

기후변화 대응을 위한 R&D 결과가
온실가스 감축 등 기후변화 대응에
미치는 영향을 도출하기 위한 연구성과 추적 연구
(Research achievement tracking research to derive
the impact of R&D results for climate change
response on climate change response, such as
reduction of greenhouse gases)

연구기관 : (주)티비앤에이
연구책임자 : 최 미 옥 이사

2021. 1. 25

과 학 기 술 정 보 통 신 부

제 출 문

과 학 기 술 정 보 통 신 부 장 관 귀 하

본 보고서를 “기후변화 대응을 위한 R&D 결과가 온실가스 감축 등 기후변화 대응에 미치는 영향을 도출하기 위한 연구성과 추적 연구”의 최종보고서로 제출합니다.

2021. 01 . 25 .

연구기관명 : (주)티비앤에이

연구책임자 : 최미옥 이사

연 구 원 : 김황만 수석 컨설턴트

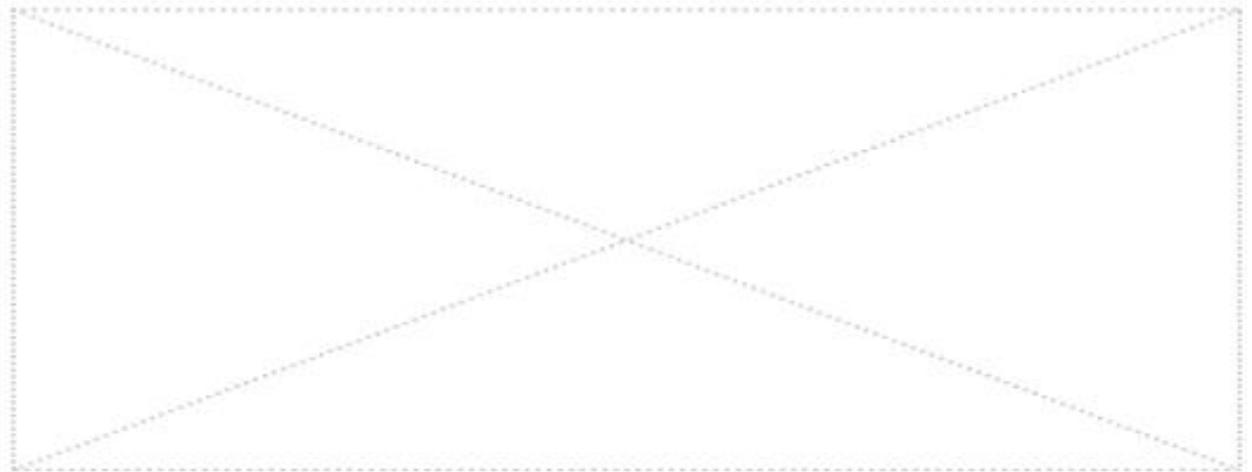
연 구 원 : 김희진 책임 컨설턴트

연 구 원 : 진문정 전임 컨설턴트

요 약

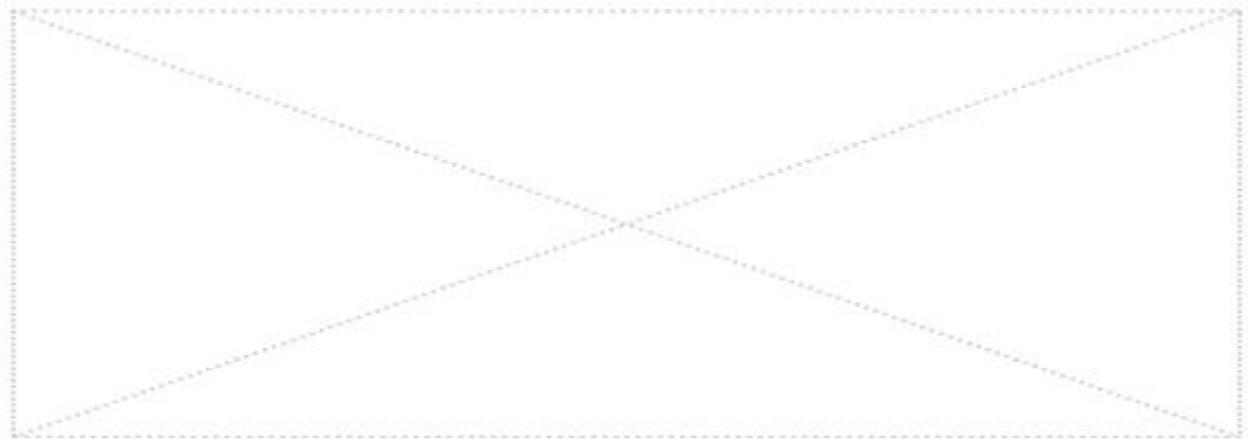
I. 추진배경

- 대한민국은 온실가스로 인한 해수면 상승 등의 이상기후 현상이 증가하고 있으며, 온실가스 배출량 또한 지속적 상승



[국내 연평균 해수면높이]

자료: 국가 온실가스 인벤토리 보고서, 온실가스 종합정보센터, 2019



[국가 온실가스 총배출량 추이]

자료: 국가 온실가스 인벤토리 보고서, 온실가스 종합정보센터, 2019

- 대한민국 정부는 기후변화 대응전략 마련 및 기후변화대응 R&D 사업 등을 통해 원천기술 확보 추진
 - '20년과 '30년을 목표연도로 국가 온실가스 로드맵을 수립하고, '30년까지 국가 온실가스 감축목표('30년 BAU 대비 37% 감축) 및 로드맵 수립('16.12, '18.7)



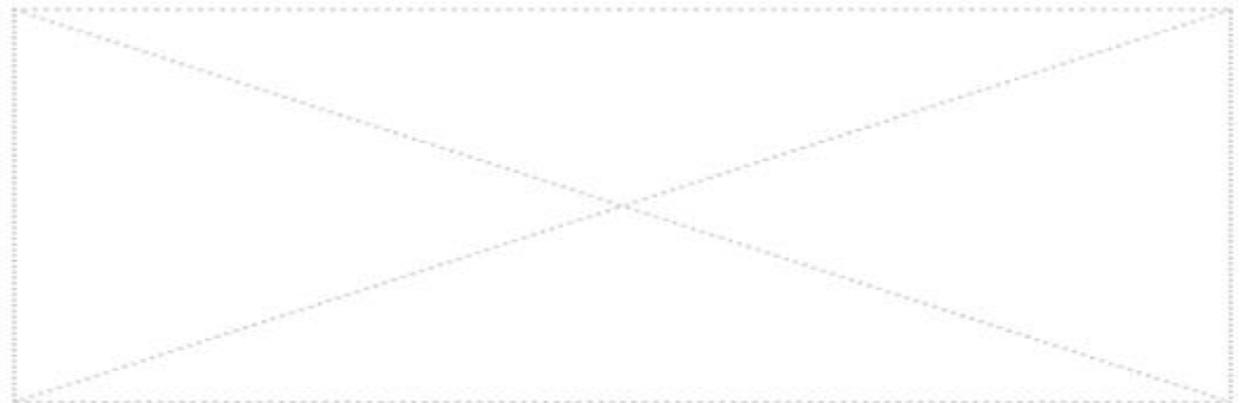
<'16.12 로드맵>

<'18.7 로드맵>

[2030 국가 온실가스 감축 목표]

자료: 제2차 기후변화대응 기본계획, 관계부처합동, 2019

- 정부는 '15년 7월 기후변화 대응 핵심기술 전략을 수립하고, 태양 전지·연료전지·바이오연료·이차전지·전력IT·이산화탄소 포집·처리(CCS)와 같은 6대 핵심기술 개발에 투자 강화
- 기후변화 위기에 대응하여 온실가스 감축 효과가 큰 기술분야에 대해 세계 선도적 원천기술 확보 및 미래 성장 동력 창출 지원을 위해 '09년 이후 '기후변화 대응기술 개발사업'을 추진



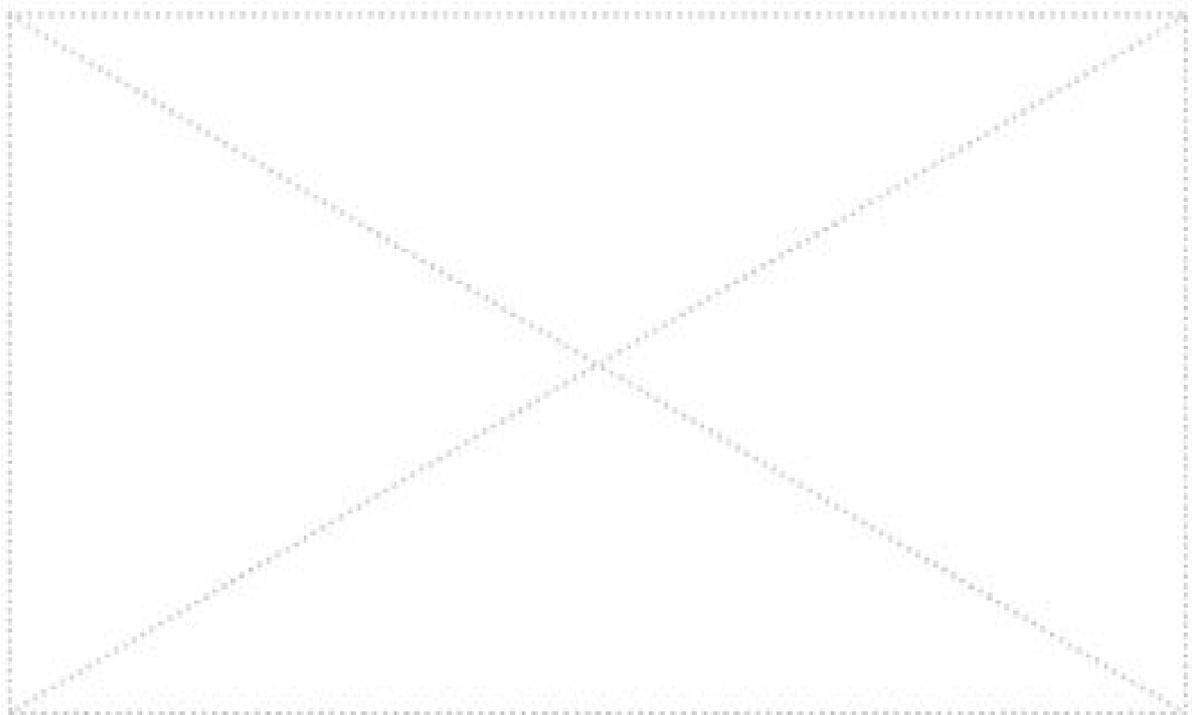
[기후변화 대응기술 개발사업 예산 추이 (단위: 억원)]

자료: 한국연구재단

□ 이에 지난 10년간 추진해온 R&D 사업 성과에 대한 진단 필요

Ⅱ. 성과 분석을 위한 「요소트리」 도출

- 기후변화가 발생하고 영향을 미치는 과정별 대응기술을 기후변화 영향물질의 ‘배출 예방’-‘배출 저감’-‘온실가스화 방지·관리’, ‘모니터링·예측’-‘영향 대응’-‘피해 저감’ 등 6단계로 유형화
 - ① (기후변화 영향물질 발생 예방) 신재생에너지 활용 등 화석연료 사용 대체를 통한 기후변화 영향물질 발생 예방
 - ② (기후변화 영향물질 배출 저감) 화석연료를 많이 활용하는 산업, 운송 등 주요 영역의 기후변화 영향물질 배출 저감
 - ③ (기후변화 영향물질 온실가스화 방지 및 관리) 배출되는 기후변화 영향물질을 저장하거나에너지로 전환하여 긍정적으로 활용
 - ④ (모니터링 및 변화 예측) 기후변화 영향물질 발생 전부터 소멸까지 모니터링 및 향후 예측
 - ⑤ (기후변화 영향 대응) 기후변화에 영향을 받는 대표 영역(농업, 산림, 수자원 등) 영향 대응
 - ⑥ (기후변화 피해 저감) 기후변화의 영향을 받는 영역(해양, 산림 등)과 인체에 대한 피해(질병, 식품 안전 등) 방지 및 최소화



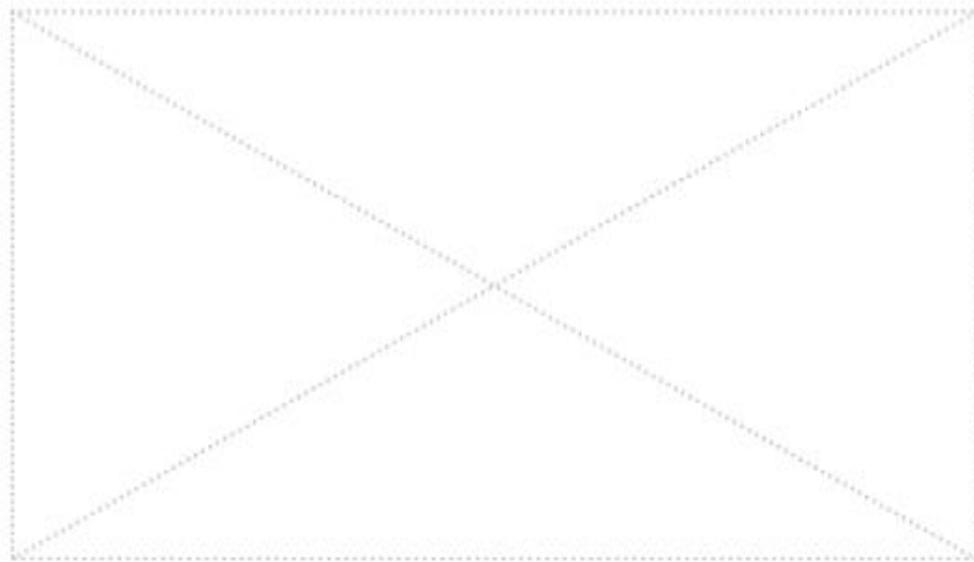
□ 기후변화 대응 요소트리

기후변화 과정		기후변화 대응 과정				
구분	대분류	중분류	소분류			
기후변화 발생	인간 및 자연활동	기후변화 영향물질 발생 예방	재생에너지 생산 및 공급	수력에너지		
				태양광/태양열에너지		
				지열에너지		
				풍력에너지		
				해양에너지		
				바이오에너지		
				폐기물에너지		
				하이브리드 신재생에너지		
				에너지하베스팅		
				수소에너지		
	연료전지					
	기후변화 영향물질 배출 저감	기후변화 영향물질 배출 저감	산업 및 시설물 배출 저감	전력 저장		
				수소저장		
			수송 수단의 배출저감	송배전 시스템 및 전기지능화		
산업의 배출 저감						
기후변화 영향물질 발생	기후변화 영향물질 온실 가스화 방지 및 관리	탄소포집·저장·활용(CCUS)	건축 분야 배출 저감			
			이산화탄소 포집			
		Non-CO2저감	교통 및 자동차 분야 배출 저감			
			이산화탄소 자원화			
		기후변화 영향	모니터링 및 변화 예측	모니터링 및 변화 예측	Non-CO2 저감	
					non-CO2 포집 및 저감	
					기후 예측 및 모델링	
					기후 정보 및 경보시스템	
			기후변화 영향 대응	수자원 및 해양생태계 관리	수산자원 및 연안 관리	해양 생태계 관리
						작물 재배 및 생산 관리
농업 및 축산, 산림 관리	유전자원 및 유전개량, 가축질병관리			수환경 피해 저감		
				해양 피해 저감		
기후변화 피해	기후변화 피해 저감	산림&육상 피해 저감 및 생태 복원	산림 피해 저감			
			생태 모니터링 및 복원			
			인체 피해 저감			
	인체 피해 저감	인체 피해 저감	감염 질병 관리			
			식품 안전 예방			

기후변화대응기술개발사업 지원 분야

Ⅲ. 성과 분석

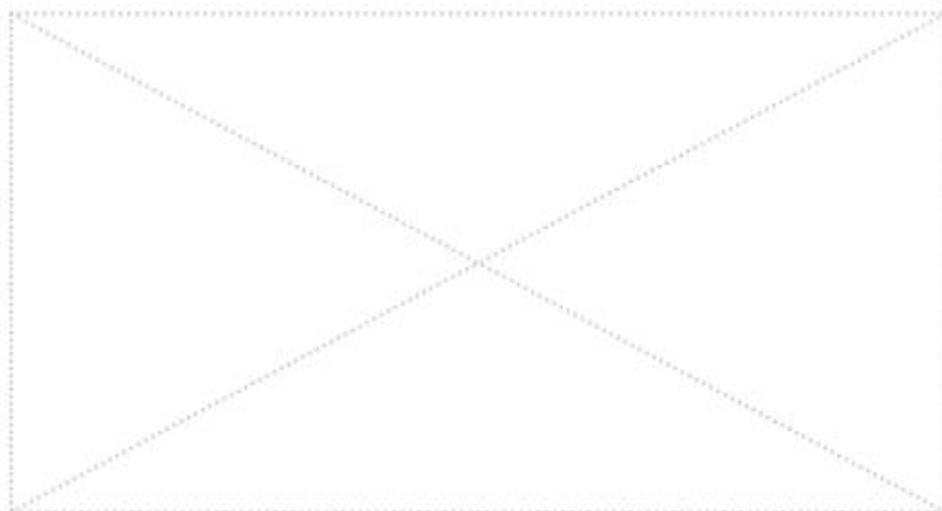
- 총예산은 2014년도를 제외하고 지속적으로 증가(CAGR:23%)하고 있으며, 2017년 타 년도에 비해 가장 많은 과제(530개) 확보
- 2009년부터 2019년까지의 기후변화 대응기술 개발사업 과제에 대한 총예산은 약 5,600억원 규모이며, 연도별 평균 예산은 509억원이며, 연도별 투입 예산은 2014년을 제외하고 지속적으로 증가



[예산 추이]

* 자료: 한국연구재단 자료 기반 분석

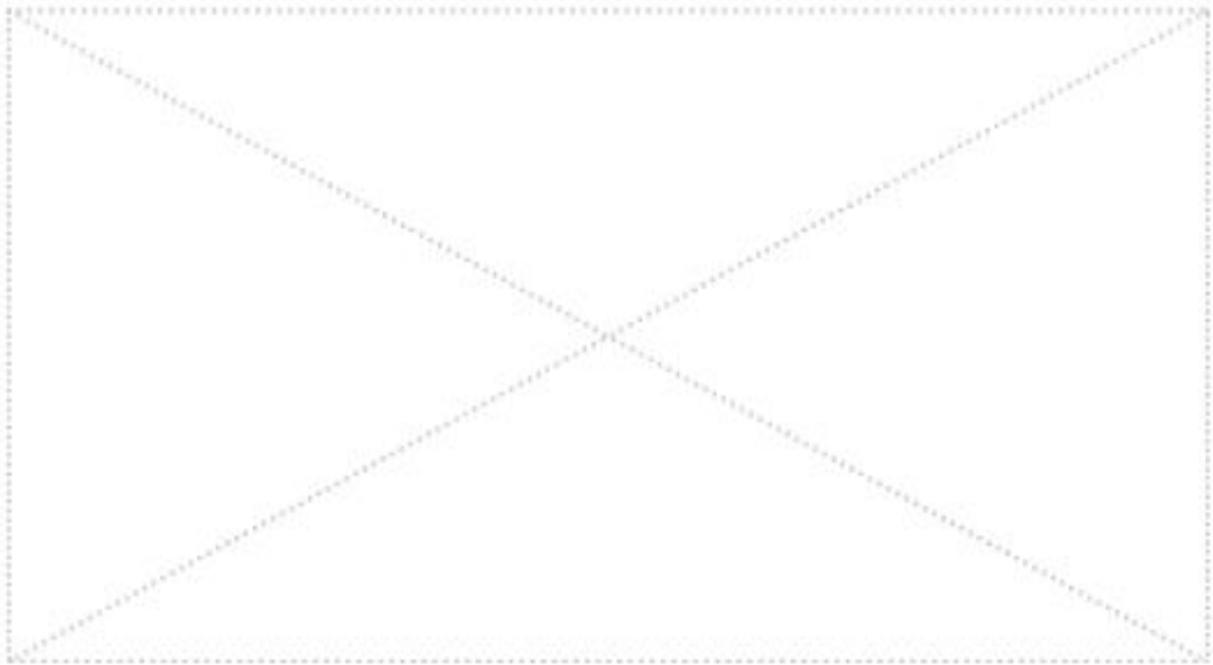
- 2009년부터 2019년까지의 기후변화 대응기술 개발사업 총 과제수는 3,144개, 연도별 평균 과제수는 286개



[과제수 추이]

* 자료: 한국연구재단 자료 기반 분석

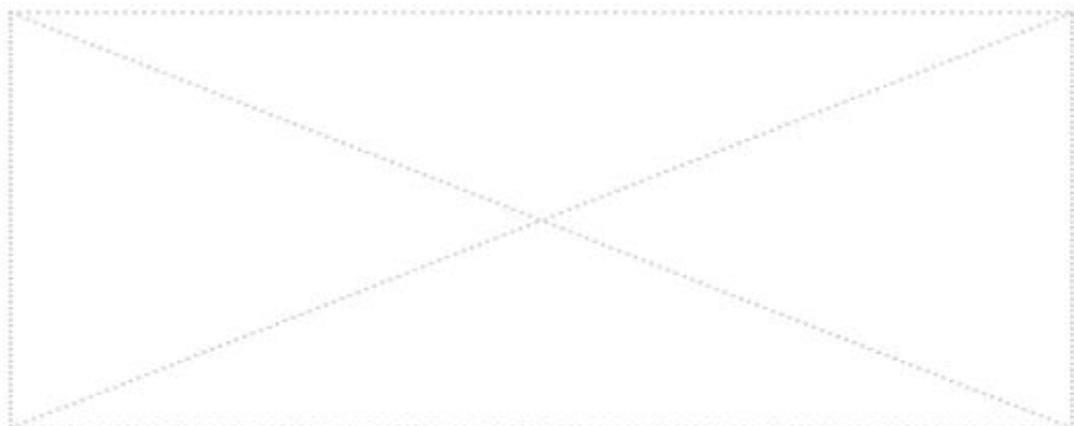
- 유관 부처와 추진 업무 성격을 구분하면, 과기정통부는 R&D를, 환경부는 조사분석, 규제 등을 주로 수행
- 과기정통부는 기후변화 대응 과정 중 기후변화 영향물질 발생 예방, 온실가스화 방지 및 관리 단계 등에 집중됨



[부처별 역할 비교]

* 자료: 본 연구에서 작성

- 과기정통부는 기초/원천기술 개발 중심, 기후변화대응 파급력이 높은 영역을 우선 추진하면서 기후변화 영향물질발생 예방 분야에 대한 R&D 추진이 다수



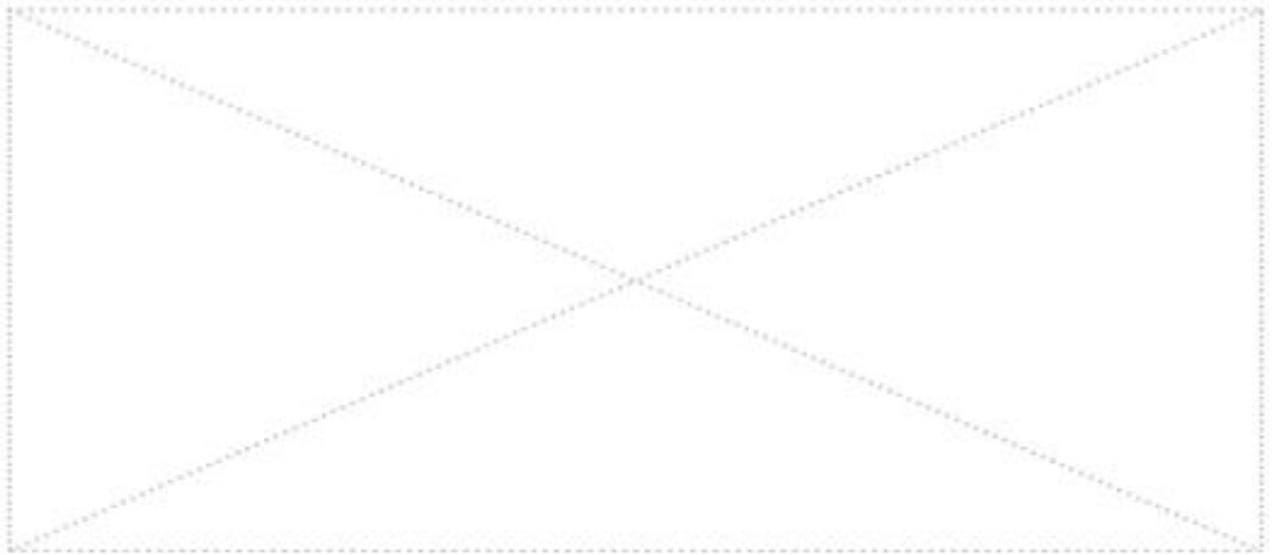
[과기정통부 역할 및 수행 분야 비교]

* 자료: 본 연구에서 작성

IV. 효과 및 스토리 도출

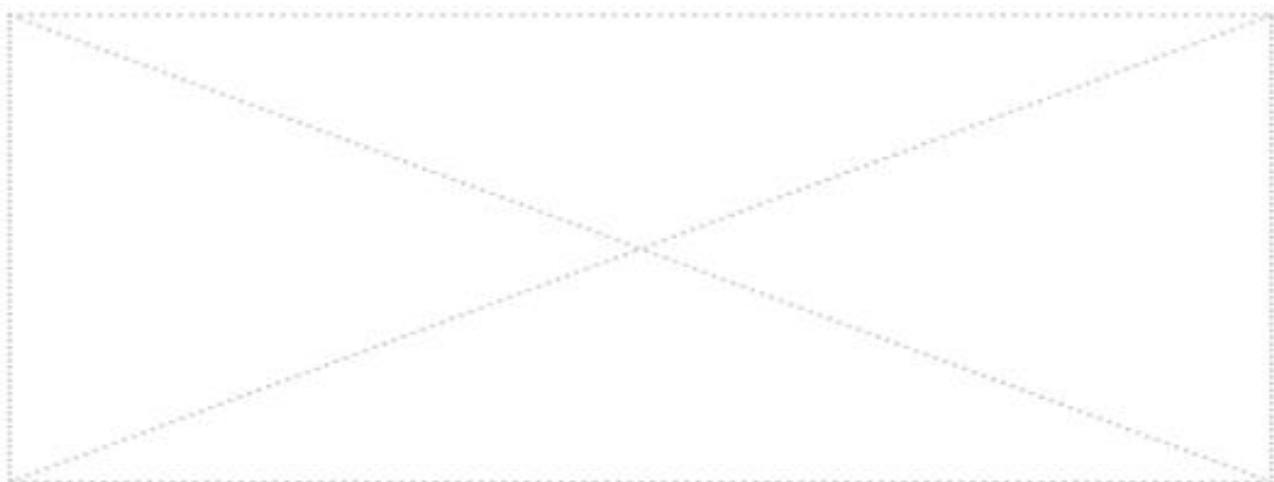
□ 기후변화 영향물질 발생 예방

- '10년대 초 해외 대비 절반 수준에 그친 국내 기술이 지속적 발전을 통해 '19년에는 세계 최고 수준 달성



[태양광/태양열 분야 대표 성과]

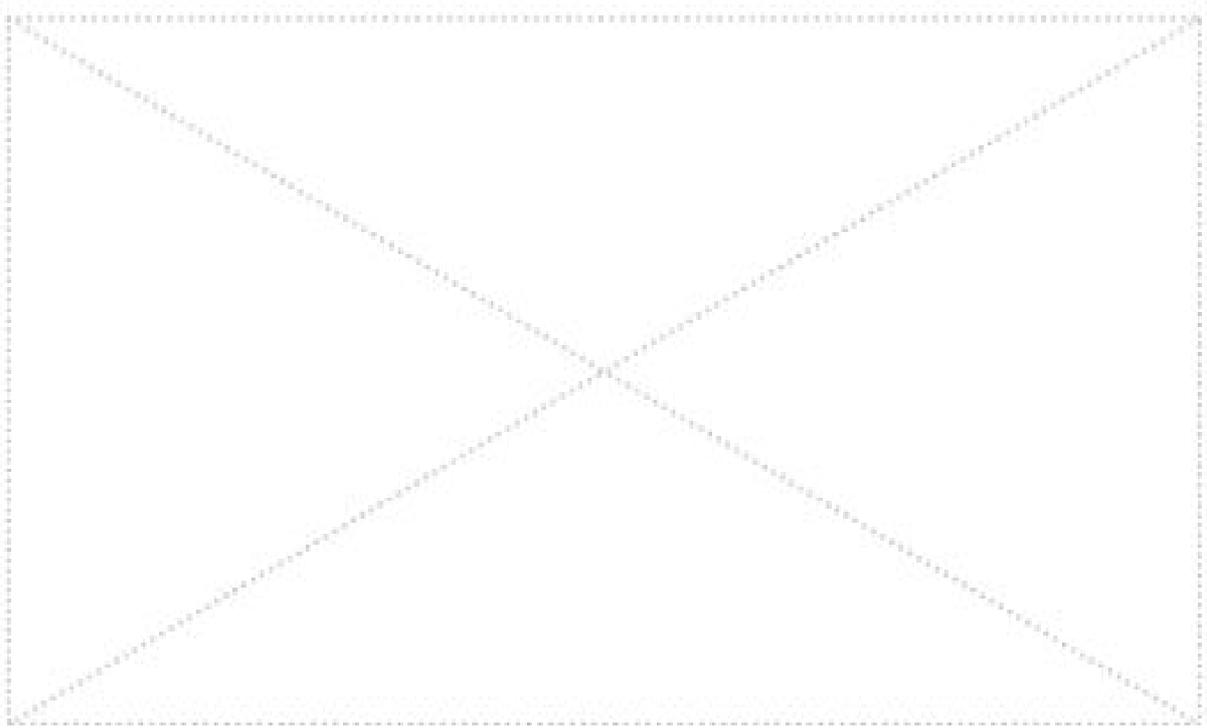
- 수소에너지는 '19년 상용화가 가능한 10% 이상의 전환 효율에 도달



[수소에너지: 성과]

□ 기후변화 영향물질 배출 저감

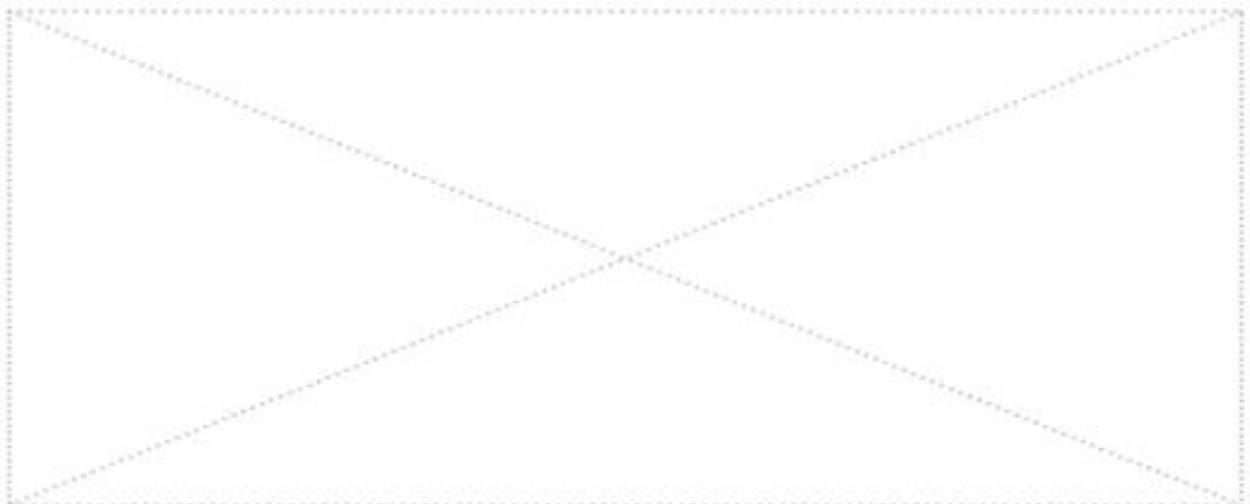
- 교통 및 자동차 분야 배출 저감을 위해, 자동차 내장재의 TVOC 배출 국제 허용 기준인 50ppm 이하를 '16년에 달성



[교통 및 자동차 분야 배출 저감: 성과]

□ 기후변화 영향물질 온실가스화 방지 및 관리

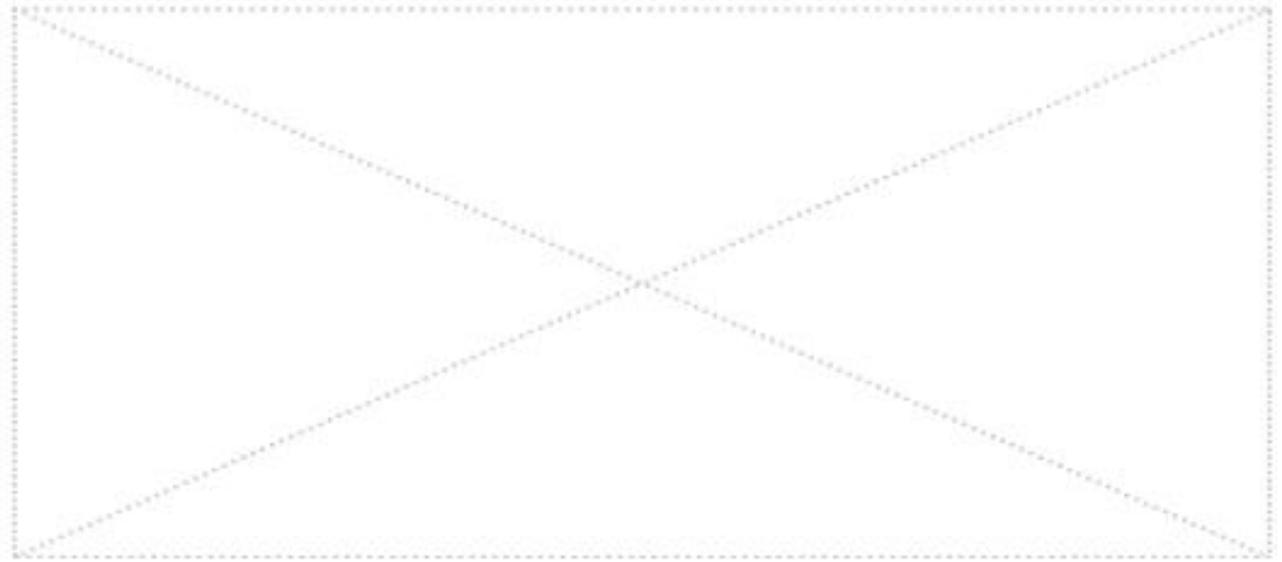
- 탄소자원화 기술은 고농도, 고순도, 효소 고효율성화 등의 기술 트렌드로 발전되어 왔으며, '17년 고순도 99% 이상 달성



[탄소 자원화: 성과]

□ 모니터링 및 변화 예측

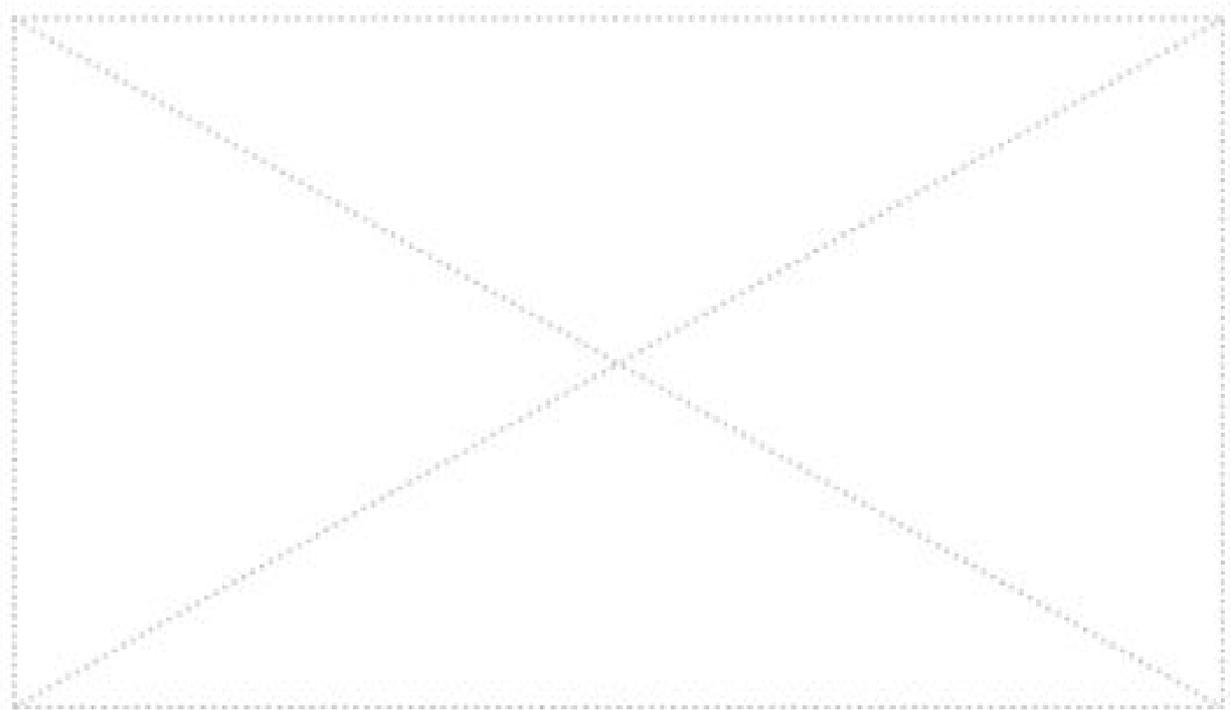
- 고해상도와 관련하여 통합 기후예측 시스템을 위한 기후예측 시뮬레이터 및 대양 관측 연구를 통해 해상도 50km 달성



[기후 예측 및 모델링: 성과]

□ 기후변화 영향 대응

- 해안, 농업 작물 재배 및 생산 관리 등에서 기후변화 영향 최소화 위한 기술 개발 확보



[수산자원 및 연안 관리: 성과]

목 차

제1장 개요	1
1. 연구의 필요성	1
2. 연구 목표	3
3. 연구의 내용 및 범위	3
제2장 기후변화 정의와 요소트리	4
1. 기후변화의 정의	4
2. 기후변화 대응 요소트리 도출 프로세스	5
3. 기후변화 대응 요소트리	10
가. 대분류 및 중분류	10
나. 소분류	13
다. 세부분류	14
제3장 R&D 예산 투입 성과	17
1. 총예산 투입 성과	17
가. 예산	17
나. 과제	17
다. 총예산 투입 성과: 사업 분류 기준 - 대분류	18
라. 총예산 투입 성과: 사업 분류 기준 - 중분류	19
2. 국가 기후기술 분류체계 기준 예산 투입 성과: 예산 및 과제	20
가. 대분류	20
나. 중분류	20
제4장 기후변화 대응기술 사업 성과	24
1. 태양광/태양열	24
2. 해양에너지	28
3. 바이오에너지	29
4. 하이브리드 신재생에너지	33
5. 수소에너지	34
6. 연료전지	36
7. 이차전지	39
8. 산업의 배출 저감	43
9. 교통 및 자동차 분야 배출 저감	44
10. 탄소 포집·저장·수송·전환	45
11. 탄소 자원화	57
12. 기후 예측 및 모델링	63

13. 수산자원 및 연안 관리	65
14. 작물 재배 및 생산 관리	66
제5장 기후변화 대응기술개발사업의 효과 및 스토리 도출	67
1. 효과 및 스토리 도출 프로세스	67
2. 기후변화 대응의 필요성	69
가. 기후변화 영향물질 발생 예방	69
나. 기후변화 영향물질 배출 저감	70
다. 기후변화 영향물질 온실가스화 방지 및 관리	71
라. 모니터링 및 변화 예측	72
마. 기후변화 영향 대응	73
바. 기후변화 피해 저감	74
3. 기후변화대응기술개발사업 효과와 스토리	75
가. 태양광/태양열	75
나. 해양에너지	78
다. 바이오에너지	80
라. 하이브리드 신재생에너지	84
마. 수소에너지	86
바. 연료전지	89
사. 이차전지	91
아. 산업의 배출 저감	93
자. 교통 및 자동차 분야 배출 저감	95
차. 탄소 포집·저장·수송·전환	97
카. 탄소 자원화	101
타. 기후 예측 및 모델링	108
파. 수산자원 및 연안 관리	110
하. 작물 재배 및 생산 관리	112
제6장 요약 및 시사점	114

표 목차

<표 2-1> 국가 기후기술 분류체계	5
<표 2-2> 기후변화 대응 요소트리: 소분류	13
<표 2-3> 기후변화 대응 요소트리: 세부분류	14
<표 3-1> 대분류 예산 및 과제수 비중	20
<표 3-2> 대분류 예산 및 과제수 추이	20

<표 4-1> 태양광/태양열 과제별 주요 성과	24
<표 4-2> 해양에너지 과제별 주요 성과	28
<표 4-3> 바이오에너지 과제별 주요 성과	29
<표 4-4> 하이브리드 신재생에너지 과제별 주요 성과	33
<표 4-5> 수소에너지 과제별 주요 성과	34
<표 4-6> 연료전지 과제별 주요 성과	36
<표 4-7> 이차전지 과제별 주요 성과	39
<표 4-8> 산업의 배출 저감 과제별 주요 성과	43
<표 4-9> 교통 및 자동차 분야 배출 저감 과제별 주요 성과	44
<표 4-10> 탄소 포집·저장·수소·전환 과제별 주요 성과	45
<표 4-11> 탄소 자원화 과제별 주요 성과	57
<표 4-12> 기후 예측 및 모델링 과제별 주요 성과	63
<표 4-13> 수산자원 및 연안 관리 과제별 주요 성과	65
<표 4-14> 작물 재배 및 생산 관리 과제별 주요 성과	66
<표 5-15> 2017년 주요국 발전원별 LCOE	75
<표 5-1> 국가 온실가스 배출 현황 (단위 : 백만톤 CO ₂ eq.)	93
<표 5-2> 최종에너지 소비량 현황 (단위 : 백만 TOE)	95

그림 목차

[그림 1-1] 국가 온실가스 총배출량 추이	1
[그림 1-2] 2030 국가 온실가스 감축 목표	2
[그림 1-3] 기후변화대응기술개발사업 예산 추이(단위: 억원)	2
[그림 2-1] 기후변화의 의미	4
[그림 2-2] 기후변화대응 기본계획 목표 유형	7
[그림 2-3] 기후변화대응 기본계획과 기술분류 매칭 결과	8
[그림 2-4] 요소트리 도출 과정	9
[그림 2-5] 기후변화 과정	10
[그림 2-6] 기후변화 과정과 대응 과정	11
[그림 2-7] 기후변화 과정과 대/중분류	12
[그림 3-1] 예산 추이	17
[그림 3-2] 과제수 추이	17
[그림 3-3] 대분류별 예산 추이	18
[그림 3-4] 대분류별 과제수 추이	18
[그림 3-5] 중분류별 예산 추이	19
[그림 3-6] 중분류별 과제수 추이	19
[그림 3-7] 예산 비중	21

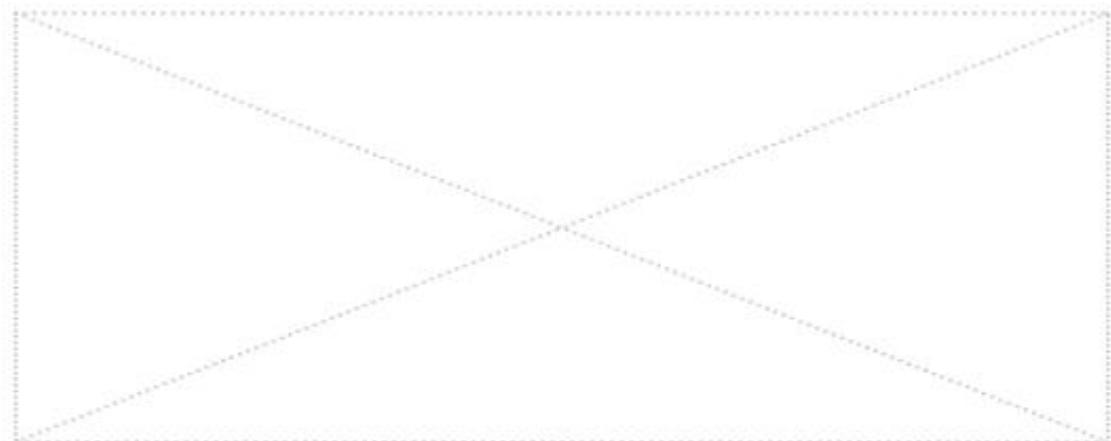
[그림 3-8] 중분류 기준 예산 추이	21
[그림 3-9] 과제수 비중	22
[그림 3-10] 중분류 기준 과제수 추이	22
[그림 3-11] SCI 논문 성과	22
[그림 3-12] 특허 성과	23
[그림 6-1] 기후변화 대응기술 트렌드	68
[그림 5-2] 중분류: 기후변화 영향물질 발생 예방	69
[그림 5-3] 중분류: 기후변화 영향물질 배출 저감	70
[그림 5-4] 중분류: 기후변화 영향물질 온실가스화 방지 및 관리	71
[그림 5-5] 중분류: 모니터링 및 변화 예측	72
[그림 5-6] 중분류: 기후변화 영향 대응	73
[그림 5-7] 중분류: 기후변화 피해 저감	74
[그림 5-8] 태양광/태양열: 필요성	76
[그림 5-9] 태양광/태양열: 성과	77
[그림 5-10] 해양에너지원 별 국내외 기술수준 비교	78
[그림 5-11] 해양에너지: 필요성	78
[그림 5-12] 해양에너지: 성과	79
[그림 5-13] 바이오에너지: 필요성	81
[그림 5-14] 바이오에너지: 성과(1/2)	82
[그림 5-15] 바이오에너지: 성과(2/2)	83
[그림 5-16] 하이브리드 신재생에너지: 성과	85
[그림 5-17] 수소에너지: 필요성	86
[그림 5-18] 수소에너지: 성과	87
[그림 5-19] 연료전지: 필요성	89
[그림 5-20] 연료전지: 성과	90
[그림 5-21] 이차전지: 성과	92
[그림 5-22] 산업의 배출 저감: 성과	94
[그림 5-23] 교통 및 자동차 분야 배출 저감: 성과	96
[그림 5-24] 탄소 포집·저장·수송·전환: 성과(1/2)	98
[그림 5-25] 탄소 포집·저장·수송·전환: 성과(2/2)	99
[그림 5-26] 대기 중 이산화탄소 농도	101
[그림 5-27] 탄소 자원화: 성과(1/5)	102
[그림 5-28] 탄소 자원화: 성과(2/5)	103
[그림 5-29] 탄소 자원화: 성과(3/5)	104
[그림 5-30] 탄소 자원화: 성과(4/5)	105
[그림 5-31] 탄소 자원화: 성과(5/5)	106
[그림 5-32] 동아시아 지역의 연최고·일최저 기온(TN _x)의 5년 평균 시계열	108
[그림 5-33] 기후 예측 및 모델링: 성과	109
[그림 5-34] 국내 해역별 연평균 해수면온도	110
[그림 5-35] 한반도 연근해 어종 변화	110

[그림 5-36] 수산자원 및 연안 관리: 성과	111
[그림 5-37] 주요 농작물 주산지 이동 지도	112
[그림 5-38] 쌀 생산성 미래 예측	112
[그림 5-39] 작물 재배 및 생산 관리: 성과	113
[그림 6-40] 기후변화 대응기술 트렌드	114
[그림 6-41] 기후변화 대응 중요도	115
[그림 6-42] 부처별 역할 비교	116
[그림 6-43] 부처별 역할 및 수행 분야 비교	116

제1장 개요

1. 연구의 필요성

- 우리나라는 20세기 초와 비교하여 연평균 기온 및 강수량의 변화로 이상기후 현상이 증가하였으며, 한파 및 폭염 등 기상 이변 속출
 - 20세기 초와 비교(1912~ , 6개 지점 관측)하여 연평균기온 변화량은 0.18℃/10년 상승하였으며, 최근 30년간 큰 폭으로 상승(1.4℃ 증가)
 - 지난 106년 동안 연 강수량이 증가(+16.3mm/10년)이 증가하고, 강한 강수가 증가하고 약한 강수는 감소하는 강수의 양극화 현상 심화¹⁾
 - 기후변화로 인해 호우, 태풍, 대설 등 재산 및 인명피해 발생이 지속되어 재산피해와 복구에 따른 경제적 손실이 10여년간 10.7조원 규모('08-'17년 기준)
- 온실가스 배출량은 산업계를 중심으로 매년 증가하고 있어 향후 기후변화로 인한 악영향을 피하기 어려운 상황
 - '17년 국가 온실가스 배출량은 709.1백만톤으로 '90년 이후 연평균 3.3% 증가하였으며, 배출원 기준으로는 산업(55%), 건물(22%), 수송(14%) 순으로 배출
 - 이러한 추세대로 온실가스 배출 시, 21세기 말 이상기후 현상은 더욱 심화될 것으로 전망되고 있음



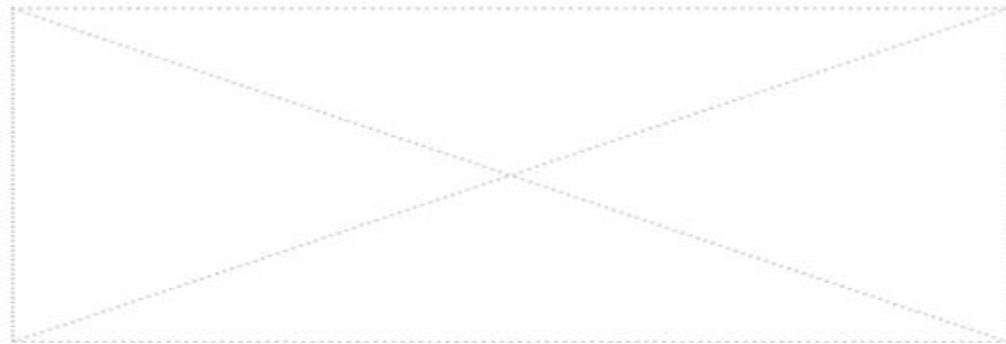
[그림 1-1] 국가 온실가스 총배출량 추이

자료: 국가 온실가스 인벤토리 보고서, 온실가스 종합정보센터, 2019

- 기후변화 현상은 전세계가 공통적으로 직면하고 있으며, 이에 전세계는 신기후체계를 마련하고, 온실가스 감축을 위한 기술개발 등을 통해 기후변화 대응 추진 중

1) 한반도 100년의 기후변화, 기상청, 2018

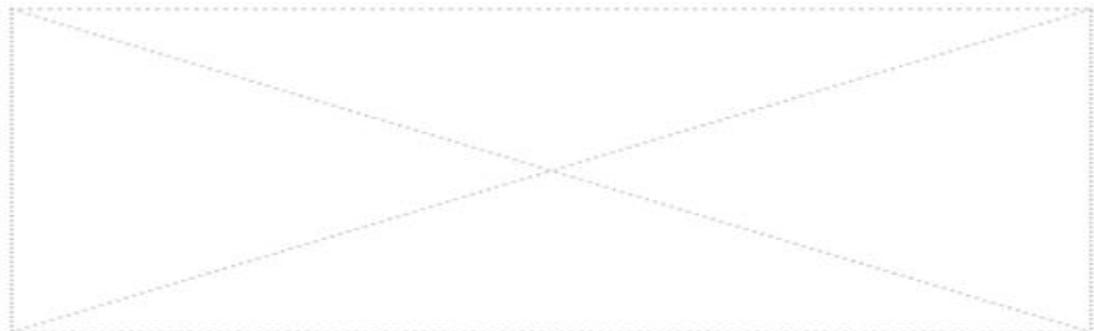
- 지난 '15년 유엔기후변화협약 제21차 당사국총회에서 '파리협정'이 채택되면서, 신기후 체계(Post-2020)으로 전환 시작
- 기후변화체계의 변화는 온실가스 감축을 위한 신기술경쟁을 촉진하였고, 주요 선진국은 기후변화 대응을 위한 신기술의 개발 및 촉진을 통해 온실가스 감축 및 기후변화 대응을 위한 이행방안으로 활용하고 있는 실정임
- 우리나라 정부는 기후변화 대응을 위한 전략을 마련하고, 기후변화대응R&D사업 등을 통해 관련 원천기술 등 확보 추진
- '20년과 '30년을 목표연도로 국가 온실가스 로드맵을 수립하고, '30년까지 국가 온실가스 감축목표('30년 BAU 대비 37% 감축) 및 로드맵 수립('16.12, '18.7)



[그림 1-2] 2030 국가 온실가스 감축 목표

자료: 제2차 기후변화대응 기본계획, 관계부처합동, 2019

- 정부는 '15년 7월 기후변화 대응 핵심기술 전략을 수립하고, 태양전지·연료전지·바이오연료·이차전지·전력IT·이산화탄소 포집·처리(CCS)와 같은 6대 핵심기술 개발에 투자 강화
- 기후변화 위기에 대응하여 온실가스 감축 효과가 큰 기술분야에 대해 세계 선도적 원천기술 확보 및 미래 성장 동력 창출 지원을 위해 '09년 이후 '기후변화대응기술개발사업'을 추진



[그림 1-3] 기후변화대응기술개발사업 예산 추이(단위: 억원)

자료: 한국연구재단

- 이에 지난 10년간 추진해온 R&D 사업이 정책적 추진 목표 달성에 얼마나 기여하였는지 진단하고, 경제사회적으로 미친 영향을 파악하여 향후 기후변화 정책 등에 반영 필요

2. 연구 목표

- 기후변화 대응 R&D사업의 기후변화 영향 파악
 - '09년부터 추진되어 온 기후변화 대응 R&D('19년까지 5,642억원 투자) 사업의 과학적·기술적·경제적 연구성과가 실제 기후변화 대응에 미친 영향과 의미를 추적 조사하고, 그 결과를 바탕으로 성과 정리

3. 연구의 내용 및 범위

- 기후변화 대응 요소트리 도출
 - 기후변화가 발생한 인위적 요인으로부터, 이를 극복하기 위한 방법으로 기후변화대응 기술이 제시·도출되기까지의 과정을 5단계 수준으로 분석한 '(가칭)기후변화 대응 요소트리' 도출
 - 「기후변화대응기술 확보 로드맵(CTR, '16.6)」의 10대 기후기술(태양전지·연료전지·바이오연료·이차전지·CCS·CO2 전환 등) 활용
- 기후변화 대응 R&D 성과 도출
 - 기후변화 대응 R&D의 성과관리를 담당하는 한국연구재단의 협조를 받아 주요 연구성과를 도출하고 이를 '(가칭)기후변화 대응 요소트리'에 매칭
 - 해당 연구기관/연구자 심층취재를 통해 연구 추진배경부터 필요성, 연구내용, 연구성과의 현재 성숙 정도 등을 추적 조사
 - 그간 홍보된 연구성과(과기정통부·연구재단·연구기관 보도내용, 기후 우수기술 10선 등)를 참고하되, 개별과제 단위가 아닌 의미가 부여된 '군(group)' 단위로 도출
- 기후변화 대응 R&D 효과 및 스토리 도출
 - 상기 연구성과가 기후변화 대응에 있어 어떠한 의미를 지니는지를 '(가칭)기후변화 대응 요소트리'와 연계하여 기후변화 요인·과정으로부터 이어지는 하향식 이야기 형태로 도출

제2장 기후변화 정의와 요소트리

1. 기후변화의 정의

□ 기후변화란 일정한 지역에서 장기간에 걸쳐서 진행되고 있는 기후의 변화를 의미함

○ 사전적 정의

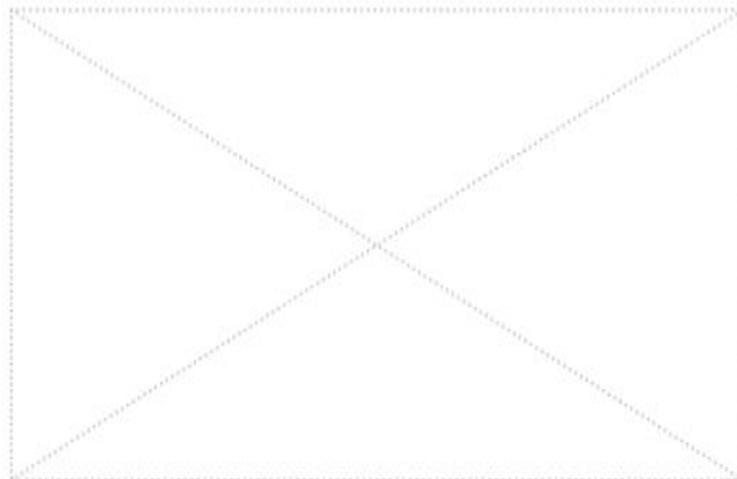
- 장기간에 걸친 기간(대체로 수십년 또는 그 이상) 동안 지속되면서, 기후의 평균 상태나 그 변동 속에서 통계적으로 의미있는 변동을 일컫는 것을 의미
- 기후변화는 자연적인 내부 과정이나 외부의 강제력에 의해서, 또는 대기의 조성에 있어서나 또는 토지 이용도에 있어서 끊임없는 인위적 변화에 의해 발생

○ 기후변화협약(UNFCCC)의 정의

- 기후변화협약(UNFCCC) 제 1조에서는 기후변화를 “전지구 대기의 조성을 변화시키는 인간의 활동이 직접적 또는 간접적으로 원인이 되어 일어나고, 충분한 기간 동안 관측된 자연적인 기후변동성에 추가하여 일어나는 기후의 변화”로 정의
- 이에 기후변화협약은 대기 조성을 변화시키는 인간 활동에 의해 야기되는 “기후변화”와 자연적 원인에 의해 야기되는 “기후변동성”을 구분

○ IPCC의 정의

- 기후 특성의 평균이나 변동성의 변화를 통해 확인 가능하고 수십 년 혹은 그 이상 오래 지속되는 기후상태 변화를 말하며, 자연적 변동성 때문이든 인간 활동에 따른 결과이든 시간 경과에 따른 모든 기후변화를 포함함



[그림 2-1] 기후변화의 의미

* 자료: 한국환경공단 자료 재구성

2. 기후변화 대응 요소트리 도출 프로세스

□ 국가 기후기술분류체계는 감축, 적응, 감축/적응융복합으로 구분

- 감축 부분은 자원의 활용을 줄이기 위한 인류의 조정 활동 또는 온실가스의 흡수원을 증대시키는 활동을 의미
 - 감축 분야를 크게 ‘온실가스 저감’ 영역과 ‘온실가스 고정’으로 이분화하며, ‘온실가스 저감’ 영역의 경우 ‘에너지 공급’, ‘에너지 저장·운송’ 및 ‘에너지 수요’ 세 가지 영역으로 분화
- 적응은 기후변화로 인하여 실제 발생하거나 예상되는 영향에 대한 조절을 진행하는 과정을 의미
 - 인간 및 자연시스템에서 기후변화로 인해 발생하는 환경적, 사회적 및 경제적 위험과 영향에 대응하기 위한 기술 전반을 포함
- 감축/적응융복합 분야는 온실가스 감축에 기여하거나, 기후변화로 인한 피해를 예방하기 위한 활동으로 감축 및 적응 부문 기술이 병용되거나 다기술이 융·복합된 분야를 의미
 - IPCC 용어집에서는 별도 구분을 하고 있지 않으나 기술의 진보성에 의한 신기술 출현 및 학제간의 융합으로 융·복합 기술의 출현이 예상됨에 따라 기후기술 분류체계 수립 과정에서 새로운 대분류 신설

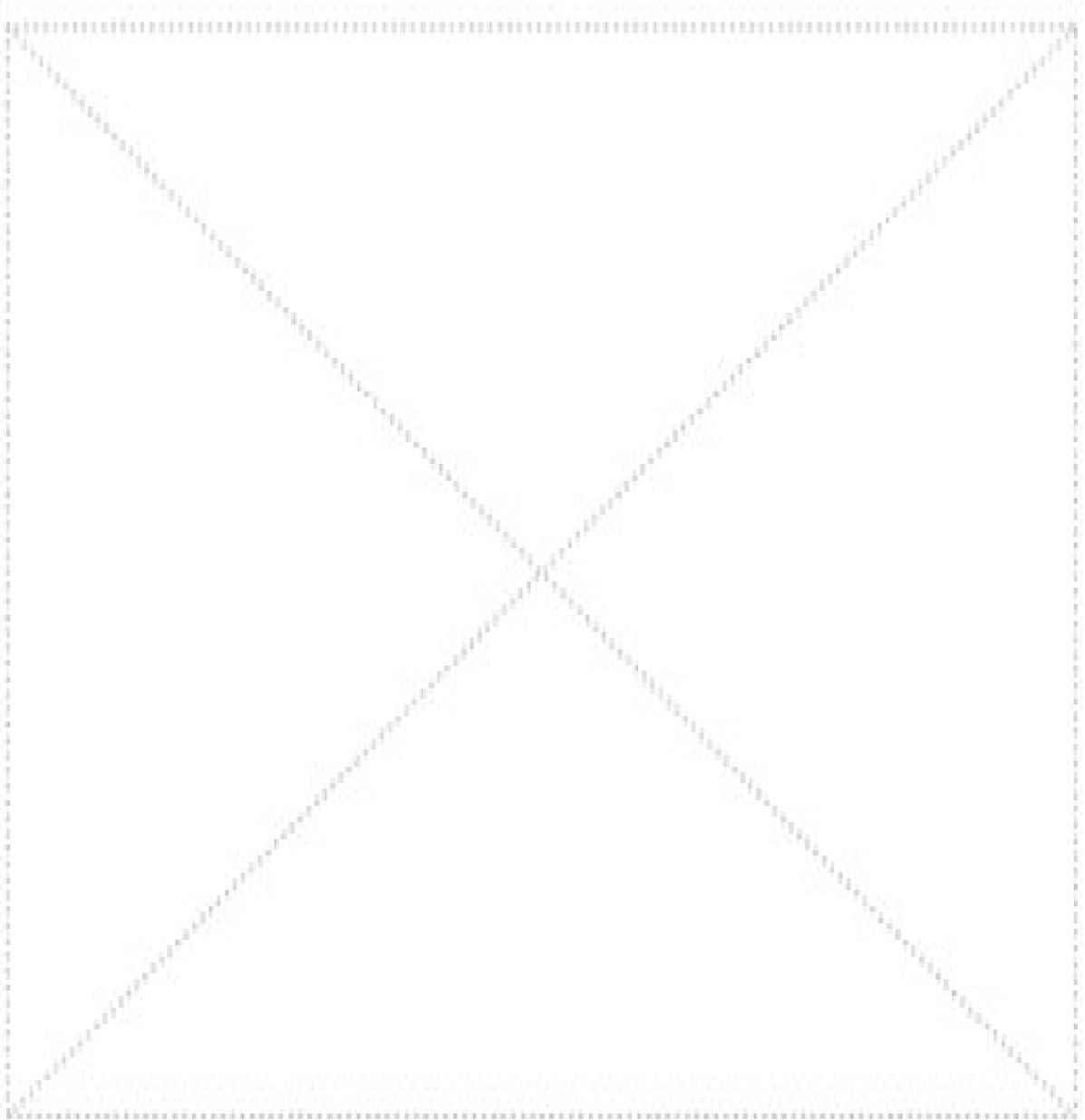
<표 2-1> 국가 기후기술 분류체계

대분류	중분류			소분류 범위
감축	온실가스 저감	에너지 생산 & 공급	(1) 비재생에너지	1. 원자력 발전
				2. 핵융합 발전
				3. 청정화력 발전·효율화
			(2) 재생에너지	4. 수력
				5. 태양광
				6. 태양열
				7. 지열
				8. 풍력
				9. 해양에너지
				10. 바이오에너지
	(3) 신에너지	11. 폐기물		
		12. 수소제조		
	에너지 저장 & 운송	(4) 에너지 저장	13. 연료전지	
			14. 전력저장	
(5) 송배전 & 전력 IT		15. 수소저장		
(6) 에너지 수요		16. 송배전 시스템		
		17. 전기지능화 기기		
		18. 수송효율화		
		19. 산업효율화		
			20. 건축효율화	

