

기후변화의 주범 이산화탄소(CO₂), 미래 자원으로 가능성은?

진윤정 수석연구원, 경영연구센터 (chin@posri.re.kr)

김성제 책임연구원, 경영연구센터 (sungjekim@posri.re.kr)

목차

1. 탄소자원화 기술의 대두 배경
2. 탄소를 자원화하는 방법
3. 주요국 및 산업계 추진 동향
4. 미래 자원으로 가능성

※ 동 보고서는 탄소자원화 국가전략프로젝트 사업단과 협업을 통해 작성

Executive Summary

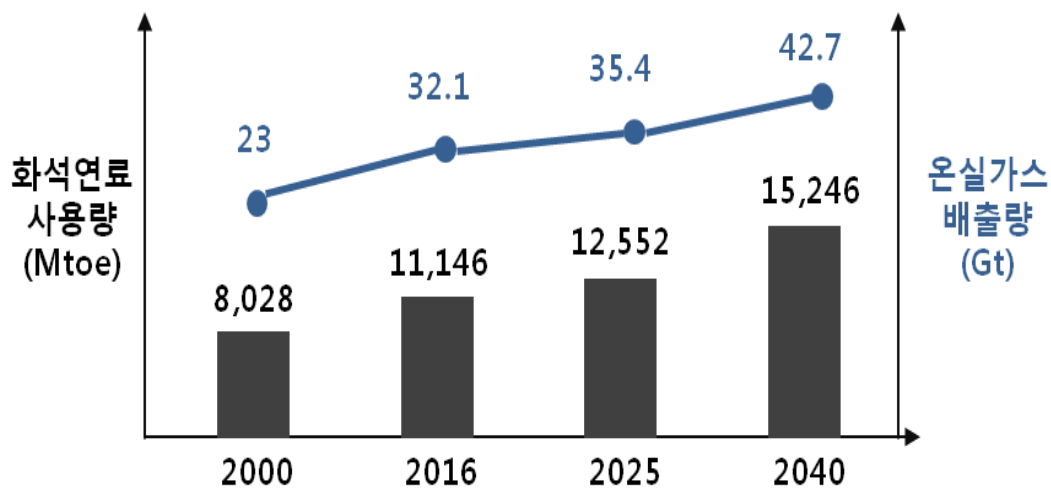
- 최근 기후변화 문제를 일으키는 주범인 이산화탄소(CO₂) 감축을 위한 대안으로서 탄소를 자원화하는 기술이 주목받고 있음
 - 탄소자원화란? CO₂를 포집하여 화학, 생물학적 변환 과정을 거쳐 ①화학제품의 원료, ②광물탄산화, ③바이오 연료 등으로 전환하는 기술을 의미
 - 탄소자원화는 혁신적 CO₂ 감축 수단일 뿐 아니라 폐기물과 같이 처리대상으로 여겨지던 CO₂를 경제적 가치를 가진 자원으로 재활용한다는 점에서 크게 주목
- 미국, EU, 중국 등 주요국들은 중장기 온실가스 감축목표 달성을 위한 가교기술로서 탄소자원화 기술 개발을 꾸준히 추진 중임
 - 특히 미국은 탄소자원화 기술을 국가전략기술로 채택, 자국 CO₂ 감축뿐 아니라 기술 선점을 통한 신시장 확보를 위해 가장 적극적인 움직임
 - 우리나라도 국가 온실가스 감축목표 달성 수단이자 10대 기후기술의 하나로 탄소자원화를 포함, 현재 실증사업 추진 중(~'22년)
- 그러나 탄소자원화 기술은 현재까지 기초연구 및 실증 단계 수준으로 시장 경쟁력을 갖추기 위한 많은 도전과제에 직면하고 있어, 이에 대한 정책적/제도적 지원이 기술개발의 Key로 작용할 것임
 - 향후 탄소규제의 강화/확대(탄소배출권 가격 상승 등) 등을 통해 현재 경제성이 확보되지 않는 관련 기술들도 상용화될 유인이 존재
- 철강업계의 경우, 중장기적으로 요구되는 저탄소/친환경 혁신 측면에서 탄소자원화 기술의 도입·적용 가능성을 모색할 필요성이 있음
 - 탄소자원화 기술 적용을 통해 CO₂ 감축과 함께 새로운 생산공정기술 개발의 계기이자 수익창출 기회로 활용할 수 있다는 기대가 존재
 - 티센크루프 등은 제철소 부생가스 내 포함된 CO₂를 이용해 화학제품을 생산하는 장기 프로젝트를 추진 중(Carbon2Chem, '15~)
 - 단, 사업모델의 불확실성이 존재하며, 정책의존도가 높은 탄소자원화 기술 특성 상 미래 활용가치를 고려하여 장기적 차원에서 접근할 필요

