

최종보고서 제출

한국연구재단 귀하

“기후변화대응기술개발사업 종합성과 조사 분석 연구”에 관한 연구의 최종보고서를
별첨과 같이 제출합니다.

2024. 9. 30.

연구책임자 윤 은 영

(인)

연 구 원 이 재 희
박 성 준
권 여 은
최 지 연
육 보 람

과제번호

기후변화대응기술개발사업
종합성과
조사
분석
연구
과학기술정보통신부

기후변화대응기술개발사업 종합성과 조사
분석 연구
(Comprehensive Study and Analysis of
the Overall Achievements in Climate
Change Response Technology
Development Project)

연구기관 : (주)날리지웍스
연구책임자 : 윤은영

2024. 9. 30.

과 학 기 술 정 보 통 신 부

안 내 문

본 연구보고서에 기재된 내용들은 연구책임자의
개인적 견해이며 과학기술정보통신부의 공식견
해가 아님을 알려드립니다.

과학기술정보통신부 장관 유 상 임

제 출 문

과 학 기 술 정 보 통 신 부 장 관 귀하

본 보고서를 “기후변화대응기술개발사업 종합성과 조사 분석 연구”의 최종보고서로 제출합니다.

iris
2024. 9. 30.

연구책임자 윤 은 영

연 구 원 이 재 희
박 성 준
권 여 은
최 지 연
육 보 람

※ 연구기관 및 연구책임자, 연구원은 실제 연구에 참여한 기관 및 자의 명의임.

요 약 문

과제번호			연구기간	2023년 12월 1일 ~ 2024년 4월 30일 (5개월)	
과제명	(한글) 기후변화대응기술개발사업 종합성과 조사 분석 연구 (영문) Comprehensive Study and Analysis of the Overall Achievements in Climate Change Response Technology Development Project				
연구책임자 (주관연구기관)	윤은영	참여 연구원수	총 5명	연구비	70,000천원
요약					
PART I. 연구개요					
○ (연구 배경 및 필요성) '09년부터 정부의 기후변화대응 정책 이행을 지원해온 동 사업이 '24년 일몰 종료 예정으로, 그간의 사업 운영 성과와 개선 필요사항을 점검함으로써 후속 사업이 보다 효율적·효과적으로 추진될 수 있도록 방향을 도출하는 것이 필요 ○ (과업 목표) △기후변화대응기술개발사업 성과 종합 검토를 통한 그간의 사업 추진 효과를 분석하고, △향후 과기정통부 기후변화대응 및 탄소중립 이행 정책 수립을 위한 기술 발굴 및 관련 후속 R&D사업 개선 방안 도출					
PART II. 기후변화대응기술개발사업 종합성과 분석					
○ (사업 전 기간(2009~2023)) - SCI 논문(총 8,208건), 등록특허(건)으로 국가 전체 R&D사업 평균뿐만 아니라 ET분야 평균을 상회하는 성과를 도출 - SCI 논문(전 기간 평균 IF 7.19, mrnIF 평균 76.2), 우수특허(A~AAA) 비율 6.3%로 질적 성과들이 모두 국가전체 수준을 상회 - 세계 최고 수준의 원천기술 확보로 탄소중립 실현에 기여할 성과 토대 축적 * △세계 최고수준의 변환효율을 갖는 양자점-SnO2 이중층을 이용한 고효율 페로브스카이트 태양 전지 개발('22.1), △세계 최초 준안정상 팔라듐 수소화물 촉매 개발('22.3) 등 ○ (최근 3년(2021~2023)) - SCI 논문(최근 3년 평균 IF 10.1, mrnIF 81.6), 등록특허(B등급 이상의 비율이 71.7%)의 질적수준이 2021년 국가 R&D 전체 성과를 상회 - 동 사업의 성과지표 7개에 대한 목표달성률은 '23년 기준 SCI 논문의 mrnIF와 유기태양전지 모듈 효율 2개 지표를 제외한 나머지 5개 지표에서 목표치를 100% 초과 - 최근 3년 동안 창출된 우수성과 중 5개의 대표성과 선정 * ①개미산과 이산화탄소만으로 잘 증식하는 플랫폼 균주 개발, ②유사 할로젠 음이온을 사용한 고효율 페로브스카이트 태양전지 개발, ③고성능-고내구성 나노 촉매 개발로 차세대 그린수소생산 기술 확보, ④양자점-SnO2 이중층을 이용한 고효율 페로브스카이트 태양 전지 개발, ⑤바이오 알파올레핀 생산 고효율 촉매 공정 기술 개발					
PART III. 환류 및 정책제안					
○ 선행 기후변화대응기술개발사업 추진 성과 활용, 여건 변화에 따른 새로운 요구에의 대응 등을 고려한 후속 사업 추진 필요					
비공개 사유			비공개 기간		

목 차

PART I. 연구 개요	1
1. 연구 배경 및 필요성	2
2. 연구 내용 및 범위	3
3. 추진 전략 및 방법	4
3.1 연구 프레임워크	4
PART II. 기후변화대응기술개발사업 종합성과 분석	5
1. 성과분석 개요	6
1.1 성과분석 개요	6
1.2 성과분석 체계	7
2. 사업추진 현황	9
2.1 사업 개요	9
2.2 사업 내용	14
2.3 성과목표 및 지표	18
3. 성과조사 결과	23
3.1 투입성과	23
3.2 산출성과	31
4. 심층분석(적절성, 효율성, 효과성, 파급효과) 결과	38
4.1 심층분석 기준	38
4.2 사업추진의 적절성	39
4.3 사업추진의 효과성	50
4.4 사업추진의 효율성	94
4.5 파급효과	99
5. 종합평가	108

PART III. 환류 및 정책제안120

1. 주요 여건 변화 분석	121
1.1 탄소중립고 혁신기술 요구	121
1.2 주요국 기후변화 및 탄소중립 대응 R&D 추진 동향 ...	124
1.3 향후 R&D 추진 방향	132
2. 후속 사업 추진 방안 도출	133
2.1 후속 사업 추진 방향	133
2.2 사업 추진 모델(안)	134
2.3 중점분야별 기술개발 지원 방안	136

[부록] 성과 파급효과 분석을 위한 전문가 인터뷰 결과137

표 목차

<표 I -1> 기후변화대응기술개발사업 상위 정책 동향 및 사업 추진 이력	2
<표 II-1> 성과분석 항목	7
<표 II-2> 전체 기간 투자·성과 분석을 위한 분야 조정	8
<표 II-3> 사업수요와 목적의 논리적 전개	11
<표 II-4> 기후변대응기술개발사업 추진절차	13
<표 II-5> 기후변화대응기술개발사업 세부사업 체계 (2013~2014년)	14
<표 II-6> 기후변화대응기술개발사업 세부사업 체계 (2015~2020년)	15
<표 II-7> 기후변화대응기술개발사업 세부내용 (2021~2023년)	15
<표 II-8> 기후변화대응기술개발사업 연차 목표 및 내용 (최근 3년)	16
<표 II-9> 기후변화대응기술개발사업 연차별 추진 로드맵 (최근 3년)	17
<표 II-10> 기후변화대응기술개발사업 성과계획	18
<표 II-11> 기후변화대응기술개발사업 단계별 성과목표	18
<표 II-12> 기후변화대응기술개발사업 성과지표	19
<표 II-13> 기후변화대응기술개발사업 성과지표 목표 및 설정 근거	20
<표 II-14> 기후변화대응기술개발사업 성과지표 측정방법	21
<표 II-15> 최근 3년(2021~2023) 지원과제 수	23
<표 II-16> 사업 전체 기간(2009~2023) 지원과제 수 (최상위과제 단위)	24
<표 II-17> 사업 전체 기간(2009~2023) 중 신규 지원과제 수 (세부과제 단위)	24
<표 II-18> 사업 전체 기간(2009~2023) 신규 지원과제 수 (최상위과제 단위)	25
<표 II-19> 사업 전체 기간(2009~2023) 신규 지원과제 수 (세부과제 단위)	26
<표 II-20> 최근 3년간(2021~2023) 연구비	27
<표 II-21> 사업 전체 기간(2009~2023) 연간 연구비 추이	28
<표 II-22> 사업 전체 기간(2009~2023) 분야별 연구비	30
<표 II-23> 사업 전체 기간(2009~2023) 분야별 연구비 비중	30
<표 II-24> 사업 전체 기간(2009~2023) SCI급 학술지 게재 건수	31
<표 II-25> 사업 전체 기간(2009~2023) SCI급 학술지 게재 건수	32
<표 II-26> 사업 전체 기간(2009~2023) 국제학술대회 성과	33
<표 II-27> 사업 전체 기간(2009~2023) 수상실적 성과	33
<표 II-28> 사업 전체 기간(2009~2023) 특허 성과	34
<표 II-29> 사업 전체 기간(2009~2023) 기술이전 성과	35
<표 II-30> 사업 전체 기간(2009~2023) 인력양성(학위배출) 성과	36
<표 II-31> 사업 전체 기간(2009~2023) 인력양성(연수지원) 성과	37

<표 II-32> 사업 전체 기간(2009~2023) 언론보도 건수	37
<표 II-33> 심층분석 항목	38
<표 II-34> 전략목표-성과목표-성과지표간 연계성	39
<표 II-35> 기후변화대응 종합기본계획('08.9)	42
<표 II-36> 기후변화대응 국가연구개발 중장기 마스터플랜('08.12)	43
<표 II-37> 녹색기술 연구개발 종합대책('09.1)	44
<표 II-38> 기후변화 대응 핵심기술 개발전략('14.7)	45
<표 II-39> 기후변화대응기술 확보 로드맵(CTR) ('17.12)	45
<표 II-40> 기후변화대응 종합기본계획('08.9)	46
<표 II-41> 성과목표 달성도 종합	51
<표 II-42> SCI 논문의 표준화된 순위보정 영향력 지수(mrnIF) 목표달성 평가	52
<표 II-43> 기술 이전 건수 목표달성 평가	53
<표 II-44> C1가스 전환 유기산 부피 농도 목표달성 평가	53
<표 II-45> 유기태양전지 모듈 효율 목표달성 평가	54
<표 II-46> SOFC 중저온영역 초고성능 셀 성능(최대출력) 목표달성 평가	55
<표 II-47> 열분해오일로부터 탈산소연료 생산 탄소회수율 목표달성 평가	56
<표 II-48> 나노그리드 전력/통신 전송용량 목표달성 평가	56
<표 II-49> 사업 전체 기간(2009~2023) mrnIF 범위별 SCI 논문 건수	58
<표 II-50> 최근 3개년(2021~2023) SCI 논문 성과	59
<표 II-51> 최근 3개년(2021~2023) SCI 논문의 상위저널 게재 성과	60
<표 II-52> SCI 논문 상위 10% 저널 게재 성과(최상위 5개)	60
<표 II-53> 우수논문(mrnIF 100) 성과 상세내용 (1)	61
<표 II-54> 우수논문(mrnIF 100) 성과 상세내용 (2)	62
<표 II-55> 우수논문(mrnIF 100) 성과 상세내용 (3)	64
<표 II-56> SCI 논문 mrnIF 90 이상 논문의 주요 내용과 사업목표와의 연관성	65
<표 II-57> 특허 SMART 분석 평가지표 및 배점('18.3월 이후 평가모델 기준)	68
<표 II-58> 사업 전체 기간(2009~2023) 특허 SMART 분석 평가지표별 연도별 평균점수	69
<표 II-59> 사업 전체 기간(2009~2023) 특허 SMART 분석 총점 등급 연도별 성과 ...	70
<표 II-60> 최근 3개년(2021~2023) 특허 SMART 분석 평가지표별 연도별 평균점수	71
<표 II-61> 최근 3개년(2021~2023) 특허 SMART 분석 총점 등급 연도별 성과	71
<표 II-62> 우수특허(총점 A) 성과 상세내용(1)	72
<표 II-63> 우수특허(총점 A) 성과 상세내용(2)	73
<표 II-64> 최근 3개년(2021~2023) 실시권유형별 기술이전 성과	79
<표 II-65> 최근 3개년(2021~2023) 세부기술별 기술이전 성과	79
<표 II-66> 기술이전 우수사례	80
<표 II-67> 대표성과 선정을 위한 후보 우수성과 목록	81

<표 II-68> 사업 전체 기간(2009~2023) 연도별 정부연구비 10억원당 SCI 논문 성과	95
<표 II-69> 최근 3개년(2021~20203) SCI 논문 성과 효율성(10억원당)	96
<표 II-70> 사업 전체 기간(2009~2023) 연도별 정부연구비 10억원당 특허 성과	97
<표 II-71> 최근 3개년(2021~20203) SCI 논문 성과 효율성(10억원당)	98
<표 II-72> 주요 성과 활용 현황	100
<표 II-73> 기후변화대응기술개발사업 2021~2023년 성과분석 종합	108
<표 II-74> 기후변화대응기술개발사업 사업 구조 변화 이력	110
<표 II-75> 기후변화대응기술개발사업 분야별 주요 대표성과 축적 현황	114
<표 II-76> 기후변화대응기술개발사업 지원분야별 투자 대비 성과 비교(2009~2023)	118
<표 III-1> EU의 에너지 연구 및 혁신 지원프로그램	128
<표 III-2> ALCA-Next 프로그램의 6개 기술 영역	130



그림 목차

[그림 I -1] 연구 프레임워크	4
[그림 II-1] 사업 전체 기간(2009~2023) 분야별 연구비 현황	29
[그림 II-2] 사업 전체 기간(2009~2023) SCI급 학술지 게재 건수 추이	31
[그림 II-3] 사업 전체 기간(2009~2023) SCI급 학술지 게재 건수 추이	32
[그림 II-4] 사업 전체 기간(2009~2023) 국제학술대회 성과 추이	33
[그림 II-5] 사업 전체 기간(2009~2023) 특허 성과(출원, 등록) 추이	34
[그림 II-6] 사업 전체 기간(2009~2023) 기술이전 및 기술료 성과 추이	35
[그림 II-7] 언론보도 예시	37
[그림 II-8] 기후변화대응기술개발사업 사업추진체계	47
[그림 II-9] 기후변화대응기술개발사업 기획·관리·평가 체계	48
[그림 II-10] 기후변화대응기술개발사업 기후기술 관리 및 활용 체계	49
[그림 II-11] 사업 전체 기간(2009~2023) SCI 논문 평균 영향력지수(IF) 추이	57
[그림 II-12] 사업 전체 기간(2009~2023) SCI 논문 표준화된 순위보정 영향력지수(mrnIF) 추이 ..	58
[그림 II-13] 최근 3년(2021~2023) SCI 논문 평균 영향력지수(IF) 추이	59
[그림 II-14] 최근 3년(2021~2023) SCI 논문 평균 표준화된 순위보정 영향력지수(mrnIF) 추이 ..	60
[그림 II-15] SMART 등급 부여기준 분포	68
[그림 II-16] 사업 전체 기간(2009~2023) 우수특허 비율 추이	70
[그림 II-17] 투광형 유기 태양전지 미니모듈 시험 결과	75
[그림 II-18] 사업 전체 기간(2009~2023) 정부연구비 10억원당 SCI 논문 성과 추이 ...	94
[그림 II-19] SCI 논문 성과 효율성(10억원당) 비교	95
[그림 II-20] 사업 전체 기간(2009~2023) 정부연구비 10억원당 특허 성과 추이	97
[그림 II-21] 특허(출원 및 등록) 성과 효율성(10억원당) 비교	98
[그림 II-22] 기후변화대응기술개발사업의 과학기술적 성과 생산성	111
[그림 II-23] 기후변화대응기술개발사업 성과의 질적 수준	112
[그림 II-24] 기후변화대응기술개발사업 기술이전 누적건수 및 누적계약금액	113
[그림 II-25] 기후변화대응기술개발사업 기술이전 성과	113
[그림 II-26] 기후변화대응기술개발사업 투자 및 성과 요약	116
[그림 III-1 탄소중립 달성까지 기존 기술과 신규 기술의 기여도]	121
[그림 III-2] 탄소중립 녹색성장 기술혁신 전략 목표 및 기본방향	122
[그림 III-3] 제1차 기후변화대응기술개발 기본계획(2023~2032) 비전 및 목표	123
[그림 III-4] ARPA-E 프로그램 개발 과정	125
[그림 III-5] ARPA-E의 성과('23년 7월 기준)	125

[그림 III-6] 유럽 그린 딜 정책 개요	127
[그림 III-7] JST 지원사업 내 ALCA-Next, GteX 프로그램의 포지셔닝	129
[그림 III-8] JST ALCA-Next 기술 영역 도출 과정	130
[그림 III-9] JST GteX 프로그램 연구과제 구성	131
[그림 III-10] 사업 추진 모델(안) (1안 : 프로젝트 in 프로그램)	134
[그림 III-11] 사업 추진 모델(안) (2안 : 先프로그램 → 後프로젝트)	134
[그림 III-13] 장기 추진 모델	135
[그림 III-14] 후속 사업 추진 모델(안)	136



PART | . 연구 개요

PART I. 연구 개요

1. 연구 배경 및 필요성

- 2009년부터 정부의 기후변화대응 정책 이행을 지원해왔던 기후변화대응기술개발사업이 2024년 일몰 종료
 - 기후변화대응기술개발사업은 「기후변화대응종합기본계획(‘08.9)」, 「기후변화대응 중장기 마스터플랜(‘08.12)」, 「제1차 녹색성장 5개년 계획(‘09)」, 「녹색기술 연구개발 종합대책(‘09)」 등 정부의 기후변화대응 정책 이행·실천을 목표로 추진되기 시작
 - 정부의 장기 R&D사업 일몰 정책에 따라 2024년 일몰 예정으로, 후속 사업 추진 방안 마련이 필요
- 이에 그간의 사업 운영 성과와 개선 필요사항을 점검함으로써 후속 사업이 보다 효율적·효과적으로 추진될 수 있도록 방향을 도출하는 것이 필요 (Review & Lesson)
 - 그간 3년 주기로 상위 중간평가 대응을 위한 성과분석이 이루어져 왔으나, 전체 기간에 대한 성과분석 사례는 부재
 - 기후변화대응기술개발사업 전 기간에 대한 종합성과분석을 통해 성공·실패사례와 그 요인을 식별하여 후속 사업 추진 방향에 반영하는 것이 필요
 - 기존과 달리 ‘2050년 탄소중립 실현’이라는 명확하고 강력한 정책 목표가 주어지고 관련 정책·산업·기술환경의 변화가 빠르게 일어나는 상황을 고려할 때 기후변화대응기술개발사업 후속사업 추진 역시 매우 중요

<표 I-1> 기후변화대응기술개발사업 상위 정책 동향 및 사업 추진 이력

구분	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	
정책 동향	('08.9) 기후변화대응종합기본계획 ('08.12) 기후변화대응 중장기 마스터플랜 ('09) 제1차 녹색성장 5개년 계획 ('09) 녹색기술 연구개발 종합대책																	
								('14.7) 기후변화대응 핵심기술개발전략 수립										
								('15.12) UNFCCC 파리협정체결										
								('16.06) 기후변화대응기술 확보 로드맵(CTR) 수립										
								('16.12) 2030 NDC 발표										
								('16.12) 기후변화대응 기본계획('17~'36)										
													('20.10) 2050 탄소중립 선언					
													('21.10) 2050 탄소중립 시나리오 발표					
													('21.10) 2030 NDC 상향					
기후변화대응 기술개발사업 추진 이력	('09) 기후변화대응기술개발사업 착수																	
								('15) 태양전지, 연료전지, 이차전지 등 전략적 지원(Top-down) 본격화										
								('16) 사업구조 개편 : 탄소저감/탄소자원화/기반기술연구										

2. 연구 내용 및 범위

☐ 과업 목표

- 기후변화대응기술개발사업 성과 종합 검토를 통한 그간의 사업 추진 효과 분석
- 향후 과기정통부 기후변화대응 및 탄소중립 이행 정책 수립을 위한 기술 발굴 및 관련 후속 R&D사업 개선 방안 도출

☐ 연구 범위

- 시간적 범위 : 2009~2024년
- 대상적 범위 : 기후변화대응기술개발사업

☐ 연구 내용

- (성과분석)
 - 사업 체계, 운영, 성과관리 체계 분석 및 관련 후속 연구 추진 및 발전 현황 분석 등에 따른 본 사업의 효과성 분석
 - 내역사업 및 기술분야별 과학적(논문, 특허성과 등), 기술적, 경제적 성과를 분석하고 본 사업의 대표성과 도출
- ※ 태양전지, 연료전지, 이차전지, 기반기술연구, 에너지효율향상 등 전체 내역사업
- (환류 및 정책제안) 사업성과 분석을 기반으로 기후변화대응기술개발 R&D의 지속적인 성과 창출 및 질적 성과 개선을 위한 정책과제 발굴 및 관련 후속사업 추진 시 개선 방안 도출
- 기후변화대응 기술 분야 효율적 기술개발 지원방안 및 신규 프로그램형 사업 기획(안) 제안

3. 추진 전략 및 방법

3.1 연구 프레임워크

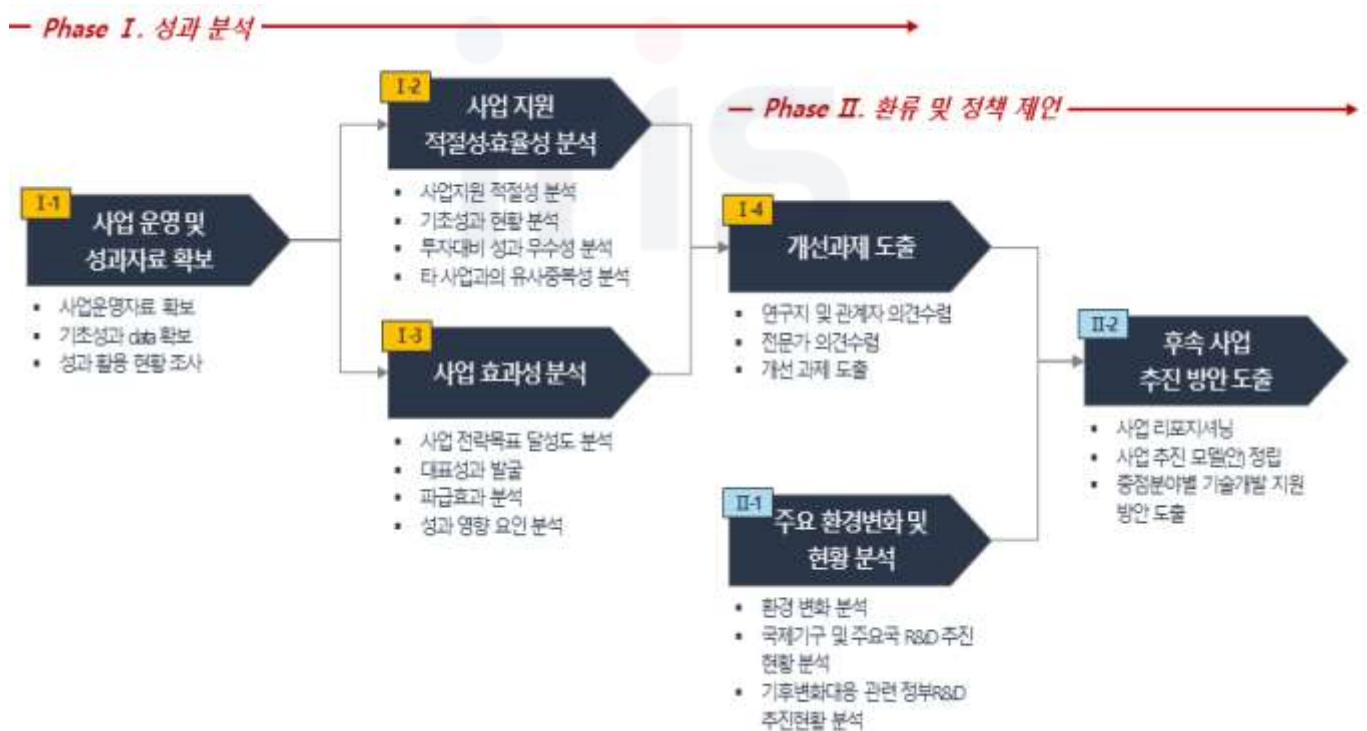
□ 주어진 과업 내용을 2단계 6개 모듈로 구분하여 추진

○ [Phase- I. 성과 분석]

- (모듈 I -1) 사업운영 및 성과자료 확보
- (모듈 I -2) 사업지원 적절성·효율성 분석
- (모듈 I -3) 사업 효과성 분석
- (모듈 I -4) 종합 분석 및 개선과제 도출

○ [Phase-II. 환류 및 정책 제언]

- (모듈 II-1) 주요 환경변화 및 현황 분석
- (모듈 II-2) 후속 사업 추진방안 도출



[그림 I -1] 연구 프레임워크

PART II. 기후변화대응기술개발사업 종합성과 분석

PART II. 기후변화대응기술개발사업 종합성과 분석

1. 성과분석 개요

1.1. 성과분석 개요

☐ 성과분석 목적

- 본 조사·분석은 국가 R&D사업으로서 기후변화대응기술개발사업 추진 현황을 파악하고, 성과에 대한 체계적인 분석을 통해 정부 R&D투자의 효율성 제고 및 정책 결정을 위한 기초자료로 활용하기 위함임
 - 과학기술기본법 제12조 및 동법 시행령 제20조에 근거

☐ 성과분석 대상

- 기후변화대응기술개발사업을 통해 대학, 출연(연), 기업 등이 수행한 2021~2023년까지의 과제와 더불어 사업 전체 기간인 2009~2023년까지의 과제도 본 조사·분석 대상 범위에 포함하여 분석
- 최근 3개년(2021~2023) 분석 대상
 - 당해 연도(2021년 1월 1일 ~ 2023년 12월 31일)에 예산이 집행된 과제를 대상으로 연구비, 연구수행주체, 기술분야 등을 조사
 - 당해 연도 포함 기 등록된 과제를 대상으로 논문, 특허, 기술료 등 당해연도(2021년 1월 1일 ~ 2023년 12월 31일) 발생성과를 조사
- 사업 전체 기간(2009~2023) 분석 대상
 - 당해 연도(2019년 1월 1일 ~ 2023년 12월 31일)에 예산이 집행된 과제를 대상으로 연구비, 연구수행주체, 기술분야 등을 조사
 - 당해 연도 포함 기 등록된 과제를 대상으로 논문, 특허 등 당해연도(2019년 1월 1일 ~ 2023년 12월 31일) 주요 발생성과를 조사

1.2. 성과분석 체계

□ 종합 성과분석 체계

- 사업의 목적, 핵심가치, 성과목표 달성을 위한 사업성과를 적절성, 효과성, 효율성, 체계성 관점에서 종합적으로 분석하고 성과 영향요인 및 정책제안을 도출
 - 사업추진의 적절성 : 정부지원 적절성, 상위계획과의 부합성, 사업추진체계의 적절성 분석
 - 사업추진의 효과성 : 사업별 투입 및 추진내용 대비 성과의 효율성 분석
 - 사업성과의 효율성 : 사업별 수행활동의 목표 달성도 등 성과의 효과성 분석
- 「2024년도 국가연구개발사업 자체평가 지침(2023.12)」 가이드에 따라 성과분석 항목 구성

<표 Ⅱ-1> 성과분석 항목

구분	항목	내용
사업추진 현황	사업 개요	· 사업 추진 배경 및 목적, 추진 근거, 추진 체계
	사업 내용	· 사업 추진 이력 및 세부 내용
	성과목표 및 지표	· 성과목표체계 및 성과지표
성과조사	투입성과	· 지원과제 및 연구비 투입 성과 분석
	산출성과	· 논문, 지식재산권, 기술이전, 기타 성과 분석
심층분석	사업추진의 적절성	· 정부지원 적절성, 상위계획과의 부합성, 사업추진체계의 적절성 분석
	사업추진의 효과성	· 사업별 투입 및 추진내용 대비 성과의 효율성 분석
	사업성과의 효율성	· 사업별 수행활동의 목표 달성도 등 성과 효율성 분석
	종합평가	· 사업추진의 적절성·효과성·효율성 종합 분석 및 제언

□ 사업 전체 기간 분석에 따른 추가적인 구분

- (투자 단계 구분) 상위 정책에 따른 기후변화대응기술개발사업 구조 개편 시점 등을 기준으로 전체 사업 추진 기간을 3단계로 구분하여 분석
 - 1기(2009~2014년) : 기후변화대응 정책 본격화에 따른 R&D 투자 확대 시기
 - 2기(2015~2020년) : CTR에 따른 사업구조 개편 및 분야별 지원규모 확대 시기
 - 3기(2021~2023년) : 정부 R&D투자 효율화 정책(계속사업 일몰)에 따른 사업 추진 갈무리 시기

- (지원 분야 재정리) 기후변화대응기술개발사업 전체 추진 기간 중 사업구조 개편에 따라 총 18개로 구분된 내역사업을 기술분야를 기준으로 13개 분야로 재정리하여 분석
- 예를 들어, '지구온난화(태양전지)' 내역사업은 '태양전지' 분야와 기술적 분야가 동일하므로 '태양전지'로 분야를 통합하여 분석

<표 II-2> 전체 기간 투자·성과 분석을 위한 분야 조정

내역사업 구분		성과분석을 위한 분야 재정리	
01	태양전지	01	태양전지
02	연료전지	02	연료전지
03	바이오에너지	03	바이오에너지
04	이차전지	04	이차전지
05	Korea CCS 2020	05	Korea CCS 2020
06	지구온난화(연료전지)	06	차세대수소에너지
07	지구온난화(태양전지)	07	C1가스리파이너리
08	지구온난화(차세대수소에너지)	08	차세대 탄소자원화
09	차세대 탄소자원화	09	에너지효율향상
10	기후기술현지화지원	10	기후기술현지화지원
11	기반기술연구	11	기반기술연구
12	다부처공동연구	12	다부처공동연구
13	C1가스리파이너리	13	기타
14	에너지효율향상		
15	기획심사평가비		
16	녹색기술포럼		
17	위탁용역		
18	전력IT		

2. 사업추진 현황

2.1. 사업 개요

(1) 사업개요

[사업명]

단위사업	기후·환경연구개발사업
세부사업	기후변화대응기술개발사업
내역사업	기후변화대응기술개발사업

[사업목적]

사업목적	기후변화 위기에 대응하여 온실가스 감축효과가 큰 기술 분야에 대하여 세계 선도적 원천기술 확보 및 혁신 성장 동력 창출 지원
------	--

[사업현황]

사업구분	계속사업 ☐ 기한사업 ☒		
사업추진방식	상향식 ☐ 혼합식 ☐ 하향식 ☒		
사업유형	연구개발 - 기초연구		
다부처 여부	다부처 ☐	참여부처 (다부처사업)	-
사업기간	'09년 ~ '24년	총사업비	8,558억 원('24년 종료)
사업규모	'21년 기준 32개 과제	지원대상	대학, 출연연, 기업 등
지원형태	출연	지원조건	출연 100%
사업시행주체	과학기술정보통신부(한국연구재단)		
예비타당성 통과여부	해당 없음		

(2) 사업 추진 배경 및 목적

□ 추진 배경

- '15.12월 파리기후협정 타결로 2020년부터 '모든' 협약 당사자가 한층 강화된 온실가스 감축과 기후변화 적응 의무를 부담
 - 각 국가는 가능한 '가장 높은 수준의 감축 목표'를 설정·제출(매 5년) '전지구적 차원의 이행 점검'을 받아야 함
- 우리나라는 '30년 감축목표(BAU 대비 37%)의 달성을 위해 쉰정부적 노력이 필요함에 따라 총력적 기후변화 대응체제로 전환
 - 10대 기후기술 개발, 탄소자원화 전략 마련, 청정에너지 R&D 투자 확대 등 온실가스 감축기술 R&D 강화 포함
- 그간, 정부는 온실가스 배출 감축 및 처리와 기후변화 영향을 최소화하기 위한 기후기술 R&D 정책을 지속 추진
 - '08년 범부처 최상위 R&D 계획인 「기후변화 대응 국가연구개발 중장기 마스터플랜」 수립(국가과학기술위원회)
 - 이후 '10년 CCS추진계획, '14년~'15년 기후기술 핵심기술개발 전략, '16년 탄소자원화 전략 등 환경변화에 따라 전략 구체화 추진
- 철강·석유화학·조선 등 주력산업의 투자여력이 부족한 가운데, 신재생에너지 등 효율적 온실가스 감축수단의 보급·확산에 애로
 - 국내 산업공정은 이미 높은 수준의 에너지 효율을 달성하고 있고 배출권 거래 시장이 경직되어 있어 추가 감축량 확보에 어려움 호소*
 - ※ '15.1월 온실가스 배출권 할당 시 철강업계는 3년간 3,600만톤이 부족하여 향후 온실가스 초과 배출로 인한 과징금(1톤당 약 3만원)이 1조원에 이를 것으로 추정
 - 국내 신재생에너지 발전은 지리적 특성(좁은 국토, 기후의 불규칙성), 낮은 전기요금 및 단일 전력체계 등으로 인해 확산에 애로
- 어려운 온실가스 감축 여건을 극복하고 새로운 기후산업 창출을 위해서는 한국의 강점인 과학기술 역량을 적극 활용할 필요
 - 한국은 기후기술의 요소기술인 NT, BT, ICT 등에 대한 연구 역량이 우수하고 태양광* 및 ICT와 결합된 에너지 효율화는 세계적 수준
 - ※ '06~'11년간 태양광 분야의 국제 특허수는 LG가 1,108개로 1위(WIPO, 2014)
 - ※ '08년 이후 기후기술에 대한 지속적인 투자로 최고 기술보유국 대비 평균 78.5% 수준의 기술력 확보('16년 기준, KISTEP)

□ 사업 목적

- 기후변화 위기에 대응하여 온실가스 저감·자원화 및 기후변화 적응 분야에서 세계 선도적 원천기술 확보 및 미래 성장동력 창출 지원

- 사업 목적 달성을 위해 기후변화대응기술개발을 통한 성장동력 확충을 목표로 추진
 - (탄소저감) 온실가스 감축효과가 큰 기술분야에 대한 지원을 통해 경쟁력 있는 기초·원천기술 및 에너지·환경분야의 세계 선도적 원천기술을 확보
 - (탄소자원화) 온실가스·부생가스 등 탄소를 자원으로 활용하여 원료 및 화학제품을 생산하는 핵심기술 확보 및 기술 혁신형 산업 생태계 조성을 통해 온실가스를 감축 및 경제적 가치 창출
 - (기반기술 연구 및 기후 협력) 기후변화 영향에 대한 취약성을 저감시키고 저항력을 강화시키는데 도움이 되기 위하여 기후변화 위험관리를 위한 정책 수립·시행과 사회·경제적으로 기후변화에 적응하여 안정적인 국민 삶 유지를 위한 기반기술 확보

<표 II-3> 사업수요와 목적의 논리적 전개

사업 수요	· (탄소저감 분야) 태양전지, 연료전지, 바이오에너지, 이차전지, 전력 IT, CCS 등 6대 핵심 기술 개발 · (C1가스리파이너리) 석유대비 저렴한 C1가스로 석유기반 화학소재 및 수송용 연료를 대체 생산할 수 있는 핵심 기술(바이오 및 화학 촉매, 리파이너리) 개발 · (차세대 탄소자원화) 화석원료, 폐기물 등에서 발생하는 온실가스를 석유/석탄 대체자원으로 활용하여 화학소재 및 연료를 생산하는 핵심 원천 기술 개발 · (기반기술) 통합기후예측 모델 개발, 통합수처리 기술 개발 및 공통 플랫폼 기술개발 등 기후변화적응 및 기반기술 연구 지원 · (기후기술 글로벌 현지 사업화) 국내 기후 기술·산업의 글로벌 진출 및 국가 온실가스 감축목
↓	
사업 목적	· 신성장동력 확보를 위한 상용화 기술개발 · 혁신적 온실가스 감축 기술의 조기 확보 · 기후변화 과학연구 지원
↓	
전략 목표	· 2030년 선진국 수준의 기술경쟁력 확보 · 2050년 신기술에 의한 온실가스 저감 잠재량 2.5억 CO₂톤 확보
↓	
비전	· 지속가능한 국가성장 및 저탄소사회 실현

참고: 기후변화대응 국가연구개발 중장기 마스터플랜('08.12)

(3) 사업 추진 근거

☐ 법적 근거

- 과학기술기본법 제16조의5(성장동력의 발굴·육성)
- 기초연구진흥 및 기술개발지원에 관한 법률 제14조 및 동법 시행령
- 저탄소 녹색성장 기본법 제26조 및 동법 시행령
- 기후변화대응기술개발촉진법 제8조(기술개발사업의 추진)

☐ 상위 계획

- 「기후변화대응 종합기본계획」(08.9)
- 「기후변화대응 국가연구개발 중장기 마스터플랜」(‘08.12)
- 「녹색기술 연구개발 종합대책」(‘09.1)
- 기후변화 대응 핵심기술 개발전략(‘14.7)
- 「기후변화대응기술 확보 로드맵」(‘16.6, ‘17.12)

(4) 사업 추진 체계

☐ 사업 추진 체계

- 기후변화대응기술개발사업은 과학기술정보통신부 소관 과학기술분야 연구개발사업 처리규정을 준용하여, 추진위원회 및 전문기관을 운영
 - (과학기술정보통신부) 연구개발계획서 검토 및 조정, 연구개발수행의 관련 및 감독, 연구개발성과의 평가 및 후속조치 등 사업 추진계획 및 제도 수립 운영
 - (한국연구재단) 사업 추진계획 수립 및 수행, 사업의 기획·평가·관리
 - (연구개발기관) 기술개발 목표 달성을 위한 사업 수행 및 우수 연구성과 확보

□ 사업 추진 절차

- 기후변화대응기술개발사업의 연구과제는 외부 연구자가 수행하는 용역연구과제로 과제별 목적 및 특성에 부합하는 최적의 연구수행 주체들이 연구과제를 수행하도록 함

<표 II-4> 기후변대응기술개발사업 추진절차

추진 절차	주요 내용
계획 수립	사업추진 기본방향 수립 사업별 예산 및 연구개발방향 설정 등
↓	
과제공모 및 선정	과학기술정보통신부 : 공고(안) 확정 및 공고 • 전문기관 : 사전검토 → 전문가 평가 → 전문기관 평가 • 기후변화대응사업 추진위원회 : 심의.의결
↓	
협약	총괄협약 : 과학기술정보통신부 ↔ 전문기관 • 과제협약 : 전문기관 ↔ 연구기관
↓	
연구비 지급	과학기술정보통신부 → 전문기관 → 연구기관 • 연구비 교부의뢰 및 과제별 연구비 지급
↓	
진도관리	• 연구수행결과를 평가하여 계속지원여부 결정
↓	
결과평가	• 공개발표회 개최(연구기관) • 공개발표 시 전문가가 참여하여 결과평가 병행 실시(전문기관)
↓	
성과관리	• 연구개발결과의 활용실태를 점검(과기정통부, 전문기관 공동) • 우수연구개발 사례집 발간 / 배포 • 연구성과의 실용화 연계(연구기관)

2.2. 사업 내용

(1) 사업 추진 이력 및 내용

□ 1기(2009~2014년) : 기후변화대응 정책 본격화에 따른 R&D 투자 확대

- 기후변화대응기술개발사업은 기후변화 대응을 위한 기초연구 강화를 통하여 미래 신성장 동력을 창출하고 「저탄소 녹색성장」을 견인하는 것을 목적으로 2009년 신규과제 공모를 시작
 - 태양광, 바이오에너지, 연료전지, 에너지저장, 통합 기후예측시스템 개발 분야 등을 개별 과제 단위로 지원
- 2011년부터 Korea CCS 2020 사업 착수, 2012년 기후변화대응기술개발사업에 편입
- 2013년부터 미래유망 SEED기술, 미래유망 도약기술, 연구기반 구축, Korea CCS2020, 사업 관리 등 5개 분야로 지원 분야를 체계화

<표 II-5> 기후변화대응기술개발사업 세부사업 체계 (2013~2014년)

구분	사업목적	지원방식
미래유망SEED 기술개발	태양전지, 이차전지, 연료전지, 바이오에너지, 친환경소재 등 에너지·환경 분야 기초원천기술개발 지원	Bottom-up
미래유망도약 기술개발	인공광합성, 차세대 이차전지, 통합기후예측, 바이오피파이너리, 통합 수 처리 등 에너지·환경 분야 원천기술개발 지원	Top-down
연구기반구축	온실가스 통합관리시스템 구축 및 연구성과 확산 등을 위한 연구기반 구축 과제 지원	Top-down
Korea CCS2020	Korea CCS2020-대량배출원에서 배출되는 CO ₂ 를 포집하여 처리할 수 있는 세계 최고 수준의 핵심원천기술 확보를 위하여 포집·저장·전환-R&D기반조성 지원	Top-down
사업관리	전문기관 기획·심사·평가비	-

□ 2기(2015~2020년) : CTR에 따라 사업구조를 개편하고 분야별 지원규모를 확대하여 기후변화정책 이행을 밀착 지원

- 기후변화대응기술개발사업은 2015년부터 「기후변화대응기술 확보 로드맵(CTR)」 체계에 맞춰 3개 분야(탄소저감, 탄소자원화, 기후변화) 형태로 사업구조를 개편
 - 탄소저감 분야 : 태양전지, 연료전지, 바이오에너지, CCS 등
 - 탄소자원화 분야 : 지구온난화대응 에너지·환경 원천기술개발, 차세대 탄소자원화, C1가스리파이너리
 - 기후변화 : 기반기술 연구
- 단위과제 중심 지원에서 총괄·사업단과제 중심 지원으로 전환하여 과제별 지원 규모 대폭 상향

<표 Ⅱ-6> 기후변화대응기술개발사업 세부사업 체계 (2015~2020년)

분야	내역사업	주요 내용
탄소저감	태양전지	실리콘 태양전지의 경제적·기술적 한계극복을 위한 비실리콘 차세대 원천기술 개발 지원
	연료전지	연료전지 가격경쟁력 확보 및 상용기술의 한계 극복을 위한 차세대 연료전지 원천기술 개발 지원
	바이오에너지	인공광합성, 바이오리파이너리, 바이오매스-원유 리파이너리지원
	이차전지	대용량 충전 시스템 개발, 쾌속 충전 EV용 이차전지 개발 등 차세대 이차전지 개발 지원
	CCS	이산화탄소 포집, 저장, 전환 원천기술 개발
	다부처공동연구	신재생 하이브리드 이용 미래에너지 저장 기술 개발
탄소 자원화	지구온난화대응 에너지환경원천기술개발	태양전지 및 차세대 수소에너지 원천기술개발
	차세대 탄소자원화	부생가스·탄소폐자원 전환, CO2 전환의 차세대 혁신형 기술 개발 지원
	C1가스리파이너리	C1 바이오촉매와 C1 화학촉매 분야의 핵심 촉매 개발, C1 리파이너리 분야의 핵심소재 개발
기후변화	기반기술연구	통합 기후예측, 통합 수처리 등 원천기술 개발 지원 등

- 3기(2021~2023년) : 정부 R&D투자 효율화 정책(계속사업 일몰)에 따른 사업 추진 갈무리
- 태양전지, 연료전지, 바이오에너지, 이차전지, 차세대탄소자원화, 기반기술연구, C1가스리파이너리, 에너지효율향상기술개발 등 8개 분야를 중심으로 사업 추진

<표 Ⅱ-7> 기후변화대응기술개발사업 세부내용 (2021~2023년)

구분	주요 내용
태양전지	도심형 및 이동기기용 태양전지 등에 적합한 기후산업 육성모델을 발굴, 이에 기반한 차세대 태양전지 원천기술 개발
연료전지	고체산화물 연료전지 등 에너지 다소비 지역에 적합한 기후산업 육성모델을 발굴, 이에 기반한 차세대 연료전지 원천기술 개발
바이오에너지	기존 기술 한계 극복을 위한 미활용·신규 바이오매스 확보 및 바이오매스를 연료화 하는 복합 전환·이용기술 개발
이차전지	대용량 충전 시스템, 쾌속 충전 EV용 이차전지 등에 적합한 육성모델을 발굴, 이에 기반한 차세대 이차전지 원천기술 개발
차세대 탄소자원화	부생가스·탄소폐자원 전환, CO2 전환(재생에너지 활용 및 유기성 폐자원)을 통한 화학원료·연료 생산 기술 개발
기반기술연구	해수 자원화를 위한 분리막 원천기술 개발, 기후변화대응 전략 플랫폼 구축, 미세먼지 원인규명 및 저감기술 개발·실증 등 기반기술 연구
C1가스 리파이너리	C1가스(CO, CH4) 전환용 바이오촉매 및 화학촉매 원천기술 개발 및 리파이너리 기술 개발
에너지효율 향상기술개발	에너지 효율 향상 및 에너지관리시스템 핵심 원천기술 개발을 통해 최종 에너지 소비 부문(건물)의 에너지 효율 향상 추진

(2) 최근 3년(2021~2023년) 연차별 목표 및 내용

□ 연차 목표 및 내용

○ 2021년 총 32개, 2022년 13개, 2023년 12개 과제를 지원·운영

※ 사업 일몰('24)에 따라 지원 운영 대상 과제 수 자연 감소

<표 II-8> 기후변화대응기술개발사업 연차 목표 및 내용 (최근 3년)

구분		2021년	2022년	2023년
연차목표		32과제 지원 운영	13과제 지원 운영	12과제 지원 운영
핵심목표 및 내용	태양전지	계속 2과제, 종료 7과제	계속 1과제, 종료 1과제	계속 1과제, 종료 1과제
	연료전지	계속 3과제, 종료 1과제	계속 2과제, 종료 1과제	계속 1과제, 종료 1과제
	바이오에너지	계속 2과제, 종료 4과제	계속 2과제	계속 2과제
	이차전지	계속 1과제, 종료 1과제	종료 1과제	종료 1과제
	C1가스리파이 너리	계속 1과제	계속 1과제	계속 1과제
	에너지효율향 상	신규 4과제	계속 4과제	종료 4과제
	차세대탄소자 원화	종료 1과제	-	-
	기반기술연구	종료 4과제	-	-

<표 II-9> 기후변화대응기술개발사업 연차별 추진 로드맵 (최근 3년)

구분	2021년	2022년	2023년	2024년
태양전지	도심 분산전원용 고성능 플렉서블 태양전지 원천기술개발			
	이동기기 자가전원용 태양광 발전 기술개발			
	도시생활구조물 활용을 위한 차세대 태양전지 원천기술개발			
	생활수용성 확대를 위한 건물 적용 단일접합 태양전지 원천기술개발			
연료전지	건물에너지 네트워크용 차세대 연료전지 핵심원천기술개발			
	백업전원분야 활용을 위한 저가형 차세대 연료전지 원천기술개발			
	온사이트 수소충전소를 위한 광화학/광전기화학 물분해 수소생산 원천기술개발			
	단주기 전력 변동성 대응 수소연료전지 원천기술개발			
바이오에너지	바이오리파이너리를 위한 미생물 시스템대사공학 원천기술 개발			
	바이오매스 유래 오일 기반 화학원료 및 수송용 연료 제조기술 개발			
	폐바이오매스를 이용한 zero-waste 바이오 리파이너리 기술 개발			
	팜유잔사물 유래 바이오가스 에너지화 기술 개발			
	바이오매스 유래 윤활유급 화학제품 제조를 위한 바이오-화학 융합 원천기술 개발			
	나무 열분해오일로부터 바이오항공유 생산 원천기술 개발			
이차전지	대용량 충전 시스템용 고안전성 전고체전지 기술개발			
	전기자동차용 차세대 리튬금속 이차전지 핵심원천기술개발			
에너지효율향상	친환경 공기 냉매를 이용한 준등온 압축식 냉방 시스템 핵심기술개발			
	건물 에너지 효율 향상용 에너지하베스팅 기술을 적용한 초소형 센서 통합 모듈 원천기술개발			
	저압(LV)네트워크 최적 운영을 위한 분산자원 건전성 관리 플랫폼 개발			
	전력 및 데이터 제공이 가능한 건물용 DC 나노 전력그리드 시스템 개발			
차세대탄소자원화	차세대 탄소자원화 핵심기술개발			
C1가스리파이너리	(C1바이오촉매) 기존 석유기반 화학제품을 대체 생산 C1전환 세계 최고 성능 바이오촉매 (C1화학촉매) 세계 최고 C1 전환 화학 촉매 확보 및 C1 가스 전환 촉매 시스템 구현 (C1리파이너리) 기술경제적 타당성 확보된 C1전환 리파이너리 공정기술 구현			
기반기술연구	저 에너지 소모형 염분차발전-해수담수화 하이브리드 공정용 분리막 및 시스템 핵심기술 개발			
	생활밀착형 VOCs 피해 저감을 위한 선진형 핵심기술 개발			
	비도로 이동 오염원 및 소각장 배출 미세먼지 저감기술 개발·실증연구			
	현장 맞춤형 발생원별 미세먼지 원인규명 고도화			

2.3. 성과목표 및 지표

(1) 성과목표체계

<표 Ⅱ-10> 기후변화대응기술개발사업 성과계획

구분	주요 내용
사업유형	연구개발-기초연구
사업 전략목표	세계적 수준의 에너지·환경 분야 원천기술 개발을 통해 기후변화 문제해결 기반 마련 및 국가 신 성장 동력 확보
성과목표	기후변화대응(신재생에너지 및 C1리파이너리)분야 세계 최고 수준 원천기술 개발

<표 Ⅱ-11> 기후변화대응기술개발사업 단계별 성과목표

단계(평가주기)	1단계	기간	2021~2024
단계별 성과목표			
성과목표-1	가중치	설정 근거	관련 내역사업명
기후변화대응 (신재생에너지 및 C1리파이너리)분야 세계 최고 수준 원천기술 개발	1.0	세부사업 내 내역사업별 기술개발 지원 로드맵	태양전지, 연료전지, 바이오에너지, 이차전지, C1가스리파이너리, 에너지효율향 차세대 탄소자원화, 기반기술연구

(2) 성과지표

□ 성과지표 구성

- 기후변화대응기술개발사업의 성과지표는 세부 기술별 핵심지표 5개를 포함한 총 7개의 성과지표로 구성
 - 성과지표는 'SCI 논문의 표준화된 순위보정 영향력 지수(mrnIF)', '기술 이전 건수', '세부 기술별 핵심지표'로 구분되며,
 - 세부 기술별 핵심지표는 'C1가스 전환 유기산 부피 농도', '유기태양전지 모듈 효율', 'SOFC 중저온영역 초고성능 셀 성능(최대출력)', '열분해오일로부터 탈산소연료 생산', '나노그리드 전력/통신 전송용량' 등 5개 성과지표를 포함하고 있음

<표 II-12> 기후변화대응기술개발사업 성과지표

성과목표-1	가중치	성과지표명		지표 유형	설정 사유
기후변화대응 (신재생에너지 및 C1리파이너리)분야 세계 최고 수준 원천기술 개발	1.0	SCI 논문의 표준화된 순위보정 영향력 지수 (mrnIF)		질	원천기술 창출의 기반이 되는 우수 논문(과학적 성과) 등록 관련 지표 설정
		기술 이전 건수		양	원천기술 창출의 활용 기반을 측정하는 지표로 '기술 이전'을 성과지표로 설정
		세부 기술별 핵심 지표	C1가스 전환 유기산 부피 농도	질	C1가스리파이너리분야 세계 최고 수준 원천기술 창출 기반이 되는 대표기술로 C1가스 전환 유기산 부피농도를 성과지표로 설정
			유기태양전지 모듈 효율	질	태양전지분야 세계 최고 수준 원천기술 창출 기반이 되는 대표기술로 유기태양전지 모듈 효율을 성과지표로 설정
			SOFC 중저온영역 초고성능 셀 성능(최대출력)	질	연료전지분야 세계 최고 수준 원천기술 창출 기반이 되는 대표기술로 중저온영역(700℃ 이하) 초고성능 셀 성능으로 최대출력을 성과지표로 설정
			열분해오일로부터 탈산소연료 생산	질	바이오에너지분야 세계 최고 수준 원천기술 창출 기반이 되는 대표기술로 열분해오일로부터 탈산소연료 생산탄소 회수율을 성과지표로 설정
			나노그리드 전력/통신 전송용량	질	에너지효율향상분야 최고 수준 원천기술 창출 기반이 되는 대표기술로 나노전력그리드 시스템 전력/통신 전송용량을 성과지표로 설정

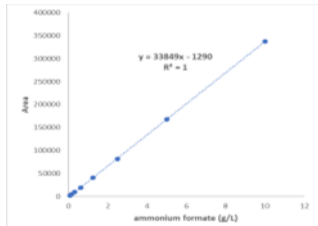
□ 성과지표 목표 및 목표치 설정 근거

<표 II-13> 기후변화대응기술개발사업 성과지표 목표 및 설정 근거

성과지표명	단위	목표치			목표치 설정 근거
		2021	2022	2023	
SCI 논문의 표준화된 순위보정 영향력 지수 (mrnIF)	-	82.1	82.1	82.1	2020년 주요 R&D사업 SCI 평균(69.57)을 고려할 때 본 사업 최근 3년('18-'20) 실적이 매우 높은 수치이므로 해당 수준('20년 기준 82.13) 유지를 지속하도록 목표치 설정
기술 이전 건수	건	5	5	5	본 사업의 성격(기초응용연구)과 '11-'20년 기술 이전 평균실적(5건)을 종합 고려하여 목표치 설정
C1가스 전환 유기산 부피 농도	mole /L	0.5	0.7	1	세계 최고수준의 기술 확보로 상용화가 진행된 Lanzatech Inc.의 에탄올 생산 성능과 비교하여 유기산 농도 목표 설정하고, 생물전환 공정으로 상용화가 진행된 에탄올의 경제성을 고려하여 유기산 부피 농도 목표 설정 : 유기산의 농도 > 1 mole/L 설정근거 : 세계 최고(세계 최초) 성능지표
유기태양전지 모듈 효율	%	-	14	15	유기태양전지 단위소자 세계 최고 효율은 18.2%로, 본 연구단에서 제시한 단위소자 효율 20%는 세계 최고 수준임. 최근 대만 National Chiao Tung University, 한국화학연구원 등 여러 연구 기관에서 Cell to module 제작시, 모듈 패터닝에 의한 유요면적 감소(geometrical fill factor~90%), 대면적화로 인한 필름 균일도 감소 및 편향 증가 등의 원인으로 인해 20% 이상의 효율 감소가 발생한다는 연구 결과를 보고하고 있으므로, 모듈 효율 목표를 단위소자 대비 20% 감소한 16%로 설정 * 유기태양전지 모듈 효율 측정을 위한 요소 기술 및 시스템 개발로 성과지표 측정이 가능한 시점인 2022년부터 목표치 설정
SOFC 중저온영역 초고성능 셀 성능(최대출력)	W/ cm2	1	1.5	2.2	연료전지 SOFC 주요 요소기술로써 최근 발표된 지르코니아 후막 기반의 고성능 SOFC 셀은 700oC에서 1.5-2 W/cm2 정도의 최대출력임이 확인 된 바, 대면적 셀에서 고성능 구현이 아직 보고된바 없음을 고려하여 목표치로 설정(전극 활성면적 1cm2)
열분해오일로부터 탈산소연료 생산	%	-	-	60	석유 대체 연료 생산을 위해 산소 함량 감소 및 수소화 증가가 필요함. 항공유의 경우 불포화 탄화수소의 농도를 감소시켜야 함. 열분해오일 유래 바이오항공유에 대한 표준이 없으므로, 열분해오일 유래 탈산소 바이오연료 관련 세계 최고 수준 결과를 활용함. (PNNL 벤치 규모 수첨탈산소 결과 : O/C = 0.0018-0.0027 (mol/mol), H/C = 1.73-1.94 (mol/mol), Energy Fuels 2012, 26, 3891-3896.)
나노그리드 전력/통신 전송용량	W/ Line / Gbps	-	-	100 /10	에너지효율향상분야 나노그리드 시스템 설계 기술 DC기반 전력 및 데이터 동시 전송이 가능한 시스템(전력, 통신, 보안 등) 아키텍처 및 표준안 개발에 따른 성과지표로 전기 내선 규정의 전선 공장 기준 평가(10m 이상, 전압 강하율 정의) 현행 세계 기술표준 규격(Max. 100W/Line, 20 Gbps) 이상을 목표치로 설정 * 21-22년은 전력/통신 전송용량 측정을 위한 설비 구축기간으로 성과지표 측정이 가능한 2023년에 대해 목표치를 설정

□ 성과지표 측정 방법

<표 II-14> 기후변화대응기술개발사업 성과지표 측정방법

성과지표명	측정산식 및 방법, 시기	자료출처																				
SCI 논문의 표준화된 순위보정 영향력 지수 (mrnIF)	○ 측정산식 : 논문 건당 표준화된 순위보정 영향력 지수 산술평균 ○ 측정방법 : 연구재단 성과관리시스템 및 NTIS성과 조사 ○ 측정시기 : 연차종료 시점(매년 12월말)	기후변화대응 기술개발사업 ERND 및 NTIS 성과 자료																				
기술 이전 건수	○ 측정산식 : 기술실시계약 건수 ○ 측정방법 : 연구재단 성과관리시스템 및 NTIS성과 조사 ○ 측정시기 : 연차종료 시점(매년 12월말)	기후변화대응 기술개발사업 ERND 및 NTIS 성과 자료																				
C1가스 전환 유기산 부피 농도	○ 측정산식 : 실험적 측정(측정대상 : 포름산암모늄) ○ 측정방법 : 고성능 액체크로마토그래피(HPLC)에 의한 측정 - HPLC 측정 조건 - 사용 기기: HPLC (High performance Liquid Chromatography) - 분석 컬럼: 유기산 분석용 이온교환 컬럼 - 이동상: 묽은 황산 용액 - 분석 방법 - 표준품 시약을 이용한 HPLC 측정 (외부표준법 사용) - 순수한 표준품 시약 (포름산암모늄)을 농도별로 희석 - 각 농도의 표준품 시액을 HPLC에 정확한 양 주입 후 얻은 피크의 넓이 (area)를 농도에 따라 표시하여 검량선을 만들 (아래 검량선 예시) <table border="1"><thead><tr><th colspan="2">Standard (g/L)</th></tr><tr><th>g/L</th><th>area</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.078125</td><td>2181</td></tr><tr><td>0.15625</td><td>4704</td></tr><tr><td>0.3125</td><td>9636</td></tr><tr><td>0.625</td><td>19598</td></tr><tr><td>1.25</td><td>40503</td></tr><tr><td>2.5</td><td>81627</td></tr><tr><td>5</td><td>168217</td></tr><tr><td>10</td><td>337546</td></tr></tbody></table>  - LDG로부터 생산된 포름산암모늄의 정량분석 - 일정 간격을 두고 포집한 반응액을 이용하여 2.1에서 설명한 방법과 동일한 조건으로 HPLC를 측정함 - 반응액 내의 포름산암모늄의 피크넓이를 측정한 후 검량선으로부터 시료성분의 양을 계산함$x \text{ (g/L 포름산암모늄)} = (y+1290)/33849$ - 반응액 내 포름산암모늄의 피크넓이는 사용한 표준물질의 범위 내에 포함되어야 하며, 그 범위를 넘을 경우 측정하고자 하는 시료를 희석하여 범위 내에 있도록 하여 신뢰도를 높임	Standard (g/L)		g/L	area	0.078125	2181	0.15625	4704	0.3125	9636	0.625	19598	1.25	40503	2.5	81627	5	168217	10	337546	기후변화대응 기술개발사업 ERND 및 NTIS 성과 자료 (연차 및 결과보고서)
Standard (g/L)																						
g/L	area																					
0.078125	2181																					
0.15625	4704																					
0.3125	9636																					
0.625	19598																					
1.25	40503																					
2.5	81627																					
5	168217																					
10	337546																					

성과지표명	측정산식 및 방법, 시기	자료출처
	2.3. 생산된 포름산암모늄의 mole/L 환산 - 포름산암모늄: 63.05 g/L = 1 mole/L > X mole/L = 반응액 내 포름산암모늄 농도 (g/L) / 63.05 g/L - 시료 변질을 방지하기 위해 실험종료 후 1주일 이내 ○ 측정시기 : 연차종료 시점(매년 12월)	
유기태양전지 모듈 효율	○ 측정산식 : 태양전지 효율 = (개방전압(V_{oc}) X 단락전류밀도(J_{sc})X충진률(FF))/입사된 빛에너지(P_{in}) : 100mW/cm²) ○ 측정방법 : 태양전지 전류-전압 곡선 측정법(시험성적서) - 솔라시뮬레이터 측정 장치를 이용해 200cm² 이상 모듈 면적에서 효율 측정 ○ 측정시기 : 연차종료 시점(매년 12~1월)	기후변화대응 기술개발사업 ERND 및 NTIS 성과 자료 (연차 및 결과보고서)
SOFC 중저온영역 초고성능 셀 성능(최대출력)	○ 측정산식 : (전류, A) x 셀 전압, V) /셀 면적(cm²) ○ 측정방법 : 부하(전기저항)를 변화시키면서 전기화학적 셀 전류-전압 측정 평가 ○ 측정시기 : 연차종료 시점(매년 1월 말)	기후변화대응 기술개발사업 ERND 및 NTIS 성과 자료 (연차 및 결과보고서)
열분해오일로부터 탈산소연료 생산	○ 측정산식 : (액상 생성물 탄소 몰수)/(출발 물질의 탄소 몰수) ○ 측정방법 : 원소분석법(시험성적서) - 벤치 규모 반응에서 (열분해오일 반응물의 건조 중량 대비) 탄소 회수율을 측정 ○ 측정시기 : 연차종료 시점(매년 1월말)	기후변화대응 기술개발사업 ERND 및 NTIS 성과 자료 (연차 및 결과보고서)
나노그리드 전력/통신 전송용량	○ 측정산식 : 실험적 측정 ○ 측정방법 - 전력 전송용량(200W/Line) 정밀 전압/전류 측정기를 통해 개발한 에너지라우터-에너지라우터 간 선로의 전력 전송 측정(오차 ±0.1% 이하 측정기 사용) - 통신 전송용량(20Gbps) 범용 통신 속도 측정 프로그램(benchmark software)을 통해 개발한 에너지라우터-에너지라우터 간 통신 전송용량 측정 ○ 측정시기 : 연차종료 시점(23.2월 및 24.6월)	기후변화대응 기술개발사업 ERND 및 NTIS 성과 자료 (연차 및 결과보고서)

3. 성과조사 결과

3.1 투입성과

(1) 지원과제

가. 최근 3년 지원과제 현황

☐ 전체 지원과제 수

- 2021~2023년까지, 최근 3년의 분석 대상기간 동안 기후변화대응기술개발사업에서 총 28개의 총괄과제와 3개의 사업단 과제가 추진되었으며, 세부과제와 단위과제 기준으로는 총 194개의 과제가 추진됨
- 총 31개(총괄과제 28개, 사업단과제 3개)의 추진과제 중 4개(총괄과제 4개)는 2021년 신규로 추진

<표 II-15> 최근 3년(2021~2023) 지원과제 수

구분		최상위과제 기준				세부과제 기준			
		21	22	23	합계	21	22	23	합계
전체	합계	31	13	11	55	194	94	77	365
	총괄	28	11	10	49	122	49	43	214
	사업단	3	2	1	6	72	45	34	151
신규	합계	4			4	15			15
	총괄	4			4	15			15
	사업단								
계속	합계	27	13	11	51	179	94	77	350
	총괄	24	11	10	45	107	49	43	199
	사업단	3	2	1	6	72	45	34	151

나. 전체 추진기간(2009~2023년) 지원과제 현황

☐ 전체 지원과제 수

- 기후변화대응기술개발사업은 15년간(2009~2023년) 최상위과제 기준 총 526개 과제를 지원
 - 신규과제 기준으로는 총 120개(총괄과제 72개, 사업단과제 4개, 단위과제 44개) 과제를 지원

<표 Ⅱ-16> 사업 전체 기간(2009~2023) 지원과제 수 (최상위과제 단위)

구분		09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	합계
전체	합계	34	42	41	47	42	44	29	24	38	46	48	36	31	13	11	526
	총괄	13	21	22	25	24	24	27	21	34	34	39	31	28	11	10	364
	사업단			1	1	1	1	2	2	3	4	4	4	3	2	1	29
	단위	21	21	18	21	17	19		1	1	8	5	1				133
신규	합계	34	8	4	7	2	3	13	4	15	11	10	5	4			120
	총괄	13	8	2	3	1		12	4	13	3	5	4	4			72
	사업단			1				1		1	1						4
	단위	21		1	4	1	3			1	7	5	1				44
계속	합계		34	37	40	40	41	16	20	23	35	38	31	27	13	11	406
	총괄		13	20	22	23	24	15	17	21	31	34	27	24	11	10	292
	사업단				1	1	1	1	2	2	3	4	4	3	2	1	25
	단위		21	17	17	16	16		1		1						89

- 세부과제 기준으로는 총 2,565개 과제를 지원
 - 신규과제 기준으로는 총 425(총괄과제 294개, 사업단과제 87개, 단위과제 44개) 과제를 지원

<표 Ⅱ-17> 사업 전체 기간(2009~2023) 중 신규 지원과제 수 (세부과제 단위)

구분		09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	합계
전체	합계	74	107	124	157	165	171	179	183	248	264	282	246	194	94	77	2,565
	총괄-세부	53	86	85	96	93	93	95	77	136	131	155	138	122	49	43	1,452
	사업단-세부 ¹⁾			21	40	55	59	84	105	111	125	122	107	72	45	34	980
	단위과제	21	21	18	21	17	19		1	1	8	5	1				133
신규	합계	74	33	27	15	3	3	61	18	91	34	29	22	15			425
	총괄-세부	53	33	5	11	2		37	18	60	15	24	21	15			294
	사업단-세부 ¹⁾			21				24		30	12						87
	단위과제	21		1	4	1	3			1	7	5	1				44
계속	합계		74	97	142	162	168	118	165	157	230	253	224	179	94	77	2,140
	총괄-세부		53	80	85	91	93	58	59	76	116	131	117	107	49	43	1,158
	사업단-세부 ¹⁾				40	55	59	60	105	81	113	122	107	72	45	34	893
	단위과제		21	17	17	16	16		1		1						89

1) 사업단과제 내 세부과제 = 사업단과제 내 총괄과제의 세부과제 + 사업단과제 내 단위과제

☐

□ 분야별 신규 과제지원 수

- (최상위 과제) 태양전지 분야 27개, 연료전지 18개, 바이오에너지 17개, 이차전지 13개, Korea CCS 2020 2개, 차세대수소에너지 1개, C1가스리파이너리 1개, 차세대탄소자원화 1개, 에너지효율향상 4개, 기후기술현지화지원 14개, 기반기술 연구 12개, 다부처공동연구 1개 과제를 지원
- 이차전지, Korea CCS 2020, C1가스리파이너리, 차세대탄소자원화 분야는 사업단 형태로 지원

<표 Ⅱ-18> 사업 전체 기간(2009~2023) 신규 지원과제 수 (최상위과제 단위)

(단위 : 개)

구분	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	합계
1. 태양전지	11						7	2	5		1	1				27
- 총괄과제	4						7	2	5		1	1				20
- 단위과제	7															7
2. 연료전지	7						4	1	1	3	1	1				18
- 총괄과제	2						4	1	1	3	1	1				13
- 단위과제	5															5
3. 바이오에너지	10			1	1				3			2				17
- 총괄과제	4			1	1				3			2				11
- 단위과제	6															6
4. 이차전지	4	5	1	1					1	1						13
- 총괄과제	2	5	1	1					1							10
- 사업단과제										1						1
- 단위과제	2															2
5. Korea CCS 2020			1									1				2
- 사업단과제			1													1
- 총괄과제												1				1
6. 차세대수소에너지							1									1
- 총괄과제							1									1
7. C1가스리파이너리							1									1
- 사업단과제							1									1
8. 차세대탄소자원화									1							1
- 사업단과제									1							1
9. 에너지효율향상													4			4
- 총괄과제													4			4
10. 기후기술현지화지원									1	7	6					14
- 총괄과제									1		1					2
- 단위과제										7	5					12
11. 기반기술 연구	1	3	1	1		1			3		2					12
- 총괄과제	1	3	1	1					2		2					10
- 단위과제						1			1							2
12. 다부처 공동연구								1								1
- 총괄과제								1								1
13. 기타	1		1	4	1	2										9
- 단위과제	1		1	4	1	2										9
합계	34	8	4	7	2	3	13	4	15	11	10	5	4			120

- (세부과제) 태양전지 분야 72개, 연료전지 64개, 바이오에너지 49개, 이차전지 61개, Korea CCS 2020 22개, 차세대수소에너지 3개, C1가스리파이너리 24개, 차세대탄소자원화 30개, 에너지효율향상 15개, 기후기술현지화지원 28개, 기반기술 연구 46개, 다부처공동연구 2개 과제를 지원

<표 Ⅱ-19> 사업 전체 기간(2009~2023) 신규 지원과제 수 (세부과제 단위)

(단위 : 개)

구분	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	합계
1. 태양전지	19						18	12	16		4	3				72
- 총괄 세부과제	12						18	12	16		4	3				65
- 단위과제	7															7
2. 연료전지	13						16	4	5	15	3	8				64
- 총괄 세부과제	8						16	4	5	15	3	8				59
- 단위과제	5															5
3. 바이오에너지	22			4	2				11			10				49
- 총괄 세부과제	16			4	2				11			10				43
- 단위과제	6															6
4. 이차전지	14	22	3	5					5	12						61
- 총괄 세부과제	12	22	3	5					5							47
- 사업단 세부과제										12						12
- 단위과제	2															2
5. Korea CCS 2020			21									1				22
- 사업단 세부과제			21													21
- 총괄과제												1				1
6. 차세대수소에너지							3									3
- 총괄 세부과제							3									3
7. C1가스리파이너리							24									24
- 사업단 세부과제							24									24
8. 차세대탄소자원화									30							30
- 사업단 세부과제									30							30
9. 에너지효율향상													15			15
- 총괄 세부과제													15			15
10. 기후기술현지화지원									12	7	9					28
- 총괄 세부과제									12		4					16
- 단위과제										7	5					12
11. 기반기술 연구	5	11	2	2		1			12		13					46
- 총괄 세부과제	5	11	2	2					11		13					44
- 단위과제						1			1							2
12. 다부처 공동연구								2								2
- 총괄 세부과제								2								2
13. 기타	1		1	4	1	2										9
- 단위과제	1		1	4	1	2										9
합계	74	33	27	15	3	3	61	18	91	34	29	22	15			425

(2) 연구비

가. 최근 3년 연구비 현황

□ 연구비 투입 현황

- 2021~2023년까지 최근 3년간 기후변화대응기술개발사업에 총 1,875억원이 투입되었으며, 사업 일몰에 따른 신규과제 미지원으로 연간 투입액이 2021년 1,016억원에서 2023년 385억원으로 자연 감소함
 - 에너지효율향상 분야의 경우 2021년 4개 과제를 신규 지원함에 따라 연간 연구비가 연평균 15%씩 증가
- 3년 추진기간 동안 C1가스리파이너리 분야에 가장 많은 연구비(전체 연구비의 32%)가 투입되었으며, 이 외 연료전지(14%), 기반기술연구(12%), 태양전지(12%), 바이오에너지(11%) 순으로 투입됨

