

국내외 IP 요약보고서

# 미국 탄소 포집 기술 연구 동향 및 향후 전망

본 보고서는 해외 환경 산업 및 기술 관련 이해를 높이기 위한 국내외 전문가의 보고서이며, KEITI의 공식 의견이 아님을 알려드립니다.

---

# 미국 탄소 포집 기술 연구 동향 및 향후 전망

---

IP 유형호

- 개요
- 용매 (Solvent) 탄소 포집 기술 동향
- 흡수제 (Sorbent) 탄소 포집 기술 동향
- 멤브레인(Membranes) 탄소 포집 기술 동향
- 결론 (향후 전망)



※ 동 보고서는 요약 및 번역본입니다. 상세 내용은 원문을 참조하십시오.  
원문은(<https://netl.doe.gov/sites/default/files/2020-07/Carbon-Capture-Technology-Compendium-2020.pdf>)에 게재되어 있습니다.

## 개요

미국 에너지부 (이하 "DOE")의 화석 에너지 프로그램은 탄소 포집 기술 (이하 "CCS") 연구 개발에 대해 포괄적이고 다각적인 접근 방식을 채택했다. 이산화탄소 포집 기술에 관한 연구는 결국 오늘날의 화석 연료 기반 전력 플랫폼과 산업 시스템을 더욱더 신뢰할 수 있고 안전하게 만들기 위한 것이다. 미국 국가 에너지 기술 연구소 (이하 "NETL")은 차세대 첨단 기술을 개발하기 위해 탄소 포집 연구·개발 프로그램을 구현하고 있다. 성공적인 이산화탄소 포집 기술은 탄소 포집 및 저장 (이하 "CCS") 기술을 비용 효율적으로 구현할 수 있다. DOE의 CCS 연구 개발 노력은 청정 석탄 및 탄소 관리 사무소(이하 "OCCM")의 CCS 및 전력 시스템 프로그램의 하나로 수행된다. OCCM은 NETL에서 계약된 연구 활동 및 현장 연구를 통해 NETL에 의해 구현되고 연구 과제가 수행된다. DOE 및 NETL의 탄소 포집 프로그램은 연소 후 포집과 연소 전 포집이라는 두 가지 핵심 연구 영역으로 구성되며 또한, 개념 공학 및 재료 설계로부터 25MW 파일럿에 이르는 다양한 TRL<sup>1)</sup> 사업들이 현재 진행 중이다. 이 두 가지 핵심 영역은 현재의 최첨단 용매 기반 포집 시스템과 비교하여 비용과 성능 모두에서 진보를 이루고 있다. 연소 후 시스템은 공기 중 연료 연소 후 기존의 화석 연료 화력 발전소에서 생성된 연도 가스 흐름에서 CO<sub>2</sub>를 분리한다. 이러한 시스템 방식에서 CO<sub>2</sub>는 연소 가스의 주성분인 질소 (N<sub>2</sub>)와 분리된다. 연소 전 시스템은 석탄 가스화 복합화력발전소(IGCC<sup>2)</sup>)에서 가스 화기에 의해 생성된 합성 가스 증기에서 CO<sub>2</sub>와 수소 (H<sub>2</sub>)를 분리하도록 설계되었다. 두 가지 방식 모두에서 고급 용매, 흡착제, 멤브레인, 하이브리드 시스템 및 기타 새로운 개념을 기반으로 한 기술도 개발 진행 중이다. 본 보고서는 DOE / NETL의 이산화탄소 포집 기술 및 연구 개발 동향에 대한 기술 정보를 요약하여 제공한다<sup>3)</sup>.

---

1) TRL(Technology Readiness Levels)

2) IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle)

3) 총 132개 연구 과제 중, 2019년 10월 1일 현재 진행 중인 사업은 80개, 완료된 연구 과제는 52개이다. 활성 연구 과제 목록은 2017년 9월 1일과 2019년 10월 1일 사이에 활성화되었으며, 일부는 해당 기간 종료되었을 수 있다.

## 용매 (Solvent) 탄소 포집 기술 동향

국립 에너지 기술 연구소의 연구 및 혁신 센터(RIC)는 연소 전 이산화탄소를 위한 고급 용매를 개발하고 있다. 기존 에너지 사용의 단점과 이산화탄소배출 비용을 모두 줄일 수 있는 이산화탄소 포집 기존 기술에 비교해 새로운 고급 용매 설계, 합성, 특성화, 모델링 및 자료의 성능을 테스트 진행 중이다. 액체 용매 공정은 이산화탄소 포집을 위한 가장 잘 개발된 기술 중의 하나이다. 분리 과정에서 액체 용매는 흡수 사이클을 만들고, 가스 증기에서 나오는 CO<sub>2</sub> 분리 공정에 필요한 에너지는 전기 또는 낮은 등급의 폐열을 이용한다. 현재 최첨단 연소 전 이산화탄소 포집 용매는 미국의 Selexol (Union Carbide, Houston, Texas)와 독일의 Rectisol (Lurgi AG, Frankfurt am Main)이다. 안타깝게도 두 용매 모두 친수성이며 증기압이 높다. 따라서, 압력을 가하고 고온에서 심각한 부식을 일으킬 수 있다. 따라서, 수분 흡수 및 용매 증발을 피하기 위해서는, 합성 가스 온도를 조절한 이후, (10° C for Selexol and -10° C for Rectisol) 다시 고온으로 연소시키는 방법이 있다. 이러한 공정은 비효율적이고 비용이 많이 든다는 단점이 있지만, 대신 증기압이 낮은 소수성 용매 합성 가스를 냉각하는 것과 관련된 에너지 및 비용을 최소화하고, 더 높은 온도에서 운영 할 수 있다.