대분류	중분류	소분류 범위
적응	(7) 온실가스 고정	21. CCUS 22. Non-Co2 저감
	(8) 농업 & 축산	23. 유전자원 & 유전개량
		24. 작물 재배 & 생산
		25. 가축질병관리
		26. 가공, 저장 & 유통
	(9) 물관리	27. 수계 & 수생태계
		28. 수자원 확보 및 공급
		29. 수처리
	(10) 기후변화 예측 및 모니터링	30. 수재해 관리
		31. 기후 예측 및 모델링
	(11) 해양, 수산 & 연안	32. 기후 정보 & 경보 시스템
		33. 해양생태계
		34. 수산자원
		35. 연안재해 관리
36. 감염 질병 관리		
(12) 건강	37. 식품 안전 예방	
	38. 산림 생산 증진	
(13) 산림 & 육상	39. 산림 피해 저감	
	40. 생태 모니터링 & 복원	
	41. 신재생에너지 하이브리드	
감축/적응 융복합	(14) 다분야 중첩	42. 저전력 소모 장비
		43. 에너지하베스팅
		44. 인공광합성
		45. 분류체계로 다루기 어려운 기후변화 관련 기타 기술

* 자료: 과기정통부

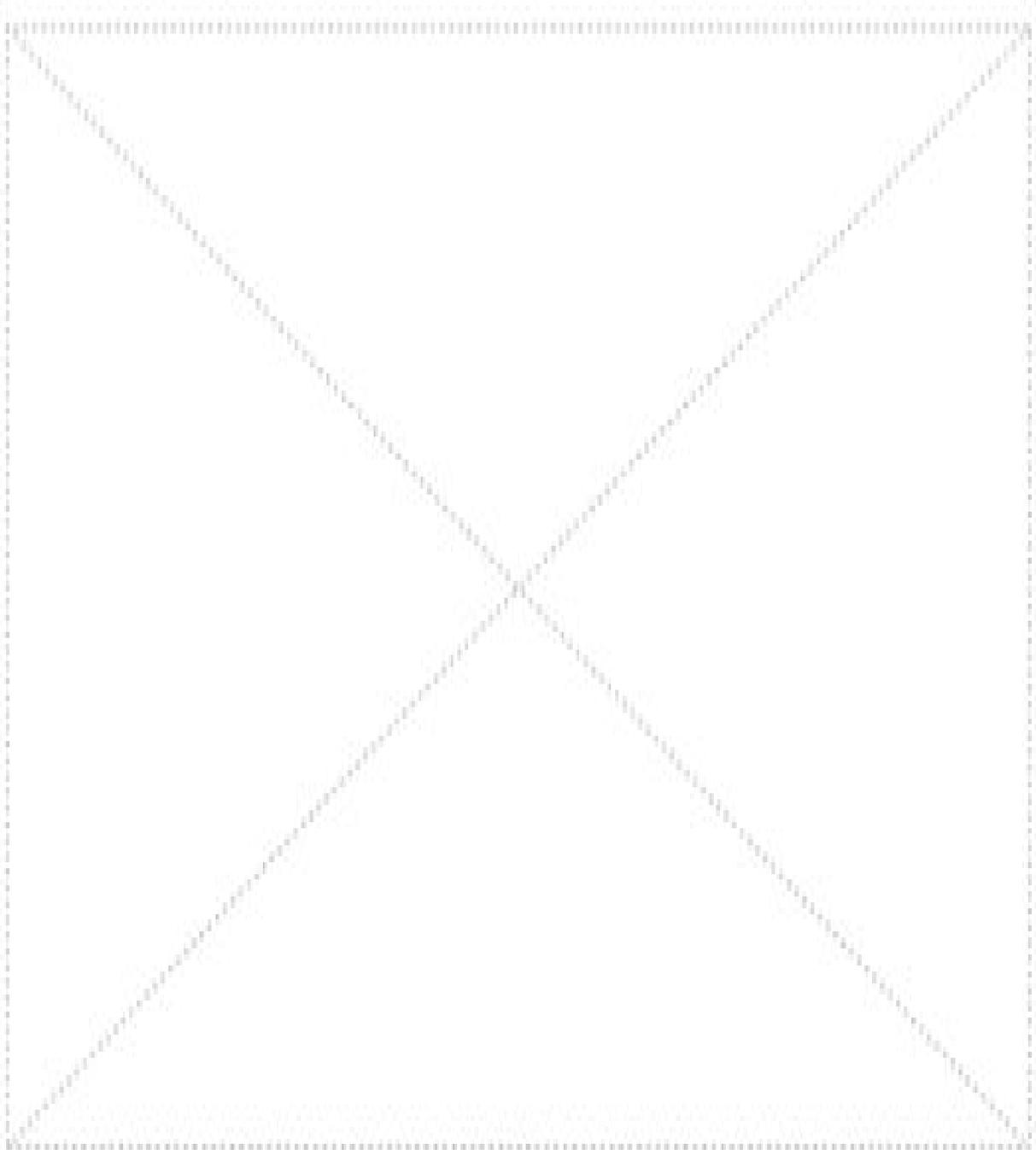
□ 정책 목표의 방향성을 요소트리에 반영하기 위해 제2차 기후변화대응 기본계획을 분석한 결과, 총 26개의 달성목표 중 R&D에 해당하는 항목은 4개(15.4%)로 적은 비율을 차지하고 있으며, '제도 개선'이 80.8%로 압도적인 비중을 차지하고 있음



[그림 2-2] 기후변화대응 기본계획 목표 유형

*자료: 본 연구에서 작성

- 제2차 기후변화대응 기본계획과 기술분류를 매칭한 결과, 정책 목표 달성을 위해 적응 단계의 R&D가 다수 추진 중



[그림 2-3] 기후변화대응 기본계획과 기술분류 매칭 결과

*자료: 본 연구에서 작성

- 국가기후기술분류는 R&D 분류에 초점을 두어, 일반인이 기후변화대응을 이해하는데 다소 어려운 한계를 보유하고 있어, 기후변화 대응 요소트리에서는 일반인이 기후변화와 성과에 대해 이해할 수 있는 수준과 구성을 고려하기로 함

- 기후변화 대응 요소트리(안)는 2차 자료 조사를 통해 기후변화 과정을 정의하고, 각 기후변화 과정에서 대응하기 위해 필요한 R&D를 분류로 재구성
 - 1차 요소트리(안)은 전문가 검토 의견을 수렴하여 기술적 체계 등 이슈 보완
 - 수정(안)은 결과물의 최종 활용 기관인 과기정통부, 한국연구재단의 검토 의견을 수렴하여 확정

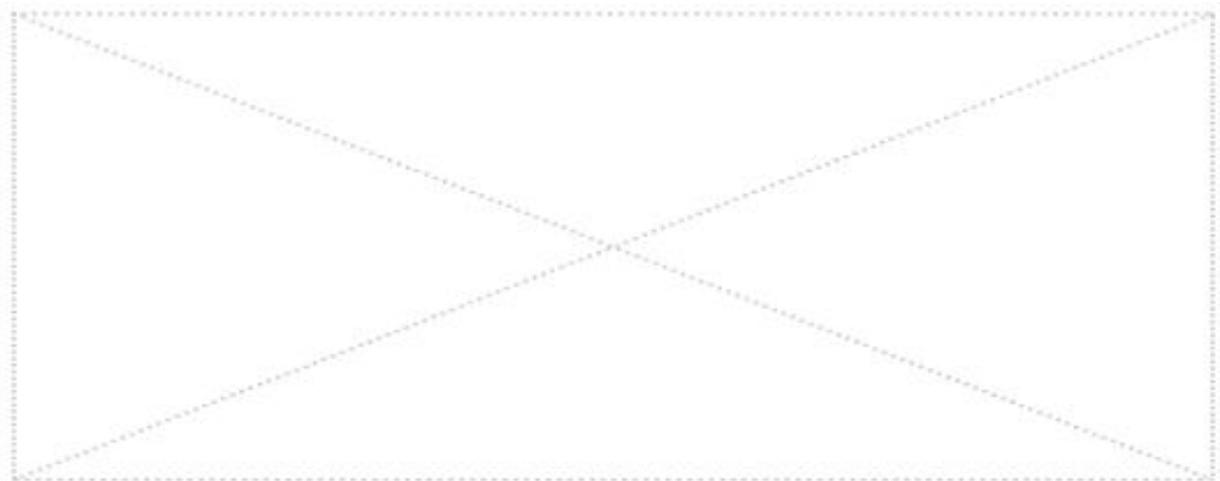


[그림 2-4] 요소트리 도출 과정

3. 기후변화 대응 요소트리

가. 대분류 및 중분류

- 기후변화 원인과 기후변화 영향물질의 발생 등 기후변화 과정과 영향을 도식화하여 일반인이 이해할 수 있는 수준의 개념을 설정
- 기후변화의 인위적 요인은 온실가스, 에어로졸의 영향, 토지 피복 변화와 산림 파괴 등으로 볼 수 있음
 - 제3차 당사국 총회(1997년 12월)에서는 주요 6대 온실가스로 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆)을 지정
 - 온실가스는 지표에서 나오는 장파 복사의 부분적 담요 역할을 수행하며, 이를 자연적 온실효과(natural greenhouse effect)라고 지칭하며, 인간 활동은 온실가스 방출을 통해 이 담요 효과를 강화하고 있음
 - 화석 연료와 바이오매스 연료로 인해 황화합물, 유기화물, 검댕(black carbon)을 함유하는 에어로졸이 증가해 왔으며, 온실 가스과 마찬가지로 인간의 활동으로 인한 산업화가 대기 중 에어로졸의 양이 급격히 증가
 - 과잉 토지 이용이나 장작, 숯 채취 등에 의한 토지 이용도의 변화와 도로의 건설, 벌목, 농업 확장, 도시화 및 산업화로 인한 산림 파괴는 지표면의 반사율 변화를 유발시켜 결국 기후변화를 야기
- 기후변화 원인은 크게 인간활동과 자연활동으로 나눌 수 있으며 이로 인해 기후변화 영향물질이 발생하고, 다시 자연, 인간이 부정적 영향을 받는 흐름을 형성하고 있음

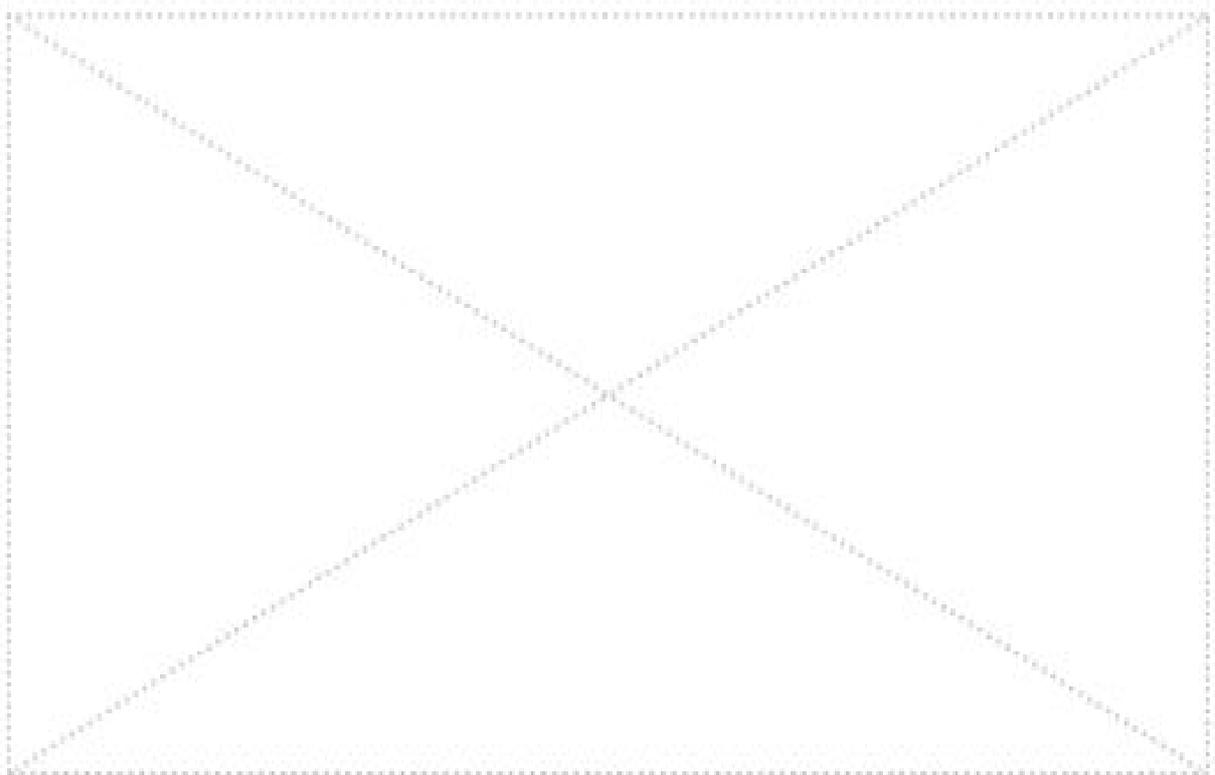


[그림 2-5] 기후변화 과정

* 자료: 본 연구에서 작성

□ 기후변화 과정에서 각 단계를 대응하기 위해 취하는 활동을 기후변화 대응 과정으로 정의하고, 대분류로 구성

○ 대분류는 기후변화 발생 및 영향에 대한 세부 대응 방안을 유형화하여, 기후변화 발생 예방 및 배출 저감, 기후변화의 영향에 대한 관리, 대응, 피해 저감으로 분류하였음

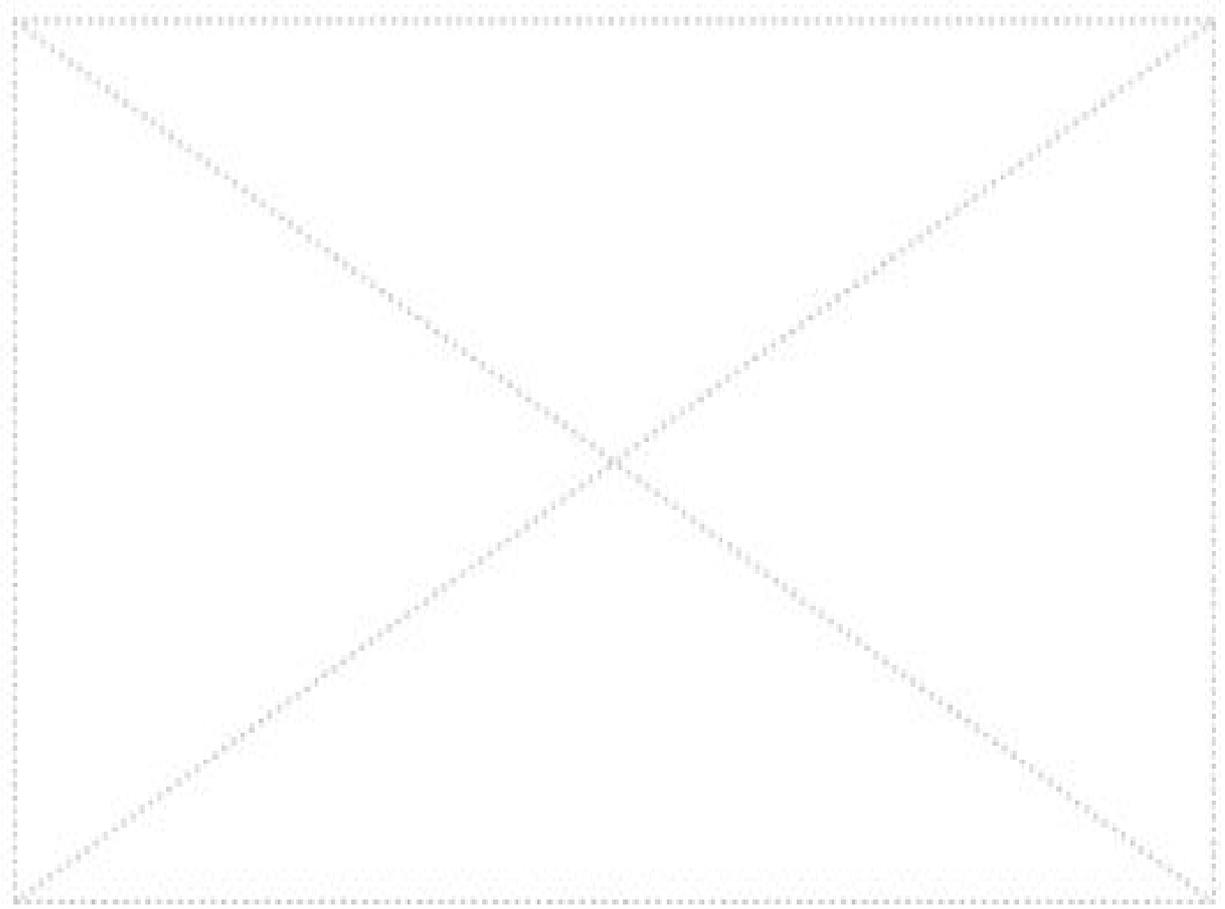


[그림 2-6] 기후변화 과정과 대응 과정

* 자료: 본 연구에서 작성

□ 중분류는 대분류의 배출예방-저감-관리-영향대응-피해 저감의 세부 대응 방안을 유형화 하였음

- 기후변화 영향물질 발생 예방 단계에서는 재생에너지와 비재생에너지를 생산/공급을 통해 탄소를 배출하는에너지 사용을 감소할 수 있는 R&D 추진
- 기후변화 영향물질 배출 저감 단계에서는 산업 및 시설물, 수송수단 등에서 배출하는 기후변화 영향물질 배출량을 줄여 기후변화로 인한 영향도 감소시키고자 하는 R&D를 추진
- 기후변화 영향물질 온실가스화 방지 및 관리 단계에서는 이미 발생된 탄소를 긍정적으로 활용하여, 온실가스가 아닌에너지화 등으로 전환하는 R&D를 추진
- 모니터링 및 변화 예측 단계에서는 기후변화 과정을 정확하게 진단하기 위한 기술 개발
- 기후변화 영향 대응 단계에서는 이미 영향이 발생하였더라도 피해로 연결되지 않도록 방지하는 R&D 추진
- 기후변화 피해 저감은 이미 영향으로 인한 각종 피해가 발생했을 경우 그 피해를 최소화하기 위한 R&D 추진



[그림 2-7] 기후변화 과정과 대/중분류

* 자료: 본 연구에서 도출

나. 소분류

□ 소분류에서는 중분류의 유형별로 현재 추진되고 있는 주요 분야에 따라 구분하였음

<표 2-2> 기후변화 대응 요소트리: 소분류

기후변화 과정		기후변화 대응 과정		
구분	대분류	중분류	소분류	
기후변화 발생	인간 및 자연활동	기후변화 영향물질 발생 예방	재생에너지 생산 및 공급	수력에너지
				태양광/태양열에너지
				지열에너지
				풍력에너지
				해양에너지
				바이오에너지
				폐기물에너지
				하이브리드 신재생에너지
				에너지하베스팅
				수소에너지
	연료전지			
	기후변화 영향물질 배출 저감	기후변화 영향물질 배출 저감	산업 및 시설물 배출 저감	전력 저장
				수소저장
수송 수단의 배출저감			송배전 시스템 및 전기저능화	
기후변화 영향물질 발생	기후변화 영향물질 온실 가스화 방지 및 관리	탄소포집·저장·활용(CCUS)	산업의 배출 저감	
			건축 분야 배출 저감	
		Non-CO2저감	교통 및 자동차 분야 배출 저감	
			이산화탄소 포집	
기후변화 영향	기후변화 영향	모니터링 및 변화 예측	이산화탄소 자원화	
			Non-CO2 저감	
		기후변화 영향 대응	non-CO2 포집 및 저감	
			수자원 및 해양생태계 관리	기후 예측 및 모델링
				기후 정보 및 경보시스템
			기후변화 피해	기후변화 피해 저감
	산림& 육상 피해 저감 및 생태 복원	해양 생태계 관리		
		인체 피해 저감		
	유전자원 및 유전개량, 가축질병관리			
	식품 안전 예방			

* 자료: 본 연구에서 작성

다. 세부분류

□ 세부분류에서는 소분류를 구성하는 기술에 따라 구분하였음

<표 2-3> 기후변화 대응 요소트리: 세부분류

대분류	중분류	소분류	세부분류			
기후변화 영향물질 발생예방	에너지 생산 및 공급	신·재생 에너지	수력/수열 에너지	수력	수력터빈 설계 및 제작	
				수력	발전기 설계 및 제작	
				수열	수력발전 자원조사	
				수열	수력발전시스템	
			태양광/태양열 에너지	태양광	열처리	
					태양광	수열플랜트 및 기타
					태양광	태양전지 및 모듈
				태양열	태양광	부품소재 및 장비
					태양열	발전 시스템
					태양열	태양열 설비
			지열 에너지	지열	태양열	자원추정 및 평가
					태양열	건물/산업이용 시스템
		풍력 에너지	지열	태양열	발전 및 연료생산 시스템	
				지열	지열 열 펌프시스템 등 직업 이용 기술	
			지열	지열	지열 발전(간접 이용 기술)	
				지열	육상풍력	
			풍력	풍력	해상풍력	
				풍력	부유식풍력	
			해양 에너지	해양	풍력에너지 융복합	
				해양	조력 및 조류 발전	
			바이오 에너지	바이오	파력 및 해류 발전	
				바이오	해수온도차발전	
		폐기물 에너지	바이오	바이오액체연료생산		
			바이오	바이오매스 가스화		
		하이브리드 신재생에너지	하이브리드	바이오매스 생산 및 가공		
			하이브리드	직접에너지 회수		
		에너지 하베스팅	하이브리드	고형연료제조		
			하이브리드	정제 및 유화		
		수소 에너지	에너지	열분해		
			에너지	생물학적 전환		
비재생 에너지	에너지	독립형/분산형 발전				
	에너지	ZEB/그린 리모델링				
연료전지	연료전지	전력/열/연료 서비스				
	연료전지	열전발전				
에너지 저장 및 운송	에너지	압전발전				
	에너지	광전발전				
전력 저장	전력 저장	RF(Radio Frequency) 발전				
	전력 저장	수소제조/분리				
화학적 저장	화학적 저장	수소저장				
	화학적 저장	수소이용/응용				
전자기적 저장	전자기적 저장	알카리(AFC)				
	전자기적 저장	인산형 (PAFC)				
열역학적 저장	열역학적 저장	용융탄산염형(MCFC)				
	열역학적 저장	고체산화물형 (SOFC)				
물리적 저장	물리적 저장	고분자전해질형 (PEMFC)				
	물리적 저장	직접메탄올(DMFC)				
			시스템(개질기, 스택, 전력변환기, BOP)			

대분류	중분류		소분류	세부분류		
			수소에너지 저장	물리적 수소 저장		
				화학적 수소 저장		
				수소 운송		
			송배전 시스템 및전기지능화			전력설비
						전력계통 운영
						전력계통 계획
기후변화 영향물질 배출저감	생산 분야의 배출 저감	산업의 배출 저감	제조 장비 효율화			
			제조 공정 효율화			
			공장에너지 관리 시스템			
	건축·설비의 배출저감	건축 분야 배출 저감	액티브 건축(조명, 공조시스템)			
			패시브 건축(창호(외피), 단열(재), 차양)			
			가정,건물에너지관리(HEMS, BEMS)			
	수송 수단의 배출저감	교통 및 자동차 분야 배출 저감	건물신재생(건물 적용 신재생에너지 설비)			
			고효율 인버터			
			고효율 변압기			
	기후변화 영향물질 온실가스화 방지 및 관리	탄소 포집·저장 활용(CCUS)	탄소 포집·저장·수송·전환	교통시스템(ITS)		
				자동차/철도		
				친환경 선박		
저탄소항공교통						
탄소 활용 (자원화)			CO2 포집			
			CO2 수송			
Non-CO2 저감		탄소 포집·저장 활용(CCUS)	CO2 저장			
			CO2 전환			
			가스 분리/정제			
		Non-CO2 저감	Non-CO2 포집·수송·관리	CCU		
				인공광합성		
				C1 리파이너리		
모니터링 및 변화 예측	기후변화 예측/모니터링	기후 예측 및 모델링	그린탄소 활용			
			CH4 포집및 활용 저감			
			N2O 수송			
	정보 전달 및 예·경보	기후 정보 및 경보시스템	기후 정보 및 경보시스템	불화가스류(HFCs, PFCs, SF6, NF3) 저감		
				Non-CO2 온실가스 통합관리		
				CH4 활용		
기후변화 영향 대응/	수자원 및 해양생태계 관리	수산자원 및 연안관리	N2O저감			
			해양생태계 관리			
		농업 및 축산, 산림 관리	작물 재배 및 생산 관리	해양환경 관리 기술	기상관측	
					해양오염제어 기술	
	유전자원 및 유전개량, 가축 질병 관리		유전자원 및 유전개량, 가축 질병 관리	유전자원 및 유전개량, 가축 질병 관리	기상장비·시스템	
					위험기상예측	
	기후변화 피해 대비/저감	수환경및 해양 피해 대비/저감	수환경 피해 저감	진단·예측		
				기상예보		
	기후변화 피해 대비/저감	수환경및 해양 피해 대비/저감	수환경 피해 저감	수산자원정보조사		
				수산자원 예측 플랫폼		
				연안환경오염제어 기술		
				연안 생태계 복원 기술		
농작물영향 평가						
농작물 안정 재배 기술						
병해충 예찰및 방제 시스템						
가축 개량 및 생산관리 기술						
안정 생산 기술						
가축질병 모니터링 및 진단						
수생태계 건강성 위협요인 측정 및 감시						
유해물질 저감						

대분류	중분류	소분류	세부분류
		해양 피해 저감	피해 평가 및 예측
			모니터링·예측기술
			재해 취약지역 분석
			재해관리 플랫폼 개발
	산림& 육상 피해 저감 및 생태 복원	산림 피해 저감	대피 및 경계피난시스템
			대형산불기작 구멍 및 피해 저감관리
		육상 피해 저감	도시폭염, 폭우 재해 피해 저감 관리
			생태 모니터링 및 복원
	인체 피해 대비/저감	감염 질병 관리	혹서 및 풍수해로 인한 질병 관리
			알레르기, 전염성질환 등 간접적 영향질환 관리
		식품 안전 예방	식품안전관리

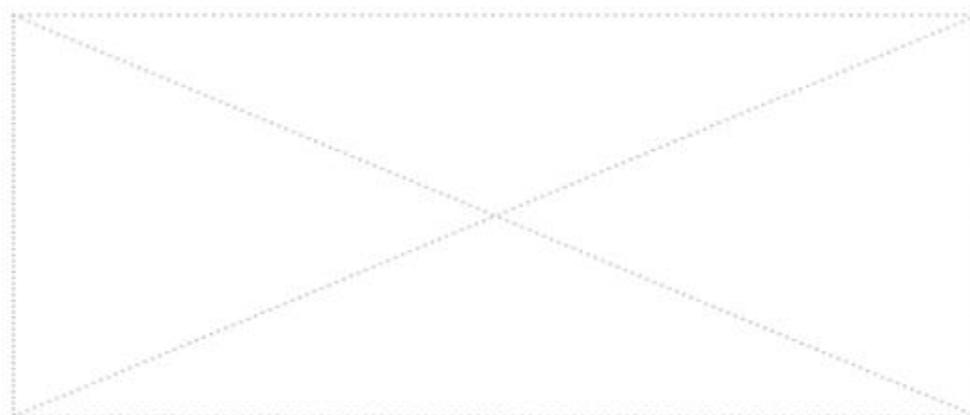
* 자료: 본 연구에서 작성

제3장 R&D 예산 투입 성과

1. 총예산 투입 성과

가. 예산

- 총예산은 2014년도를 제외하고 지속적으로 증가(CAGR:23%)하고 있으며, 2017년에 타년도에 비해 가장 높은 과제수(530개)가 배정되었음
- 2009년부터 2019년까지의 기후변화 대응기술 개발사업 과제에 대한 총예산은 5,600억원이며, 연도별 평균 예산은 509억원임
- 연도별 투입 예산은 2014년을 제외하고 지속적으로 증가 중

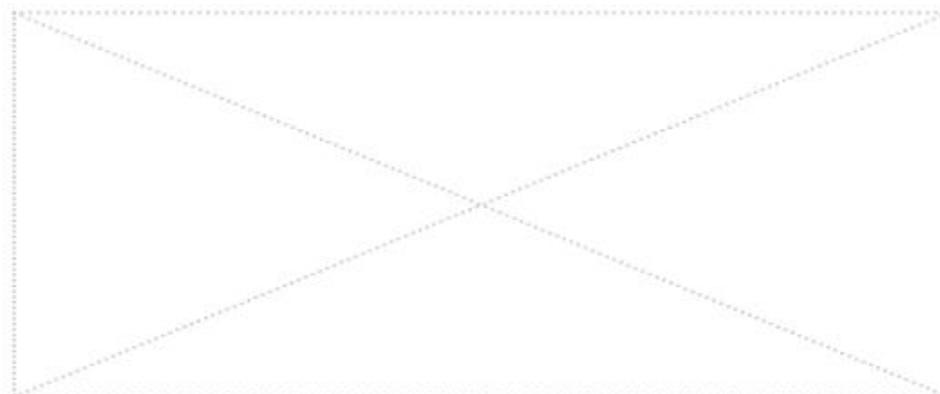


[그림 3-1] 예산 추이

* 자료: 한국연구재단 자료 기반 분석

나. 과제

- 2009년부터 2019년까지의 기후변화 대응기술 개발사업 총 과제수는 3,144개, 연도별 평균 과제수는 286개임



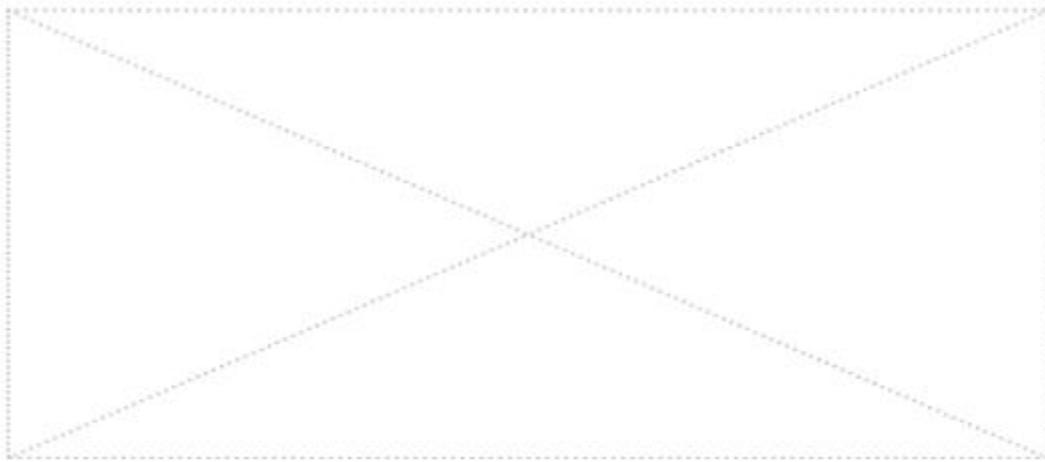
[그림 3-2] 과제수 추이

* 자료: 한국연구재단 자료 기반 분석

다. 총예산 투입 성과: 사업 분류 기준 - 대분류

1) 예산

- 거대과학연구개발사업이 원천기술개발사업보다 예산과 과제수는 높지만, 예산의 연평균 증가율은 원천기술개발사업(42%)이 거대과학연구개발사업의 연평균 증가율(21%)보다 높음
- 거대과학연구개발사업에 대한 총예산은 4,974억원(88.8%), 원천기술개발사업에 대한 예산은 총 627억원(11.2%)임
- 거대과학연구개발사업과 원천기술개발사업 모두 증가 추세이며, 거대과학연구개발사업이 차지하는 비중은 높지만, 원천기술개발사업의 연평균 증가율(42%)이 2배 이상 높음

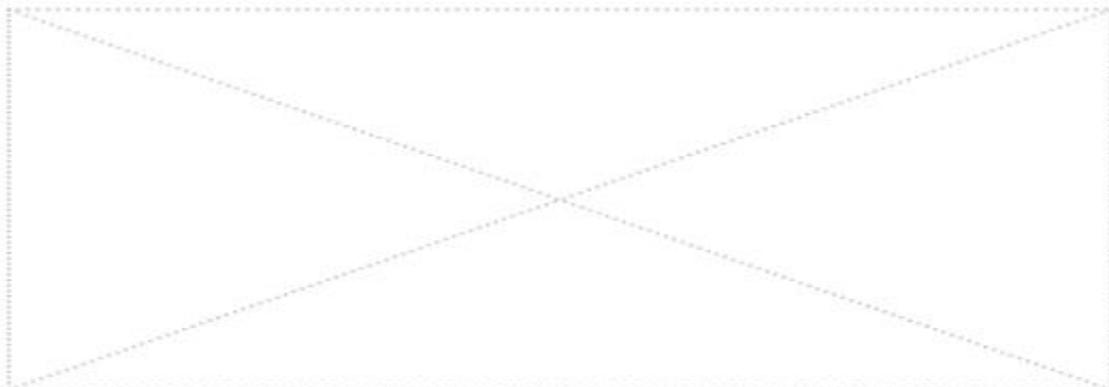


[그림 3-3] 대분류별 예산 추이

* 자료: 한국연구재단 자료 기반 분석

2) 과제

- 총 과제수는 거대과학연구개발사업은 2,805개(89.2%), 원천기술개발사업은 339개(10.8%)로 예산 규모 대비 과제수에서 거대과학연구개발사업이 다소 높음



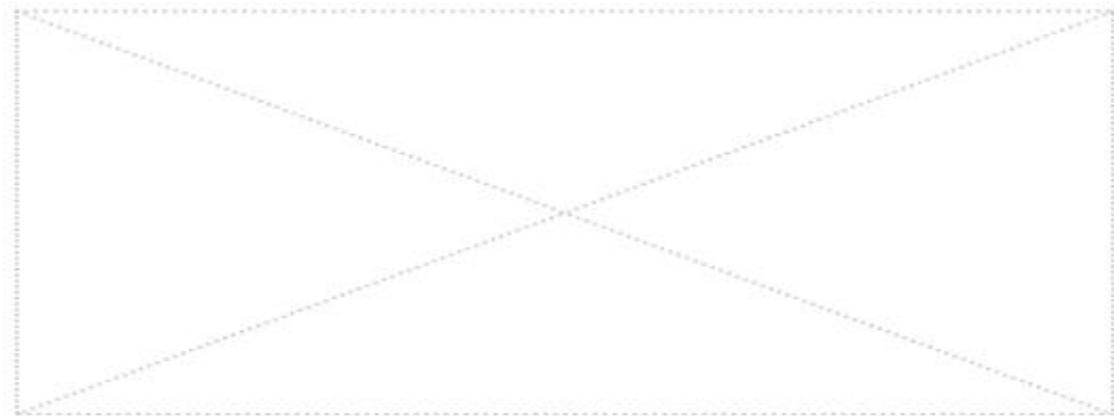
[그림 3-4] 대분류별 과제수 추이

* 자료: 한국연구재단 자료 기반 분석

라. 총예산 투입 성과: 사업 분류 기준 - 중분류

1) 예산

- 중분류 기준으로 기후변화대응기술개발사업이 2011년, 2013년, 2014년을 제외하고, 예산과 과제수의 비중이 매년도 총예산과 과제의 50%를 상회하며 높은 비중 차지
- 중분류 기준으로 C1가스리파이너리사업의 총예산은 626억원(11.2%), 기후변화대응기술개발사업은 3,320억원(59.3%), KOREA CS 2020 사업은 1,654억원(29.5%)임
- KOREA CS 2020 사업을 제외하고 두 사업은 증가 추세이며, 기후변화대응기술개발사업은 2016년 이후 크게 증가

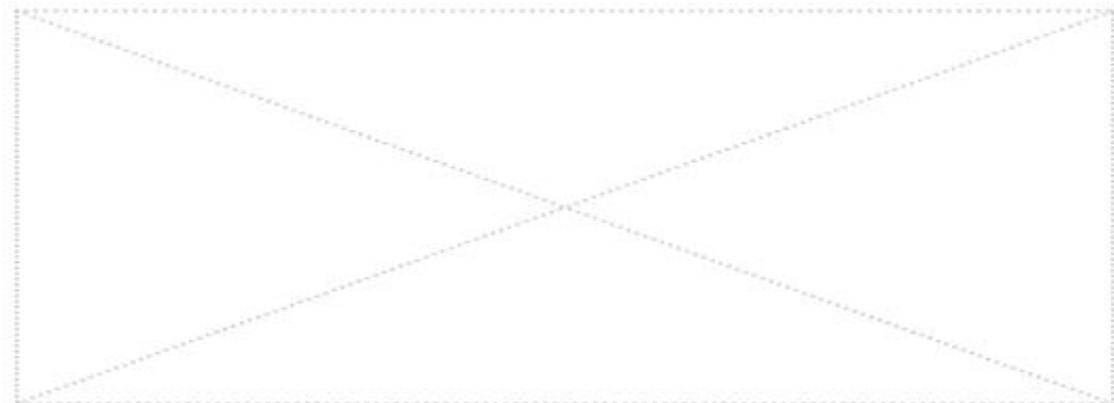


[그림 3-5] 중분류별 예산 추이

* 자료: 한국연구재단 자료 기반 분석

2) 과제

- 총 과제수는 C1가스리파이너리사업 334개(10.8%), 기후변화대응기술개발사업 1,747개 (68.7%), KOREA CS 2020 사업 637개(20.5%)임



[그림 3-6] 중분류별 과제수 추이

* 자료: 한국연구재단 자료 기반 분석

2. 국가 기후기술 분류체계 기준 예산 투입 성과: 예산 및 과제 가. 대분류

- 감축 부문이 예산(91.3%), 과제수(91.0%), 과제당 예산(48.9%) 모든 부분에서 타 분류에 비해 차지하는 비중이 가장 큰 반면, 적응 부문은 예산에 비해 과제수가 많아 과제당 예산의 비중이 높음

<표 3-1> 대분류 예산 및 과제수 비중

예산 비중	과제수 비중
[Blank Chart Area]	[Blank Chart Area]

* 자료: 한국연구재단 자료 기반 분석

<표 3-2> 대분류 예산 및 과제수 추이

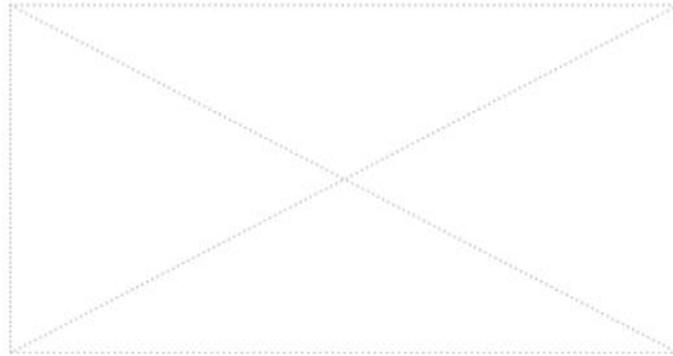
예산 추이	[Blank Chart Area]
과제수 추이	[Blank Chart Area]

* 자료: 한국연구재단 자료 기반 분석

나. 중분류

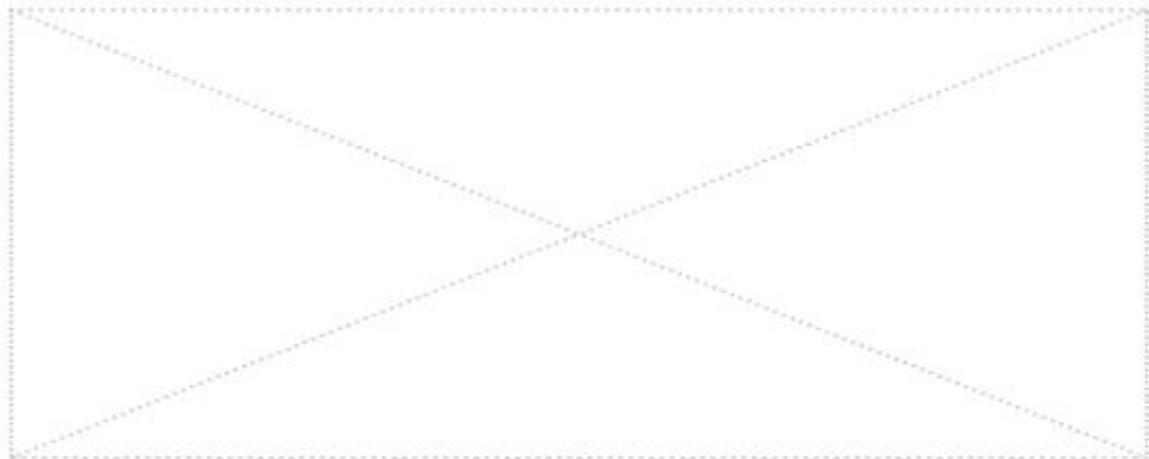
1) 예산

- 온실가스 고정이 총예산의 52.8%로 가장 높은 비중을 차지하고 있으며, 재생에너지(21.6%), 신에너지(17.0%) 순으로 예산의 비중이 높고, 연도별 비중도 3개 분야가 이와 비슷한 순서로 높은 비중을 차지



[그림 3-7] 예산 비중

* 자료: 한국연구재단 자료 기반 분석

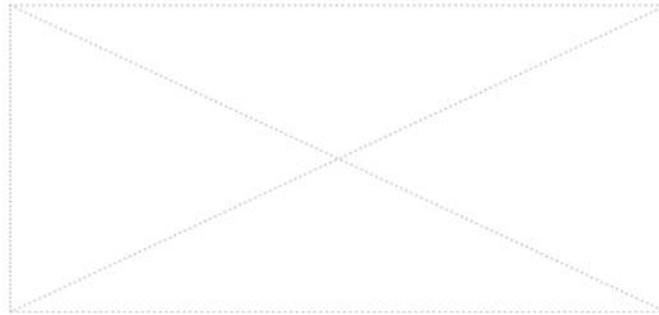


[그림 3-8] 중분류 기준 예산 추이

* 자료: 한국연구재단 자료 기반 분석

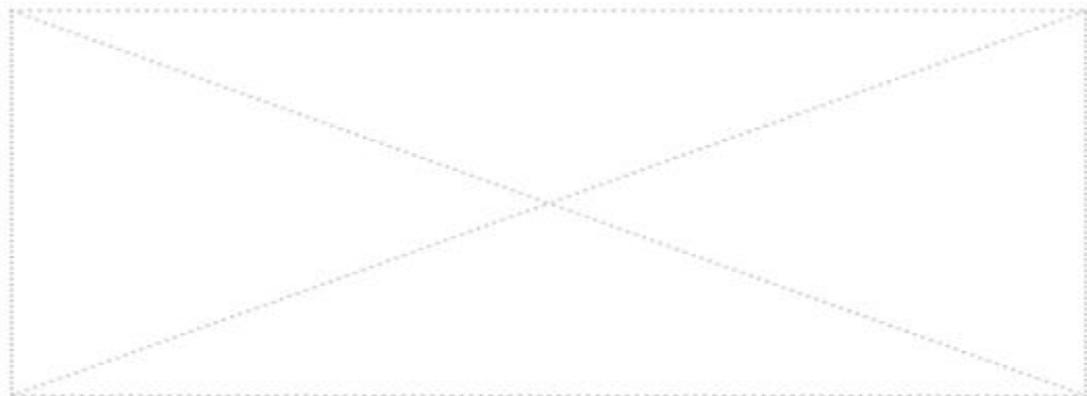
2) 과제

- 온실가스 고정(36.1%), 신에너지(27.6%), 재생에너지(24.6%) 순으로 과제수를 차지하는 비중이 높으며, 온실가스 고정 분야는 '14, '17년에 다수 추진



[그림 3-9] 과제수 비중

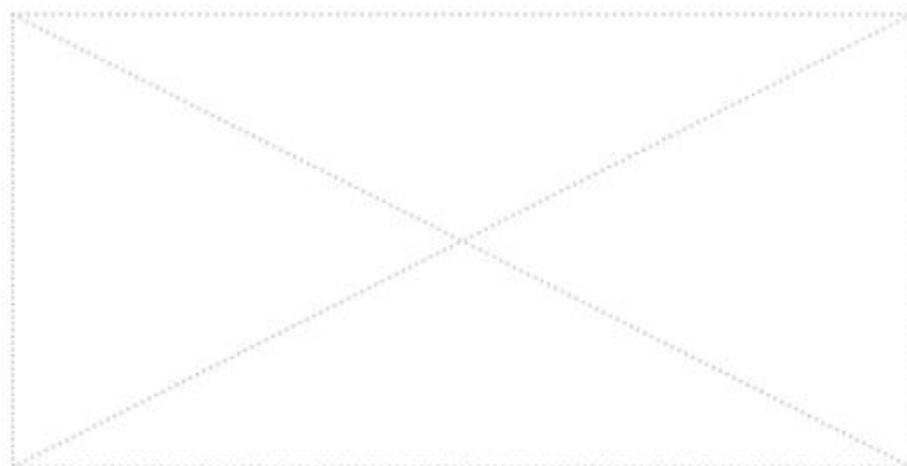
자료: 한국연구재단 자료 기반 분석



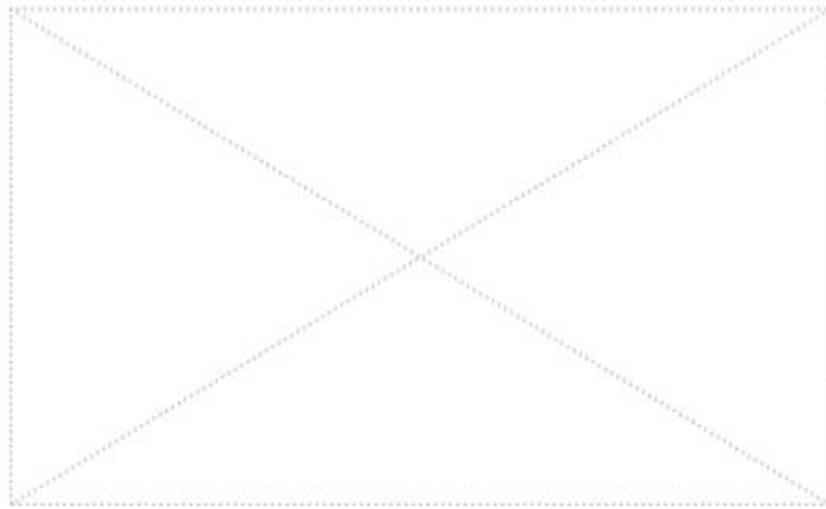
[그림 3-10] 중분류 기준 과제수 추이

자료: 한국연구재단 자료 기반 분석

- 기술변화대응기술개발사업을 통해 '18년까지 총 2,321.9편의 SCI 논문과 특허 603.3건의 성과 창출



[그림 3-11] SCI 논문 성과



[그림 3-12] 특허 성과

제4장 기후변화 대응기술 사업 성과

1. 태양광/태양열

□ 과제별 주요 성과

- 최근 들어 페로브스카이트와 같은 차세대 태양전지에 대한 연구가 활발
- 그동안의 기술 개발의 목표가 고효율에 집중해온 반면, 최근에는 플렉서블, 무독성, 다색, 투명과 같이 실용성 및 심미성, 활용성을 높이기 위한 연구 개발 진행
- 기존에는 원천기술 개발이 많았지만 최근에는 활용기술 개발도 활발해지고 있음
- 고효율 박막 태양전지 제조, 플렉서블 재료 기반 공정 기술 개발, Pb-free 태양전지 개발 등 다양한 재료와 형태의 태양전지에 대한 연구 활발

<표 4-1> 태양광/태양열 과제별 주요 성과

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2015-2020	Pb-free 페로브스카이트형 신규 소재 개발	▶ 광활성 페로브스카이트형 태양기술 개발 ▶ 전달층 및 나노와이어 기반 대체 전극 개발	▶ 고효율 유기태양전지 제작 및 페로브스카이트 기반 가시광 디스플레이 소자 개발
2009-2015	고광전변환 구조를 이용한 고효율 고분자-나노입자 하이브리드 태양전지	▶ 초저가-고효율의 제3세대 태양전지 개발 ▶ ZnO 기반 하이브리드 탠덤 태양전지 구조 개발	▶ 전력변환효율 2%인 태양전지 제작 ▶ 고분자-나노입자 하이브리드 탠덤 태양전지용 중간전극 개발
2009-2015	고분자 나노 입자 하이브리드 태양전지를 이용한 Tandem 태양전지 소자기술 연구	▶ 광학구조체와 결합한 고효율 고분자-나노입자 태양전지 개발	▶ 고효율의 태양전지 소자를 개발해 4.17% PCE 달성
2015-2020	고성능 정공수송물질의 분자설계 및 분자구조제어 합성기술 개발	▶ 고내구성 신규 전하전달 소재 개발 ▶ 분자구조제어 합성기술 개발	▶ 고효율, 고내구성 위한 정공수송물질 개발 ▶ 페로브스카이트 태양전지 효율 18.87% 달성
2015-2020	고신뢰성 무연 페로브스카이트형 대면적 태양전지 기술개발	▶ 고신뢰성 페로브스카이트형 태양전지 개발 ▶ 고효율 친환경 태양전지 원천 소재 기술 개발	▶ 유기전하전달 소재 개발 ▶ Pb-free 페로브스카이트 태양전지 개발 *광전변환효율 2.15%
2015-2020	고신뢰성 페로브스카이트 태양전지용 봉지기술 개발	▶ 고성능, 고신뢰성 페로브스카이트 태양전지용 봉지막 개발	▶ 고성능 페로브스카이트 태양전지 봉지막 개발 *증착 후 원 효율의 95% 이상 유지
2009-2015	고효율 Triple Junction 유기복합 탠덤 태양전지 기술개발	▶ 고효율 유기복합 태양전지 원천 기술 개발 ▶ 터미널 정션 원천기술 개발	▶ 태양전지 소재 및 전극 개발 ▶ 6.5%의 최고효율 양자점 태양전지 개발

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2015-2020	고효율 고안정 유기태양전지 소자 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 모폴로지 기술 및 다층 구조 소자 기술 개발 ▶ 고안정성 계면 소재기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 터너리 고분자 태양전지 제작 *9.46%에너지 변환효율 달성 ▶ 다층 유기태양전지 개발 *효율 9.3%
2009-2015	고효율 태양에너지 수집용 광학 구조 연구	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 높은 투과도, 낮은 면 저항의 표면 플라즈몬 전극 개발 ▶ 유-무기 하이브리드 태양전지 내 광학적 구조체 도입 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 높은 형태 선택성을 가지는 테트라포드 합성법 개발 *태양전지 약 2.2% 효율 ▶ 나노입자 합성법 개발
2009-2015	광결정 구조를 이용한 염료감응태양전지의 광증폭 효과에 대한 연구	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 염료감응형 태양전지 요소기술 개발 ▶ 광증폭 제어 기반기술 및 소재 평가 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 광증폭형 염료감응태양전지 요소 기술 개발 ▶ 염료감응형 태양전지 제작
2009-2015	다기능성 그래핀 소재 및 공액고분자 자기조립체를 이용한 신개념의 고효율 유기태양전지의 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 그래핀 소재를 적용한 고성능 유기 태양전지 개발 ▶ 다기능성 그래핀 및 복합체 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 나노복합체 및 고성능 고효율 유기태양전지 제조 ▶ 그래핀/공액고분자 소재 태양전지 개발
2016-2021	도심 분산전원용 고성능 플렉서블 무기박막 태양전지 원천기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고효율 태양전지 제조기술 개발 ▶ 박막미세가공 기술 및 박막 태양전지 장비 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고효율 대면적 박막 태양전지 제조기술 개발 *플렉서블 굽힘 후 효율 저하 10% 이내 ▶ 투광률 31%의 투광형 셀 제작
2016-2021	무독성 버퍼층을 갖는 다색 플렉서블 박막 태양전지 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 친환경, 심미적 건물용 박막 태양전지 제품 개발 ▶ 무독성 버퍼층 기술 및 고성능 투명전극 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 파장 흡수 극대화 기술 개발 ▶ 투명전극 기술 개발 *그리드 없이 10.4% 효율 증가
2009-2015	벌크 헤테로 접합 무기박막 태양전지 제조 원천기술개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 저가 박막형 고효율 태양전지 개발 ▶ 1차원 나노구조 박막 원천기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 박막 코팅 기술 및 CIS 나노입자 잉크 및 전구체 페이스트 개발 ▶ 나노막대 제조 및 나노튜브 제조 기술 개발
2017-2022	상업용 실리콘 기반 wide bandgap 페로브스카이트 다중 접합 태양전지 요소 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고효율 실리콘 태양전지 기술 개발 ▶ 다중 접합 탠덤 태양전지 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 이중 태양전지 접합 기술 개발 ▶ 전자 전달 재료 증착 기술 개발
2009-2015	신규 광활성 물질 합성 및 연속 공정에 의한 유기 박막 태양전지 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고효율 유기박막 태양전지 및 신규 광활성 소재 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 새로운 형태의 고분자 설계 및 합성
2016-2021	열/광/수에 안정한 다색 염료 및 저차원 탄소소재 전극개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고효율 유기염료소재 개발 ▶ 유기물질계 기반 상대 전극 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 파장 흡수 다색 염료 개발 *R/G/B 불투명 셀 효율 10/10/9% ▶ 상대 전극 개발 *투과성과 95% 효율 달성

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2009-2015	염료감응/CIGS 이종접합 기술 및 고효율 triple junction 탠덤 태양전지 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 터미널 정선 기초원천기술 개발 ▶ 고효율 유기복합 탠덤 태양전지 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 그래핀을 이용한 전극 개발 *투과도 82.2% 달성 ▶ 이종접합을 위한 염료감응 태양전지 광전극 및 대전극 소재 개발
2016-2021	염료기반 반투과형 유기태양전지 소재 및 소자 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 염료기반 반투과 유기태양전지 소재 개발 ▶ 저조도 대비 태양전지 성능 극대화 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고안정성/고투과도 태양전지 서브모듈 개발 ▶ 저조도 태양전지 기술 개발
2009-2015	용액공정 이용 벌크 헤테로 접합 무기박막 태양전지 제조 원천기술개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 용액공정을 이용한 CIS계 무기박막 태양전지 개발 ▶ 3D 나노구조 무기박막 태양전지 제조 원천기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 용액공정 기반 반투명 양면박막 태양전지 개발 *태양전지 효율 5.6% 달성 ▶ 박막 코팅 기술 개발
2009-2015	용액공정 이용 수직성장 n형 산화물 반도체 1차원 나노구조 박막 원천기술개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 태양전지에 응용 가능한 n형 산화물 반도체 제작 원천기술 개발 ▶ 저가 박막형 고효율 태양전지 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ n형 산화물 반도체 기술 개발 ▶ 나노구조 후면 전극 기관 제조 원천기술 개발
2009-2015	용액공정을 통한 고효율 탠덤 유기 태양전지 구현을 위한 원천기술 연구	<ul style="list-style-type: none"> ▶ N/P 접합형 유기/무기물 하이브리드 탠덤 유기 태양전지 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 계면층 조절을 통한 단일 셀에서 5%의 최적화된 효율 달성 ▶ 하이브리드 타입 탠덤 유기 태양전지 소자 제작
2009-2015	우수한 개방전압 특성의 Macromolecular Structure 설계 합성 및 고효율 유기태양전지 원천기술 연구	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 모노머를 이용한 개방전압 특성의 고분자 소재 원천기술 개발 ▶ 고효율 유기 박막형 태양전지 기초 원천 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 소자 구조의 최적화 및 효율 극대화 연구로 광전변환효율 9.3% 달성 (PCE > 11% 목표 대비 85% 달성)
2017-2022	이종 다중접합 태양전지 적용을 위한 효율 18% 이상의 고신뢰성 박막형 InGaP 태양전지 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 다중접합 태양전지를 위한 태양전지 에피 성장 기술 개발 ▶ 고효율 박막형 태양전지 전사 및 소자 제작 공정 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 에피 격자 상수 일치 및 도핑 농도 향상 기술 개발 ▶ 기관 박리 기술 및 박막 태양전지 셀 공정 기술 개발 *태양전지 효율 15.6%
2015-2020	인쇄기반의 고내구성 플렉서블 유기태양전지 소자 및 모듈 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고효율 고안정 유기태양전지 소자 기술 개발 ▶ 인쇄기반의 고효율 유기태양전지 모듈 제작기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고분자를 이용한 적층형 태양전지 개발 *에너지 변환효율 11.4% 달성 ▶ 인쇄기반 유기태양전지 소자 개발 *소자 효율 9%, 필름 균일도 오차 5% 이내 달성
2015-2020	인쇄기반의 고성능 유기태양전지 모듈제작기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 유효 면적 및 효율 극대화 유기태양전지 모듈 제작 기술 개발 ▶ 인쇄형 잉크 및 대면적 인쇄 공정 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 광활성 물질로 인쇄기반의 단위 소자 효율 9% 달성 ▶ 인쇄기반 유기태양전지 모듈 개발로 모듈 효율 7.5% 달성

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2009-2015	차세대형 소자 구조 및 공액 고분자의에너지 준위 조절을 통한 고효율 유기태양전지	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 낮은 밴드갭 공액고분자 및 태양전지 소자구조 개발 ▶ 유기반도체와의 하이브리드 태양전지 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고분자 태양전지 소자 개발로 소자 효율 7% 이상 달성 ▶ 광흡수 증가 위한 신규 억셉터 개발 *태양전지 초기 효율 0.7% 달성
2017-2022	페로브스카이트 기반 삼중접합 탠덤 태양전지 고효율화 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 삼중접합 탠덤용 페로브스카이트 태양전지 소재 및 소자기술 개발 ▶ 삼중접합 태양전지 구현 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 접착형 투명 정공수송층을 이용한 접합 공정 개발 *12.1%의 광전효율 확보 ▶ 페로브스카이트 광 흡수층 접합 기술 개발
2016-2021	폴리머 기반 적용 R2R 공정기반 고효율 플렉서블 CIGS 박막 태양전지 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 대면적 고효율 플렉서블 박막 태양전지 기술 개발 ▶ 플렉서블 박막 태양전지의 고효율 셀 및 모듈 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 폴리머 기반용 저온 플렉서블 박막 태양전지 제조기술 개발 *소면적 셀 효율 20.4%, 대면적 셀 효율 16.0% 달성 ▶ 경량 플렉서블 재료 기반의 패키징 공정 기술 개발
2016-2021	플렉서블 CIGS 박막 태양전지 손실요인 분석 플랫폼을 통한 고효율화 전략 수립	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고품질 CIGS 박막 특성 평가 시스템 구축 및 기술 개발 ▶ 태양전지 소자 및 모듈 문제점 진단 시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 셀 손실요인 분석 및 공정 재설계를 통한 고효율화 분석 플랫폼 구축 ▶ CIGS 벌크 및 계면 특성 이해 및 변조 기술 개발
2020	후속 사업	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 차세대 태양전지로 주목받는 페로브스카이트 태양전지 분야에서 '20년 9월 세계 최고 공인효율(25.5%)을 달성하는 등 전 세계 관련 연구 선도('20.10) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 논문으로 보고된 최고효율인 25.17%의 발전효율을 기록 ▶ 페로브스카이트 태양전지 광활성층 성능-안정성 향상
2020	후속 사업	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 포스텍 연구팀은 '나노기반 소프트 일렉트로닉스연구단' 지원으로 페로브스카이트에 유기물을 첨가해 안정성과 효율성을 동시에 높이는 기술 개발('20.11) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 기존 3차원 구조의 발전효율인 16.1%를 21.3%으로 끌어올렸으며, 수분에도 강해 60% 상대습도 조건에서 50시간이 지나도 초기 효율의 80% 이상 유지
2020	후속 사업	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 무기 페로브스카이트 태양전지와 성질이 다른 고분자 태양전지를 이어 붙인 이중 소재 하이브리드 태양전지 개발('20.10) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 기존의 12.5%의 효율을 45% 끌어올려, 상용화 분기점인 20%에 근접한 18%의 효율을 달성
2020	후속 사업	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 20nm 이하의 선폭을 갖는 고순도 적색, 녹색, 청색 페로브스카이트 양자점 합성 기술을 세계 최초로 개발('20.9) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 천연색 구현이 가능한 차세대 페로브스카이트 LED 구현
2020	후속 사업	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 유연하게 휘어지는 페로브스카이트 태양전지를 개발 및 세계 최고의 광전효율(빛을 전기로 바꾸는 비율) 달성('20.11) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 기존 20%를 넘지 못했던 최고효율 20.7% 달성, 가로세로 20cm의 대면적화 성공, 롤투를 용액 공정(종이를 인쇄하듯 태양전지 대량생산이 가능한 공정) 기술 개발

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2020	후속 사업	▶ 페로브스카이트 태양전지의 광활성 층이 수분에 노출되는 것을 막으면서 전지 효율을 높이는 ‘유기 정공 수송층 물질’ 개발('20.9)	▶ 수분 취약성 문제 해결을 통해 24.82%의 효율 달성
2020	후속 사업	▶ 고효율 페로브스카이트 태양전지를 제작할 때 ‘에틸렌 글라이콜 겹사슬’을 도입하여 페퍼민트오일에 녹는 정공전달 고분자 물질 (Alkoxy-PTEG)을 개발('20.2)	▶ 화학 용매 대체가 가능한 친환경 유기 전자 소재 기술이며, 30일이 지나도 88%의 효율을 보유하여 안전성 증명

2. 해양에너지

□ 과제별 주요 성과

- 해수담수화와 연계된 염분차 발전과 관련한 연구개발을 통해 박막형 패턴형 이온교환막 개발 및 패턴막 전용 RED 스택 개발을 했으며, RED 스택의 발전효율을 38.1% 달성
- 해양에너지 관련한 기술 개발 지원은 최근 신재생에너지에 대한 관심이 커지면서 시작됨

<표 4-2> 해양에너지 과제별 주요 성과

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2017-2021	해수담수화 연계 염분차발전을 위한 분리막 및 융합시스템 핵심원천기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 해수 담수화 연계 RED 전용 패턴형 이온교환막 원천기술 개발 ▶ 패턴형 이온교환막 적용 RED 스택 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 박막형 패턴형 이온교환막 개발 *양/음이온교환막 이온선택도 94/93% ▶ cross-flow 타입의 패턴막 전용 RED 스택 개발 *RED 스택 발전효율 38.1%

3. 바이오에너지

□ 과제별 주요 성과

- 바이오에너지에 대한 연구 개발 중 촉매와 관련한 개발이 활발하게 이뤄져왔으며, 과거에는 바이오에너지 생산 및 설계와 관련한 원천기술 개발이 주를 이뤘다면, 최근에는 응용 및 활용 기술이 주를 이루고 있음
- 주된 기술 개발의 목표는 고수율이며, 고순도, 고선택성과 같이 바이오에너지로 전환하기 위한 기술 개발을 활발히 진행

<표 4-3> 바이오에너지 과제별 주요 성과

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2009-2015	Ligno-biofuel 생산을 위한 바이오융합화학 기초 원천기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 리그닌 관련 기질과 염료 분해활성이 높은 변이 효소 확보 ▶ 다단계 효소 반응 시스템 개발 ▶ 리그닌 분해 효율 극대화 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 리그닌 monomer로 선정된 guaiacol에 대한 수첨탈산소 반응 결과 100% 전환율 및 C6-8 탈산소 탄화수소 연료 수율 90.1% 달성 ▶ 고탄소의 경우, 항공유 등으로 활용 가능한 리그닌 전환 반응 기술 개발 ▶ 백색 부후균 유래 재조합 리그닌 분해 효소의 대장균 발현 시스템 및 refolding 시스템 확보
2009-2015	Ligno-biofuel 원료 확보를 위한 리그닌 저분자화 원천기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 리그닌 분해 세균 발굴 및 유전체 확보 ▶ 목질계 바이오매스의 이용 및 분해 가능성 확인 ▶ 세균 우래 리그닌 분해 관련 효소의 리그닌 관련 기질에 따른 활성 확인 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 신규 리그닌 분해 세균 발굴 및 유전체 확보, 대사경로 분석 ▶ 리그닌 분해 관련 효소의 활성 확인 및 발현 조건 확립 ▶ 리그닌에서 배양시 배양 조건에 따라 리그닌이 저분자화를 GPC를 통하여 확인
2009-2015	SSF 맞춤형 인공미생물 이용 바이오매스의 바이오연료전환 기술연구	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 단백질의 입체구조 규명 및 기작의 분자생물학적 메커니즘 규명연구 ▶ 인공미생물 제작을 위한 플랫폼 기술 및 바이오 부탄올디젤 생산성 향상 기술 개발 ▶ 생물공정제어, 미세유체를 이용한 반응기 최적화 방법 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 셀로바이오스와 자일로스를 동시에 대사하는 대장균 개발 ▶ 부탄올 생합성 효소 모두에 대한 구조 분석 ▶ 다양한 미생물 분석 장치 개발
2009-2015	나노금속 담지촉매를 이용한 리그닌 단량체 전환 기초원천기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 석유대체 탄화수소 연료를 생산하는 촉매 반응기술을 개발 ▶ 나노구조 촉매를 설계, 제조 ▶ 신규 합성법 3개를 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ benzyl phenyl ether 100% 전환율 및 C6-18 탈산소 탄화수소 연료수율 100% 달성 ▶ 나노금속 함량 2-3 wt%인 수첨탈산소 촉매 제조 ▶ 리그닌 분해산물의 수첨탈산소 반응을 위한 나노구조 촉매를 개발

