

2050 탄소중립 에너지기술 로드맵

—
CCUS



탄소중립은 이제 글로벌 뉴노멀이자 새로운 성장 패러다임으로 자리잡았습니다. 전세계 140여개국이 탄소중립을 선언하고, 미국·EU 등 주요국들은 탄소중립 이행 계획을 수립하고 대규모 재정투입 및 탄소국경세 도입 등 본격 착수단계에 돌입하였습니다. 우리나라도 '20년 10월 2050 탄소중립 선언, '21년 10월 2050 탄소중립 시나리오 및 2030 NDC 상향 확정·발표하였습니다. SK하이닉스, LG에너지솔루션 등 13개 우리 기업들도 글로벌 RE100에 가입하고 탄소감축 투자확대, ESG 경영에 적극 나서고 있습니다.

탄소중립은 우리 경제의 새로운 도약 기회이나, 그 도전 과정에서 죽음의 계곡과 다윈의 바다를 건너야 하는 부담감도 따릅니다. 정부는 12월 10일 탄소중립 실현을 위한 중장기 비전과 정책과제를 담은 '산업·에너지 탄소중립 대전환 비전과 전략'을 발표하였습니다. 동 전략에 따르면 '50년 재생에너지 전원 비중은 '18년 3.6%에서 '50년 70.8%로, 또한 '50년 청정수소 자급률은 60%로 끌어올릴 계획입니다.

탄소중립 실현을 위해서는 화석 연·원료 기반인 현재 산업·에너지 구조의 근본적인 전환이 요구되며, 특히 기존의 생산 방식과 효율을 뛰어넘는 한계돌파형 기술개발이 필요합니다. 이에 정부는 금년 11월 17일 '탄소중립 산업·에너지 R&D 전략'을 발표하고 2030 NDC, 2050 탄소중립 실현을 위한 핵심기술과 개발 이정표를 제시하였습니다. 동 전략의 기초가 되는 본 로드맵은 청정연료발전, 전력계통, 그린수소 등 에너지 13대 분야 197개 핵심기술 개발 일정을 담고 있으며 향후 30년간 탄소중립 에너지 기술개발의 밑그림이 될 것입니다.

끝으로, 산업통상자원부는 본 로드맵 집필을 위해 13개 작업반을 올해 4월부터 11월 까지 약 8개월간 구성하였으며, 동 작업반을 통해 각고의 노력을 기울여주신 180여 명의 산·학·연 전문가와 정부 관계자 여러분께 진심 어린 감사의 말씀을 전합니다. 기업을 위한 탄소중립 원칙 아래 2050 탄소중립 달성을 위해 모든 정책역량을 모아 원천 기술을 확보할 수 있는 새로운 기회 창출이 이루어지도록 최선을 다하겠습니다.

2021년 12월
산업통상자원부 제2차관 박기영



코로나 팬데믹과 기후 위기는 탄소중립이라는 국제 합의를 끌어냈으며, 현재까지 140여 개국이 2050년 온실가스 배출제로 선언에 동참했습니다. 美 바이든 대통령은 파리협약에 재가입했고, 2050년 100% 청정에너지시대 실현을 선언하였습니다. 중국은 시진핑 주석의 탄소중립 선언에 힘입어 2020년 133GW의 재생에너지를 설치했습니다. 독일도 지난해 재생에너지 발전 비율이 46%로 증가했고, 특히 1분기에는 52%로 전통 에너지를 넘어섰습니다. 제조업 비중이 큰 독일은 최근 30년간 국내총생산(GDP) 54% 증가, 에너지 소비 14% 감소 양상을 보여, 산업분야 탄소배출 비중이 큰 우리나라에 시사하는 바가 큼니다.

우리 정부도 이러한 세계적 추세에 발맞추어 지난해 10월 탄소중립 목표를 선언하고, 12월 관계부처 합동으로「2050 탄소중립 추진전략」을 발표하였습니다. 현재 정부가 추진하는 탄소중립은 에너지 공급 차원의 전환뿐만 아니라, 多배출 제조업의 산업구조 전환 부문까지 포괄하는 쏠 부문의 전환을 뜻합니다.

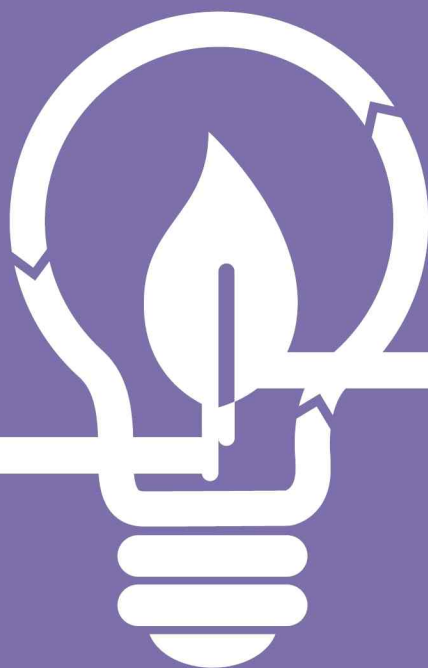
탄소중립의 성공적 달성을 위해서는 무엇보다 현 기술을 뛰어넘는 혁신기술 확보와 저탄소 혁신성장 산업으로의 전환이 중요합니다. 한국판 그린뉴딜을 통해 기확보된 기술경쟁력을 중심으로 글로벌 탄소중립 속도 경쟁에서 우위를 다지고 신시장을 선점해 나가야 할 것입니다. 또한, 탄소중립의 새로운 성장동력으로서 에너지 혁신을 가속하기 위해 산학연 모두가 뜻을 모아야 합니다. 이러한 시점에서, '2050 탄소중립 에너지기술 로드맵'이 우리의 에너지 시스템을 근본적으로 혁신하고, 앞으로 미래 에너지산업의 투자를 견인할 것이라고 확신합니다.

끝으로, '2050 탄소중립 에너지기술 로드맵 수립'을 위해 아낌없는 헌신과 노력을 해주신 모든 분과위원님과 관계자 여러분께 진심으로 감사 인사드립니다.

2021년 12월

한국에너지기술평가원장 권기영

권기영



| CCUS |



I. 개요

1. 분야 정의	2
2. 전략방향 설명	3
3. 선정배경(탄소중립 관점)	5
4. 핵심수단 및 전략도출	10
5. 전략방향-핵심기술 로드맵	11




II. 비전 및 목표

1. 비전 및 목표	14
------------------	----



III. 전략방향 및 핵심기술

1. CO ₂ 대량 배출원에 적용 가능한 저비용 포집기술	16
2. 저장 핵심기술 자립화 및 조기 통합실증(저장)	50
3. 시장수요/온실가스 감축이 가능한 CCU 제품 및 공정 조기 상용화(활용)	72



2050 탄소중립
에너지기술 로드맵

I

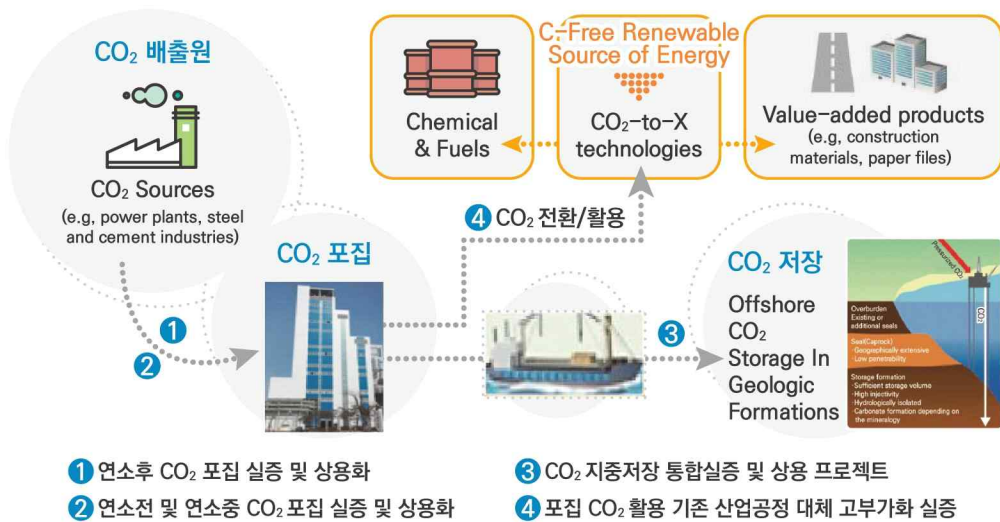
개요

1. 분야 정의	2
2. 전략방향 설명	3
3. 선정배경(탄소중립 관점)	5
4. 핵심수단 및 전략도출	10
5. 전략방향-핵심기술 로드맵	11

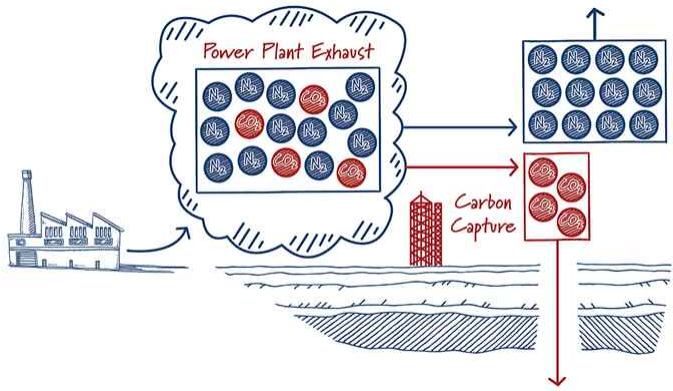
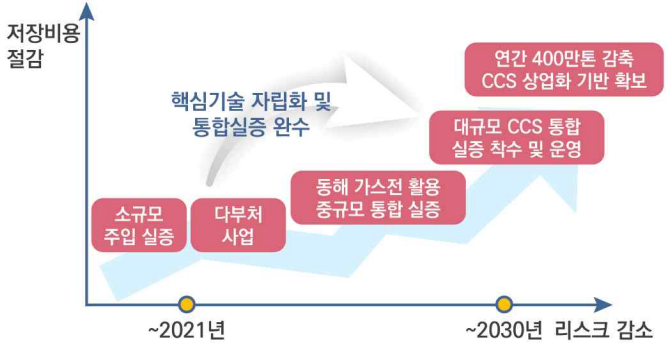
01 분야 정의


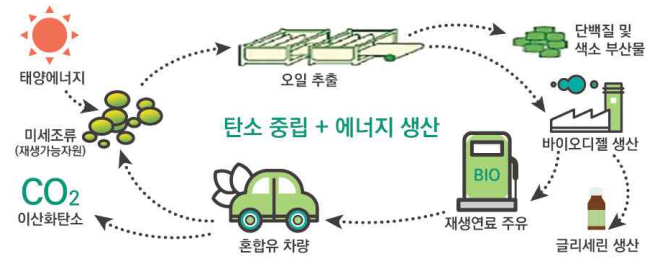
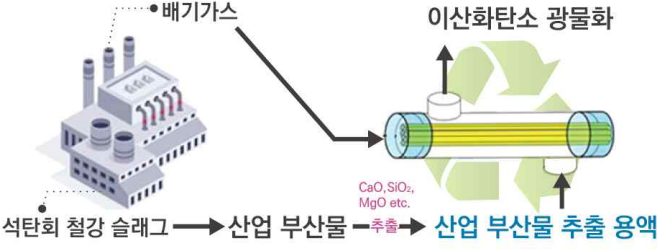
- 타 기술에 의해 저감되지 않고 대기 중으로 배출될 수밖에 없는 CO₂를 경제적이고 안전하게 포집하여 저장 또는 활용할 수 있도록 하는 기술로서 탄소중립을 위한 마지막 수단임
- 기 확보 기술을 중심으로 발전 및 연소, 산업공정(정유, 철강, 석유화학, 시멘트, 수소생산공정 등) 배출원별 포집기술 최적화, 고도화 기술을 개발하고 실증 추진
- 미래시장 개척을 위해 저농도 및 직접공기 포집기술을 개발하고 혁신적 차세대 포집기술, 포집비용 저감을 위한 혁신 소재, 공정 개발
- CO₂ 저장소의 탐사 및 구축, 포집된 CO₂의 수송·주입·모니터링 등 CO₂의 안정적 저장을 위한 핵심기술 국산화 및 기술경쟁력 확보
- 에너지, 산업공정 등에서 배출되는 CO₂를 직접 또는 간접 전환하여 잠재적 시장가치가 있는 제품으로 활용하는 기술로서 개발 필요성, 시급성이 크고 신시장 창출이 가능한 CO₂ 활용 제품에 집중(화학적 전환, 생물학적 전환, 광물 탄산화로 구분)

중점투자분야 개요



02 전략방향 설명

전략명	개요	기대효과
<p>CO₂ 대량 배출원에 적용 가능한 저비용 포집기술</p>	 <p>발전 및 연소, 산업공정(정유, 철강, 석유화학, 시멘트, 수소생산공정 등) 배출원별 최적 포집기술 개발, 미래시장 개척을 위한 저농도·직접공기 포집·차세대 포집기술 개발 등 포집능력 향상 및 포집비용 저감 추진</p>	<p>CO₂ 포집 대상별 저비용 포집기술 확보 및 대형 실증, 보급 (30) \$30/t-CO₂ (50) \$20/t-CO₂</p>
<p>저장 핵심기술 자립화 및 조기 통합실증</p>	 <p>핵심기술 자립화 및 통합실증 완수</p> <p>연간 400만톤 감축 CCS 상업화 기반 확보</p> <p>대규모 CCS 통합 실증 착수 및 운영</p> <p>동해 가스전 활용 중규모 통합 실증</p> <p>소규모 주입 실증</p> <p>다부처 사업</p> <p>~2021년</p> <p>~2030년 리스크 감소</p> <p>핵심기술 자립화 및 조기 통합 실증을 통한 상용화 기반 확보</p> <p>• 해양 지중저장 핵심기술의 상용화자립화를 통하여 설비 및 공정 국산화를 확대, 해외 의존도를 낮추고 국내 해양설비, 모니터링 및 저장 운영 업체의 기술 역량 향상을 도모하여 대규모 CCS 통합 실증 목표를 조기 달성하고 궁극적으로 해외시장 진출 기반 마련</p>	<p>핵심기술 자립화 및 조기 통합 실증을 통한 상용화 기반 확보</p>

전략명	개요	기대효과
<p>시장수요/ 온실가스 감축이 가능한 CCU 제품 및 공정 조기 상용화</p>	<p>(화학적 전환)</p>  <p>열촉매 화학, 광화학, 전기 화학, 효소 화학</p> <p>플랫폼화합물, 유기산, 유기카보네이트, 탄화수소, 고분자, 탄소소재 및 차세대 활용</p>	
	<p>(생물학적 전환)</p>  <p>태양에너지, 미세조류 (재생가능자원), CO2 이산화탄소, 오일 추출, 탄소 중립 + 에너지 생산, 혼합유 차량, 바이오디젤 생산, 재생연료 주유, 단백질 및 색소 부산물, 글리세린 생산</p>	<p>경제적 CO₂ 순환공정 확보, 감축효과 극대화</p>
	<p>(광물 탄산화)</p>  <p>배기가스, 이산화탄소 광물화, 석탄회 철강 슬래그, 산업 부산물, CaO, SiO₂, MgO etc., 산업 부산물 추출 용액</p>	
	<ul style="list-style-type: none"> 에너지, 산업공정 등에서 배출되는 CO₂를 직접 또는 간접 전환하여 잠재적 시장가치가 있는 제품으로 활용하는 기술로서 개발 필요성, 시급성이 크고 신시장 창출이 가능한 CO₂ 활용 제품에 집중(화학적 전환, 생물학적 전환, 광물 탄산화로 구분) 	

03 선정배경

가

CO₂ 대량 배출원에 적용 가능한 저비용 포집기술

● 현황

- 기존공정에서 CO₂를 포집하기 위해서는 추가적인 비용이 소요되므로 민간이 감내할 수 있는 수준으로 CO₂ 포집 비용을 낮출 필요가 있음
- 발전 및 연소, 석유화학산업과 철강 산업 등 다배출 분야의 CO₂를 포집함으로써 탄소중립 목표 달성이 가능
- 각각의 공정별 최적 포집기술이 필요하며, 일부 기술의 경우 유사한 조건의 배출가스 간에 확장이 용이
- 예로, 석유화학산업의 전체 배출량 중 1/3을 차지하는 NCC 열원용 메탄 연소 배출가스는 공정에 따라 소폭 차이는 있으나 연소가스의 조성은 큰 차이가 없어 확장이 매우 용이한 표준기술이 될 수 있음

● 문제점

- \$60~70/t-CO₂ 수준의 높은 포집비용, 추가적인 포집 에너지 소모, 신뢰성 있는 기술 부재 등 민간이 참여하기 제한적인 조건을 지님
- 개발된 기술을 적용하기 위해서는 장기 운전 성능 실증이 필요
- 현재 개발된 기술은 저농도 조건에서는 포집효율이 감소하고 포집비용이 상승하는 등 추가적인 기술개발이 필요한 상황임

● 해결방안

- CO₂ 포집기술의 장기 운전 실증을 위해 정부와 민간의 투자 확대가 필요
- 정부에서 초기 기술개발을 지원하고 중장기 운전 실증 시에 민간의 투자를 확대
- 중장기 실증(2년 이상) 과정 중 민간에서 자발적으로 최적 기술을 선정할 것으로 예상되며, 운전비용 최소화를 위해 폐열활용, 성능 개선 등의 노력이 있을 것으로 예상됨
- 저농도 배가스에 적합한 용매 개선, 포집/분리조건 최적화, 용매 안정성 검증/개선, 저농도 건/습식 포집기술 개발, 선택적 흡착제/공정 개발, 배가스 직접 활용 CO₂ 전환공정 등 기술개발을 추진

포집 위치에 따른 CO₂ 포집기술의 분류



출처 : CCU 기술혁신 로드맵(2021)

나 저장 핵심기술 자립화 및 조기 통합실증

● 현황

- “경제적이고 안전한 저장사업”에 대한 산업계 및 사회적 요구가 증대함
- 발전 및 산업계에서 다양한 규모로 포집된 CO₂를 국내 대륙붕에 효과적으로 처분하기 위해서는 다양한 규모의 저장소를 다수 확보하는 것이 시급함
- 수소 사회로의 전환 과정에서 블루수소 생산과 CO₂ 저장사업의 연계가 불가피함
- 장기적으로 국내 저장소뿐만 아니라 해외 저장소 활용을 통한 CO₂ 감축량 확보전략이 필요

● 문제점

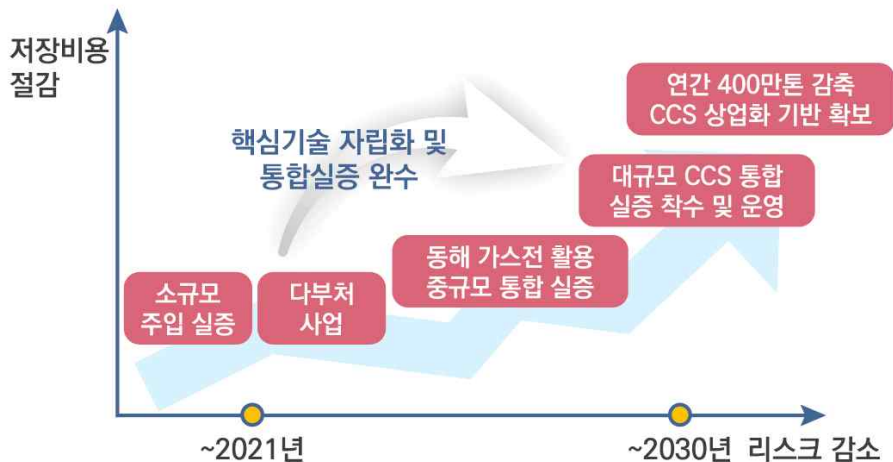
- 국내 대륙붕에서 저장소 확정 지연 및 시추/탐사 자료 부족으로 인한 저장용량 추산의 불확실성 존재
- 수소, 미세먼지, 플랜트, 석유·가스 분야 등 전환·산업 분야에 CCS 기술이 복잡하게 중첩·연계되어 있어 단일 기술로 CCS 전주기 실증이 전무함
- 국내 대륙붕에서 저장사업 추진 시 비용 절감이 가능한 기술의 자립화 및 신기술 개발의 수준이 낮음

● 해결방안

- 대륙붕 및 인접수역을 대상으로 CO₂ 지중저장소 종합탐사 조기 수행이 필요하며 정부 주도의 국가 CO₂ 저장용량 관리가 필요함
- 수소, 미세먼지, 플랜트, 석유·가스 개발과 연계된 hybrid CCS를 추진

- CCS 전주기 실증사업 추진을 통한 실적 확보 및 요소기술 수준 향상을 통해 CCS 조기 상용화 및 탄소중립 정책 지원
- 해외 저장소 확보 및 활용 체계 구축을 통해 민간의 CCS 사업 참여를 유도하고 정부 탄소중립 목표 달성에 기여

저장 핵심기술 자립화 및 조기 통합실증 전략방향



다

시장수요/온실가스 감축이 가능한 CCU 제품 및 공정 조기 상용화

● 현황

- 글로벌 시장 수요 및 국내 여건을 고려한 핵심 분야 기술경쟁력을 확보하고 있음
- 감축 효과 경제성 확보를 위한 기술혁신 및 실용화 단계로의 연계 중임
- CO₂를 원료로 활용한 제품은 다양하게 보고되고 있으나 전환제품의 시장을 고려하면 파급력이 큰 제품을 찾기가 쉽지 않은 상황임. 따라서 합성가스, 메탄올, 합성연료, 합성나프타 등 원료 물질들의 제조 기술을 우선 확보하는 것이 필요

● 문제점

- 낮은 경제성으로 상용화에 한계가 있어 기술개발 투자 저조, 글로벌 시장 부재, 상용화된 기술 및 제품 부재 등의 문제가 있음. 해외 일부 기술은 상용화 발표를 했으나 확대되지 않고 있음. 국내 일부

기술은 실증을 통해 상용화에 접근하고 있지만 대체로 원천기술 수준에 머물고 있으며, 감축 방법론 부재로 감축량을 평가하지 못하고 있음

● (화학적 전환)

- 다양한 원천기술 확보 및 실증 연구가 추진되고 있으나 주요 선진국이 확보한 수준의 기술 상용화 사례는 없음
- 기술적으로는 촉매의 낮은 활성, 비활성화로 인해 글로벌 시장 형성단계에 있는 화학 제품군 생산을 위한 핵심 촉매-공정 기술의 수준이 낮은 편임
- 기존 원료 대비 낮은 경제성과 함께, 추가 공정에너지 사용으로 온실가스 감축 효과 감소가 우려되어 통합공정 구축이 필요

● (생물학적 전환)

- 고효율 CO₂ 생물학적 전환 산업시스템 구축을 달성하기 위한 국내 사계절 고농도 바이오매스 생산기술이 아직 갖춰지지 않음
- 공정 융합 및 저가 기질 활용 등을 통한 생산 설비망의 비효율화 극복 방안이 필요
- 온실가스 발생원별 최적화된 산업 균주를 확보하기 위한 추진전략이 부재함
- 타 기술에 비해 낮은 처리량으로 인해 온실가스 감축 효과가 낮을 것이라는 우려가 존재함

● (광물탄산화)

- 활용 가능한 양이온 물질(광물, 산업부산물 등)의 종류 및 순도, 최종산물의 산업 적용성 및 국내 산업 활용성을 고려한 전략이 마련되지 않아 제품 표준화가 필요
- CO₂ 소모량 및 농도, 통합 공정에너지 등을 고려하여 공정비용 저감과 함께 감축 잠재량이 큰 기술 실증이 시급함

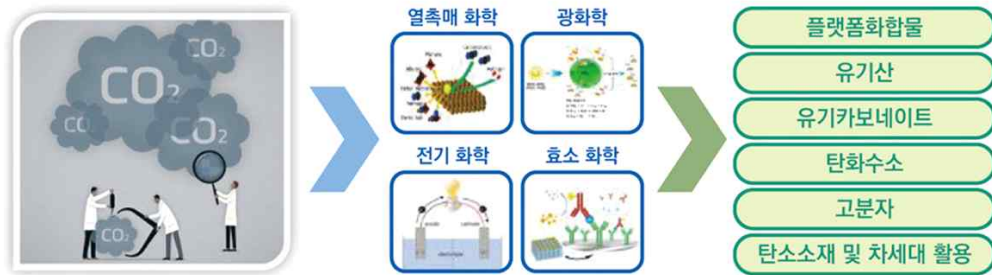
● 해결방안

- 경제성 확보를 위한 지원 필요
 - 기술개발 투자를 높이는 등 집중투자 필요
 - 배출되는 CO₂를 활용하여 국내 생산 제품(주로 석유제품)을 대체함과 동시에 고부가화할 수 있는 기술 사업화 모델 확립 필요
 - 글로벌 시장 형성단계에 있는 주요 화학 제품군 생산을 위한 핵심기술 개발로 국내 기술경쟁력 제고 필요
 - 밸류체인 및 시장수요를 고려한 플랫폼 화합물, 고분자 제품, 탄산염 중심의 원천·상용화 기술 확보에 집중
 - 기술 반영이 가능한 국가인벤토리 가이드라인 개발, 감축량 평가 방법 확립 등 CCUS 기술 보급 확산을 촉진하기 위한 기반 구축 및 제도(인센티브, 우선구매 등) 개선
- CO₂를 활용한 화학기초원료 제조
 - 탄소 침적 개선, 재생이 용이한 신규 고효율 촉매 개발
 - 에너지/제조원가/탄소발자국을 개선하기 위해 열 교환망 최적화를 포함한 효율적 공정 설계 및 개선

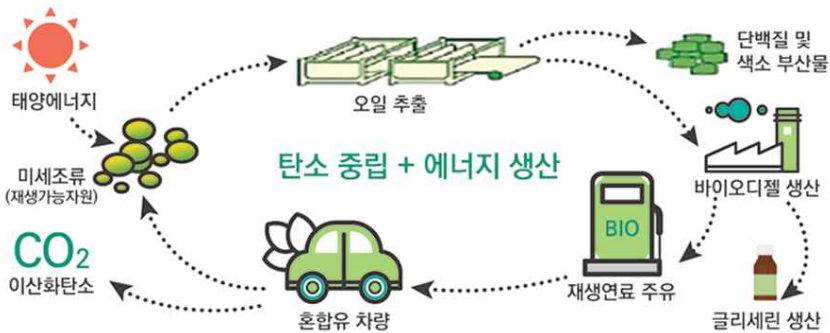
- 신재생에너지 사용을 전제로 한 전기화학적 전환 기술의 개발
- CO₂를 활용한 연료/나프타 제조
 - 전환 촉매 및 공정의 개선으로 촉매활성을 높여 미반응물을 감소시킴
 - 기술 검증 및 초기 상용화는 부생수소, 개질수소를 활용하는 등 장기적인 관점의 그린 수소 확보 필요

CO₂ 활용 기술의 분류와 개념

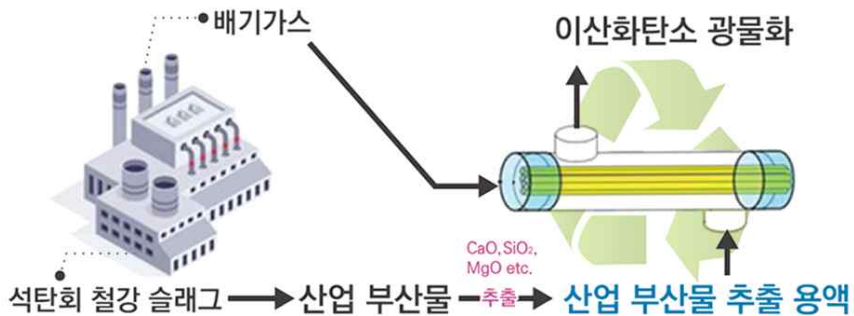
(화학적 전환)



(생물학적 전환)



(광물 탄산화)



출처 : (화학전환) 한국화학연구원 환경자원연구센터 (자체제작 그림)

(생물전환) KDI 경제정보센터

(광물 탄산화) 박진석, "[사이언스] 초투과성 분리막을 이용한 CO₂ 전환시스템 개발 비용 ↓ 효율 ↑", 특허뉴스

04 핵심수단 및 전략도출

CCUS



Pillar
(핵심수단)

< 안전하고 경제성 있는 CCUS 기술 확보 >

- 발전 및 CO₂ 다배출 산업분야에서 배출되는 CO₂를 포집·활용·저장하는 기술

전략도출

Dilemma		Solution	
		해결 방안	
Dilemma 1	<ul style="list-style-type: none"> 상용화 전 단계로 기술신뢰성 확보가 필요하며 포집비용이 높음 - 석탄발전 분야 외 LNG 발전, 산업분야 (철강, 시멘트, 석유화학, 정유) 적용 필요성은 높으나, 최적 기술 적용 및 상용화 경험 없음 	Solution 1	<ul style="list-style-type: none"> 장기운전을 통한 신뢰성 확보 대형 실증을 통한 비용절감 및 다양한 배출원(LNG발전, 철강, 시멘트, 석유화학, 정유 산업)에 적용가능한 최적 기술 확보 추진
Dilemma 2	<ul style="list-style-type: none"> 국내 저장소 확정 지연 및 요소기술 미확보 등 CCS 통합실증을 위한 기술적 문제가 존재하며, 주민 수용성, 관련 법제도 미비 등 기술 외적인 이슈사항 존재 	Solution 2	<ul style="list-style-type: none"> 대륙붕 및 인접 해역 탐사시추 적극 지원을 통한 국내 저장소 확보 추진(한계형 저장소 포함) 및 저장용량 증진, 해외저장소 활용 체계 확보
Dilemma 3	<ul style="list-style-type: none"> 기술성 확보 외에도 설비투자비, 공정비용 등 경제성 측면에서 기존제품 대비 비교우위를 확보하지 못해 상용화 기술 부재 	Solution 3	<ul style="list-style-type: none"> 각 CCU 제품/기술별로 기술성 확보 및 상용화를 위한 집중투자로 CCU 제품 시장 창출 및 관련된 온실가스 감축 인증방법론 확보

