

글로벌기술협력기반육성사업(GT)
심층분석보고서

이산화탄소 저감 및 자원화 기술: 미국의 CCUS 산업 동향 분석



MOTIE
MINISTRY OF
TRADE, INDUSTRY & ENERGY

beyond leading technology

kiat

Keit

한국산업기술평가관리원

KETEP

한국에너지기술평가원
KOREA INSTITUTE OF ENERGY TECHNOLOGY
EVALUATION AND PLANNING



KOREA-ISRAEL
INDUSTRIAL R&D FOUNDATION

목 차

주요 내용 요약	1
I. 서 론	2
II. CCUS 산업 시장 및 정책 동향	8
1. 이산화탄소 관련 시장	8
2. 온실가스 저감 사업 현황	11
3. 온실가스 저감 관련 정책	15
III. CCUS 기술 개발 현황 및 동향	20
1. 이산화탄소 저감 기술 프로그램	20
2. 이산화탄소 저감 기술	22
2.1. EOR	22
2.2. CCS	23
2.3. CCUS	27
IV. 결론	38
V. 참고문헌	40
VI. 주 작성자 및 문의처	40

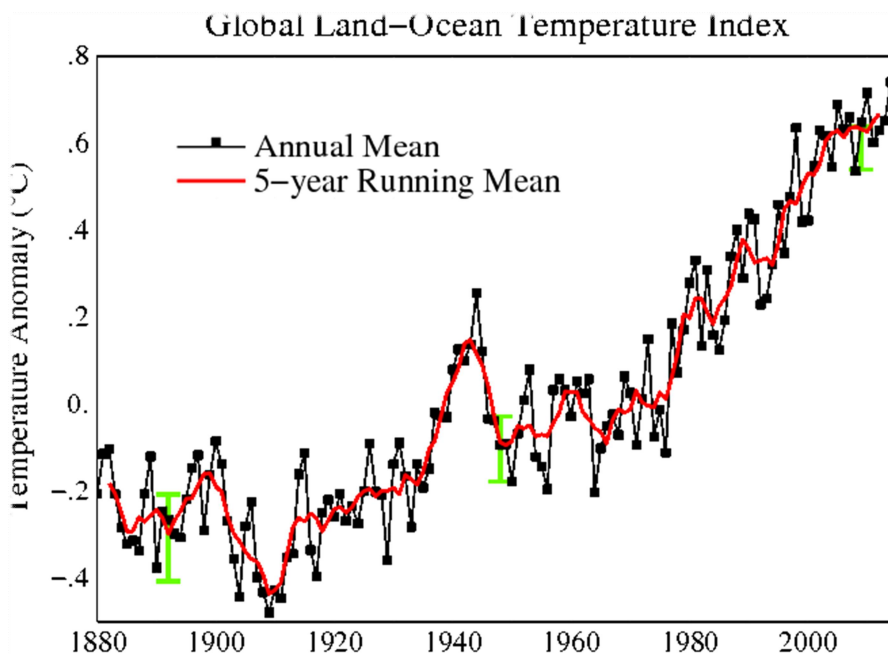
주요 내용 요약

- 산업화와 더불어 온실가스의 배출은 지속적으로 증가하고 있으며, 지구 온난화로 인한 해수면 상승, 이상 기온 현상 등 다양한 자연 재해가 발생되고 있음
- 온실가스 중 이산화탄소(CO₂)는 가장 큰 비중을 차지하며, 산업유형 별 CO₂ 배출량은 발전소 등 에너지 공급원에서 가장 많고, 발전을 포함한 시멘트/철강/화학/정제 산업 등에서 발생하는 CO₂ 가 전 세계 발생량의 절반을 차지함
- 지구온난화 대응책 마련을 위한 국제사회의 논의가 본격화되고 있고, 세계 최대 온실가스 배출국인 미국과 중국이 온실가스 감축 공약을 발표하는 등 전 세계 각국이 온실가스 저감에 적극 동참하고 있음
- 현재 미국 에너지성 DOE(Department of Energy)는 이산화탄소를 저감하기 위한 기술로, CCS(Carbon Capture & Storage)와 CCU(CC & Utilization)이 복합된 CCUS 기술에 관심을 두고 다각적 기술 개발을 추진 중임
- 이산화탄소 관련 시장(기술, 탄소배출권, 제품)은 현재 형성단계이고, 이산화탄소의 자원화 기술(CCU)을 통한 기존 화학제품 시장의 진출은 포집/폐기 기술 시장의 범위를 확장할 것으로 예상됨
- 미국은 이산화탄소 저감을 위한 대형 사업을 추진하고 있으며, 원천 기술 개발 및 상용화를 위한 지원 정책을 수립 중. 또한 국제 대응을 위한 전략을 심도 있게 수립 중이며, 전략 기술로 EOR(Enhanced Oil Recovery)과 CCS를 고수하여 왔으나, CCU가 필수부가가치함을 인지하여, 기존 CCS 기술개발 전략 포트폴리오에 탄소 활용 및 재사용(Carbon Use and Reuse) 기술을 포함시킴
- 우리나라는 미국의 CCU 집중 투자에 대응하여, 기술적 의존 및 이에 따른 산업 경쟁력 약화 등에 선제적으로 대응할 필요가 있음. 국내 기업의 실정에 맞는 맞춤형 CCU 기술 개발을 통해 원천기술 확보 및 신산업을 선점하고 고용을 창출하여 국가경쟁력을 지속적으로 유지할 수 있는 국가 차원의 정책적 지원이 필요함

I 서론

- 19세기 후반 산업화와 더불어 화석연료 사용량이 급증하기 시작하였고, 온실가스(CO_2 , CH_4 , N_2O , 불화가스 등) 배출로 인한 지구 온난화가 가속화되고 있음. 지구 연평균 기온이 19세기 이후 약 0.85°C 상승하는 결과를 초래하였고, 2100년까지 3.7°C 상승을 전망. 이에 따라 전세계적으로 다양한 재해가 발생되고 있으며 특히 해수면 상승이 가장 큰 문제임
- 지구온난화로 인한 그린란드의 빙하가 녹아내리고 있으며, 1년에 약 500억 톤 이상의 물이 해양으로 유입되어 지난 100년 동안 해수면이 약 23cm 상승하였음(NASA, 2000). 현재 다양한 동/식물들이 멸종 위기에 처해있고 이상 기후 및 자연재해가 증가하는 중이며, 관련 피해액은 전 세계 GDP 1.6%에 해당하는 1.2조 달러/년으로 추정
- NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)는 “미국을 비롯한 세계의 대기온도가 20세기 초에 비해 1°F 상승하였으며, 과거 30년 동안 기온의 상승 속도가 가속화 되고 있으며, 70년대 중반 이후부터의 상승 속도는 수세기 전에 비하여 3배 이상”이라고 발표(NOAA, 2007)

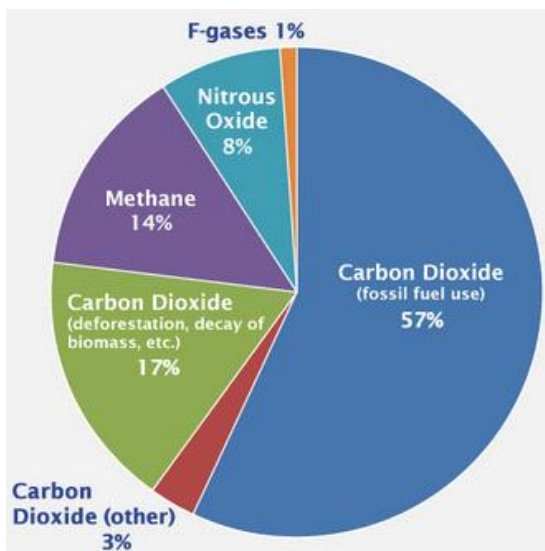
[그림 1] 글로벌 기온 상승 추이



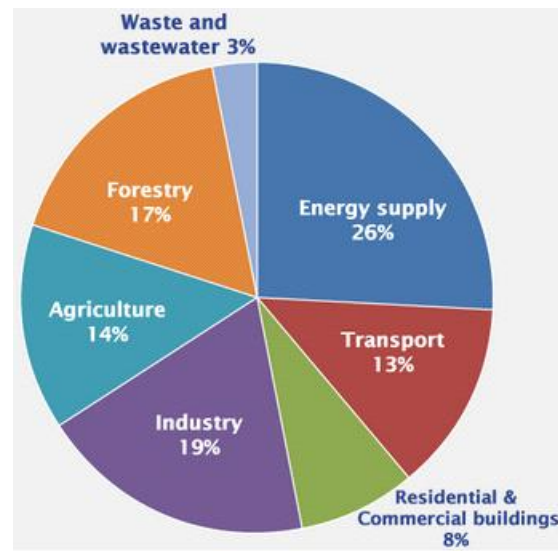
Source: NASA GISS (<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>)

- 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 발간된 보고서에 따르면 6대 온실가스(CO_2 , CH_4 , N_2O , HFCs, PFCs, SF_6)의 배출량이 1970~2004년에 70% 증가(1990년 이후 24% 증가)
- 온실가스의 대표적인 이산화탄소(CO_2)는 가장 많은 배출량을 보이며, 처음 계측이 시작된 1958년에는 대기 중 농도가 310 ppm 정도였으나 석탄, 석유 등 화석연료의 비약적인 소모로 인해 매년 증가하여 2015년 현재 400ppm을 상회하고 있음(CO_2 Now.org)
- 이에 선진국에서는 CO_2 농도를 500 ppm 이하에서 안정시키고자 CO_2 를 저감하는 방법으로 에너지 효율화 및 대체 에너지 활용 등 다방면의 노력을 경주하여 왔으나 CO_2 의 증가 추세는 지속되고 있음
- 산업유형 별 CO_2 배출의 경우, 발전소 등의 에너지 공급원에서 가장 많은 배출량을 보이고, 발전/시멘트/철강/화학/정제 산업 등에서 발생하는 CO_2 가 전체 발생량 중 절반을 차지함. 나머지 운송, 농업, 임업 등의 기반 산업에서 대동소이한 발생량을 보임

[그림 2] 배출 온실가스 성분 및 산업별 온실가스 배출



<배출 온실가스 성분>



<산업별 온실가스 배출>

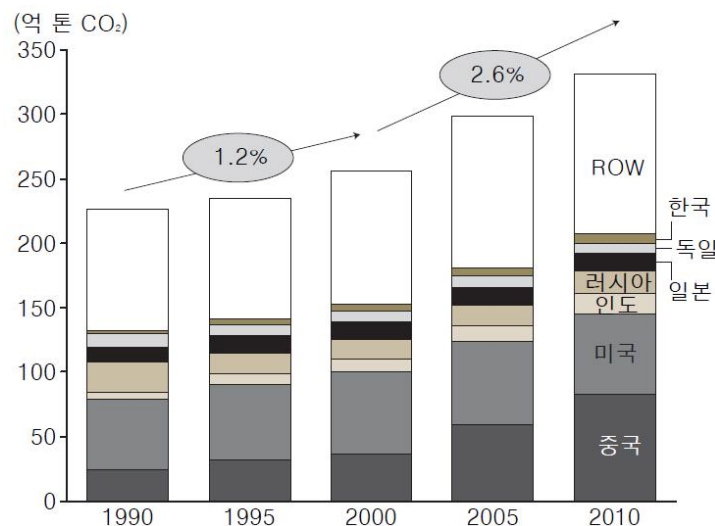
Source: IPCC (2007)

- 지구온난화에 대한 과학적 증거가 제시되기 시작하면서, 온난화 대응책 마련을 위한 국제사회의 논의가 본격화되고 있음
- 2013년 제19회 기후변화협약당사국총회(COP 19)에서는 전 세계 각국이 2020년

이후의 감축목표 제출에 합의. 차년도에 개최된 COP 20에서는 기존에 세계 각국이 제시한 2020년 감축목표인 지구 평균온도 상승 2℃ 또는 1.5℃ 이하 억제에 문제가 있음을 확인하였고, 보다 강화된 감축노력의 필요성을 제기

- 특히, 그 동안 자국 산업보호 문제 등으로 교토의정서에서 탈퇴하는 등 글로벌 기후변화 대응체제 참여에 소극적이었던 미국 및 세계 최대 온실가스 배출국인 중국(중-미 이산화탄소 배출: 전 세계 배출량의 45%)이 베이징 양자 정상회담(2014.11.12.)을 통하여, 미국은 2025년까지 2005년 대비 배출량을 26~28%로, 중국은 특정 목표치를 제시하는 대신 배출량 감축이 시작되는 배출 정점을 2030년 이내가 될 것이라고 감축 공약을 발표
- 오바마 대통령은 2030년까지 석탄·화력 발전을 통한 온실가스 배출량을 대폭 줄이고 (2030년까지 2005년 대비 32%로 새로이 강화) 태양광과 풍력을 이용한 청정전력계획(Clean Power Plan)을 공식 발표하여 기후변화와의 전면전을 선포(2015.8.3.). 뿐만 아니라 유럽 연합 등 세계 주요국들의 기후변화 문제에 대한 인식이 적극적인 태도로 변화하고 있음
- 우리나라는 2009년에 2020년까지 온실가스 배출을 배출전망치(BAU) 대비 30% 감축하기로 하는 온실가스 감축목표를 설정하고 국제사회에 공표한 바 있으며, 2014년에 2030년 온실가스 감축 목표를 BAU 대비 37%로 공표하고, 이를 구체화하기 위한 온실가스 감축목표 달성 로드맵을 수립하는 등 대외적 대응을 위한 지속적인 노력을 기울이고 있음

