탄소중립 기술혁신 추진전략

10대 핵심기술 개발 방향

철강·시멘트
석유화학
산업공정 고도화
CCUS

과학기술정보통신부
Ministry of Science and ICT

한국에너지기술연구원
KOREA INSTITUTE OF ENERGY RESEARCH

CONTENTS

요 약

Ⅰ. 철강·시멘트 기술개발 전략

1. 개요 9
2. 국내·외 현황 10
3. 핵심기술 구성 및 선정 배경 21
4. 비전 및 목표 22
5. 중분류별 추진전략 23

Ⅱ. 석유화학 기술개발 전략

1. 개요 43
2. 국내·외 현황 44
3. 핵심기술 구성 및 선정 배경 53
4. 비전 및 목표 54
5. 중분류별 추진전략 55

Ⅲ. 산업공정 고도화 기술개발 전략

1. 개요 67
2. 국내·외 현황 68
3. 핵심기술 구성 및 선정 배경 77
4. 비전 및 목표 78
5. 중분류별 추진전략 79

Ⅳ. CCUS 기술개발 전략

1. 개요 93
2. 국내·외 현황 94
3. 핵심기술 구성 및 선정 배경 100
4. 비전 및 목표 101
5. 중분류별 추진전략 102

요 약

Ⅰ. 철강·시멘트

목표 철강·시멘트 산업 저탄소 전환기술 확보

| 핵심지표 |

▶ 수소환원제철 기술 연·원료대체율(수소)

▶ 시멘트 석회석 대체가능율

▶ 시멘트 순환연료 대체가능율

혁신전략

현황·이슈

① **철강·시멘트 부문 배출량 감축** 시급*

② 철강산업 **에너지 원단위효율 한계돌파**** 를 위한 혁신기술 필요

* 2019년 국가 온실가스 배출량 철강 1.17억 톤(16.7%), 시멘트 3.9천만 톤(5.6%)

** 국내 철강 산업의 에너지 효율 추가 절감 가능성 : 중국·인도의 1/4, 유럽의 2/3(IEA)

기술개발

① 철강·시멘트 분야 **탄소 다배출공정 탈피**

② **연료·원료 대체** 혁신기술 개발

- (장기 혁신기술) **수소환원제철 기술** 개발과 (중단기 과제) **철강·시멘트 산업 저탄소 연료·원료 대체 기술** 개발의 **2-Track 추진**
- 중장기 전략과 연계하여 2-Track 추진을 위해 **그린수소, 바이오에너지 및 CCUS** 등 관련기술의 **활용·연계 추진**

정책·제도

산업현장에 직접 적용하는 **실증 인프라*** 구축 및 **실용화**를 **위한 규제개선, 인증제도 마련**** 등 **지원** 추진

* 산학연 R&D 협업체계 및 테스트베드 실증 인프라 구축

** 폐기물 활용 지원 정책, 혼합시멘트 혼합재품질관리를 위한 표준화·인증 등

철강·시멘트 기술개발 전략

중분류	현 수준	단기(~'25)	중기(~'30)	장기(~'50)	목표
저탄소/무탄소 그린 제철 기술	수소환원 제철연구 단계 (수소사용율 0%)	수소제철 신기술 및 저탄소 연·원료 대체 혁신 기술 개발		▼CCUS 연계('40) 실증	('30) 수소환원제철 및 저탄소 고로 개발
		폐자원·폐열 및 부산물 재활용 기술 개발	실증 및 단계적 상용화	▼수소 연계('35)	('40) 수소환원제철 수소사용율 100%
					('50) 수소환원제철 기술적용 탄소중립
탄소 저감형 친환경 시멘트 기술	석회석 대체 자원 전무	비탄산염 원료·혼합재 함량 증대기술 개발		상용화	('40) 석회석대체율 ≥8%
	순환연료 대체율 24%			▼CCUS 연계('30)	('40) 순환연료대체율 ≥65%
	수소버너 /적용전무	대체연료·친환경열원 개발 및 공정 효율 향상		실증 및 상용화	('50) 2 MW버너 개발·적용

■ 정부의 집중지원이 필요한 기간 ▼ 타분야 기술연계

기대효과

친환경 **원료·연료대체** 및 **공정 저탄소화**로 철강·시멘트 산업 부문 '50년 탄소중립 달성 기여

※ 예) 철강, 시멘트 탄소중립 혁신기술이 현장에 모두 적용될 경우 '40년 CO_2 배출을 '19년 대비 20% 내외 감축 가능

정책 동향

세 계 각국의 잇따른 탄소중립 선언과 탄소국경세 등 관련 제도 등으로 대표적 온실가스 다배출산업인 철강·시멘트의 산업 구조 고도화 및 친환경 신공정 R&D 확대 추진

독일 연방교육부 친환경 철강생산을 위한 연구개발 사업 지원 및 독일시멘트협회 2050년 탄소감축 목표 설정

영국 영국광물생산협회 2050년 감축 목표 설정

일본 친환경 제철 공정 R&D를 지원하는 금속소재 산업경쟁력 강화 플랜 등 추진

국 내 정부의 탄소중립 목표 설정, 철강 및 시멘트 업계의 탄소중립 공동선언문 서명·발표

시장현황 및 전망

세 계 국가 기간산업으로 분류되는 철강·시멘트 산업은 산업성장 및 경제상황, 특히 개도국의 상황에 따라 수요 변동이 발생하는 분야이지만 생산량은 현 수준을 유지할 전망

※ 세계 철강 생산량 : ('00) 8.5억 톤 → ('20) 18.8억 톤

※ 세계 시멘트 생산량 : ('10) 32.8억 톤 → ('19) 41.0억 톤
* 최고 '14년 41.9억 톤 기록

국 내 국가 제조업 내 큰 비중을 차지하는 철강·시멘트는 대표적 온실가스 다배출산업으로 탄소중립 목표달성을 위한 혁신 기술 필요

※ 철강 생산량 : ('00) 4,310만 톤 → ('19) 7,141만 톤(세계 6위)

※ 철강 산업 생산액 99조 원(제조업 중 6.3%), 수출액 310억 달러(4.1%), 부가가치 23조 원(4.1%)

※ 시멘트 국내 수요('19) : 4,948만 톤(최고 '97년 6,000만 톤)

※ 시멘트 수출('19) : 650만 톤('11년 1,000만 톤 기록)

기술개발 현황

저탄소/무탄소 그린 제철 기술 기존 고로 공정에서 사용하는 석탄 연료 대신 수소 연료를 사용하는 수소환원제철 기술 개발이 필요하며 상용화 기술은 장기적 연구개발이 요구되어 글로벌 철강사는 기존 직접환원철 기반의 기술을 추진 중이며, 수소환원제철 이외에 기존 공정(고로, 전로) CO_2 저감 기술인 산소고로, 전로 스크랩 다량 사용 기술, 폐자원 활용 확대기술 등이 개발 중

탄소저감형 친환경 시멘트 기술 시멘트 분야 미래 혁신기술로서 선진국을 중심으로 저탄소 배출, CO_2 흡수 시멘트 콘크리트 기술에 대한 연구개발 및 투자 중

산업 동향

저탄소/무탄소 그린 제철 기술 선도국의 철강社는 탄소중립 기술개발을 위해 수소 제조, Green 전력, CO_2 재활용 등 산업 전반의 범위에서 범협력 체계를 구축하고 기술 개발 전략 수립 및 추진 중이나 여전히 개발 진행도는 낮은 상황이며 상업화에 추가적 연구개발 필요

※ 포스코에서 보유하고 있는 FINEX 유동환원로를 이용한 수소환원제철 기술에 대해 기술적 차별화를 기반으로 조기 상용화 기술 개발 추진 필요하며 정부-기업의 범국가적 프로젝트 필요

탄소저감형 친환경 시멘트 기술 선도국의 시멘트社들은 온실가스 감축을 위해 다양한 방안을 도출·적용 중이며, 철강산업 및 수소산업 등과의 연계를 통한 온실가스 감축방안도 적극적으로 추진 중

Ⅱ. 석유화학

목표 저탄소 차세대 석유화학 기술 구현

| 핵심지표 |

▶ **탄소중립원료 제품 가격경쟁력**
(동종 석유화학제품 대비)

혁신전략

현황·이슈	기술개발	정책·제도
① **탄소중립 원료 이용공정**의 **기술신뢰성·경제성** 부족* ② **운전최적화**에 의한 **효율 향상**은 **한계 도달**** * 석유화학 원료와 공정 부문의 다양한 혁신 노력들이 동시에 진행되고 있으나 연구 단계이거나 소규모 적용 수준 (SK, LG, 롯데, 한화 등 주요 기업들이 탄소중립 노력 중) ** LG화학 나프타 분해·정제(NCC) 플랜트의 에너지효율은 세계 최고 수준에 도달	① 바이오매스, 순환자원 활용 **석유화학 원료, 고부가 제품 제조기술** ② 공정 **전기화**(신재생 연계), **저에너지화 기술** 개발 · 산업계 수요 기반으로 경제성 확보가 가능한 원료, 공정 우선 개발 ※ 석유화학 공정의 탄소저감 혁신기술은 현재 개념수준, 구현을 위한 중장기 소재개발 및 공정화 R&D 필요 → 정밀한 기술성, 환경성 평가를 통한 상용화 기간 단축 추진	**탄소중립 제품·공정 조기 보급** 및 활용 촉진을 위한 **지원 제도***, **온실가스 감축효과 인증 기준** 등 마련 * 금융 지원 등 인센티브 제도, 탄소중립 원료 이용제품 의무사용비율 규정 등

석유화학 기술개발 전략

중분류	현 수준	단기(~'25)	중기(~'30)	장기(~'50)	목표
탄소중립 원료 활용	[바이오나일론] 現 석유화학제품 대비 가격 150% 이상	● 해외선도기술도입('26~)		해외수소 연계('40~) ▼	석유화학제품 대비 가격경쟁력 100% 확보 ('25) 바이오나일론 ('30) 바이오폴리에스터 ('40) 바이오폴리올레핀
		바이오나프타 생산기술 실증	바이오나일론/폴리에스터/폴리올레핀 가격경쟁력 확보 및 사업화		
			◎ 기존 나프타 가열분해로 투입('26~)		
		폐플라스틱 화학원료화 기술 개발 및 실증		사업화	
			◎ 해중합 플랫폼 실증 완료('25)	◎ 폐플라스틱 활용 플랫폼 실증 완료('30)	
		메탄직접전환/부생 CO전환 원천기술 개발 및 실증		상용화	
공정탄소 저감	탄소저감 新 공정 개발 TRL 2~3			재생전력 대량공급 ▼	('40) 재생E 연계 전기가열로 보급 및 기존 가열분해로 20% 대체
		전기가열 분해 및 전기화학적 합성공정 요소기술 개발 및 실증		상용화	
		에너지절약형 나프타 분해/ 신개념 COTC/ 저에너지 분리소재·공정 기술 개발 및 실증 상용화			

■ 정부의 집중지원이 필요한 기간 ◎ 상용화 시기 ▼ 타분야 기술연계 ● 해외 연계

기대효과

탄소중립 원료·제품 생산 및 그린化 新공정 적용으로
석유화학 부문의 저탄소 산업 전환에 기여

정책 동향

세 계 탄소 고배출 산업인 석유화학 산업에 대한 탈탄소화 압력이 거세짐에 따라, 지속가능한 석유화학 산업으로의 전환을 가속화하기 위한 생태계 구축, 규제 도입 등 정책적 지원 강화 활발

EU 2021년 플라스틱세 시행, 2023년 탄소국경세 도입하여 순환경제사회로의 이행 추진

미국 탄소국경세 도입 선언 및 셰일가스 개발 제한 시도

중국 2060 탄소중립을 목표로 석유화학 업종 탄소배출량 정점 도달 실현 목표

국 내 석유화학 산업구조 저탄소화 및 신산업 육성을 위한 기술개발 지원 확대, 투자여건 개선, 민관협력 강화 추진

※ 민·관 소통창구 마련, 석유화학 탄소중립 시나리오 수립 등을 위해 석유화학 탄소제로위원회 출범('21.2) 및 대규모 R&D 사업 기획 중

시장현황 및 전망

세 계 유가의 불확실성, 탄소배출 규제 등으로 인해 기업의 채산성이 악화되었으나, 일상생활 뿐만 아니라 에너지시스템 현대화에서도 석유화학 제품은 널리 활용되고 있어 석유화학 제품 시장은 성장세를 유지할 전망

- ※ 석유화학 제품 시장규모 : ('21) 540조 원 → ('30) 약 870조 원 (Globenewswire.com, '21)

국 내 에틸렌 생산능력 기준으로 세계 4위, 2020년 기준 28.7조 원(248억 달러)규모의 무역흑자 시현

기술개발 현황

탄소중립 원료 활용 납사에 의존적인 원료 구조를 바이오매스, 폐플라스틱, 부생자원으로 대체하기 위한 연구개발 활발

- BASF, SABIC, 한화솔루션 등 폐플라스틱 화학원료화 프로젝트 추진
- Natureworks, BASF, DOW 등 생분해성 플라스틱 원천/상용화 기술개발 추진

공정탄소 저감 운전 최적화에 의한 효율향상 및 탄소저감의 한계를 극복하기 위한 공정 전기화 및 신공정 도입 연구 본격화

- BASF, DOW, Shell 등 석유화학 핵심유닛 크래커 전기화 연구개발 착수

산업 동향

세 계 '대량생산/선형경제'에서 '지속가능/순환경제'로의 패러다임 전환에 대응하기 위한 글로벌 석유화학업계의 생존 노력 가속화

- BASF '2050 탄소중립 넷제로 달성' 선언
- 석유기업, 제품 수요기업 등 밸류체인 내 동종/이종업종간의 기술제휴, 공동투자를 통해 원료 다변화, 제품 포트폴리오 차별화 추진

국 내 국내 석유화학업계는 대내외적인 환경변화에 대응하고 미래 먹거리 창출을 위하여 자체적인 탄소중립 목표를 설정하고 탄소중립 성장 가속화

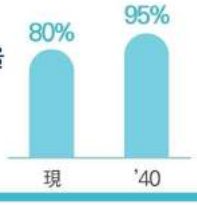
- LG화학 '2050 탄소중립 성장 선언', 롯데케미칼 '2030 탄소중립성장' 선언 등 RE100 추진, 설비/공정 개선, 친환경제품 개발 등의 분야에 투자 확대

Ⅲ. 산업공정 고도화

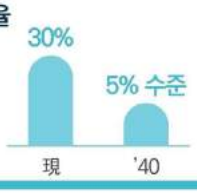
목표 산업 온실가스 제어 및 효율 극대화

| 핵심지표 |

▶ 반도체·디스플레이 공정가스 배출저감기술 효율



▶ 산업공정 에너지효율 설계 오차



혁신전략

현황·이슈	기술개발	정책·제도
① **공정가스** 지구온난화지수(GWP)는 **CO_2의 수 백~수 만배*** ② **제조업 중심 경제구조, 산업공정 에너지효율 향상**이 탄소중립에 필수** * 주요 공정가스 GWP100 (CO_2=1) : NF_3 16,100, CF_4 6,500, c-C_4F_8 8,700, CHF_3 11,700 ** 향후 20년간 에너지 관련 온실가스 감축의 40% 이상이 효율향상으로 감축(IEA, '20) ※ 재생에너지, 미래차 등 전력반도체 수요 증가 ('19년 약 450억$ → '23년 약 530억$)로 반도체 산업 확장으로 인한 공정가스 배출량 증가 전망	① **고(高) GWP 공정가스 대체·제어·인증** 기술 ② 산업효율 향상을 위한 **스마트 그린 기기·공정·공장 고도화 기술** 개발 추진 • (단기) 배출가스 저감효율 향상기술과 (중·장기)신규 저(低)GWP 공정가스 개발의 2-Track 추진 • 실증 및 사업화를 위한 수요업체, 제조 업체와 기술전문가의 협업체계 및 테스트베드 인프라 구축 추진	개발된 대체·효율화 기술의 실제 산업 적용을 위한 **공인인증체계 확립 등 현장 도입 유인책 강구**

산업공정 고도화 기술개발 전략

중분류	현 수준	단기(~'25)	중기(~'30)	장기(~'50)	목표
반도체·디스플레이 그린공정 개발	저감효율 80%	배출제어 시스템 고도화	시스템 실증·상용화		('40) 저감효율 ≥95%
		친환경대체가스 기술 확보		적용 및 양산 기술 개발	('40) 친환경가스 양산기술
	GWP요소 기술개발 중 최고 대비 85% 수준	GWP 국가 인증체계개발	Global GWP 인증체계개발	GTP 측정기술개발	('30) GWP글로벌인증체계
		반도체·디스플레이 고효율·저전력 소재기술	반도체·디스플레이 고효율·저전력 제조기술	사업화	('30) 고효율 전력반도체 집적화·공정 기술 확보
산업기기·공정 효율화	에너지원단위 0.150 TOE/백만원	요소기술개발	핵심 소재 개발 및 기기 효율 향상	사업화	('40) 에너지원단위 0.119 TOE/백만원 ('30) IE5급 전동기 상용화
	현장오차 30%	AI FEMS 및 공정설계 최적화 지원 에너지 트윈 개발		실증	('30) 에너지트윈 현장오차<5%
	효율개선 2~5%	스마트팩토리 센서·시스템 및 공장맞춤형 시스템개발	상용화		('30) 그린스마트팩토리 에너지절감율 10%

■ 정부의 집중지원이 필요한 기간

기대효과

공정가스 배출 제어 및 친환경 공정 전환,
산업 기기·공정·공장의 **에너지효율 극대화**로 산업공정 저탄소화 실현

※ 예) '30년 친환경 대체가스 기술 확보로 고(高)GWP 온실가스 활용 공정에 GWP 150이하 신규 공정가스 확보

정책 동향

세 계 주요국의 잇따른 탄소중립 선언에 따라 관련 정책 및 제도 마련 중

EU 2050 기후중립 목표 발표와 함께 탄소국경세 도입 추진 중 ('23년 시행 예정)

중국 '14차 5개년 계획('20.10)'에서 오염물질 배출저감 및 효율향상 등 6대 목표 발표

국 내 산업에서 배출되는 불소계 온실가스의 감축 목표 향상 및 산업부문 에너지 효율 향상 추진 중

- '반도체·디스플레이 탄소중립위원회' 출범 및 대표기업 4개사 '2050 반도체·디스플레이 탄소중립 공동선언문' 선언
- 선진국형 고효율·저소비로 전환을 목표한 제3차 에너지기본계획('19.6), 에너지효율 혁신전략('19.8) 및 제6차 에너지이용 합리화 기본계획('20.8) 발표

시장현황 및 전망

반도체·디스플레이 그린공정 개발 친환경차 보급 확대 및 신재생에너지 활용 요구 증대에 따른 전력 반도체 수요 확대, OLED 비중 확대 등으로 지속적인 시장 성장과 스크러버 시장의 동반 성장 전망

- 반도체 공정 및 전력기기 시장은 GWP가 낮은 신규 온실가스를 이용한 친환경 기술개발이 활발하며 추후 관련 시장 지속 확대 전망

※ 반도체공정 Low-GWP 신규 온실가스 사용량 전망: ('20) 0 ton/yr → ('30) 1,300 ton/yr

산업기기·공정 효율화 산업부문 온실가스 감축 효과를 위해 IoT 및 AI기술이 결합된 고효율·지능화 산업기기, FEMS, 그린 스마트팩토리 등 산업기기·공정 효율향상 확대 추진

- 10만 TOE이상의 에너지 다소비 기업의 FEMS 설치 의무화 시행('25년)에 따라 FEMS 시장 지속 확대 전망

기술개발 현황

반도체·디스플레이 그린공정 개발 온실가스와 NO_x를 동시에 저감할 수 있는 처리기술과 Low-GWP 소재 개발에 초점

- 제품 성능의 고도화, 정밀화에 따라 공정가스 사용량과 종류가 다양해져 배출가스 제어기술의 고효율 및 소형화 장비에 대한 연구 진행 중
- Low-GWP 대체소재는 3M, Honeywell 등 글로벌 불소화학 기업 중심으로 개발·제조·판매 되고 있어 해외의존도가 매우 높고 선제적 특허출원으로 기술 장벽이 매우 높은 실정

산업기기·공정 효율화 혁신적 온실가스 감축을 위해 에너지 다소비 공정·공장 중심으로 효율향상 기술 개발 중

- 고온(200℃급) 히트펌프, IE5급 차세대 전동기, IoT 기반 공정 효율 최적화 등

산업 동향

반도체·디스플레이 그린공정 개발 온실가스와 NO_x를 동시에 저감할 수 있는 처리기술과 Low-GWP 소재 개발 절실

- 공정가스 배출제어는 초기 선도국의 기술을 수입 했었으나, 국내 전자산업의 발전에 따라 내수시장의 대부분을 국내 중소기업이 주도 중
- 온실가스 검증·인증 측정과 관련하여 신규 개발 온실가스의 GWP값 측정을 위한 인증기관 전무

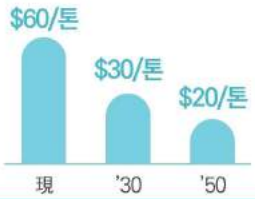
산업기기·공정 효율화 에너지 다소비 공정을 중심으로 선도국과 기술격차를 좁히기 위해 노력 중이며 다양한 효율 향상 시도들이 시장에 반영되는 중

Ⅳ. CCUS

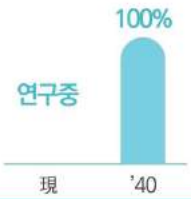
목표 CCUS 상용화 기술 확보

| 핵심지표 |

▶ CO_2 상용급 포집 가격경쟁력



▶ CO_2 전환 제품 가격경쟁력 (기존 시장가 대비)



혁신전략

현황·이슈	기술개발	정책·제도
① 고비용 및 **상용화 불확실성*** ② **국내저장소 미확보** 및 낮은 사회적 수용성 ③ **민간투자 유인책 부족** * 미국, 노르웨이 등에서 원유생산 시 CO_2 주입을 통해 원유회수율을 증진하여 경제성을 확보하는 기술을 상용화하였으나, 순수한 CCUS기술은 상용화 가능성 불확실	① **혁신소재 개발, 효율향상, 대형화**로 비용 저감 ② 국내 환경(배출원, 저장소, 시장수요) 기반 **실증연구를 통한 검증·안전성 확보** · 포집-저장 연계 기술개발을 통한 대규모 CO_2처리, 수익창출 가능한 포집-활용 제품화 가속을 위한 산·학·연 공동개발 방식 추진	**CCS 사회적 수용성 확보** CO_2이송·저장·활용 관련법령 정비, 국가 관리·평가 체계 구축 및 **민간 확산을 위한 인센티브 도입**

CCUS 기술개발 전략

중분류	현 수준	단기(~'25)	중기(~'30)	장기(~'50)	목표
포집	포집비용 $60~70/톤	연소배가스 포집 중/대규모 실증		CCS 사업 추진	포집 비용 저감 ('30) $30/톤 ('50) $20/톤
		산업공정 및 기타 포집 기술 개발		대규모 실증 및 상용화	
			◎ 일부기술상용화		
저장	100 톤 시험 주입	저장소 확보 및 중·대규모 실증		상용화	('30) 잠재용량 확보 ('50) 대규모 저장
활용	파일럿 실증	연료·화학제품 핵심 기술개발 및 공정최적화		상용화 확대	기술 상용화
			◎ 일부기술상용화		('25) 기술경쟁력 확보 (선진국 대비 90%)
		광물탄산화 제품 실증 기술 개발	상용화		('40) 가격경쟁력 확보 (現 시장가 대비 100%)
		차세대 탄소소재화 핵심 기술 개발		상용화	

■ 정부의 집중지원이 필요한 기간 ◎ 상용화 시기

기대효과

'50년 연간 일정규모 이상의 CO_2 저장* 및 약 5조원 규모의 CCU 신산업 창출 기대**

* 국산 포집기술 비용혁신과 상용화 및 적극적인 국내·외 해양저장소 확보를 통한 CCS사업 확대 시
** 경제적인 CCU신기술 도입을 통해 '17년 생산량 및 가격 기준, CCU 기반 주요 제품이 석유화학제품(경유, 플라스틱 등) 10% 대체 시

정책 동향

세 계 주요국은 CCUS 대규모 실증과 상용화 확대를 위해 법·제도·재정 지원 방안을 마련하여 관련 시장과 산업을 육성 중

미국 「45Q Tax Credit」 정책으로 포집·처리된 CO_2당 최대 50달러 세액공제 혜택 제공

호주 「기후변화대응 저탄소 기술로드맵('20)」 수립, 정부가 집중 투자할 우선순위 기술에 CCS 포함

중국 「CCUS 기술발전로드맵('19)」 수립을 통해 2050년까지 단계별 중장기 목표 및 발전방향 제시

일본 CO_2 포집 및 활용 활성화를 위한 「탄소 재활용 로드맵('19)」 수립

국 내 「제3차 녹색성장 5개년 계획('19)」을 수립하여 'CCUS 원천 및 실증기술 확보' 계획을 마련하고, 「탄소중립기술혁신로드맵('21)」 및 「CCU 기술혁신 로드맵('21)」 발표를 통해 관련 R&D 추진기반 마련

시장현황 및 전망

세 계 CCUS 기술은 전 세계적으로 시장이 형성되기 시작하는 단계로, 배출권 시장 확대 등으로 인하여 향후 큰 폭으로 성장 가능할 것으로 전망

※ 현재 글로벌 CCUS 시장은 2020년 27억 달러 규모에서 연평균 성장률 4.6%로 2025년 33억 달러 전망

국 내 현재 관련 시장은 미형성 단계이나, 탄소중립 선언에 따른 CCUS 기술수요 및 기업 관심도 증대로 시장 형성 가능성 향상

※ CCUS 국내 시장은 연평균 7.6% 수준으로 전망

기술개발 현황

포집 미국, 캐나다, 노르웨이 등에서 포집된 CO_2와 EOR(Enhanced Oil Recovery)을 연계하여 수백만 톤/년 이상의 포집 기술을 개발 중이며, 국내 포집 기술은 선진국 대비 70~90% 수준

저장 대규모 저장의 경우 수용성 확보를 위해 해양 지중저장이 활발하게 추진되고 있으며, 노르웨이와 호주는 세계 최대 규모의 해양 CCS 프로젝트를 운영

※ 국내는 저장기술 자립화 및 중규모 해상 저장 실증 연구를 추진 중으로, 포항 영일만 해상에 100톤 규모 시험주입 성공

활용 전세계적으로 CO_2 활용기술 개발연구가 확대되고 있으며, 건축소재 및 메탄올, 폴리우레탄 등의 화학제품 생산 등 일부 기술은 상용화 단계에 진입

※ 국내는 화학·생물전환, 광물화 기술 개발을 통하여 연료, 화학제품, 건축소재 등을 핵심 소재 및 공정 요소기술을 확보하고 있으며, 파일럿 규모의 실증 연구단계 추진 중

산업 동향

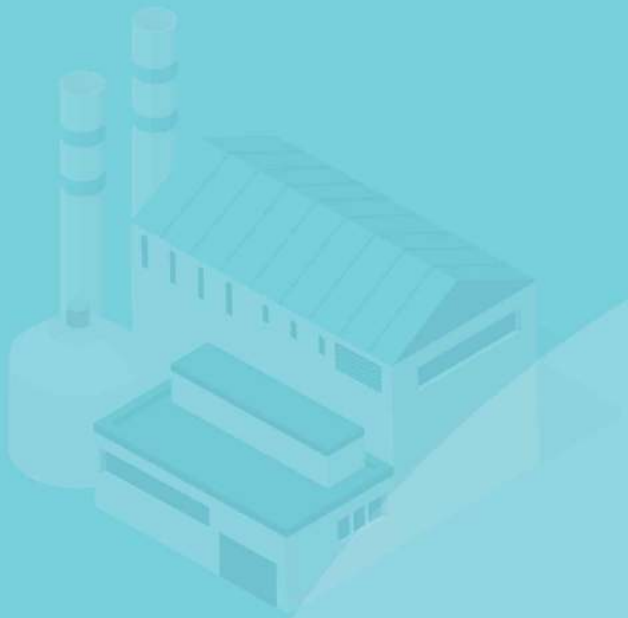
포집 전 세계적으로 석탄화력, 시멘트, 철강, 석유화학 산업에서 CO_2 포집 실증 진행 중

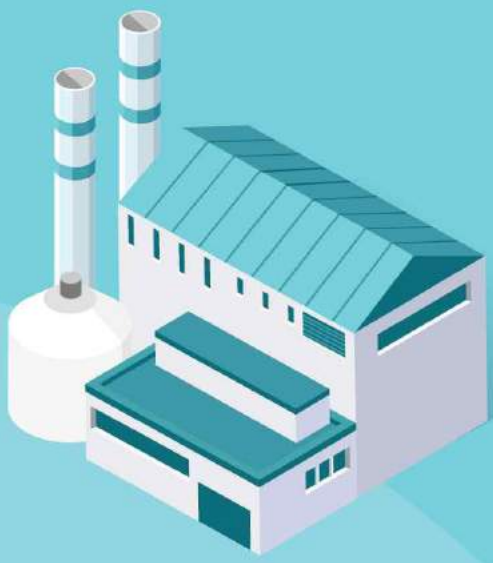
저장 2017년 이후 상업적 CCS 프로젝트는 저장용량과 사업 수가 지속적으로 증가하고 있으며, 2020년 전 세계 상업규모 CCS 사업은 28개 사업에서 연간 저장용량 40백만 톤(Mtpa)규모로 운영 중

※ 저장용량 : ('19) 37백만 톤/년 → ('20) 40백만 톤/년

※ 총 사업수* : ('19) 51개 → ('20) 65개
* 운영, 건설, 설계, 계획 중 사업 포함

활용 전세계적으로 정부·민간 주도의 다양한 CCU 프로젝트 추진 중





철강·시멘트

Ⅰ. 철강·시멘트 기술개발 전략

1. 개요 9
2. 국내·외 현황 10
3. 핵심기술 구성 및 선정 배경 21
4. 비전 및 목표 22
5. 중분류별 추진전략 23

1. '철강·시멘트' 개요

온실가스 다배출 자원을 사용하는 기존공정을 온실가스 저배출·무배출의 에너지 효율적 친환경 철강·시멘트 제조로 전환하기 위한 소재·부품·공정·장비·설비 기술

	저탄소/무탄소 그린 제철 기술	탄소 저감형 친환경 시멘트 기술
정의	온실가스 다배출 탄소 연·원료 제철 기술 한계를 극복하기 위한 혁신 저탄소/무탄소 연·원료 그린 제철 기술	석회석 채광에서부터 반제품인 클링커를 주재료로 건축· 토목용 기초 원료인 시멘트를 생산하는 산업의 탄소저감형 친환경 시멘트 제조·재활용 기술
필요성	세계적 에너지원단위 효율성을 보유함에도 불구하고 국내 철강 산업은 온실가스 국가전체 배출량 16%와 산업부문 30%를 차지해 국가 탄소중립 목표 설정에 혁신 및 신기술 개발이 필요	시멘트산업에서의 온실가스 배출량은 39백만 톤('19)으로, '19년 기준 산업계 총 발생량의 10%, 국내 총 발생량의 5.6%를 차지하여, 이에 대한 체계적 탄소배출 저감 방안 도출이 시급

2. 국내·외 현황

1) 정책 및 제도 동향

정책

- 각국의 잇따른 탄소중립 선언으로 철강·시멘트 산업의 2050년 온실가스 감축 기여가 필요하며, 주요국은 소재 경쟁력 강화를 위한 철강·시멘트 산업 구조 고도화 및 친환경 신공정 R&D 지원

EU

2050년 탄소중립 선언 및 철강·시멘트 산업의 그린화 선도

※ 청정에너지 인프라 및 혁신기술 투자 확대(~'30년 1조 유로), 시멘트 산업의 5C 밸류체인(Clinker, Cement, Concrete, Construction, Re-Carbonation)에 따른 온실가스 감축

· **(독일)** 연방교육부(BMBF)의 친환경 철강생산을 위한 연구개발 사업 지원(Carbon2Chem, '16~)과 R&D 성과 상용화 지원 확대 및 독일시멘트협회 2050년 탄소감축 목표 설정*

※ Salzgitter AG社와 MACOR社는 후속 사업인 BeWiSe를 통해 제강 공정 석탄의 그린수소 대체 경제성 확보에 대한 필요 기술의 탐색적 연구 지원