<표 II-20> 최근 3년간(2021~2023) 연구비

(단위 : 백만원, %)

구분	21	22	23	합계	증감율	비중
기후변화대응기술개발사업	101,664	47,316	38,539	187,519	-38%	100
- 태양전지	13,798	3,890	4,334	22,022	-44%	12
- 연료전지	11,391	8,127	6,635	26,153	-24%	14
- 바이오에너지	10,978	4,666	4,666	20,310	-35%	11
- 이차전지	7,756	5,833	-	13,589	-99%	7
- C1가스리파이너리	21,000	20,000	18,104	59,104	-7%	32
- 차세대탄소자원화	9,756	-	-	9,756	-99%	5
- 에너지효율향상	3,600	4,800	4,800	13,200	15%	7
- 기반기술연구	23,385	-	-	23,385	-99%	12

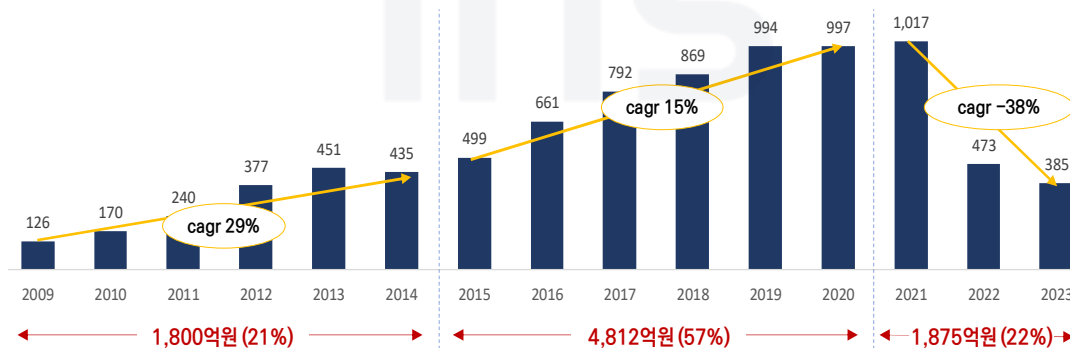
나. 전체 추진기간(2009~2023년) 연구비 현황

□ 연간 연구비 추이

- 2009~2023년까지 15년간 기후변화대응기술개발사업에 투입된 연구비는 총 8,487억원이며, 연간 연구비가 연평균 8.3%씩 증가되었음
 - (2009~2014년) 전체 연구비의 21%인 1,800억원을 투입, 연평균 증가율은 21%
 - (2015~2021년) 전체 연구비의 57%인 4,812억원을 투입, 연평균 증가율은 57%
 - (2021~2023년) 전체 연구비의 22%인 1,875억원을 투입, 연평균 증가율은 22%
- 전체 추진 기간의 연평균 연구비는 566억원이며, 2015~2020년 기간 동안의 연평균 연구비가 2009~2014년 기간 대비 2.7배 증가하였다가 2021~2023년 기간 다소 감소하였음
 - (2009~2014년) 연평균 연구비는 300억원
 - (2015~2021년) 연평균 연구비는 802억원
 - (2021~2023년) 연평균 연구비는 625억원

<표 II-21> 사업 전체 기간(2009~2023) 연간 연구비 추이

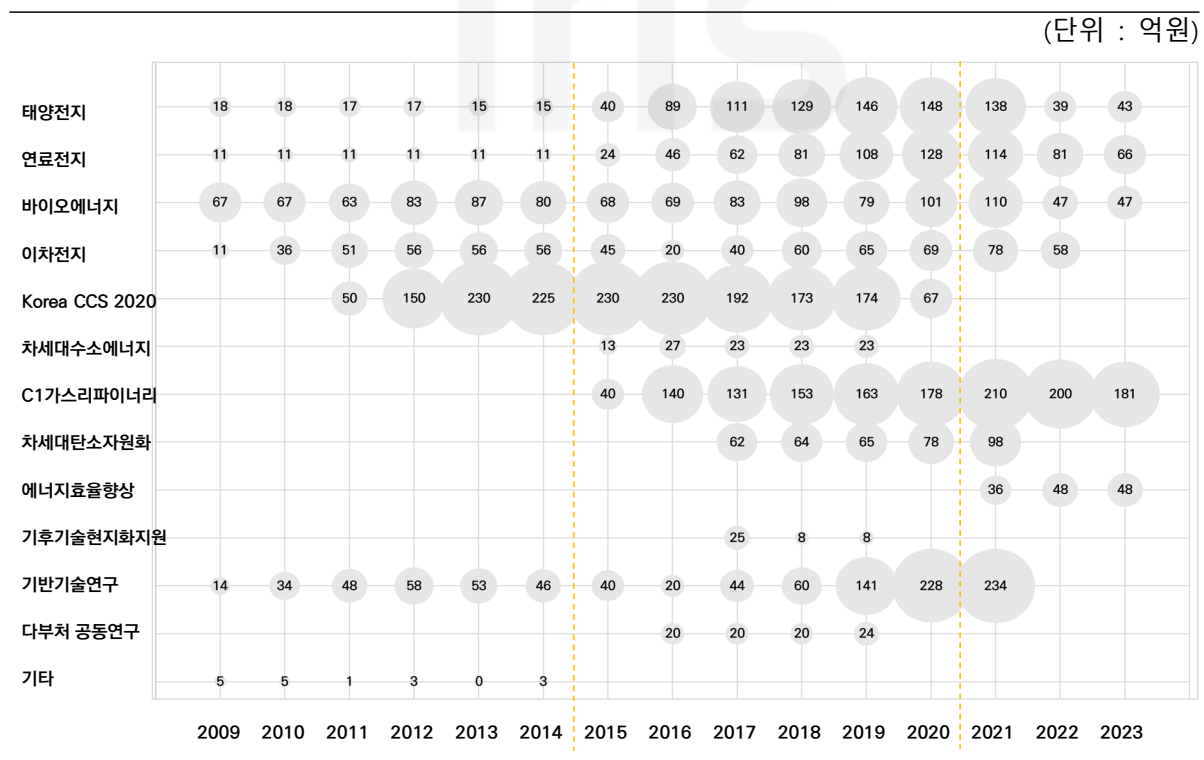
(단위 : 억원, %)



구분	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	합계	cagr
연간 연구비	126	170	240	377	451	435	499	661	792	869	994	997	1,017	473	385	8,487	8.3%
연평균 연구비	300						802						625			566	

□ 분야별 연구비 현황

- 분야별로는 KoreaCCS2020 분야에 전체 연구비의 20.3%(1,721억원)가 투입되었으며, 이 외 C1가스리파이너리(16.4%), 바이오에너지(13.5%), 기반기술연구(12.0%), 태양전지(11.6%) 순으로 투자되었음
- (태양전지) 2009~2023년까지 총 985억원 투입, 전체 연구비의 11.6%
- (연료전지) 2009~2023년까지 총 773억원 투입, 전체 연구비의 9.1%
- (바이오에너지) 2009~2023년까지 총 1,145억원 투입, 전체 연구비의 13.5%
- (이차전지) 2009~2022년까지 총 700억원을 투입, 전체 연구비의 8.3%
- (KoreaCCS2020) 2011~2020년까지 총 1,721억원 투입, 전체 연구비의 20.3%
- (차세대수소에너지) 2015~2019년까지 총 108억원 투입, 전체 연구비의 1.3%
- (C1가스리파이너리) 2015~2023년까지 총 1,396억원 투입, 전체 연구비의 16.4%
- (차세대탄소자원화) 2017~2021년까지 총 367억원 투입, 전체 연구비의 4.3%
- (에너지효율향상) 2021~2023년까지 총 132억원 투입, 전체 연구비의 1.6%
- (기후기술현지화지원) 2017~2019년까지 총 40억원 투입, 전체 연구비의 0.5%
- (기반기술연구) 2009~2021년까지 총 1,018억원 투입, 전체 연구비의 12.0%



[그림 Ⅱ-1] 사업 전체 기간(2009~2023) 분야별 연구비 현황

<표 Ⅱ-22> 사업 전체 기간(2009~2023) 분야별 연구비

(단위 : 억원, %)

구분	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	합계	비중 (%)
전체	126	170	240	377	451	435	499	661	792	869	994	997	1,017	473	385	8,487	100
태양전지	18	18	17	17	15	15	40	89	111	129	146	148	138	39	43	985	11.6
연료전지	11	11	11	11	11	11	24	46	62	81	108	128	114	81	66	773	9.1
바이오에너지	67	67	63	83	87	80	68	69	83	98	79	101	110	47	47	1,145	13.5
이차전지	11	36	51	56	56	56	45	20	40	60	65	69	78	58		700	8.3
Korea CCS2020			50	150	230	225	230	230	192	173	174	67				1,721	20.3
차세대수소에너지							13	27	23	23	23					108	1.3
C1가스리파이너리							40	140	131	153	163	178	210	200	181	1,396	16.4
차세대탄소자원화									62	64	65	78	98			367	4.3
에너지효율향상													36	48	48	132	1.6
기후기술현지화지원									25	8	8					40	0.5
기반기술연구	14	34	48	58	53	46	40	20	44	60	141	228	234			1,018	12.0
다부처공동연구								20	20	20	24					84	1.0
기타	5	5	1	3	0	3										17	0.2

<표 Ⅱ-23> 사업 전체 기간(2009~2023) 분야별 연구비 비중

(단위 : %)

구분	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
태양전지	15	11	7	5	3	3	8	14	14	15	15	15	14	8	11
연료전지	8	6	4	3	2	2	5	7	8	9	11	13	11	17	17
바이오에너지	53	39	26	22	19	18	14	10	10	11	8	10	11	10	12
이차전지	9	21	21	15	12	13	9	3	5	7	7	7	8	12	
Korea CCS2020			21	40	51	52	46	35	24	20	18	7			
차세대수소에너지							3	4	3	3	2				
C1가스리파이너리							8	21	17	18	16	18	21	42	47
차세대탄소자원화									8	7	7	8	10		
에너지효율향상													4	10	12
기후기술현지화지원									3	1	1				
기반기술연구	11	20	20	15	12	10	8	3	6	7	14	23	23		
다부처공동연구								3	3	2	2				
기타	4	3		1		1									
합계	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

3.2 산출성과

(1) 논문 (과학적 성과)

□ 전문 학술지 게재 (사업 전체 기간, 2009~2023)

- 2009년부터 2023년까지 사업 전체 기간 중 SCI급 학술지에 총 8,208건의 논문을 게재하였으며, 2020년에 1,015건으로 가장 많은 성과가 발생
- SCI 논문 성과는 2009년 1건을 시작으로 지속적으로 상승하여 2019년에는 993건으로 전년 대비 127%(213건) 크게 증가하였으며, 2020년에 1,015건으로 가장 많은 양적 성과를 창출
- 2020년 이후 매년 논문의 양적 성과가 크게 감소하였으며 2023년 309건을 기록
- 사업 전체 기간 중 국내 학술지 논문은 147건, 국외 학술지 논문은 8,061건으로 국외 학술지 논문이 98.2%의 압도적인 비중을 차지

<표 II-24> 사업 전체 기간(2009~2023) SCI급 학술지 게재 건수

(단위 : 건)

구분	'09	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23	합계
국내	0	3	16	18	15	18	8	10	9	10	13	18	5	3	1	147
국외	1	105	243	406	464	501	674	671	661	770	980	997	799	481	308	8,061
합계	1	108	259	424	479	519	682	681	670	780	993	1,015	804	484	309	8,208



[그림 II-2] 사업 전체 기간(2009~2023) SCI급 학술지 게재 건수 추이

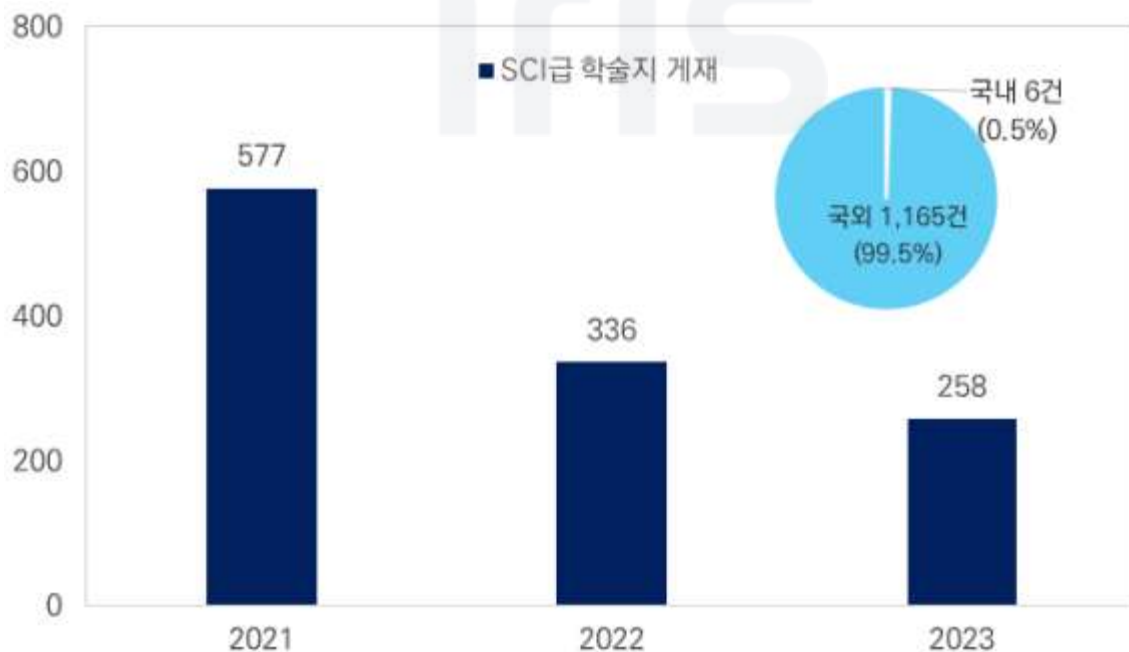
□ 전문 학술지 게재 (최근 3년, 2021~2023)

- 2021년부터 2023년까지 최근 3년간 SCI급 학술지에 총 1,171건의 논문을 게재하였으며, 2021년에 577건, 2022년 336건, 2023년 258건으로 논문수가 점차적으로 감소
- 본 사업이 일몰사업으로 지정됨에 따라 연구비가 2021년→2022년 53.5% 삭감, 2022년→2023년 18.5% 삭감되면서 사업의 성과 창출에 영향을 준 것으로 해석됨
- 최근 3년간 게재된 국내 학술지 논문은 6건(0.5%), 국외 학술지 논문은 1,165건(99.5%)으로 국외 학술지 논문을 중심으로 성과가 창출되었음

<표 II-25> 사업 전체 기간(2009~2023) SCI급 학술지 게재 건수

(단위 : 억원, 건)

구분	'21	'22	'23	합계	비중	CAGR
연구비	1019.14	473.16	385.39	1,877.7	-	△38.5%
과제수	194	94	77	365.0	-	△37.0%
국내	3	2	1	6	0.5%	△42.3%
국외	574	334	257	1,165	99.5%	△33.1%
합계	577	336	258	1,171	100.0%	△33.1%



[그림 II-3] 사업 전체 기간(2009~2023) SCI급 학술지 게재 건수 추이

□ 학술대회 성과

- 2009년부터 2023년까지 기후변화대응기술개발사업에서 발생한 국제학술대회 논문발표 성과는 총 15,752건으로, 2019년 2,030건을 기록하여 최대 성과가 발생
- 사업 전체 기간 동안 국제학술대회에서 총 1,702건의 초청강연을 진행

<표 Ⅱ-26> 사업 전체 기간(2009~2023) 국제학술대회 성과

(단위 : 건)

구분	'09	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23	합계
논문발표	115	369	520	1,171	1,175	1,372	1,430	1,493	1,479	1,932	2,030	789	788	576	513	15,752
초청강연	16	77	92	129	133	188	167	205	159	177	197	33	58	39	32	1,702



[그림 Ⅱ-4] 사업 전체 기간(2009~2023) 국제학술대회 성과 추이

□ 수상실적

- 기후변화대응기술개발사업에서 2009년부터 2023년까지 우수논문발표상, 학술대회논문상, 장관표창 등 수상실적은 총 1,260건으로 2019년 197건의 최다수상실적을 기록

<표 Ⅱ-27> 사업 전체 기간(2009~2023) 수상실적 성과

(단위 : 건)

구분	'09	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23	합계
수상실적	1	9	23	52	91	86	100	106	150	178	197	92	79	61	35	1,260

(2) 지식재산권 (기술적 성과)

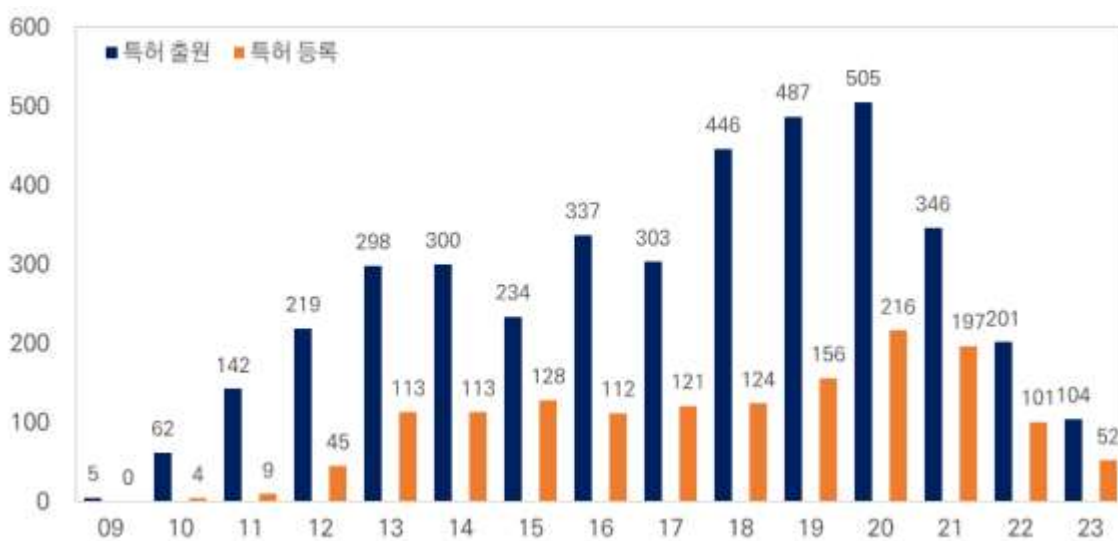
□ 특허 출원 및 등록 성과

- 2009년부터 2023년까지 특허성과(출원, 등록)는 총 5,480건 달성
 - 사업 전 기간(2009~2023) 동안 특허 출원은 총 3,989건, 특허 등록은 1,491건을 기록
 - 2015년과 2017년 특허성과가 전년 대비 소폭 감소하였으나, 2009년 출원특허 5건을 시작으로 2020년까지 전체적으로 상승하는 추이를 보임
 - 2020년에는 특허 출원 505건, 특허 등록 216건으로 총 721건의 최대 성과가 발생
- 출원 및 등록 특허 5,480건 중 국내 특허는 4,320건(78.8%), 해외 특허는 1,160건(21.2%)으로 국내 특허가 높은 비중을 차지

<표 II-28> 사업 전체 기간(2009~2023) 특허 성과

(단위 : 건)

구분		'09	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23	합계
출원	국내	5	48	109	158	213	236	171	260	244	348	385	389	272	143	82	3,063
	국외	0	14	33	61	85	64	63	77	59	98	102	116	74	58	22	926
	소계	5	62	142	219	298	300	234	337	303	446	487	505	346	201	104	3,989
등록	국내	0	4	8	39	92	95	107	97	99	101	129	188	177	87	34	1,257
	국외	0	0	1	6	21	18	21	15	22	23	27	28	20	14	18	234
	소계	0	4	9	45	113	113	128	112	121	124	156	216	197	101	52	1,491
총 합계		5	66	151	264	411	413	362	449	424	570	643	721	543	302	156	5,480



[그림 II-5] 사업 전체 기간(2009~2023) 특허 성과(출원, 등록) 추이

(3) 기술이전 (경제적 성과)

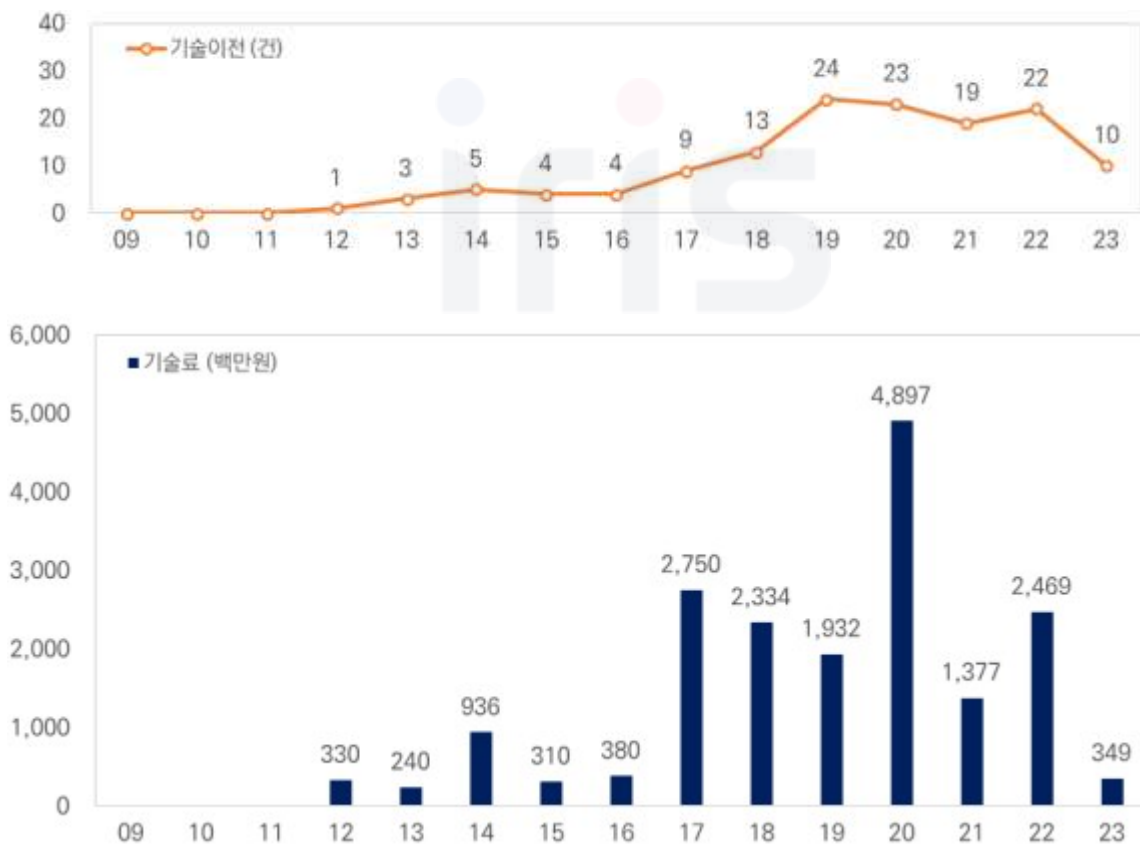
□ 기술이전 및 기술료 성과

- 기후변화대응기술개발사업은 2009년부터 2023년까지 총 137건의 기술이전의 성과를 기록
- 기술이전에 따른 기술료는 15년(2009~2023) 동안 총 18,304백만원을 달성하였으며, 2020년에는 4,897백만원의 최대 기술료가 발생

<표 II-29> 사업 전체 기간(2009~2023) 기술이전 성과

(단위 : 건, 백만원)

구분	'09	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23	합계
기술이전	0	0	0	1	3	5	4	4	9	13	24	23	19	22	10	137
기술료	0	0	0	330	240	936	310	380	2,750	2,334	1,932	4,897	1,377	2,469	349	18,304



[그림 II-6] 사업 전체 기간(2009~2023) 기술이전 및 기술료 성과 추이

(4) 기타성과 (사회적 성과)

□ 인력양성(학위배출)

- 기후변화대응기술개발사업을 통해 2009년부터 2023년까지 총 2,711명(연평균 180명)의 인력이 학위를 취득하였음
- 총 2,711명 중 여학생 957명(35.3%), 남학생 1,754명(64.7%)이 학위를 취득
- 학위유형으로는 석사학위 취득이 1,744명(64.3%)으로 가장 많았으며, 박사학위 취득이 810명(29.9%)으로 뒤를 이음
- 학과유형으로는 공학이 1,984명(73.2%), 이학이 710명(26.2%)으로 이공계열이 전체 학위배출 인원의 99.4%를 차지

<표 Ⅱ-30> 사업 전체 기간(2009~2023) 인력양성(학위배출) 성과

(단위 : 명)

구분		'09	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23	합계
성별	여성	1	12	28	62	102	76	118	81	96	100	80	82	44	39	36	957
	남성	3	21	66	115	153	178	197	176	157	144	173	152	95	70	54	1,754
	합계	4	33	94	177	255	254	315	257	253	244	253	234	139	109	90	2,711
학위	학사	0	3	3	3	5	10	16	7	12	20	18	13	8	9	5	132
	석사	3	27	68	126	197	175	210	166	159	141	146	132	80	63	51	1,744
	석사수료	0	0	0	2	6	1	1	0	1	1	0	0	0	2	0	14
	박사	1	3	23	46	44	66	88	84	81	77	89	89	51	35	33	810
	박사수료	0	0	0	0	3	2	0	0	0	5	0	0	0	0	0	10
	석박통합	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	합계	4	33	94	177	255	254	315	257	253	244	253	234	139	109	90	2,711
	학과	공학	3	23	67	131	176	180	234	178	179	170	193	179	108	86	77
이학		1	10	26	44	79	72	79	79	74	73	59	49	30	23	12	710
인문사회		0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
농림수산		0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	1	1	0	0	0	5
의약보건		0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
기타		0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	5	1	0	1	9
합계		4	33	94	177	255	254	315	257	253	244	253	234	139	109	90	2,711

□ 인력양성(연수지원)

- 사업 전체 기간(2009~2023) 동안 총 102명의 인력을 대상으로 연수를 지원
 - 연수 목적으로는 학술연수 79명(77.5%), 기술연수 23명(22.5%)을 지원
 - 연수 형태로는 교육훈련이 79명(77.5%)으로 가장 많았고, 그 외 학위과정, 박사 후 연수, 인턴십 등으로 지원

<표 Ⅱ-31> 사업 전체 기간(2009~2023) 인력양성(연수지원) 성과

(단위 : 명)

구분		'09	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23	합계
연수 목적	기술	0	1	0	0	5	0	0	1	2	10	1	0	0	3	0	23
	학술	0	0	2	15	2	0	4	8	14	8	14	5	3	4	0	79
	합계	0	1	2	15	7	0	4	9	16	18	15	5	3	7	0	102
연수 구분	학위 과정	0	0	0	4	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	7
	박사 후	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	2	1	0	0	0	6
	교육 훈련	0	1	2	9	5	0	3	9	14	17	11	1	0	7	0	79
	인턴	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	4
	기타	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	3	0	0	6
	합계	0	1	2	15	7	0	4	9	16	18	15	5	3	7	0	102

□ 언론보도

- 2009년부터 2023년까지 총 4,301건의 언론보도를 통해 동 사업의 기술개발 성과를 홍보

<표 Ⅱ-32> 사업 전체 기간(2009~2023) 언론보도 건수

(단위 : 건)

구분	'09	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23	합계
언론보도	0	11	14	48	260	247	396	297	561	716	719	457	446	107	22	4,301



[그림 Ⅱ-7] 언론보도 예시

4. 심층분석(적절성, 효율성, 효과성, 파급효과) 결과

4.1. 심층분석 기준

(1) 심층 분석 기준

□ 심층분석 항목 및 내용

- 기후변화대응기술개발사업의 성과분석을 위해 적절성, 효과성, 효율성, 체계성 네 가지 관점을 중점으로 분석을 수행함
- 기후변화대응기술개발사업의 적절성을 평가하기 위해 정부개입의 적절성, 상위계획과의 부합성, 타 사업과의 차별성 항목 분석
- 기후변화대응기술개발사업의 효과성을 평가하기 위해 성과 목표대비 달성도, 성과의 우수성 및 사업의 대표성과 항목 분석
- 기후변화대응기술개발사업의 효율성을 평가하기 위해 연구비 대비 논문 및 특허 효율성을 분석
- 기후변화대응기술개발사업의 체계성을 평가하기 위해 사업 목표와 세부 내용, 성과지표의 연계성, 기획-관리-평가의 적절성을 분석

<표 II-33> 심층분석 항목

관점	항목	내용
적절성	정부 지원 적절성	사업의 목적에 따라 성과목표 및 성과지표가 연계성을 갖도록 설정되어 있는가?
	사업추진체계의 적절성	사업의 기획, 집행, 성과관리, 평가 등의 추진 체계가 적절한가? * 환경변화에 대한 대응, 성과의 체계적 관리 여부 등
	예산 및 투자전략의 적절성	사업 목적 달성을 위해 투입이 필요한 곳에 적정 규모로 투입되었는가?
효과성	성과목표 달성도	사업의 핵심성과가 목표를 달성하였는가?
	연구성과 우수성	사업을 통해 발생된 성과가 질적으로 우수한가?
	대표성과 선정	사업으로 인해 대표성과가 발생했는가?
효율성	연구비 대비 논문 효율성	정부지원금 대비 논문 성과 창출 정도가 어떠한가?
	연구비 대비 특허 효율성	정부지원금 대비 특허성과 창출 정도가 어떠한가?

4.2. 사업추진의 적절성

(1) 정부 지원 적절성

□ 사업목표(전략목표)와 성과목표-성과지표간 연계성

- 기후변화대응기술개발사업의 전략적 목표와 연구 방향의 추진체계를 검토한 결과, 전략목표-성과목표-성과지표 간의 연계성을 갖고 있는 것으로 판단
 - 전략목표는 세계적 수준의 에너지·환경 분야 원천기술을 개발하는 것으로 제시하였고, 이의 성과목표를 신재생에너지 및 C1가스리파이너리분야 세계 최고 수준 원천기술 개발로 설정
 - 성과지표는 과학기술적 성과, 신재생에너지 및 C1가스리파이너리 기술별 성능 지표로 구성하고 세계 최고 수준의 목표치를 설정함으로써 전략목표-성과목표-성과지표간 높은 연계성을 갖도록 하였음
- ※ SCI 논문의 표준화된 순위보정 영향력 지수(mrnIF)는 사업일몰로 인한 지원과제수가 감소되는 상황에서도 기존 평가대상연도의 높은 실적 수준을 지속하도록 도전적으로 설정
- ※ 기술 이전 건수는 기초응용연구 성격을 갖는 동 사업에서 도출하기 쉽지 않은 도전적 성과지표이며, '11~'20년 기술이전 평균실적을 종합 고려하여 이를 유지하는 5건으로 목표치 설정
- ※ C1가스 전환 유기산 부피 농도, 유기태양전지 모듈 효율, SOFC 중저온영역 초고성능 셀 성능(최대출력), 열분해오일로부터 탈산소연료 생산 탄소회수율, 나노그리드 전력/통신 전송용량은 최근의 글로벌 기술개발 동향을 고려하여 세계 최고 수준의 기술적 성능을 달성토록 각각 목표치 설정

<표 II-34> 전략목표-성과목표-성과지표간 연계성

전략목표	세계적 수준의 에너지·환경 분야 원천기술 개발을 통해 기후변화 문제해결 기반 마련 및 국가 신성장 동력 확보
↓	
성과목표	기후변화대응(신재생에너지 및 C1리파이너리)분야 세계 최고 수준 원천기술 개발
↓	
성과지표	· SCI 논문의 표준화된 순위보정 영향력 지수 (mrnIF) : ('21)82.1 → ('22)82.1 → ('23) · 기술 이전 건수 : ('21)5 → ('22)5 → ('23)5 · C1가스 전환 유기산 부피 농도 : ('21)0.5 → ('22)0.7 → ('23)1 · 유기태양전지 모듈 효율 : ('22)14 → ('23)15 · SOFC 중저온영역 초고성능 셀 성능(최대출력) : ('21)1 → ('22)1.5 → ('23)2.2 · 열분해오일로부터 탈산소연료 생산 탄소회수율 : ('23)60 · 나노그리드 전력/통신 전송용량 : ('23)100/10

(2) 상위계획과의 부합성

가. 근거 법령과의 부합성

□ 과학기술기본법

- 기후변화대응기술개발사업은 「과학기술기본법」 제11조(국가연구개발사업의 추진)에 근거하여 사업이 추진됨

과학기술기본법

제16조의5(성장동력의 발굴·육성)

- ① 정부는 과학기술에 기반을 둔 성장동력을 발굴·육성하기 위하여 필요한 시책을 세우고 추진하여야 한다.
- ② 정부는 제1항에 따른 시책을 세울 때 다음 각 호에 관한 사항을 포함하여야 한다.
 - 1. 성장동력 분야별 핵심기술의 개발·사업화

□ 기초연구진흥 및 기술개발지원에 관한 법률

- 기후변화대응기술개발사업은 「기초연구진흥 및 기술개발지원에 관한 법률」 제14조(특정연구개발사업의 추진)에 근거하여 사업이 추진됨

기초연구진흥 및 기술개발지원에 관한 법률

제14조(특정연구개발사업의 추진)

- ① 과학기술정보통신부장관은 기초연구의 성과 등을 바탕으로 하여 국가 미래 유망기술과 융합기술을 중점적으로 개발하기 위한 연구개발사업(이하 “특정연구개발사업”이라 한다)에 대하여 계획을 수립하고, 연도별로 연구과제를 선정하여 이를 다음 각 호의 기관 또는 단체와 협약을 맺어 연구하게 할 수 있다. 이 경우 제2호의 기관 중 대표권이 없는 기관에 대하여는 그 기관이 속한 법인의 대표자와 협약할 수 있다.
 - 1. 제6조제1항 각 호에 해당하는 기관
 - 2. 제14조의2제1항에 따라 인정받은 기업부설연구소 또는 연구개발전담부서
 - 3. 「산업기술연구조합 육성법」에 따른 산업기술연구조합
 - 3의2. 「협동연구개발촉진법」 제2조제3호에 따른 과학기술인 협동조합
 - 4. 「나노기술개발 촉진법」 제7조에 따른 나노기술연구협의회
 - 5. 「민법」 또는 다른 법률에 따라 설립된 과학기술분야 비영리법인 중 연구 인력·시설 등 대통령령으로 정하는 기준에 해당하는 비영리법인
 - 6. 「의료법」에 따라 설립된 의료법인 중 연구 인력·시설 등 대통령령으로 정하는 기준에 해당하는 의료법인
 - 6의2. 「1인 창조기업 육성에 관한 법률」 제2조에 따른 1인 창조기업으로서 연구 인력 및 시설 등 대통령령으로 정하는 기준을 충족하는 기업
 - 7. 그 밖에 연구 인력·시설 등 대통령령으로 정하는 기준에 해당하는 국내외 연구 기관 또는 단체 및 영리를 목적으로 하는 법인
- ② 제1항에 따른 연구에 필요한 비용은 정부 또는 정부 외의 자의 출연금, 그 밖에 기업의 연구개발비로 충당한다.
- ③ 제1항에 따른 협약의 체결방법, 제2항에 따른 출연금의 지급·사용 및 관리에 관하여 필요한 사항은 대통령령으로 정한다.

□ 저탄소 녹색성장 기본법

- 기후변화대응기술개발사업은 「저탄소 녹색성장 기본법」 제26조(녹색기술의 연구개발 및 사업화 등의 촉진) 및 동법 시행령 제11조(녹색기술 관련 재원의 배분방향 등의 심의)에 근거하여 사업이 추진됨

저탄소 녹색성장 기본법

제26조(녹색기술의 연구개발 및 사업화 등의 촉진)

- ① 정부는 녹색기술의 연구개발 및 사업화 등을 촉진하기 위하여 다음 각 호의 사항을 포함하는 시책을 수립·시행할 수 있다.
 1. 녹색기술과 관련된 정보의 수집·분석 및 제공
 2. 녹색기술 평가기법의 개발 및 보급
 3. 녹색기술 연구개발 및 사업화 등의 촉진을 위한 금융지원
 4. 녹색기술 전문인력의 양성 및 국제협력 등
- ② 정부는 정보통신·나노·생명공학 기술 등의 융합을 촉진하고 녹색기술의 지식재산권화를 통하여 저탄소 지식기반경제로의 이행을 신속하게 추진하여야 한다.
- ③ 「과학기술기본법」에 따른 과학기술기본계획에 제1항의 시책이 포함되는 경우에는 미리 위원회의 의견을 들어야 한다.

저탄소 녹색성장 기본법 시행령

제11조(녹색기술 관련 재원의 배분방향 등의 심의)

- ① 위원회는 법 제15조제7호에 따라 저탄소 녹색성장을 위한 녹색기술 연구개발사업에 대한 재원의 배분방향 및 효율적 사용에 관한 사항을 심의한 때에는 「과학기술기본법」 제9조에 따른 국가과학기술위원회에 의견을 제시할 수 있다.
- ② 위원회는 제1항에 따른 위원회의 심의를 지원하기 위하여 관련전문기관을 지정할 수 있다.

□ 기후변화대응기술개발촉진법 제8조(기술개발사업의 추진)

- 기후변화대응기술개발사업은 「기후변화대응기술개발촉진법」 제8조(기술개발사업의 추진)에 근거하여 사업이 추진됨

기후변화대응기술개발촉진법

제8조(기술개발사업의 추진)

- ① 과학기술정보통신부장관, 관계 중앙행정기관의 장 및 지방자치단체의 장은 기본계획 및 시행계획에 따라 맡은 분야에 대한 기후변화대응 기술개발사업(이하 "기술개발사업"이라 한다)을 추진하고 이를 지원하기 위한 시책을 마련하여야 한다.
- ② 과학기술정보통신부장관, 관계 중앙행정기관의 장 및 지방자치단체의 장은 기술개발사업을 추진할 때 「파리협정」에 따른 온실가스 감축 목표, 산업계의 기후변화대응 기술수요 및 기술발전 예측결과를 반영하여야 한다.
- ③ 과학기술정보통신부장관은 기후변화대응 기술개발 전략 수립 및 투자방향의 설정 등을 위하여 대통령령으로 정하는 바에 따라 종합적인 기술지도(技術地圖)를 작성하여야 한다.
- ④ 과학기술정보통신부장관, 관계 중앙행정기관의 장 및 지방자치단체의 장은 기술개발사업을 추진할 때에는 제2항 및 제3항에 따른 사항을 소관 분야 개발대상 핵심기술의 도출 등에 적극 반영하여야 한다.

나. 상위계획과의 부합성

□ 「기후변화대응 종합기본계획」(08.9)

- 기후변화대응기술개발사업은 ‘기후변화대응 종합기본계획’ 추진과제 ①-① R&D 투자 확대
로 선진국 수준의 녹색기술 확보, ②-③ 기후변화 적응대책 추진으로 안전사회 구축, ②-⑤
기후변화 감시 예측 능력 고도화와 부합성이 높음

<표 Ⅱ-35> 기후변화대응 종합기본계획('08.9)

비전	범지구적 기후변화대응 노력에 동참하고 녹색성장을 통한 저탄소사회 구현 Low Carbon, Green Growth -
목표	중점 추진과제
① 기후친화산업을 신성장동력으로 육성	① 산업부문의 에너지 효율 향상 ② R&D 투자 확대로 선진국 수준의 녹색기술 확보 ③ 기후친화산업의 육성·보급과 수출경쟁력 강화
② 국민의 삶의 질 제고와 환경 개선	① 교통체증 완화를 통한 삶의 질 제고 ② 녹색 생활환경 창출 및 사회체질 개선 ③ 기후변화 적응대책 추진으로 안전사회 구축 ④ 저탄소 의식 및 생활양식 확산 ⑤ 기후변화 감시 예측 능력 고도화
③ 기후변화 대처를 위한 국제사회 노력을 선도	① 국가 온실가스 감축목표 설정 ② 적극적·능동적 협상 전략 추진 ③ 개도국 지원 및 국제협력 활성화

▶ 출처 : 기후변화대응 종합기본계획('08.9)

□ 「기후변화대응 국가연구개발 중장기 마스터플랜」(‘08.12)

- 기후변화대응기술개발사업은 ‘기후변화대응 국가연구개발 중장기 마스터플랜’ 비전 및 목표에 부합하며, 추진과제 1-1. 신·재생에너지 개발과 실용화 촉진, 1-3. 에너지 효율화 기술 개발과 보급, 2-1. 기후변화 대응 기초·원천연구 지원 강화, 2-3. 연료전지·수소에너지 기술 개발, 3-1. 기후변화 관측 및 예측 연구 지원 등의 이행 과제와도 부합
- 또한 중점기술 대분류 기준 ‘화석연료 대체’ 및 ‘관측 및 예측’ 관련 기술을 직접적으로 다루고 있어 매우 높은 부합도를 가짐

<표 Ⅱ-36> 기후변화대응 국가연구개발 중장기 마스터플랜(‘08.12)

비전	지속가능한 국가성장 및 저탄소사회 실현				
목표	· 2012년 선진국 대비 기술수준 평균 80% 달성 · 2030년 선진국 수준의 기술경쟁력 확보 · 2050년 신기술에 의한 온실가스 감축(2.5억 CO2톤)				
전략	중점 추진과제				
1. 신성장동력 확보를 위한 상용화 기술 개발 2. 혁신적 온실가스 감축 기술의 조기 확보 3. 기후변화 과학연구 지원	1. 신·재생에너지 개발과 실용화 촉진				
	2. 화석연료 이용기술의 고도화				
	3. 에너지 효율화 기술 개발과 보급				
	1. 기후변화 대응 기초·원천연구 지원 강화				
	2. CO2 포집·저장기술 조기 확보				
	3. 연료전지·수소에너지 기술 개발				
	4. 미래원자력 기술의 국제경쟁력 확보				
	1. 기후변화 관측 및 예측 연구 지원				
	2. 기후변화 영향평가 및 적응 연구 지원				
중점기술					
분야	대기 중 온실가스 농도 저감 분야			기후변화의 과학적 규명 분야	
대분류	화석연료 대체	에너지효율화	온실가스 처리	관측 및 예측	영향평가 및 적응
중분류	· 재생에너지 · 신에너지 · 원자력·핵융합	· 건물/가정상업 · 발전/전환 · 산업 · 수송	· CO₂처리 · Non-CO₂제어 · CO₂ 흡수원	· 현상 규명 · 모니터링 · 예측	· 자연·환경 · 산업·경제 · 사회·문화

▶ 출처 : 기후변화대응 국가연구개발 중장기 마스터플랜(‘08.12)

□ 「녹색기술 연구개발 종합대책」('09.1)

- 기후변화대응기술개발사업은 '녹색기술 연구개발 종합대책' 27대 중점육성기술의 주요 기술 분야를 다루고 있어 높은 부합도를 가짐

<표 II-37> 녹색기술 연구개발 종합대책('09.1)

비전	녹색기술 선진화를 통한 녹색강국 건설		
목표	녹색과학기술역량	녹색 산업경쟁력	환경지속성
	기술수준 ('12) 선진국대비 80% ('20) 선진국대비 90%	녹색기술 일자리 창출 ('12) 16만명 이상 세계시장점유율 ('12) 7% 이상 달성 ('20) 10% 이상 달성	환경 지속성 지수 ('12) 20위권 진입 ('20) 10위권 진입

27대 중점육성기술

1. 기후변화 예측 및 모델링개발 기술 2. 기후변화 영향평가 및 적응기술 3. 실리콘계 태양전지의 고효율 저가화 기술 4. 비실리콘계 태양전지 양산 및 핵심원천 기술 5. 바이오에너지 생산요소기술 및 시스템 기술 6. 개량형 경수로 설계 및 건설 기술 7. 친환경 핵비확산성 고속로 및 순환 핵주기시스템 개발 기술 8. 핵융합로 설계 및 건설 기술 9. 고효율 수소제조 및 수소저장 기술 10. 차세대 고효율 연료전지 시스템 기술 11. 친환경 식물성장 촉진기술 12. 석탄가스화 복합발전 기술 13. 고효율 저공해 차량 기술 14. 지능형 교통, 물류 기술	15. 생태공간 조성 및 도시재생 기술 16. 친환경 저에너지 건축 기술 17. 환경부하 및 에너지 소비 예측을 고려한 Green Process 기술 18. 조명용 LED, 그린 IT 기술 19. 전력 IT 및 전기기기 효율성 향상 기술 20. 고효율 2차 전지기술 21. CO2 포집, 저장, 처리기술 22. Non-CO2 (이산화탄소제외 온실가스) 처리기술 23. 수계수질평가 및 관리기술 24. 대체수자원 확보기술 25. 폐기물 저감, 재활용, 에너지화 기술 26. 유해성물질 모니터링 및 환경정화 기술 27. 가상현실 기술
--	--

▶ 출처 : 녹색기술 연구개발 종합대책('09.1)

□ 「기후변화 대응 핵심기술 개발전략」(‘14.7)

- 기후변화대응기술개발사업은 ‘기후변화 대응 핵심기술 개발전략’의 주요 전략분야 및 중점 추진과제 분야를 다루고 있어 부합도가 높음

<표 II-38> 기후변화 대응 핵심기술 개발전략(‘14.7)

기술개발전략	중점 추진과제
1. 청정 신·재생 에너지 활용 가속화	태양전지
2. ICT를 활용한 에너지 생산·소비 효율화	연료전지
3. 시장 선점을 위한 온실가스 처리기술 확보	바이오에너지
	이차전지
	전력 IT (EMS, 신재생하이브리드)
	CO2 포집·처리 기술

▶ 출처 : 기후변화 대응 핵심기술 개발전략(‘14.7)

□ 「기후변화대응기술 확보 로드맵(CTR)」(‘16.6, ‘17.12)

- 기후변화대응기술개발사업은 ‘기후변화대응기술 확보 로드맵’의 10대 기후기술 중 ‘1.탄소 저감’ 분야의 6개 기후기술과 ‘3. 기후변화적응’ 분야와 부합도가 높음

<표 II-39> 기후변화대응기술 확보 로드맵(CTR) (‘17.12)

목표	기후기술 관리를 통한 기후변화대응 역량 극대화			
기본 방향	① 탄소저감·탄소자원화·적응 등 기후기술 전반에 대한 기술관리 강화 ② 범부처 관리체계 下, 기후기술개발 활동 공유·결집·조율 ③ 기후기술 기반 온실가스 감축 : ‘30년 44백만톤(연간)			
주요 내용	분야	10대 기후기술	50대 세부기술군	실증 및 활용
	1. 탄소 저감	① 태양전지 ② 연료전지 ③ 바이오연료 ④ 이차전지 ⑤ 전력 IT ⑥ CCS	30개 세부기술군	12대 기후산업육성모델 CCS 실증
	2. 탄소 활용	⑦ 부생가스 전환 ⑧ CO2 전환 ⑨ CO2 광물화	10개 세부기술군	탄소자원화 실증단지 조성 및 해외 탄소크레딧 확보
	3. 기후변화적응	⑩ 공통 플랫폼	10개 세부기술군	공통 플랫폼 개발

▶ 출처 : 기후변화대응기술 확보 로드맵(CTR) (‘17.12)

□ 「제1차 기후변화대응 기술개발 기본계획(’23~’32)」(’22.12.14)

- 기후변화대응기술개발사업은 ‘탄소중립 실현 기여, 신성장동력 및 에너지안보 확보, 기후위기 적응강화’라는 기본계획 방향성에 부합하며, ‘1. 온실가스 감축’ 관련 6개 추진과제 및 ‘2. 기후변화 적응’의 2-4. 과학기술기반 기후변화 감시·예측 및 영향평가 과제와 높은 부합성을 가짐

<표 II-40> 기후변화대응 종합기본계획(’08.9)

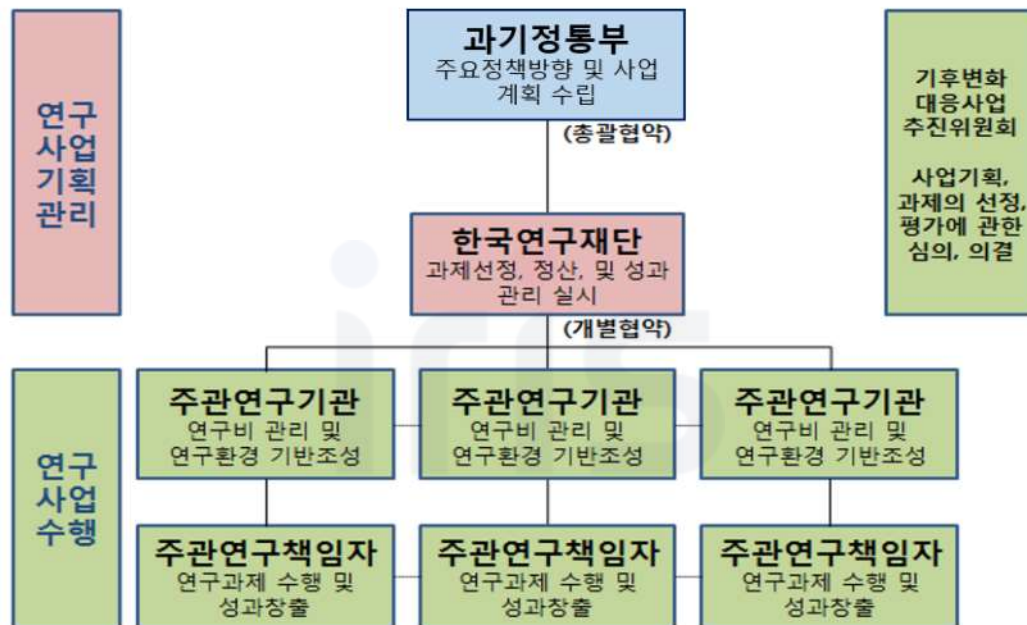
비전 방향성	과학기술 혁신을 통한 기후위기 대응과 신시장 선점		
	탄소중립 실현 기여	新성장동력 및 에너지안보 확보	기후위기 적응 강화
전략	중점 추진과제		
1. 온실가스 감축	1-1. 무탄소 에너지 생산 1-2. 에너지 시스템 전기화 1-3. 탄소배출 연·원료의 대체 1-4. 에너지 소비 효율 향상 1-5. 온실가스 저장·흡수·활용 1-6. 에너지 공급/수요 유연성 향상		
2. 기후변화 적응	2-1. 자연·생태계 회복력 강화 2-2. 선제적인 감염병 및 식량안보 대응 2-3. 기후 적응형 도시·인프라 구현 2-4. 과학기술기반 기후변화 감시·예측 및 영향평가 2-5. 과학기술기반 재난재해 관리		
3. 혁신 생태계 조성	3-1. 기후기술 산업 활성화 및 국민체감 향상 3-2. 연구/산업 현장 맞춤형 우수 인재양성 및 활용 3-3. 국제사회에서의 공동협력 및 기술이전·확산 3-4. 기후변화대응 거버넌스 활성화 및 정책역량 강화		

▶ 출처 : 기후변화대응 종합기본계획(’08.9)

(3) 사업추진체계의 적절성

□ 사업 추진방식

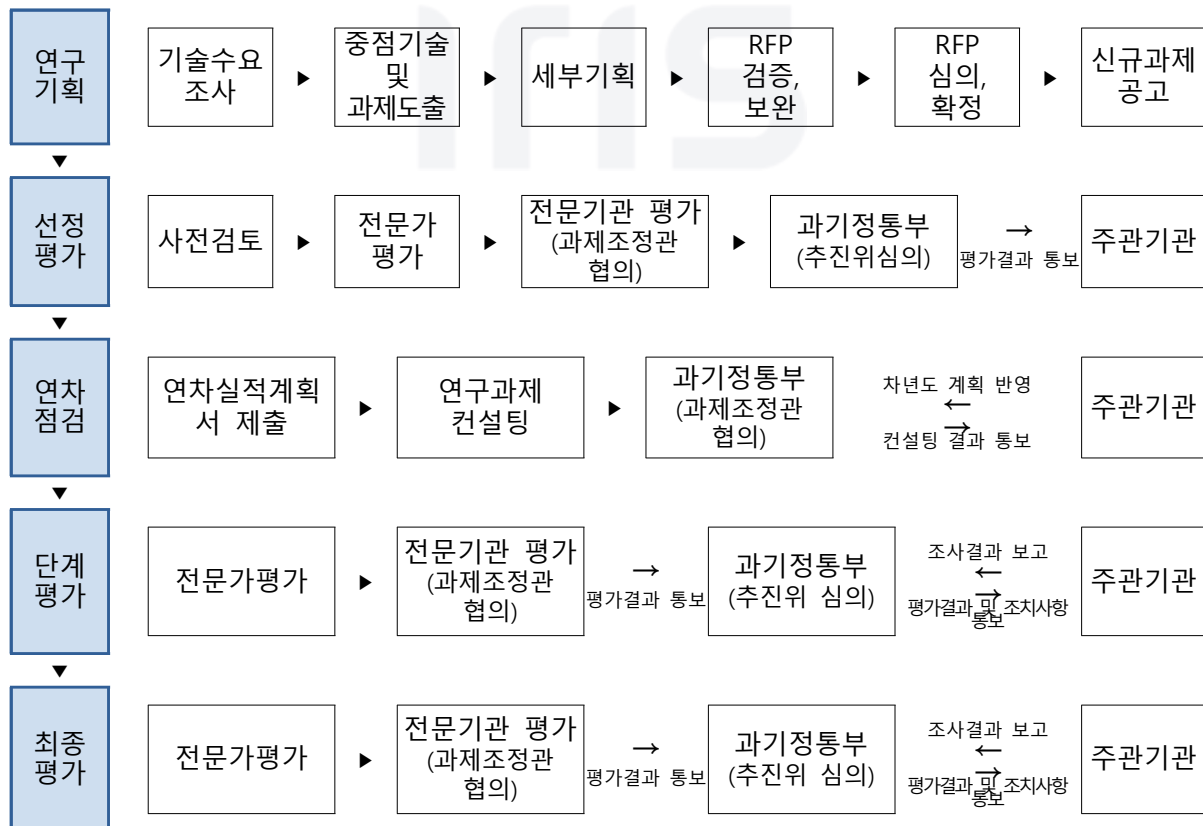
- 과기정통부-한국연구재단-주관기관-연구책임자로 이어지는 사업주체간 역할분담 및 유기적인 협력체계 구축
 - 정부는 정책 및 계획수립과 예산배분·조정 등을 수행하고, 전담기관인 한국연구재단은 과제기획과 평가·관리를 수행하며, 주관기관인 기업, 대학, 정부출연연구소는 연구개발을 수행하여 사업주체간 역할분담 및 협력체계가 명확히 구분되어 있음
 - 「기후변화대응기술개발사업 추진위원회」를 구성하고 동 사업과 관련된 기획, 과제의 선정, 평가에 관한 심의를 통해 체계적 사업 관리를 도모



[그림 Ⅱ-8] 기후변화대응기술개발사업 사업추진체계

□ 사업 추진절차

- 기후변화대응기술개발사업은 원천기술개발사업평가 매뉴얼*을 근거로 기획·관리·평가를 실시
 - ※ 「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 및 「과학기술정보통신부 소관 과학기술분야 연구개발사업 처리규정」에 따라 원천기술개발사업 기획·선정·점검·평가를 위한 관리 지침
 - (기획) 사업특성을 고려하여 정기적으로 기술수요조사를 실시하고 기획에 반영하고 있으며, 연도별 추진계획 및 시행계획의 방향성을 준용하여 체계적인 과제기획체계를 운영
 - (관리) 주기적으로 추진현황을 점검하여 성과창출을 독려하고, 연구 과제 진행 중 적정시점에 진도보고를 실시하여 성공적인 과제추진을 지원함
 - ※ 공식적인 평가관리 외에도 주관부서와 참여부서가 연구과제책임자와 소통을 통해 과제추진 현황 및 애로사항을 점검하고, 목표 성과를 달성할 수 있도록 독려하여 과제관리 수행
 - (평가) 원천기술개발사업의 평가는 원천기술개발사업평가 매뉴얼을 준용하여 수행되고 있으며 선정평가, 연차점검, 단계평가, 최종평가 등을 규정화하여 평가의 전문성과 신뢰성을 확보함
 - ※ (선정평가) 기술분야별 전문가를 통한 서면 및 발표평가 등을 통해 평가의 전문성 및 객관성 제고
 - ※ (최종평가) 기획·선정·중간평가에 참여한 전문가를 중심으로 평가단을 구성하여 평가의 전문성을 제고하고, 경제적·사회적 파급효과를 평가할 수 있는 전문가 및 기술성 평가를 위한 변리사, 특허심사관 등 활용



[그림 Ⅱ-9] 기후변화대응기술개발사업 기획·관리·평가 체계

□ 성과 관리 및 활용 체계

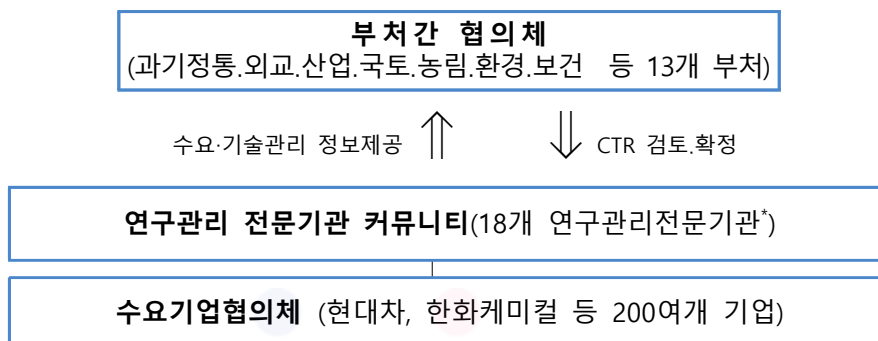
○ 부처간-민·관 협업을 통한 사업 추진

- 기후변화대응기술 확보 로드맵(CTR*, 2016.6.27.)을 2017년 기준으로 현행화하고, CTR 관련 민·관 협업체계를 확대 운영함

* CTR(Climate Technology Roadmap) : 기후기술의 체계적인 확보 및 활용을 통해 파리협정 이행을 국가연구 개발 측면에서 효율적으로 지원

- '기후기술확보를 위한 부처간 협의체(13개)'를 구성하여 CTR 검토, 세부기술군별 목표 등 조정, 성과연계·협력 방안 등을 검토함

- 정부부처(13개), 연구관리 전문기관(18개) 및 기업(200개) 등으로 구성된 협업체계를 운영함



* 한국연구재단, 에너지기술평가원, 산업기술평가관리원, 산업기술진흥원, 해양수산과학기술진흥원, 농림식품기술기획평가원, 환경산업기술원, 국토교통과학기술진흥원, 보건산업진흥원, 기상산업진흥원, 국립재난안전연구원, 국립산림과학원, 한국임업진흥원, 국립농업과학원, 국립식량과학원, 국립원예특작과학원, 국립축산과학원, 지식재산전략원(IP 관리 전문기관)

[그림 Ⅱ-10] 기후변화대응기술개발사업 기후기술 관리 및 활용 체계

4.3. 사업추진의 효과성

효과성은 본 사업에서 계획한 목표를 어느 정도 달성하였는지에 대한 분석을 목적으로 '목표 대비 달성도' 및 발생한 성과들의 질적인 우수성을 검증하기 위한 '성과의 우수성' 검증

- 효과성 분석은 각 분석항목을 통해 기후변화대응기술개발 사업이 국가연구개발 사업이 기 수립한 목표를 달성하고, 발생한 성과의 우수성 및 대표성과를 분석함
- 사업이 효과적으로 성과를 냈는가를 평가하기 위해 목표대비 달성도, 성과의 질적 우수성, 대표성과의 우수성을 바탕으로 분석을 실시함

분석1	사업의 핵심성과가 목표를 달성하였는가?
분석2	사업을 통해 발생한 성과가 질적으로 우수한가?
분석3	사업으로 인해 대표성과가 발생하였는가?