1. 탄소자원화 기술의 대두 배경

□ 최근 기후변화 문제를 일으키는 주범인 이산화탄소(CO₂) 감축을 위한 대안으로서 탄소를 자원화하는 기술이 주목받고 있음

- 그동안 주요국들의 CO₂ 감축노력에도 불구하고 화석연료 중심의 에너지 믹스, 개도국 경제성장 등의 영향으로 전 세계 CO₂ 배출량은 지속적으로 증가하는 추세임

[그림 1. 화석연료 사용/CO₂ 배출량 추이 및 전망]



출처: IEA, World Energy Outlook (2017) * 현 정책 기반 시나리오 기준

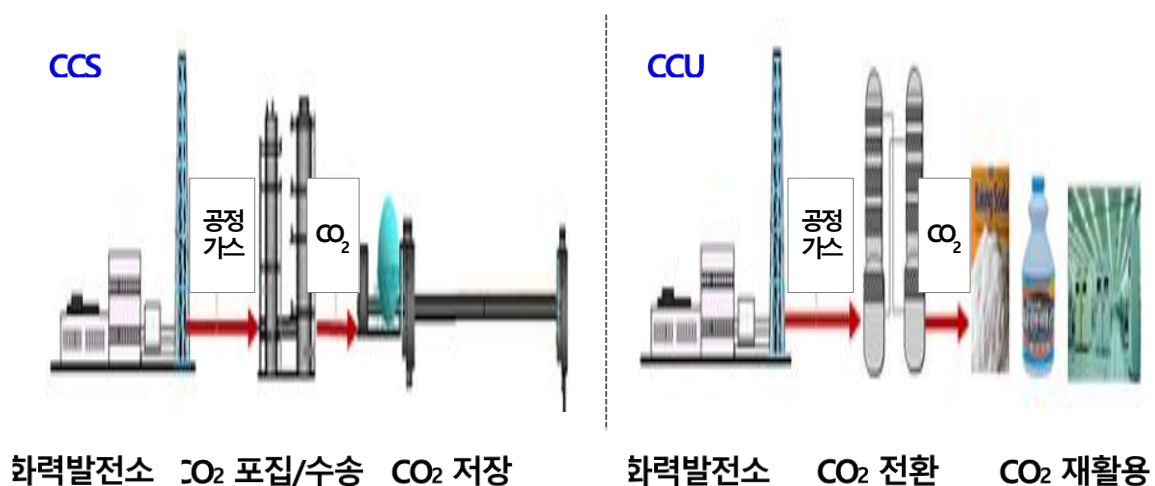
- CO₂ 배출량 자체를 감축하는 노력과 더불어 배출된 CO₂를 포집하여 저장 또는 활용하는 탄소포집·저장·활용(CCUS) 기술 등 새로운 감축수단의 병행이 필수적이라는 인식이 확대되고 있음
 - IPCC, IEA 등은 UN기후변화협약상 공동 목표인 지구 평균온도 상승을 1.5°C 이하로 제한하는 데 있어 CCUS* 기술 도입 없이는 사실상 불가능하다고 지적함¹ <첨부>
 - *CCUS: Carbon Capture, Utilization and Storage
 - 특히 CO₂를 포집하여 폐기물과 같이 저장하는 것이 아니라 이를 경제적 가치를 가진 자원으로 재활용하는 탄소자원화에 대한 논의가 활발함

1 2100년까지 온도 상승을 1.5°로 제한하기 위해서는 2010년 대비 탄소 배출량을 2030년까지 최소 45% 감축하고 2050년까지 순 제로(net-zero) 배출이 필요함 (IPCC 48차 총회, 2018.10)

□ 탄소자원화 기술은 ‘탄소포집·저장·활용(CCUS)’이라는 상위기술의 범주에 포함되며, CCUS 기술은 포집한 CO₂의 최종 처리 방식에 따라 두 가지 기술로 구분됨

- ① 탄소포집저장(CCS, Carbon Capture Storage): CO₂가 대기 중으로 방출되기 전에 포집하고 수송하여 지중, 해저지층에 영구적으로 저장
- ② 탄소자원화(CCU, Carbon Capture Utilization): 포집된 CO₂를 화학, 생물학적 변환 과정을 거쳐 화학/플라스틱 제품의 원료, 바이오 연료 등으로 전환

[그림 2. CCS/CCU 기술 개요]



출처: POSRI 재작성, 한전경영경제연구소 자료 기반

□ 탄소자원화(CCU)는 혁신적 CO₂ 감축 수단일 뿐 아니라 CCS와 달리 CO₂를 경제적 가치를 가진 자원으로 재활용(Recycling)한다는 점에서 차별화됨

