

STI Brief

제3호 | CCUS 기반 E-Fuel 합성 기술

CONTENTS

I 서 론**1**

1. 배경 및 필요성	1
2. 이산화탄소 포집/저장 및 전환 기술의 정의 및 범위	4
3. 이산화탄소 전환 기술을 이용한 e-Fuel 합성	14

II 해외 동향**19**

1. 정책 동향	19
2. 시장·산업 동향	29
3. 기술개발 동향	32

III 국내 동향**34**

1. 정책 동향	34
2. 기술개발 동향	37

IV 결 론**34**

1. 시사점	38
--------------	----

▶ 참고문헌**40**

I 서 론

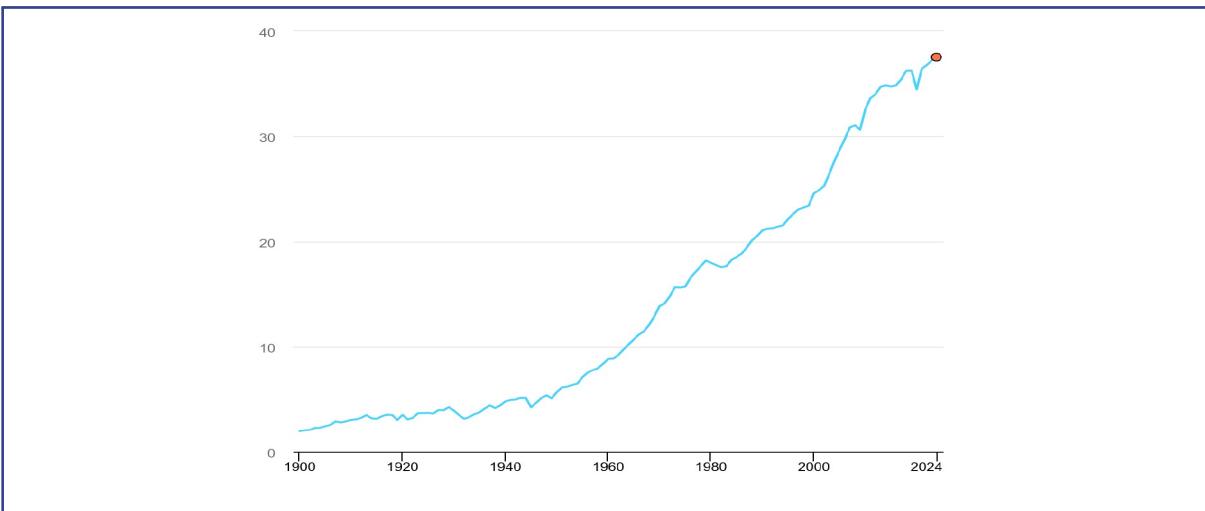
1

배경 및 필요성

■ 2050 Net-zero CO₂ 달성을 위한 신속·전제적¹⁾ CO₂ 포집·저장·전환 기술의 전략적 적용 필요

- 탄소 배출을 전제로 운용되는 현행 에너지 공급 체계 및 산업 생산 방식의 구조적 고착화로 인해 전 세계적 이산화탄소(CO₂) 배출 증가세 지속
 - 최근 수십 년간 경제성장, 산업화 확산, 생활수준 향상에 따라 이산화탄소 배출은 지속적인 상승 추세를 보이며, 특히 에너지 부문의 CO₂ 배출량은 2024년 기준 37.8Gt CO₂로 사상 최고치 기록
 - 현행 에너지·산업구조가 유지될 경우, 글로벌 배출량은 2050년까지 현재 대비 약 두 배 수준으로 확대될 것으로 예상되며, 국제사회가 지향하는 탄소중립 목표 달성을 위한 구조적 전환 필요
- 대기중 CO₂ 농도의 급격한 증가로 인해 기후위기 가속화
 - 2025년 대기 중 CO₂ 농도는 422.5ppm에 도달할 것으로 전망되며, 이는 산업화 이전 대비 약 50% 증가한 수준으로 지구 기후시스템의 안정성 훼손이 가속화되고 있음을 시사
 - 파리협정(2015)이 제시한 산업화 이전 대비 지구 평균기온 상승폭 1.5°C 이내 억제 목표와 달리, 2024년 이미 1.6°C 상승이 관측되는 등 기후 변화 억제 목표 달성을 가능성이 크게 약화되고 있는 상황
- 기후변화로 인해 경제·사회·환경 전반에 걸친 피해가 심화되고, 글로벌 차원의 리스크가 확대
 - 파키스탄 대홍수, 동아프리카 지역의 만성적 가뭄 등 기후변화로 직접 연계된 재단이 빈발하며 인명 피해·기반시설 파괴·식량 안보 악화 등 다차원적 피해가 전 세계적으로 증가하는 실정
 - 특히 기후 재단에 따른 경제·사회적 비용이 지속적으로 증가하고 있으며, 현행 에너지·산업 체계가 유지될 경우 이러한 위험은 장기화·상시화되어 국가 단위를 넘어 국제적 대응이 필요한 글로벌 리스크로 확대

1) 연소전 포집(Pre-comustion capture)



출처 : IEA (2025), Global CO₂ emissions from energy combustion and industrial processes and their annual change, 1900–2023, IEA, Paris

| 에너지 연소 및 산업 공정 부문 전 세계 이산화탄소 배출량의 연간 변화(1900–2023년) |

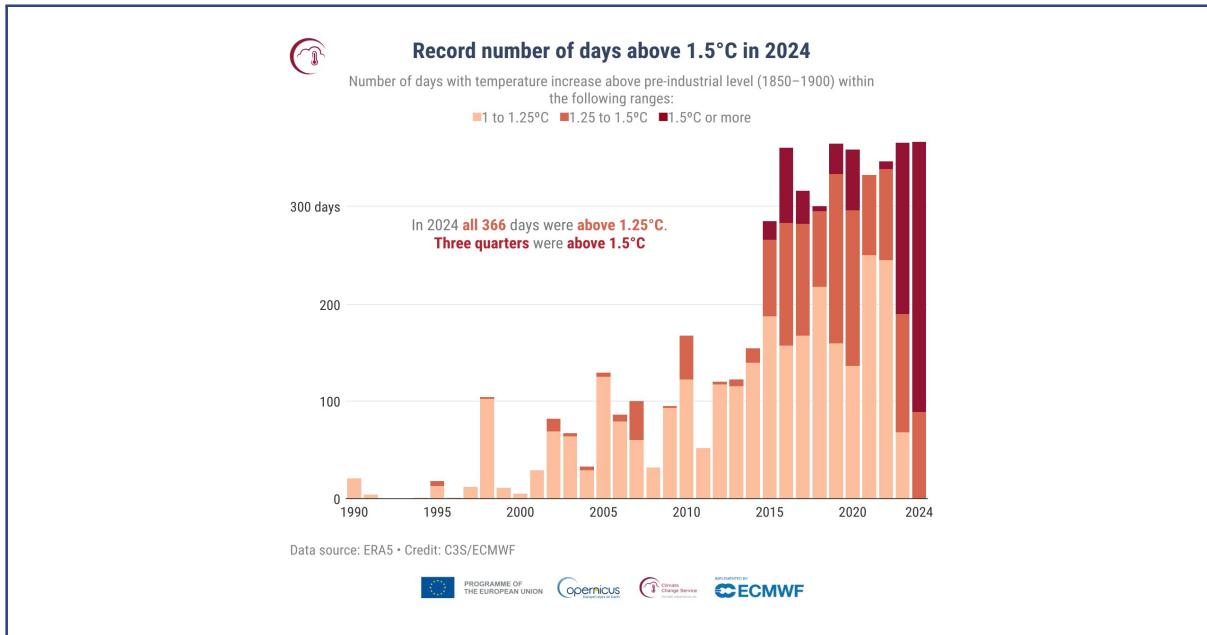
■ 2050 Net-zero CO₂ 달성을 위한 신재생에너지 기반 수소/CO₂ 전환 이퓨얼(e-Fuel²⁾) 기술 개발 필요성 강화

- e-Fuel은 재생에너지 기반 수소(그린수소)와 포집된 CO₂를 활용해 합성하는 탄소중립 연료로, 탄소 순환구조(Closed Carbon Cycle)를 구현할 수 있는 대표적 기술
 - 재생에너지로 생산한 수소와 산업 및 대기에서 포집한 CO₂를 다시 연료로 전환함으로써, 배출된 탄소를 다시 활용하는 순환형 에너지 시스템을 구축할 수 있어 탄소중립 실현의 핵심 기반 기술로 평가
- 촉매·공정 기반의 다양한 e-Fuel 합성 기술이 발전하며 기술 확장성과 산업 적용 가능성이 빠르게 확대되는 추세
 - 열·촉매 반응을 기반으로 CO₂와 수소를 직접 반응시켜 액체연료를 생산하는 PTL(power-to-liquid) 기술의 상용화를 목표로 개발 중
 - CO₂를 일산화탄소(CO)로 전환한 후 그린수소와 혼합하여 합성가스(Syngas)를 제조하고, 이를 Fischer-Tropsch³⁾ 공정이나 메탄을 합성 공정에 투입하는 방식도 산업 적용성이 높은 기술로 인식
 - 최근에는 전기화학적 공정을 활용해 CO₂를 메탄올·에탄올 등 액체연료로 직접 전환하는 기술이 등장하고 있으며, 재생에너지 전력과의 연계를 통해 고효율 전환 기술 개발이 가능해지는 등 기술적 다양성과 잠재력이 확대 추세

2) 태양광이나 풍력 등 재생에너지를 활용해 물을 전기 분해해서 수소를 생산하고 여기에 이산화탄소나 질소를 합성해서 만드는 새로운 연료

3) 합성가스(수소와 일산화탄소 혼합물)를 금속 촉매(주로 철 또는 코발트)를 이용해 고온/고압에서 반응시켜 액체 탄화수소(합성유, 합성디젤 등)로 전환하는 화학 공정

- 기존 에너지 인프라와의 높은 호환성으로 전환 비용 최소화 및 탈탄소화 가속화 가능
 - e-Fuel은 내연기관 차량, 항공기, 선박 등 기존 화석연료 기반 시스템에서 별도 인프라 구축 없이 바로 활용할 수 있어, 산업·수송 부문의 탈탄소화를 병행하는데 큰 장점 제공
 - 특히 수송·물류·항공 등 전력 기반 전환이 즉각적으로 어려운 분야에서 e-Fuel은 실질적이고, 비용 효율적인 대안으로 작용
- 탄소 중립을 위한 화석연료 대체 및 어려운 감축 분야 대응의 전략적 솔루션으로 부상
 - e-Fuel 기술은 기존 내연기관 중심의 에너지 시스템 구조적 제약을 보완하며, 중장기적으로 국가 탄소중립 목표 달성을 뒷받침하는 핵심 기술군으로 자리매김
 - 특히 산업·수송 부문 등 탄소 배출 감축이 어려운 분야에서 e-Fuel은 높은 배출 저감 효과를 보유한 수단으로, 국가 Net-Zero 전략의 핵심 기술로서 고도화가 필수적인 것으로 평가



출처 : Data source: ERA5•Credit: C3S/ECMWF

| 산업화 이전 수준 대비 온도 상승폭 변화 |

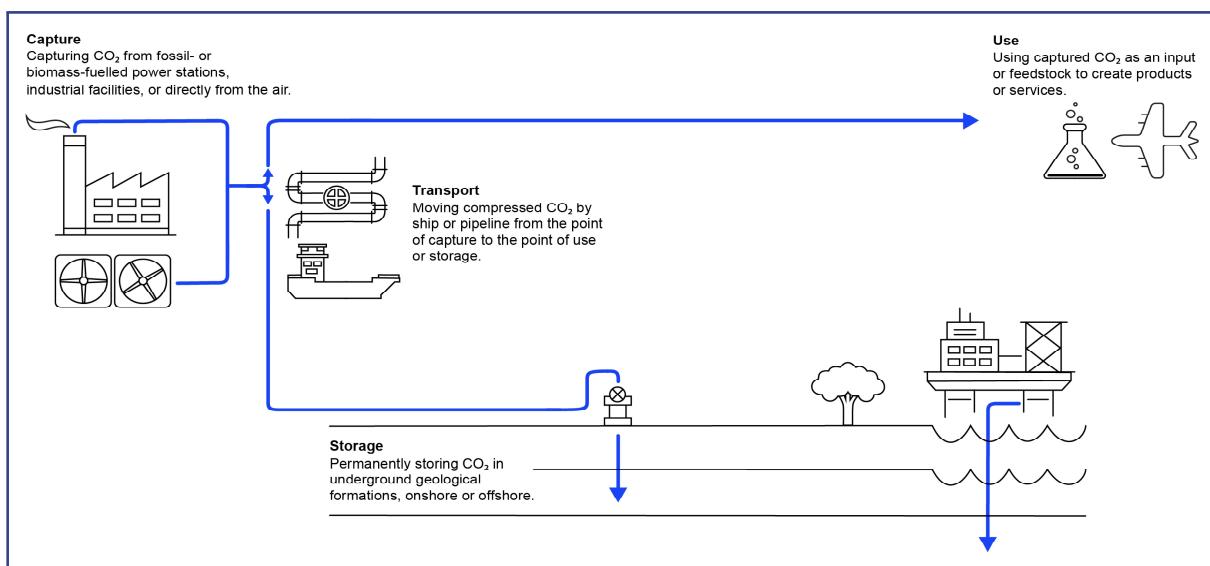
2

이산화탄소 포집/저장 및 전환 기술의 정의 및 범위

1 이산화탄소 포집/저장 기술의 정의 및 범위

■ (정의) 이산화탄소 포집/저장/활용 기술⁴⁾

- 대규모 산업 배출원 또는 대기 중에서 CO₂를 분리·압축한 뒤 적정 위치로 운송하여 장기간 저장하거나, 이를 연료·화학물질 등 부가가치 있는 제품으로 전환해 활용하는 과정



출처 : IEA. CO₂ Storage Resources and their Development

| 잠재적 이산화탄소 관리 개요도 |

■ 이산화탄소 포집 기술은 적용되는 시점이나 방식에 따라 ①연소 후 포집, ②연소 전 포집, ③순(純) 산소 연소, ④직접 공기 포집으로 분류

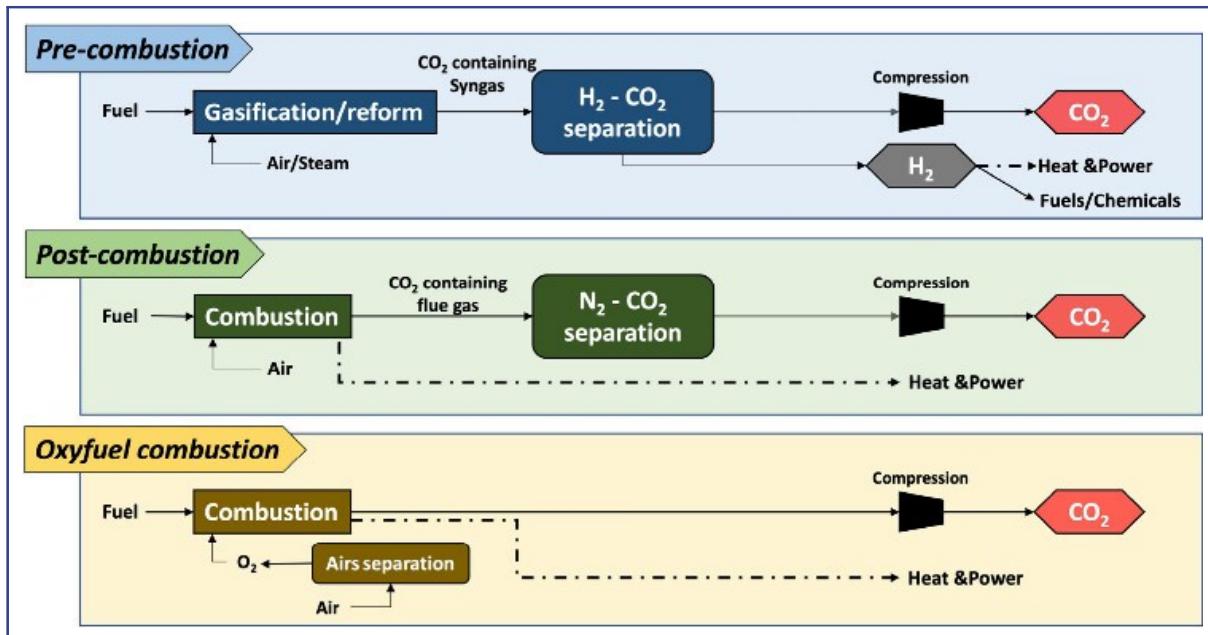
- (연소 후 포집⁵⁾) 화석연료가 연소된 후 배출되는 연소 가스에서 분리하는 가장 일반적인 방식
 - 주로 아민 계열의 화학 흡수제를 사용 이산화탄소를 선택적으로 흡수·분리하는 습식 방식 사용
- (연소 전 포집⁶⁾) 화석 연료 연소 전 이산화탄소를 분리하는 방식
 - 연료를 고온·고압 조건에서 산소 및 증기와 반응시켜 수소와 이산화탄소의 혼합가스로 전환한 후, 이산화탄소는 포집하고 수소는 연료로 활용