(1) 성과목표 달성도

- 기후변화대응기술개발사업은 기후변화 대응을 위한 신재생에너지, C1가스리파이너리 분야의 세계 최고수준 기술경쟁력 확보라는 최종 성과목표 달성을 위하여 총 7개의 성과지표를 설정함
 - 원천기술 창출의 기반이 되는 우수 논문에 대한 지표로 'SCI 논문의 표준화된 순위보정 영향력 지수 (mrnIF)'와 원천기술 창출의 활용 기반을 '기술 이전'에 대한 성과를 측정함
 - C1가스리파이너리, 태양전지, 연료전지, 바이오에너지, 에너지효율향상 5개 분야에 대해 세부기술별 핵심지표를 설정하여 성과를 측정함
- 동 사업의 성과지표 7개에 대한 목표달성률은 '23년 기준 SCI 논문의 표준화된 순위보정 영향력 지수(mrnIF)와 유기태양전지 모듈 효율 2개 지표를 제외한 나머지 5개 지표에서 목표치를 100% 초과하였음

- (SCI 논문의 표준화된 순위보정 영향력 지수(mrnIF)) '23년 목표치인 82.1에 상회하는 81.4로 목표치 99.1% 달성
- (기술이전 건수) '23년 목표치 5건을 초과하는 8건으로 목표치 160% 달성
- (C1가스 전환 유기산 부피 농도) '23년 목표치 1을 넘어서는 1.8로 목표치 180% 초과 달성
- (유기태양전지 모듈 효율) '23년 목표치 15에 가까운 14.5로 목표치 96.7% 달성

- (SOFC 중저온영역 초고성능 셀 성능(최대출력)) '23년 목표치 2.2에 만족하는 성능 2.2를 도출하여 목표치 100% 달성
- (열분해오일로부터 탈산소연료 생산 탄소회수율) '23년 목표치 50을 만족하는 55을 기록하여 목표치 110% 초과 달성
- (나노그리드 전력/통신 전송용량) '23년 목표치 100/10에 만족하는 100/10를 충족하여 목표치 100% 달성

<표 II-41> 성과목표 달성도 종합

성과지표	측정산식 및 방법	가중치	구분	실적 및 목표치		
			연도	2021	2022	2023
SCI 논문의 표준화된 순위보정 영향력 지수 (mrnIF)	$\sum(\text{표준화된 순위보정영향력 지수(mrnIF)}) / \text{SCI논문건수}$	1	목표	82.1	82.1	82.1
			실적	81.2	82.4	81.4
			달성률	98.9%	100.4%	99.1%
기술이전 건수	기술실시계약 건수		목표	5	5	5
			실적	10	13	8
			달성률	200.0%	260.0%	160.0%
C1가스 전환 유기산 부피 농도 (mole/L)	고성능 액체크로마토그래피 (HPLC)에 의한 포름산암모늄 측정		목표	0.5	0.7	1.0
			실적	0.8	1	1.8
			달성률	160.0%	142.9%	180.0%
유기태양전지 모듈 효율(%)	개방전압(Voc) x 단락전류밀도(Jsc) x 충진률(FF) / 입사된 빛에너지 (Pin:100mW/cm ²)		목표	-	14	15
			실적	-	13	14.5
			달성률	-	92.9%	96.7%
SOFC 중저온영역 초고성능 셀 성능(최대출력) (W/cm ²)	전류(A) x 셀 전압(V) / 셀 면적(cm ²)		목표	1	1.5	2.2
			실적	1.05	1.7	2.2
			달성률	105.0%	113.3%	100.0%
열분해오일로부터 탈산소연료 생산 탄소회수율(%)	(액상 생성물 탄소 몰수)/ (출발 물질의 탄소 몰수)		목표	-	-	50
			실적	-	-	55
			달성률	-	-	110.0%
나노그리드 전력/통신 전송용량 (W/Line/Gbps)	정밀 전압/전류 측정기와 범용 통신 속도 측정 프로그램을 통해 에너지라우터-에너지라우 터 간 선로의 전력 전송 및 통신 전송 용량 측정		목표	-	-	100/10
			실적	-	-	100/10
			달성률	-	-	100.0%

▶ SCI 논문의 표준화된 순위보정 영향력 지수(mrnIF)와 기술이전 건수는 당해연도에 입력한 실적을 계상하였음
(EX. 2021년 대상연도에 대한 실적은 2021년 내 성과입력 시스템에 입력된 경우만 집계)

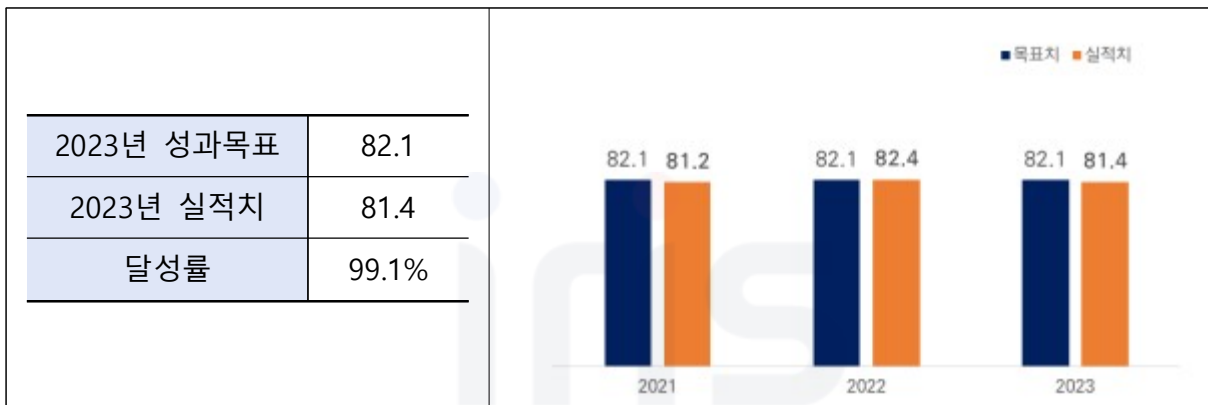
□ SCI 논문의 표준화된 순위보정 영향력 지수(mrnIF)

- 표준화된 영향력지수(mrnIF)는 원천기술 창출의 기반이 되는 우수 논문(과학적 성과) 등록 관련 지표로 관련 기술 개발 및 확보를 나타내는 성과지표임

$$\frac{\sum(\text{표준화된 순위보정 영향력지수})}{\sum(\text{SCI 논문건수})}$$

- 동 지표의 3년간 목표치는 매년 82.1*로 달성치는 2021년 81.2, 2022년 82.4, 2023년 81.4로, 2023년 목표달성률은 82.1에 근접한 99.1%를 달성
- ※ 2021~2023년은 본 사업의 2020년 SCI 논문의 mrnIF 기준 82.13 유지를 지속하도록 목표치를 설정
- 특히, 최근 3개년 동안 게재된 SCI 논문 건수(총 1,171건) 중 상위 20% 논문(mrnIF 80 이상)이 전체 SCI 논문의 약 63%(737건)를 차지하며 양질의 논문을 다수 창출하였음

<표 II-42> SCI 논문의 표준화된 순위보정 영향력 지수(mrnIF) 목표달성 평가



※ SCI 논문의 표준화된 순위보정 영향력 지수(mrnIF)는 당해연도에 입력한 실적을 계상하였음
(EX. 2021년 대상연도에 대한 실적은 2021년 내 성과입력 시스템에 입력된 경우만 집계)

< 표준화된 순위보정영향력지수(Rank Normalized Impact Factor: mrnIF) >

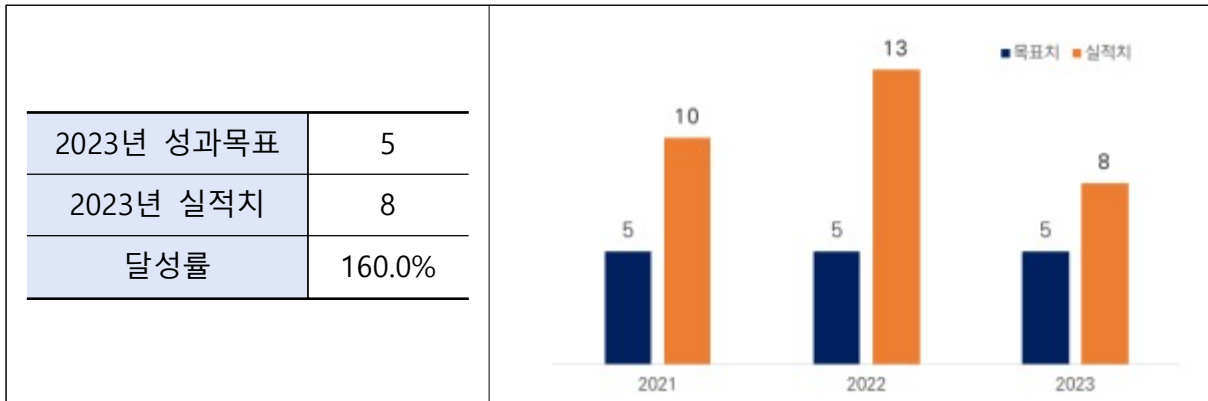
- 기존 순위보정영향력지수의 최하위 값이 분야 내 저널 수에 의존하는 단점을 보완하기 위해 순위보정지수의 최소값을 0, 최대값을 100으로 표준화한 지표로 지수 값이 큰 저널일수록 해당 분야 내에서 위상이 높음을 의미
 - 순위보정영향력지수 : $rnIF = \frac{N - R_j + 1}{N}$
 - 표준화된 순위보정영향력지수 : $mrnIF = 100 \times \frac{(N \times rnIF - 1)}{N - 1}$
- (N : 해당 저널분야의 저널수, R_j : 해당 저널의 분야 내 IF 순위)

□ 기술 이전 건수

- 동 지표의 3년간 목표치는 매년 5건*이고, 실적치는 2021년 10건, 2022년 13건, 2023년 8건으로 매년 목표치 이상을 초과하는 성과를 달성하였으며, 2023년 목표달성률 160%를 성취하였음

※ 본 사업의 성격(기초응용연구)과 2011~2020년 기술 이전 평균실적(5건)을 종합 고려하여 목표치 설정

<표 II-43> 기술 이전 건수 목표달성 평가

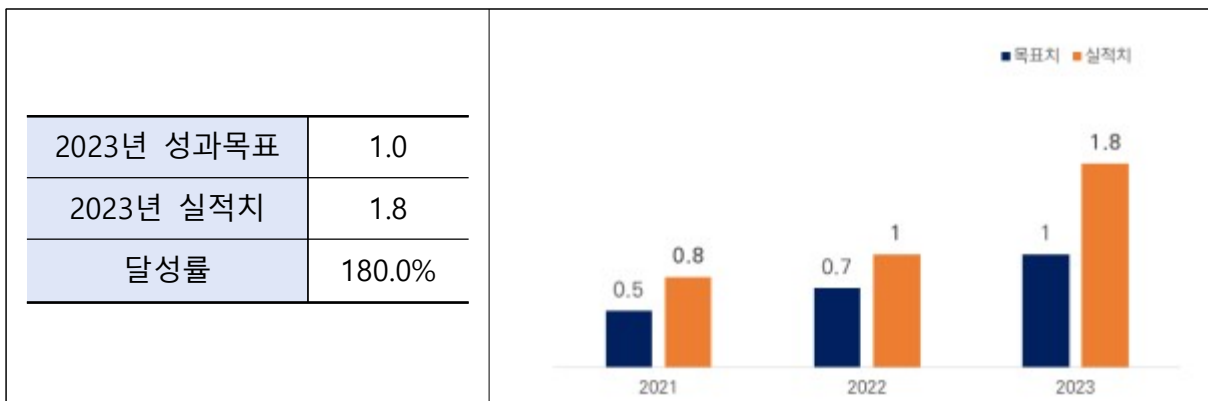


※ 기술이전 건수는 당해연도에 입력한 실적을 계상하였음
(EX. 2021년 대상연도에 대한 실적은 2021년 내 성과입력 시스템에 입력된 경우만 집계)

□ C1가스 전환 유기산 부피 농도

- C1가스리파이너리분야 세계 최고 수준 원천기술 창출 기반이 되는 대표기술로 C1가스 전환 유기산 부피농도를 성과지표로 설정
- 동 지표의 3년간 목표치는 2021년 0.5mole/L, 2022년 0.7mole/L, 2023년 1.0mole/L이고, 달성치는 2021년 0.8mole/L, 2022년 1.0mole/L, 2023년 1.8mole/L로 측정
- 특히, 2023년에는 목표달성률 180%를 기록하며 단계별 성과목표인 “기후변화대응(신재생에너지 및 C1리파이너리)분야 세계 최고 수준 원천기술 개발” 달성에 있어 기술 핵심성 확보에 기여함

<표 II-44> C1가스 전환 유기산 부피 농도 목표달성 평가



□ 유기태양전지 모듈 효율

- 태양전지분야 세계 최고 수준 원천기술 창출 기반이 되는 대표기술로 유기태양전지 모듈 효율을 성과지표로 설정
- (측정방법) 태양전지 전류-전압 곡선 측정 : 솔라시뮬레이터 측정 장치를 이용해 200cm² 이상 모듈 면적에서 효율 측정

$$\text{유기태양전지 모듈 효율} = \frac{\text{개방전압(Voc)} \times \text{단락전류밀도(Jsc)} \times \text{충진률(FF)}}{\text{입사된 빛에너지 (Pin:100mW/cm}^2\text{)}}$$

- ※ 유기태양전지 단위소자 세계 최고 효율은 18.2%로, 본 사업의 연구단에서 제시한 단위소자 효율 20%는 세계 최고 수준
- ※ 대만 National Chiao Tung University, 한국화학연구원 등 여러 연구 기관에서 Cell to module 제작시, 모듈 패터닝에 의한 유효면적 감소(geometrical fill factor~90%), 대면적화로 인한 필름 균일도 감소 및 핀홀 증가 등의 원인으로 인해 20% 이상의 효율 감소가 발생한다는 연구 결과를 보고하고 있으므로, 모듈 효율 목표를 단위소자 대비 20% 감소한 16%로 설정
- 동 지표의 2년간 목표치는 2022년 14%, 2023년 15%이고, 달성치는 2022년 13%, 2023년 14.5%로, 2023년 목표치 대비 96.7%를 달성
- ※ 유기태양전지 모듈 효율 측정을 위한 요소 기술 및 시스템 개발로 성과지표 측정이 가능한 시점인 2022년부터 목표치 설정
- 본 사업의 연구단은 2023년 한 해 동안 프린팅이 가능한 광활성층 소재를 개발하여 단위소자 (작은 셀, 소면적 1cm²)에서 최고 효율 14.5% 수준까지 달성
- 비록 목표치 15%에는 미치지 못하였으나, 유기태양전지 모듈 효율 14.5%는 세계 최고 수준 일 뿐만 아니라, 거의 손실 없이 1cm² 셀(14.6%)에서 200cm² 모듈(14.5%)로 대면적화하는 기술을 확보했다는 점에서 큰 의의가 있음

<표 Ⅱ-45> 유기태양전지 모듈 효율 목표달성 평가



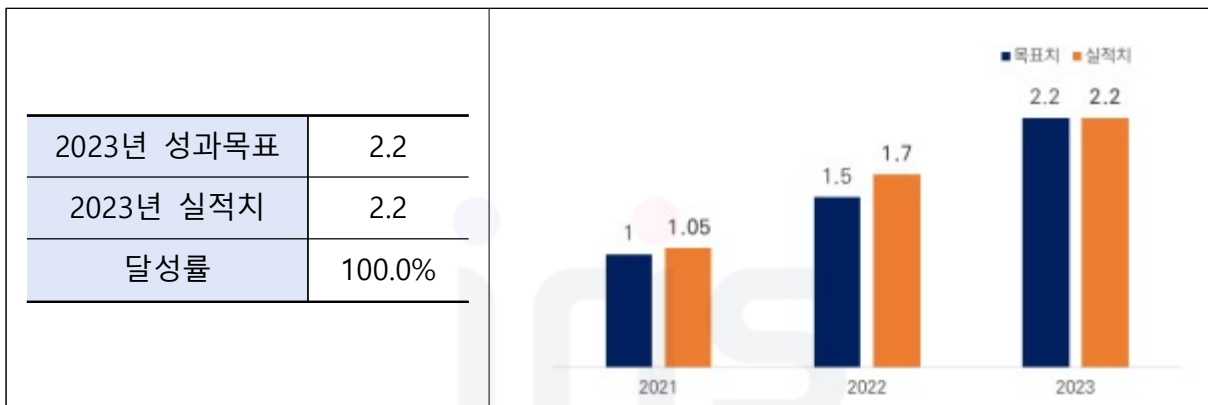
□ SOFC 중저온영역 초고성능 셀 성능(최대출력)

- 연료전지분야 세계 최고 수준 원천기술 창출 기반이 되는 대표기술로 중저온영역(700℃ 이하) 초고성능 셀 성능으로 최대출력을 성과지표로 설정
- (측정방법) 부하(전기저항)를 변화시키면서 전기화학적 셀 전류-전압 측정 평가

$$\text{초고성능 셀 성능(최대출력)} = \frac{\text{전류(A)} \times \text{셀 전압(V)}}{\text{셀 면적(cm}^2\text{)}}$$

- 동 지표의 3년간 목표치는 2021년 1.0W/cm², 2022년 1.5W/cm², 2023년 2.2W/cm²이고, 달성치는 2021년 1.05W/cm², 2022년 1.7W/cm², 2023년 2.2W/cm²로, 2023년 목표달성률 100%를 성취하여 본 사업의 연료전지분야 기술 핵심성을 확보함

<표 II-46> SOFC 중저온영역 초고성능 셀 성능(최대출력) 목표달성 평가



□ 열분해오일로부터 탈산소연료 생산 탄소회수율

- 바이오에너지분야 세계 최고 수준 원천기술 창출 기반이 되는 대표기술로 열분해오일로부터 탈산소연료 생산탄소 회수율을 성과지표로 설정
- (측정방법) 원소분석법 : 벤치 규모 반응에서(열분해오일 반응물의 건조 중량 대비) 탄소 회수율을 측정

※ 항공유의 경우 불포화 탄화수소의 농도를 감소시켜야 하며, 열분해오일 유래 바이오항공유에 대한 표준이 없으므로, 열분해오일 유래 탈산소 바이오연료 관련 세계 최고 수준 결과를 활용

$$\text{탈산소연료 생산 탄소회수율} = \frac{\text{액상 생성물 탄소 몰수}}{\text{출발 물질의 탄소 몰수}}$$

- 동 지표의 2023년 목표치는 50%이고, 달성치는 55%로 목표달성률 110%를 성취하여 본 사업의 바이오에너지 분야 기술 핵심성을 확보하였음
- ※ 동 성과지표는 연도별 도출되는 지표가 아닌 전체 연구기간 요소기술(촉매 성형 방법, 다단계 반응 최적화)확보 종합에 따른 연속 반응 운전을 통해 최종 연구 수행연도에 측정되는 성과지표로 2023년 목표치 설정

<표 II-47> 열분해오일로부터 탈산소연료 생산 탄소회수율 목표달성 평가



□ 나노그리드 전력/통신 전송용량

- 에너지효율향상분야 최고 수준 원천기술 창출 기반이 되는 대표기술로 나노전력그리드 시스템 전력/통신 전송용량을 성과지표로 설정
 - (측정방법1) 전력 전송용량(200W/Line) : 정밀 전압/전류 측정기를 통해 개발한 에너지라우터-에너지라우터 간 선로의 전력 전송 측정(오차 $\pm 0.1\%$ 이하 측정기 사용)
 - (측정방법2) 통신 전송용량(20Gbps) : 범용 통신 속도 측정 프로그램(benchmark software)을 통해 개발한 에너지라우터-에너지라우터 간 통신 전송용량 측정
- ※ 2021~2022년은 전력/통신 전송용량 측정을 위한 설비 구축기간으로 성과지표 측정이 가능한 2023년에 대해 목표치를 설정
- 동 지표의 2023년 목표치는 100W/Line/10Gbps이고, 달성치는 100W/Line/10Gbps로 목표달성률 100%를 성취하여 본 사업의 에너지효율성향상분야 기술의 핵심성을 확보하였음

<표 II-48> 나노그리드 전력/통신 전송용량 목표달성 평가



(2) 종합적 연구성과의 우수성

가. 과학적 우수성(SCI 논문)

□ SCI 논문의 질적 수준(사업 전체 기간, 2009~2023)

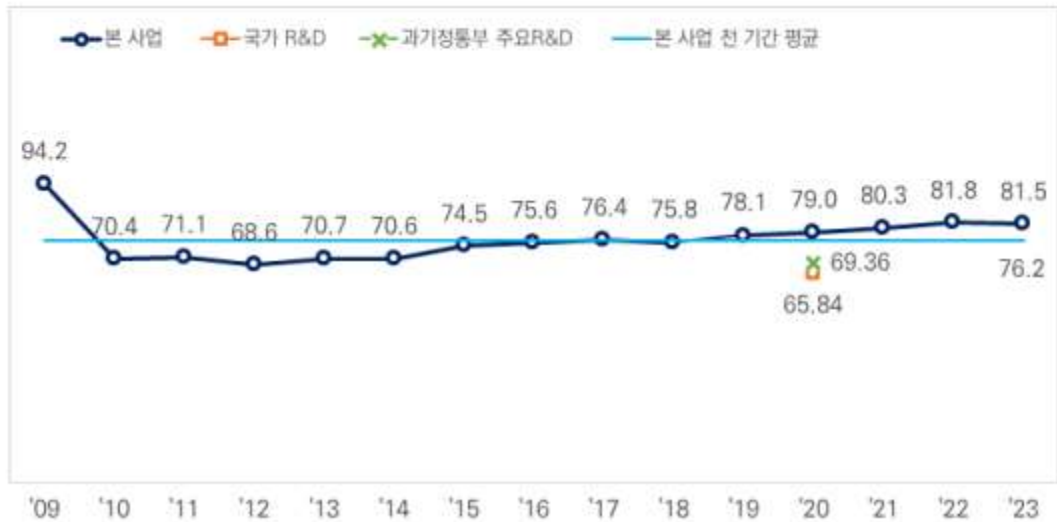
- 2009~2023년까지 총 15년 동안 SCI급 논문을 총 8,208건 게재하였으며, 전 기간 평균 영향력지수(Impact Factor)는 7.19로 매우 우수함
- 본 사업에서 창출된 SCI급 논문의 평균 영향력지수(IF)는 2009년 4.45를 시작으로 2022년 11.32까지 꾸준히 증가하였으며, 연평균 6.2%씩 논문의 질적 수준이 향상되었음
- 2020년 우리나라 전체 SCI 논문의 평균 IF는 4.79로 국가R&D 대비 약 1.5배 수준이며 과기정통부 주요 R&D 논문의 5.91보다도 1.2배 높은 수치로 매우 우수함¹⁾



[그림 Ⅱ-11] 사업 전체 기간(2009~2023) SCI 논문 평균 영향력지수(IF) 추이

- 게재된 논문의 표준화된 순위보정 영향력지수(mrnIF) 평균은 76.2로 질적 성과가 매우 우수
- 본 사업에서 게재한 SCI 논문의 표준화된 순위보정 영향력지수(mrnIF)는 사업의 성과가 본격적으로 창출된 2010년 70.4을 시작으로 꾸준히 증가하며 2020년까지 mrnIF 70대를 유지하였으며, 2021년 이후 80대를 넘으며 논문의 질적 수준이 향상되었음
- 2020년 우리나라 전체 SCI 논문의 평균 mrnIF는 65.84및 과기정통부 주요 R&D SCI 논문의 평균 mrnIF는 69.36으로 기후변화대응기술개발의 논문 질적 성과가 매우 우수함을 확인

1) 2020년 한국연구재단 주요 연구개발사업 성과분석보고서(한국연구재단, 2022)



[그림 II-12] 사업 전체 기간(2009~2023) SCI 논문 표준화된 순위보정 영향력지수(mrnIF) 추이

- 본 사업을 통해 발표된 mrnIF 90 이상(상위 10%)의 SCI 논문은 2009년부터 2023년까지 총 2,249건으로 전체 논문에서 가장 많은 비중(27.4%)을 차지하였으며, 우수한 질적수준을 보임
- mrnIF 80이상 90미만의 논문은 총 1,671건(20.4%), mrnIF 70이상 80미만의 논문도 총 1,950건(23.8%)으로 상위 30% 이상의 논문이 전체 SCI 논문의 5,870건을 70% 이상을 차지하며 높은 수준의 논문 성과를 창출해냄

<표 II-49> 사업 전체 기간(2009~2023) mrnIF 범위별 SCI 논문 건수

(단위 : 비중(%))

mrnIF	'09	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23	합계	비중
90 이상	1	22	55	63	101	88	174	181	172	188	279	334	271	193	127	2,249	27.4
80 이상 90 미만	0	20	43	75	73	72	126	126	134	176	222	214	202	119	69	1,671	20.4
70 이상 80 미만	0	18	62	93	110	162	164	156	190	203	248	245	176	75	48	1,950	23.8
60 이상 70 미만	0	15	31	60	68	46	66	83	58	63	86	85	67	44	29	801	9.8
50 이상 60 미만	0	17	27	57	49	75	81	83	56	85	81	57	34	27	18	747	9.1
0 이상 50 미만	0	16	41	76	78	76	71	52	60	65	77	80	54	26	18	790	9.6
합계	1	108	259	424	479	519	682	681	670	780	993	1,015	804	484	309	8,208	100.0

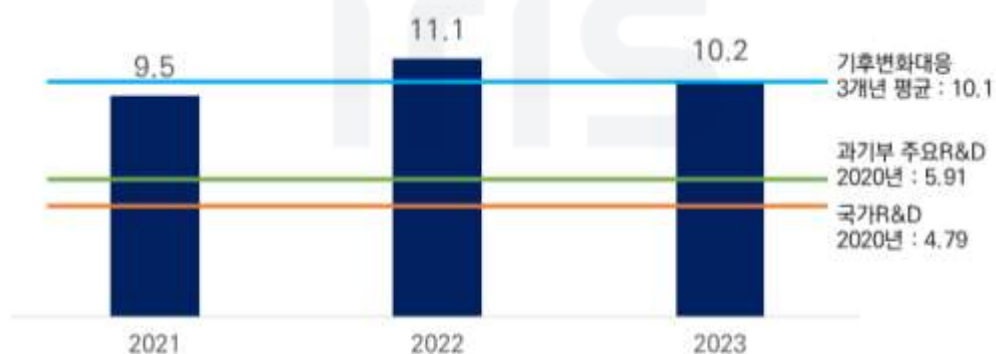
□ SCI 논문의 질적 수준(최근 3년, 2021~2023)

- 최근 3년(2021~2023년) 동안 SCI 논문을 총 1,171건 게재하였으며, 3년 평균 영향력지수(Impact Factor)는 10.1로, 본 사업의 전 기간(2009~2023년) IF인 7.19보다도 매우 뛰어남
- 본 사업에서 창출된 SCI급 논문의 평균 영향력지수(IF)는 2021년 9.5, 2022년 11.1, 2023년 10.2를 기록하였으며, 최근 3개년 동안 연평균 3.4% 증가
- 최근 3개년 SCI 논문의 평균 IF(10.1)는 2020년 국가R&D SCI 논문의 평균 IF(4.79) 대비 2.1배 높고, 과기정통부 주요 R&D 논문의 평균 IF(5.91)보다도 1.7배 높은 수치임

<표 II-50> 최근 3개년(2021~2023) SCI 논문 성과

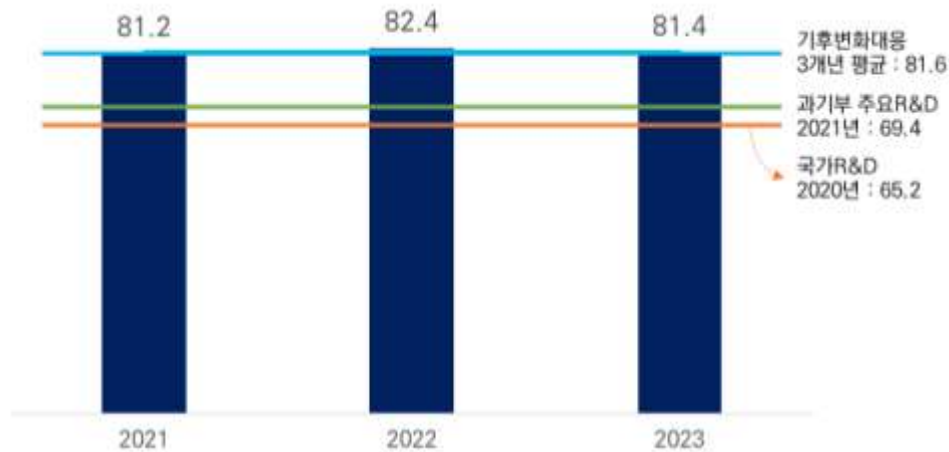
구분	2020	2021	2022	합계	연평균증가율
SCI(E) 논문 수	577	336	258	1,171	△33.1%
평균 IF	9.5	11.1	10.2	10.1	3.4%
평균 mrnIF	81.2	82.4	81.4	81.6	0.1%

※ SCI 논문 성과는 당해연도에 입력한 실적을 계상하였으므로, 동기간에 대한 사업 전체 기간 분석 성과와 차이 있음 (EX. 2021년 대상연도에 대한 실적은 2021년 내 성과입력 시스템에 입력된 경우만 집계)



[그림 II-13] 최근 3년(2021~2023) SCI 논문 평균 영향력지수(IF) 추이

- 최근 3년(2021~2023년) 동안 게재된 SCI 논문의 표준화된 순위보정 영향력지수(mrnIF)는 81.6으로 2021년 국가R&D와 과기정통부 주요 R&D와 비교하여 질적으로 우수한 성과를 달성
- 본 사업에서 창출된 SCI급 논문의 표준화된 순위보정 영향력지수(mrnIF)는 2021년 81.2, 2022년 82.4, 2023년 81.4를 기록하였으며, 최근 3개년 동안 꾸준히 상위 20% 이내 우수 저널에 논문을 게재하는 성과를 창출하였음을 입증함
- 최근 3개년 동안 도출된 SCI 논문의 mrnIF는 2021년 국가R&D SCI 논문의 평균 mrnIF(65.2) 대비 1.3배 높고, 과기정통부 주요 R&D 논문의 평균 mrnIF(69.4)보다도 약 1.2배 높은 수치임



[그림 Ⅱ-14] 최근 3년(2021~2023) SCI 논문 평균 표준화된 순위보정 영향력지수(mrnIF) 추이

- 최근 3년(2021~2023년)간 게재된 SCI논문 1,171건 중 452건(전체 SCI 논문의 38.6%)이 상위 10% 저널에 게재되었고, 그 중 14건은 mrnIF 99 이상인 상위 1% 저널에 게재

<표 Ⅱ-51> 최근 3개년(2021~2023) SCI 논문의 상위저널 게재 성과

mrnIF	2021	2022	2023	합계	비중	비고
전체 논문 수	577	336	258	1171	100.0%	
99 이상	8	4	2	14	1.3%	상위 1%
95 이상 99 미만	72	62	55	189	15.3%	상위 5%
90 이상 95 미만	123	75	51	249	20.4%	상위 10%
합계	203	141	108	452	38.6%	

- 상위 1% 저널(mrnIF 99이상)에 게재된 논문 14건 중 최상위 논문 5건을 살펴본 결과, mrnIF 100인 논문이 3건이었으며, △태양전지, △연료전지, △C1가스리파이너리 분야에서 각각 1건씩 게재하는 매우 우수한 성과를 창출
- 14건의 논문 중 태양전지 분야는 세계 3대 과학저널 중 하나인 Nature를 포함한 상위 1% 저널 논문에 7건을 게재하여 차세대 태양전지 원천기술 확보를 통한 기술 경쟁력 제고에 기여

<표 Ⅱ-52> SCI 논문 상위 10% 저널 게재 성과(최상위 5개)

번호	성과연도	기술분야	논문명	학술지명	mrnIF (2022 JCR)
1	2021	태양전지	Pseudo-halide anion engineering for alpha-FAPbI(3) perovskite solar cells	Nature	100.0
2	2021	연료전지	Anion exchange polyelectrolytes for membranes and ionomers	Progress In Polymer Science	100.0

번호	성과연도	기술분야	논문명	학술지명	mrnIF (2022 JCR)
3	2022	C1가스 리파이너리	A generalized-template-based graph neural network for accurate organic reactivity prediction	Nature Machine Intelligence	100.0
4	2022	태양전지	Large-area perovskite solar cells employing spiro-Naph hole transport material	Nature Photonics	99.4
5	2021	태양전지	Enhanced electrical properties of Li-salts doped mesoporous TiO ₂ in perovskite solar cells	Joule	99.3

<표 II-53> 우수논문(mrnIF 100) 성과 상세내용 (1)

논문명	Pseudo-halide anion engineering for alpha-FAPbI(3) perovskite solar cells		
학술지명	Nature	분야	태양전지
과제명	고안정,친환경,최고효율 단일접합 태양전지 원천기술 개발		
저자명	정재기(Jaeki Jeong) 등		
성과연도	2021	mrnIF	100.0
주요내용	- 페로브스카이트(perovskites) 필름 표면에 존재하는 음이온 공극 결함을 억제하고 필름의 결정성을 향상시키기 위해 유사 할로겐화물 음이온 포메이트(HCOO-)를 사용하는 음이온 공학 개념을 제안 - 그 결과 태양전지 장치는 25.6%(25.2% 인증)의 전력 변환 효율을 달성하고, 장기간 작동 안정성(450시간)을 가지며, 10% 이상의 외부 양자 효율 달성		
요약문 (Abstract)	 Metal halide perovskites of the general formula ABX₃—where A is a monovalent cation such as caesium, methylammonium or formamidinium; B is divalent lead, tin or germanium; and X is a halide anion—have shown great potential as light harvesters for thin-film photovoltaics 1,2,3,4,5. Among a large number of compositions investigated, the cubic α-phase of formamidinium lead triiodide (FAPbI₃) has emerged as the most promising semiconductor for highly efficient and stable perovskite solar cells6,7,8,9, and maximizing the performance of this material in such devices is of vital importance for the perovskite research community. Here we introduce an anion engineering concept that uses the pseudo-halide anion formate (HCOO⁻) to suppress anion-vacancy defects that are present at grain boundaries and at		

the surface of the perovskite films and to augment the crystallinity of the films. The resulting solar cell devices attain a power conversion efficiency of 25.6 per cent (certified 25.2 per cent), have long-term operational stability (450 hours) and show intense electroluminescence with external quantum efficiencies of more than 10 per cent. Our findings provide a direct route to eliminate the most abundant and deleterious lattice defects present in metal halide perovskites, providing a facile access to solution-processable films with improved optoelectronic performance.

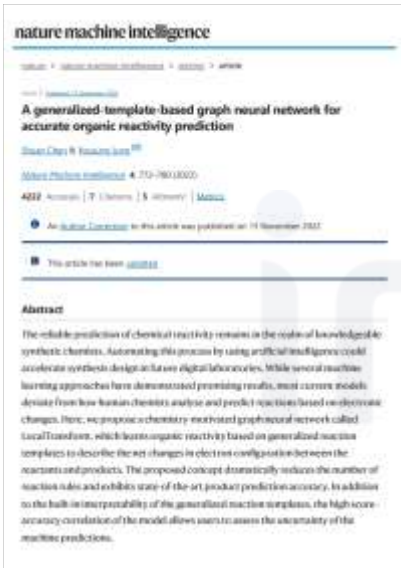
<표 표-54> 우수논문(mrIF 100) 성과 상세내용 (2)

논문명	Anion exchange polyelectrolytes for membranes and ionomers		
학술지명	Progress In Polymer Science	분야	연료전지
과제명	AEMFC 상용화를 위한 혁신 탄화수소계 바인더 개발		
저자명	Chen Nan jun, Lee Young Moo		
성과연도	2021	mrIF	100.0
주요내용	■ 음이온 교환 막 연료전지(AEMFCs)를 위한 필수 물질인 음이온 교환 폴리전해질(AEPs)의 발전을 체계적으로 요약하고, 이오노머(ionomer) 연구의 중요성에 중점을 두어 내구성에 미치는 양이온 종 및 폴리리머 백본 구조의 중요성을 강조 ■ 최신 AEMs 및 이오노머의 장단점을 비교하여 AEMFCs에 대한 미래 연구의 방향성을 설명		
요약문 (Abstract)	Anion exchange membrane fuel cells (AEMFCs) have attracted great interest as a low-cost fuel cell technology for clean energy conversion and utilization for the future. AEMFCs have been considered the most promising succedaneum to proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) for addressing the cost issues associated with PEMFCs due to utilizing non-platinum group metals as electrocatalysts under alkaline conditions (such as Ag, Ni, and Co). Herein, we focus on a critical topic of AEMFCs—anion-exchange polyelectrolytes (AEPs)—which are essential materials for low-cost AEMFCs. Specifically, AEPs have been used as anion-exchange membranes (AEMs) and binders (or ionomers) in AEMFCs. Years of study have allowed AEMFCs to recently achieve unprecedented progress, specifically in terms of power density and durability. These properties are comparable to or higher than PEMFCs due to the recent development of high performance AEPs. Currently, most AEPs		

focused on the application of AEMs, and the importance of ionomer research has not been widely recognized. Moreover, a comprehensive review involving a systematic performance comparison of the state-of-the-art AEMs and ionomers is still lacking, making future research on AEMFCs unclear. This review systematically and comprehensively summarizes the development of AEPs and highlights the importance of cationic species and polymer backbone structures on durability with an emphasis on the importance of ionomer research. We further describe the differences between AEMs and ionomers by comparing the advantages and disadvantages of the state-of-the-art AEMs and ionomers to accurately guide future research on AEMFCs. We cover synthetic methods, degradation mechanisms, strategies to enhance performance, water transport behaviors, structure design criteria, and new challenges for AEMs and ionomers. This review is expected to expand further understanding of AEMs and ionomers and provide a future direction for designing AEMs and ionomers for future AEMFCs.



<표 II-55> 우수논문(mrnlF 100) 성과 상세내용 (3)

논문명	A generalized-template-based graph neural network for accurate organic reactivity prediction		
학술지명	Nature Machine Intelligence	분야	C1가스리파이너리
과제명	원자단위 d-오비탈 엔지니어링을 통한 메탄 활성화		
저자명	Shuan Chen, Yousung Jung		
성과연도	2022	mrnlF	100.0
주요내용	■ 일반화된 반응 템플릿을 기반으로 유기 반응성을 학습하여 반응물과 생성물 사이 전자구성의 순 변화를 설명하는 LocalTransform이라는 화학기반 그래프 신경망을 제안		
요약문 (Abstract)	 The reliable prediction of chemical reactivity remains in the realm of knowledgeable synthetic chemists. Automating this process by using artificial intelligence could accelerate synthesis design in future digital laboratories. While several machine learning approaches have demonstrated promising results, most current models deviate from how human chemists analyse and predict reactions based on electronic changes. Here, we propose a chemistry-motivated graph neural network called LocalTransform, which learns organic reactivity based on generalized reaction templates to describe the net changes in electron configuration between the reactants and products. The proposed concept dramatically reduces the number of reaction rules and exhibits state-of-the-art product prediction accuracy. In addition to the built-in interpretability of the generalized reaction templates, the high score-accuracy correlation of the model allows users to assess the uncertainty of the machine predictions.		

□ SCI 논문 성과의 핵심성(최근 3년, 2021~2023)

- 최근 3년간 상위 10% 이내 저널에 게재된 SCI 논문들은 본 사업의 목적인 “기후변화 위기에 대응하여 온실가스 감축효과가 큰 기술 분야에 대하여 세계 선도적 원천기술 확보 및 혁신 성장 동력 창출 지원”과 연관성을 가지며, 각 기술분야에 대한 원천기술 성과를 창출하였음

<표 II-56> SCI 논문 mrnIF 90 이상 논문의 주요 내용과 사업목표와의 연관성

C1가스리파이너리분야				
1	논문명	A generalized-template-based graph neural network for accurate organic reactivity prediction	저널명	Nature Machine Intelligence
			게재년도	2022
			mrnIF	100.0
	주요내용	■ 일반화된 반응 템플릿을 기반으로 유기 반응성을 학습하여 반응물과 생성물 사이 전자구성의 순 변화를 설명하는 LocalTransform이라는 화학기반 그래프 신경망을 제안		
	사업목표와의 연관성	■ 화학적인 반응성 예측을 개선하는데 LocalTransform 그래프 신경망이 어떻게 기여할 수 있는지를 제시하며, 향후 C1가스(CO, CH ₄) 전환 화학촉매 확보를 위한 기술개발에 기여하여 온실가스 저감으로 기후변화 문제해결		
2	논문명	A sustainable carbon-consuming cycle based on sequential activation of CO ₂ and CH ₄ using metal oxides	저널명	Applied Catalysis B: Environmental
			게재년도	2023
			mrnIF	98.5
	주요내용	■ 연구에서는 금속 탄산염 내 이산화탄소(CO ₂)가 높은 온도에서 메탄(CH ₄)과 반응하여 아세트산(CH ₃ COOH)으로 변환되는 새로운 경로를 개발		
	사업목표와의 연관성	■ 탄소 중립 및 지속 가능한 에너지 생산을 위한 혁신적인 방법으로서의 CO ₂ 및 CH ₄ 의 순환적 활용에 대한 새로운 시각을 제공하며, C1가스(CO, CH ₄) 전환 화학 촉매 확보 기술개발에 기여하여 온실가스 저감으로 기후변화 문제해결		
태양전지분야				
3	논문명	Pseudo-halide anion engineering for alpha-FAPbI(3) perovskite solar cells	저널명	Nature
			게재년도	2021
			mrnIF	100.0
	주요내용	■ 페로브스카이트(perovskites) 필름 표면에 존재하는 음이온 공극 결함을 억제하고 필름의 결정성을 향상시키기 위해, 유사 할로겐화물 음이온 포메이트(HCOO-)를 사용하는 음이온 공학 개념을 제안 ■ 그 결과 태양전지 장치는 25.6%(25.2% 인증)의 전력 변환 효율을 달성하고, 장기간 작동 안정성(450시간)을 가지며, 10% 이상의 외부 양자 효율 달성		
	사업목표와의 연관성	■ 페로브스카이트 태양전지에서 유사할라이드 음이온을 활용하여 성능을 향상시켜, 태양전지 분야의 세계적 수준의 원천기술을 확보하고 기술경쟁력을 제고		

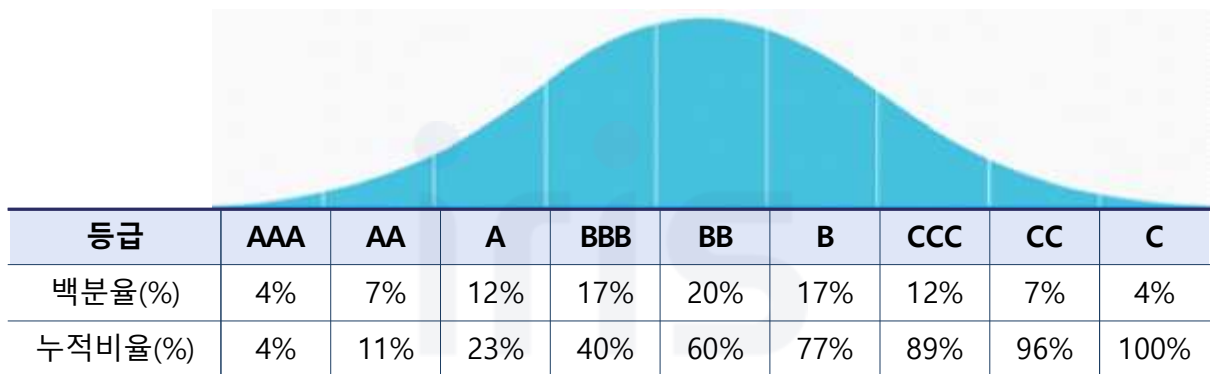
4	논문명	A wearable organic photovoltaic-thermoelectric(OPV-TE) hybrid generator to minimize the open-circuit voltage losses of OPV module	저널명	Nano Energy
			게재년도	2022
			mrnIF	93.8
	주요내용	■ 웨어러블 디바이스에서 사용되는 유기 태양전지 모듈의 개선을 위해 유기박막태양전지-열전소자(OPV-TE)를 통합한 하이브리드 발전기를 도입하여 발전 효율을 향상시키고 웨어러블 기기에 적용 가능한 실용적인 솔루션을 제시		
사업목표와의 연관성	■ OPV 모듈의 성능을 향상시키고, 특히 웨어러블 기기에서 활용할 수 있는 발전기의 새로운 형태를 제시함으로써, 태양전지 분야의 세계적 수준의 원천기술을 확보			
연료전지분야				
5	논문명	High-performance anion exchange membrane water electrolyzers with a current density of 7.68 A cm(-2) and a durability of 1000 hours	저널명	Energy & Environmental Science
			게재년도	2021
			mrnIF	99.1
	주요내용	■ 음이온 교환 막을 적용한 수전해기의 제작, 성능 특성, 내구성 등에 대한 실험 수행 ■ 특히 7.68 A cm(-2)의 높은 전류 밀도에서 운전하면서도 1000시간 동안 지속적인 성능을 유지할 수 있음을 실험 결과로 제시		
사업목표와의 연관성	■ 고전류 밀도와 긴 내구성을 가진 음이온 교환 막을 사용한 수전해기를 개발하여, 연료전지분야의 세계적 수준의 원천기술을 확보			
6	논문명	Metal-nitrogen intimacy of the nitrogen-doped ruthenium oxide for facilitating electrochemical hydrogen production	저널명	Applied Catalysis B: Environmental
			게재년도	2022
			mrnIF	98.5
	주요내용	■ 질소 도핑된 루테늄 산화물의 금속-질소 상호작용을 조사하고 이것이 전기화학적 수소 생산에 어떻게 기여하는지를 실험적으로 검증		
사업목표와의 연관성	■ 물리적 및 화학적인 상호작용을 통해 촉진된 전기화학적 수소 생산에 대한 새로운 시각을 제공하였으며, 연료전지분야의 세계적 수준의 원천기술을 확보하기 위한 기술 기반을 마련			
바이오에너지분야				
7	논문명	Food waste valorization to green energy vehicles: sustainability assessment	저널명	Energy & Environmental Science
			게재년도	2021
			mrnIF	99.1
	주요내용	■ 바이오메탄을 이용한 내연기관차(ICEV), 바이오에탄올을 이용한 ICEV, 바이		

		오수소를 이용한 연료전지차(FCV), 바이오전기를 이용한 플러그인 전기 자동차 등 음식 폐기물(FW)의 친환경 연료를 활용한 4가지 유형의 GV 운영을 비교		
	사업목표와의 연관성	■ 음식 폐기물을 지속 가능한 방식으로 가치화하고 이를 친환경 에너지 차량에 활용함으로써 얻을 수 있는 잠재적 이점과 환경적 영향을 평가한 연구로, 세계적 수준의 에너지 및 환경 분야의 원천기술을 확보		
8	논문명	Direct propylene epoxidation with oxygen using a photo-electro-heterogeneous catalytic system	저널명	Nature catalysis
			게재년도	2022
			mrnIF	98.8
	주요내용	■ O ₂ 를 이용한 프로필렌 에폭시화를 위한 통합된 광전기 이중 촉매 시스템을 설계 및 제조하고, 해당 시스템을 사용하여 프로필렌을 에폭시드로 변환하는 과정에서의 반응 메커니즘과 효율성을 이해		
	사업목표와의 연관성	■ 광전기 이중촉매 시스템을 이용한 화합물 생산 방법이 친환경적이고 효율적일 수 있다는 가능성을 제시하였으며, 세계적 수준의 에너지 및 환경 분야의 원천기술을 확보		
에너지효율향상분야				
9	논문명	Multi-Level Stacked Regression for predicting electricity consumption of Hot Rolling Mill	저널명	Expert Systems with Applications
			게재년도	2022
			mrnIF	90.5
	주요내용	■ 제철소에서 열간 압연기(HRM, Hot Rolling Mill)의 특정 기간의 총 전력 소비량을 예측하기 위해, 다층 누적 회귀 모델(Multi-Level Stacked Regression model)을 도입하고 이 모델이 전력 소비의 복잡한 패턴을 어떻게 파악하는지 이해		
	사업목표와의 연관성	■ 새로운 모델을 개발하여 전기 소비량 예측에 적용될 수 있는 잠재적인 이점과 응용 가능성을 논의하였으며, 에너지 효율 향상 원천기술 개발을 통해 관련 산업분야의 혁신성장 동력 창출에 기여		
10	논문명	Reliable Lego (R)-style assembled stretchable photovoltaic module for 3-dimensional curved surface application	저널명	Applied Energy
			게재년도	2022
			mrnIF	91.2
	주요내용	■ 건물 일체형 태양광발전(BIPVs) 및 차량 일체형 태양광발전(VIPVs)를 포함한 차세대 태양광 응용 분야의 요구사항을 충족하기 위해, 곡면에 조립할 수 있는 레고® 스타일 조립 모듈을 도입하여, 압축력과 다습 환경에서의 태양광 성능 및 에너지 변환 효율 등을 확인		
	사업목표와의 연관성	■ 복잡한 형태의 표면에 적용될 수 있는 레고 스타일 조립이 가능한 태양전지 모듈을 개발함으로써, 에너지 소비 부문(건물)의 에너지 효율 향상 추진으로 관련 산업분야의 혁신성장 동력 창출에 기여		

나. 기술적 우수성(특허)

□ 특허 질적분석 개요

- 기술적 성과(특허) 분석법 : 특허 성과의 질적 평가방법인 특허분석평가시스템 (한국발명진흥회(KIPA)의 System to Measure, Analyze and Rate patent Technology; SMART)을 통해 산출된 점수(Score) 및 등급(Grade)을 활용하여 등록 특허 성과의 질적 수준을 검토
 - SMART 시스템은 다량의 특허정보를 활용하여 구축된 5대 기술별 평가 모형을 통해 기술 분야별 특성과 차이를 반영한 객관적인 평가 결과를 제공해주는 온라인 특허평가 시스템으로, 대상 특허의 전체 점수, 등급뿐 아니라 평가지표별 점수와 등급을 제시하여 특허 유지관리의 효율성을 향상시키고 객관적이며 신속한 특허평가가 가능
 - 특허 평가는 평가 모형을 활용하여 평가 점수가 생성되고, 등급 분류 기준에 따라 등급이 부여*되며, 최고 AAA 등급부터 최하 C 등급까지 총 9등급으로 나뉨
- ※ 평가등급은 기술분야별(기계, 물리/재료, 전기/전자/IT, 바이오, 화학) 상대평가에 의해 산정됨



[그림 II-15] SMART 등급 부여기준 분포

<표 II-57> 특허 SMART 분석 평가지표 및 배점('18.3월 이후 평가모델 기준)

평가지표	세부내용	배점
권리성	제 3자와의 특허분쟁에서 독점배타적 지위를 유지할 수 있는 정도	35
기술성	기술동향과 부합하거나 선도하는 정도	35
활용성	비즈니스에 활용되는 정도 및 활용 가능성	30

▶ 평가요소 : IPC 수, 거절결정불복심판수, 권리자 변동수, 도면수, 독립항 길이 및 수, 무효심판 기각 수, 발명자 수, 정보제공 수, 조기공개 여부, 총 피인용 수, 해외 패밀리 국가수 등 32개 평가요소를 고려하여 종합적 평가

□ 특허 성과의 질적 수준(사업 전체 기간, 2009~2023)

- 기후변화대응기술개발 사업 전체 기간(2009~2023) 동안 본 사업을 통해 창출된 등록특허의 SMART 총점 등급 평균점수는 4.66이고, 권리성 > 기술성 > 활용성 순으로 우수한 수준을 가짐
- 사업 전체 기간 동안 권리성 등급의 평균점수는 5.18점으로 SMART 분석 평가지표(권리성, 기술성, 활용성) 중 가장 높은 평가를 받아 개발된 기술들이 독점배타적인 지위를 높게 갖음을 의미
- ※ 본 사업의 특허 질적분석은 2009년부터 2023년까지 등록된 특허 1,491건 중 SMART 시스템에서 평가 가능한 1,006건의 특허를 대상으로 분석을 수행하였음

<표 II-58> 사업 전체 기간(2009~2023) 특허 SMART 분석 평가지표별 연도별 평균점수

구분	특허 합계	특허 비중	평균점수			
			총점	권리성	기술성	활용성
2009	0	-	-	-	-	-
2010	1	0.1%	6.00	3.00	7.00	5.00
2011	2	0.2%	6.00	6.00	7.50	4.50
2012	8	0.8%	4.63	4.25	5.63	4.00
2013	23	2.3%	5.74	5.43	6.43	4.13
2014	34	3.4%	4.79	4.74	5.38	3.79
2015	54	5.4%	5.19	5.24	5.33	4.41
2016	57	5.7%	4.84	5.18	5.35	4.26
2017	82	8.2%	5.01	5.40	5.41	4.37
2018	96	9.5%	4.80	5.25	5.09	4.42
2019	138	13.7%	4.89	5.64	5.05	4.76
2020	193	19.2%	4.72	5.36	4.87	4.62
2021	184	18.3%	4.16	4.81	4.20	4.00
2022	91	9.0%	4.18	4.82	4.25	3.81
2023	43	4.3%	4.16	4.91	3.88	4.47
총합계	1,006	100.0%	4.66	5.18	4.86	4.33

- 2009~2023년까지 사업 전체기간 동안 본 사업을 통해 등록된 특허의 우수특허(A~AAA)* 비율은 6.3%로 국가R&D 대비 우수한 성과를 창출해 냄
- ※ 우수특허 : SMART 질적 지표 9개 등급 중 상위 3등급(상위 23%) 이내 특허 비율을 의미²⁾
- 본 사업의 우수특허 비율은 6.3%(63건)로 2017~2021년 국가R&D 사업에서 발생한 국내 특허의 우수특허 비율(4.3%) 대비 1.3배 높은 성과를 창출
- 사업 전기간 동안 등록 특허에 대해서 SMART 총점 등급별 특허건수를 살펴보면, BB등급이 346건(37.5%)으로 가장 많은 비중을 차지하였으며, BBB등급이 197건(21.3%)으로 뒤를 이음

2) 2021 국가연구개발사업 성과분석보고서(한국과학기술기획평가원, 2022)

<표 Ⅱ-59> 사업 전체 기간(2009~2023) 특허 SMART 분석 총점 등급 연도별 성과

(단위 : 건, %)

구분	특허 합계	특허 비중	총점 등급									평균 점수
			AAA	AA	A	BBB	BB	B	CCC	CC	C	
2009	0	0.0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
2010	1	0.1%	0	0	0	1	0	0	0	0	0	6.00
2011	2	0.2%	0	0	0	2	0	0	0	0	0	6.00
2012	8	0.8%	0	0	0	2	3	2	0	1	0	4.63
2013	23	2.3%	1	2	4	7	5	2	0	2	0	5.74
2014	34	3.4%	0	1	4	10	7	5	2	1	4	4.79
2015	54	5.4%	1	0	8	19	13	4	4	3	2	5.19
2016	57	5.7%	1	0	4	14	18	8	9	3	0	4.84
2017	82	8.2%	0	0	8	28	21	12	8	5	0	5.01
2018	96	9.5%	0	0	6	21	36	20	8	4	1	4.80
2019	138	13.7%	1	1	6	43	45	13	24	4	1	4.89
2020	193	19.2%	0	1	10	35	81	28	31	5	2	4.72
2021	184	18.3%	0	0	3	15	82	30	22	27	5	4.16
2022	91	9.0%	0	0	1	9	37	21	9	9	5	4.18
2023	43	4.3%	0	0	0	5	21	4	6	3	4	4.16
총합계	1,006	100.0%	4	5	54	211	369	149	123	67	24	4.66
비중			0.4	0.5	5.4	21.0	36.7	14.8	12.2	6.7	2.4	
누적비중			0.4	0.9	6.3	27.2	63.9	78.7	91.0	97.6	100.0	



[그림 Ⅱ-16] 사업 전체 기간(2009~2023) 우수특허 비율 추이

□ 특허 성과의 질적 수준(최근 3년, 2021~2023)

- 최근 3년(2021~2023) 동안의 등록특허 216건에 대한 SMART 총점 등급 평균점수는 4.17이고, 권리성 > 기술성 > 활용성 순으로 우수한 평가를 받음
- 최근 3년간의 등록특허 권리성 등급의 평균점수는 4.83점이며, 2021년 4.81점에서 2022년 4.82점, 2023년에는 4.91점으로 평가받아 등록특허의 권리성 점수가 꾸준히 상승
- ※ 2021년부터 2023년까지 창출된 등록특허의 질적분석은 SMART 시스템에서 평가 가능한 총 318건을 대상으로 분석을 수행하였음

<표 II-60> 최근 3개년(2021~2023) 특허 SMART 분석 평가지표별 연도별 평균점수

구분	특허 건수	특허 비중	평균점수			
			총점	권리성	기술성	활용성
2021	184	57.9%	4.16	4.81	4.20	4.00
2022	91	28.6%	4.18	4.82	4.25	3.81
2023	43	13.5%	4.16	4.91	3.88	4.47
총합계	318	100.0%	4.17	4.83	4.17	4.01

- 2021년부터 2023년까지 특허 등록 성과의 SMART 등급 분석 결과를 보면 우수특허(A~AAA)는 4건에 그치나, B등급 이상의 비율이 71.7%로 국가 R&D 전체(61.9%) 대비³⁾ 높은 수준이며, 과기정통부 R&D사업의 성과인 64.6%와 대비하여도 높은 수준임

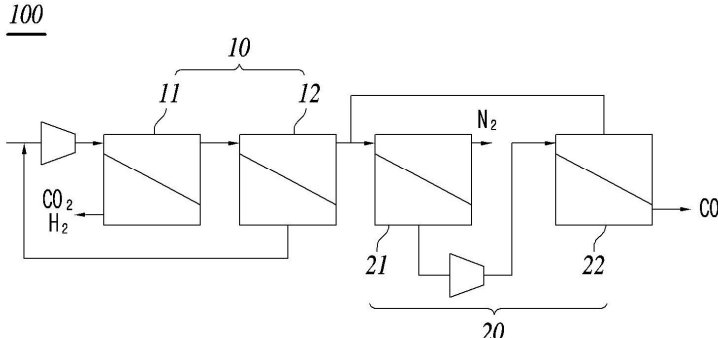
<표 II-61> 최근 3개년(2021~2023) 특허 SMART 분석 총점 등급 연도별 성과

	구분	총점 등급									평균 점수
		AAA	AA	A	BBB	BB	B	CCC	CC	C	
기후 변화 대응 R&D	2021	0	0	3	15	82	30	22	27	5	4.16
	2022	0	0	1	9	37	21	9	9	5	4.18
	2023	0	0	0	5	21	4	6	3	4	4.16
	합계	0	0	4	29	140	55	37	39	14	4.17
	비중	0.0	0.0	1.3	9.1	44.0	17.3	11.6	12.3	4.4	
	누적 비중	0.0	0.0	1.3	10.4	54.4	71.7	83.3	95.6	100.0	
정부 R&D	비중	0.0	0.1	1.7	11.1	26.4	22.7	19.8	15.7	2.6	
	누적 비중	0.0	0.1	1.8	12.9	39.2	61.9	81.7	97.4	100.0	
과기부 R&D	비중	0.0	0.0	1.1	11.9	32.2	19.5	20.2	13.6	1.6	
	누적 비중	0.0	0.0	1.1	12.9	45.1	64.6	84.8	98.4	100.0	

3) 2021년 과학기술정보통신부 주요 연구개발사업 성과분석 보고서(2023, 한국연구재단)

- 최근 3개년 동안 창출된 우수특허(A~AAA)를 살펴보면 4건 중 2건은 차세대탄소자원화 분야에서 개발된 기술이며, 나머지 2건은 연료전지와 C1가스리파이너리 분야에서 개발된 기술임
- “산업부생가스로부터 일산화탄소 회수 시스템 및 회수 방법(등록번호 1022240790000)”는 산업부생가스로부터 일산화탄소를 고순도 및 경제적으로 회수할 수 있는 기술로 온실가스 저감을 통한 기후변화 문제해결에 기여할 수 있는 기술적 핵심성을 확보함
- “최적화 기반의 탄소 활용 전략을 수립하기 위한 방법 및 이를 수행하는 서버(등록번호 1022035020000)”는 CO₂ 직접자원화 설계기술을 개발하여 온실가스 저감을 통한 기후변화 문제해결에 기여할 수 있는 기술적 핵심성을 확보함

<표 II-62> 우수특허(총점 A) 성과 상세내용(1)

우수특허	산업부생가스로부터 일산화탄소 회수 시스템 및 회수 방법		
등록국	대한민국	특허권자	한국화학연구원
등록번호	1022240790000	등록일	2021.03.02
총점 등급	A	기술분야	차세대 탄소자원화
과제명	CO 및 CH ₄ 회수용 분리막 원천소재 및 분리공정 개발		
요약문	이산화탄소, 질소, 일산화탄소 및 수소를 포함하는 산업부생가스를 공급하는 공급부; 이산화탄소 및 수소를 투과시킬 수 있는 분리막을 포함하며, 상기 공급부로부터 공급되는 산업부생가스를 공급받아 이산화탄소 및 수소를 투과시키는 제1 막분리부; 및 전이금속이 담지된 고분자막을 포함하며, 상기 제1 막분리부에서 잔류한 기체를 공급받아 일산화탄소를 투과시키는 제2 막분리부;를 포함하는 산업부생가스로부터 일산화탄소 회수 시스템이 개시된다. 본 발명의 일 측면에 따른 일산화탄소 회수 시스템은 별도의 원료와 부원료 및 열에너지가 사용됨이 없이 상온에서 오직 압력 조작만으로 산업부생가스로부터 일산화탄소를 고순도로 회수할 수 있으므로 분리비용이 적게 들고, 공정이 간단하여 투자비 또한 적게 들며, 부수입을 올릴 수 있는 액화 CO₂도 얻게 되므로 경제성이 높다는 이점이 있다. 		

<표 II-63> 우수특허(총점 A) 성과 상세내용(2)

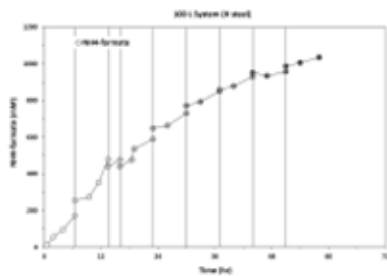
우수특허	최적화 기반의 탄소 활용 전략을 수립하기 위한 방법 및 이를 수행하는 서버		
등록국	대한민국	특허권자	인천대학교 산학협력단
등록번호	1022035020000	등록일	2021.01.11
총점 등급	A	기술분야	차세대 탄소자원화
과제명	최적화 기법을 이용한 CO ₂ 직접자원화 설계기술 개발 및 평가		
요약문	컴퓨팅 시스템 상에서 수행되는, 탄소 활용 전략 수립과 관련된 시뮬레이션을 수행하는 방법이 도시된다. 본 발명의 다양한 실시예 중 하나에 따르면, 탄소 활용 전략 시뮬레이션 수행 방법은 적어도 하나 이상의 공급 원료에 대한 선택 정보, 적어도 하나 이상의 활용 기술에 대한 선택 정보 및 적어도 하나 이상의 최종 산물에 대한 선택 정보를 수집하는 단계; 수집된 선택 정보를 기초로 하여, 공급 원료, 활용 기술 및 최종 산물들을 연결하는 탄소 활용 전략의 구조를 생성하는 단계; 선택된 활용 기술과 관련된 공정의 크기 및 비용과 관련된 데이터를 수집하는 단계; 시뮬레이션 수행을 위한 문제 설정 정보를 수집하는 단계; 및 수집된 상기 문제 설정 정보에 기초하여 목적함수를 선택하고 선택된 목적함수의 최대값 또는 최소값을 계산하는 단계를 포함하여 구성될 수 있다.		

다. 기술적 우수성(세부기술)

□ C1가스 전환 유기산 부피 농도

○ 주요 연구개발 내용 및 우수성

- 대표적인 온실가스 배출 산업인 철강산업에서 발생하는 일산화탄소를 포함한 부생가스를 일산화탄소 수화효소를 이용해 유기산(개미산)으로 전환하는 등 연구는 **세계 최고수준의 기술을 확보하기 위해** 이미 생물전환공정으로 상용화가 진행된 Lanzatech Inc.의 에탄올 생산 성능과 경제성을 고려하여 **유기산 부피 농도 최종 목표치를 1mole/L 이상으로 설정**하였으며,
- **3개년도(2021~2023) 연구에서 모두 유기산 부피 농도 목표를 초과달성**하며 최종목표 180% 달성 완료
- 특히, **2023년도 연구에서는 100L 실증 시스템을 현대제철 당진공장에 설치하여 LDG(Linze Donawitz Gas)로부터 유기산 생산을 성공적으로 수행**

참고	100L 규모 일산화탄소 수화 반응기의 현장 운전
• 100L 규모의 일산화탄소 수화 반응기를 제작하여 이를 현대제철 현장 설치 및 운전을 진행 • 반응기의 안정적인 성능 운전이 진행됨을 확인하였고, 이러한 효소반응을 통해 현대제철 부생가스(LDG) 유래 일산화탄소가 1M 이상의 개미산으로 생산됨을 확인 • 연구팀에서 개발한 일산화탄소 수화반응의 경우 분리되지 않은 CO 함유 부생가스를 원료로 사용하고, 수화반응을 촉매하는 신개념의 효소촉매를 이용하여 개미산을 생산할 수 있는 개미산 생산기술임 • 스케일업된 현대제철 현장반응기 운영에서 별도의 추가적인 에너지 투입이 필요없이 고농도 개미산이 생산될 수 있는 원천개념 반응을 실증하였고, 이때 높은 수율의 개미산 생산이 가능함을 확인하여 향후 경제성이 매우 우수한 기술이 될 수 있음을 입증함	
	
100L 일산화탄소 수화 반응기 현장설치	100L-scale 반응기 개미산 생산

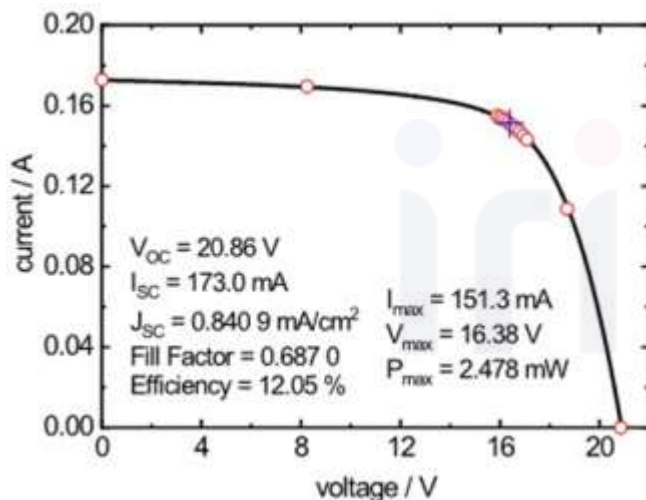
○ 연구개발 활용/향후 계획

- CO수화효소(CO hydratase)인 CODH와 FDH의 분자 재설계를 바탕으로 현재 대량 개미산 생산 시스템 개발을 목표로 안정적인 반응, 개미산 생산 공정 설계 및 운전 최적화 조건을 지속적으로 탐색중
- 이로부터 생산된 개미산을 이용하여 생분해성플라스틱 PHB 생산 미생물 제작 및 PHB 생산으로 연계 예정

□ 유기태양전지 모듈 효율

○ 주요 연구개발 내용 및 우수성

- 신규 모듈 구조, 고성능 기능층, 유연 투명전극, 고균일도 모듈 인쇄 공정, 레이저 패터닝 공정 등의 기술을 개발하여 고효율의 유기태양전지 모듈을 제작하는 기술을 확보
- 2022년도에 유기태양전지 모듈 크기 200cm² 이상의 대면적 모듈에서 13%의 고효율을 달성
- 2023년도에는 대면적 고균일 모듈 제작을 위한 슬롯다이(slot-die) 인쇄 공정과 유효 면적(active area)을 모듈 면적 전체의 97%까지 극대화하는 레이저 미세 패터닝 공정 등의 기술 개발을 통해, **14.5%의 고효율을 달성**하여 유기태양전지 모듈 제작기술을 확보함
- 특히, 기존 타 연구에서는 인체에 극도로 유해하여 공장에서 사용이 불가능한 할로젠 용매를 사용해 모듈을 제작해 상용화가 불가능하지만, 동 연구에서는 공장 생산에 사용 가능한 비할로젠용매를 사용했음에도 세계 최고효율의 모듈을 제작할 수 있는 상용화 기술을 개발하여 우수성을 입증



• 시험기관 : 한국에너지기술연구원

• 모델명/식별번호 : 0626

• 시험일자 : 2023.7.1..

• 솔라시뮬레이터 : WACOM,
WXS-155S-L2 (Class-AAA)

• 기준 태양전지 : KIER-PS-FD #2

• 시험조건 : STC [AM1.5G,
100mW/cm², (25.0±1.0)°C]

• 소자 면적 : 205.71cm²(지정 조사
면적)

• 시료 유형 : 투광형 유기
태양전지 미니모듈 (유리판 기반)

[그림 Ⅱ-17] 투광형 유기 태양전지 미니모듈 시험 결과

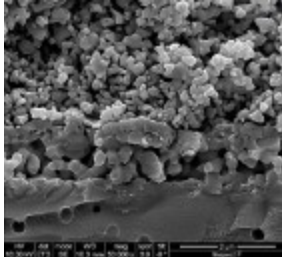
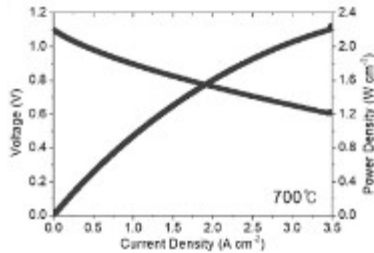
○ 연구개발 활용/향후 계획

- 최근 태양전지 연구단에서 개발한 프린팅이 가능한 광활성층 소재의 단위소자 최고효율이 약 17%로 달성되었기 때문에, 이 소재에 대한 대면적 모듈화 기술 최적화를 통해 2024년 16% 모듈 목표치를 충분히 달성하여 세계 최고수준의 기술 확보가 가능할 것으로 기대

□ SOFC 중저온영역 초고성능 셀 최대출력

○ 주요 연구개발 내용 및 우수성

- 최근 발표된 지르코니아 후막 기반의 고성능 SOFC 셀은 700oC에서 1.5-2W/cm² 정도의 최대출력을 나타내고 있으며, 이러한 고성능은 모두 작은 크기의 버튼셀에서 얻어져 대면적 셀에서 고성능이 구현된 예는 아직 보고된 바 없음
- 요소기술들을 종합적으로 적용하여 SOFC 셀의 성능을 최대화하고 대면적화하는 연구를 진행
- 2023년에는 양극 신소재, 양극/음극용 나노촉매, 계면 기능층을 적용하여 700℃, 전류 밀도 3.5A/cm²에서 SOFC 중저온영역 초고성능 셀 최대출력 2.2 W/cm²를 달성하여 세계 최고수준의 기술 수준을 확보

참고	중저온용 초고성능 셀 개발
	• 양극 페로브스카이트 나노촉매 infiltration 기술 개발 ☞ 다성분 페로브스카이트 촉매를 불순물 없이 in situ로 양극 기공 내부에 합성할 수 있는 infiltration 기술을 개발하여 셀 성능을 2배 가까이 높임 • 음극 단일원자 Pt/ceria 촉매 개발 ☞ Pt가 원자 단위로 ceria 나노입자 표면에 균일하게 분포되어 있는 촉매를 개발하여 연료극 분극저항을 50% 이하로 낮춤 • 셀 성능 향상을 위하여 키스트 및 각 위탁기관에서 개발한 요소기술을 적용하여 셀을 제조하고 성능을 측정 • 중저온용 초고성능 셀은 음극지지형 디자인으로 셀 크기는 2cmx2cm, 유효 전극 면적은 1cmx1cm로 제작됨 • 연료극 지지체 ~500μm, 연료극 기능층 ~15μm, 전해질 ~10μm, 반응방지막 ~3μm, 공기극 ~15μm 두께로 제조 • 키스트의 양극과 음극용 나노촉매, 카이스트의 양극 신소재, 성균관대의 양극-전해질 계면 기능층, 고려대의 표면 활성화막의 우수한 효과를 확인하였음
	  (좌) 제조된 셀의 미세구조 (우) 계면 기능층 SEM 이미지 고성능 셀의 700도 성능 평가 결과

○ 연구개발 활용/향후 계획

- 현재 계면 기능층, 음극 나노촉매, 표면 활성화막의 대면적 셀 적용을 위한 공정조건 최적화 실험이 개별적으로 진행되고 있으며, 2024년에는 이들을 종합적으로 적용하여 100cm² 크기의 대면적 고성능 셀을 제조하고 평가할 예정

□ 열분해오일로부터 탈산소연료 생산 탄소회수율

○ 주요 연구개발 내용 및 우수성

- 나무 열분해오일의 촉매화학적 전환을 통해 온실가스 저감을 위한 탄소 중립적 바이오항공유 생산 기술을 개발하는 것으로, **벤치 규모 탈산소 반응을 통해 탈산소 생성물의 탄소회수율 55% 목표를 달성**
- **0.6kg/일 급 바이오항공유 생산 공정 기술 개발**을 통해 중질유분에서 유래하는 고탄소 연료를 생산하고 신규 원천 촉매를 활용하여 촉매 반응 공정을 벤치 규모에서 132시간 이상 연속으로 안정적 운전이 가능하여, 기존 선진기술과 경쟁하여 기술적 우위를 확보

※ 기존 미국, 유럽, 중국 등에서 이루어지는 수첨탈산소 공정에서는 중질유분의 활용이 어려우며 장기 운전에서 생성물의 품질이 서서히 또는 급격히 나빠지는 문제가 보고되고 있음

참고	0.6 kg/일 급 바이오항공유 생산 공정 기술
• 개발된 바이오항공유 생산 공정기술의 주요 기능 및 사양은 다음과 같음 ☞ (벤치 규모 연속 운전 시간) 나무열분해오일 유량 25 g/h, 3가지 촉매의 조합으로 이루어진 촉매층 140 g, 수소 유량 ~3 L/min으로 132시간 이상 연속 운전 ☞ (탄소회수율) 나무열분해오일 대비 탄소 회수율 55% ☞ (O/C 비) $O/C = 0.0086 \text{ mol/mol}$ • 원천 촉매의 활용과 더불어 Pd/C – LaNiTiCe 촉매 – Ru/WZr로 구성된 3단 반응 시스템을 구성하고 벤치 규모 반응 운전 방법을 최적화하여 스케일업된 규모에서 132시간 이상 안정적인 연속 운전이 가능함을 확인	
 벤치규모 수첨탈산소 반응 장치  바이오항공유로 활용가능한 탈산소 연료	

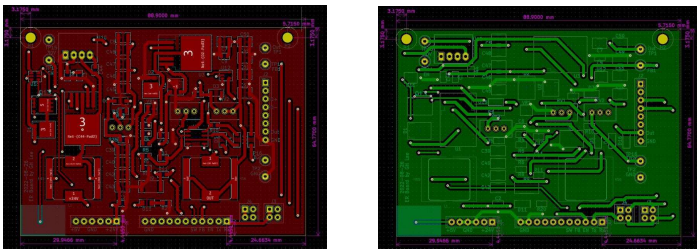
○ 연구개발 활용/향후 계획

- 벤치 규모 반응 운전 방법을 최적화에 대한 스케일업을 통한 안정적인 공정 운전 실증을 수행하고, 동 연구의 최종연차인 2024년 촉매 탄소회수율 60% 이상을 달성하고자 함
- 현재 지속가능 항공유는 유지 및 합성가스로부터 생산하는 제품이 대다수이나, 유지 원료의 확보에 한계가 있어 생산량을 확대하고 항공산업의 탄소중립 달성에는 한계가 있으며, 동 연구의 개발 기술을 통해 지속가능 항공유 생산을 위한 원료 공급 확대를 달성 기대

□ 나노그리드 전력/통신 전송용량

○ 주요 연구개발 내용 및 우수성

- 나노전력그리드의 전력/통신 송수신을 담당하는 에너지 라우터의 각 게이트웨이는 시스템 운전 중 새로운 노드가 연결되거나, 비정상적으로 노드가 연결 해제되더라도 별도의 조정 없이 시스템이 정상 운전해야 함
- 2023년도 목표치 100W/Line/10Gbps 달성을 위해 동 연구에서는 DC 전력 라우팅 기능을 갖는 고속 나노그리드 게이트웨이 시작품을 제작하여 기술을 확보
- 시작품은 승압을 위한 부스트 컨버터 회로와 전류 제어를 위한 피드백 회로가 포함된 벡 컨버터 회로, 수신 역할일 때 사용될 바이패스 회로를 조합한 구조로 설계
- 시작품이 배터리 충·방전 실험을 통해 1개 라인으로 양방향 전력 송수신이 가능함을 검증

참고	DC 전력 라우팅 기능을 갖는 고속 나노그리드 게이트웨이 개발
	• 개발된 시작품의 설계 요구사항은 다음과 같음 ☞ 비슷한 배터리 전압을 가진 두 노드가 연결되는 순간 전류를 제어할 수 있는 구조 ☞ 1개 라인으로 양방향 송수신이 가능한 구조 ☞ 100W 이상의 전력 송수신이 가능하고, 10Gbps 이상의 속도로 통신 가능한 구조 • 시작품은 승압을 위한 부스트 컨버터 회로와 전류 제어를 위한 피드백 회로가 포함된 벡 컨버터 회로, 그리고 수신 역할일 때 사용될 바이패스 회로를 조합한 구조로 설계하여, 1라인으로 양방향 송수신이 가능하면서, 운전 중 새로운 노드가 연결되더라도 순간 전류를 제한할 수 있도록 개발 • 시작품은 USB-C PD로 48V 5A로 연결되는 경우에 240W까지 전력을 제어할 수 있고, 통신 속도도 USB-C 3.0에서는 10Gbps (1,250MB/s)까지 가능하며, 먼저 자체적인 비호환 USB-C PD 규격을 사용하여, 100W/line 규격을 달성
	 에너지 라우터 시작품 인쇄 회로 (좌)앞면, (우)뒷면  USB C타입 커넥터 상용 제품

○ 연구개발 활용/향후 계획

- 2024년도 목표치인 200W/Line/20Gbps 달성할 것으로 기대되며, 건물용 나노 전력그리드 Living Lab을 구축 및 운영하여 분산자원 대응 나노 전력그리드의 전력/데이터 전송 최적 운영 및 제어 검증 예정

라. 경제적 우수성(기술이전)

□ 기술이전(최근 3년, 2021~2023)

- 최근 3년 동안 본 사업을 통해 총 31건의 기술이전 계약이 체결되었으며, 2021년 10건, 2022년 13건, 2023년 8건을 기록
- 실시권유형 중 통상실시권*이 연도별로 가장 많은 성과를 창출하였으며, 2021년에는 노하우이전, 2022년에는 전용실시권과 특허권양도가, 2023년에는 특허권 양도가 두 번째로 높은 비중을 차지
- ※ 특허권자 등이나 전용실시(사용)권자와의 계약에 의하여 또는 법률이나 행정처분에 의하여 일정한 범위에서 특허발명 등을 실시(사용)할 수 있는 권리

<표 Ⅱ-64> 최근 3개년(2021~2023) 실시권유형별 기술이전 성과

(단위 : 건, %)

실시권유형	2021		2022		2023		합계	
	건수	비중	건수	비중	건수	비중	건수	비중
노하우이전	3	30.0	1	7.7	1	12.5	5	16.1
독점적통상실시권	1	10.0	0	0.0	0	0.0	1	3.2
통상실시권	3	30.0	4	30.8	4	50.0	11	35.5
전용실시권	2	20.0	4	30.8	0	0.0	6	19.4
특허권양도	1	10.0	4	30.8	3	37.5	8	25.8
합계	10	100.0	13	100.0	8	100.0	31	100

- 최근 3년간 체결된 기술이전 성과의 기술 분야를 살펴보면 C1가스리파이너리 분야가 총 21건으로 67.9%의 가장 많은 비중을 차지하고 있으며, 에너지효율향상 > 태양전지 > 연료전지 분야 순으로 성과가 창출
- 이는 본 사업의 최종 성과목표에서 'C1가스리파이너리 분야의 기술 개발을 통해 세계 최고수준 기술경쟁력 확보에 기여'와 연계되는 결과이며, 사업의 목적인 온실가스 감축효과가 큰 기술 분야에 대하여 혁신 성장 동력 창출 지원을 달성하는데 기여

<표 Ⅱ-65> 최근 3개년(2021~2023) 세부기술별 기술이전 성과

(단위 : 건, %)

세부기술 분야	2021		2022		2023		합계	
	건수	비중	건수	비중	건수	비중	건수	비중
태양전지	2	20.0	0	0.0	0	0.0	2	6.7
연료전지	1	10.0	0	0.0	1	12.5	2	6.4
C1가스리파이너리	5	50.0	12	92.3	4	50.0	21	67.9
에너지효율향상	1	10.0	1	7.7	3	37.5	5	15.7
기반기술연구	1	10.0	0	0.0	0	0.0	1	3.3
합계	10	100.0	13	100.0	8	100.0	31	100

- 우수사례로는 철강산업의 부생가스에서 수소, 일산화탄소 분리회수하는 차세대 분리막 공정 기술이전(2021년, 한국화학연구원) 체결건으로 3억 원의 기술료 발생
 - 이전된 기술은 국내외 철강산업의 온실가스 감축과 탄소중립에 크게 기여할 수 있는 기술로 사업의 목적인 '온실가스 감축효과가 큰 기술 분야에 대하여 혁신 성장 동력 창출 지원'을 달성하는데 있어 경제적 핵심성을 가짐

<표 II-66> 기술이전 우수사례

계약명	철강 부생가스로부터 고순도 수소 분리막 공정		
발명자	권인찬	기술형태	통상실시권
기술양도	한국화학연구원	기술양수	단일가스캠(주)
기술체결	2021.12.22	기술료	300,000,000원
업체유형	중소기업	내역사업	차세대 탄소자원화
과제명	Non-acetogen 기반 CO 가스 이용 바이오폴리머 생산용 바이오촉매 및 원천기술 개발		
기술내용	• 활용도가 낮았던 철강산업 부생가스로부터 유용한 자원인 수소와 일산화탄소를 분리·정제하는 분리막 공정이 국내 독자 기술로 개발돼 기술이전을 실시함 • 부생가스로부터 수소와 일산화탄소를 분리·정제하는 기술은 난이도가 높아 국내에는 독자 기술이 없어 일부 기업에서 해외 흡착법(PSA) 상용 공정을 수입해 소규모 플랜트를 시범운영하였음 ※ 기존 흡착법은 고압에서 운전되며 가스 회수율이 낮아서 플랜트 제작·운영 비용 및 에너지가 많이 드는 단점을 가짐 • 철강 부생가스로부터 수소와 일산화탄소를 회수하는 분리막 기술을 세계 최초로 개발하였으며, 동 사업의 연구개발을 통해 95% 이상의 고순도 수소를 95% 이상 회수하고, 99% 이상의 고순도 일산화탄소를 90% 이상 회수하는 분리막 원천기술을 각각 개발 • 상용화시 경제적 효과 및 온실가스 저감 기여할 수 있으며, 화학연 연구팀과 기술이전 기업 단일가스캠(주)는 실증 플랜트 공정기술 개발 중		
			
기술이전 협약식		일산화탄소 회수 막분리 미니 파일럿	

(3) 대표성과

가. 대표성과 선정 방법 및 기준

□ 목적

- 2021년~2023년에 창출된 기후변화대응기술개발사업의 우수성과 후보 검토를 통한 대표성과 확정

□ 선정 방법

- **(후보성과 대상)** 2021년에서 2023년에 발생한 성과 중 본 사업의 주관·추진 주체가 선정한 우수성과 20개를 대상으로 함
 - ① ‘국가연구개발사업 우수성과 100선’ 우수성과 후보 제출 및 100선에 선정된 성과
 - ② 기후변화대응기술개발사업 사업단에서 제출한 우수성과
- **(대표성과 선정)** 주관연구기관 과제책임자와 내부연구진 논의 하에 선정
 - 성과의 차별적 우수성, 성과의 혜택, 성과의 혁신성 등을 고려하여 총 5개의 대표성과를 선정

<표 II-67> 대표성과 선정을 위한 후보 우수성과 목록

No.	성과명	발생연도	내역사업	성과창출자/소속	비고
1	개미산과 이산화탄소만으로 잘 증식하는 플랫폼 균주 개발	2021	C1가스리파이너리	이상엽/ 한국과학기술원	2021년 국가연구개발 사업 우수성과 100선
2	유사 할로젠 음이온을 사용한 고효율 페로브스카이트 태양전지 개발	2022	태양전지	김진영/ 울산과학기술원	2022년 국가연구개발 사업 우수성과 100선
3	고성능-고내구성 나노 촉매 개발로 차세대 그린수소생산 기술 확보	2023	연료전지	유성종/ 한국과학기술원	2023년 국가연구개발 사업 우수성과 100선
4	양자점-SnO ₂ 이중층을 이용한 고효율 페로브스카이트 태양 전지 개발	2023	태양전지	김동석/ 울산과학기술원	2023년 국가연구개발 사업 우수성과 100선
5	친수성/소수성 실리카 구형 분말 제조기술	2021	연료전지	황해진/ 인하대학교	2022년 사업 시행계획 주요성과 선정

No.	성과명	발생연도	내역사업	성과창출자/소속	비고
6	리튬금속 저장용 1차원 탄소나노 구조체 개발	2021	이차전지	이상민/ 전기연구원	"
7	고효율 전기화학적 이산화탄소 전환 에틸렌 생산 기술	2021	차세대 탄소자원화	오형석/ 한국과학기술 연구원	2022년 사업 시행계획 주요성과 선정
8	세계 최초 100m3/d급 RED-RO-RED 시스템 구축	2021	기반기술연구	정남조/ 한국에너지기술 연구원	"
9	소규모 VOCs 저감장치 자체재생하기 위한 기술개발	2021	기반기술연구	송지현/ 세종대학교	"
10	귀금속계 촉매 대체 가능한 저가 신규 촉매 개발	2021	기반기술연구	허일정/ 한국화학연구원	"
11	세계 최초 CO hydratase 및 개미산 생산기술 개발	2021	C1가스리파이너리	C1가스리파이너리 사업단	"
12	선택적 나무 유래 바이오항공유 생산 촉매 개발	2022	바이오에너지	하정명/ 한국과학기술 연구원	2023년 사업 시행계획 주요성과 선정
13	독립전원용 전력관리모듈 및 저전력 환경센서 개발	2022	에너지효율향상	문승언/ 한국전자통신 연구원	"
14	MEA 촉매층에서의 물질 전달 메커니즘 규명	2022	연료전지	이승걸/ 부산대학교	"
15	불소 함유기 치환 신규전해질 적용을 통한 고에너지밀도 리튬금속전지 장기신뢰성 기술 확보	2022	이차전지	이상민/ 포항공과대학교	"
16	고정밀 DC 아크고장 검출기술 개발	2022	에너지효율향상	정학근/ 한국에너지기술 연구원	"
17	반투명 CIGS 태양전지 모듈기술 개발	2022	태양전지	정중현/ 한국과학기술 연구원	"
18	바이오 알파올레핀 생산 고효율 촉매 공정 기술 개발	2022	바이오에너지	황동원/ 한국화학연구원	"
19	고성능 태양광 물분해용 헤테로정선 광전극 소재 개발	2022	이차전지	박종혁/ 연세대학교	"
20	친환경 공기 냉매 적용 초고속 터보 냉방 시스템	2022	에너지효율향상	이범준/ 한국에너지기술 연구원	"

□ 대표성과 분석 항목 및 기준

- (사업과의 연관성 및 핵심성) 성과와 사업 목표 간 연관성 및 핵심 성과라고 판단할 수 있는가?
- (기존 지식/기술 대비 성과의 차별성) 국내외 유사기술 대비 어떤 차별성을 갖는가?

