

제4기 국가나노기술지도(2023~2032)

# 나노기술 혁신을 통한 새로운 전환



과학기술정보통신부  
Ministry of Science and ICT



• CONTENTS

I. 수립 개요	1
II. 제4기 국가나노기술지도 추진 방향	7
III. 제4기 국가나노기술지도 요약	16
IV. 제4기 국가나노기술지도(안)	17
1. 9대 Big Questions별 나노기술 도전	17
2. 나노인프라 혁신 제고	61
V. 기대효과 및 활용방안	67
사전적 상세나노기술지도	73



# I 수립 개요

## 1. 수립 배경 및 목적

### ■ 수립 배경 및 근거

- 국가나노기술지도는 '08년부터 대한민국 나노기술의 발전을 위해 정부차원에서 주기적·지속적으로 수립
  - ※ 제1기 지도('08년) → 제2기 지도('14년) → 제3기 지도('18년)
- 나노기술개발촉진법 제6조 및 시행령 제5조에 의거하여 5년마다 작성

#### 나노기술개발촉진법

**제6조(연구개발의 추진)** ③ 과학기술정보통신부장관은 기술개발 전략의 수립, 연구개발 투자방향의 설정 등을 위하여 대통령령으로 정하는 바에 따라 나노기술 분야의 종합적인 기술지도(技術地圖)를 작성하여야 한다.  
④ 관계 중앙행정기관의 장은 나노기술 연구개발사업을 추진할 때 제3항에 따라 작성된 기술지도를 개발 대상 핵심기술의 도출 등에 적극 반영하여야 한다.

#### 나노기술개발촉진법 시행령

**제5조(나노기술지도의 작성)** ① 과학기술정보통신부장관은 법 제6조 제3항의 규정에 따른 나노기술분야의 종합적인 기술지도(이하 “기술지도”라 한다)를 5년마다 작성하고, 이를 관계중앙행정기관의 장에게 통보하여야 한다. ② 과학기술정보통신부장관은 기술지도를 작성하기 위하여 필요하다고 인정하는 때에는 연구기관, 대학 및 국가연구개발사업에 참여하는 기업 등에게 관련 자료의 제출을 요청할 수 있다.

### ■ 수립 목적

- 축적되어온 대한민국 나노기술의 지속 발전\*과 제5기 나노기술종합발전계획('21~'30)의 적극 이행\*\*을 위한 나노기술 중장기전략 필요
  - \* 20년간의 투자로 우리나라 나노기술은 현재 세계 4위 수준으로, 1위 미국 대비 기술수준은 25%('01년) → 85.7%('19년) 수준으로 상향
  - \*\* 제5기 나노기술종합발전계획의 [전략1-3]나노기술 투자전략 고도화에서 국내외 기술·산업 동향을 반영한 국가나노기술지도 수립
  - 기술지도 수립으로 대내외 경제·사회·기술 환경변화에 선제적으로 대응하고, 나노분야 연구개발의 전략적 방향 설정에 기여

## 2. 추진체계 및 경과

### 추진체계



- 과기정통부(주무부처) 등 관계부처, 국가나노기술정책센터, 나노기술연구협의회 기술 분과 전문가 등으로 수립위원회를 구성하여 수립
  - 나노기술 분야별 산·학·연 전문가로 5개의 기술 분과(나노정보전자, 나노에너지, 나노환경, 나노바이오, 나노기반) 구성

### 추진 경과

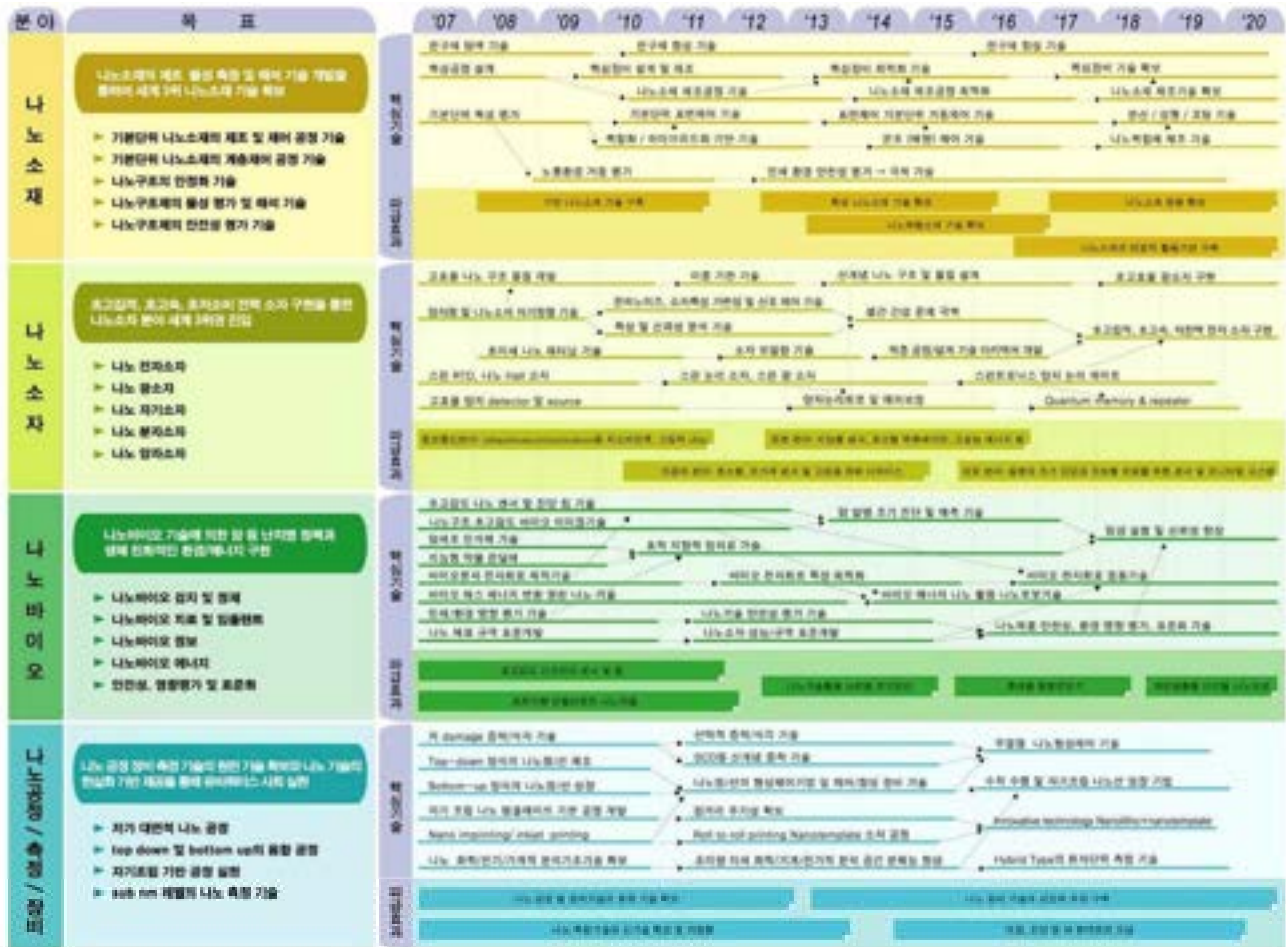
- ▶ ('22.4~6) 사전 기획 및 수립위원회 구성
- ▶ ('22.6.27) 수립위원회 Kick-off 및 분과별 회의 착수
- ▶ ('22.9.8) 수립위원회 1차 회의 개최
- ▶ ('22.10.24~11.8) 온라인 수요조사 진행
- ▶ ('22.12) 기술 분과별 사전적 상세기술지도 초안 마련
- ▶ ('23.4) 전략적 나노기술지도 마련
- ▶ ('23.5) 수립위원회 2차 회의, 공청회 개최 등 의견 수렴
- ▶ ('23.6) 국과심 상정 및 의결

# 참고

## 제1~3기 국가나노기술지도 수립 경과

### ■ 제1기 국가나노기술지도

- (수립 배경) 미래사회 예측, 과학기술수준, 시장 전망 등을 종합적으로 고려한 나노기술지도를 작성하여 정부 및 민간 연구개발에 전략적으로 활용
- (수립 방향) 분야별 핵심기술의 발전 방향을 전망하고 전략을 검토함으로써 정부 및 민간 부문의 전략을 공유하고 연구개발사업의 가이드라인으로 활용
- (수립 결과) 4대 기술분야\* 47개 중분류 기술에 대한 정량적 지표 중심의 상세기술지도 전개, 기술개발 전략 및 투자전략 제시
  - \* 나노소재(에너지 및 환경 포함), 나노소자, 나노바이오, 나노공정·측정·장비
- (의의·한계) 나노기술 분야 최초 기술지도로 국가 차원의 나노기술 현황 파악에 기여, 나열식 지도에 가까워 정책 수립 시 참고에 한계



## 제2기 국가나노기술지도

- (수립 배경) 나노기술 분야에 대한 현황 진단 및 미래 사회수요와 시장 전망 등을 종합적으로 반영한 나노기술지도(로드맵)를 수립하여 정부 정책 추진 및 민간 연구개발 방향 설정에 전략적으로 활용
- (수립 방향) 국내외 환경변화와 신정부 과기정책 추진 방향을 반영, 나노기술지도의 활용 및 실효성을 높이기 위해 산업지형은 중기적(20년) 관점, 과학기술은 장기적(25년) 관점으로 기술지도 전개
- (수립 결과) 중점나노기술을 도출하고 이를 중심으로 기술로드맵과 투자전략 제시, 6대\* 기술 분야 33개 중분류 기술에 대한 상세기술지도 전개
  - \* 나노소재, 나노소자, 나노바이오, 나노에너지·환경, 나노공정·측정·장비, 나노안전성
- (의의·한계) 나노기술로 구현되는 최종제품 중심 기술지도 작성 시도, 정보의 시각화·조직화가 이루어지지 않아 적절한 정보 제공 제한적







### 3. 그간의 나노기술 투자 및 성과

◆ 나노기술은 '01년 이후 세계 4위에 도달하기까지 반도체, 디스플레이, 이차전지, 양자 등 국가전략기술·산업에 파급력있는 기반기술로서 기여

■ (투자) '01~'22년간 나노분야 R&D에 총 10.2조 원을 투자하여 기초원천 기술개발 및 인프라 확충을 통해 나노기술 산업화 동력 마련

● '22년 투자액은 1조 2,477억 원으로 정부 R&D투자액의 4.2%

※ R&D 정부투자 추이 : ('13) 5,245억 원 → ('18) 5,862억 원 → ('22) 1조 2,477억 원

■ (논문성과) SCI 논문수 세계 8위('01)에서 세계 4위('14~)로 성장했으며, 질적 수준(mrnIF)은 세계 6위('22)로 성장

\* 한국 순위: 세계 8위('01년, 1,313편) → 세계 6위('03년, 1,856편) → 세계 5위('08년, 4,188편) → 세계 3위('13년, 7,434편) → 세계 4위('18년, 9,531편) → 세계 4위('22년, 9,319편)

\* 한국 논문 mrnIF 추이 : 세계 13위('13년, 66.33) → 세계 12위('17년, 68.25) → 세계 6위('22년, 73.59)

■ (특허성과) 미국 등록특허 수 세계 8위('01)에서 세계 4위('21~) 수준으로 양적·질적으로 성장



\* 한국 순위 : 세계 5위('03년, 129편) → 세계 4위('04년, 173편) → 세계 3위('08년, 328편) → 세계 3위('13년, 647편) → 세계 3위('18년, 1,052편) → 세계 4위('22년, 953편)

■ (나노융합산업 성과) '21년도 사업체 수 880개, 매출액은 165.6조 원, 종업원 수 15.4만 명이며, '12년 이후 10년간 연평균 최고 6% 내외 증가<sup>1)</sup>

※ 나노융합기업수 : ('12년) 504개 → ('17년) 717개 → ('21년) 880건, CAGR 5.6% ↑

※ 매출액 추이 : ('12년) 129.1조 원 → ('17년) 145.1조 원 → ('21년) 165.6조 원, CAGR 2.8% ↑

#### 〈나노기술 관련 주요 사례〉

나노정보전자	나노에너지	나노환경	나노바이오	나노기반
				
양자점(QD) (QLED TV)	CNT 도전재 (전기차용 LiB)	나노섬유 (미세먼지필터)	나노진단입자 (진단 모니터링)	나노노광공정 (5nm EUV)

1) 나노융합산업조사 2022(한국탄소나노산업협회)

## 1. 글로벌 주요국 나노기술 정책동향

- ◆ 미국, 일본, EU 등 나노기술 선도국은 인류가 직면한 글로벌 경제·사회문제 해결을 위해 정책적으로 나노기술 적극 활용 중



미국

▶ '01년부터 NNI(National Nanotechnology Initiative)의 일관된 목표 지속 확대 및 나노과학과 나노기술을 활용한 글로벌 이슈 해결 등 도전적 실행 강화

- '01~'23년간 NNI에 총 407억달러의 투자를 통해 나노기술 관련 새로운 발견과 심도있는 이해를 달성하였으며, 경제·사회적 이익실현에 기여
  - NNI는 독립적인 R&D 프로그램이 아닌 **범부처 차원**에서 부처별 추진되는 나노기술 관련 연구개발 방향을 제시하는 **청사진**으로서의 역할 수행
    - ※ NNI는 국내외에서 학제간 및 부처간 조정에 큰 성공을 거둔 것으로 잘 알려져 있으며, 미국에서 근래 최고의 활동 사례로 평가(全美과학공학의학한림원(NASEM), '20년 리뷰보고서)
- '21년 6차 국가나노기술개발전략(NNI)을 발표하여 나노기술의 중요성과 경제 영향이 커지고 있음을 강조하며 관련 투자의 지속·확대를 추진
  - 비전 실현을 위해 5대 목표 ① 나노기술 R&D 세계 리더로서의 위상 유지, ② 나노기술 R&D 상용화 촉진, ③ 나노기술 R&D 지속지원 인프라 제공, ④ 대중 참여 나노기술 인력 확대, ⑤ 책임 있는 나노기술 개발 제시
- 나노과학기술의 혁신을 활용하여 자국 또는 세계적으로 중요한 문제를 해결하기 위한 연구개발 활동을 지속 탐색·활용
  - 에너지부, 국방부, NSF 등 참여한 범부처 사업으로 Nanotechnology- Inspired Grand Challenges\*('15년~)를 통해 차세대 컴퓨팅 개발에 도전
    - \* 데이터의 능동적 해석 및 학습, 학습한 내용을 사용하여 생소한 문제의 해결, 인간 두뇌의 에너지 효율성으로 작동 가능한 새로운 유형의 컴퓨터 개발을 지원
  - 나노기술로 세계적 문제 해결에 접근하는 메커니즘인 National Nanotechnology Challenge에서 기후변화 해결을 위해 Nano4EARTH('23년~) 추진



▶ 국가 경제성장과 사회문제 해결을 동시에 추구하는 Society 5.0 실현에 나노기술과 첨단재료를 핵심 기반기술로 설정

● 제6기 과학기술·이노베이션 기본계획('21~'25) 內 중점 육성분야\*의 하나로 나노기술·재료를 포함시켜 투자 및 정책수립 진행

\* ①AI기술 ②생명공학 ③양자기술 ④머티리얼(나노기술·재료) ⑤건강 및 의료

- 과학기술이 전 지구적 위기 직면 글로벌 과제 해결과 사회·경제 전반의 이슈 해결을 강조
- 나노기술·재료를 머티리얼\* 테크놀러지로 전략적 변화 및 확대를 통해 나노기술보다 넓은 범위로 확대하여 위상 강화

\* 머티리얼: 첨단재료의 연구개발을 부각시키기 위해 물질, 재료, 디바이스를 모두 포괄하며, 기존에 사용하던 나노기술·재료 범주를 포함

● 나노기술 기반의 초스마트사회(Society 5.0)\* 실현과 디지털 전환에 초점

\* Society 5.0 : 사이버 공간(가상사회)과 물리적 공간(현실사회)을 고도로 융합하는 매개체로 과학기술을 통한 '경제발전'과 '사회과제 해결' 목표를 달성하기 위한 핵심 수단

- 나노기술·재료 기반의 중점 추진 연구개발 테마 **그랜드 챌린지**를 사회 모습 3개\*로 분류하고 하위 13개 챌린지\*\*를 국가 중점사업으로 선정

\* ① 안전·안심·풍요로운 디지털 사회 ② 건강하고 행복한 사회 ③ 저환경부하의 지속가능한 사회

\*\* 13개 연구개발 테마 : 양자 상태의 고도제어, 포스트 5G 디바이스·재료기반, IoT 디바이스 집적, 나노 역학제어를 통한 스마트 재료, 헬스케어 IoT, Bioinspired 재료·시스템, Bio-adaptive 재료, 뇌 모사 AI·스마트 로봇, 지속가능한 원소전략, 탄소중립 기반, 다기능 복합계의 재료설계, 프로세스 설계기반, 차세대 피연산자 계측

- 「**나노기술·재료과학기술 연구개발전략**」('21년)을 발표하여 나노기술 기반의 **소재기술 투자**\*를 통한 일본의 소재혁신력 강화에 집중

\* (문부과학성) '데이터 창출·활용형 소재연구개발 프로젝트', '소재 첨단 리서치 인프라(Beyond nano)' 지원, (NEDO) '소재혁신 기술선도 연구프로그램' 추진



EU

▶ 건강 및 기후환경, 글로벌 경쟁력 강화, 디지털화, 지속가능성 등 여러 사회적 도전과제 해결 달성에 핵심지원기술로 나노기술 활용

● 나노기술 기반 첨단소재 등 핵심지원기술(Key Enabling Technologies)\*을 EU 사회·경제 전방위 산업발전 성장동력으로 선정(Horizon Europe)

\* ①첨단제조 ②마이크로/나노 전자-광자 ③인공지능 ④첨단소재(나노기술 포함) ⑤생명과학 기술 ⑥보안 및 연결 기술

- 첨단기술을 통해 지식기반경제 전환 촉진을 위해 산업용 첨단기술(Advanced Technologies for Industry)\*을 선정하여 정책 및 시장분석 현황 공유

\* EU는 '산업용 첨단기술(ATI)'을 선정하여 유럽의 정책입안자, 산업관계자 및 학계 전문가들과 첨단기술의 개발 및 기술 동향이나 관련 정책과 시장을 분석하고 해당 정보를 제공. 16개의 ATI에는 KET 6가지 (나노기술, 마이크로/나노 전자, 첨단소재 등)도 포함

● 유럽 연구혁신 프로그램 Horizon Europe('21~'24)은 과학기술 혁신을 통한 글로벌 과제 해결 및 정책개발·지원을 통해 지속가능한 발전 추구

- 핵심영역\*을 중심으로 유럽의 회복력 촉진 대책 제시 및 임무 지향형 사회문제 해결에 지속적 투자 확대

\* 핵심영역(우수과학, 글로벌 도전과제와 유럽 산업경쟁력, 혁신적 유럽)과 임무지향 5대 미션(기후변화 적응, 암 정복, 건강한 해양, 스마트시티, 건강한 토양 및 음식) 설정

● EU 그린딜 정책의 일환으로 '20년 「지속가능성을 위한 화학물질전략」에 나노물질 포함하는 등 나노기술 안전성에 대해 지속 지원

- 유럽화학물질청(ECHA)에서 나노기술 관련 연구 방향 제시 및 연구지침 관련 나노물질 커뮤니케이션 전략 공표하여 안전하고 지속 가능한 개발 및 연구 독려



## 중국

### ▶ 나노기술을 포함한 과학기술 전반에 대한 기반조성으로 新수요 발굴을 통해 내수시장 육성 및 자립형 공급망 구축 등 질적성장 도모

#### ● 기초·원천 연구개발을 지속적으로 강화하여 기술개발 능력을 확보하기 위해 **나노분야 포함 기초연구 프로젝트 지속 투자**

- 나노기술 강국으로의 입지 확보를 위해 중국과학원을 중심으로 나노산업화 기술 도약을 목표로 **전략적 나노선도형 프로젝트('20년)\* 추진**

\* 3단계 기술로드맵: ①전략적 선도형 나노기술(신에너지 및 첨단 제조 분야를 중심으로 나노기술 기반 프로젝트 지원) ②선도형 나노기술의 집중공략(既 확보된 기술 및 산업화 가능성이 높은 핵심기술 기반 프로젝트 지원) ③나노제조 공통성 및 평가기술(나노산업화 응용에 영향을 미치는 핵심 공통성 기술 관련 프로젝트 지원)

- 범부처 참여 **나노과학기술 중점특별프로젝트**를 실시하여, 연구성과의 사업화 촉진을 목표로 '21년 연구과제 4,500만 위안 지원

※ 주요 추진분야: 신형 나노제조 및 가공기술, 나노특성화 및 표준, 나노바이오의약, 나노정보재료 및 소자, 에너지나노물질 및 기술, 환경나노물질 및 기술, 나노과학 중대 기초연구 등

#### ● 「국가중장기과학기술발전계획」에서 **나노기술에 기반한 7개 중점연구과제**(나노소재, 나노소자 등) 선정

※ 2035년까지 과학기술강국 건설을 목표로 하는 국가핵심계획 「14차 5개년 계획('21~'25)」에서 과학기술 혁신 및 자립과 자강을 강조

#### ● 중국과학원에서 사회·경제의 지속적인 발전과 세계 선도 및 전략적 수요 충족을 목표로 나노기술의 역할 강조한 「**2050 나노기술발전로드맵**」\* 발표

\* 1단계('11~'20, 경쟁력강화; 중국의 나노기술수준을 선진국 수준으로 끌어올려 국제적인 선도 역할 가능한 연구진 육성) → 2단계('20~'30, 병행추진; 사회와 경제의 지속적인 발전에 중요한 영향력을 미치는 나노기술 개발) → 3단계('30~'50, 세계선도; 세계를 선도하고 전략적 수요를 충족시키는 나노기술체계 구축)

## 2. 국내 주요 과학기술 정책동향

◆ 과학기술 기반 국가전략기술 및 인류사회에 기여하는 국가·사회문제 해결 역량 제고를 위해 임무중심 R&D를 추진 중

■ (제5차 과학기술기본계획) 과학기술을 통해 국가 또는 세계 단위 문제를 극복하고 선도 국가로 도약하기 위한 과학기술 혁신역량 고도화

● 대내외 환경 변화에 따른 국가·사회 문제해결 역량 향상을 위한 과학기술 정책외연 확장과 중점적으로 육성해야 하는 유망기술 선정·관리

- 기술패권 경쟁 대응 및 국정과제 이행 관련 초격차 기술확보에 국가역량을 집중하기 위한 12대 국가전략기술 분야\* 선정·육성

\* 반도체·디스플레이, 이차전지, 첨단모빌리티, 차세대원자력, 첨단바이오, 우주 항공·해양, 수소, 사이버 보안, 인공지능, 차세대 통신, 첨단로봇·제조, 양자

■ (제5기 나노기술종합발전계획) 나노기술 분야 최상위 계획으로 향후 10년간의 나노기술 발전 비전·목표 및 추진과제를 담은 계획 수립

● 비전 달성을 위해 글로벌 선도연구 및 나노융합산업 경쟁력 강화, 나노팜 인프라 고도화 등 4대 전략과 14개 중점과제를 추진

■ (임무중심 R&D 혁신체계 구축전략) 국가적 난제 해결과 동시에 정부 R&D 효과성 제고를 위해 임무중심 R&D 시스템으로 대전환 추진

● 국가가 당면한 도전과제를 해결하기 위한 임무를 정하고, 정해진 임무를 명확한 시간 내 달성하기 위한 R&D와 이를 위한 혁신체계 구축

■ (과학기술미래전략2045) 2045년을 대비하는 대한민국 미래상을 제시하고, 이를 위한 구체적 전략으로 과학기술 도전과제와 중장기 정책방향 설정

● 국민 삶과 경제성장의 질을 높이고 인류사회에 기여하는 과학기술 도전과제를 거시적 시각에서 제시

- 안전하고 건강한 사회, 풍요롭고 편리한 사회, 공정하고 차별 없는 소통·신뢰 사회, 인류사회에 기여하는 대한민국의 미래상과 그에 따른 8가지 과학기술 도전과제 제시

### 3. 추진 방향 및 절차

#### ■ 추진 방향

① 그간의 R&D 성과를 활용하고, 나노기술 R&D의 임무를 명확히 하기 위해 도전적 질문(Big Questions) 해결 중심 나노기술개발 전략 전개 필요

● 나노기술이 딥테크(Deep Technology)\*라는 특징점을 살려서 그간 축적한 나노기술 R&D 역량 활용 극대화 제고 필요

\* 첨단 과학·공학 기반을 두고, 오랜 연구와 상업화 시간에 따른 대규모 투자가 소요되나, 주요산업분야 및 사회 문제해결 등에 활용되어 파급력이 매우 높은 기술

※ 딥테크 연구를 통해 개발한 첨단 기술은 향후 10년간 유망한 기술 혁신 및 산업의 핵심이 될 것으로 전망 (네덜란드 컨설팅 기업 Birch 연구결과)

● 기술정책 방향에 대한 對국민 공감대 제고와 실효성 제고를 위해 도전적 질문(Big Questions)에 연계된 나노기술 주제 도출 필요

② 나노기술의 기반기술 속성과 기술수요분야 중심 R&D 지원 강화 추세 고려하여, 기반성과 목적성이 양립 가능한 나노기술개발 전략 추진 요구

● '08년 제1기 지도이후 나노기술은 기반기술\*이자 정보전자, 에너지·환경, 바이오 등 수요분야의 범위를 확장해오며 점진적 발전

\* 나노소재, 나노소자, 나노장비, 나노안전 등

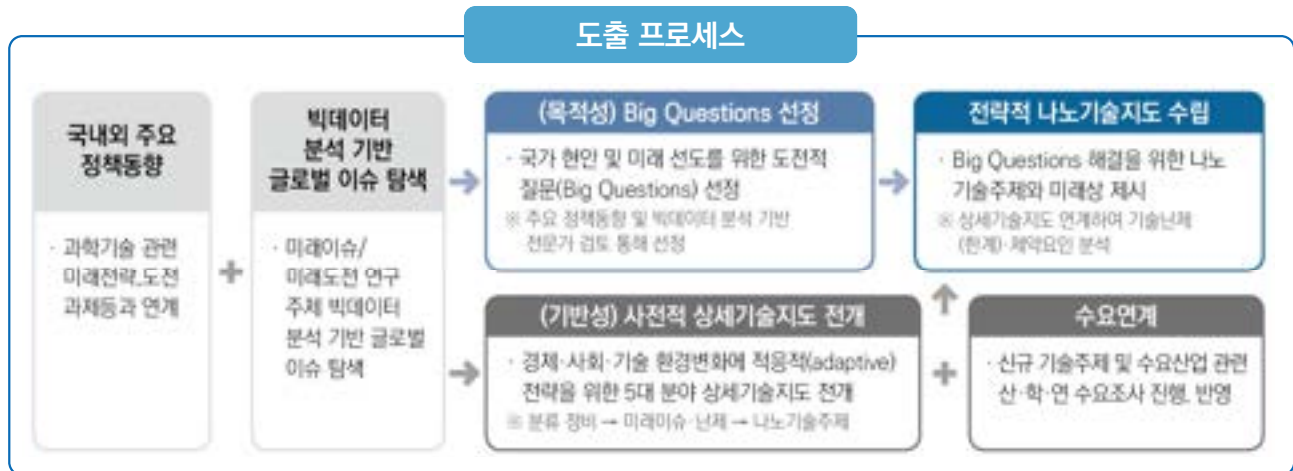
※ (사례) 탄소나노튜브(CNT)는 00년대 초반 반도체(나노전자소자 배선)과 디스플레이(전자방출원 소재), 복합소재 등 다양한 수요잠재 분야로 시도되어왔으며, 결과적으로 리튬이온전지 전극 도전재로 상용화 되어 성장 중

● 나노기술이 기반성과 수요 연계 목적성을 모두 보유함에 따라, 나노기술 R&D는 이를 포괄하는 양립 가능한 전략 방향 수립 필요

- 기술수요분야별로 관련된 나노기술주제를 망라하여 도출하는 한편 기반성도 포함하여 기술 지도로서의 활용성 제고



## 추진 절차

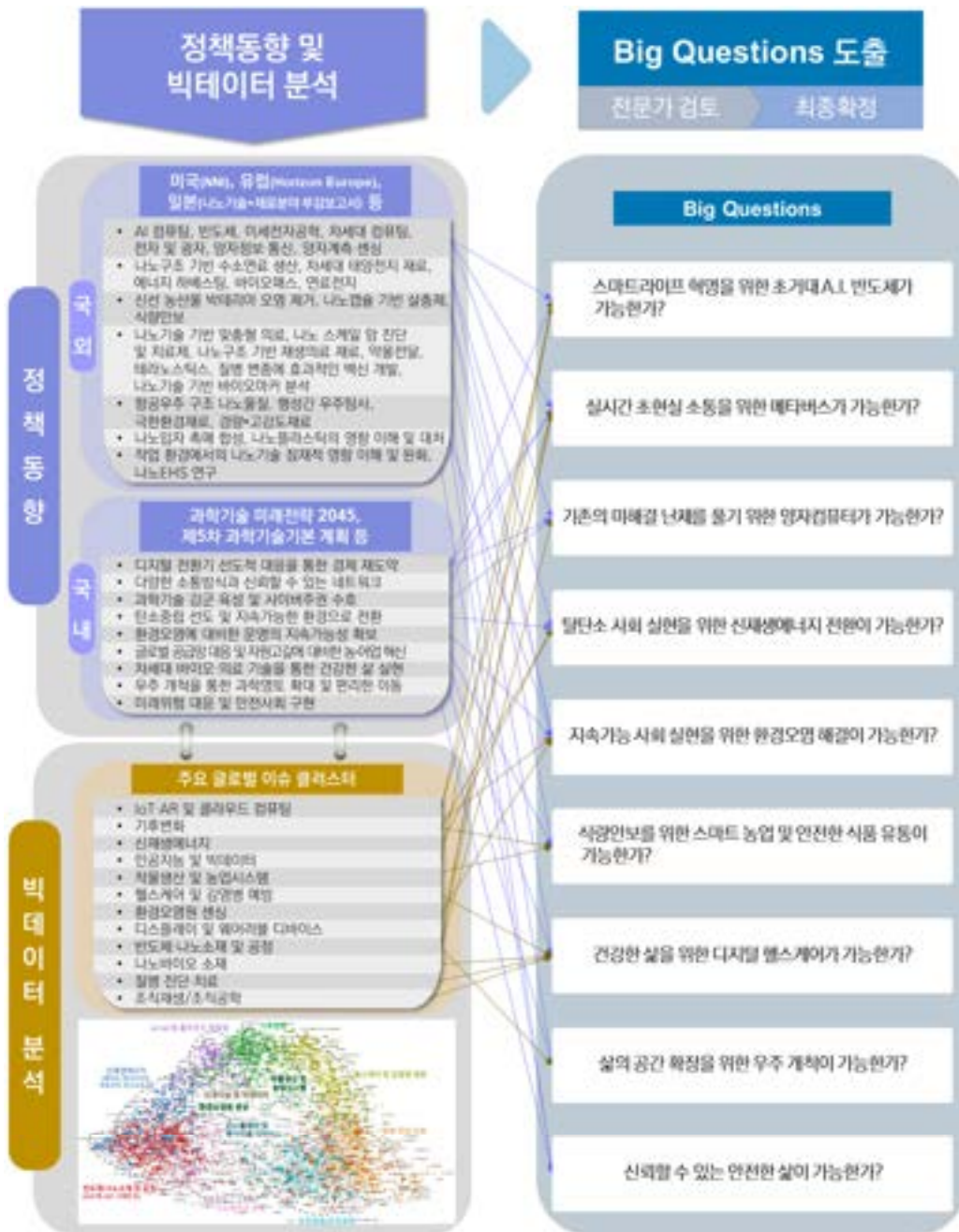


- **(국내외 정책동향 연계)** 미국·유럽·일본 등 주요국 과학기술정책과 국내 과학기술기본계획, 과학기술미래전략2045의 도전과제 등과 연계
- **(글로벌 이슈 탐색)** 미래이슈·미래도전 관련 연구주제 빅데이터 분석\*을 통한 글로벌 이슈 탐색  
\* 텍스트 네트워크 분석으로 키워드 집합체로 구성된 주요 글로벌 이슈 클러스터 탐색
- **(Big Questions 선정)** 주요 정책동향 및 빅데이터 분석 기반 나노기술 관련 국가 현안 및 미래 선도를 위한 도전적 질문 도출  
- 전문가 검토를 통해 **도전적 질문(Big Questions)** 최종 선정·확정
- **(사전적 상세기술지도)** 경제·사회·기술 환경변화에 적응적(adaptive) 전략을 위해 5대 나노 기술 분야별 상세기술지도 전개  
- 분류체계 재정비 → 미래기술이슈 및 난제 도출 → 나노기술주제 도출  
→ 상세기술지도(로드맵) 전개  
※ 글로벌 선도 나노·미래소재 원천기술 확보를 위해 요소기술 중 TRL 2~3 수준 도달 시점을 기준으로 로드맵 작성
- **(수요조사)** 신규 기술주제 및 수요산업 관련 산·학·연 대상 수요조사 진행  
\* (신규 기술주제 수요조사) 상세기술지도 신규 나노기술주제 도출을 위한 연구자 대상 온라인 수요조사 진행  
\* (미래전략산업 수요연계 수요조사) 나노분야 기업 및 유관기관 대상 수요조사(나노융합산업연구조합)를 기반으로 중단기 수요중심 주제 후보 발굴
- **(전략적 나노기술지도)** Big Questions별 기술난제(한계)와 제약요인을 분석하여 주요 나노기술 주제와 역할·미래상을 제시  
- 사전적 상세기술지도상 주제를 토대로 수립하여 지도간 연계 강화

## 도전적 질문(Big Questions) 선정 과정

### ■ 정책 동향 연계 및 빅데이터 분석 기반 글로벌 어젠다 도출

- 주요 정책동향 내 도전과제와 빅데이터 분석 기반으로 도출된 미래 주요 어젠다를 중심으로 Big Questions 선정
- ※ 축적된 연구정보 빅데이터가 최신 트렌드 반영에 시간 차가 발생하는 점을 고려, 최신 국내외 정책동향 분석 결과와 연계하여 도출



## 빅데이터 분석 과정 및 결과

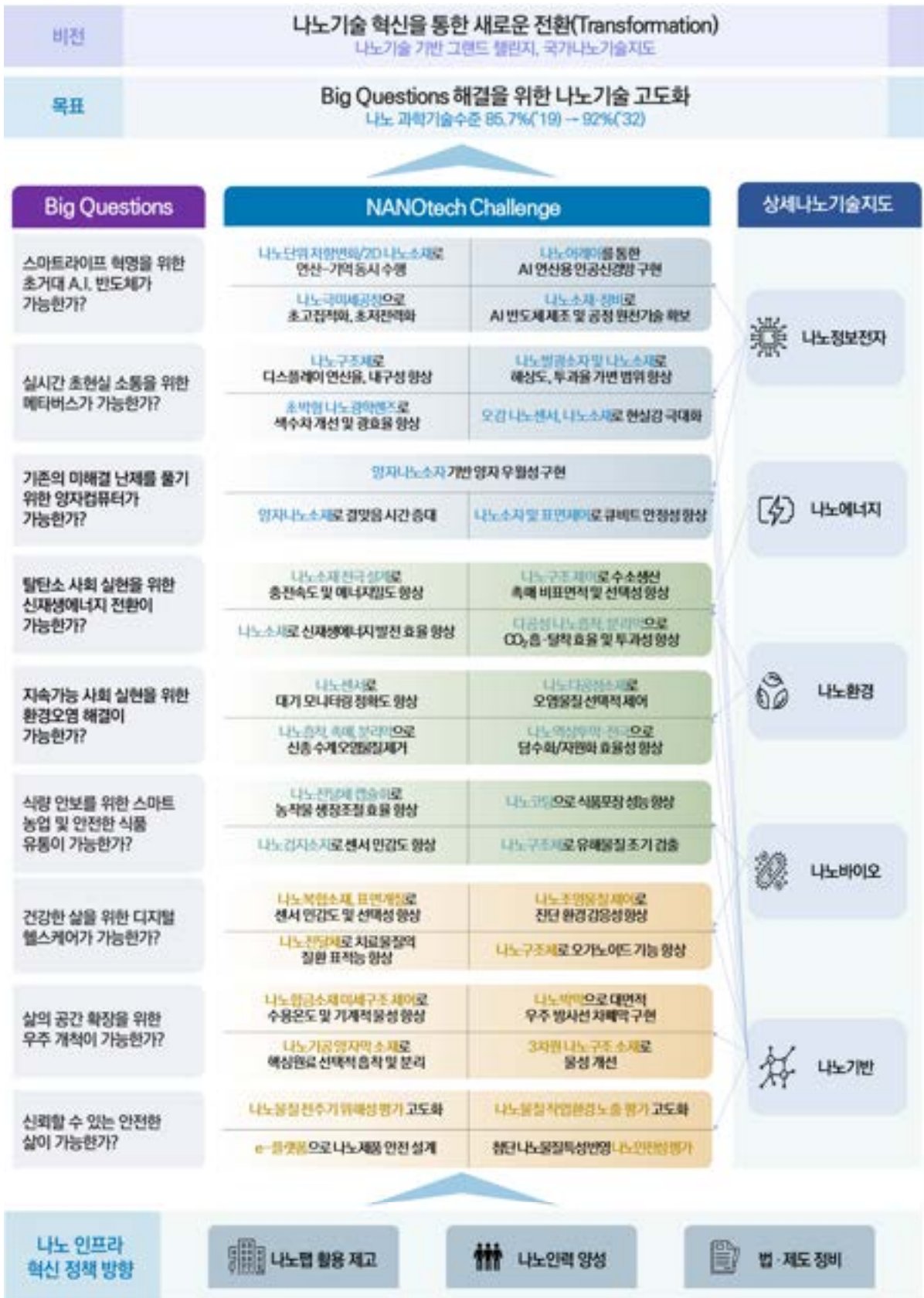
- 미래이슈 및 미래도전과 관련된 연구주제 빅데이터로부터 단어 동시출현 네트워크 분석을 통해 글로벌 이슈 탐색

※ 나노기술 중심 이슈가 아닌, 경제·사회 거시적 관점의 글로벌 이슈 도출을 위해 “Future Issue”, “Future Challenge”로 검색식 구성하여 연구 데이터 수집 후 제목, 초록, 키워드를 대상으로 단어 동시출현 네트워크 분석 수행



- 동시출현 네트워크 매핑 결과, 미래이슈·미래도전 관련 12개의 주요 글로벌 이슈 클러스터”를 확인

- \*① “IoT·AR 및 클라우드 컴퓨팅”, ② “기후변화”, ③ “신재생에너지”, ④ “인공지능 및 빅데이터”, ⑤ “작물생산 및 농업시스템”, ⑥ “헬스케어 및 감염병 예방”, ⑦ “환경오염원 센싱”, ⑧ “디스플레이 및 웨어러블 디바이스”, ⑨ “반도체·나노소재 및 공정”, ⑩ “나노바이오 소재”, ⑪ “질병 진단·치료”, ⑫ “조직재생/조직공학”



## 1. 9대 Big Questions별 나노기술 도전

## 1-1 스마트라이프 혁명을 위한 초거대 A.I. 반도체가 가능한가?

- ◆ 스마트한 사회 구현을 위해 추론·판단을 통한 인간의 지적 능력 보완 및 정서적 교감 능력까지 갖춘 초거대 인공지능 반도체 실현과 이를 통한 특이점(Singularity\*) 도달은 가능한가?

\* 인공지능의 발전으로 인류의 지성총합 보다 더 뛰어난 인공지능 등장 시점

### ■ 현황 챗GPT 4.0 등 초거대(Hyperscale) 인공지능\* 초기 버전 등장

- 범용 GPU를 이용하여 인공지능을 구현하는 기존 방식은 대규모·대용량 연산에 비효율적이며 과도한 에너지 소비가 발생

\* 초거대 인공지능 : 딥러닝 기법을 사용하는 인공지능망 가운데 파라미터가 무수히 많은 AI

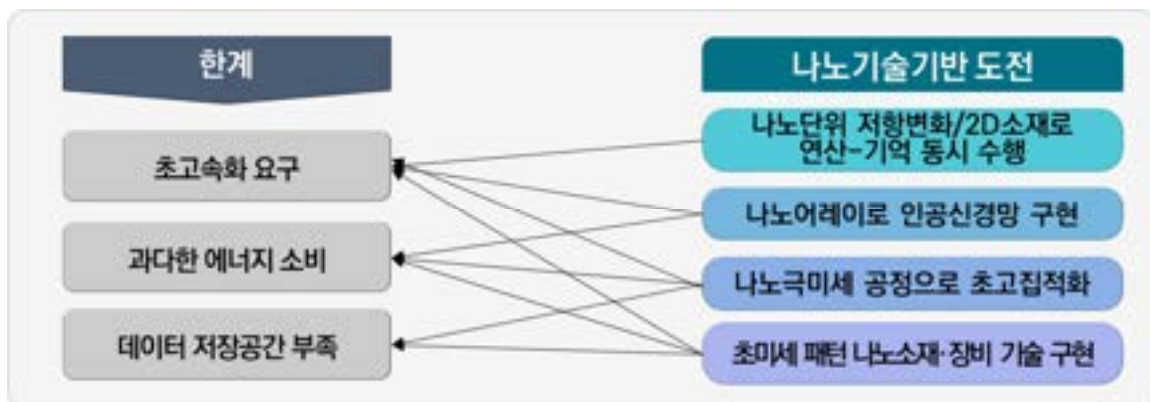
### ■ 한계 AI 반도체의 초고속, 저전력화 요구 및 급증하는 데이터센터의 저장 공간 확보에 한계

※ GPT-3 학습에 1.287GWh의 전력 소모, 502톤의 CO<sub>2</sub> 배출량에 해당

(미국 120개 가구의 1년 전기소모량, 미국 자동차 110대의 1년간 CO<sub>2</sub> 배출량과 동일)

※ 초거대 AI 학습에 수백개의 연산소자가 필요하며, 1초에 163조번 연산이 가능한 GPU 1024개를 사용하면 GPT-3 수준의 언어모델 학습에 약 1개월 소요

### ■ 한계 극복을 위한 나노기술 기반 도전 (NANOtech Challenge)



## ① (NANOtech Challenge) 나노단위 저항변화/2D 나노소재로 연산-기억 동시 수행

기술적 제약요인	기존 폰-노이만방식 구조상의 메모리와 연산장치의 물리적 분리로 인한 병목현상 존재
----------	---

나노기술의 역할	나노스케일 저항변화 및 이차원 나노소재 기반 연산-기억 동시 수행이 가능한 나노소자로 컴퓨팅 아키텍처 구현
----------	---

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	실리콘 기반 나노 eFlash 저항 변화 소자 및 논리 회로 구현 기술	논리 연산자 및 application(개)	
	* 시스템 회로 내부에 설계된 나노 eFlash 구조기반 채널의 저항 변화를 통해 논리 연산을 수행하는 나노소자 기술	4	> 20
2	이차원 나노소재 활용 메모리 소자 디자인 및 연산 아키텍처 구현 기술	로직 연산자(개)	
	* 이차원 나노 소재를 활용해 다양한 구조의 메모리 소자를 제작하여 PIM 기능을 수행할 수 있는 나노소자 기술	4	> 20

## ② (NANOtech Challenge) 나노어레이를 통한 AI 연산용 인공신경망 구현

기술적 제약요인	고집적 인공시냅스-뉴런 어레이 아키텍처 기술 부재 및 성능 최적화 모델링 한계
----------	---

나노기술의 역할	나노어레이를 통한 인공지능 연산용 인공신경망 및 인공시냅스-뉴런 나노소자 개발로 인간 두뇌 모사 지능형 디바이스 구현
----------	---

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	수동형/능동형 확률스위칭 나노소자 기술	확률특성 제어(% 확률 간격)	
	* 인간의 두뇌신경에서의 확률론적 동작원리를 모사할 수 있는 지능형 소자 기술	5	0.5
2	ANN(Artificial Neural Network) 연산용 2단자 기반 저항 변화를 활용한 시냅스 나노소자 기술	Multibit/cell(bits)	
	* 활성 물질을 외부 자극에 의해 변화시킴으로써 저항 변화(가중치 변화)를 일으키는 시냅스 나노소자 기술	10	100

### ③ (NANOtech Challenge) 나노극미세공정으로 초고집적화, 초저전력화

기술적 제약요인	나노소자의 저장용량, 집적도 한계 및 저전력화 요구
----------	------------------------------

나노기술의 역할	나노스케일 극미세공정으로 초고집적화 및 극소 영역에 데이터 장기 저장 및 읽기/쓰기 무한반복 가능한 초저전력화 나노소자 구현
----------	---

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	수직 적층 구조의 나노스케일 트랜지스터 기술	트랜지스터 모빌리티 ( $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	
	* 3D 적층 형태의 DRAM을 위해 나노스케일 채널을 가지며 낮은 오프전류와 고이동도를 갖는 트랜지스터 기술	~ 10	> 100
2	수십 나노 피치 3차원 낸드플래시 초집적 나노기술	칩 Stack height( $\mu\text{m}$ )	
	* Stack height 감소에 따른 낸드플래시 셀 간의 간섭 및 동작 속도 개선 위한 저저항 게이트 전극 및 고이동도 채널 소재 도입한 낸드플래시 소자 기술	8~9	> 15

나노기술의 역할	중단기 수요중심	나노-마이크로 실리카 입자 및 나노하이브리드 수지 기반 나노 복합절연소재 개발로 반도체 패키징 및 초고집적화 나노소자 구현
----------	----------	--

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'28
1	반도체 절연 필름용 나노실리카 기반 나노복합소재 기술	절연필름 접착력(kgf/cm)	
	* 나노실리카-나노하이브리드 수지의 융복합 소재 기반 반도체 절연 필름용 나노복합소재 제조 기술	$\geq 0.25$	$\geq 0.7$

#### ④ (NANOtech Challenge) 나노소재·장비로 AI 반도체 제조 및 공정 원천기술 확보

기술적 제약요인	초미세 나노패터닝 공정을 위한 부품·장비 및 분석의 기술적 한계
----------	-------------------------------------

나노기술의 역할	원자수준 초미세 패턴으로 초미세 디지털 나노리소그래피 기술용 핵심 나노소재 기술 구현
----------	---

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	대면적 초미세패턴용 포토레지스트 공정 기술	BEUV/EUV 감도(mJ/cm <sup>2</sup> )	
	* 차세대 반도체 소자(메모리, 로직소자 등) 혹은 디스플레이에 적용되는 대면적 초미세패턴 형성을 위한 고감광성 포토레지스트 소재, 박막 코팅공정, 및 현상 기술	100/40	50/20
2	나노스케일 디지털 리소그래피 기술	패터닝 해상도(nm)	
	* 마스크를 사용하지 않고 나노스케일의 패턴을 SW 데이터를 이용하여 이미지를 형성하고 기판의 변형을 보정하여 노광하는 기술	400	10

나노기술의 역할	중단기 수요중심	고균일도 무결점 나노소재 및 장비 개발로 초미세 나노 패터닝 공정 기술 구현
----------	----------	--

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'28
1	그래핀 기반 차세대 EUV 펄리클 기술	EUV 투과율(%)	
	* 고투과율 및 고균일도를 갖는 대면적 그래핀 적층 기반 EUV 펄리클 기술	90	94



## Big Question 해결을 위한 나노기술 로드맵

나노기술 예시 주제	핵심요소기술									
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
실리콘 기반 나노 eFlash 저장 변화 소자 및 논리 회로 기술	실리콘 기반 나노 eFlash 저장 변화 소자 확보를 위한 게이트 신호를 적용 기술/고집적 eFlash 기반 어레이를 위한 박막 기술 eFlash 소자 기반 논리 회로 설계 및 시뮬레이션 기술									
야차원 나노 소재를 이용한 메모리 소자 디자인 및 연산 아키텍처 기술	다양한 메모리 소자 및 어레이 제작을 위한 고통질 - 대면적 이차원 소재 성장 기술 PIM 기능 수평을 위한 병렬 어레이 회로 설계 및 논리 연산 기술									
수동형/능동형 확률스위칭 나노 소자	고재작성 신뢰성 높은 수동/능동형 확률스위칭 소자 제작 기술 확률론적 동적 원리에 바탕을 둔 학습/인식 알고리즘 설계 및 시스템 설계 기술									
ANN 연산용 2D/3D 기반 저장 변화를 활용한 시냅스 나노소자 기술	소자 신뢰성 기술/데이터 유지 내구성 확보 기술/데이터 저장 감 차이 확보 기술 자연확률스위칭 확보 기술/데이터 업데이트 선행성 확보 기술									
수직 적층 나노스케일 트랜지스터 기술	게이트 절연체 소재 개발 및 계면 결합 제어 기술/신화물 트랜지스터 특성 확보 기술 고유전율 막막 도입 및 트랜지스터 누설 전류 최소화 기술									
수십 나노 피치 3차원 낸드플래시 초집적 나노기술	낮은 비저항의 게이트 전극 소재 기술 및 균일 증착 기술 고이온도 채널 소재 도입 및 기계적 스트레스 최소화 한 낸드플래시 기술									
대면적 초미세 패턴용 포토레지스트 공칭 기술	(BEUV) 고품질 고감광성 무기 포토레지스트 소재 및 고순도 제조 공칭 기술 재현 신뢰성 향상을 위한 포토레지스트 트랙 정비제어 기술 대면적 초고해상도 막질 구현을 위한 소재 및 균일 코팅 공칭 기술									
나노스케일 디지털 리소그래피 기술	노광용 포토레지스트 소재 및 공칭 기술 고속 기반 변형 측정 및 스캐너 이송 스테이지 제어 기술 대면적 이피지 보정이 가능한 병렬 노광 스캐너 기술									

※ 상기 나노기술 예시 주제 외 관련 나노기술 주제는 사전적 상세기술지도(별첨) 내 나노정보전자, 나노공정·분석·장비 분야 기술 로드맵 참고

## 미래상 인간 두뇌 수준을 넘어서는 나노반도체기술 확보를 통해 인간의 지적 능력의 보완·확장을 넘어 새로운 삶의 경험 제공



## 1-2 실시간 초현실 소통을 위한 메타버스가 가능한가?

- ◆ 초실감·초연결 등으로 현실과 가상 간 경계 없는 소통 기술과 이를 통한 궁극적 메타버스 플랫폼 기반 사회 실현은 가능한가?

### ■ **현황** TV/디스플레이 등 평면(2D) 영상을 통한 소통을 넘어 사용자 경험(UX) 극대화를 위한 확장현실(XR)\*과 텔레햅틱(Tele-haptic)\*\* 등의 기술 진화

\* 확장현실(XR) : 가상현실, 증강현실, 혼합현실이 연계된 현실

\*\* 텔레-햅틱(Tele-haptic) : 촉감을 원격 전송하는 기술

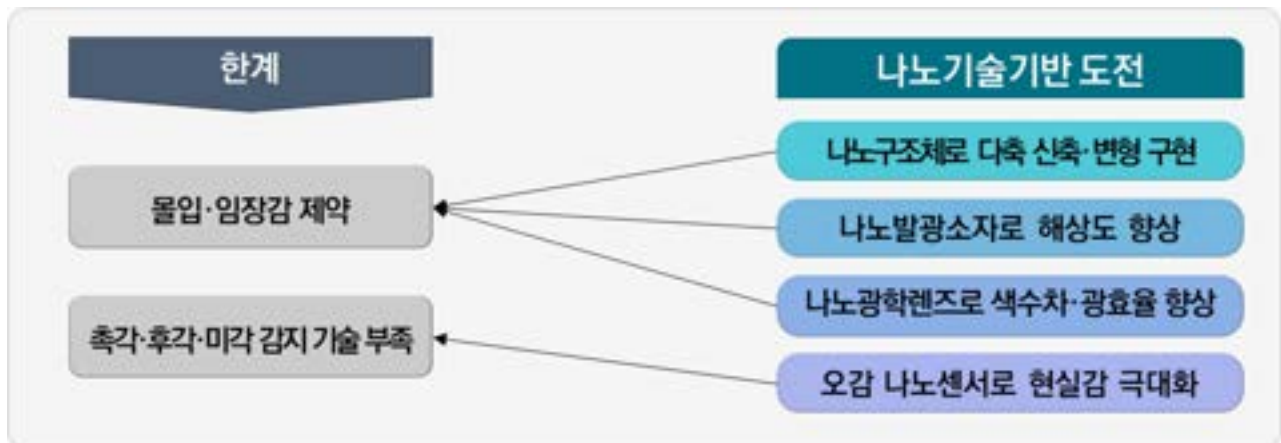
### ■ **한계** 부자연스러운 가상공간에 따른 제한적인 몰입·임장감과 촉각·후각·미각 감지 기술의 한계

※ 몰입감 제고를 위한 XR H/W로서 HMD의 경우, 해상도는 12,600×8,100 pixels 이상이 요구되나, 최근 출시 제품들은 1,832×1,920 및 3,840×2,160 수준

※ 사람이 일반적으로 인식할 수 있는 지연시간(latency)\*은 10~20ms이며, 최신 HMD는 15ms 수준으로 멀미나 불편함 등의 해소를 위해서는 지연시간 개선 필요

\* 지연시간 : 사용자의 입력이 시스템에 전달되어 응답하는데 소요되는 시간

### ■ 한계 극복을 위한 나노기술 기반 도전 (NANOtech Challenge)



① (NANOtech Challenge) 나노구조체로 디스플레이 연신율, 내구성 향상

기술적 제약요인	다축 변형·신축에 따른 디스플레이 해상도 저하 및 화상 왜곡의 한계
----------	---------------------------------------

나노기술의 역할	나노소자 및 나노구조체로 디스플레이의 연신율, 내구성 향상을 통한 해상도 왜곡이 없는 프리폼 디스플레이 구현
----------	--

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	프리폼 디스플레이 백플레인용 고신축·고변형 나노소자 기술	연신율(%)	
	* 높은 신축성을 가져 변형이 가능하며 디스플레이 성능을 그대로 유지할 수 있는 나노소자 기술	20	100
2	해상도 및 화상 변질 방지용 디스플레이 프론트플레인 나노소자 기술	신축율(%)	
	* 다축 변형 및 신축에 따라 해상도 및 화상 변화가 없는 디스플레이 프론트플레인용 나노소자 기술	20	100

나노기술의 역할	중단기 수요중심	고신축성 및 고전도성 나노소재로 디스플레이의 연신율, 내구성 향상은 물론 안정성까지 확보된 프리폼 디스플레이 구현
----------	----------	---

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'28
1	고신축성 은나노와이어 기반 투명전극 기술	신축후 면저항 (@50% strain)( $\Omega/\text{sq}$ )	
	* 은나노와이어를 전도성 나노점유와 복합화하여 반복적인 신축에도 구조가 유지되는 신축 투명전극 기술	-	$\leq 115$

## ② (NANOtech Challenge) 나노발광소자 및 나노소재로 해상도, 투과율 가변 범위 향상

기술적 제약요인	디스플레이 발광소자의 <b>초고해상도 픽셀화 및 대면적화</b> 기술의 요구
----------	--

나노기술의 역할	<b>나노발광소자</b> 를 통한 해상도, 투과율 가변 범위 향상으로 나노발광소자 기반 <b>스마트 투명 디스플레이</b> 구현
----------	---

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	초고휘도 나노발광소자 기술	해상도(ppi)	
	* 초현실감을 구현할 수 있는 초고해상도, 고색순도, 초고휘도를 갖는 디스플레이 광원 나노소자 기술	4000	16000
2	능동형 투명조절 디스플레이 나노소자 제조 기술	응답 속도(ms)	
	* 온도나 밝기와 같은 주변 환경변화에 맞게 투과도가 능동적으로 변하는 투명 디스플레이 나노소자 기술	30	10

## ③ (NANOtech Challenge) 초박형 나노광학렌즈로 색수차 개선 및 광효율 향상

기술적 제약요인	디스플레이 고화소/고화질 구현을 위한 <b>광학계의 소형화 및 정밀화</b> 에 따른 성능 개선 요구
----------	--

나노기술의 역할	<b>초박형 나노광학렌즈</b> 를 통한 색수차 개선 및 광효율 향상으로 <b>나노광학소자의 소형화 및 입체영상 디스플레이</b> 개발
----------	---

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	초박형 나노광학렌즈 기술	색수차(deg)	
	* 나노구조에 의해 광파의 위상을 제어하여 초박 구조로 결상이 가능한 AR/VR용 나노광학 렌즈 기술	N/A	5
2	공간 광변조 나노광학소자 기술	시야각(deg)	
	* 나노광학구조에 의해 빛의 위상, 진폭 등을 독립적으로 능동 제어하여 3차원 공간의 고해상도, 광시야각 고품질 이미지 형성이 가능한 입체영상 디스플레이용 나노광학소자 기술	10	60

**나노기술의 역할**

**중단기 수요중심** 고해상도, 고색순도, 고균일도 나노소재를 통한 **대면적 초실감 디스플레이 구현**

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'28
1	고해상도 XR 디스플레이 구현을 위한 대면적 색변환 나노소재 기술	대면적 박막 균일도 (두께 편차)(%)	
	* 초실감 영상을 위한 대면적, 고균일도의 나노소재 제조 기술	< 10	< 5
2	고효율 및 고색순도 광변환 페로브스카이트 나노소재 기술	페로브스카이트 필름 안정성 (PL 감소율)(%)	
	* 페로브스카이트 양자점 발광소재의 안정성 향상 기술 및 광변환 복합 필름 기술	> 50	< 15
3	나노셀룰로오스 기반 투명 디스플레이용 유연 필름 기술	투과율(%)	
	* 나노셀룰로오스 기반으로 필름의 표면 처리를 통해 광학 필름의 요구 물성에 적합한 표면 특성을 부여하는 기술	85	91

**4 (NANOtech Challenge) 오감 나노센서, 나노소재로 현실감 극대화**

**기술적 제약요인**

실시간 현장감을 느끼기 위한 **센서 및 미디어 디바이스 기술의 부재**

**나노기술의 역할**

**나노센서/소재 기반으로 동시 공감각을 통한 현실감 극대화의 초실감 리얼공간 구현**

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	주파수 및 진폭 광대역 햅틱 액추에이터 나노소재 기술	진동주파수(Hz)	
	* 다양한 촉각을 구현할 수 있는 햅틱 액추에이터 나노소재 기술	180~240	20~5000

**나노기술의 역할**

**중단기 수요중심** **저유전율 나노소재** 기반으로 신호 전송 손실 최소화를 통한 **초연결 네트워킹 구현**

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'28
1	초고속 통신 회로용 실리카 나노입자 기반 고분자 복합소재 기술	필름 유전율(@10 GHz)	
	* 절연성 기판 소재의 저유전율 및 저유전 손실 특성 극대화를 위해, 고분자 소재의 화학적 구조 설계와 더불어, 공기층이 포함되어 있는 나노실리카 입자를 혼합하는 복합화 기술	3.2	< 3.0

## Big Question 해결을 위한 나노기술 로드맵

나노기술 예시 주제	핵심요소기술									
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
프리핑 디스플레이 백플레인용 고신속 고안정 나노소자 기술	고신속성 백선/전극/가편용 나노구조 및 공정기술, 고신속성 나노소자 집적 기술							자유곡면 나노소자 기술		
해상도 및 화상 변질 방지용 디스플레이 프론트플레인 나노소자 기술	초고연신율을 나노소자 구조 설계 기술/ 다축 변형시 하소 및 구동회로의 설계 및 제조 기술							자유곡면 나노소자 기술		
초고해도 나노발광소자 기술	R/G/B 수직집적형 전압형 나노소자 기술				백플레인 CMOS 집적 기술		고효율/고휘도/고속응답 나노발광소자 기술			
능동형 투명조절 디스플레이 나노소자 제조기술	투과도 자동 조절 가능 나노소재 기술					초고해상도 구현이 가능한 나노패턴 및 공정기술				
초박형 나노광학렌즈 기술	초박형 나노광학 메타렌즈 구조 설계 기술					초박형 나노광학렌즈 대면적 제조를 위한 나노공정기술				
공간 광변조 나노광학 소자 기술	초고해상도 패설 및 광변조소자 기술				능동 나노광학구조 설계 및 측정 기술		초고집적 나노집적소자 설계 및 구동 기술			
주파수 및 진폭 광대역 합성역주어터 나노소자 기술	진동주파수와 진폭 및 진동 가속도의 진동 자극 시간을 광대역으로 구현할 수 있는 나노소자 기술 순간적으로 온도를 조절하여 온/냉을 느낄 수 있게 하는 나노소자 기술									

※ 상기 나노기술 예시 주제 외 관련 나노기술 주제는 사전적 상세기술지도(별첨) 내 나노정보전자 분야 기술 로드맵 참고

## 미래상 초실감 리얼공간을 위한 나노소자, 나노소재 등을 기반으로 오감체험이 가능한 초연결 지식 정보화 사회 실현



### 1-3 기존의 미해결 난제를 풀기 위한 양자컴퓨터가 가능한가?

- ◆ 기존 컴퓨터로 해결할 수 없는 인류 난제 해결을 위해 양자 우월성 구현 및 양자 한계 도달을 위한 고신뢰성·고안정성 양자컴퓨터 상용화가 가능한가?

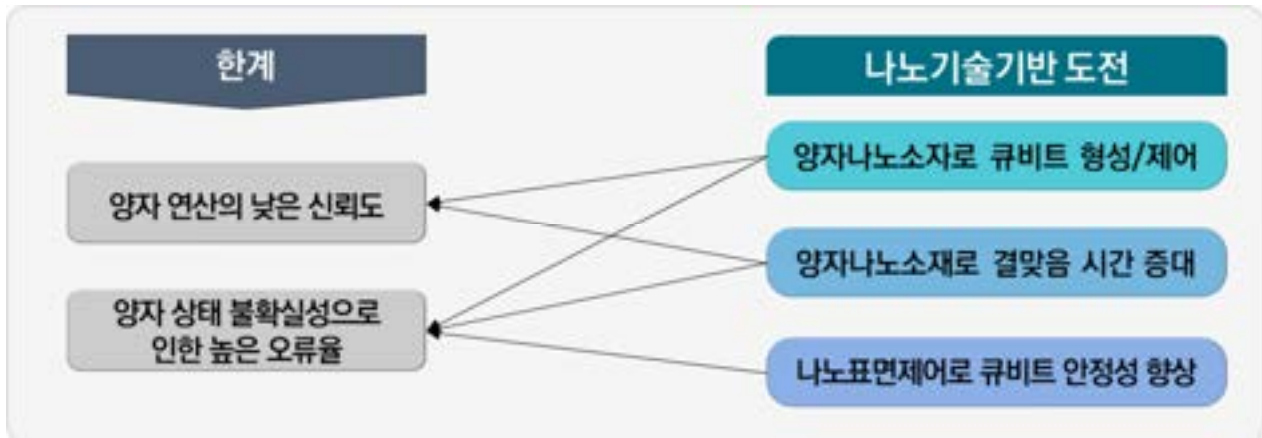
■ **현황** 양자 우월성\* 달성을 위해 수백 큐비트 이상의 구현 사례가 보고되고 있으나, 높은 오류율과 극저온에서 구동 가능한 실정으로 범용 양자컴퓨터 상용화에 제한적

\* 양자 우월성 : 양자컴퓨터를 이용해 특정 문제에 대해 현재의 슈퍼컴퓨터보다 빠르게 연산을 수행하는 것으로 양자컴퓨터 개발의 중요한 이정표

■ **한계** 고신뢰도의 양자 연산을 위한 큐비트 구현의 한계 및 높은 오류율

※ 2022년 IBM에서 433큐비트 프로세서 'Osprey'를 공개하였으나, 큐비트 구현을 위해서 극저온(영하 273°C)이 필요

■ **한계 극복을 위한 나노기술 기반 도전 (NANOtech Challenge)**



## ① (NANOtech Challenge) 양자나노소자 기반 양자 우월성 구현

기술적 제약요인	양자 상태의 불확실성으로 인한 양자 중첩 및 얽힘 상태 조절의 한계와 수백 이상 고성능 큐비트 구현 기술의 요구
-------------	--

나노기술의 역할	양자나노소자 기반 양자 중첩·얽힘 조절을 통한 큐비트 형성 및 제어로 양자 우월성을 갖는 양자컴퓨팅 상용화
-------------	---

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	범용 양자컴퓨터용 큐비트 형성 및 제어 원천기술	극저온 이동도( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	
	* 큐비트 집합 (노드) 사이 양자얽힘을 구현한 양자네트워크 방식의 대규모 양자 컴퓨팅 기술	$10^5$	$\sim 10^7$
2	양자통신, 양자센서용 원천소재 기술	양자결함 위치제어 에러 (nm)	
	* 양자점 및 반도체 레이저 제작시 필요한 원소재 기술	20	0.2

## ② (NANOtech Challenge) 양자나노소재로 결맞음 시간 증대

기술적 제약요인	열, 소음, 전자기파 등 외부환경에 민감한 양자 상태로 인한 결어긋남(decoherence) 발생 및 짧은 양자 중첩 유지 시간
-------------	---

나노기술의 역할	초전도, 이온트랩, 양자점 등 양자나노소재를 통한 결맞음 시간 증대로 양자 중첩 및 얽힘 유지 시간 극대화
-------------	---

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	범용 양자컴퓨터용 큐비트 형성 및 제어 원천기술	결맞음시간(ms)	
	* 큐비트 집합 (노드) 사이 양자얽힘을 구현한 양자네트워크 방식의 대규모 양자 컴퓨팅 기술	$> 0.1$	$> 10$



### ③ (NANOtech Challenge) 나노소자 및 표면제어로 큐비트 안정성 향상

기술적 제약요인	양자 상태의 불확실성과 양자 측정 과정에서 원래의 양자 상태가 붕괴되는 현상으로 인한 양자 오류 발생
나노기술의 역할	나노소자 및 표면제어 기술을 통한 큐비트 안정성 및 게이트 충실도 향상으로 양자 계산 정확도 개선

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	고신뢰성·고안정성 양자컴퓨팅 소자용 표면 제어 기술	양자 게이트 충실도(%)	
	* 양자컴퓨터, 센서의 성능(큐비트 안정성, 조작 충실도)을 향상시킬 수 있는 나노소자 기술	< 76	> 99

## Big Question 해결을 위한 나노기술 로드맵

나노기술 예시 주제	핵심요소기술									
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
범용 양자컴퓨터용 큐비트 형성 및 제어 원천기술	큐비트 형성 기술	초전도 큐비트용 기판성장기술		양자소재 특성 메트릭 확립 기술			큐비트 칩 설계 및 제작기술			
양자통신, 양자센서용 원천소재기술	28nm 등 고품질 반도체 기반 대면적 성장기술			양자소재 특성분석의 표준화 기술			양자정보 양립구현 기술 및 확장적 양자원격 전송 기술			
고신뢰성·고안정성 양자컴퓨팅 소자용 표면 제어 기술	고순도 증착원자 Co, Pd를 원자기반 원소재 기술				비선형 신호를 양자 통신 양자 센서용 광부품용 원소재 기술			고기능 나노광회로 및 양자광원 생성기 개발 기술		
	국도로 균일한 표면 생성을 위한 나노공정기술					in situ로 트랩 표면을 cleaning할 수 있는 ion-beam bombardment 기술				

※ 상기 나노기술 예시 주제 외 관련 나노기술 주제는 사전적 상세기술지도(별첨) 내 나노정보전자, 나노소재 분야 기술 로드맵 참고

## 미래상 양자나노소자 및 소재기술 등으로 기존 컴퓨터로 해결할 수 없었던 각종 기술난제들을 해결할 양자컴퓨터의 상용화



## 1-4 탈탄소 사회 실현을 위한 신재생에너지 전환이 가능한가?

◆ 탈탄소 사회 실현을 위해 신재생에너지를 통한 온실가스 배출의 최소화과 배출된 탄소의 포집·전환이 가능한가?

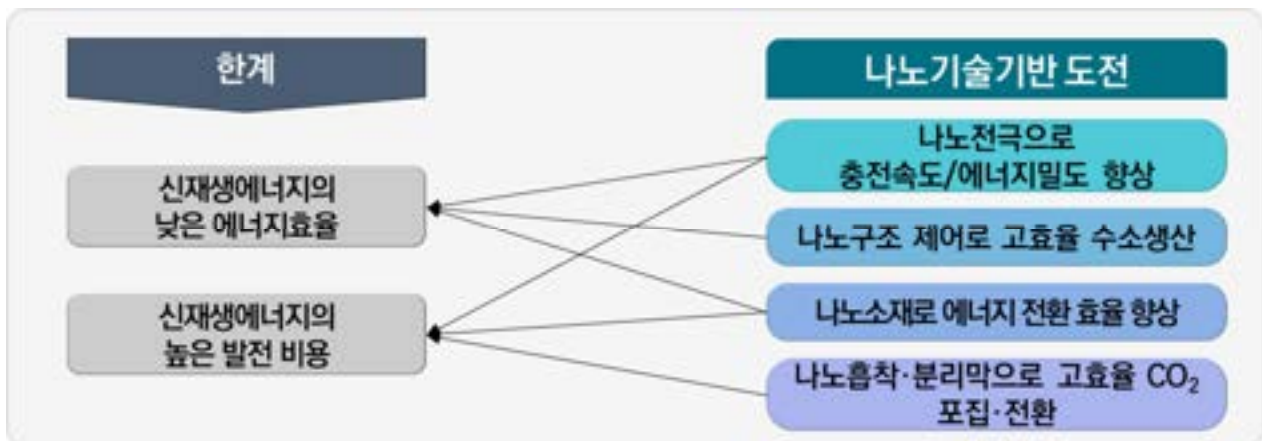
■ **현황** 에너지의 생산·저장·활용 과정에서 온실가스 배출이 불가피하며, 이로 인한 기후 변화로 인류와 지구의 생존 위협이 지속되어 친환경 신재생에너지 전환이 시급

■ **한계** 신재생에너지 기술의 낮은 에너지효율과 높은 발전 비용으로 인한 제한적인 보급·확산

※ IEA 보고서에 따르면, 2022년 에너지 부문 이산화탄소 배출량은 전년 대비 0.9%(3억 2,100만 톤) 증가한 368억 톤으로 사상 최고치를 기록

※ 블룸버그에 따르면 화석연료와 재생에너지의 발전 비용이 균등한 시점을 의미하는 그리드 패리티(Grid Parity) 달성에 한국은 2027년 이후에나 가능할 것으로 전망

■ **한계 극복을 위한 나노기술 기반 도전 (NANOtech Challenge)**



## ① (NANOtech Challenge) 나노소재 전극 설계로 충전속도 및 에너지 밀도 향상

기술적 제약요인	이차전지 양극재, 분리막, 전해질 등 소재의 낮은 전기화학 특성
-------------	-------------------------------------

나노기술의 역할	전극의 나노구조 설계, 나노스케일 제어를 통한 초고속 충전/장수명 이차전지 구현
-------------	--

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	초고속충전 및 고에너지 밀도 전극을 위한 나노구조 제어 기술	상온 전지 충전속도(C-rate)	
	* 리튬이차전지의 충전 및 방전 속도 통제를 위해 전극을 구성하는 활물질 입자의 크기 및 구성을 나노수준에서 제어하기 위한 기술	> 0.2	> 20
2	수계 이차전지 전극/전해질 계면 제어 나노소재 기술	이차전지 수명 특성 (회, 초기 용량 80% 유지)	
	* 전극-전해질 계면에서의 물 분해 또는 수소 발생 등의 부반응이 효율 및 수명 저하의 원인으로 작용하는 수계 이차전지의 부반응을 억제할 수 있는 나노계면 제어 기술	100	1000

나노기술의 역할	중단기 수요중심	탄소복합 나노소재 기반으로 고효율/초고에너지 밀도의 이차전지 구현
-------------	----------	--------------------------------------

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'28
1	이차전지 음극재 및 도전재용 탄소복합 나노소재 기술	총방전 용량 (mAh/g)	
	* CNT, Graphene 등과 같은 carbon계 나노입자 등 고품질 복합 분산체 제조 기술을 통한 균질한 고용량, 고효율 실리콘 음극소재 제조 기술	1300	> 1800
2	고에너지밀도 전고체 이차전지를 위한 탄소 나노소재 기술	중량당 에너지밀도 (Wh/kg)	
	* 에너지 밀도의 성능적 한계 극복을 위한 고체전해질 기반 이차전지용 탄소 나노소재 기술	280	400

## ② (NANOtech Challenge) 나노구조 제어로 수소생산 촉매 비표면적 및 선택성 향상

기술적 제약요인	청정 수소생산 기술의 요구와 수소저장·방출 과정의 낮은 에너지·경제 효율성
----------	---

나노기술의 역할	나노구조 제어를 통해 비표면적 및 선택성이 향상된 나노촉매 기반으로 고효율 수소 생산 및 고용량 수소저장
----------	--

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	대용량 수전해 적층 모듈화 나노기술	수소 생산율(Stack당, Nm <sup>3</sup> /h)	
	* 수전해 셀의 적층을 통한 모듈 단위 부피당 수소발생 양의 증대 및 장기안정성 확보 기술	≥ 0.5	≥ 2
2	대용량 암모니아 분해 시스템 및 연계 나노기술	사용전력 1kWh 당 수소 생산량(L)	
	* 대용량 수소생산용 암모니아 분해 시스템 기술	≥ 700	≥ 1500
3	수소 저장용 나노흡착제 합성 기술	수소저장밀도(wt%)	
	* 높은 수소저장밀도를 갖는 고효율 수소 나노흡착제 합성 기술	> 4.5	> 6.5

나노기술의 역할	<b>중단기 수요중심</b> 유·무기 나노소재를 통한 전해질막 성능 및 내구성 개선으로 고성능 수소모빌리티 구현
----------	--

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'28
1	수전해 PEMFC용 유무기 강화복합 나노소재 전해질막 기술	수소이온전도도(@RH50%) (S/cm)	
	* 기계적 물성 및 이온전달 특성 개선을 위한 유무기 강화 복합 나노소재 지지체 및 이오노머 복합 고분자 전해질막 기술	0.079	≥ 0.1

### ③ (NANOtech Challenge) 나노소재로 신재생에너지 발전 효율 향상

기술적 제약요인	태양광, 바이오매스 등 재생에너지의 낮은 전환 효율 및 대면적화 한계
나노기술의 역할	나노박막 기반 다층 구조로 에너지 변환 효율 향상 및 대면적화와 나노-바이오 촉매 기반 환원력 공급으로 고농도 바이오연료 생산

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	대면적 적층형 태양전지 제작 나노기술	광전변환효율 (%) (M10 기준(182 x 182 mm <sup>2</sup> ))	
	* 다층 구조 적층형 태양전지를 대면적화할 수 있는 균일한 나노박막 소재 형성 기술	26	33
2	차세대 태양전지 대면적 나노박막 형성 기술	광전변환효율%(800 cm <sup>2</sup> 기준)	
	* 차세대 태양전지의 대면적화를 위한 나노박막 기술	16	24
3	바이오연료 고농도 생산을 위한 환원력 공급 기술	바이오연료 생산농도(g/L)	
	* 바이오연료(바이오항공유, 바이오디젤, 바이오에탄올 등) 고농도 생산에 필수적인 환원력 공급을 위한 나노-바이오 촉매 및 나노시스템 기술	N/A	10
4	바이오매스 전환 고내구성 나노-바이오 촉매 기술	바이오매스 전환 연료 생산 성능 향상 수준(%)	
	* 바이오매스 유래 저해물질, 고탄소 연료 독성으로 성능이 저하되지 않는 나노-바이오 촉매 개발 및 활용 기술	N/A	> 100

### ④ (NANOtech Challenge) 다공성 나노흡착, 분리막으로 CO<sub>2</sub> 흡·탈착 효율 및 투과성 향상

기술적 제약요인	이산화탄소의 낮은 반응성으로 인한 탄소 포집·전환을 위한 흡착제, 분리막의 낮은 효율성
나노기술의 역할	다공성 나노흡착제/분리막 활용으로 CO <sub>2</sub> 에 대한 흡·탈착 효율, 투과성 및 선택성 향상을 통한 CO <sub>2</sub> 의 효율적 포집·전환

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	대기 중 이산화탄소 직접 포집 나노소재 및 모듈화 기술	CO <sub>2</sub> 흡착능(mmol/g)	
	* 저농도 이산화탄소 포집을 위한 나노다공성 소재 및 모듈화 기술	1.5	2.5
2	고농도 이산화탄소 포집을 위한 나노분리막 기술	CO <sub>2</sub> 투과도(GPU)	
	* 다양한 배기가스 대상 이산화탄소 분리를 위한 다공성 나노 입자와 고분자를 혼합한 고투과성 및 고선택성 분리막 기술	1,500	2,500
3	CO <sub>2</sub> 로부터 고부가 탄소나노소재 합성 제조 기술	CO <sub>2</sub> 전환수율(%)	
	* CO <sub>2</sub> 를 활용하여 고부가 탄소소재를 합성 및 응용하는 기술	40	~60

## Big Question 해결을 위한 나노기술 로드맵

나노기술예시주제	핵심요소기술										
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	
초고속충전 및 고에너지밀도 전극을 위한 나노구조 제어기술	나노스케일의 일차원/2차원 구성된 마이크로 크기의 양극소재 합성 기술			나노입자 크기 및 분포 제어 기술			전극 표면 나노코팅 기술				
수계 이차전지 전극/전해질 계면 제어 나노소재 기술	이온계 용액 나노소재 설계 및 합성기술 / 용액 표면 코팅 및 계면 제어기술				양극산화물계 양극소재 설계 및 합성기술 / 양극 표면 코팅 및 계면 제어기술						
대용량 수전해 적용 모듈화 나노기술	금속분리판 부식 방지를 위한 합금 소재 개발 및 표면 방지막 합성 기술 / 알칼리 수소의 고압 압축을 위한 수소 분리 및 포집 기술						장기간 대용량 고밀도 수소 발생을 위한 모듈 제작 기술				
대용량 압도-이산화 시스템 및 연료 나노기술	분해 반응기내 전류 압도-이산화 시스템 기술 / 고순도 수소 생산을 위한 수소 정제 기술				내부식성 소재 기반 압도-이산화 설 및 시스템 기술						
수소 저장용 나노촉매 합성 기술	고용량 수소저장용 나노소재 설계 및 합성기술			수소저장 성능의 열역학적 특성 개선을 위한 나노소재 설계 및 합성 기술				비표면적 합성 기술			
대면적 적용형 대면적 나노박막 나노기술	대면적 투명전극 증착 기술		대면적 광흡수층 나노박막 합성 기술				대면적 전하수송층 합성 기술				
차세대 대면적 대면적 나노박막 합성 기술	대면적 박막 합성 장비 제작 기술			대면적 나노박막 합성 기술				나노박막의 조성 및 모듈로지 균일도 향상 기술			
나노-바이오 촉매 기반 바이오연료 고농도 생산을 위한 환경적 공급 기술	바이오연료 생산성 향상을 위한 고농도 인공효소 / 전이금속 나노입자 합성 기술					인공효소 기반 고농도 바이오연료 생산 미생물 개발 기술 / 바이오촉매 기반 전극 반응기/화학 시스템 기술					
바이오매스 전환 고내구성 나노-바이오 촉매 기술	바이오매스 전환 바이오촉매 내구성 강화 기술					바이오매스 유래 지해물질을 전환 나노-바이오 촉매 기술 / 바이오매스 전환 고농도 바이오촉매 생산 기술					
대기 중 이산화탄소 직접 포집 나노소재 및 모듈화 기술	고효율 및 고속 흡-탈착 가능한 나노흡착 소재 기술						나노촉매 대용량 합성기술 및 대면적 처리 제어-지지 비용 최적 공정기술				
고농도 이산화탄소 포집을 위한 나노분리막 기술	고분자 물리화학적 구조 제어				초박막 (50 nm 이하) 코팅 기술 / 고분자 간 계면 구조 제어기술			분리막 대면적화 기술			
CO <sub>2</sub> 로부터 고부가탄소 나노소재 합성 제조기술	금속 나노촉매 설계 및 합성기술			고표면적 탄소물질 합성기술				카본소재 고순도화 기술			

※ 상기 나노기술 예시 주제 외 관련 나노기술 주제는 사전적 상세기술지도(별첨) 내 나노에너지, 나노환경 분야 기술 로드맵 참고

## 미래상 차세대전지 나노소재, 수소생산·저장, 바이오연료 생산 나노촉매 등 신재생에너지 혁신과 나노흡착·촉매 기반의 CCUS 기술 발전·확산을 통해 저탄소 친환경 에너지 전환 가속화



**차세대 대면적전지**

다차원 고효율 대면적 나노박막, 고안정성 나노전극 소재

**CCUS를 통한 탄소중립 실현**

고성능 나노흡착, 분리막, 촉매

**초고속충전이 가능한 고에너지밀도의 이차전지**

나노구조의 전극소재 기술

**바이오매스 연료화**

고탄소/고농도 바이오연료 생산을 위한 나노-바이오촉매 기술

## 1-5 지속가능 사회 실현을 위한 환경오염 해결이 가능한가?

- ◆ 인류 존립에 필수적인 물·대기 등 환경의 위협에 대응하여 **지속가능한 사회를 실현하기** 위해 오염원을 모니터링·저감하여 **환경오염 문제 해결이 가능한가?**

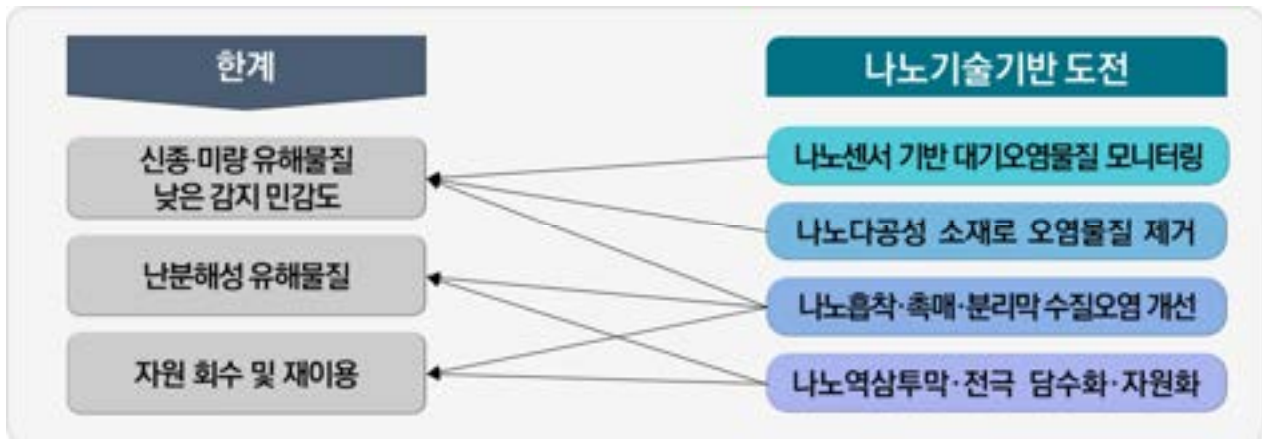
■ **현황** 환경오염 저감 및 감지 기술은 기존의 오염물질에 국한되어 적용되는 반면, 도시화 및 산업의 고도화 등으로 환경오염 물질은 지속적으로 증가

■ **한계** 초미세먼지, 나노플라스틱 등 신종·미량 유해물질의 낮은 감지 민감도 및 난분해성과 자원 회수·재이용 기술의 한계

※ 지구 육지의 99% 이상이 세계보건기구(WHO)가 권고한 안전 한도를 초과하는 위험한 수준의 초미세먼지 (PM2.5)에 노출된 것으로 관측

※ 분석기술의 비약적 발전으로 ng/L 수준까지 분석이 가능해짐에 따라 미량 유해 물질이 검출되는 사례 증가

■ **한계 극복을 위한 나노기술 기반 도전 (NANOtech Challenge)**





## ① (NANOtech Challenge) 나노센서로 대기 모니터링 정확도 향상

기술적 제약요인	미세먼지/바이오 에어로졸 구별이 어려움에 따라 낮은 모니터링 정확도
나노기술의 역할	나노센서/플랫폼 및 나노구조 기반 미세유체칩 활용 통한 실시간 대기환경 모니터링 및 오염물질 검출

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	현장형 신속 바이오에어로졸 포집·검출 일체 나노플랫폼 기술	검출 민감도(CFU/PFU)	
	* 현장에서 바이오에어로졸 전처리를 통해 바이오에어로졸을 포집하고 동시에 검출도 가능한 나노소재 기반 일체형 모니터링 시스템 기술	1000	10
2	다종 혼합 가스 패턴인식을 위한 나노센서 어레이 기술	센서 패턴인식 정확도(%)	
	* 대기 중에 혼합된 다종의 가스성분 중에서 특정 유해가스를 정성적·정량적으로 감지할 수 있는 나노소재 기반 다중센서 어레이 및 가스성분 패턴인식 기술	85	95

## ② (NANOtech Challenge) 나노다공성 소재로 오염물질 선택적 제어

기술적 제약요인	유해가스, 미세먼지 및 바이오에어로졸 등 대기 중 부유 유해인자 제거를 위한 선택성 요구
나노기술의 역할	다공성 나노소재 등 나노소재 기반 흡착, 촉매, 분리막 활용으로 선택적 제어 능력, 내구성 향상을 통한 대기오염 저감

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	극미량 바이오에어로졸 포집용 3차원 나노구조 기술	포집 효율(%)	
	* 공기 중 극미량으로 존재하는 미세병원체를 효율적으로 포집할 수 있는 3차원 나노구조 기술	80	95
2	공기청정형 흡착제·촉매제 결합 나노소재 기술	CA 저감효율 대비(%)	
	* 흡착과 분해 Site를 나누어 기체 오염물질의 흡착과 분해가 동시에 나노소재로 공기청정 효율과 내구성이 증대되는 기술	50	90
3	휘발성 유기화합물 저감용 나노분리막 기술	Rejection rate(%)	
	* 배출원에서 생성되는 다매체의 기체 오염성분 중 특정 유해 가스를 분리하여 저감할 수 있는 나노소재 기술	70	90

### ③ (NANOtech Challenge) 나노흡착, 촉매, 분리막으로 신종 수계 오염물질 제거

기술적 제약요인	신종 유해물질의 지속 발생 및 수질오염물질의 낮은 제거효율
----------	----------------------------------

나노기술의 역할	나노소재 기반 흡착, 촉매, 분리막 활용으로 안정성, 내구성, 에너지효율 향상을 통한 수계 난분해성 오염물질 저감 및 제거
----------	--

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	수중 미량유기물 및 산화제 실시간 측정 나노소재 기술	유해물질 검출한도(ppb)	
	* 수중 미량유해물질 및 산화제를 기능기별로 측정할 수 있는 나노촉매 소재 및 전극 기술	10	< 0.01
2	미량오염물질 표적 산화 및 흡착 나노기술	최대 흡착량(mg/g)	
	* 고선택성 산화 및 흡착을 위한 나노소재 및 공정 기술	500	> 1000
3	수돗물 탁질유발물질 감지 나노소재 기술	탁질유발물질 검출(%)	
	* 바이오 소재 및 형광 나노소재 기반 실시간 탁질유발물질 센서 기술	30	80

나노기술의 역할	중단기 수요중심	나노소재 기반 분리막으로 고효율 수처리를 통한 수중 미량오염 물질 저감 및 제거
----------	----------	--

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'28
1	나노셀룰로오스 기반 고효율 수처리 및 유기용매 분리막 제조 기술	분리성능(%)	
	* 나노셀룰로오스 3차원 나노섬유구조체 내에 존재하는 기공 사이즈를 조절하여 수처리 및 유기용매 분리막 소재 제조 기술	-	> 99

#### ④ (NANOtech Challenge) 나노역삼투막·전극으로 담수화/자원화 효율성 향상

기술적 제약요인	수자원 재이용 및 담수화를 위한 수처리 기술의 낮은 효율 및 과도한 에너지 소모
나노기술의 역할	나노스케일 역삼투막 및 나노전극으로 담수화/자원화의 효율성·선택성 향상을 통한 수자원 생산

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	초박막 고투과성 및 자연모사형 다기능 나노역삼투막 기술	수투과도(LMH/bar)	
	* 자연모사 표면 패턴을 통한 저오염성 해수담수화 나노분리막 및 초박막 선택층 두께(50nm 이하)를 지닌 나노역삼투막 기술	1	3
2	재이용수 생산 나노광전기화학 촉매 기술	총유기탄소 제거율(%)	
	* 탈염공정에서 유기물, 질소 제어를 위한 나노광전기화학 촉매 기술	50	> 95
3	에너지 추출형 나노이온·역삼투막 기술	수투과도 (LMH/bar)	
	* 이온 선택성 기능과 역삼투막 기술 혼합한 에너지 저감형 나노역삼투막 기술	3	10

## Big Question 해결을 위한 나노기술 로드맵

나노기술 예시 주제	핵심요소기술									
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
현장형 신속 바이오에어로졸 포집·검출일체 나노플랫폼 기술	바이오에어로졸 전지량의 효율을 높이기 위한 표면적 확대 나노구조 기술					나노소재 기반 현장형 바이오에어로졸 신속 전처리 키트 개발 및 유효성 평가 기술				
다중 혼합 가스 패턴인식을 위한 센서 어레이 기반 나노기술	다중 나노소재 기반 센서 어레이 구축 및 집적 기술			AI 기반 다중 혼합 가스 패턴인식 기술을 통한 실시간 유해가스 감지 기술			다중 혼합 가스의 분리 및 감지를 통한 정량적·정형적 분석 기술			
극미량 바이오에어로졸 포집용 3차원 나노구조 기술	멤브레인에 3차원 나노구조체 합성 및 나노구조에 의한 멤브레인 자질을 최소화 할 수 있는 기술						미량의 병원체를 고효율로 포집할 수 있는 표면적 향상 및 표면 개질 기술			
공기청정형 흡착제·촉매제 결합 나노소재 기술	흡착소재의 기공조질 개질 기술		산화촉매의 피독 현상을 방지 가능한 결합소재 기술			광에너지를 이용하여 재생 가능한 결합소재 기술		나노소재의 열안정·고정화 기술		
위험성 유기화합물 저감용 나노분리막 기술	나노분리막 표면 작용기 제어 기술			나노분리막 표면 기공 제어 기술			나노분리막 촉매 코팅 기술			
수중 미량유기물 및 산화제 실시간 측정 나노소재 기술	유기물 가능기를 선택적 직접/간접 나노촉매 기술 / 잔류 산화에 실시간 측정 나노촉매 설계 및 합성 기술						정량화 및 선택성 향상 기술			
미량오염물질 표적 선별 나노기술	활성산화제 고효율 생성 나노촉매소재 기술 / 미량물질 선택적 나노소재 설계 및 합성 기술					미량 오염물질 포집 및 분해 동시에 가능 나노흡착소재 제조 기술				
수돗물 탁질유발물질 감지 나노소재 기술	유해 미생물 및 탁질유발 부산물 검출을 위한 나노바이오 기반 환경센서 기술						내핵비교관용질 검출을 위한 나노형광물질 및 입타이 센서 기술			
초박막 고투과성 및 자연모사형 다기능 나노역삼투막 기술	고투과성 및 고속 흡·탈착 가능한 나노공극 소재 기술						나노공극제 대응형 합성기술 및 대응형 처리 저에너지 비용 절감 공정 기술			
재이용수 생산 나노광전기화학 촉매 기술	고효율 광전기화학 촉매 합성 기술						고효율 광전극 제조 및 공정 기술			
에너지 추출형 나노이온·역삼투막 기술	우수한 수투과도를 보이는 막막 제조 기술 / 고선택성 이온교환막 구조 제어 기술						에너지 추출을 위한 자연압 나노전극 제조 기술 / 에너지 효율 증대를 위한 모듈 설계 기술			

※ 상기 나노기술 예시 주제 외 관련 나노기술 주제는 사전적 상세기술지도(별첨) 내 나노환경 분야 기술 로드맵 참고

## 미래상 나노환경센서, 나노촉매 및 나노흡착제·분리막으로 신종·미량 환경오염물질의 실시간 모니터링 및 제거 기술 혁신을 통한 환경오염 문제 해결



## 1-6 식량안보를 위한 스마트 농업 및 안전한 식품 유통이 가능한가?

- ◆ 기후변화와 글로벌 공급망 불확실성 등에 따른 식량안보(Food Security)의 불안정성이 증대되는 가운데, 정밀 농업 혁신 및 첨단기술 기반 안전한 식품 유통 등으로 식량 안보가 가능한가?

■ **현황** 기후변화로 인한 농업 생태계의 변화는 식량 위기를 초래하며, 신선식품의 안전한 유통을 위한 유해물질 측정, 안전 포장에 요구

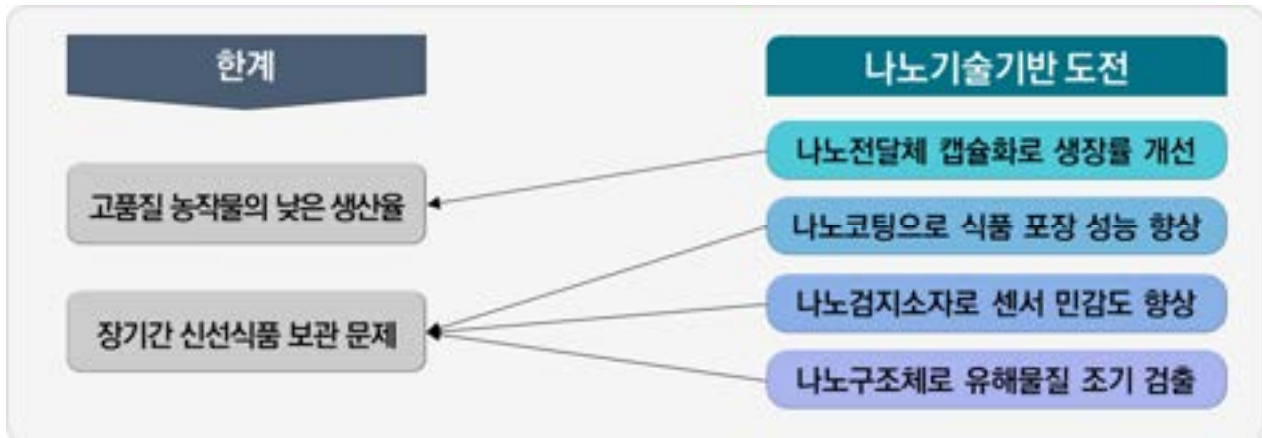
■ **한계** 고품질 농작물 대량생산 및 장기간 신선식품 보관의 한계

※ 글로벌 수요에 따라 2050년까지 농업 식량 생산량을 50% 정도 늘려야 하며, 온실가스 배출을 대폭 감축하지 않으면 수확량이 30%까지 감소할 수 있는 상황

(2021 기후변화 리스크 평가 보고서 - 영국 왕립국제문제연구소)

※ 냉장식품의 짧은 유통기한(4~5일)을 늘리기 위한 식품 안전성 검증(잔류 농약 등 유해물질 최대 500종 동시 분석) 및 스마트포장재 개발 등은 지속 연구 대상

■ **한계 극복을 위한 나노기술 기반 도전 (NANOtech Challenge)**



## ① (NANOtech Challenge) 나노전달체 캡슐화로 농작물 성장조절 효율 향상

기술적 제약요인	농작물 성장물질 흡수/전달의 낮은 효율		
나노기술의 역할	나노소재 기반 나노전달체 및 캡슐화를 통해 성장조절물질 전달효율을 높인 맞춤형 나노비료/농약으로 농작물 성장조절 및 병충해 구제		
나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	농작물 성장조절 나노소재 기술	나노입자 사이즈(nm)	
	* 농작물의 성장조절을 위해 유효성분의 전달 및 분해의 효율성 증대를 위한 비료 및 성장조절물질에 적용가능한 나노소재 기술	100	20
2	농작물 병충해 구제를 위한 친환경 나노융합소재 기술	원인 해충/균 살생률(%)	
	* 농작물의 병해충 구제를 위한 친환경 나노융합소재 및 나노전달체 기술	N/A	99.9

## ② (NANOtech Challenge) 나노코팅으로 식품포장 성능 향상

기술적 제약요인	식량의 장기간 신선도 유지 및 보관의 한계		
나노기술의 역할	나노코팅으로 항균력 향상 및 나노소재 기반 식품 포장재로 살균 지속성 확보를 통한 장기간 안전하게 식량 저장		
나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	식량의 장기간 보관을 위한 나노융합소재 기술	대조군 대비 소독성능(%)	
	* 장기간의 식량 저장을 위해 항균 및 항바이러스가 가능한 식품 저장 물질 및 나노코팅 기술을 위한 나노융합소재 기술	~ 80	> 90
나노기술의 역할	<span style="background-color: #0072bc; color: white; padding: 2px;">중단기 수요중심</span> 산소, 오일, 수분에 대한 침투 저항성을 갖는 나노소재를 통한 안전한 식품 포장 및 보관		

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'28
1	나노셀룰로오스 기반 친환경 배리어 코팅제 및 식품포장재 기술	배리어 필름 산소투과율 (cc/m <sup>2</sup> ·day)	
	* 나노셀룰로오스가 포함된 배리어 코팅제 및 배리어코팅 필름을 제조하는 기술	< 100	< 1

### ③ (NANOtech Challenge) 나노검지소자로 센서 민감도 향상

기술적 제약요인	농축산·식품 유통과정에서 극미량 유해 물질의 조기 검출/분리 및 정밀 검역의 한계
나노기술의 역할	나노바이오소자를 통한 민감도 고도화, 집적화, 소형화로 스마트팜 관리 및 식품 유해물질의 조기 현장 검지와 GMO/LMO 감별 가능

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	농축산현장 및 식품 유통과정에서 유해물질 나노검지 기술	바이오마커 검출 리셉터 개발(건)	
	* 농축산 현장이나 식품 유통과정에서 발생하는 무증상, 극미량 유해물질을 현장에서 조기 검출하기 위한 나노바이오 검지 기술	0	4
2	농수축산물 정밀 검역 및 GMO/LMO 감별용 나노기술	휴대용 나노바이오 측정기 민감도(%)	
	* 농수축산물 정밀 검역을 위해 국내산·수입산 식자재의 성분 구별 및 GMO/LMO 식품 감별을 위한 다중 선별 및 극미량 검출이 가능한 나노바이오 검지 기술	0	90
3	스마트팜 관리를 위한 오염물질 저감 나노소재 및 나노센서 네트워크 기술	친환경 나노바이오 복합소재의 살균력(%)	
	* 수확 후 농산물의 품질을 저해하고 안전을 위협하는 세균, 곰팡이, 화학물질 저감을 위한 세척 기술과 제조·가공 환경의 교차오염원에서 전파되는 유해 물질 신속 제거 및 스크리닝하는 나노바이오 기술	0	99.9

### ④ (NANOtech Challenge) 나노구조체로 유해물질 조기 검출

기술적 제약요인	식품 내 유해물질의 선택적 검출 및 신속한 분리·제거의 한계
나노기술의 역할	항체표지 나노구조체(나노입자, 나노튜브, 나노캡 등)를 통한 식품 유해물질 분리/제거의 신속성, 선택성 향상

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	식품 내 바이오 유해물질의 분리·제거 나노기술	유해물질 종류(종)	
	* 식품에 대한 유해물질의 오염 여부를 현장에서 신속하고 정밀하게 검출하기 위해 식품 내 바이오 유해물질의 분리 및 제거를 위한 나노 전처리 플랫폼 제조 기술	N/A	≥ 10

## Big Question 해결을 위한 나노기술 로드맵

나노기술 예시 주제	핵심요소기술										
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	
농작물 성장조절 나노소재 기술	농작물 수확을 극대화 나노융합 소재 적용된 비료 및 성장조절물질 개발 기술					성장조절물질 나노전달체 및 나노정밀화 기술					
농작물 병충해 구제를 위한 친환경 나노융합 소재 기술	식량 보호·병충해 구제 친환경 나노융합 소재 개발 기술					조질 방출 및 표적 위치 전달/흡수 향상 나노재형 기술					
식량의 장기간 보관을 위한 나노융합 소재 기술	친환경·나노융합 소재 개발 기술			식품 포장재 항균코팅 기술			선택적 사멸기능 소재를 함유하는 포장 기술				
농축산 및 식품 유통과정에서 유해물질 나노검지 기술	식품에 유해물질 검지 기술		농축산물용 나노바이오센서 기술		초소형화·고집적화·고안감도 나노 바이오 소자를 통한 현지 검지 기술		현장 진단을 위한 휴대용 나노바이오 검지 시스템 개발 기술				
농수축산물 정밀 검역 및 GMO/LMO 검별용 나노소재/소자 기술	국내산·수입산 식자재 분별용 고효율 바이오소재 개발 기술				GMO/LMO 식물의 특이적 바이오마커 검지 기술		대량형 GMO/LMO 식물의 선택적 검출 가능한 고효율 나노소자 및 검지 기술				
스마트팜 관리를 위한 오염물질 저감 나노소재 및 나노센서 네트워크 기술	식품 전처리 기술 및 센서어레이 기술				플라즈마 살균수 이용 고효율 세척 시스템 기술			오염물질 제거 시스템 기술			
식품 내 바이오유해물질의 분리·제거 나노기술	항해 표지나노구조체 제작 기술			바이오소재 고정화 기술			현장에서 사용가능한 신속 전처리 기술		다중 유해물질 분리 및 제거 신속 기술		

※ 상기 나노기술 예시 주제 외 관련 나노기술 주제는 사전적 상세기술지도(별첨) 내 나노바이오 분야 기술 로드맵 참고

## 미래상 나노비료/농약을 통한 농작물 성장조절 개선, 나노검지소자를 통한 유해물질 조기 검출 및 제거 등 첨단 농업·제조업 혁신으로 식량안보 강화





## 1-7 건강한 삶을 위한 디지털 헬스케어 가능한가?

- ◆ 의학의 발전으로 인간 건강수명이 증가하는 가운데, 맞춤형 정밀 의료 실현으로 난치병과 신·변종 감염병 정복 및 건강한 삶으로의 획기적 전환이 가능한가?

■ **현황** 나노바이오 기술과 ICT 기술의 융합을 통한 첨단바이오 및 디지털 헬스케어 기반으로 개인의 건강을 진단·예측하여, 보다 정교하게 질병을 예방, 진단, 치료하는 개념으로 발전되고 있는 상황

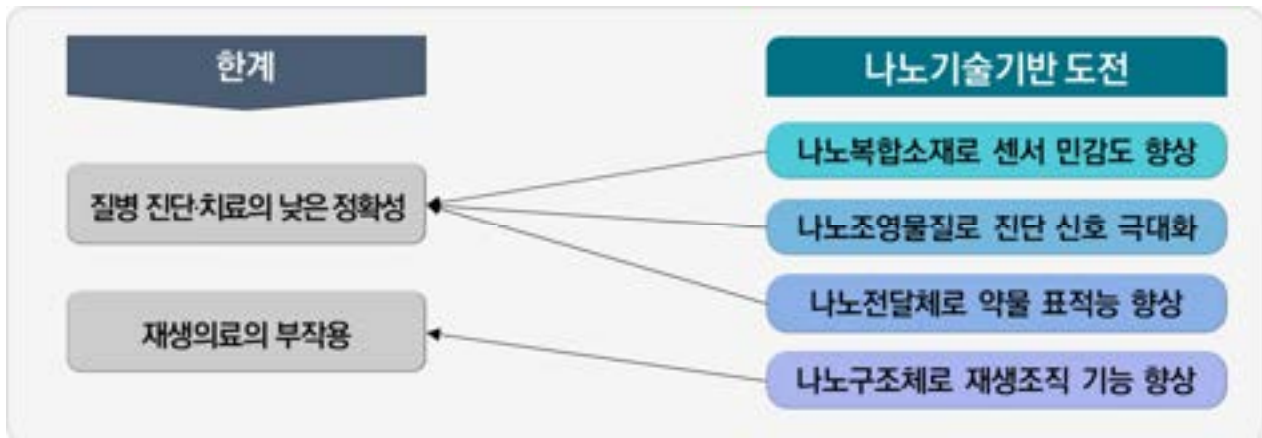
※ 바이오의약품 시장 내 첨단 바이오의약품 점유율 대폭 확대 전망('22년 10% → '32년 30%)

■ **한계** 질병 진단·치료의 낮은 정확성 및 면역거부반응 등 부작용에 따른 재생의료의 한계

※ 미 국립보건원에 따르면 매년 700만 명 이상의 사람들이 오진을 받으며, 300만 명이 오진으로 인한 부작용 경험 및 37만 명 이상이 영구적 장애/사망하는 사실을 발표

※ 세포치료, 유전자치료 등 재생의료 및 첨단 치료가 일상화되고 있지만, 생명을 위협할 수 있는 면역반응 등 심각한 부작용 문제가 존재(미 식품의약국에 따르면 전염병 감염, 저혈압, 콩팥 손상, 열병, 저산소증 등의 부작용 주의 경고)

■ **한계 극복을 위한 나노기술 기반 도전 (NANOtech Challenge)**



## ① (NANOtech Challenge) 나노복합소재, 표면개질로 센서 민감도 및 선택성 향상

기술적 제약요인	체외 진단을 위한 극소량 바이오마커의 낮은 재현성과 신뢰성 부족
나노기술의 역할	나노복합소재 및 표면개질 등을 통해 민감도, 선택성 향상으로 고재현성/고신뢰성 체외 진단 가능

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	체외 진단용 나노표준물질 기술	특이도/정확도(%)	
	* 체외진단에 사용되는 나노소재 및 소자의 성능평가 및 실증에 요구되는 기준에 부합되는 나노표준물질 기술	95	> 99
2	인체 부착형 비침습형 체외 진단용 나노기술	센서 민감도(mV/dec)	
	* 인체에 부착하여 땀, 구강, 눈물 등에서 배출되는 다양한 바이오마커의 비침습적 검출을 위해 필요한 나노복합소재, 비정형성 나노구조 및 센싱 기술	45	> 55
3	신변종 감염성 물질의 포집·분리·고농축 나노기술	바이오마커 포집율(%)	
	* 신변종 감염성 물질의 효과적인 포집, 분리 및 고농축을 위한 나노전처리 플랫폼 기술	70	90

## ② (NANOtech Challenge) 나노조영물질 제어로 진단 환경 감응성 향상

기술적 제약요인	체내 진단을 위한 조영제의 낮은 질환조직 표적률 및 진단신호의 한계
나노기술의 역할	나노소재 기반 조영물질의 제어를 통해 약물 동태학적 거동, 환경 감응성 향상으로 질환조직 표적률 및 진단신호 극대화

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	체내투여를 위한 나노조영제 안전성 향상 및 대량생산 기술	나노입자의 생체이용률(%)	
	* 생체적합성/안전성 물질로 구성된 나노조영제 제조, 표면개질 및 생분해 제어기술과 균일 대량생산 관리 기술	5	15
2	나노조영제 질환조직 표적전달 극대화 기술	나노조영제의 정상 대비 질환 표적 비율(배수)	
	* 나노조영제의 형태, 크기, 표면성질 등을 제어하여 약물 동태학적 거동 및 질환부위 표적분포를 향상하는 기술	> 5	> 50
3	정밀영상진단을 위한 다중신호 증폭 나노조영제 기술	영상대조도(S/B ratio)	
	* 조영제의 나노공간 내에 두 종류 이상의 상보적 영상신호 발생 물질 탑재 기술	10	> 100

### ③ (NANOtech Challenge) 나노전달체로 치료물질의 질환 표적능 향상

기술적 제약요인	체내 질환 부위로 전달물질의 낮은 표적능 및 도달률
----------	------------------------------

나노기술의 역할	나노구조체/전달체의 크기, 표면 등의 제어로 물질의 질환 표적능 향상을 통한 표적 질환 부위로의 약물 도달률 극대화
----------	--

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	질환부위 고집적 표적지향형 나노구조체 기술	나노구조체 표적능(%ID/g)	
	* 나노구조체의 형태 자체 또는 나노구조체 표면에 타겟물질을 탑재하여 질환조직세포 표면의 단백질이 인지할 수 있도록 하는 표적지향형 나노구조체 기술	5	> 10
나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
2	약동학/약력학 최적화 나노전달체 기술	특정 조직 표적능(%ID/g)	
	* 질환부위로의 도달률 극대화, 정상조직에서의 배출 가속화, 약물 배출의 최적화를 통해 나노전달체의 효능을 극대화하는 기술	1	20
3	뇌/신경 인터페이스를 위한 나노소재 기술	생체적합도(%)	
	* 뇌/신경 인터페이스를 위한 생분해성 물질 또는 구조 변환 및 임상 적용을 위한 형상기억 물질 개발 및 조절 기술	90	99

나노기술의 역할	<b>중단기 수요중심</b> 약물 담지/방출이 가능한 생체적합 나노전달체로 약물치료 효능 극대화
----------	---

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'28
1	나노산화그래핀 기반 염증성 난치질환 치료제 기술	나노산화그래핀의 체내 delivery 효율 최적화(%)	
	* 염증성 난치질환인 치매, 아토피 피부병, 죽상동맥경화 등의 치료를 위한 나노산화그래핀 적용 및 기전 분석, 치료제 기술	-	> 50
2	나노셀룰로오스를 이용한 서방성 약물방출 소재 기술	약물 방출(%)	
	* 약물의 방출이 가능한 나노셀룰로오스 기반 바이오 소재 기술	1h: 50%이하 72h: 85%이상	1h: 30%이하 72h: 70%이상

#### ④ (NANOtech Challenge) 나노구조체로 오가노이드 기능 향상

기술적 제약요인	재생 인공조직체의 기능성 조절 한계 및 이식재의 다양한 부작용
----------	------------------------------------

나노기술의 역할	나노구조체 기반 생체재료로 다중 오가노이드의 기능성 향상을 통한 재생의학 치료 효능 촉진
----------	---

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	방오효과를 위한 나노소재 및 구조 기술	표면 거칠기(nm)	
	* 방오(anti-biofouling) 효과 달성을 위한 이식재의 표면 나노단위 구조, 성질 변화 기술	> 300	> 50
2	항균·항염효과를 위한 나노소재 및 구조 기술	물질 전달을 위한 나노입자 크기(μm)	
	* 항균, 항염 효과 구현을 위한 이식재 표면상 나노구조 형성 및 항균, 항염 물질 전달 기술	> 0.01	> 10
3	생체모사 오가노이드 및 장기칩용 나노구조체 기술	칩으로부터 연결 또는 공동 배양 가능 장기의 수	
	* 전분화능 줄기세포와 나노소재를 접목한 오가노이드 형성과 다중 오가노이드 탑재 및 장기칩의 기능 고도화를 위한 나노구조체 기술	2~3	> 10

나노기술의 역할	<b>중단기 수요중심</b> 나노구조체 기반 생체 조직 지지체로 면역 거부 반응 최소화 및 실사용 수준의 생체적합 세포 증식 효율 증진
----------	---

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'28
1	나노셀룰로오스/나노하이브리드 구조체 기반 생체 조직 지지체 제조 기술	지지체 내 세포 부착도 (광학밀도 측정법)	
	* 나노셀룰로오스 또는 3D 구조 나노복합소재를 기반으로 생체 조직 지지체를 생물학적 조직을 개선하거나 대체하기 위한 기술	0.6-0.8	> 0.8

## Big Question 해결을 위한 나노기술 로드맵

나노기술 예시 주제	핵심요소기술									
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
체외진단용 나노 표준 물질 기술	인체유래 검체 및 장기의 물리화학적 특성이 표준영역에 적합한 인공 나노소재 및 소자 기술				나노소재 및 소자의 생체평가 및 신호 제한성 기술			표준 임상시료 기반 나노바이오센서 및 소자 평가 기술		
인체 부착형 비침습형 체외진단용 나노기술	바이오마커 검출용 나노소재 및 전극 기술		자유곡면형 인체 부착용 나노기술		웨어러블 기반 체외진단 나노기술			나노바이오 신호 신뢰성/제한성 기술		
신변종 감염성 병원체 및 바이오마커의 포집·분리·고농축 나노기술	신속 나노진처리 기술		감염체 포집/분리 기술		바이오소재 및 다기능성 나노화학 기반 고정화 기술			나노황균/황머어리스 기술		
체내투여를 위한 나노조영제 안전성 향상 및 대량생산 기술	무독성/저독성 나노조영제 다양화 및 제어 기술			조영제 생체적합성/안전성 향상 기술			나노조영제 균일 제조 및 대량 생산 기술			
나노조영제 집합조직 표적전달 극대화 기술	집합조직 작용기의 나노조영제 표면도입 방법 및 도입일도 정밀제어 기술						나노조영제의 생체내 장벽 극복 기술			
정밀영상진단을 위한 다중신호 증폭 나노조영제 기술	다중 조영물질 탑재 및 균일 합성 기술				집합부위 표적분포 평가 기술		다중 조영신호 간 영상 정합 및 분석 기술			
집합부위 고집적 표적지향형 나노구조체 기술	나노구조체 표면변환/크기 조절/대량합성 기술				나노구조체 집합타겟 표적 향상 기술		나노구조체 세포이입 최적화 및 조직내 투과도 향상 기술			
역동학/약리학 최적화 나노전달체 기술	나노구조체 약물 이입 최적화 기술		집합부위 도달률 극대화 기술		정성조직 배설 가속화 기술		나노구조체 약물조절 배출 기술			
뇌/신경 인터페이스 소자를 위한 나노소재 기술	나노물질 기반 신경 인터페이스 요소를 제작 및 결합 기술				뇌 타겟용 형성기여 생분해 기간 조절 및 생체적합성 기술		뇌 타겟용 형성기여 인터페이스 개발 기술		외부에게 구조변화 뇌장지 기술 개발 기술	
방오효과를 위한 나노소재, 구조 기술	생분해, 비분해성 이식재 표면성 방오 나노코팅 기술				이식재 표면성의 나노구조 조절을 이용한 친수, 소수성 표면 조절 및 구현 기술					
항균, 항염효과를 위한 나노소재, 구조 기술	나노소재를 이용한 항균, 항염 효과 구현 기술				나노소재 및 구조 복합 기술을 이용한 항균, 항균 효과 구현 기술					
생체모사 오가노이드 및 장기집합 나노구조체 형성 기술	조직 모사 계층 구조 형성 나노기술		물질 전달을 위한 나노소재, 구조체 기술		장기집합 나노공극형 나노재료 형성 기술			다중 오가노이드 상호작용 장기집합 나노구조 기술		

※ 상기 나노기술 예시 주제 외 관련 나노기술 주제는 사전적 상세기술지도(별첨) 내 나노바이오분야 기술 로드맵 참고

## 미래상 나노테라노스틱스, 백신 나노전달체, 오가노이드 기술 등 디지털 맞춤형 진단 및 치료를 통한 100세 시대 과학기술 기반 국민건강 증진



## 1-8 삶의 공간 확장을 위한 우주 개척이 가능한가?

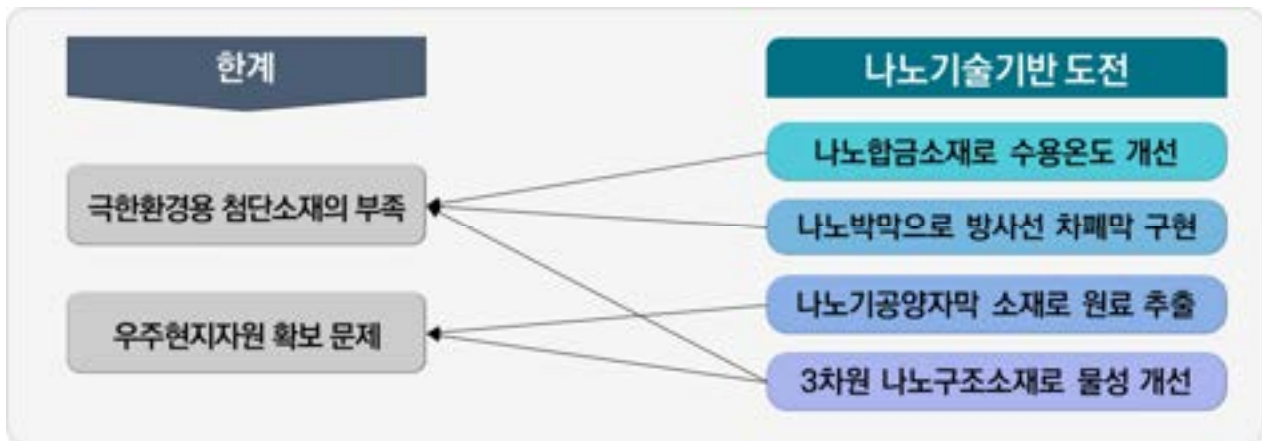
◆ 극한기술혁신에 따라 인류의 활동영역은 우주로 확장되어, 인류에게 유용한 우주 현지 자원·소재 확보 및 활용으로 자원고갈에 대한 우려 해소뿐만 아니라 새로운 거주 공간 확장도 가능한가?

■ **현황** 민간 주도 유인 우주비행, 재활용 로켓 및 더욱 광범위한 영역의 태양계 탐사 등 우주 기술이 진보하고 있으나, 여전히 극한 우주항공용 첨단소재 등 우주 탐사 기반 마련을 위한 기술 발전이 절실한 상황

■ **한계** 극한환경 적응형 첨단기술 및 우주현지자원 확보의 한계

※ 극한환경(대기권 재진입(2000℃ 이상), 발사 추진체 연소(3500℃), 왕복선 속도(마하25), 극저온(연료: 액체 수소 -253℃, 액체 산소 -183℃))에서 견딜 수 있는 소재 및 공정 기술의 안전성과 신뢰성 확보 문제

■ **한계 극복을 위한 나노기술 기반 도전 (NANOtech Challenge)**



## ① (NANOtech Challenge) 나노합금소재 미세구조 제어로 수용온도 및 기계적 물성 향상

기술적 제약요인	초고온/극저온 환경에서 견딜 수 있는 소재의 반영구적 사용 한계
나노기술의 역할	나노합금소재 기반 미세구조 제어를 통해 수용온도 및 기계적 물성 개선으로 극한 환경용 우주항공 나노소재 구현

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	초내열/장수명/열방호 나노금속소재 기술	열전도율(W/mK)	
	* 나노미세구조 제어를 통해 상용 내열소재 대비 높은 수용온도 및 고온 강도, 자가치유능을 통한 가용시간 증대, 경사기능 열방호특성을 나타내는 초내열 나노금속소재 제조 기술	15	5
2	액화수소 환경 감응형 나노금속소재 기술	극저온 충격 인성(@ 4K, J)	
	* 나노미세구조 제어를 통해 액화 가스(산소, 수소) 탱크용 초극저온 인성 및 내수소취성이 우수한 나노금속소재 제조 및 초극저온 기계적 물성 정량평가 기술	> 200	> 300
3	초내열/내식마 나노소재 기술	식마율( $\mu\text{m/s}$ @2500°C)	
	* 2,500도 이상 초고온 환경에서 내식마성을 유지하는 벌크 또는 코팅 소재 기술	5	1
4	초단열/초기밀 나노소재 기술	단열소재 내열성(°C)	
	* 외부의 극한환경과 내부를 단열시키고 고온을 견딜 수 있는 접합 소재 또는 복합 다공 소재 기술	> 1,500	> 2,500

## ② (NANOtech Challenge) 나노박막으로 대면적 우주 방사선 차폐막 구현

기술적 제약요인	내구성이 뛰어난 투명 우주방사선 차폐막 제조 기술의 한계
나노기술의 역할	나노박막 기반 대면적화 및 나노입자 기반 내구성 향상을 통한 우주환경에 적합한 내마모성을 갖춘 다기능 투명 탐색창 나노소재 구현

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	고강도 나노소재 및 우주방사선 차폐용 투명 나노박막소재 기술	우주방사선 차폐율(%)	
	* 낮은 중력으로부터 발생하는 달 표면 부유 먼지로부터 내마모성 확보 및 투명 방사선 차폐 나노박막 제조 기술	N/A	> 97

**나노기술의 역할**

**중단기 수요중심** 박막형 차폐/흡수/방열 다기능 나노소재 양산 기술 개발을 통한 우주/모빌리티용 극한환경 소재 구현

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'28
1	유연성 고효율의 방열 및 전자파 차폐 나노소재 기술	전자파 차폐율(dB)	
	* 그래핀을 이용하여 방열 특성과 전자파 차폐 및 흡수 특성을 갖는 소재를 개발하는 기술	85	100

**③ (NANOtech Challenge) 나노기공 양자막소재로 핵심원료 선택적 흡착 및 분리**

**기술적 제약요인**

우주 현지자원의 핵심원료 추출을 위한 **핵심 막소재의 부재**

**나노기술의 역할**

나노기공 양자막소재를 통해 다른 기체로부터 원료의 **선택적 흡착/분리 및 추출/정제**로 현지 자원 활용 실현

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	He-3의 추출/정제를 위한 나노기공 양자막소재 기술	원료(He-3) 분리 속도 (g/hr)	
	* He-3에 대해 선택적 흡착을 보이는 나노기공 소재 및 다른 기체로부터 He-3를 선택적으로 sieving할 수 있는 분리막 소재 개발 기술	N/A	200

**④ (NANOtech Challenge) 3차원 나노구조 소재로 물성 개선**

**기술적 제약요인**

초경량이면서 고강도 복합소재의 **구조적 설계 및 제작의 한계**

**나노기술의 역할**

3차원 나노구조체 기반 복합소재 설계로 **공극률을 높여 물성 개선**을 통한 고강도 초경량 우주·항공 소재 구현

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	나노스케일 미세구조 및 필러를 이용한 고강도 경량 소재 기술	인장 강도 (금속복합소재, MPa)	
	* 벌크 금속 물질보다 우수한 물성을 갖는 나노스케일 미세구조 및 나노필러를 이용한 고강도의 경량 나노복합소재를 제작하는 기술	500	> 1,000



나노기술의  
역할

**중단기 수요중심** 나노소재의 대량생산 기술 기반 섬유화를 통한 우주·항공용 고강도, 고내산화성 극한환경 소재 구현

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'28
우주항공용 고강도, 고내산화성 BNNT 나노소재 기술		BNNT 섬유 강도(N/tex)	
1	* BNNT 소재의 고강도 섬유화 및 패브릭을 제조하여 우주환경 대응을 위한 우주선 및 중성자 차폐용 의복, 원전 해체 작업용 중성자 방호복, 지구 재진입 시 활용 가능한 가변형 열차폐막 등을 구현할 수 있는 소재 기술	0.1	1

## Big Question 해결을 위한 나노기술 로드맵

나노기술 예시 주제	핵심요소기술									
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
초내열-장수명 열안정 나노금속소재 기술	대면/광역적 적용 가능한 초내열 금속소재 기술					자가치유능을 지닌 초내열 금속소재 기술				
액화수소환경 견딤형 나노금속소재 기술	초극저온환경 기계적응성 평가기술					초극저온(40 인성이 우수한 금속소재 기술				
초내열 내식미 나노소재 기술	세라믹코팅 나노구조 제어기술/세라믹 섬유 기반 경량화 기술					UHPC기반 나노복합소재기술/ 나노도메인 구조제어기술				
초단열 초가열 나노소재 기술	나노기공 및 물성 제어기술/ 초가열 나노복합소재 기술									
고강도 나노소재 및 우주방사선 차폐용 투명 나노복합소재 기술	대면적 투명 방사선 차폐 나노복합 성막 기술									
He-3의 추출/정제를 위한 나노기공 양자막 소재 기술	개선과학 기반 He-3용 신소재 탐색		He-3 나노기공소재 개발 기술			He-3 흡착 2D 소재 개발 기술			He-3 선택적 투과 quantum sieving 막소재 개발 기술	
나노스케일 미세구조 및 나노필러를 이용한 고강도 경량 나노복합소재 기술	새로운 소재의 나노필러의 균일한 분산을 통한 고강도 나노복합소재 개발 기술				나노식물 및 나노스케일 미세구조 제어 기술			멀티스케일 물성 평가기술 및 변형거동 분석기술		

※ 상기 나노기술 예시 주제 외 관련 나노기술 주제는 사전적 상세기술지도(별첨) 내 **나노소재 분야** 기술 로드맵 참고

## 미래상 나노복합구조 소재, 나노기공 양자막 소재 등 우주/비행체용 극한소재 및 우주자원 개발로 미지의 공간 개척을 위한 핵심기술 확보



## 1-9 신뢰할 수 있는 안전한 삶이 가능한가?

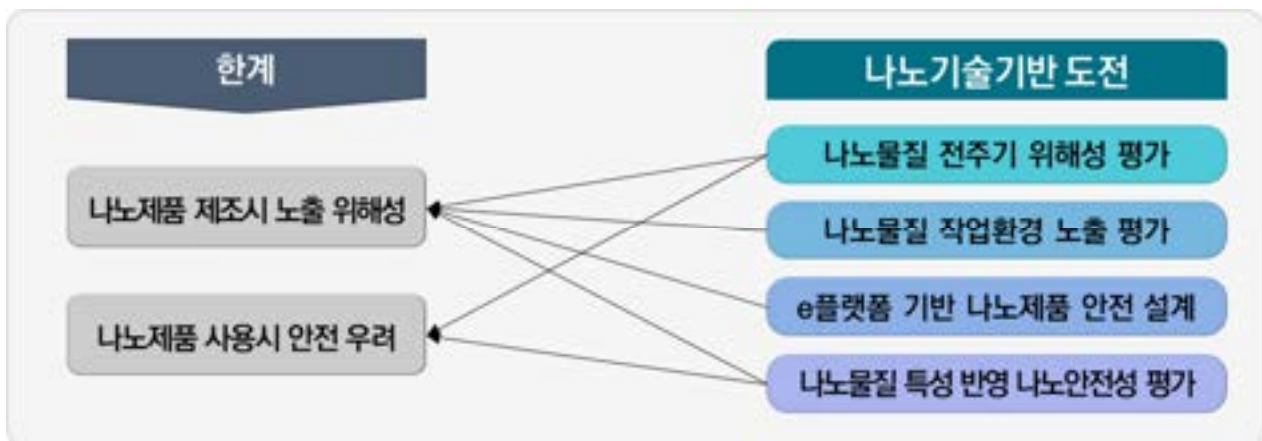
◆ 기술의 발전으로 나노물질 및 제품은 일상 생활에 침투하고 있어, 안전하고 신뢰가는 나노제품 사용 및 나노제품 제작 시 작업자의 보건안전 확보가 가능한가?