4) Carbon capture, utilization and Storage, CCUS

5) Post-combustion Capture

6) Pre-combustion Capture)

- (순산소 연소⁷⁾) 연료를 일반 공기 대신 거의 순수한 산소와 연소하여 분리하는 방식
 - 배출 가스의 대부분이 이산화탄소와 수증기로 구성, 수증기 응축 시 고농도의 이산화탄소 분리 가능
- (직접 공기 포집⁸⁾) 대기 중의 저농도의 이산화탄소를 직접 포집하는 기술



출처 : Energy Fuels 2024, 38, 15, 13858–13905

| 이산화탄소 포집 기술 분류 |

- ▣ 이산화탄소 저장 기술의 방식은 ①지중 저장, ②이산화탄소 광물화, ③해양 저장으로 분류
- (지중 저장⁹⁾) 광범위하게 연구되고 상용화에 근접한 기술로 포집한 이산화탄소를 초임계 상태¹⁰⁾로 압축 후 지하 깊은 곳의 지질 구조에 주입하는 방식
- (이산화탄소 광물화¹¹⁾) 이산화탄소를 칼슘이나 마그네슘을 포함하는 광물과 반응시켜 안정적인 고체 탄산염 (CaCO₃, MgCO₃) 광물로 전환하는 기술
- (해양 저장¹²⁾) 이산화탄소를 바다에 직접 저장하는 방식이나, 현재는 해양 산성화 등 환경 문제에 대한 우려로 인해 연구가 제한적

7) Oxy-fuel combustion

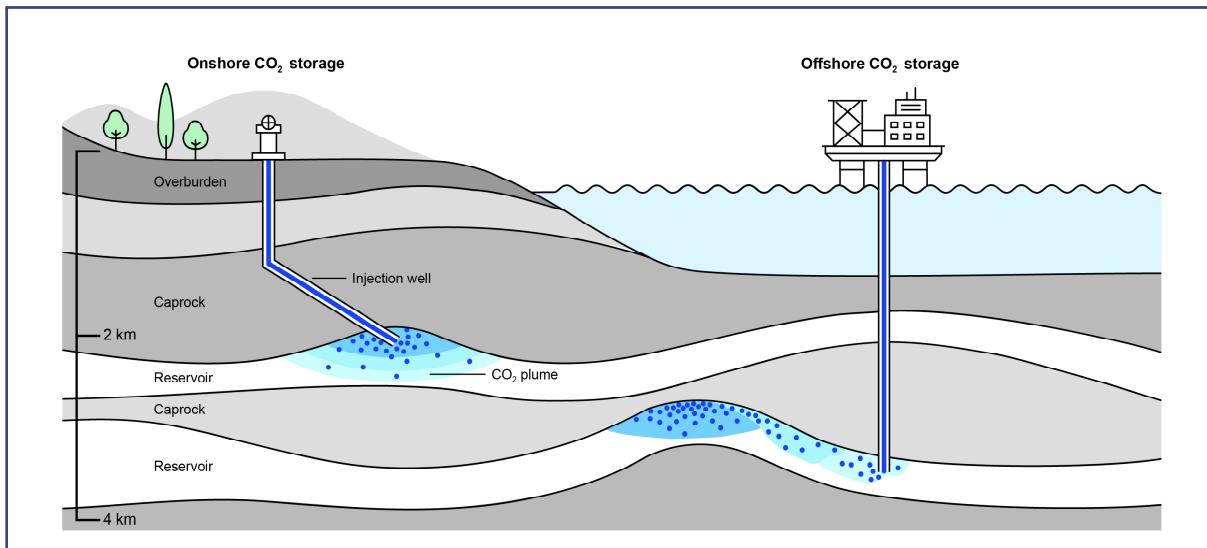
8) Direct air capture, DAC

9) Geological Storage

10) 액체와 기체의 성질을 동시에 갖는 상태

11) Mineralization

12) Ocean Storage

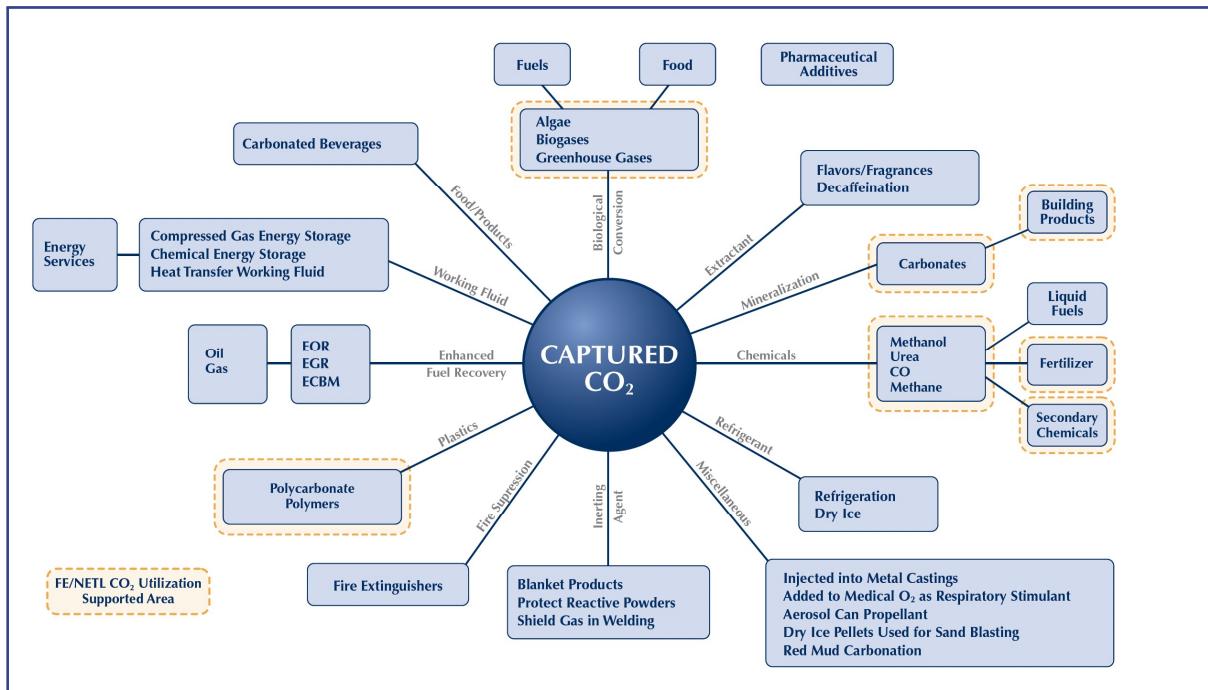


출처 : IEA. CO₂ Storage Resources and their Development

| 육상 및 해상 이산화탄소 저장 개요도 |

▣ 이산화탄소 활용 기술은 최종 제품의 유형과 에너지 투입 방식에 따라 ①건축자재, ②연료·화합물·플라스틱, ③조류(Algae) 기반 제품으로 구분

- (건축 자재) 포집된 이산화탄소를 탄산염 등 고정형 물질로 전환하여 건축자재로 활용
 - CO₂를 광물화하여 안정적인 탄산염 형태로 전환함으로써 장기 저장 효과를 확보할 수 있으며, 이는 'CO₂광물화 저장기술'과 동일한 원리로 작동
 - 전환된 물질은 콘크리트·블록·도로 포장재 등 건설 현장에서 활용 가능하며, 에너지 소비가 큰 시멘트 산업의 탄소 배출 저감에도 기여하는 등 산업적 파급효과가 상당
- (연료, 화합물, 플라스틱) 에너지를 투입하여 CO₂를 고부가가치 화학제품으로 전환
 - CO₂를 메탄올, 합성연료, 합성가스, 플라스틱 원료 등 다양한 화학물질로 재전환함으로써 탄소 순환 기반의 제조산업 확대가 가능
 - 에너지 투입방식은 열촉매(고온·고압 조건), 전기화학적 전환(전략 기반), 생화학적 전환(미생물 활용), 광·전기화학적 전환(태양광 기반) 등 다양한 공정이 적용되며, 재생 에너지와 연계할 경우 탄소중립형 화학산업 생태계 구축에 핵심 역할 수행 가능
- (조류 (Algae) 기반 제품) 조류의 생물학적 탄소 고정 기능을 활용한 고부가가치 제품 생산
 - 조류는 CO₂, 햇빛, 영양분을 흡수하여 빠르게 성장하는 특성이 있어, 생물학적 방법으로 CO₂를 안정적으로 고정할 수 있는 대표적 생물 자원
 - 수확된 조류는 바이오연료, 사료, 비료, 화장품 원료, 생분해성 소재 등 다양한 제품으로 가공될 수 있어, 탄소 저감과 함께 새로운 바이오산업 창출 효과도 기대



출처 : National Energy Technology Laboratory www.netl.doe.gov CARBON UTILIZATION—A VITAL AND EFFECTIVE PATHWAY FOR DECARBONIZATION, C2ES

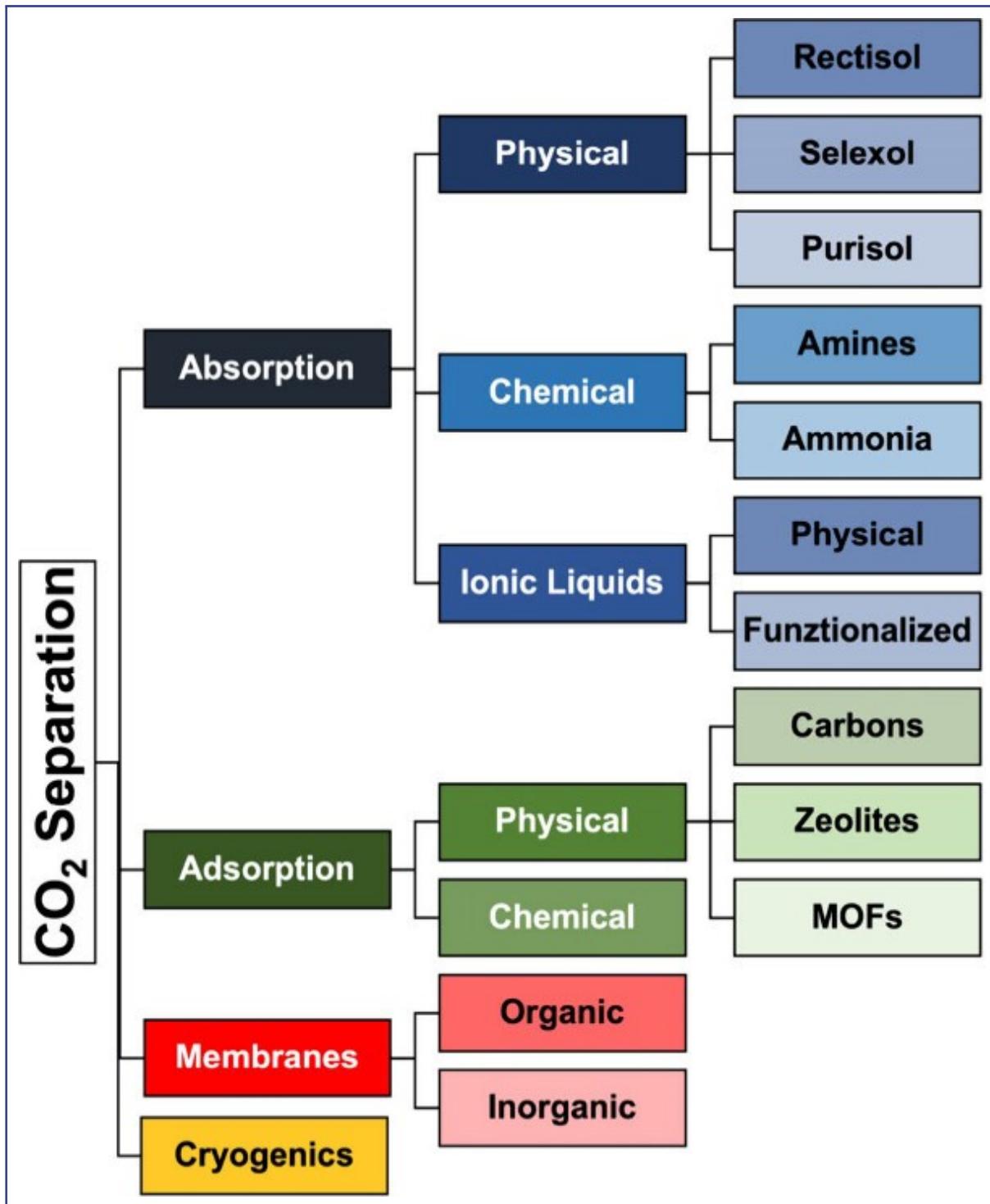
| 이산화탄소 활용 경로 |

▣ 연소 후 포집 기술에는 대표적으로 화학적 흡수(Chemical absorption), 물리적 흡수(Physical absorption), 흡착(Adsorption)이 있으며, 포집 기술 선택을 위해선 이산화탄소 배출 환경 요소 고려가 필수

- 이산화탄소 배출원의 조성, 불순물의 종류와 농도, 이산화탄소 부분압, 배출원의 온도와 압력을 고려한 포집 기술 선택이 필수 조건

| 연소 후 포집 기술 |

연소 후 포집 기술	내용
화학적 흡수	<ul style="list-style-type: none"> (방법) 일컬리성 용매와 이산화탄소 간의 산·염기 반응을 이용해 이산화탄소를 포집한 후, 틸착 공정을 통해 고순도 이산화탄소를 회수하고 용매를 원래 상태로 재생 (용매) 아민계열*이 주로 사용 * monoethanolamine, piperazine (CO₂에 대한 흡착 엔탈피) 1차 아민은 80–90kJ/mol, 2차 아민은 70–75kJ/mol, 3차 아민은 40–55kJ/mol (장점) 최대 98%*의 높은 이산화탄소 포집 효율 달성을 가능, 아민 계열 용매는 대체적으로 높은 포집 용량** * 대규모 공정의 경우 일반적으로 70–95%의 포집 효율 달성 ** monoethanolamine의 경우 포집 용량은 4mmol/g (단점) 높은 에너지비용을 발생* 및 배출원 내 불순물(SOx, NOx)에 의한 용매 분해로, 설비 부식 유발 혹은 대기 중으로 방출 시 별암성 물질 형성 * 포집 비용의 약 70%
물리적 흡수	<ul style="list-style-type: none"> (방법) 헨리의 법칙(Henry's Law)에 따라 특정 용매에 이산화탄소가 물리적으로 용해되는 원리를 이용, 고압/저온 조건에서 이산화탄소를 용매에 용해시켜 포집* * 이산화탄소 틸착 과정은 압력을 낮추거나 온도를 높이는 방식 (용매) selexol*, rectisol**, purisol*** 등 * dimethyl ether of polyethylene glycol을 이용, ** 메탄을 이용, *** N-methylpyrrolidone을 이용 (장점) 화학 결합 분해 필요성 없고, 화학적 흡수보다 재생에 필요한 에너지가 적고 용매의 분해나 부식 문제가 적은 수준 (단점) 이산화탄소의 농도가 낮은 배출원에서는 비효율적, 화학적 흡수에 비해 이산화탄소 흡수 용량이 제한적(~0.2 mmol/g). 흡수 공정 전에 냉각해야 하므로 공정 전체의 효율이 감소 가능성 존재
흡착	<ul style="list-style-type: none"> (정의) 액체 용매와 달리 다공성 고체 표면에 가스 문자가 달라붙는 현상을 이용해 이산화탄소를 분리하는 기술 (물리적 흡착) 이산화탄소와 다공성 고체 포집 물질 표면 간의 약한 반데르발스 힘에 의해 발생, 흡착 엔탈피 (~10kJ/mol)이 낮아 재생 용이 (화학 흡착) 이산화탄소와 다공성 고체 포집 물질* 표면의 특정 작용기 간의 화학 결합이 형성흡착엔탈피 (~100kJ/mol)가 높아 재생이 어렵지만 낮은 이산화탄소 농도에서도 포집 가능 * 활성탄 (activated carbon), 제올라이트, 금속-유기 골격체 (metal organic frameworks, MOFs) 등 (기타) 흡착공정은 변동 흡착, 압력/진공 변동 흡착으로 구분