* 2019년 2,000만 톤 기준 시나리오1(1,290만 톤, 36% 감축) 및 시나리오2(배출량제로)

영 국

영국광물생산협회 2050년 감축 목표 설정*

* 1990년 대비 시나리오1(81% 감축) 및 시나리오2(62% 감축)

일 본

2050년 탄소중립 선언 및 탄소중립 기술개발 기금 조성(10년 간 2조 엔)

· 환경친화적 신제철 공정 R&D와 철강 산업의 에너지 효율적 설비 도입을 지원하는 금속소재 산업경쟁력 강화 플랜

· '탈탄소사회를 지향하는 시멘트 산업의 장기비전'을 설정해 2050년 80% 감축목표 발표

중 국

2060년 탄소중립 선언 및 비화석연료·재생에너지로 에너지믹스 전환 중

· '중국제조 2025'를 통해 철강소재 자급률 95% 목표 달성을 위한 소재, 제련, 성능조정 및 성형, 고효율 생산, 녹색 제조 및 설비 등 개발 지원

한 국

정부의 탄소중립 목표 수립 및 기업의 적극적 동참 약속

· 6개 대표 철강기업 '2050 탄소중립 공동선언문' 및 7개 대표 시멘트 기업 '2050 탄소중립 도전 공동선언문' 서명·발표('21.2)

제도

- 탄소중립 목표달성을 위한 국가 차원의 철강·시멘트 산업 지원

EU

탄소국경세(2023년 도입 예정) 등 관련 제도 입안 및 시행 중

※ 철강 등에 대한 전환기금 조성 등 산업보호조치 병행

· **(독일)** 2020년 배출감축 목표 포기 시인 후 2030년 55% 감축 목표 재설정 및 손실 보충을 위한 빠르고 엄격한 정책 실시 예고, 탄소세 부과('21)

※ 일부 산업(철강, 화학 등)의 최소한의 배출 필요성을 인정하고, 신공정을 이용한 기존공정 대체, 탄소포집을 위한 국가 단위 연구개발 프로그램을 대안으로 제시

미 국

바이든 정부 공약*을 통해 기후·에너지 투자 확대 및 자국 산업 보호계획을 발표하였으며, 관련 제도 등 마련 중

* 청정에너지, 저탄소 혁신 등 기후·에너지기술 투자 확대(~'35년 2조 달러), 2035년 Pollution-free 전력 생산, 파리협정 재가입, 탄소국경조정 도입, 세제혜택 및 인센티브 제공 등

중 국

2060년 탄소중립 목표선언에도 불구하고, 각 산업의 CO_2 배출현황 자료가 부족하여 국가 차원 DB 구축 등 고강도 제어정책 시행 전망

일 본

에너지기본계획('18)을 통해 탄소중립 비전 발표 및 탄소중립을 위한 정치, 경제, 사회 차원의 전방위적인 협조를 호소

한 국

배출권거래제 시행('15) 및 2050 탄소중립 추진전략('20.12) 발표*

· 기업 지원(녹색 금융), 탄소포집 및 신재생에너지 등 국가 지원 기술 개발 등의 제도 도입을 검토 중

2) 시장동향

세계

- 국가 기간산업으로 분류되는 철강·시멘트 산업은 산업성장 및 경제상황, 특히 개도국의 상황에 따라 수요의 변동이 발생하는 분야이지만 생산량은 현 수준을 유지할 전망

저탄소/무탄소 그린 제철 기술	• 철강생산량 약 18억 톤(CO_2 배출량의 8%) · 철강산업은 금속소재분야 핵심 기초 주력산업이자 자동차·조선·기계 등 주요 산업 성장에 큰 영향을 미치는 기간산업으로 신흥국(중국, 인도, 아세안 등)이 성장 주도 · 세계 철강시장은 2021년 7,226억 달러 규모('16년 6,156억 달러에서 연평균 3.3% 성장) ※ (세계 철강 생산량) 2000년 8.5억 톤 → 2020년 18.8억 톤(World Steel Association, '20.4), 세계 철강 생산량의 증가는 중국의 생산량 추이*에 기인 * 중국의 세계 철강 생산 비중 2000년 15.0% → 2020년 56.7%(World Steel Association 통계 기준) ※ (철강 생산국 순위, '20) 중국 10.6억 톤, 인도 1.0억 톤, 일본 0.83억 톤, 미국 0.73억 톤, 러시아 0.72억 톤 및 한국 0.67억 톤 순 · 2015년 이후 수요 증가세 부진과 개도국 설비 확장에 따른 공급과잉(초과생산 능력 연평균 6억 톤 이상) 및 낮은 가동률(평균 73%) 야기 · 철강 생산은 크게 고로와 전로를 연계한 일관제철 공정*과 전기로를 포함한 전기로 공정**으로 구분 * 생산량의 70%, 철광석·석탄으로 쇳물제조 과정에서 90% 이상의 CO_2 직접 배출 ** 생산량의 30%, 다량의 전력을 사용하는 전기로에서 65% 이상의 CO_2 간접 배출 ※ 연·원료 품질 저하로 최근 다년간 탄소 배출 원단위 증가 추세, 1980년대 이후 고로 내 환원제(코크스량+미분탄량) 사용비 500 kg/t-p 유지
탄소저감형 친환경 시멘트 기술	• 시멘트생산량 약 41억 톤(CO_2 배출량의 5%) · 시멘트산업은 현대 사회의 근간이 되는 산업이며 시멘트 생산량은 경제 상황 및 저개발국가의 수요에 따라 유지 및 소폭 증가 전망 ※ (세계 시멘트 생산량) 2010년 32.8억 톤 → 2019년 41.0억 톤(최고 '14년 41.9억 톤) ※ (생산국 순위, '19) 중국 23억 톤, 인도 3.4억 톤, 베트남 1.0억 톤, 미국 0.9억 톤(한국 0.5억 톤) · 시멘트산업은 세계 온실가스 배출량의 3.7%, CO_2 배출량*의 5% * 배출비율(공정배출 60%, 연소배출 30%, 기타 10%), 시멘트 클링커 톤당 약 800 kg 이상

국내

- 국가 제조업 내 큰 비중을 차지하는 철강·시멘트는 대표적 온실가스 다배출산업으로 탄소중립목표 달성을 위한 혁신 기술 필요

저탄소/무탄소 그린 제철 기술	• 철강 생산량* 6,710만 톤('20년 기준) * 국내 철강 생산량은 세계 6위 수준이며 국민 1인당 환산시 세계 1위, 수출 세계 3위 ※ 2019년 CO_2 배출량 1.17억 톤(전체 배출량의 16%, 산업부문의 30%)이나 국내 철강산업의 에너지 원단위는 세계 최고 수준으로 에너지 절감 가능성은 중국·인도의 1/4, 유럽의 2/3에 불과 · 자동차·조선·건설·전기전자·기계를 포함한 전방 산업이 대부분 경기의 영향을 많이 받기 때문에 철강산업은 경기변동에 민감도가 높고, 원재료 해외 의존성 및 고정비 부담이 큰 대규모 자본·에너지집약 산업 · 철강산업은 사업체·종사자수 대비 국가 제조업 내 큰 비중 차지 ※ 생산액 99조 원(제조업 중 6.3%), 수출액 310억 달러(4.1%), 부가가치 23조 원(4.1%) · 제조된 철강의 30% 정도가 수출되고 있으며, 국내 자동차·조선 생산량의 감소 및 건설 시장의 리모델링 중심으로 전환, 중국·일본산 철강재의 국내 유입 증가 등으로 국내 철강 생산량 성장 억제
탄소저감형 친환경 시멘트 기술	• 시멘트생산량 5,064만 톤('19년 기준, 세계 11위) ※ 2019년 CO_2 배출량 3.9천만 톤(국가 전체 배출량의 5.6%, 산업부문의 10%) · 시멘트산업은 에너지 다소비 업종이며 건설 경기에 민감 · 2018년부터 시멘트 수요 감소세로 경영실적 악화 우려 ※ 2013년까지 건설경기 악화, 원자재 가격 상승, 낮은 시멘트 가격, 업계 과잉경쟁 등으로 적자를 지속하다가 2014년 이후 흑자로 전환 · 시멘트 국내 수요 2019년 4,900만 톤(최고 '97년 6,000만 톤) · 시멘트 수출 2019년 650만 톤('11년 1,000만 톤 기록) ※ 내수 감소에 따라 수출량이 증가하는 등 국내 소비량에 따라 수출량 변동

3) 기술동향

저탄소/무탄소 그린 제철 기술

- 수소환원제철 등 제철 분야 탄소 감축을 위한 연료 대체 연구 진행 활발

수소환원제철 철강 기술	• 탄소 및 탄화수소 기반 환원철 제조를 수소환원철 제조 전환 기술 · (선도국) 기존 제철 기술의 연료의 부분 또는 전량 수소로 전환에 대해 전세계 철강사 중심으로 실험실과 파일럿 규모의 산학연 공동 연구 진행 ※ 독일(SALCOS, 수소직접환원기술), 미국(DOE, 수소용융환원기술), 일본(COURSE50, 고로 함수소 가스 전환기술), 스웨덴(Hybrit, 수소직접환원기술) 등 · (기업) 기존 제철 기술의 온실가스 배출감축을 위해 수소 기반 직접환원철을 제조하는 Midrex, HYL 등에서의 철원을 활용하는 기술을 개발하고 있으나 펠렛 원료에 대한 수급 불안정 · (국내) 탄소 기반 고로 철강 공정에서 함수소 가스 개질을 통한 수소 고로 취입 기술 등을 통해 15% CO_2 저감을 목표로 2017년부터 COOLSTAR 국책 연구개발 진행
고로 혁신 철강 기술	• 고로에 CCUS 접목 용이성과 연·원료 소비효율 개선 위해 공기 대신 순산소 취입하는 기술 · EU는 2000년 초반 고로에서 발생하는 CO와 H_2 배가스 재취입을 위해 ULCOS TGRBF 프로젝트를 추진했으나 CCUS 처리 문제와 기술 개발 지연, 고비용 등 경제성을 이유로 연구 중단 · 일본의 JFE와 중국의 보무강철은 고로 공정에서의 순산소 취입과 CCUS 도입에 대한 연구 진행 중이나 한국 대비 기술 성숙도 열위에 있음
폐자원 다량 사용 철강 기술	• 스크랩, 더스트, 슬러지, 플라스틱을 포함한 폐자원을 고로, 전로나 전기로에서 다량 사용하는 기술 · 온실가스 추가 감축을 위해 일관제철소에서 용선과 함께 사용되는 스크랩 비율 25%(현 15%) 이상의 스크랩 다량 사용 기술 필요 ※ 2013년 포스코 PS-BOP과 같은 복합 취련기술 개발이 이루어져 용선비 저감 가능성 확인했으나 스크랩 분류 어려움, 공정 중의 손실, 고철 수급 문제, 구리 오염 등의 저급화 또한 기술 개발 제약 요소로 작용 · 제철 공정에서 다량 발생하는 함철 부산물('17년 3,400만 톤)과 외부반출시 폐기물 처리비용 및 2차 환경오염으로 연결되어 유해 폐기물로 지정 및 전로·전기로 발생 제강 부산물(1,000만 톤)을 공정 중 재활용하는 연구 진행 · 플라스틱·타이어 소비 및 폐기 확대에 따라 고분자화합물을 고로를 포함한 전로와 전기로에 재투입하는 기술을 개발 ※ (일본 JFE) 2004년부터 플라스틱을 연간 5만 톤 이상 취입 (독일·오스트리아) 열원으로 활용 중 (호주) 폐타이어 재활용으로 전기로 에너지 430 MJ/톤 감축

탄소저감형 친환경 시멘트 기술

- 시멘트산업 온실가스 저감을 위해 주요국은 비탄산염 원료 사용, 순환연료 대체, 혼합재 함량 증대 및 신규 혼합재 개발, 친환경 열원 사용 등을 추진 중

비탄산염 원료 시멘트 기술	• CO_2 없는 비탄산염 원료 활용 확대 기술 · 선진국들은 비탄산염 원료로 철강슬래그, 석탄재 및 소각재 등을 사용 중이며, 염소 제거 등의 전처리 방법도 다양하게 적용 중 · 비탄산염 원료 사용으로 공정배출 CO_2 감축과 함께 클링커 소성온도 저감으로 연료배출 CO_2 감축에도 기여 가능
가연성 순환자원 시멘트 기술	• 화석연료의 순환연료 대체율 증대 기술 · 철강산업과 같이 세계적으로 매립 및 소각되는 가연성 플라스틱 및 타이어 폐기물을 시멘트 연료로 대체 사용하기 위한 설비 및 공정기술 개발이 활발하게 진행 · EU, 호주 등 선진국은 가연성 폐기물의 연료화기술, 순환연료 대량 연소기술 및 대용량 염소 바이패스 시스템 및 바이패스 더스트의 대량 재활용을 위한 설비 및 공정기술을 개발하여 상용화 중
혼합재 시멘트 기술	• 시멘트 대체용 혼합재 함량 증대 및 신규 혼합재 개발 · 석회석은 CO_2 감축효과 및 경제성이 우수하며, 원료공급 용이하고, 콘크리트 특성 개선에도 기여하여 혼합재로서의 가치를 재평가 중 · 유럽은 석회석을 혼합시멘트용 혼합재(EN197-1)로 사용 중이며, 중국은 전로/전기로 슬래그 등도 일부 시멘트 혼합재로 사용
친환경 열원 시멘트 기술	• 클링커 소성열원으로 바이오매스 및 수소를 사용 · 세계적으로 시멘트 클링커 연소과정에서 폐목재/슬러지 등 바이오매스 사용 확대 중이며, 이를 위한 킬른 안정화 기술 개발 중 · 시멘트 공정에서 수소연소는 아직까지 적용된 사례가 없으나, 향후 온실가스 감축을 위한 하나의 방법으로 검토 중
CO_2 반응 경화 시멘트 기술	• 저탄소 및 CO_2 흡수 시멘트·콘크리트 개발 · 특수 클링커 광물 및 산업부산물을 활용하여 탄소배출이 적고, CO_2 양생을 통해 CO_2를 흡수, 고정화할 수 있는 시멘트 및 콘크리트 제조기술을 개발 중 · 대량 상용화는 미흡한 실정이며, 탄소중립 실현이 가능한 미래 혁신기술로서 미국, 유럽, 일본 등 선진국에서 다양한 연구개발 및 투자가 진행 중

4) 산업현황

저탄소/무탄소 그린 제철 기술

- 선도국의 철강社는 탄소중립 기술개발을 위해 산업 전반의 범위에서 범협력 체계를 구축하고 기술 개발 전략 수립 및 추진 중이나 개발 진행도는 여전히 낮은 상황

수소환원제철 철강 기술	• 수소를 이용한 수소환원철 기술 일부 국내·외 실험실 및 파일럿 규모로 진행 · **(유럽)** 한국, 일본과 달리 소형 제철소(연간 약 500만 톤 수준)를 운영하고 있으므로 수소환원제철 전환이 용이하며 정부-기업 연계 범 EU 프로젝트 지원을 기반으로 직접 환원철 또는 전기로 설비 기술을 보유하고 있는 엔지니어링사와 전력, 에너지 및 바이오 전문 기관 등과 협업하여 수소 제조, Green 전력 공급, 수소환원제철, 배가스 처리 위한 CCUS 기술 등에 대해 공동 개발(SSAB, 뵈스트알피네, 짤츠기타, 아르셀로미탈 등) · **(일본)** 대규모 장기적 정부 지원으로 고로 함수소 가스 취입 및 CCUS를 활용하여 2050년에 30% CO_2 저감의 목표로 R&D 추진하였으나 최근 정부 탄소중립 선언과 더불어 민관이 합동으로 수소환원제철 기술의 전략 재수립('21.5) 및 추진 중 · **(중국)** 2060 탄소중립 발표 후 보무강철을 주축으로 "중국 저탄소 야금 기술 혁신연맹" 구축 전략을 수립 중이며 원자력을 이용한 수소환원제철 기술에 대해 R&D 적극 추진 중이고, 수소 제조 및 공급을 위해 중국 칭화대와 원자력 전문 기관과 협업하여 원자력 수소환원제철 기술 개발을 단계적으로 추진하고 있음 · **(한국)** 포스코, 현대제철 및 전기로社가 2017년부터 참여하고 있는 COOLSTAR 사업으로 함수소 수소환원제철 기술과 스크랩 증량 기술 개발에 동참하고 있고 LPG와 LNG을 활용한 함수소 가스 고로 취입기술을 포스코에서 수행한 바 있음
고로 혁신 철강 기술	• 화석연료의 순환연료 대체율 증대 기술 · 순산소 고로와 CCUS 연계 고로 혁신기술은 유럽과 일본 중심으로 시험 고로에서 진행 중이며, 생산성 개선 확인 · **(유럽)** 아르셀로미탈社는 세계 조강 생산량과 유럽 내 온실가스 다배출 1위로서 탄소중립 단계적 추진 방향을 제시, 정부 연계 프로젝트 추진을 강조하면서 3C(Circular Carbon, Clean Power, CCUS)를 핵심 축으로 중장기 저탄소 혁신 기술 개발 제시하여 CCUS을 활용한 CO_2 분리/포집 제품 생산 기술 시사하였으며 스웨덴 LKAB의 시험고로를 활용하여 순산소 고로 조업을 시범적으로 실시한 결과 코크스 소비량을 30% 정도 감축 · **(일본)** JFE社가 1980년 순산소 고로 기술개발을 착수하고 실험실 수준 검증 결과 고로의 생산성을 50% 수준으로 개선할 수 있는 것을 확인

고로 혁신 철강 기술	· **(중국)** 소형 고로를 많이 보유하고 있어 신규 기술에 대한 상용화 수준에서의 테스트 및 전환이 용이하다는 장점을 보유하고 있어 향후 기술 개발 속도가 가속화 될 것으로 예상되나 유럽과 유사하게 시험고로에서 순산소 조업을 시행하여 코크스 소비량을 15% 정도 감축 · **(한국)** FINEX 유동환원 기술을 기반으로 순산소 제선 기술을 보유하고 있으며 국내 순산소 고로 기술 수준이 타 국가 대비 유리함
폐자원 다량 사용 철강 기술	• 폐자원을 전로나 전기로에서 다량 사용하는 기술이 일본과 독일 등에서 활발하나, 국내에서는 미미한 수준 · **(유럽)** 아르셀로미탈사는 Circular Carbon의 전략으로 폐자원/부산물 활용한 탄소원 대체 기술을 개발하고 있으며 독일과 오스트리아도 철강제조에 폐플라스틱을 활용하고 있으며 폐고철의 전로 내 혼합 비율도 25% 수준으로 일본과 한국 대비 5-10% 정도 높은 수준 · **(일본)** JFE 등은 연간 5만 톤 이상의 폐플라스틱을 고로와 전기로에 투입하면서 발생되는 CO와 H_2 활용 · **(호주)** OneSteel에서는 폐타이어를 전기로 내 탄소대체를 시도하였으며 탄소 투입량을 기존 대비 12% 감축

탄소저감형 친환경 시멘트 기술

● 선도국의 시멘트社들은 온실가스 감축을 위해 다양한 방안을 도출·적용 중

비탄산염 원료 시멘트 기술	● 선진국들은 비탄산염 원료를 적용 중이나, 국내는 미미한 수준 · 일본의 태평양시멘트 등은 서냉슬래그를 비롯한 다양한 비탄산염 원료 사용에 따라 2019년 CO_2 배출량을 1.72%(84만 톤) 감축 · 독일 및 네덜란드 등에서는 비탄산염 원료의 활용이 활발한 상황이나, 일부 국가들은 철강산업 기반이 구축되지 않아 적용이 불가능
가연성 순환자원 시멘트 기술	● 화석연료의 순환연료 대체율 증대 추진 중 · 가연성 폐기물을 시멘트 순환연료로 사용함으로써 에너지 회수와 함께 연소 잔재물의 시멘트 원료 활용이 가능하여 시멘트산업은 타 산업에 비해 가연성 순환자원 사용에 유리 · 국내 순환연료 대체율은 2019년 기준 24% 수준으로, 독일의 68%('18년 기준) 및 EU 평균인 44%에 비해 매우 낮은 수준이며 향후 공급체계 구축 및 설비·공정기술 개발에 따라 대체율 증대 여력이 높은 상황 · 순환연료 대체율 증대를 위한 연구개발 및 설비투자가 진행 중이나, 주로 해외 선진기술에 의존하고 있는 실정
혼합재 시멘트 기술	● 유럽은 다양한 혼합재 사용이 가능하나, 국내는 매우 한정적 · 유럽규격 EN 197-1에서는 혼합재 종류 및 함량이 다양하며, 캐나다 하이델베르그시멘트社 등에서는 석회석 혼합시멘트 등도 생산·판매 중 · 유럽시멘트협회는 혼합시멘트 활용으로 클링커 원단위를 2030년까지 74%, 2050년까지 65%로 감축 계획
친환경 열원 시멘트 기술	● 클링커 소성열원으로 바이오매스 및 수소를 연소 · 일본 태평양시멘트는 다양한 바이오매스 적용 중이며, 이를 위해 2020년 제반설비(이송, 저장 등) 구축 등 지속적 연구·설비 투자 중 · Lafarge Zementwerke, OMV 등은 2020년 7월 수소를 클링커 소성열원으로 사용하기 위한 MOU 체결 및 국가 연구개발 지원 추진
CO_2 반응 경화 시멘트 기술	● 탄소중립 시멘트·콘크리트 개발 초기 단계 · 미국, 유럽 및 일본 등에서 탄소중립 시멘트·콘크리트의 개발 및 상용화 실적이 있으나, 초기 단계로 대량 상용화 실적은 미흡 · Carbon Neutral에서 Negative까지 가능한 혁신적인 시멘트·콘크리트 기술에 대한 연구개발 및 상용화를 위한 투자가 진행 중

[철강·시멘트 주요 키플레이어 현황]

구분	국가	업체명	기술개발 현황
저탄소/무탄소 그린 제철 기술	유럽	SSAB	▸ HYBRIT 조인트벤처를 구성하여 3개 핵심 프로젝트(無화석원료 이용 펠렛 제조, 수소 이용 환원철 제조, 폐광산을 이용한 수소 저장기술)를 추진 중이며, 원료에서 반제품까지 화석원료 제로화 목표로 파일럿 진행 중
		TATA Steel	▸ 新제선 프로젝트인 HIsarna의 Scale-up 연구에 집중하며 북해 인접 조건 활용, CO_2 포집/공급 프로젝트 비중이 높음
		짤즈기타	▸ 수소환원 프로세스인 SALCOS 프로젝트를 중심으로 친환경 전력과 수소 공급을 위한 서브 프로젝트 실행 중
	중국	보무강철	▸ 소형 고로를 이용한 산소고로의 실증 기술 개발, 원자력을 이용한 수소환원제철 기술 개발 중
	일본	JFE	▸ 국립 산업기술종합연구소 주관으로 CCR연구회를 통하여 JFE 포함 32개 기관이 참여하면서 수소 환원 기술과 탄소 재활용 기술에 대한 기초 연구를 수행 중
		NSC	▸ NEDO의 주관으로 NSC 외 2개 철강사가 COURSE50에 참여하여 수소 고로와 CCUS에 대한 Pilot plant설비를 구축하고 상용화 전단계의 기술 개발 중
	한국	포스코	▸ 기존 국책과제로 추진하여 개발한 FINEX 기술의 유동환원로 기술을 기반으로 하여 수소 100% 활용 가능한 유동환원로 기술과 환원철 전용 전기로 기술 개발에 대한 추진 전략 수립 완료 ▸ 2040년까지 상용화 수준의 기술을 확보하여 2040년 이후 단계적으로 상용설비 전환 추진
		포스코, 현대	▸ 현재 추진 중인 COOLSTAR 국책과제에 개발 중인 고로에 함수소 가스 다량 취입 기술 등에 대해 상용화 기술 조기 확보(~'30) 추진

탄소저감형 친환경 시멘트 기술	프랑스	라파즈홀심	▸ 2030년까지 475 kg-CO_2/t-Ce', 2050년까지 탄소중립 달성 목표 선언, 주요 달성방안은 폐기물/부산물 재활용, 새로운 혼합재 개발 등 ▸ 효과적인 탄소가격 책정, 저탄소제품 장려, 탄소포집 기술과 같은 정책 지원 호소
	독일	하이델베르크	▸ 2030년까지 500 kg-CO_2/t-Ce', 2050년까지 탄소중립 달성 목표 선언, 주요 달성방안은 대체연료 사용 증대, 혼합재 사용 증대, 공장 효율 개선 등으로 구성 ▸ 탄소포집 기술 개발, 폐기물-시멘트-콘크리트 산업간 순환경제 시스템 구축을 중요한 2가지 요건으로 강조
	멕시코	세멕스	▸ 대체연료 사용 증대, 신재생에너지 적용, 혼합재 사용 증대로 2050년까지 탄소중립 달성 목표 선언
	일본	태평양시멘트	▸ 2050년 온실가스 80% 저감을 목표로 연료, 원료, 혁신기술 등 기술과 실용화 가능성 고려 감축 시나리오 설정(순환연료 배출 CO_2를 제외)
	한국	아세아시멘트	▸ 대체연료 사용 증대, 탈탄산원료, 혼합시멘트 기술을 이용해 CO_2 감축 목표 수립 및 연구 개발 중
		쌍용C&E	▸ 온실가스 감축 및 폐기물 유효 활용을 위해 순환연료 및 원료 사용 증대를 위한 연구개발 및 설비투자를 진행 중

3. 핵심기술 구성 및 선정 배경

중분류	현황 및 이슈	세부기술
저탄소/무탄소 그린 제철 기술	• 주요국 철강사들은 중장기적인 정부 지원을 기반으로 기존 설비에 대한 혁신기술 개발과 그린수소 기반 신기술 개발을 도모하며 탄소중립 전략 구축 중 • 수소 활용 제철 신기술은 국내외 모두 실험실과 파일럿 규모로 상용화를 위한 중장기적 투자와 연구개발이 필요 • 친환경 선도 철강사 모두 제철 기술과 함께 그린수소와 CCUS 기술을 바탕으로 탄소중립 가능성을 시사	① 한국형 수소환원제철 기술 ② 탄소저감형 저탄소 연·원료 대체 기술 ③ 자원순환형 초고속 전기로 공정 기술 ④ 철강 부산물 업사이클링기술
탄소 저감형 친환경 시멘트 기술	• 국내외 시멘트산업은 온실가스 저감을 위한 다양한 방안 도출 및 추진 중 • 주요국은 정부지원과 기업의 적극적 연구개발·설비구축 등을 통해 온실가스 저감을 위한 공동 협업체계 구축	① 비탄산염 원료 및 적용 기술 ② 가연성 순환자원 재활용 기술 ③ 혼합재 함량 증대 및 신규 혼합재 제조 기술 ④ 시멘트 생산 에너지 효율향상 및 친환경 열원 활용 기술 ⑤ CO_2 반응 경화 클링커 및 제품 제조 기술

4. 비전 및 목표

철강·시멘트 산업의 잠재적 온실가스 감축기술 확보

- ('30) 수소환원제철 및 저탄소 고로 혁신 기술 및 시멘트용 석회석 대체연료 및 혼합재 함량 증대
- ('40) 수소환원제철 수소 100% 달성 및 시멘트 순환연료 65% 이상 활용·생산공정 효율향상
- ('50) 그린수소와 CCUS 융합 및 수소환원제철로 탄소중립

철강·시멘트 기술개발 전략

중분류	현 수준	단기(~'25)	중기(~'30)	장기(~'50)	목표
저탄소/무탄소 그린 제철 기술	수소사용율 0% 상용고로 수소 직접 취입 0% 산소(30% 전기로 전력사용	수소환원제철 신기술 기초 설계 수소환원제철 혁신 기술 확보 ▼CCUS ('40) 실증/상용화 적용 ▼수소 연계('35) 저탄소 연원료 대체 혁신 기술 개발 실증/상용화 적용 폐자원과 폐열 및 부산물 재활용 기술 개발 실증 및 단계적 상용화 적용			('30) 수소환원제철 및 저탄소 고로 혁신 기술 개발 ('40) 수소환원제철 수소 사용율 100% 저탄소 고로(수소 20%, 산소 40%) 전기로 전력사용 저감율 ≥30% ('50) 수소환원제철 기술적용 탄소중립
탄소 저감형 친환경 시멘트 기술	석회석 대체자원 전무 순환연료 대체율 24% 신규혼합재 필요 수소버너 /적용 전무 소성온도 1,450 ℃	석회석 대체 기술 확보 상용화 적용 가연성 순환자원 활용 기술 개발 시스템 실증 및 상용화 혼합재 절감 기술 및 신규혼합재 개발 상용화 적용 생산공정 효율 향상 및 친환경 열원 활용 시스템 실증 및 상용화 ▼CCUS('30) CO_2 반응 경화 클링커 및 제품 제조 기술 시스템 실증 및 상용화			('40) 석회석 대체율 8% 이상 ('40) 순환연료 대체율 65% 이상 ('30) 신규혼합재 개발 1종 이상 ('50) 2 MW 버너개발 및 공정 적용 ('40) 소성온도 저감 150 ℃ 이상

■ 정부의 집중지원이 필요한 기간

기술개발	정책·제도
① 철강·시멘트 분야 탄소 다배출공정 탈피 ② 연료·원료 대체 혁신기술 개발	① 산업현장에 직접 적용하는 산학연 R&D 협업 체계 및 테스트베드 등 실증 인프라 구축 지원 ② 실용화를 위한 규제개선, 인증제도 마련 등 지원

5. 중분류별 추진전략

1) 저탄소/무탄소 그린 제철 기술

정의

- 온실가스 다배출 탄소 연·원료 제철 기술 한계를 극복하기 위한 혁신 저탄소/무탄소 연·원료 그린 제철 기술

한국형 수소환원제철 기술

탄소기반 연·원료의 고로기술에서 수소기반의 연·원료 유동환원로 기술

탄소중립형 저탄소 연·원료 대체 기술

탄소 다량 사용의 기존 제철기술에서 수소와 순산소의 하이브리드 연·원료 대체기술

자원순환형 초고속 전기로 공정 기술

고급 고철 기반의 전기로에서 다양한 고철 대체재와 폐자원을 다량 활용하는 전기로 혁신 기술

철강 부산물 업사이클링 기술

공정 내 온실가스 저감을 위한 철강 부생가스와 고체 폐기물의 활용과 고부가화 기술

기술개발 필요성

- 세계적 에너지 원단위 효율성을 보유함에도 불구하고 국내 철강산업은 온실가스 국가 전체 배출량 16%와 산업부문 30%를 차지해 국가 탄소중립 목표 설정에 혁신 및 신기술 개발이 필요

세부기술별 기술개발 목표

세부기술	현재국내 기술수준	단기 (~2025)	중기 (~2030)	장기 (~2050)		목표
한국형 수소환원제철 기술	수소활용율 0%	시험 반응로 함수소 가스 실증기술	수소환원 유동환원 데모 플랜트 건설	조업기술 완성	단계적 상용화	▪ ('30) 수소환원 데모 건설 ▪ ('40) 수소 100% 활용 Demo 수준 기술 완성 ▪ ('50) 수소환원제철 상용화
탄소저감형 저탄소연·원료 대체 기술	2톤 전로 상용고로 (수소 직접 취입 0%, 산소<30%)	시험고로 순산소 가스 실증기술	데모 플랜트 건설 및 조업 기술 완성	단계적 상용화	상용화 완료	▪ ('30) 300톤급 전로 상용화 ▪ ('40) 수소 20% 산소 40% Pilot 테스트 ▪ ('50) Demo 엔지니어링
자원순환형 초고속전기로 공정 기술	T.T.T. 50 min/heat 전기로 탄재 사용 20~40 kg/ton	폐자원 활용 및 고철예열 요소기술 확보	전기로 데모 설계 및 건설	조업기술 완성	단계적 상용화	▪ ('30) T.T.T. 35 min/heat 탄재원단위 <10 kg/ton ▪ ('50) 초고속 전기로 상용화
철강 부산물 업사이클링 기술	TRL 3~5	부생가스 분리/정제 및 고부가가치 재활용 기술	실증 및 사업화			▪ ('30) 조기 실증 및 상용화
		고체 폐기물 재활용 기술	실증 및 사업화			

현재 수행 중 또는 수행 예정인 R&D　　향후 정부의 R&D투자가 필요한 기술　　민간 부문에서 개발 예정인 기술

기술개발 추진방향

1 한국형 수소환원제철 기술(한국형 Green 철강 기술)