[그림 3] 전 세계 이산화탄소 배출 현황



Source: BP Statistical Review of World Energy (2011)

- 이산화탄소(CO₂)의 포집·저장 기술인 CCS(Carbon Capture and storage)는 산업 및 발전소 부문에서 배출되는 이산화탄소를 포집, 수송(파이프라인, 전용 수송선 등 이용)하여 지층에 폐기·저장(고갈된 가스전 및 유전, 석탄층, 대염수층 등)하는 것으로 정의되며, 비용 대비 효과적인 온실가스 감축 방안의 하나로 인정받고 있음
 - 이론적으로 CCS는 대기 중 이산화탄소 방출을 줄이면서 화석 연료의 지속적인 사용을 가능하게 하고, 에너지 및 기후 정책적 관점에서 온실가스 배출량을 실질적으로 감축하는 수단을 제공하지만 기술의 실현에는 보완사항이 많음
 - 즉 고투자 비용, 유해 포집제의 대기 방출 가능성, 잠재적 저장 능력의 한계와 불확실성, 이산화탄소 지층 저장의 안전성(누출 가능성)에 대한 대중적 저항 증가라는 문제에 직면하고 있으며, 이외에도 상당한 에너지의 공급을 필요로 함
- CCU(Carbon Capture and Utilization, CO₂ 포집 및 재활용)은 CO₂를 단순히 포집할 뿐 아니라 유용한 자원으로 재활용하여 부가가치가 높은 물질(Value-added Compounds)로 전환하는 기술로, 현재 CCS에 비하여 기술 성숙도는 낮으나 최근 기술의 유용성으로 인하여 연구가 활발히 진행되고 있음
 - 대기 중에 400 ppm 정도로 존재하는 CO₂를 무게로 환산하면 3×10^{12} 톤으로써 매장 석유보다 양적으로 우월하고 지구상에서 가장 많은 지속적 활용 가능한 탄소원임(Sustainable Carbon Source)
 - 따라서 폐기물로 인식되는 CO₂를 자원으로 재활용하여 유용한 화합물로 전환하는 CCU 기술은 탄소 자원 선순환을 위해서 필수부가결한 기술이며, 이는 자연계의 탄소 순환과 유사한 특성을 보임
 - 하지만 다양한 CCU 기술의 확보와 상용화를 위한 대형화·실증화 기술 개발이 선결되어야 할 사항임

[그림 4] 온실가스저감 기술 개념도

문제점

자원순환

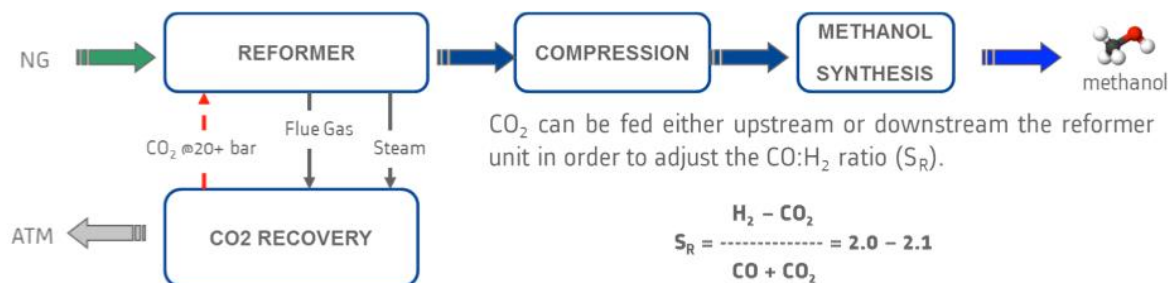
대책

CCU

폐기/배출

- 이산화탄소 전환/활용 분야는 크게 화학적 전환, 생물학적 전환, 직접 활용으로 구분할 수 있고, 기술적 범주를 촉매, 전기화학, 바이오공정, 광활용, 무기(탄산)화, 폴리머 등으로 구분 지을 수 있음
- 화학적 전환은, 주로 공정촉매 및 광)전기화학촉매 방식 등을 통해 이산화탄소를 자원화하는 기술로, 대표적으로 이산화탄소와 환원제의 개질 반응을 이용하여 다양한 화합물이 플랫폼 물질인 합성가스(CO 및 H₂)를 생산하는 것이 일반적임. 조건에 따라 특정 비율로 생산된 합성 가스를 다양한 고부가 화합물로의 전환하여 제품화와 동시에 이산화탄소를 저장하는 기술임

[그림 5] 이산화탄소 및 메탄을 활용한 메탄올 생산 공정



Source. www.alstom.com

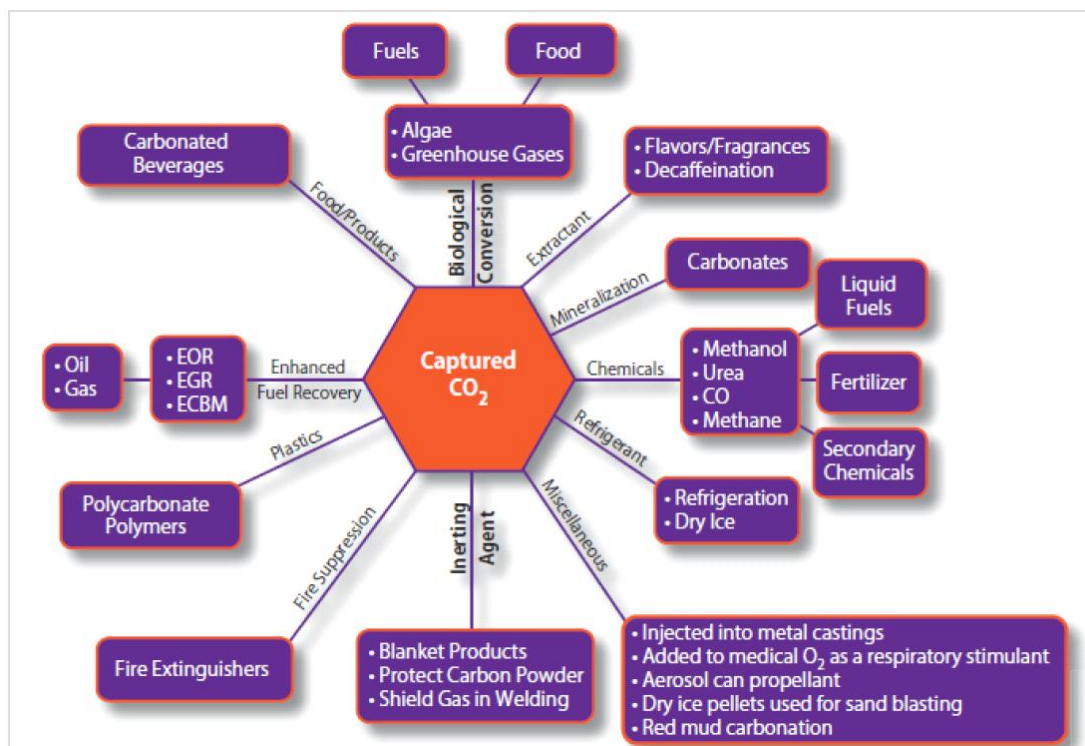
- 생물학적 전환의 경우, 효소 또는 광전기 공정이 가미된 식물의 (인공)광합성을 이용하여 CO₂ 를 화학물질로 전환하여 바이오 자원화하는 기술임. 인공광합성의 경우, 이산화탄소를 활성 물질로 전환하기 위한 에너지 소비 과정이 태양광으로 대체되기 때문에 자원화 과정에서 요구되는 에너지 문제에서 자유로움. 광화학적/생물학적 전환을 융합한 인공광합성 역시 많은 기술적 진보가 있어왔고, 현재 실증화를 위한 연구가 심도 있게 진행되고 있음
- 이산화탄소를 직접적으로 활용하여 무기탄산화하여 고정/활용하는 무기탄산염 생산 기술은 현재 기술 단계가 높고 이산화탄소의 대량 처리가 가능한 기술임
- 공정의 에너지 개선을 위해 신재생 에너지 활용 이산화탄소 전환 및 전기화학을 활용한 다양한 전환/자원화 연구 역시 진행되고 있음. 이러한 기술들은 개발 시 높은 저장 효과와 선택적 화합물 제조가 가능한 기술이나 아직 실험실 규모 수준에서 연구가 진행 중임

- 이산화탄소는 다양한 산업 및 공정에서 발생되고, 하나의 기술로 이산화탄소 저감을 달성할 수 없기 때문에 이산화탄소 저감을 위한 다양한 접근 방식이 전 세계적으로

거론되고 있고, 미국 역시 초기 CCS를 통한 이산화탄소 저감을 고수하여 왔으나, 현재 다양한 방식으로 이산화탄소를 처리하고 자원으로 재사용하기 위한 CCU 기술에 역점을 두고 있음

- 현재 미국 에너지성인 Department of Energy(DOE)는 CCU와 CCS를 융합한 CCUS (Carbon Capture Utilization (Use) and Storage) 기술 개발의 다각적 추진을 진행하고 있으며, 현 기술 개념을 통하여 실제 산업 현장에서 이산화탄소의 자원화와 폐기를 유연하게 운영하여 이산화탄소 저감을 달성하고자 함

[그림 6] CCUS를 통한 이산화탄소 저감



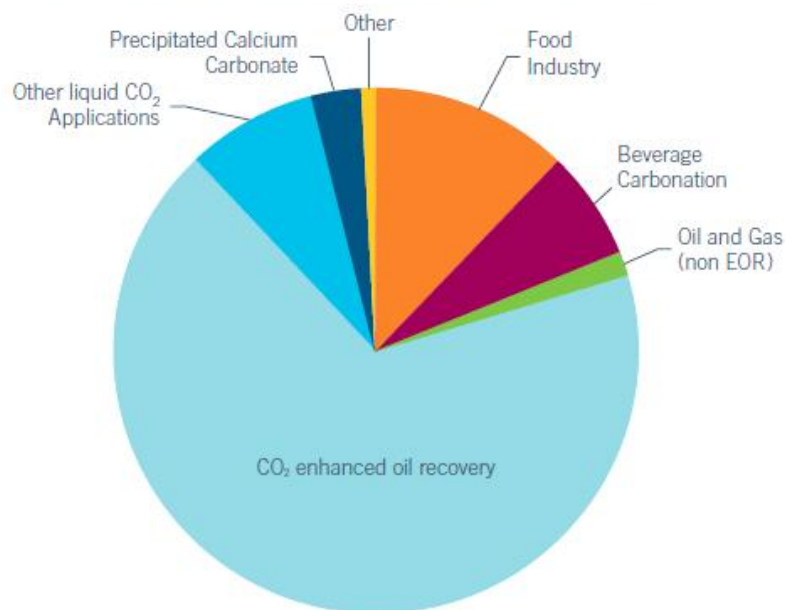
Source: US DOE (2013)

II CCUS 산업 시장 및 정책 동향

1. 이산화탄소 관련 시장

- 현재 세계 이산화탄소 시장의 수요량은 연간 8천만 톤으로 추정되고 있으며, 이산화탄소 시장의 종류와 규모는 아래의 그림과 같으며, 이 가운데 과반 이상인 5천만 톤이 원유회수증진(EOR)에 사용되고 있으며, 대부분은 미국과 캐나다에서 사용됨

[그림 7] CO₂ 수요 현황



Source: Global CCS Institute (2011)

- 미국 내에서 거래되고 있는 이산화탄소(Gas, 초임계액상) 가격은 수요와 지역에 따라 편차가 발생하나, 암모니아 생산 공정과 같은 화학산업에서 생산되는 부생 이산화탄소의 경우 톤당 3~15달러에서 거래. 2010년 Cardinal Ethanol LLC사는 4만 톤의 이산화탄소를 톤당 5달러에 공급하였으며, 이는 운송비용 정도로 매우 낮은 금액임
- 파이프라인 공급 이산화탄소는 대량 공급이 가능하나, 파이프라인 설치비와 금융비용이 포함되어 톤당 9 ~ 26달러에 공급. 미국 Dakota Gasification Company에서는 합성연료 생산 공정에서 발생한 이산화탄소를 파이프라인을 통해 톤당 19달러에 공급

- 지금과 같은 수준으로 EOR, Urea 생산과 같은 CO₂ 활용 기술 개발 프로젝트가 이루어질 경우, 현재 형성 시장 기준으로 2020년에는 CO₂ 연간 수요량이 약 1억 4천만 톤에 이를 것으로 예상(Industrial Use of Captured Carbon Dioxide, Global CCS Institute, 2011.03.)
- 이산화탄소 저감 관련 시장은 현재 시장형성 단계로, CCUS기술의 경우 현행 CO₂ 수요 시장을 대체/보완하는 방향과 신규 CO₂ 시장 창출을 위한 기술 두 가지로 접근하고 있음
 - 특히 CCS는 이미 가스 가공 부문(gas processing sector)에서 이산화탄소 1 MtCO₂ /yr 규모로 운영 가능한 기술임을 증명하였으며, 또한 음료 산업 혹은 원유회수증진(EOR)기술에도 점진적으로 사용되고 있음
 - Visiongain (2011)에 따르면, 세계 CCS 시장은 2011년 119억 달러에서 2021년 243억 달러에 달할 것으로 전망. 미국 CCS 기술 시장의 2011~2021 전 기간의 연평균성장률(CAGR)은 8%로, 유럽에 이어 높은 성장률을 보일 것으로 예측됨

[표 1] 세계 CCS 시장 전망 (2011-2021)

(단위: 십억 달러)

