

GT 워싱턴DC 거점



GT Insight

GLOBAL TECH KOREA

2022-GT-00-057

캐나다 탄소중립기술 개발 현황

CONTENTS

I. 서론

1. 탄소중립기술 개발 배경
2. Net-Zero에 도달하려는 캐나다 정부의 계획
3. CCUS 개관
4. 캐나다 CCUS 기술개발 동향 및 현황 개관

II. 이산화탄소 포집기술(Capture) 현황

1. 이산화탄소 포집기술(Capture)
2. 캐나다 이산화탄소 포집 실증 프로젝트
3. 캐나다 소재 이산화탄소 포집기술 기업 현황
4. 탄소포집 시연 프로젝트 정부지원 프로그램

III. 이산화탄소 활용기술(Utilization) 현황

1. 이산화탄소 활용기술(Utilization)
2. 캐나다 이산화탄소 활용 실증 프로젝트
3. 캐나다 소재 이산화탄소 활용기술 기업 현황

CONTENTS

IV. 이산화탄소 저장기술(Storage) 현황

1. 이산화탄소의 열역학적 특성
2. 지질학적 저장소
3. 이산화탄소 배관
4. 이산화탄소 모니터링

V. 맺음말

VI. 참고문헌



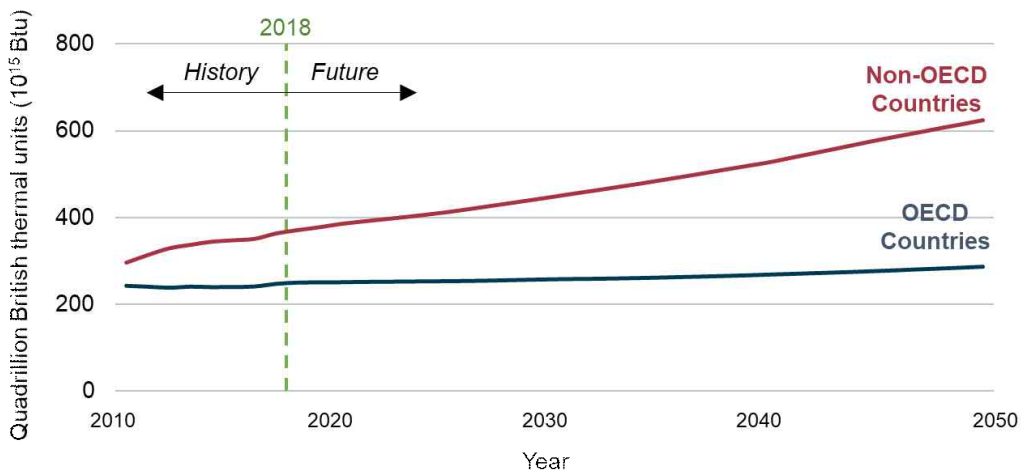
서론

1 탄소중립기술 개발 배경

현재 전세계적인 에너지 소비의 증대는 인구 증가 및 경제 성장에 기인하며, 주로 화석연료에 의존한 형태를 보여주고 있음

- 최근 50년간 에너지 수요 통계치에 따르면 화석연료 의존도는 94% (1965년)에서 84%(2019년)로 줄어들었지만, 전반적인 에너지는 여전히 화석연료에 의해 공급되고 있음[1]
- 화석연료 기반 에너지 소비 형태는 연료 연소 시 대량의 온실가스 (Green House Gas, 이하 GHG)를 발생시켜 지구 온난화의 주원인이 되었고, 이는 특정 기후대의 변화, 해수면 상승, 폭염, 가뭄 및 홍수를 일으키며 잠재적인 환경 파괴를 일으키는 역효과를 낳게 되었음

<그림 1> OECD 소속 국가 및 비소속 국가의 에너지 소비량 예상 추정치 [2]



- 경제협력 개발기구 (OECD) 소속 국가 및 비소속 국가의 에너지 소비 추이를 예측한 보고서에 따르면, 2050년 에너지 소비량은 2010년 대비 최대 2.6배 증가할 것으로 예상하였고, 향후 기술 산업의 발전과 더 많은 에너지 수요의 증가에 따른 많은 온실가스 배출이 예견되는 상황[2]