- 탄소자원화는 CO₂와 산업 부산물을 원료(Feedstock)로 이용하여 기존 제품의 대체 제품을 생산하는 등 자원 절감 효과가 존재
 - 예) 재 폐기물(Waste ashes)과 슬래그를 CO₂와 결합하여 건축자재를 생산
- 특히 CO₂ 배출량이 많은 정유·석유화학, 철강, 시멘트 등 산업부문에서는 산업 성장과 CO₂ 감축을 동시에 추구할 수 있는 수단으로 탄소자원화 기술의 가능성에 주목하고 있음

2. 탄소를 자원화하는 방법

□ CO₂를 자원화하는 방법은 이론적으로 다양하지만, 글로벌 기술 발전(성숙도) 동향 및 실현가능성, 잠재성 등 요인에 따라 크게 세 가지 유망분야로 분류됨

- CO₂를 활용해 ①화학제품의 원료 생산, ②광물 탄산화 제품 생산, ③바이오 연료 생산 분야 등이 대표적임

[표 1. 탄소자원화의 주요 분야]

구분	기술개념	최종제품(Application)
화학제품 생산 (Chemical production)	CO ₂ 를 화학적 변환을 통해 화학제품의 원료로 전환	메탄올, 우레아(Urea), CO, 메탄 등
광물 탄산화 (Mineralization)	CO ₂ 를 광물질(칼슘염 등)과 반응시켜 건축자재 등을 생산	탄산염(Carbonates) 등
바이오연료 생산 (CO ₂ to fuels)	CO ₂ 흡수가 빠른 미세조류(플랑크톤 등)를 연료로 전환	바이오디젤 등

출처: 미국 에너지부, LG경제연구원 등

□ 세 가지 분야(기술) 모두 시장경쟁력을 갖춘 단계는 아님. 기술이 성숙되기까지 시간이 더 필요하고, 시장이 충분히 성장하기 위해서는 경제성을 증명하고 고객(수요처)을 확보하는 과정이 필요함

- 기술개발 단계(TRLs)에서 현재의 프로젝트들은 기초연구(Research)와 실증(Demonstration) 단계가 대부분임.

* TRLs: Technology Readiness Levels

[표 2. CCU 기술개발 단계]

구 분	기초연구	실증	상용화
화학제품 생산			
광물 탄산화			
바이오연료 생산			

출처: 베를린 공과대학교

* 다수(Majority) 프로젝트 기준으로 표기

○ CCU 기술은 생산비용 저감, 전환공정의 효율성 개선, 설비 Scale-up, 시장 형성(Market developing) 등 도전과제에 직면하고 있는 상황임

- CO₂를 자원화(예, 화학적 전환)하는 과정에서 대량의 에너지가 필요함에 따라 에너지 공급을 위한 비용이 추가로 발생하고, 해당 과정에서 별도의 CO₂를 발생시키지 않는 방안도 모색해야 함
- 기존 석유화학 제품의 원료(Feedstock)는 비용효율성 측면에서 상대적인 경쟁력이 뛰어나기 때문에 현재 수준의 CCU 기술로는 대체하기 어려움
- 진행 중인 대부분의 프로젝트들은 기술성의 증명 단계(Lab 또는 Pilot)로 일정규모(Scale-up)의 설비 구축을 통해 경제성을 입증하고 시장을 형성(고객설득)하는 과정이 필요함

※ 일부 상용화 프로젝트도 존재하나 오일회수증진(EOR) 등 유전/가스전을 보유한 특정 국가(주로 미국)에서만 가용한 수준임

3. 주요국 및 산업계 추진 동향

[국가별 추진 동향]

- 주요국들은 중장기 온실가스 감축목표 달성을 위한 가교기술(Bridge technology)로서 탄소포집·저장·활용(CCUS) 기술 개발을 꾸준히 추진해 옴
- 친환경 재생에너지로 완전히 전환하는 데는 상당 수준의 시간과 재원이 소요되므로 현실적인 온실가스 감축 대안으로 대부분의 국가에서 관련 R&D를 추진 중임
- 초기에는 CCS 기술에 관심이 집중되었으나, 저장장소 확보 및 안정성 문제로 많은 프로젝트들이 지연 또는 취소된 바 있음
- 이에 CCS의 대체 또는 보완 기술로서, 저장장소가 필요하지 않으며 제품생산을 통해 부가적인 이익을 창출하는 탄소자원화 기술로 관심이 전환되고 있음