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	CAGR (%)
유럽	3.9	4.1	4.4	4.8	5.2	5.6	6.1	6.7	7.3	8.0	8.8	8.6
북미	2.2	2.4	2.6	2.7	2.9	3.2	3.4	3.7	4.1	4.4	4.9	8.0
아시아	1.9	2.0	2.1	2.3	2.4	2.6	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	7.6
호주	1.6	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.6	5.2
중동	1.4	1.4	1.5	1.6	1.6	1.7	1.8	1.9	2.1	2.2	2.4	5.7
남미	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.3	1.3	1.4	1.5	1.6	1.8	5.6
계	11.9	12.6	13.4	14.3	15.3	16.4	17.7	19.0	20.6	22.3	24.3	7.4
한국	0.25	0.26	0.28	0.31	0.33	0.35	0.38	0.41	0.44	0.47	0.51	7.6

Source: Visiongain (2011), KISTI 재작성 (KISTI market report Vol.2 Issue 12)

- 최근 CCS를 통한 이산화탄소 저감의 한계로 CCUS 기술이 제안되고 있고, CCUS 제품 특성상 기존 화학적 전환을 통한 석유화학 원료 시장의 활용이 용이. Urea나 메탄올, 금속 탄산염을 이산화탄소 유래 화합물 제조로 대체함으로써, 기존 이산화탄소 시장의 몇 배에 달하는 신규 시장이 창출될 것으로 기대되고 있음

[표 2] CCU 제품의 특징 및 현재 시장 수요

Chemical Product or Application	Annual Market (Mt/yr)	Mt CO2 used per Mt Product	Lifetime
Urea	100	70	6 months
Methanol	40	14	6 months
Inorganic carbonates	80	30	decades to centuries
Organic carbonates	2.6	0.2	decades to centuries
Poly(urethane)s	10	<10	decades to centuries
Technological	10	10	decades to years
Food	8	8	months to years

Source: Centre for Low Carbon Futures (2011)

- 현재의 CCUS 기술들을 종합적으로 고려할 때, 이산화탄소 저감은 최소 37 억톤/년으로 추정되며, 이는 세계 연평균 배출량의 10%에 해당함(DNV, 2011). 뿐만 아니라 기존 시장 대체 및 신규 시장 창출을 통해 경제적 이익 및 고용창출을 야기할 수 있음

2. 온실가스 저감 사업 현황

- 2014년 2월까지 전 세계에서 12개 이산화탄소 저감 프로젝트가 가동 중이며 9개는 시공 중, 추가로 39개의 프로젝트가 다양한 개발 계획 단계에 있음. 가동 또는 시공 중인 21개 프로젝트는 2011년 이후 4년 내에 50% 증가한 것으로, 기술의 대규모 적용 및 성공 가능성이 가시적이라는 뜻으로 해석할 수 있음

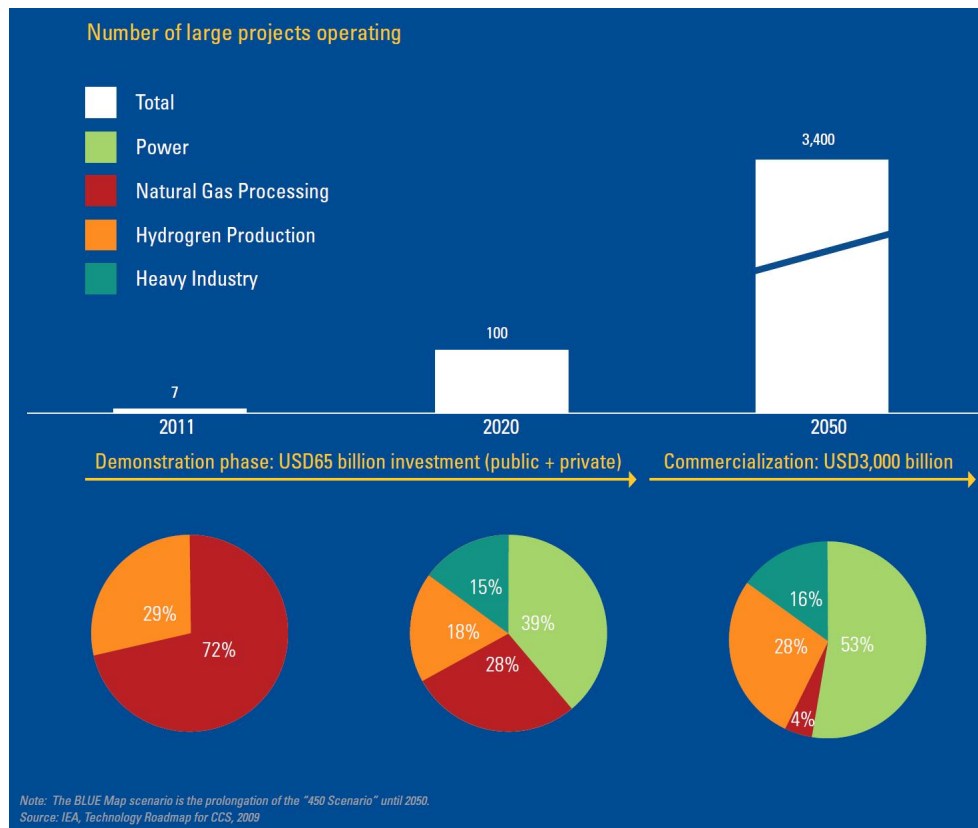
[그림 8] 지역/국가별 대규모 CCS 프로젝트의 수명주기 단계(2014.2 기준)



Source: Global CCS Institute, 글로벌 CCS 현황 (2014.2)

- 2020년까지 100개, 2050년까지 약 3,500개의 대형 프로젝트가 시행될 것으로 예측되며, 프로젝트 투자 금액 또한 65조원 규모에서 3,000조원 규모로 증가할 것으로 예상하고 있음(IEA, 2009; SBC Energy Institute, 2012). 프로젝트의 기술은 기존 천연가스 처리나 수소 생산용 플랜트, 발전 및 중공업에 까지 CCS 프로젝트를 적용하는 방향으로 기술 개발이 이루어지고 있음

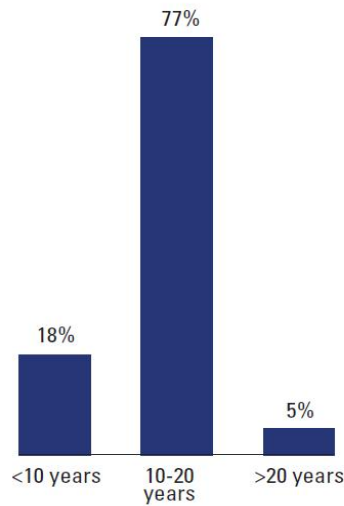
[그림 9] 지구온난화 2°C 제한을 위한 IEA의 CCS 로드맵



Source: IEA (2009), SBC Energy Institute (2012)

- 전문가들 95%가 20년 내에 상용 CCS 프로젝트가 운영 가능할 것으로 예측하고 있으며, 이들 중 20% 가량은 10년 이내에 상업용 플랜트가 가능할 정도로 CCS 기술이 성숙했다고 예상하고 있음

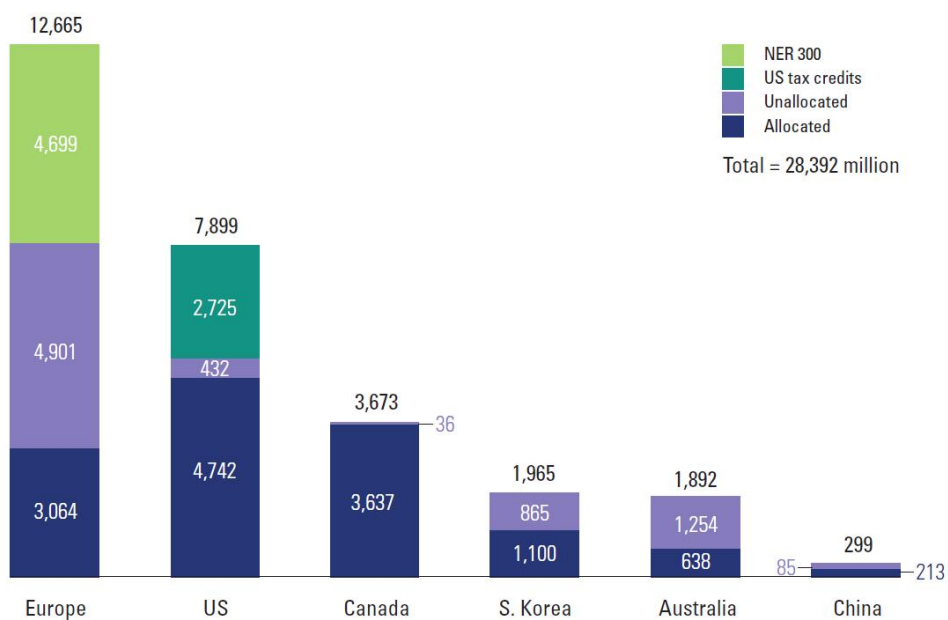
[그림 10] CCS 기술 상용화 예상시기 전문가 설문조사 (% : 응답비율)



Source: SBC Energy Institute (2012)

- 미국은 2012년까지 EU에 이어 단일 국가로는 최대의 공적 자금을 이산화탄소 저감 분야에 투자하였으며, 그 양은 전 세계 투자 금액의 약 25%에 해당하는 금액임. 특히 세액 공제를 통해 이산화탄소 저감 프로젝트의 민간 투자 금액을 보조하여, 민간의 참여를 독려하고 있음

[그림 11] 전 세계 이산화탄소 저감 사업 규모



Source: SBC Energy Institute (2012)

- 전체 CO₂ 포집량이 연 1,000만 톤이 넘는 6개의 프로젝트가 세계적으로 개발 계획 단계에 있으며, 이 중 절반인 3개의 프로젝트(레이크 찰스 CCS 프로젝트, NRG 에너지 구역 CCS 프로젝트, 미국 텍사스 클린 에너지 프로젝트)가 미국내에서 진행되고 있어 세계 이산화탄소 저감 프로젝트에서 미국의 비중이 지속적으로 증가하고 있음

3. 온실가스 저감 관련 정책

- 미국은 에너지 기술 개발 정책을 개발과 도전, 두 가지로 나눠서 동시에 추진하고 있음
 - 첫째는 미국 에너지정책의 구체적인 실행을 목표로 미국 경기부양을 위한 제조업 관련 연구개발에 집중한 투자를 진행하고 있음. CCS 실증 연구와 더불어 기존 화력발전 시스템과 CCS 기술 연계 및 비전통가스(세일가스) R&D 지원과 차량용 소재, 바이오연료, 연료전지 등 수송 R&D, 태양광, 풍력, 수력, 지열 등 신재생에너지 발전 R&D, 그리고 주거·건물·제조업 분야의 에너지효율 향상 R&D이 이에 해당됨
 - 다른 하나는 지원하는 상당수의 프로젝트가 실패할 확률이 높음을 인지함에도 미래사회를 위한 혁신적이고 파급효과가 큰 기술개발을 추진하고 있음. 백악관, 의회, 정부 부처 등에 프로젝트 성공시 미국 사회 전반에 걸쳐 일어날 파급력을 인지시키고 국가적 지지와 국민 이해 획득에 주력하고 있음
- 미국은 ARPA-E(Advanced Research Projects Agency-Energy) 프로그램을 수립하여 에너지 수입을 향후 10년 동안 20%까지 감소시키기 위한 ‘파괴적이고 혁신적인’ 에너지기술 및 정책을 개발하고 있음
 - 2009년 1차 자금 지원 발표안을 시작으로 1억 8천만 달러('11), 2억 8천만 달러('12)를 에너지 분야의 혁신적 기술 개발에 지원하는 프로그램으로 단기간(2~4년)의 고위험·고수익(high risk, high return) 연구를 지원하고 있음
 - ARPA-E의 프로그램은 PD에 의해 기획·개발되며 특정 에너지 분야의 기술개발을 추구하는 목표 지향적 프로그램과, 에너지기술 전 분야에 대해 높은 잠재력을 지닌 아이디어를 제안할 수 있는 프로그램으로 구성됨
- 미국은 2013년과 2014년에 각각 백악관 명의로 기후행동계획과 전방위 에너지전략을 발표
 - “기후행동계획(Climate Action Plan)을 통해 미국이 기후변화에 대응하는 글로벌 리더의 역할을 수행하고, 2020년까지 온실가스 배출량을 2005년도 대비 17% 감축하는 목표를 제시하였으며, “전방위 에너지 전략(The All-of-the-Above Energy Strategy as a Path to Sustainable Economic Growth)을 통해 석유, 천연가스, 원자력, 신재생에너지, 에너지효율 등 미국내 모든 에너지를 활용하여 안정적인 에너지 공급을 달성하기 위한 포괄적 에너지 전략을 제시