05 전략방향-핵심기술 로드맵

핵심기술	Baseline	단기(~2025)	~2030	~2040	~2050	전략방향 목표	
CO ₂ 대량 배출원에 적용 가능한 저비용 포집기술	<ul style="list-style-type: none"> 단위 포집설비 기준 포집량 7만 t-CO₂/년, 포집비용 \$45/t-CO₂ 포집량 3천CO₂/년, 포집비용 \$27-50/t-CO₂ 실증규모 0.1-10MWth, CO₂ 원천분리농도 90-98% 포집량 1천-4천CO₂/년, 포집비용 \$200-600 t-CO₂ 실증규모(NG) 1MWth, 포집량 5천 t-CO₂/년, 포집비용 \$35-70 /tCO₂ 	○ 발전 및 연소 배가스 중 CO ₂ 포집기술				○ 상용급 실증	<ul style="list-style-type: none"> (50) 포집량 400만tCO₂/년, 포집비용 \$20/t-CO₂ (50) 포집량 200만tCO₂/년 (50) 포집량 100만tCO₂/년, 포집비용 \$15-25/t-CO₂ (50) 포집량 50만tCO₂/년, 포집비용 \$60-100/t-CO₂ (50) 포집량 70만tCO₂/년, 포집비용 \$20-30/t-CO₂ (50) 1MWth 급 이상 실증, 포집비용 \$20/t-CO₂ 이하
		○ 산업공정 배출 CO ₂ 포집기술			○ 실증		
		○ 연료 연소 중 CO ₂ 포집기술		○ 실증	○ 확대실증		
		○ 저농도 CO ₂ 포집기술		○ 실증			
		○ 기타 가스자원 CO ₂ 포집기술			○ 실증	○ 확대실증	
		○ CO ₂ 포집비용 저감을 위한 차세대 기술 개발				○ 실증	
저장 핵심기술 자립화 및 조기 통합실증 (저장)	<ul style="list-style-type: none"> 기본기술 및 소규모 운영기술 보유 석유개발 구조 확인을 위한 탐사에 국한 개념실제 가능 수준 영일만 해상에서 100톤의 CO₂ 주입 소규모 해상 실증부지 대상 일부 기술 적용 	○ CO ₂ 수송기술			○ 실증	○ 확대실증	<ul style="list-style-type: none"> (50) 연간 500만톤 규모 수송기술 (50) 연간 1,500만톤 규모 저장 실증 (50) 저장소 구축기술 핵심기술 자립화 (50) 연간 1,500만톤 주입 실적 확보 (50) 연간 400만톤 규모 저장부지 모니터링 시스템 운영
		○ CO ₂ 저장소 탐사기술	○ 실증	○ 확대실증	○ 상용급 실증		
		○ CO ₂ 저장소 구축기술	○ 실증	○ 확대실증	○ 상용급 실증		
		○ CO ₂ 저장소 탐사기술	○ 실증	○ 확대실증	○ 상용급 실증		
		○ CO ₂ 저장 모니터링 기술	○ 실증	○ 확대실증	○ 상용급 실증		
						○ 상용급 실증	
시장수요/온실가스 감축이 가능한 CCU 제품 및 공정 조기 상용화 (활용)	<ul style="list-style-type: none"> 최고수준 촉매 공정 개발 중, pilot 수준 기술 성숙도, 가격경쟁력 확보 필요 Pilot 수준 	○ 화학적 전환기술			○ 확대실증	○ 상용급 실증	<ul style="list-style-type: none"> (50) 재생에너지 연계 활용 (50) 시장가격 경쟁력 확보 (50) 상용화 원료
		○ 생물학적 전환기술	○ 실증	○ 확대실증	○ 상용급 실증		
		○ 광물 탄산화	○ 확대실증	○ 상용급 실증			

법제 정부주도 개발 실증 도입/확산 자립/보완화 민간주도 개발 실증 도입/확산 자립/보완화 [기술확보전략] ○ 자체개발 ● 국제공동연구 ● 기술도입 ● 라이선싱



2050 탄소중립
에너지기술 로드맵

II

비전 및 목표

1. 비전 및 목표 14

01 비전 및 목표

비전

발전 및 다배출산업분야 기술 내재화로
온실가스 적극 감축 및 CCUS 선도국가 도약

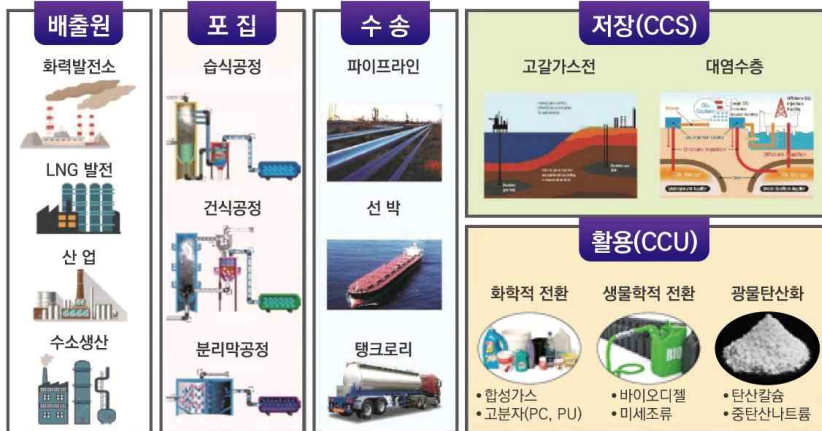
목표

- ☑ '50년 포집비용 \$20/t-CO₂ 달성

전략 방향

- ☑ CO₂ 대량 배출원에 적용 가능한 저비용 포집기술
- ☑ 저장 핵심기술 자립화 및 조기 통합실증
- ☑ 시장수요/온실가스 감축이 가능한 CCU 제품 및 공정 조기 상용화

전략
방향



출처 : 산업부 보도자료 발췌 편집

추진 전략

- ☑ CCUS 세부 요소기술 및 시장 현황 분석
- ☑ 온실가스 감축(기여)량, 시장 및 생산규모, 국내 적용성 등을 고려한 기술개발 전략 및 시장확보 방안 수립
- ☑ 정부 R&D 사업 및 민간 자체 기술개발을 통해 기술성·경제성 확보 및 산업현장에서 온실가스 감축 구현(인증 방법론 개발 병행)
- ☑ CCUS 적용을 위한 투명한 정보공개 및 소통을 통한 대중수용성 제고 및 관련 법제도 입법화 추진

III

전략방향 및 핵심기술

1. CO₂ 대량 배출원에 적용 가능한 저비용 포집기술 16
2. 저장 핵심기술 자립화 및 조기 통합실증 (저장) 50
3. 시장수요/온실가스 감축이 가능한 CCU 제품 및 공정 조기 상용화(활용) 72

01 CO₂ 대량 배출원에 적용 가능한 저비용 포집기술

가 전략방향 대상정의

● 개념 및 범위

- 타 기술에 의해 저감되지 않고 대기 중으로 배출될 수밖에 없는 CO₂를 경제적이고 안전하게 포집하여 저장 또는 활용할 수 있도록 하는 기술로서 탄소중립을 위한 마지막 수단임
- 기확보된 기술을 중심으로 배출원 선정 및 테스트베드 구축 등 발전분야 포집기술 대규모 실증을 위한 여건을 마련하고, 철강, 석유화학, 시멘트, 수소생산공정 등 발전 외 산업공정에 국내 개발 포집기술을 적용 및 최적화, 고도화하는 단계별 실증 기술개발을 추진
- 2050년 탄소중립에 기여할 수 있는 차세대 포집기술의 상용화 기술개발을 지속해서 추진하고 포집비용 저감을 위한 혁신소재 및 공정개발을 추진
- 미래시장 개척을 위한 저농도 및 공기 중 CO₂ 포집기술을 개발

포집 위치에 따른 CO₂ 포집기술의 분류



출처: CCU 기술혁신 로드맵(2021)

● 기술적 요구사항

- 민간이 감내할 수 있는 CO₂ 포집비용 실현이 가능한 포집기술 필요
- 높은 포집비용, 추가적인 에너지 소모, 신뢰성 있는 기술 부재로 인해 민간 참여 저조
- 낮은 포집비용, 장기운전을 통한 기술성능 실증, 민간참여에 의한 에너지 최적화 필요
- 포집 대상별 최적 소재, 공정, 운전기술 확보 및 에너지소비 최소화 필요

나 전략방향별 핵심기술

CCUS		CO ₂ 대량 배출원에 적용 가능한 저비용 포집기술							
핵심기술	Baseline	단기				중기			목표
		2022	2023	2024	2025	~2030	~2040	~2050	
발전 및 연소 중 CO ₂ 포집기술	<ul style="list-style-type: none"> 단위 포집설비 기준 <ul style="list-style-type: none"> - 포집량 7만 t-CO₂/년 - 포집비용 \$45/t-CO₂ 단위 포집설비 기준 <ul style="list-style-type: none"> - 포집량 5.6만 t-CO₂/년 - 포집비용 \$70/t-CO₂ 	(사) 석탄 발전 및 연소 배가스 고농도 CO ₂ 포집 (연간 1백만톤급)				(사) 연간 3백만톤급	(사) 연간 4백만톤급		<ul style="list-style-type: none"> 포집량 400만 t-CO₂/년, 포집비용 \$20/t-CO₂ 포집량 100만 t-CO₂/년, 포집비용 \$40/t-CO₂
		(사) LNG 발전 및 연소 배가스 저농도 CO ₂ 포집(연간 3십만톤급)				(사) 연간 5십만톤급	(사) 연간 1백만톤급		
산업공정 연소 배출 CO ₂ 포집기술	<ul style="list-style-type: none"> 포집량 3천 t-CO₂/년, 포집비용 ≤ \$30/t-CO₂ (매일 연계시) 포집량 3천 t-CO₂/년, 포집비용 ≤ \$27/t-CO₂ (매일 연계시) CO₂ 포집효율 ≥ 90%, H₂S 배출농도 ≤ 0.1 ppm 포집량 280 tCO₂/년, 포집비용 \$40~50/t-CO₂ (PSA 후단 off gas) 	(사) 제철공정부생가스 CO ₂ 포집				(사) 30만톤급	(사) 상용급 실증	<ul style="list-style-type: none"> CO₂ 포집-자원화 연계 상용화 자원화량 ≥ 15만 t-CO₂/년 포집량 100만 t-CO₂/년, 포집비용 \$25/t-CO₂ 포집량 100만 t-CO₂/년, 포집비용 \$50/t-CO₂ 포집량 200만 t-CO₂/년, 포집비용 \$30/t-CO₂ 	
		(사) 시멘트킬른 배가스 CO ₂ 포집				(사) 5만톤급	(사) 1백만톤급		
		(사) 합성가스 생산공정 CO ₂ 포집				(사) 50만톤급	(사) 상용급 실증		
		(사) 수소 생산공정 CO ₂ 포집				(사) 80만톤급	(사) 2백만톤급		
연료 연소 중 CO ₂ 포집기술	<ul style="list-style-type: none"> 실증규모 0.1~10 MWth, CO₂ 원천분리 농도 ≥ 90~98% 실증규모 0.1~10 MWth O_x-CFBC/1 MWth O_x-PC, CO₂ 원천분리 농도 ≥ 80~90% 실증규모 3 MWth, 포집량 5천 t-CO₂/년, CO₂ 원천분리 농도 ≥ 95% 	(사) 기암순산소연소				(사) 규모격상 (5만톤급)	(사) 1천만톤급 실증	<ul style="list-style-type: none"> 포집량 1천만 t-CO₂/년, 포집비용 \$15/t-CO₂ 포집량 120만 t-CO₂/년, 200 MWe급 이상(CFB)/ 500MWe이상(PB) CO₂ 원천분리 농도 ≥ 93% 포집비용 \$30/t-CO₂ 포집량 50만 t-CO₂/년, 포집비용 \$15~25/t-CO₂ (100 MWe) 	
		(사) 바이오매스 순산소연소				(사) 12만톤급 실증	(사) 120만톤급 실증		
		(사) 천연가스 매체순환연소				(사) 규모격상 (15만톤급)	(사) 50만톤급 실증		

범례 (사): 소재, (부): 부품, (장): 장비, (시): 시스템 [진행중 기술] 기초/핵심 R&D 응용 R&D 실증/상용화 R&D [개발할 기술] 기초/핵심 R&D 응용 R&D 실증/상용화 R&D

CCUS		CO ₂ 대량 배출원에 적용 가능한 저비용 포집기술							목표
핵심기술	Baseline	단기				중기			
		2022	2023	2024	2025	~2030	~2040	~2050	
저농도 CO ₂ 포집기술	<ul style="list-style-type: none"> 포집비용 \$300/t-CO₂, 포집농도 CO₂ 4% 수준 포집비용 \$200-600/t-CO₂, 포집량 1,000-4,000 t-CO₂/년 	(사)저농도 CO ₂ 포집				(사)5천톤급	(사)10만톤급	<ul style="list-style-type: none"> 포집량 10만t-CO₂/년, 포집비용 \$60/t-CO₂ 	
		(사)직접공기포집(DAC)				(사)5만톤급	(사)50만톤급	<ul style="list-style-type: none"> 포집량 50만t-CO₂/년, 포집비용 \$100/t-CO₂ 	
기타 가스자원 CO ₂ 포집기술	<ul style="list-style-type: none"> 포집비용 ≥\$35/t-CO₂ 실증규모(NG) 1 MWe, 포집량 5천t-CO₂/년 	(사)메탄고질화				(사)10만톤급	(사)70만톤급	<ul style="list-style-type: none"> 포집량 70만t-CO₂/년, 포집비용 \$20/t-CO₂ 	
		(사)매체순환연소 및 순산소연소				(사)2만톤급		<ul style="list-style-type: none"> 포집량 25만t-CO₂/년, 포집비용 \$20-30/t-CO₂ 	
CO ₂ 포집비용 저감을 위한 차세대 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> CO₂ 포집비용 \$36-70/t-CO₂ 	(사)CO ₂ 포집비용 저감을 위한 차세대 기술 개발					(사)실증	<ul style="list-style-type: none"> 1MWe 급 이상 실증 포집비용 ≤\$20/t-CO₂ 	

범례 (소): 소재, (부): 부품, (장): 장비, (사): 시스템 [진행중 기술] 기초연구 R&D 응용 R&D 실증/상용화 R&D [개발할 기술] 기초연구 R&D 응용 R&D 실증/상용화 R&D

다 핵심기술 개요

핵심기술 1 • 발전 및 연소 배가스 중 CO₂ 포집기술

기술개요

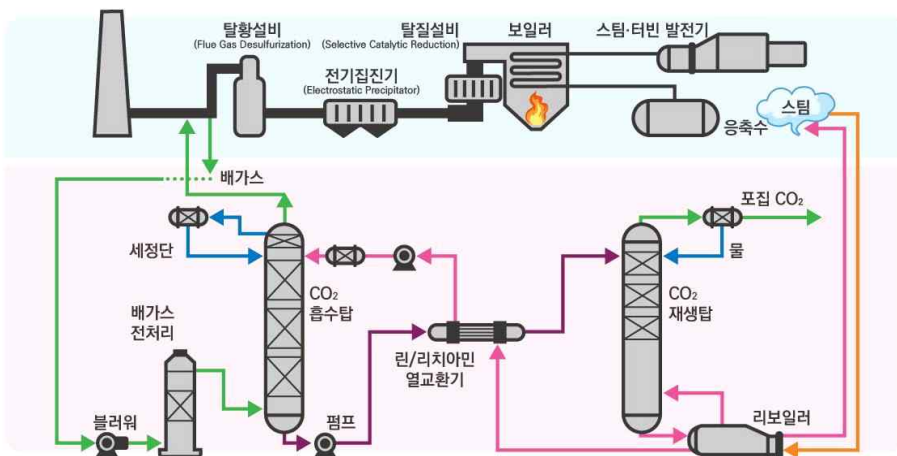
(개요)

- 연료가 연소하면서 배출되는 배기가스에 포함된 CO₂를 포집하는 기술(CO₂ 이외에는 N₂가 주성분임)

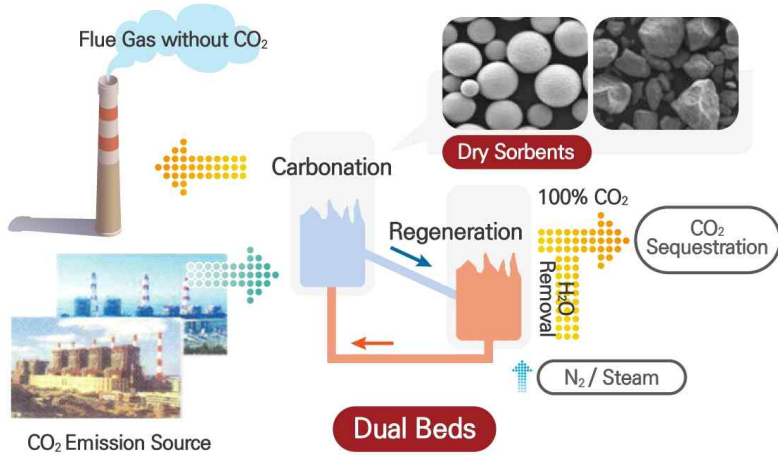
(필요성)

- 발전 및 연소공정은 CO₂ 배출량의 가장 많은 부분을 차지하는 대량 배출원이며 대규모 감축목표 달성을 위해 대규모 CO₂ 포집과 저장 또는 활용 연계 전략 필요
- 전력수급계획에 의해 LNG 발전이 확대됨에 따라 포집 대상 기술을 LNG 확대 적용 및 최적화 필요, 중규모 이상의 실증은 포집 대상 및 저장 연계 전략 필요
- 도심에 위치하고 있는 가스발전의 경우 컴팩트하고 친환경적이며 주민수용성 있는 기술개발이 필요
- 개별 산업체의 연소, 소각 과정에서 배출되는 CO₂를 포집할 수 있는 중소규모 포집기술의 개발 및 실증 필요
- 발전 및 연소 배가스에 적용할 수 있는 CO₂ 포집기술은 다른 산업분야의 CO₂ 포집에 적용할 수 있는 원천기술이 될 수 있음

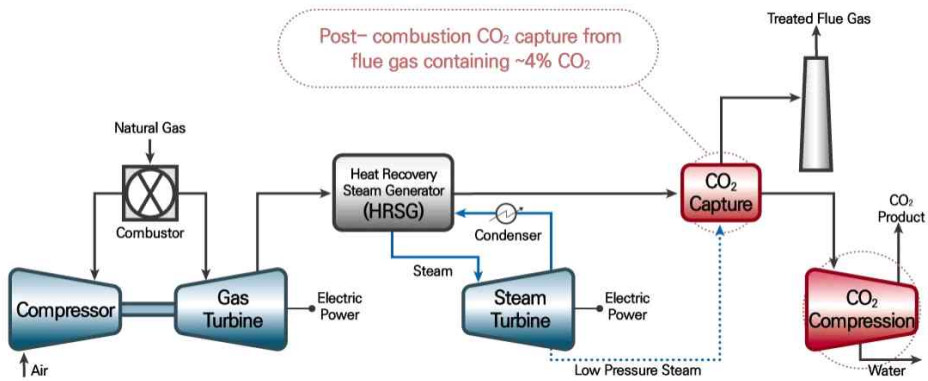
습식 포집기술의 개념도



건식 포집기술의 개념도

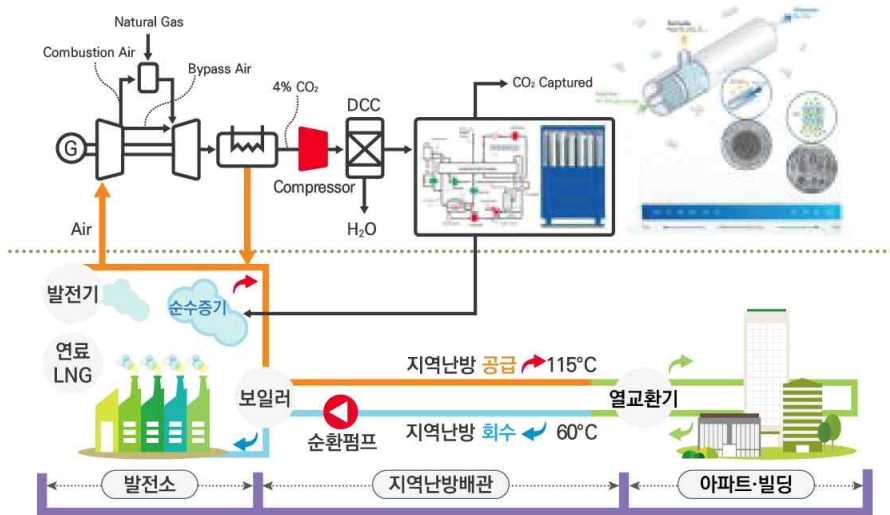


LNG 발전 포집기술의 개념도 (흡수기술)



출처 : NETL 홈페이지(<https://netl.doe.gov/coal/carbon-capture/post-combustion>)

LNG 발전 포집기술의 개념도 (막분리)



● 기술 동향

(해외)

- 전 세계적으로 대규모 CCS 설비는 65개로 21개는 초기 개발 설비, 26개는 운전 중, 3개는 건설 중, 13개는 FEED 진행 중
- 발전 및 연소 배가스용 CO₂ 포집 설비 적용 사례: 240MW급 Petra Nova 프로젝트(미국), 150MW급 Boundary Dam 프로젝트(캐나다), 12MW급 Mongstad 프로젝트(노르웨이)

240MW급 Petra Nova 설비



150MW급 Boundary Dam 설비



출처 : Global news homepage(<https://globalnews.ca/news/4077598/saskpower-two-million-tonnes-carbon-captured-storage-ccs-boundary-dam/>)

12MW급 Mongstad 설비



출처 : Energy Procedia, 37, pp6508-6519 (2013)

(국내)

- 보령화력 10MW급 습식(KoSol 흡수제) 중규모 실증프로젝트와 하동화력 10MW급 건식 중규모 실증프로젝트 진행 중임
- 태안화력 0.5MW(2,000N^m/h)급 습식(MAB 흡수제) 소규모 실증프로젝트를 통해 다양한 흡수제 성능평가 진행
- 한국지역난방공사 0.1MW (400N^m/hr)급 소규모 분리막 실증프로젝트를 통해 공정 현장운전 평가 완료 및 1MW급 프로젝트 추진 중임
- 150MW급 대규모 CCS 통합 실증을 위한 기반구축 사업 추진 중임(다부처, '21~'23)

보령화력 10MW 실증 설비



하동화력 10MW 실증 설비



태안화력 0.5MW 테스트베드

지역난방공사 0.1MW 분리막 실증설비



● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
핵심 발전 및 연소 배가스 중 CO ₂ 포집기술	단위 포집설비 기준 - 포집량 7만t-CO ₂ /년 - 포집비용 \$45/t-CO ₂	단위 포집설비 기준 ('30) 포집량 100만t-CO ₂ /년 ('35) 포집량 300만t-CO ₂ /년 ('50) 포집량 400만t-CO ₂ /년 포집비용 \$20/t-CO ₂
세부 석탄 발전 및 연소 배가스 고농도 CO ₂ 포집	- 포집량 7만t-CO ₂ /년 - 포집비용 \$45/t-CO ₂	('30) 포집량 100만t-CO ₂ /년 ('35) 포집량 300만t-CO ₂ /년 ('50) 포집량 400만t-CO ₂ /년 포집비용 \$20/t-CO ₂
세부 LNG 발전 및 연소 배가스 저농도 CO ₂ 포집	- 포집량 5.6만t-CO ₂ /년 - 포집비용 \$70/t-CO ₂	('30) 포집량 30만t-CO ₂ /년 ('40) 포집량 50만t-CO ₂ /년 ('50) 포집량 100만t-CO ₂ /년 포집비용 \$40/t-CO ₂

세부기술 : 석탄 발전 및 연소 배가스 고농도 CO₂ 포집

- (기술정의) 화석연료의 연소 배가스 중에 포함된 CO₂를 흡수, 흡착 또는 분리 공정을 적용하여 선택적으로 CO₂를 포집하여 고농도 CO₂로 회수하는 기술
- (필요성) 석탄화력발전은 국내 CO₂ 배출량의 가장 많은 부분을 차지하는 대량 배출원으로 대규모 CCS 통합 실증을 위한 대용량(연간 100만톤 이상) CO₂ 포집기술 개발 필요

세부기술 : LNG 발전 및 연소 배가스 저농도 CO₂ 포집

- (기술정의) LNG 가스를 사용하여 전기 또는 전기와 열을 생산하는 발전 또는 열병합 에너지 생산과정에서 발생하는 CO₂를 흡수, 흡착, 분리막 등의 기술을 적용하여 선택적으로 CO₂를 포집하는 기술로, 산업 목적에 따라 발전용과 도심/산업단지 열병합으로 구분할 수 있음
- (필요성) 국가 그린뉴딜 및 탄소중립 에너지 전환 정책에 따른 저탄소 에너지원인 LNG 발전 및 열병합 수요 증가가 예상되므로 LNG를 활용한 발전 또는 도심/산업단지 열병합 수요에 맞는 CO₂ 포집 조기 실증을 통한 상용화 필요

핵심기술 2 • 산업공정 배출 CO₂ 포집기술

● 기술개요

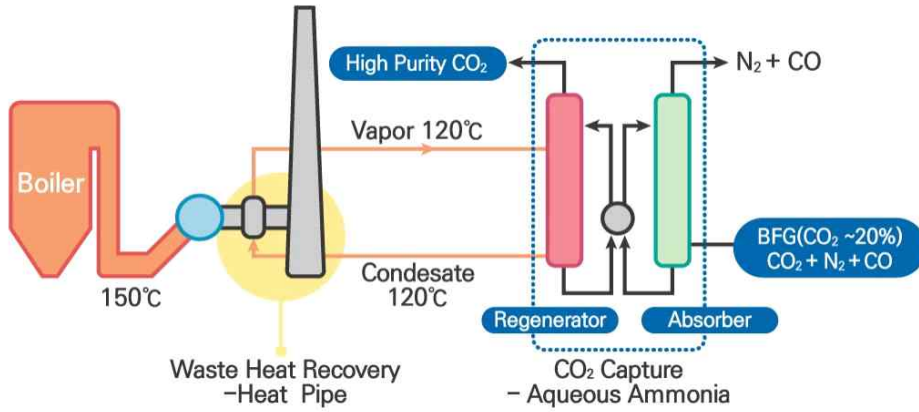
(개요)

- 각 산업별로 운영 중인 공정에서 배출되는 기체 중에서 CO₂를 포집하는 기술
 - 배출되는 CO₂ 농도가 서로 다르며, CO₂ 이외에 포함된 CO, H₂, N₂, O₂ 등의 기체 농도와 불순물(H₂S 등)의 조성이 서로 다르므로 공정별로 최적화된 포집기술 적용 필요

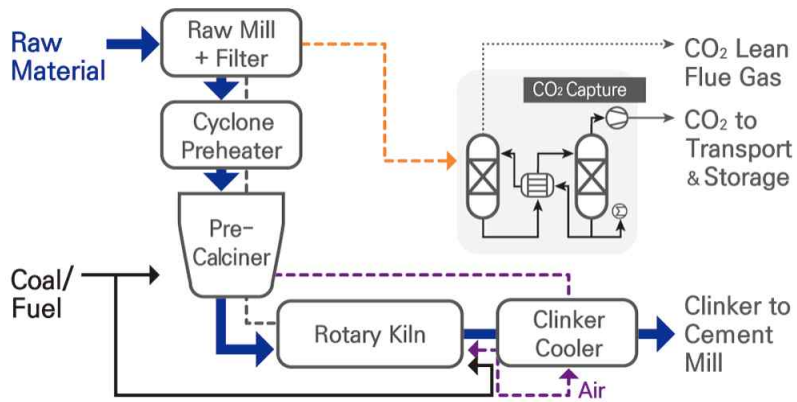
(필요성)

- 산업공정에서 배출되는 CO₂는 발전 및 연소 다음으로 많이 배출되고 있으나, 처리 대상 기체의 조성이 상이하여 공정별로 적합한 기술 선정이 필요함. 탄소중립을 위해서는 각 산업공정의 조건에 최적화된 CO₂ 포집기술의 개발, 적용, 실증 필요
- 수소생산공정 가스, 제철 부생가스, 합성가스 등은 CO₂ 포집으로 수소, 일산화탄소와 같은 고부가가치 가스를 생산할 수 있어 CO₂ 포집에 의한 경제성 저하를 최소화할 수 있을 것으로 예상되며 민간의 참여가 용이한 분야임
- 시멘트, 정유, 석유화학 산업에서 배출되는 기체의 경우 CO₂의 농도가 상이하므로 발전 및 연소 배가스에 적용하기 위해 개발한 기존 기술의 변경, 개선 및 최적화를 통해 단기간에 상용화 가능한 분야임
- 석유화학산업에서는 합성가스를 만들거나 C_xH_y를 합성하는 과정에서 고압의 CO₂를 공정 중에서 제거하고 있으며, 해당 기술을 모두 수입에 의존하고 있으므로 대체 기술 개발이 필요한 상황임

제철공정 CO₂ 포집공정의 예

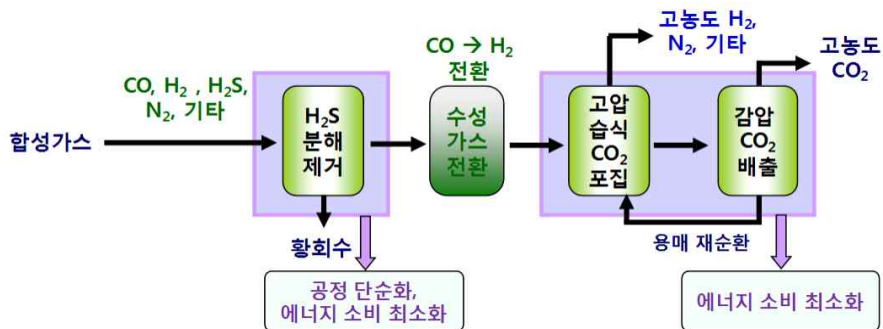


시멘트 생산 공정 CO₂ 포집기술의 예



출처 : Research gate (https://www.researchgate.net/figure/Process-overview-of-the-Norcem-cement-plant-including-the-integration-of-a-CO2-capture_fig5_336718190)

합성가스 중 CO₂ 포집기술의 예



- Shell社は 캐나다 앨버타 지역에서 MDEA 기반의 흡수공정을 이용하여 CO₂를 포집하여 지중 저장하는 연구를 수행하였음
- Air liquide社は 프랑스 노르망디의 수소 플랜트에서 심냉분리막 분리의 혼성공정을 이용하여 CO₂를 포집하는 기술을 실증하였음

(국내)

- (제철산업) 국내에서는 제철산업 부생가스를 대상으로 진행된 CO₂ 포집 연구는 RIST와 POSCO에서 개발한 고로가스 대상 암모니아수 이용 CO₂ 포집 기술(10 tCO₂/일)이 유일하며, 미활용 중저온 폐열 (~150℃)을 회수하여 CO₂ 포집 에너지로 공급하는 폐열 연계 CO₂ 포집 기술의 실증을 국내 최초로 성공하여 CO₂ 포집 기술의 경제성을 향상함
- (시멘트산업) 성신양회에서 KIERSOL 기술 이용 10tCO₂/일 규모 액상 포집, 한라 시멘트에서 에어레인 분리막을 이용한 파일럿 규모 CO₂ 포집을 개발하였으며, CCUS 기술 도입 시 시멘트 산업 특성(20% 이상 CO₂, 공정열 등)으로 인해 경제성이 있음을 확인함
- (합성가스) 합성가스에 함유된 H₂S를 제거하기 위한 파일럿 규모 기술개발을 진행하였으며, 합성가스에서 CO₂를 포집하기 위해 파일럿 규모 건식 CO₂ 포집 기술개발과 랩 규모 습식 CO₂ 포집 공정 및 용매 개발을 진행
- (수소생산) 국내 다수의 탄산가스 제조업체(선도화학, 동광화학 등)는 국내 수소생산 플랜트의 tail gas에서 CO₂를 포집 생산하는 공정을 해외에서 도입하여 설치 운영하고 있음. 국내기술로는 40~80℃, 10기압 이하 조건에서 합성가스(H₂+CO)/CO₂ 분리를 위한 습식 KIERSOL-P 흡수제를 개발한 바 있음