- 이산화탄소는 2010년 기준 전 세계 온실가스 발생량 중 76% 차지하고[3], 대기 중 농도는 산업화 이전 280ppm에서 360ppm으로 상승하여[4] 지구온난화에 상당한 기여하고 있음
- 이에 따라, 각국에서는 탄소 배출량을 0으로 만드는 ‘탄소중립’의 장기적인 계획을 세워 탄소배출에 따른 기후변화에 대응하고 있음
- 특히 탄소 포집, 활용 및 저장 기술 (Carbon Capture, Utilization and Storage: 이하 CCUS)은 대기 중이나 배출가스에 포함된 이산화탄소를 선택적으로 포집하여 산업에 활용하거나 지하에 매설하는 방식으로 탄소를 장기간 안전하게 저장할 수 있어, 기존 화석연료 기반의 내연기관이나 화력발전을 사용하면서도 이산화탄소 배출을 획기적으로 저감할 수 있어 가장 현실적인 기술로 평가되고 있음
- 2020년 국제 에너지 기구 (International Energy Agency, 이하 IEA)에서 발간한 CCUS in Clean Energy Transition Report[5]에 소개된 지속 가능한 환경 발전계획에 따르면 2070년까지 100억톤의 이산화탄소 포집이 필요하며 그중 90%는 저장, 나머지 8%의 이산화탄소는 다른 활용방안을 이용하여 대기 중의 이산화탄소 포집의 필요성을 제시함에 따라 탄소중립을 위한 CCUS 활용에 힘이 실리고 있는 상황


2 Net-Zero에 도달하려는 캐나다 정부의 계획 ● ● ●

가. 2050년까지 Net-Zero 달성하기 위한 주요 계획

- 캐나다 정부는 2021년 초 캐나다 순배출량 책임법을 개발하고 통과
- 이 법은 2030년과 2050년에 대한 캐나다의 기후 목표를 법률로 명시하고 정부가 캐나다의 2030년 목표를 달성하기 위한 배출 감소계획을 수립하도록 요구

- 퀘벡, 뉴펀들랜드 및 래브라도, 밴쿠버, 해밀턴, 토론토, 몬트리올, 샬럿타운, 할리팩스를 포함한 많은 도시와 여러 주에서도 자체적으로 순 제로(net-zero) 계획을 발표
- 🏢 캐나다의 많은 석유 및 가스 생산업체는 자체적으로 순 제로(net-zero) 계획 발표
- Canadian Natural Resources, Cenovus Energy, Imperial, MEG Energy 및 Suncor Energy(총체적으로 캐나다 오일샌드 생산량의 약 90%를 차지함)는 각각 2050년까지 오일샌드 작업에서 순제로 배출량을 달성하기 위해 노력
- 운송 부문과 석유 및 가스 부문의 배출량은 각각 캐나다 전체 배출량의 25%와 26%를 차지
- 🏢 2021년 11월, 독립 Net-Zero 자문기구는 환경기후 변화부 장관과 천연자원부 장관으로부터 석유 배출 상한선에 대한 정량적 5개년 목표의 개발을 알리는 지침 원칙에 대한 조언을 제공하도록 요청
- 2021년 10월 Wilkinson 장관은 2030년까지 전 세계 메탄 배출량을 2020년 수준보다 30% 줄이는 것을 목표로 하는 Global Methane Pledge에 대한 캐나다의 지원을 발표했으며 2030년에는 더 넓은 캐나다 경제 전반에 걸쳐 메탄 배출량을 줄이고 규제를 개발하기로 약속. 2030년까지 석유 및 가스 메탄 배출량을 2012년 수준보다 75% 감축하는 목표
- 🏢 2021년 11월 글라스고우에서 열린 COP26에서 트뤼도 총리는 세계 무대에서 석유 및 가스 부문의 배출량을 상한선 및 감축하고 2035년까지 캐나다에서 순배출 전력을 달성하겠다는 캐나다의 약속을 발표
- 🏢 2021년 6월, 정부는 2035년까지 캐나다에서 판매되는 자동차의 100%가 탄소배출 제로가 되도록 하겠다는 약속을 발표함으로써 주요 경제국에 합류
- 🏢 2020년 12월의 강화된 기후 계획에서 정부는 북미에서 가장 야심찬 경량 차량 연비 표준을 준수하고 대형 차량에 대한 야심찬 연비 표준을 개발하기로 약속
- 🏢 환경기후 변화부 장관은 2022년 3월 말까지 국가의 2030 배출량 감축 계획을 수립할 예정