- 이 전략들은 에너지 안보 강화, 이산화탄소 배출 저감, 경제 성장의 3대 목표를 수립하고, 청정에너지 기술 우위 확보를 통해 미래성장동력 시장을 선점하고 제조업 등 연관 산업 활성화를 통해 경제 활성화를 도모하고 있음
- 2013년 12월, 미국의 에너지부(DOE, Department of Energy)는 혁신적인 과학기술 개발을 통해, 에너지, 환경, 핵문제 등을 해결하고, 국가 안보를 강화하고 자국의 경제 성장을 촉진하고 고용을 창출하기 위한 계획을 발표하였음
 - 이 계획에는 과학과 에너지(Science and Energy), 핵안보(Nuclear Security), 관리와 성과(Management and Performance) 분야의 거시 목표 하에 총 12가지 전략적 세부목표가 포함되었으며, 기후 행동 계획과 전방위 에너지 전략을 지원하기 위해 DOE 소속의 에너지효율 및 재생에너지실(EERE)을 통해 2015년 EERE 프로그램의 예산을 전년대비 21.9% 증가하여 에너지효율 및 신재생에너지 분야의 R&D를 강화하였음
- 2014년 11월, 온실가스 1, 2위 배출국인 중국과 미국은 기후변화를 야기하는 온실가스 감축에 합의하였음. 미국은 2025년까지 탄소 배출량을 2005년 대비 26~28% 감축하기로 하였으며, 중국은 2030년에 배출량이 정점에 도달하고 이후 감축하기로 발표하였음
 - 미·중 협력으로 미국은 그린 빌딩, 빌딩 에너지 효율 향상, 탄소 포집·이용·처리(CCUS, Carbon Capture, Use and Sequestration), 청정 대기/수질 기술, 폐기물 처리 기술, 스마트 그리드, 그린 수송 등 다양한 에너지 기술 부문에서 자국 기업들이 중국 시장에 진출할 기회를 제공할 것으로 기대하고 있음
- 2015년 8월, 오바마 대통령은 2030년까지 석탄·화력 발전을 통한 온실가스 배출량을 대폭 줄이고(2030년까지 2005년 대비 32%로 새로이 강화), 태양광과 풍력을 이용한 청정전력계획(Clean Power Plan)을 공식 발표하였고, 직후 UN 반기문 총장과 전세계 각국의 협력에 대한 공식기자회견을 갖는 등 기후변화와의 전면전을 선포하였음
- 미국 DOE 소속의 화석에너지실(FE)은 FER&D 프로그램을 통해 미국 안보와 경제 성장을 위해 고효율, 저가의 환경 친화적인 화석에너지 개발과 관련된 CCS 실증, 탄소 포집·저장 및 발전 시스템, 천연가스 기술 개발을 지원하며, 오바마 대통령의

Climate Action Plan 목표를 달성하기 위해 Office of Clean Coal과 Office of Oil and Natural Gas에서 혁신적인 CCS 기술과 비전통가스(세일가스) 기술 개발을 수행중. 최근, 오바마 대통령은 2015년 FER&D 프로그램의 예산을 전년대비 13% 증가하였음

- 미국은 CCUS 분야의 기술 우위 및 상용화, 온실가스 감축량 및 탄소 배출권 거래제를 대비하기 위해 지속적인 투자를 진행하고 있으며, 이를 위해 다양한 정책과 법률 규제를 마련하고 있음
 - 미국 정부는 다양한 정책을 통해 이산화탄소 배출량을 규제하고 CCUS 프로젝트에 대한 투자의 근거를 마련하는 한편, 무분별한 프로젝트 양산을 막기 위해 CCUS 설비에 대한 법률을 마련하여 효율적인 CCUS 프로젝트를 추진해 나가고 있음
 - 미국 정부는 CCS 프로젝트의 운영 및 사회/경제적 영향에 대한 정확한 평가를 위해 지방 정부 차원에서 앨버타 주정부가 2013년 8월에 앨버타 규제 프레임워크 평가(RFA) 보고서의 최종안을 작성해 앨버타의 CCS 규제 제도와 전 세계 모범 사례를 평가하였음
- 미국 환경보호청(EPA)은 최근 CCS 산업의 법적 근거를 마련하기 위해 발전소의 CO₂ 배출과 지중 탄소 저장을 다루는 제안을 발표하였음
 - 이 제안에서 발전소의 CCS 설비 기술 투자 및 CCS를 통한 감축량 할당을 위해 최고 기술 평가를 토대로 신규 석탄 및 천연가스 발전소의 CO₂ 배출량을 제한하는 NSPS 규정안이 발표되었음. 아울러 EPA는 기존 발전소의 CO₂ 배출량을 제한하는 안도 마련 중
 - 이 이행 기준은 CCS의 기술적 타당성, 비용, 기술 개발 가능성, 배출 감소량 등을 평가하여 이루어짐. EPA의 신규 이행 기준에 따라 발전설비에 따라 신규 투자 설비 및 기술 개발 방향, 준수 적용 시점 등이 계획적으로 조절되어, 효율적으로 비용을 투자하고 기술 발전을 촉진할 수 있게 하였음
- 미국은 CCS 주도적인 추진 정책의 일환으로 자국내 CCS 기술의 상업화와 글로벌 탄소 배출권 시장의 전면 확대 대응을 위해 시장을 동부와 서부에서 운영 또는 운영을 시도하였음
 - 현재 전 세계 배출권 시장은 Cap & Trade 방식의 시장으로 EU시장(EU-ETS)과

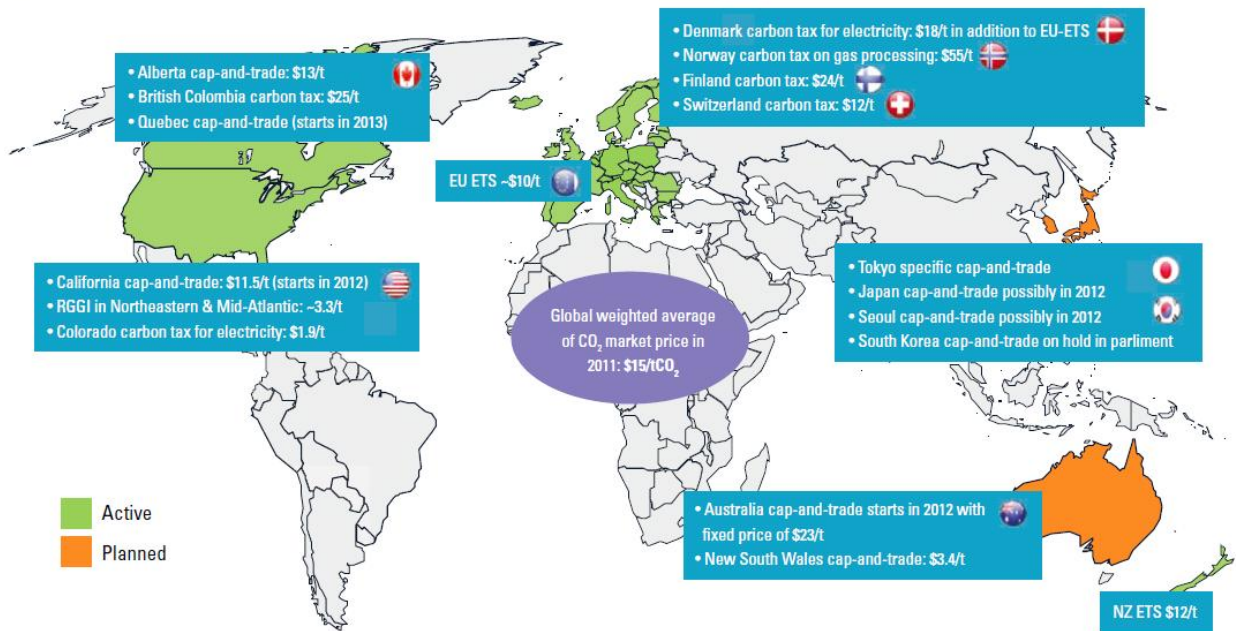
미국 동부지역의 RGGI (Regional Greenhouse Gas Initiative) 시장 등이 개설되어 운영 중이며, 미국 연방 또는 미국 서부(캐나다 포함), 호주, 뉴질랜드 등이 개설을 준비 중

- Baseline-and-Credit 시장으로는 UNFCCC에서 직접 발급하고 인증하는 CDM 배출권인 CER을 거래하는 시장이 EU-ETS 등에 개설되어 있으나, 현재는 거래량이 미미한 수준임

□ 미국은 최근 CCUS 관련 정책과 프로젝트 실행하면서 국가간 탄소 배출권 거래 가능성을 크게 고려하지 않고, 자국 내 산업과 기술 투자 방향을 우선순위로 하여 아직 국제기후회의에서 명시되지 않은 CCUS를 통한 온실가스 저감 분야에서 우위를 점하고자 하고 있음

- 하지만 2016년부터 CO₂ 의 국가 간 이동과 전 세계 CDM 감축분 준비금 제도에 의거, 향후 CCS 프로젝트에 ‘과세’ 여부 등을 비롯한 몇 가지 CCS 청정개발체제(CDM) 현안을 관리하는 절차 채택에 관한 논의가 공식적으로 다시 검토될 것으로 예상됨(Global CCS Institute, 글로벌 CCS 현황, 2014.2)
- 그밖에 바르샤바에서 논의한 기후변화 완화 노력, 심부 탈탄소 이동 경로, 재원 확보, 기존 및 신규 시장 기구와 프레임워크, 국가적으로 적합한 완화 조치 등을 비롯해 CCS 발전과 관련 있는 문제들이 국제기후회의에서 논의될 것으로 예상됨에 따라 미국 국가 정책 수립에 영향을 줄 수 있으며, 이는 온실가스 저감 정책 기조 및 프로젝트 투자에 영향을 끼칠 수 있음

[그림 12] 이산화탄소 저감 관련 탄소가격 지도 (\$/CO₂)



Notes: Average 2011 prices or expected 2012 price for cap-and-trade systems.

Source: SBC Energy Institute, based on data from the IEA (global weighted average), Carbon Tax Center, OECD and Bloomberg New Energy Finance.

Source: SBC Energy Institute (2012)

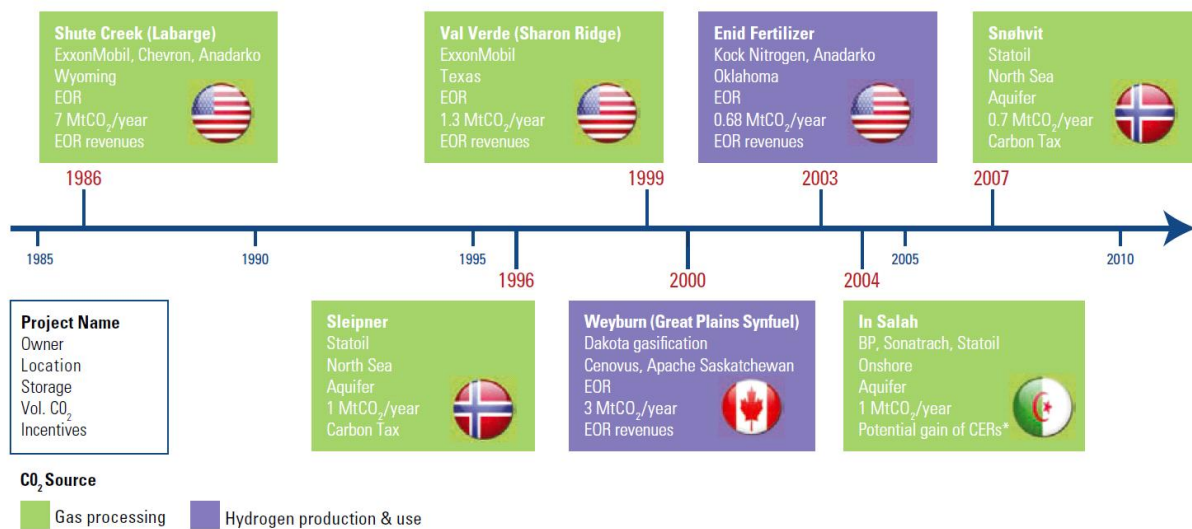
III CCUS 기술 개발 현황 및 동향

1. 이산화탄소 저감 기술 프로그램

- ☐ 미국의 탄소저감 프로그램은 주로 에너지성(US DOE)을 통해서 추진되며, 2002~2012년 10년간 GDP당 온실가스 배출량 18%를 목표로 2개의 대형 기후변화 대응 프로그램을 구성하여 운영하였음
- ☐ CCTP(Climate Change Technology Program)의 미국 기후변화 대응 연구개발사업 현황과 전망은 다음과 같음
 - 2002년 기후변화 관련 기술연구와 개발을 위해서 시행, DOE에서 총괄하고 12개 정부부처와 기구가 참여, 연간 약 40억 달러를 투자
 - 주요 연구분야 : 원자력, 핵융합, 수소, 바이오에탄올, 청정 석탄, 탄소 처리 및 저장, 수송, 건물, 산업과 전기에너지 저장과 분배 등 기후변화 뿐 아니라 에너지 안보 등을 해결하기 위한 기술 개발을 추진
 - 세부과제 예시: 온실가스 배출량의 간접적 감소에 기여하는 전기저장기술, 에너지 운반 기술 개발, CO₂ 이외 온실가스 및 메탄, 질산화물, soot 에어로졸, HFC, PFC 등의 배출 감시 등
- ☐ 2007년 DOE 산하 국립에너지기술연구실(NETL, National Energy Technology Laboratory)의 주도로 대규모 이산화탄소 지하저장 연구를 위한 SECARB(Southeast Carbon Sequestration Partnership) 프로젝트 중심의 CCS 기술 개발을 개시함
- ☐ 기후변화 대응프로그램(CCTP, Climate Change Science Program)의 일환으로 CCS 기술의 실증사업이 진행되었음. CCTP의 연구개발 사업 현황과 전망은 다음과 같음
 - 범부처 기후변화과학 통합 연구프로그램, 13개 정부부처와 기구가 참여, 연간 약 18억 달러를 투자
 - 주요연구분야 : 기후변화에서 파생될 잠재적 변화가 자연환경과 인간의 삶에 어떠한 영향을 미치는지, 또한 기후변화를 억제시키고 인간의 삶을 향상시키기 위해서는 기후관련 정보를 어떻게 사용하고 발전시킬 것인지를 연구
 - 세부과제 예시: 북미 대륙의 탄소수지, 지구규모의 탄소 순환 연구, 과학적 근거에 기반한 기후변화의 사회경제학적 및 환경학적 파급효과에 대한 분석 등

- 미국은 역사적으로 이산화탄소 저감을 위하여 EOR 및 CCS 기술을 고수하였음
 - 초기 EOR 기술의 경우, 이산화탄소 저감 보다는 잔존 석유 회수에 기술적 관심이 집중되어 왔으나, 이후 EOR 기술에 활용되는 자연 발생 이산화탄소를 산업발생 이산화탄소로 대체하여 온실가스 저감을 동시에 달성하는 기술 방향으로 전환

[그림 13] 세계적 대형 이산화탄소 저감 관련 사업 흐름



Notes: *Certified Emissions Reductions (Kyoto Protocol)
 Source: SBC Energy Institute, based on Global CCS Institute project list.