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
핵심 산업공정 배출 CO ₂ 포집기술	- 포집량 3,000t-CO ₂ /년 - 포집비용 \$27~50/t-CO ₂	(’30) 포집량 40만t-CO ₂ /년 (’40) 포집량 80만t-CO ₂ /년 (’50) 포집량 200만t-CO ₂ /년 포집비용 \$25~30/t-CO ₂
세부 제철공정 부생가스 CO ₂ 포집	- 포집량 3,000t-CO ₂ /년 - 포집비용 \$30/t-CO ₂ 이하 (폐열연계 시)	(’30) 포집량 3만t-CO ₂ /년 (’40) 포집량 30만t-CO ₂ /년 포집비용 \$27/t-CO ₂ (폐열연계) (’50) CO ₂ 포집-자원화 연계 상용화 CO ₂ 자원화량 15만t-CO ₂ /년 이상

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
세부 시멘트킬른 배가스 CO ₂ 포집	- 포집량 3,000t-CO ₂ /년 - 포집비용 \$27/t-CO ₂ (폐열연계 시)	(‘30) 포집량 1.8만t-CO ₂ /년 (‘40) 포집량 5만t-CO ₂ /년 (‘50) 포집량 100만t-CO ₂ /년 포집비용 \$25/t-CO ₂
세부 합성가스 생산공정 CO ₂ 포집	- CO ₂ 포집효율 90% 이상 - H ₂ S 배출농도 0.1ppm 이하	(‘30) 포집량 2만t-CO ₂ /년 (‘40) 포집량 50만t-CO ₂ /년 (‘50) 포집량 100만t-CO ₂ /년 포집비용 \$50/t-CO ₂
세부 수소생산 공정 CO ₂ 포집	- 포집량 280t-CO ₂ /년 - 포집비용 : \$40~50/t-CO ₂ (PSA 후단 off gas)	(‘30) 포집량 40만t-CO ₂ /년 (‘40) 포집량 80만t-CO ₂ /년 (‘50) 포집량 200만t-CO ₂ /년 포집비용 \$30/t-CO ₂

세부기술 : 제철공정 부생가스 CO₂ 포집

- (기술정의) 제철 공정에서 발생하는 부생가스(고로가스 등)로부터 CO₂를 대량으로 포집하는 기술
- (필요성) 제철산업은 산업공정 중 가장 많은 CO₂를 배출하는 산업으로 국가 CO₂ 배출량의 약 13%를 차지(2018년 기준)하며, 제철공정에서 발생하는 부생가스의 특성에 적합한 CO₂ 포집기술 및 이와 연계한 자원화 기술의 대규모 실증이 필요함, 제철소 내 다양한 폐열원과 연계한 CO₂ 포집기술 적용으로 경제성 있는 CO₂ 포집이 가능하며, 제철공정에서 발생하는 환원제인 C(carbon)/H₂/CO와 연계하여 제철산업에 적합한 CCU 기술 실증에 유리

세부기술 : 시멘트킬른 배가스 CO₂ 포집

- (기술정의) 포틀랜드 시멘트 생산과정에서 발생하는 석회석 탈탄소 가스와 연소 배연가스가 혼합된 20~25%의 고농도 CO₂를 선택적으로 포집하는 기술
- (필요성) 에너지 패러다임이 바뀌어 석회석 소성에 필요한 2,000℃의 열을 신재생에너지로 모두 교체한다고 가정해도, 시멘트 생산시설의 탈탄소 과정에서 CO₂가 대량 발생하므로 net-zero 달성을 위해 반드시 감축이 필요

세부기술 : 합성가스 생산공정 CO₂ 포집

- (기술정의) 합성가스 중의 CO₂와 H₂S를 제거하는 과정에서, 에너지소비 최소화 및 공정설비 콤팩트화를 통해 효율을 향상하고 건설비를 줄이는 저비용 고효율 CO₂ 포집 기술
- (필요성) 국내 고유기술 기반의 콤팩트한 공정 개발을 통해 상용화 진입단계인 선진 기술과 경쟁 가능한 저비용 고효율 공정시스템 개발 및 CO₂ 포집 시장 진입

세부기술 : 수소생산 공정 CO₂ 포집

- (기술정의) 메탄 수증기 촉매 개질방법을 활용한 수소 대량 생산과정에서 수소 1톤당 9.3톤의 CO₂가 발생하여 CO₂ 발생 위치별 특성에 맞게 포집하는 기술
- (필요성) 현재 현실적으로 수소를 대량 생산하기 위해서는 메탄 수증기 개질 방법을 필연적으로 활용해야 하며, 촉매 개질 과정에서 배출되는 CO₂를 포집하여 블루수소를 생산하는 기술을 확보해야 진정한 수소 사회로 진입 가능함

핵심기술 3 연료 연소 중 CO₂ 포집기술

기술개요

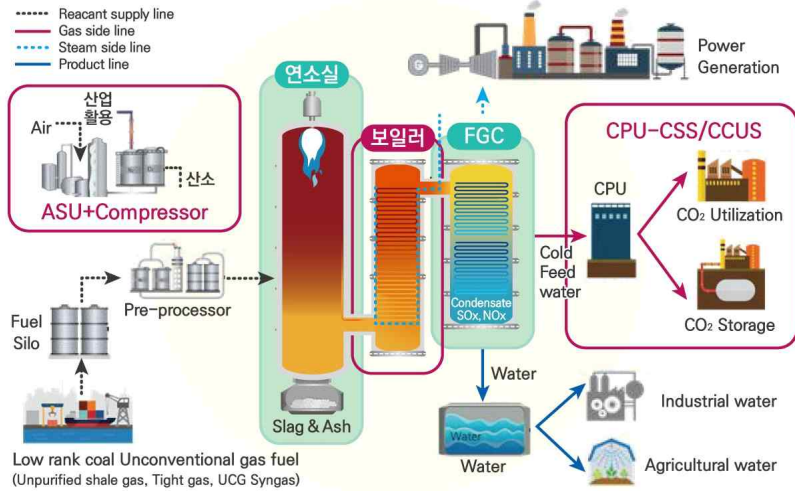
(개요)

- 연료를 연소하는 과정에서 질소가 포함된 공기 대신 순수한 산소를 사용하여 별도의 분리 설비 없이도 고농도의 CO₂가 원천적으로 분리되어 배출되도록 하는 기술

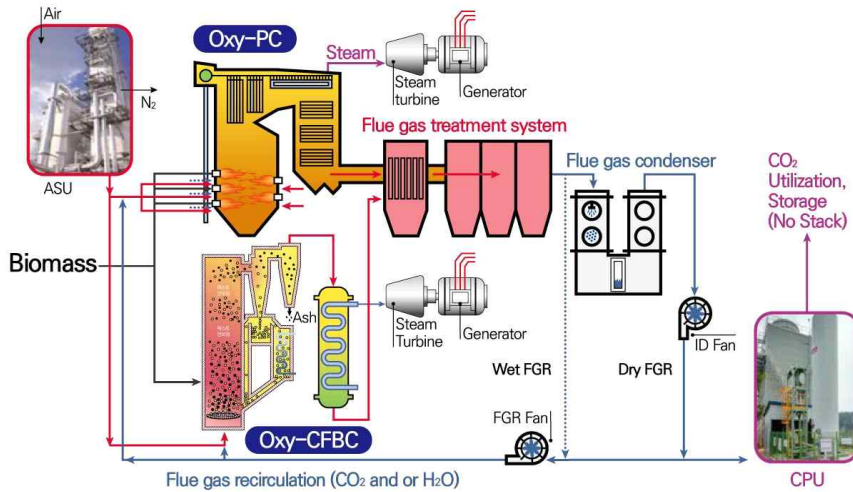
(필요성)

- LNG 발전 확대에 대응할 수 있으면서 CO₂ 포집비용의 획기적인 저감이 가능한 기술의 실증 및 상용화 필요
- 석탄, 바이오매스, 폐기물 등 기존 석탄화력 발전플랜트 및 소형 비 발전분야(스팀생산, 열공급 등) CO₂ 포집을 위한 차세대기술 확보 필요
- 기존 발전, 연소설비의 경우 CO₂ 포집설비가 추가로 설치되어야 하지만, 신규설비의 경우 CO₂ 원천분리가 가능한 연소 중 CO₂ 포집기술 적용 가능
- 기존 석탄 화력발전소에서 고농도 CO₂ 포집을 위한 순산소연소 기술은 기존 설비 변경 및 부지면적 소요가 적은 기술로 실증 및 상용화 필요
- 그린수소 생산 시 부산물로 발생하는 산소를 활용, 향후 CO₂ 포집 비용의 획기적인 감소가 가능하다는 점에서 기술 확보 필요성이 높음

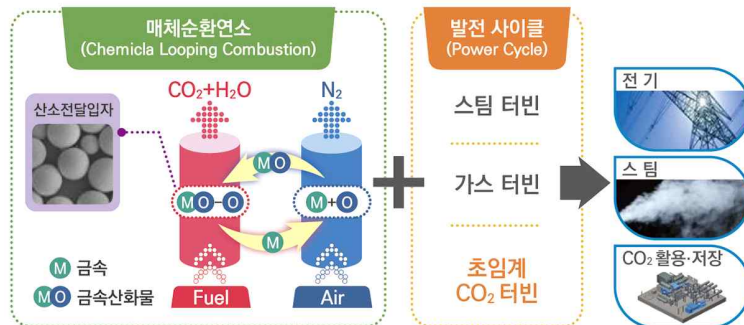
가압 순산소연소 기술 개념도



바이오매스 순산소연소 기술 개념도



매체순환연소 기술 개념도



● 기술 동향

(해외)

- (가압 순산소연소) 미국과 유럽은 2세대 순산소연소 기술로 가압 순산소연소 시스템에 주목하고 있음
 - 특히 미국은 이를 Transformative technology로 규정하여 장기 기술개발 로드맵에 포함하였음. 미 DOE는 2012년부터 총 8개의 관련 과제를 한꺼번에 지원, 현재는 EPRI/Washington 대학 및 GTI 등을 중심으로 과제가 진행되고 있음. 최근 들어서는 소형 모듈형 석탄화력 발전 시스템 개발이 DOE에서 추진됨에 따라, 여기에 가압 순산소연소 기술을 적용하고자 연구개발 진행 중임
 - 유럽의 경우 이탈리아 전력회사인 ENEL 주축으로 5MWth급 연구개발을 수행한 바 있음
- (바이오매스 순산소연소)
 - 바이오매스 순산소연소와 원천 분리되는 CO₂의 활용 및 저장이 연계된 기술은 개발된 바 없음. 또한, 화력발전에서의 BECCU 관련 프로젝트는 진행된 바 없으며, BECCS 관련 프로젝트는 진행 혹은 계획 중임(Global CCS Institute, '19년)
 - 일본은 49MWe Mikawa power plant에서 바이오매스 전소 후 CO₂ 포집공정과 연계하여 0.18Mt/연 offshore storage 예정임
 - 영국 Drax power는 '30년까지 BECCS 2기를 개발하여 연간 4Mt의 CO₂를 흡수하여 offshore storage 예정임
- (천연가스 매체순환연소) 외국에서는 주로 석탄을 연료로 사용하는 매체순환연소기술 개발 중임
 - EU에서는 9개국 16개 기관 협력 연구로 상압 1MWth 시험 운전(Mn계 페롭스카이트계 산소전달입자), 산소전달입자 내구성 향상과 공정 개선 기술개발 진행 중임
 - 캐나다의 고점성 원유 생산용 스팀공급을 위한 친환경 보일러로 사용하기 위해 가압 0.6MWth 개발 중임('19 건설 중, 운전실적 無, Fe계 천연광물 산소전달입자)
 - 미국은 상압 50kWth 설비를 운영하면서 공정 및 산소전달입자(Cu-Fe, Cu-Fe-Mn) 기술개발 중임
 - 전 세계적으로 1MWth 규모로 매체순환연소 개념을 입증하는 단계의 기술개발이 진행되고 있으며 에너지 생산 및 공급을 위한 스팀생산 보일러 기술 단계까지는 도달하지 못함

(국내)

- (가압 순산소연소) 한국생산기술연구원에서 가압순산소연소 기반 초고효율 화력발전 보일러 및 CO₂ 포집/정제 기술 개발을 수행함, 기존 발전소에 CO₂ 포집 장치를 add-on 또는 retrofit 하는 방식이 아닌, CO₂ negative 화력발전소를 새로 개발하는 방식임, 100 kWth 규모에서 가압 순산소연소-FGC (Flue gas condenser) 연계 시스템 개발을 통해 1세대 순산소연소 기술 대비 4pt% 효율 증대가 가능한 기반 기술을 확보함
- (바이오매스 순산소연소) 한국에너지기술연구원에서 10MWth급 석탄 순산소 순환유동층 연소기술을 개발 중이며, 90% 이상 CO₂ 포집을 목표로 연구 수행 중임('21년 종료), 0.1MWth급 순산소 순환유동층 연소시스템에서 바이오매스 전소 및 90% 이상 CO₂ 포집 경험을 보유함

- (천연가스 매체순환연소) 상압 200kWth 건설 및 운전을 통한 매체순환연소 기반기술을 확보('11), 0.5MWth 매체순환연소 건설 운전, 상용급 Ni계 산소전달입자 개발 완료, 산소전달입자 및 공정 세계 최고 성능 입증(~'19), 현재 3MWth 규모 세계최초 스팀생산 기술개발 진행 중임('21~'25)

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
핵심 연료 연소 중 CO ₂ 포집기술	- 실증규모 0.1~10 MWth - CO ₂ 원천분리농도 90~98%	('30) 포집량 6만t-CO ₂ /년 (40) 포집량 500만t-CO ₂ /년 (50) 포집량 1,000만t-CO ₂ /년 포집비용 \$15~25/t-CO ₂
세부 가압 순산소연소	- 규모: 0.1MWth급(가스) - CO ₂ 원천분리농도: 90% 이상 - NO _x , SO _x 원천 제거율: 90% 이상	('30) 포집량 6만t-CO ₂ /년 (40) 포집량 500만t-CO ₂ /년 (50) 포집량 1,000만t-CO ₂ /년 포집비용 \$15/t-CO ₂
세부 바이오매스 순산소연소	- 실증규모: 0.1~10MWth Oxy-CFBC/ 1MWth Oxy-PC - CO ₂ 원천분리농도: 80~90% 이상	('25) 포집량 2천t-CO ₂ /년 Oxy-CFBC / Oxy-PB 규모 1MWth 이상 (35) 포집량 12천t-CO ₂ /년 규모 : 2MWe 이상(CFB) 100MWe(PB) CO ₂ 원천분리농도 : 93% 이상 (50) 포집량 120만t-CO ₂ /년 규모 200MWe급 이상(CFB) 500MWe 이상(PB) CO ₂ 원천분리농도: 93% 이상 포집비용 \$30/t-CO ₂
세부 천연가스 매체순환연소	- 실증규모 3MWth - 포집량 5,000t-CO ₂ /년 - CO ₂ 원천분리농도: 95% 이상	('30) 포집량 15만t-CO ₂ /년 (40) 포집량 50만t-CO ₂ /년 포집비용 \$15~25/t-CO ₂ (100MWe)

세부기술 : 가압 순산소연소

- (기술정의) 연소-보일러-배가스 처리부를 10bar 이상으로 가압, 시스템을 컴팩트화하고 발전 효율을 높여 연소 중 CO₂ 포집 비용을 획기적으로 절감하는 기술, 순산소연소와 함께 배가스 내 잠열을 효과적으로 회수하면서 불순물 저감을 동시에 달성할 수 있어, 석탄, 유류연료 및 (저급) 가스 연료 모두에 적용 가능
- (필요성) CO₂ 포집 전용 시스템으로서 효율 및 경제성을 극대화할 수 있는 혁신 기술로, 여러 형태의 (저급) 연료 활용이 가능하여 적용 분야를 다양화(발전 및 산업 전반)할 수 있어 개발 필요성 높음

세부기술 : 바이오매스 순산소연소

- (기술정의) 기존 발전, 열병합 플랜트에서 공기 대신 산소와 재순환되는 배기가스가 혼합된 산화제로 바이오매스 순산소연소하여 90% 이상 CO₂를 원천 분리하는 기술
- (필요성) 기존 발전, 열병합 플랜트 내 CO₂ 포집을 위해 추가 설비 및 부지면적 소요가 적은 기술이 필요하며 바이오매스 순산소연소와 CO₂ 활용, 저장 연계 기술이 적용될 때 negative CO₂ emission 기술인 BECCUS(Bio-Energy CO₂ capture, Utilization, Storage) 구현이 가능

세부기술 : 천연가스 매체순환연소

- (기술정의) 산소전달입자(금속산화물)에서 제공되는 순산소로 천연가스를 연소하고 발생하는 열을 이용하여 스팀 및 전기를 생산하는 차세대 친환경 에너지기술
- (필요성) 천연가스 사용 및 분산전원 확대, CO₂ 및 미세먼지(NO_x) 감축에 모두 대응 가능하며, 다양한 규모로 산업 및 발전에 활용할 수 있으므로, 세계 선도 기술을 확보하여 시장 선점 필요

핵심기술 4 ● 저농도 CO₂ 포집기술

● 기술개요

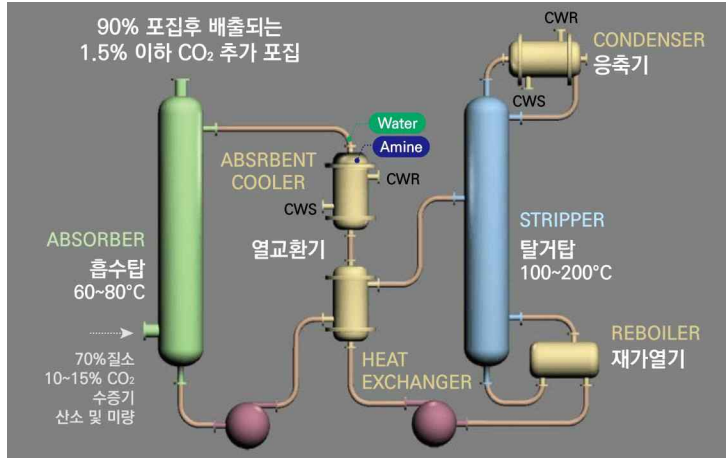
(개요)

- CO₂ 포집 후에 배출되는 저농도 CO₂를 포함하는 기체에서 CO₂를 추가로 포집하거나 공기 중에 포함된 CO₂를 직접 포집하는 기술

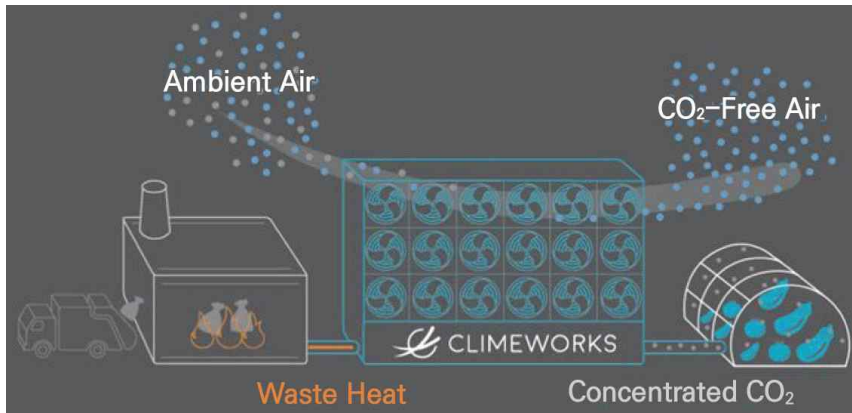
(필요성)

- CO₂ 포집설비의 경제적인 포집효율 한계(80~90% 포집)로 인해 CO₂ 포집설비를 거친 후에도 남아 있는 저농도의 CO₂를 추가로 포집하거나 공기 중에 존재하는 CO₂를 포집해야 실질적인 탄소중립이 가능함
- 컴팩트한 신개념 저농도 CO₂ 포집기술 개발을 통해 대형 포집설비 후단의 배가스에 포함된 저농도의 CO₂(<3%) 포집 및 net-zero 기술로 활용 필요
- 대형 CO₂ 고정배출원에 적용 가능한 기존 기술과 이동 배출원(차량 등)에서 배출되는 CO₂를 포집할 수 있는 기술개발 필요

저농도 CO₂ 포집기술의 개념도



공기 중 직접 CO₂ 포집기술의 개념도



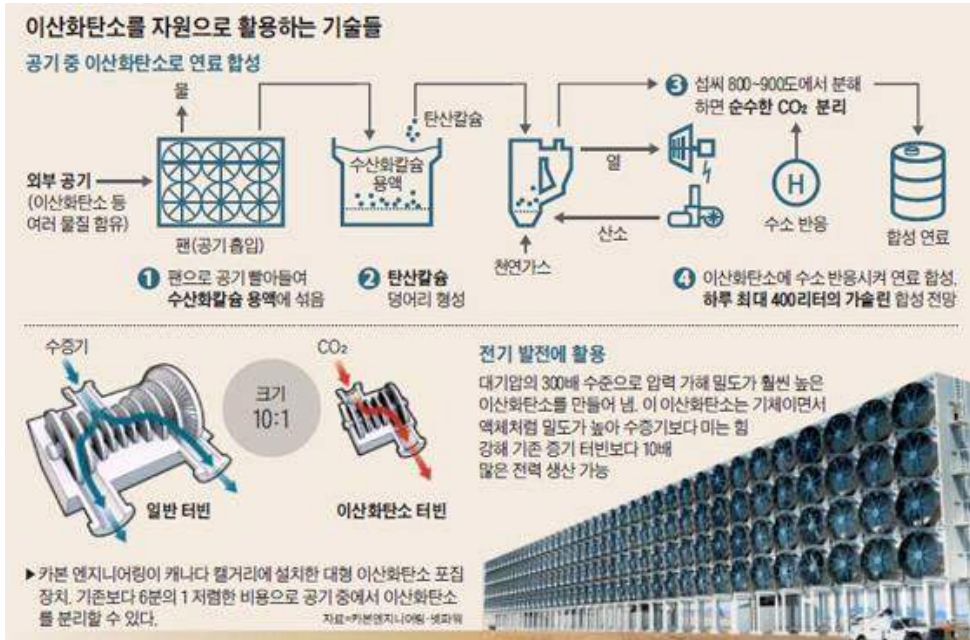
출처 : Climeworks, www.climeworks.com and Pinterest, <https://id.pinterest.com/pin/863283822294742257/>

● 기술 동향

(해외)

- 캐나다 Carbon Engineering and Occidental Petroleum Partnership에서는 매년 CO₂ 1백만 톤을 EOR로 저장하는 것을 목표로 대용량 직접 공기 포집기술을 개발하고 있음

CE's Direct Air Capture process



출처 : 조선비즈(https://biz.chosun.com/site/data/html_dir/2018/06/14/2018061400069.html)

- Climeworks는 공기로부터 이산화탄소를 제거하기 위한 대용량 공정을 아이슬란드에 구축하였고 전 세계적으로 14개의 시설을 운영 중임
- DAC 기술은 ppm 수준의 농도를 포집하기 위해 높은 비표면적 혹은 넓은 footprint를 가지는 공정이 요구되나, 저농도 CO₂ 포집은 기존 기술을 적용하여 더 많은 CO₂를 포집(99%)하거나 기존 90% 포집 후 추가로 CO₂를 포집하는 연구를 수행할 수 있음

(국내)

- 국내에서는 아주대학교에서 2016년 이산화탄소를 흡수하기 위한 도로 CO₂ 흡수 시설물 개발을 국토부 과제로 진행하여 탄소 중립형 도로에 관한 연구가 일부 진행된 바 있으나, 대기로부터 포집하는 연구는 거의 진행된 바 없음
- 국내에서는 저농도 CO₂ 포집에 관한 기술개발 연구나 상업화가 많지 않은 상황임

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
핵심 저농도 CO ₂ 포집기술	- 포집비용 \$200~600/t-CO ₂ - 포집량 1천~4천t-CO ₂ /년	('30) 포집량 1천~4천t-CO ₂ /년 ('40) 포집량 5만t-CO ₂ /년 ('50) 포집량 50만t-CO ₂ /년 포집비용 \$60~100/t-CO ₂
세부 저농도 CO ₂ 포집	- 포집비용 \$300/t-CO ₂ - 포집농도 : CO ₂ 4% 수준	('30) 포집량 350t-CO ₂ /년 ('40) 포집량 5천t-CO ₂ /년 ('50) 포집량 10만t-CO ₂ /년 포집비용 \$60/t-CO ₂
세부 직접공기포집(DAC)	- 포집비용 \$200~600/t-CO ₂ - 포집량 1천~4천t-CO ₂ /년	('30) 포집량 1천~4천t-CO ₂ /년 ('40) 포집량 5만t-CO ₂ /년 ('50) 포집량 50만t-CO ₂ /년 포집비용 \$100/t-CO ₂

세부기술 : 저농도 CO₂ 포집

- (기술정의) 포집공정의 경제성 확보를 위한 최적의 포집효율 조건에서 포집한 후 배출되는 가스로부터 CO₂를 추가로 포집하는 기술
- (필요성) 본 기술을 적용하면 기존 CCS 기술의 90% 포집 후 배출되는 10%의 이산화탄소를 추가로 포집하여 실질적인 Net zero 달성 가능

세부기술 : 직접공기포집(DAC)

- (기술정의) 배출지점이 불명확한 오염원에서 배출되는 CO₂를 포함하여 장소에 구애받지 않고, 공기 중의 CO₂를 직접 포집하는 기술
- (필요성) IEA의 Net Zero by 2050에 의하면, 네거티브포집기술인 직접공기포집 기술의 2050년 전세계 CO₂ 포집량은 거의 1 GtCO₂/년으로 예측됨 (IEA, Net Zero by 2050, 2021). 또한, 다양한 탄소전환 제품 생산 및 공급을 위해 배출원에 제약이 없는 분산형 탄소포집 기술인 직접공기포집기술개발이 필요함

핵심기술 5 • 기타 가스자원 CO₂ 포집기술

● 기술개요

(개요)

- 바이오가스, 매립지가스 등 자원으로 활용할 수 있는 기체로부터 CO₂를 포집하여 upgrade 하거나 CO₂를 고농도로 원천분리하는 기술

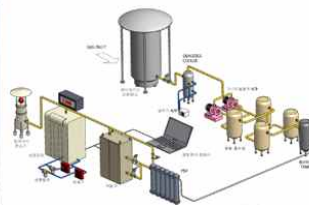
(필요성)

- 바이오가스과 매립지 가스의 경우 탄소중립(carbon neutral) 연료이므로 이를 upgrade 하여 연료 또는 원료로 사용하는 경우 CO₂ 배출을 원천적으로 줄일 수 있음
- 바이오가스, 매립지 가스의 경우 소형설비가 산재해 있어 가스 생산량이 많지 않아 개별적으로 CO₂ 포집설비를 설치하기에는 투자비가 많이 듦. 단위 설비별로 메탄고질화에 의해 고품질 가스를 생산하거나 매체순환연소 또는 순산소연소를 통해 CO₂가 원천분리 되도록 연소하고, 발생된 열은 현장에서 사용하는 기술 적용이 필요

바이오가스 upgrading에 의한 활용 예



바이오 가스 생산 설비



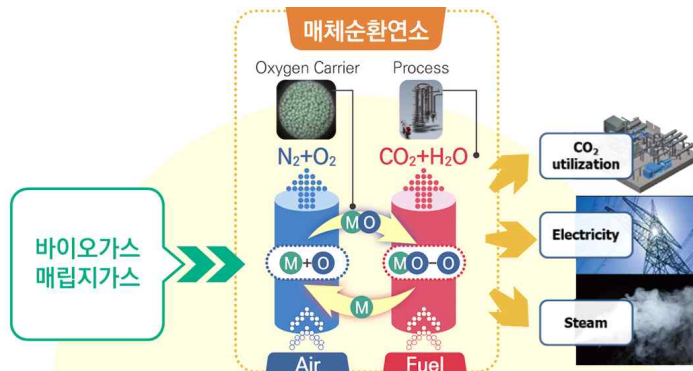
수소 추출 설비



바이오시설 충전소 실증

출처 : 월간수소경제, (왼쪽) <https://www.h2news.kr/mobile/article.html?no=7488> (가운데) <https://www.h2news.kr/news/article.html?no=8252> (오른쪽) <https://www.h2news.kr/mobile/article.html?no=7393>

바이오가스 및 매립지 가스의 CO₂ 원천분리 연소 개념도



● 기술 동향

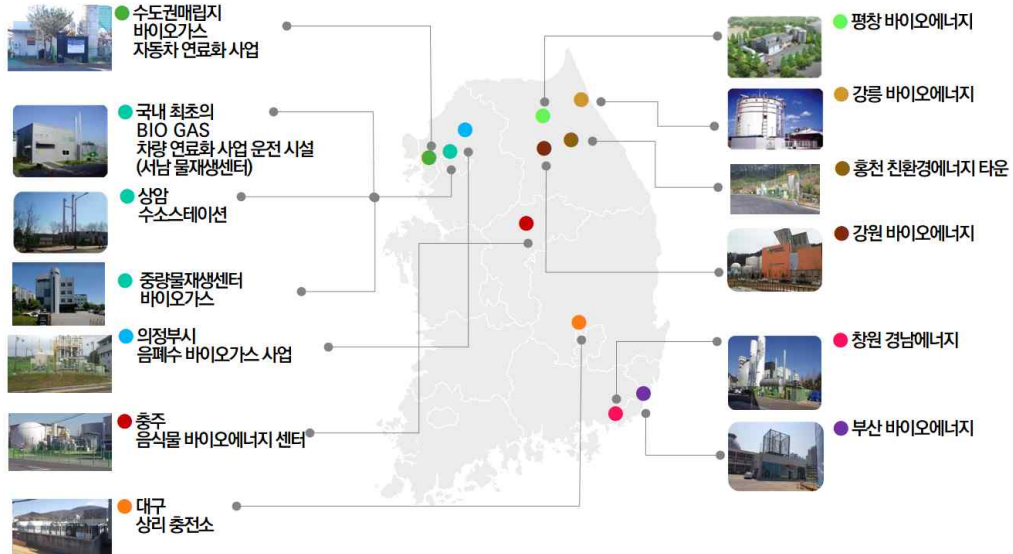
(해외)

- 2017년 기준 EU에 17,783개의 바이오가스 플랜트가 설치, 65,179 GWh의 전력을 생산하고 있으며, 2015년 기준 340개 정제시설에서 가스배관망에 15억 Nm³의 바이오메탄을 공급하였고, 약 697개 CNG(Compressed Natural Gas) 충전소에서 1억 6천 Nm³ 바이오메탄을 수송용 연료로 공급하였음
- EU의 바이오가스 정제시설은 2018년 483개소에서 2020년 729개소로 증가하였으며, EU 내 18개국에서 바이오메탄을 생산하고 있고, 이중 독일이 232개소, 프랑스 131개소, 영국이 80개소를 운영하고 있으며, 적용된 공법 중 Water Scrubbing 공법이 약 50% 정도 설치 비율을 차지함
- BECCS(Bioenergy Carbon Capture and Storage)는 대기 중 CO₂를 대량으로 줄일 수 있는 유일한 기술로 인식되고 있음
- IEA는 2050년 기준 BECCS가 연간 100억 톤의 CO₂ 감축 저감 잠재력이 있음을 보고함. 또한 산업계에서 탄소중립 달성이 불가능한 분야의 배출량을 BECCS로 상쇄하는 전략을 발표함
- 바이오가스, 매립지 가스의 순산소연소 및 매체순환연소의 경우 해당 기술이 연구개발 및 파일럿 실증 단계로 직접적으로 해당 가스를 적용한 사례는 제한적임