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2010-2016	대사재설계를 통한 바이오이소프렌 고생산 세포공장 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 다각적인 시각에서 숙주균주인 대장균유전자 조작 및 대사재설계 수행 ▶ 전구체 생합성경로 최적화 ▶ 바이오이소프렌 생산성 향상 ▶ 바이오이소프렌 고생산 세포공장 설립 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ HTS용 이소프렌 발색기술 개발 ▶ 고세균 유래 신규 MVA경로 유전자 발굴 및 이종숙주 발현 최적화 ▶ 이소프렌 생산성 50g/L 이상 유지 ▶ 돌연변이(NTG, UV처리)로 생산성과 안정성이 향상된 변이체 개발
2009-2015	리그닌 올리고머 분해를 위한 이온성액체-나노촉매 융합 반응 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 리그닌 분해 전략축매로 산촉매, 커금속 촉매, 그리고 상기 활성점들을 고분산 할 수 있는 촉매 지지체 연구를 중점적으로 수행 ▶ 활성점과 지지체 조절연구를 통해 리그닌 분해 효율을 극대화 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 활성 카본 에어로젤 담지 촉매 대비 수율 10% 향상 ▶ 고체산 촉매를 상기 촉매 도입하여 20% 이상의 방향족 수율 증대 ▶ 촉매 작용 메커니즘 규명
2009-2015	목질계 리그닌의 연료 및 화학원료로의 활용을 위한 수첨탈산소 촉매 및 근입계수 반응시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 제조변수의 최적화를 통해 고체염기촉매(Na-ZrO₂) 개발 ▶ 중요 변수들을 고려한CSTR 반응기를 설계 및 제작 ▶ Empty fruit bunch(EFB)에서 추출한 실제 리그닌을 확보 및 리그닌 활용시의 기술적 한계요인 탐색 및 해결방안을 모색 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 구아이아콜의 수첨탈산소 반응의 최적 촉매로 2Pd32WA 촉매 개발 및 사이클로hex산의 수율을 88% 달성 ▶ 25Co/ZrP 촉매를 개발하였고, 본 촉매를 이용하여 88%의 사이클로hex산 수율을 달성 ▶ 개발된 25Co/ZrP를 사용하여 경제성 평가와 실제 리그닌 공정에 적용 가능성을 확인
2010-2016	바이오 소재를 이용한 고효율 탄소전극의 개발 및 응용	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 대표적인 바이오 소재인 단백질을 이용하여 다양한 형상의 탄소나노구조체 개발 ▶ 바이오 유래 단백질의 탄소화 과정 분석 미 모델 제시 ▶ 탄소나노구조체를 슈퍼커패시터 및 리튬이온배터리 음극재 등 다양한 전극으로 응용 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 전극의 full cell 구성 및 성능구현 ▶ 방전용량 600 mAh g⁻¹, 고출력 특성 10 C, > 400 mAh g⁻¹ 달성 ▶ 원천기술확보 및 full cell 구성 및 성능구현
2017-2021	바이오매스 유래 오일 기반 화학원료 및 수송용 연료 제조기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 식물유의 고부가가치화를 위한 선택적 분리 및 리포밍 기술 개발 ▶ 식물유 복분해 리파이너리 공정과 플랫폼 화학원료 생산기술개발 ▶ 에틸렌 복분해 반응을 위한 균일계 촉매 개발 ▶ 식물유 복분해 산물 활용 바이오연료 및 제품화 기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 복분해용 지방산 에스테르 제조기술 및 포화/불포화 지방산 에스테르 분리 기술 개발 ▶ 올레인산 에스테르의 올레핀 복분해 리파이너리공정 개발(아미노알칸산 합성 수율 83% 이상 달성) ▶ 고효성 및 고안정성 에틸렌 복분해 촉매 개발(수율 96%, 92% 선택성, 3100 TON을 달성) ▶ 식물유 복분해 산물 활용 고부가 제품화기술 개발(제품 합성수율 95% 이상, 순도 98% 이상 달성)
2009-2015	바이오매스를 이용한 C3-C6 화합물 대체연료 생산 원천기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고효율 바이오화합물 및 지방산계열 대체연료 생산 균주 개발 ▶ 친환경적 바이오화합물 및 지방산계열 대체연료 생산기술 확립 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 다양한 유전자 발현 벡터 구축 및 확립 (30개) ▶ 바이오화합물 및 지방산계열 대체연료 생산 균주 23종 개발 ▶ 개발 균주의 초기 효율적 생산을 위한 최적 배양배지 및 운전 최적화 확립

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2009-2015	바이오매스를 이용한 지방산계열 대체연료 생산 원천기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 지방산 생산 균주의 성능 향상을 위한 벡터시스템 조합 최적화 ▶ 목표 탄소수의 지방산 생산성 증진을 위한 배양 최적화 ▶ 지방산 대량 생산을 위한 배지 및 발효공정의 최적화 ▶ 지방산 고생산성 균체의 대량 확보를 위한 고농도 배양 및 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 지방산 생산 증대를 위한 배양 조건 확립 (지방산 생산 최대 37% 증진) ▶ 지방산 고생산성 균체의 대량 확보 및 fed-batch 배양을 통한 고농도 배양 최적화
2009-2015	바이오에너지 생산을 위한 효소의 활성도 및 안정성 증가 설계기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 세 가지 가수 분해 효소의 기능을 향상시키는 새롭고 합리적인 효소 설계 방식 개발 및 설계 전략 구축 ▶ 효소 활성도 증대 전략 개발 ▶ cellulase, xylanase, lipase 안정성 및 활성이 높은 효소 개발 ▶ 산업용 효소 최적의 발현 및 생산 시스템을 구축 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고효성 및 고안정성의 통합 변이주 lipase의 설계 (5종 이상의 고효성 변이주 설계 및 생산, 활성 1.5배 이상 증가) ▶ 공정 효율 증대를 위한 lipase의 효율적인 고정화 방법 설계 ▶ 바이오 디젤 생산 공정 디자인 및 생산
2013-2016	섬유소 기반 산업화용 바이오에너지 생산을 위한 전처리 당화 기술	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 마이크로웨이브 전처리용 반응기에서의 고온(120-190°C)에서의 High-throughput 스크리닝을 실시 ▶ S/L ratio 10%(w/v)의 바이오매스 농도에서 전처리용 촉매 스크리닝을 수행 ▶ 고농도 당화반응기 설계 및 운용 정보 확보 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 효소적 당화율 80%, ethanol 수율 80% 달성 ▶ S/L(solid-to-liquid) ratio 20% 전처리 공정에서의 효소적 당화율 80%, ethanol 수율 85% 달성 ▶ 최종 에탄올 농도 54g/L 달성을 위해 S/L ratio 20% 전처리된 바이오매스를 고당화 공정을(30%, w/v) 통해 당용액 농도 132.6g/L 달성하고 고농도 당화반응기 설계 및 운용 정보 확보
2013-2016	섬유소 자원 기반 산업화용 바이오에너지 생산 기술	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 합성효모 시스템의 개발기술을 통해 XR isozyme 시스템 개발, 발효저해제 내성 효모시스템 구축, C5 제어유전자 탐색을 통한 섬유소바이오매스 활용 통합 합성효모를 제작 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ S/L ratio 20% 전처리된 바이오매스를 고당화 공정(30%, w/v)을 통해 당용액 농도 135 g/L 이상을 달성 ▶ 에탄올 농도 53.0 g/L, 에탄올 생산속도 1.89 g/L-hr, 에탄올 생산수율 0.43 g/g의 최종공정 변수를 달성
2020	후속 사업	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 미생물 발효를 통해 방향족 폴리에스테르*를 생산하는 기술 세계 최초 개발('18. 1) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 강도 및 열안정성이 우수하여 병, 포장재 등에 사용되는 중요한 원료이며, 대표적으로 PET(페트병 원료)
2020	후속 사업	<ul style="list-style-type: none"> ▶ KIST 연구팀은 식량 아닌 바이오매스로 바이오연료를 생산할 수 있는 새로운 미생물을 개발('19. 12) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 쓸모없는 식물성 부산물로부터 바이오연료를 생산 가능하며, 98%의 효율 달성
2020	후속 사업	<ul style="list-style-type: none"> ▶ KIST 연구팀은 버려진 폐지나 택배 박스로 바이오 디젤 원료 만드는 기술* 개발('20.10) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 포도당뿐 아니라 자일로스를 효율적으로 이용하여 디젤 원료를 생산 가능한 신규 미생물을 개발, 생산수율 2배 향상

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2020	후속 사업	▶석영 결정 소재 나노면도날로 미세 조류 바이오매스를 더욱 효과적으로 파쇄할 수 있는 기술* 개발('20.12)	▶날카로운 모서리를 지닌 7~8 나노미터 두께의 나노면도칼을 이용해 광합성 미세조류의 단단하고 두꺼운 세포벽을 단시간에 적은에너지로 파쇄, 아스타잔틴 추출효율(효율 99%) 증대
2020	후속 사업	▶저가의 글리세롤과 이산화탄소를 활용해 젖산과 포름산을 높은 수율로 생산해내는 촉매 공정*을 개발('20.12)	▶젖산과 포름산 생산량 2배 증가, 기존 촉매보다 촉매 활성 10~20배 증대

4. 하이브리드 신재생에너지

□ 과제별 주요 성과

- 연료전지와 수전해의 기술을 융합하여 복합적인 시스템 개발을 목표로, 수전해 촉매를 통해 연료전지의 효율을 상승시키는 기술을 개발

<표 4-4> 하이브리드 신재생에너지 과제별 주요 성과

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2009-2015	고온 나노복합소재 기반 저/고온 성능증폭형 연료전지 및 수전해 복합 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Y-Filler를 고분자에 도입하여 다양한 종류의 전해질막을 제작하여 그 성능을 평가하여 고효율 연료전지 시스템 제작 ▶ 향상제어 촉매, 질소도핑 카본, 촉매 지지체 연구, MEA 최적화 연구 ▶ 결정성 탄소의 산처리 시간과 열처리 온도에 따른 전기화학적 부식 저항력과 연료전지 촉매의 성능을 분석하여 일체형 재생 연료전지(URFC)의 담지체 개발 방향에 대해 제시 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고효율 연료전지 시스템 제작(이온전도도 > 0.35S/cm at 150°C) ▶ 코어-셸 형태의 촉매를 개발 ▶ 촉매손실(half cell test) 11%이하, MEA 출력밀도 0.47W/cm² at 0.6V, 내구성 500시간 (33.96% 이하의 성능감소 달성) ▶ 수전해 촉매를 촉매 층에 첨가함으로써 촉매층의 탄소 부식 저항력을 증가시키는 방법을 개발하였고 URFC의 담지체 개발에 새로운 방향을 제시

5. 수소에너지

□ 과제별 주요 성과

- 수소에너지 관련한 연구 개발 지원은 많지는 않지만 꾸준히 지속되어 왔으며, 초반 수소 생산을 위한 균 개발부터 수소 저장 원천기술, 차세대 수소에너지 원천기술 개발까지 과제의 성격이 점차 고도화되어가고 있는 것으로 보아, 수소에너지 기술이 고도화 및 성숙화하고 있음을 알 수 있음
- 최근 진행하고 있는 차세대 수소에너지 원천기술개발을 통해 효율을 높이고 온실가스를 최소화하면서 대면적의 전극 생산이 가능한 기술을 개발하였음

<표 4-5> 수소에너지 과제별 주요 성과

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2009-2015	분자 및 대사제어 기술의 통합적 접근법을 이용한 고성능 수소생산균 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 환원력 최대화를 위한 목표 유전자를 선정 및 목표 유자의 염색체로부터의 제거 및 과발현 시스템을 구축, 구축된 시스템을 실제 적용하여 확인 및 적합성 평가를 수행 ▶ H marinus hydrogenase와의 산소 성을 비교분석 H marinus genome 상에서 조절 인자의 탐색 및 분석 ▶ 수소생산 대장균에 대한 기초조건 실험 batch test를 통한 기초실험 수행 ▶ hydrogenase의 유전자 분석을 통해 해당 유전자를 규명하고 CODH의 특성을 조사 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 대장균 hydrogenase 1과 H. marinus hydrogenase를 이용한 수소 생산 활성을 확인하고 유전자 확보 ▶ hydrogenase 발현 시스템을 도입한 대장균을 기본 조건에서 배양하고 수소 생산 및 hydrogenase 활성을 확인 ▶ 수소 생산에 이용되는 유전자를 규명
2015-2020	정치형 수소저장 원천기술개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 정치형 응용에 적합한 고용량 수소 저장소재 발굴 및 탈수소화 촉매 개발 ▶ 선정된 수소저장소재를 이용한 수소저장시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 금속수소화물 기반 > 5.5 wt% 또는 70 kg-H₂/m³ 수소 흡착·탈착 특성 규명 ▶ 화학수소물 기반 4.4wt% 이상의 수소저장용량을 가지는 소재 발굴 (3L/min 수방출이 가능한 촉매 확보) ▶ 소재대비 >19wt% 이상의 수소저장 밀도를 가지는 NH₃BE₃에 대한 고성능 금속촉매 확보(수소방출속도>15L/min)
2015-2021	차세대 수소에너지 원천기술개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 태양광에너지원을 기반으로 물을 분해하여 수소를 생산하는 차세대 광-하이브리드 수소생산 원천기술 개발인가 되는 외부전압 없이 구동하는 광전기화학적 하이브리드 수소 생산 시스템 개발 ▶ 광촉매-효소-미생물 융합을 통한 광 바이오 수소 생산 시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Proprietary 도금조의 구성을 통해 수직배향 기공을 갖는 다공성 Ni-Zn-Fe(Co) 전극을 적용한 알칼라인 수전해 셀을 구성하여 효율 85%@ 400mA/cm² 달성 ▶ PEC tandem 시스템을 이용하여 7.7%의 STH 달성, PV-EC 시스템을 이용하여 12% 달성 ▶ 대면적 전극 생산을 위한 300 mm급 Ni 전극용 도금장비를 구성 ▶ 상용막 수준 이상의 액체 KOH 전해질에 대한 저항 최소화 및 수소/산소 가스혼합을 억제하는 무기 복합 다공성 분리막을 개발

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2019	후속 사업	▶ 고용량 수소저장소재 발굴 및 탈수 소화 촉매 개발, 선정된 수소저장 소재를 이용한 수소저장시스템 개발('19.05)	▶ 화학수소화물 포메이트의 저장/방출에너지 효율: 91.9%
2020	후속 사업	▶ 태양광으로부터 수소에너지를 생산하는 광전극의 효율을 향상시키는 기술* 개발('20.12)	▶ 기존 대비 4배 이상 높은 태양광-수소 전환효율을 갖는 수소 전극소재
2020	후속 사업	▶ 수소 생산 및 이산화탄소 환원을 통한 연료 생산에 활용할 수 있는 기술*을 개발('20.10)	▶ 촉매 물질을 개발 및 합성, 촉매 물질의 전자 스핀상태 변화 연구, 세계 최초로 저스핀 망간 중간체 신호를 분석, 기존에 사용되던 촉매에 비해 물 산화 효율을 2배 이상 향상
2020	후속 사업	▶ 미세먼지 원인물질 중 하나인 일산화질소(NO)를 암모니아(NH3)로 100% 바꾸는 기술을 개발('20.12)	▶ 일산화질소의 용해도를 100배 이상 향상, 100시간 이상 작동 가능하여 내구성 증대

6. 연료전지

□ 과제별 주요 성과

- 과거에는 촉매와 관련한 개발이 주를 이뤘지만, 최근에는 시스템 및 공정에 대한 개발을 진행하여 기술의 성숙도 상승을 위한 연구 개발 진행
- 이온전도도와 연료 전지 성능 향상을 위한 기술 개발이 활발하게 이뤄지고 있음

<표 4-6> 연료전지 과제별 주요 성과

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2009-2015	Channel 구조 제어 나노 cluster 형 양성자 전도성 고분자 전해질 연구	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 모노머 및 고분자 막 제조 기술 개발 ▶ 고전도 나노구조 제어 고분자 전해질 막 내구성 확보 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 다중페닐 모노머 4종 및 고분자 전해질 막 개발 ▶ 슈퍼산 이용한 전해질 막 및 새로운 모노머 개발
2015-2020	고분자 연료전지 MEA용 저가 고내구성 백금촉매 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 나노 구조 제어를 통한 고분자 전해질 연료전지용 고성능 촉매 개발 ▶ 고내구성 백금 촉매용 무기계 지지체 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 초격자 구조 합금 촉매 및 촉매 제조법 개발 *촉매 내구성 목표 40% 이하 달성 ▶ 초저담지 백금 기체 확산 전극 개발
2015-2020	고분자 연료전지 MEA용 저가, 고내구성 저백금 촉매 및 전극 혁신 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 나노 구조 제어를 통한 고분자 전해질 연료전지용 고성능 고내구성 담지 촉매 개발 ▶ 탄소 나노 섬유 기반 고성능 촉매 담체 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 저가 고내구성 초격자 백금-코발트 합금 촉매 및 제조법 개발 ▶ 전자빔 및 화학적 환원법을 이용한 고분산 나노입자 촉매 개발
2009-2015	고성능 및 내구성을 지닌 고온형 연료전지용 촉매극 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고온 나노복합소재 기반 성능 증폭형 연료전지 시스템 개발 ▶ MEA 내구성 향상시키는 복합 탄소 지지체 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 덴드라이트 형상 백금 나노입자 개발 *단위 질량 당 성능 약 3배 이상 향상 ▶ 고온 연료전지용 촉매 지지체 개발 *촉매 손실 20% 이하 달성
2016-2020	고온 PEMFC용 초고효율 전극소재 시스템	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 저가 고성능 및 내피독성 강한 비귀금속계 촉매 개발 ▶ 바 코팅 방식을 이용해 균일한 전극 개발 및 촉매 슬러리 조성 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 형광 분석기법을 통해 고효율 다원계 전극 촉매 개발해 고온 연료전지 MEA 성능 개선
2009-2015	고온 나노복합소재 기반 저/고온 성능증폭형 연료전지 및 수전해 복합 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 기존 전해질막에 새로운 합성법 도입하여 고성능 전해질막 개발 ▶ 전극/전해질 계면특성 제어형 울리코머 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Y-Filler를 도입한 전해질막 개발로 이온전도도 성능 최대 600% 향상 ▶ 실리카 기반의 신규 유/무기 복합 필러 개발

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2009-2015	금속나노입자의 전기영동 석출법에 의한 PEMFC용 다단활성층 MEA 제조법 연구	<ul style="list-style-type: none"> ▶전기영동 석출법 이용한 고성능 복합 촉매전극의 제조 기술 개발 ▶다층구조로 촉매층을 제조하는 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶대면적 Pt/C 촉매전극 제조기술의 기본기술 개발 ▶촉매층 박막화 및 다층화 통해 30% 이상의 Pt 감량화 달성
2015-2020	나노분자 구조 조절을 통한 고성능, 장기 내구성의 가교/복합 막 연구	<ul style="list-style-type: none"> ▶숯산기 함유 탄화수소계 가교 고분자 전해질 막 개발 ▶탄화수소계 고분자 나노 복합 막 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶신규 고분자 합성 방법 개발로 전해질막 연신율 32% 이상
2009-2015	단원자 수소 분리 및 확산을 위한 경사기능 복합소재 연구	<ul style="list-style-type: none"> ▶경사기능형 혼성 복합 소재 및 단순화된 GDL층 개발 ▶전도성 세라믹 혼성 복합 소재 합성 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶최적화된 HPS 공정기술로 기공률 0.0001% 이하의 치밀질 분리막 제조 기술 개발
2017-2021	동적변화 대응형 고성능/고내구성 SOFC 소재 및 셀 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶동적변화에 대한 고내구성 양극/음극 및 전해질 소재 개발 ▶운전범위 확대형 고효율 장수명 SOFC 셀 및 공정 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶이온전도도 0.05 S/cm 이상의 고성능 세리아 버퍼층 소재 개발 ▶탄소침적 억제용 기능성 나노 촉매 소재 설계 및 합성 기술 개발 *침적율 1.6% 달성
2009-2015	멀티스케일 모델링 및 실험적 성능진단을 통한 연료전지 소재, 디자인, 열 및 물 관리 기법 최적화 연구	<ul style="list-style-type: none"> ▶연료전지 성능 및 내구성 해석 모델 개발로 고성능 최적 MEA 개발 ▶거시적, 미시적 연료전지 모델링 	<ul style="list-style-type: none"> ▶연료전지 구조해석 모델 개발 ▶Ni 촉매를 이용한 전해질 막 개발로 1.2A/cm² 이상의 MEA 성능 달성
2015-2018	비과불화탄소계 전해질막 특성 분석을 위한 분자모델 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶분자동역학 전산모사 기술 이용한 특성 분석 모델 개발 ▶수소이온전달 특성 분석 메조스케일 분자모델 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶일축인장 측정법 개념 적용 프로그램 script 개발 *60단계 인장특성 전산모사 한 번에 수행 가능 ▶숯산기 도입 메조스케일 모델 개발
2015-2020	신개념 고효율 연료전지 공기극 촉매 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶금속간화합물 촉매 크기 및 모폴로지 제어 위한 합성법 개발 ▶고효율 고내구성 촉매 원천기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶크기 및 모폴로지 제어 백금-코발트 나노와이어 합금 촉매 개발 *지지체 내구성 기준 백금 질량 당 활성감소율 26%
2009-2015	일체형 재생 연료전지의 고성능/장수명 산소극 전극 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶백금계 및 비백금계 합금촉매 개발 ▶탄소계/비탄소계 및 탄소계/탄소계 복합 지지체 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶복합 촉매 고분산 기술 개발로 고성능 장수명 Bifunctional 합금 촉매 제조 ▶촉매담지량: 1.5mg/cm² ,수명: 500시간

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2009-2015	질소순환 사이클의 Pt-free 환원 반응을 이용한 신개념 연료전지	<ul style="list-style-type: none"> ▶안정화된 반응 효율을 위해 귀금속 대체 나노촉매 개발 ▶질산 및 질소산화물의 환원반응을 이용한 연료전지 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶비금속 산화물 이용한 연료전지 개발 *질산 이용한 연료전지 성능 68mW/cm²까지 향상 ▶철 산화환원쌍 이용한 연료전지 개발 *성능 300 mW/cm²
2020	후속 사업	<ul style="list-style-type: none"> ▶초음파분산 습식침투법 공정을 개발하여, 고체산화물연료전지 성능 2배 이상 향상('20.10) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶촉매용액방울의 지름을 0.01mm로 줄여 산소 유입시 방해물 최소화시켜, 기존 LSCF/GDC 복합체 공기극 사용대비 약 2.3배 이상의 성능 향상 및 우수한 장기 내구성 확인
2020	후속 사업	<ul style="list-style-type: none"> ▶가습장치가 필요 없어 소형·경량화 가능한 이중교환막연료전지 개발('20.2) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶가습 없이 수소나 산소가 공급돼도 최고 850mW/cm²의 출력과 700시간 이상 지속되는 안정성 확보 가능
2020	후속 사업	<ul style="list-style-type: none"> ▶수소 분리 공정을 거치지 않고 암모니아에서 수소연료전지에 직접 사용할 수 있을 정도의 고순도 수소를 대용량으로 추출하는 기술 개발을 통해, 99.99% 이상의 고순도 수소 생산('20.8) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶분해 반응 온도를 기존 550°C에서 450°C까지 낮추고, 수소 생산속도는 기존 기술 대비 2배 이상 증대
2020	후속 사업	<ul style="list-style-type: none"> ▶고체 산화물(세라믹) 연료전지를 3차원 마이크로 입체구조로 제작하는 기술*을 개발, 500°C의 비교적 낮은 작동 온도에서 성능을 기존 평면 세라믹 연료전지보다 50% 높이는 데 성공('20.7) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶기존 평면 구조보다 성능이 50% 이상 높고 안정성이 뛰어나며, 16cm² 이상 대면적으로 제작이 가능하여 저온형 세라믹 연료전지 중 세계 최고 수준의 출력 성능 확보

7. 이차전지

□ 과제별 주요 성과

- 초반 바인더, 소재에 대한 원천기술 개발에서 최근에는 공정 및 제어기술, 설계, 합성 기술 등 전지 생산을 위한 연구 개발 진행

<표 4-7> 이차전지 과제별 주요 성과

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2010-2016	3차원 응력분산구조의 다원계 전극소재 제조기술개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 콜로이드 자기조립 기반 역전된 형태의 3차원 전극 형성 기술 개발 ▶ 고용량 장수명 전극 제작 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 역오팔 카본 구조 기반 실리콘-카본 다원계 전극 개발
2010-2016	Graphene 복합화 음극재에 관한 연구	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 다량의 Graphene 합성 방법 및 복합 나노 소재 합성법 개발 ▶ 대형 Li 이차전지용 고용량 음극 소재 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 샌드위치형 Si@C-graphene 구조의 최적 소재 개발 *400회 충방전 이후 용량 유지율 93%
2017-2021	NCM계 양극/고체 전해질 설계에 기반한 전고체 전지 핵심 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 전고체 전지 적용 위한 NCM 양극 활물질 소재 성능 향상 기술 개발 ▶ NCM 고체전해질 소재 제조 및 계면 제어 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 전고체전지용 NCM양극 최적화 위한 입도 조절 합성 기술 개발 *0.5C 기준 96%의 수명 특성 ▶ 우수 모폴로지 갖는 고체전해질 합성 조건 개발
2017-2021	R2R 타입의 고이온전도 기능성 고체전해질 막 핵심 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고이온전도성 복합 고체전해질 막 제조 기술 및 신규 고체전해질 소재 개발 ▶ 유연성/이온전도성 고분자 지지체 제조 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 합침공정, 가압공정을 통한 복합 고체전해질 막 제조 기술 개발 ▶ 신규 조성의 황화물계 고체전해질 소재 및 솔루션 공정 기술 개발
2017-2021	R2R타입의 전고체 전지용 기능성 바인더 핵심 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 수소 결합 및 공유 결합 활용한 고결착 바인더 개발 ▶ 이온전도성 고체전해질용 바인더 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 황화물 및 산화물계 고결착 고체 전해질용 바인더 개발 ▶ 황화물 및 산화물계 이온전도성 고체전해질용 바인더 개발
2009-2015	고온내구성 전지용 이온성액체 전해질	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 대용량 전지의 고온환경 및 안전성 개선 위한 이온성 액체를 전해액으로 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고온내구성 전지용 이온성액체 전해질 전해액 g당 자가소화시간 25초 이하, Full cell cycle 용량 보전 95%
2010-2016	고출력 리튬이온이차전지를 위한 유무기나노복합 음극활물질 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고출력 리튬이온 이차전지 적용 위한 탄소 복합 무기나노 음극재료 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 탄소/무기금속 나노복합체 구조 제어 통한 고출력, 고에너지 전극활물질 개발 *수명 :초기 대비 100cycle후 90% 이상
2010-2016	고출력, 고속 충방전 금속산화물 나노튜브 제조 공정 및 음극 응용 기술	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 1차원 나노구조물 적용 차세대 초고효율 리튬이온 이차전지용 전극 소재 원천기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 이종 접합 구조의 1차원 금속 산화물 나노튜브 제조 기술 개발
2009-2015	고효율 리튬 이차전지용 초박막 무기나노입자 세퍼레이터 제조 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 3차원 콜로이드 이용해 계층형 신규 3차원 기공 구조의 다공성 지지체 개발 ▶ 고내열성 유-무기 하이브리드 분리막 제조 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 대면적 오판구조의 다공성이 제어된 분리막 제조 기술 개발 ▶ 상전이 메커니즘 활용한 딥코팅 방법으로 고내열성 분리막 제조 기술 개발

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2009-2015	고효율 리튬이차전지 음극소재를 위한 원자수준 실리콘 클러스터-탄소 고분산 복합체 제조	<ul style="list-style-type: none"> ▶소재의 수분산 특성 이용하여 실리콘-그래핀 film 및 platelets 복합체 개발 ▶전이금속 산화물/탄소 복합체 제조법 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶전기전도성 우수한 (18.7 S/cm) 실리콘-그래핀 복합 film 개발 *실리콘 이론용량 약 100% 발휘 ▶금속 산화물 나노입자를 활용한 제조 공정 개발
2009-2015	그린에너지 저장용 고효율 리튬이차전지 핵심소재 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶고용량 고출력 저가형 올리빈계 나노구조 양극 활물질 개발 ▶실리콘 나노입자 탄소 복합체 및 고내열성 복합 분리막 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶구형 모폴로지 제어 기술 및 카본 코팅 기술 개발 ▶분리막에 내열성 부직포 지지체 및 가교 고분자 바인더 도입 *열 수축 5% 이하 달성
2009-2015	그린에너지 저장용 리튬이차전지의 친환경 수분산 바인더 개발	▶고용량 장주기 리튬이차전지 구현 위한 친환경 수분산 고분자 바인더 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶새로운 형태의 수분산 바인더 개발 *초기 효율 5% 향상
2009-2015	그린에너지 저장장치를 위한 고용량, 고출력, 고안정성 올리빈계 LiMn _{1-x} FexPO ₄ 양극활물질 개발	▶올리빈 구조를 갖는 양극활물질 설계 및 양이온 치환 양극소재 합성 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶고용량 고밀도 고안정성 올리빈형 양극 소재 합성법 개발 ▶최적의 양이온 치환 종류 선정 (Mn) 및 양 선정(0.07)
2010-2016	금속 산화물의 비정질화를 통한 속도특성 향상	▶방전용량 및 속도특성 성능 향상을 위한 비정질 금속산화물 음극재 도출	▶Ti, V 복합체 비정질 산화물 개발 통해 속도특성 극대화
2010-2016	다차원 이온 전달 통로를 갖는 새로운 결정 구조의 Li ₂ MPO ₄ F 전극 소재의 개발	▶다차원 이온 전달 통로 가지는 새로운 양극 물질 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶Cyanide 기반 신규 소재 개발 (방전용량 at 1 C/0.1 C > 70%) ▶Multi-diffusion path 갖는 개발된 신규 소재 개발
2009-2015	리튬/공기 이차전지용 리튬 전극의 구조개선 및 고안전성 전해질 개발	▶리튬 금속/전해질 계면 안정화 첨가제 개발 및 흡합 유래 폴리도파민 고분자통한 분리막 개질 기술 확보	<ul style="list-style-type: none"> ▶리튬 이차전지 최고 성능 및 장기 수명 특성 확보 ▶흡합 유래 폴리도파민 표면 처리 후 분리막 친수성 향상 및 함침량 125%로 증가
2009-2015	리튬/공기 이차전지용 박막 고체 전해질 기술 개발	▶리튬/공기 전지 구동을 위해 고체 전해질을 이용한 유/수계 복합 전해질 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶고체전해질 이용한 유/수계 복합 리튬/공기 전지 시스템 구축 및 성능 향상 * 과전압 1.4V에서 0.4V까지 감소
2011-2018	리튬이차전지용 신규 양극/전해질 및 신규 전지시스템 기초·원천기술 개발	▶고용량/고출력 리튬 이차전지 및 장수명/고안전 리튬 이차전지 핵심 원천기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶신규 표면물질이 형성된 신규 고용량 고출력 양극소재 개발 *1C 대비 2C 용량 약 90%로 향상
2009-2015	리튬이차전지용 이온성 액체형 고분자 전해질의 합성 및 전기화학적 특성 분석	▶이온성 액체형 고분자 전해질 이용한 리튬 이차전지를 통해 고용량 고안전성 장수명 차세대 리튬 이차전지 소재 개발 핵심 기술 확보	▶이온성 액체형 고분자 전해질을 적용한 셀 제조 (셀 초기 용량 양극 LiCoO ₂ 적용) : 142.7 mAh/g 이상, 수명특성 : 95.5% @ 100회 이상
2010-2016	리튬이차전지용 전극소재 자기완화형 구조제어 및 계면기능제어 기술개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶실리콘 음전극 계면형상 제어기술 이용한 전극 소재 3차원 형상구조 제어기술 개발 ▶인공 SEI 계면특성 제어기술 이용한 전극계면 기능제어기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶4V급 양전극 제조 기술 및 다원계 자기완화형 구조 음전극 소재 기술 개발 *초기효율 92% 이상, 방전전압 4.0V 이상
2010-2016	분자제어를 통한 고출력 리튬이차전지용 고성능 탄소복합체 음극활물질개발	▶리튬이온의 이동도 향상 및 셀룰로오스, 탄소나노튜브와 그래핀을 복합화하여 고출력 탄소복합 음극활물질 개발	▶Si@C-graphene 복합체 개발로 2282mAh/cc, 초기효율 80.7%, Cap(2C)/Cap(0.2C) 77.0% 목표 달성

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2010-2016	생체재료 템플레이트 기반 자기구조 제어형 산화물 전극 소재기술 개발	▶ 다양한 크기와 구조 조성의 고효율 나노 복합체 구조물을 제작하여 고성능 전극 재료 개발	▶ 그래핀 하이브리드 전극구조체 기반 고안정성 고효율 전극제작기술 개발 *나노복합체 전극 출력 90% 이상
2009-2015	신개념 리튬/공기 이차전지용 핵심 요소기술 개발	▶ 리튬 전극 안정화 기술 및 공기 전극 표면 개질 기술 개발	▶ 리튬 덴드라이트 억제 기술 개발 ▶ 홍합유래 고분자 코팅 통한 활성 면적 극대화로 전 대비 수명 특성 166% 이상 개선
2011-2018	신규 비수계 활물질 및 고농도/고전압 플로우 전지 기술 개발	▶ 비수계 고전압 신규활물질 설계 및 합성기술 개발 ▶ 신규활물질/멤브레인 맞춤형 고에너지밀도 플로우 전지 설계 및 개발	▶ 활물질/멤브레인 맞춤형 비수계 RFB :에너지밀도 110Wh/L 이상, 에너지효율 80% 이상 달성
2010-2016	일차원 나노선 기반의 고용량 리튬이온 이차전지용 음극 소재 개발	▶ 고용량 나노선 및 하이브리드 나노구조체 대면적화 기술 개발 및 고용량 고효율 프로토타입 셀 제작	▶ Electrospinning 기반 기관상 대면적화 전극 기술 및 Ni wire 직접성장 기반 대면적 전극 개발
2010-2016	차세대 리튬이차전지용 전극소재 자기완화형 구조제어 및 전극계면기능제어 사업단	▶ 고안정성 및 열안정성 전극소재를 위한 전극계면 기능제어기술 개발 ▶ 실리콘 음전극 계면형상 제어기술 이용한 전극소재 3차원 형상구조 제어기술 개발	▶ 방전전압 4.0V 이상인 4V급 양전극 성능 및 초기효율 92% 이상인 1-D 나노구조 실리콘계 음전극 소재기술 확보
2010-2016	차세대 수용액 전해질 이차전지용 핵심요소기술 개발	▶ 탄소나노복합체 전극 물질 개발 및 전극 물질의 대면적화 위한 원천기술 확보 ▶ 전극 물질 실시간 분석 툴 구축	▶ 전극 물질 및 전기화학적 반응 거동 연구를 위한 다양한 실시간 분석 툴 개발 ▶ 탄소나노복합체 구조 가지는 전극 물질 제조, 적용 및 대면적화 기술 확보
2010-2016	차세대 이차전지용 1차원 나노전극소재 개발	▶ 나노구조를 가지는 활성이 높은 전극을 이용한 초고효율 리튬이온 이차전지 기술 개발	▶ 나노선 적용 고효율 박막 전지 개발, 4.7V 이상의 고전압 전고상 박막 전지 제작 조건 확보
2009-2015	탄소재 및 실리콘-탄소복합체 음극활물질의 열적안정성 향상	▶ 전기화학적 특성 및 열적 안정성 우수한 탄소재 및 Si-탄소 복합체 활물질 구조설계 및 제조공정 개발	▶ 고용량 고효율 core-shell 구조를 갖는 복합 음극활물질 제조 *고율 충방전 특성, 수명특성 향상
2017-2021	튼튼한 전극/고체전해질 설계에 기반한 에너지저장 시스템용 초고안정성 전고체 전지 핵심 기술 개발	▶ 고이온전도 가능성 고체 전해질 소재 및 고체 전해질 맞춤형 바인더 소재 개발	▶ 고체 전해질 소재 3.9 mS/cm의 이온전도도 달성 ▶ 높은 결착특성 지닌 황화물계 고체전해질용 바인더 개발
2020	후속 사업	▶ 기존 배터리에 사용되는 흑연계 음극(-) 소재보다 전지 용량이 4배 이상 큰 실리콘 기반 음극 소재의 고질적인 문제를 손쉽게 해결하는 기술을 개발('20.06)	▶ 상용 배터리 대비 25% 높은 에너지 밀도(406Wh/kg → 504Wh/kg) 획득
2020	후속 사업	▶ 이차전지의 충전속도를 4배 이상 향상시킬 수 있는 고안정성 계면제어 기술을 개발('20.09)	▶ 기존보다 4배 이상 빠르게 흑연 음극을 충전하는 데 성공. 빠른 충방전 속도로 흑연음극의 이론용량급인 370 mAhg ⁻¹ 을 획득하였고 고안정한 충방전 사이클 성능을 획득

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2020	후속 사업	▶ 이리튬과 전이금속을 포함한 양이온들의 분포 형태가 전극 물질의 초기 반응 활성화와 가역적 전기화학 반응에 중요한 요인이 되는 것을 최초 밝힘('20.08)	▶ 코발트(Co)를 사용하지 않고도 많은 에너지를 저장할 수 있는 리튬 과량(Co free 3d-transition metal based Li-rich) 양극 소재를 개발
2020	후속 사업	▶ 아연 전극의 열화 메커니즘을 규명하고, 이를 해결함으로써 전 세계에서 보고된 모든 레독스 흐름 전지 가운데 가장 오래가는 수명을 가지는 수계 아연-브롬 레독스 흐름 전지 개발('20.10)	▶ 고밀도의 결합 구조를 지닌 탄소 전극을 아연-브롬 레독스 흐름 전지에 적용해, 리튬이온전지의 30배에 달하는 높은 총방전 전류 밀도(100mA/cm ²)에서 5,000 사이클 이상의 수명 특성을 구현하는데 성공
2019	후속 사업	▶ 프린팅 공정을 이용해 안전성 높은 '다형상 전고체 리튬-황 전지'*를 개발('19.11)	▶ 일반적인 액체 전해질의 리튬-황 전지보다 2배 이상의 긴 수명 주기, 젤 형태로 인한 높은 기계적·화학적 안정성, 여러개의 전지의 직렬 연결을 통한 높은 작동 전압 확보 가능
2019	후속 사업	▶ 새로운 전지 시스템인 리튬이온 전지 내 인화성 유기 액체 전해질을 난연성 고체 전해질로 대체한, 고신뢰성 디지털 트윈형 전고체 전지 모델* 개발('19.11)	▶ 기존 리튬이온전지 대비 밀집형 전지팩 설계가 가능하여 전지의 에너지밀도 향상 가능

8. 산업의 배출 저감

□ 과제별 주요 성과

- 업체들의 실태 조사를 통해 오존 생성 데이터 확보 및 분석을 위한 프로파일을 개발
- 모델링 및 프로파일 개발, 데이터를 이용한 분석 기반 마련을 통해, 산업의 배출 저감 관련 다양한 분석 및 예측, 모니터링 가능

<표 4-8> 산업의 배출 저감 과제별 주요 성과

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2017-2022	생활밀접형 배출사업장의 오존전구물질 목록화 및 오존생성 상관성 규명	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 생활주변 5개 업종의 형태 및 운영실태 조사 ▶ 오존생성에 기여하는 주요 환경인자 및 오존전구물질의 사전 목록화 ▶ 배출원별 화학종 프로파일 작성, CAPSS 코드할당, SMOKE와 CMAQ 모델을 이용한 VOCs 배출량 산정 및 시공간적 오존농도 계산 ▶ 오존의 공간농도분포 분석, 생성오존의 확산 및 소멸 process 연구 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 모델링을 통한 도심 생활밀착형 배출원별 VOCs와 오존 생성간의 상관성 규명을 위한 전단계로 배출원별 VOCs 시공간 분배계수를 개발 ▶ 모델에 적용 가능한 화학종 구성 프로파일 개발 ▶ CAPSS 2015의 데이터를 IDA (inventory data analyzer)의 형식으로 변환하였으며, SMOKE를 구동할 수 있는 기반을 마련

9. 교통 및 자동차 분야 배출 저감

□ 과제별 주요 성과

- 친환경 소재 개발이 주를 이루고 있으며, 높은 흡음 성능 달성을 목표로 흡음소재에 대한 연구 개발이 이뤄지고 있음

<표 4-9> 교통 및 자동차 분야 배출 저감 과제별 주요 성과

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2010-2016	청정 초임계 유체 공정을 이용한 자동차용 친환경 고분자 소재 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶내열성과 강도를 동시에 갖는 폴리락티드 소재 개발 ▶나노 복합화 소재 개발 ▶초임계유체 상거동 연구 	<ul style="list-style-type: none"> ▶그래핀 충전 시 흡음성능 30% 향상 ▶HDT : 100 ℃, 기계적 강도 : 150 Mpa 달성 ▶그래핀 0.1wt% 충전시 흡음성능이 220% 향상
2010-2016	초임계유체를 이용한 자동차용 친환경 나노복합소재 연구 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶초임계 유체공정을 이용하여 셀룰로오스아세테이트(CA) 에어로겔 연구 ▶초임계 유체공정을 이용하여 각종 고분자 CA, EVA PU 등에 유기치환된 몬모릴로나이트(MMT) 등과 나노복합체 제조 연구 ▶초임계유체 공정을 이용하고 그래핀 등 나노입자 활용한 나노복합체를 제조해 자동차용 흡음소재 개발 연구 	<ul style="list-style-type: none"> ▶초임계 유체를 이용한 자동차용 흡음소재 개발 (흡음 성능: >0.35 at 1 kHz, 밀도: <18kg/m³)

10. 탄소 포집·저장·수송·전환

□ 과제별 주요 성과

- 탄소 포집 및 전환 관련 기술 개발이 활발하여 이를 위한 촉매에 대한 연구 개발이 주를 이룸
- 촉매 관련한 기술 개발은 촉매 자체를 개발하는 것부터 촉매의 전환율 및 수율을 높여 탄소 포집 및 저장, 수송, 전환에서의 효율성 증대가 목적

<표 4-10> 탄소 포집·저장·수소·전환 과제별 주요 성과

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2017-2024	C1 가스 활용 미생물 기반 C2 알코올 생산 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고농도 미생물 배양기술 확립을 위한 성장 배지 설계 및 성장인자 공정 특성 분석 ▶ 에탄올 생산성 및 선택도 향상을 위한 배지 설계를 위한 영향 인자 공정특성 분석 ▶ 교반조 형태의 2.5L급 생물반응기를 이용하여 에탄올 생산 운전 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 에탄올 생산농도 7g/L를 달성 ▶ 고농도 미생물 성장 배지 설계 ▶ 에탄올 생산성 향상 배지 설계
2015-2021	C1 가스로부터 방향족 화합물 제조 촉매기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ CO(합성가스)를 출발물질로 2단 반응이용한 방향족 화합물 제조 공정 및 촉매 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 방향족 화합물 제조에 적합한 탄화수소 제조를 위한 철계 FTS 촉매 개발 ▶ FTS 유래 탄화수소로부터 방향족 화합물 제조를 위한 최적 촉매 개발 ▶ FTS + 방향족화 2단 반응 공정 조건 변화에 따른 BTX 수율 최대화(전체 BTX 수율 > 35 % 이상)
2016-2021	C1 기반 발효액으로부터 2,3-butanediol 회수 공정 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 수상이성분계 및 이온교환수지에 의한 유기산, 유기물, 이온성 염 제거 효율 측정 및 시스템 설계 ▶ 2,3-BDO/H₂O 계 고액 상평형도 및 빙정 생성, 성장 속도 측정 ▶ 역삼투 복합 분리막 제조 및 분리막 시스템에서의 2,3-BDO 분리 인자, 유속, 투과 압력 측정 ▶ 혼합용액 성분에 대한 열역학 데이터 및 모델 확보, 2,3-BDO 증류 공정 회수율 및 순도 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 발효액에 포함된 이온성 염 및 유기물을 제거하기 위한 이온교환수지 선정 연구 (2,3-BDO 분리 인자: 1.2 이상) ▶ 동결 농축에 의한 2,3-BDO 농축 용액과 고순도 빙정 제조 기술 개발 (2,3-BDO 농도: 50%, 빙정순도 >99%) ▶ 역삼투막 시스템에 의한 2,3-BDO 농축 기술 개발 (2,3-BDO 농도: 50% → 70 ~ 80%, 2,3-BDO 용액 유속: 50 L/m²/h 이상) ▶ 증류에 의한 고순도 2,3-BDO 회수 기술 개발 (2,3-BDO 순도: 99%, 수율 : 90%, 일반 증류 공정 대비 효율 20% 향상)
2015-2024	C1 바이오 전환관련 원천 효소 및 균주 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ C1 전환 혁신형 바이오 촉매 탐색 및 설계, 플랫폼 기술 개념 설계 및 아이디어를 도출 ▶ C1 가스 전환효소 스크리닝, C1 가스 이용 효소개발 등 효소 원천기술 개발, 효소 모사 촉매반응 구축 등 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 형광기반 sMMO 감지 유전자회로 기반의 고속탐색기술 개발, sMMO 개량을 위한 무세포 단백질 합성 시스템 기반의 정량적 발현/분석 기술 개발 및 메탄의 메탄올 전환 ▶ 선택도>99%, 전환율>99%, TON=

연구기간	과제명	주요 내용	성과
		<p>바이오-화학 융복합 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ C1 전환 균주 확보, C1 전환 균주 개발 등 생산기반기술 등을 포함한 연구 	<p>~4,300, TOF ; ~1,800 h⁻¹ 의 우수한 활성 (세계 최고 수준)의 에폭사이드 락톤 전환율 달성</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 세계 최초로 메탄으로부터 2,3-BDO, 스쿠알렌 생산 균주 개발 ▶ 메탄 전환을 통해 젖산 이소프렌 숙신산 합성하는 C1 전환 균주 3종 개발 ▶ CO로부터 C-2 화합물, C-4 화합물 CO 전환 균주 2종 이상 개발 ▶ 혐기성 전세포 이용하여 선택성 100 %로 100 mM 개미산 생산, C6 유기산 생산 농도 0.52 g/L 달성.
2011-2020	Carbonic Anhydrase 모사 촉매 이용 CO2 무기 자원화 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ N3 donor 기반 촉매 활성점 개발 ▶ proton shuttle용 second coordination 개발 ▶ 생성물인 bicarbonate 탈리 촉진 작용 리간드 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 모사촉매의 이산화탄소 수화 성능을 향상시키기 위하여 phenol motif와 OH2 사이의 수소 결합을 유도할 수 있는 촉매구조를 개발하였으며 이때 pKa 값은 7.45 ▶ Stopped-flow spectrometer를 이용하여 모사촉매의 이산화탄소 수화 반응 속도 16,500(세계 최고) ▶ CO2/Ca2+ mole ratio, 온도, pH, 첨가제에 따른 탄산칼슘의 상을 calcite, vaterite, aragonite로 조절하는 기초 기술 개발
2015-2021	CO 활용 C2-화합물 제조를 위한 유전체 정보기반 Acetogen 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 범 유전체(pan-genome)수준의 C2 화합물 대사/생합성 대사네트워크 확보 및 통합 ▶ C2-화합물 생산공정용 대사회로 재설계 및 제작기법 개발 ▶ C2-화합물 생산용 혐기성 균주의 유전자 재조합기술 개발 및 재조합 균주 확보 ▶ 생산용 균주 특성에 맞춘 생물공정 반응기의 운전 및 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 일산화탄소 spike-type 유기매양으로 에탄올 17.7 g/L, 아세트산 4.1 g/L titer 확보; C2 화합물 기준 21.8 g/L, 1047 mg·gcell⁻¹·day⁻¹ 확보 ▶ Non-native 에탄올 생산균 확보 (에탄올 생산성 확인) ▶ 분리균 기반 에탄올 생산 관련 경로 : 2가지 경로 확인 (direct Acetyl-CoA 이용경로, 환원력보충을 필요로 하는 indirect pathway)
2015-2021	CO/올레핀 공중합을 통한 C1 폴리머 제조용 촉매기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 실리카, HMON, MON, 폴리스타이렌 기반 불균일 촉매 조성물, 암모늄기를 포함한 카르복실산 균일 촉매 조성물 개발 ▶ 파울링 없는 폴리케톤 제조를 위한 새로운 촉매 시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 실리카, HMON, MON, 폴리스타이렌 기반 불균일 촉매 조성물 개발 (Pd/PS-SO3H: 촉매 활성 (copolymer) 67kg/g-Pd, 2.4g/g-cat, bulk density 0.43 g/ml) ▶ 암모늄기를 포함한 카르복실산 균일 촉매 조성물 개발(촉매 활성 43 kg/g-Pd, terpolymer 19 kg/g-Pd) ▶ 촉매활성 43-67 kg/g-Pd, 고분자 Tm 30도 저감 달성 ▶ 세계 최고 수준의 촉매 활성 확보 및 수요기업과 MTA 체결
2012-2020	CO2 용해도가 향상된	▶ 고CO2 용해성을 가지는 신규 고분	▶ 고분자 중공사막의 제조를 위한

연구기간	과제명	주요 내용	성과
	CO ₂ 포집용 중공사 제조 및 모듈 개발	<ul style="list-style-type: none"> 자 분리막 소재의 개발 고분자 용액의 조성 및 제조방법의 최적화를 통한 우수한 성능을 가지는 분리막의 제조 고 CO₂ 투과 선택성을 나타내는 중공사형 분리막의 제조 	<p>고투과 선택성을 가지는 다양한 종류의 고분자 확보 및 특성평가 완료</p> <ul style="list-style-type: none"> PI-durene-PEG계 소재의 경우 534 GPU, CO₂/N₂ 선택도 18.7 성능 확보 PEG계 코팅소재를 이용한 가교 및 기체투과도 확인, 우수한 CO₂/N₂ 선택도를 나타냄으로써 코팅소재로써의 잠재성 확인 고투과 선택성을 가지는 분리막의 제조를 위한 고분자용액 조성 확보
2011-2020	CO ₂ 포집용 계층적 구조의 중간 및 거대 기공 입자 소재 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 중간 기공 금속산화물 입자 합성 에멀전을 이용한 거대기공 금속산화물 입자 합성 분무건조법을 이용한 중간 및 거대 기공 입자 합성 	<ul style="list-style-type: none"> 계층적 다공성 입자 생산을 위한 회분 공정기술 개발(계층적 기공 확인: 비표면적> 500m²/g, 입자크기 > 50μm, 크기분포< 30%) 연속 에멀전 생산 기술을 이용한 계층적 다공성 입자 생산을 위한 연속 공정 기술 개발 분무건조법을 이용한 입자 합성기술 개발
2011-2020	CO ₂ 포집용 나노탄소 분리막 대면적 모듈 제작 및 실증화 전략	<ul style="list-style-type: none"> 차세대 고투과선택성 분리막 소재 및 이의 기공 및 채널 크기 제어기술 확보 신소재에 알맞은 모듈 및 분리공정 설계 2000 GPU 이상 고투과선택성 분리막 모듈 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 나노탄소 기공제어, 표면개질 및 적층기술 개발 스핀, 스프레이 코팅기반 대면적 그래핀 분리막 코팅기술 개발 실제 공정 조건과 유사한 분위기에서 통합공정 시스템 개발
2011-2020	CO ₂ 하이드레이트를 이용한 고효율 냉방 시스템 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 상압 및 고압에서의 CO₂ 하이드레이트 제조 CO₂ 하이드레이트 열 물성 및 물질전달 향상 규명 CO₂ 하이드레이트 재생 및 포집율 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 고효율 CO₂ 하이드레이트 제조를 위한 흡수제 개발 CO₂ 하이드레이트 Lab-scale 모사 지역냉방 시스템 개발 CO₂ 하이드레이트 5000 RT급 지역냉방 시스템 개발
2015-2024	CODH/ACS 효소 모사 촉매 개발	<ul style="list-style-type: none"> CODH/ACS 효소 모사 촉매 개발을 위해 4종의 리간드 시스템과 이를 바탕으로 한 철, 코발트, 니켈, 구리 화합물 총 24종 이상 확보 집계형 리간드 기반의 니켈 화합물을 이용한 소분자(일산화탄소, 수소, 알켄 등) 활성 반응 개발 니켈 화합물의 금속 리간드 협동성을 활용한 새로운 반응 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 4종의 리간드 시스템과 이를 바탕으로 한 철, 코발트, 니켈, 구리 화합물 24종 이상 확보 니켈 화합물의 금속 리간드 협동성 및 리간드 구조변화를 활용한 새로운 반응 개발
2011-2020	Highflux고분자 분리막 개발	<ul style="list-style-type: none"> 고투과성 신규 유기고분자 분리막 개발 및 특성 평가 TR 고분자 중공사막 제조 및 모듈 개발 유체역학 시뮬레이션을 이용한 중공사막 모듈 디자인 공정 시뮬레이션을 이용한 분리막 공정 설계 TR 중공사 모듈을 통한 배가스 분 	<ul style="list-style-type: none"> spirobisindane 그룹을 가진 고투과성 및 고강도의 열전환 고분자 분리막 및 가교를 도입 isomer 효과를 이용하여 기존 TR 고분자 분리막의 성능을 2배에서 최대 4배까지 향상 HPI-PI 중공사막 제조 및 이를 통한 TR 고분자 중공사막 제조, 대면적화 및 모듈 성능 이산화탄소 투

연구기간	과제명	주요 내용	성과
		리 공정 개발	과도 1020GPU 및 이산화탄소/질소 선택도 15 달성
2011-2020	Host-guest 개념 흡수제를 위한 고도 guest 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 나노구조 호스트 물질 특성과 흡수능 관계 확립 ▶ 합성된 흡수제 특성화 ▶ 호스트-게스트 흡수제 공정 응용 및 최적화 ▶ 다양한 아민형 게스트 물질 표면 기능화 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 실라카와 아민 화합물을 이용한 유기 하이브리드형 흡수제 합성 기술 개발 ▶ 흡수제 특성화 기술 확보 및 흡수제 구조와 흡수능 상관관계 확보 ▶ 하이브리드 합성기술 최적화를 통한 흡수능 향상 (흡수능 > 20%, 흡수속도 15wt%/min)
2018-2024	Non-acetogen 기반 CO 가스 이용 바이오폴리머 생산용 바이오촉매 및 원천기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 일산화탄소를 개미산으로 전환할 수 있는 원천 효소 촉매 개발 ▶ 개미산을 이용하여 바이오폴리머를 합성할 수 있는 생합성 경로 개발 ▶ 일산화탄소 전환 효소 및 바이오폴리머 생합성 경로를 가지는 원천 균주 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 일산화탄소 개미산 전환 효소 프로토타입 개발 (kcat = 0.1 s⁻¹) ▶ 일산화탄소 hydratase 재조합 효소 특성 및 발현량 최적화/최대화 요소 파악
2015-2024	가스 전달 한계를 극복하는 고효율 C1 가스 전환 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 선행기술 분석에 의한 고성능 시스템 설계인자 도출 ▶ 생물학적 C1 가스 전환을 위한 소규모 반응시스템 개발 ▶ 기-액 접촉면적을 극대화한 생물반응시스템 개발 ▶ 생물학적 C1 전환공정 개념 설계 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 학술문헌 및 특허에 보고된 선행 결과를 토대로 생물학적 C1 가스 리파이너리 기술의 구현을 위한 핵심 요소 도출 ▶ 기포 뭉침 현상을 억제한 미소유체 기반 미세기포 제조시스템 개발로 30 μm 크기의 미세기포의 안정적 생산 가능 ▶ 기-액 접촉면적 향상, 액체 흐름 조절, 내부구조 개선을 통하여 산소 기준 604.8 h⁻¹의 물질전달계수를 얻는데 성공 ▶ 공정모사 프로그램을 이용하여 대표적인 C1 생물전환 산물인 포름산 생산공정에 대한 개념설계 수행 및 자료 도출
2011-2020	가압 운전용 튜브셀 기반 CO ₂ /H ₂ O 동시전해반응에 의한 syngas 제조기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 가압운전용 동시전해전극 촉매 개발 ▶ 탄소 침적, 스팀 고저항성 RWGS 촉매 소재 개발 ▶ 가압용 동시전해 모듈 시스템 개발 ▶ 합성가스 몰비 제어 통한 운전 조건화립 ▶ 최적 공정(연료, 전류) 조건 확립 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 가압 운전용 튜브셀 기반 CO₂ 및 H₂O로부터 syngas 제조를 위한 고온 전기분해시스템 효율 > 95% (HHV) 및 합성가스 전환 패러데이 효율 > 99.0% ▶ 고온모듈시스템의 장수명 degradation after 10,000 h operation @ -0.8A/cm² 800°C < 5% 달성 ▶ 운전압력 > 20 atm @ R ratio (H₂-CO₂)/(CO+CO₂) > 1.8 달성
2015-2018	계산화학기반 CO 가스 활성화용 촉매 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 이크릴산 유도체제조를 위한 에폭사이드 비균질화 카르보닐화반응 촉매 개발 ▶ 원천성을 가지는 에폭사이드 카보닐화 균질계 촉매의 개발하고 이를 고정화하여 비균질화하기 위한 리간드 및 촉매의 설계를 수행함 ▶ 균질 촉매의 고정화담체 개발 및 비균질화 촉매의 합성과 반응성을 연구 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 기존의 [Lewis acid][M(CO)_x] 촉매와 비교하여 ring-expansive carbonylation에서 동등 및 개선된 활성을 가지는 귀금속종 및 저귀금속종 촉매를 개발 ▶ 활성유기금속 촉매를 고정화하기 위한 리간드를 개발 ▶ 개발된 균질계 촉매의 일부 리간드를 포함하는 고비표면적의 Covalent

연구기간	과제명	주요 내용	성과
			Organic Framework(COF) 담체 개발 ▶세계 최고수준의 비균질 카보닐화 2종 촉매 확보(hydroester fication과 epoxide carbonylation to lactone)
2011-2020	고투과선택성 CO2 분리막소재를 위한 기공·채널 엔지니어링 기술개발	▶0.5-1.0 nm 의 층간거리를 가진 2D 채널 구조를 만들고, 이를 통한 기체 투과 및 분리특성에 대한 연구를 수행 ▶선택도가 높은 분리막을 제조 및 이를 통한 기체의 이동현상을 규명 ▶박리된 그래핀과 그래핀 유도체의 분산용액을 스핀코팅, 스프레이, LB 장치 등을 통하여 다공성지 지체 위에 대면적 연속공정으로 코팅할 수 있는 기술 연구를 수행	▶세계에서 최초로 그래핀옥사이드 분리막 제조 기술을 확보 ▶우수한 이산화탄소 투과도 및 이산화탄소/질소 선택도를 가지고, 선택층의 두께를 5nm 이하 (기존 대비 1/100배)로 제어가 가능한 그래핀 옥사이드기반 분리막 개발 ▶분리막의 장기적 구조 안정성 확보 ▶중공사형 및 나권형 분리막 모듈 제조 선행 기술을 개발하여 그래핀 기반 분리막 상업화 기술을 선점
2011-2020	고효율 저에너지형 비수계 이산화탄소 흡수제 개발	▶흡수제별 소형 흡수 장치 구성 및 공정개념 도출 및 최적화된 흡수제 시스템 3종 선별 ▶제조된 흡수제의 특성 확인을 위한 1차 스크리닝 실험 ▶첨가제에 의한 흡수제의 내구성 개선 연구 ▶수분, 황에 대한 흡수제의 안정성 개선 연구 ▶실험실 환경과 공정 간의 성능 차이 파악 및 개선 방법 도출	▶신개념 비수계 유기 CO2 흡수제 개발 ▶공정에 적합한 비수계 흡수제 구조/조성 최적화 ▶비수계 흡수제의 내구성 향상 및 최적화, 대량 제조 기술 개발
2013-2014	고흡수속도를 갖는 유동층 반응용 계층적 구조의 금속산화물기반 고온 CO2 흡수제 개발	▶멀티스케일 전산 모사를 통한 흡수제 후보 물질 도출 ▶계층적 기공 구조를 갖는 CO2 흡수용 금속 산화물 합성 및 흡착 거동 분석 ▶나노 결정 크기가 다른 CO2 흡수용 금속 산화물 합성 및 흡착 거동 분석	▶500°C이상의 고온 영역에서 CO2를 흡착할 수 있는 계층적 기공 구조를 갖는 건식 흡수제 개발 ▶CO2 흡수 및 탈착온도 범의 흡수 >500°C, 탈착 <700°C까지 달성 ▶흡수능 >10wt%-CO2 ▶흡수속도 >1wt%-CO2/흡수제.sec
2009-2015	광합성 기반 CO2 저감을 통한 바이오 연료 생산용 바이오매스 대체 기술 개발	▶광합성 효율 극대화 조건 확립 ▶CO2 고정 효율 높은 광합성 세균 선별 및 분자수준의 특성 분석 ▶CO2 고정화로 합성된 PACs의 성장 분석 및 산업용 미생물의 생리 활성 증진효과 검증 ▶유전자 재설계를 통한 광합성 효율 극대화된 광합성 세균 개발	▶화학적 mutation을 통해 16s rRNA 서열 분석 후 우수한 균주 선별 확보 ▶2DE/MS 분석을 통하여 광합성 세균의 단백질체 분석 및 신규 단백질 확립 ▶광합성 세균의 분자수준의 특성 분석을 위해 wodimensional electrophoresis (2-DE) 기법을 이용하여 R. sphaeroides의 proteome map을 제작, 최적화된 조건 확립
2011-2020	다공성 이중 고리식 고분자형 이산화탄소 분리용 고상 흡수제 개발	▶구조배양제용 Functional group-metal framework 구조체 개발 ▶구조배양제 이용 작용기(N, S, P) 부여 다공성 고분자 형태 분리제	▶건식 이산화탄소 분리공정에 사용될 저온영역 (70°C 이하 흡수, 150°C 재생) 운전 가능 교체상 분리제 개발 (이산화탄소 흡수량: 10 wt.% 이상,