점수	판단기준
3	· 선진연구 추격
2	· 선진연구와 경쟁
1	· 세계 최초 구현

- (성과의 혜택(파급효과)) 성과의 혜택 및 활용이 어떤 수준인지?

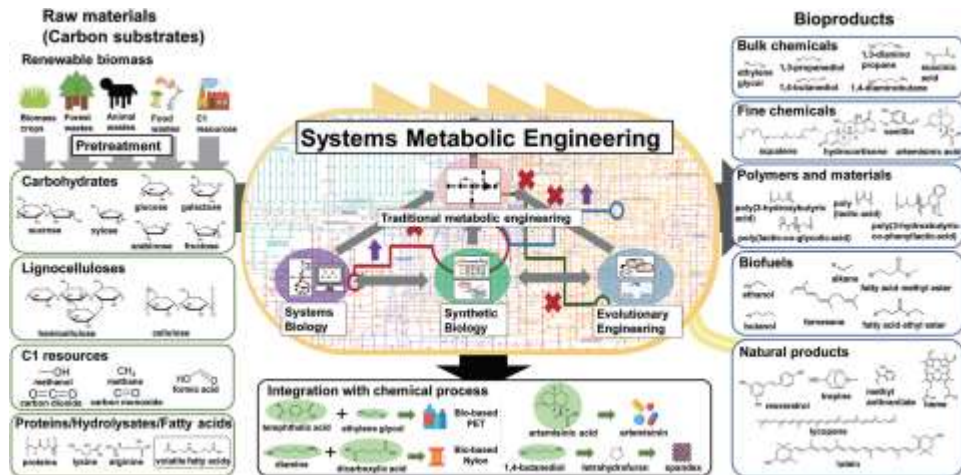
점수	판단기준
5	· 새로운 지평을 개척할 수 있는 발명/발견 · 연구결과를 접한 모든 사람들이 놀랄만한 혜택을 제공
4	· 수요자의 이목을 끌만한 차별적인 혜택의 향상 · 비용을 더 지불하더라도 연구성과를 먼저 활용하고 싶을 정도의 혜택을 창출
3	· 한 눈에 알아볼 수 있는 혜택의 향상 · 본 연구결과를 통해 기존에 제공하지 못한 혜택을 제공
2	· 어느 정도 혜택의 향상 · 기존에 제공 가능한 혜택보다 향상된 혜택을 제공
1	· 기존과 다르다는 사실 자체에 의미를 두는 변화 · 기존에 제공 가능한 혜택을 다른 방식으로 제공가능

- (성과의 혁신성) 성과가 얼마나 혁신적인지?

점수	판단기준
5	· 완전히 새로운 발견/발명
4	· 새로운 원리에 기반한 차세대 지식의 발견/발명
3	· 알려진 방법으로 기존 지식을 근본적으로 개선
2	· 기존 지식을 개선하는 발견/발명
1	· 기존의 방법으로 현안을 도출, 해결방안을 제시

나. 대표성과 선정

대표성과 1	개미산과 이산화탄소만으로 잘 증식하는 플랫폼 균주 개발		
성과창출자	이상엽 / 한국과학기술원		
과제명	시스템대사공학 기반 개미산으로부터 숙신산 및 말릭산 생산 미생물 공정 개발		
성과창출년도	2021년 1월 - 2023년 12월		
종합성과분석			
		사업과의 연관성/ 핵심성	분자생물학, 합성생물학, 시스템생물학, 진화공학 등의 기술을 융합하여 개미산 및 이산화탄소 동화 회로 개발 및 유용화합물 생산 공정을 개발하였으며, 효율적이면서도 친환경적인 바이오 화학 기반의 대체 기술을 개발하였음
		차별성	개미산과 이산화탄소만을 사용한 대장균 배양에 최적화된 배양 조건을 개발하고, 개미산 동화와 관련된 외래 유전자들의 발현량 미세조절과, ATP 합성에 관여하는 막단백질의 발현량을 미세조절하여 개미산과 이산화탄소만을 이용하여 높은 세포농도까지 성장하는 대장균을 세계 최초로 개발
성과의 혜택	- 대장균을 이용한 발효 공정을 통해 개미산 및 이산화탄소로부터 바이오 연료, 고분자 및 다양한 화학물질의 생산이 가능 - 시스템대사공학 기술을 통하여 바이오 공정 개발 비용을 최소 연간 5억 달러 이상 감축할 수 있으며, sRNA 기술, 바이오 연료 생산 공정 등을 기술이전하여 상업적 유용성을 증명하였음		
혁신성	- 타 연구팀의 경우 Adaptive Laboratory Evolution을 통해 균주 개발에 성공한 반면 본 성과는 100% rational metabolic engineering만을 이용해 균주를 개발하여 실질적으로 개미산과 이산화탄소 동화와 세포성장에 필요한 물질 합성에 요구되는 요소들을 구체적으로 파악 - 기존 연구들은 세포 농도만 측정하여 성장을 관측한 반면 본 연구진은 colony forming unit 측정을 통해 세포분열을 확인하여 이산화탄소와 개미산만으로 성장한다는 사실을 최초로 검증 - 타 연구팀에서 개발된 균주의 경우 낮은 세포 성장(OD600: ~1)을 보여 유용화합물 생산에 부적합하였으나, 본 성과의 미생물은 높은 세포 성장(OD600: ~16)이 가능하여 향후 유용화합물 생산에 활용될 수 있기에 기존 기술과의 차별적인 혁신성을 가짐		



시스템 대사공학을 통한 개미산 및 이산화탄소 동화 회로 개발 및 유용화합물 생산 공정 개발 과정

주요성과 내용

- 세계 최고 권위지 중 하나인 Nature Microbiology (IF: 28.3)에 게재되었으며, 해당 호 Hero 논문으로 선정
- Bang, Junho, et al. "Escherichia coli is engineered to grow on CO₂ and formic acid." Nature Microbiology 5.12 (2020): 1459-1463.

- 성과 관련 특허 출원
- "이산화탄소와 개미산만으로 성장 가능한 재조합 미생물 및 상기 재조합 미생물을 이용하여 유용물질을 제조하는 방법", (10-2020-0086811, 2020년 7월, 출원, 대한민국)

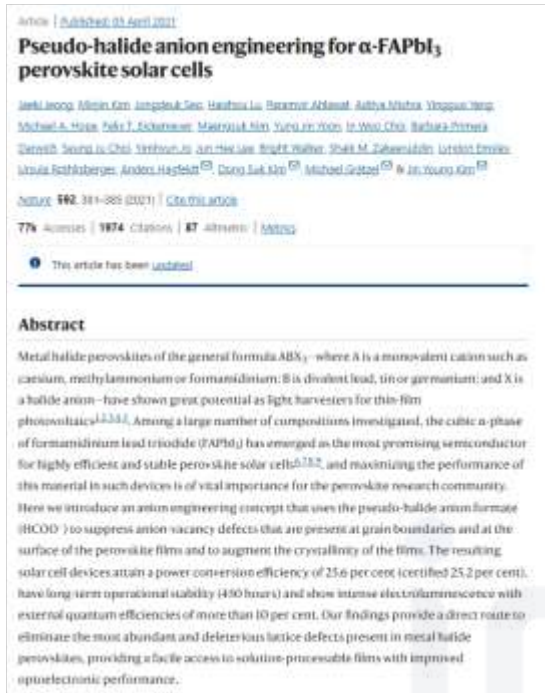


대표성과 2	유사할로젠 음이온을 사용한 고효율 페로브스카이트 태양전지 개발	
성과창출자	김진영 / 울산과학기술원	
과제명	고안정,친환경,최고효율 단일접합 태양전지 원천기술 개발	
성과창출년도	2021년 2월	
종합성과분석		
	사업과의 연관성/ 핵심성	- 페로브스카이트 태양전지는 저렴한 비용과 높은 효율로 차세대 태양전지로 각광받고 있으나, 소재의 내구성 문제로 상용화에 문제가 있음 - 본 성과는 음이온인 '포름산 이온(CH_3COO^-)'을 첨가제로 사용하는 연구를 수행하여 세계 최고 수준의 전력변환효율인 25.6%를 달성함으로써 '유사할로젠' 음이온의 탁월한 결함 제어 능력을 증명
	차별성	- 기존의 양이온 첨가제를 통한 연구에서는 페로브스카이트 결함 중 가장 높은 비중을 차지하는 X자리 결함을 효과적으로 제어하지 못했음. 본 연구는 유사할로젠 음이온을 사용하여 페로브스카이트 격자의 A, B자리가 아니라 X자리에 직접적으로 결함하는 효과를 통해 X자리 결함을 효과적으로 제어하여 개방전압(VOC)이 최대 1.21V까지 향상됨 - 본 성과를 통해 달성한 전력변환효율은 25.6%로 이는 세계 최고 수준임
성과의 혜택	- 개발된 결함 제어 및 안정성 향상 기술은 페로브스카이트 균등화 발전원가(levelized cost of electricity, LCOE)를 줄여 에너지 회수 시간(energy payback time, EPBT)을 낮추어 시장 경쟁력을 높일 수 있음 - 기존 음이온을 대체하는 새로운 물질인 포름산 이온을 유사 할로젠으로 사용하여 페로브스카이트의 품질을 향상시키고, 포름산 이온의 주변 원소와 긴밀히 상호작용하는 것을 밝혀냈다는 점에서 향후 페로브스카이트 연구 방향에 새로운 가능성을 제시	
혁신성	- 페로브스카이트를 구성하는 유사할로젠 물질에 대한 기존의 인식은 X자리 조성이 다른 페로브스카이트를 만들어내는 역할에 그쳤음 - 본 연구에서는 유사할로젠을 페로브스카이트의 전체적인 조성을 변화시키는 데 사용하는 것이 아니라 페로브스카이트의 성능과 안정성을 저하시키는 결함을 제어하는 것에 사용될 수 있다는 사실을 보여줌	

주요성과 내용

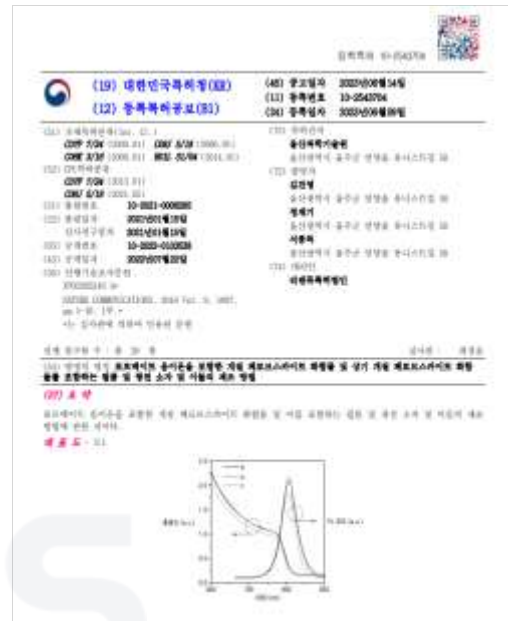
- 세계 최고 권위지 중 하나인 Nature(IF: 69.5)에 게재

Jeong, Jaeki, et al. "Pseudo-halide anion engineering for α -FAPbI₃ perovskite solar cells." *Nature* 592.7854 (2021): 381-385.

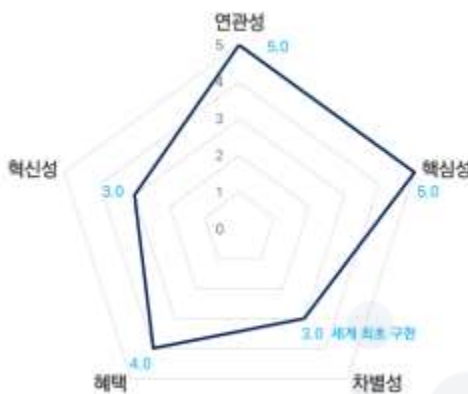


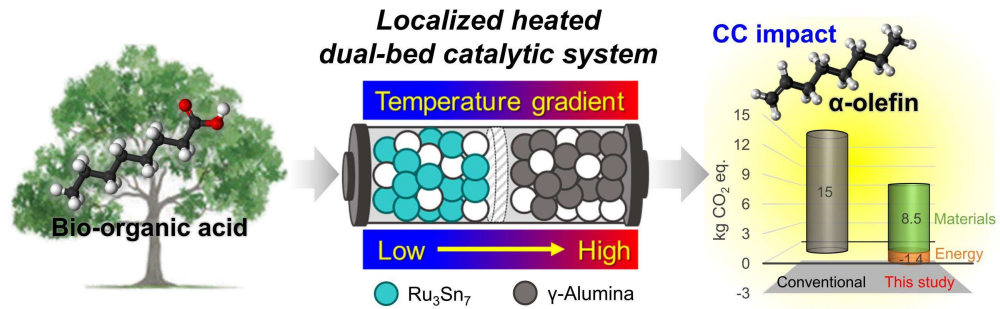
- 성과 관련 특허 출원

“포르메이트 음이온을 포함한 개질 페로브스카이트 화합물 및 상기 개질 페로브스카이트 화합물을 포함하는 필름 및 광전 소자 및 이들의 제조 방법”, (10-2543704, 2023년 6월, 등록, 대한민국)



대표성과 3	고성능-고내구성 나노 촉매 개발로 차세대 그린수소생산 기술 확보		
성과창출자	유성종 / 한국과학기술연구원		
과제명	고체알칼리막 연료전지용 고출력 고내구성 MEA 및 저가형 비귀금속계 촉매 개발		
성과창출년도	2022년 3월		
종합성과분석			
	사업과의 연관성/ 핵심성	- 본 성과는 백금을 대체할 저가·고성능·고내구성 촉매 개발과 이를 활용한 멀티스케일 막전극의 접합체를 경제적으로 제작 할 수 있는 공정을 세계최초로 개발 - 사업 시작 단계에서 선진국의 기술에 의존하며 추격하는 R&D 단계에 머물렀던 국내 그린수소생산 기술 수준을 극적으로 향상시켜 선진국과 어깨를 나란히 할 수 있는 위치로 견인	
	차별성	- 새로 개발한 루테늄 산화물 기반 나노촉매를 이용하여 고분자전해질 수전해 시스템에 적용 시 2.0V에서 상용 이리듐 산화물 촉매의 질량 대비 2.5배 이상 증가한 수전해 성능을 달성 - 개발한 루테늄 기반의 나노촉매는 상용 이리듐 산화물 촉매보다 귀금속 사용량 대비 11배 이상의 우수성을 보이며, 장시간 구동에도 안정적인 세계최고 수전해 성능을 확보	
성과의 혜택	- 백금의 도입을 통해 안정성이 높은 루테늄 산화물 촉매를 창출하였고, 동 개발 기술은 그린 수소 생산 기업과의 협력을 통해 양산화와 상용화를 진행 중이며, 이를 통해 그린 수소 경제의 핵심 기술로 활용될 전망임 - 국가 차원에서 신재생 에너지 보급률이 크게 증가함에 따라 비탄력적으로 생산되는 신재생 에너지를 장기간, 대용량 보관이 가능한 가스연료로 저장하는 공정을 실현할 수 있음 - 또한, 동 성과는 부생수소가 아닌 고순도의 청정 수소의 값싼 공급을 통해 연료전지 보급 확대에 기여할 수 있을 것으로 기대		
혁신성	- 동 성과는 이리듐 산화물보다 높은 활성을 지닌 루테늄 산화물의 전기화학적 불안정성 문제를 해결하기 위해 백금을 도입하는 기술을 개발함으로써, 안정성이 높은 루테늄 산화물 촉매를 창출 - 이 촉매는 고분자전해질 수전해 시스템에서 우수한 성능을 보여주었으며, 상용 이리듐 산화물 촉매보다 2.5배 이상의 성능 향상과 비용 효율성을 입증		

대표성과 4	바이오 알파올레핀 생산 고효율 촉매 공정 기술개발	
성과창출자	황동원, 윤광남 / 한국화학연구원	
과제명	바이오 유기산 유래 폴리알파올레핀 제조 촉매기술 개발	
성과창출년도	2023년 10월	
종합성과분석		
	사업과의 연관성/ 핵심성	- 본 성과는 고성능 RuSn 합금 촉매 기반 듀얼베드 촉매시스템 개발을 통해 바이오 유기산으로부터 알파올레핀을 제조하는 기존 다단계 촉매반응의 효율을 획기적으로 개선 (알파올레핀 수율 63% 및 순도 80% 달성) - 탄소중립형 원료인 바이오매스로부터 알파올레핀을 생산할 수 있는 혁신적인 기술로서 온실가스 감축효과가 큰 친환경 공정 기술임
	차별성	- 기존 석유화학 공정 대비 바이오매스 유래 유기산으로부터 알파올레핀을 생산할 수 있는 신공정 개발을 통해 온실가스 감축 50% 가능 - 기존 다단계 촉매 공정 대비 공정 효율을 획기적으로 개선할 수 있는 고성능 촉매 및 듀얼베드 촉매시스템 개발을 통해 알파올레핀 수율 21%, 순도 45% 향상 가능
성과의 혜택	- 다단촉매반응 통합을 통한 단일화 공정개선을 통한 반응 및 분리시스템 간소화로 에너지 저감 효과 가능하며, 기존 다단공정대비 생성물 수율 및 선택도 향상 및 이를 통한 경제성 확보 가능 1-옥텐과 1-헥센의 선형 알파올레핀은 윤활유 성분인 폴리올레핀 중합체 제조 원료로서, 국내에서 매년 10만 톤 이상 사용되고 있지만, 전량 수입에 의존하고 있음. 동 성과인 신규 알파올레핀 생산 기술 적용시 국내 석유화학산업에서 필요한 친환경 알파올레핀 생산 기반 확보 가능	
혁신성	- 바이오 옥탄산 수소화 반응과 옥탄올 탈수 반응을 One-Pot으로 구현 가능한 고효율 Ru-Sn/SiO₂-Al₂O₃ dual bed 촉매시스템 개발을 통해 세계 최고 수준 1-옥텐 생산 수율 달성으로 상용화 가능성 확인 - La이 도핑 알루미나 촉매 기술을 활용하여 바이오 알코올의 이성질화 반응을 최소화하면서 고효율로 알파올레핀을 선택적으로 생산할 수 있는 촉매시스템 개발 (알파올레핀 수율 90.9%, 순도 92.3%, 및 생산량 34.5mmol/h 달성)	



바이오 유기산 유래 알파올레핀 제조를 위한 촉매 시스템 개념도

주요성과 내용

• 성과 관련 특허 출원

“고선택성의 알파올레핀을 제조하는 방법 및 이를 위한 듀얼-베드 촉매 시스템”, (PCT/KR2022/009309, 2023년 2월, 국제출원)

• 세계적인 화학공학분야 국제학술지인 Chemical Engineering Journal(IF: 16.7)에 게재

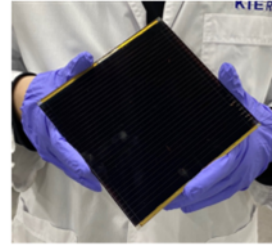
Hidajat, Marcel Jonathan, et al., "A significant support effect on RuSn catalysts for carboxylic acid transformation to hydrocarbons." Chemical Engineering Journal 461 : 141912 (2023)



대표성과 5		양자점-SnO2 이중층을 이용한 고효율 페로브스카이트 태양 전지 개발	
성과창출자		김동석 / 울산과학기술원	
과제명		고안정, 친환경, 최고효율 단일접합 태양전지 원천기술 개발	
성과창출년도		2022년 3월	
종합성과분석			
	사업과의 연관성/ 핵심성	0.1 cm² 이하 소면적 태양전지 효율 25.72%로 비공인 세계기록을 달성했으며, 국공인인증기관인 Newport에서도 25.4%의 효율을, 대면적인 25cm² 및 64cm² 크기의 서브모듈에서도 각각 21.66% 및 20.55% 공인인증 효율을 기록하여, 각 면적에서 모두 세계 최고수준의 변환효율을 확보	
	차별성	- 기존 소면적(0.1cm² 이하) 페로브스카이트 태양전지 최고효율 25.7%와 동일한 25.7% 효율을 보유하고 있어 세계 최고효율과 동일한 성능을 달성 - 대면적(20cm² 이상) 페로브스카이트 태양전지 최고효율은 21.4%로 이를 능가하는 21.67%의 공인효율을 보유하고 있어 세계 최고수준의 성능을 확보	
성과의 혜택	- 기존에 사용되는 정공수송물질에 불소(F)를 도입하여 페로브스카이트 태양전지의 주요 저하 원인인 수분 침투를 효과적으로 방지하면서 실리콘 태양전지의 최고효율에 근접한 25.7%의 고효율을 달성함으로써 페로브스카이트 태양전지의 활용에 걸림돌이 되고 있는 안정성 문제를 해결할 수 있는 실마리를 제공 - 페로브스카이트 태양전지 기술은 기존의 실리콘 태양전지와 적층형으로 활용하여 35% 이상의 초고효율 태양전지를 개발할 수 있고, 그 뛰어난 광전기적 특성으로 인해 BIPV 등 다양한 분야에 이를 활용할 수 있어 태양광 시장의 패러다임을 바꿀 수 있는 기술로 기대		
혁신성	- 동 성과는 이리듐 산화물보다 높은 활성을 지닌 루테튬 산화물의 전기화학적 불안정성 문제를 해결하기 위해 백금을 도입하는 기술을 개발함으로써, 안정성이 높은 루테튬 산화물 촉매를 창출 - 이 촉매는 고분자전해질 수전해 시스템에서 우수한 성능을 보여주었으며, 상용 이리듐 산화물 촉매보다 2.5배 이상의 성능 향상과 비용 효율성을 입증		



소면적(<64cm²) 소자 이미지



대면적(225cm²) 소자 이미지

주요성과 내용

- 국제공인인증기관(Newport)에서 소면적(0.1cm²)에 대한 효율성(25.4%) 국제인증 획득

	 National Institute of Standards and Technology	Technology and Application Center PV Lab			
Calibration Cert. # 1885-01		Newport Calibration Cert. # 2180			
REF ID: 722024 T1_2 Newport Calibration # 1885-01 Manufacturer: Korea Institute of Energy Research Material (single junction): Perovskite Measurement Date: 12 Apr 2023 Temperature Range: 20.0 °C to 25.0 °C Measurement Conditions: 25.4 W/m ² AM1.5G Environmental conditions at the time of calibration: Temperature: 24.0 ± 0.2 °C; Humidity: 20.0 ± 2.0 %					
The above DUT has been tested using the following method to meet the ISO 17025 Standard by the PV Lab at Newport Corporation. Current measurements are reported using a average value of 4 × 2 and reported with an approximately 0.5% level of confidence. Measurement of total irradiance is traceable to the World Radiometric Reference (WRR) and all other measurements and uncertainties are traceable to NIST and the International System of Units (SI). The performance parameters reported in this certificate apply only at the time of the test, and do not imply future performance.					
Designated area as defined by this serial aperture mask:					
Reported performance parameters were measured under a 10-point PV array configuration wherein the bias voltage increases by the Voc determined in full current until the measured current voltage for Voc is determined to be unchanging at the 0.07% level. This is intended to represent the quasi-steady state performance of the device. Total IV measurement time under these conditions was approximately 10 minutes.					
Efficiency (%)	25.36 ± 0.01	V _{oc} (V)	1.1761 ± 0.0006	J _{sc} (mA/cm ²)	0.000177 ± 0.000004
P _{max} (mW)	2.026 ± 0.006	V _{mp} (V)	1.027 ± 0.0014	J _{mp} (mA/cm ²)	0.000155 ± 0.000004
FF (%)	82.9 ± 1.4	Area (cm ²)	0.08907 ± 0.00060	M	0.977 ± 0.013
Methods:					
N/A: ASTM G99-19 Standard Test Method for Electrical Performance of Photovoltaic Cells Using Reference Cells Under Standard Illumination					
Q1: ASTM F1151-13 Standard Test Method for Spectral Response Measurement of Photovoltaic Devices					
Standard Reporting Conditions:					
Irradiance: 1000 W/m ² AM1.5G/1.5 AM1.5G/1.5 AM1.5G/1.5 AM1.5G					
Temperature: 25.0 ± 0.5 °C					
Secondary Reference Cells:					
Device ID: 1010-0101-001					
Device Material: mono-Si					
Calibration: National Renewable Energy Laboratory					
ASTM F1151-13 Standard Test Method for Spectral Response Measurement of Photovoltaic Devices					
Spectral Response Factor: 0.999					
Certified short-circuit current (J _{sc}) under standard reporting conditions (SRC): 0.012 mA/cm ²					
Calibration due date: 26-Sep-21					
Solar Radiation:					
Spectrum: Newport Corporation Standard W1 (GCR) Solar Spectrum Simulator, June 2013					
Total irradiance: 1000 W/m ² based on J _{sc} of the above Secondary Reference Cell					
Quantum Efficiency (QE):					
Newport Corporation Standard W1 (GCR) Solar Spectrum Simulator, June 2013					
Spectral mismatch correction factor: M = 0.977 ± 0.015					
NET Calibration Procedure:					
Newport Corporation Standard W1 (GCR) Solar Spectrum Simulator, June 2013					
Newport Corporation Standard W1 (GCR) Solar Spectrum Simulator, June 2013					
Newport Corporation Standard W1 (GCR) Solar Spectrum Simulator, June 2013					
Newport Corporation Standard W1 (GCR) Solar Spectrum Simulator, June 2013					
This certificate is to be used as a guide only, and not as a substitute for the Newport PV Laboratory.					



4.4. 사업추진의 효율성

효율성 분석은 투입을 고려할 경우 발생한 성과가 효과적인지에 대해 분석을 실시하며 사업 내부적으로 투입 규모에 따른 성과 차이 분석 및 연도별 추이 분석을 실시

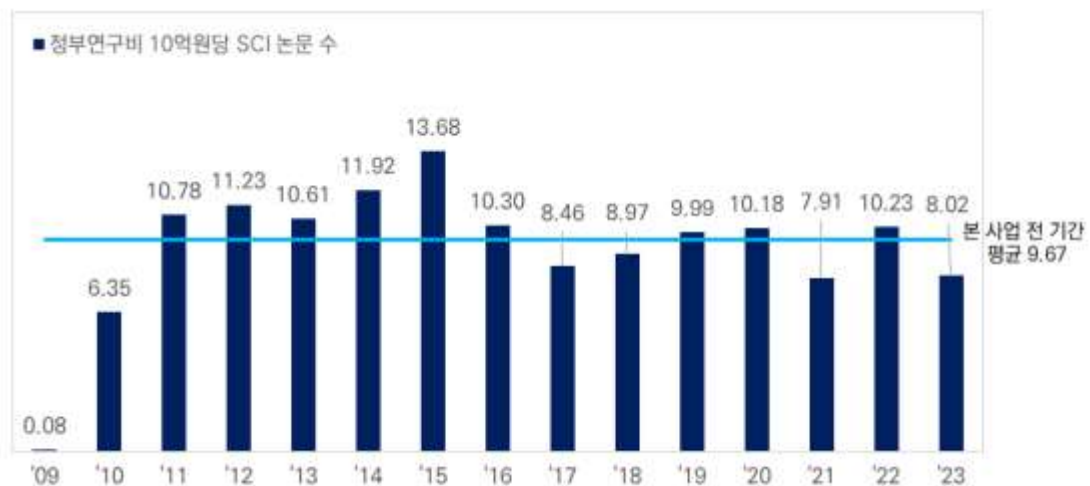
- 효율성 분석은 각 분석항목을 통해 기후변화대응기술개발 사업이 국가연구개발 사업이 투입한 자원을 고려하였을 경우 성과가 효과적인지에 대해 분석을 실시함
- 본 사업의 적절성을 분석하기 위해 분석 항목을 사업 연구비 대비 효율성 분석을 바탕으로 적절성 분석을 실시함

분석1	(연구비 대비 효율성) 정부지원금대비 성과 창출정도가 어떠한가?
-----	-------------------------------------

(1) SCI 논문 성과 효율성

□ SCI 논문 성과의 양적 효율성 비교

- 본 사업 전체 기간(2009~2023) 동안 발생한 논문 성과 8,208건에 대하여 정부연구비 10억원당 SCI 논문 건수는 9.67건임
- SCI 논문 성과가 발생한 2010년 이후 2015년에는 정부연구비 10억원당 SCI 논문 건수는 13.7건으로 가장 높은 효율성을 달성



[그림 Ⅱ-18] 사업 전체 기간(2009~2023) 정부연구비 10억원당 SCI 논문 성과 추이

- 본 사업 전체 기간(2009~2023) 동안 과제당 SCI 논문건수는 전체 평균 3.20건으로, 2022년에는 과제당 SCI 논문 5.15건을 게재하는 성과를 달성하였음

<표 Ⅱ-68> 사업 전체 기간(2009~2023) 연도별 정부연구비 10억원당 SCI 논문 성과

(단위 : 억원, 건)

구분	'09	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23	합계
정부 연구비	125.5	170.0	240.4	377.5	451.5	435.5	498.6	660.9	792.2	869.1	994.2	996.7	1016.6	473.2	385.4	8,487.2
과제수	74	107	124	157	165	171	179	183	248	264	282	246	194	94	77	2,565.0
SCI논문	1	108	259	424	479	519	682	681	670	780	993	1015	804	484	309	8,208.0
정부 연구비 10억원당 SCI논문	0.1	6.4	10.8	11.2	10.6	11.9	13.7	10.3	8.5	9.0	10.0	10.2	7.9	10.2	8.0	9.7
과제당 SCI논문	0.01	1.01	2.09	2.70	2.90	3.04	3.81	3.72	2.70	2.95	3.52	4.13	4.14	5.15	4.01	3.20

- 최근 3년(2021~2023)동안 발생한 논문 성과 1,171건에 대하여 정부연구비 10억원당 SCI 논문 건수는 6.24건으로, 2021년 기준 국가 R&D(1.82건)를 포함한 타 부처 R&D 대비 매우 우수한 수준으로 나타남
- 연도별 SCI 논문의 양적 효율성을 살펴보면 2021년에는 5.66건, 2022년에는 7.10건, 2023년에는 6.69건으로, 매년 정부연구비 10억원당 SCI 논문 5건 이상 성과를 창출



[그림 Ⅱ-19] SCI 논문 성과 효율성(10억원당) 비교

- 2023년에는 정부연구비 10억원당 SCI 논문성과가 6.69건으로, 동 성과는 국가R&D(1.82건) 대비 약 3.7배 높게 나타났으며, 과기부R&D(3.24건), ET분야 R&D(2.13건)과 비교하여도 효율성이 매우 높은 수준임을 확인

<표 II-69> 최근 3개년(2021~20203) SCI 논문 성과 효율성(10억원당)

(단위: 억원, 건)

구분		정부연구비	SCI논문 총량	정부연구비 10억원당
국가R&D	2021	265,791	48381	1.82
과기부R&D	2021	83,472	27057	3.24
ET분야 R&D	2021	33,993	7228	2.13
기후변화대응사업	2021	1016.6	577	5.66
	2022	473.2	336	7.10
	2023	382.4	258	6.69
	2021~2023	1,872.2	1,171	6.24

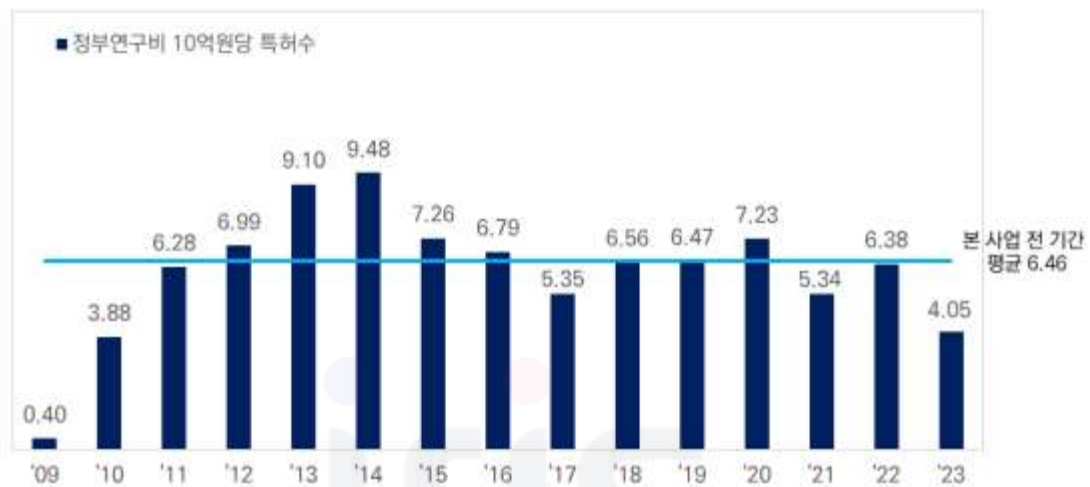
※ 최근 3개년에 대한 SCI 논문 성과는 당해연도에 입력한 실적을 계상하였으므로, 동기간에 대한 사업 전체 기간 분석 성과와 차이 있음 (EX. 2021년 대상연도에 대한 실적은 2021년 내 성과입력 시스템에 입력된 경우만 집계)

iris

(2) 특허 성과의 효율성

□ 특허 성과의 양적 효율성 비교

- 본 사업 전체 기간(2009~2023) 동안 발생한 특허(출원 및 등록) 성과 5,480건에 대하여 정부연구비 10억원당 특허 건수는 6.46건으로 높은 효율성을 가짐
- 특허 성과가 본격적으로 발생하기 시작한 2011년부터 정부연구비 10억원당 특허 성과가 6건 대로 증가하기 시작하였으며, 2014년에는 정부연구비 10억원당 특허 9.48건을 창출하며 사업 전 기간 중 가장 높은 효율성을 기록



[그림 Ⅱ-20] 사업 전체 기간(2009~2023) 정부연구비 10억원당 특허 성과 추이

- 2014년 이후에도 2023년(정부연구비 10억원당 4.05건)을 제외한 나머지 기간 동안 매년 정부연구비 10억원당 특허 성과 5건 이상을 기록하며 우수한 연구성과를 달성함
- 본 사업 전체 기간(2009~2023) 동안 과제당 특허 건수는 전체 2.14건으로, 사업이 시작한 2009년 과제당 특허 0.07건, 2022년에 과제당 3.21건의 성과를 창출

<표 Ⅱ-70> 사업 전체 기간(2009~2023) 연도별 정부연구비 10억원당 특허 성과

(단위 : 억원, 건)

구분	'09	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23	합계
정부연구비	125.5	170.0	240.4	377.5	451.5	435.5	498.6	660.9	792.2	869.1	994.2	996.7	1016.6	473.2	385.4	8,487.2
과제수	74	107	124	157	165	171	179	183	248	264	282	246	194	94	77	2,565.0
출원	5	62	142	219	298	300	234	337	303	446	487	505	346	201	104	3,989
등록	0	4	9	45	113	113	128	112	121	124	156	216	197	101	52	1,491
특허 합계	5	66	151	264	411	413	362	449	424	570	643	721	543	302	156	5,480
정부연구비 10억원당 특허	0.40	3.88	6.28	6.99	9.10	9.48	7.26	6.79	5.35	6.56	6.47	7.23	5.34	6.38	4.05	6.46
과제당 특허	0.07	0.62	1.22	1.68	2.49	2.42	2.02	2.45	1.71	2.16	2.28	2.93	2.80	3.21	2.03	2.14

- 정부출연금 10억원당 특허(출원 및 등록) 성과는 최근 3년간(2021~2023) 5.34건으로 2021년 기준 국가R&D(2.21건), 과기부R&D(2.25건), ET분야 R&D(2.91건) 대비 높은 수준을 나타냄
- 정부출연금 10억원당 출원특허 성과는 3개년(2021~2023) 3.47건으로 2021년 기준 국가 R&D(1.40건), 과기부R&D(1.91건), ET분야 R&D(1.78건) 대비 2배 가까운 효율성을 가짐
- 정부출연금 10억원당 등록특허 성과는 3개년(2021~2023) 1.87건으로 2021년 기준 국가 R&D(0.81건), 과기부R&D(0.34건), ET분야 R&D(1.13건) 보다 높은 수준임



[그림 Ⅱ-21] 특허(출원 및 등록) 성과 효율성(10억원당) 비교

<표 Ⅱ-71> 최근 3개년(2021~2023) SCI 논문 성과 효율성(10억원당)

(단위: 억원, 건)

구분		정부연구비	특허수			정부연구비 10억원당			
			출원	등록	총량	출원	등록	총량	
국가R&D	2021	265,791	37,324	21,551	58,875	1.40	0.81	2.21	
	과기부R&D	2021	83,472	15,977	9,129	25,106	1.91	0.34	2.25
	ET분야 R&D	2021	33,993	6,064	3,832	9,896	1.78	1.13	2.91
기후변화대응사업	2021	1016.6	346	197	543	3.40	1.94	5.34	
	2022	473.2	201	101	302	4.25	2.13	6.38	
	2023	382.4	104	52	156	2.70	1.35	4.05	
	2021~2023	1,872.2	651	350	1,001	3.47	1.87	5.34	

4.5. 파급효과

(1) 분석 개요

- ☐ 기후변화대응기술개발사업이 기초·원천기술개발 단계를 지원하는 특성을 고려하여 주요 성과들의 후속 단계 R&D 수행을 통한 성과 활용, 기술이전 등 사업화 목적의 활용 여부 등을 토대로 파급효과를 분석하였음
- ☐ 이를 위해 기후변화대응기술개발사업을 통해 지원된 7개 분야 17개 과제 연구책임자를 대상으로 인터뷰 등의 방법을 통해 성과 활용 현황을 조사하였음
 - 인터뷰 대상 : 우수성과 100선, 대표성과 등으로 선정된 바 있는 우수성과 도출 과제 연구책임자
 - 인터뷰 기간/방법 : 2024.4월/ 서면인터뷰 (※ 필요시 유선인터뷰 추가 진행)
 - 인터뷰 내용 : 성과의 의미, 성과 활용 현황 및 파급효과, 사업 개선사항 등

(2) 과학기술적 파급효과

- ☐ 성과 활용을 통한 기술수준 고도화
 - 17개의 과제에서 도출된 우수성과의 대다수는 기술의 성능의 개선 및 상용화 촉진 등을 위한 현장 실증 등을 목표로 후속 연구가 진행 중이거나 진행 예정이었으며, 이를 통한 국내 기술 수준의 향상과 선진국과의 기술격차 감소 등의 효과를 이끌어 냄
 - 동 기후변화대응기술개발사업 연구뿐만 아니라, 과기부의 △(개인기초연구(리더연구)), △단계도약형탄소중립기술개발사업, △나노소재기술개발, 산업부의 △신재생에너지기술개발사업, △석유대체친환경화학기술개발 사업 등을 통해 연구 성과의 후속 연구가 수행됨
 - 연료전지 분야의 ‘열유동 분포 균일성을 갖는 연료전지 스택기술(‘18) 성과는 스택기술을 기반으로 탄화수소 대응형 SOFC 개발, 수소전용 SOFC 개발에 활용
 - 이차전지 분야의 ‘430Wh/Kg급 이상의 에너지밀도를 갖는 차세대 리튬금속이온 및 전고체 이차전지 개발(‘23) 성과는 동 사업의 연구과제 종료 이후 과기부 단계도약형 탄소중립기술개발사업 연구에 연계되어 기존의 세계 최고 수준의 에너지밀도 430Wh/Kg를 500Wh/kg 이상으로 향상 시키기 위한 성능 고도화의 연구를 추진하고 있음
 - C1 가브리온파이너리 분야의 연구 성과인 ‘개미산과 이산화탄소로부터 유용 화합물을 생산하는 플랫폼 균주를 개발(‘20)은 산업부의 석유대체친환경화학기술개발 연구과제에 연계 활용되어 바이오플라스틱 및 단량체 생산기술 개발에 활용되고 있음
- ☐ 지식 확산 (SCI 논문 인용도 제고)
 - 우수 성과의 창출을 통해 Nature, Science 학술지 등 세계 최고 권위지 등에 연구논문이 게재 및 관련분야의 연구 논문으로 인용되며 파생 논문이 창출되었으며, 이는 해당 분야의 지식 확산 및 연구 역량 확산의 효과로 이어질 수 있음

- 태양전지 분야에서 '유사 할로젠 음이온을 사용한 고효율 페로브스카이트 태양전지 개발('21)' 성과가 2021년 Nature(IF 69.5) 학술지에 게재되어 2,346회 인용
- 태양전지 분야에서 '양자점-SnO2 이중층을 이용한 고효율 페로브스카이트 태양전지 개발('22)' 성과는 2022년 Science(IF 32.5) 학술지에 게재되어 945회 인용
- 연료전지 분야에서는 '프로톤전도성 소재 기반의 SOFC 기술('18)' 개발 성과는 2018년 Nature Energy(IF 56.7) 학술지에 게재되어 295회 인용
- C1가스리파이너리 분야에서는 '개미산과 이산화탄소로부터 유용 화합물을 생산하는 플랫폼 균주를 개발('20)' 성과를 통해 2020년 Chemical Society Reviews(IF 46.2)에 게재되어 301회 인용

(3) 산업경제적 파급효과

□ 성과 산업계로

- 연료전지 분야에서는 '열유동 분포 균일성을 갖는 연료전지 스택기술('18)'에 대한 기술이전이 발생하여 연구과제 종료이후 5천만원의 경제성 성과가 창출되었음
- 차세대탄소자원화 분야에서는 연구과제 종료 이후 4건의 기술이전이 완료되어 기술이전 계약금 총 20.47억원의 성과가 창출되었으며, 해당 기술을 바탕으로 후속의 실증 단계의 연구가 진행되고 있음

<표 II-72> 주요 성과 활용 현황

분야	과제명	성과	성과 활용 현황	구분
태양전지	고안정, 친환경, 최고효율 단일접합 태양전지 원천기술 개발('20.6~'25.1 /김진영, 울산과학기술원)	유사 할로젠 음이온을 사용한 고효율 페로브스카이트 태양전지 개발('21)	Jeong, Jaeki, et al. "Pseudo-halide anion engineering for α-FAPbI₃ perovskite solar cells." Nature 592.7854 (2021): 381-385. 4/29 기준 논문 인용 2,346회	지식 확산
		- 포메이트 이온(HCOO-)을 세계 최초로 페로브스카이트 구조에 상호작용하는 기술 - 세계 최고수준의 광전효율(공인인증 25.2%)을 달성 - 세계 최고 권위지 중 하나인 Nature(IF: 69.5)에 게재('21)	- 현재 동 사업의 연구과제 수행 중으로 0.1cm²에서 태양전지 효율 27% 달성 (성능 향상)하였으며, - 상업화 촉진을 위하여, 대면적(200cm²)에서 모듈 효율 22.5% 달성을 목표로 연구 진행 중 * 과기부/기후변화대응기술개발사업/고안정, 친환경, 최고효율 단일접합 태양전지 원천기술 개발/'20.6~'25.1	기술 고도화

분야	과제명	성과	성과 활용 현황	구분
태양 전지	200cm ² 이상 대면적 고효율 페로브스카이트 태양전지 핵심 원천기술 개발 (‘20.6~’25.1/ 김동석, 울산과학기술원)	양자점-SnO₂ 이중층을 이용한 고효율 페로브스카이트 태양전지 개발(‘22) ■ 산화주석과 산화타이타늄 박막을 이중으로 코팅하는 기술을 개발 ■ 페로브스카이트 태양전지에서 25cm² 및 64cm² 크기의 서브 모듈에서도 각각 21.66% 및 20.55%의 세계 최고 공인 효율을 기록	■ Kim, Minjin, et al. "Conformal quantum dot-SnO₂ layers as electron transporters for efficient perovskite solar cells." Science 375.6578 (2022): 302-306. 4/29 기준 논문 인용 945회	지식 확산
			■ 태양전지의 효율을 26.5%까지 구현하는 것을 최종목표 연구 수행 * 과기부/ 기후변화대응기술개발사업/2 00cm² 이상 대면적 고효율 페로브스카이트 태양전지 핵심 원천기술 개발/ ‘20.6~’25.1	기술 고도 화
태양 전지	고신뢰성 페로브스카이트 태양전지 기술 개발 (‘15.10~’20.10/ 석상일, 울산과학기술원)	2가 유기 양이온(메틸렌다이암모늄)을 첨가한 페로브스카이트 태양전지 기술 개발(‘19) ■ 기존 1가 양이온(MA, Br 등)을 대신하여 2가 유기 양이온을 첨가하여 페로브스카이트의 광전류 밀도를 높이고, 열, 광, 수분 안정성을 기존 대비 향상시킴 ■ 세계 최고 전류밀도인 26mA/cm² 이상, 광전효율 23.7% 달성	■ 후속 연구를 통해 기존의 전류밀도보다 더 향상된 성능을 확보 (광전효율 26% 이상) * 과기부/ 개인기초연구(리더연구)/다기 능 하이브리드 결정 반도체 연구단/‘18.6~’27.2	기술 고도 화
태양 전지	CIGS 박막태양전지 기반 고효율 투광형 태양전지 모듈 원천기술 (‘19.6~’23.12/ 정증현, KIST)	CIGS 태양전지 기반 투명 태양광 모듈 기술(‘22) ■ 세계 최고수준 반투명 모듈효율 성능을 기반으로 건물/자동차 창호에 실용적 적용이 가능한 신기술 개발(모듈발전효율 11.1% @투과면적 30%) ■ 불투명 전극(Mo)의 투명전극 대체로, 효율 저하를 극복할 수 있는 소재/공정 기술의 개발	■ 투명태양광 모듈에 적용된 양면수광형 구조를 기반으로 전면 태양광 발전뿐만 아니라 배면입사 광발전 성능을 향상시킬 수 있는 원천기술 개발 연구 수행 중 * 한국전력공사/ 한계 돌파형 원천기술개발 R&D/	기술 고도 화
태양	도심 분산전원용	유연성과 투광성을 동시에	■ 태양전지의 대면적화	기술

분야	과제명	성과	성과 활용 현황	구분
전지	고성능 플렉서블 무기박막 태양전지 원천기술 개발 ('16.11~'21.10/ 윤재호, 한국에너지공과대학교)	가지는 도시형 양면수광 박막 태양전지 기술 개발 ('20) ■ 세계 최초로 유연성과 투광성을 동시에 가지는 양면수광형 화합물 박막 태양전지 기술 개발로 유연성, 투광성, 경제성, 안정성, 효율성, 응용성을 동시에 확보하는데 성공 ■ (주)솔란드 연구소기업을 설립하여 유연 CIGS 박막 태양광 모듈 국산화 기술을 개발, 국내 최초로 한국산업규격(KS) 인증 획득	기술개발을 진행하고 있으며, 고효율 태양전지 개발을 위한 탠덤태양전지 개발에 활용 * 과기부/ 단계도약형탄소중립기술개발 사업/고효율 대면적 초경량·유연 무독성 CIGS 박막 태양전지 기술개발/ '22.5~'25.1	고도화
연료전지	고체 알칼리막 연료전지용 고출력 고내구성 MEA 및 저가형 비귀금속계 촉매개발 ('18.7~'21.2/ 유성중, KIST)	고체알칼리막 연료전지용 고출력 고내구성 MEA 및 저가형 비귀금속계 촉매 개발('19)	■ 비귀금속계 촉매 및 준안정상 팔라듐 수소화물 촉매를 활용한 수전해 관련 연구 진행 중 * 과기부/나노소재기술개발/ 고분자전해질 연료전지용 고성능 고내구성 초저백금 촉매전극 및 MEA 개발/ '21.7~'25.12	기술고도화
			■ 비귀금속계 촉매는 현재 L그룹 계열사의 기업수탁을 통해 양산 스케일 연구가 진행 중이며, 향후 기술이전 가능성 있음	기술고도화
연료전지	출력변동 대응력을 갖춘 중저온형 수소전용 초고성능 SOFC 셀 개발 ('20.6~'25.1/ 윤경중, KIST)	SOFC 중저온영역 초고성능 셀 최대출력 달성('23)	■ 기존 실험실용 코인셀 규모에서 대면적셀(100cm²) 규모로 확대하여 셀 성능(열화율0.5%/kh 이하) 확보를 위한 연구 개발 * 과기부/ 기후변화대응기술개발사업/ 출력변동 대응력을 갖춘 중저온형 수소전용 초고성능 SOFC 셀 개발/ '20.6~'25.1	기술고도화
			■ 향후 실용화를 최우선으로 두고, 셀 산업체와 협업하여 개발 기술을 적용하여 검증 연구를 수행 중	기술고도화
연료전지	AEMFC 상용화를 위한 혁신	poly(aryl piperidinium) 공중합체의 합성 및 이들을	■ 세계에서 유일한 상업화된 음이온이온교환막 수전해	기술고도

분야	과제명	성과	성과 활용 현황	구분
	탄화수소계 바인더 개발 ('18.7~'23.2/ 이영무, 한양대학교)	이용한 AEM 및 바인더의 제조('21) - AEM(음이온교환막)을 이용해 알칼리 연료전지에서 세계 최고 성능 중 하나인 $2.58\text{W}/\text{cm}^2$ 성능을 확보하고, 이를 1,000시간 동안 $0.6\text{A}/\text{cm}^2$, 70°C 조건에서 구현 - AME 수전해 공정에 개발 소재를 이용하여, 2V, 80°C 조건에서 $16\text{A}/\text{cm}^2$ 이상의 세계 최고 성능을 확보	상업 회사(독일 E사)로부터 2년에 걸친 평가를 통해, 해당 기업이 보유한 기술 성능에 근접하는 수준을 획득 (약 98% 수준)	화
연료 전지	동적변화 대응형 고성능/고신뢰성 SOFC 스택 구성요소 및 디자인 개발 ('17.8~21.12/ 이종호, KIST)	열유동 분포 균일성을 갖는 연료전지 스택기술('18) SOFC의 장점인 고품질 폐열을 활용하여 기존 열병합(CHP)기술에 더해 냉방기능까지 추가할 수 있는 삼중열병합(Tri-gen) 기능으로 동적변화 대응성을 가진 스택기술을 확보	- 연구성과 기반 수소전용 SOFC 개발과제 수행 * 과기부/기후변화대응기술개발사업/출력변동 대응력을 갖춘 중저온형 수소전용 초고성능 SOFC 셀 개발/ '20.6~'25.1	기술 고도화
			- 연구성과 기반 탄화수소 대응형 SOFC 개발과제 수행 * 과기부/단계도약형 탄소중립기술개발사업/건물용 차세대 고효율 연료전지 상용화를 위한 핵심원천기술 고도화/'22.5~'25.01	기술 고도화
			- 연구성과의 기술이전 - 계약체결일 : 2019.7.31. - 기술이전 실시기관 : 연세대학교 - 이전 실시금액 : 5천만 원 - 실시권 유형 : 비독점적 통상실시권 - 기술이전 내용 : 동적변화 대응형SOFC 스택디자인 등	경제적 성과 창출
		프로톤전도성 소재 기반의 SOFC 기술('18) 프로톤전도성 전해질을	프로톤전도성 전해질을 이용한 SOFC 기술을 확장하여 그린수소를 생산하기 위한	기술 고도화

분야	과제명	성과	성과 활용 현황	구분
		이용하여 SOFC를 세계최초로 구현 ■ 프로톤전도성 소재는 기존 산소이온전도성 소재보다 더 낮은 온도영역까지 이온전도 특성을 가져, 훨씬 낮은 온도에서 SOFC 성능을 획득 ■ 관련분야 최고 저널인 Nature Energy(IF: 56.7)에 게재('18)	PCEC(Protonic Ceramic Electrolysis Cell) 개발과제 수행 * 산업부/ 신재생에너지기술개발사업/ 그린수소 생산성 극대화를 위한 중저온 작동형 프로톤 세라믹 수전해 기술 개발/'22.4~'26.3	
			■ An, Hyegsoon, et al. "A 5 × 5 cm² protonic ceramic fuel cell with a power density of 1.3 W cm⁻² at 600° C." Nature Energy 3.10 (2018): 870-875. 4/29 기준 논문 인용 295회	지식 확산
바이오 에너지	바이오 유기산 유래 폴리알파 올레핀 제조 촉매기술 개발('20.7~'25.1/ 황동원, 한국화학연구원)	고성능 RuSn 합금 촉매 기반 듀얼베드 촉매시스템 및 La(란타넘) 도핑 알루미늄 촉매기술 개발('21) ■ 듀얼 베드 촉매시스템 개발을 통해 세계 최고 수준의 1-옥텐 생산 수율 달성으로 상용화 가능성을 확인 (알파올레핀 수율 63% 및 순도 80% 달성) ■ 기존 석유계 원료 대비 이산화탄소 50% 이상 감축 가능	■ 연구 성과인 듀얼베드 촉매시스템과 La(란타넘) 도핑 알루미늄 촉매를 활용하여 PAO(폴리알파올레핀) 합성 벤치급 공정 기술 개발 진행 중 * 과기부/ 기후변화대응기술개발사업/ 바이오 유기산 유래 폴리알파 올레핀 제조 촉매기술 개발/'20.7~'25.1	기술 고도화
바이오 에너지	나무 열분해 오일로부터 바이오항공유 생산을 위한 탈산소 업그레이딩 촉매화학 공정기술개발 ('20.7~'25.1/ 하정명, KIST)	나무 열분해오일로부터 바이오항공유 생산을 위한 벤치규모 촉매화학반응 연속 운전 성공('23) ■ 나무 열분해오일의 수첨 업그레이딩을 통해 기존 석유와 유사한 항공유분을 생산하였고, 기존 대비 4배 이상의 연속 운전 성능을 확보 (기존 최대 30시간 → 개발 기술 최대 132시간) ■ 미국 특허 출원 18/146987 (2022.12.27.)	■ 연구 성과 실증 및 사업화로 연결시키기 위해 '26년 추진 예정인 연구 사업과 연계하고자 계획 * 나무 열분해오일로부터 나프타 생산 (산업부, (가안)탄소중립 예타, '26~) * 나무 열분해오일로부터 바이오항공유 생산 (산업부, (가안)바이오산업 예타, '26~)	기술 고도화

분야	과제명	성과	성과 활용 현황	구분
이차 전지	전기자동차용 차세대 리튬금속 이차전지 핵심원천 기술개발 (‘18.7~’23.2/ 이상민, 포항공과대학교)	430Wh/Kg급 이상의 에너지밀도를 갖는 차세대 리튬금속이온 및 전고체 이차전지 개발(‘23) ■ 세계최고수준의 에너지밀도 (430Wh/Kg) 및 장기신뢰성 (>90%@300thcy)을 동시에 확보	■ 연구 성과를 기반으로 이차전지 고에너지밀도 향상(500Wh/kg 이상)을 위한 연구를 수행 중 * 과기부/단계도약형 탄소중립기술개발사업/텍토 닉 전극설계 기반 고에너지밀도 리튬금속-공기 전지 고도화 요소기술개발/ ’22.5~’25.01	기술 고도 화
이차 전지	리튬 금속전지의 안전성 향상을 위한 자가제어형 부품소재 기술과 이를 활용한 고에너지밀도 셀 제조기술 개발 (‘18.7~’23.2/ 유지상, 한국전자기기술연구원)	분리막의 코팅 물질 개량을 통해 리튬 금속 수지상 성장의 형성을 억제(‘21) ■ 분리막 분야에서 세라믹 코팅 소재를 독자적인 고체 초강산이라는 소재 적용 ■ 기존 전해질 내 Li-ion의 이동도를 기존 0.4 수준에서 0.9 이상으로 개선	■ 산업부의 이차전지 예타사업의 한 분야로 후속 연구가 진행될 예정이며, 국내 전지 3사를 대상으로 900Wh/L급 리튬 금속 전지의 상업화를 목표로 연구 개발을 추진할 계획 * 산업부/ 친환경 이동수단용 고성능 차세대 이차전지 기술개발 사업/’24.7.~	기술 고도 화
차세대 탄소자 원화	차세대 탄소자원화 핵심기술개발 (‘17.9~’22.3/ 전기원, 한국화학연구원)	이산화탄소 전환 에틸렌 생성/물산화 전극 촉매 기술(‘20) ■ 기존 Cu 촉매 대비 높은 에틸렌 생성 효율을 가짐 ■ 미국 특허 출원 (US 16869600, ’20.12.17)	■ 차세대탄소자원화사업단을 통해 창출된 연구성과 중 온실가스 저감 실증후보기술 6건을 도출하고, 해당 기술에 대한 수요기업을 발굴하여 2022년 과기부 신규사업과 연계 ※ 파일럿 플랜트 수준의 실증 단계 연구개발을 진행 중 * 과기부, 탄소자원화 플랫폼 화합물 제조기술개발/CO2 직접수소화를 통한 액체 탄화수소 제조 Power-to-Liquid 실증기술 개발/’22.5~’27.1	기술 고도 화

분야	과제명	성과	성과 활용 현황	구분
		이산화탄소를 나프타로 직접 전환하는 고성능 촉매 및 공정 기술('21) ■ 이산화탄소의 대량 저감과 기초 화학원료 생산을 동시에 구현할 수 있는 기술 확보 ■ 차세대 Power-to-Chemicals 시스템 원천 기술 확보 ■ 미국 특허 출원 (US11865521B2, '24.1.9)	■ 연구과제 종료 이후 4건의 기술이전을 완료(총 정액 20.47억원 + 경상)하였으며, 해당 기술을 바탕으로 후속의 실증 단계 연구 진행 - 전기화학적 CO₂의 에틸렌 전환기술(LG화학, 정액기술료 11.7억원, '22.4.26) - CO₂ 수소화를 통한 합성 납사 생산(GS건설, 정액기술료 4억원+경상기술료 10%, '22.5.31/ 한화토탈, 정액기술료 4억원+경상기술료 0.2%, '22.5.31)	경제적 성과 창출
C1 가브리 파이너리	시스템 대사공학 기반 개미산으로부터 숙신산 및 말릭산 생산 미생물 공정 개발 ('21.1~'24.6/ 이상엽, 한국과학기술원)	개미산과 이산화탄소로부터 유용 화합물을 생산하는 플랫폼 균주를 개발('20) ■ 개미산과 이산화탄소만을 이용하여 높은 세포농도까지 성장하는 대장균을 세계 최초로 개발하여 C1 가스 감축 및 산업의 부생가스 전환 기술과의 연계를 통해 지속가능한 화합물 생산 산업의 기반 마련에 기여 ■ Nature Microbiology (IF: 28.3)에 게재, 해당 호 Hero 논문으로 선정('20)	■ 연구성과를 기반으로 바이오플라스틱 및 단량체 생산기술 개발, 성능이 향상된 플랫폼 균주 개발 후속 연구 진행 중 * 산업부/ 석유대체친환경화학기술개발/차세대 바이오파이너리를 위한 세포공장 구축 원천기술 개발/'22.5~'27.2	기술 고도화
			■ Ko, Yoo-Sung, et al. "Tools and strategies of systems metabolic engineering for the development of microbial cell factories for chemical production." Chemical Society Reviews 49.14 (2020): 4615-4636. 4/29 기준 논문 인용 301회	지식 확산
C1 가브리 파이너리	Non-acetogen 기반 CO 가스이용 바이오 폴리머 생산용 바이오 촉매 및 원천기술 개발 ('15.9~'24.2/ 김용환, 울산과학기술원)	개발한 효소를 이용하여 일산화탄소와 물분자로부터 간단하게 개미산을 합성하는 신합성 경로를 제시('17) ■ 실제 산업가스 특히 제철산업 부생가스를 대상으로 가스의 전처리없이 진행하였으며, 효소에	■ 플라스틱 문제 해결 및 개미산을 이용한 생분해성 플라스틱의 탄소 순환 연구를 진행 중 * 과기부/ 집단연구지원/미세플라스틱 대응 화공·바이오 융합 공정 연구센터/ '20.7~'27.2	기술 고도화

분야	과제명	성과	성과 활용 현황	구분
		의하여 원하는 개미산이 생산 10L 이후 100L 반응기를 제작하여 현대제철, 포스코에서 설치 운전	창업한 씨원캠을 중심으로 현대제철, 대상 등이 참여하는 전략협의체를 구성하여 제철산업 부생가스를 이용한 개미산 및 고부가가치 화합물 생산 연계 체계를 구축 및 운영 중	기술 고도화
에너지 효율 향상	친환경 공기냉매 적용 초고속 터보 냉방시스템 ('21.5~'24.2/이범준, 한국에너지기술연구원)	초고속 터보 Componder 시스템 개발 및 열교환기 연계 냉방 시스템 개발('22) - 냉매 대신 공기를 작동유체로 이용하며 실내 공기 직접 냉각하는 제로-GWP(제로 지구온난화 지수) 냉매 기반의 냉방 성능을 구현 - 냉방 용량 10kW 이상, 성능계수 0.65 이상	개발된 공기 냉매 활용 냉방시스템을 기반으로 '컴팬더 설계 변경 및 복열기 등의 열교환기를 추가하여 저온 온도영역을 -100℃까지 확보하는 기술을 개발할 계획	기술 고도화
			삼성전자 반도체 Fab에 chiller를 공급하는 에프에스티 회사와 기술이전 협약이 이루어진 상황이며 2024년 상반기에 기술이전 완료 예정	경제적 성과 창출

5. 종합평가

(1) 최근 3년(2021~2023년) 사업추진성과 종합평가

□ 기후변화대응기술개발사업의 2021년~2023년 종합적 성과분석 결과 사업추진의 적절성, 사업성과의 효과성 및 효율성을 모두 확보한 것으로 분석됨

<표 II-73> 기후변화대응기술개발사업 2021~2023년 성과분석 종합

평가항목	종합평가
사업추진의 적절성	· (정부지원 적절성) 기후변화대응기술개발사업은 기후변화 대응 기초·원천기술을 개발하고 이를 통해 국가 신성장 동력을 확보하는 데에 목적이 있으므로 정부의 투자 지원이 타당 · (상위계획과의 부합성) 과학기술기본법, 기초연구진흥 및 기술개발지원에 관한 법, 저탄소 녹색성장 기본법, 기후변화대응기술개발촉진법 등에 근거하여 추진되는 사업으로, 기후변화대응기본계획, 기후변화대응기술 확보 로드맵 등의 상위 중장기 계획과 기후변화대응 분야 기술수요조사의 방향성에 부합 · (사업추진체계의 적절성) 기후변화대응기술개발사업의 전략목표-성과목표-성과지표-사업내용이 논리적으로 연계되며, 기획-관리-평가를 체계적이고 전문적으로 수행할 수 있는 시스템을 갖추고 있음
사업성과의 효과성	· (성과목표 달성도) 성과지표 7개에 대한 성과목표 달성도는 '23년 기준 2개 지표*를 제외한 나머지 5개 지표**에서 100% 이상 달성 * 성과목표 미달성 지표 : ①SCI 논문의 표준화된 순위보정 영향력 지수(99.1%), ②유기태양전지 모듈 효율(96.7%) ** 성과목표 달성 지표 : ①기술이전 건수(160%), ②C1가스 전환 유기산 부피 농도(180%), ③SOFC 중저온영역 초고성능 셀 성능(100%), ④분해오일로부터 탈산소연료 생산 탄소회수율(110%), ⑤나노그리드 전력/통신 전송용량(100%) · (과학적 성과의 우수성) '21~'23년 발생한 SCI 논문 성과의 평균 영향력 지수(If)는 10.1, 표준화된 순위보정지수(mrnIf)는 평균 81.6으로 해당 학문분야에서 평균 상위 18.4%의 우수성 입증하였으며, 상위 1% 저널(mrnIf 99이상)에도 14건의 논문이 게재되는 매우 우수한 성과를 달성 · (기술적 성과의 우수성 1) 최근 3개년 동안의 등록특허 B등급 이상의 비율은 71%로 국가R&D 및 과기정통부 R&D 성과대비 높은 질적 수준의 성과를 창출 · (기술적 성과의 우수성 2) △C1가스의 유기산 전환 기술 개발, △고효율의 유기태양전지 모듈 제작, △중저온용 초고성능 셀 개발, △바이오항공유 생산 기술 개발, △고속 나노그리드 게이트웨이 개발 모두 실적과 우수성 측면에서 지속적으로 향상되어 왔으며, 기존 선진기술과 경쟁할 수 있는 기술적 우위를 확보 할 수 있게 됨 · (경제적 성과의 우수성) '21~'23년 동안 총 31건의 기술이전 계약이 체결되었으며, 본 사업의 목적인 온실가스 감축효과가 큰 기술 분야에 대하여 혁신 성장 동력 창출 지원을 달성하는데 기여