출처 : Energy Fuels 2024, 38, 15, 13858–13905

| 이산화탄소 포집 기술과 일반적으로 사용되는 재료들 |

▣ **직접 공기 포집 (Direct air capture, DAC)는 기후 변화에 대응하기 위한 Carbon negative technology 중 하나로, 흡수제의 유형에 따라 분리**

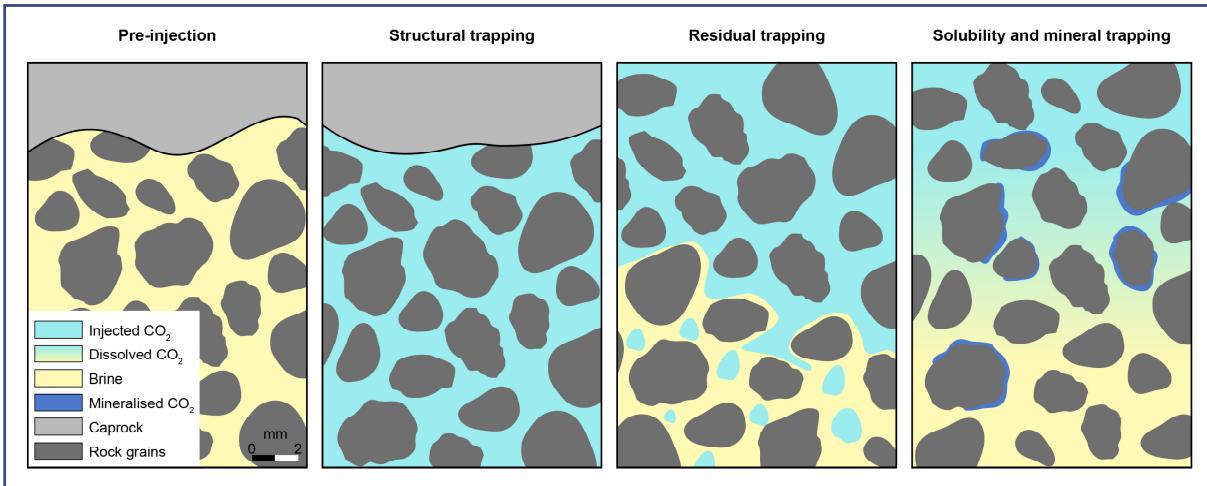
- 직접 공기 포집은 대기 중의 공기로부터 직접 이산화탄소를 포집
- 해당 기술은 콘크리트 산업, 운송 부문, 철강 산업과 같이 회피하기 어려운 이산화탄소 배출을 상쇄하는데 중요한 역할
- 사용하는 흡수제의 유형에 따라 액체 흡수제 방식과 고체 흡수제 방식으로 분류

| 흡수제 방식별 비교 |

액체 흡수제 방식	고체 흡수제 방식
<ul style="list-style-type: none"> • (정의) 액체-침전 사이클이라고도 불리며, Carbon engineering이 제시한 방식 중 하나 • (방법) 공기 중의 이산화탄소를 강알칼리성 용액 (예:NaOH)과 접촉 후 액체에 흡수시키면, 화학 반응을 통해 탄산칼슘 고체 침전물로 변환 이후 소성로에서 약 고온(900°C)로 가열시 고순도의 이산화탄소가 분리 • (특징) 고온의 열 공급에 따른 큰 에너지 소모 	<ul style="list-style-type: none"> • (정의) Climeworks 회사가 사용하는 방식, 다공성 고체 필터 이용 • (방법) 공기가 아민 작용기를 가진 고체 흡수체로 코팅된 필터를 통과하면 이산화탄소가 필터 표면에 화학적으로 결합하고, 필터가 이산화탄소로 포화되면 비교적 낮은 온도(80~120°C)로 가열하여 고순도의 이산화탄소 분리 • (특징) 저온 재생에 따른 상대적으로 낮은 에너지 요구

▣ **이산화탄소 지중 저장은 포집된 이산화탄소를 영구적으로 격리하는 이산화탄소 저장 기술이나 한계 존재**

- 이산화탄소는 염수층*, 고갈된 석유 및 가스전**, 현무암이나 석탄층 등 특정 조건을 갖춘 지질 구조에 저장 요구
 - * 고농도의 소금물을 포함하고 있는 다공성 및 투과성 암석층, ** 과거 석유나 가스를 추출하여 비어있는 저류층
 - 일반적으로 800m 이상의 깊이* 주입 시 초임계 유체 상태가 되며, 저장 암석의 미세한 공극을 채우며 기존에 존재하던 공극수 배수
 - * 압력: 100 bar 이상, 고온
 - 이산화탄소는 시간이 지남에 따라 다양한 트래핑 메커니즘에 통해 더 안전하게 저장
- 단층의 활성화로 인한 누출이 발생 가능성, 시간에 따른 이산화탄소 주입 가능 비율 감소, 높은 초기 비용과 긴 개발 기간, 그리고 적은 실제 개발 가능 매장지의 한정성 존재



출처 : S. Flude and J. Alcade (2020), Carbon capture and storage has stalled needlessly – three reasons why fears of CO₂ leakage are overblown

| 저류층 내 이산화탄소의 미시적 규모의 트래핑 과정 |

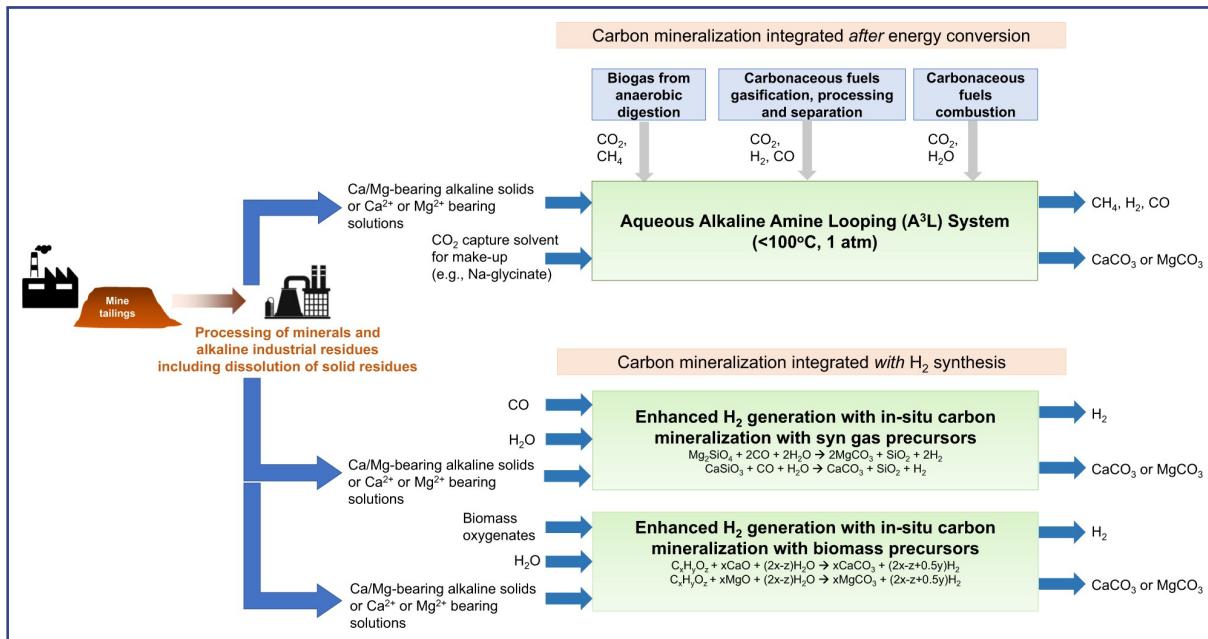
- 이산화탄소는 광물화 과정을 통해 2가지 형태로 저장할 수 있으며, 영구 저장과 자원화가 가능하다는 장점이 있으나 효율·비용상의 제약이 존재
 - 광물화는 이산화탄소를 칼슘 또는 마그네슘과 같은 알칼리성 공급원과 반응시켜 물에 녹지 않는 고체 탄산염 광물을 형성하는 과정

- (**in-situ 탄소 광물화**) 지중 저장 기술 중 주입된 이산화탄소가 지하에서 암석과 반응하여 수년에 걸쳐 고체 탄산염으로 변환되어 저장되는 방식
- (**ex-situ 탄소 광물화**) 이산화탄소가 배출되는 현장에서 포집된 이산화탄소를 공정을 통해 탄산염으로 전환하여 건축 자재 등 다양한 제품으로 판매하거나 저장하는 방식
- 광물화를 위해 칼슘과 마그네슘을 공급할 수 있는 알칼리성 원료로는 규산염 광물, 알칼리성을 띠는 산업 폐기물*, 광산 찌꺼기 등이 활용 가능
 - * 감람석, 규화석, ** 석탄재, 제철 슬래그, 시멘트 분진 등

- 열역학적 안정성과 영구적 저장 가능성, 폐기물 활용, 부가가치 자재 생성, 수소 생산 공정 효율 향상 등 다양한 장점 보유

- 이산화탄소의 광물화를 수소 생산과 연결하여 수소 생산 증대
- 수소를 만드는 과정에 이산화탄소를 바로 잡아두는 공정을 함께 넣어, 만들어진 이산화탄소가 곧바로 탄산염으로 고정되도록 하면 수소가 더 잘 만들어지는 방향으로 반응이 진행
- 바이오매스를 수소와 전환하는 과정에 알칼리성 흡수제를 추가하여 수소 생산량 증가

- 반면, 반응 속도가 느리고 고부가가치 제품의 순도 확보에 한계가 있으며, 고비용 전처리 공정, 복잡한 화학 공정 구조, 원료의 불균일성 등 해결이 필요한 과제가 여전히 존재



출처 : Communications Chemistry volume 4, Article number: 23 (2021)

| 탄소 광물화 경로 |

▣ 우선 포집 후 주로 고순도의 이산화탄소를 아래와 같은 방법으로 전환

- 열촉매 기반 건식 메탄 개질(Dry Methane Reforming, DMR) 기술은 메탄과 이산화탄소를 원료로 활용하여 일산화탄소와 수소를 1:1 비율의 합성가스로 생산하는 공정으로, 바이오리액터 (bioreactor¹³) 활용 포함
 - FT 공정¹⁴에서 요구되는 비율보다 낮아 증기 메탄 개질 (steam methane reforming, SMR) 공정과 혼합하여 FT 공정에 적합한 비율 (H₂/CO=2) 조정
 - DMR 공정은 열을 많이 필요로 하는 흡열 반응으로서 고온(1000°C)이 요구되며, 저압 조건(4 bar)에서 유리함. 촉매는 Ni, CO 기반 물질이 주로 사용
 - 고온을 유지하기 위해 막대한 열이 필요하며 FT 공정에 원료를 공급하기 위해서는 저압 합성가스를 압축하는 시스템이 필수적
- 생화학적 이산화탄소 전환 기술은 미생물 또는 효소와 같은 생물학적 촉매 (biocatalyst)를 사용하여 이산화탄소를 전환하는 방식으로 분류
 - 미생물의 에너지 및 탄소 획득 방식에 따라 독립영양과 종속영양 방식으로 분류

13) 미생물·세포·효소 등 생물학적 촉매를 이용해 원하는 물질을 생산하거나 화학 반응을 수행하는 반응기

14) 피셔-트롭슈 공정(Fischer-Tropsch process), 일산화탄소(CO)와 수소(H₂)로 이루어진 합성가스(syngas)를 촉매 반응을 통해 액체 연료(디젤, 항공유 등)나 액스, 화학제품으로 전환하는 기술

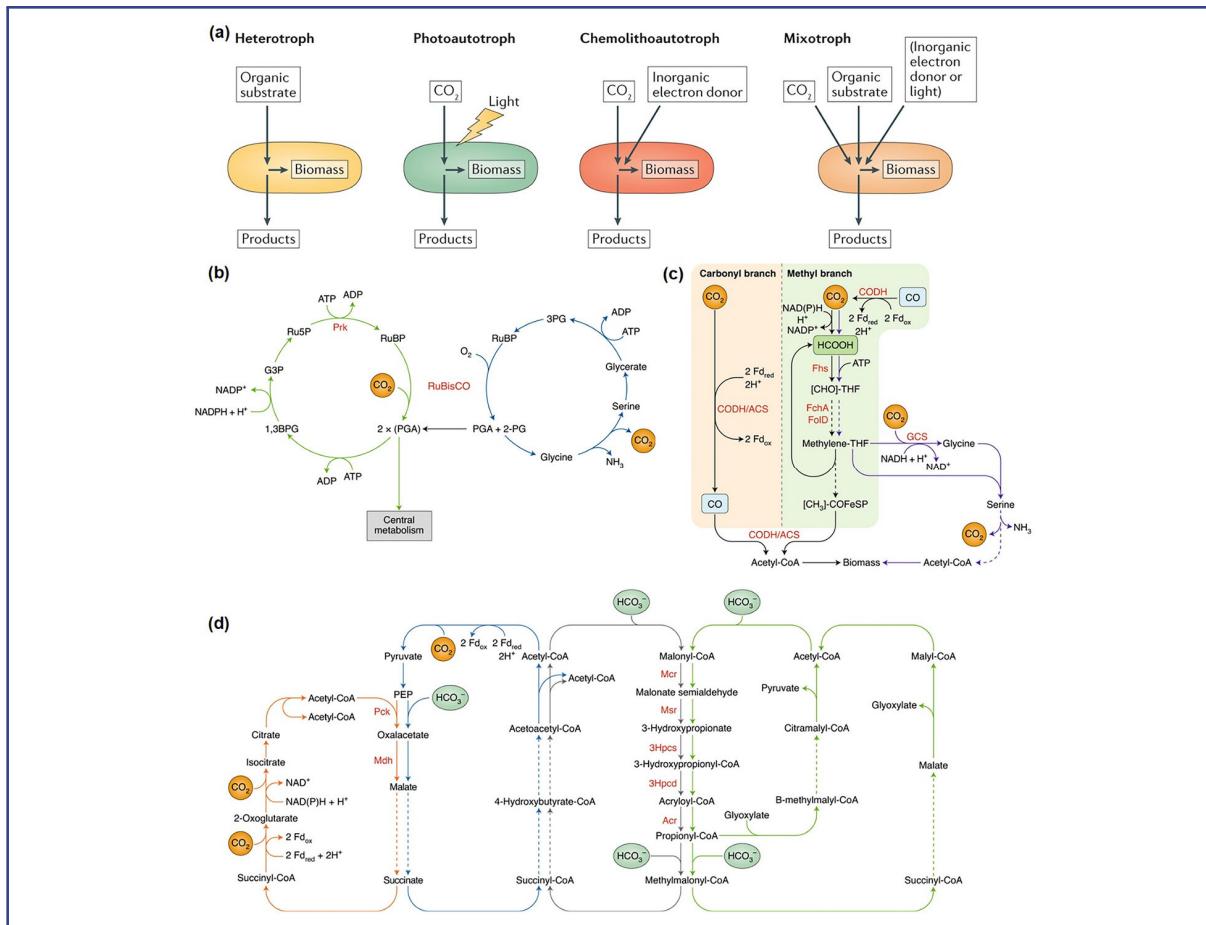
- **(독립영양 방식)** 독립영양 미생물이 빛*이나 무기** 화합물에서 에너지를 얻어 이산화탄소를 직접 고정하고 바이오매스로 전환하는 방식

* 광독립영양생물은 태양광을 에너지원으로 사용하여 광합성을 통해 이산화탄소 고정

** 화학독립영양생물은 수소와 같은 무기물 환원제를 산화시켜 에너지를 얻고 그 에너지로 이산화탄소 고정

- **(종속영양 방식)** 종속영양 미생물이 일차적으로 유기 탄소원(포도당)을 주된 에너지원으로 사용하여 대사 경로 내의 카르복실화 반응을 통해 일부 이산화탄소가 고정되는 방식