연구기간	과제명	주요 내용	성과
		<p>합성법 도출</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 방향족과 가교제를 이용한 초가교 고분자 합성조건 도출 ▶ 유동층 조업가능 물성 확보 ▶ Heterocyclic(hypercrosslinked) Polymer 분리제 합성법 최적화 	<p>흡수온도: 상온~70℃, 재생온도: 170℃ 이하, 재생에너지: 20~40kJ/mol CO₂, 흡수속도: > 8 wt%/5min, 반복운전수명 100회 이상)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 흡수제 성능(이산화탄소 흡수량: 18 wt.% 이상, 흡수온도 상온~90℃, 재생 온도: 150℃ 이하, 재생에너지: 20~40kJ/mol CO₂, 흡수속도: > 8 wt%/1min, 반복운전수명 100회 이상) 향상
2011-2020	미세조류 단일세포 이미징 및 정량화 기법을 적용한 고속 high-throughput screening 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 미세조류의 미세 유체 시스템의 적용 위한 핵심 기술개발연구 ▶ 새로운 미세유체 플랫폼의 개발 ▶ 기계적 진동을 이용한 세포 성장 및 바이오디젤 생성량 증가에 대한 연구 결과를 획득 ▶ 형질 전환 균주의 개발을 위한 단일 세포로의 유전자 전달 효율증가를 위해 전기적 충격 기법을 적용한 새로운 방식의 유전자 전달 도입 기법 병행 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Single cell manipulation을 위한 미세환경 제어 기술 개발 (다중 동적 농도 구배 4종 이상 구현) ▶ 단일 세포 고속 스크리닝 분석을 위한 형광 표지자 도입 (형광 신호 2종 이상 구현) ▶ 단일 세포 분석 및 정량화를 위한 고해상도 이미징 기술 개발 (해상도 3 μm x 3 μm 이내 구현) ▶ 이미징 기반의 스크리닝 시스템을 이용한 바이오 디젤 생성을 위한 미세 환경 인자 확보 (기존 질소(N) 박탈 방법 대비 생성 효율 20% 이상 증대 2종)
2011-2020	분자생물학적 개량을 통한 고효율 이산화탄소 고정 미세조류 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 광안테나 돌연변이 미세조류 선발 ▶ 광에너지 전환율이 증가된 고효율(5%), Biomass 고속 증대 (150%) 돌연변이 미세조류 후보 선발 ▶ 광에너지 전환 기작 및 환경 내성 규명을 위한 돌연변이체의 유전자 분석 방법 확립 및 유전자 확보 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 광전환 돌연변이 후보 library 구축 (3만 2천종의 mutation pool을 확보) ▶ 남극에 서식하는 규조류의 동결방지 단백질(Antifreezing protein)의 3차 구조를 in silico modelling을 통해 최초로 밝힘 ▶ 산업 균주인 Dunaliella에서 목표 유전자 특이적 Knock-down 기술을 개발 ▶ 야생형보다 활성이 1.5 배 증가한 단백질을 확보
2011-2020	상온, 상압용 이산화탄소 포집을 위한 탄소기반 흡착소재 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고비표면적 및 초고다공성 나노소재의 제조기술 개발 ▶ 기능성 나노소재 표면처리기술 개발 ▶ 하이브리드 금속/나노소재복합체 제조기술 개발 ▶ 고효율 이산화탄소 흡착(@ 상온, 1 bar 및 @ 40℃, 1 bar, 15% CO₂/85% N₂) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고비표면적 및 이산화탄소 분자 적합형 활성탄소 제조 (미세기공 크기 0.67 nm, 미세기공율이 83%) ▶ 셀룰로오스 섬유기반 고효율/탄소기반 흡착제 제조 (흡착량 166.2 mg/g를 달성하여 기존에 비해 18.6% 향상)
2012-2014	수소함유 폐 혼합가스를 이용, 고온 멤브레인 반응기에 의한 이산화탄소의 일산화탄소로의 전환기술개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 프로톤전도성 세라믹 멤브레인 기반의 연료전지 기반기술을 응용 ▶ 이산화탄소 고온전해에 적합한 핵심소재 기술개발부터, 단위셀 제조기술, 전기화학 평가기술, 그리고 소형 모듈화기술까지 나노이온닉스 기반 프로톤 전도성 세라믹 고온 멤브레인 반응기 전반에 대한 기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 600°C 중고온 영역에서 10 mS/cm 이상의 이온전도도를 보이며, 이산화탄소에 대한 화학적 안정성이 우수한 전해질 개발 ▶ 전환율 18.4%, 선택도 90%, 전류효율 5% 달성 ▶ 원자증착법을 활용한 촉매활성 및 내구성 향상 방안 개발

연구기간	과제명	주요 내용	성과
			▶XPS/depth-profile을 활용한 표면분석 체계 확립
2011-2020	실리콘/금속 산화물 나노와이어 전극과 분자 촉매를 활용한 2 % 광효율의 이산화탄소 전환용 하이브리드 광촉매시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶가시광 및 적외선 흡수도가 뛰어난 반도체 나노 물질 제조/합성 기술 개발 ▶개발된 광흡수 물질과 분자 촉매 integration을 통한 최적화 ▶자기 구동 가능한 고효율 광촉매 시스템 개발 및 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> ▶혁신적 하이브리드 CO2 환원 광양극 원천기술 개발(8mA/cm² @CO2 환원 전압 선택성 > 95% 안정성 > 80%/20days) ▶대면적 물산화 광음극 원천기술 개발 (8mA/cm²@OER 안정성 > 80%/20days) ▶혁신적 고효율 고선택성 CO2 환원 광촉매 개발 (광전환 효율 > 3%, 선택율 > 95% No external bias, No sacrificial agent)
2011-2020	아민화합물을 기반으로 한 저에너지 소비형 비수계 CO2 흡수제 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶분자 모델링에 의한 신규 흡수제 9 종 이상 도출 및 합성 ▶분자 모델링에 의한 반응속도 및 재생속도 증진제 설계 및 합성 ▶저수계 흡수제 개발 ▶저수계 흡수제 양산 방법 및 정제 공정 개발 ▶CO2 흡수 재생 메커니즘 규명 ▶비수계 흡수제 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶재생에너지가 2.5 GJ/t-CO₂, 흡수 속도가 2.3 × 10⁻¹⁰ mol, CO₂/cm²sPa인 수계 흡수제와 흡수속도≥1.5 ×10⁻¹⁰, 반응열이 (kJ/mol-CO₂) 60 kJ/mol-CO₂이 하인 비수계 이산화탄소 흡수제 조성 ▶이산화탄소 흡수 및 재생 메커니즘 규명 ▶수계 흡수제 재생능 향상 방안 개발
2011-2020	에너지 교환형 다단 유동층 CO2 포집기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶온도 영역별 성형 흡수제 개발 ▶에너지 교환형 다단 유동층 공정 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶Host-guest 개념의 저온용 흡수제 개발 (아민 도입량 : 1.8 mmol/g, CO₂ 흡수능 : 7.2 wt%, 비표면적 300 m²/g인 실리카 사용) ▶높은 CO₂ 흡수능과 재생안정성을 갖는 MgO계 흡수제 개발 (12 wt%, 100 cycle 확인) ▶저온용 성형흡수제 개발 (적당한 흡수능 (4.8 wt%), 흡수속도 (9.5 wt%/min), 마모 저항성 보유 (AI: 1.6)) ▶중온용 성형흡수제 개발 ((3.5 wt%, 3.2 wt%/min), 높은 마모 저항성 (AI: 1.6)) ▶고온용 성형흡수제 개발 (7.3 wt%, 3.5 wt%/min, AI: 5.5) ▶60 Nm³/h 규모 3단 유동층 포집 장치 제작
2011-2020	연소후 이산화탄소 분리막 성능평가 및 포집 공정연구	<ul style="list-style-type: none"> ▶배가스 조건을 적용한 이산화탄소 단위 분리막에 대한 성능 평가 ▶50 Nm³/hr급 분리막 포집 공정 개발 ▶200 Nm³/hr급 파일럿 공정 실증 	<ul style="list-style-type: none"> ▶0.2Nm³/hr급 분리막 신규 공정 개발 (configuration 개발) ▶50 Nm³/hr급 분리막 공정 설계 및 구축 및 200 Nm³/hr급 공정 스케일업 인자도출 ▶200 Nm³/hr급 (pilot scale) 공정 설계 및 공정 개발 ▶4,000 Nm³/hr급 (1.0 MW급) 공정 개발을 위한 스케일업인자 도출

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2011-2020	연소후 이산화탄소 분리막 포집 파일럿 공정연구	<ul style="list-style-type: none"> ▶분리막을 이용한 연소후 배가스로부터 이산화탄소 포집 ▶다단 분리막 공정을 구성하여 실험실 및 배가스 환경조건에서 공정변수를 고찰하고 포집 효율을 최적화 ▶KCRC 분과에서 개발한 분리막의 50 Nm³/hr급 막 공정 데이터 확보 	<ul style="list-style-type: none"> ▶다단막 회수루프, 자가회수루프를 통한 순도 및 회수율 향상(TRL 4단계) ▶다단막공정 회수 이산화탄소 순도 93%, 회수율 86% 달성 ▶50-150 Nm³/hr급 다단 분리막 공정 변수 최적화 및 운전 데이터 확보
2011-2020	유동층 건식흡수공정에 적용 가능한 다공성 금속 산화물계 CO ₂ 흡수제 담지체 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶마크로-메조-마이크로 세공을 모두 지니고 있는 계층적 구조의 성형 알루미늄이나 또는 TiO₂, ZrO₂ 등 혼합 금속 산화물 지지체 제조기술 연구 ▶성형 알루미늄이나 또는 금속산화물의 표면 개질 및 CO₂ 흡착 물질을 고분산도로 담지하는 방법 연구 ▶300-700도 중온영역의 금속산화물 흡착제 제조 및 특성 분석기술 연구 	<ul style="list-style-type: none"> ▶유동층 건식 흡수공정에 적용 가능한 계층적 세공 구조를 갖는 CO₂ 흡수제 담지용 Mg 등 금속산화물계 담지체 개발 ▶CO₂ 흡수제 담지량 > 30wt% 이상 ▶기계적 마모손실률 <15wt% at 5hr (ASTM-5757 방법) ▶열적 및 수열 안정성 >800°C ▶흡수능 및 흡수속도 최소 기준:> 8 wt%/5min
2012-2020	이산화탄소 선택적인 실리카 제올라이트 분리막 제조	<ul style="list-style-type: none"> ▶다양한 조건에서 CHA와 DDR 제올라이트 입자를 합성함으로써 결정학적 방향으로의 성장속도 확인을 통해 분리막을 원하는 방향성을 지니도록 성장시킬 때 조절할 수 있는 변수 확보 ▶대면적으로 재현성있게 결합없이 분리막 형태로 만들 수 있는 분리막 제작 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶CHA 제올라이트의 경우, CO₂ 350 GPU 와 CO₂/N₂ 분리계수 16이라는 분리 능력을 수분이 존재하는 feed에 대해서 획득 ▶다른 종류의 DDR 제올라이트의 경우, CO₂ 450 GPU 와 CO₂/N₂ 분리계수 8이라는 분리 능력 확보
2011-2020	이산화탄소의 폴리카보네이트/폴리에스터로의 혁신적 전환 촉매기술	<ul style="list-style-type: none"> ▶이산화탄소 전환 유기카보네이트 제조 (DMC, DPC) ▶고분자량의 지방족 폴리카보네이트 및 이의 제조방법 개발 ▶CPD 카복실레이션 반응: 신개념 촉매 개발 ▶C-H 결합을 활성화하여 이산화탄소로부터 카복실산을 합성하는 촉매 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶이세틸렌 카복실레이션을 통한 숙산 제조 ▶이산화탄소 전환 고리형 (GC, EC) 및 비고리형 (DMC, DEC)카보네이트 제조 ▶이산화탄소 전환 폴리카보네이트/폴리카보네이트 폴리올 제조 ▶연소가스의 이산화탄소를 이용 카복실산, 카보네이트 등 유기화합물 합성하는 방법 개발
2012-2020	저비용 공유결합유기고분자를 이용한 이산화탄소 포집 및 분리	<ul style="list-style-type: none"> ▶고질소 함유의 아민, 아미독심, 아조 등으로 이루어진 고효율 CO₂ 흡착 물질을 합성하고 그 CO₂ 포집능과 N₂ 대비 선택적 분리능을 분석 ▶서로 다른 작용기능을 가지는 COP의 CO₂ 포집 거동을 제1원리 양자 계산과 몬테카를로 시뮬레이션으로 해석 	<ul style="list-style-type: none"> ▶저비용의 아민 기반의 다공성 고분자 개발 및 고온, 고압에서의 세계 최고 수준 CO₂ 흡착능 달성 (COP-1, 127.6 mmol/g @ 200 bar, 318 K) ▶황 기반의 다공성 고분자 세계 최초 개발 및 고온, 고압에서 향상된 CO₂ 흡착능 및 N₂ 대비 선택성 달성 (COP-3, 74.85 mmol/g @ 200 bar, 318 K, N₂ 대비 151배 CO₂ 선택성) ▶상용 MEA 모사의 아미독심 다공성 고분자 개발 (COP-82, 2.74 mmol/g @ 1 bar, 273 K) ▶3차 아민의 트러거 염기 기반의 다공성 고분자 개발 (COP-84, 5.19 mmol/g @ 1 bar, 273 K,

연구기간	과제명	주요 내용	성과
			N2 대비 79배 CO2 선택성) ▶이조 기반의 다공성 고분자를 통하여 세계 최고 수준의 N2 대비 CO2 선택성 확보 (COP=78, N2 대비 308배 CO2 선택성 @ 1 bar, 323 K)
2011-2020	중/고온용 Alloy계 신개념 흡수제 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶중온용 이산화탄소 전식 흡수제 개발 (2종 이상) ▶고온용 이산화탄소 전식 흡수제 개발 (3종 이상) ▶개발 흡수제의 메커니즘 규명 및 성능 개선 ▶공정 연계 흡수제 특성평가 	<ul style="list-style-type: none"> ▶중온용 (250°C~450°C) 흡수제 개발 (흡수/재생 온도범위: 300°C 흡수, 450°C 재생/ 흡수속도: 12.2wt%/ 5min, 기존 Double salt 흡수제 (1.7wt%/5min) 대비 7배 증가/흡수능: 20wt% (실협조건 CO2 10 vol.%, H2O 10 vol.%, N2, 1atm)/재생성: 5cycle 후 15wt% 이상 유지) ▶알루미늄이나 첨가 Li4SiO4 기반 흡수제 (LSA), 나트륨실리케이트 사용한 NaLi3SiO4 기반 흡수제 (LONS2), 콜로이드실리카 이용한 Li4SiO4 기반 흡수제 (LODXP) 개발
2012-2020	친수성 제어된 초박형 마이크로기공성 무기질 이산화탄소 분리막 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶모세관 지지체 개발 및 지지체 모듈 개발 ▶제올라이트 나노 종결정 합성법 개발 ▶초박형(1μm) 제올라이트 분리막 합성법 개발 ▶One-step 제올라이트 막모듈 합성법 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶제올라이트 나노입자 합성법 및 나노종결정 균일 코팅법 개발 (85nm 종결정 합성) ▶두께 100μm 다공성 금속 또는 싸렛 모세관 지지체 개발 및 표면 코팅층 도입 ▶내열성 레진 포팅에 의한 콤팩트 지지체 모듈 개발 ▶두께 1μm 내외의 초박형 제올라이트 모세관 분리막 합성 ▶14%CO2-6%O2-80%N2 삼성분계 혼합가스에 대하여 CO2 투과도 5000GPU 구현
2013-2017	하이드레이트를 이용한 고효율 CO2포집 및 활용기술	<ul style="list-style-type: none"> ▶CO2 하이드레이트 생성 및 촉진 실험 ▶CO2 재생에너지 소비량 촉진 실험 (재생에너지<2.5GJ/tCO2) ▶CO2 하이드레이트 최적의 재생 온도 측정 	<ul style="list-style-type: none"> ▶CO2 포집율 95% 이상 기술 개발 ▶CO2 재생에너지 <2.5GJ/tCO2로 절감 기술 개발 ▶0.1 MPa 이하에서 하이드레이트 생성
2011-2020	합성가스 제조를 위한 CO2 저온전기분해 혁신기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶나노기술, 계산과학, 첨단 분석기법을 결합한 전기화학 촉매 소재 탐색 및 반응 메커니즘 분석 ▶개발 소재를 적용한 전극/MEA 개발 및 CO2 저온전기분해 시스템 고성능화 ▶양산성을 고려한 신규 전기화학촉매 후보군 선정 ●단위전지 성능 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> ▶저온전기분해 기술의 타당성 검토 및 원천기술 확보 ▶고활성 전기화학촉매 소재 개발 ▶신규 전기화학촉매를 적용한 전극의 대량 제조법 개발
2011-2020	해수기반 전기화학적 이산화탄소전환에 의한 무기탄산의 제조	<ul style="list-style-type: none"> ▶기술개념을 검증하기 위한 시스템 기반 구축 ▶각 적용기술의 전극 및 촉매소재 탐색 ▶각 기술의 유효반응조건 탐색 ▶선정전극의 전기분해소비에너지 평가 	<ul style="list-style-type: none"> ▶무기탄산화반응에 의한 칼슘제조 (슬래그의 경우에는 약 10kcal/mol의 활성화에너지가, 페콘크리트 경우에는 약 37kJ/mol의 활성화에너지가 도출) ▶효율적 전기분해시스템 (1.5V기

연구기간	과제명	주요 내용	성과
		<ul style="list-style-type: none"> ▶ 과전압방지 전극설계/제작/평가 	<p>준 0.5 mg/cm²의 백금담지전극에서 상온에서는 약 20-45 mA/cm²가 90°C의 온도에서 50 mA/cm² 이상의 전류밀도 확보)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 순환형 리사이클 무기탄산화공정 개발
2011-2020	혁신적 CO ₂ reductase 개발 및 이를 이용한 전기화학적 BT-NT 융합 개미산 제조 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 신규 이산화탄소 환원효소 탐색 및 선별 ▶ NT-BT 융합 전기화학 전달 시스템 개발 ▶ 전기화학시스템을 통한 개미산 합성 공정 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 이산화탄소 환원효소에 전기 환원력 공급시스템 개발 ▶ 전기화학적 이산화탄소 환원에 의한 개미산 생산 시스템 개발 (개미산 생산속도: > 2 mol/gp/h, 전기화학적 개미산 선택성: Faradic efficiency > 90%) ▶ 총 240시간 연속운전 가능한 시스템 개발 ▶ 공급된 전기환원력 이용 90% 이상 시스템 개발
2011-2020	혁신적인 CO ₂ 포집용 금속-유기 골격체 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고밀도 open metal sites을 지닌 MOFs의 개발 ▶ azolates를 갖는 MOFs합성 ▶ amines기능화를 통한 획기적 CO₂ 포집용 MOFs의 개발 ▶ 재료 엔지니어링을 통한 표면적 향상 연구 및 재료특성 향상 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 발표된 것 중 가장 높은 수소 양이온 전도도(2.2 x 10⁻² Scm⁻¹) 값을 가지는 물질을 합성 ▶ 이산화탄소를 선택적으로 흡착할 수 있는 성질을 규명하였으며 ▶ 고밀도 열린금속자리를 갖는 MOF개발 (비표면적 = 5877 m²/g) ▶ 아민기능화된 en-Mg₂(dobpdc) 제조 및 아민기능화된 MOF에서 CO₂흡착 메커니즘을 세계 최초 규명(25 oC, 0.15 bar CO₂에서 흡착능13.7 wt%)
2011-2020	히드라진 기반 이산화탄소 흡수제 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 히드라진의 흡수 성능을 극대화하는 promoter 개발 ▶ CO₂ 흡수 후 재생 공정에서 상대적으로 낮은 80 oC 이하에서 재생이 가능할 수 있도록 탈착을 촉진하는 불균일 촉매 및 히드라진의 분해를 줄일 수 있는 inhibitor 개발 ▶ large scale에서 이산화탄소 포집 및 저장에 필요한 열량을 최소화할 수 있는 기술 개발 ▶ 연속 공정 과정의 basic design을 완성 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 히드라진 기반 CO₂ 포집 흡수제 (HYD-11) 세계 최초로 개발(흡수속도가 MEA 대비 약 3배: 낮은 탈착온도, 90 oC 이하; 안정성, 90 oC에서 3회 이상 recycle 실험 결과 흡수제 안정; 72시간 이상 운전/CO₂ 90% 이상 흡수 및 탈착; 흡수제 분해, cycle당 1% 이하) ▶ 기존 흡수제의 성능을 능가하는 독자적인 CO₂ 포집 공정 창출
2015-2021	C1 가스 부산물 이용 효소 및 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 메탄, 에탄, 프로판 전환 효소의 발현 및 스크리닝 기술 개발 ▶ 알칸전환 효소의 안정성 및 경제성 확보를 위한 고정화 기술개발 ▶ 알칸전환 효소를 이용한 알콜류 생산을 위한 반응기 설계 및 운전 ▶ 메탄, 에탄, 프로판을 feedstock으로 사용하는 무세포 전환 플랫폼의 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 300 ug/mL 생산성 50% 이상 가용성의 효소발현조건 확립 ▶ 저분자 알칸 전환 효소 라이브러리를 고속 스크리닝 할 수 있는 방법 확립 (>500 변종/day) ▶ 알칸 전환 CYP 효소 라이브러리를 구축하고 개발한 스크리닝 방법을 이용하여 활성이 높은 효소 확보 ▶ 저분자 알칸 전환효소 스크리닝을 통한 발현량 또는 활성이 높은 변종 확보

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2016-2021	C1 가스 전환 균주 개량을 위한 고효율 Synthetic Genetic Tools 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고효율 유전자 전달기술 개발 ▶ 고효율 유전자 발현 및 발현 최적화 기술 개발 ▶ 염색체 유전자 발현조절기술 개발 ▶ 고효율 유전자 조작기술을 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ DNA를 세포로 전달하는 고효율 유전자 전달 시스템 개발 ▶ methylomonas sp. DH-1에서 사용 가능한 다양한 promoter 29개 발굴 ▶ methylomonas sp. DH-1의 유전자 결실이 효과적으로 일어나는 기술을 개발 ▶ 메탄산화균의 수많은 유전자의 발현을 효과적으로 조절할 수 있는 RNA interference 기반의 기술을 개발
2015-2024	C1 가스 활성화 및 고부가가치화 원천 촉매기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ C1 가스 활성화용 금속촉매 합성 ▶ C1 가스 고부가가치화를 위한 비균질계 및 용복합 촉매 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 메탄을 메탄올 전구체로 직접 전환시키는 세계 최고 균질계 촉매 개발 완료 (메탄 전환율: 90%, 메탄올 선택도: 96%) ▶ 폴리케톤의 연속제조가 가능한 세계 최고 비균질계촉매 개발 완료 (polystyrene기반 촉매 조성물 활성 67kg/g-Pd, 2.4g/g-cat, bulk density 0.43 g/ml) ▶ 세계 최초로 전기화학반응을 통한 메탄으로부터 알코올 제조 기술 확보 ▶ 세계 최초로 우레탄 제조용 전이 금속 기반 비균질 촉매 개발 완료 ▶ 부생가스로부터 혼합알코올을 직접 제조할 수 있는 세계 최고 비균질계 촉매 요소 기술 확보
2015-2024	고선택성 메탄 산화체 제조용 비균질계 촉매 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 메탄을 직접 활성화하여 메탄올을 포함한 메탄의 산화체로 전환하여 기초 화학제품 및 수송 연료 생산이 가능한 비균질계 촉매 시스템 개발 ▶ 공정 온도의 감소, 메탄 산화체로의 선택도 향상, 메탄 전화율의 향상을 이끌 수 있는 액상 및 기상에서 메탄의 선택적 산화 반응용 불균일계 촉매를 개발 ▶ 에너지 효율적인 메탄의 직접전환 촉매공정을 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 과산화수소를 이용한 메탄의 선택적 산화반응에서 메탄올 수율 0.16%, 메틸하이드로퍼옥사이드 0.37%, 포름산 수율 12.33% 달성 (메탄 산화체 수율 12.9% 달성) ▶ 메탄의 활성화 및 산화체로의 전환 위한 30여종의 촉매 제조 및 평가 수행
2015-2024	구조기반 MMO 재설계 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 효소 활성 부위의 구조적/기능적 특성을 파악하여, 기질의 선택적 산화 일으키는 화학적/생물학적 기작을 설명 ▶ 단백질 수준에서 구조적으로 모방하여 기존의 메탄 모노옥시게나아제가 갖는 효소 활성을 고온 또는 고압이 아닌 상업적 이용이 용이한 조건에서 촉매적으로 이용할 수 있는 실용화 연구 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 561 mL/mg의 효소 활성 목표 창출하고 관련 중간체 고정 기술 확립 ▶ 중합체 결합에 대한 H-B-R 중합체의 결합원리를 파악 ▶ Ms. sporium 5 균주에 교차반응을 위한 Methylocystis sp. M을 적용하여 최적 활성 달성 ▶ four-helix bundle의 디자인으로 신규 플라즈미드의 구축을 완료
2016-2021	메탄 직접 전환을 위한 플라즈마 공정 실용화 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 플라즈마 반응에 기반한 직접 전환 반응을 통해 아세틸렌을 생산하는 메탄 직접전환 공정 개발 ▶ 개발된 공정을 적용하는 상용화 수준 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Lab scale 반응기 최적화 설계 (0.6 m³/hr급 처리 용량, 공정 효율 700원/kg C₂H₂ 급, CH₄ 전환율, C₂H₂ 선택도 각 80% 이상)

연구기간	과제명	주요 내용	성과
		의 메탄 직접 전환 시스템 개발	▶LFG 개질 시스템 개발 (5 m ³ /hr급 처리 용량, CH ₄ / CO ₂ 전환율 80 / 70 % 이상)
2015-2024	메탄-메탄올 전환 플랫폼 균주 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶신규 메탄자화균의 분리/동정 및 메탄자화균 특성 분석 ▶메탄-메탄올 전환 플랫폼 균주용 유전자 조작 기술 개발 ▶메탄-메탄올 전환 플랫폼 균주의 다중오믹스 분석 및 유전체 대사모델 구축 ▶메탄-메탄올 전환 플랫폼 균주의 대사공학적 개량을 통한 유용산물 생산 	<ul style="list-style-type: none"> ▶신규 메탄자화균 분리 및 동정 2종 ▶메탄-메탄올자화균용 발현용 벡터, 유전자 삽입/제거용 벡터 시스템 개발 ▶특히 메탄자화균의 유전체, 전사체 분석 등 다중오믹스 분석 매뉴얼 개발 ▶다중오믹스 분석을 통한 막대한 양의 NGS 정보 시각화 시스템 개발 ▶유전체 대사모델을 활용한 메탄자화균의 대사를 재설계를 통한 succinate, 2,3-BDO 생산
2020	후속 사업	▶과기부의 ‘코리아 CCS 2020 3단계 사업’을 통해 태안발전본부에 0.5MW급 실증 플랜트를 구축(‘20.10)	▶세계 최고 수준의 이산화탄소 흡식 포집 실증기술 개발 완료
2017	후속 사업	▶높은 CO ₂ 흡수 용량 및 빠른 흡수속도 등 고성능-안정성을 지닌 습식 포집제(MAB) 개발 완료(‘17.01)	▶한국서부발전 실증 설비(0.5MW)에서 실증 완료 및 기술 확산을 위해 연구소기업 창업 추진(KCRC, 에기연 등 공동출자)
2020	후속 사업	▶버려지는 페트병으로 이산화탄소를 포집하는 기술 개발(‘20.09)	▶PET 페플라스틱병을 이용하여 제조된 활성탄은 이산화탄소 포집 이외에도 기존 활성탄이 이용되었던 분야에 다양하게 적용 가능
2020	후속 사업	▶이산화탄소가 환원돼 에틸렌이 합성되는 과정에서 구리 기반 촉매의 표면에 흡착한 반응 중간체를 관찰하고, 실시간으로 거동을 분석하는 데 성공(‘20.11)	▶촉매 표면에서 화합물 생성의 선택도 향상 가능성 발견, 탄소-탄소 결합을 촉진해 에틸렌 생성에 뛰어난 성능을 보이는 새로운 촉매 소재인 구리수산화물(Cu(OH) ₂) 나노와이어 발견
2020	후속 사업	▶산화 내성을 크게 높인 아민 기반 이산화탄소 흡착제 개발(‘20.01)	▶흡착 성능을 유지하면서도 기존보다 50배가량 좋은 산화 안정성 보유
2018	후속 사업	▶미생물 생체효소와 닮은 니켈 기반 일산화탄소 전이금속 촉매를 개발(‘18.04)	▶인 또는 질소가 중심에 있는 리간드를 사용해 금속이 각각 사면체·사각평면 구조를 선호하도록 하여 반응속도 향상에 기여
2019	후속 사업	▶이산화탄소보다 강력한 온실가스인 메탄을 석유화학의 찌꺼기 에틸렌을 비롯한 화학원료와 수소 등으로 99% 전환하는 ‘비산화 메탄 직접 전환기술’을 개발(‘19.09)	▶기존 메탄을 화학원료로 전환해 얻는 비율이 최대 70%였으나, 이번 기술 개발을 통해 99% 전환 비율 달성

11. 탄소 자원화

□ 과제별 주요 성과

- 탄소를 자원화하기 위한 전환 기술에 대한 개발이 활발하게 이뤄지고 있으며, 전환과 관련한 촉매 자체에 대한 개발 및 촉매를 이용하는 기술에 대한 연구 활발
- 탄소 자원화와 관련된 연구 개발에 대한 지원은 비교적 지속적으로 활발하게 진행중

<표 4-11> 탄소 자원화 과제별 주요 성과

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2016-2020	CO 포함 부생가스를 이용한 n-C6 유기산 생물학적 생산기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶CO로부터 C6 유기산 생산 신규균주 발굴 ▶C6 유기산 생산을 위한 핵심유전자 선발 및 유전자 조작 기술 개발 ▶유전체 및 전사체 확보 및 오픈스 기반 대사회로 최적화 모색 ▶GC/MS 및 LC/MS 분석을 통한 혐기성 아세트젠 대사체 정량분석 연구 	<ul style="list-style-type: none"> ▶CO/CO₂/H₂ 포함 혼합가스로부터 C6 유기산 생산 미생물 2종을 발굴 ▶신규 Clostridium sp. JS66 및 기존 C. carboxidivorans P7 균주의 유전자 조작을 위한 맞춤형 벡터 system(3종) 개발 ▶report gene을 이용한 promoter 세기 측정 기법 (4종 벡터)을 확립함 (세계 최초 CO to C6 유기산 생산 미생물의 유전자 조작 기술 개발) ▶C. carboxidivorans P7의 thiolase를 신규 균주 Clostridium sp. JS66에 외래적으로 과발현함으로써 C6 유기산 생산을 향상시킴(1.3~1.7배) ▶5종 CoA 중간물질 및 7종에너지 보조인자 대사물질(ATP 등)을 LC/MS를 이용한 정성 및 정량 분석법을 확립
2009-2019	나노 입자 조직화, 고성능 분자 분리막 개발 및 디바이스 제작	<ul style="list-style-type: none"> ▶인공광합성 디바이스를 제작하기 위해 필요한 핵심 요소 기술들인 나노입자 조직화, 고성능 분자분리막, 인공광합성 디바이스용 태양전지, 물산화광전극, CO₂환원전극 등을 개발하고 나아가 미래 인공광합성의 핵심이 될 인공 광합성 분자촉매 개발의 기초를 확보 	<ul style="list-style-type: none"> ▶전자에너지 대비 일코율 (에탄올, 프로판올)을 8% 이상의 효율로 생산하는 전극개발과 이 전극의 안정성을 유지하는 방법 개발 ▶금, 백금, 구리로 된 나노 및 마이크로 기둥의 어레이 만드는 방법 개발 ▶이산화탄소를 선택적으로 흡착할 수 있는 SGU-29 흡착제 개발 ▶탠덤 태양전지-물분해 시스템 개발(최종 태양광-수소전환효율 4.65% 달성) ▶고효율 염료감응 태양전지 개발(효율: 11.7% 달성) ▶WOB 자체적으로 만든 마이크로 기둥 어레이를 이용한 물산화광전극 개발 (광전류 밀도 current density Cd ≥ 6 mA@1.23V, RHE. 이 분야 최고치) ▶4전자 물산화가 가능한 4개의 금속 센터가 인접해 있는 균일 물산화 분자촉매 개발
2009-2019	다전자 CO ₂ 환원 (광)촉매 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶고안전성 CO₂ 환원 전기화학 촉매의 개발 ▶가시광선 감응 광촉매를 이용한 전기화학 시스템 구축 ▶광수용체와 이산화탄소 환원 촉매의 융합 	<ul style="list-style-type: none"> ▶고안전성 CO₂ 환원 전기화학 촉매의 개발(촉매의 안정성 5일 이상 지속, 70% 이상의 전류 효율, 40% urea 및 27% CO)

연구기간	과제명	주요 내용	성과
		<ul style="list-style-type: none"> 시스템 구현 ▶이산화탄소 환원 광촉매 개발 ▶제올라이트 계 이산화탄소 환원 촉매 개발 ▶전자양성자 수송체 결합된 이산화탄소 광촉매 개발 ▶분자 이산화탄소 환원 촉매 개발 ▶에탄올 생성 미생물 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶TiO₂/g-C₃N₄ 기반 복합 구조체, B-Mg(OH)2을 도핑한 TiO₂/g-C₃N₄ 기반의 광촉매 등을 개발 ▶광수용체와 이산화탄소 환원 촉매의 융합시스템 구현 (5wt% Ru/Au18@SiO₂ 계를 사용시 1.61%의 효율 획득)
2009-2019	다중금속 물산화광촉매 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶LDH 층을 박리하는 기술과 박리된 LDH층을 이용하여 composite 제조 기술 확보 ▶Layered g-C₃N₄ 제조기술 확보 ▶다공성 구조체 제조와 이를 활용한 금속 산화물 광촉매 제조기술 확보 ▶가시광선을 흡수 링커 제조를 통한 3차원 금속-유기구조체 제조 기술 확보 	<ul style="list-style-type: none"> ▶다중금속 구조의 LDH/GCN 광촉매와 조촉매의 결합을 통한 광효율 향상 (1.18%의 높은 광효율 물산화 반응 확인) ▶다중금속이 도핑된 금속-유기 구조체를 통한 금속 산화물 광촉매의 특성 분석(IPCE를 통해 6%의 물산화 광전류 획득)
2016-2021	리간드 디자인을 통한 하이드로포밀화 반응 촉매 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶브리포스기반 새로운 리간드의 개발 ▶3치환 올레핀용 하이드로 포밀화 촉매 개발 ▶메커니즘 기반 촉매개발 ▶리간드 합성의 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> ▶파이발개 리간드의 전자적 효과와 작용기에 따른 입체적 효과를 연구하여 높은 반응성과 선택성을 동시에 구현할 수 있는 리간드 구조의 최적화 ▶기존 산업화가 불가능 했던 3치환 올레핀용 하이드로포밀화 촉매를 최초개발 ▶양쪽 구조 이성질체를 모두 선택적으로 합성할 수 있는 원리를 확립하고 이를 활용하여 구조 선택적 촉매 개발 ▶선정된 후보 리간드의 합성과정을 최적화하여, 가격적으로 경쟁력 있는 합성 방법을 확립
2016-2021	메탄으로부터 BTX 직접 제조를 위한 고효율 장수명 신규 촉매기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶반응장치 및 분석시스템을 구축하고, 활성 상으로 전이금속이 담지된 이원기능 촉매 제조 및 고분산화를 통해 촉매의 활성을 증진 ▶이원기능 촉매의 물리화학적 특성 최적화 및 공정변수 최적화를 통해 촉매의 활성 및 반응 안정성을 개선 	<ul style="list-style-type: none"> ▶메탄 및 프로판으로부터 BTX 제조용 촉매 개발 (BTX 수율 12% 이상) ▶메탄의 직접 전환에 의한 BTX 제조용 촉매 개발 (BTX 수율 10% 이상) ▶메탄 및 에탄으로부터 BTX 제조용 촉매 개발 (BTX 수율 10% 이상)
2015-2021	메탄으로부터 아세틸렌을 경유한 BTX 제조 촉매기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶플라즈마, 전기, 열화학반응 등의 효율적에너지원과 비균질 촉매의 최적화로 저온 합성용 아세틸렌 제조 기술 개발 ▶아세틸렌 삼중고리화 반응을 통하여 높은 선택도로 고부가 방향족 화합물을 제조할 수 있는 비균질 촉매 시스템 구축 	<ul style="list-style-type: none"> ▶메탄 전환율 : 58.36%, 아세틸렌+에틸렌 수율 : 18.41% 달성 ▶열화학 반응시스템 구축 및 저온 활성화용 플라즈마 반응시스템 확립 ▶기존 고온법과 차별화된 저온 아세틸렌 합성 촉매 5건 이상 개발 ▶다층기공구조 제올라이트-금속 결정 촉매 3건 이상 개발 ▶아세틸렌의 선택적 벤젠 합성

연구기간	과제명	주요 내용	성과
			<ul style="list-style-type: none"> 촉매 5건 개발 ▶BTX 상대적 선택도 조절 촉매 1건 개발
2016-2021	메탄의 선택적 직접 산화를 위한 귀금속 단원자 기반 불균일계 촉매 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶밀도범함수 이론(DFT)을 이용한 최적 촉매 설계 및 원자수준에서의 반응 해석 ▶상호 복합적인 실험이론을 이용한 메탄의 직접 산화 반응 메커니즘 규명 ▶단원자 기반 불균일계 금속 촉매 합성 및 고분해능 촉매 구조 분석 ▶메탄의 선택적 직접 산화 반응기 구축 및 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> ▶메탄으로부터 메탄올 생성 공정의 공정 온도 감소, 선택도 향상, 전환율 향상 달성 ▶메탄의 활성화 메커니즘을 확인하여 메탄을 전환 기술의 원리습득 ▶단원자 귀금속 촉매의 합성 기술습득
2017-2020	메탄자화균을 이용한 고효율 메탄 전환 숙신산 생산 균주 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶메탄가스의 숙신산 전환을 위한 고효율 메탄자화균 개발 ▶Omics data 기반 메탄자화균의 대사경로 분석 및 숙신산생산을 위한 대사경로 재설계 ▶메탄자화균의 genetic engineering을 위한 plasmid vector 제작 ▶고효율 숙신산 생산 균주 개발 및 배양 조건 최적화 ▶우수 균주를 이용한 반응기 규모 배양 조건 확립 	<ul style="list-style-type: none"> ▶메탄자화균 <i>Methylomonas</i> sp. DH-1을 이용 메탄가스를 숙신산으로 전환하여 168mg/L 생산성 달성 ▶야생형 균주 0.0032 g-숙신산/g-cell/hr, ΔsdhB mutant 0.00525 g-숙신산/g-cell/hr의 specific productivity 달성 ▶메탄자화균 적용 유전공학 tool 개발을 위한 episomal plasmid replication origin 발굴
2016-2021	생물전기화학시스템 및 라만분광법 기반 신개념 고성능 CO 전환 균주 스크리닝 및 C1가스바이오리파이너리 기술개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶생물전기화학반응시스템 (BES)에서 농화배양을 통한 균주 선별 ▶BES를 통한 CO전환공정으로부터 아세테이트 및 휘발산 생산 확인 ▶아세테이트 기반 고부가대사산물 생산 가능성 확인 ▶CO전환 균주 스크리닝 및 전기화학적 활성 분석 BES 플랫폼 제작 및 테스트 ▶CO전환활성의 전기화학적 분석을 통한 활성유무 분석 ▶라만분광법 적용을 통한 CO전환 대사산물 실시간 분석 기반기술 확보 	<ul style="list-style-type: none"> ▶BES에서 CO 전환 성능 평가 및 아세테이트/휘발산 생산향상 확인 8470 ± 150 mg/L acetate, 533 ± 54, butyrate, 268 ± 2, propionate, 142 ± 15, isobutyrate, 139 ± 3 mg/L, isovalerate ▶BES 기반 균주스크리닝 플랫폼 제작 ▶BES 및 표면증강라만분광법 적용을 위한 금나노입자 도입 전극 개발 및 적용 ▶CO 전환균주 분리 및 동정: BES 농화배양 ▶여러 종류 대사산물의 혼합물에서 라만산단법을 활용한 각 대사산물의 신호구분 ▶표면이 양전하를 띠는 금나노입자를 활용한 대사산물 검출 감도 향상
2011-2020	생물학적 이산화탄소 고속전환 유기 자원화 기술	<ul style="list-style-type: none"> ▶미세유체 기반 미세조류 배양 및 특성 분석 시스템 개발 ▶고생산성 균주 개발, 선별 및 고지질 정량법 개발 ▶주광성/주화성을 활용한 광전환 및 이산화탄소 전환 효율 고속 선별 기술 개발 ▶우수 미세조류 선별을 위한 성장성, 지질 축적능 및 성분 분석을 위한 장치개발 ▶세포 내 지질 생산을 극대화할 수 있는 미세유체 기반의 세포 배양 모듈 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶이산화탄소 포집 농도는 1.042g/L/d 달성 ▶개발된 미세유체 세포 배양 및 지질 추출 시스템은 기존의 지질 추출까지의 소요시간을 30% 이상 단축 ▶광합성과 주광성의 상관관계가 존재함을 세계 최초로 규명 ▶기존 생화학적 균주 선별 방법 대비 1.5배~2배 이상 소요 시간을 단축 ▶야생형 균주에 비해 약 8배 이상의 높은 지질 함유

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2009-2019	양성자, 전자, 활성수소 수송체 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 양성자-전자 동시 수송체 제작 및 CO₂ 환원 고효율 가시광 광촉매 구현 ▶ 반도체간 에너지 준위 조합 및 반도체간 전자/정공 이동 현상을 기초로 한 최적의 전자/양성자 동시 수송체 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Grafting-From 기술을 이용하여 양성자-전자 동시 수송체 복합막 개발 ▶ 양성자 전달 능력이 개선된 core-shell 나노구조체 개발 ▶ 액체/기체 투과 특성 제어가 적용된 분리막 개발 ▶ 안정성을 갖춘 양자점 혹은 페로브스카이트 전극의 성능향상 (양자점 전극: 기존 광전 효율보다 10% 이상 성능 증가, 페로브스카이트 전극: 15% 이상 효율 달성) ▶ 하이브리드 전극 물질 및 전극 표면 개질 방법의 안정성 확보
2016-2021	열전달 제어와 목적산물 선택도 조절을 위한 고효율 가스 전환 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 콤팩트 반응시스템 설계 및 제작 ▶ 열전달 채널 구조 및 열매체 영향 분석 ▶ 촉매층 및 냉각 채널 구조 및 크기 변화에 따른 온도 구배 특성 분석 ▶ 최적 모듈 설계를 위한 기초 데이터 확보 ▶ 콤팩트 반응시스템용 촉매 성형 기술 확보 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ C₂ 수율 17.2% 달성 ▶ 반응기 규모 32.9g (촉매기준) 달성 ▶ 촉매 회석제 비율 0% 달성 ▶ 반응기 열전달 면적비 570 m²/m³ 달성 ▶ m³Y 달성
2009-2019	유무기 하이브리드 물산화광촉매 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 산소발생 효율 향상을 위한 반도체 나노입자 개질 및 이종 융합촉매 개발 ▶ 광감응체 복합화를 통한 광흡수율 및 양자효율 증대 ▶ 산소발생 조촉매 비교 연구 및 백금 대체 촉매 개발 ▶ Z-Scheme 접근법을 통한 물-P-N 접합 복합 광촉매 개발산화 산소 발생 달성 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 단일 또는 이종융합 촉매 및 광감응체 복합화를 통한 여러 종의 새로운 광촉매 개발기술 확립 ▶ 귀금속을 대체할 산소발생을 위한 조촉매 개발기술 확립(6종 촉매 개발) ▶ 인공태양광 (AM 1.5) 조사 조건에서 물산화 광전류 효율 입증
2009-2019	인공광합성 구현과 실용화를 위한 기초과학 확보 및 원천기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 태양에너지 대비 1%이상의 전환 효율로 CO₂를 액체연료로 전환하는 방법 및 장치개발 ▶ 물산화 광촉매, 물산화 광전극 개발 ▶ 양성자 전자 활성수소 수송체 개발 ▶ 다전자 CO₂ 환원(광)촉매 개발 ▶ 나노 입자 조직화, 고성능 분자 분리막 개발 및 디바이스 제작 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 인공광합성 디바이스용 CO₂ 환원(광)전극 개발 ▶ 태양에너지 대비 1.0%대로 액체연료를 생산하는 인공광합성 디바이스 개발 ▶ 15 μm 이상 길이의 TCO (transparent conducting oxide) 마이크로 기동 에테이러를 기반으로 하고 WO₃/BiVO₄를 물산화 광촉매로 사용한 물산화광전극 개발 (광전류 밀도 current density ≥ 6 mA@1.23V, RHE) ▶ 인공광합성용 디바이스 디자인, 물분해 성능평가 (태양광 수소 전환 효율 4.5%) → 3.3 mA/cm² 달성) ▶ 염료감응 태양전지 개발(효율 11%)
2016-2021	저온 메탄 할로젠화를 통한 경질올레핀 제조용 불균일계 촉매	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 금속 나노입자 및 나노다공성 금속 산화물 촉매 개발 ▶ 제올라이트 기반 메탄 활성화 촉매 개 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 메탄 염소화 및 고선택성 메틸클로라이드 제조용 촉매 소재 개발 (CH₄ 전환율 ≥ 38%, CH₃Cl 선

연구기간	과제명	주요 내용	성과
	개발	<ul style="list-style-type: none"> 발 ▶ 전환율, 촉매 수명, 경질 올레핀 형상 선택성 극대화 ▶ 고효성 전기분해 촉매 소재 개발 ▶ 염소가스 재생 공정 및 촉매 평가시스템 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 택성 $\geq 70\%$ 이상) ▶ 메틸클로라이드로부터 경질올레핀 제조용 촉매 소재 개발 (CH₃Cl 전환율 $\geq 86\%$, 경질 올레핀 선택도 $\geq 75\%$ 이상)
2015-2024	전환 효율 극대화를 위한 C1 반응 소재 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ C1 가스 고부가 전환용 콤팩트 구조체 반응기 설계 기술 개발 ▶ 미세구조 구조체 반응기 설계 기술 개발 ▶ 촉매 고분산 담지 및 안정화 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 담체(Al₂O₃, MgO) 고분산 코팅 조건 최적화 및 코팅량 제어기술 확보 ▶ 구조체 재질 (FeCr합금, SiC) 및 형상별(monolith, foam, mesh) 담체 코팅 조건 최적화 확립 ▶ 코팅층 박리 억제 및 안정화 기술 확보 (코팅량 무게 손실률 < 50%, 워시코팅 대비)
2017-2021	차세대 탄소자원화 핵심기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 부생가스/탄소폐자원 활용기술 개발 ▶ 재생에너지 활용 CO₂ 전환 융합 기술 개발 ▶ 유기성(그린탄소) CO₂ 전환 융합기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 전이금속을 이용한 CO 고선택투과성 촉진수송복합막개발 (CO/N₂ 선택도 최대 35.8, CO 투과도 25.4 GPU) ▶ CO₂를 COG와 반응시켜 유용한 CO로 전환하는 기술개발 (CO₂ 전환율 90%) ▶ 인공광합성 핵심인 2D COF 광촉매상의광전하의전달 메커니즘을 펩토초분광법을 이용 세계 최초로 규명 ▶ CO₂로부터 옥살산 제조 기술 개발 (전환효율 95%) ▶ CO₂와 수소로부터 청정연료 및 화학제품 제조: 촉매 최적화(액체 탄화수소 수율 35.2%) 및 P2L/P2G 하이브리드 공정 개발 (CO₂ 저감율 90%)
2015-2021	카르보닐화 반응을 통한 우레탄/이소시아네이트 제조용 촉매개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 일산화탄소(CO)를 아민이나 니트로 화합물과 카르보닐화 반응시켜 우레탄(카비메이트) 제조용 고효성 촉매를 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 촉매합성방법 개선을 통한 고효성 촉매 개발 (촉매 활성: 59.3 g/g-cat) ▶ SeO₂(OCH₃)- 촉매를 이용한 산화성 카르보닐화 반응 최적 조건 도출
2016-2021	합성가스로부터 DME/MA를 경유한 초산 제조용 촉매기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ DME/MA 경유 간접 고정층 및 유동층 반응공정 개발 ▶ CH₄/CO₂ 직접 활용 초산 제조 촉매기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 회분식 반응기를 이용한 초산 수율 60% 초과 달성 ▶ 3단계의 반응에 대한 개별 반응기 연구 및 dual-layer segregation 현상에 통한 합성가스로부터의 메틸아세테이트 직접합성 성공 및 공정 최적화 (동일한 기술을 이용한 에탄올 합성을 위한 기술 개발) ▶ Chemical looping process를 활용한 초산 합성 성공
2020	후속 사업	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 루테튬 금속과 탄소를 포함한 복합체 촉매* 개발('20.06) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 이산화탄소가 녹아 있는 '탄산 환경'에서도 잘 작동할 뿐만 아

연구기간	과제명	주요 내용	성과
			<p>나라 저렴한 재료를 이용해 간단한 공정으로 합성 가능</p>
2020	후속 사업	<p>▶ 이산화탄소를 포집해 건설 소재 등 부가가치 높은 자원으로 만드는 기술*을 개발('20.11)</p>	<p>▶ 기존 공정 유닛과 비교해 부피는 5분의 1에서 20분의 1 수준, 물질전달 효율은 1.5배 우수, 부피 대비 표면적이 기존 시스템보다 수 배 이상 높아 비용 대비 효율성 높음</p>
2020	후속 사업	<p>▶ 대사공학기술을 활용하여 태양광과 이산화탄소로부터 실생활과 다양한 화학공업에 쓰이는 광합성 아세톤을 직접 생산할 수 있는 세계 최고 수준의 기술 개발('20.01)</p>	<p>▶ 지구온난화의 주범인 이산화탄소를 활용하여 기존의 석유화학제품을 대체할 수 있는 이산화탄소활용 원천기술</p>
2019	후속 사업	<p>▶ 발전소와 공장 등에서 발생하는 이산화탄소를 활용해 전기와 수소를 생산하는 시스템을 개발('19.06)</p>	<p>▶ 이산화탄소의 탄산수소칼륨로의 전환 효율 57% 이상 달성</p>
2020	후속 사업	<p>▶ 개미산과 이산화탄소만으로 상대적 고농도 배양이 가능한 대장균 개발('20.10)</p>	<p>▶ 개량한 대장균을 이산화탄소와 개미산만이 함유된 배지에서 배양한 결과 광학밀도(optical density) 11 수준까지 증식</p>
2020	후속 사업	<p>▶ 메탄에서 고부가가치 화학제품을 생합성하는 전략 제시 및 이를 기반으로 메탄 유래 식품소재와 바이오 플라스틱 원료를 생산하는 기술 개발('20.09)</p>	<p>▶ 메탄과 이산화탄소를 동시에 동화할 수 있는 유형 II 메탄자화균의 개량에 성공</p>
2020	후속 사업	<p>▶ 미생물이 C1 가스(이산화탄소, 일산화탄소 등 단일 탄소로 이뤄진 가스)를 활용하는 새로운 대사 회로 메커니즘 규명('20.03)</p>	<p>▶ 현재까지 알려진 관련 대사회로 중 가장 우수한 효율 보유</p>

12. 기후 예측 및 모델링

□ 과제별 주요 성과

- 모니터링 및 예측을 위한 기술 개발이 주를 이루고 있으며, 이를 위해 다양한 모형 및 시뮬레이터, 모델링, 시스템 등을 개발
- 기후 예측 및 모니터링 관련한 연구의 개발 기간은 비교적 장기로 진행되어 기술의 성숙이 충분히 진행될 수 있도록 기술 개발 진행

<표 4-12> 기후 예측 및 모델링 과제별 주요 성과

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2009-2019	LES를 이용한 난류 모수화 및 고해상도 OGCM 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 고해상도 OGCM 개발 및 분석 ▶ GAIA 기후모형내 OGCM 개선 ▶ 대기-해양 난류 LES 모수화 검증, 개선 ▶ 해양-기후 역학과정 규명 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ GFDL MOM4.1 기반 수평해상도 1/4도, 연직 50층 고해상도 OGCM 개발 ▶ OGCM에 적용, 논문제로 남아있던 남빙양(Southern Ocean)을 비롯한 고위도의 혼합층의 깊이가 과소평가되는 문제의 해결 등 획기적 모델개선을 달성 ▶ LES를 이용 구름물방울을 Lagrangian 입자로 직접 재현하는 LCM을 개발 ▶ 개선된 Noh 해양혼합층 모델을 대기모델과의 결합 및 위성 SST 자료동화를 통해, SST의 일변화의 예측성을 향상
2009-2019	고해상도 기후모형 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 선진 구름분해모형을 도입하고 구름미세물리 과정의 민감도 분석 ▶ 구름분해모형을 이용한 적운대류 모수화 방안의 개선 ▶ 50km 고해상도 전지구 대기모형에 적합한 구름미세물리과정의 개발 ▶ 개선된 구름미세물리과정을 포함한 고해상도 대기모형의 장기적분을 통한 안정도 검증 및 기후변동성 분석 ▶ 고해상도 전지구 기후시스템 (대기해양접합)에 적합한 구름미세물리과정의 개발 및 안정도 검증 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 선진 구름분해모형 중 국내도입이 가능한 모형의 조사 및 도입 ▶ 구름분해모형을 이용한 적운대류 모수화 방안의 개선 ▶ 구름 미세물리과정의 민감도 분석을 통한 50km 고해상도 대기모형에 적합한 구름미세물리과정 개발
2009-2019	기후예측 시뮬레이터 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 현재 구축되어있는 기후 시스템 모형 내 물리 과정들의 품위를 검증하고 물리과정 개선 ▶ 모델과 관측결과의 분석을 통해 실제 기후 시스템 내부의 역학과정을 이해함으로써 물리 과정에 개선점을 제공 ▶ 지구 시스템 모형의 성능을 검증하고 민감도 실험들을 수행함으로써 지구시스템 모형의 품위를 개선 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 현재 구축되어있는 GAIA 기후 시스템 모형에 깊은 대류 모수화 방안을 추가 및 개선 ▶ 기후 시스템 모형에 추가된 모수화 방안들을 이용하여 여러 민감도 실험을 수행하였으며 이를 바탕으로 모델 품위를 개선 ▶ 기후 시스템 모형의 물리 과정 개선의 근간이 되는 다양한 기후역학 현상들을 규명 ▶ 기후 시스템 모형에 여러 생지화학 과정을 추가하여 지구 시스템

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2009-2019	기후예측 시뮬레이터를 위한 지면-대기 탄소순환모형 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▶가이아 기후예측 시뮬레이터를 위한 지면-대기 탄소순환 모형 개발 ▶가이아 지구시스템 모델의 지면 모델의 생지화학과정의 물리모수화를 개선하고, 탄소-기후 되먹임 과정의 정성·정량화 연구 	<p>모형 제작</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶기후예측 시뮬레이터의 탄소순환 과정 모델링 기술 확보 ▶지면모델의 생지화학과정 모수화 개선으로 탄소-기후 되먹임 과정의 모델링기술 향상 ▶현장관측과 위성관측자료의 융합을 통해 탄소순환 모니터링을 향상
2009-2019	통합 기후예측 시스템을 위한 기후예측 시뮬레이터 개발 및 대양 관측	<ul style="list-style-type: none"> ▶GAIA 시뮬레이터 개발에 필요한 해양생지화학 과정, 지면-대기 탄소순환모형 개발 ▶고해상도 기후시스템 모형을 위한 해양 및 대기 물리과정의 모수화 방안 개발 ▶해양 탄소순환을 고려한 지구시스템 상호작용 연구 ▶해양 자료와 정보 제공을 위하여 열대 서태평양 및 독도해역 해양 관측 ▶자료동화시스템 활용 기후재분석 자료 생산, 중·장기 기후예측성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> ▶해상도종속성을 개선시킨 구름 미세물리과정의 개발 ▶고해상도 (1/4도, 50층) OGCM 개발 ▶대기와 식생 탄소순환과정을 고려한 대기-지면식생 모형을 개발 ▶해양 생지화학 과정 모형 접합 기후예측 시뮬레이터 개발 ▶개선된 구름미세물리과정과 고해상도에 적합한 연직혼합과정을 접합하여 고해상도(50km) 전지구 대기모형의 개선

13. 수산자원 및 연안 관리

□ 과제별 주요 성과

- 분리막 제조와 관련된 기술 개발이 주를 이루고 있으며, 이를 통해 수처리 및 하폐수 재이용이 가능하여, 기후변화에 따른 집중 호우 등의 기상이변에 대응 가능

<표 4-13> 수산자원 및 연안 관리 과제별 주요 성과

연구기간	과제명	주요 내용	성과
2010-2016	수처리용 혁신 분리막 개발 및 응용	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 새로운 분리막 재료와 나노입자 첨가제를 적용해 수투수도와 내생물막오염성이 개선된 혁신 분리막 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 지지층 제조 고분자 농도를 낮춘 RO 분리막 개발 *염제거율 손실 없이 수투수도 300% 증가 ▶ AS 분리막의 경우 대조군에 비해 내생물막오염성 99% 상승
2010-2016	하폐수 재이용을 위한 생물막오염 제어 분리막의 제조	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 패턴형 분리막의 제조 ▶ 그래핀 옥사이드(GO) 함유 분리막의 제조 ▶ 역삼투막에서의 다공성 지지층의 영향 규명 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 평판형 패턴 NF/RO 분리막을 제조 및 개선 ▶ 다양한 패턴 분리막(중공사형 패턴 분리막/나노패턴 분리막/패턴 RO 분리막)의 제조 및 패턴 최적화 ▶ GO 복합 UF 분리막의 제조 ▶ 패턴형 GO RO 분리막 제조

14. 작물 재배 및 생산 관리

□ 과제별 주요 성과

- 농촌주택의에너지 효율 향상을 위한 기술 개발을 통해, 실내에서 작물 재배 및 생산 관리가 가능하게 됨에 따라 기후의 영향을 덜 받고 작물 재배 및 생산이 가능
- 단열 및 난방 관련한 기술 개발로 이상기후로 인한 급격한 기온 저하에 대비 가능

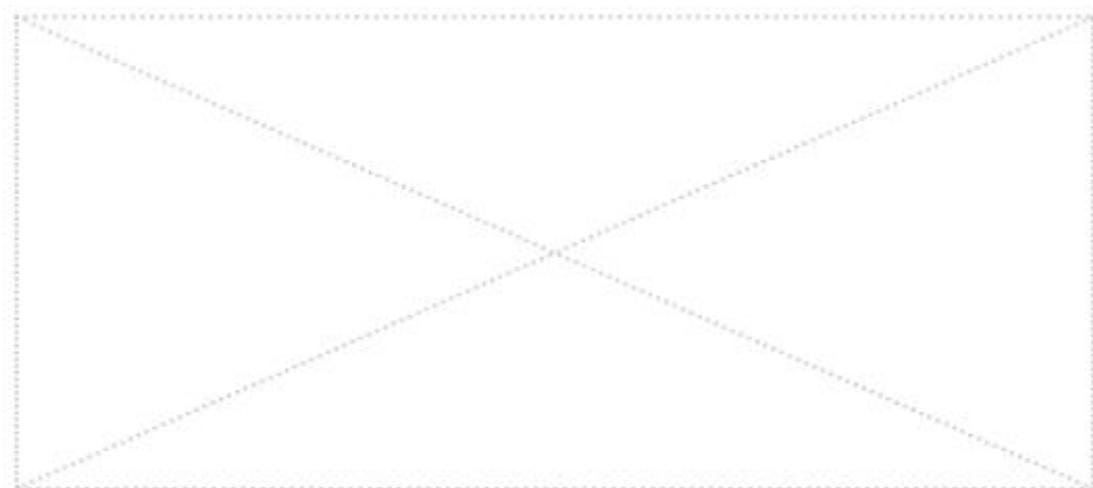
<표 4-14> 작물 재배 및 생산 관리 과제별 주요 성과

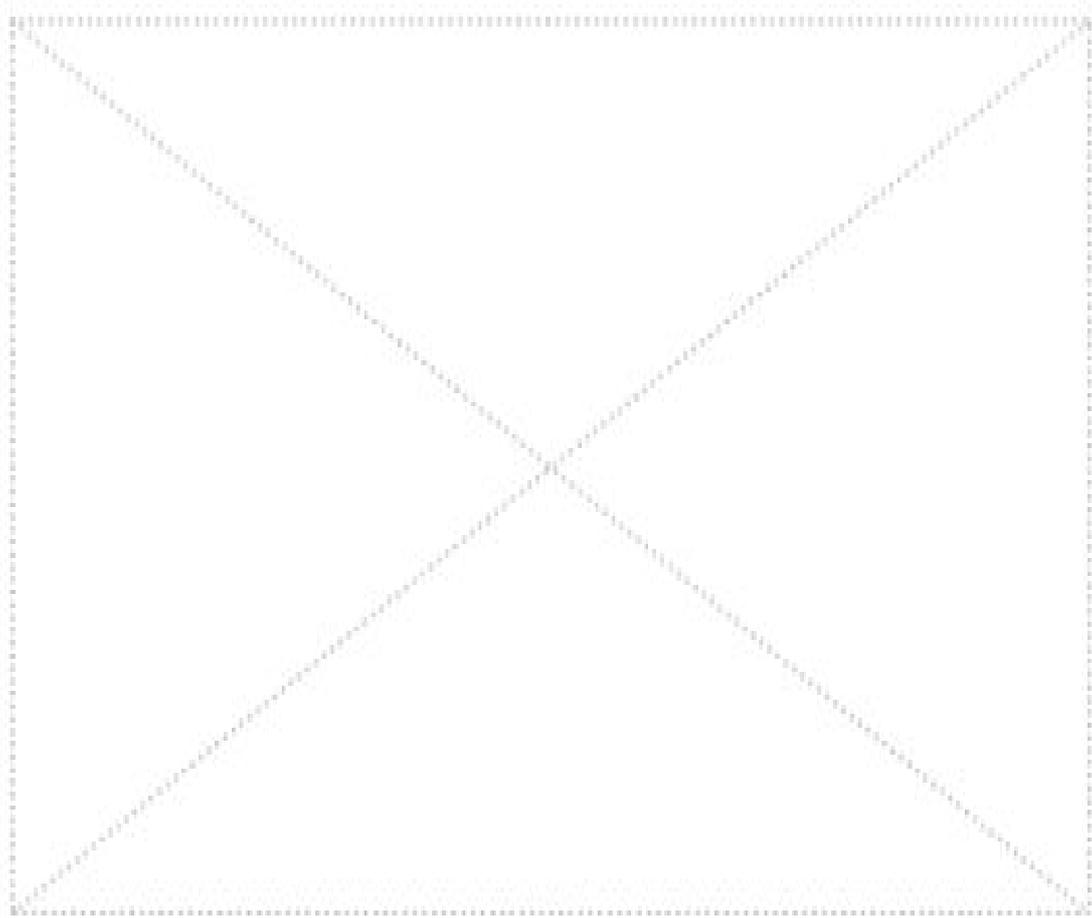
연구기간	과제명	주요 내용	성과
2017-2017	우즈베키스탄 농촌주택의에너지효율화를 위한 저가 보급형 외피단열기술 실증사업	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 우즈베키스탄 농촌주택의에너지 효율화를 위한 저가 보급형 외피 단열기술 실증을 통해 국내 기후 기술의 해외 진출 기반 구축 ▶ 기술실증사업에 대한 평가 및에너지효율화 농촌주택 모델 제시 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 현지 적정화 및 기후특성을 고려한 기존 외벽체 대비 약 2배 이상의 단열성능 확보 가능한 외단열패널(All in One Panel) 기술 실증 ▶ 농촌주택에너지효율화를 위한 저가 보급형 외피단열기술 실증을 통해 난방에너지 40% 절감 가능한 농촌주택 모델 제시

제5장 기후변화 대응기술개발사업의 효과 및 스토리 도출

1. 효과 및 스토리 도출 프로세스

- 기후변화 대응 R&D 효과 및 스토리 도출은 전술한 장에서 도출한 기후변화 대응 요소트리의 분류와 연계하여 기후변화 대응기술개발의 필요성과 사업의 성과를 제시하였음
 - 요소트리와 연계하여 기후변화 요인·과정으로부터 이어지는 하향식 이야기 형태로 도출
 - 기후변화 대응기술개발사업의 효과는 각 과제별 단위가 아니라, 기술군의 관점에서 그동안 추진해온 성과들이 연계되면서, 어떠한 발전을 보여왔는지를 제시하는 방식으로 구성하였음
 - 그동안 성과분석에서는 사업/과제 단위의 성과 분석을 통해 각 과제의 투입 대비 성과의 우수성을 중심으로 제시하고, 사업 단위의 논문, 특허, 기술이전의 질적 우수성 관점에서 모니터링 및 성과 분석 실시
 - 상기의 관점은 사업 관리 측면에서는 효과적이나, 일반인이 기후변화 대응기술개발에 대한 이해와 그 성과를 체감하는 것에는 한계 존재
 - 이러한 이슈를 해결하기 위해, 과제가 아닌 기후변화 대응 이슈 중심으로 그룹핑하고, 기후변화 대응기술개발사업 전체에서 발생된 성과를 시계열로 표현하여 R&D 투자를 통해 기술개발이 발전되어 온 것을 파악할 수 있도록 구성
- 각 효과 도식화 결과는 전문가 검토와 과기정통부, 한국연구재단의 검토를 거쳐 수정보완
 - 2차 자료를 바탕으로 각 요소트리 분류별 최근 10여년의 기술 트렌드를 도출
 - 언론보도, 국내외 연구기관 발표 자료를 조사하여 최근 10년 기술개발이 지향하는 이슈 도출