University of Notre Dame, Lawrence Livermore National과 협력 텍사스 대학의 실험실 (LLNL)과 동료들은 연소 후 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>) 포집을 위해 하이브리드 캡슐화 이온성 액체 (이하 "IL<sup>4</sup>") 및 상변화 이온성 액체 (이하"PCIL<sup>5</sup>") 기술을 연구 중이다. 비록 이온성 액체는 이산화탄소흡수 용매와 같은 많은 유리한 특성이 있지만, 일반적으로 낮은 물질 전달 속도와 대규모 상업 운영에서 실제 적용이 어렵다는 제한이 있다. 따라서, 고용량 및 낮은 재생 에너지를 가진 IL 및 PCIL을 결합 합성하는 기술 연구를 진행했다. 이 연구 과제는 마이크로 캡슐화된 IL 및 PCIL의 성공적인 합성을 통해 획기적으로 개선된 물질 전달률을 실험실 규모 단위에서 시뮬레이션하여 가스에서 이산화탄소제거를 검증했다. 기존의 용매 기반 탄소 포집 방법은 일반적으로 포획 용매로 모노 에탄올 아민(MEA<sup>6</sup>)과 같은

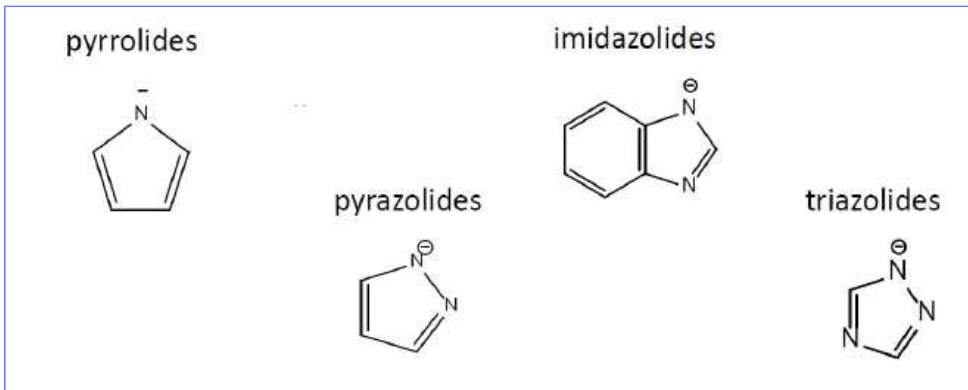
---

4) IL (Ionic Liquid)

5) PCIL (Phase-Change Ionic Liquid)

6) MEA (Monoethanolamine)

아민 화합물을 사용한다. 그러나 아민 화합물은 시간이 지남에 따라 부식되고 분해되며 상대적으로 높은 증기압을 가지므로 외부 환경으로 누출 가능성이 더 크다. IL은 무수하고 주변 온도에서 액체상태로 존재하며 증기압이 낮다. 열적으로도 안정하고 상대적으로 부식성이 없으며 특정 IL은 이산화탄소흡수에 대한 상당한 효과가 있으며 및 혼합 가스 내에서도 CO<sub>2</sub>에 대한 선택적 흡수성이 높다. 예를 들어, 헥사 플루오로 포스페이트 (PF<sub>6</sub><sup>-</sup>) 및 테트라 플루오로 보레이트 (BF<sub>4</sub><sup>-</sup>) 음이온은 이산화탄소 포집이 가능한 것으로 나타났다. IL은 연도 가스에서 배출되는 탄소 포집에 영향을 미치는 아민 가스 처리와 유사한 과정에서 사용될 수 있다.



〈그림1. 극성 비양자성 용매의 복소고리식 이온 구조〉

## ○ 흡수제 (Sorbent) 탄소 포집 기술 동향

마이크로파 보조 흡수제 기술(Microwave-Assisted Sorbent Regeneration)은 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>) 포집 공정을 위한 마이크로파 보조 흡착제 재생산 기술을 평가하고 전자기장에 최적화된 새로운 흡착제에 대한 설계, 합성, 평가하는 것이다. 고체 흡착제를 사용한 탄소 포집 기술은 최신 용매 사용 기술과 비교하면 보다 적은 수분 순환 능력으로 열부하를 낮추는 등 많은 이점이 있다. 그러나 고체 흡착제는 용매보다 가열하기가 더 어렵고 일반적으로 직접 가열이 필요합니다. 재생을 위해 증기 또는 재순환 된 CO<sub>2</sub>를 사용하면 속도가 느려진다. 재생 온도는 마이크로파 복사를 통한 급속 가열 방법을 이용하여 매우 빠른 속도로 고온에 도달 할 수 있

7) Figure 1: Several types of aprotic heterocyclic anions.