- 복잡한 다탄소 화합물의 생성이 가능하고, 대부분의 공정이 상온·상압 조건에서 이루어져 유전공학을 통해 원하는 생산 경로를 설계하거나 강화하는 데 용이
- 미생물의 대사 속도가 본질적으로 낮아 전환 속도가 제한적이며, 이산화탄소를 기체 형태로 활용할 경우 배양액으로의 물질 전달 효율이 저하되는 한계가 존재



출처 : Adv. Funct. Mater. 2025, e13716

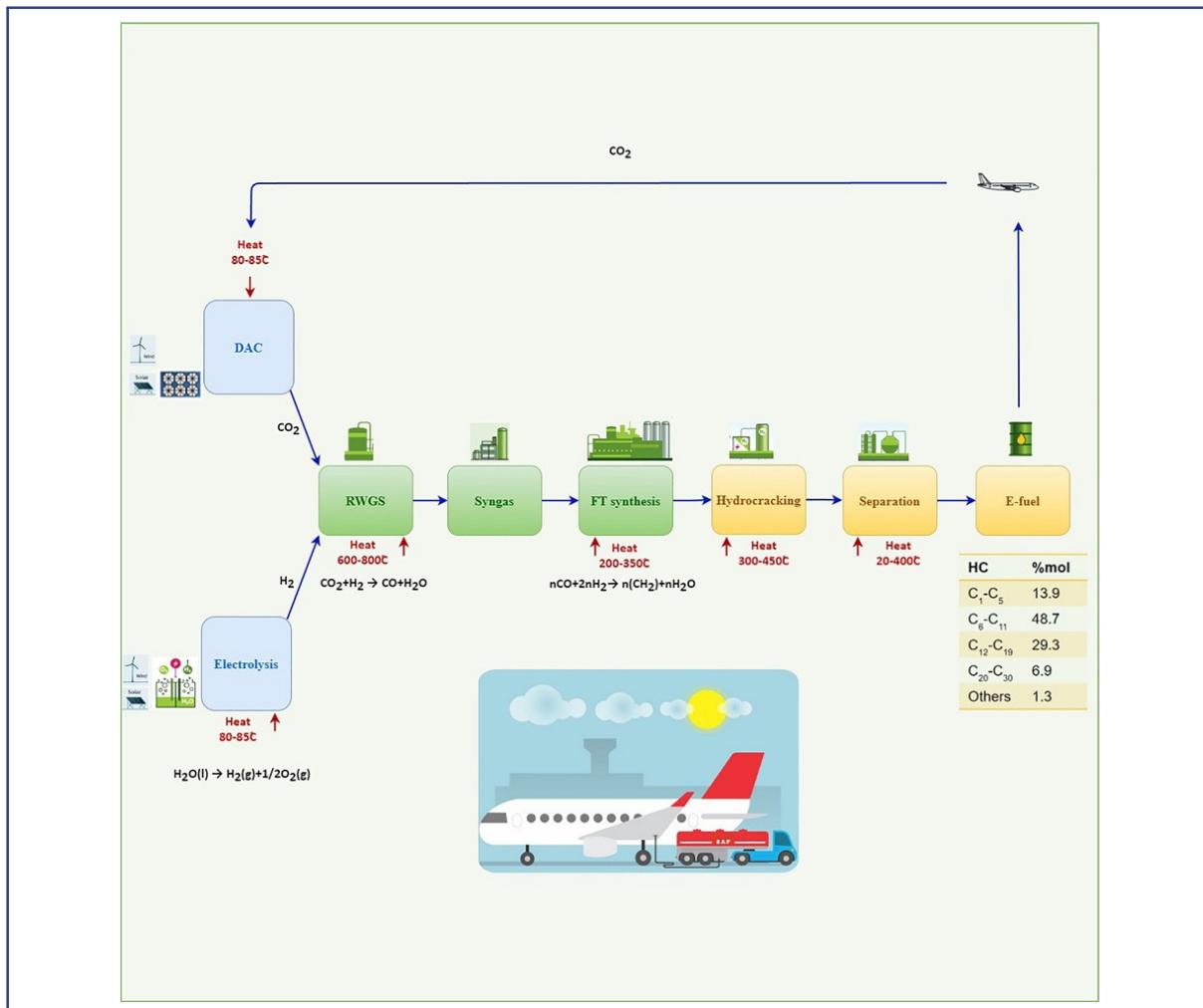
| 미생물을 이용한 이산화탄소 전환의 대사 경로 |

3

이산화탄소 전환 기술을 이용한 e-Fuel 합성

- 탄소중립 연료인 e-Fuel은 주로 재생에너지로 생산한 수소(그린수소)와 포집된 이산화탄소를 합성하거나 이산화탄소를 전환하여 생성

- 수전해를 이용한 e-Fuel 합성은 생산한 수소와 대기 중 직접 포집을 활용, 이산화탄소를 RWGS(reverse water gas shift)를 통해 합성가스로 전환 후 생성



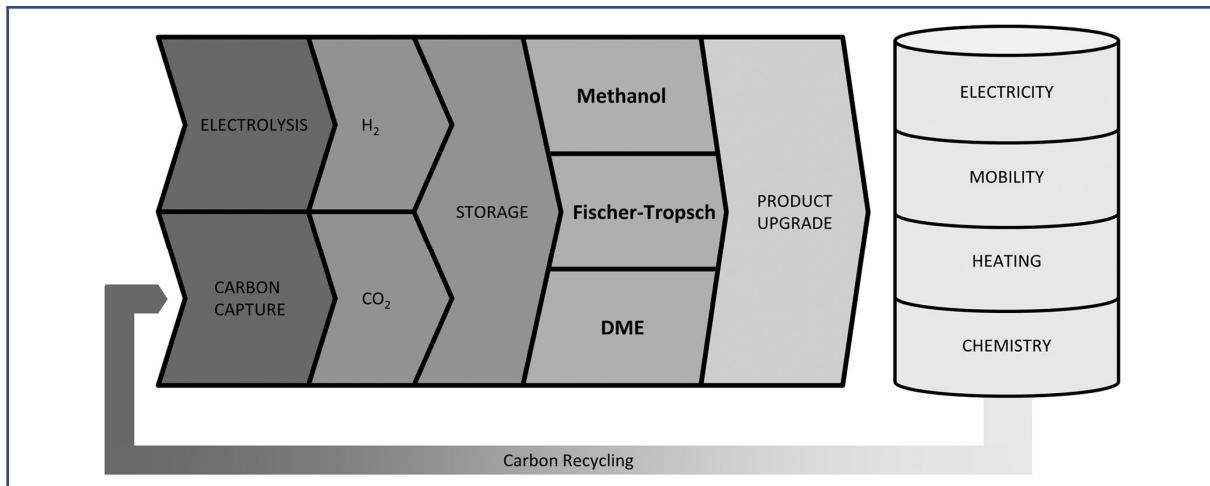
출처 : iScience 27, 109154, March 15, 2024

- 열 촉매를 이용한 Power-To-Liquid (PTL) 기술을 이용해 이산화탄소와 수소를 반응시켜 e-Fuel을 합성 가능
 - PTL 기술은 재생 에너지로 생산된 수소와 포집된 이산화탄소를 액체 연료로 전환하는 공정으로 항공, 해운, 화학 산업에 탄소중립 연료 제공

- 이산화탄소를 활용한 주요 액체 연료 합성 경로는 메탄올 합성 경로, dimethyl ether (DME) 합성 경로, 피셔 트롭시(FT) 합성 경로가 존재

| 액체 연료의 주요 합성 경로 |

합성 경로	주요 내용
메탄올	<ul style="list-style-type: none"> 직접 이산화탄소 수소화 (Direct CO₂ Hydrogenation) 과정을 통해 메탄올 합성 반응 온도 200–300°C, 압력 50–100bar, 촉매는 Al₂O₃ 기반 CuO/ZnO 기존 일산화탄소 기반 합성에 비해 부산물 형성이 적고, 반응열이 낮으나 합성 중에 물이 생성되어 전환율이 낮아지는 한계성 존재
DME	<ul style="list-style-type: none"> 일산화탄소 혹은 이산화탄소와 수소를 통해 메탄올을 합성한 뒤 탈수시켜 DME 합성 메탄올 합성 후 탈수 단계에서는 운전 온도가 220–400°C, 압력은 1–30 bar, 고체 산 촉매나 제올라이트가 주로 촉매로서 사용 초기 투자 비용이 낮고 반응을 동시에 진행시켜 높은 원료 전환율 달성을 가능하나, 현 기술은 아직 초기 연구 단계
피셔– 트롭시(FT)	<ul style="list-style-type: none"> 수성 가스 전이 반응 (WGSR)를 통해 이산화탄소를 일산화탄소로 전환시켜 합성가스를 생성한 후 기존 FT 합성에 투입시켜 연료를 생성 <ul style="list-style-type: none"> * 고온 공정 조건은 300°C 이상, 압력 20–40 bar, 철 기반 촉매 사용 * 저온 공정 조건은 260°C 미만, 압력 20–45 bar, 철 또는 코발트 기반 촉매 사용



출처 : Energy Environ. Sci., 2020, 13, 3207–3252

| 합성을 통해 액체 연료를 생산하는 Power-to-X 경로 |

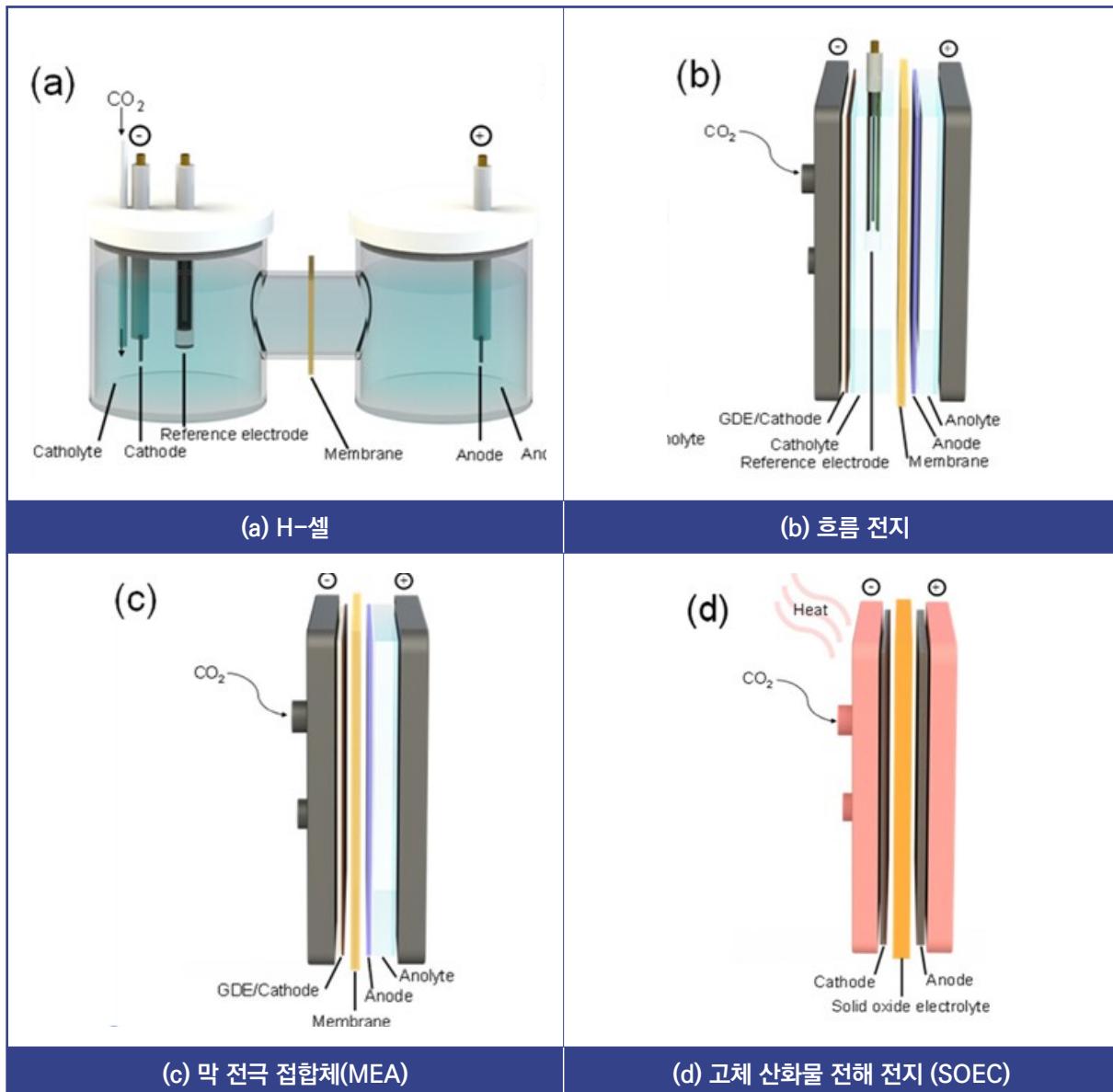
▣ 전기화학적 이산화탄소 전환 기술은 전기화학 반응기 내에서 CO₂가 환원전극으로 확산된 후, 촉매 표면에서의 전자 이동을 통해 다양한 탄소 기반 물질로 전환되는 방식

- 주요 생성물은 탄소 1개를 포함하는 일산화탄소·포름산·메탄과, 탄소 2개를 포함하는 에틸렌·에탄을 등으로 분류
- 이산화탄소 반응기는 작동 온도에 따라 고온에서 운전되는 고체산화물 전해전지(SOEC)와, 저온(상온) 조건에서 전기분해가 이루어지는 막전극접합체(MEA) 반응기로 구분
 - SOEC 반응기는 600°C 이상의 고온, 상압에서 작동, 이산화탄소를 합성가스(CO, H₂)로 변환, 단일 공정으로 합성가스 생산 가능

- (구성·원리) 환원전극에는 세라믹-금속 복합체가 적용되어 이산화탄소 환원이 이루어지며, 산화전극에는 전도성 세라믹 및 페로브스카이트 구조 소재가 사용되고, 분리막을 통해 산소 이온이 이동
- (장점) 고온 조건에서 운전되어 저온 전기분해 기술 대비 시스템 효율이 높고(70% 이상), 합성가스 조성비를 유연하게 조절할 수 있는 장점 보유
- (한계·성숙도) 운전 온도가 낮아질 경우 고체 탄소가 반응기에 축적되는 한계가 있으며, 기술성숙도는 TRL 7~8 수준으로 성숙

- MEA 반응기는 저온 이산화탄소 기술의 다양한 반응기 중 하나, 상온 상압의 조건에서 작동하며, 무간극 구조로 저항을 낮추어 에너지 효율 극대화

- (구성·촉매) 환원전극에는 가스전달전극(GDE)이 주로 적용되어 이산화탄소 환원이 이루어지며, 분리막으로는 음이온교환막(AEM)이 사용됨. 다탄소 생성물 전환에는 구리(Cu) 기반 촉매가 활용되고, 일산화탄소 생성에는 은(Ag) 또는 금(Au) 촉매가 주로 적용
- (특징·장점) 상온 조건에서 운전이 가능하며, 높은 전류밀도와 에너지 효율을 확보할 수 있고, 이산화탄소로부터 메탄올·에탄올·프로판올 등 e-Fuel을 직접 생산할 수 있는 잠재력을 보유
- (공정 연계) 고효율 SOEC를 활용해 일산화탄소를 생산한 후, 이를 저온 이산화탄소 전환 기술에 공급함으로써 메탄올·에탄올·프로판올 등 e-Fuel 생산으로 연계 가능
- (한계) 저온 이산화탄소 전환 기술은 전반적인 기술 성숙도가 낮아 안정성이 충분하지 않으며, 전극 과전압과 pH 영향에 따른 전압 손실로 인해 이론 구동 전압 대비 약 2~3V 높은 전압이 요구되는 한계 존재
- (성숙도) 저온 이산화탄소 전환 기술 중 MEM 기반 반응기는 기술성숙도(TRL) 4~6 수준으로 상대적으로 높은 편