주요 이슈사항

탄소중립 목표달성 위한 수소환원제철 기술 개발

- 철강업 탄소중립 기여를 위해 에너지원을 석탄에서 수소로 전량 전환하는 철강공정 기술개발 필요
- 수소환원제철 전환에 따른 철강 및 후방산업 등 미래 국가경쟁력 확보 위한 국가적 R&D 개발 체제 구축 및 추진
- 국내 철강사가 보유한 FINEX 유동환원로 기술을 기반으로 하는 한국형 수소환원제철은 타 국가대비 수소환원제철 기술 개발에 유리하며 철강업의 위기를 극복할 新성장 동력으로 활용

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 수소유동로 기반 직접환원철(DRI) 제조 및 엔지니어링 기술
  - · 100% 수소 활용 분광 유동화 및 환원 최적화 기술
  - · 다단 연속 수소유동환원 공정 개발 및 최적화 기술
  - · 분광 수소 유동 환원 공정 Scale up 설계 및 실증 기술
- 수소환원철 용해용 전기로 공정 및 엔지니어링 기술
  - · 수소 환원 DRI 기초 물성 연구 및 DRI 전용 新전기로 공정 설계 기초 기술
  - · 수소환원철 기반의 新전기로 공정 개발 및 최적화 기술
  - · 철강 제품 생산을 위한 新전기로 기반 일관 공정(전기로-정련-연주)의 개발 및 최적화 기술

목표달성 전략

조기 상업화 위해 범산업계가 참여 가능한 R&D 시스템 구축

- 한국형 수소환원제철 기술개발 가속화를 위해 산·학·연을 통합한 별도의 범산업계 연구법인을 설립 후 자체적 기술개발 책임 추진 필요
- 한국형 수소환원제철 실험 Plant용 R&D 장치는 그린수소제조, 수소환원공정, 수소환원철용 전기로를 일관 통합 공정 형태로 설치하여 상용화 기술 개발 추진
- 블루수소 생산 원료인 천연가스, 가연성 폐자원, 바이오매스 등을 안정적으로 확보할 수 있는 방안 마련
- 수소환원제철의 조기 상용화를 위해 정부의 일관된 목표 하에 장기 대형과제로 전폭적 R&D 지원, 범산업계(수소생산업체, 설비 엔지니어링사, 한전 등) 및 국제 동조 연구 수행 필요
- 수소환원제철 실현을 위해 소요량이 대폭 증가가 예상되는 그린 에너지 및 수소 공급을 위한 국가적 인프라 구축 필요

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
수소유동로 기반 직접환원철 제조 및 엔지니어링 기술	· 철광석 환원 시 수소 직접 취입률 0%(현재) · 기술 수준: 세계 최고 수준 · 수소 100% 활용 개발 필요 · 포스코	· 수소 100% 활용 실험 실적 개발 중(유럽 SSAB 등)	· ('30) 수소 100% 활용 Demo 수준 엔지니어링 기술 확보 · ('40) 수소 100%활용 Demo 수준 기술 완성 · ('50) 수소환원제철 상용화 전환
수소환원철 용해용 초대형 혁신 전기로 기술 개발	· 수소환원철 용해용 전기로 기술 개발 필요 · 기술 수준: 공정 없음	· 수소환원철 용해용 전기로 기술 실험실적 개발 중(유럽 SSAB 등)	· ('30) 수소환원철 용해용 전기로 Demo 수준 엔지니어링 기술확보 · ('40) 수소환원철 용해용 전기로 Demo 수준 기술 완성 · ('50) 수소환원철 용해용 전기로 상용화 전환

2 탄소저감형 저탄소 연·원료 대체 기술

주요 이슈사항

기존 탄소 다배출 공정 내 무탄소 연·원료(수소 등) 일부 대체 혁신 기술 개발 및 단기·중기 온실가스 저감 추진

- 탄소중립 목표달성을 위한 장기 혁신 기술인 한국형 수소환원제철 기술의 안정성, 상용화 시기, 현 설비의 매몰비용(약 36조 원 등) 및 제조 제품의 경제성 등 고려해, 現 CCUS 연계 탄소 중립형 고로-전로-압연 공정의 저탄소 연·원료 대체 혁신 기술의 이원화 필요
- 현 철강 공정에 적용 가능한 혁신 기술로 단기/중기 적용 기술을 포함해 2050 탄소중립 구현 과정 중 온실가스 저감 동시 추진 가능
- 무탄소 연료(NH_3, H_2) 사용 열처리 가열로 설계기술 확보를 통한 해외의존 탈피 및 국내 자력화

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 탄소중립형 Super 고로 기술
  - · 탄소 다배출 고로 공정에서의 탄소 원료를 일부 수소로 치환하고 산소 공급량을 증대하여 온실가스를 저감
  - · CCUS와 연계 CO_2 포집이 용이한 고로 혁신 기술 추진
- 고탄소 용선 저감(스크랩 증대) 전로 상하취 복합 열원 확보 기술
  - · 고탄소 용선 저감 및 스크랩 증대를 위한 전로 설비 내 상부 가스 이차 연소를 통한 추가 열원 공급 기술
  - · 전로 하부를 통한 열원 공급 기술 개발 및 고열원 조업 대응 설비 엔지니어링 기술
- 무탄소 연료 사용(NH_3, H_2) 가열 기술 개발
  - · 무탄소 연료 혼소 시 기존 설비와의 호환성 평가(열전달 특성, 연소기 안정성 등) 및 설비변경 최소화 기술 개발
  - · 무탄소 연료 전소 시 연소기 안정성, 열전달 특성, 환경오염물질 배출 특성 변화를 고려한 가열로/환경설비 최적화 설계기술 개발

목표달성전략

산학연 R&D 협업체계 구축, 연구 인프라 지원 및 기업의 온실가스 배출 제도 개선 필요

- 철강사, 에너지 관련 중소 중견업체, 연구기관, 학계 등 산학연 R&D 협업체계 구축 및 기술 조기 상용화를 위한 특수 목적의 공동 연구 법인을 추진하여 기술개발 가속화 추진
- 조기 상용화를 위해 중장기 대규모의 정부 국책 사업 추진이 필요하며, 참여 기업의 적극적인 기술 개발을 위한 기업 민간부담금 경감 제도 개선이 필요함
- 개발 과정 중 온실가스 저감 실적에 대한 기업 배출권 추가 할당 등 인센티브 제도 도입에 의해 기업의 적극적 참여 독려 필요
- 무탄소 연료의 도시가스 배관 혼입에 대한 영향성 평가를 위한 탄소중립 시범단지 구축 및 테스트 베드 인프라 구축 실증 연구 지원 필요

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
탄소임계형 하이퍼고로 기술	· 현재 상용 고로 산소 〈 30%, 수소 직접 취입 0 % · 기술 수준 10% · 포스코, 현대제철	· 기초연구 완료(일본 JFE) · 430 Nm^3 고로 산소 35% 테스트 조업(중국 보무그룹)	· ('30) 수소-순산소 고로 기초 연구 · ('40) 수소 20% 산소 40% Pilot 테스트 · ('50) Demo 엔지니어링
고탄소 용선 저감 전로 상하취 복합 열원 확보 기술	· 현 전로 용선 사용비 84% · 기술수준 50% (하부 열원 공급 기술) · Pilot 단계(2 톤 전로, 상용화 300 톤) · 포스코(PS-BOP)	· 상취 2차 연소 기술 확보 (미국 탈만사 : 2차 연소 랜스 제작/공급사)	· ('30) 용선 사용비 ≤75% · ('25) 100 톤급 Demo 전로 2차 연소 기술 확보 · ('30) 300 톤급 전로 상용화
무탄소 연료 사용 가열 기술 개발	-	· 수소 전소 가열로(Pit furnace) 테스트 조업(Linde)	· ('30) 무탄소 연료 혼소 가열로 실증 · ('40) 무탄소 연료 전소 가열로 실증

3 자원순환형 초고속 전기로 공정 기술

주요 이슈사항

철강 탄소중립 실현은 그린 전력을 기반으로 전기로의 확대로 이어질 전망이나 국내 전기로 기술은 선진국 대비 조업 및 엔지니어링 기술 수준 낮음

- 철강산업 탄소중립 저변에는 전기로 공정의 생산을 현재 30% 수준에서 50% 이상 확대되어야 하며 전기로의 높은 전력 소비를 충족하기 위해 탄소중립 전력의 충분한 수급과 함께 전기로 공정 자체의 에너지 소비 효율 극대화 필요
- 고철 기반의 전기로 공정을 기존 일관제철소의 생산을 대체하기 위해 현재의 TTT(Tap-To-Tap) 시간과 유동을 획기적으로 개선하여 전기로 생산성이 2배 이상 증가 필요
- 철강산업의 탄소중립을 위해 고급 스크랩의 사용량 증대로 수입에 의존하고 있는 국내 철강사의 경쟁력 제고가 필요하며, 이를 위해 저급 스크랩의 가공 및 자동 선별 및 분류 기술과 직접환원철과 같은 고급 스크랩 대체재의 대량 사용 기술 개발 필요
- 매립·소각 시 여러 환경 문제를 유발하는 플라스틱, 타이어, 축산 고형분 등 재사용이 가능한 폐자원을 재활용할 수 있는 최적 공정인 전기로에서 보조 에너지원으로 자원을 순환시켜 토탈 자원 재활용 전기로 기술 개발 요구

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 자원순환형 초고속 하이브리드 취련 전기로 엔지니어링 및 실공정 적용 기술 개발
  - · 전기로 저취 및 복합 취련 기술
  - · CO_2/O_2 하이브리드 취입 및 유동 제어 기술
  - · 전기로 배가스 폐열 연·원료 예열 기술
- 폐자원 순환형 탄재 대체재 전기로 활용 기술 개발
  - · 폐플라스틱, 고분자화합물과 바이오매스 탄소 대체 취입과 포오밍 제어 기술
  - · 고급고철 대체 다량 사용 및 용락 제어 기술
  - · 폐자원 단광 제조 및 투입 기술과 저급 원료 기반의 고급강 제품 제조 기술

목표달성전략

산학연 및 국내외 엔지니어링社로 독립법인을 구성하여 실증 및 테스트베드 구축, 관련 개발 기술을 공동 활용

- 국내 전기로社, 학계, 국내외 전문 엔지니어링社들로 구성된 법인을 설립하여 공동 연구를 통해 기술개발의 난제를 조기에 극복하고 개발 기술을 산업으로 보다 용이하게 확대할 수 있는 기반 시스템 구축 필요
- 개발 기술의 실용화와 실질적인 CO_2 저감 효과 창출을 위해 실증화 규모의 테스트베드 인프라 구축·지원 강화
- 전기로 전문 기술 자문단 구축 및 운영을 통해 산업계 적용 시 각 사의 환경에 맞는 현장 적용 활용이 가능한 기술 지원 시스템 구축
- POSCO 등은 해외 기술을 활용하여 국내 최초로 증발 냉각 방식을 일부 가열로에 도입해 증발 냉각 방식의 효과를 입증하였고, 추가 투자를 통해 개조를 계획하고 있음. 향후 증발 냉각 방식 시스템은 가열로·전기로 등 다양한 수냉 대체 분야에서 효율 향상과 폐열 활용의 목적으로 급격한 도입 증가가 예상

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
자원 순환형 초고속 하이브리드 취련 전기로 엔지니어링 기술 및 실공정 적용 기술 개발	· 전기로 전력 원단위 380~400 kWh/ton · 기술수준 70-95% · 폐열 고철 예열 : 동국제강 폐열 스팀 활용 : 현대제철 · 전기로 T.T.T 50분/heat	· 에코아크 280 kWh/ton : 폐열활용 고철 예열 (일본 JP-plantech) · 30분/heat(전력원단위 : 407 kWh/ton) : 미국 Nucor	· ('30) T.T.T. : 35분/heat · ('40) 전력원단위: 250 kWh/ton 이하
폐자원 순환형 탄재대체재 전기로 활용 기술 개발	· 전기로 탄재 사용 20~40 kg/ton · 기술수준 30% · 폐타이어 활용 : 세아베스틸	· 폐플라스틱, 바이오매스 등 전기로 미활용	· ('30) 탄재 원단위 10 kg/ton 이하, CO_2 발생 10% 저감

4 철강 부산물 업사이클링 기술

주요 이슈사항

고체부산물의 업사이클링 기술로 유가금속 회수 시 2조 원 이상 경제적 가치와 4 TWh 에너지 회수가 가능하나 상용화 기술 부재

- 철강 슬래그 발생량은 2,800만 톤으로 고로 슬래그는 1,600만 톤으로 OPC 대체재로 활용, 제강 슬래그는 1,100만 톤으로 FeO와 MnO 다량의 유가금속 함유로 저급 도로 및 복토용으로 활용
- 제강 슬래그는 일반적으로 고온상태에서 냉각되어 100만 톤당 0.5 TWh의 잠재적 현열이 활용되지 못하고 대기로 방출되는 실정
- 공정 중 발생되는 함철 부산물인 더스트와 슬러지 또한 제선과 제강에서 발생하여 전 세계적으로 3,400만 톤이 발생되어 활용도가 높지 않아 미세먼지나 중금속 침출의 원인 가능
- 철강산업에서 발생하는 이러한 고체 부산물(더스트, 슬러지, 내화물, 슬래그 등)의 (재)활용을 통한 온실가스 저감 기술이 필요
- 일관제철공정에서 발생하는 부생가스는 통합공정 내 열원이나 전력생산에 별도로 사용하므로, 이를 기타탄소 자원으로 활용하기 위해서는 전반적인 철강제조 공정 변경이 불가피하므로 공정 변경의 리스크로 인해 온실가스 저감량과 경제성 높은 부생가스 활용기술 개발이 필요

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 고체 부산물 재활용 및 전환 기술
  - · 제강 슬래그 유가금속 회수 및 고부가화 기술
  - · 슬래그 현열 회수 및 화학적 에너지 전환 공정 및 시스템 기술
  - · 고함수율 슬러지 및 더스트 단광 제조 및 직접환원철 제조 기술
- 철강 부생가스 고부가화 기술
  - · 부생가스를 직접 혹은 일부를 분리하여 공정 내 재활용함으로써 공정전체에서 CO_2 발생량을 감소시킬 수 있는 실증기술 개발
  - · 부생가스 내 CO 전처리, 분리 및 정제하여 고질화하는 기술 개발
  - · 부생가스를 활용한 화학적 혹은 생물학적 전환기술을 통해 플랫폼 화합물 및 생분해성 고분자 등을 제조하는 기술 개발

목표달성전략

산학연 얼라이언스를 구성해 조기 실증 및 상용화를 위한 테스트베드 구축 등 기술개발을 위한 지원 강화

- 실증기술의 경우 산학연 얼라이언스를 구성해서 조기 상용화 기술 개발
- 기존 확보된 요소기술의 조기 실증 및 상용화를 위해서는 테스트베드 인프라 구축·지원을 통해 기업지원 강화
- 고체폐기물 및 부생가스 등 산업체 부산물 유래 제품의 경우 구매 우대, 세제 지원 등 다양한 지원정책 제공

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
고체 부산물 재활용 및 전환 기술	· 기술 검증 완료 · (최고기술대비) 기술수준 70% · 기술개발 단계 : TRL 5 · 포스코, 현대제철	· 상용화 70% 수준 기술(일본 NSC, JFE)	· ('30) 조기 실증 및 상용화
철강 부생가스 고부가화 기술	· 부생가스의 공정 내 직접 재활용기술 · 실험실 아이디어성 기술 · (최고기술대비) 기술수준 100% · 기술개발 단계 : TRL 2 · 포스코, 현대제철	· 없음	· ('30) 조기 실증 및 상용화
	· 부생가스 내 CO 분리 및 정제기술 · 막분리 흡착 혼성공정 CO 순도 99% · (최고기술대비) 기술수준 60% · 기술개발 단계 : TRL 6 · RIST, 화학연	· 상용화 수준 기술 (미국 Costello)	
	· 부생가스로부터 기타 고부가 화학제품 제조 기술 · 알코올 및 올레핀 제조 시 메탄올 생산수율 40% 및 올레핀 생산수율 80% · (최고기술대비) 기술수준 80% · 기술개발 단계 : TRL 6 · 화학연	· 상용화 60% 수준 기술실증(독일 Thyssenkrupp)	

2) 탄소저감형 친환경 시멘트 기술

정의

- 석회석 채광에서부터 반제품인 클링커를 주재료로 건축·토목용 기초 원료인 시멘트를 생산하는 산업의 탄소저감형 친환경 시멘트 제조·재활용 기술

비탄산염 원료 및 적용 기술
원료로 사용되는 석회석을 산업부산물로 대체 활용하는 기술

가연성 순환자원 재활용 기술
가연성 순환자원의 시멘트 연료 활용을 위한 기술

혼합재 함량 증대 및 신규 혼합재 제조 기술
시멘트 중 혼합재 증량 및 신규 혼합재 개발·활용 기술

시멘트 생산에너지 효율향상 및 친환경 열원 활용 기술
시멘트 제조 공정 에너지 효율 향상 및 유연탄을 대체 활용하는 기술

CO_2 반응 경화 클링커 및 제품 제조 기술
CO_2 흡수능이 우수한 클링커 및 이를 사용한 CO_2 반응경화 시멘트 제품 제조기술

기술개발 필요성

- 시멘트산업의 온실가스 배출량은 2019년 기준 39백만 톤이며 이는 산업계 총 발생량의 10% 및 국내 총 발생량의 5.6%를 차지하여, 이에 대한 체계적 탄소배출 저감 방안 도출이 시급

세부기술별 기술개발 목표

세부기술	현재국내 기술수준	단기 (~2025)	중기 (~2030)	장기 (~2050)	목표
비탄산염 원료 및 적용 기술	석회석대체 자원 전무	석회석 대체 순환자원 확대 적용기술		상용화 적용	▪ ('40) 석회석 대체량 8% 이상
		시멘트 클링커 저온소성 기술	상용화 적용		
가연성 순환자원 재활용 기술	순환연료 대체율 24%	가연성 폐기물 연료화 기술	시스템 실증/상용화		▪ ('40) 순환연료 대체율 65% 이상
		순환연료 대량 대체 기술	시스템 실증/상용화		
		염소바이패스 및 더스트 재활용기술	시스템 실증/상용화		
혼합재 함량 증대 및 신규 혼합재 제조 기술	신규혼합재 필요	혼합재 함량 확대 배합 기술	상용화 적용		▪ ('30) 신규 혼합재 개발 1종 이상
		혼합재 반응성 증대 기술	상용화 적용		
		신규 혼합재 개발 기술	상용화 적용		
시멘트 생산에너지 효율향상 및 친환경 열원 활용 기술	클링커 제조열량 750 kcal/kg·Clinker 수소버너 및 적용 전무	수소활용 시멘트 클링커 소성기술		시스템 실증/상용화	▪ ('40) 클링커 제조열량 10 kcal/kg·Clinker 감축 ▪ ('50) 2 MW급 순수소 및 수소·하이브리드 버너 및 공정적용
		시멘트생산공정 효율향상 기술	시스템 실증/상용화		
		바이오매스 확대적용을 위한 소성기술	시스템 실증/상용화		
CO_2 반응 경화 클링커 및 제품 제조 기술	소성온도 1,450 ℃	저탄소 시멘트 클링커 제조기술	시스템 실증/상용화		▪ ('40) 소성온도 저감 150 ℃ 이상
		시멘트·콘크리트 CO_2 양생기술	시스템 실증/상용화		

현재 수행 중 또는 수행 예정인 R&D　　향후 정부의 R&D투자가 필요한 기술

기술개발 추진방향

1 비탄산염 원료 및 적용 기술

주요 이슈사항

산업부산물로 석회석 대체 및 저온소성 기술 도입

- 시멘트 제조공정에서 배출되는 CO_2 총량의 60% 이상이 석회석의 탈탄산 반응으로 인해 발생하는 CO_2에서 기인하므로 비탄산염 원료(CO_2와 결합하지 않은 CaO를 함유한 물질)로 대체하면 CO_2 배출량을 크게 저감
- 유럽 시멘트협회의 경우 비탄산염 원료 사용에 의해 2030년까지 3.5%, 2050년까지 8% 공정배출 CO_2를 저감하기로 계획

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 석회석 대체 순환자원 확대 적용 기술
  - · 비탄산염 원료의 발굴 및 품질 신뢰성 평가
  - · 비탄산염 원료 사용으로 인한 CO_2 배출저감 평가방법 개발 및 표준화
  - · 비탄산염 원료의 시멘트 공정 사용을 위한 전처리 방법 개발
  - · 비탄산염 원료가 시멘트 소성 및 열에너지 사용량에 미치는 영향 연구
- 시멘트 클링커 저온소성 기술
  - · 기존 클링커 대비 100 ℃ 이상의 저온 소성 클링커 및 시멘트 개발
  - · 광화제 성분 함유 산업부산물을 활용한 저온소성 기술 연구
  - · 산업부산물을 다량 활용한 저온소성형 시멘트 제조기술 연구
  - · 저온소성 시멘트의 품질 및 활용방안 연구

목표달성전략

철강·발전·소각 등 관련 산업-시멘트-건설 순환생태 구축

- 재활용 가능 산업부산물이 발생하는 산업에 대해 법적·제도적 차원에서 단순매립을 지양하고, 저탄소 고부가가치 재활용 유도
- 재활용되지 못하고 있는 비탄산염 산업부산물에 대한 환경, 보건, 안전, 품질 영향 평가를 통한 가치 제고

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
석회석 대체 순환자원 확대 적용 기술	· 석회석 대체, 순환자원 사용은 전무한 수준('17년 기준)	· 일본은 고로슬래그를 혼합재보다 비탄산염 원료로 사용 선호(일본 태평양시멘트)	· ('40) 석회석 대체량 8% 이상
시멘트 클링커 저온소성 기술	· 클링커 소성온도 저감을 위한 SO_3 적용 중이나, 선진국 대비 소성온도 저감 한계	· 선진국에서는 다양한 광화제 사용 및 저온소성 클링커 개발 중 (일본 태평양시멘트)	· ('30) 소성온도 100 °C 이상 저감

2 가연성 순환자원 재활용 기술

주요 이슈사항

가연성 순환자원 활용 화석연료 대체율 증대

- 시멘트산업의 온실가스 배출량은 공정배출(원료의 탈탄산 반응에 의해 배출되는 이산화탄소)이 60%, 연소배출 30%, 기타 10%로 구성
- 소각 및 매립 처분되는 가연성 폐기물을 분리, 선별 및 재활용하여 시멘트 제조에 사용되는 유연탄, Pet-coke 등 화석연료를 대량 대체해 국가 전체적인 온실가스 배출량을 감축할 수 있는 가연성 순환자원의 연료 대량 대체기술 개발 및 보급이 시급히 요구

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 가연성 폐기물 연료화 기술
  - · 선별, 파쇄, 분리 등 전처리를 통한 열량 및 연소성 향상 기술
  - · 염소 함량별 선별 자동화 및 염소 제거기술
- 순환연료 대량 대체기술
  - · 성상별 대량 이송 및 정량투입 기술
  - · 대량 투입이 가능한 연소설비 및 공정기술(Main Burner, Combustion Chamber 등)
  - · 연소성 개선을 위한 Oxygen Enhanced Combustion 기술
- 염소 바이패스 시스템 및 더스트 재활용 기술
  - · 대용량 염소 바이패스 시스템 설계 및 활용기술
  - · 염소 바이패스 더스트의 대량 재활용 기술

목표달성전략

실증시스템 구축을 통한 상용화 기술 개발

- 시멘트산업을 중심으로 가연성 폐기물의 연료 대체율 증대 및 연소 효율 증대를 위한 국내 설비 및 공정기술 개발과 실증시스템 구축 및 실용화를 위한 정책적 지원 필요
- 가연성 폐기물의 매립 및 소각을 최소화하고 시멘트 연료 대체율을 극대화할 수 있도록 폐기물 재활용 관련 법적, 제도적 저해요인 개선, 국가적인 폐기물 재활용 지원 정책 및 관련 산업과 연계한 자원순환 시스템 구축 필요

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
가연성 폐기물 연료화 기술	· 국내 가연성 폐기물의 시멘트 연료 제조기술 미흡으로 해외 설비 및 기술도입 중 · 해외는 전처리 기술 상용화를 통해 연소성 및 열량 등 품질이 우수한 순환연료 공급 중 · 선진기술 대비 50% 수준	· 기술개발 및 상용화 90% 이상(독일)	· ('40) 선도국 대비 80% 이상 – 시멘트용 가연성 순환자원 제조기술
순환연료 대량 대체기술	· 폐플라스틱 연료로 사용 중이나 연료 대체율은 낮음 · 순환연료 대체율 24%('19) · 순환연료 대량 사용을 위한 국내 설비 및 공정기술 미흡	· 순환연료 대체율은 EU 평균 44%('17), 독일 68%('18) 수준으로 높음 · 유럽 등 Main Burner, 예열실 순환연료 대량 사용 및 환경영향 저감 설비 상용화(KHD, FLSmidth, Phillard 등)	· ('40) 순환연료 대체율 65% 이상 연소설비 및 공정기술 개발 및 실증 – 예열실 및 Main Burner 순환연료 사용기술 – 환경영향 저감 기술
염소 바이패스 및 더스트 재활용 기술	· 대용량 염소 바이패스 기술 확보 미흡으로 해외 설비·기술 도입 · 순환연료 대체율 증가에 따른 바이패스 더스트 증가 대비 대량 재활용기술 확보 필요 · 에너지연 기초기술 보유 및 시멘트업계, 세라믹기술원 등 기술개발 단계	· 대용량 염소 바이패스 기술 개발 및 상용화(Lafarge, 태평양시멘트 등) · 바이패스 더스트 대량 재활용기술 개발 및 상용화(태평양시멘트 등)	· ('40) 대용량 염소 바이패스 기술 –기술개발 및 실증 · ('40) 바이패스 더스트 대량 재활용기술 개발 및 실증 – 수세 및 KCI 제조기술 – 특수시멘트 제조기술 등

3 혼합재 함량 증대 및 신규 혼합재 제조 기술

주요 이슈사항

혼합재 사용 기준 보완 및 확대 제·개정 필요

- 국내 시멘트 중 클링커 함량은 60~70%로 잠정 집계되나, 정확한 통계 부재로 혼합시멘트 사용에 의한 CO_2 저감효과 파악 불가

  ※ 반면, 유럽의 경우 2017년 평균 77%로 집계되나, 네덜란드 46% 등 여건에 따라 혼합재 사용량 증대 가능

- 무분별한 혼합재 사용으로 건축물의 내구성 하락 및 수명단축의 원인으로 작용하는 상황

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 혼합재 함량 확대 배합기술
  - · 클링커 사용량 저감을 위한 혼합재 종류, 함량에 따른 기초물성 평가 및 시장 수용성 연구
  - · 혼합재 종류, 함량 증가에 따른 시멘트·콘크리트 물성 변화 검증 및 품질 신뢰성 검증 필요
  - · KS규격 개정에 의한 혼합시멘트 종류 및 혼합재 함량 확대 및 CO_2 배출 저감 효과 정량 측정
- 혼합재 반응성 증대
  - · 활성 플라이애시, 고분말 슬래그 등 경제성을 고려한 혼합재 반응성 최적화 기술의 종합 검토
  - · 자극제 혼합을 통한 혼합재 반응성 증대, 입도 최적화를 통한 유동성능 개선, 단위수량 저감을 통한 내구성 향상 등 혼합재의 기능성 극대화
  - · 혼합시멘트의 단점인 초기반응성 저하 문제 해결을 위한 기술 개발 필요
- 신규혼합재 개발
  - · 기존에 혼합재로 사용되지 못하던 산업부산물, 폐자원에 수화 반응성을 부여하여 고부가가치 저탄소 혼합재로 활용할 수 있는 기술 개발(예 : 미활용 철강슬래그, 메타카올린, 활성 소각재 등)

목표달성전략

시멘트업계-레미콘업계-건축업계-사용자 공감대 형성

- 혼합시멘트의 혼합재 사용량을 공개하도록 제도화함으로써 투명성 확보, 품질 불안 잠식
- 건축 설계 기술과 연계한 건축물의 탄소성적 평가방법 개발을 통해 소비자의 합리적 선택 유도
- 단순 매립, 재활용 산업부산물을 발생하는 산업에 대해 법적·제도적 차원에서 저탄소 고부가가치 재활용 유도

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
혼합재 함량 확대 배합기술	· 국내 OPC 혼합재 함량 10% 이내 · 국내 혼합시멘트 중의 혼합재 함량은 30~40%로 추정 · 국내 고로슬래그시멘트 혼합량은 최대 70% 규정	· 유럽 규격은 혼합시멘트 중 혼합재 함량을 최대 95%까지 혼합(EN197-1, CEM III/C(고로슬래그 사용)	· ('30) OPC 혼합재 함량 15% 확대 · ('30) 시멘트 혼합재 관련 규격 개정
혼합재 반응성 증대	· 혼합재의 품질 검증 부족으로 혼합재 과다사용 시 품질문제 발생, 부정적 인식 확산	· 유럽, 일본, 미국 등 혼합재 품질규격 엄수(분말도, 강열감량 등)	·('30) 혼합재 반응성 증대를 위한 기술 개발 및 표준화 (분말도, 자극제(산업부산석고) 등)
신규혼합재 개발	· 이미 대부분의 고로슬래그가 혼합재로 활용되고 있어 신규 혼합재 개발이 요구됨	· 유럽, 일본 등도 활발하게 신규 혼합재 발굴 연구 중(메타카올린 연구는 EU 지원 하에 진행 중)	·('30) 산업부산물, 폐자원을 재가공한 수화반응성 저탄소 혼합재 개발

4 시멘트 생산에너지 효율향상 및 친환경 열원 활용 기술

주요 이슈사항

제조공정 에너지 효율향상 및 친환경 열원 증가

- 최근 시멘트 제조공정의 예열기 및 냉각기에서의 에너지 효율향상과 폐열발전 설치를 통한 폐에너지 재활용 기술에 관심이 증대되는 상황
- 친환경 열원인 바이오매스 등의 유연탄 대체량 증대, 바이오매스 종류 다양화 및 무탄소 열원인 수소 활용에 대한 관심 증가
- 이에 따라 시멘트산업에서도 수소, 바이오매스 등의 친환경 열원 활용 및 생산에너지 효율향상에 대한 체계적 연구 필요성 대두

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 수소활용 시멘트 클링커 소성기술
  - · 수소연료 활용을 위한 2 MW급 시멘트 킬른용 수소버너 개발
  - · 수소연료 사용에 따른 공정 안정화 기술 및 품질확보기술 개발
- 시멘트 생산 공정 효율향상 기술
  - · 킬른 예열기 및 냉각기의 효율향상 기술 개발
  - · 신개념 고효율 설비 구축 및 클링커 품질향상 기술 개발
  - · 폐열발전 설비의 전력생산 효율향상 기술 개발
- 바이오매스 확대적용을 위한 소성기술
  - · 바이오매스의 시멘트 킬른 공정적용 및 공정안정화 기술 개발
  - · 바이오매스 적용 공정생산 클링커의 품질 특성 분석 및 평가 등

목표달성전략

실증시스템 구축 및 적용 등을 통한 생산기술 개발

- 시멘트산업을 중심으로 수소산업, 소재·장비산업 및 시스템 구축산업 등의 융합 연구단 구성으로 상용화 기술 간의 협업 시스템 구축이 필수
- 시멘트 제조공정 실증 시스템 구축 및 적용 등을 통한 상용화 선행 작업 필요
- 수소 및 바이오매스 등의 시멘트 제조공정 적용을 위한 법적·제도적 안전성 확보 필요

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
수소활용 시멘트 클링커 소성기술	· 국내 시멘트산업에서의 수소 연료 이용은 전무 · 수소 버너 등은 일부 연구개발 · 기술보유 : 에너지연 등	· 수소 연료는 미국 및 유럽 등에서 연구개발 중 · 최근('20~) 라파즈社 등에서 수소 연료를 혼합 사용하기 위한 연구 시작 (프랑스 라파즈社)	· ('50) 2 MW급 순수소/수소-하이브리드 버너 개발 및 공정적용
시멘트 생산공정 효율향상 기술	· 국내 시멘트산업에서의 폐열발전 공정 설치 중 · 시멘트 클링커 제조열량 : 750 kcal/kg·Clinker · 시멘트 생산 공정에서의 예열기, 냉각기 등의 효율개선 중 · 기술보유 : 쌍용C&E 등	· FLSmidth社는 냉각기 효율 개선 및 생산성 향상을 위한 다수의 기술보유 · IKN社는 신개념 프리히터 설계 및 설치 등을 위해 EU 국가과제 참여 중(EU IKN社)	· ('40) 시멘트 클링커 제조열량 740 kcal/kg·Clinker 달성
바이오매스 확대적용을 위한 소성기술	· 국내 시멘트산업에서는 일부 고체 또는 슬러리 형상의 바이오매스 사용 중 · 국내 기술수준 : 30~40% · 국내에서는 서울대, KIST 등 다수의 기관에서 연구 수행 중	· 선진국들에서는 시멘트산업에서 다양한 바이오매스 사용 중 · 유럽 시멘트산업에서는 다량의 바이오매스 사용 중 (프랑스 라파즈社)	· ('40) 바이오매스의 시멘트공정 적용 및 품질 최적화 실증

