

CCUS(CO₂ 포집, 저장 및 전환) 기술개발과 정책방향

김재식 한국중부발전(주) 차장 | e-mail : wotlr@komipo.co.kr
천대인 한국중부발전(주) 차장 | e-mail : marty1@komipo.co.kr

이 글에서는 화석연료 사용으로 배출되는 CO₂를 대량으로 저감하는 가장 적극적이고 현실적인 방법으로 일컫는 CCS 중 포집 및 재이용 기술개발과 정책방향에 대해 소개하고자 한다.

신기후체제와 CCS의 필요성

CCS를 설명하기에 앞서 최근 기후변화대응과 관련된 중요한 이슈인 파리협정에 대해 먼저 설명하고자 한다. 작년 12월 파리에서 개최된 기후변화당사국총회(COP21)에서 신기후체제 출범을 알리는 파리협정문 채택으로 온실가스 감축이 전세계적인 이슈로 부각되었다. 파리협정문은 2020년 만료 예정인 교토의 정서 이후의 기후변화대응을 담은 국제협약으로 2015년 12월 12일 195개국 대표들의 협상에 의해 UN 기후변화협약(UNFCCC)에서 채택되었다. 파리협정문은 온실가스 배출을 줄이고 기후변화에 대한 적응능력 강화를 목표로 하고 있다. 장기적으로 산업화 이전 대비 평균기온 상승을 2℃보다 낮은 수준으로 유지하기로 하고, 1.5℃ 이하로 제한하기 위한 노력을 추구하는 것이다. 파리협정문의 내용은 다른 협정과는 다르게 감축목표 설정방식이 상향이다. 회원국은 자발적 온실가스 감축목표(Intended Nationally Determined Contribution)를 제출할 것을 의무화했고, 2020년 이후 5년마다 감축목표를 수정해서 제출하도록 하였다. 다만, 이전 목표보다 진전된 목표를 제시토록 하고 온실가스 감축노

력의 검증은 2023년부터 5년마다 실시하기로 했다. 각국의 온실가스 감축목표를 제출하는 것은 의무이나 목표이행은 자발적으로 이루어진다. 이행을 강제하거나 불이행 시 처벌할 수 없다는 한계가 있고 공식 발효를 위해서는 55개국 이상과 글로벌 온실가스 배출량의 55% 이상에 해당하는 국가의 비준이라는 두 가지 기준을 충족하여야 한다. 우리나라의 목표는 2030년 배출전망치(BAU, 특별한 감축노력을 하지 않을 경우 예상되는 미래배출량) 대비 37%를 감축하는 것이다. 바로 이 목표 달성을 위한 감축수단 중 하나로 CCS를 제시한다.

CCS란 Carbon Capture and Storage(탄소 포집 및 저장) 혹은 Carbon Capture and Sequestration(탄소 포집 및 격리)의 약자로, 화석연료의 연소로 인하여 발생하는 온실가스인 이산화탄소를 물리 화학적인 방법을 이용하여 분리한 후 이를 압축, 수송하여