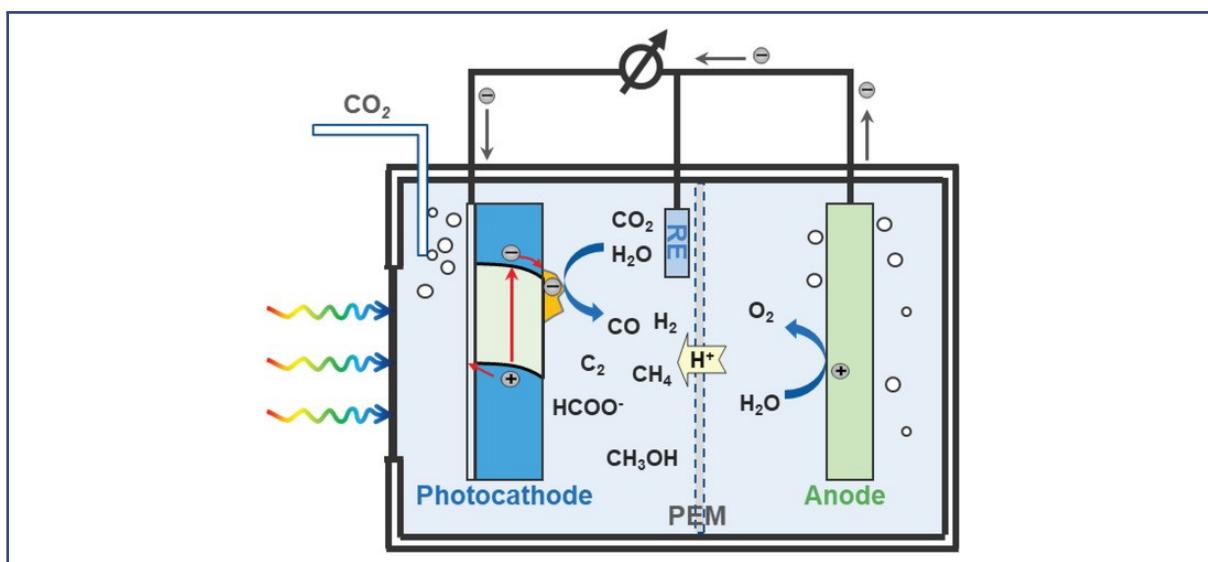


출처 : Chem. Rev. 2024, 124, 7, 3648–3693

| 다양한 전기화학적 이산화탄소 전환을 위한 반응기의 모식도 |

▣ 광전기 화학적 이산화탄소 전환 기술은 광합성과 유사하게 빛을 흡수하는 반도체 재료를 활용, 태양광 에너지를 전기 에너지로 변환 후 에너지를 이산화탄소 환원반응에 사용

- 태양광이 광음극(photocathode) 소재인 p형 반도체에 조사되면, 반도체가 빛을 흡수하여 전자-정공 쌍을 생성
 - 광음극(photocathode)의 기판으로 사용되는 반도체는 가시광선을 흡수할 수 있는 적절한 밴드갭을 요구하며, p형 실리콘, 갈륨 인(GaP), 인듐 인(InP), 산화구리(Cu_2O) 등이 활용
- 여기된 전자¹⁵⁾는 전도대(Conduction Band¹⁶⁾)로 이동한 후 촉매 표면으로 전달되어 흡착된 이산화탄소를 환원하며, 상대 전극에서는 주로 물의 산화 반응을 통해 산소가 발생
 - 생성물의 종류에 따라 적용 촉매가 결정되며, 구리·금·은 등이 주로 사용
 - 이산화탄소 환원이 이루어지기 위해서는 반도체의 전도대 에너지가 이산화탄소 환원 전위보다 더 음의 값(높은 에너지 준위)에 위치 필요
 - 환원전극과 산화전극은 전해질에 침지되어 있으며, 분리막을 통해 서로 분리
- 상대적으로 높은 선택도를 확보하고 self-biased 시스템 구현이 가능하여, 외부 전압 없이 태양광만으로 이산화탄소 전환이 가능한 장점을 보유하나 반응 속도가 느려 상용화에 어려움



출처 : Adv. Energy Mater. 2022, 12, 2201070

| 광전기화학적 이산화탄소 전환을 위한 반응기의 모식도 |

15) 원자가 외부 에너지(빛, 열 등)를 흡수하여 평소보다 더 높은 에너지 준위의 궤도로 이동한 불안정한 상태의 전자

16) 고체 물질(특히 반도체)에서 전자가 자유롭게 이동하며 전류를 흐르게 하는 가장 높은 에너지 영역

II

해외 동향

1

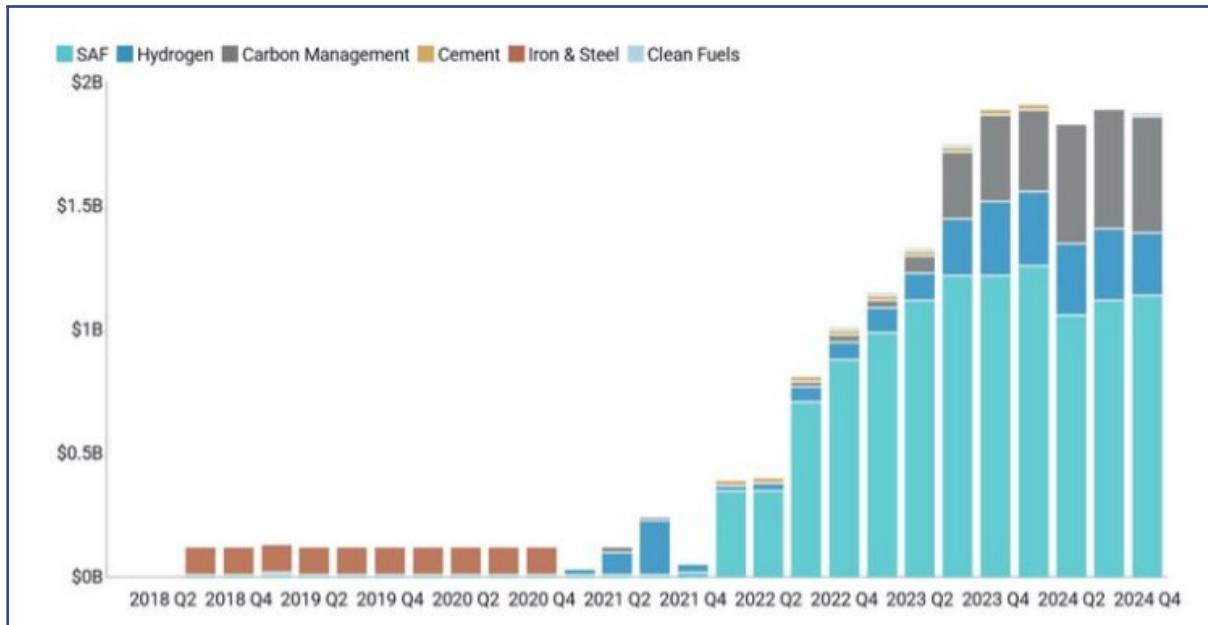
정책 동향

1 미국

■ (CCUS 정책) 연방 정부 기후 규제 완화 속 세제 규제 완화 중심의 시장 주도형 접근과 주정부 중심 분산형 탄소관리 체계가 병행되는 것이 특징

- (선별적 정책) 연방정부 차원의 기후규제 후퇴 속 CCUS 기술 선별적 지원 유지
 - 트럼프 2기 행정부는 기후변화 대응을 위한 연방정부 차원의 규제 및 의무 기반 정책을 전반적으로 후퇴시키는 기조를 유지
 - 다만 CCUS기술은 화석연료, 중공업 기반 산업 경쟁력 유지를 위한 수단으로 인식하고, 기후규제와는 분리된 '산업기술'로서 정책적 존속이 허용되는 양상
- (세제 지원) 2025년 One Big Beautiful Bill Act에는 CCUS 관련 45Q 세액공제가 유지되며, 특히 CO₂ 활용 프로젝트(강화유전(EOR) 포함)도 동일한 세액공제 수준을 인정
 - 45Q 세액공제를 중심으로 한 CCUS 인센티브 체계는 유지·강화되며, 직접 보조금이나 대규모 연방 R&D 프로그램보다는 세제 기반의 시장 주도형 확산 전략이 강조
- (거버넌스) 연방정부 직접 개입 축소 및 주(州)정부 중심 거버넌스 강화 기조 형성
 - 연방정부의 정책 리더십 약화로 인해, 주정부가 CCUS·CDR 정책의 핵심 추진 주체로 부상하며 캘리포니아, 뉴욕, 매사추세츠, 워싱턴 등은 CDR 중심의 입법·재정 프로그램 확대
 - 노스다코타·와이오밍·루이지애나 등은 지질학적 CO₂ 저장 인허가 권한(primacy)을 확보하여 저장 프로젝트를 주도
- (규제완화) CCUS 저장시설과 관련한 허가, 환경 규제 절차를 완화하고, 주정부 권한을 확대함으로써, 프로젝트 추진 속도 및 민간 참여 여건 개선 경향이 강화
 - 규제완화 및 인허가 신속화 중심 접근 정책기조는 비용절감과 사업 가속 측면에서는 긍정적이나, 안정성, 책임성 관리의 지역 편차 가능성도 내포

- (구조적 한계) 연방정부 차원의 명확한 감축 목표 및 의무체계 부재로 인해, CCUS는 장기적 국가전략보다는 단기 산업 정책의 보조 수단으로 기능
 - 이에 따라 기술표준, 장기저장 책임, 크로스보더CO₂ 운송¹⁷⁾ 등 체계적 거버넌스 구축에 한계



※ SAF : Sustainable Aviation Fuel(지속가능한 항공연료)

출처 : Reuter. 2025. 4.30., US carbon capture storage hit by inflation, Trump

| 미국 기술별 탈탄소화 투자 현황 |

- (e-Fuel 정책) 강제적 탈탄소 수단이 아닌 연료 중립적 선택지로서 세계 인센티브 기반의 시장유도에 의존하며, 연방 리더십 약화 속 주정부 정책이 실질적 확산을 좌우하는 구조

- (연료중립적 접근) 연방 정부 차원의 강제적 감축 규제, 의무 혼합 정책은 약화되는 반면, e-Fuel은 기후정책의 핵심수단이라기 보다 연료 선택지 중 하나로 취급
 - 항공, 해운 등 특정 부문에 대한 의무 혼합 비율 설정에는 소극적인 기조가 유지
- (세계 인센티브) e-Fuel은 연료 유형이 아닌 성과(전주기 탄소집약도) 기준으로 평가되는 구조하에서 지원되고, 직접 보조금이나 전용 펀드보다 세계 인센티브를 통한 민간 투자 유도
 - 청정연료 생산 세액공제(45Z) 등 기존 세계 프레임에서, 전주기 탄소집약도 기준을 충족할 경우 e-Fuel도 지원 대상에 포함
- (제한적 수요) SAF(항공) 및 해운을 중심으로 제한적 수요가 있으며, 항공, 해운산업의 e-Fuel의 자발적 도입 및 주 정부 단위 정책으로 지원

17) 한 국가에서 포집된 이산화탄소를 국경을 넘어 다른 국가의 저장지(CCS) 또는 활용시설(CCU)로 운송하는 체계

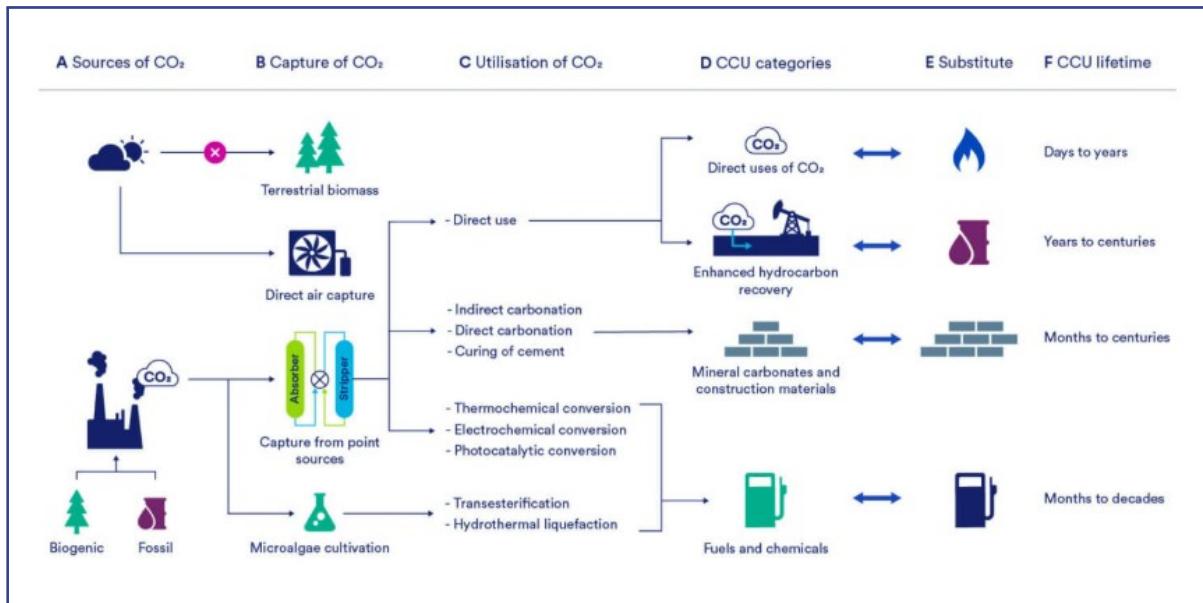
- (제한적 활용) 에너지 및 산업경쟁력 관점에서 e-Fuel의 제한적 활용
 - e-Fuel은 에너지안보, 산업경쟁력 풀에임에서 검토되며, 화석연료 산업과의 충돌을 최소화하는 범위내에서 보완 기술로 인정
 - 재생전력, 그린수소 추가성 요건 등 EU와 같은 엄격 기준 도입에는 소극적 자세 견지

2 EU

■ (CCUS 정책) 탄소가격 기반 시장 유인, 대규모 공공 투자, 클러스터·크로스보더 인프라, 엄격한 저장 규제를 결합한 ‘통합형·인프라 중심 탄소관리 전략’으로 특징

- (Net-Zero 필수 감축수단) EU는 CCUS를 재생에너지, 전기화만으로는 해소가 어려운 산업부문 잔존배출 대응을 위한 핵심수단으로 규정하고 2050 탄소중립 달성을 위한 필수 기술로서 정책 체계에 반영
- (시장기반 유인) 포집·저장된 CO₂를 배출로 간주하지 않는 EU ETS¹⁸⁾체계를 통해, CCUS 적용 기업이 실질적인 탄소비용 절감 효과를 누릴 수 있도록 설계하여 탄소가격 신호 기반의 시장 유인을 정책 핵심축으로 활용
- (공공재정 투자) EU는 Innovation Fund 등 대형 재정수단을 활용하여 CCUS의 대규모 실증 및 초기 상용 프로젝트를 집중 지원하고 있으며, 이를 통해 기술 리스크 및 초기 투자 부담을 공공이 선제적으로 분담하는 구조를 채택
- (인프라 집적) 개별 기업 단위 접근이 아닌 산업단지-항만-저장소를 연계한 CCUS 클러스터 및 허브 모델을 핵심 전략으로 설정하여, 포집·운송·저장을 통합한 규모의 경제 및 비용 효율성 확보 추진
- (초국가적 정책) EU는 TEN-E(범유럽 에너지 네트워크) 개정을 통해 CO₂파이프라인 및 저장 인프라를 유럽 공공이익사업(PCI)으로 공식 인정하고, 이에 따라 국경 간 CO₂ 운송·저장을 제도적으로 허용
 - 개별국가 단위의 저장 한계를 극복하고, 저장 잠재력이 큰 지역을 중심으로 포집-운송-저장을 통합한 EU 단위 최적화 탄소관리 인프라 구축 추진을 통해 CCUS의 규모경제 확보 및 비용 효율성 제고
- (규제·표준체계) 지중저장에 대한 장기 책임, 모니터링, 사후 관리 기준 법제화를 통해 환경·안전 리스크에 대한 사회적 신뢰 확보 증시 및 민간투자 확대를 위한 제도적 불확실성 해소

18) 배출권거래제



출처 : Vision for Carbon Capture, Utilisation, and Storage in the EU, Clean Air Task force(2023.5)