■ **현황** 나노제품의 설계·제조부터 관리 및 폐기에 이르기까지 전주기 과정에서 노출되는 나노물질의 안전성은 지속 평가·관리되어오고 있지만, 나노물질의 독성 기준에 관한 논란은 계속되는 상황

■ **한계** 나노물질 및 나노제품의 제작·사용 시 인체/환경에 노출되는 나노물질 안전성에 대한 우려

※ 유럽연합집행위원회(EC)는 2021년 소비자안전과학위원회(SCCS)에서 안전성평가 중인 화장품 내 나노물질에 대한 위험성을 경고하는 등 나노물질에 대한 불안은 잔존

■ **한계 극복을 위한 나노기술 기반 도전 (NANOtech Challenge)**



## ① (NANOtech Challenge) 나노물질 전주기 위해성 평가 고도화

기술적 제약요인	나노물질의 인체/환경 노출 및 전주기 위해성 평가 기술의 한계
나노기술의 역할	생산·사용·폐기 과정의 나노제품 전주기에서 나노물질의 안전성 평가 및 환경 변화 거동 평가 기술 고도화를 통한 안전한 나노환경 구현

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	인체에 대한 나노물질 전주기 노출 평가 기술	나노물질 전주기 위해평가 수행 건수(건)	
	* 나노물질의 전주기 과정에서 인체 노출을 평가하는 기술을 의미하며, 기기 분석을 통한 물질의 물리화학적 특성을 분석하고 정량하는 기술	0	10
2	나노물질의 환경 변화 거동 평가 및 이를 반영한 위해성 평가 기술	변환거동 평가 대상 물질 수(개)	
	* 환경 매체 내 나노물질 변화 거동 평가 및 존재상 예측 기술	0	7
3	나노제품 전주기 DB 구축 기술	나노제품 전주기 DB구축 달성도(%)	
	* 나노소재 및 제품의 사용량, 배출량 등의 인벤토리 정보, 안전한 사용, 안전한 폐기 및 재활용 등 전주기 과정에서의 DB 구축 기술	60	100

## ② (NANOtech Challenge) 나노물질 작업환경 노출 평가 고도화

기술적 제약요인	다양한 나노물질을 취급하는 작업 환경에서의 노출 평가 기술의 한계
나노기술의 역할	나노물질 작업자 건강 모니터링 및 작업장 노출 평가 기술 고도화를 통한 안전한 나노사회 구현

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	나노물질 작업장 노출 평가 기술	노출평가 기술 확립도(%)	
	* 다양한 나노물질 사업장 및 연구실에서 작업자 및 연구자의 안전보건 확보를 위한 노출 평가 기술	80	95
2	나노물질 작업자 보호 기술	작업자 보호기술 확립도(%)	
	* 나노물질 취급, 제조 작업자 및 연구자의 건강 보호를 위한 건강 모니터링 및 보호구 사용의 적정성, 노출 저감 기술	90	99
3	나노제품 안전성 판단기준 정립 및 인증 시스템 구축 기술	안전성 인증 나노제품 (건/년)	
	* 나노제품 내 사용된 나노물질의 유해성 평가 결과 및 노출 평가 결과를 기반으로 나노제품별 안전성 판단기준을 정립하고, 이에 따른 나노제품 안전성 인증 절차 확립 및 제도 운영 방안 마련	N/A	30

### ③ (NANOtech Challenge) e-플랫폼으로 나노제품 안전 설계

기술적 제약요인	나노제품 생산공정 시 성능뿐만 아니라 안전성도 함께 고려하는 기술의 한계
나노기술의 역할	e-플랫폼 구축으로 안전성 기반 나노제품 설계를 통한 안전하고 신뢰할 수 있는 나노제품 개발

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	안전성 기반 나노제품 설계를 위한 e-플랫폼 구축 기술	신규 개발된 나노제품 통합설계 플랫폼 수(건)	
	* 우수한 성능을 가지면서도 안전한 나노소재 및 나노제품의 개발을 위해, 나노제품을 생산하는 공정에서부터 제품의 성능뿐만 아니라 안전성도 함께 고려한 제품설계 및 개발 지원 e-플랫폼의 구축 기술	0	3
2	In silico 기반 복합구성 나노제품의 안전성 예측 기술	예측모델 성능(신뢰도, %)	
	* 복합구성(multicomponent) 나노제품 내 구성물질의 정보(특성, 형태, 조성, 독성 등)에 기반하여, 혼합독성을 고려한 나노제품 안전성 예측 기술	60	85

#### ④ (NANOtech Challenge) 첨단 나노물질 특성 반영 나노안전성 평가

기술적 제약요인	첨단 나노물질 및 이를 활용한 나노제품의 물리·화학적 특성 평가 기술의 한계
나노기술의 역할	고속 대량, 개인맞춤형, 나노물질 특성 반영 동물대체평가 등 다양한 나노안전성 평가를 통한 신속·정확한 나노제품 안전성 평가

나노기술 예시 주제		대표성능지표	
		'23	'32
1	첨단 나노물질 물리·화학적 특성 평가 기술	물리·화학적 특성 평가기술 건수(건)	
	* 기존 기술의 최적화를 통한 신규·첨단 소재 및 제품의 물리·화학적 특성 평가 기술	0	20
2	기존 및 신규 나노물질 대응 환경 위해성 평가 기술	첨단 나노물질 안전성 평가 기술 확립도(%)	
	* 기존 및 신규 나노물질 그리고 이를 활용한 나노제품에 대한 안전성 평가 기술	80	95
3	고속 대량 나노안전성 평가 기술	고속대량 처리 성능 (샘플/hr)	
	* 안전성 예측 기술과 함께 활용하여 생산된 나노물질의 안전성을 예측/스크리닝하여 독성 평가의 우선순위를 부여하는 기술	50	400
4	개인맞춤형 나노안전성 평가 기술	개인차 요소 발굴(개)	
	* 나노물질에 의한 인체 독성은 각 개인별로 다르게 나타날 수 있어 안전성 평가시 개인차를 반영하여 수행	5	> 15

## Big Question 해결을 위한 나노기술 로드맵

나노기술 예시 주제	핵심요소기술									
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
인체에 대한 나노물질 전주기 노출 평가 기술	재물 내 이물질 평가 기술			인체 노출 매체에서 특성분석 기술			나노물질 인체 노출 평가 자료 구축 및 활용 기술			
나노물질의 환경 변환 거동 평가 및 이를 반영한 유해성 평가 기술	환경 매체 내 나노물질 변환 거동 평가 및 존재량 예측 기술			나노물질의 변환거동이 연계된 유해성 평가 기술			나노물질의 거동특성이 반영된 유해성 자료 생산			
나노제품 전주기 DB 구축 기술	나노제품 인벤토리 정보구축 기술			나노제품 안전한 사용/폐기에 관한 DB구축 기술			나노제품 차질용 DB구축 기술			
나노물질 작업장 노출평가 기술	나노물질 작업장 특성 평가 기술			작업장 나노물질 포집 및 측정 기술			나노물질 작업장 노출 평가 기술			
나노물질 작업자 보호 기술	작업장 나노물질 발생 환경 제어 기술			보호구 제작 및 성능 평가 기술			나노물질 작업자 건강모니터링 기술			
나노제품 안전성 판단기준 정립 및 인증시스템 구축 기술	나노제품 분류체계 확립			안전성 판단기준 및 인증 절차 수립			나노제품 안전성 인증제도 운영			
안전성 기반 나노제품 설계를 위한 e-플랫폼 구축 기술	의사결정지원 시스템 개발 기술			e-플랫폼 구축 기술			e-플랫폼 적용/검증 기술			
In silico 기반 복합구성 나노물질의 안전성 예측 기술	나노 혼입 특성 DB 구축/ 안전성 예측 기술			예측모델 고도화 기술			예측률 적용/검증 기술			
나노물질 물리·화학적 특성 평가 기술	평가를 위한 시료 전처리 기술			물리적 (크기, 크기분포, 모양 등)/화학적 (표면특성, 구성, 농도 등) 특성 평가 기술						
기본 및 신규 나노물질에 대한 환경 유해성 평가 기술	매체를 시뮬레이션 기술			매체별 특성 평가 기술			특성규명을 위한 cutting-edge 기술			
고속 대량 나노안전성 평가 기술	나노물질 특이적 바이오미커 개발 기술			고속 대량 스크리닝 알고리즘 개발 기술						
개인 맞춤형 나노안전성 평가 기술	나노물질 특성유발 기전 규명 개인차에 따른 특성영향 요소 발굴			개인 맞춤형 나노안전성 평가 기술						

※ 상기 나노기술 예시 주제 외 관련 나노기술 주제는 사전적 상세기술지도(별첨) 내 나노안전성 분야 기술 로드맵 참고

## 미래상 나노기술이 적용된 제품의 설계 단계부터 안전성을 고려하는 Safe-by-Design 및 e-플랫폼 기술 개발·실현으로 무독성 나노제품 구현 및 안전한 나노환경 신뢰도 제고





## 2. 나노인프라 혁신 제고

### 2-1 나노팹인프라를 활용한 주요 나노기술분야 기술혁신 제고

▶ 분야별 연구·산업화 지원역량 강화를 위해 나노팹 시설·장비 고도화 및 인프라 간 연계·협력 확대

#### ■ 나노정보전자

- **범용장비 기반 양자소자 제조 인프라 구축**(과기정통부/한국나노기술원, 범용장비 기반 양자소자 제조 인프라 구축사업('23~'25))
  - (인프라 구축) 사용 수요가 높은 양자소자 공정을 위한 범용 장비 구축을 통해 국내 양자컴퓨팅 관련 연구의 저변 확대 추진

〈구축대상 장비〉

공정분야	장비명	구축대수
리소그래피(Lithography)	멀티플랫폼 지원 전자빔 리소그래피	2대
	레이저 직접 패터닝 장비	1대
식각(Etching)	Deep 실리콘 건식 식각장비	1대
박막 증착 (Thin Film Deposition)	TiN전용 원자층 증착장비	1대
	저온 고밀도 플라즈마 CVD	1대

- (표준공정기술 개발) 물리계별 양자소자 제작에 공통적으로 포함되는 일괄 표준 단위공정 선정 및 관련 기술개발

#### ■ 나노에너지

- **차세대 이차전지(전고체리튬전지) 기술지원 체계 구축**(산업부/광주나노기술집적센터, 나노인프라 공정서비스역량 고도화('23~'27))
  - (일괄공정 구축) 전고체리튬전지 공정 플랫폼\*을 구축하여 전지를 구성하는 핵심소재 부품\*\* 및 전지 시제품 제작 일괄 공정 구축
    - \* 하이 니켈 기반 상온작동형 전고체전지
    - \*\* 고밀도 양극, 산화물기반 박형 복합고체전해질 시트, 리튬 음극
  - (제품화 검증 지원) 플랫폼 공정 및 평가분석 라이브러리를 활용하여 제품화 기술 개발의 방향성 및 타당성 검증 지원

## ■ 나노환경

### ● 반도체·디스플레이 탄소중립 공정 테스트베드 기능 강화

- 반도체·디스플레이용 저 온난화 지수(GWP)\* 공정 가스 개발(산업부/전북나노기술집적센터, 반도체디스플레이온실가스감축공정기술개발('22~'25))

\* 지구온난화지수(GWP: Global Warming Potential) : 이산화탄소를 기준으로 다른 온실가스가 지구 온난화에 기여하는 정도를 나타낸 값

〈공정가스 종류 및 대체가스 GWP 목표 예시〉

가스 종류	활용 공정	GWP (IPCC 5th, 2014)	대체 가스 GWP 목표
CF4	식각공정	6,630	500 이하
N2O	증착공정	265	150 이하
NF3	세정공정	16,100	150 이하

- 디스플레이 기상증착 및 세정공정용 GWP 150이하의 대체가스 및 공정기술개발(산업부/전북나노기술집적센터, 탄소중립산업핵심기술개발('23~'30))

※ 기업에서 개발한 대체가스를 나노인프라의 반도체·디스플레이 식각 및 증착 공정에 적용하여 기존 가스와 성능 비교 및 개발 가스의 양산공정 적합성 검증

## ■ 나노바이오

### ● 나노인프라 기반 바이오 융합 중심 R&BD 기술 지원(과기정통부/나노종합기술원, 반도체 공정 기반 나노메디컬 디바이스 개발('21~'25))

- (산업화 지원) 산·학·연의 원천·핵심 기술을 연계하여 유효성 검증 및 성능 고도화를 통한 산업화 R&BD 지원 및 공백 기술의 공동개발 지원

- (공정 기술 지원) 나노인프라 활용 준양산 공정/평가 기술 지원 및 기술 상용화를 위한 나노바이오 체내·체외 진단기술 실증 지원

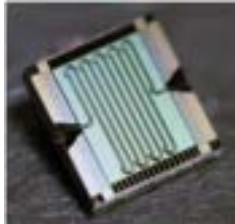
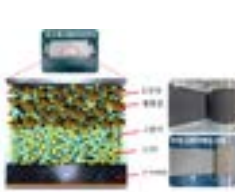
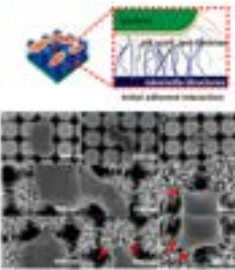

## ■ 나노기반

● 나노인프라 통합정보시스템(Virtual Fab)(과기정통부/국가나노인프라협의체, 나노인프라 연계체계 총괄지원('21~'24))

- 기존 나노인프라를 전산시스템으로 연계\*하여 나노·반도체 분야 연구·산업 수요(공정 및 측정·분석)에 대한 협업 지원체계 마련

\* 나노종합기술원, 한국나노기술원, 나노융합기술원, 서울대학교 반도체공동연구소, 한국전자통신연구원 초지능창의연구소, 대구경북과학기술원 차세대반도체융합연구소

- 온라인으로 해결이 어려운 이용자의 공정/분석 설계 초안 마련, 참여기관/활용가능 장비 연계, 애로사항 해결 등 컨설팅 제공

<p style="text-align: center;"><b>〈나노정보전자〉</b> 대구경 양산 적용 양자정보과학 핵심소자</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• 대학과 나노인프라가 공동으로 대구경 양산 적용 가능한 양자 정보과학 핵심소자 제작기술 확보 필요</li> <li>• 3D 아키텍처 구현 TSV 인터포저 기술을 확보하여 양자컴퓨팅 분야 글로벌 리딩 기술 확보</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>〈나노에너지〉</b> 하이 니켈 기반 상온작동형 전고체전지 핵심부품</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• 상온작동형 산화물 기반 전고체 리튬이차전지 핵심소재 부품 제작 기술 확보</li> <li>• 차세대 이차전지인 고안전성 전고체전지 핵심소재기술 및 부품 공정 기술을 확보하여 이차전지 분야 글로벌 리딩 기술 확보</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>〈나노바이오〉</b> 나노반도체-바이오 융합형 고민감도 핵심소자</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• 산·학·연 연계 핵심/원천 나노반도체 기술 기반 바이오 융합 기술을 통한 고감도 소자 제작 기술확보</li> <li>• 나노바이오 성능 고도화 및 준양 산화를 위한 제작기술·평가·검증 기술 확보</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>〈나노기반〉</b> 통합정보시스템(Virtual Fab)</p>  <p style="text-align: center;">이용자 편의성 제고</p>

▶ 나노인프라 첨단 장비를 활용하여 특성화고/전문대, 대학/대학원, 재직자 대상으로 R&D 및 산업화에 기여할 수 있는 나노융합기술 전문인력양성

■ 특성화고/전문대 대상 현장 실무인력 양성

- 특성화고/전문대 대상으로 지역별 국가나노기술인프라 시설을 활용하여 첨단 나노사업에 적합한 현장 실무인력 양성 및 공급(산업부/국가나노인프라협의체, 나노융합기술인력양성(13~계속/연 200명))
  - 기업 수요를 반영한 현장실무 경험 제공 및 첨단 나노장비 운용기술 습득을 위한 교육생 주도형 실습교육\* 실시
  - \* 나노융합기술원(대전), 한국나노기술원(수원), 나노융합기술원(포항), 나노공정기술센터(대구)

■ 대학/대학원 대상 나노전문인력 양성

- 나노인프라 활용 나노 R&D 및 산업 맞춤형 전문인력양성 (과기정통부/나노기술연구협의회, 국가나노인프라를 활용한 전문인력양성(20~25)/연 1,500명 내외)
  - 6대 국가나노인프라\* 및 대학공공인프라 시설 활용 주력·신산업 분야 연구개발 및 산업계 제품개발 실무능력을 겸비한 나노기술 전문인력 양성
  - \* 나노융합기술원(대전), 한국나노기술원(수원), 나노융합기술원(포항), 전북나노기술집적센터(전주), 광주 나노기술집적센터(광주), 나노공정기술센터(대구)
  - 나노소자공정 및 측정·분석 기술에 대한 기초-응용-고급 단계별 맞춤형 교육 및 취업 연계형 고급 교육과정 시행
- 취업연계를 위한 현장 실습 중심의 나노전문인력양성(과기정통부/나노융합기술원, 나노전문인력양성 및 일자리지원사업(19~계속/연 100~150명))
  - 이공계 대졸 예정자 미취업자 대상 나노인프라기관 장비 활용 인턴십 교육을 통해 산업 현장 맞춤형 전문인력양성 및 일자리 창출 지원
  - 나노융합기술 분야(반도체 첨단센서 등)와 연계된 장비 실습 및 소자 제작 전문 실습 교육
- 공공 나노인프라 활용 실무형 반도체 설계 인력양성 지원 (과기정통부/한국전자통신연구원, 반도체설계검증인프라활성화(23~27/1단계 연 500명, 2단계 연 1,000명))
  - 반도체 설계 분야의 학부생·대학원생에게 공공팹을 활용한 설계검증\* 서비스 제공
  - \* 졸업 전 설계→칩(Chip) 제작→측정 과정을 경험하여, 설계자로서 역량 강화

- 6인치 기반 500nm 노드 CMOS 공정을 통해 학생이 설계한 칩을 공정해주고, 직접 측정할 수 있는 기회 제공\*

\* 한국전자통신연구원(초지능창의연구소), 서울대학교(반도체공동연구소), 대구경북과학기술원(차세대반도체융합연구소)

● **실습 기반 양자소자 교육**(과기정통부/한국나노기술원, 범용장비 기반 양자소자 제조 인프라 구축('23.02~'25.06/연 50명))

- 제조기술 난이도가 높고, 미 성숙된 국내 양자소자 산업의 신진인력양성을 위하여 양자소자 제조 이론과 실습을 연계한 교육 프로그램 운영

- 인프라 장비를 이용하여 다양한 물리계의 양자소자를 직접적으로 제조할 수 있는 인력 양성

■ **재직자 대상 나노소재분야 전문인력양성**

● **응용소재 관련 재직자 직무능력 향상을 위한 교육 플랫폼 구축 및 인력양성**(산업부/국가나노인프라협의체, 미래산업 핵심 응용소재분야 전문인력양성사업('22~'24/연 160명))

- 산업 성장·파급력이 예상되는 세라믹, 반도체, 질화물복합소재, 탄소복합소재 등의 응용소재분야 산업현장 재직자 대상 교육플랫폼 구축 및 인력양성\*

\* 나노융합기술원(포항), 나노공정기술센터(대구), 철원플라즈마산업기술연구원, 한국세라믹연구원

## 2-3 나노기술촉진 관련 법·제도 정비

### ▶ 나노기술 발전에 필요한 시의성 높은 촉진법 개정과 측정표준·기술영향평가 등 제반사항 정비

#### ■ 나노기술개발촉진법 개정 추진

- '02년 제정이후 20여년간의 나노기술수준과 대내외 환경변화를 반영한 나노기술개발촉진법 개정
  - 미래소재, 연구데이터 등 국내외 기술·산업발전 동향에 부합하고, 나노기술 정책추진에 핵심적으로 필요한 사항 중심으로 개정

#### ■ 나노기술 측정 및 표준화 제고

- 미세플라스틱, 미세먼지, 첨단물질, 바이오테크놀로지 등 신규 나노물질과 나노제품에 대한 측정·표준\* 역량 제고
  - \* 나노기술개발 촉진법 제15조(측정표준체계의 확립)
    - 금번 나노기술지도상 도출된 나노안전분야에 대한 면밀한 검토를 통해 지속적인 나노물질·제품에 대한 측정·표준 도모

#### ■ 나노기술영향평가 연구 추진

- 나노기술의 발전과 산업화가 경제·사회·문화·윤리 및 환경에 미치는 영향 등을 사전 평가하여 반영(나노기술개발촉진법 제19조)
  - 나노기술의 발전과 산업화가 국민생활의 편익증진 및 관련 산업 발전 등 국가사회 전반에 미치는 긍정적·부정적 영향 도출
  - 도출 결과는 국가연구개발사업에 대한 연구계획에 반영하거나 나노기술이 초래할 수 있는 부정적 영향을 최소화하기 위한 대책 마련

## 1. 기대효과

- **국가나노기술지도 수립·제시하여 정부와 민간의 나노기술 연구개발 방향 설정 및 투자 전략 고도화로 국가 나노기술 혁신에 기여**
  - 국가전략기술, 탄소중립, 팬데믹 등 국가·사회문제 해결을 위한 나노기술주제 제시를 통해 인류사회에 기여하기 위한 임무중심 R&D추진
  - 나노기술 로드맵 마련을 통해 정부 나노기술 R&D정책 이행하여 과학기술 강국으로의 도약과 초격차·지렛대 기술 확보
- **파급력 있는 나노기술로 산업 전반에 기술혁신을 촉진하여 미래 신산업 선점 및 글로벌 경쟁력 강화에 기여**
  - 나노기술이 기반성 및 IT/BT/ET와의 융합성을 모두 보유함에 따라, 산업 전반에 응용·융합하여 기술 자립화와 산업경쟁력 확보 촉진

## 2. 활용방안

- **국가나노기술지도 활용성 및 전략성 강화를 위해 도출된 나노기술주제를 나노분야 국가 R&D 예산·사업 기획에 활용**
  - 한국연구재단, 한국산업기술평가관리원 사업 공고 등에 국가나노기술지도 활용 권장을 기재하는 등 도출된 나노기술주제에 대한 활용성 제고
  - 나노미래소재원천기술개발사업, 나노커넥트 등 신규과제 기획 시 기초자료로 활용하여 전략성 강화

## 1. 제1~3기 나노기술지도 요약

■ '08년 나노기술분야 최초 기술지도 수립이후, 제3기까지 나노기술분류체계의 개선과 사전적 상세기술지도 업데이트

● 제2기 지도부터 전략적 중점나노기술 포함하여 정책적 의미를 부여

	제1기 국가나노기술지도 ( '08~'17)	제2기 국가나노기술지도 ( '14~'25)	제3기 국가나노기술지도 ( '18~'27)
	'06.7 착수, '08.4 의결	'13.8 착수, '14.2 의결	'17.9 착수, '18.6 의결
특징	<ul style="list-style-type: none"> <li>나노기술 분야 <b>최초 기술지도</b>로서 의미</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>나노기술 자체 발전경로 보다는 산업경쟁력 강화 및 미래사회 수요 대응을 위한 중점나노기술 도출</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>4차산업혁명(국정과제) 연계된 <b>'전략적 기술지도'</b> 도입, 나노기술의 중요성 인식 제고</li> </ul>
구성		<ul style="list-style-type: none"> <li>(중점나노기술) 나노기술로 구현되는 최종제품(21개 전략제품 및 5개 전략기술) 중심</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(전략적 기술지도) 30대 미래 기술 구현을 위한 70대 핵심나노기술</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>(상세기술지도) 4개 대분류, 47개 중분류 및 관련 핵심기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(상세기술지도) 6개 대분류, 33개 중분류, 86개 소분류</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(사전적 기술지도) 6개 대분류, 26개 중분류, 97개 소분류</li> </ul>
활용 사례	<ul style="list-style-type: none"> <li>'08년 교과부 "나노기초·원천 기술중기전략" 반영, "나노·소재기술개발사업" 과제 발굴 활용</li> <li>'11년~12년 지경부 "산업 기술로드맵(나노융합분야)" 반영, "나노융합산업원천기술 개발사업" 과제 발굴 활용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>'14년 범부처 "국가중점과학기술 전략로드맵" 반영, "나노·소재 기술개발사업"의 계산나노과학 관련 과제 발굴 활용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>과기정통부 '나노·미래소재원천기술개발사업('20~)' 기획 및 과제 도출 활용</li> <li>산업부 '나노융합혁신제품기술 개발사업('21~)' 기획 및 과제 도출 활용</li> </ul>
평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>전략적 고려보다는, 기술지도 보다는 나열식 기술지도</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>기술정보의 정량적 시각화 및 조직화에 제한적</li> <li>활용 사례가 제한적</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>전략적 지도 70대 핵심나노기술 레벨의 편차로 활용 한계</li> <li>전략적 지도 중심 추진으로 사전적 기술지도는 후행적 병렬 진행으로 연계성 및 일관성 제한적</li> </ul>



## 2. 제3기 국가나노기술지도 70대 핵심나노기술 성과 분석

■ 제3기 기술지도의 70대 핵심나노기술 이행 확인을 위해, '18~'21년도 수행 과제와의 주요 키워드 매칭을 통한 과제화 분석

● (방법) 핵심나노기술(기술명, 정의)과 수행 과제(과제명, 연구목표, 연구내용, 기대효과)와의 연관성을 판단하여 과제화 사례분석 진행

● (결과) 사례분석 결과 70개 핵심나노기술 중 과제화 비율은 84.3%(59개)

※ 나노·소재기술개발사업('18~'20년, 과기정통부), 미래소재디스커버리('18~'20년, 과기정통부), 나노 미래소재원천기술개발사업('20년, 과기정통부), 나노융합혁신제품기술개발사업('21년, 산업부) 대상 (신규 과제 329건)

### ■ 핵심나노기술 과제화 사례

핵심나노기술명	핵심나노기술 정의 및 관련 과제 사례	
3차원 나노집적소자	정의	• 반도체 front-end process(앞단 공정)를 이용하여 여러 겹의 소자층을 via를 통해 연결하여 적층한 융합 집적 소자
	과제명	- “반도체 초고집적화를 위한 3차원 집적회로(3D IC) 제조용 도금 소재 개발”, (2020), 과기정통부 - “3차원 집적회로(3D IC) 구현을 위한 반도체용 구리 및 솔더 도금 소재 개발”, (2020), 과기정통부
초고효율 광전변환 나노소재	정의	• 현재의 태양전지용 광흡수 소재의 효율 한계를 극복하여, 기존의 계통발전에 비해 가격 경쟁력이 우수한 새로운 태양전지용 광흡수 나노소재
	과제명	- “질화물 기반 박막 태양전지 제조를 위한 원천기술개발”, (2019), 과기정통부 - “태양전지 광흡수층용 금속 질화물 박막을 위한 금속 전구체 및 화학기상증착 박막공정 개발”, (2019), 과기정통부
고안전성 전고상 이차전지 나노소재	정의	• 외부 충격에 의한 전해질의 누액 및 폭발 위험성을 획기적으로 줄이고, 다양한 온도 및 전압 환경에서도 안정적으로 작동하게 하는 이차전지용 고체 전해질 나노소재
	과제명	- “고용량 고안전성 차세대 이차전지용 복합고체전해질 시트 개발”, (2020), 과기정통부 - “전극 침투형 3mS/cm급 나노 고체전해질 소재 기반 고안전성 이차전지 기술 개발”, (2021), 산업부

### 3. 제3기 대비 제4기 국가나노기술지도 방향 비교

- 3기 나노기술지도의 사전적/전략적 기술지도 체계를 유지하는 한편, 도전적 질문 (Big Questions) 해결 중심의 전략적 기술지도 수립을 통한 활용성 제고
- 3기 기술지도에서 70대 핵심나노기술의 한계점을 분석하여 4기 기술지도 수립 시 반영

한계 유형	핵심나노기술 사례
핵심나노기술 간 중복 및 레벨차	⑧나노포토닉스 vs. ⑭저전력 나노이미지센서 ⑨소프트 나노소재/나노공정 vs. ⑩고성능 유연 스위치/발광 나노소자
기술명과 정의·범위 간 상충	<p>“고성능 나노분리판”</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• (정의) 수소자동차용 연료전지 고성능화를 위해 핵심 부분인 막전극접합체(MEA) 및 분리판에 활용되는 나노소재</li> </ul> <p>“기능성 물질 나노전달체”</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• (정의) 피부 개선 및 피부질환 치료를 위하여 단백질 형태의 경피 투과를 증진시키고 기능성 물질을 전달시키는 나노소재</li> </ul>

- 사전적 상세기술지도 도출 결과\*를 바탕으로 전략적 나노기술지도를 수립하여 지도 간 연계 강화

\* (도출과정) 분류 재정비 → 미래핵심기술이슈 및 난제 도출 → 나노기술(주제) 도출 → 상세기술지도(로드맵) 전개

	제3기 국가나노기술지도('18~'27)	제4기 국가나노기술지도('23~'32)
특징	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 4차 산업혁명(국정과제)과 연계된 ‘전략적 기술지도’ 도입, 나노기술의 중요성 인식 제고</li> <li>• 사전적 상세기술지도와 전략적 기술지도의 도입</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 도전적 질문(Big Questions) 해결 중심의 전략적 나노기술지도 전개</li> <li>• 사전적/전략적 기술지도 체계 유지</li> <li>• 데이터 기반 도전적 질문 선정하여 전략성과 활용성 동시 제고</li> </ul>
내용구성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (전략적 기술지도) 30대 미래기술 구현을 위한 70대 핵심나노기술</li> <li>• (사전적 기술지도) 6개 대분류*, 26개 중분류, 97개 소분류 * 나노소자, 나노에너지·환경, 나노바이오, 나노소재, 나노공정·측정·장비, 나노안전성</li> <li>• (실행방안) 나노팝 고도화, 일자리 창출, 나노 안전망 구축 등 정책 방향 제시</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (전략적 기술지도) 9개 도전적 질문(Big Questions) 선정 및 35개 나노도전(NANOtech Challenge) 제시</li> <li>• (사전적 기술지도) 5개 대분류*, 35개 중분류, 92개 소분류 * 4대 활용 분야(정보전자, 에너지, 환경, 바이오) 및 기반속성(공정·분석·장비, 소재, 안전성)</li> <li>• (인프라 혁신 제고) 나노팝 인프라 혁신, 인력양성, 법·제도 정비 등 정책 방향 설정</li> </ul>





---

# 제4기 국가나노기술지도(2023~2032)

## 사전적 상세기술지도

---



• CONTENTS

사전적 상세기술지도

제1절 나노정보전자	77
제2절 나노에너지	136
제3절 나노환경	193
제4절 나노바이오	235
제5절 (나노기반)나노공정·분석·장비	292
제6절 (나노기반)나노소재	325
제7절 (나노기반)나노안전성	370





### 1. 개요

#### 가. 정의

- 사용자가 원하는 특정 기능을 발현하기 위해 원자나 분자 단위 수준에서 물질들을 제어하여, 전혀 새로운 성질과 기능을 가진 나노소자 또는 시스템을 구현하는 과학기술

#### 나. 범위

- 나노정보전자 기술의 범위는 나노융합 기억소자, 나노융합 시스템반도체 및 전력소자, 나노융합 지능형 소자, 나노융합 정보표시소자, 나노융합 포토닉스소자, 나노융합 센서소자 등 6대 중분류 기술들을 포함
- **(나노융합 기억소자)** 나노융합 기억소자 분야는 크게 저전력, 고집적 및 고신뢰성 나노 메모리 소자 개발 기술을 포함. 국내 나노융합 기억소자 분야는 글로벌 리딩 기술을 보유하고 있으며, 외국과의 초격차 기술 확보를 위해 초고집적화, 초미세화 및 초고안정성을 위한 나노소재, 소자 공정 기술 개발이 요구
- **(나노융합 시스템반도체 및 전력소자)** 디지털화 및 빅데이터 처리를 위한 기술 수요가 폭발하고 있는 시점에서 매우 중요한 기술로 대두. 나노융합 시스템반도체 분야는 고속 및 저전력으로 다량의 데이터를 효율적으로 처리 가능한 신소재·소자 개발 기술이, 전력소자는 전력변환 효율 향상 및 고전압을 효율적으로 처리하는 기술 개발이 요구
- **(나노융합 지능형 소자)** 나노융합 지능형 소자 분야는 데이터 처리 및 저장 기능을 동시에 확보할 수 있는 나노소자 기술을 의미. 이러한 기술을 통해 인간의 뇌와 같이 매우 적은 에너지를 소비하고, 다량의 데이터를 필요에 따라 단·장시간 저장이 가능하며, 단순 데이터 처리를 넘어 고차원적인 인지 및 학습 기능이 탑재되어 있으며, 빠른 데이터 처리 속도를 보유한 나노소자 기술 개발이 요구
- **(나노융합 정보표시소자)** 나노융합 정보표시소자 분야는 시공간을 초월하여 사용자 간의 실시간 정보전달 및 상호 소통을 위해 필수적인 디스플레이 소자 개발 기술을 의미. 이를 위해 생동감 및 현실감 있는 시각, 촉각, 청각 전달이 가능한 나노발광소자 기술 및 나노광학소자 기술, 휴대성이 좋으며 형태를 자유롭게 변형 가능한 프리폼 나노기술, 시인성이 우수한 투명 나노소자 기술 개발이 요구

- **(나노융합 포토닉스소자)** 나노융합 포토닉스소자 분야는 기존 나노소자에 집약된 전자 기반의 데이터 전달, 신호 처리 및 감지 기능을 넘어서기 위해 광자 혹은 빛을 이용하여 향상된 기능을 부여하는 나노기술을 포함. 이를 위해 고품위 나노광변조기, 저손실 광도파로, 비활성 및 저전력 광 컴퓨팅, 고품위 광집적회로 (PIC) 기반 나노감지소자 기술 개발이 요구
- **(나노융합 센서소자)** 나노융합 센서소자 분야는 화학, 물리 및 광학 기술 기반 나노센서소자 구현 기술을 포함. 공통적으로 고감지, 고분해능, 고선택성, 고안정성 등의 기능을 구현하기 위해 필요한 나노기술 개발이 요구. 또한, 해당 기술을 가스 감지, 물리량 변화 감지, 넓은 범위 파장의 빛 변화 감지 분야에 적용함으로써 사용자가 원하는 특정 인자의 변화를 실시간으로 인식 가능한 나노센서 소자 기술 개발이 요구

〈나노정보전자 분야 기술 분류체계 제3기·제4기 수정 경과〉

3기 나노기술지도		4기 나노기술지도	
중분류	소분류	중분류	소분류
나노정보 입출력소자	고성능/고안정성 나노구동소자 설계 및 제작 기술	나노융합 기억소자	초저전력 3차원 메모리 소자
	소프트 나노소재 및 나노구동 소자 기술		초고집적 3차원 스토리지 소자
	NEMS 설계 및 제조 기술		고신뢰성 스토리지 클래스 메모리 소자
	나노터치 Input/Output 소자 기술	나노융합 시스템반도체 및 전력소자	초저전력 고속 로직 소자
나노연산 소자	에너지 절감형 슈퍼 스텝 스위칭 미래 CMOS extension 반도체 소자 기술		신개념 로직 소자
Non-CMOS 반도체 소자 기술	실리콘 기반 나노메모리 소자		전력반도체 소자
나노기억 소자	수직 3D 스토리지	나노융합 지능형 소자 (로직-메모리 융합소자)	Processing-in-memory 소자
	스토리지 클래스 메모리		뉴로모픽 소자
	셀렉터 소자 기술	나노융합 정보표시소자	실감형 디스플레이
	유연 메모리 및 응용 기술		프리폼 디스플레이
나노유연발광 소자	투명 디스플레이		
나노광전 소자	초고해상도 나노발광 소자	나노융합 포토닉스소자	스마트 광 배선/통신 소자
	투명 나노광전자 소자		광 컴퓨팅 소자
	나노수광 소자		Photonic integrated circuits (PIC)
나노센서 소자	고성능 나노센서 소재 및 소자 설계	나노융합 센서소자	감지 소자
	화학 센서 기술		화학센서
	햅틱 센서 기술		물리센서
	광 센서 및 이미지 센서 기술	광학센서	
	Package 및 신뢰성 측정 기술		

## 다. 역량 분석(SWOT)

		기회(O)	위협(T)
외부 환경		O1. 폭발적으로 증가하는 데이터 시대로 반도체 수요 지속적 증가 O2. 미-중 기술패권 경쟁 O3. 팬데믹 이후 비대면 및 가상 세계에 대한 관심 급증 O4. AI, ICT 등 기술 간 융·복합화 가속	T1. 파운드리 기업의 메모리 사업 진출 T2. 대만-중국 반도체·디스플레이 굴기 위협 T3. 미국 정부 반도체 제조 분야 강화 및 공급망 재편 T4. 초미세화에 따른 높은 외산 공정 장비 의존도 T5. ESG 경영 강화
내부 환경			
강점 (S)	S1. 반도체, 디스플레이, 센서 분야 글로벌 기업 다수 보유 S2. 정부의 반도체·디스플레이, 양자, AI·로봇 산업 육성 전략 적극 강화 S3. 초격차 기술 강화를 위한 투자	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 전 세계 1위 메모리 반도체 시장 점유율 바탕으로 AI 등 차세대 융복합 기술 선도</li> <li>○ 미국의 중국 견제와 국내 정부 핵심전략산업 지원 정책 기조로 기술 초격차 유지 및 선도 기술 개발 전략</li> <li>○ 지능형 반도체, AR/VR 등 신산업 분야에 대한 적극 지원 및 육성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 기술 융복합으로 파운드리-메모리 간 기술 경계가 모호해 지면서, 국내 파운드리 업계와 협업 증진 전략</li> <li>○ 정부의 핵심전략 산업 투자 전략에 발맞추어 차세대 기술 개발에 집중</li> <li>○ 나노소자 개발에 필요한 인프라 국산화 기술 육성</li> </ul>
		SO 전략 WO 전략	ST 전략 WT 전략
약점 (W)	W1. 보안 이슈로 산-학-연 기술 개발 연계성 부족 W2. 차세대 기술 위한 원천소재 기술 확보 미흡 W3. 국내 박사급 고급인재 확보 인프라·환경 부족	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 산-학-연 융합 연구 강화 및 제품개발 지원 정책을 통한 선순환 체계 마련</li> <li>○ 원천소재 기술 및 저변 강화 위한 대기업 및 중소기업 상생 정책 강화</li> <li>○ 고급인재 양성 및 유치 방안 마련으로 차세대 기술 선도 및 초격차 유지 전략 수립</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 반도체 공정 친화성 측면 고려하여 팹에 즉시 투입될 수 있는 나노소재 및 공정 기술 탐색/개발 전략</li> <li>○ 나노기술 분야 간 융합을 통한 신성장 동력 기술 확보 전략 마련</li> <li>○ 나노소자 개발을 위한 친환경 소재 및 공정 개발 전략 필요</li> </ul>

## 2. 국내외 기술 및 산업동향(현황 및 전망)

### 가. 국외 기술 및 산업 동향

#### ○ (나노융합 기억소자)

- (초저전력 3차원 메모리 소자) 인공지능, 빅데이터 등 데이터센터 및 서버에서 처리해야 하는 데이터 양 증가로 초고속 및 고대역 메모리 소자 기술의 필요성이 폭발적으로 증대. 특히 소비 전력이 낮고 칩 당 메모리 용량이 높으며 초당 데이터 전송량이 빠른 DRAM 기술 수요가 증가. 미국 마이크론은 액침불화아르곤(ArFi) 패터닝 기술을 이용하여 10나노급 5세대(1b) 소자를 개발하였으며, 차세대 소자 개발을 위한 투자를 진행
- (초고집적 3차원 스토리지 소자) 인공지능 및 클라우드 컴퓨팅 등에서 기하급수적으로 발생하는 정보들을 영구적으로 저장할 수 있는 스토리지 소자 개발을 활발히 진행. 이를 위하여 낸드플래시 소자의 경우 232단의 수직으로 적층된 구조 개발을 통해, 테라비트 이상의 대용량 데이터를 저장하는 전략을 취하고 있으나, 낸드플래시 단수가 높아짐에 따라 기존 Si 소재로는 고속으로 데이터를 읽고 쓰는데 한계를 보이고 있어, Si을 대체하여 III-V 물질과 같은 고이동도 채널 소재 도입에 대한 개발이 활발히 진행. 또한, 기존 전하 트랩 층의 약한 내구성을 강화하기 위하여 하프늄 산화물 기반 강유전체 채널을 도입하여 저항변화 방식으로의 데이터 저장 방식으로의 기술변화가 진행
- (고신뢰성 스토리지 클래스 메모리 소자) 전하 저장 방식의 기존 메모리 및 스토리지 소자가 나노미세공정에 따른 물리적 한계에 도달함에 따라 소재 내 저항변화 원리를 기반으로 하는 차세대 메모리 소자 필요성 부각. 폭발적으로 증가 중인 데이터 생성량 및 처리속도를 만족하고자, 메모리 중심의 컴퓨팅 기술 구현이 대두되고 있으며, 이에 따라 스토리지 급용량과 메모리에 상응하는 동작 속도를 확보 가능한 스토리지 클래스 메모리 기술이 필요. 미국 인텔은 상변화 메모리와 오보닉 문턱 스위치 소자를 셀렉터로 이용하여 크로스포인트 구조가 2층으로 적층된 스토리지 클래스 메모리 양산 및 제품을 판매. 일본 Toshiba에서는 MFIM 구조 활용한 자가정류 기능의 크로스포인트 메모리 연구결과를 발표. 일본 Kioxia는 Si-doped HfO<sub>2</sub> (4 nm) 기반 크로스포인트 메모리 구조의 강유전체 터널 접합을 구현한 결과를 발표

#### ○ (나노융합 시스템반도체 및 전력소자)

- (초저전력 고속 로직 소자) AI, 머신러닝, 딥러닝 등 빅데이터 처리에 필요한 고성능 컴퓨팅의 수요와 IoT, 웨어러블 기기 등에 필요한 저전력 컴퓨팅의 수요가 4차 산업혁명 이후로 폭발적으로 증가. 현재 시스템반도체 분야에는 FinFET이 고성능, 저전력 시스템에 주로 적

용되고 있으며 FinFET의 뒤를 이을 유력한 차세대 3차원 로직 소자로서 Gate-All-Around (GAA) FET 소자가 삼성전자, intel, TSMC, imec, IBM research 등에서 활발하게 연구되었고 상용화를 기대. 이후, GAA FET의 소모 전력, 성능, 집적도의 비약적 향상을 위해 소자의 전류 전송 방향, 구조 및 배치를 최적화하는 forksheet FET (FSFET), vertical-transport FET (VFET), complementary FET (CFET)이 연구되고 있으나, 현재까지 주된 로직 소자로 사용되고 있는 실리콘 기반의 반도체 소자는 물질 특성으로 인해 이동도 감소와 60 mV/dec 이하의 subthreshold swing (SS) 구현 불가능하다는 물리적 한계점을 보유. 이러한 한계점을 돌파하기 위해 소자의 채널, 게이트, 소스/드레인 영역에 다양한 신물질 (HZO, GeSn, Ge, IGZO, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, WS<sub>2</sub>, Graphene, InGaAs 등)을 적용한 tunneling FET (TFET), negative-capacitance FET (NCFET), 2D FET, CNT, III-V FET 등 저전력, 고성능, 고집적도 시스템반도체를 구현하려는 연구가 활발히 진행. 해당 기술들은 단편적인 영역에서 기존 실리콘 기반 로직 소자보다 우수한 성능을 보일 수 있으나, 기술의 성숙도가 매우 높은 현재의 로직 소자를 완전히 대체하기는 어려운 상황이므로, 신구조/신물질 로직 소자는 현재의 실리콘 기반 로직 칩의 일부를 대체하는 방식으로 개발이 이루어질 것으로 예상

- (신개념 로직 소자) 이종접합기술의 발전을 계기로 1,000억개 이상의 나노소자가 집적되는 multi-chip-mega-system의 다양한 부분에 새로운 신개념 로직소자를 이용하여 로직기능을 소자, 모듈, 칩 단위로 구현함으로써 전체 시스템의 연산효율, 에너지효율을 개선하기 위한 기술들이 모색. 다차로직, 재구성로직/배선, 물리적스위치, 아날로그연산, 스피로로직, 양자컴퓨팅 소자 등 새로운 소자기반의 아키텍처들이 통상적인 실리콘 기반뿐 아니라 이종집적 시스템상의 배선구조, RDL구조, bridge구조에 구현될 수 있도록 새로운 박막형 채널소재, 새로운 전극소재를 활용한 연구가 진행. 양자컴퓨팅 소자는 크게 이온 트랩 소자와 초전도 큐비트 소자로 분류 가능한데, 큐비트의 정교한 조작 성능을 유지하며 큐비트의 개수를 확장시키는 방향으로 연구가 진행될 것으로 기대
- (전력 반도체 소자) 전 세계적인 전기자동차의 폭발적인 수요, 친환경 재생에너지 기반 발전원의 증가, 빅데이터를 저장할 서버용 전력 반도체, 산업용 모터 등 전기 사용에 대한 수요 증가로 인하여 전력 반도체 시장이 급성장하고 있으며 공급이 수요를 따라가지 못하고 있어 각국에서 전폭적인 지원이 이루어지고 있는 상황. 시장조사 전문기관인 OMDIA에 따르면 글로벌 전력반도체 시장은 2023년 약 530억 불 규모의 시장을 형성하고 연평균 35%의 성장률을 보일 것으로 전망. 미국, EU, 일본 및 중국 등에서는 2010년경부터 전력 반도체 육성을 위해 정부 주도로 파워아메리카사업, 차세대파워일렉트로닉스사업 및 3세대 화합물반도체육성사업 등을 산·학·연 컨소시엄을 구성하여 지원

## ○ (나노융합 지능형 소자(로직-메모리 융합소자))

- Processing-in-memory 분야는 데이터 처리 및 저장 기능을 동시에 확보할 수 있는 나노소자 기술을 의미하며 최근 융합기술로 떠오르는 추세
  - (DRAM processing unit) 2017년 프랑스의 UPMEM사는 RISC-V 프로세서를 DRAM 내에 내장시켜, CPU의 기능 일부를 DRAM 내부에서 수행할 수 있는 PIM 기술을 구현. 아키텍처 측면으로는 1세대 PIM (near-memory computing) 영역이지만, PIM 기능이 구현된 자체에 큰 의의
  - (저항 변화 소자 기반 PIM 하드웨어 구현) 2020년 대만 국립 칭화대학교의 Meng-Fan Chang 교수팀은 2Mb (8 Sub-bank) 저항 변화 소자 기반 CIM Macro 칩을 설계. ISSCC에 발표된 위의 성능은 CIFAR-100 데이터 인식을 90.18%와 121.38 TOPS/W의 에너지 효율을 달성
  - (하프니아 산화물 강유전체 기반 연산기능 소자) 강유전체 소자의 낮은 동작 전압, 높은 스위칭 속도 등 여러 이점을 포함하며, 하프니아 산화물 기반 강유전체 박막의 분극 방향으로 데이터를 저장할 수 있는 비휘발성 메모리 및 논리를 구현할 수 있는 기술이 활발하게 연구되고 있는 상황. NAND 및 NOR 게이트 구현을 위한 입력으로 내부 분극과 외부 전압을 이용하여 논리 회로 구현하려고 시도 중. 2022년 1월 IMECAS의 Zhaohao Zhang 연구팀은 제한적 전계 효과를 해결하기 위하여 전하 트랩 및 분극 스위칭 효과를 도입하여 단일 소자에서 8개의 Boolean 로직과 2개의 FinFET 소자를 결합하여 16개의 Boolean 로직을 구현한 결과를 발표
  - (이차원 소재 기반 floating gate memory 연산 소자) 2020년 스위스 로잔 연방 공과대학교의 Andras Kis 교수팀은 이차원 반도체 소재 중 하나인 MoS<sub>2</sub>(Molybdenum disulfide) 단일 층 기반의 플로팅게이트 메모리를 이용하여 로직 회로와 메모리 사이에서의 데이터 이동이 필요 없는 메모리 소자에서의 직접 논리 연산(NOT, NAND, NOR, XOR)을 수행 가능
  - (이차원 소재 저항 변화 메모리 (RRAM) 기반 연산 소자) 2022년 미국 UCF 대학교 Tania Roy 교수 연구팀에서 MoS<sub>2</sub> 박막 기반 2단자 저항 변화 메모리 소자를 제작하고 이를 활용하여 발화형 로직 게이트(threshold logic gate)를 구현하는 기술을 발표. 해당 연구팀에서 제작한 소자는 set 전압의 경우 2% 이하 낮은 C-to-C 및 D-to-D 가변성을 보이며 reset power의 경우 대략 15% 정도의 가변성을 보이며, 제작한 소자와 여러 회로 부품들을 활용하여 AND, OR 및 NOT 로직 게이트를 구현
- (뉴로모픽 소자) 고차원 인지/학습기능 및 대규모 데이터 처리를 보다 효율적으로 수행할 수 있는 전자소자 기술의 필요성이 크게 증대. 특히, 두뇌의 에너지 효율성 및 그 고차원적

인지/학습 기능을 모사할 수 있도록 인공 뇌를 구현하는 기술 수요가 증대 중. Loihi, Tianjic, DYNAPs, Braindrop 등과 같은 CMOS 소자기반 인공 뇌 프로토타입들이 제안 . 이에 더 나아가 최근 비CMOS 소자들, 예를 들어 ion migration ( $\text{SiO}_x$ ,  $\text{TiO}_x$ ,  $\text{HfO}_x$ ), mott transition ( $\text{VO}_2$ ,  $\text{NbO}_2$ ), ferroelectric switching (HZO, STO), magnetic switching (MgO barrier), phase transition (GST) 등의 현상을 이용한 뉴로모픽 소자들을 이용한 인공신경망(뇌) 결과를 발표

### ○ (나노융합 정보표시소자)

- (실감형 디스플레이) 수년간 지속되었던 팬데믹의 영향으로 비대면 삶의 편의성과 효율성, 필요성 등을 깨닫게 되면서, 보다 현실감 있는 비대면 소통을 위한 기술 개발이 빠르게 진행 중 . 특히 메타버스에 대한 관심이 급증하면서, 기존의 XR 디바이스에 3차원 영상을 표시하기 위한 디스플레이 기술의 필요성이 증대되고 있으며, 나아가 오감을 공감각으로 느낄 수 있는 정보표시 나노소자 기술에 대한 관심이 고조되고 있는 상황. 실감형 디스플레이는 초대형 메타버스 플랫폼 기업(e.g., 애플, 마이크로소프트, 메타 등)과의 협업을 기반으로 미국, 프랑스, 영국, 대만 등의 나노 및 마이크로 디스플레이 제조 기업에서 활발하게 연구 개발되고 있으며, 공감각 기술은 액추에이터와 신경신호 인공감각에 대한 기초연구들이 진행 중
- (프리폼 디스플레이) 디스플레이는 스마트 및 휴대기기의 외형을 결정함. 고해상도, 큰 화면 및 휴대성을 확보한 프리폼 디스플레이는 현재 벤더블, 폴더블, 롤러블에서 스트레처블 등으로 형태를 자유자재로 변형할 수 있는 프리폼 기술 개발이 빠르게 진행 중이며, OLED 및 LED를 활용한 광원 기술을 접목하여 빠르게 발전 중. 일본 샤프는 차량 내부 계기판, 대시보드 등 곡면에 인테리어 디자인 및 정보전달의 기능을 향상시킬 수 있는 디스플레이를 개발 중이며, 미국과 캐나다의 Daktronics는 건물 외벽용 디스플레이를 개발. 중국의 BOE 등에서 프리폼 디스플레이에 대한 시제품을 발표하면서 한국과 중국의 경쟁 구도로 활발한 연구 진행 중
- (투명 디스플레이) 스마트윈도우 및 증강현실 기술이 주목받기 시작하면서 투명 디스플레이 기술의 필요성이 증대 중. 이에 발맞추어 2021년 CES에서는 냉장고, 침대, 자동차 등 일반 가전에 적용 가능한 OLED 기반의 투명 디스플레이 기술이 발표되어 많은 관심을 받았으며, 또한 마이크로 LED 기반의 플렉서블 및 스트레처블 투명 디스플레이 구현을 위한 원천기술들이 보고되고 있는 상황. 투명 OLED 기반의 투명 디스플레이 기술은 국내에서 기술을 선점하고 있으며, 투명도가 높으면서도 저항이 낮아 안정적으로 구동할 수 있는 전극 소재 등 핵심 소재 개발에 대한 원천 연구가 활발히 진행 중

### ○ (나노융합 포토닉스소자)

- (스마트 광 배선/통신 소자) 기존의 광파이버 및 III-V족 화합물 반도체를 사용한 나노 광 소자 및 집적소자 이외에도 Si photonics 기술을 사용한 optical transceiver 및 receiver 등이 인텔에서 상용화되었으며, 미국, 유럽, 일본을 중심으로 다양한 기업들이 연구 개발에 참여. 특히, Si photonics의 경우 일부 foundry 서비스가 유럽의 IMEC, 싱가포르, 미국 등에서 제공되고 있으며, III-V족 화합물 반도체 소자의 경우에도 foundry 서비스가 시작
- (광 컴퓨팅 소자) 전통적으로 광파이버 및 III-V족 화합물 반도체 소자를 이용한 광 컴퓨팅 소자가 기존의 전자 소자를 활용한 컴퓨팅의 한계를 극복하기 위해 연구가 진행. 최근에는 Si photonics 기술을 이용한 광 컴퓨팅 기술이 MIT 등을 중심으로 활발히 연구 진행 중이며, 이 기술을 활용한 뉴로모픽 포토닉스 또한 연구개발이 진행 중. 광자를 이용한 양자컴퓨팅에 관해서는 많은 미국, 유럽, 중국 등에서 활발히 연구되고 있으며, 미국 등에서는 관련 벤처 기업도 생겨나고 있는 상황
- (Photonic integrated circuits(PIC) 감지 소자) Discrete하게 개발되던 감지 소자도 최근에는 Si photonics 등의 나노 집적 기술을 통해 통합. 특히, LiDAR나 gas sensing 등에 대해서는 Si photonics나 화합물 반도체의 나노 집적광학 기술을 통해 집적화하려는 움직임이 미국이나 유럽 등에서 활발히 이루어지고 있는 상황

### ○ (나노융합 센서소자)

- (화학센서) 환경과 건강에 관한 관심이 증폭되고 있는 가운데 실생활에서 발생하거나 존재하는 다양한 오염물질을 편리하면서도 지속적인 모니터링이 가능한 기술 개발이 활발히 이루어지고 있는 상황. 제한된 환경에서 특정 물질의 존재 여부 및 양을 파악하는 기존의 응용 분야를 넘어, 넓은 영역에서 극미량의 오염물질을 감지하여 오염원의 발생, 분포 및 이동 경로 등의 전반적인 분석이 가능하며, 쾌적한 환경을 조성하는 데 기여할 수 있는 고성능 가스 센서에 관한 기술개발이 중요한 과제로 대두. 특히 전 세계에서 지속적으로 심각성을 더해가고 있는 오염으로 인해 화학 센서 시장은 2028년까지 380억 달러 수준에 이를 것으로 전망. 북미의 경우 자동차 산업의 수요 증가로 인해 대기 중 오염물질 모니터링이 가능한 가스 센서에 관한 관심이 증폭
- (물리센서) 대학과 기업체를 중심으로 전자피부용 웨어러블 센서들이 연구되고 있으며 의공학 분야의 생체삽입형 센서, 가상현실 분야의 차세대 햅틱센서 등 실용화에 노력. 대학이 연구를 주도하며 애플, 삼성, Fitbit 등의 글로벌 기업들이 동시적인 상용화에 힘쓰고 있는 단계. 약한 내구성이 단점이었던 유연 물리센서는 3축 변형에 저항하는 초박형, 초신



축성 형태로 진화하여 내구성을 향상시키는 방향으로 연구되고 있으며, 특정 물리량 또는 변형 축에 대해 선택적으로 감지할 수 있는 디커플링 관련 연구가 활발히 진행 중. 또한 지속적으로 관심이 증대되고 있는 가상현실(Virtual Reality, VR) 및 증강현실(Augmented Reality, AR)분야를 위한 고감도/다기능성의 햅틱센서 연구가 진행 중이며, 센서의 실용도를 높이기 위해 무전원/무선통신 센서 연구가 활발히 진행 중

- **(광학센서)** 전 세계적으로 지속적인 성장을 보이는 전자 산업과 더불어 광학 센서에 대한 수요도 증가. 광학 센서는 이미지 센서, 근접 센서, 모션 센서, 안전 센서 등의 분야에 적용할 수 있어 고성능 카메라 뿐만 아니라 가전제품, 조명산업, 의료기기, 분석기기 등과 같은 다양한 응용 분야에서의 수요가 있을 것으로 예상. 초고해상도 이미지 인식 기술과 인식되는 이미지의 왜곡을 최소화하는 기술과 관련된 연구가 꾸준히 진행 중. 또한, Near Infrared(근적외선, NIR) 보다 안전하고 정밀한 비접촉 감지가 가능한 Short-wave Infrared(단파적외선, SWIR) 기반의 광학 센서 및 인간의 시각 인식 기능 모방과 같은 새로운 분야로의 확대 응용을 위해 고성능 광학 센서 및 광전자 시냅스 소자 기술을 기반으로 하는 이미지 센서에 대한 연구가 세계적으로 활발하게 이루어지고 있는 추세

## 나. 국내 기술 및 산업 동향

### ○ (나노융합 기억소자)

- **(초저전력 3차원 메모리 소자)** 2021년 SK Hynix는 EUV 공정을 도입하여 10나노급 4세대 (1a) DRAM 기술 및 단일 칩으로 세계 최대 용량인 24 기가비트 DDR5 제품을 개발. 이는 데이터 처리 속도를 높이는 동시에 전력 소모를 낮춰 방대한 양의 데이터를 빠르게 처리할 수 있으며, 2차원 미세공정의 한계를 극복하고자 3차원 낸드플래시 구조와 유사한 3차원 형태의 차세대 DRAM 기술을 제시
- **(초고집적 3차원 스토리지 소자)** 2022년 SK Hynix는 100층 이상의 낸드플래시가 적층된 소자 제작을 위하여 채널 홀을 두 번으로 나누어 식각하는 기술을 바탕으로 238단의 3차원 낸드플래시를 개발. 정보가 저장되는 스토리지 영역과 별개로 놓여 있던 구동회로 부분을 스토리지 하단부에 배치하여 면적 감소 효과를 얻어 효율성을 높이는 기술을 개발
- **(고신뢰성 스토리지 클래스 메모리 소자)** 칼코지나이드 계열 소재의 상변화 및 스핀 전달 토크 원리를 이용한 저항변화 메모리 소자를 크로스포인트 어레이로 적층하는 기술을 개발 하였으며, 삼성전자 종합기술원에서 HZO (7 nm) 기반 4 X 4 스위칭이 가능한 다이오드 크로스포인트 기반 메모리 어레이를 구현

○ (나노융합 시스템반도체 및 전력소자)

- (초저전력 고속 로직 소자) 2022년 삼성전자는 Gate-All-Around (GAA) 구조를 가지는 3 nm node Multi Bridge Channel Field Effect Transistor (MBCFET)를 세계 최초로 상용화에 성공. 해당 기술은 초저전력을 요구하는 웨어러블 기기, 모바일 AP와 초고집적을 요구하는 AI 학습용 그래픽 카드, 서버용 CPU 등에 활용 가능. 이처럼 해당 분야의 기술 연구는 삼성전자가 전 세계 기술을 선도하고 있으며, 국내 여러 연구소와 대학에서는 새로운 3차원 로직 소자 구조 (FSFET, VFET, CFET)를 개발하기 위한 연구가 활발히 진행. 아울러, CMOS 기반 실리콘 소자의 물리적 한계를 뛰어넘기 위한 신구조/신물질 로직 소자 기술 연구가 활발히 진행. 해당 기술로 물질 및 구조의 변화를 통해 60 mV 이하의 SS를 목표로 하는 NCFET 및 TFET, 고이동도 특성을 가지는 III-V channel 물질 소자, 저전력 특성을 가지는 2D channel 물질 소자 등이 연구소와 대학을 중심으로 활발히 연구. 해당 기술들은 실리콘 기반 소자 대비 일부 영역에서 뚜렷한 장점이 있지만, 공정이나 집적도 향상의 어려움과 특정 동작 조건에서 큰 단점을 보이는 등의 문제가 있으므로 이러한 난제들을 개선하는 연구가 필요
- (신개념 로직소자) 신개념 로직소자로 분류되는 기술들은 아직 개념정립, 초기실증단계에 머물러 있으며, 대부분의 경우 소재 및 소자 개념상의 기술한계 돌파를 위한 초기 단계의 연구가 진행. 다차로직소자의 경우, 종래의 다단계 스위칭 소자의 개념을 넘어서는 반양극성소자 (anti-ambipolar)와 silicon CMOS소자와의 혼성소자를 이용한 누설전류 한계 돌파, CMOS 소자기반의 초저전력시스템향 다차로직 아키텍처 등의 혁신기술이 국내대학에서 마이크로프로세서 수준까지 개발되었고, 산업계에서도 일부 개념검증을 시도. 기계적 스위치를 이용하는 누설전류제어기술은 아직 배선소자기술 수준에서 연구되고 있으나, 향후 이종집적시스템과 연계되어 다양한 형태의 미세 물리적스위치 기술이 발전할 것으로 예상. 그 외 아날로그 컴퓨팅 등 새로운 연산 아키텍처와 관련된 연구는 응용분야의 제약으로 국내 연구는 비활성. 스핀로직소자의 경우, 저차원 나노소재 도입과 이에 따른 스핀 완화 거리(spin relaxation length)와 스핀 수명 시간(spin life time) 향상으로, 1D 나노선(nanowire)과 2D 나노플레이크(nano-flake)의 스핀 주입 및 전송 특성이 확인되었으나, 안정적 소자화 및 제품화를 위한 연산성능이나 동작온도 등의 한계를 돌파하기 위한 기술개발이 필요. 양자 컴퓨팅소자의 경우, 국내 대학 연구진 기술로 칩 형태의 이온 트랩 소자가 제작되며, 이는 이온 큐비트 5~10개 정도 포획이 가능한 수준. 초전도 큐비트 소자 역시 큐비트의 개수는 비슷한 수준으로 제작 가능
- (전력 반도체 소자) 2021년 관계부처 합동으로 2025년까지 글로벌 수준의 차세대 전력반도체 경쟁력 확보를 위한 전력반도체 지원 방안을 발표하였으며 소자-모듈-시스템을 연

계하는 통합 Value chain 형성 및 8-인치 공정 기반 파운드리 인프라 확보 방안을 발표. 국내 전력반도체 시장은 약 20억 달러 규모이며 2030년 35억 달러 규모로 성장할 것으로 예측되나 기술력 부족과 해외 선진기업의 특허 선점으로 수요의 90% 이상을 수입에 의존하고 있어 국산화가 필요한 상황. 2017년 부산에 6-인치 급 전력반도체 생산이 가능한 파워반도체상용화센터 구축을 위해 830억 원을 지원한 것을 시작으로 매년 전력반도체 관련 R&D 예산을 지원. SK에서는 전력반도체용 SiC 기판 생산을 위해 5600억을 투자하여 Dupont의 사업부를 인수하고 국내 전력반도체 전문기업인 예스티의 경영권을 인수하는 등 적극적인 투자를 진행

### ○ (나노융합 지능형 소자(로직-메모리 융합소자))

#### - (Processing-in-memory 소자)

- (1세대 HBM-PIM) 2021년 2월 삼성전자는 TSV 기술과 3D 적층 구조 기반의 연산장치와 메모리 사이의 물리적 거리를 좁힌 고대역폭 인-메모리 (High bandwidth memory PIM)를 세계 최초 공개. 기존 HBM2 모델 대비 2배 이상의 시스템 성능 향상과 70% 이상의 감소한 에너지 소비량을 제시. 하지만, 메모리 용량 절하와 연산 수행 성능 문제 등으로의 고집적화를 고려했을 때 메모리와 연산기능이 융합된 차세대 아키텍처가 필요
- (단일 flash memory 아키텍처 및 소규모 연산 네트워크 구축) 2018년 서울대 이종호 교수팀은 half-covered 플로팅 게이트 구조 기반의 TFT NOR flash memory를 통해 인간의 신경 학습 알고리즘을 모사한 인-메모리 성능을 확인. 2019년에는 NAND flash memory에서의 XNOR 연산 기반의 네트워크 동작을 구현해 기존 저항 변화 메모리 (RRAM) 대비 100배 이상의 면적 절감이 가능
- (2단자 저항 변화 메모리 (RRAM) 기반 연산기능 구현) 2022년 동국대 김성준 교수팀은 SiN 기반 2단자 멤리스터를 제작하고, 이를 활용한 다양한 로직 게이트 구현 결과를 발표. 제작한 SiN 기반 저항 변화 메모리 소자는 단극성 (unipolar) 및 양극성 (bipolar)의 전기적 특성을 보이며, 두 가지 특성을 모두 활용한 NOR 및 XNOR 기능 외의 14개 Boolean 로직 게이트를 구현
- (임베디드 자성 메모리 플래시 로직 공정) 삼성전자는 시스템 반도체의 회로 안에 데이터를 기억하는 플래시메모리 회로를 구현하는 임베디드 플래시 로직 공정 사용. 더 나아가 eFlash의 단점으로 보고되는 데이터 기록을 위한 기존 데이터 삭제 과정으로 인한 속도와 전력효율 저하를 개선하여 기존 eFlash보다 약 1000배 빠른 쓰기 속도를 나타내며, 28나노 FD-SOI eMRAM(embedded Magnetic Random Access Memory)를 출하 시작
- (단일 자성 메모리 성능 최적화 및 어레이 아키텍처 설계) 2021년 KAIST 박병국 교수

연구팀은 외부 자기장 없이 동작 가능하며, 스위칭 효율을 증가시킨 소재 기술 개발. 2022년 1월 삼성종합기술원은 낮은 저항값 특성 한계를 극복하기 위해 전류 합산 방식이 아닌 저항 합산 방식으로 숫자 분류 최대 98%, 얼굴 검출 93% 정확도 및 100 nJ 이하의 저전력 MRAM 셀 기반 64x64 크로스바 어레이를 보고

- **(뉴로모픽 소자)** 강유전체 물질의 분극 특성을 이용해 산화물 반도체의 광 반응성을 제어해 신호 전달 세기 조절이 가능한 뉴로모픽 칩을 구현하는데 성공. 또한 수직 이온-젤 트랜지스터를 이용해 크로스바 배열로 확장할 수 있는 인공 시냅스 소자, 웨어러블·로보틱스에 활용 가능한 신경 세포망 님은 인공섬유소자, ‘스커미온’이라는 독특한 스핀 구조체를 활용해 신경전달 물질과 동일한 원리로 스커미온의 수를 조절함으로써 시냅스 가중치를 효과적으로 제어가능한 소자 등이 개발

### ○ (나노융합 정보표시소자)

- **(실감형 디스플레이)** 착용형 3차원 디스플레이 구현을 위한 기술은 연구소와 대학을 중심으로 진행되고 있으며, 산업계에서는 초실감 VR 영상 구현을 위한 초고해상도 마이크로 디스플레이 상용화를 위한 노력 지속. 비 착용형 3차원 디스플레이는 원천기술 단계에 머물러 있으며, 초고해상도-대면적 SLM 및 상호작용 기술과, 능동메타소재 개발을 통한 홀로그램 영상 구현을 위한 연구가 연구소와 대학을 중심으로 진행. 공감각 기술은 액추에이터와 신경신호 인공감각은 대학을 중심으로 연구가 수행되고 있으며 기초연구의 초입단계에 해당
- **(프리폼 디스플레이)** 2020년 이후, OLED 기술을 기반으로 폴더블 스마트폰, 롤러블 대화면 TV 등이 출시되었으며, 삼성전자와 LG디스플레이에서는 마이크로 LED 기반으로 건물 외벽 곡면에 디스플레이를 설치하는 B2B사업을 진행. OLED 뿐만 아니라 LED를 활용한 플렉서블 및 스트레처블 및 변형에도 화면 왜곡이 없고 해상도가 유지되는 디스플레이 구현을 위한 연구가 활발하게 전개. 특히, 대학 및 연구소에서는 마이크로 LED 광원으로 의료 및 바이오 헬스 분야에 사용할 수 있는 탈부착형 패치 개발을 진행 중이며, 더 나아가 인체 삽입형 또는 고연신율 소재를 기반으로 피부를 모사한 e-skin 연구개발도 활발히 진행
- **(투명 디스플레이)** 국내 대기업을 중심으로 가전 및 공공(지하철, 차량 등) 분야 응용을 위한 투명 디스플레이를 활용한 다양한 사업화가 진행 중에 있으며, OLED 및 LED를 활용한 플렉서블 및 스트레처블 투명 디스플레이 구현을 위한 연구가 연구소 및 대학을 중심으로 진행. 특히, 국내 기업 중에서는 LGD가 투명 OLED를 이용한 55인치 투명 디스플레이를 상용화 하는 등 적극적으로 기술을 선도

○ (나노융합 포토닉스소자)

- (스마트 광 배선/통신 소자) 국내에서는 다수 연구소 및 대학에서 다양한 광소자 연구가 진행되고 있으나, 광 배선 및 통신을 위한 Si photonics 등의 집적광학 기술은 선진국 등에 비해 비활성. 산업계에서는 삼성에서 오랫동안 Si photonics의 DRAM interconnect 응용을 위한 연구가 진행됐으나 실제 제품화까지는 가지 못하였으며, 몇몇 중소/중견기업에서 관련 연구에 관심을 보이는 정도
- (광 컴퓨팅 소자) 국내에서는 일부 대학 및 연구소에서 광 컴퓨팅을 위한 연구를 진행하였으나, 최근에는 양자 응용을 위한 광소재 및 광소자 연구가 활발히 진행. 인공지능 광소자에 대해서는 수광소자 쪽의 연구는 활발히 진행 중이나 그 이외의 소자에 대해서는 선진국에 비해 비활성
- (Photonic integrated circuits(PIC) 감지 소자) 연구소나 학교에서는 주로 단위 수광 소자 등의 연구가 활발히 진행. 삼성 등에서는 기존의 Si photonics 기술을 활용하여 LiDAR를 위한 hybrid laser 집적 및 optical phase array 제작 등의 기술을 개발

○ (나노융합 센서소자)

- (화학센서) 환경과 건강에 대한 전 세계적으로 급증하는 관심과 더불어 국내에서도 많은 대학 및 연구소의 연구진들이 다양한 나노 소재를 이용해 고감도 및 고선택성을 갖는 가스 센서 기술의 개발을 위해 노력을 추진
- (물리센서) 국외와 마찬가지로 물리센서는 대학 및 연구소를 중심으로 높은 내구성과 3차원 신축성을 가지는 고차원 유연 물리센서로 연구 수행. 특히 나노 소재들을 이용한 압전, 정전 등의 자가발전 센서들의 연구가 활발히 진행되고 있으며, 고감도/다기능성의 헵틱센서 및 실용화를 위한 무전원, 무선센서 연구가 진행
- (광학센서) 국내 이미지 센서 시장을 주도하고 세계적으로 점유율 2위인 삼성전자에서 2023년 출시 예정인 갤럭시 S23에 2억 화소 카메라 탑재를 확정. 이와 더불어 국내 다수의 연구소 및 대학에서 곡면형 구조를 갖는 이미지 센서, 고성능 SWIR 기반 광학 센서 및 광전자 시냅스 소자와 이를 기반으로 한 뉴로모픽 이미지 센서에 대한 기초 기술 연구를 진행

### 3. 기술발전 전망

중분류	현재 기술	미래 기술
나노융합 기억소자	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고유전율 이원계 산화물 기반 DRAM Peripheral 트랜지스터</li> <li>- 채널 길이를 증가시킨 구조의 평면형 DRAM Cell 트랜지스터</li> <li>- EUV 리소그래피 이용 DRAM 커패시터 형성 기술</li> <li>- 200단 이상 수직 적층된 3차원 낸드플래시 기술</li> <li>- Peripheral 트랜지스터와 낸드플래시 수직 적층 형성 기술</li> <li>- 4bit (QLC) 정보 저장 멀티레벨 기술</li> <li>- 임베디드 시스템 용 Mbit 급 고신뢰성 저항 변화 메모리</li> <li>- Gbit급 고용량 2층 크로스포인트 저항변화 메모리 기술</li> <li>- 3차원 적층 가능한 셀렉터 소재 및 소자 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 3차원 수직형 DRAM 소재 및 소자 기술</li> <li>- 커패시터-리스(Capacitorless) DRAM 기술</li> <li>- 낸드플래시 Warpage 개선 및 웨이퍼 본딩 기술</li> <li>- 500단 이상 낸드플래시 형성 기술</li> <li>- 실리콘 채널 대체 고이동도 수직 채널 소재 및 형성 기술</li> <li>- 5bit (PLC)/6bit (HLC) 이상 멀티레벨 기술</li> <li>- 저항변화 층을 채널로 도입한 낸드플래시 기술</li> <li>- Tbit급 초고집적 4층 이상 크로스 포인트 저항변화 메모리 기술</li> <li>- 10나노 이하 영역 동작 가능한 고신뢰성 저항변화 메모리 기술</li> </ul>
나노융합 시스템반도체 및 전력소자	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 4면의 채널을 모두 감싼 형태의 트랜지스터 기술</li> <li>- 실리콘 외 Ge, III- V 화합물, 2D 기반 n/p형 채널 소재</li> <li>- Non-CMOS 기반 신개념 로직 소자 개발 및 구현</li> <li>- 마이크로 셸피치 게이트 수준 전력 반도체 소자</li> <li>- 최대 항복 전압 1700V 확보 위한 마이크로 셸 피치 정션 소재 및 형성 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 4면 채널을 모두 감싼 n/p 타입 트랜지스터 3차원 적층 기술</li> <li>- 초고속 초절전 트랜지스터 동작 위한 초 박막 신소재 채널 집적 공정 기술</li> <li>- 초저전력항 이진/다치 로직 소자 위한 스핀, 양자 소재/소자 기술</li> <li>- 나노 셸피치 게이트 수준 전력 반도체 소자</li> <li>- 20<math>\mu</math>m 이상 두께의 고밴드갭 슈퍼정션 등 항복 전압 6600V 구현 기술</li> </ul>
나노융합 지능형 소자 (로직-메모리 융합소자)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 저항변화 메모리 기반 단일 PIM 기능 구현 기술</li> <li>- CMOS/Non-CMOS 기반 인공 뉴런소자 제작 기술</li> <li>- PUF 용 순수 난수 발생 가능한 확률스위칭 소재 및 소자 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고내구성, 빠른 속도, 고효율 단위 시냅스 소자 기술</li> <li>- 대규모 시냅틱 어레이 개발 및 동작 방법 개발 기술</li> <li>- 외부 회로를 포함한 저전력, 고성능 시스템 개발</li> <li>- 고내구성 및 저전력 인공뉴런 소자 제작 기술</li> <li>- &lt;100 fJ 이하 초저전력 확률스위칭 소자 및 특성 제어 기술</li> </ul>
나노융합 정보표시소자	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 해상도 773 ppi급 디스플레이 생산기술</li> <li>- 마이크로LED 및 OLED 이용 2,000-5,000 ppi급 해상도 디스플레이 기술</li> <li>- 공간표시 디스플레이 기술</li> <li>- 좁은 시야각 및 낮은 해상도의 입체영상 광소자 기술</li> <li>- OLED 기반의 폴더블 디스플레이 생산기술</li> <li>- 곡률 반경 50R급 플렉서블 디스플레이 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- &gt;10,000 ppi 급 초고해상도 나노 광원 디스플레이</li> <li>- Mnit급 초휘도 및 비온드REC/2020 트루 컬러 고색순도 디스플레이 기술</li> <li>- 광시야각 및 초고해상도 입체영상이 가능한 복소변조 공간광변조 나노광학소자 기술</li> <li>- 스트레처블 디스플레이 및 구동회로 기술</li> <li>- 2차원 소재 구동회로를 가지는 유연 디스플레이 기술</li> </ul>

중분류	현재 기술	미래 기술
나노융합 정보표시소자	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 스마트폰, 태블릿, 노트북용 다중 폴딩 디스플레이 기술</li> <li>- 피부 탈부착 단색 광원 기반 단순 정보 전달용 디스플레이 연구개발</li> <li>- 투과도 50% 미만의 투명 디스플레이 기술</li> <li>- 수동형 투과율 가변 디스플레이 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 사용 편의성이 확보된 초실감 AR/VR 나노 광학 렌즈 기술</li> <li>- 차량 내/외장재 대체 자유곡면 디스플레이 및 건물 외벽 입체형 디스플레이 구현 기술</li> <li>- 피부 탈부착, e-skin, 콘택트렌즈 및 인체 삽입형 풀컬러 디스플레이 기술</li> <li>- 투과도 80% 이상의 고해상도 나노광원 소자</li> <li>- 능동형 투과율 가변성 나노소재 및 소자 디스플레이 기술</li> </ul>
나노융합 포토닉스 소자	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hybrid bonding 등을 이용한 laser 집적 optical transceiver 및 receiver</li> <li>- SiN, LNO, BTO 등의 물질 기반 제한적인 양자 회로 등의 구현</li> <li>- LiDAR 등을 위한 optical phase array 소자</li> <li>- MEMS 기술 등을 이용한 integrated photonics 소자</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 직접 성장을 통한 Si 상 고효율 화합물 반도체 성장 기술</li> <li>- 고대역폭/저전력 Integrated photonics 기술</li> <li>- 강한 광학 비선형 특성 소재를 활용한 양자 소자 및 뉴로모픽 포토닉스 소자 구현</li> <li>- Photonics 기술을 활용한 LiDAR 등 공감각 소자 및 시스템 개발</li> </ul>
나노융합 센서소자	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수십~수백초의 감지 시간 및 상대적으로 긴 재생 시간을 갖는 가스 센서</li> <li>- 평평하고 단단한 실리콘 및 PCB 기반의 센서 시스템</li> <li>- 진동기반의 단순 촉각 구현 햅틱 센서</li> <li>- 전원 탑재 무선 센서</li> <li>- NIR 기반 적외선 이미지 센서</li> <li>- 연구용, 군사용 및 우주탐사와같이 제한된 분야에서 사용되는 SWIR 센서</li> <li>- 2차원 평면형 이미지 센서 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수 초 내의 빠른 감지 시간과 짧은 재생 시간을 갖는 나노감지막 기반 가스 센서</li> <li>- 유연/신축성 나노소재 기반 가스 센서 기술</li> <li>- 3차원 고감도/다기능성 유연 물리/햅틱 센서</li> <li>- 특정 물리량 또는 변형 축에 대한 선택적 감지 기술</li> <li>- 무전원, 무선센서 기술</li> <li>- 움직이는 피사체에 대한 고정밀도 이미지 인식 기술</li> <li>- 기존 NIR 센서를 대체 저비용 나노소재 기반 SWIR 감지 기술</li> <li>- 나노소재 기반 곡면형 이미지 센서 기술</li> </ul>

## 4. 나노기술지도 전개

### 4-1. 나노융합 기억소자

#### 가. 초저전력 3차원 메모리 소자

##### 1) 개요

- (정의) 트랜지스터 구조에 연결된 커패시터에 전하 유무에 따라 '0'과 '1'을 구분하고 일시적으로 이를 기억하는 나노소자
- (필요성) 폭발적으로 증가하는 데이터를 저장하며, 인공지능 등 컴퓨터 프로세서에서 수행하는 연산량 증대로 초고속 대용량 메모리가 필요. 트랜지스터와 직접적으로 연결된 커패시터에 전하를 빠르게 저장할 수 있는 DRAM을 통해 고속 메모리로 사용
- (발전 전망) 나노미터 스케일의 초미세화 공정으로 커패시터에 저장된 전하 누설로 인해 신뢰성 문제 발생. 신소재 도입으로 DRAM 셀 트랜지스터 누설전류 최소화 및 커패시터 휘발성 개선으로 저전력 동작 구현. 집적도 향상을 위해 수직으로 쌓아 올리는 3차원 DRAM으로의 전환에 따른 산화물 셀 트랜지스터로 개발될 전망

##### 2) 미래핵심기술이슈 : 저장용량은 크되 소비전력은 낮은 3차원 DRAM 구현

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
3D 수직구조의 다층 트랜지스터 형성 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 3차원 적층 형태의 DRAM 기술 개발 시, 결정성 실리콘 대신 비정질 산화물 기반 게이트-올-어라운드(GAA) 나노스케일 트랜지스터 개발 필요</li> <li>- 나노미터 영역으로 미세화 공정 시 전하 이동도 감소 문제</li> <li>- 나노스케일 산화물 트랜지스터의 고속 동작 등 스위치 특성 저하 문제</li> <li>- 낮은 오프전류와 높은 캐리어이동도, 산포가 최소화된 채널의 동시 구현 한계</li> <li>- 낮은 컨택저항 형성 기술 개발 필요</li> </ul>
DRAM에 적용할 수 있는 고속/고내구성을 가지며 비휘발성을 갖는 커패시터 형성 기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 미세화 공정으로 전하 저장할 수 있는 커패시터의 감소 문제</li> <li>- 커패시터의 높이를 늘려 고종횡비 커패시터를 제작하고 있으나 기계적 불안정성 문제</li> <li>- 전하의 저장 유무를 판별할 수 있는 커패시터 정전용량 확보 필요</li> <li>- 커패시터에 저장을 오래 저장할 수 있도록 비휘발성을 갖는 소재 및 기술 필요</li> <li>- 커패시터용 초박막 고유전율 소재 개발 및 강유전체 도입으로 총전용량 개선 필요</li> <li>- 지속적인 DRAM 집적도를 위해 필요한 수 Å 이하의 등가산화물 두께 형성 기술과 낮은 누설전류를 갖는 커패시터 형성 기술 필요</li> </ul>



## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
수직 적층 구조의 나노스케일 트랜지스터 기술	정의	○ 3D 적층 형태의 DRAM을 위해 나노스케일 채널을 가지며 낮은 오프전류와 고 이동도를 갖는 트랜지스터 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 산화물 채널에 적합한 게이트 절연체 소재 개발 및 계면 결함 제어기술</li> <li>- 나노스케일 영역에서 산화물 트랜지스터 특성 확보 기술</li> <li>- 커패시터 절연체용 고유전율 박막 도입 및 트랜지스터 누설 전류 최소화 기술</li> </ul>
1나노미터 이하 등가 산화물 두께 기반 고신뢰성 커패시터 형성 기술	정의	○ 누설전류를 최소화하며 내구성 높은 커패시터 형성 기술 및 비휘발성 갖는 커패시터 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고유전율 소재의 증착 공정 기술</li> <li>- 고종횡비 구조의 커패시터 표면에 고유전율 박막을 균일한 두께 및 조성을 충족시키며 증착할 수 있는 공정 기술</li> </ul>

## 나. 초고집적 3차원 스토리지 소자

### 1) 개요

- (정의) 트랜지스터 게이트 아래 놓인 트랩 층에 전하가 저장됨에 따라 전원이 꺼지더라도 저장된 데이터를 영구적으로 보존할 수 있는 기억소자
- (필요성) 트랜지스터 외부에 커패시터와 같은 추가적인 전하 저장소가 필요하지 않아, 나노스케일의 미세화 공정 및 초고집적 소자 구현에 유리. 전하가 저장되는 부도체 트랩 층이 외부와 단절된 구조를 채택함에 따라 비휘발성 스토리지 구현 가능
- (발전 전망) 1000단 이상으로 적층된 3차원 낸드플래시 개발이 예상됨에 따라, 고종횡비 식각 및 증착 공정 기술, 웨이퍼 기계적 안정성 확보 및 웨이퍼 본딩 기술 개발이 전망되며, 고 이동도를 가진 채널 소재 및 전하 트랩 층 대신의 저항변화 원리를 통한 데이터 저장 방식 개선으로 내구성이 향상될 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 저장용량을 극대화하기 위한 3차원 낸드플래시 제조 공정 기술 및 초고집적 소자의 동작 신뢰성 확보

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
좁은 면적에 수백 단 이상의 낸드플래시 제조를 위한 공정 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1000단 이상의 박막 증착 후 채널 홀 식각 기술 필요</li> <li>- 고 종횡비 채널 홀 박막 증착 기술 필요</li> <li>- 기계적 안정성 (와피지 등) 확보 방안 필요</li> </ul>
패키지를 위해 정해진 칩 높이에서 1000단 이상의 낸드플래시 동작이 가능한 기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1000단 이상의 낸드플래시를 위한 저 전압 소자 기술 필요</li> <li>- 기존 차지 트랩 플래시 메모리는 15~25V 이상의 높은 동작 전압 요구</li> <li>- 트랩층 미세화에 따른 낸드플래시 층 간 간섭 제어 기술 필요</li> <li>- 산포와 신뢰성이 고려된 Quad level cell (QLC, 4bits/cell) 이상의 멀티레벨 기술 필요</li> <li>- 저저항 게이트 전극 소재 개발 및 증착 공정 기술 필요</li> <li>- 수천단 이상의 낸드플래시 셀들의 정보를 고속으로 읽고 쓰기 위한 높은 캐리어 이동도 채널 소재 개발 필요</li> <li>- 하나의 셀에 다수의 정보를 저장할 수 있는 기술 필요</li> <li>- 낸드플래시 수명/내구성 극대화 방안 필요</li> </ul>

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
나노스케일 채널 홀 공정 기술 기반 고집적 낸드플래시 소자 기술	정의	○ 수백단으로 적층된 낸드플래시를 형성하기 위한 채널 홀 에칭 공정 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고 종횡비 구조의 에칭 기술</li> <li>- 고 종횡비 구조의 채널 증착 기술</li> <li>- 멀티 스택 에칭 기술 도입으로 각 층별 align 기술</li> </ul>

나노기술명	개요	
수십나노 피치 3차원 낸드플래시 초집적 나노기술	정의	○ Stack height 감소에 따른 낸드플래시 셀 간의 간섭 및 동작 속도 개선 위한 저저항 게이트 전극 및 고 이동도 채널 소재 도입한 낸드플래시 소자 기술
	요소 기술	- 줄어든 피치 공간에 게이트 금속 소재를 균일하게 증착할 수 있는 기술 - 박막에서 낮은 비저항을 갖는 게이트 전극 소재 기술 - 고 이동도 채널 소재를 도입한 낸드플래시 소자 기술 - 3차원 낸드플래시에 기계적 스트레스를 최소화할 수 있는 공정 및 소자 기술
나노스케일 강유전체/ 저항변화 소재 기반 낸드플래시 소자 기술	정의	○ 3차원 낸드플래시 구조에서 차지 트랩 방식을 저항변화 원리로 변경하여 고속 동작, 내구성 향상 및 동작 전압을 감소시키는 기술
	요소 기술	- 강유전성 및 저항변화 특성이 나타나는 이원계 산화물 소재의 증착 공정 기술 - 높은 특성 균일도 확보를 위한 이온 및 분극 움직임 제어 기술 - 고내구성 및 높은 리텐션 확보 가능한 저항변화 메모리 특성 구현 기술

## 다. 고신뢰성 스토리지 클래스 메모리 소자

### 1) 개요

- (정의) DRAM 메모리 소자에 상응하는 고속 동작 및 낸드플래시 스토리지의 대용량 및 비휘발성 특성들을 동시에 갖는 소자
- (필요성) 컴퓨터 구조 메모리 계층 내, DRAM 메모리 소자와 낸드플래시 기반 스토리지 소자 간의 속도 차이 및 메모리 용량의 성능 차이에 따른 병목 현상을 극복하기 위한 새로운 계층의 메모리 소자 구현 필요
- (발전 전망) 기존의 전하 저장 방식이 아닌 산화물, 칼코지나이드 계열 소재 자체 내에서 원자의 스핀/분극 방향, 이온의 국부적인 움직임, 결정 구조의 변화로 저항이 가역적으로 달라지는 특성을 이용하여, 추가적인 전하 저장소가 필요하지 않은 저항변화 메모리 소자 활용 전망. 고속 동작이 가능한 크로스포인트 구조 도입 및 다층 (4층 이상) 적층 가능한 집적도 향상 및 신뢰성 향상 기술이 개발될 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : nm 사이즈의 극소 영역에 데이터를 장기간 보관 가능하며 데이터를 읽고 쓰는 작업을 무한 반복해도 문제가 없는 저항변화 메모리 및 셀렉터 소자 구현

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
10나노미터 이하의 극소 영역에서 이온/스핀 등의 정밀하고 안정적인 제어 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 칼코지나이드 소재 내 원자/이온들의 relaxation에 따른 상태 불안정성</li> <li>- 산화물 내 국부적인 이온 움직임에 따른 불균일도 제어 기술 필요</li> <li>- 3비트 이상의 멀티레벨 특성 확보 필요</li> <li>- 스핀의 방향을 반전시킬 수 있는 새로운 동작 원리 개발을 통해 저전력 및 고내구성 자성 메모리 소자 요구</li> </ul>
MRAM/PRAM 수준의 낮은 온 저항, 높은 저항비, 고 내구성을 갖는 강유전체 터널정선 소자 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 강유전성의 나노미터 소자 제작 및 집적화의 한계</li> <li>- 하프늄 산화물 기반 강유전체 메모리 저항 차이 개선 필요</li> </ul>
구조적으로 2단자 이면서 낮은 누설전류와 높은 동작전류 특성이 동시에 구현되는 셀렉터 소자 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 낮은 누설전류 확보를 통해 고집적 크로스포인트 어레이 형태 개발 필요</li> <li>- 메모리와 셀렉터 소자 2개의 동작 전압/전류 매칭의 한계</li> <li>- 셀렉터 자체 내 메모리 기능이 함유된 셀렉터-리스 메모리 소자 개발 필요</li> </ul>

### 2-2) 나노기술(주제)

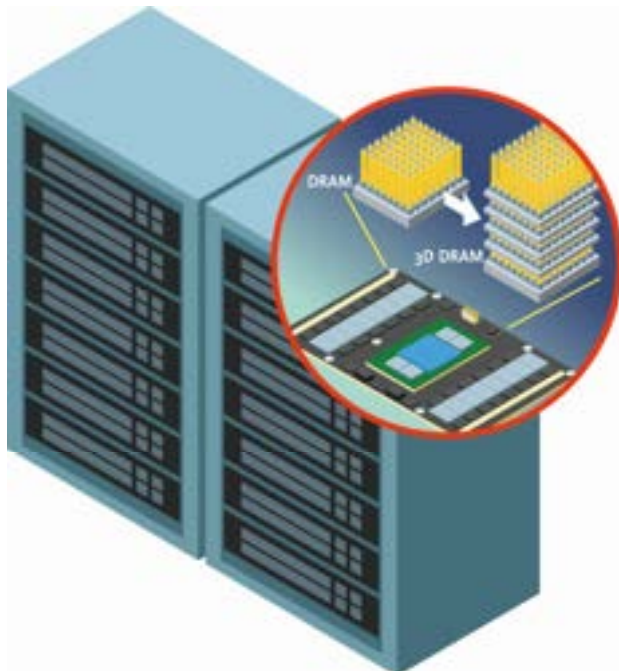
나노기술명	개요	
10나노미터 이하 칼코지나이드 나노소재 기반 고신뢰성 상변화 메모리 나노소자 기술	정의	○ 다성분계 칼코지나이드 나노소재에서 신개념 동작 원리 기술 도입으로 초박막, 극소면적에서 저전력으로 동작하는 고신뢰성 상변화 메모리 소자 기술
	요소	- 10nm 이하의 칼코지나이드 소재에서 메모리 신뢰성 확보 기술

나노기술명	개요	
	기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 상변화를 위해 필요한 동작 전류 감소 기술</li> <li>- 상변화 메모리 소자의 저항 드리프트 현상 억제 기술</li> </ul>
고성능 저항변화 메모리 구현을 위한 나노스케일 필라멘트 제어 기술	정의	○ 저전력 고신뢰성 저항변화 메모리 구현하기 위한 원자 이동 제어 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노스케일 필라멘트를 균일하게 형성할 수 있는 소자 기술</li> <li>- 고온 리텐션 향상을 위해 형성된 필라멘트의 안정성 강화 기술</li> <li>- 필라멘트를 형성하는 원자/이온의 무작위 이동 억제 기술</li> <li>- 산화막 내에 필라멘트 형성에 참여하는 이온의 양 제어 기술</li> </ul>
초고속·저전력 및 고내구성 동시 구현 자성 메모리 나노기술	정의	○ 차세대 자화 반전 동작 원리가 채택된 자성 메모리를 구현하여 초고속 (<ns) 저전력 및 고내구성 (>1010) 을 동시에 확보할 수 있는 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1nm 이하의 두께로 구성된 40층 이상의 MTJ (Magnetic Tunnel Junction) 구조가 집적화 공정에서 받을 수 있는 데미지 최소화 및 Side-wall 기술</li> <li>- 20 nm 이하의 자성 메모리 집적화 소자/공정 기술</li> <li>- 스핀-궤도 토크 (Spin-Orbit Torque, SOT)와 같은 신개념 동작 원리를 갖는 소자 기술</li> </ul>
나노스케일 강유전체 기반 초고속·고신뢰 메모리 소자 기술	정의	○ 10nm 이하 면적에서의 이원계 강유전체 기반 초고속, 저전력 및 고내구성 메모리 동작 확보 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 초고속 스위칭, 고신뢰성 강유전체 초박막 제조 기술</li> <li>- 자가정류 특성 갖는 FTJ (Ferroelectric Tunnel Junctions) 소자 기술</li> <li>- 초고속, 고신뢰성 2단자 강유전체 소자 기술</li> <li>- 3D 적층의 강유전체 메모리 적합 셀렉터 제조 기술</li> </ul>
3차원 적층 가능 나노스케일 셀렉터 소자 기술	정의	○ 20nm 이하 면적에서도 높은 전류 밀도와 낮은 누설전류 동시에 확보할 수 있는 셀렉터 소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 셀렉터와 저항변화 메모리 소자 집적화 기술</li> <li>- 3차원 적층을 위한 저온 박막 증착 기술</li> <li>- 셀렉터의 면적 스케일링 시 전류 공급 능력 향상 기술</li> <li>- 저항변화 메모리 소자와 집적되기 위한 셀렉터 소자의 전압 및 전류 조절 기술</li> <li>- 저항변화 메모리와 집적화됨에 따라 2개의 소자 간 Intermixing 방지 등 신뢰성 강화 기술</li> </ul>

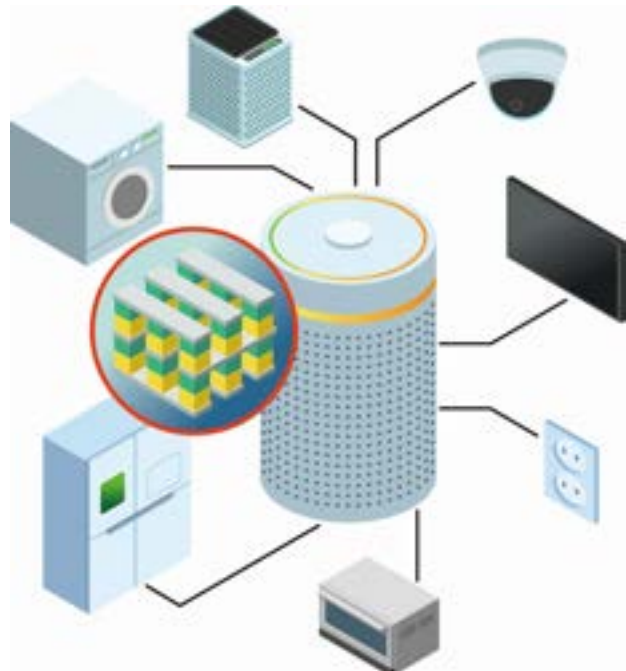
### 〈나노융합 기억소자 로드맵〉

종분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술								
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
나노융합 기억소자	초저전력 3차원 메모리 소자	저전력임은 크고 소비전력은 낮은 3차원 DRAM 구현	수직 적층 나노스케일 트랜지스터 기술	게이트 절연체 소재 개발 및 계면 결합 제어 기술/ 신소재 트랜지스터 특성 확보 기술			고유전율 박막 도핑 및 트랜지스터 누설 전류 최소화 기술					
			고신뢰성 커넥터 형성 기술	고유전율 소재/공정 기술			고충량 커넥터 구조 내 고유전율 소재 적용 기술					
	초고집적 3차원 스토리지 소자	저장용량을 극대화하기 위한 3차원 낸드플래시 제조 공정기술 및 초고집적 소자의 동작 신뢰성 확보	나노스케일 채널 홀 공정기술 기반 고집적 낸드플래시 소자 기술	고충량 커넥터 구조의 제작 및 채널 증식기술			멀티 스택 제작 기술 도입으로 각층 별 w/eon 기술					
			나노-피처 스케일링 가능한 3차원 낸드플래시 기술	낮은 비저항의 게이트 전극 소재 기술 및 균일 증착기술			고이동도 채널 소재 도입 및 기계적 스트레스 최소화 한 낸드플래시 기술					
			강유전성/저항변화 소자 기반 낸드플래시 기술	강유전성 및 저항변화 특성이 내추는 이형제 신소재의 증착 공정기술			높은 특성 균일도 확보 및 고내구성 및 높은 저항전 확보 기술					
	고신뢰성 플래시 메모리 소자	nm 사이즈의 극소 영역에 데이터를 장기간 보존 가능시켜 데이터를 읽고 쓰는 작업을 무한 반복해도 문제가 없는 저항변화 메모리 및 플래시 소자 구현	집적자-비드 기반 고신뢰성 상변화 메모리 나노소자 기술	나노스케일 필라멘트 균일 형성 및 필라멘트의 원자/이온 제어 기술			고온 저항성 향상을 위해 형성된 필라멘트의 안정성 강화 기술					
			나노스케일 필라멘트 제어 기술	이온 움직임 제어 기술			나노스케일 필라멘트의 균일 형성 및 안정성 강화 기술					
			초고속·저전력 및 고내구성 동시 구현 자성 메모리 나노기술	4층 이상 MUT 구조의 집적화 공정에서의 데이터 최소화 및 Side-wall 기술 20-nm 이하 STT 기반 자성메모리 집적화 기술			신형 자성층 합 (SOT) 기반 자성메모리 기술					
			나노스케일 강유전체 초고속·고신뢰 메모리 기술	자기장용 특성 FIJ 소자 기술			3D 적층 형태의 강유전체 메모리 적용 플래시 제조기술					
			3차원 적층형 나노스케일 셀렉트 소자 기술	3차원 적층 가능한 셀렉트 소자 기술			저항변화 메모리 집적화한 형태의 신소재 형성 기술					

### 〈나노융합 기억소자 대표제품〉



데이터 센터 내 초집적, 초저전력 3차원 나노소자



IoT 기기 내 나노소자

## 4-2. 나노융합 시스템반도체 및 전력소자

### 가. 초저전력 고속 로직 소자

#### 1) 개요

- (정의) 현존 최고 동작 속도를 보이는 저전력 로직 소자를 대체할 수 있는 나노로직 소자
- (필요성) 단순 소자 크기 제어를 통한 소자의 성능 개선 효과가 한계에 봉착하였으며, 이를 극복하기 위해 새로운 나노구조, 나노물질, 동작 원리를 기반으로 한 차세대 나노소자가 요구. 특히, 초저전력 고속 로직 소자 분야는 기술의 성숙도가 매우 높은 분야로 현존 기술을 완벽히 대체할 소자를 찾기 어렵기 때문에 일부 기술에 접목하는 방식의 접근이 필요
- (발전 전망) 새로운 나노소자 구조에서는 포크시트 FET (Forksheet FET, FSFET), 수직 채널 FET (Vertical FET, VFET), 상보형 FET (Complementary FET, CFET) 등이, 새로운 나노물질 및 동작 원리 측면에서는 터널링 FET (Tunneling FET, TFET), 음의 커패시턴스 FET (Negative Capacitance FET, NCFET), 2차원 물질 채널 FET (2D FET), 탄소나노튜브 트랜지스터, III-V족 물질 채널 FET 등이 활발히 연구. 이러한 접근법은 기존의 2차원 스케일링에서 3차원 스케일링 방식으로의 나노소자 구조의 전환 및 나노물질 적용을 의미하며, 시스템반도체의 지속적인 발전을 위한 동력원이 될 것으로 예상

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 데이터 처리속도는 빠르되 소비전력이 매우 낮은 로직 소자

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
Super-steep 물질이 갖는 hysteresis 특성으로 인한 문턱전압 변화	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ferroelectric 등 신물질 기반 super-steep SS(<math>&lt; 60</math> nm/dec) 소자들은 상(phase) 전환 과정 시 hysteresis가 발생하여 로직 회로의 오류 야기</li> <li>- Hysteresis를 감소를 위한 물질 연구가 진행되고 있으나, 근본적인 해결 단계에는 이르지 못한 문제</li> </ul>
고속 로직 소자 개발을 위해 필수적인 상전환 물질이 가진 느린 스위칭 속도	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 상전환 물질 사용 시, 상 전환 속도가 현재 로직 회로의 동작 속도에 요구되는 ps(<math>10^{-12}</math>초) 수준에 미치지 못하는 문제</li> <li>- Ferroelectric 물질의 경우, ns(<math>10^{-9}</math>초) 수준의 상 전환 시간을 가지는데, ps 수준의 동작에서는 상이 전환되지 않아 super-steep SS 등의 특성을 얻을 수 없는 한계</li> </ul>
비 실리콘계 물질을 활용 시 고성능 구현이 가능하나 기존 실리콘 CMOS 공정과의 장비 호환성 및 오염 문제	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 비 실리콘계 물질을 활용한 나노소자는 기존의 실리콘 나노소자 공정과 호환이 되어야 제품화까지 가능한 문제</li> <li>- 오염에 매우 민감한 나노소자 공정에서 실리콘 및 비 실리콘 간의 오염은 성능과 수율에 매우 치명적이므로 높은 순도가 요구</li> <li>- 비 실리콘계 물질의 공정이 실리콘 기반 공정과 호환이 어려울 경우, 다른 종류의 웨이퍼(III-V 웨이퍼 등)를 활용하거나 실리콘 공정과는 별도의 추가 공정이 필요하며, 이는 공정 비용 및 복잡성의 증가를 초래</li> </ul>

기술난제	개요
고성능 및 가격 경쟁력 확보를 위한 대면적 웨이퍼 스케일 공정의 균일도 및 신뢰성 확보의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 제품의 제조 단가 절감을 위해 대면적 웨이퍼 스케일에서의 높은 공정 균일도 및 신뢰성 확보 필요</li> <li>- 비 실리콘계 물질 (Graphene, CNT 등의 1D 및 2D 채널 물질, III-V 물질)은 대면적 웨이퍼 스케일 공정 기술 필요</li> <li>- 비 실리콘계 나노소자의 대면적 웨이퍼 상의 위치에 따른 공정 균일도가 아직 확보되지 않았으며, 물질 간 interface의 결함 제어, 채널 격자 구조, gate stack 구조, 및 contact (silicide) 구조 제어 등 공정 신뢰성 기술 필요</li> </ul>

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
Super-steep 특성의 나노소재 기반 초저전력 로직 소자 기술	정의	○ 60mV/dec 이하의 SS 특성을 보이거나 hysteresis 특성은 보이지 않는 로직 소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Super-steep 특성을 보이는 나노소재 및 이를 포함한 stack 구조 기술</li> <li>- 소자 동작에 불필요한 side effect (hysteresis, non-uniformity 등) 감소 기술</li> <li>- 실리콘 CMOS와 호환 가능한 substrate, Gate/Source/ Drain/Contact 공정 기술</li> <li>- 웨이퍼 레벨 대면적 집적이 가능한 소자 제작 기술</li> </ul>
외부 바이어스에 빠른 신호 전환이 가능한 나노소재 기반 고속 로직 소자 기술	정의	○ 본질적으로 게이트 전환 속도가 10ps 이하인 로직 소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ps(<math>10^{-12}</math>초) 수준의 동작 주파수 구현이 가능한 나노소재 개발 및 소자 기술</li> <li>- 기생 저항 및 캐패시턴스 저감을 위한 물질 및 소자 구조 기술</li> <li>- 실리콘 CMOS와 호환 가능한 substrate, Gate/ Source/ Drain/ Contact 공정 기술</li> <li>- 웨이퍼 레벨 대면적 집적이 가능한 소자 제작 기술</li> </ul>
실리콘 공정 기반 비실리콘계 나노소재 동시집적 기술	정의	○ 비 실리콘 나노소재 이용 시 기존 CMOS 공정과의 호환 또는 동시집적이 가능한 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고성능 차세대 p-형 반도체 및 MOSFET 개발 기술</li> <li>- 차세대 고성능 반도체 대면적 균일 저온 박막 공정 기술</li> <li>- 단일 3차원 수직 집적 공정 기술</li> <li>- 단일 3차원 집적 PIM/뉴로모픽 시스템 개발 기술</li> </ul>
비실리콘계 나노소재 기반 대면적 균일도 및 고신뢰성 확보 공정 기술	정의	○ 웨이퍼 스케일의 비 실리콘 나노소재 기반 제작 소자의 균일도 및 신뢰성 확보 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ALD/MOCVD/CVD용 저온 공정 2차원 소재의 전구체 기술</li> <li>- 진공 공정을 통한 웨이퍼 수준에 대면적 2차원 박막 형성 기술</li> <li>- 용액 합성용 2차원 소재 전구체 기술</li> <li>- 웨이퍼 수준 2차원 균일 특성 박막 형성을 위한 대면적 건식 전사기술</li> <li>- 2차원 반도체를 통한 웨이퍼 수준 단일 3차원 집적 PIM/뉴로모픽 시스템 개발 기술</li> </ul>



## 나. 신개념 로직 소자

### 1) 개요

- (정의) 신개념 기반 로직 소자는 front, middle, back end of line (FEOL, MOL 및 BEOL) 공정과 redistribution layer (RDL), Bridge 등의 package 공정 전반에 적용 가능한 나노로직 소자로, 기존 실리콘 CMOS와는 상당히 다른 기능을 기존 CMOS 공정에 접목하여 시스템 연산/에너지 효율을 개선하는 데 활용될 수 있는 새로운 나노소자
- (필요성) 최근 로직 기술은 FEOL 영역에서의 소자 스케일링을 넘어, 이종 집적 기술을 기반으로 다중 칩 수준에서의 시스템 최적화를 향해 발전. 이 때문에 단위 칩의 기능을 여러 칩으로 분산하는 과정에서 일부 기능에 특화된 소자로 전환하거나, 칩과 칩의 연결 부분에서의 새로운 병목현상을 제어하는 기술 등의 새로운 로직 기능에 대한 수요가 예상. 신개념 나노로직 소자는 CMOS 기반 신소자에 의존적인 FEOL 영역을 포함, MOL 및 BEOL 영역, 그리고 RDL, bridge 등의 package 영역에 새로운 로직 기능을 부여함으로써, 실리콘 CMOS 기반 시스템 대비 혼성시스템 성능 개선이 필요
- (발전 전망) 나노소재 기술 및 이종 집적 기술의 발전과 함께 새로운 로직 기능을 기존 CMOS 시스템에 융합하여 시스템의 연산/에너지 효율 한계를 돌파하려는 시스템 레벨의 수요변화에 따라, 기존에 연구 중인 다치로직, 자기 재구성 로직, 기계적 스위치, 스핀로직, 양자 컴퓨팅 등의 기술을 새로운 소자 환경, 새로운 개발 목표를 대상으로 한 연구가 이루어질 것으로 예상되며, 이를 통해 기존 시스템 성능을 대폭 향상시킬 것으로 기대

### 2) 미래핵심기술이슈 : 現 나노스케일 로직 소자 제작에 필요한 인프라를 활용하면서도 소자 성능을 대폭 향상시킬 수 있는 융합기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
다치로직을 통해 소자 성능 개선이 가능하나 중간상태 누설전류로 인한 소모전력 증가를 극복할 수 있는 기술의 부재	- 다치로직은 소자수, 배선길이를 30%이상 절감할 수 있으나, 중간상태의 누설전류로 전력효율 개선효과가 낮아지는 문제
자기재구성 소자에 적용 가능한 안정적인 N, P 형 극박막 소재 확보의 한계	- 원자층에 가까운 극박막 소재는 효율적인 게이트제어를 통해 자기 재구성 기능, 메모리 기능 등 다양한 기능구현이 가능하지만, 상온에서 안정적인 고성능 n, p형 극박막 소재 구현 필요 - 극박막 소재를 써야만 하는 장점이 있는 응용 기술 부족 - 기존에 제안된 Monolithic 3D 집적 기술은 이종 집적 기술의 발전에 따라 응용의 필요성이 낮아졌으므로, 자기 재구성 기능을 활용한 연산 효율 개선 방향으로 전환 필요

기술난제	개요
배선 소재의 경우 영률 특성으로 인해 기계적 스위치의 신뢰성과 동적 전압 간 상충관계 발생	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기계적 스위치 연구에 사용된 금속 배선 소재, 실리콘 등은 영률 특성의 한계로 미세화 따라 반발력이 약해서 반데르발스 힘에 의해 전극이 협착되는 문제 발생</li> <li>- RDL, bridge 등 새로운 구조, 새로운 동작 조건에서의 기술 적용 시도 전무</li> </ul>
처리 속도 향상을 위해 전자의 스핀을 활용하는 것이 필수적이나, 로직 소자 구현을 위한 소재 및 공정 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 스핀 주입 및 제어를 위한 소스와 드레인(S/D) 영역에 강자성체 물질 도입에 따른 증착, 식각, 열처리 등의 공정 호환성 확보 필요</li> <li>- 스핀 결맞음 구현을 위한 저차원 channel 물질, 그 외 S/D, Gate에 도입을 위한 신물질 합성 및 공정 조건과 기존의 CMOS 공정의 heat budget 안정화를 통한 특성 확보 필요</li> </ul>
기존 컴퓨터 성능을 대폭 뛰어넘을 수 있는 양자컴퓨팅 소자 개발 요구는 많으나, 구현을 위한 소재 및 대면적 가공 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 양자 소자의 발열을 최소화하기 위해 dielectric loss가 작고 열전도성이 좋은 최적의 물질 확보 필요</li> <li>- 마이크로미터 스케일의 정밀 레이저 가공 기술 개발 및 이에 용이한 소재 발굴 필요</li> <li>- 대면적/대용량 양자컴퓨팅 소자 제작을 위한 공정 자동화 필요</li> </ul>

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
3진법 이상 다치 레벨 상태의 나노소재 기반 차세대 로직 소자 기술	정의	○ 現 컴퓨팅 방식 대비 높은 정보 밀도로 정보처리가 가능한 로직 소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 영미분 전도 특성 소재 개발 기술</li> <li>- n형, p형 고성능 극박막 반도체 소재(결함밀도 &lt;math&gt;&lt; 105/cm^2&lt;/math&gt;) 기술</li> <li>- 다치로직 설계 자동화 기술</li> <li>- 저저항 contact 기술</li> <li>- 고성능/고신뢰성 극박막 절연체 기술</li> </ul>
외부 자극에 실시간 기능 변화가 가능한 나노소재 기반 로직 소자 기술	정의	○ 외부자극에 의해 로직기능을 재구성함으로써 연산효율, 에너지효율을 개선하는 데 필요한 로직 소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 스핀 소자, 극박막 소자 등 재구성이 가능한 로직 소자 기술</li> <li>- 재구성 로직을 활용한 연산 아키텍처 구현 기술</li> <li>- high on-off ratio 저항 변화 소자 등 재구성이 가능한 배선 소자 기술</li> <li>- 재구성 배선구조 활용 아키텍처 구현 기술</li> </ul>
나노전자 기계 시스템 기반 물리적 스위치소자 기술	정의	○ 배선, RDL, Bridge 등 단일칩 또는 이중 집적 시스템에 적용하여 연산효율, 에너지효율을 개선하는 데 필요한 물리적 스위치소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고신뢰성 물리적 스위치 조절이 가능한 고탄성/고전도 소재 기술</li> <li>- RDL 및 Bridge 구조 내에 구현 가능하거나, BEOL 배선 구조를 활용한 물리적 스위치소자 기술</li> </ul>
저차원 나노소재의 스핀 특성을 이용한 로직 소자 기술	정의	○ 저차원 나노소재(1D 및 2D) 기반의 스핀-FET 및 이를 위한 스핀 주입과 검출 소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 균일한 자성(수직 자기 이방성, 자구벽 에너지 등)의 분포를 갖는 magnetic contact 공정 기술</li> <li>- 스핀-궤도 결합(SOC) 적용 위한 강자성체/중금속 계면 최적화 기술</li> <li>- Electric-optic material, VDW crystal 등 Spin relaxation length가 극대화된 기능성 저차원 채널 소재 합성 기술 : Long-distance spin transport channel 소재 기술</li> <li>- 초고속 계면 스핀 제어 및 측정 기술</li> <li>- CMOS 공정 호환성이 있는 상온 spin injection/detection 기술</li> </ul>

나노기술명	개요	
고신뢰성·고안정성 양자컴퓨팅 소자용 표면 제어 기술	정의	○ 양자컴퓨터, 센서의 성능(큐비트 안정성, 조작 충실도)을 향상시킬 수 있는 나노소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 표면 조도(Ra)가 수 nm 정도의 매우 균질한 금속 표면 생성 기술</li> <li>- 레이저 가공 혹은 에칭 시 sidewall의 표면 거칠기를 최소화하는 가공 기술</li> <li>- 가능하다면 in situ로 트랩 표면을 cleaning할 수 있는 ion-beam bombardment 기술</li> </ul>

## 다. 전력반도체 소자

### 1) 개요

- (정의) 전력의 형태(직류 및 교류), 전압 및 전류의 크기 등을 변환하기 위해 전력 변환 회로에 사용하는 소자
- (필요성) 전기를 에너지로 사용하는 모든 전자 및 기계장치는 필요로 하는 전력량, 전압 및 전류 크기 등이 다르며, 해당 장치들이 요구하는 전력을 공급하기 위해 전력반도체가 필요
- (발전 전망) 전기자동차 생산의 폭발적 증가와 신재생에너지 발전소의 급격한 증가로 인해 직류 및 교류 전력을 손실 없이 효율적으로 변환할 수 있는 기술이 더욱 중요해지고 있으며, 고효율 전력 변환을 위해서는 저가, 고전압, 고성능, 고신뢰성을 바탕으로 Si, SiC, GaN 전력 반도체 소자의 중요성이 향상될 것으로 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 전력 변환 및 제어를 효율적으로 처리하기 위한 저저항 전력반도체 소자 구현

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
소자 크기 소형화와 고농도 불순물 주입을 위한 25nm 이하의 대면적 나노패터닝 기술의 부재	- 고밴드갭 반도체의 미세 나노패턴 (트렌치 게이트 폭, 채널 폭 등)을 형성하기 위해 레이아웃(마스크) 기술과 노광을 통해 패턴을 정밀하게 형성할 수 있는 기술 필요
6inch 이상 대면적의 고밴드갭 반도체에 3% 오차 이하의 불순물 농도를 조절하는 기술의 부재	- 낮은 저항 형성뿐만 아니라 고른 대면적 산포를 확보하기 위해 대면적 웨이퍼에서 낮은 농도의 불순물 조절 기술 필요 - 기존에 활용되는 화학 기상 증착법(CVD)을 통해 고밴드갭 반도체 대면적 웨이퍼에서 불순물 농도를 정밀하게 제어하는 기술은 현시점에서는 불가능

### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
나노스케일 셸피치 게이트(gate)기반 전력반도체 소자 기술	정의	○ 소자의 게이트 간격(셸피치)이 나노미터 수준인 전력반도체 기술
	요소 기술	- 직접도가 높은 트렌치 구조의 게이트 기술 - 고품질 산화막과 반도체의 계면 기술 - 고품질 나노산화막 성장 기술 - 나노트렌치 배선 증착기술 - 나노스케일 전력반도체용 사진 및 노광 기술
나노스케일 필라 간격 기반 나노셸피치 슈퍼정선 기술	정의	○ 소자의 필라(pillar) 간격(셸피치)이 나노미터 수준인 전력반도체 기술
	요소 기술	- 불순물 보상을 줄이기 위한 열공정 최소화 기술 - 고농도 불순물의 단결정 반도체 성장 기술 - 이온주입을 통한 불순물 오차 제어 기술 - MeV급 고온 이온주입 기술 - 나노스케일 필라 제작용 사진 및 노광 기술

### 3) 미래핵심기술이슈 : 고전압을 효율적으로 제어하기 위한 전력반도체 소자 구현

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
고밴드갭 반도체에 고농도 및 깊은 두께 불순물 주입을 위한 500℃ 이상의 고온, 1MeV 이상의 고에너지 이온주입 기술의 부재	- 전력반도체 소자가 높은 항복 전압을 얻기 위해 반도체를 p형으로 만들 수 있는 불순물을 높은 깊이로 이온 주입하는 기술 필요
고전압 구현을 위한 p형 고밴드갭 반도체 형성 기술의 부재	- 높은 항복 전압을 위해서는 낮은 드리프트 층의 불순물 농도가 필요하며, 높아진 저항을 상쇄시키기 위해 고밴드갭 반도체를 p형으로 만들어 정공을 주입할 수 있는 나노층 형성 기술 필요
저결함 단결정 고밴드갭 반도체 성장 기술의 부재와 전자와 정공의 재결합 에너지로부터 발생하는 반도체의 결함 제어 기술의 부재	- 높은 항복 전압을 위해서는 누설전류 최소화가 필수이며, 고밴드갭 단결정 소재를 고품질로 형성시킬 수 있는 기술 필요 - 특히 고밴드갭 웨이퍼의 결함으로부터 발생하는 후막 단결정 층의 결함을 차단하는 기술 필요

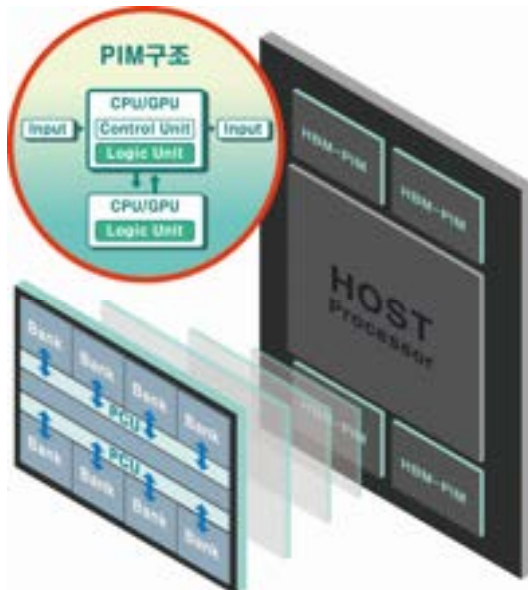
#### 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
저저항, 고속 스위칭 동시 구현 가능 나노스케일 고밴드갭 슈퍼정션 기술	정의 ○ 고밴드갭 물질로 이루어진 p형 필라와 n형 필라로 조합된 전력반도체 구조 기술
	요소 기술 - 슈퍼정션 구조 설계 및 시뮬레이션 기술 - 고밴드갭 물질의 단결정 적층 성장 기술 - 이온주입을 통한 불순물 오차 제어 기술 - MeV급 고온 이온주입 기술 - 나노스케일의 전사 및 노광 기술
높은 항복전압 구현 고밴드갭 양극 나노소자 기술	정의 ○ 높은 항복 전압을 위해 매우 낮은 불순물 농도와 두꺼운 드리프트 층을 가지는 소자, 전자와 정공의 동시 전도가 가능한 소자 기술
	요소 기술 - 양극 소자의 스위칭 구조 설계 및 시뮬레이션 기술 - 고밴드갭 물질의 단결정 성장 기술 - 전자와 정공의 생존 시간 조절 기술
저결함 단결정 기반 고전압 제어용 고밴드갭 나노버퍼층 성장 기술	정의 ○ 전자와 정공의 동시 전도가 가능한 저결함 단결정 고밴드갭 반도체 나노 소자 기술
	요소 기술 - 대면적 기판의 결함을 확장 시키지 않는 버퍼층 성장 기술 - 대면적 기판의 단결정을 구조를 유지시킬 수 있는 고속 버퍼층 성장 기술

### 〈나노융합 시스템반도체 및 전력소자 로드맵〉

중분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술										
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	
나노융합 시스템 반도체 및 전력소자	초저전력 고속 로직 소자	메이커 차세대는 배반된 소비전방이 매우 낮은 로직 소자	Super-slope 특성의 나노스케 7nm 초저전력 로직 소자 기술 저전력 배리어스케 배반 성능 향상을 위한 나노스케 7nm 고속 로직 소자 기술 실리콘 공형 기반 3D/4D/5D 나노스케 통합 기술 유일하게 나노스케 7nm 대면적 공형도 및 고신뢰성 확보 공정 기술	복합 설계된 On/Off 전층 특성의 소자 개발	소자층차별화된 side-effect 감소 기술					나노스케 안정성 확보 기술	실리콘 CMOS 배리어 효율 개선용 집적 기술			
	신개념 로직소자	핵 로직소자 제작에 필요한 인프라를 활용하면서도 소자성능을 대폭 향상시킬 수 있는 공정 기술	3D형 이점의 디바이스 개발을 위한 나노스케 7nm 차세대 로직 소자 기술 외부구조에 집적 가능한 초박막 나노스케 7nm 로직 소자 기술 나노스케 7nm 시트층 기반 몰리브덴 나노스케 기술 자외선 나노스케 스텝 수천을 이용한 로직 소자 기술 고신뢰성, 고전압, 양자효과를 소자용 표면 제어 기술	초고압 다차원적 집적 기술	단위 area 다차원적 시스템 기술	초저전력 3D형 로직 소자 개발	재구성 가능 및 혁신 구조를 활용한 3D 다차원적 집적 기술							
	전력 반도체 소자	전력 변환 및 제어를 효율적으로 제어하기 위한 차세대 전력 반도체 소자 구현 고전압을 효율적으로 제어하기 위한 전력 반도체 소자 구현	나노스케일 접합기 제어(IGBT) 기반 전계 반도체 소자 기술 나노스케일 접합기 기반 나노스케일 접합기 소자 기술 자외선, 고속 소류형 접합기 구현 가능 나노스케일 접합기 소자 기술 높은 접합압을 위한 고전압 접합기 나노스케일 접합기 소자 기술 저장압 안정성 기반 고전압 제어용 고전압 나노스케일 접합기 소자 기술	나노스케일 접합기 제어(IGBT) 기반 전계 반도체 소자 기술	나노스케일 접합기 제어(IGBT) 기반 전계 반도체 소자 기술	나노스케일 접합기 제어(IGBT) 기반 전계 반도체 소자 기술	나노스케일 접합기 제어(IGBT) 기반 전계 반도체 소자 기술	나노스케일 접합기 제어(IGBT) 기반 전계 반도체 소자 기술	나노스케일 접합기 제어(IGBT) 기반 전계 반도체 소자 기술	나노스케일 접합기 제어(IGBT) 기반 전계 반도체 소자 기술	나노스케일 접합기 제어(IGBT) 기반 전계 반도체 소자 기술	나노스케일 접합기 제어(IGBT) 기반 전계 반도체 소자 기술	나노스케일 접합기 제어(IGBT) 기반 전계 반도체 소자 기술	나노스케일 접합기 제어(IGBT) 기반 전계 반도체 소자 기술

### 〈나노융합 시스템반도체 및 전력소자 대표제품〉



차세대 PIM 인공지능 칩



이온트랩 기반 양자컴퓨터 내 전력 반도체 소자

### 4-3. 나노융합 지능형 소자 (로직-메모리 융합소자)

#### 가. Processing-in-memory (PIM) 소자

##### 1) 개요

- (정의) 메모리 (Memory)와 연산처리장치 (Processor) 간의 병목현상 (Bottleneck)을 해결하기 위해 고안된 메모리 기능과 연산을 동시에 수행할 수 있는 나노융합소자 제작 기술
- (필요성) 이미지, 소리 및 동영상 등과 같은 비정형화된 데이터 비중의 증가와 방대한 데이터의 빠른 처리를 요구하는 인공지능 기술의 발전에 맞춰 기존 폰 노이만(von Neumann) 구조의 한계를 극복하기 위한 새로운 컴퓨팅 아키텍처가 필요. 대부분의 현재 컴퓨팅 시스템은 메모리와 연산처리장치가 분리되어 연산 성능을 우선시 되어왔으나, 인공지능 및 딥러닝의 등장에 따라 처리해야 하는 데이터양과 연산량이 폭발적으로 증가하면서 방대한 데이터양의 이동으로 기존의 컴퓨팅 시스템에서는 메모리 기능 · 처리 속도가 한계에 도달. 데이터의 병목현상 해결을 위해 데이터 이동 경로 증축 및 길이 단축, 3D 적층 등의 메모리와 연산장치의 물리적 거리를 근접시키거나 적층 구조를 이용하여 대역폭을 확장시킨 near-memory computing이 등장하였으나, 계속해서 요구되는 고집적화에 근본적 한계가 존재. 또한, 결과적으로 메모리 칩 내부에 연산 기능을 수행하는 논리 회로가 추가되기 때문에 경제적 부담과 공정의 복잡도가 증대
- (발전 전망) CMOS와의 호환성이 높은 실리콘을 비롯한 저항변화 메모리 (RRAM), 강유전체 메모리 (FeRAM), 강자성체 메모리 (MRAM) 및 이차원 소재 메모리 등, 다양한 소재 기반의 메모리 소자 연구가 진행 중이며, 병렬 어레이 구조에 AND, OR, XOR, NOR 등과 같은 기본로직 연산이 결합한 PIM 반도체가 다방면으로 보고되어 현재까지 다양한 소재 기반의 고효율 · 고성능 메모리 기능에 학습이 포함된 특화 로직 연산을 적용한 PIM이 대규모로 확장되어 wafer-scale의 고성능 메모리 · 연산 융합 컴퓨팅 아키텍처가 구현될 것이며, 나아가 고차원의 학습 알고리즘과 결합한 IoT, 무인 자동차 및 인공지능 기술의 핵심 기술로 자리 잡을 것으로 기대

##### 2) 미래핵심기술이슈 : 데이터 저장 및 연산 기능을 동시에 가진 융합형 컴퓨팅 아키텍처 구현

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
빅 데이터 병목현상을 극복할 수 있는 메모리와 연산소자가 융합된 고집적이 가능한 병렬 컴퓨팅 아키텍처 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고집적이 가능한 NAND 구조를 이용하거나, 논리 연산 수행이 가능한 고집적 embedded Flash memory 어레이 아키텍처 개발 및 개선 필요</li> <li>- 차세대 embedded flash memory 고성능화를 위한 다양한 나노신소재와 연산 아키텍처 개발 필요</li> </ul>

기술난제	개요
강유전체 특성 확보 시 필요한 높은 열처리, 제작 및 구동 시 열화 현상 문제	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 페로브스카이트 계열의 CMOS 공정 호환성 및 하프니아 산화물 기반의 높은 열처리 온도 완화 필요</li> <li>- fatigue 및 imprint 등의 열화 현상 완화 필요</li> <li>- 고효율 2단자(FTJ, Ferroelectric Tunnel Junctions) · 3단자(FeFET) 연산 아키텍처 및 집적화 공정 개발 필요</li> </ul>
저전력에서 빠르게 스핀 스위칭이 가능한 MRAM 소재 부재 및 고집적 아키텍처 설계 기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 낮은 전류에서의 자화 반전과 빠른 스위칭이 가능한 신자성 및 스핀 전달 소재 기술 필요</li> <li>- SOT-MRAM 어레이 기반의 고차원 학습이 가능한 특화 논리 연산 아키텍처 설계 및 수행 기술 필요</li> </ul>

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
실리콘 기반 나노eFlash 저항 변화 소자 및 논리 회로 기술	정의	○ 시스템 회로 내부에 설계된 나노eFlash 구조 기반 채널의 저항 변화를 통해 논리 연산을 수행하는 나노소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 실리콘 기반 나노eFlash 저항 변화 소자 확보를 위한 게이트 산화물 적층 기술</li> <li>- 고집적 eFlash 기반 어레이를 위한 박막 기술</li> <li>- eFlash 소자 기반 논리 회로 설계 및 시뮬레이션 기술</li> </ul>
나노스케일 저항 변화 메모리 (RRAM) 기반 in-memory 기술	정의	○ 나노스케일 저항변화 메모리 (RRAM) 소자를 활용하여 다양한 논리 게이트를 구현하고 이를 바탕으로 연산 회로를 구현하는 나노소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 저항 변화 메모리 소자의 필라멘트 제어 기술</li> <li>- 소자의 가변성을 줄이기 위한 제작 및 공정 기술</li> <li>- 6bit 이상의 가중치 변화를 선형적으로 제어할 수 있는 기술</li> <li>- 누설 전류 (sneak path current) 현상을 억제할 수 있는 기술</li> </ul>
강유전체 나노소재 기반 메모리 (FeRAM) 기반 in-memory 기술	정의	○ 나노강유전체의 분극 방향에 따른 터널링 저항 변화(2단자) 또는 채널 전류 변화(3단자)를 이용해 메모리 기능과 논리 연산을 동시다발적으로 수행하는 in-memory 컴퓨팅 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 강유전체의 분극 도메인 형성 및 제어 기술</li> <li>- 강유전체 소자의 동작 전압 범위 확대 및 높은 내구성 · 신뢰성 확보 기술</li> <li>- 강유전체 기반 새로운 구조의 메모리 소자 제작 및 어레이 공정 설계 기술</li> <li>- 어레이 내의 선택적 단일 셀 거동 및 논리 연산 구현 기술</li> </ul>
자기저항 메모리 (MRAM) 기반 in-memory 나노기술	정의	○ 자화 방향에 따른 자기저항변화에 기반한 비휘발성 특징을 이용해 나노스케일 메모리 기능과 논리 연산을 동시다발적으로 수행하는 나노소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 낮은 동작 전압 및 빠른 자화 스위칭을 위한 소재 분석 및 구조 설계 기술</li> <li>- 고신뢰성 및 높은 열적 안정성을 갖는 대용량 MRAM 제작 기술</li> <li>- 고차원 학습이 가능한 논리 연산 아키텍처 설계 및 수행 기술</li> </ul>
이차원 나노소재를 이용한 메모리 소자 디자인 및 연산 아키텍처 기술	정의	○ 이차원 나노소재를 활용해 다양한 구조의 메모리 소자를 제작하여 PIM 기능을 수행할 수 있는 나노소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 어레이 제작을 위한 고품질 · 대면적 이차원 소재 성장 기술</li> <li>- 다양한 구조 기반 메모리 소자 제작 기술</li> <li>- PIM 기능 수행을 위한 병렬 어레이 회로 설계 및 논리 연산 기술</li> </ul>



## 나. 뉴로모픽 소자

### 1) 개요

- (정의) 뉴로모픽 소자는 두뇌와 신경 세포의 동작 원리를 모사하여 고차원 학습, 인지, 및 추론 기능을 보다 에너지 효율적으로 수행할 수 있는 인공 신경망, 즉 인공 뇌를 구현하는데 요구되는 나노소자 기술
- (필요성) 기존의 폰 노이만 구조의 컴퓨팅 시스템은 중앙처리장치와 정보 저장 소자가 분리되어 있기에 병목현상이 발생하여 많은 양의 정보처리에 한계를 갖고 있으며 많은 에너지를 요구. 또한, 빅데이터로 인해 연산 처리량이 더욱 급격하게 증가함에 따라, 데이터를 효율적으로 처리하는 시스템 개발의 필요성 증대되면서, 컴퓨팅 전력 소비를 줄이고, 대규모 정보 처리에 효율적인 컴퓨팅 시스템을 구축하는 새로운 방식 중 하나로 인간의 두뇌 속 신경계가 동작하는 여러 인공신경망 방식들이 개발
- (발전 전망) 뉴로모픽 하드웨어를 구성하는 전자소자에 따라 인공시냅스 소자, 인공뉴런 소자, 그리고 stochastic 스위칭을 이용한 확률스위칭 소자로 나눌 수 있으며, 인공시냅스 소자는 차세대 메모리로 각광받고 있는 멤리스터(양이온 방식, 음이온 방식), PRAM (Phase-change memory), FeRAM (Ferroelectric 메모리), MRAM (Magnetic 메모리) 및 기존 3단자 메모리인 SRAM, DRAM, 플래시 메모리를 이용하여 인공시냅스 소자에 관한 연구가 진행. 개발된 소자를 이용하여 대규모 인공시냅스 어레이 설계 및 구동시스템을 확보하여 빅데이터를 효율적으로 처리할 수 있는 시스템에 활용 가능할 것으로 기대. 인공뉴런 소자는 Ovonic Threshold Switch (OTS) 소재, 금속 산화물, 강유전체 전해질 및 이차원 물질 등 다양한 소재를 활용하여 2단자 멤리스터 및 3단자 트랜지스터 기반 인공뉴런 소자에 관한 연구도 진행. 개발된 소자를 기반으로 대규모 인공뉴런 소자 어레이를 설계하고 이를 활용하여 고효율 뉴로모픽 하드웨어 시스템을 구현할 것으로 기대. 확률스위칭 소자는 나노포어, 배리스터, 강유전체 field effect transistor 기반의 2단자 소자와 3단자 소자로 구현 가능할 것으로 기대

### 2) 미래핵심기술이슈 : 매우 방대한 양의 데이터를 짧은 시간 내에 효율적으로 처리 가능한 인공신경망 시냅스 및 시큐리티 소자 구현

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
데이터 열화 없이 높은 안전성으로 구동할 수 있는 신뢰성 높은 인공신경망 시냅스 소자 기술의 한계	- 시냅스의 중요한 성능(보존성, 내구성, 높은 전류비, 다치레벨)을 만족시킨 상황에서 소자 간/사이클 간 높은 스위칭 신뢰성 요구

기술난제	개요
셀 간의 낮은 변동성을 가지는 동작 및 고수율이 가능한 고집적 시냅스 어레이 제작 기술의 한계	- 데이터 열화 없이 높은 안전성으로 구동할 수 있는 신뢰성 높은 인공신경망 시냅스 소자 기술 필요
외부 해킹이 불가능한 시큐리티용 순수 난수 발생이 가능한 소자 및 어레이 기술의 부재	- 단위 소자 간 불균일성(같은 set 전압 분포 또는 같은 current range 동작)이 동일한 소자 및 어레이 개발 필요

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
ANN(Artificial Neural Network) 연산용 2단자 기반 저항 변화를 활용한 시냅스 나노소자 기술	정의 ○ 활성 물질을 외부 자극에 의해 변화시킴으로써 저항변화(가중치 변화)를 일으키는 시냅스 나노소자 기술
	요소 기술 - 대용량 어레이를 만들었을 때, 안정적인 동작을 위한 소자의 신뢰성 개선 기술 - 데이터 유지 기술, 내구성 확보 기술, 데이터 저항값 차이 확보 기술 - 저전력 스위칭 확보 기술 - 빠른 데이터 업데이트를 위한 데이터 업데이트 선형성 확보 기술
트랜지스터 구조 기반 ANN 연산용 시냅스 나노소자 기술	정의 ○ 기존 트랜지스터 구조변화 없이 채널 또는 게이트옥사이드 층 만의 변화를 통해 문턱 전압 또는 채널 저항을 조절하여 메모리(인공시냅스) 역할을 할 수 있는 나노소자 기술
	요소 기술 - 채널 도핑 농도에 따른 고성능 소자, 저전력 소자 등 다양한 응용에 맞게 변형 가능한 기술 - 대용량 어레이 제작을 위한, 소자 간 산포 및 수율을 확보하는 소자의 신뢰성 개선 기술 - 데이터 유지 기술, 내구성 확보 기술, 데이터 저항값 차이 확보 기술 - 잦은 프로그래밍을 위한 저전력 스위칭 확보 기술
암호화 소자(PUF, Physically Unclonable Function)용 나노소자 기술	정의 ○ 하드웨어 소자 내부에서 난수를 발생시켜 외부에서 소프트웨어적으로 외부 해킹이 불가능하게 하는 나노소자 기술
	요소 기술 - PUF 구성요소(Uniqueness, Reliability, Uniformity 등)에 맞는 소자 개발 기술 - 어레이 기술에 접목하기 위한 수율 개선 기술 - 소자 내에서 순수 난수 생성 기술
ANN 시냅스 나노소자 및 PUF용 어레이 개발 및 동작 기술	정의 ○ PIM용 시냅스 나노소자 및 PUF 소자를 대용량 어레이로 제작하는 기술 과 어레이 내 소자를 동시에 동작시키기 위한 회로 개발 기술
	요소 기술 - 어레이 수율 확보 기술 - 어레이 동작을 위한 1R, 1T1R, 1S1R 구조 설계 기술 및 주변 회로의 저전력 및 소자 동시 액세스를 위한 회로 설계 기술 - 어레이(MAT)의 연결을 통한 BANK 단위 연구개발 기술

### 3) 미래핵심기술이슈 : 뉴로모픽 하드웨어 시스템을 고효율 인공뉴런 소자/어레이 개발 및 인공 시냅스와의 통합형 네트워크 시스템 설계 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
시그널 출력 열화 없이 저전력으로 구동하는 고내구성 인공뉴런 소자 기술의 부재	- 고내구성 및 저전력의 인공뉴런 소자 구현을 위한 다양한 신소재 및 아키텍처 개발 필요
고집적 인공 시냅스-뉴런 어레이 아키텍처 기술의 부재 및 성능 최적화 모델링 기술의 한계	- 균일한 성능 산포도를 갖는 고집적도 인공뉴런 어레이 공정 및 성능 feedback 기술을 위한 자체 시뮬레이션 모델링 개발 필요

#### 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
멤리스터 구조 기반 인공뉴런 나노소자 기술	정의	○ 인공신경망 및 인공뉴런의 기능을 모사할 수 있는 멤리스터 구조 기반 나노 소자 기술
	요소 기술	- 고내구성 소자 제작을 위한 다양한 소재에 따른 동작 원리 규명 및 개선 기술 - 소비 전력 감소를 위한 동작 전압 및 대기 전류 레벨 감소 기술 - 고집적화를 위한 소자 크기의 소형화 및 수직 적층 기술 - 인공뉴런 동작으로 위한 학습 알고리즘 및 모델링 기술 - 인공시냅스와 통합 시스템 어레이 확장 기술
3단자 트랜지스터 구조 기반 인공뉴런 나노소자 기술	정의	○ 게이트(Gate), 드레인(Drain) 및 소스(Source) 3가지 전극으로 구성되며 단일 소자 혹은 수동 소자와 조합되어 드레인 혹은 게이트 전극에 충분한 전기 신호가 입력되었을 때, 출력 신호를 발현하는 나노소자 기술
	요소 기술	- 적절한 도핑 농도 조절을 통한 트랜지스터 소자 제작 기술 - 드레인 전극의 기생 커패시턴스를 이용하여 생물학적 축전 및 발화(Integrate & Fire) 현상을 모방하는 기술 - 게이트 전극에 인가되는 전압을 조절하여 인공뉴런 소자의 출력 신호 주파수를 조절하는 기술 - 포토센서와 같은 감각소자 또는 인공시냅스 소자와의 연결 강도에 따라 인공 뉴런 소자의 출력 신호 주파수를 조절하는 기술
인공뉴런 나노소자 어레이 개발 및 모델링 기술	정의	○ 개발된 인공뉴런 소자를 활용하여 생체 신경 모방 네트워크 구축을 위한 소자 어레이 개발 및 시뮬레이션을 위한 모델링 기술
	요소 기술	- 스케일 확장을 위한 웨이퍼-수준의 소자 집적 공정 기술 및 일관된 성능을 낼 수 있는 어레이 공정 최적화 기술 - 집적소자 성능 feedback 과정을 위한 시뮬레이션 및 소자 모델링 기술 - 고집적도 인공뉴런 소자 어레이를 위해 최적화된 로직 아키텍처 설계 기술 - 인공뉴런 소자 어레이와 인공시냅스 소자 어레이의 네트워크 시스템 설계 기술

#### 4) 미래핵심기술이슈 : 인간의 뇌와 유사한 기능을 가진 확률스위칭 소자 구현

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
인간 뇌의 저전력 구동 원리를 모사하는 뉴로모픽향 확률 스위칭 나노소자 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 원하는 혹은 지정된 확률로 스위칭이 일어날 수 있는 확률스위칭 소자 개발 필요</li> <li>- 스위칭 횟수와 무관하게 일정한 확률스위칭 특성을 보이는 소자 개발 필요</li> <li>- 사람 두뇌의 확률론적 동작 원리에 바탕을 둔 확률 기반 학습/인식 알고리즘 설계 필요</li> <li>- 이와 동시에 하드웨어에 적용 시 효율적 동작이 가능한 알고리즘 기술 필요</li> </ul>

#### 4-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
수동형/능동형 확률스위칭 나노소자	정의	○ 인간의 두뇌신경에서의 확률론적 동작 원리를 모사할 수 있는 지능형 소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고 제어성/신뢰성 확률스위칭 소자 기술</li> <li>- 수동형 확률스위칭 소자 제작 기술</li> <li>- 능동형 확률 조절 스위칭 소자 제작 기술</li> <li>- 사람 두뇌의 확률론적 동작 원리에 바탕을 둔 확률 기반 학습/인식 알고리즘 설계 기술</li> </ul>
3차원 확률스위칭 나노소자 어레이 기술	정의	○ 확률스위칭 나노소자를 수직 방향으로 적층할 수 있는 3차원 어레이 공정/제조 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 확률론적 소자 플랫폼 기술: i) 이단자 구조 기반의 수동형 확률론적 시냅스 소자 설계/제작/개발. ii) 삼단자 구조 기반의 능동형 확률론적 시냅스 소자 설계/제작/개발</li> <li>- 수평 및 수직 방향에 대한 확률스위칭 소자 고신뢰성 적층 기술</li> <li>- 선별된 소자 어레이 선별 후, 패턴 공정을 통한 3차원 확률론적 시냅스 어레이 설계/제작 기술</li> <li>- 웨이퍼 스케일링 가능한 확률론적 시냅스 구동층의 웨이퍼 스케일 확장 기술</li> <li>- 각 단계별 소자 및 어레이 특성 평가/최적화 기술</li> </ul>