평가항목	종합평가
	· (대표성과) 사업의 연관성 및 핵심성, 차별성, 파급효과, 혁신성을 고려하여 5개의 대표성과를 선정 * ① 개미산과 이산화탄소만으로 잘 증식하는 플랫폼 균주 개발(2021) ② 유사 할로젠 음이온을 사용한 고효율 페로브스카이트 태양전지 개발(2022) ③ 바이오 알파올레핀 생산 고효율 촉매 공정 기술 개발(2022) ④ 고성능-고내구성 나노 촉매 개발로 차세대 그린수소생산 기술 확보(2023) ⑤ 양자점-SnO2 이중층을 이용한 고효율 페로브스카이트 태양 전지 개발(2023)
사업성과의 효율성	· (정부연구비 10억 원당 SCI 논문 성과) 최근 3년('21~'23)간 정부연구비 10억 원당 SCI 논문성과는 6.24건으로 '21년 기준 국가R&D 및 과기정통부 R&D, ET분야 R&D 성과 대비 매우 높은 효율성을 가짐 · (정부연구비 10억 원당 특허 성과) 최근 3년('21~'23)간 정부연구비 10억 원당 특허(출원 및 등록) 성과는 5.34건으로 '21년 기준 국가R&D 및 과기정통부 R&D, ET분야 R&D 성과 대비 높은 수준을 보임



(2) 기후변화대응기술개발사업 전체 기간(2019~2023) 추진 성과 및 의의

□ 기후변화대응 기초·원천 R&D 전초기지로서 정부 정책에 유연하게 대응하여 밀착 지원

○ 1기(2009~2014) : 기후변화대응 R&D투자 확대

- 기후변화대응종합기본계획('08), 기후변화대응 중장기 마스터플랜('08), 녹색기술 연구개발 종합대책('09) 등 상위 정책에 맞춰 2009년 기후변화대응기술개발사업 추진을 통해 기후변화대응 R&D 투자를 확대

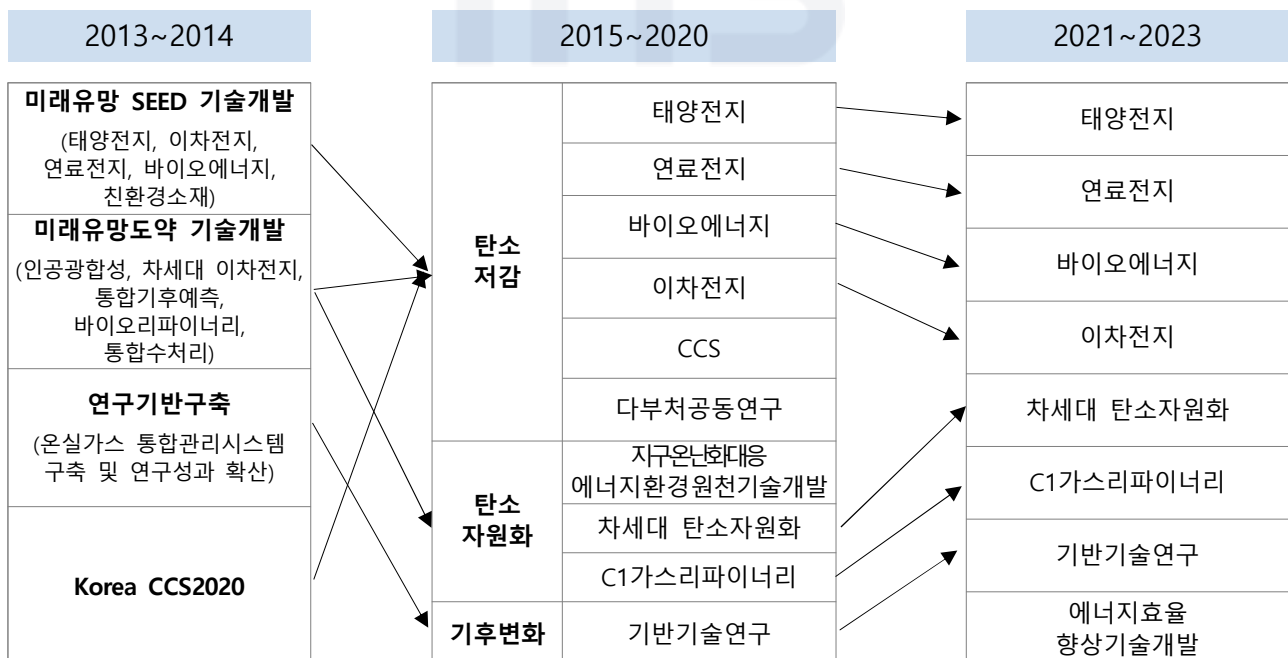
○ 2기(2015~2020) : 전략 기술 집중 지원

- 정부가 기후변화대응 핵심기술개발전략('14), 기후변화대응기술확보로드맵(CTR)('16) 등 기후변화대응 R&D전략을 체계화함에 따라 기후변화대응기술개발사업도 이에 맞춰 사업 구조를 개편하고 분야별 투자 규모를 확대하는 등 주요 전략 분야에 집중적인 투자 지원을 실시

○ 3기(2021~2023) : R&D 완주 지원, 후속 지원 준비

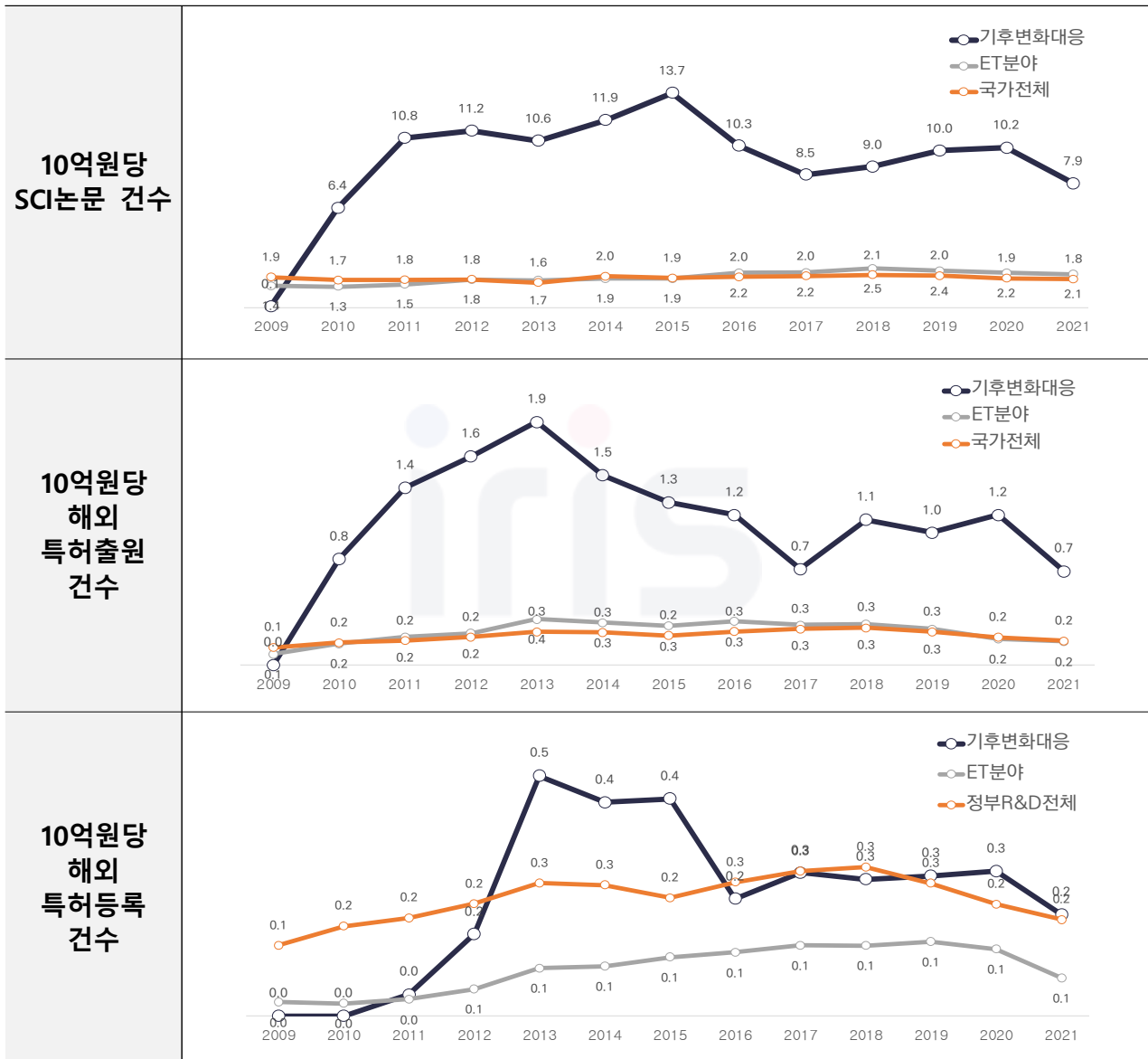
- 정부의 R&D효율화 정책으로 기존 계속사업의 일몰이 확정됨에 따라 신규 과제 지원보다는 기존 과제 지원에 집중하고, 기후변화대응을 위한 후속 R&D 투자 방안을 모색

<표 표-74> 기후변화대응기술개발사업 사업 구조 변화 이력



□ 기후변화대응 및 탄소중립 실현 기여를 위한 과학기술적 역량 축적

- (양적 성과) SCI논문, 해외특허 출원·등록 등에서 국가 전체 R&D사업 평균 뿐 아니라 ET분야 평균을 상회하는 성과를 도출하여 국가 과학기술 역량 축적에 기여
 - 10억원당 SCI논문 건수와 10억원당 해외 특허출원 건수는 2010년부터 지속적으로 국가전체 평균과 ET분야 평균을 상회해 왔으며, 10억원당 해외 특허등록 건수는 2013~2015년 이후 2019년부터 다시 국가전체 평균 및 ET분야 평균 성과를 상회



▶ 출처 : 국가전체 10억원당 성과 - 국가연구개발사업 성과분석보고서, KISTEP

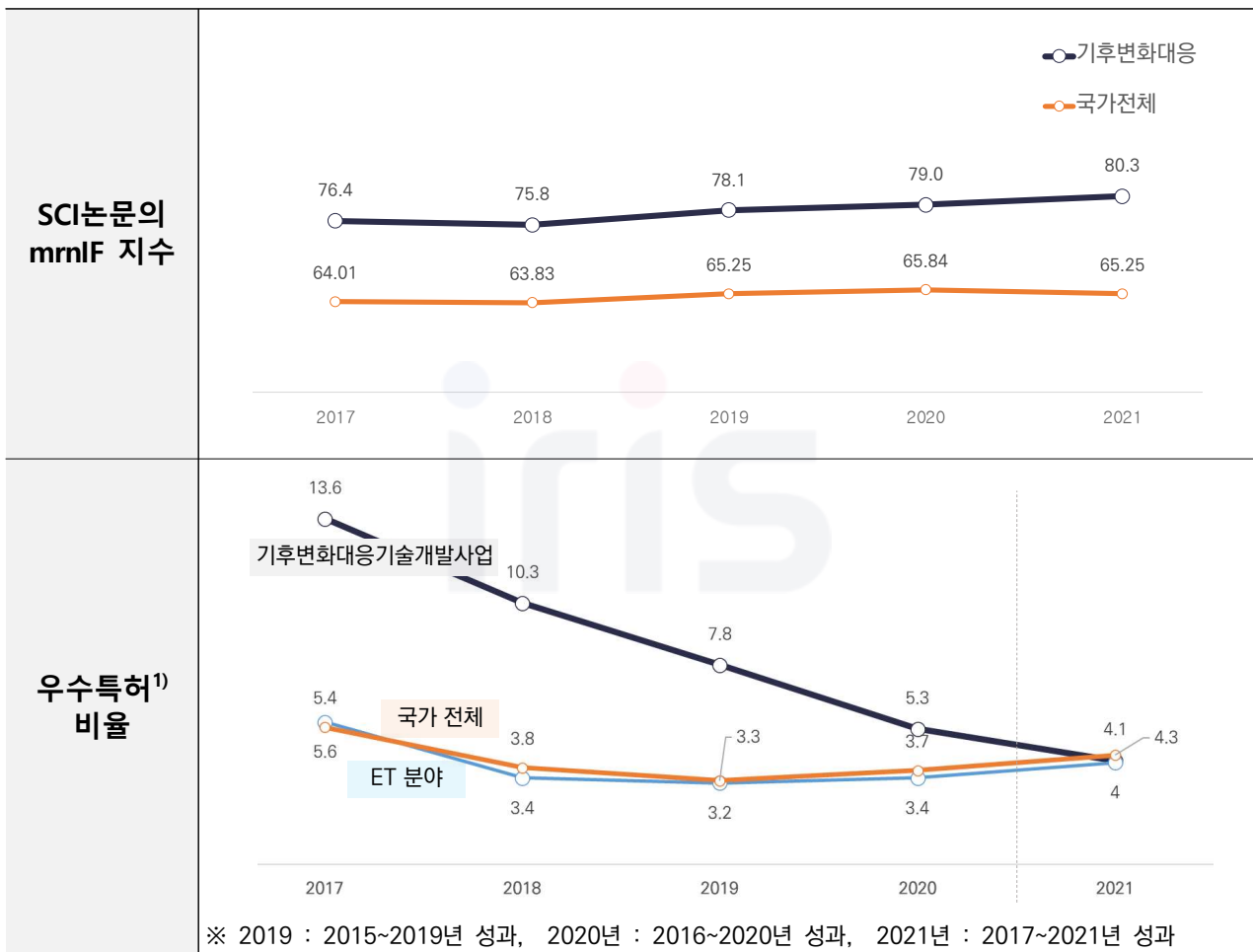
▶ 출처 : 기후변화대응기술개발사업 10억원당 성과 - 한국연구재단 내부 자료

[그림 Ⅱ-22] 기후변화대응기술개발사업의 과학기술적 성과 생산성

○ (질적 성과) SCI논문의 mrnIF 지수, 우수특허비율 등 질적 성과들이 모두 국가전체 수준을 상회

※ 국가 전체 성과값에 대한 확인이 2017~2021년까지만 가능함에 따라 동 분석 기간도 2017~2021년으로 한정함

- 2017~2021년 기간 동안 국가 전체의 SCI논문 mrnIF 지수는 64.01~65.25 수준을 유지하고 있는 반면, 기후변화대응기술개발사업은 2017년 76.4에서 2021년 80.3으로 증가 추세
- 우수특허비율의 경우 2017년 국가 전체의 우수특허 비율이 5.6%인데 비해 기후변화대응기술개발사업은 13.6%의 실적을 나타냈으며, 이후 2020년까지 국가 전체 수준을 상회

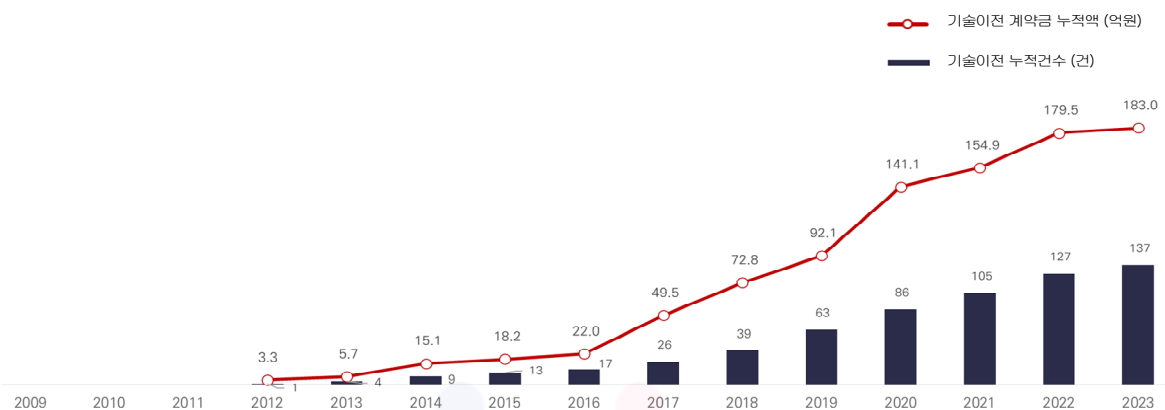


1) 우수특허 비율 : SMART 질적 지표의 9개 등급 결과 중 상위 3등급(AAA~A)에 포함되는 특허의 비율

- ▶ 출처 : 국가전체 mrnIF 지수 - 국가연구개발사업 성과분석보고서, KISTEP
- ▶ 출처 : 국가전체 SMART 특허지수 - 정부 R&D 특허성과 조사·분석 보고서, 특허청
- ▶ 출처 : 기후변화대응기술개발사업 성과 - 한국연구재단 내부 자료

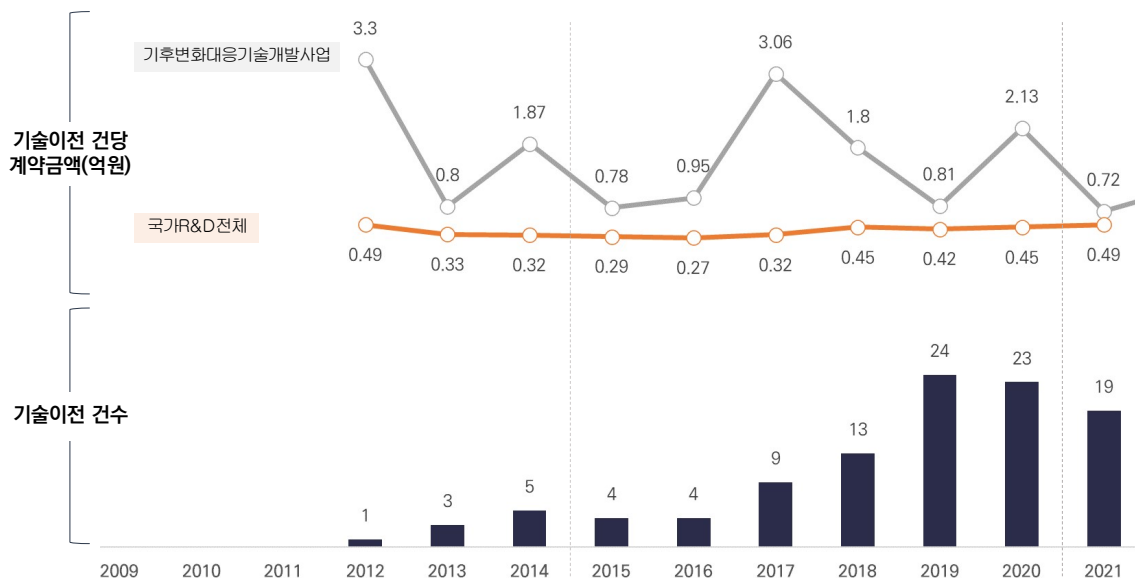
[그림 Ⅱ-23] 기후변화대응기술개발사업 성과의 질적 수준

- (기술이전) 기초원천기술개발 단계를 지원하여 기술이전 성과 발생이 쉽지 않음에도 기술이전 건당 계약금액이 정부 전체 성과를 상회하는 수준으로 발생
- 기후변화대응기술개발사업을 통해 총 137건의 기술이전계약이 이루어졌으며 이 중 건당 계약금액이 5억원 이상인 계약건수는 총 7건
- * Korea CCS 2020(5건) : ('14) 5억원, ('17) 20억원, ('18) 5억원, ('18) 6억원, ('20) 20억원
- * C1가스리파이너리(1건) : ('21) 5.8억원, 차세대수소에너지(1건) : ('20) 5억원
- 기후변화대응기술개발사업의 연간 기술이전 건당 계약금액을 살펴보면, 연도별로 편차는 있으나 0.72~3.3억원으로 국가R&D전체 실적(0.27~0.49억원)을 지속적으로 상회



▶ 출처 : 국가R&D전체 기술이전 건당 계약금액 - 정부 R&D 특허성과 조사·분석 보고서, 특허청

[그림 Ⅱ-24] 기후변화대응기술개발사업 기술이전 누적건수 및 누적계약금액



▶ 출처 : 국가R&D전체 기술이전 건당 계약금액 - 정부 R&D 특허성과 조사·분석 보고서, 특허청

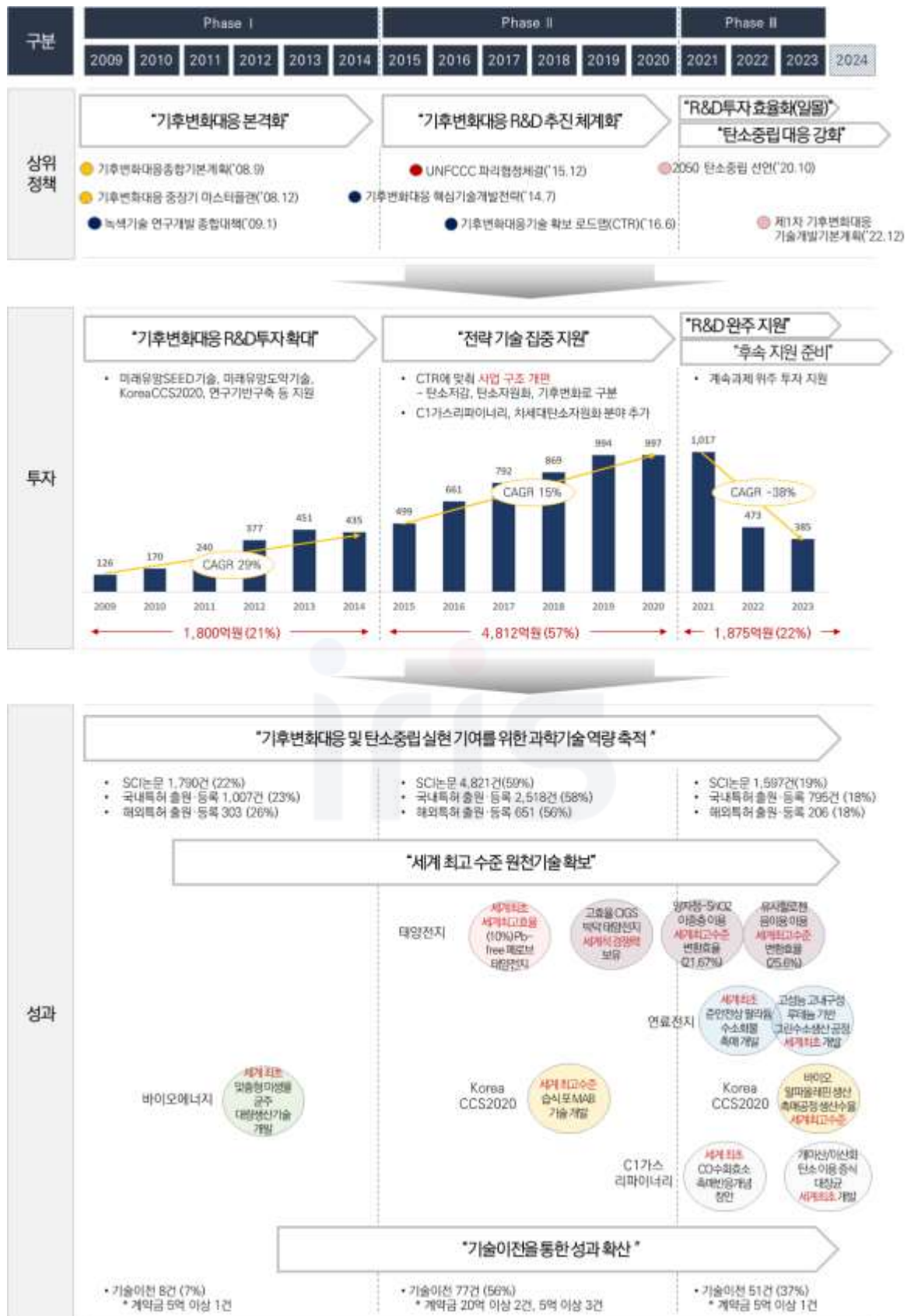
[그림 Ⅱ-25] 기후변화대응기술개발사업 기술이전 성과

□ 세계최고수준 원천기술 확보를 목적으로 기술개발 목표 점진적 상향 → 세계최고수준 성과 도출

<표 II-75> 기후변화대응기술개발사업 분야별 주요 대표성과 축적 현황

분야	성과 시기	성과명	성과의 의미
태양전지	'13.5	나노로드 구조 고효율 박막 태양전지 기술 개발	· 티타늄나노로드와 광흡수성능이 우수한 페로브스카이트 소재를 결합하여 태양전지 효율을 20% 이상 향상시킴
	'17.10	고효율, 고내구성 Pb-free 친환경 페로브스카이트 태양전지 원천소재 및 소자 기술 개발	· 세계 최초로 10%이상(세계 최고) 효율을 갖는 Pb-free 친환경 페로브스카이트 태양전지 제작 · 한국에너지기술연구원 공인 인증 효율 획득
	'17.3	고신뢰성 페로브스카이트 태양전지 제조용 무기전달 소재 개발	· FAPBI3의 결정상 안정화에 2가 양이온을 도입하는 새로운 개념을 부여하고, 그 원인의 해석을 ' Science(IF:41.063) '에 보고함으로써 성과 우수성을 객관적으로 인정 받음
	'19.11	고효율 페로브스카이트 태양전지를 위한 광 흡수 영역을 넓힌 소재 개발	
	'20.12	도심 분산전원용 경량 플라스틱 기반 고효율 CIGS 박막 태양전지 기술	· 유연 태양전지 기술을 한 단계 업데이트 할 수 있는 국내 최고 수준의 저온 성막기술 확보 → 세계적 경쟁력 보유
	'21.2	유사할로젠 음이온을 사용한 고효율 페로브스카이트 태양전지 개발	· 음이온인 포름산 이온(CH_3COO^-)을 첨가제로 사용하는 연구를 수행하여 세계 최고 수준의 태양전지 전력변환효율인 25.6%를 달성
	'22.1	양자점-SnO ₂ 이중층을 이용한 고효율 페로브스카이트 태양 전지 개발	· 0.1cm ² 이하 소면적 태양전지 효율 25.72%로 비공인 세계기록을 달성하였으며, 대면적(20cm ² 이상)에서도 21.67% 세계 최고 수준의 변환효율을 확보
연료전지		연료전지 공기극용 Co 기반 비귀금속계 촉매 개발	· 비귀금속계인 코발트와 탄소를 활용한 고체 알칼리막 연료전지의 산소극에 적용 가능한 고내구성·고활성 촉매를 개발하여 '18년 상용 전해질막과 이오노머를 적용한 막-전극접합체 기준 세계 최고 성능(420mW/cm ²) 달성
	'22.3	세계 최초 준안정상 팔라듐 수소화물 촉매 개발	· 경원소(수소, 리튬 등)를 포함하는 합금 촉매 소재의 새로운 합성법을 개발하여, 다단계 촉매 결정화 과정이라는 준안정 촉매 소재 개발 패러다임을 제시
	'22.3	고성능-고내구성 나노 촉매 개발로 차세대 그린수소생산 기술 확보	· 백금을 대체할 저가·고성능·고내구성 루테튬 기반의 나노촉매 개발과 이를 활용한 멀티스케일 막전극의 접합체를 경제적으로 제작 할 수 있는 공정을 세계 최초로 개발

분야	성과 시기	성과명	성과의 의미
바이오 에너지	'13.8	세계 최초 맞춤형 미생물 균주 대량 생산기술 개발, 바이오부탄올 생산을 위한 미생물균주 및 관련 기술이전	· 세계적 학술지 네이처프로토콜에 게재 · 정액기술료 3.06억원
	'16.4	미생물 이용 의료용 바이오플라스틱 폴리락테이트-글라이콜레이트 생산 기술 개발	· 세계 최초 미생물 기반 PLGA 생산 및 이를 위한 다양한 생화학/컴퓨터 시뮬레이션 기술의 접목
	'19.1	시스템대사공학 전략 개발 및 바이오 기반 화합물 지도 총정리	· 미생물 활용 화학물질 생산 전략과 생산경로를 총정리한 대사회로 지도(Bio-based chemicals)가 전 세계적으로 바이오화학물질 합성의 Google-map 으로 불림
이차전지	'17.11	초고속 충전 가능한 리튬이온전지 양극소재 개발	· 과리튬망간 전이금속 산화물(LMR) 소재에 나노미터 크기의 고이온전도성 표면층을 생성하여 표면 열화 현상을 극복한 새로운 양극재를 개발
	'18.5	세계 최초 상-분리 전고체 전해질 기술 개발	· 고에너지밀도 전지인 리튬-황 전지에 적용하여 전해질로 달성할 수 있는 세계 최고 수준의 성능 확보($670\text{mAh g}_{\text{sulfur}}^{-1}$, 쿨롱효율=98.3%, 250사이클)
Korea CCS2020	'17.7	세계 최고 수준의 습식 포집 MAB 기술 개발	· 성능 및 안정성을 크게 향상시킨 흡수제를 기반으로 하는 CO₂ 포집 기술로, 재생에너지를 2.0GJ/t-CO₂, 전기에너지를 200kWh/t-CO₂ 이하로 낮출 수 있는 세계 최고 수준의 기술
	'23.10	바이오 알파올레핀 생산 고효율 촉매 공정 기술 개발	· 고성능 RuSn 합금 촉매 기반 듀얼베드 촉매시스템 개발을 통해 세계 최고 수준 1-옥텐 생산 수율 달성으로 상용화 가능성 확인
C1가스 리파이너리	'21.4	CO hydratase 이용 산업폐가스로부터 개미산 및 생분해 플라스틱 생산 기술 개발	· 세계 최초로 CO(일산화탄소) 수화 효소 (CO hydratase) 촉매 반응 개념 창안 및 효소개발 성공(미국, 유럽, 한국 특허 등록 완료)
	'23.12	개미산과 이산화탄소만으로 잘 증식하는 대장균 개발	· 개미산과 이산화탄소만을 이용하여 높은 세포농도까지 성장하는 대장균을 세계 최초로 개발하여 친환경적인 바이오 화학 기반의 대체 기술 개발에 기여



[그림 Ⅱ-26] 기후변화대응기술개발사업 투자 및 성과 요약

(3) 개선 방안 및 제언

□ ‘2050 탄소중립’ 중심의 정책 변화에 대응토록 사업 추진 및 관리 방식 개선 필요

- 기후변화대응기술개발사업이 추진되는 동안 탄소중립이라는 글로벌 이슈가 등장했고, 이에 정부는 2050년까지 탄소중립을 실현하겠다는 구체적이고 명확한 국가적 미션을 설정
- 이러한 정책 변화에 대응하기 위해서는 탄소중립 실현에 기여할 수 있는 목표 중심의 후속 R&D 추진이 필요하며, 기존 기후변화대응기술개발사업의 지원 전략을 개선하여 ① 선택과 집중, ② 프로그램형 방식, ③ 문제해결 중심의 성과관리로 전환하는 것을 제언

□ (선택과 집중) 백화점식 지원 방식의 분산 투자가 아닌 주요 분야별 단독 사업 방식으로 전환하여 집중 지원 및 관리

- 그간 기후변화대응기술개발사업은 정부의 기후변화대응정책에 유연하게 대응하면서 다양한 분야를 지원해왔으나, 기존의 방식은 한정된 자원 내에서 분야별 전략적·지속적 지원이나 성과관리에 있어 한계가 존재함
- 따라서 정부의 기후변화대응 및 탄소중립 실현에 기여할 혁신적 원천기술 확보를 위해 R&D 지원이 필요하나 투자 공백이 우려되는 분야들을 우선 지원 대상으로 선택하여 집중 지원하는 전략이 필요
- 또한 각 분야별 특성에 따라 목표를 설정하고 관리하여 실질적인 성과를 효과적으로 도출할 수 있도록 분야별 단독 사업 방식으로의 추진을 제안함
 - 예를 들어, ‘태양전지’ 분야의 경우 무탄소 발전 전환 목표 달성을 위해 고효율 태양전지 기술 확보 및 현장 보급이 필요하나 현재의 기술 수준으로는 목표 시점 내에 요구되는 성능의 기술 확보가 매우 불확실하여 지속적인 R&D 지원이 필요하나 후속 연계사업 부재로 투자 공백 위기
 - 태양전지 분야는 선행 기후변화대응기술개발사업 추진을 통해 세계 최고 수준의 성과들을 도출해왔고, 타 분야 대비 우수성과 생산성도 높아 향후 지속적인 R&D투자를 탄소중립 실현에 기여할 혁신적 원천기술 개발 확보가 기대되는 분야로 후속 사업 추진이 필요한 분야임

□ (미션 중심의 프로그램형) 특정 기술 중심에서 해결 난제 중심의 프로그램형 사업 추진

- ‘2050년 탄소중립 실현’이라는 기한 목표가 제시된 상황에서 기존 기술의 점진적 개선 방식으로는 목표 달성이 불투명
 - 기존 기후변화대응기술개발사업은 특정기술의 기술적 성능목표를 상향하는 방식으로 신규과제를 기획·공모·지원하였으며, 이러한 과정을 거쳐 세계 최고 수준의 성과들이 도출될 수 있었음
 - 그러나 탄소중립 실현을 위한 성능 목표를 확보하기 위해서는 여전히 해결해야 할 기술적 난제들이 존재하고, 2050년까지 남은 기간을 고려했을 때 기존의 점진적 개선 방식으로는 해결이 어려움

- 따라서 탄소중립 실현에 기여 가능한 도전적 목표치를 설정하고, 이에 도전할 파괴적·혁신적 R&D를 지원하는 ‘프로그램형’으로 전환 필요
- 기술을 특정하지 않고 ‘난제 해결’을 목표로 하는 다양한 창의·도전적 R&D를 지원

<표 Ⅱ-76> 기후변화대응기술개발사업 지원분야별 투자 대비 성과 비교 (2009~2023)

구분	기후변화대응기술개발사업 지원 분야별 성과				종합 비교
	전체 투입 연구비 분야별 비중(%)	mrnIF95 이상 논문성과 분야별 비중(%)	SMART A등급 특허성과 분야별 비중(%)	전체 기술이전 계약금액 분야별 비중(%)	
태양전지	11.6	24.3	13.5	4.8	타 분야 대비 논문·특허 성과 우수
연료전지	9.1	9.7	3.8	3.4	타 분야 대비 논문성과 약간 우수
바이오에너지	13.5	17.6	32.7	6.7	타 분야 대비 논문·특허 성과 우수
이차전지	8.3	15.2	3.8	1.8	타 분야 대비 논문성과 우수
Korea CCS 2020	20.3	8.3	34.6	43.7	타 분야 대비 특허·기술이전 성과 우수
차세대수소에너지	1.3	1.6	0.0	2.9	타 분야 대비 논문·기술이전 약간 다소 우수
C1가스리파이너리	16.4	14.9	5.8	26.7	타 분야 대비 기술이전 성과 우수
차세대 탄소자원화	4.3	4.0	3.8	6.6	타 분야 대비 기술이전 성과 약간 우수
에너지효율향상	1.6	0.0	0.0	2.2	-
기후기술현지화지원	0.5	0.0	0.0	0.0	-
기반기술연구	12.0	4.3	1.9	1.1	-
다부처공동연구	1.0	0.1	0.0	0.2	-
기타	0.2		0.0	0.0	-

□ **(성과 관리 및 활용)** 글로벌 기술패권경쟁 심화에 따라 질적 성과 목표 설정 및 성과 활용·관리 강화

- 기후변화대응기술개발사업은 ‘세계적 수준의 에너지·환경 분야 원천기술 개발’을 목표로 하여 평균 mrnIF지수, 기술이전건수, 세부사업별 핵심지표 등을 성과지표·목표로 설정하여 우수한 성과들을 도출해왔음
- 그러나 탄소중립이라는 글로벌 이슈에 대한 각국의 기술패권경쟁이 심화되고 있고, 2050 탄소 중립 목표 달성을 위해 보다 혁신적 기술개발이 요구되고 있다는 점에서 성과지표를 개선할 필요가 있음
- (논문 질적 요구 수준 강화) 논문의 경우 기존 수준 혹은 국가 전체 수준과의 상대적 비교로 성과의 우수성을 평가하기 보다는 절대적 기준을 상회하는 성과 도출 여부로 평가하는 것이 필요

※ 예시 : (기존) ‘평균 mrnIF 지수’ → (개선) ‘(10억원당) mrnIF 95 이상 논문 건수’

- (특허 성과 관리 강화) 에너지 안보 확립과 글로벌 시장 선점을 고려할 때 우수 특허의 전략적 확보 및 활용이 중요하므로, 등록특허를 기준으로 우수특허성과 관련 지표를 추가하여 사업을 관리하는 것이 필요

※ 예시 : (기존) 특허 관련 성과지표 부재 → (개선) 'SMART 우수특허 비율'

- (기술이전 성과 관리 강화) 단순 기술이전 계약 건수가 아닌 일정 수준 이상의 계약금액이 체결된 기술이전 건수로 관리하는 것을 제안

※ 예시 : (기존) '기술이전 건수' → (개선) '계약금액 1억원 이상인 기술이전 건수'

○ 또한 타사업으로의 연계를 통한 후속 단계 진입 등 성과 활용 현황에 대한 입체적 모니터링 필요

- 혁신적 원천기술 개발 성과가 후속 R&D 및 사업화 과정을 거쳐 현장에 보급됨으로써 실질적으로 탄소중립 실현에 기여하기 위해서는 성과 활용의 축진이 매우 중요
- 원천기술 개발 성과는 기술이전, 사업화, 타사업에서의 후속 R&D단계 연구 수행 등의 방식으로 활용이 이루어지는 만큼 기술이전 및 사업화 성과 외에 타사업 R&D수행 여부에 대한 모니터링을 통해 성과의 우수성과 활용성을 평가·관리하는 방안 마련이 필요



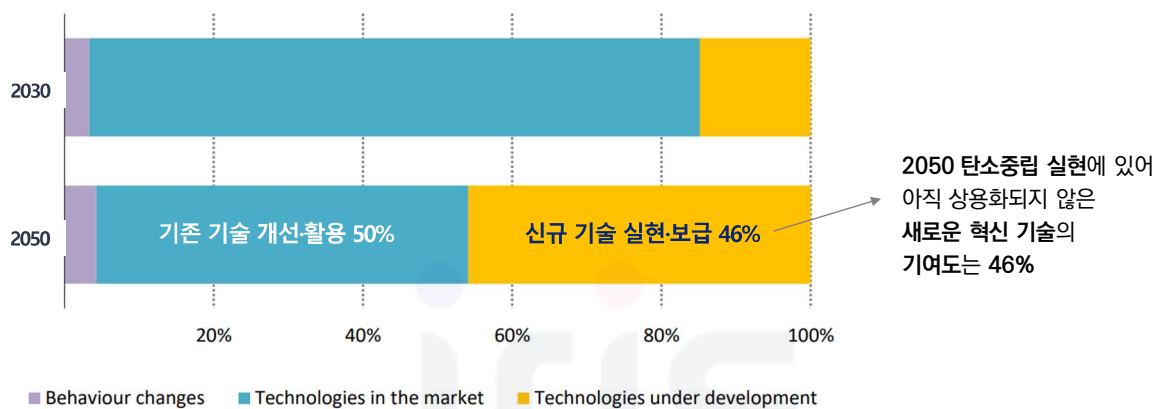
PART III. 환류 및 정책 제언

1. 주요 여건 변화 분석

1.1 탄소중립과 혁신기술 요구

- 2050 탄소중립은 기존 기술만으로는 달성 불가능, 아직 상용화되지 않은 새로운 혁신기술 확보 필수
 - IEA의 「Net Zero by 2050(‘21.5)」에 따르면, 2050년까지 탄소중립을 달성하려면 아직 상용화되지 않은 새로운 기술 확보를 위한 엄청난 도약이 필요하며, 그 도약을 위한 노력은 지금 이루어져야 하는 상황

Annual CO₂ emissions savings in the net zero pathway, relative to 2020



* 자료 : Net Zero by 2050, IEA (2021.5)

[그림 Ⅲ-1 탄소중립 달성까지 기존 기술과 신규 기술의 기여도]

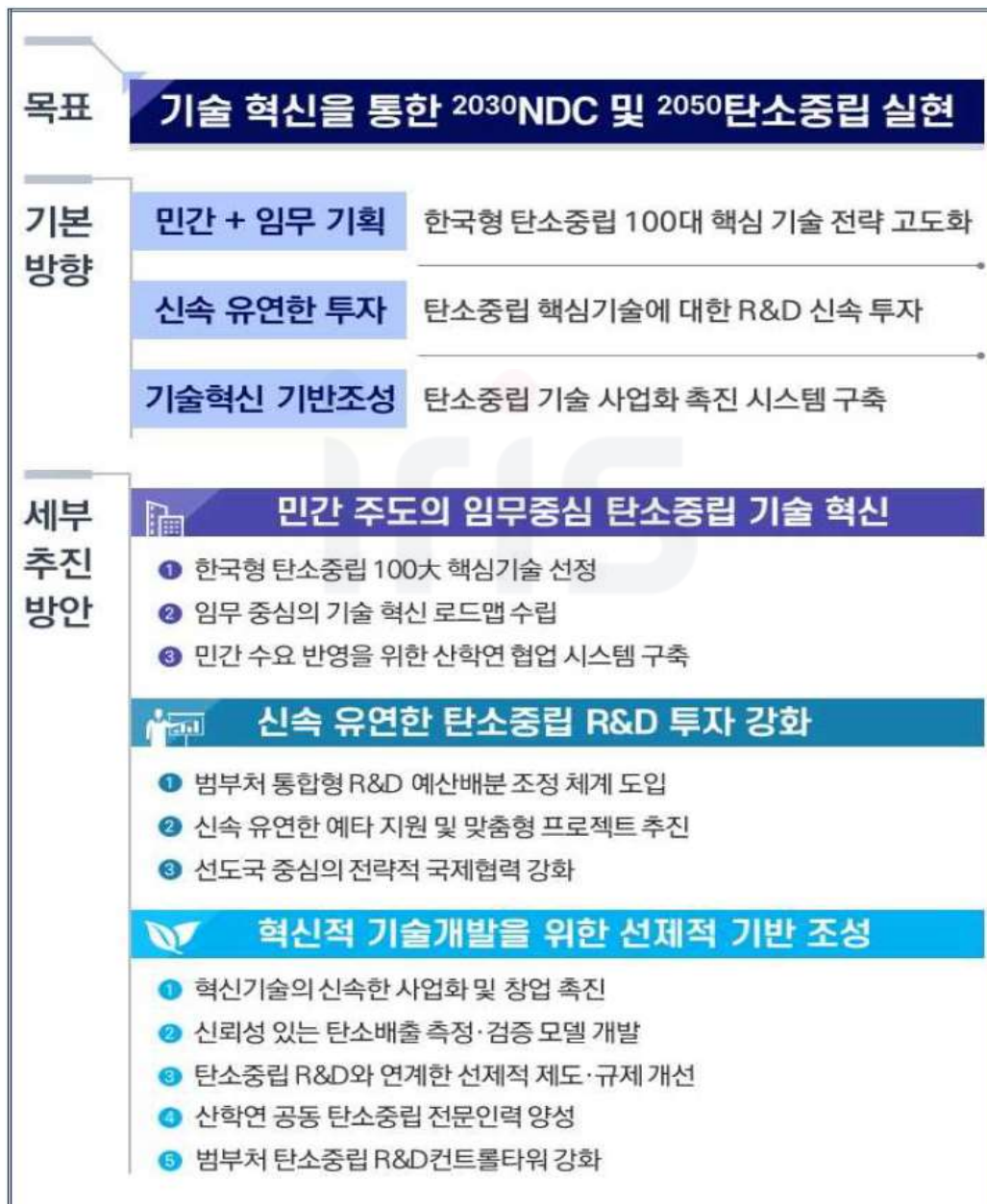
- 정부는 2030 NDC 달성, 2050 탄소중립 목표 달성 수단으로서 혁신 기술 확보를 강조

	주요 내용	후속 사업으로 풀어야 할 새로운 요구
국가 탄소중립·녹색성장 기본계획(‘23~’42)	2030년까지 온실가스 40% 감축 달성 2050년 탄소중립 사회로 이행	- 부문별 감축 정책 이행을 위한 혁신 기술 확보 - 기후위기 적응 등을 위한 R&D 지원
제1차 기후변화대응 기술개발 기본계획 (‘23~’32)	2030 NDC 달성 기여 목표 감축기술 확보 - 기후변화 적응 R&D 체계적 추진 - 기후변화 대응 혁신생태계 조성	- 선행사업 성과 현장 적용성 강화, 후속 단계로 shift - 감축 뿐만 아니라 적응분야 까지 지원 확대
※ 이 외 각 분야별 기술개발 전략	2030 NDC 달성 및 2050 탄소중립 실현 위한 각 분야별 기술개발 목표 제시	- 기한 내 요구 기술 확보를 위한 R&D지원체계 혁신 - 미션 중심 R&D 지원 및 관리

[참고] 탄소중립 및 기후변화 대응 관련 주요 정책

□ 탄소중립 녹색성장 기술혁신전략('22.10)

- 그간의 기술 임무보호/정부주도 방식에서 임무중심의 기술선정/민간주도 방식으로 전환, 신속 유연한 탄소중립 R&D투자 강화, 혁신적 기술개발을 위한 선제적 기반 조성 등을 세부 추진 방안으로 제시
- 국내 여건을 고려한 '한국형 탄소중립 100대 핵심기술'을 선정하고, 임무 기반 기술혁신 로드맵 수립을 추진



[그림 Ⅲ-2] 탄소중립 녹색성장 기술혁신 전략 목표 및 기본방향

□ 제1차 기후변화대응 기술개발 기본계획('23~'32)

- 기후기술법 제5조에 따른 기후변화대응 기술 분야 최상위계획으로서, 탄소중립 실현 기여, 신성장동력 및 에너지안보 확보, 기후위기 적응 강화 등을 방향으로 설정
- 전략은 크게 온실가스 감축, 기후변화 적응, 혁신 생태계 조성으로 구분되어 감축 분야 중점기술 뿐 아니라 적응 분야 중점 기술까지 밸런스있게 강조하고 있음



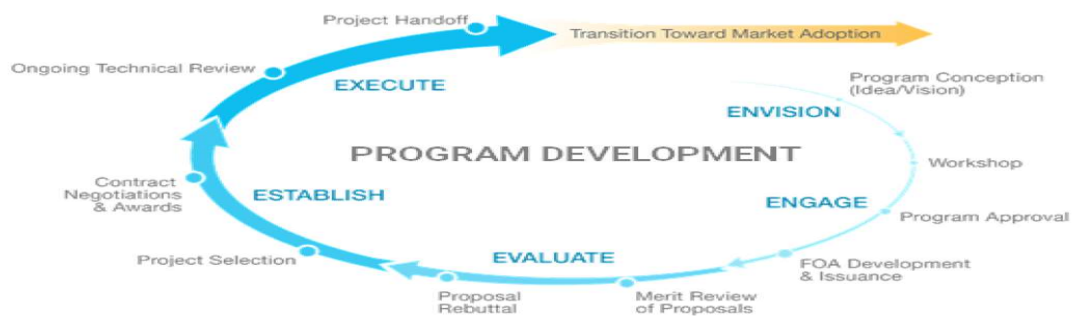
[그림 Ⅲ-3] 제1차 기후변화대응기술개발 기본계획(2023~2032) 비전 및 목표

1.2 주요국 기후변화 및 탄소중립 대응 R&D 추진 동향

(1) 미국 'ARPA-E 프로그램'

- ARPA-E(Advanced Research Projects Agency-Energy)는 파괴적이고 혁신적인 에너지 기술과 정책 개발을 목적으로 설립, 추진됨
 - '05년 미국의회는 DOE에 DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)를 모델로 한 ARPA-E 설립을 권고, '07년 'The America Competes Act'에 의거, ARPA-E 공식 설립
 - 석유소비 세계 1위 국가인 미국의 해외 에너지 수입의존을 줄일 수 있는 기술, 온실가스 배출 감축 기술, 에너지 효율 향상 기술, 미국이 리더십을 유지하는 첨단 에너지 기술개발 등 변환적(Transformational)이고 파괴적(disruptive)인 에너지 기술 개발을 임무로 추진
 - ARPA-E는 완전히 새로운 에너지 생성, 저장, 사용 방법을 개발하며, 높은 잠재력과 영향력을 갖추었으나 민간부문 투자가 이루어지기는 아직 매우 이른 에너지 기술개발 추진
- 파괴적·혁신적 기술 확보를 위해 '오프 로드맵'을 기조로 하는 개방형·탐색형 프로그램과 특정 문제 해결에 집중하는 집중형 프로그램 등을 운영
 - 새로운 과학적 혁신과 시장 개발을 신속하게 활용하기 위해 전통적인 기술개발 로드맵 대신 "오프 로드맵" 방식 채택
 - 완전히 새로운 경로에 대한 옵션을 만들기 위해 미지의 에너지 기술역역과 해당 영역의 교차점을 탐색하며, 단순하지만 쉽게 대답할 수 없는 일련의 질문을 사용하여 새로운 프로그램을 구성함
 - ARPA-E 운영 프로그램은 집중형, 개방형 요청, 탐색적 주제, 스케일업 등의 4가지 유형으로 구분
 - 집중형(Focused) 프로그램 : 특정 에너지 문제를 해결하기 위해 프로그램 디렉터가 개발, 기초과학에서 초기 단계 기술까지 고유한 연결고리 제공, 최신 과학적 발견을 기반으로 상업적 구현을 위한 실행 가능한 경로를 구상
 - 개방형 요청(Open Solicitation) 프로그램 : 에너지 기술분야의 판도를 바꾸는 돌파구를 만들 수 있는 잠재력을 가진 모든 아이디어에 대한 지원으로, 집중 프로그램의 범위를 벗어난 잠재적인 아이디어가 손실되지 않도록 개방형 자금조달 기회 발표(FOA) 주기적 실시
 - 탐색적 주제(Exploratory Topics, ETs) 프로그램 : 기존 또는 신규 집중 프로그램의 신속한 지원 또는 미국의 경쟁력과 안보에 중요한 에너지 문제 관련 잠재적 신규 영역 조사
 - 스케일업(SCALEUP) 프로그램 : 실제 에너지 시스템에서 제품 개발, 생산, 배치 관련 스케일업 문제와 기술적 위험을 해결함으로써 고위험, 파괴적 혁신기술의 스케일업 지원, 실험실 수준에서 달성한 기술성능을 상업적 실행 가능한 버전으로 변환하는 팀 지원

- ARPA-E 프로그램은 ARPA-E의 영향력과 잠재력이 큰 투자가 완전히 새로운 방식의 에너지 생성, 저장, 사용을 가능하게 하는 변환적 기술로 이끌 수 있도록 개발
 - 1단계(Envision, 구상단계) : 프로그램의 개념(Idea/Vision) 정립
 - 2단계(Engage, 정립단계) : 워크샵, FOA 개발 등을 통해 개념을 더욱 정밀화
 - 3단계(Evaluate, 평가단계) : 정식제안, 반박 토론 등
 - 4단계(Establish, 확정단계) : 프로젝트 선정 및 계약협상 등
 - 5단계(Execute, 집행단계) : 최종 집행



[그림 Ⅲ-4] ARPA-E 프로그램 개발 과정

- 프로그램 운영을 통해 '09~'23년까지 총 1,542개의 프로젝트를 지원하여 논문·특허 성과 뿐 아니라 후속 투자 유치, 창업 및 사업화 등의 파급 효과가 발생함
 - 09년부터 ARPA-E는 잠재적으로 혁신적인 에너지 기술 프로젝트 1,542개 이상을 위해 R&D 자금으로 약 35억 8천만 달러를 제공함
 - 6,797개의 논문게재와 1,039건의 특허가 출원되었으며, 323건의 기술이전(라이선싱) 도출
 - 212개의 프로젝트는 민간부문으로부터 약 115억 달러의 후속 투자를 유치하였으며, 300개의 프로젝트는 후속 개발을 위해 다른 정부기관과 제휴
 - ARPA-E를 통해 149개의 새로운 회사가 형성되었고 27개의 회사는 인수, 합병, IPO등을 통해 엑시트가 이루어졌는데 이때 보고된 총 가치는 약 218억 달러임



▶ * 출처 : <https://arpa-e.energy.gov/about/our-impact>

[그림 Ⅲ-5] ARPA-E의 성과('23년 7월 기준)

(2) EU 'Horizon 2020'

- 에너지는 EU 온실가스 배출량의 75% 이상을 책임지고 있음에 따라 2050년까지 기후 중립성(Climane Neutrality)을 향한 전환의 핵심적인 역할은 에너지 문제임
 - 기후 중립성에 도달하기 위해서는 지금까지 전 세계적으로 실현된 것보다 최소 6배 이상 더 빠르게 탈탄소화 해야하며, 이를 위해서는 재생 가능 에너지원과 청정 에너지 운반체의 비중을 획기적으로 늘리고 에너지 효율을 개선해야 함

- '16년 유럽위원회(European Commission, EC)는 청정에너지전환을 촉진하기 위해 에너지 효율 우선, 재생 에너지 분야의 글로벌 리더로서의 유럽, 소비자를 위한 공정한 거래라는 3대 목표 설정, 이의 달성을 위한 청정에너지 전략 제시
 - 연구와 혁신은 청정에너지 전환 목표 달성의 핵심원동력으로서 Horizon 2020을 통해 '안전하고 깨끗하며 효율적인 에너지'라는 사회적 과제를 위해 57억 유로를 할당
 - Horizon 2020에서는 아래와 같은 4개의 상호 연결된 전략적 우선순위에 집중하고 있으며 모두 디지털화를 핵심 동인으로 삼고 있음
 - 2050년까지 EU 빌딩자산의 탈탄소화
 - 재생 에너지에 대한 EU 리더십 강화
 - 저렴하고 통합된 에너지 저장 솔루션 개발
 - 전기 이동성과 보다 통합된 도시 교통 시스템

- '19년 유럽위원회는 기후변화대응책이자 경제성장 전략인 '유럽 그린딜'을 발표하였으며 청정에너지는 유럽 그린딜의 일환으로 기후목표 달성에 중요한 역할 담당
 - '지속가능한 미래를 위한 EU 경제의 변화'를 위해 기후변화 대응 목표를 상향 조정(2050년까지 탄소배출 순제로)함과 동시에 이를 달성하기 위한 6대 분야별 정책 계획 제시
 - 6대 분야는 탄소중립 달성을 위한 깨끗하고 저렴하고 안전한 에너지 공급, 청정·순환경제를 위한 산업재편, 지속가능한 운송, 예건축의 에너지 및 자원 효율성 강화, 친환경적인 식품시스템, 생태계와 생물다양성 보존으로 구성
 - 이에 필요한 자금조달방안으로 EU예산 및 Invest EU를 활용한 투자계획과 공정전환체계(Just Transition Mechanism)를 제시



▶ * 출처: EU 위원회(KOTRA, 유럽 그린딜 추진동향 및 시사점, 글로벌마켓리포트에서 재인용)

[그림 Ⅲ-6] 유럽 그린 딜 정책 개요

□ '21년 EU 위원회는 탄소중립 달성을 위한 강력한 의지 표명의 일환으로 'Fit for 55' 발표

- 동 입법안은 '30년까지 탄소배출량을 '90년 대비 55% 감축하기 위해 기후, 에너지, 토지사용, 운송, 그리고 과세 관련 정책 및 법령을 수정 또는 제정하는 것을 주 내용으로 함
- EU는 유럽 그린딜(European Green Deal)의 목표를 실현하기 위해서는 동 입법안을 약 10년에 걸쳐 성공적으로 이행하는 것이 핵심이라고 판단함
- 동 입법안의 주된 방향성은 (i) 오염원에 대한 탄소가격과 세금을 부과하고, (ii) 각종 산업에 대해 보다 더 강력한 온실가스 배출기준과 규제를 적용하며, (iii) 탄소감축 또는 탄소중립 기술에 대한 투자를 촉진한다는 것임
 - 재생에너지 기술 투자 확대 및 재생에너지 친화적인 에너지 생태계 구축을 통해 향후 10년간 재생에너지 비중을 전체 40%까지 끌어 올리는 것(현재 약 20% 수준)을 포함함
 - EU는 탄소중립 달성을 위해 산업 구조의 근본적 변화를 꾀하고 있으며, 동 입법안은 EU의 탄소중립으로의 전환은 탄소중립이 경제발전과 궤를 같이한다는 믿음을 바탕으로 하고 있음을 보여주는 것임

□ '22년 EU 위원회는 'Fit for 55' 정책 패키지의 일환으로 러시아 화석연료에 대한 의존에서 신속하게 탈피하고 친환경 전환을 가속화하기 위한 'REPowerEU' 계획 발표

- 'REPowerEU' 계획은 보다 저렴하고 안전하며 지속가능한 에너지를 위한 계획으로 연구 및 혁신활동을 통해 특히 그린 수소 및 태양에너지에 대한 시장 준비가 되도록 신규 및 기존

기술 솔루션을 지원함

- EU 위원회는 '25년까지 수소 밸리의 수를 두 배로 늘리기 위해 수소 공동 사업에 대한 Horizon Europe 투자를 보충하고 수소경제를 위한 대형 기술개발 프로젝트의 시작과 함께 청정수소에 대한 ERASMUS+와 공동 사업을 통해 기술을 지원할 예정

※ ERASMUS+ : 유럽 연합에 속한 나라들 사이의 교환학생 프로그램

- 또한 그린 수소 및 태양 에너지 기술에 대한 EU 국가들과 전략적 연구 및 혁신 의제를 개발, 구현하고 무엇보다도 Horizon Europe에서 자금을 확보할 예정

□ 한편, EU는 에너지 연구 및 혁신을 위하여 주요 연구분야별로 다양한 지원프로그램을 통해 연구 및 혁신 자금을 지원하고 있음

- 주요 연구 분야로는 태양에너지, 풍력 에너지, 지열 에너지, 해양 에너지, 수력, 바이오에너지, 핵융합 에너지, 핵분열, 에너지 저장 분야가 있으며 아래 표와 같은 다양한 지원프로그램을 운영하고 있음

<표 Ⅲ-1> EU의 에너지 연구 및 혁신 지원프로그램

프로그램	개요
Horizon Europe	9번째 유럽 연구 및 혁신 프레임워크 프로그램(2021-2027)으로 유럽의 회복, 대비 및 탄력성을 조정하고 가속화하기 위한 연구혁신 프로젝트 지원
LIFE	환경 및 기후 행동을 위한 EU의 자금 지원 수단
NER 300 programme	환경적으로 안전한 탄소 포집 및 저장(CCS) 및 혁신적인 재생 에너지 기술에 중점을 둔 혁신적인 저탄소 기술 연구 자금
COSME	기업 및 중소기업의 경쟁력을 위하여 중소기업이 수명 주기의 모든 단계에서 금융에 쉽게 접근할 수 있도록 지원
European structural and investment funds (ESIF)	일자리 창출과 지속가능하고 건강한 유럽 경제 및 환경에 투자하는 기금
EIC Horizon Prize on artificial photosynthesis	주택, 운송 또는 산업에서 사용할 준비가 된 지속 가능한 연료를 생산하기 위해 햇빛을 사용하는 것을 시연하는 최고의 솔루션에 500만 유로의 상금 수여
SOFT Innovation Prize	융합 에너지의 거대한 도전 과제에 대한 새로운 솔루션을 찾은 뛰어난 연구원 또는 업계에 상을 수여
Prize for renewable energy islands	섬의 전기, 난방, 냉방 및 운송을 위한 지역 재생 에너지 생산에 대한 상을 수여

▶ * 출처 : https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/energy_en

(3) 일본 'ALCA-next, GteX'

- 일본 과학기술진흥기구(JST)는 탄소중립 실현을 혁신·첨단 원천기술 확보를 위해 2023년부터 '전략적 창조연구 추진사업' 첨단 탄소중립개발(ALCA-Next)'과 '혁신적 GX 기술 창출 사업(GteX)을 추진



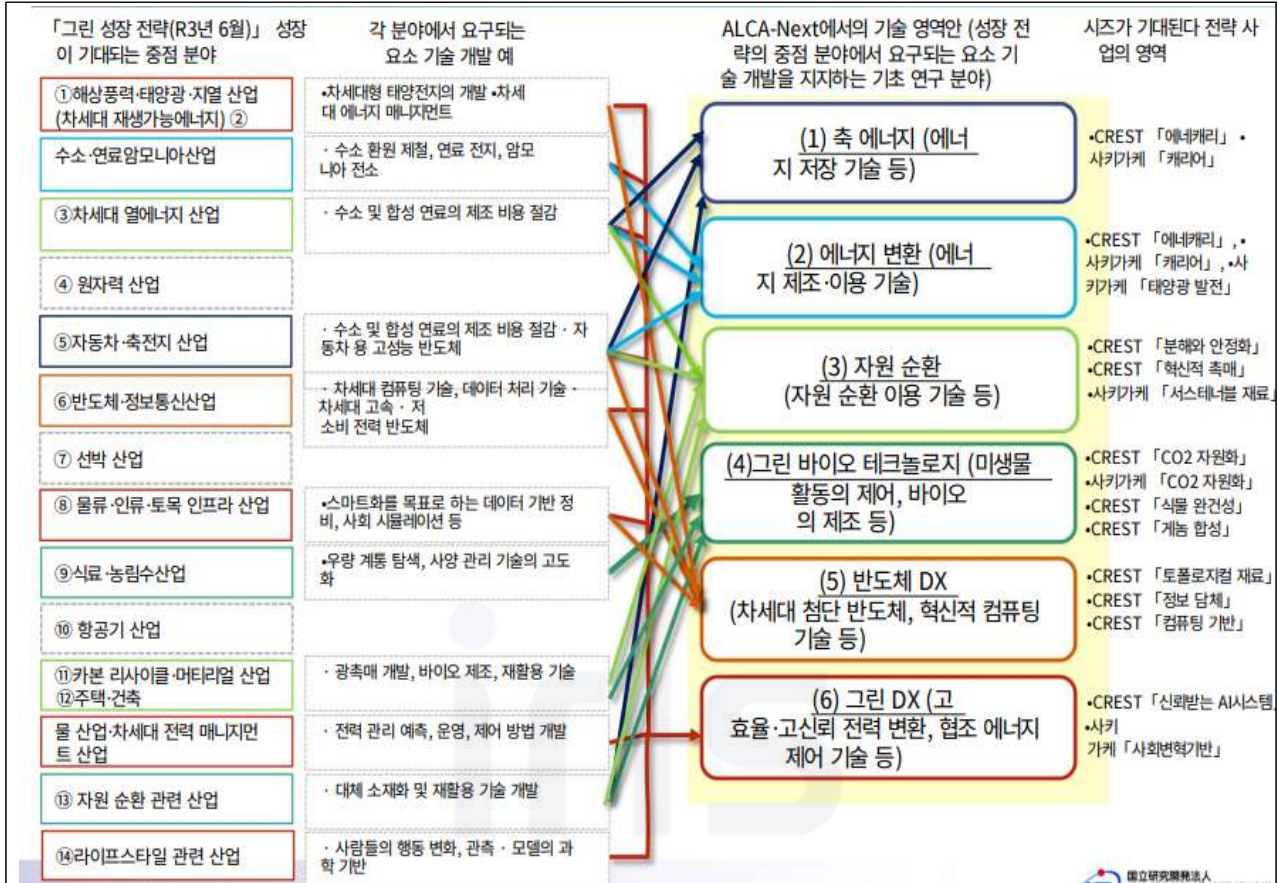
▶ * 자료 : ALCA-Next 웹사이트, JST

[그림 Ⅲ-7] JST 지원사업 내 ALCA-Next, GteX 프로그램의 포지셔닝

- ALCA-Next는 탄소중립 기여라는 출구를 명확하게 바라보면서 개별 연구자의 자유로운 발상을 바탕으로 과학기술 패러다임을 크게 전환하는 게임 체인징 테크놀로지 창출을 목표로 함
 - 2050년 탄소중립 실현 등에서의 공헌을 목표로, 종래의 연장선상에 없는, 비연속적인 혁신적 기술에 관한 기초연구를 추진
 - 세계적으로 주목 받고 있는 중요한 기술로 도전적이지만 혁신적인 기술 시드로 발전할 것으로 기대되는 연구를 폭넓게 파고들어 기술성숙도(TRL)를 끌어올리기 위한 '스몰 스타트', 스테이지 평가에 의하여 선택과 집중 지원하는 '스테이지 게이트 평가 후 가속' 등이 주요 특징
 - 스테이지 게이트 평가에서 연구개발 계속/중단에 관해서는 과학적 관점 뿐만 아니라 탄소중립 기여 가능성 관점에서 엄격한 평가를 실시
- GteX는 하향식으로 설정한 중점 분야에 대해 대학 등의 톱 레벨 연구자에 의한 통합적 '팀

형' 연구체제로 R&D를 수행하며, 기초연구 성과 도출에 그치지 않고 사업화를 지향

- ALCA-Next는 2050년 탄소중립 실현 실행 계획인 '녹색성장전략'을 바탕으로 과학적 미규명 부분이 많은 6개 분야를 기술 영역으로 선정



▶ * 자료 : 혁신적 GX기술개발소위원회(5회) 배포자료 중 '혁신적 GX 기술창출사업 기본방침(안)', 문무과학성

[그림 Ⅲ-8] JST ALCA-Next 기술 영역 도출 과정

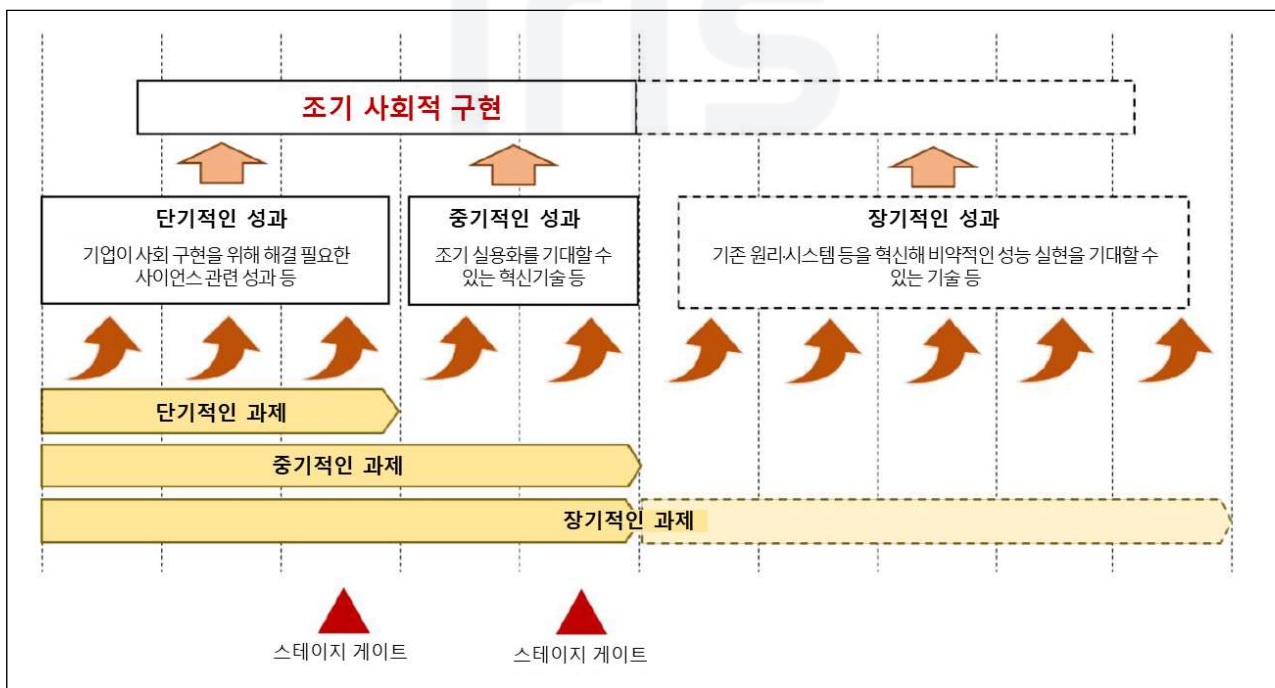
- 각 기술영역별로 연구 제안을 기대하는 배경과 병목 현상 과제의 예를 설명하나, 이에 한정하지 않고 탄소 중립을 위한 연구성과 도출을 위해 개별 연구자의 자유로운 신발상을 폭넓게 모집
- 6개의 기술 영역은 향후 녹색성장전략의 개정이나 산업 동향, 연구개발 동향 등을 근거로 필요에 따라 재검토를 실시할 수 있음

<표 Ⅲ-2> ALCA-Next 프로그램의 6개 기술 영역

축 에너지 영역	에너지 전환 영역	자원 재활용 영역	그린 바이오 테크놀로지 영역	반도체 영역	그린컴퓨팅 DX 영역
-------------	--------------	--------------	-----------------------	--------	----------------

▶ * 자료 : 2023년 ALCA-Next 모집요강

- GteX는 GX의 실현으로 이어지는 혁신적인 기술 창출을 위해 단순 요소 기술의 기초연구가 아닌 다양한 연구실·연구자가 집결하는 통합연구를 지원
- 대학 등 아카데미아가 실시해야 할 기초연구 성과를 산업계의 실증·실용화 단계로 원활하게 연결하는 것을 목표로 함
 - 또한 일본이 GX 추진의 글로벌 네트워크 핵심이 되는 것을 목표로 하므로 이를 위해 최상위 연구기관과의 전략적 및 적극적 협력을 촉진
 - 국제적인 시야에 서는 연구개발을 추진하고 성과의 신속한 국제 전개를 도모하여 세계를 선도하는 연구개발을 추진
 - 파트너 국가가 되는 해외 대학 및 연구기관과 함께 연구자 파견, 수탁, 공동연구 실시 등 세계 톱 레벨 연구기관 및 연구자와 국제 협력을 강력하게 추진
 - 산업계가 보유한 병목 현상을 해결하는 혁신적인 기술 씨드를 조기에 사회에 구현하는 것을 목표로 함
 - 연구 도중 단계에서도 기술 씨드 창출을 목표로 후속 사업에서의 전개, 기업에의 기술이전, 스타트업 설정 등의 성과가 요구됨
 - 이러한 배경으로 연구개발 과제는 3년 내 단기 성과 창출을 목표로 하는 단기지원과제, 5년 내 성과 창출을 목표로 하는 중기지원과제, 10년 내 성과 창출을 목표로 하는 장기과제로 구성할 것을 권장함