나. 캐나다 순배출량 책임법(Canadian Net-Zero Emissions Accountability Act)

 2021년 6월 29일에 법률로 제정된 캐나다 순배출량 책임법(Canadian Net-Zero Emissions Accountability Act)은 2050년까지 순배출량 제로 달성을 위한 캐나다의 약속을 법률로 명시

- 2050년까지 순 온실가스 배출량 0을 달성하기 위한 캐나다 정부의 약속을 법률로 명시하고 이를 이행하기 위한 책임성과 투명성의 틀을 제공
- 이 법은 5개년 국가 배출량 감축 목표를 설정하고 각 목표를 달성하기 위해 신뢰할 수 있는 과학 기반 배출량 감축 계획을 개발하기 위해 법적 구속력이 있는 프로세스를 설정
- 파리협정에 따라 2030년 온실가스 배출 목표를 2030년까지 2005년 수준보다 40~45% 감소시키는 캐나다의 NDC(국가 결정 기여)로 설정
- 이 법은 또한 10년 앞서 2035년, 2040년 및 2045년에 대한 국가 배출량 감소 목표를 설정하도록 요구
- 각 목표를 달성하기 위해 신뢰할 수 있는 과학기반 배출 감소 계획 필요


 각 배출 감소 계획에는 다음이 포함되어야 함

- 계획과 관련된 연도의 온실가스 배출 목표
- 캐나다의 가장 최근 온실가스 배출 인벤토리 요약(국가 인벤토리 보고서) 및 캐나다가 국제 기후변화 공약에 따라 제출한 계획과 관련된 정보
- 캐나다 정부가 목표를 달성하기 위해 취하려는 주요 배출 감소 조치에 대한 설명
- 기후 변화에 대한 캐나다의 국제적 약속이 계획에서 어떻게 고려되는지에 대한 설명
- 관련 부문별 전략에 대한 설명


- 연방 정부 운영을 위한 배출 감소 전략에 대한 설명
- 구현을 위한 예상 일정
- 조치 및 전략으로 인한 온실가스 배출 예측
- 캐나다의 주 및 기타 정부와의 주요 협력 조치 또는 협정에 대한 요약


2030년 배출량 감축 계획

- 2030 배출 감소 계획은 캐나다가 2030년까지 온실가스 배출을 2005년 수준보다 40-45% 줄이는 방법을 개략적으로 설명
- 이 계획에는 2026년 온실가스 잠정 목표도 포함되며, 이는 현재와 2030년 사이의 중간점검 역할을 할 것임

 이 법은 환경기후변화부 장관이 왕실 승인 후 6개월 이내에 2030 배출량 감축 계획을 수립하고 이 기한을 90일 연장할 수 있도록 요구

- 환경 기후변화부 장관은 협력사와 이해관계자가 가능한 한 많은 시간을 계획에 제출할 수 있도록 2030년 온실가스감축 계획 수립 시한을 2022년 3월 29일까지로 연장

 이 법은 캐나다 정부가 실행할 수 있는 조치 및 부문별 전략을 포함하여 목표 및 배출 감소 계획에 대한 독립적인 조언을 제공할 Net-Zero 자문기구를 입법으로 신설

 이 법에 따르면 환경 및 지속 가능한 개발국장은 최소 5년에 한 번 정부의 기후 변화 완화 조치 이행을 조사하고 보고해야 함

- 이 법은 재무부 장관이 환경 및 기후 변화부 장관과 협력하여 연방 부처와 기업이 기후변화와 관련된 재정적 위험과 기회를 관리하기 위해 취한 주요 조치를 요약한 연례 보고서를 발표할 것을 요구

다. Net-Zero 자문기구

🏢 Net-Zero 자문 기구(NZAB)는 2021년 2월에 출범

🏢 관련 경험과 지식을 한데 모은 최대 15명의 회원으로 구성된 자문기구는 캐나다의 순제로 목표 달성을 지원하기 위해 환경 및 기후 변화 장관에게 독립적인 조언을 제공