[그림 6-1] 기후변화 대응기술 트렌드

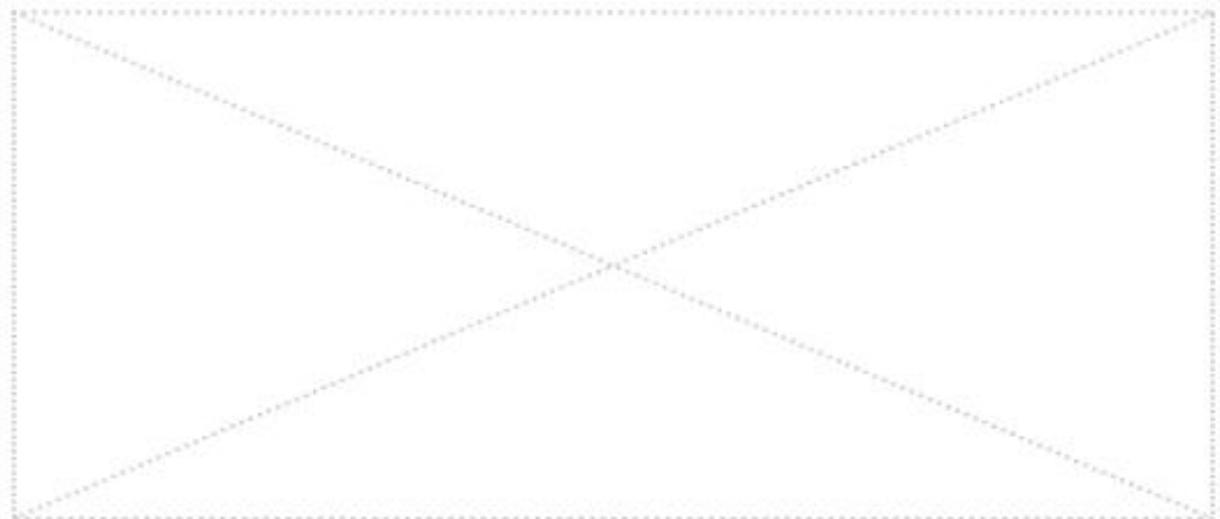
* 자료: 본 연구에서 작성

- 기술 트렌드에 따른 기후변화 대응기술개발사업에서 추진된 성과를 도식화하고, 사업 전체의 관점에서 보았을 때 성장한 효과를 제시하였음
- 전문가 6명을 대상으로 각 요소트리 분류별 기후변화 대응기술개발사업 효과의 그룹핑 결과를 검토 수렴
 - 각 요소트리 분류별 트렌드를 도출하여 해당 트렌드에 적절성에 대해 전문가 검토 의견을 수렴하여 수정/보완
 - 기후변화 대응기술개발사업의 성과를 요소트리에 매칭하고, 그 결과를 전문가 검토 의견을 받아 수정/보완

2. 기후변화 대응의 필요성

가. 기후변화 영향물질 발생 예방

- 기후변화를 일으키는 온실가스 배출의 주원인인 화력에너지를 대체하기 위하여 태양광, 풍력, 수력 등의 자연을 활용한에너지와 수소에너지와 같은 신에너지를 통해 온실가스 발생 예방을 위한 노력을 추진해왔음
- 에너지 저장 및 운송 과정에서 발생 가능한 온실가스를 줄이기 위하여 전력 저장, 수소에너지 저장, 송배전 시스템 및 전기지능화 과정에 대한 기술 개발 진행중
- 대한민국은 기후변화를 일으키는 온실가스 배출량 세계 7위 수준이며, 화력 발전이 온실가스 배출의 주원인임
- 온실가스 배출을 차단하기 위해 화석 연료와 같은 온실가스 발생에너지 대신 신재생에너지를 개발하고,에너지 저장 및 운송 과정에 대한 기술 개발을 추진하여, 온실가스를 배출하지 않는에너지의 경제성 및 효율성 확보를 위한 환경을 구축해 왔음

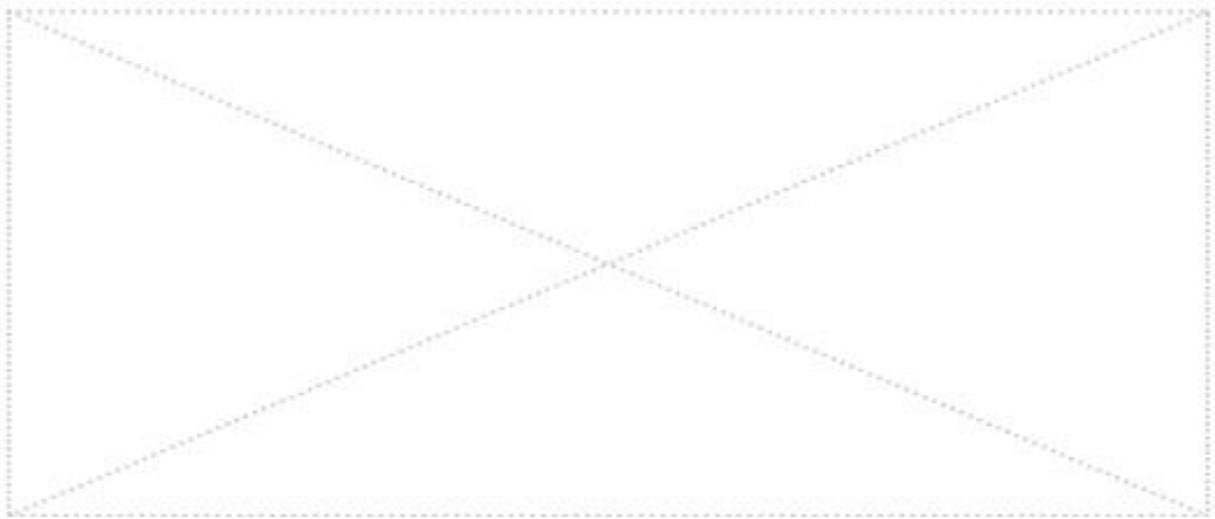


[그림 5-2] 중분류: 기후변화 영향물질 발생 예방

* 자료: 본 연구에서 작성

나. 기후변화 영향물질 배출 저감

- 기후변화 영향물질로 인한 온실가스 효과 차단 또는 최소화를 위해, 온실가스 배출이 많은 산업 및 시설물, 수송 수단의 배출 저감을 유도하는 기술의 개발을 통해 화력발전을 계속 사용해도 온실가스를 적게 배출하게 만드는 환경을 구현하고 있음
- 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆)의 발생을 줄이기 위하여, 산업과 시설물, 수송수단에서 온실가스를 덜 배출할 수 있는 대체품의 활용, 온실가스를 배출하지 않는 에너지를 활용하도록 추진해 왔음. 이를 통해 향후 활발한 산업 및 교통 활동에도 온실가스 배출이 감소할 수 있는 환경 마련이 가능해짐

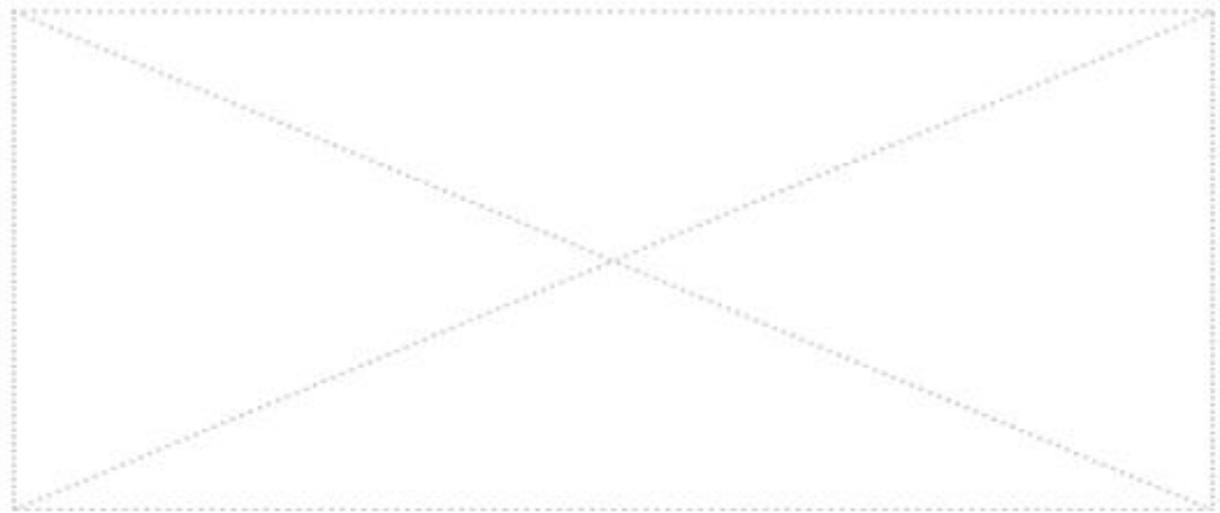


[그림 5-3] 중분류: 기후변화 영향물질 배출 저감

* 자료: 본 연구에서 작성

다. 기후변화 영향물질 온실가스화 방지 및 관리

- 기후변화 영향물질이 온실가스로서 부정적 영향을 미치지 않도록 관리하고, 우리 생활에 긍정적으로 활용될 수 있도록 기후변화 영향물질을 전환하는 기술 개발을 통해, 기후변화에 대한 영향 제거 및 긍정적 활용을 위한 기술 개발을 확대하고 있음
- 산업공정, 에너지산업, 농업, 폐기물 분야 등에서 배출되는 탄소와 기타 물질들이 모여 온실가스효과를 만들게 되는데, 이러한 기후변화 영향물질을 긍정적으로 활용하게 만들어 기후변화 방지가 가능함
- 이산화탄소의 포집/수송/저장 및 전환, Non-CO₂의 포집/정제/활용 및 분해를 통해 기후변화 영향물질을 연료로 활용할 수 있도록 기술 개발을 추진중

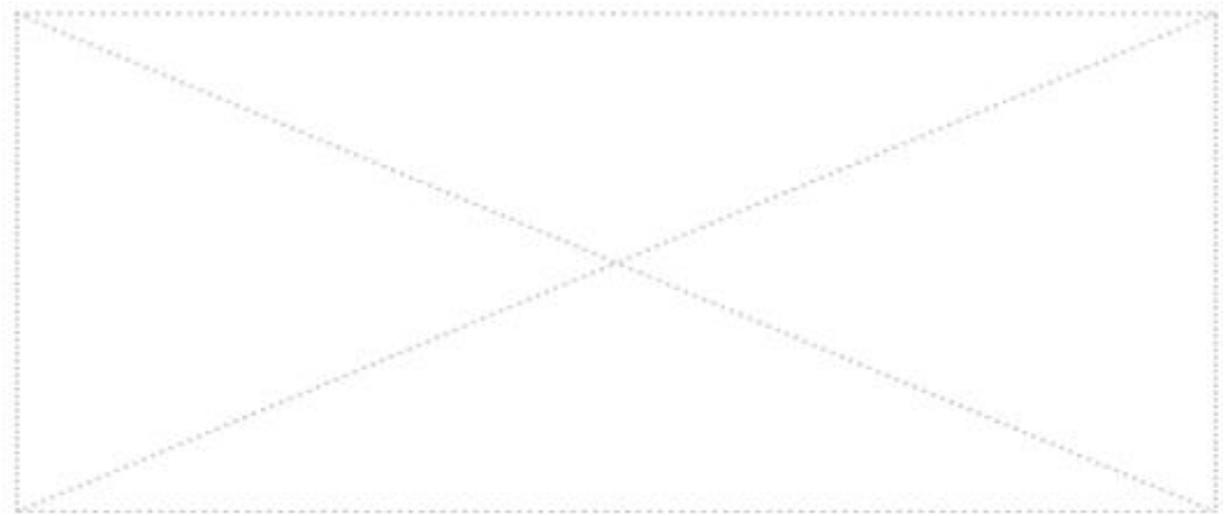


[그림 5-4] 중분류: 기후변화 영향물질 온실가스화 방지 및 관리

* 자료: 본 연구에서 작성

라. 모니터링 및 변화 예측

- 기후변화의 원인 및 영향을 파악하고, 향후 발생 가능한 변화 예측을 통해 사람과 생태계 측면에서의 대비 및 대응이 가능하도록 하는 기술 개발을 추진중
- 기후변화에 대비하기 위해 태풍, 홍수 등 급작스러운 환경 변화, 기온 상승, 해빙과 같이 서서히 변화하고 있는 환경 변화를 계속 파악하고, 이를 통해 앞으로 있을 변화 예측이 중요함
- 예측을 통해 사람과 생태계에 발생 가능한 피해를 최소화하거나 방지할 수 있는 기술 개발 및 확보가 필요함
- 기후변화 모니터링 및 예측 기술 확보를 통해 기후변화에 대한 장기적 대응, 피해를 최소화할 수 있는 환경 구현이 가능

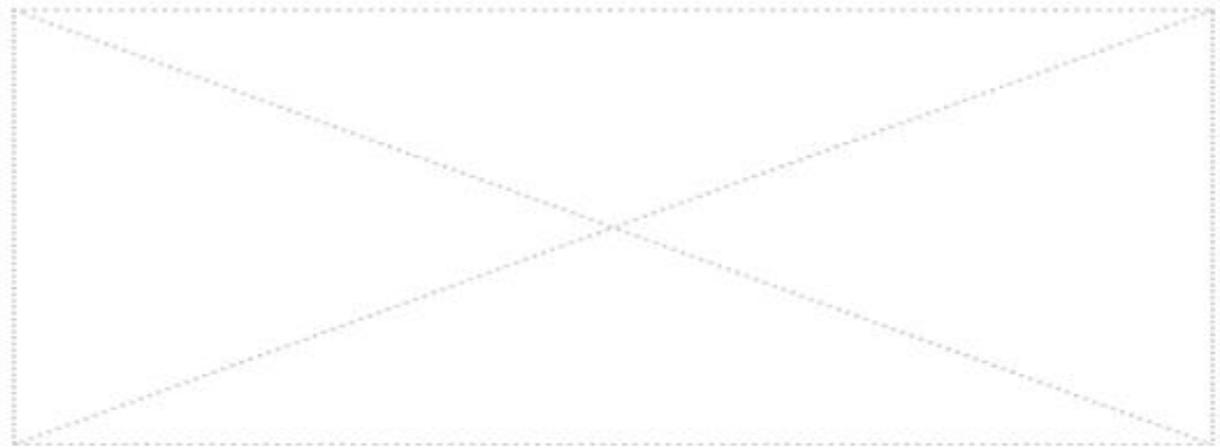


[그림 5-5] 중분류: 모니터링 및 변화 예측

* 자료: 본 연구에서 작성

마. 기후변화 영향 대응

- 기후변화에 취약한 수자원 및 해양, 농축산, 수환경에 대한 대응기술 개발을 통해 자원 확보 차원에서 기후변화의 영향 최소화를 위한 노력중
- 기후변화로 인해 봄/가을의 단축, 아열대 생물체의 등장 등의 변화가 발생하고 있음
- 수자원, 해양 생태계, 농업, 축산, 산림 자원에 대한 기후변화로 인한 영향 최소화 및 예방을 위해 노력하는 단계이며, 이를 통해 향후 기후변화의 속도가 늦어지거나 유지되는 환경 구현이 가능함

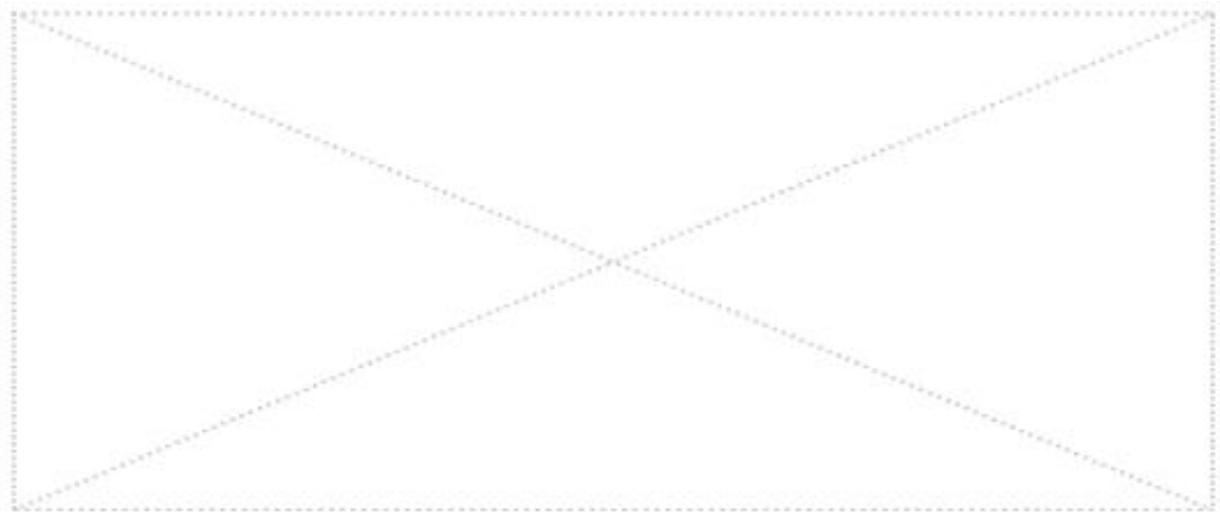


[그림 5-6] 중분류: 기후변화 영향 대응

* 자료: 본 연구에서 작성

바. 기후변화 피해 저감

- 기후변화로 인한 피해가 큰 수자원 및 해양, 농축산, 수환경 등에 대하여 피해가 최소화 될 수 있도록 대비하고, 피해 후 빠르게 복구/복원이 가능하게 하기 위한 노력중
- 국내외 홍수, 쓰나미 등 기후변화로 인해 발생하는 자연재난/재해가 늘고 있으며 이로 인한 피해규모도 확대되고 있음
- 수환경, 해양, 산림, 육상 등 기후변화로 인한 피해가 심각한 대표적인 영역들에 대해 피해 저감을 위한 활동들을 확대하고 있으며, 이를 통해 피해를 받게 되더라도 최소화 하여 피해를 받게 된 이후에는 빠르게 복구 및 복원이 가능함



[그림 5-7] 중분류: 기후변화 피해 저감

* 자료: 본 연구에서 작성

3. 기후변화대응기술개발사업 효과와 스토리

가. 태양광/태양열

1) 필요성

- 태양광/태양열에너지 생산 시, 발전의 전 생애주기에서의 온실가스 발생량이 석탄의 1/17에 그쳐 기후변화 대응에 기여 가능
- 태양광은 빛에너지를 받아 태양전지판을 이용하여 전기를 생산하는 방식이며, 태양열은 태양으로부터 오는 복사에너지를 집열판으로 흡수하여 열에너지를 모아 터빈을 돌려 전기를 생산(태양 열에너지→기계에너지→증기터빈보일러)
- 온실가스 배출 원인 중에너지 부문이 1/3을 차지함을 감안하면, 에너지 부문에서의 온실가스 배출 저감이 필수적이며, 태양광의 경우 탄소 배출량이 석탄에 비해 1/17 수준이므로, 에너지 부문에서의 온실가스 배출 저감을 위한 좋은 대안
- 태양광 및 태양열 시장에서의 경쟁력 확보를 위해 변환효율 개선 및 비용 경제성 확보가 중요하므로, 이를 위해 공정 기술, 대면적 양산기술, 대량생산 기술을 위한 연구개발이 중요한 과제
- 우리나라의 태양전지 기술 수준은 세계 최고기술 수준인 일본 대비 87.5%이지만, 페로브스카이트 분야에서 세계 최고 기술을 보유하는 등 활발한 연구를 통해 선진국의 기술을 빠르게 추격하고 있음 (KISTEP, 기술수준평가, 2018)
- 태양광에서의 기술 트렌드는 고효율, 고성능, 유연화 등이 있으며, 실용적이면서도 심미성을 갖춘 기술에 대한 수요가 존재하므로, 관련 기술 개발을 위한 투자 필요
- 미국과 독일은 태양광의 LCOE²⁾가 가스, 석탄에 비해 낮아 이미 그리드 패리티³⁾에 도달했지만, 한국은 여전히 태양광의 LCOE가 높은 편. 향후 신재생에너지의 확대를 위해 태양광 및 태양열의 가격 경쟁력 확보를 위한 연구 개발에 대한 지원 필요

<표 5-15> 2017년 주요국 발전원별 LCOE

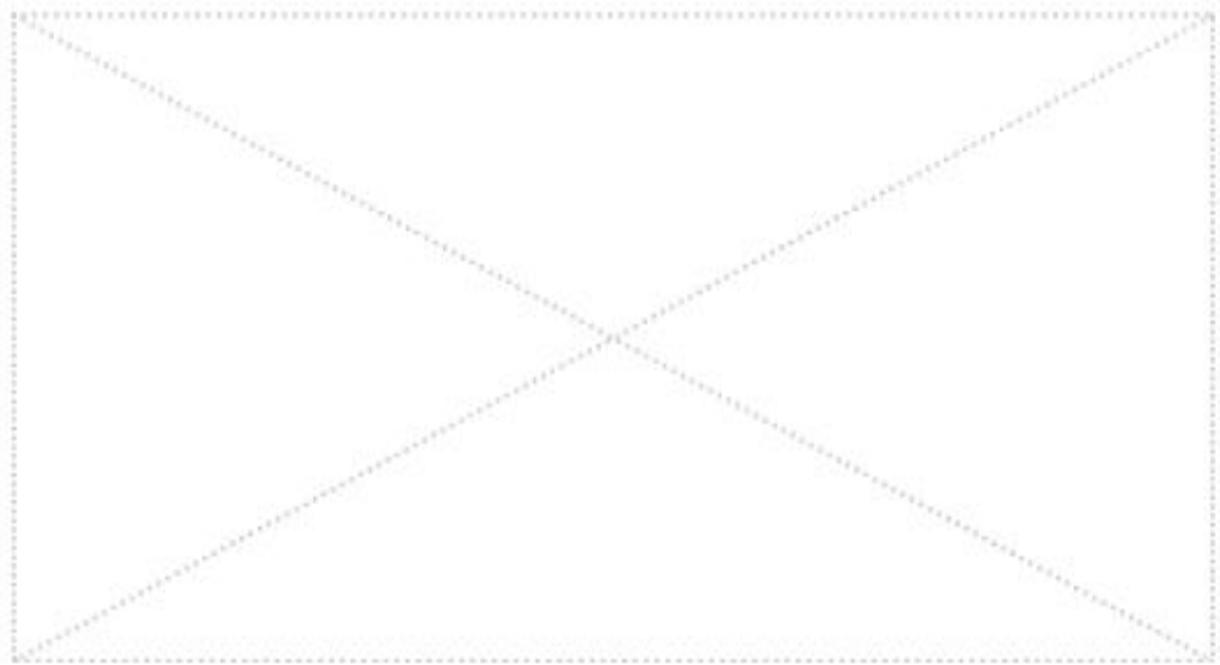
(단위 : 달러/MWh)

	한국	미국	독일	세계 평균
태양광	106	44	58	50
육상풍력	105	37	50	44
가스	85	40	87	-
석탄	62	90	156	-

*자료: 블룸버그ENF, 한전 경영연구원

2) 균등화발전원가(LCOE, Levelized Cost Of Electricity)이란, 발전 과정에서 배출되는 오염물질 및 사고 위험 비용, 관련 정책비를 반영한 사회적 비용 등을 모두 발전비용으로 포함하여, 발전량으로 균등화한 값임. 1kWh의 전기를 생산하기 위해 필요한 비용

3) 그리드 패리티란, 전기를 생산하는 단가와 화석연료를 사용하는 기존 화력발전 단가가 동일해지는 균형점을 뜻함



[그림 5-8] 태양광/태양열: 필요성

* 자료: 본 연구에서 작성

2) 성과

- 태양광에너지 기술은 고효율화, 유연화, 대면적화 등의 트렌드가 형성되고 있으며, '10년대 초 해외 대비 절반 수준에 그친 국내 기술이 지속적 발전을 통해 '19년에는 세계 최고 수준 달성
- 유연화 및 다중 접합화 기술의 경우 세계 수준에 미치지 못하지만 지속적 발전을 통해 세계 수준에 근접해지고 있음
- 그동안 가장 널리 사용된 실리콘 태양전지는 제조공정이 복잡하고 높은 생산단가로 인해 대량 보급에 한계가 있어, 페로브스카이트, 텐덤, 유기 태양전지 등 다양한 차세대 태양전지에 대한 개발이 활발히 이뤄지고 있음
- 차세대 태양전지 중 대면적, 유연화 등 실용적인 형태의 기술 개발이 가능하며 광전효율*이 높은 페로브스카이트에 대한 연구 및 기술 개발이 활발히 진행중이며, 기술 트렌드로는 고효율화, 유연화, 대면적화, 무독성 등이 있음
 - * 광전효율: 빛을 전기로 바꾸는 효율
 - 유연화를 위한 기술 개발에서는 섬유탄에서는 3.85%('17년), ITO에서는 6.15%('15년)의 광전효율 달성
 - 대면적화가 가능한 페로브스카이트 기술 30cm² 달성 ('17년)
 - 무독성을 위한 Pb-free 기술을 '18년 개발 ('18년)
- 텐덤 태양전지는 다양한 종류의 태양전지를 겹겹이 쌓을 수 있는 다중 접합화라는 트렌드를

형성중이며, 다중 접합화를 통해 고효율을 달성할 수 있으므로, 전세계적으로 기술 개발이 활발히 진행중

- 옥스퍼드에서 28%의 효율을 달성하였으며, 대한민국은 20%의 효율 달성 ('17년)

○ 유기 태양전지는 유연화(Flexible)이 가능한 장점이 존재하여 최근 관련 연구에 대한 지원 진행

- 유연화가 가능한 유기 태양전지에서 100cm²에서 15%의 효율 달성 ('19년)

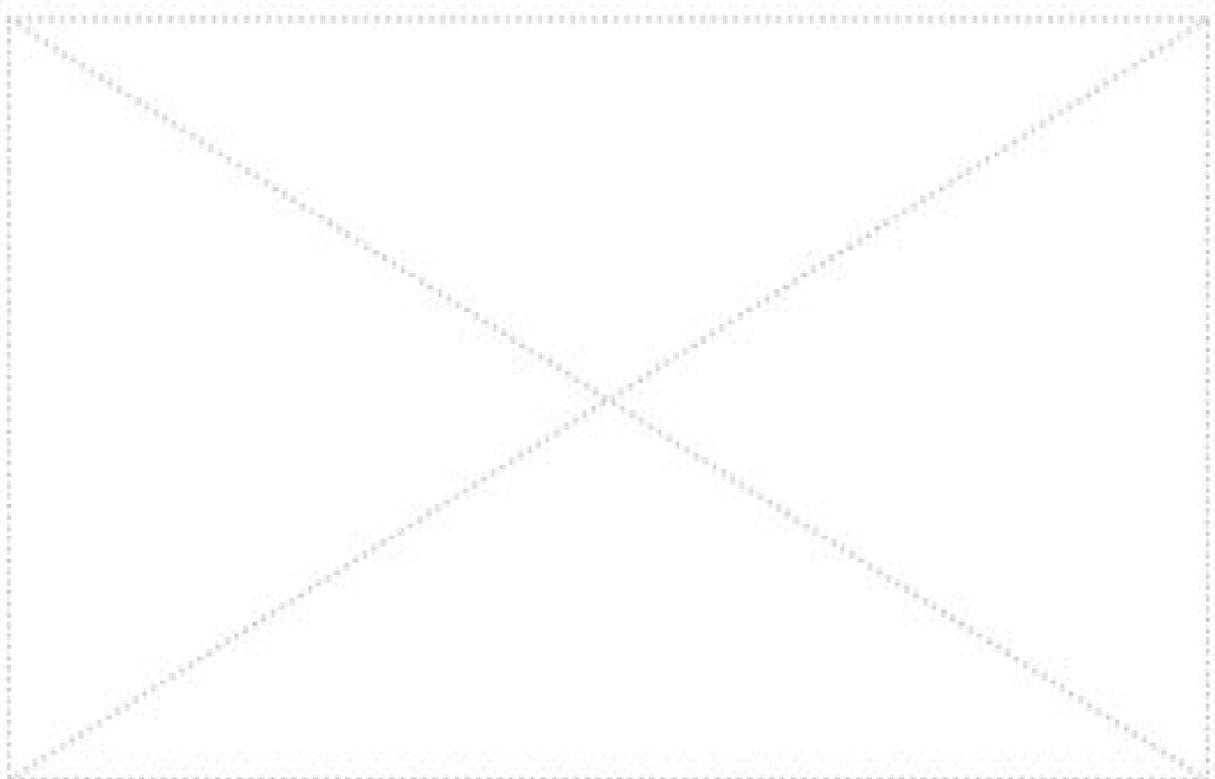
○ 기후변화대응 R&D 사업 이후 지속적인 사업을 통해, 페로브스카이트 관련 다음과 같은 성과를 추가 창출

- 페로브스카이트를 활용한 전지가 '10년 12%의 효율에서 2020년 25.5%의 효율을 달성하며, 실리콘 태양전지가 40년간 이뤄온 효율 개선을 10년 만에 달성 ('20년)

- 고순도 적색, 녹색, 청색 페로브스카이트 양자점 합성 기술 세계 최초 개발 ('20년)

- 유연하게 휘어지는 페로브스카이트 태양전지 세계 최고의 광전효율인 20.7% 달성 ('20년)

- 기존 대비 발전효율을 5.2%p 높이고, 고습도(60%)의 조건에서도 50시간 동안 80%의 효율 달성이 가능한 분자첨가제 개발을 통해 효율성 및 안정성 측면에서의 기술 수준 견인 ('20년)



[그림 5-9] 태양광/태양열: 성과

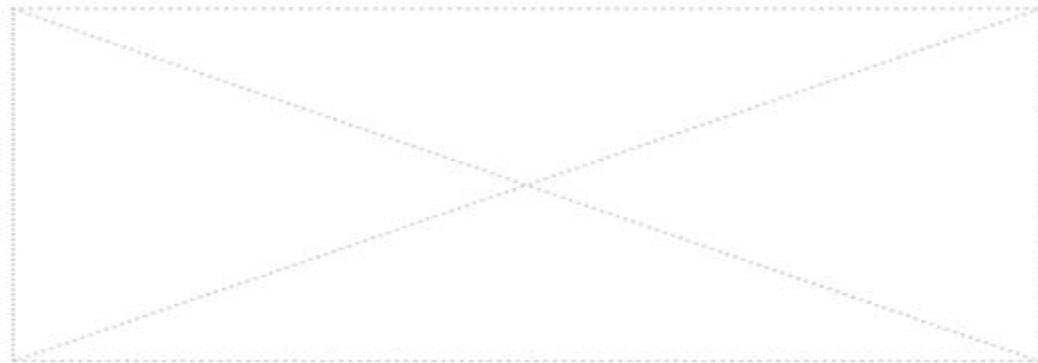
※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미

* 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

나. 해양에너지

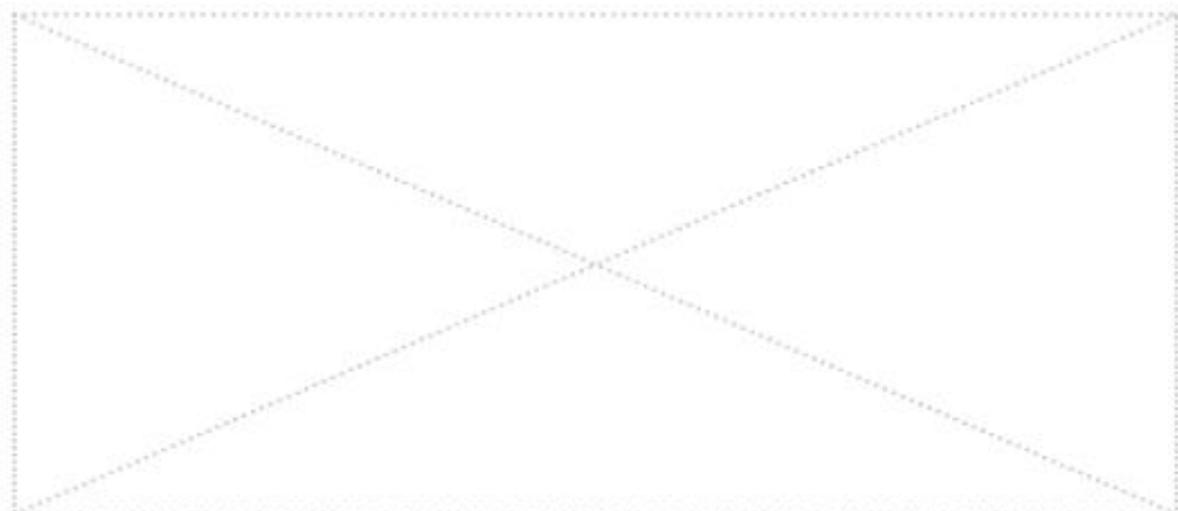
1) 필요성

- 해양에너지는 파력, 조력, 해류 등을 활용하여 전기 또는 열을 생산하는 기술을 의미하며, 신재생에너지 중 차지하는 비중은 1% 수준으로 미미하나, 부존 잠재량이 연간 전력에너지의 4배를 생산할 수 규모에 이르러, 기존 탄소 배출에너지의 대체원으로서의 가치가 높음
- 태양 복사에너지의 23%를 차지하는 해양에너지는 에너지 변환 효율과 에너지 밀도가 높고 대규모 개발이 가능하여 경제성 확보가 유리한 무고갈성 청정에너지
- 해양에너지의 종류로는 온도차 발전, 파력 발전, 해류 발전, 염도차 발전, 조류 발전이 있으며, 조류 발전에 대한 기술 개발이 활발하게 진행중
- 유럽, 미국, 아시아를 중심으로 대규모 파력, 해상풍력 및 조류 발전 등에 대한 개발 추진중
- 우리나라의 해양에너지 기술 수준은 최고 기술국인 EU 대비 2010년 72.3%, 2018년 81.5%로 9.2%p 증가하였으며, 2020년에는 5.1%p 증가한 85.4%에 이를 것으로 전망



[그림 5-10] 해양에너지원 별 국내외 기술수준 비교

*자료: 해양수산부, 산업통상자원부

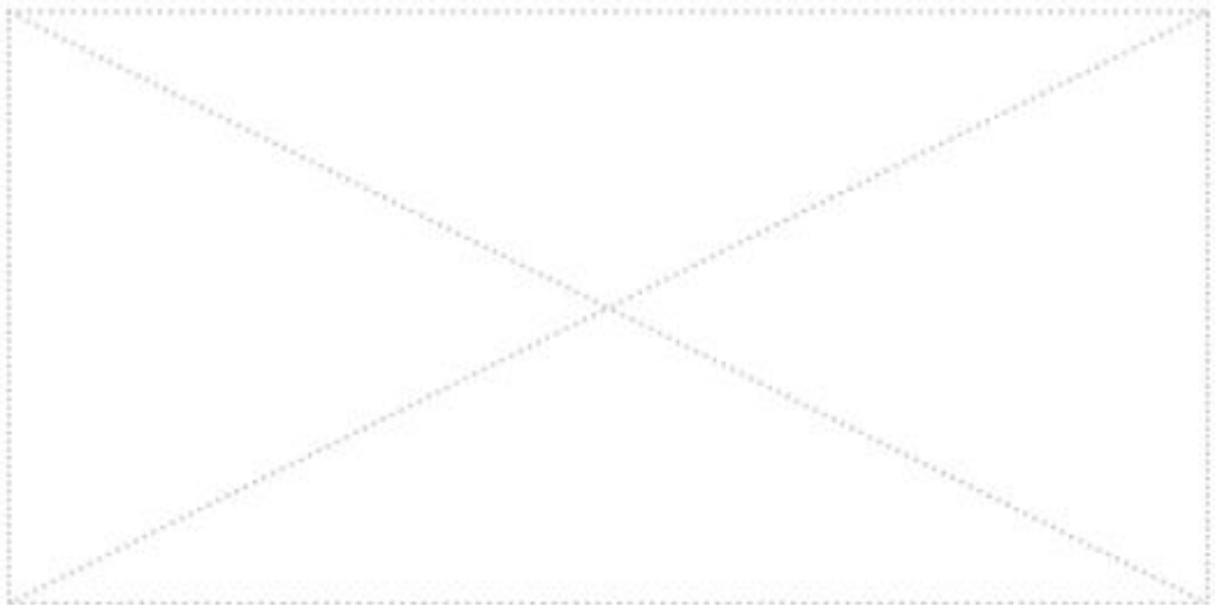


[그림 5-11] 해양에너지: 필요성

* 자료: 본 연구에서 작성

2) 성과

- 해양에너지 분야에서는 고밀도화, 발전 고효율화, 고효율 염수 담수화 기술 트렌드가 형성되어 왔으며, 해외는 신재생에너지와 관련해 다양한 분야에 대한 기술 개발이 이뤄져 기술 성과가 있는 반면, 대한민국은 관련 기술 개발에 대한 지원이 비교적 최근에 집중되어 있음
- 염분차발전에서는 해수담수화와 연계한 염분차 발전을 위한 분리막 및 융합시스템 핵심 원천기술 개발을 진행하고 있으며, 고밀도화, 발전 고효율화 등의 기술 트렌드 존재
 - 고밀도화를 위한 기술 개발에서는 에너지밀도를 1.93W/m² 달성 ('20년)
 - 발전 고효율화를 위한 기술 개발은 세계적으로 이뤄지고 있으며, '15년 해외에서는 5%, 65w의 광전효율을 달성하였으며, 우리나라는 '19년 스택의 발전효율에서 38.1%의 효율 달성 ('19년)
- 염수 담수화 부분에서는 역삼투압 방식의 이동형 담수 시스템을 개발하고 있으며, 관련 기술 성과로는 고효율 역삼투압 필터를 적용한 염수 생산을 통해 소요 전력을 절감시키는 기술 및 하루 10톤 규모의 염수 담수화가 가능한 설비 개발 진행 ('18년)



[그림 5-12] 해양에너지: 성과

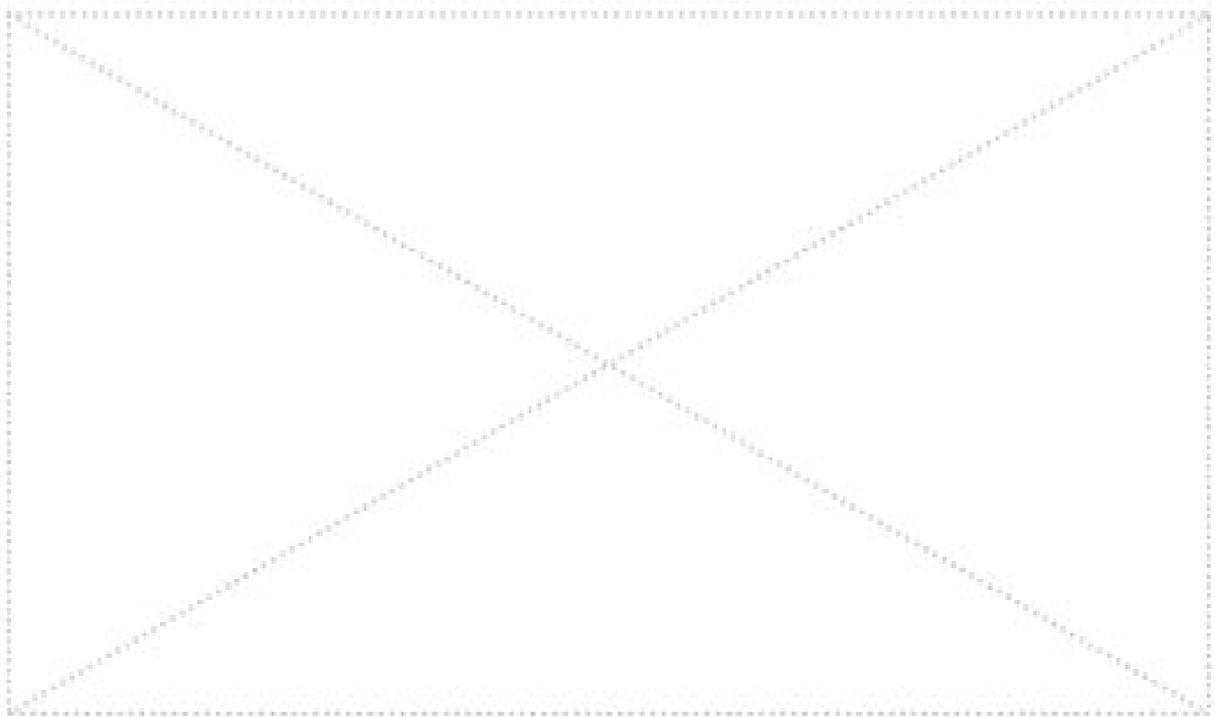
- ※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미
- * 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

다. 바이오에너지

1) 필요성

- 생물 자원의 물질을 전기 및 열에너지 형태로 변환한 에너지를 의미하며, 바이오디젤 등을 수송 부분에 활용하여 탄소 배출 저감에 기여
- 바이오에너지는 바이오매스를 직접 또는 물리적, 생화학적 변환과정을 거쳐 가스, 액체, 고체연료나 전기, 열에너지 형태로 이용하는 생물, 화학, 연소공학 등의 기술을 의미
- 바이오에너지는 재생 가능한 원료를 사용하고, 석유화학 제품을 대체할 수 있는 제품을 생산할 수 있어 온실가스 저감에 효과적이며, 다른 신재생에너지와 달리 열, 전기, 연료(난방 또는 수송용 연료) 등 다양한 형태로 활용 가능
- 바이오매스는 연소시 이산화탄소를 배출하지만, 바이오매스인 식물이 대기 중의 탄소를 흡수한 이후 이 식물이 연소할 때 대기 중으로 탄소가 배출되는 것이므로 탄소 중립에 적합
- 하지만 높은 생산 비용과 낮은 에너지 효율성, 식물성 바이오매스 사용으로 인한 논란 해결을 위하여, 효율성 및 경제성 증대를 목표로 새로운 바이오매스를 이용한 연구 개발 진행중
 - 상용화 단계에 도달한 바이오 에탄올과 바이오 디젤의 효율성 향상을 위한 연구와 동·식물성 유지 대신 해조류를 활용한 바이오디젤 생산 연구 개발이 활발
 - 1세대 바이오연료 기술은 식량 작물을 주원료로 함에 따른 곡물 가격 상승과 재배의 한계가 있어, 비식용작물을 원료로 한 진보된 바이오 연료 기술을 위한 개발이 활발
 - 최근 지속 가능하며 환경 친화적인 미세조류 기반의 3세대 바이오매스*에 대한 연구 개발이 활발
 - * 3세대 바이오매스(미세조류, 거대조류)는 지상식물이 자라지 못하는 조건에서 배양이 가능하여 식량과의 경쟁관계가 없으며 지상 식물보다 고생산성을 지님
 - * '10년 출범한 과기정통부의 차세대 바이오매스 연구단은 미세조류 기반의 바이오연료·소재 산업화 기술을 개발하였으며, '18년 기준 연구단의 기술 수준은 세계 최고 대비 97% 수준
- '20년 녹색에너지연구원에 따르면, 한국의 농업 바이오매스⁴⁾ 26개의 이론적에너지 잠재량이 원자력 발전소 1기 수준인 147만 1,722toe에 달하여, 관련 바이오매스시장에서의 주도권 확보를 위한 연구 개발에의 지원 필요

4) 농업 바이오매스는 재생 가능에너지로 변환 가능한 농업 관련된 생물자원 및 그 생물자원을 이용해 생산한 연료. 가축분뇨, 농산 부산물(벼짚, 왕겨, 콩대 등), 에너지 작물(쌀, 유채 등)이 해당됨.



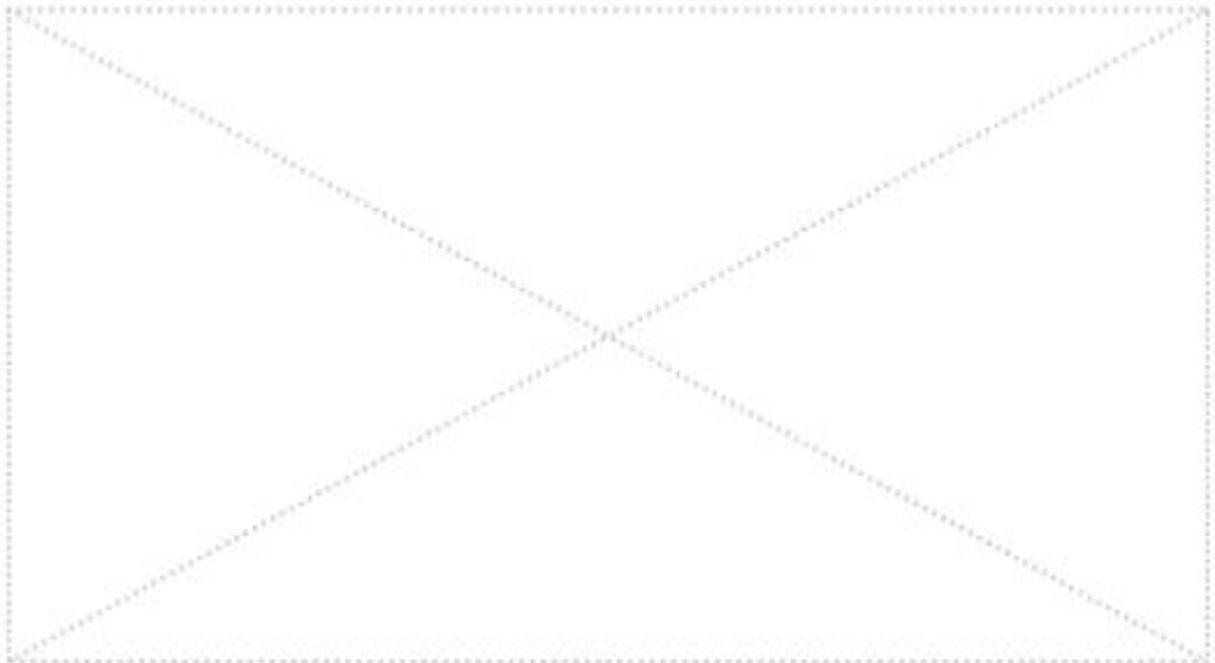
[그림 5-13] 바이오에너지: 필요성

* 자료: 본 연구에서 작성

2) 성과

- 우리나라의 바이오에너지 기술 개발 수준은 선진국 대비 72.5%이며, 바이오에너지에 대한 기술 개발을 꾸준히 진행하여, 관련 세계 최고 및 세계 최초 기술 보유 (KISTEP, 기술수준평가, 2018)
- 바이오에너지와 관련하여, 원천기술 및 생산 기술, 응용기술 개발이 이뤄지고 있으며, 바이오매스의 에너지로의 전환을 위해 촉매에 대한 연구 개발이 활발히 진행하며 관련 성과 창출 지속
- 10년 동안 바이오에너지 관련 연구에 대한 지원이 지속적으로 진행된 만큼, 바이오에너지 기술 트렌드는 고전환율, 고수율, 고선택도, 고효율, 고순도, 고생산성, 촉매 기술 개발 등 다양
 - 고전환율과 관련하여 바이오 융합화학 기초 원천기술 개발을 진행하였으며, 관련 성과로는 리그닌monomer 전환율의 경우에는 해외 기술 수준과 동등한 수준을 달성하였으며, 리그닌 외에 금속촉매 에틸렌 복분해 전환율은 90%, 아크릴로니트릴 복분해 전환율 85%, 에틸렌 복분해 전환율 60% 달성 ('19년)
 - 고수율을 위해 다양한 기술 개발이 진행중이며 석유대체 탄화수소 연료 생산을 위한 촉매 반응 기술을 연구하여, 식물유 복분해 산물을 활용한 고부가 제품의 합성 수율을 세계 최대 수율인 99%에 근접한 95%까지 끌어올리는 성과 창출 ('19년)

- 고선택도와 관련하여 섬유소 기반 산업화용 바이오에너지 생산을 위한 전처리 당화 기술을 연구하여, 리그닌 dimer, 금속촉매 에틸렌 복분해, 자기복분해 등 다양한 기술 개발 성과를 거두고 있으며, 금속촉매 에틸렌 복분해 선택도 96%, 자기복분해 선택성 95% 달성 ('19년)



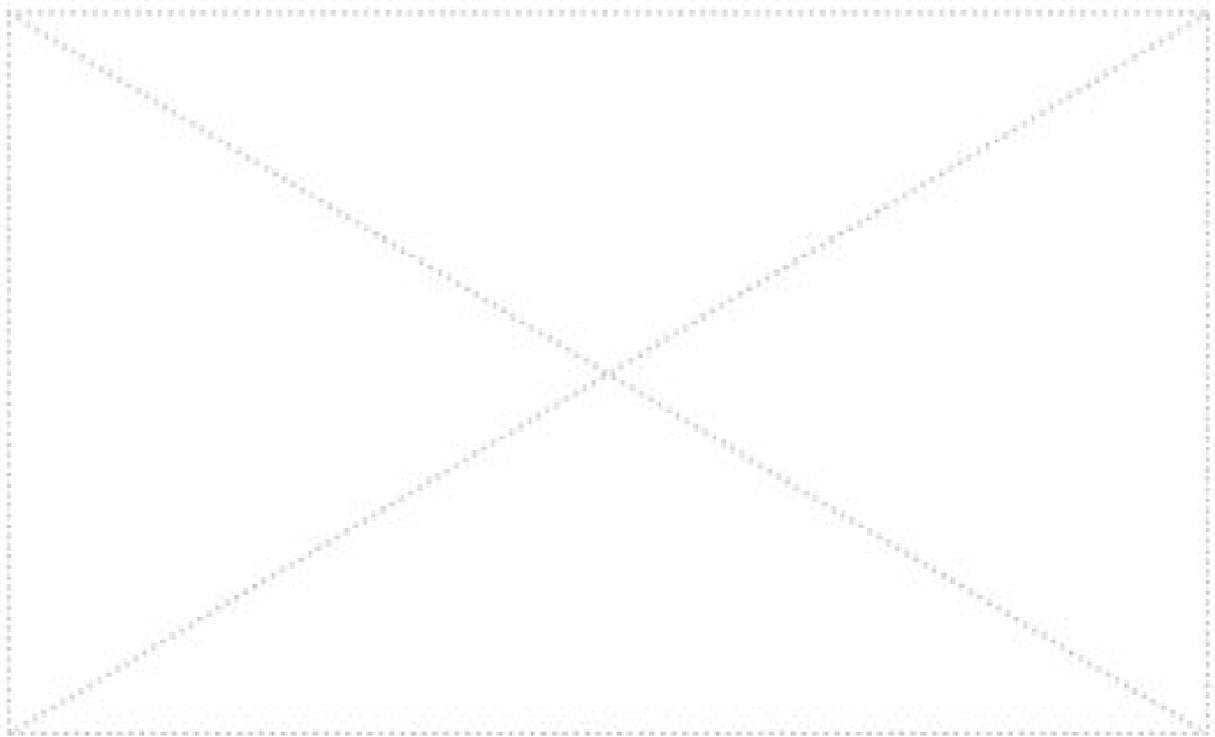
[그림 5-14] 바이오에너지: 성과(1/2)

※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미

* 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

- 활용도 증대를 위해 바이오매스 유래 오일 기반 화학원료 및 수송용 연료 제조기술 개발 관련하여, 식물유 복분해 산물을 활용한 고부가 제품 개발을 위한 연구를 진행하였으며, '19년 고부가 제품의 분자량 50,000g/mol, 인장강도 51.5 MPa 달성 ('19년)
- 바이오매스를 이용한 제품의 순도를 높이기 위해, 바이오매스 유래 오일 기반 화학원료 및 수송용 원료 제조기술 개발을 진행하였으며, 관련 기술 수준은 95%의 해외 수준을 능가하여, 식물유 복분해 산물을 활용한 고부가 제품의 순도 98%, 데센 및 데센산에스테르 순도 98% 달성 ('19년)
- 바이오매스를 이용한 제품 및 바이오에너지 생산성 증대를 위해, 미생물 세포공장 기반의 친환경 바이오이소프렌 생산기술 연구를 시작하여, '14년부터 이소프렌 생산성을 높이기 위한 연구 개발을 진행하며 초기 5g에서 30g까지 생산성 증대 달성 ('16년)
- 바이오에너지로의 전환을 위해 대사 재설계를 통한 바이오 이소프렌 고생산 세포공장 연구에 착수하여 다양한 촉매에 대한 기술 개발이 이뤄지고 있으며, 촉매 관련 기술 수준에서는 해외 수준에 도달 및 능가
 - S/L ratio 관련하여 10% 이하인 해외 수준을 능가하여 20%의 S/L ratio 달성 ('16년)
 - 당화율 측면에서 효율적 당화율을 80% 달성하여 해외 수준 도달 ('14년)

- 에틸렌 농도 43.0 g/L 달성 ('15년)



[그림 5-15] 바이오에너지: 성과(2/2)

※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미

* 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

○ 기후변화대응 R&D 사업 이후 지속적인 사업을 통해, 다음과 같은 성과를 추가 창출

- 친환경 미생물을 활용하여 페트병 원료인 플라스틱을 만들고 분해할 수 있는 기술을 세계 최초로 개발하여, 기존 플라스틱을 재활용하여 친환경 플라스틱을 생산할 수 있는 가능성 제시 ('18년)
- 식량이 아닌 바이오매스로 바이오연료를 생산할 수 있는 미생물을 개발하여, 그동안 바이오에너지 관련 식량을 연료로 사용하는 것에 대한 윤리적 논란 해결 가능 ('19년)
- KIST 연구팀은 폐지나 택배 박스로 디젤연료를 생산하는 기술을 개발하여, 식량 연료가 아닌 목질계 바이오매스를 이용한 바이오연료 개발 기술 수준 견인 ('20년)

라. 하이브리드 신재생에너지

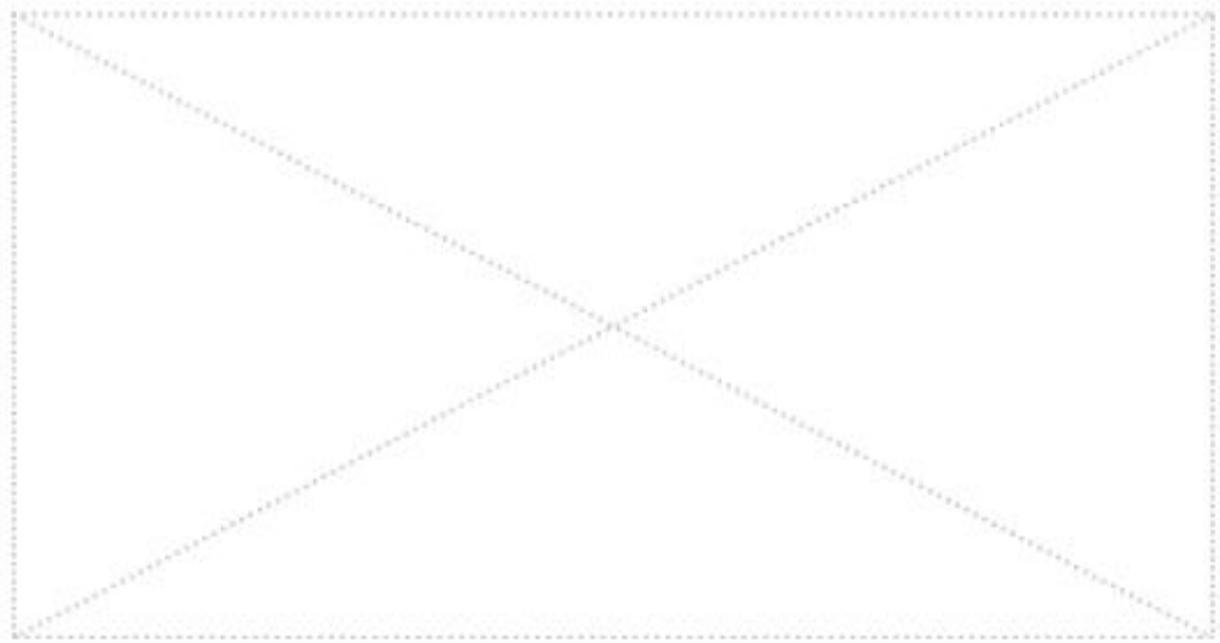
1) 필요성

- 세계 각국은 탄소 배출을 줄이기 위하여 신재생, 재생에너지 활용을 촉진하며 관련 R&D를 진행중이나, 낮은 경제성이라는 한계에 봉착하여, 신재생에너지의 경제성 확보를 위해 하이브리드 신재생에너지 등의 기술이 시도되고 있으며, 융복합 기술을 통해 석탄 에너지를 능가하는 경제성 확보 필요
- 하이브리드 신재생에너지 시스템은 둘 이상의에너지 전환 방식을 결합하거나 한 방식에 둘 이상의 연료를 사용하는 것으로서, 양쪽의 문제를 상호 보완하여 해결할 수 있는 장점을 보유
- 전 세계적으로 신재생에너지와 ESS를 결합하여 안정적 전력 공급을 위한 기술 개발이 주를 이루며, 다양한 신재생에너지원별 조합을 중심으로 발전 중이며 소규모의 상업화가 진행중
 - 우리나라는 2020년 11월, 세계 최초로 화력발전소와 ESS를 연계한 하이브리드 발전 기술 개발에 성공

2) 성과

- 하이브리드 신재생에너지와 관련한 스마트에너지 그리드 기술 수준은 최고 기술 보유국인 미국 대비 80.0%이며, 기초 연구와 응용 개발 연구 수준은 보통. ICT 기반 자원 개발·처리 기술 수준은 최고 기술 보유국인 미국 대비 60.0% 수준 (KISTEP, 기술수준평가, 2018)
- 하이브리드 신재생에너지 관련 연구에 대한 지원 성과가 최근에 집중되어 있으며, 향후 관련 기술 고도화를 위해 연구 지원 지속 및 확대 필요
- 하이브리드 신재생에너지 중 신재생 융복합 열에너지에서는 신재생 융복합 시스템 최적화,에너지 자립의 트렌드 형성
 - 신재생 융복합 시스템 최적화를 위해 계간 축열식 신재생 융복합 블록히팅 시스템 기술 연구에 착수하여 융복합 열공급 및 최적제어 시스템 실증/분석을 완료하였고('17년), 제로에너지 건물 적용 설비 설치를 완료 ('15년)
 - 에너지 자립을 위해 신재생에너지 설비 기반 단위 지역에너지 공급 기술 연구를 시작하여, 난방부하 보조열원의 의존율 57%, 태양열 의존율 85% 달성 ('15년)
- 양방향 수전해-연료전지 관련 기술 개발을 위해 고효율 양방향 고온 수전해-연료전지 발전 기술 연구에 착수하였으며, 관련 기술에서 고효율화, 장수명, 대용량의 트렌드 형성
 - 고효율과 관련된 기술에서 SOFC의 발전효율 50% 달성 ('20년)
 - 장수명과 관련된 기술에서 총 운전시간 1,000시간 달성 ('20년)

- 대용량과 관련된 기술에서 1kW였던 스택 용량을 30kW까지 향상 ('20년)



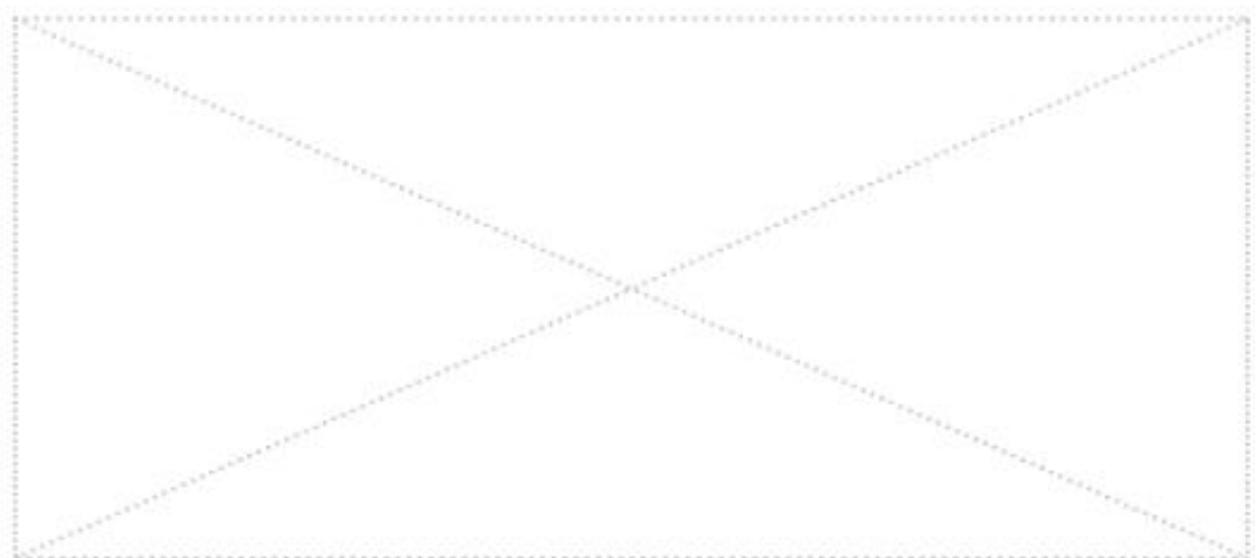
[그림 5-16] 하이브리드 신재생에너지: 성과

- ※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미
- * 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

마. 수소에너지

1) 필요성

- 기후변화 영향물질을 발생시키는 수송 부문에서 사용되는 연료의 대체 수단이자, 에너지 효율성이 높은 수소에너지 부상. 경제성, 안전성 이슈 해소를 위한 기술 개발 확대 필요
- 수소에너지는 물, 유기물, 화석연료 등의 화합물 형태로 존재하는 수소를 연소시켜 얻어내는 에너지
- 수소는 우주 분자의 90% 이상을 차지하는 무한한 물질이기 때문에 필요에 따라 얼마든지 생산이 가능한 장점을 보유
- 사용 후에 순수한 물만 배출해 친환경적이며 액체나 고압 기체로 저장이 가능하고, 쉽게 운송할 수 있다는 이점 보유
- 자연환경 조건에 따라 전기 생산량이 달라져 에너지 공급 측면에서 안정성이 부족한 신재생에너지의 단점 보완
- 이러한 장점을 바탕으로 화석연료 중심의 현재에너지 시스템에서 벗어나 수소를 에너지원으로 활용하는 자동차, 선박, 열차, 기계 혹은 전기 발전, 열 생산 등을 늘리고, 이를 위해 수소를 안정적으로 생산-저장-운송하는데 필요한 모든 분야의 산업과 시장을 새롭게 창출하는 수소경제를 추진 중
- 수소위원회는 '50년 경 전세계 수소 소비량을 약 5억 4,600만 톤으로 예상
 - 이는 132억 6,000만 배럴의 석유를 대체하는 규모로, 에너지로 환산하면 약 78EJ 수준
- 수소·연료전지 기술수준은 최고 기술 보유국인 일본 대비 78.3%이며, 3년의 기술 격차가 존재하여, 수소 관련 기술 개발 확대 필요 (KISTEP, 기술수준평가, 2018)



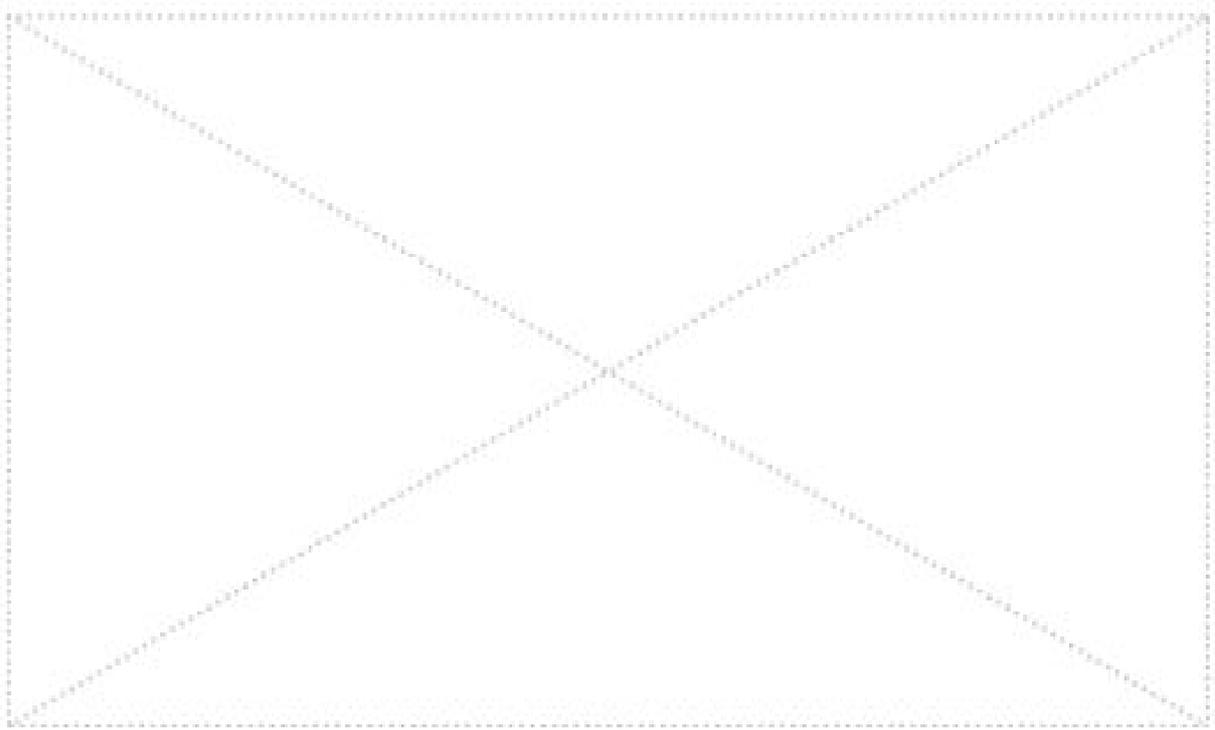
[그림 5-17] 수소에너지: 필요성

* 자료: 본 연구에서 작성

2) 성과

□ 수소에너지 기술 수준 향상을 위한 연구가 필요하며, 관련 연구에 대한 지원 성과가 비교적 최근에 집중되어 있어, 향후 수소에너지 관련 연구에 대한 지원 지속 및 확대가 필요. 수소 저장 및 수전해 관련 효율 향상을 위한 연구 지원 집중 필요