▶ * 자료 : 2023년 GteX 모집요강

[그림 Ⅲ-9] JST GteX 프로그램 연구과제 구성

1.3 향후 R&D 추진 방향

- 향후 에너지·환경 분야 R&D는 탄소중립이라는 시대적 과제 달성을 위해 보다 전략적·통합적 전략을 취할 필요

	지금까지의 R&D	앞으로의 R&D
여건 변화	기후변화 대응 요구 증대 에너지 안보 중요성 부각	탄소중립 목표 달성 시급성 증대 에너지 전환 가속화 및 신산업 육성 필요성 대두
요구되는 역할	에너지 효율 향상, 청정에너지 기술 개발 개별 기술 단위 혁신에 주력	에너지 시스템 전환을 위한 통합 솔루션 제공 사회·경제·정책 연계 강화
성과 활용	개발기술 사업화 및 상용화 미흡 성과의 사회적 파급효과 제한적	개발 기술의 신속한 실증 및 상용화 추진 성과의 사회·경제·정책과의 연계 강화
추진 전략	연구자 주도 상향식 과제 기획 기초·원천 연구에 집중	정책 연계 하향식 과제 기획 강화 학·연·산 연계 협력 연구 강화
평가 관리	정성적 성과(논문, 특허 등) 중심 평가 개별 과제 단위의 관리	탄소중립 기여도 중심 평가 포트폴리오 관점 단위 기술간 연계·통합 효과
추진 형태	단순 묶음 형태의 프로그램형, 파편화된 프로젝트 사업을 개별적으로 추진·관리	프로그램형-프로젝트형 체계화

[참고] 프로그램형사업, 프로젝트형사업 개념

□ 표준이 되는 정의나 개념은 확인하기 어려우며, 유사한 개념 정의 사례를 토대로 아래와 같이 조작성 정의 제시 가능

	프로그램형 사업	프로젝트형 사업
일본 ¹⁾	이노베이션 창출을 위해 정책·시책의 목적으로 바람직한 사회의 모습을 설정, 그 실현을 위한 일련의 활동을 편성한 것	-
기재부 ²⁾	(프로그램) 동일한 정책목표를 달성하기 위한 단위사업의 묶음으로써 정책적 독립성을 가진 일정규모의 사업	(단위사업) 원가가 집계되는 원가대상이자 중간 묶음이며, 정책목표 달성을 위한 수단으로서의 사업 (세부사업) 투입품목과 단가를 기준으로 편성되는 재정사업의 기초단위로서 단위사업을 구성하는 사업 내역
연구진 제안	동일한 정책 목표 하에 유사·연계된 복수의 프로젝트형 사업들을 체계적으로 연계하여 통합 관리가 가능한 사업	소수의 독립적인 과제로 구성되어 개별 과제 단위의 관리가 중심이 되는 사업

1) KISTEP, 국가연구개발사업 유형별 성과분석평가방법 개발 연구
(원출처: 일본 총합과학기술회의(CSTP), 국가 연구개발 평가에 관한 대강적 지침('16)

2) 기재부 프로그램 예산제도

2. 후속 사업 추진 방안 도출

2.1 후속 사업 추진 방향

1.1.1 추진 분야

- ☐ 탄소중립 실현 국가목표 이행 기반 실행력 높은 R&D 우선 지원
 - 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 핵심기술 개발에 집중 투자
 - 단기적으로 실현 가능하고 파급효과가 큰 기술 우선 지원
 - 정부 정책과 연계한 실증 및 상용화 촉진 가능토록 프로그램 운영
- ☐ 국가전략기술 기반 R&D 집중 지원
 - 무탄소신전원, 수소, CCU 등 탄소중립 전략기술 선정 및 집중 육성
 - 원천기술개발과 상용화단계 간 간극 해소토록 전주기 관점 촘촘한 지원 체계 구축
 - 기술 분야별 특성을 고려한 맞춤형 지원 체계 마련
- ☐ 미래인력양성 및 국제협력 활성화 지속 지원
 - 탄소중립 분야 전문인력 양성을 위한 교육 및 훈련 프로그램 확대
 - 국제 공동연구 및 인력교류 활성화를 통한 글로벌 협력 강화
 - 개도국 대상 기술이전 및 역량 강화 지원

1.1.2 추진 방식

- ☐ 프로그램형 사업과 프로젝트형 사업의 연계 병행 추진
 - 장기적 비전을 가진 프로그램형 사업과 단기 목표 지향 프로젝트형 사업의 조화로운 추진
 - 프로그램 내 세부 프로젝트 간 연계 및 통합 관리로 시너지 효과 창출
 - 사업 간 연계와 피드백을 통한 성과 창출 및 확산 촉진
- ☐ 질적 성과 수준 제고 및 성과 활용·확산 중점 성과관리
 - 연구 성과의 질적 수준 평가 및 관리 체계 강화
 - 우수 성과에 대한 추가 지원 및 확산 활동 적극 추진
 - 기술사업화 및 정책 연계를 통한 연구 성과의 실질적 활용 촉진
- ☐ 산·학·연 연계 주체별 역할 명확화 및 추진 시너지 확보
 - 산업계, 학계, 연구계 간 역할분담 및 협력 체계 구축
 - 주체별 전문성을 활용한 공동연구개발 및 기술 이전 활성화
 - 산·학·연간 인력 및 정보 교류 확대를 통한 시너지 효과 창출

2.2 사업 추진 모델(안)

(1) 기후변화대응·탄소중립 R&D 지원 분야 내 추진 모델

□ (1안) 플랫폼 형태의 통합 프로그램 방식 (프로젝트 in 프로그램)

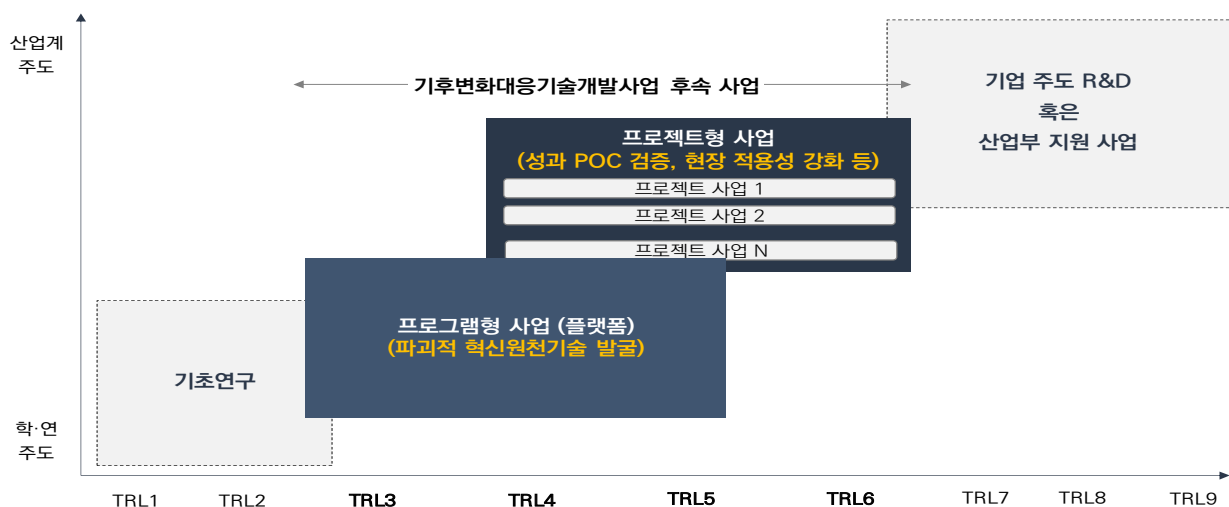
- 세부 분야별로 추진되는 '프로젝트형 사업'들을 하나로 묶어 '프로그램형'으로 관리함으로써 프로그램형 사업이 일종의 플랫폼 기능을 가지고 기초연구 성과 TRL을 상향시키는 역할을 하도록 하는 모델



[그림 Ⅲ-10] 사업 추진 모델(안) (1안 : 프로젝트 in 프로그램)

□ (2안) 프로그램/프로젝트 역할을 구분하는 방식 (先프로그램 → 後프로젝트)

- 파괴적 혁신원천기술 발굴을 위한 '프로그램형 사업'과 성과 POC 검증을 통한 현장 적용성 강화를 목적으로 하는 '프로젝트형 사업'이 선후 관계로 연계되어 기초연구 성과 TRL을 상향시키는 역할을 하도록 하는 모델



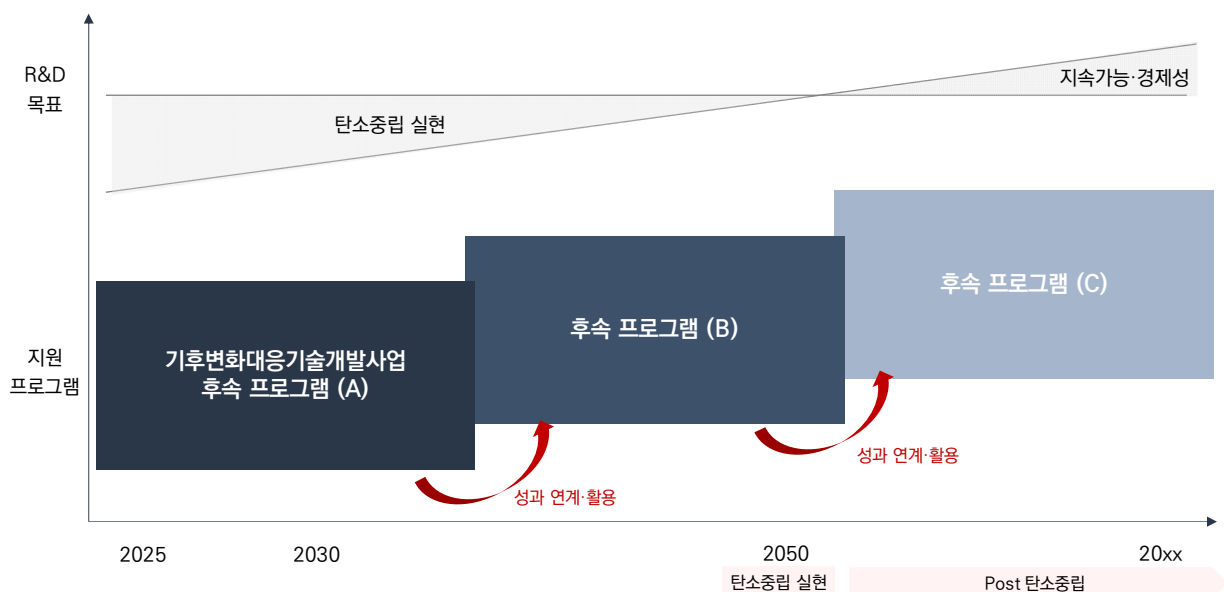
[그림 Ⅲ-11] 사업 추진 모델(안) (2안 : 先프로그램 → 後프로젝트)

[참고] (2안 기준) 프로그램형사업, 프로젝트형사업 특징

	프로그램형 사업	프로젝트형 사업
목표 설정	포괄적, 방향제시적	구체적, 목표제시적
과제 선정	상향식(Bottom-up), 연구자 주도	하향식(Top-down), 정부 주도
연구단계	기초·원천연구 중심	응용
참여 주체	대학, 연구소 중심	대학·연구소·기업 컨소시엄 중심
리스크 감수	높음(실패 허용)	낮음(성공 지향)

(2) 탄소중립까지의 여정을 고려한 장기 추진 모델

- 탄소중립 실현 이후 기후변화대응과 탄소중립 상태의 지속가능·경제성 등을 위해서는 지속적인 원천기술 확보 노력이 이어질 수 있도록 ‘Rolling R&D Program’ 방식의 추진이 필요
- 선행 연구성과 활용 및 새로운 원천기술 개발 수요에 대응하여 2050년 탄소중립 달성 시까지 뿐만 아니라 그 이후에도 연속성을 가지고 R&D투자가 이어질 수 있도록 장기적 모델 추진 필요



[그림 Ⅲ-13] 장기 추진 모델

2.3 중점분야별 기술개발 지원 방안

□ 온실가스 감축 분야는 각 분야별 프로젝트형 사업들을 묶어 프로그램형 사업 내에서 관리하고, 적응 분야는 각 프로젝트형 사업을 관리하는 구조로 재정비

온실가스 감축 분야

기후변화 적응 분야

무탄소에너지 신규사업 (프로그램형)

수소분야 국가전략기술 확보 (프로젝트형)

기초원천 미래연구 수소 공급기술 개발
미래 전문인력 확보
국제공동연구 상용화 기술 레벨업 산학연 연계

CCU 핵심기술개발 (프로젝트형)

차세대 CCU C1가스리파이너리밸류업
DACU 원천기술개발

태양전지

연료전지

미세먼지

자원순환

적응 기술 개발 (프로젝트형)

AI 기반 미래기후기술개발
기후변화 적응 국제공동연구

[그림 Ⅲ-14] 후속 사업 추진 모델(안)

[참고] 과기정통부 추진 예정 R&D사업들

As-Is (~2025년)			To-Be (2026~)			
분야	세부사업명	비고	분야	세부사업명	비고	
무탄소	기후변화대응기술개발	'24 종료	무탄소	CCU	DACU원천기술개발	'23 신규
	단계도약형 탄소중립기술개발	"			C1가스리파이너리밸류업기술개발	'24 신규
	CCU3050	"			탄소자원화 플랫폼 화합물 제조기술 개발	'26 신규
	유용물질 생산을 위한 Carbon to X 기술개발	"			차세대 CCU 신규사업	'25 신규
기후변화 대응	기후변화 영향 최소화기술 개발	"		수소	미래수소원천기술개발	'26 신규
미세먼지 자원순환	에너지 환경 통합형 학교 미세먼지 관리기술 개발	"			그린수소기술 자립 프로젝트	'24 신규
	동북아-지역 연계 초미세먼지 대응 기술개발	'25 종료			H2NEXTROUND	"
	바이오매스기반 탄소중립형 바이오플라스틱 제품기술 개발	"			수소공급 신규사업	'25 신규
	플라즈마활용 폐유기물 고부가가치 기초원료화 기술 개발	"	에너지	무탄소에너지 신규사업	"	
국제협력	기후기술 인재양성 시범사업	'24 종료	기후변화 대응	디지털기반 기후변화 예측 및 피해 최소화	'23 신규	
				AI기반 미래 기후기술 개발 신규사업	'25 신규	
			미세먼지 자원순환	Next-zero 대응 미세먼지 저감기술 개발	'24 신규	
				석유대체 친환경화학기술 개발	'26 종료	
			국제협력	기후기술 국제협력 촉진	'31 종료	
				기후변화 적응기술 국제공동연구 신규사업	'25 신규	

[부록] 성과 파급효과 분석을 위한 전문가 인터뷰 결과

인터뷰 대상	울산과학기술원 김진영 교수	기술분야	태양전지
참여과제	고안정, 친환경, 최고효율 단일접합 태양전지 원천기술 개발('20.6~'25.1)		
주요성과	- 유사 할로젠 음이온을 사용한 고효율 페로브스카이트 태양전지 개발 (2022년 우수성과 100선 선정) - 자체 측정 전력변환효율 25.6%(공인 인증효율 25.2%) 세계 최고 수준 달성 - 세계 최고 권위지 중 하나인 Nature(IF: 69.5)에 게재('21)		

1. 성과의 의미

2020년부터 본 사업에 참여한 과제를 통해 태양전지 분야에 다양한 성과를 이루셨습니다.

연구자님께서 생각하시는 주요 성과들을 소개해 주시고, 해당 성과들이 태양전지 분야에서 갖는 의미와 가치에 대해서 설명 부탁드립니다.

아울러 해당 성과들이 우수한 성과로 도출될 수 있었던 성공적 요인은 무엇이고, 성과를 도출하는 과정에서 겪은 애로사항에는 어떤 것들이 있었습니까?

저희는 2009년도에 시작한 기후변화대응기술개발사업(이하 기후변화 과제)에 첫 해부터 참여해 오고 있으며 끊기지 않고 지금까지 약 15년을 한 사업으로, 지속적으로 수행하고 있는 셈입니다. 물론 중간에 작은 연구 주제는 조금씩 달라졌지만, '차세대 태양전지 개발'이라는 큰 물줄기는 한 번도 벗어난 적이 없습니다. 이렇게 오랜 시간을 하나의 주제에 집중해서 연구를 하다보니 좋은 결과도 도출되는 것 같습니다. 기후변화 과제를 통해서 달성한 연구 성과 중에 가장 자신있게 내세울 수 있는 것은 좋은 논문을 써서 다른 많은 연구자들에게 우리 연구실에서 수행한 연구를 알렸던 것 일 겁니다. 그 중에서도 네이처 지에 2021년도 4월에 출간한 "Pseudo-Halide Anion Engineering for α -FAPbI₃ Perovskite Solar Cells, Nature, 592(7854), 381-385 (2021)"이라는 논문이 가장 소개해 줄 만한 것으로, 할로젠 음이온과 유사한 포메이트 이온(HCOO⁻)을 사용해서 고효율과 안정성을 함께 갖춘 페로브스카이트 태양전지를 개발한 것입니다.

부연 설명을 드린다면, 페로브스카이트(Perovskite)는 기본적으로 ABX₃(A:1가 양이온, B:금속 양이온, X:할로젠 음이온)인 화학 조성을 갖는 물질을 일컫는데, 화학 조성 변경으로 밴드갭 제어가 가능하여 태양전지의 광활성층으로 지난 10년 이상 동안 많은 연구가 진행되면서 빠르게 발전하였습니다. 페로브스카이트 ABX₃ 구조 중 A의 위치에는 methylammonium(MA), formamdinum(FA), ethylammonium(EA), cesium(Cs), rubidium(Rb) 등과 같은 다양한 유-무기물 등이 연구되고 있고, B의 위치는 lead(Pb), tin(Sn), germanium(Ge), magnesium(Mg) 과 같은 물질들이 보고되고 있지만 X 위치의 물질들에 관한 보고는 일반적으로 사용되는 Br⁻ 과 I⁻ 이외에는 거의 알려지지 않았

습니다. 여기에 저희 연구팀이 유사 할로겐 음이온 물질인 포메이트 이온(HCOO-)을 세계 최초로 페로브스카이트 구조에 상호작용하는 기술을 개발하여 페로브스카이트 광활성층의 전기적·화학적 성질을 향상시키는데 성공하였습니다.

이 유사 할로겐 음이온 관련 연구는 논문이 발표되기 약 4년 전부터 기획하여 무수히 많은 시행착오와 끊임없는 노력이 만들어 낸 역작이라고 봐야 할 것 입니다. 이렇게 오랫동안 수많은 시도가 있었기에 성공할 수 있었는데, 이처럼 장기간에 걸쳐 한 가지 일을 파고들 수 있는 과제가 많지는 않습니다. 또한 연초가 되면 연구비 지급이 자주 지체되어 진행하던 연구가 갑자기 끊어질 때도 있는데, 이러한 것만 없다면 제가 진행해 본 연구사업 중에 가장 좋은 것 같습니다. 요약하면, 오랜 기간을 지속적으로 지원해 줄 수 있는 기후변화 과제가 있었기 때문에 많은 좋은 결과가 나왔다고 보여지며, 이 논문의 경우 발표된 지 아직 3년밖에 되지 않았지만 파급효과는 매우 커서 다른 논문에 의해 4월 8일 현재 벌써 2,300회가 넘는 인용횟수를 보이고 있습니다.

2. 주요 성과들의 활용 현황 및 파급효과

참여 중이신 과제의 최종 성과(목표)는 무엇이며, 이를 달성하는데 주요 성과들이 어떻게 기여하고 있습니까?

그 외 연구 성과들이 현재 어떻게 활용되고 있으며, 해당 성과들이 갖는 과학적, 기술적, 경제적 파급효과에 대해서 구체적인 사례로 설명 부탁드립니다.

(과학/기술적 파급효과 예시) 현재 참여 중인 과제 외에 다른 후속 연구가 진행 중이라면, △어떤 부처/기관에서 어느 수준을 목표로 연구를 수행하고 있는지, △해당 연구를 통해 해결하고자 하는 주요 문제(이슈)는 무엇인지, △동 사업을 통해 창출된 성과가 어떻게 활용되고 있는지 등

(경제적 파급효과 예시) 성과의 기술이전이 이뤄졌다면, △기술이전이 어떤 과정으로 이뤄졌고, △어느 기업에 어느 단계까지 진행이 되었으며, △기술을 이전받은 기업에서는 해당 성과를 어떻게 활용되고 있는지 등

본 과제의 최종 목표는 “고효율, 고안정, 친환경 페로브스카이트 태양전지와 유기 태양전지용 소재 및 소자 원천기술 개발”을 위해 다양한 신규 페로브스카이트 및 유기소재 개발과 이에 기반한 소자 공정 기술을 개발하여 유기 태양전지 효율 20% 이상, 페로브스카이트 태양전지 효율 27%를 달성하고자 합니다. 저희는 주로 페로브스카이트 태양전지 효율 27% 달성을 위해 집중을 하고 있는 상황이며 저희가 이룬 결과들을 이용해서 27% 이상되는 소자를 제작했으며, 상업화를 촉진시키기 위해서 대면적 모듈로의 연구 방향을 전환하는 시도 중입니다. 모듈의 목표는 22.5%로서 이를 달성하여 NREL 모듈 차트에 등재 하는 것이 또 다른 목표 중에 하나입니다. 올해가

마지막 연차이기 때문에 모듈의 효율을 극대화하기 위한 각고의 노력을 기울이고 있는 중이며 조만간 효율을 달성할 수 있을 것으로 기대합니다.

위의 목표 중에 모듈에 대한 목표가 성공적으로 달성된다면, 페로브스카이트 태양전지의 상용화를 위한 기반은 잡혔다고 볼 수 있습니다. 아직 본 연구가 완료되지 않아서 후속과제가 없고 기술이전이 진행되지 않아 정확하게 파급효과를 제시할 수는 없지만, 저희 연구실이 찾아낸, 유사 할로겐 음이온은 향후 개발될 신규 페로브스카이트 물질의 다양한 화학 조성에 마중물 역할을 할 것으로 보입니다. 특히 작은 소자에서의 효율이 모듈에서는 많이 줄어드는 경향이 있는데, 적극적으로 유사 할로겐 음이온을 발굴해 낸다면 모듈에 적합한 조성을 찾아낼 수 있을 것입니다. 유사 할로겐 이온이 광활성 층의 벌크 구조 형성에 도움을 주는 것을 밝혔기 때문에, 태양전지에 국한되지 않고 페로브스카이트 발광 다이오드, 디텍터 그리고 열전소자 연구에도 많이 활용되어 우수한 성능을 낼 수 있을 것으로 기대하게 됩니다.

3. 사업의 개선사항 및 향후 방향 제언

기후변화대응기술개발사업이 일몰을 앞두고 있어, 태양전지 분야에 대한 새로운 계획 수립과 동시에 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 전략이 필요한 시점입니다.

3-1. 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성과 태양전지 분야의 기술 발전을 촉진하기 위하여 과학기술정보통신부가 취해야 할 역할과 전략은 무엇이라고 생각하십니까?

향후 태양전지 분야 후속사업에서 중점적으로 다루어야 할 연구 분야와 투자 방향(TRL 단계, 지원 대상, 지원 기간, 사업 형태 등)에 대해 말씀해주시고, 왜 그렇게 생각하시는지 설명 부탁드립니다.

우리나라는 2030년까지 2018년도 대비 온실가스 배출량 46%라고 하는 NDC 제시한 것으로 알고 있습니다. 이는 주요 선진국에 비해서는 낮은 감축목표이지만 '탄소중립 시나리오 개선을 위한 상향식 통합모형 구축'보고서(KAIST, 2022)에서 시뮬레이션을 실시해 본 결과 '9차 전력수급기본계획'(산업통상자원부, 2020)을 수정하지 않고 유지할 때 위에 제시한 NDC 달성은 실패할 것으로 예측됩니다. 이는 지금보다 훨씬 급진적인 탄소중립 관련 기술(신재생에너지 및 carbon capture, utilization(CCU)) 개발이 시급하다는 것을 보여주고 있습니다. 이러한 시기에 기후변과 과제의 일몰은 너무 근시안적인 계획이며 더욱 확대시켜야 한다고 생각합니다. 신재생에너지의 경우 기후변화에 가장 치명적인 분야가 풍력으로 보이는데, 이는 온난화로 인한 편서풍 등의 지속적인 바람이 약해지기 때문에 현재보다는 풍력발전에 의한 발전단가는 높아질 것으로 알려져 있습니다. 이에 비해 지구에 도달하는 태양광이 적어진다는 보고는 아직 없는

것으로 알고 있고 도심형 발전소 개념으로 가게 된다면 훨씬 더 많이 보급할 수 있는 가능성이 있는 재생에너지라고 할 수 있을 것입니다.

이러한 태양전지의 막대한 보급을 위해서는 먼저 차세대 태양전지의 실증사업이 진행되어야 한다고 봅니다. 실리콘 태양전지의 경우에는 이미 많이 보급되어 있지만, 딱딱하고 검푸른 색이라는 미적이 측면에서의 단점으로 도시의 모든 건물에 적용하기는 힘든 실정입니다. 이를 극복하기 위해서 효율이 우수한 페로브스카이트 태양전지나 심미적으로 우수한 유기 태양전지의 실증사업을 할 수 있다면 도시의 건물에 다양한 태양전지가 접목되어 기후변화에 충분히 대비할 수 있을 것으로 보입니다.

3-2. 이 외 기후변화대응기술개발사업의 효과성 분석과 향후 투자 방향 도출과 관련하여 추가적으로 고려해야 할 사항이나 기타 의견에 대해서 자유롭게 작성 부탁드립니다.

현재 유기 태양전지와 페로브스카이트 태양전지의 연구사업에 대해 많은 전문가들이 우려의 시선으로 바로보고 있다는 것을 알고 있습니다. 효율과 안정성에서 모두 실리콘 태양전지에 비해 강점을 찾을 수 없기 때문입니다. 그러나 효율의 경우 하루 중의 발전시간을 보면 다른 면을 볼 수 있습니다. 결정질 실리콘 태양전지의 경우 직사광선에서 최대의 효율을 보이지만, 유기나 페로브스카이트 태양전지와 같은 박막형 태양전지는 입사각에 상관없이 거의 동일한 효율을 보입니다. 즉 발전소가 아닌 도심형 태양전지를 고려할 때, 건물의 벽면이나 창호에 도입할 수 있는데 이때 직사광선을 받을 수 있는 시간은 매우 제한적이기 때문에 박막형 태양전지가 훨씬 많은 전력을 생산할 수 있을 것으로 보고 있습니다. 이러한 부분을 고려해 보면 좋을 것 같습니다.

인터뷰 대상	울산과학기술원 김동석 교수	기술분야	태양전지
참여과제	200cm ² 이상 대면적 고효율 페로브스카이트 태양전지 핵심 원천기술 개발('20.6~'25.1)		
주요성과	- 양자점-SnO₂ 이중층을 이용한 고효율 페로브스카이트 태양전지 개발 (2023년 우수성과 100선 선정) - 국제공인인증기관(Newport)에서 소면적(0.1cm²)에 대한 효율성(25.4%) 국제인증 획득 - 세계 최고 권위지 중 하나인 Science(IF: 63.8)에 게재('22)		

1. 성과의 의미

2020년부터 본 사업에 참여한 과제를 통해 태양전지 분야에 다양한 성과를 이루셨습니다.

연구자님께서 생각하시는 주요 성과들을 소개해 주시고, 해당 성과들이 태양전지 분야에서 갖는 의미와 가치에 대해서 설명 부탁드립니다.

아울러 해당 성과들이 우수한 성과로 도출될 수 있었던 성공적 요인은 무엇이고, 성과를 도출하는 과정에서 겪은 애로사항에는 어떤 것들이 있었습니까?

실리콘 태양전지의 대안으로 개발되고 있는 차세대 태양전지 기술은 고효율 대면적 모듈인 페로브스카이트 태양전지의 조기 상용화를 위한 중요한 단계에 도달하였습니다. 이를 위해선 고효율 대면적 모듈 제조 기술의 확보가 필수적입니다.

과거에는 대면적을 제조하는 과정에서 알려진 전자수송층 제조 방법이 균일한 대면적에 화학적이나 물리적 결함 없이 투명 전극 위에 도포하는 것이 어려웠습니다. 특히, 화학용액 증착법으로 제조된 산화주석 또는 치밀막 산화타이타늄 위에 다공성 산화타이타늄을 형성하는 것은 대면적 제조 기술에 제한이 있었습니다.

이러한 문제를 해결하기 위해 얇고 균일하며 전도성이 높고 저온에서도 실용적으로 제조가능 한 전하수송층을 개발하는 데 초점을 맞췄습니다. 또한, 제조 시간을 최적화하여 기존에는 최소 2시간에서 최대 7시간이 소요되던 과정을 15분 이내로 단축하여 상용화에 용이 하도록 대면적에 초점을 두어 개발하였습니다.

개발된 기술의 핵심은 산화주석과 산화타이타늄 박막을 이중으로 코팅하는 혁신적인 아이디어입니다. 우선, 산화타이타늄으로 치밀막을 형성한 후에 산화주석 양자점 나노 입자를 도포하는 방식을 사용했습니다. 또한, 폴리 아크릴릭산을 이용하여 양자점 산화주석을 균일한 두께로 산화주석을 결함 없이 코팅하는 기술이 핵심이었습니다.

이러한 기술을 적용하여 페로브스카이트 태양전지에서 0.1cm² 이하의 소면적 태양전지에서 25.72%의 효율을 달성하였습니다. 이는 기존 비공식 기록으로, 세계 최고 효율을 보여주고 있습니다. 또한, 25cm² 및 64cm² 크기의 서브 모듈에서도 각각 21.66% 및 20.55%의 세계 최고 공인 효율을 기록하였습니다.

성과 도출 과정에서 가장 큰 어려움은 적용되지 않은 혁신 기술을 최초로 도입하는

것이었습니다. 이중구조의 전하수송층에 대한 두께조절 및 균일성 박막을 제조하는 것은 매우 어려운 작업이었으며, 수백 번 이상의 소자 적용 실험을 통해 최고 효율 결과를 도출하는 데 수많은 시간이 소요되었습니다.

2. 주요 성과들의 활용 현황 및 파급효과

참여 중이신 과제의 최종 성과(목표)는 무엇이며, 이를 달성하는데 주요 성과들이 어떻게 기여하고 있습니까?

그 외 연구 성과들이 현재 어떻게 활용되고 있으며, 해당 성과들이 갖는 과학적, 기술적, 경제적 파급효과에 대해서 구체적인 사례로 설명 부탁드립니다.

(과학/기술적 파급효과 예시) 현재 참여 중인 과제 외에 다른 후속 연구가 진행 중이라면, △어떤 부처/기관에서 어느 수준을 목표로 연구를 수행하고 있는지, △해당 연구를 통해 해결하고자 하는 주요 문제(이슈)는 무엇인지, △동 사업을 통해 창출된 성과가 어떻게 활용되고 있는지 등

(경제적 파급효과 예시) 성과의 기술이전이 이뤄졌다면, △기술이전이 어떤 과정으로 이뤄졌고, △어느 기업에 어느 단계까지 진행이 되었으며, △기술을 이전받은 기업에서는 해당 성과를 어떻게 활용되고 있는지 등

기존의 차세대 태양전지 모듈 기술은 200cm² 이상의 크기를 기준으로 하여 17.9%에서 세계 최고 효율을 달성한 바 있습니다. 이러한 성과는 태양에너지 산업에서의 중요한 발전을 나타내는 것으로, 에너지 전환 및 환경 보호에 대한 글로벌 관심이 증대되는 상황에서 의미가 큼니다. 이와 같은 기술적 성취는 태양광 발전 분야에서의 혁신과 지속 가능한 에너지의 확대에 기여하고 있습니다.

본 연구를 통해 차세대 페로브스카이트 태양전지의 효율을 이전보다 19.4%로 높이는 데에 성공함으로써, 세계적인 기술적 역량의 한 단계를 더욱 진전시켰습니다. 이러한 성과는 태양전지 산업의 경쟁력을 향상시키고, 미래 태양광 시장에서 우리나라의 위치를 강화하는 데에 상당한 역할을 할 것으로 기대됩니다.

뿐만 아니라, 본 연구에서는 투명 전극에 전하수송층을 제조하는데 있어 기존의 방법과는 비교할 수 없는 획기적인 제조 시간과 두께를 유지하는 기술을 개발하였습니다. 이러한 기술은 태양광 산업의 경쟁력을 높이고, 태양전지의 성능 향상 및 생산성 증대에 기여할 것으로 예상됩니다.

기존의 실리콘 태양전지를 대체할 수 있는 차세대 태양전지는 대면적 고효율로 제조될 수 있는 기술입니다. 이 기술은 페로브스카이트의 두께를 얇게 조절할 수 있어 반투명한 태양전지를 제작할 수 있거나, 주택의 창문 형태나 자동차의 선루프 등에 응용될 수 있는 장점이 있어 향후 활용 가치가 높을 것으로 기대됩니다.

특히, 페로브스카이트 소재는 반도체 메모리, 발광 다이오드, 광센서 등 다양한 분야의 광전자 소재로 활용될 수 있습니다. 이번 연구에서 개발된 대면적 기술을 적용할 경우, 이러한 다양한 분야에서 과학 기술적 파급 효과를 가져올 것으로 전망됩니다.

차세대 태양전지는 기존 실리콘 태양전지의 시장규모인 435조원(26년 예상치)의 1/10을 달성한다고 하더라도, 4조원 이상의 고부가 가치 산업으로 성장할 것으로 예상됩니다. 이러한 대면적 기술을 통해 높은 경제적 가치 창출이 가능할 것으로 기대됩니다.

3. 사업의 개선사항 및 향후 방향 제언

기후변화대응기술개발사업이 일몰을 앞두고 있어, 태양전지 분야에 대한 새로운 계획 수립과 동시에 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 전략이 필요한 시점입니다.

3-1. 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성과 태양전지 분야의 기술 발전을 촉진하기 위하여 과학기술정보통신부가 취해야 할 역할과 전략은 무엇이라고 생각하십니까?

향후 태양전지 분야 후속사업에서 중점적으로 다루어야 할 연구 분야와 투자 방향(TRL 단계, 지원 대상, 지원 기간, 사업 형태 등)에 대해 말씀해주시고, 왜 그렇게 생각하시는지 설명 부탁드립니다.

22020년에 수립된 대한민국의 NDC를 기준으로 2050년 탄소 중립을 달성하기 위해서는 2018년을 기준으로 대한민국의 총 에너지 소비량의 70% 이상을 재생 에너지로 전환해야 가능합니다. 재생 에너지 중에서는 태양광이 가장 큰 비중을 차지할 것으로 예상됩니다.

이러한 전환을 달성하기 위해서는 과학기술정보통신부에서 추진 중인 기후변화 대응 기술개발 사업을 지속적으로 확대하고, 상용화에 초점을 둔 연구 및 개발에 집중해야 합니다. 특히, 현재의 TRL 5 수준 기술을 실용화에 초점을 둔 TRL 7-8로 빠르게 발전시키기 위한 후속 사업을 신속하게 추진해야 합니다.

대표적으로 패널 간 연결을 효율적으로 제조하는 기술, 차세대 태양광 패널에 적합한 캡슐화 재료 및 기술, 전력 시스템과의 통합을 위한 10kW 이상 패널의 빠른 실증화 기술개발 등을 신속히 추진해야 합니다. 이러한 노력은 신속한 기술 발전과 최종적으로는 실제 적용에 중요하다고 판단됩니다.

3-2. 이 외 기후변화대응기술개발사업의 효과성 분석과 향후 투자 방향 도출과 관련하여 추가적으로 고려해야 할 사항이나 기타 의견에 대해서 자유롭게 작성 부탁드립니다.

기후변화대응기술개발사업의 효과성을 분석하고 향후 투자 방향을 도출하기 위해 몇 가지 고려해야 할 사항은 다음과 같습니다.

1. 기술의 실용화와 상용화: 기후변화 대응 기술은 개발된 기술이 실제로 적용되고 상용화되는 것이 중요하다고 판단됩니다. 따라서 실용화와 상용화 단계에서의 기술의 성능과 경제적 효과를 평가하는 것이 필요하다고 판단됩니다.
2. 사업의 지속가능성: 효과적인 기후변화 대응기술개발을 위해서는 사업의 장기적인 지속가능성을 고려해야 한다고 봅니다. 이를 위해 기술의 생애주기와 함께 사업 모델의 지속가능성을 분석하는 것이 필요하다고 판단됩니다.
3. 협력과 파트너십 강화: 기후변화 대응 기술은 다양한 분야의 전문가들과의 협력과 파트너십이 필요합니다. 특히, 현재 국제협력을 중시하는 기조를 반영하여 국내외적으로 산업계, 학계, 정부 및 비정부 기관과의 협력을 강화하고 효율적인 파트너십을 구축하는 것이 중요하다고 판단됩니다.
4. 혁신적인 연구과 연구개발 활동 지원 강화: 새로운 기술 및 혁신적인 아이디어를 발굴하고 연구개발을 지원하는 것이 중요합니다. 따라서 획기적인 연구개발 활동에 대한 지원과 장려책이 필요하다고 판단됩니다.

이러한 사항들을 고려하여 기후변화 대응 기술개발사업의 효과성을 평가하고 향후 투자 방향을 도출하는 것이 중요합니다. 이를 통해 기후변화에 대응하고 지속 가능한 미래를 위한 기술 개발과 적용이 가능해질 것으로 기대됩니다.

인터뷰 대상	울산과학기술원 석상일 교수	기술분야	태양전지
참여과제	페로브스카이트 태양전지의 고신뢰성 확보를 위한 요소 기술 개발('15.10~'20.8)		
주요성과	• 1가의 메틸암모니움과 브롬을 대신해 다른 '2가 유기 양이온'(메틸렌다이암모늄, MDA)을 첨가하여 기존에 비하여 크게 향상된 물성의 페로브스카이트 태양전지 기술을 개발 • 2020년 우수성과 100선 선정 • '사이언스(Science; IF: 41.063)'에 게재('19)		

1. 성과의 의미

2015년부터 본 사업에 참여한 과제를 통해 태양전지 분야에 다양한 성과를 이루셨습니다. 연구자님께서 생각하시는 주요 성과들을 소개해 주시고, 해당 성과들이 태양전지 분야에서 갖는 의미와 가치에 대해서 설명 부탁드립니다.

아울러 해당 성과들이 우수한 성과로 도출될 수 있었던 성공적 요인은 무엇이고, 성과를 도출하는 과정에서 겪은 애로사항에는 어떤 것들이 있었습니까?

광활성층의 광전류 밀도와 효율은 물질 원자 내 전자의 에너지 구조인 '밴드갭(Bandgap)'에 의해 결정된다. 밴드갭이 좁을수록 태양광 중에서 흡수 가능한 파장대가 넓어지므로, 광활성층인 페로브스카이트 물질의 밴드갭을 적절히 좁히는 것이 중요하다. 그런데 기존 광활성층의 경우 페로브스카이트 '상(phase)'이 바뀌지 않게 넣어주던 메틸암모니움(MA, methylammonium)이나 브롬(Br) 같은 물질은 오히려 밴드갭을 넓혔다. 페로브스카이트 결정 상의 안정성을 유지하려 한 선택이 광활성층의 효율을 낮추게 된 것이다. 심지어 메틸암모니움은 광활성층의 내구성을 낮추고 브롬은 광 안정성을 낮추는 문제를 보였다.

본 연구팀은 이러한 문제를 해결하기 위해 메틸암모니움과 브롬을 대신해 다른 '2가 유기 양이온'(메틸렌다이암모늄, MDA, Methylenediammonium)을 첨가했다. '1가 양이온'을 첨가하는 고정관념에서 벗어나 '2가 유기 양이온'을 넣은 시도를 통해 페로브스카이트 결정 구조를 안정하게 만들면서도 효율도 상승시켜 광활성층의 안정성과 효율성을 동시에 잡았다. 페로브스카이트 층의 흡수파장 영역 확대가 중요한 이유는 FAPbI_3 의 밴드갭(1.51eV)이 이론적으로 가장 효율이 높을 수 있는 1.34eV에 비해 높기 때문이다. 하지만 FAPbI_3 의 상 안정제인 MA, Br 등의 첨가물은 이 밴드갭을 오히려 높인다. 본 연구는 밴드갭의 변화를 최소화하고 FAPbI_3 의 상을 안정화하는 새로운 소재를 개발하여 세계 최고 전류밀도인 26 mA/cm^2 이상을 확보하였다.

본 연구의 기본 개념은 무르고 쉽게 녹이는 '철'에 소량의 다른 금속을 첨가하면 단단하고 녹슬지 않는 '스테인리스 스틸(stainless stell)'이 만들어지는 것과 같은 원리를 활

용한 것이다. 본 연구는 이처럼 첨가물을 통해 '페로브스카이트(perovskite)'의 단점을 잡을 수 있는 기술을 개발한 것이다. 본 연구는 기존에 사용하던 조성과 다른 새로운 조성의 소재로 태양광의 흡수 파장대역을 넓혔다. 이를 통해 광전류 밀도를 세계 최고로 증가시키면서도 열, 광, 수분 안정성을 기존 대비 크게 향상시켰다. 본 연구는 페로브스카이트 물질의 내구성을 위해 주로 첨가하던 물질이 '1가 양이온'이라는 고정관념에서 벗어나 '2가 유기 양이온'을 첨가하여 얻어진 결과이다. 페로브스카이트 물질의 안정성을 확보하면서, 흡수 파장대역을 넓혀, 그 당시에 SCI 문헌상으로 보고된 최고 광전효율인 23.3%를 넘는 23.7%를 달성하였다. 본 연구를 통해 안정성이 확보된 고효율의 페로브스카이트 태양전지는 낮은 공정가, 유연성, 그리고 용액 공정이 가능하다는 이점을 통해 상용화에 한 걸음 다가가는 성과로 볼 수 있다.

2. 주요 성과들의 활용 현황 및 파급효과

과제 참여 종료 이후 현재 연구 성과들이 어떻게 활용되고 있으며, 해당 성과들이 갖는 과학적, 기술적, 경제적 파급효과에 대해서 구체적인 사례로 설명 부탁드립니다.

(과학/기술적 파급효과 예시) 후속 연구가 진행 중이라면, △어떤 부처/기관에서 어느 수준을 목표로 연구를 수행하고 있는지, △해당 연구를 통해 해결하고자 하는 주요 문제(이슈)는 무엇인지, △동 사업을 통해 창출된 성과가 어떻게 활용되고 있는지 등

(경제적 파급효과 예시) 성과의 기술이전이 이뤄졌다면, △기술이전이 어떤 과정으로 이뤄졌고, △어느 기업에 어느 단계까지 진행이 되었으며, △기술을 이전받은 기업에서는 해당 성과를 어떻게 활용되고 있는지 등

태양전지의 상용화는 물리/화학/재료/화공/기계/전기전자 등의 전문지식을 필요로 하는 대표적인 다학제적 분야 중의 하나이다. 오랜 역사를 가진 실리콘 태양전지는 상용화에 필요한 각각의 기술별 밸류 체인이 잘 구성되어 대량생산과 신뢰성 확보가 모두 이루어져 이미 성숙된 산업으로 자리 잡아 화석에너지로 생산되는 전기 가격보다도 더 낮은 가격으로 전기 생산이 가능한 그리드 패리티를 달성하고 있다. 그러나, 페로브스카이트 태양전지 기술은 연구실에서 그 기술이 구현된 것이 10여년 정도로, 아직 상용화 기술로 이어지게 위해서는, 기후변화대응기술개발 사업을 포함한 여러 단계의 대규모 연구개발 투자가 필요한 상황이다. 그렇다면, 이미 성숙된 실리콘 태양전지 기술을 두고, 페로브스카이트 태양전지의 연구를 진행하여야 하는 이유가 무엇인가? 실리콘 태양전지는 가격/안정성/성숙된 밸류체인 등 여러 면에서 이상적인 태양전지 기술로 볼 수 있음. 그러나, 실리콘 태양전지는 대량생산에 의한 저가격화가 이루어졌지만, 그 생산과정을 보면 실리카로부터 실리콘의 생산에 따른 이산화탄소의 배출과 고순도 실리콘으로의 정제와 단결정의 제조에 다량의 에너지가 필요하다. 물

론 장기간의 실리콘 태양전지의 가동으로 실리콘 태양전지 그 자신의 생산에 들어간 에너지 비용을 회수 (에너지 페이백)할 수 있지만, 그것보다 더 적은 이산화탄소 배출과 에너지 사용에 대한 대안 기술이 있으면 신재생에너지 사용으로의 수단을 극대화할 수 있을 것이다. 이러한 실리콘 태양전지의 대안 기술로 연구되기 시작한 것이 페로브스카이트 태양전지 기술로, 그 미래가 기대되는 기술이다. 그에 더하여 페로브스카이트 태양전지는 실리콘 태양전지와 협업한 소위 페로브스카이트/실리콘 탠덤기술을 통한 효율 향상이 가능한 것으로 판단되어 이 기술로의 발전이 급격히 이루어지고 있다.

상기와 같은 배경 속에, 페로브스카이트 태양전지는 밴드갭 변화에 유용성, 용액공정성과 그로 인한 낮은 공정가, 그리고 유연성 때문에 차세대 태양전지 중 가장 높은 주목을 받고 있다. 그럼에도 불구하고, 페로브스카이트 태양전지는 안정성의 문제로 상업화 부분에서 어려움을 겪고 있다. 그중 페로브스카이트 층의 열, 광, 수분 안정성은 핵심으로 이를 보완하는 연구가 필요하다. 현재까지 많은 연구들이 전자이동층 혹은 정공이동층의 개선 혹은 계면의 최적화로 이를 개선하려고 노력하였지만, 유기 물질을 포함하고 있고 전자를 만들어내는 페로브스카이트 물질 그 자체의 안정성을 올리는 데는 아직 어려움을 가지고 있는 상황임. 전자이동층, 정공이동층은 여러 후보군의 물질이 있지만, 현재까지 25%가 넘는 고효율의 페로브스카이트 태양전지는 모두 $FAPbI_3$ 물질을 기반으로 하고 있다. 그러므로 $FAPbI_3$ 의 밴드갭을 최대한 활용하면서 안정성을 유지할 수 있도록 한 이번 연구는 소재개발로써 연구적, 산업적으로 매우 큰 의의가 있다고 할 수 있으며, 보다 구체적인 파급효과는 다음과 같음.

과학기술적 파급효과: $FAPbI_3$ 물질의 밴드갭의 확장없이 알파상으로 안정화 시킬 수 있는 방법의 개발로 $FAPbI_3$ 물질의 안정화에 미치는 분자 화학적 이해도를 높이는 파급 효과가 있었음

경제산업적 파급효과: 페로브스카이트 태양전지의 고효율화와 새로운 소재의 활용을 통해 페로브스카이트 층의 열, 광, 수분 안정성을 높이는 효과를 가져왔다.

페로브스카이트 태양전지는 현재 매우 활발히 연구 중에 있으며, 그 연구의 확장성이 크게 증가될 것으로 예상된다. 향후 추가적인 연구를 통해 안정성이 확보된 페로브스카이트 태양전지는 낮은 공정가, 유연성 등 실리콘 태양전지가 가지지 못한 특징적인 요소를 극대화하는 방향으로 상용화가 기대된다.

‘2가 유기 양이온’을 첨가한 페로브스카이트의 태양전지 기술 성과를 활용 후속 연구로 과학기술정보통신부의 기초연구사업(리더연구)을 수행중이며, 다기능성 하이브리드 반도체 제조가 최종 목표임. 후속 연구를 통하여 기존 보다 향상된 성능을 확보하였음.

3. 사업의 개선사항 및 향후 방향 제언

기후변화대응기술개발사업이 일몰을 앞두고 있어, 태양전지 분야에 대한 새로운 계획 수립과 동시에 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 전략이 필요한 시점입니다.

3-1. 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성과 태양전지 분야의 기술 발전을 촉진하기 위하여 과학기술정보통신부가 취해야 할 역할과 전략은 무엇이라고 생각하십니까?

향후 태양전지 분야 후속사업에서 중점적으로 다루어야 할 연구 분야와 투자 방향(TRL 단계, 지원 대상, 지원 기간, 사업 형태 등)에 대해 말씀해주시고, 왜 그렇게 생각하시는지 설명 부탁드립니다.

태양에너지로부터 직접 전기적 에너지를 얻을 수 있는 수단을 제공하는 태양전지를 활용하여 얻어지는 에너지가 현재 가장 저렴한 신재생 에너지로 부상하였다. 이것은 실리콘으로 대표하는 실리콘 태양전지의 효율이 오르고 가격이 내리는 동시적인 효과에 의하여 와트당 가격이 급격히 하락한 요인이라고 볼 수 있다. 실리콘 태양전지는 폴리실리콘, 잉곳, 웨이프, 셀, 모듈, 패널로 이어지는 복잡하고 긴 가치 사슬을 이루고 있기에, 가격이 급격히 낮아지기 어려운 구조를 가지고 있다. 하지만, 중국이라는 국가가 이러한 태양전지 기술의 산업 생태계에 들어와서 정상/비정상적인 여러 요인들로 그 가치 사슬의 대부분을 거의 독점적으로 점령하면서 나타난 결과로도 볼 수 있다. 이에 따라 태양전지가 중요한 산업으로 자리매김할 것으로 예상하여, 우리나라를 포함한 많은 나라가 한때 여러 회사가 태양전지 분야로 진출하였지만, 최근에는 사업을 접거나 파산하는 문제가 발생하였다. 그럼에도 불구하고, 태양전지 산업의 규모는 매년 엄청난 규모로 성장하여 전 세계 시장이 2024년에는 500 GW 이상일 것으로 예상하고 있다.

태양전지는 2050년 탄소중립을 달성하기 위한 핵심적인 수단이 되었지만, 산업적인 측면에서는 실리콘 태양전지가 지배하고 있는 이상 중국으로의 종속이 더 심하여지는 문제점이 발생하고 있다. 이것을 탈피하기 위한 방법은 기존의 실리콘 태양전지에서 차세대 태양전지로 태양전지 산업을 변경하는 것이다. 물론 이러한 과정은 많은 시간이 걸릴 수 있지만, 다행히 한국이 주도하여 왔던 페로브스카이트 태양전지가 그 대안이 될 수 있다. 페로브스카이트 태양전지는 실리콘 태양전지와는 완전히 다른 특징적인 요소를 가지고 있기 때문에, 중국 지배적인 위치를 차지한 현재의 상황을 변경하여 태양전지가 탄소중립의 중요한 수단이 되게하면서 산업적인 자립도 가능하다.

따라서 향후 태양전지 분야의 후속은 페로브스카이트 태양전지에 집중하여 상용화 측면에서 기술의 원천성 확보와 기술의 완성도를 올리는 방법으로 지원이 이루어질 필요가 있다. 좀더 상세하게 설명하여, 지금까지의 간헐적으로 지원된 사업형태는 효율/안정성/대면적이라는 큰 방향성으로 지원하였다면, 후속 업에서는 목표치 그 자체보다는 재현성과 상용성을 전제로, 기술을 보다 더 세분화 하여 기술의 완성도 향상이 일어날 수 있도록 연구의 지향점을 변경하여야 할 것이다. 이러한 연구가 성공적으로

완성되기 위해서는 세부 기술을 더욱 세부화하여 핵심 원리와 기술의 허들을 원천적으로 이해하고 해결할 수 있는 단계에서부터, 규모 자체는 크지 않아도 TRL 7 단계까지 이어지도록 5년 이상의 장기 지원이 필요하다.

3-2. 이 외 기후변화대응기술개발사업의 효과성 분석과 향후 투자 방향 도출과 관련하여 추가적으로 고려해야 할 사항이나 기타 의견에 대해서 자유롭게 작성 부탁드립니다.

앞에서도 언급한 바와 같이, 태양전지는 물리/화학/재료/화공/전기전자 기술의 협력이 필요한 대표적인 다학제 기반의 연구 분야이다. 하지만, 페로브스카이트 태양전지는 화학적으로 합성되는 물질을 주로 사용하면서, 실리콘 태양전지에 비하여 그 밸류 체인이 짧다. 그리하여 집중적이고, 대규모적인 연구가 적기에 이루어 질 수 있다면, 한국이 비교우위를 점하고 있는 연구실 규모의 원천 기술이 상용화 기술에서도 그 경쟁우위를 확보 할 수 있을 것으로 확신하다. 이것을 위해서는 기후변화대응기술개발 사업이 더욱 더 확대되어 세분화된 기술로서 기술의 완성도를 올리는 방향으로 지원이 이루어져야 할 것이다.

iris

인터뷰 대상	한국과학기술연구원 정증현 책임연구원	기술분야	태양전지
참여과제	CIGS 박막태양전지 기반 고효율 투광형 태양전지 모듈 원천기술('19.6~'23.12)		
주요성과	• 세계 최고수준 반투명 모듈효율 성능을 기반으로 건물/자동차 창호에 실용적 적용이 가능한 신기술 개발(모듈발전효율 11.1% @투과면적 30%) 등		

1. 성과의 의미

2019년부터 본 사업에 참여한 과제를 통해 태양전지 분야에 신기술 개발 등 성과를 이루셨습니다. 연구자님께서 생각하시는 주요 성과들을 소개해 주시고, 해당 성과들이 태양전지 분야에서 갖는 의미와 가치에 대해서 설명 부탁드립니다.

아울러 해당 성과들이 우수한 성과로 도출될 수 있었던 성공적 요인은 무엇이고, 성과를 도출하는 과정에서 겪은 애로사항에는 어떤 것들이 있었습니까?

1. 주요성과 및 의미

- 투명태양전지 기술은 건물 창호에 적용할 수 있는 기술로서, 높은 창호비중을 갖는 도심건물의 태양광발전소 전환에 있어 필수적인 요소이나, 고효율 광발전, 안전성 및 장기안정성을 동시에 구현할 수 있는 기술이 제공되고 있지 않음. 연구개발 중이거나 일부 상용화된 기술이 있으나, 장기안정성이 낮거나(유기태양전지) 광발전효율이 낮아서(비정질 Si 태양전지) 실용성이 부족함.
- 본 과제에서 개발한 CIGS 태양전지 기반 투명 태양광 모듈 기술은, CIGS 태양전지의 높은 광발전효율과 장기안정성의 장점 덕분에 실용화 가능성이 높음. 특히, CIGS 태양전지의 투명화를 가능케 하는 기술은, 기존 기술로는 불가능하여 불투명 전극(Mo)의 투명전극 대체와 이에 따른 효율 저하를 극복할 수 있는 소재/공정 기술의 개발 의의가 있음.
- 본 과제에서 개발한 투명태양전지를 이용한 블록형 디자인 요소는, 건물 리모델링이나 신축 시에 적용이 용이하여 에너지 자체생산이 가능하면서 건물 외관을 심미적으로 향상시킬 수 있음. 제로에너지 빌딩이 요구되는 시장환경 하에서, 태양광 디자인 요소를 건물 설계 반영하고자 하는 건설사들의 관심이 높음.

2. 우수성과 도출의 성공적요인

- 본 기술 개발은, 각 연구분야에서 전문성이 높은 연구팀 간의 긴밀한 소통과 협력이 중요함.
- KIST는 CIGS 태양전지 공정연구를 10년 이상 수행하고 있어, CIGS 태양전지 분야

전문성이 우수하며, 이는 해당 분야에 대한 장기적인 연구비 확보를 가능케 하는 과
기부, 산업부의 태양광분야의 지속적인 지원이 큰 도움이 되었으며,

- CIGS 태양전지의 투명화를 위한 레이저 공정 분야는 전문성이 높은 뉴욕주립대 연
구팀과의 기술협력이 큰 기여를 하였음. 이러한 국제협력이 다년간 지속가능할 수
있게 한 기존 연구지원체제도 도움이 되었음.
- 디자인 전문성이 높은 국민대, 컬러구조체 공정 전문성이 높은 이화여대와 같은 우
수 연구팀의 조직이 성과창출에 필요함.

3. 애로사항

- 지난 5년간 연구를 수행하면서, 혁신법 적용으로 해외 참여기관의 참여 여부가 불투
명하여 일시적으로 기술협력이 어려움을 겪은 바 있음. 향후 국제공동연구에 어려움
이 발생하지 않도록 혁신법을 보완하거나 유연한 법령해석의 필요성 있음.

2. 주요 성과들의 활용 현황 및 파급효과

과제 참여 종료 이후 현재 연구 성과들이 어떻게 활용되고 있으며, 해당 성과들이 갖
는 과학적, 기술적, 경제적 파급효과에 대해서 구체적인 사례로 설명 부탁드립니다.

(과학/기술적 파급효과 예시) 후속 연구가 진행 중이라면, △어떤 부처/기관에서 어느 수준
을 목표로 연구를 수행하고 있는지, △해당 연구를 통해 해결하고자 하는 주요 문제(이
슈)는 무엇인지, △동 사업을 통해 창출된 성과가 어떻게 활용되고 있는지 등

(경제적 파급효과 예시) 성과의 기술이전이 이뤄졌다면, △기술이전이 어떤 과정으로 이
뤄졌고, △어느 기업에 어느 단계까지 진행이 되었으며, △기술을 이전받은 기업에서는
해당 성과를 어떻게 활용되고 있는지 등

1. 본 과제의 연구성과에 기반한 후속 원천연구 수행

- 투명태양광 모듈에 적용된 양면수광형 구조(태양광을 태양전지 전면 및 배면방향에
서 동시에 입사시킬 수 있는 구조)를 기반으로 전면 태양광 발전 뿐만 아니라 배면
입사 광발전 성능을 향상시킬 수 있는 원천기술 개발과제 수행 중(한국전력 한계돌
파형기술개발)
- 기존 연구과제는 CIGS 태양전지의 불투명전극을 투명전극으로 대체할 때 발생하는
계면저항을 낮추는 기술까지만 개발하였으나, 후속연구에서는 계면저항을 낮추는
것과 동시에 결함최소화를 통해 광여기 전자-홀의 재결합손실을 억제함으로써 배면
입사 광발전 능력을 향상시킬 수 있는 소재 및 공정기술을 확보하는 것을 목표로
함.
- 초박형유리(UTG)에 적용함으로써 유연 양면수광형 CIGS 셀 기술을 개발하고 있으
며, 향후 유연 태양광 투명 모듈기술을 확보할 수 있고 이 기술은 건물 창호 적용

성을 향상시킬 수 있음.

2. 개발기술의 실용화를 위한 후속연구 필요성

- CIGS 태양전지 기반의 투명태양광 모듈 기술은 고효율 광발전과 장기안정성을 동시에 갖춰 시장경쟁력이 매우 우수한 기술임. 그러나, 기존 태양광시장에서 Si 태양전지 가격경쟁력이 높아짐에 따라 CIGS 태양전지 생산기업이 전무한 상태로 본 기술개발의 실용화를 추진할 산업인프라가 부족함.
- 또한, 본 기술을 채용하여 개발한 블록형 태양광 디자인 제품은 제로에너지 빌딩 정책하에서 많은 국내 건설사들의 관심을 받고 있어 시장 확대 가능성이 있지만, 투명태양전지 생산기업이 없어 수요와 공급의 불일치가 발생하고 있음.
- 본 투명태양전지 기술의 실용화에 관심을 갖는 중소,중견기업은 다수 있으나 기술력이 부족하여, CIGS 투명태양전지 모듈의 실용화를 위한 산학연 협력의 후속연구가 필요함.

3. 사업의 개선사항 및 향후 방향 제언

기후변화대응기술개발사업이 일몰을 앞두고 있어, 태양전지 분야에 대한 새로운 계획 수립과 동시에 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 전략이 필요한 시점입니다.

3-1. 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성과 태양전지 분야의 기술 발전을 촉진하기 위하여 과학기술정보통신부가 취해야 할 역할과 전략은 무엇이라고 생각하십니까?

향후 태양전지 분야 후속사업에서 중점적으로 다루어야 할 연구 분야와 투자 방향 (TRL 단계, 지원 대상, 지원 기간, 사업 형태 등)에 대해 말씀해주시고, 왜 그렇게 생각하시는지 설명 부탁드립니다.

1. 과학기술정보통신부의 역할과 전략

- 태양전지를 이용한 우리나라의 탄소중립 목표 달성을 위해서는 좁은 국토여건을 고려한 태양전지 설치 전략이 필요함. 즉, 우리나라는 70% 이상의 산지를 제외하면 대부분 토지가 사람이 거주하거나 농업생산에 활용되고 있으므로 기존 태양전지 기술로 탄소중립에 필요한 충분한 전기에너지를 얻는 것이 어려움.
- 따라서, 기존에 이미 사람들에 의해 사용되고 있는 공간(주거공간, 농업용지, 도로, 등)을 태양광발전소로 전환할 수 있는 경쟁력 있는 고부가가치 태양전지 기술을 개발하는 것을 지원해야 함.
- 이러한 차세대 태양전지기술은 제한된 공간을 효과적으로 활용하기 위한 초고효율 태양전지 기술, 설치용이성을 획기적으로 증대시키는 기술, 소량 다품종 수요 대응을 위한 기술, 심미성 증진기술 등임.

2. 후속사업 연구분야 및 투자방향

도심 건물, 자동차, solar farm, 도로 및 부가시설(방음벽 등)과 같이 기존 시설에 적용할 수 있는 다기능, 고효율 광발전, 설치용이한 태양전지 기술

(예시)

- 고안정성 투명 태양전지 대면적 모듈 기술의 실용화 (1 m² 크기, 투명도 조절, 수명 > 20년)
- 소량 다품종 태양전지 기술수요에 대응할 수 있는 초고효율 투명 유연태양전지 모듈 원천기술 (투과도 50%, 광발전 모듈효율 > 15%)
- 초고효율 박막 탠덤태양전지 셀 및 모듈 기술 (셀효율 > 35%)

3-2. 이 외 기후변화대응기술개발사업의 효과성 분석과 향후 투자 방향 도출과 관련하여 추가적으로 고려해야 할 사항이나 기타 의견에 대해서 자유롭게 작성 부탁드립니다.

- 산업성숙도가 충분한 Si 태양전지에 비해, 건물일체형 태양전지를 비롯하여 기능성 및 심미성, 설치편의성 측면에서 경쟁력이 있는 CIGS 박막태양전지가 미래 산업으로서의 가능성이 충분히 높다고 할 수 있음.
- 탄소중립달성의 절실한 필요성에 비추어, 다양한 거주공간의 태양광발전소 전환이 필수적이라고 인식한다면, 현재 기술경쟁력 비교우위의 결과 산업화에 도달하지 못한 박막태양전지의 미래 수요대응을 위해서 실용화기술 확보를 용이하게 할 수 있는 박막태양전지 기술개발 거점(박막태양광 실용화 연구센터)을 정부에서 지원하는 게 필요함.

인터뷰 대상	한국에너지공과대학교 윤재호 교수님	기술분야	태양전지
참여과제	도시 분산전원용 고성능 플렉서블 무기박막 태양전지 원천기술 개발('16.11~'21.10)		
주요성과	• 2021년 중간평가 대표성과 선정(도시 분산전원용 경량 플라스틱 기반 고효율 CIGS 박막 태양전지 기술) • 유연기판 박막 태양전지 국내 최초 20.4%의 효율 달성 및 세계 최고 수준에 근접(세계 최고 효율: 20.8%)		

1. 성과의 의미

2016년부터 본 사업에 참여한 과제를 통해 태양전지 분야에 다양한 성과를 이루셨습니다.

연구자님께서 생각하시는 주요 성과들을 소개해 주시고, 해당 성과들이 태양전지 분야에서 갖는 의미와 가치에 대해서 설명 부탁드립니다.

아울러 해당 성과들이 우수한 성과로 도출될 수 있었던 성공적 요인은 무엇이고, 성과를 도출하는 과정에서 겪은 애로사항에는 어떤 것들이 있었습니까?

○ 초경량 유연 박막 태양전지 고효율화 기술 개발

- 고분자 기판에 적용가능한 화합물 박막의 저온 성막기술을 개발하고, 광흡수층의 알칼리 원소 도핑 메커니즘 규명 등 체계적인 분석기술과 신뢰성 및 노하우를 기반으로 선진기술과 차별화되는 유연 박막 태양전지 기술로 국내 최초로 20% 이상의 변환효율을 달성함으로써, 세계 최고수준 기술 구현

- JCR 상위 5% 이내 Applied Surface Science 외 국제 우수학술지 게재 다수

○ 유연성과 투광성을 동시에 가지는 도시형 양면수광 박막 태양전지 기술 개발

- 상기 유연 박막 기술을 기반으로, 세계 최초로 유연성과 투광성을 동시에 가지는 양면수광형 화합물 박막 태양전지 기술 개발로 유연성, 투광성, 경제성, 안정성, 효율성, 응용성을 동시에 확보하는데 성공

○ 차세대 생활밀착형 태양전지 원천기술 확보 및 사업화 발판 마련

- 기존의 대량보급형 양산형 태양광 모듈 기술과 차별화되고, 수요대응에 용이하며 고부가가치를 지닌 차세대 도시형 태양전지 원천기술로써, 세계 최고수준의 경량 유연 CIGS 박막 태양전지 기술을 개발하여 국제 태양광시장 기술동향지에 "Better polymer substrate process: KIER"라는 제목으로 소개되어 그 우수성을 입증
- 여타의 유기기판 태양전지와 달리 고도의 안정성을 갖는 CIGS 박막을 기반으로 경량 플라스틱 기판에서 고효율 태양전지 기술을 확보함에 따라 소재 안정성, 효율, 기능성 등을 모두 보유한 태양광 모듈 제조 가능성 입증
- 건축물일체형 태양광(BIPV) 뿐만 아니라 기기일체형 태양광(DIPV) 응용에 적합하여 신시장 창출에 유망한 초경량·고출력 태양전지 기술이므로, (주)솔란드 및 (주)엘아이전선과 연구소기업을

설립하여 경제적 성과창출의 발판을 마련

- 상기 설립한 연구소기업 (주)솔란드와 유연 CIGS 박막 태양광 모듈 국산화 기술을 개발, 국내 최초로 한국산업규격(KS) 인증 획득

○ 성공요인 및 에로사항

- 기술 및 산업 트렌드에 대한 객관적인 전망을 바탕으로 중장기적 관점에서 성장가능한 기술 개발 아이템에 집중한 것이 우선적인 성공 요인이라고 할 수 있음. 이는 단순히 태양전지 시장만을 바라본 것이 아니라 탄소중립을 위한 전체 글로벌 에너지 시장의 관점에서 접근했기 때문에 가능했던 것으로 판단됨
- 또한 국내 관련전문연구기관을 총망라하여 연구역량을 결집한 것이 성공요인이라고 할 수 있음. 지난 10년 이상 공동연구를 진행한 연구그룹이 집결하여 연구를 수행함으로써 보다 수준 높은 연구결과를 얻었다고 판단됨. 다만 제한적인 연구비와 연구인프라로 인한 한계를 있는 것으로 판단됨
- 다시 말해 효과적인 공동연구가 진행되기 위한 연구비와 연구인프라의 측면을 다시한번 고려해야 함. 특히 병렬적인 연구목표가 아니라 모든 연구기관이 하나의 연구목표를 향해 연구수행을 하는 과제의 경우 더욱더 공동연구를 위한 인프라가 중요함. 최근 한국에너지기술연구원에서 이러한 연구수행을 위한 '태양광기업공동활용연구센터'가 설립이 되었으나 보다 다양한 연구를 수행하기 위한 시설투자가 병행되어야 함
- 과제 기술개발 내용에 대한 사업화에 대한 보다 전략적인 지원이 필요함. 기술이 개발되었다고는 하나 이를 사업화로 성공하는 것은 별개의 문제. 따라서 다양한 형태의 사업을 위한 지원이 필요한 것으로 판단됨.

2. 주요 성과들의 활용 현황 및 파급효과

과제 참여 종료 이후 현재 연구 성과들이 어떻게 활용되고 있으며, 해당 성과들이 갖는 과학적, 기술적, 경제적 파급효과에 대해서 구체적인 사례로 설명 부탁드립니다.

(과학/기술적 파급효과 예시) 해당 성과를 활용한 후속 연구가 진행 중이라면, △어떤 부처/기관에서 어느 수준을 목표로 연구를 수행하고 있는지, △해당 연구를 통해 해결하고자 하는 주요 문제(이슈)는 무엇인지, △동 사업을 통해 창출된 성과가 어떻게 활용되고 있는지 등

(경제적 파급효과 예시) 성과의 기술이전이 이뤄졌다면, △기술이전이 어떤 과정으로 이뤄졌고, △어느 기업에 어느 단계까지 진행이 되었으며, △기술을 이전받은 기업에서는 해당 성과를 어떻게 활용되고 있는지 등

○ 과학/기술적 파급효과

- 현재 과기정통부 단계도약형 사업으로 대면적화 기술개발이 진행되고 있음
- EU Horizon 사업과 연계한 국제공동연구사업 진행중
- 현재 기술을 바탕으로 대면적화 연구가 진행되고 있으면 고효율 태양전지 개발을 위한 탠덤 태양전지 개발에 활용되고 있음

○ 경제적 파급효과

- 모듈 제조 공정에 대한 기술이전을 통해 일부 사업화에 성공하였으나 확장에는 어려움을 겪고 있음
- 향후 건물, 자동차 등 다양한 영역의 시장이 활성화될 것으로 예측됨
- 다만 기존 태양전지 대비 가격경쟁력을 확보하기 위해서는 모듈 조립뿐만 아니라 태양전지 까지도 자체생산을 해야 하는데 이를 위한 시설투자과 기술확보가 필요한 상황임

3. 사업의 개선사항 및 향후 방향 제언

기후변화대응기술개발사업이 일몰을 앞두고 있어, 태양전지 분야에 대한 새로운 계획 수립과 동시에 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 전략이 필요한 시점입니다.

3-1. 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성과 태양전지 분야의 기술 발전을 촉진하기 위하여 과학기술정보통신부가 취해야 할 역할과 전략은 무엇이라고 생각하십니까?

향후 태양전지 분야 후속사업에서 중점적으로 다루어야 할 연구 분야와 투자 방향 (TRL 단계, 지원 대상, 지원 기간, 사업 형태 등)에 대해 말씀해주시고, 왜 그렇게 생각하시는지 설명 부탁드립니다.

- 산업부와의 이어달리기를 고려할 때 과기부는 탄소중립의 비용을 줄이기 위한 기술적 대안을 제시해야함. 따라서 시장수요에 대응할 수 있는 원천기술의 파일럿 단계까지의 개발에 집중해야함.
- 산업화 관점에서 페로브스카이트/결정질실리콘 태양전지 양산화가 가장 중요한 방향성이라면 과기부는 이 산업화 방향을 지원할 수 있는 기술이거나 새로운 게임체인저를 만들 수 있는 기술에 집중해야함
- 산업화 방향을 지원할 수 있는 것은 주로 페로브스카이트 소재의 안정성을 확보하거나 모듈 소재의 성능을 확보하는 등의 소재 개발에 집중해야함. 소재개발의 경우 산업화 기반이 조성되어 있으므로 원천기술만의 확보만으로도 산업화 크게 기여 가능함
- 새로운 영역을 발굴한다는 측면에서는 실리콘 태양전지를 활용하지 않는 다중접합 태양전지

를 개발하거나, Earth-Abundant binary 화합물을 활용하는 태양전지를 개발하는 등의 소재 안정성, 소재의 가격, 환경성을 동시에 해결할 수 있는 소재 및 소재 개발이 필요함

- 우주환경을 비롯한 극한 환경에 대응할 수 있는 태양전지 개발도 신규 시장 관점에서 추진해야 할 영역임

3-2. 이 외 기후변화대응기술개발사업의 효과성 분석과 향후 투자 방향 도출과 관련하여 추가적으로 고려해야 할 사항이나 기타 의견에 대해서 자유롭게 작성 부탁드립니다.