1) 미국

- 미국 정부는 탄소자원화 기술을 산업부문 온실가스 감축의 핵심 수단으로 판단하고, 정부 차원에서 R&D 자금 지원, 세제 관련 인센티브 제도 시행 등을 통해 기술개발 및 투자 활성화를 추진함
 - 에너지부(DOE)는 탄소자원화 기술을 국가전략기술로 채택, 탄소자원화 기술을 통한 온실가스 감축, 제품 판매를 통한 부가이익 창출뿐 아니라 잠재적 일자리 창출에도 기여할 것으로 기대한다고 밝힘
 - 현재까지 100여 개 이상의 탄소자원화 프로젝트를 추진 중이며, 이 중 상용화 단계인 오일회수증진(EOR) 기술은 미국이 선도하는 중점 분야임
 - 이 밖에도 석유화학, 시멘트 및 발전부문의 대규모 파일럿 프로젝트를 추진 중임 (예: Skyonic社 시멘트 공장의 CO₂ 포집 및 중조(Sodium bicarbonate) 생산 프로젝트 등)

2) 유럽

- 유럽은 1990년대 이후 글로벌 기후변화 대응기술의 일환으로 CCUS 기술개발에서 선도적 역할을 해왔으며, 최근 독일을 중심으로 산업부문의 탄소자원화 기술개발을 본격 추진하고 있음

- EU 차원 기후변화 대응 기금 및 기술지원 프로그램 등을 통해 유럽 각 지역에서 CCUS 프로젝트를 추진하고 있으며, 2020년까지 CCUS 기술을 적용해 화력발전소의 CO₂ 無배출을 목표로 하는 EU ZEP(Zero Emission Power Plant Platform) 등이 대표적 프로그램임
- 특히 독일 정부는 탈원전을 목표로 한 자국의 에너지전환 정책(Energiewende) 및 중장기 온실가스 감축목표 달성을 위해 재생에너지와 함께 탄소자원화 기술에 대한 지원을 대폭 확대함
- 2010년부터 2016년까지 150개 이상의 프로젝트에 약 100백만 유로를 투자하였으며, 민관협력을 통해 산업계에서도 50백만 유로를 투자함
(예: Bayer社 CO₂를 원료로 폴리우레탄품 생산 ‘Dream Production’ 프로젝트, ThyssenKrupp 등 ‘Carbon2Chem’ 프로젝트 등)

3) 중국

- 중국 정부는 2050년까지 중국 에너지 믹스의 절반 이상을 석탄발전이 차지할 것으로 전망되는 바, 국가 온실가스 감축을 위해서는 CCUS 기술이 절대적으로 필요하다고 인식하고 있음
- 국가발전개혁위원회(NDRC)는 CCUS 기술로드맵을 발표('11), 2030년까지 단계별 기술개발을 위한 세부 실행계획을 제시하고, '14년부터 광동성 등을 중심으로 대표 프로젝트를 추진함
- 신규 석탄발전소의 경우 CCUS 기술적용을 의무화하는 방안을 추진 중이며, 산업부문은 업종별 특성을 고려하여 기술적용이 가능한 영역 및 감축잠재량 분석을 우선 추진하고 있음

[그림 3. 중국 2030년 CCUS 기술로드맵]