5 CO_2 반응 경화 클링커 및 제품 제조 기술

주요 이슈사항

탄소중립 시멘트·콘크리트 제조기술 개발

- 시멘트산업의 온실가스는 공정 및 연소 배출이 90% 이상으로 산업 특성상 온실가스 배출량의 획기적 감축이 어려우며, 탄소중립 실현을 위해서는 혁신적인 시멘트 제조기술 개발 및 CCU 등 타 기술과의 융합을 통한 온실가스 감축기술 개발 및 상용화 필요

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 저탄소 시멘트 클링커 제조기술
  - · CO_2 흡수 클링커 광물 제조기술 및 산업부산물 활용기술
  - · 실증설비를 통한 CO_2 감축량 산정 및 공정 안정화 기술 개발
- 시멘트·콘크리트 CO_2 양생 기술
  - · 저탄소 시멘트 활용 콘크리트 제품의 배합설계 기술
  - · CO_2 양생시스템 실증설비 구축 및 활용기술

목표달성전략

실증을 통한 생산기술 확보 및 표준화 필요

- 저탄소 및 CO_2 반응 경화형 시멘트·콘크리트의 개발 및 상용화를 위해서는 장기적인 성능검증과 함께 표준화를 위한 KS 제·개정 필요
- CO_2 양생기술 상용화를 위해서는 시멘트·콘크리트 산업과 CCUS 기술과의 융합 연구단 구성을 통한 협업 시스템 구축 필요

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
저탄소 시멘트 클링커 제조기술	· 국내 시멘트산업에서 CO_2 반응 경화 클링커 및 제품 제조기술 개발 실적은 전무 · 실험실적 기술개발 검토 단계이며, 일부 철강부산물을 활용 시멘트 연구 · 한양대, 세라믹기술원 등	· 미국, 유럽 등 저탄소 배출 및 CO_2 흡수 시멘트 제조기술 개발 · 저탄소 시멘트 클링커 제조를 통해 CO_2 대폭 감축 가능한 기술개발 및 상용화 추진 중 (30~40%, Solidia)	· ('40) 저탄소시멘트 클링커 제조기술 – 석회석 저감 20% 이상 – 소성온도 저감 150 ℃ 이상
시멘트·콘크리트 CO_2 양생 기술	· 국내 CO_2 반응 경화 콘크리트 제품 제조기술 개발 실적은 전무 · 한양대, 세라믹기술원 등 실험실적 연구단계	· 미국, 유럽, 일본 등 Precast Concrete 대상 CO_2 양생기술 개발 및 상용화 추진 중 · CO_2 양생을 통해 콘크리트 탄소발생 최대 70% 감축 (Lafarge Holcim)	· ('40) CO_2 양생 콘크리트 제품 제조기술 – 시멘트량 대비 CO_2 20% 이상 흡수 – CCU기술 융합 실증

석유화학

Ⅱ. 석유화학 기술개발 전략

1. 개요 43
2. 국내·외 현황 44
3. 핵심기술 구성 및 선정 배경 53
4. 비전 및 목표 54
5. 중분류별 추진전략 55

1. '석유화학' 분야 개요

탄소중립 新화학산업 구축을 위한 신규 원료 활용, 공정의 전기화, 반응 및 분리에너지 최소화 등 석유화학 산업 공정 밸류 체인 내의 혁신적인 탄소 감축 기술

	탄소중립 원료 활용	공정탄소 저감
정의	석유화학산업의 원료를 재생·순환 가능한 바이오매스, 폐플라스틱, 공정 부생자원을 포함한 탄소중립/저탄소 원료로 변환하는 기술	저탄소 석유화학산업 구현을 위해 온실가스 감축이 가능한 재생에너지 연계 저에너지/저탄소 전환 공정 기술
필요성	탄소중립 산업으로의 혁신을 위한 원료 차원에서의 탄소저감/무배출 기술 개발 및 전방산업의 탄소중립을 위한 혁신 소재 공급 필요	석유화학 온실가스 배출량*의 대부분은 석유화학 반응 및 분리에 필요한 화석원료 기반 고에너지 소비에 기인하며, 이에 화학원료 생산에 재생에너지를 연계한 반응·분리 공정기술 개발 필요 * '19년 71백만 톤

2. 국내·외 현황

1) 정책 및 제도 동향

정책

- 전 세계적 탄소중립 노력에 따라 탄소배출산업인 동시에 탄소중립사회 구현의 핵심 후방산업인 석유화학 분야에 대한 탈탄소화 압력이 거세질 전망

EU

기후위기, 환경오염에 대응하기 위한 사회적 요구에 발맞추어 지속가능한 석유화학 산업으로 패러다임 전환을 위한 정책적 지원 강화

· 2021년 탄소국경세* 법안 초안 발표 및 2023년 본격적인 도입 선언

* 탄소국경세: 역내 국가보다 탄소 배출을 많이 하는 국가의 제품에 대해 관세를 부과하는 제도

· 채취-생산-소비-폐기의 선형 경제구조를 바이오매스 활용 또는 플라스틱의 100% 재활용에 의한 순환경제 사회로 이행 추진

※ Horizon 2020 프로그램을 통해 2030년까지 석유기반 화합물의 30%를 바이오매스 기반 제품으로 대체하는 정책 수립

· 플라스틱 사용을 줄이고, COVID19발 경기부양책 자금 확보를 위해 2021년부터 플라스틱세 전격 시행 예정[1)]

※ 2020년 7월 유럽이사회에서 최종 결정되어 2021년 1월 1일부터 모든 EU 회원국은 재활용이 불가능한 플라스틱 폐기물 1 kg당 0.8 유로의 세금을 부담해야 함

미 국

바이든 행정부 미국식 탄소국경세 도입 선언 및 셰일가스 개발 제한 시도

중 국

2060년 탄소중립을 위하여 우선적으로 철강, 시멘트, 석유화학 업종에서 탄소배출량 정점 도달 실현 추진

한 국

석유화학산업 탄소중립 달성 및 산업경쟁력 강화를 위해 저탄소 산업구조로의 전환, 저탄소 신산업(화이트 바이오) 육성 추진(대한민국 2050 탄소중립 추진전략, '20)

· 에너지이용 효율 개선, 저탄소 연료전환, CCUS 기술 도입, 혁신적 산업공정 개발 등 산업분야의 온실가스 배출 저감 방향성 제시

※ 석유화학 분야에 대해서 민·관 소통창구 마련, 탄소중립 시나리오 수립, 정책·기술과제 발굴을 위하여 '석유화학 탄소제로위원회' 출범('21.2)

1) kotra 해외시장뉴스, EU, 2021년 1월 1일 플라스틱세 전격 도입, 2020.12.17

제도

- 배출권거래제, 목표관리제, 에너지절약전문기업제도 등 주로 에너지 사용량 절감 및 이용 구조 개선에 초점을 둔 탄소저감 제도 운영

- 온실가스 다배출 기업에 배출권을 할당하고 기업별 배출량에 따른 배출권 잉여업체와 부족업체간 거래를 자유롭게 허용하는 배출권거래제 시행

※ 2015년 1월부터 석유화학업종을 비롯한 525개 업체를 대상으로 본격 시행 중이며 배출권 거래 가격은 2020년 10월 기준 20,000원/톤 수준

- 배출권거래제 적용을 받는 할당 대상 업체보다 온실가스 배출량이 비교적 적은 업체* 등을 대상으로 온실가스 감축, 에너지절약목표를 설정하고 관리하는 직접 규제 방식의 목표 관리제 운영

* 온실가스 배출량 및 에너지 소비량이 일정 수준(50,000 tCO_2-eq/200 TJ 이상 업체, 15,000 tCO_2-eq/80TJ 이상 사업장) 이상인 업체 및 사업장을 지정('20년 기준 403개 업체)

- 에너지절약전문기업 제도 운용* 및 에너지진단 의무화 사업**을 통해 불필요한 에너지 손실을 줄이고 합리적인 에너지 사용을 유도

* 에너지절약전문기업제도 지원현황 : 1993년부터 2017년까지 4,358건, 2조 9천억 원 지원

** 6,406개 사업장에 대한 에너지진단을 통해 13,737천 tCO_2-eq 감축

2) 시장동향

세계

- ‘대량생산/선형경제’에서 ‘지속가능/순환경제’로의 패러다임 전환에 대응하기 위한 글로벌 석유화학 업계의 생존 노력 가속화

- 전 세계 석유화학제품 시장은 2021년 약 540조 원 규모에서 2030년 약 870조 원 규모로 성장할 전망(Globenewswire.com, ’21)

- 석유화학제품은 플라스틱, 비료, 포장, 섬유 등 인류가 일상생활에서 매일 사용할 뿐만 아니라, 태양광 패널, 풍력 터빈 날개, 전기차 부품 등 현대 에너지시스템 전환에서도 널리 활용되고 있어, 향후 연료로서 원유 수요는 위축될지라도 석유화학 시장은 지속 성장할 전망(IEA, ’20)

- 유가의 불확실성, 탄소저감 압력으로 화석원료 의존 기업의 채산성 악화

  ※ ExxonMobil : 2010년대 초반까지 전 세계에서 가장 가치 있는 기업 → 2020년 다우존스 종목에서 제외

- 글로벌 화학업체는 지속적인 온실가스 감축 노력을 통하여 온실가스 원단위 측면에서 절대적 탈동조화(온실가스 배출량은 감소, 생산량은 증가)에 도달

  ※ 1990년~2017년 사이 유럽 화학산업의 온실가스 배출은 60% 감소, 동기간 생산량은 84% 증가

- 혁신소재 공급을 통하여 전방산업인 태양광, 풍력, 전기차, 전지산업의 탄소배출 저감에 기여하는데 성공

  ※ 자동차 회사 등 화학제품 구매기업은 생산업체에 제품 생산 시 재생에너지 사용을 요구하는 추세(BMW는 LG화학에 전기차 배터리 생산에 재생에너지 사용 요구)

  ※ BASF는 생분해도와 물성이 모두 우수한 PBAT(Polybutylene Adipate Terephthalate) 양산에 성공, 향후 합성용 모노머를 바이오매스로부터 생산하겠다는 계획 발표

- 현재까지의 성과를 바탕으로 탄소중립 기술 선도지위 유지를 위한 대규모 투자 확대

  ※ BASF, DOW, Shell 등은 석유화학 핵심유닛인 크래커를 전기화하는 연구개발 착수

  ※ BASF, SABIC 등은 폐플라스틱 열분해오일을 화학제품의 feedstock으로 사용하는 기술 상업화 추진

국내

- 세계 최고 수준의 에너지 효율*을 달성하였음에도 산업구조 상 에너지원단위**가 높은 편이며, 투자자의 ESG***요구로 기업들은 규제 대응과 미래 경쟁력 확보 차원에서 장기적 플랜 수립 본격화

  * LG화학 NCC 플랜트의 에너지원단위는 16.61 GJ/ton에틸렌으로서 세계 Top 25% 기업의 23.27 대비 71% 수준

  ** GDP 대비 에너지소비량(IEA('17), TOE/천$): 韓 0.159, 美 0.123, 日 0.089, OECD 평균 0.105

  *** 환경·사회·지배구조(Environmental, Social, Governance)

- 국내 석유화학산업은 에틸렌 생산능력을 기준으로 세계 4위의 위상을 보유하고 있으며, 2019년 기준 95조 원 규모의 제품 생산, 2020년 기준 356억 달러 규모를 수출하여 약 248억 달러의 무역흑자를 실현(한국석유화학협회, '21)

  * 2019년 기준 에틸렌 생산량(세계시장 점유율): (미국) 37.4백만 톤/년(20.4%), (중국) 26.9백만 톤/년(14.7%), (사우디) 17.7백만 톤/년(9.6%), (한국) 9.8백만 톤/년(5.3%)(한국석유화학협회, '20)

- 석유화학 기초화학 물질 제조업 부문의 2018년 생산액은 43.6조 원이며, 전·후방산업에 대한 연관효과*가 가장 큰 국내의 대표적인 기간산업에 해당

  * 2017년 기준 산업별 연관계수(전·후방산업): (석유화학) 2.76, (철강) 2.56, (자동차) 2.50, (조선) 1.79 (한국석유화학협회, '20)

- 반면, 석유화학산업은 연간 약 71백만 톤의 온실가스를 배출하는 대표적인 탄소배출업종(국내 제조업 중 두 번째)

  ※ 나프타 열분해 과정에서 46백만 톤 직접배출, 기초유분 처리 과정에서 24백만 톤 간접배출, 화학제품 생산 과정에서 백만 톤 배출(석유화학협회 자료)

- 산업계의 지속적인 노력으로 온실가스 원단위(온실가스배출량/GDP)의 상대적 탈동조화*는 실현하였으나, 절대적 탈동조화에는 다다르지 못한 상황

  * 국내총생산(GDP) 증가율이 온실가스 배출량 증가율보다 더 높아 온실가스 원단위가 개선되는 경우

- 석유화학산업은 대표적 에너지집약업종으로 공정 에너지 투입 과정에서 다량의 탄소가 배출될 뿐만 아니라, 일부 화학공정들은 반응 중에 필연적으로 이산화탄소가 생성되므로 근본적인 온실가스 감축에는 난제 존재

- 국내 석유화학업계는 대내외적인 환경변화에 대응하고 미래 먹거리 창출을 위하여 자체적인 탄소중립 목표 설정[2)]

LG화학	· 업계 최초로 '2050 탄소중립 성장' 선언 · 전체 사업장을 대상으로 RE100(Renewable Energy 100%) 추진 예정
롯데케미칼	· '2030 탄소중립성장' 선언 · 친환경 사업 등에 5조 원 투자 등 2030년까지 친환경 부문 6조 원 규모 성장 목표
SK이노베이션	· '그린밸런스 2030'* 선언 * 경영활동의 환경관련 부정 영향을 상쇄하기 위하여 환경 긍정 영향을 창출하는 그린 비즈니스를 집중 육성해 2030년까지 환경 부정 영향을 제로(0)로 맞추는 전략
SK종합화학	· 친환경 제품 비중을 2025년까지 70% 이상으로 확대 계획
여천NCC	· 글로벌 최고 수준의 에너지 효율을 유지하기 위해 지속적인 설비 및 공정개선에 투자할 계획
한화토탈	· 프랑스 토탈사의 2050 Net Zero 선언에 부응하기 위한 세부 이행방안 검토 중

- 석유화학 원료와 공정 부문의 다양한 혁신 노력들이 동시에 진행되고 있으나 연구단계이거나 소규모 적용에 그치고 있음
  - · 수송 및 산업 부문의 전기화 추세에 따라 연료 수요가 감소할 것이라는 전망 하에 원유에서 화학제품 생산량을 극대화하는 COTC(Crude Oil to Chemicals) 기술이 부각되면서 전환에너지 감소에 대한 니즈 확대
  - · 코로나19로 인한 플라스틱 폐기물의 다량 발생, 미세플라스틱의 환경 축적 이슈가 국가적 의제가 되면서 생분해성 바이오 플라스틱 생산 및 폐플라스틱의 화학적 재활용 기술이 집중적으로 재조명됨

2) 산업부 보도자료, '석유화학업계, '2050 탄소중립'을 위해 뭉쳤다!', 2021.2.9.

3) 기술동향

탄소중립 원료 활용

- 석유화학산업의 원료를 바이오매스, 폐플라스틱, 부생자원 등으로 대체하여 탄소순환 모색
  - 저급연료로 사용하던 바이오매스 열분해유를 고도화하여 기존 원유기반 나프타 물성과 유사한 바이오나프타로 전환
  - 바이오매스 가스화 및 성분 분획화 기술을 고도화하여 원료 활용 효율을 높이고, 화학적·생물학적 고수율 전환 기술 개발을 통해 기존 다양한 석유화학 화합물과 바이오플라스틱 생산 연구
  - 출연연 및 기업을 중심으로 플라스틱 폐기물의 전처리, 열분해, 가스화 및 해중합을 위한 촉매 및 공정 원천 기술 개발 추진 중
  - 대학 및 출연연을 중심으로 다양한 생물 자원으로부터 플라스틱 폐기물(PET 및 PU)의 생물학적 분해, 업사이클링을 위한 생촉매 발굴 및 관련 원천 기술 개발 추진 중
  - 범용 올레핀계 플라스틱 열분해를 통한 저분자 파라핀 생산 기술이 실증단계로 연구가 진행되고 있으며, 석유화학대체 나프타 생산을 위한 플라스틱 분해 공정의 비용 저감 기술 개발 활발
  - 폐플라스틱 유래 합성가스로부터 알코올 등 다양한 화합물을 생산하는 연구가 진행되고 있으며, 플라스틱을 안정적/연속적으로 가스화할 수 있는 공정 기술 개발 도모
  - PET, PC 등 일부 플라스틱의 해중합 및 플라스틱으로 재생산하는 순환기술 개발 진행 중
  - 부생자원 메탄의 직접전환 화학공정을 통한 탄화수소 화합물 생산 기술 연구가 진행되고 있으며 국내 파일럿 공정 단계 추진
  - 부생가스 일산화탄소의 전통적 전환공정이 아닌 다양한 반응과 화합물 생산을 위한 촉매와 공정 개발 수요가 높음
  - 미생물과 효소를 기반으로 하는 친환경적 생물학적 메탄 또는 일산화탄소 전환 연구가 활발히 진행되고 있으며, 다양한 화합물 생산을 위한 실험실 연구와 일부 화합물 실증화 연구 진행

공정탄소 저감

- 운전 최적화 방식의 탄소저감 한계를 극복하기 위한 공정 전기화 및 신공정 도입 연구 본격화

- 최근 글로벌 선도기업을 중심으로 재생에너지 기반 전기를 활용한 전기가열로 공정 기술 개발을 활발히 추진 중이며, 국내에서는 차별화된 전기가열로 적용을 위한 초기 연구 수행 중

- 재생에너지 기반 전기화학적 방법으로 유용한 화합물(에틸렌옥사이드, 프로필렌옥사이드 등) 합성기술 연구 개발 중

- 석유화학 공정의 운전 최적화 방식으로는 온실가스 배출 저감에 한계가 있어 혁신적인 에너지 절약형 반응·분리·정제 기술 및 시장 제품 수요에 유동적인 공정 개발 진행 중

- 석유화학 분리 공정 중 증류 기술은 국가 에너지 소비량의 약 11%에 이르는 수준임에도 불구하고 80여 년 동안 대체되지 못하고 있어 혁신적인 대안 기술이 필요한 시점이며 현재는 학술적 수준의 소재 기술 위주로 진행되고 있으며, 탄소중립의 목표달성을 위해서는 저에너지에서 운용이 가능한 분리용 소재와 공정기술의 융합형 기술 개발에 대한 수요가 증가하고 있음

[석유화학 주요 키플레이어 현황]

국가	업체명	기술개발 현황
한국	GS Caltex	▸ GS Caltex Mixed Feed Cracker 프로젝트 진행 중
	S-oil	▸ S-oil 은 Aramco의 Thermal Crude To Chemicals(TC2C) 투자 의사 결정 예정('21)
	현대케미칼(오일뱅크)/롯데케미칼	▸ 현대케미칼의 Heavy Feed Petrochemical Complex(HPC) 공정 투자 진행 등 다양한 Crude to Chemical 공정 투자 진행 중
	SKC	▸ 2021년 폐플라스틱 열분해를 위해 울산시와 MOU 체결 및 연 6만 톤 규모 열분해 사업 계획 발표(1,000억 원 투자 예정)
	SK종합화학	▸ 2021년 폐플라스틱 열분해 사업화를 위해 美열분해 전문 생산업체 Brightmark LLC와 협력
	롯데케미칼	▸ 2020년 폐플라스틱 수거문화 개선 및 재활용을 위한 'Project LOOP' 진행
	LG화학/CJ제일제당/SKC	▸ 화이트바이오 산업 진출을 위해 R&D 투자 진행 및 생분해성 플라스틱 산업화 기술 개발 중
	삼양사	▸ 폐플라스틱의 화학적 재활용 기술 상업화
	한화솔루션/송원산업	▸ 생분해성 플라스틱 물성 강화를 위한 친환경 가소제 개발 및 상용화 추진

미국	UOP	▸ 이탈리아 ENI사와 공동 개발한 Ecofining process(Renewable Diesel 생산 공정)의 Licensing을 통한 상업화 진행 ▸ Biomass 열분해 오일(RTP Process : Pyrolysis oil)을 적용한 Refinery co-processing 기술 개발 및 상업화 적용 중
	Natureworks	▸ 생분해성 수지인 PLA(Poly Lactic Acid/Poly Lactide) 기술의 세계 최초 상업화 기술 개발 및 Application 기술 공동 개발
	Agilyx	▸ 2021년 ExxonMobil과 폐플라스틱 재활용을 위한 Joint venture 진행(Cyclyx)
	KBR	▸ Mura Technology와 폐플라스틱 열분해를 위한 Global alliance 협약 체결
	DOW	▸ 생분해성 플라스틱 물성 강화를 위한 친환경 첨가제 개발 및 상용화 추진
일본	JGC	▸ 2020년 5월 JGC, Showa Denko, Ebara, Ube 공동으로 폐플라스틱 가스화 기술 라이센싱을 위한 협약 체결
유럽	Neste (핀란드)	▸ 핀란드 및 싱가포르의 Bio-refinery Capacity 증설 및 Biochemical/ Biopolymer 분야로 사업 확장 중
	BP (영국)	▸ 저효율 Refinery 가동량 축소, Green H2 Pilot Project 가동
	Total (프랑스)	▸ Refinery company에서 Energy company로 전환 천명, 신재생 에너지 사업 및 Renewable Diesel 사업 확대, Grandpuits refinery를 Biorefinery로 전환하며 신재생 전기로 Biofuel, Biopolymer(PLA 및 Bionaphtha) 및 Recycled polymer 생산
	Shell (네덜란드)	▸ LanzaJet社의 산업폐가스 내 '일산화탄소 to 에탄올 전환 기술'에 투자하였으며 2022년 상용급 플랜트 건설 예정
	LyondellBasell (네덜란드)	▸ 2020년 폐플라스틱 열분해를 위한 MoReTec 기술 개발 및 Pilot Plant 실증
	SPEAR (네덜란드)	▸ SABIC/Plastic Energy 조인트벤처로서 2022년 하반기 운전을 목표로 플라스틱 리사이클링 상업화 공정 건설 중

	BASF (독일)	▸ 2050년까지 탄소중립 넷제로 달성 선언. 2025년까지 1조 3,500억 원, 2030년까지 추가로 2조 7,000억 원 투자 예정 ▸ 2018년 폐플라스틱의 화학 원료화를 위한 ChemCycling™ 프로젝트 진행 ▸ 2019년 재생전기를 이용한 Steam cracker용 Furnace 기술 개발 착수 및 SABIC/LINDE와 합작하여 공장 건설 후 2023년 시운전 예정 ▸ 동사 생산 생분해성 고분자인 Ecoflex® 및 Ecovio® 제품 다각화 및 바이오매스 유래 모노머 함량 증진
	Carbiolice (프랑스)	▸ 플라스틱 생분해 가속화를 위한 효소 첨가제 개발 및 분해된 플라스틱 모노머를 재중합하여 플라스틱을 재생산하는 기술 상용화 추진
사우디 아라비아	Aramco	▸ Sabic社와 공동으로 Yanbu에 Crude Oil to Chemicals(COTC) 기술 적용 공장 건설 계획 발표, 코로나 영향에 따른 Project Scope 재검토 중
중국	헝리, 저장, 헝이, 성홍	▸ COTC 기술 상업화 추진 중 ▸ Hengil 는 Phase 1 건설 및 운전을 완료하고 Phase 2 추진 중
	Zhejiang Youcheng Project	▸ Zhejiang Youcheng Holding Group Co., Ltd이 Chongzuo City, 광저우에 50만 톤 규모의 PLA 공장 건설 계획 발표, 기타 다수 Player가 설비 확장 계획 발표
	Kingfa Sci. &Tech, Red Avenue New Materials Group 등	▸ 중국 정부의 Non-Biodegradable Polymer 억제 정책에 따라 다수의 Player 들이 PBAT(Polybutylene Adipate Terephthalate) 생산 공장 설립 계획 발표/건설
캐나다	Enerkem	▸ 2016년 300 톤/일 규모 폐플라스틱 및 바이오매스 처리가 가능한 혼합 가스화 기술 상업화(바이오메탄올/에탄올 생산)

3. 핵심기술 구성 및 선정 배경

중분류	선정 배경	세부기술
탄소중립 원료 활용	• '대량생산/선형경제' → '지속가능/순환경제' 패러다임 전환에 대응하기 위한 석유화학 분야 기술적 breakthrough 필요 • 온실가스를 필연적으로 배출하는 납사 등의 석유계원료에서 재생 가능하고, 업사이클링이 가능하거나, 온실가스 저감에 직접 활용할 수 있는 원료로 대체하기 위한 기술개발 필요 • 기존 석유중심 생산시스템에 대한 충격을 최소화하면서, 탄소중립 원료의 분자구조에 적합한 혁신적 전환 공정 개발	① 바이오매스 활용 ② 폐플라스틱 활용 ③ C1 가스 전환
공정탄소 저감	• 공정효율이 세계 최고에 도달한 상황에서 단순 효율화만으로는 탄소저감에 한계 존재 • 대부분의 온실가스 배출 요인인 석유화학 반응 및 분리공정 사용 에너지를 재생에너지 기반으로 탈바꿈하고, 신규소재 및 공정을 활용하여 에너지 소비량 대폭 감소 추진	① 석유화학 공정 전기화 ② 저탄소 혁신공정 개발

4. 비전 및 목표

탄소중립 석유화학공정 기술 구현

- (~'25) 바이오나일론 가격경쟁력 확보 (석유화학제품 대비 100%)
- (~'30) 화학제품 배출원단위 저감 (0.58 kg-CO_2/kg-제품) 및 바이오폴리에스터 가격경쟁력 확보(석유화학제품 대비 100%)
- (~'40) 화학제품 배출원단위 혁신 (0.10 kg-CO_2/kg-제품) 바이오폴리올레핀 가격경쟁력 확보 (석유화학제품 대비 100%)

석유화학 기술개발 전략

중분류	현 수준	단기 ~'22	단기 ~'23	단기 ~'24	단기 ~'25	중기 ~'26	중기 ~'28	중기 ~'30	장기 ~'50	목표
탄소중립 원료 활용	바이오매스 활용 TRL 4 [※바이오나일론: 현 석유화학제품 대비 가격 150% 이상]	바이오나프타 생산기술 실증				기존 나프타 가열분해로 투입			해외수소 연계('40~) ▼	('25) 바이오나프타 생산기술 실증, 바이오나일론 경제성 획득
		바이오나일론 가격경쟁력 확보				바이오폴리에스터 가격경쟁력 확보			폴리올레핀 / 사업화	('30) 폴리에스터 경제성 획득 ('40) 폴리올레핀 경제성 획득
	폐플라스틱 활용 TRL 5	플라스틱 나프타/가스화플랫폼 실증							사업화	('30) 양산기술 실증 및 사업화 추진
		플라스틱 해중합 플랫폼 실증				상용화 및 사업화				
	C1 가스 전환 TRL 4	메탄 직접전환 원천 기술 개발				메탄 직접전환기술 실증			상용화	('25) 원천기술 확보
		부생 CO전환 원천기술 개발				부생 CO전환 기술 실증			상용화	('30) 양산기술 실증
공정탄소 저감	석유화학공정 전기화 TRL 2								재생 전력 대량공급 ▼	('30) 전기가열 분해공정 실증
		전기가열 분해공정 요소기술 개발 및 실증							상용화	('40) 전기가열 분해공정 상용화 적용(0.10 kg CO_2/kg 제품 달성)
		전기가열 및 전기화학적 합성공정 요소기술 개발 및 실증							상용화	('40) 전기가열 및 전기화학적 합성공정 실증
	저탄소 혁신공정 개발 TRL 2	에너지 절약형 나프타 분해 기술 실증							상용화	('30) 나프타 분해기술 실증 (0.58 kgCO_2/kg 제품 달성)
		신개념 COTC 기술 요소기술 개발 및 실증							사업화	('30) 저에너지 분리소재 공정기술 실증
		저에너지 분리소재 및 공정 기술 실증							상용화	('40) COTC 기술 실증

■ 정부의 집중지원이 필요한 기간

기술개발

① 바이오매스, 순환자원 활용 석유화학 원료, 고부가 제품 제조기술 개발

② 공정 전기화(신재생 연계), 저에너지화 기술 개발

※ 산업계 수요 기반으로 경제성 확보가 가능한 원료, 공정 우선 개발

정책·제도

탄소중립 제품·공정 조기 보급 및 활용 촉진을 위한 지원 제도*, 온실가스 감축효과 인증 기준 등 마련

* 금융 지원 등 인센티브 제도, 탄소중립 원료 이용제품 의무사용비율 규정 등

5. 중분류별 추진전략

1) 탄소중립 원료 활용

정의

- 석유화학산업의 원료를 재생·순환 가능한 바이오매스, 폐플라스틱, 공정 부생자원을 포함한 탄소중립/저탄소 원료로 변환하는 기술

바이오매스 활용

바이오매스를 액화, 가스화, 또는 유효성분으로 분획하여 석유대체 원료화하고 고부가 소재로 업사이클링하는 기술

폐플라스틱 활용

미활용 플라스틱 폐기물을 석유화학 원료로 환류하거나 업사이클링하는 기술

C1 가스 전환

미활용 가스자원(부생가스, 메탄)을 고부가 플랫폼화합물로 전환하는 저에너지/고효율 전환 기술

기술개발 필요성

- 탄소중립 산업으로의 혁신을 위한 원료 차원에서의 탄소저감/무배출 기술 개발 및 전방산업의 탄소중립을 위한 혁신 소재 공급 필요

세부기술별 기술개발 목표

세부기술	현재국내 기술수준	단기(~2025)	중기(~2030)	장기(~2050)	목표
바이오매스 활용	바이오나프타 TRL 4	바이오매스 나프타	생산 및 원료 활용 기술개발		▪('25) 생산기술 실증 ▪('30) 납사수요 1% 대체 ▪('50) 납사수요 10% 대체
	바이오매스 가스화플랫폼 TRL 4	바이오매스 가스화 및 원료활용 기술개발			▪('25) 가스화기술 실증 ▪('30) 합성가스 전환기술 실증 및 상용모델 개발
	바이오매스 업사이클링 TRL 5	바이오매스 업사이클링			▪('25) 바이오나일론 경제성 획득 ▪('30) 바이오폴리에스터 경제성 획득 ▪('40) 바이오폴리올레핀 경제성 획득
폐플라스틱 활용	플라스틱나프타 TRL 5	폐플라스틱 열분해유의 나프타 생산 /원료 활용 기술 개발 및 실증			▪('30) 양산기술 실증, TRL 7
	플라스틱 가스화플랫폼 TRL 5	폐플라스틱 가스화 및 원료 활용 기술 개발 및 실증			▪('30) 양산기술 실증, TRL 7
	해중합플랫폼 TRL 5	폐플라스틱 해중합 플랫폼 실증	상용화 및 사업화		▪('30) 양산기술 상용화, TRL 9
C1 가스 전환	메탄전환 TRL 4	메탄 전환 공정 개발 및 실증		상용화	▪('24) BTX 수율 30% ▪('24) 생분해성고분자 생산성 0.3 g/L/h ▪('30) 양산기술 실증, TRL 7
	CO전환 TRL 4	부생가스 CO 전환 공정 개발 및 실증		상용화	▪('24) 개미산 생산성 4 g/L/h ▪('24) 아세트산 수율 〉35% ▪('30) 양산기술 실증, TRL 7