(국내)

- 국내에서 적용 중인 바이오가스 고질화 시설 공법은 Water Scrubbing, PSA(Pressure Swing Adsorption) 및 Membrane과 같이 3가지 공법이 주로 적용되어 운영하고 있으며, 국내 운영 현황은 아래에 지역별로 제시하였음
- 국내에서 적용 중인 바이오가스 고질화 공법 중에 온실가스를 포집하면서 메탄 혹은 수소를 생산하는 공정에 관한 연구는 환경부, 산업부, 과학기술정보통신부 등 다양한 부처에서 과제가 진행되고 있음
- 환경부는 수소 분리막을 적용하여 이산화탄소를 포집하면서 수소를 생산하는 블루수소 정제 기술을 개발 중이며, 산업부에서는 바이오 사이트에서 정제, 개질 및 수소 분리/이산화탄소 포집 통합 기술개발을 추진 중임. 또한 과학기술정보통신부에서는 CO₂ free 수소 생산기술을 개발하고 있음
- 향후 바이오가스로부터 재생에너지를 활용하여 CO₂를 포집하면서 수소를 생산하는 green 수소생산, 온실가스 감축 기술이 개발된다면 negative CO₂ 포집 기술로 net zero 기술을 실현할 수 있을 것으로 기대됨

국내 바이오가스 플랜트 현황



- 바이오가스 및 매립지가스에 대한 순산소연소와 매체순환연소 기술의 적용 가능성은 실험실 규모에서 확인함. 천연가스 매체순환연소의 경우 상압 200 kWth, 가압 0.5 MWth 연속운전 및 세계 최고 수준 성능 실증을 완료하였으며 현재 3 MWth 규모 세계 최초 스팀생산 기술개발 진행 중임('21~'25)

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
핵심 기타 가스자원 CO ₂ 포집기술	- 실증규모(NG) 1MWe - 포집량 5,000t-CO ₂ /년	('30) 포집량 25천t-CO ₂ /년 ('50) 포집량 70만t-CO ₂ /년 포집비용 \$20~30/t-CO ₂
세부 메탄고질화	- 포집비용 \$35/t-CO ₂ 이상	('30) 포집량 1만t-CO ₂ /년 ('40) 포집량 10만t-CO ₂ /년 ('50) 포집량 70만t-CO ₂ /년 포집비용 \$20/t-CO ₂
세부 매체순환연소 및 순산소연소	- 실증규모(NG) 1MWe - 포집량 5,000t-CO ₂ /년	('30) 포집량 2.5만t-CO ₂ /년 ('40) 포집량 25만t-CO ₂ /년 포집비용 \$20~30/t-CO ₂

세부기술 : 메탄 고질화

- (기술정의) 바이오가스로부터 이산화탄소를 포집하면서 메탄을 고질화한 후, 메탄 개질로 수소를 생산하면서 CO₂를 분리하여 고순도 수소생산과 이산화탄소 포집을 동시에 할 수 있는 negative CO₂ 포집 기술
- (필요성) 바이오가스로부터 CO₂를 포집하면서 수소를 생산하는 기술로서 블루 및 그린수소 생산, negative CO₂ 포집 기술로 net zero 사회 구축 가능

세부기술 : 매체순환연소 및 순산소연소

- (기술정의) 산소전달입자(금속산화물)에서 제공되는 순산소로 바이오가스 또는 매립지 가스를 연소하고 발생하는 열을 이용하여 스팀 및 전기를 생산·이용하는 기술
- (필요성) 바이오가스 또는 매립지 가스에 포함된 CO₂를 단순 분리하는 고질화 대비 메탄의 연소로 발생하는 CO₂까지 원천분리함으로써 마이너스 배출량 최대화 및 타 산업 분야 CO₂ 배출량에 대한 상쇄 효과를 극대화할 수 있는 기술

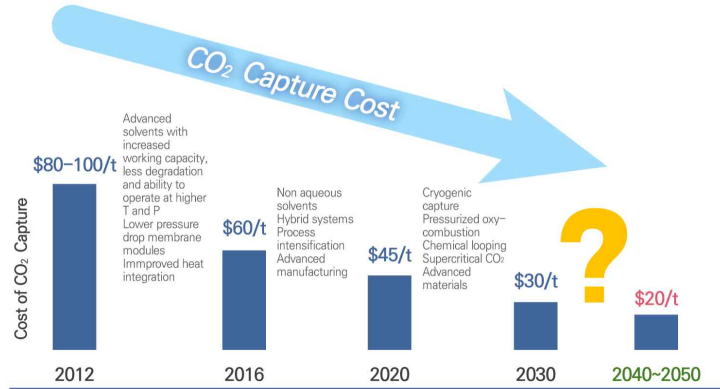
핵심기술 6 CO₂ 포집비용 저감을 위한 차세대 기술 개발**기술개요****(개요)**

- 현재 \$60~70/t-CO₂인 CO₂ 포집비용을 2050년 기준 \$20/t-CO₂까지 획기적으로 저감할 수 있는 소재, 공정 기술개발 및 기존공정의 에너지 소모량을 줄일 수 있는 공정 연계 최적화, 산업체 현장 적용을 통한 에너지 이용 고도화 기술 개발

(필요성)

- CO₂ 포집기술은 포집대상의 성상과 온도, 압력 조건에 따라 소재 및 공정의 개선과 최적화 과정이 필요함
- 기존에 개발된 기술의 경제성 확보를 위한 trouble shooting, 성능 개선, 최적화 및 reverse engineering 필요
- 개선된 소재, 공정을 현장에 적용하여 에너지 최적화 및 미활용에너지 연계, 재생에너지 연계 등을 통한 경제성 향상과 탄소배출 최소화 필요

CO₂ 포집비용 감소 추세



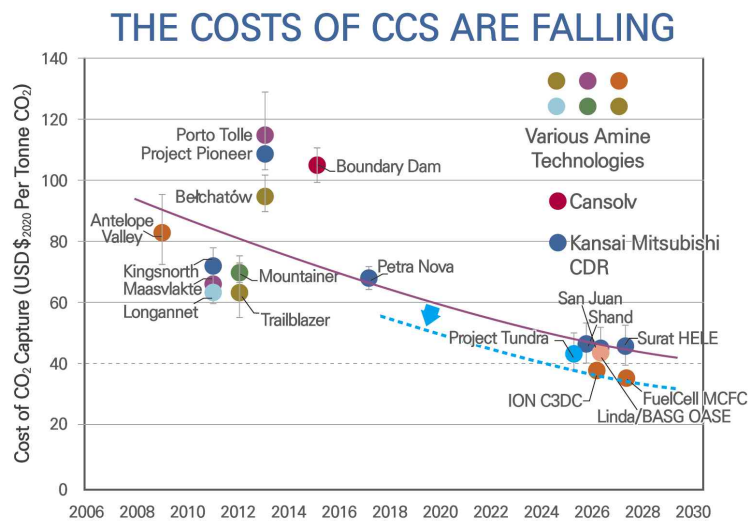
출처 : <https://www.ifri.org/en/publications/etudes-de-lifri/carbon-capture-storage-and-utilization-rescue-coal-global-perspectives> 에서 발췌 편집

● 기술 동향

(해외)

- CO₂ 포집 소재 개선(에너지 소모량 감소, 성능저하 감소), 신규 소재 개발, CO₂ 압축공정 개선, 고압 CO₂ 포집, 설비 대형화를 통한 비용 감축, 설비 모듈화에 의한 비용 감축, 에너지 최적화 등을 통해 포집비용을 감소시키려는 노력이 계속되고 있음

아민 흡수제를 이용한 CO₂ 포집기술의 CO₂ 포집비용 감소 추세



출처 : CCS Talks: The Technology Cost Curve, GCCSI, 2020

(국내)

- 신기술 개발, 기존 기술의 규모 격상에만 집중하여 개발된 기술의 개선 및 최적화에 관한 연구 투자가 제한적임

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
핵심 CO ₂ 포집비용 저감을 위한 차세대 기술 개발	- 포집비용 \$35~70/t-CO ₂	(‘50) 1MWe 급 이상 실증 포집비용 \$20/t-CO ₂ 이하

세부기술 : 없음

라

기술확보 전략

● 소재-부품-장비 확보전략

(소재)

- 개발대상
 - 흡수제, 첨가제(소재 성능향상, 불순물에 대한 내성 증진, 부반응 최소화)
 - 고선택성 촉매
 - 산소전달입자
 - 투과도 및 선택성 향상 유무기 복합소재
 - 내부식성 배관 및 구조소재
- 확보전략
 - 산·학·연 협동 국내자체개발
 - 실험실 규모 설비이용 시험
 - 대량생산 제조기술 개발
 - 국내 실증설비 활용 성능 검증

(부품)

- 개발대상
 - 스트럭처드 패키징
 - 중공사 집적화기술
 - 대용량 모듈 제조기술
 - 에너지 최적화를 위한 열교환기
 - 내부식성 압축기, 블로워, 팬 등
 - 세라믹 분리막 모듈 부품
- 확보전략
 - 국내외 기성품 조합 및 개선
 - 소량 소요 부품은 수입
 - 대량 소요 부품은 기성품 부재 시 국내개발
 - 연구기관과 중소/중견 부품업체 공동개발 및 장기운전실적 확보 및 성능검증

(장비)

- 개발대상
 - 포집대상 기체의 전처리 설비
 - 주요물질 정밀측정장비(CO₂, 휘발분, 부반응 생성물질 등)
 - 세라믹 중공사막 제조 장비 및 접합 장비
- 확보전략
 - 연구기관과 중소/중견 장비 제작업체, 중공업사, 계측업체 및 계측기 제작사 공동개발 및 장기운전실적 확보 및 성능검증

● **시스템 확보전략**

(설계·제작)

- 기 보유 국내 자체기술의 개선, 최적화
- 폐열활용, 에너지효율 극대화를 위한 heat integration 기술 확보
- 엔지니어링, EPC 제작사 대상 기술이전 및 기술협력을 통한 국산화 기술 확보
- 대형 실증에 의한 국내업체의 track record 확보

(시험)

- Lab. → Bench → Pilot → Commercial 규모의 단계적 scale-up을 거치되 기존 유사기술 scale-up 경험이 있는 기술은 중간단계 생략
- 소재 시험 및 소재의 공정적용 시험 병행
- 소재 및 시스템의 안전성 확보를 위한 시험 방법론 개발 및 적용
- 배출기체의 품질검사 체계 확보
- 각 규모격상 단계별 객관화된 시험 방법론 개발 및 적용
- 장기운전 track record 확보

(인증)

- 소재 및 시스템 성능인증 (공인시험기관)
- 신기술 인증, 녹색기술 인증 (단, 기준항목 재정립 및 인증기준 고도화 필요)
- 탄소배출권 확보 인증
- 각 규모격상 단계별 성능 인증 방법론 개발 및 적용

● 국내외 실증(Scale-up) 방안**(국내)**

- 기술개발 로드맵에 따른 단계적 scale-up 추진
- 발전, 산업체 현장 적용 및 상용규모 최적 heat integration 기술 확보
- 포집-저장, 포집-활용 통합실증 추진
- 장기실증 및 안정성 확보 (track record 확보)
- 설계, 제작, 운전 전주기 국산화 기술 확보
- 주민수용성 확보

(해외)

- 국외 test bed 및 실증단지를 통한 해외 기술 실증
- 배출권 확보 및 CO₂ 활용을 고려한 해외 EOR 사업 추진
- 바이오매스, 기타가스자원 확보가 가능한 신흥개도국 신시장 창출
- 국내에서 확보한 track record를 이용한 해외시장 진출

● 기반구축 방안

(인력양성)

- 국내 대학 기초연구 지원을 통한 소재 및 공정개발 핵심인력 육성
- 한국발전교육원 등 관련 교육기관에 CCUS 전문인력 양성과정 신설
- 국내외 CCUS 특화 대학 연계 전문인력 양성
- 소재, 부품, 장치 개발인력 및 시스템 운영인력 양성
- 실증설비 현장운전을 통한 고급기술자 과정 개설 및 산업체 고급인력 육성

(국제협력)

- 국외 전문연구기관과의 정보공유, 컨퍼런스 등을 통한 기술교류
- IEA-GHGT, CSLF 등 활용 국제협력 인프라 구축
- 산업별 국제 협회(ex. WSA (World Steel Association))를 통한 개발 기술의 확산 및 협력 관계 유지
- 국외 test bed 및 실증단지를 통한 해외 기술실증
- 국내외 실증 수행 시 관련 해외기관(EPRI, UKCCSA 등)과의 협의를 통한 매칭펀드 마련, 실증 결과에 대한 공동 검증 및 연구 수행

(법·제도 개선)

- 탄소국경세 및 탄소세 국내 대응책 마련 및 법·제도 구축
- 포집-활용, 포집-저장된 CO₂에 대한 배출권 인정, 인센티브 부여를 통한 민간 적용 기회 확대
- 민간기업의 신기술 투자에 따른 위험부담 경감 및 경제적 장애요인을 해소할 수 있는 제도적 지원방안 필요
- 국내·외 바이오매스, 기타 가스자원 활용 확대를 위한 제도 개선
- BECCUS 플랜트에 대한 REC, Carbon pricing, negative CO₂ credit 마련
- CCUS 연구개발에 대한 민간 투자금액만큼 배출권거래제 유상할당 비율에 해당하는 금액을 납부한 것으로 인정

마

탄소중립 기여 효과

● 탄소중립 기술과의 연계성

- CO₂ 포집기술은 다른 기술에 의해 저감되지 않고 대기 중으로 배출될 수밖에 없는 CO₂를 경제적이고 안전하게 포집(분리)할 수 있는 기술로서 탄소중립을 위한 마지막 수단임
- 지속 가능한 녹색사회 실현을 위한 대한민국 2050 탄소중립 전략(2020)에서는 에너지 공급(전력·열) 부문과 산업부문에서 주요 감축 수단으로 CO₂ 포집·저장·활용(CCUS) 기술을 제시하고 있음

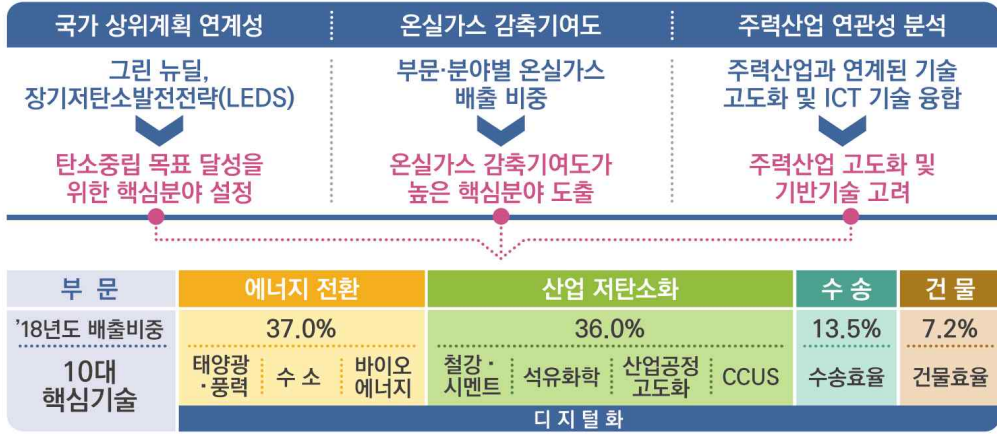
주요 부문별 감축수단 및 전망

감축수단	전망지표*		
	감축효과	기술성숙	감축비용
에너지공급(전력·열)			
1. CO ₂ 포집·저장·활용(CCUS)	●	◐	○
2. 에너지믹스 개선	●	●	●
3. 수소경제 활성화	연료전지 도입	◐	◐
	수소 공급	●	○
산업			
1. 수소화 기술 및 원료 재활용	●	◐	○
2. 신소재 전환 및 고부가 제품 확대	●	○	○
3. 기기 효율개선	●	●	●
4. 스마트 공장 및 산단	◐	●	◐
5. CO ₂ 포집·저장·활용(CCUS)	●	◐	○
6. 저탄소 연·원료 사용	○	●	●
7. 산업공정 배출 감축	●	●	●

출처 : 지속가능한 녹색사회 실현을 위한 대한민국 2050 탄소중립 전략 (2020)

- 탄소중립 기술혁신 추진전략 (안)에서는 LEDS 연계성, 감축기여도 등을 바탕으로 탄소중립에 핵심적인 기여가 가능한 10대 핵심기술을 아래의 그림과 같이 선정하였으며, 산업 저탄소화 부문에 CCUS가 핵심기술로 선정되었음

탄소중립 기술혁신 추진전략 (안)의 10대 핵심기술 도출과정 및 부문별 핵심기술



출처 : 탄소중립 기술혁신 추진전략(안), 2021.03.31.

- 특히 산업부문 온실가스 다배출 업종의 온실가스 감축 방안을 종합적으로 검토하면, 공통으로 연료전환, 원료전환, 에너지효율 개선, CCUS로 구분할 수 있음. 즉, CCUS는 다배출 업종에서 공통 적용 가능한 온실가스 감축 방안임

〈산업부문 온실가스 다배출 업종의 온실가스 감축 방안 비교〉

구분 업종	연료전환	원료전환	에너지효율 개선	CCUS
철강	수소환원제철 고반응성 코크스	철스크랩 직접환원철	고로 용융 슬래그 현열 등 활용	CCU
정유	천연가스 전환	정제공정 부생가스 사용량 증대	정유공장-산업단지 열통합	CCU
석유화학	NCC 전기가열로 바이오매스 보일러	바이오 원료 수소 원료 패플라스틱 원료	폐열회수	CCU
시멘트	폐기물 패플라스틱	페콘크리트, 석탄재 광화제, 부원료 배합설계비 제어	설비 고효율화	CCUS

출처 : 한국에너지기술연구원 PD 이슈리포트, 산업부문 온실가스 포집 대상 및 기술개발 방향 (2021.07.02.)

- CO₂ 포집기술은 CCUS 기술의 시작이자 가장 높은 비용을 차지하는 기술이므로 기술개발을 통해 경제적인 포집기술을 확보해야만 탄소중립을 위한 마지막 수단으로서 국가와 산업, 국민의 부담을 최소화할 수 있음
- 포집된 CO₂는 활용 또는 저장될 수 있으며, 이를 통해 직접적인 감축량으로 인정받을 수 있음

CO₂ 포집, 압축, 수송, 저장 비용 수준 (산업부문의 최적화된 기술 기준)



출처 : G2VP Insight, <https://blog.g2vp.com/we-are-close-to-a-tipping-point-in-industrial-carbon-capture-d5acf266a580>

- 2030, 2040, 2050년까지 단계적인 규모 격상(scale-up)을 통해 CO₂ 포집량을 증대시키고 포집비용을 낮출 계획임. 포집된 CO₂는 활용 또는 저장될 수 있으므로, CO₂ 활용 부문에서의 전환율(활용률)과 저장 부문에서의 손실을 제외한 값이 CO₂ 감축량으로 고려할 수 있음
- 다음의 표와 같이, 2050년 기준 세부기술 전체의 CO₂ 포집량을 합산하면 약 21백만 t-CO₂/년이며 이는 세부 기술별로 2050년까지 격상 가능한 수준에서 포집설비 1기를 설치하는 기준의 포집량이므로 포집설비 설치 대수를 증가시키는 방법으로 CO₂ 포집량을 증가시킬 수 있고 CO₂ 포집량만큼 탄소중립에 기여할 수 있음

세부기술별 탄소포집 실증 계획 (해당기간 실증 예정 CO₂ 포집량)
(단위설비 1기 기준이며, 설치 증가 시 확대 가능함)

(단위 : 톤 CO₂/년)

구분		기간		~2030	~2040	~2050
		전략방향	핵심기술			
CO ₂ 대량 배출원에 적용 가능한 저비용 포집기술	발전 및 연소 배가스 중 CO ₂ 포집기술	석탄 발전 및 연소 배가스 고농도 CO ₂ 포집		1,000,000	3,000,000	4,000,000
		LNG 발전 및 연소 배가스 저농도 CO ₂ 포집		300,000	500,000	1,000,000
	산업공정 배출 CO ₂ 포집기술	제철공정 부생가스 CO ₂ 포집		30,000	300,000	300,000
		시멘트킬른 배가스 CO ₂ 포집		18,000	50,000	1,000,000
		합성가스 생산공정 CO ₂ 포집		20,000	500,000	1,000,000
		수소생산공정 CO ₂ 포집		400,000	800,000	2,000,000
	연료 연소 중 CO ₂ 포집기술	바이오매스 순산소연소		2000	12,000	1,200,000
		가압 순산소연소		60,000	5,000,000	10,000,000
		천연가스 매체순환연소		150,000	500,000	500,000
	저농도 CO ₂ 포집기술	저농도 CO ₂ 포집		350	5,000	100,000
		직접공기포집(DAC)		1,000	50,000	500,000
	기타 가스자원 CO ₂ 포집기술	메탄 고질화		10,000	100,000	700,000
		매체순환연소 및 순산소연소		25,000	250,000	250,000
	계				1,772,350	10,685,000

02 저장 핵심기술 자립화 및 조기 통합실증(저장)

가 전략방향 대상정의

● 개념 및 범위

- 해양 지중저장 핵심기술의 상용화 및 자립화를 통하여 설비 및 공정 국산화 확대, 해외 의존도를 낮추고 국내 해양 설비, 모니터링 및 저장 운영 업체의 기술 역량 향상을 도모하여 대규모 CCS 통합실증 목표를 조기 달성하고 궁극적으로 해외시장 진출 기반 마련
- **(CO₂ 수송기술)** 포집원로부터 저장소까지 CO₂ 수송의 전주기 기술개발을 통해 파이프라인 설계/운영 및 전용수송선박 건조 기술 자립
- **(CO₂ 저장소 탐사기술)** 지중저장소를 찾기 위한 탐사설계/자료취득·처리·해석 및 지질/지구물리 자료 통합 3D 지질 모델링 기술개발
- **(CO₂ 저장소 구축기술)** CO₂ 해양 지중저장을 위한 설비/시설 및 해저배관 구축, 주입-저장 공정 설계, 저장소 관리를 위한 기술개발
- **(CO₂ 저장 주입기술)** CO₂ 주입정 안전성 확보 및 시추/완결/관리 기술개발
- **(CO₂ 저장 모니터링기술)** 주입된 CO₂에 의해 유발되는 물리/화학/지질/환경적 변화를 감지하는 최적의 모니터링 프로그램을 구축/운영하는 기술개발

CO₂ 지중저장 전략방향 개념도



● 기술적 요구사항

- 외국 전문 회사가 독점한 해양 지중저장 핵심기술의 자립화를 통해 조기 대규모 통합 실증 및 상용화 목표 달성이 필요하며, 이를 통해 입증된 핵심기술은 향후 대규모 해양 저장시설 설계/구축 및 운영에 직접 사용, 설계 기간 및 비용 단축을 도모
- CO₂ 지중저장을 위한 수송, 해저 주입설비 설계/제작/운영 기술 자립화를 통한 핵심기술 국산화를 대단위 초기 투자비 절감, 프로젝트 추진 신속성 확보, 국내 연관사업의 활성화에 기여할 필요가 있음

나 전략방향별 핵심기술

CCUS		저장 핵심기술 자립화 및 조기 통합실증(저장)								
핵심기술	Baseline	단기				중기			목표	
		2022	2023	2024	2025	~2030	~2040	~2050		
CO ₂ 수송기술	• 파이프라인 설계 기술은 보유하지만 대용량 CO ₂ 해양 이송 설계 경험은 부재 • 천연가스 송출 및 배관 운영기술은 보유하지만 국내 대규모 CO ₂ 압축/액화/저장/ 송출 운영기술은 없음 • 소형 LPG급 수송선 개념설계 가능 • 유럽 및 일본에서 사전조사 단계이며 이동식 주입시설 건조·활용기술 개발 및 CCS 상용화 사례는 없음		(S)CO ₂ 배관 최적화설계기술			(S)1Mtpa 배관기술 실증	(S)5Mtpa 배관기술 실증		• 5Mtpa 배관 기술 확보 • 5Mtpa 운영 기술 확보	
					(S)CO ₂ 배관수송시스템 안전운영기술		(S)5Mtpa 운영기술 실증		• 상용급 건조 2척	
				(S)CO ₂ 전용수송선박건조기술				(S)상용급 건조실증		• 상용급 건조 2척
				(S)FFSO형 CO ₂ 수송·주입복합선 건조기술				(S)상용급 건조실증		
CO ₂ 저장소 탐사기술	• 국내 대륙붕 3D 탄성파 탐사 자료 취득 및 자료처리 • 유가스전 부존량 결정론적 평가 • m단위 유가스전 특성화 기술 • 3차원 모델링 기술 유가스전 유망구조에 적용 • 국내외 명확한 가이드라인 부재	(S)CO ₂ 저장소 탐사자료취득/자료처리기술				(S)실증	(S)상용화		• 연간1500만톤 처리 규모 저장소 확보 • 국내 대륙붕 모든 유망지역 3D 탄성파 볼륨 확보 • 국내 대륙붕 관할 해역 전 지역 추계론적 저장자원량 평가 • 저장소 현장 물성 변화 실시간 계측 • 운영 중인 저장소 CO ₂ 플룸 시간경과 3차원 영상 실시간 구현 • 해외 저장소 평가 및 확보	
			(S)CO ₂ 저장소 평가기술			(S) 저장자원량 추계론적평가	(S)국내 대륙붕 관할 해역 전 지역실증			
			(S)CO ₂ 저장소 특성화 기술			(S) 저장소 물성규명	(S) 저장소 현장 물성 변화 실시간 계측			
			(S)CO ₂ 저장소 모델링 기술			(S)CO ₂ 주입영상화	(S) 운영 중인 저장소 실시간 영상 구현			
			(S)CO ₂ 저장소 선정 기술			(S) 가이드라인 제시	(S) 해외 저장소 평가 및 확보			

범례 (S): 소재, (부): 부품, (장): 장비, (시): 시스템 [진행중 기술] 기초원천R&D 응용 R&D 실증/상용화 R&D [개발할 기술] 기초원천R&D 응용 R&D 실증/상용화 R&D

CCUS		저장 핵심기술 자립화 및 조기 통합실증(저장)							
핵심기술	Baseline	단기				중기			목표
		2022	2023	2024	2025	~2030	~2040	~2050	
CO ₂ 저장소 구축기술	<ul style="list-style-type: none"> • 영일만 해상 소규모 해상 저장시설 구축 실적 • 영일만 해상 소규모 해상 저장시설 구축 실적 • 유가스전 해양시추 경험, 유정완결 프로그램 개발 기술 부재 • 육상 파일럿 부지 관측공(1km 심도) 설치 실적 • 통합 운영관리시스템 개념 설계 가능 		(사)CO ₂ 저장소 해상 저장시설 구축기술				(사)400만톤 규모 플랫폼	(사)해양플랫폼 운영/관리	<ul style="list-style-type: none"> • 해양플랫폼 운영/관리 기술 개발 • 해저 주입설비 시공/관리 기술 자립화 • 해양 주입정 시추 및 완결 시공/관리 기술 자립화 • 해양 관측공 확보 및 운영 기술 실증 • 연간 400만톤 규모 저장소 통합운영관리 시스템 개발 및 실증
			(사)CO ₂ 저장소 해저 주입설비 구축기술				(사)400만톤 규모 주입설비	(사)해저주입설비 시공/관리 자립화	
			(사)CO ₂ 주입공사추 및 완결 기술				(사)400만톤 규모 주입설비	(사)해저주입설비 시공/관리 자립화	
			(사)CO ₂ 관측공 설치 기술				(사)해양관측공 설계 및 관측시스템	(사)해양관측공 확보 및 운영 실증	
			(사)CO ₂ 저장소 통합 운영관리 시스템 구축 기술				(사)400만톤 규모 통합운영관리 시스템		
CO ₂ 저장 주입기술	<ul style="list-style-type: none"> • 기상환경 주입 최적화 가능 • 주입위치, 주입공 수, 주입속도 등 최적화 가능 • 석유가스 생산정 안전관리 지침 적용 • 석유가스 해상구조물 안정성 평가 가능 • 개념 설계 단계 		(사)CO ₂ 주입 최적화 기술			(사)주입 최적화 현장 실증	(사)주입 최적화 상용화 실증	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂ 주입 최적화 기술 실증 및 상용화 • 주입효율 향상 공정/소재 상용화 • 주입 안전관리 체계 구축 및 실증 • 저장 안전관리 체계 구축 및 실증 • 저장소 통합관리 기술 실증 및 상용화 	
			(사)CO ₂ 저장 효율향상 기술			(사) 최대 주입효율 실증	(사)주입효율 향상 공정/소재 상용화 실증		
			(사)CO ₂ 주입 안전관리 기술			(사)400만톤 주입제어 이행	(사)주입 안전관리 체계 구축 및 실증		
			(사)CO ₂ 저장소 안전관리 기술			(사) 안전관리 기술 실증	(사) 저장 안전관리 체계 구축 및 실증		
			(사)CO ₂ 저장소 통합관리 기술			(사) 전주기 통합관리 실증	(사) 저장소 통합관리 상용화 실증		
CO ₂ 저장 모니터링 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 반복성과 유사도를 고려하지 않은 일반적인 3차원 탄성파 탐사 수행 • 2차원 해저면 케이블(OBC) 탐사 수행 • 시추공 모니터링 최적화를 위한 수치 모델링 가능, 현장자료 취득/분석 사례 전무 • 실험실 코어규모에서 CO₂ 추적자 시험 및 해석 • 해저면 근처 이산화탄소 정밀 탐색 기법 부재 • 인공추적자 분석을 위한 대기 및 해수 시료 채집 시스템 부재 	(사)CO ₂ 지구물리 해상 모니터링 기술				(사)실증	(사)상용급 실증	<ul style="list-style-type: none"> • 저장소에서 구축된 현장 빅데이터 기반 시간차 자료 분석 자동화 • OBC, 광케이블 등 다중 탐사 융복합 기술 확보 • 주입정 인근 지층 CO₂ 플룸 실시간 영상 확보 • 심부 대수층 저장소 대상 관측공 운영 및 수리지화학 모니터링 기술 확보 • 무인/자동화 관측 시스템 운용 	
		(사)CO ₂ 지구물리 해저면 모니터링 기술				(사)실증			
		(사)CO ₂ 지구물리 시추공 모니터링 기술				(사)실증			
		(사)CO ₂ 수리지화학 관측공 모니터링 기술				(사)실증			
		(사)CO ₂ 해양-대기 환경 모니터링 기술				(사)실증			

범례
(소): 소재, (부): 부품, (장): 장비, (시): 시스템
[진행중 기술]
기초원천R&D
응용 R&D
실증/상용화R&D
[개발할 기술]
기초원천R&D
응용 R&D
실증/상용화R&D