□ 수소에너지는 '19년 상용화가 가능한 10% 이상의 전환 효율에 도달



[그림 5-18] 수소에너지: 성과

※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미

* 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

- 수소저장 측면에서는 고저장성, 고효율화, 대면적화의 기술트렌드 형성
 - 고저장성을 위한 기술 개발을 위해 정치형 응용에 적합한 고용량 수소저장소재 발굴 및 탈화수소 촉매 개발에 착수하였고, 관련 기술 성과로 수소저장율 5.7wt% 달성 ('17년)
 - 고효율화와 관련하여 수소저장소재를 이용한 수소저장시스템을 개발하여, 태양광-수소 전환에서 세계 최고 수준인 16%에 근접한 12%의 효율 달성 ('19년)
 - 대면적화를 위한 기술 개발을 위해 고효율 양방향 고온 수전해-연료전지 발전 기술 개발에 착수하여 300 mm급 Ni 전극용 도금 장비 개발 ('19년)
 - 고용량 수소저장소재 발굴 및 탈수소화 촉매 개발, 선정된 수소 저장소재를 이용한 수소저장시스템을 개발 ('19년)
- 수전해는 고효율화, 장수명 등의 기술트렌드가 형성된 가운데 총운전시간 1,000시간

기술을 기후변화 대응기술개발사업을 통해 확보

- 고효율화를 위한 기술 관련, 다차원 산화물 기반 양방향 수전해 기술 개발을 통해 포메이트의 저장/방출에너지 효율 91.9% 달성 ('19년)
- 장수명과 관련하여 가역 수전해-연료전지용 금속-세라믹 복합체 연결재 소재 개발을 통해 초기 총 운전시간 500시간 수준에서 1,000시간 수준으로 견인 ('19년)
- 대면적화 관련하여, 수전해-연료전지 장치용 고온 밀봉 소재 개발을 통해 단전지 단위면적 100 cm² 이상 달성 ('20년)
- 대용량 관련한 기술에서 고온 양방향 수전해 열 유동 전산해석 기술 개발을 통해 3년만에 스택 용량 1kW를 30kW까지 향상 ('19년)

바. 연료전지

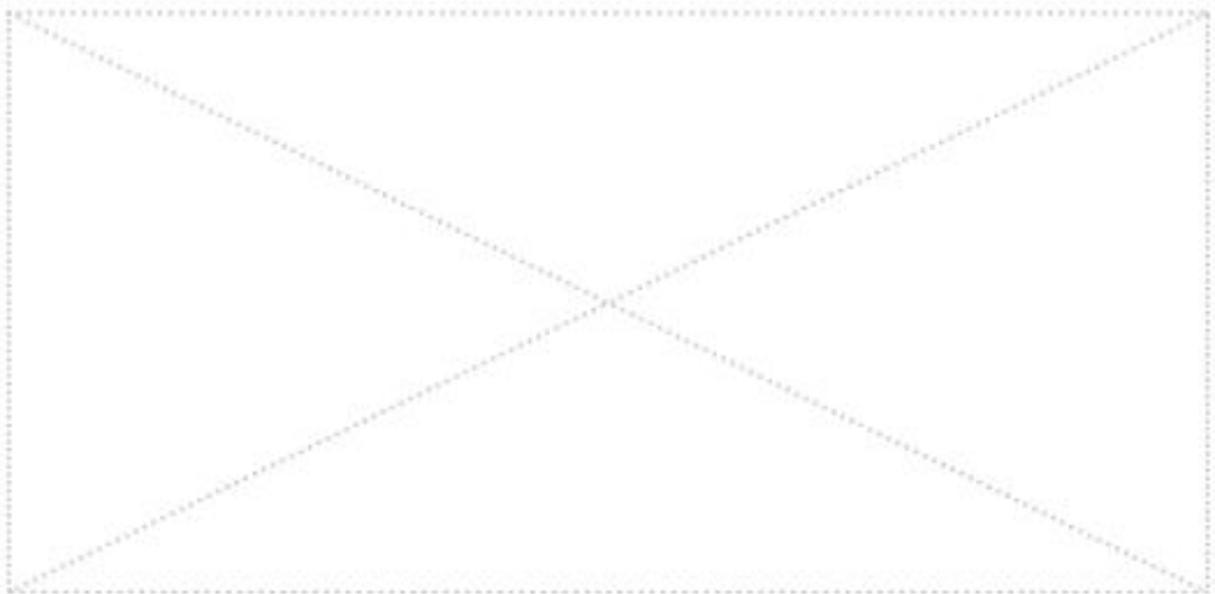
1) 필요성

- 연료전지는 수소를 사용하여 전기와 열을 생산하는 친환경 기술 중 하나로서, 대체에너지와 연계한 친환경 수소 생산 및 공급을 통해 수소경제 내에서 친환경 분산발전원의 역할을 할 것으로 전망
 - 연료전지는 연료와 산화제를 전기화학적으로 반응시켜 전기에너지를 발생시키는 장치임

- 연료전지 종류 중 기존에는 AFC, PAFC, MCFC에 대해 활발히 연구했으나, 최근 PEMC, DMFC에 대한 연구가 가장 활발히 진행중이며, SOFC*의 경우 가정용, 자동차용 등으로 연구를 진행중인 반면 우리나라는 다른 연료전지에 비해 기술력이 낮음
 - * 고온형 연료전지로서, 수소·도시가스·바이오가스 등 다양한 연료 사용이 가능. 타 연료 전지 대비 발전효율(45%~60%)이 높은 것이 장점

- 우리나라의 연료전지 기술 수준은 최고 기술 보유국인 미국의 기술 수준 대비 89.6%로써, 일본(96.3%), EU(92.9%)에 이어 4위이며, 세부기술별로 기술 수준은 차이가 있지만, 국내 연료전지 기술 중 MCFC 기술(92.5%)이 가장 높으며, PEMFC(90.0%), DMFC(90.0%), PAFC(87.5%), SOFC(83.8%) 순 (KISTEP, 기술수준평가, 2018)

- 전기자동차, 모바일기기의 증가로 급격히 시장이 확대되고 있으며, 고효율, 고용량 기술 트렌드를 형성하고 있음

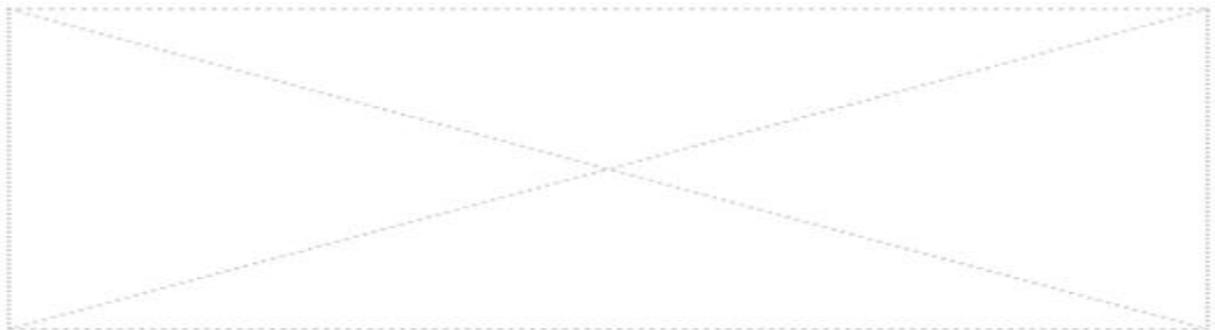


[그림 5-19] 연료전지: 필요성

* 본 연구에서 작성

2) 성과

- 연료전지는 태양광 등 신재생에너지와 관련하여 매우 중요한 기술임에도 불구하고, 관련 연구에 대한 지원이 활발하지 않은 것으로 분석되며, 고내구성과 고효율화 이외에도 고저장성 등 연료전지 기술 향상을 위한 연구 지원 필요
- 연료전지 중 고분자 연료전지는 재료 선택 및 셀 제작과 운전이 용이하다는 장점이 존재하며, 보다 오랜 시간 사용이 가능하므로, 고분자 연료전지의 연구 개발에 대한 지원 진행
- 연료전지는 고내구성, 고용량, 고효율, 장수명화 기술개발을 추구하고 있으며, '17년 이후 해외와 대등한 수준으로 발전하고 있음
- 고내구성과 관련한 기술에서 고분자 연료전지용 고풍력 고내구성 MEA 구조 설계 제어 기술 개발을 통해 촉매의 초기 활성도를 40%까지 저감, 고효율화를 위한 기술 개발을 통해 Cell 성능 2.0 A/cm³ 0.6V 달성 ('17년)



[그림 5-20] 연료전지: 성과

- ※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미
- * 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

사. 이차전지

1) 필요성

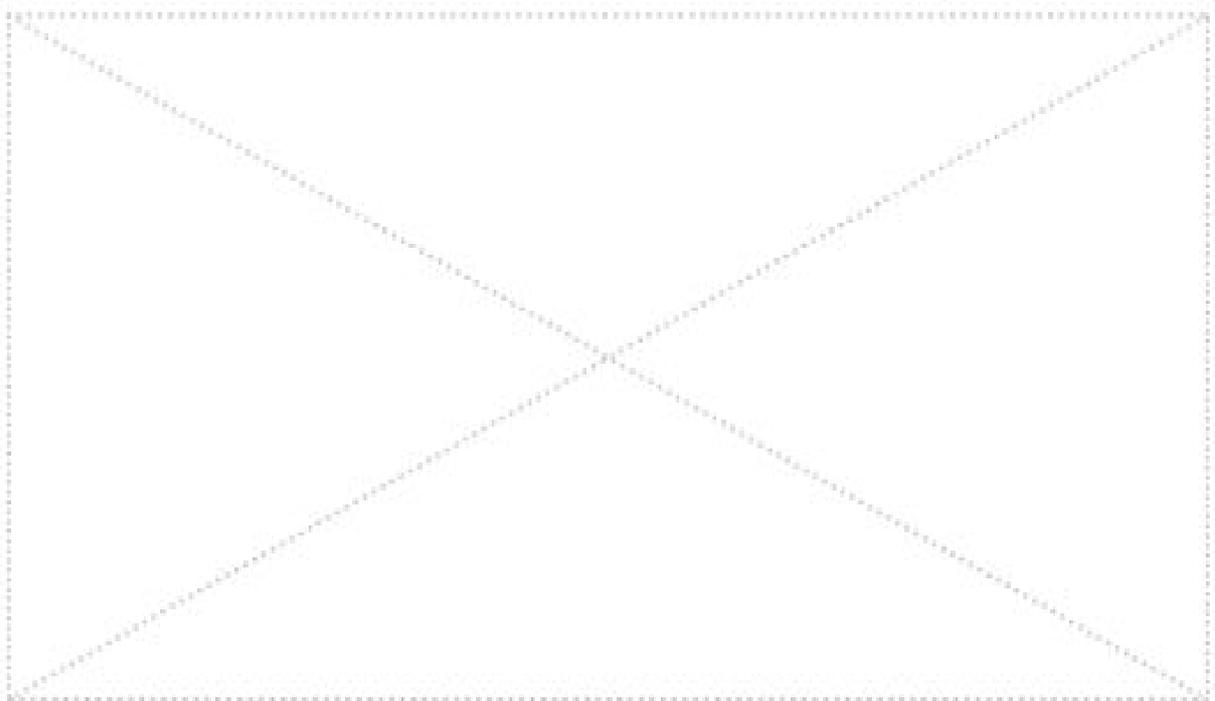
- 1997년 교토의정서 채택 이후 2020년 전 세계의 온실가스 감축방향을 담은 합의문 ‘파리 기후협정’이 프랑스 파리 유엔 기후변화협약 당사국총회(COP21)에서 채택됨에 따라 파리 협약의 타결로 세계는 화석연료 0%, 신재생에너지 100% 시대로 진입
 - 자동차 탄소배출규제 및 연비규제 강화에 따라 전기차 수요가 확대되면서 이차전지 기술개발 증가
 - 신재생에너지는 자연에서 발생하는에너지원(태양, 바람 등)을 원천으로 하기 때문에 자연 현상에 따라 출력 변동이 심해 발전량 조절이 용이하지 않아 신재생에너지의 안정적 활용을 위해서는 신재생에너지의 변동성을 관리할 수 있는 대안이 필요성 증가
- 현재의 이차전지 시장에서는 리튬 이온 전지가 주를 이루고 있으며, 초기에는 스마트기기 등 소형 IT 기기 중심으로 성장하였으나, 최근에는 전기자동차용 배터리를 중심으로 리튬이온 전지 시장이 급성장 중
 - 리튬이온 배터리 내 전해질(액체)은 열폭주(과전류로 인한 스파크 현상)에 의한 발화 위험성을 지니고 있어 안전성에 대한 우려 존재
 - 리튬이온 배터리의 용량은 약 5년 이내 한계에 도달할 것으로 예측되며 가격 중심의 개발 경쟁이 심화될 전망
 - 우리나라의 대용량 장수명 이차전지 기술동향은 세계최고 수준인 일본 대비 80.0% 수준으로, 2위인 미국(87.0%)을 추격중 (KISTEP, 기술수준평가, 2018)
- 세계 주요국을 중심으로 리튬-황 전지, 레독스 플로우 전지, 나트륨이온 전지 등 차세대 이차전지 기술 개발을 위한 연구 진행
 - 우리나라는 리튬이온 전지에 비하여 차세대 이차전지 분야에 대한 기술개발 수준은 낮은 편이므로, 기술 성숙을 위한 기술 개발 지원 필요
 - 이차전지 관련 기술에 대한 지원은 최근에 비해 과거에 활발한 것으로 분석되며, 대용량 장수명 이차전지 기술 수준이 최고 기술 보유국인 일본 대비 80%인 것을 감안하면, 이차전지 관련 기술에 대한 지원 확대 및 지속 필요 (KISTEP, 기술수준평가, 2018)

2) 성과

- 리튬 2차전지는 고용량, 충전시간 고속화, 고안전, 고효율, 장수명의 트렌드가 형성되어 왔으며, 기후변화 대응기술개발사업을 통해 '16년 초기 효율 92%를 달성하여 세계수준에 근접
 - 이차전지의 용량 증대를 위해 그린에너지 저장용 고효율 리튬이차전지 핵심소재

개발 및 차세대 리튬이차전지용 전극소재 자기완화형 구조제어 및 전극계면 기능 제어 기술 개발 진행

- 고용량과 관련하여, '09년 초기방전용량 150mAh/g을 '15년 180mAh/g 수준으로 향상, 해외 수준인 360 mAh/g을 능가하여 1,000mAh/g 달성 ('15년)
- 장수명을 달성하기 위해 신개념 리튬/공기 이차전지용 핵심 요소기술 개발 연구를 통해 100 사이클 80% 수준 달성 ('15년)
- 이차전지의 효율성 증대를 위해 3차원 응력분산구조의 다원계 전극소재 제조기술 개발을 통해 초기 효율 92% 달성 ('15년)



[그림 5-21] 이차전지: 성과

※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미
* 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

- 기후변화대응 R&D 사업 이후 지속적인 사업을 통해, 다음과 같은 성과를 추가 창출
 - 저렴한 금속재를 이용한 고용량 리튬 과량 양극 소재 개발에 성공. 이 소재를 이용해 고밀도의 작은 부피와 무게를 지닌 배터리를 생산 가능 ('20년)
 - 현재 사용하고 있는 양극 소재보다 높은에너지 밀도를 갖는 리튬과량 양극 소재 제조가 가능한 조건을 개발. 이차전지의 밀도 향상 가능 ('20년)
 - 배터리 화재 위험은 줄이고 충전 속도는 높일 수 있는 새로운 유기계 불연성 전해액을 개발하여, 배터리 수명과 안정성 증대를 통한 전기자동차의 주행거리 및 저장용량 향상 가능 ('20년)
 - 세계 최고 수명을 지닌 불타지 않는 ESS 수계전지를 개발을 통한 배터리 수명 연장에 성공 ('20년)

아. 산업의 배출 저감

1) 필요성

- 온실가스 총배출량을 차지하는 분야별 비중으로는 에너지 86.9%, 산업공정 7.8%, 농업 2.9%, 폐기물 2.3%로, 산업공정(20.8백만톤 CO₂eq.)이 에너지(632.4백만톤 CO₂eq.) 다음으로 온실가스 배출이 많으므로, 산업 공정에서의 온실가스 배출 저감을 위한 연구 개발 필요

<표 5-1> 국가 온실가스 배출 현황 (단위 : 백만톤 CO₂eq.)

구분	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
총배출량	657.6	684.2	687.5	697.0	691.5	692.3	692.6	709.1	727.6
순배출량	603.8	630.7	638.9	652.8	649.3	649.9	648.7	667.6	686.3
에너지	566.1	595.0	596.3	605.1	597.5	600.8	602.7	615.8	632.4
산업공정	54.7	53.1	54.2	54.8	57.3	54.4	52.8	56.0	57.0
농업	21.7	20.7	21.3	21.2	21.3	20.8	20.5	20.4	21.2
토지이용, 토지이용변화 및 임업	-53.8	-53.6	-48.6	-44.2	-42.2	-42.4	-43.9	-41.6	-41.3
폐기물	15.0	15.5	15.7	15.9	15.4	16.3	16.5	16.8	17.1
총배출량 증감률 (%)		4.0	0.5	1.4	-0.8	0.1	0.0	2.4	2.6

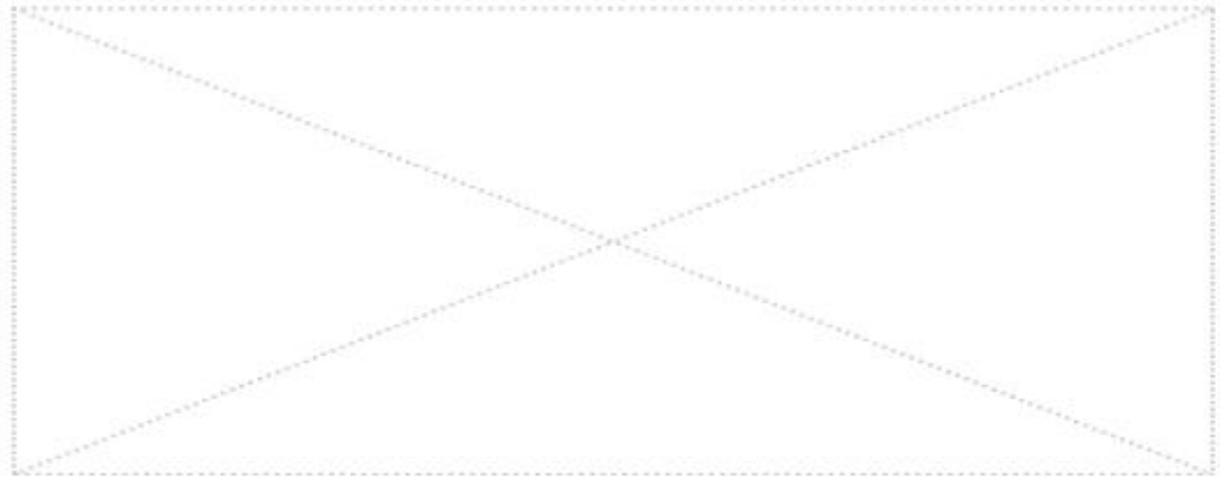
*자료: 환경부, 국가온실가스통계

*CO₂eq. : Carbon dioxide equivalent(이산화탄소 환산톤)

- 산업의 배출 저감과 관련한 스마트 팩토리 기술 수준은 최고 기술 보유국인 EU·미국 대비 67.5%, 고효율·초정밀 생산시스템 기술 수준은 최고 기술 보유국인 일본 대비 81.6%로 산업 배출 저감 기술은 최고 기술 보유국을 추격중 (KISTEP, 기술수준평가, 2018)
- 비교적 최근에 연구 개발 지원이 집중되어 있어 있으며, 프로파일과 오염물질 제거 외에 산업의 배출 저감을 위한 다양한 장치에 대한 연구 지원 필요

2) 성과

- 최근 생활밀착형 사업장의 VOCs 발생량과 오존생성의 상관성 규명을 통한 보급형 VOCs 처리 신기술, 보급형 VOCs 전처리장치와 댐핑기술 개발을 통해 산업에서의 배출 저감을 위한 기술 개발 진행
- 프로파일 개발과 관련하여 SMOKE 구동 가능한 기반 마련, 배출원별 VOCs 시공간 분배계수 개발에 대한 연구를 진행하여, 관련 성과로서 주요 제품 오존전구물질의 특성 조사, 실내외 VOCs 및 오존전구물질 화학종 목록화 작성, 국내 실정을 반영한 시간적, 공간적 프로파일을 개발 ('20년)
- 오염물질 제거를 위해 VOCs 저감을 위한 보급형 전처리 장치 개발, 생활밀착형 VOCs 저감을 위한 보급형 전처리 장치와 댐핑 기술 개발을 진행하여 병렬식 습식 세정 장치 개발 ('20년)



[그림 5-22] 산업의 배출 저감: 성과

※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미

* 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

자. 교통 및 자동차 분야 배출 저감

1) 필요성

- 우리나라의에너지 소비량은 수송 부분이 산업계 다음으로 높은 비중을 차지하며, 최근 10여년간에너지 소비량이 연평균 1.9% 증가

<표 5-2> 최종에너지 소비량 현황 (단위 : 백만 TOE)

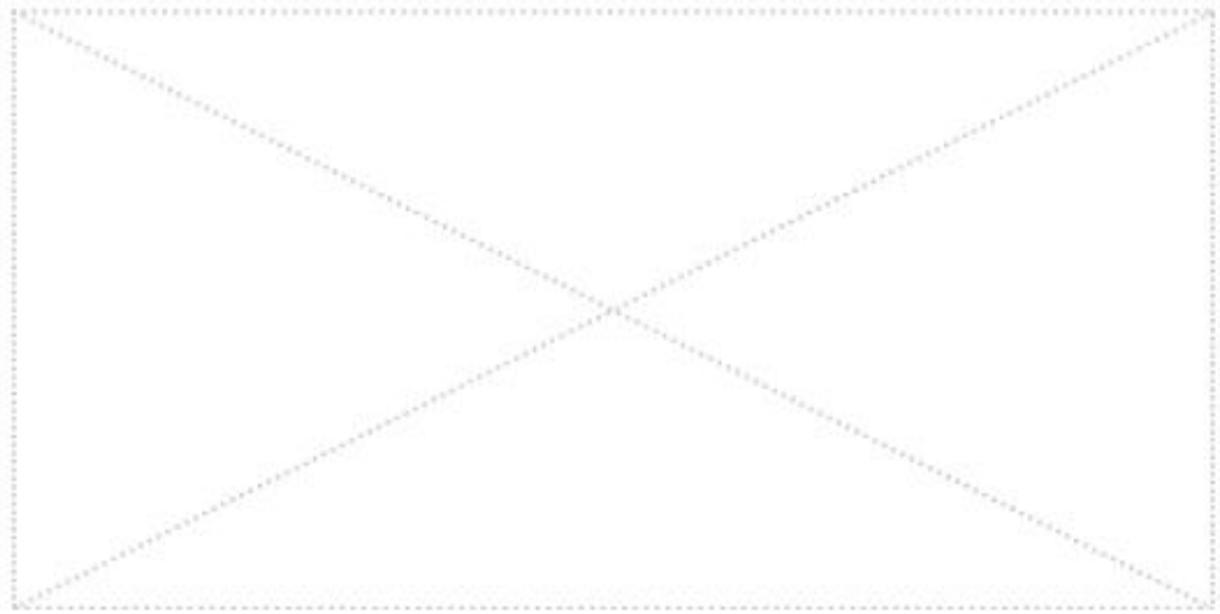
구분	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	CAGR
산업부문	116.2	124.9	125.9	128.6	132.6	133	135.2	141.9	142.9	2.6
수송부문	36.9	36.8	36.8	37	37.2	39.9	42.3	42.8	43	1.9
가정·상업	37.4	38.3	38.6	37.8	35.6	37	38.7	39.9	41.3	1.2
공공·기타	4.5	4.8	5.2	4.7	4.7	5.1	5.2	5.5	5.6	2.8
계	195	204.8	206.5	208	210.1	215	221.4	230	232.7	2.2

*자료 : 에너지경제연구원, 에너지통계연보

- 기후변화 대응, 고유가, 화석연료 의존 탈피 등의 이유로에너지 효율이 높은 친환경 차량에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이에 따라 하이브리드자동차에서 순수전기자동차에 이르기까지 차량의 전동화가 진행중
- 친환경 다기능 건설재료 기술 수준은 최고 기술 보유국인 EU·미국 대비 70%이며, 스마트 도로교통 기술 수준은 최고 기술 보유국인 미국 대비 82.5%로, 교통 및 수송 분야에서의 탄소 저감을 위한 관련 기술 개발 필요 (KISTEP, 기술수준평가, 2018)

2) 성과

- 교통 및 자동차 분야의 배출 저감을 위한 기술 트렌드로는 고효율화, 친환경화 등이 존재
 - 효율성 증대를 위한 기술 개발에서 TVOCs의 배출 수준을 국제 허용 기준인 50ppm 이하 수준으로 달성 ('16년)
 - 기술 효율성을 높이기 위한 연구를 통해, 청정 초임계 유체 공정을 이용한 자동차용 친환경 고분자 소재, 비도로 이동 오염원 및 소각장 배출 미세먼지 저감기술을 개발하였으며, 그래핀 0.1wt% 충전시 흡음성능 220% 향상 달성 ('15년)
 - 친환경 소재 연구를 통해 초임계 유체를 이용한 자동차용 친환경 나노복합소재 개발하였으며, 이를 통해 바이오 매스의 함량 10wt% 이상 가능 ('15년)
 - 열 분해 온도 129도에서 180도까지 향상을 통해 열 안정성 증대, 밀도 18kg/m³ 이하 수준 달성, 흡음 성능 0.35 at 1 kHz 달성을 통한 효율성 증대 ('16년)



[그림 5-23] 교통 및 자동차 분야 배출 저감: 성과

※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미

* 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

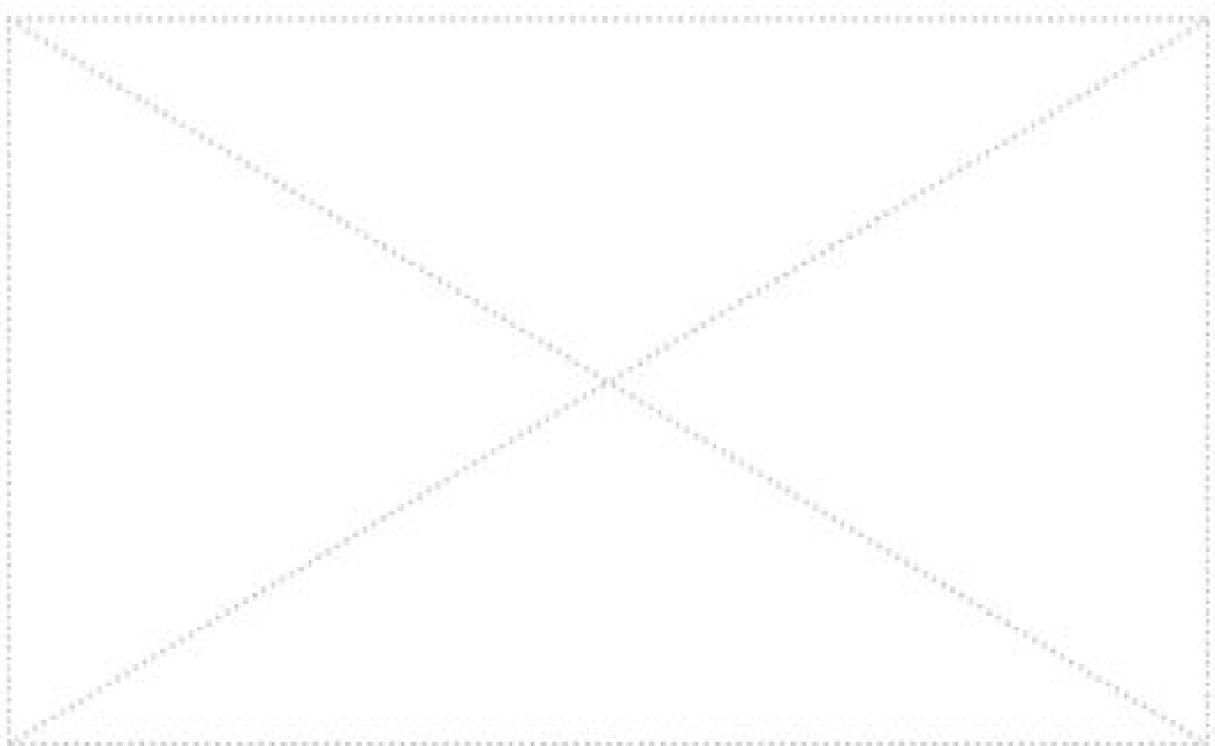
차. 탄소 포집·저장·수송·전환

1) 필요성

- 이산화탄소 포집·저장 기술(Carbon Capture, Utilization & Storage, CCS)이란 산업시설 등에서 발생하는 이산화탄소를 포집하고 이를 지중 등에 저장(Carbon Capture & Storage, CCS)하는 기술을 의미
- 지구 온난화 심화의 주요 원인은 온실가스 배출량 증가이며, 온실가스 중 이산화탄소 배출 비중이 가장 높음
 - 국제에너지기구(IEA)는 세계 온실가스의 대부분은 에너지부문에 발생(68%)하고 있으며, 온실가스를 구성하는 요소 중 이산화탄소의 비중(90%)이 메탄가스(9%), 아산화질소(1%)에 비해 매우 높은 수준
- 산업계에너지 사용 효율이 최대 수준임을 감안하면, 이산화탄소 배출 감소 노력과 더불어 기술적 대안으로 이산화탄소의 포집 활용 및 저장(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)을 통한 직접적 감축이 요구되고 있는 상황
 - 2017년 국제에너지기구에너지기술전망 보고서에 제시된 2°C 시나리오에서는 이산화탄소 포집·저장 기술(CCS)이 2060년까지 이산화탄소 누적 배출 감축에 14% 정도 기여할 것으로 예상되고 있음(에너지 기술 전망, '17)
- 해외 주요국들은 이산화탄소 포집·저장·활용 기술 개발을 활발히 진행하며, 실증 및 상용화 성공 및 적극 추진
 - 해외 각국의 정부는 이산화탄소 저장 및 포집에 대한 투자를 활발히 진행하며 기술 개발에 적극적 지원중
 - 미국은 탄소자원화 기술을 국가전략기술로 채택하여 '17년부터 2년간 이산화탄소 포집 R&D에 약 1억 1백만 달러, 저장 R&D에 9천 5백만 달러를 투자하면서, 자국의 이산화탄소 감축과 기술 선점을 통한 신시장 확보에 총력을 기울이고 있음
 - 이산화탄소 포집·저장·활용 기술을 선도 중인 우리나라는 그동안의 기후변화 대응 연구를 바탕으로 기초·원천 연구를 수행 및 다양한 실증 연구 진행 중

2) 성과

- 탄소 포집·저장·수송·전환과 관련된 연구 지원은 10년 간 꾸준히 진행되어 왔으며, 탄소 포집에 대한 기술 지원이 집중돼 있음. 꾸준한 지원의 결과 관련 기술의 세계 최고 수준 달성하였으며, 향후 포집 외에도 저장·수송·전환과 관련된 연구에 대한 지원 확대를 통한 탄소 관련 기술 세계 최고의 자리 유지 필요
 - 탄소 포집용 소재 기술에서 세계 최고 수준(15.5 barrer)을 달성 ('14년)
 - 효소 관련 전환율 기술(에폭사이드 락톤 /전환율>99%, TON=4,300, TOF: 1,800h⁻¹), 스쿠알렌 생산(1,41mg/g DCW), 카르보닐화 락톤 형성 관련 기술(카르보닐화 락톤 형성 수율>98%, 기질/촉매비<100, 온도<100℃)에서 세계 최고 수준 달성 ('17년)
- 탄소의 포집·저장·수송·전환 관련한 기술 트렌드로는 고효율화, 고투과 선택성, 고전환율, 대면적화, 고생산성, 고수율, 고흡수성 등이 존재



[그림 5-24] 탄소 포집·저장·수송·전환: 성과(1/2)

※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미
* 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

- 고효율을 위한 기술 개발을 위해 가스 전달 한계를 극복하는 고효율 C1 가스 전환 시스템 개발, CO 포함 부생가스를 이용 n-C6 유기산 생물학적 생산기술, CO₂ 용해도가 향상된 CO₂ 포집용 증공사 제조 및 모듈 개발 연구 진행
 - 관련 기술 성과로는 해외에서 연구된 수준인 물질전달계수 162.2 h⁻¹를 초과하여 600 h⁻¹(산소 기준) 달성('17년)하였으며, '15년 0.2g/L였던 유기산 농도에 대한 연

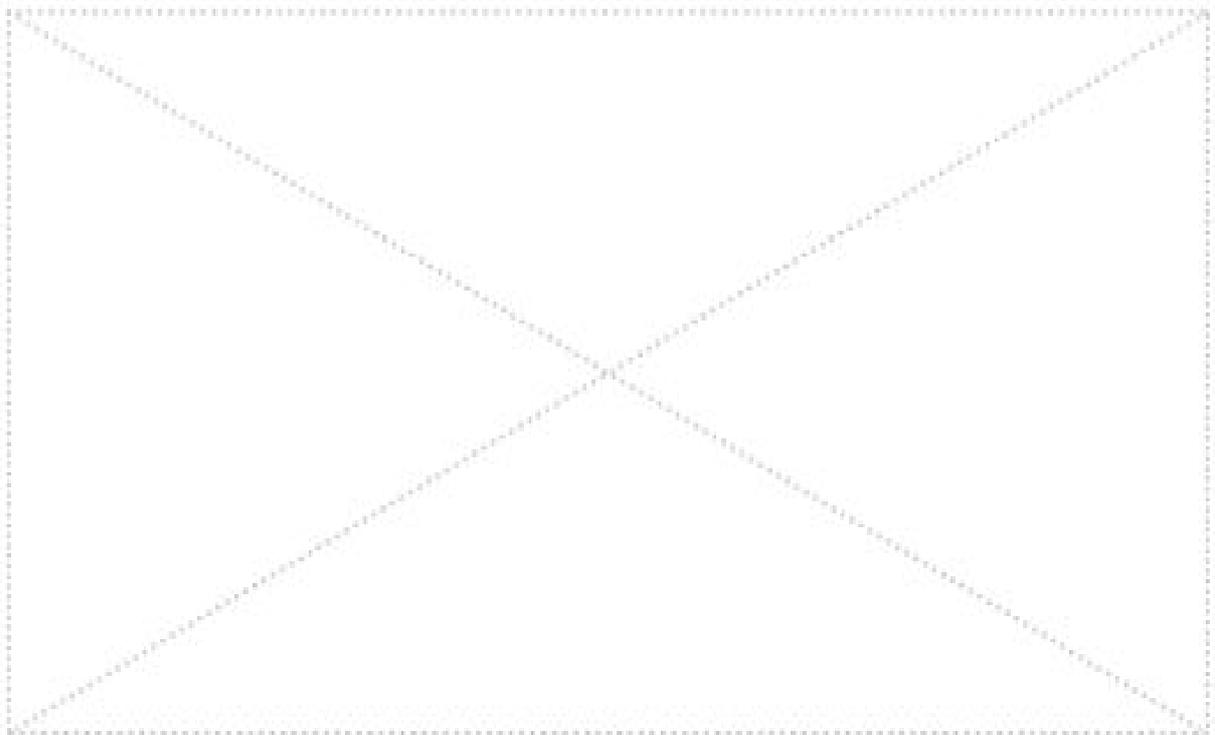
구 개발을 통해 2년 만에 10g/L 수준 달성 ('17년)

- 에너지 회수율 30% 달성('12년), 면저항 $0.45\Omega\text{cm}^2$ 달성('13년), 이온전도도 10 mS/cm 달성('14년), 세포 생산성 0.62 OD/h 달성 ('17년)

○ 고투과 선택성을 위해 CO₂ 포집용 계층적 구조의 중간 및 거대 기공 입소재 기술 개발을 진행하여 세계 최고 수준인 O₂/N₂ 투과 선택도 15.5 달성 ('14년)

- CO₂ 투과도는 '12년 66.57 barrer에서 기술 개발을 통해 2년 만에 148.48 barrer 달성('14년), CO₂/N₂ 선택도는 '12년 14.05에서 기술 개발을 통해 2년 만에 23.5 달성 ('14년)

○ 고전환율과 관련하여에너지 교환형 CO₂ 포집기술, 혁신적인 CO₂ 포집용 금속-유기 골격체 개발을 통해 다단 유동층 세계 최고 수준인 에폭사이드락톤 전환율 99% 이상, TON= ~4,300, TOF ; ~1,800 h⁻¹을 달성 달성 ('17년)



[그림 5-25] 탄소 포집·저장·수송·전환: 성과(2/2)

※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미

* 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

○ 대면적화를 위해 CO₂ 포집용 나노탄소 분리막 대면적 모듈 제작 및 실증화 전략 연구를 통해 CO₂ 포집용 나노탄소 분리막 대면적 모듈의 투과도 2,000 GPU, 용량 0.28 ton/day 달성 ('19년)

○ 고생산성 관련, CO₂ 포집용 계층적 구조의 중간 및 거대 기공 입자 소재 기술 개발을 진행하여, 세계 최초로 메탄으로부터 스쿠알렌 생산((1.41mg/gDCW) ('17년)

○ 고수율을 위해 C1 바이오 전환 관련 원천효소 및 균주 개발을 진행하여, 세계 최고 수

준인 카르보닐화락톤형성 수율 > 98 %, 기질/촉매비 < 100, 온도 < 100°C 달성 ('17년)

- 탄소 포집과 관련하여 고흡수성을 위하여 에너지 교환형 다단 유동층 CO₂ 포집기술, 혁신적인 CO₂ 포집용 금속-유기 골격체에 대한 연구를 통해, 2년 만에 흡수제의 흡수능 수준을 8wt% CO₂까지 향상, 흡착 속도 8 wt%/5min, 흡착능 12 wt% 달성 ('14년)

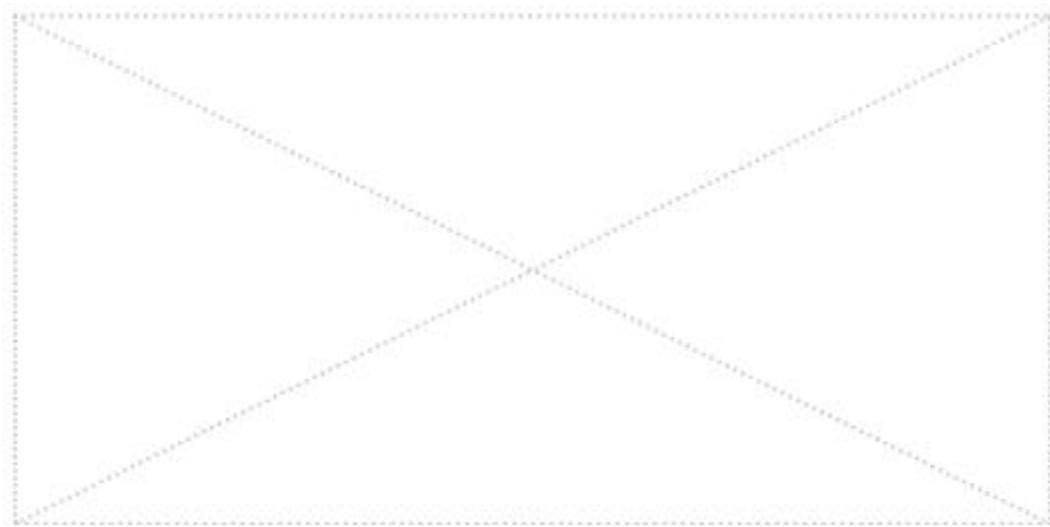
□ 기후변화대응 R&D 사업 이후 지속적인 사업을 통해, 다음과 같은 성과를 추가 창출

- 이산화탄소를 없애는 동시에 전기와 수소를 생산하는 '수계금속 이산화탄소 시스템'의 성능을 향상시킬 수 있는 촉매 개발. 이를 통해 기존 연구팀이 개발한 '수계금속 이산화탄소 시스템' 상용화 가능성 증대 ('20년)
- 태안발전본부에 0.5MW급 실증플랜트 구축, 세계 최고 수준의 이산화탄소 습식포집 실증기술 개발 완료 ('20년)

카. 탄소 자원화

1) 필요성

- 탄소 자원화는 포집한 이산화탄소를 화학적·생물학적 변환하여, 화학 제품의 원료, 광물 탄산화, 바이오 연료 등으로 전환하는 기술로, 이산화탄소를 감축하면서 경제적 가치를 가진 자원으로 재활용한다는 점에서 크게 주목받고 있음
- 이산화탄소 배출을 저감하는 것만으로는 급격히 증가하고 있는 대기 중 이산화탄소 농도를 줄이는 데에 한계가 있어, 이산화탄소를 포집 및 재활용이 가능한 탄소 자원화 필요성 증대



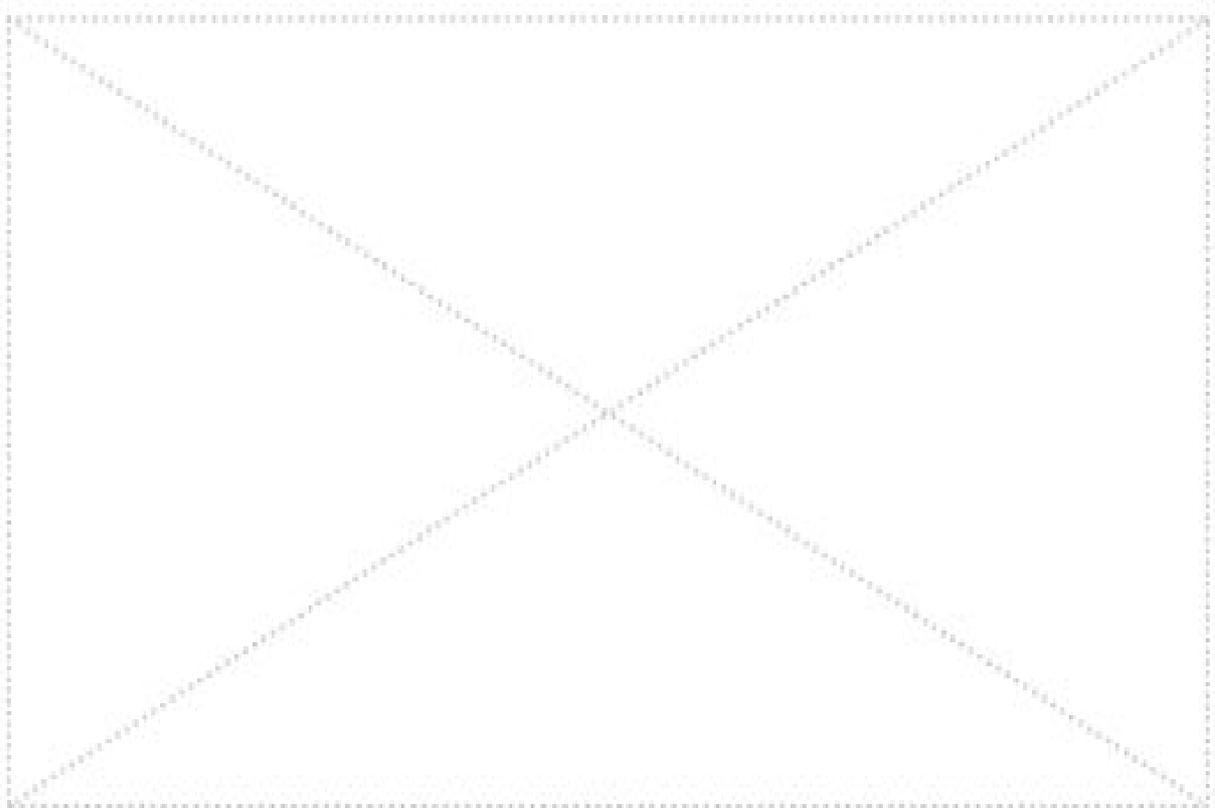
[그림 5-26] 대기 중 이산화탄소 농도

*자료 : EPICA Dome C CO₂ record(2015) & NOAA(2018)

- 탄소자원화 기술은 현재까지 기초 연구 및 실증 단계 수준으로 기술 성숙이 필요하며, 생산 비용 저감, 전환 공정의 효율성 향상, 설비 확대, 시장 형성 등 시장 경쟁력 제고를 위한 적극적 정책적·제도적 지원 필요
- 미국, EU, 중국 등 주요국들은 중장기적 온실가스 감축을 위한 기술로 탄소자원화를 꼽아 관련 기술 개발을 적극적 추진 중
 - 미국은 탄소 자원화 기술을 국가 전략 기술로 채택하고, 자국의 이산화탄소의 감축과 기술 선점을 통한 신시장 확보를 위하여 기술 개발에 적극적 투자 진행
 - EU는 '90년대 이후 글로벌 기후변화 대응기술의 하나로 CCUS를 채택하여 기술 개발을 선도하여 왔으며, 최근 독일을 중심으로 산업 분야에서의 탄소자원화 기술 개발을 본격적으로 추진하고 있음
 - 우리나라도 CCUS를 10대 기후기술의 하나이자 국가 온실가스 감축목표 달성 수단으로 채택하여 실증사업 진행 중

2) 성과

- 탄소 자원화와 관련된 기술 지원은 10년간 꾸준히 이어져 왔으며, 탄소 자원화와 관련하여 촉매 관련된 기술이 대부분을 차지하였음. 촉매 기술 개발을 통한 전환 및 자원화 효율 확대를 위해 관련 기술 고도화에 대한 지속 지원 필요
- 탄소 자원화와 관련된 기술 트렌드는 크게 탄소 자원화 전체와 공정, 인공광합성으로 분류하였음
 - 탄소 자원화 전체 기술 트렌드는 고수율, 고전환율, 고선택도, 고생산성, 고농도 및 고순도, 효소 고효율성, 에너지 효율 향상 등이 형성되어 있음



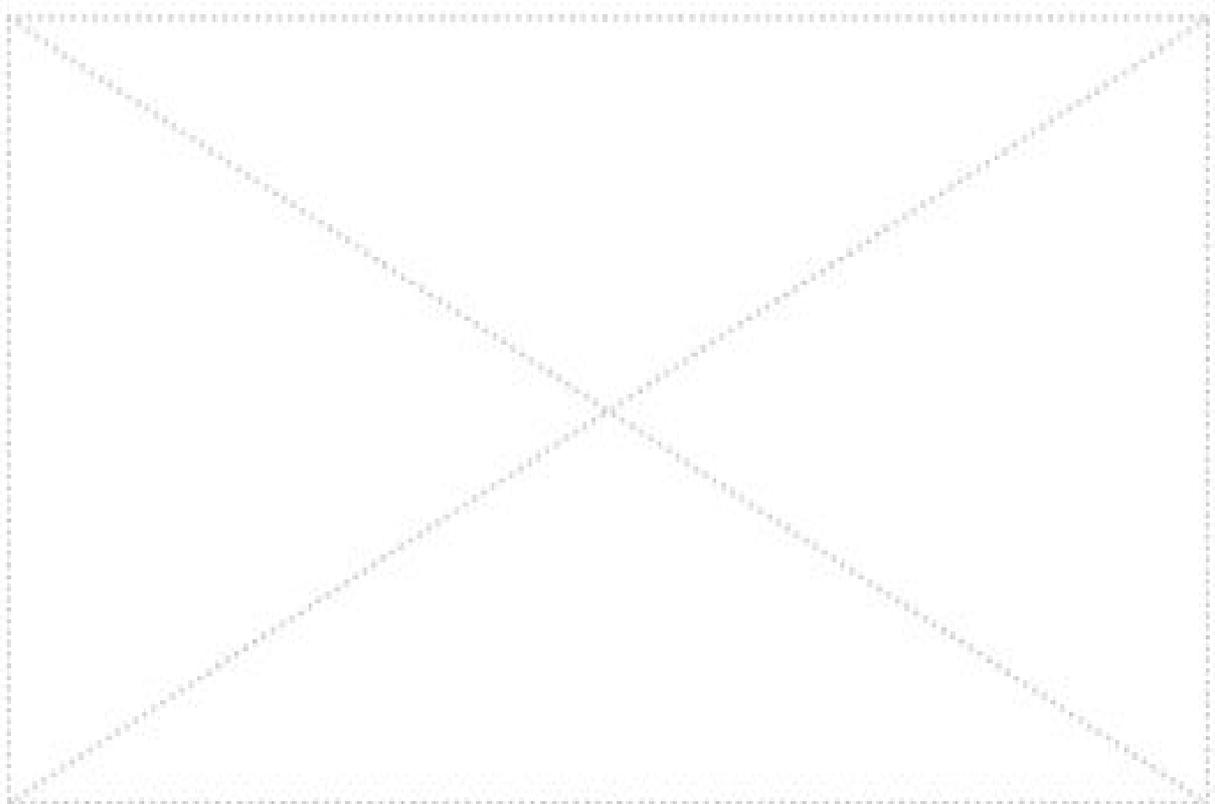
[그림 5-27] 탄소 자원화: 성과(1/5)

※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미

* 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

- 메탄에서 메탄올로의 전환하는 플랫폼 기술 수준(8.8 g/g DCW/day)이 세계 최고 수준 기록 ('17년)
- 고수율을 위한 기술 개발을 위해 메탄으로부터 아세틸렌을 경유한 BTX 제조 촉매기술 개발, 메탄으로부터 BTX 직접 제조를 위한 고효율 장수명 신규 촉매기술 개발 진행
 - 관련 기술 성과로는 촉매 수율을 '15년 대비 10% 정도 증가한 98%, 메탄올 경유 간접 합성 촉매의 알코올 수율을 '15년 대비 67% 증가한 250 g/kgcat/hr, BTX 수율을 '15년 대비 3배 증가한 30%, 아세틸렌 수율을 '15년 대비 3배 이상 증가한 15%, 혼합 알코올 직접 합성 촉매의 알코올 수율을 '15년 대비 67% 증가한 250 g/kgcat/hr 달성 ('17년)

- 고선택도를 위하여 C1 가스 활성화 및 고부가가치화 원천 촉매기술-DME/MA를 경유한 초산 생산, C1 가스로부터 방향족 화합물 제조 촉매기술 연구를 통해 '15년 대비 2배 가까운 기술 수준 향상 ('17년)
- * '15년 대비 BTX 촉매 관련 메탄 전환율 2배 향상(30%), 혼합 알코올 직접합성 촉매의 CO₂ 전환율 2배 향상(20%), 메탄올 경유 간접 합성 촉매의 CO₂ 전환율 2배 향상(20%), 올레핀 제조 촉매를 통한 메탄 전환율 85% 향상(37%) ('17년)
- * 메틸클로라이드 전환율 80% 달성 ('16년)



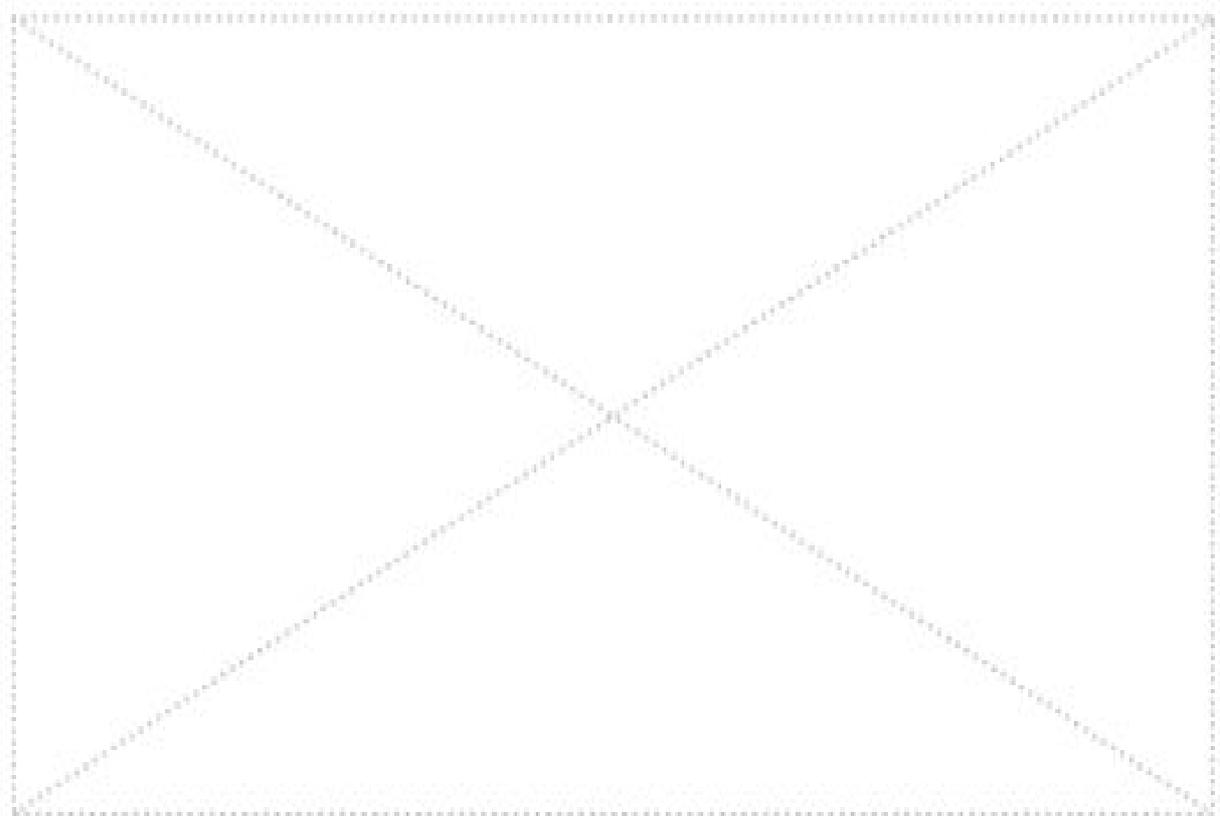
[그림 5-28] 탄소 자원화: 성과(2/5)

※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미
 * 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

- 고선택도를 위한 메탄의 산화이량화를 통한 올레핀 제조 촉매기술, 저온 메탄 할로겐화를 통한 경질올레핀 제조용 불균일계 촉매기술, C1 가스로부터 방향족 화합물 제조 촉매기술에 대한 연구를 통해 올레핀 선택도를 '15년 대비 70% 향상된 51% 달성 ('17년)
- * '11년 대비 전기화학적 개미산 선택성 125% 향상 ('20년)
- * BTX 선택도 40% 달성 ('17년)
- * '16년 대비 경질올레핀 선택도 7.1% 향상(75%) ('17년)
- 고생산성을 위하여 메탄 전환 유용산물 생산용 균주, C1 전환 균주 스크리닝 기술, 메탄-메탄올 전환 플랫폼 균주, 계산화학기반 CO 가스 활성화용 촉매, Carbonic Anhydrase 모

사 촉매 이용 CO₂ 무기 자원화 기술, C1 가스로부터 방향족 화합물 제조 촉매기술에 대한 연구 개발을 통해 세계 최고 기술 수준인 메탄에서 메탄올로의 생산속도 8.8 g/g DCW/day 달성 ('17년)

- * '11년 대비 개미산 생산속도 10배 증가(2 mol/gp/h) ('20년)
- * '15년 대비 젓산 생산 37.1%, 알칸전환효소의 생산성 3배 증가 ('17년)
- * '16년 대비 에탄올 생산농도 2.5배 증가(50g/L) ('20년)
- * '18년 대비 유기산 생산성 10배 증가(0.1 g/L/hh) ('20년)
- * '18년 대비 C2-화합물 생산성 67% 증가(500 mg·gcell⁻¹·day⁻¹) ('17년)



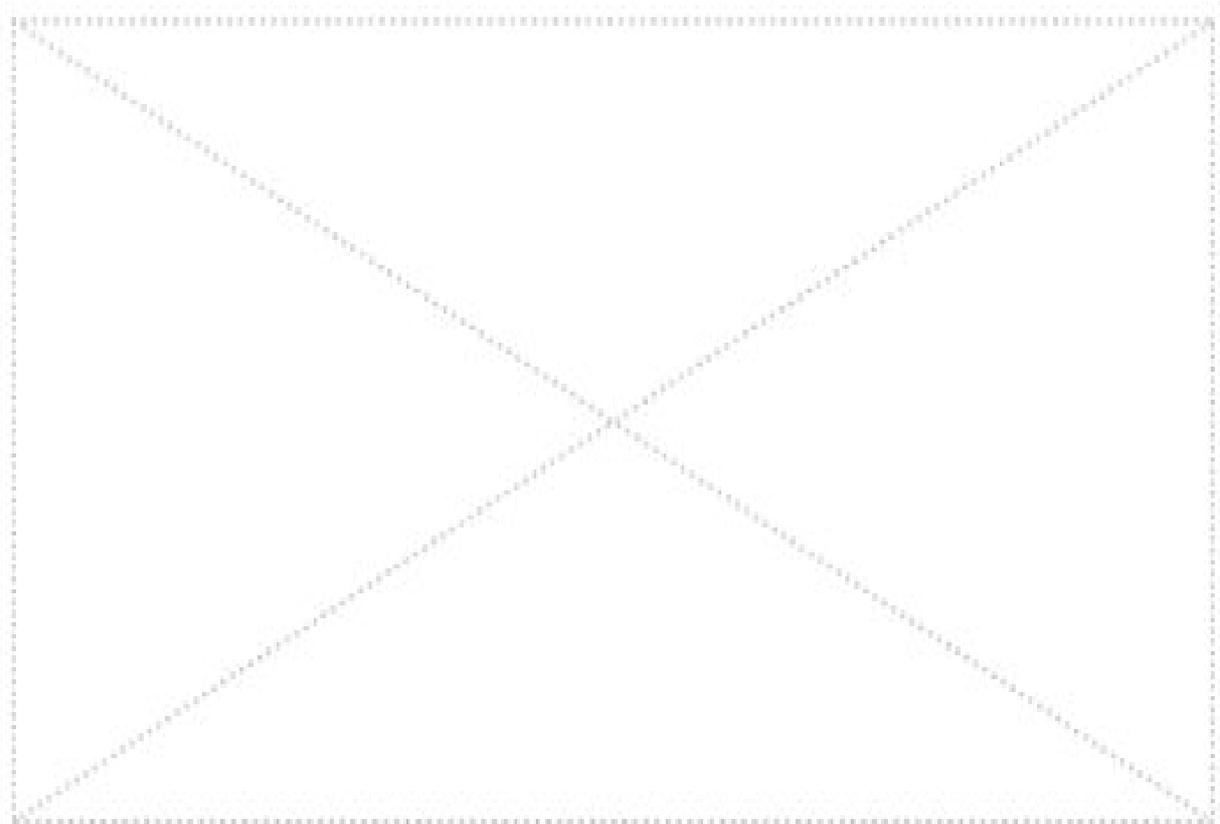
[그림 5-29] 탄소 자원화: 성과(3/5)

※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미

* 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

- 고농도 및 고순도 관련한 기술 개발을 위해 C1 기반 발효액으로부터 2,3-butanediol 회수 공정 연구, 구조기반 MMO 재설계 기술 연구를 통해 1년만에 2,3-BDO 농도 60% 향상된 80%, 순도 3.1% 증가한 99% 달성 ('17년)
- 효소 고효율성을 위해 CO 활용 C2-화합물 제조를 위한 유전체 정보기반 Acetogen 기술, 생물학적 메탄전환 플랫폼 공정, 생물학적 CO₂ 전환 플랫폼 공정 연구 개발을 통해 알칸전환효소의 발현수준을 2년 만에 2배 증대된 300 ug/mL 달성('17년), 효소특이활성을 2년 만에 60% 향상된 561 mU/mg 달성 ('18년)

- * '17년 알칸 전환효소의 가용성 50% 달성 ('17년)
- 에너지 효율 향상을 위하여 C1 화학공정 유기산 생산 촉매-공정, C1 가스 직접 전환에 의한 BTX 생산 공정 개발, C1 가스 부산물 이용 효소 및 시스템 개발 연구를 통해 물질전달 계수를 4년 만에 2.7배 향상된 800 H^{-1} 달성 ('20년)
- * 전기분해시스템의 전류밀도를 연구 시작 년도(2011년) 대비 6배 증가한 $300\text{mA}/\text{cm}^2@1.5\text{v}$ 달성 ('20년)
- * '20년 전기분해 소비에너지 수준을 연구 시작 년도(2011년) 대비 25% 감소한 $600\text{kWh}/\text{tNaHCO}_3$ 달성 ('20년)

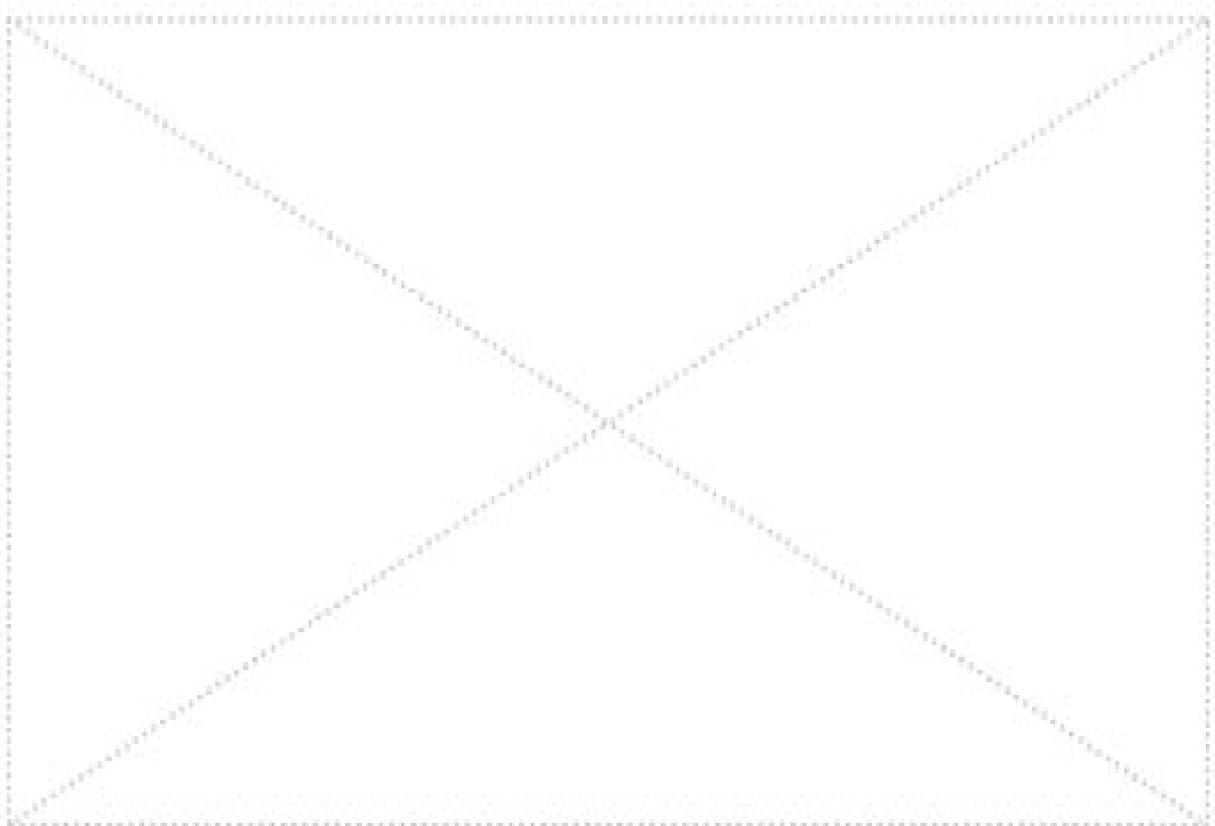


[그림 5-30] 탄소 자원화: 성과(4/5)

※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미
 * 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