현재 수행 중 또는 수행 예정인 R&D　　향후 정부의 R&D투자가 필요한 기술

기술개발 추진방향

1 바이오매스 활용

주요 이슈사항

- EU는 Horizon 2020 프로그램을 통해 바이오매스 확보, 바이오리파이너리, 시장·제품·정책 개발 중심으로 투자해오고 있으며, 2030년까지 석유기반 화합물의 30%를 바이오매스 기반 바이오화합물로 대체하는 정책을 수립
- 미국은 에너지부의 바이오매스 프로그램을 통해 바이오리파이너리를 지원하고 있으며, 다른 정부 기관, 산업계 등과 제휴를 기본 추진
- 국내 미활용 바이오매스 발굴 뿐만 아니라 다양하고 저렴한 원료 확보 체계에 대한 해법 마련 필요
  - · 현재 개발된 바이오매스 전환 공정은 특정 바이오매스 종류에 국한되며 바이오매스 공급체계와의 연계성이 부족한 상황으로 국내에서 확보 가능한 바이오매스 활용 업사이클링 기술개발 필요
- 석유원료와의 차이점으로 기존 석유화학플랜트 활용이 어렵고, 생물전환 기술은 현행 기술로는 전체 바이오매스의 이용 불가능
- 또한, 생물전환 기술은 바이오매스 유래 석유화학 대체 화합물을 생산하는 value-chain이 주로 C6 이하로 제한되어 있어, 이를 극복하기 위한 바이오-화학 융복합 기술 개발이 필요
- 세계 주요국에 비해 국내 바이오매스 관련 정책 및 투자가 미흡한 만큼 선진국과의 기술격차 해소 및 산업 활성화를 위한 정부의 적극적인 정책적 지원 및 투자가 필요

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 바이오매스 나프타 생산 및 원료 활용 기술 개발
  - · 바이오매스 액화를 위한 열분해, 수열분해, 생물학적 분해, 촉매 분해 등 기술 개발
  - · 바이오매스 분해유 내 Oxygenate 성분 제거 기술 개발
  - · 기존 원유 기반 나프타와 바이오매스 액화 나프타 혼합에 따른 생산 제품 다양화 및 석유 나프타와 바이오매스 나프타 비율 최적화
- 바이오매스 가스화 및 원료 활용 기술 개발
  - · 바이오매스 가스화를 통한 합성가스 원료 생산 및 석유화학대체 소재/화합물 생산 전환 기술 개발
- 바이오매스 업사이클링 기술 개발
  - · 바이오매스 주성분 분획화, 바이오매스 분획 물질의 소재화/저분자 원료화 및 고부가화를 위한 바이오-화학 융복합 기술 개발
  - · 바이오매스 활용 탄소중립 산업 혁신소재 설계 및 양산 기술 개발
  - · 고순도 원료 물질 고효율 정제 기술 개발

목표달성전략

- 단기적으로는 기존 시설에서의 활용 효율 극대화, 중장기적으로는 신규 플랫폼 소재 생산기술 개발 추진
- 국내 고유의 신규 플랫폼 화학물질 설계 및 생산 기술을 통한 시장 선도 기술 확보
- 복잡한 성분의 집합체인 바이오매스의 효과적 원료화 및 활용을 위해 융합 연구단 등을 구성하고 기초-핵심-실증 기술이 연계될 수 있는 산학연 얼라이언스 추진 필요
- 다양한 혁신적 신기술 개발 시도와 이에 대한 정밀한 검증 및 차단계 진입 평가 기법 개발
- 바이오매스를 원료로 사용한 제품의 활용 촉진을 위한 법적 인센티브 또는 바이오매스 유래 제품 활용 의무화 규제 수립

  ※ 나프타 분해 설비의 바이오오일 의무 혼합 비율 규정 등
- 기술의 조기 보급 및 시장 선점을 위하여 기술 도입(발굴)/산업화 기술 개발 체계를 구축하고 성과 공유 및 활용에 대한 가이드라인 제시
- R&D 투자와 함께 상용화 보급을 위한 금융 지원 체제 마련

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
바이오매스 나프타 생산 및 원료 활용 기술 개발	· 바이오매스의 액화기술: 파일럿/실증 · 바이오 나프타: 실험실 규모	· 바이오매스 액화 기술: 실증/상용 규모 · 바이오 나프타: 파일럿 규모(최대 10% 바이오매스 혼용 수준)	· ('25) 바이오나프타 생산 기술 실증 · ('30) 국내 납사 수요 1% 대체 · ('50) 국내 납사 수요 10% 대체
바이오매스 가스화 및 원료 활용 기술 개발	· 선진국 대비 기술수준 80% · 파일럿 공정 단계 · 바이오매스 가스화 및 합성가스 전환(에너지연, 서강대, UNIST)	· 상용화 기술 개발 완료(미국 INEOS BIO, 캐나다 Enerkem)	· ('25) 가스화기술 실증 · ('30) 합성가스 전환기술 실증
바이오매스 업사이클링 기술 개발	· 선진국 대비 기술수준 80% · 바이오매스 분획화 및 소재화 기술은 실험실/파일럿 규모 연구 단계(KIST, 화학연, 에너지연) · 셀룰로오스계 통합 활용 기술은 연구 및 파일럿 실증 단계 (생명연, KIST) · 합성생물학 기반 생물촉매 설계 및 신규소재 생산기술은 실험실 규모 연구 단계(KAIST, SK이노베이션)	· 상용화 80% 수준 기술 확보(미국 Natureworks) · 미국, 유럽 중심으로 2030 혹은 2050년까지 석유기반 화합물의 30-50%를 바이오매스 기반 화합물 대체 목표로 상용화 계획 수립 · 선도국 기준 전체 플라스틱 시장의 약 0.5%를 바이오플라스틱이 점유	· ('25) 바이오나일론 가격경쟁력 확보 · ('30) 바이오폴리에스터 가격경쟁력 확보 · ('40) 바이오폴리올레핀 가격경쟁력 확보

2 폐플라스틱 활용

주요 이슈사항

- 국내에서 발생하는 플라스틱 폐기물은 연간 886만 톤에 이르며('18년 기준) 지속적으로 증가하고 있음. 플라스틱 폐기물의 기존 국내 매립지는 2018년 총 218곳으로 전체 매립 용량의 약 45%가 남아있으며, 수도권 매립지는 2025년에 사용이 종료되는 것으로 발표
- 정부는 2018년에 2030년까지 플라스틱 폐기물 발생량 50% 감축 계획을 발표한 바 있으며 2020년에 추가로 2025년까지 플라스틱 폐기물 발생량 20% 감축 및 재활용 비율 70% 상향 계획을 발표함. 이러한 정책을 통해 신규 폐기물 발생량 감소를 실현할 수 있으나, 기존 매립 폐플라스틱과 지속적으로 발생할 미래 폐기물을 저감할 적극적인 기술 개발이 필요
- 기업 개발 동향 : 국내 기업들은 환경사회지배구조(ESG) 경영 계획을 수립하고 친환경 탄소중립 기술 개발에 주목하고 있으며, 이를 위해 다양한 플라스틱 폐기물 활용 기술을 확보하고자 함
- 기술적 이슈 : 현재 플라스틱 재활용 시장에서 물리적으로 활용이 되지 못하는 저가/혼합/오염 플라스틱 폐기물을 단순히 재활용 하는 것을 넘어, 플라스틱 폐기물을 석유화학 대체 원료로 활용하기 위해 분해, 고부가 화합물을 전환하는 화학적, 생물학적 업사이클링(upcycling =upgrade+recycling) 기술 필요

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 폐플라스틱 나프타 생산 및 원료 활용 기술 개발
  - · 폐플라스틱 액화를 위한 열분해, 수열분해, 촉매분해 등 기술 개발
  - · 폐플라스틱 액화 생성물의 나프타, 방향족, 올레핀 등 석유화학 기초원료 전환 기술 개발
- 폐플라스틱 가스화 및 원료 활용 기술 개발
  - · 폐플라스틱 열화학적 가스화 기술 개발
  - · 폐플라스틱 유래 합성가스로부터 고부가 석유 대체 화학원료 생산 기술 개발
- 폐플라스틱 분해 및 업사이클링 기술 개발
  - · 폐플라스틱 선택적 분해를 통한 플라스틱 단량체 생산 기술 개발
  - · 폐플라스틱 유래 단량체 정제 및 고부가화 업사이클링 기술 개발

목표달성전략

- 석유화학산업에서 발생하는 온실가스 감축 및 지속가능한 탄소원의 사용을 위해 다양한 폐플라스틱 원료를 분류하고 각 원료에 대응하는 폐플라스틱 순환 전략 수립
- 산학연에서 개발 완료한 플라스틱 리파이너리 핵심 원천 기술의 심화 및 실증 기술 개발 추진
- 플라스틱 리파이너리 공정 실증을 위한 테스트베드 구축 및 관련 기업 참여 유도
- 저급 플라스틱 폐기물 원료 확보를 위해 지자체의 플라스틱 폐기물 수거 체계와 연계 방안 마련
- 플라스틱 폐기물 유래 화학원료의 원활한 시장 진입을 위해 친환경 제품 인센티브 강화

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
폐플라스틱 열분해유의 나프타 생산 및 원료 활용 기술 개발	· 1 톤/일 규모 파일럿 기본 설계 연구 개발 중(폐플라스틱 열분해유로부터 나프타 생산 연구는 초기 단계이며, 열분해유의 수율은 약 60% 수준), TRL 5 · 선도국 대비 기술수준 : 70% (SK이노베이션, 한화솔루션, 에너지연)	· 2만 톤/년 규모 플랜트 착공(네덜란드 Sabic, Plastic energy)	· ('30) 납사 수율 60%, 납사 품질 스펙 충족, 50 톤/일 규모 연속 운전 실증, TRL 7 · ('30) 플라스틱 액화 생성물의 나프타 및 석유화학 공정 혼합 적용 실증, TRL 7
폐플라스틱 가스화 및 원료 활용 기술 개발	· 가스화기 냉가스 효율: 60%, TRL 5 · 선도국 대비 기술수준: 80%(에너지연, 고등기술원, 생기연)	· 상용화 100% 수준의 기술 확보(캐나다 Enerkem, 일본 Ebara-Ube, 스위스 Thermoselect 등)	· ('30) 가스화기 냉가스 효율:65%, 합성가스 수율 60% 및 10 톤/일 규모 연속 운전 실증, 100 톤/일 규모 연속 공정 설계 · ('30) 플라스틱 가스화 생성물로부터 연료 및 석유화학 기초원료 생산 실증, TRL 7
폐플라스틱 해중합 및 업사이클링 기술 개발	· 화학원료 수율 80%, TRL 5 · 선도국 대비 기술수준 89%(롯데케미칼, 시온텍, 화학연)	· 상용화 90% 수준의 기술 확보(이탈리아 Garbo, 일본 Jeplan, 네델란드 Ioniqa 등)	· ('30) PET, PU, PA, PLA, PC 등 플라스틱 원료로부터 단량체 제조 및 정제 기술 상용화, TRL 9

3 C1 가스 전환

주요 이슈사항

- 대량의 셰일 가스전의 개발과 채취 기술의 발전으로 현재 확인된 매장량은 187조 4,000억 m^3(잠재 매장량 : 635조 m^3)로 전 세계가 59년 동안 사용 가능한 양이며 전통 가스나 석유의 확인 매장량과 비슷함
- 석유화학 플랜트에서 발생하는 부생가스는 열원으로 사용 후 이산화탄소로 배출되는데 이는 탄소중립 달성 저해 요소
- 향후 공정전기화 등의 신공정 도입에 의해 잉여 배출이 메탄가스(CH_4)와 기존 석유화학 플랜트에서 발생하는 부생가스 내 일산화탄소(CO)를 활용한 고부가가치 제품 생산을 통해 새로운 석유화학산업 생태계를 구축할 필요가 있음
- 부생가스는 유효성분의 농도가 낮고 불순물이 다량 함유되어 열화학적 전환이 어렵고 메탄은 분자구조가 안정하여 전환 과정에서 과다한 에너지가 투입
- 최근 생물학적 가스 전환 기술이 검토되어 기술 개발이 활발히 진행되고 있으나 생산 가능한 제품이 한정적이고 기-액 전달 등의 어려움으로 상업화 가능한 성능 지표에 도달하지 못하는 실정

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 메탄 전환 공정 개발
  - · 메탄의 저에너지 직접 전환을 위한 촉매 화학적, 생물학적 전환 기술 개발 및 실증
  - · 메탄 활용 $C_{>2}$ 화합물 생산 화학전환 기술 개발
  - · 메탄/CO_2 활용 생분해성 고분자 양산 기술 개발
- 부생가스 일산화탄소 전환 공정 개발
  - · 저순도 일산화탄소 전환을 위한 촉매 화학적, 생물학적 전환 기술 개발
  - · 부생가스 활용 생분해성 고분자 양산 기술 개발
  - · 부생가스와의 연계 및 자원화 기술 개발

목표달성전략

- 기(旣) 개발된 원천기술의 현장 적용 및 개별 기술의 통합 실증을 위한 산학연 연구 컨소시엄 지원
- 부생가스 발생 산업체나 바이오/매립지가스 발생 지자체의 적극적인 사업 참여 및 가스화학공정 실증을 위한 유틸리티/부지 제공
- 부생가스, 바이오/매립지가스 활용 화학제품에 대한 친환경 제품 인센티브 강화(청정연료의 경우 RFS 인증)
- 전주기 평가를 통한 기존 화석연료 기반 석유화학 공정 대비 실질적 이산화탄소 배출 저감 효과 제시

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
메탄 전환 공정 개발	· 선도국 대비 기술수준 90% · 파일럿 공정 단계 · 알코올 제조(KIST, 서강대, 아주대) · 올레핀 제조(KAIST, 화학연, KIST) · BTX 제조(서강대, 서울대) · 메탄 생물학적 전환 효소, 균주 및 공정 개발(서울대, 서강대, 경희대 등)	· 화학전환: 상용화 수준의 기술 확보(Saudi Aramco 미국 Siluria tech 社와 기술 제휴('18), 미국 Siluria Oxidative coupling에 의한 메탄 전환 기술 상용화) · 생물학적 전환: 연구실 수준(MIT, Northwestern Univ.)	· ('24) BTX 수율 〉30% · ('24) 생분해성 고분자 생산성 〉0.3 g/L/h · ('30) 양산기술 실증 및 상용화 진입
부생가스 CO 전환 공정 개발	· 선도국 대비 기술수준 80% · 파일럿 공정 단계 · 일산화탄소 활성화 촉매 개발(생기연, 아주대, KAIST, RIST, 성균관대, 화학연) · 일산화탄소 생물학적 전환 효소, 균주 및 공정 개발(국민대, KAIST, GIST, KIOST, UNIST, KIST, 에너지연, 화학연)	· 화학전환: 상업화 단계 (Fischer-Tropsch 공정, Sasol, Shell, ExxonMobil 등) · 생물학적 전환: 상업화 단계 (LanzaTech)	· ('24) 개미산 생산성 〉4 g/L/h · ('24) 아세트산 수율 〉35% · ('30) 양산기술 실증 및 상용화 진입

2) 공정 탄소 저감

정의

- 저탄소 석유화학산업 구현을 위해 온실가스 감축이 가능한 재생에너지 연계 저에너지/저탄소 전환 공정 기술

화학공정 전기화

화석원료 기반 에너지원을 재생에너지 기반 전기 에너지원으로 대체하는 석유화학 공정 기술 및 관련 부품소재 기술

저탄소 혁신공정 개발

석유화학 공정 투입 에너지의 혁신적 감소를 위한 에너지 절약형 촉매공정 및 분리기술

기술개발 필요성

- 석유화학 온실가스 배출량('19년, 7천 1백만 톤)의 대부분은 석유화학 반응 및 분리에 필요한 화석원료 기반 고에너지 소비에 기인하며, 이에 화학원료 생산에 재생에너지를 연계한 반응·분리 공정기술 개발 필요

세부기술별 기술개발 목표

세부기술	현재국내 기술수준	단기 (~2025)	중기 (~2030)	장기 (~2050)	목표
화학공정 전기화	분해공정 TRL 2	전기가열 분해공정 적용 기술 개발 및 실증			▪('30) 양산기술 실증, TRL 7 ▪('40) 재생에너지 연계 양산 기술 적용, 전기가열로 보급 및 기존 가열분해로 20% 대체, 화학제품 배출원단위 0.10 $kgCO_2/kg$ 제품 달성
	합성공정 TRL 2	전기가열 및 전기화학적 합성공정 적용기술 개발 및 실증			▪('40) 양산기술 실증, TRL 7
저탄소 혁신 공정 개발	나프타 분해 TRL 5~6	에너지 절약형 나프타 분해 기술 실증			▪('30) 양산기술 실증, 화학제품 배출원단위 0.58 $kgCO_2/kg$ 제품 달성, TRL 7
	COTC TRL 2	신개념 COTC 기술 요소기술 개발(연료유 전환 기술 등)		실증	▪('40) 양산기술 실증, TRL 7
	분리공정 TRL 2~4	저에너지 분리용 소재와 공정 기술 개발 및 실증			▪('30) 양산기술 실증, TRL 6~7

현재 수행 중 또는 수행 예정인 R&D　　향후 정부의 R&D투자가 필요한 기술

기술개발 추진방향

1 화학공정 전기화

주요 이슈사항

- 석유화학 온실가스 배출원은 고온 공정용 에너지 소비가 대부분을 차지하므로 탄소중립을 위해서는 기존 화석연료가 아닌 재생에너지 기반 전기를 활용한 전기가열로 공정 개발 및 실증이 필수적
- 석유화학 공정에 전기가열로 적용은 최근 글로벌 선도기업에서 활발한 연구개발을 진행 중이며, 국내 실정에 맞는 차별화된 소재, 공정 개발 및 재생에너지와 연계된 실증이 필요
- 선진국을 중심으로 유용한 화합물 합성 공정에 전기화학적인 방법을 도입함으로써 선택성을 높이고 공정을 단순화하여 효율을 높이는 연구가 진행되고 있으므로 국내에서도 실정에 맞는 차별화된 기술개발과 실증이 필요함

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 나프타 분해 공정에 전기가열로 적용을 위한 소재, 공정 기술 개발
- 합성 공정(청정수소 생산, 폐플라스틱 활용, 부생가스 원료 고부가화 제품 제조 등)에 전기가열로 플랫폼 활용 기술 개발
- 재생에너지 연계 대규모 전기가열로 공정시스템 실증
- 재생에너지 연계 전기화학적 합성공정 실증

목표달성전략

- 국내 기존 개발 기술, 산업 환경, 인프라 등을 고려한 글로벌 선도기업과는 차별화된 국내 실정에 맞는 한국형 전기가열로 공정 개발
- 타 기술과의 공동 개발을 통한 기술 융복합 효과 극대화 추진. 에너지 손실 방지 및 공정에 적합한 전력 공급 방안 개발을 위하여 신재생에너지 기술과의 연계를 추진하고, 전기화에 의한 잉여 메탄을 고부가화하여 화학원료 수율 및 경제성 향상
- 개발 초기 단계부터 산학연 얼라이언스 구성을 통한 상용화 기간 단축

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
전기가열 분해공정 적용 기술	· 차별화된 촉매식 나프타 분해기술(화학연)	· 전기가열 나프타 분해 기술: 상용화 50% 수준(독일 BASF, 미국 Dow-Shell)	· ('30) 양산기술 실증, TRL 7 · ('40) 재생에너지 연계 양산기술 적용 전기가열로 보급 및 기존 가열 분해로 20% 대체, 0.10 $kgCO_2/kg$ 제품 달성
전기가열 및 전기화학적 합성공정 적용 기술	· 이산화탄소를 활용한 메탄으로부터 수소 제조 기술(화학연)	· 전기가열 메탄으로부터 수소 전환 기술: 상용화 50% 수준 (덴마크 Haldor Topsoe) · 전기화학적 방법으로 에틸렌으로부터 에틸렌옥사이드 합성 (U. of Toronto)	· ('40) 전기가열 및 전기화학적 합성공정 양산 기술 실증, TRL 7

2 저탄소 혁신공정 개발

주요 이슈사항

- 석유화학 공정 내 전환에너지 감소를 위해서는 기존 에너지 다소비 공정에 혁신적 에너지 절약형 촉매 공정 및 분리기술 개발이 필수적
- 향후 연료유 수요 감소 및 화학제품 수요 증대에 따른 연료유 과잉이 예측되므로, 원유에서 화학제품을 최대로 생산하는 COTC(Crude Oil to Chemicals) 기술개발을 통해 석유화학산업의 전환에너지 감소가 필요
- 특히 석유화학제품 생산에서 분리기술은 단일기술로는 가장 많은 에너지 소비와 온실가스가 배출되는 기술 중 하나이며 향후 바이오매스, 폐플라스틱 자원화 등 저탄소 자원화 공정의 분리기술로 확장 가능성이 매우 높음

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

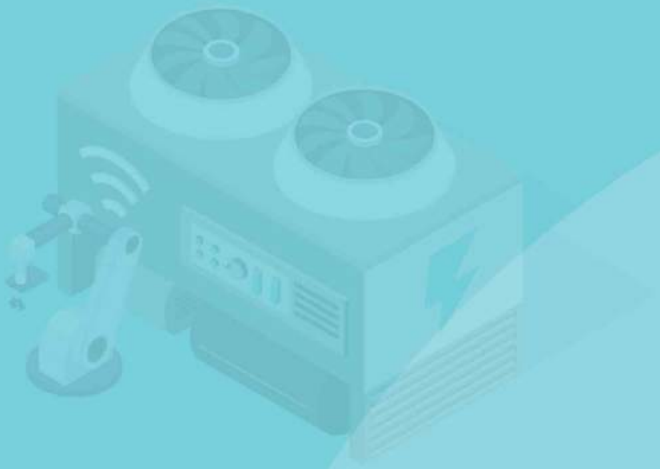
- 석유화학산업 온실가스 배출량의 70%를 차지하는 기존 나프타 열분해 공정을 에너지 절약형 공정으로 전환(전기가열로 기술과 연계)
- 향후 연료유 및 화학제품 수요 불균형 예측으로 인해 중국, 중동을 중심으로 COTC(Crude Oil to Chemicals) 기술이 상용화되고 있으며, 가격경쟁력 확보를 위한 국내 실정에 맞는 차별화된 COTC 기술개발
- 연료유를 기초화학 원료 물질로 전환할 수 있는 요소기술 개발
- 분리용 소재 중심 기술(다공성 흡착제 기술, 고효율 분리막 모듈 기술) 및 탄소중립 원료 활용기술이 연계되어 저에너지 하이브리드형 분리 신공정 기술의 개발이 동시에 진행되는 소재-공정 융합 기술 개발 및 실증

목표달성전략

- 세계 최초로 국내에서 개발된 촉매식 나프타 분해 공정 및 나프타-메탄올 동시 분해공정의 실증을 통한 에너지 절약형 나프타 분해 기술 실증
- 국내 기존 개발 기술, 산업 환경, 인프라 등을 고려한 글로벌 선도기업과는 차별화된 국내 실정에 맞는 한국형 COTC 촉매 공정 개발
- 개발 초기 단계부터 산학연 얼라이언스 구성을 통한 상용화 기간 단축

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
에너지 절약형 나프타 분해 기술 실증	· 세계 최초 촉매식 나프타 분해 공정 및 나프타-메탄올 동시 분해 공정(화학연)	· 상용화 사례 없음	· ('30) 에너지 절약형 나프타 분해 기술 실증, TRL 7 (0.58 $kgCO_2/kg$ 제품 달성)
신개념 COTC 기술 개발	· 국내 기술 없음	· Hengli Petrochemical ('18년 상업화, 프랑스 Axens 기술) · Zhejiang Petreleum and Chemical('19년 상업화, 미국 UOP 기술)	·('40) 차별화된 COTC 기술 요소기술 실증, TRL 7
저에너지 분리용 소재와 공정기술	· 기존 프로필렌/프로판 분리공정 대비 에너지 소비량 5% 이상, 이산화탄소 배출 10% 저감 · 선도국 대비 기술수준 50% · 기술개발 단계 TRL 2-4(화학연)	· BASF 다공성 흡착제(독일 BASF) · OSN 분리막(독일 EVONIK), PVA 분리막(독일 GKSS, 미국 MTR)	· ('30) 증류 공정 대비 에너지 저감율 10% 이상, 이산화탄소 배출 저감율 20% 이상



산업공정 고도화

Ⅲ. 산업공정 고도화 기술개발 전략

1. 개요 67
2. 국내·외 현황 68
3. 핵심기술 구성 및 선정 배경 77
4. 비전 및 목표 78
5. 중분류별 추진전략 79

1. '산업공정 고도화' 개요

공정 중 직접 배출되는 온실가스(F-gas, N_2O 등) 배출을 줄이고, 에너지·자원 효율을 극대화할 수 있는 에너지 다소비기기, 공정제어·관리 및 배출가스 처리 기술 고도화 기술

	반도체·디스플레이 그린공정 개발	산업기기·공정 효율화
정의	전자산업 공정에서 직접 배출되는 온실가스인 F-gas, N_2O 등을 제어하기 위한 저에너지 및 고효율 스크러버 기술	산업현장에서의 에너지 효율 개선을 위한 기기 효율 향상, 공정 및 공장 효율 개선을 위한 기술
필요성	우리나라 주력산업인 전자산업의 온실가스 감축을 통해 탄소세 등 국제 규제에 대응 및 경쟁력 강화	산업부문 에너지 소비의 65%를 차지하는 구동 관련 전동기를 포함한 전기기기와 열원기기의 효율향상, 공정·공장 에너지 최적화 기술혁신을 통한 탄소배출량 저감 및 글로벌 기술 경쟁력 강화

2. 국내·외 현황

1) 정책 및 제도 동향

세계

- 주요국의 탄소중립 선언에 따라 관련 정책 및 제도 마련 중

EU

유럽 그린딜('19.12)을 통해 2050 기후중립 목표 발표와 함께 탄소국경세* 도입 추진 중('23년 시행 예정)

*탄소국경세 : EU로 수입되는 제품 중 이산화탄소 배출이 많은 국가에서 생산된 제품에 과세를 부과하는 조치로 2023년부터 시행 계획

· 유럽기후법 개정으로 에너지효율 목표(현재 '30년 32.5%) 상향 예정

미 국

바이든 대통령의 주요 대선공약인 2050 탄소중립 추진

일 본

스가 총리 의회 연설('20.10)에서 2050 탄소중립 목표선언 → 旣 제출한 LEDS('19.6, 80% 목표) 수정 예정

중 국

유엔 총회('20.9)에서 2060 탄소중립 선언('30년 배출량 정점)

· 14차 5개년 계획('20.10)에서 오염물질 배출 저감 및 효율 향상 등 6대 목표 발표

국내

- 2050 탄소중립 전략에 따라 산업에서 배출되는 불소계 온실가스의 감축 목표 향상 및 산업부문 에너지 효율 향상 추진

- '반도체·디스플레이 탄소중립위원회' 출범 및 대표기업 4개사 '2050 반도체·디스플레이 탄소중립 공동 선언문' 등을 통해 업계의 탄소중립 선도 의지 표명
- IPCC 가이드라인을 따라 국가 온실가스 통계를 작성 중이지만 반도체·디스플레이 산업에서 배출되는 Non-CO_2 온실가스의 정확한 배출량과 Scrubber를 통한 처리효율이 보고되고 있지 않은 실정
- 2040년까지 매년 국내총생산(GDP)는 연평균 2.4%, 산업부문 에너지 수요는 연평균 1.1% 증가('17~'40)를 예상하여 관련 정책을 수립 중
- 선진국형 고효율·저소비로 전환을 목표한 제3차 에너지기본계획('19.6), 에너지효율 혁신전략('19.8) 및 제6차 에너지이용 합리화 기본계획('20.8) 발표

2) 시장동향

세계

● 반도체·디스플레이 및 FEMS 수요 증대로 시장 확대 전망

반도체· 디스플레이 그린공정 개발	● 반도체, 디스플레이 장비 시장은 지속적 성장과 스크러버 시장의 동반 성장 전망 · 스크러버 시장은 장비 시장의 3% 규모로 추정(약 12.6억 달러, '17) ※ 화학물질 제어 장치(7.66%), 가스제어장치(6.37%), 기타 후처리 설비(4.97%) 등의 시장 역시 규모 확대 중 · 디스플레이 산업은 OLED가 LCD 시장을 대체하면서 OLED 비중이 2023년까지 30.9%까지 확대될 것으로 예상(OMDIA) · 삼불화질소(NF_3)는 대체 물질이 없어 지속 성장이 예상되며, 수요기업의 지속적인 라인 증설로 연평균 성장률(CAGR)은 7%('19~'25)로 예상 · 반도체 공정 및 전력기기 시장은 GWP가 낮은 신규 온실가스를 이용한 친환경 기술개발이 활발하며 추후 관련 시장 지속 확대 전망 ※ 반도체공정 Low-GWP 신규 온실가스 사용량 전망 : ('20) 0 ton/yr → ('30) 1,300 ton/yr ※ 세계 냉매시장은 20조 원 대로 매년 5% 수준의 성장이 전망되고, 국내에서는 2020년에 HCFC 계열 사용 중단됐으며 키갈리 개정의정서에 의해 점진적으로 낮은 GWP의 HFO계열 냉매로 전환 예정 · 전력반도체는 전기·수소자동차 보급 확대* 등 신재생에너지 활용 요구 증대에 따라 2023년 530억 달러 규모**에 이를 것으로 전망 * 글로벌 친환경자동차 판매량 : 2019년 200만 대 돌파 후 연평균 29% 성장해 2025년 1,120만 대, 2030년 3,110만 대 전망(딜로이트, '19) ** 글로벌 전력반도체 시장 규모 : 2019년 약 450억 달러 → 2023년 약 530억 달러 성장(OMDIA, '20.2)
산업기기·공정 효율화	● IoT 및 AI기술이 결합된 고효율·지능화 산업기기, FEMS, 그린 스마트팩토리의 적용 확대 추진 * 글로벌 FEMS 시장 규모 : 2015년 135억 달러 → 2024년 356억 달러(Navigant Research, '15) · 유럽의 경우, 산업공정 열공급의 탄소중립(전기화)을 위한 산업용 히트펌프 시장에 16개 기업이 참여(약 30종류의 제품 라인업 확보)하고 있으며, 식음료, 건조공정 등 120 ℃ 이상의 열공급이 가능한 고온 히트펌프 개발 및 실증 확대 중

국내

- 탄소중립 실현을 위하여 온실가스 감축을 위한 설비 도입, 기기고도화 등 산업 효율 개선과 관련 시장 확대 전망

반도체· 디스플레이 그린공정 개발	• 온실가스 감축을 위한 수요기업의 설비 도입 확대 및 효율개선을 위한 시장 성장 전망 · 특히, 반도체 수요 확대 및 시스템 반도체의 성장 및 차세대 디스플레이 제품인 OLED 신 · 증설 투자에 따른 장비 시장 규모의 증가 예상 · NF_3, PFCs(CF_4, C_4F_8), HFCs(CHF_3) 및 N_2O 사용량의 지속적 증대와 대부분 국내 기업 주도로 생산 확대 · 자동차, 태양광 등 시스템 기업은 전력변환 효율 개선을 위하여 SiC 등 신소재 기반의 전력반도체 탑재를 본격화할 전망
산업기기·공정 효율화	• 80 °C급 온수 생산이 가능한 히트펌프가 출시되어 있으며, 전기화 이슈에 따른 저효율 보일러 대체 및 공정 열공급 고도화를 위한 시장 성장 전망 · 최근 산업폐열 이용 제고를 위한 수백 kW급 공정용 스팀 생산 히트펌프 개발 및 시장 출시 준비 중 · 10만 TOE이상의 에너지 다소비 기업의 FEMS(공장에너지관리시스템) 설치 의무화 시행('25)에 따라 FEMS 시장 지속 확대 전망 · FEMS 활용을 통한 공장 디지털화 및 제조업 효율 향상을 위한 노력이 시장에 나타나는 중 ※ 국내 FEMS 시장 : 2020년 약 1.1조 원, 연평균 28.4% 성장 전망(NIPA)