다

핵심기술 개요

핵심기술 1 • CO₂ 수송기술

● 기술개요

(개요)

- 대용량 CO₂ 압축액화 및 수송 파이프라인 설계 기술 최적화
- CO₂ 수송시스템 안전운전 및 유지개발 기술
- 해양 CCS 목적의 CO₂ 수송선 건조 기술

(필요성)

- 울산지역 산업시설에서 포집한 CO₂ 가스를 육상허브터미널에서 압축·액화 후 기존 가스파이프라인 및 해상플랫폼을 이용하여 동해가스전 저류층에 주입·저장하는 일련의 시설로 구성되며 CO₂ 유체 거동에 따른 분야별 맞춤 연구개발이 필요함
- CO₂ 터미널 및 수송 분야는 정유/석유화학공정/LNG 발전 등에서 부수적으로 발생하는 CO₂를 포집하여 해상 지중저장을 위하여 고압가스 혹은 액화가스 형태로 이송하는 일련의 시스템으로써 CO₂ 유체 특성 및 유동성 분석을 통하여 가장 경제적이며 안전한 시설구축을 위한 기술개발이 핵심과제임

CO₂ 수송 개념도



● 기술 동향

(해외)

- 노르웨이 Sleiper(100만톤/년), 중국 Jilin EOR(50만톤/년) 등 20개소 이상의 실증·상용화급 프로젝트 추진 중으로 중대규모 설계기술 보유
- 이산화탄소 파이프라인 설계기술은 미국 500 MWe IGCC 화력발전소에서 포집된 7000 t/d CO₂의 100 km 액상 육상이송 및 700 MWe 석탄 화력발전소에서 포집된 15,000 t/d CO₂ 의 100 km 액상 육상이송을 설계한 바 있음
- CO₂ 압축/액화/건조 플랜트 설계기술은 영국 Amec 등에서 포집원에서 포집된 상온/상압 CO₂ 가스를 7단 압축기를 이용하여 상온 80bar로 압축/액화 플랜트에 대한 설계기술 보유

(국내)

- 국내 업체의 석유·가스의 정제 및 화학 플랜트 설계기술은 상용화급이나, CO₂ 유체를 대상으로 한 지속적인 수송용 플랜트의 설계 실적은 없는 상황
- 국내 CO₂ 액화플랜트는 주로 외국사의 기본 설계를 바탕으로 중소 엔지니어링 업체가 건설하거나, 냉동기 메이커가 냉동 기술을 기반으로 CO₂ 액화플랜트를 건설해 왔음

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
핵심 CO ₂ 수송기술	- 기본 설계기술 및 소규모 운영기술 보유	(‘30) 연간 100만톤 규모 수송기술 확보 (‘50) 연간 500만톤 규모 수송기술
세부 CO ₂ 배관 최적화 설계 기술	- 파이프라인 설계 기술은 보유하지만, 대용량 CO ₂ 해양 이송 설계 경험은 부재	(‘30) 1Mtpa 배관 기술 확보 (‘50) 5Mtpa 배관 기술 확보
세부 CO ₂ 배관 수송시스템 안전운영 기술	- 천연가스 송출 및 배관 운영기술은 보유하지만 국내 대규모 CO ₂ 압축/액화/저장/송출 운영기술은 없음	(‘30) 1Mtpa 운영 기술 확보 (‘50) 5Mtpa 운영 기술 확보
세부 CO ₂ 전용 수송선박 건조 기술	- 소형 LPG급 수송선 개념설계 가능	(‘30) 초대형 장거리 운항 가능 선박 설계 최적화 (‘50) 상용급 건조 2척
세부 FPSO형 CO ₂ 수송-주입 복합선 건조 기술	- 유럽 및 일본에서 사전 조사 단계이며 이동식 주입시설 건조·활용기술 개발 및 CCS 상용화 사례는 없음	(‘30) 해상 이동식 주입시설 건조 기술 확보 (‘50) 상용급 건조 2척

세부기술 : CO₂ 배관 최적화 설계 기술

- (기술정의) CO₂ 터미널 및 육·해상 수송 파이프라인의 적기 구축 및 안정적인 운영단계 진입을 위한 플랜트 엔지니어링 설계기술
- (필요성) 대용량 CO₂의 수송시스템에 대한 엔지니어링 설계기술 개발이 필요 구축 및 운영 기술은 일부 선진국만 경험이 있으므로 국산화가 필요

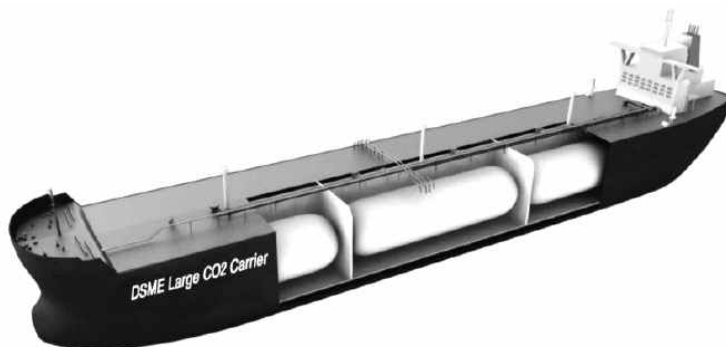
세부기술 : CO₂ 배관 수송시스템 안전운영 기술

- (기술정의) CO₂ 수송시설 구축 작업 완료 후 안정적인 운영단계 진입을 위한 시운전 절차 수립 및 안전운영을 위한 매뉴얼 개발뿐만 아니라 사용 후 원상복구를 위한 개념설계 기술
- (필요성) 온도·압력별 밀도변화가 민감하고 구조물 대상 부식성 및 밀폐지역에서 질식가능성이 높아 안전운영 매뉴얼 구축 필요 CCS 설비의 지속 흐름 및 시설 운영 안정성 확보를 위한 관내 부식률 예측 및 제어 기술개발 필요

세부기술 : CO₂ 전용 수송선박 기술

- (기술정의) CO₂를 장거리 수송할 수 있는 선박을 건설하기 위해 저장 화물창 최적 배치 기술, 안전설계 기술, CO₂ 적하역 및 BOG 재액화 기술을 포함
- (필요성) 대규모 포집시설과 지중저장소와 위치가 멀고 지리적 여건상 파이프라인을 통한 CO₂ 수송이 불가능한 경우를 대비하여 포집된 CO₂를 안전하게 수송하기 위한 전용 수송선박 개발은 필수적임

CO₂ 전용 수송선박 예시



출처 : Yoo, B. Y., Choi, D. K., Huh, C., Kang, S. G., & Kim, I. S. (2013). A feasibility study on CO₂ marine transport in South Korea. Energy Procedia, 37, 3199-3211.

세부기술 : FPSO형 CO₂ 수송-주입 복합선 건조 기술

- (기술정의) 선박으로 액화 CO₂를 운송하여 이동식 주입시설을 활용하여 해저 지하저장소에 저장할 수 있는 FPSO형 복합선 건조 기술
- (필요성) 해저배관 및 해상 플랫폼 등 초기 대규모 시설투자 절감 및 개발건 중·소규모 저장소 및 육지에서 원거리에 위치하는 저장소에 적용 가능

핵심기술 2 CO₂ 저장소 탐사기술

기술개요

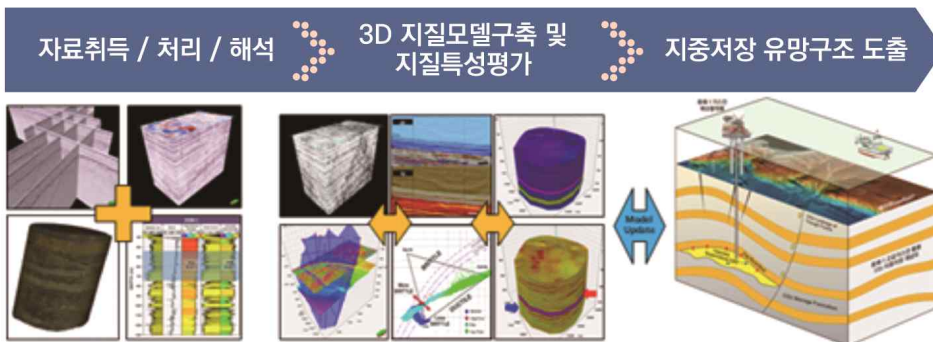
(개요)

- 지중저장소를 찾기 위한 탐사설계/자료취득·처리·해석 기술
- 지질/지구물리 자료 통합 CO₂ 지중저장소 3D 지질 모델링 기술
- 저장성능, 차폐능력, 위험요소, 안정성, 유체거동 등의 특성을 평가하는 요소기술

(필요성)

- '30년 이후 CO₂ 연간 400만톤 주입 목표에 도달하기 위해 대규모 저장소 탐색 필수
- 석유개발 구조가 아니지만, 양질의 저류층과 덮개층이 두껍게 분포하는 지역도 CCS에서 지중저장 구조로 활용할 수 있으므로 신규 탐사가 필요함
- 탄소중립 정책실현을 위한 CCS 사업의 지속적 추진을 위해 대규모 저장소(유망구조)의 다수 후보군 도출 필요. 이를 위해 전 국토 및 인접 해역에 대한 종합 탄성파 탐사 필요

CO₂ 지중저장소 탐사기술 개요



출처 : 한국지질자원연구원(GP2017-027-2019), <https://library.kigam.re.kr/Search/Detail/59534?key=GP20170272019&campuscode=00>

● 기술 동향

(해외)

- 유럽에서는 북해의 대규모 대염수층을 활용한 지질학적 저장(Dedicated Geologic Storage) 방식이 선호되며, 노르웨이 Sleipner 프로젝트의 성공을 계기로 대규모 해상 이산화탄소 저장 방식의 비중이 확대되는 추세로 신규 광역 물리탐사가 지속해서 추진됨
- 국제적 석유회사인 PGS는 저장소 탐사 및 모니터링을 위한 탐사설계, 취득, 처리, 특성화, 모델제작, 유동 시뮬레이션 등의 전주기 솔루션을 구축함

(국내)

- 국내 대규모 해양 CCS 실증을 위하여 다부처 공동사업을 통해 대규모 해양 CCS 실증부지의 안전성 정보 제공을 위해 수억 톤의 CO₂ 지중저장이 가능한 대규모 해양 지중저장소 확보를 목표로 후보 지역에 대한 정밀 해저지형 탐사를 통하여 주입 전 해저지형 특성 파악(해저지형 베이스라인 구축)
- 포항지역 영일만 해상에서 중소규모 CO₂ 주입 실증을 통해 저장소 탐색, 저장지술 자립화를 위한 연구과제가 수행되었고 시험 주입에 성공함(산업부)
- 저장소 확보를 위해 대규모 통합 실증 저장소 및 상용화급 저장소 확보를 목표로 국내 탐사자료 분석과 시추자료 분석을 통해 유망구조를 도출한 바 있으며(과기부), 현재 유망지역에 대한 정밀탐사 및 시추 탐사를 계획하고 있음(다부처)

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
핵심 CO ₂ 저장소 탐사기술	- 석유개발 구조 확인을 위한 탐사에 국한	(‘30) 연간 400만톤 처리 규모 저장소 확보 (‘50) 연간 1,500만톤 처리 규모 저장소 확보
세부 CO ₂ 저장소 탐사 자료취득/자료처리 기술	- 국내 대륙붕 3D 탄성파 탐사 자료 취득 및 자료처리	(‘30) 대규모 3D/4D 탄성파 자료처리 기술 확보 (‘50) 국내 대륙붕 모든 유망지역 3D 탄성파 불륨 확보
세부 CO ₂ 저장소 평가 기술	- 유가스전 부존량 결정론적 평가	(‘30) 저장자원량추계론적 평가기술 개발 및 적용 (‘40) 국내 대륙붕 관할 해역 전 지역 추계론적 저장자원량 평가
세부 CO ₂ 저장소 특성화 기술	- m 단위 유가스전 특성화 기술	(‘30) m단위 저장소 물성 규명기술 (‘40) 저장소 현장 물성 변화 실시간 계측
세부 CO ₂ 저장소 모델링 기술	- 3차원 모델링 기술 유가스전 유망구조에 적용	(‘30) CO ₂ 주입에 따른 시간경과 3차원 영상화 기술 개발 (‘40) 운영 중인 저장소 CO ₂ 플룸 시간경과 3차원 영상 실시간 구현
세부 CO ₂ 저장소 선정 기술	- 국내외 명확한 가이드라인 부재	(‘30) 해상저장소 평가 가이드라인 제시 (‘40) 해외 저장소 평가 및 확보

세부기술 : CO₂ 저장소 탐사 자료취득/자료처리 기술

- (기술정의) CO₂를 저장하기 위한 저장소를 지구물리적 방법으로 탐사하고 탐사자료를 통해 지하 지층 및 구조를 영상화하는 기술
- (필요성) 석유 탐사용 기존 자료의 한계를 극복하고, 추가적인 저장소를 찾기 위해 기존 자료의 재처리, 추가 자료 획득, 기존 및 신규 자료 종합 분석을 통한 지하구조 영상화가 필요하며, 이를 통해 유망지역 및 유망구조 도출 가능

세부기술 : CO₂ 저장소 평가 기술

- (기술정의) 퇴적분지, 유망지역 및 유망구조의 지중저장 잠재성을 지시하는 지표들을 평가하고, 확보된 자료의 품질과 양에 따라 상이한 수준별 저장자원량을 평가하는 기술
- (필요성) 현재 퇴적분지 규모 결정론적 저장자원량 평가 가능한 수준이나, 국가별 저장자원량이 자원화되는 추세에서 과학적 신뢰도가 높고, 불확실성을 정량화할 수 있는 추계론적 평가 방법 확보가 필요함

세부기술 : CO₂ 저장소 특성화 기술

- (기술정의) 저장층, 덮개층, 단층 등 지중저장 지질 요소들의 주요 물성(수리적/역학적/지화학적/열적)을 분석하고, CO₂ 주입에 따른 물성의 변화를 예측 및 평가하는 기술
- (필요성) 지중저장 지질 요소들은 저장소의 성능(주입성, 저장효율 등)과 안전성에 영향을 미치기 때문에 주입 전·중·후 지질 요소들의 물성이 어떻게 변화하는지 분석하고 예측하는 것이 필수적임

세부기술 : CO₂ 저장소 모델링 기술

- (기술정의) 탄성파/시추코어/물리검층 기반의 자료를 활용하여 지하 지층 및 지질구조의 3차원 분포 모델을 구축하고, 이를 기반으로 지층 내에(특히, 저장층, 덮개층) 각종 물성들이 어떻게 분포하는지 3차원으로 예측하는 기술
- (필요성) 다양한 물성의 3차원 모델을 구축하여 저장소 내 CO₂ 플룸의 거동, 역학적 안정성, 열적 변화 등의 시뮬레이션이 가능하고, 저장용량 평가를 위한 필수적인 단계임

세부기술 : CO₂ 저장소 선정 기술

- (기술정의) 저장소 후보지들의 평가 결과를 바탕으로 CO₂ 포집원, 수송 방법, 주입 조건, 저장층 특성 등을 고려하여 최적의 저장소를 선정하는 기술
- (필요성) CCS 사업의 경제성 향상과 안전성 확보를 위해 최적을 저장소를 선정하는 기술이 필수적임

핵심기술 3 • CO₂ 저장소 구축기술

● 기술개요

(개요)

- CO₂ 해양 지중저장을 위한 설비/시설 및 해저배관 구축, 주입-저장 공정 설계, 저장소 관리를 위한 기술

(필요성)

- 지중저장소 주입성에 영향을 미치는 열역학·지화학적 반응 모델 및 주입공법별 영향성 분석 모델이 없으며, 정확한 주입유체-잔존유체-암석간의 물리화학적 반응 모델 분석이 부재하여 고정밀의 주입성 평가가 어려움. 따라서 주입성 저하 방지를 위해 주입라인의 온도·압력 변화에 따른 CO₂ 상변화 조건을 고려한 주입설비 설계 및 유정완결 기술 확보가 필수적임
- 주입설비에서 온도와 압력 변화 상변화 모델 구축을 통해 2상 분리로 인한 압력 손실, 주입성 저하, 하자발생 가능성 등에 대한 분석에 기반하여 신규 및 재활용 설비의 최적 공정 제어 및 시스템 구축 기술 개발을 통해 사업성과 안정성 확보가 필요

CO₂ 주입 저장 공정 구성도



● 기술 동향

(해외)

- (중국) 최근 중국 내외에서 기업 활동 시 환경오염 발생에 대하여 엄격한 규제를 시행하는 추세로 볼 때, 온실가스 감축을 위한 추진동력을 갖출 것으로 전망. 육상 및 연안 소규모 지중저장/모니터링 프로젝트를 수행하다 현재 중단된 상태이며, 대규모 해양 지중저장/모니터링 프로젝트는 수행하지 않았음
- (일본) 석탄 화력발전소를 다수 보유하고 있어 국가적 차원의 CCUS 연구 지원이 이루어지고 있으며, 세계 최대, 최고 수준의 인력풀을 통해 실증에서부터 기초 원천기술 연구까지 다루고 있음. 주로

소규모 CCS 현장을 운영한 경험을 보유하고 있으며, Tomakomai CCS 프로젝트의 대규모 현장 실증단계에 있음

- (EU) 지속적인 연구개발과 실험실 규모 실증을 수행해왔으며, 저장 관련 기술을 선도함. 상용화에 가까운 대규모 포집, 해양 지중저장, 모니터링 프로젝트 수행에 성공하였음. 미국과 더불어 기업에 의한 기술 수요 기반이 우수하며, 메이저 석유회사들과의 연계·협력을 통해서 원천/응용기술을 확보하고 있음
- (미국) 정부, DOE, EPA 및 주요 기업들의 연구·지원을 통해 세계 최고 수준의 기술력을 확보함. CO₂ 저장 기술을 저장 측면 외에도 전통적인 석유시추 산업과 연계하여 실행하고 있음

(국내)

- 소규모 CO₂ 주입 및 저장 실증사업을 통해 요소기술 개발 및 실증을 추진 중임. 해상플랫폼 CO₂ 주입시험(100톤, 산업부) 등 육해상에서의 소규모 실증사업을 통한 R&D 수준의 기술 향상 및 경험 축적을 하였으나, 선진국의 최고기술을 모방한 국내 연구 수행 및 일부 기술 개선 수준에 그침

핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
핵심 CO ₂ 저장소 구축기술	- 개념설계 가능 수준	(‘30) 연간 400만톤 규모 저장부지 구축 실적 (‘50) 저장소 구축기술 핵심기술 자립화
세부 CO ₂ 저장소 해상 저장시설 구축 기술	- 영일만 해상 소규모 해상 저장시설 구축 실적	(‘30) 연간 400만톤 규모 처리 해양플랫폼 설계 (‘50) 해양플랫폼 운영/관리 기술개발
세부 CO ₂ 저장소 해저 주입설비 구축 기술	- 영일만 해상 소규모 해상 저장시설 구축 실적	(‘30) 연간 400만톤 규모 처리 주입설비 설계, 운영 기술개발 (‘50) 해저 주입설비 시공/관리 기술 자립화
세부 CO ₂ 주입공 시추 및 완결 기술	- 유가사전 해양시추 경험, 유정완결 프로그램 개발 기술 부재	(‘30) 해양 주입정 시추/완결 설계, 운영 기술 개발 (‘50) 해양 주입정 시추 및 완결 시공/관리 기술 자립화
세부 CO ₂ 관측공 설치 기술	- 육상 파일럿 부지 관측공(<1km 심도) 설치 실적	(‘30) 해양 관측공 설계 및 관측시스템 설치 기술개발 (‘50) 해양 관측공 확보 및 운영 기술 실증
세부 CO ₂ 저장소 통합 운영관리시스템 구축기술	- 통합 운영관리시스템 개념 설계 가능	(‘30) 연간 400만톤 규모 저장소 통합 운영관리시스템 개발 및 실증

세부기술 : CO₂ 저장소 해상 저장시설 구축 기술

- (기술정의) CO₂ 도입시설, CO₂ 압축·온도 조절 설비(펌프 등), 버퍼탱크, 유틸리티 설비 등 대상 설비에 대한 상세설계
- (필요성) 각종 기기, 장치 및 설비의 안전운전 및 유지보수를 위한 기술검토 필요

세부기술 : CO₂ 저장소 해저 주입설비 구축 기술

- (기술정의) 정두장비, 생산트리 및 해저유정통제시스템 개발
- (필요성) 정두장비 및 생산트리의 마모도, 부식도, 피로도 등 시뮬레이션을 통한 안정성 예측 및 해저유정 통제시스템의 부식도, 사용연수, 추가 보수 필요성 등을 고려한 재활용 가능 여부 분석 필요

세부기술 : CO₂ 주입공 시추 및 완결 기술

- (기술정의) 주입정 시추(수직정 경사정 등) 프로그램 개발, 시추공 내 튜빙, 벨브, 패커 등 CO₂ 주입 및 관측을 위한 유정완결 설계기술
- (필요성) 주입공 위치의 지질 및 압력 데이터 분석, 인근 시추공 자료 분석, 신규 시추공 케이싱 사이즈, 강도 등 사양 기본 설계 및 구간별 케이싱 설치 심도 설계 필요, CO₂ 주입공 유정완결 설계를 위해 필요한 각종 장비(튜빙 사이즈, 튜빙 사양 결정 등) 주입공 유정완결 프로그램에 필요한 시추 프로그램 개발 필요

세부기술 : CO₂ 관측공 설치 기술

- (기술정의) 관측공 구축에 필요한 케이싱, 시멘팅, 정두장비, 이수, 모니터링 장비 등 시추 및 모니터링 프로그램 개발
- (필요성) CO₂ 관측공 설계를 위해 필요한 각종 장비 사양 및 절차 구축 필요

세부기술 : CO₂ 저장소 통합 운영관리시스템 구축기술

- (기술정의) CO₂ 수송, 주입 및 저장 중 예기치 못한 내·외부 요인으로 인한 발생 가능성을 평가하고, 이로 인한 사고를 방지하는 통합관리 기술
- (필요성) 공정별 발생할 수 있는 오류들을 미리 방지하기 위해 통합적으로 관리할 수 있는 기술개발이 필요

핵심기술 4 • CO₂ 저장 주입기술

● 기술개요

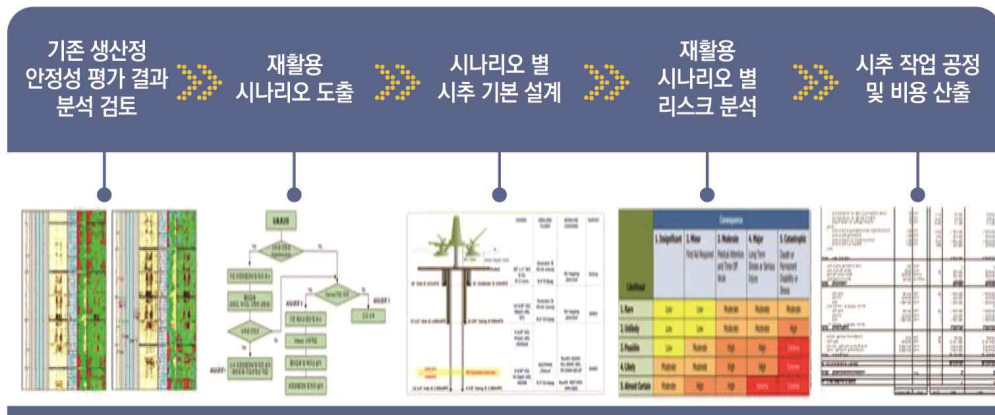
(개요)

- CO₂ 주입정(기존 생산정 재활용 포함) 안전성 확보 기술
- CCS 시추 프로그램 및 주입정·관측정 구축 기술
- CCS 유정완결 설계 및 현장 구축 기술

(필요성)

- CO₂ 주입정의 주입효율, 기밀성, 위험요소, 안정성, 관내 유체거동 등의 특성을 평가하는 요소기술을 개발하고, 중규모 및 대규모 CCS 통합실증 부지를 활용하여 다양한 요소기술의 현장 실증이 필요함
- 기존 가스 생산시설의 CO₂ 주입시설 재활용을 위한 시설 잔존수명 평가 및 재활용에 따른 위험성 평가 기술 개발로 초기 투자비용 절감을 통한 사업성 제고 필요

시추설계 구성도



● 기술 동향

(해외)

- 미국, 호주 등 육상 CO₂ 지중저장 실증을 수행한 국가들은 CO₂ 주입/저장에 따른 지층 및 지질 위험요소, 토양, 지하수, 식생, 미소지진 등 환경적으로 안전성을 확보하기 위한 다양한 연구가 수행되었고 이를 통해 안전성/위험성을 평가하는 체계를 구축했음

- 미국, 일본, 영국 등 선진국들은 중규모 이상의 해저 CO₂ 지중저장 실증 경험이 없지만, 지질 위험요소 특성 및 위험도 평가에 관한 연구, 기술, 장비의 기반이 구축되어 있어 상대적으로 쉽게 접근할 수 있음
- 노르웨이의 대규모 해저 CO₂ 지중저장 실증을 수행사례를 통해 해저면-상부 해저지층에 대한 위험요소 특성 및 위험도 평가에 대한 개념을 도출한 수준이며 소규모 해저 CO₂ 지중저장 실증을 수행한 일본에서도 노르웨이 사례를 활용하였음

(국내)

- 영일만 해상에서 수행한 소규모 주입 실증 사업을 통해 해상 플랫폼에서 소규모 CO₂의 주입 실적 확보

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
핵심 CO ₂ 저장 주입 기술	- 영일만 해상에서 100톤의 CO ₂ 주입	('30) 연간 400만톤 주입 실적 확보 ('50) 연간 1,500만톤 주입 실적 확보
세부 CO ₂ 주입 최적화 기술	- 가상환경 주입 최적화 가능	('30) CO ₂ 주입 최적화 시나리오 현장 실증 ('50) CO ₂ 주입 최적화 기술 실증 및 상용화
세부 CO ₂ 저장 효율향상 기술	- 주입위치, 주입공 수, 주입속도 등 최적화 가능	('30) 최대 주입효율 달성 설계/공정/소재 개발 ('50) 주입효율 향상 공정/소재 상용화
세부 CO ₂ 주입 안전관리 기술	- 석유가스 생산정 안전관리 지침 적용	('30) 연간 400만톤 주입 제어 이행실적 확보 ('50) 주입 안전관리 체계 구축 및 실증
세부 CO ₂ 저장소 안전관리 기술	- 석유가스 해상구조물 안정성 평가 가능	('30) 주입시설, 저장층, 해저지반 등 안전관리 기술개발 ('50) 저장 안전관리 체계 구축 및 실증
세부 CO ₂ 저장소 통합관리 기술	- 개념 설계 단계	('30) 전주기(수송, 주입, 저장) 통합관리 기술개발 ('50) 저장소 통합관리 기술 실증 및 상용화

세부기술 : CO₂ 주입 최적화 기술

- (기술정의) 계절별 해수 온도 변화 및 주입기간 경과에 따른 저장소 압력 상승을 고려하여 CO₂ 주입 시나리오를 수립하고, 시나리오별 최적(상변화 방지, 설비 에너지 소비 최소)의 공정을 설계하는 기술
- (필요성) CO₂ 수송, 주입 중 예기치 못한 내외부 요인으로 인한 이송유체의 상변화(기화) 가능성을 평가하고, 이송 중 CO₂의 상변화로 인한 사고를 방지

세부기술 : CO₂ 저장 효율향상 기술

- (기술정의) CO₂ 주입기간, 유량 및 주입 위치별 유체 특성에 기반한 최적 주입-저장 시스템 설계
- (필요성) CO₂ 주입기간, 유량 및 주입 위치별 주입 저장 효율이 상이하여 CO₂ 저장 효율을 극대화할 수 있는 기술의 개발이 필요함

세부기술 : CO₂ 주입 안전관리 기술

- (기술정의) 이송유체의 주입 중 발생 가능한 리스크를 고려한 주입압력의 정밀 제어 기술, CO₂ 주입 제어 시스템의 운영 안정성 확보 기술
- (필요성) CO₂ 주입 중 발생할 수 있는 요인들에 대한 압력제어 시스템 최적화 필요, 주입 시스템 설계 및 실증 과정을 통해 구성요소의 운영 안정성 확보

세부기술 : CO₂ 저장소 안전관리 기술

- (기술정의) CO₂ 누출 및 전주기 위험성 평가 기술
- (필요성) 시설, 공정별 위험성 및 안정성 평가 기준 제시, 공정 안전장치 (ESD, Vent Stack, 소방설비 등) 구성안 도출 및 설치기준 평가, 육·해상 시설 및 배관 인근 환경영향 평가 필요

세부기술 : CO₂ 저장소 통합관리 기술

- (기술정의) CO₂ 수송, 주입 및 저장 중 예기치 못한 내외부 요인으로 인한 발생 가능성을 평가하고, 이로 인한 사고를 방지하는 통합관리 기술
- (필요성) 공정별 발생할 수 있는 오류들을 미연에 방지하기 위해 통합적으로 관리할 수 있는 기술개발이 필요

핵심기술 5 CO₂ 저장 모니터링 기술**기술개요****(개요)**

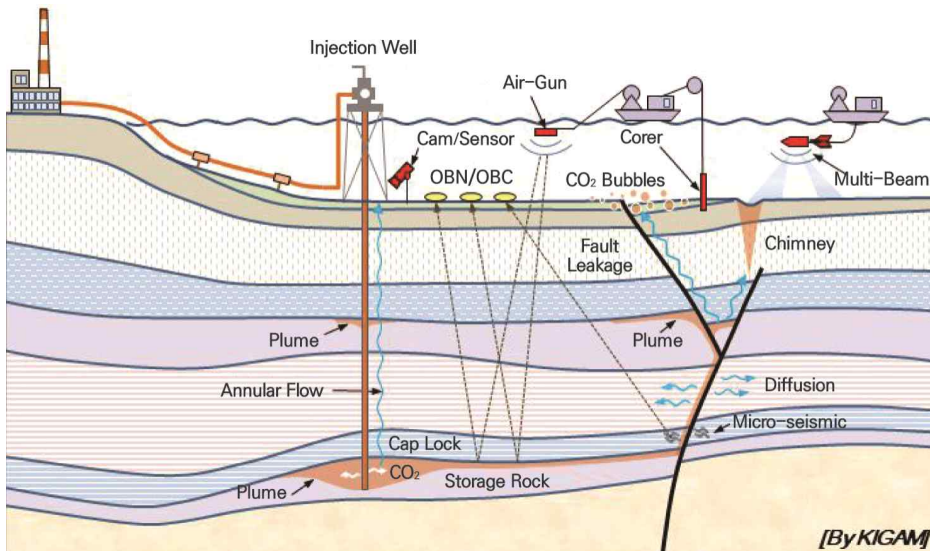
- 주입된 CO₂에 의해 유발되는 물리/화학/지질/환경적 변화를 감지하는 기술
- 현장 및 지질학적 특성에 따라 최적의 모니터링 프로그램을 구축/운영하는 기술

(필요성)