- 기후변화대응(탄소중립)에 기여하는 여러 가지 기술에 대한 효과성 분석을 통해 태양전지 기술의 중요성에 대해 다시한번 자리매김하는 것이 중요함. 현재 글로벌 시장 대비 국내의 경우 태양전지의 기여도에 대해 과소평가된 측면이 있음. 다만 관련 기술의 국산화 및 공급망 안정화 측면에서 극복해야 할 사안들이 많이 있는 것도 사실임. 하지만 태양전지의 세계시장 추이 및 국내 기술 개발 수준을 고려한다면 차세대 태양전지 기술 개발 및 산업화는 매우 중요한 아이템이며 국가 전략기술에 포함되어야 함.
- 따라서 기후변화대응기술의 향후 투자방향 측면에서도 이러한 부분들이 고려되어야 함.

iris

인터뷰 대상	한국과학기술원 유성종 책임연구원	기술분야	연료전지
참여과제	고체알칼리막 연료전지용 고출력 고내구성 MEA 및 저가형 비귀금속계 촉매 개발('18.7~'21.2)		
주요성과	• 연료전지 공기극용 Co 기반 비귀금속계 촉매 개발('21) • 세계 최초 준안정상 팔라듐 수소화물 촉매 개발('22) • 2023년 우수성과 100선 선정 • "Energy & Environmental Science" (IF: 39.7)에 게재('22) • "Nature" (IF: 69.5)에 게재('22) 등		

1. 성과의 의미

2018년부터 본 사업에 참여한 과제를 통해 연료전지 분야에 다양한 성과를 이루셨습니다.

연구자님께서 생각하시는 주요 성과들을 소개해 주시고, 해당 성과들이 연료전지 분야에서 갖는 의미와 가치에 대해서 설명 부탁드립니다.

아울러 해당 성과들이 우수한 성과로 도출될 수 있었던 성공적 요인은 무엇이고, 성과를 도출하는 과정에서 겪은 애로사항에는 어떤 것들이 있었습니까?

고체알칼리막 연료전지용 고출력 고내구성 MEA 및 저가형 비귀금속계 촉매 개발 프로젝트의 성공 이야기는 그 자체로 흥미롭고 교훈적인 내용을 담고 있습니다. 이 연구는 2018년부터 2021년까지 진행되었으며, 그 성과는 국제적으로도 인정받아 "Energy & Environmental Science"와 "Nature"에 게재되는 쾌거를 이루었습니다. 이러한 성공은 여러 중요한 요인에 기인하며, 동시에 연구 과정에서 겪은 여러 애로사항들 역시 이야기할 가치가 있습니다.

우선, 연구의 성공적인 요인 중 하나는 혁신적인 연구 접근 방식에 있습니다. 공기극용 Co 기반 비귀금속계 촉매의 개발과 세계 최초로 준안정상 팔라듐 수소화물 촉매를 개발한 것은 기존의 기술적 한계를 뛰어넘는 중대한 진보였습니다. 이러한 혁신은 연료전지 기술의 새로운 지평을 열었으며, 이는 과학과 기술의 발전에 있어 끊임없이 새로운 도전을 모색하는 연구자들의 열정과 창의성을 보여줍니다.

또한, 이 연구는 연구팀의 전문성과 협력에 크게 의존했습니다. 다양한 분야의 전문가들이 모여 각자의 지식과 기술을 공유하고 통합함으로써, 복잡하고 도전적인 연구 과제를 성공적으로 수행할 수 있었습니다. 이는 현대 과학 연구에서 다학제적 접근의 중요성을 강조합니다.

5년이라는 장기적인 계획과 지속적인 투자도 중요한 성공 요인이었습니다. 연구 기간 동안의 안정적인 자금 조달과 체계적인 연구 계획은 복잡한 연구 과제를 지속 가능하

게 만들었습니다.

하지만 이러한 성공의 이면에는 연구 과정 중 겪은 여러 애로사항들이 존재했습니다. 기술적인 난관, 특히 촉매의 안정성과 효율성을 높이는 것은 연구 과정에서 큰 도전이었습니다. 연구팀은 Co 기반 비귀금속계 촉매의 효율성을 높이려고 수많은 시도를 했습니다. 하지만 실험 결과는 기대에 못 미쳤고, 이는 연구팀에게 큰 실망을 안겨주었습니다. 그러던 어느 날, 실험실의 한 연구원이 실수로 촉매의 조성을 잘못 혼합했습니다. 이 '실수'는 오히려 새로운 발견으로 이어졌고, 이후 연구팀은 이 '행운의 실수'를 바탕으로 촉매의 성능을 크게 개선할 수 있었습니다. 또한, 연구팀 간의 협력과 의사소통도 또 다른 도전 과제였으며, 특히 다양한 분야의 전문가들이 참여하는 학제간 연구에서는 이러한 문제가 더욱 복잡해질 수 있습니다.

결론적으로, 이 연구 프로젝트는 혁신적인 아이디어, 전문가들 간의 협력, 장기적인 계획과 지속적인 투자가 어떻게 큰 성공으로 이어질 수 있는지를 보여줍니다.

2. 주요 성과들의 활용 현황 및 파급효과

과제 참여 종료 이후 현재 연구 성과들이 어떻게 활용되고 있으며, 해당 성과들이 갖는 과학적, 기술적, 경제적 파급효과에 대해서 구체적인 사례로 설명 부탁드립니다.

(과학/기술적 파급효과 예시) 후속 연구가 진행 중이라면, △어떤 부처/기관에서 어느 수준을 목표로 연구를 수행하고 있는지, △해당 연구를 통해 해결하고자 하는 주요 문제(이슈)는 무엇인지, △동 사업을 통해 창출된 성과가 어떻게 활용되고 있는지 등

(경제적 파급효과 예시) 성과의 기술이전이 이뤄졌다면, △기술이전이 어떤 과정으로 이뤄졌고, △어느 기업에 어느 단계까지 진행이 되었으며, △기술을 이전받은 기업에서는 해당 성과를 어떻게 활용되고 있는지 등

이제 고체알칼리막 연료전지용 고출력 고내구성 MEA 및 저가형 비귀금속계 촉매 개발 프로젝트의 막을 내린 후, 우리는 그 파급효과를 목격하고 있습니다. 이 프로젝트는 단순한 연구를 넘어, 과학, 기술, 그리고 경제에 이르기까지 다방면에 영향을 끼치고 있습니다.

과학적 및 기술적 측면에서 볼 때, 이 연구는 기존의 연료전지 기술에 혁명을 가져왔습니다. 연구팀이 개발한 비귀금속계 촉매는 연료전지의 효율성과 내구성을 크게 향상시켰으며, 이는 연료전지 기술의 새로운 장을 열었습니다. 또한, 준안정상 팔라듐 수소화물 촉매의 개발은 수소 에너지의 저장과 전환 방식을 개선하며 새로운 준안정상 촉매 연구 테마로 자리매김 하고 있습니다.

경제적인 측면에서도 이 연구는 중요한 영향을 미칠것으로 예상합니다. 비귀금속계

축매의 개발은 연료전지 제조 비용을 크게 절감할 것이며, 이는 에너지 시장에서의 경쟁력을 높이는 데 기여할 것입니다. 산업적으로도, 이 축매 기술은 이미 여러 분야, 특히 수송 및 에너지 저장 분야에서 활발하게 적용될 것으로 예상됩니다.

후속 연구의 측면에서, 이 연구는 다양한 부처 및 기관에서 지속적으로 연구되고 있습니다. 연구팀의 성과를 기반으로, 많은 연구자들이 연료전지 뿐만 아니라 수전해의 효율성과 내구성을 더욱 향상시키기 위해 노력하고 있습니다. 이들은 특히 축매의 대규모 생산, 실제 적용에서의 성능 유지, 장기적 안정성에 중점을 두고 연구를 진행하고 있습니다. 산업계에서도 이 성과를 활용하여 보다 효율적이고 친환경적인 에너지 솔루션을 개발하는 데 박차를 가하고 있는 중입니다.

이 연구 프로젝트의 여정은 단순히 연구 성과의 기록이 아닙니다. 그것은 지속 가능한 미래로 나아가는 길에서 중요한 역할을 하는 과학과 기술의 힘을 보여주는 이야기입니다. 과학과 기술의 발전이 어떻게 사회와 경제에 긍정적인 변화를 가져올 수 있는지를 증명하는 살아있는 사례라고 생각됩니다.

3. 사업의 개선사항 및 향후 방향 제언

기후변화대응기술개발사업이 일몰을 앞두고 있어, 연료전지 분야에 대한 새로운 계획 수립과 동시에 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 전략이 필요한 시점입니다.

3-1. 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성과 연료전지 분야의 기술 발전을 촉진하기 위하여 과학기술정보통신부가 취해야 할 역할과 전략은 무엇이라고 생각하십니까?

향후 연료전지 분야 후속사업에서 중점적으로 다루어야 할 연구 분야와 투자 방향(TRL 단계, 지원 대상, 지원 기간, 사업 형태 등)에 대해 말씀해주시고, 왜 그렇게 생각하시는지 설명 부탁드립니다.

우리는 현재 기후 변화와의 싸움에서 중요한 전환점에 서 있습니다. 과학기술정보통신부는 이 중심에서 연료전지 기술의 발전과 2030 NDC 및 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 전략적 계획을 수립해야 합니다. 이러한 과제를 수행하기 위해 과학기술정보통신부는 새로운 역할과 전략을 채택해야 하며, 이는 연료전지 분야의 미래를 크게 형성할 것입니다.

과학기술정보통신부는 첫째로, 통합적인 접근 방식을 취해야 합니다. 연료전지 기술은 단순히 과학적 문제가 아니라, 환경, 경제, 사회와 긴밀하게 연결되어 있습니다. 따라서, 이 부처는 다양한 분야와의 협력을 통해 연료전지 기술이 지속 가능한 발전에 기여할 수 있도록 해야 합니다. 이것은 다학제적 연구의 촉진, 산업계와의 파트너십 강화, 그리고 정책 입안자와의 긴밀한 협력을 포함해야 합니다. 둘째, 지속 가능한 연구

및 개발 지원이 무엇보다 중요합니다. 연료전지 기술, 특히 고성능 및 저비용 촉매의 개발은 장기적인 관점에서 접근해야 합니다. 이는 단기적인 성과보다는 지속 가능한 발전을 목표로 해야 하며, 이를 위해 안정적인 자금 지원과 연구 환경 조성이 필요합니다. 셋째, 국제 협력의 강화는 필수적입니다. 기후 변화는 국경을 넘는 문제이므로, 국제적인 연구 협력과 기술 교류를 촉진해야 합니다. 이는 글로벌 기술 발전을 촉진할 뿐만 아니라, 한국의 연료전지 기술이 세계 무대에서 중요한 역할을 하도록 할 것입니다. 향후 연료전지 분야의 후속 사업에서는 몇 가지 중점적인 연구 분야와 투자 방향을 설정해야 합니다. 연구 분야는 촉매의 효율성과 내구성 향상, 대규모 생산과 실용화에 초점을 맞추어야 합니다. 투자 방향은 기술 성숙도(TRL)에 따라 달라져야 하며, 초기 단계에서는 기초 연구에, 후기 단계에서는 실용화와 상업화에 중점을 두어야 합니다. 지원 대상은 다양화되어야 하며, 지원 기간은 장기적인 관점을 유지해야 합니다. 또한, 사업 형태는 전통적인 프로젝트 기반의 연구 지원을 넘어, 네트워크 구축, 교육 및 훈련 프로그램 개발 등을 포함해야 합니다.

3-2. 이 외 기후변화대응기술개발사업의 효과성 분석과 향후 투자 방향 도출과 관련하여 추가적으로 고려해야 할 사항이나 기타 의견에 대해서 자유롭게 작성 부탁드립니다.

기후변화대응기술개발사업의 효과성과 투자 방향을 고려할 때, 다학제적 협력의 중요성을 강조해야 합니다. 기술 개발은 사회, 경제, 정책 등 다양한 분야와의 연계를 요구합니다. 장기적 관점과 지속 가능한 발전에 중점을 두고, 기술의 상업화와 시장 진입 장벽을 낮추는 전략도 필요합니다. 또한, 기술 이전과 지식 공유를 촉진하고, 지속적인 모니터링과 평가 체계를 구축하여 사업의 효과성을 높여야 합니다. 이러한 접근은 기술 개발을 넘어 지속 가능한 미래를 향한 종합적인 방향을 제시할 것으로 판단됩니다.

인터뷰 대상	한국에너지기술연구원 윤경중 책임연구원	기술분야	연료전지
참여과제	출력변동 대응력을 갖춘 중저온형 수소전용 초고성능 SOFC 셀 개발('20.6~'25.1)		
주요성과	전류밀도 3.5A/cm²에서 SOFC 중저온영역 초고성능 셀 최대출력 2.2 W/cm²를 달성(세계 최고수준) 등		

1. 성과의 의미

2020년부터 본 사업에 참여한 과제를 통해 연료전지 분야에 'SOFC 중저온영역 초고성능 셀 최대출력' 등의 성과를 이루셨습니다.

연구자님께서 생각하시는 주요 성과들을 소개해 주시고, 해당 성과들이 연료전지 분야에서 갖는 의미와 가치에 대해서 설명 부탁드립니다.

아울러 해당 성과들이 우수한 성과로 도출될 수 있었던 성공적 요인은 무엇이고, 성과를 도출하는 과정에서 겪은 애로사항에는 어떤 것들이 있었습니까?

[주요성과]

- 고체산화물 연료전지의 전극 내부에 활성이 우수한 나노 촉매를 합성할 수 있는 기술을 개발함.
- 고온에서 나노소재의 구조가 변형되는 주요 원인을 밝혀내고 그 원인을 제거하여 700도 이상의 높은 온도에서 고체산화물 연료전지가 작동하는 장시간 동안 나노 구조를 유지할 수 있는 방안을 마련함.
- 일반적인 셀에 비하여 두배 가량 높은 2.2 W/cm²의 성능을 확보하고 500시간 이상 성능 저하 없이 안정되게 작동시킴.

[연료전지 분야에서 갖는 의미]

- 고체산화물 연료전지가 작동하는 700도 이상의 고온에서는 나노 소재를 안정되게 활용하는 것이 어려운 것으로 여겨져 왔음.
- 고온에서 나노 소재가 불안정성한 원인을 이해하고 이를 근본적으로 개선할 경우 효율적으로 나노 기술을 활용할 수 있음을 증명하였음.
- 나노 기술을 바탕으로 셀 성능을 향상시킬 경우 동일한 전기 용량을 얻는데 요구되는 셀의 숫자가 감소함.
- 즉, 적은 양의 셀을 사용하여 동일한 전기 용량을 얻을 경우 전기 생산 단가를 낮출 수 있으며 이는 연료전지가 기존 화석 연료 기반의 발전 기술 대비 경제성을 확보할 수 있는 기술적 기반이 됨.

[성공요인]

- 오랜 기간 수행해온 연구의 결과라고 말할 수 있습니다. 나노 촉매를 적용해서 고체산화물 연료전지의 성능을 높이는 연구를 10년 이상 지속해왔습니다.

[애로사항]

- 고체산화물 연료전지 전극의 내부에서 나노 스케일로 발생하는 현상을 직접적으로 관찰하는 것이 매우 어려움. 따라서, 많은 실험 결과를 가정과 추측으로 해석하고 이를 바탕으로 문제의 해결책을 찾아나가는 방향으로 연구가 진행됨.
- 고온에서 미세한 스케일로 발생하는 현상을 직접적으로 관찰할 수 있는 in situ 분석 기술이 마련될 경우 훨씬 더 효율적으로 연구를 진행할 수 있을 것으로 예상됨.
- 개발된 기술의 제품 적용을 위해서는 대면적 셀과 스택에 적용 평가가 필요하지만 연구기관에서 대용량 실험을 하는 것에는 인력, 장비 등의 한계가 있음. 산업체와의 협업이 활성화될 경우 개발된 기술의 실질적 활용이 더욱 원활해 질 것으로 예상됨.

2. 주요 성과들의 활용 현황 및 파급효과

참여 중이신 과제의 최종 성과(목표)는 무엇이며, 이를 달성하는데 주요 성과들이 어떻게 기여하고 있습니까?

그 외 연구 성과들이 현재 어떻게 활용되고 있으며, 해당 성과들이 갖는 과학적, 기술적, 경제적 파급효과에 대해서 구체적인 사례로 설명 부탁드립니다.

(과학/기술적 파급효과 예시) 현재 참여 중인 과제 외에 다른 후속 연구가 진행 중이라면, △어떤 부처/기관에서 어느 수준을 목표로 연구를 수행하고 있는지, △해당 연구를 통해 해결하고자 하는 주요 문제(이슈)는 무엇인지, △동 사업을 통해 창출된 성과가 어떻게 활용되고 있는지 등

(경제적 파급효과 예시) 성과의 기술이전이 이뤄졌다면, △기술이전이 어떤 과정으로 이뤄졌고, △어느 기업에 어느 단계까지 진행이 되었으며, △기술을 이전받은 기업에서는 해당 성과를 어떻게 활용되고 있는지 등

- 과제의 최종 목표는 100W 이상을 생산할 수 있는 고성능 대면적(100cm²) 셀을 개발하고 이를 스택화하여 스택에서 우수한 성능을 구현하는 것임.
- 또한 셀과 스택에 온도와 전기 부하의 변동이 발생했을 때 이에 대한 내구성(열화율 0.5%/kh 이하)을 확보하고 우수한 성능을 유지하는 것도 중요한 목표임.
- 지금까지 셀 성능을 향상시킬 수 있는 다양한 기술이 개발되어 왔지만 대부분의 경우 실험실 스케일의 코인 셀에서의 효과가 보고되어 왔고 대면적 셀에는 적용되지 못했음.
- 그 이유는 대부분의 성능 향상 기술에 일반적이지 않고 실용성이 부족한 이질적인 소재나 공정 기술이 사용되었기 때문임.
- 본 연구에서는 지금까지 검증된 소재와 공정 기술을 바탕으로 성능 향상을 이루는 것을

목표로 하여 연구를 진행하고 있음.

- 본 과제에서 개발되는 기술들은 기존의 셀 제조 업체에서 일반적인 제조 기술을 크게 변형하지 않으며 채용할 수 있는 기술들로서 실용적인 활용에 최우선 순위를 두고 개발하고 있음. (몇몇 셀 업체들과 협업하며 개발된 기술을 적용해서 검증하는 연구를 수행하고 있음)
- 기존 소재와 공정 기술을 대부분 유지하며 약간의 개선을 통하여 셀 성능을 두배 이상 향상시키게 되면 고체산화물 연료전지의 경제성을 획기적으로 개선하여 상용 제품 개발에 크게 기여할 수 있음.
- 본 과제에서 개발되는 기술을 향후 고온 수전해에 직접적으로 활용될 수 있으며 이를 통해 청정 수소의 경제성을 향상시키는데 기여할 수 있을 것으로 예상됨.

3. 사업의 개선사항 및 향후 방향 제언

기후변화대응기술개발사업이 일몰을 앞두고 있어, 연료전지 분야에 대한 새로운 계획 수립과 동시에 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 전략이 필요한 시점입니다.

3-1. 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성과 연료전지 분야의 기술 발전을 촉진하기 위하여 과학기술정보통신부가 취해야 할 역할과 전략은 무엇이라고 생각하십니까?

향후 연료전지 분야 후속사업에서 중점적으로 다루어야 할 연구 분야와 투자 방향 (TRL 단계, 지원 대상, 지원 기간, 사업 형태 등)에 대해 말씀해주시고, 왜 그렇게 생각하시는지 설명 부탁드립니다.

- 지금까지 과기부를 비롯한 연료전지 연구 개발 결과가 실질적인 제품에 효과적으로 적용되지 못한 케이스가 많았다고 생각됨.
- 한가지 원인으로 원천 연구의 경우 논문 등 학문적 성과에 초점을 맞추며 실질적인 산업 현장의 수요를 반영하지 못했기 때문으로 생각됨.
- 또한 산업체에서는 문제점에 대한 원천적인 해결책을 마련하지 못한 채 엔지니어링 측면으로만 접근해왔기 때문에 고질적인 문제를 해결하지 못해왔음.
- 과기부의 중요한 역할은 원천 연구를 통해서 산업체의 난제를 해결하는 것이라고 생각됨.
- 산업체의 기술 수요를 체계적으로 파악하고 원천적인 측면에서 접근하여 이를 근본적으로 해결할 수 있는 기술을 개발하는 것이 필요함.
- 원천연구와 실용화 연구, 양산까지 유기적으로 이어지는 체계를 마련하는 것이 필요함.
- 근본적인 이해도를 높이기 위한 실질적인 셀과 스택의 분석 기술 개발이 필요하고 이를 통해서 얻어진 방향성을 실질적으로 구현하기 위한 첨단 소재/공정 기술에 대한 연구가 동반되어야 함.
- 또한 연료전지에서 소재/공정으로 해결할 수 없는 열/유동 측면의 이슈에 대한 체계적인 연구가 유기적으로 함께 이루어져야 함.

3-2. 이 외 기후변화대응기술개발사업의 효과성 분석과 향후 투자 방향 도출과 관련하여 추가적으로 고려해야 할 사항이나 기타 의견에 대해서 자유롭게 작성 부탁드립니다.

- 우수 논문 등의 학문적 성과와 기술이전 등의 상용화 성과가 동시에 고려되어야 함.
- 연구 기관에서 개발된 신규 기술이 산업체와의 협업을 통해 실질적인 시스템에서 검증될 수 있는 구조가 필요하다고 생각됨.



인터뷰 대상	한양대학교 이영무 교수	기술분야	연료전지
참여과제	- 고강도 장기 내구성 고체 알칼라인 연료전지용 신규 복합막 지지체 개발('15.10~'20.12) - AEMFC 상용화를 위한 혁신 탄화수소계 바인더 개발('18.7~'23.2)		
주요성과	- 우수 저널(PROGRESS IN POLYMER SCIENCE(IF 29.19), ENERGY & ENVIRONMENTAL SCIENCE(IF 38.53) 논문 게재 - 특허 국제 출원(신규 지방족 사슬 함유 폴리(알킬-아릴 피페리디늄) 중합체 이오노머, 음이온교환막, 복합막 및 이의 제조방법, 2022.4.22.) 등		

1. 성과의 의미

2015년부터 본 사업에 참여한 과제를 통해 연료전지 분야에 다양한 성과를 이루셨습니다.

연구자님께서 생각하시는 주요 성과들을 소개해 주시고, 해당 성과들이 연료전지 분야에서 갖는 의미와 가치에 대해서 설명 부탁드립니다.

아울러 해당 성과들이 우수한 성과로 도출될 수 있었던 성공적 요인은 무엇이고, 성과를 도출하는 과정에서 겪은 애로사항에는 어떤 것들이 있었습니까?

본사업을 통해 다음과 같은 성과를 도출하였다.

우수한 성능을 갖는 poly(aryl piperidinium) 공중합체의 합성 및 이들을 이용한 음이온교환막(Anion exchange membrane, AEM) 및 바인더의 제조

AEM을 이용해 알칼리 연료전지 에서 세계 최고 성능 중 하나인 2.58 W/cm² 의 성능을 확보 하고, 이를 1000 시간동안 0.6 A/cm², 70oC 조건에서 구현하였음.

이들 소재를 이용하여 음이온교환막 수전해(Anion exchange membrane water electrolysis) 공정에 이용하여 세계 최고성능인 2V, 80 oC 조건에서, 16 A/cm² 이상의 성능을 확보하였고, 이를 약 2000 시간동안 1.5 A/cm², 60oC 조건에서 확보하여 상업화에 근접한 성능과 내구성을 갖는 기술을 확보 하는데 기여 하였음.

이들 소재 들을 이용한 논문이 Nature Communications, Angewandte Chem. Int'l Ed., Advanced Materials, Energy & Environmental Sci., Progress in Polymer Sci., Trends in Chemistry, 등 해외 최정상급 논문에 게재.

총 9건의 국내외 특허 출원하였고, 일부는 등록되고 있음.

음이온교환막과 바인더에 대한 연구재단의 투자에 감사드린다. 귀중한 연구 투자로 우수한 연구진과 공동으로 연구를 진행 할 수 있어 감사했다. 특히 촉매연구를 진행했던 KIST 유성종박사 팀, KAIST 이진우교수 연구 팀에서 제공받은 촉매들과 본 연구의 음이온 교환 막 및 바인더 연구가 조합이 되어 좋은 성과를 낼 수 있었다.

애로사항: 없음.

2. 주요 성과들의 활용 현황 및 파급효과

과제 참여 종료 이후 현재 연구 성과들이 어떻게 활용되고 있으며, 해당 성과들이 갖는 과학적, 기술적, 경제적 파급효과에 대해서 구체적인 사례로 설명 부탁드립니다.

(과학/기술적 파급효과 예시) 후속 연구가 진행 중이라면, △어떤 부처/기관에서 어느 수준을 목표로 연구를 수행하고 있는지, △해당 연구를 통해 해결하고자 하는 주요 문제(이슈)는 무엇인지, △동 사업을 통해 창출된 성과가 어떻게 활용되고 있는지 등

(경제적 파급효과 예시) 성과의 기술이전이 이뤄졌다면, △기술이전이 어떤 과정으로 이뤄졌고, △어느 기업에 어느 단계까지 진행이 되었으며, △기술을 이전받은 기업에서는 해당 성과를 어떻게 활용되고 있는지 등

위 분리막 및 바인더 연구를 통해 세계를 선도 할 수 있는 소재를 확보 하였고, 이를 국내외 논문에 발표하여 좋은 반응을 받았다. 미국, 일본, 중국, 유럽의 전문가들로 부터 본 소재들에 대한 귀한 평가가 이어졌고, 우수한 성능을 갖는 원인이 competitive adsorption 이라고 하는 새로운 mechanism 으로 진행 되었다는 사실 또한 밝혀지고 있다.

이들 소재는 우수한 성능과 특히 요구되었던 내구성 문제를 해결 할 수 있어서, 과학자들의 꿈이었던, 알카리연료전지 및 수전해에 획기적인 전기를 마련하여 상업화에 근접하였다는 평가를 받았다. 특히 세계에서 유일한 상업화된 음이온이온교환막수전해 상업 회사로 부터 2년여에 걸친 평가를 통해 그들 스펙을 충족시키는데 근접한 결과(약 98%)를 획득하고 있다.

따라서, 본 기술을 국내 회사에 기술이전이나 창업등을 통해 국내 수소기술이 세계적인 경쟁력을 가질 수 있도록 할 계획이다.

3. 사업의 개선사항 및 향후 방향 제언

기후변화대응기술개발사업이 일몰을 앞두고 있어, 연료전지 분야에 대한 새로운 계획 수립과 동시에 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 전략이 필요한 시점입니다.

3-1. 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성과 연료전지 분야의 기술 발전을 촉진하기 위하여 과학기술정보통신부가 취해야 할 역할과 전략은 무엇이라고 생각하십니까?

향후 연료전지 분야 후속사업에서 중점적으로 다루어야 할 연구 분야와 투자 방향(TRL 단계, 지원 대상, 지원 기간, 사업 형태 등)에 대해 말씀해주시고, 왜 그렇게 생각하시는지 설명 부탁드립니다.

과학기술정보통신부에서는 연구재단을 통해 기초연구 TRL1-3단계까지의 연구를 진행하는걸로 알고 있다. 현재 연료전지 연구는 성능은 우수하나 내구성을 좀 더 향상시켜야 하는 문제점을 가지고 있다. 따라서 연료전지 연구에 대해서는 내구성 향상에 초점을 맞춘 기초연구를 수행 할 수 있게 기획해주면 좋을 것 같다.

같은 막이나 바인더를 이용하여 알카리수전해에 응용할 수 있고, 또한 CO2 전해, 포집 등에도 응용 가능한데, 이러한 음이온교환막과 바인더를 응용한 타응용분야에 기초연구로 투자해 주면 좋을 것 같다.

알카리 수전해 분야는 상업화에 가까운 결과를 얻었기 때문에, 국내 회사에 기술이전이나 창업등을 통해 기술이 산업화 될 수 있도록 할 예정이다. 그럼에도 스케일업하는데 많은 비용이 들어 가므로 TRL 을 3-7로 높여 본 기술이 국내외 경제에 미치는 파급효과를 높이기 위해 연구재단에서 지속적인 투자를 해 주시기를 요청한다. 산업기술평가원, 에기평등에 이어달리기 과제 등으로 지속적인 투자를 통해 기초연구과제가 산업화과제로 발전 될 수 있도록 관심을 가져주시기를 양망한다.

- 3-2. 이 외 기후변화대응기술개발사업의 효과성 분석과 향후 투자 방향 도출과 관련하여 추가적으로 고려해야 할 사항이나 기타 의견에 대해서 자유롭게 작성 부탁드립니다.

기후변화대응사업을 통해 세계적인 기술을 개발 할 수 있도록 해 주셔서 감사드린다. 개발된 기술들이 연속성을 가지고 최종적으로 국가경제에 기여 할 수 있도록 지속적인 연계투자를 해 주시면 좋을 것 같습니다. 기후변화대응기술은 현재 국가12대 기술과도 밀접한 관계가 있으나 정부가 바뀌면 이름이 바뀌어 연속성이 없어 보이는 문제가 있음. 정부가 바뀌더라도 연속적으로 연구개발에 매진 할 수 있도록 지속적인 투자가 요구됩니다.

인터뷰 대상	한국과학기술연구원 이종호 책임연구원	기술분야	연료전지
참여과제	동적변화 대응형 고성능/고신뢰성 SOFC 스택 구성요소 및 디자인 개발('17.8~21.12)		
주요성과	• 세계적인 학술지 네이처 에너지(NATURE ENERGY, IF 46.859) 논문 게재('19) • Fuel cell with improved thermal distribution in stack(미국 특허등록, '21.6.) 등		

1. 성과의 의미

2017년부터 본 사업에 참여한 과제를 통해 연료전지 분야에 다양한 성과를 이루셨습니다.

연구자님께서 생각하시는 주요 성과들을 소개해 주시고, 해당 성과들이 연료전지 분야에서 갖는 의미와 가치에 대해서 설명 부탁드립니다.

아울러 해당 성과들이 우수한 성과로 도출될 수 있었던 성공적 요인은 무엇이고, 성과를 도출하는 과정에서 겪은 애로사항에는 어떤 것들이 있었습니까?

1. 상용화 성과: 과제 기획당시 국내 SOFC 시장을 장악하고 있는 해외 업체들에 비해 국내업체들의 역량이 크게 뒤지는 상황에서 국내업체들의 역량을 빨리 키우는 것이 관건이었습니다. 따라서 본 과제에서는 먼저 국내 업체들의 최대 취약분야인 스택기술의 경쟁력 제고를 위해 국내외 스택제품들의 단점을 모두 극복하면서도 특허침해를 피할 수 있는 차별화된 스택기술을 확보하고자 하였고, 결과적으로 고유한 KIST 디자인 (열유동 분포 균일성을 갖는 연료전지 스택기술)을 확보하는데 성공한 것이 이 과제를 통한 최대 성과라고 생각합니다. 특히 SOFC의 장점인 고품질 폐열을 활용하여 기존 열병합(CHP)기술에 더해 냉방기능까지 추가할 수 있는 삼중열병합(Tri-gen) 기능까지 가지는 동적변화 대응성을 가진 스택기술을 확보함으로써 SOFC 기술의 확장성과 범용성을 높일 수 있었던 것이 큰 의미라 할 수 있습니다. 실제 본 과제서 개발된 기술은 순수 국내기술로 사업화를 추진 중이었던 국내 중소기업에 기술 이전해 제품화에 성공하였으며 현재까지도 국내 대기업들 못지않게 독자적인 기술력으로 사업을 진행 중에 있습니다.

2. 원천기술 확보 성과: 해외기술과 경쟁할 국내기술의 상용화에 못지않게 본 과제서 중점을 두었던 것은 차세대 시장을 선점하기 위한 미래원천기술의 확보였습니다. 그중에서도 차세대소재기술이 가장 원천기술로서의 가치를 확보할 가능성이 크기에 차세대 소재기반의 SOFC 기술확보에 주력하였고, 결과적으로 기존의 산소이온전도성 소재보다 월등한 성능을 가진 프로톤전도성 소재기반의 SOFC 기술을 확보할 수 있었습니다. 이러한 차세대 소재기술에 대한 원천성을 인정받아 관련분야 최고의 저널인

nature Energy에 소개될 수 있었다는 것도 본 과제를 통해 확보한 최대 성과라고 생각합니다.

3. 성공요인: 상용화기술의 경우 기술을 필요로 하는 산업체의 의견을 취합하여 기술 개발 초기부터 맞춤형으로 개발을 진행하였습니다. 또한 공개자료 범위내에서 최대한 경쟁사들의 기술을 분석하고 각각의 기술에 대한 장단점을 파악하여 기술개발에 반영하였습니다. 이러한 선행기술에 대한 철저한 분석은 초기 개발단계에서의 시행착오를 줄일 수 있었으며 기업체의 수요의견에 대해서도 비판적으로 수용함으로써 차별화된 기술을 조기에 확보할 수 있었습니다. 원천기술의 경우도 대규모 연구인력을 투입해 추진해오던 연구개발 전략보다는 소수 정예의 인원으로 가장 병목기술로 파악된 기술들, 이번 경우에는 탄소결성을 가진 전해질소재에 대한 공정기술에 대해서만 우선 집중하는 선택과 집중의 전략을 구사했습니다. 또한 기존에 보고되어 있던 타 연구팀의 경험을 찾아내 최대한 활용하는 것이 시간과 노력을 단축할 수 있는 길이라 생각하고, 프로톤 세라믹 연료전지 관련 보고들을 자체적인 기준을 세워 체계적으로 정리함으로써 난립해 있던 자료들 속에서 도움이 되는 정보들을 찾아낼 수 있었습니다. 이렇게 수집된 모든 데이터들을 주요변수기준으로 구분해 도식화했고, 이를 통해 원하는 성능을 구현하는데 필요한 전략을 도출할 수 있었습니다. 이처럼 초기부터 연구를 서두르기보다 연구자들이 충분히 본인의 연구내용이나 다른 연구자의 연구결과들을 검토해 볼 수 있는 시간을 주었던 것이 결과적으로는 초기 연구단계에서의 시행착오를 최소화 할 수 있었고 차별화된 아이디어를 낼 수 있었던 가장 큰 요인으로 작용한 것 같습니다.

4. 애로사항: 성공적인 성과도출을 위해서는 참여연구원들의 잠재력을 최대한 끌어낼 수 있어야 하며 그러기 위해서는 과제시한이나 연구비 등에 대한 부담 없이 연구원들이 창의적으로 충분히 고찰하고 생각할 시간을 주는 것이 필요한 것 같습니다. 하지만 과제시한 내 주어진 성과지표 달성여부만으로 연구자들을 평가하는 시스템에서는 연구자들이 단순 지표 달성을 위한 연구에 집중할 수밖에 없고 그런 경우 창의적이고 원천적인 기술확보가 쉽지 않았다는 것이 가장 아쉬운 점이었습니다. 따라서 성과지표 달성 여부로만 과제 및 참여연구원들을 평가하기 보다는 그 과정에 얼마나 충실히 임했는지로 평가해줘야만 연구원들이 기본에 충실하며 실질적으로 도움이 될 연구결과물을 얻어내는 길인 것 같습니다.

2. 주요 성과들의 활용 현황 및 파급효과

과제 참여 종료 이후 현재 연구 성과들이 어떻게 활용되고 있으며, 해당 성과들이 갖는 과학적, 기술적, 경제적 파급효과에 대해서 구체적인 사례로 설명 부탁드립니다.

(과학/기술적 파급효과 예시) 후속 연구가 진행 중이라면, △어떤 부처/기관에서 어느 수준을 목표로 연구를 수행하고 있는지, △해당 연구를 통해 해결하고자 하는 주요 문제(이슈)는 무엇인지, △동 사업을 통해 창출된 성과가 어떻게 활용되고 있는지 등

(경제적 파급효과 예시) 성과의 기술이전이 이뤄졌다면, △기술이전이 어떤 과정으로 이뤄졌고, △어느 기업에 어느 단계까지 진행이 되었으며, △기술을 이전받은 기업에서는 해당 성과를 어떻게 활용되고 있는지 등

(과학기술적 파급효과)

1. 상용화 기술 후속과제: 선행과제에서 확보된 고효율 SOFC 셀/스택기술을 활용해 다양한 연료체계에 대응 가능한 SOFC를 개발하기 위한 과제에 참여 중에 있습니다.

- 수소전용 SOFC 개발과제 (과기부 기후변화대응기술개발사업, 20.06~25.01)
- 탄화수소 대응형 SOFC 개발과제 (과기부 단계도약형 탄소중립기술개발사업, 22.05~25.01)

- 암모니아 연료용 SOFC 개발과제 (산업부 신재생에너지기술개발사업, 22.04~25.03)

선행과제에서 확보된 SOFC 기술은 현재 시장에서 운용되는 탄화수소연료 체계에서 충분한 경제성을 확보하기 위한 내구성확보나 수명연장 작업에 활용되고 있으며, 향후 도래할 무탄소 연료인 그린수소 및 암모니아 연료체계에 대응 가능한 선제적인 대응기술개발에도 활용되고 있습니다.

2. 원천기술 후속과제: 선행과제에서 확보된 프로톤전도성 전해질을 이용한 SOFC 기술을 확장해 그린수소를 생산하기 위한 PCEC (Protonic Ceramic Electrolysis Cell) 개발과제를 과기부 미래수소원천기술개발사업 (21.07~26.12)과 산업부 신재생에너지핵심기술개발사업 (22.04~26.03)으로 수행 중에 있습니다.

(경제적 파급효과)

1. KIST 스택기술을 이전받은 (주) 피엔피에너지텍에 따르면 2020년 국내외 연구용 10kW 규모 스택을 시작으로 2021년까지 50억원 규모의 투자를 계획하고 있습니다. 예상 매출액은 2020년 10억원 규모에서 2024년 150억 규모로 증가할 것으로 예상되며 이에 따른 생산설비 증설과 인력채용을 진행하고 있습니다.

(계약체결 2019.7.31., KIST-연세대 50,000,000원, 계약명(열유동 분포 균일성을 갖는 연료전지 스택 특허 기술의 실시권설정계약), 비독점적 통상실시권, 기술이전 내용(동적변화 대응형SOFC 스택디자인 등))

2. 그동안 축적된 SOFC 스택평가 및 운용기술을 확장해 그린수소를 생산하기 위한

SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell) 스택을 평가/분석/해석할 수 있는 기술과 노하우를 확보하였고, 이를 국내 대기업에 이전해 KIST내 협력연구센터를 설립하고 공동연구를 진행할 예정입니다. 현재 협력연구센터에는 대용량 SOEC 스택 및 실증기를 평가할 수 있는 설비를 갖춰가고 있으며 24년 7월 협력센터 완공 후 공동연구를 진행할 예정입니다.

3. 사업의 개선사항 및 향후 방향 제언

기후변화대응기술개발사업이 일몰을 앞두고 있어, 연료전지 분야에 대한 새로운 계획 수립과 동시에 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 전략이 필요한 시점입니다.

3-1. 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성과 연료전지 분야의 기술 발전을 촉진하기 위하여 과학기술정보통신부가 취해야 할 역할과 전략은 무엇이라고 생각하십니까?

향후 연료전지 분야 후속사업에서 중점적으로 다루어야 할 연구 분야와 투자 방향 (TRL 단계, 지원 대상, 지원 기간, 사업 형태 등)에 대해 말씀해주시고, 왜 그렇게 생각하시는지 설명 부탁드립니다.

- 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표에 기여하기 위해 연료전지 기술분야에서 추진해야 될 내용은 크게, 기존 연료전지기술의 개선을 통해 단기적인 탄소배출 감축에 기여하는 것과 장기적인 관점에서 탄소중립 목표 이상의 효과에 기여할 보다 고효율 시스템 구현을 위한 차세대 기술을 확보하는 것입니다.
- 현재 단기적인 관점에서 시스템의 효율과 경제성을 확보하기 위한 노력은 기업주도의 산업부 과제를 통해 진행 중이나, 보다 장기적인 투자가 필요하거나 또는 산업체들이 당장 개발에 뛰어들기에는 위험도가 큰 기술들의 경우 과기부에서 담당해주는 것이 필요합니다.
- 과기부 과제의 경우 단계를 구분해 2050 탄소중립 목표에 직접적으로 기여할 수 있도록 개발된 원천기술들이 상용화까지 연결될 수 있게 TRL 4~5 단계까지의 기획이 되어야 합니다. 따라서 연구기획단계에서부터 산업체의 수요를 바탕으로 과제가 만들어질 필요가 있으며, 과제수행기간 동안에도 산업체와의 긴밀한 기술교류 및 점검을 통해 과제종료 시 바로 기업체가 활용할 수 있는 수준의 기술적 완성도를 갖출 수 있게 진행되어야 합니다.
- 그러나 2050 기한이 정해진 상황이라고 시한에 맞춰 촉박하게 가시적인 대형결과물을 재촉하는 경우 산업부과제와의 차별성도 힘들고 실제 기업이 주도하는 과제들보다 더 좋은 결과물을 낼 수 없을 것입니다. 따라서 각 연구주체들이 독창적인 성과물을 내고 이를 상용화까지 연결할 수 있도록 창의적이고 도전적인 연구를 할 수 있는 평가시스템을 갖춰줘야 합니다.
- 또한 미래를 준비하는 과기부인 만큼 2050 목표가 아닌 그 이후를 내다보고 기술을 선점할 수 있는 TRL2 수준의 기초원천기술개발과제도 개인연구과제가 아닌 집단형 연

구과제 형태로 지원할 필요가 있습니다. 특히 기초원천기술이라고 하더라도 가능한 미래 산업과 기술시장 트렌드를 놓치지 않게 초기개발 단계에서부터 산업체들과 긴밀한 의견교환 체계를 갖출 필요가 있습니다.

- 특히 원천기술의 경우 소재부품 레벨에서의 연구개발 수요가 많을 것이기에 가능한 국내 소재부품기업들이 연구개발과제 진행 중에도 쉽게 기술개발 현황을 파악하고 접근할 수 있도록 해 기술에 대한 이해도와 이를 통해 스스로 자체역량을 갖출 준비를 하는 기술지원도 병행해야 합니다.

3-2. 이 외 기후변화대응기술개발사업의 효과성 분석과 향후 투자 방향 도출과 관련하여 추가적으로 고려해야 할 사항이나 기타 의견에 대해서 자유롭게 작성 부탁드립니다.

- 기후변화대응기술 사업의 경우 실제적인 탄소감축이나 경제산업적인 기여분은 관련 산업이 어느정도 성숙되어야만 그 효과가 산정될 수 있을 것입니다. 그러나 아직 연료 전지 산업의 경우 자동차용이나 건물용, 발전용 시장이 아직 충분한 레코드를 확보할 만큼 숙성되지 않았기에 성급한 평가를 시도해서는 안될 것이고 좀 더 시장진행상황을 보면서 효과를 평가하는 것이 필요합니다.

- 국가적으로는 도입된 신에너지기술이 그 효과를 충분히 검증할 수 있도록 시장을 안정적으로 유지- 확장시켜주어야 하며, 그래야만 더 많은 산업체들의 참여와 투자를 유도할 수 있고 궁극적으로 산학연 기술개발과 이를 이어받아 상용화하는 산업활성화의 선순환체계가 갖춰질 것입니다.

인터뷰 대상	한국화학연구원 황동원 본부장	기술분야	바이오에너지
참여과제	바이오유기산 유래 폴리아올레핀 제조 촉매 기술 개발('20.7~'25.1)		
주요성과	• 바이오 유기산으로부터 알파올레핀을 선택적으로 생산하는 촉매 공정 기술 개발을 통해 기존 석유계 원료 대비 이산화탄소 50% 이상 감축 ※ 듀얼-베드 촉매 시스템 특허 출원 (PCT/KR2022/009309, 2022. 6.) • 세계적인 화학공학분야 국제학술지 Chemical Engineering Journal(IF: 16.7) ('23) 게재		

1. 성과의 의미

2020년부터 본 사업에 참여한 과제를 통해 바이오에너지 분야에 다양한 성과를 이루셨습니다. 연구자님께서 생각하시는 주요 성과들을 소개해 주시고, 해당 성과들이 바이오에너지 분야에서 갖는 의미와 가치에 대해서 설명 부탁드립니다.

아울러 해당 성과들이 우수한 성과로 도출될 수 있었던 성공적 요인은 무엇이고, 성과를 도출하는 과정에서 겪은 애로사항에는 어떤 것들이 있었습니까?

(주요성과)

- 고성능 RuSn 합금 촉매 기반 듀얼베드 촉매시스템 개발을 통해 바이오 유기산으로부터 알파올레핀을 제조하는 기존 다단계 촉매반응의 효율을 획기적으로 개선 (알파올레핀 수율 63% 및 순도 80% 달성)
- La이 도핑 알루미늄 촉매 기술을 활용하여 바이오 알코올의 이성질화 반응을 최소화하면서 고효율로 알파올레핀을 선택적으로 생산할 수 있는 촉매시스템 개발 (알파올레핀 수율 90.9%, 순도 92.3%, 및 생산량 34.5mmol/h 달성)

(바이오에너지 분야 의미와 가치)

- 상기 촉매 기술 결과를 바탕으로 바이오 유기산으로부터 알파올레핀을 선택적으로 생산하는 촉매 공정 기술 개발을 통해 기존 석유계 원료 대비 이산화탄소 50% 이상 감축 가능
- 기존 석유 기반 알파올레핀 제조 기술을 탄소중립형 원료인 바이오매스로부터 알파올레핀을 생산할 수 있는 혁신적인 기술로서 온실가스 감축효과가 큰 친환경 공정 기술임
- 국내 석유화학산업의 저성장 기조에 따른 고용창출 둔화를 개선할 수 있는 지속 가능한 신화학산업 창출 기대 (국내 화학기업 성장에 따른 신규 고용 창출)

(성공요인과 애로사항)

- 본 과제의 성공을 위해 과제 기획단계에서부터 바이오매스 전처리, 탈수/수소화 촉매 개발 및 올리고머화 분야와 환경영향평가의 최고 전문가들이 참여할 수 있도록 과제를 구성하였으며, 과제 진행 중 오픈 마인드로 연구결과물에 대한 활발

한 토론을 통해 우수 성과를 도출하였음.

- 애로사항으로 과제 기획 당시 바이오매스 원료를 KIST에서 공급 받기로 하였으나, 화학연에서 요구하는 샘플량에 미치지 못하여 벤치급 공정 개발이 지연되는 상황이 발생하였으나, 양 기관간 지속적인 교류를 통해 기술 이해를 통해 문제를 해결하였음.

2. 주요 성과들의 활용 현황 및 파급효과

참여 중이신 과제의 최종 성과(목표)는 무엇이며, 이를 달성하는데 주요 성과들이 어떻게 기여하고 있습니까?

그 외 연구 성과들이 현재 어떻게 활용되고 있으며, 해당 성과들이 갖는 과학적, 기술적, 경제적 파급효과에 대해서 구체적인 사례로 설명 부탁드립니다.

(과학/기술적 파급효과 예시) 현재 참여 중인 과제 외에 다른 (후속)연구가 진행 중이라면, △어떤 부처/기관에서 어느 수준을 목표로 연구를 수행하고 있는지, △해당 연구를 통해 해결하고자 하는 주요 문제(이슈)는 무엇인지, △동 사업을 통해 창출된 성과가 어떻게 활용되고 있는지 등

(경제적 파급효과 예시) 성과의 기술이전이 이뤄졌다면, △기술이전이 어떤 과정으로 이뤄졌고, △어느 기업에 어느 단계까지 진행이 되었으며, △기술을 이전받은 기업에서는 해당 성과를 어떻게 활용되고 있는지 등

(참여과제 최종 성과 목표)

- 국내 석유화학산업은 대규모 온실가스 배출로 인해 경제적, 환경적 위기에 직면하고 있어 이를 극복하기 위한 혁신적인 차세대 기술의 발굴이 필요함.
- 국내 미활용 바이오매스의 생물학적 전환을 통해 생산되는 다양한 바이오 유기산으로부터 대표적인 스페셜티 석유화학제품인 폴리알파올레핀을 생산하기 위한 원천 촉매 및 공정기술을 개발함.
- 본 과제에서는 바이오 유기산으로부터 윤활유의 주성분인 폴리알파올레핀 (PAO)을 제조하는 벤치급 촉매 공정 기술 개발을 목표로 함.
 - PAO 합성 벤치급 공정 기술 개발을 위해 우수한 촉매 소재 개발과 공정 기술 개발이 필요한데, La 도핑 알루미늄 촉매와 듀얼베드 촉매시스템을 활용하여 진행할 예정

(과학/기술적 파급효과)

- 본 과제에서 확보한 바이오 윤활유 생산 촉매 공정 기술은 다양한 바이오매스 전환 반응에 플랫폼 기술로 활용 가능함.
- 바이오매스 유래 스페셜티 케미칼 제조 기술의 핵심 요소 촉매기술 확보를 통해

바이오리파이너리 산업의 과학기술적 기반 구축

- 바이오-폴리올레핀 제조 원천기술 개발 결과를 친환경 윤활기유 생산 기업으로 기술이전 및 수요기업과 산업계 연계형 실증사업 및 사업화 추진 (2028년 폴리올레핀 글로벌 시장 62억불로 성장 예측)
 - 현재 랩스케일 수준 원천기술 개발 단계로 벤치급 공정기술개발이 완료되는 시점에서
 - 본격적으로 기술이전 및 사업화를 추진 예정
- 신기후체제 도래에 따른 온실가스 감축 대응, 화석연료의 의존성 저감, 바이오리파이너리 및 탄소자원화 신성장 동력 창출

(경제적 파급효과)

- 본 과제에서 총 8편의 국내외 특허를 확보한 상태이며, 벤치급 공정 기술 개발 완료 후 바이오 윤활유 생산을 검토 중인 SK 이노베이션, LG화학 등 수요기업과 함께 사업화를 추진할 계획임.

3. 사업의 개선사항 및 향후 방향 제언

기후변화대응기술개발사업이 일몰을 앞두고 있어, 바이오에너지 분야에 대한 새로운 계획 수립과 동시에 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 전략이 필요한 시점입니다.

- 3-1. 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성과 바이오에너지 분야의 기술 발전을 촉진하기 위하여 과학기술정보통신부가 취해야 할 역할과 전략은 무엇이라고 생각하십니까?
향후 바이오에너지 분야 후속사업에서 중점적으로 다루어야 할 연구 분야와 투자 방향(TRL 단계, 지원 대상, 지원 기간, 사업 형태 등)에 대해 말씀해주시고, 왜 그렇게 생각하시는지 설명 부탁드립니다.

- 기존 사업을 통한 확보한 우수 기술에 대해서는 2030 NDC에 실질적으로 기여할 수 있도록 수요기업과 연계하여 실증기술 개발과 사업화를 추진
- 바이오에너지 연구분야 및 기술 그룹에 대해서 상업화 공정 개발 가능성 및 2050 탄소중립 기여도를 분석하고, 이에 따른 후속 사업 투자 방향 설정 필요
- 산업부에서도 바이오에너지 관련 사업을 추진하고 있기 때문에 TRL 단계를 구분하여 부처간 사업을 조율하면 좋겠음.

- 3-2. 이 외 기후변화대응기술개발사업의 효과성 분석과 향후 투자 방향 도출과 관련하여 추가적으로 고려해야 할 사항이나 기타 의견에 대해서 자유롭게 작성 부탁드립니다.

- 현재 사업내 각 과제별로 온실가스 감축 효과 등을 분석하고 관리하고 있으나, 개별 분석으로 기후변화대응기술개발사업 전체 성과 관리에 한계가 있음.
- 기후변화대응기술개발사업의 핵심 성과 지표들을 총괄적으로 관리할 수 있는 시스템 보완하면 좋겠음.



인터뷰 대상	한국과학기술연구원 하정명 책임연구원	기술분야	바이오에너지
참여과제	나무 열분해오일로부터 바이오항공유 생산을 위한 탈산소 업그레이딩 촉매화학공정 기술 개발('20.7~'25.1)		
주요성과	• 0.6 kg/일 급 바이오항공유 생산 공정 기술개발(탄소회수율 55% 달성) • APPLIED CATALYSIS B-ENVIRONMENTAL(IF 24.319) 논문 게재('22) • CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL (IF 16.744) 논문 게재('22) 등		

1. 성과의 의미

2020년부터 본 사업에 참여한 과제를 통해 '바이오항공유 생산 공정 기술개발' 등의 성과를 이루셨습니다. 연구자님께서 생각하시는 주요 성과들을 소개해 주시고, 해당 성과들이 바이오에너지 분야에서 갖는 의미와 가치에 대해서 설명 부탁드립니다.

아울러 해당 성과들이 우수한 성과로 도출될 수 있었던 성공적 요인은 무엇이고, 성과를 도출하는 과정에서 겪은 애로사항에는 어떤 것들이 있었습니까?

1. 우수성과1: 나무 열분해오일로부터 바이오항공유 생산을 위한 벤치규모 촉매화학반응 연속 운전 성공.

1.1. 관련 특허 및 논문 성과

- 대한민국 특허 출원 10-2022-0157108 (2022.11.22.)
- 미국 특허 출원 18/146987 (2022.12.27.)

1.2. 성과 내용

- 나무 열분해오일의 수첨 업그레이딩을 통해 기존 석유와 유사한 항공유분을 생산함.
- 관련 촉매를 개발하고 적절한 공정 조건을 조합하여 안정적으로 탈산소 석유대체 연료 생산을 확인함.
- 최대 132시간 연속 운전 결과 확보. (vs. 기존 최대 30시간 연속 운전 확인)

1.3. 성공요인

- 새로운 고효율성 촉매 개발 및 적용
- 원활한 연속 반응 운전을 위한 반응기 설계 최적화
- 관련 연구자들로 구성된 총괄 컨소시엄에서 이루어진 활발한 연구 토의로 필요한 문제를 정의하고 해결책을 얻음.
- 충분한 연구비 확보로 박사후연구원 등 우수한 연구팀 구성

1.4. 애로사항

- 실험을 수행할 박사후연구원 등 우수한 연구팀을 확보가 쉽지 않음.

2. 우수성과2: 나무 열분해오일로부터 시클로헥산을 생산 촉매화학반응 기술

1.1. 관련 특허 및 논문 성과

- 대한민국 특허 출원 10-2021-0173882 (2021.12.07.)
- Chemical Engineering Journal 2022, 446, 136578 (IF 16.744)

1.2. 성과 내용

- 기존의 나무열분해오일 업그레이딩/수첨 반응은 석유 대체가 가능한 탈산소 탄화수소를 생산할 수 있으나, 공정 과정에서 대량의 수소를 소모하여 수소 공급 관련 문제가 있음.
- 본 성과에서는 완전 탈산소 대신 복잡한 열분해오일의 화합물들을 알코올로 전환하여 원료의 안정성을 확보하고 석유화학 제품의 원료, 알코올계 연료 등의 제품으로 전환할 수 있음.

1.3. 성공요인

- 본 성과의 반응생성물을 얻을 수 있는 효율적인 촉매를 개발함.
- 그동안의 연구를 통해 나무 열분해오일의 특성을 이해하고 관련 반응을 제안할 수 있었음.

1.4. 애로사항

- 실험을 수행할 박사후연구원 등 우수한 연구팀을 확보가 쉽지 않음.

2. 주요 성과들의 활용 현황 및 파급효과

참여 중이신 과제의 최종 성과(목표)는 무엇이며, 이를 달성하는데 주요 성과들이 어떻게 기여하고 있습니까?

그 외 연구 성과들이 현재 어떻게 활용되고 있으며, 해당 성과들이 갖는 과학적, 기술적, 경제적 파급효과에 대해서 구체적인 사례로 설명 부탁드립니다.

(과학/기술적 파급효과 예시) 현재 참여 중인 과제 외에 다른 (후속)연구가 진행 중이라면, △어떤 부처/기관에서 어느 수준을 목표로 연구를 수행하고 있는지, △해당 연구를 통해 해결하고자 하는 주요 문제(이슈)는 무엇인지, △동 사업을 통해 창출된 성과가 어떻게 활용되고 있는지 등

(경제적 파급효과 예시) 성과의 기술이전이 이뤄졌다면, △기술이전이 어떤 과정으로 이

뤼졌고, △어느 기업에 어느 단계까지 진행이 되었으며, △기술을 이전받은 기업에서는 해당 성과를 어떻게 활용되고 있는지 등

본 사업의 연구 성과는 향후 실증/사업화로 연결시키기 위해 아래와 같은 연구 사업을 추진중임.

- 산업통상자원부 (가)탄소중립기술 예타 (2026년 시작): 나무 열분해오일로부터 나프타 생산
- 산업통상자원부 (가)바이오산업 예타 (2026년 시작): 나무 열분해오일로부터 바이오항공유 생산

위 사업으로 연계하여 실증화, 사업화를 추진하고자 함.

위 사업과 연계하여, 또는 별도로, 국내 정유/석유화학 기업들과 관련 기술의 활용과 관련한 협의를 지속 진행중임.

3. 사업의 개선사항 및 향후 방향 제언

기후변화대응기술개발사업이 일몰을 앞두고 있어, 바이오에너지 분야에 대한 새로운 계획 수립과 동시에 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 전략이 필요한 시점입니다.

3-1. 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성과 바이오에너지 분야의 기술 발전을 촉진하기 위하여 과학기술정보통신부가 취해야 할 역할과 전략은 무엇이라고 생각하십니까?

향후 바이오에너지 분야 후속사업에서 중점적으로 다루어야 할 연구 분야와 투자 방향(TRL 단계, 지원 대상, 지원 기간, 사업 형태 등)에 대해 말씀해주시고, 왜 그렇게 생각하시는지 설명 부탁드립니다.

TRL 단계: 1~5:

- 현재 산업통상자원부, 환경부 등에서는 2030 또는 2035년 탄소중립 목표를 단기 목표로 설정하고 여기에 맞는 기술을 선택하여 상용/실증에 가까운 기술 개발을 지원하고 있음. (목표 TRL 6-7) 과학기술정보통신부는 타부처와는 달리 조금 더 장기 비전을 가지고 기술 개발을 지원할 필요가 있으며, 2040-2050년에 실증/상용화가 가능한 기술에 투자하는 것이 바람직함. 목표 TRL 5 정도의 기술을 목표로 삼고, 그런 관점에서 전문가 자문을 통해 단기 실증 연구와 구별되는 과학기술정보통신부 고유의 연구 영역을 구축하는 것이 바람직하다고 생각됨.

중점 연구 분야:

- 바이오매스 기반 수소 생산 기술 또는 바이오수소 생산 기술, 바이오항공유 생산 기

술, 바이오선박유 생산 기술 등 향후 국내 산업에서 중요해질 수 있는 기술들을 선
도적으로 개발하되, **산업통상자원부 등의 영역과 구별되는 기술**을 개발하는 것을 목
표로 삼을 필요가 있음.

사업 형태:

- 바이오연료 기술의 경우 이미 많은 연구 과제들로 진행되어 온 바 있어서 완전히 새로운 기술을 제시하기는 어려우며, **기존의 연구팀들을 모아 컨소시엄을 구성하여** 응용 단계(TRL4-5)의 연구 개발 사업을 중심으로 수행하는 것이 바람직할 것으로 보임. 또한, 연구재단에서 진행한 사업이 완료된 후 **산업통상자원부 등 타 부처의 연구/개발 사업으로 연계될 수 있도록** 사업 내용을 구성하는 것을 제안함.
- 바이오에너지의 경우 정유/석유화학 등 거대 장치 산업으로 연계되어야 하므로 연구재단의 사업 수행 완료후 바로 기술 실시/이전은 어려움. 정유/석유화학 업계에서는 최소 파일럿에서 실증되고 설계서가 확보된 기술을 이전받는데 익숙해져 있어 단순히 몇가지 원천 특허로 산업 실증으로 연계하기 어려움. 또한, 이들 업계에서는 파일럿 규모 실증이 이루어졌다고 하여도 2차 파일럿, 데모공정 등 여러 단계의 기술 실증 단계를 거치게 되므로 파일럿 규모로 실증된 기술을 이전받는 것도 어느 정도 실패 가능성을 염두에 둘 수밖에 없음. 따라서, 연구재단에서 운영하는 바이오에너지 관련 사업에서는 직접적인 기술 이전 등을 바로 요청하는 것보다 **파일럿 규모 실증으로 연계할 수 있는 기업을 확보하는 것을 목표로** 요청하는 것이 더 바람직함.

이어달리기:

- 현재 진행중 또는 종료하는 연구 사업들에 대해 적극적으로 산업통상자원부, 중소벤처기업부, 환경부 등의 연구 사업에 연계하는 길을 넓혀주면 실증 가능한 기술들이 좀 더 수월하게 실증 단계로 넘어갈 수 있을 것으로 판단됨. 따라서, 부처간 협의를 통해 기초/응용 기술이 산업 기술로 연계될 수 있도록 지원해줄 것을 요청함.

3-2. 이 외 기후변화대응기술개발사업의 효과성 분석과 향후 투자 방향 도출과 관련하여 추가적으로 고려해야 할 사항이나 기타 의견에 대해서 자유롭게 작성 부탁드립니다.

효과성 분석:

- 바이오에너지의 경우 소규모 생산과 활용으로 바로 진행할 수 없으며 어느 정도 규모를 가진 생산업체에서 시장에서 진줄하였을 때에 효과를 확인할 수 있다는 점에서, 일부 부품의 교환, 소재의 개발 등으로 효과를 추산할 수 있는 여타 신재생에너지와는 구별됨. 따라서, 바이오에너지 분야의 효과성 분석을 위해서는 “개발후 5년 내”와 같은 단기 효과를 이야기하는 것은 큰 의미가 없음.
- 여타 신재생에너지들이 전기에너지와 연계되는 것과 구별하여 바이오에너지는 전기

에너지와 상관없기 때문에 효과성을 분석할 때 일반적인 전기에너지 분석의 방법을 그대로 적용하는 것은 무리할 수 있으니 바이오에너지 나름의 효과성 분석법이 필요함.

- 바이오에너지의 경우 바이오항공유, 바이오선박유와 같이 규제와 연계된 기술들이 많으므로 규제 대응 효과도 효과성 분석에 투입하는 것이 효율적일 것으로 보임.

투자방향:

- 기존의 바이오디젤 사업의 경우, 정유 대기업이 어느 정도 배제된 조건에서 중소/중견기업들이 제품을 생산하고 산업을 키워옴. 현재 바이오항공유 등 규제가 시작된 분야에서, 많은 대기업들은 규제가 들이닥친 상황까지 적절한 대응을 취하지 않다가 현재는 정부의 지원책을 요구하는 실정임.
- 향후 기후변화대응기술개발 사업의 바이오에너지 개발의 경우에도 국내의 의지있는 중소/중견기업을 중심으로 기술 개발이 진행될 수 있도록 지원하는 것이 더 효율적이며 향후 산업화에도 더 유리할 수 있음. 따라서, 파일럿으로 연계할 수요기업/개발기업의 조건으로 중소/중견기업이 참여할 수 있도록 하는 것이 효율적일 수 있음.



인터뷰 대상	포항공과대학교 이상민 교수	기술분야	이차전지
참여과제	전기자동차용 차세대 리튬금속 이차전지 핵심원천기술 개발('18.7~'23.2)		
주요성과	• 불소 함유기 치환 신규전해질 적용을 통한 고에너지밀도 리튬금속전지 장기신뢰성 기술 확보 • 리튬 금속 전지용 비수계 전해액 및 이를 포함하는 리튬 금속 전지 특허 출원 (10-2022-0079024, 2022. 6.) 등		

1. 성과의 의미

2018년부터 본 사업에 참여한 과제를 통해 이차전지 분야에 '리튬금속전지 장기신뢰성 기술 확보' 등의 성과를 이루셨습니다. 또한 이차전지 분야 사업단장으로 활동해 주셨습니다.

연구자님께서 생각하시는 주요 성과들을 소개해 주시고, 해당 성과들이 이차전지 분야에서 갖는 의미와 가치에 대해서 설명 부탁드립니다.

아울러 해당 성과들이 우수한 성과로 도출될 수 있었던 성공적 요인은 무엇이고, 성과를 도출하는 과정에서 겪은 애로사항에는 어떤 것들이 있었습니까?

[주요 연구 성과 소개 및 의미]

본 연구단 활동을 통하여 얻게 된 연구성과물은 전 세계적으로 최초로 시도되고 있는 신규성이 확보된 원천기술임. 또한 이를 기반으로 실용화 가능성을 타진하기 위한 원천기술간의 셀 밸런스 최적화를 통하여 세계최고수준의 에너지밀도 (430Wh/Kg) 및 장기신뢰성 (>90%@300thcy)을 동시에 확보할 수 있는 차세대 리튬금속 이차전지 개발에 성공하였음.

- 현재까지 개발된 원천요소기술(대면적 리튬금속박판기술+유무기하이브리드 보호기술+내전압성 전해액기술+핵생성원소기반 3차원 구조체+단이온전도성 분리막기술)을 적용하여 ~430Wh/Kg급 이상의 에너지밀도를 갖는 차세대 리튬금속이온 및 전고체 이차전지를 개발함.

- 각 핵심요소기술에 대한 차년도 연구 계획은 이미 충분한 예비 실험을 통하여 가능성을 검증한 근거 하에 수립되었기 때문에 해당 단계 목표 달성은 충분히 이루어진 것으로 판단됨.

① 전해도금 활용 롤투롤 연속식 리튬박 제조공정기술 개발

20mAh/cm²의 고전류밀도에서 전해도금 공정으로 덴드라이트가 억제된 고밀도의 리튬금속박을 연속적으로 제조 할 수 있는 공정 및 장비 기술. 기존 압연 리튬금속 박막 대비 약 2배 향상된 충방전 안정성 확보.

② 저부식성 리튬 금속 전지용 전해질 개발

고부식성 전해질과 달리, 리튬 금속의 부식을 완화시키는 새로운 개념의 전해질을 설계함. 화

학적 부식의 의한 SEI 두께가 1/2 미만 수준으로 감소하였음. NCM523 (3.83 mAh cm⁻²)과 박형 리튬금속 음극(40 μm)을 조합하여 전지 구동을 진행함. 2g Ah⁻¹ 미만의 희박 전해액 조건에서 400사이클의 높은 성능을 보여줌.

③ 단이온 전도성 복합 보호막 기술 개발

리튬 금속에서의 수지상 성장을 억제하고 안정적인 구동을 이끌어 낼 수 있는 보호막 설계 기술을 제시하였음. 단이온 전도성을 지닌(리튬 이동수>0.95 이상) 10μm 미만 두께의 보호막을 리튬 금속에 적용하여, 파우치 셀 수준에서 검증하였으며, 고용량 NCM523(3.72 mAh cm⁻²) 및 40 μm의 리튬박막을 사용하여, 350 사이클 후 80% 용량값을 유지하였음. 2.15g Ah⁻¹의 전해액 양을 이용하여 350 Wh kg⁻¹의 높은 에너지 밀도 달성을 증명하였음.

④ 슬러리 기반 다공성 탄소 구조체 기술 개발

슬러리 기반 탄소 구조체 (3D-carbon based porous anode, 3D-CPA) 대면적화 설계/제조 기술 확보, 350Wh/kg 에너지밀도 달성, 저팽창률 (<20%, 4 mAh/cm²), 용량밀도 (~1,000 mAh/cc), DSC 181 J/g (for 4 mAh/cm²), full cell 수명 70%@200cycle (at 이용율=50%) 확보.

⑤ 고안정성 Ag-Li 금속간화합물 합금음극 기반 고에너지밀도 전고체 전지용 셀 제조 기술 개발

전고체전지에서 리튬음극을 사용할 때 발생하는 빈번한 내부단락 문제와 인듐음극을 사용할 때 발생하는 0.6V 가량의 전압저하 문제를 해결하기 위해, 리튬전위를 가진 Ag-Li 금속간화합물 합금음극을 개발하여 도입함. Ag와 Li 포일을 롤프레스로 접합 후에 자발적으로 생성되는 금속간화합물 층은 리튬수지상 성장을 억제할 뿐만 아니라 고체전해질과도 안정적인 화학적 계면 또한 형성함. 합금음극이 적용된 NCM 풀셀은 0.2C 충방전 조건에서 27사이클을 보이는 리튬 대조군 셀 대비 5배가량 향상된(140사이클 이상) 수명특성을 달성할 뿐만 아니라 12C의 고속방전 조건에서 200사이클 이상의 우수한 수명특성을 달성. 또한, 해당 Ag-Li 기반 음극 기술과 동시에 고에너지밀도 전고체 전지를 개발하기 위해 후막 (7~8 mAh/cm²) 양극 제조 기술, 얇으면서도 치밀한 멤브레인 기술을 개발함과 동시에 이를 셀로 조립, 구현할 수 있는 기술을 확보함. 에너지밀도 371 Wh/kg을 달성하고, 300 사이클까지 안정적인 수명 특성을 확보함.

⑥ Electrophoretic deposition 기반 복합구배형 3차원 구조체 전극화 기술 개발

기존 방법으로는 구현이 어려운 다층구조의 전극을 electrophoresis에 기반한 방법으로 구현, 구조체 전극의 하부층에서 우선적인 리튬 핵생성을 유도하여 안정적인 리튬 전착 및 우수한 가역성을 달성하여 균일 탄소 구조체 전극(~400 사이클)에 비해 우수한 성능 (~900 사이클)을 구현함

⑦ 고체초강산 적용 분리막을 통한 리튬이동도 향상 및 고안정성 SEI 형성 기술 개발

기존 분리막 대비 2.75 배(0.31 → 0.85) Li-ion transference number 및 1/10의 전지 저항 증

가율을 갖는 고성능/고안정성 고체초강산 적용 분리막의 리튬금속 전지 적용 평가 완료, 향상된 성능으로 100회 이후에도 리튬 증착층의 두께가 1/5의 증가, 기존 대비 150회 이상의 수명에서도 80% 이상의 용량 유지율을 달성

⑧ 장기신뢰성이 확보된 430Wh/Kg 급 차세대 리튬금속 이차전지 설계 및 요소기술개발)
박판 리튬금속음극 기반 고에너지밀도 (430Wh/Kg) 및 장기 신뢰성 (98.4%@200thcy, 다층스택셀), (>90%@300thcy, 75%@485thcy, 단층 스택셀)을 확보하였으며 이를 위하여 전해액 저항량 설계가 요구되며 이를 실현하기 위해서는 리튬보호기술, 고밀도 리튬금속 전착기술, 분리막 내 전해액 보액기술 및 전해액 내전압특성이 전지 설계에 적용 및 구현되어야 함. 본 과제에서는 해당 핵심요소기술들을 적용한 리튬금속전지 설계 기술을 최적화하고 목표 성능을 확보함.