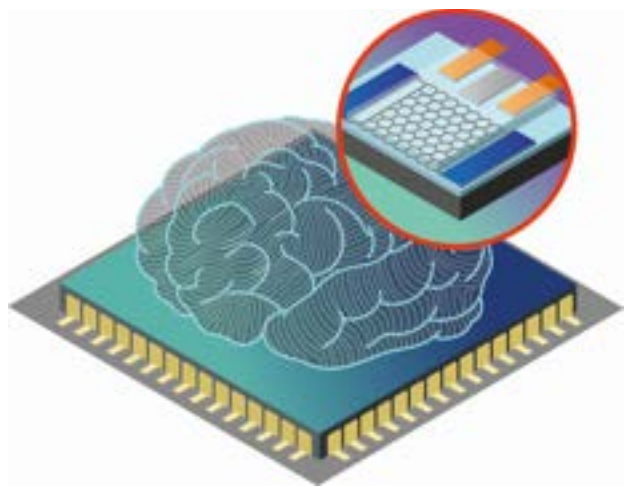
### 〈나노융합 지능형 소자 로드맵〉

종분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술										
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	
나노융합 지능형 소자 (로직-메모리 융합소자)	Processing-in-memory 소자	데이터 저장 및 연산 기능을 동시에 가진 융합형 컴퓨터 아키텍처 구현	실리콘 기반 나노 eFlash 저장 변위 소자 및 논리 회로 기술	실리콘 기반 나노 eFlash 저장 변위 소자 확산을 위한 제1회 신제품 개발 기술/2차세대 eFlash 기반 제2차세대 변위 소자 기술										
			나노 스케일 저장 변위 메모리 (1T1R) 기반 In-memory 기술	eFlash 소자 기반 논리 회로 설계 및 시뮬레이션 기술										
			강유전체 나노 소자 기반 메모리 (1T1R) 기반 In-memory 기술	물리변위를 제어하는 기술/변위 제어 기술										
			자기유전 메모리 (MRAM) 기반 In-memory 나노 기술	50nm 이하의 기공치 선형 제어 및 누설 전류 제어 기술										
			다차원 나노 소자 및 이종전 메모리 소자 구현 및 연산 아키텍처 기술	공유전 분극 도메인 형성 및 제어 기술/분극 전압 범위 확대 및 높은 내구성 - 신소재 확보 기술										
	뉴로모픽 소자	매우 상대적 영미 데이터에 짧은 시간 내에 효율적으로 처리 가능한 인공신경망 시스템 및 시뮬라티 소자 구현	1T1R/1T2R 구조 기반 저장 변위를 활용한 시스템 나노 소자 기술	소자 신뢰성 기술/데이터 내구성 확보 기술/데이터 저장 및 제어 기술										
			1T1R/1T2R 구조 기반 1T1R/1T2R 시스템 나노 소자 기술	저전력 시스템 제어 기술/데이터 선형성 확보 기술										
			3차원 구조 기반 나노 소자 기술	고성능 소자, 저전력 소자 등 다양한 응용에 맞게 변형 가능한 기술										
			3차원 구조 기반 나노 소자 및 1T1R/1T2R 구조 기반 나노 소자 기술	소자간 상호 작용을 확보를 위한 소자 신뢰성 기술/데이터 유지, 내구성 확보 기술/데이터 저장 및 제어 기술										
			수용형 뉴로모픽 소자 및 1T1R/1T2R 구조 기반 나노 소자 기술	1T1R 구조에 맞는 소자 개발 기술										
뉴로모픽 소자	뉴로모픽 하드웨어 시스템을 고도로 인공화된 소자/아키텍처 개발 및 인공 지능 시스템의 통합된 하드웨어 시스템 설계 기술 개발	1T1R/1T2R 구조 기반 인공 뉴로 소자 기술	인공 뉴로 모픽을 위한 학습 알고리즘 및 모델링 기술/인공 지능 시스템 아키텍처 개발 기술											
		3차원 구조 기반 인공 뉴로 소자 기술	생물학적 특성을 모방하는 소자 제어 기술											
		인공 뉴로 소자 아키텍처 개발 및 모델링 기술	데이터에 의한 출력 신호 처리/수출 호환하는 기술											
		수용형 뉴로모픽 시스템 나노 소자	데이터-수용형 소자 집적공정 기술 및 공명 회로 기술/정밀 feedback 조절을 위한 시뮬레이션 및 소자 모델링 기술											
		3차원 뉴로모픽 나노 소자 아키텍처 기술	차세대 3차원 뉴로모픽 설계 기술											
뉴로모픽 소자	인공 지능 하드웨어 시스템을 고도로 인공화된 소자/아키텍처 개발 및 인공 지능 시스템의 통합된 하드웨어 시스템 설계 기술 개발	수용형 뉴로모픽 시스템 나노 소자	고대역폭 인공 지능 수용형 뉴로모픽 시스템 소자 제어 기술											
		3차원 뉴로모픽 나노 소자 아키텍처 기술	확률론적 동작/데이터 방향을 본 학습/인식 알고리즘 설계 및 시스템 설계 기술											
		수용형 뉴로모픽 시스템 나노 소자	3차원 뉴로모픽 시스템 소자 모델링 기술/2차원 학습 기술											
		3차원 뉴로모픽 나노 소자 아키텍처 기술	확률론적 시스템 아키텍처 설계/데이터 인식/처리 기술											
		수용형 뉴로모픽 시스템 나노 소자	3차원 뉴로모픽 시스템 아키텍처 설계/데이터 인식/처리 기술											

### 〈나노융합 지능형 소자 대표제품〉



엣지 컴퓨팅 내 PIM 소자



인공지능 컴퓨팅 시스템 내 뉴로모픽 소자

## 4-4. 나노융합 정보표시소자

### 가. 실감형 디스플레이

#### 1) 개요

- (정의) 현실과 동일한 가상/증강현실 공간의 화상 표현을 위해 다양한 초점거리 및 시점을 초고 해상도와 자연색 수준으로 표현할 수 있으며, 시각 외 공감각까지 표현하는 나노광학소자 기술
- (필요성) 메타버스를 통한 효과적인 상호 소통을 위해서는 가상현실/증강현실에서도 현실과 구분이 되지 않는 수준의 실감 입체영상과 공감각 정보 제공이 필요. 시각적으로는 XR (eXtended Reality), 홀로그램 기술에서 높은 수준의 초실감을 구현하기 위한 3차원 공간 실감 디스플레이 광소자 기술 개발이 필요하며, 화상의 현실감 확보를 위해 해상도, 휘도, 색 순도, 시야각 등의 성능을 크게 개선하면서 소형화/집적화 및 저전력 구동이 가능한 디스플레이 광소자 기술과 시청각과 함께 촉각을 포함한 동시 공감각을 통해 현실감을 극대화하는 기술이 필요
- (발전 전망) 향후 안경 형태의 투시형 디스플레이 기반의 3차원 입체영상 표현 기술이 메타버스 시대의 핵심적인 디스플레이 기술로 자리매김할 것으로 예상되며, 이후 비착용형 3차원 공간 실감 디스플레이 기술로 변모하고, 나아가 3차원 실감형 입체영상을 즐기게 되면서 시각뿐만 아니라 후·촉·청각을 동시에 실감하는 기술 요구가 증대될 것으로 전망

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 시각, 청각 및 촉각을 통해 실시간 소통이 가능한 디스플레이 구현

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
광원의 크기는 작으나 매우 밝은 빛을 낼 수 있는 소재 및 소자 기술의 부재	- 발광소자의 소형화에 따른 급격한 휘도 저하 방지 나노소자 제조 기술 필요 - 나노발광소자의 고수율 화소 집적화 기술 필요
광학계 크기의 물리적 한계를 극복하여 초박형 실감 디스플레이를 구현할 수 있는 기술의 부재	- AR/VR 렌즈의 큰 부피에 따른 소형화/박막화 및 저 색수차, 고 광효율이 가능한 나노광학소자 설계 기술 필요 - 초박형 나노광학렌즈의 나노구조 대면적 고정밀 제조 기술 필요
공간적으로 빠르게 빛을 제어할 수 있는 능동 광학계의 소형화 한계	- 공간 광변조 소자의 좁은 시야각을 개선하기 위한 초고집적 나노집적소자 설계 및 제작 기술 필요 - 광변조 소자 소형화를 위한 복소 광변조가 가능한 나노광학 구조 설계/제작 및 능동 구동 기술 필요
이용자가 디스플레이를 통해 시각 및 청각뿐만 아니라 실시간으로 현장감을 느낄 수 있는 촉각 액추에이터의 부재	- 단순한 압각뿐만 아니라 다양한 촉각 (eg. 온/냉/통각 및 부드러움, 거친 느낌 등)을 느낄 수 있도록 하기 위한 햅틱 액추에이터의 광대역의 주파수, 진동 가속도, 자극 시간 및 냉온 감각 구현 나노액추에이터 제조 및 구동 기술 필요

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
초고휘도 나노발광소자 기술	정의	○ 초 현실감을 구현할 수 있는 초고해상도, 고색순도, 초고휘도를 갖는 디스플레이 광원 나노소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고효율/고휘도/고색순도 발광 나노소자 기술</li> <li>- 고직진 평행광 기술</li> <li>- R/G/B 수직 집적 탠덤형 나노소자 기술</li> <li>- 초고해상도 구현이 가능한 나노패턴 및 공정 기술</li> <li>- 백플레인 CMOS 집적 기술</li> <li>- 플렉서블 디스플레이 적용 페로브스카이트 자발광 소자 기술</li> </ul>
초박형 나노광학렌즈 기술	정의	○ 나노구조에 의해 광파의 위상을 제어하여 초박 구조로 결상이 가능한 AR/VR용 나노광학렌즈 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전가시광 대역에서 높은 광효율 및 낮은 색수차를 가지는 초박형 나노광학 메타렌즈 구조 설계 기술</li> <li>- 초박형 나노광학렌즈 대면적 제조를 위한 나노공정 기술</li> </ul>
공간 광변조 나노광학소자 기술	정의	○ 나노광학 구조에 의해 빛의 위상, 진폭 등을 독립적으로 능동 제어하여 3차원 공간의 고해상도, 광시야각 고품질 이미지 형성이 가능한 입체영상 디스플레이용 나노광학소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 초미세 나노패턴 형성 및 초고해상도 패널 및 광변조 소자 기술</li> <li>- 복소 광변조가 가능한 능동 나노광학 구조 설계 및 측정 기술</li> <li>- 광시야각을 가지는 초고집적 나노집적소자 설계 및 구동 기술</li> <li>- 고해상도 복소 광변조 메타표면 제작을 위한 나노공정 기술</li> </ul>
주파수 및 진폭 광대역 햅틱 액추에이터 나노소자 기술	정의	○ 다양한 촉각을 구현할 수 있는 햅틱 액추에이터 나노소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 진동 주파수와 진폭 및 진동 가속도와 진동 자극 시간을 광대역으로 구현할 수 있는 나노소자 기술</li> <li>- 순간적으로 온도를 조절하여 온/냉을 느낄 수 있게 하는 나노소자 기술</li> </ul>

## 나. 프리폼 디스플레이

### 1) 개요

- (정의) 형태 변형이 자유롭고 자유표면에 부착이 가능하며, 스트레칭 및 폴딩과 같은 극한의 변형에도 내구성이 우수하고, 설치장소에 구애받지 않으며, 시각적인 전달뿐만 아니라 공간 감각까지 표현하기 위해 유연성 및 고연신률의 특성을 포함한 나노발광소자 기술
- (필요성) 기존 디스플레이는 다양한 장소 및 표면 설치에 제한적이며, 이에 광원 및 구동 부분에서 모두 유연성과 신축성을 보유함과 동시에 변형된 형태에서 시인성이 훼손되지 않아 유선형의 건물 외장 벽면, 인체, 차량 내/외부 등 설치장소를 구애받지 않는 프리폼 디스플레이의 필요성이 대두
- (발전 전망) 자유곡면에 설치가 가능해야 하므로 픽셀을 구성하는 광원 및 구동 회로 부분이 유연성 및 신축성을 가질 수 있는 나노소재 및 구조의 개발이 촉구. 변형이 자유로운 나노소재를 기반으로 한 광원 및 나노전자소자 개발에서 시작하여 고 신축성, 다축 변형, 자유곡면에 부착 가능한 디스플레이 기술로써 구현되어 가는 방향으로 발전되어 나갈 전망. 또한, 기존에는 변형 곡률 반경이 큰 굽힘과 롤링이 국소 부분에 국한된 폴딩 제품이 상용화되었으나, 향후 곡률 반경이 작은 자유 변형 및 스트레칭이 가능하면서 화상과 해상도 왜곡이 없는 자유 변형 디스플레이로 발전할 것으로 예상

### 2) 미래핵심기술이슈 : 자유변형 및 자유곡면 사물 일체형 디스플레이

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
디스플레이의 다축 신축에 따른 내구도 저하 문제	- 고 신축성, 고 내구성의 화소 광원 개발 필요 - 나노소재 및 구조 기반 고 유연/다축 신축용 백플레인 소자 기술 필요 - 내구성 및 다기능성 확보를 위한 이중 집적 기술 필요
디스플레이의 다축 신축에 따른 해상도 저하 및 화상 왜곡 문제	- 단일/이/삼축 변형 시 디스플레이의 해상도 변화 및 화상 왜곡이 없는 나노소자 기술 필요

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
프리폼 디스플레이 백플레인용 고 신축·고 변형 나노소자 기술	정의 ○ 높은 신축성을 가져 다축 변형이 가능하며 디스플레이 성능을 그대로 유지할 수 있는 나노소자 기술
	요소 기술 - 고 신축성 배선/전극/기판용 나노구조 및 공정 기술 - 고 신축성 나노소자 집적 기술 - 초고연신율용 나노소자 구조 설계 기술 - 다축 변형 시 해상도 유지가 가능한 화소 및 구동회로 설계 및 제조 기술 - 고 신축 열성형이 가능한 3차원 입체 인몰드형 일렉트로닉스 소자 기술



나노기술명	개요	
해상도 및 화상 변질 방지용 디스플레이 프론트플레인 나노소자 기술	정의	○ 다축 변형 및 신축에 따라 해상도 및 화상 변화가 없는 디스플레이 프론트플레인용 나노소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고 신축성 프론트플레인용 나노구조 및 공정 기술</li> <li>- 다축 변형 시 해상도 유지가 가능한 화소 및 구동회로 설계 및 제조 기술</li> </ul>

## 다. 투명 디스플레이

### 1) 개요

- (정의) 창문과 같이 투명한 디스플레이 장치로써, 디스플레이 너머의 사물이 보이며 화상을 나타내는 프론트 패널과 구동 회로가 있는 백플레인 모두 고 투명도를 가지는 디스플레이 기술 구현 기술
- (필요성) 투명 디스플레이는 빛을 투과하는 성질을 지닌 투명한 패널을 이용하여 정보표시 및 상호 소통이 가능한 장치로, 투명한 특성 때문에 주변 환경과 조화를 이룰 수 있어 심미성이 뛰어나지만 뿐만 아니라 자동차 유리, 가정용 창문, 엘리베이터, 광고판, 생활 가전 등 다양한 곳에 광범위하게 활용할 수 있으며, 디스플레이 플랫폼으로서 화상 정보와 화상 너머의 현실 정보를 동시에 활용하거나 필요로 하는 이동 수단, 산업, 교육, 오락 및 의료현장에서 증강현실에서 매우 중요한 부분을 차지
- (발전 전망) 고 투과율 달성을 위해 투과율이 높은 나노소자 구조를 개발하는 것이 필수적이며, 주변 온도나 밝기와 같은 환경 변화에 맞게 능동적으로 투과율 조절이 가능한 소재 및 소자를 개발하는 방향으로 발전할 전망. 또한, 투명도의 부분적 조절을 통해 화상을 명확하게 보여주면서도 주변 환경은 고 투명도로 보여주는 기술이 개발될 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 스마트 투명 디스플레이

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
고 투명도 디스플레이 소재/소자의 부재	- 높은 투명도에도 저항이 변하지 않는 투명 전극 개발 필요 - 고 투명도 및 고 성능을 갖는 반도체 소재 개발 필요
능동형 투과율 가변형 소재/소자의 부재	- 주변 환경 변화에 맞게 능동적으로 투과율을 가변할 수 있는 소재 및 소자 구조 기술 개발 필요

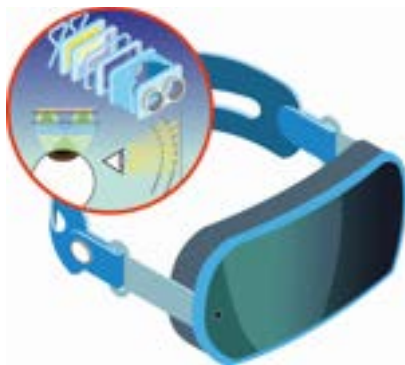
#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
고 투명도 저 전력 구동 나노소자 및 투명배선 기술	정의 ○ 투명 디스플레이를 구성하는 백플레인, 발광소자, 기판 등이 투명하면서도 높은 전기적/물리적/화학적 특성을 갖는 소재 및 소자 제조기술
	요소 기술 - 고 투명 p-type 반도체 및 트랜지스터 소자 기술 - 고 투명도 및 고 전기전도도 전극 및 나노소자 기술 - 얇은 두께에서도 높은 광 효율을 가지는 투명 디스플레이 발광 나노소자 기술 - 투명한 나노소재 및 소자 제조 기술
능동형 투명 조절 디스플레이 나노소자 제조 기술	정의 ○ 온도나 밝기와 같은 주변 환경 변화에 맞게 투과도가 능동적으로 변하는 투명 디스플레이 나노소자 기술
	요소 기술 - 온도 및 밝기에 따라 투과도가 자동으로 조절될 수 있는 전극 및 나노소자 제조 기술 - 고 투명도 나노전극 및 나노소자 기술 - 고 투명도를 유지할 수 있는 디스플레이 구조 및 집적 기술

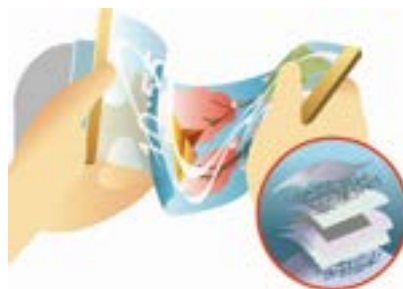
### 〈나노융합 정보표시소자 로드맵〉

종분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술									
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
나노융합 정보표시소자	실감형 디스플레이	시각, 청각 및 촉각을 통해 실시간 소용이 가능한 디스플레이 구현	초고해상도 나노발광소자 기술	UV/UVB 수직입사형 발광형 나노소자 기술		고효율/고전도/고색순도 나노발광소자 기술							
			초박형 나노광학렌즈 기술	백광렌즈 CAOS 집적 기술		초고해상도 구현이 가능한 나노렌즈 및 공정기술							
			공간 광변조 나노광학 소자 기술	초박형 나노광학 렌즈 구조 설계 기술		초박형 나노광학 렌즈 대면적 제조를 위한 나노공정기술							
			주파수 및 진폭 광대역 범위 액추에이터 나노소자 기술	초고해상도 패턴 및 광변조소자 기술		고효율 나노광학구조 설계 및 측정 기술		고해상도 복소광변조 대면적 제조를 위한 나노 공정기술					
	프리폼 디스플레이	자유변형 및 자유곡면 시뮬레이션 기반 프리폼 디스플레이 구현	프리폼 디스플레이 백광렌즈 고신축-고변형 나노소자 기술	고신축성 백광/편광/가변용 나노구조 및 공정기술, 고신축성 나노소자 집적 기술		초고전신율용 나노소자 구조 설계 기술/ 다축 변형시 웨스 및 구동회로의 설계 및 제조 기술		자유곡면 나노소자 기술					
			해상도 및 화상 변질 방지용 디스플레이 프리폼렌즈 나노소자 기술	고신축성 프리폼렌즈용 나노구조 및 공정기술		다축 변형시 웨스 및 구동회로의 설계 및 제조기술		자유곡면 나노소자 기술					
			고투명도 저안티구동 나노소자 및 투명 백선 기술	고투명/고전기전도도 투명계 프리폼렌즈 나노소재 및 소자 기술									
			능동형 투명조절 디스플레이 나노소자 제조기술	고투명도 저안티구동 디스플레이 나노소자 기술									
	투명 디스플레이	스마트 투명 디스플레이 구현	고투명도 저안티구동 나노소자 및 투명 백선 기술	고투명/고전기전도도 투명계 프리폼렌즈 나노소재 및 소자 기술									
			능동형 투명조절 디스플레이 나노소자 제조기술	투명도 자동 조절 가능 나노소재 기술									고투명도 유지 디스플레이 구조 및 나노소자 기술

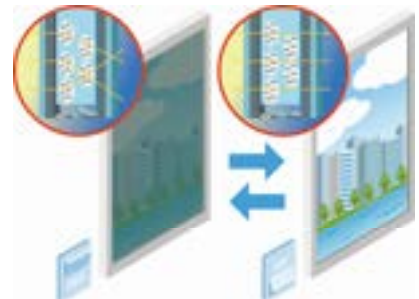
### 〈나노융합 정보표시소자 대표제품〉



스마트 글래스 내 나노광학소자



프리폼 디스플레이 내 나노소자



스마트 윈도우 내 나노소재

## 4-5. 나노융합 포토닉스소자

### 가. 스마트 광 배선/통신 소자

#### 1) 개요

- (정의) 광전자공학을 기반으로 광자 혹은 빛으로 정보를 통신하기 위한 나노배선 및 나노소자 개발 기술로써 기존의 장거리 광통신 이외에도 중거리(데이터센터 등) 및 단거리(칩간/칩내 통신 등) 통신이 가능한 기술. 광원인 반도체 레이저 다이오드, 빛을 전기 신호로 부호화하는 광변조기, 저손실로 빛을 전파하는 광도파로, 광을 검출하는 광 검출기 및 이를 통합하는 각종 도파로 소자 등의 배선/통신용 소자로 구성
- (필요성) 급격한 모바일기기의 보급 및 빅데이터, 인공지능 기술의 등장으로 데이터가 폭발적으로 증가하면서, 근거리 통신 중 하나인 Cloud 서버용 데이터센터에서의 병목현상이 대두되며 데이터센터에서의 수많은 서버와 배선들을 원활히 연결할 수 있는 저렴한 배선 기술이 필요. 또한, 앞으로의 빅데이터를 이용한 인공지능 기술, 고성능 컴퓨터의 입출력 배선, 초고해상도 디스플레이를 이용한 메타버스 기술 등을 위한 칩간/칩내 (chip-to-chip/intra-chip)에서의 고속 및 고효율의 스마트 배선 기술이 시급히 요구
- (발전 전망) 앞서 언급한 근거리 통신 중 Cloud 기반 데이터센터의 광배선 기술에서 인공지능/고성능 컴퓨터 기술을 위한 칩간/칩내 광배선 기술 발전 전망. 이를 위해 로직-to-로직 (e.g. CPU-GPU), 로직-to-메모리 (e.g. CPU or GPU-DRAM) 에서의 대역폭 밀도를 수 Tbps/mm에서 수십 Tbps/mm으로 발전할 것으로 예상

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 초고집적, 초고속, 초고효율의 광통신 소자 및 배선 기술

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
초고속 데이터통신에 따른 광 트랜시버(광 변조기) 소비전력 증대	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 칩간/칩내 근거리 통신에서 증가하는 통신량 대비 소비전력 증가에 따른 광 트랜시버 구성 전기광학 소자들의 고효율화 필요</li> <li>- 특히, 통신량 증가에 따라 소비전력에서 가장 큰 비중을 차지하는 광 변조기의 고효율화를 통해 소비전력을 저감할 수 있는 차세대 광변조기 설계, 제작 기술 개발 필요</li> </ul>
광전소자의 초고집적화 및 소형화 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 초고집적도의 칩간/칩내 스마트 배선을 위해 현재 금속 배선기술과 경쟁할 수 있는 나노기술 기반의 초저손실 광 도파로 및 광전소자 설계, 제작 기술 필요</li> </ul>

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
초고속, 초고효율, 초저전력 나노광 변조기 기술	정의	○ 초고속 및 초고효율 특성을 갖는 광변조기 기술 개발을 통해 테라스케일 인터커넥트를 초저전력으로 가능하게 하는 광변조기 설계 및 제작 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 광 위상 이동기 설계 및 제작 기술</li> <li>- 광 간섭계/공진기 설계 및 제작 기술</li> <li>- 고감도 광 흡수기 설계 및 제작 기술</li> <li>- 광 트랜시버 고집적 기술</li> </ul>
초저손실 나노기술 기반 광 도파로 및 이를 이용한 광전 소자 기술	정의	○ 초저손실 및 초소형의 광 도파로 및 이를 활용한 광전자소자 기술을 통해 광집적회로의 초고집적을 실현하는 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노기술(플라즈모닉스)에 기반한 광도파로 및 광전자소자 설계/제작 기술</li> <li>- Si 기반 이종 재료 집적 기술</li> </ul>

## 나. 광 컴퓨팅 소자

### 1) 개요

- (정의) 전자 대신 빛의 우수한 성질을 이용하여 데이터 처리가 가능한 컴퓨팅 구현 기술
- (필요성) 광 컴퓨팅은 기존의 전자소자를 이용한 폰 노이만 컴퓨팅의 한계를 뛰어넘는 초고속 및 초저전력 컴퓨팅을 가능하게 하는 기술로, 대용량 데이터를 빠르게 처리하기 위해 필요성이 대두되었으며, 나아가 기존 컴퓨터가 갖고 있는 전류의 흐름에 의한 발열 문제를 해소하기 위한 대안으로 제시. 특히, 광통신 기술로 시작된 Si photonics 등의 나노집적 광학 소자 및 소재 기술을 이용해 기존의 광 컴퓨팅 기술을 발전시킬 필요성이 대두되며, Si photonics 기술을 필두로 한 나노집적 광학 기술을 이용해 다양한 인공지능 및 양자컴퓨팅 하드웨어를 광으로 구현하려는 연구도 활발히 진행
- (발전 전망) 기존에는 광파이버나 III-V 화합물 반도체를 이용한 소자 이외에도 Si photonics 집적 광학 회로를 이용한 회로 레벨의 광 컴퓨팅 소자 기술이 주로 연구됐으나, 최근에는 집적 광학 회로 위에 광학 비선형/비휘발성 나노소재를 집적한 포토닉스 소자 및 광 컴퓨팅 소자 구현 연구가 활발히 진행. 또한, MEMS photonics 기술을 이용한 광 컴퓨팅 소자의 연구도 제안되고 있으며, 이와 같은 기술을 통해 기존의 전자소자를 이용한 컴퓨팅 소자로는 달성할 수 없는 초고속/초고효율의 연산/인공지능/양자 응용을 위한 소자를 실현하면서도 기존의 광통신과도 시너지를 낼 수 있는 소자와 시스템을 실현할 수 있을 것으로 기대

### 2) 미래핵심기술이슈 : 비선형 광학 소자 및 비휘발 광학 소자를 활용한 광 컴퓨팅 나노소자

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
대규모 광 컴퓨팅을 위한 옵티컬 노드 급증에 따른 소비전력 증가를 억제할 수 있는 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 광 컴퓨팅을 위해서는 대규모의 광 입출력 포트(N port)가 필요하며, 이를 제어하기 위해서는 아키텍처에 따라서 <math>N^2</math>개 이하의 광 스위치가 필요</li> <li>- 전통적인 방법으로 광 스위치를 제어하기 위해서 열 광학(thermo-optic) 효과를 주로 사용했으나 이는 스위치 수가 늘어날수록 막대한 전력을 소모</li> <li>- 소모 전력을 줄이면서 효율적으로 광스위칭을 할 수 있는 소재 및 구조의 탐색 필요</li> </ul>
양자 광학 등 극도로 약한 빛을 처리하기 위한 초저손실 광소자 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 대규모 광 컴퓨팅 기술을 위해서는 수많은 광 스위치 등의 광소자가 필요하게 되며, 이 스위치 등을 지나가면서 광 흡수 등에 의해 광신호가 열화되는 문제</li> <li>- 광신호의 열화는 시스템 전체의 효율에 영향을 주며, 특히 양자 소자 등의 매우 약한 빛을 증폭 노이즈 등이 없이 처리하기 위해서는 초저손실 광 소재 및 구조 개발 필요</li> <li>- LiNbO<sub>3</sub>나 AlN 등과 같은 초저손실 광 비선형 소재의 광소자 응용 및 고품질화가 제안되고 있으나, 기존의 Si photonics와 쉽게 호환될 수 있는 광소자의 초저손실/초고효율화 연구가 촉구</li> </ul>

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
비휘발 광학 소자 기반 저전력 광 컴퓨팅 나노소자 기술	정의	○ 비휘발성 나노소재 및 나노구조를 이용한 광학 비휘발 소자
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 광학적으로 비휘발성 혹은 bistable 특성을 보이는 구조 및 소재 탐색 및 집적 기술</li> <li>- 비휘발성 소재 및 구조를 이용한 초저전력 광 스위치소자 기술</li> </ul>
저손실/비선형 광학 소자 기반 광 컴퓨팅 나노소자 기술	정의	○ 저손실 나노소재 및 나노구조를 이용한 광학 비선형 소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 레이저, 모듈레이터, 디텍터 등의 광소자에 광학 비선형 재료 및 구조를 접목한 비선형 광학 소자 기술</li> <li>- LiNbO<sub>3</sub>, AlN, BaTiO<sub>3</sub> 등의 비선형 소재의 집적광학 소자 개발, 혹은 Si photonics 등의 platform과 통합 기술</li> <li>- 광학 비선형성을 이용한 광 컴퓨팅 소자/회로를 위한 설계 및 공정 기술</li> </ul>

## 다. Photonic Integrated Circuits (PIC) 감지 소자

### 1) 개요

- (정의) 회절 및 간섭 등 빛 고유의 특성 활용을 극대화하기 위해 다수의 광학 소자를 높은 밀도로 집적시킬 수 있는 집적광학계를 활용한 나노감지소자
- (필요성) 기존에는 다양한 형태의 나노기술을 활용한 감지 소자 혹은 센서 소자가 존재하나, 원리상 정확성/정밀성, 재현성, 센싱 선택성 등의 한계가 존재. 한편, 빛을 이용한 감지 소자는 상기 특성들을 보완하며 매우 우수한 감지 특성 확보가 가능하지만, 현재 기술은 bulky한 광학계를 사용하여 scalability에 단점이 존재. 따라서 초소형화 및 고집적이 가능한 PIC 기반의 감지 소자 개발이 시급
- (발전 전망) PIC를 활용한 감지 소자는 대표적으로 LiDAR(Light Detection and Ranging)로 불리는 3차원 공간 감지 소자, 가스/바이오 분자 등의 물질을 비화학적으로 감지하는 light-matter interaction 기반 감지 소자를 생각할 수 있으며, 기존의 기타 원리에 기반한 센서 대비 초소형화가 가능하고 정밀도, 재현성, 선택성 측면에서 매우 큰 장점을 보유하므로, 향후 자율주행차 분야, 의료분야, 안전 분야 등에서 활용 가능한 형태로 발전할 것으로 예상

### 2) 미래핵심기술이슈 : 초소형, 초고정밀, 초고속, 광대역 PIC 기반 감지 소자

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
미래 이동체가 요구하는 고감지거리, 고공간분해능, 고속 3D 공간 감지 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 단순 물체의 3D 공간 감지가 아닌 미래의 이동체에 적용하기 위한 감지 소자는 고 감지 거리, 고 공간 분해능, 고속 특성이 필요하여 이를 위한 PIC 설계, 제작 기술 개발 필요</li> <li>- 특히 단순히 기존의 Si photonics 기술의 확장으로는 이러한 특성 확보가 불가하며 상술한 3D 공간 감지 성능을 달성하기 위해서는 III-V/Si hybrid 나노소자 개발 필요</li> </ul>
가스, 바이오 물질, 바이러스 등 다양한 물질 감지를 위한 범용성 확보의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Light-matter interaction은 물질 종류에 따라 그 특성이 매우 민감하여 물질의 지문이라 불리지만 범용적으로 사용하기 위해 넓은 파장 범위(광대역)에 적용 가능한 감지 플랫폼 필요</li> </ul>

### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
실리콘-화합물 반도체 소재 융합 및 광 집적회로 (PIC) 기술 기반 고품위 나노감지소자 기술	정의	○ 고 감지 거리, 고 공간 분해능, 고속 특성을 가지는 PIC기반 공간 감지 센서 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고속 빔 조향을 위한 PIC 내장형 파장 및 위상 튜닝 기술</li> <li>- 초고효율(초저손실) 안테나 기술</li> <li>- 초고민감 광검출기 기술</li> </ul>

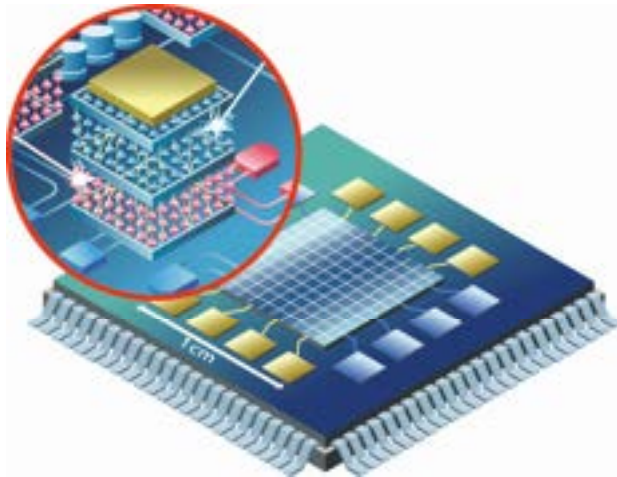


나노기술명	개요	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- III-V/Si 이종 집적 기술</li> <li>- 초고속 위상제어 알고리즘 기술</li> </ul>
<p>초고정밀, 고민감, 광대역 특성 보유 광 집적회로 기반 나노감지소자 기술</p>	정의	<p>○ 넓은 파장 범위 (광대역)을 세밀하게 감지하기 위해 빛-물질 상호작용을 기반으로 한 광집적회로 나노감지소자 기술</p>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Light-matter interaction 극대화를 위한 웨이브 가이드 제작 기술</li> <li>- Spectrometer 제작 기술</li> <li>- 광대역 대응 PIC 플랫폼 제작 기술</li> <li>- 광대역 광검출을 위한 광검출기 집적 기술</li> </ul>

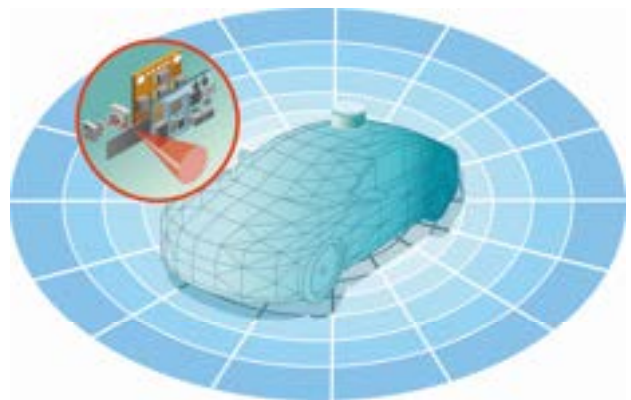
### 〈나노융합 포토닉스소자 로드맵〉

중분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술								
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
나노융합 포토닉스 소자	스마트 광 배선/통신 소자	초고선형, 초고속, 초고출력의 광통신 소자 및 배선 기술	초고속, 초고출력, 초저전력 나노광연조기 기술  초저손실 나노기술 기반 광도파로 및 이를 이용한 광전소자 기술	광 회상 어레이 설계 및 제작 기술 고강도 광 흡수기 설계 및 제작 기술		광 간섭계/공진기 설계 및 제작 기술					광트랜시버 고집적 기술	
	광 컴퓨팅 소자	비선형 광학 소자 및 비파괴 광학 소자를 활용한 광 컴퓨팅 나노소자	비파괴 광학 소자를 활용한 저전력 광 컴퓨팅 나노소자 기술  저손실/비선형 광학 소자를 활용한 광 컴퓨팅 나노소자 기술	비파괴 또는 bistable 재료의 광학 기술		광집적회로용 집적 기술				광집적 회로 및 대규모 어레이 기술		
	Photonic integrated circuits (PIC) 감지소자	초소형, 초고정밀, 초고속, 광대역 PIC 기반 감지소자	실리콘-회합물 반도체 융합 광집적회로 기반 고효율 나노감지 소자 기술  초고정밀, 고민감, 광대역 광집적회로 기반 나노감지 소자 기술	고속 범 조영을 위한 패턴 및 위상 형성 기술 UV-DI 어종집적 기술		초저손실 연배나 기술/초고전압 광모듈기 기술					초고속 위상제어 및 고저조 기술	
				고속 범 조영을 위한 패턴 및 위상 형성 기술 UV-DI 어종집적 기술		초저손실 연배나 기술/초고전압 광모듈기 기술					초고속 위상제어 및 고저조 기술	
				Light-matter interaction 극대화를 위한 광도파로 제작 기술 광대역 광검출기 집적 기술						Spectrometer 제작 기술 / 광대역 대용 PIC 플랫폼 제작 기술		

### 〈나노융합 포토닉스소자 대표제품〉



광 컴퓨팅 나노소자



라이다 센서 내 나노감지소자

## 4-6. 나노융합 센서 소자

### 가. 화학센서

#### 1) 개요

- (정의) 선택적이고 가역적인 화학반응을 통해 특정 분석 물질의 농도 및 전체 조성을 이에 대응되는 전기적 신호로 변환함으로써 관련 정보를 디지털화하여 분석할 수 있는 고감지 나노 화학 센서
- (필요성) 우수한 감지 능력, 높은 선택성, 저렴한 제조 비용, 넓은 감지 범위, 소형화 용이성, 연속적 감지 능력 등의 장점을 기반으로, 환경 모니터링, 산업 공정 모니터링, 가스 성분 분석, 의료 등 다양한 응용 분야에 효과적으로 활용이 가능한 기술로 반드시 필요
- (발전 전망) 화학적 작용을 기반으로 한 다양한 종류의 화학 센서 중에서도 특히 실생활과 건강에 밀접한 연관이 있는 가스 센서 기술은 나노기술을 토대로 민감도 및 선택도 등의 감지 특성을 향상할 수 있을 뿐만 아니라 전자코와 같은 응용 기술을 토대로 우리 삶과 더욱 긴밀한 상호작용을 할 것으로 기대

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 극소량으로도 실시간 감지가 가능한 고성능 나노가스센서 기술

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
공기 중에 존재하는 다양한 가스 중 특정 가스의 감지 및 정밀한 검출의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 대기 중 오염물질 감지와 같은 실생활 속 응용을 위해서는 저농도의 가스를 더욱 정확히 감지할 수 있는 기술 필요</li> <li>- 실생활에서는 다수의 가스가 혼재되어 있으므로 이러한 환경에서 높은 선택성을 토대로 특정 가스를 정확히 감지할 수 있는 기술 필요</li> <li>- 다수의 화학물질이 혼재된 휘발성 화학물질을 종합적으로 감지하여 분석할 수 있는 전자코 기술을 기반으로 질병 진단 및 식품 품질 관리 등에 응용</li> </ul>

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
고감도 및 고 선택성 나노가스센서 기술	정의	○ 다양한 가스가 혼합된 환경에서 특정 가스에 대한 높은 민감도 및 높은 신뢰도로 선택적인 감지가 가능한 나노소재 기반 가스 센서 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노소재 및 복합소재 기반 고 민감도 고 선택성 가스 감지막 기술</li> <li>- 다공성 나노필터막 기술</li> <li>- 다수의 나노가스 센서 집적 및 통합 기술</li> <li>- 다중 복합신호 해석 및 분석기술</li> </ul>

## 나. 물리센서

### 1) 개요

- (정의) 인간의 피부 및 장기 등 유연하고 불규칙적인 표면에 부착되어 대상의 기계적 변화를 감지하여 다양한 물리량을 측정하는 MEMS/NEMS 기반의 유연 센서
- (필요성) 스트레처블한 기판 위에서 다양한 센서 기능을 실현하기 위해서는 외부 자극에 대한 저항, 정전용량, 압전, 정전, 초전 특성을 이용한 다양한 나노소재 기반의 압력, 온도, 미끌림, 재질 등 감지 센서들이 반드시 필요
- (발전 전망) 유연한 기판 위에서 다양한 물리량을 감지하며 다른 물리량들을 선택적으로 디커플링하여, 보다 고감도/다기능성의 센서 개발 및 무전원, 무선통신 기술을 접목한 실용도 높은 집적화된 센서 개발 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 유연하면서도 내구성이 우수한 3차원 나노물리센서

#### 2-1) 개요

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
3차원 구조의 특성상 외부 응력에 취약한 내구성	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 유연 물리센서의 내구성을 증가시키기 위해 변형 시 발생하는 응력들이 국소 부위에 집중되지 않도록 분산시키는 기술 필요</li> <li>- 응력 완화를 위한 나노구조체 및 나노소자 집적화 기술 필요</li> <li>- 응력 완화 및 나노소자 보호를 위한 패키징 기술 필요</li> </ul>

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
응력집중 방지용 나노복합체 기반 유연 나노센서 기술	정의	○ 유연 나노센서 변형 시 응력 집중을 막기 위한 유연 패키징 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노복합체 합성 기술</li> <li>- 응력 완화 구조 설계 기술</li> <li>- 나노복합체 기반의 패키징 기술</li> </ul>

### 3) 미래핵심기술이슈 : 고감도 및 다기능성 햅틱센서 구현

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
다양한 물리량 감지 및 민감도 향상을 동시에 구현 가능한 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 구체화된 촉각을 감지하기 위해 다양한 물리량들을 구분하고, 동시에 감지할 수 있는 기술 필요</li> <li>- 기존의 햅틱센서는 단순한 진동 또는 압력을 감지하는 수준이며, 진동의 진폭과 주파수를 함께 분석하며 구체화된 촉각을 묘사하고 감지하는 기술 필요</li> <li>- 민감도 향상을 위해 단위 전극들의 크기를 줄이고 집적화하는 기술 필요</li> </ul>

기술난제	개요
변형 등의 외부 자극이 촉각 감지에 영향을 미치는 문제	- 물리적 접촉에 의한 전기적 특성 변화를 통해 감지하는 압저항/정전용량식 물리센서의 특성상 기계적 변형에 의한 영향은 불가피 - 센서 감도를 떨어뜨리는 원초적인 원인인 기계적 변형에 대해 독립적인 감지 기술 개발 필요

### 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
세밀한 촉각 묘사가 가능한 고감도 나노물리센서 기술	정의 ○ 나노스케일 전극 어레이 기반 민감도 향상 기술 및 진동의 진폭, 주파수 등의 물리량을 동시에 감지하는 압저항/정전용량식 촉각 센서 기술
	요소 기술 - 압전 센서 및 압전 액츄에이터 제작 기술 - 센서 전극 어레이 형성 및 나노화/집적화 기술 - 진동의 진폭 및 주파수 동시 감지 센서 기술 - 전극 간 신호 상호간섭 방지 기술
기계적 변형에 독립적인 촉각 감지 나노기술	정의 ○ 외부 자극에 의한 촉각 감지 영향과 전극 간의 상호간섭을 최소화하는 기술
	요소 기술 - 기계적 변형에 둔감한 전극 구조 설계 기술 - 촉각 센서 민감도 향상 기술 - 전극 간 신호 상호간섭 방지 기술

### 4) 미래핵심기술이슈 : 특정 물리량 또는 변형 축에 대한 선택적 감지 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
특정 물리량에 대한 선택적 감지의 한계	- 불필요한 물리량에 의한 영향을 디커플링하는 기술 필요 예) 온/습도 영향을 받지 않는 힘, 압력센서
특정 변형축 변화에 대한 선택적 감지의 한계	- 특정 변형 축에 의한 영향을 디커플링하는 기술 필요 예) 촉방 압력은 제외하고 수직 압력만을 측정하는 센서

### 4-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
사용자 선택적 특정 물리량 감지 나노센서 기술	정의 ○ 불필요한 물리량은 선택적으로 걸러내고 사용자가 원하는 물리량만을 감지하는 물리센서 기술
	요소 기술 - 유연/신축성 물리센서 제작 기술 - 물리량 선택적 감지를 위한 나노복합체 및 구조체 제조 기술
나노구조체 기반 이방축 감지 물리센서 기술	정의 ○ 외부에서 압력 인가 시 촉방 압력은 제외하고 수직 압력만을 선택적으로 정확히 감지 가능한 나노물리센서 기술
	요소 기술 - 유연/신축성 물리센서 제작 기술 - 전극 패턴 기술 - 특정 축에 대한 선택적 감지를 위한 나노구조체 제조 및 전극 설계 기술

## 5) 미래핵심기술이슈 : 무전원, 무선 센서 기술

### ○ 기술난제

기술난제	개요
무선 센서의 막대한 양의 데이터 전송 및 처리의 한계	- 전극의 수가 많아짐에 따라 수신되는 데이터 양이 기하급수적으로 증가하게 되므로 이를 안정적으로 전송하고 처리하는 무선전송 기술 필요
무선 센서의 충분한 전원 공급의 한계	- 전극의 수가 많아지고 처리하는 데이터 양이 많아질수록 필요한 전력도 많아지게 되므로, 안정적인 센서 구동을 위한 회로의 저전력 설계 및 충분한 전력 공급 기술 필요

## 5-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
나노소재 기반 고효율 무선 전력 전송 기술	정의	○ 나노입자 혹은 박막을 이용한 전자기장 제어를 통한 고효율 무선 전력 공급 기술
	요소 기술	- 무선 전력 공급용 안테나 기술 - 나노페라이트 입자 혹은 박막 기술
자가 발전 나노센서 기술	정의	○ 압전, 열전 등의 나노전극을 활용한 자가 발전 기술
	요소 기술	- 유연/신축성 물리센서 제작 기술 - 압전, 열전 센서 기술 - 나노전극 어레이 집적화 기술

## 다. 광학센서

### 1) 개요

- (정의) 비접촉식 센서의 일종으로 광학 신호인 빛을 감지하고 그 세기의 정도를 전기적 신호로 출력하는 나노센서
- (필요성) 광학센서는 카메라에 사용되는 이미지 센서를 넘어 가전제품, 조명산업, 의료기기, 분석기기, 자동차 분야, 안전 감지 등 다양한 응용 분야에 활용 가능. 특히, 비접촉 감지에 기반한 광학센서는 다른 접촉형 센서와는 달리 물리적인 오류를 방지할 수 있고 우수한 감지 능력을 갖추고 있어 많은 분야에 활용 가능. 현재 산업 전반에 걸쳐 기술에 대한 완성도가 높은 편이나, 새로운 응용 분야의 개발 및 초고성능 이미지 인식 기술에 대한 수요 등에 의해 지속적인 기술 개발 필요
- (발전 전망) 더욱 선명한 이미지 인식을 위한 고해상도 이미지 센서 기술, 수차에 의한 이미지 왜곡을 방지하기 위한 곡면형 이미지 센서 기술, 뉴로모픽 컴퓨팅 시스템 및 인간의 시각 인식 기능을 모방을 위한 광전자 시냅스 소자 기반 뉴로모픽 이미지 센서 등으로 발전될 것으로 예상

### 2) 미래핵심기술이슈 : 나노스케일에서도 감지력이 우수한 고해상도 CMOS 이미지 센서 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
고집적도를 위해 광센서가 소형화됨에 따라 센서 수광 특성 저하	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 단위 면적당 높은 화소수의 구현을 위해서는 각 화소를 이루는 센서의 극소형화가 필수</li> <li>- 실리콘 기반 광 센서의 제한된 최소 수광 면적을 극복할 수 있는 나노기술 필요</li> <li>- 단위 면적당 수광 특성이 높은 신규 소재 기반 광 센서 기술 필요</li> </ul>
무기 수광소재인 InGaAs의 높은 제조 단가에 따른 응용 분야 제한	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 안전하며 응용 분야가 넓은 단적외선(SWIR, 1.0-2.5<math>\mu</math>m)을 활용한 이미지 센서 기술에 대한 수요 증대</li> <li>- 매우 높은 제조 단가에 의해 응용 분야가 제한되어 새로운 기술 및 소재를 이용한 단적외선 이미지 센서 기술 필요</li> </ul>

### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
고집적·고감도 수광 나노소재 및 나노센서 기술	정의	○ 수광 면적 대비 고감도의 감지 특성을 갖는 나노소재 및 소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2차원 나노소재, 양자점, 유기반도체 등과 같은 신소재 기반 나노수광소재 기술</li> <li>- 나노수광 소재 기반 고감도 광학센서 소자 기술</li> <li>- 고순도 대면적 나노수광 소재 형성 기술</li> <li>- 나노수광 소재 미세 패터닝 기술</li> </ul>

나노기술명	개요	
나노소재 기반 단적외선 광학센서 기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 광학센서의 고집적 어레이 기술</li> <li>- 적층형 광학센서 기술 개발</li> <li>- 누설전류 및 간섭 현상 제어 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 저비용 공정이 가능한 단적외선 수광 나노물질 개발 기술</li> <li>- 비중금속 기반의 환경 친화적 수광 물질 개발 기술</li> <li>- 고성능 단적외선 이미지 센서 소자 기술</li> </ul>

### 3) 미래핵심기술이슈 : 곡면형 이미지 센서 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
기존 반도체 공정으로 곡면형 이미지 센서 제작 시 복잡하고 제한적인 방법에 따른 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 곡면형 구조에서도 우수한 감지 특성을 갖는 광학센서 소자 기술</li> <li>- 복잡하고 고비용의 공정 기술을 대체할 새로운 방식의 고효율 저비용 공정 기술</li> <li>- 기계적으로 우수한 유연성 및 신축성을 갖는 새로운 소재 기반의 광학센서 기술을 통해 복잡하고 고비용의 공정 기술을 대체할 새로운 방식의 공정 기술</li> </ul>

#### 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
고해상도 곡면형 나노광학센서 소자 어레이 공정 및 집적 기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기존의 2차원 소자 제작 공정을 적용하기 어려운 3차원 곡면형 이미지 센서 제작을 위한 간단하고 효율적인 신공정 기술 및 미세 패터닝 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고성능 유연/신축성 광학센서 소자 기술</li> <li>- 2차원 평면 구조의 소자를 3차원 형태로 변형시키는 공정 기술</li> <li>- 3차원 곡면형 기판 위에 직접적으로 소자를 제작하는 공정 기술</li> <li>- 곡률 반경의 조절이 가능한 이미지 센서 기술</li> </ul>

### 4) 미래핵심기술이슈 : CMOS 이미지 센서 성능을 뛰어넘는 광전자 시냅스 기반 나노센서 소자 구현

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
명암 감지만 가능한 현 뉴로모픽 이미지 센서의 색상 감지의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 광전자 시냅스 소자로 구성된 고해상도 뉴로모픽 이미지 센서 기술</li> <li>- 단위 소자 레벨의 광전자 시냅스 특성을 뛰어넘는 어레이 기술</li> <li>- 양극성 가중치 변화가 가능한 미래형 광전자 시냅스 소자 기술</li> <li>- 저비용 공정이 가능하며 초저전력 소모성 시냅스 소자 기술</li> <li>- 단순 명암 감지를 넘어 색상을 감지할 수 있는 뉴로모픽 이미지 센서 기술</li> </ul>



#### 4-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
나노소재 기반 고성능 뉴로모픽 이미지 센서 기술	정의	○ 광전자 시냅스 소자를 기반으로 누적되는 정보를 강화함으로써 효율적인 이미지 인식이 가능하며 단순 명암 감지를 넘어 색상을 구분할 수 있는 뉴로모픽 이미지 센서 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노소재, 저차원 소재, 및 유기 소재와 같은 신소재 기반 광전자 시냅스 소자 기술</li> <li>- 저비용 고품질 소재 공정 기술</li> <li>- 광학적 자극에 의한 양극성 가중치 변화 기술</li> <li>- 광전자 시냅스 소자 어레이 기반 색상 인식 가능한 뉴로모픽 이미지 센서 기술</li> <li>- 패턴 인식, 기억, 망각, 명순응, 암순응 등 인간 시각 기능 모사 기술</li> </ul>

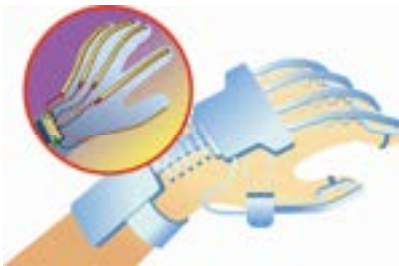
### 〈나노융합 센서소자 로드맵〉

중분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술										
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	
나노융합 센서소자	화학센서	극소량/극미량 실시간 감지가 가능한 고성능 나노 가스 센서 기술	고집도 및 고신뢰성 나노가스 센서 기술	고 집도/고 신뢰성 나노소재 기반 가스 감지용 기술		나노가스 센서 설계 및 통합 기술								
				대형형 나노-화학센서 기술		이종 재료 나노-화학센서 기술								
	물리센서	유연/탄성 나노구조의 무손상/가역 나노 물리센서	유연/탄성 나노소재 기반 유연 나노센서 기술	나노복합체 합성 및 공해학적 구조 설계 기술		나노복합체 기반의 특기장 기술								
				세밀한 측정 및 이미징 가능한 나노-물리센서 개발 기술		집진 센서 및 집진 역동학 제어 기술		진동/이러이 측정 및 나노-화물/집진 기술						
		고집도 및 다기능성 화학/물리 센서 구현	기체의 변화에 대한 특이적인 측정 감지 나노기술	집진 센서 및 집진 역동학 제어 기술		진동/이러이 측정 및 나노-화물/집진 기술		진동/이러이 측정 및 나노-화물/집진 기술						
				지역적 변화에 응답한 전자 구조 설계 기술		진동/이러이 측정 및 나노-화물/집진 기술		진동/이러이 측정 및 나노-화물/집진 기술						
		특정 물리량 또는 변형 후에 대한 선택적 감지 기술	사용자가 원하는 물리량을 선택적으로 감지 가능한 나노-물리센서	유연/탄성 나노소재 기반 나노센서 기술		유연/탄성 나노소재 기반 나노센서 기술		유연/탄성 나노소재 기반 나노센서 기술						
				나노구조에 기반한 고효율 무선 전력 전송 기술		무선 전력 공급용 나노구조 기술		나노-재료/이러이 측정 및 나노-화물/집진 기술						
	무선전 무선 센서 기술	무선전 나노센서 기술	무선전 나노센서 기술		무선전 나노센서 기술		무선전 나노센서 기술							
			무선전 나노센서 기술		무선전 나노센서 기술		무선전 나노센서 기술							
	광학센서	나노-포지셔닝/고집도/고신뢰성/고대역폭 CMOS 이미지 센서 기술	고집도/고집도 수광 나노소재 및 나노센서 기술	신소재 기반 나노-수광 소재 기술 및 나노-수광 소재 미세 패터닝 기술		고집도 대역폭 나노-수광 소재 기술								
				나노-수광 기반 (CMOS) 광학 센서 기술		나노-수광 소재 기반 고집도 광학 센서 기술								
극미량 이미지 센서 기술		고대역폭 극미량 나노-광학 센서 소자 이미지 측정 및 감지 기술	차세대 단색/이러이 수광 소재 기술		고집도 단색/이러이 광학센서 및 감지 기술									
			고집도 극미량 나노-광학 센서 소자 이미지 측정 및 감지 기술		극미량 극미량 나노-광학 센서 소자 이미지 측정 및 감지 기술									
CMOS 이미지 센서 성능을 향상시키는 광전자 시스템 기반 나노-센서 소자 구현	나노소재 기반 고성능 뉴로모픽 이미지 센서 기술	차세대 고집도 나노-광학센서 기술		나노-신소재 기반 광전자 시스템 소자 기술		대형 집진 나노-모픽 이미지 센서 기술								
		광학/이러이 측정 및 나노-수광 소재 기반 나노-센서 기술		집진/이러이 측정 및 나노-수광 소재 기반 나노-센서 기술										

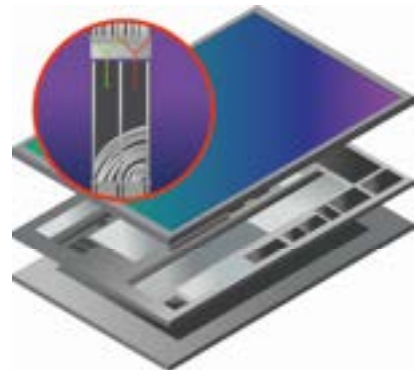
### 〈나노융합 센서소자 대표제품〉



차량용 음주운전 측정용 나노센서



데이터 글로브용 나노햅틱센서



고해상도 나노광학센서

〈나노정보전자 미래상〉



### 1. 개요

#### 가. 정의

- 나노기술을 적용하여 에너지 부족 현상과 청정에너지 공급 등 에너지 분야가 직면하고 있는 기술적 한계를 돌파하고, 쾌적하고 지속 가능하며 안정된 사회를 실현할 수 있는 융합과학 및 기술

#### 나. 범위

- 나노에너지 기술은 나노융합 연료전지, 나노융합 태양전지, 나노융합 하베스팅, 나노융합 이차전지, 나노융합 수소, 나노융합 바이오에너지, 나노융합 에너지효율화 등 7개의 중분류 기술들을 포함
- **(나노융합 연료전지)** 나노융합 연료전지 분야는 전해질이나 전극의 종류에 따라 PEMFC(고분자 전해질 연료전지), SOFC(고체 산화물 연료전지), AEMFC(음이온 교환막 연료전지), PCFC(프로토톤 세라믹 연료전지)의 4개의 소분류로 구성되며, 3기 소분류에서 최근 새롭게 각광받고 있는 차세대 연료전지 기술로 AEMFC와 PCFC가 추가
- **(나노융합 태양전지)** 나노융합 태양전지 분야는 광활성 소재의 종류에 따라 무기물계 및 유기물계의 포괄적인 소분류로 구분하고, 새로운 고효율 소자로 기대를 모으고 있는 유무기 하이브리드 및 차세대 태양전지와 적층형 태양전지를 별도 소분류로 구분
- **(나노융합 하베스팅)** 나노융합 하베스팅 분야는 열전 하베스팅, 압전 하베스팅, 마찰 하베스팅의 소분류로 분류하였고, 상대적으로 연구개발이 줄어든 정전 하베스팅 대신 활발한 연구가 이루어지고 있는 마찰 하베스팅을 추가
- **(나노융합 이차전지)** 나노융합 이차전지 분야는 리튬 이차전지, 전고체 이차전지, 전력저장용 이차전지, 슈퍼 커패시터 4가지 소분류로 구성. 중요성과 연구 주목도가 크게 높아진 고체 전해질 기반의 전고체 이차전지를 별도 소분류로 구성하고, 나머지 액체 전해질 기반 이차전지를 리튬 이차전지로 분류
- **(나노융합 수소)** 나노융합 수소 분야는 수소생산(수전해 수소생산, 연료이용 수소생산)과 수소저장(무기물 기반 수소저장, 유기물 기반 수소저장) 네 가지 분야로 분류. 수소 분야는 3기에는 없던 중분류이지만 수소 에너지의 중요성이 급격히 증가하는 추세에 따라 신규 추가

- **(나노융합 바이오에너지)** 나노융합 바이오에너지 분야는 바이오매스 연료화, 바이오매스 화학소재화의 두 소분류로 분류. 3기 지도에는 없던 중분류로 바이오매스 활용에 대한 기존의 공백 기술을 새롭게 4기에 추가
- **(나노융합 에너지 효율화)** 나노융합 에너지 효율화 분야는 인공광 재활용 및 건물일체형 태양 전지 기술로 분류. 기존의 에너지 절약 중분류에서 연구개발 활성도나 산업적 가치의 관점에서 일부 소분류를 제외하였고, 실내발전용 태양전지 기술을 보다 포괄적인 인공광 재활용으로 변경

〈나노에너지 분야 기술 분류체계 제3기·제4기 수정 경과〉

제3기 나노기술지도		▶	제4기 나노기술지도	
중분류	소분류		중분류	소분류
나노융합 연료전지	고분자 전해질 연료전지	▶	나노융합 연료전지	PEMFC
	고체산화물 연료전지			SOFC
	직접탄소 연료전지			AEMFC
	PCFC			
나노융합 이차전지	Li 이온 이차전지	▶	나노융합 태양전지	무기물계 박막 태양전지
	슈퍼커패시터			유기물계 박막 태양전지
	금속공기전지			유무기 하이브리드 및 차세대 태양전지
	극미소 전원용 하이브리드 전지			적층형 태양전지
	전력 저장용 전지	나노융합 하베스팅	열전 하베스팅	
나노융합 태양전지	페로브스카이트 태양전지	▶	나노융합 하베스팅	압전 하베스팅
	유기 태양전지			마찰 하베스팅
	염료감응 태양전지	▶	나노융합 이차전지	리튬 이차전지
	실리콘 태양전지			전고체 이차전지
	화합물계 태양전지			전력저장용 이차전지
	유무기 하이브리드 적층형 태양전지			슈퍼 커패시터
나노융합 에너지 하베스팅	열전 발전/냉각	▶	나노융합 수소	수전해 수소생산
	압전 하베스팅			연료이용 수소생산
	정전 하베스팅			무기물 기반 수소저장
	유기물 기반 수소저장			
나노융합 에너지절약	건물 일체형 태양전지 기술	▶	나노융합 바이오 에너지	바이오매스 연료화
	스마트 윈도우 기술			바이오매스 화학소재화
	실내 발전용 광전변환 전지 기술	▶	나노융합 에너지 효율화	인공광 재활용
	에너지 단열재			건물일체형 태양전지
	산업 에너지 절약 기술			

다. 역량 분석(SWOT)

		기회(O)	위협(T)
외부 환경		O1. 기후변화 이슈로 수소/태양광 등 청정에너지원 수요 급증 O2. 전기차, 수소차의 급격한 보급 확대 O3. 천연가스 공급 부족 등으로 새로운 에너지 패러다임 요구 증가	T1. 에너지 자원화에 기인한 에너지 안보 위기 증대 T2. 유럽/미국 등 선진국을 중심으로 청정에너지 R&D 및 산업 투자 급증 T3. 장기적 경제 불황으로 신기술 수용성 저하
내부 환경			
강점 (S)	S1. 국내 연구개발 수준 및 원천 기술 수월성 S2. 신재생에너지 공급 관련 정부의 정책적 지원 S3. 수소/전기차/태양광 관련 배후 산업 활성화	○ 연구개발 수월성을 기반으로 차세대 에너지 분야 R&D 초격차 확보 ○ 신재생에너지 공급 및 투자 지속 ○ 산업기술 R&D 지원을 통한 글로벌 시장 선점	○ 전통에너지/원자력 /신재생 에너지 등 국가 에너지 공급 포트폴리오 구축 ○ 세계 선도 최우수 연구개발 수행 ○ 적극적 정책지원이나 홍보를 통한 신기술 수용성 향상
		SO 전략 WO 전략	ST 전략 WT 전략
약점 (W)	W1. 청정 에너지 분야 정부 연구비 감소 W2. 원천기술의 상용화 연계 미비 W3. 차세대 나노에너지 분야 고급 연구 개발 인력 부족	○ 청정에너지 생산 분야 정부 연구개발 지원 확대 ○ 상용화 연계 기술의 정책적 지원 ○ 연구개발 투자를 통한 고급 인력 양성	○ 과학적/산업적 파급력이 큰 돌파형 원천기술 개발 ○ 인력 양성 및 산업 지원을 통한 건전한 산업생태계 구축 ○ 적극적인 국제공동 연구 수행을 통한 연구 네트워크 구축

## 2. 국내외 기술 및 산업동향(현황 및 전망)

### 가. 국외 기술 및 산업 동향

- **(나노융합 연료전지)** 일본, EU 및 미국은 국가의 정책 지원 하에 연료전지 시스템 실증 및 보급이 활발하게 이루어지고 있으며, 고효율 및 고신뢰성 연료전지를 확보하는 연구개발 중점 추진하여 전 세계 연료전지 시장이 급속 팽창하고 있으며, 특히 건물용 연료전지 시장의 경우 2023년 18.3조원까지 확대될 것으로 전망. 전 세계적으로 2016년 500MW 용량의 62,000 개의 연료전지 시스템이 공급되었으며, 시스템 공급량 중 정치형 비율이 80%이상, 용량면에서는 수송형이 약 60%를 차지. 일본은 정부 주도의 대규모 실증 프로그램인 에네팜(Ene-farm) 정책을 통해 보급 확대 및 지속적인 연구개발을 지원하여, 2009년 상용화를 시작으로 2015년 기준 15만대 보급/운전을 진행하였으며, 2030년까지 530만대 보급 예정. 유럽은 연료전지 기술의 빠른 상용화를 위해 시스템 실증 프로그램인 에네필드(Enfield) 프로젝트를 출범시키고, 실제 사용환경에서의 시스템 운전경험을 바탕으로 경제성 향상, 공급망 완성 추구. 미국은 연료전지 시스템 설치를 지원하기 위해 연방정부의 투자세금감면(ITC) 프로그램을 통하여 연료전지 등을 이용한 에너지 생산투자 금액의 30%를 개인 및 기업 세금에서 면제해주는 혜택 제공
- **(나노융합 태양전지)** 미국, 중국, EU의 주도하에 미래 탄소중립을 목표로 설치용량 확대 및 발전단가 절감을 통한 경제성 확보를 당면과제로 삼고 있으며, 차세대 태양전지를 중심으로 나노기술을 통한 문제 해결 노력이 매우 활발하게 진행
  - **(무기물계 태양전지)** 실리콘 태양전지는 n형 실리콘 및 양면 수광형 등의 구조 개발을 통한 고효율 셀/모듈 효율 향상 개발이 주류를 이루고 있으며, 중국을 중심으로 규모의 경제를 통한 발전단가 절감 진행. 여전히 고효율 HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) 구조의 실리콘 태양전지는 양산화 단계에 진입하지 못한 상태. 박막 태양전지의 경우 일본 Solar Frontier사의 주도적인 기술개발로 구리-인듐-갈륨-셀레늄 (CIGS) 박막 태양전지의 효율이 23.4%로 향상되었으나 카드뮴 텔루라이드 (CdTe)는 22.1% 효율 정체 상태. 초저가 구리-아연-주석-황-셀레늄 (CZTSSe) 박막 태양전지 역시 중국 연구진이 13.0% 효율을 달성하였으나 여전히 낮은 효율 보유. 갈륨 비소 (GaAs) 단결정 태양전지의 경우 미국 NREL에 의해 집광 및 우주용 30.8%의 고효율 태양전지 연구개발
  - **(유기물계 태양전지)** 유기태양전지는 롤투롤 (Roll-to-roll) 진공공정 방식을 이용한 독일의 Heliatek사를 비롯하여, 프랑스 ARMOR사, 덴마크 Infinity PV사 등 유럽을 중심으로 상용화 진행. 용액공정 유기태양전지의 경우 낮은 효율에 머물고 있다가 최근 5년 사이에 비폴러렌 엑셉터 소재 개발로 19% 이상의 (19.6%, Nature Materials, 2022) 높은 광

전변환 효율을 달성하는 등 괄목할만한 성장실현. 셀 단위 고효율 소재의 경우 중국이 최근 활발한 연구 성과를 보이고 있으며, 용액공정 유기태양전지의 플렉서블, 대면적화 연구는 중국, 유럽을 중심으로 최근 20~200cm<sup>2</sup> 면적에서 12~14%의 성능 보고

- (유무기 하이브리드 및 차세대 태양전지) 유무기 페로브스카이트 기반 태양전지는 영국 Oxford PV사, 중국 Microquanta Semiconductor사, 폴란드 Saule Technologies사 등의 스타트업을 통한 시범 프로젝트가 활발하게 진행되고 있으며, 동시에 나노기술을 기반으로 한 효율 및 안정성 향상 연구 진행. 양자점 태양전지는 아직 효율 및 안정성이 낮지만 차세대 태양전지 소재로서 많은 장점을 갖기 때문에 세계적으로 다양한 기관에서 황화납 (PbS), 비납계 양자점 소재 등이 개발되고 있으며, 최근 페로브스카이트 양자점 소재가 개발되어 오스트레일리아 연구진에 의해 2020년 16.6% 효율의 양자점 태양전지가 보고
- (적층형 태양전지) 미국/유럽 등에서 우주용 태양광 발전을 위한 4중 접합 이상의 초고효율 집광 태양전지를 지속적으로 연구개발 중이며 45% 이상의 높은 효율 달성. 유무기 하이브리드 페로브스카이트 태양전지 고효율화에 따라 페로브스카이트 소재를 실리콘 및 박막, 유기 태양전지 등에 적층하는 연구가 활발하며, 페로브스카이트-실리콘의 경우 영국 Oxford PV사에서 상용화 추진 중

#### ○ (나노융합 하베스팅)

- (열전 하베스팅) 일본 도시바·도요타·산요·샤프·KELK사 등주요 기업들이 주력상품에 적용 가능한 열전기술을 보유하고 있으며, 일본 FerroTec사와 KELK사가 열전냉각용 모듈 생산에 주력. 최근 웨어러블 전기소자의 전원공급을 위한 웨어러블 열전발전 시스템 개발과 태양광, 태양열을 동시에 이용하여 전기를 생산할 수 있는 광전-열전 하이브리드 발전 시스템에 대한 연구가 급격하게 증가. 미국 Cymbet사, IPS사 등에서 Texas Instrument사, Microstrain사와 같은 세계적인 회로부품업체와 공동으로 초소형 태양전지, 압전소자 등을 박막전지와 하이브리드하여 극미소 전원 모듈을 Eval-kit로 판매
- (마찰 하베스팅) 짧은 연구기간 동안, 미국 Georgia Tech.의 Zhong Lin Wang 교수 그룹을 중심으로 급격한 연구 성과 및 응용 데모 결과가 보고되어, 다양한 산업에 적용 가능성을 입증하고 있으며, 최근, 블루에너지 하베스팅을 목표로 바다에서 버려지는 에너지를 회수하기 위한 정전/마찰전기 발전 소자 개발 추진

#### ○ (나노융합 이차전지)

- (리튬 이차전지) 최근 미국 주도로 나노기술을 적용한 리튬금속 및 보호막 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 일본, 중국, 유럽 각국도 연구개발 진행. SolidEnergy Systems사는 2021년 리튬금속 음극을 적용하여 셀 에너지 밀도가 450Wh/kg인 6Ah 용량의 전지 개



발을 발표. Sion Power사는 2022년 Licerion<sup>®</sup> 리튬금속 이차전지 개발하여 음극으로 사용할 박막 리튬을 독자 기술로 개발하였음을 발표. 또한, 2017년 미국 DOE에서는 총 5천만 달러 규모의 대규모 자금 지원을 통해 퍼시픽 노스웨스트 국립연구소 (PNNL) 및 다수의 연구기관이 주축이 된 Battery 500 프로젝트를 수행하여 리튬금속 이차전지 개발을 진행. 영국의 OXIS Energy사는 2019년 양극으로 황, 음극으로 리튬금속을 채택한 471Wh/kg의 고에너지밀도 리튬-황전지 개발을 발표

- **(전고체 이차전지)** 고체 전해질을 채용한 전고체 이차전지의 개발은 전세계적으로 진행 중이며, 높은 이온전도의 구현과 계면저항 해결을 위해 나노기술을 적용. 일본의 도요타자동차는 2021년 전고체 배터리로 달리는 자동차를 공개했으며, 2030년까지 16조원의 연구개발비를 투입하여 해당 자동차를 양산할 예정. 중국의 전기차 제조사 NIO사는 2021년 150kWh 전고체전지를 신차에 도입할 예정이라고 발표했으며, 실리콘계 음극과 하이니켈 양극소재를 사용하여 에너지 밀도 360Wh/kg를 달성할 것으로 예측

#### ○ (나노융합 수소)

- **(수전해/연료이용 수소생산)** 개질수소와 부생수소 생산기술은 화석연료 추출 공정에 기반을 두고 있어 이산화탄소 배출을 동반하기 때문에, 최근 암모니아와 같이 운반과 저장이 편리한 연료에서 수소를 추출하는 공정 시스템 개발이 각광. 일본의 전략혁신 창조 프로그램 (SIP) 중 암모니아 분해반응을 통한 고순도 (>99.98%) 수소생산 프로젝트를 진행했으며, 히로시마 대학, AIST 및 Taiyo Nippon Sanso, Toyota, Showa Denko사 등이 참여하여 10 Nm<sup>3</sup>/h 급 수소 정제시스템 개발. 미국은 DOE 산하 첨단에너지연구개발청의 REFUEL (Renewable energy to fuels through utilization of energy-dense liquid) 프로그램에서 암모니아를 가장 유망한 탄소중립 액체연료로 선정하였으며 암모니아 합성 및 분해를 위한 막반응기 개발. 호주 과학산업연구원 (CSIRO)은 국가 수소로드맵 수립을 통해빅토리아 수소에너지 공급망 시범 프로젝트로 액화수소 수출, 로열 멜버른 공과대학, 모나시 대학에서 수소 협력 프로젝트 추진. 또한 노르웨이 Yara사의 재생 가능한 암모니아 프로젝트, 프랑스 Engie사의 100 MW급 태양광 발전 연계 그린수소 생산 플랜트 건설 등이 진행
- **(무기물 기반 수소저장)** 미국, 일본, 중국 등의 주도 하에 기존 물리적 수소저장기술의 한계를 극복하기 위한 무기재료 기반의 다양한 화학적 수소저장기술이 개발되고 있으며, 최근에는 수소 저장 밀도가 높고 상온에서 액체상태로 운반이 용이한 무기수소화물인 암모니아를 활용하기 위해 그린수소 생산지역인 사우디아라비아, 호주, 덴마크, 영국 등이 그린 암모니아 생산 추진
- **(유기물 기반 수소저장)** 일본, 독일, 미국 등의 주도 하에 유기재료 기반의 다양한 화학적 수소저장기술이 개발되고 있으며, 최근 상온·상압에서 액체상태로 안전하게 수소를 저장하고

운송할 수 있는 액상 유기수소 운반체에 대한 관심이 높은 상태. 현재 일본과 독일을 중심으로 액상 유기수소 운반체를 이용한 수소저장·추출 시스템 개발 및 해상·육상 운송 실증 추진

○ **(나노융합 바이오에너지)** 미국, 유럽을 중심으로 도로·항공용 바이오연료 및 바이오소재 생산 기술 개발이 활발히 진행되고 있으며 관련 산업이 크게 성장하고 있고, 특히 탄소중립 및 순환경제 이슈가 강조되는 상황에서 바이오매스를 원료로 연료 및 화학소재를 생산하는 미생물 기반 화이트바이오 기술 부상. 미국에서는 바이오에너지 기술 사무국 (BETO) 프로그램을 통하여 바이오연료 및 바이오소재 생산 스케일업 및 바이오매스 전환효율 향상을 위한 기술 개발 추진. 유럽에서는 Horizon 2020을 통하여 항공 및 육상교통을 위한 바이오연료 생산 상용화 기술을 개발하는 한편, REDIFULE 프로젝트를 통하여 직접 사용(Drop-in) 형태의 바이오연료 생산 및 이를 위한 바이오매스 활용기술 개발 중

○ **(나노융합 에너지 효율화)**

- **(인공광 재활용)** 실내 다양한 인공 광원의 빛에너지를 전기에너지로 만드는 광전 소자로서 광흡수 및 광전현상이 발생하는 반도체로 이루어진 나노 기술을 적용했으며, IT 산업의 고도화에 따라 자가발전형 센서와 연계. 다양한 연구가 진행되어 인공광 (형광등 1000 lx)에서 34%라는 기록적인 광전효율을 보고. 또한 대면적 (8 cm<sup>2</sup>)에서도 30.6% (1000 lx)의 효율을 확보함과 더불어 직렬 모듈(64cm<sup>2</sup>)을 통한 저전력 실내 전자소자 구동으로의 실용 가능성이 입증

- **(건물일체형 태양전지)** 건물일체형 태양전지는 태양광을 수집하기 어려운 특수 조건 하에서 작동하여야 하고, 건축자재로서의 심미성과 안정성 확보가 필수. 기존의 태양전지를 이용하여 건물에 단순 부착하는 형태의 초보적 산업으로 기업들이 시장을 확대해나가고 있지만 향후 건물의 심미성과 안정성을 위한 광전변환 기술 혁신 요구 전망. 미국의 Ubiquitous Energy사와 네덜란드의 SENSE사는 투명 태양전지 기술을 바탕으로 건물 일체형 태양전지 시장에 진입하고 있으며 이미 대규모 프로젝트로 진행 중. 네덜란드 LUSOCO사는 반도체 나노입자 기반의 태양광 집광기를 창호에 적용하려 하며 이를 바탕으로 창호 기반 건물 일체형 태양전지 시장에 진출. 미국의 UbiQD는 태양광 집광기 기반으로 창호 기반 건물 일체형 태양전지에 적용하려 하고 있으며, 변환된 광을 바탕으로 식물 생장에 도움을 주는 영농형 태양발전시스템으로 활용. 미국 Solaria사는 반투광 창문형 태양전지 모듈을 신규 건축물 유리창에 적용 중이며, 미국 미시간 주립대학교는 건물 창문에 적용이 가능한 무색 (colorless) 투명 유기 태양전지 기술을 보고. 독일 Merck사는 영국의 건물일체형 태양광 발전시스템 (BIPV) 업체인 Polysolar사와 에너지 절약 창문 (Power generating & Energy Saving Windows) 프로젝트 진행

## 나. 국내 기술 및 산업 동향

- (나노융합 연료전지) 공급의무화 시장에서 중요성을 인정받으며 급성장하고 있으며, 산·학·연 협동연구를 통해 종합적인 나노융합 연료전지 개발이 추진. 수소경제 활성화 로드맵에 따르면 2040년까지 발전용 연료전지 15GW(내수 8GW), 가정·건물용 연료전지 2.1GW(94만 가구) 보급 목표. 수소경제 로드맵과 연계하여 수소연료전지 기자재 성능평가 기술개발, 선박용 수소 연료 공급·시험설비 구축, 친환경 수소연료 선박 R&D 플랫폼 구축 등 단계적 수소선박 개발용 인프라 구축 추진 중이며, 해외 의존도가 높은 수소선박 핵심 부품/기자재의 국산화 진행 중
  - PEMFC를 기반으로 하는 1kW급 연료전지의 보급사업에 퓨얼셀파워 및 GS퓨얼셀이 참여하고 있으며, 최근에는 5kW급 연료전지를 개발 중. 최근 미국 Bloom Energy사와 기술협약을 맺은 SK를 중심으로 두산 퓨얼셀, 포스코에너지 등의 대기업들도 발전형 연료전지 사업에 적극적으로 참여하고 있으며, 2021년에 SOFC 분야 중소기업체들도 참여한 ‘한국 연료전지협의회’를 발족하여 SOFC 시장 확대와 기술력 확보를 위해 노력
  - PCFC 기술은 개발 초기 단계로 학·연 연구 중심 추진되고 있으며, 2021년부터 과학기술정보통신부 미래수소원천기술개발사업으로 KIST, 한국에너지기술연구원, 금오공과대학교를 비롯하여 고려대학교, 광주과학기술원, 세종대학교, 한국과학기술원 등에서 최종 2026년까지  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  크기의 프로톤 전도성 세라믹 전기화학 셀 3단 슷스택 작동을 목표로 연구 진행 중
- (나노융합 태양전지)
  - (무기물계 태양전지) 실리콘 태양전지의 경우 한화솔루션에서 세계 주요 태양광 모듈 시장 점유율 1위를 하는 등 선전하고 있으나, 국내 태양광 업체가 생존하기 위해서는 중국과의 경쟁을 위한 발전단가 절감이라는 과제 직면. 박막 태양전지는 CIGS를 중심으로 솔란드, 아반시스 등의 기업에서 고효율 및 유연, 경량 박막 태양전지를 연구개발 중
  - (유기물계 태양전지) 고효율, 유연, 대면적 유기 태양전지 연구가 주를 이루고 있으며, 부산대는 세계 최고 수준의 17.40% 광전 효율을 달성, GIST 연구팀은  $528 \text{ cm}^2$  크기에서 7.67% 효율의 대면적 유연 유기 태양전지를 개발, KIST 연구팀은 저온 프린팅 공정으로 제작 가능한 유기태양전지 대면적화 기술로 모듈  $>20 \text{ cm}^2$  (활성층 면적 기준)에서 세계 최고 수준인 14.07%를 보고. 유기소재의 고유 기계적 특성을 이용한 스트레처블 유기 태양전지의 경우 KAIST에서 효율 11%를 달성하였으며, 특히 이는 10% 인장 1000회 반복 시 10% 이내의 효율 변동을 보이는 우수한 내구성 확보
  - (유무기 하이브리드 및 차세대 태양전지) 페로브스카이트의 경우 UNIST에서 25.7%의 세계 최고 효율을 보유하고 있으며, 대면적 코팅 기술 또한 활발하게 연구. 독성 용매를 대체할 친환경 용매 기반의 페로브스카이트 박막 제조 기술이 국내 연구진에 의해 개발되었고,

유니테스트 등의 기업에서도 수년 내 양산화를 목표로 연구개발 중. 양자점 태양전지 기술은 세계 최고 수준이나, 안정성 및 효율 향상 등의 추가적인 연구개발 필요

- (적층형 태양전지) 단일 접합 실리콘 태양전지의 한계효율을 극복하기 위해 고효율 페로브스카이트 태양전지를 적층하는 연구가 활발하며, 최근 한화솔루션 등의 대기업에서 6인치 페로브스카이트-실리콘 적층형 태양전지 개발에 성공하여 2025년 상용화를 목표로 연구개발 중. 이 외에도 주성엔지니어링, 신성이엔지 등의 기업에서 양산화를 목표로 페로브스카이트-실리콘 적층형 태양전지 개발에 집중

#### ○ (나노융합 하베스팅)

- (열전 하베스팅) 계면제어 및 나노구조를 이용한 열전소재 성능향상에 대한 연구가 진행 중이며 아직 n-형의 경우 전 세계에서 나노기술을 이용한 성능 향상 보고. 중고온용 열발전 소재/소자, 나노구조를 이용한 강도 향상, 신뢰성 높은 전극 형성 기술 등 관련 기술개발을 통해 열전소자의 수명과 효율을 최대화하기 위한 연구가 진행 중. 체온을 이용하는 웨어러블 열발전 소자/시스템 개발 연구 진행
- (압전/마찰 하베스팅) 삼성, 현대, 엘지 등 대기업을 중심으로 소재 관련 기초 및 소자/시스템 응용성 검증 연구 개발 추진. 최근, 압전 및 정전/마찰전기 발전 소자에서 생성되는 전기에 대한 전력 수집/관리 및 에너지 전달 시스템과의 결합을 통한 제품화 연구가 활발히 진행

#### ○ (나노융합 이차전지)

- (리튬 이차전지) 정부 과제를 통하여 리튬금속 이차전지 기술 개발이 활발히 진행. 리튬금속 구조체, 보호막, 분리막 개발에 나노기술의 적용이 필수적이며, 2018-2022년 과기부 기후변화대응기술 개발 과제를 통해, 리튬금속 이차전지 구현을 위한 기술개발추진. LG에너지솔루션, 삼성SDI, SK온의 국내 이차전지 제조 3사 또한 자체적으로 리튬금속 이차전지 기술 개발을 진행
- (전고체 이차전지) 국내 이차전지 3사와 현대자동차, 학계, 연구계를 통하여 전고체 전지의 개발이 활발히 진행. 삼성전자 종합기술원은 2020년 3월에 은-탄소 (Ag-C)를 음극으로 사용하는 전고체전지 개발을 발표하여 Nature Energy 게재. LG에너지솔루션은 2021년 9월 미국 UC San Diego와 상온 고속 충전이 가능한 실리콘 음극 적용 전고체전지 개발을 발표하여 Science 게재. 현대자동차는 2021년 4월 전고체전지를 탑재한 전기차 양산 계획을 발표

#### ○ (나노융합 수소)

- (수전해/연료이용 수소생산) 국내는 탄소 중립 사회를 실현하기 위한 산·학·연 협동연구를 통해 암모니아 분해를 통한 수소 생산 기술 개발이 추진되고 있음. KIST는 1kW급 암모니

아 기반 수소추출 시스템 개발, 한국에너지기술연구원은 20 Nm<sup>3</sup>/h (약 1.8 kg/h) 고효율 암모니아 분해 촉매반응기 개발, 한국에너지기술평가원은 CES, 현대자동차, 젠스엔지니어링, 한국에너지기술연구원, KIST 참여로 신재생에너지 핵심기술개발사업을 통한 암모니아 기반 고순도 수소 생산기술을 연구개발하여 암모니아 분해 촉매 개발, 분해반응기 잔류 암모니아 흡착 시스템 개발, 고순도 수소 생산을 위한 PSA (압력변동흡착) 공정을 개발하고 수소 생산량 100 Nm<sup>3</sup>/h 급 대용량 반응기 개발 준비

- (무기물 기반 수소저장) 울산과학기술원, 한국과학기술연구원, 한국과학기술원 등에서 금속수소화물 기반의 화학적 수소저장기술 개발이 주도적으로 이루어지고 있으며, 암모니아 합성의 경우 전기화학적 암모니아 합성기술이 한국과학기술연구원, 울산과학기술원을 중심으로 연구 진행. 국내에서는 암모니아 합성기술보다 해외에서 수입한 암모니아의 수소 추출기술에 더욱 초점을 맞추고 있는 상황
- (유기물 기반 수소저장) 대구경북과학기술원, 한국과학기술연구원, 한국과학기술원 등에서 탄소 기반의 화학적 수소저장기술 개발이 주도적으로 이루지고 있으며, 액상 유기수소 운반체 소재, 저장추출 시스템 및 관련 촉매 연구는 한국과학기술연구원과 한양대학교를 중심으로 연구가 진행

○ (나노융합 바이오 에너지) 바이오에너지 분야에 적용 가능한 나노-바이오기술인 효소, 미생물 개발 역량이 높은 수준이나 그동안 관련 정책 및 시장 상황으로 인하여 상용화 기술 개발이 제한적. 최근 전 세계적으로 바이오연료/소재 산업이 급격히 성장하고 있으며, 대표적인 바이오소재인 바이오플라스틱 산업의 연평균 성장률이 약 17%로 나노-바이오 융합기술 개발을 통한 바이오연료 및 바이오소재 생산 기술 상용화를 위한 연구개발이 시급

○ (나노융합 에너지 효율화)

- (인공광 재활용) 국내에서는 현재까지 실제 미래 에너지원으로서의 기능성 및 응용성보다는 효율을 극대화하는 소재 기술 연구개발이 진행 중. 최근 휴대성 및 미관을 고려하여 LG 화학, 코오롱 등의 기업에서 유기물을 이용한 실내광 발전용 광전지 기술에 대한 연구개발 및 시장 동향을 파악하고 있으며 시장 진입을 위한 연구 개발을 지속
- (건물일체형 태양전지) (☞)이건창호와 같은 건축자재를 기반으로 하는 업체에서 기존 태양전지를 이용하여 건물 설계에 맞게 시공하고 있는 수준으로, 건물일체형 태양전지 자체를 위한 기술개발은 초기 단계. (☞)코오롱은 유기 태양전지 기반 BIPV용 반투명 태양전지 모듈 기술, 한국전자통신연구원은 비정질 실리콘 기반 BIPV용 태양전지 모듈 기술, 한국과학기술연구원은 창호용 투과도 조절 CIGS 박막 태양 전직 기술을 개발 중. 또한 한국과학기술연구원은 염료감응형 태양전지로 창호형 BIPV를 개발 중

### 3. 기술발전 전망

중분류	현재 기술	미래 기술
나노융합 연료전지	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 복합발전용 대용량 연료전지</li> <li>- 수소 연료를 사용하는 전지</li> <li>- 대용량 주전원</li> <li>- 고온용 범용 소재</li> <li>- 고에너지소비 벌크 제조기술</li> <li>- 고가 소재 활용</li> <li>- 낮은 이온전도도를 갖는 전해질</li> <li>- 두께가 두꺼운 전해질</li> <li>- 분극저항이 높은 전극 소재</li> <li>- 탄화수소연료에 피독되는 전극</li> <li>- 고온에서 낮은 성능의 단전지 기술</li> <li>- 저효율 단전지 기술</li> <li>- 연료이용률이 낮은 단전지 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 분산발전 및 수송용 중소형 전지</li> <li>- 다양한 연료를 사용하는 전지</li> <li>- 소용량 보조전원 시스템</li> <li>- 중저온용 고효율 소재</li> <li>- 초소형 박막제조 기술</li> <li>- 저가, 고성능 나노 소재 활용 기술</li> <li>- 높은 이온전도도를 갖는 전해질</li> <li>- 나노스케일에서 강성 확보한 전해질</li> <li>- 분극저항이 낮은 전극 소재·구조</li> <li>- 탄화수소 연료적응성 전극소재·구조</li> <li>- 저온에서 높은 성능을 갖는 단전지 기술</li> <li>- 고효율 단전지 기술</li> <li>- 연료이용률이 높은 단전지 기술</li> </ul>
나노융합 태양전지	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 저효율 중량 태양전지 소자</li> <li>- 고가의 희귀 원소 기반 소재</li> <li>- 실험실 레벨 소재 합성 기술</li> <li>- 단위 셀 제작 기술</li> <li>- 독성 물질 기반 제조 기술</li> <li>- 단일 접합 셀 구조</li> <li>- 경성 (Rigid) 기판 기반 소자</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고효율 경량 태양전지 소자</li> <li>- 저가의 풍부한 원소 기반 소재</li> <li>- 대량 합성 기술</li> <li>- 모듈 양산화 기술</li> <li>- 친환경 물질 기반 제조 기술</li> <li>- 다중 접합 셀 구조</li> <li>- 연성 (Flexible) 기판 기반 소자</li> </ul>
나노융합 하베스팅	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 벌크 소재 기반의 열전 소재 개발 중심</li> <li>- 저차원 열전 소재 기반 합성법 및 측정 방법의 부재</li> <li>- 납계 압전 소재 기반 에너지 하베스팅 기술 의존</li> <li>- 압전 에너지 하베스팅 전력 성능 극대화 위주의 기술 개발</li> <li>- 다양한 마찰 에너지 하베스팅 소재 기술의 제한적 효율확보</li> <li>- 단일 에너지 변환 기반 에너지 하베스팅 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 저차원 열전 소재 기반 합성법 및 측정 기술 개발</li> <li>- 비납계 친환경 압전 소재 기반 에너지 하베스팅 기술 개발</li> <li>- 고성능, 고신뢰성 압전 에너지 하베스팅 소재 및 시스템 개발</li> <li>- 고효율 마찰 에너지 하베스팅 기술 개발</li> <li>- 다양한 에너지 변환 메커니즘의 융복합을 통해 고성능 하이브리드 에너지 하베스팅 구현</li> </ul>
나노융합 이차전지	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고에너지밀도, 고출력, 안전성의 상충관계 특성 구현</li> <li>- 액상전해질의 리튬이차전지</li> <li>- 리튬기반 이차전지</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 에너지밀도, 고출력, 안전성 동시 구현</li> <li>- 고상전해질의 전고체 이차전지</li> <li>- 다양한 화학반응과 물질을 이용하는 이차전지</li> </ul>
나노융합수소	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 알칼라인 수전해(AE), 양성자교환막수전해(PEMWE)</li> <li>- 귀금속 기반 촉매 개발</li> <li>- 단원계 나노 단위 촉매</li> <li>- 실험실 단위 셀 개발 및 성능 평가</li> <li>- 물리적 수소저장기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 음이온교환막수전해(AEMWE) 기술</li> <li>- 비귀금속 기반 촉매 개발</li> <li>- 다원계 단원자 촉매</li> <li>- 대용량 시스템 개발 기술</li> <li>- 화학적 수소저장기술</li> </ul>
나노융합 바이오에너지	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 저탄소 바이오연료 중심</li> <li>- 바이오매스 전환 효율 향상기술</li> <li>- 열분해 기술 중심</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고탄소 바이오연료 중심</li> <li>- 에너지 저소비형 전환기술 중심</li> <li>- 나노-바이오 촉매 기술 중심</li> </ul>

중분류	현재 기술	미래 기술
나노융합 에너지효율화	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기존 태양전지 기반</li> <li>- 낮은 투광성 태양전지</li> <li>- 심미성이 고려되지 않은 기술</li> <li>- 최적 입사각 조건하 작동</li> <li>- 외부 태양광을 이용한 태양전지기술</li> <li>- 고정 부착된 전력 발전 기술</li> <li>- 전력 생산 기술에만 집중된 태양전지 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 건축물 광환경에 최적화된 광전지 나노기술</li> <li>- 고효율 투광형 광전지 나노소재 및 소자 기술</li> <li>- 심미성이 확보된 색상 구현 광전지</li> <li>- 입사각 의존도가 낮은 기술</li> <li>- 실내등을 이용하여 발전하는 광전 변환 전지 기술</li> <li>- 인공광원 및 IoT 결합형 광전지 기술</li> <li>- 휴대성, 저중량 및 기계적 유연성이 확보된 광전지 나노기술</li> <li>- 광전지와 결합이 가능한 흡광, 발광, 농축, 투과형 광학요소 나노기술</li> </ul>

## 4. 나노기술지도 전개

### 4-1. 나노융합 연료전지

#### 가. 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)

##### 1) 개요

- (정의) PEMFC는 수소이온을 전달하는 고분자 전해질막(PEM)을 이용하는 연료전지로서, 수소에너지를 전기에너지로 변환시키는 기술
- (필요성) PEMFC는 장치의 작동온도가 낮아 높은 응답 특성을 지니고 있어 수송용 및 분산 발전용 전원으로 높은 효율성을 가지며, 현재 승용차 등에 주로 활용되고 있으나, 향후 대형 상업용 차량, 유인 비행체, 상업용 건물의 분산 발전 등으로 시장이 확대될 것으로 기대되어 그 필요성이 증대
- (발전 전망) PEMFC는 수송용 및 분산 발전 분야에서 활용이 확대될 것으로 예상되며, 이를 위해서는 현재 수천 시간 수준의 PEMFC의 수명을 수만 시간 수준으로 획기적으로 향상하고, 현재의 1/2 수준의 시스템 가격 달성을 이룰 것으로 전망

##### 2) 미래핵심기술이슈 : 장수명 저가 PEMFC 기술

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
PEMFC의 귀금속 촉매 대량 사용에 따른 문제	- 최대 수 만 시간의 수명이 요구되는 상용차 및 발전용 PEMFC는 고가의 백금 촉매를 다량 사용하는 문제
PEM 전해질막의 라디칼에 의한 화학적 열화에 따른 연료전지의 짧은 수명	- 전해질막의 열화에 의한 수소 크로스오버 증가는 성능 및 안전 측면에서 연료전지의 수명을 제한하는 주요 요소 - 전해질막 열화를 억제하기 위해 라디칼 스캐빈저를 적용하고 있으나 수용성 세륨염 형태의 라디칼 스캐빈저는 전도도 저하
PEMFC용 이오노머의 낮은 기체 투과성	- 이오노머의 낮은 기체 투과성은 PEMFC의 고출력밀도 운전에서 촉매 표면으로의 산소전달을 저해하여 성능을 감소

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
PEMFC용 초저백금 고내구 나노촉매 기술	정의	○ 기존 연료전지의 대비 1/10 이하의 백금을 사용하는 연료전지 촉매 기술
	요소 기술	- 단원자/클러스터 촉매 설계 및 합성 기술 - 고 표면적 탄소 담지체 설계 및 합성 기술 - 초저백금 촉매 기반 전극 설계 및 제조 기술 - 탄소나노튜브 기반 3차원 구조체 활용 고성능 전극 제조 기술



나노기술명	개요	
PEMFC용 고 활성점 밀도 비귀금속 나노촉매 기술	정의	○ 백금 촉매를 대체하는 높은 촉매 단위부피당 활성점 밀도를 가지는 저가의 비귀금속계 촉매 기술
	요소 기술	- 단일원소 구조 촉매 활성점 설계 및 합성 기술 - 비귀금속계 촉매 기반 전극 설계 및 제조 기술
PEMFC용 초분산성 라디칼 스캐빈저 나노기술	정의	○ 전해질막 이온 전도도 및 기계적 물성을 감소시키지 않는 높은 분산성을 지니는 불용성 라디칼 스캐빈저 기술
	요소 기술	- 나노입자 라디칼 스캐빈저 설계 및 합성 기술 - 라디칼 스캐빈저 표면 처리 기술 - 나노입자 라디칼 스캐빈저 적용 제막 기술
고 기체 투과성 PEM 이오노머 나노모폴로지 제어 기술	정의	○ 산소 투과도가 높은 이오노머 나노모폴로지 제어 기술
	요소 기술	- 이오노머 분자구조 설계 및 합성 기술 - 이오노머 분산액 모폴로지 제어 기술 - 나노모폴로지 제어 이오노머 기반 전극 제조 기술

## 나. 고체산화물 연료전지(SOFC)

### 1) 개요

- (정의) 소재 및 구조의 나노기술화를 통해, SOFC의 저온 작동성을 확보하고 취약한 장기 내구성을 대폭 개선하여 차세대 발전시스템 분야를 선도할 수 있는 한계 돌파 기술
- (필요성) 기존의 SOFC는 높은 효율 및 연료 다양성 등의 여러 장점을 가지고 있음에도 불구하고, 높은 작동온도로 인한 신뢰성 저하는 차세대 발전 분야에서 자리 매김하는데 큰 어려움으로 작용. 이러한 기술적 한계를 극복하고 시장경쟁력을 확보할 수 있는 효과적인 기술 개발이 필요
- (발전 전망) SOFC는 분산형 발전 분야에서 매우 주요한 기술로써, 궁극적으로 탄소 제로화를 앞당기는데 가장 효과적인 기술로 평가. 최근에는 각종 환경규제로 인해 트럭, 선박 등 대형 운송 수단의 차세대 주 동력원으로도 각광 받고 있으며, SOFC의 고질적인 문제점으로 지적되고 있는 고온의 작동온도가 획기적으로 개선된다면, 그 적용 분야가 무궁무진할 것으로 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 고효율, 고내구성 SOFC 기술

#### 2-1) 개요

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
SOFC의 저온 작동성 확보의 한계	- SOFC의 높은 작동온도는 실제 작동환경 하에서의 주된 장기 안정성 저하 요인으로 지목받고 있으나, 작동온도 하강에 따른 소재 성능 저하는 SOFC의 저온 작동성을 확보하는데 큰 걸림돌로 작용
표면/계면 성능 및 내구성 강화 소재 개발의 한계	- 단위 셀 구조 내 표면 및 계면은 열화에 가장 취약한 요소로 평가되고 있어, SOFC 성능의 성공적 장기 안정성 확보를 위해서는 표면 및 계면에서의 한계 돌파형 연구성과 필요
나노소재 공정의 대면적화 한계	- 나노소재 제조공정의 제한적 유효면적으로 인해 SOFC 성능에 대한 신뢰성은 물론, 나노구조 적용의 당위성 저하

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
나노구조 SOFC 전해질 및 전극 기술	정의 ○ 셀 소재의 나노구조화는 전극의 반응사이트를 증대시키는 한편, 이온 전도 경로를 줄여 전해질의 저항을 낮추는데 매우 효과적으로, 이러한 특성을 이용하여 SOFC의 고온 작동성을 효과적으로 개선하는 기술
	요소 기술 - 충분한 소재 연결도를 갖는 전극의 나노구조 제조 기술 - 고밀도/고결정성의 박막 전해질 제조 공정 기술 - 연료극 및 공기극 소재와의 정합성 확보를 통한 단전지(single cell) 공정 기술

나노기술명	개요	
SOFC의 표면 및 중간층 나노박막 소재 기술	정의	○ 나노스케일의 고기능성 소재를 표면 및 계면에 삽입하여 SOFC의 성능 및 내구성, 연료 유연성 확보 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 양극의 표면개선을 통한 산소 이온화 반응 성능 및 소재 안정성 향상 기술</li> <li>- 전해질/전극 계면의 이온 전도도 개선을 통한 열저항 및 물질이동 현상 개선 기술</li> <li>- 연료 유연성 제고를 위한 중저온 내부 건식 개질 수율/선택도 향상을 위한 최적 촉매 소재 후보군(단일원자 촉매, 나노복합 촉매, 합금 촉매, 산화물 촉매 등) 도출 및 연료전지 소재와의 정합성 확보 기술</li> <li>- 입자 조대화, 탄소 침적, 황 피독 등을 억제할 수 있는 촉매 내구성 기술</li> </ul>
균일도를 확보할 수 있는 SOFC 나노소재 대면적 제조공정 기술	정의	○ 나노소재 제조공정의 대면적화를 통한 나노소재 기반 SOFC의 신뢰성 및 시장성 확보 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 대면적 셀의 기준이 되는 <math>10 \times 10 \text{cm}^2</math> 이상의 면적에서 전해질 두께를 나노 스케일로 정밀하게 제어할 수 있는 제조공정 기술</li> <li>- 나노구조 기반의 입자 및 기공 크기 균일도를 대면적에서 확보할 수 있는 전극소재 제조 기술</li> </ul>

## 다. 음이온 교환막 연료전지(AEMFC)

### 1) 개요

- (정의) AEMFC는 수산화이온을 전달하는 고분자전해질막(AEM)을 이용하는 연료전지로서, 전통적인 알칼리 연료전지(alkaline fuel cell; AFC)의 발전된 형태
- (필요성) AEMFC는 높은 작동 pH로 인해 저가의 촉매 및 전해질막 소재를 사용할 수 있으면서, PEMFC의 장점인 높은 응답성, 출력밀도 등의 장점을 유지할 수 있어 수송용 및 분산발전용 연료전지 가격 저감을 위한 한계 돌파 기술로 주목. 또한 에너지 밀도가 높은 암모니아(4.1kWh/kg과 2.6kWh/L)를 연료로 직접 활용할 수 있어 기존의 연료전지가 저장/운송된 암모니아로부터 수소를 추출하여 활용해야 하는 반면, 암모니아를 연료전지 내에서 직접 산화시켜 전기에너지로 변환할 경우 운송 및 활용에서 높은 효율이 기대되어 그 필요성이 증대
- (발전 전망) 현재 수송용 및 분산 발전용으로 각광받고 있는 PEMFC는 고가의 백금촉매를 과량 사용해야 하는 반면, AEMFC의 약염기성 환경에서는 저가의 전이금속/비귀금속 촉매를 사용할 수 있으므로, 가격 경쟁력이 월등히 높을 것으로 기대되며 PEMFC에서 주로 이용되는 고가의 과불화탄소계 전해질막(Nafion 등)을 대체하여 저가의 탄화수소계 전해질 이용이 가능하다는 장점 보유. 고성능 핵심 소재 개발 및 반응 메커니즘 등에 대한 선제적 연구를 통해 수소 경제 활성화를 넘어 시장의 주도권 선점이 가능할 것으로 기대

### 2) 미래핵심기술이슈 : 흡착 피독 저항성 고성능 AEMFC 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
AEMFC용 저가 소재 촉매의 부재	- AEMFC는 높은 작동 pH로 인해 저가의 전이금속 및 화합물 촉매를 사용할 수 있으나, 현재는 고가의 백금 촉매를 주로 사용하는 문제
암모니아 전기화적 부분산화반응용 고효성 촉매의 부재	- 암모니아의 전기화학적 부분산화반응에 대한 촉매의 반응 활성 부족
AEMFC의 낮은 구동 온도	- 성능 증대를 위해 현재 최대 50°C 수준인 작동온도를 80°C 이상으로 높여야 하는 문제
전해질막의 암모니아 크로스오버에 의한 효율 저하	- 연료극으로 공급된 암모니아가 공기극으로 이동하여 연료 손실 및 공기극 성능 저하로 인해 연료전지의 효율 저하
이산화탄소 피독에 의한 전극 활성 저하	- AEMFC는 공기 중의 이산화탄소에 의해 활성이 급격히 감소

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
AEMFC용 비금속계 활성점 나노촉매 기술	정의	○ 금속 활성점을 포함하지 않는 고효성 산소 환원 반응 촉매 기술
	요소 기술	- 탄소계 촉매 활성점 설계 및 제어 기술 - 비금속계 촉매 기반 전극 설계 및 제조 기술
결정면 제어 전기화학적 암모니아 부분산화 나노촉매 기술	정의	○ 암모니아 부분산화반응용 고선택성 및 고효성 나노촉매 기술
	요소 기술	- 암모니아 부분산화반응 선택성 촉매 소재 설계 기술 - 고효성 암모니아 부분산화반응 나노촉매 제조 기술 - 암모니아 부분산화반응 메커니즘 분석 나노기술
AEMFC 작동 온도 향상 나노기술	정의	○ 80℃ 이상에서 운전이 가능한 AEMFC용 음이온 교환막 나노기술
	요소 기술	- 음이온 전도성 고분자 설계 및 합성 기술 - 음이온 교환막 나노 상분리 제어 기술
나노모폴로지 제어 암모니아 저투과성 전해질막 기술	정의	○ 암모니아 투과도가 낮은 고분자 전해질막 나노기술
	요소 기술	- 암모니아 저투과성 소재 및 나노모폴로지 제어 기술 - 암모니아 차단성 나노코팅/계면 제어 기술
AEMFC 이산화탄소 피독 저항 나노기술	정의	○ 대기 중 이산화탄소 수준 농도에 저항성을 지니는 이오노머 나노소재 기술
	요소 기술	- 이오노머 설계 및 합성 기술 - 이오노머 나노분산액 제조 기술 - MEA(Membrane Electrode Assembly) 설계 및 제조 기술

## 라. 프로톤 세라믹 연료전지(PCFC)

### 1) 개요

- (정의) 양성자 전도성 세라믹 전해질을 사용하는 연료전지로 높은 이온 전도도와 낮은 활성화 에너지 특성으로 600도 이하 저온에서 고효율로 전력 변환 및 수소생산이 가능한 에너지 변환 시스템
- (필요성) 타 연료전지 대비 높은 연료 이용 효율과 낮은 탄소배출의 장점을 가지고 있으며, 고체 전해질의 사용으로 인해 안정적이고 내구성이 높은 특성을 보유. 수소뿐만 아니라 탄화수소를 비롯한 다양한 연료의 사용이 가능하여 연료의 가용성과 비용 측면에서 높은 유연성을 보이며, PCFC는 차량 및 가정용 발전, 군사용 발전 등 광범위한 응용 분야로 확장 가능성을 가지고 있어 차세대 연료전지로 부상
- (발전 전망) 기존 세라믹 및 폴리머 연료전지로는 달성할 수 없는 혁신적인 제품개발로, 기존 연료전지 시장과 차별화된 시장영역, 예를 들어 고효율/저비용 세라믹 연료전지 자동차, 휴대용 세라믹 전원, 냉난방/보일러 결합 건물/가정용 전원 등의 시장 개척이 가능할 것으로 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 고이온전도, 고내구성 PCFC 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
고전도성 나노스케일 박막 프로톤 세라믹 전해질 구현의 한계	- 박막 제조 기술을 통한 연구실 규모의 소형 단전지 제작 및 기본 성능 평가에 머물러 있으며, 박막화 과정에서의 전해질 조성 제어 및 균일도 확보 등 다양한 문제
고활성 나노구조 프로톤 전도성 PCFC 양극 개발 기술의 한계	- 소형 버튼셀 크기에서의 전극 나노구조 기술 적용 및 검증 단계에 머무른 상태로, 전극 소재의 물성과 전해질-전극 계면 특성 상관관계 규명, 전기화학 반응 메커니즘 해석 등에 기반한 소재 및 구조 엔지니어링의 체계적 개발 필요

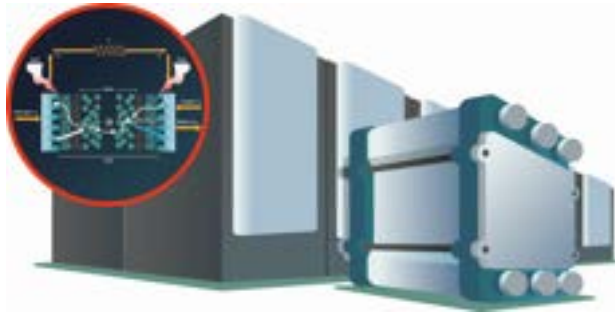
### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
고전도성 나노스케일 박막 프로톤 세라믹 전해질 기술	정의	○ 고전도성 프로톤 세라믹 전해질 소재 및 나노스케일 박막화를 통해 저온에서의 PCFC 성능을 대폭 개선할 수 있는 소재 및 공정 기술
	요소 기술	- 조성 변화를 억제하는 치밀 전해질 형성 공정 기술 - 대면적 박막 전해질 제작이 가능한 나노기술
고활성 나노구조 프로톤 전도성 PCFC 양극 기술	정의	○ PCFC의 전해질-전극 계면 특성 향상과 전기화학 반응성을 향상할 수 있는 고활성 삼중 전도성 양극 소재 기술 및 나노구조화 공정 기술
	요소 기술	- 고활성 삼중 전도성 양극 소재 개발 기술 - 삼중 전도성 양극 소재의 반응 속도 결정 단계 규명 박막 모델 평가 기술 - 전해질/전극 계면 특성 향상 및 활성 향상을 위한 전극 나노구조화 공정 기술

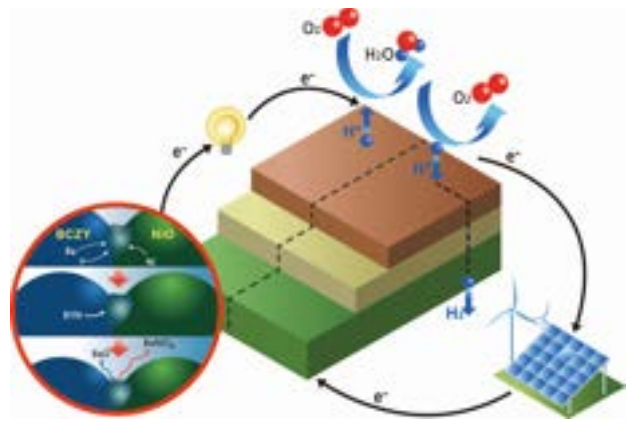
### 〈나노융합 연료전지 로드맵〉

중분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술																	
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032								
나노융합 연료전지	PEMFC	장수명 저가 PEMFC 기술	PEMFC용 초박막 고분자 나노촉매 기술	단원자/양자점 나노촉매, 고품질 나노입자에 설계 및 합성 기술	초박막 촉매 기반 전극 설계 및 제조 기술	원소 나노 촉매 기반 고분자 구조체 합성 고분능 전극 부용 제조 기술															
			PEMFC용 고품성형 압도 4차원 나노촉매 기술	단원자 구조 촉매 합성 및 설계 및 합성 기술				비공극 촉매 기반 전극 설계 및 제조 기술													
			PEMFC용 초박막 4차원 스펙트럼 기술	나노입자 4차원 스펙트럼 설계 및 합성 기술			4차원 스펙트럼 촉매 제어 기술		나노입자 4차원 스펙트럼 제어 제어 기술												
			고분자 기반 PEMFC용 나노구조 촉매 제어 기술	이온노에 분자구조 설계 및 합성 기술			이온노에 분자구조 모놀리더 제어 기술		나노 모놀리더 제어 이온노에 기반 전극 제조 기술												
	SOFC	고효율, 고내구성 SOFC 기술	나노구조 SOFC 전해질 및 전극 기술	충분한 소재 안정도를 갖는 전극 나노구조 제조 기술 / 고밀도·고결정성의 막 전해질 제조공정 기술			전극 나노구조 및 소재의 정밀 제어 공정을 통한 전극 공정 기술														
			SOFC의 표면 및 종전체 나노구조 설계 기술	전극 나노구조의 변형 성능 및 소재 안정성 향상 / 열팽창 및 열안정성 향상 위한 전극 / 촉매 나노구조 합성 기술			전극 나노구조 제어 이온노에 기반 전극 제조 기술														
			공정도를 확보할 수 있는 SOFC 나노구조 제작 공정 기술	대면적 영역에서 전해질 두께를 나노 스케일로 정밀하게 제어할 수 있는 제조공정 기술			나노구조 기반 나노입자 및 나노 구조 공정을 통한 나노구조 제어 기술														
	AEMFC	중량 저감 저온성 고성능 AEMFC	AEMFC용 비금속계 합성 나노촉매 기술	탄소계 촉매 합성 및 설계 제어 기술			비금속계 촉매 기반 전극 설계 및 제조 기술														
			고분능 촉매 전이 촉매 및 이온노에 기반 나노촉매 기술	전극, 고분능 촉매 나노입자 분산 나노촉매 설계 및 제조 기술			고분능 촉매 나노입자 분산 나노촉매 설계 및 제조 기술														
			AEMFC 촉매 온도 분산 나노기술	촉매 분산 온도 분산 설계 및 합성 기술			촉매 분산 온도 분산 나노입자 제어 기술														
			나노입자 제어 및 나노 구조 제어 기술	나노입자 제어 및 나노 구조 제어 기술			나노입자 제어 및 나노 구조 제어 기술														
			AEMFC 이온노에 기반 나노기술	이온노에 설계 및 합성 / 이온노에 나노입자 제조 기술			이온노에 기반 나노입자 및 나노 구조 공정을 통한 나노구조 제어 기술														
	POFC	고효율, 고내구성 POFC 기술	고분능 나노스케일 막 프로톤 세라믹 전해질 기술	초소형 막 전해질 제조 기술			대면적 막 전해질 제작 기술 나노 기술														
			고분능 나노구조 프로톤 전도성 POFC 막 기술	초소형 막 전해질 제조 기술			고분능 나노구조 막 전해질 제조 기술 / 고분능 나노구조 막 전해질 제조 기술														

### 〈나노융합 연료전지 대표제품〉



연료전지 전극 내 나노촉매



나노스케일 박막 프로톤 세라믹 전해질

## 4-2. 나노융합 태양전지

### 가. 무기물계 태양전지

#### 1) 개요

- (정의) 실리콘 또는 화합물 반도체 등 무기물 소재를 광 흡수층으로 사용하여 태양에너지를 전기에너지로 변환시키는 기술
- (필요성) 무기물의 특성상 안정성이 우수하고, 태양광 발전 초기부터 개발되어 양산화된 태양 전지로서, 신재생에너지 설치 용량 확대를 위해 지속적인 기술 개발이 필수
- (발전 전망) 높은 기술 성숙도로 이론 한계 효율에 근접하고 있으나 전 세계적인 신재생에너지 설치 확대를 위해 효율 향상 및 단가 절감이 필요하며, 향후 화석연료 에너지를 대체할 수 있는 주요 에너지 발전 분야로서 전망이 우수

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 광활성 신소재 및 신규 소자구조 개발을 통한 효율 극대화 및 발전단가 절감 기술

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
실리콘 태양전지 효율 고착화	- 실리콘 태양전지의 높은 기술 성숙도로 인해 이론 한계 효율에 근접함에 따라 소자 성능 정체
친환경/저가의 고효율 박막태양전지 광활성 소재 확보의 한계	- 인듐(In), 갈륨(Ga) 등의 고가 소재나 고진공 장비 사용으로 발전단가가 높고, 카드뮴(Cd) 등 독성물질을 사용하여 환경문제가 존재
기존 무기물 광활성 소재의 재료적 한계	- 기존 소재로는 현재의 실리콘 태양전지를 능가하는 성능 구현이 불가능

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
이론 효율 달성을 위한 신규구조 실리콘 태양전지 나노기술	정의	○ 소자 효율 퀀텀 점프를 위한 실리콘 태양전지 신규 소자구조 기술
	요소 기술	- 실리콘 소재의 근적외선 흡광 특성 향상 기술 - 신규 계면 부동화층 및 선택적 전하 주입층 기술 - PERC (Passivated Emitter and Rear Cell), 실리콘 이종접합 (SHJ) 성능 극대화를 위한 신규 소자구조 개발 기술
친환경/저가의 소재 및 공정 기반 나노박막 태양전지 기술	정의	○ 저가의 친환경 소재 및 공정을 통한 박막 태양전지용 무기물 신소재 기술
	요소 기술	- CZTS 기반 초저가 친환경 고효율 박막태양전지 개발 기술 - Cd-free 전하 주입층 기술 - 전기화학 및 저온 공정 기반 나노소재 합성 기술
비실리콘계 신규 광활성 무기 나노소재 기술	정의	○ 새로운 화학결합을 가지는 박막 태양전지용 무기물 신소재 기술
	요소 기술	- 무기 할라이드 광활성 소재 및 소자 기술 - 다성분 황화물계 광활성 소재 및 소자 기술 - 산화물/질화물 기반 광활성 소재 기술



## 나. 유기물계 태양전지

### 1) 개요

- (정의) 공액 유기반도체 소재를 광활성층으로 사용하여 태양에너지를 전기에너지로 변환시키는 기술
- (필요성) 저비용의 유기 소재 기반이므로 저온 공정 및 대량생산이 용이하여 미래 태양광 발전 소재로의 활용이 무궁무진
- (발전 전망) 높은 잠재성을 바탕으로 많은 연구가 이루어지고 있으며 최근 빠른 성장세를 나타내고 있으나, 소자 구동 시 발생하는 구조적 문제로 인한 전하 손실과 낮은 안정성을 보여 상용화의 걸림돌로 작용. 나노기술을 통해 나노구조를 제어하여 효율 및 안정성이 개선된다면 큰 발전 가능성 존재

### 2) 미래핵심기술이슈 : 나노구조 개선을 통한 고성능/고안정성 유기 태양전지 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
새로운 고성능 광활성 신소재의 부재	- 안정성, 롤투롤 공정, 다양한 흡수파장을 동시에 구현할 수 있는 광활성층 소재의 부재 - 유연성 및 투광도를 구현할 수 있는 기판 및 상부투명전극 소재 필요
이종접합 구조의 나노모폴로지 제어 한계	- 유기 태양전지 광활성층 내의 낮은 엑시톤 확산 거리 및 전하 재결합 손실을 극복하기 위해 모폴로지 제어 필요
낮은 장기 안정성	- 수분, 열, 광 및 소자 구동에 따른 모폴로지 변형 등 유기 소재의 본질적인 특성을 극복하여 소자 내구성을 확보할 수 있는 기술 필요
유기 태양전지 대면적 모듈화 한계	- 소면적에서 최적화된 광활성층 나노모폴로지를 대면적 모듈 제작시 결함을 최소화하고 균일하게 재현하는 기술 필요

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
고품위 유기 나노신소재 기술	정의 ○ 높은 흡광도 및 전하 이동도를 갖는 고성능 유기 나노소재 기술
	요소 기술 - 고효율 고전하이동도의 비플러렌계 전자받개 나노소재 설계 및 합성 기술 - 고효율 고전하이동도의 전자주개 나노소재 설계 및 합성 기술 - 엑시톤(exciton) 전하 분리가 용이한 무전압 손실 유기 광활성층 소재 기술
유기 광활성 소재의 나노모폴로지 제어기술	정의 ○ 전자주개/전자받개로 이루어진 이종접합 구조의 나노모폴로지 제어 기술
	요소 기술 - 전자주개/전자받개 소재 혼합 및 상분리 제어를 통한 나노 스케일 네트워크 구조의 모폴로지 최적화 기술 - 계면 에너지준위 매칭 기술

나노기술명	개요	
유기 태양전지의 열·광·수분 안정성 향상 나노기술	정의	○ 유기태양전지 소자의 장기 안정성 향상을 위한 나노소재 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 높은 광안정성의 유기 소재 설계 및 합성 기술</li> <li>- 나노모폴로지 고정화 기술을 통한 안정성 향상 기술</li> <li>- 투명 나노봉지막 코팅 기술</li> </ul>
대면적 유기 태양전지 제조 나노기술	정의	○ 유기 태양전지 대면적화를 위한 나노박막 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 대면적 유기 나노박막 형성 기술</li> <li>- 대면적 균일한 나노모폴로지 구조 제어 기술</li> <li>- 대면적 나노박막 제조 장비 기술</li> </ul>

## 다. 유무기 하이브리드 및 차세대 태양전지

### 1) 개요

- (정의) 유무기 복합소재 또는 양자점 소재를 광흡수층으로 사용하여 태양에너지를 전기에너지로 변환시키는 차세대 태양전지 기술
- (필요성) 고효율 양산화가 가능한 차세대 태양전지 기술로써, 저비용으로 경량의 고효율 발전이 가능하기 때문에 미래 에너지 분야의 게임체인저 역할을 할 수 있는 필수적인 기술
- (발전 전망) 페로브스카이트 태양전지는 이미 실리콘 태양전지의 효율에 근접했으며 양산화를 위한 대면적화 기술 개발 및 고 안정성 확보가 중요. 양자점 태양전지의 경우 저온 공정 및 대량생산을 통한 경제성이 매우 우수하나 효율이 20% 미만으로 낮아 나노기술을 통해 개선 가능할 것으로 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 고신뢰성 초고효율 차세대 태양전지 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
차세대 태양전지의 낮은 변환 효율	- 광 흡수의 극대화 및 광 전압 손실 최소화를 통한 초고효율 소자 기술 필요
고성능 무독성 광활성 소재의 부재	- 상용화를 위해 비독성 기반 유무기 하이브리드 소재 및 양자점 태양전지 개발 필요
낮은 장기 안정성	- 무기물계 소재 대비 계면 재결합, 이온 이동, 외부 환경 등에 의한 소자 열화 현상이 작동 안정성을 제한
태양전지 소자 대면적화 한계	- 균일한 대면적 박막 형성 공정 기술의 한계

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
초고효율을 위한 소재의 전기적 광학적 특성 제어 나노기술	정의 ○ 전기적 광학적 특성 개선을 통한 고효율 유무기 하이브리드 소자 나노기술
	요소 기술 - 유무기 하이브리드 박막 소재 밴드갭 제어 기술 - 하이브리드 박막 결정 성장 제어 기술 - 층간 나노소재 기술
친환경 나노광활성 박막 소재/공정 기술	정의 ○ 독성 원소가 함유된 소재를 대체할 수 있는 나노소재 기술
	요소 기술 - 비납계 유무기 하이브리드 조성 설계 기술 - 무독성 원소 기반의 양자점 소재 합성 기술 - 무독성 용매 기반 박막 제조 기술
유무기 하이브리드 태양전지의 열·광·수분 안정성 향상 나노기술	정의 ○ 태양전지 구동 안정성 확보를 위한 나노소재 및 소자 기술
	요소 기술 - 광/열/수분에 안정한 나노소재 설계 및 합성 기술 - 투명 봉지재 기술
대면적 나노박막 형성 기술	정의 ○ 차세대 태양전지의 대면적화를 위한 나노박막 기술
	요소 기술 - 나노박막의 조성 및 모폴로지 균일도 향상 기술 - 대면적 나노박막 형성 기술 - 대면적 박막 형성 장비 제작 기술

## 라. 적층형 태양전지

### 1) 개요

- (정의) 입사광의 효율적인 활용을 위해 두 개 이상의 서로 다른 밴드갭을 갖는 광 흡수층을 적층하여 태양에너지를 전기에너지로 변환시키는 기술
- (필요성) 단일 접합 태양전지의 이론 한계 효율은 약 29%로 이미 기술 성숙도가 높은 실리콘 및 페로브스카이트 태양전지는 한계에 근접. 이에 따라, 두 개 이상의 태양전지를 적층하면 소자의 효율을 비약적으로 향상할 수 있기 때문에 필수적인 기술
- (발전 전망) 초고효율 우주용 발전원으로써 적층형 태양전지가 개발되어 쓰이고 있으나 가정용 및 산업용으로는 점유율이 낮은 상황. 페로브스카이트 태양전지 기술의 발전으로 다양한 적층형 태양전지가 연구되고 있고 이론적으로 매우 높은 효율을 달성할 수 있지만, 용액 공정 기반의 다층 구조이므로 고효율 소자 개발을 위해 소재 및 소자 설계가 매우 중요하며 관련된 기술 개발이 지속적으로 발전될 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 광하베스팅 극대화를 통한 이론한계효율 돌파 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
적층 구조로 인한 높은 입사광 손실	- 직렬 연결 소자의 특성상 소자의 전류 밀도 향상을 위한 광 포집 극대화 및 전류 매칭 기술 필요
다층 구조 소자에서의 높은 계면 손실	- 하위 셀 간 전자/정공 재결합을 위해 전기적 특성이 우수하면서도 광학적 손실을 최소화할 수 있는 재결합 층이 필수
적층형 태양전지 소재 및 소자의 대면적화 한계	- 상용화를 위해 다층 구조의 적층형 소자를 균일하게 넓은 면적에 형성해야 하는 난제

#### 2-2) 나노기술(주제)

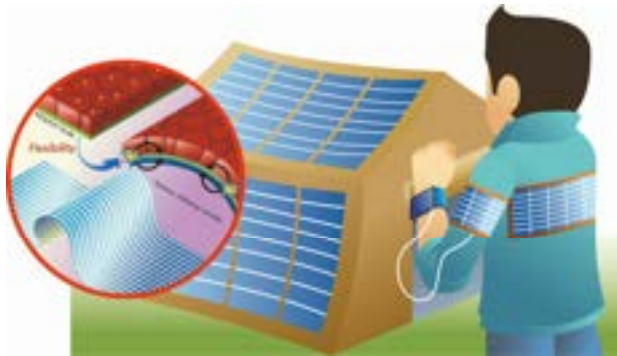
나노기술명	개요
광 포집 극대화 나노기술	정의 ○ 입사광의 손실 최소화를 통한 적층형 소자의 전류 밀도 극대화 기술
	요소 기술 - 하위 셀 간 광전류 매칭 설계 기술 - 광 흡수층 박막의 밴드갭 제어 기술 - 입사광을 제어할 수 있는 층간 나노소재 형성 기술 - 고품위 투명 전극 설계 및 형성 기술 - 밴드갭 제어를 통한 유기 태양전지 (OPV-OPV) 탠덤 제작 기술
다중접합 태양전지 제작 나노기술	정의 ○ 삼중 접합 이상의 다층 구조에서 발생하는 계면 손실을 최소화하여 효율을 극대화하는 나노기술
	요소 기술 - 공정 호환성 향상 기술 - 층간 결함 제어를 위한 부동층 설계 및 형성 기술 - 직렬 저항 최소화 기술 - 재결합 층 설계 기술

나노기술명	개요	
대면적 적층형 태양전지 제작 나노기술	정의	○ 다층 구조 적층형 태양전지를 대면적화할 수 있는 나노소재 형성 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 대면적 광 흡수층 나노박막 형성 기술</li> <li>- 대면적 전하 수송층 형성 기술</li> <li>- 대면적 투명 전극 증착 기술</li> </ul>

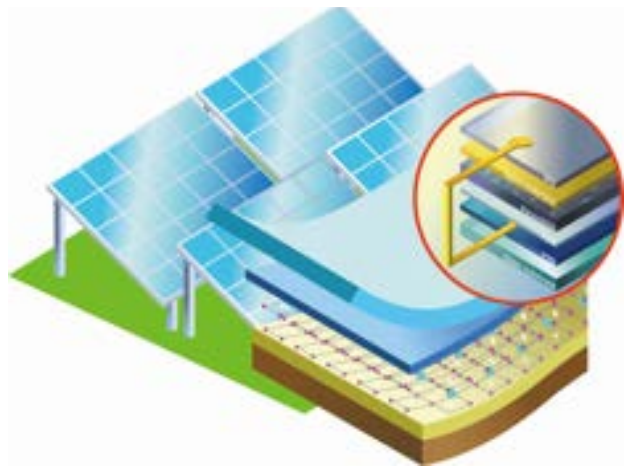
### 〈나노융합 태양전지 로드맵〉

중분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술																
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032							
나노융합 태양전지	무기물계 태양전지	광활성 산소계 및 신구 소자구조 개념을 통한 효율 극대화 및 발전도가 절감	이온 흐름 양성을 위한 신구조 산화물 태양전지 나노기술	질리온 소재의 근적외선 흡수 특성 향상 기술	PSFC, SAI 산소구멍배출을 위한 신구 소자구조 기술	신구 계면 부동화층 및 전하수집층 기술														
			혼합양이온의 소자구조 및 나노-박막 태양전지 기술	CDTS 기반 초저저 전압형 고효율 적외태양전지 기술	Co-free 전하수집층 기술				전기화학 및 저온 공정 기반 나노소재 합성기술											
			비실리콘계 신구 광활성 무기 나노소재 기술	무기 광활성 광활성 소재 및 소자 기술	다양한 물리물계 광활성 소재 및 소자 기술				전하층/광활성 계면 광활성 소재 기술											
	유기물계 태양전지	나노구조 개선을 통한 고성능/고안정성 유기 태양전지	고효율 유기 나노소재 기술	고효율 고안정성 유기 광활성층에 전자수집 나노소재 설계 및 합성 기술	고효율 고안정성 유기 광활성층에 전자수집 나노소재 설계 및 합성기술															
			무기 광활성 소재의 나노-모듈러지 제어 기술	전자주입/전도성 계층 분할 및 소량기 제어용 용한 나노소재 및 나노-구조의 모듈러지 최적화 기술					계면-유기물계 태양전지 기술											
			유기광활성층의 광-수용 안정성 향상 나노기술	높은 광안정성의 유기 나노소재 설계 및 합성기술	나노-모듈러지 고안정성 기술을 통한 안정성 향상 기술				무기 나노-구조의 제어 기술											
	유기 나노-박막 제어 기술		대면적 유기 나노-박막 제어 기술	대면적 나노-박막 제어 기술	대면적 유기 나노-박막 합성기술															
				대면적 나노-박막 제어 기술	대면적 유기 나노-박막 합성기술															
				대면적 나노-박막 제어 기술	대면적 유기 나노-박막 합성기술															
	유무기 하이브리드 및 차세대 태양전지	고신뢰성 초고효율 차세대 태양전지	초고효율을 위한 소량의 전극의 광학적 특성 제어 나노기술	유무기 하이브리드 박막 소재 합성 기술	하이브리드 박막 광활성 합성 제어기술															
			전하수집 나노-광활성 박막 소재 합성 기술	비공극 유무기 하이브리드 조성 설계 기술	무독성 원소 기반의 광활성 소재 합성기술															
			유무기 하이브리드 태양전지의 광-수용 안정성 향상 나노기술	광-수용에 안정한 나노소재 설계 및 합성기술																
			대면적 나노-박막 합성 기술	대면적 박막 합성 장비 기술	대면적 나노-박막 합성기술															
	직층형 태양전지	광활성층 극대화를 통한 이온전계효율 증폭	광무집 대면적 나노기술	직접광 흡수 나노기술	직접광 흡수 나노기술															
			다중접합 대면적 제어 나노기술	공진공용성 합성 기술	직접광 흡수 나노기술	직접광 흡수 나노기술														
			대면적 직층형 태양전지 제어 나노기술	대면적 광흡수층 나노기술	대면적 광흡수층 나노기술															

### 〈나노융합 태양전지 대표제품〉



웨어러블 디바이스용 유연 태양전지



하이브리드 나노박막 태양전지

### 4-3. 나노융합 하베스팅

#### 가. 열전 하베스팅

##### 1) 개요

- (정의) 온도 차이를 이용한 에너지 회수(Energy harvesting, Seebeck 효과)로 산업용/차량용 발전기로 활용하거나 그 반대로 전기에너지를 인가하여 소자의 양단에서의 냉각/발열(Peltier 효과)를 발생시키고 이를 이용하여 냉각 또는 발열을 일으키는 공기조화 기술
- (필요성) 에너지 변환 과정이 단일 재료 내에서 일어나고, 부산물을 발생시키지 않아 친환경 기술로서 큰 가치를 가지며, 크기를 다양하게 조절할 수 있다는 장점을 보유함에 따라 반드시 필요
- (발전 전망) 저차원 열전 소재는 수 nm의 크기를 가진 1D 및 2D 기반 나노열전소재로, 이러한 나노소재를 이용한 차세대 고효율 열-전기 변환 에너지 소재의 구현을 통해 에너지 활용 효율화 기대

##### 2) 미래핵심기술이슈 : 저차원 소재 기반 에너지 변환 모듈 기술

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
저차원 단결정 나노소재 대량 합성법의 부재	- 기존의 열전 소재를 대체할 수 있는 신조성 나노소재의 대량 합성법 필요
저차원 나노소재의 열 및 전기적 특성 분석의 한계	- 저차원 나노소재의 열 및 전기적 특성의 평가 기술의 표준화 기법의 한계
저차원 기반의 소재를 활용한 모듈 제작 기술의 부재	- 나노소재의 모듈화를 위한 기반 기술 및 공정 기술의 부재

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
저차원 단결정 나노열전소재 합성 기술	정의 ○ 나노선 및 나노시트 형태의 단결정 열전 소재의 제조 기술
	요소 기술 - 저차원 소재 에너지 밴드 제어 기술 - 나노소재 크기 제어 및 해석 기술 - 나노반도체 소재 결함 제어 기술 - 나노반도체 소재 도핑 기술
저차원 소재의 열 및 전기적 특성 측정 및 제어 기술	정의 ○ 저차원 소재의 열 및 전기적 특성 측정 및 제어 기술
	요소 기술 - 단일 나노소재의 전기적 특성 측정 기술(전기전도도, 제백계수) - 단일 나노소재 열전도도 특성 측정 기술 - 포논 제어를 통한 열전도 특성 제어 메커니즘 확보 기술 - 온도에 따른 열전 성능 지수 측정 기술

나노기술명	개요	
저차원 소재 기반 열전 모듈화 기술	정의	○ 저차원 소재 기반 열전 모듈 제작 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 저차원 소재의 n형, p형 선택적 도핑 기술</li> <li>- 모듈 적용 소재의 공극 분석 및 해석 기술</li> <li>- 저차원 소재 정렬 및 모듈화 기술</li> <li>- 원자 확산 방지 기술</li> <li>- 저차원 소재 기반 열전 모듈의 안정성 및 내구성 확보 기술</li> </ul>