- 공정 관련 기술 트렌드로는 안정성, 가스 조성 억제 등이 존재
 - 안정성 향상을 위한 혁신적 CO_2 reductase 개발 및 이를 이용한 전기 화학적 BT-NT 융합 개미산 제조 시스템 연구를 통해, 전기화학공정의 안정성 관련 연속운전 시간을 연구 시작 년도인 2011년 대비 24배 증대한 240시간 달성 ('20년)
 - 가스 조성 억제를 위한 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 환원 전기화학 촉매에 대한 연구를 통해 연구 시작 년도인 2011년 대비 합성가스 조성을 20% 감소시킨 2.0 달성 ('19년)

- 인공광합성 관련한 기술 트렌드로는 태양전지 고효율화, 광전류 증대, 에너지전환 고효율화, 고전환율, 고효율 대면적화, 고성능 나노복합막 등이 형성되어 있음
 - 태양전지 고효율화를 위한 인공광합성 디바이스용 태양전지개발 연구 개발을 통해 1년 만에 에너지 효율을 1.0% 이상 수준 달성 ('15년)
 - * 광전류 3.3 mA/cm²('15년), 광전압 2.2V('15년), 500 nm 파장에서 광-전자 전류 전환 효율 8%대 달성 ('16년)
 - 광전류 증대를 위한 인공광합성 디바이스용 물산화광전극 개발 연구 개발을 통해 광전류 5 mA/cm² @1 Sun, 광전류 밀도 6 mA@1.23V, RHE) 달성 ('15년)
 - 에너지전환 고효율화를 위한 인공광합성 디바이스 개발, 백금을 대체할 SUS 전극 개량 기술 개발을 통해 SUS 전극의 표면개질을 통한 성능 기존 대비 10% 증진 ('16년)



[그림 5-31] 탄소 자원화: 성과(5/5)

※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미
 * 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

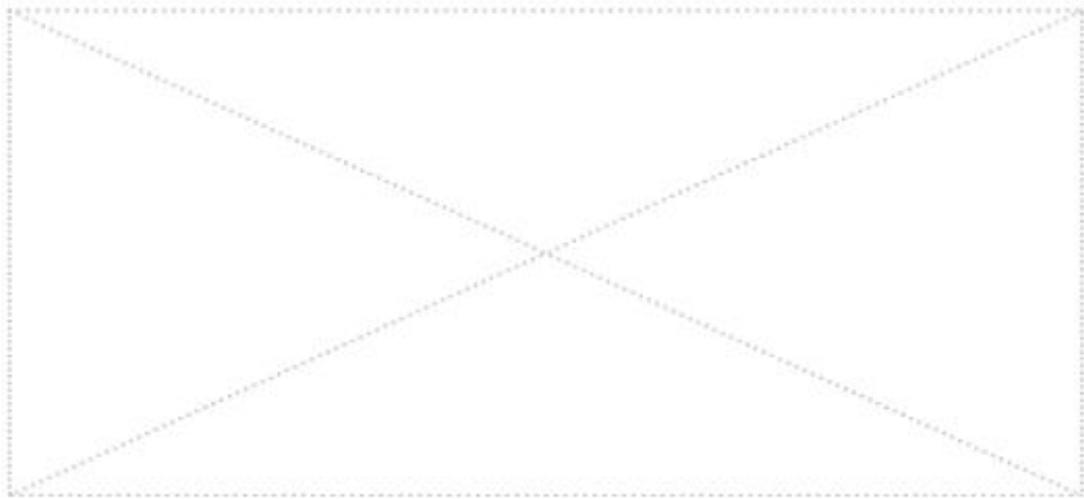
- 인공광합성 관련 고전환율을 위한 다전자 CO₂ 환원 (광)촉매 개발을 통해 해외 수준인 0.016%를 초과하는 광촉매 ECE 1.61% 달성 ('15년)
- 고효율 대면적화를 위한 다중금속 물산화광촉매 개발 연구를 통해 광효율을 1년 전 대비 53% 향상시킨 1.18% 달성 ('14년)
 - * 6%의 물산화 광전류 획득 ('14년)

- 고성능 나노복합막과 관련된 나노구조체 기반의 전자/양성자 동시 수송체 개발, 양자점 기반의 나노 입자의 모양 제어 및 나노 무기 입자 성능 최적화, 고선택성 양성자/전자 촉진수송 전해질 개발, 양성자-전자 동시 수송체 제작 및 CO₂ 환원 고효율 가시광 광촉매 구현, 하이브리드 전극 물질 혹은 전극 표면개질 방법 개발 연구를 통해 나노복합막의 이온전도도 0.096 S/cm @80°C/100% RH 달성 ('16년)
- * 광흡수능 10%, 나노복합전해질막의 이온전도도 0.03 S/cm, 전류밀도 9.74 mA/cm², 전자-양성자 재결합율 5% 달성 ('14년)
- * Nafion의 인장강도 25.3 MPa 달성 ('16년)

타. 기후 예측 및 모델링

1) 필요성

- 동아시아 지역의 이상고온 현상들은 자연변동성과의 관련성 또한 큰 것으로 나타나 자연적 원인으로 인한 기후 변동의 불확실성 증대에 대비하기 위한 예측 모델 고도화 필요



[그림 5-32] 동아시아 지역의 연최고·일최저 기온(TNx)의 5년 평균 시계열

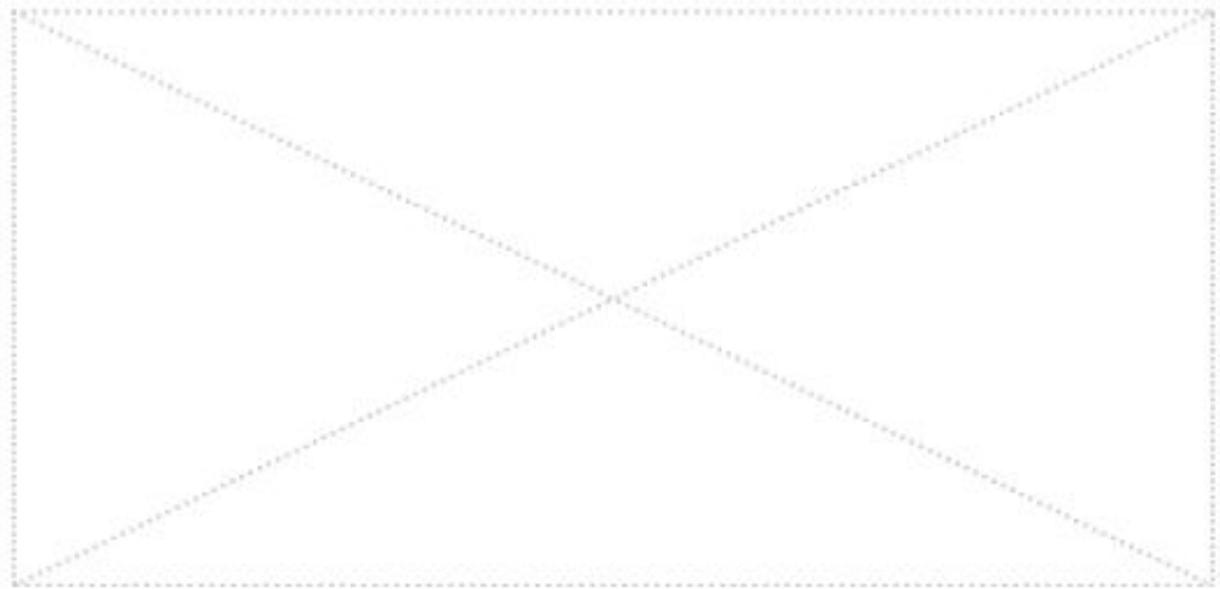
* 자료: Kim et al., 2016

* HadEX3 관측자료(OBS, 검정색), CMIP6 모든 강제력(ALL, 녹색), 자연 강제력(NAT, 파란색), 온실가스 강제력(GHG, 빨간색), 에어로졸 강제력 실험(AER, 보라색)의 앙상블 평균 결과

2) 성과

- 최근에 비해 과거에 기후 예측 및 모델링 기술 연구에 대한 지원이 이뤄졌으며, 데이터를 통한 예측 가능성 증대를 위한 연구 개발 지원 확대 필요
- 기후 예측 및 모델링 기술은 각국 환경에 부합하는 모델 개발로 동등 수준의 비교는 한계 존재. 해외는 1km*1km의 해상도 구현, 2100년 기후 예측 등 장기 예측 실시
- 기후 예측 및 모델링의 기술 트렌드를 기후 예측 및 모델과 온실가스 통합관리 시스템으로 구분
 - 기후 예측 및 모델링의 기술 트렌드로는 고해상도, 빅데이터화, 장기예측화 등 존재
 - 고해상도와 관련하여 통합 기후예측 시스템을 위한 기후예측 시뮬레이터 및 대양 관측 연구를 통해 해상도 50km 달성 ('15년)
 - 빅데이터화와 관련한 LES를 이용한 난류모수화 및 고해상도 OGCM 연구를 통해 30년 데이터 분석 가능 ('16년)
 - 장기예측화와 관련하여 고해상도 OGCM 분석 및 해빙, 조석혼합 모수화 및 기후예측 시뮬레이터를 위한 지면-대기 탄소순환 모형 연구를 통해 10년 주기 예측 가능 달성 ('16년)

- 온실가스 통합관리 시스템을 위해 온실가스 통합관리 시스템 개발 연구를 진행하였으며, 관련 기술 트렌드는 시스템 구축, 정보 처리 고도화 등이 있음
 - 온실가스 관리 시스템 구축, 온실가스에너지 통계 정보 고도화 ('15년)



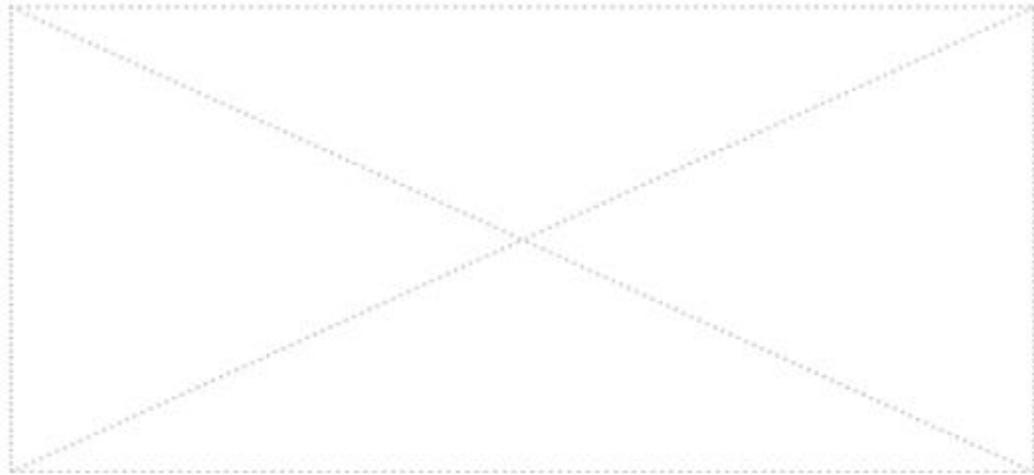
[그림 5-33] 기후 예측 및 모델링: 성과

- ※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미
- * 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

파. 수산자원 및 연안 관리

1) 필요성

- 이산화탄소 증가로 인해 해양의 표면 수온, 해수면이 상승하면서 해류의 흐름이 변경됨에 따라 해안 생태계의 교란 진행중
- 국내의 모든 해역에서의 연평균 해수면 온도가 상승하면서 기후변화의 문제가 연안 관리 및 해양생물자원 변화의 문제로 확대

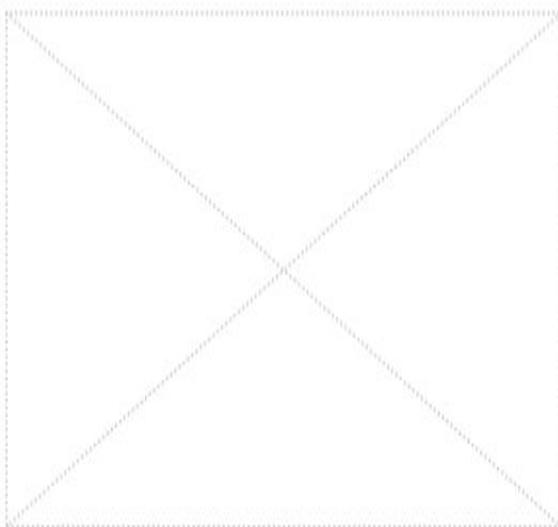


[그림 5-34] 국내 해역별 연평균 해수면온도

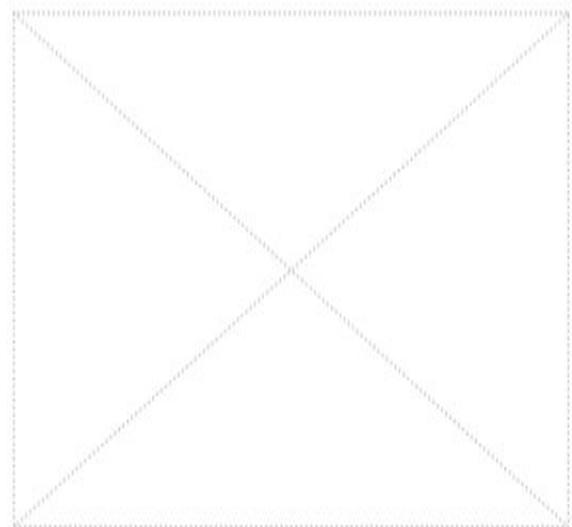
*자료 : 국립수산과학원
*정신해양관측 지점 기준

- 기후환경의 변화에 따라 시기 별, 지역 별 연근해 어종에 변화가 심화됨에 따라, 수산자원 관리 필요성 증대

<시기별 연근해 어종 변화>



<지역별 연근해 어종 변화>

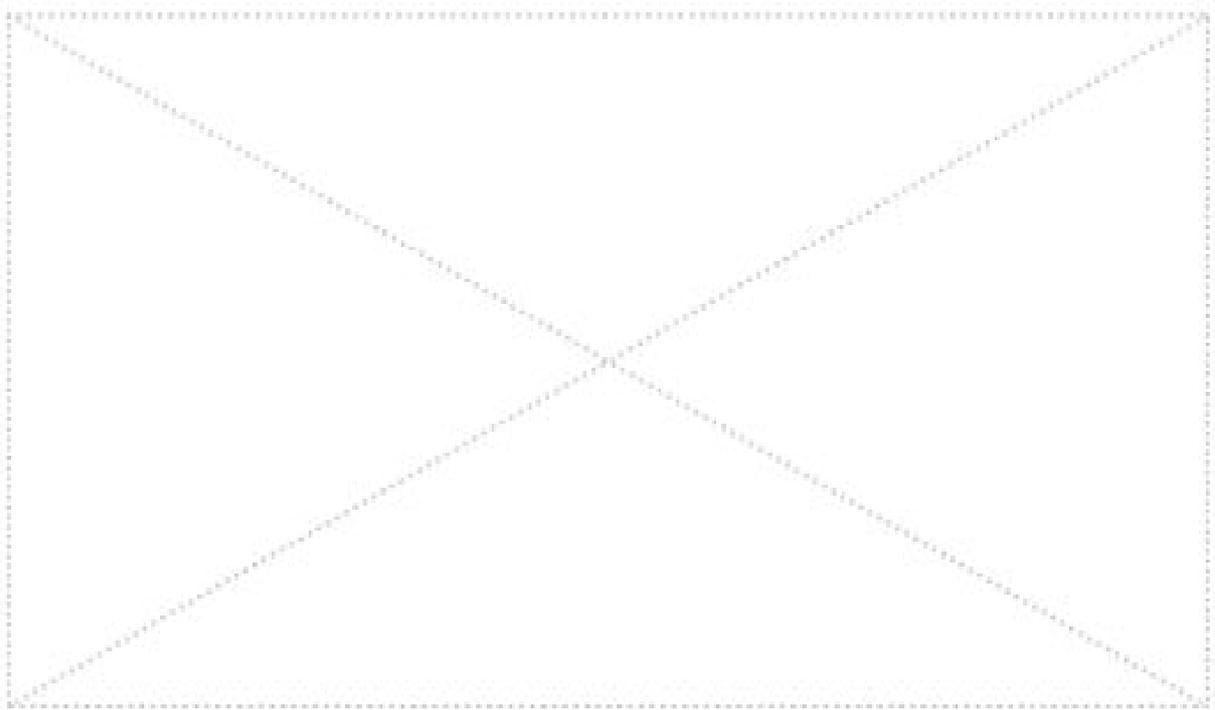


[그림 5-35] 한반도 연근해 어종 변화

*자료 : 한국은행 제주 본부('17)

2) 성과

- 최근에 수자원 및 연안 관리 연구 지원은 활발하지 않은 편이므로, 해수담수화 등 수산자원 및 연안 관리를 위한 기술 지원 확대 필요
- 수산자원 및 연안 관리와 관련하여 해수담수화 분야의 트렌드로는 대면적화, 고 패턴균일도, 고투수율, 내염소성, 오염 저감 등이 존재



[그림 5-36] 수산자원 및 연안 관리: 성과

※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미

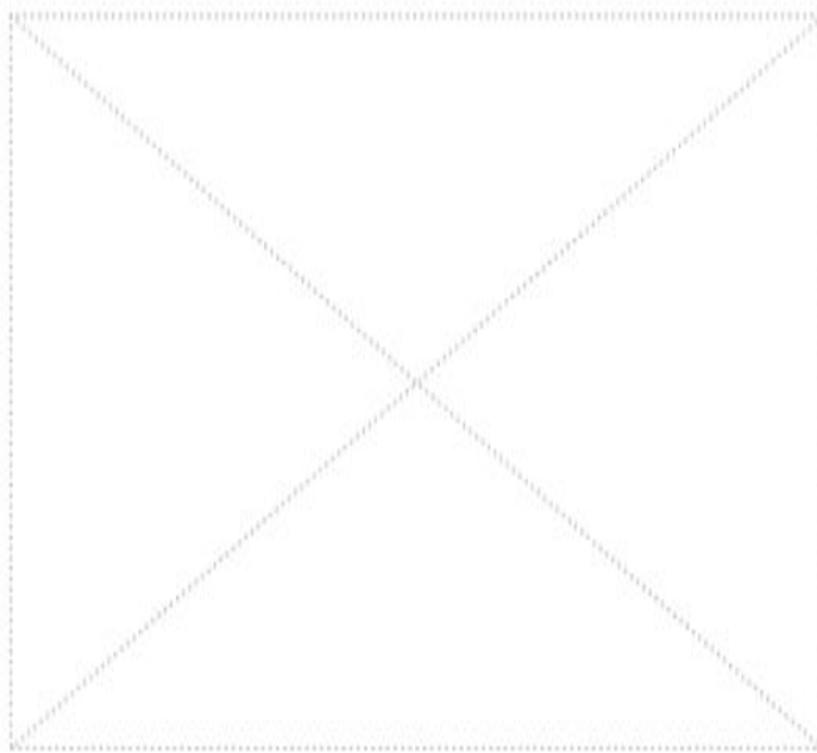
* 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

- 분리막의 대면적 및 고 패턴균일도 향상을 위한 분리막 생물 반응기 공정에 적용 가능한 분리막 개발 연구를 통해 대면적 주형에서 패턴 균일도 향상 ('15년)
- 분리막의 투수율을 높이기 위한 역삼투 공정에 적용 가능한 분리막 개발 및 고성능 혁신 분리막 제조, 다양한 패턴 분리막 제조 연구를 통해 수투수도 및 역삼투막 관련 기술 향상
 - '12년 대비 '13년 수투수도 20% 향상으로 60 LMH 달성 ('13년)
 - 역삼투막 합성 및 개발에 대한 연구를 통해 신개념 역삼투막 합성('13년), 혼합 나노 역삼투막 개발('14년), 고성능 내오염성의 역삼투막 개발('15년)
- 분리막의 내염소성과 관련한 다양한 패턴 분리막 제조 연구를 통해 '15년 48,000 ppm h 달성 ('15년)
- 오염 저감 관련 중력식 막 여과 수처리 기술 연구 개발을 통해 염제거율 1년 만에 99.5% 달성 ('13년)

하. 작물 재배 및 생산 관리

1) 필요성

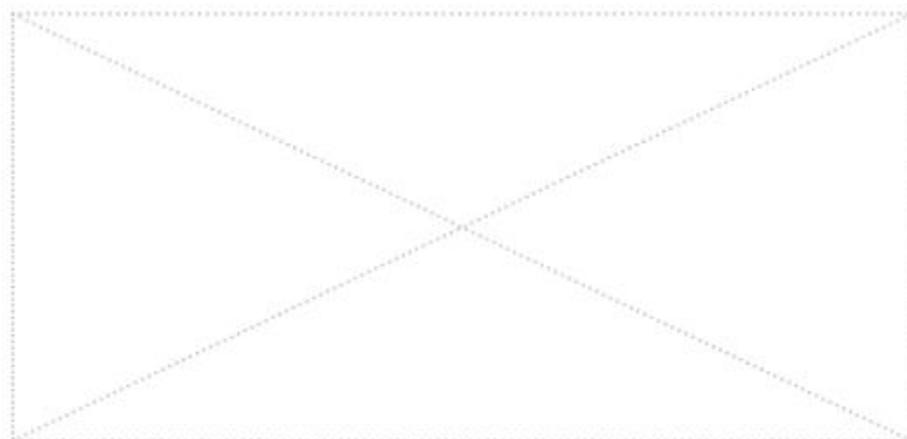
- 기후변화로 인해 평균 기온이 상승하면서, 작물의 주산지가 남부지방에서 충북, 강원 지역 등으로 북상하면서 작물 지배 및 생산에서의 큰 변화가 일어나고 있음



[그림 5-37] 주요 농작물 주산지 이동 지도

*자료 : 통계청, 기후변화에 따른 주요 농작물 주산지 이동 현황, 2018

- 기후변화의 작물에 대한 영향은 주산지 이동뿐 아니라, 주 식량인 쌀의 생산성 감소라는 국가적 문제 야기라는 측면에서 기후변화에 대응하기 위한 작물 재배 및 생산 관리 기술 개발 필요

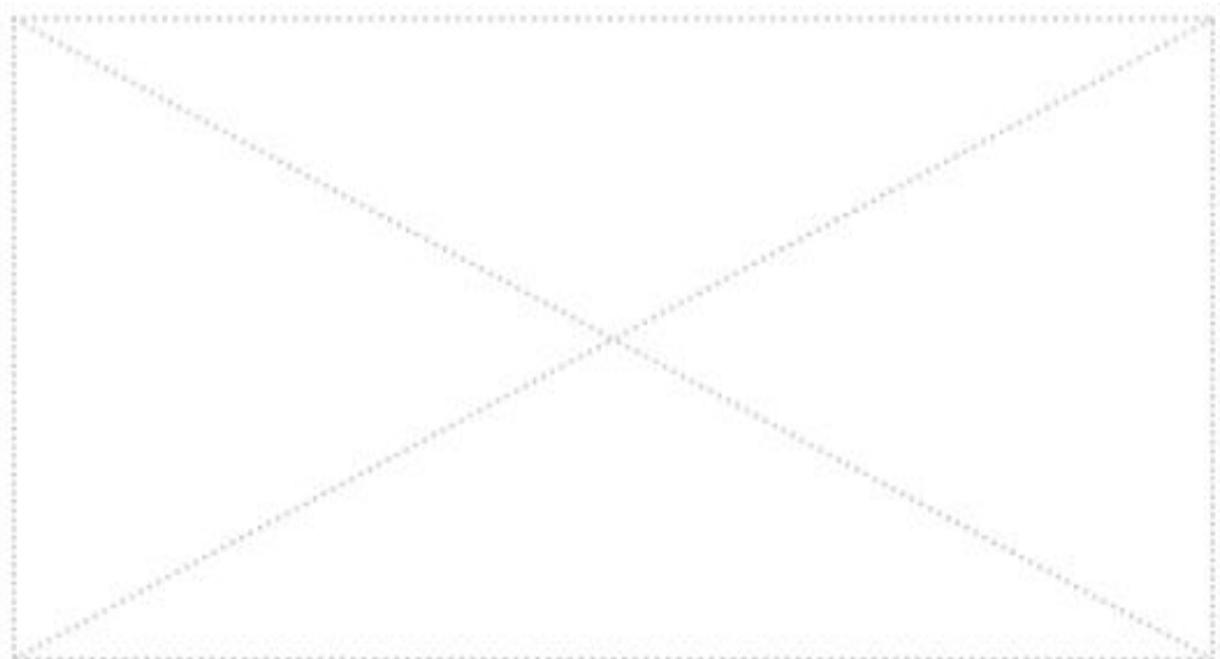


[그림 5-38] 쌀 생산성 미래 예측

*자료 : 농촌진흥청, RCP8.5 시나리오에 따른 쌀 생산성 미래 예측

2) 성과

- 작물 재배와 관련한 연구 지원 성과는 최근에 집중되어 있으며, 이산화탄소 감축 및 적응을 위해 관련 기술 개발 확대 필요
- 농촌지역에 대한 에너지 효율화 및 미세먼지 관련 기술 개발을 통해 이산화탄소와 미세먼지 배출 및 관리에 노력을 기울이고 있음
 - 농촌주택에너지 효율화와 관련하여 저가 보급형 외피단열기술에 대한 연구를 진행하였으며, 기술 트렌드로는 이산화탄소 감축, 에너지 절감 등 존재
 - 이산화탄소 감축을 위한 연구개발을 통해 이산화탄소 13,100톤 감축 기술 개발 ('17년)
 - 에너지 절감과 관련하여 72,000 MWh의 에너지 절감 ('17년)
 - 관리체계와 관련하여 비위생 매립지 개선 및 폐기물 관리체계에 대한 연구를 진행하였으며, 기술 트렌드로는 기술 현지화 등 존재
 - 자원 연계 방안을 포함한 사업화 추진기반 마련, 관리체계의 개선요소 도출 및 해결 방안 제시 ('18년)
- 동남아시아 국가에 비위생 매립지 개선 등 다양한 기술 협력을 통한 네트워크 형성

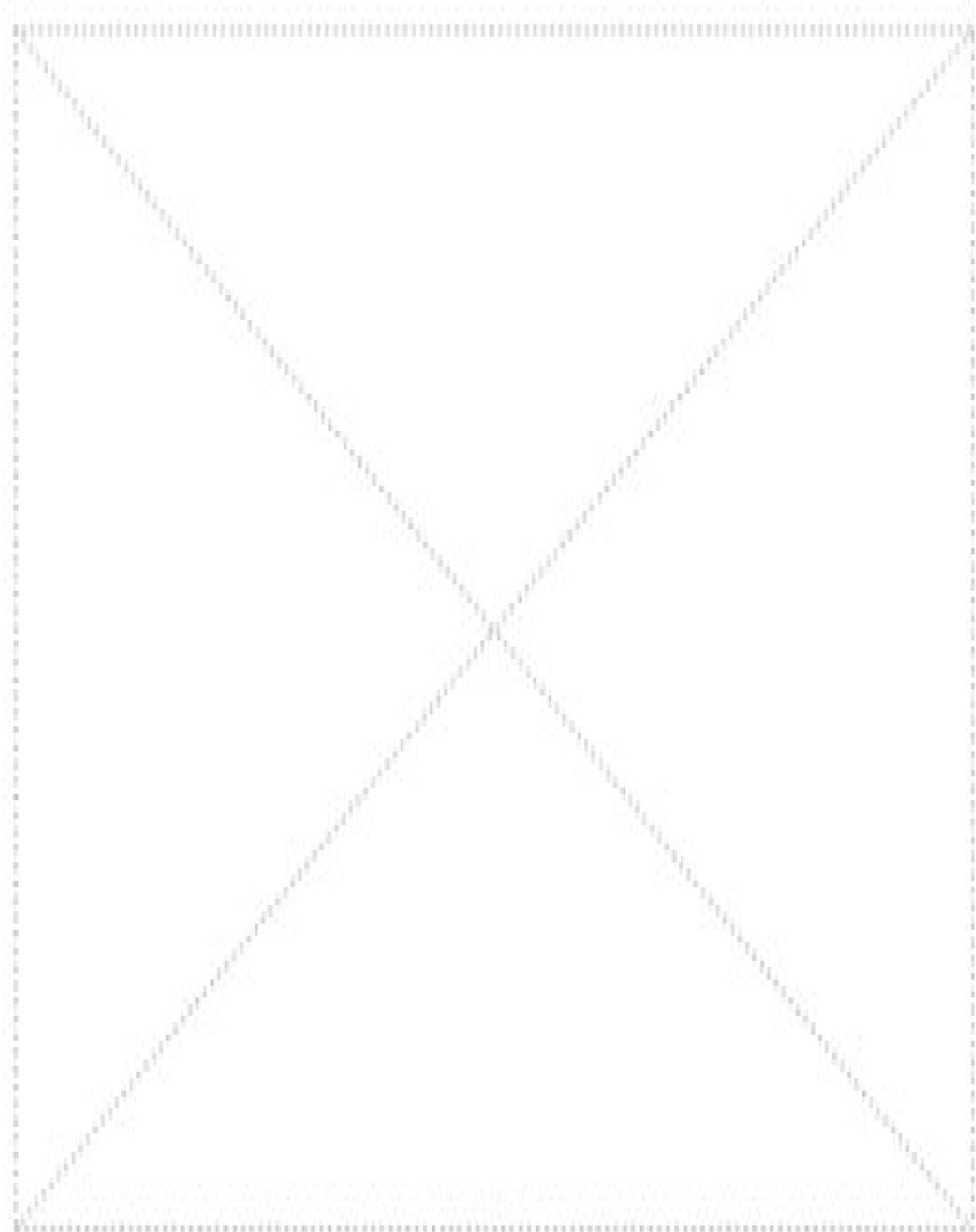


[그림 5-39] 작물 재배 및 생산 관리: 성과

- ※ 그림 내 같은 도형은 동일한 기술에서 창출된 성과를 의미
- * 기후변화 R&D사업 성과 기반 도식화 결과

제6장 요약 및 시사점

- 기후변화 대응을 위해 지난 10여년간 에너지효율 개선과 기능 개선을 위한 기술트렌드가 형성되어 왔음



[그림 6-40] 기후변화 대응기술 트렌드

* 자료: 본 연구에서 작성

□ 기후변화 대응 연구개발사업에서는 요소트리 중 총 14개 분야에 대해 R&D가 추진되어 성과를 확보함

○ 기후변화 영향물질 발생 예방 분야에서는 재생에너지 생산 및 공급 부문에서 태양광/태양열에너지, 해양에너지, 바이오에너지, 하이브리드 신재생에너지 4개 분야, 비재생에너지 생산 및 공급 부문에서 수소에너지, 연료전지, 에너지 저장 및 운송 부문에서 전력 저장 총 7개 분야가 사업을 통해 추진되어 성과 확보

○ 기후변화 영향물질 배출 저감 분야에서는 산업의 배출 저감, 교통 및 자동차 분야 배출 저감 2개 분야에서 사업이 추진되어 성과 확보

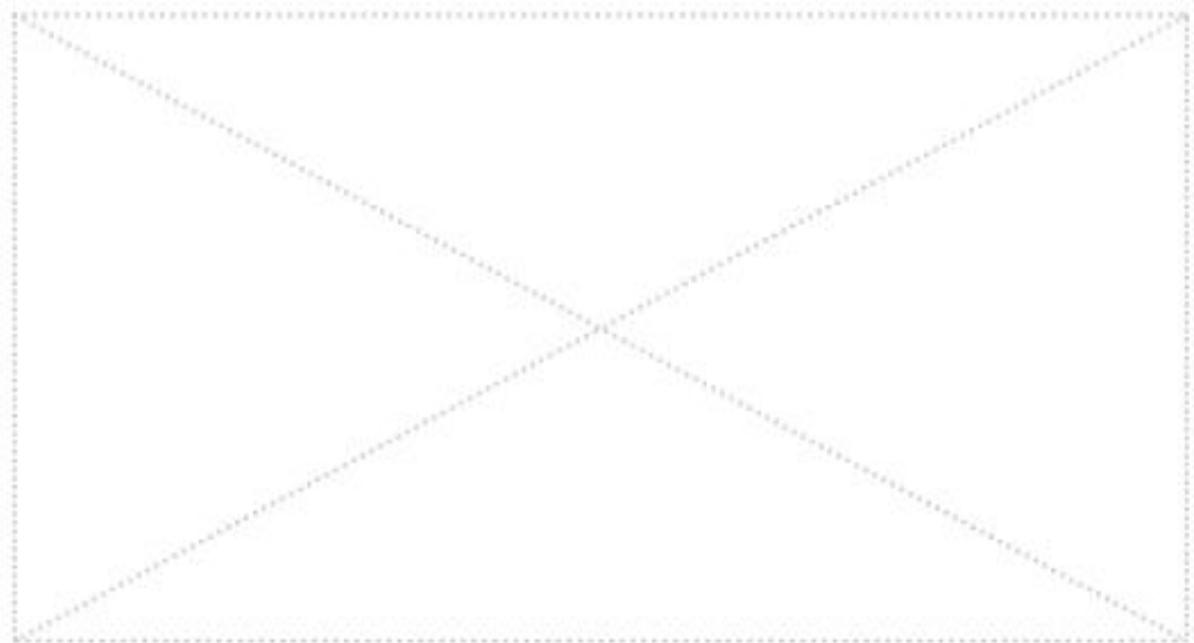
○ 기후변화 영향물질 온실가스화 방지 및 관리 분야에서는 이산화탄소 포집, 이산화탄소 자원화 2개 분야에서 추진

○ 모니터링 및 변화 예측 분야는 기후 예측 및 모델링 분야에서 사업 추진

○ 기후변화 영향 대응 분야는 수산자원 및 연안 관리, 작물 재배 및 생산 관리 2개 분야에서 추진

□ 기후변화 대응 연구개발사업의 성과는 기후변화 영향물질 배출 저감, 발생 예방 단계에 집중되었으며, 이는 대응에서 과급력과 R&D의 역할이 큰 부분이기 때문임

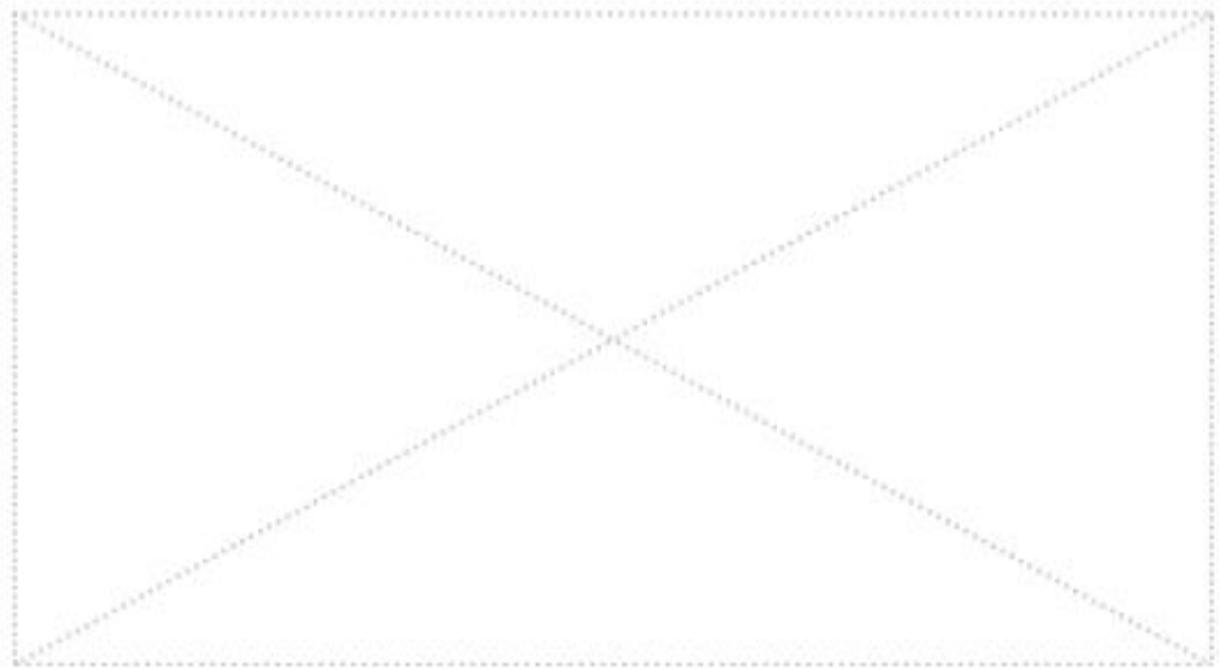
○ 기후변화 대응 과급력과 R&D 유형별로 구분하면, 모니터링 및 변화 예측 단계 이후는 즉각적인 탄소배출 감소와는 연관성이 낮아지며 R&D 유형 중 조사분석 단계가 포함됨



[그림 6-41] 기후변화 대응 중요도

* 자료: 본 연구에서 작성

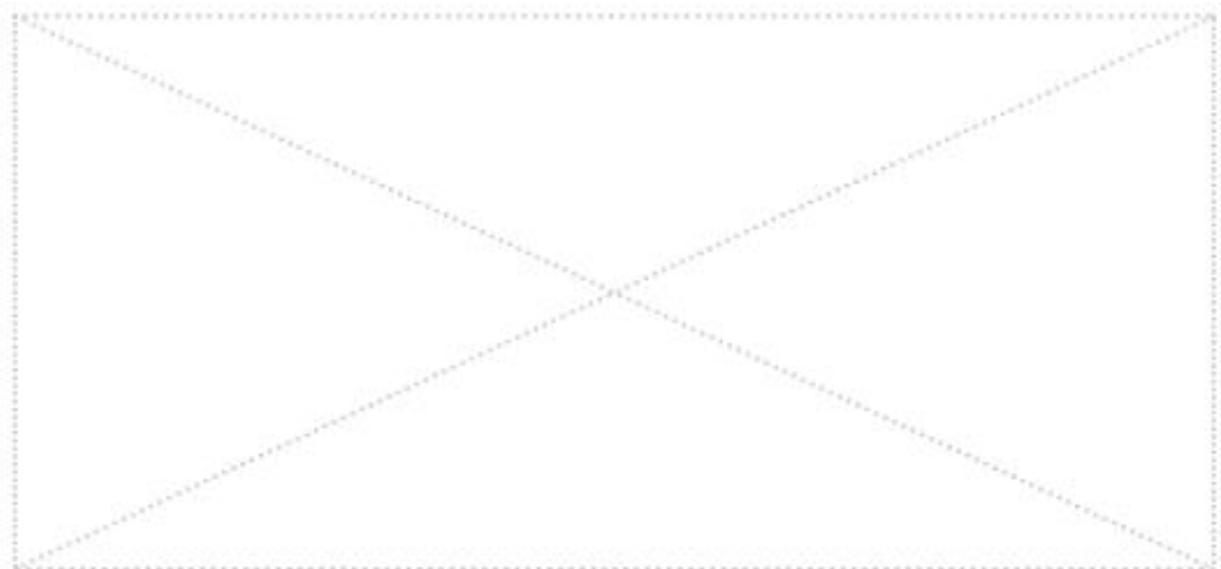
- 유관 부처와 추진 업무 성격을 구분하면, 과기정통부는 R&D를, 환경부는 조사분석, 규제 등을 주로 수행하고 있어, 과기정통부는 기후변화 대응 과정 중 기후변화 영향물질 발생 예방, 온실가스화 방지 및 관리 단계 등에 집중됨



[그림 6-42] 부처별 역할 비교

* 자료: 본 연구에서 작성

- 과기정통부는 기초/원천 기술 개발 중심, 기후변화대응 파급력이 높은 영역을 우선 추진하면서 기후변화 영향물질 발생 예방 분야에 대한 R&D 추진이 다수 이루어져 타분야에 대한 추진 필요성도 고려할 필요가 있음



[그림 6-43] 부처별 역할 및 수행 분야 비교

* 자료: 본 연구에서 작성

[참고] 성과분석 과제 목록

No.	과제명
1-1	분광학적 방법을 이용한 플렉서블 CIGS 태양전지의 전기적·광학적 측정 연구
1-1	염료기반 반투과형 유기태양전지 소재 및 소자 기술 개발
1-1	열/광/수에 안정한 다색 염료 및 저차원 탄소소재 전극개발
1-1	웨이퍼 본딩을 이용한 고효율 III-V 태양전지 기술개발
1-1	웨어러블 기기용 플렉서블 PV-EES 융합 모듈 원천기술 개발
1-1	원자층 증착 기술을 활용한 CIGS/Perovskite 텐덤 태양전지 계면 특성 제어
1-1	복합열화 현상 제어를 위한 고내구도/내피독성 분리판 설계/개발
1-1	고성능, 고내구성 연료전지 전극층 멀티스케일 구조 제어
1-1	온사이트 수소충전소를 위한 광전기화학 수소생산기술 및 시스템 개발
1-1	고효율 태양광 수소생산을 위한 저비용, 대면적 BVO 산화물 기반 광전기화학전지 개발
1-1	다목적 고성능 수소 생산 공정 최적화
1-1	복합내성 고성능 효모 기반 바이오에탄올 생산 기술
1-1	우수한 출력특성을 갖는 리튬이차전지 전극용 2차원 나노구조 복합체의 화학적 합성법 개발
1-1	온도 맞춤형 중고온 CO2 흡수제 개발
1-1	다단 CO2 포집공정 열교환형 유동층 반응기 열설계
1-1	웹 기반의 CCS 기술 경제성 분석 프로그램 개발과 이를 활용한 CCS R&D 성과의 경제적 가치 평가에 관한 연구
1-1	벌크 헤테로 접합 무기박막 태양전지 제조 원천기술개발
1-1	벌크 헤테로 접합 무기박막 태양전지내의 전하이동에 대한 초고속 동력학 연구
1-1	유기태양전지와 염료감응 태양전지의 융합형 고효율 소자 기반기술개발
1-1	차세대형 소자 구조 및 공액 고분자의에너지 준위 조절을 통한 고효율 유기태양전지
1-1	고효율 나노 양자점 (QD) 태양전지 핵심기술 및 실용소자 개발
1-1	고효율 태양에너지 수집용 광학 구조 연구
1-1	신규 광활성 물질 합성 및 연속 공정에 의한 유기 박막 태양전지 개발
1-1	다기능성 그래펜 소재 및 공액고분자 자기조립체를 이용한 신개념의 고효율 유기태양전지의 개발
1-1	우수한 개방전압 특성의 Macromolecular Structure 설계 합성 및 고효율 유기태양전지 원천기술 연구
1-1	고성능 정공수송물질의 분자설계 및 분자구조제어 합성기술 개발
1-1	고효율 고안정 유기태양전지 소자 기술 개발
1-1	벤젠 유도체 기반 수소저장기술 개발
1-1	복잡 구조 전극지지체 상 고균일도 Ni 도금기술 개발
1-1	유기성 폐자원 활용 및 상온 CO2 전환용 다공성 비균일 촉매 시스템 개발 및 이를 통한 폴리머플랫폼/폴리머 소재 개발
1-1	유기성 폐자원 활용 퓨란계 폴리머 플랫폼 제조 촉매공정 개발
1-1	고효율, 고선택성 균일 유기금속촉매 기반 당류 유기성폐자원 및 CO2 전환 폴리머 플랫폼 제조
1-1	부생가스를 이용한 이산화탄소 전환연계 고부가 화학원료 제조기술 개발
1-1	부생가스와 이산화탄소를 이용한 고부가 화학원료 생산용 Syn-gas 제조기술개발
1-1	유기성 폐자원 원료 기반 청정액체연료 생산을 위한 원천 요소기술 개발
1-1	유기성 폐자원 유래가스 초청정 전처리 요소기술 개발
1-1	유기성 폐자원 유래 바이오가스의 고품질화 요소기술 개발
1-1	유기성 폐자원 유래 바이오가스로부터 액체연료 (C5-C20) 선택적 제조 3D구조 모듈형 촉매 및 공정 개발
1-1	베트남 (Phong Khe, 하노이) 연계 카본머니 및 친환경 제지 재활용 기술의 현지 타당성 조사
1-1	베트남 현지 제지 산업 현장 및 현지 관련법규 타당성 조사
1-1	우즈베키스탄 농촌주택의에너지효율화를 위한 저가 보급형 외피단열기술 실증사업

No.	과제명
1-1	온실가스 감축을 위한 신·재생에너지 및 기후변화대응기술의 베트남현지화 수요발굴
1-1	부탄 팀푸시 폐기물관리체계 개선방안 예비조사
1-1	베트남 메콩델타 염수처리 시스템 기술실증
1-1	유기 용매, 고분자를 포함하는 초임계 유체 혼합물의 상거동 연구
1-1	분리막 유동 해석 플랫폼 개발
1-1	분리막 공정내 이온/유동흐름/막오염 최적화를 위한 실시간 내부 모니터링 및 분리막/모듈 최적화 기술 개발
1-1	부산 항만지역에서 미세먼지 발생과 거동에 대한 모니터링
1-1	부생가스를 이용한 3-Hydroxypropionic acid의 생물공학적 생산기술 개발
1-1	원자단위 d-오비탈 엔지니어링을 통한 메탄 활성화
1-1	올레핀 활용 촉매 개발
1-1	벤치규모 바이오촉매 테스트 시스템 제작 및 운전지원
1-1	부생가스를 이용한 고부가 알코올 제조 촉매공정 개발
1-1	유기나노입자 Nanofluid 기반의 C1 가스 생물전환을 위한 물질전달효율/생촉매농도 동시 향상 기술 개발
1-1	유기나노입자 Nanofluid 및 미생물 표면개량 기술 기반의, 고속 C1 가스 생물전환을 위한 물질전달효율/생촉매농도 동시 향상 융·복합 기술 개발
1-1	고속 C1 생물전환을 위한 미생물 표면 개량 기술 개발
1-1	염소 재생 공정을 위한 고성능 전극촉매 개발
1-1	부생가스를 이용한 고부가 알코올 제조 촉매기술 개발
1-1	부생가스를 이용한 메탄올/에탄올 제조 촉매기술 개발
1-1	고속 C1 전환 효소 스크리닝 기술 및 바이오촉매 개발
1-1 1-3 1-7	일산화탄소로부터 수소로의 생물학적 전환을 위한 고효율 미생물촉매 개발 및 반응시스템 개발
1-1 1-3 1-7	인쇄기반의 고내구성 플렉서블 유기태양전지 소자 및 모듈 개발
1-1 1-3 1-7	인쇄기반의 고성능 유기태양전지 모듈제작기술 개발
1-1 1-3 1-7	일산화탄소 및 메탄의 회수를 위한 분리막/흡착제 원천소재 및 분리공정 개발
1-1 1-3 1-7	일산화탄소의 선택적 회수를 위한 금속염이 포함된 다공성 탄소 기반 고성능 흡착제 및 흡착 공정 개발
1-1 1-4 1-7	폴리머 기반 적용 R2R 공정기반 고효율 플렉서블 CIGS 박막 태양전지 개발
1-1 1-4 1-7	플렉서블 CIGS 모듈을 위한 수분차단층 기술 개발
1-1 1-4 1-7	폴리이미드 기반의 2000m ³ /hr 규모 이산화탄소 막분리 포집 실증 기술 개발
1-1 1-4 1-7	폴리에스터 모노머제조를 위한 카복실화 촉매개발
1-1 1-4 1-7	폴리케톤 합성용 다공성 유기 나노입자 기반 비균일 촉매 시스템 개발
1-1 1-4 1-7	표면증강라만분광법을 이용한 비평형 용존 C1 가스 및 대사산물 실시간 모니터링 기술 개발
1-1 1-5	고도 나노상분리 촉진형 비과불화탄소계 고분자 전해질막 개발

No.	과제명
1-1 1-5	고분자 구조에 따른 전해질막의 물성 및 성능 분석
1-1 1-5	고기능성 경사구조형 복합 공기극 제조와 이를 적용한 고성능 SOFC 셀 제조 기술 개발
1-1 1-5	고내구성 알칼리막 연료전지 MEA 기술 개발
1-1 1-5	고분자 구조 고체 흡수제 피독 및 재생 특성
1-1 1-5	고광전변환 구조를 이용한 고효율 고분자-나노입자 하이브리드 태양전지
1-1 1-5	고부가 C2+ 화합물 생산을 위한 전기화학적 CO2 전환 촉매 개발
1-1 1-6	폴리머기판기반로컬콘택전극및복합금속산화물원도우층적용CIGS 태양전지개발
1-1 1-6	폴리머 기판 기반 2-step CIGS 박막 태양전지 기술 개발
1-1 1-6	이종 다중접합 태양전지 적용을 위한 효율 18% 이상의 고신뢰성 박막형 InGaP 태양전지 개발
1-1 1-6	페로브스카이트 기반 삼중접합 탠덤 태양전지 고효율화 기술 개발
1-1 1-6	이중금속 다전자 물 산화 광촉매 개발
1-1 1-6	페바이오매스를 이용한 zero-waste 바이오피파이너리 기술 개발
1-1 1-6	포름산 전환 금속기반 조촉매 개발
1-1 1-6	이중결합이 함유된 카보네이트 합성 및 고분자화 반응 개발
1-1 1-6	페로브스카이트 태양전지의 고신뢰성 확보를 위한 요소 기술 개발
1-1 1-6	평판형 양방향 수전해 셀의 성능 향상 및 양방향 전환운전 안정성 확보
1-2	고온 PEM 연료전지 반응가스 유로 및 냉각관 최적 설계
1-2	고온 PEMFC용 저가 전해질막 및 막전극접합체(MEA) 제조 기술 개발
1-2	고온 PEMFC 전극 내 백금 기반 촉매들의 phosphate 음이온 피독 현상의 정량적 분석
1-2	고에너지밀도/고출력 저반응성 리튬 구조체 요소기술개발
1-2	광섬유 센서를 이용한 지중 저장소 이산화탄소 누출 모니터링
1-2	광결정 구조를 이용한 염료감응태양전지의 광증폭 효과에 대한 연구
1-2	고신뢰성 무연 페로브스카이트형 대면적 태양전지 기술개발
1-2	고신뢰성 페로브스카이트 태양전지 기술 개발
1-2	고신뢰성 페로브스카이트 태양전지용 봉지기술 개발
1-2	광촉매-바이오 융합 수소생산 기술
1-2	광촉매-바이오촉매 융합 CO2 선택적 전환기술 개발
1-2	광전기화학전지를 이용한 이산화탄소 전환 에틸렌 및 에탄올 제조 기술 개발
1-2 1-4 1-5	PV-EES 융합을 위한 고에너지 밀도, 고 안정성 플렉서블 배터리 기술 개발
1-2 1-4 1-5	POME 바이오가스의 고질화 공정 개발
1-2 1-4 1-5	POME 바이오가스의 전처리 공정 개발
1-2 1-4 1-5	R2R 가능한 고체전해질막용 무기계 고체전해질 소재 개발 및 scale-up 기술개발

No.	과제명
1-2 1-4 1-5	Pb-free 페로브스카이트형 신규 소재 개발
1-3 1-5 1-7	도심분산전원용고성능플렉서블무기박막태양전지원천기술개발
1-3 1-5 1-7	도심 분산전원용 유기물 기반 태양전지 원천기술 개발
1-3 1-5 1-7	도심 분산전원용 유기물 기반 태양전지 성능/신뢰성 평가기술 개발 및 공정 전주기 평가를 통한 검증
1-3 1-5 1-7	동적변화 대응형 SOFC 셀 성능/ 내구성 향상을 위한 세리아 버퍼층 개발
1-3 1-5 1-7	동남아시아 각국 대상 해수담수화 역량강화 GIST-UNEP joint 아카데미 프로그램 운영 사업
1-3 1-5 1-7	도심 생활밀착형 발생원별 오존 전구물질(VOCs)과 오존 생성간의 상관성 연구
1-3 1-7	플렉서블 CIGS 박막 태양전지 손실요인 분석 플랫폼을 통한 고효율화 전략 수립
1-3 1-7	플렉서블 무기박막 태양전지 기반 BIPV 시제품 개발
1-3 1-7	플렉서블 CIGS 태양전지 R2R 장비 설계
1-3 1-7	필름형 반투과 유기태양전지 서브모듈 개발
1-3 1-7	플렉시블 III-V 화합물 반도체 태양전지 모듈의 고효율화 및 장기안정성 확보를 위한 원천기술 개발
1-3 1-7	플렉서블 PV-EES 모듈을 위한 집적화 및 패키징 기술 개발
1-3 1-7	플렉서블 배터리의 봉지 및 모듈화 기술 개발
1-3 1-7	플렉서블에너지 소자의 특성 분석 및 평가
1-3 1-7	필리핀 마닐라 비위생 매립지 개선 예비조사
1-3 1-7	필리핀 군부대 유희부지 태양광발전사업 기획 기초연구
1-4 1-5 1-7	무독성 버퍼층을 갖는 다색 플렉서블 박막 태양전지 기술 개발
1-4 1-5 1-7	물의 광산화 산소발생을 위한 유무기 하이브리드 나노입자계 개발
1-4 1-5 1-7	미세기공구조제어를 통한 고효율 리튬이차전지용 고안전성/고성능 복합분리막 개발
1-4 1-5 1-7	미세유체 기반 mechanotransduction 유도칩에서 기계적 스트레스 최적 제어를 통해 이산화탄소 대량 포집 및 유용유기물 전환 최적화기술 개발
1-4 1-5 1-7	미세유체 반응기를 이용한 미세조류 공정기술 개발
1-4 1-5 1-7	무연 페로브스카이트형 신규 소재의 설계 및 특성 전산모사

No.	과제명
1-4 1-5 1-7	미생물 세포공장 기반의 친환경 바이오이소프렌 생산기술 개발연구
1-4 1-5 1-7	미세먼지 및 전구물질 실시간 관측을 위한 드론플랫폼 운용
1-4 1-5 1-7	미세먼지 배출저감을 위한 소각장 지능형 통합 관리 시스템 개발
1-4 1-5 1-7	미세기포의 거동분석 및 특성평가
1-6	상업용 실리콘 기반 wide bandgap 페로브스카이트 다중 접합 태양전지 요소 기술 개발
1-6	고분자 연료전지 MEA용 고내구성 백금촉매 무기계 지지체 개발
1-6	고분자 연료전지 MEA용 고성능 장수명 비과불화탄소계 전해질막 개발
1-6	우량 형질전환 미세조류 발굴을 위한 고효율 나노/마이크로 통합 시스템 구축
1-6	용액공정 이용 수직성장 n형 산화물 반도체 1차원 나노구조 박막 원천기술개발
1-6	용액공정 이용 벌크 헤테로 접합 무기박막 태양전지 제조 원천기술개발
1-6	고효율 Triple Junction 유기기복합 텐덤 태양전지 기술개발
1-6	염료감응/CIGS 이중접합 기술 및 고효율 triple junction 텐덤 태양전지 개발
1-6	고효율 고분자-나노입자 하이브리드 태양전지 구조 연구
1-6	고분자 나노 입자 하이브리드 태양전지를 이용한 Tandem 태양전지 소자기술 연구
1-6	용액공정을 통한 고효율 텐덤 유기 태양전지 구현을 위한 원천기술 연구
2-1	해수를 이용한에너지 저장 및 수소생산 시스템 개발
2-1	혁신 분리막을 이용한 이산화탄소 포집
2-1	해수담수화 연계 염분차발전을 위한 분리막 및 융합시스템 핵심원천기술 개발
2-1	해수자원화 분리막 공정 최적화 및 기술적/경제적 타당성 평가기술 개발
3-1	MEA 환경을 고려한 고효율/고내구성의 산소환원반응 촉매의 전산 설계
3-1	Multiphysics 현상의 종합적인 해석을 통한 열/전기 복합추종 운전조건 대응형 고체산화물 연료전지 repeating unit 스마트디자인 확보
3-1	Load-Proof SOFC용 차세대 전극 소재 및 계면 제어 기술 개발
3-1	Ligno-biofuel 생산을 위한 바이오융합화학 기초 원천기술 개발
3-1	Ligno-biofuel 원료 확보를 위한 리그닌 저분자화 원천기술 개발
3-1	바이오매스 분해 및 바이오연료 생합성 효율향상을 위한 개량단백질 개발연구
3-1	Morphosynthesis를 이용한 광화학 및 광전기화학적 소재 개발
3-1	바이오리파이너리를 위한 미생물 시스템대사공학 원천기술 개발
3-1	바이오기반 화학물질의 고효율생산을 위한 단백질공학연구
3-1	바이오·화학 융복합 기술을 이용한 리그닌의 선택적 해중합을 통한 분해 중간체 생산 원천기술 개발
3-1	바이오 소재를 이용한 고효율 탄소전극의 개발 및 응용
3-1	NaOH/HCl 생산용 전해장치 개발
3-1	MAB 기술 고도화 및 패키징화
3-1	MAB 흡수제 기반 CO2 포집 기술 0.5 MW급 실증
3-1	MOF에 내포된 알킬아민을 이용한 이산화탄소 포집
3-1	MOF와 메조다공성 실리카 hybrid 물질을 이용한 경제적인 이산화탄소 포집제 개발
3-1	바이오 알코올 (C2, C3) 기반 이산화탄소 동시전환 기술 균일 및 불균일 촉매 개발
3-1	Methylobacterium 대사공학 toolbox 개발
3-1 3-2	리그닌 올리고머 분해를 위한 이온성액체-나노촉매 융합 반응 시스템 개발
3-1 3-2	리그닌분해 효소의 입체구조연구
3-1 3-2	리그닌 해중합 단량체를 활용한 플랫폼화합물의 생물전환 원천기술 개발

No.	과제명
3-1 3-2	리그닌 해중합 단량체 이용 균주 개발을 위한 단백질 발현 시스템 개발
3-1 3-2	리튬/공기 이차전지 공기전극용 촉매 개발
3-1 3-2	리튬 이차전지 양극용 고용량, 고전압 특성의 Li3V2(PO4)3/나노탄소 복합소재 개발
3-1 3-2	리튬 불화올리빈계 (Li2MPO4F, M=Fe, Co, Ni) 양극 활물질의 합성 및 이를 적용한 리튬 전지내의 반응 메커니즘 규명
3-1 3-2	리튬 덴드라이트 억제용 리튬 비활성 3D 유기구조체 설계
3-1 3-2	리튬 금속 전지의 안전성 향상을 위한 자가제어형 부품소재기술과 이를 활용한 고에너지 밀도 셀 제조 기술 개발
3-1 3-2	리튬 메탈 기반의 이차전지 안전성 향상을 위한 소화 물질이 포함된 core-shell 구조체 및 분리막 개발
3-1 3-2	리튬 음극 집전체용 저조도 동박 제조기술 개발
3-2	나노금속 담지촉매를 이용한 리그닌 단량체 전환 기초원천기술 개발
3-2	나노바이오촉매 접근방식 기반 CO2 reductase 고정화/안정화 및 개미산 생산 기술 개발
3-2	나노기술을 이용한 신개념 촉진수송 이산화탄소 분리막
3-2	나노분광기반 실시간 CO 전환균주 대사산물 분석기술 개발
3-3	반투과 태양전지용 인쇄/코팅 투명전극제작 공정개발
3-3	박막 태양전지 전사 및 모듈화와 인캡슐레이션 코팅 기술개발
3-3	박막 고분자 전해질형 고출력 고내구성 MEA 기술 개발
3-3	백업전원용 저가형 비키금속계 촉매 기반 고체알칼리막 연료전지 개발
3-3	백업전원 활용을 위한 비키금속기반 고성능·고내구성 알칼리막연료전지 MEA 기술 개발
3-3	백업전원 활용을 위한 알칼리막연료전지 MEA 내 전달현상 모델링 및 최적화
3-3	방사광 가속기기반 실시간 X선 분광-현미경법을 활용한 연료전지 전기화학 촉매 화학조성 변화 분석
3-3	바이오연료 생산을 위한 인공 미생물 설계·제작 플랫폼 기술개발
3-3	바이오연료용 인공미생물에 적합한 최적 발효공정 설계 기술 개발
3-3	바이오연료 생산을 위한 인공미생물 설계·제작 플랫폼 기술개발
3-3	바이오에너지 생산을 위한 효소의 활성도 및 안정성 증가 설계기술 개발
3-3	바이오케미칼 및 바이오폴리머 생산을 위한 탈스토니아 유트로파 플랫폼 균주 시스템 개발
3-3	섬유소 자원 기반 산업화용 바이오에너지 생산 기술
3-3	섬유소 기반 산업화용 바이오에너지 생산을 위한 전처리 당화 기술
3-3	반응성 리그닌 생산을 위한 유기용매 페바이오매스 분별공정 개발
3-3	속도 특성 제어를 위한 새로운 결정 및 입자 구조의 전극 소재 원천기술 개발
3-3	방사광 빔을 이용한 CO 발생반응(Carbon Monoxide Evolution Reaction, CMER) 활성 디스크립터 해명
3-3	배가스로부터 이산화탄소 분리막 포집 신공정 개발
3-3	배가스 산소 분리용 고분자 복합막 기술 개발
3-3	발전소 배가스 중 CO2 포집을 위한 고효율에너지 교환형 흡탈착 기술 개발
3-3	박막 시료의 CO2 흡수특성 시스템 구축 및 CO2 흡수특성 심층 분석
3-3	발전소 배가스 중 CO2 포집을 위한 고효율에너지 교환형 흡탈착 공정 기술 개발
3-3	바이오연료를 직접 사용하는 고체산화물 연료전지용 구성요소 소재 개발
3-3	수소저장용기 열관리 모델링 연구
3-3	세르비아 베오그라드시 재생에너지 지역난방 도입 타당성 검토
3-3	발효최적화를 통한 바이오이소프렌 대량생산 배양공정 개발
3-3	소규모 고농도 배출 VOCs 회수를 위한 흡착원천소재 개발 및 가스분리공정 개발
3-3	소규모 VOCs 배출원 대응형 흡착산화와 나노금속촉매 하이브리드 시스템 개발
3-3	소규모 VOCs 배출원 대응형 플라즈마-촉매 공정용 나노촉매 시스템 개발

No.	과제명
3-3	발연황산을 이용한 메탄으로부터 메탄올과 메탄올 유도체 제조 공정개발
3-4	목질계 리그닌의 연료 및 화학원료로의 활용을 위한 수첨탈산소 촉매 및 근임계수 반응시스템 개발
3-4	바이오수소에너지의 효율적 생산을 위한 산소내성균주 개발
3-4	목질계 바이오매스 이용 에탄올 생산을 위한 통합적 단일 생물공정 효모 균주 개발
3-4	바이오매스를 이용한 지방산계열 대체연료 생산 원천기술 개발
3-4	바이오매스를 이용한 C3-C6 화합물 대체연료 생산 원천기술 개발
3-4	바이오매스 유래 오일 기반 화학원료 및 수송용 연료 제조기술 개발
3-4	무기탄산화 전기분해 전극 개발
3-4	바이오알코올 (C2, C3) 활용 이산화탄소 동시전환 불균일 촉매기술 개발
3-5	SSF 맞춤형 인공미생물 이용 바이오매스의 바이오연료전환 기술연구
3-5	X-선 고도분석법을 이용한 고체전해질의 멀티스케일 구조 및 계면 분석
3-5	Time-resolved 전기화학 모델링 기반 공간구조형 리튬금속음극 반응메커니즘 연구
3-5	xEV용 리튬 금속 전지의 대면적화와 안전성 강화를 위한 다기능성 부품 소재 설계 및 이를 적용한 셀 요소 기술 개발
3-5	xEV용 리튬 금속 전지 셀 검증 기술 개발
3-5	Stable Ultrathin Film Composite Membranes with High CO2 Flux
3-5	Thermally Rearranged (TR) Polymers AS MEMBRANES FOR CO2 REMOVAL FROM FLUE GAS
3-5	VOCs 흡착 및 회수를 위한 유기 복합 다공체 기반 소재 개발
3-6	도시 생활구조물 활용을 위한 차세대 투광형 컬러 태양전지 원천기술 개발
3-6	도시 생활구조물 CIGS 태양전지용 고효율 고색순도 컬러링 원천기술 개발
3-6	도시 생활구조물 활용을 위한 CIGS 태양전지 심미성 향상 디자인 기술 개발
3-6	대사플럭스 측정기술 기반 바이오화학소재 생산균주 개발 시스템 구축
3-6	대심도 시추기술을 이용한 경산분지 CO2지중저장소 지질특성 연구
3-6	대심도 시추기술을 이용한 포항·태백산분지 CO2 지중저장소 지질특성 연구
3-6	대사재설계를 통한 바이오이소프렌 고생산 세포공장 개발
3-6	대학의 기후변화 대응정책에 관한 국제비교연구
3-6	대학단위 온실가스 통합관리시스템 개발 및 시범 사업
3-6	대학단위 온실가스 통합관리 시스템 개발
5-1 5-2	분자구조의 제어를 통한 고성능 음이온교환막 원천소재 개발
5-1 5-2	분자 및 대사제어 기술의 통합적 접근법을 이용한 고성능 수소생산균 개발
5-1 5-2	분자 수준에서 탄소나노소재의 기능화를 통한 고성능 음극 소재 개발
5-1 5-2	분자동역학·분광학을 이용한 SMART 지하수 통합관리 시스템 개발
5-2	제일원리기반 전산기법을 이용한 고효율 이산화탄소 포집흡수제 디자인
5-2	주입공 내 CO2 거동 특성 분석/대응기술개발
5-2	제오라이트 분리막내 결합 구조의 정량 분석
5-2	정치형 수소저장 원천기술개발
5-2	정치형 수소저장을 위한 고효율 수소 방출용 단일금속/다중금속 촉매 개발
5-3 5-4 5-5 5-6 5-7	차세대 수소에너지 원천기술개발
6-1	삼중 탠덤 태양전지 효율 극대화를 위한 계면제어 및 특성평가
6-1	CIGS 박막태양전지 기반 고효율 투광형 태양전지 모듈 원천기술
6-1	차세대 도심응용 박막태양전지 모듈을 위한 박막미세가공 원천기술 개발
6-1	고분자연료전지용 고효율 고내구성 MEA 구조 설계 및 제어 기술 개발
6-1	고분자 연료전지 MEA용 저가 고내구성 백금촉매 개발