3) 기술동향

반도체·디스플레이 그린공정 개발

- 온실가스와 NO_x를 동시에 저감할 수 있는 처리기술과 Low-GWP 가스 소재 개발 절실

공정가스 배출제어 기술	• 반도체, 디스플레이 제조 회사별로 배출제어 기술을 도입·사용 중이며 배출제어기술은 세계 최고 수준 기술 보유 · 제품 성능의 고도화, 정밀화에 따라 공정가스 사용량과 종류가 다양해져 배출가스 제어 기술의 고효율 및 소형화 장비에 대한 연구 진행 중
친환경 공정가스 대체·전환 기술	• 기존 공정가스는 화학적 안정성 및 무독성의 성질을 보여 널리 사용되고 있지만 GWP가 CO_2 대비 수천~수만 배이므로 소량으로도 환경에 큰 영향을 미침 · Low-GWP 소재는 글로벌 불소화학 기업(3M, Honeywell, DuPont, Daikin 등) 중심으로 개발·제조·판매되고 있어 해외의존도가 매우 높고 선제적 특허출원으로 기술 장벽 존재 ※ GWP 500 친환경 가스개발 시 CO_2 97% 감축효과 기대, GWP 150 미만의 친환경 가스 개발 및 적용 시 99% 감축효과 기대 (NF_3 GWP 16,100 기준) ※ SF_6는 전체 가스차단기(중전기기)의 80%에 사용되고 있음. 선진사인 3M, ABB, GE는 SF_6를 대체하기 위한 다양한 대체가스 및 이를 이용한 전력기기 개발을 진행 ※ 효성중공업은 3M사가 독점 지적재산권을 보유하고 있는 Novec 4710 절연가스 회피기술을 개발하기 위한 신규 온실가스 기반 70 kV급 중전기 개발 중
온실가스 인증 측정기술	• 공정가스 배출 제어기술이나 친환경 공정가스 대체·전환 기술이 개발되었을 때 온실가스 저감효과를 입증하기 위해 체계적이고 공인된 측정 방법 및 이를 입증할 테스트베드의 설치, 운영, 측정, 검·인증 등 필요
고효율 저전력 소자·패널 기술	• Si MOSFET, IGBT 등 기존 실리콘 기반의 전력반도체 대비 SiC와 같은 Wide Band Gap 기반의 화합물 반도체의 고온 친환경 공정기술과 디스플레이의 소비전력 효율화 및 최소화시키기 위한 기술 개발 필요성 증대 · 높은 Band Gap으로 인해 500 °C의 고온에서의 이온주입과 1,200 ~ 1,300 °C 이상의 고온에서의 산화막 형성 필요 · 기존 고화질 디스플레이의 소비전력을 절감 및 대면적 디스플레이의 초 저소비 전력화를 위한 기술 개발(전광판/입간판 : 26.5, TV : 3.53, 모니터 : 0.65, 기타 0.19)

산업기기·공정 효율화

- 부분적인 효율 및 구조개선 등의 전통적 방법만으로는 탄소중립 목표달성이 어려우므로 혁신적인 해결 기술 필요

에너지 다소비기기 효율향상	• 에너지 자원의 최대 소비 주체인 에너지 다소비기기 핵심부품의 기술적 수준 및 고부가가치 제품의 경쟁력 미흡 · 유럽 및 일본의 경우, 산업공정 열공급 전기화의 큰 축을 담당하는 히트펌프의 산업적용 범위를 넓히기 위한 고온(200 ℃급) 히트펌프 개발 추진 중 · IE4 전동기가 일부 선진사를 통해 상용화 중이며, 효율과 가격 경쟁력 기반의 IE5급 차세대 전동기 기술 개발 중
공정효율 최적화 기술	• 에너지 다소비 공정을 중심으로 에너지 효율화 기술을 도입하여 사용 중이며, 공정 운영상의 최적화 기술은 세계적 기술 수준을 보유 · 효율 최적화 기술은 주로 운영 단계에서의 동적 스케줄링 및 최적 제어, 공정 불량률 저감의 형태로 개발 중
그린 스마트팩토리 고도화 기술	• 전 세계적으로 에너지 효율화를 위해 고효율에너지기기 개발 중심에서 IoT기반 에너지 관리시스템을 포함한 고효율 스마트팩토리 고도화로 이동 중 · 데이터 분석을 통한 에너지 절감 기술은 미성숙 상태이며, 국내의 우수한 IoT 기술기반으로 전력 및 무선 가스미터 실증 중

4) 산업협황

반도체·디스플레이 그린공정 개발

- 반도체·디스플레이 산업의 공정가스 대체 소재 개발·검증 및 저전력 고효율 소자·패널 기술 확보를 위한 선제적 대응 필요

공정가스 배출제어 기술	초기에는 미국, 독일 등 선진 기술을 수입했으나 국내 전자산업이 세계 일류 수준으로 발전함에 따라 내수시장의 대부분을 국내 중소기업이 주도 중
친환경 공정가스 대체·전환 기술	2000년 초 일본 중심으로 반도체, 디스플레이 공정챔버 대체 세정가스 개발이 활발히 진행
온실가스 인증 측정기술	신규 개발 온실가스의 GWP값 측정을 위한 인증기관 전무
고효율 저전력 소자·패널 기술	독일 인피니언과 미국 TI에서 선도 기술을 보유 중이며, 국내 기업에서도 신소재 기반의 기술개발 본격화

[반도체·디스플레이 그린공정 개발 주요 키플레이어 현황]

세부기술	국가	기업명	기술개발 현황
공정가스 배출제어 기술	미국	에드워드	▸ Burn-Wet, 국내 CSK와 합병하여 국내 영업
	일본	에바라	▸ Burn-Wet
		칸켄	▸ Heat-Wet
	한국	유니셈	▸ Burn-Wet, Plasma-Wet, Heat-Wet
		GST	▸ Burn-Wet, Plasma-Wet, Heat-Wet
		MAT+	▸ 촉매를 적용한 Heat-Wet 주력

친환경 공정가스 대체·전환 기술	미국	린데	▸ F_2 제조기술, F_2/N_2 mixture gas 개발 완료
	일본	쇼와덴코	▸ Fluoro-Carbon계 식각가스 global No.1
		다이킨	▸ COF_2 공정가스 확보
	한국	SK머티리얼즈	▸ 삼불화질소(NF_3) global M/S No.1(10,000 톤 이상) ▸ NF_3 대체 F_3NO 친환경 공정가스 원천기술 보유
		원익머트리얼즈	▸ 아산화질소(N_2O) 생산량 10,000 톤 이상
		효성	▸ 삼불화질소(NF_3) 생산량 5,800 톤
온실가스 검증·인증 측정기술	▸ 신규 개발 온실가스의 GWP 값 측정을 위한 인증기관 전무		
고효율 저전력 소자·패널 기술	독일	인피니언	▸ SiC, GaN 등 신소재 기반 전력반도체 선도 기술 보유
	미국	TI	▸ 자동차, 산업용 등 Power IC 분야 선도 기술 보유
	일본	ROHM	▸ SiC 소자의 Trench 구조 공정 기술 보유
	한국	KEC	▸ 실리콘 기반 MOSFET, IGBT 주력, SiC 개발 중
		실리콘마이터스	▸ 무선충전 및 전력관리용 Power IC 기술 보유
		SDC & LGD	▸ OLED 저전력 구동기술 개발 보유

산업기기·공정 효율화

● 선도 기업과 기술격차를 좁히기 위한 R&D 요구

에너지 다소비기기 효율향상	최고 기술 보유국인 일본과 기술 격차를 점차 좁혀 나가는 중
공정효율 최적화 기술	미국, 독일, 일본을 중심으로 산업공정 전반에 걸친 에너지 효율화가 본격 진행 중이며, 국내에서는 대기업의 에너지 다소비 공정을 중심으로 추진 중
그린 스마트팩토리 고도화 기술	디지털화, FEMS 융합, 에너지 네트워크를 통한 제조업 효율향상 노력이 시장에 반영되는 중

[산업기기·공정 효율화 주요 키플레이어 현황]

세부기술	국가	기업명	기술개발 현황
에너지 다소비기기 효율 향상	일본	미쯔비시중공업	▸ 출수온도 60 °C 공랭식 히트펌프 칠러(3D 스크롤) ▸ Low-GWP 냉매 적용 200 °C급 산업용 히트펌프 개발 중 ▸ 서보모터용 영구자석 전동기기술
		도시바캐리어	▸ 한랭지형 공랭식 히트펌프냉동기
		고베 스틸	▸ 165 °C(現 세계최고) 스팀 생산 히트펌프 상용화
		신일본제철	▸ 저손실의 전기강판 기술, 세계 1위 30% 점유율
	독일	지멘스	▸ 하이브리드형 전동기 회전자, 자동권선 기술 기반 IE4 전동기 사용화
	한국	한국냉난방시스템	▸ 한국형 멀티 다중열원 냉난방시스템 COP 3.7
		부스타	▸ 미쯔비시전기 한랭지 냉난방겸용 컴팩트큐브 COP 4.2
		MTS	▸ 지열원 결합 80 °C 고온수 히트펌프
		귀뚜라미	▸ 120 °C 스팀 생산 산업용 히트펌프 개발 및 출시 준비 중
		월드이앤씨	▸ 120 °C 스팀 및 8 °C 냉수 동시생산 히트펌프 개발 및 출시 준비 중
		매그플러스	▸ Low-GWP 냉매 적용 대온도차(70 °C) 냉온수 동시생산 히트펌프 개발 중
		현대중공업/효성중공업	▸ IE3급 저압 유동전동기 상용화, 3.0 kV이상의 고압전동기 기술

공정효율 최적화 기술	미국	IBM	▸ 2000년대 초반부터 에너지 소비 모니터링, 분석, 제어체계 구축 관리 기술 확보, 'GIView FEMS'
	독일	지멘스	▸ 데이터 기반의 공정 자동화, 최적화을 기술 확보하고 암벡 공장 적용, 기존 대비 에너지효율 30% 개선
	일본	후지쓰IT	▸ 에너지흐름 가시화와 원격제어
	한국	LS산전	▸ 자동화 기반 스마트공정 라인 FEMS 구축으로 연간 25% 에너지 비용 절감
		대우조선해양	▸ 에너지 자동제어시스템 구축을 통해 이전 대비 각각 7%, 18% 절감
그린 스마트 팩토리 고도화 기술	미국	GE	▸ 산업용 빅데이터 처리 및 분석을 통한 예측
		Emerson	▸ 플랜트 설비 관련 에너지 센서 기술 구축
	일본	화낙	▸ 엣지 컴퓨팅 방식과 인공지능을 결합한 독자 스마트팩토리 시스템 개발 및 개방형 플랫폼 제공
		Landis+Gyr	▸ 에너지 측정 계량 솔루션 제공 및 스마트그리드 연계 프로젝트 진행
	독일	지멘스	▸ FEMS 보급 확대를 위한 신뢰성 있는 효율적 에너지솔루션 개발 및 제공
	한국	SKT	▸ IoT 통신용 loRa 전국망 구축 및 무선 가스 미터 실증
		KT, LG U+	▸ IoT 통신용 NB-IoT 전국망 구축 및 전력 미터 연동테스트

3. 핵심기술 구성 및 선정 배경

중분류	선정 배경	세부기술
반도체·디스플레이 그린공정 개발	• 전자산업 분야의 기술 고도화에 따라 정밀·집적화를 위한 가스종 및 사용량 증가로 배출가스 제어 기술 고도화 및 장비 소형화 기술 필요 • 식각, 세정 및 증착 공정에서 사용되는 온실효과 높은 공정가스를 Low-GWP 공정가스로 대체하고 중장기적 친환경 공정가스 개발 필요 • 전 세계적으로 GWP 측정요소의 통합측정 및 신뢰성측정이 가능한 기관이 전무	① 공정가스 배출제어 기술 ② 친환경 공정가스 대체·전환 기술 ③ 온실효과 측정 검증·인증 기술 ④ 반도체·디스플레이 고효율·저전력 소자·패널 기술
산업기기·공정 효율화	• 탄소중립을 위한 산업부문 에너지 다소비기기 효율 및 성능 고도화 필요 • 개별 기기 효율 개선을 넘어 공정과 생산시스템 관점의 효율적 관리 · 최적화 필요 • 그린 스마트공장 구축 수준은 대부분 기초단계	① 에너지 다소비기기 효율 향상 ② 공정효율 최적화 ③ 그린 스마트팩토리 고도화

4. 비전 및 목표

온실가스 배출제어·대체 혁신기술 확보 및 산업부문 에너지 효율 극대화

- ('40) 친환경 대체가스 및 Non CO_2 95% 이상 저감 시스템 사업화
- ('30) GWP Global 인증체계 구축 (고신뢰인증 표준불확도 <5%)
- ('30) 산업공정 에너지 효율 극대화 (효율향상 15%이상) 및 에너지 절감률 10% 달성

산업공정고도화 기술개발 전략

중분류	현 수준	단기(~'25)	중기(~'30)	장기(~'50)	목표
반도체·디스플레이 그린공정 개발	저감효율 85 %	배출 제어 시스템 소형화 배출 제어 시스템 성능 고도화	배출 제어 시스템 실증/사업화 (>95%)		('30) 저감효율 ≥90% (감축목표 65%) ('40) 저감효율 ≥95% (감축목표 85%)
	GWP 측정 요소기술 개발	GWP 국가 인증체계 개발 GWP Fast-track 인증체계 개발 (불확도 <15%)	Global GWP 인증체계개발	GTP 측정 기술개발	('30) GWP 글로벌 인증체계 ('26) GWP Fast-track 인증체계
	TRL 3	친환경 가스 DB 구축 및 검증 (PFCs, NF_3대체) Low GWP(<150) 공정가스 개발	친환경 대체가스 원천기술 확보 NO_x-free 공정가스 개발	사업화 사업화	('25) Low GWP <150 물질 개발 ('30) 친환경 가스 양산기술
	선진사 대비 85%	고효율 전력반도체 기술 (소자, 모듈/패키징, IC) 고효율화소 저전력 구동기술	고효율 전력반도체 고도화 (One Chip 고집적) 및 고효율 전력반도체 공정기술 디스플레이 패널 소비전력 75% 및 퍼블릭 디스플레이 소비전력 최소화 (≤10%)	사업화 사업화	('25) 고효율 전력반도체 및 패널 기술개발을 통한 전력변환 효율 개선 ('30) 고효율 전력반도체 및 패널고도화/집적화 및 친환경 공정기술 확보
산업기기·공정 효율화	에너지원단위 : 0.15 TOE/백만원	기기 효율향상 요소기술개발 실증·상용화 기술개발	효율향상 고도화	산업규모별 보급 모델 사업화	('40) 에너지원단위 0.119 이하
	전동기수준 : IE4급	전동기 효율향상(IE5급) 초고효율 전동기 핵심소재	초고효율 전동기 융복합 생산기술 고효율 전동기 상용화	IE5 적용 사업화	('30) IE5급 전동기 상용화
	선도국 대비 80%	생산성 및 에너지효율화 동시충족 자율운용형 AI FEMS 개발		사업화	('30) AI FEMS 기술선도
	현장오차 30%	공정설계 최적화 지원 에너지지표 개발(현장오차(5%)		사업화	('30) 에너지지표 현장오차 5% 미만
	효율 개선 2~5% 수준	그린 스마트팩토리 센서 표준화 및 시스템 개발	실증/상용화		('25) 그린 스마트팩토리 센서 및 시스템
		공장 맞춤형 스마트팩토리 고도화		실증·사업화	('30) 에너지 절감률 10%

■ 정부의 집중지원이 필요한 기간

기술개발	정책·제도
① 고 GWP 공정가스 제어·대체·인증 기술 및 고효율·저전력 반도체·디스플레이 기술 ② 산업효율 향상을 위한 스마트 그린 기기·공정·공장 고도화 기술 개발 추진	개발된 대체·효율화 기술의 실제 산업 적용을 위한 공인 인증 체계 확립 등 현장 도입 유인책 강구

5. 중분류별 추진전략

1) 반도체·디스플레이 그린공정 개발

정의

- 전자산업 공정에서 직접 배출되는 온실가스인 F-gas, N_2O 등을 제어하기 위한 저에너지 및 고효율 스크러버 기술

공정가스 배출제어 기술

전자산업 공정에서 직접 배출되는 온실가스인 F-gas, N_2O 등을 제어하기 위한 저에너지 및 고효율 스크러버 기술

친환경 공정가스대체·전환 기술

Low GWP(〈 150), NO_x-Free, 高 GWP 부산물 미생성, 무독성을 만족하는 친환경 공정가스 개발

온실효과 측정 검증·인증 기술

차세대 반도체·디스플레이 공정가스 등 성능에 대한 공정평가 및 온실효과 평가·인증을 위한 친환경가스 측정 검증 시스템

반도체·디스플레이 고효율 저전력 소자·패널 기술

화합물 기반 WBG 차세대 전력반도체 및 외부 환경대응형 최저 전력 소모 新디스플레이 기술

기술개발 필요성

- 우리나라 주력산업인 전자산업의 온실가스 감축을 통해 탄소세 등 국제 규제에 대응 및 경쟁력 강화

세부기술별 기술개발 목표

세부기술	현재국내기술수준	단기(~2025)	중기(~2030)	장기(~2050)	목표
공정가스 배출제어 기술	저감효율 85%	배출제어 시스템 소형화 및 성능 고도화	시스템 실증/상용화		▪('30) 저감효율 ≥ 90%(감축목표: 65%) ▪('40) 저감효율 ≥ 95%(감축목표: 85%)
친환경 공정가스 대체·전환 기술	TRL 3	친환경 소재 후보물질 DB구축	NF_3, PFCs, HFCs, N_2O 대체소재 원천기술 확보	산업별 친환경 공정가스 적용 및 양산기술	▪('25) 후보물질 확보 ▪('30) TRL 5 달성 ▪('40) TRL 8 달성
온실효과 측정 검증·인증 기술	GWP 측정 요소기술 개발 (복사강제력 측정기술 불확도 10%)	GWP 국가인증체계 개발	Global GWP 인증체계 개발	AI 기반 GWP 지수 고도화	▪('25) 신속인증 불확도〈15% ▪('30) 고신뢰인증 표준불확도〈5% ▪('50) GTP 측정기술 개발
고효율 저전력 소자·패널 기술	기술수준 85%	WBG 기반 고효율 전력반도체 개발	WBG 소자 제작 공정 최적화		▪('25) SiC, GaN 소재 기반 전력반도체 개발 ▪('30) SiC, GaN 기반 반도체 소자 제조공정기술 최적화
	現, 소비전력 150 W/m²	고효율화소 저전력 구동기술	소비전력 75 %	퍼블릭 디스플레이 소비전력 최소화 (≤10%)	▪('30) 혁신적 디스플레이 소재 개발 및 에너지 초절감 디바이스 기술 개발

현재 수행 중 또는 수행 예정인 R&D　　향후 정부의 R&D투자가 필요한 기술

기술개발 추진방향

1 공정가스 배출제어 기술

주요 이슈사항

전자산업 분야의 기술 고도화에 따라 정밀, 집적화를 위한 가스 종류 및 사용량 증가로 배출가스 제어기술의 고도화 필요

- 상용 기술의 경우, 장치 설치공간의 한계로 저에너지로 고용량을 처리하기 어려운 실정이며, 배출가스의 다양화로 효율이 낮아지는 애로사항 존재

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발	공정가스 배출 제어기술 대용량화(반도체 500 LPM, 디스플레이 1,500 LPM) /초고효율화(≥95%) 기술개발 • Burn-wet, Plasma-wet, 촉매-wet 등 획기적인 고효율화 기술개발을 통한 배출저감 기술 개발 및 시스템 소형화(플라즈마 기술, 촉매기술 포함) • 인텔리전트 제어모듈 개발 및 공정연계 배출가스 제어시스템 확보 • 공정 평가시스템 구축
목표달성전략	개발된 기술의 산업적용이 용이하도록 개발기술의 실증 시스템 구축 및 인프라 지원 • 전자산업 사업장 실제가스를 활용하여 성능테스트를 위한 관련 수요기업의 협조 강화 • 전자산업 사업장 실증테스트 기반 공인검증 제도 마련

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
공정가스 배출저감 기술	· 저감효율 85% · 기술보유자(GST, 유니셈, CSK, KC이노베이션 등)	· 처리용량 국내 수준 동일 · 저감효율 90% · 기술보유자(에드워드, 에바라 등)	· ('30) 처리효율 ≥95%(처리용량 디스플레이 1,500 LPM 이상)
고효율 배출 제어 기술	· 소용량 배출 저감효율 85%	· 처리용량 국내 수준 동일 · 저감효율 90% · 에드워드(CSK 합병)	· ('30) 소용량 저감효율 90% · ('40) 저감효율 ≥95%
	· 대용량 배출 저감효율 85% · 기술보유자(삼성엔지니어링, 에코프로)	· 기술 없음	· ('30) 대용량 저감효율 90% · ('40) 저감효율 ≥95%
공정 평가시스템 구축	· 기술 없음	· 기술 없음	· ('30) 공정 평가시스템 확보

2 친환경 공정가스 대체·전환 기술

주요 이슈사항

- 기존 공정가스는 안정하고 무독성이지만 GWP가 높아 대체·전환 필요
- PFCs와 NF_3 대체 가스 개발은 국내 기준 TRL 5단계*에 머물러 있으며, 전방산업 적용 사례가 없고, N_2O, HFCs 대체 연구도 전무한 상태

* 에너지기술개발사업 일환으로 TRL 3-5단계 원천기술개발 추진 중이나 실증화 연구 및 경제적 양산기술 미확보

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 저 GWP 및 NO_x-free 신규 공정가스 개발
  - · 차세대 친환경 후보물질 선정, 검증 및 DB 구축 기술
  - · 신규 공정가스 적용 및 대량 양산기술 확보

목표달성전략

- 불소화학 전문가, 반도체·디스플레이 식각·세정공정 전문가 확보 선행
- 표준화된 GWP 측정 및 평가, 정량적 탄소 저감 측정 및 인증을 통해 신규 공정가스 개발에 필요한 기반기술의 동시 확보 필요

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
저 온난화 지수 신규공정가스 개발	· NF_3 대체 F_3NO 원천기술 확보(SK머티리얼즈)	· F_2 상용화기술 확보(미국 Linde) · COF_2 상용화기술 확보(일본 Daikin)	· ('25) 친환경 후보물질 5종 확보 (Low GWP 〈150) · ('30) 기존 소재 동등 성능 - 세정/식각 성능 95% 이상 · ('30) 원천/양산기술 확보 - 대량 양산기술
	· PFCs 대체용 Fluoro-ether/alcohol계(아주대), Fluorocarbon계(성균관대) 식각가스 개발 中	· CF계 식각가스 분야 글로벌 점유율 1위 (일본 Showa Denko)	· ('30) 친환경 후보물질 10종 확보 · ('30) 기존 소재 동등 성능 - 식각 성능 95% 이상 · ('30) 원천기술 확보 - 친환경 소재 DB 구축
NO_x-free 신규공정가스 개발	· 없음	· 없음 (SCR처리기술에 집중)	· ('25) 친환경 후보물질 3종 확보 (Low GWP 〈50) - NO_x 미 발생 · ('30) 99% 이상 처리 기술 확보 · ('30) De-NO_x에서 NO_x-free 소재 기술 확립

3 온실효과 측정 인증 기술

주요 이슈사항

반도체·디스플레이 및 전력기기 분야에서 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)*가 낮은 신규 온실가스의 개발 및 이를 이용한 온실가스 배출량**이 낮은 공정 개발 연구가 활발히 진행 중

* 지구온난화지수 측정요소 i) 복사강제력(Radiative Forcing) ii) 대기수명(Atmospheric Lifetime)

** 교토의정서를 비롯한 IPCC 보고서에서는 온실가스별 배출량 보고 시 지구온난화지수를 곱한 CO_2 환산량(CO_2eq.) 사용

- 필요성 : 신규물질 및 공정개발 단계에서 탄소배출 감축량 평가를 위한 유일한 수단으로써 GWP 인증이 필수이나, 전 세계적으로 GWP 측정요소의 통합측정 및 신뢰성측정*이 가능한 기관이 전무

* 측정소급성이 확보된 측정품질 체계로써 측정 불확도 평가체계가 동반되어야 함

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- GWP 국가측정소급성 구축
  - · GWP 인증을 위한 분자분광학 기반 복사강제력 및 대기수명 측정을 위한 1차급표준기* 및 국가측정소급성 구축, 국제신뢰도** 확보를 통한 Global GWP 인증체계로 확대

    * 국가표준에 대한 소급성을 확립하기 위해 국가측정시스템 전반에서 기준이 되는 최상위 표준측정시스템

    ** 측정요소기술의 BIPM-CCQM, APMP-TCQM 수준 국제비교 또는 SCI급 국제 논문 게재
- GWP Fast-track 인증체계 구축
  - ·인증체계를 다원화하기 위한 질량분석 기반 대기수명 측정시스템 이용 Fast-track 인증체계 개발 및 모사대기환경 실증
- 친환경소재·공정 적용평가 및 온실효과 직접 인증체계 개발
  - · 다양한 기술기반의 인증체계 간 동등성 확보를 위한 국가표준기와의 비교 측정체계 개발 및 소급성 전파체계 확립

목표달성전략

- 산학연에서 진행되고 있는 Low-GWP 신규 온실가스 개발 사업과 연계하여 신뢰성 있는 GWP 국가인증체계 지원을 통한 과학적 근거 기반 개발·양산 의사 결정 체계 제공
- GWP 측정체계를 고신뢰성 평가체계-신속 평가체계로 다원화하여 다양한 시장수요 탄력적 대응 체계 구축
- GWP 측정시스템 구축 및 국가 차원에서의 제3자 검증체계 구축을 통해 전 세계적으로 신뢰할 수 있는 신규물질의 GWP 제공
- 신규 온실가스의 개발비용 저감을 위한 인공지능 기반 GWP 예측기술 개발
- 친환경가스 시장 성숙기 진입 대비 GWP 국가인증체계의 표준불확도를 5% 이내 수준으로 개선하고 글로벌 인증기술로 확대 적용
- 국내 GWP 국가측정소급성 체계의 국제표준화 및 신규 온실가스의 GWP를 IPCC 보고서 등재 추진
- 온실효과 직접 인증을 위한 GWP 지수 고도화를 위해 기후민감도(Climate Sensitivity)가 고려된 지구온도변화지수(Global Temperature change Potential, GTP)의 AI-assisted 측정체계 개발 연계

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
GWP 국가측정소급성 구축	· 세계 최초 복사강제력 측정표준 개발 완료(표준연) · 대기수명 측정기술은 개발 이력 없음	· GWP 측정소급성 구축 이력 없음 · NIST: 딥러닝 기반 예측기술 개발 중 (측정기술 대비 정확도 50% 수준)	· ('25) 세계 최초 분광학 기반 표준기 개발(국가인증체계) · ('30) 글로벌 GWP 인증체계 · ('30) 표준불확도 〈 5%
GWP Fast-track 인증체계 구축			· ('26) 세계 최초 질량분석 기반 GWP 측정시스템 구축 - 대기수명 신속 평가체계 확립 - 딥러닝 기반 예측기술 (측정기술 대비 정확도 30%) - 신속인증 불확도 〈 15%
친환경소재·공정 적용평가 및 온실효과 직접 인증체계 개발	· GTP 측정기술 개발이력 없음	· GTP 측정기술 개발 이력 없음	· ('50) 친환경가스 공정 및 소재 적용평가 및 GTP 인증

4 고효율 저전력 소자·패널 기술

주요 이슈사항

전기자동차 및 태양광 등 신재생에너지에 사용되는 파워반도체는 탄소중립 이행의 필수적이나 대부분(약 90%)을 수입에 의존하고 있고, 중국의 추격으로 지위를 위협받고 있는 국내 디스플레이 산업 또한 위기

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

WBG(Wide Band Gap) 소재인 SiC, GaN 등을 활용한 전력반도체 개발로 전력변환 고효율화, 반도체 제작 공정 최적화 및 디스플레이의 고효율 발광소재, 마이크로 LED 등 기술개발 필요

- 고효율 전력반도체 개발
  - · SiC, GaN 등의 소재를 활용하여 고효율 전력반도체 소자를 개발하고 Trench 형태의 소자 구조 구현 등을 통해 기술 경쟁력 확보
  - · 고온의 열을 효과적으로 방출할 수 있는 방열 기술과 전기적 연결을 위한 접합 신뢰성 향상 기술 확보
  - · 전력소자, 보호회로, 드라이버 내장 One Chip 형태의 Power IC 개발을 통해 집적도 향상 및 전력변환 효율 극대화
- 전력반도체 소자 친환경 공정 최적화
  - · 고효율 전력소자의 고신뢰성 확보를 위한 제작 공정 최적화
- 에너지 효율 극대화 디스플레이 개발
  - · 발광효율이 낮은 형광소재를 인광소재, TADF와 같은 고효율 OLED 발광 소재 기술 개발
  - · 기존 디스플레이의 소비전력을 절감시키기 위한 시나리오별 구동 기술 개발
  - · 상시 구동중인 입간판과 같은 퍼블릭 디스플레이를 고효율 마이크로 LED 디스플레이로 대체하여 소비전력 최소화
- 디스플레이 에너지 효율 극대화 친환경 공정 개발
  - · 고효율 저전력 패널의 고신뢰성 확보를 위한 제작 공정 최적화*

    * 퍼블릭 디스플레이 등 대면적 디스플레이의 초 저소비 전력화를 위한 기술 개발

목표달성전략

소재-소자-모듈-IC-인프라(제조·평가)-시스템 간 연계 활성화를 위한 공동 협의체 구성 및 차세대 기술개발 추진

- 소재·소자, 모듈/IC, 제조 인프라 및 자동차, 태양광 등 시스템 분야까지 전력반도체 산업 전 영역의 생태계 활성화를 위한 협의체 구성
- 신소재 기반 전력반도체 종합 기술경쟁력 확보를 위해 차세대 설계 기술 및 제조공정 기술 확보
- 패널, 소재, 모듈, 인프라 및 융복합 디스플레이 분야까지 에너지 효율 극대화를 위한 제품 산업 영역 생태계 활성화를 위한 협의체 구성
- 친환경 디스플레이 제품 제조 기술 경쟁력 확보를 위해 차세대 설계 기술 및 제조공정 기술 확보

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
고효율 전력반도체 개발 (소자·모듈·IC)	· 최고기술 대비(인피니언) 기술수준 80% · SiC, GaN 등 초기 기술 확보 중	· 인피니언(독일), CREE(미국) 등에서 선진 기술 보유 중	· ('30) WBG 소재 기반 파워반도체 소자·모듈 기술 개발 제작공정 최적화
전력반도체 소자 친환경 공정 최적화			
에너지 효율 극대화 디스플레이 개발	· 소비전력 150 Wh 수준	· N/A	· ('30) 기존 디스플레이 50 W/ 퍼블릭 디스플레이 10 W 이하
디스플레이 에너지 효율 극대화 친환경 공정 개발			

2) 산업기기·공정 에너지 효율화

정의

- 산업현장에서의 에너지 효율 개선을 위한 기기 효율 향상, 공정 및 공장 효율 개선을 위한 기술

에너지 다소비기기 효율 향상

산업공정의 대표적 에너지 다소비기기인 전기기계, 열원기기 등의 운전효율 향상 기술

공정효율 최적화

산업공정에서의 에너지·자원 소비 저감을 위해 에너지 효율을 극대화하는 공정 계획, 관리, 운영 최적화 기술

그린 스마트팩토리 고도화

공장 제품 생산량 증대, 제품 생산 원단위 절감 및 수익성 향상을 위한 공장-에너지-환경 최적화 시스템 기술

기술개발 필요성

- 산업부문 에너지 소비의 65%를 차지하는 구동 관련 전동기를 포함한 전기기기와 열원기기의 효율향상, 공정·공장 에너지 최적화 기술혁신을 통한 탄소배출량 저감 및 글로벌 기술 경쟁력 강화

세부기술별 기술개발 목표

세부기술	현재국내 기술수준	단기 (~2025)	중기 (~2030)	장기 (~2050)	목표
에너지 다소비기기 효율 향상	기술 수준 80% 에너지원단위 0.150 TOE/백만원	요소부품 효율향상 실증/사업화	효율향상 고도화 표준모델 개발	산업규모별 보급 확산	▪ ('30) 에너지원단위 0.119 TOE/백만원 ▪ ('30) 연평균 효율 개선 0.5% ▪ ('30) 산업용 히트펌프 생산온도 200 ℃
	전동기 효율등급 IE4급 철손 2.8 W/kg @3.7 kW	IE5급 전동기 설계 및 저 손실 자성소재 확보	IE5급 전동기 Cost 저감 및 상용화	IE5 적용 에너지기기 사업화	▪ ('25) IE5급 효율 ▪ ('25) 철손 2.0 W/kg ▪ ('30) IE5급 전동기 상용화
공정효율 최적화	에너지효율 설계 오차 30%	단위공정 효율개선	공정효율 최적화		▪ ('30) 에너지효율 설계 오차 5%
그린 스마트팩토리 고도화	효율 개선 2~5% 수준	스마트 에너지 센서 개발 및 표준화	스마트 에너지 센서 상용화		▪ ('25) 스마트에너지 센서 개발 및 표준화 ▪ ('30) 그린 스마트팩토리 에너지 절감률 10%
		에너지 통합관리 시스템 개발	공정/공장/산단 맞춤형 그린 스마트팩토리 고도화		