## 나. 압전 하베스팅

### 1) 개요

- (정의) 압전 에너지 하베스팅 기술은 기계적 변형을 전기에너지로 변환하는 원리를 이용하여 일상생활 또는 산업 현장의 미활용 에너지를 재활용하여 유용한 전기에너지를 생산하는 기술
- (필요성) 소형화, 무선화, 고기능화가 필요한 다양한 분야 즉 웨어러블컴퓨터, 넷북, 무선 센서 네트워크, 스마트폰 등의 정보통신기기, 초소형 로봇틱스, 차세대 의료기기 등의 에너지원으로 개발되고 있고 그 상용화 분야는 점차 확대되는 추세로 관련 기술이 매우 필요한 상황
- (발전 전망) 압전 에너지 하베스팅은 발전량이 적고, 전력이 불안정하기 때문에 실용화에 많은 어려움이 있었으나, 급속한 발전을 가져온 나노기술에 힘입어 저가 고효율 나노소재 개발이 성공적으로 이루어지는 단계. 기존 압전소재의 경우 납을 포함하는 세라믹 소재를 중심으로 개발되어 왔으며, 장기적으로는 납을 포함하지 않은 무연계 친환경 압전 세라믹 소재, 고분자 소재, 복합체 소재 개발이 필요하고, 이를 중심으로 관련 나노기술이 개발될 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 친환경 고성능 나노압전소재 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
무연 압전소재의 압전/유전특성 조절을 통한 친환경 고성능 압전TEH(Energy Harvesting) 개발의 한계	- 친환경/고성능 압전TEH에 요구되는 높은 압전 특성 및 낮은 유전율을 동시에 갖는 무연 압전 재료 개발 필요
반강유전체 및 릴렉서 고분자 제어를 통한 세라믹 수준의 유기물 압전소재/부품 확보의 한계	- 전기활성 고분자 압전소재는 (기계적으로 유연하고 투명하며, 공정이 간편함은 물론 상대적으로 생체친화적이라는 장점에도 불구하고) 정확한 메커니즘 및 그에 따른 조성 개발이 미흡하여 여전히 획기적인 효율 향상에 한계
고효율 압전소재의 개발 및 대면적 공정 기술의 한계	- 상용 MEMS 압전TEH 개발을 위해 반도체 증착공정이 가능한 고효율 신 압전 소재 개발 필요
압전 에너지 하베스팅 소자에서 공진 주파수 불일치	- 압전 에너지 하베스팅 소자에서 설치환경에 따라 공진 주파수를 맞춰야하는 문제로 인해 사용이 제한
압전 에너지 하베스팅 소재 및 소자의 신뢰성 부족	- 온·습도 등 환경 변화에 따른 공진 주파수 변형, 출력 성능 저하 및 배터리를 대체할 수준의 지속 가능한 수명 부족
새로운 컨셉의 융합소자 제작을 통한 출력 향상 한계	- 자기-기계-전기 변환 하베스터의 낮은 에너지 변환 효율로 인해 에너지 발전량이 적어 응용범위가 제한

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
배향 무연 압전 후막 기반 친환경/고성능 압전 TEH 나노기술	정의	○ [001] 방향으로 배향된 무연 압전체 나노기술을 통한 친환경/고성능 압전 TEH 제조 기술
	요소 기술	- [001]-배향 무연 압전 시드 제조를 위한 나노소재 기술 - [001]-배향된 무연 압전 후막 제조를 위한 나노공정 기술 - 배향된 무연 압전 후막의 나노구조 조절을 통한 친환경/고성능 압전 TEH 제조 기술
고성능 전기활성 압전 유기소재 나노기술	정의	○ 세라믹 수준의 높은 압전 계수와 전기기계 결합계수를 기반으로 에너지 변환 효율 향상이 가능한 유기물 압전소재 나노기술
	요소 기술	- 반강유전체 및 릴렉스 고분자 나노소재 설계 및 합성 기술 - 다중 상 기반 고분자 다중 합체 나노소재 메커니즘 해석 및 합성 기술 - 압전 세라믹 소재부품에 버금가고 대체할 수 있는 유연하고 투명한 유기물 압전 및 강유전 소재/부품 기술 - 건물용, 웨어러블용 등의 응용 분야에 경제적으로 사용할 수 있는 에너지 하베스팅 제품 및 기술
전기차 센서적용 압전TEH 재료/소자 기술	정의	○ 전기차에 적용하는 각종 센서 (타이어압력, 배터리 불량진단, 마이크로폰 등)의 전력원으로 활용 가능한 MEMS 압전TEH 개발 기술
	요소 기술	- 반도체 공정에 적합한 고효율 압전 신소재 기술 - 신 압전소재 맞춤형 대면적 공정 및 특성 분석 기술 - MEMS 압전TEH 소자 구현 및 전력회로 설계 기술
자가공진조절 나노압전 에너지 하베스팅 기술	정의	○ 고성능 압전 나노소재 기반의 자가공진조절 압전 에너지 발전소자 개발 기술
	요소 기술	- 높은 압전 에너지 밀도 성능 지수 ( $d \times g$ ) 값을 갖는 압전 나노소재 기술 - 자가공진조절(Self-resonance tuning) 기술을 통한 광대역 주파수 환경에서 동작 가능한 압전 에너지 하베스팅 소자 기술 - 높은 피로 수명을 가지는 압전 에너지 하베스팅 나노소재 및 소자 기술
장기구동 가능한 고신뢰성 압전 나노발전기 기술	정의	○ 고내구성의 압전소재와 소자 기술을 기반으로 주변 환경 변화에 둔감하고 장시간의 수명을 가지는 압전 나노발전기 기술
	요소 기술	- 고성능 및 고신뢰성의 압전 나노복합소재 제작 기술 - 장수명의 압전 에너지 하베스터 설계 및 제작 기술
고출력 하이브리드 나노에너지 하베스팅 기술	정의	○ 자왜, 압전, 마찰전기 재료의 에너지 변환 효율 향상을 위한 나노기술
	요소 기술	- 비정질 자왜재료 (magnetostriction)의 나노결정립 형성 기술 - 압전재료의 공공결함 제어 기술 - 마찰전기 재료의 초고비표면적 나노구조체 형성 기술

## 다. 마찰 하베스팅

### 1) 개요

- (정의) 두 물질 간의 접촉 시 일어나는 전하 이동 현상에 의해서 생긴 포텐셜로 에너지를 발생하  
는 기술로 마찰대전과 정전기유도의 커플링 효과에 기인한 에너지 하베스팅 기술
- (필요성) 마찰에 의한 전력 생성 방식은 두 대전체의 마찰 시 나타나는 물질 간 전하 이동 현  
상에 의한 것으로, 바이오, 스마트 물류, 안전, IoT 센서 등 4차 산업혁명의 핵심 분야의 실현  
에 있어 매우 중요한 에너지원. 가장 큰 장점으로 다른 에너지원의 전력 변환 시스템보다 에너  
지 변환 효율이 높아 작은 외부 응력에 의해서도 높은 출력을 얻을 수 있고, 열, 태양 등 다른  
에너지원에 비해 시간적, 공간적 제약이 없을 뿐만 아니라, 물질 내부의 변형(strain)에 의해  
에너지를 생산하는 기존 압전(piezoelectric) 소재의 피로도(fatigue) 현상이 없어 지속적인  
에너지 생산에도 매우 유리
- (발전 전망) 4차 산업혁명 핵심 분야에서의 에너지 수급 문제를 해결할 수 있는 에너지 하베  
스팅 기술 중의 하나로 배터리 교체가 어렵거나 불가능한 상황에서의 안정적인 소자 구동에  
필요한 기술로, 향후 인체 삽입형 소자, 스마트 물류, 전기자동차 센서 등 다양한 응용 분야  
에 사용이 될 것으로 보이며, 이외에 치료, 능동형 센서 등 관련 분야로의 새로운 제품 개발  
이 활발할 것으로 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 나노마찰 에너지 하베스팅 효율 향상 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
마찰 에너지 하베스팅의 낮은 출력 및 충전 효율	- 마찰대전 소재의 낮은 전하 농도, 높은 임피던스 등으로 인해 출력 저하 및 충전 효율 감소
정전발전 소재의 에너지 변환 효율 향상의 한계	- 마찰대전으로 형성된 전하의 손실 및 유도된 전기장의 손실로 인해 전기에너지 변환 효율 향상이 제한

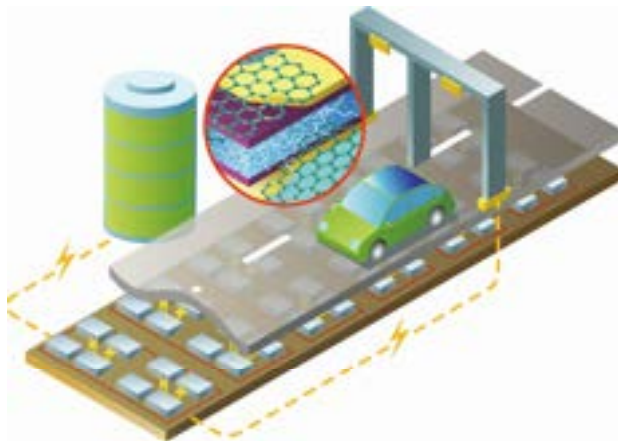
#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
고출력·저임피던스 나노정전발전소재 및 소자 기술	정의 ○ 고효율 마찰대전 기반 고출력 나노발전소자 기술
	요소 기술 - 고효율 전하 전달을 위한 대전체 나노소재 기술 - 극한 환경에서 안정적인 전하 유지를 위한 나노소재 및 표면 기능화 기술 - 효율적인 에너지 저장을 위한 低 임피던스 소재 및 소자 구조 기술
고효율 증상 정전 소재 나노기술	정의 ○ 전하 포집층 및 전자 방지층을 기반으로 마찰대전으로 포집된 전하의 손실을 막고, 유도된 전기장의 손실을 막아, 전기 생산 효율 향상을 보이는 정전 발전 소재 나노기술
	요소 기술 - 고효율 전하포집층 나노소재 설계 및 증착 기술 - 고유전율 전자방지층 나노소재 설계 및 제작 기술 - 고효율 마찰대전 나노표면 소재/구조 설계 및 제작 기술

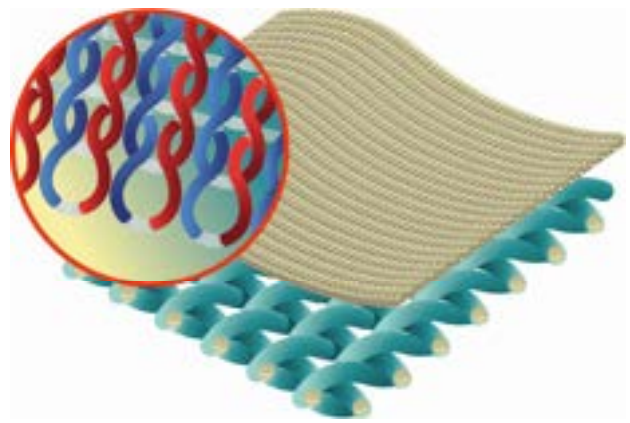
### 〈나노융합 에너지하베스팅 로드맵〉

종분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술																		
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032									
나노융합 에너지 하베스팅	열전 하베스팅	저차원 소재 기반 에너지 변환 모듈	저차원 단결정 나노-열전 소재 합성 기술	에너지 밴드 제어기술	나노소재 크기 제어기술	결함 제어 기술	나노반도체 도핑 기술															
			저차원 소재의 열 및 전기적 특성 측정 및 제어 기술	단결 소재 전기적 측정기술	열전도 특성 측정기술	복소 기반 열전도 특성 제어기술	열전성능차수 측정기술															
			저차원 소재 기반 열전 모듈화 기술	저차원 소재의 열, 광학적 특성의 도핑 기술	저차원 소재 모듈 기술/ 용이유산 합성기술	열전 모듈 안정성 및 내구성 확보 기술																
	압전 하베스팅	친환경 고성능 나노압전소재 기술	배양 무연압전 후각 기반 친환경/고성능 압전 나노기술	배양 무연 압전 시트 및 후각 제어를 위한 나노공정 기술			친환경/고성능 압전 나노하베스팅 소재 제조 기술															
			고성능 전기발전용 압전 유기소재 나노기술	친환경친화 및 일체화 고분자 나노소재 기술			고분자 다중입체 나노소재 대량 합성 및 분기 기술															
			전자차 센서용 압전도기 재료/소자 기술	고효율 압전 신소재 기술			MEMS 기반 에너지 소자 구멍 및 전계차로 설계 기술		신 압전소재 맞춤형 대면적 공정기술													
			자가발전조립 나노압전 에너지 하베스팅 기술	높은 압전 에너지 밀도 및 고효율의 높은 출력수율을 갖는 압전 나노소재 기술			자기조립형 나노소재 기술		자기조립형 나노소재 기술													
			장기구동 고성능압전 나노생체인 기술	고성능 고성능압전 나노소재 합성 제어 기술			장수명의 압전 나노하베스팅 설계 및 제조 공정기술															
	마찰 하베스팅	나노마찰 에너지 하베스팅 효율 향상 기술	고효율 저압/저전압 나노압전소재 및 소자기술	고효율 전하 전달 위한 대면적 나노소재 기술/안정적인 전하 운반을 위한 나노소재 및 표면 기능화 기술			에너지 저장용 저압/저전압 소재 및 소자 기술															
			고효율 증심 접점 소재 나노기술	고효율 전하수송 나노소재 설계 및 제작기술			고효율 전하수송 나노소재 기술		고효율 마찰대안 나노소재/구조설계 및 제작 기술													

### 〈나노융합 에너지하베스팅 대표제품〉



압전 하베스팅 시스템 내 나노압전소재



웨어러블 정전 발전 시스템 내 나노정전소재

## 4-4. 나노융합 이차전지

### 가. 리튬 이차전지

#### 1) 개요

- (정의) 리튬 이차전지는 양극, 음극 및 액체 전해질을 사용하여 반복된 충방전을 통해 전기에너지를 저장하는 기술
- (필요성) 한 번 사용하고 나면 재사용이 불가능한 일차전지와 달리, 방전이 되면 충전을 통해 반영구적으로 재사용할 수 있으며, 높은 에너지 밀도와 우수한 출력을 자랑하고, 충전지 수명이 줄어드는 메모리 효과가 없어 다양한 분야에 활용 가능하여 필수적인 기술
- (발전 전망) 리튬 이차전지는 소재 및 활물질 표면 제어 기술 발전으로 초고속 충전 기능을 확보하고 전극 및 셀 단위의 폼팩터(form factor) 최적화를 통해 에너지 밀도를 향상시킬 것으로 예상. 차세대 음극인 리튬금속을 사용하는 리튬-공기전지 등을 구현하여 고에너지밀도의 이차전지를 구현하거나 리튬이온 이차전지의 양극을 사용하여 에너지 밀도를 높일 수 있기 때문에 활발한 기술 개발 전망

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 초고속 충전이 가능한 리튬이온 이차전지 기술

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
리튬이온 확산에 따른 초고속 충전의 한계	- 전극 내부의 느린 리튬이온 확산계수에 따라 큰 과전압이 발생 - 나노급 소재 사용 시, 액체 전해질의 부반응이 많아지며 전극의 에너지 밀도가 감소
초고속 충전을 위한 전극/전해질 계면 제어의 한계	- 음극/액체 전해질 계면 부반응에 의해 계면 저항층이 생성 - 초고속 충전 시, 전극과 접촉하고 있는 액체 전해질 영역에서 리튬 결핍층이 생성

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
초고속 충전을 위한 전극 나노구조 제어 기술	정의	○ 리튬이차전지의 충전 및 방전 속도 통제를 위해 전극을 구성하는 활물질 입자의 크기 및 구성을 나노수준에서 제어하기 위한 기술
	요소 기술	- 나노스케일의 일차입자로 구성된 마이크로 크기의 양극 소재 합성 기술 - 다상의 나노스케일 입자 크기 및 분포 제어 기술 - 양극 소재의 안정성 및 리튬 확산을 위한 표면 나노코팅 기술 - 흑연 음극 소재의 충전 속도 향상을 위한 표면 나노코팅 기술 - 나노실리콘 음극 소재 등 급속충전 음극소재 개발 기술 - 나노알루미나 기반 고안정성 코팅 분리막 기술 - 초고효율, 초고용량 및 장수명의 나노실리콘(Si)계 음극 복합 물질 개발 기술

나노기술명	개요	
초고속 충전을 위한 활물질/전해질 나노계면 제어 기술	정의	○ 리튬이온을 저장하는 음극/양극 활물질과 전해질의 계면 저항을 나노수준에서 통제하는 기술
	요소 기술	- 흑연 및 실리콘 음극 소재의 인공 고체 전해질 계면상(Solid electrolyte interphase) 코팅 기술 - 양극 산화물 소재 표면의 나노 이중 산화물 코팅 기술 - 신규 액상 전해질 첨가제 개발을 통한 음극/양극 보호 기술 - 신규 액상 전해질 조성 개발을 통한 활물질/전해질 안정화 기술

### 3) 미래핵심기술이슈 : 초고에너지밀도 리튬 이차전지 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
복합전극의 이온/전자 전도도 전달 경로의 한계	- 복합전극의 로딩량이 높아지면 이온 및 전자전도도의 전달 경로가 제한
리튬금속/무음극 시스템 구현의 한계	- 층상계(LiCoO <sub>2</sub> , NCM 등) 양극 적용 시 무음극으로 리튬이차전지 구현 필요 - 리튬금속의 문제 해결을 위해 음극 구조체 개발, 분리막, 기능성 전해질, 음극 보호막 등 기술 개발이 필요
황 양극 활용의 낮은 전기화학 특성	- 황 전극은 높은 이론 용량을 가지고 있으나, 황의 낮은 전자전도도, 방전 시 형성된 리튬황화물의 해리 등의 문제 보유

#### 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
후막전극 제조를 위한 나노고분자 바인더 기술	정의	○ 고로딩 후막전극의 물성 확보를 위한 나노고분자 바인더 제조 및 합성 기술
	요소 기술	- 이온전도성을 가지는 나노고분자 바인더 기술 - 나노고분자 바인더가 적용된 대면적 후막전극 제조 기술 - 탄소나노튜브 기반 고성능 후막전극 제조 기술
리튬금속 음극 적용을 위한 나노구조 설계 기술	정의	○ 고용량 및 고에너지밀도 구현이 가능한 리튬금속 음극을 적용하여 효율과 수명 안정성을 확보하는 나노기술
	요소 기술	- 무음극 적용 리튬전극의 나노스케일 계면 안정화 기술 - 음극 나노구조체 소재 기술 - 리튬금속 표면 보호막 기술 - 리튬금속 계면 안정화를 위한 기능성 분리막 및 전해액 첨가제 기술
황 나노전극 구현을 위한 전극구조 설계 기술	정의	○ 황전극의 전기화학 특성 확보를 위한 나노구조 전극 설계 및 제조 기술
	요소 기술	- 황전극 전자전도도 향상을 위한 복합소재 기술 - 리튬황화물의 해리 억제를 위한 소재 기술 - 황-탄소(또는 금속) 복합소재 설계 기술

## 나. 전고체 이차전지

### 1) 개요

- (정의) 고체상의 활물질 및 전해질을 사용하여 반복된 충방전을 통해 전기에너지를 저장하는 기술
- (필요성) 이차전지의 대형화 및 고에너지 밀도화에 따른 안전성 우려를 해결하기 위한 기술로서 불연 혹은 난연성의 고체 전해질을 사용하는 전고체 전지가 주목받고 있으며, 종래 가연성의 유기 액체 전해질을 사용하지 않아 전지 안전성의 획기적인 개선에 필요
- (발전 전망) 전고체 이차전지는 난연성 고체 전해질을 사용하여 우수한 안전성을 가지며 소재 및 전극 기술 개발을 통해 리튬이온전지를 상회하는 에너지밀도를 확보할 것으로 예상

### 2) 미래핵심기술이슈 : 고안전성 고에너지 밀도 전고체 전지 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
기존 전지 시스템의 에너지 밀도 한계	- 고체 전해질의 적용으로 기존 리튬이온전지 대비 향상된 에너지 밀도 구현 필요
초급속 충전이 가능한 이차전지 구현의 한계	- 면적당 용량 및 한계전류 밀도의 개선 필요 - 고전류에서 전지의 각 요소에서 과전압 발생
극한 환경에서 작동이 가능한 이차전지 구현의 한계	- 기존 액체 전해질의 물리적 한계에 따른 고온 및 저온의 극한환경에서 이차전지의 성능 극복 필요

### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
고에너지 밀도 전극을 위한 나노구조 및 계면 제어 기술	정의	○ 고에너지 복합전극의 성능 향상 및 전지 구성 물질 계면 최소화를 위한 나노기술
	요소 기술	- 전자전도성 나노소재의 형상 및 표면 제어 기술 - 이온전도성 나노고분자 바인더 설계 및 합성 기술 - 나노소재가 균일하게 분산된 대면적 전극 제조 기술 - 전극/고체 전해질 계면 부반응 최소화 나노기술 - 전극/고체 전해질 접촉 유지를 위한 나노기술 - 고균일성을 갖는 고품질 그래핀 대량 제조 및 고성능 이차전지 도전재 기술
초급속 충전을 위한 나노전극 소재 기술	정의	○ 초급속 충전을 위한 나노전극 소재 기술
	요소 기술	- 가역적 리튬 전달착 반응의 한계전류 밀도 극대화를 위한 나노복합전극 설계 및 제조 기술 - 과전압 극소화를 위한 복합전극 소재 설계 및 제조 기술

### 3) 미래핵심기술이슈 : 고체 이온전도체 소재 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
상온에서 초고이온전도도를 가지는 소재의 부재	- 초고이온전도도를 통해 초고속 충전 구현이 가능하지만, 상온에서 초고이온 전도도를 보이는 소재 및 기술 필요
나노급 입자크기를 가지는 고체 전해질 소재의 부재	- 고체의 특성상 전극 내 균일한 이온 전달 경로를 형성하기 위해 소입경 고체 전해질 필요
고체 전해질의 극한조건에서 낮은 안정성	- 고전압 또는 저전압에서 고체 전해질이 전기화학적 부반응을 일으켜 전지의 저항 증가로 인해 안정성 저하

#### 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
나노스케일 구조 제어를 통한 초고이온전도 소재 기술	정의	○ 나노스케일 프레임워크 구조를 제어하여 이온 전도도를 향상시키는 기술
	요소 기술	- 이온전도도 향상을 위한 고체 전해질 결정 내 결함 제어 기술 - 이온전도도 향상을 위한 나노스케일 고분자 체인 제어 기술
나노급 입자크기를 가지는 고체 전해질 제조 기술	정의	○ 이온전도도 손실이 없는 나노급 고체 전해질 합성 기술
	요소 기술	- 나노급 입자크기( $\ll 1\mu\text{m}$ ) 가지는 고이온전도성( $>1\text{mS/cm}$ ) 고체 전해질 제조 기술 - 나노급 고체 전해질의 표면 안정화 기술
나노계면 제어를 통한 전위안정성 고체 전해질 기술	정의	○ 고체 전해질 전위안정성 향상을 위한 활물질/고체 전해질 나노계면 제어 기술
	요소 기술	- 고전압/저전압 안정성을 위한 고체 전해질 나노제어 기술



## 다. 전력저장용 이차전지

### 1) 개요

- (정의) 대규모 전력 저장 용도로 대용량 이차전지 시스템을 사용하여 전기에너지를 저장하는 기술
- (필요성) 지속적으로 얻을 수 없는 태양에너지, 풍력에너지 등의 재생에너지는 에너지 저장시스템(Energy Storage System, ESS)을 활용해야하며, 이를 위한 전력 저장용 이차전지의 개발이 필수
- (발전 전망) 태양, 풍력에너지 등 재생에너지의 사용 확대와 함께 전력 저장용 이차전지에 대한 수요도 크게 증가할 것으로 예상되며, 이에 대응하는 이차전지 기술개발이 활발히 추진될 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 고내구성 전력저장용 이차전지 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
Na-S전지의 낮은 안전성	- Na-S전지는 나트륨금속 음극을 중온(300℃ 내외)에서 구동하는 시스템으로 안전성 문제
리독스 흐름 전지의 취약한 장기 내구성	- 리독스 흐름 전지 내구성 확보를 위한 전해액, 전극 요소기술 필요
수계 이차전지 전극/전해질 계면 부반응 제어의 한계	- 수계 이차전지의 가역성 확보를 위한 전극/전해질 부반응 제어 기술 필요
나트륨 이차전지의 낮은 장기 수명	- 나트륨 이차전지의 수명확보를 위한 음극, 양극, 전해질 소재 기술 필요

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
나트륨 황 (Na-S) 전지의 안전성 향상을 위한 나노구조 셀 설계 기술	정의 ○ 나트륨-황 (Na-S) 이차전지는 고온에서 작동하는 대용량 셀을 채용한 이차전지로 전지의 안전성 확보가 필수적인 시스템이며 이를 해결하기 위한 나노구조 셀 설계 기술
	요소 기술 - 나트륨 금속 음극과 베타알루미나 고체 전해질 사이의 계면 제어 기술 - 베타알루미나 소재 개발 및 형상 제어 기술 - 나트륨 음극, 황 양극, 베타알루미나 고체 전해질의 배치 및 셀 설계 기술
리독스 흐름 전지 전극/전해질 나노계면 제어 기술	정의 ○ 대용량 셀 제조에 이점을 가진 리독스 흐름 전지 (Redox flow battery, RFB)의 셀 전기화학 특성과 장기 내구성을 확보하기 위한 나노계면 제어 기술
	요소 기술 - 산화환원 가역성 확보를 위한 전극 촉매 기술 - 전극 내구성 확보를 위한 복합소재 설계 및 합성 기술 - 셀 내구성 확보를 위한 시스템 설계 기술

나노기술명	개요	
수계 이차전지 전극/전해질 계면 제어 나노소재 기술	정의	○ 전극-전해질 계면에서의 물 분해 또는 수소 발생 등의 부반응이 효율 및 수명 저하의 원인으로 작용하는 수계 이차전지의 부반응을 억제할 수 있는 나노계면 제어 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 아연계 음극 나노소재 설계 및 합성 기술</li> <li>- 망간산화물계 양극 나노소재 설계 및 합성 기술</li> <li>- 아연 음극 소재 표면 코팅 및 계면 제어 기술</li> <li>- 망간산화물계 양극 소재 표면 코팅 및 계면 제어 기술</li> </ul>
나트륨 이차전지의 고수명 구현을 위한 전극 소재 나노기술	정의	○ 유기 전해액을 사용하는 유사 시스템으로 나트륨 이온을 저장할 수 있는 음극과 양극 소재의 개발 및 대량생산을 위한 나노구조 제어 및 코팅 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 비정질 탄소/합금 음극 나노소재 설계 및 합성 기술</li> <li>- 전이금속산화물계 양극 나노소재 설계 및 합성 기술</li> <li>- 나트륨전지용 전해액 합성 기술</li> </ul>

## 라. 슈퍼커패시터

### 1) 개요

- (정의) 전극과 전해질의 계면 반응에 의해 전기에너지를 저장하는 기술
- (필요성) 최근 에너지 저장 시스템(ESS), 수소차, 자동 무인 운반차(AGV) 등 장치에서 고출력 밀도를 요구하는 수요가 확대되고 있으며, 슈퍼커패시터는 표면반응을 통해 전하를 충전하여 이차전지로는 불가능한 수준의 출력밀도를 구현할 수 있어 고출력밀도를 요구하는 활용 분야의 대안으로 필수적인 기술
- (발전 전망) 슈퍼커패시터는 전극 기술 개발을 통해 용량을 향상시키고 고온 및 저온 성능 확보를 통해 적용 분야를 확대시킬 것으로 예상

### 2) 미래핵심기술이슈 : 고용량/고출력 슈퍼커패시터 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
슈퍼커패시터 전극 초고용량화의 한계	- 슈퍼커패시터의 표면화학반응으로 인해 이차전지 대비 낮은 에너지 밀도

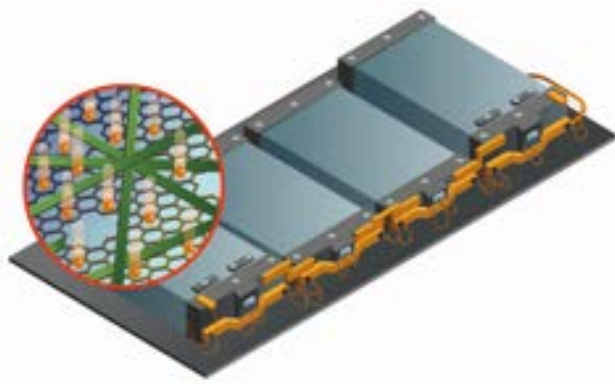
#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
슈퍼커패시터 나노구조체 기술	정의	○ 고용량 슈퍼커패시터를 위한 전극 나노스케일 구조 제어 기술
	요소 기술	- 슈퍼커패시터 전극 나노구조 제어 기술 - 슈퍼커패시터 나노집전체 제조 기술
슈퍼커패시터 전극/전해질 나노계면 제어 기술	정의	○ 고용량 슈퍼커패시터를 위한 전극/전해질 나노계면 제어 기술
	요소 기술	- 슈퍼커패시터 전극/전해질 나노계면 분석 및 제어 기술

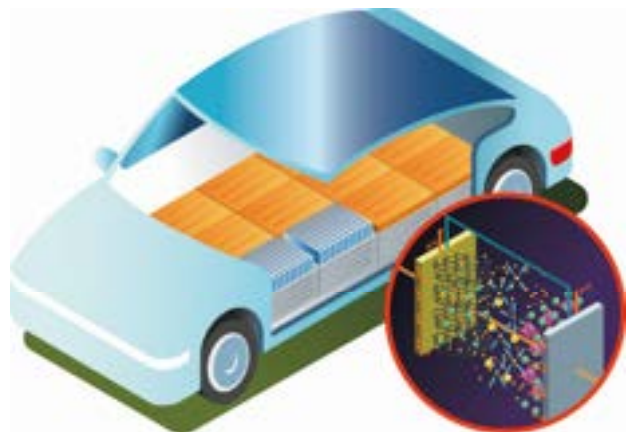
### 〈나노융합 이차전지 로드맵〉

종분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술												
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032			
나노융합 이차전지	리튬 이차전지	초고속 충전이 가능한 리튬이온 이차전지	초고속 충전을 위한 전극 나노구조 제어 기술	나노스케일적 입체구조를 구현한 마이크로 크기의 양극소재 합성 기술	나노입자 크기 및 분포 제어 기술	전극 표면 나노코팅 기술										
			초고속 충전을 위한 전해질/구체 나노계면 제어 기술	전해질 고분자 전해질 개발 기술	나노전해질 코팅 기술	공극/양극 보호 및 황화물/전해질 안정화 기술										
		고에너지밀도 리튬 이차전지	수익성의 제고를 위한 나노고분자 바인더 기술	지연전도성을 가지는 나노고분자 바인더 기술	나노고분자 바인더, 탄소나노튜브 기반의 유연성 고분자 전해질막 제조 기술											
			저온고속 충전 제고를 위한 나노구조 설계 기술	무정규 직육면체 나노스케일 계면 안정화 기술	공극 나노구조체 기술	저온고속 충전 보호막 기술	저온고속 충전 안정화를 위한 기능성 분리막 및 전해질 첨가제 기술									
	전극 나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	활성이 전이전도도 향상을 위한 복합소재 기술	활성이 전이전도도 향상을 위한 복합소재 기술	리튬충전용의 계면 안정화를 위한 소재 기술	활성이 전이전도도 향상을 위한 복합소재 기술	리튬충전용의 계면 안정화를 위한 소재 기술	복합 나노구조는 공극 복합 소재 설계 기술									
		고안전성 고에너지밀도 전고체전지	고에너지 밀도 전극을 위한 나노 구조 및 계면 제어 기술	전극-고체전해질 계면 부반응 최소화 기술 / 전이전도성 및 지연전도성 나노소재 기술												
		고에너지밀도 전고체전지	초고속 충전을 위한 나노구조 소재 기술	리튬 전염적 안정 한계전도도 극대화 & 복합 전극 고안전 디스퍼전을 위한 나노복합전극 기술												
			나노스케일 구조 제어를 통한 초고에너지밀도 소재 기술	고체전해질 코팅 결합 제어 & 고분자 바인더 제어 기술												
	고에너지밀도 전고체전지 소재	나노입자 집적/포함 가지는 고체전해질 제조 기술	나노입자 집적/포함 가지는 고체전해질 제조 기술	나노입자 집적/포함 가지는 고체전해질 제조 기술	나노입자 집적/포함 가지는 고체전해질 제조 기술	나노입자 집적/포함 가지는 고체전해질 제조 기술	나노입자 집적/포함 가지는 고체전해질 제조 기술									
		나노입자 제어를 통한 전이전성 고체전해질 기술	고안전성 & 지연성 안정성을 위한 고체전해질 나노제어 기술													
		나노입자 집적/포함 가지는 고체전해질 제조 기술	나노입자 집적/포함 가지는 고체전해질 제조 기술	나노입자 집적/포함 가지는 고체전해질 제조 기술	나노입자 집적/포함 가지는 고체전해질 제조 기술	나노입자 집적/포함 가지는 고체전해질 제조 기술	나노입자 집적/포함 가지는 고체전해질 제조 기술									
		나노입자 제어를 통한 전이전성 고체전해질 기술	고안전성 & 지연성 안정성을 위한 고체전해질 나노제어 기술													
전극 나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술										
	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술										
	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술										
	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술	나노구조 구현을 위한 전극구조 설계 기술										
슈퍼 커패시터	고용량/고출력 슈퍼 커패시터	슈퍼커패시터 나노구조체 기술	슈퍼커패시터 나노구조체 기술	슈퍼커패시터 나노구조체 기술	슈퍼커패시터 나노구조체 기술	슈퍼커패시터 나노구조체 기술										
			슈퍼커패시터 나노구조체 기술	슈퍼커패시터 나노구조체 기술	슈퍼커패시터 나노구조체 기술	슈퍼커패시터 나노구조체 기술	슈퍼커패시터 나노구조체 기술	슈퍼커패시터 나노구조체 기술								

### 〈나노융합 이차전지 대표제품〉



초고속 충전 이차전지 내 나노전극소재



자동차용 고에너지밀도 이차전지 내 나노전극소재

## 4-5. 나노융합 수소

### 가. 물분해 수소생산

#### 1) 개요

- (정의) 이산화탄소 배출 없이 물을 전기분해하여 수소를 생산하는 기술
- (필요성) 청정에너지 수소를 연료로 사용하는 기술이 고도화됨에 따라 기존의 화석연료를 이용하여 수소를 생산하는 기술에서 탄소중립 사회를 실현하기 위한 친환경 수소생산 기술로 전환 필요
- (발전 전망) 그린수소생산 기술은 탄소중립을 달성하기 위한 차세대 에너지원 확보 차원에서 매우 중요한 기술이며, 가격 경쟁력과 수소 발생효율 및 용량을 갖춘 수전해 수소생산 기술은 차세대 친환경 에너지 생산 기술로 매우 유망

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 비귀금속 촉매 기반 음이온 교환 고전류밀도 수전해 기술

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
수전해 효율 향상을 위한 고성능 비귀금속 촉매의 부재	- 산소발생과 수소발생 반응에 낮은 과전압을 가지면서 장기안정성이 뛰어난 비귀금속 촉매 필요
고이온전도성 수전해 멤브레인 확보의 한계	- 수소이온 또는 수산화이온이 선택적으로 이동할 수 있는 고이온전도성 고분자 멤브레인이 절실히 요구되나, 기계적·화학적 안정성과 이온전도성을 동시에 만족하는 멤브레인 필요
촉매 전극의 성능과 수명 향상을 위한 촉매 지지체의 부재	- 촉매 활성을 극대화하기 위해 다공성을 유지하면서 멤브레인과의 결합성 및 전해질에서 장기적으로 동작이 가능한 전도성 지지체 필요
고전류밀도에서 동작 가능한 수전해 모듈화 한계	- 고전류밀도에서 수소 발생 효율이 급감하고 셀의 수명이 급속하게 저하되는 문제를 해결하기 위한 촉매/지지체/멤브레인 어셈블리 기술의 최적화 및 셀 모듈화 기술 개발이 초기 단계

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
비귀금속 수전해 나노촉매 기술	정의	○ 비귀금속 기반으로 낮은 과전압과 장기안정성을 가지는 수소 발생 및 산소 발생 나노촉매 기술
	요소 기술	- 다원소 합금 기반 비귀금속 나노촉매 소재 합성 기술 - 비표면적 향상을 위한 나노촉매 형상 제어 기술 - 장기안정성 확보를 위한 촉매 안정성 평가 기술
단일원자 나노촉매 형성 기술	정의	○ 귀금속 사용량을 최저로 하면서 촉매 활성을 극대화하는 단일원자 나노촉매 합성 기술
	요소 기술	- 대면적 균일성 단일원자 합성 기술 - 단일원자 촉매 성능 및 미세구조 분석기술 - 다원계 기반 단위 원자 촉매 안정성 향상 기술

나노기술명	개요	
나노다공성 전도성 촉매지지체 제조 기술	정의	○ 수전해 촉매의 활성을 유지하면서도 셀의 전극저항을 최소화하기 위한 다공성 전도성 지지체 제조 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고비표면적 다공성 촉매 지지체 형성 기술</li> <li>- 촉매와의 접합력 증진을 위한 지지체 표면 개질 기술</li> <li>- 액체 전해질의 확산과 발생된 기체의 확산 최적화를 위한 지지체 형상 제어 기술</li> </ul>
고이온전도성 나노멤브레인 기술	정의	○ 수소 이온 또는 수산화 이온이 쉽게 이동할 수 있는 고이온전도성 고분자 전해질 제조기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고이온전도성 고분자 전해질 합성기술</li> <li>- 전해질의 기계적 안정성 향상 기술</li> <li>- 촉매 전극과의 접합력 및 계면 저항 최소화 기술</li> </ul>
수전해 셀 어셈블리 나노기술	정의	○ 촉매/지지체/멤브레인 어셈블리를 통한 고성능 수전해 셀 제조 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다공성 지지체 전극 표면의 촉매 담지 기술</li> <li>- 촉매 전극과 멤브레인의 접합 기술</li> <li>- 셀 구동 전압-전류 특성 및 장기안정성 평가 기술</li> <li>- 나노구조체 소재를 이용한 고밀도, 장수명 고분자 전해질 수전해 기술</li> </ul>
대용량 수전해 적층 모듈화 나노기술	정의	○ 수전해 셀의 적층을 통한 모듈 단위 부피당 수소발생 양의 증대 및 장기 안정성 확보 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 장기간·대용량·고밀도 수소 발생을 위한 모듈 최적화 기술</li> <li>- 금속 분리판 부식 방지를 위한 합금 소재 개발 및 표면 방지막 형성 기술</li> <li>- 발생 수소의 고압 압축을 위한 수소 분리 및 포집 기술</li> </ul>

## 나. 연료이용 수소생산

### 1) 개요

- (정의) 수소 캐리어인 다양한 연료로부터 수소를 추출 및 생산하는 기술
- (필요성) 개질수소와 부생수소생산기술은 화석연료 추출 공정에 기반을 두고 있어 이산화탄소 배출을 동반하며, 수소의 부피당 저장 용량이 작은 문제 존재. 따라서 운반과 저장이 편리한 연료에서 수소를 추출함으로써 경제적 비용을 줄일 수 있는 연료추출 수소생산 기술 필요
- (발전 전망) 수소 캐리어로서 암모니아는 세계적으로 생산시설, 운반선 등의 인프라가 잘 갖춰져 있으며, 운송이 용이하고 분해 시 질소와 수소만을 생성하므로 이산화탄소 발생 없이 수소생산이 가능. 암모니아를 이용한 수소생산은 미래 수소에너지 산업에서 매우 큰 비중을 차지할 것으로 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 암모니아 기반 고안정성 수소생산 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
표면 피독성으로 인한 매우 낮은 안정성	- 귀금속계 촉매인 백금(Pt), 이리듐(Ir) 등의 암모니아 산화 반응과정에서 촉매 표면에 중간생성물 흡착으로 인해 안정성 저하
암모니아 산화용 비귀금속계 촉매의 부재	- 암모니아 산화 반응에 효율적인 Pt, Ir를 제외한 비귀금속계 촉매 개발 필요
이론적으로 요구되는 열역학적 전압을 뛰어넘는 매우 큰 과전압이 요구되는 문제	- 이론적으로 요구되는 0.06 V보다 훨씬 큰 과전압을 요구(Pt: ~0.7 VRHE) - 현재까지 보고되는 촉매 대부분은 전기화학적 산소발생반응 영역 (>1.23V)에서 암모니아 산화가 발생
낮은 수소생산 속도 및 효율	- 암모니아 열분해 공정(cracking)은 빠른 수소생산 속도를 보이나, 질소산화물(NOx) 생성 - 암모니아 열분해 공정에 비해 저온 전기분해의 낮은 수소생산 속도 및 효율
암모니아 분해-잔류 암모니아 흡착-고순도 수소 정제 등 연계 시스템 기술 개발의 한계	- 암모니아 분해 과정에서 발생한 잔류 암모니아의 흡착 시스템 및 발생 수소의 정제 등 연계 시스템 개발 필요

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
고선택성 무피독 비귀금속계 나노촉매 기술	정의 ○ 암모니아 산화에 높은 반응성을 보이며 장기안정성을 가지는 비귀금속계 나노촉매 기술
	요소 기술 - 다원소 합금 기반의 비귀금속 나노촉매 합성 기술 - 비표면적, 선택성 향상을 위한 나노촉매 형상 제어 기술 - 무피독성 비귀금속 나노촉매 합성 기술 - 장기안정성 확보를 위한 나노촉매 안정성 평가 기술 - 액체 암모니아, 기체 암모니아, 폐수 암모니아 등 다양한 측정환경에서 고내구성 촉매 합성/평가 기술

나노기술명	개요	
다공성 나노지지체/촉매 기술	정의	○ 암모니아 산화 촉매 활성 자리를 극대화할 수 있는 다공성 지지체/촉매 개발 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 비표면적 향상을 위한 다공성 지지체에의 나노촉매 합성 기술</li> <li>- 촉매와의 접합력 증진을 위한 지지체 표면 개질 기술</li> <li>- 액체 전해질의 확산과 발생된 기체의 확산 최적화를 위한 지지체 형상 제어 기술</li> </ul>
고이온전도성, 고내구성 전해질 나노기술	정의	○ 셀 작동 조건(온도, 압력)에서 수소/수산화 이온이 쉽게 이동할 수 있는 고이온전도성/고내구성 전해질 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고이온전도성 전해질 합성 기술</li> <li>- 작동 온도 및 압력 범위 내 전해질의 기계적 안정성 향상 기술</li> <li>- 촉매 전극과의 접합력 및 계면 저항 최소화 기술</li> </ul>
대용량 암모니아 분해 시스템 및 연계 나노기술	정의	○ 대용량 수소생산용 암모니아 분해 시스템 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 분해 반응기 내 잔류 암모니아 흡착 시스템 기술</li> <li>- 고순도 수소생산용 수소 정제 기술</li> <li>- 내부식성 소재 기반 암모니아 분해 셀 및 시스템 기술</li> </ul>



## 다. 무기물 기반 수소저장 기술

### 1) 개요

- (정의) 무기 소재를 수소저장을 위한 매체로 이용하는 기술
- (필요성) 제로-탄소 배출 사회 실현을 위한 재생에너지 사용, 그리고 이의 안정적인 공급을 위해 친환경적이고 무게 대비 높은 에너지 밀도를 가지는 수소가 재생에너지 운반체로 주목 받는 상황. 수소를 재생에너지 운반체로 활용하기 위해서는 수소의 생산, 저장 및 운송, 활용에 대한 기술을 고르게 개발해야하며, 그 가운데 무기물 기반 수소저장 기술은 장소, 형태에 제약받지 않고 다양한 분야에 수소를 활용할 수 있도록 하는 기술로 반드시 필요
- (발전 전망) 무기물 기반의 화학적 수소저장은 일반적으로 높은 수소저장밀도를 보이지만, 반복적인 수소저장·방출 단계에서 물질의 안정성과 에너지·경제적 효율성이 낮다는 단점 보유. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 새로운 소재의 개발 또는 수소저장·방출 단계에서 작용하는 고성능 촉매를 확보하는 것이 매우 중요. 상술한 기술을 확보한다면 무기물 기반의 수소저장 기술이 높은 수소저장 밀도, 우수한 공간 활용성, 높은 효율성을 장점으로 수소의 저장 및 운송에 크게 이바지할 수 있을 것으로 기대

### 2) 미래핵심기술이슈 : 고성능 무기 소재 기반 수소저장 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
낮은 수소저장·방출의 가역성	- 반복적인 수소저장·방출에서 재료의 구조적·화학적 장기 안정성(가역성) 확보 필요
수소저장·방출의 열역학/동역학적 특성 개선의 한계	- 수소 방출 엔탈피 및 수소저장·방출 반응속도를 개선할 수 있는 재료(또는 촉매) 개발 필요

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
금속(착)수소화물 나노합성 기술	정의	○ 고효율·고안정 금속(착)수소화물 나노합성 기술
	요소 기술	- 고용량 수소저장용 나노소재 설계 및 합성 기술 - 수소저장·방출의 열역학/동역학적 특성 개선을 위한 나노촉매·합금 기술 - 장기 안정성(가역성) 확보를 위한 소재 나노구조 제어 기술

## 라. 유기물 기반 수소저장

### 1) 개요

- (정의) 유기 소재를 수소저장을 위한 매체로 이용하는 기술
- (필요성) 무기물 기반 수소저장과 동일하게 안전하고 효율적인 수소의 저장 및 운송에 필요한 기술로, 특히 액상 유기물 기반 수소저장 기술은 기존의 석유화학 인프라를 활용한 수소 운반을 가능하게 한다는 점에서 핵심기술 중 하나로 반드시 필요
- (발전 전망) 유기물 기반의 화학적 수소저장은 무기물 기반 수소저장 기술과 마찬가지로 반복적인 수소저장·방출 단계에서 물질의 안정성과 에너지·경제 효율성이 낮다는 단점 보유. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 새로운 소재의 개발 또는 수소저장·방출 단계에서 작용하는 고성능 촉매를 확보하는 것이 매우 중요. 상술한 기술을 확보한다면 유기물 기반의 수소저장 기술이 높은 수소 저장밀도, 우수한 공간 활용성, 높은 효율성을 장점으로 대용량 수소의 저장 및 장거리 운송에 크게 이바지할 수 있을 것으로 기대

### 2) 미래핵심기술이슈 : 고성능 유기소재 기반 수소저장 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
고성능 수소저장용 유기 소재의 부재	- 반복적인 수소저장·방출에서 효율성과 장기 안정성을 동시에 만족하는 고용량 수소저장용 유기 소재 개발 필요
수소저장·방출 반응을 위한 고성능 촉매의 부재	- 수소저장·방출의 열역학/동역학적 특성을 개선하면서 장기 안정성이 뛰어난 촉매 개발 필요

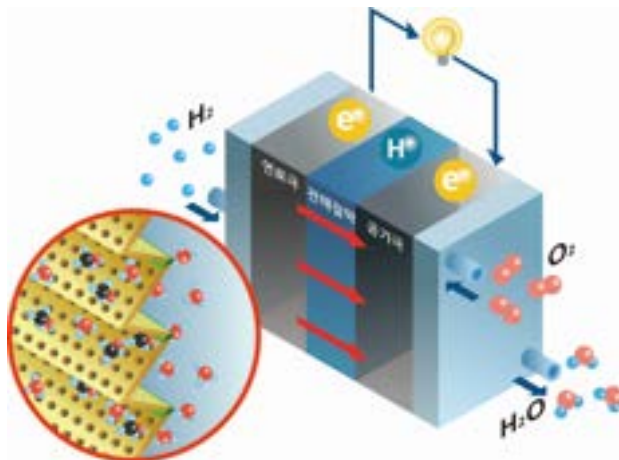
#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
유기계 화학수소화물 나노합성 기술	정의	○ 높은 수소저장밀도를 갖는 고효율·고안정 유기계 화학수소화물 나노합성 기술
	요소 기술	- 고용량 수소저장용 나노소재 설계 및 합성 기술 - 수소저장·방출의 열역학/동역학적 특성 개선을 위한 나노촉매 기술 - 장기 안정성(가역성) 확보를 위한 나노소재 및 촉매 복합제어 기술
수소 흡착제 나노합성 기술	정의	○ 높은 수소저장밀도를 갖는 고효율 수소 흡착제 나노합성 기술
	요소 기술	- 고용량 수소저장용 나노소재 설계 및 합성 기술 - 수소저장·방출의 열역학적 특성 개선을 위한 나노소재 설계 및 합성 기술 - 비표면적 향상 기술

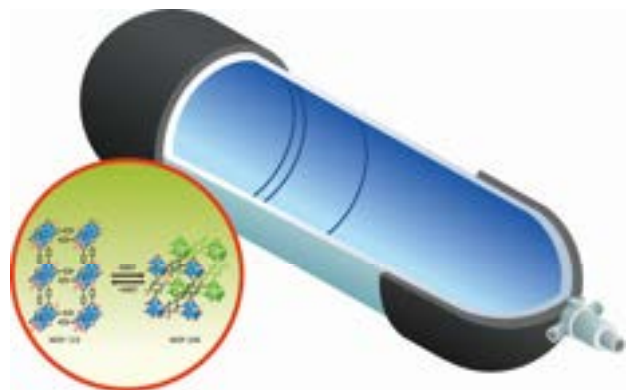
### 〈나노융합 수소 로드맵〉

중분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술										
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	
나노융합 수소	물분해 수소생산	비귀금속 촉매 기반 고효율 고전압밀도 수전해	비귀금속 수전해 나노촉매 기술	다양스 합금 기반 비귀금속 나노촉매 소재 합성기술	비표면적 향상을 위한 나노촉매 합성 제어기술/표면적 증대를 위한 촉매 안정성 향상기술									
			전달입자 나노촉매 합성기술	대면적 고효율 전달입자 합성 기술 / 전달입자 촉매 성능 및 미세구조 분기 기술	다양스 기반 나노입자 촉매 안정성 향상 기술									
			나노다공성 전도성 촉매기판 제조기술	고비표면적 다공성 촉매 지지체 합성 기술 / 촉매와의 접합력 증진을 위한 지지체 표면 개질 기술	촉매 전해질의 확산과 탈출의 개선을 위한 지지체 합성 제어기술									
			고이온전도성 나노첨가제 기술	고이온전도성 고분자 전해질 합성기술	전해질의 기계적 안정성 향상 기술 / 촉매 전극과의 접합력 및 계면 저항 최소화 기술									
			수전해 셀 이종촉매 나노기술	다양성 지지체 전이 촉매 합성 기술 / 촉매 전극과 전해질과의 접합 기술	셀 구동 전압-전력 특성 및 장기안정성 평가 기술 / 나노구조체 적용한 고밀도, 장수명 고효율 수전해 수전해 기술									
			대용량 수전해 적용 모듈화 나노기술	급속방전 및 부식 방지를 위한 합금 소재 개발 및 표면 방지제 합성 기술 / 합금 소재의 고밀도 접합을 위한 수소 분리 및 포획 기술	장기간 대용량 고밀도 수소 방출을 위한 모듈 최적화 기술									
	연료이용수소 생산	앞오너저 기반 고안정성 수소 생산	고안정성 무연속 비귀금속 나노촉매 기술	다양스 합금 기반 무연속 비귀금속 나노촉매 합성기술	비표면적 향상을 위한 나노촉매 합성 제어 및 안정성 평가기술									
			다양성 나노지지체/촉매 기술	비표면적 향상을 위한 다양한 지지체/촉매 나노촉매 합성 기술 / 촉매와의 접합력 증진을 위한 지지체 표면 개질 기술	촉매 전해질의 확산과 탈출의 개선을 위한 지지체 합성 제어기술									
			고이온전도성 고분자 전해질 나노기술	고이온전도성 전해질 합성기술	저온 온도 및 압력 범위 내 전해질의 기계적 안정성 향상 기술 / 촉매 전극과의 접합력 및 계면 저항 최소화 기술									
			대용량 연료이용 분해 시스템 및 연계 나노기술	분해 반응기내 전열 전달/내열 충격 시스템 기술 / 고온도 수소 생산용 수소 정제 기술	내부식성 소재 기반 연료이용 분해 및 정제 기술									
	무기물 기반 수소저장	고성능 무기소재 기반 수소저장	금속기반수소저장 나노합성기술	고용량 수소저장용 나노소재 설계 및 합성기술	수소저장 반응물 특성 개선용 나노촉매 합성기술			장기 안정성/기계적 특성을 위한 소재 나노구조 제어기술						
			유기물 기반 수소저장	고성능 유기소재 기반 수소저장	고용량 수소저장용 나노소재 설계 및 합성기술	수소저장 반응물의 특성 개선을 위한 나노촉매 합성기술			장기 안정성/기계적 특성을 위한 나노소재 설계 및 합성 기술					

### 〈나노융합 수소 대표제품〉



수소연료전지용 막-전극 나노접합체



수소저장장치 내 나노흡착제

## 4-6. 나노융합 바이오에너지

### 가. 바이오매스 연료화

#### 1) 개요

- (정의) 나노융합기술을 이용하여 바이오에너지 생산 기술의 한계를 돌파하고 지속 가능한 에너지 생산 및 사용이 가능한 사회 구현을 위한 에너지 기술
- (필요성) 단기간 내에 전기에너지로 대체가 어려운 육상 내연기관 차량 및 항공기용 탄소중립 연료 생산 기술 개발이 필요하며, 이에 바이오매스를 원료로 연료를 생산할 수 있는 바이오매스 연료화 기술 개발 필요
- (발전 전망) 바이오매스 연료화 기술로서 바이오에탄올, 바이오디젤 및 바이오항공유 생산 기술은 개발되었으며, 화석연료 수준의 에너지 밀도 및 성능을 가지는 바이오연료 생산 기술과 에너지 저감형 바이오연료 생산 기술 개발 전망

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 고탄소/고농도 바이오연료 생산 기술

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
고탄소 바이오연료 생산을 위한 적합 촉매의 부재	- 바이오매스 전환 고탄소 바이오연료 생산 가능 촉매의 종류, 성능 및 반응 조건이 제한적
고농도 바이오연료의 생산성 한계	- 바이오연료 생합성 과정에서 환원력 공급 문제로 인해 바이오연료 생산성 향상에 한계

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
고탄소 바이오연료 생산 나노-바이오촉매 기술	정의 ○ 바이오매스 성분을 원료로 석유계 연료 물성을 가지는 고탄소 바이오연료 생산이 가능한 나노-바이오촉매 기술
	요소 기술 - 바이오매스 전환 나노-바이오촉매 구조체화 기술 - 인공지능 기반 고탄소 연료 합성 인공효소 기술 - 바이오매스 전환 고탄소 연료 생산 인공미생물 기술
나노-바이오촉매 기반 바이오연료 고농도 생산을 위한 환원력 공급 기술	정의 ○ 바이오연료(바이오항공유, 바이오디젤, 바이오에탄올 등) 고농도 생산에 필수적인 환원력 공급을 위한 나노-바이오 촉매 및 나노시스템 기술
	요소 기술 - 바이오연료 생산 미생물의 환원력 공급용 고성능 인공효소 기술 - 바이오연료 생산을 위한 전기 활성 인공미생물 기술 - 인공효소 기반 고농도 바이오연료 생산 미생물 기술 - 바이오 적합형 전극 기반 바이오연료 생산 생물전기화학 시스템 기술

## 나. 바이오매스 화학소재화

### 1) 개요

- (정의) 나노융합기술을 이용하여 석유기반 화학소재를 대체하는 바이오소재 생산을 위한 바이오매스 화학소재화 기술로서 특히 화학소재로의 전환과정에서 에너지 소비를 최소화하는 에너지 저감형 바이오화학소재 생산 기술
- (필요성) 탈화석연료 시대를 대비하기 위해 바이오매스를 원료로 다양한 화학소재를 생산할 수 있는 바이오매스 화학소재화 기술 필요
- (발전 전망) 바이오매스를 전환하여 화학소재를 생산하는 과정에서 소모되는 에너지 절감이 가능한 탄소 저배출 에너지 기술 개발이 가속화될 것으로 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 에너지 저감형 화학소재 생산 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
에너지 저소비형 화학소재 생산의 한계	- 고온반응 중심의 화학소재 생산 기술을 상온반응 중심의 바이오공정으로 전환함으로써 화학소재 생산 공정 에너지 소비를 절감할 수 있는 기술 필요
바이오매스를 원료로 다양한 화학소재 생산의 한계	- 석유 기반의 다양한 화학소재의 맞춤형 생산이 가능한 모듈형 나노-바이오 촉매 반응 기술 개발 필요
낮은 바이오매스 전환 효율	- 바이오매스 유래 저해물질, 생산물질의 세포 독성으로 인한 나노-바이오 촉매의 성능 저하 문제

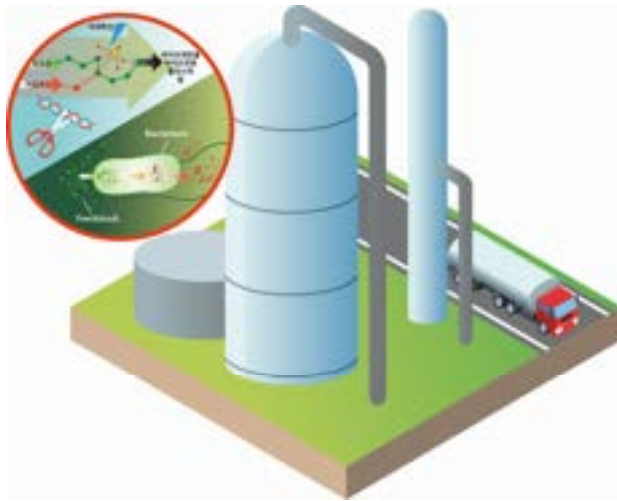
### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
바이오화학소재 생산을 위한 모듈형 나노-바이오촉매 기술	정의	○ 다양한 화학소재의 고농도 생산이 가능한 모듈형 나노-바이오촉매 및 모듈 조절 기술
	요소 기술	- 바이오매스 전환 플랫폼 소재 생산 인공미생물 모듈화 기술 - 플랫폼 소재 전환 화학소재 생산 인공미생물 모듈화 기술 - 바이오센서 기반 인공미생물 모듈 조절 및 군집 활용 기술
바이오매스 전환 고내구성 나노-바이오촉매 기술	정의	○ 바이오매스 유래 저해물질, 고탄소 연료 독성으로 성능이 저하되지 않는 나노-바이오촉매 개발 및 활용기술
	요소 기술	- 바이오매스 전환 바이오촉매 내구성 강화 기술 - 바이오매스 유래 저해물질 전환 나노-바이오촉매 기술 - 바이오매스 전환 고농도 바이오화학소재 생산 기술

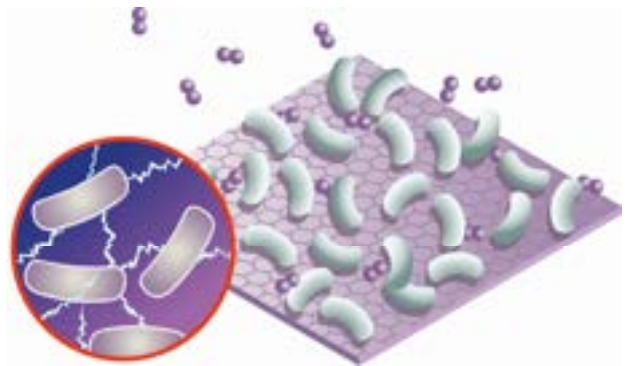
### 〈나노융합 바이오에너지 로드맵〉

중분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술								
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
나노융합 바이오 에너지	바이오매스 연료화	고전소/고농도 바이오연료 생산	고전소 바이오연료 생산 나노-바이오촉매 기술	바이오매스 전환 나노-바이오촉매 구조제어 기술 / 인공지능 기반 고전소 연료합성 인공요소 기술				바이오매스 전환 고전소 연료생산 인공지능 기술				
			나노-바이오촉매 기반 바이오연료 고농도 생산을 위한 환경적 공급 기술	바이오연료 생산성 향상을 위한 공급용 고전소 인공요소 / 인공지능 기반 바이오연료 생산 인공요소 / 인공지능 기반 바이오연료 생산 인공요소				인공요소 기반 고농도 바이오연료 생산 미생물 개발 기술 / 바이오촉매 기반 고농도 바이오연료 생산 미생물 개발 기술				
	바이오매스 화학소재화	에너지 저장용 화학소재 생산	바이오 화학소재 생산용 모듈형 나노-바이오촉매 기술	바이오매스 전환 플랫폼 소재 생산 인공지능형 모듈화 기술 / 플랫폼 소재 전환 화학소재 생산 인공지능형 모듈화 기술				바이오촉매 기반 인공지능형 모듈 조합 및 공급 향상 기술				
			바이오매스 전환 고내구성 나노-바이오촉매 기술	바이오매스 전환 바이오촉매 내구성 강화 기술				바이오매스 유래 저분자량 전환 나노-바이오촉매 기술 / 바이오매스 전환 고농도 바이오화학소재 생산 기술				

### 〈나노융합 바이오에너지 대표제품〉



바이오연료 생합성 인공미생물



바이오연료 생산 생물전기화학 전극 시스템 내 나노-바이오촉매

## 4-7. 나노융합 에너지 효율화

### 가. 인공광 재활용

#### 1) 개요

- (정의) 실내 다양한 인공 광원의 빛에너지를 전기에너지로 만들기 위해 광흡수 및 광전현상이 발생하는 층이 유기 및 무기 하이브리드 소재 기반 반도체로 이루어진 광전 소자 나노기술
- (필요성) 4차 산업 혁명과 함께 사물인터넷(IoT), 웨어러블 전자기기 및 휴대용 전자 제품을 포함한 다양한 센서들의 실내 사용의 급증에 따른 차세대 저전력 분산전원 기술 확보 전략이 매우 중요. 실내 활용 가능한 에너지원 (빛, 열, 마찰, 무선주파수 (RF)) 중 빛을 활용한 발전이 에너지원에 대한 접근성, 효율 및 안정성에 있어 탁월한 우수성 보유. 다양한 광활성 재료 중 상대적으로 저렴한 유기 및 무기 하이브리드 소재 기반 반도체의 경우 저조도 광원에서의 높은 흡광력 및 형상 자유도, 심미성, 환경 친화성 등 실내 적용성에서 탁월한 우수성 확보. 하지만 아직 실내광을 적용한 태양전지 개념의 연구들이 초기 연구 단계에서 벗어나지 못하고 상황. 인공광 활용에 최적화된 소재, 소자 디자인 및 실내 환경에 필요한 다양한 요소 개발이 필요
- (발전 전망) 인공광전지는 분산형 에너지원으로 인공 광원이라는 미활용 에너지원을 활용하는 전 일 동작 에너지원으로 활용이 가능. 또한 특별한 인프라가 요구되지 않은 장점이 있고, 다양한 IoT 센서노드 및 저전력 실내 전자기기의 전원으로 사용이 가능. 건물 전체의 에너지 소모량의 30% 이상인 인공 광원의 에너지를 전기로 재활용하게 될 경우 기존 기술 대비 약 2배 이상의 탄소저감 효과 기대. 인공 광원은 건물 내 조명에만 국한되는 것이 아니라, TV, 자동차 등 생활 밀착 요소의 다양한 광원을 포함하며 인공광전지는 웨어러블 소자, 군사용 전자기기, 건물일체형 전력원 등 미래 핵심 전자 장비의 전력원 등 광범위하게 사용될 것으로 전망

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 심미성이 극대화된 고효율 고안정성 대면적 인공광전지 기술

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
낮은 인공광 광전변환 효율	- 낮은 조도 및 파장 영역이 다양한 실내 인공 광원에서 초고효율 광전변환 (흡광, 전하 수송 등)이 가능한 기능층 설계 기술 필요
형상 자유도 및 심미성 확보의 한계	- 다양한 폼팩터를 가지는 실내 구조물에 적용 가능하고, 실내 미관을 해치지 않는 심미성 극대화 및 형상 제어 기술 필요
실내 내구성 확보의 한계	- 실내 환경 (열, 광, 수) 조건에서 안정적 동작을 위한 성능 열화 방지 기술 필요
친환경 대면적 모듈화 한계	- 인체 무해한 고출력 대면적화 기술 필요

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
인공광 고 감응성 나노소재 기술	정의	○ 선택적 광 흡수 영역 및 저조도 고 흡광도 기반으로 초고효율 광전변환 효율을 보이는 유기 및 유무기 하이브리드 흡광체 및 수송층 나노 설계 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 인공 광원 맞춤형 성능 예측 전산모사 기술</li> <li>- 파장 선택성이 우수한 고 감응형 광활성 나노소재 설계 및 합성 기술</li> <li>- 고 이동도 광활성 나노소재 설계 및 합성 기술</li> <li>- 파장 선택적 광증폭 기술</li> <li>- 인공광전지 성능 측정 표준화 기술</li> </ul>
나노모폴로지 제어 기술	정의	○ 전자주개/받개 흡광층 성분 간의 이종 접합구조의 나노모폴로지 제어 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 이종 광활성 물질 간 혼합 최적화 기술</li> <li>- 흡광층 나노모폴로지 제어 기술</li> <li>- 계면 제어 층간 나노소재 기술</li> </ul>
형상 제어 및 심미성 확보 나노기술	정의	○ 다차원 형상 제어가 용이하며 다양한 색 표현을 가능하게 하는 광전 에너지 발전용 소재 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 초박막(초경량), 유연 및 투광형 나노소재 확보 기술</li> <li>- 흡수 및 투광 파장 영역 제어형 나노구조체 및 흡광체 확보 기술</li> <li>- 광변조 투명 전극 나노소재 기술</li> <li>- 높은 기계적 유연성의 전극 나노소재 기술</li> <li>- 인공 광원과 결합형 나노소재 광전지 기술</li> </ul>
장기 안정성 확보 나노기술	정의	○ 실내 열, 광, 수 환경에서 성능 안정성을 유지하는 나노기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 계산과학 기반 이종 접합 흡광층의 나노 상분리 억제 기술</li> <li>- 수분 및 산소 차단 고 안정성 나노소재 확보 기술</li> <li>- 나노박막형 봉지체 확보 및 코팅 기술</li> </ul>
초박막 소자 모듈화 나노기술	정의	○ 인공광전지의 대면적화를 위한 균일 나노박막 제조 및 모듈화 공정 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 대면적 광 활성층 및 기능층 나노박막 균일 코팅 기술</li> <li>- 롤투롤 장비 포함 모듈 제조 장비 기술</li> <li>- 약광형 모듈 나노구조 최적화 기술</li> </ul>
친환경 인공광전지 나노소재 기술	정의	○ 친환경 소재 기반 인공광전지 나노소재 및 소자 공정 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 인체 무해 나노소재 (중금속 배제, 비납계 등) 및 소자 기술</li> <li>- 비할로겐 용매 공정 기술</li> </ul>



## 나. 건물일체형(BIPV) 태양전지

### 1) 개요

- (정의) 건물의 미관을 훼손하지 않고 건물 자체에서의 태양에너지 하베스팅을 극대화하기 위한 창호 및 건물 외관에 설치 가능한 태양전지 나노소재 기술
- (필요성) 건축물 에너지 절감은 탄소배출 감소 관점에서 높은 중요도에도 불구하고 관련 기술에 대한 연구 및 관심이 부족한 실정. 건축물 광에너지 수집으로 내부에 필요한 에너지를 확보하는 자체 수급 기술은 미래 스마트 제로에너지 빌딩을 구현하기 위한 미래 산업분야의 핵심 기술. 이러한 건축물 결합형 광전지를 활용한 BIPV시스템은 건축물의 에너지 자체 생산을 통한 분산형 에너지를 제공할 뿐만 아니라 미활용 에너지를 재사용한다는 관점에서 큰 탄소저감 효과 발생. 또한, 관련 분야는 건축, 토목, 전기, 전자 및 화학, 신소재, 나노 등의 다양한 기술이 융합된 분야로 관련 연구개발의 파생 기술들은 다양한 산업 분야에서 활용 가능한 파급력을 보유하여 필수적인 기술
- (발전 전망) 사회의 도시화·디지털화 및 이상기후 대비 실내 온도 유지 등으로 인해 건축물 전력 사용량은 지속 증대될 것으로 전망. BIPV 시스템은 이러한 상황에서 전력의 사용을 효율적으로 관리하기 위한 최적의 방안이며, 향후 건축물 전력 사용량 저감시키고 하절기 및 동절기의 전력 부하에 의한 전력 피크를 완화하기 위해 확대 적용될 것으로 예상. BIPV는 기존 건축물에 결합되는 형태로 추가적인 부지를 요구하지 않으므로 전력 소모량 및 건축물이 밀집된 도시에 적합한 에너지원이며, 나아가 개발된 친환경 기술들은 에너지 분야의 선도 기술 확보에 도움이 되고, 신축 및 기존 건축물의 스마트화를 위한 하나의 주요 초석이 될 것이라 기대

### 2) 미래핵심기술이슈 : 심미성이 극대화된 건물일체형 고성능 태양전지 나노기술

#### 2-1) 개요

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
낮은 광전 변환 효율	- 건물의 다양한 외형에 상관없이 고효율 확보가 가능한 광전 소재 및 소자 기술 필요
심미성 우수한 고투광 광전 소재 확보의 한계	- 건물의 미관을 훼손하지 않으며 고성능 창호형 태양전지 적용 가능한 광전 소재 및 소자 기술 필요
다차원 대면적화 한계	- 다양한 삼차원 곡면에 적용 가능한 초박막 유연 소자 개발 및 고출력화 기술 필요
낮은 내구성	- 실외 극한 환경(열, 광, 수) 조건에서 안정적 동작을 위한 성능 열화 방지 기술 필요

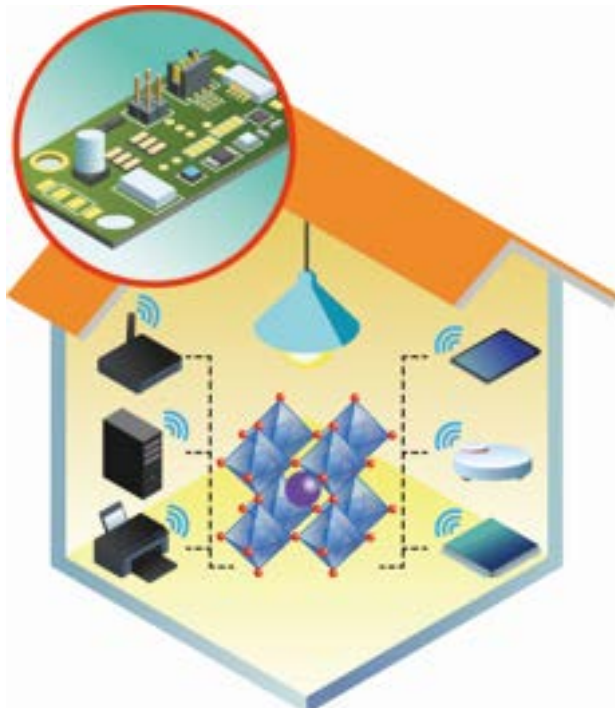
## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
입사각에 구애받지 않는 나노흡광 기술	정의	○ 빛의 입사각에 덜 민감한 등방성 소재 및 소자 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 입사 각도에 기반한 흡광 최적화 전산모사 기술</li> <li>- 모든 각도에서 무손실 하베스팅 가능한 고 감응형 광활성 나노소재 합성 기술</li> <li>- 입사각에 따른 빛의 산란 반사 제어형 표면 처리 및 나노구조체 기술</li> </ul>
광 변조 및 증폭 나노기술	정의	○ 발광/흡광 사이의 스펙트럼 매칭의 최적화를 위한 특정 파장 영역대로의 광변조 및 증폭 나노기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고신뢰성 광학 전산 모사 기술</li> <li>- 투광 파장 제어형 미세 공동 효과 나노구조체 전극 기술</li> <li>- 광변조를 통한 근적외선 흡수 나노기술</li> <li>- 광대역 흡광 탠덤 태양전지 기술</li> </ul>
에너지 저감 변색 나노기술	정의	○ 고투광 변색 광 농축기 적용을 통한 심미성이 확보된 태양전지 고성능화 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 색 표현이 가능한 고효율 비독성 나노흡광체 개발 기술</li> <li>- 재흡수 저감 나노도광체 개발 기술</li> <li>- 나노소재 열화 방지 기술</li> <li>- 태양전지와 광 농축기 사이의 계면 광 손실 최소화 기술</li> </ul>
외부 환경 내구성 확보 나노기술	정의	○ 장시간 외부의 극한환경에서 성능 안정성을 유지하는 나노기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 계산과학 기반 흡광층의 열화 방지 나노기술</li> <li>- 분자레벨 접합력 향상 기술 기반 열, 광, 수에 안정적인 나노소재 기술</li> <li>- 전해질 기반 소자용 고 안정성 전해질 및 봉제 기술</li> <li>- 나노박막형 봉지체 확보 및 코팅 기술</li> </ul>
다차원 대면적화 나노공정 기술	정의	○ 다양한 삼차원 곡면에서 빛 활용성을 극대화하기 위한 초박막 소자 모듈화 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 대면적 광 활성층 및 기능층 나노박막 균일 코팅 기술</li> <li>- 연속 생산성 및 다차원 대면적화가 가능한 전극 기판 소재·공정 기술</li> <li>- 유효 발전 면적 극대화 모듈 구조 최적화 기술</li> </ul>
상시 동작 광에너지 하베스팅 나노기술	정의	○ 주간(외부 태양광) 및 야간(실내 인공광)에 상시 에너지 하베스팅 가능한 나노기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 주중에는 태양광을 수집하고 야간에는 인공광(내부광원) 에너지를 수집 하는 소재 및 소자 기술</li> <li>- 양면으로 에너지 수집이 가능한 광전지 나노기술</li> <li>- 선택적 투광형 나노전극 및 소자 기술</li> </ul>

### 〈나노융합 에너지 효율화 로드맵〉

중분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술								
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
나노융합 에너지 효율화	인공광 재현용	심리성이 극대화된 고효율 고안정성 대면적 인공광전지	인공광 고효율성 나노소재 기술	성능 전신모사 / 고안정성 광합성 나노소재 개발			고안정도 광합성 나노소재 개발 / 최상 선택적 광촉매 기술 / 촉상 효율화 기술					
			나노모폴로지 제어기술	광합성 물질 건 혼합 최적화/광합성 나노 모폴로지 제어기술			계면 제어 용인 나노소재 기술					
			형상 제어 및 심리성 확보 나노기술	초경량, 유연, 투광성 나노소재 및 계면장력 제어형 나노구조체 기술			기체적으로 유연한 투명전극 나노소재 기술			인공광원 고효율 광전지기술		
			장기 안정성 확보 기술	계산 과학 기반 나노 생합성 최적/수분 및 산소 차단 고안정성 나노소재 확보 기술			나노적막형 봉지재 확보 및 코팅 기술					
			초박막 소자 모듈화 나노기술	대면적 균일 코팅 기술			Roll-to-roll - 모듈 제조/적합형 모듈 나노구조 최적화 기술					
			친환경 인공광전지 나노소재 기술	전체 무해 나노소재 및 소자 개발 기술			비활물질 용해 공정기술					
	건물일체형 태양전지	심리성이 극대화된 건물일체형 고성능 대면적 나노기술	일사각에 구애받지 않는 나노 흡광기술	흡광 최적화 전신모사 기술 / 모든 각도에서 무손실 하베스팅 가능한 고안정성 광합성 나노소재 기술 / 빛의 산란 반사 제어를 위한 표면 나노구조체 기술								
			광 변조 및 증폭 나노기술	고신뢰성 광학 전신 모사 / 투명 차단 제어용 공중 효과 나노구조체 기술			광변조 기반 근거리집 중수 기술 / 광대역 흡광 양전 대면적 나노기술					
			에너지 저감 면적 나노기술	최소한의 기능 비독성 흡광체 및 저흡수 저감 나노도핑제 개발 기술 / 나노소재 열화 방지 기술			양전지-광촉매기 계면 결손실 최소화 기술					
			외부 환경 내구성 확보 나노기술	계산 과학 기반 흡광층의 열화 방지 및 접합제 향상 고안정 나노소재 기술			전해질 안정성 확보 및 봉재 기술 / 나노적막형 봉지재 확보 및 코팅 기술					
			다차원 대면적화 나노공정기술	대면적 적막 균일 코팅 기술			연속생산성 및 다차원 대면적화 가능한 건국기반 소재 공정기술 / 유출 방한 면적 확대용 모듈 구조 최적화 기술					
			상사 용각 광에너지 하베스팅 나노기술	상사 에너지 수집 소자/양면형 에너지 수집 소자 기술			선택적 투광성 나노전극 및 소자 기술					

### 〈나노융합 에너지 효율화 대표제품〉

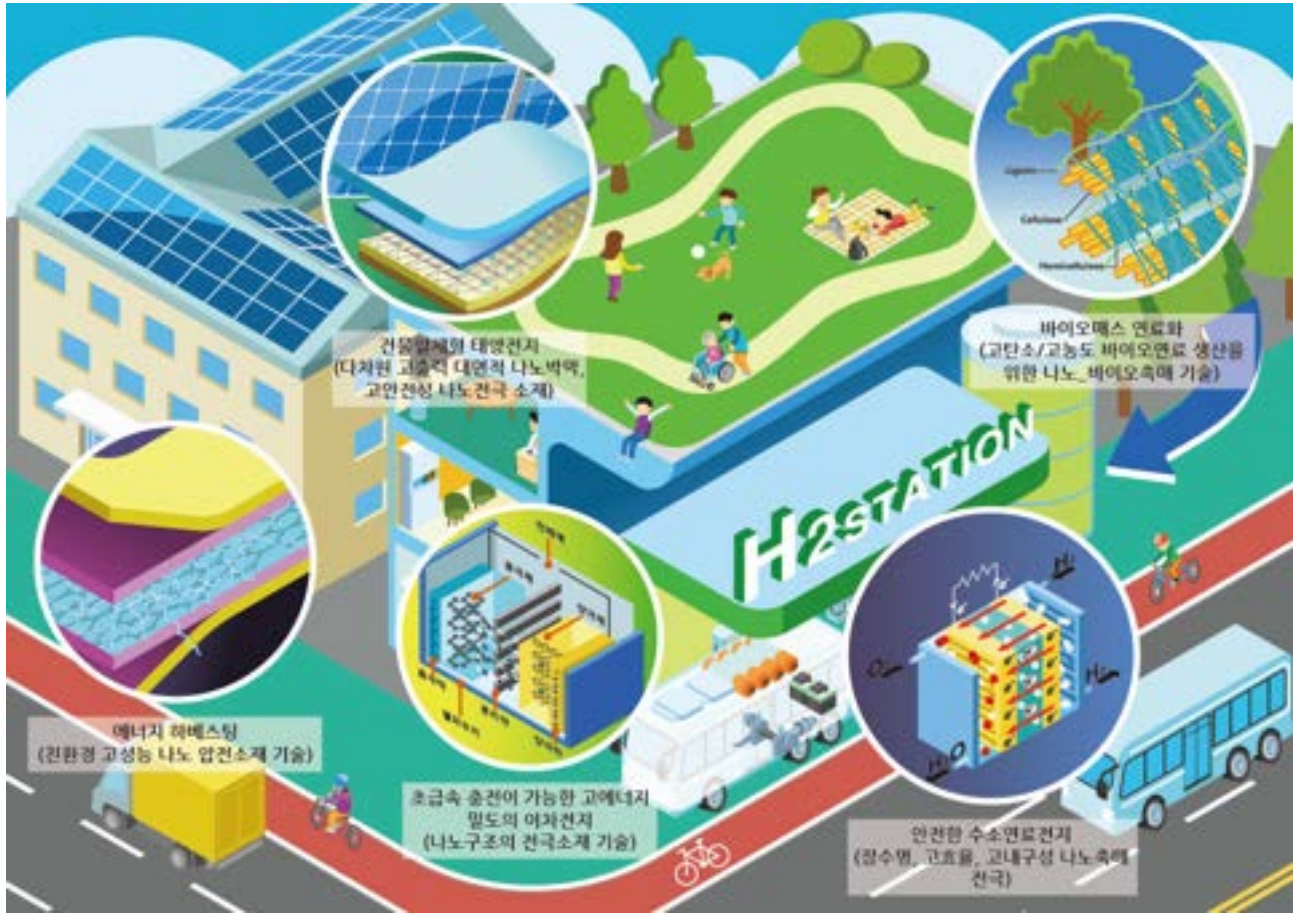


실내발전용 인공광전지 나노소재



건물일체형 태양광전지 나노소재

## 〈나노에너지 미래상〉



### 1. 개요

#### 가. 정의

- 나노기술을 융합하여 직면하고 있는 기후변동성 및 환경변화에 능동적이며 탄력적으로 적응할 수 있도록 기술적 한계를 돌파하고 지속 가능한 발전을 추구하는 기술

#### 나. 범위

- 나노환경 기술의 범위는 나노융합 물 관리기술, 대기 관리기술, 탄소 포집·전환 기술 등 3대 중분류 및 8대 소분류 기술을 포함
- **(나노융합 물 관리기술)** 해당 분야의 소분류는 크게 수질 측정·분석, 수질 오염 저감, 및 담수화/자원화 기술을 포함. 수질 측정·분석 분야는 수계 (신종)유해물질의 실시간, 선택적, 정밀 측정·분석을 위한 나노소재 및 센서기술을 포함. 수질 오염 저감 분야는 기존 화학약품의 사용을 최소화하면서 수계 난분해성 오염물질의 효과적인 제어를 위한 나노소재의 상용화, 저가화, 저에너지화, 고내구성 확보 기술을 포함. 담수화/자원화 분야는 기후변화 적응의 방안으로 대체 수자원 생산을 위한 선택성 및 내구성 확보 기술, 해수 내 고부가가치 자원과 효율적 에너지 회수 기술을 포함
- **(나노융합 대기 관리기술)** 해당 분야의 소분류는 대기환경 및 실내 공기질 측정분석 그리고 대기오염 저감을 포함. 나노기술을 활용한 실내·외 다양한 공기오염 측정·분석기술 현장형 바이오에어로졸 신속 전처리 나노기술 및 대기 중 오염원의 선택적 저감기술을 포함
- **(나노융합 탄소 포집·전환)** 해당 분야의 소분류는 탄소포집 기술, CO<sub>2</sub> 전환기술, 비CO<sub>2</sub> 전환기술을 포함. 나노기술을 활용한 탄소 포집·전환 기술과 관련된 산업은 탄소배출권 시장의 확대와 더불어 급격히 성장하고 있으므로, 다양한 배출원으로부터 탄소를 효율적으로 포집하고 및 석유 대체 제품으로 전환하는 전반적인 사이클을 기술

〈나노환경 분야 기술 분류체계 제3기·제4기 수정 경과〉

제3기 나노기술지도		▶	제4기 나노기술지도	
중분류	소분류		중분류	소분류
나노융합 환경/수질	나노기공 환경촉매		나노융합 물 관리기술	수질 측정·분석
	나노분리막			수질 오염 저감
				담수화/자원화
나노융합 환경/대기	나노촉매		나노융합 대기 관리기술	대기환경, 실내공기질 측정·분석
	나노흡착재			대기 오염 저감
	배출가스 처리 나노촉매		나노융합 탄소 포집·전환	탄소 포집 기술
		CO <sub>2</sub> 전환기술		
		비-CO <sub>2</sub> 전환기술		

### 다. 역량 분석(SWOT)

		외부 환경	
		기회(O)	위협(T)
내부 환경		<p>O1. 글로벌 팬데믹 이후 안전한 수질/공기질 관심 증가</p> <p>O2. 탄소중립 실현을 위한 탄소 포집 및 전환 기술 수요 증대</p> <p>O3. 기후변화 가속화에 따른 지속 가능한 환경기술 필요</p>	<p>T1. 나노물질의 안전성 우려</p> <p>T2. 타 분야 대비 낮은 기술 경쟁력 및 기술사업화 비율</p> <p>T3. 높은 재생에너지 발전 단가로 인한 탄소 포집 및 전환 기술 경제성 저하</p>
강점 (S)	<p>S1. 정부의 탄소중립 정책 및 강화되는 환경기준</p> <p>S2. 국내 환경 분야 나노융합 기술의 비약적 발전</p> <p>S3. 기후변화 적응 기술에 대한 국내 기업 투자 확대 추세</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 나노 융합기술 기반 지속 가능한 수질·공기질 확보를 통한 국가 난제 해결 및 국제 경쟁력 확보</li> <li>○ 정부의 탄소중립 기술 육성 전략에 따른 탄소중립 소재, 공정 원천기술의 적용 가속화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 나노환경 소재 및 공정 기술의 안전성 평가를 통한 신뢰성 확보</li> <li>○ 현장 실증화를 통한 경제성 및 장기 성능 확보</li> </ul>
	<p>W1. 나노환경 분야 전문기업 및 인력 부족</p> <p>W2. 국민이 체감하는 나노환경 분야 성공사례 부족</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 기후변화 적응 기술의 상용화 가속을 위한 우수 인력 확보 및 사업화 투자 강화</li> <li>○ 기술 실증화를 통해 국민이 체감하는 수질·공기질 관리 및 탄소 이용 기술 확보</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 기후변화 적응형 나노융합 기술 신시장 창출과 활성화를 통한 전문기업 및 인력 육성</li> <li>○ 기후변화 적응 기술의 조기 상용화를 위한 인센티브 적극 지원</li> </ul>

SO 전략    ST 전략  
WO 전략    WT 전략

## 2. 국내외 기술 및 산업동향(현황 및 전망)

### 가. 국외 기술 및 산업 동향

- (나노융합 물 관리기술) 나노융합 물 관리기술 분야는 기후변화대응을 위해 수자원을 안전하게 공급, 이용하기 위한 기술로 현대 생활 및 생산 활동, 인간의 존립을 위해 필수적. 2020년 기준 세계 물시장은 약 996조 원(8,034억 \$) 규모로 추정되며, 2024년까지 연평균 3.4%대의 성장을 기록할 것으로 전망. 이에 선진 국가를 비롯한 글로벌 기업들은 물 시장의 선점을 위하여 치열한 경쟁을 벌이고 있는 상황

※ 글로벌 워터 인텔리전스 보고서, Global Water Intelligence 2019

- (수질 측정·분석) 4차 산업 시대를 맞이하여 각종 센서를 이용한 물환경 현장 원격 감시와 이를 이용한 예측·예보 시스템 구축이 활발. 하지만, 현재 센서로 측정 가능한 수질 항목은 전기전도도, 탁도, pH, 용존산소, 엽록소, 질산염 등에 불과하여, 복잡한 전처리와 크로마토그래피/질량분석 과정이 필요한 대부분 항목들은 랩온어칩(Lab-on-a-Chip)과 같은 미세유체 기술(microfluidics)을 이용한 센서로 개발 중

- 현재 상용화된 물환경 센서는 수온, pH, 용존산소, 전기전도도, 탁도, 클로로필 등으로 YSI, Hydrolab, Troll 등 해외 다항목 측정센서와 HACH, WTW 등에서 생산하는 개별 센서의 국내 시장점유율이 매우 높은 수준
- SubChem Systems Inc.은 현장에서 장기간 수중에 설치할 수 있는 Autonomous Profiling Nutrient Analyzer™ (APNA)을 상용화하였으며, 질산염, 아질산염, 철, 요소, 인산염, 규산염, 암모니아 중 4가지를 동시 측정
- SYSTEAS는 EXOCET/D, WARMER 등 유럽연합의 연구개발사업을 통해 수중형 영양염류 프로브(Nutrient Probe Analyzer, NPA)를 개발

- (수질 오염 저감) 나노소재를 통한 여과, 흡착, 산화/환원 등 기존 물리화학적 기법의 효율 극대화, 해당 공정 규모의 소형화, 환경 이슈 대응의 유연화 등을 도모하기 위한 목적을 공유. 형태학적 특성 조절을 통한 비표면적 확대, 표면 전하 및 친·소수 특성 개질, 표면 기능성기 도입을 기반으로 제조된 나노 흡착제는 오염물질 흡착효율 향상, 선택적 제거, 수계 매질 간섭 효과 최소화 등 장점 기대. 기존 나노 기술의 도입 목적은 처리 효율 증대에 집중되었다면, 최근 새로운 소재 적용이나 특성 개질을 통해 고전적인 물리화학적 수처리 기법에서 기대가 어려운 기술적 장점(예: 선택성, 다기능성)을 구현하려는 시도가 이루어지고 있는 상황. 또한, 실제 적용성 확보를 위한 소재 고정화나 반응기 설계 기술에 관한 관심이 높아지는 추세

- 미국 NEWT Center(Rice, Yale, ASU의 컨소시엄)는 높은 독성을 갖는 무기 산소산 제



거를 위한 나노 흡착제, 미생물 관련 이슈의 원인인 바이오 필름 제어를 위한 초상자성 나노 입자, 오염물질 선택적 산화-환원을 위한 저금속 함유 단일원자 촉매 등의 개발이 진행 중

- 수질 오염 저감을 위한 전기화학 촉매의 경우, De Nora 등의 기업 및 미국, 이탈리아 등 유럽의 대학과 연구소에서 수처리에 사용되는 전극의 개발이 이루어지고 있는 상황. 그러나 대부분의 전극은 수처리보다는 Chloro-Alkali Cell, Alkaline Electrolyzer 등 생산 및 에너지 변환의 목적으로 사용되고 있어, 1950년대 개발된 IrO<sub>2</sub>, RuO<sub>2</sub> 기반의 DSA(Dimensionally Stable Anode)의 방법에서 큰 발전을 이루지 못하고 있는 수준
- TiO<sub>2</sub> 등 광촉매 산화의 수처리 적용성 확보를 위해 기존 슬러리 형태의 광촉매 산화와 분리막 여과 결합의 접근법에서 탈피하여, 다공성 광촉매 코팅 담체 기반의 유동상 반응기, 광촉매 담지 분리막, 광촉매-광학섬유 결합 소재 등을 대안으로 하는 연구가 진행 중
- 환경 나노촉매의 상용화에 있어서는 독일(BASF), 미국(Engelhard) 등의 연구가 활발하며 나노분산촉매 관련 기술은 일본(M. Haruta)과 미국(W. Goodman)이 주도. 담체 관련 나노기술의 경우 오염된 환경으로부터 유용자원을 회수하고 정화하는 기술개발이 활발하며 대상 오염물질의 부산물을 최대한 저감하는 기술.

- (담수화/자원화) 기존 표준적인 방식이 아닌 새로운 하이브리드 나노막 중심으로 미국이 세계적인 수준의 원천기술을 과점하고 있으며, 분리막의 표면에 새로운 환경 촉매 물질을 이용하여 나노 코팅하는 기술을 적용하여 고성능 분리 기능, 고투수성 기능 및 향상된 내오염성을 부여하는 방향으로 연구개발이 진행 중. 최근에는 활성탄 전극에 전기를 인가하는 축전식 탈염공정(Capacitive Deionization, CDI) 기술이 선택적 이온 분리와 회수, 기수 담수화 목적 등으로 상용화.

- 나노여과 및 역삼투분리막 생산 업체는 Dow Chemical 를 비롯하여 Koch, Hydranaurics&Nitro, GE Power&Water, TriSep, AMI 등 미국 회사들이 독점 하고 있는 실정. 일본도 아사히 카세이(Asahi Kasei), 토요보(Toyobo), 미쓰비시(Mitsubishi) 그리고 도레이(Toray) 등 기업이 분리막 기술개발을 주도
- CDI 및 전기투석(Electrodialysis) 기술은 네덜란드의 Voltea와 Mega, 미국 GE, 중국 EST 등의 기업을 중심으로 사업화가 진행 중

○ (나노융합 대기 관리기술) 나노융합 대기 관리기술은 실내·외 공기질을 실시간 측정분석하고 선택적으로 저감 하는데 나노기술을 활용. 대기 측정분석으로는 크게 미세입자 및 가스 오염물질 모니터링, 바이오에어로졸 모니터링 기술로 나눌 수 있으며 저감 분야의 경우, 실내공기청정 기술과 대기오염배출원 관리기술로 분류 가능

- **(대기환경, 실내공기질 측정·분석)** 국외에서는 10  $\mu\text{m}$  이하 크기의 미세먼지와 가스 형태의 오염물질을 측정/분석할 수 있는 기술 개발을 목표로 사업 분야를 확장
  - 미국 MIT에서 금속나노입자와 탄소나노튜브의 결합으로 H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, NO 등의 가스 물질 센서를 개발하였고, 저온에서 작동하기 위한 연구를 진행 중. 일본 오사카 대학은 미세먼지 전구체 가스를 검출하는 기술을 개발하였고 고신뢰성 센서가 목적. 영국 맨체스터 대학교는 흑연판을 기반으로 독성 폭발성 가스 센서를 개발. 부유인자 센서로는 Andersen의 다단 임팩터, MSP의 WPS, TSI의 SMPS와 CPC, PMS의 LPC(laser particle counter)와 Beta gauge 등이 개발
  - 미국 TSI사는 바이오에어로졸 검출을 위한 형광기반 시스템인 FLAPS (Fluorescence Aerodynamic Particle Sizer)를 개발하였으며, 나아가 UVAPS (Ultraviolet Aerodynamic Particle Sizer)를 개발하여 상용화. 국외의 바이오에어로졸 검출은 대부분 국방부의 지원을 받아 생화학테러 대비 기술로 개발되고 있는 상황
- **(대기 오염 저감)** 대기가 비교적 청정한 북미지역도 공기청정기 시장은 매년 성장. 카펫 마감, 생활양식 등 내부적 요인이 실내 공기질을 악화. 미국천식재단(American Asthma Foundation)에 따르면 어린이들에게 가장 흔하게 발생하는 질병인 천식으로 인해 연간 약 3,500명의 어린이가 사망하고 있어 실내 공기질 관리 시장이 점점 성장하는 추세.
  - 미국에서는 나노물질을 활용한 공기청정기가 활발히 개발되고 있으며 Molekule사, Airocide사에서 각각 플로리다 대학교, NASA 연구진들과 협업하여 광촉매 나노물질 기반의 공기청정기가 개발되었음.
  - 국외의 경우, 배기가스, 굴뚝 등의 점오염원에서 배출되는 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, 휘발성 유기화합물(VOC) 등의 유해가스 처리용 나노촉매 기술이 활발히 개발. VOC 제거 촉매는 펠릿 촉매나 허니컴 구조에 담지시키는 형태로 개발. 미국의 Unifrax사는 자동차 촉매 변환장치 안에 들어가는 에코-리덕을 개발. 이는 기존의 배기가스 촉매 성능을 활성화하고 백금족 금속의 사용량을 최대 40%까지 낮추는 것이 가능. 또한, 영국의 Johnson Matthey사는 배기가스 후처리 시스템용 나노촉매를 개발
- **(나노융합 탄소 포집·전환)** 나노 기술을 활용한 탄소 포집·전환 기술과 관련 산업은 탄소배출권 시장의 확대와 더불어 급격히 성장하고 있으며, 다양한 배출원으로부터 탄소를 효율적으로 포집하고 및 석유 대체 제품으로 전환하는 전반적인 사이클에서 에너지효율 향상을 통한 경제성 제고가 목표
  - **(탄소 포집 기술)** Exxon Mobile(미국)과 Hailburton(미국)과 같은 전통적인 대형 에너지 기업들은 산업배출 탄소를 대규모 포집 및 저장하는 기술을 실증하고 있으며 에너지효율을 높이기 위한 흡착제, 분리막 성능을 높이기 위해 기술 개발 중. 또한, Climeworks(미

국), Global Thermostat(미국)과 같은 스타트업 기업에서는 산업 배출 이산화탄소뿐만 아니라 공기로부터 이산화탄소를 포집하기 위한 기술 솔루션 개발에 주력

- **(CO<sub>2</sub> 전환 기술)** 유럽은 탄소 전환 기술 개발에 선도적 역할을 해 왔으며, EU 및 개별국 차원에서 다양한 산업부문 탄소자원화 기술 개발을 지원. 특히, 독일 정부는 자국의 에너지 전환 정책 및 중장기 온실가스 감축 목표 달성을 위해 2010년부터 2016년까지 150개 이상의 프로젝트에 약 100백만 유로를 투자하였으며, 폴리우레탄폼 및 석유 대체 제품 생산을 위해 나노 촉매 기술을 적극 활용
- **(비-CO<sub>2</sub> 전환기술)** 이산화탄소 외 온실효과가 높은 질소산화물, 메탄 등의 가스를 다양한 방법으로 전환하고 있으며, 특히 미국의 경우 셰일가스, 바이오가스, 동반가스 등 비전통 가스 자원의 처리를 위해 메탄 전환 나노 촉매 및 공정 기술을 발전시키고 있는 상황. Velocys(미국) 및 Compact GTL(영국)과 기업은 카자흐스탄 및 미국의 비전통 메탄 가스 자원을 활용하기 위한 나노 촉매 및 컴팩트 공정 개발에 집중. 나노 촉매 기반의 메탄 전환 연구는, 산화이량화, 비산화이량화, 탈수소방향족화 등이 활발

## 나. 국내 기술 및 산업 동향

- **(나노융합 물 관리기술)** 우리나라의 물 시장 규모는 129억 달러로 세계 12위에 해당하지만, 세계 시장 성장률 대비 낮은 성장(2.6%)이 전망되고 상하수도 등 인프라 완비로 내수시장의 성장 정체가 우려. 더욱이 물 기업 해외 수출 참여율은 4.5%에 불과하여 내수시장에 대한 의존도가 높은 상황. 이 같은 국내 물 시장의 현 주소를 바탕으로 환경부는 ‘지속가능한 물 관리 기술 확보로 물 산업 강국 도약’이라는 비전을 수립하여 2030년까지 국내 물 산업 매출액 50조 원을 달성하는 한편 해외 수출 10조 원, 물 산업 일자리 20만 개 창출이 전략적 목표
- **(수질 측정·분석)** 전기화학센서, 나노센서, 바이오센서 기술을 응용하여 환경측정센서를 개발하고자 하는 연구가 국내에서 수행되어 왔으나 대부분 제품화에 이르지 못한 상황. 국내생산업체에서 개별 센서로는 DO, pH, 탁도 등 기본적인 항목만이 상용화된 실정
- **(수질 오염 저감)** 기후 변화 적응을 위한 수자원 다변화나 분산형 수처리로의 패러다임 전환으로, 나노 소재의 수처리 공정 도입에 대한 기초연구는 간헐적으로 진행 중. 국외 선진 연구 동향과는 달리 여전히 기존 수처리 기술의 대안을 위한 기능성 환경 소재 확보에 연구 노력이 과도하게 집중
  - 반도체 폐수와 양식장 폐수 등 산업폐수, 선박평형수 및 지하수 복원 등의 목적으로 나노 전기화학촉매 활용 수처리 기술 연구와 산업화가 점진적으로 이루어졌고, 최근 글로벌 팬데믹에 따른 개인위생에 대한 수요 증가로 전기화학적 살균수 제조 기술의 시장이 급성장
  - 환경부를 중심으로 나노소재·공정 활용 분야 지원을 통한 환경·자원 위기 극복 및 고부

가가치 핵심환경기술 개발, 저독성 나노소재 기반 오염방지 및 오염정화 후 관리 기술개발, 환경보건기술개발과 연계한 나노소재 및 나노 활용 실용화 기술개발 등의 연구개발이 진행

- 펜톤 산화의 촉매적 기능성을 확보하기 위해 산화철 담지입자, 높은 비표면적과 분리능 확보를 위한 중금속 제거용 자성 금속산화물, 유기오염물질 흡착 제거를 위한 소수성 표면 탄소계 나노물질 등의 개발 및 적용 가능성 평가를 위한 기초 연구가 진행
  - TiO<sub>2</sub> 계열 광촉매 담지 부유 기술과 태양광을 활용하여 조류 성장 방지 및 관련 방출 독소 물질 산화를 위한 기술로서 적용. 아울러 이산화티탄을 건축구조물에 함입하여 우수에 용존되어 있는 유기물 및 질소산화물의 처리에 활용
  - 자연광에서도 광분해가 가능한 소재 개발로 다공성 물질 내 광산화반응 소재 개발, 새로운 나노세공 물질 합성을 위한 나노촉매 개발에 대한 연구가 진행 중
  - 고성능 나노촉매를 수처리 기술로 개발하여 미량유해물질 등 저농도 유해물질의 제거목적으로 활발히 연구되고 있는 상황
- (담수화/자원화) LG화학 등 분리막 제조 분야 선도 기업이 주도하고 있고, 역삼투압 보다 경제성이 높은 나노막을 개발하여 저농도로 존재하는 유해물질 제거를 위해 효과적인 고성능의 분리막 기술, 기존 수처리 공정에서 사용하는 분리막이 아닌 막증류에 적합한 물재이용 분리막 기술, 막오염 저감 기법 등이 다양하게 연구 진행. 또한 축전식 탈염기술 분야는 시온텍, 퓨리캠 등의 중소기업을 중심으로 사업화가 진행

### ○ (나노융합 대기 관리기술)

#### - (대기환경, 실내공기질 측정·분석)

- 국내의 미세입자 및 가스 센서 관련 연구는 정부출연연구기관과 대학교에서 활발히 연구 중. 한국표준과학연구원(KRISS)은 산업측정표준그룹의 경우 Beta gauge를 이용하여 PM10과 PM2.5 측정기를 개발하여 사용하고 있으나, 실시간 측정 및 초미세입자 측정에는 많은 제약이 존재. 광주과학기술원(GIST)은 자동차 배출 가스 측정기, 미세먼지 측정기 등을 개발하였으나 상용화를 위해서는 더 많은 연구가 필요. 한국화학연구원은 촉매를 이용하여 고감도 가스센서를 개발하였고 다중가스 센서와 저온에서 구동하는 센서를 개발 중
- 한양대학교는 바이오에어로졸을 샘플링하여 검출할 수 있는 일체형 시스템을 개발. 검출감도를 높이기 위하여 효율적인 샘플링용 멤브레인과 민감도를 높이는 센서 시스템을 도입. 세종대는 고농축 임팩터를 사용하여 부유미생물을 포집하고 멤브레인에 효소를 고정화하여 바이오에어로졸을 검출. 연세대학교는 임팩터 또는 전기집진판 표면에 바이

오에어로졸을 포집 후 ATP 발광법으로 바이오에어로졸을 검출. 하지만, 실제 환경에 적용하기까지는 더 많은 개발이 필요한 실정

- (대기 오염 저감)

- 국내 공기청정기 시장은 2019년 이후 소폭 하락세를 보이는 상황. 특히 2020년 이후 현재까지 COVID-19 사태로 미세먼지가 감소하면서 국내 대기질이 개선. 국내 시장 분위기는 다소 침체되었지만, 전 세계적으로 공기청정기 시장은 계속 성장할 전망으로, 지속적인 연구개발이 필요
- 국내 공기청정기 시장은 코웨이, LG전자, SK매직, 삼성전자 등 대기업에서 선도하여 가정용 공기청정기 개발이 진행 중. 3AC, 크린앤사이언스 등은 내부에 들어가는 HEPA 및 촉매 필터를 개발 중
- 기존의 활성탄을 사용하여 잔존 VOC를 흡착 제거하던 기술이 최근 촉매를 활용하여 저온에서 VOC를 제거하는 기술로 대체되었지만, 외국의 촉매산화 방식을 주로 응용한 것으로 국내 자체 기술개발은 시작 단계로 파악
- 1990년대 초부터 정부의 지원을 받아 질소산화물 저감기술 개발이 활발히 진행되었으며, 저온용 선택적촉매환원(SCR), 비암모니아계 SCR촉매 개발 등의 연구가 활발히 진행 중. 국내 촉매제조업체로 세라컴, 희성촉매, 엔티시, 엔바이온 등이 있으며 공단 및 중소기업의 공장에 적용되는 VOC 제거 촉매를 개발 중

○ (나노융합 탄소 포집·전환) 탄소 포집·전환 기술 관련 국내 시장 규모는 탄소중립 정책 선언에 힘입어 매년 빠르게 성장할 것으로 전망되며, 투자비 및 운전비 등 경제성 향상을 위한 나노기술 개발과 조기 실증을 통한 시장 선점 경쟁이 치열. 국내 탄소배출량은 연평균 1.33% 증가하여 20년 782백만톤, 30년 851만톤에 이를 것으로 예상되기 때문에 탄소 포집·전환 시장의 성장 또한 가속화될 것으로 전망

- (탄소포집 기술) 극동환경화학·대우건설은 하루 10톤의 CO<sub>2</sub>를 처리하는 DECO<sub>2</sub> 통합공정을 설계하여 인천 서구 청라 소각장 배출가스를 대상으로 실증화 단계에서 공정을 수행. 한국전력공사, 포항산업과학기술원 등에서 주요 배출원인 발전과 철강 분야를 중심으로 단계적 연구과정을 거쳐 10 MW급 파일럿 연구까지 수행 중이며, 연소 후 습·건식 기술은 세계적 경쟁력 확보를 위한 Track-record 확보 차원의 기술 최적화 및 장기 운전 연구가 수행

- (CO<sub>2</sub> 전환 기술) 국내 CO<sub>2</sub> 활용기술은 전기화학, 광물화, 고분자, 생물전환 등 정부 추진 기초원천연구가 중점적으로 진행되고 있으며, 산업부 및 기업을 중심으로 고분자 및 연료 생산 관련 실증 연구가 추진 중. 한국화학연구원, 한국에너지기술연구원 등 정부출연연구

기관은 CO<sub>2</sub> 전환을 통한 석유대체 화학제품을 생산하기 위하여 파일럿 규모 연구를 수행  
- (비-CO<sub>2</sub> 전환기술) 대표적 비-CO<sub>2</sub> 온실가스인 메탄을 효율적으로 전환하기 위해 국내에  
서는 C<sub>1</sub>리파이너리 사업단을 중심으로 셰일가스, 제철 부생가스 등을 활용한 나노 소재 및  
공정을 개발. 한국과학기술연구원은 메탄의 산화이량화에 적합한 촉매 화학공정을 개발  
및 벤치스케일 반응기 개발 연구를 수행

### 3. 기술발전 전망

중분류	현재 기술	미래 기술
나노융합 물 관리기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염물질 분해에 집중된 나노 기술</li> <li>- 여과, 산화·환원, 흡착 등 단순 원리 기반 나노 촉매 기술</li> <li>- 유해물질 포집, 분리를 위한 나노기공 기술</li> <li>- 유해물질 산화·환원용 나노촉매 기술</li> <li>- 에너지 주입형 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염물질의 측정, 분해, 재이용의 포괄적인 목적으로 활용되는 나노 기술</li> <li>- 다목적 하이브리드 원리 기반 융·복합 나노촉매 기술</li> <li>- 유해물질 포집, 분리 및 물 재이용을 위한 나노 촉매 기술</li> <li>- 유해물질 산화·환원 분해 및 부산물 최소화를 위한 나노촉매 기술</li> <li>- 에너지 중립/회수형 기술</li> </ul>
나노융합 대기 관리기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 안정성이 낮아 수명이 짧은 단일가스센싱 기술</li> <li>- 주기적으로 샘플링하고 실험실에서 전처리 및 분석 후 관리</li> <li>- 비선택성 흡착기술 기반의 공기청정 방안</li> <li>- 높은 온도를 이용한 산화기반의 VOC제거</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다중 혼합 가스 패턴인식을 통한 멀티 가스센싱 기술</li> <li>- 현장에서 실시간 바이오에어로졸 모니터링 및 관리</li> <li>- 선택적 나노촉매를 활용한 공간별 공기청정 관리</li> <li>- 상온에서 산화·환원이 가능한 나노촉매를 활용한 VOC제거</li> </ul>
나노융합 탄소 포집·전환	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고순도 이산화탄소 포집을 위한 흡착제 입자 및 분리막 소재의 단편적 개발</li> <li>- 높은 포집 비용으로 상용화 어려움</li> <li>- 이산화탄소 전환으로부터 넓은 분포의 탄화수소 화합물 생성, 분리 단계에서 경제성 저하</li> <li>- 미세기공구조 촉매 사용 시 활성점 소결 및 탄소 침적으로 인한 짧은 촉매 운전 수명</li> <li>- 광전기화학을 이용한 이산화탄소 전환 시스템의 낮은 수율</li> <li>- 메탄 및 질소화합물의 전환 시 에너지효율 및 경제성 저하</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 흡착제와 분리막 하이브리드 기술</li> <li>- 다양한 배출가스 및 대기 중 이산화탄소를 대상으로 한 나노기능성 흡착제 및 분리막 개발</li> <li>- 초박막, 대면적화 분리막 기술을 이용한 고용량 포집기술로 경제성 제고</li> <li>- 나노 활성점 설계기술을 이용한 타겟 생성물 선택도 극대화</li> <li>- 나노다공성 소재 개발로 높은 촉매 안정성</li> <li>- 고효율 나노촉매, 나노이온교환막, 포집·전환 동시 구현 시스템을 통한 경제성 제고</li> <li>- 탄소소재 병산, 나노촉매 활성 증진, 광전기화학 에너지 직접 사용을 통한 경제성 증진</li> </ul>

## 4. 나노기술지도 전개

### 4-1. 나노융합 물 관리기술

#### 가. 수질 측정·분석

##### 1) 개요

- (정의) 나노기술을 적용하여 수질 관리를 위한 측정·분석 분야가 직면하고 있는 기술적 한계를 돌파하고 나아가 4차 산업기술과 융합하여 수질 관리의 실시간 및 선제 대응을 위한 기반 기술
- (필요성) 국민의 생활 수준 향상으로 안전하고 건강한 물(물 복지)에 대한 수요가 증가하고 있고 기후변화로 인해 수질과 수량의 급격한 변동이 빈번하게 일어나 기존의 수처리 공정을 효과적으로 제어하는 ICT 기술과 이를 위한 실시간 수질 측정·분석기술의 중요도가 증가. 또한, 글로벌 팬데믹으로 인해 수질 측정으로 질병의 전파를 예측하는 하수역학 분야가 기대를 모으는 추세. 산업화와 분석기술의 발전에 따라 새롭게 보고되는 수계 신종 유해물질 및 감염성 미생물의 종류와 양이 지속적으로 증가하고 있어 이를 효과적으로 측정할 수 있는 기술 개발이 필요
- (발전 전망) 수질 측정·분석의 미래핵심 기술이슈는 수중 유해물질의 급격한 변동 및 신규 유해물질의 발생에 효과적으로 대응할 수 있는 실시간 측정·분석, 수중 다양한 간섭물질의 영향을 최소화하는 수계 유해물질에 대한 선택적 정밀 측정·분석을 통한 국민들이 체감하고 신뢰할 수 있는 기술의 형태로 진화될 전망

##### 2) 미래핵심기술이슈 : 수계 신종 유해물질에 대한 실시간 측정·분석

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
미량 유해물질 및 산화제 농도의 실시간 측정기술의 부재	- 현재 수중 미량 유해물질의 분석에는 전처리와 질량분석법을 위해 많은 시간이 필요해 유해물질에 발생에 대한 실시간 대처 불가능 - 많은 수처리 공정에서 유해물질 제거를 위해 산화제를 사용하고 있으나 잔류 산화제의 양을 실시간으로 분석할 수 있는 기술 전무
수계 유해물질·병원성 미생물 검출을 위한 복잡한 전처리 단계	- 특정 유해물질 및 병원성 미생물을 표적으로 한 분석 기법 적용의 한계 - 비표적 기법을 활용한 수계 유해물질/병원성 미생물 검출 기술 개발 필요

##### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
수중 미량유기물 및 산화제 실시간 측정 나노소재 기술	정의	○ 수중 미량유기물 및 산화제를 기능기별로 측정할 수 있는 나노촉매 소재 및 전극 기술
	요소 기술	- 수중 유기물 기능기별 선택적 직접 전자 전달 나노촉매 설계 및 합성 기술 - 수질 정화용 잔류 산화제 실시간 측정 나노촉매 설계 및 합성 기술 - 정량화 및 선택성 향상 기술



나노기술명	개요	
이미지 기반 수돗물 이물질 검출 나노분리막 기술	정의	○ 이물질로 인한 나노필터의 이미지를 이용하여 실시간 변화를 측정하는 나노분리막 기술
	요소 기술	- 나노분리막의 변색을 통한 수질 변화 감지 기술 - 필터 오염도 정량화 및 수질 지표화 기술
수계 미량 병원성 미생물 검출을 위한 나노전기 수력학 기술	정의	○ 수계 신종 미량 병원성 미생물 검출을 위한 전기 수력 기반 나노기술
	요소 기술	- 나노전기 수력학 현상 제어가 가능한 나노다공성 막 재료 기술 - 나노전기 수력학 기반 수계 병원균 고농축 분리, 포집, 농축 기술

### 3) 미래핵심기술이슈 : 수계 유해물질에 대한 선택적 정밀 측정·분석

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
현장 시료 중 복합 간섭물질, 이물질로 인한 측정 신호의 신뢰도 저하	- 수계 신종 미량 오염물질 및 잔류 산화종에 대한 측정 시간 단축 및 정밀화 필요 - 이미지, 형광, 전기 신호 등을 기반으로 한 측정 선택성 및 검출한계 향상 필요
미량 유해물질/병원성 미생물 측정을 위한 선택적인 현장 농축 기술의 부재	- 수계 미량 유기 오염물을 선택적으로 농축하여 현장에서 검출 한계 - 수계 미량 병원성 미생물을 선택적으로 농축하여 현장에서 검출 한계

#### 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
수돗물 탁질 유발물질 감지 나노소재 기술	정의	○ 바이오 소재 및 형광 나노기술 기반 실시간 탁질 유발 물질 센서 기술
	요소 기술	- 유해 미생물 및 탁질유발 부산물 검출을 위한 나노바이오 기반 환경 센서 기술 - 내분비교란물질 검출을 위한 나노형광물질 및 압타머 센서 기술
수계 미량 유기 오염물 포집용 3차원 나노구조 및 나노유동 제어 기술	정의	○ 수계 미량 유기 오염물질 측정을 위한 미세유체 농축용 나노구조 기술
	요소 기술	- 대용량 액상시료 내 미량 유기 오염물질 선택적 포집용 3차원 나노구조 표면 제작 기술 - 유체-나노구조 상호작용 및 나노스케일 유동 제어 기술

## 나. 수질 오염 저감

### 1) 개요

- (정의) 나노기술을 적용하여 수질 오염 저감 분야가 직면하고 있는 기술적 한계를 돌파할 수 있는 기술로 변화하는 하폐수 및 수자원을 안전하게 처리·공급·이용하기 위한 수처리를 대상으로 하는 영역이며 미량 유해물질의 제거, 무약품·에너지 중립형 수처리 기술을 위한 나노소재 및 이에 기반한 수처리 공정 기술
- (필요성) 국민들의 안전하고 건강한 수자원 및 수질 확보를 위해 기존에 알려지지 않은 신종 유해물질이나 유해 미생물에 대한 리스크 관리를 위한 나노소재 기술의 개발이 필요. 이를 활용한 수처리 공정은 환경 현안에 따른 강화된 수질 규제기준을 충족하며 기후변화 적응을 위해 수중 오염물질로부터 에너지와 유가자원을 회수할 수 있는 방향으로 설계 필요
- (발전 전망) 위 필요성에 대응하기 위해 수계 신종 난분해성 오염물질 제어를 통한 안전하고 건강한 수질 확보, 수질오염저감 기술의 저에너지화, 탄소중립화, 무약품화 등의 기술적 발전 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 수계 신종 난분해성 오염물질 제어를 통한 안전하고 건강한 수질 확보

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
수질오염저감을 위한 나노소재의 현장 적용 한계	- 환경시료 대상 운전에서 나노소재의 구조 및 효율 변화 - 나노촉매 대용량 생산에 따른 경제성 저하 - 수질오염저감 나노소재의 효율, 대용량화 및 장기 안정성 확보를 위한 기술 개발 필요
관리대상 오염물질에 대한 선택성 부재	- 다양한 물질이 혼합된 폐수에서 관리 대상인 독성 오염물질에 대한 선택적인 분리·전환 기술의 부재 - 특정 오염물질에 대한 표적 제거 기술 개발 필요
신규 난분해성 수질 오염물질의 도래	- 높은 산화 저항성을 보유한 과불화화합물, 중금속, D <sub>2</sub> O 등 신규 난분해성 수질 오염물질 등장 - 소독제 내성 병원균 및 도래 - 분리·산화환원 융복합형 기술 개발 필요
폐수 방류 신규기준인 총유기탄소 제거 기술 확보의 한계	- 방류기준이 산소요구량에서 총유기탄소로 전환됨에 따라 유기물을 무기화할 수 있는 적극적인 수처리 촉매 기술 개발 필요
고농도 영양염류 폐수 제거 기술 개발의 한계	- 부영양화를 유발하는 질소, 인이 고농도로 함유된 축산폐수, 산업폐수 등 악성 폐수에 대한 효과적인 수질오염 저감 기술 개발 필요
고도산화용 탄소 소재 및 전극의 가격 경쟁력 미흡	- 고도산화에 사용되는 탄소계 나노소재는 Boron doped diamond, Fullerene, Carbon Nanotube 등 고가의 합성 방법이 활용 - 따라서 기존 탄소 소재의 저가화 및 금속 산화물 등 대체 나노소재의 개발 필요
산화저항성이 높은 수중 신규 미량 오염물질의 출현	- 과불화화합물, TMAH 등 기존에 알려진 가장 강력한 산화종인 수산화라디칼에 저항성을 갖는 신규 미량오염물질이 도래 - 산화/환원 복합 처리공정을 통해 신종 오염물질을 효과적으로 제어할 수 있는 기술 개발 필요

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
수처리용 나노소재의 다공성 지지체 기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 폐액 및 폐수에서 나노물질 회수용 나노입자 지지체 기술</li> <li>- 안정적으로 나노물질을 담지할 수 있는 소재 설계 및 합성 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수중 물질을 담지체 내부로 빠르게 전달하기 위한 친수성 표면개질 기술</li> <li>- 지지체의 수중 제어가 용이한 소재 합성 기술</li> <li>- 지지체 내부 나노소재 고정화 기술</li> </ul>
미량오염물질 표적 산화 및 흡착 나노기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 고선택성 산화 및 흡착을 위한 나노소재 및 공정 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 활성 산화제의 고효율 생성을 위한 나노촉매 소재 설계 및 합성 기술</li> <li>- 미량오염물질 선택적 포집 및 흡착을 위한 나노소재 설계 및 합성 기술</li> <li>- 표적 대상 미량오염물질의 다양화를 위한 나노구조·개질 기술</li> <li>- 재사용성 확보를 위한 재생 기술</li> <li>- 나노촉매/흡착제 Scale-up 적용을 위한 공정 기술</li> </ul>
총유기탄소 무기화 금속계 (광)전기 나노촉매 기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 난분해성 유기 오염물질 완전 산화용 금속계 나노(광)전기 촉매 전극 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 비귀금속 아산화상 산화물 설계 및 합성 기술</li> <li>- 전기전도도 및 수산화라디칼 생성능 향상을 위한 도핑 및 표면 처리 기술</li> <li>- 아산화상 비귀금속 산화물을 이용한 (광)전기화학적 총유기탄소 제거 공정 기술</li> </ul>
영양염류오염 제어 나노전기화학 촉매 기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 고농도 질소 오염물의 산화/환원 순환을 가속화 하는 나노촉매 소재 및 전극 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 암모니아 산화를 위한 고효율 염소 발생 산화 촉매 및 전극 설계 및 합성 기술</li> <li>- 질산성질소 환원을 위한 환원 촉매 및 전극 설계 및 합성 기술</li> </ul>
수처리용 탄소계 나노소재 및 고효율 나노촉매 기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 산화 저항성이 높은 유기·무기계 오염물질(예: 과불화합물, 질산성 질소, 과염소산) 제거를 위한 환원성 화학종 생성 및 환원 반응 유도용 나노촉매 제조 및 활성산소종 생성용 금속 기반 촉매를 대체하기 위한 높은 가시광 감응성 및 전자전달매개 특성을 보유한 탄소 나노소재 제조 및 산화 기반 수처리 적용 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 탄소 나노소재의 수처리 적용성을 높이기 위한 표면개질 기술 (친수성 확보 및 고정화 달성)</li> <li>- 촉매 특성 개선을 위한 탄소 나노소재 도핑 및 금속 촉매 복합화 기술</li> <li>- 산화 촉매의 활성산소종 발생능 및 안정성 평가 기술</li> <li>- 전구체 활성화를 통한 환원성 라디칼 생성 유도 금속계 나노촉매 제조 기술</li> <li>- 수소화 촉매로서 귀금속 대체 전이금속 촉매 및 귀금속 저함량 촉매 제조 기술</li> <li>- 촉매의 환원 기반 수처리 효율 및 안정성 평가 기술</li> </ul>
재이용수 생산 나노광전기화학 촉매 기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 탈염공정에서 유기물, 질소 제어를 위한 나노광전기화학 촉매 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고효율 광전기화학 촉매 합성 기술</li> <li>- 고효율 광전극 제조 및 공정화 기술</li> </ul>
흡착·여과·산화 복합 기능성 소재 나노기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 공정의 공간·시간적 제약 문제 해결을 위해 물리화학적 수처리의 기반 처리 경로를 동시에 구현하는 다기능성 복합 나노소재 제조 및 수처리 적용 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 흡착, 여과, 산화 중 복수 이상의 복합 나노소재 제조기술 (예: 나노촉매 담지 분리막, 산화촉매 합입 다공성 탄소계 흡착제)</li> <li>- 소재의 수처리 효율 및 안정성 평가기술</li> </ul>
해수 내 고위해성 봉산 및 방사능 오염물질 제거를 위한 나노흡착·분리 복합 시스템 기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 봉산 흡착이 가능하고 물투과가 용이한 다공성 나노소재를 도입한 나노흡착 분리막 기술 및 나노흡착제/분리막 기능을 혼합한 방사능 원소 제거용 나노흡착 분리막 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 봉산 흡착을 위한 나노입자 제조기술</li> <li>- 나노흡착제 효율 향상을 위한 구조화 기술</li> <li>- 봉산 제거를 위한 분리막 코팅 기술</li> <li>- 흡착제·분리막 복합화 기술</li> <li>- 방사성 핵종 포집을 위한 나노흡착제 제조 및 분리막 코팅 기술</li> <li>- 분리막 모듈화 기술</li> </ul>

### 3) 미래핵심기술이슈 : 수질오염저감 기술의 저에너지화, 탄소중립화, 무약품화

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
무약품 수질 오염 저감 기술에 대한 수요 증대	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 신규 방류기준으로 황산/염소 이온 등이 추가됨에 따라 염기반 수처리제의 사용이 제한</li> <li>- 응집/중화/산화/환원을 통한 수처리 과정에서 약품의 투입 없이 나노소재의 활용을 통한 수질 오염 저감 기술의 확대 적용 필요</li> <li>- 수처리제 수송/저장 과정 회피를 위한 실시간 산화제 생산 필요</li> </ul>
탄소중립형 수질 오염 저감 기술의 부재 및 낮은 효율	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 탄소중립을 위한 저에너지형 수질 오염 저감 기술 개발 필요</li> <li>- 수질 오염 저감 동시 오염물질로부터의 에너지 및 자원 회수 기술 개발 필요</li> <li>- 태양에너지 등 신재생에너지 연계형 수질 오염 저감 기술 개발 필요</li> </ul>
하폐수 방류수에 대한 물 재이용 기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기후변화로 인한 수량부족으로 하폐수 처리수에 대한 물 재이용 기술 수요 증대</li> <li>- 전자/철강/화학 산업 등 대량 용수 사용 산업을 위한 초순수 생산 기술 개발 필요</li> </ul>
태양광 활용 수질오염저감 기술의 낮은 효율 및 현장 적용의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 광흡수율, 전기전도도, 재결합율을 동시에 향상시켜 태양광에서 효과적으로 운전할 수 있는 수질오염 저감 나노촉매 개발 필요</li> <li>- 광활성 나노촉매의 현장 적용성 향상을 위한 고정화 및 공정화 기술 개발 필요</li> </ul>
탄소중립을 위한 자원 회수·생산형 수처리 기술 부족	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 하폐수 중 에너지 준위 및 부가가치를 갖는 오염물질을 활용하거나 회수하여 에너지 및 자원을 생산하는 수처리 기술의 수요가 지속적으로 증가</li> </ul>

#### 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
수처리 동시 에너지 회수형 나노전기화학 촉매 소재 기술	정의	○ 오염물질로부터 직접 전자전달이 가능한 나노소재 및 전극 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 직접 산화 전기화학 촉매 설계 및 합성 기술</li> <li>- 직접 산화 전기화학 촉매 전극화, 안정화 및 대면적화 기술</li> </ul>
산화제·산화제 전구체 생성용 나노전기화학 촉매 기술	정의	○ 외부 화학약품 투입 최소화 혹은 배제 조건에서 수처리용 산화제/산화제 전구체의 전기화학적 생성을 위한 나노구조 전기촉매 제조 및 수처리 적용 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 활성 염소종, 오존, 과산화수소, 과황산 등 수처리용 산화제 생성을 위한 전기촉매 제조기술</li> <li>- 전구체 활성화를 통한 고효율 라디칼계 산화제 생성 유도 복합 촉매 제조 기술</li> <li>- 신재생에너지 생산 및 저장 장치 연계 기술</li> </ul>
과산화수소 원위치 생산 나노광촉매 기술	정의	○ 물/산소 원위치 산화환원을 통한 고농도·고순도 과산화수소 산화제 생산용 광촉매 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 유기 반도체 나노 광촉매 소재 전산 설계 슈퍼컴퓨팅 기술</li> <li>- 유기 반응 매체 활용 광화학적 과산화수소 생산능 고속탐색 스크리닝 (High-throughput screening) 기술</li> <li>- 태양광 기반 과산화수소생산 반응기 및 분리막 정제 공정 최적화 기술</li> <li>- 과산화수소생산 탄소배출 및 에너지 소모량 전과정 평가 기술</li> <li>- 과산화수소 원위치 현장 생산 및 수처리 활용 실증 기술</li> </ul>
가시광활성 소독용 수처리 광촉매 나노기술	정의	○ 소독용 화학약품의 인체 유해 가능성 차단을 위한 저조도 가시광 활성 광촉매 제조 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 실내 공간 내 허용 가능한 조도와 파장의 광에너지 감응도가 높은 금속산화물계 광촉매 제조 기술</li> <li>- 가시광 활성 및 산화 화학종 생성능 개선을 위한 촉매 개질 기술</li> <li>- 촉매 고정화 기술 및 소독능·장기 안정성 평가 기술</li> </ul>

나노기술명	개요	
유가 이온의 선택적 흡착 동시 결정화가 가능한 나노소재 기술	정의	○ 유가 이온의 선택적 흡착 동시 결정화가 가능한 나노소재 기술
	요소 기술	- 탄소나노튜브, 그래핀 산화물, 나노다이아몬드 등 나노소재의 수처리 적용성을 높이기 위한 표면 개질 기술 - 유가 이온 흡착 및 결정화 반응효율이 높은 나노소재 기술 - 나노소재에 대한 안정성 평가 기술
유기용매 정제를 위한 하이브리드 가교 나노여과 증공사막 기술	정의	○ 유기용매에 대한 내화학적성을 지닌 유기용매 분리/정제를 위한 나노분리막 소재 기술
	요소 기술	- 고분산성 및 상용성 지닌 나노입자 제조 기술 - 나노입자와 고분자 매트릭스 가교 기술 - 나노입자 기공 크기 정밀 제어 기술
태양광/펜톤 촉매 연계형 분리막 나노기술	정의	○ 태양광 기반 활성산소종 생산용 광촉매 기능이 연계되거나 펜톤 나노촉매를 분리막 표면에서 성장시켜 반응을 유도하는 수처리용 분리막 기술
	요소 기술	- 태양광 광흡수 유기 반도체 나노광촉매 소재 기술 - 태양광 광촉매의 분리막 표면 화학적 고정화 기술 및 분리막의 표면 광흡수, 기공, 젖음성 특성 제어 기술 - 광흡수 자가 세척 분리막 여과 모듈 및 공정 기술 - 전도성 고분자 및 펜톤 나노촉매의 직접 성장을 통한 촉매 고정형 분리막 제조 기술 - 광흡수 펜톤 세척 분리막 여과 모듈 및 공정 기술
자성입자를 활용한 가역적 흡착 멤브레인 기술	정의	○ 자성 특성을 이용한 가역적 흡착 반응성 멤브레인 기술
	요소 기술	- 자성입자 표면에 수처리 기능성 도입 기술 - 자성입자 배열을 위한 전/자기장 제어 기술 - 안정적인 입자 제어를 위한 공정 구성 기술

## 다. 담수화/자원화

### 1) 개요

- (정의) 기후변화 적응을 위한 양질의 대체 수자원 확보 관점에서 담수화 분야가 직면하고 있는 기술적 한계를 돌파할 수 있는 기술로 선택성, 에너지 효율성, 장기 내구성, 고부가가치 자원·에너지 회수성 향상을 위한 나노기술 및 이를 활용한 담수화·자원화 공정 기술
- (필요성) 기후변화와 더불어 세계적인 인구 증가, 공업·농업 등의 산업 활동 증대로 인해 수자원이 부족한 지역이 더욱 많아져, 해수, 하수 처리수 등을 원수로 한 물 생산 기술의 개발이 필요. 또한, 탄소중립에 대한 전 세계적인 수요로 인해 하·폐수 및 해수로부터 유가자원을 회수하기 위한 기술 개발이 필요
- (발전 전망) 담수화 및 자원화 기술은 기후변화 적응을 위한 대체 수자원 생산 기술의 선택성, 에너지 효율성, 장기 내구성 확보 및 해수, 산업폐수 중 고부가가치 자원 및 에너지의 효율적 회수 효율 향상을 중심으로 발전할 것으로 예상되며, 이를 위한 나노소재 및 모듈·공정 기술 또한 발전할 것으로 예상

### 2) 미래핵심기술이슈 : 기후변화 적응을 위한 대체 수자원 생산 기술의 선택성, 에너지 효율성, 장기 내구성 확보

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
담수화 기술 장기운전 과정에서의 문제	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 필연적으로 발생하는 농축수 처리에 대한 대안 부재</li> <li>- 산화/환원 기술과의 하이브리드화 필요</li> <li>- 막오염에 대한 소재 저항성 증진 필요</li> <li>- 담수화용 막의 대면적화 기술 필요</li> </ul>
담수화 과정에서의 과도한 에너지 사용	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 해수 담수화 에너지 소비량 (1.7 kWh/m<sup>3</sup>) 저감 필요</li> <li>- 단위면적당 담수 생산량 및 에너지 소비량 저감을 위한 혁신적 소재 개발 필요</li> </ul>
특정이온에 대한 제거 선택성의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 분리막, 흡착 소재의 나노수준 물리화학적 구조 제어 필요</li> <li>- 독성이온, 유가 이온에 대한 선택적 분리/회수 기술 필요</li> <li>- 초순수 제조용 극미량 오염원 제어 기술 필요</li> </ul>

### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
나노기반 광반응 활용 태양광 담수화 기술	정의	○ 빛을 에너지원으로 이온교환막 간의 산화/환원 반응을 매개하여 염 분리를 유도하는 담수화 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 유기 반도체 소재 기반 태양광 광전극(양극) 소재 개발 기술</li> <li>- 태양광 기반 담수, 에너지, 유용화합물 생산 전기화학 공정 기술</li> <li>- 전극 표면 및 전해질 내 반응 원리 규명을 위한 분광학적 모니터링 기술</li> </ul>

나노기술명	개요	
초박막 고투과성 및 자연모사형 다기능 나노역삼투막 기술	정의	○ 자연모사 표면 패턴을 통한 저오염성 해수담수화 나노분리막 및 초박막 선택층 두께(50nm 이하)를 지닌 나노 역삼투막 기술
	요소 기술	- 선택층 소재 제조 및 초박막 선택층 도입 기술 - 초다공성 고강도 지지체 및 대면적 제조 기술 - 자연모사 패턴 설계 기술 - 내오염성 향상을 위한 다기능(자연모사 패턴·친수성·항균성) 복합화 기술 - 패턴 지지체 기반 고밀도 나노박막 선택층 제조 기술 - 내오염성 화학물질 대량 합성 기술 - 대면적 패턴 분리막 제조 및 표면개질 기술
저전압 이온선택적 나노전극소재 기술	정의	○ 해수 담수화 및 하·폐수내 유가 이온성 자원회수를 위한 저인가 전압에서 구동 가능한 나노전극소재
	요소 기술	- 나노공극을 가지는 전극 합성 기술 - 공극 및 전도성 조절을 통한 전극 제조 기술 - 나노전극 대면적화 및 평가기술
해수전지담수화용 세라믹 나노분리막 기술	정의	○ 해수 내 나트륨(Na+) 이온만을 선택적으로 투과할 수 있는 세라믹 나노분리막 소재 기술
	요소 기술	- 나노이온채널을 조절하는 전극 합성 기술 - 전기저항/전도성 평가를 위한 시스템 제작 기술 - 세라믹 나노분리막 대면적화 기술
농축수 무발생 나노분리막 기술	정의	○ 염의 용해 한도까지 담수화의 회수율을 높여 농축수 무방류 해수 담수화 공정 기술(공정 최종 생성물은 생산수 및 고체염)
	요소 기술	- 옹스트롬 사이즈 수준의 초고도 분별력을 지니는 나노분리막 - 극고압에서 안정적 탈염 성능을 제공하는 역삼투막 - 스케일링 현상을 최소로 하는 막 표면 개질 기술 - 고농도 농축수를 높은 에너지 효율로 결정화하는 용매추출 기술

### 3) 미래핵심기술이슈 : 해수, 산업폐수 중 고부가가치 자원 및 에너지의 효율적 회수

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
탄소중립을 위한 유용자원·에너지 회수 기술의 부재	- 해수, 산업폐수 중 Li, In 등 희소금속 회수 기술 필요 - 혐기소화유출수 등으로부터 고순도 암모니아 회수 기술 필요
역삼투, 전기투석으로 제거율이 낮은 중성, 저분자 오염물질 제거의 한계	- Urea, Nitromethane 등 분자량이 작은 중성 유기물과 중성 pH에서 착이온을 형성하는 Boron 등은 초순수를 생산하는 역삼투·전기투석 공정에서 제거율이 제한적임에 따라 이에 대한 효율 향상 필요
담수화 과정에서 분리된 유가 자원의 활용방안 부재	- 희토류 금속 이온 등 담수화 과정에서 회수할 수 있는 고부가가치 자원을 선택적으로 분리하여 고순도화할 수 있는 기술 개발 필요