Source: SBC Energy Institute (2012)

2. 이산화탄소 저감 기술

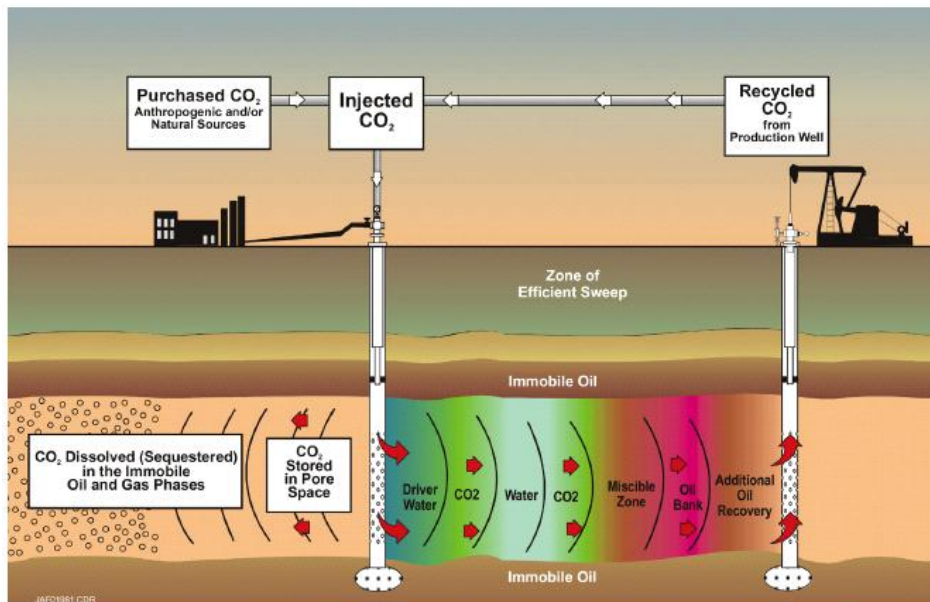
2.1. EOR

□ CO₂ 활용 원유회수증진 기술(Enhanced Oil Recovery, EOR)

- 유전에 남아있는 원유를 이산화탄소를 주입하여 추가적으로 생산해내는 기술로, EOR을 통하여 유전의 원유 채유율을 30-60%, 또는 그 이상으로 높일 수 있음. EOR은 크게 열적회수법, 가스주입법 및 화합물주입법의 3가지 기술로 분류됨
- 미국은 CO₂ EOR을 수십년 동안 사용해 오고 있고, 전 세계 EOR 프로젝트의 80%이상을 미국에서 진행. 지난 30년 동안 New Mexico와 Colorado의 자연 발생 CO₂ 를 활용하여 Permian Basin의 원유를 EOR을 통하여 채유하였고, DOE는 차세대 CO₂ EOR을 활용하여 2,400억 배럴의 원유를 추가로 회수 할 수 있을 것으로 전망
- 이 기술의 향후 개발 사안은 상업적으로 이용 가능한 이산화탄소의 확보이고, 다양한 산업계에서 이산화탄소를 포집하기 위한 기술이 필연적임
- IPCC에 따르면 북미를 중심으로 가장 많은 이산화탄소 수요를 보이는 EOR의 적용을 통하여, 현재 이 시스템에서 사용되는 자연계 발생 이산화탄소를 인위적 행위의 산업 기반에서 발생하는 이산화탄소로 완전히 전환시킬 수 있고, 이를 통하여 이산화탄소 저감을 실현할 수 있다고 전망. CCUS 기술의 EOR 적용을 통해서 2020년 경에는 약 8~9천만톤의 이산화탄소 저감 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상
- CCS를 통한 저장 기술 탐색 혹은 CCU를 통한 미래 활용기술을 탐색해야 하는 다른 국가에 비해, 미국은 비교적 쉽게 접근이 가능하고 CCUS기술의 경제성 문제를 극복할 수 있는 EOR을 통한 기술 적용이 주로 시도되고 있음. 따라서 EOR은 현재 미국이 이산화탄소 저감을 위하여 가장 관심을 두고 있는 기술 중 하나임
- 미국의 BP, DF2, Carson등은 petcoke를 연료로, IGCC+shift+연소전회수, 저장(EOR) 기술을 개발하였음(2011년 운전)
- 바운더리 댐 탄소 포집 및 격리 실증 프로젝트 포집 시설을 사용하여, 연간 100만 톤의 CO₂ 를 웨이번 오일장치에서 EOR용으로 사용
- 미시시피 주의 캠퍼 카운티 IGCC 582 메가와트(MW) 프로젝트는 미국 에너지부와 공동으로 서던 컴퍼니와 KBR에서 개발한 교통통합가스화(TRIGTM) 기술(저급 석탄용으로 계획된 석탄 가스화 방법)을 사용하며, 플랜트는 전체 CO₂ 배출량의 65%, 즉 연간 약 350만 톤을 포집하여 CO₂ -EOR 작업에 사용.

CO₂ 를 비롯한 부산물 판매로 발생하는 매출이 연간 미화 약 5천만 달러에서 1억 달러에 이를 것으로 예상되며, 프로젝트 제안업체(서던 컴퍼니)는 청정 석탄전력계획(CCPI)에 의거, 미국 에너지부에서 미화 2억 7천만 달러 규모의 재정 지원을 받음

[그림 14] EOR (원유회수 증진 기술) 개념도



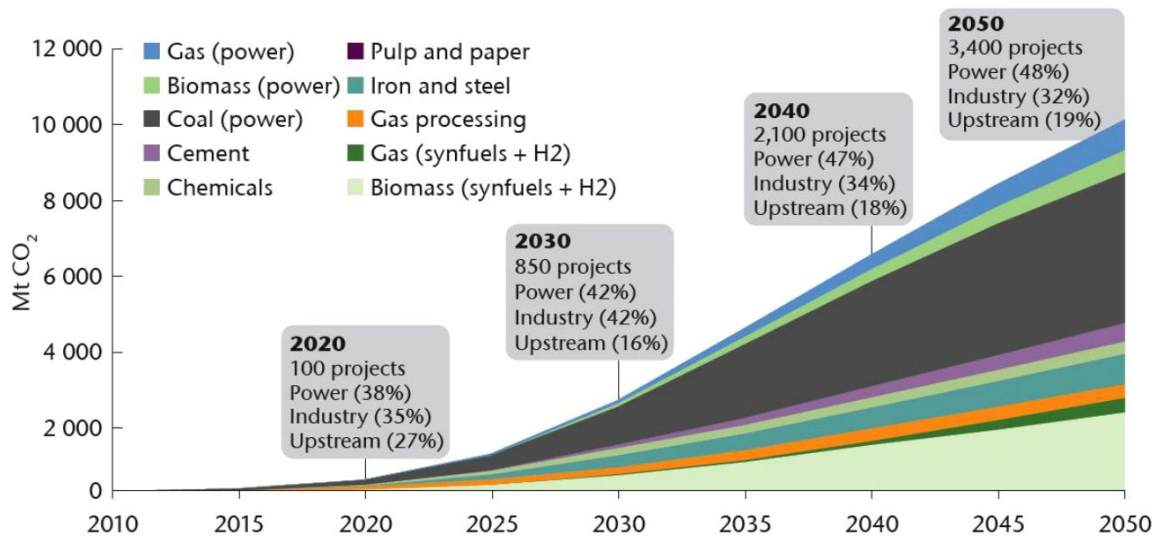
Source: Advanced Resources International and Melzer Consulting, Optimization of CO₂ Storage in CO₂ Enhanced Oil Recovery Projects, prepared for UK Department of Energy & Climate Change, November 2010.

Source: Advanced Resources International and Melzer Consulting (2010)

2.2. CCS

- 미국을 포함한 전 세계 각국은 이산화탄소 저감을 위한 기술로드맵을 세우고, 기술 개발을 추진 중. 현재 상용화에 근접한 CCS 기술에 대해서는 이를 기반으로 한 이산화탄소 저감의 구체적인 기술 적용 시나리오가 작성되고 있음

[그림 15] 2010-2050년 IEA CCS Global Technology Roadmap



Source. IEA (2009)

□ 미국 내 CCS 관련 기술 개발 현황

- Fluor 등 주요 엔지니어링사들은 흡수제로서 개량 MEA를 활용한 기본설계기술 확보
- 전력회사 Southern Company는 석탄화력발전소에 25 MW급 습식아민 CO₂ 포집플랜트를 건설하여 장기운전 중 (MHI의 KS-1 흡수제 적용)
- DOE는 화력발전소에 적용 가능한 4개의 advanced 습식 CO₂ 포집시스템을 선정하여 이의 비용절감 연구 수행 중(2011년, \$6,700만/4년), 연구목표 : 발전단가(Cost of electricity, COE) 증가분 25% 이내이면서 CO₂ 제거율 90% 이상(0.5~5 MW급 연소후 습식아민 CO₂ 포집기술)
- Linde : BASF의 에너지절약형 advanced 아민 흡수제를 1MW급 설비에서 실증
- Newman System : 고효율 CO₂ 흡수탑 설계, 건설 및 성능평가
- Southern Company : 석탄화력발전소에서 습식아민 CO₂ 포집기술의 열통합(heat integration) 최적화
- University of Kentucky Research Foundation : 일본 Hitachi 의 advanced 흡수제와 혁신적 열통합(heat integration) 최적화
- 미국은 NETL 주도로 1990년 후반부터 소재 개발을 시작으로 2008년 DOE 3개 신규 과제(\$6백만/3년)를 통해 소재와 공정 개발로 투자 분야 확대하고 있으며 2011년 0.5 MW 규모 시범화 후 2015년 기술 사용화 계획 발표
- 연소 후 건식흡수제 분야에서 미국에서 가장 앞선 RTI는 2010년 실증과 2011년

규모격상, 2015년 상업화 완료를 천명

- 연소배가스에 대한 흡수반응을 실시하여 제거율 90%를 보여주었으며, 공개된 연속운전 결과는 3.5시간 평균 제거율이 77%임
- 2010년까지 10 ton-CO₂ /day(0.5 MW) 파일럿 규모 실증 후 2011년 10배 규모격상을 통해 100 ton-CO₂ /day(5 MW) 규모 실증을 완료하고 2015년부터는 상업화를 완료하겠다고 발표하였음(Nelson, 2008)
- NETL은 Encapsulated Amine-based 고체흡수제에 대한 특허를 획득하였으며 MATRIC, TVA, Fuji Silysia, Georgia Tech, University Hartford, Sud Chemie와 함께 첨단 흡수제 제조에 초점을 맞추고 연구를 진행
- ADA는 2012년 1 MW 규모의 건식흡수제 이용 공정 설계를 완료
- 바운더리 댐 탄소 포집 및 격리 프로젝트와 캠퍼 카운티 석탄 가스화 복합 발전(IGCC) 프로젝트가 가동 단계에 접어들고 있음. CO₂ 배출량이 최고 90%까지 줄어들며, 완전 가동시 연간 CO₂ 100만 톤을 포집. EOR에 사용되지 않는 포집 CO₂ 는 연안 CO₂ 저장에 대한아퀴스토어 프로젝트를 통해 심부 염대수층에 저장
- 미국과 캐나다 등은 석유개발 기술에 따른 저장부지의 조사 및 평가기술이 매우 앞서 있으며, MMV/MVA 관련 모니터링 등 요소기술에 주력하고 있음
- DOE 중심의 RCSP가 운영중이며, 포집/저장을 연계한 프로그램이 시작 단계임
- CO₂ 파이프라인: 미국에 2,000 km 이상의 CO₂ 배관 설치 (주로 EOR 목적)
- 미국 cross-gole EM 이미지화 실험 및 single well EM : Lost Hills Field, Cal. (both) & Frio Brine Pilot, Texas (교차공 EM) cross-hole ERT (Electrical Resistance Tomography) : Cranfield site, Mississippi LBNL U-tube sampler system : 호주 오토웨이와 미국 Frio and Cranfield sites 등에서 성공적인 지구화학 시료 채취
- 캐나다 Weyburn-Midale site 에서의 CO₂ 모니터링은 주입정과 석유생산정에서 직접 시료채취하는 방법 채택
- Frio site : 지구화학 추적자시험 실시 및 중성자 검층법