- 이를 위해 자문 기관은 기반 시설의 단계적 변화를 지원하는 경제적, 환경적으로 유익한 투자를 장려하기 위한 정책 조치에 대한 조언을 포함하여 캐나다 경제 전반에 걸쳐 장기적인 저탄소 경제 성장을 촉진하기 위한 조치에 대한 조언을 제공

- 자문위원

- Marie-Pierre Ippersiel (Co-chair) / President and CEO, PRIMA Quebec
- Dan Wicklum (Co-chair) / President and CEO, The Transition Accelerator
- Catherine Abreu / Executive Director, Climate Action Network Canada
- Kluane Adamek / Yukon Regional Chief, Assembly of First Nations
- Linda Coady / Executive Director, Pembina Institute
- Simon Donner / Professor, Department of Geography, University of British Columbia
- Sarah Houde / CEO, Propulsion Québec
- Gaetan Thomas / CEO, Conseil Économique du Nouveau-Brunswick
- Kim Thomassin / Executive Vice-President and Head of Investments in Québec, and Stewardship Investing, Caisse de dépôt et placement du Québec (CDPQ)
- John Wright / Former President Saskpower
- Yung Wu / CEO, MaRS Discovery District

자문기구는 환경기후변화부 장관과 연 3회 이상 만나 업무에 대한 최신 정보와 임시 자문을 제공

- 적어도 매년 한 번, 자문기구는 조사 전반에 걸친 분석을 종합하고, 참여에서 들은 내용을 요약하고, 유망한 순 제로 경로에 대해 장관에게 조언을 제공하는 공개적으로 이용 가능한 보고서 출간

2021년 11월, 환경기후 변화부 장관과 천연자원부 장관은 Net-Zero 자문기구에 석유 및 가스 부문의 배출량 상한선에 대한 정량적 5개년 목표의 개발을 알리는 지침 원칙에 대한 조언을 제공할 것을 요청

라. Net-Zero 액셀러레이터 펀드

캐나다 계획의 일환으로 캐나다 정부는 80억 달러 규모의 Net-Zero Accelerator Fund를 시작하여 캐나다가 국내 온실가스 배출량을 줄일 수 있도록 하는 프로젝트를 지원

- 예를 들어, Algoma Steel Inc.는 펀드로부터 최대 4억 2천만 달러를 받아 운영을 개선하고 Sault Ste.에 있는 시설에서 석탄 화력 제강 공정을 단계적으로 중단
- 이는 2030년까지 500개의 일자리를 창출하고 연간 300만 톤 배출량을 감소시킬 것으로 전망
- NZA(Net Zero Accelerator) 이니셔티브는 깨끗하고 장기적인 성장을 위해 경제를 변화시키는 데 도움이 되는 캐나다의 순 제로 목표를 지원
- 온실가스 배출량을 낮출 수 있는 프로젝트에 투자함으로써 캐나다는:
 - 2030년까지 배출량을 실질적으로 줄임으로써 모범을 보임
 - 2050년까지 순 제로 경제 달성이라는 목표 달성
 - 장기적인 지속 가능성과 경쟁 우위를 보장하는 핵심 부문의 변화
 - 경제 전반에 걸쳐 청정기술 채택 가속화
 - 배터리 혁신 및 산업 생태계 구축

대형 방출기의 탈탄소화

- 2030년까지 이들 산업의 GHG 발자국을 극적으로 줄이고 2050년까지 순 제로 경로를 만들 청정 기술 및 프로세스 채택에 대한 투자를 통해 캐나다 최대 산업 배출자의 탈탄소화 및 지속 가능한 성장 지원
- 탄소 포집, 활용 및 저장(CCUS) 기술의 채택, 에너지 효율성 개선, 공정 및 장비의 전기화, 화석연료 사용 목표

청정기술과 산업 변혁

- 다음을 통해 경쟁력 있고 지속 가능한 저탄소 경제로의 캐나다 전환 가속화:
 - 자동차, 항공우주, 농업 및 농식품과 같은 주요 산업 부문의 녹색 변혁 지원
 - 캐나다에서 강력한 청정기술 부문을 개발하고 성장시키기 위해 혁신적인 순 제로 기술에 대한 수요의 세계적인 변화를 활용