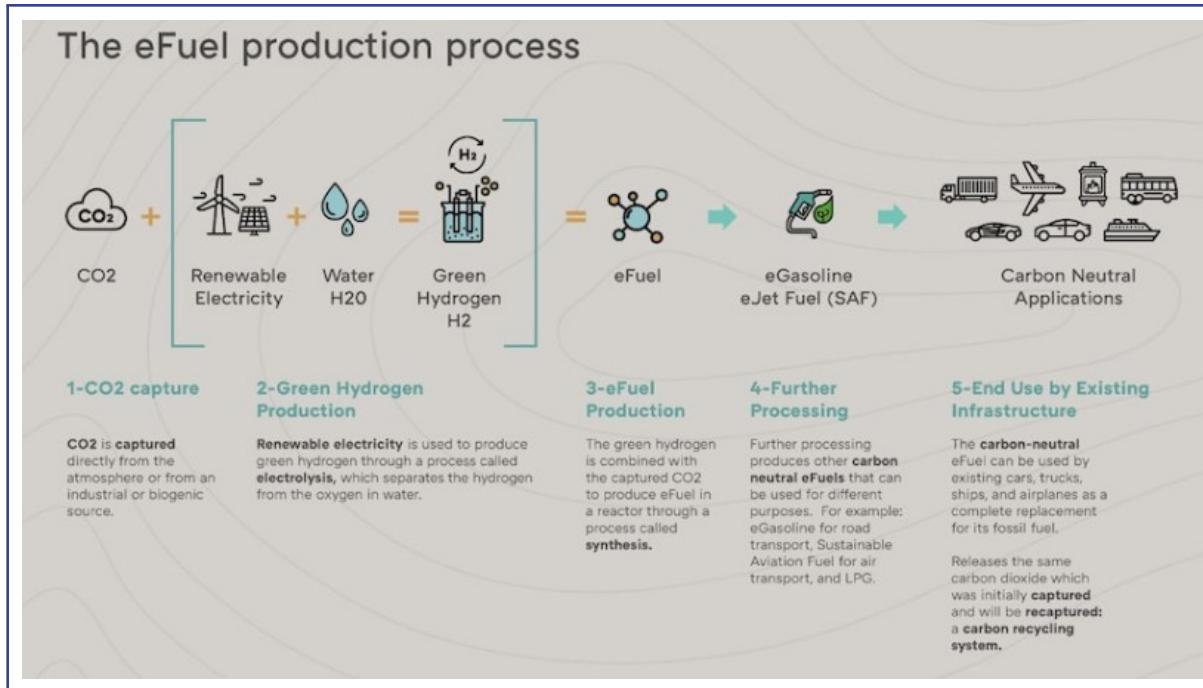
| EU CCUS 단계별 개요 |

▣ (e-Fuel 정책) EU는 재생에너지 확대와 전기화만으로는 감축이 어려운 항공·해운·중공업 등 난감축 부문(hard-to-abate sectors)의 탈탄소화를 위해 e-Fuel을 핵심 대안으로 설정

- (패키지 중심 제도) EU는 Fit for 55¹⁹⁾ 패키지를 중심으로 항공·해운·에너지 정책과 연계·추진하며, 항공 부문에서는 지속가능항공연료(SAF)의무화를 통해 e-Fuel기반 합성연료 사용 비중 확대
- (재생에너지 기반) EU는 e-Fuel을 재생연료로 분류하고, 재생에너지 전력 사용, 시공간적 상관성 등 엄격한 기준을 적용함으로써 실질적인 온실가스 감축 효과 확보 추진
 - 단순 연료 대체가 아닌 Net-Zero에 부합하는 연료 전환을 정책적으로 유도
- (CCUS·수소정책 연계) e-Fuel 정책은 단독 기술 정책이 아닌 수소 전략 및 CCUS 정책과 연계 구조로 설계되어, 재생에너지 기반 수소 생산확대, 산업 및 DAC 기반 CO₂ 포집 인프라 구축과 결합하여, 탄소순환 기반 연료 생태계 조성을 중장기 목표로 설정
- (공공재정 지원) Innovation Fund, Horizon Europe 등을 통해 e-Fuel 생산 기술, 대규모 실증 프로젝트, 공급망 구축에 대한 선제적 공공 투자를 추진
 - 이는 높은 생산 비용과 기술적 불확실성을 고려하여, 초기 시장 창출 및 민간 투자 유인을 강화하기 위한 정책적 조치로 평가

19) EU가 2030년까지 온실가스 배출을 1990년 대비 최소 55% 감축하기 위해 마련한 포괄적 기후에너지입법 패키지

- (단계적 의무화) e-Fuel 정책은 핵심 특징은 공급 중심이 아닌 수요편인 전략으로, 항공·해운 부문을 중심으로 단계별 사용 의무를 부과함으로써, 생산비용이 높은 초기 단계에서도 안정적인 수요 기반을 제도적으로 확보 및 기술 성숙과 비용하락 유도 구조 채택



출처 : e-Fuel 생산과정(2023), Greenium

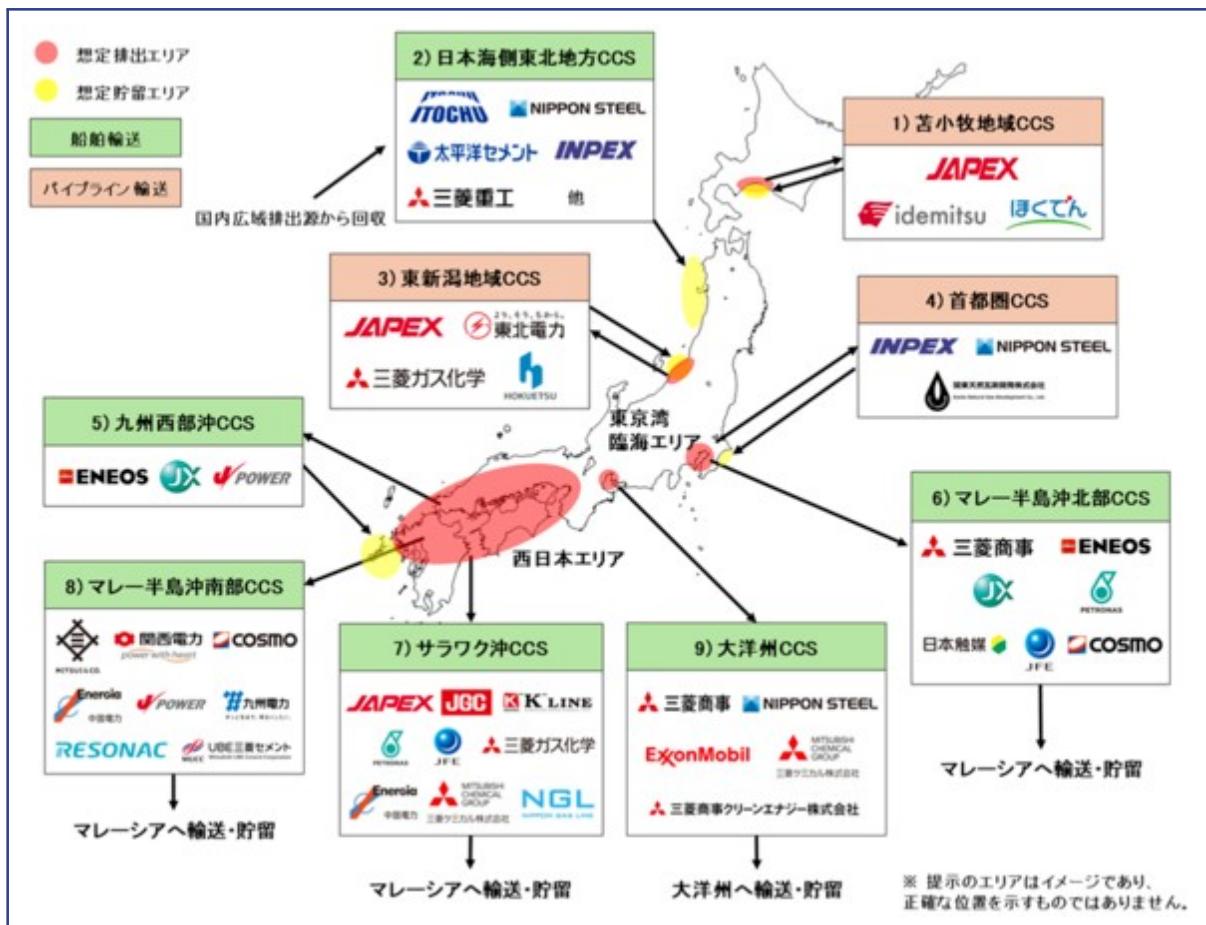
| e-Fuel 생산과정 개요 |

3 일본

- (CCUS 정책) 일본은 2050년 탄소중립 목표 달성을 위해 CCUS를 화력발전 및 산업 부문 전환을 보완하는 핵심 기술로 인식하고 있으며, 재생에너지 확대의 구조적 한계를 고려할 때 CCUS를 일본 에너지 구조의 현실을 반영한 전환기 필수 수단으로 정책에 포함

- (대형 실증중심) 일본 CCUS 정책의 특징은 국가 주도 대형 실증 프로젝트를 통한 단계적 상용화 전략으로서 대규모 포집·저장 실증을 추진하고, 기술적 신뢰성 확보 후 민간 확산을 유도하는 구조를 채택
- (해외저장) 지질학적 저장 잠재력이 제한적인 일본의 특성상, 해외 저장지 활용을 포함한 크로스보더 CO₂ 운송을 중장기 정책 옵션으로 검토 추진 중
 - 특히 호주 및 동남아 국가와 협력하여 국제 CCUS 밸류체인 구축을 모색

- (점진적 전환) CCUS는 일본내 철강·화학·정유 등 기존 산업 경쟁력을 유지하면서, 탈탄소화를 추진하기 위한 현실적 전환 수단으로 활용되고 있으며, 급진적 규제보다는 기술 축적과 비용 절감을 중시하는 점진적 접근이 특징

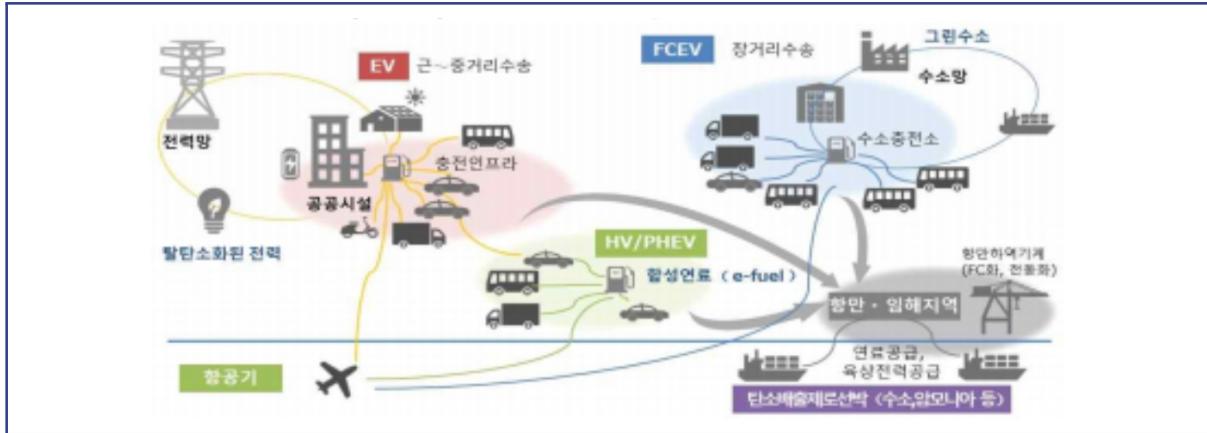


출처 : 일본 CCUS 선진화 사업 선정지 및 기업 (일본 경제산업성)

| 일본의 CCUS 사업지 현황(9개소) |

- (e-Fuel 정책) 일본은 항공·해운·자동차 등 수송 부문의 탈탄소화를 위해 e-Fuel을 기존 내연기관·연료 인프라와 양립 가능한 대안 연료로 인식하고, 전면적 전기화의 한계를 보완하는 전략의 일환으로 e-Fuel을 정책에 포함
- (기술 및 산업연계) 일본 e-Fuel정책은 규제 의무화보다는 기술개발 및 실증 중심의 산업 연계형 접근을 채택하고, 합성연료 생산기술 고도화, 촉매·공정효율개선, 엔진 적합성 검증 등을 중심으로 R&D 및 실증 지원
- (산업 컨소시엄) 자동차 제조사, 정유사, 항공업계가 참여하는 산업 컨소시엄 중심의 실증 프로젝트를 통해 e-Fuel의 실제 적용 가능성 검증 및 기존 산업 생태계를 활용한 전환 중시

- (수소·CCUS 연계) 일본의 e-Fuel정책은 수소 기본전략 및 CCUS 정책과 연계되어 추진되고, 재생에너지 기반 수소와 포집된 이산화탄소를 결합한 탄소순환형 시스템을 중장기 목표로 설정



출처 : 일본 경제산업성, 2050년 탄소중립사회 방향성(2022)

| 일본의 운수부문 탄소중립 미래사회(2050년) |

4 중국

- (CCUS 정책) 중국은 2060년 탄소중립 목표 달성을 위해 CCUS를 석탄 중심 에너지 구조하에서 불가피한 감축 수단으로 인식, 단기간 내 화석연료 의존도를 급격히 낮추기 어려운 산업·발전 부문을 중심으로 CCUS를 현실적 전환 기술로 정책에 반영
 - (국영기업 주도 전략) 중국 CCUS 정책의 특징은 국영 에너지·화학 기업 주도의 대규모 실증 프로젝트로서, 석유·가스전, 석탄화학 단지 등을 중심으로 포집-저장-활용을 결합한 프로젝트 추진을 통해 기술 축적 및 비용 절감을 위한 단계적 확산 도모
 - (활용 중심 접근) 중국은 지질 저장뿐만 아니라 EOR(석유회수증진), 화학 원료 전환 등 활용(CCU) 중심의 CCUS에 상대적으로 비중을 두고 있으며, 이는 산업 연계 효과와 단기 경제성을 중시하는 정책 기조를 반영
- (e-Fuel 정책) 중국은 독립적 감축 수단보다 CCUS·수소 기술의 활용 분야 중 하나로 인식 하며, 항공·화학연료 중심의 실증 단계에 머물러 있고, EU와 같은 의무화 정책은 미시행
 - (탐색전 추진) 중국 e-Fuel 정책은 국가 R&D 및 산업 실증 중심의 탐색적 단계에 해당하며, 합성연료 생산 기술, 촉매, 공정 효율 개선 등을 중심으로 기술 축적
 - 중국의 e-Fuel 정책은 규제 중심이 아닌, 기술·산업 실증 중심의 초기 단계 정책으로 중장기 활용 가능성 탐색에 초점

5 호주

▣ (CCUS 정책) 호주의 CCUS 정책은 풍부한 저장 잠재력을 기반으로 한 제도 정비 및 크로스 보더 저장 허브 전략을 통해 글로벌 탄소 관리 거점화를 지향하는 것이 특징

- (정책목표) 풍부한 지질학적 저장 잠재력과 에너지 자원을 기반으로 CCUS를 국가 전략산업이자 수출지향형 탄소관리 기술로 인식하고 아태 지역 탄소 저장 허브로서의 역할을 중장기 정책 목표로 설정
- (상용화 추진) 호주는 CCUS 관련 법·제도를 비교적 조기에 정비하여 민간 주도의 상요 프로젝트 추진이 가능한 환경을 조성하여 저장 책임, 인허가, 장기 모니터링 등 제도적 틀을 명확히 함으로써 투자 불확실성 완화
- (저장허브 전략) 호주는 해외에서 포집된 CO₂를 자국 저장지로 유입·저장하는 크로스보더 CCUS 허브 구축을 중심 추진 중이며, 일본 및 한국 등과 협력 가능성이 정책적으로 검토 중



출처 : SK E&S, 호주 산토스간 '국경통과 CCS'추진 협력 MoU 체결(2023), 연합뉴스

| 한-호주 CO₂ 수출입 허용 합의 기반 비즈니스 협력 |

▣ (e-Fuel 정책) 호주의 e-Fuel 정책은 재생에너지 기반 수소 경쟁력을 활용한 수출 지향형 전략으로, CCUS·수소 정책과 연계된 글로벌 연료 공급 가능성 탐색 단계