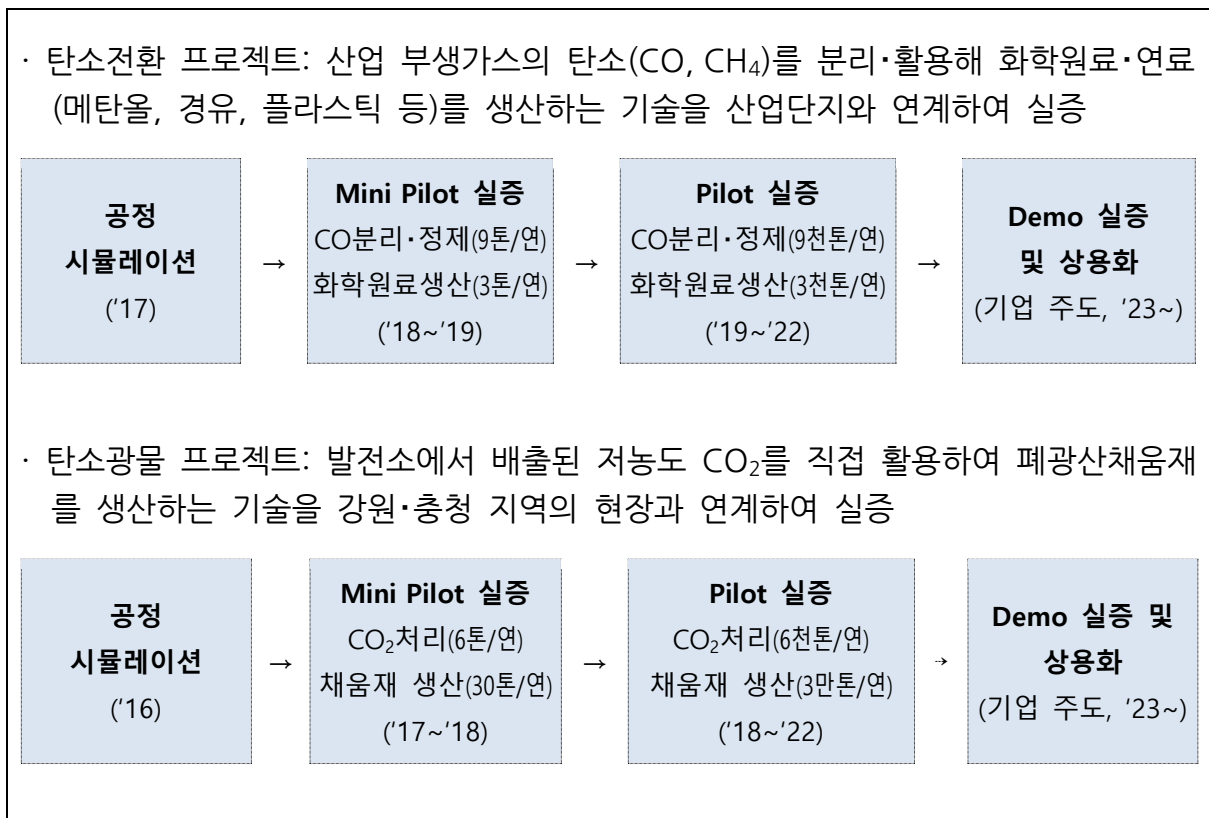
구 분	2015년	2020년	2030년
기초기술 개발	① 에너지 저소비 CCUS 기술 개발 ② 저장안정성 기술/시스템 개발	저장안정성 시스템 완성	
Full-Chain 프로젝트 개발	< Pilot 프로젝트 개발 > ① 연간 20만톤 이상 규모 ② energy penalty < 25% ③ CO ₂ 톤당 처리비용 < 350 RMB	< 준상용화 프로젝트 개발 > ① 연간 100만톤 규모 ② energy penalty < 20% ③ CO ₂ 톤당 처리비용 < 300 RMB	< 상용화 프로젝트 개발 > ① 연간 100만톤 이상 규모 ② energy penalty < 17% ③ CO ₂ 톤당 처리비용 < 240 RMB
CCUS 상용화	CCU, CCS 통합하여 연간 1백만톤 수준 감축가능한 일괄 공정 pilot 기술 개발	생산처-수요처 연계를 고려한 CCUS 준상용화 설비 구축 (연간 2백만톤 감축 수준)	생산처-수요처 연계를 고려한 CCUS 상용화 설비 구축 (연간 2백만톤 감축 이상)

출처: Global CCS Institute, Guangzhou Institute of Energy Conversion (2013)

4) 대한민국

- 정부는 CCUS 기술을 2030년 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 주요 감축수단 및 10대 기후기술에 포함하고, 적극적인 기술개발 및 상용화를 추진하겠다고 밝힘
 - 기후변화대응 기술확보 로드맵('17)에서 10대 기후기술로 CCUS를 명시, 국가 온실가스 감축로드맵('18)에서는 CCUS 기술개발 및 상용화를 통한 감축량('30년까지 10.3백만톤)을 할당함
 - ※ '19년, 국가 CCUS 종합추진계획 발표 예정
 - 탄소자원화 기술을 국가 전략프로젝트로 추진('16.12~), 파일럿 실증단계까지를 목표로 '17~'22년간 총 475억원을 투자할 계획임 (정부 340억원, 민간 135억원)
 - 특히 철강업종 등을 대상으로 산업 부생가스의 탄소(CO, CH₄)를 분리·활용하여 유용한 화학원료를 생산하는 기술을 적용하는 실증사업을 검토 중임

[그림 4. 우리나라 탄소자원화 실증 프로젝트]