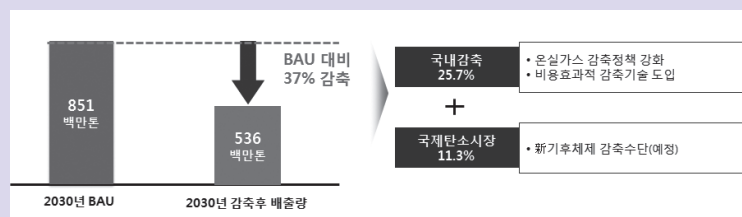


그림 1 신기후체제 대비 우리나라 감축목표

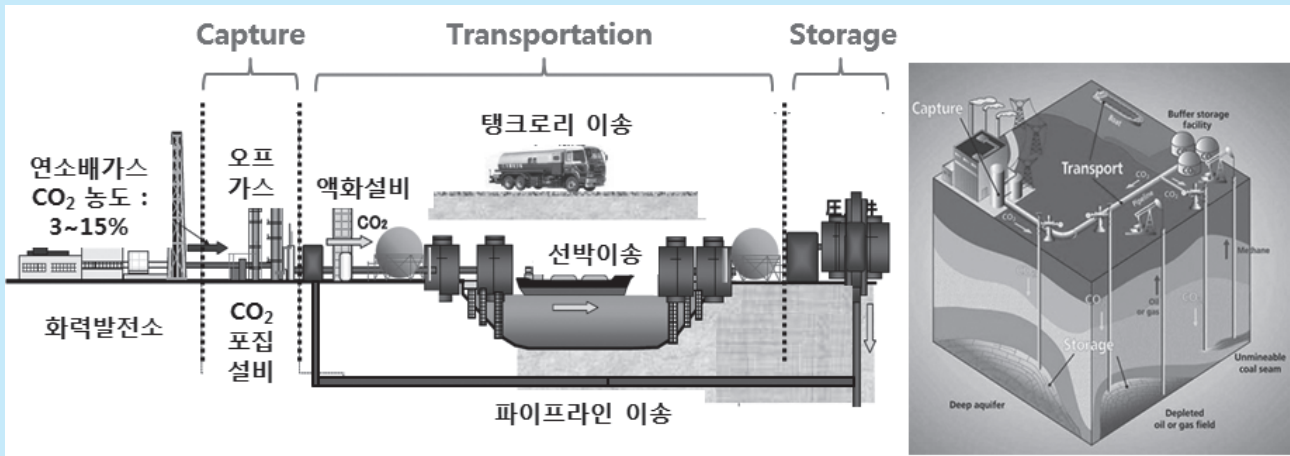


그림 2 이산화탄소 포집, 수송, 저장과정(출처 : RITE, 2008)

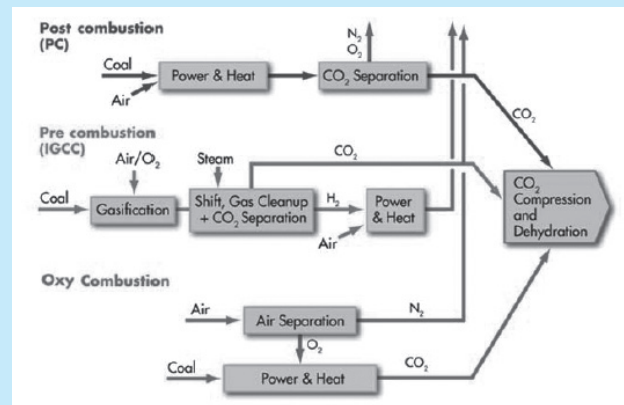
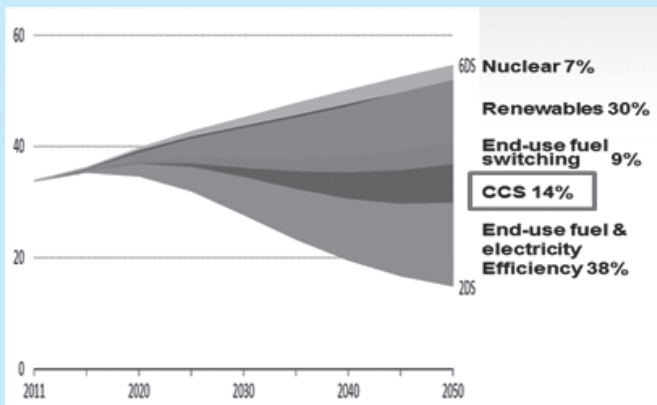


그림 3 CCS의 역할(출처 : IEA 2014) 및 기술종류 구분(출처 : CO₂ Capture Technologies, Global CCS Institute, 2012)

폐가스전 등 검증된 저장소에 주입하여 탄소배출을 저감하는 기술을 일컫는다.

CCS는 국가감축목표 달성을 위해서는 반드시 개발하여야 하는 중요 기술적 수단임이 분명하다. IEA(International Energy Agency, 국제 에너지 기구)에서는 온실가스를 저감하기 위한 2050년까지의 청사진을 기획하면서 전체 저감량의 약 14%를 CCS 기술이 담당해야 할 것으로 예상하였다. CCS기술은 현실적으로 단기간 내에 이산화탄소를 저감할 수 있는 기술로 평가 받고 있다. 왜냐하면 CCS를 구성하는 이산화탄소의 포집, 수송, 저장 기술은 각각 다른 용도로 기존 산업에서 이용되어 왔기 때문에 기술의 실

제 적용에 대한 리스크가 적다.