- (정책목표) 호주는 e-Fuel을 재생에너지 기반 수소 수출전략의 연장선에서 인식하고, 풍부한 태양광·풍력 자원을 활용해 생산한 수소를 기반으로 합성 연료 생산 가능성 검토 중
- (수출지향형 전략) 호주 e-Fuel정책은 내수 중심보다는 일본·EU 등 해외 수요 대응형 전략에 가깝게 설계되어, 항공·해운용 합성연료 공급 가능성을 중심으로 실증 및 국제 협력 논의 진행

6 OECD

▣ (CCUS 정책) OECD는 CCUS를 산업부문 및 장주기 에너지 시스템의 잔존배출 감축을 위한 필수 기술 옵션으로 규정하고, 재생에너지·전기화와 병행되는 보완적 감축 수단으로 정책 프레임을 설계하며, 국가별 여건에 따른 기술 포트폴리오 접근 강조

- (시장형성 중심) OECD는 CCUS 확산의 핵심 제약 요인으로 높은 초기 비용과 불확실한 수요를 지적하며, 장기 저장책임에 대한 제도 명확화 및 공공조달 등을 통해 시장 신호를 명확히 하는 정책 설계를 각국에 권고
- (인프라 기반) OECD는 개별 프로젝트 중심 접근의 한계를 지적하고, 산업 클러스터·허브 중심의 CCUS 인프라 구축이 비용 절감 및 민간 투자 유인을 동시에 달성할 수 있는 핵심 전략임을 강조
- (국제협력 중요성) OECD는 저장 잠재력의 지역 편중 문제를 고려하여, 국경간 CO₂ 운송·저장에 대한 국제 협력 및 제도 정합성 확보를 중장기 과제로 제시
 - 이는 글로벌 CCUS 시장 형성을 위한 공통 규범과 협력 프레임 구축 필요성과 연계

▣ (e-Fuel 정책) OECD는 항공·해운·중장비 등 난감축 수송 부문의 장기적 탈탄소 옵션으로 인식하고 있으며, 단기적 대체 연료가 아닌 중장기 전환 기술로서 정책적 검토 필요성 제시

- (에너지 효율성) e-Fuel의 높은 생산 비용과 에너지 손실문제를 주요 정책 쟁점으로 지적하며, 비용 대비 감축효과 분석 등을 전제로 선별적 정책 적용을 권고
- (수소·CCUS와 통합) e-Fuel 정책은 단독 추진이 아닌 재생에너지 기반 수소 생산과 CCUS 정책과의 통합적 설계가 필요하다는 점을 강조하며, 국가별 에너지 믹스에 따른 우선순위 설정의 중요성을 강조

- (정책적 정합성) OECD는 EU와 간통 강제 의무화 보델을 일반화 하기 보다는 정책 효과 비교 및 검증을 통해 정책 일관성과 국제적 신뢰성 확보를 중시

CCUS 도전과제별 대응 정책 수단				
도전과제	경제적타당성	사업소요기간	혁신격차	사업복잡성
대응정책 수단	<ul style="list-style-type: none"> • 보조금, 세액공제, 융자 • 국영기업 • 탄소가격제 및 탄소 누출 대응 정책 • 공공조달 • 저배출 의무화 제도 • 차액계약제도(CfD) • 규제자산기반(RAB) 방식 • 신흥국 및 개발도상국 고려사항 	<ul style="list-style-type: none"> • 인허가 원스톱 창구 • 명확한 인허가 처리 일정 • 내부 규제 역량 • 사전 경쟁 단계 자원 평가 • 데이터 공유 및 투명성 • 지역사회 참여 요건 	<ul style="list-style-type: none"> • 연구개발 및 실증 • 국제협력 플랫폼 • 기술 공동개발을 위한 외국인 직접투자 	<ul style="list-style-type: none"> • 장기 책임 관련 법제 • 하브 조성을 위한 경쟁형 공모 • 선도 사업자를 위한 일회성 백스톱 계약 • 련던의정서 규정 (세부요건) • 고품질 탄소 제거에 대한 정의 수립 • 모니터링·보고·검증 (MRV)체계

Policy toolkit to address CCUS challenges

Governments have several policy tools to address challenges to CCUS deployment. It is important that these tools work together to tackle **economic viability**, **lead time**, **innovation** and **complexity** challenges.

Whatever tools a government chooses to employ will be unique to that country, but it is vital that the tools are effective and efficient, setting up a viable and sustainable commercial market for CCUS that attracts investment and retains it over the long term.

Challenges	Economic viability Absent any policy support, the economic viability of a CCUS project is a major barrier to wide-scale deployment. High costs and a lack of revenue streams for projects directly impact a project's economic viability.	Lead times Lead times (i.e. the total time required between a project's conception and commissioning) currently average around six years. Reaching net zero goals hinges on cutting these lead times.	Innovation gaps The technology maturity of CCUS varies considerably by technology type and application. Technologies which are mature today are also not necessarily the ones consistent with a net zero energy system.	
Policy tools	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Grants, tax credits, loans <input type="checkbox"/> State-owned enterprises <input type="checkbox"/> Carbon pricing and leakage policy <input type="checkbox"/> Public procurement <input type="checkbox"/> Low-emissions mandates <input type="checkbox"/> (Carbon) contracts-for-difference <input type="checkbox"/> Regulated asset base <input type="checkbox"/> Emerging market and developing economy considerations: concessional finance, sustainable debt, multilateral funding instruments 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> One-stop shop for permitting <input type="checkbox"/> Clear approval timelines <input type="checkbox"/> Internal regulatory capacity <input type="checkbox"/> Precompetitive resource assessments <input type="checkbox"/> Data sharing and transparency <input type="checkbox"/> Community engagement requirements 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Research, development and demonstration <input type="checkbox"/> Platforms for international co-operation <input type="checkbox"/> Foreign direct investment for technology co-development 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Long-term liability legislation <input type="checkbox"/> Competitive solicitations for hubs <input type="checkbox"/> One-off backstop agreements for first movers <input type="checkbox"/> London Protocol specifications <input type="checkbox"/> Definition of high-quality removals <input type="checkbox"/> Monitoring, reporting and verification mechanisms

IEA CC BY 4.0.

출처 : CCUS 도전과제별 대응 정책수단, OECD(2023)

| OECD CCUS 도전과제 대응 정책적 수단 |

2

시장·산업 동향

■ CCUS 시장 동향 및 전망

- 글로벌 CCUS 시장은 2022년 기준 약 30억 달러 규모로 평가되며, 2023년부터 2032년까지 연평균 13.3% 성장하여 2032년에는 약 103억 달러 규모에 이를 것으로 전망
 - 이러한 시장 확대는 온실가스 감축을 위한 국제적 노력 강화, 각국 정부의 정책·제도적 지원, 이산화탄소를 활용한 석유회수증진(CO₂-EOR) 기술에 대한 수요 증가에 기인
 - 기술 발전에 따라 해상 석유·가스 탐사가 확대되고, 이산화탄소를 주입해 원유 회수율을 높이는 가스 주입 EOR 기술의 활용이 확산되면서 CCUS 시장 성장의 추가적인 동인으로 작용



출처 : CCUS Market Size(2022), Allied Market Research

| 글로벌 CCUS 시장 규모 및 전망 |

■ CCUS의 경제적 취약성으로 인해 정책적 장치로서 국가 탄소 배출권 거래제(ETS, Emissions Trading System)의 중요성 부각

- CCUS는 높은 비용과 복잡한 위험 구조로 인해 상업적 투자가 어려워 정부의 정책적 지원 없이는 경제성 확보의 난제
- 국가 탄소배출권 거래제란 정부가 전체 온실가스 배출 총량을 정해 기업에게 무료 또는 유상으로 배출권을 할당, 기업들은 해당 배출권 범위 내에서 온실가스를 배출할 수 있도록 하는 제도
 - 각 기업은 할당된 배출권만큼 온실가스를 배출할 수 있고, 여분이 남으면 시장에 판매할 수 있으며, 할당량을 초과하면 추가 배출권을 구매 필요

- 배출권 거래를 통해 기업들은 감축 여력이 있으면 비용 절감과 추가 수익을 얻고, 감축이 어려운 기업은 시장에서 배출권을 매입해 의무를 이행
- 배출허용 총량을 점차 감소시키며, 기업에 예측 가능한 감축 경로와 장기적 시장 신호를 제공
- 중국, 일본, 싱가포르, 유럽 등에서도 자체 배출권 거래제, 혹은 국제 연계 배출권 거래제를 운영

▣ 전문 운송 및 저장 서비스 기업이 이산화탄소를 받아 운송·저장, 배출 기업은 이 서비스에 대해 요금을 지불하는 전략으로 CCUS를 상업적으로 운영하기 위한 모델 개발 추진

- 영국의 경우 규제 기반 자산 모델을 도입하여 이산화탄소 파이프라인과 저장소를 필수 공공 유틸리티로 간주, 정부가 승인한 저장 전문 기업은 인프라 구축에 투자한 자본에 대한 수익률을 보장 받고 수익은 배출 기업으로부터 회수
- 미국의 경우 45Q 세액 공제가 이 모델의 핵심 동력으로, 저장 전문 기업이 배출 기업의 이산화탄소를 저장하고, 그 대가로 45Q 세액을 공제
- 네덜란드의 경우 정부가 포집 및 배출 기업을 지원하고 이 기업들이 특정 회사 (Porthos)에 저장 서비스 요금을 지불하는 구조

한국과 해외의 배출권 가격 비교

2024.10.31. 기준이며, 캘리포니아는 2024.8.14 기준

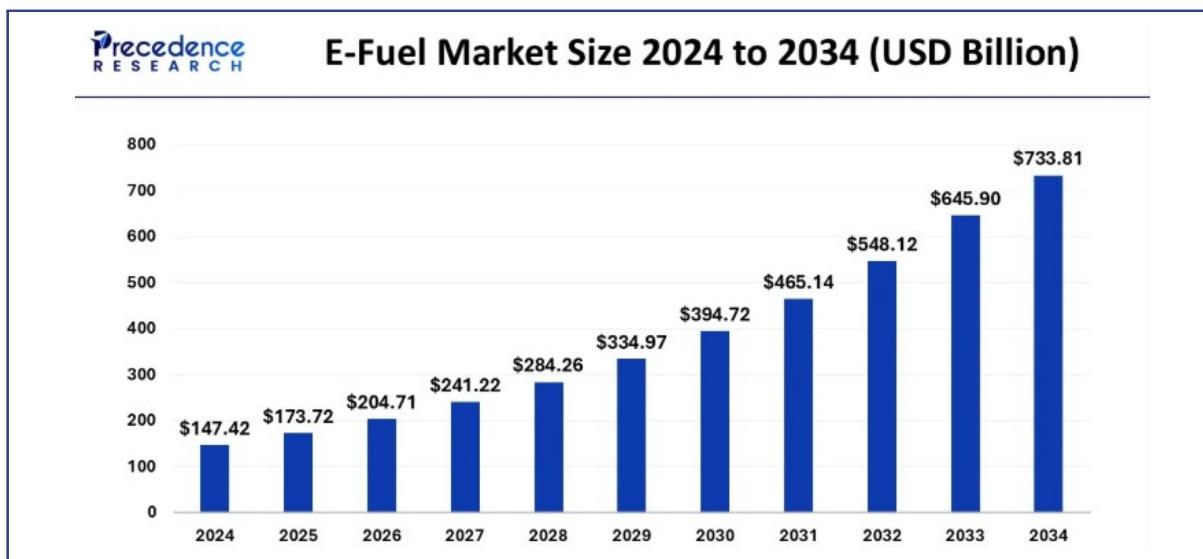


출처 : 국회예산정책처 NABO Focus / 제작=정아민 기자

| 한국과 해외의 배출권 가격 비교 |

▣ e-Fuel 시장 규모 및 전망

- 글로벌 e-Fuel 시장은 2024년 기준 약 1,474억 달러 규모로 추정되며, 2025년에는 약 1,737억 달러로 확대된 이후 2025년부터 2034년까지 연평균 17.41%의 높은 성장률을 기록하여 2034년에는 약 7,338억 달러 규모에 이를 것으로 전망
 - 이러한 시장 성장은 전 세계적으로 탄소 배출 증가에 대한 우려와 그로 인한 환경적 부정적 영향이 확대됨에 따라, 지속가능한 에너지원으로의 전환 필요성이 강화된 데 기인
 - 특히 항공·해운 등 난감축 수송 부문을 중심으로 기존 화석연료를 대체할 수 있는 e-Fuel에 대한 정책적·산업적 관심이 높아지면서 글로벌 시장 확대 견인



출처 : e-Fuel Market Size(2024), Precedence Research

| 글로벌 e-Fuel 시장 규모 및 전망 |

▣ 2030년대 e-Fuel 시장 규모 및 수요는 점차 확대될 것으로 예상

- e-Fuel 시장은 2020년대 중반 수십억 달러 수준에서 2030년도에는 400-800억 달러대 이상으로 성장할 것으로 전망, 운송 부문이 가장 큰 수요처로 예상
- 해운 부문에서 연료가 증유에서 메탄올로 전환 가능성이 있으므로, 메탄올에 대한 수요가 장기적으로 확대 예상
- 현재 e-methane이 기존 인프라 활용성에 의거하여 현재 비용이 크나, 액체 상태의 합성 가솔린, 디젤 등이 저장, 운송 편의성 때문에 빠르게 성장 전망
- 현재 e-Fuel은 화석연료 대비 단가가 수배 이상 비싸지만, 재생에너지의 확충, 정책 인센티브에 의해 2030년대 이후 점진적 비용 하락 예상

3

기술개발 동향

1 CCUS 기술개발 동향

연소 후 이산화탄소 포집 기술 개발은 파일럿 플랜트 및 상용 규모 실증 단계로 나아가는 추세

- 캐나다의 Boundary Dam은 세계 최초로 석탄화력발전소에 상용 규모 CCS를 적용, Shell Cansolv의 아민 솔벤트 사용
- 미국의 Petra Nova는 MHI의 KS-1 솔벤트를 사용하여 연간 1.4 Mt의 이산화탄소를 포집
- 직접 공기 포집 기술은 아직 초기 단계이나 새로운 정책 및 세금 공제 도입에 힘입어 규모 확장 단계
 - (Saudi Aramco와 Siemense Eenergy) 협력하여 고체 흡착제 소재를 이용 연간 12톤의 이산화탄소를 포집하는 파일럿 플랜트 공개, 또한 KAUST와 협력하여 포집한 탄소를 광물화하여 저장하는 기술 시행 예정
 - (Climeworks) 아민 기반 고체 흡착제를 사용, 유럽 전역에 파일럿 플랜트를 운영 중
 - (Carbon engineering) 액체 흡착제(알칼리용액)방식을 사용, 캐나다와 미국에 파일럿 플랜트 및 상용 플랜트를 운영
 - (Global Thermostat) 아민 기반 다공성 세라믹 구조의 흡착제를 사용하여 이산화탄소를 포집, 미국에서 상용 플랜트 운영 예정
- 이산화탄소 저장 기술을 운송 및 저장 서비스 모델로 운영하는 회사 등장
 - Porthos, Northern Lights 프로젝트는 다양한 배출원으로부터 이산화탄소를 받아 저장하는 운송 및 저장 네트워크를 개발
- 고온 이산화탄소 전기분해 기술은 Haldor Topseoe(덴마크)에서 산업 공정 및 대형 플랜트용의 장치를 개발, 그 외에 다양한 기업에서 상용화 추진
- 이산화탄소의 건설자재 (탄산염화, 콘크리트 등)를 활용하여, CarbonCure(캐나다), Blue Planet systems(미국)에서 시범 플랜트 운영
- LanzaTech(미국)에서 미생물을 활용한 생물학적 촉매를 기반으로 이산화탄소를 에탄올로 전환하는 플랜트 운영
- Covestro(독일)은 촉매 반응을 통해 이산화탄소를 원료로 한 폴리올을 생산

- Carbon Clean(영국)에서는 아민 기반 시스템으로 포집된 이산화탄소를 촉매 반응을 통해 에탄올이나 메탄올로 전환
- Dry methane reforming(DMR)기술의 경우 상업 플랜트 프로젝트는 활발하지 않으나 여러 글로벌 에너지 기업에서는 DMR을 핵심 기술 중 하나로 채택