### 3-2) 나노기술(주제)

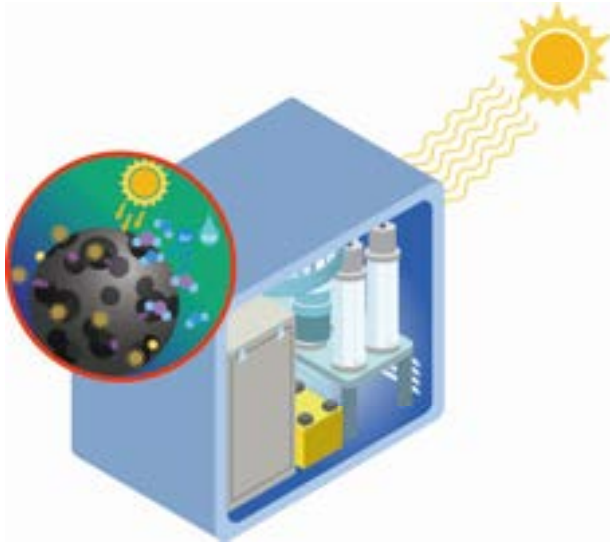
나노기술명	개요	
초순수 생산 나노소재 전극 기술	정의	○ 중성, 저분자 오염물질의 산화·흡착이 가능한 나노전기화학 촉매 소재 및 공정 기술
	요소 기술	- 탄소나노튜브, 그래핀 산화물, 나노다이아몬드 등 - 나노소재의 수처리 적용성을 높이기 위한 표면 개질 기술 - 산화력이 강한 정공(Hole) 생성 가능한 나노소재 촉매 기술 - 산화 촉매의 활성산소종 발생능 및 안정성 평가 기술
유가자원 선택적 회수용 나노분리막/나노기공 전극 및 소재 기술	정의	○ 산업 폐액 내 존재하는 희소금속 또는 유가자원의 선택적 회수를 위한 나노 분리막 및 나노기공 크기를 제어한 축전식탈염용 탄소전극 소재 기술, 또는 생물모방형 선택적 흡착제가 적용된 분리막 기반 투과형 전기산화·흡착 시스템 기술
	요소 기술	- 고용량·고선택성 유가금속 흡수 소재 합성 기술 - 확산 한계를 극복한 용액 투과형 막전극 제조 기술 - 물질이동 속도 조절 기술 - 탈염용량이 향상된 탄소전극 설계 및 합성 기술 - 유가자원의 선택적 회수를 위한 탄소전극의 나노기공 크기 제어 기술 - 탄소전극 대면적화 및 공정화 기술 - 해양 생물 및 식물 특성 모사 흡착 소재 합성 기술 - 기능기의 종류 및 배열 조절을 통해 대상 희소금속에 대한 선택도 확보 기술 - 희소금속 회수용 흡착 소재가 도입된 전도성 막 전극 기술
에너지 추출형 나노이온·역삼투막 기술	정의	○ 이온 선택성 기능과 역삼투막 기술 혼합한 에너지 저감형 나노역삼투막 기술
	요소 기술	- 우수한 수투과도를 보이는 박막 제조 기술 - 고선택성 이온교환막 구조 제어 기술 - 에너지 추출을 위한 저전압 나노전극 제조 기술 - 에너지 효율 증대를 위한 모듈설계 기술



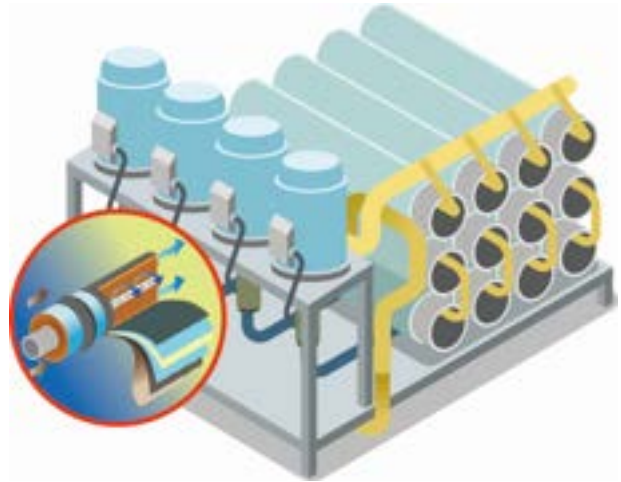
### 〈나노융합 물 관리기술 로드맵〉

종분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술										
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	
나노융합 물 관리 기술	수질 측정분석	수계 생물유체물질에 대한 실시간 측정 분석	수중 미생유기물 및 산화제 실시간 측정 나노소재 기술	유기물 기능기반 선택적 직접전자전달 나노촉매 기술 / 전위 산화에 실시간 측정 나노촉매 설계 및 합성 기술	정밀화 및 선택적 측정 기술									
			이차지 기반 수돗물 이물질 검출 나노센서 기술	나노분리막 변형을 통한 수질변화 감지 기술	정밀 오염도 정밀화 및 수질 지표화 기술									
		수계 유체물질에 대한 선택적 정밀 측정 분석	수돗물 적실 유입물질 감지 나노소재 기술	무해 미생물 및 탁질 유입 부산물 검출을 위한 나노바이오 기반 환경센서 기술	나노전기수학적 현상 제어가 가능한 나노 다공성 막 제조 기술	나노전기수학적 기반 수계 병원균 고농축 분리, 모노 농축 기술								
			수계 미량 유기오염물질 포집용 3차원 나노구조 및 나노유동 제어 기술	미량 유기오염물질 선택적 포집용 3차원 나노 구조 표면 제어 기술	유해 나노구조 상호작용 및 나노스케일 유동 제어 기술									
나노융합 물 관리 기술	수질 오염 저감	수계 생물 유체물질 제거를 통한 안전하고 건강한 수질 확보	수처리용 나노소재의 다공성 제어 기술	나노물집합체 설계 및 합성 기술 / 전이성 표면 제어 기술	다공성 수층 제어 기술, 나노소재 구조에 고집적 기술									
			미량오염물질 표적 산화 나노기술	표적 산화제 고분자 나노캡슐화 기술 / 미량오염 물질 표적 나노소재 설계 및 합성 기술	미량 오염물질 표적 분해 기술 / 나노캡슐화 제조 기술									
			중유기질소 유기물 금속착염(중금속) 나노촉매 기술	미생물학적 나노촉매 산화촉매 설계 및 합성 기술 / 도핑 및 표면 제어 기술	미생물학적 중유기질소 제거 기술									
			영양염류 오염 제거 나노 전기화학 촉매 기술	영양염류 산화제 고분자 나노캡슐화 기술	영양염류 산화제 고분자 나노캡슐화 기술									
			수처리용 전도성 나노소재 및 고분자 나노촉매 기술	전도성 나노소재 전이성-고분자화 위한 표면 제어 기술 / 도핑 및 금속촉매 복합 기술 / 전이성 나노소재 합성 및 나노구조 제어 기술	전도성 나노소재 전이성-고분자화 기술 / 전이성 나노소재 합성 및 나노구조 제어 기술									
			제어용 수 생산 나노공정(화학) 촉매 기술	고분자 나노캡슐화 기술	고분자 나노캡슐화 기술									
			중금속 산화 촉매 기술 나노소재 기술	중금속 산화 촉매 나노소재 기술	중금속 산화 촉매 나노소재 기술									
			해수 내 고분자 나노캡슐화 및 표적 오염물질 제거를 위한 나노캡슐화-표적 나노소재 기술	표적 산화제 고분자 나노캡슐화 기술 / 표적 산화제 나노소재 구조 제어 기술	표적 산화제 고분자 나노캡슐화 기술 / 표적 산화제 나노소재 구조 제어 기술									
		수질오염저감 기술의 저유해, 저에너지, 탄소중립화, 무인화	수처리 용이 에너지 효율 나노구조(표면) 촉매 기술	표적 산화제 고분자 나노캡슐화 기술	표적 산화제 고분자 나노캡슐화 기술									
			산화제 산화제 연구에 응용된 나노 전기화학 촉매 기술	표적 산화제 고분자 나노캡슐화 기술	표적 산화제 고분자 나노캡슐화 기술									
			과산화수소 원자력 생산 나노촉매 기술	과산화수소 원자력 생산 나노촉매 기술	과산화수소 원자력 생산 나노촉매 기술									
			가시광 활성 소독용 수처리 광촉매 나노기술	가시광 활성 소독용 수처리 광촉매 나노기술	가시광 활성 소독용 수처리 광촉매 나노기술									
			유기오염의 선택적 촉매 분해 기술 나노소재 기술	유기오염의 선택적 촉매 분해 기술 나노소재 기술	유기오염의 선택적 촉매 분해 기술 나노소재 기술									
			유기오염에 정밀화 위한 나노구조 기반 나노소재 기술	유기오염에 정밀화 위한 나노구조 기반 나노소재 기술	유기오염에 정밀화 위한 나노구조 기반 나노소재 기술									
			대량오염물질 촉매 연계형 분리막 나노기술	대량오염물질 촉매 연계형 분리막 나노기술	대량오염물질 촉매 연계형 분리막 나노기술									
			자생미생물 활용한 가역적 촉매 분리막 기술	자생미생물 활용한 가역적 촉매 분리막 기술	자생미생물 활용한 가역적 촉매 분리막 기술									
나노융합 물 관리 기술	담수화/ 자원화	기후변화 적응을 위한 대량 수자원 생산 기술의 선택적, 저에너지, 저탄소, 장기 내구성 확보	나노기반 광안정 염분 대량용 담수화 기술	유기 전도성 소재 기반 대량용 광안정(광) 소재 기술	대량용 기판 양-에너지-자원 생산 전기화학 공정 기술 / 전도성 광안정(광) 소재 기술									
			표적형 고분자 및 자생미생물 기반 나노-역삼투막 기술	표적형 고분자 및 자생미생물 기반 나노-역삼투막 기술	표적형 고분자 및 자생미생물 기반 나노-역삼투막 기술									
			저탄소 이온선택적 나노-전도성 기술	나노공극을 가지는 전기 합성 기술 / 공극 및 전도성 조절을 통한 전극 제조 기술	나노전도 대면적화 및 평가 기술									
			해수전담수화를 위한 나노분리막 기술	해수전담수화를 위한 나노분리막 기술	해수전담수화를 위한 나노분리막 기술									
		해수, 산업폐수 등 고분자기반 자원화 및 폐수처리 효율적 향상	농축수 무염분 나노분리막 기술	농축수 무염분 나노분리막 기술	농축수 무염분 나노분리막 기술									
			초순수 생산 나노소재 전극 기술	초순수 생산 나노소재 전극 기술	초순수 생산 나노소재 전극 기술									
			유기오염 선택적 흡수 나노분리막 나노구조 기반 전극 및 소재 기술	유기오염 선택적 흡수 나노분리막 나노구조 기반 전극 및 소재 기술	유기오염 선택적 흡수 나노분리막 나노구조 기반 전극 및 소재 기술									
			에너지 효율적 나노소재-역삼투막 기술	에너지 효율적 나노소재-역삼투막 기술	에너지 효율적 나노소재-역삼투막 기술									

〈나노융합 물 관리기술 대표제품〉



수처리 시스템 내 나노광촉매



해수담수화 시스템 내 나노역삼투막

## 4-2. 나노융합 대기 관리기술

### 가. 대기환경 실내공기질 측정·분석

#### 1) 개요

- (정의) 유해가스, 미세먼지, 바이오에어로졸과 같이 대기환경과 실내공기질을 분석하고 관리하기 위해 사용되는 촉매, 리셉터, 신호프로브, 기구·기계·장치, 소프트웨어 등에 적용 가능한 나노환경 기술
- (필요성) 최근 전 세계는 화석연료와 공장 등으로부터 발생한 미세먼지, COVID19 팬데믹에 의한 호흡기 신변종 감염병, 러시아 전쟁 등을 통한 생화학테러 위험성으로부터 건강을 보호하고 안정적인 삶을 위해 노력하는 추세. 이에 따라 대기 환경 및 실내 공기질을 측정하고 분석하여 미세먼지, 가스, 바이오에어로졸을 모니터링하고 관리할 수 있는 기술이 필요
- (발전 전망) 대기환경, 실내 공기질 측정·분석은 나노환경 기술과 바이오, 기계 등 다학제적 융합기술 분야로 실시간 대기환경, 실내공기질 모니터링을 통한 건강 토탈케어 형태의 기술로 진화 전망. 다중이용시설 사용의 증가와 함께 실내 공기질 모니터링이 건물설계부터 시설관리까지 계속 필요함에 따라 관련 산업이 활성화 추세이며, 다중이용시설 외 대중교통차량 또한 공기질 관리 대상에 포함. 현행 '실내공기질 관리법'은 실내공기질 유지기준과 권고기준을 별도로 마련하고 있으며, 환경부령에서 지정하는 시료채취방법 및 측정방법으로 다중이용시설별 실내공기질을 관리하고 있지만, 비효율적인 표준화 방법 때문에 관리 횟수가 현저히 낮아 데이터 분석도 미흡. 대기 중 유해가스, 미세먼지 및 바이오에어로졸과 같은 극소량의 공기부유 유해인자를 고가의 장비 없이 자율적 관리 체계로의 선제적 대응이 필요하며, 이를 위해 고신뢰성 실시간 관리 기술의 요구가 증대. 따라서 신뢰성 있는 실시간 모니터링 기술 개발을 통해 기존 표준화 방법을 대체하기 위해서는 검출 성능향상을 위한 나노소재의 적용이 중요한 전략으로 떠오르는 추세

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 유해 가스와 미세먼지 모니터링을 통한 대기환경 관리

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
유해가스의 가역적 흡·탈착 현상 분석을 통한 고신뢰성 유해가스 감지 기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 대기 중의 유해가스 감지는 센서소재 표면에 가스의 흡·탈착을 통해 이루어지며, 특정 가스의 흡·탈착 특성에 대한 이해가 이루어져야 정확도 높은 고신뢰성 센서 개발이 가능</li> <li>- 나노소재 표면에서 대기 중 유해가스와 흡·탈착을 통해 반응이 이루어지고 있으나, 흡·탈착 성분의 정성적·정량적 분석의 어려움으로 인해 가역적인 가스 반응 특성을 가지는 고신뢰성 유해가스 감지 소재 개발이 한계</li> </ul>

기술난제	개요
고신뢰성 나노소재 기반 센서 대량생산 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다양한 나노소재를 활용한 유해가스 감지특성을 가지는 센서가 다수 개발되고 있으나, 높은 소자 간 편차에 의하여 특정 유해가스 성분을 감지하기 위한 신뢰성이 낮은 문제</li> <li>- 대면적에 일정한 나노패턴을 형성할 수 있는 기술을 확보하여 고신뢰성 나노소재 기반 유해환경 센서를 대량으로 생산할 수 있는 기술 확보 필요</li> <li>- 반도체 공정 기술을 활용하여 센서의 소형화와 대량생산을 통한 가격 경쟁력 확보 필요</li> </ul>
다종 혼합 가스 패턴인식을 위한 센서 어레이 기반 나노기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 종래에는 단일 종의 가스성분과 실험실 조건에서 유해환경 가스에 대한 특성 분석이 수행되고 있으며, 이러한 실험실 기반 특성 평가는 대기 중에서 유해가스를 감지하는 것과는 상당한 편차</li> <li>- 대표적으로 다종의 가스가 혼합된 환경에서 특정 유해가스를 정성적/정량적으로 감지할 수 있는 기술 필요</li> <li>- 다종의 나노소재 기반 센서 어레이를 구축하는 기술과 더불어, 혼합 가스 성분을 개별적으로 구분해 낼 수 있는 패턴인식 기술 도입 필요</li> </ul>
저농도의 유해가스 분석을 위한 포터블 고농축·파과 기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 발생원으로부터 수용체까지 유해가스의 유입경로 및 이동을 예측하기 위해서는 보급 가능한 센서들을 여러 지점에 배치하여 실시간 분석 필요</li> <li>- 하지만 보급 가능한 저가형 센서들은(저항변화식 가스 센서) 고감도·고선택도를 가지기 힘들며, 여러 수분 및 풍량 등의 영향을 받게되는 문제</li> <li>- 현재는 테들러백에 포집하거나, SPME나 흡착봉을 활용하나 이는 실시간 분석이 될 수 없고, 고가의 장비를 활용하여 분석하는 형태</li> <li>- 따라서 저농도의 유해가스를 정확하게 흡착시켜 농축한 후 필요에 따라 자체적으로 농축된 유해가스를 파과하는 기술을 센서와 일체화시키는 접목이 필요</li> </ul>
장기 수명성이 확보된 안정한 저항변화식 가스센서 나노소재 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 산화물/촉매 기반 저항변화식 가스 센서는 대부분 200~300℃의 고온에서 가스를 검출</li> <li>- 고온에서 장기간 반복 활용되면 귀금속류의 촉매 활성분은 서로 sintering 되어 응집. 응집된 나노촉매 입자들은 활성이 떨어지게 되며 가스 센서 감도 저하의 문제 발생</li> <li>- 따라서 단일 금속활성분이 아닌 고온 안정성이 확보된(sintering이 방지된) 합금계 나노촉매 입자의 도입 필요</li> </ul>

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
실시간·실환경 분광기 기반 유해가스 모니터링 나노기술	정의	○ 실시간·실환경 분광기를 활용한 나노소재 표면에 유해가스의 흡·탈착 현상을 모니터링하고, 가역적 반응 특성을 가지는 고신뢰성 가스 감지 나노소재 설계 및 가스 나노센서 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 유·무기 하이브리드 나노소재 합성 및 표면 개질기술</li> <li>- 다양한 수분환경에서 가스 감지 가역성과 신뢰성이 우수한 나노소재 복합화 기술</li> <li>- 분광분석법을 활용한 나노소재 표면 화학성분에 대한 실시간/실환경 분석 기술</li> </ul>
고신뢰성 가스검출이 가능한 대면적 나노패턴 형성기술	정의	○ 높은 신뢰성과 재현성을 가지는 유해가스 감지 센서 개발을 위한 대면적 나노패턴 형성 기술 및 대량생산 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고신뢰성 유해대기 가스 센서를 위한 대면적 기반 고종횡비 나노소재 패터닝 기술</li> <li>- 금속산화물과 금속을 포함하여 다양한 소재를 활용한 고종횡비 나노패터닝 및 이들의 복합화가 가능한 나노패터닝 기술</li> <li>- 유해가스 성분에 대한 센서 소자 간의 신뢰적인 감도 분석기술</li> </ul>

나노기술명	개요	
다중 혼합 가스 패턴인식을 위한 나노센서 어레이 기술	정의	○ 대기 중에 혼합된 다종의 가스성분 중에서 특정 유해가스를 정성적·정량적으로 감지할 수 있는 나노소재 기반 다중센서 어레이 개발 및 가스성분 패턴인식 기술
	요소 기술	- 다중 나노소재 기반 센서 어레이 구축 및 집적화 기술 - Si기반 다중 혼합가스 패턴인식 기술을 통한 실시간 대기 유해가스 감지 기술 - 다중 혼합 가스의 분리 및 감지를 통한 정성적·정량적 분석기술
고감도 가스검출을 위한 농축·파과 나노기술	정의	○ 고농축·파과 나노기술을 활용하여, 초 저농도의 실내외의 가스상 오염원을 보급 가능한 센서로 신뢰성 있게 실시간 모니터링하는 기술
	요소 기술	- 다공성 소재 활용 자체발열형 가역적 가스의 흡·탈착(파과) 나노기술 - 수분·간섭가스에 대한 영향을 최소화하는 흡·탈착 기술 - 센서부와외의 포터블 일체형 시스템 직접화 기술
센서 안정성 확보를 위한 합금촉매 기반 저가형 센서 나노소재 기술	정의	○ 장기 안정성이 확보된 저가형 저항변화식 가스 센서 나노소재 기술
	요소 기술	- 고온에서 반복 센서 구동시에도 촉매 활성 입자의 Sintering이 방지된 고효율 합금 촉매 설계 기술 - 귀금속 촉매 함량을 최소화하며 고효율 특성을 갖는 합금 촉매 나노기술

### 3) 미래핵심기술이슈 : 호흡기 질환 관련 바이오에어로졸 모니터링을 통한 실내공기질 관리

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
극미량으로 존재하는 바이오에어로졸 분석을 위한 효율적인 포집의 한계	- 공기 중에 극미량으로 존재하는 바이오에어로졸을 제거하거나 분석하기 위해서는 고효율의 포집 방법이 필요 - 바이오에어로졸은 기류와 함께 멤브레인을 통과하면서 차단, 충돌, 확산, 정전기력 등을 통해 멤브레인 표면에 부착되므로 물리화학적 흡착을 위한 비 표면적 증가와 표면 개질 연구 개발 필요 - 간단하고 저렴한 공정을 이용한 표면적을 극대화한 대면적 나노구조체 개발이 핵심 해결과제
현장에서 미세먼지와 에어로졸의 구별 한계로 인한 낮은 모니터링 정확도	- 현장에서 미세먼지와 바이오에어로졸의 실시간으로 구별하는 기술의 부재로 현장 모니터링에 한계 - 나노구조 기반의 미세유체 칩 내에서 타겟 물질의 분리/농축/정제가 연속적으로 이루어질 수 있다면, 기존 기술로는 불가능하였던 공기 시료 내 생물학적 유해인자 검출 가능 - 또한, 미량의 병원성 미생물 분석을 위한 선택적인 현장 농축 기술로 응용 가능
대기 중 부유 미생물의 종 구분을 전제로 하는 현재의 감염 가능성 판단 기술의 한계	- 공기 중 존재하는 미생물 병원체를 포함한 미생물 종류를(박테리아, 곰팡이, 또는 바이러스 species구별을 의미) 선택적으로 구별할 수 있는 나노프롭 소재 개발 및 나노프롭 소재를 적용한 미생물 탐지 기술 필요 - 종류가 매우 다양한 미생물종을 선택적으로 인식할 수 있는 나노프롭 소재는 탐지 플랫폼 기술과 연계하여 감염병을 유발하는 공기 중 미생물을 신속하게 탐지하고, 실내공기의 생물학적 오염 수준을 제공하여 국민 건강 보전에 기여할 수 있는 핵심 환경-바이오 소재 개발 필요

기술난제	개요
현장에서 긴 시간이 소요되고 전문가가 필요한 바이오에어로졸 분석기술의 제한성	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 현장에 미량 존재하는 공기 중 미생물 병원체를 농축하고 고농도의 핵산을 추출하는 전처리 기술 향상을 위한 나노기술 필요</li> <li>- 넓은 표면적을 가지는 나노구조체를 통해 포집률과 정제율을 향상할 수 있으며, 기존 기술로는 불가능하였던 대면적, 대용량의 전처리 플랫폼을 가능하게 하여 현장형 전처리 기술로 응용 가능</li> </ul>
바이오에어로졸의 현장 포집과 실험실 분석으로 인한 실시간 대응 불가	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 공기 중 분포한 바이오 에어로졸의 포집과 동시에 실시간 검출도 가능한 나노소재 기반 일체형 모니터링 시스템 필요</li> <li>- 고효율의 포집 기술과 고감도의 검출 기술이 통합된 나노소재 기반의 일체형 모니터링 시스템은 공기 중의 생물학적 유해인자의 오염수준을 현장에서 신속히 파악하여 실시간 대응이 가능</li> <li>- 공기 감염성 미생물의 확산을 방지하여 국민 건강 보전에 기여할 수 있는 나노플랫폼 기술 개발 필요</li> </ul>
공기 오염관련 생물학적 테러에 대비하기 위한 현장 모니터링 기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 생물학적 테러 위험물의 조기 탐지를 위한 높은 광감응성 및 전자 전달 특성을 보유한 나노소재 제조 및 이를 활용한 신속, 고감도 광전기화학 검출 기술 필요</li> <li>- 우수한 광촉매 특성, 화학적 안정성, 제조 용이성을 보유한 산화물 기반 나노소재를 활용한 광전기화학 검출 기술 개발을 통한 고위험 병원체에 대한 고감도, 신속 탐지에 대한 차세대 핵심 기술 확보 필요</li> </ul>

### 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
극미량 바이오에어로졸 포집용 3차원 나노구조 기술	정의 ○ 공기 중 극미량으로 존재하는 미세병원체를 효율적으로 포집할 수 있는 3차원 나노구조 기술
	요소 기술 - 바이오에어로졸 포집용 멤브레인에 3차원의 나노구조체를 합성할 수 있는 나노기술 - 나노구조에 의한 멤브레인의 차압을 최소화 할 수 있는 나노구조 합성 기술 - 미량의 병원체를 고효율로 포집할 수 있는 표면적 향상 및 표면 개질 기술
바이오·비바이오 에어로졸 구별 및 농축용 미세유체 기반 나노기술	정의 ○ 미세먼지, 세균, 바이러스를 구별하고 농축할 수 있는 나노구조 기반의 미세유체 칩 기술
	요소 기술 - 공기 시료 내 생물학적 유해물질을 다른 물질들과 분리·정제하기 위한 나노구조 기반의 미세유체칩 제작 기술 - 공기 시료 내 미량의 특정 병원성 미생물을 고농도로 농축할 수 있는 전처리 기술
실내공기 중 미생물 다중분석을 위한 나노프로브 소재 기술	정의 ○ 공기 중 미세병원체를 포함한 미생물 (박테리아, 곰팡이, 바이러스 등)을 선택적으로 구별하여 장소에 따라 병원체 및 미생물 종류를 다중 분석할 수 있는 나노기술
	요소 기술 - 신호 프로브의 표면 개질을 통한 물의 분산성 향상 기술 - 리셉터 고정화 기술 및 방향성 조절 기술 - 리셉터 초고속 스크리닝 기술 - 리셉터 선택성과 친화도 성능 표준화 기술
현장형 신속 바이오에어로졸 포집·검출 일체 나노플랫폼 기술	정의 ○ 현장에서 바이오에어로졸 전처리를 통해 바이오에어로졸을 포집하고 동시에 검출도 가능한 나노소재 기반 일체형 모니터링 시스템 기술
	요소 기술 - 나노소재 기반의 고효율 바이오에어로졸 포집 기술 - 나노소재 기반의 고감도 바이오에어로졸 검출 기술 - 일체형 바이오에어로졸 포집 및 검출 플랫폼 개발 기술 - 다양한 기판에서 대면적의 나노구조체를 합성할 수 있는 나노기술 - 미량의 병원체를 고농도로 농축할 수 있는 표면적 향상 및 표면 개질 기술

나노기술명	개요	
광전기화학 기반 생물학적 테러 위험물 감지 나노기술	정의	○ 광전기화학적으로 생물학적 테러 위험물을 검출할 수 있는 나노기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bi, Cu, Fe 기반 산화물 나노소재의 광 감응성 및 전기 전달 특성 개선을 위한 나노구조화, 도핑 및 조촉매 복합화 기술</li> <li>- 고위험성 위험물에 대한 선택성 부여를 위한 산화물 반도체 표면 처리 기술</li> <li>- 고위험성 테러 위험물 광전기화학적 감지 성능 (민감도, 감지시간 등) 평가 기술</li> </ul>

## 나. 대기오염 저감

### 1) 개요

- (정의) 유해가스, 미세먼지, 바이오에어로졸 등 대기 중에 존재하는 기체오염물질을 저감하기 위해 사용되는 촉매, 필터, 멤브레인 등에 적용가능한 나노환경기술을 의미. 이는 실내공기청정 소재·가전 및 공장, 배기가스 처리장치에 활용
- (필요성) 황사, 미세먼지, 새집증후군 등 실내·외 인간의 건강을 위협하는 대기오염의 악화는 천식, 비염 등의 호흡기 질환 및 아토피 등의 피부 질환을 유발. 따라서 인간의 건강한 삶을 영위하기 위해 실내 공기질의 관리는 필수적이며, 더불어 배출원의 공기오염에 대한 효율적 관리 필요
- (발전 전망) 실내공기질 및 배출원의 오염 저감은 나노기술과 보건, 기계 플랫폼 등 다분야 융합연구로, 오염원 및 오염도에 따른 선택적 기술을 적용하는 형태로 발전
  - ‘대기환경보전법 시행규칙’에 따르면 대기오염방지시설은 집진, 흡수·흡착, 연소, 촉매, 응축, 산화환원반응, 미생물을 이용한 처리시설 등을 포함. 나노촉매의 경우, 비교적 저렴하며 2차 오염 없이 입자상, 가스상 오염을 모두 저감 가능
  - 국내에서 주로 배출되는 대기오염물질은 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO, VOC로, 이는 대기 중의 화학반응을 통해 미세먼지를 생성기 때문에 효율적인 관리가 필요. NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO 등은 각각 배기가스, 화력발전 등에서 나오는 점오염원이며, VOC 등은 실내의 주된 오염원. 따라서, 배출원 및 실내에 특화된 나노촉매의 개발을 통해 선택적 대기오염 저감이 가능

### 2) 미래핵심기술이슈 : 장소별 실내공기청정 기술의 다변화

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
실내 광원의 UV부재로 광촉매 효율 저하	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 광촉매 기술은 2000년대 초반부터 실내 공기청정용으로 활용되어 왔으며, 주된 광촉매로 활용되는 이산화티타늄(TiO<sub>2</sub>)는 주로 UV-A를 흡수하여 활성화</li> <li>- 실내 공간의 형광등 및 백열등에서는 UV-A가 미비하여, 실내공간에 풍부한 가시광 및 근적외선을 흡수 활용할수 있는 나노촉매의 개발 필요</li> </ul>
방사성 핵종기체의 산화제거 불가	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 지하공간 및 실내 다양한 공간에서 방사성기체 오염이 확인. 라돈 등의 기체로 다른 기체오염과 달리 표면 작용기가 없다는 특성</li> <li>- 기존에 촉매기술은 산화/환원라디칼을 이용하여 결합을 부수는 역할을 하지만 작용기가 없는 방사성기체의 경우, 라디칼로 인한 저감효과가 미비하여 방사성기체를 분리저감시킬 수 있는 나노다공성 소재의 설계 필요</li> </ul>
입자상/가스상 오염물질 동시 제거의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 실내 공간은 입자상 오염과 가스상 오염이 공존하므로, 효율적인 공기청정을 위해 두 가지 이상의 기술 적용 필요</li> <li>- 이는 서로 다른 기술에 간섭을 주어 장기사용시 효율을 떨어뜨리기 때문에, 두 가지 기술의 혼합을 통해 입자상, 가스상 오염의 동시처리 필요</li> </ul>



기술난제	개요
저비용 탈귀금속형 대기 촉매기술의 부재	- 상온 촉매기술의 경우 주로 표면에너지가 높은 귀금속 나노촉매를 활용 - Pt, Au, Ag 등의 나노촉매는 높은 비용으로 인해 활용성이 떨어지기 때문에 상온에서 활용 가능한 탈 귀금속 대기촉매의 개발 필요
다매체 기체오염(산화성/환원성)이 혼재된 공간에서의 선택적 분해 불가	- 장소별 기체오염의 특성이 서로 달라, 기체오염은 작용기의 특성에 따라 환원성, 산화성 기체로 나뉘지므로, 산화가 주된 촉매 기술은 다양한 기체 오염이 혼재된 공간에서 비효율적 - 산화/환원이 동시 가능한 기술의 개발을 통해 다양한 공간에서의 공기청정 달성 가능

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
실내 공기청정용 가시광 및 광열(산화)촉매 나노소재 기술	정의 ○ 가시광역대(Vis-NIR)를 흡수하여 다양한 산화라디칼을 생성하는 광촉매 나노소재 기술 및 실내공간의 광원을 받아 열에너지로 전환하여 산화 촉매 활성에너지로 활용하는 기술
	요소 기술 - 광대역 흡수가 가능한 밴드갭 조절용 표면 제어 기술 - 무기 바인더와 결합 가능한 표면 제어 기술 - 촉매 및 (광열)서포트 나노물질의 결합 기술 - 촉매의 높은 열 전도율 및 열 안정성 유지 기술 - 나노소재의 펄렛화/고정화 기술
방사성 기체오염 흡착·분리용 나노다공성 소재 기술	정의 ○ 방사성 기체오염(라돈 등)을 효율적으로 흡착 분리하여 자연붕괴를 일으켜 제거가능한 나노다공성 소재 기술
	요소 기술 - 제올라이트, MOF 등의 기공 기반 흡착 나노소재 기술 - 나노소재의 기공 제어 기술 - 흡착 나노소재의 리간드 작용기(아민계열) 치환 기술 - 나노실리카 흡착소재 기술
휘발성 유기화합물 저감용 나노분리막 기술	정의 ○ 배출원 중에 혼합된 다종의 가스 성분 중 특정 유해가스를 분리하여 저감할 수 있는 나노기술
	요소 기술 - 나노분리막 표면 작용기 제어 기술 - 나노분리막 표면 기공 제어 기술 - 나노분리막 촉매 코팅 기술
산소원자 결합 금속산화물 상온 나노촉매 기술	정의 ○ 귀금속을 사용하지 않는 상온 산화촉매소재로 에너지 절감형 공기청정 나노소재 기술
	요소 기술 - 산소원자 결합 나노촉매 표면 제어 기술 - 무기 바인더와 결합 가능한 표면 제어 기술 - 나노소재의 펄렛화·고정화 기술
(광)전기화학적 공기청정 나노소재 기술	정의 ○ 전기화학 기반의 산화/환원이 동시에 작용하여 다매체 기체오염(환원성/산화성)이 혼재된 공간에서의 효율적 공기청정 기술
	요소 기술 - 나노소재의 전극화 기술 - 고체형 전해질 개발 기술 - Fuelcell type의 공기청정 필터 제작 기술

### 3) 미래핵심기술이슈 : 대기오염 배출원의 효율적 청정관리

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
연료 다변화 대응 저온용 배기가스 저감 촉매 소재 개발의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 친환경 연료의 활용으로 배기가스의 조성이 달라질 것으로 예상되며, 다양한 조성의 배기가스의 맞춤형 나노소재 개발 필요</li> <li>- 낮은 온도에서 높은 활성을 가지며, 수분, 황 등으로 유발되는 표면 피독 현상에 높은 내구성을 가지는 나노소재 개발을 통해 다양한 후처리 시스템에 적용 가능</li> </ul>

#### 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
공기청정형 흡착제·촉매제 결합 나노소재 기술	정의	○ 흡착과 분해 Site를 나누어 기체오염물질의 흡착과 분해가 동시에 나노소재로 공기청정 효율과 내구성이 증대되는 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 흡착 소재의 기공 조절 개질 기술</li> <li>- 산화 촉매의 피독 현상을 방지 가능한 흡착제·촉매제 결합 소재 기술</li> <li>- 광에너지를 이용하여 재생 가능한 흡착제·광촉매 결합 소재 기술</li> <li>- 나노소재의 펄렛화·고정화 기술</li> </ul>
원자레벨 조절 공기청정 나노소재 기술	정의	○ 원자 레벨의 산화 촉매 기술로 귀금속 사용량을 줄이며 산화 효율을 극대화한 나노기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 금속 전구체를 효과적으로 분산시켜 지지체에 원자단위로 담지하는 기술</li> <li>- 지지체의 리간드를 효율적으로 변환하는 개질 기술</li> </ul>
저온 피독저항 특성보유 배기가스 저감 촉매 기술	정의	○ 200℃ 이하 저온에서 물, 황 저항 특성 보유 탈질 촉매 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 황, 물 저항 특성 개선용 나노구조체 기술</li> <li>- 표면 부반응 제어용 지지체 표면 개질 기술</li> <li>- 내구성 증진을 위한 Thermal regeneration 제어 기술</li> </ul>
SCR 탈질 반응용 반응성 환원제 기술	정의	○ SCR(Selective Catalytic Reduction) 탈질 반응용 NH <sub>3</sub> 환원제 대체 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Active, passive SCR의 한계점을 보완하는 반응성 환원제 개발 기술</li> <li>- 나노사이즈 고분산 귀금속·전이금속 활용 나노촉매 제조 기술</li> <li>- 촉매 구조설계를 통한 반응 면적 확대 기술</li> </ul>
친환경 연료 대응 후처리 나노소재 기술	정의	○ 암모니아, 수소를 사용하는 공정에서 연소조건에 따라 배출되는 질소산화물 암모니아의 동시 저감용 나노소재 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 암모니아, 수소 전소·혼소에 따른 연소 효율 개선 기술</li> <li>- 복잡 형상 촉매 제조로 인한 반응 면적 향상 및 촉매 효율 극대화 기술</li> <li>- Thermal NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> slip 대응 산화·환원 반응용 나노촉매 제조 기술</li> <li>- 연료변화 대응 고효율 질소산화물 저감용 SCR 촉매 제조 기술</li> <li>- CO, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub> 등 발생 오염물질 저감용 산화 촉매 조성 개발 기술</li> </ul>

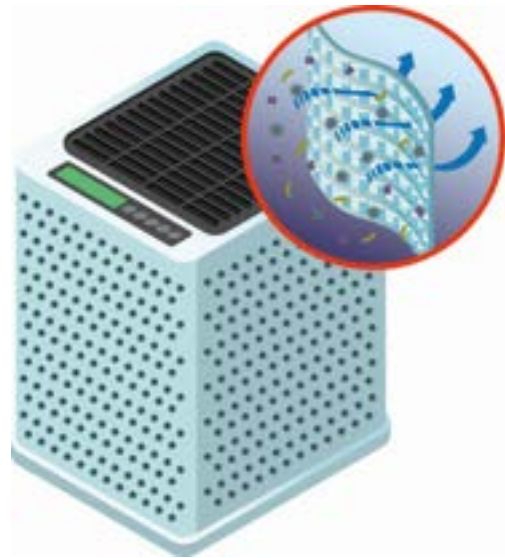
### 〈나노융합 대기 관리기술 로드맵〉

종분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술								
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
나노융합 대기관리 기술	대기환경 실내 공기질 측정	원거리·초미세먼지 모니터링을 통한 대기 환경 관리	실시간 실외 환경 공기 기반 유해가스 모니터링 나노기술	유 무기 하이브리드 나노소재 합성 및 표면 개질 기술	수분환경에서 감지 기역성과 신뢰성이 우수한 소재 복합화 기술	분광분석법을 활용한 나노소재 표면 화학정보에 대한 실시간 실외환경 분석 기술						
			고신뢰성 가스검출이 가능한 대면적 나노소재형 질량 나노기술	대면적 기반 고품종 나노소재 제어 기술	공극선택성과 공극률 조절된 복합화 가능한 나노소재 기술	센서 소자 간의 신뢰적인 감도 분석 기술						
			다중 혼합 가스 체감인식을 위한 센서 어레이 기반 나노기술	다중 나노소재 기반 센서 어레이 구축 및 집적화 기술	AI 기반 다중 혼합가스 체감인식 기술을 통한 실시간 유해가스 감지 기술	다중 혼합 가스의 분리 및 감지를 통한 질량식-정량적 분석 기술						
			고감도 가스검출을 위한 능동적 나노기술	다공성 소재 활용 차폐/방출 가역적 가스 흡착·탈착제 나노기술	수분/간섭가스에 대한 영안능 최소화하는 흡착·탈착 기술	센서부위의 표면적 일체형 시스템 집적화 기술						
			센서 안정성 확보를 위한 합금촉매 기반 저가형 센서 나노기술	고온에서 안정적인 구동시에도 촉매 활성 유지, Sintering의 방지와 고활성 촉매 제어 기술	귀금속 촉매의 양질의 최소화 하여 고활성 특성화 하는 합금 촉매 나노기술							
			휴대기 적합한 간편 바이오센서를 통한 실내환경 관리	극미량 바이오에어로졸 포집과 3차원 나노구조 기술	바이오에어로졸 포집 및 나노구조에 의한 바이오에어로졸 포집률 향상 기술	이러한 바이오에어로졸 포집률 향상 기술	이러한 바이오에어로졸 포집률 향상 기술					
				바이오에어로졸 포집 및 능동적 미세유체 기반 나노기술	바이오에어로졸 포집을 위한 나노구조 기반 미세유체 집적 기술	특정 병원성 미생물을 고도로 농축할 수 있는 친화적 기술						
				실시간 공기 질 측정용 다중공극 나노소재 기반 나노기술	신호 프로세스의 표면 개질을 통한 물리 분산성 향상 기술	저온에 고활성 기술 및 병원성 조절/초고속 스크리닝/안정성과 신뢰도 성능 표준화 기술						
		현장형 신속 바이오에어로졸 포집 기술		바이오에어로졸 친화성의 효율을 높이기 위한 표면적 확대 나노구조 기술	나노소재 기반 현장형 바이오에어로졸 신속 친화적 기포 생성 및 유출의 평가 기술							
		공간/시간에 기반 생물학적 데이터 수집을 위한 나노기술		공간/시간에 기반 생물학적 데이터 수집을 위한 나노구조, 도핑 및 조색제 복합 기술	고활성 환경감지용 나노소재 기반 나노구조, 도핑 및 조색제 복합 기술	고활성 환경감지용 나노소재 기반 나노구조, 도핑 및 조색제 복합 기술						
		나노융합 대기관리 기술	대기오염 저감	최소형 실외공기정화 기술의 다변화	실내 공기정화용 가습 및 광활성 산화촉매 나노소재 기술	광촉매 흡수기 가능한 반도체 조색제 표면제 기술 / 촉매 및 광촉매 나노소재 복합 기술	무기 촉매와 결합 가능한 표면제 기술 / 촉매의 광안정성 유지 기술 / 나노소재의 광안정성-고정화 기술					
					방사성 가해소성 촉매활성 나노 다공성 소재 기술	제올라이트, MOF 등의 기공 기반 촉매 나노소재 기술	촉매 나노소재의 리소트 제어 기술	나노소재의 기공 제어 기술				
					위험성 유기화합물 저감용 나노분리 기술	나노분리막 표면 제어 기술	나노분리막 표면 제어 기술	나노분리막 표면 제어 기술				
산소첨가 결합 금속산화물 산화 나노촉매 기술	산소첨가 결합 나노촉매 표면제 기술				무기 촉매와 결합 가능한 표면제 기술	나노소재의 광안정성-고정화 기술						
생물/화학적 공기정화 나노소재 기술	나노소재의 전극화 기술				고체형 전해질 계층 기술	Fuel cell type의 공기정화 필터 제어 기술						
대기오염 저감용의 효율적 정화 기술	공기정화용 촉매촉매에 결합 나노소재 기술				촉매소재의 기공/표면 개질 기술	산화촉매의 촉매 활성을 향상시키는 결합 나노소재 기술	광촉매를 대체하여 저온 가능한 결합 나노소재 기술	나노소재의 광안정성-고정화 기술				
	원자배열 조절 공기정화 나노소재 기술				금속 전극을 효과적으로 분산시켜 지지체에 원자적으로 부착하는 기술	차세대 리소트를 효율적으로 변화하는 기술						
	저온 화학적 촉매활성 나노소재 기술				활, 불 저항 촉매 개선용 나노구조체 기술	표면 부반응 제어용 지지체 표면 개질 기술	내구성 증진을 위한 Thermionization 반응 제어 기술					
	SCR 탈질 반응용 반응성 원천제 기술			Active, passive SCR의 원천제를 보완하는 반응성 원천제 개질 기술	나노소재 기반 고온성 기공성 / 전극성 나노촉매 제어 기술	촉매 구조개질 통한 반응성의 증가 기술						
	신뢰성 연료 대응 후처리 나노소재 기술			연소-촉매에 따른 연소 효율 개선 및 촉매 효율 극대화 기술	산화/환원 반응용 나노촉매 제어 기술	질소산화물 저감용 SCR 촉매 제어 기술 / 오염물질 저감용 산화 촉매 조성 제어 기술						

〈나노융합 대기 관리기술 대표제품〉



환경 실시간 모니터링 시스템 내  
나노복합소재 기반 센서



대기오염 청정관리용 나노흡착제/촉매

### 4-3. 나노융합 탄소 포집·전환

#### 가. 탄소 포집 기술

##### 1) 개요

- (정의) 나노기술을 활용하여 배기가스, 개질가스, 고정배출원 등 다양한 발생원에서 이산화탄소를 포집하는 기술로, 최근에는 공기 중에서 존재하는 이산화탄소를 직접 포집하는 기술 까지 포함
- (필요성) 2050년 탄소배출 넷제로의 탄소중립사회 이행을 위한 첫 단계 기술이며, 나노기술을 이용한 이산화탄소 격리, 활용을 위한 필수적인 기술
- (발전 전망) 효율적인 이산화탄소 분리는 탄소중립의 성공 유무를 결정할 기술이며 탄소배출 넷제로의 근간이 될 기술로, 나노융합 탄소 포집 기술은 발전 가능성이 매우 높을 것으로 예상

##### 2) 미래핵심기술이슈 : 이산화탄소의 효율적 포집을 위한 흡착 기술과 분리막 기술 완성도 제고, 다양한 산업 배가스 내 이산화탄소 포집 기술

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
고농도 배출원으로부터 이산화탄소를 효율적으로 포집하기 위한 나노흡착제의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 흡착제의 효율 및 기공성 제어 기술 필요</li> <li>- 기존 소재의 경우 수분 등 불순물 존재 시 이산화탄소 흡착 능력이 현저히 떨어지거나(제올라이트) 규칙적인 기공구조 제어가 어려운 문제(활성탄)</li> <li>- 이산화탄소의 고속흡착 및 고흡착능을 지닌 새로운 나노흡착제 소재 개발 필요</li> <li>- 규칙적인 나노기공 제어 기술 및 기공 내 기능기 도입을 통한 흡·탈착 효율 증대 및 표면 개질을 통한 내화학적 향상 필요</li> </ul>
고유량, 고농도의 산업 배출가스를 처리하기 위한 고투과성, 고성택성 나노분리막 기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다양한 배가스 내 이산화탄소 분리를 위한 나노분리막 기술 필요</li> <li>- 고투과성 및 고선택성 고분자 분리막 및 다공성 나노입자와 고분자를 혼합한 하이브리드 분리막 기술 필요</li> <li>- 다양한 배가스 대상 이산화탄소 분리를 위한 내구성 확보 필요</li> <li>- 분리막의 박막화 및 자유 부피 제어를 통한 이산화탄소 선택성 향상 및 효율 극대화 필요</li> <li>- 개발된 나노분리막 소재 대면적화 및 모듈화 기술 필요</li> </ul>
에너지 효율이 좋은 CO <sub>2</sub> 포집 기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 저농도 이산화탄소 포집을 위한 나노다공성 소재 및 모듈화 기술 필요</li> <li>- 저농도 이산화탄소에 대한 고흡착능 및 고속 흡·탈착 가능한 다공성 나노흡착 소재 제조 기술 필요</li> <li>- 다공성 나노흡착제 대용량 합성 기술 필요</li> <li>- 대용량 처리 가능한 흡착제 모듈화 기술 필요</li> <li>- 저에너지 비용 흡착공정 개발 필요</li> </ul>
전기에너지를 직접 사용하는 포집 기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기존 CO<sub>2</sub> 포집 기술의 경우 열 또는 압력을 활용하여 고순도 CO<sub>2</sub>를 탈거해야 하는 문제</li> <li>- 이를 해결하기 위해서 전기에너지를 활용하여 CO<sub>2</sub>를 흡·탈착할 수 있는 새로운 기술 필요</li> <li>- 전기화학적 CO<sub>2</sub> 흡·탈착할 수 있는 나노전극 소재 기술 필요</li> </ul>

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
고농도 이산화탄소 흡착을 위한 나노다공성 흡착제 구조화 기술	정의	○ 다양한 배가스 대상 이산화탄소에 대한 고속흡착 및 고흡착능 지닌 나노 흡착제 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 규칙적인 나노기공 제어 기술</li> <li>- 나노기공 내 기능기 도입을 통한 흡착-탈착 효율 증대 기술</li> <li>- 흡착제 표면 개질을 통한 내화학적 향상 기술</li> </ul>
고농도 이산화탄소 포집을 위한 나노분리막 기술	정의	○ 다양한 배기가스 대상 이산화탄소 분리를 위한 다공성 나노입자와 고분자를 혼합한 고투과성 및 고선택성 하이브리드 분리막 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 이산화탄소에 대한 고투과성 및 고선택성 나노분리막 소재 기술</li> <li>- 나노분리막 대면적화 및 모듈화 기술</li> <li>- 저에너지 분리막 공정 기술</li> <li>- 다공성 나노입자의 물리화학적 구조 제어 기술</li> <li>- 하이브리드 분리막 초박막 (300nm 이하) 코팅 기술</li> <li>- 나노입자와 고분자 간 계면 구조 제어 기술</li> <li>- 고분자 분리막의 초박막 코팅 기술</li> <li>- 선택적 이산화탄소 투과를 위한 고분자 물리화학적 구조 제어 기술</li> <li>- 지지체와 선택층 간 계면 구조 제어 기술</li> <li>- 고분자 분리막 대면적화 및 모듈화 기술</li> </ul>
대기 중 이산화탄소 직접 포집 나노소재 및 모듈화 기술	정의	○ 저농도 이산화탄소 포집을 위한 나노다공성 소재 및 모듈화 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 저농도 이산화탄소에 대한 고흡착능 및 고속 흡·탈착 가능한 나노흡착 소재 기술</li> <li>- 나노흡착제 대용량 합성 기술</li> <li>- 대용량 처리 가능한 흡착 모듈화 기술</li> <li>- 저에너지 비용 흡착 공정 기술</li> </ul>
전기화학적 CO <sub>2</sub> 포집을 위한 전극 소재 나노기술	정의	○ 전기에너지의 충·방전을 통해 CO <sub>2</sub> 를 포집·탈거할 수 있는 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전기에너지의 충전을 통해 CO<sub>2</sub>를 포집할 수 있는 나노전극 소재 기술</li> <li>- 전기에너지의 방전을 통해 CO<sub>2</sub>를 탈거할 수 있는 전극 구조화 기술</li> <li>- 개발된 전극이 적용될 수 있는 CO<sub>2</sub> 흡·탈착 시스템 기술</li> </ul>

## 나. CO<sub>2</sub> 전환 기술

### 1) 개요

- (정의) 나노기술을 적용하여 대표적 온실가스인 CO<sub>2</sub>를 유용한 물질로 전환하는 기술로, 촉매, 반응 장치 등의 기술 범주로 분류
- (필요성) 2050년 탄소배출 넷제로의 탄소중립사회 이행에 기여 가능한 나노기술 개발 촉진 이 필요. 기존 화석연료(석탄, 석유, 천연가스)로부터 생산되었던 연료 및 화학 원료의 탄소를 CO<sub>2</sub>의 탄소를 대체하여 탄소중립 시대에 화학산업의 경쟁력 확보가 필요
- (발전 전망) 세계적인 탄소중립 지향은 탄소국경세, 환경 비친화적 기업 투자 제한 등 새로운 경제 질서 형성을 유도함에 따라, 대표적 온실가스인 CO<sub>2</sub>를 고부가 화학원료로 전환하는 나노기술은 지속적으로 발전할 것으로 예상

### 2) 미래핵심기술이슈 : CO<sub>2</sub> 공급원, 제품 다양화에 따른 다양한 전환반응에 쓰이는 나노촉매 및 반응 장치의 성능 제고

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
CO <sub>2</sub> 로부터 탄화수소계열 화합물 합성 시, CH <sub>4</sub> 의 생성 억제 및 활성 증진의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub> 수소화 반응(피셔-트롭시 및 메탄올 경유 합성)을 통해 긴 사슬의 탄화수소 화합물을 합성</li> <li>- 반응 중간체의 수소화 반응과 사슬 성장 반응이 확률적 분포를 보임에 따라 CH<sub>4</sub>가 필수적으로 생성</li> <li>- CH<sub>4</sub>는 온난화지수가 높고 액화가 어려워 가치가 낮은 부산물로, 생성 억제 필요</li> <li>- CH<sub>4</sub> 생성을 억제하는 나노촉매 설계 필요</li> </ul>
CO <sub>2</sub> 유래 화합물(탄화수소 및 함산소화합물)의 업그레이드용 제올라이트 나노다공성 촉매의 짧은 수명	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub> 수소화 반응을 통해 생성되는 탄화수소 또는 메탄올을 액체연료, 올레핀, 방향족 화합물 등으로 전환할 때 제올라이트가 사용</li> <li>- 반응이 진행됨에 따라 제올라이트의 미세기공이 탄소 침적에 의해 막혀 본연의 기능을 상실</li> <li>- 반응 중 생성되는 수분에 의해 제올라이트의 활성점이 녹아내리는 문제</li> <li>- 장기간의 CO<sub>2</sub> 전환반응에도 제올라이트가 안정적으로 기능을 할 수 있게 하는 나노촉매 기술 필요</li> </ul>
저온 CO <sub>2</sub> 전환 반응 시(메탄올, DME 합성), 낮은 촉매 활성	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub> 수소화 반응으로부터 합성하는 메탄올과 DME는 열역학적으로 낮은 온도, 높은 압력이 유리</li> <li>- 그러나 반응 온도를 필요 이상으로 낮추면 반응속도가 느려지는 문제</li> <li>- 높은 수율의 메탄올과 DME를 얻으려면 낮은 온도에서도 활성이 높은 고성능 나노촉매 개발 필요</li> </ul>
고온 CO <sub>2</sub> 전환 반응 시(건식 개질, RWGS), 활성상 소결로 인한 촉매 활성 저하 방지, 나노촉매의 대량생산 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub>를 메탄과 반응시키거나 수소와 반응시켜 일산화탄소를 얻는 반응은 열역학적으로 높은 온도가 유리</li> <li>- 섭씨 800도 이상의 고온에서는 니켈, 구리, 백금과 같은 활성 금속이 소결되거나 기화하여 노출되는 표면이 적어지고, 중국에는 촉매 활성이 저하</li> <li>- 높은 반응온도에서도 금속입자의 소결을 방지하여 오랜 시간 활성을 유지하는 고온 안정성 나노촉매의 개발 필요</li> </ul>

기술난제	개요
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub> 전환 화학공정의 상용화를 위해서는 나노구조를 갖는 촉매를 랩스케일 에 상응하는 성능 수준에서 대량합성하는 기술 필요 (분무건조, 연속함침·침전, 기상증착 등)</li> <li>- 합성된 나노촉매를 반응기 특성에 맞게 고강도로 성형하는 기술 필요 (구상화, 펄릿화, 사출, 3D 프린팅 등)</li> </ul>
CO <sub>2</sub> 전환 시 열역학적 평형 한계 수율이 존재하며, 이를 극복하기 위한 실시간 분리막 소재의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub> 전환반응에서 목표 산물의 수율이 열역학적 한계에 의해 제한되는 현상</li> <li>- 수분과 같은 부산물을 제거함으로써 평형 한계 수율을 극복 가능</li> <li>- 부산물을 반응 중 실시간으로 제거하는 방법으로는 흡수제, 분리막 활용 등이 존재</li> <li>- 부산물을 선택적으로 제거하며 고온에서도 안정성을 보이는 나노세공 구조의 흡수제 및 분리막 개발 필요</li> </ul>

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
CO <sub>2</sub> 로부터 화석연료 대체 탄화수소 직접 합성 나노촉매 기술	정의	○ 이산화탄소의 수소화 반응을 통해 가솔린/디젤/항공유, 올레핀 등의 화석 연료를 대체하는 탄화수소 화합물을 합성하는 고효율 나노촉매 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 부산물인 메탄의 생성을 억제하는 나노활성점 제어 기술</li> <li>- 가솔린, 디젤, 항공유 등 목적 산물의 수율을 증진시키는 텐덤 촉매 설계 기술</li> <li>- 합성가스, 메탄올 등 중간체에 따른 반응 최적화 공정 기술</li> </ul>
CO <sub>2</sub> 유래 화합물의 고부가화를 위한 나노다공성 촉매 기술	정의	○ CO <sub>2</sub> 로부터 유래하는 메탄올 및 탄화수소의 최종 제품화에 쓰이는 제올라이트 나노다공성 촉매의 내코크성, 내화학성 향상 및 다기능성 촉매 설계 및 합성 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수분저항성 향상을 위한 제올라이트 나노구조 설계 기술</li> <li>- 코크저항성 향상을 위한 제올라이트 나노구조 설계 기술</li> <li>- 금속·제올라이트 복합기능 나노구조 촉매 기술</li> </ul>
CO <sub>2</sub> 전환 함산소 기초화학원료 직접 합성 고효율 나노촉매 기술	정의	○ CO <sub>2</sub> 로부터 메탄올, DME, 고급알코올 등의 함산소화합물을 합성하는 촉매의 효율을 증진시키는 나노촉매 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 낮은 온도에서도 CO<sub>2</sub>를 효율적으로 전환하는 나노촉매 기술</li> <li>- 균일계/불균일계 촉매 하이브리드화 나노기술</li> <li>- C<sub>2</sub> 이상 고급알코올, 고급에터 합성을 위한 복합기능 촉매 합성 기술</li> </ul>
고온 CO <sub>2</sub> 전환 나노촉매 대량합성 및 성형 기술	정의	○ 건식개질, 역수성가스화 반응 등의 고온 CO <sub>2</sub> 전환반응으로부터 합성가스를 만드는 반응에서 촉매의 안정성을 확보하는 나노기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 금속 촉매 소결 방지를 위한 나노기술</li> <li>- 코크저항성 향상을 위한 나노기공 구조 설계 기술</li> <li>- 안정적인 나노촉매 대량합성 기술 (분무건조, 연속함침, 연속침전, 화학기상 증착, 물리기상증착 등)</li> <li>- 구상화, 펄릿화, 사출, 압출, 3D 프린팅 등 고강도, 맞춤형 성형 기술</li> </ul>
평형한계수율 극복을 위한 반응-분리 하이브리드 기술	정의	○ CO <sub>2</sub> 전환 반응 시 생성되는 부산물을 선택적으로 제거하여 열역학적 평형에서 유래하는 한계수율을 극복하기 위한 분리막 소재 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 타겟 물질의 선택적 투과효율이 높은 나노분리막 기술</li> <li>- 고온, 고압에서 운전 가능하며 내화학성이 확보된 분리막 제조 기술</li> <li>- 반응기-분리막 하이브리드화를 위한 반응기 설계 기술</li> <li>- 촉매·분리막 하이브리드 나노구조 설계 기술</li> </ul>



### 3) 미래핵심기술이슈 : 광전기화학과 같은 신재생에너지를 직접 활용한 CO<sub>2</sub> 전환 및 고부가가치 생성물 합성기술(시스템, 이온교환막, 촉매 등)

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
나노탄소소재 등 고부가가치 소재 합성으로 경제성이 향상된 CO <sub>2</sub> 전환기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전기화학적 CO<sub>2</sub> 전환 기술의 경우 전기에너지를 활용해야 한다는 측면에서 경제성 확보의 한계</li> <li>- 이러한 문제를 해결하기 위해서는 최종 생성물의 고부가가치를 통한 경제성 확보 필요</li> </ul>
태양광으로부터 CO <sub>2</sub> 대량 직접 전환을 위한 대면적 부지 부족	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 대규모 면적 확보에 비교적 용이한 근해 태양광을 활용한 광전기화학 활용 기술 필요</li> <li>- 해수로부터 효과적인 광 흡수 및 CO<sub>2</sub> 전환성능이 우수한 나노촉매 설계 기술 필요</li> <li>- 물 산화 시스템 및 이산화탄소 환원 시스템의 나노스케일 결합 기술 필요</li> </ul>
광전기화학 CO <sub>2</sub> 전환을 위한 나노이온교환막 소재의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 광전극 활용에 최적화된 나노이온 교환막 개발 필요</li> <li>- 이온전도도 제어기술 및 선택적 다중 탄소 전환 기술 필요</li> </ul>
다양한 자원을 전해질로 활용한 CO <sub>2</sub> 전환기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 폐수 중 유기물 산화를 통한 전자 공급 기술 필요</li> <li>- 오염물 산화 및 이산화탄소 환원 동시 구현 기술 필요</li> <li>- 정공제어를 위한 나노전극 소재 및 시스템 구현 기술 필요</li> </ul>
Cu 기반 전기화학 전극의 취약한 내구성	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub>를 전기화학적으로 전환하여 C<sub>2</sub> 화합물을 생산하는 기술은 내구성이 취약하여 사업화에 한계</li> <li>- 이를 해결하기 위해 기존 Cu 기반의 촉매에서 탈피할 필요</li> <li>- 또한, 다양한 접근 방법을 통해 내구성을 개선하고, 이를 바탕으로 시스템을 규모화하는 연구 필요</li> </ul>
전기화학적 CO <sub>2</sub> 포집·전환 통합 기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 공정의 간소화를 위해 CO<sub>2</sub> 동시 포집·전환 반응이 필요하며, 이를 통해 CO<sub>2</sub>의 탈거 공정 및 미반응 CO<sub>2</sub> 재순환 공정을 제거하여 경제성 확보 필요</li> <li>- CO<sub>2</sub> 전환 효율 증대를 위한 나노촉매 전극 기술 및 생성물의 크로스오버에 따른 산화를 방지할 막-전극 접합체 기술 필요</li> </ul>

#### 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
CO <sub>2</sub> 로부터 고부가가치 탄소나노소재 합성기술	정의	○ CO <sub>2</sub> 를 활용하여 고부가가치 탄소 소재를 합성 및 응용하는 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 이산화탄소로부터 탄소나노튜브, 탄소나노섬유, 다공성 탄소 물질을 제조하기 위한 금속 나노촉매 설계 및 합성 기술</li> <li>- 고표면적 탄소 물질 합성 기술</li> <li>- 탄소 소재 고순도화 기술</li> </ul>
전기화학적 CO <sub>2</sub> 광물화 전극 소재 나노기술	정의	○ CO <sub>2</sub> 를 전기화학적으로 광물화하여 고정화하는 기술, 생성된 광물의 고부가가치로 경제성이 확보된 CCU 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전기화학적으로 CO<sub>2</sub>를 액상 화합물로 만드는 전극 소재 기술, 이를 활용한 광물화를 통해 파우더로 회수할 수 있는 기술</li> <li>- 전기화학적으로 CO<sub>2</sub>를 광물화하고 회수할 수 있는 전해 디바이스 기술</li> <li>- 이산화탄소를 이용하여 탄산칼슘, 탄산마그네슘, 중탄산소다 등 고체탄산염을 전환하는 기술</li> </ul>

나노기술명	개요	
해수에서 태양광 연료생산을 위한 나노인공광합성 기술	정의	○ 해수로부터 효과적인 광 흡수 및 CO <sub>2</sub> 전환 기능이 우수한 나노촉매 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 이산화탄소 활성화 기술</li> <li>- 연속적 다 전자 및 다 양성자 동시 전달 기술</li> <li>- 자연 모사 광전기화학 전극 스택 시스템 기술</li> </ul>
광전기화학적 CO <sub>2</sub> 연료화용 나노이온교환막 소재 기술	정의	○ 광전극 활용에 최적화된 나노이온교환막 기술
	요소 기술	- 광전기화학 반응 중 이온전도도 제어를 통한 선택적 다중 탄소전환 기술
전기화학적 CO <sub>2</sub> 전환 비 Cu계 고내구성 나노촉매 전극 기술	정의	○ 기존 탄화수소생산용 Cu 전극의 취약한 내구성을 개선하기 위한 CO <sub>2</sub> 전기 화학 전환 나노소재 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 비 Cu계 고선택도 에틸렌 생산 나노소재 기술</li> <li>- 고내구성 막·전극 접합체 기술</li> <li>- 나노전극 소재들이 적용된 전해 디바이스 및 시스템 기술</li> </ul>
전기화학적 CO <sub>2</sub> 동시 포집-전환 합성가스 생산 나노촉매 기술	정의	○ 배기가스에서 습식 흡수제에 포집된 탄산염 형태의 CO <sub>2</sub> 를 전기화학적으로 전환하여 고농도 합성가스를 생산하는 기술 및 고효율·고전환율 포집·CO <sub>2</sub> 전환 합성가스(CO, H <sub>2</sub> ) 생산 나노촉매 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고효율·고전환율·고내구성 포집·CO<sub>2</sub> 전환 합성가스(CO) 생산 나노전극 소재 설계 및 합성 기술</li> <li>- 포집·CO<sub>2</sub> 직접 전환에 적합한 CO<sub>2</sub> 흡수제 기술</li> <li>- 포집·CO<sub>2</sub>로부터 CO<sub>2</sub>를 효율적으로 공급하는 양극성 분리막 기술</li> <li>- 나노전극 소재 및 양극성 이온교환막 적용 막·전극 접합체 설계 및 반응기 최적화 기술</li> <li>- 전기화학적 포집·CO<sub>2</sub> 직접 전환 합성가스(CO) 생산 디바이스 및 시스템 기술</li> </ul>
전기화학적 CO <sub>2</sub> 전환을 위한 고내구성·고성능 이온교환 고분자 나노소재 기술	정의	○ 전기화학적 CO <sub>2</sub> 전환을 위한 고내구성·고전도성 음이온교환막과 바인더의 제조를 위한 고분자 나노소재 합성 및 가공 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고전도성 음이온교환 고분자 나노소재 합성 기술</li> <li>- 높은 기계적·알칼라인 안정성을 갖는 음이온교환막 제조 및 특성 분석 기술</li> <li>- 고전도성 음이온교환 바인더 제조 및 특성 분석 기술</li> </ul>
대기중 CO <sub>2</sub> 동시 포집·전환 나노촉매 기술	정의	○ 대기 중 존재하는 희박 농도의 이산화탄소를 동시 포집 전환하여 유용화합물을 생산하는 기술 및 고효율 포집·CO <sub>2</sub> 전환 나노촉매 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고효율·고전환율·고내구성 CO<sub>2</sub> 전환 나노촉매 소재 설계 및 합성 기술</li> <li>- 포집·CO<sub>2</sub> 직접 전환에 적합한 CO<sub>2</sub> 흡수·흡착제 기술</li> <li>- 포집·CO<sub>2</sub>로부터 CO<sub>2</sub>를 효율적으로 공급하는 양극성 분리막 기술</li> <li>- 나노촉매 소재 및 반응기 설계/최적화 기술</li> <li>- 공기 중 이산화탄소 동시 포집 전환 공정 설계 및 최적화 기술</li> </ul>

## 다. 비-CO<sub>2</sub> 전환기술

### 1) 개요

- (정의) 이산화탄소 외 온실효과를 유발하는 N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> 등 가스를 다양한 방법으로 전환하는 나노기술
- (필요성) N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> 등은 온실효과가 높으면서 여러 산업에서 발생량이 많아 적절한 처리가 필요. 이들을 효과적으로 전환할 수 있는 촉매, 분리막 등의 나노기술이 필요
- (발전 전망) 다양한 형태의 온실가스를 저감하는 기술은 이산화탄소 저감량으로 환산하여 탄소 저감 기술로 인정이 가능하기 때문에 이산화탄소 저감 시장이 포화된 이후라도 지속적으로 발전 가능할 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 열화학, 전기화학 등 다양한 전환기술을 활용하여 이산화탄소를 제외한 다양한 온실가스를 고부가 화합물로 효과적으로 전환하는 나노소재 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
많은 에너지를 필요로 하며 코크 침적이 과도한 CH <sub>4</sub> 분해	<ul style="list-style-type: none"> <li>- H<sub>4</sub>는 매우 안정한 화학물질로 이를 활성화하려면 많은 양의 에너지가 필요</li> <li>- 많은 양의 에너지를 가하여 활성화하더라도 고부가가치 화합물(올레핀, 방향족 화합물)로 전환되는 양이 적기 때문이 이를 조절할 수 있는 나노 기술 필요</li> <li>- 메탄을 분해하면 탄소 성분은 대부분 가치가 낮은 코크로 전환되므로 이를 전극소재나 커패시터용 고부가 탄소 소재로 전환시킬 수 있는 나노기술 필요</li> </ul>
CH <sub>4</sub> 부분산화를 통한 에틸렌 생산 기술의 낮은 선택도	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 산화제를 사용한 CH<sub>4</sub>의 부분산화를 통해 완전 산화를 억제하며 메탄올을 선택적으로 생성하기 위한 나노촉매 활성점 제어 기술 필요</li> </ul>
전기화학적 산화반응을 통한 고부가 화합물 제조 시 전극 촉매의 낮은 수율	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 탄화수소로부터 전기화학적 산화올레핀 합성 기술 필요</li> <li>- 전기화학적 바이오매스 리파이너리 기술 개발 필요</li> </ul>
광전기화학을 이용한 메탄 활성화 시스템의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 광전극을 활용한 CH<sub>4</sub>전환 기술 필요</li> </ul>
광전기화학을 이용한 N <sub>2</sub> O 환원 기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 광전극을 활용한 N<sub>2</sub>O 환원 기술 필요</li> </ul>
광전기화학을 이용한 과산화수소생산 기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 산소환원을 통한 과산화수소 생성 기술 필요</li> </ul>
나노촉매전극 및 복잡한 전기화학 시스템 일체화를 위한 3D 프린팅 기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다중금속 산화물 원소의 3D 프린팅 기술 필요</li> <li>- 나노미세화와 마이크로 유로 패터닝을 동시에 구현하는 기술 필요</li> </ul>

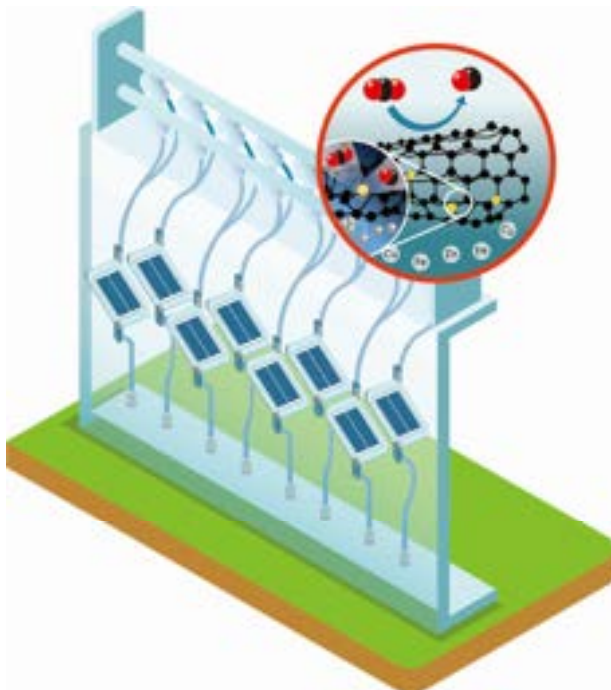
## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
메탄 열분해 및 개질반응용 나노촉매 기술	정의	○ 메탄 열분해 및 개질반응 시 높은 활성 및 선택도, 안정성을 갖는 나노촉매 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 메탄과 이산화탄소를 동시에 전환하여 수소를 생산할 수 있는 메탄건식 개질용 고효율 나노촉매 기술</li> <li>- 고온 (600℃ 이상)의 메탄건식 반응에 내구성을 갖는 고안정성 촉매 기술 및 저온 메탄 분해 반응을 위한 나노촉매 기술</li> <li>- 메탄을 이용한 단일벽 탄소나노튜브 제조를 위한 1nm 이하 고분산 나노촉매 제조 기술</li> </ul>
고선택성 메탄 부분산화 나노촉매 기술	정의	○ 메탄을 산화제로 부분산화하여 에틸렌, 메탄올, 포름알데하이드 등 기초 화학원료로 전환하는 촉매 및 반응 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 메탄을 산화제로 부분산화하여 에틸렌, 메탄올, 포름알데하이드 등 기초 화학 원료로 전환하는 촉매 및 반응 기술</li> <li>- 나노촉매의 활성점 제어 기술 (나노입자의 크기, 분산, 표면형태, 이종금속 합금, 코팅 기술 등)</li> <li>- 활성 산소 공급이 가능한 분리막 기술</li> </ul>
광·전기화학적 고부가 화합물 전환 합성반응 나노촉매 소재 기술	정의	○ 전기화학적 산화올레핀 및 다이올 합성을 위한 선택적 변환 산화반응 기술 구현을 위한 나노전극소재 및 반응시스템 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 올레핀 에폭시데이션 반응을 위한 나노촉매 전극 및 전해질 환경 제어기술</li> <li>- 촉매 표면의 올레핀 결합력 제어를 통한 반응경로 제어 및 다이올·유기산 생성물 선택도 증대 기술</li> <li>- 올레핀 화합물 길이에 따른 산화반응 제어 기술</li> <li>- 올레핀산화 반응에 특화된 반응기 구조 설계 및 유로 제어 기술</li> <li>- 전기화학적 선택적 바이오매스 변환반응을 통해 고부가 화합물 합성의 기초 원료가 되는 유기산 화합물 생산을 위한 전해환경 및 나노촉매 전극계면 제어 기술</li> <li>- 바이오매스 반응원료와 목표 생성물에 특화된 다중원소 나노촉매 설계 기술</li> <li>- 고부가 유기산을 높은 수율로 대량생산이 가능한 반응기 설계 기술</li> </ul>
광전기화학적 CH <sub>4</sub> 산화를 통한 고부가가치 화합물 생산 기술	정의	○ 광전극을 활용한 CH <sub>4</sub> 전환 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CH<sub>4</sub> 흡착·반응 활성점의 분리 기술</li> <li>- CH<sub>4</sub> 산화를 위한 산화종 생성 기술</li> <li>- 고부가가치 화합물의 재산화 억제 기술</li> <li>- CH<sub>3</sub> 결합 활성화를 위한 고반응성의 촉매 전극 기술</li> <li>- 기상 반응물·액상 전해질·고상 전극 촉매가 형성하는 3중계면 반응 제어 기술</li> <li>- CH<sub>3</sub> 활성화 반응 준위와 CO<sub>2</sub> 환원 준위를 만족하는 광전극 밴드갭 엔지니어링 기술</li> </ul>
광전기화학적 N <sub>2</sub> O 환원 기술	정의	○ 광전극을 활용한 N <sub>2</sub> O 환원 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- N<sub>2</sub>O 흡착·반응 활성점의 분리 기술</li> <li>- 선택적인 N<sub>2</sub>O 환원을 위한 활성점 제어 기술</li> </ul>
전기화학적 화합물 합성을 위한 유로일체형 나노전극촉매 기술	정의	- 전기화학 반응기의 유로에 나노촉매소재를 고르게 도포하여 유로와 반응기를 일체화하는 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전기화학적 화합물 생산 반응기의 생산단가 절감을 위한 나노다공성 촉매 전극에 마이크로미터 단위의 유로 형성 기술</li> <li>- 유체역학 기반의 액상/기상 반응물에 따른 최적 유로 설계 기술</li> <li>- 3D 프린팅이 가능한 나노촉매소재 합성 및 나노형상의 소재가 임프린팅된 유로 형성기술, 3D 프린팅을 이용한 전기화학 반응기 제작 기술</li> </ul>

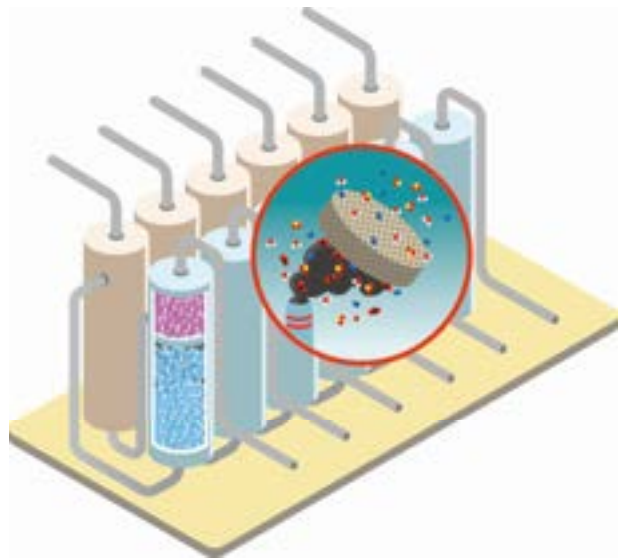
### 〈나노융합 탄소 포집·전환 로드맵〉

종분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술											
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032		
나노융합 탄소 포집·전환	탄소 포집 기술	이산화탄소의 효율적 포집을 위한 촉매 기술과 분리막 기술 혁신도 제고, 다양한 산업 배출소 내 이산화탄소 포집 기술	고압도 이산화탄소 흡착을 위한 나노소재 기반 구조화 기술	나노구조 제어 기술 및 촉매-결정 표층 제어 기술					촉매의 표면 특성을 통한 이산화탄소 포집 기술						
			고압도 이산화탄소 포집을 위한 나노소재 기술	고분자 분리막 제조 기술					촉매의 표면 특성을 통한 이산화탄소 포집 기술 / 고분자 기반 나노소재 기술						
			대규모 이산화탄소 저장 포집 나노소재 개발 기술	고분자 및 고분자 복합 기반 나노소재 기술					나노소재 기반 이산화탄소 포집 기술 / 촉매의 표면 특성을 통한 이산화탄소 포집 기술						
	CO <sub>2</sub> 전환 기술	CO <sub>2</sub> 공급원 제형 다양화에 따른 다양한 전환기술에 쓰이는 나노촉매 및 반응 장비의 성능 제고	CO <sub>2</sub> 광촉매 기반 이산화탄소 전환 나노소재 기술	백티 나노소재 기반 나노 촉매 개발 기술					수용액 기반 나노 촉매 기술						
			CO <sub>2</sub> 광촉매 기반 구조화를 위한 나노소재 기술	제올라이트 나노구조 설계 기술					금속-제올라이트 기반 나노 촉매 기술						
			CO <sub>2</sub> 광촉매 기반 촉매를 위한 나노소재 기술	전하 나노소재 촉매 개발 기술					수소 생산을 통한 이산화탄소 전환 기술						
			CO <sub>2</sub> 전하 나노소재 기반 촉매 개발 기술	공기 촉매 소멸 방지 기술					구조화된 나노소재 기반 이산화탄소 전환 기술 / 나노촉매 기반 이산화탄소 전환 기술						
			광촉매 나노소재 개발을 위한 나노소재 기술	내열, 내압, 내부식성 촉매 구조화를 위한 나노소재 기술					촉매 기반 나노소재 설계 기술						
			CO <sub>2</sub> 광촉매 구조화 나노소재 설계 기술	공기 나노소재 설계 및 합성 기술					고분자 나노소재 합성 기술						
			전하 나노소재 촉매를 위한 나노소재 기술	전하 나노소재 촉매를 위한 나노소재 기술					촉매 기반 나노소재 합성 기술						
			전하 나노소재 촉매를 위한 나노소재 기술	촉매 나노소재 촉매를 위한 나노소재 기술					촉매 기반 나노소재 합성 기술						
			전하 나노소재 촉매를 위한 나노소재 기술	전하 나노소재 촉매를 위한 나노소재 기술					촉매 기반 나노소재 합성 기술						
바-CO <sub>2</sub> 전환 기술	발전, 전기화학 등 다양한 전환기술을 활용하여 이산화탄소를 제외한 다양한 온실가스도 고효율, 저비용으로 전환하는 나노소재 기술	전하 나노소재 촉매를 위한 나노소재 기술	고압도 나노소재 기술					촉매 기반 이산화탄소 포집 기술							
		고압도 나노소재 촉매를 위한 나노소재 기술	전하 나노소재 촉매를 위한 나노소재 기술					나노촉매를 통한 나노소재 기술							
		고압도 나노소재 촉매를 위한 나노소재 기술	고압도 나노소재 촉매를 위한 나노소재 기술					촉매 기반 이산화탄소 포집 기술 / 촉매의 표면 특성을 통한 이산화탄소 포집 기술							

### 〈나노융합 탄소 포집·전환 대표제품〉

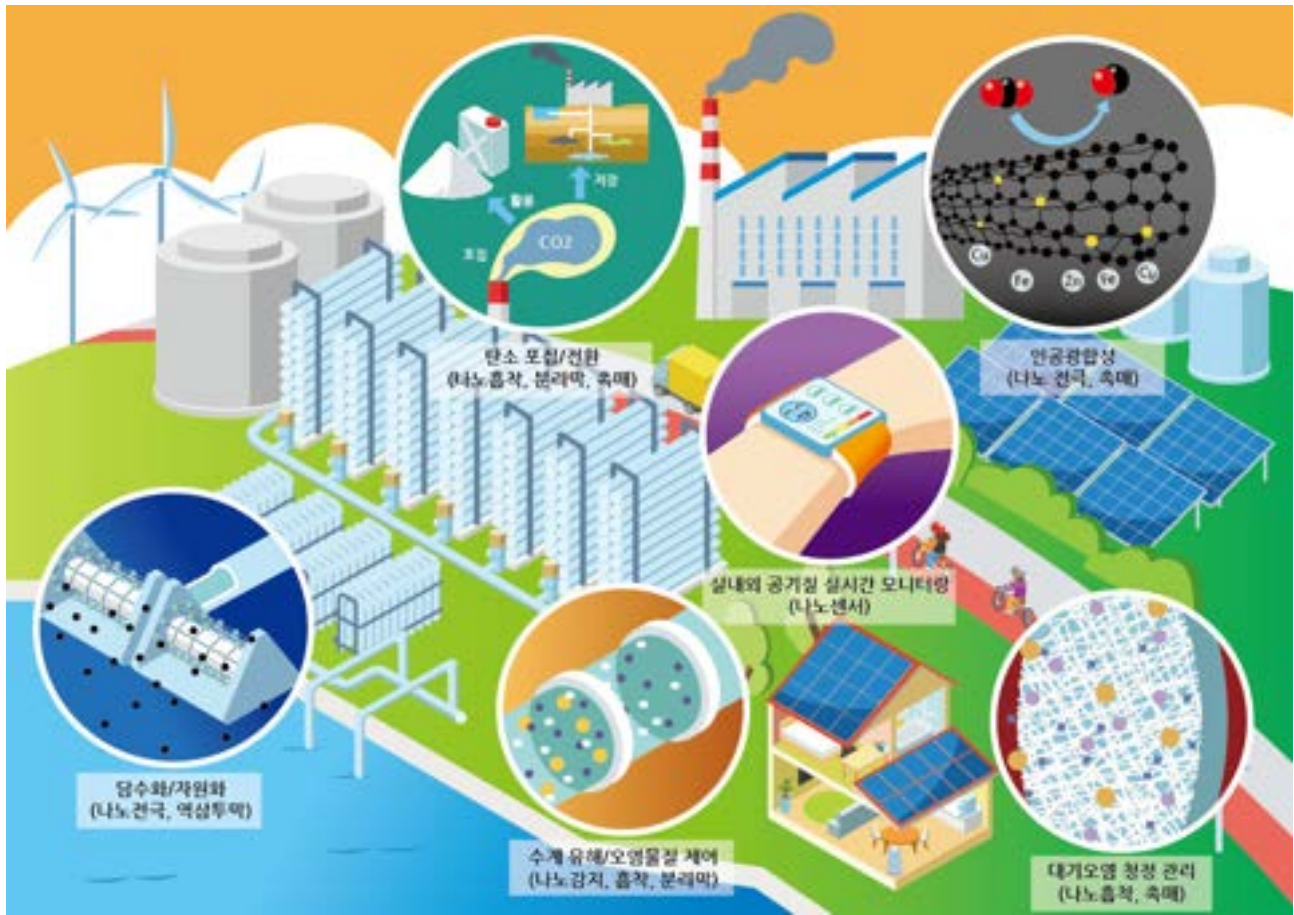


인공광합성용 나노촉매



탄소 포집용 나노흡착제

## 〈나노환경 미래상〉



### 1. 개요

#### 가. 정의

- 나노기술을 적용하여 생명현상을 규명하고 바이오 및 의료 분야에 활용하는 융합과학 및 기술

#### 나. 범위

- 나노바이오 기술의 범위는 나노진단, 나노치료, 나노바이오분석, 나노융합라이프 등 4대 중 분류 기술들을 포함
- **(나노진단 분야)** 나노진단 분야의 소분류는 크게 체내진단 및 체외진단 기술을 포함. 나노진단 분야는 그 기능의 고도화, 소형화, 자동화로 인해 재택진단, 현장진단(POCT, Point-of-Care Testing), 생활환경, 국방·보안 분야 등에 있어 활용성이 높아질 것으로 예상. 특히, 감염병의 경우 초고감도/고선택성 및 동시다중 검지 기술, 실시간 분석기술 등이 요구. 또한, 비침습 기반의 나노진단 기술 및 저가·대량 양산이 가능한 나노바이오 진단 센서 기술이 필요
- **(나노치료 분야)** 나노치료 분야의 소분류는 질병예방 및 표적치료 그리고 나노재생 및 재활을 포함. 나노치료 분야는 나노기술과 바이오 기술을 융합하여 질병이 있는 생체 조직에만 특정하게 작용하는 지능형 약물 전달 및 표적치료 시스템을 개발하여 약물의 사용으로 인한 부작용을 없애고 암과 같은 난치병 치료가 가능하고, 수술적 치료에서 불가능했던 손상된 조직과 장기를 복원하는 치료기술
- **(나노바이오 분석 분야)** 나노바이오 분석 분야의 소분류는 생체신호 측정 및 제어기술을 포함. 나노바이오 분석 분야는 단일 분자를 고감도로 측정하고 분석하는 기술과 단일 생체분자 정보기술을 이용하여 질병 진단 등이 가능한 정밀제어 시스템 구현 기술
- **(나노융합라이프 분야)** 나노융합라이프 분야의 소분류는 식품, 화장품, 생활용품 기술을 포함. 제3기 국가나노기술지도의 중분류였던 농수산식품과 생활용품 분야를 제4기 국가나노기술지도에서는 나노융합라이프 중분류로 통합. 제3기 국가나노기술지도의 농수산식품 및 생활용품 중분류를 제4기 국가나노기술지도에서는 식품 및 생활용품 소분류로 분류

〈나노바이오 분야 기술 분류체계 제3기·제4기 수정 경과〉

제3기 나노기술지도		▶	제4기 나노기술지도	
중분류	소분류		중분류	소분류
나노 진단	나노검지 기술		나노 진단	체내진단
	나노바이오칩 기술			체외진단
	나노바이오 전처리 및 자동화 기술			
나노 치료	나노 약물 전달 기술		나노 치료	질병예방 및 표적치료
	나노구조체를 이용한 세포/조직공학 기술			나노재생 및 재활
	나노바이오 임플란트 기술			
나노바이오 분석	생체분자 나노분석기술		나노바이오 분석	생체신호 계측 및 제어
	생체분자 나노제어기술			
농수산식품	나노기술응용식품 제조기술		나노융합 라이프	식품
	농수산식품 유해물질 현장 검출 기술			화장품
	농수산식품 관리기술			생활용품
생활용품	고기능성 나노화장품 기술			
	나노소재 생활용품 기술			



## 다. 역량 분석(SWOT)

		기회(O)	위협(T)
외부 환경		O1. Big data, AI, ICT 등 기술간 융·복합화 가속 O2. 정밀의료 패러다임 전환에 따른 체내 영상진단 및 이식형 진단 기기 수요 증대 O3. 나노기술 기반 COVID 백신의 글로벌 임상 적용으로 나노기술 유용성의 대중적 검증 O4. 재생의학으로의 나노 기술 적용 범위 확대	T1. 추격형 연구로 기술 선도 경쟁력 한계 T2. 글로벌 제약사의 나노바이오에 대한 막대한 연구비 투자 T3. 나노물질의 인체 적용에 대한 장기안전성에 대한 우려 T4. 글로벌 기업의 나노바이오 분석기기 선점
내부 환경			
강점 (S)	S1. 국내 나노기반 원천기술의 발전 S2. 정부의 바이오산업 육성 전략 강화 S3. 국내 나노바이오 스타트업 기업 지속 증가 추세 S4. 나노바이오 연구의 기술 사업화 연계 인프라 환경 보유	○ 나노바이오기술 역량을 토대로 지속적인 산업경쟁력 강화 ○ 첨단 기술분야(Big data, AI 등)와 연계한 나노바이오 기술 플랫폼 구축 ○ 나노백신의 글로벌 성공을 계기로 국내 나노원천기술의 나노바이오 적용 확대	○ 국가 나노바이오 원천기술과 글로벌 의료산업 선진시스템 연계 통한 상용화 R&D 가속화 ○ 글로벌 제약사의 막대한 재원을 국내의 뛰어난 나노바이오 기술에 투입될 수 있도록 기술 개발 노력 ○ 나노물질의 장기안전성 평가를 극복할 수 있는 체외 배설 가속화 기술 개발
		SO 전략    ST 전략 WO 전략    WT 전략	
약점 (W)	W1. 나노와 바이오를 융합한 전문인력 부족 W2. 나노바이오기술의 산업화 확대 미흡 W3. 나노바이오 기술의 산업화 확대 미흡 및 국민 체감 성공사례 부족 W4. 나노바이오기업의 국내외 시장진출의 한계	○ 나노바이오 기술 상용화 가속 위한 우수 인력 확보 및 사업화 투자 강화 ○ 나노기술의 바이오 분야 적용 확대를 활용한 국내 연구 컨소시엄 확대 ○ AI 기술을 이용한 맞춤형 나노바이오 소재 제품화	○ 다학제 융합 연구를 통한 나노바이오 융합 소재/부품/장비 연구 활성화 ○ 차세대 나노바이오 산업화 분야 지속적 발굴 및 투자 전략 수립 ○ 나노바이오 정밀의료 기술에 대한 국민 체감 강화 노력 ○ 국내 나노바이오 기업의 해외 진출 지원 및 글로벌 기업화 전략 모색

## 2. 국내외 기술 및 산업동향(현황 및 전망)

### 가. 국외 기술 및 산업 동향

○ (나노진단 분야) 나노진단 분야는 국민의 건강과 헬스케어 향상을 위하여 나노와 바이오 융합기술을 접목하여, 인체의 질병과 질환 모니터링, 감염병 진단, 동반진단, 실시간 질병/질환 모니터링, 비침습적 생체 영상진단 등을 위하여 초고감도, 고선택성, 다중 및 실시간 검지, 고정밀 나노조영제 등 기존 진단기술의 한계를 극복하기 위한 기술 개발과 이를 이용한 산업화를 연구하고 개발하는 분야

- (체내진단) 최근 암과 치매 등 다양한 질병 및 질환 타깃을 선정하여 진단 바이오마커의 발굴, CT/MRI, PET/MRI, MRI/형광 등 multi-modality 영상 이미지의 고속 판독이 가능한 진단기술과 기술사업화까지 걸리는 시간과 비용을 획기적으로 단축 가능한 장점으로 인공지능-빅데이터 연계한 진단 분야 응용 기술 개발이 확대 중

• 최근 해외 우수 대학과 의대 등에서는 MRI에 사용하는 나노입자와 이의 표면개질 기술을 개발하고 CT, PET, 형광, 광음향 등의 다른 modality 영상기법과 병용하여 다양한 질병의 이미지 해상도를 높이고 인공지능과 연계하여 진단의 정확성을 향상시키는 연구 개발을 진행 중

※ Recent Advances of Bioresponsive Nano-Sized Contrast Agents for Ultra-High-Field Magnetic Resonance Imaging, Frontiers in Chemistry, 2020

• 영상 조영제의 글로벌 시장은 2021년 49억 USD에서 2026년 59억 USD로 3.7%의 성장이 예상되며, 이중 나노조영제는 주로 MRI 또는 광학영상 진단 용으로 개발 중

※ 글로벌 시장동향보고서, contrast media/contrast agent market, 2021 MARGETS and MARKETS™

• 근적외 영상조영제의 글로벌 시장은 2021년 3.3억 USD에서 2026년 6억 USD로 12.6%의 성장이 예상되며, 이중 나노조영제는 2021년 36.6%에서 2026년 40.7%로 성장할 것으로 예상

※ 글로벌 시장동향보고서, near infrared imaging/NIR market, 2021 MARGETS and MARKETS™

- (체외진단) COVID-19 발생 후 감염병 재난에 효과적인 대응을 위하여 예측, 진단, 치료제 및 백신 관련 기술 개발이 활발하게 진행되고 있으며, 이중 방역을 위한 첫 단계로 ‘신속하고 정확한 진단’ 기술 개발이 활발히 진행 중

• 애보트 (Abbott Laboratories) 회사는 체외진단, 헬스케어, 제약 및 기기 장비의 글로벌 선두 업체로서 감염병, 인플루엔자, STD, 열대성 전염병 등을 진단할 수 있음. 또한, 항체, 약물 남용 진단, 염증성 질환 검사 자동화 장비와 시약, 센서 등 200 종류 이상의 체외진단 및 POCT 제품을 생산하고 판매 중

- 미국에서는 신속하고 빠른 질병 진단에 대한 수요의 증가로 진단기기에 새로운 기술이 적용된 POCT 장치에 대한 수요가 증가하고 있으며, 바이오칩 및 나노바이오테크놀로지와 같은 첨단기술이 진단기기에 도입되면서 일반인들이 현장 진단에 접근할 수 있는 기회 확대 중

※ 미국 체외 진단기기 시장동향, 대한무역투자진흥공사, 2020

- 큐아젠(Qiagen) 회사는 분자진단 시료 처리 및 어세이 기술 기반제품을 생산에 다양한 형광 나노입자를 활용하여 진단기술에 적용하고 있으며 2019년 기준 1.53 billion 달러의 매출을 기록 중

※ 차세대 체외진단기기 시장 (2020)

- 영국 옥스포드나노포어(Oxford Nanopore Technologies) 회사는 나노포어를 가지는 디바이스를 이용하여 유전자의 염기서열 정보를 분석하는 차세대 염기서열분석(next generation sequencing; NGS) 기술을 개발하고 이를 활용하여 COVID-19의 염기서열을 분석하는 기술을 활용한 제품을 개발

- 일본 도쿄대에서는 바이러스를 고효율로 분리하는 나노구조막을 이용하여 인플루엔자 및 SARS, COVID-19 등 직경 100-120nm 수준의 바이러스 분리 기술을 개발하였고, AI와 나노기술로 COVID-19 중증 질환과 연계된 바이오마커를 발굴하여 환자 진단에 활용하는 연구를 진행 중

※ 일본, 나노·소재 기술을 적용한 감염병 대응 핵심 연구 발표, 과학기술진흥기구 연구개발전략센터, 2021

- 미국 Lucira Health 회사는 등온증폭 기술을 이용하여 COVID-19 올인원 진단키트 (Lucira COVID-19 All-in-one Test Kit)를 개발하고 FDA로부터 가정에서 개인이 감염 여부 확인이 가능한 제품으로 긴급 사용 승인을 최초로 받았으며, 가정 내 감염병 진단 키트 사용 확대의 시초

- 2020년 미국 셉록바이오사이언스에서는 특정한 유전자 배열을 인식하여 크리스퍼 유전자 기술을 활용하여 특정 유전자를 인식하고 절단 후 형광 신호 발생을 유도하는 3세대 유전자 가위인 크리스퍼(CRISPR) 기술 기반의 신종 COVID-19 바이러스 감염증 진단 키트를 상용화

- 중국에서는 금 나노입자와 유전자를 결합하고 상호제어를 통해 다양한 체내 바이오마커 기반 진단이 가능한 기술 개발이 활발히 진행 중

○ **(나노치료 분야)** 나노치료는 인체에 주입된 나노물질의 나노특성을 활용하여 질병을 예방, 치료, 재생하는 기술로서 지질형 나노입자를 활용한 COVID-19 예방백신의 개발과 임상 적용에 힘입어 빠르게 발전하는 분야임. 나노치료 기술은 약리학적 활성을 갖는 물질을 다

양한 나노기술을 이용하여 최적의 효력을 발휘하도록 세포, 조직, 장기 및 기관으로의 전달 및 방출을 제어하는 일련의 기술로서 기존 의약품의 부작용을 최소화하고 효능 및 효과를 극대화시켜 필요한 양의 약물을 효율적으로 전달할 수 있도록 나노제형을 설계하여 약물치료를 최적화하는 기술을 의미

- **(질병예방 및 표적치료)** 나노약물전달 기술은 치료물질을 효과적으로 전달할 수 있는 나노구조체를 개발하거나 타겟물질 등을 사용하는 방법으로 생체이용률, 치료효과, 환자의 순응도 향상과 부작용 감소를 목적으로 약물전달 분야의 연구개발 추진 중

- 최근 미국과 일본을 중심으로 신약개발의 리스크를 줄이면서도 파급효과를 낼 수 있는 신규 나노 약물전달제 개발에 대한 연구가 활발하게 추진 중
- 특히, 약물 전달분야는 나노입자 혹은 나노캡슐로 표적지향성 전달체, Pharmacy-on-a-chip 등이 개발
- 항원 전달용 나노전달체기술이 핵심인 COVID-19 백신 개발의 경우, 팬데믹에 대한 빠른 대응을 위하여 주요 선진국에서 대규모의 국가 지원이 이뤄짐. 대표적 예로, 미국은 2020년에 모더나에 약 3조원, 노바백스에 2.9 조원 등 약 100 억달러를 지원하였으며, 이를 통하여 나노전달체의 임상적용이 가속화
- 이러한 전격적인 정부와 기업의 투자를 바탕으로 빠르게 COVID-19 백신 개발과 임상 시험을 완료하여 미국/독일 연합의 화이자/바이오엔텍 (Pfizer/BioNTech)은 2021년 375 억달러(4.9조원)의 매출을 기록했으며 2022년 426 억달러(5.5조원)의 매출이 예상되고, 미국 모더나(Moderna) 는 2021년에 169 억달러(2.2조원), 2022년에 257 억달러(3.4조원)의 매출 예상

※ MEDI:GATE NEWS, 2022년, 2021년 코로나백신 시장규모

- **(나노재생 및 재활)** 나노기술을 활용하여 분실 또는 손상된 조직을 복원하거나 시도를 하는 것으로 정의되며, 이는 고도의 학제적 분야이며 나노기술에 생체/재료 공학 등과 같은 최근 진보 기술의 발전으로 가능

- 나노기술을 기반으로 생체 장기 기관을 모사하는 기술은 선진국에서 많은 관심과 국가적 지원을 받으며 대학과 연구소 중심으로 기초 연구를 수행 중이며, 다양한 시제품을 제작하여 성능 검증과 설계 보완 중
- 나노기술과 생체공학 기술을 융합하여 다양한 분야로 연구 중임. 나노구조물을 이용한 초발수/초발유 기술 및 이를 이용한 생체 멤브레인, 이온채널, 생체 임플란트 개발, 하이브리드 초친수/초발수 표면을 통한 고성능 lab-on-a-chip 또는 cell-on-a-chip 등을 개발
- 생체운동의 메커니즘을 구현할 수 있는 생체 친화적 초소형 actuator 기술 개발, 생체분

자를 이용한 구동기 기술을 개발. 생체모사 소재를 기반으로 하는 생체적합성 접착제 및 임플란트 개발, 나노구조물을 기반으로 하는 기능성 표면 기술 (예, bio-fouling, self-cleaning, anti-reflection, water capture 등) 기술 개발

- 나노약물 전달기술을 보유한 기업체들(예, 레모넥스 등)도 향후 유전자치료에 관한 컨소시엄을 구성하는 등 유전자치료에 그 기술을 접목할 준비 중

※ 나노바이오 기술의 산업화 및 표준화 동향, 나노종합 기술원 (2021)

- (유럽) 첨단 제제의 인허가를 염두에 둔 개발 및 신속 개발 지원제도가 2017년 3월에 신설되어 운영 중. 줄기세포 기반 치료제뿐만 아니라 조직공학 제제를 통칭하는 Advanced Therapy Medical Products라는 용어를 새로 도입하여 유럽 연합국 사이에서 이들을 제품으로 정의

※ 해외 주요국 의약품 규제 동향 정보집 (제4호)-유럽 일본, 식품의약품안전평가원 (2022)

- (일본) 재생의료 연구개발 촉진, 재생의료제품 조기 승인제도, 안전성 생명윤리 확보 노력을 위한 재생의료추진법 재정 및 재생의료기술에 대한 규제 및 안전성 확보를 위한 재생의료안전 법안을 제정

※ 해외 주요국 의약품 규제 동향 정보집 (제4호)-유럽 일본, 식품의약품안전평가원 (2022)

○ **(나노바이오분석 분야)** 나노바이오 분석기술은 특정 기관 및 조직에서 단일 세포 및 단일 생체분자 수준의 분석과 생체분자를 직접 분석할 수 있는 디지털 기반 분석과 무표지 멀티측정으로 확대 중. 또한, 실험실 수준에서 벗어나 일상생활에서 생체신호를 정밀 측정 및 분석할 수 있는 기술이 함께 발전 중이며, 더불어 생체분자의 구동 및 제어기술에 대한 중요성이 증가함에 따라, 해당 연구에 대한 관심도가 자연스럽게 증가하고 있음. 해당 분야는 NT, BT, IT가 융합 분야로써, 소재, 소자 뿐만 아니라 다양한 분석방법과 장비를 포함하여 매년 시장의 확대가 진행 중(2021년 2.50억 달러에서 2025년 4.25억 달러로 시장 확대 예상). 국가적 움직임으로는 해당 분야의 상용화 촉진을 위해 미국의 국가나노기술전략, 유럽의 6대 미래혁신기술 선정 및 Horizon 2020 프로그램, 일본의 5, 6기 과학기술 기본계획, 중국의 나노기술발전정책 등에서 모두 나노스케일 첨단 측정 및 분리 기술, 장비가 포함되어 있음을 확인 가능

- 생체 단일분자를 디지털 기반으로 분석하는 기술은 디지털 PCR, 디지털 ELISA 장비를 중심으로 분석기술 개발 및 사업화가 진행중. 영국의 Bio-Rad 회사는 디지털 PCR 및 단일세포 카운팅에 대표적 기업으로 전 세계적으로 가장 많은 사용자를 확보. 미국의 Quanterix 사는 디지털 ELISA 대표 기업으로 수 십 fL 크기의 magnetic bead를 이용하여 암, 알츠하이머 등 질병 진단 시스템을 개발

※ 서린바이오사이언스, Quanterix 차세대 Digital ELISA System

- 대학 및 연구소에서 주로 기술개발되고 있는 초고분해능 광학현미경은 기존 광학현미경이 갖는 분해능 한계를 극복하고 생체 단일분자를 직접 영상화할 수 있는 기술로 독일 막스플랑크의 Stefan Hell과 미국 제닐리아 팜의 Eric Betzig 그룹이 개발자로 2014년에 노벨상을 수상. 미국 Harvard 대학의 Zhuang 연구그룹은 형광물질을 사용하는 STORM 현미경을 개발하여 단분자 바이오 연구를 진행 중
- 표면 플라즈몬 공명을 이용한 나노바이오 센서는 전 세계적으로 20 여종의 플라즈몬 기판이 상용화되어 있고 대표적 제품으로 덴마크 Silmeco사의 Au 나노필라구조 기반 SERStrate 제품이 있으며, 미국 Real Time Analyzer 및 NIRMidas는 기존 ELISA에 플라즈몬 기판을 담지하여 민감도를 향상시킨 제품을 판매 중
- 질량분석법은 생체분자를 동시에 여러 개 검출할 수 있는 무표지 멀티플렉싱 기술로 대학 및 연구소 중심으로 진행. 기존에 단백질, 지질체, 대사체 등을 각각 따로 프로파일링하는 프로테오믹스, 리피도믹스, 메타볼로믹스에서 최근에는 생화학물질 간 상호작용을 볼 수 있도록 각 분야가 융합된 멀티오믹스 연구로 전환되고 있으며, 나노입자의 분자량 측정과 나노구조체 작용기 분리, 나노입자 표면 작용기 분석 등 기존 측정이 어려웠던 나노입자의 화학 및 질량 정보를 제공할 수 있어 나노입자를 이용한 바이오 연구에 활용 중

※ ACS Omega 2020, 5, 2041; Advance Materials 2019, 31, 1901556

- 생체분자 정밀 구동 및 제어기술의 경우, 나노바이오 물질을 제어하기 위한 기술과 이를 구동하기 위한 구조전달체 제조기술을 중심으로 발전해 왔으며, 산업 기술보다는 아직 학교, 연구소 등에서 기초 연구개발 중심 진행 중. 구체적인 핵심 기술의 경우 크게 1) 분석, 진단 등 목적에 적합한 최적화된 구조체 재료 선정 및 제작 방법, 2) 제작한 시스템의 정밀 제어를 위한 제어 시스템 개발로 구분. 제어기술의 경우 고점성 유체환경에서의 효과적이고 정확한 움직임 원격으로 어떻게 구현할 수 있는가를 중심으로 발전 중. 특히 해당 스케일에서 충분한 추진력을 확보하기 위해서 자기장 기반 제어, 음향 기반 제어, 화학반응 기반 제어, 광 기반 제어기술(옵티컬 트위저 등)에 대한 연구가 활발하게 진행 중

※ Science Robotics, 2017, 15, 2

○ **(나노융합라이프 분야)** 나노융합라이프 분야는 국민의 안전성 및 편이성 향상을 도모하기 위해 나노 및 바이오 융합기술을 이용하여 식품 속 위해물질 모니터링, 화장품 소재, 생활보호 부품, 생활용품 소재 개발 등을 포함

- **(식품)** 식품 분야는 식품, 농수산, 포장재, 살충제, 비료 개발 등을 포함하고 있음. 현재, 식품의 신선도 향상 및 기후변화에 따라 식품 저장의 안정성 향상에 대한 기술 요구가 높으며, 관련 시장은 2025년에 40.7억 달러에 이를 것으로 예상. 식품 분야에서는 식품의 안전성 감시용 나노센서, 박테리아·바이러스 검출 센서, 잔류농약 검출 센서, 임산물의 병충

해 감시센서 등을 개발하여 농수산물 유통매장, 식당, 공항, 항만, 고속도로 등에서 광범위하고 일상적인 감시시스템이 갖추어질 것이며, 이중 일부는 법제화되고 다른 부분은 개인, 시민단체, 유통업체들에 의하여 시행 예정

※ 나노바이오커넥트 추진전략 기획 연구 보고서, 2021

- 미국 내에서는 나노농수산물과 더불어 나노에 대한 안전성 및 안정성 연구를 2016년 이후 FDA(Food and Drug Administration, USA)와 EPA(Environmental Protection Agency, USA)에서 진행 중
- 영국은 기후변화, 인구증가, 토양의 질 저하 등으로 인한 세계 식량난을 해결하기 위해 나노 기반의 농업 시스템이라는 농업 모델을 제시하였으며, 모든 순환과정을 인공지능의 기계 학습 기능을 적용하여 나노 물질들의 속성을 분석하고 제어하는 방안을 제안. 또한, 나노 비료의 개발을 통해 작물 비옥도 및 영양의 효율성 강화, 아산화질소 배출을 줄이기 위한 연구개발을 진행 중

※ 버밍엄 대학, Science Times, 2021

- 중국과학원은 식물의 나노입자 매개 카드뮴 내성의 메커니즘 연구를 통하여 금속 나노입자(산화철과 산화아연 나노입자)가 식물 성장조절제 역할 및 중금속 오염 지역의 농작물 개선을 도울 수 있는 것으로 보고 ※ 중국과학원, 영농자재신문, 2022

- **(화장품)** 나노융합기술을 활용한 화장품 및 생활용품 분야는 나노기술과 무기나노소재 및 유기바이오 소재 기술을 접목하여 활발하게 시장 확대가 진행 중에 있으며, 세계시장은 2025년 3.02억 달러에 이를 것으로 예상. 화장품 분야는 기술 발달을 통해 제형적 측면과 더불어 소비자 맞춤형 바이오 소재 확보 및 안전성·유효성 연구에 대한 관심 증가 추세. 나노바이오 화장품은 생물공학(예, 발효, 생물전환, 생물합성 등) 기술을 접목하여 유효물질의 고기능성을 유지하는 것이 특징

※ 나노바이오커넥트 추진전략 기획 연구 보고서, 2021

- 대표적인 나노바이오 화장품 기술은 리포솜, 나노캡슐화, 나노유화를 이용한 에멀전, 펩타이드 합성기술, 줄기세포 응용 기술 등. 이러한 나노기술을 통해 주름개선, 미백, 자외선 차단제, 탈모, 아토피 등 다양한 피부 고민을 해결해 줄 수 있는 기능성이 향상된 나노 화장품 개발을 위해 맞춤형 기능성 화장품소재 생산 및 물리/화학적으로 불안정한 생리활성물질의 안정화를 목표로 연구개발 진행 중
- 미국은 나노물질을 이용한 생활용품을 선도적으로 개발하고 있고 그 이외에 자외선 차단, 미백, 주름개선 효능이 있는 나노물질을 이용한 고부가가치 화장품 및 친환경 건축자재 등의 다양한 생활용품을 개발하여 출시
- 일본은 나노소재합성 및 표면기능화기술에 대한 원천기술을 바탕으로 고품질 화장품 원

료소재 공급처로서의 역할을 담당. 또한, 일본 내수 화장품시장 동향 중의 하나로는 고령 인구증가에 맞춰 시니어 화장품개발을 새로운 사업 방향으로 피부 저자극의 기능성 화장품 제품개발에 집중. 이외에도 일본에서는 친환경·비건에 대한 사회적 관심에 따라 천연·유기농 화장품 소재 및 노화 방지 성분으로서 연어 머리로부터 추출된 프로테오글리칸(proteoglycan)과 같은 천연자원 소재로부터 새로운 고부가가치 화장품 원료개발을 진행 중

- 유럽에서는 유럽연합에 유통되는 모든 화학물질에 대해 사전적 관리를 총괄하는 규정인 REACH(Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals)를 2007년 6월부터 시행 중. 또한, 유럽에서는 안전성 평가와 관련하여 2013년 7월 11일부터 나노물질을 사용한 화장품에 대하여 나노물질의 이름, 규격, 사용된 나노물질의 양, 나노물질의 독성자료 및 사용방법에 대해 유럽연합에 알려야 하며 원료로 사용되는 나노물질에 대하여는 물질명 앞에 나노를 표기하도록 규정

- 유럽 화장품 기업인 랑콤사는 나노바이오 입자를 적용한 기능성 화장품 분야 시장을 주도하고 있으며, 나노/마이크로 에멀전 형태인 세라마이드 화합물을 함유하는 조성물을 개발

※ 나노종합기술원, 나노바이오기술의 산업화 및 표준화 동향, 2021

- 기능성 화장품 활성물질을 효과적으로 피부에 흡수시킴으로써 장시간 안정적으로 효능을 극대화할 수 있다는 점이 나노바이오 화장품의 장점. 그러나, 많은 입증된 효과에도 불구하고 인체에 미치는 영향에대한 연구는 현재까지 부족한 실정이며 위험성에 대한 우려도 지속되고 있어 나노 바이오 화장품에 대한 안정성과 유효성을 검증하는 연구 필요

- **(라이프)** 나노기술을 적용한 생활용품 시장에서 새로운 스마트 항균 기술을 요구하고 있으며 항균 펩타이드, 항균 폴리머, 자연 항균 약제 등 다양한 종류의 항균제들이 개발되나 섬유 등의 생활용품에 적용할 수 있는 항균 소재 기술이 부재하여, 인체에 안전한 항균기능을 섬유에 부여하는 것은 기존의 벌크 기술로는 제어하기 힘든 장벽기술

- 옥시 사태 이후 독성화학물질의 생활용품에 대한 적용과 항균제에 대한 국제표준이 매우 엄격해지고 있으며, 산업 규모로는 2020년 비의료 시장에서 스마트 항균 코팅과 표면처리가 2억2천500만 달러 규모로 성장, 2022년까지 5억 달러 전망
- 일본은 나노소재를 이용한 가정용품, 잡화, 스포츠용품 등도 개발



## 나. 국내 기술 및 산업 동향

- **(나노진단 분야)** 국내 산업·기술개발 현황은 고감염성 질병, 암, 당뇨 등 만성질환을 가지는 환자의 상시 진단 및 모니터링을 위한 기술과 구현을 위한 시료 전처리, 증폭, 분석, 판독에 필요한 나노소재, 소자, 센서, 기기와 소프트웨어 확보를 위한 기술개발이 추진 중이며, 특히 종래 아날로그 신호 활용에서 빅데이터와 인공지능 연계를 위한 디지털 분석으로 패러다임이 변화하는 중
  - **(체내 진단)** 체내진단을 위해서 다양한 나노조영제, 초음파, 내시경 등을 활용한 의료영상 진단기술과 인공지능과의 접목으로 첨단의료영상 진단기기 산업이 확대가 진행 중
    - 한국표준과학원에서는 반도체 공정을 이용한 금 나노입자를 제어하고 합성하는 기술을 이용하여 MRI, CT 등에 적용 가능한 조영제 개발이 진행 중
    - IBS 나노의학연구단에서는 2021년 텍스트란과 산화철을 합성하여 5나노미터 수준의 MRI 조영제를 개발하여 체내의 혈관, 장기, 종양 등의 정밀한 영상 촬영 연구가 진행 중
  - **(체외 진단)** COVID-19 발생 이후 국내 나노바이오 진단 업체의 다양한 제품 개발과 해외 수출 확대로 매출 1조 이상의 분자진단 및 면역진단 기업의 시장 점유율이 증가하고 있으며, 나노바이오 센서를 통한 신속 정확한 분석 기술개발과 진단 시약과 센서 이외에 기기와 소프트웨어, 그리고 인공지능 연계 기술개발이 활발히 진행 중
    - 현장 진단이 가능하며, 기존 채혈을 통한 분석에서 비침습적 방법과 나노바이오 소재/나노구조/나노소자/나노공정/나노측정/분석기술과 연계하여 의료현장 및 가정에서 활용하여 진단하는 기술로 발전하고 있으며, 점차 원격의료 분야에 확대 적용을 준비 중
    - 3세대 분자진단 기술을 카이스트, 서강대, 서울대, 나노종합기술원과 옵토레인, 레보스 케치, 바이오티엔에스 등의 기업에서 반도체 공정을 활용하여 나노리터 수준의 파티션을 가지는 디바이스를 활용하여 절대 정량이 가능한 제품을 개발 중
    - 마라나노텍(Mara Nanotech Korea, Inc.)과 나노종합기술원, 한국생명공학연구원에서는 반도체 공정기술을 이용하여 나노홀을 가지는 실리콘 소자를 활용하여 COVID-19, 심근경색을 측정할 수 있는 센서와 기기를 개발
    - 한국과학기술원과 서강대학교에서는 나노구조 기반의 광열 유전자 증폭 기술을 개발하여 분자진단 시간을 단축하는 연구와 진단 기기로부터 발생하는 데이터를 활용하여 스마트폰을 이용한 가정 내 질병 진단에 활용하는 연구 활발하게 진행 중
- **(나노치료 분야)** 나노치료의 선제적 치료 분야인 질환 예방을 위한 나노백신은 COVID-19 예방을 위한 백신이 개발되어 임상에 적용되었으며, 이를 계기로 다양한 나노백신, 특히 암 및 퇴행성질환을 예방하기 위한 나노백신 분야의 연구가 국내외에서 활발히 진행 중

- **(질병예방 및 표적치료)** 국내 약물전달시스템 관련 연구개발은 해외동향과 유사한 형태로 주 연구 주체는 대학이며, 한국화학연구원과 KIST와 같은 정부출연연구소 및 제약회사/바이오 스타트업에서도 활발히 연구가 진행 중

- 대부분의 나노약물전달기술은 하나 또는 그 이상의 재료로 구성이 되며 활성 약물(active pharmaceutical ingredient, API)의 용해도를 증가시키며 약물 방출 특성을 조절하기 위하여 약물 제재설계(pharmaceutical formulations)의 기술이 도입
- 나노약물전달기술에 사용되는 주요 나노구조체로는 블록공중합 고분자로 마이셀(micelle) 및 입자, 캡슐을 만들어 사용하며 생분해성 고분자는 체내에 들어간 후 조작 및 회수가 필요하지 않아 각광
- Polylactic Acid(PLA), Polyglycolic Acid(PGA) 그리고 이들의 공중합체 Polylactic-Glycolic acid(PLGA) 등을 활용한 나노구조체는 확산/침식, 분해 등의 특징으로 많이 사용
- 특히, PLA와 PLGA의 마이크로 입자는 캡슐화되어 약물의 분해를 막고 생체적합성을 향상시키며 약물방출의 지속성을 유지 가능
- COVID-19 예방백신의 신속한 글로벌 임상 적용에 힘입어 지질 나노입자(Lipid Nanoparticle, LNP)를 이용한 유전자치료제 전달기술 개발에 대한 R&D 투자 급증

- **(나노재생 및 재활)** 나노재생 및 재활 기술은 나노소재 개발 및 이용에 큰 중점을 두는 뼈, 피부 재생용 이식제, 혹은 줄기세포의 활용에 비중을 두는 지지체 및 세포 혼합형 조직공학제 개발 중. 세라믹, 티타늄 등 강성이 좋은 재료의 표면을 나노기술을 통해 손상된 골조직으로의 이식 및 치료효과를 높이는 효과를 달성한 제품들이 지속적으로 개발, 출시 중. 또한 피부 드레싱도 콜라젠 및 합성고분자를 바탕으로 나노공극 형성 및 이식 주변 조직과의 상호작용을 촉진하는 기술이 적용 중

※ 바이오인공장기의 미래-대한민국 정책 브리핑, 한국과학기술기획평가원 (2018)

- 나노 기술의 적극적 활용은 이식제에서는 많은 성과를 창출하고 있으며, 나노 담지/전달 기술을 활용한 기능성 성장인자 전달이 복합된 상품들도 상용화

※ 조직재생 기능성 생체재료 나노표면개질, 한국과학기술연구원 생체재료연구단 (2015)

- 특히, 조직공학적 제제는 줄기세포의 활용 및 전달이 중요. 이는 세포치료제 및 세포를 활용한 조직공학적 제제의 인허가 정책 및 규정이 국외환경과 다른 것도 반영된 결과이며, 기능화된 줄기세포의 주사적 주입 및 활용에 머무는 1세대 재생의학적 제제에서 정체. 비록 지지체, 세포 혼합형 복합 조직공학제제의 상용화가 초기의 단계에 있기는 하지만 국내 연구진들의 나노재생의학 분야 기술은 세계적 수준

※ 재생의료 산업 및 임상 동향-첨단바이오의약품을 중심으로, 바이오 경제연구센터 (2022)

- **(나노바이오분석 분야)** 나노바이오 소재를 나노 단위에서 정밀 제어하고 이를 계측하기 위해 고감도 장비를 기반으로 연구개발이 진행 중. 최근 디지털 기반의 분석기술이 기존 단일분자 분석기술 대비 높은 정량성으로 각광받으면서 국내 연구진의 기술개발과 더불어 사업화가 진행 중
  - 생체 단일분자를 디지털 기반으로 분석하는 기술은 디지털 PCR, 디지털 ELISA 장비를 중심으로 분석기술 개발 및 사업화가 진행 중. (주)레보스케치, (주)옵토레인, (주)스몰머신즈 등 국내 기업이 개발한 디지털 분석기기를 중심으로 연구기관과 협력하여 생체물질의 고감도 분석기술을 개발 중
  - 전자현미경 국내 기업인 (주)코셈은 2012년 Tabletop SEM 제품 출시 이후 X선 분광과 주사투과현미경(STEM)이 결합한 SEM을 출시하였고 대기압 SEM과 원자현미경(AFM) 통합 현미경을 개발 중임. 엠크래프츠는 국내 원천기술로 3 nm급 소형 SEM 제품 출시 이후, 하이엔드 SEM 개발 중
  - 나노미터 단위의 고해상도 분석 장비인 원자현미경 (Atomic Force Microscope, AFM)은 국내 파크시스템즈가 세계를 선도하는 1위 기업으로 연매출 1,000억원 규모로 최근 8년간 평균 30%의 매출 성장을 보여왔고, 2021년 머신러닝 기반 소프트웨어를 탑재한 원자현미경을 출시
  - 초고분해능 현미경의 발명자 그룹에서 연수한 연구진을 중심으로 국내 대학(고려대, 한양대)에 STORM 현미경이, 한국표준과학연구원에 STED 현미경이 설치. 나노약물 연구에 중요 이슈인 나노입자 정량 기술이 STED 초고분해능 현미경을 이용하여 개발
  - 표면 플라즈몬 나노바이오 센서에 활용하는 기술개발은 연구기관을 중심으로 진행되고 있고, 플라즈모닉 기판의 핵심 특허 중 국내에서 한양대학교, 경희대학교, KAIST 연구그룹이 보유. 2017년에 국내 기업 (주)icluebio이 설립되어 국산 SPR 장비 및 측정 서비스를 제공
  - 한국표준과학연구원과 KAIST 연구팀은 2016년 질량분석법을 이용하여 나노입자 표면의 작용기를 분자 수준에서 분석하였고 (※ 전자신문, 2016. 3. 21. 'KRISS-KAIST, 나노입자 표면 분석 신기술 개발), DGIST는 산화금속 나노입자를 이용해 300 nm 분해능으로 세포막 내 단백질 상호작용을 규명 (※ ACS Applied Material Interfaces 2020, 12, 18056) 질량분석 장비는 대부분 국외 기업이 주도하고 있고, (주)아스타가 국내기업 최초로 말디 표면 질량분석기를 개발하여 2015년부터 사업화 진행
  - 나노물질 기반 생체신호 측정 기기 개발 연구는 국내 대학 및 연구소에서 활발하게 이루어지고 있는 분야. 서울대학교 연구팀은 그래핀 기반의 패치형 혈당 측정 디바이스를 개발한 바 있으며 (※ 조선일보, 2016. 3. 22. '땀으로 혈당 측정하고 당뇨 관리 약물도 전달하는 전자피부 개발'), 연세대학교 연구팀은 금속나노입자를 기반으로 한 생체신호 측정용 스마

트 렌즈를 개발 (※ 연합뉴스, 2017. 4. 27. '당뇨병 녹내장 진단하는 스마트 콘택트렌즈 센서 개발'). 최근에 뇌-기계 인터페이스 등 뇌파를 측정하는 신분야로의 응용도사례 등장. 이와 같은 연구 결과들을 바탕으로 국내 (주)이오플로우, (주)브레인유, (주)비웨이브, (주)인더텍 등 다양한 기업들이 출현

- 나노바이오 정밀제어 분야의 경우에는 아직 사업화보다는 연구기관에서의 기술개발 중심으로 진행. 그 중에서도 정밀 나노 제어 기술개발, 나노로봇 및 입자 제작, 분석기술과의 결합 등의 주제로 진행 중

○ **(나노융합라이프 분야)** 농수산물식품 유해 물질 검출 시스템 개발, 나노기술 응용 식품 개발, 나노포장재 개발, 나노 농약·비료 개발 분야 등과 관련한 국내 산업체는 초기 단계이며 성장 추세

- **(식품)** 식품 분야에서의 나노융합 기술은 단기적으로는 고기능성 물질의 나노제품화를 위한 소재 및 공정기술 개발이 요구되며, 중장기적으로는 농수산물식품 안전성을 측정·검사·모니터링할 수 있는 식품 유해물질 나노검출기 분야 및 이들의 유통 및 관리를 최적화할 수 있는 유통이력 및 포장재 기술개발 필요. 나노기술을 융합하여 생산한 식품은 430억원으로 산업화 초기 단계에 해당

※ 나노융합산업조사, 2020

- 식중독균을 선별적으로 포집하고 감지하는 기술로 반도체 기반 Bio-MEMS 공정기술과 나노구조체를 이용하여 현장에서 병원성 식중독균을 실시간으로 검출하는 기술 개발 추진. 금속 화합물 나노 시트에 펩타이드를 부착시켜 인공항체를 합성하고, 식중독 원인균과 결합시켜, 결합체에 근적외선을 쬐어 세균을 사멸시키는 기술 개발 (※ 카이스트, UPI 뉴스, 2021). 유전자 변형 농수산물 (Genetically Modified Organism, GMO) 검출을 위해 GMO 제품이 닿으면 색깔이 변하는 가루 형태의 바이오센서 개발 (※ 인하대학교, 동아일보, 2022) 등

- 전자코는 동물의 후각 기관을 모방하여 휘발성유기화합물 냄새를 구별하는데 특화된 감지 소자이며, 현장에서 비접촉 방식으로 과일 및 육류의 신선도를 판별할 수 있는 나노-바이오 전자코 시스템 개발

※ 한국생명공학연구원, KBS 뉴스/ 2021, 부산대학교, 매일경제, 2022

- 지속가능성, 생분해성, 생체적합성, 높은 기계적 안정성뿐만 아니라 항균성을 가진 나노바이오 필름이 활발하게 개발 중이며, 일회용 비닐, 용기 등의 플라스틱 포장재, 화장품, 식품의 포장재에 적용

※ 주식회사 에이엔플리, 특허등록번호: 10-2021-0117234

- 전달 및 분해 효과를 극대화하기 위해 나노구조체를 이용한 나노농약 및 나노비료와 살충효과가 높은 농약과 영양 효과가 높은 비료 개발과, 대지에서 작물들이 효율적인 영양 흡수를 위해 나노구조체를 이용한 토양 스캐폴드 비료 개발이 진행 중
- **(화장품)** 화장품 나노기술은 나노 사이즈 크기를 갖는 나노바이오 입자·구조체를 함유한 화장품으로 바이오 입자에 활성물질을 넣어 피부에 흡수시킬 수 있으며, 피부 세포층을 선택적으로 통과 가능. 국내 나노바이오 화장품 소재 기술은 화장품 연구의 가장 핵심이 되는 분야로 신규 타겟 탐색 및 천연소재 발굴, 안정적 확보를 위한 바이오 생산기술의 활용과 화장품 원료의 가치를 높이는 감성 소재 합성연구가 중요한 연구영역으로 지속적인 투자가 이뤄질 전망. 나노화장품을 생산하는 업체는 현재 25개가 있으며, 업체별 생산 규모는 나노생체 삽입 소재 분야 다음으로 나노화장품 분야의 규모가 큰 편
  - ※ 나노융합산업조사, 2020
  - ※ 나노종합기술원, 나노바이오기술의 산업화 및 표준화 동향, 2021
  - 아모레퍼시픽 기술연구원을 비롯한 국내 화장품 기업들에서는 나노바이오 기술을 이용하여 피부의 생리활성물질을 감지하고, 피부의 회복 능력을 개선하거나, 유해 광선 및 유해 물질을 차단하는 기능을 하는 다양한 제품이 개발 및 상용화 중
    - ※ 나노종합기술원, 나노바이오기술의 산업화 및 표준화 동향, 2021
  - 나노입자를 이용한 무기 자외선 차단제 개발, 펩타이드를 나노 리포솜화하여 피부 흡수율을 높이는 등 기능성 화장품 개발을 진행 중
    - ※ 나노종합기술원, 나노바이오기술의 산업화 및 표준화 동향, 2021
  - 국내에서는 한국생명공학연구원에서 금, 은 나노입자를 이용한 색조화장품 제조기술 개발을 필두로 닥터오라클을 포함한 여러 화장품 회사들에서 세포재생인자(EGF)를 나노물질로 전달하여 노화현상을 막는 기술 및 주름과 피부톤을 개선하는 고분자 나노침투기술 등이 개발 중
    - ※ 나노종합기술원, 나노바이오기술의 산업화 및 표준화 동향, 2021
  - 고분자 나노기술과 자성 나노물질 등을 이용한 의약품과 식품, 화장품, 의료기기 등의 안전성 확보를 위해 식약처 산하 독성과학원에서 연구를 진행하였음. 특히 나노물질 관련 제품의 안전성 평가가이드 제정을 수립하였으며, 지속적으로 신규 나노물질들에 대한 안전성 평가규정 등을 추가 중
- **(라이프)** 생활용품 분야는 팬데믹으로 인한 항바이러스, 항균력이 향상된 소재/부품 등의 개발이 활발히 진행 중
  - ※ 한국재료연구원, 이데일리, 2022
  - 급성 바이러스성 호흡기 질환에 효과적인 항균/ 항바이러스 기능을 갖춘 나노물성 및 센스디퓨저는 개발 및 상용화 상태. 아포 세균이나 특정 바이러스 살균 문제를 해결하기 위

해 나노입자의 전위차를 이용한 나노 전지의 전기에너지로 세균이나 바이러스를 억제할 수 있는 소독제가 개발되었으며 상용화 단계

※ 나노케이비(주), 브릿지경제, 2021

- 항균 및 항바이러스 효과 지속성을 향상시킨 나노바이오 세라믹은 의료기기를 포함한 다양한 제품에 적용되어 상용화 진행
- 구리의 항바이러스 및 항균 특성을 이용하여, Influenza A와 대장균을 사멸하는 구리 나노 매쉬를 이용한 second skin을 개발. 개발된 구리 나노 매쉬는 손에 잡히는 물건을 온도와 습도변화에 간섭이 없을 뿐만 아니라, 열인식에 대한 감각이 우수하며, 폴리우레탄/파릴렌 코어셀 나노 섬유 사용하여 구리 나노 매쉬의 유연성을 높여 피부 부착 용이  
※ 한국생명공학연구원, PNAS, 119 (24) e2200830119, 2022
- 구강바이오 필름(구강 내 각종 세균들이 부착하여 형성된 미생물 덩어리) 형성 억제 및 내산성균에 대한 항균 효과와 성장억제를 위해 나노 에멀전화 된 시나몬 오일 개발. 건강 기능식품, 치약, 구강 세정제, 마우스 스프레이로 사용 가능

### 3. 기술발전 전망

중분류	현재 기술	미래 기술
나노진단	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 실시간 정성분석 기반 나노검지</li> <li>- POCT 현장형 나노진단</li> <li>- 혈액 기반 침습 나노검지 기술</li> <li>- 단일측정 단일 나노센서 기술</li> <li>- 시료전처리/반응/측정 모듈 개발 통합시스템 개발</li> <li>- 감염병 나노진단 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 상시감시 정량분석기반 나노검지</li> <li>- 맞춤형 나노진단</li> <li>- 비침습 무채혈 나노검지 기술</li> <li>- 다중 마커 동시 측정·분석 나노센서 기술</li> <li>- 미래 감염병 선제대응 나노진단</li> <li>- 전체 시스템 자동화 및 기능 고집적화 (Sample in Answer out)</li> <li>- 인체 부착·섭취·삽입 및 상시모니터링</li> <li>- Big data, AI 기반 디지털 나노센서 기술</li> <li>- 두 종류 이상의 조영물질이 동시 탑재된 임상용 나노조영제 기술</li> </ul>
나노치료	<ul style="list-style-type: none"> <li>- EPR효과 기반의 약물 전달용 나노구조체 기술</li> <li>- 진단용 나노구조체 기술</li> <li>- 치료용 나노구조체 기술</li> <li>- in vitro 수준의 나노구조체를 이용한 기능성 조직 성장 및 분화 기술</li> <li>- 전임상단계의 나노구조물 기반 인공뼈(관절) 및 인공장기 형성 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mRNA, siRNA, miRNA, 단백질 등 바이오의 약품을 함유한 예방 및 치료용 나노전달체 기술</li> <li>- 표적지향 약물 전달용 나노구조체 기술</li> <li>- 진단/치료병합(테라노스틱스) 기술의 비임상을 통한 안전성 확보 및 임상적용/상용화</li> <li>- 나노기술을 이용한 대단위 3차원 세포 배양 및 인공조직체 형성 실현. 임상적용 및 상용화</li> <li>- 나노구조체 기반 인공 골/연골 및 다양한 인공 장기를 통한 인체조직 부분, 전체 대체</li> </ul>
나노바이오 분석	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 단일분자 측정기술</li> <li>- 표지 생체분자 단일 검지 및 분석</li> <li>- 고비용 분석장비</li> <li>- 비실시간 생체신호 측정 및 분석 장비 개발 기술</li> <li>- 기존 생체 내 혹은 단순 합성 캐리어 기반 전달체</li> <li>- 자기장 기반 단순 제어 기술</li> <li>- 단순 컨트롤 기반 제어 및 선형적 데이터 측정/해석 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 디지털 분석기반 단일분자 계측</li> <li>- 디지털 분석기반 고해상도 이미징 기술 접목</li> <li>- 무표지 생체분자 멀티 검지 기술</li> <li>- 보급형 분석장비</li> <li>- 실시간, 생활형 생체신호 측정 및 분석 장비 개발 기술</li> <li>- 정밀 3차원 구동제어 구조체를 위한 새로운 폼 팩터 및 신공정 개발기술</li> <li>- 자기장, 빛, 초음파 등 새로운 매개기반의 제어 기술</li> <li>- 인공지능 기반 생체신호 분석/제어 및 빅데이터 측정/해석 기술</li> </ul>
나노융합 라이프	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 생분해성 포장재 나노기술개발</li> <li>- 농약 및 비료의 나노캡슐화 기술개발</li> <li>- 식중독균 검사 나노융합기술 개발</li> <li>- 자외선차단 및 미백효과가 뛰어난 나노융합 소재 개발</li> <li>- 나노융합 소재기반 항균작용을 이용한 생활용품 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노기술을 이용한 생분해성 포장재 범용화</li> <li>- 농약 및 비료의 나노캡슐 현장 적용</li> <li>- 현장, 고감도 식중독균, GMO 식품 및 신식품 신선도 판별 나노융합기술</li> <li>- 코스메슈티컬(화장품+의약품) 나노융합 소재/부품 개발</li> <li>- 친환경/친인체적 나노융합소재 기반 향균/항바이러스 생활용품의 고도화</li> </ul>

## 4. 나노기술지도 전개

### 4-1. 나노진단

#### 가. 체내진단

##### 1) 개요

- (정의) 사람이나 동물의 체내에서 발생하는 질환 관련 생물학적/해부학적 영상정보 또는 생체 내 신호를 측정 및 검사하기 위해 사용되는 영상 조영제 시약, 대조·보정 물질, 기구·기계·장치, 소프트웨어 등에 적용 가능한 나노바이오 기술
- (필요성) 인구의 고령화와 디지털 의료기술의 발전에 따른 개인맞춤형 의료서비스와 정밀/조기 진단, 신변종 감염병 확산에 따른 비대면 원격의료 산업의 수요 증가로 생체내에서 발생하는 다양한 의료영상, 생체신호 등의 디지털 데이터 구축과 이에 대한 활용 요구가 증가하는 추세
- (발전 전망) 체내진단은 ICT 기술과 나노바이오 기술과의 연계로 체내 영상측정과 생체내 삽입과 섭취가 가능한 다양한 형태의 기술로 진화. CT, MRI, 초음파, 광학 등의 신호를 이용하여 체내의 질환 정보를 비침습적으로 실시간, 고해상도 영상화하고 의료현장에서 진단 정보로 사용하기 위해 나노소재 기반의 고감도, 고정밀, 저독성, multi-modality 영상 조영제가 개발되고 있고, 한편으로 영상장비의 경우 휴대가 가능한 소형화된 의료장비로 진화하고 있으며, 나노기술, 반도체 기술, 인공지능기반 영상데이터 고속 처리기술간 융합이 활발히 진행. 생체신호 측정을 위해 체내에 이식되는 바이오센서 및 디바이스의 사용 편의성, 휴대성을 극대화하고 체내 보호, 면역거부 방지, 오염방지, 항균성 향상, 생체적합성을 부여하기 위한 유무기 하이브리드 형태의 나노바이오 패키징 기술개발이 진행. 소화기 내 발생하는 다양한 바이오마커와 환자의 지속적인 약물 투여 여부 확인을 위해 소화 가능한 센서(ingestible sensor) 관련 기술 개발이 진행되고 있으며, 이의 기술 구현을 위한 다양한 나노바이오 소재, 센서 및 측정 시스템과 관련 소프트웨어 개발과 스마트폰 등 디지털 기기와 연계를 통한 디지털 헬스케어로 발전

##### 2) 미래핵심기술이슈 : 정밀의료영상을 위한 고품질 나노조영제

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
체내투여 나노조영제의 안전성 확보 및 대량합성/품질관리의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노물질이 야기하는 광범위한 독성 문제를 해결하기 위해 인체무해하고 체외 배출이 용이한 무독성/저독성 생체친화성 나노소재 발굴 시급</li> <li>- 높은 균일도의 나노물질 합성은 달성하기 어려운 기술적 난제이며, 이를 극복하기 위한 화학(chemistry)-제조(manufacturing)-품질(control) 관리가 가능한 대량제조 나노기술 확보 필수</li> </ul>