CCS기술은 CO₂를 포집하는 위치에 따라 연소후 포집(Post Combustion), 연소전 포집(Pre Combustion), 순산소 연소(Oxy Combustion) 등으로 크게 세 가지 방식으로 구분된다. 먼저 연소후 포집기술은 연소후 배기가스에 포함된 이산화탄소를 흡수제를 이용하여 포집하는 기술로 기존 석탄화력에 적용하기가 가장 용이하여 가장 빠르게 도입 가능하며, 연소전 포집기술은 석탄의 가스화 또는 천연가스의 개질반응에 의한 합성가스를 생산한 후 일산화탄소를 수성가스 전이반응을 통해 수소와 이산화탄소로 전환한 후 이산화탄소를 포집하는 동시에 수소

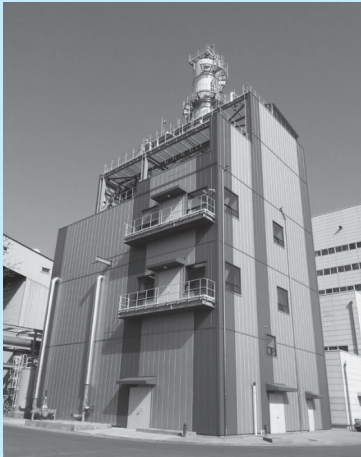
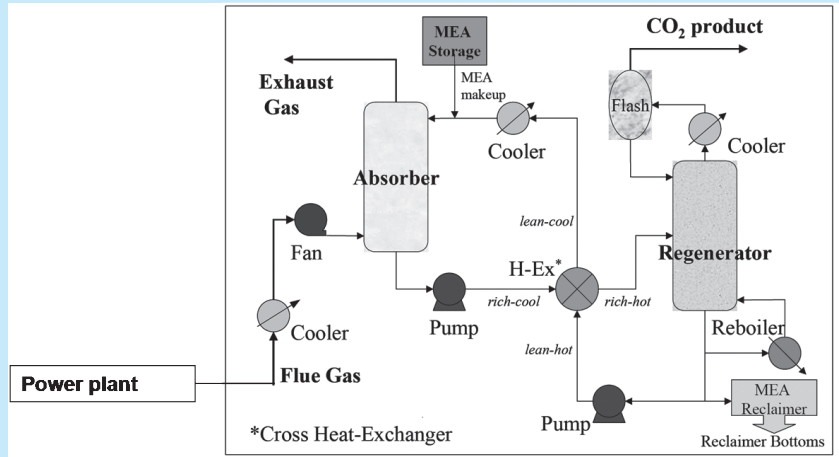


그림 4 10MW급 습식 CO₂ 포집 실증플랜트 및 공정도



를 생산하는 기술이다. 마지막으로 순산소 연소기술은 질소 성분을 미리 배제한 순도 95% 이상의 산소와 재순환된 배기가스를 사용하여 미분탄을 연소시켜 이산화탄소와 물이 대부분을 차지하는 배기가스를 생성시켜 물 응축과정을 통해 CO₂를 회수하는 기술이다. 앞서 기술한 바와 같이 현재 폭넓게 연구되고 있는 연소후 포집기술은 습식아민, 탄산칼륨, 암모니아 포집기술과 막분리, 건식포집기술로 분류될 수 있다. 현재까지 가장 경쟁력이 있는 기술로 알려진 연소후 습식아민 포집기술로 알려져 있으며, 10MW급 연소후 습식아민 CO₂ 포집기술은 한전 전력연구원을 총괄기관으로 하여 발전5사, 포스코건설, 대림산업, KEPCO E&C 등 10여개 기관이 참여하여 국책연구과제를 수행하였으며, 실증설비는 한국중부발전 보령화력 제8호기에 설치하였다.

10MW급 연소후 습식 CO₂ 포집 Pilot plant 개요

보령화력본부 내에 설치된 습식아민을 이용한 10MW 이산화탄소 포집 플랜트의 설계 기준 용량(Capacity)은 재생공정 상단부로 나가는 드라이 이산

화탄소 기준 200ton/day이다. 다음은 본 공정의 개략도(Schematic Diagram)이다.