- 주입한 CO₂의 거동을 파악하여 안정적으로 저장되고 주입 후 안전하게 머물러 있는지 확인하는 것이 필수적이고 저장의 성공 여부를 판단할 수 있는 근거가 필요함

- 유출된 CO₂가 주변 환경과 생태계에 영향을 미치는지에 대해 종합적으로 관측하고 대응하여 주민들의 수용성을 확보하는 데 필수적임

CO₂ 모니터링 기술 개요



출처 : 2019-2024 한국지질자원연구원 연구사업계획서, <https://library.kigam.re.kr/Search/Detail/59302>

● 기술 동향

(해외)

- 노르웨이에서는 Sleipner 프로젝트를 통해 북해 노르웨이해역 천연가스에서 추출되는 이산화탄소를 생산정 주변 해저 염대수층에 1996년에서 2014년까지 약 1,500만 톤을 누적 저장한 바 있으며, Barrents Sea 수심 약 300m 지역에서 심도 2,600m 해저지층에 2008년부터 300만 톤 규모의 이산화탄소를 저장하는 Snohvit 프로젝트가 수행된 바 있음
- 석유회사 BP는 LoFS (탄성파 케이블 길이 120 km, 2,500 다중채널 센서) 장비 Valhall CCS monitoring 현장 적용, CGGVeritas 등 다국적 석유회사 컨소시엄은 노르웨이 Ekofisk 현장 저류층 모니터링을 LoFS 광섬유로 수행하여 “Optical Oil Field” 개념을 확립
- 영국지질조사소, 해양연구소, 대학 및 Fugro GEOS, Sonardyne 등 산학연 컨소시엄은 CCS 해양 지중저장소 해저면 모니터링(MMV) 국제공동 프로젝트(540만 GBP 규모)에서 해양 로보틱스 기반 저비용, 고효율 해저 모니터링 시스템을 개발함
- 누출 이산화탄소가 해양에 미치는 영향을 살피기 위해 조절된 누출 실험(예를들면 QICS, ETI MMV, STEMM-CCS)이 진행되었음. 주요 결론은 누출 여부를 명확하게 확인할 수 있고 어느 곳이나 적용할 수 있는 지시자는 존재하지 않는다는 것이며, 여러 변수를 함께 고려하고 누출 탐지, 누출 기원 특정, 누출량 산정의 단계적 접근의 필요성을 제안하였음

(국내)

- 한국지질자원연구원에서는 2011년 CO₂ 지중저장을 위한 부지선정을 위한 연구, 포항부지 해상 소규모 CO₂ 주입 실증을 통해 CO₂ 주입과 4D 모니터링 관련 기술개발을 수행. 영일만 일대 천해에서 24채널 탄성파 및 소량의 OBS 탄성파 탐사와 모니터링을 수행하였으며, 교통차량 미소진동 모니터링 관련 과제에서 수동 탄성파 신호의 음원위치 결정 알고리즘을 개발함
- 국내 대규모 해양 CCS 실증을 위하여 다부처 공동사업을 통해 대규모 해양 CCS 실증부지의 안전성 정보제공을 위해 수억 톤의 CO₂ 지중저장이 가능한 대규모 해양지중저장소 확보를 목표로 후보지역에 대한 정밀 해저지형 탐사를 통하여 주입 전 해저지형 특성을 파악함(해저지형 베이스라인 구축)
- 국내에서 지화학 모니터링 연구는 충북 음성지역에서 파일럿 규모의 모니터링 테스트를 시행하였고 (K-COSEM 프로젝트), 모델링 및 실험실 기반의 다양한 주입 이후의 가스 거동, 누출 및 지하수 특성 변화 연구를 하였음

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
핵심 CO ₂ 저장 모니터링 기술	- 소규모 해상 실증부지 대상 일부 지구물리 모니터링 기술 적용	(‘30) 연간 400만톤 규모 저장부지 통합모니터링 운영 실적 확보 (‘50) 연간 400만톤 규모 저장부지 모니터링 시스템 운영, 시스템 성능 향상 및 비용 절감
세부 CO ₂ 지구물리 해상 모니터링 기술	- 반복성과 유사도를 고려하지 않은 일반적인 3차원 탄성파 탐사 수행	(‘30) 시간차 자료의 진폭의 NRMS 차 감소 (‘50) 저장소에서 구축된 현장 빅데이터 기반 시간차 자료 분석 자동화
세부 CO ₂ 지구물리 해저면 모니터링 기술	- 2차원 해저면 케이블(OBC) 탐사 수행	(‘30) OBC, OBN의 광폭 3차원 배열 탐사를 통해 고해상도 확보 (‘50) OBC, 광케이블 등 다중 탐사 융복합 기술 확보
세부 CO ₂ 지구물리 시추공 모니터링 기술	- 시추공 모니터링 최적화를 위한 수치 모델링 가능 - 현장자료 취득/분석 사례 전무	(‘30) 주입 CO ₂ 플룸 고해상도 이미지 확보 (‘50) 주입정 인근 지층 CO ₂ 플룸 실시간 영상 확보
세부 CO ₂ 수리지화학 관측공 모니터링 기술	- 실험실 코어 규모에서 CO ₂ 추적자시험 및 해석	(‘30) 해양 고갈가스전에서 추적자시험을 통한 CO ₂ 지중저장 모니터링 (‘50) 심부 대수층 저장소 대상 관측공 운영 및 수리지화학 모니터링 기술 확보
세부 CO ₂ 해양-대기 환경 모니터링 기술	- 해저면 근처 이산화탄소 정밀 탐색 기법 부재 - 인공추적자 분석을 위한 대기 및 해수 시료 채집 시스템 부재	(‘30) CO ₂ 분압과 자연/인공추적자 동시 연속 관측 (‘50) 무인/자동화 관측시스템 운용

세부기술 : CO₂ 지구물리 해상 모니터링 기술

- (기술정의) 해수면에 수진기를 배열하여 탄성파 신호를 기록하고 지중저장된 CO₂의 거동/부존/안정화를 확인/탐지하는 기술
- (필요성) CO₂가 안정적으로 저장되고 있는지 검증 필요

세부기술 : CO₂ 지구물리 해저면 모니터링 기술

- (기술정의) 해저면에 가설/부착된 탄성파 관측망으로부터 탄성파 신호를 기록하여 지중저장된 CO₂의 거동/부존/안정화를 확인/탐지하는 기술
- (필요성) 해저면 탄성파 탐사는 더 많은 물성 정보와 고해상도의 자료를 얻을 수 있고 수동형 탄성파(passive seismic) 탐사를 통해 실시간 모니터링이 가능함

세부기술 : CO₂ 지구물리 시추공 모니터링 기술

- (기술정의) 시추공에 설치된 탄성파/광섬유 센서배열에서 기록하고, 취득된 시간경과 자료를 분석하여 지중저장된 CO₂의 거동특성을 모니터링하는 기술
- (필요성) 일반 지표 탄성파 탐사에 비해 고해상의 자료를 얻을 수 있고 센서를 영구적으로 설치할 경우 수동형 탄성파 탐사를 통해 실시간 모니터링이 가능함

세부기술 : CO₂ 수리지화학 관측공 모니터링 기술

- (기술정의) 주입정에서 CO₂와 함께 다양한 화학추적자($\delta^{13}C$, SF₆, Kr, Xe 등)를 주입하고, 관측정에서 시간에 따라 심도별 유체 샘플링을 통해 추적자를 분석함으로써, 저장층에 주입된 CO₂가 저장층내에서 이동하는 것을 모니터링하고 검증하는 기술
- (필요성) 수리지화학적 변화를 관측함으로써 CO₂의 누출 여부를 파악할 수 있음

세부기술 : CO₂ 해양-대기 환경 모니터링 기술

- (기술정의) 이산화탄소 주입을 통해 발생할 수 있는 퇴적층의 화학적 생물학적 변화, 수층에서의 이산화탄소계 교란 및 생태계에 미치는 위해성을 모니터링/평가/관리하는 기술
- (필요성) CO₂ 누출에 의한 해양환경 및 생태계의 영향을 파악하는 것이 필수적임

라

기술확보 전략

● 소재-부품-장비 확보전략

- 해양 CO₂ 주입설비 소재, 부품 및 장비의 자립화 및 국산화
 - 대수심 해저 주입펌프 설계 및 테스트 시험
 - 해저 CO₂ 주입 및 통제라인 설계, 개발 및 설치 기술
 - 국내외 확대 적용을 위한 실증기반 Generic CO₂ 주입 플랫폼 개발
- 대규모 해양 CCS를 위한 CO₂ 수송선 건조
 - 고압 저온의 액화 CO₂ 화물창 소재 개발, 설계 및 최적 배치 시험
 - CO₂ 수송선 위험도 해석 및 유출 모델링을 통한 안전 설계 기준 도출
 - CO₂ 수송선의 Loading/Unloading 기술 및 선박내 CO₂ Boil-off 가스의 재액화 기술 실증
- 해양 지중저장소 CO₂ 모니터링 장비 및 소재 개발을 위한 테스트베드 구축
 - 해양 CO₂ 모니터링 장비 테스트를 위해 해안에서 가까운 연안에 테스트베드 구축
 - 테스트베드 활용 CO₂ 모니터링 비용 절감 및 성능향상을 위한 신소재, 센서(예, 광케이블, OBN, OBC 등) 등의 개발 및 성능시험

● 시스템 확보전략

- 포집원 다변화 및 CCU 활성화 기반조성을 위한 권역별 CO₂ 허브 터미널 시스템 구축
 - 권역별 배출원, 잠재적 포집원, 저장소, 활용산업 등을 분석한 권역별 허브터미널 위치 도출 및 부지 조성
 - 기존 인프라 용도 전환 및 재활용 건전성 평가를 통한 효율적인 CCUS 인프라 시스템 구축
 - 허브시스템의 효율적으로 운영하기 위한 허브터미널 관리센터 구축 및 관리 운영시스템 개발
- 대용량 CO₂ 수송을 위한 액화/주입/운송 시스템 구축
 - CO₂ 상온 및 저온 압축 액화 공정시스템 구축
 - 액화 CO₂ 정제 및 고압 송출 펌프 시스템 설계 및 구축
 - 기존 인프라 용도 전환 및 재활용 건전성 평가를 통한 효율적인 CCUS 인프라 시스템
 - 허브시스템의 효율적으로 운영하기 위한 허브터미널 관리센터 구축 및 관리 운영시스템 개발

- 국내 지구물리 탐사 인프라를 활용한 CO₂ 저장소 탐사기술 고도화
 - 한국지질자원연구원, 한국해양과학기술원 및 대학 등에서 보유하고 있는 탐사선을 적극적으로 활용하여 탐사기간을 단축하고, 국내 전문인력 확보에 노력
 - 노후화된 탐사 시스템 및 자료처리 시스템을 고도화하여 양질의 탐사자료 확보
 - 기존 및 신규 탐사자료는 해양 CCS 사업의 근간이 되는 핵심 자료로 취득에서 정보생산의 단계를 체계적으로 관리할 수 있는 시스템 구축
- 저비용/고해상도 CO₂ 모니터링 시스템 확보
 - 신호대잡음비를 획기적으로 향상시킬 수 있는 지구물리/지화학 모니터링 시스템 개발 및 실증 수행
 - 모니터링 시스템을 장기 운용함에 따라 대량의 모니터링 정보들을 신속하게 처리할 수 있는 처리능력의 향상이 필요하며, 인공지능을 이용한 빅데이터 처리 시스템과 연계하여 추진
 - 해외 의존도가 높은 고가의 CO₂ 모니터링 시스템의 경우 자립화를 조속히 추진할 수 있도록 선택과 집중
 - 국내외 실증부지(동해가스전 등)를 활용한 모니터링 시스템의 성능 테스트와 이행 실적 확보에 주력
- CO₂ 지중저장 안전성 확보가 가능하도록 CO₂ 주입 시설/시스템 확보
 - 저장 안전과 관련된 한계 및 장애 기술을 조기에 극복할 수 있도록 해외 선진기술 도입 및 확산, 국내 산업계 보유 장점 기술 고도화 및 실증에 주력
 - 해양 주입정 시추 및 완결의 경우 국내 산업계 전문인력 양성과 이행실적 확보를 통해 국내 해양 시추산업의 기반을 다질 수 있도록 생태계 조성
- 산업계 맞춤형 CO₂ 저장소 구축기술 개발
 - 해양 플랜트, 주입시설, 해저 배관 등을 구축하고 관리하는 기술의 경우 국내 산업계의 기술 수준이 상대적으로 높은 만큼 해양 CCS 산업현장에서 장애가 되는 기술을 발굴하여 맞춤형으로 연구개발 추진
- 국내외 실증(Scale-up) 방안
 - 해양 지중저장소 CO₂ 모니터링 장비 개발을 위한 실증부지 구축
 - 해양 CO₂ 모니터링 장비 테스트를 위해 해안에서 가까운 연안에 실증부지 구축
 - 실증부지 활용 CO₂ 모니터링 비용절감 및 성능향상을 위한 신소재, 센서(광케이블, MEMS 등) 등의 개발 및 성능 검증
 - 실증부지 활용 주입시설, 해저배관, 주입정 구축 시 안전성 확보와 관련된 소재와 부품의 개발 및 성능 검증

- 2030년 국내 대륙붕에서 운용될 것으로 예상되는 동해가스전 저장소, 국내 대륙붕 대규모 CO₂ 지중저장소 활용 장기간 기술 실증
 - 동해가스전 저장소, 대규모 CO₂ 지중저장소 저장 및 모니터링 설계, 설비/시설 설계 단계에서 관련 기술의 실증이 가능하도록 반영
 - 모니터링 시스템, 주입시설, 해저배관 및 주입정 부품/소재에 대한 장기간 운영 실적을 확보하여 성능 개선에 활용
- K-CCUS 추진단 중심의 해외 실증사업 추진 및 핵심 요소기술 실증 지원
 - 2030년부터는 국내에서 축적된 이행실적을 바탕으로 동남아, 북미 및 유럽의 CO₂ 지중저장 사업에 기술 이전 및 상업적 기술 서비스가 가능하도록 실증사업을 체계적으로 추진

● 기반구축 방안

- (인력양성) 한국에너지기술평가원 CCUS 인력양성 사업, K-CCUS 추진단 CCUS 교육 프로그램, 한국지질자원연구원 인재개발센터 CCUS 국제 프로그램 등 기존 인력양성 프로그램 지원과 신규 프로그램 개발을 통한 국내외 인력양성 추진
- (인프라 활용) CCS 관련 현장 실무 능력을 배양할 수 있도록 국내외 실증부지 적극 활용
 - 공주대학교 및 한국지질자원연구원 실증부지, 한국생산기술연구원 CO₂ Loop 등의 기존 인프라 적극 활용 및 지원
- (국제협력) 국내 CCS 실증부지 활용 해외 전문기관의 CCUS 실증사업을 유치하고, 국내외 산학연 연계 국제 협력 프로그램 발굴
- (법·제도 개선) 국내 대륙붕 저장소 확보 및 CCS 관련 기술개발을 위한 해양 탐사, 시추, 장비 구축, R&D 시설투자 시 세액공제 확대를 위한 조세특별법 개정, 특별용자사업 추진 등 검토

마

탄소중립 기여 효과

● 탄소중립 기술과의 연계성

- 지하 하부에 CO₂를 저장하는 CCS는 포집, 수송, 저장의 전 과정에 해당하는 종합적인 기술 분야로 단일 기술로는 가장 큰 온실가스 감축 기여도를 갖는 기술로 평가되고 있고 배출된 CO₂를 포집하여 안전하게 제거(저장)하는 현실적으로 유일한 사후 감축 방안임
- 화석연료를 이용한 발전이 점진적으로 감소하는 추세이지만 저탄소 에너지로의 구조적 전환은 장기간 대규모 투자가 필요하므로 가교기술로서 전환에 따른 부작용 완화에 기여
- CO₂ 수송기술은 대규모 CO₂ 장거리 수송시스템의 설계, 설치, 운영에 대해 분석·검토하여 효율적이고 안정적인 운송수단을 개발함으로써 효과적인 CCS 공정을 구축할 수 있고 CO₂ 전용 수송선박 건조나 FPSO형 CO₂ 수송-주입복합선 건조 기술은 더욱 다양한 사업개발 모델을 제시할 수 있음
- CO₂ 저장소 탐사기술은 추가로 CO₂를 주입할 수 있는 저장소를 탐사·선정하는 기술로 CO₂ 배출량에 비해 부족한 대규모의 저장공간을 확보하는 문제를 해결하는 측면에서 지속해서 CCS 사업개발을 추진할 수 있도록 하는 중요한 요소임
- CO₂ 저장 구축·주입기술은 저장소의 구조 안정성 및 장기 저장능력 확보를 위해 다양한 주입 시나리오 하에서 정적·동적 저장용량을 정량적으로 예측하여 시설설계에 충분한 여유를 확보하여 주입압력 상승에 대비하고, 저장소 모델 구축을 통해 압력상승에 따른 단층 또는 덮개암 파쇄에 대한 안정성 평가 기술을 확보함으로써 안정적인 저장소 운영을 통해 탄소저감에 기여할 수 있음
- CO₂ 저장 모니터링 기술은 주입 현장에 각종 센서 설치와 모니터링 탐사를 통해 주입한 CO₂의 거동 및 누출에 따른 환경영향을 관측하는 기술로 저장소들의 완결성과 저장 안정성을 보증하기 위해서는 해당 기술의 활용이 필수적이고 사회적 수용적 확보 측면에서 중요한 역할을 함

03

시장수요/온실가스 감축이 가능한 CCU 제품 및 공정 조기 상용화(활용)

가

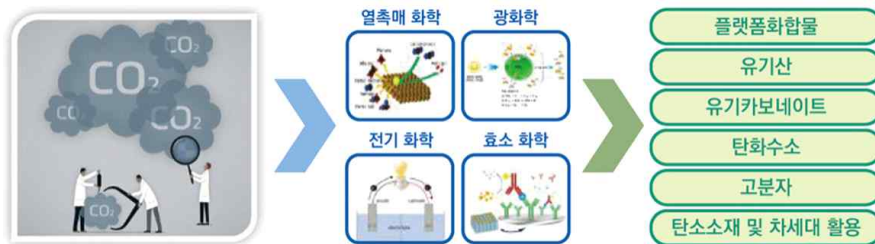
전략방향 대상정의

개념 및 범위

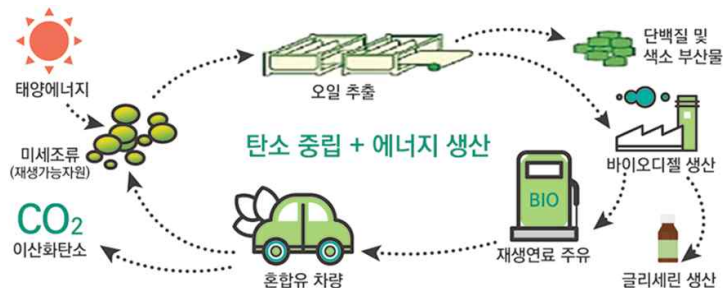
- 에너지, 산업공정 등에서 배출되는 CO₂를 직접 또는 간접 전환하여 잠재적 시장가치가 있는 제품으로 활용하는 기술로서, 개발 필요성, 시급성이 크고 신시장 창출이 가능한 CO₂ 활용 제품에 집중(화학적 전환, 생물학적 전환, 광물 탄산화로 구분)
- 공업용, 식음료용 및 농업용 산업가스 등 액화탄산 형태로 활용하거나 원유회수증진(EOR) 기술 등의 직접 활용 기술이나 제품은 제외
- CO₂ 유래 연료(Fuels), 화학물질(Chemicals) 및 건축자재(Building materials) 제조 기술개발을 중심으로 최근 몇 년간 국내는 물론 전 세계적인 높은 관심을 불러일으키고 있는 기술과 제품의 자립화에 집중
- 가능한 기존공정 변경을 최소화하면서 시장성이 있는 제품을 제조하는 기술 우선

CO₂ 활용 기술의 분류와 개념

(화학적 전환)



(생물학적 전환)

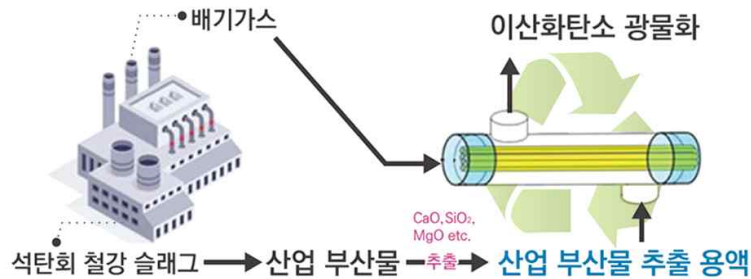


출처 : (화학적 전환) 한국화학연구원 환경자원연구센터

(생물학적 전환) "해양 미세조류를 이용한 바이오디젤 2019년 상용화", <KDI 경제정보센터, 경제정책해설 2015년 8월호>

CO₂ 활용 기술의 분류와 개념

(광물 탄산화)



출처 : 박진석, “[사이언스] 초투과성 분리막을 이용한 CO₂ 전환시스템 개발 비용 ↓ 효율 ↑”, 특허뉴스(2020. 05. 14)
<http://www.e-patentnews.com/7097>

● 기술적 요구사항

• (화학적 전환)

- 다양한 기술적 경로 탐색을 위주로 원천연구가 이루어지고 있으나 중·대규모 실증 연구로 연계되지 않아 상용화를 위한 사례가 미흡하므로 기 확보된 기술의 실증 연구 강화 필요
 - * 열촉매적 전환을 통한 합성가스, 메탄올, 유기카보네이트 및 개미산(전기화학) 생산 등은 소규모 실증 연구 수준
- 열역학적 한계로 인해 대체로 석유화학제품 대비 높은 공정·에너지 비용이 필요하므로 극복할 수 있는 타 분야와의 융합 기술 등 필요
- 탄소중립 기술 수요*를 고려한 탄소순환 등 핵심기술 연구 필요
 - * 효율적 재생에너지 저장 기술, 석유화학산업 나프타 원료 대체 기술 등

• (생물학적 전환)

- 균주의 CO₂ 전환율(고정화율)이 낮고, 저농도 미세조류 배양으로 인하여 바이오매스 회수 공정(수확 및 건조)의 에너지 소비 과다 등을 극복할 수 있는 기술 필요
- 생산된 바이오매스를 유용제품으로 활용하는 산업화 연구 활성화를 위한 컨소시엄 구성 등 기술 수요 확보 필요

• (광물 탄산화)

- 선진국대비 CO₂ 광물화 반응생성물의 제품화* 연구가 부족하고 제품 산업적 활용처가 불분명하므로 활용처에 대한 맞춤 기술개발 필요
 - * 시멘트·콘크리트 대체제, 건설소재 등으로 저·고농도의 CO₂를 양생·반응에 활용, 온실가스 감축 및 CO₂ 고정화율 향상 등
- 간접탄산화 기술은 산업부산물 내 유효성분(양이온) 추출 등으로 전체 공정·에너지 비용이 많이 들어 산업 내 적용 한계를 극복할 수 있는 기술 투자가 필요
- 가용 산업부산물별 저에너지 추출기술 및 최종 탄산염 제품의 고부가가치화 핵심기술 개발 필요

나 전략방향별 핵심기술

CCUS		시장수요/온실가스 감축이 가능한 CCU 제품 및 공정 조기 상용화(활용)							
핵심기술	Baseline	단기				중기			목표
		2022	2023	2024	2025	~2030	~2040	~2050	
화학적 전환	최고수준 촉매 및 공정 개발 중이며 pilot 수준 • (합성가스) 데모 실증단계 (20톤/년 규모 완료 후 격상) (메탄올) 실증단계 (10톤/년 규모 완료) • 실증단계 (20톤/년 규모 완료) • 실증단계 (2톤/년 규모 완료) • 실증단계(알파 올레핀 1단계 실증규모 완료) • 실증단계(100kg/년 규모 완료 후 격상)	(사)플랫폼화합물 제조	→				(사)상용급 실증		<ul style="list-style-type: none"> 기술 상용화 및 국산 기술 보급 확대 바이오 융합 유기산 제품 상용화 카보네이트 제품 상용화 연 150만톤 이상 납사유 제품 상용화 고분자 제품 상용화 탄소 소재 제품 상용화
		(사)유기산 제조	→				(사)상용급 실증		
		(사)유기카보네이트 생산	→				(사)상용급 실증		
		(사)탄화수소류 생산	→				(사)상용급 실증		
		(사)고분자 제조	→				(사)상용급 실증		
		(사)탄소소재 및 차세대 활용기술	→				(사)상용급 실증		
생물학적 전환	• 바이오매스 생산단가 \$2.0/kg 수준 • 바이오디젤 생산단가 \$10.0/L 수준, 항공유 생산단가 \$10.0/L 수준 • 발전용 수소연료: lap 규모 원천기술	(사)바이오매스(BM) 생산	→				(사)실증	(사)상용급 실증	<ul style="list-style-type: none"> BM 생산단가 \$0.4/kg, 배가스 기준 CO₂ 전환율 60% 기존제품대비 가격경쟁력 확보 생산 비용 저감
		(사)바이오연료화	→				(사)실증	(사)상용급 실증	
		(사)바이오소재화	→				(사)실증	(사)상용급 실증	
광물 탄산화	• 포집량 7만 t-CO ₂ /년, 포집/압축비용 \$45/t-CO ₂ • CO ₂ 활용한 흡착반응기술은 국내 연구 미미 • CO ₂ 광물화 반응 파일럿 플랜트 실증 추진	(사)콘크리트재료혼합공정중 CO ₂ 흡착 및 CaCO ₃ 고정화	→						<ul style="list-style-type: none"> CO₂ 활용 15천톤/년 규모 기술 상용화 CO₂ 활용 약 70만톤 (40% 대체 기준) 기술 상용화 (3만톤/년 이상 규모)
		(사)CO ₂ 반응경화저온소성특수시멘트 제조 및 양병	→				(사)상용급 실증		
		(사)무기탄산계 화합물 제조	→				(사)실증	(사)상용급 실증	

범례 (소): 소재, (부): 부품, (장): 장비, (사): 시스템 [진행중 기술] 기초/원천 R&D 응용 R&D 실증/상용화 R&D [개발할 기술] 기초/원천 R&D 응용 R&D 실증/상용화 R&D

다

핵심기술 개요

핵심기술 1 • 화학적 전환기술

● 기술개요

(개요)

- 화학적 전환 기술은 CO₂를 유용한 자원으로 재활용하여 범용 사용하거나 부가가치가 높은 물질 (Value-added Compounds)로 제조하는 것이 가능하며, 원유를 통해 제조되는 제품을 대체하여 온실가스 배출을 줄이는 효과가 있는 기술

(필요성)

- 선택과 집중을 통하여 기획보된 우수 기술의 실증 연구를 강화하여, 적극적 상용화 성공사례 창출이 시급
- 동시 포집·전환기술, 화학-바이오촉매 융합기술, 기존공정·시스템 연계 기술 등 기술간 융합을 통한 공정효율화 및 경제성 확보
- 재생에너지 유동성 연계, 화학 원료·제품 대체를 위한 CO₂ 활용 핵심 원천기술 개발

● 기술 동향

(해외)

- 미국 연방 정부의 에너지부(Department of Energy, DOE)는 CO₂ 전환기술을 미래 기술로 선정하여 많은 R&D 투자를 지원하고 있으며 특히 민간기업의 CCU 기술개발을 적극 추진 중임
 - 코네티컷대학교와 Catelectric Advanced Electrocatalysis社は 아연산화물을 이용한 CO₂의 연료 전환기술을 개발하고, 파일럿 규모의 연구를 계획 중임
- 미국의 Sandia National Lab은 2010년부터 태양광과 CO₂를 이용한 석유 대체 합성 디젤연료를 제조하는 Sunshine to Petrol 프로젝트를 진행 중임
 - 농축 태양열 에너지 기반의 산학연 컨소시엄인 이 프로젝트는 태양열을 집적하여 CO₂와 물을 열화학적으로 전환하고, 합성가스와 같은 플랫폼 화합물을 제조하여 디젤 연료와 같은 고부가 탄소화합물 제조에 활용하는 기술임
 - 본 기술을 통해 발전소 등과 같은 CO₂ 대량 배출원에서 직접 전환이 가능한 상용기술의 개발을 목표로 하고 있으며, 현재 태양열 개질 시스템은 캘리포니아 새크라멘토에서 실증 연구가 지속될 예정임

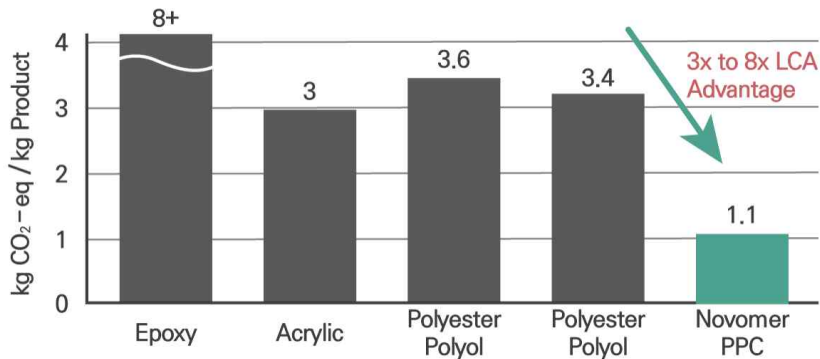
샌디아 국립 연구소의 태양열 활용 CO₂ 전환 기술개요 (Sandia National Laboratories)



출처 : "Alliance Formed to Commercialize Solar Reforming Technologies to Convert Waste CO₂ into Synthetic Fuel" (Green Car Congress) 2010. 06. 01, <<https://www.greencarcongress.com/2010/06/s2p-20100601.html>>

- 미국의 Lawrence Berkeley National Lab.은 DOE의 지원을 받아 2011년 Caltech와 함께 인공광합성 공동연구센터를 설립하고 물, CO₂, 햇빛으로부터 가솔린 대체 연료를 제조하는 기술을 연구 중임
 - 광촉매를 사용해 태양광을 직접 에너지로 이용하거나, 전기화학 촉매를 사용해 태양광으로부터 생산되는 전기를 이용하는 등의 기술을 포괄하고 있으며, 현재 2단계 사업까지 추진되었음
- 미국의 대표적인 CO₂ 이용 고분자 제조기술로는 노보머社에서 개발한 폴리올과 폴리프로필렌 카보네이트, 폴리에틸렌 카보네이트 제조기술임
 - 균일계 촉매인 코발트 기반의 Salen 촉매를 개발하여 2009년부터 시험생산을 하였음
 - 노보머社에서 개발한 폴리우레탄용 폴리프로필렌 카보네이트의 제품명은 컨버지(converge®)로, 컨버지는 코팅 및 접착, 밀폐제, 탄성중합체 적용 제품 등에 사용되는 기존의 석유화학 기반 폴리올의 지속 가능한 대체재로 높은 가치를 지니고 있음
 - 컨버지 폴리올의 경우 탄소를 최대 50%까지 함유하고 있으며, 전 과정 평가 결과 일반적인 폴리에테르 및 폴리에스터 폴리올 대비 CO₂ 배출량이 1/3 수준에 불과한 것으로 보고되고 있음.(S. Waddington, 2014)
 - 컨버지 폴리올을 발포제로 사용하면 기계적 강도 및 인열 강도, 내하중 성능 등이 향상되고, 기존 폴리올 대비 연소열이 40% 감소하여 엄격한 인화성을 요구하는 용도로의 활용에 이점을 가진 것으로 알려져 있음
 - 노보머社에서 개발된 컨버지 제품 라인 및 관련 운영 기술은 2016년 11월에 사우디 아람코(Saudi Aramco) 사에 1억 달러에 인수되어 글로벌 사업을 추진하고 있음