No.	과제명
6-1	신개념 고효율 연료전지 공기극 촉매 개발
6-1	고분자 연료전지 MEA용 저가, 고내구성 저백금 촉매 및 전극 혁신 기술 개발
6-1	고분자 연료전지 내구성 향상을 위한 기능성 담체 개발
6-1	고분자 연료전지용 비과불화탄소계 전해질막 계면내구성 강화 기술 개발
6-1	나노분자 구조 조절을 통한 고성능, 장기 내구성의 가교/복합 막 연구
6-1	비과불화탄소계 전해질막 특성 분석을 위한 분자모델 개발
6-1	삼중열병합 복합발전 연료전지 시스템 개발 및 보급을 위한 차세대 고온PEMFC 핵심원천기술 개발
6-1	고온 PEMFC용 초고효율 전극소재 시스템
6-1	고온 고분자 전해질 연료전지용 박막 전극의 제조
6-1	동적변화 대응형 고성능/고신뢰성 SOFC 스택 구성요소 및 디자인 개발
6-1	삼중열병합 시스템용 스택 제작 및 운전모드별 특성 평가, 모듈화 기술 개발
6-1	삼중열병합 시스템용 SOFC 스택 모듈화 기술을 위한 해석
6-1	동적변화 대응형 고성능/고내구성 SOFC 소재 및 셀 기술 개발
6-1	비상운전환경에서 redox 안정성이 우수한 SOFC 연료극지지체 및 셀 개발
6-1	동적변화 대응형 삼중열병합 시스템 설계 및 제어 기술 개발
6-1	동적변화 대응형 냉난방 시스템 모델 개발
6-1	저가형 비귀금속 연료전지 촉매의 실시간 구조 분석
6-1	비귀금속기반 고성능·고내구성 알칼리막연료전지 MEA 및 스택 기술 개발
6-1	멀티플렉스 오믹스 데이터 분석 및 바이오시스템 네트워크 분석을 위한 시스템생물학 기술 개발
6-1	비천연 아이소프렌 구조 생산을 위한 전구체 생산 플랫폼 기술 개발
6-1	나노선 전극 구조 전고상 전지 개발
6-1	나노 입자 조립을 통한 나노 다공성구조의 음극 활물질 제조 기술 개발
6-1	비수계 RFB 타겟형 활물질 설계 및 멤브레인 기술 개발
6-1	나노입자의 차원 제어를 통한 흑연/고체전해질 복합체 기반의 3차원 구조 음극 설계 및 조성 최적화
6-1	다공성 나노구조체 미세구조 제어 및 수율향상 기술개발
6-1	삼차원 구조체를 이용한 리튬 금속 안정화 기술 개발
6-1	멀티스케일해석을 통한 리튬금속 전극의 전기화학-기계적 해석 모델링
6-1	고온 수소 환원공정을 이용하여 저가로 생산 가능한 음극소재용 리튬금속 분말 및 박막 개발
6-1	뿌리기술 기반 다차원 리튬박 음극소재 개발
6-1	산화/환원 안정성 및 탄소 침적에 대한 내구성 향상을 위한 CO ₂ /H ₂ O 공전해 반응용 전극소재 개발
6-1	다 전자 전달 나노입자를 이용한 선택적 CO ₂ 전환 전기화학 촉매의 개발
6-1	기름 보일러 배가스의 이산화탄소 포집을 위한 랩규모 분리막 공정
6-1	재조합 시아노박테리아를 이용한 이산화탄소의 아세트산 전환 기술개발
6-1	비수계 흡수제의 CO ₂ 흡수 및 재생 특성 연구
6-1	저가 금속 수소화촉매 합성법 개발
6-1	자연교배와 분자유전학적 개량법을 활용한 환경저항성 미세조류 균주개발 및 분자기작연구
6-1	장기분지 CO ₂ 지중저장소 선정을 위한 퇴적학적/광물학적 연구
6-1	단층대 유동특성 분석 및 단층재활성에 의한 덮개암 누출가능성 평가
6-1	나노탄소/고분자 복합막 기반 CO ₂ 분리소재개발
6-1	기체분리용 열전환막용 신규 모노머 및 고분자
6-1	나노탄소/고분자 복합막 기반 CO ₂ 분리기술 개발
6-1	다공성 나노물질을 이용한 CO ₂ 분리용 고유량 혼합매질 복합막 제조 및 모듈개발
6-1	나노튜브의 배향을 통한 CO ₂ 분리용 혼합매질 분리막 제조 및 모듈개발
6-1	비천연 아미노산 이용 이산화탄소환원효소와 전자전달체 complex 합성 기술 개발
6-1	자연교배와 분자유전학적 개량법을 활용한 환경저항성 미세조류 균주개발 및 분자기작연구
6-1	나노튜브의 배향을 통한 CO ₂ 분리용 혼합 매질 분리막 제조 및 모듈 개발

No.	과제명
6-1	고온 나노복합소재 기반 저/고온 성능증폭형 연료전지 및 수전해 복합 시스템 개발
6-1	일체형 재생 연료전지의 고성능/장수명 산소극 전극 개발
6-1	저/고온형 성능증폭형 MMCM아졸계 전해질막 개발 및 Hybrid Ionomer 개발
6-1	고성능 및 내구성을 지닌 고온형 연료전지용 촉매극 개발
6-1	질소순환 사이클의 Pt-free 환원 반응을 이용한 신개념 연료전지
6-1	멀티스케일 모델링 및 실험적 성능진단을 통한 연료전지 소재, 디자인, 열 및 물 관리 기법 최적화 연구
6-1	Channel 구조 제어 나노 cluster 형 양성자 전도성 고분자 전해질 연구
6-1	단원자 수소 분리 및 확산을 위한 경사기능 복합소재 연구
6-1	금속나노입자의 전기영동 석출법에 의한 PEMFC용 다단활성층 MEA 제조법 연구
6-1	차세대 광-하이브리드 수소생산 원천기술 개발
6-1	삼차원 마이크로구조의 전기화학 HER 및 OER 촉매 개발
6-1	당류 유기성 폐자원 활용 CO2 전환 폴리머 플랫폼 제조 원천 촉매 개발
6-1	자연광합성 모방 유-무기 하이브리드 CO2 전환용 광촉매 개발
6-1	산화환원 활성점 제어를 통한 고선택 CO2 전환 산화물 광촉매 개발
6-1	CO 및 CH4 회수용 분리막 원천소재 및 분리공정 개발
6-1	CO 촉진수송 고체 전해질 분리막 소재 개발
6-1	자가 발생 압력을 이용한 고순도/고열량 바이오가스 생산 기술 개발
6-1	기후기술현지화 지원사업
6-1	남태평양 도서국가의 기후변화에 따른 물 문제 해결을 위한 중력식 막 여과 수처리 기술 실증
6-1	기후변화대응기술의 베트남 현지화 수요발굴을 위한 현지 수요검증
6-1	기후변화적응을 위한 필리핀 레이테 주 홍수위험경감 기획 기초연구
6-1	기후예측 시뮬레이터를 위한 지면-대기 탄소순환 모형 개발
6-1	기후예측 시뮬레이터 개발
6-1	기후 요소 상호 작용 연구를 통한 기후 예측시스템 모형 검증 및 개선
6-1	자료동화 접합 기후예측체계 개발 및 기후변화 진단 연구
6-1	기후예측시뮬레이터를 활용한 빙권 변동성 연구
6-1	기후예측시뮬레이터 개발
6-1	장주기 변동에 대한 예측가능성 연구
6-1	기능성 혼합 탄소나노튜브 역삼투막기술 개발 및 응용
6-1	녹색기술 정책기획체계 구축
6-1	녹색기술 정보분석체계 구축
6-1	녹색기술 국가연구개발사업 우수성과사례 조사
6-1	기후변화대응기술개발 전략 연구
6-1	기후변화 대응기술개발 전략 및 산업육성방안 연구
6-1	기후변화대응을 위한 기술분류체계 설정과 국내외 동향 분석 및 협력네트워크 구축
6-1	저에너지 소모형 염분차발전-해수담수화 하이브리드 공정용 분리막 및 시스템 핵심기술 개발
6-1	기후변화대응기술개발 전략 및 정보 분석 연구
6-1	기후변화 적응분야 기술개발 전략 및 기반 연구
6-1	기후변화대응기술 효과 및 경쟁력 분석 연구
6-1	내오염성 및 고성능 RO 분리막 및 모듈 핵심기술 개발
6-1	사업장 미세먼지 생성 원인규명 고도화
6-1	자동차 발생 원인별 미세먼지의 확산 및 변환 현상 규명
6-1	자동차 발생 원인별 미세먼지의 특성화
6-1	농촌 지역 미세먼지 종합진단 및 고농도 원인 규명
6-1	드론을 이용한 미세먼지 발생원별 3차원 측정
6-1	비도로 이동 오염원 및 소각장 배출 미세먼지 저감기술 개발·실증연구
6-1	비도로 대형 디젤엔진의 미세먼지 저감용 정전 매연여과장치 개발 및 선박 적용 실증 평가
6-1	고온 양방향 수전해 열 유동 전산해석 기술 개발

No.	과제명
6-1	메탄 산화이량화 반응용 고효율 페로브스카이트 촉매개발
6-1	메탄 염소화 반응부산물 전환을 위한 고선택성 촉매 개발
6-1	메탄 직접 산화반응용 나노세공 신소재 합성 및 분석
6-1	메탄 전환용 광/전기화학반응 촉매 기술 개발
6-1	CO 가스 환원효소의 개발 및 전자전달경로 재설계
6-1	메탄 고리화 반응을 위한 계층형 다공 구조의 촉매 물질 합성
6-1	메탄 고리화 반응을 위한 계층형 다공구조의 제올라이트 합성
6-1	메탄 고리화 반응을 위한 계층형 다공 구조의 제올라이트 합성
6-1	산점의 공간적 분포가 조절된 메조다공성 ZSM-5를 이용한 C1 방향족화 촉매 개발
6-1	저등급 CO의 생물학적 전환을 통한 화학원료 생산을 위한 재조합 미생물 플랫폼 균주 시스템 개발
6-1	CO 포함 부생가스를 이용한 n-C6 유기산 및 알코올 생물학적 생산기술 개발
6-1	메탄 산화이량화 반응용 고효율 나노 스피넬 담지 촉매 개발
6-1	메탄 산화이량화 반응을 위한 고성능 하이드록시아파타이트 촉매개발
7-1	과장 흡수 영역 및 투과도 조절을 위한 광활성층 도너/억셉터 디자인 및 합성기술 개발
7-1	페로브스카이트 광 흡수층 접합 모델 개발
7-1	투광형 탠덤 지향 고효율 페로브스카이트 태양전지 기술과 상용화를 위한 대면적화 및 안정성 향상 기술 개발
7-1	팜유잔사물 유래 바이오가스에너지화 기술 개발
7-1	그린에너지 저장용 고효율 리튬이차전지 핵심소재 개발
7-1	그린에너지 저장용 리튬이차전지의 친환경 수분산 바인더 개발
7-1	그린에너지 저장장치를 위한 고용량, 고출력, 고안정성 올리빈계 LiMn _{1-x} FexPO ₄ 양극활물질 개발
7-1	톱다운 전극/고체 전해질 설계에 기반한 에너지저장 시스템용 초고안정성 전고체 전지 핵심 기술 개발
7-1	NCM계 양극/고체 전해질 설계에 기반한 전고체 전지 핵심 기술 개발
7-1	R2R 타입의 고이온전도 기능성 고체 전해질 막 핵심 기술 개발
7-1	통합적인 미세조류 분석 플랫폼
7-1	통합 기후예측 시스템을 위한 기후예측 시뮬레이터 개발 및 대양 관측
7-1	통합 기후 예측을 위한 열대 서태평양 관측
7-1	그린캠퍼스 조성 및 확산 기반 연구 : 온실가스 통합관리시스템 개발 및 그린캠퍼스 인증제 운영 방안 연구
7-1	그린캠퍼스 인증제 도입기반 조성
7-1	특수차량용 PM 저감 신기술 실증 및 NOx 저감 신기술 개발
7-1	특수차량용 플라즈마 기술 적용 미세먼지 저감 장치의 비교 검증 및 인증기준안 개발
7-1 7-2	고효율 유연 CIGS 태양전지용 알칼리처리 및 표면처리 기술 개발
7-1 7-2	고효율 리튬이차전지 음극소재를 위한 원자수준 실리콘 클러스터-탄소 고분산 복합체 제조
7-1 7-2	Graphene 복합화 음극재에 관한 연구
7-1 7-2	Highflux 분리막을 이용한 이산화탄소 포집기술 개발
7-1 7-2	고효율 이산화탄소 광전환 촉매 개발
7-1 7-2	고효율 이산화탄소 포집을 위한 차세대 증공사 흡착제 개발
7-1 7-2	Highflux-PBO분리막 개발
7-1 7-2	고효율 양자점 태양전지의 나노 표면구조 제작 및 최적화 연구
7-1 7-2	고효율 장수명 Pb-free 페로브스카이트 태양전지 소자기술개발

No.	과제명
7-1 7-2	고효율 무연 페로브스카이트형 태양전지 기술 개발
7-1 7-2	고효율 양방향 고온수전해-연료전지 발전 기술
7-1 7-2	Heme 효소 활성자리 모사/개량을 통한 고효율 메탄 전환 촉매 개발
7-1 7-2	고효율 바이오공정을 위한 C1가스 물질전달 연구
7-1 7-2 7-4	고출력, 고속 충전 금속산화물 나노튜브 제조 공정 및 음극 응용 기술
7-1 7-3	고출력 고내구성 PEMFC MEA용 가속수명평가 기술 개발
7-1 7-3	고체알칼리 연료전지 장수명 전해질막 개발
7-1 7-3	고전도성 박판형 분리판/가스켓 일체형 제조 기술 개발
7-1 7-3	고온형 PEMFC의 고성능 전극 소재의 분자수준 최적 전산설계 연구
7-1 7-3	고온형 PEMFC 연료전지 스택 개발 및 삼중열병합 복합발전 시스템 설계
7-1 7-3	고온용 PEMFC 전해질막 및 전극 대량생산 기술 설계
7-1 7-3	고체알칼리막 연료전지용 고출력 고내구성 MEA 및 저가형 비귀금속계 촉매 개발
7-1 7-3	고체알칼리막 연료전지용 고효율, 고내구성을 가지는 저가형 비귀금속 합금 산화극 촉매 개발
7-1 7-3	고체 알칼리막 연료전지용 저가의 고성능 비귀금속 양극 촉매 개발
7-1 7-3	고이온전도성, 고내구성 과불소계 음이온전도성 이오노머 및 강화복합막/전극바인더용 이오노머 분산액 개발
7-1 7-3	고정화 생촉매를 이용하는 지방산글리세라이드의 선택적 조제
7-1 7-3	고온내구성 전지용 이온성액체 전해질
7-1 7-3	고출력 리튬이온이차전지를 위한 유무기나노복합 음극활물질 개발
7-1 7-3	고입출력이 가능한 공간구조형 리튬금속음극 원천기술개발
7-1 7-3	고용량, 저비용, 안전 특성을 가진 전고체 리튬 금속 전지의 개발
7-1 7-3	고체화학적 이론 연구에 기반한 신규 중고온 흡수제 개발
7-1 7-3	고체 아민 복합체형 이산화탄소 분리용 흡수제 개발
7-1 7-3	고온용 Alloy계 신개념 흡수제 개발
7-1 7-3	고유량 CO2분리용 Thin-Film Composite Membrane의 개발
7-1 7-3	고체 산화물 연료전지용 LSCF 및 GDC/LSCF 나노 분말 합성 기술
7-1 7-3 7-4	고효율 리튬 이차전지용 초박막 무기나노입자 세퍼레이터 제조 기술 개발
7-1 7-4	일차원 나노선 기반의 고용량 리튬이온 이차전지용 음극 소재 개발
7-2	태양전지·열전 융합소자의 효율 향상을 위한 interface 물질 개발 및 융합소자 구조 설계 최적화 연구

No.	과제명
7-2	태양전지·열전 융합소자 구조 설계 및 최적화 시뮬레이션 연구
7-2	태양전지·열전 발전 시스템의 발전효율 향상을 위한 고성능 무기판 열전 발전 소자 제작 공정 개발
7-2	태양전지-이차전지 모노리틱 전원 및 이를 이용한 올인원 융합소자 개발
7-2	태양전지-이차전지 모노리틱 전원을 위한 고효율 탈부착식 무반사 표면집광필름의 광학설계 및 개발
7-2	태양전지-이차전지 모노리틱 전원 기반 저전력 올인원 센서 인터페이스 개발
7-2	탈합금화 PtZn을 기반으로 한 연료전지 MEA용 고성능 저백금 환원극 촉매 개발
7-2	태양전지-전해조 일체형 물분해 수소 생산 기술 개발
7-2	탄소재 및 실리콘-탄소복합계 음극활물질의 열적안정성 향상
7-2	차세대 리튬이차전지용 전극소재 자기완화형 구조제어 및 전극계면기능제어 사업단
7-2	리튬이차전지용 전극소재 자기완화형 구조제어 및 계면기능제어 기술개발
7-2	금속 산화물의 비정질화를 통한 속도특성 향상
7-2	마이크로세 장기분지 내 CO2 지중저장소의 지하 지질구조 분석과 안정성 평가
7-2	마이크로중력, 광섬유 및 MEMS 센서를 이용한 이산화탄소 플룸 거동 모니터링
7-2	탈수소화 반응을 이용한 이중결합이 함유된 다양한 카보네이트 단량체의 촉매적 합성
7-2	탈황/탈수 동시처리를 Smart 흡수제 개발
7-2	태양전지용 고분자-나노입자 하이브리드 합성 및 형태학 연구
7-2	탄자니아 가정용 태양광 물 펌프 보급을 위한 기술지원
7-2	토고 태양에너지 기술 보급을 위한 기술지원
7-2	막오염 저감을 위한 고성능 분리막 및 스페이서 개발기술개발
7-2	맞춤형 저감기술 적용에 따른 미세먼지 개선 효과 분석
7-2 7-3	리튬이차전지용 이온성 액체형 고분자 전해질의 합성 및 전기화학적 특성 분석
7-2 7-4	실내 저조도 구동형 모노리틱 자가 충전 광화학 전원 개발
7-2 7-4	신규 비수계 활물질 및 고농도/고전압 플로우 전지 기술 개발
7-2 7-4	신재생에너지 기반 CO2 전환 산화-환원 융합 공정 기술 개발
7-2 7-4	신재생 전기 활용 CO2 전환 산화-환원 융합 시스템 개발
7-3	SOFC 스택 디자인 최적화를 위한 in-situ 진단 기술 개발
7-3	신개념 리튬/공기 이차전지용 핵심 요소기술 개발
7-3	리튬/공기 이차전지용 리튬 전극의 구조개선 및 고안전성 전해질 개발
7-3	리튬/공기 이차전지용 카본/촉매 복합 나노구조 공기전극 개발
7-3	리튬/공기 이차전지용 박막 고체 전해질 기술 개발
7-3	리튬/공기 이차전지의 공기전극/전해질 계면의 전기화학적 분석
7-3	리튬이차전지 기능성 전극계면의 전기화학적 특성 연구
7-3	리튬이차전지용 나노전극 구조체의 원자레벨 특성 조절
7-3	차세대 수용액전해질 이차전지용 핵심요소기술 개발
7-3	리튬이차전지용 신규 양극/전해질 및 신규 전지시스템 기초·원천기술 개발
7-3	R2R타입의 전고체 전지용 기능성 바인더 핵심 기술 개발
7-3	리튬금속 지능형 계면 및 다중 보호기술 개발
7-3	리튬금속 계면 제어 및 보호를 위한 무기소재 기술 개발
7-3	리튬금속전극 지능형 계면 및 보호막 설계
7-3	리튬금속기반 전고체 전지 전극 요소기술 연구
7-3	신규 TR고분자를 위한 새로운 고분자 디자인 창출 및 모노머 제조
7-3	차세대 알칼라인 수전해 원천기술개발
7-3	신개념 반응조 이용 자원순환형 통합 수처리 시스템 개발
7-3	RO 용 분리막 원천기술 및 시스템 최적화 기술 개발
7-4	BIPV를 위한 CIGS 모듈의 건물적용성 및 건축환경성능평가

No.	과제명
7-4	섬유상 구조의 촉매 지지체를 적용한 전극 구조 제어 및 이를 통한 고출력 고분자 연료전지용 촉매층 개발
7-4	선택적 산소반응을 일으키는 초저백금 연료극 촉매 연구
7-4	AEMFC용 비귀금속 HOR 합금 촉매의 열화 연구
7-4	AEMFC 상용화를 위한 혁신 탄화수소계 바인더 개발
7-4	Bi-functional effect 발현 및 Energetics 개선을 통한 AEMFC용 M1/NiM2M3 HOR 촉매 개발
7-4	AMFC용 비과불소계 음이온교환형 이오노머 개발 및 강화막 제조
7-4	단백질공학을 통한 고효율 lignin 분해 효소 재설계
7-4	단백질공학을 이용한 TypeII fungal peroxidase의 ligninase로의 재설계
7-4	생체재료 템플레이트 기반 자기구조 제어형 산화물 전극 소재기술 개발
7-4	3차원 응력분산구조의 다원계 전극소재 제조기술개발
7-4	차세대 이차전지용 1차원 나노전극소재 개발
7-4	분자제어를 통한 고출력 리튬이차전지용 고성능 탄소복합체 음극활물질개발
7-4	다차원 이온 전달 통로를 갖는 새로운 결정 구조의 Li2MPO4F 전극 소재의 개발
7-4	선택적 이산화탄소 전환용 복합 산화물 광촉매 개발
7-4	BT(미생물, 바이오 필름, 탄산염광물 형성)기반 덮개층/주입정 밀봉능력 향상기술 실증
7-4	서아프리카 세네갈 지역의 기후기술 수요 발굴
7-4	단백질 공학을 통한 고효율 이소프렌 생합성 효소의 개발
7-4	생활밀착형 VOCs 피해 저감을 위한 선진형 핵심기술 개발
7-4	생활 밀접형 배출사업장의 오존전구물질 목록화 및 오존생성 상관성 규명
7-4	생활밀착형 VOCs 저감을 위한 보급형 전처리 장치와 댐핑 기술 개발
7-4	선박 배출가스 및 미세먼지 측정방법 평가, 실증 연구
7-4	비 요소수계 탈질 촉매 시스템 개발
7-4	비 요소수계 탈질 촉매 코팅 기술 개발
7-4	비 요소수계 질소산화물 제거 시스템을 위한 고효율 고내구성 H2-SCR 촉매 개발
7-4	비 요소수계 저온 탈질을 위한 모노리스 촉매와 플라즈마의 결합
7-4	비 요소수계 저온 탈질을 위한 반응 모델 개발 및 성능 예측
7-4	C1 가스 리파이너리
7-4	C1 가스 부가가치 증대를 위한 C-C 결합 생성용 생촉매 시스템 개발
7-4	단쇄 유기산화물 Co-feeding에 의한 Xylene 선택적인 메탄 직접 탈수소방향족화반응 촉매시스템 개발
7-4	C1 가스 리파이너리 연구 기획관리평가
9-1 9-2	초음속 스프레이를 이용한 고성능 투명전극 기술 개발
9-1 9-2	초임계 증착을 이용한 벌크 헤테로 접합 무기 태양전지 제조 기술 개발
9-1 9-2	초임계 증착을 이용한 벌크 헤테로 접합 무기 태양전지 제조 원천기술 개발
9-1 9-2	청정 초임계 유체 공정을 이용한 자동차용 친환경 고분자 소재 개발
9-1 9-2	초임계 유체 연속공정을 이용한 내열성 고강도 폴리락티드 소재 개발
9-3	촉매지지체 기반 전극 구조 제어 및 이를 통한 고출력 고내구성 고분자 연료전지용 촉매층 개발
9-3	촉매 슬러리 조성 개발을 통한 고성능 전극 개발
9-3	촉매 및 수송체의 모양 및 크기 조절 합성
9-3	최적화 기법을 이용한 CO2 직접자원화 공정 개발 및 평가
9-3	최적화 기법을 이용한 CO2 직접자원화 설계기술 개발 및 평가
9-3	초임계유체를 이용한 자동차용 친환경 나노복합소재 연구 개발
10-1	아민기반 고성능 저온 CO2 고체 흡수제 개발

No.	과제명
10-1	혁신적 CO2 reductase 개발 및 이를 이용한 전기화학적 BT-NT 용합 개미산 제조 시스템 개발
10-1	실리콘/금속 산화물 나노와이어 전극과 분자 촉매를 활용한 2% 광효율의 이산화탄소 전환용 하이브리드 광촉매시스템 개발
10-1	C1 가스 및 부산물 이용 효소 및 시스템 개발
10-1	C1 가스 활용 미생물 기반 C2 알코올 생산 시스템 개발
10-1	가스 전달 한계를 극복하는 고효율 C1 가스 전환 시스템 개발
10-1	C1 가스의 3-HP 전환을 위한 미생물 컨소시엄 공정 개발
10-1	C1 가스로부터 방향족 화합물 제조 촉매기술 개발
10-1 10-11	CO2 수소화 포름산제조공정의 연결설계
10-1 10-11	CO2 고흡수속도를 얻기 위한 담지체 및 아민 담지 기술 개발
10-1 10-11	CO2 분리용 PBO중공사 막제조 및 분리막 시스템 개발
10-1 10-11	메탄가스 기반 C4화합물 생산 미생물 복합공정 기술 개발
10-1 10-11	메탄가스로부터 젖산 생산을 위한 고효율 바이오 전환 균주 개발
10-1 10-11	CO/올레핀 공중합을 통한 C1 폴리머 제조용 촉매기술 개발
10-1 10-11	메탄 활성화 유기금속 촉매 개발
10-1 10-11	메탄가스를 이용한 고부가가치 이소프렌의 생물학적 제조기술 개발
10-1 10-11	메탄 직접 전환을 위한 플라즈마 공정 실용화 개발
10-1 10-11	메탄가스의 고효율 전환을 위한 non-heme 효소 모사 촉매 개발
10-1 10-11	메탄 활용 신규 대사 경로 및 균주 개량을 위한 시스템생물학 분석
10-1 10-11	메탄가스로부터 류콘산과 젖산 생산을 위한 고효율 바이오 전환 균주 개발
10-1 10-11 10-13	광합성기반CO2 저감을 통한 바이오연료생산용 바이오매스 대체기술 개발
10-1 10-4	고투과선택성 CO2 분리막소재를 위한 기공채널 엔지니어링 기술개발
10-1 10-4	고투과선택성 CO2 분리막소재를 위한 기공·채널 엔지니어링 기술개발
10-1 10-4	고효율 N2/CH4 분리를 위한 차세대 분리막 분자체 기능 구현
10-1 10-4	고해상도 OGCM 분석 및 해빙, 조석혼합 모수화개발
10-1 10-4	고해상도 기후모형 개발 연구
10-1 10-4	고해상도 기후 예측 시뮬레이터 개발
10-1 10-4	고품질 합성왁스 생산을 위한 산업형 C1 가스 전환기술 개발
10-1 10-4	고효율 C1 생물전환공정 가스 재순환을 위한 분리막 기술 개발
10-10	C1 가스 전환 균주 개량을 위한 고효율 Synthetic Genetic Tools 개발
10-10	C1 가스 전환 촉매 생성물로부터 미전환 C1 가스 선택적 회수를 위한 하이브리드 분리 소재 및 공정 개발
10-10	C1 기질 기반의 고부가가치 화합물 Formate ester 생산 공정 최적화
10-10	C1 가스 전환 기술 공통시험 연구

No.	과제명
10-10	C1 가스 전환기술의 시장·산업·기술 동향분석 및 기술 경제성 분석
10-10	C1 기반 발효액으로부터 2,3-butanediol 회수 공정 개발
10-10	C1 가스 전환 균주용 고효율 유전자 전달 시스템 및 유전자 발현 튜닝 시스템 개발
10-10	C1 기반의 5-Aminolevulinic acid 생산을 위한 대사경로 설계 및 생산 조건 최적화
10-11	그래파이트/고내열성 고분자복합체 구조 조절을 통한 고전도성 연료전지용 분리판 제조
10-11	해수기반 전기화학적 이산화탄소전환에 의한 무기탄산의 제조
10-11	분자생물학적 개량을 통한 고효율 이산화탄소고정 미세조류 개발
10-11	국내 육상 1만톤급 CO2 지중저장 실증 연구
10-11	국내 육상 CO2 파일럿 저장소 선정 및 특성화
10-11	미세조류 형질전환을 위한 액적기반 전기천공 장치 개발
10-11	미세조류 단일세포 이미징 및 정량화 기법을 적용한 고속 high-throughput screening 기술 개발
10-11	국내 육상에서의 1만톤급 CO2 지중저장 실증연구
10-11	국내 육상 CO2 지중저장 파일럿 저장소 선정 연구
10-11	국가 녹색도 지표개발 및 녹색성장 전략연구
10-11	균용차량 및 비도로 차량의 NOx 저감 기술 및 주행모드 개발
10-11	굴뚝 배출 유해물질 온라인 측정시스템 개발
10-11	구조기반 MMO 재설계 기술 개발
10-13	메탄-메탄올 전환 플랫폼 균주 개발
10-13	메탄올 이용 생물학적 전환을 통한 고부가 화합물 생산 공정 개발
10-13	메탄올을 이용한 고부가가치 화합물 생산 공정개발
10-13	메탄으로부터 BTX 직접 생산을 위한 연속식 촉매 반응 시스템 개발
10-15	에너지원 통합형 대면적·고성능 태양전지·열전 융합소자 원천기술개발
10-15	알칼라인 연료전지용 비귀금속계 산소환원 반응 촉매 개발
10-15	알칼리막연료전지용 수소산화반응 촉매 개발 및 전극 성능 향상 기술 개발
10-15	연료전지 성능 최적화를 위한 전해질 및 실시간 모니터링 센서 개발
10-15	알칼라인 하이드라진 연료전지 MEA용 100% 비귀금속 촉매 기술 개발
10-15	에틸렌 복분해 반응을 위한 균일계 촉매 개발
10-15	에틸렌 복분해 반응 최적화를 위한 리간드 개발 및 전이금속 촉매 개발
10-15	에틸렌 복분해 반응을 위한 전전이금속계 촉매 개발
10-15	Intact 리그닌으로부터 촉매·바이오 화학 융합공정을 이용한 고부가 정밀화학 소재 합성 기술 개발
10-15	Kinetics 조절을 통한 고효율 전극소재의 반응기구 규명과 성능향상에 관한 연구
10-15	아연금속-공기 2차전지 개발
10-15	아연금속-공기 단위전지 개발
10-15	아연금속-공기 2차전지용 음이온 선택투과 복합 분리막 개발
10-15	아연금속-공기 2차 전지의 세부 저항 분석을 통한 반응 및 열화 기구 연구
10-15	아연공기 이차전지용 수계전해액
10-15	아연공기 이차전지용 고효율 공기극 소재 개발
10-15	에너지저장시스템용 초고안전성 전지 구현 및 성능 평가
10-15	In-Situ 인프라 구축을 통한 리튬금속 반응메커니즘 고도분석기술 개발
10-15	KOREA CCS 2020 사업
10-15	에너지 교환형 유동층 CO2 포집기술 개발
10-15	연소후 CO2 포집 공정 경제성 평가 및 분리막 CO2 포집 공정 최적 설계
10-15	Korea CCS2020사업 기획평가
10-15	Host-guest개념 흡수제를 위한 고도 guest 기술 개발
10-15	아민화합물을 기반으로 한 저에너지 소비형 습식 CO2 흡수제 개발
10-15	역수성가스반응(RWGS) 촉매전극 개발
10-15	액적기반 미세유체 시스템과 미세조류를 활용한 차세대 이산화탄소 전환 신기술
10-15	에너지 교환형 다단 유동층 CO2 포집기술 개발
10-15	에너지 교환형 유동층용, 마그네슘에 기반한, 중온 영역 CO2 흡수제 개발

No.	과제명
10-15	연소후 이산화탄소 분리막 성능 평가기술개발
10-15	아민화합물을 기반으로 한 저에너지 소비형 비수계 CO2 흡수제 개발
10-15	에너지 집약형 비수계 CO2 포집 공정 기술개발
10-15	Integrated Microalgae Analysis Platform(iMAP)
10-15	Korea CCS 2020사업 기획관리평가
10-15	In(Ga)As/GaAs 양자점에서 다중-엑시톤 생성을 통한 태양전지 광전변환 효율 개선 연구
10-15	양산공정에 적합한 고성능 유기태양전지용 광활성 소재 개발
10-15	양산공정에 적합한 광활성 소재 플랫폼 구축
10-15	In-free, PEDOT-free 전극이 적용된 고안정성 플렉서블 소자개발
10-15	에너지기반 유망 기후기술의 인도네시아 진출을 위한 수요발굴
10-15	에너지기반 유망 기후기술의 후보 사업발굴 및 사업화 전략수립
10-15	LES를 이용한 난류모수화 및 고해상도 OGCM 개발
10-15	역학식생모형의 진단 및 검증
10-15	양방향 고온 수전해-연료전지 스택 운전기술 개발
10-15	에폭사이드 카보닐화를 통한 락톤 유도체 생산 시스템 개발
10-15 10-17	중성자 In-situ 회절을 이용한 이차전지 핵심소재 및 원천기술 개발
10-15 10-17	중대형 이차전지 新소재 기초·원천기술 개발
10-15 10-17	중대형 이차전지용 Intercalation 이 가능한 고용량 신규 음극 소재 개발
10-15 10-17	중성자 산란 활용 전고체 전지 소재 이온전도 메커니즘 연구
10-15 10-17	중공사막을 이용한 CO2 분리공정의 모델링 및 최적화
10-15 10-17	중/고온용 Alloy계 신개념 흡수제 개발
10-15 10-17	지중 주입된 이산화탄소의 거동 예측을 위한 통합 수치 모델링 기술 개발
10-15 10-17	지중저장 후보지 CO2 저장량 산정을 위한 대상 암석의 지화학적 특성 규명
10-15 10-17	중력 및 측지기술을 이용한 거동 및 누출 모니터링
10-15 10-17	중온-저온 2단계 CO2 수소화 메탄올합성 촉매반응공정 개발
10-15 10-17	중온영역에서 메탄올 합성반응 촉매개발
10-15 10-17	지능형 탈질시스템 성능최적화 실증 기술 개발
10-17	공정 실증 및 소재 성능평가기반 연구
10-17	고효율 저에너지형 비수계 이산화탄소 흡수제 개발
10-17	유무기 복합 아민계 고품 신흡수제 개발
10-17	다공성 이중 고리식 고분자형 이산화탄소 분리용 고상 흡수제 개발

No.	과제명
10-17	고흡수속도를 갖는 유동층 반응용 계층적 구조의 금속산화물기반 고온 CO2 흡수제 개발
10-17	관능기에 따른 아틸렌계 알칼리 고분자 전해질 막
10-17	광 직접 활용 광촉매-바이오촉매 CO2 전환 시스템용 광촉매 소재 개발
10-17	공기 연소장에서의 N2O 생성 및 저감기구에 대한 연구
10-2	CO2 수소화반응에 의한 포름산 및 포름산 유도체 생산시스템 개발
10-2	Carbonic Anhydrase 모사 촉매 이용 CO2 무기 자원화 기술 개발
10-2	Carbonic anhydrase 모사촉매 개발
10-2	CCS에 대한 인식향상 방안연구
10-2	CCS 지중저장소 검색을 위한 태백산 분지 통합층서 및 분지 구조해석 연구
10-2	CCS의 경제성 및 사업성 분석
10-2	Carbonic Anhydrase 모사 촉매 이용 CO2 무기 자원화 기술개발
10-2	CFD 기반 폐기물 소각로 연소 및 NOx 제어 성능 최적화 연구
10-2	CO 포함 부생가스를 이용한 n-C6 유기산 생물학적 생산기술 개발
10-2	CO 활용 2,3-BDO 제조를 위한 Acetogen 균주 개발
10-3	결정질 실리콘 태양전지-프린터블 이차전지 기반 모노리틱 유연 전원 시스템 개발
10-3	계산과학기반 고분자연료전지용 MEA 소재 전산 설계
10-3	계산화학 기반 AEMFC용 비귀금속계 촉매 및 MEA 시스템 설계
10-3	가역성이 향상된 아연금속-공기 2차전지용 아연 나노복합체에 관한 기술개발
10-3	CO2 육상 파일럿 지중저장 실증을 위한 모니터링 기술 개발 및 현장 실증
10-3	CO2 지중저장을 위한 대심도 지질 및 수리특성 평가기술 개발 연구
10-3	CO2 지중저장을 위한 지상시스템 운영 기술 개발
10-3	가압운전용 공전해 모듈 시스템 핵심 기술 개발
10-3	CO2 포집공정 열교환형 유동층 반응기 열설계
10-3	CO2 지중저장을 위한 시추공 완결기술개발 연구
10-3	CO2 지중저장을 위한 지상시스템 개념 및 기본 설계
10-3	CO2 저장압 및 덮개암의 주입/저장/차폐 능력 평가 기술 개발
10-3	CO2 지중저장을 위한 장기분지 지질구조와 퇴적계 연구
10-3	CO2 저장량 최적화 및 증대를 위한 다중 스케일 평가기술 개발
10-3	CO2 포집 흡수제 평가, 공정 시뮬레이션 및 공정 최적화
10-3	CO2 용해도가 향상된 CO2포집용 복합막 제조 및 모듈 개발
10-3	CO2 전환 합성가스 제조를 위한 연료극 소재 개발
10-3	가압 운전용 튜브셀 기반 CO2/H2O 동시 전해반응에 의한 syngas 제조기술 개발
10-3	CO2 포집 공정 시뮬레이션 및 공정 최적화
10-3	CO2 용해도가 향상된 CO2포집용 중공사 제조 및 모듈 개발
10-3	CO2 저장압 및 덮개암의 주입/저장/차폐 능력 평가 및 효율 향상 기술 개발
10-3	가지형 고분자를 이용한 나노구조체 형성 및 혼합 매질 분리막 개발
10-3	CO2 용해도가 향상된 CO2 포집용 중공사 제조 및 모듈 개발
10-3	경제적인 이산화탄소 MOF 포집제 개발
10-3	CO2 지중저장을 위한 경상분지와 포항분지 지질구조와 퇴적계 연구
10-3	CO2 지중저장 모니터링 기술 개발 및 현장 적용
10-3	CO2 저장부지 주변 지하수의 지구화학 모니터링 기술개발 및 현장 적용
10-3	CO2 포집용 계층적 구조의 중간 및 거대 기공 입자 소재 기술 개발
10-3	CO2 직접 수소화 촉매 및 공정개발
10-3	CO2 직접수소화를 통한 액체 탄화수소 연료 제조 촉매 및 공정 개발
10-3	CO2 전환을 통한 폴리머 플랫폼 제조 및 유기 폐자원 동시 활용 폴리머 소재 제조를 위한 공정 기술 개발
10-3	개도국과의 협력 네트워크 구축
10-3	개도국 현지화를 위한 기후기술 사업화 유망 수요 발굴 연구
10-3	가이아 지구시스템 모형을 활용한 대서양 자오면 순환의 변동과 영향 탐구
10-3	가역운전 수전해 셀 연료극 내구성 향상 기술 개발

No.	과제명
10-3	가역 수전해-연료전지용 금속-세라믹 복합체 연결재 소재 개발
10-3	개미산대사 및 C4화합물 생산효소의 입체구조연구
10-3	경질올레핀 및 방향족화합물 생산을 위한 메탄의 비 산화 직접 전환용 촉매 설계 기술 개발
10-3	계산화학 기반 에폭사이드 카보닐화 촉매 연구
10-3	계산화학기반 CO 가스 활성화 촉매 연구
10-3 10-4 10-9	합성가스 제조를 위한 CO2 저온전기분해 혁신기술 개발
10-3 10-4 10-9	합성가스로부터 DME/MA를 경유한 에탄올 및 초산제조용 촉매공정 개발
10-3 10-7 10-12	Highflux고분자 분리막 개발
10-3 10-7 10-12	Host-guest개념 고온용 흡수제를 위한 신규 guest 기술 개발
10-3 10-9	C1 가스 활성화 및 고부가가치화 원천 촉매기술 개발
10-4	저비용 리튬금속 제조 기반 다차원 음극소재 개발
10-4	CO2 포집용 나노탄소 분리막 대면적 모듈 제작 및 실증
10-4	저에너지형 비수계 및 저수계 CO2 포집 기술개발
10-4	저에너지 소비형 비수계 습식 CO2 흡수제 개발 및 실증
10-4	저에너지 소비형 습식흡수 CO2 포집 신공정 기술 개발
10-4	저수계 포집공정의 흡수제 성능향상을 위한 열변성과 기포 발생 현상 연구
10-4	저수계 흡수제 CO2 포집 기술 파일럿 기술검증 플랜트 설계도서 도출 연구
10-4	저비용 공유결합유기고분자를 이용한 이산화탄소 포집 및 분리
10-4	CO ₂ 포집용 계층적 구조의 중간 및 거대 기공 입자 소재 기술 개발
10-4	저온 CO2 액화 및 흡착용 다공성 유무기 하이브리드 흡착제 개발
10-4	저에너지 소비형 Hybrid 비수계 흡수제 개발
10-4 10-10	유동층 건식흡수공정에 적용 가능한 다공성 금속 산화물계 CO2 흡수제 담지체 개발
10-4 10-10	상온, 상압용 이산화탄소 포집을 위한 탄소기반 흡착소재 개발
10-4 10-10	새로운 소재를 이용한 차세대 연료전지용 MEA 연구
10-4 10-10	새로운 전자활성물질 개발을 통한 고효율 유기태양전지의 제조
10-4 10-10	유무기 복합 다공체 기반 고효율 CH ₄ /N ₂ 분리용 흡착제 및 흡착분리 공정 개발
10-6	하이브리드 건식 표면코팅 기술을 활용한 고기능성 확산층 개발
10-6	합성 생물 공학을 이용한 고수율의 대사경로 합성
10-6	합성 공정 변수 제어를 통한 전고체 전지용 NCM계 양극 물질 최적화 연구
10-6	합성 액체연료 생산을 위한 고온 공전해 스택 모듈 원천기술 개발
10-6	합성 가스 생산을 위한 이산화탄소 변환용 고효율 전극 촉매 개발
10-6	혁신적인 CO2 포집용 금속-유기 골격체 개발
10-6	하이플렉스 분리막 공정을 위한 배기가스 추기설비 및 전처리 기술 개발
10-6	하이드레이트를 이용한 고효율 CO2포집 및 활용기술
10-6	한국-인도네시아 국제협력 활성화를 위한 기후기술 R&D 수요 발굴 연구
10-6	하폐수 재이용을 위한 생물막오염 제어 분리막의 제조
10-6	한계돌파형 C1가스 리파이너리 공정시스템 개발
10-7	고강도 장기 내구성 고체 알칼라인 연료전지용 신규 복합막 지지체 개발
10-7	CO2 포집용 대용량 분리막/흡수제 하이브리드 시스템 기술개발

No.	과제명
10-7	CO2 포집을 위한 비수계 흡수 공정 개발
10-7	고CO2 용해성 이온성액체계 분리막 소재개발
10-7	CO2 포집용 분리막/흡수제 하이브리드 기술개발
10-7	CO2 포집용 나노탄소 분리막 대면적 모듈 제작 및 실증화 전략
10-7	고CO2 용해성 이온성액체계 분리막소재 개발
10-7	계산화학기법 활용 이산화탄소-바이오알코올 (C2, C3) 동시전환 촉매 탐색
10-7	계산화학기반 고효성 메탄 직접 전환용 촉매 설계
10-7	계산화학기반 CO 가스 활성화용 촉매 개발
10-7 10-8	이오노머 분포 제어를 통한 고효율 고내구성 고분자 연료전지용 촉매층 개발
10-7 10-8	이온전도도가 향상된 고내구성 강화복합막의 개발
10-7 10-8	이오노머 나노분산액을 활용한 음이온 전도성 강화복합막 개발
10-7 10-8	이산화탄소의 폴리카보네이트/폴리에스테르의 혁신적 전환 촉매기술
10-7 10-8	이온성액체의 SO2 흡수 메커니즘 해석
10-8	고성능 고내구성 비극속계 촉매 설계를 위한 탄소기반 model 촉매연구
10-8	고성능 광결정 구조를 위한 유무기 나노입자 합성 및 분산액 제어기술 개발
10-8	고선택성 메탄 산화체 제조용 비균질계 촉매 개발
10-9	On-site 삼중열병합 건물에너지 네트워크용 차세대 고체산화물 연료전지 핵심원천기술 개발
10-9	친환경 모빌리티용 태양광 수소 온사이트 생산 시스템 개발 및 실증
10-9	카로티노이드 기반의 코리네박테리움 이소프레노이드 대사 재설계
10-9	친환경용매를 이용한 리그닌 추출 및 정제 공정 개발
10-9	이산화탄소 제거용 물 흡수공정의 첨가제 연구
10-9	친환경 수용액 전해질을 이용한 알칼리 이차전지용 양극소재 연구
10-9	이산화탄소로부터 전기화학적 시스템에 적용 가능한 혁신적 탄소 전극 제조
10-9	연소후 이산화탄소 포집을 위한 고선택성 고유량 분리막 기술개발
10-9	이산화탄소 선택적인 실리카 제올라이트 분리막 제조
10-9	이산화탄소 포집용 초박형 제올라이트 모세관 막모듈 벤치규모 실증 연구
10-9	이산화탄소 전환 광촉매 개발
10-9	이산화탄소 전환 나노와이어 기반 하이브리드 광촉매 개발
10-9	이산화탄소 포집, 전환 및 저장을 위한 신 공정 경로의 모델링과 전산모사를 통한 경제성과 탄소배출 저감효과 분석
10-9	이산화탄소를 활용한 친환경 폴리카보네이트 제조 및 단량체 제조 원천기술 개발
10-9	CO2로부터 포름산제조 기술개발
10-9	CO2환원 포름산제조 공정개발
10-9	연속식 바이오디젤 직접생산을 위한 재조합시아노박테리아 활용 원천기술개발
10-9	이산화탄소 지중 저장 부지 선정 및 성능 평가를 위한 통합 수치 모델링
10-9	NT(나노 물질)-BT(미생물, 바이오 필름)를 이용한 CO2 저장능력 향상 융합기술 개발
10-9	이산화탄소 습식 흡수제 포집반응 모사 및 신규 흡수제 설계
10-9	이산화탄소 습식 흡수제 포집반응 모사 위한 대규모 응집물질 모사법 개발 및 적용
10-9	CO2 흡수 촉진용 Carbonic Anhydrase 모사 촉매 개발
10-9	CO2 흡수제 수용액의 열역학적 물성
10-9	연소후 이산화탄소 분리막 포집 파일럿 공정연구
10-9	이산화탄소 포집용 하이플렉스 고분자 중공사형 분리막 및 그 모듈 개발
10-9	이산화탄소 전환 합성가스 제조를 위한 고효율 고온 전해조 개발
10-9	CO2/H2O 동시 전해반응용 금속-세라믹 융합 양극소재 개발
10-9	CO2 하이드레이트를 이용한 고효율 냉방 시스템 기술 개발
10-9	이산화탄소 유래 유기 카보네이트 단분자/고분자 제조

No.	과제명
10-9	이산화탄소 하이플렉스 분리막 및 그 모듈 개발
10-9	이산화탄소 전환을 위한 무기탄산화 반응 및 공정해석
10-9	이산화탄소 지중 저장 통합 수치 모델링 기술을 이용한 지중 저장 부지 선정 및 설계
10-9	이산화탄소 포집능 및 포집속도 향상을 위한 화학적 이해
10-9	연소후 이산화탄소 분리막 성능평가 및 포집 공정연구
10-9	친수성 제어된 초박형 마이크로기공성 무기질 이산화탄소 분리막 개발
10-9	이산화탄소 지중저장을 위한 경상분지 신동층군 암상의 물성 특성화
10-9	이산화탄소의 시클로펜타다이엔 유도체와 디페닐카보네이트로의 촉매적 전환기술
10-9	이산화탄소 습식흡수제 포집반응 모사 및 신규 흡수제 설계
10-9	이산화탄소 선택적인 실리카 제오라이트 분리막 제조
10-9	Pb-free 광활성소재를 기반으로한 고효율 장수명의 페로브스카이트 태양전지 개발
10-9	Pb-free 광활성 신소재의 설계 및 합성
10-9	친환경 고효율 광활성 소재 및 고순도화 기술 개발
10-9	Non-fullerene계 및 열/광/대기안정성 유기태양전지 소재 기술 개발
10-9	친환경 페로브스카이트형 태양전지 기술개발
10-9	친환경 신규 광활성 소재 기술 개발
10-9	친환경 페로브스카이트형 태양전지 기술 개발
10-9	친환경 페로브스카이트 태양전지 맞춤형 전하전달층 개발 및 소자 최적화 연구
10-9	이산화탄소로부터 경질올레핀을 생산하는 촉매 및 공정기술 개발
10-9	CO2로부터 직접 방향족 화합물 제조를 위한 촉매 및 공정 개발
10-9	이산화탄소 전환용 광-바이오촉매시스템: 전자전달물질 및 NADH 대체물질 개발
10-9	이산화탄소 전환 대응 하이포아염소산 생산 산화 촉매 개발
10-9	이산화탄소와 바이오 알코올 (C2, C3) 동시전환용 균일촉매 기술개발
10-9	이산화탄소가 풍부한 합성가스로부터 선형 장쇄 올레핀 제조용 촉매공정 개발
10-9	이산화탄소/코크오븐가스로부터 고농도 일산화탄소 생산을 위한 탄소침적 및 소결 저항성이 우수한 건식 개질 촉매 개발
10-9	이산화탄소를 탈수소제로 활용한 저급올레핀(C2=/C3=)화 촉매기술개발
10-9	이산화탄소 환원 에틸렌 제조 용 전이금속 나노입자 촉매 기술 개발
10-9	이산화탄소 환원 에탄올 제조 용 탄소 복합 촉매 기술 개발
10-9	이산화탄소와 메탄 활용 고부가 화학원료 제조용 촉매 개발
10-9	친환경/자원순환형 통합 수처리 (Integrated Water Technology) 원천기술 개발
10-9	C1 바이오 전환관련 원천 효소 및 균주 개발
10-9	C1 전환 균주 스크리닝 기술 개발
10-9	C1 탄소의 대사전입을 위한 C-C 결합 생성용 생촉매 개발
10-9	C1 전환 균주개발을 위한 아세트제닉 세균 대사체 분석
10-9	C2 알코올 생산 미생물공정 배양조건 및 운전전략 최적화
10-9	C1 직접 전환용 혁신적 반응기 개발을 위한 모델링 및 설계기술 개발
10-9	Non-acetogen 기반 CO 가스 이용 바이오폴리머 생산용 바이오촉매 및 원천기술 개발
10-9	Non-acetogen 기반 CO 가스 활용 바이오부탄올 제조 균주 개발
10-9	C1 활성화용 고선택성 멤브레인 개발
10-9	C1 가스 부산물 이용 효소 및 시스템 개발
10-9	C1가스 활용 BTX 직접 제조를 위한 코크저항성 나노클러스터 촉매 개발
10-9	친환경에너지타운 조성사업 마스터플랜 및 신재생에너지 하이브리드 최적화 시스템 구축 기본설계 연구
10-9	Dual-phase 반응 기반 고효율 리튬저장체 핵심기술 개발
10-10	Crosslinked Poly Membranes for CO2 Removal Flue Gas
10-9	Fluorinated Bisphenol Monomer synthesis
10-10	

No.	과제명
10-9 10-10	First Principles-based Computational Design of Novel High-efficiency Solvents for Carbon Dioxide Cap
10-9 10-10	DMFC용 저 전자삼투유도성 가교 술폰화 아릴렌계 전해질 막
10-9 10-10	GaAs:N-QD/In(Ga)As-QD 기반 파장 맞춤형 텐덤 태양전지 성장 기술 개발
10-9 10-10	GAIA 지구시스템 모형을 이용한 기후변화 진단 및 예측
10-9 10-10	GAIA 지구시스템 모델링을 통한 기후변화 예측성 연구
10-9 10-10	GAIA 시뮬레이터 자료 분석을 통한 모델 개선 및 기후 연구
10-9 10-10	CODH/ACS 효소 모사 촉매 개발
10-9 10-10	CO활성화 질소기반 리간드를 이용한 금속 촉매 개발
10-9 10-11	CO/CO2 분리를 위한 유무기 복합 다공체 기반 흡착제 및 흡착 분리 공정 개발
10-9 10-11	CO 활용 C2-화합물 제조를 위한 유전체 정보기반 Acetogen 기술 개발
11-1	메탄의 산화이량화를 통한 올레핀 제조 촉매기술 개발
11-1	메탄의 선택적 염소화 반응을 위한 고성능 나노다공성 불균일계 촉매 개발
11-1	메탄으로부터 아세틸렌을 경유한 BTX 제조 촉매기술 개발
11-1	메탄의 고부가가치 화합물 전환을 위한 신규 경로 및 균주 개발
11-1	메탄을 고부가 화합물로 전환하기 위한 비균질 촉매 개발
11-1	메탄의 BTX 직접 전환 반응 속도식 및 반응기 모델링
11-1 11-2	탄소나노구조체-금속나노입자를 이용한고용량의 수용액 전해질 이차전지 전극물질 개발
11-1 11-2	탄성과 및 전기전자탐사를 이용한 거동 및 누출 모니터링
11-1 11-2	탄소자원화 전략 플랫폼 구축
11-1 11-2	탄소자원화 기술 전과정평가 기반 구축 및 평가 도구 개발
11-1 11-2	탄소자원화 LCI 데이터베이스 검증방법론/절차 개발 및 검증 수행
11-1 11-2	탄소 배출권 확보를 위한 학교/마을 상수도 구축 및 운영 실증사업
11-1 11-2	탄소 배출권 산정 및 CDM 등록 방법론 연구
11-1 11-2	캄보디아 저탄소 교통 기술 도입을 위한 기술지원
11-1 11-2	카르보닐화 반응을 통한 우레탄/이소시아네이트 제조용 촉매개발
11-10	모델링을 통한 관측자료 기반 배출량의 미세먼지 영향분석 및 정책 활용방안
11-10	메탄자화균을 이용한 고효율 메탄 전환 숙신산 생산 균주 개발
11-10	메탄-프로판 혼합가스를 이용한 생물학적 프로판을 생산공정 인자 탐색
11-10	메탄자화균의 다중오믹스 및 시스템네트워크 분석과 세포공장 디자인
11-11	합성효모를 이용한 섬유소 슈가의 바이오에탄올 전환 기술
11-11	합성가스로부터 방향족 직접 전환을 위한 core-shell 구조의 금속산화물-제올라이트 bifunctional 촉매 개발
11-11	합성가스로부터 DME/MA를 경유한 초산 제조용 촉매기술 개발
11-13	열전달 제어와 목적산물 선택도 조절을 위한 고효율 가스 전환 시스템 개발
11-18	생물학적 이산화탄소 고속전환 유기 자원화 기술
11-18	생물학적 이산화탄소 유기 자원화 공정 기술 개발

No.	과제명
11-18	생체모방 Carbonic Anhydrase 모사 물질 개발
11-18	차세대 탄소자원화 핵심기술 개발
11-18	차세대 탄소자원화 핵심기술 개발 연구단 관리 (사무국 운영)
11-18	생체모방 유무기복합화 기술 기반의 신규 촉매 고정화 소재 개발
11-2	메탄으로부터 BTX 직접 제조를 위한 고효율 장수명 신규 촉매기술 개발
11-2	메탄으로부터 메탄올 합성을 위한 균질계 C-H 결합 활성화 촉매 개발
11-2	메탄으로부터 경질 탄화수소를 경유한 방향족 제조기술 개발
11-2	메탄으로부터 방향족 화합물로의 전환을 위한 신 촉매 기술
11-2	메탄으로부터 고부가가치 화합물 5-Aminolevulinic acid 생산을 위한 C1 기질 전환 플랫폼 설계 및 대사공학적으로 개량된 비-메틸 영양체 코리네 균주 개발
11-24 11-25 11-26	인공광합성 구현과 실용화를 위한 기초과학 확보 및 원천기술 개발
11-24 11-25 11-26	인공광합성 디바이스 제작
11-24 11-25 11-26	인공광합성 디바이스용 저가 소재 기반 물산화 촉매 전극 개발
11-24 11-25 11-26	인공광합성 디바이스용 화합물반도체 박막 태양전지 기반 광전극 개발
11-24 11-25 11-26	인도네시아 서부 숨바와 바이오매스 9.9MW 구축사업
11-24 11-25 11-26	인도네시아 파력발전 보급/확대를 위한 실증 연구 사업 Phase 1
11-24 11-25 11-26	인도네시아 사업장 유해폐기물 관리솔루션 선진화 방안 기획 기초연구
11-26	나노구조를 이용한 태양전지 효율향상 기술개발
11-26	나노 입자 조직화, 고성능 분자 분리막 개발 및 디바이스 제작
11-26	나노구조 전극을 채택한 고출력 이차전지에서 SEI 형성제에 관한 연구
11-26	나노 형상구조 제어를 통한 고출력 금속 산화물계 전극소재 개발
11-26	나노고체 전해질 계면과 내부 이온채널의 영상화 및 메커니즘 연구
11-29	이동기기 자가 전원용 III-V족 초고효율 태양광 발전기술 개발
11-29	이동기기용 III-V 화합물반도체 초고효율 플렉서블 셀/모듈 기술개발
11-29	유무기 하이브리드 물산화광촉매 개발
11-29	이산화탄소 거동 예측, 평가, 검증 수치 모델링
11-29	이산화탄소 highflux 초박형 무기질 모세관 분리막 기술 개발
11-29	이산화탄소 대량처리를 위한 (혁신적) 화학적 전환기술
11-29	융합기반 프로톤 익스체인지 연구
11-29	유연 페로브스카이트 태양전지 기술 개발
11-29	유연성 페로브스카이트 태양전지용 고신뢰성 소재 개발
11-29	유연 페로브스카이트 태양전지 고효율화 기술 개발
11-29	유연 페로브스카이트 태양전지 계면 제어 연구
11-29	유엔기후변화협약(UNFCCC)의 기술수요분석(TNA/TAP)과 연계한 다자·양자 현지 기후기술 수요발굴 사업
11-29	다중금속 물산화광촉매 개발
11-3	리그닌 분해산물의 업그레이딩을 통한 바이오연료 생산 기술 개발
11-3	리그닌 열분해 기술 개발
11-3	리간드 디자인을 통한 하이드로포필화 반응 촉매 개발
11-3	전환 효율 극대화를 위한 C1 반응 소재 개발
11-3	정수처리용 MINs 분리막의 개발

No.	과제명
11-32	양성자, 전자, 활성수소 수송체 개발
11-32	양친성 펩타이드 조립체 기반 MMO 모방 촉매 개발
11-4	다전자 CO2 환원 (광)촉매 개발
11-4	다중 층상형 금속 소재 기반 이산화탄소 환원 전기화학 촉매 개발
11-4	다점 도장공정 VOC발생저감을 위한 IoT기반 통합관리 시스템 개발
11-6	전기 저장 용합소자용 고출력 초경량 플렉서블 III-V 태양전지 개발
11-6	저온 후처리 공정을 이용한 동적변화 대응형 SOFC 단위셀의 표면성능 및 안정성 개선 연구
11-6	전기방사법에 의한 고용량 리튬 이차전지용 1차원 전극소재 대량합성 기술 개발
11-6	전고체전지 고체 전해질용 바인더 합성을 위한 기능성 가교제 개발
11-6	전고체전지의 고에너지화를 위한 전극복합체 요소 기술 개발
11-6	전기자동차용 차세대 리튬금속 이차전지 핵심원천기술 개발
11-6	전하 제어형 소재 부품 및 리튬 금속 전지 셀 설계 제조 기술 개발
11-6	전기도금 리튬전극의 계면 안정화를 위한 인비보 보호막 형성 및 전지의 장수명 확보가 가능한 고농축 이온성 전해질 시스템 개발
11-6	전기화학적 CO2 전환 공정 원천기술 개발
11-6	저온작동 평면집적 단일형 고체산화물 연료전지 스택 개발
11-6	저저항 페로브스카이트 태양전지 모듈 기술 개발
11-6	전이금속 기반 촉매를 활용한 유기 및 무기 화합물의 수소화/탈수소화 반응 메커니즘 규명
11-6	전 지구 자료동화 시스템 개발 및 기후변화 메커니즘 연구
11-6	전기화학적 저온산화법을 이용한 VOCs 저감기술개발
11-6	전력망 연계 태양광발전소를 위한 개선된 마이크로그리드 설계 및 개발
11-6	저온 플라즈마 기술을 적용한 포집 매연입자의 가스 전환 연구
11-6	메탄자화관 이용 효율적 숙신산 생산을 위한 TCA 회로 최적화기술 개발
11-6	메탄의 선택적 직접 산화를 위한 귀금속 단원자 기반 불균일계 촉매 개발
11-6	저온 메탄 할로겐화를 통한 경질올레핀 제조용 불균일계 촉매 개발
11-6	전산유체역학을 이용한 마이크로채널 기반 반응기 열전달 특성 분석 및 반응기 설계
11-6	전자상자기공명을 이용한 C1 가스 전환효소의 중간체 규명
11-6	전이금속기반의 메탄가스전환 non-heme 효소모사 촉매시스템 개발
11-9	생물학적 네트워크의 수리적 분석과 모델링
11-9	생물학적 고속 광전환에 의한 이산화탄소 유기자원화 기술
11-9	생물학적 C1 가스 전환기술의 시장·산업·기술 동향분석 및 기술 경제성 분석
11-9	생물전기화학시스템기반 혁신형 생물학적 CO 전환 반응기 개발
11-9	생물전기화학시스템 및 라만분광법 기반 신개념 고성능 CO 전환 균주 스크리닝 및 C1가스바이오리파이너리 기술개발
14-3	효율 극대화를 위한 다중 집합 태양전지 기술 개발
14-3	활성점이 농축된 Fe-N-C 산소 환원 촉매에 대한 in situ 분석 연구
14-3	효모로부터 heme 분자가 결합된 리그닌 분해 효소의 생산
14-3	황화수소 제거공정 모델링 및 최적화 연구
14-3	흑연/고체전해질 복합 음극의 마이크로 패터닝을 통한 계면 특성 제어
14-3	히드라진 기반 이산화탄소 흡수제 개발
14-3	활성금속나노입자 합성 및 고분산 기술개발
14-3	흡수속도가 조절가능한 중고온 CO2 포집용 하이브리드 흡수제 개발
14-3	활성금속나노입자 합성 및 고분산 기술 개발
14-3	활성화 barrier-free 비평형계 소재 연구
14-3	혼합 탄소산화물 (CO2/CO)로부터 숙신산무수물 제조기술 개발
14-3	흡착제 카트리지 관리/운동을 위한 IoT기반 통합관리시스템 개발
14-3	현장 맞춤형 발생원별 미세먼지 원인규명 고도화
14-3	확산 저항이 최소화된 나노 쉬트 제올라이트 촉매 개발
14-3	화학적 기계적으로 안정한 지르코니아 기반 세라믹 분리막 소재기술 개발

본 연구보고서에 기재된 내용들은 연구책임자의 개인
적 견해이며 과학기술정보통신부의 공식견해가 아님
을 알려드립니다.

과학기술정보통신부 장관 최 기 영