본 CO₂ 포집 설비의 배가스는 Structured Packing으로 채워진 흡수탑의 하부로 주입되고, 상부로 주입되는 린 아민 흡수제와 향류(Countercurrent)로 접촉을 한다. 흡수탑에 주입되는 배가스는 보령화력 8호기(500MW) 배가스를 일부 분기하여 1/50만급 10MW급 포집설비에 주입하고, 조성 및 온도는 0.1MW급 Test bed와 동일하다. 아민 흡수제는 흡수제1(KoSol-4)를 사용하고 충전물 및 흡수탑 최적 높이 산정을 위해 흡수탑 상부에 3개의 다른 린 아민 주입 라인을 고려하고 있다. 흡수탑 하부에는 전체 에너지 사용량을 줄이기 위해 흡수탑 냉각 펌프(Absorber Cooling Pump)와 흡수탑 내부 열교환기(Absorber Intercooler)로 구성된 흡수탑 내부냉각 시스템을 고려하고 있다. 이는 흡수탑 하부의 리치 아민의 온도를 낮추어 이산화탄소 흡수능력을 증가시킨다. 흡수탑 상부에는 처리된 배가스와 함께 딸려나갈 아민의 손실량(Losses)을 줄이고 배가스의 온도를 낮추어 전체적인 물 밸런스(Water Balance)를 조절하여 경제적인 운전이 가능하도록 한다. 흡수탑에서 린 아민에 의해서 이산화탄소가 제거된 배가스는 흡

표 1 10MW급 CO₂ 포집설비 연속운전 조건 및 달성목표

Flue gas 인입량 [Sm ³ /h]	흡수제 순환량 [kg/h]	L/G비	Stripper Pressure [kgf/cm ²]	Flue gas 주입온도 [°C]	Lean amine 주입온도 [°C]	인터쿨링 온도 [°C]
36,500	86,000	2.3	0.3	36 ~ 40	37 ~ 40	35