[표 3] 전력생산 기반 통합 파일럿 CCS 현황

Project name	Country	MWe	Status
Total's Lacq CCS Pilot	France	30	Operating
Southern Company's Plant Barry CCS Pilot	US	25	Operating
Huaneng's Shidongkou CCS Pilot	China	22	Operating
American Electric Power's Mountaineer CCS Pilot	US	20	Completed
Shenhua's Mongolia Coal-to-liquids Pilot	China	18.5	Operating
Huazhong University of Science & Technology's Hubei Phase I Pilot	China	16.7	Operating
Sinopec's Shengli CCS Pilot	China	8	Operating
E.ON/Alstom Karlshamn CCS Pilot	Sweden	5	Operating
China Power Investment Corporation's Chongqing Hechuan Pilot	China	1.9	Operating
Enel's Brindisi I CCS Pilot	Italy	48	In construction
Endesa's Compostilla CCS Pilot	Spain	30	In construction
CS Energy's Callide Oxyfuel Pilot	Australia	30	In construction
Statoil Mongstad TCM CCS Pilot	Norway	15	In construction

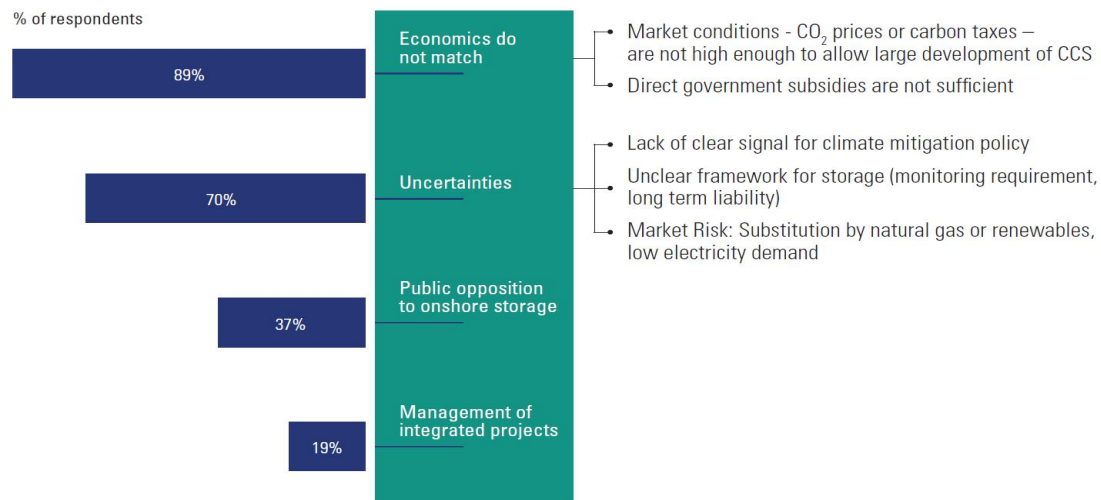
Source: Bloomberg New Energy Finance

Source: SBC Energy Institute (2012)

2.3. CCUS

- 기존 온실가스 저감의 해법으로 여겨졌던 이산화탄소 포집/폐기(CCS) 기술이, 단일 개념 형태로 온실가스 저감을 달성할 수 없다는 결론에 도달함에 따라, CCU의 제약 사항 극복을 위하여 DOE에서는 CCS와 CCU를 융합한 형태인 CCUS 기술에 많은 관심을 두고 있음. 이를 통하여 현재 제기되고 있는 CCS 기술의 결점을 상당 부분 보완할 수 있을 것으로 전망하였고, 최근 CCUS 기술 개발에 대한 투자가 활발히 진행 중

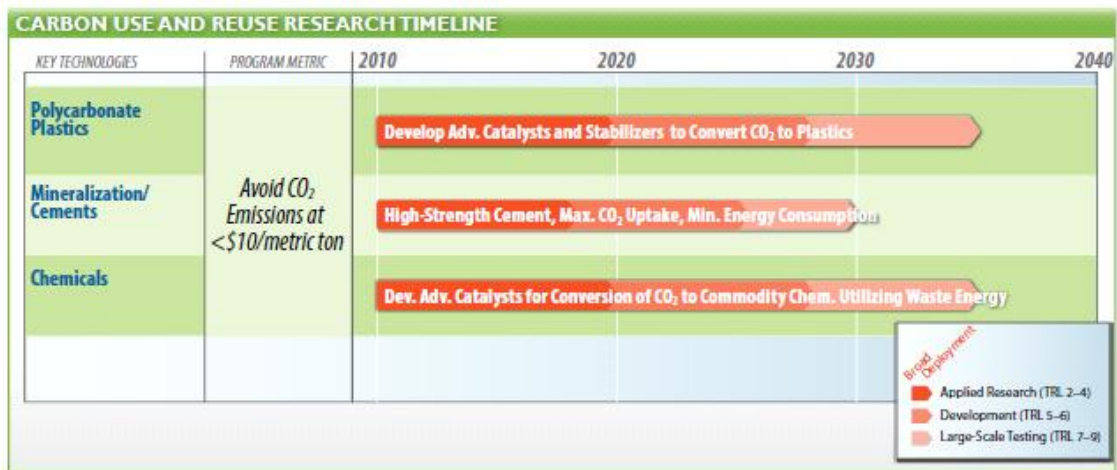
[그림 16] 이산화탄소 저감 기술의 Challenges



Source: SBC Energy Institute (2012)

- 현재의 CCU 기술들을 통한 종합적 CO₂ 저감은 최소 37 억톤/년으로 추정되며, 이는 세계 연평균 배출량의 10%에 해당함(DNV, 2011). 뿐만 아니라 CCU 기술 도입을 통한 부가화합물의 생산은 경제적 이익 및 고용창출을 야기할 수 있음. 이에 DOE는 배출 이산화탄소의 자원으로서의 재활용에 대한 research timeline을 설정하고, CCUS의 핵심 기술 및 자원화 전략을 수립하고 있음

[그림 17] 탄소 자원 사용 및 재사용의 연구 개발 추진 계획

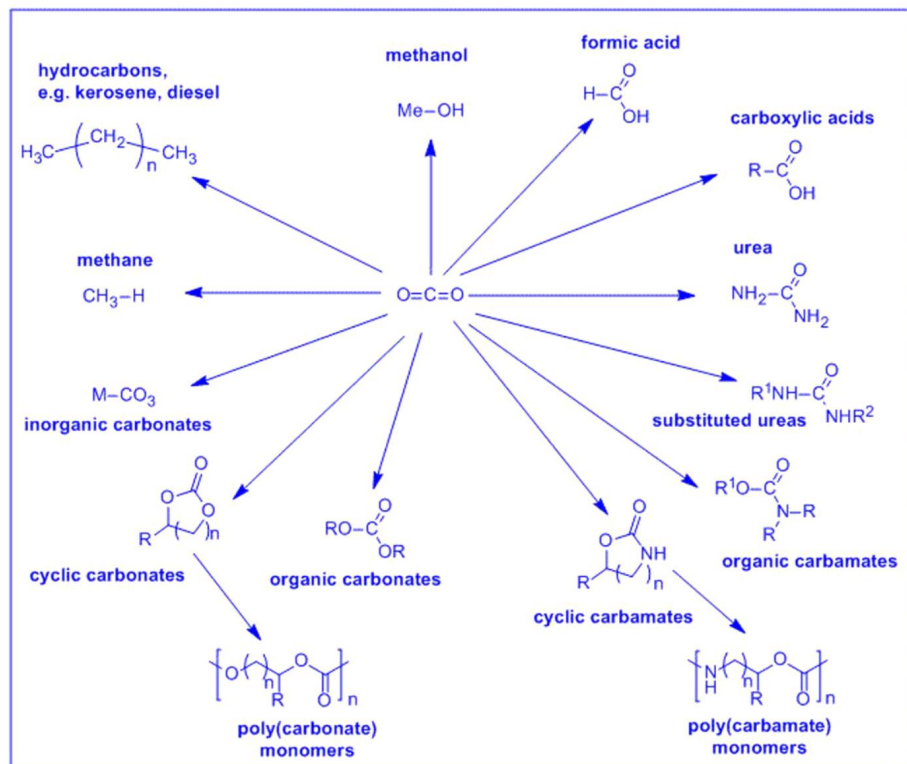


Source. Clean Coal Research Program, DOE 2014.12

- 2011년 NETL은 이산화탄소 저감을 위하여 CCU 기술이 필수부가결 함을 인지하여, 기존 CCS 기술개발 전략 포트폴리오에 탄소 활용 및 재사용(Carbon Use and Reuse) 기술을 포함시켰음. 광석화/시멘트(mineralization/cement), 화학물질(Chemicals), 폴리카보네이트 플라스틱(polycarbonate plastics) 기술개발을 CCUS 중대 목표기술로 명시하였고, 기술별 특징은 다음과 같음
 - 광석화: 카보네이트 광석화는 이산화탄소의 고체 무기 카보네이트로의 전환을 의미함. 자연계에서 알칼리 또는 알칼리 토금속은 이산화탄소와 화학반응을 하여 미네랄로 전환됨(CaCO₃ 및 MgCO₃ 등). 이런 카보네이트 물질은 화학적으로 안정하여 CO₂가 대기 중으로 재 분출될 우려가 적음. 하지만 광석화 반응 속도가 느리고, 생성 광물 체적 등으로 인한 수송의 문제가 있음. 생성된 카보네이트는 건설용 또는 제지/플라스틱 공정에서 filler 소재 등으로 활용 될 수 있음. 이 기술 역시 에너지 및 공정 효율화에 대한 기술 개발이 이루어지고 있음
 - 시멘트: 기존 수분을 활용한 시멘트 생산 공정에 비하여 개발된 이산화탄소를 활용하는 기술은, 다양한 산업에서 발생하는 이산화탄소를 줄일 수 있는 획기적인 기술임. 이 기술을 통하여 생산된 시멘트는 기존 공정을 통한 시멘트와 물성이 유사할 뿐만 아니라, 공정에 소모되는 에너지 역시 낮음. 현재 상용화를 위한 기술 개발이 활발히 이루어지고 있고, 기존 공정 적용이 용이하다고 알려져 있음. 관련 기술 개발 사안은, 이산화탄소/에너지 활용의 효율화 등이며 American Standard Test Method(ASTM) 기준 충족을 위한 노력이 진행 중
 - 화학물질: CCU의 개념 중 자원화는 탄소가 관여된 현 개발 공정의 대부분을

사용할 수 있음. CO_2 는 다양한 방식으로 전환 시킬 수 있고, 특히 대표적인 전환
 활성물인 CO 를 플랫폼원료로 사용하여 각종 화합물을 생산할 수 있음. CO_2
 전환을 통하여 생산가능한 정밀화학 제품군은 아래와 같고, 메탄올(Methanol),
 초산(Acetic acid), 개미산(Formic acid), DMC(Dimethyl Carbonate), 고분자화합물,
 연료 등 범용 활용이 가능

[그림 18] CO_2 를 이용한 정밀화학 제품 다운스트림



- 폴리카보네이트 플라스틱: 일반적인 고분자 단량체인 에틸렌 또는 프로필렌을 이산화탄소와 결합한 형태인 폴리에틸렌 카보네이트 또는 폴리프로필렌 카보네이트로 전환하는 기술. 폴리카보네이트 플라스틱 기술은 합성가스 공정과 달리 CO_2 를 CO 등의 활성분으로 전환시키지 않고 직접 활용이 가능하므로 공정에너지 측면에서 유리. 폴리카보네이트 플라스틱은 코팅제, 비닐백 및 라미네이트 등으로 활용할 수 있음. 생성된 플라스틱의 형태에 따라 CO_2 의 반영구적 고정이 가능. 현재 관련 기술 개발 사안은 폐에너지/대체에너지를 활용한 CO_2 전환, 에너지 효율화를 위한 촉매 개발 및 플라스틱 내구성 증진을 위한 안정제 개발 등임

□ DOE 지원 연구 개발 과제 현황은 다음과 같음

- Solidia Tehcnology Inc.: 이산화탄소 활용 무기바인더인 Wollastonite 물질(Solidia Cement™, SC)을 Portland Cement(PC) 대체에 활용하기 위한 개발을 수행 (2010-2015). 현재 기술의 상용화를 위하여 기존 시스템 상 대체 가능성 입증을 위한 연구를 시도. 현 기술은 PC에 비하여 CO₂ 발생을 60% 이상 감소시킬 수 있음
- McGill University: 기존 콘크리트 공정에 사용되는 수분을 이산화탄소로 대체하기 위한 연구를 수행(캐나다, 2010-2014). 이산화탄소로의 대체를 통하여, 강도/내구성 증진 및 공정에너지 절감 등을 도모할 수 있음. 또한 CO₂ curing 공정 중 칼슘카보네이트 형태로 전환된 CO₂ 가 결국 칼슘규소수화물에 저장이 되는 형태이므로, 이산화탄소 저감을 달성할 수 있음. 현재 최소의 비용으로 최대의 이산화탄소 활용을 위하여, 기 개발된 프로토타입 제품을 이용하여 공정비용 효율화 및 고기능성 콘크리트 제조공정 확립을 위한 연구를 진행