기술난제	개요
체내진단을 위한 나노조영제의 질환 표적전달 및 영상신호 감도/대조도 성능 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 현재 나노조영제의 질환 표적능은 매우 낮은 수준이며 이의 향상을 위해 나노소재 조성, 크기, 표면화학 등의 정밀제어를 통한 생체내 장벽 극복 기술 개발 필요</li> <li>- 나노조영제의 질환 선택적 생화학 반응 제어를 통한 정상조직 대비 질환 진단 신호 극대화 기술 필요</li> </ul>
나노조영제의 단일 신호모드에 의존한 단순 영상 정보의 영상진단 효용성 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 복수의 영상신호 간 상보적 정보를 통합하여 생체내 정밀의료정보를 제공하는 임상용 나노조영제 부재</li> <li>- 동일한 약물동태학적 거동의 다중 영상신호 발생을 위해 다중신호 복합화 나노소재 설계, 제조 및 다중영상 평가기술 개발 필요</li> </ul>

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
체내투여를 위한 나노조영제 안전성 향상 및 대량생산 기술	정의	○ 생체적합성/안전성 물질로 구성된 나노조영제 제조, 표면개질 및 생분해 제어기술 및 균일하게 대량으로 생산하고 관리하는 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 무독성/저독성 구성소재(유기/고분자, 무기 재료 등) 다양화 및 균일도, 조성, 형태 정밀 제어 기술</li> <li>- 나노입자 표면 개질을 통한 생체적합성/안전성 향상 기술</li> <li>- 나노조영제 균일 제조 및 대량생산 기술</li> </ul>
고감도/고신뢰성 영상신호 발생 나노조영제 설계/제조 기술	정의	○ 고정밀/고신뢰성 영상진단 신호 발생을 위한 나노조영제 영상신호 증강/안정화/균일화 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 영상신호 발생 나노물질 구조 최적화 및 신호 안정화 기술</li> <li>- 고신뢰성 나노조영제 제조 기술</li> <li>- 질환 영상분석 기술</li> </ul>
나노조영제 질환조직 표적전달 극대화 기술	정의	○ 나노조영제의 형태, 크기, 표면성질 등을 제어하여 약물동태학적 거동 및 질환부위 표적분포를 향상시키는 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 질환표적 작용기의 나노조영제 표면 도입 반응 개발 및 표면 수식 밀도 제어를 통한 질환타겟 표적 기술</li> <li>- 나노조영제의 물리화학적 제어를 통한 생체내 장벽 극복 기술</li> </ul>
정밀영상진단을 위한 다중신호 증폭 나노조영제 기술	정의	○ 조영제의 나노공간 내에 두 종류 이상의 상보적 영상신호 발생 물질 탑재 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다중 조영물질 탑재 및 균일 합성 나노기술</li> <li>- 다중 조영물질의 약물동태학적 거동 및 질환부위 표적분포 평가기술</li> <li>- 다중 조영신호 간 영상 정합 및 분석기술</li> </ul>
생체내 세포 추적에 위한 나노조영제 기술	정의	○ 줄기세포 등 세포치료제의 이식/투여 후 체내 이동 및 질환표적 분포 등의 거동을 영상으로 추적 관찰하기 위한 세포 표지 용 나노조영제 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 낮은 세포독성의 나노조영제 소재를 활용한 세포 표지 효율 극대화 기술</li> <li>- 세포 내 대사 환경에서 치료 활성의 저하 없이 장시간 관찰이 가능한 영상신호 안정화 기술</li> </ul>
암 조직 침투능 향상 및 영상 유도 정밀 수술을 위한 나노조영제 기술	정의	○ 암조직 내부의 조밀한 영역 및 혈관으로부터 유리된 저산소 영역의 약물 반응 또는 질환상태 관련 영상정보를 얻기 위한 나노조영제의 암 조직 침투 효율을 극대화하고, 질환조직 경계면을 정확하게 영상화하여 최소침습적인 정밀 수술을 가능하게 하는 나노조영제 기반 영상화 기술

나노기술명	개요	
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 암세포/기질세포/세포외기질 등으로 구성된 조밀한 암조직의 생물학적/기능적 장벽 극복/회피 기술</li> <li>- 고효율 질환표적 및 체내 장벽 극복을 위한 나노조영제 표적기술</li> <li>- 질환 세포/조직의 표현형/미세환경에 감응하여 영상 신호를 발생하는 나노바이오 기술</li> </ul>
동물질환모델 기반 신약 스크리닝을 위한 실시간 분자영상 나노조영제 기술	정의	○ 질환동물모델을 활용한 생체 분자영상을 통해 약물 선도/후보물질 등의 유효성, 독성을 in vivo 상에서 실시간으로 빠르게 스크리닝하는 나노조영제 기반 신약개발 가속화 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 질환 표적성 및 질환 감응 영상신호 발생 효율이 높은 분자영상 나노조영제 기술</li> <li>- 인간 질환의 표현형이 정확하게 반영된 실험동물모델 구축 및 in vivo 영상 분석 기술</li> </ul>

## 나. 체외진단

### 1) 개요

- (정의) 사람이나 동물로부터 유래하는 검체를 체외에서 모니터링과 검사하기 위해 사용되는 시약, 대조·보정 물질, 기구·기계·장치, 소프트웨어 등에 적용 가능한 나노바이오 기술
- (필요성) 지구 환경의 변화에 따른 신·변종 감염병 확산과 저출산·고령화에 따른 의료비 부담 증가로 치료 중심의 의학에서 스마트기기 확산과 나노기술의 발전으로 질병 및 질환의 예방, 관리, 모니터링으로의 의료 패러다임이 변화 중이며, 지속적인 디지털 헬스케어 산업성장으로 나노기술이 융합된 신개념 체외진단 기술 및 관련 제품의 수요 증가에 따라 필수적인 기술
- (발전 전망) 체외분자·면역진단은 신종 감염병의 지속적인 발생과 등 미래사회문제 해결을 위해 ICT 기술과 융합되어 검사시약, 진단장비, 진단소프트웨어 등의 성능 향상(정량측정, 정확도)과 맞춤형 치료 연계된 의료기기로 진화
  - 인구 고령화와 만성질환자의 증가에 따라 단일성 진단과 치료에서 질병 및 질환의 예방, 진단 및 모니터링을 위한 다회성 측정이 가능한 체외진단 기술로 글로벌 헬스케어 패러다임이 변화
  - 나노기술 기반으로 정확도가 향상된 디지털 분자진단 기술과 차세대 염기서열분석기를 이용한 신종 감염병 진단의 정확도 향상과 반도체 및 나노기술간 융합으로 소형화되고 정확도가 개선된 현장 면역진단기기 개발이 진행되고 있으며, 의사의 판독 편차 감소를 위한 AI 기반의 디지털 병리진단 기술개발과 이의 의료현장 및 생활밀착형 제품 적용으로 발전
  - IT, BT, NT 등과의 융합으로 비침습적 방식으로 단일·다중 질병 진단의 신속성과 정확성 향상 및 진단의 자동화가 가능한 시약, 센서, 기기의 개발로 지속적인 비의료·의료 big data 구축과 이를 AI를 통한 분석으로 신개념 나노바이오기술로 발전할 것으로 예상
  - 인체에서 발생하는 다양한 물리화학적 신호인 호흡, 심박수, 근전도, 피부 산도, 압력, 체온, 이온농도 등의 측정이 가능한 다양한 형태의 웨어러블 센서 개발과 이로부터 발생하는 다양한 디지털 데이터를 기반으로 다중생체마커의 상관관계를 인공지능을 이용하여 분석하고 이를 통한 디지털 헬스케어로 구현하는 기술이 발전

### 2) 미래핵심기술이슈 : 고재현성/신뢰성 나노 체외진단기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
극소량 바이오마커의 고재현성 신호 측정 및 분석의 한계	- 지속적인 나노기술의 발전으로 체내에 존재하는 극소량의 바이오마커의 검출 기초원천기술은 개발되었으나, 기술 사업화에 필요한 신호 증폭, 분석, 노이즈 제거 등의 나노기술 필요 - 극소량의 바이오마커 검출(~ pico mole) 수준을 위해 전기·화학·광학 신호 증폭을 위한 나노소재와 나노구조체, 센서 및 소자 개발이 시급

기술난제	개요
체외진단 신뢰성 확보를 위한 표준물질 정립의 한계	- 복잡한 IRB 허가 및 검체 확보의 한계로 연구 개발된 나노기술의 검증 필요 - 이를 극복하기 위해 인체유래 검체와 유사한 물리·화학적 특성을 가지며 성능 평가에 적합한 인공 표준 물질 개발이 시급
나노소재 및 센서의 양산 한계	- 분자·면역진단 등 체외진단 분야에서는 인체유래 물질 내 존재하는 바이오마커의 정량 분석을 위해 사용되는 나노소재 및 센서의 상업화 수준의 재현성(CV 5%이내) 확보가 필수적이거나, 현재 이를 만족하는 양산 기술 확보가 시급 - 실험실 수준의 생산, 재현성, 신뢰성은 확보되었으나, 기술사업화 수준의 제조와 품질 관리가 가능한 대량제조 나노기술은 부재

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
고선택적 생체신호 검출 나노기술	정의 ○ 바이오 유해물질 (바이러스, 미생물)과 질병 (종양, 치매 등) 진단에 요구되는 생체신호 검출을 위한 고재현성 및 신뢰성을 가지는 나노소재와 소자 및 센싱 기술
	요소 기술 - 특정 염기서열 및 항체/항원 제어 및 바이오마커/바이오 유해물질의 특이적 인지를 위한 나노소재 기술 - 나노소재·구조체 기반 신호 증폭 및 극소량 물질 검출 기술- 나노바이오 소재 및 소자 신뢰성 및 검출 재현성 기술
체외진단용 나노표준물질 기술	정의 ○ 체외진단에 사용되는 나노소재 및 소자의 성능평가 및 실증에 요구되는 기준에 부합되는 나노표준 물질 기술
	요소 기술 - 인체유래 검체 및 장치의 물리화학적 특성이 표준영역에 적합한 인공 나노소재 및 소자 기술 - 나노소재 및 소자의 성능평가 및 실증화를 위한 신호 재현성/신뢰성 기술 - 표준 임상시료 기반 나노바이오 센서 및 소자 평가기술
나노바이오 소재·센서 양산 공정 기술	정의 ○ 다양한 바이오마커의 디지털 신호 검출을 위해 사용되는 나노소재과 나노구조와 센서·칩의 저가 대량 양산을 위해 필요한 나노공정 기술
	요소 기술 - 기능성 나노소재 합성 기술 - 나노구조체(나노튜브, 나노시트, 나노선, 나노입자, 나노홀, 나노필라, 나노캡 등) 제작 및 자유곡면(평면, 구형, 곡면 등)의 표면에 구현 가능한 공정 기술 - 초소형화, 고집적화, 유연화, 대면적, 저가양산 나노공정 기술 - 양극산화 알루미늄 기반 초소형 멀티플렉스 센서시트 기술

## 3) 미래핵심기술이슈 : 개인 맞춤형 정밀의료를 위한 나노 진단기술

### ○ 기술난제

기술난제	개요
민감도 향상을 위한 선택적 바이오마커 분리/포집의 문제	- 체내외 존재하는 신규 바이오마커의 발굴이 지속적으로 진행되고 있으나, 소량의 바이오마커를 선택적으로 분리하는 나노기술 필요 - 체외진단 감도 향상을 위해 선택적 바이오 분리를 위한 나노구조체, 나노필터, 나노표면개질 및 다기능성 소재 및 공정 기술 개발 필요
인체 부착형 비침습형 체외진단의 한계	- 사람의 피부, 안구, 구강 등에서 배출되는 바이오마커의 비침습적 분석의 필요성이 증대되고 있으나, 비정형성 곡면에 부착하여 측정 가능한 기술 필요 - 이를 극복하기 위한 새로운 물리화학적 특성을 보유한 나노복합 소재, 구조, 소자, 센서 등의 개발이 시급

기술난제	개요
다중 생체신호 기반 복합질환 진단기술 부족	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 미래 체외진단은 지속적으로 발굴되는 신규 바이오마커 기반의 다중 인자의 측정이 요구되고 있으나, 현재는 단일 바이오마커 기반 나노바이오 센서를 사용으로 미래 대응에 한계</li> <li>- 복수의 물리적 신호(혈압, 체온, 심박 등)와 화학적 신호(바이오마커, 이온, 산도 등) 간 상보적 정보 분석을 통해 정밀의료 정보 제공이 가능하나, 이를 위한 나노기술이 부재</li> <li>- 복합 다중신호 측정·분석을 위한 나노소재 및 구조 설계, 제조 및 신호 측정 및 평가기술 개발 필요</li> </ul>
다기능성 체외진단을 위한 나노집적화의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 인체의 다양한 부위에서 배출되는 바이오마커의 비침습적 체외진단의 요구가 증대되고, 다중 마커의 동시 검출 및 데이터 관리 등 다양한 기능 요구 대응에 현재 나노기술의 적용 한계</li> <li>- 고정밀, 고재현성, 고신뢰성 및 다층형/고집적형 구조를 가지는 다기능성 체외진단 구현을 위한 소재, 소자, 공정 기술 및 장비의 개발이 시급</li> </ul>

### 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
민감도 향상용 바이오마커 분리/포집 나노기술	<p><b>정의</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 극소량의 바이오마커의 분자·면역 진단의 민감도 향상을 위해 샘플의 고순도, 고효율 전처리를 위한 나노기술</li> </ul> <p><b>요소 기술</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 유전자, 바이오마커 나노필터링 기술</li> <li>- 나노구조체를 이용한 생체물질 분리, 포집, 농축, 추출 기술</li> </ul>
인체 부착형 비침습형 체외진단용 나노기술	<p><b>정의</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 인체에 부착하여 땀, 구강, 눈물 등 에서 배출되는 다양한 바이오마커를 비침습적으로 검출하기 위해 필요한 나노복합 소재, 비정형성 나노구조 및 센싱 기술</li> </ul> <p><b>요소 기술</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 바이오마커 검출용 전도성, 신축성 나노소재 및 나노전극 기술</li> <li>- 자유곡면형 인체 부착용 나노구조 기술</li> <li>- 웨어러블용 나노복합 소재, 구조, 센서 및 디바이스 기술</li> <li>- 나노바이오 신호 신뢰성 및 검출 재현성 기술</li> </ul>
다중 질병 동시 진단 나노기술	<p><b>정의</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 다중 질병의 동시 진단을 위해 2종 이상의 상이한 바이오마커 검출을 위해 1가지 이상의 고해상도의 광학/전기/전기화학 등 다양한 디지털 신호의 측정이 가능하며, 질병의 상호 연계성 분석을 위한 나노기술</li> </ul> <p><b>요소 기술</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 다중 바이오마커의 분자/면역화학 검출 기법을 동시 이용한 나노진단 기술</li> <li>- 고집적 나노어레이를 이용한 정성/절대정량 센싱 기술</li> <li>- 다중 나노바이오 센서의 집적화 기반 디지털 신호 수집 및 데이터화 기술</li> <li>- 광학/전기/전기화학 등 복합 고정밀 다중 신호 검출 기술</li> </ul>
다기능성 체외진단용 나노집적화 기술	<p><b>정의</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 다기능성 (다중 측정, 데이터 관리, 물리화학적 안정성, 내구성, 소형화 등)을 가지는 미래 체외진단 기술 대응에 요구되는 나노집적화 기술</li> </ul> <p><b>요소 기술</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 센서 소형화 및 집적화 나노 공정 및 장비 기술</li> <li>- 나노리터 수준 유체 제어 및 극소량 인자 측정 기술</li> <li>- 다중 바이오마커 검출을 위한 멀티 나노전극/소재 기술</li> <li>- 나노소재·구조체 기반 신호 증폭 및 극소량 물질 검출용 집적화 기술</li> </ul>

#### 4) 미래핵심기술이슈 : 데이터 기반 질병X 대응 나노 체외진단기술

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
체외진단 빅데이터 확보를 위한 나노바이오 센서의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다양한 생체신호의 디지털 신호 측정 및 저장을 통해 빅데이터 구축 후 인공지능 연계 기술의 필요성은 높으나, 고정밀 정보 수집/저장이 가능한 디지털 나노바이오 센서 기술이 부재</li> <li>- 정밀 생체신호 측정은 달성하기 어려운 기술적 난제이며, 이를 극복하기 위해 신호의 측정, 디지털 정보 저장, 분석, 분리, 판독에 요구되는 첨단 나노소재, 나노구조체, 센서 기반의 나노기술 확보 필수</li> </ul>
효율적인 질병 검체 확보를 위한 나노기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 대부분의 신변종 감염병 방역을 위해서는 소량의 질병 검체를 효율적으로 포집한 후 보관, 이송이 필요하나 이를 위한 나노기술 부재</li> <li>- 극소량의 고감염성 바이러스, 박테리아의 효율적인 포집, 분리, 농축을 위한 나노기술 기반 신속 전처리 기술 개발 요구 증대</li> </ul>
감염병X 대응 현장 검출 기술 확보의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 미래 발생 가능한 신변종 감염병 신속대응을 위한 고감도 나노진단 기술이 제한적으로 구현되어 공백 기술 확보 필수</li> <li>- 과학방역을 위해 극소량의 감염병 인자(바이러스, 박테리아 등)를 나노구조체를 이용하여 포집하고, 이로부터 핵산의 추출 및 분리 후 측정의 일괄 과정을 위한 나노기술 부족</li> </ul>
원격 진단 적용을 위한 나노기술 편의성 확보의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 미래 신변종 감염병과 원격의료 대응을 위해 가정에서 나노진단 기술적용이 필요하나 편의성 확보의 어려움으로 제한적으로 사용</li> <li>- 코로나 19 이후 국내외 원격의료 활성화와 규제 완화에 따른 가정진단키트 보급이 확대되고 있으나, 나노기술의 편의성 확보의 어려움으로 기술 적용의 한계</li> </ul>
질병 X 대응 진단 바이오마커 스크리닝 기술 부족	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 해외로부터 유입되는 다양한 신변종 감염병과 미지의 질병X 대응을 위해 신규 바이오마커 발굴과 이에 맞는 나노바이오 나노바이오 진단기술 필요</li> <li>- 신변종 감염병 확산방지를 위한 다양한 바이오마커의 고민감성, 재현성, 신뢰성 확보를 위한 나노바이오 신기술 기반 진단기술 고도화 및 평가기술 부재</li> <li>- 인공지능 등 다양한 신기술과 기 개발된 나노바이오 센서간 연계를 통한 진단 기술의 고도화 나노기술 개발 필요</li> </ul>

#### 4-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
신변종 감염성 물질의 포집·분리·고농축 나노기술	정의	○ 신변종 감염성 물질의 효과적인 포집, 분리 및 고농축을 위한 나노전처리 플랫폼 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 의료현장 및 가정 사용 가능한 신속 나노 전처리 기술</li> <li>- 나노소재 및 구조를 가지며, 물리화학적 안정성이 높은 감염체 포집/분리 기술</li> <li>- 감염성 물질에 대한 특이적 결합 향상을 위한 항체, 압타머 등의 바이오소재 및 다기능성 나노박막 기반 고정화 기술</li> <li>- 2차 감염 방지를 위한 나노 항균/항바이러스 기술</li> </ul>
질병X 대응 의료 현장 검출 및 바이오마커 스크리닝 나노기술	정의	○ 신·변종 감염성 바이오 유해물질(바이러스, 미생물)을 현장에서 신속 정확하게 검출하고, 현재 미발굴된 바이오마커 발굴 및 이를 활용한 고신뢰성 질병X 나노진단 기술

나노기술명	개요
	<p>요소 기술</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 특정 염기서열 및 항체/항원 인식 및 제어를 위한 나노소재 (유저자 가위 등)</li> <li>- 바이오마커 및 바이오 유해물질의 특이적 인지 나노소재 기술</li> <li>- 유전자, 바이오마커 나노필터링 기술</li> <li>- 나노박막/구조/표면 기능화 제어를 이용한 유해물질/바이오마커 현장 전처리 나노기술</li> <li>- 바이오 유해물질을 나노소재·구조체를 이용한 신호 신속 증폭 및 현장 진단 기술</li> <li>- 바이오마커 스크리닝을 위한 나노소재 및 나노소자 기술</li> <li>- 초고속 디지털 나노바이오 스크리닝 기술</li> </ul>





## 4-2. 나노치료

### 가. 질병예방 및 표적치료

#### 1) 개요

- (정의) 인체에 주입된 나노물질의 특성을 활용하여 특정 질병을 예방, 치료하는 기술로서 나노/바이오 기술을 융합하여 질환 관련 생체 조직/세포에 대한 약물의 집적도를 높임으로써 유효성과 안전성을 극대화하는 표적지향의 지능형 약물전달 및 치료 시스템
- (필요성) 현재의 나노치료제 기술은 주로 EPR(enhanced permeability and retention) 효과를 활용하여 질환부위의 편제화를 유도하고 있으나 지극히 낮은 타겟도달률에 대한 기술적 한계 존재(\*Nature Reviews Materials 2016;1:1-12). 또한, 최근 EPR효과가 수동적 현상이라는 기존의 해석 역시 존재(\*Nature Materials 2020;19:566-575). 이러한 기술적 한계를 극복하고자 최근의 연구 방향은 표적지향형 나노치료제의 개발과 혈액에서의 나노입자와 단백질의 상호작용, 질환부위 조직으로의 투과도, 세포내 전달, 약물의 조절 유출, 그리고 EPR 효과를 규명함으로써 이를 예측하고 증진시키는 방법 개발 등의 이슈가 대두. 향후 나노치료제 시장을 선도하기 위해서는 이러한 기술 한계를 빠르게 극복하는 것이 필요
- (발전 전망) 나노표적전달 기술은 질병을 예방하거나 선제적으로 치료할 수 있는 나노백신과 질환부위에 특이적으로 도달하여 치료용 약물을 방출하는 표적지향형 약물전달시스템, EPR 효과 증진 나노치료시스템, 조직 투과도 향상 나노구조체로 구성되어 발전될 전망
  - 표적지향형 나노백신: COVID-19와 같은 감염성 질환의 예방을 목적으로 mRNA/단백질 항원에 대한 나노전달시스템으로 개발되어 임상에서 활용되었으며, 향후 암, 노화 관련 퇴행성질환 등을 면역제어로 치료하는 나노백신 면역치료제로 발전할 가능성 존재. 이와 함께 특정세포를 타겟으로 하여 전달약물의 체내농도를 낮추어 독성을 낮춘 표적지향형 나노백신으로 발전할 것으로 전망
  - 표적지향형 진단치료병합 나노시스템: 환자 개인의 질환 특성에 맞추어 질환을 표적하고, 치료할 수 있는 개인맞춤형 약물탑재 나노시스템으로서 질환부위를 제외한 정상조직으로의 분포를 최소화하여 안전성과 유효성을 높이고, 약물전달 효율 및 치료반응을 모니터링할 수 있는 기술
  - 새로운 나노구조체: 기존의 금속 나노입자, 단백질 나노입자, 지질나노입자, 고분자 나노입자 등에서 벗어나 인체에 활용할 수 있는 안전성이 확보되고, 약물 탑재 및 치료적용이 가능한 신규 나노구조체가 개발되고 있으며, 대표적인 예로 DNA 오리가미, 엑소솜, 엑소솜 모사체 등 생체유래 나노물질 또는 생체물질로 제조된 나노구조체 등이 존재
  - EPR 효과 증진 나노치료시스템: 체내 영상 또는 조직을 이용한 공간 다중오믹스를 이용하

여 EPR 효과의 메커니즘을 규명함으로써 이를 예측하고 증진시키는 기술이 적용된 나노 치료 시스템

- 조직 투과도 향상 나노구조체: 조직 내 세포외 기질 등에 의하여 제한되는 약물의 조직 투과도를 증진시킬 수 있는 세포 외 기질 용해 또는 움직임 능력이 탑재된 나노구조체

## 2) 미래핵심기술이슈 : 표적지향형 나노구조체

### ○ 기술난제

기술난제	개요
나노전달체의 질환 부위로의 도달률 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 현재의 비표적 나노전달체는 체내 표적으로의 전달율이 평균 0.7% 이하로 낮으며(Nature Review 2016;1:1-12), 이로 인해 다양한 부작용을 유발할 가능성 존재</li> <li>- 따라서 표적형 나노물질을 활용하여 체내에서 질환부위로의 도달율을 높이고, 이에 따라 치료효과를 높이는 기술이 필수</li> </ul>
나노물질과 체내시스템의 상호작용 조절의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노물질과 혈액/체액의 단백질과의 상호작용을 최적화하여 혈액 내의 머무름 최적화가 목표</li> </ul>
나노물질의 장기간 체내 잔류 문제	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노물질의 체내 사용 시 체내 잔류 문제로 미국 식약처 등에서는 나노물질의 장기독성 평가 필요</li> <li>- 나노물질의 표면변환을 통해 체외 배설을 가속화하는 기술 필요</li> </ul>

### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
질환부위 고집적 표적지향형 나노구조체 기술	<p>정의</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 나노구조체의 형태 자체 또는 나노구조체 표면에 타겟물질을 탑재하여 질환조직세포 표면의 단백질이 인지할 수 있도록 하는 표적지향형 나노구조체 기술</li> </ul>
	<p>요소 기술</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노구조체 표면 변환 기술</li> <li>- 나노구조체 크기, 크기분포 조절 기술</li> <li>- 나노구조체 대량합성 기술</li> <li>- 나노구조체의 질환타겟 표적 기술</li> <li>- 나노구조체의 세포 이입 최적화 기술</li> <li>- 나노구조체의 조직 내 투과도를 향상시키는 기술</li> </ul>
체내 반감기를 조절할 수 있는 나노구조체 기술	<p>정의</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 나노구조체의 질환타겟능을 높이기 위해 나노물질과 체내혈액/체액과의 상호작용을 억제하고, 질환부위로 전달되지 않은 나노물질을 빠르게 체외로 배출하여 안전성을 높이는 기술</li> </ul>
	<p>요소 기술</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노구조체 친수화 기술</li> <li>- 나노구조체 표면 변환 기술</li> <li>- 나노구조체 체외 배출 기술</li> </ul>
최적의 약력학 확보를 위한 약물이입/배출 나노구조체 기술	<p>정의</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 질환부위에 도달한 나노구조체에 이입된 다양한 약물(RNA, 펩타이드, 단백질, 저분자약물 등)의 질환조직 내 배출을 조절하여 질환을 치료하는 기술</li> </ul>
	<p>요소 기술</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노구조체에 약물을 이입하는 기술</li> <li>- 나노구조체의 약물조절배출 기술</li> </ul>

### 3) 미래핵심기술이슈 : 나노테라노스틱스

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
진단신호 정량화를 바탕으로 한 치료효과 예측의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 외부에서 검출이 가능한 다양한 영상화 신호 중 정량화가 가능하여 약동학(PK)적 정보를 활용한 약력학(PD) 정보를 도출할 수 있는 기술 부족</li> <li>- 다양한 영상신호 중 정량화가 가능한 영상신호를 활용하여 나노구조체의 분포를 실시간으로 평가하고, 이를 활용한 PK/PD 정보를 도출할 수 있는 기술 필요</li> </ul>
나노전달체의 효능이 나타나는 농도가 너무 높은 문제	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노물질의 외부진단기기에 대한 검출효율 문제와 질환부위 도달율 등의 문제로 약효를 나타내는 나노물질의 농도가 너무 높고, 이에 따라 독성문제를 야기할 가능성 존재</li> </ul>
나노전달체의 균일 친수화 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다양한 나노입자가 진단/치료 효능을 동물실험으로 입증하여 임상시험을 수행하지만 다양한 문제점이 발생하여 효능 검증에 실패</li> <li>- 다양한 원인이 지적되고 있지만, 가장 큰 문제는 나노물질의 균일한 대량합성이 수월하지 않아 다양한 크기의 나노물질을 활용한 임상시험이 균일한 결과를 기대하기 어려운 문제</li> </ul>

#### 3-2) 나노기술(주제) 표적지향형 나노전달체

나노기술명	개요	
정량적 진단신호를 발생하는 나노구조체 기술	정의	○ MRI, CT, PET, SPECT, Optical 등의 신호 발생이 가능한 나노구조체 자체 또는 형광, 방사성동위원소 등이 붙어 외부에서 검출이 가능한 나노조영제 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 영상화가 가능한 나노구조체 코어합성 기술</li> <li>- 나노구조체 표면 변환 기술</li> <li>- 나노구조체 크기, 크기분포 조절 기술</li> <li>- 나노구조체 대량합성 기술</li> <li>- 나노구조체 표면 표지 기술</li> <li>- 나노구조체의 체내안정성 확보 기술</li> <li>- 영상 정량화 기술</li> </ul>
약동학/약력학 최적화 나노전달체 기술	정의	○ 질환부위로의 도달률 극대화, 정상조직에서의 배출 가속화, 약물 배출의 최적화를 통해 나노전달체의 효능을 극대화하는 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노구조체 약물 이입 최적화 기술</li> <li>- 표적지향을 통한 질환부위로의 도달률 극대화 기술</li> <li>- 정상조직에서의 배출을 가속화하는 기술</li> <li>- 나노구조체의 약물조절배출 기술</li> </ul>
외부에너지와 최적의 상호작용이 가능한 나노구조체 이용 치료기술	정의	○ 질환부위에 도달한 나노구조체에 외부에너지(자기장, 방사선, 빛, 초음파 등)를 가하여 약물의 배출을 유도하거나 열 또는 활성산소를 발생시켜 질환을 치료하는 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 외부에너지와 상호작용을 일으킬 수 있는 나노구조체 합성 기술</li> <li>- 외부에너지와 상호작용에 의한 나노구조체의 약물조절배출 기술</li> </ul>

#### 4) 미래핵심기술이슈 : 생체 유래 나노구조체 (엑소솜과 엑소솜 모사체)

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
지질기반 나노입자 조직 표적능의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 현재 개발되고 있는 LNP 기반 치료제의 경우 생체 내에 투여할 경우 대부분이 간, 비장 및 신장 등에 축적되어 담즙 배출, 신장 여과 및 세망내피계 시스템에 의해 체내에서 제거되어 병원 부위로의 전달 효율이 낮은 문제</li> <li>- 자연 분비되는 엑소솜은 표면 막단백질을 기반으로 체내에서 조직 특이성을 보이지만, 정맥투여시 특정 조직에 대한 표적능에 한계가 있어 표적능 향상 기술 도입 필요</li> </ul>
엑소솜 생산성의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 자연적으로 분비되는 엑소솜의 특성상 극소량이 분비되기 때문에(중간엽 줄기세포 기준 하루동안 106개의 세포에서 1~4<math>\mu</math>g이 분비) 엑소솜을 재생의료 치료제로 쓰기에는 생산 및 공급 차원에서 한계</li> <li>- 이에 따라 엑소솜의 생산성을 극대화시킬 수 있는 새로운 생산 공정 및 정제 기술 개발 필요</li> </ul>
엑소솜 표적능 향상 및 약물 탑재 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 엑소솜 표적능 향상을 위해 시행되는 유전자 도입은 효율, 유전자 변형의 불확실성, 그리고 비용과 시간 등의 측면에서 한계</li> <li>- 기존의 약물 탑재 기술 (electroporation, sonication, freeze and thaw)의 방법으로는 소포체 내 약물의 봉입 효율이 매우 낮은 문제</li> </ul>

#### 4-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
엑소솜 기반 나노치료제 기술	정의	○ 기존 세포치료제의 한계점 극복을 위해 엑소솜 또는 엑소솜 모사체의 질환 표적능 향상, 약물 탑재 등 조직 재생 치료제 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 엑소솜 및 생체유체 세포막 스크리닝/대량 배양 기술</li> <li>- 엑소솜 또는 엑소솜 모사체 분리정제/균질화/대량생산/질한타겟 표적기술</li> <li>- 엑소솜과 엑소솜 모사체 분리 이전(endogenous) 및 이후(exogenous) 약물 봉입 기술</li> <li>- 엑소솜 또는 엑소솜 모사체와 약물의 병용 치료 기술</li> </ul>

#### 5) 미래핵심기술이슈 : 뇌 자극 및 신호 측정용 차세대 나노 인터페이스

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
침습형 뇌 자극 기술의 정밀도 및 안전성 문제	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 현재의 침습적 뇌 자극 기술의 경우 의료적으로 응용하기에 넘어야 할 점이 많을 뿐만 아니라, 뇌 관련 실험을 수행시에도 뇌 조직의 변형, 동물의 행동형태 변경 등 다양한 단점을 부여</li> <li>- 따라서 외부에서 몸을 통과할 수 있는 매개를 이용하면서도, 정밀하게 뇌 안에서 세포를 자극할 수 있도록 매개를 고효율로 전달하기 위한 나노입자 등 방법의 개발이 필요</li> </ul>
뇌신호 측정 및 뇌자극 기기의 수명의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기존 강성 물질로 이루어진 뇌 신호 측정 및 뇌 자극 기기의 경우 체내에서 상처 및 면역 반응을 일으키고, 해당 반응으로 인해 기기 주변에 절연층이 형성됨으로써 기기 수명의 극명한 한계</li> </ul>

기술난제	개요
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 따라서 강성이 낮으면서도 생체적합한 나노재료 기반 물질을 이용한 뇌 기기 개발 및 이를 제작하기 위한 공정 필요</li> <li>- 기존의 유연성 물질의 경우 전도성, 빛전달성, 유체전달성 및 기능성이 대폭 떨어져 기존 뇌 기기에 비해 낮은 성능을 가지는데, 낮은 강성을 가지는 폴리머, 하이드로젤, 전도성 나노물질의 경우, 공정의 한계로 복잡한 다기능성 고해상도 디바이스 제작이 어려우므로 이 부분에 대한 해결 필요</li> </ul>
단일 신경세포종 자극 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 퇴행성 뇌질환 및 정신질환 진단/치료, 뇌 현상에 대한 정밀 실험을 위해서는 신경세포의 종류에 따라 차별적으로 신호를 자극/측정할 수 있는 기술 필요</li> <li>- 현재 기술은 전기/자기적인 방법을 사용하고 있으므로 모두 전기반응성을 가지는 뇌의 입장에서 세포종 특이성 및 고해상도를 가지기 어려우므로 이를 해결하기 위한 방법 필요</li> <li>- 다매개를 이용한 세포특이적 뇌 자극을 위해서는 신경 세포를 정밀하게 타겟할 수 있는 나노스케일의 인터페이스 개발 기술 필요</li> </ul>
기술 개발 후 나노 신경 인터페이스의 실입상 적용의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 뇌진단 및 치료를 위한 인터페이스가 삽입되고 난 뒤에 입상에 실제적으로 쓰이기 위해서는, 생체 내에서 기능을 다하고 난 뒤 분해될 수 있는 형태의 기술 필요</li> <li>- 실제 입상에 쓰일 신경 인터페이스의 경우, 뇌/척수/말초신경 등 목표 신경 조직에 따라, 혹은 수술방법에 따라 (경피막 위/아래 부착형 수술, 기기 삽입형 수술, 말초신경을 덮는 수술 등) 형상 및 고정에 대한 문제에 대한 고려 필요</li> <li>- 따라서 상황에 따른 맞춤형 인터페이스 형상 변화 나노기술의 접목을 통한 해결방안 필요</li> </ul>

## 5-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
외부 매개 변환용 나노입자 주사를 통한 최소 침습형 정밀 뇌 자극 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>정의               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 비침습적으로 뇌에 신호를 강제적으로 유도하여 (자기장, 근적외선, 초음파 등) 뇌 현상에 대한 해석 및 뇌질환 치료를 가능하게 하는 나노입자 기반의 신경자극 기술</li> </ul> </li> <li>요소 기술               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 초정밀/비침습성 뇌 자극을 가능하게 하는 특정 종류 신경세포 타겟형 나노입자 기반 기술</li> <li>- 나노입자를 활용하기 위한 외부 시스템형 기반 기술 (MRI, 초음파 등) 개발 및 뇌 적용 기술 개발</li> </ul> </li> </ul>
초장기간 단일 신경세포 수준 자극 및 신경신호 측정을 위한 다기능 나노디바이스 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>정의               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 퇴행성 뇌질환, 정신질환의 진단/치료 및 뇌 동작원리 탐구를 위한, 단일 신경세포 수준의 자극 및 초장기간 신호측정을 가능하게 하는 나노소재 기반 유연성 다기능 나노디바이스 기술</li> </ul> </li> <li>요소 기술               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 고품질의 뇌 신호 획득을 위한 고전도성 나노물질 및 유연성 소재 (폴리머, 하이드로젤 등) 개발 기술</li> <li>- 삽입 시 뇌 조직 파괴 및 면역 반응을 최소화하여 신경 탐침의 수명을 대폭 늘릴 수 있는 나노재료 및 이를 기반으로 한 디바이스 제작 기술</li> <li>- 복합적인 뇌신경 정보를 얻기 위한 뇌자극, 뇌 신호 기록, 약물 및 바이러스 투입 등 다기능 요소가 첨가된 기기 개발 기술</li> <li>- 높은 공간적 해상도를 가지는 디바이스의 개발을 통해 단일 뉴런에서 발생하는 신호를 측정하거나 단일 세포를 자극할 수 있는 기술</li> <li>- 나노단위의 크기를 가짐으로써 뇌 심부의 물리적 손상 및 장기 면역 반응을 최소화할 수 있는 인터페이스 제작 기술</li> </ul> </li> </ul>

나노기술명	개요	
신경 신호측정을 위한 유전자변형기법 적용 나노인터페이스 기술	정의	○ 뇌 현상 정밀 파악을 위해 필수적인, 신경세포의 종류에 따라 차별적으로 신호를 자극/측정할 수 있는 유전자변형 기술을 적용하기 위한 나노인터페이스 시스템 개발 기술
	요소 기술	- 유전자변형을 통해 특정 세포종만의 신호를 개별적으로 발생시키는 기술 (광유전학 등) 및 이를 위한 나노인터페이싱 디바이스 개발 기술 - 특정 세포종 신호 측정 (칼슘 이미징 등)을 위한 기술 및 이를 동물 모델에 적용하기 위한 인터페이스 소자 및 디바이스 개발 기술
뇌/신경 인터페이스를 위한 나노소재 기술	정의	○ 뇌/신경 인터페이스를 위한 생분해성 물질 또는 구조 변환 및 임상 적용을 위한 형상기억 물질 개발 및 조절 기술
	요소 기술	- 생분해성 나노물질 자체를 이용하여 신경 인터페이스를 이루는 요소들 (전극, 기판, 절연막, 생체적합 코팅막 등)을 제작하고, 이를 결합하는 기술 - 타겟하는 뇌 신경 질환에 따라 생분해성 나노물질의 생분해 기간을 조절 및 생체적합성 기술 - 생체적합성 및 생분해성을 모두 보유한 형상기억 나노소재 개발에 대한 기술 - 수술 후유증이 적도록 좁은 공간으로 삽입되어 몸 속에서 널리 퍼질 수 있는 형상기억 나노소재 기반 인터페이스 기술 - 원하는 타겟 신경 부위에 따라 접히고 말리는 형태의 디바이스 개발 및 외부 매개를 통해 해당 구조를 변화시킬 수 있는 기술

## 나. 나노재생 및 재활

### 1) 개요

- (정의) 재생의학은 생체재료와 인체유래 줄기세포, 생체활성 (신호) 물질 등을 이용하여 손상된 신체 조직 및 장기를 재생시키는 연구. 나노재생의학은 기존 조직공학, 재생의학적 관점에 나노미터 수준의 지지체 구조 조절 및 형성, 세포 및 생체활성 물질의 배치 및 활용에 대해 심도있는 이해를 더 하여 추진. 재활의학은 질병 및 사고에 의해 발생한 만성적인 장애, 특히 활동상의 장애를 가진 환자로 하여금 정상적 기능에 가깝도록 회복할 수 있는 수단을 제공하는 분야. 나노기술이 접목된 나노 재활의학은 근골격계, 신경근육계의 회복 및 재활에 적용되어 고령화 사회에서 사회 구성원의 삶의 질을 향상시키는데 기여 가능
- (필요성) 출산율 저하, 평균수명 연장에 맞물려 가속화 되고 있는 인구의 고령화에 따른 다양한 재생, 재활의학적 수요가 발생. 나노재생 및 재활의학은 기존, 미래의 공여자 부족으로 인한 재생 목적 공여 조직의 공급 부족을 감당할 수 있는 중요한 미래기술이며, 신체의 기능이 저하되는 현상을 완화 및 극복하는데 기여 가능하여 필수적인 기술
- (발전 전망) 나노스케일에서의 구조 형성 및 변화 기술은 기존 이식재의 부작용감소, 재생의학적 치료제의 효과 극대화 및 고기능화를 위한 필수적인 기술. 불필요한 유착을 해소하는 세포가 붙지 않는 표면구조 형성, 나노소재를 통한 생물학적 신호의 복합적 제시, 고효율의 생착을 위한 세포의 침투 및 증식을 유도하는 나노환경 조성 등으로 기능화를 도모하는 기술적 개념이 제시되고 있으며, 나노재생 및 재활을 위해 적극적으로 도입될 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 이식재 부작용 완화 나노소재, 구조 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
체내 삽입형 이식재의 세포 흡착 및 피막형성 방지 기술의 부재	- 섬유성 피막 형성 등을 방지하는 기존 소재 및 코팅 기술의 독성, 지속성 문제와 나노소재, 구조 활용 기술이 제시되고 있으나 신뢰성 문제가 존재 - 이를 극복하기 위한 방오 효과 나노소재, 표면개질 기술 필요
체내 삽입형 이식재의 항균, 항염 효과 달성 기술의 부재	- 이식재와 체내 바이러스, 박테리아와 상호작용 중 발생하는 염증반응에 따른 이식 주변부 조직 및 이식재 기능 상실 현상 발생 - 이를 극복하는 항균, 항염 나노소재 기술 필요

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
방오 효과를 위한 나노소재 및 구조 기술	정의 ○ 방오 (anti-biofouling) 효과 달성을 위한 이식재의 표면 나노단위 구조, 성질 변화 기술

나노기술명	개요	
	요소 기술	- 생분해, 비분해성 이식재 표면상 방오 효과 달성을 위한 나노코팅 기술 - 이식재 표면상의 나노구조 조절을 이용한 친수, 소수성 표면 조절 및 구현 기술
항균·항염 효과를 위한 나노소재 및 구조 기술	정의	○ 항균, 항염 효과 구현을 위한 이식재 표면상 나노구조 형성 및 항균, 항염 물질 전달 기술
	요소 기술	- 나노소재를 이용한 항염, 항균 효과 구현 기술 - 나노구조 조절을 이용한 항염, 항균 효과 구현 기술

### 3) 미래핵심기술이슈 : 재생의학 치료효능 촉진 나노기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
인공혈액 성분 제조 기술 미확보	- 혈액 기능을 일부 대체 할 수 있는 나노소재 기반 인공 혈액, 혹은 산소 전달형 재료 도입 필요
이식 주변부로 부터의 혈관침투 제한에 따른 생착, 생존능 저하 문제	- 이식 주변부 조직과의 상호작용 시 혈관화 침투 유도 기술 한계 존재. 주변부로부터의 혈관화 촉진을 유도하는 나노기술 필요
치료용 인공 조직체 내부 산소공급 제한 및 혈관화 기술의 부재	- 내부 혈관 구조 부재에 의한 인공조직체 내부 세포의 대사문제 발생 및 치료 효능 기능 상실. 이를 해소하기 위한 나노기술 활용 인공혈관 형성 기술 필요

#### 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
혈관 모사형 나노구조체 형성 기술	정의	○ 인공조직체 내 물질 수송을 용이하게 하는 혈관 유사 구조체 형성과 나노막, 나노구조체를 통한 세포 거리 조절 및 혈관 침투 공간 확보 및 혈관 유도 물질 담지 및 방출 기술
	요소 기술	- 미세유체역학 장치 도입 등을 통한 혈관 모사체 형성 혹은 혈관화 유도 기술 - 나노제조기술을 이용한 3차원 지지체 내 나노, 마이크로 단위의 상호연결성 채널 형성 기술 - 3D 환경 내 혈관 구성 세포 패터닝, 도관 형성기술 - 전기적 결합, 리간드-수용체 상호작용 등을 이용한 자발적인, 혹은 광가교 등의 화학적 반응을 이용한 세포 표면 외막형성 및 나노구조체를 이용한 세포 간 거리 조절 기술 - 나노막, 나노구조체상 혈관 침투 유도인자 담지, 방출 기술
산소 전달형 나노소재 기술	정의	○ 세포 내, 외부 산소 전달이 가능한 나노소재를 목적부위 산소 공급 및 세포 생존 보장 기술
	요소 기술	- 세포 외부 산소 생성, 전달형 나노소재 기술 - 세포 내, 외부 산소전달을 위한 나노입자 형성, 수요응답형 전달 기술



#### 4) 미래핵심기술이슈 : 재생을 위한 인공조직체 기능 향상 나노기술

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
나노생체재료를 이용한 복합적 생체신호 제시 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노 생체재료 기반 물질 제시 기술은 1~2가지 물질의 일방형 물질 전달로 제한</li> <li>- 조직형성, 재생을 위한 다양한 물질의 복합적인 전달이 필요하며 다상, 수요 응답형의 방안 모색</li> </ul>
물리적 세포 외 나노환경 모사 한계 및 기능성 조절 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 세포의 표면 인지에 따른 기능성을 조절하기 위한 표면 나노구조 조절기술이 발전 중이지만, 표면 구조 조절 기술은 2차원적 기판에 주로 적용되고 있으며, 3차원 세포 지지체 구성 시 세포 접촉면에서의 나노 단위 구조 조절은 제한적</li> <li>- 3D 프린팅과 같은 적층제조기술을 활용한 나노단위의 무늬형성 포합 구조 조절 기술 필요</li> </ul>
나노생체재료를 이용한 전기적 신호전달, 제시 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 신경, 심장조직의 재생 및 재활을 위한 전도성 나노 생체재료를 활용한 인공 조직체 형성 기술</li> <li>- 전기전도성의 생분해성 나노 생체재료의 종류 및 적용 범위가 제한적(탄소 나노튜브, 그래핀, 금 나노입자)</li> <li>- 목표 조직과 유사한 전기전도도를 갖도록 조절하는 기술 부족</li> </ul>
자발적 형성에 의존한 기존 오가노이드의 기능성 발휘 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 현재의 오가노이드 형성 기술은 줄기세포의 자발적 구조형성에 의존하여 수행</li> <li>- 이는 계층적/복합적 구조를 가지고 있는 생체 조직과 동일한 체외 조직을 제작하는 것을 어렵게 하기 때문에 세포 및 기질의 나노구조 조절법의 개발 필요</li> </ul>
산소 및 영양분 공급 및 오가노이드 간 상호작용이 원활한 장기칩 소재 기술 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기존 장기칩은 낮은 세포독성, 우수한 투과율을 가진 polydimethylsiloxane (PDMS)를 주로 활용하여 형성하지만 재료 자체의 낮은 산소 투과율 및 영양분 공급, 오가노이드 간 상호작용에 제한</li> <li>- 나노공극, 고도화된 나노채널 도입 등의 나노기술 발전이 필요</li> </ul>

#### 4-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
복합적 생화학적 신호물질 전달용 나노소재, 구조체 기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 다상, 수요 응답형의 생화학적 물질 제시를 통한 세포의 기능성 향상 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 생분해성 나노입자 내 생물학적 물질 담지, 방출 조절 기술</li> <li>- 접촉, 비접촉 세포에 대한 물질 제시 및 세포 기능성 조절 기술</li> <li>- 생분해성 나노입자, 나노구조체의 표면상 생물학적 물질 결합 및 접촉 세포에 대한 표적전달 기술</li> <li>- 자극감응성 생분해성 나노 생체재료를 기반으로 한 다중 물질의 다상, 수요 응답형 물질 방출 기술</li> </ul>
기능성 세포 외 환경 조성을 위한 나노구조 기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 세포 접촉면의 나노단위의 형태적 무늬형성을 이용한 단일, 다수의 세포 기능성 조절기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 세포 배양 기판, 생체재료 상 나노단위 미세 구조 형성 기술</li> <li>- 3차원적 세포 미세환경의 나노단위 구조형성 기술</li> </ul>
전기신호 전달형 나노소재 기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 신경, 심장조직의 재생 및 재활을 위한 전도성 나노생체재료를 활용한 인공 조직체 형성 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전도성 및 생분해성, 혹은 나노크기에 의한 자연 제거가 가능한 나노소재 기술</li> <li>- 전도성 및 생분해성 나노소재를 활용한 등방성 무늬 형성, 배양 세포의 방향성 조절 기술</li> <li>- 나노소재 성질, 구조 제어를 통한 목표 전기전도, 방향성 달성 기술 [심장, 신경 전기전도도: 심장 = 0.005-0.16 S/m, 신경 = 0.08-1.3 S/m]</li> </ul>

나노기술명	개요	
생체모사 오가노이드 및 장기칩용 나노구조체 기술	정의	○ 전분화능 줄기세포와 나노소재를 접목한 오가노이드 형성과 다종 오가노이드 탑재 및 장기칩의 기능 고도화를 위한 나노구조체 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 목표 조직 모사형 계층적 구조 형성을 위한 나노구조 형성 기술</li> <li>- 목표 세포, 조직 특이적 물리/생화학적 신호, 세포 분화 물질 전달을 위한 나노소재, 구조체 기술</li> <li>- 채널 내부 산소, 영양품 공급, 대사물질 제거가 용이한 장기칩용 나노공극형 나노채널 형성 기술</li> <li>- 세포 분화를 위한 신호물질의 선택적 통과, 분리가 가능한 나노공극형 막 기술</li> <li>- 다종 오가노이드간 상호작용 지원을 위한 장기칩용 나노구조 형성 기술</li> <li>- 3차원 구조 나노복합소재를 이용한 오가노이드 배양 플랫폼 기술</li> </ul>



## 4-3. 나노바이오분석

### 가. 생체신호 계측 및 제어

#### 1) 개요

- (정의) 생체에서 생성되는 다양한 신호를 검출하여 그 양을 측정하고 생체분자를 정밀 제어하는 나노바이오 분석기술
- (필요성) 생체신호는 생체 기관의 특징적인 상태를 나타내는 지표로 건강 상태를 파악하고 모니터링에 활용할 수 있으므로 생체신호의 정밀 계측 기술이 필요. 질병 관련 생체물질은 대부분 극소량으로 정확한 측정을 위해서 나노 단위의 크기와 양을 측정할 수 있어야 하며, 생체분자의 이동/형태 변화 관찰 및 반응/분석을 수행하는 곳으로 정밀하게 이동시킬 수 있는 제어 기술이 필요
- (발전 전망) 생체신호 계측 기술은 단일 분자 개수를 직접 세어 그 양을 도출하는 디지털 정량 기술과 나노 수준의 고해상도로 생체분자의 활성 상태와 구조를 이미징하는 현미경 기술, 그리고 생체분자를 증폭하지 않고 무표지로 한 번에 여러 종을 검출할 수 있는 다중 검지 기술이 발전할 것으로 전망. 생체분자의 제어를 위한 분석 기기 시스템 개발 및 목적에 최적화된 나노스케일 구조체 및 구동기 제작 연구, 기개발된 기술의 응용분야 발굴 연구로 나누어 발전할 것으로 예상
  - 최근 디지털 PCR, 디지털 ELISA 등과 같은 생체분자 개수를 직접 셀 수 있어 정확한 양을 측정할 수 있는 디지털 기반 분석기술이 핵심 기술로 개발
  - 생체분자들을 이미지로 구현하는 이미징 기술은 조직에 분포하는 특이적 생체분자 정보를 얻어 질병 특이적 물질 발굴에 유리하기 때문에 질병 연구에 활용되는 비중이 높아질 전망이며, 여러 생체물질을 동시에 검출하는 다중 검지 방향으로 개발
  - 건강 모니터링 과정에서 측정되는 신호와 의료기관에서 질병 진단, 치료 과정에서 축적되는 생체 데이터를 인공지능 기반 데이터 처리로 진단/평가하는 방향으로 발전될 것으로 기대
  - 제어기술의 경우 기기 내에서 구동을 위한 다양한 비접촉식 구동 방법들이 개발될 예정이며, 예를 들어 자기장, 초음파, 광 등을 이용한 정밀 제어 연구가 더욱 확장될 것으로 예상
  - 이에 더불어 생체 분자의 이동 및 제어를 도와줄 구조체 제작 연구도 함께 진행될 것으로 예상. 기존에 사용되던 생체 내 리포솜, 엑소솜, 나노입자 등 물질 체계의 응용 분야뿐만 아니라, 인공 나노 구조체 제작을 위한 3차원 리소그래피 및 프린팅 기반 기술 등의 발전 전망
  - 기존에 사용되던 단순한 구동/제어 방식을 넘어선 인공지능 기반의 제어 기술의 발전 및 이어지는 고도화된 데이터 측정/해석 기술이 함께 포함될 것으로 예상

## 2) 미래핵심기술이슈 : 디지털 정량을 위한 단분자 다중 분석

### ○ 기술난제

기술난제	개요
표지자 없이 여러 개 단분자의 동시 검출의 한계	- 형광/분광/전기화학/면역 표지자 없이 한 번에 수십 ~ 수백 종류의 단분자를 검출할 수 있는 기술을 통해 복잡한 생체신호 간 관계성 이해 필요
고감도 다중 표지를 통한 극미량 분자의 고감도 검출의 한계	- 검출감도 향상을 위해 단분자에 단일 표지 및 다중 표지 화합물을 적용하여 광학/전기화학/질량분석 등의 방식으로 다중 분석이 가능한 기술로 극미량으로 존재하는 생체 분자 검출 필요
분자 정량 결과의 이미지화 한계	- 단분자를 직접 계수하고 그 양을 측정하여 광학/전기화학/질량분석 이미지로 구현함으로써 정량결과를 시각화하는 것과 나노스케일 해상도 필요

### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
단분자 동시 다중 검출 센싱 나노기술	정의 ○ 여러 개의 다양한 단분자를 동시에 검출 또는 해당 단분자를 선택적으로 추출하는 고감도 센싱 나노기술
	요소 기술 - 무표지 다중 검출 기술 (수십 ~ 수백 종) 및 다중 표지 결합 가능한 나노입자 및 나노구조체 기술 - 검출한계 (광학/전자기/질량) 향상을 위한 고감도 다중 표지 기술 - AI 기반 검출 신호 해석 및 다중 신호 구현 나노미터 고분해능 센싱 기술
디지털 생체신호 고분해능 나노기술	정의 ○ 생체신호를 측정하고 도출된 결과를 디지털화하여 이미지로 빠르게 구현할 수 있는 고속 현미경 기술
	요소 기술 - 나노입자 기반 고감도 이미지 신호 생성 기술 - 시료 탑재 나노구조체 고속 스캐닝 기술 - AI 기반 나노수준 이미지 분해능 향상 기술

## 3) 미래핵심기술이슈 : 나노바이오 복합 현미경

### ○ 기술난제

기술난제	개요
분석 중 생체시료의 활성 환경 유지의 한계	- 생체 내 활성 모사를 위해 분석 시료의 초기 액체 환경이 유지되어야 하며, 이를 위해 분석 중 건조로 인한 활성 변화가 없도록 미세 유체칩 등을 이용하여 용매를 일정하게 주입함으로써 활성 환경 유지 필요
연계 현미경 측정 시 나노미터 이하 정확도의 이미지 정합 한계	- 현미경 측정 연계 시, 기 획득한 이미지를 정확하게 기준에 맞춰 배치해야 하는데, 이미지 분해능을 고려하여 나노미터 수준으로 이미지 또는 시료 위치 마커를 맞추는 것이 필요

### 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
생체시료의 활성 유지를 위한 나노유체 조절 기술	정의 ○ Buffer와 같은 생화학 용액을 일정하게 주입하여 시료의 액상 상태를 유지할 수 있는 미세 유체 조절 장치 적용 시료 도입 시스템 기술

나노기술명	개요
요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노리터 볼륨의 미세 유체 조절 및 칩 공정 기술</li> <li>- 미세 유체 정밀 컨트롤을 위한 밀폐 및 펌프시스템 기술</li> <li>- 미세유체 칩 표면 개질화 기술</li> <li>- Si 기반 시료 용액 분포 파악 및 자동 주입 기술</li> </ul>

#### 4) 미래핵심기술이슈 : 단일 세포 멀티오믹스를 위한 나노바이오 기술

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
생체 시료에서 세포를 분리할 때 특정 세포로의 편중 없이 살아있는 단일 세포로 분리하는 문제	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 생체 조직에서 단일 세포 수준으로 분리하는 기존의 방법은 세포를 물리적 분쇄 또는 효소 반응으로 분리하는 방법으로, 특정 세포로의 편중이 있어 이를 극복할 수 있는 나노바이오기술 개발 필요</li> <li>- 나노입자 또는 나노구조체를 활용하여 세포의 살아있는 상태를 유지하면서 단일 세포를 조직과 같은 시료에서 분리할 수 있는 기술 개발 필요</li> </ul>
단일 세포에서 다양한 생체물질의 정밀 분리/센싱 과정에서 다세포 분석법 적용의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다세포 분석에 사용되는 마이크로 미세 피펫팅, 원심분리법, 마이크로웰 희석법 등의 생체물질 분리 추출 방법은 단일 세포에 적용하기에는 그 크기가 크다는 어려움이 있어, 단일 세포 수준에 적용할 수 있는 정밀 센싱 방법이 필요</li> <li>- 나노미터 크기까지 자유롭게 조절할 수 있는 나노입자, 나노구조체, 또는 나노바이오칩 기술을 적용하여 이에 생체물질별로 친화적인 작용기를 도입 해서 원하는 물질을 분리, 센싱하는 나노바이오기술 개발 필요</li> <li>- 각각의 생체물질 분리법은 대부분 수동으로 진행되어 실험자의 스킬이나 장비에 따라 그 수율이 다르다는 문제가 있으므로, 나노기술이 적용된 생체물질 분리법의 자동화 기술 필요</li> </ul>
단일 세포에서 추출한 DNA, RNA의 염기서열 분석의 신뢰성 및 정량성 부족	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 차세대 염기서열분석법 (NGS)은 서열정보를 제공하나 분석과정에서 발생하는 랜덤 에러 처리에 취약하고 정량성이 미흡하여 이를 극복할 수 있는 시퀀싱 정량 기술 필요</li> </ul>

#### 4-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
생체시료 내 세포 분리를 위한 나노구조체 기술	정의	○ 혈액 및 타액, 그리고 조직과 같은 생체 시료에서 세포를 선택적으로 분리할 수 있는 나노입자 기반 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 항체 결합 형광 및 코팅 자성 나노입자 기술</li> <li>- 세포 친화성 작용기 도입된 나노구조체 기술</li> <li>- 특정 세포 분리를 위한 세포 표적성 리간드 도입 나노입자 기술</li> <li>- 비특이적 결합을 줄이기 위한 나노입자 표면 개질 기술</li> <li>- 단일 세포 분리 자동화 가능 바이오칩 기술</li> </ul>
단일 세포 내 단백질 추출을 위한 나노기술	정의	○ 세포 내 단백질을 최대한 분리하고 추출하는 나노기술로, 특히 저농도의 질병 핵심 생체물질까지 포집 가능한 나노입자 또는 나노구조체 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 항체 결합 형광 및 코팅 자성 나노입자 기술</li> <li>- 압타머 탑재 나노입자 기술</li> <li>- 저농도 타겟 단백질용 고친화적/선택적 나노입자 및 표면 개질 기술</li> <li>- 단백질 분리/포집 바이오칩 제작 공정 기술</li> </ul>

나노기술명	개요	
이온화율 향상을 위한 나노구조체 및 나노입자 기술	정의	○ 여러 종의 대사체를 동시에 표지자 없이 검출 가능한 질량분석 기술을 활용하기 위해 낮은 이온화율을 극복할 수 있는 나노구조체 및 나노입자 기술
	요소 기술	- 나노입자 양성자 소스 코팅 기술 (양이온성 고분자, 실리카, 금속산화물) - 나노입자 표면 개질화를 통한 극성 조절 기술 - 대사체 포집 및 양성자 고효율 전달용 나노구조체 기술 - 이온화 효율 극대화를 위한 이종의 나노물질 복합화 기술 - 양성자 교환반응 시간섭 이온 생성을 억제하는 나노구조체 매트릭스 개발 기술
DNA/RNA 분자 sequencing 적용 나노포어 정량 기술	정의	○ 나노포어를 이용하여 유전체를 시퀀싱하고 기존 NGS의 낮은 정량성을 극복할 수 있는 정량 기술
	요소 기술	- 단백질, 무기 나노물질 기반 나노포어 제작 기술 - 나노포어 내 온도, pH, 속도 측정 및 조절 미세유체 기술 - 나노포어 통과 유전체 분자의 카운팅 기술 - AI 기반 전기신호 해석 및 정량 기술

### 5) 미래핵심기술이슈 : 다중, 고정밀 분석을 위한 생체분자 구동 및 제어 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
생체분자 탑재용 3차원 나노구조체의 정밀도/해상도/생체안정성/적합성 부족	- 생체분자의 구동 및 제어를 3차원 나노구조체 탑재 및 이동으로 해결하려는 움직임이 많아짐으로써, 복잡한 구조 및 역할을 가지면서도 높은 해상도 및 정밀도를 가지고, 생체 내/외 안정성 및 적합성을 모두 보유한 나노구조체 개발 필요 - 현재의 단순 형태 캐리어 기반 전달체(리포좀, 엑소좀 등) 및 마이크로로봇의 형태로는 해당 조건을 달성하기 어려우므로, 3차원 정밀 구동 제어 제작을 위한 재료적, 기계적 고민이 시급
생체분자 구동 및 제어 해상도의 한계	- 현재의 구동 및 제어기술은 초고감도 정량/정성 분석을 위한 단일 생체분자의 정밀도가 부족 - 단일 생체분자를 원하는 곳으로 이동시키고, 반응 및 변화를 실시간으로 관찰할 수 있도록 하는 기술 개발 필요
다중 생체분자 구동 및 제어 한계	- 현재의 단일 생체분자 구동 및 제어를 위주로 한 기술은 분석기술의 효율을 급격하게 떨어뜨릴 뿐만 아니라, 다중 분자에 의한 반응 및 변화를 관찰하는데 한계 - 대량의 시료를 한꺼번에 제어하는 기존의 방식이 아닌, 신소재 기반 캐리어를 이용하거나 고정밀 비접촉식 방식, 비선형적 제어 등을 이용하여 분석 기기 내 한 번에 여러 개의 생체 분자를 구동 및 제어 필요

#### 5-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
생체분자 탑재용 나노구조체 제작을 위한 3차원 구조 제작 제어 기술	정의	○ 분석기기 내 생체분자를 포함시켜 정밀 제어하기 위한 구조체의 형태 및 제작 방법에 대한 기술
	요소 기술	- 초정밀 나노구조체 구성을 위한 고안정성 재료 및 고해상도 제작이 가능한 재료 개발 기술 - 초고해상도 나노구조체 제작을 위한 신공정 기술 - 나노구조체 생체적합성 및 반응성 조절 기술

나노기술명	개요	
다매개 기반 고해상도 나노생체물질 구동 및 제어 기술	정의	○ 분석기기 내 생체물질을 높은 공간적/시간적 해상도로 구동 및 제어하기 위한 테크닉 및 장비에 대한 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 새로운 매개를 이용한 (빛, 자기장, 초음파 등) 생체물질 제어 기술</li> <li>- 생체물질 구동을 고분해능 및 고정확성을 지닌 채 수행하기 위한 다매개 기반 제어 기술</li> <li>- 분석 기기 내 쉽게 탑재 가능한 소형, 경제적 제어 방법 개발 기술</li> </ul>
나노생체분자 다중 분석을 위한 인공지능 기반 구동 및 제어 기술	정의	○ 분석기기 내 생체물질을 높은 공간적/시간적 해상도로 구동 및 제어하기 위한 테크닉 및 장비에 대한 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다중 생체분자 구동 및 제어를 위한 하드웨어 및 소프트웨어 기술</li> <li>- 인공지능 기반 고정밀 다중 생체물질 제어 및 분석 기술</li> </ul>



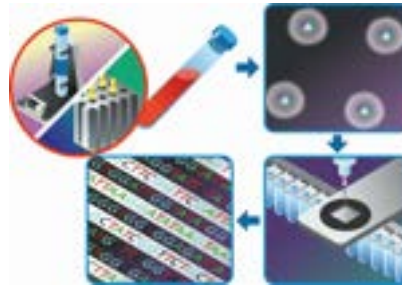
### 〈나노바이오 분석 로드맵〉

중분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술								
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
나노 바이오 분석	생체신호 계측 및 제어	다차원 정량 및 단일자 다중 분석	단일자 동시 다중 검출 센싱 나노기술	무표지 다중 검출 기술 및 다중 표지 검출 가능 나노기술		고감도 다중 표지 기술			차기 기반 신도 측정 및 분석 기술			
			다차원 생체신호 고분해능 나노기술	나노입자 기반 이미징 신호 생성 기술		4차원 생체 나노구조체 고속 스캐닝 기술			분해능 향상 차기 기술			
		나노바이오 칩 기반 원리형	생체신호 측정 위치를 위한 나노구조체 조립 기술	나노구조체를 위한 미세패터닝 및 집속 기술		유체 내 표적 물질 기술 및 원형 조립용 일체 및 합성 나노기술		미세패터닝 집속 기술		차기 기반 신호 측정 및 제어 및 자동 주입 기술		
		인공 세포 및 바이오인공기	생체 시뮬 내 세포 분석을 위한 나노구조체 기술	합성 세포/인공기 나노입자 기술		세포 표적형 나노입자 도입 나노입자 및 나노입자 표면 개질 기술			저용량 바이오칩 플랫폼 기술			
			인공 세포 내 단백질 추출을 위한 나노기술	합성 및 인공기 나노기술		고분해능/인공기 나노입자 및 표면 개질 기술			단백질 분리/고분해능 바이오칩 기반 기술			
			이온채널 활성을 위한 나노구조체 및 나노입자 기술	합성 세포 및 인공기 플랫폼 통합 구성 기술		합성 세포 고분해능 나노구조체 기술			나노입자 집속 및 제어 기술			
			DNA/RNA 분자 시퀀싱 적대 나노구조체 기반 기술	단백질, 무기 나노입자 나노입자 기술		분도, pH, 속도 감지 센서 및 유전자 분자의 계측 기술			차기 기반 정량 분석 및 측정 기술			
		다중, 고감도 분석을 위한 생체분자 구동 및 제어 기술	생체분자 집착을 나노구조체 제어를 위한 3차원 구조 제어 기술	나노구조체를 고분해능/고해상도 제어 기술		초고해상도 나노구조체를 인공형 기술			생체적합성 및 인공형 구조 기술			
			다체계 기반 고해상도 나노생체 물질 구동 및 제어 기술	새로운 제어를 이용한 고해상도 생체물질 제어 기술		고분해능 다체계 기반 제어 기술			생체적 제어 기술			
			나노생체분자 다중 분석을 위한 인공구조 기반 구동 및 제어 기술	다중 생체분자 구동 및 제어를 위한 마이크로 및 나노구조체 기술		인공구조 기반 다중 생체물질 제어 기술						

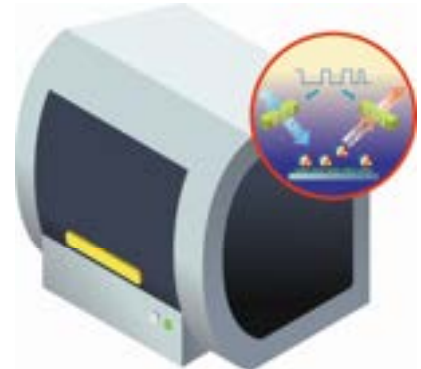
### 〈나노바이오 분석 대표제품〉



뇌 질환 및 정신 질환 진단을 위한 나노디바이스



단일세포 분리 자동화 플랫폼



나노생체분자 분석기

## 4-4. 나노융합라이프

### 가. 식품

#### 1) 개요

- (정의) 국민의 안전한 먹거리 제공을 위해 나노융합 기술을 적용한 위해요소 감지 시스템 개발과 친환경 및 식량난 극복을 위해 지속가능한 식품 제조 기술
- (필요성) 매년 조리도구 및 식재료로 인한 병원성 박테리아에 의한 감염으로 집단 식중독 및 식중독으로 인한 사망사례가 발생. 현장에서 식중독균 및 유해물질을 신속하고 정확하게 선별적으로 포집하고 감지하는 기술 개발이 필요
  - 나노융합 시스템의 개발은 식품의 신선도 측정뿐만 아니라 매년 발생하는 과수화상병으로 인한 감염병 및 가축 농장의 악취로 인한 농가의 피해를 사전에 예방할 수 있으며 나아가 농가의 소득증진을 도모 가능
  - 유엔은 2030년까지 기후변화, 인구 증가, 토양의 질 저하 등으로 인해 약 8억 4,000만 명이 식량부족에 시달릴 것으로 예상되므로, 지속가능한 농업 솔루션을 찾는 것이 필요. 나노와 인공지능 기술을 이용하여 정밀농업을 수행하여 식량을 증산하고 온실가스 배출을 감소 가능
- (발전 전망) 식중독 유해균 및 식품으로 부터의 유해물질을 판별하는 기술은 학교, 기업, 식당 등에서 사용되어 질 수 있으며, 사전 예방이 가능하여 대규모 감염의 위험 대비 가능. 식중독 및 유해물질 감지 시스템은 상용화를 위해 대량 생산 기술이 확립 되어져야하며, 현장에서 신속·정밀하게 사용할 수 있도록 성능 검증이 필요한 방향으로 발전될 전망
  - 나노융합 모니터링 시스템은 가축이나 과수농가 감염병에도 적용 되어 조기 방역을 위해 활용될 수 있으며, 또한 축산농가 및 산업시설에서 발생 된 복합악취를 실시간 모니터링함으로써 사회적 이슈 문제 해결이 가능할 것으로 전망
  - 토양을 비옥하는 나노비료를 제작하여 재배율을 높이거나, 나노물질의 첨가를 통해 식물의 성장률을 향상시킴으로써 미래 식량난 해결에 원천기술이 될 것으로 전망

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 기후변화로 인한 식량 위기 극복

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
농작물 성장물질/농약 고효율 흡수/전달 친환경 소재 개발의 한계	- 현재 화학농약의 사용을 지양하고 있어 친환경 농약의 개발이 대두. 이에 따라, 친환경적이고 최소량으로 최대 효과를 나타낼 수 있는 친환경 무생물학적 나노 소재에 대한 연구 필요 - 나노금속 물질을 농업바이오 신소재로 활용하는 연구가 최근 들어 시작되었으나, 안전성 및 식물에 미치는 영향 등 기초연구 및 실용화 연구 필요

기술난제	개요
기후 변화에 따른 농축산·식품 감염병 현장 조기 검출의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 과수원의 과수화상병 (2021년 기준, 618농가 피해) 과 가축농가의 조류인플루엔자, 아프리카돼지열병, 브루셀라병 등 (2022년 기준, 760 농가 피해)의 감염병은 조기 예방이 어려워 농가의 피해를 야기한 후에야 사후진단 진행</li> <li>- 우리나라의 식중독(살모넬라, 병원성대장균, 캠필로박터제주니 등) 발생사례는 2021년 기준 5,582건이며, 139,570명의 환자가 발생</li> <li>- 농축산 및 식품 감염병을 현장에서 조기진단하기 위해 발생 초기에 극미량·다종의 유해물질을 검출할 수 있는 신속·정밀·고감도의 나노 융합 센서 기술이 개발 부족</li> </ul>
GMO/LMO 식품 및 식자재 진위 판별의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- LMO (Living Modified Organisms)는 유전자 변형 생물체로 특정한 성질을 갖도록 DNA를 변형시킨 새로운 생명체를 의미 유전자 재조합 식물 GMO는 LMO가 생명력을 잃고 냉장, 냉동, 가공된 식품을 의미. 일반적으로 판매되는 GMO 식품의 표시대상은 콩, 옥수수, 사탕무 등이 주원료와 주원료를 가공하여 유전자 재조합 DNA나 외래 단백질이 남아있는 식품 중 원료 함량이 상위 5순위 이내인 식품도 GMO 표시 대상이나, 간장, 식용유, 과당, 주류, 식품 첨가물 등은 표시 대상이 아니기 때문에 자신도 모르게 GMO 식품에 노출 가능성 존재. GMO를 감별하기 위해서 GMO 진단키트로 단백질 항체 감별키트 및 유전자 분석 방식의 PCR 키트가 개발되어져 있으나 현장에서 사용 불가</li> <li>- 가짜 참기름, 가짜 식용유, 가짜 치즈, 가짜 고춧가루 등 가짜 식품은 허위표시 만연. 가짜 식품은 육안 구별이 어려우며, 탄소안정동위원소 분석, 수소 핵자기 공명 분석, 유전자 분석 방식을 사용하기 때문에 일반 소비자가 현장에서 사용 하는데 한계</li> <li>- 실시간·현장형 GMO/LMO 및 식자재의 진위 판별이 가능한 나노바이오 센서 개발 필요</li> </ul>

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
농작물 성장조절 나노소재 기술	정의	○ 농작물의 성장조절을 위해 유효성분의 전달 및 분해의 효율성 증대를 위한 비료 및 성장조절물질에 적용가능한 나노소재 개발 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 농작물의 수확률 극대화를 위해 나노융합 소재를 적용하여 영양 효과를 높인 비료 및 성장조절물질 개발 기술</li> <li>- 비료 및 성장조절물질의 효율적인 전달 및 흡수를 위한 나노전달체 및 나노캡슐화 기술</li> </ul>
농작물 병충해 구제를 위한 친환경 나노융합 소재 기술	정의	○ 농작물의 병해충 구제를 위한 친환경 나노융합 소재 기술 및 나노전달체 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 친환경적이고 병해충·병원균 제거 및 예방을 통해 식물의 성장을 증가 및 병원균 제거·예방 기능을 부여한 나노융합 소재 개발 기술</li> <li>- 농약에 함유된 유효성분의 조절 방출과 표적위치로의 효율적인 전달 및 흡수를 위한 나노제형 기술</li> </ul>
식품 내 바이오 유해물질의 분리·제거 나노기술	정의	○ 식품에 대한 유해물질의 오염 여부를 현장에서 신속하고 정밀하게 검출하기 위해 식품 내 바이오 유해물질의 분리 및 제거를 위한 나노 전처리 플랫폼 제조 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 선택적 유해물질 분리 및 고농축을 위한 항체표지 나노구조체 (나노입자, 나노 튜브, 나노캡 등) 제작 기술</li> <li>- 유해물질에 대한 특이적 결합도가 높은 항체, 압터머, 단백질 등의 바이오소재 고정화 기술</li> <li>- 현장에서 사용 가능한 신속 전처리 기술</li> <li>- 다종 유해물질에 대한 분리 및 제거 신속 기술</li> </ul>
농축산 및 식품	정의	○ 유통 되어지는 농작물에 잔류되어 있는 식물 매개 곤충 유해물질 (살충제, 살균제,

나노기술명	개요	
유통과정에서 유해물질 나노검지 기술		<p>제조제, 성장조절제) 등 농축산 현장이나 식품의 유통과정에서 발생하는 무증상, 극미량 유해물질을 현장에서 조기 검출하기 위한 나노바이오 검지 기술</p>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 400여 종의 식물 매개 곤충 유해물질의 다중 검지 기술 및 나노입자 프로브 개발 기술</li> <li>- 농축산물 맞춤형·특화형 나노바이오 센서 기술</li> <li>- 나노기술을 이용하여 극미량의 유해물질 신속 검사를 위한 소자의 민감도 고도화·집적화·소형화를 통한 현장 검지 기술</li> <li>- 시료전처리, 증폭/분리, 포집/농축, 검출 모듈을 하나의 모듈로 일체화 시킨 현장 진단을 위한 휴대용 나노바이오 검지 시스템 개발 기술</li> </ul>
식량의 장기간 보관을 위한 나노융합 소재 기술	정의	<p>○ 장기간의 식량 저장을 위해 항균 및 항바이러스가 가능한 식품 저장 물질 및 나노코팅 기술을 위한 나노융합 소재 기술</p>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 과일의 신선도 유지, 식품의 부패, 식수의 오염에 대한 위험을 낮추기 위한 친환경·나노융합 소재 개발 기술</li> <li>- 친환경 소재를 적용한 식품 포장재 항균코팅 기술: 나노항균 물질 개발, 코팅 공정 최적화, 항균력 및 안전성 평가</li> <li>- 식중독균 선택적 사멸기능 소재를 함유하는 포장 기술 : 박테리오파지 최적 활성조건 확립, 식품포장재 개발 및 살균 지속성 확보</li> </ul>
농수축산물 정밀 검역 및 GMO/LMO 감별용 나노기술	정의	<p>○ 농수축산물 정밀 검역을 위해 국내산·수입산 식자재의 성분 구별 및 GMO/LMO 식품 감별을 위한 다중 선별 및 극미량 검출이 가능한 나노바이오 검지 기술</p>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 국내산·수입산 식자재의 선택적 분별이 가능한 고효율 바이오 소재 개발 기술</li> <li>- GMO/LMO 식품의 특이적 바이오마커 검출을 위한 나노구조체 기반 초고속 신호증폭기술 및 유전자 나노바이오 검지 기술</li> <li>- 극미량의 GMO/LMO 식품의 특이적 바이오마커를 선별적으로 검출 가능한 고집적화 나노소자 개발 기술을 통한 나노바이오 검지 기술</li> </ul>
스마트팜 관리를 위한 오염물질 저감 나노소재 및 나노센서 네트워크 기술	정의	<p>○ 수확 후 농산물의 품질을 저해하고 안전을 위협하는 세균(총균, 대장균군, 식중독균), 곰팡이(총 곰팡이), 화학물질(곰팡이독소, 농약, 중금속)을 저감하기 위한 효과적인 세척기술을 개발하고, 제조·가공 환경의 교차오염원(식품 표면, 에어로졸, 조리도구, 바닥, 종사자 등)에 의해 전파되는 유해물질을 신속하게 제거 및 스크리닝 하는 나노바이오 클린 제어 기술</p>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 유해물질 스크리닝을 위한 식품 전처리 기술 및 센서어레이 기술: 수용체 발굴 및 개조, 고효율 분리/농축 기술 개발, 어레이 신호분석 체계 확보 기술</li> <li>- 플라즈마 살균수를 적용한 고효율 세척 시스템 기술: 살균수 이화학적 특성 분석 및 살균력 검증, 공정 최적화, 경제성 평가 기술</li> <li>- 식품 제조 환경에서 발생하는 교차오염 제거 기술: 신규 항균 소재 발굴, 나노 살균제 제형 개발, 처리방법 최적화, 안전성 평가 기술</li> </ul>

## 나. 화장품

### 1) 개요

- (정의) 나노소재 및 바이오 기술을 적용하여 피부보습, 미백, 주름개선, 자외선차단, 여드름 증상 개선, 피부장벽회복, 탈모방지 및 미세먼지 차단 등의 피부 보호를 위해 기능·품질·안전성을 강화한 제품을 지칭
- (필요성) 기존 화장품 첨가제를 친환경 나노소재로 대체 또는 첨가하여 기능과 안전성을 향상시키는 방식으로 개발 필요
  - 나노리포좀 등의 기능성 나노바이오 소재의 적용을 통해 자외선차단, 미백, 주름개선 등 화장품의 기능성이 현격히 강화되면서도 부작용이 없고 감성적이며 인체 친화적인 화장품 개발이 요구
  - 나노바이오 기술을 이용하여 화장품 소재의 신규 타겟 물질 및 천연소재를 발굴하고 안정적 확보를 위해 바이오 생산기술을 활용하여 화장품 원료의 가치를 높이는 소재 합성연구를 지속할 필요
  - 특정 국가 수입의존도가 높은 화장품 나노소재에 대한 원천기술확보를 통해 고부가가치 K-beauty의 글로벌 경쟁력 제고
  - 신규 사용금지 또는 소비자 기피(케모포비아)성분의 친환경 대체 나노바이오 소재 개발을 통한 국민보건에 도움을 주는 보건제품으로서의 가치 등 새로운 화장품 영역의 선점 필요
  - 빠른 대외적 환경변화 및 코로나19등으로 인해 중국시장에서의 급격한 매출감소에 따른 국내기업들의 피해증가. 화장품소재 및 기능성을 강조한 부가가치 높은 화장품개발을 통한 세계시장으로의 판로 확대 필요
- (발전 전망) 나노바이오화장품은 고령인구 증가, 웰빙에 대한 다양한 요구 증가, 개인 맞춤형 선호 등의 수요에 능동적으로 대응함을 통해 고부가가치 미래 화장품산업의 새로운 패러다임을 창출 기대
  - K-beauty 열풍으로 인해 화장품 분야는 헬스케어 영역에서도 고부가가치를 창출할 수 있는 분야이며, 의료분야와의 융합연구를 통해 산업 규모성장 기대
  - 개인 맞춤형 나노바이오 소재 합성기술과 나노리포좀 및 마이셀 등의 유효성분의 피부전달효율 극대화 기술간의 접목을 통해 K-뷰티의 신성장동력 강화

## 2) 미래핵심기술이슈 : 맞춤형 화장품 나노바이오소재

### ○ 기술난제

기술난제	개요
피부상태 진단 및 피부질환 세균 판별을 위한 피부진단 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 각 개인의 피부 상태에 대한 고민은 매우 다양하며, 생활환경에 따라 마스크로 인한 트러블, 건조함, 피부 붉어짐 등의 피부 문제</li> <li>- 개인의 피부상태를 신속하게 진단하고, 그에 따른 피부 솔루션을 제공할 수 있는 미래지향적 맞춤형 화장품 플랫폼 구축 요구</li> <li>- 현재 신속 피부진단기술로는 이미징 분석기술로 피부상태를 진단하고 수분 센서로 수분도를 측정하는 기술수준에 정체</li> <li>- 개인 피부 표면의 수분 및 산도를 신속 진단할 수 있는 휴대용 나노바이오 센서 개발 뿐만 아니라, 피부질환의 주요 원인이 되고있는 피부 세균들을 현장에서 판별할수 있는 나노구조체 기반의 고감도 바이오센서개발 필요</li> </ul>
맞춤형 화장품 제형을 위한 기능성 나노바이오소재 설계 및 합성 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 개인 피부 진단결과에 따라 맞춤형 화장품 제형을 위한 기능성 나노바이오소재 설계 및 합성 기술 필요</li> <li>- 현재 화장품 제형에 사용되는 주된 소재들은 천연물추출물 또는 미생물 기반의 발효공정을 이용한 소재들이 대부분 유통되어 사용</li> <li>- 각 개인의 피부상태 진단결과에 따라 피부 장벽 개선에 효과적인 기능성(항산화, 항염 및 항균) 나노바이오 재료들을 설계하고 신속하게 합성할 수 있는 나노바이오 합성기술 필요</li> </ul>
피부개선 유효성분들의 저조한 피부흡수율의 문제	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 개인의 피부 맞춤형 화장품이 개발되었더라도 피부의 표피 또는 진피에 도달할 수 있어야 하는데, 대부분의 화장품들은 피부 흡수율이 저조하며 기대한 피부개선 효과에 한계</li> <li>- 피부 유효성분을 우수한 경피투과율로 피부 세포속까지 전달할 수 있는 나노제형기술 또는 나노구조체기반 피부흡수 유도시스템 개발 필요</li> <li>- 피부 유효성분들을 고농도로 분산시킬 수 있는 나노제형기술(나노에멀전, 리포솜, 마이셀 등)과 무자극 피부흡수 유도시스템 개발 필요</li> </ul>

### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
맞춤형 화장품을 위한 피부상태 진단 디지털 나노센서 기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 다양한 생활환경, 기능성 유효성분 및 화장품에 따라서 피부 상태 및 타입을 현장에서 신속하게 진단하고, 디지털자료로 확보할 수 있는 휴대용 디지털 나노바이오 센서 및 클라우드 기반 디지털 나노바이오 뷰티 플랫폼 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 피부노화 및 질환을 유발하는 요인들(수분 및 산도)을 신속하게 진단할 수 있는 나노구조체 기반의 스마트 나노센서기술</li> <li>- 피부에 부착이 가능한 플렉서블 나노구조체 기반의 고감도 전기화학센서용 전극 제조기술</li> <li>- 피부의 pH 및 수분 등의 신속·정확 센싱 기술</li> <li>- 피부상태를 실시간으로 진단하고 이미징화 시킬 수 있는 전용 디지털 나노바이오 센서 및 이미징소자 개발 기술</li> <li>- 피부의 모공크기, 피부붉은반점, 및 피부변색 등을 휴대용 광학 이미징 기기(또는 휴대폰 카메라)의 어플리케이션으로 이미지를 실시간으로 분석 및 관리할 수 있는 나노센서 기반 플랫폼 기술</li> <li>- 휴대용 디지털 나노바이오 센서결과를 클라우드 데이터로 실시간 모니터링 및 디지털 자료화 기술</li> </ul>

나노기술명	개요	
피부질환 세균 판별용 휴대용 유전자 진단 나노바이오 기술	정의	○ 피부질환을 유발하는 세균들의 유전자를 신속하게 분석할 수 있는 휴대용 PCR기반 현장 검체 진단 나노바이오 기술
	요소 기술	- 피부질환을 유발하는 다양한 세균들을 포집하기 위한 나노어레이 기반의 세균포집기 개발 기술 - 미세유체 소자 및 나노어레이 기반 통합형 유전자 분석 시스템 제작 기술 - 통신모듈이 결합된 통합형 나노바이오 유전자분석 장비를 개발하여 피부 질환 세균의 신속진단 및 피부상태 진단결과를 실시간 소비자에게 제공할 수 있는 기술
다차원 구조제어를 통한 개인 맞춤형 기능성 펩타이드 화장품 나노소재 기술	정의	○ 소비자의 피부상태 진단결과에 따라 피부활성 및 피부장벽개선에 효과적인 기능성 펩타이드소재 설계 및 합성 기술 ○ 기능성 바이오소재의 다차원 구조제어를 통해 피부투과 및 다양한 기능성 효과를 극대화하고, 이를 이용한 고부가가치 피부개선 및 장벽강화 나노바이오소재 개발 기술
	요소 기술	- 피부상태 진단결과에 따라 기능성 펩타이드 화장품 나노소재를 신속하게 설계 및 합성할 수 있는 기술 - 많은 조합설계로 맞춤형 기능성 나노바이오 재료 합성 기술 - 다양한 기능성 펩타이드의 조합을 통해 2가지 이상의 피부개선(항산화, 항염, 주름개선 등) 효과 구현 기술
기능성 유효성분들의 효과적 피부전달을 위한 나노전달체 기술	정의	○ 기능성 유효성분들의 피부흡수율 향상을 위한 나노분산 안정화 및 나노제형, 나노니들 시스템 등 나노전달체 기술
	요소 기술	- 피부 유효성분들을 고농도로 분산 및 유효성분들의 피부흡수율을 최적화 하기 위한 나노제형기술 - 얼굴 및 피부에 각종 유효성분들을 효과적으로 주입할 수 있는 나노니들 피부자극 시스템 기술 - 피부에 붙이는 나노니들 패치를 통해 장시간 기능성 피부활성 성분들의 효과적인 피부투과 효율 향상 기술 - 피부재생 및 유효성분의 피부 진피층으로 전달을 위한 나노구조체 기반의 피부흡수 유도시스템 제작 기술

### 3) 미래핵심기술이슈 : 피부장벽 강화를 위한 나노제형 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
피부장벽강화 유효성분 스크리닝의 한계	- 피부장벽약화 및 붕괴의 주된 원인은 건조한 피부이며, 이는 가려움증의 원인. 또한, 세균감염으로 인한 피부염을 유발하며 민감성 피부로의 변화와 만성 아토피 질환으로 발전 가능 - 개인의 피부상태를 진단하고, 피부장벽강화에 도움이 되는 유효성분들을 이용한 코스메슈티컬 제품개발이 필요. 기존 천연물 추출물 중심의 유효성분에 국한하지 않고 합성생물학 기반 바이오소재, 기능성 펩타이드 및 세라마이드 기반 나노 융합 화장품 소재개발 필요
난용성 물질 탑재 효율 향상 및 안정성을 확보한 전달기술의 한계	- 피부염의 가장 중요한 원인 인자 중의 하나는 피부각질층(petmeability barrier)의 기능 이상에 의하여 발생. 손상된 피부장벽 기능으로 인해 자극성 물질 및 알레르겐이 침투하여 피부염 발생. 따라서 피부의 건조를 최소화하고 이를 회복하기 위한 보습 피부관리가 중요

기술난제	개요
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 피부보호막을 형성할 수 있는 세라마이드와 같은 지질기반의 유효성분을 고농도로 분산시킬 수 있는 제형기술 필요</li> <li>- 또한, 장기적으로 피부 보호막형성 및 유효성분들의 경피흡수율 향상을 위한 나노패치 기반의 피부장벽강화 기능성 화장품개발 필요</li> </ul>

### 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
피부장벽강화 유효성분 후보물질 고속 스크리닝 나노기술	정의	○ 피부장벽강화 및 개선효과에 대한 다양한 나노바이오 소재들의 빅데이터를 기반으로 기능성 유효성분들을 신속하게 스크리닝할 수 있는 나노플랫폼 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 개인의 피부진단 결과에 따라 피부장벽 강화 또는 개선에 효과적인 합성생물학 기반 바이오소재, 기능성 펩타이드 및 세라마이드 기반 기능성 나노바이오 소재 개발 기술</li> <li>- 피부장벽강화 및 개선에 대한 다양한 나노바이오 소재들의 빅데이터화 기술</li> <li>- 빅데이터기반 AI기술을 이용하여 개인 맞춤형 피부개선 유효성분 설계와 신속한 나노합성 기술</li> </ul>
난용성 물질 탑재 효율 향상 및 안정성을 확보한 나노전달체 기술	정의	○ 지질기반 피부장벽강화 유효성분들의 고농도 분산기술 및 경피흡수율 향상을 위한 나노전달체 개발 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수용액상에 지질기반 유효성분들의 고농도 분산 기술</li> <li>- 대표적 보습제인 세라마이드의 마이셀 또는 리포좀 나노전달체 개발 기술</li> <li>- 기능성 펩타이드와 세라마이드의 결합을 통한 경피흡수용 나노전달체 개발 기술</li> </ul>

### 4) 미래핵심기술이슈 : 디지털융합 나노바이오 뷰티

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
소비자 피부 상태의 디지털 자료화를 위한 전용 디바이스의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다양한 생활환경, 기능성 유효성분 및 화장품 제품군에 따른 소비자들의 피부 상태를 디지털자료로 확보할 수 있는 휴대용 나노바이오 센서 및 전용 디바이스 개발 기술 필요</li> <li>- 소비자들이 가정 및 직장 등의 생활환경에서 손쉽게 피부 상태를 측정할 수 있는 휴대용 디바이스와 이러한 결과들을 디지털로 축적할 수 있는 소프트웨어 개발 기술 필요</li> </ul>
디지털 개인 맞춤형 화장품 소재 선택의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 화장품 관련 기능성 나노바이오 소재 개발 및 매년 고가의 화장품 제품이 출시되고 있으나, 개인에 맞는 화장품 소재 및 제품들을 올바르게 선택해서 사용하는 데 한계</li> <li>- 소비자들의 피부 상태에 대한 디지털자료 확보도 부족하지만, 이러한 자료들을 기반으로 개인 맞춤형 화장품 추천 및 피부케어 AI 인공지능 플랫폼 기술도 부재</li> </ul>



### 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
AI 기반 디지털 피부케어를 위한 나노기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 피부상태에 대한 디지털 나노바이오 플랫폼 빅데이터를 기반으로 실시간 개인 피부상태 예측 관리 및 맞춤형 나노바이오 화장품 추천 등 피부케어 시 디지털 나노융합 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다양한 생활환경, 기능성 나노바이오 유효성분 및 화장품 제품군에 따른 소비자들의 피부상태에 대한 빅데이터 확보 및 나노 엑추에이터 기술</li> <li>- 빅데이터로부터 개인의 피부상태를 실시간으로 진단하고 solution을 제공할 수 있는 AI 알고리즘 기술</li> <li>- 빅데이터로부터 개인맞춤형 기능성 나노바이오 소재/제품 추천 및 피부케어를 위한 AI 인공지능 플랫폼 구축 기술</li> <li>- 개인 맞춤형 피부 상태를 미리 예측하고, 이에 따른 맞춤형 화장품 선별 및 인공지능 나노바이오 융합 피부관리 프로그램 개발 기술</li> </ul>
환경 유해인자 감응형 화장품 나노소재 기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 실내외의 생활환경에 따라서 소비자의 피부 보습, 자외선 차단, 및 활성산소 제거 등의 피부보호와 활성을 최적화 시켜줄 수 있는 스마트 감응형 화장품 나노소재 개발 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소비자들의 다양한 생활환경에 따라서 피부의 습도, 자외선 차단, 및 활성산소 제거를 능동적으로 제어할 수 있는 스마트 화장품 나노소재 개발 기술</li> <li>- 환경 유해인자 감응형 화장품 나노소재 설계 및 합성 기술</li> <li>- 스마트 화장품 나노소재의 나노제형기술을 통한 환경 유해인자로부터의 피부 보호 및 최적화 기술</li> </ul>

## 다. 생활용품

### 1) 개요

- (정의) 나노융합라이프 생활용품은 생활 주변 유해물질들의 위협으로부터 야기 가능한 위험을 최소화하기 위해 일반 국민들이 간편하게 사용할 수 있는 생활보호제품을 제조하기 위한 나노융합 소재 및 부품 원천기술을 지칭. 또한, 나노융합기술을 통한 고령자, 임산부, 청소년에게 용이한 디지털 헬스케어 기술을 개발하여 국민의 의료 서비스 및 의료 복지 증진에 기여
- (필요성) 국민들이 불편함을 겪고 있거나, 사회적 이슈(팬데믹 바이러스, 성폭력 마약, 살생물제 등)가 되고있는 문제들을 해결하기 위해 과학방역 및 디지털 헬스케어 기술의 개발이 반드시 필요
  - Covid-19 발생 이후 확진자와 사망자는 감소하는 추세이나, 2022년 8월 기준으로 전 세계 사망자는 640만 명을 넘었으며, 변이바이러스 및 원숭이두창 등 새로운 감염병들이 보고되고 있어 항균 및 항바이러스 효과를 가진 생활보호용품에 대한 중요성이 증가
  - 마약으로 인한 성범죄 및 가슴기 살균제 사고 등 화학물질로 인한 인명 피해가 증가. 이들 유해물질들은 무색, 무취의 화학물질인 경우가 많아 국민들이 쉽게 판별하기 힘들기 때문에, 현장에서 유해물질을 간단하게 판별할 수 있는 나노융합소재 및 소자 기반 생활보호용품이 필요
  - 고령자, 임산부 및 청소년에게서 발생하는 우울증 및 건강이상에 대한 객관적 지표 제시 및 자가진단을 위한 디지털 헬스케어 시스템 개발이 필요
- (발전 전망) 나노융합 기술을 활용한 항균작용 및 항바이러스 작용을 동시에 가능하게 하는 각종 나노융합 소재 및 소자들이 개발되었으며, 이를 통해 팬데믹으로부터 국민을 보호할 수 있는 제품들이 개발되어 현재는 고도화 연구를 진행. 또한, 유해물질로 인한 피해를 예방하기 위한 생활보호용품의 개발도 활발히 진행
  - 나노융합소재 기반 생활보호용품 개발을 위해 나노소재의 균일 분산 및 영구 결합 기술 개발, 항균 기능을 갖춘 나노 융합 섬유 소재 개발, 인체에 무해한 항균 원천소재 개발, 항균 접착 바이오물질을 이용한 기능성 항균섬유 개발 등의 원천기술 개발이 시급히 요구되어 발전될 전망
  - 현장에서 복합 살생물제 및 휘발성 바이오마커를 쉽게 검출할 수 있는 나노 융합 소재 및 소자가 개발된다면 미래 사회적 문제를 해결하는데 원천기술로 활용될 수 있을 것으로 전망
  - 의료 비용의 증가, 의료 서비스 수요 증가 및 전문인력 부족 등의 문제를 해결하기 위한 헬스케어 시스템 및 제품개발이 필요. 일상에서 사용가능한 자가 검진 및 원격진료를 위한 생체신호 측정기술이 요구되며, 육창방지를 위한 센서 기술과 원격 모니터링 기술 개발을 통해 국민의 의료 서비스 증진을 도모 가능

## 2) 미래핵심기술이슈 1 : 유해 환경대응을 위한 나노 기반 생활보호기술

### ○ 기술난제

기술난제	개요
생활 속 환경 유해물질 피해 예방 대책 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 대부분의 환경 유해물질은 극저농도의 양으로도 큰 악영향을 미칠 수 있어 극저농도에 대한 고감도, 고정밀 나노소재 기반 센서 기술 필요</li> <li>- 그러나 현존 센서 기술들은 실험실, 전문가용으로 제작되어 있어 일반인이 생활에서 접근하기 어려운 문제</li> <li>- 특히 유해물질로 인한 피해가 발생한 이후에 전문가 분석을 통해 유해물질의 유무 확인 필요</li> </ul>
환경 유해물질을 제거하는 기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 가습기 살균제, 독성가스, 휘발성 유기화합물 등의 사고사례에서도 확인할 수 있듯 밀폐된 공간에서 환경 유해물질에 노출되는 것은 극도로 위험</li> <li>- 그러나 자연적인 환기 이외에는 생활 속에서 위와 같은 환경 유해물질을 제거하는 방법 부재</li> </ul>
환경 유해물질을 차단하는 생활보호용품의 기능의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 생화학 위험에 직접적으로 노출되는 사람의 호흡기 및 피부를 보호할 수 있는 제품은 방독면, 방호복 등이 있으나 이는 실생활에 부적합</li> <li>- 항균 작용을 유지 시키면서 안정적으로 생활용품에 적용하는 방법은 현재 큰 장벽 기술</li> <li>- 피복 형태 혹은 인공피부 형태의 나노소재에 항균 기술을 적용시켜 생활용품에 적합한 제품화 필요</li> </ul>
실시간 항정신성 약물 육안 검출을 위한 나노소재의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 체내 마약은 일반적으로 혈액, 소변 검사를 통해 분석되지만, 특정 마약의 경우 체내에 유입된 이후 대사과정을 통해 소변이나 땀 등으로 배출되어 사후 검출에 한계</li> <li>- 마약 뿐만 아니라 수면제, 근육이완제, 마취제 등 다양한 항정신성 약물이 범죄에 악용되고 있으나 이를 실시간으로 검지할 수 있는 생활용품이 전무</li> </ul>
생활 속 극미세플라스틱 확인 기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 통상적인 미세플라스틱의 크기는 1<math>\mu</math>m~5mm 정도의 마이크로 단위로 필터를 통해서 간단히 제거 가능</li> <li>- 그러나 1<math>\mu</math>m 이하의 나노미터 크기인 극미세플라스틱은 대기 중에 존재하며, 호흡을 통해 생활 속에서 무방비하게 흡입의 문제</li> </ul>
생활용품에서 발생하는 환경호르몬의 문제	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 환경호르몬은 유기용제, 합성수지, 고분자화합물 등 인공화합물에서 발생하는 화학물질 중 체내에 유입되면 호르몬과 유사한 작용을 하는 독성물질 유발</li> <li>- 환경호르몬은 생체 내 수용체들과 결합한 뒤 신호전달 등의 다양한 과정에 교란을 일으켜 인체에 악영향</li> </ul>
밀집 공간 안전 확보에 대한 개인적 대응 방안 미흡	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 최근 발생한 밀집 공간에서의 사고사례를 통해서 알 수 있듯, 거대 인원의 유동에 의한 군중의 밀집 정도는 개인이 판단하기 매우 어려운 문제</li> <li>- 군중 밀집이 1제곱미터당 6명 이상의 경우 경고가 필요한 과밀로 취급하지만, 개인별 차이에 대한 객관적인 판단 지표가 필요</li> </ul>

### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
생활 속 환경 유해물질/환경호르몬 현장	<p>정의</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 생활 속 유해물질 또는 환경호르몬 (비스페놀a, 프란 등)을 실시간으로 현장에서 모니터링할 수 있는 생활용품에 적용 가능한 나노소재 및 분석 기술</li> </ul>

나노기술명	개요	
검출 및 제거용 나노기술	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 복합적인 환경 유해물질 검출이 가능 및 환경 유해물질 제거용 나노소재 제조 기술</li> <li>- 고민감도 나노소재를 생활보호용품에 적용하기 위한 고집적 적용 기술</li> <li>- 광학, 전기 센서 등을 이용한 환경 호르몬 현장형 고민감도 검출 기술</li> <li>- 실시간 모니터링이 가능한 나노측정기술</li> </ul>
생활보호용품에 적용 가능한 환경 유해물질 차단 나노융합소재 기술	정의	○ 유해물질로부터 능동적으로 자신을 보호할 수 있는 나노융합소재 기반 생활보호용품 개발 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 차단 기능을 갖춘 인공피부 나노융합 소재 제조 및 합성 기술</li> <li>- 나노융합 소재 기반 생활보호용품 제조 공정 기술</li> </ul>
실시간 항정신성 약물 육안 검출을 위한 나노소재 기술	정의	○ 마약 위험에서 간단하게 눈(비색, 광학 등)으로 확인이 가능한 나노융합 소재 기반 생활보호용품 개발 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 실시간 눈으로 판단 가능한 신규 화합물 개발 기술</li> <li>- 광학, 비색 등 눈으로 검사 결과를 확인 가능한 나노융합소재 고도화 기술</li> </ul>
극미세플라스틱을 확인할 수 있는 나노용품 기술	정의	○ 대기중에 존재하는 극미세플라스틱을 확인해 대비할 수 있는 나노용품 개발 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노소재 기반 극소량 물질 검출 기술</li> <li>- 고감도 고분해능 탐지 기술</li> </ul>

### 3) 미래핵심기술이슈 2 : 사회적 약자를 위한 디지털 헬스케어 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
고령자 및 임산부의 생체신호 동시 측정의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 초고령 노인 및 중증 환자의 경우 판단력 저하로 인해 생체 변화를 스스로 알아차리기 어렵기 때문에, 호흡, 체온, 배뇨, 수면, 혈압, 심박수 등의 생체에서 일어나는 변화를 추적하고 분석할 수 있는 기술 필요</li> <li>- 임산부의 고혈압은 비만 및 스트레스 노출 시 고혈압이 발생할 가능성이 높아지며 고혈압으로 인해 출혈 및 태반으로 가는 혈류량의 감소와 태아의 저체중 증상 발생 가능</li> <li>- 다양한 생체 신호를 동시에 측정하고 다양한 요인에 따른 신체 변화를 연계하여 분석하여 고혈압 및 뇌졸중 등의 질병에 대한 조기예측 및 예방이 가능할 수 있도록 생체신호 동시 측정 플랫폼 개발 필요</li> <li>- 의료진이 직접 진료를 하지 않더라도 간편한 생체 신호 측정기술을 이용하여 고령자와 임산부의 건강을 추적관리 할 수 있는 기술 필요</li> </ul>
스트레스 및 우울증 진단을 위한 객관적 지표의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전연령층에서 다양한 이유로 스트레스 및 우울증을 겪고 있으나, 스트레스 및 우울증 진단을 위해서는 병원방문이 필요하여 병원치료를 거부하는 사람이 대다수이므로 자가진단을 위한 기술 개발 필수</li> <li>- 병원에서의 우울증 진단은 상담 및 설문 등을 통한 진단이 주로 이루어지므로, 신체 내의 정신질환 바이오마커 측정을 통한 객관적 진단법 필요</li> </ul>
장애인을 위한 오감 나노바이오 감지 디지털 헬스케어 제품의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 시각장애, 청각장애, 감각장애, 발달장애, 뇌병변 장애 등 장애인의 삶의 질 개선을 위한 오감 감지 디지털 헬스케어 제품 미비</li> <li>- 시각장애인과 청각장애인을 위한 시각 및 청각의 기능을 개선할 수 있는 감각 센서 개발 필요. 또한, 발달 장애 및 뇌병변 장애로 인해 주로 침상에서 생활해야하는 장애인은 욕창 발생의 위협에 놓여 있으므로, 욕창방지 및 실시간 모니터링을 위한 오감 감지 나노바이오 센서 개발 및 디지털 헬스케어 제품개발 필요</li> </ul>

### 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
우울증 및 스트레스 자가 진단 나노기술	정의	○ 스트레스 및 우울증 자가진단을 위한 나노융합 센서 및 원격 모니터링 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 스트레스 및 우울증 관련 바이오마커 발굴 및 검출을 위한 나노구조체 기술</li> <li>- 극미량의 스트레스 및 우울증 바이오마커의 변화를 감지할 수 있는 고민감·고집적화 나노융합 센서 기술</li> <li>- 바이오마커 측정에 따른 스트레스 및 우울증의 모니터링을 위한 디지털 헬스케어 제품개발 기술</li> </ul>
사회적 약자를 위한 디지털 헬스케어 오감 나노바이오 센서 기술	정의	○ 정신적·신체적 장애를 가진 장애인 또는 고령자 등 사회적 약자를 위한 생체 신호 모니터링 및 오감 나노바이오 센서 디지털 헬스케어 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 욕창 예방을 위한 고감도, 고정밀의 체압 측정 압력 센서 개발 및 원격 모니터링 기술</li> <li>- 청각장애, 시각장애, 감각 장애를 가지고 있는 장애인을 위해 장애 기능 개선을 위한 오감 나노바이오 센서 개발 및 디지털 헬스케어 기술</li> <li>- 고령자의 생체 신호(호흡, 체온, 배뇨, 수면, 혈압, 심박수 등)를 동시에 검출할 수 있는 생체 신호 측정 플랫폼이 내장된 디지털 헬스케어 제품 개발 기술</li> </ul>



## 〈나노바이오 미래상〉



### 1. 개요

#### 가. 정의

- 나노공정·분석·장비는 나노기반 기술로 인위적인 방법으로 물리화학적인 특성이 크게 개선되거나 완전히 다른 특성을 발현하는 나노소재 및 나노소자를 개발하는 기술

#### 나. 범위

- 나노정보전자 기술의 범위는 나노구조체기술, 나노증착기술, 나노패터닝기술, 나노측정·분석 기술 등 4대 중분류 기술들을 포함
- **(나노구조체 기술)** 나노구조체 기술 분야는 나노미터 스케일의 구조를 갖는 나노구조체를 제조하고 이를 가공하여 조립하는 공정 및 장비에 관한 기술을 포함. 전 세계적으로 정부의 연구개발 투자 주도로 중장기적인 기간에 걸쳐 발전하고 있으며, 응용 분야는 차세대 반도체, 디스플레이, 헬스케어, 에너지, 항공, 우주 등으로 지속해서 확장
- **(나노증착기술)** 나노증착기술 분야는 평면, 구면 및 3차원 구조까지 나노미터 수준의 얇은 막을 증착하는 기술을 의미. 정보전자소자 개발에 집중적으로 활용되고 있으며, 최근 기능성 필름, 바이오/에너지/환경/식품 산업 등 다양한 산업군의 핵심 요소기술
- **(나노패터닝 기술)** 나노패터닝 기술 분야는 포토리소그래피를 통해 원하는 미세 형상을 기존에 기록된 마스크 혹은 디지털 정보에서 기판으로 인쇄하는 기술. 최근, 차세대 메모리를 위한 고집적 극미세패턴 구현, 디스플레이, 센서 등을 위한 대면적 미세패턴 구현에 기술개발 및 투자가 지속. 이와 함께, 나노접촉기술 기반의 나노임프린팅과 저가/대면적/사용자 맞춤형 나노프린팅 기술 개발 및 상용화가 진행되며, 미래 제품에 필요한 나노-마이크로-밀리미터 복합 스케일의 표면 구조를 위한 나노패터닝 기술 및 융합 가공기술에 대한 기술 요구
- **(나노측정·분석기술)** 나노측정·분석기술 분야는 나노소재를 구성하는 개별 단위 수준에서 원자 배열 구조, 원소 판별, 원자 결합상태 등을 정밀하게 측정하고 이를 분석하는 기술. 해당 기술은 4차 산업혁명에서 핵심기술군인 반도체, 디스플레이, 바이오, 태양전지, 이차전지 등의 연구개발에 적극적으로 활용되며, 구조/조성 제어에 따른 신물질 및 물성발현기구 규명에 필수적인 나노구조 측정·분석기술 고도화 및 관련 인프라가 요구



〈나노기반 (나노공정·분석·장비) 분야 기술 분류체계 제3기·제4기 수정 경과〉

제3기 나노기술지도		▶ 제4기 나노기술지도	
중분류	소분류	중분류	소분류
나노박막기술	나노증착 기술	나노구조체 기술	나노구조체 제조 기술
	나노조성 제어 기술		나노구조체 조립 기술
나노구조체 제조 및 정렬 기술	나노패터닝 및 장비 기술	나노증착 기술	물리적 증착 기술
	나노구조체 집적화 및 장비 기술		화학적 증착 기술
나노측정·분석 기술	SPM·광융합 나노측정기술	나노패터닝 기술	리소그래피 기술
	나노물성 분석기술		나노접촉 기술
			나노프린팅 기술
		나노측정·분석 기술	나노구조 측정·분석 기술
			나노물성 측정·분석 기술

다. 역량 분석(SWOT)

		기회(O)	위협(T)
외부 환경		O1. 4차 산업혁명, 소부장 자립화, 사회난제 해결을 위한 과학기술 요구 증대 O2. 기술·산업간 융·복합화 R&D 가속 O3. 개방형 연구플랫폼 구축 및 활용	T1. 코로나19, 탄소중립 등으로 사회구조 전환 T2. 장비기술은 해외기업 대비 낮은 기술력 및 시장지배력 T3. 저출산 및 고령화에 따른 학령 인구 및 이공계 인력 감소
내부 환경			
강점 (S)	S1. 세계 수준의 나노과학기술 역량 S2. 정부의 나노기술 기반 산업 육성 전략 강화 S3. 소재·부품·장비 관련 산·학·연 연구기반 보유	○ 나노기술 역량을 바탕으로 과학기술난제 해결 및 주력 분야 강화 ○ 전주기적 연구기반과 연계한 개방형 연구플랫폼 구축으로 연구개발 가속화	○ 사회구조 변화에 유연하게 대처할 수 있는 발상의 전환 필요 ○ 국내 산업경쟁력을 바탕으로 장비 관련 국제협력 및 해외 진출 선도 ○ 개발도상국 이공계 인력 흡수 및 교육
		SO 전략 WO 전략	ST 전략 WT 전략
약점 (W)	W1. 나노기반관련 전문인력 부족 W2. 장비관련 기초/원천기술 확보 미흡 W3. 국내산업에 의존성이 높은 공정·장비기술 개발	○ 4차 산업혁명 대응, 미래 소부장 준비를 위한 나노기반 투자 강화 및 전문인력 양성 ○ ICT와의 융합을 넘어 타 분야와의 협업을 통해 기초/원천 기술 확보 노력 ○ 산·학·연 개방형 인프라 구축	○ 나노제조 및 측정·분석 장비 관련 산·학·연 국제협력 추진 ○ 개발도상국 나노과학기술 분야 지배력 강화 ○ 킬러 장비 개발을 위한 정부 주도 지원

## 2. 국내외 기술 및 산업동향(현황 및 전망)

### 가. 국외 기술 및 산업 동향

- (나노구조체기술) 나노미터 스케일의 구조를 갖는 나노구조체를 제조하고 이를 가공하여 조립하는 공정 및 장비에 관한 기술 분야. 전 세계적으로 정부의 연구개발 투자 주도로 중장기적인 기간에 걸쳐 발전하고 있으며, 응용 분야는 차세대 반도체, 디스플레이, 헬스케어, 에너지, 항공, 우주 등으로 지속해서 확장
  - 양자점 제조 기술은 나노소재 가운데 가장 활발하게 연구되어 상용화되고 있는 기술로, 대량 합성 기술이 안정화되기 시작하여 현재 디스플레이 분야에서 활발하게 적용. 카드뮴 기반의 양자점이 우수한 광학적 성질을 보여주나, 중금속 규제와 환경 문제가 대두됨에 따라 비카드뮴 기반의 친환경 양자점을 상용화하려는 노력이 지속. 미국 Dow Chemical/Nanosys, 영국 Nanoco가 친환경 양자점을 개발하고 양산하는 체제를 구축. 미국 3M은 양자점 광학 필름 기술을 개발하고 있으며, 일본과 중국 기업들은 양자점 기반 TV를 출시. 친환경 양자점 기술은 디스플레이뿐만 아니라 전자/바이오/센서 등의 다양한 분야에 적용하는 연구가 활발히 진행
  - 나노와이어와 CNT 등의 1차원 나노구조체는 화학/바이오센서, 나노 LED, 에너지 소자 등에 적용하기 위한 고효율 생산 제조 기술 개발 중. 미국에서는 나노기술의 안정성 문제와 산업화 정책을 바탕으로 기초연구부터 상용화까지 연결될 수 있는 산·학·연 연계 플랫폼을 구축. 유럽에서는 디스플레이 및 태양전지 등의 고부가가치 제품들의 생산경쟁력을 강화하기 위한 1차원 나노소재를 적극적으로 연구개발. 일본과 중국은 정부의 정책적 지원을 바탕으로 1차원 나노소재의 고품질 대량생산 및 상용화를 적극적으로 추진
  - 2차원 나노구조체 중 대표적인 그래핀은 투명전극, 에너지 저장, 베리어 필름, 전자파 차단/차폐 등의 다양한 응용을 바탕으로 대면적/고품질 대량 합성에 주안점을 두어 기술개발 중. 미국의 GrapheneCA는 고품질 그래핀 플레이크를 생산하는 라인을 구축 중이며, 향후 새로운 그래핀 제품과 기술을 확대하는 추세. 중국은 그래핀 연구 및 관련 산업에 전폭적인 투자를 하고 있기때문에 중국 내 그래핀 시장 규모는 2025년 1,000억 위안(17조 원) 규모로 성장할 것으로 전망
  - 자기조립기술과 같은 상향식(Bottom-Up) 기술은 자연계의 구동력을 바탕으로 원자나 분자의 상호작용을 통해 구조체를 스스로 형성하고 특정한 기능을 수행할 수 있는 나노구조체를 제조하는 기술. 현재 유기발광소자(OLED), 에너지저장 멤브레인 등에 적용하기 위해 활발히 연구 진행
  - 고분자 나노패터닝 분야에서는 프랑스 Curie Institut의 Patrick Keller 박사, 미국 MIT

의 자기조립 연구단, 미국 Texas 대학의 Korgel 그룹, 미국 Berkeley Lab 등이 기술 선도 특히 MIT 자기조립 연구단은 1차원 자기조립 유기고분자 소재를 기반으로 3차원 제조/3차원 자기복제 시스템을 선도하는 연구단이며, 유기소재 기반 4차원 프린팅 기술에 관련된 미래형 프로젝트를 수행. 액정소재 기반의 패터닝 분야에서는 미국 콜라도대학의 Noel Clark 그룹, 펜실베니아 대학의 Shu Yang 그룹, 네덜란드 아인트호벤 기술대학의 Dirk Broer/Albert Schenning 그룹 등이 기술 선도. 최근 유기고분자와 무기소재의 복합소재를 스마트 윈도우/스마트 섬유 등의 응용분야에 접목

- 나노구조체 조립 공정 기술은 대면적 나노구조체의 적층화를 위한 전기방사 관련 기술개발이 활발히 진행 중으로 특히 전기방사 기술로 3차원 나노소재를 적층하여 고기능 필터, 저가 고성능 연료전지/수소전지 멤브레인 등을 개발 진행

○ **(나노증착기술)** 평면, 구면 및 3차원 구조까지 나노미터 수준의 얇은 막을 증착하는 기술로 정보전자소자 개발에 집중적으로 활용되고 있으며, 최근 기능성 필름, 바이오/에너지/환경/식품 산업 등 다양한 산업군의 핵심 요소기술로 위치. 나노증착 장비의 세계 시장은 2020년 88억 달러에서 연평균 약 7.9%로 성장 중이며, 2025년에는 112억 달러에 이를 것으로 전망. 특히 원자층 증착 장비 시장 규모는 2021년 48.2억 달러이며 연평균 16.5% 이상으로 매우 가파르게 성장

- 나노증착 및 관련 장비 기술은 미국, 유럽, 일본 기업들의 주도로 연구개발 중이며 세계 시장을 점유. 미국 Applied Materials, Lam Research, 일본 TEL, Ulvac, 스위스 Oerlikon Balzers, 네덜란드 HAUZER 등이 대표적
- 정보전자소자 관련 나노증착기술은 대면적 고속대량 및 비용절감 관점에서 연구개발 진행. 해당 기술은 관련 기업들의 적극적인 투자를 바탕으로 산·학·연의 공동연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 상압 증착, 용액 기반 화학 공정, 인쇄전자 기술, 하이브리드(예. 진공증착 + 인쇄전자) 증착기술 등
- 최근 해외 우수대학들에서는 기존의 정보전자소자 관련 물질 뿐만 아니라 바이오/에너지/기능성 필름 등에 활용될 수 있는 물질에 대한 나노증착 연구개발 진행. 최근 특정 영역에 선택적으로 증착할 수 있는 기술개발을 통해 증착과 패터닝이 동시에 가능한 선택적 증착 기술에 관한 연구가 주목받고 있으며, 국외 기업들의 투자가 가파르게 증가

○ **(나노패터닝 기술)** 정보전자산업에 널리 사용되는 전통적인 포토리소그래피는, 최근 차세대 메모리를 위한 고집적 극미세패턴 구현, 디스플레이, 센서 등을 위한 대면적 미세패턴 구현의 기술개발로 지속적인 기술개발 및 투자 지속. 이와 함께 나노접촉기술 기반의 나노임프린팅과 저가/대면적/사용자 맞춤형 나노프린팅 기술개발 및 상용화가 진행 되지만, 미래 제품

에 필요한 나노-마이크로-밀리미터 복합 스케일의 표면 구조를 위한 나노패터닝 기술 및 융합 가공 기술은 사례를 찾기 어렵다는 한계

- 전통적인 포토리소그래피는, 기존 193 nm ArF 기반 미세패터닝 구현이 7 nm 노드 이후의 기술에 있어 물리적 한계 및 다중패터닝 구현의 문제점을 보임에 따라 13.5 nm 극자외선 (Extreme Ultraviolet, EUV)을 사용하는 차세대 반사형 광학계 패터닝 기술이 2020년 대만 TSMC와 삼성전사에서 5 nm 노드 이후의 로직 반도체 소자에 적용. 2022년 삼성전자, 미국 마이크론 등이 메모리 반도체 소자에 대한 EUV 리소그래피(EUVL) 기술 적용 발표
- 현재 ArF 리소그래피용 나노패터닝 장비는 네덜란드 ASML, 일본 Nikon, Cannon 등이 대표적인 관련 기업이며, EUVL용 광학계는 독일 Zeiss가 독점 중이며, 최종 EUVL 노광기는 네덜란드 ASML이 독점 생산 및 공급. EUV용 블랭크 마스크 검사장비와 패턴 검사장비는 일본 레이저텍이 독점
- 대면적 기판 상의 미세패턴 구현은 디스플레이용 박막트랜지스터(TFT) 및 화소 구현에 폭넓게 적용. 일반적인 디스플레이용 소자의 패턴 크기는 3-4 $\mu\text{m}$ 이지만, 8.5세대 디스플레이는 2,250 $\times$ 2,500 mm<sup>2</sup>, 10.5세대는 3,370 $\times$ 2,940 mm<sup>2</sup>의 대면적 기판에 균일한 소자를 구현해야 하기에 초대형 리소그래피 노광장비는 일본 Nikon, Cannon이 관련 시장을 과점
- 최근 마스크리스 노광기는 오스트리아 EVG에서 반도체 공정에 적용 가능한 수준인 해상도 2 $\mu\text{m}$  급 장비를 개발하였으며, 일본 Nikon에서는 대면적 메타표면 제작이 가능한 100 nm 급 디지털 노광기의 2025년 사업화를 발표. 포토리소그래피가 대응하기 어려운 영역에서는 나노접촉 기술 기반 패터닝의 수요가 증가 추세. 대표적으로 광부품, 바이오칩, 3D 낸드플래시 메모리 등의 분야에서 2018년 약 0.38억 달러에서 연평균 20% 성장으로 2024년 1.45억 달러에 이를 것으로 전망
- 자율주행 자동차의 등장, 플렉서블/폴더블 디스플레이 개발 등으로 기존 평면 기반의 소자가 아닌 곡면 혹은 그 이상의 폼팩터(Form factor)를 가지는 다양한 광학 부품 및 소재에 관한 연구개발이 진행. 또한 COVID-19 이후 고부가가치 바이오칩/센서 소자 관련 연구가 주목받고 있으며, DNA 염기서열분석, 인체맞춤형 구동기 및 센서 분야에 다양한 비평면 패터닝 기술 수요발생
- 독일 SUSS Microtech, 오스트리아 EVG, 스웨덴 Obducat 등이 광부품 및 바이오칩 제작용 나노임프린트 공정장비를 개발 중이며, 일본 Cannon은 미국 Molecular Imprints 반도체 사업 부문 인수를 통해 차세대 NAND용 나노임프린트 공정장비 개발 진행. 2022년 일본 SCIVAX가 설립되어 나노임프린트 관련 토털솔루션을 제공
- 최근 적층 가공(3D 프린팅)이 주목받고 있으나, 절삭 가공 수준의 양산성과 정밀도를 동시에 기대하기에 어려운 상황. FDM(Fused Deposition Modeling), SLS(Selective Laser

Sintering), DLP(Digital Light Processing), SLA(Stereolithography)가 적용된 장비들이 세계적으로 많은 수의 기업들(3D Systems, Envisiontech GmbH, Stratasys, Objet, Nanodimension 등)을 통해 보급되고 있으나, 프린팅 분해능의 한계로 인해 마이크로미터 이하 스케일의 3D 형상 구현에 한계

- 최근 나노/마이크로 단위의 정밀도를 구현하는 2PP(Two-Photon Polymerization), P $\mu$ SL(Projection Micro Stereolithography)가 적용된 상업화 장비가 시장에 공개되어 많은 주목. 대표적인 기업은 독일 KIT 대학의 졸업생들이 설립한 Nanoscribe로, 160 nm 이하 수준의 미세패턴들을 임의의 형태로 다양한 레진에 패터닝이 가능. 미국 Boston Micro Fabrication은 최대 2  $\mu$ m 급 분해능을 제공. 현재 다양한 적층가공용 소재개발과 함께 미세액적기반 나노프린팅, 다광자 흡수(Multi-Photon Polymerization) 등이 차세대 기술로 활발하게 연구개발
  - 2PP 기반 나노프린팅 기술의 핵심은 2PP 실현을 위한 높은 침투출력과 함께 안정성과 신뢰성을 가지는 광원으로 2PP의 초기 광원은 Ti:Sapphire 펄스 레이저로 대표되는 광결정 기반 펄스 레이저가 사용되었으나, 광원의 안정성 및 유지보수에 어려움. 최근 Er 및 Yb 등의 희토류 원소를 함유하는 광섬유 펄스 레이저가 2PP 광원으로 사용되기 시작. 대표적인 기업은 독일 Toptica, Menlosystems로 독일 Nanoscribe는 이들 기업의 레이저를 도입하여 사용
- (나노측정·분석기술) 미국, 유럽, 일본이 관련 기술개발 및 산업을 주도하고 있는데, 미국은 반도체용 나노측정장비, 유럽은 나노구조분석장비, 일본은 나노구조분석장비 및 주사탐침 현미경(Scanning Probe Microscopy, SPM) 기반 측정장비 분야에 강점. 나노측정·분석 기술은 4차 산업혁명에서 핵심기술군인, 반도체, 디스플레이, 바이오, 태양전지, 이차전지 등의 연구개발에 적극적으로 활용되므로, 관련 시장은 지속해서 성장 중
- 나노구조측정·분석 분야에서는, 투과전자현미경(Transmission Electron Microscopy, TEM)의 세계 시장은 연평균 10% 내외로 성장 중이며, 2020년 이후 약 6.7억 달러 규모로 형성. 미국, 네덜란드, 일본은 TEM 분야에서 강세를 보이고 있으며, 기술력 기반으로 지속적인 연구개발 주도
  - 미국 ThermoFisher Scientific은 반도체 분야 장비 시장을 주도. 특히 기체 주입 고분해능 TEM 기술 및 자동화를 선도. 일본 JEOL은 가격경쟁력을 지닌 실용적인 분석 장비 생산으로 미국 ThermoFisher와 전자현미경 시장의 큰 축을 담당. 일본 Hitachi는 세계 최고 수준의 특수 TEM 장비 및 저가/고성능 SEM 장비에 집중. 독일 Zeiss는 세계 최고의 광학 기술을 바탕으로 높은 전자현미경 관련 기술 수준을 보유하고 있으나, 소비자 요구에 대한 대응 실패와 글로벌 서비스 플랫폼 구축 실패로 시장경쟁력 확보 실패

- 현재 전자현미경의 성능은 구면수차보정 기술과 직접 전자빔 검출기 기술로 피코미터 분해능에 진입. 독일 CEOS 등의 기업에서 구면수차보정 기술을 개발하여 TEM 분해능을 비약적으로 향상 시켰으며, 미국 Gatan사는 전자빔 조사량을 최소화하는 고분해능 이미징 기술 개발
- 나노물성측정·분석 분야에서는, 근접장 기술로 회절 한계를 극복하여 샘플의 정성적/정량적 화학 정보를 동시에 얻을 수 있는 광융합 SPM이 개발되었고, SPM은 대면적 고속측정 기술이 개발되어 반도체 공정 모니터링용으로 적극 활용. 현재 차세대 반도체용 EUV 마스크 결함 탐색 및 고속대량 분석 기술로 발전. 미국 Asylum Research, 독일 Bruker, 한국 Park Systems가 대표적인 기업
- 또한, 전기적/기계적/열적 특성을 나노스케일에서 정밀 측정하는 기술이 상용화. 소자나 응용 단위에서 요구되는 다양한 동작 환경(고온/저온, 습도 등)에서의 측정 기술 및 나노구조측정장비(SEM, TEM, XRD 등)에서 in-situ로 나노물성을 측정하는 장비기술이 상용화. 미국 KLA Tencor, Nanometrics는 반도체 in-line 측정 장비를 중심으로 물성분석 기술을 개발 중이며, 영국 Deben은 다양한 나노구조측정장비에 설치가능한 in-situ 인장/압축응력 장비를 개발. 미국 Hysitron은 SEM과 TEM 챔버 안에서 나노압입시험, 나노인장/압축/굽힘 시험이 가능한 시험기를 개발

## 나. 국내 기술 및 산업 동향

- (나노구조체기술) 국내에서는 ICT 산업을 기반으로 많은 투자가 이루어지고 있으며, 나노구조체의 생산/제조는 산·학·연 협력하에 활발한 기술개발 진행
  - 국내 양자점 분야는 해외 선진국 대비 우수한 기술력을 보유하고 있고, 비카드뮴 계열의 양자점을 디스플레이에 응용하는 기술에 강점. 삼성전자에서는 색 재현력과 발광효율이 높은 비카드뮴계 양자점 기반으로 양자점 TV를 출시하여 세계 시장을 선도. 한솔케미칼, 나노스퀘어 등의 기업은 양자점 양산 체제 보유. 대학과 연구소에서는 친환경 양자점 합성 및 광학적 특성 및 안정성 향상 기술에 관한 연구가 활발히 진행
  - 1차원 나노소재는 국내 대학과 정부출연연구소에서 개발된 성과를 바탕으로 제조 및 양산 단계에 진입하여 유망한 성장동력산업으로 부상. 국내에서는 전자제품 분야에 그 비중이 높으며, 미국 다음으로 높은 기술경쟁력을 확보. 최근 SK이노베이션은 전기차 배터리 핵심 소재인 탄소나노튜브(CNT) 생산 기업에 150억 원 투자하였고, LG에너지솔루션도 CNT를 실리콘 음극재 보완재로 적극 활용
  - 그래핀 등 2차원 나노소재는 정부 주도하에서 연구개발이 주도적으로 이루어져, 2차원 나노소재 제조기업 성장의 밑거름. 국내 그래핀 관련 연구 및 산업 수준은 세계 최고 수준으

로, 대면적 생산 기술과 박리 기술 등의 스타트업·중소기업들이 설립. 한국화학연구원, 한국기계 연구원은 그래핀 양산 기술개발 중이며, 그래핀스퀘어, 글로텍, 참그래핀 등은 그래핀 양산기술로 사업화 진행

- 자기조립기술을 이용한 나노구조체 조립기술은 최근 전자재료 및 신소재산업, 생명공학, 디스플레이, 반도체 등에서 그 중요성이 부각되고 있는데, 특히 구조물을 하향식으로 얻기 어려운 나노구조를 원자 혹은 분자 단위의 직접 조작을 통해 제조하는 것에 기여. 한국전자통신연구원, 한국과학기술원, 포항공과대학교 등이 자기조립 관련 원천기술에 대한 연구개발 주도
- 전기방사 기술을 이용한 나노구조체 제조 기술은, 나노구조 형성을 통한 연료전지용 전해질막 및 멤브레인 개발에 적극 활용. 한국생산기술연구원, KIST 수소연료전지연구단, KAIST, 서울대학교 등이 관련 기술개발을 주도

○ **(나노증착기술)** 국내에서는 차세대 반도체, 디스플레이 관련 증착기술 개발에 집중하고 있으며, 기능성 필름/바이오/에너지/환경/식품 산업 등에 관련된 나노증착 기술은 상대적으로 미흡하거나 취약

- 삼성전자와 SK하이닉스가 메모리 및 비메모리 반도체 기술개발을 주도하고 있어, 관련 화학/소재 기업 및 장비 기업들은 해당 기술로드맵을 따라가는 실정. 국외기업과 규모 대비하여 중소/중견기업이 관련 장비 기술을 주도하고 있으며, 대표적으로 주성엔지니어링, 원익IPS, 테스 등이 기술 주도. CVD/ALD용 전구체 합성 및 생산은 SK트리켄, 동진썬미켄, 디엔에프, 유피케미칼, 아이켄스 등이 CVD/ALD 장비개발 및 판매에 대응
- 삼성전자와 SK하이닉스를 중심으로 적극적인 산·학·연 협력 연구를 통해, 정보전자소자용 나노증착기술이 주로 연구 개발. 고유전율(High-k) 물질 증착, 멀티패터닝(DPT)/쿼드러플패터닝(QPT) 물질 증착, 선택적 증착, OLED 봉지, 2차원 나노소재 증착 등에 관련된 핵심 소재/공정개발 및 장비 기술이 대부분

○ **(나노패터닝기술)** 국내에서는 세계 선도적인 반도체 및 디스플레이 제품들의 제조 기술력을 보유하고 있으나, 이들에 필수적인 포토리소그래피 소재 및 장비의 원천기술은 국외에 의존. 특히 EUV 극미세패턴 혹은 초대면적 리소그래피 기술의 경우 핵심 소재 및 장비는 네덜란드 ASML, 일본 JSR, 신에츠화학, Cannon, Nikon 등에 전량 의존. 그러나 최근 다양한 소재와 장비에 대한 국내 원천기술 확보가 활발히 진행 중이며, 일부 성과는 국산화 진행. 차세대 나노패터닝 기술인 나노접촉 및 나노프린팅기술은 국내 연구진들이 세계적인 수준의 성과를 발표 중이며, 이에 대한 상용화 연구개발이 추가적으로 필요

- 극미세패턴 구현을 위한 리소그래피 기술에서는, 소모성 소재/부품의 일부는 연구개발이



이루어지고 있으나, 핵심 광원 및 광학계에 대해서는 연구개발이 매우 미흡

- ArF 리소그래피의 경우 동진세미켐이 관련 포토레지스트를, 에프에스티에서는 펠리클 및 포토마스크를 개발. EUV 리소그래피의 경우 에스엔에스텍에서 블랭크 마스크 및 펠리클을, 에프에스티, 참그래핀 등이 펠리클 개발 진행. 최근 에프에스티 자회사인 이솔은 EUV 용 펠리클 투과율 검사장비를 상용화하고, EUV 리뷰 설비 및 평가용 EUV 광원 개발 진행
- 전통적인 유기 EUV 포토레지스트는 동진세미켐이 국산화를 진행 중이며, 새로운 고흡광 무기 EUV 포토레지스트는 전남대학교, 성균관대학교, 인하대학교 등에서 연구개발 진행
- 초대면적 리소그래피 기술과 관련하여, LG전자가 디스플레이 10.5세대 적용 가능한 4  $\mu$ m급 디지털노광기를 개발하고 있으며, 반도체 공정에 적용 가능한 고해상도 디지털 노광 시스템의 개발 사례는 전무
- 삼성전자, LG전자에서 나노임프린트 기반 양산 장비를 개발하고 있으나, PSS(Patterned Sapphire Substrate) 이외에 반도체 공정 등에 보편적인 나노패터닝 기술로는 아직 편입되지 못하는 상황. 한국기계연구원을 필두로 고려대학교, 연세대학교, 광주과학기술원 등의 학·연 중심으로 연구개발이 진행
- 한국기계연구원에서는 대면적 평판 및 롤투롤 나노임프린트 기술, 자유형상에 대응할 수 있는 소프트 나노임프린트 기술, 접착층이 필요없는 나노전사공정을 개발. 고려대학교는 고종횡비 나노패턴의 대면적 패터닝 및 곡면 기판 상에 구현하는 기술개발을 바탕으로 메타버스용 AR/VR용 메타렌즈 개발 중
- 나노/마이크로/수밀리미터에 이르는 복합 스케일 가공은, 한국기계 연구원에서 리소그래피와 나노/마이크로 구조 스탬핑이 적용된 하이브리드 패터닝 기술로 플라스틱 미세유체 및 나노구조색 제품 성형에 적용하였으나, 양산에 필요한 고온/고압 환경에서 수 만회 이상의 반복성형 연구는 미흡

○ (나노측정·분석기술) 국내에서는 SPM 분야에서 국내기업이 세계적인 기술을 보유하고 있으나, 나노측정·분석 등 타 분야에서는 기초/원천기술 보유가 미흡하고 관련 국내기업의 경쟁력이 낮은 편. 전통적인 나노측정·분석장비 분야에서는 기술선도국과의 경쟁보다 새로운 측정원리 기반의 측정·분석장비의 기술개발 및 신산업 분야에서 요구하는 특화된 측정·분석장비의 기술개발을 통해 전략적으로 관련 시장에 진입하는 것이 필요. 또한 측정·분석방법에 대한 표준화와 응용산업 분야에 대한 연계 방안까지 함께 수립하여 기술 개발하는 것이 중요

- 나노구조측정·분석 분야에서는 보급형 SEM에서는 시장경쟁력을 갖춘 장비가 개발되었으나, 고성능 FE-SEM과 RBS는 상용화까지는 이르지 못한 수준