- CO₂제거효율:90% 이상, • CO₂포집량:200ton/day,
- 1,000시간 연속운전, • 흡수제재생에너지:2.80GJ/tonCO₂

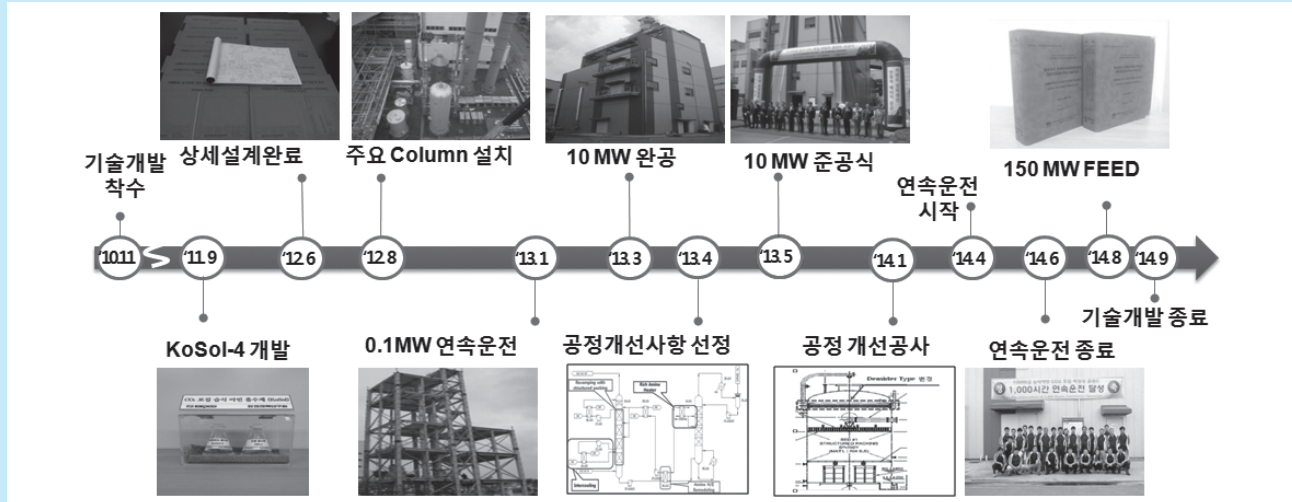


그림 5 10MW급 연소후 습식아민 CO₂ 포집기술개발 추진경과

수탑 내부 발열 반응에 의해서 온도가 상승된 상태에서 흡수탑 상단으로 유입된다. 흡수탑 상단역시 Structured Packing이며 세척수(Washing Water)는 흡수탑 내부 세척 펌프(Washing Pump)을 통해서 승압 후 흡수탑 내부 냉각 열교환기(Washing Cooler)를 통해서 45°C로 냉각된 후 흡수탑 상부로 유입되어 다시 처리된 배가스를 세척한다.

흡수탑 하부에서 나오는 리치 아민은 리치 아민 순환 펌프(Rich Amine Circulation Pump)를 통해서 승압된 후 리치 아민 필터(Rich Amine Filter)에서 혹시 있을 지도 모를 입자들을 제거한 후 린/리치 아민 열교환기(Lean/Rich Amine Exchanger)에서 온도가 높은 린 아민과 열교환을 하여 110°C까지 상승된다. 이 상승된 리치 아민은 재생탑(Stripper)의 중간으로 주입된다. 충전물 성능 시험을 위해서 리치 아민 주입라인을 2개 고려하였다. 재생탑 역시

Structured Packing 형태이며 이 탑의 목적은 리치 아민으로부터 이산화탄소를 분리하는 것이다. 리치 아민은 재생탑 하부로 내려가면서 리보일러(Reboiler)로 부터 나오는 뜨거운 증기가 리치 아민으로부터 계속 이산화탄소를 분리한다. 리보일러의 열원으로 약 20 barg의 고압 증기가 외부에서 공급이 되지만 아민의 열적 퇴화 방지를 위해서 4barg로 압력이 강하가 되고 감온기(Desuperheater)를 통해서 포화 증기(Saturated LP Steam)로 된 후 리보일러를 거치고 난 후 응축이 될 것이다. 이 응축된 응축수는 응축수 드럼(Steam Condensate Drum)을 통해서 응축되지 않은 스팀과 분리가 된 후 응축수 펌프(Steam Condensate Pump)를 통해서 승압이 된 후 일부는 감온기의 냉각수로 일부 사용이 되고 남은 응축수는 모두 발전소 복수기로 보내진다.

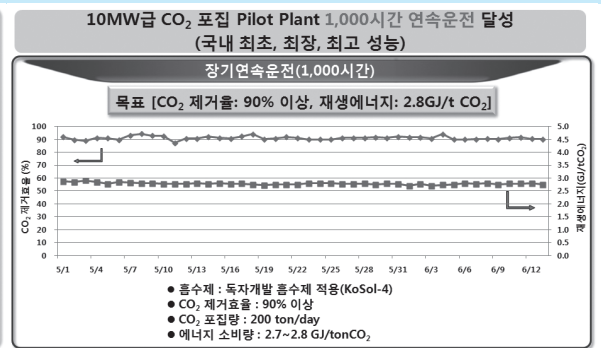
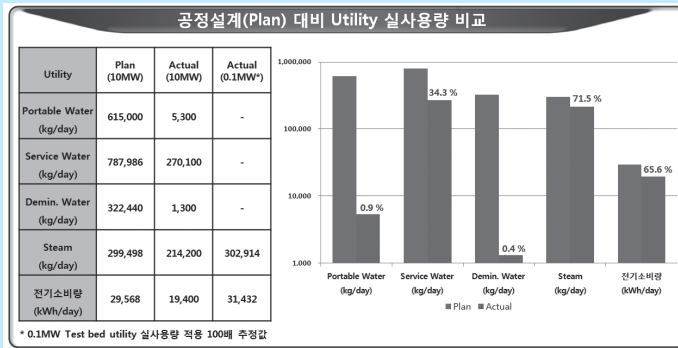