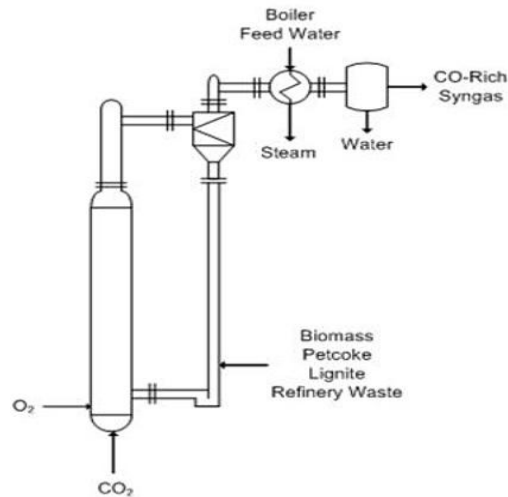
[그림 19] 이산화탄소를 활용한 콘크리트 블록



- Albemarle & Novomer: DOE의 지원을 받아 2013년 Albemarle Corp.(신소재 제공) 와 Novomer(신축매 제공)는 공동으로 이산화탄소와 에폭시드의 공중합 반응으로 폴리프로필렌카보네이트(PPC)의 대규모 생산에 성공, 생산된 폴리머 중량 중 40% 이상이 이산화탄소임
- Research Triangle Institute: 이 연구는 CO₂ 의 화학원료로서의 활용 가능성을 타진하기 위하여 수행이 되었고(2010-2014), 개발자들은 저급 탄소원인 petcoke, sub bituminous coal 및 biomass를 이산화탄소와 반응시켜 일산화탄소, 에틸렌 및 다양한 화합물을 생산하고자 하였음. 기본적으로 플랫폼 원료인 일산화탄소

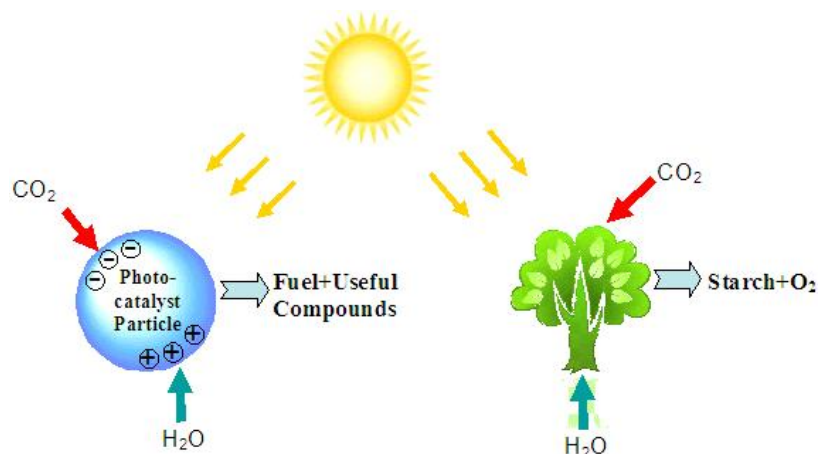
생산을 위하여 이산화탄소와 탄소의 반응에 주안점을 두었고, 또한 저온 영역에서 반응성을 보이는 건식 개질 촉매 ($500\text{-}600^{\circ}\text{C}$)를 개발하는 등 적절한 촉매의 활용을 통한 현 대형 화학공정의 활용가능성 여부를 검토하였음

[그림 20] CO_2 전환 공정 흐름도



- PhosphorTech Co.: CCU 공정의 에너지/단가 문제 해결을 위하여, 태양광으로부터 이산화탄소를 유용한 화합물로 전환시키기 위한 나노기반 촉매 개발 연구를 수행 (2010-2013). 현재 광촉매의 고질적인 문제인 생산량 ($0.01\text{-}0.1\text{ v/v\%}$)의 이슈 해결을 위하여 CO_2 전환 성능 개선에 대한 연구에 주안점을 두고 있음

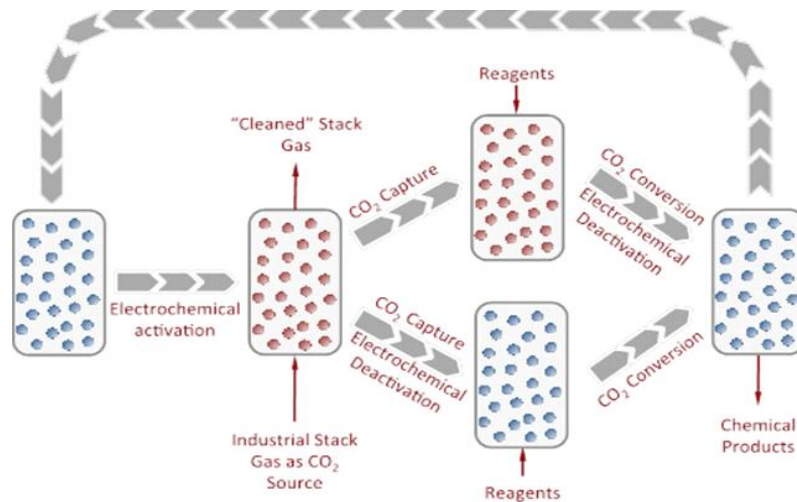
[그림 21] 광촉매 활용 CO_2 전환



- Massachusetts Institute of Technology & Siemens: 이산화탄소의 효율적 저장 및

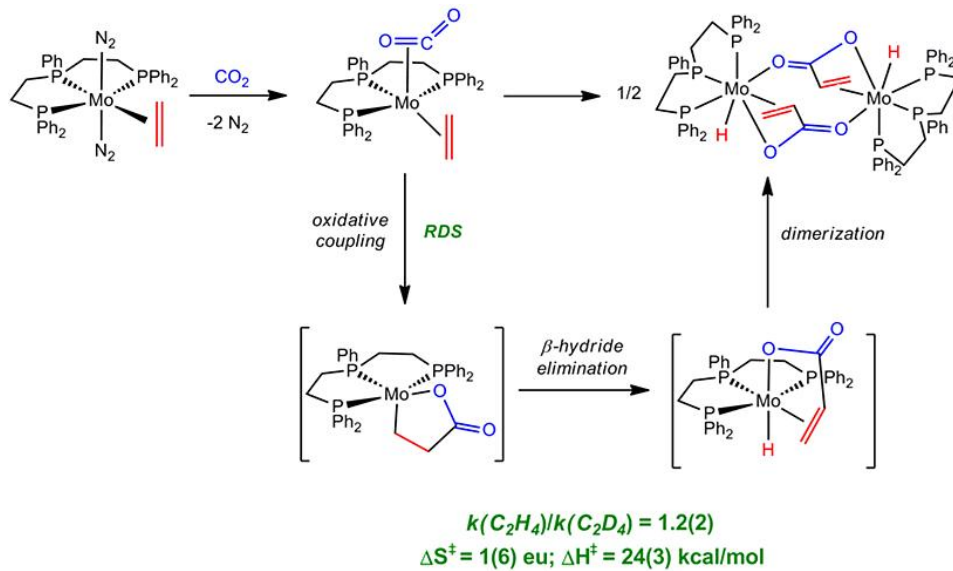
자원화를 달성하기 위하여 전기화학 개념을 도입. 이산화탄소를 유기 카보네이트로 전환하기 위한 기술을 개발 수행(2010-2013). 이 기술을 통하여 CO₂ 의 포집 및 화학적 저장을 동시에 구현할 수 있고, 지중 저장의 문제를 해결할 수 있음

[그림 22] 전기화학을 활용한 CO₂ 포집 및 활용 통합 공정 개념도



- Brown University: 몰리브데늄 촉매를 이용하여 이산화탄소와 에틸렌을 반응시켜 고부가 아크릴레이트 화합물을 생산하기 위한 벤치급 연구를 수행(2010-2013). 연구는 아크릴레이트 생성 용 몰리브데늄 콤플렉스의 범위 설정을 위한 가능한 리간드 구조체 선정, 촉매 조합 및 반응 효율화를 위한 메카니즘 조사와 모사, 벤치 스케일 반응을 위한 최적 촉매 제조 및 디자인의 3단계로 구성하여 진행

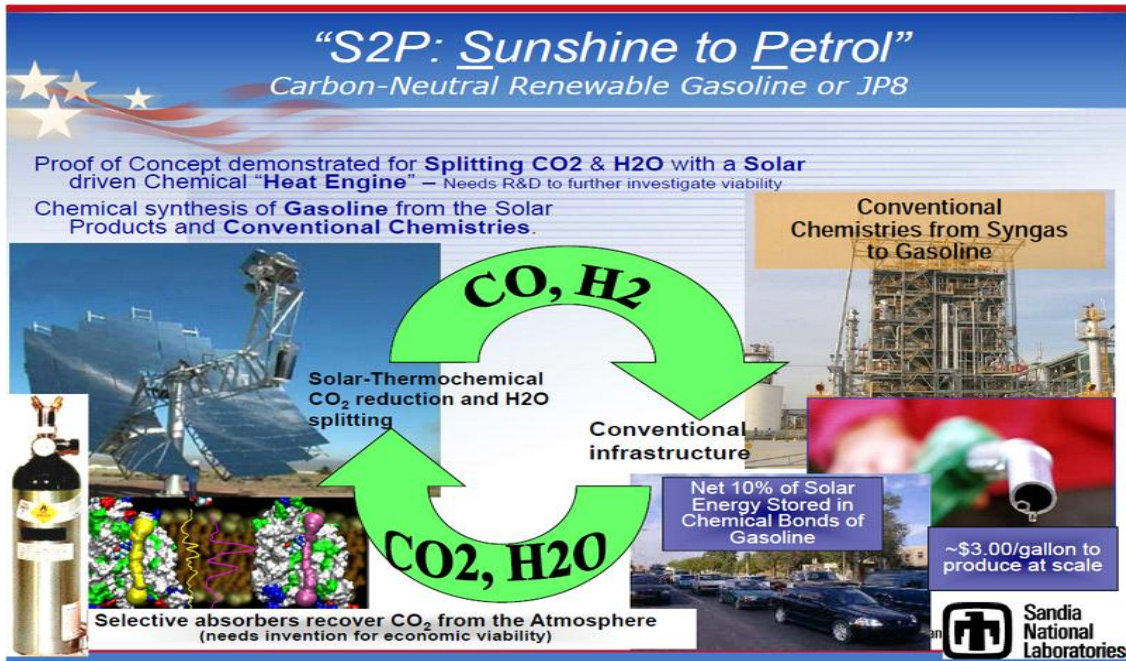
[그림 23] 몰리브데늄 촉매 상 이산화탄소-에틸렌 반응을 통한 아크릴산 제조



- Plant Biology를 위한 Helios 프로젝트의 일환으로, 로렌스버클리 국립연구소에 2007년 태양에너지 연구센터인 Helios SERC(Solar Energy Research Center)가 설립된 바 있음. 다른 2개의 Helios 연구가 Bioenergy, Biofuel에 집중되어 있는 반면, 로렌스버클리 국립연구소의 SERC는 태양광을 활용하여 물과 이산화탄소로부터 메탄올 등의 액체연료를 생산하여 Plant Biology를 완성하는 것이 목표임. Helios SERC의 주요 연구분야는 태양 집광 및 태양전지 전극 물질 개발, 물산화 및 이산화탄소 전환 고효율 촉매 및 반응 시스템 개발이 주된 연구내용이며 전기화학적 측면에서 소재 및 시스템 개발이 이루어졌고, 보다 획기적인 반응경로에 의한 제조방법을 찾고자 메카니즘 위주의 연구를 수행하였음
- 미국 샌디아 국립연구소(Sandia National Laboratories)를 중심으로 2010년 농축 태양열 에너지를 활용한 이산화탄소의 화학적 전환 기술 분야에 산학연이 구성됨. 이 기술은 태양열을 집적하여 이산화탄소와 물을 열화학적으로 전환하여 합성가스와 같은 플랫폼 화합물을 제조하여 디젤 연료와 같은 고부가 탄소화합물 제조에 활용하는 기술로써, 발전소 등과 같은 이산화탄소 대량 배출원에서 직접 전환이 가능한 상용기술의 개발을 목표로 함. 본 태양열 개질 시스템은 현재 캘리포니아 새크라멘토(Sacramento)에서 실증 중이며, 이 실증은 샌디아의 뉴멕시코 설비와 베이커즈필드의 발전소 프로젝트 모두에서 지속될 것임. 상업적 플랜트의 첫 번째 단계를 계획이 현재 미국 각지에서 진행 중이며, 첫 번째 상업

플랜트의 보급은 2013년 시작될 수 있을 것으로 예상하였음

[그림 24] 샌디아 국립 연구소의 태양열 활용 이산화탄소 전환 기술 개요



- 미 과학재단인 NSF(National Science Foundation)에서 현재 진행/제안 중인 온실가스 저감 관련 연구 분야는 다음과 같음
 - 신재생 에너지 관련 촉매 기술(바이오촉매, 바이오매스 리파이너리, 전기화학 촉매, 광촉매)
 - 탄소순환 관련 촉매 기술(CO₂ , CH₄ , 천연가스 전환을 통한 연료 생산 및 화학 중간체 합성)