- 코셈, 새론테크놀로지, 씨크 등이 대표적인 기업으로 최근 새론테크놀로지에서 FE-SEM 상용화 추진 중이나 정밀 렌즈 기술의 부재로 고사양 장비 개발까지 이르지 못한 수준
- 국내 TEM 보유 수는 약 1,000대 수준으로 추산되며, 연간 약 20대의 장비가 구입되고 있어 관련 시장은 연간 500-1,000억 원 규모로 추산. 국내에는 아직 TEM을 상용화한 기업은 없으며, 한국기초과학연구원, 한국표준과학연구원을 중심으로 TEM과 표면분석장비의 국산화 및 고도화를 수행 중이나, 아직까지 전자현미경 관련 기술은 해외기업에 전적으로 의존하는 상황
- 나노물성측정·분석 분야에서는, SPM 전문기업인 Parks Systems가 반도체 공정모니터링용 3D in-line 측정 장비 상용화, EUV 마스크 리페어 기술개발 및 상용화에 성공. 전기-역학, 역학-광, 전기-열 복합 물성 측정 장비, 소자 동작 환경에서 in-situ 물성측정 장비 등은 연구개발이 활발하게 이루어지고 있으나, 상용화 단계에 도달하지는 못한 수준. 한국기계연구원, 한국표준과학연구원, KAIST, 성균관대학교 등을 중심으로 in-situ 측정 기반의 나노물성 기초연구가 활발하게 진행

### 3. 기술발전 전망

중분류	현재 기술	미래 기술
나노구조체기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 양자점 표면 제어 및 합성 기술</li> <li>- 나노 촉매 대량 합성 기술</li> <li>- 1차원 나노소재 대량 합성 및 소자 구현 기술</li> <li>- 2차원 나노소재 대면적 합성 기술</li> <li>- 콜로이드 기법 및 나노촉매를 이용한 나노구조체 조립 기술</li> <li>- 롤투롤 기술 기반 2차원 나노소재의 전사 기술</li> <li>- 전기방사를 이용한 3차원 나노구조체 제조 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 친환경 양자점 대량 생산 공정 및 장비 기술</li> <li>- 고성능 나노 촉매 특성 제어 및 대량 생산 장비 기술</li> <li>- 1차원 나노소재 형상 균일화 및 양산 장비 기술</li> <li>- 2차원 나노소재 대량 생산 장비 및 특성 균일화 기술</li> <li>- 자유곡면에서의 전자기장 및 광제어 기반 나노구조체 자가조립 및 정렬화 기술</li> <li>- 대면적 2차원 나노소재의 계면접착 기술 및 4D 소재 기반 적층 구조화 기술</li> <li>- 전기방사 기반 정렬패턴 나노구조 증착기술</li> </ul>
나노증착기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 한정적 롤투롤 연속 증착 기술</li> <li>- 1미터 스케일 대면적 증착 기술</li> <li>- 나노미터 스케일 두께 조절 기술</li> <li>- 국부적 선택적 증착 기술</li> <li>- 공간분할 고속 증착 기술</li> <li>- 실험적/경험적 조성 조절 기술</li> <li>- 원자/분자 단위 이론적 반응성 예측 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 광폭 고분자 기판 상 롤투롤 연속 증착기술</li> <li>- 철강/철판을 위한 초대면적 증착 기술</li> <li>- 용스트롬 스케일 두께 및 조성 동시 조절 기술</li> <li>- 3차원 구조 내 선택적 증착 및 동시 에칭 기술</li> <li>- 공간 분할 및 상압 공정을 이용한 초고속 증착 기술</li> <li>- 기계학습을 이용한 증착 및 조성 디자인/예측 기술</li> <li>- 다층 구조 스케일의 이론적 증착 시뮬레이션 기술</li> </ul>
나노패터닝기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 저흡광 PR소재 기반 low NA EUV 리소그래피 기술</li> <li>- 마이크로스케일 대면적 리소그래피 기술</li> <li>- 나노임프린트기반 비유연소자의 평면상 단순 구조 패터닝</li> <li>- 비선형 광흡수 기반 미세나노구조 및 몰드 나노프린팅 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고흡광 PR소재 기반 high NA EUV 리소그래피 기술</li> <li>- 나노스케일 디지털 리소그래피 기술</li> <li>- 유연/웨어러블 대응을 위한 고신뢰 유연 패터닝 기술</li> <li>- 유/무기 하이브리드 다층박막구조 실현을 위한 고정밀 패터닝 및 정렬기술</li> <li>- 나노프린팅 고속화를 위한 고효율 다채널 극초단 레이저 기술</li> <li>- 회절한계 극복 초미세패턴 프린팅 기술</li> <li>- 다중재료(유기/금속/금속산화물) 나노프린팅 기술</li> </ul>
나노측정·분석기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노 측정·분석</li> <li>- 나노이미징 기술</li> <li>- 거시적 물성변화 측정/분석 기술</li> <li>- In-line 표면형상 측정/분석 기술</li> <li>- 유전 박막 측정/분석 기술</li> <li>- 구조체의 in-line 표면형상 측정 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 극한환경 모사 나노 측정·분석</li> <li>- 극한환경 나노이미징 기술</li> <li>- 원자층 층수 변화에 따른 나노물질의 물성변화 측정/분석기술</li> <li>- 나노구조체의 원자스케일 변형률 분포 측정을 위한 원자 격자 간섭계 기술</li> <li>- In-line 나노물성 측정/분석 기술</li> <li>- 유전 초나노박막 측정/분석 기술</li> <li>- 나노구조체의 근접장 에너지 전달 측정 장비 기술</li> <li>- 나노구조체의 in-line 전기-역학-광 복합 물리 측정 기술</li> </ul>

## 4. 나노기술지도 전개

### 4-1. 나노구조체 기술

#### 가. 나노구조체 제조 기술

##### 1) 개요

- (정의) 나노구조체는 약 100 나노미터 이하의 크기로 작아질 때 물질이 가지는 본연의 물성이 아닌 다른 물성을 보이는 신소재를 의미하며, 이를 합성하고 응용하는 기술
- (필요성) 나노구조체의 물리적인 특성과 응용에 대한 기초/원천기술개발 중이나, 이를 산업계에 활용하기 위한 제조생산 기술개발이 필요. 특히, ICT, 바이오산업에 적용 가능한 고품질의 균일한 나노구조체를 대량 생산하는 공정 및 장비기술 개발이 매우 필요
- (발전 전망) 나노구조체 제조기술은 인체와 환경에 친화적이면서 다양한 산업에 적용하기 위해 고성능/고품질/대량생산 관점에서 발전. 양자점 및 나노촉매 등에서는 안정성과 신뢰성 확보, 탄소나노튜브 및 나노와이어 등의 1차원 구조체는 용도와 목적에 맞게 크기와 형상을 제어하는 기술 개발, 2차원 나노구조체는 이를 적용한 소자/제품로 개발될 전망

##### 2) 미래핵심기술이슈 : 나노구조체의 성분/형태 제어 및 대량생산 기술

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
나노구조체 환경 불안정성에 의한 특성 저하	- 양자점, 나노와이어와 같은 나노구조체는 산소, 수분, 열 및 자외선과 같은 다른 원인 등에 의해 특성 저하 문제
나노구조체 유독성 및 유해성	- 카드뮴 기반의 고효율 양자점과 같이 고품질 나노소재는 친환경적이지 않고 환경규제(RoHS)의 제약 - 나노구조체는 인체에 유해한 영향을 미칠 가능성을 내포하고 있어, 나노소재 활용에 있어 유독성 및 유해성의 문제
나노구조체 특성 균일화 및 양산성 기술의 부재	- 나노와이어, 탄소나노튜브, 그래핀 등 나노소재들을 균일한 크기 및 구조로 제조하는 것의 한계 - 나노구조체의 특성 균일화 제어 및 저비용 대량생산의 한계
나노구조체 제조 공정에서의 환경 파괴 및 자원 낭비 문제	- 특정 소재 기판 위에 합성되는 나노소재 활용을 위해 기판 에칭 및 박리가 필요 - 모재 기판에서 성장된 나노구조체를 박리할 때, 에칭 용액 및 모재 기판이 소모되어 환경 파괴와 자원 낭비가 발생하는 문제
나노구조체 제조 공정에서의 형상 제어 한계	- 나노구조체의 활성화 성능은 형상(Morphology)의 영향을 크게 받으나 용도 및 목적에 맞는 크기와 형상 제어기술이 Cube, Rod, Sphere 등으로 제한

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
친환경/고품질 양자점 대량생산 기술	정의	○ 친환경 양자점의 양자 효율 향상 및 대량생산 공정·장비 기술
	요소 기술	- 양자점 표면 제어 기술 - 친환경 양자점 양자 효율 향상 기술 - 고품질, 고순도 양자점 대량생산 기술
1차원 나노구조체 균일 제조 기술	정의	○ 1차원 나노구조체의 형상 및 구조를 균일하게 제어하는 제조 공정·장비 기술
	요소 기술	- 1차원 나노구조체 대면적 균일 합성 장비 기술 - 1차원 나노구조체 이종 구조 제조 기술
고품질 2차원 나노구조체 대면적 제조 기술	정의	○ 고품질의 2차원 나노소재를 대면적으로 합성할 수 있는 공정·장비 기술
	요소 기술	- 화학기상증착법 기반의 대면적 합성용 장비 기술 - 대면적 나노소재 품질 향상 기술 - 나노소재 연속 생산 기술
2차원 나노소재 대면적 친환경 박리기술	정의	○ 고품질의 2차원 나노소재를 모재 기판에서 박리하고 모재 기판을 재사용 할 수 있는 공정·장비 기술
	요소 기술	- 전기화학 기반의 대면적 박리 장비 기술 - 모재 기판의 표면 처리 및 재사용 기술
에너지 저장용 나노입자 형태 및 구조 제어 기술	정의	○ 연료전지에 사용되는 나노입자의 형태 및 형상 제어 기술
	요소 기술	- 나노입자 형태 및 구조 제어 장비 기술 - 나노입자 형태/구조 고도화 및 수명 개선 기술 - 고효율 나노입자 생산 공정의 양산화 기술

## 나. 나노구조체 조립 기술

### 1) 개요

- (정의) 자기조립기술과 같은 상향식(Bottom-Up) 기술 및 상향식/하향식(Top-Down) 융합기술을 바탕으로 다양한 나노구조체 및 구조체 어셈블리를 제조하는 기술. 나노구조체 내의 조성을 정밀하게 제어하여 원하는 물성을 얻고, 이들 나노구조체를 조립하여 특정한 기능을 수행할 수 있는 소자를 개발하는 기술까지 포함
- (필요성) 나노구조체는 전자/기계/의료/에너지 등 다양한 산업 분야에서 기존 소재의 한계를 극복 혹은 성능향상을 위해 고려되고 있으나, 일부 분야에서 제한적으로 활용. 대면적 평면 및 자유곡면 환경에서 나노구조체를 원하는 위치에 자유롭게 조립·집적하여 다양한 차원의 구조체 어셈블리를 구현하는 것이 반드시 필요
- (발전 전망) 나노구조체를 다양한 구조와 형태로 손쉽게 조립·집적할 수 있는 나노구조체 조립기술로 진화 중이며, 저비용 고효생산성 관점에서 공정 및 장비기술이 발전될 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 나노구조체 성능 극대화 및 고정밀 형상 제어 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
자유 곡면 환경에서의 나노구조체 조립 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 대표적인 나노구조체 bottom-up 조립방식인 콜로이드 조립 방법은 주로 액체 매질을 이용하여 나노입자의 결정 모양이나 패턴 제작</li> <li>- 액체 매질을 이용하는 자유곡면에서의 나노구조체 조립은 비연속적인 라플라스 압력으로 인해 정밀한 형상 구현 한계</li> <li>- 자유 곡면 위에 나노소재를 조립하기 위해서는 나노소재의 인터페이스의 압력 및 유동을 균일하게 제어하는 기술 필요</li> <li>- 해당기술은 나노로드를 이용한 청색 발광소자를 이용하는 QNED에 사용될 수 있으나, 나노로드의 정밀한 위치 및 방향성 제어 문제</li> </ul>
전기방사 기반의 나노섬유 정렬화 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전기방사 기반의 나노섬유 제작 기술에선 액적 크기, 고분자 용액 농도, 인가 전압 및 전극과 집전체 간의 거리 등 여러 조건 제어를 통해 다양한 나노섬유 형상을 제작되나, CVD 등에 대비하여 넓은 면적을 빠르게 증착하는 것이 불가능하며, 특히 제작되는 나노섬유의 정밀한 정렬 기술은 기술적 한계</li> <li>- 나노파이버 분사는 제트 스트레칭 현상을 통해 나노미터 사이즈의 직경을 갖는 나노섬유가 집진기에 생성되나, 벤딩 및 제트 스트레칭 현상으로 인해, 나노섬유의 고정밀 정렬화된 격자 패턴 제작 한계</li> </ul>
Self-assembly 기반의 나노구조체 조립에서 형상 및 위치 제어 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 일반적으로 자가조립은 외부에서 가해진 에너지에 의한 열역학적 환경에 대해 에너지적으로 유리한 구성에 도달하기 위한 방향으로 구조체를 형성해, 자가조립은 나노구조체를 만드는 다른 Top-down 방식인 리소그래피나 템플릿 합성법에 비해 형상 제어나 위치 제어 한계가 존재</li> <li>- 해당기술은 나노결정, 양자점, 나노와이어 등의 나노소재를 이용한 나노광학 장비 개발에 요소기술로 나노미터 수준의 정밀도의 구현이 기술 난제</li> </ul>

기술난제	개요
대면적 나노소재 전사에 따른 물리·화학적 특성 저하	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 원자층 1층 ~ 수층으로 이루어진 다양한 대면적 나노소재를 박리하여 전사할 때, 전사하는 소재 및 전사 공정에 따라 나노소재의 물리적 화학적 특성 저하가 발생</li> <li>- 고성능 웨어러블 센서를 제작하기 위해서는 유연 신축 기판 표면에 대면적의 나노소재를 물리·화학적 특성 저하 없이 전사하는 공정 기술이 소재별로 필요</li> </ul>
대면적 나노박막 구조체 적층 구조화 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전도체인 그래핀, 반도체성의 MoS<sub>2</sub>, 유전체인 h-BN 등 2차원 나노소재를 적층하면 원자층 두께의 초박막 고성능 트랜지스터 개발이 가능하나, 이를 위해서는 서로 다른 특성을 갖는 2차원 나노소재를 적층하고 조립하여 소자화하는 기술 필요</li> </ul>

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
자유곡면에서의 나노구조체 정렬화 기술	정의	○ 자유곡면 환경에서 Nanorod의 위치, 간격, 방위를 정렬하는 초정밀 나노구조체 정렬화 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노소재의 인터페이스 압력 및 유동 제어 기술</li> <li>- 나노구조체 위치, 간격, 방위의 초정밀 정렬화 기술</li> </ul>
전기방사 기반의 정렬패턴의 나노섬유 구조 증착기술	정의	○ 전기방사 기술을 활용한 sub 5 $\mu$ m 균일 공극을 갖는 정렬화 나노섬유 제작 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노섬유 구조 제어 및 증착 기술 고도화</li> <li>- 균일 공극의 위치, 간격의 정밀화 나노섬유 구조 증착 기술</li> </ul>
전자기장 및 광 제어 기반의 나노구조체 self-assembly 기술	정의	○ 전자기장 및 광 제어를 이용하여 나노구조체를 대량으로 자기 조립하기 위한 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전자기장 및 광제어를 이용한 나노구조체 제어 기술</li> <li>- 정밀 제어를 통한 나노구조체 조립 기술</li> <li>- 대량의 나노구조체 자기 조립 기술</li> </ul>
2차원 나노소재 대면적 무손상 전사 기술	정의	○ 2차원 나노소재를 원하는 기판에 손상 없이 대면적으로 전사할 수 있는 공정 및 장비 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 손상 저감을 위한 2차원 나노소재 전사 필름 설계 및 제조 기술</li> <li>- 2차원 나노소재 대면적 전사 기술</li> <li>- 무손상 전사기술을 통한 대면적 나노소재 상용화</li> </ul>
2차원 나노소재의 적층 구조화 기술	정의	○ 다양한 특성의 2차원 나노소재를 원하는 순서대로 적층하고 조립할 수 있는 공정 및 장비 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2차원 나노소재 원자층 적층 및 패터닝 기술</li> <li>- 이종의 2차원 나노소재 적층 기술</li> <li>- 이종의 2차원 나노소재 대면적 조립 및 적층 기술</li> </ul>

### 〈나노구조체 기술 로드맵〉

종분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술								
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
나노 구조체 기술	나노구조체 제조기술	나노구조체의 성장/형태 제어 및 대량생산 기술	친환경/고효율 성장형 대량 생산 기술	정자형 표면 제어 기술		친환경 정자형 성장 효율 향상 기술			고효율, 고수도 성장형 대량생산 기술			
			1차원 나노 구조체 균일 제조 기술	1차원 나노구조체 대면적 균일 합성 및 장비 기술				1차원 나노구조체 이종구조 제조 기술				
			고효율 고품질 나노구조체 대면적 제조 기술	대면적 합성 장비 기술		대면적 나노소재 통합 합성 기술			나노소재 연속 생산 기술			
			2차원 나노소재 대면적 친환경 적층 기술	친기화적 기반의 대면적 적층 장비 기술				모재기반의 표면 제어 및 제어 기술				
			메타물질 기반의 나노 입자형태 및 구조 제어 기술	나노입자 형태 및 구조 제어 장비 기술		나노입자 형태/구조 고도화 및 수형 개선 기술			고효율 나노입자 생산 공정의 안정화 기술			
	나노구조체 조립기술	나노구조체 정밀 극대화 및 고정밀 형성 제어 기술	저온/극박에서의 나노구조체 정렬화 기술	나노소재의 인터페이스 결합 및 유동 제어 기술				나노구조체 위치, 간격, 방향의 초정밀 정렬화 기술				
			전기장/사 기반의 정밀패턴의 나노선유 구조 증착 기술	나노선유 구조 제어 및 증착 기술 고도화				균일 공극의 위치, 간격의 정밀화 나노선유 구조 증착 기술				
			전자기장 및 광제어를 이용한 나노 구조체 self-assembly 기술	전자기장 및 광제어를 이용한 나노구조체 제어 기술		정밀 제어를 통한 나노구조체 조립 기술			대면적 나노구조체 자기 조립 기술			
			2차원 나노소재 대면적 무손상 전사 기술	손상 제어를 위한 2차원 나노소재 전사형용 설계 및 제조 기술			2차원 나노소재 대면적 전사 기술		무손상 전사기술을 통한 대면적 나노소재 상용화			
			2차원 나노소재의 식별 구조화 기술	2차원 나노소재 원자층 식별 및 패터닝 기술		이종적 2차원 나노소재 식별 기술			이종적 2차원 나노소재 대면적 조립 및 식별 기술			



## 4-2. 나노증착 기술

### 가. 물리적 증착 기술

#### 1) 개요

- (정의) 증착하고자 하는 물질에 열 또는 운동에너지 등의 물리적 에너지를 가하여 해당 물질을 원자 혹은 분자 기체 상태로 만들어 원하는 곳에 증착하는 기술
- (필요성) 산업 분야가 요구하는 증착 물질의 다양성, 우수한 계면 접합성, 저온 증착 가능성, 해당 기술의 성숙도 및 화학적 증착기술 대비 환경 안정성 등으로 정보전자소자, 금속/세라믹 기능성 코팅 등의 광범위한 분야에 활용으로 기술 개발 필요
- (발전 전망) 기술성숙도가 높은 물리적 증착기술은 고속/대면적/저온/저손상 관점에서 기술 진화 중이며, 기존 정보전자소자, 금속/세라믹 기능성 코팅을 넘어, 기능성 필름/바이오/식품/에너지 분야로 그 활용도가 확대될 것으로 예상

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 초대형/고속/고수율 박막 증착 기술

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
박막 두께 감소에 따른 특성의 연속성 감소	- 박막의 두께가 옹스트롬 스케일로 줄어들어 따라 물리적 연속성, 전기적 연속성 (전도도, 유전율 등), 화학적 연속성의 열화에 따른 최종제품의 기술적 한계의 원인
초대형, 초고속 증착 환경에서의 박막 특성 저하	- 박막을 증착하고자 하는 면적이 초대형 (자동차, 철강 등)이거나 초고속 증착 (태양전지, 배터리, 연료전지 등)이 필요시 진공기반 증착 박막 대비하여 특성이 저하되는 문제
기능성(바이오, 초소수성, 향균, 촉매 등) 나노코팅에서의 저수율, 고비용 문제	- 기능성 나노코팅을 위한 신소재 증착 시 성능 목표치에 도달하더라도 저수율, 고비용으로 인한 상용화 한계

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
0.1 나노미터 초박막 증착 기술	정의	○ 1nm 이하의 두께를 지니며, 물리적 전기적 화학적 연속성을 그대로 유지하는 박막 증착기술
	요소 기술	- 활성화 표면을 위한 표면 처리 기술 - 초박막에서 다성분계 박막 제조 기술 - 0.1나노미터 수준에서 박막 증착 및 특성 실시간 측정 기술
초대형/초고속용 박막 증착 기술	정의	○ 1미터 단위 이상의 초대형 구조 기판에서 반도체용 박막 수준의 특성을 초고속 증착 속도로 유지하는 기술
	요소 기술	- 진공/상업에서의 증착 특성 유지 기술 - Roll-to-Roll과 같은 기판의 초고속 운송 기술 - 진공 기반의 증착 방법의 증착 속도 향상 기술

나노기술명	개요	
기능성 (바이오, 초소수성, 향균 등) 나노코팅에서의 저수율, 고비용 문제 해결 기술	정의	○ 기능성 나노코팅에서 저수율, 고비용 문제 해결을 위한 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 저가, 고반응성, 고증기압 프리커서 합성 기술</li> <li>- 고수율 증착을 위한 초고속 증착 기술</li> <li>- 비용 절감을 위한 상압 증착 기술</li> </ul>

## 나. 화학적 증착 기술

### 1) 개요

- (정의) 열, 전계, 빛 등이 에너지를 이용하여 전구체의 화학반응을 원하는 곳에서 일으켜 설계한 소재를 증착하는 기술
- (필요성) 대면적/고속대량 공정, 미세공정에 적합한 두께 조절 및 균일도, 3차원 구조 위에서의 증착 균일도, 조성 제어 용이성 등으로 정보전자소자, 디스플레이, 전력반도체 등에 광범위하게 적용되어 필수적인 기술
- (발전 전망) 화학적 증착기술은 미세화되어 가는 정보전자소자 분야에서 집중적으로 발전하고 있으며, 수 nm 박막 증착, 3차원 구조에서의 증착 균일도, 상압/저온 증착, 롤투롤 등의 주제 중심으로 발전. 플렉서블 디스플레이용 박막트랜지스터와 전기차용 센서를 위한 저온/대면적/고속대량 화학 증착 기술과 전력반도체와 광소자 등을 위한 구조/조성 정밀 제어 화학 증착 기술로 발전될 것으로 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 미세화를 위한 구조/조성 정밀 제어 및 대면적/고속 화학 증착 기술의 신뢰성 확보

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
계층적 3차원 나노구조에서 박막의 균일도 감소	- 3차원 구조가 계층적으로 형성되어 있는 나노구조 (3차원 낸드 플래시의 Fishbone구조 등)에서 박막의 단차피복성 열화 및 Seam 형성의 문제
신물질의 박막 증착화 기술의 한계	- 새로운 물질을 탐색하여 그 특성이 원하는 목적에 부합하더라도 필요한 공정, 전구체, 반응물, 부반응 등과 같은 박막 증착화에 따른 기술의 부재
박막 증착 후 초미세 구조 패터닝의 한계	- 포토리소그라피의 물리적 한계로 인한 박막 증착 후 원하는 사이즈와 구조의 다단계 패터닝이 불가하며, 이로 인해 최종 소자 크기 구현의 한계
2차원 나노소재 대면적 증착 기술의 한계	- 2차원 나노소재 대면적 증착 시 균일도, 박막 품질, 재현성 문제와 높은 증착 온도, 낮은 수율 등으로 산업에 적용의 한계
단결정 박막 제조 기술의 한계	- 현재 단결정 또는 고품질 (Defect-free)의 박막 증착에 한계가 있으며, 기존의 증착기술 개선 또는 새로운 형태의 증착기술을 통한 해결 필요
3차원 구조체 위 증착에서의 재현성 및 균일도 저하	- 대용량의 파우더 나노코팅에서 균일한 파우더 분리 및 기체 전달의 어려움으로 두께 균일도와 재현성 저하의 문제 - 3차원 구조체 위의 증착 시 단차피복성, 균일도, 재현성 확보의 문제
증착 공정 시 발생하는 particle로 인한 공정 신뢰성 저하	- 다양한 공정 기술에서 발생하는 파티클로 인한 공정 신뢰성 확보, 장비 관리의 문제
배치타입 증착 공정으로 인한 생산성 한계	- 기존 배치타입 증착 공정은 진공 환경 유지와 기판 투입 및 공정 후 배출에서 발생하는 tact time으로 인한 생산성의 한계가 존재
고성능 롤투롤 제조장비 구축을 위한 원천기술의 한계	- 고정밀 고성능의 롤투롤 제조장비 구축을 위한 원천기술 개발이 절실히 필요한 상황이며, 롤투롤 제조공정 디지털 트윈화를 위한 기반 기술로서 시스템의 최적화 및 지능화 필요

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
계층적 3차원 나노구조에서 박막 증착 속도 조절 기술	정의	○ 계층적 3차원 나노구조에서 높은 단차 피복성 및 Seam-less 구조를 제작하는 기술
	요소 기술	- 3차원 나노구조에서 Gas flow 이해 및 시뮬레이션 기술 - 3차원 구조에서 균일한 단차 피복성 박막 기술 - 3차원 나노구조 위치별 박막 증착 속도 억제/증대 기술
양자 계산으로 디자인된 합성-공정 연계 기술	정의	○ CVD/ALD 공정에서 목적하는 물질의 전구체의 설계 단계에서 양자 역학 계산을 통해 공정과 반응물을 연계하여 공동 개발하는 기술
	요소 기술	- 양자 역학 계산 및 머신러닝과 연계 기술 - 전구체 설계/합성, 반응물과 기본 증착 공정 기술 - 표면흡착 반응 및 반응물과의 반응 정도 이론적 계산 기술
선택적 증착/식각의 자발적 원자층 공정 기술	정의	○ 최초 패터닝된 표면 물질에 추가적인 공정이 없이 선택적 화학 반응을 통해 원자층 수준에서 증착/식각하여 다음 계층 패턴으로 활용할 수 있는 기술
	요소 기술	- 전구체와 표면 간의 화학적 반응성 이론적 계산 기술 - 분자 흡착을 활용한 표면 개질 기술 - 증착과 식각의 연속적/동시 공정 기술
저저항 금속 극박막 ALD 증착 기술	정의	○ 원자층 증착법을 활용한 낮은 비저항을 갖는 금속 증착 기술
	요소 기술	- 증착 속도 및 균일도 개선을 위한 프리커서 합성 기술 - 표면 처리 기술을 활용한 증착 속도 및 균일도 개선 기술 - 우수한 균일도 및 전기적 특성 확보를 위한 공정 기술
고생산성 나노층 증착 기술	정의	○ 연속 이송 및 증착을 통한 고생산성 나노층 증착 기술
	요소 기술	- 공간 분할을 통한 나노층 연속 증착 기술 - 다중 고속 이동자의 페루프 구성을 통한 기판 연속 이송 기술 - 진공 공정 환경 대응 시스템 기술
대면적 2차원 나노소재 합성공정 및 장비 기술	정의	○ 대면적에서 균일하고 전기적 특성이 우수한 2차원 소재를 합성할 수 있는 기술
	요소 기술	- 대면적 2차원 나노소재 합성에 적합한 장비 기술 - 대면적 2차원 나노소재 합성을 위한 전구체 합성 기술 - 대면적 2차원 나노소재 합성을 위한 공정 기술
2차원 채널 소재 저온 합성 장비 및 공정 기술	정의	○ 저온에서 이차원 또는 산화물 반도체 소재의 결정화 정도 조절을 통해 Channel 소재로 적용하는 기술
	요소 기술	- 결정화 조절 및 박막 증착을 위한 공정/장비 기술 - 결정화 조절 및 박막 증착을 위한 전구체 합성 기술 - 결정화 메커니즘 이론적 계산 기술
대용량 배터리 소재 제조 및 안정화를 위한 분말 원자층 증착 기술 및 장비 개발	정의	○ 우수한 균일도와 재현성을 갖는 대용량 (10L 이상) 파우더 나노코팅 기술
	요소 기술	- 물리적/전기적/화학적 연속성 개선을 위한 표면 처리 기술 - 증착 속도, 균일도, 거칠기 개선을 위한 전구체 합성 기술 - 균일도, 전기적 특성 확보를 위한 공정 및 장비 기술
롤투롤 제조 장비 디지털 트윈 핵심 기술	정의	○ 롤투롤 제조 장비 핵심 부품/모듈 모델 개발 및 SI 시스템 통합모형을 통한 롤투롤 설계/제어 기술의 확보 및 디지털 트윈화를 위한 핵심 기술
	요소 기술	- 롤투롤 핵심 부품/모듈 모델 및 단위 제어 시뮬레이션 기술 - 롤투롤 디지털 트윈화를 위한 SI 모델링 기술 - 롤투롤 핵심 모듈/부품 모델 개발 및 SI 시스템을 이용하여 디지털 트윈화를 위한 하이브리드 모델 기술

### 〈나노중착 기술 로드맵〉

중분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술								
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
나노 중착 기술	물리적 중착 기술	초대형/고속/고수율 박막 중착 기술	0.1 나노미터 초박막 중착 기술	물성파 위변동 위한 표면처리 기술	표적막에서 다성분계 박막 제조 기술	0.1 나노미터 수평에서 박막 중착 및 특성 실시간 측정 기술						
			초대형/초고속을 위한 중착 기술	진동/안정제어박막 특성 유지 기술	Roll-to-roll 및 같은 기판의 초고속 공술 기술	진공기반의 중착방법의 중착속도 향상 기술						
			기능성/에너지, 초소수성, 항균 및 나노 코팅에서의 자수율, 고비율로 제조 기술	저기, 고안정성, 고출력 박막에서 형성 기술	고수율 중착을 위한 초고속 중착 기술							
	화학적 중착 기술	미래화를 위한 구조/조성 정밀 제어	계층적 3차원 나노 구조에서 박막 중착 속도 조절 기술	3차원 나노 구조에서 gas flow 제어 및 수율제어 기술	3차원 구조에서 균일한 박막 형성 기술	3차원 나노 구조 박막 형성 속도 향상/정제 기술						
			양자 계층으로 디자인된 합성-공정 연계 나노 기술	양자역학 계산 및 유산/비유전계 기술	양자 계층을 통한 박막 형성 기술	양자 계층을 통한 박막 형성 기술	양자 계층을 통한 박막 형성 기술					
			산학적 중착/식각의 지능적 통합 공정 기술	양자역학 기반의 화학적 반응성/이온화 계산 기술	양자 계층을 통한 박막 형성 기술	양자 계층을 통한 박막 형성 기술	양자 계층을 통한 박막 형성 기술					
			자이팅 금속 극박막 ALD 중착 기술	중착속도 및 균일도 개선 위한 유산/비유전계 기술	표적막/기판을 통한 중착속도 및 균일도 개선 기술	무수한 균일도 및 전기적 특성 확보를 위한 공정 기술						
		대면적/고속 화학중착기술의 신기술 확보	대면적 2차원 나노 소재 합성공정 및 중착 기술	대면적 2차원 소재 합성을 위한 연구용 기술	대면적 2차원 소재 합성을 위한 중착 기술	대면적 2차원 소재 합성을 위한 공정 기술						
			2차원 재료 소재 계층 합성공정 및 공정 기술	결정화 제어/이온화 계산 기술	결정화 조절 및 박막 중착을 위한 연구용 기술	결정화 조절 및 박막 중착을 위한 공정 기술						
			대면적 에너지 소재 제조 및 안정화를 위한 분말 합성 중착 기술 및 장비 개발	물리적/전기적/화학적 특성 개선 위한 표면처리 기술	중착속도, 균일도, 거칠기 개선 위한 연구용 기술	균일도, 전기적 특성 확보를 위한 공정 및 장비 기술						
			물부용 제조공정 디자인을 위한 핵심 기술	물부용 핵심부품/소재 개발 및 전기 제어 시스템/이온화 기술	물부용 디자인 최적화 위한 AI 모델링 기술	AI 시스템을 이용한 디자인 최적화 위한 하이브리드 모델링 기술						

### 4-3. 나노패터닝 기술

#### 가. 리소그래피 기술

##### 1) 개요

- (정의) 리소그래피(Lithography)는 원하는 미세 형상을 기존에 기록된 원판 마스크 혹은 디지털 정보에서 기판으로 인쇄하는 공정으로 산업에 널리 사용되는 포토리소그래피는 빛을 이용하여 원판 마스크의 형상을 광감응제를 통해 전사하는 과정이고, 기계적 형상의 전사 및 직접 프린팅하는 새로운 공정까지도 포함
- (필요성) 리소그래피 기술은 반도체 및 디스플레이 분야에서 미세전자소자 구현에 필수기술. 국내 기업들이 해당 분야에서 세계 선도적인 공정 기술은 확보하고 있으나, 기초/원천기술들은 대부분 외국에 의존하고 있는 실정. 또한, 반도체 산업의 치열한 경쟁 및 미-중 갈등 속에서 지속적인 기술 경쟁 우위를 확보하기 위해 정부와 민간의 주도적 지원이 절실히 필요
- (발전 전망) 나노패터닝을 위한 리소그래피 기술은 물리적 한계에 달하는 원자 수준의 초미세 패턴의 구현, 대면적 나노패턴 구현, 저가의 대면적 디지털 나노패턴 구현과 같이, 다양한 산업적 요구사항을 반영하는 형태로 기술이 요구되며, 고집적 반도체 소자의 제조 기술뿐만 아니라 향후 새로운 시장을 창출할 플렉서블 디스플레이, 센서, 메모리 소자, 기능성 표면 적용 제품 등의 수요가 급증할 것으로 기대

##### 2) 미래핵심기술이슈 : 초미세패턴의 대면적 리소그래피 기술

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
극한 발생조건이 필요한 초미세 패턴공정을 위한 고출력 극자외선 광원제작 및 분석기술의 한계	- 극미세 패턴 리소그래피 공정을 위해서는 13.5nm EUV 혹은 6.7nm BEUV와 같은 고출력의 안정한 극자외선 광원 및 분석기술이 필요하나, 극한의 광원 생성 조건 및 비효율적인 광원 발생으로 인하여 고출력 고안정성의 극자외선 광원 개발과 이의 적절한 분석기술이 제한
초고평탄도 표면 및 계면 제어가 필요한 (B)EUV 고반사율 광학계 기술의 한계	- (B)EUV 광은 모든 물질에 높은 흡수율을 갖기 때문에, 기존 투과형 광학계가 아닌 반사형 광학계의 사용이 필요하나, 높은 반사율 및 정밀한 나노패턴의 구현을 위해서는 대면적에서 원자수준의 표면 거칠기 및 박막 계면 조절, 고정밀도 다중 박막 적층과 같은 관련 제조 공정, 장비, 소재 기술의 개발이 미흡
기판 변형을 수반하는 다층 리소그래피 공정시 고해상 선폭 및 패턴 보정 기술의 한계	- 고집적 패널레벨 패키징 및 유연전자소자 패터닝에서 기판의 변형을 보정할 수 있는 나소스케일의 패터닝 기술이 필요하나 기존의 마스크 기반의 리소그래피 기술로는 적용이 제한
고생산성 및 고성능의 달성을 위한 대면적 미세패턴 제작 기술의 한계	- 초고해상도 디스플레이 및 미래 반도체 소자의 구현에 있어서 생산성과 성능의 향상을 위해 대면적에서의 2차원 혹은 3차원 미세패턴이 구현이 필요. 특히 초대면적 및 초미세패턴의 동시 달성을 위해서 대면적에 균일한 포토 레지스트의 박막을 형성하고, 이를 노광, 현상 하고 최종적으로 적절히 에칭하는 장비, 공정 및 소재 기술의 개발이 제한

기술난제	개요
나노미터급 리소그래피를 위한 고속 초정밀 웨이퍼 이송 기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노레벨의 리소그래피를 위해서는 고속 초정밀 웨이퍼 이송 스테이지 기술이 반드시 필요하나, 국내에 이를 대응할 수 있는 고속 초정밀 스테이지 기술력이 매우 미비하므로 국내 나노 비 기술력 제고를 위해 반드시 내재화 개발 필요</li> <li>- 나노미터급 리소그래피를 위한 고속 초정밀 웨이퍼 스테이지는 설계 및 해석 기술부터, 구성 부품, 다자유도 위치 측정, 제어 및 보상, 보정 등의 분야에 있어 High-end 급 기술 개발과 시스템 통합 기술 개발 필요</li> </ul>

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
차세대 리소그래피용 (B)EUV 광원 제작 및 분석/평가 기술	정의	○ 고생산성 극미세패턴 리소그래피 공정을 위한 극자외선 [(B)EUV] 광원 및 분석기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 저출력 EUV 광원 및 광학체 평가 기술</li> <li>- 고풍력 EUV, BEUV 광원 및 관련 소재 · 부품 분석 평가 기술</li> </ul>
(B)EUV 고반사율 비구면 반사경 제작 기술	정의	○ (B)EUV 광원용 광학계 구현을 위한 고반사율 다층박막 원자수준 표면 거칠기 반사경 제작 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 극저열팽창 대면적 반사경 소재 및 특성 평가 기술</li> <li>- 원자수준 표면형상/거칠기 가공을 위한 저탄성 극초정밀 연마 기술</li> <li>- 원자수준 반사경 형상 측정용 레이저 간섭계 및 환경 제어 기술</li> <li>- 대면적 고균질 다층박막 증착 공정 기술</li> </ul>
나노스케일 디지털 리소그래피 기술	정의	○ 마스크를 사용하지 않고 나노스케일의 패턴을 SW 데이터를 이용하여 이미지를 형성하여 기판의 변형을 보정하여 노광하는 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 노광용 포토레지스트 소재 및 광학 기술</li> <li>- 고속 기판 변형 측정 및 스캐너 이송 스테이지 제어 기술</li> <li>- 대면적 이미지 보정이 가능한 병렬 노광 스캐너 설계 기술</li> </ul>
대면적 초미세패턴용 포토레지스트 공정 기술	정의	○ 대면적 초미세패턴용 습식 포토레지스트 박막 코팅 및 현상 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sub 10nm의 (B)EUV 고흡광 고감광성 무기 포토레지스트 소재 및 고순도 제조 공정 기술</li> <li>- 미세패턴 공정의 낮은 LER의 달성 및 패턴 신뢰성 향상을 위한 포토레지스트 트랙 장비 제어 기술</li> <li>- 대면적 디스플레이의 초고해상도 픽셀 구현을 위한 포토레지스트 소재 및 대면적 균일 코팅 공정 기술</li> <li>- 탄소나노튜브 기반 차세대 반도체 노광용 EUV 펄리클 기술</li> </ul>
고종횡비 및 고선택성 나노구조 식각 기술	정의	○ 높은 식각 선택성을 가지며 높은 종횡비의 구현을 이용하여 초미세 나노 구조를 형성하는 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 선택적 식각 및 표면 기능화를 위한 신물질 및 식각 시스템 기술</li> <li>- 저압 및 저이온 에너지 기반의 3차원 저손상 식각 기술</li> <li>- 높은 생산성을 위한 고밀도 플라즈마 기반의 고속 식각 기술</li> </ul>
나노미터급 리소그래피를 위한 고속 초정밀 웨이퍼 스테이지 기술	정의	○ 리소그래피 공정 중 웨이퍼의 고속 이송과 초정밀 위치 추종 및 제어가 가능한 스테이지 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 초정밀 위치 시스템 설계 및 구현 기술</li> <li>- 초정밀 위치 제어 및 고속 이송 추종 제어 기술</li> <li>- 고가속, 고속 이송이 가능한 웨이퍼 스테이지 설계, 해석 및 구현 기술</li> </ul>

## 나. 나노접촉 기술

### 1) 개요

- (정의) 나노스케일 혹은 나노/마이크로 멀티스케일로 구성된 고집적/고기능 소자 등을 제조하기 위한 기술로 나노구조가 가공된 마스터 제작 기술, 나노임프린트 기반 공정 기술 및 이를 이용한 제품 생산기술까지 포함하는 제조 기반 기술
- (필요성) 유연정보전자소자, 웨어러블 정보전자소자, 고성능 3차원 전자소자, 나노메타물질 기반 소자 등의 개발 수요 증가에 따라 다층의 기능성 패터닝 기술개발이 중요 및 다양한 제품에 적용할 수 있는 고내구성 나노구조 금형 기술이 필요하며, 수 nm의 균일한 고밀도 나노스케일 패터닝 및 적층공정 기술이 요구되므로 3차원 표면에 기능성을 부여할 수 있는 나노패터닝 기술로 진화하는 것이 반드시 필요
- (발전 전망) 나노구조가 적용된 제품의 실용화는 나노스케일 뿐만 아니라 마이크로/밀리미터 스케일까지 동시에 가공할 수 있는 기술이 필요하며, 해당 제품의 대량생산이 가능하도록 고온/고압 환경에서 수 만회 이상 반복이 가능한 고내구성 소재 기반 고신뢰성 나노접촉 기술로 발전될 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 고내구성 소재 기반 고신뢰성 나노접촉 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
대면적 패터닝시 상 균일도 및 정렬도 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 넓은 면적에 기능성 나노패턴을 제작하기 위한 대면적 나노임프린팅 패터닝 공정 및 장비 개발 필요</li> <li>- 나노급 패턴의 적층형 제작을 위한 1nm 이내의 정렬 정밀도 해결 필요</li> <li>- 레진의 점도/구성 물질 간의 휘발성 차이, 장비 내 압력 불균일 등 소재/장비 한계로 인해 대면적 기판상 비균일도 발생</li> </ul>
나노접촉식 패터닝의 오염/결함 문제	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 스텝-앤-리피트 공정 시 장비 내 오염물질 및 경계선에 의해 Void가 발생하여 결함 유도</li> <li>- 스텝/레진 간 순차적인 접촉을 통해 모세관 현상 진행 방향을 한 방향으로 유도하려는 시도가 있으나 어려운 문제</li> </ul>
비평면 자유형상 표면 위에 균일한 나노급 패턴 제작 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 렌즈의 곡면 표면 또는 용기(Vessel) 내 측면 등 소자의 표면에 나노패턴을 제작하여 기능을 구현하기 위해, 곡면을 대상으로 하는 나노급 패터닝 공정 및 장비 개발 필요</li> </ul>
스탬프 상 나노구조체와 기판 사이의 균일 접촉의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노스케일 두께의 금속 또는 산화물 박막 등이 증착된 나노구조체 스탬프를 기판 위에 대면적으로 전사할 때 기판의 상태 (패턴 유무, 소재, 유연 특성 등)에 따른 압력 구배 차이로 인한 균일한 접촉 문제로 대면적 전사의 한계</li> </ul>
대량 생산을 위한 나노~밀리미터 스케일 가공 기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노구조 시장 확대를 위해서는 나노~밀리미터 크기의 복합 구조를 제품 수준에서 대량으로 복제하여 대량 제조하는 기술 필요</li> <li>- 이를 위해서는 현재 리소그래피 등 나노가공 기술로 해결이 어려운 고온, 고압, 반복 사용에 견딜 수 있는 고내구성의 금속 소재에 나노~밀리미터 복합 구조 가공 및 이를 이용한 대량 성형 기술 개발 필요</li> </ul>



## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
10nm이하 다층 나노패턴 구현 나노임프린트 공정 장비 기술	정의	○ 웨이퍼 레벨 10nm이하 선평의 다층 나노패턴 대량 제조가 가능한 나노 임프린트 공정 기술
	요소 기술	- 나노임프린트 공정 기반 10nm 이하 패터닝을 위한 소재 및 장비 기술 - 웨이퍼 레벨 대면적 기판상 정렬도 및 균일도 제어 기술
자유형상 표면 기반의 나노임프린트 리소그래피 장비 및 공정 기술	정의	○ 유연 나노스탬프를 이용해서 렌즈 표면, 용기(Vessel) 내측면 등 비평면 자유형상 형상의 기판을 대상으로 나노패터닝 수행이 가능한 장비 및 이를 이용한 3차원 나노기능성 소자 제작 공정 기술
	요소 기술	- 비평면 자유형상에 대한 나노스탬프 제작 및 나노임프린트 장비 기술 - 비평면 자유형상에 대한 나노패터닝 공정 구현 및 3차원 나노기능성 소자 응용 기술
나노소재 및 박막 패턴의 대면적 고수율 전사 기술	정의	○ 나노패턴이 형성된 스탬프 위에 나노스케일 두께의 금속 또는 산화물 박막을 적층하고 대면적 기판에 전사하여 나노소재의 균일 패터닝을 구현하는 기술
	요소 기술	- 나노소재 및 박막 패턴의 형성을 위한 증착 및 결합에너지 제어 기술 - 대면적 기판 전사 수율 향상 및 나노소재 균일 패터닝 기술
고내구성 소재의 대면적 나노~밀리미터 복합구조 가공 기술	정의	○ 제품의 대량생산을 위해 필수적인 금속 등의 고내구성 소재에 대한 대면적 나노~밀리미터 복합구조 가공 및 대량 성형 기술
	요소 기술	- 금속 모재 기반 나노구조 증착 기술 - 나노-밀리미터 복합 구조 기계가공·증착 융합공정 및 성형 기술 - 금속 표면 비등방성 나노구조 가공 기술 - 나노구조 기계적 가공 기술
나노접촉 패터닝의 결합 제어기술	정의	○ 접촉패터닝의 대면적화를 위한 반복 성형 시 발생하는 불량률 발생 요인을 제어하는 기술
	요소 기술	- 접촉 패터닝 공정 중 실시간 결합 모니터링 기술 - 외부 유입 또는 공정 상 발생한 잔해 등 장비 내 오염원 관리 및 제거 기술 - 임프린트 레진의 점도, 구성 물질 간의 휘발성 차이, 장비내 압력 불균일 등으로 인해 발생하는 대면적 기판 상 비균일도 제어 기술

## 다. 나노프린팅 기술

### 1) 개요

- (정의) 나노미터 단위의 공간 분해능을 가지면서, 대면적 3차원 구조의 패터닝이 가능한 기술 중 적층 가공(Additive Manufacturing) 원리를 기반으로 하는 나노패터닝 기술
- (필요성) 적층 가공에서 사용되는 다양한 원리들을 기반으로 재료를 분사하고 쌓고 용착하고 녹여 붙이는 3차원 나노구조 제조 기술은 리소그래피의 마스크 혹은 나노접촉 기술의 금형과 같은 모 패턴이 불필요하여 원하는 패터닝을 짧은 시간 내에 저비용으로 구현하는 것이 가능하며, 해당 기술은 현재까지 기초연구 위주로 연구개발이 진행으로 다양한 적층 제조 기술들을 바탕으로 제품양산에 적용할 수 있는 실질적인 연구개발이 필요
- (발전 전망) 나노프린팅 기술은 잉크젯 프린팅과 유사한 액체 분사 기반 Poly Jet 기술, 전극 패터닝에 활용되는 Aerosol Jet 기술과 유사한 미세액적기반 나노프린팅 기술, 펄스초 레이저 기반 이광자흡수(2PP), 다광자흡수(MPP) 기반 나노프린팅 기술로 발전될 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 나노급 분해능 및 높은 생산성 확보

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
나노프린팅 기술의 느린 프린팅 속도로 인한 생산성 제약(평면상 프린팅)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 극초단 레이저의 비선형 광흡수를 이용한 나노프린팅 공정은 미세 복셀 (VOXEL)의 3차원 스캐닝을 기반으로 하므로, 나노미터 수준의 분해능을 유지하면서, 대면적 3차원 구조를 프린팅에 장시간이 소요되는 한계</li> <li>- 넓은 평면 상에 고속으로 나노패턴을 제작하기 위해서는, 효과적인 비선형 광흡수 기반 프린팅을 가능하게 하는, 고출력 극초단 레이저 기술, 병렬형 빔 스캐닝 기술과 더불어 짧은 노출시간에서 프린팅이 가능한 재료의 확보 필요</li> </ul>
나노프린팅 기술의 수평 방향 분해능 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노프린팅 기술의 수평 방향 분해능은, 집광된 레이저빔의 크기, 광자-프린팅 재료(광중합) 간의 상호반응 및 에칭(프린팅 되지 않은 배경물질 제거) 정도로 결정</li> <li>- 일반적으로 회절한계의 1/2~1/3 수준의 패턴은 안정적으로 프린팅이 되나, 해당 이하 수준의 분해능을 얻기에는 한계</li> <li>- 다양한 과학기술 분야의 보다 높은 분해능 요구에 대응하기 위해서는 이를 극복하기 위한 새로운 기법에 대한 연구 개발 필요</li> </ul>
자유곡면 상에 나노프린팅 실현의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노프린팅을 기반으로 하이브리드 광학 구조를 실현하기 위해서는 기존 광학재료 상에 강한 접착력으로 프린팅될 수 있는 재료 및 계면 활성화에 대한 난제를 극복하여야 하며, 자유곡면 상에 프린팅할 수 있는 공정연구가 필요</li> </ul>
나노프린팅의 다양한 응용을 위한 재료의 다양성 부족	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 현재의 나노프린팅 가능한 재료는 광중합 폴리머 계열의 재료에 집중 개발 중이나, 바이오 및 광학분야 응용의 확장성 확보를 위해서는, 생체 적합성 및 광학 굴절률의 균일성을 보장할 수 있는 재료에 대한 다양성 확보가 요구</li> <li>- 더불어 전도성 나노프린팅 소재 등의 요구에 대응하기 위해서는, 전도성 금속 및 금속 산화물 기반 재료의 프린팅 가능성에 대한 확보가 필요</li> <li>- 나아가, 희토류 금속 및 세라믹 등에 대한 나노프린팅 가능성에 대한 고려 및 확대도 필요</li> </ul>

기술난제	개요
미세액적 생성 기반 잉크젯 기술의 프린팅 해상도 및 속도의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 현재 잉크젯 공정은, 마이크로미터급의 패터닝 해상도 구현은 용이하나, 나노미터급의 해상도의 안정적 구현은 추가 연구/개발이 필요</li> <li>- 해상도의 향상과 더불어, 용액공정의 제약 중 하나인 불안정한 액적 생성으로 인한 낮은 균일도 문제에 대한 해결이 필요</li> <li>- 높은 생산성의 확보를 위해, 다중 노즐의 채택이 필수적이며, 하나의 패턴으로 통합하기 위한 노즐 간 위치정밀도 확보 필요</li> <li>- 잉크젯 노즐 개발의 경우, 압전소자와 MEMS 방식에 대한 별도의 전략 필요</li> </ul>

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
고출력 극초단 레이저의 다채널 증폭 기술	정의	○ 나노프린팅의 고속화를 위한 극초단 근적외선 레이저 고출력 증폭 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고신뢰성 극초단레이저 공진기 개발 기술</li> <li>- 다채널 레이저의 간섭 빔 병합 및 고효율 이차조화파 생성 기술</li> <li>- 실시간 고출력 레이저의 핵심 변수 모니터링/제어 기술</li> <li>- 각 채널별 출력확보 및 출력 안정도 확보 기술</li> </ul>
극초단 레이저빔 병렬형 및 공간 광변조 시스템 기술	정의	○ 동시에 여러 채널의 극초단 고출력 레이저빔을 고효율로 집광/스캔하거나, 공간 광변조기 제어를 통한 2D 평면 이미지 투영으로 나노패터닝을 고속/대면적으로 실현하는 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 극초단 레이저빔의 다채널 병렬형/동시제작 고효율 빔 제어 시스템 기술</li> <li>- 레이저빔의 공간적/시간적 제어를 활용한 고속/대면적 제작 기술</li> <li>- 고충형비/대면적 나노프린팅 및 레이저-물질 상호작용 공정 최적화로 나노패터닝 품질/생산성 향상 기술</li> </ul>
나노프린팅 수평 방향 분해능 향상 기술	정의	○ 나노프린팅 공정의 수평 방향 분해능 한계를 극복하는 집광 레이저 빔 크기, 광자-프린팅 재료 상호작용 및 에칭 공정 최적화 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 광중합 억제제를 통한 비선형 광학 기반 프린팅 분해능 향상 기술</li> <li>- 비선형 광학 기반 나노프린팅의 수평 분해능 향상 기술</li> <li>- 고해상 대면적 나노프린팅을 위한 시스템화 기술</li> </ul>
다중재료 기반 다기능(광학/바이오/전자) 나노프린팅 기술	정의	○ 생체적합재료, 금속/금속산화물, 세라믹 등 다양한 물질의 나노프린팅 도입을 통한, 다양한 기능을 수행하는 능동소자의 나노프린팅 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기능성 재료 프린팅 가능 구조체 기술</li> <li>- 다중 소재에 대한 나노급 프린팅 공정 기술</li> </ul>
고속/고해상도 미세액적 기반 잉크젯 프린팅 기술	정의	○ 다중 노즐에서의 미세액적의 제어를 통한, 나노미터 분해능의 고생산성 미세구조 프린팅 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수송 유체 내 비응집균일 분산/유동 제어 기술</li> <li>- 잉크젯 토출 부위 복잡유체의 표면에너지/계면 안정화 기술</li> <li>- 딥러닝 기반 균일 유동 분산 제어 최적화 기술</li> </ul>



## 4-4. 나노측정·분석 기술

### 가. 나노구조 측정·분석 기술

#### 1) 개요

- (정의) 나노소재를 구성하는 원자 개별 단위 수준에서 원자 배열 구조, 원소 판별, 원자 결합 상태 등을 정밀하게 측정하고 이를 분석하는 기술
- (필요성) 재료의 물리적 성질은 거시적인 관점에서 제조 방법에 좌우되지만, 미시적인 관점에서는 원자의 배열상태나 각 원자의 결합상태에 따라 변화 가능. 따라서 나노소재의 연구는 원자 단위까지의 극미소 영역에서 소재 구조를 설계하고 설계된 구조에 따른 물성을 평가하는 것이 필요
- (발전 전망) 원자 수준에서 실시간으로 관찰하고 분석할 수 있는 고분해능 구조분석 장비, 수 나노미터의 공간분해능을 갖는 화학성분 분석 장비, 대용량의 고분해능 이미지와 데이터를 효과적으로 가공·분석할 수 있는 기계학습 및 인공지능 기술, 극한환경에서의 측정 기술, 측정·분석기술의 표준화 등의 발전 및 기존에 존재하지 않은 새로운 나노소재가 보고됨에 따라 그에 걸맞는 나노구조 측정·분석기술의 개발 병행될 것으로 전망

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 나노화에 따른 구조 측정·분석 기술 한계 극복

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
물질의 나노화에 따른 측정 기술의 한계	- 물질의 크기가 나노크기로 줄어들어 따라 물성의 크기도 감소하여, 물성 측정 감도의 기술적인 한계에 봉착
대량 측정 기술로 실현에 따른 분석 기술의 한계	- 측정기술의 발전에 따라 대량 측정은 가능해졌으나, 대량으로 측정된 결과 (Image, spectroscopy 등)에 대한 분석기술의 한계로 소량 선택적으로 분석하거나 분석 시간이 과하게 소요되는 문제
소재/소자의 작동환경에서 특성 발현 및 손상원인 파악의 한계	- 물성의 발현이 원자 구조 레벨에서 이루어지는 점을 볼 때, 소재/소자의 실제 환경에서 발생 가능한 물성의 변화를 파악하기 위한 장치가 없으며 또한 분석 기법의 표준화 미정립
기판 영향 없이 박막(혹은 2D물질)의 물성 평가의 한계	- 박막(혹은 2D 물질)의 물성(전기적, 역학적, 열적)은 기판의 영향에 따라 변화될 수 있으며, 기판이 없는 상태의 박막(혹은 2D물질)은 구조적 취약성으로 시험편 제조 수율이 크게 떨어진다는 문제

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
극한환경 모사 나노측정·분석 기술	정의 ○ 소재 소자의 나노화, 측정·분석 대상의 대량화 및 대면적화, 측정·분석 시 극한적 구동 환경 모사 등을 포함하는 나노 측정·분석기술의 하드웨어와 소프트웨어 기술
	요소 기술 - 나노구조 이미징을 위한 시료 제작 기술 - 나노구조 및 물성 이미징 기술

나노기술명	개요	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- In-line 나노물성 측정·분석 기술</li> <li>- 인공지능 기반 나노측정·분석 기술</li> </ul>
나노구조체의 원자스케일 변형을 분포 측정을 위한 원자 격자 간섭계 기술	정의	○ 전사 과정이나 합성 과정 중에 2차원 나노구조체에서 발생하는 변형율의 분포를 높은 공간해상도로 측정/분석하는 원자 격자 간섭계 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 원자 격자 간섭계 헤드 광학계 및 제어 모듈 기술</li> <li>- 간섭 신호 측정 신호 처리 기술</li> <li>- 원자 격자 간섭계 측정 MEMS 프로브 기술</li> <li>- 원자 스케일 변형 기반 in-situ 역학 측정 기술</li> </ul>
원자층 층수 변화에 따른 나노물질의 물성 변화 측정/분석 기술	정의	○ 2차원 나노물질 원자층 층수 변화에 따른 역학적 물성(탄성계수, 강도, 점착력, 연신율 등)을 측정 및 분석하는 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 두께가 제어된 시편 제조 기술</li> <li>- 이종의 2차원 나노물질 적층 전사 기술</li> <li>- 2차원 나노물질 관련 재료 전산 모사 기술</li> <li>- 2차원 나노물질의 역학적, 전기-역학적 물성 평가기술 및 국제 표준화</li> </ul>
In-line 나노물성 측정/분석 기술	정의	○ 반도체 공정 전/후에서의 나노박막/구조물의 물성(표면 형상, 전류, 유전상수, 결정 구조 등)을 측정/분석하는 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 표면 형상, 전류, 유전상수, 결정 구조 동시 측정 기술</li> <li>- 인공지능 기반의 측정 결과 고속 분석 및 결합 분석 기술</li> <li>- 웨이퍼 스케일 측정을 위한 프로브 설계 및 제조 기술</li> </ul>
극한환경 나노이미징 기술	정의	○ 초고온, 극저온, 특정 극한환경 적용 소재에 대한 실환경 나노미터 분해능 이미징 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 극저온/초고온 환경 구현을 위한 요소 장치 개발 기술</li> <li>- 극저온/초고온 환경에서의 나노박막/구조체 측정/분석 기술</li> <li>- 극한환경에서의 위상변화 해석 기술</li> <li>- 극저온+전기장, 극저온+자기장, 초고온+자기장 등 다중 극한환경에서의 나노이미징 기술</li> </ul>

## 나. 나노물성 측정·분석 기술

### 1) 개요

- (정의) 나노소재의 물성을 정밀하게 측정하고 이를 분석하는 기술
- (필요성) 재료의 물리적 성질은 거시적인 관점에서 제조 방법에 좌우되지만, 미시적인 관점에서는 원자의 배열상태나 각 원자의 결합상태에 좌우. 따라서 나노소재의 연구는 원자 단위까지의 극미소 영역에서 소재 구조를 설계하고 설계된 구조에 따른 물성을 평가하는 것이 필요
- (발전 전망) 기존에 존재하지 않은 새로운 나노소재가 보고됨에 따라 그에 걸맞은 나노물성 측정·분석 기술의 개발 병행 필요하며, 소재/소자의 나노화에 따른 물성 측정의 한계를 극복하기 위한 하드웨어 및 소프트웨어 기술 개발이 될 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 나노화에 따른 물성 측정·분석기술한계 극복

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
물질의 나노화에 따른 측정 기술의 한계	- 물질의 크기가 나노크기로 줄어들어 따라 물성의 크기도 감소하여, 물성 측정 감도의 기술적인 한계에 봉착
대면적 in-line 측정 시에 측정 속도와 분해능 사이의 trade-off 존재	- 대면적 in-line 측정 시에는 측정 프로브의 동작 stroke이 커지거나 이미징 FOV(Field Of View)가 증가할 필요가 있지만, 프로브의 stroke이 커지면 변위 분해능이 감소하고, 이미징 FOV가 커지면, 이미지 분해능이 감소하는 trade-off 문제

### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
유전 초나노박막 측정/분석 기술	정의 ○ 10nm 이하의 유전 초박막 물성(유전상수, 강유전성, 결정구조 등)을 측정/분석하는 기술
	요소 기술 - 유전 초박막 제조 기술 - 유전 초박막 물성 측정/분석 기술 - 전기장 인가 하에서 실시간 물성 변화 측정/분석 기술
나노구조체의 근접장 에너지 전달 측정 장비 기술	정의 ○ 나노스케일 간극이나 나노구조체 표면에서의 근접장 에너지 전달 특성을 평가하는 기술
	요소 기술 - 측정 대상과 거리 제어 기술 - 미세 에너지 전달 측정 기술 - 미세 소자 및 프로브 제작 기술 - 미세 에너지 전달 측정과 연계된 전산 시뮬레이션 기술
나노구조체의 in-line 전기-역학-광 복합 물리 측정 기술	정의 ○ 고해상도 Nano-LED 소자와 같이 나노구조체를 이용한 소자의 제조 공정 시에 in-line으로 전기-역학-광 특성을 측정하는 기술
	요소 기술 - 웨이퍼 스케일 전기적 접촉을 위한 메타구조체 프로브 설계 및 제조 기술 - 전기-역학 동시 측정용 센서 기술 - 아날로그 신호 고속처리용 반도체 IC 설계 및 제조 기술 - 인공지능 기반의 측정 결과 고속 분석 및 결합 분석 기술

### 〈나노측정·분석 기술 로드맵〉

중분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술									
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
나노 측정·분석 기술	나노구조 분석기술	나노구조에 따른 구조 측정·분석기술 함께 극복	국편환경 묘사 나노 측정·분석기술	나노구조 이미징을 위한 시료 제작기술	나노구조 및 물질 이미징 기술	in-situ 나노물성 측정·분석기술	인공지능 기반 나노 측정·분석기술						
			나노구조체의 원자·분자 수준 변형을 분포 측정을 위한 원자·분자 간섭계 기술	원자·분자 간섭계 제작·광학·제어 기술	간섭 신호 측정 신호 처리 기술	원자·분자 간섭계 측정 MEMS 프로브 기술	원자·분자 변형 기반 in-situ 측정·분석기술						
			전자·분자 수준 변화에 따른 나노 물질의 동적·정적 측정·분석기술	동적·정적 변화에 따른 측정·분석기술	최소·초고속 나노물성 측정·분석기술	2차원 나노물성 관련 재료·측정·분석 기술	2차원 나노물성·화학·전기·역학적 측정·분석기술 및 국제 표준화						
			in-situ 나노물성 측정·분석기술	표면·분자, 전위, 유전상수, 열전도도 등 측정·분석기술	인공지능 기반의 측정·분석 기술과 고·초 분해 및 결합 분석기술	행위·분자 수준 측정을 위한 프로브 설계 및 제작기술							
			국편환경 나노 이미징 기술	국편·외·초고속 환경구현을 위한 요소·장치·제작 기술	국편·외·초고속 환경에서의 나노·제어·구조체 측정·분석기술	국편·외·초고속에서의 원·분·화·물·생·체·측정·분석기술	다중·국편·외·초고속에서의 나노·이미징 기술						
	나노물성 측정·분석 기술	나노·외·초고속 물질 측정·분석 기술 함께 극복	유전·초고속·정적 측정·분석기술	유전·초고속·정적 측정·분석기술	유전·초고속·정적 측정·분석기술	유전·초고속·정적 측정·분석기술	유전·초고속·정적 측정·분석기술	유전·초고속·정적 측정·분석기술	유전·초고속·정적 측정·분석기술	유전·초고속·정적 측정·분석기술	유전·초고속·정적 측정·분석기술	유전·초고속·정적 측정·분석기술	유전·초고속·정적 측정·분석기술
			나노구조체의 균일성·불균일성·결함 측정·분석 기술	측정·분석·처리·제어 기술	최소·초고속·정적 측정·분석기술	최소·초고속·정적 측정·분석기술	최소·초고속·정적 측정·분석기술	최소·초고속·정적 측정·분석기술	최소·초고속·정적 측정·분석기술	최소·초고속·정적 측정·분석기술	최소·초고속·정적 측정·분석기술	최소·초고속·정적 측정·분석기술	최소·초고속·정적 측정·분석기술
			나노구조체의 in-situ 전기·화학·광·복합 물성 측정 기술	나노구조체 프로브 설계 및 제작기술	전기·화학·광·복합 물성 측정·분석 기술	하이브리드·외·초고속·정적 측정·분석기술	인공지능 기반의 측정·분석 기술과 고·초 분해 및 결합 분석기술						



## 제6절 (나노기반) 나노소재

### 1. 개요

#### 가. 정의

- 나노정보전자·에너지·환경·바이오 관련 분야 소재 기술 외 국가전략기술 목표 달성에 필수적인 나노소재 기술로서 응용분야가 확실한 나노소재 기술군과 미래선도 산업을 견인할 수 있는 Emerging 나노소재 기술로 분류

#### 나. 범위

- 나노소재 기술의 범위는 우주·항공극한소재, 모빌리티·드론·로봇 소재, 데이터·AI 혁신소재, 6G소재, 양자소재 및 Emerging 나노소재의 6대 중분류 기술들을 포함
- **(우주·항공 극한 소재)** 우주·항공극한 나노소재 분야의 소분류는 크게 극한환경 및 고강도 구조소재와 달환경 적응형 나노소재 기술을 포함. 우주·항공극한소재 분야는 초고온환경, 극저온환경 및 초경량 나노소재 기술로 국방·항공 분야 등에 있어 활용성이 높아질 것으로 예상. 특히, 달환경 적응형 나노소재의 경우 달 탐사 및 달 자원 활용을 위한 기반 소재로 기술적 우위를 선점하는데 의미
- **(모빌리티·드론·로봇 소재)** 모빌리티·드론·로봇 나노소재 분야의 소분류는 스마트 전기기능 나노소재, 구조전자용 나노소재, 외부환경 대응형 나노소재 및 유연 MLCC 나노소재를 포함. 고안정성·고에너지 효율을 가지는 나노소재와 다중환경을 견디는 나노소재, 그리고 형태변형이 가능한 커패시터 나노소재에 활용가능한 기술을 의미
- **(데이터·AI 혁신 소재)** 데이터·AI 혁신 나노소재 분야의 소분류는 첨단 계산 나노과학 기술과 데이터·AI 기반 나노소재 설계 기술을 포함. 계산속도와 정확도가 담보된 계산 툴과 AI 기반 나노소재 기술을 의미
- **(6G 소재)** 6G 나노소재 분야의 소분류는 초고성능/초저지연 통신 나노소재, 6G 미디어 구현 나노소재 및 고주파수 제어 초박막 나노소재 기술을 포함. 극고주파 대역 활용이 가능한 나노소재 및 초실감 구현을 위한 능동형 나노소재 및 밀리미터파 제어소재 기술을 포함
- **(양자소재)** 양자 나노소재 분야의 소분류는 양자컴퓨팅 양자 나노소재와 양자 통신 및 센서 소재를 포함. 지수적 계산능력 향상기술과 원천보안형 정보통신이 가능한 나노소재 기술을 포함
- **(Emerging 나노소재)** Emerging 나노소재 분야의 소분류는 초격자 2차원 나노소재, 화합물 이차원 나노소재 및 이온반도체 나노소재를 포함. 결정 제어와 다성분 안정성이 확보된 나노소재

기술과 반도체 특성 외 정보저장이 가능한 이온반도체 소재 기술을 포함

〈나노기반 (나노소재) 분야 기술 분류체계 제3기·제4기 수정 경과〉

3기 나노기술지도		4기 나노기술지도 조정(안)	
중분류 (3개)	소분류 (13개)	중분류 (6개)	소분류 (14개+)
나노입자소재	금속나노분말	우주·항공 극한 소재	극한환경 구조 소재
	세라믹나노분말		달 현지자원 활용을 위한 소재
	나노촉매		고강도 경량 소재
	양자점	스마트 전기기능 나노소재	
저차원소재	1차원 나노소재	모빌리티·드론·로봇 소재	구조전자용 나노소재
	2차원 나노소재		외부 환경 대응형 나노소재
	저차원 탄소나노소재		Flexible MLCC 나노소재
	유무기 하이브리드 나노소재		첨단 계산나노과학 기술
나노복합소재	나노코팅소재	데이터·AI 혁신 소재	데이터·AI 기반 나노소재 설계 기술
	나노기공소재	6G 소재	초고성능/초저지연 통신 나노소재
	고분자 나노복합소재		6G 미디어 서비스 구현 나노소재
	탄소나노복합소재		고주파수 스펙트럼 제어 초박막 나노소재
	3차원 계층소재	양자소재	양자컴퓨팅 양자소재
		양자 통신 및 양자 센서 소재	
		Emerging 나노소재	초격자 2차원 결정 소재
			화합물 이차원 소재
			이온반도체 소재

### 다. 역량 분석(SWOT)

		내부 환경		
		기회(O)	위협(T)	
외부 환경		O1. 국내 우주항공 소재 기술에 대한 위상 증진 및 관심 확대 O2. 국제정세 불안에 의한 방위 산업 관심 증가 O3. 소재 개발 트렌드가 다변화됨에 따른 신규 소재의 중요성 증대	T1. 해외 기술 선진국 대비 낮은 경쟁력 T2. 미/일/독 원천소재에 대한 높은 수입의존도 T3. 글로벌 기업의 공격적 기초 소재 개발과 막대한 연구비 투자	
		<b>강점 (S)</b> S1. 세계적인 나노소재부품 수요 기업 다수 보유 S2. 정부의 나노소재산업 인프라 구축 및 산업육성을 위한 투자 S3. 국내의 활발한 소재 관련 기술 및 연구 현황	○ 최종 수요기업의 요구를 적극 반영한 연구개발 목표 설정 ○ 많은 국내 연구진을 중심으로 다양한 신규 소재 관련 지식 확보. ○ 연구 개발 트렌드에 맞춘 소재 개발에 대한 투자 증대	○ 기존 해외 소재 공급업체를 대체할 수 있는 원천소재의 선제 국산화 ○ 글로벌기업에 대응할 수 있는 강소 나노소재 관련 국내 기업 집중육성 ○ 글로벌 기업에 대응할 수 있는 원천 기술 확보
		SO 전략 WO 전략	ST 전략 WT 전략	
<b>약점 (W)</b>		W1. 나노소재 원천기술 확보 미흡 W2. 고급 연구개발 전문인력 부족 W3. 하이엔드급 나노소재 기술 한계 W4. 기업과 연계된 주요 이슈의 선정과 역량 집중 부재	○ 중소기업 기술력을 보완할 수 있는 산학연 협력 연구 기회 확대 ○ 고난도 나노소재 기초기술에 대한 국가 장기 투자 전략 확보 ○ 소자 개발 트렌드와 관련하여 요구되는 신소재의 물성을 기업과 학계 간 공유 ○ 소재 산업 발전에 따른 인력 양성	○ 현재 시장보다는 10년 이후 환경을 고려한 장기적 연구개발 ○ 산학연 융합 기반 기업 맞춤형 소재 및 공정 국산화 장기적 전략 수립 ○ 기업과 학계간 연합으로 주요 이슈를 선정하고 기술 선점에 노력 ○ 차세대 재료에 대한 지속적 발굴 노력

## 2. 국내외 기술 및 산업동향(현황 및 전망)

### 가. 국외 기술 및 산업 동향

○ (우주·항공 극한소재) 미국, 유럽, 중국, 일본 등 우주항공기술 선진국을 중심으로 초내열·열방호·초경량 나노소재에 대한 기술 개발 경쟁이 지속. 우주항공기술 뿐만이 아닌 국가전략 기술로 취급되어 대외 유출을 엄격히 제한하고 있는 상황

- 미국은 NASA 및 GE를 중심으로, 기존 합금보다 온도 수용성을 약 60℃ 향상시킨 3세대 단결정 초내열 소재를 약 20년 전 개발하였으며, 초내열합금의 주요 원소인 Re 및 Ru의 함량을 변화시키며 더욱 뛰어난 물성을 나타내는 4세대 및 5세대 합금 개발에 지속 노력. 또한, 초내열 내산화성 나노구조 소재에 대해 Multidisciplinary University Research Initiatives (MURI)을 통하여 200℃ 이상 고온에서 열적, 기계적으로 안정한 소재를 시뮬레이션으로 탐색하고 제조법을 개발하는 프로그램 진행
- 극저온(약 77 K 환경) 소재의 경우, 지난 70년도부터 현재까지 원천 기술 특허 대부분을 미국과 일본이 독점(예. 7니켈 및 9니켈강). 이를 기반삼아, 미국과 일본은 현재 초극저온 액화 수소 환경(약 4K - 20 K)에서 활용 가능한 다양한 합금소재의(예. 12니켈강, 개선된 300계 스테인리스강) 원천 기술 특허를 지속적으로 확보
- 일본에서는 SIP-SM4I 및 HOPE-X 등 프로그램으로 세라믹 코팅 및 복합소재를 통한 우주항공소재 개발
- EU C3HARME 및 영국 X-MAT 프로그램으로 마하 7 이상 극초음속 체계를 위한 소재개발 진행 중. HERMES (프랑스), HOTOL (영국), SANGER (독일) 등 각 국가별로 탄소복합재 및 내산화 코팅 개발이 진행중이며 중국, 인도 등 후발국도 적극적으로 연구개발에 투자중
- 최근 스페이스X, 아르테미스 계획으로 대표되는 항공우주 산업에서 경량화된 재료에 대한 관심이 높아지고 있으며 이에 따라 2020년 344억 1천만 달러로 평가되는 항공 우주 재료 시장은 연평균 8.1% 성장하여 2029년에는 693억 7천만 달러에 이를 것으로 예상

※ Exactitude Consultancy, Aerospace Materials Market by Type and by Region Global Trends and Forecast from 2022 to 2029

○ (모빌리티·드론·로봇 소재) UAM·UAV의 구현을 위한 비행거리, 안정성을 확보하기 위해서는 이에 포함되는 주요 구성 요소인 무선통신, 에너지, 동력 구동 및 기체용 부품의 경량화가 요구되며, 이는 종래의 금속 소재가 아니라 복합체 형태의 소재가 활용될 것으로 전망. 이에 따라 각 요소에 요구되는 성능을 만족시키기 위한 나노소재 기반의 고성능 복합소재 개발 진행

- 초고전압 MLCC용 소재는 MLCC 세계선두 그룹인 일본에서 전장용 MLCC 및 이를 위한 고품위 나노소재 개발 진행 중

- 탄소나노튜브를 이용한 경량와이어 제조기술은 미국을 중심으로 학계와 산업계에서 연구 개발이 이루어지고 있으며, 모터 등 모빌리티용 부품 개발은 아주 초기 단계
- 프레임 일체형 에너지 저장 나노소재 기술 연구 결과들이 지속적으로 발표되고 있으며, 종합적으로 고려해 볼 때 연구실 규모의 부품/시스템 성능평가(TRL 4단계) 수준으로 평가. 프레임 일체형 에너지 저장 부품은 모빌리티, 드론 및 로봇 등의 추가 동력원 확보와 동시에 외부 충격에 대한 배터리의 안정성 향상과 더불어 기존 배터리 모듈 증설시 발생하는 하중 집중 문제 해결이 요구되며, 부품 상용화로 2030년까지 1.5조원 규모의 신시장 창출이 예상
- 입체면 인쇄기술은 미국, 호주, 중국 등 주요 연구기관에서 전극, 전자기판 등 부분별 제작에 활용할 수 있는 소재를 개발 중이며, 분사 방식, 적용 분야에 따라 Voxel8, Nano Dimension, Opecnec 등 기업에서 개발된 기술이 세계적으로 활용되고 있으며, 대학을 중심으로 물 분해(water splitting) 방식, 멀티노즐 방식 등 새로운 기술이 개발 중
- 차세대 모빌리티·드론·로봇용 내·외장재는 단순 경량/고강도 특성 구현을 넘어서서 다기능성 (방청, 방오, 방염, 난연, 전자기차폐, 스텔스, 자가 치유 등)의 구현을 목표로 개발이 진행되고 있음. 이를 위해 다층 라미네이트 구조의 복합체에 적용 가능한 접착코팅용 나노소재의 개발 및 적용이 이뤄지고 있는 추세
- 미국의 Technical Fibre Products 社의 경우 복합체 충전용 섬유의 다기능화를 위해 나노소재 기반 코팅 기술을 도입하는 중이며, EU의 Horizon 2020 프로그램의 일환으로 16개의 산·학·연기관이 참여하는 MASTRO 프로젝트를 진행하여 동결방지, 자가치유, 능동감지 기능성을 가진 나노소재 적용 복합소재 개발 진행 중

※ Composites World, "Multifunctional composite structures across end markets", 2021

○ **(데이터·AI 혁신소재)** 기존 계산과학기술의 한계(scale/time 관점)를 극복하기 위한 노력과 데이터/AI를 기반으로 소재 개발을 가속화하기 위한 다양한 기술 개발 및 산업화 노력 진행 중. 기존 제1원리계산 및 분자동역학 시뮬레이션 등의 계산 기술의 한계를 극복하기 위한 노력이 미국 및 유럽 등을 중심으로 활발히 진행되고 있고, 특히 인공지능 기술과 접목하여 새로운 형태의 계산과학 기술을 개발 중. 제1원리계산의 계산 시간/스케일 측면에서의 한계를 극복할 수 있는 새로운 계산과학기술 개발을 통해 반도체, 촉매 등의 다양한 소재 설계에 응용 중

- 데이터 기반 소재 설계를 위해서는 소재 데이터베이스(DB)를 구축하는 것이 무엇보다 중요하며, 세계적으로 첨단 계산과학기술을 기반으로 대량의 소재 물성을 계산하고 이를 DB화하여 공개

- 미국의 경우 Lawrence Berkeley 연구소의 Materials Project (materialsproject.org) 및 노스웨스턴대학교의 OQMD (oqmd.org) 등이 있고, 유럽의 경우 독일 막스플랑크연

구소의 NOMAD (nomad-lab.eu) 등이 있음. 현재 공개된 소재 DB는 대부분 계산 데이터 중심이고, 실험 데이터를 DB화 하는 노력이 전세계적으로 진행 중

- 미국 버클리대학에서는 자연어처리 기술을 이용하여 문헌상에서 실험 데이터를 수집하고 이를 기반으로 AI 기술을 활용하여 새로운 소재 설계 가능성 제시하였으며, Citrine Informatics에서는 데이터 기반의 소재설계 기술을 상업화
- AI 기능이 탑재된 로봇 및 실험자동화 장치를 이용하여 신소재 개발을 가속화할 수 있는 플랫폼(Autonomous lab)을 개발중이며, 촉매 및 유기소재 등의 다양한 분야에 적용 중
- 캐나다 토론토대학에서는 유기태양전지 소재 개발을 가속화할 수 있는 AI 로봇 개발하였고, 미국, 독일 등에서도 유사 플랫폼 개발
- 영국 리버풀대학에서는 자율주행 기능이 탑재된 로봇으로 실험실을 자유롭게 움직이면서 사람처럼 실험을 수행할 수 있는 플랫폼 개발

○ (6G) 6G 통신에서 요구되는 초고속/초광대역/초저손실/고신뢰성 통신기술 실현을 위해 sub-THz/THz 주파수 대역에서 우수한 전자기 성능을 발휘하는 해당 주파수 대역에서 우수한 전자기성능을 발휘하는 새로운 나노소재가 요구

- 6G 통신에서 sub-THz 대역의 극고주파를 활용함에 따라 통신부품 내에서 주파수 상승에 따른 신호손실 문제와 전송속도 지연 문제가 대두되고 있으며, 이를 해결하기 위해 기존 부품용 기판소재로 활용되던 에폭시, PI 등을 PTFE 등의 저유전/저손실 나노소재로 대체하려는 요구 증가. 미국의 Rogers, 독일의 Isola, 일본의 Panasonic 등이 상업적으로 가장 앞서나간 결과를 보여주고 있으며, 5G용 기판 시장의 대부분을 차지
- 부품 집적화와 다양한 주파수 활용화에 따라 발열 및 대역간 전파간섭에 의한 부품성능 저하 문제를 해결하기 위해 기존의 전도성 차폐소재 및 방열소재를 대체하는 전자파 흡수차폐/방열 다기능 나노복합소재 개념 제시. 미국의 Laird는 5G용 전파 흡수차폐/방열 복합소재인 Coolzorb 시리즈를 상용화하였으며, 일본의 TDK도 5G용 전자파 흡수 복합소재인 IR시리즈 공개
- 6G 통신에서 구현 가능한 고화질 광시야각 홀로그램 영상을 제공하기 위해서는 복소변조가 가능함과 동시에 가시광 파장 이하대의 픽셀피치를 가지는 능동 메타소재 홀로그램 디바이스 기술이 필요하지만 대부분 수동형 디바이스 기술이거나 이를 변형한 multiplexed 홀로그램 기술 연구가 활발. 진정한 능동 메타 관련해서는 가능성 검증 수준이고, 파장대역도 가시광이 아닌 적외선 이하에서 작동하는 수준

○ (양자소재) 양자기술은 양자중첩으로 존재하는 큐비트를 기반으로 하며 양자상태로 존재할 수 있는 결맞음 유지시간을 극대화할 수 있는 소재를 개발 중. 양자컴퓨터 기술이 세계적으

로 중요한 미래전략기술로 부상하는 상황에서, 향후 에러보정의 오버헤드를 최소화할 수 있는 낮은 에러율의 물리 큐비트 개발은 양자물리와 함께 진행 중

- 에러 보정형(fault-tolerant), 범용 양자컴퓨팅으로 도약하기 위한 노력 진행. 범용 대규모 양자컴퓨터 상용 프로토타입의 등장 시기는 향후 20~30년 사이로 예측(2017 MIT 10대 혁신기술 선정, 세계 경제포럼 10대 미래유망기술 선정 등)
- 유럽연합의 경우 Quantum Technologies Flagship을 통해 2018년부터 10년 동안 총 1.3 조원의 연구비를 지원하며 광기반 양자시계, 원자증기셀 기반 각속도/자기장/시계, 다이아몬드 NV 센터 기반 MRI 이미징, 다이아몬드 NV 센터 기반 자기장/전기장/온도/압력 센서 등의 총 4개 양자센싱 프로젝트를 지원. 영국의 경우 Quantum Technology Hub를 통해 2014년부터 10년 동안 총 4 천억원 규모의 지원을 하고 있으며 중력계, 자력계, 자이로스코프, 원자시계, 양자이미징 등 총 12개의 양자센싱 프로젝트를 진행중. 중국의 경우 2020년 총 12 조원 규모의 National Lab for Quantum Information Sciences 거대 연구센터를 조성하고 양자기술 전반에 대한 중장기적 지원을 추진

- (Emerging 나노소재) 다양한 응용성에 기반을 두고 기존에 존재하지 않은 소재군을 의미. 새로운 결정구조를 가지는 나노소재개발을 기반으로 신응용처를 발굴하여 신시장 창출을 기대
  - (초격자 2차원 결정 소재) TSMC, 인텔 등 산업체에서 Post-Si 채널 소재로서 이차원 결정 소재 연구를 수행 중. 중국 연구진들에 의해서 단결정 에피 기판 상에서 이차원 단결정 소재를 고온 합성 하는 방법이 보고. 하지만, 비정질 유전체 상에 저온 성장은 현재로서는 요원. 미국 하버드, MIT, 콜럼비아 대학 등에서 인위적 Moiré 패턴을 지니는 이차원 복합 구조에서 유발되는 양자 현상 연구가 활발히 진행 중. 소재 개발 측면에서는 대면적 웨이퍼 상에 균일한 Moiré 초격자 구조를 구현하는 연구가 시카고 대학 등에서 보고
  - (화합물 이차원소재) 미국, 드렉셀 대학에서 2011년 최초의 맥신 합성 보고 이후, 미국, 중국, 유럽, 호주, 일본, 등에서 다양한 기초 및 응용연구가 폭발적으로 증가. 최근에 국제학회 및 리뷰 논문 등을 통하여 연구저변이 확대되고 있으며 조성의 다양화 및 기초물성에 대한 이론 및 실험 결과, 소재 물성을 기반으로 한 응용기술 개발에 대한 보고가 증가
  - (이온반도체) 이황화 몰리브덴 기반 다양한 작동 원리를 가지는 반도체 소자 개발(Northwestern 大)이 보고 되고, 이에 기반한 기초 및 응용연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있으나 차세대 소자로 유망한 후보군인 이온반도체 기반 소자는 보고된 바 없는 상황. 또한, 이온절연체에 대한 연구는 미국 등에서 활발히 진행되는 중이나, 이온반도체에 대한 개발 및 연구는 국제적으로도 요원한 수준

## 나. 국내 기술 및 산업 동향

- **(우주·항공 극한소재)** 국내 전반적인 초내열 소재 연구수준은 기술 선진국인 미국, 일본, 러시아에 비하여 약 10년 이상 뒤쳐져 있는 상황. 탄소섬유 및 이를 이용한 나노복합소재 등을 중심으로 기초소재에 대한 연구개발 및 산업화를 위한 노력이 진행 중. 최초의 한국형 발사체인 누리로의 추진체 부품 및 연료용 고압 탱크에 경량성과 강도를 동시에 잡을 수 있는 알루미늄 합금이 사용

※ KEIT, 항공용 금속소재 자립화 현황 및 전망, 2021

- 초내열·열방호 소재의 경우, 재료연구원이 2세대 단결정 초내열 합금인 CMSX-4보다 크립 특성이 우수한 합금 및 800 ℃에서 900 MPa급 고강도를 나타내는 초내열 합금 개발에 성공
  - 극저온 소재의 경우, 포스코의 고망간강이 거의 유일한 국내 원천 기술임. 아직 초극저온 환경(4K - 20K) 적용을 위한 원천 기술은 전무한 수준이며, 더불어 해당 온도 환경에서 수소취성 현상에 대한 연구 역시 전무한 수준
  - 효성 및 전주기계탄소기술원에서 탄소섬유 산업화를 위한 연구가 진행 중. (주) DACC에서 항공기 브레이크용 탄소/탄화규소 복합소재를 산업화하였으며 한국세라믹기술원, 한국에너지기술연구원에서 섬유 및 복합소재에 대한 연구가 진행 중. 재료연구원을 중심으로 산화물, 봉화물 등 다양한 초고온용 내삭마 나노재료를 활발히 개발 중
- 
- **(모빌리티·드론·로봇 소재)** 산업통상자원부는 ‘4차 산업혁명시대의 항공산업 발전전략’을 통해 개인용 비행체 및 드론 개발을 위한 경량 신소재 기술의 개발을 주요 발전방안으로 제시했으며, 국토교통부 주관으로 작성된 한국형 도심항공교통(K-UAM) 기술로드맵에서 기체 및 전기추진체의 경량화를 주요 세부기술로 선정
  - 초고전압 MLCC용 소재는 삼성전기에서 최근 이를 위한 소재개발이 시작되어 세계시장 점유율이 1% 이내로 저조한 수준 (IT용 MLCC 세계점유율 약 24%)
  - 경량와이어 기술은 자동차 하네스를 탄소나노튜브 섬유기반으로 대체하려는 시도가 있으며, 연구소를 중심으로 모터, 발전기용 구리권선을 대체하는 탄소나노튜브/금속 복합와이어에 대한 기초연구가 진행 중
  - 프레임 일체형 에너지 저장 소재 및 소자 관련 개념 특허는 국내 연구진들도 보유하고 있으나 고강도 에너지 저장 소재, 고탄성 전해질 소재 개발 연구는 TRL 2단계로 아직 초기 단계. 중소 벤처기업들을 중심으로 지식재산권과 선행 연구에 관한 핵심 기술 기초 연구를 진행하고 있으며, 특히 (주) 사성파워는 구조전지 IT 솔루션(소프트웨어), 구조전지 및 구조전지 응용 제품(착용형 로봇, ESS) 등을 개발·생산 중



- 국내에서 구조전자기술을 실현할 수 있는 3D인쇄전자 관련 기능성 소재 및 장비에 대한 연구개발은 대학(서울대, KAIST, 한밭대, 연세대, 부산대, 경북대, UNIST, 성균관대, 중앙대, 한양대, 고려대 등)과 연구원(ETRI, KRICT 등)을 중심으로 연구가 진행되고 있으며, 최근 국내 대기업 및 중견기업에서 경연성 PCB 제조 및 전자소자 하우징에 직접 전극 및 회를 인쇄하는 기술을 차세대 자유형상소자 구현 공정에 적용하기 위한 검토를 진행 중
- 국내 접착코팅 소재 공급업체는 주로 저가 산업용제품 중심의 개발 및 판매가 이뤄지고 있으며 미래모빌리티에 필요한 고기능성-고부가가치 제품의 경우 외국계 기업들의 점유율이 월등히 높은 상황

※ 지식산업정보원 “고기능 신소재·부품 산업별 기술동향 분석”, 2021

- **(데이터·AI 혁신소재)** 국내에서도 나노분야에서 계산과학기술에 대한 중요성을 인식하고 있지만 기초기술 개발보다는 응용연구에 집중되어 있고, 과기부, 산업부를 중심으로 소재데이터에 대한 중요성이 인식되어 소재 DB 구축을 위한 노력 진행 중
  - 비전문가도 손쉽게 나노소재를 설계할 수 있는 나노소재 설계용 계산과학 플랫폼이 개발 중에 있으며 다양한 응용분야로 확장 노력 중. 나노소재의 다양한 물성을 예측하기 위해서는 현재 계산나노과학기술의 한계를 극복할 수 있는 시뮬레이션 기술의 개발과 계산나노과학 플랫폼의 응용 분야 확대가 필요
  - KIST에서는 다양한 계산나노과학 기술을 이용하여 연구테마별 (리튬이차전지, 나노입자 촉매 등) 나노소재 설계를 위한 시뮬레이션 플랫폼(vfab.org)을 개발하여 외부에 공개
  - ㈜버추얼랩에서는 나노소재의 물성 예측을 위한 Materials Square라는 시뮬레이션 플랫폼을 상용화 중인 상황
  - 나노소재 분야의 계산·실험 데이터를 확보하고, 이를 체계적으로 관리·활용할 수 있는 플랫폼 구축 중. 특히 문헌상의 나노소재 데이터를 효율적으로 수집할 수 있는 기술 (자연어 처리기술 등) 개발이 필요. 또한, 현재 계산-실험 간의 괴리감을 없애기 위해서는 실험데이터를 기반으로 소재를 설계할 수 있는 AI 기술 개발에 많은 노력 필요
  - 과기부의 소재연구데이터플랫폼구축사업에서 에너지·환경, 스마트·IT, 구조·안전 소재분야의 연구데이터 표준화 체계를 확립하고 이를 기반으로 나노소재 DB를 구축 중
  - 서울대, KAIST 등 대학을 중심으로 계산데이터 기반의 나노소재 설계용 AI 기술 개발 중
- **(6G)** 6G 통신에서 요구되는 초고속/초광대역/초저손실/고신뢰성 통신기술 실현을 위해 sub-THz/THz 주파수 대역에서 우수한 전자기성능을 발현하는 새로운 나노소재가 요구
  - 중공형 실리카 등의 세라믹 필러를 활용하여 고분자의 유전손실을 낮추고자 하는 연구가 기존 통신부품 기관 업체들을 중심으로 활발하게 이뤄지고 있으며, 세라믹 반도체 공정의

배후산업이 잘 갖춰져 있는 만큼 세라믹 기반의 저유전/저손실 LTCC 소재 및 공정 개발에 대한 연구에도 업체들의 관심이 높은 상황

- 솔루에타와 창성 등 한국은 3G/4G용 전파 반사차폐 소재 분야에서 주도적인 업체를 다수 보유하고 있었으나 통신 세대의 변화와 함께 발생한 전파흡수 요구를 효과적으로 대응하지 못하고 통신 성능 저하 최소화 소재 개발의 주도권을 잃고 있는 상황
- 최근 헥사페라이트와 CNT섬유 등 다양한 신규 나노소재를 활용하여 6G 통신 주파수 대역에서 우수한 전파흡수 성능과 방열성능을 동시에 확보하고자 하는 연구가 정출연을 중심으로 이뤄지고 있는 상황
- 광메타 홀로그램 디스플레이 관련하여서는 서울대, KAIST, ETRI, POSTECH, GIST 등 학계 및 출연연 등 연구기관을 중심으로 기초연구가 진행중이나 대부분 수동 소자 중심의 연구가 이루어지고 있는 상황. POSTECH은 메타물질에 액정기술을 접목해 외부자극에 반응해 여러 가지 홀로그램 이미지를 보여주는 Multiplexed 홀로그램 기술을 개발
- 최근 고집적 구동 회로와 능동 메타 물질을 결합하여 진정한 고화질 광시야각 홀로그램을 구현하고자 하는 연구가 ETRI를 중심으로 이루어지고 있는 상황

- **(양자소재)** 국내 양자기술 역시 양자중첩 조절과 양자상태의 결맞음 시간 유지를 위한 소재 기술 개발이 진행 중. 여러 물리계에 걸쳐 확장형, 에러 보정형 (fault-tolerant), 범용 양자 컴퓨팅으로 도약하기 위한 노력이 진행 중이나 기초연구단계 수준
  - 2019년부터 연구재단, IITP 주관으로 중력계, 자력계, 이미징, 광원 등 다양한 양자센싱 과제를 지원하고 있으며 지속적으로 연구비 규모를 확대해 나갈 것으로 기대

#### ○ **(Emerging 나노소재)**

- (초격자 2차원 결정 소재) 삼성에서 Post-Si 채널 소재로서 이차원 결정 소재에 대한 연구가 진행 중. 학계에서 관련 소재의 물성 탐색 위주로 연구가 이루어지고 있으며 소재 제작에 관련된 원천 기술 확보는 미흡한 편
- (화합물 이차원소재) 국내에서는 KIST에서 전자파차폐기술 적용(2016)을 보고하였으며, 나노종합기술원에서 산화안정화(2019) 및 마이크로 응용소자 기술(2021)을 보고. KAIST에서는 센서소자를 발표(2018)하였고, 전자통신연구원, 화학연구원, 성균관대학교, 연세대학교 등에서 맥신 소재관련 연구가 진행되고 있으나, Ti3C2 이외 조성의 다양화(다성분) 기초연구와 대면적 기술 및 응용소자 개발 등이 필요
- (이온반도체) 국내에서는 이온반도체 원천기술은 전무한 수준이며, 기초연구 진행 또한 활발히 진행되고 있지 않은 수준. 따라서, 차세대 소자 물질로서 한계를 가지고 있는 이온절연체를 넘어서는 이온반도체 원천기술 개발과 이를 통한 차세대 소자 개발 필요성이 꾸준히 중요시되는 분야

### 3. 기술발전 전망

중분류	현재 기술	미래 기술
우주·항공 극한소재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 약 77K 극저온 환경 적용 금속소재</li> <li>- 800 °C 미만에서 1 GPa 급 강도를 나타내는 초내열 소재</li> <li>- 일회성 초고온 나노구조소재</li> <li>- 알루미늄, 타이타늄 등의 단순 금속 합금 경량 소재</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 4K - 20K 초극저온 수소 환경 적용 금속소재</li> <li>- 800 °C 이상에서도, 1 GPa 급 강도와 자가치유 능력을 지닌 초내열 소재</li> <li>- 재진입 비행체용 반복사용 나노구조 소재</li> <li>- 2500°C 이상 초고온 나노구조 소재</li> <li>- 구조적 지지효과를 통해 높은 강도지닌 경량화 합금 소재</li> </ul>
모빌리티·드론· 로봇 소재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고효율 장수명 에너지소자 기술 및 고성능 전자 소자부품 기초 기술</li> <li>- 상용 소재를 활용한 IT용 MLCC</li> <li>- 나노카본 기반 와이어 기초 기술</li> <li>- 패키지 및 기판 기술을 이용한 고강도 혹은 고 변형성 프레임 일체형 에너지 저장 소자</li> <li>- 단순 입체면상 200 μm 선폭의 전도성 나노소재 전극 인쇄기술</li> <li>- 합금 및 탄소섬유 기반 경량 복합체 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 초경량 나노소재 기반 에너지 소자 및 전자소자 부품 기술</li> <li>- 초 기능성을 가진 나노소재 기반 복합체 및 접착 코팅 기술</li> <li>- 구리 대체 고전도성 경량 와이어 기술</li> <li>- 고강도 혹은 고변형성 에너지 저장 나노소재를 적용하여 변형 내구성이 매우 우수한 프레임 일체형 에너지 저장 소자</li> <li>- 6축 전방위 자유형상 입체면 1 μm 이하 선폭의 기능성 나노소재 및 인쇄 기술</li> <li>- 소결 이방성을 해결한 멀티 이종 소재 및 이를 활용한 적층/소결/신뢰성 확보 기술</li> </ul>
데이터·AI 혁신소재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 작은 분자(원자 10개 미만) 에너지 계산</li> <li>- 양자컴퓨터/시뮬레이터 알고리즘 개발(인공지능, 분광학 스펙트럼, 분자 동역학 등)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 실용 소재(촉매, 배터리 등)를 포함하는 나노구조 체 계산과 시뮬레이션</li> <li>- 양자컴퓨터/시뮬레이터 알고리즘 하드웨어 구현</li> </ul>
6G	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 5G 통신대역 유전소재 (유전율 3.2 / 유전손실 0.002 수준)</li> <li>- 전도성 소재 기반으로 반사 위주의 전자파 차폐 소재</li> <li>- 적외선 이상의 동작 파장</li> <li>- mm 수준의 메타물질 제조 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 6G 통신대역 저유전·저손실 유전소재(유전율 2.2 / 유전손실 0.001 수준)</li> <li>- 초고손실 유전/자성 소재 기반으로 흡수 위주의 전자파 차폐소재</li> <li>- 가시광 동작 파장</li> <li>- 8인치 수준 메타물질 대면적 제조 기술</li> </ul>
양자소재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 10~20 큐비트 1차원 배열 수준</li> <li>- 단일광자와 이종큐비트 얽힘 벨 상태 충실도 80% 수준, 양자 연결효율 10 수준</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1,000~10,000 큐비트 2, 3차원 배열</li> <li>- 단일광자와 이종큐비트 얽힘 벨상태 충실도 95% 수준, 양자연결효율 50 수준</li> </ul>
Emerging 나노소재	[초격자 2차원 결정소재] <ul style="list-style-type: none"> <li>- 단결정 웨이퍼 상에서 성장 가능</li> <li>- 700°C 이상 고온 합성</li> <li>- 물성 탐색 위주, 단일 소자 제작</li> </ul>	[초격자 2차원 결정소재] <ul style="list-style-type: none"> <li>- 유전체 포함, 비정질 기판상 성장</li> <li>- Backend 공정을 위한 450°C 이하 온도 합성</li> <li>- 소자 어레이 제작을 위한 웨이퍼 공정</li> </ul>
	[화합물 이차원소재] <ul style="list-style-type: none"> <li>- 합성기술 및 분산 기술</li> <li>- 응용소자 기초기술</li> </ul>	[화합물 이차원소재] <ul style="list-style-type: none"> <li>- 조성의 다양화 기초 및 실험 기술</li> <li>- 물성 평가기술 및 물성 제어기술</li> <li>- 소재 안정화 및 대면적 소자화 응용기술</li> </ul>
	(이온반도체) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 산화물 기반 이온 절연체 제작 기술</li> <li>- 이온반도체 및 이온절연체 응용 기초 소자 기술</li> <li>- 이온반도체 합성 및 응용 분야 전무</li> </ul>	(이온반도체) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 웨이퍼 단위 대면적 이온반도체 성장 기술</li> <li>- 이온반도체 채널 기반 차세대 소자 기술</li> <li>- 이온반도체 기반 소자 성능평가 및 제어 기술</li> </ul>

## 4. 나노기술지도 전개

### 4-1. 우주·항공 극한 소재

#### 가. 극한환경 구조 소재

##### 1) 개요

- (정의) 극한환경(Extreme environment) 소재란, 기존 통상적인 소재가 사용되기 어려운 극고온·극저온의 극한 온도 조건 및 방사선 노출 환경에서 활용될 수 있는 소재를 의미하며, 구조용 재료의 경우 이와 같은 환경에 노출 시에도 기계적 물성의 저하가 거의 없는 반영구적으로 사용이 가능한 소재를 의미
- (필요성) 우주·항공 소재는 전반적인 소재 기술을 선도하는 분야이며, 특히 발사체 및 기체를 구성하는 구조용 재료의 경우 사용 온도 범위가 넓은 극한환경용 구조재료가 요구. 예로써 터빈·램제트 엔진용 초고온환경용 소재 및 액체 추진제용 액화가스 산화제·액화가스 연료재 저장을 위한 초극저온 환경용 소재에 대한 원천기술 확보가 필요
- (발전 전망) 기존 우주·항공용 구조용 소재 개발 동향을 살펴볼 때, 타재료에 비해 금속 소재가 등한시 되어왔으며, 현재까지도 상용 인코넬 합금, 스테인리스강, 알루미늄 합금 등 기존 기술이 활용되고 있는 상황. 그러나 최근 극한환경 적용에 목적을 둔 신개념의 합금 소재(예: 고기능성 철강 소재, 다중성분계 합금, 자가치유 금속 소재 등) 설계 기술이 주목받고 있으며, 더불어 금속 3D 프린팅과 같은 새로운 소재 제조 기술이 발달함에 따라 우주·항공용 신금속 소재 개발에 큰 발전이 있을 것으로 기대

##### 2) 미래핵심기술이슈 : 초고온환경에서 견딜 수 있는 나노금속 소재

###### ○ 기술난제

기술난제	개요
상용 초내열 합금 소재의 수용온도 한계	- 상용 초내열 합금 소재는 약 800℃ 이상의 온도에서 1GPa 이하의 낮은 강도를 나타내어, 고강도 부품 적용이 어려운 문제
상용 초내열 합금 소재의 고온 환경 반영구적 사용의 한계	- 상용 초내열 합금 소재는 고온 환경 노출 시 크립 및 void 발생으로 반영구적 사용이 제한
단일 금속 소재 내 단계적 열전도율 구현의 한계	- 현재 단계적 열전도율을 나타내는 소재는 세라믹/금속의 복합체를 활용하며 단일 금속 소재로는 제작에 한계

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
초내열·장수명·열방호 나노금속 소재 기술	정의	○ 나노미세 구조 제어를 통해 상용 내열소재 대비 높은 수용온도 및 고온강도, 자가치유능을 통한 가용시간 증대, 경사기능 열방호특성을 나타내는 초내열 나노 금속 소재 제조 기술
	요소 기술	- 터빈/램제트 적용 가능한 초내열 금속 소재 기술 - 자가치유능을 지닌 초내열 금속 소재 기술 - 열방호 경사기능 금속 소재 기술

## 3) 미래핵심기술이슈 : 초극저온 환경에서 견딜 수 있는 나노금속 소재

### ○ 기술난제

기술난제	개요
4-20K 영역의 극저온에서 낮은 인성 및 수소취성 저항성의 한계	- 상용 극저온 소재의 적용 가능 온도는 약 77K 수준이며, 이하 온도 영역에서 낮은 인성 및 내수소취성을 나타내는 문제
4K-77K 극저온환경에서 기계적 물성 정량 평가의 한계	- 극저온 환경에서 정확한 강도, 연신율, 인성 등 기계적 물성 정량 평가가 매우 어려운 문제

## 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
액화수소 환경 감응형 나노금속 소재 기술	정의	○ 나노미세 구조 제어를 통해 액화가스(산소, 수소) 탱크용 초극저온 인성 및 내수소취성능이 우수한 나노금속 소재 제조 및 초극저온 기계적 물성 정량평가 기술
	요소 기술	- 초극저온(4K) 인성이 우수한 금속 소재 기술 - 액화수소환경 내수소취성능이 우수한 금속 소재 기술 - 초극저온 환경 기계적 물성 평가 기술

## 4) 미래핵심기술이슈 : 우주항공용 초단열 내산화 나노소재

### ○ 기술난제

기술난제	개요
초고온 환경에서 내열 및 내삭마 특성을 유지하는 나노소재의 부재	- 2500도 이상 대기 중에서 구조를 유지할 수 있는 나노소재의 부재
초고온 환경에서 단열 특성을 유지하는 나노소재의 부재	- 2500도 이상 외부 환경에 대해 단열성 및 기밀성을 유지할 수 있는 나노소재의 부재

#### 4-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
초내열·내삭마 나노소재 기술	정의	○ 2,500도 이상 초고온 환경에서 내삭마성을 유지하는 벌크 또는 코팅 소재 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 벌크 세라믹 나노복합화 기술</li> <li>- 세라믹 코팅 나노구조 제어 기술</li> <li>- 세라믹 섬유 기반 경량화 복합소재 기술</li> <li>- UHTC기반 재진입 비행체용 나노복합 소재 기술</li> <li>- 초내열 세라믹 원료(전구체, 나노분말) 나노도메인 구조 제어 기술</li> </ul>
초단열·초기밀 나노소재 기술	정의	○ 외부의 극한환경과 내부를 단열시키고 고온을 견딜 수 있는 접합 소재 또는 복합 다공 소재 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노기공 제어 기술</li> <li>- 물성(열적, 기계적) 제어 기술</li> <li>- 내외부 온도차 2000도 이상의 극한 계면에서 기밀을 유지하는 복합소재 기술</li> <li>- 나노필러 복합화를 통한 기계적/물리화학적 물성 향상 기술</li> </ul>

## 나. 달 현지자원 활용과 달환경 적응형 나노소재

### 1) 개요

- (정의) 달에 풍부한 월면토, 태양풍 기체 등 현지자원을 활용하여 인간의 거주를 위해 유용하게 사용될 수 있는 소재를 탐색하고, 이를 이용하여 방사선 차폐, 방탄, 단열, 자가치유 등 다기능 투명 탐색창 소재를 개발하며, He-3 기반 3세대 핵융합 발전을 위한 핵심 원료가 되는 He-3를 지구보다 매장량이 높은 달에서 추출, 정제하는 기술
- (필요성) 우주 시대를 대비한 과학적 탐사와 민간 기업의 달 경제 건설을 위해, 향후 10년 이내에 달에 인간이 서식할 수 있는 환경을 조성하는 노력이 활발히 진행될 것으로 예상. 달 기지 체류 시 인체가 받는 방사선 피해를 최소화할 뿐 아니라 식물의 광합성을 이용한 산소발생, 지속가능한 식량공급 등이 인류의 달 환경 생존성 극대화를 위해 확보해야 할 기술이 될 것으로 예상. 또한, 달에는 지구 대비 풍부한 He-3 농도(~10 ppb)를 가지고 있으며, 달 현지자원활용(ISRU)을 통해 연 100톤을 지구에 가지고 오면 지구 소모 전력의 대부분을 핵융합 발전로 대체할 수 있을 것으로 기대됨에 따라 필수적인 기술
- (발전 전망) 달에 풍부한 월면토, 태양풍 기체 등 현지자원을 이용하여 방사선 차폐 및 방탄, 단열, 자가치유 등 다양한 기능을 가지는 투명 방탄창을 선도적으로 개발하는 것은 우주시대를 대비하여 국내 소재 기술이 국가 경쟁력을 확보할 방안. 달 현지에서 He-3를 추출, 정제하기 위해 He-3를 포함하는 토양으로부터 기체를 기화 및 응축하는 공정이 필요. 그러나 이러한 공정은 에너지가 한정된 달에서 막대한 비용이 소비될 것으로 예상. 따라서, He-3를 분리막으로 선택적 분리하는 기술은 향후 ISRU 개발에서 핵심 기술이 될 것으로 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 달 환경 자급자족을 위한 나노소재

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
달 현지자원활용(ISRU)을 통한 핵심원료 제조기술의 부재	- 월면토로부터 투명 방탄창 소재 개발을 원료물질 추출 기술 필요
우주환경에 적합한 내마모성을 갖춘 투명 우주방사선 차폐막 기술의 한계	- 우주 방사선을 차폐하면서 투명성을 유지할 수 있는 박막 소재 개발 필요 - 태양풍의 volatiles 또는 활성 산소로부터 내구성을 갖는 박막 소재 개발 필요 - 우수한 내마모성, self-healing 특성을 갖는 투명 코팅 소재 개발 필요 - 달 환경의 넓은 온도차를 극복하기 위해 열충격에 우수하며, 단열기능을 갖는 투명 소재 개발 필요

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
월면토로부터 산화물 나노입자등의 원료물질 추출 및 활용 기술	정의	○ 월면토로부터 알루미늄 기반 산화물 등의 원료물질을 효율적으로 분리/추출하는 기술 및 추출된 알루미늄 기반 산화물 나노입자 활용을 위해 저온 소결을 통한 내구성 향상 기술
	요소 기술	- 월면토로부터 알루미늄 기반 나노입자 합성을 위한 원료 추출 기술 - 월면토로부터 추출된 알루미늄 기반 나노입자를 이용한 투명 방탄창 기술
고강도 나노소재 및 우주방사선 차폐용 투명 나노박막 소재 기술	정의	○ 낮은 중력으로부터 발생하는 달표면 부유 먼지로부터 내마모성 확보 및 투명 방사선 차폐 나노박막 제조 기술
	요소 기술	- 대면적 투명 방사선 차폐 나노박막 성막 기술 - 질화 붕소 나노튜브 기반 경량 금속 기지 고에너지 입사 및 방사선 차폐용 복합 신소재 기술

## 3) 미래핵심기술이슈 : 달 자원 이용을 위한 나노다공성 양자막 소재

### ○ 기술난제

기술난제	개요
He-3 추출을 위한 핵심 막소재 부재	- He-4 대비 20배 이상의 He-3 흡착 선택도를 보이는 나노기공 신소재 탐색 및 개발 - He-4 대비 20배 이상의 He-3 permeance를 보이는 흡착 2D 신소재 탐색 및 개발

## 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
He-3의 추출/정제를 위한 나노기공 양자막 소재 기술	정의	○ He-3에 대해 선택적 흡착을 보이는 나노기공 소재 및 다른 기체로부터 He-3를 선택적으로 sieving할 수 있는 분리막 소재 개발 기술
	요소 기술	- 계산과학을 통한 He-3 흡착 및 분리막 신소재 탐색 기술 - He-3 흡착 나노급 기공을 가지는 2D, 3D 소재 개발 기술 - He-3 흡착 2D 소재 개발 기술 - He-3의 선택적 투과가 가능한 quantum sieving막 소재 개발 기술



## 다. 고강도 경량 소재

### 1) 개요

- (정의) 높은 비강도를 가지는 소재로서 알루미늄, 마그네슘 등 가벼운 금속 합금 기반 소재 또는 강도 강화 효과가 우수한 나노소재를 기반으로 한 초경량 소재 기술
- (필요성) 우주·항공 및 자동차 소재의 경우 가벼운 동체 설계가 필수이며 특히 우주·항공 소재의 경우 극한 환경에 대한 안정성을 높이기 위해 고강도의 초경량 소재 개발이 필수
- (발전 전망) 경량 소재는 주로 가벼운 금속인 알루미늄, 마그네슘과 합금 원소 첨가를 통한 특성 개선 소재로 제작되어 온 상황. 최근에는 나노물질 첨가한 복합소재로 추가적인 강도 강화 효과를 통한 높은 비강도를 가지는 신소재 및 3차원 구조체 제작을 통한 초경량 신소재 연구 보고되고 있는 추세

### 2) 미래핵심기술이슈 : 우주·항공 소재용 초경량 강화 나노소재

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
벌크스케일 금속의 강도 강화 한계를 넘을 수 있는 소재의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기존 벌크스케일 미세구조를 가지는 금속 기반 복합소재의 경우 강도 강화 효과의 한계가 존재함에 따라 나노스케일의 미세구조를 활용하는 복합소재 설계 및 제작이 필요</li> <li>- 금속 기반 복합소재의 강도를 극대화할 수 있는 새로운 나노스케일 필러를 개발하여 기존의 금속 또는 세라믹 벌크 복합소재 대비 우수한 기계적 물성을 가지는 나노복합소재 개발이 필요</li> </ul>
다공성 나노구조에서 나타나는 강도 저하를 해결할 수 있는 방법론의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다공성 소재의 영률은 상대밀도에 비례하는 것으로 알려져 있으며 고강도를 유지하면서 경량화를 달성하기 위한 새로운 구조적 설계가 필요</li> <li>- 시뮬레이션 및 머신러닝 기반 고강도 경량 구조체를 선별하여 실험적으로 구현 가능한 구조체 제작 및 공정 연구가 필요</li> <li>- 다공성 3차원 구조체에 활용되는 나노소재의 강도 강화 효과 분석이 필요하며 기계적 물성이 최적화된 소재를 적용한 3차원 구조체 개발 연구가 필요</li> </ul>
새로운 나노복합소재에 대한 기계적 물성 측정법의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노소재 소재 및 미세구조 기반 고강도 경량 소재의 분석을 위한 멀티스케일 기계적 물성 측정 및 변형 거동 분석법 개발이 필요</li> </ul>

### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
나노스케일 미세구조 및 나노필러를 이용한 고강도 경량 나노복합소재 기술	정의	- 벌크 금속 물질보다 우수한 물성을 지는 나노스케일 미세구조 및 나노필러를 이용한 고강도의 경량 나노복합소재를 제작하는 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노석출물 및 나노스케일 미세구조 제작 기술</li> <li>- 새로운 소재의 나노필러의 균일한 분산을 통한 고강도 나노복합소재 개발 기술</li> <li>- 멀티스케일 물성 평가기술 및 변형거동 분석 기술</li> </ul>

나노기술명	개요	
3차원 나노구조체를 활용한 고강도 초경량 소재 기술	정의	- 나노스케일 단위 구조를 가지는 고강도 3차원 구조체 설계 및 높은 공극률을 가지는 초경량 3차원 다공성 나노복합소재 개발 기술
	요소 기술	- 머신러닝을 통한 나노스케일 단위구조를 가지는 벌크 3차원 다공성 계층 구조 설계 기술 - 높은 공극률의 3차원 고강도 초경량 소재 제작 기술 - 3차원 고강도 초경량 소재의 산업 적용을 위한 대면적화 기술

### 〈우주·항공 극한 소재 로드맵〉

중분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술								
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
우주·항공 극한소재	극한환경 구조소재	초고온환경에서 견딜 수 있는 나노금속소재	최대열-장수명 열안정 나노금속소재 기술	미반도체의 적용 가능한 초내열 금속소재 기술			저가저온을 지닌 최내열 금속소재 기술					
		초극저온 환경에서 견딜 수 있는 나노금속소재	액화수소환경 견딜형 나노금속소재 기술	초극저온환경 기계적물성 평가기술			초극저온4K 전방위 우수한 금속소재 기술					
		우주환경을 초인열 내성과 나노소재	초내열 내후각 나노소재 기술	세라믹코팅 나노구조 제어기술/세라믹 상부 기판 결합기술			UHPC기반 나노복합소재기술/나노소재인 구조제어기술					
	달 현지자원 활용과 달환경 적응형 나노소재개발	달 환경 차폐차축을 위한 나노소재	달면도로부터 산화물 나노입자 등의 전로물질을 추출 및 활용 기술	달면도로부터 광우리는 기반 나노입자 합성을 위한 원료 추출 기술			달면도로부터 추출된 광우리는 기반 나노입자를 이용한 투명 코팅 기술					
		달 자원 이용을 위한 나노다공성 임피어스트	고강도 나노소재 및 우주방사선 차폐용 투명 나노복합 소재 기술	대면적 투명 방사선 차폐 나노복합 소재 기술								
		고강도 경량소재	우주항공소재용 초경량 고풍 나노소재	He-3의 추출/정제용 위한 나노기공 임피어 스트레 기술	계면제어 기반 He-3을 친소재 설계		He-3 나노기공 소재 개발 기술		He-3 중성자 검출 소재 개발 기술		He-3 선제기 부가 quantum sensing 소재 개발 기술	
	고강도 경량소재	우주항공소재용 초경량 고풍 나노소재	나노스케일 미세구조 및 나노입자를 이용한 고강도 경량 나노복합소재 기술	세로로 소재의 나노결정미 구조를 통한 고강도 나노복합소재 개발 기술			나노입자를 및 나노스케일 미세구조 제어 기술			멀티스케일 물성 평가기술 및 변형거동 분석기술		
				경량 나노구조체를 활용한 고강도 초경량 소재 기술	핵심 계면을 통한 나노스케일 단위구조를 거치는 벌크 구조형 다공성 계층구조 설계 기술			농민 공극률용 3차원 고강도 초경량 소재 제어 기술			3차원 고강도 초경량 소재의 선형 특성을 위한 대면적화 기술	

## 4-2. 모빌리티·드론·로봇 소재

### 가. 스마트 전기기능 나노소재

#### 1) 개요

- (정의) 4차 산업혁명과 포스트 코로나 시대의 모빌리티(자율주행차, 전기차, 드론, 로봇 등)의 핵심 전장 및 배터리 부품을 위한 경량, 다기능성, 고효율의 열/전자기관리, 안테나, 센서, MLCC, 경량와이어 등에 적용 가능한 전기기능성 스마트 나노소재 기술
- (필요성) 5G 이상급 통신의 발전에 따른 자율주행기술의 고도화로 인해 고성능, 고정밀 전장 부품의 비중 증가가 급속도로 이루어지고 있는 상황. 특히 고주파 사용에 따른 인체 피해 및 발열에 따른 장비 오작동, 통신 시그널의 안정적인 송수신 및 센싱은 전장 부품에 필수적인 기술. 또한 화석연료의 사용을 최소화하는 친환경 모빌리티에서는 주행거리의 증가를 위해 배터리의 효율 증가와 더불어 부품 경량화가 필수
- (발전 전망) 미래 모빌리티·드론·로봇용 전장 및 배터리 부품은 하나의 소재 혹은 부품으로 경량 및 다기능을 부여할 수 있는 스마트 소재부품의 기술로 진화. 이를 위해 열관리성, 전기전도성, 경량, 고밀도, 고센싱 등의 핵심 기능을 복합적으로 수행할 수 있는 융합형 스마트 나노소재 기술의 개발이 활발히 진행. 미래 모빌리티에 적용될 초고전압 충전기는 아직 도입되지 않은 기술로, 향후 초고전압 충전이 가능한 배터리의 기술이 발달할 경우, 이에 필요한 소재, 소재 형성 및 평가기술의 필요성이 폭발적으로 증가할 것으로 예상

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 고안정성 및 고에너지효율을 가지고 전기기능을 보유한 나노소재

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
기존 지상 모빌리티용 소재 활용 시 UAM·UAV 에너지 효율화에 필요한 경량화의 한계	- 기존 활용되어온 무선통신, 에너지, 동력 구동 및 기체용 부품용 소재 활용 시 UAM /UAV에 요구되는 안정성과 경량성 확보가 어려우며, 이를 극복하기 위한 나노소재 제조 및 공정 기술의 개발 필요
초고전압 MLCC용 나노소재 및 제품화 기술의 부재	- 미래 모빌리티에 사용되는 1,200V급 초고전압 충전/비충전이 반복되는 극한 환경에서도 전기적 특성, 신뢰성, 효율, 내구성 확보 필요 - 초고전압 MLCC용 나노소재 및 이의 적층/소결/신뢰성 평가를 통한 MLCC 제조기술 개발 필요
고비중이며 고온 안정성이 결여된 구리선을 대체할 경량 고전도성 와이어 나노복합소재 기술의 부재	- 미래 모빌리티의 경량화 및 전기화에 따른 고에너지효율을 달성을 위한 기존 고비중 전선을 대체하는 초경량 고전기전도성 와이어용 나노소재 기술 개발 필요

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
UAM·UAV용 경량 나노소재 기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ UAM/UAV를 구성하는 무선통신, 에너지, 동력 구동 및 기체용 부품에 필요한 소재로서, 안정성과 경량성을 확보함과 동시에 각 구성요소에 특화된 성능 구현이 가능한 나노소재 제조 및 공정 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 내마모성 고절연 나노소재 기술</li> <li>- 외장 통신 부품 보호를 위한 고내구성 방청 나노소재 기술</li> <li>- 저전력 센서용 나노소재 기술</li> <li>- 지능형 열/전자기 관리 나노소재 기술</li> <li>- 고성능 안테나 기판 및 배선용 나노소재 기술</li> <li>- 탄소나노소재 기반 차세대 차량용 하네스 전도성 와이어 기술</li> </ul>
초고전압 MLCC용 나노소재 및 제품화 기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 차세대 통신 및 미래 모빌리티에 사용되는 초고전압 충전/비충전이 반복되는 극한 환경에서도 내구성을 가지는 초고전압 MLCC용 나노소재의 설계/합성/적층 및 소재부품 특성 평가 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고온 내구성 나노소재 (전극, 유전체) 조성 설계 기술</li> <li>- 극한환경 적용을 위한 나노입자 제어 및 전극 형성 기술</li> <li>- 나노전극분말 고분산, 소결제어 가능 페이스트 제조 기술</li> <li>- 신규 나노소재 다층 박막 적층 기술</li> <li>- 초고전압 MLCC 부품 전기적 특성 및 신뢰성 평가 기술</li> <li>- 초고용량 MLCC용 초미립 니켈 나노분말 합성 및 전극 형성 기술</li> </ul>
고에너지효율·고기능성 경량 와이어용 나노소재 기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 미래 모빌리티 구현을 위한 고전기전도성/센싱/에너지하베스팅 등 고기능성과 저비용의 고에너지효율 달성이 가능한 경량 와이어용 나노소재 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 초경량 전도성 케이블용 나노소재 기술</li> <li>- 텍스타일 스마트 센서용 나노소재 기술</li> <li>- 나노소재 기반 멀티노즐 방사 기술</li> <li>- 경량 와이어 나노복합화를 통한 고기능화 기술</li> <li>- 나노소재 기반 경량 와이어 후처리 공정 기술</li> </ul>

## 나. 구조전자용 나노소재

### 1) 개요

- (정의) 구조전자용 나노소재는 미래 인간친화형 수송체, 드론 및 로봇 시스템이 전기화되고 지능화됨에 따라, 보다 가볍고 에너지 효율이 높은 구조로 변화하고 있어, 이에 대응하는 경량/고기능성 구조체형 전기전자소자(전자소자, 에너지저장소자)에 필수적인 나노소재 기술
- (필요성) 인공지능을 기반으로 하는 전기지능화 미래형 제품의 경우 초경량화, 지능화, 맞춤형 및 고기능화를 위한 기술에 대한 요구가 커지고 있으며, 이러한 제품의 개발을 위해서는 전기전자소자와 하우징의 일체형 구조체 모듈 제조 기술 개발이 필수
  - 구조전자용 나노소재 기술은 구조체 소자의 전주기 공정에 적합한 나노융합형 소재 기술 개발이 필요하며, 급속도로 발전하는 구조전자소자 플랫폼 기술에 대응하기 위한 국가적 차원의 지원이 필요
- (발전 전망) 폼팩터 프리(Form-Factor Free)한 전자소자의 요구가 증대되고 있는 시점에서 기존 제조 기술로는 구현할 수 없었던 소자를 구현할 수 있는 구조전자 기술을 활용하는 방향으로 기술이 진화되는 추세
  - 4차 산업혁명은 산업 전반의 자동화, 지능화, 스마트화가 진행되고, 일상에서도 자율주행차, 플라잉카 등 전기기능 수송체 뿐만 아니라 인공사지 등 인간친화형 로보틱스와 같은 전기지능화 기기의 출현이 가속화됨에 따라, 새로운 개념의 구조체형 제조기술과 이에 필요한 나노소재 기술, 그리고, 이를 이용해 제조되는 전기전자소자의 플랫폼 기술이 급속히 발전될 전망
  - 3D 프린팅 기술의 발전은 구조전자 기술의 발전에 기여. 특히, 플렉시블(Flexible), 웨어러블(Wearable), 스트레처블(Stretchable)로 대변되는 미래 전기·전자 디바이스 및 부품과 사물인터넷(IoT) 기술이 융합된 스마트 전장부품, 바이오·헬스케어, 에너지 저장·변환 부품(초박형·고밀도 Battery) 개발에 3D 프린팅을 기반으로 한 구조전자 기술의 적용 연구가 지속적으로 진행될 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : e-모빌리티 구조전자용 나노소재 개발 및 기기를 만들기 위한 공정 기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
고강도 혹은 고변형 에너지 저장소자 구현을 위한 나노소재의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 자유 변형 프레임 나노복합소재(전극 및 패키징) 기술 개발 필요</li> <li>- 기계적 물성과 리튬 저장 특성이 동시에 우수한 양/음극 소재 개발 필요</li> <li>- 계면 접합력을 향상시키는 계면 강화 사이징 소재 개발 필요</li> <li>- 고탄성/고이온전도성 나노복합 전해질 기술 필요</li> <li>- 프레임 일체형 에너지 저장소자 공정 기술 필요</li> </ul>

기술난제	개요
구조전자용 삼차원 기기 인쇄 기술의 부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 입체면상에 인쇄하기 위해 전단박화(Shear thinning)에 의한 유사가소성을 갖도록 인쇄 잉크용 기능성 나노소재 설계 및 합성 기술 필요</li> <li>- 자유형상 입체면상 직접인쇄를 위한 6축 자유도의 전방위 인쇄 소재/공정 기술 필요</li> </ul>

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
프레임 일체형 에너지 저장 나노소재 기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 프레임 일체형 에너지 저장소자 기술은 전기수송체나 로봇 본체, 부품에 배터리 기능을 추가하는 개념으로 수송체의 항속거리 및 적재중량과 전기 전자기기의 사용 시간을 대폭 향상시킬 수 있는 구조체형 에너지 저장소자 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 자유변형 프레임 나노복합소재(전극 및 패키징) 기술</li> <li>- 중량지지 (load bearing)형 에너지 저장 나노소재 기술</li> <li>- 프레임 일체형 에너지 저장소자 계면강화 나노소재 기술</li> <li>- 고탄성/고이온전도성 나노복합 전해질 기술</li> <li>- 프레임 일체형 에너지 저장소자 공정 기술</li> <li>- 복합나노소재 교체/액체 복합전해질 제조 기술</li> </ul>
자유형상 기능성 소자 직접인쇄 나노소재 및 전방위 인쇄기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 입체면상에 회로기판 없이 자유형상의 기능성 소자를 직접 인쇄할 수 있는 나노소재 및 공정 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전기/광학 기능성 나노소재 기술</li> <li>- 3차원 형상가변 나노소재 기술</li> <li>- 자유형상 전자회로 나노소재 기술</li> <li>- 입체면 고해상도 나노소재 인쇄 기술</li> <li>- 나노급 초고해상 인쇄 공정 기술</li> </ul>

## 다. 모빌리티용 나노고분자 소재

### 1) 개요

- (정의) 차세대 모빌리티·드론·로봇이 다양한 (극한)환경에서 임무를 수행하기 위해 충분한 기능을 갖춘 스마트한 나노소재 기술
- (필요성) 차세대 모빌리티·드론·로봇은 서로 긴밀히 연결되어 정보를 주고받고, 인간의 도움없이 스스로 움직이며, 매우 적은 전력 소모로 오랜 시간 구동되는 것이 필수. 특히, 인간이 하기 매우 힘든 영역의 일(우주, 군사, 재난 등)들을 대신하여 수행하기 위해서는 다양한 (극한) 환경에서 임무를 수행하기 위해 충분한 기능을 갖추면서도 모빌리티·드론·로봇을 경량화할 수 있는 소재가 반드시 필요
- (발전 전망) 많은 나라들이 차세대 모빌리티·드론·로봇을 미래 핵심 산업으로 선정하고, 이에 대한 시장 선도력을 갖추기 위한 엄청난 노력을 하는 추세. 4차 산업혁명과 친환경 경제의 핵심 산업인 '자율주행 전기차'는 이미 상용화되어 대중화의 길로 가고 있으며, 로보틱스, UAM(도심항공모빌리티)도 향후 5년 내에 상용화 레벨의 제품들이 출시될 것으로 예측. 이들은 향후 오랜 기간 산업을 이끌어갈 핵심기술이 될 것으로, 상용화 이후에도 시장을 선도하기 위한 '고도화 기술'을 축적해야 할 것으로 예상

### 2) 미래핵심기술이슈 : 다중환경 대응형 나노소재

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
장기간 자외선/고습/진동 환경에 노출될 경우 내·외장 접착제·코팅제의 형상 및 기능이 저하되는 문제	- 차세대 모빌리티는 다양한 온도, 습도 환경 및 자외선, 진동 환경에서 장기간 활용이 필요하며 용도에 따라 특수한 기능을 갖춘 내·외장 접착제·코팅제를 필요로 하나, 기존 소재는 외부 환경에 장기간 노출될 경우 그 특성의 유지가 어려운 문제
화재/충돌/낙뢰와 같은 돌발상황에서 성능유지가 가능한 접착제·코팅제 확보의 한계	- 차세대 모빌리티의 안정성 확보를 위해서는 돌발적인 재해 상황(화재, 지진, 낙뢰, 침수 등)에서 기존에 활용되어온 소재보다 안정적으로 기능하는 접착제·코팅제의 확보가 필수
기존 차량용 기어 부품 성능의 한계	- 기존 고분자 소재의 강성 및 내구성 부족 - 생분해 가능하고 표면평활성이 양호하며 고강도, 경량, 내마모성이 우수한 나노셀룰로오스 기반의 소재 기술 필요

### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
차세대 모빌리티·드론·로봇용 초 기능성 나노접착코팅 소재 기술	정의 ○ 뛰어난 기능성(방열, 내열, 절연, 전자기차폐 성능을 가진 친환경 나노 점접착 소재 및 방청, 방오, 방염, 난연, 전자기차폐, 스텔스, 자가 치유 등)을 가지면서도 다양한 환경에서 충분한 접착력과 유지력을 보이는 나노 접착코팅 소재 기술



나노기술명	개요	
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다양한 소재를 경량 복합화하며, 기능성을 극대화하면서도, 다양한 환경에서 충분한 접착력을 보이는 초 기능성 점접착 소재 기술</li> <li>- 외부 환경에 적응하여 기능성을 극대화하면서도 충분한 유지력을 보이는 초 기능성 코팅 소재 기술</li> </ul>
차량용 나노셀룰로오스 복합소재 기술	정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 고강도, 저밀도, 내마모성, 치수 안정성이 우수한 나노셀룰로오스를 플라스틱 복합 소재화하여 차량용 고강성·고내구 기어 부품에 적용 가능한 중간재로 제조하는 기술</li> </ul>
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노셀룰로오스 표면개질 및 제조 기술</li> <li>- 나노셀룰로오스 복합소재 설계 및 복합화 기술</li> <li>- 나노셀룰로오스 복합소재 부품 제조 공정 기술</li> <li>- 나노셀룰로오스 복합소재 부품 시뮬레이션 및 평가 기술</li> </ul>

## 라. Flexible MLCC용 나노소재

### 1) 개요

- (정의) 수 nm의 얇은 두께를 갖는 유전체 나노시트의 합성, 특성 평가, 소자화 등에 관한 나노 기술
- (필요성) 기존 유전체의 소형화는 구형인 나노입자의 특성상 막 두께 200nm 이하에서 심각한 유전율 저하의 문제를 보임에 따라 필수적인 기술
- (발전 전망) 나노시트를 이용한 차세대 초소형 박막 커패시터 소자가 구현되면 기존 제품을 대체할 새로운 시장이 형성될 것으로 기대

### 2) 미래핵심기술이슈 : 고성능 유연박막 커패시터 소재

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
낮은 나노시트의 유전 특성	- 동일 두께에서는 BaTiO <sub>3</sub> 계 박막 대비 유전율이 월등히 높지만 벌크 BaTiO <sub>3</sub> 에 비해서는 유전율이 낮은 문제
화학적 박리에 의한 나노시트 합성의 한계	- 벌크 소재 층간에 이온을 삽입하여 화학적으로 나노시트를 박리하는 방법의 경우 최소 1-2주의 긴 시간이 필요
나노시트의 정밀 집적 기술의 부재	- Langmuir-Blodgett 흡착법을 이용하여 나노시트 층간에 틈이 없는 다층막을 만들 수 있지만 비용 효율적이지 않은 문제

### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
고유전체 단일원자층 나노시트 합성 기술	정의	○ 높은 유전 특성을 가진 유전체 페로브스카이트 나노시트 합성 기술
	요소 기술	- 고전도성 소재 및 고유전체 단결정 합성 기술 - 단일원자층 나노시트 화학적 박리 기술
고유전체 단일원자층 나노시트 특성 평가 기술	정의	○ 고유전 단일원자층 나노시트의 특성을 평가할 수 있는 평가 기술
	요소 기술	- 단일 나노시트 소자화 기술 - 단일 나노시트 전기적 특성 평가 기술 - AFM을 이용한 단일 나노시트 유전 특성 평가 기술
단일원자층 나노시트 기반 대면적 소자화 기술	정의	○ 고유전 단일원자층 나노시트의 면적을 크게 하여 소자화 시 소수의 나노시트만으로 소자화가 가능하게 하는 소자화 기술
	요소 기술	- 단일원자층 나노시트 정렬 및 적층 기술 - 단일원자층 계면 결함 제어 기술 - 인공 초격자 형성 및 interface 제어 기술 - 대면적 소자화 및 유연성 확보 기술