현재 수행 중 또는 수행 예정인 R&D　　향후 정부의 R&D투자가 필요한 기술　　민간 부문에서 개발 예정인 기술

기술개발 추진방향

1 에너지다소비기기 효율 향상

주요 이슈사항

열원기기와 전동기는 산업공정의 대표적인 에너지 다소비 설비로 복합화, 지능화, 고성능화 및 고효율화 필요

- 열원기기는 전열면적 극대화와 고성능화로 효율을 향상 중이며, 산업용 히트펌프는 산업적용 범위를 넓히기 위한 고온화 및 대온도차 시스템 개발 필요
- 2030년 이후에 IE4급 및 IE5급 전동기의 의무사용이 예상되므로 전동기 및 산업 공정 전반의 경쟁력 확보를 위해 기술개발 필요

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 열원기기 고효율화 기술 개발
  - · 열원기기 고효율화/저탄소화 표준모델 개발 실증
  - · 에너지다소비 중소형 공정설비 개발
  - · 산업용 고온 및 대온도차 히트펌프 개발
- 초고효율 전동기(IE5) 기술 개발
  - · 저손실 자성소재 개발을 포함한 IE5급 전동기 설계 및 양산화 기술
  - · 초고효율 전동기용 저손실 소재 개발

목표달성전략

고효율 핵심기기 보급 확산에 대한 지원 필요

- 고효율화 기기의 표준모델 개발 실증과 수요기업 보급 확산 방안 필요
- 최저소비효율기준의 상향조정 및 고효율 전동기의 의무 생산·적용

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
열원기기 고효율화 기술	· (최고기술 대비/선진국 대비) 기술수준 80% · 귀뚜라미(120 ℃), 월드이앤씨(120 ℃) 등	· 상용화 90% 수준(일본 Kobelco(165 ℃) MHI(200 ℃ 개발 중), Mayekawa(200 ℃ 개발 중) 등)	· ('25) 표준모델 30종 개발 · ('30) 표준모델 보급 · ('30) 히트펌프 생산온도 200 ℃
초고효율 전동기(IE5) 기술 개발	· 최저효율제 시행이후 IE2/IE3급 전동기 사용 중 (기술수준 IE4급) · 철손 2.8 W/kg(@3.7 kW) · 기업(효성중공업, 하이젠모터), 연구소(전기연, 생기연), 학교(한양대, 충남대)	· (전동기) 지멘스(독), Advanced Energy(미), DTU(덴) · (소재) 신일본제철(일), 지멘스(독) 등	· ('25) IE5급 전동기 설계 및 제조 기술 확보 · ('25) 철손 2.0 W/kg · ('30) IE5급 전동기 상용화 · ('30) 저철손 소재 생산기술 확보(박판, 연자성 소결, 3D성형 등)

2 공정효율 최적화

주요 이슈사항

복잡하고 다양해지는 생산 환경과 에너지 전환에 따른 에너지 비용 증가 등으로 기업의 경쟁력 확보에 애로

- 제조 방법, 공정운영 방식에 따라 다르게 요구되는 에너지, 자원의 효율적 관리·제어를 위한 생산 공정효율 최적화를 통해 에너지 소비 최소화 필요
- 생산성과 에너지 효율화의 동시 고려가 어려운 기존 정적 제어 방식의 한계를 벗어나 데이터 기반 동적 제어를 지원하는 FEMS* 기술 개발 필요

  * FEMS : 공장 에너지 관리 시스템(Factory Energy Management System)
- 공정설계단계 시뮬레이션모델과 실운영 단계의 생산 환경 차이로 인한 최적화 한계 극복을 위한 디지털 에너지트윈 기반의 공정 설계 최적화 기술 개발 필요
- 제조 공정에서의 불량품은 자원효율을 저하하는 직접적 요인이 되므로, 자원 효율 극대화를 위한 데이터 기반의 공정 불량률 저감 기술 필요

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

생산 공정에서의 에너지·자원 효율을 극대화할 수 있는 데이터 기반 기술

- AI FEMS 기술
  - · 생산성과 에너지 효율화를 동시 달성할 수 있도록 데이터 분석 및 학습 기반의 동적 제어를 지원하는 FEMS 기술
- 공정설계 최적화 지원 에너지트윈 기술
  - · 공정 설계 단계에서 정확하게 에너지·자원의 소비를 예측하고 공정 설계 최적화를 지원하는 에너지 트윈 기술
- 공정 불량률 저감 품질예측 분석 기술
  - · 생산 공정에서의 자원효율을 극대화하기 위해 데이터 기반의 품질 예측 및 분석을 통한 공정 불량률 저감 기술

목표달성전략

개발된 기술의 산업적용이 용이하도록 산학연 공동 플랫폼 구축 및 인프라 지원

- 설비 Spec과의 비교를 위한 설비 제조업체, 공정 설계 전문가와 공장 운전에 능통한 운전전문가, 데이터 분석 및 AI 전문가 협업 진행
- EIS(Energy Information System)와 EOS(Energy Optimization System)의 연계를 통해 중장기적 관점의 FEMS 적용 및 운영·관리지원을 바탕으로 실질적 에너지 저감 효과 도출 및 사례 마련
- 개발기술의 현장 적용 및 실증을 위한 테스트베드 인프라 구축
- 개발될 기술의 수요기업 적용 가능하도록 관련 법규 및 제도적 뒷받침 마련

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
AI 기반 FEMS 기술	· (최고기술 대비/선진국 대비) 기술수준 80% · NIA, ETRI 등	· 상용화 80% 수준의 기술 확보(미국 구글 등)	· ('25) AI 플랫폼 기술 확보 · ('30) AI FEMS 적용 및 기술 선도
공정설계최적화 지원 에너지트윈 기술	· 현장 오차 30% 수준 · (최고기술 대비/선진국 대비) 기술수준 65% · ETRI, 생기연 등	· 현장 오차 20% 수준, 상용화 80% 수준의 기술 확보(미국 GE 등)	· ('30) 현장 오차 5% 미만 에너지트윈 기술 확보 · ('40) 에너지트윈 적용 및 공정설계 최적화 기술 선도
공정 불량률 저감 품질예측 및 분석 기술	· (최고기술 대비/선진국 대비) 기술수준 62.5% · ETRI, 생기연, LG CNS 등	· 상용화 80% 수준(독일 지멘스 등)	· ('25) 품질 분석예측 기술 확보 · ('30) 공정설계 적용 및 기술 선도

3 그린 스마트팩토리 고도화 기술

주요 이슈사항

기초단계 수준의 스마트팩토리 및 효율적인 에너지 관리가 되지 않는 정부지원 주도의 중소기업 스마트 공장 추진

- 대기업과 중소기업 간의 생산성 격차가 벌어짐에 따라 제조업 경쟁력 확보 및 산업 전반의 에너지 절감을 위한 중소기업 중심의 스마트 에너지 통합 관리시스템 확대 필요
- 스마트공장 구축은 대부분 기초단계(76.4%)이며, 공급기업의 요소 및 고도화 기술은 선진국 대비 낮은 수준(40~90%)으로 관련 분야의 전문 인력 확보 및 민간 주도의 스마트 생태계 조성 필요
- 원자재 입고부터 제품 생산, 유통 및 폐기 과정 전반에 걸친 전 과정 에너지 사용량 및 탄소배출량 확인을 통한 탄소국경세 등에 대한 선제적 대응

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 에너지-설비-생산정보 연계 에너지통합관리 시스템 개발
  - · 산업 공정 전반 및 개별 공정의 소요 에너지 계량 목적의 산업용 스마트 에너지진단 센서 표준화
  - · 설비 또는 대표공정 중심의 에너지 최적화 공정 분석 기술
- 맞춤형 스마트팩토리 고도화 기술
  - · 사업장, 설비 또는 대표공정 중심의 맞춤형 스마트팩토리 인터페이스 표준화
  - · 맞춤형 유연 생산이 가능한 스마트팩토리 고도화

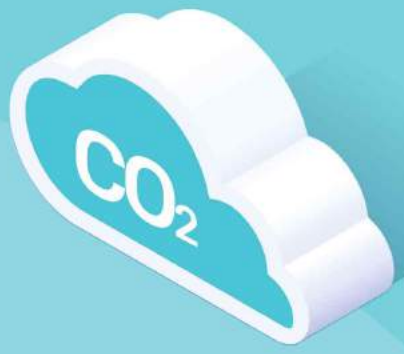
목표달성전략

- 에너지 효율 및 절감을 위한 주요 지원체계, 혜택, 기술보급 등이 대기업에만 국한되지 않도록 중소 중견기업 중심으로 관련 사업을 확장 시킬 수 있는 제도적 기반 마련
- 동일 또는 유사업종 기업 공통 적용이 가능한 탄소중립 선도(표준) 모델 개발 및 보급 확산(에너지원 전환, 생산공정 개선, 탄소자원화 등)
- 제품의 생산에서 폐기에 이르는 전 과정(부품 포함)에 대한 탄소 배출량의 수치화 및 배출 수치에 대한 라벨링 등의 의무화
- 생산 설비에 증강현실(AR) 기술을 적용한 설비 유지 보수 최적화 관리

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
그린 스마트팩토리용 에너지-설비-생산 정보 연계 에너지통합관리 시스템 개발	· 에너지 진단 매뉴얼을 통한 설비 분석 수준 · (최고기술/선진국 대비) 기술수준 56% · 기업(LS산전, SKT, 한국유량계공업, 대양전기공업, 두텍), 연구소(KIST, 기계연, KETI), 대학(KAIST, 경북대, 울산대, 광운대)	· GE(미), Emerson(미), DENSO(일), Landis+Gyr(일),후지(일), BOSCH(독), TESTO · 연구소(LETI, CSEM, NIST) · 대학(IMTEK, Texas, Stuttgart)	· ('25) 스마트 에너지 센서 고도화(유량, 온습도, 압력 등) 및 표준화 · ('30) 스마트실증 및 상용화
맞춤형 스마트팩토리 고도화 기술	· 에너지 다소비 산업공정 기준 에너지 절감률 약 2~5%수준 · (최고기술/선진국 대비) 기술수준 75% · 에너지 원단위 0.159 ton/천달러 · 기업(삼성SDS, 포스코 ICT, 현대엔지니어링), 연구소(에너지연, 생기연, ETRI), 대학(KAIST, 서울대, 충남대, 광운대)	· OECD 평균 에너지 원단위 0.104 ton/천달러 · IBM(미), 지멘스(독), 연구소(EEI, VDE, ECN), 대학(워싱턴, MIT, 옥스퍼드, DTU)	· ('30) 에너지 절감률 10%

CO_2



CCUS

Ⅳ. CCUS 기술개발 전략

1. 개요 93
2. 국내·외 현황 94
3. 핵심기술 구성 및 선정 배경 100
4. 비전 및 목표 101
5. 중분류별 추진전략 102

1. 'CCUS' 개요

배출된 CO_2를 포집하여 심부 지층에 안전하게 저장하거나, 직접 또는 전환하여 활용하는 기술

※ CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage)

	저비용 CO_2 포집기술	안전하고 효율적인 CO_2 저장기술	신산업 창출형 CO_2 활용기술
정의	배출된 CO_2를 선택적으로 분리하여 고농도로 회수하거나 공정 자체에서 고농도로 배출되도록 하여 회수하는 기술	CO_2 수송 및 저장 과정에서 발생할 수 있는 안전사고, 누출, 지진유발, 지형변화, 환경오염 등을 방지하기 위한 안전성 평가기술과 비용절감을 통한 CCS 경제성 향상과 저장소 저장용량 증대를 위한 효율향상 기술	배출된 CO_2를 그대로 활용하거나 청정연료, 기초화학제품 등과 같은 유용한 제품으로 전환하여 활용
필요성	CO_2 포집 비용 저감 및 기술 상용화를 통한 CCUS 산업의 기술경쟁력 확보	CCS 도입 및 확산을 위해 CO_2 수송 및 저장의 안전성 확보를 통한 수용성 환경 개선이 필요하며, 비용절감 및 효율향상을 통한 경제성 확보도 CCS 상용화의 선결과제	CCU 기술은 CO_2를 경제적 가치를 지닌 제품으로 전환시킴으로써, CO_2 처리 비용 일부를 상쇄하거나 수익 창출 가능

2. 국내·외 현황

1) 정책 및 제도 동향

정책

- 주요국은 CCUS 대규모 실증과 상용화 확대를 위해 법·제도·재정 지원 방안을 마련하여 관련 시장과 산업 육성 중

미 국

「45Q Tax Credit」 정책으로 포집·처리된 CO_2당 최대 50달러 세액공제* 혜택 제공 및 DOE의 CCUS R&D 프로그램 등을 통한 상용 규모의 기술개발을 위한 R&D 지속 추진

* ('30년 기준) 저장 $50/ton, EOR $30/ton, 활용 $35/ton

E U

「2018년 Renewable Energy Directive II」 발표를 통해 CCU 연료를 의무사용 재생연료 범위에 포함하였으며, Innovation Fund* 및 Horizon 2020 프로그램 등을 통하여 CCUS 기술개발 집중 지원

* EU ETS 수익금의 일부를 CCS 등 탄소저감 사업에 투자

호 주

「연안 석유 및 온실가스 저장법(Offshore Petroleum and Greenhouse Gas Storage Act 2006) 개정」('20)을 통해 국경 지역 CO_2 저장 규제통합·간소화하고, 2020년 발표된 '기후변화대응 저탄소 기술 로드맵'의 5대 저배출 우선기술로 CCS* 포함

* CCS 가격목표치: 탄소압축, 허브수송, 저장을 포함해 톤당 20호주달러 미만 추진

중 국

「CCUS 기술발전로드맵('19)」발표를 통해 2050년까지 단계별 중장기 목표* 및 발전방향 제시

* ('30) 기존 CCUS기술 상용화 응용실현 및 산업화 능력 확보, 제1세대 포집기술 비용 및 에너지소모비율 10~15% 감소
('40) CCUS 시스템통합, 2세대 포집기술 비용 40~50% 감소, 상용화 실현
('50) CCUS 기술확산 실현, 여러개의 산업클러스터 구축

일 본

CO_2를 자원으로 인식하고 이를 재활용하기 위한 기술혁신을 효과적으로 추진하기 위해 경제산업성 내부에 '카본리사이클실'을 설치('19)하고, CO_2 포집 및 활용 활성화를 위한 「탄소 재활용 로드맵('19)」 수립

한 국

「제3차 녹색성장 계획('19)」수립으로 'CCUS 원천 및 실증기술 확보' 계획을 마련하고, 「탄소중립 기술혁신 전략('21)」 및 「CCU 기술혁신 로드맵('21)」등의 발표를 통해 관련 R&D 추진기반 마련

※ 2030년 감축목표 이행 수정로드맵('18)에서는 CCUS를 통한 10.3백만 톤 감축 목표 명시

제도

- 국내외 배출권거래제 등에서 CCUS 기술 적용을 통한 감축량을 일부 인정받고 있으나, 현재 CCUS 국가 인벤토리 집계 및 CCU 기술의 감축량 평가에 대한 명확한 방법론 및 CCUS 사업 활성화를 위한 법적 기반 부재

국가 인벤토리	現 인벤토리 작성기준(IPCC 1996 GL)상 CCUS 기술적용을 통한 배출량 집계방법 부재 ※ 2024년 이후 적용될 작성기준(IPCC 2006 GL)에는 CCS 적용에 따른 집계방법이 포함될 예정이나 CCU 기술의 경우 집계원칙만 명시
배출권거래제	CCUS 기술 적용 시 배출원에서의 CO_2 포집량 차감 일부 인정* * 「온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침」 산정 대상 온실가스 배출 활동 중 이산화탄소 포집 및 이동에 따른 이산화탄소 이동량 포함
상용화 촉진	일반적인 기술 보급촉진을 위한 경제적 인센티브로 R&D 민간부담금 비율, 금융지원, 세액공제, 기술료 면제 등이 가능하나, CCUS 기술 확산·보급을 위한 별도의 지원책 부재
법적 기반	이산화탄소는 현재 '폐기물'로 정의되어 처리과정 및 재활용 과정에 제약 및 제한이 따르며, 최근 이산화탄소 해양지중저장 관련 입법*이 이루어졌고, 최근 CCUS 기술개발·보급을 위한 법안 준비 중 * 해양폐기물 및 해양오염퇴적물 관리법

2) 시장동향

세계

- CCUS 기술은 전 세계적으로 시장이 활성화되기 시작하는 단계로, 배출권 시장 확대 등으로 인하여 향후 큰 폭으로 성장 가능 전망
  - 현재 글로벌 CCUS 시장은 2020년 27억 달러 규모에서 연평균 성장률 4.6%로 2025년 33억 달러 전망 (BCC Research, '20)

[CCUS 기술분야별 글로벌 시장 전망]

단위: 백만 달러

구분	2020	2021	2022	2023	2024	2025	성장률 ('20~'25)
포집	884.1	921.5	964.2	1,013.6	1,067.6	1,126.7	5.0
저장	755.7	785.9	820.5	860.7	904.5	952.4	4.7
전환	563.9	585.9	611.1	640.5	672.6	707.6	4.6
기타	468.6	483.3	500.2	520.2	542.0	565.8	3.8
합계	2,672.2	2,776.8	2,895.8	3,035.2	3,186.6	3,352.6	4.6

출처: BCC Research

국내

- 관련 시장 미형성 단계이나, 탄소중립 선언에 따른 CCUS 기술수요 및 기업 관심도 향상으로 시장 형성 가능성이 높아짐
  - CCUS 국내 시장은 연평균 7.6% 수준으로 전망(BCC Research, '20)

그러나, CCUS 미래시장 전망의 경우, 기술혁신 속도, 인프라 성숙도, 관련 산업 및 시장에 대한 가정에 따라 크게 변동적

3) 기술동향

포집

- 미국, 캐나다, 노르웨이 등에서 포집된 CO_2와 EOR(Enhanced Oil Recovery)을 연계하여 수백만 톤/년 이상의 포집 기술을 개발
  - 국내 포집 기술은 선진국 대비 70~90% 수준으로, 가장 앞서 있는 연소 배가스 포집기술의 경우에도 습식 10 MW_e, 건식 10 MW_e, 분리막 3 MW_{th} 규모 수준이며, 매체순환연소 등의 차세대 기술은 선진국과 동등한 수준에서 기술개발 추진 중

저장

- 대규모 저장의 경우 수용성 확보를 위해 육상 지중저장을 대신하여 해양 지중저장이 활발하게 추진되고 있으며, 노르웨이와 호주는 세계 최대 규모의 해양 CCS 프로젝트를 운영
  - 국내에서는 저장기술 자립화 및 중규모 해상 저장실증 연구를 추진 중에 있으며, 포항 영일만 해상에 100 톤 규모 시험주입에 성공

활용

- 전 세계적으로 CO_2 활용기술 개발연구가 확대되고 있으며, 건축소재 및 메탄올, 폴리우레탄 등의 화학제품 생산 등 일부 기술은 상용화 단계에 진입
  - 국내는 화학·생물전환, 광물화 기술 개발을 통하여 연료, 화학제품, 건축소재 등 핵심 소재 및 공정 요소 기술을 확보하고 있으며, 파일럿 규모의 실증 연구가 추진 중이나 상용화 사례는 없음

4) 산업현황

포집

- 세계적으로 석탄화력, 시멘트, 철강, 석유화학 산업에서 CO_2 포집 실증이 진행 중이며, 향후 확대 예상
  - (미국) Petra Nova CCS 프로젝트에서는 240 MW_e 규모의 발전소 연소배가스 중 CO_2 포집(연 140만 톤) 상용화
  - (한국) 10 MW 규모 CO_2 포집 실증 플랜트(연 6~7만 톤)를 운영하면서 흡수제 및 공정 기술 확보하고, 순도 99.5% 이상 액화 CO_2 저장 설비 설치

저장

- 2017년 이후 상업적 CCS 프로젝트는 수와 저장용량이 지속적으로 증가하여 2019년 저장용량 37백만 톤/년에서 2020년 40백만 톤/년 규모로 저장용량이 증가하였으며, CCS 총 사업수는 51개에서 65개로 27% 상승
  - (북미) 2020년 미국은 12개의 CCS 사업이 추가되었고, 캐나다는 허브/클러스터 형태의 ACTL(Alberta Carbon Trunk Line) 운영 등 북미지역 주도의 CCS 사업 활성화
  - (유럽) 14개의 CCS 사업이 추가되었으며, 신규 참여국 확대(덴마크, 스웨덴 및 이탈리아 등), CCS 연계 탄소중립 산업 클러스터 구축(영국), Longship 프로젝트(노르웨이) 추진 등 관련 프로젝트 확대 추진

활용

- 세계적으로 정부·민간 주도의 다양한 CCU 프로젝트가 추진 중
  - (유럽) 50개 내외의 벤치급 이상 실증 및 상용화 프로젝트가 추진되고 있으며, 5개 내외의 사업이 상업화 단계에 진입
  - (독일) Covestro, BASF, Evonik 등의 기업이 참여하는 15개의 시범사업이 제안되어 상업 규모로 가동되고 있으며, 주로 연료, 화학물질 생산 등에 집중
  - Carbon8(영국), Calera(미국) 등에서는 이산화탄소 광물화를 통한 시멘트 대체제, 건축자재 생산 상업화
  - (한국) CO_2 화학전환, 생물전환, 광물화 실증 프로젝트가 수행된 바 있으며, CO_2 기반 고분자 제조기술이 개발되어 기업으로의 기술이전 등이 추진되었으나 상용화까지 연결되지는 못함

[CCUS 주요 키플레이어 현황]

국가		기업명	기술개발 현황
포집	일본	MHI	▸ 240 MW_e급 포집(연소배가스, 습식, Petra Nova)
		Hitachi	▸ 150 MW_e급 포집(연소배가스, 습식, SaskPower)
	미국	Fluor	▸ Econoamine FG Plus(연소배가스), Fluor Solvent(공정가스)
		Petra Nova Project	▸ 연간 140만 톤 발전소 CO_2 포집 후 석유회수증진(EOR)사업에 활용
	캐나다	Shell-CanSolv	▸ 150 MW_e급(연소배가스, 습식, SaskPower)
		Weyburn -Midale Project	▸ 연간 300만 톤 석유가스 CO_2 포집 후 석유회수증진(EOR)사업에 활용
	한국	한전/중부발전	▸ 10 MW_e급 습식 포집 중규모 실증(보령화력)
		한전/남부발전/ 에너지연	▸ 10 MW_e급 건식 포집 중규모 실증(하동화력)
저장	노르웨이	Sleipner Project	▸ 연간 90만 톤 CO_2 포집 후 대염수층에 저장
	한국	한국석유공사/ 공주대	▸ 포항분지 실증저장소에서 시험주입(100 톤) 및 국내저장소 탐색
활용	독일	Covestro	▸ CO_2를 이용한 폴리우레탄 폼매트리스 제품(Cardyon) 상용화
		Sunfire	▸ 재생전력에 기반한 CO_2-수소 전환 액체연료 생산 기술 실증
	영국	Carbon8	▸ CO_2 급속 탄산화 기술 상용화를 통하여 건축소재 대체재 생산
	일본	Asahi Kasei	▸ CO_2 기반 Dimethyl Carbonate 생산 기술 상용화
	한국	화학연/ ㈜부흥산업사	▸ CO_2 화학전환을 통한 CO 및 초산 생산 공정 데모급 실증(20 톤/년)
		고려대/ 지역난방공사	▸ CO_2 생물전환 미세조류 생산 및 고부가화 공정 실증(10 톤급)
		대우건설/ 남동발전	▸ 배가스 내 CO_2 직접 광물탄산화 건설소재 생산 실증(40 톤/일)

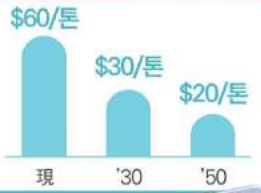
3. 핵심기술 구성 및 선정 배경

중분류	선정 배경	세부기술
저비용 CO_2 포집기술	• CCUS 기술 확산 및 민간(기업) 참여 확대를 위한 CO_2 포집 비용 저감 필요 • 중·대규모 포집기술 실증·상용화 경험 필요	① 연소 배가스 포집 기술 ② 산업분야 공정가스 및 합성가스 포집 기술 ③ 바이오가스 및 매립지가스 포집 기술 ④ 연료 연소 중 원천분리 기술 ⑤ 차세대 포집 기술
안전하고 효율적인 CO_2 저장기술	• CCS 사업의 필수적 전제인 대규모 국내 저장소 확보 필요 • 저장 비용절감 및 효율향상과 함께 CCS 사업의 안전성 확보를 위한 주입 운영 기술의 고도화 필요	① 수송(배관수송 최적화 및 선박수송 상용화) ② 탐사(저장소 탐사 및 평가기술) ③ 주입(주입효율 및 안전성 향상 기술) ④ 모니터링(고성능 모니터링 기술)
신산업 창출형 CO_2 활용기술	• 실용화 단계로의 연계가 취약하여 시장수요 및 국내 산업여건을 고려한 CCU 기술경쟁력 확보 우선 • 경제성 확보 및 온실가스 감축 실효성 향상을 위한 소재·공정 혁신기술 개발 필요	① 연료 전환 기술 ② 화학제품 전환 기술 ③ 건축소재 광물탄산화 기술 ④ 탄소소재 전환 기술

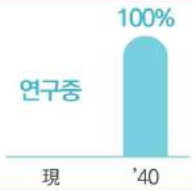
4. 비전 및 목표

CCUS 상용화 기술 확보

▶ CO_2 상용급 포집 가격경쟁력



▶ CO_2 전환 제품 가격경쟁력 (기존 시장가 대비)



CCUS 기술개발 전략

중분류	현 수준	단기 ~'22	단기 ~'23	단기 ~'24	단기 ~'25	중기 ~'26	중기 ~'28	중기 ~'30	장기 ~'50	목표
저비용 CO_2 포집기술	상용급 포집비용 $60~70/톤	(연소배가스 포집) 중규모, 대규모 실증				포집-저장, 포집-전환 연계 실증			CCS 사업 추진	('25) 연소배가스 포집 중대규모 실증 ('30) 포집 비용($30/톤) 및 대규모 포집 사업화 ('50) 포집 비용($20/톤)
		(산업분야 공정가스 포집) 포집 및 수소생산 연계 기술개발				실증 및 상용화 적용				
		(바이오가스 및 매립지가스 포집) 분리 및 정제 기술 고도화-실증				블루수소 생산 활용 및 Negative CO_2 포집 실증			현장적용 및 상용화	
		(연료연소 중 원천분리) 순산소 연소 및 매체순환연소 수 MWth 급 실증				수십~100MWth 실증			대규모 실증 및 상용화	
		차세대 혁신포집기술 원천기술 개발 및 소규모 실증							실증 격상	
안전하고 효율적인 CO_2 저장기술	100 톤 시험 주입	(수송) 배관수송 최적화 중규모 실증				대규모 실증			상용화	('25) 저장비용($60/톤) ('30) 대규모 저장소 확보 (6억 톤 규모) ('50) 저장비용($30/톤)
		(탐사) 탐사기술 고도화 대규모 저장소 확보				대규모 실증 (대규모 저장소 추가확보)			상용화	
		(주입) 주입운영 최적화 중규모 실증				대규모 실증			상용화	
		(모니터링) 고성능 모니터링 중규모 실증				대규모 실증			상용화	
신산업 창출형 CO_2 활용기술	파일럿 실증	(연료 전환) 효율향상·비용저감 핵심 기술개발				실증 공정 최적화 및 일부 기술 상용화			상용화	('25) 기술경쟁력 확보 (선진국 대비 90%) ('40) 가격경쟁력 확보 (現시장가대비 100%)
		(화학제품 전환) 효율향상·비용저감 핵심 기술개발				실증 공정 최적화 및 일부 기술 상용화			상용화	
		(건축소재 광물화) 효율향상·비용저감 핵심 기술개발 및 중규모 실증						대규모 실증 및 상용화		
		차세대 탄소소재화 혁신원천기술 개발							실증 및 상용화	

■ 정부의 집중지원이 필요한 기간

기술개발	정책·제도
① 혁신소재 개발, 효율향상, 대형화로 비용 저감 ② 국내 환경(배출원, 저장소, 시장수요) 기반 실증연구를 통한 검증·안전성 확보 ※ 포집-저장 연계 기술개발을 통한 대규모 CO_2처리, 수익창출 가능한 포집-활용 제품화 가속을 위한 산·학·연 공동개발 방식 추진	① CCUS 산업생태계 조성 및 국가 관리·평가 체계 구축 및 민간 확산을 위한 인센티브 도입 ② CCS 사회적 수용성 확보, CO_2이송·저장·활용 관련법령 정비

5. 중분류별 추진전략

1) 저비용 CO_2 포집 기술

정의

- 배출된 CO_2를 선택적으로 분리하여 고농도로 회수하거나 공정 자체에서 고농도로 배출되도록 하여 회수하는 기술

연소 배가스 포집 기술

공기에 의한 연료의 연소 후 배출되는 배기가스로부터 CO_2를 포집하는 기술

산업분야 공정가스 및 합성가스 포집 기술

수소생산공정, 정유·석유화학공정, 제철부생가스 등의 산업공정가스 또는 합성가스에서 CO_2를 포집하는 기술

바이오가스 및 매립지가스 포집 기술

음식물처리장 등에서 발생하는 가스 및 폐기물 매립지에서 생산되는 가스로부터 CO_2를 포집하는 기술

연료 연소 중 원천분리 기술

연료를 연소시키는 과정에서 고농도의 CO_2가 원천적으로 분리되어 배출되는 기술

차세대 포집 기술

탄소중립 목표 달성을 위한 공기중·저농도 CO_2 혁신포집기술

기술개발 필요성

- CO_2 포집 비용 저감 및 기술 상용화를 통한 CCUS 산업의 기술경쟁력 확보

세부기술별 기술개발 목표

세부기술	현재국내기술수준	단기(~2025)	중기(~2030)	장기(~2050)	목표
연소 배가스 포집 기술	발전분야 중규모 실증	중규모, 대규모 실증	포집-저장, 포집-전환 연계 실증	CCS 사업 추진	▪('30) 대형 포집 기술 확보 및 CCS 사업 추진 포집비용 $30/톤$CO_2$ ▪('40) 차세대 포집기술 실증 ▪('50) 포집비용 $20/톤$CO_2$
산업분야공정가스 및 합성가스 포집 기술	수소생산, 제철 부생가스 소규모 실증	CO_2 포집 및 수소생산기술 실증	상용화 적용		▪('30) CO_2 포집 수소생산 기술 상용화
바이오가스 및 매립지가스 포집 기술	고질화 메탄 활용기술, 촉매개질 및 수소분리	분리 및 정제 기술 고도화·실증	블루수소 생산 및 Negative CO_2 포집 실증/상용화		▪('30) 기술개발 및 현장 실증 ▪('40) 상용화 적용
연료 연소 중 원천분리 기술	MW_{th}급 소규모 실증	순산소 연소 및 매체순환 연소 수 MW_{th} 급 실증	수십~100MW_{th} 실증	대규모 실증 및 상용화	▪('30) 10~100 MW_{th} 급 실증
차세대 포집 기술	실험실 규모 개발	기타 혁신 포집기술 원천기술 개발 및 소규모 실증		실증 격상	▪('40) DAC 포집비용 $100/톤$CO_2$ ▪('50) Net zero 가능 기술로 저농도 CO_2 포집기술 적용

현재 수행 중 또는 수행 예정인 R&D　향후 정부의 R&D투자가 필요한 기술　민간 부문에서 개발 예정인 기술

기술개발 추진방향

1 연소 배가스 포집 기술

주요 이슈사항

- 가장 많은 양의 CO_2를 배출하고 있는 포집 대상으로 CCS 비용의 70~85%를 차지하는 CO_2 포집 비용 저감을 위해 격상실증을 통한 비용 저감 가능성 및 적용 가능성 확인 필요
- 상용화를 위한 제약조건 확인 및 실증 경험 필요