[표 4] NSF 연구과제 현황

연구과제명	과제시작일 (연구비)	수행기관
Integrated CO ₂ Capture and Catalytic Conversion to Solar Fuels Using Hybrid Multifunctional Materials	2014.10.01. (\$167,231)	Texas A&M Engineering Experiment Station
Photo-Thermo-Chemical CO ₂ Reforming of CH ₄ by Concentrated Sunlight	2015.08.01. (\$100,000)	Texas A&M Engineering Experiment Station
Novel Photocatalysts based on TiO ₂ -Passivated III-V Compounds for CO ₂ Reduction	2015.08.01. (\$330,000)	University of Southern California
CO ₂ as a Sustainable Feedstock for Chemical Commodities	2012.09.15. (\$1,750,000)	Brown University
Hydrocarbon conversion on oxysulfide surfaces: Towards the design of sulfur-tolerant reforming catalysts	2015.07.01. (\$189,595)	Louisiana State University & Agricultural and Mechanical College
Combined Catalytic Conversion of CH ₄ and CO ₂ to Value-added Products over the Oxide Supported Metal Catalysts from DFT-based Multiscale Study	2014.09.01. (\$366,462)	Southern Illinois University at Carbondale
CO Hydrogenation to Long-chain Terminal Alcohols and Aldehydes: A Combined Approach by Transient Kinetics and Theoretical Modeling	2014.10.01. (\$432,000)	Washington State University
Environmentally Significant Reforming Reactions Studied Using a Novel Catalytic Shock Tube	2012.09.01. (\$226,240)	CUNY City College
Tailoring the nature of the active site of Ni electrocatalysts for electrochemical co-reduction of CO ₂ and H ₂ O	2014.09.01. (\$405,452)	Wayne State University
Efficient CO ₂ Electrochemical Reduction on Transition Metal Dichalcogenide Catalysts	2015.08.01. (\$329,793)	University of Illinois at Chicago
Viologen-catalyzed Electrochemical Conversion of Biomass for Sustainable Energy and Products	2015.09.01. (\$100,000)	Brigham Young University
Electrocatalytic Multielectron Reduction of Carbon Dioxide to Fuels Using Small Metal-Metal Bonded Clusters	2011.02.15. (\$610,869)	University of California-Davis

Source: <http://www.nsf.gov/>

- 세계 각국의 관계자들이 참가하는 ICCDU(International Conference on Carbon Dioxide Utilization, 2013)에서 미국의 CCU 관련 발표 논문 현황과 이산화탄소 전환 및 활용 연구의 분야는 다음과 같음

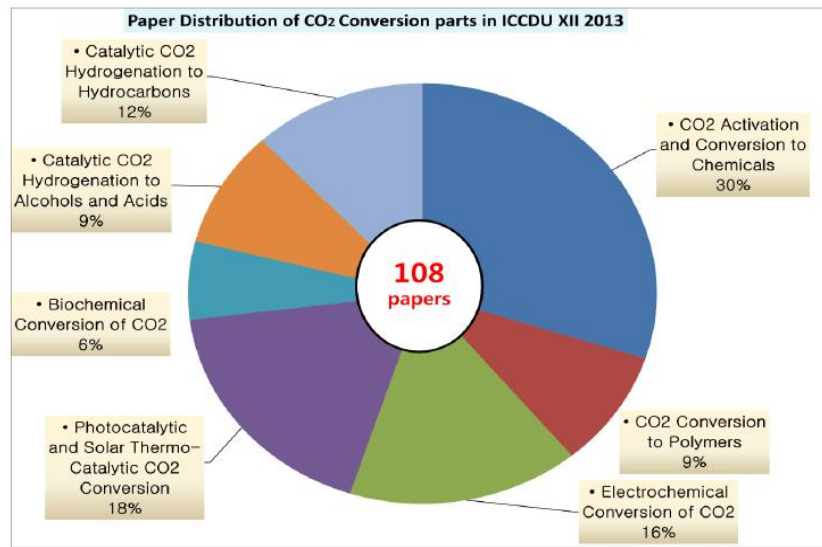
[표 5] ICCDU XII 2013년 국가별 논문 발표수

국가	논문발표수(구두+포스터)
USA	65
China	19
UK	16
Germany	15
France	10
Korea	9
Japan	9
Singapore	8
Italy	5
Spain	5
Canada/India/Brazil/Belgium	각 3 편
Switzerland/Netherlands/Austria	각 2 편
Poland/Saudi/Norway/Hungary/Estonia	각 1 편

○ 이산화탄소 전환

- 촉매화학적 이산화탄소 수소화 반응 분야(Catalytic CO₂ Hydrogenation to Alcohol, Acids, and Hydrocarbons)
- 전기화학적 이산화탄소 전환 분야(Electrochemical CO₂ Conversion)
- 광에너지 및 태양열 활용 이산화탄소 전환 분야(Photocatalytic and Solar Thermo-Catalytic CO₂ Conversion)
- 생물화학적 이산화탄소 전환 분야(Biochemical CO₂ Conversion)
- 이산화탄소 유래 고분자 제조 기술(CO₂ Conversion to Polymers)

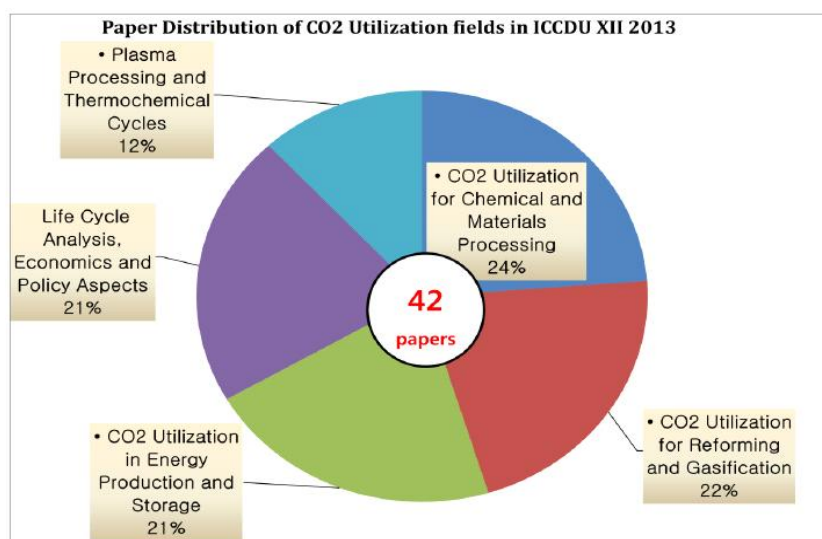
[그림 25] ICCDU XII 2013년 이산화탄소 전환 연구 분야



○ 이산화탄소 활용

- 화학공정에서의 이산화탄소 활용 분야(CO₂ Utilization for Chemical and Materials Processing)
- 개질 및 가스화 반응에서의 이산화탄소 활용 분야(CO₂ Utilization for Reforming and Gasification)
- 에너지 제조 및 저장을 위한 이산화탄소 활용 분야(CO₂ Utilization for Energy Production and Storage)

[그림 26] ICCDU XII 2013년 이산화탄소 활용 연구 분야



IV 결론

- ☐ 지구 온난화 이슈와 더불어 이산화탄소 저감을 위한 기술 개발 및 국가 간 경쟁은 더욱 심화될 것으로 전망
- ☐ 미국 DOE는 온실가스 저감을 위한 전략으로, 기존 고수하던 이산화탄소 포집/폐기의 전략을 이산화탄소의 자원화라는 개념을 도입하여 CCUS 기술 분야로 확장하였고, 현재 관련 연구를 활발히 진행 중
- ☐ 미국은 온실가스 저감 분야에서 세계적 선도를 위한 다각도의 기술 개발 및 정책화에 앞장서고 있고, 특히 기술의 대형화를 통한 시장 선도에도 심혈을 기울이고 있음
- ☐ 이산화탄소 관련 시장은 현재 형성 단계이며 특히, 이산화탄소가 기존 폐기물에서 유용한 자원으로 활용 될 수 있다는 원료의 개념으로 패러다임이 전환 중이므로, 이산화탄소 제품의 고부가/범용 화합물 시장으로의 진출이 예상됨
- ☐ 온실가스 전환/자원화를 위하여 촉매, 전기화학, 바이오, 광화학, 무기탄산화 및 고분자화 등의 기술이 사용되고, 미국은 기술 실증(촉매, 무기탄산화, 고분자 분야 등)을 통한 시장 선점뿐만 아니라 기술선도를 위한 신기술(전기화학, 광화학, 바이오 등) 개발에 심혈을 기울이고 있음
- ☐ 특히 미국은 이산화탄소 전환의 에너지 효율화를 위한 신재생 에너지 연계 연구를 활발히 수행 중에 있으며, 에너지 빈국인 우리나라 역시 에너지와 CCUS를 융합한 관련 분야의 연구개발 및 정책적 지원이 활성화되어야 할 것으로 사료됨
- ☐ 우리나라는 미국 등의 선진국에서의 CCU 집중 투자에 대응하여, 기술적 의존 및 이에 따른 산업 경쟁력 약화 등에 선제적으로 대응할 필요가 있음. 미래부 Korea CCS 2020 사업을 통해 이산화탄소 포집·저장(CCS) 및 전환이용(CCU)기술 개발 지원을 하고 있으나, CCU 원천기술개발 프로젝트에 투자되는 예산은 139억원(전체예산 1,727억원 중 8% 수준)으로 상대적 비중이 낮은 상황이므로 CCU에 대한 정부투자를 검토해야 할 시점임

- 온실가스 저감 및 관련 신산업 창출을 위한 국내 CCU 사업 활성화는, CCU 기술의 원천성 확보와 이를 상용화하기 위한 기업들의 온실가스 저감 사업화 유도 전략이 뒷받침 되어야 함. 탄소권 거래시장 점검, CCU 경제성/친환경성 분석, 정부 주도 온실가스 대응 사업 효율화, 기술 상용화를 위한 기업 지원, 기술/제품 무역 효율화 등을 위한 정책 지원이 필요함
- 특히, 이산화탄소의 포집 및 자원화의 비용을 획기적으로 낮추어 경제성을 확보할 수 있는 기존기술의 연장선이 아닌 새로운 개념의 한계돌파형(Breakthrough) 기술개발이 필요하며, 이산화탄소 처리량이 커서 직접적인 온실가스 감축에 기여할 수 있는 기술 개발이 우선적으로 선행되어야 함
- 빠르게 발전하는 NBIT 융합기술을 활용하여 이산화탄소의 포집, 저장, 전환이용 기술의 획기적 발전을 추구해야 함
- 또한, 이산화탄소의 전주기 처리 과정의 통합적인 실증기술 개발을 위해서는 재정 및 금융지원 등을 통하여 민간의 참여를 적극 유도하고 산학연관 협력 체계를 강화해야 함
- 미국 뿐만 아니라 CCUS 관련 선진국들과의 국제협력 체계를 강하게 구축하여, 최신의 원천기술 개발에 국제 공동연구 프로젝트에 참여를 확대하여 기술선도국과 파트너십을 구축해야 함
- CCUS를 통한 온실가스 저감이라는 궁극적 목표 달성을 위해서는 이산화탄소 뿐만 아니라 온실가스 및 부생가스 등의 탄소원의 자원화를 위한 국가 차원의 탄소자원화 전략 수립이 필요함
- 탄소원의 ‘포집-전환-가공’ 등 개별 기술간 연계 및 융·복합 시스템화를 통한 경제성 제고 방안 마련과 함께, 탄소자원화 기술의 산업화 지원, 정책·기술개발 전략 수립, 산학연관 네트워크 구축 등을 전략적으로 지원하는 허브(가칭 국가탄소자원화정책센터) 구축도 검토가 필요한 시점임

V 참고문헌

- Global CCS Institute, Accelerating the Uptake of CCS: Industrial Use of Captured Carbon Dioxide, (2011.3)
- Global CCS Institute, 글로벌 CCS 현황 (2014.2)
- Atlantic Council, US Policy Shift to Carbon Capture, Utilization, and Storage Driven by Carbon Dioxide Enhanced Oil Recovery
- Centre for Low Carbon Futures, Carbon Capture and Utilisation in the Green Economy (2011.7),
- JRC Scientific and Policy Reports, Carbon Capture and Utilisation Workshop (2013)
- 국가환경정보센터, 해외환경산업 정책보고서 제96호 (2013.05.29.)
- KISTI Market Report, 이산화탄소의 포집·저장·활용 기술, Vol.2 Issue 12, 3-6
- NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS)
- International Panel on Climate Change (IPCC, 2007)
- BP Statistical Review of World Energy 2011
- <http://www.alstom.com>
- US Department of Energy (2013)
- 아이앤비디 협동조합, 화학기술 융·복합 산업 분석사업 중간보고서 (2015.5.8.)
- International Energy Agency (IEA), Technology Roadmap for CCS (2009)
- SBC Energy Institute analysis of 22 answers
- SBC Energy Institute, based on data from IEA, Carbon Tax Center, OECD and Bloomberg New Energy Finance
- SBC Energy Institute, based on Global CCS Institute project list
- SBC Energy Institute, results from answers from 27 actors in the CCS industry
- Advanced Resources International and Melzer Consulting
- Bloomberg New Energy Finance
- DOE, Clean Coal Research Program (2014.12)
- <http://www.netl.doe.gov>
- <http://www.nsf.gov>
- International Conference on Carbon Dioxide Utilization (ICCDU, 2013)

VI 주 작성자 및 문의처

- 주 작성자 : 한국화학연구원 연구전략팀 양경욱 팀장(kwyang@kriict.re.kr), 온실가스자원화 연구센터 장태선 센터장(tschang@kriict.re.kr), 온실가스자원화연구센터 허일정 선임연구원(zaiseok@kriict.re.kr)
- 문의처 : 한국에너지기술평가원 글로벌협력실 위싱턴사무소 박재형 소장 (jaehyung@ketep.re.kr)

글로벌기술협력기반육성사업 심층분석보고서

이산화탄소 저감 및 자원화 기술: 미국의 CCUS 산업 동향 분석

발행처 : 한국에너지기술평가원

가격 : 비매품



한국에너지기술평가원
KOREA INSTITUTE OF ENERGY TECHNOLOGY
EVALUATION AND PLANNING

GT 심층분석보고서는 국제기술협력정보시스템(<http://gtonline.or.kr>)를 통해 보실 수 있습니다.

본 브리프의 내용은 저자 개인의 의견으로 각 기관의 공식 입장과는 무관합니다.