그림 6 10MW급 연소후 습식아민 CO₂ 포집설비 연속운전 최종결과

10MW급 연소후 습식 CO₂ 포집기술 상용패키지 개발

CO₂ 포집설비에서 포집된 고농도의 CO₂를 저장 및 활용하기 위해서는 반드시 압축/액화공정을 거쳐야하기 때문에 포집-압축 연계기술은 CO₂ 포집기술의 상용화를 위한 핵심 기술이다. 따라서 CO₂ 포집공정의 세계시장 진출 및 선점을 위해서는 포집공정과 최적의 연계를 통하여 에너지 소비를 저감할 수 있는 CO₂ 압축/액화공정의 연계 및 발전소와 통합된 전체 기술의 상용화패키지 개발이 필수적이다. 2014년 12월부터 상용패키지 개발 연구과제가 진행 중이며, 다음은 보령화력본부 8호기에 설치된 포집, 압축, 액화, 저장설비의 개념도이다. 포집설비는 업그레이드를 거쳐 1차 3,000시간 연속운전을 마무리하고 2차 3,000시간 연속운전을 목전에 두고 있으며, 이때 적용되는 흡수제는 한전 전력연구원에서 독자적으로 개발한 흡수제인 KoSol15이다. 주요 목표로는 흡수제재생에너지 소비량을 앞

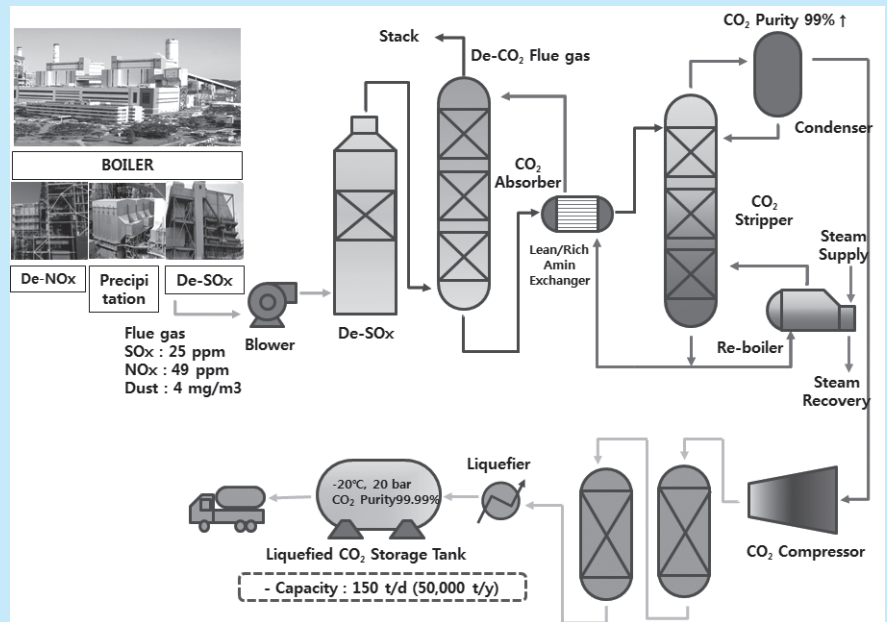


그림 7 보령화력 10MW급 습식아민 CO₂ 포집 및 압축·액화·정제·저장설비 개념도

선 과제에서 세계 최고수준에 도달한 2.80GJ/tonCO₂를 넘어서 2.60GJ/tonCO₂ 달성과 11월에 준공 예정인 압축·액화·저장설비와 연계운전이다.

발전소의 배기가스는 탈질, 전기집진기, 탈황공정을 거쳐 포집설비에서 CO₂를 선택적으로 포집한 후 압축기, 액화기, 정제기를 거쳐 -20°C, 20bar, 순도 99.99% 액화 CO₂ 생산하여 전환 또는 직접이용에 활용될 계획이다.