Novomer社에서 개발한 폴리올의 CO₂ 저감효과



출처 : "High Performance CO₂-based Polyols for Polyurethane Applications" NOVOMER <http://b-dig.iie.org.mx/BibDig2/P13-0601/docs/Peter%20Shepherd_pres.pdf>

- 독일의 코페르니쿠스 프로젝트(Power2X)는 재생에너지 시스템을 산업적 수준으로 구성하는 프로젝트로서, 과학계와 산업계의 협업을 통하여 네 개의 주제로 진행되고 있음
 - 첫째는 과잉 생산된 재생에너지를 다른 에너지 형태로 전환하여 저장, 둘째는 재생에너지 효율을 높이는 전기 그리드 개발, 셋째는 전원공급의 산업 과정 재구조화, 넷째는 재생에너지와 기존에너지의 연결로 구성됨
 - 2025년까지 재생에너지로부터 메탄올, FT 연료, 고급 알코올 생산 등을 데모플랜트 규모로 실증하는 것을 포함, 성공적인 에너지 전환을 목표로 연구를 추진하고 있음

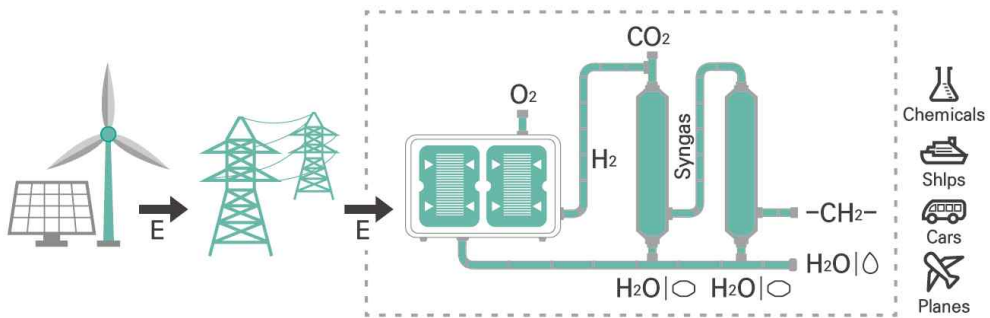
독일의 코페르니쿠스 프로젝트



출처 : Kopernikus project 홈페이지

- CO₂로부터 액상 탄화수소를 얻는 기술 중 가장 상용화에 가까운 기술로 독일 Audi 社의 e-diesel 프로젝트를 들 수 있음
- 협력사인 Sunfire 社의 Solid oxide electrolyser cell(SOEC) 기술을 이용해 고온에서 물을 전기분해하여 얻은 수소로 CO₂와 합성가스를 만든 후 저온의 피셔-트롭시 합성 반응으로 긴 사슬의 탄화수소를 제조하는 다단 간접전환 방식임

독일 Sunfire 社의 Power-to-Liquids 공정 모식도

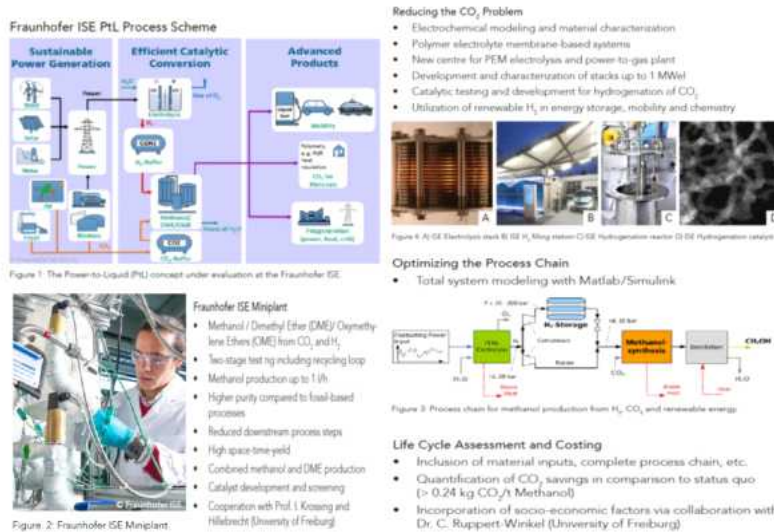


출처 : Sunfire 홈페이지

- 본 기술은 풍력과 같은 재생 전기에너지를 이용해 물을 전기분해하여 수소를 얻고, 이를 CO₂ 환원에 이용함으로써 이론적으로는 물과 CO₂, 에너지만을 필요로 하는 청정기술임
- 고온의 SOEC 및 RWGS 반응을 위해서는 기본적으로 많은 양의 에너지가 필요할 뿐만 아니라, 유동적으로 공급되는 재생 전기에너지의 특성을 고려할 때, 예열 등의 준비를 위해 비효율적으로 소비되는 에너지가 많다는 단점이 존재함
- 고온에서 동작하는 흡열반응인 RWGS의 후단에 배치되는 FTS는 비교적 저온에서 동작하는 발열반응으로써, 온도 차이가 심해 에너지 효율성이 떨어질 수밖에 없으며, 이에 따라 실질적인 CO₂ 감축 효과를 감소시킬 것으로 판단됨
- Sunfire 사는 상기 공정을 활용하여 2021년 노르웨이 Heroya에서 연간 8,000톤을 생산할 수 있는 PtL 공정을 상용화하겠다고 발표한 바 있으며, 이때 20MW의 전력을 사용하게 되고, 연간 CO₂ 저감량은 21,000톤이 될 것으로 예상하였음
- 독일의 Fraunhofer 연구소에서는 HyCO₂ 프로젝트에서 재생에너지 기반 수소를 CO₂와의 반응을 통해 메탄올, 디메틸에테르, 옥실메틸렌에테르 등을 생산하는 과제를 2015년부터 3년 동안 진행하였음
- 변동성이 있는 재생에너지에 적합한 PEM 방식의 수전해 기술을 기반으로 한 수소 생성 기술과 수소 및 CO₂로부터 메탄올을 생성하는 기술을 시간당 1리터 규모로 개발하였음

- 해당 기술은 1톤의 메탄올 생산 기준 약 0.24kg 이상의 온실가스 감축 효과가 있는 것으로 확인되었음

독일 Fraunhofer 연구소의 HyCO₂ 프로젝트

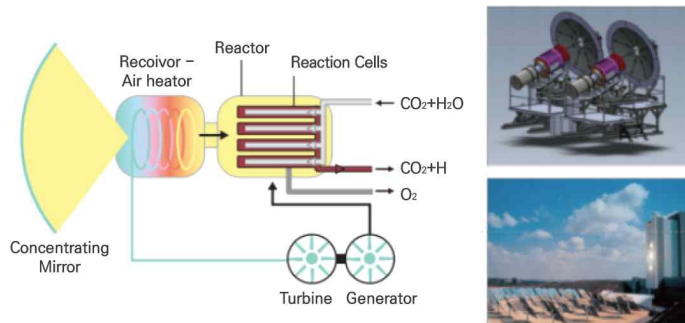


출처 : “HyCO₂ – Liquid Energy Storage, Chemicals, and Fuels from CO₂ and H₂” <Fraunhofer> <<https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/hyco2.html>>

- 독일 EnBW(전력기업), 하이델베르크대학교, 칼스루에공대(KIT) 등은 공동으로 광촉매 공정을 통해 태양에너지로 CO₂와 물을 반응시켜 메탄올을 생산하는 ‘Solar2Fuel’ 프로젝트를 추진하였음
- 독일은 이외에도 천연가스를 이용한 열에너지 사용 망을 구축하기 위해 신재생에너지로 생산된 전기에너지를 수소생산 및 CO₂ 환원에 사용하여, 메탄 형태로 전환한 후 이를 공급하는 CO₂ 개질 기술 개발하고 있음
- 재생에너지를 이용하여 CO₂를 탄소원으로 활용, 전환하는 독일의 CO₂ RRECT 프로젝트는 Dream Production 및 신재생 화학에너지 저장기술을 포괄하는 미래 기술을 연구하고 있음
- Bayer, RWE, Siemens 및 막스플랑크 연구소와 10여 개 대학이 공동으로 참여하는 대형 미래 기술개발로 CO₂ 포집/분리, 신재생에너지 활용 수소생산, CO₂ 촉매 반응에 의한 전환기술 개발, 소재 개발 및 경제성 분석을 포괄하고 있음
- 본 프로젝트는 2020년 이후 현실화를 목표로 하는 장기 프로젝트로 진행되고 가시적 성과 없이도 지속적인 지원을 보장받고 있으며, 독일의 CO₂ 활용 전략의 핵심 가치가 포함되어 있음
- 본 프로젝트는 요소 기술별 목표가 명확하게 설정되어 있으므로 다양한 파생 기술로 인한 성과를 기대할 수 있고 CO₂ 전환기술은 주로 RWGS 반응을 통한 CO 생산 및 CO₂ 건식 개질을 통한 CO 생산에 집중하고 있음

- 재생에너지를 활용한 CO₂에서 액체연료를 생산하는 기술 중엔 태양열을 직접 이용한 Solar-to-Liquids 프로젝트도 추진된 바 있음
 - Oxygen vacancy가 있는 반응성이 큰 금속산화물을 물과 CO₂와 함께 반응해 산화시켜 물은 수소로, CO₂는 CO로 환원하여 합성가스를 만들고, 그 후 산화된 금속산화물을 고온의 태양열을 집적해 다시 환원시키는 루핑 시스템 기술임
 - 이스라엘의 NCF 프로젝트(New CO₂Fuels)는 위의 프로세스를 개발하여 메탄올을 합성하는 공정을 추가로 개발하였고, 이때의 전환 효율은 40%에 도달하는 것으로 확인하였음

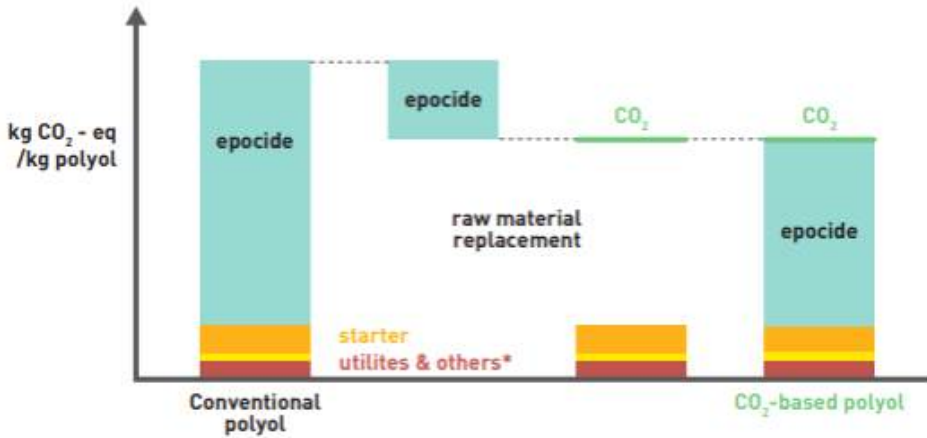
이스라엘의 NCF프로젝트 개념도



출처 : NCF 홈페이지

- 유럽에서 CO₂ 기반 고분자 화합물 제조 기술 분야에 대해 가장 기술적으로 성숙한 기업은 바이엘 그룹의 코베스트로(Covestro)이며, 화장품에서부터 자동차, 건축, 전자제품 등 다양한 화학제품의 원료 물질을 세계 각국에 공급하고 있음
 - 바이엘 그룹은 CO₂ 유래 폴리우레탄 및 폴리카보네이트 물질에 관한 연구를 선도적으로 추진하였으며, 코베스트로는 폴리우레탄의 원료인 폴리올을 CO₂가 포함된 폴리올로 대체 적용하고자 이중금속시안염 촉매 기반의 자체 기술을 개발하였음
 - 독일 정부지원 하에 2005년 시작된 ‘Dream Production’ 프로그램에 추진해왔으며, 2011년부터 Pilot Plant 연구사업을 추진하고, 2016년부터 데모급 플랜트를 가동하고 있으며, 현재 유럽지역 내에 ‘CardyonTM’이라는 상품명으로 제품 판매를 시작하였음
 - 코베스트로의 특허는 대부분 폴리올/폴리카보네이트 제조기술에 관한 것으로 알려져 있으며, 최근에는 바이오매스 유래 폴리우레탄 절연품 생산기술 개발을 계획하고 있어 향후 바이오매스 및 CO₂ 유래 폴리우레탄이 생산될 것으로 기대되고 있음(한국화학연구원, 2018)
 - 코베스트로는 CO₂ 함유 폴리올 생산기술의 전 과정 평가를 통해 기존 상용 폴리올 대비 약 20%의 CO₂ 감축 효과가 있다고 보고하고 있음(A. Prokofyeva, and C. Gurtler, 2014)

Covestro사 폴리올의 CO₂ 저감 효과



출처 : “이산화탄소 전환 (CCU) 기술백서” <한국화학연구원>

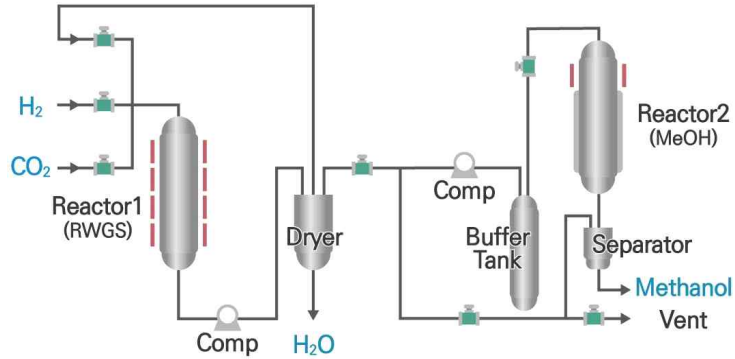
- 에코닉 테크놀로지(Econic technology)社は 폴리올과 폴리우레탄 등 다양한 고분자 화합물을 만들기 위하여, 폴리올레핀과 CHO(Cyclehexeneoxide)의 에폭시 공중합을 촉진하는 마그네슘 기반 촉매에 관한 연구개발을 상용화 단계에 진입하였음
 - 폴리올 균일계 촉매를 사용하여 CO₂ 함량이 높은 폴리올을 제조하는 데 성공하였고 현재 개발된 기술을 상용화하기 위해 관련 기업들과 협의 중인 것으로 알려져 있음
- 대부분 CO₂ 전환 화학 원료 생산기술의 경우, 현재 상용화 단계에 진입하지는 못한 실정이나 메탄 등의 환원제를 활용한 CO₂ 개질 반응에 의한 일산화탄소 및 합성가스 제조 관련 연구는 활발히 진행되고 있음
 - CO₂ 개질 반응을 위한 다양한 촉매들이 개발됐으며, 현재 니켈 및 코발트 계통이 CO₂ 개질 반응에 높은 활성을 나타내는 것으로 보고되고 있음
 - CO₂ 개질 반응은 기존의 메탄 수증기 개질과의 공정 유사성으로 인해 상용화가 상대적으로 높은 것으로 평가되고 있으나, 상대적으로 높은 반응 온도를 요구하는 점과 촉매의 장기 안정성 등이 주요한 기술적 이슈로 알려져 있음
 - 독일 린데(Linde)社에서 건식 개질 기술 실증을 위한 파일럿 규모의 개질 설비를 건설한 바 있으며, 천연가스를 이루는 핵심 성분인 메탄과 CO₂를 결합해 일산화탄소와 수소로 구성된 합성가스를 생산하는 기술을 실증하였음
 - CO₂ 수소화 반응에 기반을 둔 개미산 제조 기술은 BASF, BP 등의 글로벌 화학기업 및 독일 아헨공대와 같은 주요 대학에서 연구가 수행되고 있으며 주로 균일계 촉매를 활용하여 공정을 개발하였으나, 촉매 회수 등의 이슈로 상용화 수준에는 이르지 못한 것으로 알려져 있음
 - 캐나다 Mantra社에서는 CO₂ 기반 개미산 제조를 위한 전기화학 시스템에 관한 연구도 일부 수행하여 성과를 도출했고, 주로 기업, 대학을 중심으로 연구를 수행하고 있음

- 미쯔이케미컬社は 자체 석유화학 플랜트에서 방출되는 CO₂를 포집하여 수소와 반응시키는 메탄올 생산기술을 개발하고 있음
- NKK社は CO₂로부터 메탄 개질 반응을 통해 DME 합성 공정을 개발하고, 2002년 파일럿 운전을 시작하였음
- 일본 JFE社は CO₂의 개질 반응을 통해 합성가스 또는 일산화탄소를 생산하는 기술을 개발하였고, 이를 이용한 화합물 합성 공정을 개발 중임
- 일본 S. Sato 연구팀(Toyota Inc.)은 SC의 혼성광촉매 반응을 이용한 CO₂ 전환 연구 결과를 발표하였음
 - H₂O 분해 촉매인 Ta₂O₅ 나노 입자가 가시광선을 흡수하여 발생한 전자를 루테늄 착물에 전달하고, 이때 CO₂를 HCOOH로 전환하며 효율은 75%를 나타내며 선택적 환원임을 확인하였음

(국내)

- 한국은 2000년을 전후로 온실가스 저감 기술 개발사업, CO₂ 저감 및 처리 기술 개발사업, 기후변화협약 기반구축사업 등 다양한 정책적 지원을 통해 CO₂ 저감 기술개발 연구가 이루어지기 시작함
 - 선진국과 비교했을 때 아직 기술개발이 미진하고, 기초 연구 단계 머물러 있어 상업적 시장 형성에는 시간이 걸릴 것으로 전망함
- 국내에선 Korea CCS 2020 사업을 통해 CO₂ 포집 및 처리에 관한 포괄적인 기술개발이 이루어져 왔음
 - CO₂를 직접 수소화하여 액상의 탄화수소를 생산하는 과제는 수행된 바 없으나, 피셔-트롭시 전 단계인 합성가스를 제조하는 기술개발은 주로 전기화학 반응을 대상으로 수행되었음
 - CO₂ 수소화와 유사한 기술인 Gas-to-Liquids(GTL) 및 Coal-to-Liquids(CTL) 등의 연구사업이 한국화학연구원, 한국에너지기술연구원 등에서 수행된 바 있음
- 한국화학연구원에서는 Fe계 촉매를 이용해 CO₂를 탄화수소로 만드는 기술을 파일럿 규모의 실증 연구로 추진한 바 있으나, CO₂ 전환율 및 C₃₊ 선택도의 향상 등 기술 고도화가 더욱 필요한 상황이며, 아울러 재생에너지 연계가 가능한 촉매 및 통합 공정 개발 역시 필요함
- 액상 탄화수소 이외에 CO₂에서 합성가스를 거쳐 메탄올을 제조하는 간접반응공정은 높은 수준의 기술성숙도를 나타내고 있음
 - CO₂와 수소를 높은 온도에서 반응시키는 역수성 가스반응으로 합성가스를 제조한 후, 이를 메탄올 합성반응에 이용하는 간접 다단 반응 기술은 한국과학기술연구원에서 TRL 6단계의 파일럿 스케일로 수행한 바 있음

CO₂로부터 메탄올 합성 공정 모식도

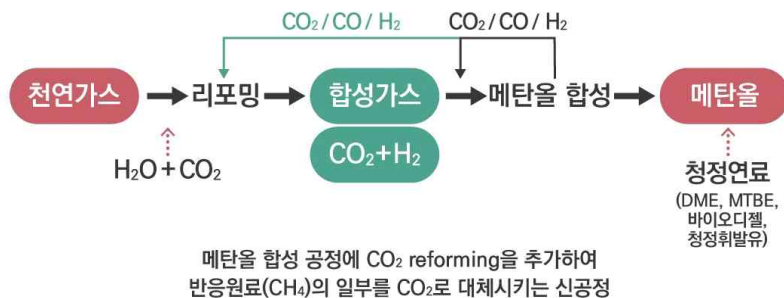


출처: KIST “CO₂로부터 하루 50kg 이상 메탄올합성 실증공정개발”

- CO₂를 천연가스 및 수증기와 복합 리포밍 반응에 사용하고, 이로써 생산되는 CO/CO₂/H₂ 합성가스를 메탄올 합성에 이용한 공정은, KRICT에서 10톤/day 급의 Demo Plant를 건설하여 1,000시간 운전 성공한 바 있음(TRL 6~7)

천연가스 및 CO₂로부터 메탄올 합성 공정 모식도

▪ New Methanol Process

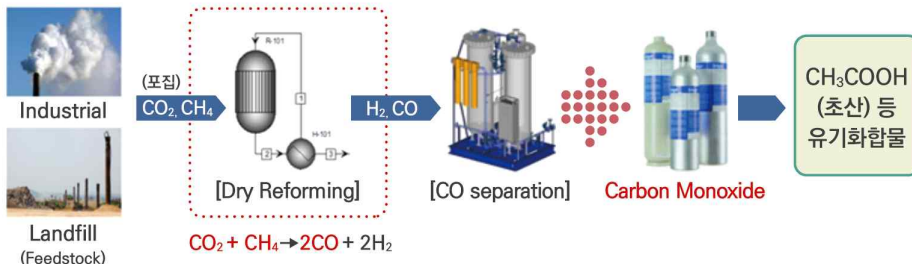


출처: “이산화탄소 전환 (CCU) 기술백서” <한국화학연구원>

- 합성가스를 거치지 않고 CO₂를 수소화하여 메탄올을 제조하는 직접반응 기술은 촉매연구 만이 일부 보고될 뿐, 직접 반응공정연구와 후속 실증 연구는 아직 추진되지 않았음
- 한국가스공사에서는 CO₂ 개질 공정에 의한 메탄올/디메틸에테르(Dimethyl Ether, DME) 제조 공정을 개발하여 데모 플랜트를 운전한 바 있음
- 한국화학연구원에서는 기관 주요 사업, 과기부, 산업부 지원으로 1990년대부터 다양한 화학제품, 연료, 고분자 등 CO₂ 활용 탄화수소 제조기술을 개발하기 시작하였음
- 디메틸에테르(Dimethyl Ether, DME), 메탄올, 디메틸카보네이트(Dimethyl Carbonate, DMC), 합성가스 및 일산화탄소, 개미산, 초산 등의 다양한 CO₂ 유래 화학물질 생산원천기술 개발연구를 수행해 왔음

- 기관 주요 사업으로 합성가스(또는 일산화탄소)는 석유화학 및 정밀화학 공정에 공급하는 원료를 대체할 수 있는 중요한 플랫폼 화합물로서, CO₂ 전환 합성가스(또는 일산화탄소) 기술 상용화 연구가 집중적으로 추진되었음
- 기술개발 역량을 토대로 2013~2017년에는 산업부 지원으로 합성가스와 초산을 생산하는 20톤/년 규모의 파일럿 플랜트 실증사업을 성공적으로 수행한 바 있으며, 해당 기술은 현재 (주)부흥산업사의 주도하에 울산 산업단지 내에서 5,000톤/년 규모의 데모 플랜트 실증사업으로 발전하여 추진하고 있음
- CO₂와 바이오매스를 연계한 플라스틱 생산기술을 개발하고 있으며, 스웨덴, 중국 등 해외 관련 기관과의 협업을 통해 원천기술 단계부터 상용화를 염두하고 연구를 진행 중임

CO₂ 전환 일산화탄소 등 제조 공정 모식도



출처 : 한국화학연구원 환경자원연구센터

- 국내에서도 다양한 화학 원료를 제조하기 위한 연구개발을 지속해서 추진하고 있음
- CO₂ 전환 촉매기술에 기반한 일산화탄소(CO), 초산, 개미산, 폴리올, 알킬렌 카보네이트, 디메틸카보네이트(DMC, Dimethyl carbonate) 등 다양한 중간화학물질 또는 고분자 물질을 생산하는 화학원료화 기술이 연구된 바 있음
- 과기부 연구사업에서는 주로 다양한 핵심 원천기술 확보를 중심으로, 산업부 연구사업에서는 실증기술 개발을 중심으로 연구가 추진되었음

〈국내 주요 기술개발 동향〉

기술분야	보유(연구)기관	화학 원료
촉매전환 (화학원료 및 제품)	한국화학연구원 (주)부흥산업사	CO(합성가스), 초산, 윤활기유
	RIST	폴리올, DMC
	SK 이노베이션	폴리프로필렌 카보네이트
	아주대학교	폴리카보네이트, 공중합체 등
	한국화학연구원 KIST	개미산, 메탄올

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
핵심 화학적 전환기술	- 최고수준 촉매 및 공정 개발 중이며 pilot 수준	(‘25) 통합공정 설계 및 실증규모 확대 (‘30) 제품화(10개) 및 융합 연구 (‘40) 주요제품 가격경쟁력 확보 (現시장가 수준) (‘50) 재생에너지 연계 활용
세부 플랫폼화합물 제조 기술	(합성가스) - 최고 수준 신촉매와 공정 개발 - 데모 실증단계(20톤/년 규모 완료 후 격상) (메탄올) - 최고 수준 촉매/공정 개발 - 실증단계(10톤/년 규모 완료)	(‘27) - 5,000톤/년 이상 CO ₂ 처리 - 건식개질 기술 활용 (‘28) 메탄올 생산기술 상용화 (‘30) 기술 상용화 및 국산 기술 보급 확대
세부 유기산 제조 기술	- 최고 수준 신촉매와 공정 개발 중 - 실증단계(20톤/년 규모 완료)	(‘29) 연 2만톤 이상 CO ₂ 전환 개미산 생산기술 상용화 (‘40) 바이오 융합 유기산 제품 상용화
세부 유기카보네이트 생산 기술	- 최고 수준 신촉매와 공정 개발 중 - 실증단계(2톤/년 규모 완료)	(‘25) 핵심촉매 기술경쟁력 확보 (선진국대비 90%) (‘29) 카보네이트 제품 상용화
세부 탄화수소류 생산 기술	- 최고 수준 신촉매와 공정 개발 중 - 실증단계(알파 올레핀 1단계 실증규모 완료)	(‘30) 연 20만톤 이상 CO ₂ 전환기술 상용화 (‘40) 연 150만톤 이상 납사류 제품 상용화
세부 고분자 제조 기술	- 최고 수준 신촉매와 공정 개발 중 - 실증단계(100kg/년 규모 완료 후 격상)	(‘28) 고분자 제품 상용화
세부 탄소소재 및 차세대 활용 기술	- 랩 규모 원천기술	(‘50) 탄소 소재 제품 상용화

세부기술 : 플랫폼화합물 제조 기술

- (기술정의)
 - CO₂를 활용한 건식기술 및 복합개질 방식을 이용한 합성가스 생산기술
 - CO₂를 통해 생산된 합성가스를 이용한 메탄올 생산기술

- (필요성)

- 플랫폼 화합물인 합성가스와 메탄올은 다양한 제품 제조에 사용할 수 있는 물질로 그 가치는 매우 높고 활용 분야가 다양하여 향후 기술의 파급효과가 클 것으로 판단

세부기술 : 유기산 제조 기술

- (기술정의)

- CO₂ 개질을 통해 제조된 합성가스(간접) 또는 CO₂를 직접 활용 가능한 핵심 촉매 공정기술 개발을 통한 고부가가치 유기산을 제조하는 기술

- (필요성)

- CO₂를 유기산의 원료로 직접, 간접 활용하여 탄소중립의 목표를 수립하고 다양한 고부가 유기산 제조기술을 통해 다양한 화학산업에서 활용

세부기술 : 유기카보네이트 생산 기술

- (기술정의)

- CO₂ 직접, 간접(개질을 통해 제조된 합성가스) 활용 가능한 촉매를 개발하여 유기카보네이트를 생산하는 기술

- (필요성)

- CO₂를 유기카보네이트의 원료로 직접, 간접 활용하여 탄소중립의 목표를 수립하고 기존 유독성 원료를 CO₂로 대체 가능

세부기술 : 탄화수소류 생산 기술

- (기술정의)

- CO₂의 바이오, 전기 화학 등 직접적인 활용을 통한 방식과 CO₂ 개질 반응을 통해 제조된 합성가스를 간접적으로 활용하여 탄화수소를 생산하는 기술

- (필요성)

- CO₂ 및 부생가스를 활용기술로서 원료 경제성을 확보하고 석유 자원 미활용을 통한 온실가스 저감

세부기술 : 고분자 제조 기술

- (기술정의)
 - CO₂를 활용한 고분자 중합 기술 및 엔지니어링 플라스틱 중합 기술
 - 융합형 차세대 폴리머 제조 기술
- (필요성)
 - CO₂를 고부가가치 고분자 물질로 전환하여 기존의 석유화학 기반의 고분자 제품을 대체할 수 있는 기술개발 필요

세부기술 : 탄소소재 및 차세대 활용 기술

- (기술정의)
 - CO₂ 활용 리튬 이차전지를 위한 소재화 기술
 - CO₂와 질소산화물을 동시에 전환하기 위한 촉매 공정 기술
- (필요성)
 - 탄소중립의 목적을 수립하기 위해 새로운 CO₂ 활용 방안 모색이 필요하며 이차전지, 아크릴로니트릴 등 고부가 산업에서 적용 가능한 기술 필요

핵심기술 2 ● 생물학적 전환기술

● 기술개요

(개요)

- 미생물(조류) 및 바이오 기술을 활용, CO₂를 전환하여 다양한 화학물질을 제조하는 기술

(필요성)

- 고효율 CO₂ 전환 및 고농도 바이오매스 생산을 위한 우수 균주* 스크리닝 시스템 구축·활용하여 고효율 생물전환 기술 확보
- 저비용·저에너지 바이오매스 대량생산-회수 시스템 효율화를 통한 바이오매스 생산단가 저감
- 바이오 연료·소재로 활용하는 전주기 원천·실증 기술개발 추진

● 기술 동향

(해외)