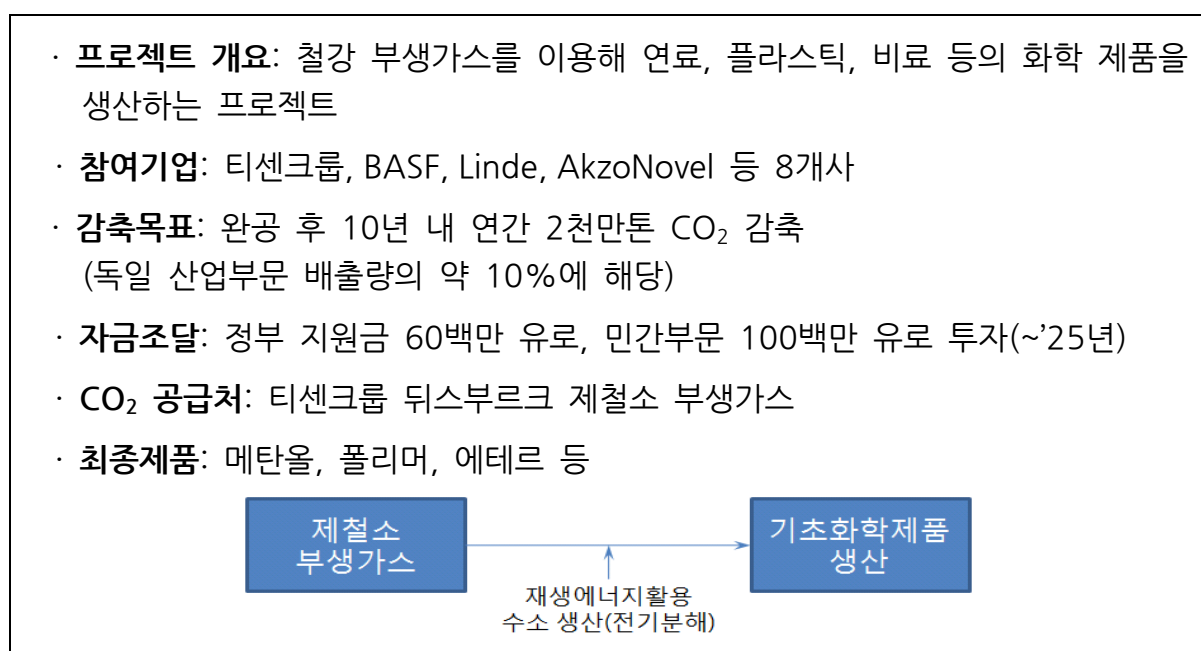


출처: 탄소자원화 국가전략프로젝트 사업단

[산업계 추진 동향]

- 산업부문의 경우 탄소자원화 기술 적용은 온실가스 감축과 함께 새로운 생산공정기술의 개발을 촉진하는 계기이자, 혁신의 원동력이 될 수 있다는 점에 주목하고 있음
 - 탄소를 연·원료로 사용하는 석유화학 산업과 시멘트, 철강 등 고순도 CO₂를 배출하는 산업 등에서 적용방안이 활발하게 모색되고 있는 상황임
 - 철강산업은 대량의 CO₂ 배출원, 회수여력이 있는 미활용 폐열 및 탄소 등 환원제가 존재하는 산업으로 탄소자원화에 매우 적합한 업종으로 분류됨
- 철강업계의 경우, 온실가스 다배출 공정 특성상 획기적인 온실가스 감축을 위해서는 공정 혁신뿐 아니라 CCUS 기술 도입을 병행할 필요가 있다는 논의가 진행되고 있음
 - 단기적 온실가스 감축수단으로는 공정설비의 에너지효율 향상, 폐열 회수기술 적용 등이 있으나 감축여력이 크지 않으며, 장기적으로는 CCUS 기술적용을 통해 획기적인 감축을 모색할 수 있음
 - 철강부문의 CCUS 기술연구는 그동안 공정 부생가스의 탄소포집 중심이었으나, 최근 포집된 탄소를 연·원료 형태로 재사용하는 탄소자원화 방안이 본격적으로 제기되고 있음
 - 티센크루프, BASF 등이 추진 중인 Carbon2Chem 프로젝트가 대표적임

[그림 5. Carbon2Chem 프로젝트 주요 내용]