맺음말

보령화력에 설치된 CO₂ 포집 및 재이용설비는 포집된 CO₂를 저장하거나 전환을 하는 것이 아니라 포집된 CO₂를 농업용, 공업용, 음료용 등으로 직접 이용하는 수준에 머물고 있다. 이는 경제성이 담보된 저장과 전환 기술이 없다는 것을 반증하는 것이다. 이에 대한 고민을 보여주는 대목이 CCS보다 CCUS에 더 많은 관심을 보이는 정부정책의 변화이다. 2016년 6월 국가과학기술심의회에 관계부처 합동으로 두 가지 중요한 사항이 보고된다. ‘기후변화대응기술 확보 로드맵’과 ‘기후변화대응과 신산업 창출을 위한 청정에너지기술 발전전략’으로 CCUS를 강조한다. 이곳에서 언급되는 CCUS란 기존의 이산화탄소 포집 및 저장(CCS)과 이산화탄소 전환·활용(CCU)을 모두 포함하는 용어로 인식된다. 먼저, ‘기후변화대응기술 확보 로드맵’에서는 R&D 측면에서 효율적인 지원을 목적으로 하며, 탄소저감, 탄소자원화, 기후변화적응 3대 분야의 10대 기후기술을 다루며, 이중 탄소자원화는 CCUS 기술을 골자로 한다. 또한, ‘기후변화대응과 신산업 창출을 위한 청정에너지기술 발전전략’에서는 “저탄소 에너지경제로의 전환을 위해 에너지의 생산·저장·전달·소비단계에 적용되며, 온실가스 감축 및 신산업 육성에 기여하는 기술”로 청정에너지기술을 정의하며, 6대 분야 14개 세부기술 영역을 선정하였다. 6대 분야의 마지막 분야에 CCUS를 선정함으로써 CCUS의 중요성을 언급하였다. 포집된 CO₂를 저장하는 것도 중요하지만 저장과 전환의 한계를 인식하고 자원화를 위한 기반조성을 강조하면서 자원화의 중요성 또한 일깨워주는 대목이다. 마지막으로 CCUS를 위해서는 몇 가지 고려해야 할 사항이 있다. 이에 대한 내용은 2013년 온실가스 종합정보센터의 ‘CCU 기술 활용에 따른 온실가스 배출량 산정 기초연구’에서 잘 설명하고 있다. CCU 관련 기술 중 온실가스의 장기적 고정의 특성이 있는 몇몇 기술에 대해서는

CO₂ 저장(고정) 시 물리적으로 누출될 수 있는 양을 산정, 모니터링 혹은 보고하는 것과 관련한 방법론이 개발될 필요가 있다. 포집, 운반 및 주입공정으로부터 발생할 수 있는 탈루성 배출량과 관련하여, 추가적인 세부 지침 또한 개발될 필요가 있다. 온실가스 감축량 산정 방법론을 개발하기 위해서 몇 가지 해결해야 할 사항이 있다. 첫 번째로 사고로 인해 누출될 수 있는 가능성에 대한 연구뿐 아니라, 저장 옵션에 따라 발생할 수 있는 물리적인 누출율에 대한 연구가 필요하다 (영속성과 법적인 사안). 두 번째로 저장 옵션마다 추가적으로 에너지를 필요로 하는 경우, 이로 인한 영향(추가로 배출되는 온실가스)을 고려할 필요가 있다. 또한 CO₂ 포집 및 저장이 기존의 산정 바운더리(boundaries)를 넘어서는 경우, 책임 소재와 경제적 누수의 문제도 존재한다. 온실가스 감축 측면에서 CCS가 국제적으로 승인되어 추진되고 있는 반면 CCU와 같은 온실가스를 재활용하는 기술에 대한 감축량 허용의 불확실함은 이들 CCU 기술보급에 가장 큰 문제점이다. CO₂의 영구적 저장을 제공하지 않는 CO₂ 재활용 기술은 배출원과 최종 산출물 사이에 탄소배출에 대한 책임을 누가 물어야 할지 불분명하므로 투자하기에 상대적 위험성이 크다. 발전소나 산업용 플랜트에서의 CO₂ 배출원이 CO₂ 재활용에 공헌해도 탄소가격을 전액 부담해야 할 수도 있는 상황에서 재활용을 위한 포집은 상업적으로 매력력이 떨어진다. 반면, 탄소가격의 책임이 최종 산출물에 돌아간다면 상품이 상업적으로 경쟁력이 떨어지는 위험에 노출된다. 완성된 형태의 CO₂ 재활용 기술은 특히, 탄소가격의 부재시에 초기 실증사업의 발전을 앞당길 수 있는 잠재력이 있다. 이런 CCU 측면의 기능적인 측면을 고려할 때 향후, 정부차원에서 CCU 기술의 탄소배출권 시장 메커니즘 활용 또는 정책적 지원방안 마련이 필요하다.