- UC Berkeley, Peidong Yang 연구팀에서 박테리아와 광전극을 접합하여 박테리아가 전극으로부터 전자를 받아 CO₂를 환원 아세트산을 생성하는 시스템을 보고하였음
- 미국 Emory대학교의 T. Lian 교수와 Yale 대학교의 V. Batista 교수연구팀은 TiO₂ 루타일상 단일결정표면에 Re 화합물을 공유결합으로 연결하였으며, 이러한 형태의 구조가 매우 효과적인 CO₂ 전환 효율을 나타낸다고 보고하였음(A. Ge, B. Rudshyeyn, 2016)
- 미국 에너지부는 “American Recovery and Reinvestment Act of 2009”를 통해 캘리포니아 주립대, 애리조나 주립대, Texas A&M대학교 등을 비롯한 대학 및 연구소로 조성된 대형 컨소시엄 NAABB(National Alliance for Algal Biofuels and Bioproducts) 등의 형태로 광합성 기반 미세조류 연구를 추진하고 있음
 - DOE는 NAABB 외에도 솔라자임, 알제놀, 사파이어 등 각 기업의 실증 플랜트 구축 사업을 지원한 바 있음
 - 알제놀社は 시아노박테리아 균주를 중심으로 에탄올을 생산하는 파일럿 규모의 프로젝트를 진행하고 있으며, 석유 가격 폭락에 대응하여 바이오연료 대신 식품 및 동물사료 소재 생산을 위한 CO₂ 전환 연구를 진행하고 있음 (Pires, 2017)
 - 미세조류 기반의 바이오 연료 및 유용물질 생산에 대한 연구개발과 투자에 발맞추어 많은 기업이 새롭게 창업되고 있음
- DOE는 미세조류 기반 CO₂의 연료 전환 방법 대비 더 효율적인 CO₂ 전환을 목표하고 있음
 - ARPA-e의 ‘Electrofuels’ 프로그램을 통하여, CO₂의 생물학적 전환 연구에 많은 연구비를 투자하면서 원천기술 확보에 주력해오고 있다. 총 13개의 과제를 지원하였으며, 다양한 전기생합성 미생물을 이용한 바이오연료 생산 연구가 진행되었음
- 미국 란자텍(Lanzatech)社は 탄소 고정 균주(아세토젠)를 이용하여, C1 가스 고부가가치 화학소재를 생산하는 생물학적 전환기술 분야를 선도해왔으며, 미생물 기반 파일럿 플랜트 건설을 통해 탄소 저감 기술 검증을 진행해왔음(LanzaTech, 2019)
 - 란자텍社は EU의 ‘Steelmanol’ 프로젝트에 참여하여 철강 산업에서 생산되는 가스(syngas)를 생물학적으로 전환하여 에탄올을 생산하는 연구도 진행 중임(Steelmanol, 2019)
 - 최근 미생물 전기생합성 분야의 주요 기술이 될 수 있는 기술 특허를 발표한 바 있으며, 미국 메사추세츠대학교(Amherst)의 Derek Lovley 교수 연구팀과의 공동 연구를 통해 혁신적인 CO₂ 전환기술 플랫폼의 확장을 목표하고 있음
- 미국 매사추세츠대학교의 Derek Lovley 교수 연구팀은 2010년 미생물 전기생합성용어를 ‘미생물을 이용하여 전극에서 전자를 공급받아 CO₂를 탄소화합물로 전환하는 기술’로 정의하고 선도적으로 연구를 수행하고 있음(Nevin et al., 2010)

- 혐기성 박테리아 아세트젠을 중심으로 전기생합성을 위한 미생물로의 전자 전달메카니즘 규명 및 전기생합성 발효의 효율을 높이기 위한 연구에 집중하고 있음
- 미국 하버드대학교의 Daniel G. Nocera 교수 연구팀 및 UCLA대학교의 James Liao 연구팀은 인공수전해 수소 기반 전기생합성 미생물 시스템 관련 연구 결과를 발표해왔음(Li et al., 2012; Liu et al., 2016)
- EU 중심 FP7 대규모 연구사업 중 CO₂의 직접 전환을 목표로 시아노박테리아의 유전적 조작 도구 개발, 대사공학적 균주 개발 및 CO₂의 고정화를 높이기 위한 광합성 배양기를 개발하고 있음(Lindblad et al., 2019)
- 미세조류의 산업적 활용은 유니레버(Unilever), 코르비온(Corbion) 등 유럽 내 바이오기업들이 기술 개발에 참여하고 있으며, 고부가가치 유용물질인 건강기능식품, 천연/바이오 의약품 및 화장품 소재 생산 위주로 개발되고 있음
- 최근 Electrochaea社は CO₂의 메탄화 ‘P2G-BioCat’ 프로젝트를 진행하고 있으며, 생물학적 메탄화(Power-to-gas) 기술 분야에서 상당히 앞선 기술을 보유하고 있음
 - CO₂의 메탄화 실증 연구로써 덴마크 지역에 1MW급 재생에너지와 연계한 생물학적 메탄화 전환 실증 플랜트를 구축하였으며, 미생물 배양기 규모는 10,000L 수준임(Electrochaea, 2018)
 - 재생에너지로부터 수전해 기술을 이용하여 수소를 생산하고, 생산된 수소와 바이오플랜트에서 나오는 CO₂는 메타노젠 고세균에 의해 생물학적으로 메탄으로 전환되어 도시가스 연료로 공급되는 것을 목표로 하고 있음
 - 현재 Electrochaea의 기술성숙도(TRL)는 8단계까지 도달했으며, 본격적으로 사업화 단계를 진행하고 있음(한국화학공학회 NICE, 2018)
- EU집행위원회는 EU 최대의 연구혁신 프로그램인 ‘Horizon 2020’을 통해 대형 컨소시엄 형태의 프로젝트를 추진하여, 신재생에너지 기반 CO₂의 유용물질/액체연료 생물학적 전환 기술개발의 가속도를 더하고 있음
 - BioRECO₂VER 프로젝트는 산업발전소 유래 CO₂를 젖산, 이소부텐 등 플랫폼 화학소재로 전환하기 위한 공정 최적화에 집중하고 있으며, 생물학적 전환에 있어서 TRL4와 5단계를 목표로 3종의 미생물 플랫폼을 테스트 중임
- 최근 유럽에서 시작한 프로젝트인 ‘BAC-TO-FUEL’에서는 인공광합성 수전해 기술과 융합하여, CO₂와 수소를 바이오 연료(에탄올, 부탄올)로 전환하는 미생물 전기생합성 연구를 진행하고 있음
 - 아세트젠 박테리아를 이용하여 CO₂의 생물학적 전환공정을 개발하며, 이를 통해 신재생에너지 기반 Bac-To-Fuel 공정으로부터 20g/L/day의 에탄올 및 15g/L/day의 부탄올 생산 수준의 TRL 5를 목표로 잡고 있음
- 영국의 Carbon 8은 금속 탄산화 기술을 개발하였고, 폐기물 매립의 변형, CO₂의 영구적 포집, 자연 골재의 대체(Carbon8, 2020) 이러한 특징을 통해 폐기물 발생처에서 신속한 처리, 비용절감, 탄소 발생량 저감 등의 이점이 있음

- 일본의 대표 바이오벤처 유글레나(Euglena)社は 2020년까지 미세조류 기반 항공 연료 실용화를 목표로 미세조류에 관한 연구개발과 생산관리에 집중하고 있음
- 미세조류로부터 유용물질을 생산하고자 하는 Chinese Microalgae Industry Alliance(CMIA) 연합체가 형성되어 있으며, 'CO₂-Microalgae-Fuels' 프로젝트를 진행하고 있음
 - 10여 개의 중국 벤처 기업들이 카로티노이드, 지방산 등 식품소재를 위주로 사업화를 하고 있으나, 아직은 높은 생산 단가 때문에 큰 시장을 형성하지 못하고 있음(Chen et al., 2016)

(국내)

- 과기부는 지구온난화 및 국제사회의 온실가스 감축 의무 본격화에 적극적으로 대응하기 위해, 'Korea CCS 2020' 연구사업을 CO₂ 포집 및 처리 연구개발센터(KCRC) 중심으로 진행하였음
 - 2020년까지 \$30/톤-CO₂ 이하의 원천기술 개발을 목표로 혁신적 포집, 저장, 전환 기술을 개발하는 사업이었으며, 이를 통해 고려대학교 심상준 교수팀 외 다수의 연구팀은 야생형 균주 대비 미세조류 성장 능력 2배, 지질 함량 4배의 초우량 균주를 확보했음
 - 배양규모 스케일업이 용이한 광생물 반응기를 개발하였고 이러한 연구 성과를 바탕으로 대용량 광생물 반응기를 이용하여 5톤 규모의 CO₂ 생물전환 공정 실증을 통해 유용물질의 생산성 및 경제성을 평가할 예정임
- 해양 바이오에너지 생산기술 개발연구센터(2009~2019)도 미세조류 관련 기술개발을 진행해온 바 있음
 - 국내 CO₂ 생물학적 전환기술의 대부분이 현재 상업화 단계에 못 미치는 R&D 단계에 있지만, 최근 파이코일바이오테크리아(PBK) 바이오벤처기업이 미세조류 인공배양과 이를 이용해 DHA를 생산하고 있음
- 전기생합성 미생물 기반 CO₂의 생물학적 전환 연구는 광합성 미생물보다 더 높은 태양광 전환 효율로 CO₂를 환원시켜 다양한 유용물질을 생산할 수 있지만, 아직도 국내에서는 활발히 연구되지 않고 있음
 - 2010년부터 미국과 유럽을 중심으로 'Electrofuels' 관련 주요 미래 유망 기술로 많은 관심을 받고 있지만, 국내에서는 지금까지 연구된 바가 미미함
 - 2010년부터 KAIST는 글로벌 프런티어 사업의 지능형 바이오 시스템 설계 및 합성 연구단에서 '인공광합성 생화학공장 구축' 관련 연구를 진행해오고 있으며 해당 연구는 미생물이 광화학적 방법으로 CO₂로부터 유용물질을 생합성 하는 것을 극대화하기 위해 지능형 전기생합성 바이오시스템을 구축하는 것을 목표로 하고 있음
- 한국원자력연구원은 아세트젠 Clostridium 균주 및 다양한 독립영양미생물을 활용해 생물전기화학 반응기에서 CO₂를 고정하여 부티르산(butyric acid) 및 에탄올(ethanol) 생산 연구를 수행한 바 있음

- KAIST에서는 포름산과 CO₂를 이용할 수 있는 종속영양생물(E.coli) 균주를 개발하였으며, 광운대학교 김용환 교수팀은 효소 및 미생물을 이용하여 CO₂를 포름산으로 전환하는 연구를 진행하고 있음
- 한양대학교에서는 생물전기화학적으로 CO₂를 메탄화하는 연구(P2G)를 수행해왔으며, 한국전력연구원은 최근 미생물을 이용하여 연간 36톤의 CO₂를 12톤의 메탄으로 전환하는 5kW급 메탄 생산 설비를 구축했다고 밝혔음

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
핵심 생물학적 전환기술	- 기술 성숙도 및 가격경쟁력 확보 필요	(‘25) 생물 배양기 설계 및 운전 (‘30) 바이오소재 제품화 (‘50) 시장가격 경쟁력 확보
세부 바이오매스(BM) 생산	- 바이오매스 생산단가 \$2.0/kg 수준	(‘30) BM 생산단가 \$1.0/kg 배가스 기준 CO ₂ 전환율 40% (‘50) BM 생산단가 \$0.4/kg 배가스 기준 CO ₂ 전환율 60%
세부 바이오연료화	- 바이오디젤 생산단가 \$10.0/ℓ 수준 - 항공유 생산단가 \$10.0/ℓ 수준	(‘30) 바이오디젤 및 항공유 생산단가 절감 (\$5.0/ℓ) (‘50) 기존제품 대비 가격경쟁력 확보
세부 바이오소재화	- 발전용 혼소연료 랩 규모 원천기술	(‘30) 바이오소재 중규모 기술 상용화 (‘50) 생산비용 저감

세부기술 : 바이오매스(BM) 생산

- (기술정의)
 - 배출원, 소재별 고효율 CO₂ 생물전환 균주 확보 및 배양 기술
 - 미세조류 바이오매스 고농도, 대량 생산 및 회수 시스템화 기술
- (필요성)
 - 광합성에 의해 만들어진 유기물에서 에너지를 추출하기 때문에 지속적인 순환이 가능한 재생에너지라는 점과 지구상 어느 곳에서 얻을 수 있는 자원이기에 개발 필요

세부기술 : 바이오연료화

- (기술정의)
 - 고효율, 저에너지형 바이오디젤 생산 기술
 - 생물전환 탄소 유래 항공유 및 발전용 고체연료 생산 기술
- (필요성)
 - 화석연료의 대체가 가능하며, 기존 인프라의 재활용이 가능하기 때문에 원료의 경제성 및 제품 단가의 하락을 위한 기술이 필요

세부기술 : 바이오소재화

- (기술정의)
 - 미세조류 유래 천연색소 및 오메가 지방산, 제품화 기술
 - 미세조류 유래 플라스틱 소재 생산 기술
- (필요성)
 - 광합성을 통해 만들어진 유기물로부터 고부가가치 제품을 생산하고, 바이오 플라스틱 소재 생산을 통해 탄소중립 목표 수립 가능

핵심기술 3 광물 탄산화**기술개요****(개요)**

- CO₂의 광물화를 통해 콘크리트·레미콘·시멘트 원료로 활용하여 온실가스 배출량 감축 페러다임을 전환할 수 있는 기술

(필요성)

- 산업적 활용처가 분명하고 온실가스 감축 효과가 큰 광물 탄산화 제품군 발굴 및 단계적 실증을 통해 상용화 기술 확보
- 가용 산업부산물별 저에너지 추출 기술 및 최종 탄산염 제품의 고부가화 핵심기술 개발을 통하여 경제성 개선 노력

● 기술 동향

(해외)

- 미국의 Skyonic 社에서는 SkyMine 프로세스를 개발하여 여러 가지 제품들을 생산하고 있으며, CO₂, 물, 소금(NaCl)을 투입하여 염산(HCl), 중조, 차아염소산나트륨(NaOCl) 등을 제조하는 공정으로 연간 75,000톤의 CO₂를 활용할 것으로 기대함
- CO₂ 광물화와 관련한 기술로 선두를 달리고 있는 기업 중 하나인 Calera는 Ca를 포함하는 용액과 CO₂를 반응시켜 탄산칼슘 포함 물질을 생산하고 있으며 생산한 탄산칼슘을 건축재 등으로 판매하고 있음
- 독일의 하이델베르크 시멘트에서도 폐시멘트/콘크리트의 재활용을 통해 석회석을 대체하는 기술을 개발하고 있음
- 핀란드의 알토대학교(Aalto University)는 2000년대부터 슬래그로부터 PCC를 제조하는 공정을 개발해 오고 있음
 - 알토대학교는 Slag2X 공정을 개발하여 파일럿 공정을 운전하고 있다. 이는 암모늄염용액을 활용해 Ca를 용출, 탄산화하여 PCC를 생산하는 공정이며 2014년 세계 최초로 슬래그를 활용하여 PCC를 생산하는 파일럿 플랜트(400L 반응기, 10kg-PCC)를 가동하였음
 - 본 공정을 통해 CO₂ 저감, 에너지 절감, 폐기물 활용 등을 달성하는 이점을 낳았으며, 연구의 방향은 생산품인 PCC의 입형 및 입도 제어, 암모늄염의 회수 등에 중점을 두고 있다. 생산된 PCC는 제지산업의 filler, 코팅재 등으로의 활용을 목표로 하고 있음

(국내)

- 한국전력공사 전력연구원(KEPRI)에서는 2010년대 중반부터 전기분해법을 이용하여 NaHCO₃와 HCl, NaOCl 등을 생산하기 위한 기술개발을 추진하고 있음
- 전기분해법으로 생산하는 NaOH를 활용해 배가스 중 CO₂와의 반응을 통하여 중조(NaHCO₃)를 생산함
 - 전기분해의 양극에서 발생하는 염소(Cl₂)와 수소(H₂) 가스 등을 이용하여 차아염소산나트륨(NaOCl), 염산(HCl) 등을 생산하며, 실험/모델링 등을 통하여 CO₂ 포집율은 90% 이상, 중조의 순도는 97% 이상 달성 가능할 것으로 판단함(이동욱 외, 2016)
- 대우건설에서는 배가스중 CO₂를 알칼리 혼합액과 흡수, 고정화하여 탄산화물(carbonated products)을 생산하는 기술을 개발 및 실증하였음
 - 본 기술은 DECO₂로 명명된 바 있으며, 인천 청라 소각장에서 활용하고 있으며 앞으로 울진 민자 석탄화력발전 시설에 적용할 예정임

- 한국과학기술원 또한 'Korea CCS 2020' 사업 내용의 하나로, 2010년대에 들어 본격적으로 CO₂ 광물화(PCC 제조) 공정을 개발해 오고 있음
 - 염수(NaCl)의 전기분해를 통해 NaOH와 HCl을 생산하며, NaOH는 배가스와 반응하여 NaHCO₃를 얻으며 전기분해로 생산된 염산은 알칼리 산업부산물 중 Ca를 용출하는데 활용되고 이 상등액과 중조를 반응시켜 순수 탄산칼슘을 얻는 것을 특징으로 하고 있음
- 한국지질자원연구원에서는 2000년대 후반부터 광물화 기술개발을 추진해 오고 있으며 대표적인 연구주제/기술로는 탄산칼슘과 황산암모늄 제조 기술을 들 수 있음
 - 탄소광물화사업단에서는 생활계/산업계 부산물의 광물 탄산화를 통해 중저급 석회석과 광산 부산물을 이용하여 CO₂를 고정화하고, 고부가가치 광물을 합성하는 것을 목표로 기술개발 활동을 전개하고 있음
 - 탄소광물화사업단의 개발 기술 중 하나인 '친환경 In-situ PCC 기술'은 CO₂를 직접 활용하여, 폐지펄트 내의 PCC를 합성 및 친환경 고급 제지용지로 재활용하는 것임
 - 석고탄산화 기술은 탈황석고에 암모니아와 CO₂를 반응시켜, 탄산칼슘과 황산암모늄을 생산하는 기술임(에너지코리아, 2014)
 - 한국지질자원연구원에서 개발한 공정의 경우 연간 1,000톤의 부산석고를 사용하는 광물 탄산화 공정으로 제조 원단위를 검토한 결과, 석고 처리비로 약 29만 원/톤이 소요되는 것으로 산정되었음
- 포항산업과학연구원에서는 정부 과제로 제철 슬래그 중 Ca를 용출, 탄산화하는 기술을 개발하였음(산업통상자원부, CO₂와 제철 슬래그를 활용한 탄산칼슘/중조 동시 제조의 핵심기술 개발, 2015.12~2018.10)
 - 암모늄염 용액을 이용해 제철 슬래그 중 Ca를 용출하며, 중조 탄산화 여액과 반응시켜 탄산칼슘을 제조하는 기술이며 가장 큰 특징으로는 2종의 탄산염(중조, 탄산칼슘)을 하나의 공정에서 생산하는 것이 가능함
 - 해당 기술을 바탕으로 현재까지 벤치 스케일(100kg/d) 장치를 설계 및 운전하였으며, 후속 연구를 통해 기술개발 규모와 완성도를 높이고자 노력하고 있음

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
핵심 광물 탄산화	- Pilot 수준	(`25) 선택적, 경제적 추출 기술 확보 (`30) CO ₂ 반응 경화 시멘트·건설소재군(4개) (`40) 광물탄산화 상용규모 격상 (`50) 상용화 완료
세부 콘크리트 재료혼합 공정 중 CO ₂ 흡착 및 CaCO ₃ 고정화	- CO ₂ 활용 7만 t-CO ₂ /년 규모	(`25) CO ₂ 활용 300톤/년 규모 기술 실증 (`28) CO ₂ 활용 15천톤/년 규모 기술 상용화
세부 CO ₂ 반응경화 저온소성 특수시멘트 제조 및 양생	- CO ₂ 를 활용한 흡착·반응기술은 선진국에서 활용되는 기술이나, 국내는 아직 연구·적용되지 못함 * 탄산화 공정적용은 국내에서 검증되지 않아 종합적 검토 필요	(`25) CO ₂ 활용 300톤/년 규모 실증 (`28) CO ₂ 활용 15천톤/년 규모 상용화 (`30) 시멘트·건설소재군(4개)상용화, (20% 대체 기준) 약 35만톤 (`50) (40% 대체 기준) 약 70만톤
세부 무기탄산계 화합물 제조	- 1m ³ 규모 농축수 - CO ₂ 광물화 반응 파일럿 플랜트 실증 추진 - 200kg CO ₂ /일 처리, 350kg 중조/일 생산 가능 수준	(`25) 추출효율 90%, 기술 실증 (60톤/년 규모) (`30) 무기탄산염 생산기술 실증 (`50) 기술 상용화 (3만톤/년 이상 규모)

세부기술 : 콘크리트 재료혼합 공정 중 CO₂ 흡착 및 CaCO₃ 고정화

- (기술정의) 콘크리트 및 레미콘의 재료혼합 공정 중 CO₂를 주입하여 시멘트 광물 상의 CO₂ 접촉에 따라 CaCO₃로 고정화하는 기술
- (필요성) 발전/연소 배출가스 CO₂ 직접반응을 통한 포집 및 대량 활용 가능하며, 시멘트 대체체 등 건설소재에 활용되어 온실가스 감축 효과 증대 기대

세부기술 : CO₂ 반응경화 저온소성 특수시멘트 제조 및 양생

- (기술정의) 시멘트 원료인 석회석을 대체하고 클링커 온도를 낮춰서 에너지 사용을 절감하는 기술
- (필요성) 주요 온실가스 배출원인 시멘트 산업에서 원료와 에너지 절감을 통한 근본적인 배출 저감 노력 필요

세부기술 : 무기탄산계 화합물 제조

- (기술정의) 양이온과 CO₂가 반응하여 무기탄산염을 제조하는 기술
- (필요성) 무기탄산계 생산기술은 공정이 비교적 단순하고, 기술개발 수준이 높은 기술로 중부 주도의 조기 상용화를 통해 기술시장 선도가 가능

라 기술확보 전략

추진전략

기술확보 전략 주요 내용



출처 : 한국화학연구원 환경자원연구센터

화학적 전환기술

- 다양한 합금 유형 또는 다른 금속의 도핑, 촉매 구조 변경과 같은 다양한 전략적인 촉매 연구를 통해 반응 성능, 내구성을 향상시켜 기술 최적화 방안 도출
- 통합공정 등 공정연구를 통해 반응물 투입 대비 플랫폼화합물, 유기산, 유카보네이트, 탄화수소, 고분자 생산 수율을 향상시켜 원료 손실 저감
- 요소 기술이 확립된 제품군을 선별하여 통합공정 설계 및 실증규모 확대
 - 기술경쟁력이 부족하나 글로벌 시장이 형성되고 있는 제품군은 핵심 촉매·공정 기술 확보에 집중
- 상용화 단계 실증기술의 규모 격상 및 제품화를 추진하고, 기술의 파급효과*를 최대화할 수 있는 융합연구 병행

* 온실가스 감축효과, 자원순환율, 경제성 향상, 감축방법론 개발 등

- CO₂ 동시 포집·전환 기술, CO₂ 무포집 전환기술, 폐기물·부산물 환원제 활용 개질기술, 바이오 원료-CO₂ 동시 활용 기술, 화학-바이오 촉매 융합 기술, CO₂ 및 미세먼지(대기오염물질) 동시 저감 기술 등
- 고분자 제품은 물성개선을 위한 다양한 단량체 제조기술 동시 개발
- 잉여 재생에너지 활용·화학산업 혁신을 위한 CO₂ 리파이너리형 기술의 고도화
- 추가적인 CO₂ 탄소 소재화 기술 등 혁신적 화학 전환 연구 집중투자

생물학적 전환기술

- 대규모 생물 전환 균주개발 및 고농도 배양조건 확립, 고효율 생물 배양기 설계 및 운전 기본자료 확보
- 발전 분야 중·소규모* 바이오매스 생산 실증 추진을 통해 바이오매스 생산성을 향상하고, 바이오소재 제품화
 - * 연소배가스 기준 200Nm³/h 이상
- 바이오매스 생산기술 대형화*를 통해 생산단가를 낮추고, 연료·소재 생산기술 효율화를 통해 가격경쟁력** 확보
 - * 연소배가스 기준 1,000 Nm³/h 이상
 - ** 現생산단가의 50% 수준으로 절감 등

광물 탄산화

- 해외 상용제품 생산기술 중심으로 국내에서의 상용화 여건*을 마련하고, 부산물별 유효성분의 선택적·경제적 추출기술 동시 확보
 - * CO₂ 반응경화·양생기술 확보, 중규모 격상 실증, 공정 효율화, 철강 슬래그 활용 탄산화 실증 등
- 수요·활용 산업을 연계*한 대규모 기술 실증 및 상용화 추진
 - * 시멘트 산업 연계한 CO₂ 양생기술, 연소배가스 처리설비연계한 탈황석고 재활용기술 등
- 탄산염 제품은 품질(순도, 백색도, 입상 등) 향상을 통한 다각화 활용
- 대규모 CO₂ 처리를 위한 광물화 기술개발 및 탄산화제품 고부가화 기술개발 등을 통한 경제성 확보

● 정책적 전략

- (산업계) 제품 시장수요를 반영한 공급사/수요사 기술개발 요구사항 제시 및 기술 상용화 방향성 제시
 - 온실가스 기반 제품 개발시 실 현장에서 필요한 기술 범위 제시와 개발 방향성 확립으로 개발 후 원활한 기술 활용, 매출 증대 및 안정적 대량 고정 수요처 확보
 - 사업규모 확대 시 사업협력 파트너에 대한 정보 공유로 기술 확장성 제고
 - 탄소중립 시대 CCU 관련 친환경 기술시장 선점을 위한 국내 기업간 협업 경쟁력 강화
- (연구계) 탄소중립형 세계 최고 수준의 혁신기술 개발 및 실증
 - 화석자원 기반 산업 구조의 패러다임 전환을 위한 탄소순환 개념의 혁신기술 개발 및 실증 수준의 기술 확보로 국내 산업계의 유연한 보급 기반 마련
 - 과학적 입증을 통한 기술 신뢰성 제고 및 글로벌 기술 선도로 온실가스 활용기술의 국제적 경쟁력 강화 및 연관 기술 파급력 확대
- (정부) 탄소중립형 혁신기술 보급 정책 수립
 - 기술력 기반의 실효적 온실가스 활용기술 지원 정책 마련 및 규제화 방안 도출
 - 기술보급을 통한 온실가스 감축 효과 극대화로 국가 탄소중립 이행 및 그린뉴딜 정책 활성화

마

탄소중립 기여 효과

● 탄소중립 기술과의 연계성

- 전문가들은 전 세계가 2050년 이전에 탄소중립을 달성해야만 지구 평균 온도 상승 폭을 1.5°C 이하로 억제할 수 있다고 주장하고 있으며 많은 나라에서 탄소중립을 선언하고 있음
 - 근래 들어 유럽 연합(EU), 캐나다, 남아프리카공화국이 2050년까지 탄소중립을 선언하였고, 뉴질랜드, 칠레, 덴마크, 프랑스 헝가리, 영국은 법으로 공표까지 하면서 적극적인 활용을 하고 있음. 또한 오스트리아, 아이슬란드와 같은 나라는 2040년과 같은 훨씬 더 도전적 목표를 세웠고, 최근 들어 한국(2050)과 일본(2050), 그리고 중국(2060)이 탄소중립을 선언하였음
 - 정부의 “2050년 탄소중립 전략”에 따르면 산업에서 배출되는 온실가스는 석탄, 석회석, 납사 등을 화합물로 제조하는 과정에서 반드시 배출되는 부산물이므로, 에너지 저감형 공정으로 제조해도 온실가스 감축량에는 여전히 한계가 존재함
 - 따라서 이산화탄소를 포집, 활용하는 기술인 CCU(Carbon Capture & Utilization) 기술의 중요성이 두드러지고 있음. CCU기술은 이산화탄소를 단순히 버려지는 물질이 아닌 원료로 활용해 부가가치가 높은 탄소화합물로 전환하는 기술로서, 온실가스 감축을 통해 환경 문제를 해결함과 동시에, 대기 중에 풍부하게 존재하는 이산화탄소를 탄소원으로 사용할 수 있음

- 아울러 전환 후 고부가가치 탄소화합물의 생성에 따른 추가적인 이익까지도 기대할 수 있어 그 가능성을 서서히 인정받고 있음. 여기에 탄소순환 개념을 추가한다면 탄소중립 시대를 겨냥한 핵심기술이 될 것임
- 탄소중립을 실현하기 위해서는 국민 인식개선이 무엇보다 중요하며, 아무리 좋은 정책과 제도를 만들어도 국민이 공감하지 않으면 탄소중립은 요원할 것임. 이미 국민에게는 신기후체제 이후 이상기후 현상 등을 통해 기후변화에 대한 인식이 각인되었고, 정부의 그린뉴딜 정책에 대한 이해도도 높은 수준이므로, 이제는 신뢰할 수 있는 세부적인 기술개발, 정책, 제도가 필요한 시점임. 따라서 기업과 국민의 공감대를 확보한다면 CCU 기술은 탄소중립을 위한 신성장 동력의 중심축이 될 것임
- 시멘트 및 건설소재 : 시멘트제조 공정에서 온실가스 전체 배출량의 60%가 발생하고 있으며 주원료인 석회석을 대체해 비탄산염 원료를 사용한 반응경화 저온소성 시멘트를 생산하는 경우 기존 온실가스 발생 대비 배출량이 축소될 수 있음
- 반응경화 저온소성 시멘트 기술의 핵심은 이산화탄소가 다량 발생하는 석회석 원료의 비중을 90%→70% 수준으로 줄여서 시멘트를 생산하는 데 있음. 또한 콘크리트 양생과정에서 물을 대신해 이산화탄소를 접촉시켜 CaCO_3 로 고정화함으로써 건설부문에서도 이산화탄소를 흡착함에 따라 시멘트생산, 콘크리트 양생과정 양쪽 측면에서 CO_2 감축에 기여 가능함
- 무기탄산계 화합물 제조 : 시멘트제조 공정에서 나오는 이산화탄소를 포집하여 양이온을 반응시켜 무기탄산염을 제조하는 기술로 이미 기술 수준이 상용화에 근접해 있고 다량의 포집된 이산화탄소를 활용하는 기술로 탄소감축에 기여 가능함
- 시멘트업종은 다량의 CO_2 가 발생하고 제조공정에서 포집률이 우수하며 시멘트 생산과정에서 발생하는 폐열 등을 활용할 수 있어 CCU기술을 적용하기에 유리한 조건으로, 무기탄산계 화합물을 제조하는 경우 제지, 제약 등 여타산업과의 연계성을 높일 수 있으므로 조기 상용화를 통해 기술시장 선도 필요

위원회 명단

성명	소속	직위
한건우(★)	한국에너지기술평가원	PD(위원장)
권여선	한국에너지기술평가원	PM
이호섭	한국석유공사	팀장
이중범	한국전력연구원	실장
이경무	LG화학	부장
김영주	한국전력공사	팀장
장형순	한국금속재료연구조합	책임
김의철	한국시멘트협회	센터장
안국현	대한석유협회	실장
김평중	한국석유화학협회	본부장
권이균	공주대학교	교수
신영재	한국해양대학교	교수
장태선	한국화학연구원	책임
유동헌	에너지경제연구원	선임연구위원
류호정	한국에너지기술연구원	책임
이교은(간사)	한국에너지기술평가원	선임

2050 탄소중립 에너지기술로드맵

발행일	2021년 12월
발행인	권기영
발행처	한국에너지기술평가원
주소	(06175) 서울특별시 강남구 테헤란로 114길 14
전화	02-3469-8400
홈페이지	www.ketep.re.kr
편집인쇄	현대아트컴·한국장애인문인복지후원회

본 보고서는 에너지기술정보서비스 ETIC(www.etic.kr)를 통해서도 보실 수 있습니다.
무단 전재 및 복사를 금합니다.

2050 탄소중립 에너지기술로드맵
KOREA INSTITUTE OF ENERGY TECHNOLOGY
EVALUATION AND PLANNING