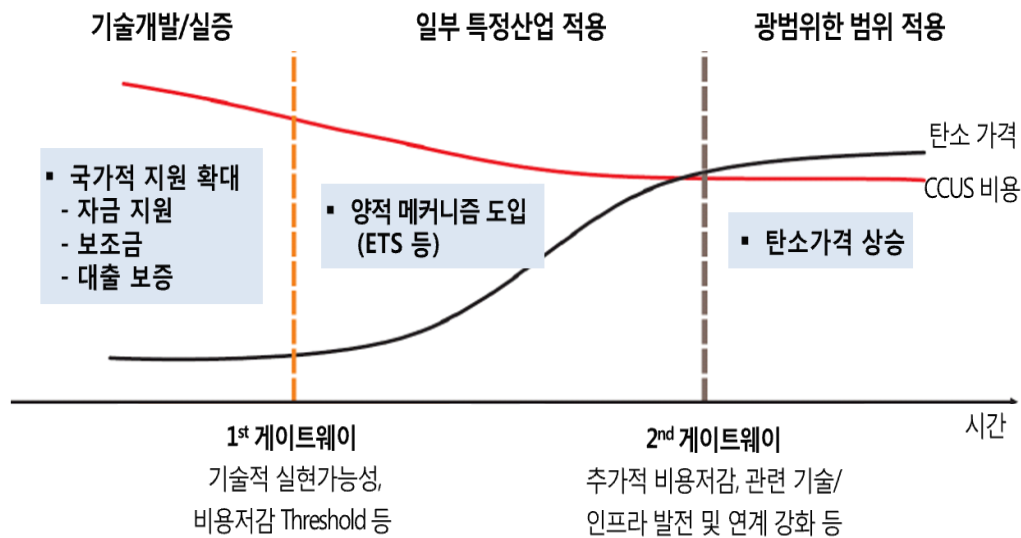
출처: Carbon2Chem

4. 미래 자원으로 가능성

- 탄소자원화 기술은 CO₂ 배출량을 줄이는 것이 아니라 이를 자원화하여 제품을 만드는 혁신적인 접근으로 기후변화 대응과 에너지 문제를 동시에 극복할 수 있는 방식으로 평가되고 있음
 - 우리나라와 같이 에너지 다소비 산업구조로 인해 에너지 절약 및 재생에너지 활용만으로는 CO₂ 감축에 한계가 있는 국가의 경우, 이를 극복할 수 있는 가장 현실적인 감축수단 중 하나임
 - 이와 함께 석탄발전뿐 아니라 석유화학, 철강, 시멘트 등 연관산업의 원료/제품 다변화/다원화, 부가가치 창출, 다양한 융합기술 파급 효과, 일자리 창출까지 경제적 효과에 대한 기대가 존재함
- 그러나 현 단계는 전 세계에서 상용화 수준의 검증된 기술 및 사업모델이 없는 상태로, 적극적인 정책/제도적 뒷받침을 통해야만 기술개발 및 사업 활성화가 가능한 상태임
 - 정책의존도가 높은 기술 특성상 독일 등의 사례와 같이 국가적 지원을 통해 초기 R&D 및 실증 사업 추진뿐 아니라 자생력 있는 산업 생태계 조성까지 뒷받침이 필요함
 - IEA(2017), Mckinsey(2014) 등은 일정 수준 이상의 탄소가격이 존재해야만 탄소자원화 기술의 경제성이 확보될 수 있음을 지적함
 - 또한 공통기술, 혁신기술 성격의 탄소자원화 기술개발을 위해서는 민간협력이 필수적이므로, 정부 차원에서 민간 참여/투자 촉진을 유도할 수 있는 다양한 정책/제도적 체계조성 노력과 병행이 필요함
 - 우리나라의 경우 2015년 배출권거래제 도입을 통해 탄소규제가 존재하므로, 탄소자원화 실증사업 참여에 대한 탄소크레딧 인정을 통해 인센티브를 제공하는 방안을 검토해 볼 필요가 있음

(예: 탄소자원화 사업 투자에 대한 탄소크레딧 사전 인정 방안 등)

[그림 6. CCUS 기술의 발전 단계별 정책 지원]



출처: POSRI 재작성, IEA(2017) 자료 기반

- 철강업계는 중장기적 온실가스의 획기적 감축/탈탄소화를 위한 핵심 수단으로 CCUS 기술을 도입할 필요가 있으나, 기술 성숙 단계를 감안하여 중장기적 도입/적용 가능성을 모색해야 함
 - 티센크루프 사례와 같이 저탄소/친환경 시대 철강산업의 미래 도전과제 대응 측면에서 장기적인 관점의 R&D를 추진할 필요가 있음
 - 제철소 내 부생가스를 화학물질로 전환하여 활용하는 기술은 초기 단계부터 제품의 수요처인 화학업계의 기업들과 연계하여 상호 Win-Win 할 수 있는 사업 모델을 수립하는 것이 바람직함
- 탄소자원화 기술은 순환경제(Circular Economy)로의 전환, 저탄소/친환경 성장 패러다임 변화 속에서 그 중요성이 더욱 커질 수 있으므로, 관련 동향에 대한 지속적인 모니터링이 필요함
 - 향후 탄소규제 강화/확대(배출권가격 상승 등) 등을 통해 현재 경제성이 확보되지 않는 관련 기술들도 상용화될 가능성이 있음
 - 선제적으로 기술 우위 확보 시 향후 탄소자원화 기술 시장의 선점 및 상용화 과정에서 주도적 역할을 수행할 수 있으므로 미래 활용가치를 고려하여 장기적 차원에서 전략적 접근을 모색할 시점임