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 포집-저장 연계 대규모 실증
- LNG 발전용 포집기술 최적화 및 중규모 실증
- 산업 대상 포집 중·소규모 실증 및 포집-전환 연계 실증

목표달성전략

- 포집원·포집기술 선정, 설계 자료 확보 등 대규모 실증기반 구축
- 2030년까지 발전 분야 대규모 포집-저장 연계 실증(150 MW급) 및 LNG 발전, 발전 이외 분야 실증 및 차세대 혁신 포집('40) 원천기술 확보
- 장기적으로는 CCUS 보급 확산을 위한 고효율, 저에너지, 저비용 차세대 혁신 포집기술 개발 및 적용

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
포집-저장 연계 대규모 실증	· 규모: 200 톤CO_2/일 · 기술개발 단계: TRL 7(한전)	· 규모: 5,000 톤CO_2/일 (일본 MHI, 캐나다 Shell 등) · 포집비용: $45~60/톤$CO_2$	· ('30) 150 MW급 대규모 포집-저장 연계 실증, 포집비용 $30/톤$CO_2$ · ('50) 포집비용 $20/톤$CO_2$
LNG 발전용 포집기술 최적화 및 중규모 실증	· 규모: 2,000~40,000 Nm^3/h · 기술개발 단계: TRL 5~6 (에너지연, 한전, 에어레인, 한국지역난방공사)	· 규모: 40,000 Nm^3/h · 상용화 80% 수준의 기술 확보(미국 MTR)	· ('30) 1~10 MW 규모 중규모 포집 실증
산업 대상 포집 중·소규모 실증 및 포집-전환 연계 실증	· 규모: 2,000 Nm^3/h · 기술개발 단계: TRL 5~6 (에어레인, 한국지역난방공사)	· LNG발전 대상 상용급 FEED 과제 진행 중(미국) · MCFC에 분리막 기술 적용 3 MW_e 규모 소규모 파일럿(미국 FuelCell Energy)	· ('30) 1~10 MW 규모 중·소규모 포집 실증

2 산업분야 공정가스 및 합성가스 포집 기술

주요 이슈사항

탄소중립을 위하여 발전 외 화석연료 의존도가 높아 CO_2 발생량이 많은 철강·석유화학·시멘트 등의 산업 공정에서도 CO_2 포집기술 적용 필요

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 수익창출이 가능한 수소생산공정 CO_2 포집 기술 개발
- 정유 및 석유화학 공정 CO_2 포집 기술 개발 CO_2 포집 사업화
- 제철 부생가스 CO_2 포집 기술 개발

목표달성전략

- 정유·제철부생가스로부터 수소 생산이 가능하거나, 합성가스로부터 출발하는 수소/이산화탄소 분리공정 개발에 단기 집중
- 기존 공정의 개선 및 재설치가 필요한 대규모 포집-수소 생산 연계 실증 및 기타 산업공정의 이산화탄소 포집 기술 적용 추진
- 장기적으로는 실제 산업공정 설치를 통한 대용량 포집 장기 운전, 공정열 활용 CO_2 전환, 포집된 고순도 CO_2의 저장 연계 실증

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
수소 생산공정 CO_2 포집	· 기술 개발 단계 : TRL4 (에너지연, 전력연)	· 상용화 수준의 기술 확보 (미국 UOP, 독일 BASF)	· ('30) 400,000 톤/년 규모 CO_2 포집 사업화
정유/석유화학 공정 CO_2 포집	· 기술 개발 단계 : TRL3 (에너지연)	· 상용화 수준의 기술 확보 (미국 UOP/DOW, 캐나다 Shell 등)	· ('30) 150,000 톤/년 규모 CO_2 포집 사업화
제철 부생가스 CO_2 포집	· 기술 개발 단계 : TRL6 (RIST, 화학연 등)	· 상용화 80% 수준의 기술 확보(일본 미쓰비시중공업, 캐나다 Shell)	· ('30) 33,000 톤/년 규모 CO_2 포집 사업화
시멘트 공정 CO_2 포집	· 기술 개발 단계 : TRL6 (에너지연, 에어레인)	· 상용화 수준의 기술 확보(노르웨이 Aker)	· ('30) 40,000 톤/년 규모 CO_2 포집 사업화

3 바이오가스 및 매립지가스 포집 기술

주요 이슈사항

바이오·매립지가스의 CO_2 포집을 통하여 소규모 실증만으로 고질화 및 고부가가치화가 가능하며, 장기적으로 negative CO_2 포집 기술로 확대 가능

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 바이오가스 분리·정제 고도화 및 블루수소 생산 연계 기술
- CO_2 포집 메탄 고질화 기술
- 바이오·매립지가스 연소 중 CO_2 원천분리 기술

목표달성전략

- 바이오·매립지가스의 고질화 기술 개발 조기 추진 및 수소 생산을 위한 기초 연구 추진
- 2030년까지 중규모 이상의 수소 생산기술 개발 추진
- 장기적으로 실제 산업공정 설치를 통한 대용량 포집 장기 운전 및 negative CO_2 포집기술로 탄소중립에 기여

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
바이오가스 분리·정제 기술 고도화 및 블루수소 생산 연계 기술	· 기술 개발 단계: TRL7-9 · 에너지연, 화학연, 현대건설, 한솔이엠이, 한국지역난방공사	· 상용화 80% 수준의 기술 확보(미국, Pall Corp. Green Hydrotech, Criterion, MTR)	· ('30) 300,000 톤/년 규모 CO_2 포집 및 수소 생산
CO_2 포집 메탄 고질화 기술	· 기술 개발 단계: TRL4-6 · 연세대, 고려대, 화학연, 에어레인, 에너지연	· 상용화 80% 수준의 기술 확보(미국 MTR, 조지아공대, Air Liquide, 독일 Evonik)	· ('30) 메탄 고질화 실증 개발
바이오가스/매립지가스 연소 중 CO_2 원천분리 기술	· 기술개발 단계: TRL4 · 에너지연, 전력연 등	· 실험실 규모 feasibility test	· ('30) 1~3 MW_e급 실증 · ('40) 상용화 적용

4 연료 연소 중 원천분리 기술

주요 이슈사항

- LNG 발전 확대에 대응할 수 있으면서 CO_2 포집비용의 획기적인 저감이 가능한 기술 확보 필요
- 신규 LNG 발전 적용을 위한 단계별 격상실증·상용화 및 석탄, 바이오매스, 폐기물 등 고체연료로 적용 분야 확대 필요

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 기체연료 순산소연소 기술
- 기체연료 매체순환연소 기술
- 고체연료 순산소연소 기술

목표달성전략

- 기체연료(LNG, 합성가스 등) 순산소연소, 고체연료(석탄, 바이오매스, 폐기물) 순산소연소, 매체순환연소 기술 개발(수 MW_{th}급 실증 및 격상규모 설계 기술 확보)
- 2030년까지 수십~100 MW_{th} 실증을 위한 순산소연소, 매체순환연소 규모격상 및 스팀터빈, 가스터빈 연계 발전효율 실증 추진, 석탄, 바이오매스, 폐기물 등 고체연료로 적용분야 확대
- 장기적으로는 100 MW_e 이상 상업화 규모 안정적 운전 실증 추진

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
기체연료 순산소연소 기술	· 기술개발 단계: TRL5 · 생기연, 에너지연, 전력연 등	· 상용화 90% 수준 기술 확보(미국 NET Power) · 규모: 50 MW_{th}	· ('30) 10~20 MW_{th}급 실증 · ('40) 100~200 MW_{th}급 실증
기체연료 매체순환연소 기술	· 기술개발 단계: TRL6 · 전력연, 에너지연 등	· 상용화 70% 수준 기술확보(EU Darmstadt University) · 규모: 1 MW_{th}	· ('30) 100 MW_{th} 분산전원급 실증 · ('40) 300 MW_{th}급 실증
고체연료 순산소연소 기술	· 기술개발단계: TRL4 · 생기연, 에너지연 등	· 상용화 60% 수준 기술확보(캐나다, Canmet Energy) · 규모: 0.8 MW_{th}	· ('30) 10 MW_{th}급 실증 · ('40) 30 MW_{th}급 실증

5 차세대 포집 기술

주요 이슈사항

기존 포집기술의 경제성 있는 포집효율 한계(~90%)를 극복하고 탄소중립 실현이 가능한 차세대 원천기술의 지속적인 연구 개발 필요

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 고효율·저비용 직접공기포집 기술(Direct Air Capture, DAC)
- 대용량 포집 플랜트 후단 배출 저농도 CO_2 처리 기술

목표달성전략

- 초기(~'25)에는 직접공기포집 혁신 소재 및 기술개발을 통해 프로토타입 시연 및 격상규모 설계 기술을 확보하고, 대용량 포집 플랜트 후단 배출 1~3%의 저농도 CO_2를 포집하는 컴팩트 포집기술 개발
- 고효율·저비용 직접공기포집 시스템($100/톤$CO_2$) 기술 개발·보급 및 컴팩트 저농도 CO_2 포집 기술 상용화를 통한 2050년 탄소중립에 기여

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
고효율·저비용 직접공기포집 기술	· 기술개발 단계: TRL3~4 · 경희대, 명지대, 철도연, ㈜애니텍, 우리앤계명㈜, 에너지연 등	· 상용화 90% 수준의 기술 확보(Climeworks) · 규모: 4,000 톤CO_2/년[3] · 포집비용: $94-232/톤$CO_2$[4]	· ('30) 1,000~4,000 톤CO_2/년 규모 파일럿 테스트 · ('40) 포집비용 $100/톤$CO_2$
대용량 포집 플랜트 후단 배출 저농도 CO_2 처리 기술	· 기술개발 단계: TRL3~4 · 동국대, 세프라텍, 화학연 등	· 상용화 60% 수준의 기술 확보(미국 MTR) · 초기 연구 단계	· ('30) 대용량 포집공정 후단 배가스(<3%) 적용 기술 실증

3) Climeworks, DoE-Carbon Capture Project Review Meeting, Oct 7th 2020.
4) Keith et al., Joule 2, 1573-1594.

2) 안전하고 효율적인 CO_2 저장기술

정의

- CO_2 수송 및 저장 과정에서 발생할 수 있는 안전사고, 누출, 지진유발, 지형변화, 환경오염 등을 방지하기 위한 안전성 평가기술과 비용절감을 통한 CCS 경제성 향상과 저장소 저장용량 증대를 위한 효율향상 기술

저장소 탐사

저장소를 확보하기 위한 지질조사·물리탐사·시추탐사 및 평가 기술

주입

포집된 CO_2를 안전한 심부지층에 주입하여 영구히 저장하는 기술

모니터링

주입된 CO_2를 탐지하여 저장소에서의 거동 및 누출을 추적하는 기술

기술개발 필요성

- CCS 도입 및 확산을 위해 CO_2 수송 및 저장의 안전성 확보를 통한 수용성 환경 개선이 필요하며, 비용절감 및 효율향상을 통한 경제성 확보도 CCS 상용화의 선결과제

세부기술별 기술개발 목표

세부기술	현재국내 기술수준	단기 (~2025)	중기 (~2030)	장기 (~2050)	목표
수송 (배관수송 최적화 및 선박수송 상용화)	해저배관 수송기술 국산화	배관수송 최적화	실증	기술 상용화	▪('25) 수송비용 $20/톤 ▪('30) 수송비용 $10/톤
	선박수송 개념설계	선박수송 개념화	선박수송 기술개발	실증 및 상용화	
탐사 (저장소 탐사 및 평가기술)	저장소 유망구조도출	3억 톤 확보	6억 톤 확보	10억 톤 확보	▪('25) 저장용량 3억 톤 확보 ▪('30) 저장용량 6억 톤 확보
	저장소 탐사 및 시추기술 75% 수준	물리탐사기술 실증	시추탐사기술 실증	수출 산업화	
주입 (주입효율 및 안전성 향상기술)	주입기술 80% 수준	저장비용 $60/톤	저장비용 $30/톤	경제성 확보	▪('25) 40만 톤급 저장 실증 ▪('30) 400만 톤급 저장 실증
	100톤 규모 시범주입	40만 톤/년 저장	400만 톤/년 저장	상업화/대형화	
모니터링 (고성능 모니터링 기술)	4D 모니터링 실증 수준	기술 자립화	기술 실증	기술 상용화	▪('25) 모니터링 기술 자립화 ▪('30) 모니터링 기술 상용화
	모니터링 기술수준 85%	신기술 개발	신기술 상용화	수출 산업화	

현재 수행 중 또는 수행 예정인 R&D　향후 정부의 R&D투자가 필요한 기술　민간 부문에서 개발 예정인 기술

기술개발 추진방향

1 수송 기술

주요 이슈사항

- 세계적으로 CO_2 배관 기술은 성숙 단계로서 상용화 수준을 갖추고 있으며, 현재 배관수송 설계 최적화 및 부식 방지 배관 소재 개발 등에 집중적인 연구개발이 이루어지고 있음
- CO_2 원거리 수송에 대한 수요가 증가하면서 CO_2 전용 수송선, LNG-CO_2 수송 복합선, FPSO형 수송-주입 복합선 등의 개발이 주목
- 해양 지중저장이 확산되면서 포집된 CO_2를 해저 저장소로 연안에서 송출하는 허브터미널 기술에 대한 관심이 증가

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- CO_2 배관수송 최적화 기술
- CO_2 수송선 기술

목표달성전략

- 배관수송 최적화 기술은 실증 현장에서 비용절감 기술개발을 중점적으로 추진하고 수송선 기술은 국내 조선산업의 강점과 결합하여 특수선박 조선 및 운영기술 개발을 추진

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
CO_2 배관수송 최적화 기술	· 해저배관 구축 및 운영 (한국석유공사) · 고압가스배관관리 (한국가스안전공사) · 해저배관설치(현대중공업)	· 배관수송기술의 경우 상용화 완성 단계 · 수송비용 $10/톤 이하 (석유메이져, Statoil, Encana)	· ('25) 수송비용 $20/톤 이하 달성 · ('30) 수송비용 $10/톤 이하 달성
CO_2 수송선 기술	· FPSO 특수선 건조(삼성중공업) · CO_2 전용 수송선 개발 (대우조선해양)	· 200 톤급 CO_2 운반 전용선 (프랑스, EU, 호주) · 대규모 CO_2 전용 운반선 개발 중 (호주, 노르웨이)	

2 탐사 기술

주요 이슈사항

- CCS 상용화를 위한 가장 핵심적 과제인 대규모 CO_2 저장소 확보를 위한 저장소 탐사 및 시추기술에 대한 수요가 증가하고 있으며, 특히 3차원 물리탐사 기술과 해양 대심도 시추기술 개발요구 급증
- 대규모 CO_2 저장소 저장용량 및 저장 안전성 평가 기술은 저장소 선정의 핵심 기술이며, 저장 설계를 위한 저장소 모델링 기술은 효율적이고 안전한 저장 설계를 위한 필수 기술
- 저장소 정적 모델링 기술과 동적 시뮬레이션 기술은 저장 설계와 주입 최적화에 활용되기도 하며, 거동 및 누출 시뮬레이션을 통해 모니터링 설계에도 적용되어 기술개발 필요성 증가

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- CO_2 저장소 탐사 및 시추 기술
- CO_2 저장소 평가 및 저장 모델링 기술

목표달성전략

- 저장소 탐사기술은 기술자립화를 추진하고 인공지능과 4차 산업 기술을 접목한 스마트 저장소 평가 및 저장소 모델링 기술의 개발을 추진

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
CO_2 저장소 탐사 및 시추 기술	· 해양 물리탐사(지자연, 한국해양과학기술원) · 해양 시추(한국석유공사) · 탐사시추(지오텍)	· 4차원 물리탐사 상용화(미국 Schlumburger) · 대심도 해양 시추완결기술 상용화(미국 Schlumburger)	· ('25) 국내 대륙붕 저장용량 3억 톤 확보 · ('25) 국내 대륙붕 저장용량 6억 톤 확보
CO_2 저장소 평가 및 모델링 기술	· 저장소 평가(한국석유공사) · 저장소 모델링(지자연)	· 저장소 모델링(석유메이져, Equinor, BP, Exxon-mobile, Shell, Encana) · 저장소 평가(미국 NETL)	

3 주입 기술

주요 이슈사항

- 안전하고 효율적으로 심부 지층에 주입하기 위한 주입설비 기술은 저장 사업에서 가장 큰 시설비가 소요되는 분야로 해상 저장의 경우 주입공 구축, 해상 플랫폼 구축, 해저 주입설비 구축 기술의 고도화를 통해 저장 비용 절감과 안전성 확보에 있어 매우 중요한 기술
- 저장소에서의 CO_2 주입운영 최적화는 심부 지층에 저장할 때 발생하는 압력 상승 및 저장소의 변화를 파악하여 안전하고 효율적으로 주입하고 저장소를 관리 및 운영하는 기술로서, 특히 안전성과 관련하여 중요성이 강조되고 있음

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- CO_2 주입설비 구축 기술
- CO_2 주입운영 최적화 기술

목표달성전략

- CO_2 주입설비 구축 기술은 중규모 CCS 통합실증을 통해 자립화를 달성하고 대규모 CCS 통합실증 단계에서 상용화할 수 있도록 추진하고 CO_2 주입운영 최적화 기술은 실증 테스트베드를 활용하여 개발을 추진

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
CO_2 주입설비 구축 기술	· 주입설비 설계(대성산업가스) · 주입공 구축(한국석유공사) · 주입설비 구축(현대중공업)	· 해저 주입설비 기술(노르웨이, 미국, Equinor) · 해저 주입공 기술(미국 Schlumburger)	·('25) 연간 40만 톤급 저장 실증사업 실행 ·('30) 연간 400만 톤급 저장 실증사업 실행
CO_2 주입운영 최적화 기술	· 저장소 주입운영(한국석유공사) · 주입 최적화(지자연)	· 저장소 주입운영기술(노르웨이, 미국, Equinor, Shell, Exxon-Mobile, BP)	

4 모니터링 기술

주요 이슈사항

- CO_2 모니터링 기술은 4D 모니터링 기술과 해양 CCS의 경우 해저면 모니터링 기술이 핵심기술로 부상하고 있으며, 전자통신과 센서기술이 결합된 지구물리 모니터링과 시추공 모니터링 기술의 복합 모니터링 시스템 기술에 대한 기술적 요구가 증가
- CO_2 거동 및 누출 감지 기술은 발전되고 있는 센서기술 및 전자통신 기술과 결합되어 고도화 되고 있으며, 누출 감지에 따른 조기 대응 기술도 인공지능 기술을 도입하여 급속도로 발전
- 해양 CCS 모니터링 기술을 중심으로 최신 해저면 모니터링 기술을 도입한 고성능 CCS 모니터링 서비스 산업의 발전

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 고성능 CO_2 모니터링 시스템 기술
- CO_2 거동·누출 감지 및 누출 대응 기술

목표달성전략

- 성능 센서기술 및 전자통신기술을 결합하고 4차 산업기술을 접목한 모니터링 시스템을 개발하여 수출 산업화하고, 해양 CCS 모니터링 기술의 핵심인 해저면 OBS/OBC/OBN 모니터링 기술의 상용화 추진

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
고성능 CO_2 모니터링 시스템 기술	· 지구물리모니터링 센서 (에이에이티) · 시추공 모니터링(지자연)	· OBC/OBN 모니터링 (미국, 중동, SBG, Schlumburger, ARGAS) · 관측공 모니터링(미국, 캐나다, PNNL, UC버클리)	· ('25) 모니터링 기술 자립화(OBS/OBC/OBN) · ('30) 모니터링 기술 고도화(4D 모니터링 시스템)
CO_2 거동·누출 감지 및 누출 대응기술	· 거동 모니터링(한국석유공사) · 누출 모니터링(지자연, 한국해양과학기술원)		

3) 신산업 창출 CO_2 활용기술

정의

- 배출된 CO_2를 그대로 활용하거나 청정연료, 기초화학제품 등과 같은 유용한 제품으로 전환하여 활용

CO_2 연료 전환 기술

CO_2의 화학적·생물학적 전환 공정을 통하여 메탄, 메탄올, 휘발유 및 경유 등과 같이 연료 또는 연료첨가제로 전환 활용하는 기술

CO_2 화학제품 전환 기술

CO_2를 합성가스, 유기산, 고분자 제품 및 나프타와 같이 기초화학 원료 또는 화학제품으로 전환 활용하는 기술

건축소재 광물화 기술

CO_2 광물탄산화 반응을 활용하여 탄산염을 제조하고, 이를 시멘트·콘크리트 대체제 및 건축소재로 활용하거나 기타 산업적 용도로 활용하는 기술

탄소소재 전환 기술

CO_2를 활성탄 등의 다공성 탄소소재, 전극소재, 탄소나노튜브, 탄소섬유 등과 같은 다양한 탄소소재로 전환 활용하는 기술

기술개발 필요성

- CCU 기술은 CO_2를 경제적 가치를 지닌 제품으로 전환시킴으로써, CO_2 처리 비용 일부를 상쇄하거나 수익 창출 가능

세부기술별 기술개발 목표

세부기술	현재국내 기술수준	단기 (~2025)	중기 (~2030)	장기 (~2050)	목표
연료 전환 기술	메탄올 파일럿 실증, 바이오매스 생산단가 $2.0/kg	화학전환 연료화 저비용 기술개발	실증 확대 및 메탄올 상용화	재활용 탄소연료 상용화	▪('25) 기술경쟁력 확보 (선진국 대비 90%) ▪('30) 바이오매스 생산단가 $1.0/kg ▪('40) 재활용 탄소연료 경제성 확보 (現시장가 대비 100%)
		발생원별 생물전환 광합성미생물 개발	생물전환-바이오연료 생산 실증	바이오연료 상용화	
화학제품 전환 기술	합성가스, 초산 등 파일럿 실증	합성가스, CO, 유기산 생산 실증	상용화 기술 확보	상용화 기술군 확대	▪('25) 고분자 제품화 기술경쟁력 확보(선진국 대비 90%) ▪('45) CO_2 범용 화학제품 경제성 확보 (現시장가 대비 100%)
		고분자 제품화기술 개발 및 물성개선	고분자 제품 상용화 기술확보		
		재생에너지 직접 활용 기술 고도화		범용제품 적용	
건축소재 광물탄산화기술	광물탄산염 파일럿 실증, 폐광산채움재 대규모 실증	산업부산물 활용 광물화 기술 고도화	상용화 기술 확보	상용화 확대	▪('30) 현장 적용·상용화 사례 확보 ▪('40) 상용화 기술 확대 및 고부가제품화
탄소소재 전환 기술	실험실 규모	전극소재, CNT, 탄소섬유 등 탄소소재 원천기술 개발		기술 상용화	▪('30) 원천기술 경쟁력 확보 (선진국 대비 90%) ▪('45) 기술 상용화

현재 수행 중 또는 수행 예정인 R&D　　향후 정부의 R&D투자가 필요한 기술

기술개발 추진방향

1 연료전환 기술

주요 이슈사항

- 경제성 확보를 위한 촉매 개발 및 공정 효율향상·최적화 연구개발이 집중적으로 이루어지고 있음
- 재생에너지 활용 비중이 증가하면서 재생전력 기반 수소 및 CO_2 반응을 통한 연료화 기술(Power-to-Gas, Power-to-Liquids 등) 개발이 주목
- CO_2 생물전환을 통한 바이오매스 생산 및 이를 활용한 바이오연료 생산 기술 시장 확대 중

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- CO_2 화학전환을 통한 연료생산 전주기 통합기술
- CO_2 생물전환을 통한 바이오매스 생산 및 연료화 기술

목표달성전략

- 고효율·저비용 촉매 확보 및 공정 최적화를 통하여 비용을 저감하고, 재생에너지 및 그린수소와 연계한 친환경 CCU 청정연료 확보
- 발생원별 고효율 대규모 CO_2 생물전환 실증기반을 구축하고, 이를 활용하여 CO_2 생물전환-바이오연료 생산 연계 실증 추진

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
CO_2 화학전환을 통한 연료 생산 전주기 통합기술	· F-T, GTL, CTL 기술 등 파일럿 실증(수 톤/일) · 화학연, 에너지연, 한국가스공사, 현대오일뱅크 등	· 재생에너지 기반 수소 및 액체연료화 기술 실증 (독일 Sunfire)	· ('30) 바이오매스 평균단가 $1.0/kg, CO_2 전환율 40% · ('40) 재활용 탄소 연료 경제성 확보 (現 시장가 대비 100% 이하)
CO_2 생물전환을 통한 바이오연료 생산 기술	· 바이오연료화 기술 실증초기단계 · 생명연, 에너지연, 한국지역난방공사, 고려대, SKI 등	· 바이오매스 생산 미세조류 균주개발 및 대량 생산 공정 구축(미국 ExxonMobil)	

2 화학제품 전환 기술

주요 이슈사항

- 나프타 등 석유계 원료 대체 기술 확보와 함께, 정밀화학에서 석유화학까지 다양한 범용 화학제품 생산을 위한 글로벌 CO_2 전환 기술 확보 필요
- 일부 상용화 단계에 진입한 CO_2 고분자 제품화 기술경쟁력 확보 필요 및 CO_2 고분자 물성 향상 필요
- 전 세계적으로 재생에너지 기반 광·전기화학반응을 통해 화학제품을 생산하는 e-chemical 기술개발 연구 확대 중

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 플랫폼 화합물 제조 소재·공정 기술
- 고분자 제품 제조 소재·공정 기술
- 재생에너지 직접 활용 화학제품 제조 소재·공정 기술

목표달성전략

- 빠른 시일 내 상용화 진입이 가능한 화학제품(합성가스, 고분자 등)을 중심으로 선도국 수준의 기술경쟁력을 확보하고, 국내 산업 활용 추진
- 경제성 확보가 용이한 고부가 제품군 중심의 기술개발 전략에서 나프타 등의 기초화학원료 및 범용화학제품 등으로 상용화 기술을 확대

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
플랫폼 화합물 제조 소재·공정 기술	· CO 생산 데모실증 단계 · 화학연, 부흥산업사 등	· 상용화 70% 수준 기술 확보 · 독일, Calcor	· ('25) 기술경쟁력 확보 (선진국 대비 90%) · ('30) 합성가스, DMC, 고분자 단량체 생산 기술 상용화 · ('40) 재생에너지 직접 연계 기술 상용화
고분자 제품 제조 소재·공정 기술	· PC 생산기술 실증단계 · 아주대, 경희대, RIST, 화학연, SKI 등	· 폴리우레탄 생산기술 상용화 · 독일, Covestro	
재생에너지 직접활용 화학제품 제조 소재·공정 기술	· 실험실 규모 · KAIST, 서울대, 화학연, KIST, 경북대, UNIST, 고려대 등	· 전기화학 기반 CCU 화학제품 생산 기술 실증 및 사업화 추진(네덜란드 Avantium)	

3 건축소재 광물화 기술

주요 이슈사항

- 제철·제강 슬래그 등을 활용한 광물탄산화 기술개발 추진 중으로, 국내 활용 가능한 광물 및 산업부산물의 종류·순도 및 최종제품의 국내 산업적용 가능성을 고려한 전략 고도화 필요
- 온실가스 감축잠재량 및 산업적 활용 규모가 큰 광물화 기술 중심의 대규모 실증 연구 확대 및 비용절감을 위한 공정기술 개발 필요

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 산업부산물 활용 광물탄산화 기술 및 고부가화 기술

목표달성전략

- 산업 적용·활용이 용이하여 빠르게 상용화 단계로 진입 가능한 광물화 기술 실증을 우선 추진하고, 장기적으로는 공정 비용 저감을 통해 대규모 CO_2 전환이 가능한 광물화 기술을 확대
- 생산된 광물탄산염 제품의 고품위화 및 고부가화(Ti복합체, Al 복합체 등)을 통한 탄산염 신규 시장 창출

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
산업 부산물 활용 광물탄산화 기술 및 고부가화 기술	· CO_2포집물 건설소재 활용 실증 (40 톤CO_2/일) · 중조생산기술 실증(25 kgCO_2/일) · 슬래그활용 PCC 생산기술실증 (100 kgCO_2/일) ·대우건설, 전력연, 지자연, RIST, KIST 등	· 발전배가스 CO_2 활용 시멘트 보충재 상용화 전단계(미국 Calera) · 시멘트공정 적용 중탄산나트륨 생산기술 상용화(250 톤/일, 포집규모: 75,000 톤/년, 미국 Skyonic) · 10만 톤 규모 중탄산나트륨 생산 실증(미국 Skyonic)	· ('25) 상용화 전단계 기술군 확보 (TRL8) · ('30) 연간 온실가스 감축량 수만 톤 수준의 광물화 기술 상용화 달성

4 차세대 탄소소재화 기술

주요 이슈사항

- 탄소소재는 우수한 전기적, 기계적 특성과 열적 안정성, 흡착·수송 특성 등으로 인하여 연료전지, 슈퍼커패시터, 리튬이차전지 등 에너지 저장재료로 활용 가능하며, 철강, 알루미늄 및 시멘트 등을 대신한 보강재로서의 활용 기대
- 탄소소재 시장규모는 2020년 2,100억 달러 규모로 예상되고 있으며, 탄소섬유 시장 역시 산업수요 증가로 인해 확대 중
- CO_2 화학전환 반응을 통한 탄소나노튜브, 탄소나노섬유, 카본블랙 등과 같은 고부가 탄소소재 및 제품화 기술 개발 추진 중
- CO_2 탄소소재화 연구는 전 세계적으로 기초원천 연구단계로, 기술개발 투자를 통하여 글로벌 시장 선도 가능

기술개발 핵심내용 및 목표달성 전략

기술개발

- 탄소소재화 혁신 기술

목표달성전략

- 저온·저압의 온화한 조건에서 CO_2로부터 탄소소재 합성이 가능한 촉매 제조 및 공정 기술을 확보
- 이와 동시에 전환된 탄소소재의 고부가 활용 및 제품화 기술 개발 추진

[중점과제 및 기술개발 목표]

중점과제	현재 국내 수준 (기술보유자·기관)	선도국 기술 수준 (기술보유자·기관)	목표
차세대 탄소소재 합성 및 제품화 기술	· 붕소하이드라이드를 활용한 CO_2 탄소소재 제조 원천기술 확보(KAIST)	· 응용탄산염 전기분해 기반 탄소나노튜브 합성 원천기술 확보(미국 조지워싱턴대) · CO_2 전환 다공성 탄소 합성 원천기술 확보(중국 과학기술대학)	· ('25) 탄소소재 기술경쟁력 확보 (선진국 대비 90%) · ('45) 기술상용화

전문분과위원회

분야	소속		직위	성명
철강·시멘트	분과장	연세대학교	교수	손 일
	간사	한국에너지기술연구원	기술원	정 혜 림
	아주대학교		교수	박 은 덕
	한국세라믹기술원		수석연구원	추 용 식
	한국에너지기술연구원		실장	곽 영 태
	아세아시멘트		이사	강 봉 희
	현대제철		책임	조 종 오
	쌍용C&E		팀장	임 채 용
	포스코		수석	손 상 한
	컴버스텍		대표이사	류 인
석유화학	분과장	서강대학교	교수	나 정 걸
	간사	한국연구재단	연구원	문 경 은
	한국화학연구원		본부장	황 영 규
	한국과학기술연구원		책임연구원	엄 영 순
	LG화학		책임	강 무 성
	롯데케미칼		파트장	민 형 기
	SK이노베이션		수석	박 재 연
산업공정고도화	분과장	한국표준과학연구원	연구소장	강 상 우
	간사	한국에너지기술연구원	기술원	정 혜 림
	한국에너지기술연구원		단장	문 승 현
	한국전자통신연구원		실장	손 지 연
	삼성전자		그룹장	김 경 아
	SK머티리얼즈		수석	곽 정 훈
	주식회사 뉴텍		연구소장	이 승 헌
	인천테크노파크		선임연구원	김 정 식
CCUS	분과장	한국화학연구원	실장	최 지 나
	간사	한국화학연구원	선임연구원	안 진 주
	공주대학교		교수	권 이 균
	경북대학교		교수	이 수 출
	한국에너지기술연구원		책임연구원	류 호 정
	한국해양과학기술원		책임연구원	이 상 훈
	한국남동발전		부장	정 동 진

| 탄소중립 기술혁신 추진전략 | 10대 핵심기술 개발 방향

발 행 일	2021년 9월
발 행 인	김 종 남
발 행 처	한국에너지기술연구원
주 소	(34129) 대전시 유성구 가정로 152
디 자 인	레드포인트
인 쇄	신광사

본 보고서는 www.ctpp.re.kr 에서도 보실 수 있습니다.
무단 전재 및 복사를 금합니다.