상기의 해당 성과들이 우수한 성과로 도출될 수 있었던 성공적 요인은 먼저 각 요소기술분야 최고 전문가로 구성되었다는 점이며, 또한 빈번히 발생하는 기술적 이슈에 대해서 가능한 조기에 한시적인 TFT 운영을 통하여 해결하고자 하였음. 또한 하나의 셀 플랫폼을 구현하는데 다양한 요소기술을 동시간대에 개발케 하고 이를 셀플랫폼에 적용하여 문제점을 파악하고 다시 요소기술 담당자에 피드백할 수 있는 집단 연구의 조성은 본 사업을 성공적 인자 중 하나임. 다만, 중요한 각기 다른 분야 전문가들의 역량을 공통의 목표 달성을 이루기 위하여 한 방향의 집단 지성을 발휘케 하는 것이 가장 큰 애로사항임.

2. 주요 성과들의 활용 현황 및 파급효과

과제 참여 종료 이후 현재 연구 성과들이 어떻게 활용되고 있으며, 해당 성과들이 갖는 과학적, 기술적, 경제적 파급효과에 대해서 구체적인 사례로 설명 부탁드립니다.

(과학/기술적 파급효과 예시) 후속 연구가 진행 중이라면, △어떤 부처/기관에서 어느 수준을 목표로 연구를 수행하고 있는지, △해당 연구를 통해 해결하고자 하는 주요 문제(이슈)는 무엇인지, △동 사업을 통해 창출된 성과가 어떻게 활용되고 있는지 등

(경제적 파급효과 예시) 성과의 기술이전이 이뤄졌다면, △기술이전이 어떤 과정으로 이뤄졌고, △어느 기업에 어느 단계까지 진행이 되었으며, △기술을 이전받은 기업에서는 해당 성과를 어떻게 활용되고 있는지 등

과기정통부 한국연구재단 주관하에 단계도약형 탄소중립기술개발사업을 통하여 포스텍을 중심으로 고에너지밀도 리튬공기전지 개발을 목표로 연구를 수행 중에 있음.

해당 과제 제목은 “텍토닉 전극설계 기반 고에너지밀도($\geq 500\text{Wh/kg}$) 리튬금속-공기 전지 고도화 요소기술개발”이며 핵심 요소기술별로 하기와 같은 연구목표가 설정되어 있음.

- (음극 구조체/보호막) 고입출력 가능 리튬구조체 음극 및 대가·전기화학적 안정성 확보 기술 개발
- (전해질) 비발화·비휘발·고안정성 전해질 기술 개발
- (촉매/양극) 저가·고활성·고내구성 촉매 및 구조체 양극 기술 개발
- (전지 플랫폼) 요소기술 성능 검증 및 에너지밀도·가역성 극대화를 위한 전지플랫폼 기술 개발

→ 동사업에서 개발한 요소기술(△전해도금 활용 롤투를 연속식 리튬박 제조공정기술 개발, △저부식성 리튬 금속 전지용 전해질 개발, △슬러리 기반 다공성 탄소 구조체 기술 개발, △Electrophoretic deposition 기반 복합구배형 3차원 구조체 전극화기술 개발)이 활용

고에너지밀도($\geq 500\text{Wh/kg}$) 리튬금속-공기 전지 고도화를 위해서는 무엇보다 이에 상응하는 높은 면적당 용량비(>를 갖는 3차원 리튬음극구조체의 설계 (리튬이용율(>65%) 및 대면적(>10cm²)화)가 반드시 필요함.

아직 과제 진행 중이기는 하지만 다음과 같은 예상 성과의 활용이 예상됨.

○ 활용계획

- 대기 환경에서 구동 가능한 고효율/고에너지밀도 리튬금속—공기 전지를 위한 핵심기술로 활용
- 기존 리튬이온전지 및 리튬금속 기반 차세대 이차전지 기술에 적용 가능
- 고에너지밀도 리튬금속—공기 전지 안정성 확보 및 상용화를 위한 플랫폼 구축

○ 기대효과

- 고에너지밀도 전지 수요가 급증하고 있는 전기자동차 분야 및 대용량 에너지저장시스템에 적용 가능
- 전기자동차 상용화 촉진 및 신재생에너지 보급을 통한 기후변화 에너지 문제 해결에 기여

3. 사업의 개선사항 및 향후 방향 제언

기후변화대응기술개발사업이 일몰을 앞두고 있어, 이차전지 분야에 대한 새로운 계획 수립과 동시에 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 전략이 필요한 시점입니다.

3-1. 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성과 이차전지 분야의 기술 발전을 촉진하기 위하여 과학기술정보통신부가 취해야 할 역할과 전략은 무엇이라고 생각하십니까?

향후 이차전지 분야 후속사업에서 중점적으로 다루어야 할 연구 분야와 투자 방향(TRL 단계, 지원 대상, 지원 기간, 사업 형태 등)에 대해 말씀해주시고, 왜 그렇게 생각하시는지 설명 부탁드립니다.

이차전지 분야는 산업화가 점점 성숙단계에 이르면서 점차 저가격화/재활용/재사용 등 해당 산업이 갖추어야 할 전주기 지속성에 집중하고 있으며 전반적인 R&D 사업도 이에 연동되어 진행되고 있음. 현재는 과기정통부 R&D 사업도 산업부 사업과 마찬가지로 현세대 혹은 가까운 미래에 예상되는 차세대 소재군 사업화에 초점을 맞추어 가고 있음. 하지만 기존 소재기술에 대한 초격차를 실현하기 위해서는 무엇보다 새로운 소재군에 집중된 개발이 있지 않는 한 현실화되기 어려운 목표이기에 미래 신소재를 지속적으로 발굴하고 탐험하고 이를 실증화 단계까지 이끌어줄 정부차원의 R&D 전략이 반드시 필요함.

한 사례로서, Na-ion 전지기술에 대한 정부(산업부 주도)차원의 소규모 연구개발(소재-전극-셀 검증기술개발)이 2015년도에 시작되었지만 아쉽게도 2018년도에 종료되고 후속연구개발이 진행되지 못함. 왜냐하면 낮은 에너지밀도 때문에 이차전지 셀 업체 관점에서 당장의 사업화에도움이 되지 않는다는 의견 때문에 정부에서도 지원을 중단함. 그간 공백기(2019년~2022년) 동안 중국은 지속적인 자체기술개발로 지금은 전세계에서 최초로 Na-ion 전지 제품화에 성공함으로써 CTP(Cell to pack) 기술 외에 또 하나의 중국발 초격차를 우리에게 경험케 함. 즉 무엇보다 정부(과기정통부) 주도 사업은 현 산업체 눈높이 기준에 동조한 당장의 실익보다는 학연을 중심으로 한 미래산업관점에서의 실익을 보다 더 예측하고, 기업이 현재 개발 여력이 없어 접근할 수 없는 유망 신소재 군에 대해서는 미래기대실익이 다소 부족하더라도 꾸준히 선행 기술을 축적케 하는 체계적인 집단 R&D 전략(미래소재-반제품-셀검증, 3(TRL2~4)+3(TRL4~6)+3(TRL6~7) 년 등)이 그 어느 때보다도 절실히 필요함.

3-2. 이 외 기후변화대응기술개발사업의 효과성 분석과 향후 투자 방향 도출과 관련하여 추가적으로 고려해야 할 사항이나 기타 의견에 대해서 자유롭게 작성 부탁드립니다.

과기정통부 사업을 비롯한 정부사업은 이차전지 응용분야에 대규모의 투자를 진행하고 있지만, 주로 아이디어 위주의 소재 및 시스템 개발 등에 집중되어 원인분석 및 중요한 현상 발견 등에 등한시됨. 이와는 달리 일본등과 같은 선진국 등에서는 Root-cause 등을 알아내는 고도 분석기술개발 등과 같은 기초연구사업을 정부주도하에 추진되고 있으며, 이는 경쟁국 대비 초격차화를 이루어낼 수 있는 중요한 분야임. 다만 독립적인 개별 대학 교수 주도의 산발적으로 추진되는 지금까지의 기초연구사업보다는 특정응용분야와 연계된 신 분석방법개발-신 분석틀 개발-신 분석장비개발에 이르는 집단 연구화가 필요하다고 사료됨.

인터뷰 대상	한국전자기술연구원 유지상 차세대전지연구센터장	기술분야	이차전지
참여과제	리튬 금속 전지의 안전성 향상을 위한 자가제어형 부품소재기술과 이를 활용한 고에너지 밀도 셀 제조 기술 개발('18.7~'23.2)		
주요성과	- ENERGY & ENVIRONMENTAL SCIENCE (IF 38.532) 논문 게재('21) - 이종 리튬염을 포함하는 전해질 및 이를 포함하는 리튬 금속 전지 특허 출원('21) 등		

1. 성과의 의미

2018년부터 본 사업에 참여한 과제를 통해 이차전지 분야에 논문 게재, 특허 출원 등 다양한 성과를 이루셨습니다. 연구자님께서 생각하시는 주요 성과들을 소개해 주시고, 해당 성과들이 이차전지 분야에서 갖는 의미와 가치에 대해서 설명 부탁드립니다.

아울러 해당 성과들이 우수한 성과로 도출될 수 있었던 성공적 요인은 무엇이고, 성과를 도출하는 과정에서 겪은 애로사항에는 어떤 것들이 있었습니까?

대표적인 성과는 리튬금속전지용 분리막 분야에서 창출할 수 있었습니다. 대부분의 리튬 금속 전지 연구가 보호막 및 전해질 위주로 진행되는 반면 해당 연구에서는 부품 분야에서의 기술 개발을 통해 리튬 금속 전지의 수명을 개선하고자 시도하였습니다.

분리막 분야에서 세라믹 코팅 소재를 독자적인 고체 초강산이라는 소재를 적용하여 리튬 금속의 수지상 성장 억제 가능성을 확인하였습니다. 해당 기술은 기존 PE 분리막위에 고체초강산이라는 산화물을 코팅하여 기존 전해질 내 Li-ion의 이동도를 기존 0.4 수준에서 0.9 이상으로 개선하였으며 이를 통해 리튬의 수지상 성장을 억제할 수 있는 분리막을 개발할 수 있었습니다. 해당 기술은 기존의 연구와 달리 분리막의 코팅 물질 개량을 통해 리튬 금속 수지상 성장의 형성을 억제할 수 있는 원천 기술로 Energy & Environmental Science라는 우수 저널에 논문을 게재할 수 있었습니다. 후속 연구로 고체 초강산의 나노입자화와 scale up 기술 개발을 통해 대면적 리튬금속전지에 적용할 계획입니다.

해당과제에서 창출한 다양한 특허 및 논문들은 주로 코인셀 수준이 아닌 500~1000mAh급 풀셀 제조를 통해 창출이 되었습니다. 랩에서의 코인 셀은 실제 차세대 전지용 성능 평가를 진행하기에는 한계가 존재합니다. 실제 코인셀에서는 가압조건, 전해액량, 셀의 두께 변화 등 다양한 변수 등을 측정하고 분석하는 데 한계가 존재하므로 이를 풀셀 제조로 대응하여 성능 평가를 진행한 것이 우수한 연구성과들로 창출되는 데 기여하였다고 생각합니다. 다만 연구소에서도 차세대 전지를 수작업으로 제조하는 데 필요한 인프라가 매우 부족하고 공정조건이 확립되어 있지 않아서 이를 확립하는데 많은 시행착오가 존재하였습니다.

2. 주요 성과들의 활용 현황 및 파급효과

과제 참여 종료 이후 현재 연구 성과들이 어떻게 활용되고 있으며, 해당 성과들이 갖는 과학적, 기술적, 경제적 파급효과에 대해서 구체적인 사례로 설명 부탁드립니다.

(과학/기술적 파급효과 예시) 후속 연구가 진행 중이라면, △어떤 부처/기관에서 어느 수준을 목표로 연구를 수행하고 있는지, △해당 연구를 통해 해결하고자 하는 주요 문제(이슈)는 무엇인지, △동 사업을 통해 창출된 성과가 어떻게 활용되고 있는지 등

(경제적 파급효과 예시) 성과의 기술이전이 이뤄졌다면, △기술이전이 어떤 과정으로 이뤄졌고, △어느 기업에 어느 단계까지 진행이 되었으며, △기술을 이전받은 기업에서는 해당 성과를 어떻게 활용되고 있는지 등

현재 리튬 금속 전지 관련 연구는 산업부의 이차전지 예타사업의 한 분야로 후속 연구가 진행될 예정입니다. 산업부에서는 국내 전지 3사를 대상으로 900Wh/L급 리튬 금속 전지의 상업화를 목표로 연구 개발을 추진할 계획입니다. 리튬 금속 전지는 미국의 주요 스타트업 등에서 활발히 연구가 진행되고 있으나 국내의 경우 일부 대기업에서 해외 기업과의 제휴를 통한 기술 탐색 정도에 그치고 있습니다. 산업부의 이차전지 예타사업을 통해서 과기부의 연구 결과가 잘 활용될 수 있도록 노력할 예정입니다.

현재 리튬 금속 전지는 아직까지 높은 에너지 밀도와 장수명을 동시에 구현하는 기술은 없는 상태입니다. 현재 350~400Wh/kg급 리튬 금속 전지를 대용량화하여 20~100Ah급 전지로 제조하는 기술을 미국 스타트업에서 시도하고 있으나 수명과 안전성을 동시에 만족하고 있지는 못한 상태입니다. 과기부에서 지원한 기후변화대응사업에서는 연구실 수준에서의 500mAh급 소형 전지를 제조하여 성능 평가를 수행하였으므로 실제 대형전지로의 기술 적용에는 미진한 부분이 있을 수 밖에 없습니다.

하지만 해당 사업에서 발굴한 고체초강산 코팅 분리막 기술, 리튬 금속 전지용 전해질 기술 및 외부 압력인가 제어를 통한 리튬 수지상 성장 억제 기술은 추후 7월부터 진행될 산업부 리튬금속 전지 과제에서 활용될 것입니다. 기존의 리튬 금속 전지 연구는 리튬 수지상 성장 억제를 위한 보호막 위주의 연구였으나 해당 연구를 통해서 외부 가압 제어가 수지상 성장에 더욱 효과적인 것을 파악하였으며 전지의 기계적 물성 개선을 통한 가압 압력 증대 기술이라는 리튬 금속 전지의 수명 개선 방향을 발견할 수 있었습니다.

리튬금속 전지는 차세대 전지의 핵심 음극인 리튬을 활용하는 전지로 기존 리튬이온전지대비 1.5배 이상의 높은 에너지 밀도 구현이 가능하기 때문에 현대차, SK온 등에서 차세대 전지의 하나로 활발한 연구가 진행중입니다. 현재 국내외 기업들은 EV용 대형 전지로 제조하여 A 샘플 단계에 진입을 하는 단계에 있습니다. 현대차의 경우 미국의 solid energy system이나 팩토리얼 에너지등으로부터 A 샘플을 납품받아 평가하는 단계로 알려지고 있습니다. 하지만 아직까지 전지의 수명 개선과 안전성에 대한 충분한 신뢰성을 확보하지 못하고 있기 때문에 이를 개선하기 위한 연구가 필수적입니다.

3. 사업의 개선사항 및 향후 방향 제언

기후변화대응기술개발사업이 일몰을 앞두고 있어, 이차전지 분야에 대한 새로운 계획 수립과 동시에 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 전략이 필요한 시점입니다.

3-1. 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성과 이차전지 분야의 기술 발전을 촉진하기 위하여 과학기술정보통신부가 취해야 할 역할과 전략은 무엇이라고 생각하십니까?

향후 이차전지 분야 후속사업에서 중점적으로 다루어야 할 연구 분야와 투자 방향(TRL 단계, 지원 대상, 지원 기간, 사업 형태 등)에 대해 말씀해주시고, 왜 그렇게 생각하시는지 설명 부탁드립니다.

현재 이차전지 분야는 전기차 시장의 활성화와 더불어 중국과의 치열한 경쟁에 직면하고 있습니다. 과기부는 기후변화대응기술개발사업을 통해 차세대 전지 분야의 집단 연구 지원을 통해 전고체 전지 및 리튬금속전지 등에 대한 지원을 하였습니다.

현재 산업부에서는 이차전지 예타 사업을 통해 400Wh/kg급 차세대 전지 상업화를 위한 R&D 지원을 계획하고 있습니다. 차세대 전지의 핵심 소재는 리튬 금속 음극으로 모든 차세대 전지 (전고체전지, 리튬금속전지, 리튬-황전지)가 리튬 음극을 사용하여야 하므로 해당 기술에 대한 지원이 더욱 중요하다고 봅니다.

기존 많은 과제에서도 리튬 음극에 대한 지원이 이루어졌으나 상업화를 위한 후속 연구진행은 더욱 필요한 실정입니다. 기존 지원은 리튬 금속 소재에 대한 보호막, 전해질 위주로 실험실 코인셀 수준의 검증에 대한 지원이 많이 이루어졌습니다.

현재 리튬 금속을 사용한 전지는 사이클 진행에 따른 전지의 두께 증가 문제로 모듈 제조단계에서 강한 압력의 인가가 필수적입니다. 이를 해결하기 위한 저가압하에서의 리튬 금속 전지 구동 기술 개발이 반드시 필요합니다. 또 리튬 금속의 경우 현재 낮은 충전속도하에서의 수명 개선 연구위주로 현재 전기차용 전지로 필수적인 급속 충전 성능을 달성할 수 없다면 상업화가 요원할 것입니다. 리튬 금속은 급속 충전시 전지의 내부 단락 가능성이 매우 크므로 이를 해결하여 리튬 금속의 급속 충전 성능을 개선할 수 있는 혁신 기술의 개발이 필요합니다.

따라서 후속사업으로는 450Wh/kg급 리튬금속전지의 저가압 구동 및 급속 충전 성능 개선 기술 분야에 대한 원천 기술 탐색 지원이 제일 바람직하다고 생각합니다. 실제 코인셀이 아닌 500~1000mAh급 리튬 금속 전지에 대한 저가압 구동 및 급속 충전성능, 안전성 확보 등에 대한 연구지원이 바람직합니다. TRL은 현재 3~5단계 수준에서 약 5년 이상의 연구 기간이 필요할 것으로 생각합니다.

3-2. 이 외 기후변화대응기술개발사업의 효과성 분석과 향후 투자 방향 도출과 관련하여 추가적으로 고려해야 할 사항이나 기타 의견에 대해서 자유롭게 작성 부탁드립니다.

현재 과기정통부에서는 연구재단을 통해 다양한 이차전지 소재 원천기술 개발에 대한 연구 지원을 하고 있습니다. 주로 대학 및 연구소에서 개발된 원천 기술들은 주로 코인셀 수준에서 평가가 이루어지다 보니 대형전지에 적합한 소재 스케일업이 부족하고 대형전지에서 평가 결과와 잘 맞지 않는 경우가 많습니다.

실제 원천성 소재들은 1~5g 수준의 소재합성이 이루어지는 반면 1Ah급 소형 전지 제조에도 100~500g 수준의 소재가 필요하므로 원천성 소재들을 적용하기에는 무리가 있습니다. 따라서 후속 연구에서는 유망 기술 및 소재에 대한 전지 적용을 강화할수 있도록 소재의 스케일업 공정 개발 지원이 필요하다고 생각합니다. 대학에서 개발한 후보 소재를 연구소에서 스케일업하는 협업 과제의 발굴이 중요합니다.

두 번째로 차세대 전지 소재를 적용하기 위한 실험실 수준에서의 차세대 전지 제조 인프라 확충에 대한 지원이 필요합니다. 리튬 금속 전지도 실제 랩에서 수작업으로 제조하다보니 대학 및 연구소에서 개발한 소재를 적용한 풀셀 테스트에 많은 난관이 존재하였습니다. 따라서 주요 과기부의 투자 분야로 연구소에 1~2Ah급 차세대 전지용 제조 및 평가 인프라를 구축 지원하는 것이 필요하다고 봅니다. 수작업이 아닌 적절한 수준의 pilot 제조 설비를 갖추어야 하고 화재 위험성이 있는 리튬 금속 전지는 충분한 방폭 시설하에서 충방전 실험을 진행하는 것이 필요합니다.

인터뷰 대상	한국화학연구원 전기원 책임연구원	기술분야	차세대 탄소자원화
참여과제	차세대 탄소자원화 핵심기술 개발('17.9~'22.3)		

1. 성과의 의미

2017년부터 본 사업에 참여한 과제를 통해 차세대 탄소자원화 분야에 다양한 성과를 이루셨습니다.

연구자님께서 생각하시는 주요 성과들을 소개해 주시고, 해당 성과들이 차세대 탄소자원화 분야에서 갖는 의미와 가치에 대해서 설명 부탁드립니다.

아울러 해당 성과들이 우수한 성과로 도출될 수 있었던 성공적 요인은 무엇이고, 성과를 도출하는 과정에서 겪은 애로사항에는 어떤 것들이 있었습니까?

우수성과

1. 우수 성과명: 이산화탄소 전환 에틸렌 생성/물산화 전극 촉매 기술

(핵심 개발 내용)

- 전기화학적 이산화탄소 전환 에틸렌 생산 전해 시스템 개발
- 형상이 제어된 염기성 환경 구리 기반 촉매 및 중성 조건 비귀금속 기반 물 산화 전극 촉매 개발

(의미와 가치)

- 재생에너지 전력을 이용한 이산화탄소로부터 석유화학 기초원료인 에틸렌 생산
- 기존 Cu 촉매 대비 높은 에틸렌 생성 효율
- 가역적 물산화 전극 촉매를 통해 이산화탄소 전환 시스템에 적용 가능

(관련 실적)

- Nano Energy (2021) 84, 105859 (IF 17.881 , mrnIF95.50) 게재
- 대한민국 특허 출원 (10-2019-0069562), 미국 특허 출원 (US 16869600)
- LG화학과 기술실시계약 (정액 기술료: 11.7억)

2. 우수 성과명: 이산화탄소를 나프타로 직접 전환하는 고성능 촉매 및 공정 기술

(핵심 개발 내용)

- 이산화탄소를 수소와 낮은 온도에서도 쉽게 반응시키면서 부산물을 작게 생성하는 고성능 촉매 개발

- 5kg/일 규모의 이산화탄소로부터 액체 탄화수소 제조 공정 개발 (1,000시간 이상 운전)

(의미와 가치)

- 탄소중립을 위한 이산화탄소의 대량 저감과 기초 화학원료 생산을 동시에 구현할 수 있는 기술 확보
- 재생에너지원의 활용을 최대화할 수 있는 차세대 Power-to-Chemicals 시스템 원천 기술 확보

(관련 실적)

- ACS Catalysis (2021) 11, 2267 (IF 13.084, mrnIF91.304) 게재, 전면 표지 논문 선정
- 대한민국 특허 등록(#10-2168444), 미국 특허 출원 17/424857 (2021-07-21)
- 한화토탈, GS 건설 (기술명: 이산화탄소 수소화 촉매, 공정 및 시스템) 기술이전 (정액기술료 8억원 + 경상기술료 10% 0.2%)

3. 우수 성과명: 이산화탄소를 포름산으로 전환하는 신규 금속전자전달체 및 필름형 태양광 광촉매 개발

(핵심 개발 내용)

- 이산화탄소를 포름산으로 선택적으로 전환하는 고효율 니켈 금속전자전달체의 개발
- 신규 필름형 태양광 광촉매의 개발 - NADH 재생 실험과 포름산 제조 실험을 진행한 결과 2시간 이내에 98.57%의 NADH 재생, 334.5 μmol 의 포름산 생산을 확인

(의미와 가치)

- 태양광 에너지를 직접 이용하여 이산화탄소와 물로부터 유용한 고부가가치의 화학 제품 생산
- 2D COF 광촉매 상의 광전하 전달 메커니즘을 세계 최초로 규명하였으며, 개발된 계면 합성법을 이용하여 두께조절 및 대면적화가 가능한 광촉매 합성법을 개발

(관련 실적)

- Journal of the American Chemical Society (2020) 142, 19142 (IF 15.419, mrnIF92.09) Cover 논문 선정
- PCT 특허 출원 (KR2010/004945) / 대한민국 특허 등록(#10-2020-0048256)
- (주)키텍바이오(기술명: 단핵성전이금속 복합체 및 이를 포함하는 이산화탄소 환원용 광촉매) 기술이전(특허권 양도, 정액기술료 0.4억원+ 경상기술료 5%)

4. 우수 성과명: 음식물 쓰레기로부터 바이오가스 생산/정제/전환을 통한 액체연료를 생산하는 원천 요소기술 및 통합 공정 개발

(핵심 개발 내용)

- 고속/고순도 바이오가스 생산을 위한 전도성 구조체가 주입된 고압 혐기성 반응조개발
- 청정연료 생산을 위한 바이오가스 초청정 정제 기술
- 바이오가스로부터 액체연료 직접제조용 촉매 및 공정 개발

(의미와 가치)

- 탄소중립 자원으로부터 석유대체연료 생산하여 실질 온실가스 저감 가능 기술
- 3D 프린팅 기술로 촉매 제조 원천기술 확보로 기존 기술 대비 성능이 우수
- 국내 미활용 가스자원인 바이오가스/매립지가스 활용에 적합

(관련 실적)

- Water Research (2021) 194 (IF 11.236, mrnIF98.969) 게재
- 국내 특허 등록(#10-2021-2318776), 미국특허등록(11,198,090, 2021)
- 인투코어테크놀로지(주) (기술명: 바이오가스로부터 액체연료 선택적 제조기술) 기술 이전 (0.3억 + 경상 기술료 1%)
- (주)이에프(기술명: 고속/고순도 바이오가스생산기술) 기술 이전 (정액기술료 0.77억 + 경상기술료 5%)
- 신평산업(주) (기술명: 바이오가스로부터 정제기술) 기술 이전 (정액기술료 0.25억)

5. 우수 성과명: 부생가스 분리를 위한 분리막/흡착제 원천소재 및 분리공정 개발

(핵심 개발 내용)

- 철강 부생가스로부터 수소 분리 후 고순도 일산화탄소 및 메탄 회수를 위한 막분리 혼성 공정기술
- 일산화탄소 /질소 분리 회수를 위한 CO 선택적 촉진수송 고분자 전해질 복합막 개발
- 고효율 메탄/질소 분리용 흡착제 개발

(의미와 가치)

- 철강, 화학산업의 부생가스 및 천연가스 매립지가스 등의 탄소폐자원으로부터 고부가가치의 C1가스 (CO, CH₄)를 고순도, 고회수율로 회수하는 차세대 분리막 및 흡착제 원천기술과 막분리혼성공정개발
- 철강 부생가스에서 일산화탄소, 메탄, 이산화탄소, 수소 등의 유용한 물질을 회수하는 기술의 확보

(관련 실적)

- Chemical Engineering Journal (2022) 429, 132240 (IF 13.273, mrnIF97.89) 게재

- 대한민국 특허 등록(#10-2180607, #10-102177251)
- (주)단일가스캠 (기술명: 철강부생가스로부터 고순도 수소 분리막공정) 기술이전 (정액기술료 3억+경상기술료)

6. 우수 성과명: CCU LCA 방법론 및 LCI DB 개발

(핵심 개발 내용)

- CCU 기술에 적용가능한공통 전과정 평가방법론 개발 및 탄소자원화관련 주요 물질 및 에너지에 대한 전과정 목록 데이터베이스 개발
- 신뢰성을 확보한 탄소자원화 기술 주요 물질 및 에너지 DB 29건을 개발하여 분석의 정확도 및 Data coverage 확보

(의미와 가치)

- CCU 기술에 적용 가능한 공통 LCA 방법론 개발 및 탄소자원화 관련 주요물질, 에너지에 대한 LCI DB 구축
- CCU LCA 수행방법론최초 개발하여 의사결정 및 비교가능한결과 도출하는데 기여하고, 활용데이터범위를 확장하여 더 많은 국내 DB 확보, 연구단 개발기술의다양한 분석 결과 및 R&D 방향성 제시

(관련 실적)

- 이산화탄소 전환기술 전과정 평가수행 가이드라인 ('19, KRICT)
- 전과정목록데이터베이스 개발 (29건)

성공적 요인

1. 모래시계형 단계별 전략: 1단계에서는 다양한 시도를 통한 핵심기술에 대한 혁신적인 기술을 창출하고 게이트 리뷰를 통해 성과가 나온 과제들을 스크리닝후 2단계에서 총괄과제 재편성
2. 2-Track 전략(First-Mover형, Feasibility형): 각 하부과제를 First-Mover형, Feasibility형으로 분류하고 성과목표를 과제의 성격에 맞춰 설정하고 이를 달성하도록 과제 관리
 - First Mover 형 과제의 경우 IF>10 학술지 10편 이상 게재를 목표로 설정, 과제 종료 시점까지 CO₂전기전환, 광전환, 수소전환기술 등에서 IF>10 이상 논문 총 49편(IF>20 논문 총 12편)을 게재
 - Feasibility형 과제의 경우 실용 가능성에 초점을 맞춘 성능지표를 목표에 포함시키고 이를 달성하도록 독려하고 참여 기업의 적극적인 참여 유도
3. 도전적 목표 설정: 각 과제별 연구목표 설정은 도전성 있음을 증명할 수 있도록 참고문헌을 근거한 X-Y차트를 제시하였으며, 연구 수행 시 이를 달성하기 위한 노력을 수행

4. 자문위원회 적극적인 활용: 탄소자원화 수요기업을 대상으로 산업계 자문위원을 확충하여 (58.5%) 온실가스 감축 측면에서 의미 있는 기술을 개발하는데 필요한 조언을 구함
5. 연구 성과의 적극적인 홍보 및 수요 기업 발굴:
6. 기술의 우수성 및 연구성과 홍보: 기술이전 촉진을 위하여 유튜브, 언론보도 등 다양한 매체를 통한 홍보 추진
 - 기술 이전 상담회 등을 통하여 수요기업의 관심이 높고 온실가스 감축 효과가 높은 공정 기술을 6개로 압축하여 민간기업과 함께 후속 사업을 기획
 - 수요기업에 대한 설문 조사 (응답 200건), 기술이전 상담회(기술 상담 34건) 등 개최를 통해 12개 수요기업을 발굴

성과를 도출하는 과정에서 겪은 애로사항

1. 사업 초기 정부 및 민간의 온실가스 감축을 위한 탄소자원화 기술 중요성에 대한 인식 부족: 사업 초기에는 당초 기획된 예산 대비 축소 예산 실행
2. 온실가스 감축을 위한 탄소자원화 기술에의 경제성 평가를 사업성의 가장 큰 요소로 인식하는 경향이 팽배 (온실가스 감축 효과와 경제성은 trade-off 인 관계가 대부분임)
3. 본 사업은 원천기술 확보 성격의 과제인데, 연차 및 단계 평가시 평가 위원 들의 조급한 상용화 목표 요구
4. 기술 이전과 후속 사업 연계를 위한 민간 기업에의 참여 유도시 대기업 실무자의 결정 권한 한계 및 최종 결정자의 변심

2. 주요 성과들의 활용 현황 및 파급효과

과제 참여 종료 이후 현재 연구 성과들이 어떻게 활용되고 있으며, 해당 성과들이 갖는 과학적, 기술적, 경제적 파급효과에 대해서 구체적인 사례로 설명 부탁드립니다.

(과학/기술적 파급효과 예시) 후속 연구가 진행 중이라면, △어떤 부처/기관에서 어느 수준을 목표로 연구를 수행하고 있는지, △해당 연구를 통해 해결하고자 하는 주요 문제(이슈)는 무엇인지, △동 사업을 통해 창출된 성과가 어떻게 활용되고 있는지 등

(경제적 파급효과 예시) 성과의 기술이전이 이뤄졌다면, △기술이전이 어떤 과정으로 이뤄졌고, △어느 기업에 어느 단계까지 진행이 되었으며, △기술을 이전받은 기업에서는 해당 성과를 어떻게 활용되고 있는지 등

세계 선도 수준의 탄소자원화 원천 기술 확보

- 사업단 전체 IF≥10 학술지 80편 게재, IF≥20 학술지 15편 게재 완료

- 게재 완료한 논문은 총 245편이며 질적 성과 (IF 9.996, mrnIF지수 85.09)가 매우 우수
- Energy & Environmental Science Recent HOT Articles 선정, Advanced Materials 등 국제학술지의 표지논문으로 총 16건의 논문 게재
- 지식재산권: 특허 출원 171건(해외 41건), 등록 59건(해외 3건)

후속 연구 진행

- 온실가스 저감 실증 후보기술 6건 도출하고 수요기업을 발굴하여 2022년 신규사업인 과기정통부 “탄소자원화 플랫폼 화합물 제조기술개발”에 연계

(과제1) 부생가스 내 고순도 일산화탄소 회수 (단일가스캠, 네오디엠)

(과제2) 부생가스와 이산화탄소 전환 합성가스 및 올레핀생산 (대주)

(과제3) CO₂전기 전환에 의한 에틸렌 생산 (LG화학)

(과제4) CO₂수소화를 통한 Power-to-Liquid 기술 (한화토탈, GS건설)

(과제5) 유기성폐자원 및 이산화탄소 동시 활용 폴리머플랫폼생산 (강남화성, 에코프로HN)

(과제6) 유기성 폐기물 원료기반 바이오납사/윤활기유 생산 (인투코어, 피그랜드, 대전도시공사)

- 상기 6개의 과제 모두 파일럿 플랜트 수준의 실증 단계 연구 개발 진행 중

성과의 기술 이전

- 9건의 기술이전을 완료 (총 정액 24.57억원 + 경상)

순번	기 술 명	연구책임자 (기관)	기 업 명	기 술 료	계약일자
1	마이크로파를 이용한 다공성 MOF 입자 합성 노하우 기술이전	김진수 (경희대)	S&T	0.15억원	2018. 7. 31
2	청정연료 생산을 위한 바이오가스 정제 시스템 및 방법 기술	백일현 (에너지기술연)	(주)신평산업	정액기술료 0.25억원	2019. 10. 23
3	바이오가스로부터 액체연료 직접 제조를 위한 화학 전환 공정	관근재 (화학연)	인투코어테크놀로지(주)	정액기술료 0.3억원+ 경상기술료 1%	2020. 10. 20
4	철강부생가스로부터 고순도 수소 분리막공정	김정훈 (화학연)	단일가스캠(주)	정액기술료 3억원 + 경상기술료 (재실시 50%)	2021. 12. 22
5	단핵성전이금속 복합체 및 이를 포함하는 이산화탄소 환원용광촉매	김진홍 (이화여대)	(주) 키텍바이오	정액기술료 0.4억원+ 경상기술료 5%	2021. 12. 27
6	전기화학적 CO ₂ 의 에틸렌 전환기술	오형석 (KIST)	LG화학	정액기술료 11.7억원	2022. 4. 26
7	고속/고순도 바이오가스 생산 기술	강석태 (KAIST)	(주)이에프	정액기술료 0.77억 + 경상기술료 3%	2022. 4. 27
8	CO ₂ 수소화를통한 합성납사생산	전기원 (화학연)	GS 건설	정액기술료 4억원+ 경상기술료 10%	2022. 5. 31
9			한화토탈	정액기술료 4억원+ 경상기술료 0.2%	2022. 5. 31

- 기술 이전 받은 기술을 바탕으로 후속의 실증 단계 연구 개발 진행 중
- 기술 이전 과정: 1) 탄소중립 관련 탄소자원화원천기술의 상용화를 위한 기술 추진을 희망하는 기업을 대상으로, 사업에 대한 홍보 및 관심 기업체 발굴을 위한 수요 조사 시행, 2) 사업단 기획 기사 등 각종 매체를 통한 기술 성과 홍보, 3) 기술 사업화 유망기술에 대한 기술이전 및 상용화를 위한 기술 상담회 진행, 4) 기술 이전 이후 상업화를 위한 후속 사업의 기획에 수요기업의 의견 적극 반영

3. 사업의 개선사항 및 향후 방향 제언

기후변화대응기술개발사업이 일몰을 앞두고 있어, 차세대 탄소자원화 분야에 대한 새로운 계획 수립과 동시에 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 전략이 필요한 시점입니다.

3-1. 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성과 탄소자원화 분야의 기술 발전을 촉진하기 위하여 과학기술정보통신부가 취해야 할 역할과 전략은 무엇이라고 생각하십니까?

향후 탄소자원화 분야 후속사업에서 중점적으로 다루어야 할 연구 분야와 투자 방향(TRL 단계, 지원 대상, 지원 기간, 사업 형태 등)에 대해 말씀해주시고, 왜 그렇게 생각하시는지 설명 부탁드립니다.

실증단계 연구 개발 집중 투자

- 기존에 정부 부처의 여러가지 사업들을 통해서 확보된 탄소자원화 원천기술 등의 실증 단계 연구 개발필요 (TRL 5 ~ 7 단계 연구 개발 수행 필요)
- 관심 기업의 기술 수요 조사를 통해서 다양한 탄소자원화 기술 수요 파악 및 대형 융합 사업 기획
- High Risk – High Return 과제에의 대폭적인 정부 예산 지원
- 탄소 자원화 발굴과 수행시 반드시 LCA 등의 평가를 통해서 온실가스 저감 효과 파악 필요
- 탄소자원화 제품의 기존 화석연료 자원 기반 제품 대비 경제성 열위 인정 (탄소중립을 위해서는 석유 등의 화석연료 사용을 배제한 상태에서 경제성 비교 필요)
- CCU 등 탄소자원화에서 기존의 시장을 대체할 수 있는 대체 연료 및 대체 원료의 확보 기술에의 과감한 연구 개발 지원 필요 (2030 NDC에서의 CCU에 의한 탄소 감축 목표 달성을 위해서는 탄소자원화 제품의 시장이 큰 범용 제품의 개발이 필요함. 예) 탄소 중립 납사, 탄소 중립 연료 등)
- 탄소자원화 기술의 활용을 위해서는 그린 수소의 수요가 크므로 관련 기술을 융복합한 대형 사업의 필요 (별렬형 대형 과제는 지양, 기술 연계형 직렬형 과제 지향,

Gate-to-Gate 기술 검토 필요)

- 기존 수행 과제들의 성과 분석을 철저히 하여 후속 활용 가능성이 낮은 과제는 신규 과제의 중복성 검토시 배제

3-2. 이 외 기후변화대응기술개발사업의 효과성 분석과 향후 투자 방향 도출과 관련하여 추가적으로 고려해야 할 사항이나 기타 의견에 대해서 자유롭게 작성 부탁드립니다.

- 기후 변화 대응기술에서 재생에너지 기술과 CCU 기술은 서로 밀접하게 연관하여 활용 가능하므로이를 고려한 연결성 과제 수행이 필요 (예: e-fuel과 e-chemical)
- 기후 변화 대응기술의 효과성 분석시 전과정 평가 등을 통한 탄소발자국에 의한 배출량 및 감축량을 산출하고 기술 경제성 분석시 단위 탄소 감축량에 대한 비용을 산출하여 기술을 평가하는 것이 필요
- 기업체 들이 가장 시장의 니즈를 잘 파악하고 있으므로 과제 도출시 수요 기업체에의 설문 조사 및 기술 수요조사 등을 통해 기술을 도출하여 기획하는 것이 필요함

iris

인터뷰 대상	한국과학기술원 이상엽 교수님	기술분야	C1리파이너리
참여과제	• 바이오파이너리를 위한 미생물 시스템대사공학 원천기술 개발('12.5~'21.4) • 시스템대사공학 기반 개미산으로부터 숙신산 및 말릭산 생산 미생물 공정 개발('21.1~'24.6)		
주요성과	• 세계 최고 권위지 중 하나인 Nature Microbiology (IF: 28.3)에 게재, 해당 호 Hero 논문으로 선정('20) • 개미산과 이산화탄소만으로 잘 증식하는 대장균 개발 (2021년 우수성과 100선 선정) • 기술이전(열안정성이 높은 효소 개발 등 관련 기술이전 ('21, 5.8억원, ㈜프로애펙)) 등		

1. 성과의 의미

2012년부터 10년이 넘는 기간 동안 본 사업에 참여하시어 C1리파이너리 분야에 다양한 성과를 이루셨습니다.

연구자님께서 생각하시는 주요 성과들을 소개해 주시고, 해당 성과들이 C1리파이너리 분야에서 갖는 의미와 가치에 대해서 설명 부탁드립니다.

아울러 해당 성과들이 우수한 성과로 도출될 수 있었던 성공적 요인은 무엇이고, 성과를 도출하는 과정에서 겪은 애로사항에는 어떤 것들이 있었습니까?

저희 연구진은 지난 2012년부터 C1리파이너리 분야 사업에 참여하면서 메탄, 이산화탄소와 같은 C1 가스로부터 쉽게 전환가능하며, 미생물에서의 이용 가능성이 높은 개미산을 이용한 연구를 수행하고 있습니다. 이 연구를 통해 기존에 자연계에 존재하는 미생물의 개미산 및 이산화탄소 동화 대사회로보다 우수한 동화효율을 보이는 대사회로를 구축하는 데 성공하였습니다. 나아가 구축한 동화 대사회로를 대장균 균주에 도입하여 개미산과 이산화탄소로부터 유용 화합물을 생산하는 플랫폼 균주를 개발한 바 있습니다. 본 연구진이 개발한 개미산과 이산화탄소만을 이용하여 성장 및 유용 화합물 생산이 가능한 균주는 C1 가스를 감축하여 환경 문제를 해결하는 것뿐만 아니라 향후 지속가능성을 갖춘 화합물 생산 산업의 기반으로서, 근미래에 기존 화합물 생산 공정에서의 원료 수급 문제를 해결하는 대체 산업으로서 전망이 밝습니다. 특히 산업 부생 가스 전환 기술과의 연계를 통해 이산화탄소 및 개미산의 생물학적 전환 시스템을 효율적으로 구축할 수 있을 것이며, 이는 석유 의존도를 낮추고 원료 및 에너지 사용에 발생하는 비용을 낮춰 경제적으로 유의미한 성과를 창출할 것입니다. 또한, 정부의 그린뉴딜 정책 발표와 더불어 국내 우수 기업들이 친환경 바이오 기술 확보에 힘쓰고 있어 본 연구진의 이산화탄소 및 개미산 전환 기술은 다양한 정책 및 기업과 맞물려 녹색 성장을 이뤄낼 것이라 기대됩니다. 이러한 의미를 인정받아 세계 최고 권위지 중 하나인 Nature Microbiology에 게재되기도 하였으며, 국내에서도 2021년 당해

연도 우수성과 100선에 선정되는 등 다양한 방면에서 그 의미를 인정받았습니다.

미생물 기반의 C1리파이너리 연구는 기존의 포도당과 같은 바이오매스 기반의 리파이너리와 대비하여 많은 어려움이 있었습니다. C1 물질들은 바이오매스 기반의 탄소원과 대비하여 에너지 효율이 낮아, 상대적으로 복잡한 대사 반응을 필요로 합니다. 따라서, 저희 연구진은 이러한 어려움을 극복하기 위해 인실리코 모델링을 통한 대사 흐름 예측, 여러 대사공학 전략 등 첨단 바이오 기술들을 도입하여 극복할 수 있었습니다.

이 외에도 본 사업에 참여하면서 저희 연구실에서 창출한 무수히 많은 정량적, 정성적 성과 그 자체로도 의미가 크지만, 본 사업을 통해 개발된 여러 핵심 기술들이 향후 산업화에 적극 활용될 것으로 기대되며, 저희 연구진 또한 핵심 기술을 소프트웨어 등의 다양한 형태로 공개하는 동시에, 경제적 가치가 큰 결과에 대해서는 지적재산권을 확보하여 향후 기업에 기술 이전하는 전략을 취하여 실제 제품으로 생산하는 산업화 단계까지 이어가고자 합니다.

2. 주요 성과들의 활용 현황 및 파급효과

참여 중이신 과제의 최종 성과(목표)는 무엇이며, 이를 달성하는데 주요 성과들이 어떻게 기여하고 있습니까?

그 외 연구 성과들이 현재 어떻게 활용되고 있으며, 해당 성과들이 갖는 과학적, 기술적, 경제적 파급효과에 대해서 구체적인 사례로 설명 부탁드립니다.

(과학/기술적 파급효과 예시) 현재 참여 중인 과제 외에 다른 (후속)연구가 진행 중이라면, △어떤 부처/기관에서 어느 수준을 목표로 연구를 수행하고 있는지, △해당 연구를 통해 해결하고자 하는 주요 문제(이슈)는 무엇인지, △동 사업을 통해 창출된 성과가 어떻게 활용되고 있는지 등

(경제적 파급효과 예시) 성과의 기술이전이 이뤄졌다면, △기술이전이 어떤 과정으로 이뤄졌고, △어느 기업에 어느 단계까지 진행이 되었으며, △기술을 이전받은 기업에서는 해당 성과를 어떻게 활용되고 있는지 등

C1 바이オリ파이너리 구축을 통해 본 연구진은 최종적으로 **이산화탄소를 탄소원으로 석유를 대체하여 다양한 화합물이 생산가능한 바이オリ파이너리를 보편화시킬 수 있는 기술**을 개발하고자 합니다. 본 연구진이 개발한 기술은 온실가스인 이산화탄소 저감에 기여할 뿐만 아니라 개미산, 이산화탄소, 일산화탄소 등 C1 탄소 화합물로부터 각종 화학물질을 생산하는 C1 리파이너리 시스템 구축에 필요한 핵심 원천 기술입니다. 따라서, 상기 연구 성과들을 기반으로 후속 연구를 통해, 개미산과 이산화탄소를

이용한 바이오플라스틱 및 단량체 생산 기술을 현재 개발하고 있습니다. 특히, 상기 구축한 개미산과 이산화탄소만으로 성장 가능한 미생물을 기반으로 개미산 및 이산화탄소 동화 효율이 더욱 향상된 균주를 개발하고 있습니다. 또한, 바이오플라스틱 및 단량체 생산 회로를 도입하여 미생물에서 C1 물질로부터 다양한 유용 화합물을 생산할 수 있도록 진행하고자 합니다.

본 연구진은 C1리파이너리 분야에서 세계를 선도하는 연구 그룹이기에 향후 진화공학을 포함한 차세대 시스템 대사공학 등의 다양한 방법을 적용하여 지금보다 향상된 동화회로 효율, 더 빠른 세포 성장률, 더 높은 최고 세포 성장을 달성할 수 있도록 수행하고 있습니다. 이와 더불어 본 연구진이 확립한 유용 화합물 생산 기술을 상기 균주에 추가 적용하여 향후 더 다양한 유용 화합물들을 산업화가 가능한 수준으로 생산할 것이며 산업 부생 가스를 개미산으로 전환하는 기술과 연계한 통합적 시스템을 구축하여 지속가능 산업의 기반을 마련할 것으로 기대됩니다.

3. 사업의 개선사항 및 향후 방향 제언

기후변화대응기술개발사업이 일몰을 앞두고 있어, C1리파이너리 분야에 대한 새로운 계획 수립과 동시에 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 전략이 필요한 시점입니다.

3-1. 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성과 C1리파이너리 분야의 기술 발전을 촉진하기 위하여 과학기술정보통신부가 취해야 할 역할과 전략은 무엇이라고 생각하십니까?

향후 C1리파이너리 분야 후속사업에서 중점적으로 다루어야 할 연구 분야와 투자 방향(TRL 단계, 지원 대상, 지원 기간, 사업 형태 등)에 대해 말씀해주시고, 왜 그렇게 생각하시는지 설명 부탁드립니다.

C1 가스 리파이너리 사업단은 C1 바이오촉매, C1 화학 촉매, C1 리파이너리 총 3개의 총괄 연구그룹으로 구성되어, 세계 최고 수준의 C1 가스 기반 기초 화학 소재, 제품 및 수송 연료 생산기술을 개발하였습니다. 특히 기후변화대응개발사업을 통하여 본 연구진은 기존의 C1 이용기술과 차별화되는 **저온 저압 C1 직접 전환 가스**를 이용하여 리파이너리 기술을 구현하였기에 해당 기술의 응용연구가 진행된다면 대한민국이 **2030 NDC, 2050 탄소 중립 목표 달성**하는데 크게 이바지할 것이라고 믿습니다.

따라서 과학기술정보통신부는 기후변화대응기술개발사업에서 개발된 기술을 고도화하기 위해 단기적 성과 중심의 연구지원보다는 **중장기적 관점의 C1리파이너리 분야**

후속사업 지원 계획을 전략적으로 수립해야 합니다. 기존 석유기반 화학제품을 백퍼센트 대체할 수 있는 고효율의 C1 전환 플랫폼이 개발될 수 있도록 지원을 아끼지 말아야 합니다. 특히, C1 가스 리파이너리 사업단을 통해 개발된 각 분야의 융복합 기술들이 실증단계에서 검증될 수 있도록 국가차원에서 기반시스템을 마련하여야 합니다.

C1 리파이너리 기술은 전통적인 화석연료 기반 화학 공정과 달리 저온,저압 조건에서 C1 가스가 전환되는 한계를 돌파하여야 하기에 정밀하고 고도화된 기술을 요구합니다. C1 화학물질이 가진 낮은 에너지 효율과 복잡한 생물 혹은 화학적 전환 반응의 효율을 극대화시켜, 전통적 화석연료 기반의 제품들과의 경쟁력을 가질 수 있도록 높은 기술 성숙도를 달성해야 하기 때문입니다. 따라서 **향후 C1 리파이너리 분야 후속사업에서는 다양한 C1 물질을 경제적이면서 지속가능하게 확보하기 위한 안정적인 공급망 구축에 집중하여야 합니다.** **탄소 포집 및 활용 기술(CCUS)과 촉매, 공정 에너지 회수연구 분야 집중 개발을 통해** C1리파이너리의 경제성을 증대시키고 에너지 효율 개선할 수 있는 국가적 장치를 마련해야 할 것입니다. 더불어, **저온 및 저압 조건에서 고부가가치 화합물 생산에 큰 이점을 가지고 있는 미생물 기반 C1-바이오리파이너리 융합연구가 더욱 확장될 수 있도록 지원의 비중을 증대시켜야 합니다.**

또한, C1리파이너리 연구가 단순히 하나의 연구소, 사업단 수준이 아니라, 국제 수준에서의 기술 협력을 통해서 국내외 최신 기술의 융복합을 통해 기술의 초고도화를 촉진할 수 있도록 국가시스템적 기반이 마련되어야 합니다. TRL 1-6 단계의 기초연구의 지속적인 개발뿐 아니라 기술개발의 실증 모델 검증과 시연까지 가능하도록, 광범위한 구간에서의 전폭적인 지원을 통해 국가 산업에 C1리파이너리 기술을 고착 및 보편화 시켜야 할 것입니다.

3-2. 이 외 기후변화대응기술개발사업의 효과성 분석과 향후 투자 방향 도출과 관련하여 추가적으로 고려해야 할 사항이나 기타 의견에 대해서 자유롭게 작성 부탁드립니다.

2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성을 위해선 바이오 파운드리 구축과 이를 활용한 바이오 데이터 기반의 첨단 디지털 바이오 기술개발이 필수적입니다. 바이오 파운드리 는 합성생물학 전 과정을 표준화, 고속화, 자동화하여 생물 실험 및 제조 공정을 지원하는 핵심 인프라로서, 인공지능을 포함한 디지털 바이오 기술과 결합하여 바이오제조 공정 개발 효율성을 극대화 할 수 있습니다. 이에 따라 향후 기술개발 사업 및 투자 방향은 C1리파이너리와 바이오리파이너리의 융합이 극대화될 수 있도록, 합성생물학 및 디지털 바이오 분야의 기술 개발에도 집중하고, 관련 기술 개발 및 인프라 구축이 안정적으로 진행될 수 있도록 국가적 지원이 마련되어야 합니다.

인터뷰 대상	울산과학기술원 김용환 교수	기술분야	C1리파이너리
참여과제	Non-acetogen 기반 CO 가스 이용 바이오폴리머 생산용 바이오촉매 및 원천기술 개발('15.9~'24.2)		
주요성과	- CO hydratase 이용 산업폐가스로부터 고농도 개미산 및 생분해성 플라스틱 생산기술 개발 (2022년 기후변화대응 대표기술 10선 선정) - CO hydratase 개념 관련 기술이전((주)씨원바이오 선급기술료 1.4 억원) 등		

1. 성과의 의미

2015년부터 본 사업에 참여하시어 C1리파이너리 분야에 다양한 성과를 이루셨습니다. 연구자님께서 생각하시는 주요 성과들을 소개해 주시고, 해당 성과들이 C1리파이너리 분야에서 갖는 의미와 가치에 대해서 설명 부탁드립니다.

아울러 해당 성과들이 우수한 성과로 도출될 수 있었던 성공적 요인은 무엇이고, 성과를 도출하는 과정에서 겪은 애로사항에는 어떤 것들이 있었습니까?

성과 1번: 산소에 안정한 효소 개발

- C1 가스 전환에 사용되는 효소의 상당수는 FeS cluster를 가지고 있어서 매우 산소에 취약함. 미량의 산소를 접하는 경우에도 효소의 활성이 쉽게 잃어버림.
- 본 연구에서는 산소에 쉽게 구조가 파괴되어 버리는 FeS cluster를 보호하기 위하여 효소의 이 부분으로 들어가는 터널 구조를 파악하였음.
- 특정 터널 구조를 파악하고 터널의 내경을 줄였을 때 산소의 입출입을 막아 결과적으로 산소가 FeS cluster를 파괴하는 것을 저지할 수 있었음.
- 이러한 성과는 특허 출원/등록 및 세계적인 논문인 Nature Catalysis 표지 논문 (2022년) 및 Nature 본지 Research Highlight (2022년)에 소개되었음.
- 이러한 효소를 이용하여 향후 C1 가스를 안정하게 전환할 수 있게 되었음.

성과 2번: 효소와 전자전달체 상호작용 부분 파악

- 앞에서 개발한 효소는 C1 가스를 산화하여 생성된 전자를 전자전달체에 전달해야 연속해서 활성을 가질 수 있음. 자연계에서는 ferredoxin과 같은 단백질이 이용되고 있으나 효소 반응을 위해서는 현재 viologen과 같은 인공 전자 전달화합물이 이용되고 있음. 그러나 효소의 어느 부분에 이러한 전자전달체가 결합되어 전자를 받아 가는지에 대한 정보가 전혀 알려지지 않은 상태임.
- 또한 전자전달체와 효소의 결합 친화도가 낮아 상대적으로 고농도의 전자전달체를 사용해야 하는 문제점 역시 존재하였음.
- 전자전달체와 효소의 친화도를 높이기 위해서는 먼저 전자전달체가 효소에 결합되는 지점을 알아내야하는 과제가 있었음.
- 본 연구에서는 몇가지 가정을 바탕으로 효소 표면의 특정 지점, 특히 방향족

아미노산 잔기를 통하여 전자전달체로 전자가 이동되는 것을 확인할 수 있었음.

- 또한 이 부분을 중심으로 전자전달체와 효소와의 친화도를 높이기 위하여 표면잔기를 돌연변이시켰음. 이러한 결과로 전자전달체와의 친화도가 10 배 정도 크게 향상되어 결과적으로 전자전달체 사용량을 크게 감소 시킬 수 있었음.
- 더 나아가 이 돌연변이 효소와 전자전달체를 결합한 효소 단백질 3차원 입체구조를 최초로 성공하였음. 이를 바탕으로 전자전달체가 효소 특정 부분에 어떻게 결합되어 전자를 전달할 수 있는 지를 과학적으로 증명하였음.
- 이 결과는 특허출원 및 등록과 더불어 세계적인 학술지인 Nature Communications (2024년)에 최근 출간되었음.

성과 3번: CO 수화반응 제시

- 위에서 개발한 효소를 이용하여 일산화탄소와 물분자로부터 간단하게 개미산을 합성하는 신합성 경로를 제시하였음. 이 반응은 열역학적으로 자발적으로 가능하여 어떠한 외부에너지 투입이 필요없는 반응임.
- 이 효소 반응을 실험실에서 입증하였고 더 나아가 실제 산업가스 특히 제철산업 부생가스를 대상으로 가스의 전처리없이 진행하였으며, 효소에 의하여 원하는 개미산이 생산될 수 있음을 확인하였음.
- 이를 바탕으로 10 L 이후 100 L 반응기를 제작 현대제철, 포스코에 설치 운전하였으며 원하는 성능목표를 달성하였음.
- 이러한 성과는 특허출원/등록 및 기술이전 및 세계적인 학술지인 Nature Chemical Engineering (2024년)에 출간되었음.

<성공요인>

- 모험적인 연구에 사업단에서 전략적으로 자원배분 및 연구기회를 제공함.
- 연구가 계획대로 진행되지 않은 상황에서도 신뢰를 가지고 지속적인 지원을 제공함
- 실험실에서의 연구성과가 나왔을 때 이에 대하여 사업단에서 전폭적인 지원을 제공함.

특히 기초연구와 이를 스케일업하는 엔지니어링 연구사이의 간극을 사업단에서 채워줌. 이를 통하여 실제 현장 적용 연구가 가능하였음.

- 연구그룹 사이의 인간적인 신뢰를 바탕으로 정보 공유가 원활하게 이루어짐.
- 지속저인 연구 성과 공유를 통하여 연구 진행의 방향을 공유하고 이루어진 성과에 대하여 지속적인 격려가 이루어짐.

2. 주요 성과들의 활용 현황 및 파급효과

과제 참여 종료 이후 현재 연구 성과들이 어떻게 활용되고 있으며, 해당 성과들이 갖는 과학적, 기술적, 경제적 파급효과에 대해서 구체적인 사례로 설명 부탁드립니다.

(과학/기술적 파급효과 예시) 후속 연구가 진행 중이라면, △어떤 부처/기관에서 어느 수준을 목표로 연구를 수행하고 있는지, △해당 연구를 통해 해결하고자 하는 주요 문제(이슈)는 무엇인지, △동 사업을 통해 창출된 성과가 어떻게 활용되고 있는지 등

(경제적 파급효과 예시) 성과의 기술이전이 이뤄졌다면, △기술이전이 어떤 과정으로 이뤄졌고, △어느 기업에 어느 단계까지 진행이 되었으며, △기술을 이전받은 기업에서는 해당 성과를 어떻게 활용되고 있는지 등

<과학/기술적 파급 효과>

- 폐플라스틱 등 유해물질을 가스화하는 공정에서도 제철부생가스와 같은 가스가 발생함. 본 연구에서는 이를 효소를 이용하여 개미산으로 처리할 수 있을 것으로 생각함. C1 가스 과제에서 개발된 효소를 더 개발하여 이를 플라스틱 가스전환에 적용하여 개미산이 생산될 수 있음을 확인하였음. 이는 향후 폐플라스틱, 미세플라스틱 문제 해결에 기술적 기반을 제공할 수 있는 혁신적인 연구가 판단됨.
- 현재 이 연구결과를 바탕으로 ERC 선도연구센터 사업을 통하여 플라스틱 문제 해결 및 생산된 개미산을 이용하여 생분해성 플라스틱으로 탄소를 순환시키는 연구를 진행 중에 있음.

<경제 파급 효과>

- 개념 특허를 바탕으로 씨원캠 스타트업 기업을 설립 및 기술이전을 실시하였음.
- 씨원캠을 중심으로 현대제철, 대상 등이 전략협의체를 구성하여 제철산업 부생가스를 이용하여 개미산 및 이를 이용한 고부가가치 화합물 생산하는 연계 체계를 구축하고 운영하고 있음.
- 향후 철강산업의 탈탄소화에 맞추어 실제 제철산업 현장에 본 공정을 설치 운영할 경우 막대한 부가가치 창출이 기대됨.

3. 사업의 개선사항 및 향후 방향 제언

기후변화대응기술개발사업이 일몰을 앞두고 있어, C1리파이너리 분야에 대한 새로운 계획 수립과 동시에 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 전략이 필요한 시점입니다.

3-1. 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성과 C1리파이너리 분야의 기술 발전을 촉진하기 위하여 과학기술정보통신부가 취해야 할 역할과 전략은 무엇이라고 생각하십니까?

향후 C1리파이너리 분야 후속사업에서 중점적으로 다루어야 할 연구 분야와 투자 방향(TRL 단계, 지원 대상, 지원 기간, 사업 형태 등)에 대해 말씀해주시고, 왜 그렇게 생각하시는지 설명 부탁드립니다.

- 제철산업은 우리나라 및 전세계 산업 중에서 가장 온실가스 배출이 큰 산업임.
- 본 기술은 배출가스에 포함된 다종의 유해물질을 전처리하지 않고 직접 전환할 수 있는 세계 유일의 기술이라 자부할 수 있음.
- 또한 외부의 특별한 에너지 투입 없이 개미산을 상온상압하에서도 생산할 수 있어 경제성이 타의 추정을 불허할 정도로 압도적인 우위를 가지는 기술임.
- 특히 본 기술은 Nature에 출간될 정도의 혁신성을 인정 받은 기술임.
- 따라서 본 기술을 파격적으로 지원한다면 국내 제철산업의 탈탄소화, 탄소중립화에 크게 기여할 것으로 확신함.
- 후속산업에서는 여전히 기초연구 (효소 개량, 대량 생산 등)과 함께 이를 스케일업하여 공정화하는 연구를 병행하는 것이 필요함.
- 5년 단위의 성과창출에 대한 검토를 통하여 집중지원하는 것이 필요함.
- 특히 제철산업 현장에 설치 운영되는 공정의 경우 대규모 연구비가 투입되어야 하므로 이에 대한 파격적인 지원이 필요함. 이후 실제 산업화규모로 확장하는데 필요한 정부 자원 지원책 역시 강구되어야 함.

3-2. 이 외 기후변화대응기술개발사업의 효과성 분석과 향후 투자 방향 도출과 관련하여 추가적으로 고려해야 할 사항이나 기타 의견에 대해서 자유롭게 작성 부탁드립니다.

- 해외에서 전례를 찾아볼 수 없는 혁신적인 연구에 대한 집중 투자가 필요함.
- 본 기술은 이에 부합하다고 자부함.

인터뷰 대상	한국에너지기술연구원 이범준 박사	기술분야	에너지효율향상
참여과제	친환경 공기 냉매 적용 초고속 터보 냉방 시스템('21.5~'24.2)		
주요성과	• 국내 최초 공기 냉매로만 구동하는 초고속 터보 냉방 시스템 설계 및 구현 • 에어 포일 베어링(특허 출원, 10-2022-0023458, 2022.2.23.) 등		

1. 성과의 의미

2021년부터 본 사업에 참여한 과제를 통해 에너지효율향상 분야에 '초고속 터보 냉방 시스템 설계 및 구현' 등 성과를 이루셨습니다. 연구자님께서 생각하시는 주요 성과들을 소개해 주시고, 해당 성과들이 에너지효율향상 분야에서 갖는 의미와 가치에 대해서 설명 부탁드립니다.

아울러 해당 성과들이 우수한 성과로 도출될 수 있었던 성공적 요인은 무엇이고, 성과를 도출하는 과정에서 겪은 애로사항에는 어떤 것들이 있었습니까?

본 과제에서는 기후 변화에 대응하기 위하여 대표적인 지구온난화 물질인 프레온 가스를 기반으로 한 냉방 기기의 냉매를 근본적으로 사용하지 않는 냉방 및 냉동 시스템을 개발하는 것입니다.

이를 구현하기 위하여 냉매 대신 공기를 작동유체로 이용하며 실내 공기 직접 냉각하는 제로-GWP (제로 지구온난화 지수) 냉매 기반의 고성능 냉방 시스템 개발을 목표로 하여 초고속 터보 Componder 시스템 개발 및 열교환기 연계 냉방 시스템을 개발 완료하였습니다.

본 과제 기간 동안 초고속 터보 기술과 고속 회전체 제어 기술을 통합한 공기 냉매 냉방 시스템 최적 설계 및 운전 기술 개발 결과를 통하여 공기 냉매 활용 냉방 용량 10 kW 이상, 성능계수 0.65 이상의 최종 냉방 시스템을 제작 및 평가를 완료하였습니다.

성과를 도출하기 위한 성공적 요인은 기후 변화 대응을 위한 전세계적인 관심 및 투자의 증가에 있다고 생각합니다. 실제로 과제를 진행하면서 다수의 첨단 반도체 장비 업체에서 공기 냉매를 통한 냉방/냉동 시스템의 개발을 상위 수요 업체들로부터 요청 받고 있으며, 향후 지구 온난화 지수가 높은 냉매의 사용이 금지될 것이므로, 공기 냉매 시스템을 강력한 대체 기술로 평가하고 있으며, 빠른 시일 내 사업화를 위하여 기술 이전 등의 협력을 연구원에 요청하고 있습니다.

이러한 강력한 산업계의 요청이 과제가 진행되는 과정에서 강한 동기가 되었습니다. 이러한 산업계의 요청 및 기후변화 대응 기술 개발이라는 사명감이 우수한 과제 성과를 도출할 수 있었던 요인입니다.

2. 주요 성과들의 활용 현황 및 파급효과

과제 참여 종료 이후 현재 연구 성과들이 어떻게 활용되고 있으며, 해당 성과들이 갖는 과학적, 기술적, 경제적 파급효과에 대해서 구체적인 사례로 설명 부탁드립니다.

(과학/기술적 파급효과 예시) 후속 연구가 진행 중이라면, △어떤 부처/기관에서 어느 수준을 목표로 연구를 수행하고 있는지, △해당 연구를 통해 해결하고자 하는 주요 문제(이슈)는 무엇인지, △동 사업을 통해 창출된 성과가 어떻게 활용되고 있는지 등

(경제적 파급효과 예시) 성과의 기술이전이 이뤄졌다면, △기술이전이 어떤 과정으로 이뤄졌고, △어느 기업에 어느 단계까지 진행이 되었으며, △기술을 이전받은 기업에서는 해당 성과를 어떻게 활용되고 있는지 등

후속 과제로는 ‘ -100°C 5 kW 급 냉열을 반도체 공정에 공급’ 하는 과제가 산업부 한국에너지기술평가원 주관으로 약 4년간 180억 정부 출연금 규모로 현재 과제 선정평가가 진행되고 있습니다. 초저온의 냉열 공급 기술은 초정밀 반도체 에칭 공정에 필수적인 기술입니다.

본 과제에서 개발된 공기 냉매 활용 냉방시스템 (본 연구 사업 결과물: 초고속 컴팬더 시스템 + 엔드 쿨러 + 통합 제어시스템) 을 기반으로하여 컴팬더 설계 변경 및 복열기 등의 열교환기를 추가하여 저온 온도영역을 -100°C 까지 확보하는 기술을 개발하고자 합니다.

-100°C 냉열 생산 기술은 저온을 요구하는 초저온 반도체 식각 공정, 바이오 의약품 생산 및 유통 저장, 저온 신선 식품 유통, 수소 충전소 저온 칠러 등의 고부가가치 영역에서 활용될 수 있습니다.

현재 삼성전자 반도체 Fab 에 칠러를 공급하는 에프에스티 회사와 기술 이전 협약이 이루어진 상황이며 2024년 상반기에 기술 이전이 완료될 예정입니다. 본 기술을 기반으로 저온의 다양한 칠러 제품 라인업 구성에 활용할 예정입니다. (기술 이전은 저온 냉열 생산 관련 기술 교류 등을 통해 업체에서 연구 내용을 파악한 후 연구소를 방문하여 시작되었음)

3. 사업의 개선사항 및 향후 방향 제언

기후변화대응기술개발사업이 일몰을 앞두고 있어, 에너지효율향상 분야에 대한 새로운 계획 수립과 동시에 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 전략이 필요한 시점입니다.

3-1. 2030 NDC, 2050 탄소중립 목표 달성과 에너지효율향상 분야의 기술 발전을 촉진하기 위하여 과학기술정보통신부가 취해야 할 역할과 전략은 무엇이라고 생각하십니까?

향후 에너지효율향상 분야 후속사업에서 중점적으로 다루어야 할 연구 분야와 투자 방향(TRL 단계, 지원 대상, 지원 기간, 사업 형태 등)에 대해 말씀해주시고, 왜 그렇게 생각하시는지 설명 부탁드립니다.

1. 에너지 효율 향상 관련 후속 사업에서는 건물 및 산업체에서 사용하고 있는 열에너지의 효율적 생산 및 활용에 관심을 두어야 한다고 생각합니다.

국내 에너지의 절반 이상이 열에너지의 형태로 소비되고 있으며, 건물 및 산업체에서 대규모의 열에너지가 화석에너지 근간으로 소비되고 있습니다. 이는 직접적인 탄소 배출 증가를 의미합니다.

추후, 신재생 에너지의 변동성을 흡수할 수 있는 섹터커플링의 기술로서, 고온 및 저온 열원의 생산, 저장, 활용 분야에 대한 관심과 투자가 필요할 것으로 생각됩니다. (전력이 남을 때 고온 및 저온 열원을 생산하여 필요한 산업체 등에 공급하거나 열원을 저장하였다가 전력이 부족할 때 발전하는 개념)

이러한 섹터 커플링 분야에도 공기 활용 컴팬더 기술은 압축기 측 고온 및 팽창기 측 저온의 동시 생산 기술로서 신재생에너지 가변 출력 대응 기술로도 유력한 기술 후보로 판단됩니다.

2. 다른 측면으로는 전기자동차의 보급이 확산되는 측면에서, 전기자동차 배터리를 통한 신재생 에너지 변동성 흡수 기술에 관한 연구 및 기반 인프라 구축에 관하여 기술 개발 및 투자가 필요하다고 생각합니다.

전기 자동차는 한 대당 100 kW ~250 kW 의 변동성을 흡수할 수 있는 에너지저장 장치로서 신재생 에너지 변동성을 상당량 흡수할 수 있을 것으로 생각됩니다. 자율 주행, 전력 거래 등의 신기술과 연계 기술이 필요할 것으로 판단됩니다.

3-2. 이 외 기후변화대응기술개발사업의 효과성 분석과 향후 투자 방향 도출과 관련하여 추가적으로 고려해야 할 사항이나 기타 의견에 대해서 자유롭게 작성 부탁드립니다.

연구 과제를 통한 기후변화대응기술개발의 결과물이 너무 개념적이거나 대상이 뚜렷하지 않아 효과성을 판단하는데 모호한 경우가 있는 것 같습니다.

또는 연구 개발 결과물이 너무 지엽적이어서 활용 가치가 한정적인 경우도 많습니다.

과제를 기획하거나 선정할 때, 개발 기술이 적용될 수 있는 뚜렷한 제품을 확보하고, 기술 개발에 따른 기존 기술 대체이 대체되어 신기술의 침투율 증가 등의 뚜렷한 결과를 예상할 수 있는 산업 및 기술을 먼저 고려하여, 과제 발굴 및 투자가 이루어지길 바랍니다.