으며, 빠른 재생 과정에서 더 작은 크기의 재생기로 이어져 잠재적으로 비용을 절감할 수 있다. 흡착제 재생 영역에서 유전체 및 자기 상호 작용을 통해 벌크 가스 온도 상승 및 고체배지의 증가 없이 대상을 선택적으로 자극할 수 있는 고주파 전자기를 적용하여 흡수제 재생률을 높일 수 있다. 이러한 상태는 결국 상대적으로 낮은 온도에서도 열역학에 따라 예측된 것보다 흡착제 재생률을 훨씬 더 높게 만든다. 또한, 선택적으로 에너지를 투입할 수 있어, 기존 열난방 가열 방식보다 효율적이고 가열 속도가 더 빠르다.

## 멤브레인(Membranes) 탄소 포집 기술 동향

국립 에너지 기술 연구소 (NETL)의 연구 및 혁신 Center는 새로운 초고성능 멤브레인 및 연소 후 이산화탄소 포집을 위한 멤브레인 모듈에 관한 연구를 진행 중이다. 연구 중인 멤브레인 유형에는 폴리머 멤브레인 및 혼합 매트릭스 멤브레인(MMM<sup>8)</sup>) 등이 있다. 또한, 고 투과성 평판 및 중공 섬유 지원을 통한 폴리머의 박막 코팅 적용에 관한 연구도 진행 중이다. 멤브레인 기술은 대규모 가스 분리를 위한 매우 흥미로운 기술이다. 모듈성 및 볼트 체결식 설치로 좁은 공간에도 설치할 수 있고, 장치 및 운영의 단순성과 작동이 쉽다. 또한, 다른 기술에 비해 일반적으로 대기 전력이 훨씬 낮다. 멤브레인은 산업 분야에서 쓰일 때는 폴리머 형태로 주로 사용되고, 가스 분리 기술에서 일반적으로 가스 혼합물에서 수소를 분리할 때, 천연가스 정화 등 매우 높은 투과성 멤브레인 재료가 요구된다. 그러나, 성능 요구 사항을 충족하기 위해 대부분은 다음과 같은 실질적인 단점이 존재한다. 예를 들면, 기계적 강도 불량, 박막 형성 능력 불량, 노화로 인한 성능 저하, 복잡하고 값비싼 합성 절차와 같은 것이다. 따라서 고성능이면서 동시에 연소 후 이산화탄소 포집의 실제 요구 사항을 충족하고 단점을 보완하는 새로운 멤브레인을 개발해야 한다.

---

8) MMM (Mixed Matrix Membranes)

## 결론 (전망 및 과제)

미국 에너지부 국가 에너지 기술 연구소 산하 Southern Company는 중립국으로서 천연가스 및 석탄 기반 발전소에서 온실가스 감축 기술 발전을 위한 연구 시설(이하 “NCCC<sup>9)</sup>)을 운영하고 있다. 앨라배마주 월슨빌에 위치한 센터는 비용 효율적인 타사 기술 평가를 위한 고유한 시험대로서 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>) 포집 기술의 실험실 연구 간 격차를 해소하고 대규모 공동 연구를 지원한다. NCCC는 기술 개발자에게 탁월한 이점을 제공한다. 발전소의 실제 운영 조건에서 실험할 수 있는 기회를 통해 저비용 탄소 포집 공정의 상용화를 가속한다. NCCC는 탄소 포집 혁신가를 대상으로 한 110,000시간의 기술 테스트를 미국 이외 6개국, 60 개 이상의 기술 테스트를 통해 예상 탄소 포집 비용을 1/3로 줄이는 데 직접 참여했다. NCCC는 국내 외적으로 환경, 건강 및 안전을 확인하고 해결하기 위해 계속해서 첨단 기술 평가 목표를 달성할 것이다. 운영, 구성 요소 및 시스템 개발 문제는 물론 기술 개발자와 협력하여 과정을 향상하게 시키고 확장 달성할 것으로 기대된다. DOE가 후원하는 연구 과제 및 산업, 대학 및 기타 연구 과제 협력 기관은 테스트를 위한 모든 기술을 제공하며 탄소 포집 실험 연구 과정의 비용을 절감한다. 다양한 고급 이산화탄소흡수 화학 물질 및 물리적 용매, 다양한 수소 및 이산화탄소 선택성 멤브레인, 수성 가스 촉매, 고온 수은 포집 흡착제, 고체 산화물 연료 전지가 테스트 진행 중이다. NCCC에서 연소 후, 가스화 및 연소 전 기술 테스트에서 생성된 성능 데이터를 사용하여 엔지니어링 규모 확장이 가능한 실험실 데이터를 검증하여 탄소 포집 솔루션의 새로운 혁신을 주도할 것으로 예상된다.

---

9) NCCC(National Carbon Capture Center)

---

---

## 국내외 IP 요약보고서

---