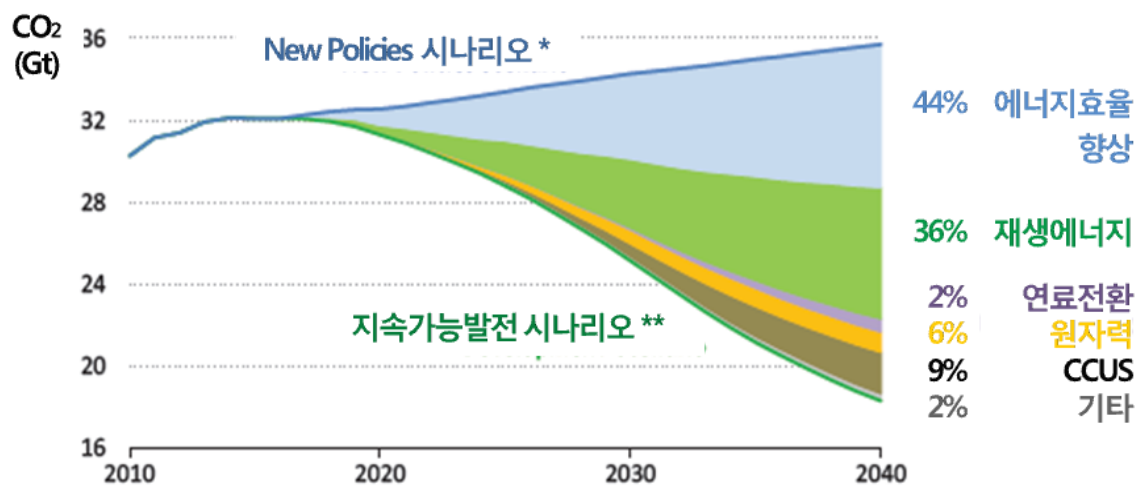
[첨부] IPCC IEA 보고서 주요 내용

□ IPCC(기후변화에 관한 정부 간 협의체) 5차보고서('14)

- 현재 전 세계 온실가스 배출량 증가 추이상 전지구적 온도 상승 1.5~2°C 이하 억제 목표를 달성하기 위해서는 2027년 이후에는 화석연료 사용을 전면 중지할 필요
- 이에 CO₂ 감축 옵션으로서 CCUS의 역할이 필수적이며, 특히 2050년까지 발전부문의 화력발전소+CCS, 원자력 및 재생에너지 발전을 통한 탈탄소화가 필요

□ 국제에너지기구(IEA) WEO 2017 보고서('17)

- 지속가능발전 시나리오가 실현되기 위해서는 에너지효율 향상과 재생에너지/원자력 사용 확대가 전체 감축의 약 80% 이상 기여해야 하며, CCUS 기술이 약 9% 수준에서 기여



* 각국 정책과 現 수준을 기반으로 기본 전망

** UN의 지속가능 어젠다 등 기후변화 대응 노력이 반영된 전망

이 자료에 나타난 내용은 포스코경영연구원의 공식 견해와는 다를 수 있습니다.

[참고자료]

[보고서]

Arno W. Zimmermann, Technische Universitat Berlin, Assessing Early-Stage CO₂ Utilization Technologies- Comparing Apples and Oranges?, 2017

Global CCS Institute, Guangzhou Institute of Energy Conversion, CCUS development roadmap study for Guangdong Province, Guangdong Carbon Capture and Storage Readiness (GDCCSR) Project, March 2013

Global CCS Institute, The Global Status of CCS, 2017Hans-Jorn Weddige, ThyssenKrupp, CO₂: from Waste to Raw Material, Tackling the Climate Challenge across Industry Sectors, November 2016

International Energy Agency(IEA), 20 Years of Carbon Capture and Storage, Accelerating Future Deployment, 2016

IEA, Five Keys to Unlock CCS Investment, 2017

Markus Oles, ThyssenKrupp, Carbon2Chem, October 2017

World Economic Forum(WEF), Towards the Circular Economy: Accelerating the Scale-up across Global Supply Chains, January 2014

관계부처합동, 2030 국가 온실가스 감축로드맵 수정안, 2018.9

미래창조과학부, 발상의 전환, 온실가스를 에너지로 바꾸는 탄소자원화, R&D KIOSK 국가연구개발사업 정보 길잡이 제33호, 2017.2

포스코경영연구원, 온실가스 감축을 위한 탄소자원화 사업 활용 방안 및 활성화 정책 제안, 2018.4.27

LG경제연구원, 이산화탄소 재활용하는 CCU 기술의 개발 빨라지고 있다, 2011.10

[웹사이트]

<https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability-and-resource-productivity/our-insights/why-commercial-use-could-be-the-future-of-carbon-capture>

<http://s3platform.jrc.ec.europa.eu/carbon-capture-and-utilization>