2 e-Fuel 기술개발 동향

■ 유럽 전역에서 e-Fuel 및 합성 SAF 생산 인프라 구축이 본격화되며, 항공·해운 연료의 대규모 탈탄소 전환이 가속화

- (Norsk e-Fuel (노르웨이)) 이산화탄소 포집 및 재생전력 기반 PtL SAF 생산프로젝트로 2026년 상업 생산 개시, 2032년까지 연간 20만 톤 이상의 SAF 공급을 목표로 하는 플랜트 계획 발표



출처 : Norsk e-fuel 생산기지 조감도, NorSK社 홈페이지

| 글로벌 e-Fuel 시장 규모 및 전망 |

- (유럽 해운, 항공 e-Fuel 프로젝트) 해운 공급 가능 e-Fuel 프로젝트만 60여 개 이상의 파이프라인이 존재, 북해, 발트해 연안에 집중. 핀란드/스웨덴/덴마크에서 합성 SAF 플랜트가 2030년 가동 목표로 추진

III

국내 동향

1

정책 동향

■ 한국은 2050 탄소중립 로드맵을 공식화하고, CCUS, 수소환원제철, 그린수소 활용을 핵심 정책 수단으로 채택

- (목표) 한국은 2030년까지 2018년 대비 온실가스 배출량을 40% 감축하는 것을 NDC의 핵심 목표로 설정
 - 이는 국제사회에 제출된 공식 감축 목표로서, 발전·산업·수송·건물·농축수산·폐기물 등 전 부문을 포괄하는 절대량을 의미

| 탄소중립 관련 주요 법·제도 |

법	내용
탄소중립/녹색성장 기본법(2021)	<ul style="list-style-type: none"> • 2050년 시행 • 온실가스 감축 목표 상향 (35%+), 기후대응기금, 참여 거버넌스 등 구체적 정책 수단 포함
이산화탄소 포집, 수송저장 및 활용에 관한 법(2024)	<ul style="list-style-type: none"> • 2050년 시행 • 규제 절차 간소화, 기업 지원 인센티브, CCUS 인프라, 기술 R&D 확대 추진 포함
한국 배출권 거래제 (K-ETS)	<ul style="list-style-type: none"> • 정부가 온실가스 배출 목표량을 정하고, 온실가스를 배출하는 기업에 연간 배출권을 할당한 후, 기업들이 남거나 부족한 배출권을 서로 사고 팔도록 허용하는 제도

■ (CCUS 정책) 한국은 △기술 상용화 기반 확보, △산업현장 적용 확대, △중장기 감축 기여도 제고를 주요 목표로 설정하고, 기술개발-실증-확산으로 이어지는 단계적 추진 전략 채택

- (기술개발 및 실증 중심 정책) 정부는 포집·운송·저장·활용 전주기를 포괄하는 CCUS 기술개발 로드맵을 수립하고, 대형 실증사업을 중심으로 기술 성숙도를 단계적 제고
 - 발전·산업 부문 대형 배출원을 대상으로 한 실증을 통해 기술 적용 가능성을 검증하고, 민간 확산을 위한 기반을 마련하는데 정책역량 집중

- (활용 중심 단계적 확산) 국내 저장 여건의 제약을 고려하여, 단기적으로는 화학원료 전환, 합성연료, 건설자재 활용 등 CCU 중심의 적용 확대를 병행 추진
 - 이를 통해 산업 연계 효과와 초기 시장 창출을 도모하는 한편 중장기적으로는 저장기술 및 인프라 구축을 병행하는 전략 채택
- (법·제도적 기반 정비) 한국은 '탄소중립·녹색성장 기본법'을 중심으로 CCUS를 온실가스 감축 수단으로 제도화하고 있으며, 저장 안전성, 환경영향 관리, 장기책임체계 등 CCUS 적용을 위한 법·제도 정비를 단계적으로 추진
 - 배출권 거래제와 연계를 통해 CCUS 적용에 대한 시장 기반 유인 강화 추진
- (산업·지역 기반 확산전략) 정부는 개별 기업 단위 접근의 한계를 극복하기 위해 산업단지·항만을 중심으로 한 CCUS 클러스터 및 허브 구축 가능성 검토 및 포집-운송-저장을 연계한 집적형 인프라 모델에 대한 비용 절감 및 사업성 제고 추진
- (국제협력) 한국은 국제기구 및 주요국과의 협력을 통해 기술정보 교류 및 공동 실증을 확대하고 있으며, 중장기적으로는 크로스보더 CO₂ 운송·저장 협력 가능성도 정책적으로 검토 중
 - 높은 비용 구조, 저장 인프라 부족, 민간 투자 불확실성, 지역사회 수용성 확보는 향후 정책 추진 과정에서 해결해야 할 주요과제로 제시



출처 : 탄소중립 10대 핵심기술 개발방향 보고서(2021), 과기정통부

▣ (e-Fuel 정책) 한국은 e-Fuel을 수송·에너지 분야의 장기 탈탄소 옵션으로 인식하고, 기술개발·산업 실증 중심의 단계적 접근을 기반으로 전주기 정책 연계와 제도적 기반 마련 추진

- (정책방향) 규제 의무화보다는 기술개발 및 산업 실증 중심의 단계적 접근을 정책 기조로 하며, 기술개발 촉진, 산업 연계 실증 확대, 관련 전략과의 연계 강화를 주요 추진 방향으로 설정
 - (기술개발 촉진) 전기합성연료 생산 공정(재생수소·CO₂ 전환 기술) 고도화를 위한 R&D 지원 확대
 - (산업연계 실증) 정유·항공·해운 업계 등과 협력하여 e-Fuel 생산·활용의 파일럿·파일럿 확장 사례 구축 추진
 - (전략연계 강화) 수소 기본전략, CCUS 정책 및 e-Fuel 간의 전략적 연계를 통해 전환체계 구축
- (추진수단) 연구개발 중심 지원 및 실증 프로젝트 및 시범 적용과 제도적 연계를 통한 조성여건 마련을 중심 추진수단으로 설정
 - (R&D 중심 지원) 정부 R&D 예산을 기반으로 재생수소 기반 e-Fuel 변환 공정(합성연료 생산 공정) 기술 개발을 추진 및 촉매·공정 효율·LCA(전주기 탄소회수량) 개선을 목표로 연구개발 추진
 - (실증 프로젝트) 항공·해운 등 실수요 분야를 대상으로 파일럿 실증 사업을 추진하여 기술 타당성 검증
 - (제도적 연계) e-Fuel 활용 확대를 위한 전력 및 수소 공급망 정책, CCUS 인프라 정책과의 연계를 강화하여 전주기 체계를 구축하는 방향으로 정책 수립이 진행
- (국제협력) EU, 미국, 일본 등 주요국의 제도·기술 동향과의 정합성을 고려하며 국제 협력을 확대 추진
 - 특히 국제 연료 표준·LCA 체계 정비를 위한 다자간 협의체 참여가 강화되고 있으며, 해외 실증·공급망 협력 프로젝트를 통한 전략적 포지셔닝 추진 중
- (중장기 정책) 단기 실증 중심의 기술개발에서 출발하여, 전주기 공급망 구축 및 제도적 기반 정비를 통해 중장기적으로 상업적 확산 기반을 마련하는 방향으로 진화
 - 이를 위해 e-Fuel 관련 인증·LCA 기준 정비, 수요 견인 정책(공공조달·의무 조치), 국제 정책 연계 등이 정책과제 로드맵에 포함

2

기술개발 동향

■ CCUS 파일럿 플랜트를 통해 이산화탄소를 미세조류로 전환하거나 CO₂ 기반 폴리올 생산 공정에 활용하는 등 다양한 전환·활용 실증사업을 추진

- (SK 이노베이션) 산업 현장 배기가스(일 10톤 규모의 이산화탄소)에서 포집한 CO₂를 미세조류로 전환하는 파일럿 설비를 운영하고, 수확된 미세조류를 바이오피그먼트 및 바이오플라스틱 원료 등으로 활용하는 전환·활용 방안 실증 중
- (한화토탈에너지스) 실제 석유화학 공정에서 이산화탄소를 포집해 폴리올 생산 공정에 투입하는 파일럿 사업 진행

■ 국내 CCUS 분야에서는 대규모 실증 프로젝트들이 연이어 추진

- (동해가스전 CCUS 실증사업) 30년간 총 3,600만 톤의 이산화탄소를 해저 고갈 가스전에 저장하는 플랜트 실증 예정
 - (강원 CCU 메가프로젝트) 시멘트, 철강, 석유화학산업의 이산화탄소를 포집, 청정연료 및 소재로 전환하는 대형 실증 구상
 - 시멘트, 철강 현장에서는 산업 현장 내에서 이산화탄소를 포집하여 탄산염으로 고정화해 건축 자재 생산
 - 전남, 충남 지역 대형 정유, 화학 플랜트 현장에서 100톤/일 이상의 이산화탄소를 포집하고 연계 활용 기술*과 같은 통합 시스템 실증 수행
- * 합성원료, 바이오매스, 합성연료 등

■ 국내에서는 e-Fuel 생산 기반을 마련하기 위한 수소 인프라와 CCUS 연계 프로젝트가 점차 확대

- (SK E&S/Plug Power 합작 수소 기가팩토리) 2025년 상업 가동을 목표로 전해조 및 연료전지 생산과 청정수소 공급을 연계한 허브로 구축 중이며, 향후 국내 PtL/e-Fuel 프로젝트에 필요한 전해·수소 설비 공급 기반으로 기능할 것으로 기대
- (보령 저탄소 수소/CCS 프로젝트) LNG 개질+CCS+전해수소를 결합해 연 25만 톤 규모 청정 수소를 생산하고, 이동, 발전용으로 활용하는 한편, 장기적으로는 합성연료 및 e-Fuel 원료 수소 공급도 가능하도록 설계

IV 결 론

1 시사점

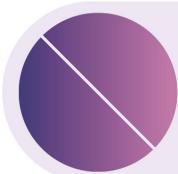
▣ 글로벌 탄소중립 목표 달성을 배경으로 CCUS 시장은 지속적인 성장 추세에 있으나, 기술 성숙도 제고가 요구되며, 이를 뒷받침하기 위한 법·제도 정비와 해외 저장소 확보가 필수적인 과제로 제기

- 2025년 기준, 국내 CCUS 시장은 연평균 21.2%의 성장을 기록, 석유·가스, 전력 산업에서 도입 활발
- Net-zero 2050 달성을 위해서는 CCUS 기술의 조속한 적용이 필수적이나, 국내 CCUS 기술 성숙도는 해외 주요국 대비 아직 초기 단계
- R&D 투자를 바탕으로 원천기술 확보 및 대규모 실증 단계를 통한 기술 성숙도 상승이 과제
- CCUS는 초기 투자비와 운영비 부담이 커 민간 기업의 자발적 참여만으로는 경제성 확보에 한계
- 미국은 정책을 통해 시장을 창출하고 있음. 반면 국내는 2024년 CCUS법이 제정되었으나 구체적인 혜택과 인증 기준에서 보완 필요
- 적용 기술이 실제 이산화탄소 감축에 얼마나 기여했는지 평가하는 객관적 인증 제도가 필수적이며 탄소배출권 거래제와 연계 필요
- 국내는 지질학적 특성상 대규모 이산화탄소 저장소 확보에 한계가 있을 수 있으므로 해외 저장소 확보가 필수적

▣ e-Fuel은 전기화가 어려운 분야에서 필수재로 남을 것이므로 정부 주도의 연구와 기술 개발 정책 수립 및 국제 협력을 통한 원천기술 확보가 필수적

- e-Fuel은 단순한 대체 연료가 아닌 에너지 저장 매체이자 화학 산업의 기초 원료로 기능
- 일본은 2028년까지 300BPD의 e-Fuel 생산 기술 확립, 2040년 상용화, 2050년 가솔린보다 낮은 가격 실현을 목표로 하고 있으나 국내에선 구체적인 정책과 로드맵이 미흡한 상황

- 현재 e-Fuel은 그린수소 생산, 탄소 포집, 전환 기술의 고비용으로 인해 기존 연료 대비 3-7배 높은 가격으로 시장을 확대하기 위해선 정책적인 규제와 초기 비용 투자 필요
 - 국내는 재생에너지 생산 단가가 높아 그린수소 기반 e-Fuel 생산에 제약이 있어 국제협력 (예:호주)을 통해 그린 수소 생산을 확보 필요
 - 해외 선도국은 이미 CCUS기술을 전 세계 프로젝트에 판매 중으로, 이를 벤치마킹하여 e-Fuel 원천 기술 선점 및 기술 패키지 수출 필요
- CCUS와 e-Fuel은 시너지를 창출하여 탄소중립 연료의 생산과 이산화탄소 감축을 동시에 달성가능하며, 이는 탄소중립 사회로의 전환을 위한 핵심 전략
- (산업 생태계 조성) CCUS 및 e-Fuel 기술을 기반으로 친환경 연료 공급 생태계를 조성할 필요가 있으며, 이는 탄소중립 연료(e-methanol, e-DME)의 가격 경쟁력 확보, 수소 생산 단가와의 연계, 기술 실증 및 상용화를 포괄하는 종합적 접근 필요
 - (글로벌 협력 및 기술 리더십) 한국은 CCUS와 e-Fuel 기술의 국제적 협력과 기술 교류를 강화하여 국제 협약, 공동 프로젝트 추진 등을 통해 기술적 우위를 확보하고, 외부에서의 경쟁력 유지 필요
 - (정책적 지원과 재정 투자) 정부는 CCUS와 e-Fuel 기술의 상용화를 위해 재정 지원, 세제 인센티브, 탄소 가격 책정 메커니즘 등 다양한 정책적 지원을 강화가 요구되며 이는 기술 발전과 산업 전반에 걸친 확산을 촉진 가능



참고문헌

1. Adv. Funct. Mater. 2025, e13716
2. Nature Reviews Methods Primers volume 3, Article number: 61 (2023)
3. Adv. Energy Mater. 2022, 12, 2201070
4. ACS Energy Lett. 2024, 9, 4293–4305
5. Ind. Eng. Chem. Res. 2024, 63, 8705–8712
6. ACS Sustainable Chem. Eng. 2015, 3, 2100–2111
7. iScience 25, 103990, April 15, 2022
8. Communications Chemistry volume 4, Article number: 23 (2021)
9. Energy Fuels 2024, 38, 13858–13905
10. CARBON UTILIZATION—A VITAL AND EFFECTIVE PATHWAY FOR DECARBONIZATION Jeffrey Bobeck, Janet Peace, Fatima Maria Ahmad (Center for Climate and Energy Solutions), Ron Munson (Cogentiv Solutions), August 2019
11. Legal and Regulatory Frameworks for CCUS, An IEA CCUS Handbook
12. CO₂ Storage Resources and their Development, An IEA CCUS Handbook
13. CCUS Policies and Business Models, IEA
14. Global Hydrogen Review 2025, IEA
15. Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change, IPCC
16. Climate Change 2023 Synthesis Report, IPCC
17. Energy Environ. Sci., 2020, 13, 3207
18. Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 1, 2024, pp. 14~26
19. CCUS와 수소환원제철 중심의 한국 탄소중립 전략: 기술·정책 현황과 전망, goover reprot, 2025
20. 한국의 탄소 포집, 활용 및 저장(CCUS): 산업 탈탄소화의 미래
21. What's your ETS?
22. SK E&S and partners aim to build Korea's largest low-carbon hydrogen plant, December 5, 2023, by Ajsa Habibic
23. South Korea's SK E&S, US Plug Power commit \$746 million to hydrogen project, 02 May 2023, By Charles Lee
24. South Korea's SAF Expansion Drives Climate Action and Market Leadership, MOLIT News
25. TESI JOINS NORSK e-Fuel'S SHAREHOLDER GROUP TO ADVANCE SUSTAINABLE AVIATION FUEL PRODUCTION

26. H2 cluster projects FINLAND
27. European Aviation Environmental Report 2025
28. e-Fuels observatory for shipping
29. The Potential of e-Fuels to Decarbonise Ships and Aircraf
30. e-Fuel Market to Reach \$48.5 Billion, Globally, by 2030 at 34.3% CAGR: Allied Market Research
31. 이퓨얼(e-Fuel) 시장 – 2030년까지의 세계 예측
32. 글로벌) e-Fuel는 2030년까지 최대 10억 갤런 이상으로 확장, KETEP
33. 일본의 e-Fuel 정책 및 국내 시사점
34. 탄소 포집 CCU 기술을 활용한 e-메탄올 / e-DME 생산 동향 및 전망