### 〈모빌리티·드론·로봇 소재 로드맵〉

종분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소가								
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
모빌리티·드론·로봇 소재	스마트 전기기능 나노소재	고안정성 고에너지밀도 전기기능 나노소재	LAM-UAV용 경량 나노소재 기술	최근에 개발된 나노소재 기술 / 내열성 고강도 나노소재 기술			고안정 전후시각용 및 배선용 나노소재 기술 / 시능형 절연막이온 나노소재 기술			외장 통신 부품 보호를 위한 고내구성 방청 나노소재 기술		
			초고안압 MLCC용 나노소재 및 제형화 기술	고압 내구성 나노소재/전도, 유연성 초소형 설계 기술/스핀코팅/열처리 및 분산/표시/소독/제조 및 전극 형성 기술						나노소재/다공체 막의 적용 기술 /초고안압 MLCC 부품 전기적 특성 및 신뢰성 향상 기술		
			고에너지밀도-고기능성 전압전이체용 나노소재 기술	초경량 배터용 및 혁신차량용 나노소재 기술 / 합디스콘 용액 전사 기술						나노-복합 전압전이체 고기능화 기술 /전압전이체 대량 제조 및 후처리 공정 기술		
	구조전자용 나노소재	e-모빌리티 구조전자용 나노소재 및 공정기술	프래임 일체형 e-UV기 지형 나노소재 기술	중량저지 및 에너지 저장 나노소재 기술 /에너지저장 나노소재 기술/나노복합 전해설 기술			프레임 일체형 e-UV기 제조/공정기술 /에너지저장 나노소재 제조/공정 기술					
모빌리티용 나노고분자 소재	다용량성 대용량 나노소재	차세대 모빌리티드론-로봇용 초기능성 나노-합성 고강도 소재 기술	고강도 / 고내열 / 고강성 / 고강도 / 고강성 / 전자기억 나노-합성 소재 기술			차세대 모빌리티용 나노소재/고분자 소재 제조/공정 기술 /고분자 소재 제조/공정 기술			차세대 모빌리티용 나노소재/고분자 소재 제조/공정 기술 /고분자 소재 제조/공정 기술			
		차량용 나노-생물무오스 복합소재 기술	나노-생물무오스 복합소재 제조 기술			나노-생물무오스 복합소재 부품 제조/공정 기술 및 평가 기술			나노-생물무오스 복합소재 부품 제조/공정 기술 및 평가 기술			
Flexible MLCC용 나노소재	고성능 유연박막 제형/처리 소재	고유전체 단일원자층 나노시트 합성기술	고전도성 소재 및 고유전체 단일원자층 합성기술			단일원자층 나노시트 화학적 합성 기술			단일원자층 나노시트 화학적 합성 기술			
		고유전체 단일원자층 나노시트 특성 평가기술	단일 나노시트 소재화 기술			단일 나노시트 전기적 특성 평가기술 / AFM을 이용한 단일 나노시트 표면 특성 평가기술			단일 나노시트 전기적 특성 평가기술 / AFM을 이용한 단일 나노시트 표면 특성 평가기술			
		단일원자층 나노시트 기반 대면적 소자화 기술	단일원자층 나노시트 합성 및 적용 기술 / 계면 결합 제어 기술			대면적 소자화 및 유연성 제어 기술			대면적 소자화 및 유연성 제어 기술			

### 4-3. 데이터·AI 혁신 소재

#### 가. 첨단 계산나노과학 기술

##### 1) 개요

- (정의) 첨단 계산나노과학 기술은 기존 계산나노과학 기술의 한계를 극복하여 높은 정확성으로 나노소재 물성을 예측하는 기술
- (필요성) 현재 계산나노과학 기술은 소재 본연의 물성은 예측 가능하지만 외부 환경요인에 따른 소재 특성을 예측하는데 한계가 있어, 이론-실험간의 간극이 존재하여 이를 해결할 수 있는 기술 개발이 필요
- (발전 전망) 첨단 계산과학 기술은 데이터, AI, 양자컴퓨터 등을 활용하여 높은 정확성으로 대규모 시스템을 고려할 수 있어 이론-실험 간의 간극 해소에 기여할 전망

##### 2) 미래핵심기술이슈 : 계산속도와 정확도가 확보된 나노소재

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
대규모 시스템을 높은 정확도로 시뮬레이션 할 수 있는 기술의 부재	- 현재 계산나노과학 기술은 계산속도와 정확도 사이의 상충관계에 따라 이론-실험간의 간극 존재
비전문가도 손쉽게 계산과학을 활용할 수 있는 툴 부재	- 계산과학의 중요성이 커지면서 실험연구자들도 손쉽게 시뮬레이션할 수 있는 플랫폼 기술이 제한적인 문제
양자컴퓨팅이 적용된 계산나노과학 기술의 부재	- 양자컴퓨터에 적용 가능한 계산나노과학 기술은 현재 매우 제한적인 문제

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
한계극복형 계산나노과학 기술	정의 ○ 양자역학 및 동역학 등의 물리법칙을 기반으로 하는 현재 계산나노과학 기술의 한계를 극복하여 실제 나노미터급 시스템을 높은 정확도로 모델링 할 수 있는 기술
	요소 기술 - AI 기반 전자구조 예측 기술 - 뉴럴네트워크 기반 원자간 포텐셜 개발 기술 - 나노미터급 시스템의 화학반응 모델링 기술 - 원자-전자 동시 고려 분자동역학 시뮬레이션 기술
양자컴퓨터용 계산나노과학 기술	정의 ○ 양자컴퓨터/시뮬레이터를 이용한 나노구조체 계산 및 시뮬레이션 기술
	요소 기술 - 실용 소재 계산을 위한 알고리즘 개발 기술 - 알고리즘 구현을 위한 하드웨어 개발 기술 - 양자 기계학습 등 시와 양자 컴퓨터 융합 기술

## 나. 데이터·AI 기반 나노소재 설계 기술

### 1) 개요

- (정의) 데이터·AI 기반 나노소재 설계 기술은 대규모 소재 데이터 확보를 통해 소재의 구조-물성-공정간의 상관관계 규명 및 소재 개발 가속화를 위한 기술
- (필요성) 4차 산업혁명 시대를 대비하여 소재 데이터의 중요성이 증가하여 이를 위한 데이터 확보 및 응용 기술 개발이 필요
- (발전 전망) 데이터·AI 기반 나노소재 설계 기술은 양질의 대규모 소재 데이터 확보 및 소재 구조, 공정, 물성(특성), 분석 등의 데이터를 활용한 소재 개발이 가속화될 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : AI 기반 나노소재 개발 가속화 방법론

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
대규모 데이터 확보 기술 및 나노소재설계 적용 기술의 부재	- 연구자가 문헌에서 데이터를 수집할 경우 확보되는 데이터의 수는 매우 소규모 - 소재의 구조 정보로부터 물성을 예측하는 방식은 원하는 물성을 찾을 때까지 구조를 바꾸어야 하는 시행착오식 방식에 머물러 있는 문제
나노소재 합성공정 조건 예측 기술의 부재	- 이론적으로 설계된 소재는 실제 실험적으로 구현되지 않은 경우가 많은 상황
나노소재 분석데이터의 자동 해석 방법의 부재	- 분석데이터(XRD, TEM 등)의 정확한 해석을 위해서는 연구자의 많은 경험 이 필요
AI 엔진 및 자동화 없이 나노소재 개발 가속화의 한계	- 연구자의 개입을 최소화하여 AI 로봇 스스로 소재를 개발할 수 있는 4차 산업혁명 플랫폼 개발 필요

### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
나노소재 역설계 기술	정의 ○ 연구자가 원하는 소재 물성(성능)을 입력하여 소재 정보(결정구조, 조성 등)을 예측하는 기술
	요소 기술 - 소재 구조(조성)-물성간 상관관계를 대변할 수 있는 AI 생성모델 개발 기술 - 다중물성을 입력값으로 하는 AI 역설계 기술 - 수요자 맞춤형 소재 설계 기술
나노소재 공정조건 예측 및 분석용 AI 기술	정의 ○ 소재 정보(구조 및 조성)로부터 그 소재의 최적 합성·공정 조건 예측하고 실험장비로부터 얻어진 분석데이터를 자동으로 해석해줄 수 있는 AI 기술
	요소 기술 - 공정 최적화 기술 - 소재 정보 및 공정 데이터 디지털화 기술 - 소재 정보-공정간 상관관계를 대변할 수 있는 AI 생성 모델 개발 기술 - 분석 장비별 자동 해석을 위한 AI 기술 - 고성능의 이미지 데이터 분류 기술 - AI 모델의 정확성 향상을 위한 데이터 증강 기술

나노기술명	개요	
AI 로봇을 이용한 나노소재 개발용 스마트연구실 구축 기술	정의	○ AI와 로봇 기술을 접목하여 연구자의 개입 없이 AI 로봇 스스로 소재를 개발할 수 있는 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 로봇 친화형 합성·분석 자동화 장치 개발 기술</li> <li>- 자동화 장치 모듈화 및 최적 스케줄링 기술</li> <li>- 연속형/범주형 변수를 동시에 고려 가능한 공정 최적화 AI 기술</li> </ul>

### 〈데이터·AI 혁신 소재 로드맵〉

종분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술								
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
데이터·AI 혁신소재	집단 계산 나노과학 기술	계산속도와 정확도가 확보된 나노소재	환경극대형 계산·노과학 기술	시 기반 전자구조 예측 기술	노화내성 유그 기반 원자간 보강재 개발 기술	나노·미세공 공해방지 대응용 기술	원자-전자 동시 고해 분자용역학 시뮬레이션 기술					
			양자컴퓨팅용 계산·노과학 기술	실용 소재 계산을 위한 알고리즘 개발 기술	양자계산 구현을 위한 하드웨어 개발 기술	양자 계산을 통한 AI 양자 컴퓨팅 용량 기술						
	데이터·AI 기반 나노소재 설계 기술	시 기반 나노소재 개발 가속화 방법론	나노소재 역설계 기술	소재 구조-물성간 상관관계 추출 시뮬레이션용 개발 기술	다중물성을 입력값으로 하는 AI 역설계 기술	수소저장용형 소재 설계 기술						
			나노소재 공정조건 예측 및 분석용 AI 기술	공정데이터 기술 및 소재 정보 공유데이터 디지탈화 기술	소재-공정 상관관계 추출 시뮬레이션용 기술 (AI/ML/데이터 분석 및 분석데이터를 활용한) AI 기술	시 모델의 정확성 향상을 위한 데이터 증강 기술						
			AI 플랫폼 적용한 나노소재 개발용 스마트연구실 구축 기술	로봇 친화형 합성 분석 자동화 장비 개발 기술	연속형/반자동 연속 동시 고해 기술 고집적화 AI 기술	자율화 장비 모듈화 및 최적 스케줄링 기술						

## 4-4. 6G

### 가. 초고성능/초저지연 통신 나노소재

#### 1) 개요

- (정의) 6G 통신에서 요구되는 초고속/초광대역/초저손실/고신뢰성 통신기술 실현을 위해 sub-THz/THz 주파수 대역에서 우수한 전자기성능을 발현하는 나노소재 기술
- (필요성) 기존 3G/4G 통신은 수 GHz, 최근 상용화되고 있는 5G 통신도 28GHz 수준의 주파수를 사용하나 미래의 6G 통신은 최소 100GHz 이상의 sub-THz 또는 THz 주파수 대역을 사용할 것으로 예상. 따라서 기존 통신용 소재는 6G 주파수 대역에서 전자기성능을 상실하기에 활용이 어렵고, 고성능 6G 통신을 구현하기 위해서는 해당 주파수 대역에서 우수한 전자기성능을 발현하는 새로운 나노소재가 필요
- (발전 전망) 초고성능/초저지연 6G 통신을 위해서는 먼저 sub-THz 대역 이상의 고주파 통신을 구현하기 위한 통신부품용 소재가 필요. 특히 신호 전송속도를 높이고 손실을 줄이기 위한 부품 기판의 저유전/저손실화에 대한 개발이 활발히 이뤄질 것으로 예상. 또한, 부품별/용도별로 다양한 주파수 대역이 활용됨에 따라 전자파 노이즈 간섭에 대한 우려가 커지고 있으며, 통신부품 집적화와 처리 속도 증가로 인한 발열 문제도 지적되고 있기에 성능저하 요인들을 제거할 수 있는 소재에 대한 연구가 개발될 전망

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 초고성능/초저지연 6G 통신 구현을 위한 극고주파 대역 전파활용 나노소재

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
극고주파 대역 전파신호를 처리할 수 있는 통신부품 소재의 부재	- sub-THz 이상 주파수 전자기파의 송수신, sub-THz 대역에서의 고선형성 등 6G 주파수 대역에 대응 가능한 물성을 가지는 소재 필요
소재의 높은 전자기 손실로 통신신호 손실 및 왜곡	- 주파수가 높아짐에 따라 기판의 표면 조도 등 제작 정밀도에 대한 요구도가 더 높아지는데, 이러한 정밀 제작이 가능하면서도 저유전/저손실을 가지는 나노소재의 개발의 한계
다양한 주파수 대역 전파 간섭으로 통신 서비스 신뢰성의 한계	- 전자파를 대역별로 효과적으로 반사/흡수/투과할 수 있는 소재 필요 - 현재는 단일 주파수 또는 모든 주파수 대역에 대해서만 반사/흡수/투과 특성 제어 가능하며, 원하는 다양한 주파수 대역에 대한 선택적 전자파 제어의 한계
통신부품 집적화로 발열에 의한 부품성능 저하	- 저유전 특성과 방열기능을 동시에 갖춘 소재의 부재 - 세라믹 방열소재의 장기신뢰성 저하, 고밀도화 한계, 낮은 열충격 특성 등으로 안정적인 장기 활용의 한계
우주환경에서 활용할 수 있는 6G용 통신부품 소재의 부재	- 저궤도 통신위성 등 6G 대응을 위한 우주용 통신부품에 대한 요구 높아지거나 고온/저온/진공 등 우주환경에 대응 가능한 나노소재의 부재



## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
THz급 주파수 초고속/초광대역 6G 통신부품용 나노소재 기술	정의	○ 6G 주파수 대역 (sub-THz/THz)에서 초고속/초광대역 통신 구현을 위해 활용되는 통신부품용 나노소재의 설계 및 합성 기술
	요소 기술	- 고출력 테라헤르츠 전자기파 신호 발생 소재 기술 - 전자기 고선형성 나노화합물 소재 기술 - 지능형 재구성 안테나용 형상/전자기 특성 가변 나노소재 기술
sub-THz 6G 통신 대응 저손실 유전 특성 나노소재 기술	정의	○ 6G 주파수 대역 (sub-THz/THz)에서 낮은 유전율과 낮은 유전손실을 가지는 고분자 또는 세라믹 나노소재의 설계 및 합성 기술
	요소 기술	- 저유전 고분자 수지 설계 및 합성 기술 - 중공형 나노세라믹 소재 설계 및 합성 기술 - 저온소성형 저유전 나노소재 설계 및 합성 기술 - 저유전/저손실 나노박막 소재 설계 및 합성 기술 - 고주파수 대역 전자파 차폐 부품용 고품질 맥신 나노소재 기술 - 유무기 나노하이브리드 수지 기반 고내구성 차세대 반도체 패키징 소재 기술
sub-THz 6G 통신 대응 초고손실 나노유전/자성소재 기반 전자파 흡수 복합소재 기술	정의	○ 6G 주파수 대역 (sub-THz/THz)에서 활용되는 전자기파를 효과적으로 제어 (차폐/반사/흡수)하여 전자기파 간섭에 의한 통신 성능 저하를 최소화하는 소재 기술
	요소 기술	- 테라헤르츠 대역 고손실 나노자성 소재 설계 및 합성 기술 - 테라헤르츠 대역 저유전/고손실 나노유전 소재 설계 및 합성 기술 - 6G 전자파 저반사/고흡수 나노복합 소재 설계 및 제조 기술 - 다중대역 선택제어 초고손실 전자기 소재 설계 및 제조 기술
6G 통신용 저유전 나노복합 방열 소재 기술	정의	○ 6G 통신부품에서 방출되는 열을 효과적으로 제거하여 부품의 기능저하, 오작동, 기판열화 등의 문제를 최소화하는 절연성 나노 세라믹 복합소재 기술
	요소 기술	- 저유전 세라믹 나노방열 소재 기술 - 6G 전자파 차폐/방열 다기능 나노복합 소재 기술 - 통신반도체 패키징용 고열전도도 나노방열 소재 기술
저궤도 위성용 통신부품 나노소재 기술	정의	○ 우주방사선 및 우주 환경 요소로 인해 저궤도 위성용 통신부품의 성능이 열화되지 않도록 유지 및 보호해주는 나노소재의 설계 및 합성 기술
	요소 기술	- 저궤도 위성용 우주방사선 차폐 소재 기술 - 저열팽창/고강도/경량 탄소 나노복합 소재 기술 - 위성 통신부품용 열/치수 안정 나노소재 기술

## 나. 6G 미디어 구현 나노소재

### 1) 개요

- (정의) 초고속, 초저지연, 대용량의 6G 통신 환경에서는 기존의 5G에서는 경험할 수 없었던 오감 인터랙션, 리얼공간 표현과 같은 새로운 미디어 서비스 구현을 가능하게 하는 나노소재 기술
- (필요성) 5G 통신 환경에서는 전송 속도 및 전송 용량의 제한으로 인해 서비스되지 못했으나 6G가 제공하고자 하는 무선네트워크 환경에서는 공간 및 오감 인터랙션을 통한 다양한 경험을 제공할 수 있는 서비스 기기가 주를 이룰 것으로 예상됨에 따라 필수적인 기술
- (발전 전망) 미래에 6G 상용화가 되면 통신 성능의 획기적인 개선으로 고화질의 동영상이 가능한 홀로그램 영상 제공이 가능해지므로, 복소 변조가 가능한 메타 나노소재를 기반으로 한 홀로그램 디스플레이 구현을 통해 다양한 광플랫폼 기반 응용 제품에 적용될 것으로 예상

### 2) 미래핵심기술이슈 : 초실감 리얼공간 미디어 구현을 위한 능동형 복소 변조 메타나노소재

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
능동형 복소 변조 메타 나노소재 개발 기술의 부재	- 광변조 메타 기술은 대부분 수동 소자 기반의 메타 소재에 대한 기초 연구 중심으로 진행되어 왔으며, 능동 구동 기반의 복소 변조 가능한 메타 나노소재에 대한 기술 개발 필요
능동형 복소 변조 메타 나노소재의 산업 양산 공정 적합성을 갖는 대면적 정밀 공정 기술의 부재	- 현재까지 수동형 메타 표면을 제작하는 대면적 공정 기술 개발이 주로 진행되어 왔으나, 고화질 홀로그램 구현을 위한 가시광 영역의 메타 나노구조를 형성할 수 있는 대면적 정밀 공정 기술 필요

### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
초실감 리얼공간 미디어 나노소재 기술	정의 ○ 공간의 제한을 받지 않으면서 자유로운 정보의 제공이 가능하고, 자유로운 시점이동이 가능하도록 확장된 3차원 공간을 표현할 수 있는 미디어 디바이스를 구성하는 나노소재 및 나노공정 기술
	요소 기술 - 복소 변조 메타 나노소재 설계 및 합성 기술 - 대면적 정밀 복소 변조 메타 나노소재 공정 기술 - 복소 변조 메타 나노구조의 미세 패터닝 및 픽셀화 기술 - 복소 변조 메타 나노소재 기반 디스플레이 패널 기술

## 다. 고주파수 스펙트럼 제어 초박막 나노소재

### 1) 개요

- (정의) 레이더 및 6G 무선통신에서 사용하는 고주파수(70-170 GHz; w-band & d-band) 마이크로파(밀리미터파)의 투과·반사·흡수 스펙트럼을 제어하는 초박막(1mm 이하 두께) 소재를 설계하고, 특성을 평가하는 기술
- (필요성) 70-170 GHz 주파수 대역의 밀리미터파는 스마트 모빌리티에서 센서·통신 역할을 담당하는 레이더와 차세대 6G 무선통신에 사용. 레이더와 6G 무선통신에 집적되는 다양한 부품은 기능에 따라 특정 주파수의 마이크로파를 선택적으로 완전 투과하거나 완전 흡수하는 특성이 필요. 예를 들어, 레이더 센서 커버는 서리 방지를 위한 발열 기능을 수행하면서 동시에 신호에서 사용되는 마이크로파 주파수에 대해 투과 특성이 필요. 사용자의 요구사항에 맞추어 마이크로파 스펙트럼의 형태를 자유롭게 변조할 수 있는 플랫폼 기술이 개발된다면 다양한 확장 응용이 가능
- (발전 전망) 마이크로파 제어 연구는 수 GHz 또는 수 THz 대역에서 주로 전자기파 차폐 또는 스틸스 기능의 구현을 목적으로 개발되었고, w-band 및 d-band를 동작 대역으로 하는 밀리미터파의 스펙트럼 제어 연구는 현재까지 보고된 바 없는 상황. 자율주행차, 6G 무선통신 분야의 산업 규모를 감안할 때, 밀리미터파 스펙트럼 제어 기능의 초박막 소재에 대한 관심이 고조될 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 밀리미터파 스펙트럼 제어 초박막 나노소재

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
다중파장 제어 설계 기술의 한계	- 가시광과 마이크로파와 같이 멀리 떨어져 있는 두 주파수 대역에서 다른 광학 특성을 부여하는 설계 기술 필요(예: 가시광 투과 + 마이크로파 흡수, 가시광 반사 + 마이크로파 투과)
레이더 센서용 마이크로파 완전 투과 초박막 필름 구현의 한계	- 레이더 센서에 사용되는 특정 주파수의 마이크로파를 선택적으로 투과하는 두께 1마이크론 이하의 필름 개발 필요
전자기파 차폐용 마이크로파 완전 흡수 초박막 필름 구현의 한계	- 특정 주파수의 마이크로파를 선택적으로 흡수하는 두께 1마이크론 이하의 전자기파 차폐용 필름 개발 필요
밀리미터파 스펙트럼 및 유전율 측정의 한계	- 초박막 필름의 70-170 GHz 투과·반사·흡수 스펙트럼 및 유전율 측정 기술 개발 필요
곡면 적용 소재·공정 개발의 한계	- 다양한 폼팩터의 제품 적용을 위한 고신축성 소재 및 곡면 적용 공정 개발 필요
가혹 환경 동작 신뢰성 확보의 한계	- 차량 주행과 같은 가혹 환경에서 동작 특성이 유지되는 소재 개발 필요

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
자율주행차 레이더 센서 및 6G 이동통신 부품용 메타표면 소재 기술	정의	○ 레이더 및 6G 무선통신에 활용되는 고주파수 (70-170 GHz; w-band & d-band) 마이크로파의 투과/반사/흡수 스펙트럼을 제어하는 메타표면 소재 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기계학습 활용 밀리미터파 메타표면 설계 기술</li> <li>- 밀리미터파 완전 투과/흡수 &amp; 가시광 반사 메타표면 개발 기술</li> <li>- 밀리미터파 스펙트럼 및 유전율 정밀 측정법 구축 기술</li> <li>- 곡면 구조 적용 3차원 프린팅 공정 기술</li> <li>- 자가치유 메타표면 소재 개발 기술</li> </ul>

### 〈6G 로드맵〉

종분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술								
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
6G	초고성능 / 초저지연 통신 나노소재	초고성능/초저지연 6G 통신 구현을 위한 극고주파 대역 전이형 나노소재	가시광 주파수 초고속/초광대역 6G 통신주요용 나노소재 기술	고출력 테라헤르츠 전자기파 신호발생 소재 기술		전자기 고신뢰성 나노유전발 소재 기술			통신/전자기 특성 기반 나노소재 기술			
			sub-THz 6G 통신 대용 저손실 유전특성 나노소재 기술	저유전 고굴절률 나노소재 기술		중공형 나노소재의 소재 기술		저손실 유전 나노소재 기술		저유전/저손실 나노소재 기술		
			sub-THz 6G 통신 대용 초고손실 나노유전/유전소재 기반 전자파 흡수 복합소재 기술	고손실 나노복합소재 기술		저유전/고손실 나노유전소재 기술		전자파 차폐막/고출력 나노복합소재 기술		다중대역 선택적/초고손실 전자기소재 기술		
			6G 통신용 저유전 나노복합 발광 소재 기술	저유전 세라믹 나노복합 소재 기술		6G 전자파 차폐/발광 다기능 나노복합 소재 기술			통신/전자기 특성 기반 나노복합 소재 기술			
			저궤도 위성용 통신주요 소재 기술	저궤도 위성용 우주방사선 차폐소재 기술		저궤도 위성/고출력/광학 나노소재 복합소재 기술			광/전자기 나노소재 기술			
	6G 미디어 구현 나노소재	초소형 집광소인 미디어 구현을 위한 능동형 복소 밴드 메타나노소재	초소형 집광소인 미디어 나노소재 기술	복소 밴드 메타 나노소재 설계, 합성 및 대량적 공정기술		복소 밴드 메타 나노 구조의 미세 패시브 및 활성기 기술			복소 밴드 메타 나노소재 기반 디스플레이 핵심 기술			
	고주파수 스펙트럼 제어 초저전 나노소재	일차원/이차원 스펙트럼 제어 초저전 나노소재	저손실/저전력 패시브 및 6G 이종통신 부동용 메타표면 소재 기술	기체/액체 광물 일차원/이차원 패시브 표면 기술		일차원/이차원 스펙트럼/광학 특성 유인형 구조 기술		저가/저전력 패시브 소재 개발 기술				
				일차원/이차원 무극/양극/구속 전자 패시브 표면 개발 기술		구속 구조 적용 패시브 유인형 광정 기술						

## 4-5. 양자소재

### 가. 양자컴퓨팅 양자소재

#### 1) 개요

- (정의) 양자역학적 원리를 정보 자원으로 이용하는 양자 정보과학기술. 양자컴퓨팅, 양자센싱, 양자통신의 대표 기술 범주 분류. 이 중 양자컴퓨팅 기술은 기존 컴퓨팅 기술의 패러다임을 혁신적으로 변화시킬 수 있는 차세대 전산 기술
- (필요성) 양자컴퓨터의 실용화 전망 시기가 20~30년에 이르며, 양자 시뮬레이터 역시 10년 이후에나 실용적인 가치를 가진 프로토타입 개발이 가능할 전망. 따라서 기초기술에서 응용기술에 이르는 전방위적 추격전을 벌이기에는 충분한 시간 여유가 있는 상황. 양자기술은 양자 중첩으로 존재하는 큐비트를 기반으로 하며 양자상태로 존재할 수 있는 결맞음 유지시간을 극대화할 수 있는 소재 기술이 필요
- (발전 전망) 범용 대규모 양자컴퓨터 상용 프로토타입의 등장 시기를 향후 20~30년 사이로 예측함에 따라, 여러 물리계에 걸쳐 확장형, 에러 보정형 (fault-tolerant), 범용 양자컴퓨팅으로 도약하기 위한 노력이 진행되는 추세(2017 MIT 10대 혁신기술 선정, 세계 경제포럼 10대 미래유망기술 선정 등)

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 지수적 계산능력 구현을 위한 양자컴퓨팅 나노소재

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
동위원소 정제형 결맞음시간 확보용 초순수 원재료 성장의 한계	- 스핀 큐비트 결맞음 시간 극대화용 28Si, 12C, Ge 재료 확보 필요
Spin-Valley 자유도 제어 및 균일도 확보의 한계	- 스핀 결맞음 시간에 영향을 주는 Valley 자유도의 크기 및 균일도 제어 필요
파운드리 호환 양자컴퓨터 칩 소자 공정 확보의 한계	- 산업체 파운드리에 적용 가능한 대규모 큐비트 공정 기술 필요
차세대 집적회로 기반 양자칩 용 반도체, 초전도체 재료 탐색의 한계	- 기존 Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 를 능가하는 고온초전도체 기반 조셉슨접합 개발 필요
원자단위 불순물 위치 제어의 한계	- Donor 핵스핀 기반 양자컴퓨터용 원자단위 임플란트 기술 필요

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
범용 양자컴퓨터용 큐비트 형성 및 제어 원천기술	정의 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 큐비트 형성 (반도체: 스핀큐비트 초전도: 트랜스몬) 및 스핀잡음 최소화 용 반도체 기판 성장 기술</li> <li>○ 1000 큐비트 이상 상호작용하는 확장형 큐비트 칩 제작 기술</li> <li>○ 큐비트 집합(노드) 사이 양자얽힘을 구현한 양자네트워크 방식의 대규모 양자컴퓨팅 기술</li> </ul>

나노기술명	개요
	<p style="text-align: center;">요소 기술</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2D quantum well, Si-MOS, Ge/SiGe 동위원소 정제형 28Si 등 고품질 반도체 기판 대면적 성장기술: 극저온 이동도 <math>10^5 \text{cm}^2/\text{Vs}</math> 이상</li> <li>- 고비저항 실리콘, 사파이어 기판 등 초전도 큐비트용 기판성장기술- 양자 소재 특성분석의 표준화: 결맞음 시간, 에너지 완화시간, 극저온 전하잡음 스펙트로스코피, Valley splitting 균일도 평가 등 양자소재 특성 메트릭 확립- 상용 파운드리 공정과 호환되는 큐비트 칩 설계 및 제작 기술</li> <li>- 장거리 양자정보 얽힘구현 기술 및 확정적 양자원격 전송 기술</li> </ul>

## 나. 양자통신 및 양자센서 소재

### 1) 개요

- (정의) 양자역학적 원리를 정보 자원으로 이용하는 양자 정보과학기술. 양자컴퓨팅, 양자센싱, 양자통신의 대표 기술 범주로 분류. 이 중 양자센싱은 큐비트 등의 양자시스템으로 물리량을 측정하는 기술이며, 양자통신은 양자역학적 특성을 정보통신 분야에 적용해 기존 정보통신의 한계 극복을 위한 차세대 정보통신기술
- (필요성) 양자정보과학의 실용화 전망 시기가 20~30년에 이르며, 양자 시뮬레이터 역시 10년 이후에나 실용적인 가치를 가진 프로토타입 개발이 가능할 전망. 기초기술에서 응용기술에 이르는 전방위적 추격전을 벌이기에는 충분한 시간 여유가 있는 상황. 특히, 양자정보통신기술은 전 산업에 걸쳐 다양하게 응용할 수 있어, 더 많은 기술사업화 모델 발굴을 통해 산업계의 니즈 적용 및 인프라 환경 구축 등의 노력으로 다양한 산업의 경쟁력 제고 필요
- (발전 전망) (통신/암호) 기존의 legacy 암호 통신체계와의 호환을 통해 QKD를 이용한 새로운 프리미엄 암호응용 서비스를 제공하고 얽힘기반 양자통신은 원천적으로 도청이 불가능한 통신방법을 제공하는 등 혁신적인 정보통신에 활용 가능. (소자/센서) 양자 중력 센서, 자기 센서 등이 시장을 주도할 것으로 예상

### 2) 미래핵심기술이슈 : 원천보안형 양자정보통신 및 양자센서 나노소재

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
양자키분배 소형화의 한계	- um 수준의 단면 크기를 갖고 기존 반도체 공정을 통해 생산 가능한 광집적 회로를 제작하고, 이를 이용해 다양한 광소자 제작 필요
양자분배기와 결합 가능한 양자키분배 프로토콜 구현의 한계	- 기존의 BB84 프로토콜은 양자 리피터와 결합될 수 없는 방식으로, Ekert scheme에 기반하여 양자 중계기와 결합될 수 있는 방식의 프로토콜 연구가 중요
양자분배기 및 양자메모리 구현의 한계	- 양자중계기는 양자신호 전송 거리를 증가시키기 위해 중간 노드에서 양자 얽힘 상태를 저장하고 얽힘 교환 기술을 이용해 양자 신호를 중계하는 기술로, 양자 네트워크를 위해 필수 확보가 필요한 핵심소자로 경쟁력 확보가 시급
양자센서 신호의 표준양자한계 극복의 문제	- 표준양자한계 이상의 높은 자기장 민감도를 유지하면서 나노미터 분해능의 형광 이미징 기반 양자이미징 기술 개발 필요

### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
양자통신, 양자센서용 원천소재 기술	정의	○ 양자점 및 반도체 레이저 제작시 필요한 원소재 기술 ○ 양자통신 및 양자센서용 통신대역 단광자 발생 및 검출 기술
	요소 기술	- 고순도 중성원자 Cs, Rd 등 원자/이온기반 양자센싱 원소재 기술 - 비선형 산화물 LiNbO <sub>3</sub> , BTO, TaO 등 양자통신, 양자센서용 광부품용 원소재 기술 - 고기능 나노광회로 및 양자광원 생성기 개발 기술



### 〈양자소재 로드맵〉

중분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술											
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032		
양자소재	양자컴퓨팅 양자소재	자수적 계산능력 구현을 위한 양자컴퓨팅 나노소재	범용 양자컴퓨터를 위한 큐비트 형성 및 제어 원천기술	큐비트 형성 기술 2024 중 고분질 반도체 기반 대면적 성장기술	초전도 큐비트용 기반성장기술	양자소재 특성 예측의 확립 기술	양자소재 특성분석의 표준화 기술	양자소재 결함구현 기술 및 확장적 양자원자 전송 기술	큐비트 집성체 및 제어기술						
	양자통신 및 양자센서 소재	원천기술형 양자정보통신 및 양자센서 나노소재	양자통신, 양자센서를 위한소재기술	고순도 중성원자 Co, Nd를 원자기반 원소재 기술		비선형 산재를 양자 통신, 양자 센서를 원부용원 원소재 기술								고기능 나노구조체로 및 양자광원 성장기 개발 기술	

## 4-6. emerging 나노소재

### 가. 초격자 2차원 결정 소재

#### 1) 개요

- (정의) 서로 다른 격자 구조의 이차원 물질들이 결합하여 이루는 초격자 소재 기술
- (필요성) 안정한 구동이 가능한 고에너지 효율의 양자 소자부터 높은 빛/물질 상호 작용을 보이는 고효율 레이저, 외부 에너지나 전계 효과에 초고 민감도를 보이는 센서 등의 개발에 초격자 소재의 필요성이 증가하는 추세. 인위적으로 형성된 이차원 초격자 소재는 자연적으로 얻어진 격자 구조에는 존재하지 않던 결정 대칭성과 격자 상수를 지니며, 최근 초전도, 강자성, 토폴로지에 의한 전자 수송과 같은 새로운 물성을 보여줄 수 있음이 실험적 혹은 이론적으로 확인. 특히, 해당 소재 플랫폼은 특정 물성 혹은 소자 기능의 최적화를 위해 인위적으로 격자 구조를 자유롭게 제어 가능하여 필수적인 기술
- (발전 전망) 이차원 소재는 기존 평면 구조에 기반한 박막 소재 합성 및 제작 공정의 직접적 접목이 가능하고 결함이 없는 반데르발스 표면을 지니고 있어 이상적 물성의 구현이 가능. 이는 향후 양자 소자, 고감도 센서, 광학 소자 등을 개발함에 있어 큰 장점이 될 것으로 기대

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 인위적 이차원 결정 구조 제어 나노소재 플랫폼

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
비정질 기판상에 단결정 이차원소재 저온 합성의 한계	- 현재 대면적의 단결정 이차원 소재는 에피 성장용 기판 상에서 고온 합성을 통해서만 이루어짐에 따라 백엔드 공정에 따른 응용에 제약
대면적상 균일한 초격자 구조 형성의 한계	- 상이한 이차원 결정 박막이 층상 방향 또한 측면 방향으로 원자 구조가 제어된 고품위 계면을 이루게 하는 기술 개발 필요 - 현재 수십~수백 마이크로미터 너비의 박막에서만 초격자 구조가 구현되는 문제

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
비정질 기판 상에 이차원 결정 소재의 저온 합성기술	정의 ○ Backend 공정을 위한 450도 이하 온도에서 비정질 절연막에 단결정 이차원 소재를 합성하는 기술
	요소 기술 - 450도 이하 저온에서 단결정 이차원 소재 성장 기술 - 비정질 절연막 상에서 성장 기술
웨이퍼 크기에서 나노미터 단위의 정밀도를 갖는 초격자 구조 제어 기술	정의 ○ 웨이퍼 크기 내에서 초격자 구조가 나노미터 단위에서 균일한, 결정 대칭성과 밴드 구조가 제어된 초격자 이차원 결정 형성 기술
	요소 기술 - 측면 방향으로 나노미터 분해능을 가지고 2개 이상 소재가 순차적으로 배열된 웨이퍼 크기의 초격자 구조 형성 기술 - 층상 방향으로 원자 단위로 깨끗한 계면을 가지고 2개 이상 소재가 적층된 구조 형성 기술

## 나. 화합물 이차원 소재

### 1) 개요

- (정의) 다성분 화합물(MAX, MAB 등 3성분 이상) 원자층 에칭(A조성의 원자)에 의한 다층(원자 3층 이상) 2D 소재(MXene, MBene 등) 합성 및 응용소자화 기술 (원자조성 및 배열제어에 의한 응용 물성제어)로서 매우 높은 전기전도도와 표면활성도를 동시에 갖는 나노소재 기술
- (필요성) 전도성 세라믹 계열의 다층 2D 소재로서 원자배열, 표면화학작용기 등의 제어를 통해 매우 높은 전기전도도와 표면활성도를 동시에 갖는 우수한 물성의 나노소재의 확보와 응용소자의 성능향상이 가능. 다양한 응용분야에 따른 맞춤형 소재 원천기술 개발이 필요
- (발전 전망) 5G/6G 산업과 모빌리티 산업의 고도성장으로 목표성능이 지속적으로 높아짐에 따라, 전자 소자와 에너지 소자를 구성하는 기존 소재를 대체하는 새로운 고기능/고전도성 나노소재의 개발이 예상

### 2) 미래핵심기술이슈 : 원자층 에칭을 통한 다성분 이차원 소재

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
나노결정구조 설계 방법론의 부재	- 계산 기반 나노결정 구조 설계, 물성 예측 필요
산화 안정성 확보의 한계	- 산화 방지 제어 기술, 내구성/안정성 향상 기술 필요
합성된 물성 제어의 한계	- 단일층 물성 측정 기술, 결정 구조 및 결함 제어 기술, 표면에너지 제어 기술, 일함수/밴드갭 제어 기술 필요
나노소자 응용기술 분야 매칭의 한계	- 코팅 기술, 나노소자화 나노공정 기술 필요
합성의 재현성 확보의 한계	- 다성분 균일 합성, 대면적 건식 합성 기술 필요

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
원자층 에칭 다성분 2D 소재 나노기술	정의 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 계산 기반의 나노결정 구조 설계 및 제어 기술</li> <li>○ 산화 방지 제어 기술, 내구성/안정성 향상 기술</li> <li>○ 다성분 2D 소재 특성 구현을 통한 재현성 및 내구성이 확보된 다양한 응용 소자 상용화 기술</li> </ul>
	요소 기술 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 제일원리 계산 기반의 나노결정 구조 설계 및 물성 계산 기술</li> <li>- 강산 용액의 습식 공정, 친환경 합성 기술, 대면적 건식 합성 기술</li> <li>- 균일코팅 기술, 층간 간격 제어 기술, 나노복합화 기술, 대면적 패터닝 기술, 공정 재현성 및 물질의 내구성 향상 기술</li> </ul>

## 다. 이온반도체 소재

### 1) 개요

- (정의) 이온의 이동과 전자/정공의 수송 두 가지 자유도를 갖는 반도체 소재로서 이온 및 전자/정공의 이동 및 수송으로 물성 제어가 가능한 이차원 반도체 나노소재 기술
- (필요성) 소재 내에서 이온 및 전자/정공의 이동 및 수송으로 물성을 제어하여 응용 소자 제작 시 헤테로 구조체 제작 없이 단일 소재로 다양한 응용 소자 제작이 가능함에 따라 필수적인 기술
- (발전 전망) 공정 기술의 발전으로 소자 집적도 증가가 요구됨에 따라, 집적도 기준을 충족하기 위한 소자 단순화가 요구되는 시점에서 이온반도체 소재를 이용한 소자는 기존 실리콘 기반 소자의 한계를 뛰어넘는 차세대 소자로서 활용될 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 이온반도체 소재를 이용한 소자 집적도 증가

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
기존의 결정구조를 가지는 반도체 소재 내에서의 이온 거동의 한계	- 전자/정공의 수송과 이온 이동의 동시성이 발현되어야 하지만, 기존 반도체의 결정구조 내에서 이온의 이동이 어려운 문제 - 이온 이동이 유리한 결정구조를 가지는 반도체 소재 개발 필요
이온 이동과 반도체 특성 발현의 동시성 한계	- 이온 이동이 가능한 물질은 대부분 부도체 또는 도체 특성을 지니므로, 이온 이동이 가능한 반도체 특성을 지니는 새로운 소재 개발 필요
이온 이동 자유도에 따른 물성 제어 탐색의 한계	- 이온 이동이 가능한 반도체 소재 내에서 새롭게 발현되는 물성 평가 필요

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
이온 복합성 이차원 반도체 나노소재 기술	정의 ○ 이온의 이동과 전자/정공의 수송 두 가지 자유도를 통해 물성 제어가 가능한 반도체 소재 기술
	요소 기술 - 이온 이동이 가능하도록 결정 구조 제어를 통한 이차원 반도체 소재 합성 기술 - 합성된 소재의 나노스케일 수준의 소자 기술 - 이온 이동과 전자/정공의 수송에 따른 새롭게 발현되는 물성 확보 기술

### 〈emerging 나노소재 로드맵〉

중분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술								
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Emerging 나노소재	초격차 2차원 고품질 소재	인위적 이차원 고품질 구조 제어 나노소재 플랫폼	비정질 기반 상계 이차원 고품질 소재의 제어 합성기술	저온 단결정 이차원 소재 성장 기술				비정질 고품질 상에서 성장 기술				
			웨이퍼 크기에서 나노미터 단위의 정밀도를 갖는 초격차 구조 제어 기술	축선 방향 배열 초격차 구조 합성 기술				축선 방향 배열 초격차 구조 합성 기술				
	확립된 이차원소재	원자층 예정 다성분 2D 소재 나노기술	원자층 예정 다성분 2D 소재 나노기술	재결합이 계산가능한 나노결정구조 설계 및 물성 계산 기술	대면적 건식 합성 기술							
				고안 용액의 습식 공정기술	전환막 합성기술 / 나노패턴화 기술							
				중간단계 제어기술	대면적 패시브 기술, 공정 재현성 및 물성치 내구성 향상기술							
	이온반도체 소재	이온 반도체 소재를 이용한 소자 집적도 증가	이온 제형상 이차원 반도체 나노소재 기술	결정 구조 제어를 통한 이차원 반도체 소재 합성기술	나노스케일 수준의 소자 기술			이온 이온과 전자/정공의 수송에 따른 새롭게 발현되는 물성 제어 기술				

## 제7절 (나노기반) 나노안전성

### 1. 개요

#### 가. 정의

- 나노기술을 활용한 물질 및 제품의 전주기를 대상으로 보건·환경적 안전성을 평가하고 설계 단계에서부터 안전성이 확보된 제품을 생산하도록 하는 기술

#### 나. 범위

- **(안전한 나노환경)** 안전한 나노환경 분야의 소분류는 나노제품 전주기 위해성 평가 및 인벤토리 구축 기술로 구분. 나노제품의 생산부터 폐기까지의 전 과정에서 인체 및 환경에 대한 노출을 파악하고 제품 및 노출경로 별 유해성을 규명하여 나노제품에 대한 인체 및 환경위해성 평가를 통해 나노제품의 안전관리 기반 기술을 개발
  - 인체 노출 및 전주기 위해성 평가: 나노원료 및 제품에 대한 생산, 소비, 폐기까지 전 과정에서 인체에 대한 위해성을 평가하는 것을 의미. 인체 위해성은 노출량 평가와 실험 동물을 이용한 위험성 확인 과정을 포함
  - 환경 노출 및 유해성 전주기 평가: 나노물질의 생산, 소비, 폐기의 전주기 과정에서 환경 매체별 유해성 평가를 수행하는 것을 의미. 환경 매체에서 노출된 나노물질의 거동 및 특성을 반영한 평가 기술을 포함
  - 나노제품의 전주기 인벤토리 구축: 개발, 제조, 유통, 사용, 보관, 폐기 및 재활용에 이르는 전주기(Life Cycle)에 대한 인벤토리 구축을 포괄
- **(안전한 나노사회)** 안전한 나노사회를 위한 기술적 범위는 크게 두 가지로, 생산단계의 인체 노출 안전성 확보를 위한 작업자 안전보건 기술과 제품이 유통된 이후의 안전한 사용을 도모하는 나노제품 안전 인증 기술로 구분
  - 작업자 안전보건: 작업장의 노출평가, 보호대책, 물질안전보건자료의 작성과 같은 규제로 적용될 수 있는 기술을 포함
  - 나노제품 안전인증: 나노제품에 함유된 나노물질의 독성평가 및 노출평가 데이터를 기반으로 나노제품의 안전성 인증 시스템 구축·운영을 위해 제품 분류체계 및 나노제품별 안전성 판단기준을 정립하고 인증 절차 및 제도 운영 방안 등을 개발하는 기술을 포함
- **(나노지배구조)** 나노제품에 대한 시장의 불신을 해소하고 안전성에 대한 국제적인 규제강화 움직임에 적절하게 대응하기 위해 나노기술의 윤리와 경영을 통한 사회적 수용 제고 및 국제

협력 및 표준화 등 나노안전 거버넌스 확립의 필요성을 포괄

- 나노기술의 윤리와 경영: 나노제품 안전성 관련 이해 당사자(정부, 기업, 연구자, 대중) 간 소통과 의사결정 참여, 정보 공개 등을 통해 나노제품 안전성에 대한 합리적인 인식 제고 및 신뢰도 고취

- 국제협력 및 표준화: 해외 유수의 국책연구기관들 특히, 유럽을 중심으로 활발하게 진행되고 있는 나노안전성 연구분야의 협력연구와 이를 활용한 국제 공인표준 측정체계 확립의 필요성을 기술

○ **(나노제품의 안전한 설계)** 나노제품의 안전한 설계는 안전성 기반 나노제품 설계기술과 나노제품 안전성 예측 기술을 소분류 항목으로 포함

- 안전성 기반 나노제품 설계 기술 분야는 “안전성 기반 설계 기술 (Safety by Design, SbD)”의 개념에 기반하여, 나노기술 개발 초기 단계에서 잠재적인 위험요인을 식별하고 최소화하거나 제거하기 위해 나노제품의 안전성을 예측하는 기술을 개발하고, 예측한 제품 안전성 정보를 기존의 성능, 비용 등의 정보와 함께 활용하여 안전성이 충분히 고려된 신규 나노소재나 제품개발을 지원하는 e-플랫폼 구축을 지향

○ **(첨단소재/제품 평가 및 차세대 안전성 평가기술)** 첨단소재/제품 평가 및 차세대 안전성 평가기술 분야의 소분류는 첨단소재/제품 안전성 평가기술과 차세대 안전성 평가기술로 구분

- 첨단소재/제품 평가: 새로운 물성과 성능을 가진 첨단소재 나노물질이 환경에 미치는 안전성을 평가하기 위한 환경 독성 기술을 포함

- 차세대 안전성 평가: 최신기술을 활용하여 동물실험을 대체하고, 인체에 가장 가까운 안전성 평가모델을 개발하여 신속하고 정확하게 나노물질의 안전성을 평가할 수 있는 기술을 포함

〈나노기반 (나노안전성) 분야 기술 분류체계 제3기·제4기 수정 경과〉

제3기 나노기술지도		제4기 나노기술지도	
중분류	소분류	중분류	소분류
근로자를 위한 안전한 제조 환경	노출평가 기술	안전한 나노환경	나노제품 전주기 위해성 평가
	노출저감 기술		나노제품 전주기 인벤토리 구축
	작업자 보호 기술	안전한 나노사회	작업자 안전보건
	건강 모니터링 기술		나노제품 안전인증
	인체 위해성 평가 기술		나노기술의 윤리와 경영
스마트 컨슈머를 위한 나노안전 정보망	제품에서의 나노이탈락 DB 구축 및 기준안 제시	나노지배구조	국제협력 및 표준화
	확장된 안전보건자료 작성		나노제품의 안전한 설계
	나노제품의 안전성 인증 추천 알고리즘 개발 및 인증 시스템	안전성 기반 나노제품 설계 기술	
나노제품의 안전한 폐기	소비자 노출 평가 및 정보망 구축	나노제품의 안전한 설계	나노제품 안전성 예측 기술
	나노제품 폐기 현황 DB 구축		첨단소재/제품 평가 및 차세대 안전성 평가기술
	환경 노출 평가	첨단소재/제품 평가 및 차세대 안전성 평가기술	첨단소재/제품 안전성 평가 기술
	나노물질 환경 모니터링 기술		차세대 안전성 평가 기술
	나노 제품의 폐기시스템 개발		



다. 역량 분석(SWOT)

		외부 환경	
		기회(O)	위협(T)
내부 환경		O1. AI, ICT 등 기술간 융·복합화 가속 및 안전에 관한 국민의 높은 관심 O2. EU-REACH 등 각국 안전규제 강화 및 유럽 중심 나노물질 관리제도 체계화 O3. 제품 내 나노물질 노출평가 시험법 개발 확대	T1. 나노물질·제품의 환경 및 인체에 대한 안전성 우려 T2. 후발주자로서 해외 안전평가 기술수준 대비 낮은 경쟁력 T3. 장기노출 및 복합구성 나노제품에 대한 데이터 확보 어려움 T4. 나노물질 안전관리를 위한 비용 증가
강점 (S)	S1. 국내 화평법 등 나노물질 관리 제도화 S2. 나노융합제품 DB 등 산업 정보 구축 S3. 국내 의약품/화학물질 안전성 평가 인프라 및 기술 보유 S4. 국내 나노물질 측정기술 발전	○ AI 등 융합기술을 바탕으로 전주기 위해평가 체계 구축 및 안전평가 인프라 고도화 ○ 국내 관리제도의 이행을 통한 전문성 강화 ○ 초기 개발단계인 첨단소재 성능과 안전성에 대한 국내 요구 반영과 국제적 우위 선점 위한 OECD, ISO 등 국제기구 활동 지원 ○ 나노물질 측정 기술을 활용한 첨단소재/제품의 특성 평가 방법 모색	○ 전주기 위해평가 자료 확보 및 인벤토리 구축 ○ 국제표준 맞춤형 대응 위한 나노안전 보건자료 생성 및 국제 표준 공동 제안을 위한 국제 협력 사업 지원 ○ 안전관리 DB 구축 및 대중 교육 ○ 나노제품 안전성 인증 제도 운영 ○ 발전된 측정기술 기반으로 첨단 나노소재/제품의 정확한 안전성 평가기술 개발
		SO 전략 WO 전략	ST 전략 WT 전략
약점 (W)	W1. 나노안전평가 융합 연구 인력 부족 W2. 전주기 노출평가 기술 및 나노물질 독성평가 자료 부재 W3. 인체 나노물질 노출 평가 기술 및 국가 (국제)기술 표준 수준 W4. 국내 규제제도의 나노 물질 직접규제 근거 미흡 W5. 나노제품 안전인증 제도 기반 미흡	○ 융복합 기술 기반 전주기 노출 평가 및 나노안전 평가기술 국제표준 선점 ○ 나노물질 노출평가 결과를 활용한 나노제품 안전성 판단 기준 정립 ○ 인체 모사도 높은 나노안전성 평가 모델 개발 ○ 첨단소재의 안전성 결과기반으로 안전한 생태계 및 인체 보건관리 정책 제안	○ 나노안전 평가분야 인력양성 전략 수립 ○ 국제표준 WG의 지속 참여를 통한 규제 법적근거 수립 ○ 나노제품 안전/신뢰성 향상을 위한 정보공유 및 활용 제고 ○ 나노제품 안전인증 알고리즘 개발 및 제도 운영 전략 수립 ○ 첨단소재의 안전성 평가 기술 개발을 위한 국제협력 연구사업 개발

## 2. 국내외 기술 및 산업동향(현황 및 전망)

### 가. 국외 기술 및 산업 동향

- (안전한 나노환경) 나노물질의 전주기 과정에서 환경과 인체에 대한 노출량을 평가하고 대상 수용체에 대한 유해성을 확인하는 과정을 통해 환경 및 인체 위해의 정도를 평가하는 기술을 개발하는 분야
  - 나노물질의 전주기 평가(Life Cycle Assessment; LCA)는 나노기술 적용 제품의 제조, 사용, 폐기의 전 과정에 대한 환경 영향 평가로서 그 중요성이 지속적으로 증가. 주요 국가의 화학물질 관리제도에서 나노물질에 대한 LCA 기술이 적용될 것으로 예상되므로 선제적인 연구개발이 반드시 요구
    - OECD는 2015년에 나노기술 기반 제품에 적용할 수 있는 LCA에 관한 guidance manual 이 발간되었으며, 그 개념이 확립되었으나 실제 적용을 위한 세부적인 방법과 정책으로는 연결되지 못하는 상황. LCA의 개념은 Life Cycle Inventory (LCI)와 연결되어 나노물질의 전주기 위해성 관리에 반드시 필요
    - LCA에 관한 논문 발표는 매우 소수이며 국가별로는 유럽(36편), 미국(28편)이며, 미국과 유럽의 합계는 총 LCA 논문 중 95%를 차지. LCA 관련 총 논문 수는 71편이며, OECD 회원국에서 발표한 논문은 69편에 해당
    - LCA에 관한 최초의 논문은 2001년 유럽에서 발표하였으며, 2020년에 가장 많은 결과를 발표
  - 환경 노출 및 유해성 전주기 평가기술 분야에서는 제조된 상태에서의 나노물질을 대상으로 기술개발이 진행되고 있으며, 전주기 과정에서 환경에 노출되어 변환된 나노물질의 거동 및 특성을 반영한 평가기술 개발 요구
    - 유럽 및 미국을 중심으로 mass flow 모델 기반의 환경 매체 내 나노물질 노출 예측 연구가 수행된 바 있으며, 네덜란드 RIVM에서는 SimpleBox4Nano를 개발
    - 유럽을 중심으로 SimpleBox4nano 모델과 USEtox 모델을 결합하여 나노물질의 유해 특성을 평가하는 연구를 수행한 바 있으며, 이를 활용하여 환경 및 인체 위해성을 평가하는 기술 개발 진행
    - 미국 캘리포니아 대학과 애리조나 주립대학 등에서는 환경매체 내 나노물질 측정분석기술을 개발하여 모니터링을 통한 환경노출 농도를 산정하는 연구를 수행한 바 있으나, 나노물질의 환경 내 변환 및 자연발생 나노물질 식별 등 나노제품의 전주기 노출평가를 위한 기술은 개발된 바 없는 상황
  - 나노제품의 전주기 인벤토리 구축은 개발, 제조, 유통, 사용, 보관, 폐기 및 재활용에 이르는 전주기(Life Cycle)에 관한 내용

- 미국: 미국환경보호청(EPA)은 나노안전관리를 위해 독성물질관리법(TSCA)에 따라 나노물질을 사전신고제도(PMN) 및 중대신규사용규칙(SNUR)을 통해 관리. 나노크기 물질을 일반화학물질 범주에 포함하여 발생할 수 있는 환경 및 인체 유해성을 관리하며, 화학물질의 제조 및 수입 단계에서 위해성이 있는 물질의 독성을 평가하고 독성이 있을 경우 생산 유예 또는 금지. 살충살균살서제법(FIFRA)에 따라, 제품에 포함된 나노물질이 제품 내에서 살균성분을 나타내는 경우, 유통 또는 판매전 등록을 의무화
- EU: 유럽위원회(European Commission)는 2020년 1월부터 나노물질(나노소재, 나노폼(구조체))의 등록을 의무화. 2022년 6월에 EU REACH 등 화학물질 규제 등에 적용되는 나노물질에 대한 정의를 개정하여 고시. 나노 물질을 1 nm-100 nm 사이의 입자가 50% 이상 포함된 물질로 여전히 정의하고 있지만, 특정 나노물질에 한하여 함량 기준이 1-50% 사이에서 변동하도록 허용하는 유연성 조항이 삭제되고 최소 함량치 기준인 50%만 유지. EU 살생물제법(BPR)은 2013년부터 나노물질 특별조항을 신설하여 관리하고 있으며, 물리화학적특성 자료외에 유해성 자료의 추가 제출을 요구. 살생물제품 규제 신청서 작성단계에서 나노물질을 함유하는 경우, 응집/집적, 결정상 크기, 입자크기 등 나노특성자료의 제출을 요구. EU는 2019년 이후, 나노물질을 나노소재(nanoform)라 하고 소재별 특성을 파악하고 표준화된 안전성평가 방법 마련을 위해 OECD 제조나노물질작업반(WPMN), ISO 등을 통해 국제표준시험법 관련 기술 지침서를 개발하고 NANORIGO, Gov4Nano, NanoHarmony 등 다양한 국제협력 프로젝트를 진행

○ **(안전한 나노사회)** 나노기술의 우수한 성능에 따르는 안전성의 확보를 위해 나노물질과 제품의 생산단계에서 작업자의 보건안전을 확보하기 위한 각국의 노력이 규제의 형태로 존재

- 영국의 산업안전보건법(1974) 제5항은 사업주의 작업자 안전과 건강에 대한 확보 의무를 규정하고 있으며, 이 조항에 근거하여 나노물질에 대한 사업주의 책임을 강조. 이에 따라 2004년 이후 나노물질 작업에 대한 많은 Guidance를 내놓고 있어, Guidance에 대한 강제성은 없지만, 법을 준수하는 근거로 활용
- 독일은 연방 산업보건안전법과 직업안전보건사고예방 법규가 자율법 형태로 존재. 이 법에 근거해 발간한 지침에서는 기존의 분진을 대상으로 한 보호조치들이 나노물질에도 효과가 있다고 명시
- 미국은 연방 산업안전보건국(OSHA)이 주축이 되어 산업안전보건법(1970)을 준수하도록 요구. OSHA는 나노물질에 노동자가 노출되는 상황에 대한 규제/규정을 제시하고 있으며 신체의 보호뿐만 아니라 개인보호장비에 이르기까지 규제/규정을 제시하며, 지속적으로 개정
- 일본은 후생노동성(MHLW)이 담당하고 있으며, 나노물질의 제조 시에 제조사에 필수적인 주의사항을 준수하도록 권장. 화학물질관리법에 근거하여 규제하고 있으며, 제조나노물질

에 대한 가이드라인이 전문가 위원회에 의해 발간

- 대만: 대만은 2003년부터 “나노 기술 산업화 추진 계획”에 나노제품의 품질과 이미지를 업그레이드하고 나노기술의 산업화 촉진을 적극 실행하기 위해 나노제품 인증 제도를 시행하였으며, 통상 인정되는 국제적 품질 표준을 따라 서로 다른 특성을 가진 나노제품의 특성과 기능성에 주안점을 두고 평가하여 인증 제품에 나노마크를 부여(안전성은 필요시 검토)

○ **(나노지배구조)** 유럽 주요 국가, 미국 등을 중심으로 나노제품 안전성에 대한 다양한 대중 참여 프로그램 운영 중

- EU: Impart-Nanotox (나노안전 DB구축 프로그램), NANOTOTOUCH(열린 나노실험실), NanoTV(나노기술 정보전달), Time for Nano(교육 프로그램) 등 다양한 대중 참여 프로그램 운영
- 영국은 Nanojury를 통해 나노기술 전문가 자문 및 거버넌스 의견 제안
- 프랑스에서는 Nano Training 프로그램을 통해 나노물질의 건강/환경/안전에 대한 잠재적 영향에 대한 이해 증진 및 대중과 의사소통
- 나노안전성 관련 국제협력 및 표준화 분야는 국제경제협력개발기구(OECD)의 제조 나노물질 작업반(WPMN)과 국제표준기구(ISO)의 나노기술분과(TC 229) 운영을 통해 국제표준이 제정되고, 과학적 근거 마련을 위해 유럽을 중심으로 다양한 프로젝트 추진 중
- OECD WPMN에서는 ‘나노물질 특성 분석과 정의 및 용어표준’, ‘나노물질 테스트 방법 및 위해성 평가’, ‘나노안전 관련 정보공유, 협력 및 확산’ 등을 다루고 있으며, 기존 OECD 시험지침에 대한 나노물질 적용성을 검토하여 나노물질에 적합한 시험지침을 수정 및 개발
- ISO TC229에서는 국제전기기술위원회(IEC) 113과 협력을 통해 용어표준, 측정방법, 환경·보건·안전, 물질 사양, 나노제품 및 응용의 분야에 관한 5개의 작업반(WG)과 2개의 기술그룹(TG)이 설치/운영되어 표준화를 추진함으로써 점진적인 나노기술의 개발을 촉진하고 잠재적 리스크를 밝혀 나노물질이 시장과 환경에 안전하게 도입될 수 있도록 필요한 절차를 제공
- 나노안전성 관련 다양한 과학적 표준 운영 절차 및 지침문서가 현재 유럽 중심으로 활발하게 개발되고 있고, 2014년부터 최근까지 진행되고 있는 EU Horizon 2020와 후속으로 시작된 Horizon Europe(2021-27) 내 관련 프로젝트를 통해 다양한 국제 공인 나노특성/독성 평가방법을 확보

○ **(나노제품의 안전한 설계)** 나노제품의 안전한 설계 분야는 국민건강 및 환경보고와 더불어 화학산업계의 시장 경쟁력 강화를 위해 기존의 나노소재나 제품이 개발된 이후에 안전성 평가를 수행하는 대신, 제품 설계 단계부터 안전성을 고려하여 새로운 나노소재나 제품개발을 지

향. EU를 중심으로 기술선진국의 최근 나노기술분야의 주요 이슈 중 하나는, 탁월한 성능과 더불어 안전한 나노소재/제품을 보다 신속하게 개발할 수 있도록 안전성 및 성능 테스트 및 구현을 위한 설계, 예측, 평가기술들을 통합 플랫폼 형태로 구현

- 글로벌 화학제품 및 환경 관련 규제가 지속 강화됨에 따라, 나노제품의 인체건강 및 환경에 대한 부정적인 영향을 최소화하기 위한 나노제품 안전성 예측기술 수요가 지속적 증대. 특히 계산화학 및 나노정보학 기술에 기반한 비시험(non-testing) 기법을 활용한 안전성 예측기술과 복합구성 나노제품과 관련한 수요 증대가 장기적으로 상승할 것으로 전망

- ※ '21년 2월 기준, EU REACH(신화학물질관리) 제도 하의 제한물질 72종, 허가물질 120종, 고위험우려물질(SVHC) 후보물질 393종 발표, EU NGO 단체인 ChemSec은 향후 2,000 여종의 물질이 사용이 제한되거나, 시장 퇴출 될 것으로 전망

- 글로벌 수준에서 컴퓨터를 기반으로 하는 *in silico* 예측기법은 기존의 확률에 의존한 연구 기법에서 고도의 컴퓨팅 파워를 요구하는 인공지능 기법이 적극적으로 도입되어, 다양한 독성 및 물성 항목 예측에 활용되고 있으며, 이에 대한 검증을 위해 *in vitro* 또는 *in vivo* 실험을 뒷받침

- EU는 '유럽 그린 딜(European Green Deal)'의 일환으로 2050년 까지의 비전을 담은 '지속 가능성을 위한 화학물질전략'을 2020년에 공표하였으며, 해당 전략에는 제품의 안전성과 지속 가능성을 동시에 고려하기 위한 "Safe and Sustainable by Design(SSbD)"를 개념이 핵심 개념으로 제시

- ※ EU가 제시한 SSbD 개념: 5단계 전략으로 구성, 1) 다학제 융합기술로 우려물질을 배제한 제품설계 단계, 2) 화학물질의 전생애(lifecycle) 분석 단계, 3) 통합영향평가(자원소비, 안전성, 기후변화영향, 환경영향) 단계, 4) SSbD 기준 부합여부 검토 단계, 5) 최종 후보물질 선정 단계

○ (첨단소재/제품 평가 및 차세대 안전성 평가기술) 첨단소재/제품 평가기술 분야는 기존 나노물질 평가기술로 새로운 성능과 특성을 가지는 첨단소재/제품의 평가 가능성 여부를 먼저 따져야 하는 상황이고, EU와 독일을 포함한 각국에서 첨단소재/제품에 대한 용어를 설명 또는 정의를 논의. EU Horizon 2020 사업에서는 SUNSHINE 과제를 통해서 기업체에서 현재 생산하고 있는 첨단소재의 물리/화학적 특성과 독성평가 기술을 위한 연구가 활발하게 진행 중

- 최근 OECD WPMN은 기존 나노물질보다 복잡성(향상된 기능성과 다중 조성 등)을 갖고 있는 첨단소재가 인체나 환경에 미치는 위험성에 대해 인지하고 이에 대응하고자 첨단소재에 대한 작업서(working description) 개발을 시작(ENV/CBC/MONO(2022)29. Advanced Materials: Workding Description). 작업서에 각 회원국의 첨단소재에 대한 정의, 범주, 예시 등에 대한 의견 포함

- EU에서는 JRC와 RTD를 중심으로 농업, 식품, 포장 및 화장품 산업 분야에 적용하기 위해 개발되는 스마트(반응성, 다기능성) 나노소재 또는 나노제품에 내장된 소재에 대해 논

- 의 중이며, 스마트 나노소재의 안전성과 지속 가능성에 관한 관심을 두고 개발
- 영국은 BSI, DEFRA 등을 중심으로 첨단소재의 범주화 및 우선순위 지정에 관심을 두고, 제조공정에 사용되는 복합 소재 및 그래핀을 포함한 탄소 기반 물질의 노출로 인해 발생하는 건강에 대한 직업적 위험의 이해도 높음
  - 미국(NIOSH)은 첨단소재를 포함한 첨단기술 공정이 근로자의 잠재적 위험에 노출되지 않도록 첨단기술 공정에 대한 연구개발 투자를 가속화. 특히 첨단 고성능 소재 개발 기술을 가속화
  - 독일 UBA는 첨단소재의 개요 등 기초적인 정보의 확립 단계이며 첨단소재의 클러스터링과 안전과의 관련성을 평가하기 위한 우선순위를 지정하는 등의 노력을 OECD WPMN과 협력하여 진행. 첨단소재의 유해성 및 노출평가를 포함하여 안전과 관련한 첨단소재의 문제점 등을 파악하는 등의 초기 개발 수준
- 다양한 나노물질이 시장에 유입되고 있지만, 적절한 안전성평가를 수행한 제품은 매우 낮은 수준이며(20% 이하 추정), 안전성평가에서 동물실험을 제한하는 규제도 점점 확대. 이러한 상황속에 최신 기술을 이용한 차세대 안전성평가기술 개발이 확대

## 나. 국내 기술 및 산업 동향

- (안전한 나노환경) 국내에서는 화학물질의 등록 및 평가 등에 관한 법률(화평법) 등의 화학물질 관리제도 시행을 위한 나노물질의 물리·화학적 특성 및 유해성 평가를 중심으로 기술이 개발되었으며, 등록된 나노물질의 평가를 위한 인체 및 환경 노출평가와 이를 기반으로 한 위해성 평가 기술로 방향을 전환
- 나노물질에 대한 전주기 평가 논문은 2편이 있으며, 대부분 나노물질에 관한 연구는 단편적인 노출평가와 유해성 확인에 관한 연구에 한정. 나노물질의 유해성 평가를 위한 표준기술 및 표준물질 개발 연구가 진행되고 있으며, 환경 매체 내 나노물질 모니터링 및 노출평가 연구 수행 중
  - 한국표준과학연구원에서는 나노물질의 특성 평가를 위한 표준기술 및 표준물질 개발 연구 수행
  - 환경부 국립환경연구원에서는 환경 매체 내 카본블랙 나노물질의 측정분석 기술 개발 및 모니터링 연구 수행
  - 광주과학기술원에서는 생활하수 내 나노물질 측정분석기술 개발 및 이를 활용한 발생 및 하수처리공정 제거 특성 평가 연구를 수행 중이며, 유입 하수 및 하수처리장 방류수 내 금속계 나노물질의 환경 노출농도 산정을 위한 연구 진행
  - 안전성평가연구소에서는 하수처리공정에서 나노물질의 변환특성 및 생태독성 변화에 관한 연구 수행

- 다양한 환경 매체에 대한 측정분석 기술 개발 및 환경노출평가 연구는 수행되지 않았으며, 특히 환경 매체내에서의 나노물질 변환 및 이에 따른 유해성 연구는 수행되지 않은 상황
- 환경부에서는 나노물질의 안전관리를 위해 나노물질 정의(화평법 시행령 제2조)에 근거하여 나노물질 중 제조수입량이 0.1톤 이상인 경우 입자크기 및 분포, 입자 모양, 종횡비(aspect ratio)에 대한 시험자료를 추가로 제출하는 항목을 2021년 10월 14일에 신설
- 국립환경과학원은 나노안전성 정보시스템을 운영하며, 국내외 연구사업 결과 등 최신 DB 업데이트와 나노물질의 유해성 정보 DB화를 통해 정보 제공

- **(안전한 나노사회)** 법령상 나노안전에 관한 사항은 명시적 규제가 없으나, 나노기술촉진법 제19조에 근거하여 나노기술의 부정적 영향과 잠재적 위험에 대해 예측. 이외에는 나노물질에 대해 구체적인 언급 없이 산업안전보건법을 통한 작업자의 안전에 대해 규정. 산업부는 ‘나노안전성 플랫폼 기술개발 과제(’09~’14)’를 통해 나노소재 및 제품 생산 작업장의 노출평가를 진행하고 작업장 리스크 관리 기술을 개발·보급을 추진
  - 나노제품 안전인증은 산업부에서 2009년부터 관련 사업을 통해 나노제품 안전인증 시스템의 개별 요소 기술을 축적해 왔으며, 2011년에 수립한 ‘나노융합산업 촉진을 위한 나노제품 안전성 종합계획’에서 안전한 나노제품 시장 활성화 정책 추진의 일환으로 민간 중심 나노제품 인증 마크 개발 및 인증 추진을 계획. 이후 범부처 ‘제2차 나노 안전관리 종합계획(’17~’21)’에서 ‘안전한 나노제품 제조를 위한 나노제품 안전성 판단기준 권고안 마련 및 안전성 인증 체계 구축’을 전략목표로 제시
- **(나노지배구조)** 나노물질의 잠재적 위해성으로부터 국민건강과 생태계를 우선 보호하고, 나노기술 강국으로서의 국제적 위상을 제고해야 하는 모순적인 이해관계를 해소하기 위해 선제적이고 적극적인 대응이 필요. 이를 위해 국내 나노기술 환경·보건·안전(EHS) 분야의 연구를 강화하고 국제표준시험법 개발 및 국제사업에 적극적인 참여 필요. 이에 따라 관련 국내 정부 부처(과학기술정보통신부, 교육부, 고용노동부, 산업통상자원부, 환경부, 식품의약품안전처 등)로 구성된 ‘나노물질 안전성 정책협의회’에서 ‘범부처 나노 안전관리 종합계획’을 수립하여 국외 규제 진행 방향과 함께 추진 중. 관련 정부사업을 통해 표준화 기술개발이 추진되고 있으나 국제표준 등재를 위한 지원은 지속해서 요구되며, 대국민 인식 제고를 위한 정보 구축 및 민·관 의사결정 체계는 미비
- **(나노제품의 안전한 설계)** 글로벌 화학시장의 안전한 제품 개발 수요가 지속적으로 증가함에도 불구하고, 국내 Safe-by-Design 플랫폼 기술 미흡(세계 최고 대비 10% 수준<sup>2)</sup>), 국내 기업의 대체

2) 유관 출판 논문 대비 국내 논문 비중 기준 (’11-’21년 기준)

물질 개발 비중도 낮은 수준(글로벌 시장 비중 0.7% 수준<sup>3)</sup>)이며, 소수 대기업 중심. 나노제품의 안전한 설계 관련한 EU Horizon 과제에는 대표적으로 SABYDOMA([www.sabydoma.eu/](http://www.sabydoma.eu/)) 및 SUNSHINE([www.h2020sunshine.eu/](http://www.h2020sunshine.eu/))이 있으며, 각 과제에 국내 연구기관(한국화학연구원, 한국표준과학연구원, 한양대학교 등)이 비EU권 국제 공동연구기관으로 참여 중

- EU를 중심으로 한 글로벌 화학규제 강화와 더불어 국내에도 유사 화학제품 규제가 도입되었으며, 제품 내 유해물질에 대한 함유를 금지하는 허가/금지/제한 물질목록이 지속적으로 확대. 화학 및 환경규제는 자국 산업계를 보호하는 간접적인 무역장벽으로도 작용할 수 있으므로 제품의 성능과 더불어 보다 안전한 화학제품 설계기술이 향후 제조기업의 시장 경쟁력의 주요 요소로 부상

- 환경부는 2020년부터 '생활화학제품 안전관리 기술개발사업(2020-2027)'을 기반으로 생활화학제품의 위해성 저감을 위해 생활화학제품 내 특정 금지물질에 대한 대체물질 개발과 노출저감기술 개발을 목표로 2022년부터 5년간 관련 13개 과제를 추진할 예정이지만, 나노물질에 대한 내용은 구체적으로 포함되지 않은 상황

- 국내에서는 *in silico* 기반의 나노제품의 안전성 예측기술은 주로 단일 나노물질에 초점을 두고 개발되고 있으며, 탄소나노튜브, 금속 및 산화금속 나노물질을 중심으로 한 세포 독성 및 생태독성에 대한 예측모델 개발 연구가 진행. 복합구성 나노제품에 대한 혼합독성 예측모델 개발 연구는 글로벌 수준에서도 시작 단계로 볼 수 있으나, 최근 국내 연구진(한국화학연구원 및 한양대학교)에서도 복합구성 나노제품에 대한 독성 데이터 수집 및 분석 연구결과(Nanomaterials, 2021) 및 TiO<sub>2</sub> 기반의 복합구성 나노제품의 수생태 혼합독성 예측모델(NanoImpact, 2022)을 개발하였으나, 추가적인 검증 연구와 예측 대상 확장을 위한 후속 연구 필요

- (첨단소재/제품 평가 및 차세대 안전성 평가기술) 첨단소재/제품 평가기술과 관련하여 국내에서는 2019년에 중소기업벤처부에서 발표한 '중소기업 전략기술 로드맵 2019-2021: 첨단소재'에서 기존 나노물질이 가지지 못했던 소재들을 첨단소재/제품으로 정의하고 6개로 첨단소재 분야를 분류하고 신규 제안되고 있는 주요기술을 세분화하여 개발 현황을 제시하고 있지만, 첨단고분자소재 등 일부 분야에 대해서만 기술이 존재하고 대부분은 연구가 미진
- 환경부를 중심으로 첨단소재 나노물질에 대한 국제동향을 정리하는 수준에 그치고 있으며, 첨단소재에 대한 환경 안전성 평가에 대한 기술적 접근은 국제동향 파악 후 필요시 개발하거나 도입하려는 수준

3) 스웨덴 NGO 기관인 ChemSec ([www.chemsec.org](http://www.chemsec.org))에서 구축한 상용 대체물질 DB에 등재된 제품 및 제조국가 기준



### 3. 기술발전 전망

중분류	현재 기술	미래 기술
안전한 나노환경	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 작업장에서 노출 평가에 관한 소수의 논문 보고가 있으며 양과 질이 매우 미흡하고, 전주기 노출 평가는 전무</li> <li>- 기존 독성시험법을 나노물질에 적용할 수 있도록 개정에 노력하고 있으나 진행이 매우 느림</li> <li>- 나노물질의 물리화학적 특성 분석과 흡입독성 시험법은 재개정 완료</li> <li>- 국내 나노물질 유통량 조사는 극히 일부 물질에 대하여 수행</li> <li>- 나노안전정보보시스템 운영</li> <li>- 나노소재 및 제품의 인벤토리 정보의 제한성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전주기 시나리오를 반영한 나노물질의 인체 노출 평가 기술</li> <li>- 제품 내 나노물질 이탈력 평가기술</li> <li>- 다양한 노출 매체에서 나노물질의 물리화학적 특성 변환 분석기술</li> <li>- 신규 나노물질 정성/정량 분석 기술</li> <li>- 나노물질의 분산, 발생 등 투여를 위한 준비 기술의 개발 및 고도화</li> <li>- 나노물질의 생체 정량 및 생체 변환 분석기술의 개발 및 고도화</li> <li>- 신규 독성시험법 및 독성 대체 시험법 개발 기술</li> <li>- 국내에서 나노물질 유통량 조사 범위 확대</li> <li>- 나노 위해정보 실시간 플랫폼 시스템 운영</li> <li>- 나노소재 및 제품의 전주기 인벤토리 정보 구축</li> </ul>
안전한 나노사회	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 특정 나노물질(은나노, 카본나노튜브 등) 및 작업장에 대한 노출평가 시행</li> <li>- 다양한 나노물질 작업장에서 노출에 대한 정량적 분석기술 개발 중</li> <li>- 나노물질 작업환경에서 작업자 건강 모니터링 방법 모색</li> <li>- 나노작업장에 사용 가능한 보호구 개발 중</li> <li>- 물질안전자료 작성을 위한 부분적 자료 생산 가능</li> <li>- 물질안전보건자료 작성 제한적</li> <li>- 일부 나노제품의 안전성 판단기준 권고안 마련</li> <li>- 개별 나노물질의 안전성 자료를 바탕으로 하는 신고·등록 및 인허가 제도 운영</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다양한 나노제품 제조 및 생산 과정에서 나노물질 노출 저감 및 작업자 보호 대책 마련의 기준자료 확보</li> <li>- 다양한 나노물질 작업자의 건강모니터링 및 적합한 보호구 개발을 통한 작업자의 안전 확보</li> <li>- 물질안전보건자료 작성 시 요구되는 16개 항목을 충족할 수 있는 신뢰성 있는 기초자료 완비 및 물질안전보건자료 확보</li> <li>- 나노물질 안전성 평가 결과, 나노제품 내 나노물질 노출평가 결과 등을 기반으로 나노제품 안전성 인증을 위한 판단기준 정립</li> <li>- 제품 내 나노물질의 유해성 및 노출량을 고려하여 생산과 유통이 이루어질 수 있도록 안전성 인증 체계 구축, 제도 시행</li> </ul>
나노지배구조	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노제품 사회적 수용 제고 위한 거버넌스 부재</li> <li>- EU 비회원국으로 국내 연구기관의 유럽과제 참여 한계</li> <li>- 한국 실정에 맞는 국제표준 가이드라인 개발 요구</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노제품 안전성에 대한 대중적 차원의 소통 및 사회적인 관리·통제를 통한 안전망 구축</li> <li>- EU 준회원국 가입을 통한 국내 연구기관의 유럽 과제 참여 및 국제표준화 지원</li> <li>- OECD와 ISO 국제표준시험법에 신규 아이тем 제안</li> </ul>
나노제품의 안전한 설계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 단일 나노물질 중심의 안전성 예측기술</li> <li>- 기존 상가독성(농도 및 반응상가) 모델을 활용한 복합구성 나노제품의 혼합독성 예측기술</li> <li>- DFT 기반의 1,000 atom 이하 나노입자 중심의 특징인자 계산기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 데이터 기반의 복합구성 나노제품의 혼합독성(상가 및 상승작용) 효과를 고려한 인체 및 환경 안전성 예측 기술</li> <li>- 다양한 크기 및 형태의 나노입자 특징인자 신속 계산기술</li> </ul>
첨단소재/제품 평가 및 차세대 안전성 평가기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 단일성분 나노물질 크기, 표면, 반응성 등의 물리적/화학적 특성 측정 기술</li> <li>- 첨단소재의 정의, 분류, 범위, 기존 나노물질의 안전성과의 관련성 등 기초적인 정보에 대한 국제적인 합의를 도출하는 수준</li> <li>- 나노물질 특성이 반영되지 않은 동물대체평가 기술</li> <li>- 의약품/화학물질용 독성 바이오 마커 활용</li> <li>- 세분화 되지 않은 일반적인 안전성평가 기준 활용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 복합성분의 첨단소재/제품의 물리/화학적 특성 평가를 위한 측정기술</li> <li>- 첨단소재 나노물질의 환경노출 및 유해성 평가기술 확보</li> <li>- 나노물질의 특성을 반영하고 인체반응을 모사하는 동물대체평가 기술</li> <li>- 나노물질 특이적 바이오마커의 개발을 통해 안전성을 신속하고 정확하게 스크리닝 하는 기술</li> <li>- 개인차(특정유전자 결핍, 질병유무, 연령대, 비만 등)를 반영하는 나노물질 안전성평가 기술</li> </ul>

## 4. 나노기술지도 전개

### 4-1. 안전한 나노환경

#### 가. 나노제품 전주기 위해성 평가

##### 1) 개요

- (정의) 나노물질의 전주기 과정에서 환경과 인체에 대한 노출량을 평가하고 대상 생물종에 대한 위해성을 확인하는 과정을 통해 환경 및 인체 유해 영향을 평가하는 기술을 의미(위해성=노출량×위험성)
- (필요성) 나노물질에 대한 화학물질 관리제도(대한민국 화평법, EU REACH 등)의 시행으로 생산부터 폐기까지의 전주기 위해성 평가기술 개발 및 적용 요구. 또한, 기술의 발달과 소비자 만족에 따른 다양한 나노소재 및 나노제품 개발 요구와 동시에 합의된 안전성 확보를 통해 나노산업의 지속적인 발전 필요성 제기
- (발전 전망) 제 1~3기 국가나노기술지도를 통해 개발된 나노안전성 평가기술을 활용하여 나노물질 및 나노제품 모든 과정의 세부 단계별 인체 및 환경 노출 모니터링 및 위해성 자료 산출 등을 수행하는 전주기 평가기술 개발 및 적용 예상. 또한, 나노물질의 변환 및 거동이 반영되는 등 실제 환경조건을 고려할 수 있도록 기존 평가기술의 기술적 업데이트와 신기술 개발 전망

##### 2) 미래핵심기술이슈 : 인체 노출 및 전주기 위해성 평가 기술

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
나노물질의 인체 노출에 대한 정성 및 정량 평가 기술의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다양한 노출 매체(의도적 및 비의도적 노출 환경에 해당하는 노출 매체)에서 나노물질의 인체 노출량을 평가하는 기술 필요</li> <li>- 나노물질의 물리화학적 특성(조성, 모양, 크기 등)에 적합한 정량 분석기술의 개발 및 환경에서 변환된 나노물질을 노출 매체별로 측정할 수 있는 기술 필요</li> </ul>
나노물질의 인체 위해성 평가기술에 대한 개선 및 고도화 필요	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노물질의 안전성 평가는 규제기관에서 반드시 요구하고 있는 항목이지만 실험과정에 필요한 기술의 개선 또는 고도화가 필요</li> <li>- 다양한 노출경로에 적합한 나노물질의 준비(특성 분석) 기술과 최적의 노출 기술(흡입: 입자 발생 기술, 기타 경로: 분산 기술)의 개선 및 고도화가 필요</li> </ul>
독성시험에서 나노물질의 생체 내 거동 및 변환을 평가하는 기술 개발 및 고도화 필요	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노물질의 안전성 평가에서 노출 경로에 대한 흡수, 분포, 배설의 특성을 확인하는 독성동태시험은 반드시 요구되지만, 관련 실험법이 아직 정립되지 않은 상황</li> <li>- 생체에 노출된 나노물질 중 일부는 생체 내에서 변환(다른 모양이나 조성의 나노물질로 변환)될 수 있기 때문에, 이에 대한 분석기술 개발이 요구</li> <li>- 따라서, 생체에 노출된 나노물질을 회수하는 기술, 회수된 물질의 물리화학적 특성 분석 기술, 정량 기술의 개발 및 고도화가 필요</li> </ul>

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
인체에 대한 나노물질 전주기 노출 평가 기술	정의	○ 나노물질의 전주기 과정에서 인체 노출을 평가하는 기술을 의미하며, 기기 분석을 통한 물질의 물리화학적 특성을 분석하고 정량하는 기술
	요소 기술	- 제품 내 나노물질의 이탈락 평가 기술 - 인체 노출 매체에서 나노물질의 특성 분석 기술 - 나노물질 인체 노출 평가 자료 구축 및 활용 기술
인체에 대한 나노물질 안전성 평가 기술	정의	○ 실험 동물을 이용한 나노물질 안전성 평가 기술
	요소 기술	- 나노물질 투여를 위한 준비 기술(분산, 발생 등) - 생체 시료 내 나노물질의 정량 및 물리화학적 특성 분석 기술 - 나노물질에 적합한 독성시험법 개발 기술

### 3) 미래핵심기술이슈 : 환경 노출 및 유해성 전주기 평가기술

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
환경에 유출된 후 물리화학적 변환으로 본래와 다른 특성을 갖게 되는 제조 나노물질의 노출 및 유해성 평가의 한계	- 환경 매체에서 발생하는 물리·화학적 변환에 의해 나노물질은 환경에서 용해·응집·흡착·산화·환원 등 다양한 반응을 거치게 되어, 본래와는 다른 거동 및 유해성 표현이 가능 - 특성이 변환된 나노물질 및 나노+유해(오염)물질의 복합 형태에 대한 기존 시험법의 적용을 위해 극복해야 할 기술적 한계 존재
환경 내 동일(또는 유사) 자연발생 나노물질과의 혼재로 인한 환경 노출 평가의 한계	- 나노제품 유래 나노물질과 자연발생 나노물질의 판별 기술 부재로 나노제품에 대한 환경 노출 평가의 한계
환경 매체별 위해성 평가 및 관리 방안의 부재	- 환경 매체에서 나노물질의 관리 대상 유해물질 여부를 판단할 수 있는 위해성 평가의 부재

## 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
나노물질의 환경 변환 거동 평가 및 이를 반영한 유해성 평가 기술	정의	○ 나노물질 전주기 과정에서 환경에 유출된 나노물질의 변환거동이 반영된 노출 및 유해성 평가 기술
	요소 기술	- 환경 매체 내 나노물질 변환 거동 평가 및 존재상 예측 기술 - 나노물질의 변환 거동이 연계된 유해성 평가 기술 - 나노물질의 거동 특성이 반영된 유해성 자료 생산
환경 내 나노물질 발생원 판별 및 노출 평가 기술	정의	○ 환경 매체별 나노물질 모니터링 및 환경 노출 농도 산정 기술
	요소 기술	- 환경 매체별 나노물질 탐색 및 정량화 기술 - 환경 매체 내 자연상 나노물질과의 판별 기술 - 모니터링 기술을 활용한 매체별 환경 노출 농도 산정 기술

## 나. 나노제품 전주기 인벤토리 구축

### 1) 개요

- (정의) 개발, 제조, 유통, 사용, 보관, 폐기 및 재활용에 이르는 전주기(Life Cycle)에 대한 나노제품의 인벤토리 구축
- (필요성) 나노제품의 전주기(Life Cycle)는 나노물질을 포함한 제품의 개발, 제조, 유통, 사용, 보관, 폐기, 재활용에 이르는 전 단계를 의미. 나노소재의 유통량, 배출량과 같은 기본적인 인벤토리와 전주기 단계별로 나노물질을 어떻게 관리하고 취급하는지에 대한 정보를 수집하고 데이터베이스화하는 것은 안전한 나노기술의 발전과 나노제품의 안전성 측면에서 매우 중요하며 우선하여 수행 필요
- (발전 전망) 오늘날 ESG는 지속가능경영과 사회적책임(CSR)이 진화하고 규범화 및 제도화된 것. 지속가능성이라는 용어는 1713년 처음으로 사용되었으며, 현재 가장 널리 통용되고 있는 지속가능성 개념은 1987년 우리 공동의 미래라는 보고서를 근간으로 수립. 이후 기업의 사회적책임(CSR)과 공유가치창출(CSV)라는 개념이 제시되며, ESG 용어가 새로운 패러다임으로 자리. ESG 용어는 2004년 UN 글로벌 콤팩트(UNGC)가 발표한 'Who Cares Win'이라는 보고서에서 공식적으로 처음 사용. 이후, 2006년 국제 투자기관 연합인 UN PRI가 금융 투자 원칙으로 ESG를 강조하면서 오늘날 기업 경영에서 강조되는 ESG 프레임워크의 초석을 제시. 이에 더하여 자본주의 4.0 및 이해관계인 자본주의 담론이 등장하였으며, 코로나19 사태를 겪으면서 기후변화, 공중보건, 환경보호 등 ESG 이슈에 대한 관심이 증가
  - 나노산업에서 제품 안전 및 책임주의는 중요한 문제. 나노소재 및 제품이 사용단계를 포함한 전주기 단계에서 사람들의 건강이나 환경에 미치는 영향은 제품 수요 및 규제 위협에 영향을 줄 수 있고 결과적으로 수익 감소나 높은 운영 비용, 규제 준수 비용 및 완화 비용의 증가를 초래. 나노제품 전주기 인벤토리에는 제품 조성 및 설계, 제품 안전 테스트, 위해성 판정, 제품 위해성 우선순위 선정, 제품 라벨링, 제품 신고(예: 물질안전보건자료), 기업 조직 내 화학물질 관리에 대한 책임, 기업 공급망 내 제품 정보를 공유하기 위한 의사소통 과정, 제품 위해성에 대한 새로운 정보 관리 등이 포함. 나노제품 안전 및 책임주의에 대한 지속적인 노력이 필요
  - 나노제품 전주기 인벤토리 구축을 위해서는 단계별 정보를 데이터베이스화하는 것이 필요하며, 단계별로 필요한 활동은 '국내외 나노제품 DB 구축, 나노물질 특성 DB 구축, 나노물질 독성 평가 DB 구축과 업데이트, 나노제품 독성 평가 DB 구축과 업데이트, 나노제품 노출평가 DB 구축, 나노제품 폐기 시스템 DB 구축, 나노제품 생산 폐기 현황 DB 구축, 나노제품 재활용 DB 구축' 등을 통해 발전해나갈 전망

## 2) 미래핵심기술이슈 : 나노제품 전주기 위해 정보 실시간 제공 플랫폼 기술

### ○ 기술난제

기술난제	개요
나노제품(소재) 유통량 및 배출량 인벤토리 구축의 한계	- 산업계의 자발적 참여가 없으면 나노제품 인벤토리(유통량, 배출량 등)를 데이터 베이스화하기 어려우며, 현시점에서는 법적으로 강제하는 것이 불가능
나노제품의 안전한 사용에 관한 DB의 미구축 상태	- 나노소재 특성 자료에 관한 측정 방법, 특성값에 대한 정보 플랫폼 미구축 상태 - 나노소재, 제품의 독성 평가 방법, 독성값에 대한 정보 플랫폼 미구축 상태 - 소비자 노출, 환경 노출, 작업자 노출에 대한 구체적인 노출 변수의 미확립 및 정보 플랫폼 미구축 상태
나노제품의 안전한 폐기 및 재활용에 관한 DB의 미구축 상태	- 나노제품의 적정 폐기 방법과 나노폐기물 공정에 관한 가이드라인 부재 및 정보 플랫폼 미구축 상태

### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
나노제품 전주기 DB 구축 기술	정의	○ 나노소재 및 제품의 사용량, 배출량 등의 인벤토리 정보, 안전한 사용, 안전한 폐기 및 재활용 등 전주기 과정에서의 DB 구축 기술
	요소 기술	- 나노제품 인벤토리 정보 구축 기술 - 나노제품 안전한 사용/폐기 DB 구축 기술 - 나노제품 재활용 DB 구축 기술

### 〈안전한 나노환경 로드맵〉

중분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술								
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
안전한 나노환경	나노제품 전주기 위해성 평가	인체 노출 및 전주기 위해성 평가 기술	인체에 대한 나노물질 전주기 노출 평가 기술	체중 내 이물질 평가기술	인체 노출 체계에서 독성분석 기술	나노물질 인체 노출 평가 자료 구축 및 활용 기술						
			인체에 대한 나노물질 안전성 평가기술	나노물질 분산 및 발생 기술	생체내 나노물질 정량분석 기술	나노물질에 적합한 독성시험법 개발 기술						
		환경 노출 및 전주기 위해성 평가 기술	나노물질의 환경 변화 기술 평가 및 이를 반영한 위해성 평가기술	환경 해체 내 나노물질 변환 기술 평가 및 존재상 예측 기술	나노물질의 환경변동이 연계된 위해성 평가 기술	나노물질의 거동특성이 반영된 위해성 자료 생산						
			환경 내 나노물질 발생원 분석 및 노출 평가기술	환경 해체용 나노물질 탐색 및 정량화 기술	환경 해체 내 자연성 나노물질과의 차별 기술	모니터링 기술을 활용한 해체용 환경노출농도 산정 기술						
	나노제품 전주기 인벤토리 구축	나노제품 전주기 위해 전대 실시간 측정 분석용 기술	나노제품 전주기 DB 구축 기술	나노제품 인벤토리 정보구축 기술	나노제품 안전한 사용/폐기에 관한 DB구축 기술	나노제품 안전한 사용/폐기에 관한 DB구축 기술						
				나노제품 안전한 사용/폐기에 관한 DB구축 기술	나노제품 안전한 사용/폐기에 관한 DB구축 기술	나노제품 안전한 사용/폐기에 관한 DB구축 기술						

## 4-2. 안전한 나노사회

### 가. 작업자 안전보건

#### 1) 개요

- (정의) 나노제품 및 생산과정에서 나노물질 노출로부터 작업자를 보호하는 기술
- (필요성) 나노물질의 물리화학적 특성에 따른 잠재적 건강 유해성이 완전히 규명되지 않은 상황에서 작업자의 보호 대책이 규제로 작용함에 따라 필요
- (발전 전망) 다양한 나노물질 작업장 노출평가, 작업자 보호대책, 물질안전보건자료 작성과 같은 작업자 건강보호 기술 개발을 통한 규제 대응 등이 지속적으로 발전될 전망

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 나노물질 노출 평가 및 작업자 보호 기술

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
나노물질 작업장 노출 평가 기술 확보의 한계	- 물리화학적 특성이 다른 다양한 나노물질 작업 환경에서 노출 평가 기술 필요
나노작업 환경에서 작업자 보호 기술 개발의 한계	- 다양한 나노물질 특성에 따른 노출 저감 기술 개발 필요
나노물질 특성이 반영된 물질안전보건자료 확보의 한계	- 물질안전보건자료에 반영할 필수 자료확보가 제한적

#### 2-2) 나노기술(주제)

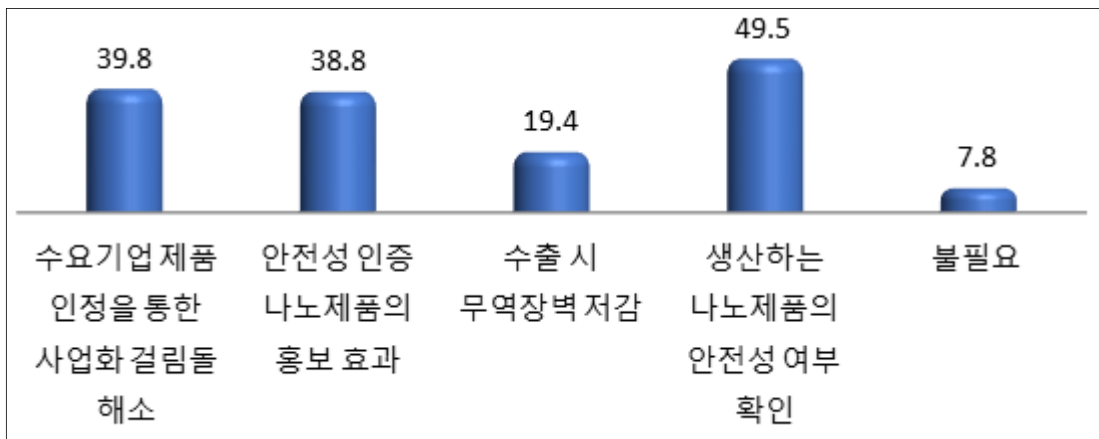
나노기술명	개요	
나노물질 작업장 노출 평가 기술	정의	○ 다양한 나노물질 사업장 및 연구실에서 작업자 및 연구자의 안전보건 확보를 위한 노출 평가기술
	요소 기술	- 나노물질 작업장 특성 평가 기술 - 나노물질 포집 및 측정 기술 - 나노물질 작업장 노출 평가 기술
나노물질 작업자 보호 기술	정의	○ 나노물질 취급, 제조 작업자 및 연구자의 건강 보호를 위한 건강모니터링 및 보호구 사용의 적정성, 노출 저감 기술
	요소 기술	- 작업장 나노물질 발생 환경 제어 기술 - 보호구 제작 및 성능 평가 기술 - 나노물질 작업자 건강모니터링 기술
나노물질 안전보건자료 작성 기술	정의	○ 나노물질 사용 작업자의 안전을 위한 물질안전보건자료 기초자료 확보 및 작성을 위한 기술
	요소 기술	- 물질 안전보건 기초자료 확보 및 생산 기술 - 나노물질별 안전보건자료 작성 기술

## 나. 나노제품 안전인증

### 1) 개요

- (정의) 나노제품의 안전한 사용 및 나노제품의 상용화 촉진을 위해 제품에 함유된 나노물질의 독성 평가 및 노출 평가 데이터를 기반으로 나노제품의 안전성 인증시스템을 구축·운영
- (필요성) 소비자 입장에서 나노제품의 안전한 사용, 그리고 기업 입장에서 나노융합 제품화 확산 및 나노제품 상용화 촉진을 위해서는 나노제품의 안전성을 인증해 줄 수 있는 기반 마련 및 시스템 구축, 운영이 필요
- (발전 전망) 나노제품의 안전성 인증 시스템 운영을 위해서는 아래와 같이 인증 분류체계 및 절차, 추진방안 확립 등 인증 시스템 마련이 필요하며, 이를 통해 나노제품의 안전성 인증 추진 시 소비자의 안전한 나노제품 사용과 함께 국내 나노제품의 사업화를 촉진하고 대국민 인식 제고에 기여할 것으로 기대
  - ① 나노제품 인증을 위한 제품 분류체계 마련
  - ② 나노제품 정보 및 나노물질 안전성 평가 결과, 나노제품 내 나노물질 노출 평가 결과 등 나노제품 안전성 인증을 위한 DB 구축 및 나노제품별 안전성 판단기준 정립
  - ③ 인증 절차 확립 및 제도 운영 방안 마련

〈 나노제품 인증시스템 운영 시 장점(복수응답) 〉



\* 나노제품 안전성 기술수요조사, 나노융합산업연구조합('17)

### 2) 미래핵심기술이슈 : 나노제품 안전성 판단기준 정립 및 인증 시스템 구축

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
나노제품별 안전성을 인증하기 위한 구체적 판단 기준 및 방법의 부재	- 나노제품의 안전성 인증을 위해서는 나노물질의 안전성 평가 데이터 및 관련 표준시험법(독성 평가, 노출 평가 등)의 확보를 기반으로, 나노제품별 안전성 판단기준 마련이 필요



기술난제	개요
나노제품의 안전성 인증 추진을 위한 세부 절차 및 제도 운영 방안의 부재	- 나노제품 분류체계 및 안전성 판단 기준에 따른 나노제품 안전성 인증 절차 및 제도 운영 방안 마련이 필요

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
나노제품 안전성 판단기준 정립 및 인증 시스템 구축 기술	정의	○ 나노제품 내 사용된 나노물질의 유해성 평가 결과 및 노출 평가 결과를 기반으로 나노제품별 안전성 판단기준을 정립하고, 이에 따른 나노제품 안전성 인증 절차 확립 및 제도 운영 방안 마련
	요소 기술	- 나노제품 안전성 인증을 위한 제품 분류체계 기술 - 나노제품별 안전성 판단 기준 정립 - 나노제품별 안전성 인증 알고리즘 및 절차 - 나노제품 안전성 인증 제도 운영 방안 (시행 주체, 지원 범위 등)

### 〈안전한 나노사회 로드맵〉

중분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술										
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	
안전한 나노사회	직업자 안전보건	나노물질 노출평가 및 직업자 보호기술	나노물질 직업성 노출평가 기술	나노물질 직업성 특성 평가기술		직업성 나노물질 포집 및 측정기술		나노물질 직업성 노출 평가기술						
			나노물질 직업자 보호 기술	직업성 나노물질 발생 환경 제어기술		보호구 제작 및 성능 평가기술		나노물질 직업자 건강위해평가 기술						
			나노물질 안전보건자료 작성 기술	물질안전보건 기초자료 확보 및 생산 기술		나노물질 안전보건자료 작성 기술								
	나노제품 안전인증	나노제품 안전성 판단기준 정립 및 인증 시스템 구축	나노제품 안전성 판단기준 정립 및 인증시스템 구축 기술	나노제품 분류체계 확립		안전성 판단기준 및 인증 절차 수립		나노제품 안전성 인증제도 운영						

### 4-3. 나노지배구조

#### 가. 나노기술의 윤리와 경영

##### 1) 개요

- (정의) 나노제품 안전성 관련 이해 당사자(정부, 기업, 연구자, 대중) 간 소통과 의사결정 참여, 정보 공개 등을 통해 나노제품 안전성에 대한 합리적인 인식 제고 및 신뢰도 고취
- (필요성) 전 세계적으로 인체 및 환경에 대한 나노제품의 안전성이 대두되면서, 안전 거버넌스\*가 중요한 문제로 부각. 나노제품의 지속적인 상용화 및 시장 확산을 위해서는 표준화, 규제 조치 외에도 부정적 인식을 해소하고 사회적 수용을 제고하기 위한 활동이 필요

\* 거버넌스 : 정부와 민간이 함께하는 행위자 간 상호작용 네트워크를 통해 공동으로 대처하는 방식

- 유럽 주요 국가, 미국 등에서는 나노제품 안전성에 대한 대중 참여 프로그램 및 교육 프로그램 등 운영

구분	프로그램	주체	주요 활동
유럽 (EU)	Impart-Nanotox (안전 관련 DB구축 프로그램)	유럽 연구 기관, 대학, 독성학자, 환경 전문가, 제조자와 윤리학자 등	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 나노안전 프로젝트 결과 및 관련 정보 보급을 위한 웹 사이트 운영, 지식공유 워크숍 개최</li> <li>○ 나노입자 부정적 영향 감소 위한 지침안내 책자 발간</li> </ul>
	NANOTOTOUCH	독일, 이탈리아, 스웨덴 등 주요 국가 과학센터	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 대중에게 연구 활동 직접 체험 기회 제공(열린 나노실험실) 및 대중-연구자 간 의사소통을 위한 기술훈련 프로그램 제공</li> </ul>
	NanoTV	Institute of Nanotechnology (IoN)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ EU가 투자하는 나노기술 응용들에 대한 정보를 대중에게 전달</li> </ul>
	Time for Nano	이탈리아 IDIS 재단 과학센터 외 13개 단체	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 청소년 교육 프로그램 운영 (웹사이트를 통한 나노기술 관련 이익·위험 교육, 나노기술 교육 등)</li> </ul>
영국	Nanojury	영국 뉴캐슬대 정책·윤리·생명과학 연구센터	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 나노기술 전문가 자문, 거버넌스 의견 제안</li> </ul>
프랑스	Nanosmile의 Nano Training	프랑스 원자력청	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 나노물질의 건강/환경/안전에 대한 잠재적 영향에 대한 이해 증진 및 대중과 의사소통</li> </ul>
미국	NIOSH 나노기술 정보 도서관	미국 국립산업안전보건연구원	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 나노물질 기술정보, 출판물 등 제공</li> </ul>
	Madison지역 합의 회의	미국 위스콘신 주립대 나노과학 및 공학센터 지원	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 나노기술 정보 전달 및 나노기술 정책에 대한 대중 의견 청취</li> </ul>

##### ○ (발전 전망)

- ① (사회적 인식 제고) 나노제품에 대한 대중의 이해도를 높이고, 나노제품 안전성에 대한 신뢰도 제고
  - 대중과의 의사소통을 통한 나노제품에 대한 인식 제고와 안전에 대한 불확실성 제거를

위한 대중 참여 프로그램 운영

ex) 식품의약품안전처에서는 현장 실무자들이 참여하는 ‘소비자 식품안전 인식제고 방안 회의’를 개최하여 식품안전 홍보 방안 등 논의

- 홈페이지, 방송 미디어 등 매체를 통해 나노기술에 대한 이해 증진 및 나노 제품의 안전성에 대한 인식 제고

- 일반 시민 및 연구자 대상 안전에 대한 교육 프로그램 마련

② (민·관 의사결정 체계 구축)

- 사회적 수용성 제고 및 정책 참여를 위해 대중들과의 지속적인 의사소통 및 대중들이 직접 참여할 수 있는 민·관 의사결정 체계 구축

ex) 식품의약품안전처에서는 민관(산업체, 학계, 소비자, 시민단체 등)으로 구성된 ‘식품안전관리 협의회’ 구성·운영 중

- 나노제품을 생산하는 기업의 사회적 책임 측면에서 자발적으로 나노제품의 생산과 유통에서의 안전관리 과정에서 시민 또는 이해당사자들을 참여시키고 그들의 의견을 반영하거나 투명성을 유지

③ (정보 제공)

- 나노제품 안전성 관련 구축된 데이터베이스를 활용하여, 나노제품의 수용 주체인 대중에게 안전성에 대해 신뢰할 만한 정보를 제공

ex) 나노물질/제품에 대한 기술정보, 안전성 확보를 위한 각종 규제 장치, 안전성 홍보 동영상 및 출판물 등

2) 미래핵심기술이슈 : 나노제품 안전성에 대한 사회적 수용 제고

○ 기술난제

기술난제	개요
나노제품 안전성에 대한 불확실성으로 인한 시장 확산에의 한계	- 나노제품의 증가와 함께 전 세계적으로 인체 및 환경에 미치는 영향에 대한 나노제품 안전성 대두 - 나노안전성에 대한 우려들은 최근 대두되고 있는 나노제품의 무역장벽 문제와 연계

2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요
나노제품 사회적 수용 제고를 위한 나노안전 거버넌스 구축 기술	정의 ○ 나노제품에 대한 사회적 수용 제고와 안전에 대한 불확실성 제거를 위해 다양한 대중적 소통과 나노안전성에 대한 사회적인 관리·통제가 잘 이루어 지도록 함으로써, 대중의 신뢰도 제고 및 시장 확산을 위한 환경 조성
	요소 기술 - 대중들과의 지속적인 의사소통 및 민·관 의사결정 체계 구축 - 나노안전성 DB를 활용한 대중을 위한 나노제품 신뢰성 제공 가이드 구축

## 나. 국제협력 및 표준화

### 1) 개요

- (정의) 해외 국책연구기관과의 협력연구를 통해 신뢰성 있는 나노물질 안전성 평가 방법을 개발하고, 이를 활용하여 국제적으로 공인된 국제표준 측정체계를 확립
- (필요성) 해외 주요국의 나노기술 정책 패러다임은 나노기술의 발전을 통한 삶의 질 향상과 국민의 건강을 위한 안전한 사용이 목표. 이와 관련하여 나노제품에 함유된 나노물질의 특성과 함량을 표시하는 나노제품 표시제가 시행 중이며, 이처럼 국제표준규격은 국제무역과 직결되는 규제 및 수출입 장벽으로 작용될 수 있으므로 우리나라의 대외무역이 국제무대에서 불이익을 받지 않기 위해 국제 협력을 통한 국제표준 제정과정에서의 적극적인 대응이 반드시 필요
- (발전 전망) 국제경제협력개발기구(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)에서는 나노안전성 연구 방법의 표준화 필요성을 인식하여 국가 간의 교류활동을 통해 나노기술의 환경·보건·안전성 영향에 관한 이슈를 해결하고자 WPMN(Working Party on Manufactured Nanomaterials)를 구성하여 운영하고 있고, 국제표준기구(International Organization for Standardization, ISO)에서는 기존의 OECD TG(Test Guideline)만으로는 시험분석에 한계가 있음을 인식하고 나노기술분과(TC 229)를 설립하여 운영. 현재 국내 다양한 관련 분야 전문가들이 OECD WPMN 및 ISO/TC 229에서 진행되고 있는 나노물질 특성측정/독성평가 표준화를 위한 국제 비교 프로그램에 적극적으로 참여하여 다양한 국제 공인 나노특성/독성 평가 방법을 확보하고 개발 단계에서 한국의 실정에 맞는 측정 방법을 국제표준에 반영하는 추세

### 2) 미래핵심기술이슈 : 국제 협력 거버넌스 구축 및 공인된 국제표준 측정체계 확립

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
유럽과제 참여의 진입장벽으로 인한 협력 연구의 한계	- EU 비회원국으로 인한 프로젝트 접근과 연구비 예산 확보의 한계
나노안전성 분야 국제표준 개발의 한계	- OECD와 ISO 국제표준 개발 단계에서의 능동적인 참여와 프로젝트 제안 필요

### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
국외(유럽) 프로젝트 참여 및 기술 표준화	정의	○ 해외 국책연구기관들과의 협력 연구를 통한 국제표준 측정체계 확립
	요소	- Horizon Europe 참여 기반 마련
	기술	- OECD, ISO & IEC 국제표준시험법 개발

### 〈나노지배구조 로드맵〉

중분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술																
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032							
나노 지배구조	나노기술의 윤리와 경영	나노제품 안전성에 대한 사회적 수용 제고	나노제품 사회적 수용 제고를 위한 나노안전 거버넌스 구축 기술																	
	국제협력 및 표준화	국제 산업 거버넌스 구축 및 공인된 국제표준 확립을 위한	국제산업 프로그램 참여 및 기술 표준화																	

## 4-4. 나노제품의 안전한 설계

### 가. 안전성 기반 나노제품 설계 기술

#### 1) 개요

- (정의) ‘안전성 기반 나노제품 설계 기술’은 나노제품 개발의 각 세부 단계에서 잠재적인 건강 및 안전 위험을 해결하는데 기여하고자 하며, 이러한 세부 단계에는 나노소재의 합성 및 가공, 제품으로의 생산, 그리고 안전한 사용 및 폐기 단계가 포함되고 이러한 각 세부단계에 대한 포괄적인 접근을 권장
- (필요성) 최근 나노기술 분야에서 주요한 이슈 중의 하나는, 탁월한 성능을 가지면서도 안전한 나노소재 및 나노제품의 개발. 나노제품을 생산하는 공정에서부터 인간 및 환경에 대한 나노제품의 잠재적인 위험을 최소화하기 위해 안전성을 고려한 성능 테스트 및 구현을 위한 새로운 e-플랫폼을 구축하는 것이 필요
- (발전 전망) ‘안전성 기반 설계 기술 (Safety by Design, SbD)’은 전체 제품 개발 프로세스에서 안전 문제를 조기에 고려하는 것을 목표로 하며, 나노물질과 관련된 ‘안전성 기반 나노제품 설계 기술’의 개념은 새로운 나노물질 및 제품의 개발 초기 단계에서 잠재적인 위해성에 대해 다양한 불확실성을 고려. ‘안전성 기반 설계’ 개념의 기본적인 가정은 재료, 제품, 도구 및 기술의 선택을 통해 위해성을 줄일 수 있으며, 가능한 한 안전하게 만들 수 있다는 것으로, 나노제품 설계단계 과정에서의 안전성 조기 통합은 바람직한 것으로 판단되며, 최근 유럽에서는 많은 프로젝트들이 SbD 개념과 산업계에서의 실질적인 적용에 관련된 연구를 수행
  - 안전 문제에 대한 조기 고려를 위한 ‘안전성 기반 나노제품 설계기술’의 개념은 분명한 필요성이 있지만, 생산 현장에서는 실질적인 적용을 위해 해결되어야 할 여러 가지 기술적인 문제점이 존재. 특히 생산 현장에서의 자발적인 ‘안전성 기반 나노제품 설계 기술’의 적용은 눈에 보이는 추가적 이득 없이 사용자의 돈과 시간적 지출을 증가시켜, 이를 위한 각 요소기술 및 통합 플랫폼이 존재하지 않거나, 있더라도 그 기술적인 완성도가 미흡. 현재 이러한 SbD의 나노산업에의 적용 노력은 일반적으로 매우 긍정적으로 받아들여지지만, 당장 현장에 적용하여 실행하기에는 많은 어려움이 있을 것으로 판단

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 안전성 기반 나노제품 설계 e-플랫폼 개발

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
기존 나노제품 생산 공정에 안전성에 대한 고려가 반영되지 않은 문제	- 기존 나노제품 생산 공정들은 제품성능을 최적화하기 위해 설계되어 있으나, 이러한 설계 단계에서 안전성에 대한 고려가 아직 반영되어 있지 않은 상태

기술난제	개요
신규 개발된 유해성 및 노출 예측 기술들의 실제 현장 적용이나 검증의 미흡	- 문헌상으로는 이미 개발된 나노소재의 유해성 및 노출에 대한 예측 기술들이 다수 존재하나, 실제 생산 제품에 대한 적용을 통한 검증사례는 부족한 상태
신규 개발된 나노소재 유해성 평가 기술 및 데이터의 현장 적용이나 검증의 미흡	- 나노소재 및 제품들에 대한 새로운 유해성 평가기술들이 개발되고 있으나 실제 생산 제품에 대한 적용이나 검증은 미흡한 상태
제품의 성능뿐만 아니라 안전성도 고려한 나노제품 설계 통합 e-플랫폼의 부재	- 나노제품을 생산하는 공정에서부터 인간 및 환경에 대한 나노제품의 잠재적인 위험을 최소화하기 위해 제품의 성능뿐만 아니라 안전성을 고려한 새로운 통합 e-플랫폼을 구축하는 것이 필요

## 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
안전성 기반 나노제품 설계를 위한 e-플랫폼 구축 기술	정의	○ 우수한 성능을 가지면서도 안전한 나노소재 및 나노제품의 개발을 위해, 나노제품을 생산하는 공정에서부터 제품의 성능뿐만 아니라 안전성도 함께 고려한 제품설계 및 개발 지원 e-플랫폼의 구축 기술
	요소 기술	- 나노소재의 유해성 및 노출에 대한 기존 실험 데이터 및 연구 결과들의 실제 나노제품 설계 및 개발에 대한 적용 및 검증 사례 축적 - 새로운 나노소재 유해성 평가기술, 측정 데이터 그리고 예측 모델들의 개발 및 이러한 기술들의 실제 나노제품 설계 및 개발에 대한 적용 및 검증사례 축적 - 기업체에서 나노제품 설계 단계에서부터 안전성에 대한 고려를 할 수 있도록 지원해주는 안전성 데이터베이스, 예측모델, 의사결정지원 시스템 등을 통합한 e-플랫폼 구축



## 나. 나노제품 안전성 예측 기술

### 1) 개요

- (정의) 나노제품의 설계단계에서 제품 구성성분의 특성 정보 및 컴퓨터 시뮬레이션(in silico) 기술을 활용한 비시험기법(non-testing method)에 기반하여, 나노제품의 안전성을 사전에 예측하는 기술
- (필요성) 글로벌 화학제품 및 환경 관련 규제 강화로 인해, 나노제품의 안전성, 제품수명, 재사용 및 재활용 가능성 등을 최대화하며, 인체건강 및 환경에 대한 부정적인 영향은 최소화하기 위한 나노제품 안전성 예측 기술 수요 지속 증대. 지속가능하며 보다 안전한 제품 출시가 향후 나노제조기업의 시장 경쟁력을 결정할 것으로 전망됨에 따라, 나노제품의 안전한 설계를 지원하는 신속한 안전성 예측 기술 개발 및 확보 필요
- (발전 전망) 나노제품 안전설계를 위한 안전성 예측 기술은 화학 및 생물 분야 빅데이터 확보 기술 및 인공지능 기반 예측 알고리즘 기술이 빠르게 발전함에 따라, 비시험기법도 지속적으로 병행 발전할 것으로 전망. 또한, 컴퓨터 기반으로 활용 가능하여 다양한 분야에서 기술 접근성 및 적용성이 비교적 높을 것으로 기대

### 2) 미래핵심기술이슈 : 지속 가능성과 안전성을 고려한 복합구성 나노제품 설계

#### 2-1) 개요

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
복합구성 나노제품의 안전성 예측 기술 개발의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 현재 나노제품 안전성 평가는 단일물질 중심이며, 실제 다양한 복합구성 나노제품의 안전성을 평가하는 데는 한계 존재</li> <li>- 실제 나노제품들은 복합구성 형태로 사용될 수 있으나, 복합구성(multicomponent) 나노제품 내 구성 물질 간의 복합독성(상가독성, 상호작용 등)을 고려한 안전성 예측 기술은 매우 미흡</li> </ul>
여러 제품 범주에 이용 가능한 안전성 예측 모델 개발/적용의 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 제품 안전설계를 위해 in silico 기술을 활용한 나노물질의 다양한 크기, 형태, 용도, 기능, 노출 등을 고려하여 제품의 인체 및 환경 안전성을 사전에 예측하는 기술 초기 단계이며, 적용 범주가 제한적</li> <li>- 나노구조 기반의 특징인자 도출에 DFT 기반의 계산이 주로 사용되고 있으나, 이러한 전통적인 계산나노과학 기법은 다양한 나노구조와 크기를 고려하여 나노특징인자를 계산하는데 한계(1,000atom 이하로 제한(약 50nm 이하))가 존재하며, 다양한 제품 범주에 이용 가능한 안전성 예측 기술이 미흡</li> </ul>

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
In silico 기반 복합구성 나노제품의 안전성 예측 기술	정의	○ 복합구성(multicomponent) 나노제품 내 구성물질의 정보(특성, 형태, 조성, 독성 등)에 기반하여, 혼합독성을 고려한 나노제품 안전성 예측 기술
	요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 복합구성 나노제품 내 구성물질 정보에 기반한 제품 안전성 예측 기술</li> <li>- 복합구성 나노제품 혼합 독성 실험 결과 데이터베이스 구축 기술</li> <li>- 복합구성 나노제품 안전성 예측 툴 적용/검증 기술</li> </ul>

### 〈나노제품의 안전한 설계 로드맵〉

중분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술									
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
나노 제품의 안전한 설계	안전성 기반 나노제품 설계기술	안전성기반 나노제품 설계 e-물질을 개발	안전성기반 나노제품 설계를 위한 e-물질을 구축 기술		의사결정지원 시스템 개발 기술				e-물질을 구축 기술				e-물질을 적용/검증 기술
	나노제품 안전성 예측기술	최적 가능성과 안전성을 고려한 나노제품 설계	In silico 기반 복합구성 나노-물질의 안전성 예측 기술		나노-물질특성 DB 구축/ 안전성 예측 기술				예측모델 고도화 기술				예측을 적용/검증 기술

## 4-5. 첨단소재/제품 평가 및 차세대 안전성 평가 기술

### 가. 첨단소재/제품 안전성 평가 기술

#### 1) 개요

- (정의) 금속·무기·유기 원료나 이들을 조합한 원료를 새로운 제조기술로 제조하여 종래에 없던 새로운 성능 및 용도를 가지게 된 첨단소재 및 제품의 안전성 평가 기술
- (필요성) 기존 나노물질의 안전성 평가기술들로 새로운 성능과 특성을 가지는 첨단소재 및 제품의 안전성을 평가할 수 있는지 의문에 따라 새로운 안전성 평가 기술의 필요성 증가
- (발전 전망) 기존 나노물질과 비교해 성능이 우수한 첨단소재 및 제품의 사용이 증가하면서 이들의 안전성을 평가하는 기술들도 발전할 것으로 기대

#### 2) 미래핵심기술이슈 : 신규 첨단소재 및 제품 맞춤형 안전성 평가기술 구현

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
첨단소재의 물리·화학적 특성 평가기술의 부재	- 기존 단일성분 나노물질의 물리·화학적 특성 평가기술들이 첨단소재/제품의 물리·화학적 특성 측정에 사용할 수 있는지에 대한 검증이 미흡

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
나노물질 물리·화학적 특성 평가기술	정의	○ 기존 기술의 최적화를 통한 첨단소재·제품의 물리·화학적 특성을 평가하는 기술
	요소 기술	- 물리·화학적 특성 측정 기술

#### 3) 미래핵심기술이슈 : 환경 유해성 평가기술

##### ○ 기술난제

기술난제	개요
기존 및 신규 나노물질의 환경 유해성 평가 방법의 부재	- 기존 평가기술로 평가하기 어려운 물질에 대한 신규 평가기술 개발 및 기존 평가법의 기술적 업데이트 필요 - OECD는 나노물질의 고유 특성을 반영한 표준 독성시험법 개발이 진행 중이나 아직 초기 단계. 또한, 생물을 사용하지 않는 시험법에 대한 개발이 필요

### 3-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
기존 및 신규 나노물질에 대한 환경 위해성 평가 기술	정의	○ 기존 및 신규 나노물질 그리고 이를 활용한 나노제품에 대한 안전성 평가 기술
	요소 기술	- 기존 및 신규 나노물질의 특성을 반영한 표준시험법 및 대체시험법 개발 기술 - 기존 및 신규 나노물질 활용 나노제품에 대한 나노물질의 환경 노출 및 유해성 평가 기술

## 나. 차세대 안전성 평가 기술

### 1) 개요

- (정의) 최신기술을 활용하여 신속하고 정확하게 나노제품의 안전성 평가를 수행하는 기술
- (필요성) 다양한 소재와 형태의 첨단 나노제품에 대한 안전성 평가를 수행하기에는 기존의 안전성 평가법은 한계가 있고, 규제기관과 사회단체에서 동물실험을 금지하거나 축소하는 추세이므로 이에 대한 동물대체 모델 개발이 시급. 또한, 시중에 유통되는 나노제품 중 충분한 안전성 평가를 통과한 것은 20% 미만. 초고속 대량 스크리닝을 통해 안전성 평가 대상물질 선별이 필요. 나노바이오/메디신 제품의 독성영향은 개인별로 다르게 나타날 수 있는데, 일반 약물과는 다르게 나노물질은 유전적변이에 의한 대사의 영향보다는 면역반응에 의한 것이 클 것으로 예상. 개인차에 의한 독성반응을 평가 및 예측하는 분야를 정밀독성이라고 하는데, 나노물질에 대해 특이적 또는 비특이적으로 반응하는 개인차를 반영한 독성 평가도 향후 중요한 분야이기에 차세대 안전성 평가기술 개발이 필요
- (발전 전망) 컴퓨터 모델링을 이용하여 안전성을 예측하는 기술과 동물대체모델을 이용한 안전성 평가기술은 통합 안전성 평가기술로 협업이 가능한 분야로 지속 발전할 전망

### 2) 미래핵심기술이슈 : 개인맞춤형 차세대 신속·정확 나노제품 안전성 평가기술 구현

#### ○ 기술난제

기술난제	개요
나노물질 특성 반영 동물대체 모델의 부재	- 동물대체 모델(오가노이드 등)이 개발되고 있으나, 인체반응을 모사하고 나노물질의 특성을 반영할 수 있는 모델이 부재
시간과 비용을 절감할 수 있는 독성 평가 기술의 부재	- 시장에 소개되는 나노물질에 대해 많은 시간과 높은 비용으로 충분한 안전성 검토가 미흡. 실제로 20% 미만의 물질만이 충분한 안전성 평가를 거치게 되어, 이를 해결하기 위해 고속 대량 스크리닝을 위한 나노물질 독성 평가 파라미터 개발이 절실한 상황
개인차를 반영하는 독성 평가 기술 부재	- 화학물질의 경우에는 개인차에 의한 약효/독성 평가에 대한 연구가 진행되고 있으나, 나노물질의 경우는 거의 수행되고 있지 않는 상황. 나노물질의 경우도 개인차(특정유전자 결핍, 질병유무, 연령대, 비만 등)를 반영하는 독성 평가 기술 개발이 필요

#### 2-2) 나노기술(주제)

나노기술명	개요	
나노물질 특성 반영 동물대체 평가 기술	정의	○ 나노물질의 특성을 반영할 수 있는 인체반응 모사 동물대체 모델 개발 기술
	요소 기술	- 오가노이드 배양 기술 - 구조 기반 나노독성 평가 기술 - 데이터 기반 통합 예측 기술

나노기술명	개요	
고속 대량 나노안전성 평가 기술	정의	○ 안전성 예측기술과 함께 활용하여 생산된 나노물질의 안전성을 예측/스크리닝하여 독성 평가의 우선순위를 부여하는 기술
	요소 기술	- 나노물질 특이적 바이오마커 개발 기술 - 고속 대량 스크리닝 알고리즘 개발 기술
개인맞춤형 나노안전성 평가 기술	정의	○ 나노물질에 의한 인체 독성은 각 개인별로 다르게 나타날 수 있어 안전성 평가 시 개인차를 반영하여 수행
	요소 기술	- 나노물질 독성 유발 기전 규명 - 개인차에 따른 독성영향 요소 발굴 - 개인맞춤형 나노안전성 시험법 개발 기술

### 〈첨단소재/제품 평가 및 차세대 안전성 평가 기술 로드맵〉

중분류	소분류	미래 핵심기술이슈	나노기술 (주제)	핵심요소기술													
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032				
첨단소재/제품 평가 및 차세대 안전성 평가기술	첨단소재/제품 안전성 평가기술	신규 첨단소재 및 제품 맞춤형 안전성 평가기술 구현	나노물질 물리·화학적 특성 평가 기술	평가용 위한 시료 전처리 기술	물리적 (크기, 크기분포, 모양 등)·화학적 (표면특성, 구성, 농도 등) 특성 평가기술												
			기본 및 신규 나노물질에 대한 환경 위해성 평가기술	해체용 시상에 노출 기술	해체용 특성 평가기술	특성규명용 위한 cutting-Edge 기술											
	차세대 안전성 평가기술 개발	개인 맞춤형 차세대 신축·영양 나노소재 안전성 평가 기술 구현	나노물질 특성 기반 동물대체 평가기술	오가노이드 배양기술 구현 기반 나노특성 평가기술	데이터 통합 기반 특성 예측 기술												
			고속 대량 나노안전성 평가기술	나노물질 특이적 바이오마커 개발 기술	고속 대량 스크리닝 및 고리층 개발 기술												
			개인 맞춤형 나노안전성 평가기술	나노물질 특성유발 관련 규명 개인차에 따른 특성명량 요소 발굴	개인 맞춤형 나노안전성 평가기술												

# 참고

## 수립위원회 명단

No.	구분	성명	소속	직위	비고	
1	주관부처	김현옥	과학기술정보통신부 융합기술과	과장		
2		이차연	과학기술정보통신부 융합기술과	사무관		
3		우지식	산업통상자원부 석유탄소나노과	사무관		
4	수립 위원회	안진호	한양대학교 신소재공학부	교수	수립위원장	
5		김덕기	한국연구재단 나노·반도체단	단장		
6		김주선	국가과학기술연구회 융합본부	본부장		
7		최영진	한국연구재단 국책연구본부	본부장		
8		이태걸	한국표준과학연구원	부원장		
9		조진우	KETI IT소재부품연구본부	본부장		
10		최경호	한국산업기술평가관리원	탄소·나노PD		
11		정종일	나노융합산업연구조합	상무		
12		이경엽	국가나노인프라협의체	사무국장		
13		전상훈	KAIST 전기전자공학부	교수	정보전자분과장	
14		고민재	한양대학교 화학공학과	교수	에너지분과장	
15		민병권	KIST 청정신기술연구본부	본부장	환경분과장	
16		윤완수	성균관대학교 화학과	교수	바이오분과장	
17		송재용	포항공과대학교 반도체공학과	교수	기반분과장 및 소재 팀장	
18		임현의	한국기계연구원 나노융합장비연구부	부장	기반분과장 및 공정· 분석·장비 팀장	
19		송경석	한국건설생활환경시험연구원 바이오본부	본부장	(기반분과) 안전성 팀장	
20	총괄 팀	총괄책임	문희성	국가나노기술정책센터	센터장	
21		간사	황한수	국가나노기술정책센터	정책기획팀장	
22			정연주	국가나노기술정책센터	선임연구원	
23		팀원	유승태	국가나노기술정책센터	선임연구원	
24			정지연	국가나노기술정책센터	연구원	
25		분과 제1간사	이정환	인하대학교 신소재공학과	교수	정보전자분과 간사
26			김진영	서울대학교 재료공학과	교수	에너지분과 간사
27			홍석원	KIST 물자원순환연구단	단장	환경분과 간사
28			정봉근	서강대학교 기계공학과	교수	바이오분과 간사
29			심우영	연세대학교 신소재공학과	교수	(기반) 소재 팀 간사
30			홍종인	중앙대학교 화학과	교수	(기반) 공정· 분석·장비 팀 간사
31	허민범		한국표준과학연구원 안전측정연구소	책임연구원	(기반) 안전성 팀 간사	
32	나노정보전자 분과	전상훈	KAIST 전기전자공학부	교수	위원장	
33		이정환	인하대학교 신소재공학과	교수	제1간사	
34		이윤희	국가나노기술정책센터	선임연구원	제2간사	
35		왕건욱	고려대 KU-KIST 융합대학원	교수		
36		심교승	UNIST 화학과	교수		



No.	구분	성명	소속	직위	비고
37	나노정보전자 분과	한재훈	KIST 광전소재연구단	선임연구원	
38		김정현	광운대학교 전자융합공학과	교수	
39		홍영준	세종대학교 신소재공학과	교수	
40		홍성훈	ETRI ICT소재연구그룹	책임연구원	
41		우지용	경북대학교 전자공학부	교수	
42		김상현	KAIST 전기전자공학부	교수	
43		백록현	포항공과대학교 전자전기공학과	교수	
44		강혜민	한국에너지공과대학교 에너지공학부	교수	
45	나노에너지 분과	고민재	한양대학교 화학공학과	교수	위원장
46		김진영	서울대학교 재료공학과	교수	제1간사
47		정연진	국가나노기술정책센터	선임연구원	제2간사
48		박희영	KIST 수소·연료전지연구센터	선임연구원	
49		김재현	국민대학교 신소재공학부	교수	
50		장호원	서울대학교 재료공학부	교수	
51		김미소	성균관대학교 신소재공학부	교수	
52		임태호	송실대학교 화학공학과	교수	
53		박익재	숙명여자대학교 응용물리학과	교수	
54		박건호	KETI 차세대전지연구센터	선임연구원	
55		심준형	고려대학교 기계공학과	교수	
56		이선미	KIST 청정에너지연구센터	책임연구원	
57		심재원	고려대학교 전기전자공학부	교수	
58		나노환경 분과	민병권	KIST 청정신기술연구본부	본부장
59	홍석원		KIST 물자원순환연구단	단장	제1간사
60	박지은		국가나노기술정책센터	연구원	제2간사
61	이재상		고려대 건축사회환경공학부	교수	
62	조강우		포항공과대학교 환경공학부	교수	
63	이준석		한양대학교 화학과	교수	
64	원승현		고려대학교 보건환경융합과학부	교수	
65	이종석		서강대학교 화공생명공학과	교수	
66	오형석		KIST 청정에너지연구센터	책임연구원	
67	김우열		한국에너지공과대학교 에너지공학부	교수	
68	안광진		UNIST 에너지 및 화학공학	교수	
69	김석기		아주대학교 화학공학과	교수	
70	백정민		성균관대학교 신소재공학과	교수	
71	나노바이오 분과		윤완수	성균관대학교 화학과	교수
72		정봉근	서강대학교 기계공학과	교수	제1간사
73		정지연	국가나노기술정책센터	연구원	제2간사
74		권오석	성균관대학교 나노공학과	교수	
75		이경균	나노종합기술원 나노바이오개발팀	선임연구원	
76		이윤상	서울대학교 병원 핵의학과	교수	
77		윤소희	한국표준과학연구원 바이오이미징팀	책임연구원	
78		김형교	(주)젠퓨어	대표	

No.	구분	성명	소속	직위	비고		
79	나노바이오 분과	김세훈	KIST 화학생명융합연구센터	센터장			
80		박성준	KAIST 바이오및뇌공학과	조교수			
81		이유빈	안전성평가연구소	선임연구원			
82	기 반 분 과	송재용	포항공과대학교 반도체공학과	교수	(공동) 분과장		
83		임현의	한국기계연구원 나노융합장비연구부	부장	(공동) 분과장		
84		나노공정· 분석·장비 팀	임현의	한국기계연구원 나노융합장비연구부	부장	팀장	
85			홍종인	중앙대학교 화학과	교수	제1간사	
86			이준영	국가나노기술정책센터	선임연구원	제2간사	
87			이한보람	인천대학교 신소재공학과	교수		
88			장봉균	한국기계연구원 나노역학장비연구실	선임연구원		
89			윤창모	(주)모만	대표		
90			김명길	성균관대학교 신소재공학부	교수		
91			장원석	한국기계연구원 나노공정장비연구실	실장		
92			김윤석	성균관대학교 신소재공학부	교수		
93			최시영	포항공과대학교 신소재공학과	교수		
94			김재현	한국기계연구원 나노역학장비연구실	실장		
95			정원석	충남대학교 기계공학과	교수		
96			김영진	KAIST 기계공학과	교수		
97			나노소재 팀	송재용	포항공과대학교 반도체공학과	교수	팀장
98				심우영	연세대학교 신소재공학과	교수	제1간사
99				이윤주	국가나노기술정책센터	연구원	제2간사
100		김종영		한국세라믹기술원 도자융합소재기술센터	책임연구원		
101		이승용		KIST 물질구조제어연구센터	책임연구원		
102	노종욱	경북대학교 나노소재공학과		교수			
103	한승민	KAIST 신소재공학과		교수			
104	안치원	나노종합기술원 나노융합소재개발실		책임연구원			
105	김철주	포항공과대학교 화학공학과		교수			
106	김선경	경희대학교 응용물리학과		교수			
107	권병화	ETRI 실감소자연구본부		선임연구원			
108	김도현	서울대학교 물리학과		교수			
109	임종우	서울대학교 화학과		교수			
110	한정호	한양대학교 신소재공학과		교수			
111	김동호	한국재료연구원 나노표면재료연구본부		본부장			
112	권민상	서울대학교 재료공학부		교수			
113	한중탁	한국전기연구원 나노융합연구센터		책임연구원			
114	박병진	한국재료연구원 기능복합재료연구실		선임연구원			
115	나노안전성 팀	송경석		한국건설생활환경시험연구원 바이오본부	본부장	팀장	
116		허민범		한국표준과학연구원 나노안전팀	책임연구원	제1간사	
117		이준영	국가나노기술정책센터	선임연구원	제2간사		
118		이태걸	한국표준과학연구원 부원장실	부원장			

No.	구분	성명	소속	직위	비고
119	기 반 분 과	나노안전성 팀	김범회	한국탄소나노산업협회 기업지원실	센터장
120			조완섭	동아대학교 의약생명공학과	교수
121			박준우	안전성평가연구소 환경독성영향연구센터	센터장
122			윤태현	한양대학교 화학과	교수
123			윤석주	안전성평가연구소 부소장실	부소장
124			이성규	한국표준과학연구원 나노안전팀	초빙연구원
125			이병태	GIST 중앙연구기기센터	교수
126			이용주	(주)캠솔브	대표
127			함혜민	나노융합산업연구조합 연구개발지원실	부장
128			김종운	한국화학연구원 화학안전연구센터	센터장



제4기 국가나노기술계획(2023~2032)

## 나노기술 혁신을 통한 새로운 전환

발행일	2023년 6월
발행처	한국재료연구원 국가나노기술정책센터
주소	서울특별시 서초구 강남대로41길 8 태연빌딩 4층
대표전화	02-584-4001
홈페이지	www.nnpc.re.kr
디자인·인쇄	(주)디자인여백플러스(02-2672-1535)

ISBN 979-11-93308-00-4

- ※ 본 보고서의 무단전재나 복제를 금하며, 가공·인용할 때는 반드시 출처를 밝혀주시기 바랍니다.
- ※ 본 보고서에 대한 문의는 한국재료연구원 국가나노기술정책센터로 하시기 바랍니다.
- ※ 본 보고서는 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-나노·소재기술 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구(No. NRF-2017M3A7A7057113)입니다.