마. 2021년 예산안 중 혁신 및 산업 혁신 지원

Strategic Innovation Fund는 2017년 출범 이후 캐나다에서 기업의 투자, 성장 및 혁신 지원

- 2021년 예산은 2021-22년에 시작하여 7년에 걸쳐 72억 달러를 현금 기준으로 전략적 혁신 기금에 제공하고 5억 1,140만 달러를 계속 투자
- Strategic Innovation Fund의 Net Zero Accelerator에 대한 자금을 늘리기 위해 7년에 걸쳐 50억 달러 투입
- Net Zero Accelerator를 통해 중공업을 탈탄소화하고 청정기술을 지원하며 의미 있는 도움이 될 프로젝트에 대한 지원을 확대
- Net Zero Accelerator가 탈탄소 프로젝트를 촉진하고 청정기술을 확대하며 캐나다의 산업 변혁을 가속화함으로써 캐나다의 온실가스 배출량을 줄이는 데 도움이 될 프로젝트를 지원하기 위해 7년 동안 80억 달러 투입

- 혁신을 통한 캐나다의 제로 트랜스포메이션 가속화

- Net Zero Accelerator는 탄소 배출량이 많은 탄소배출을 제거하고 철강 및 알루미늄에서 시멘트로의 주요 부문을 전환하고 경제 전반에 걸쳐 청정기술의 채택을 가속화함으로써(예: 자동차 및 항공우주 부문) 혁신적인 net-Zero 전환을 촉진
- 2021년 예산은 2021-22년부터 7년 동안(현금 기준) 50억 달러를 Net Zero Accelerator에 제공할 것을 제안
- 강화된 기후 계획에서 발표된 Net Zero Accelerator에 대한 지원을 바탕으로 이 자금은 정부가 캐나다 경제 전반에 걸쳐 국내 온실가스 배출량을 줄이는 데 도움이 되는 프로젝트에 최대 80억 달러의 지원을 제공
- Net Zero Accelerator는 공해를 줄이고, 청정 기술 혁신을 촉진하고, 주요 투자를 유치하고, 좋은 중산층 일자리를 창출하고, 주요 공급망의 개발을 촉진하여 캐나다 산업체와 근로자가 저탄소 이점을 사용하여 경쟁하고 승리할 수 있도록 노력

청정 기술 프로젝트 추진

- 캐나다 청정기술 부문은 청정기술 혁신의 글로벌리더이지만 (11개 기업이 Cleantech Group의 2021 Global Cleantech 100 목록에 선정, 미국 다음으로 많은 국가임), 상업적 규모 확대, 수출 및 산업 채택. 캐나다 기업은 캐나다의 작은 국내 시장에서 규모를 확장하고 충분한 환자 성장 자본에 접근하는 데 어려움을 겪고 있음
- 혁신적인 청정기술 프로젝트, 특히 대규모 프로젝트는 종종 전통적인 프로젝트 파이낸싱 범위를 벗어난 규모와 시간 범위에 대한 투자가 필요
- 예산 2021은 이러한 프로젝트에 대한 민간 부문 투자를 유치하기 위해 2021-22년부터 5년에 걸쳐 현금 기준으로 최대 10억 달러를 제공

성장하는 무공해 기술 제조

- 더 많은 국가가 2050년까지 순배출 제로 달성을 약속함에 따라 무배출 기술에 대한 수요 증가
- 2021년 예산은 무공해 기술을 제조하는 기업에 대한 일반 기업 및 소규모 기업 소득세율을 50% 인하(인하는 2022년 1월 1일에 발효되며 2029년 1월 1일부터 단계적으로 폐지되고 2032년 1월 1일까지 완전 폐지)
- 캐나다 재무부는 환경부와 협의하여 적합한 신기술을 정기적으로 검토

캐나다의 무공해 기술 제조 사례

- 풍력 터빈, 태양 전지 패널 및 수력 발전 설비에 사용되는 장비 제조
- 지열 에너지 시스템 제조
- 전기 자동차, 버스, 트럭 및 기타 차량 제조
- 전기 자동차용 배터리 및 연료 전지 제조
- 폐기물에서 바이오 연료 생산
- 녹색수소 생산
- 전기차 충전 시스템 제조
- 특정 에너지 저장 장비 제조

무공해 차량 충전 및 연료 공급

- 2016년부터 정부는 3억 7,640만 달러를 투자했으며 전국의 파트너와 함께 6,000개의 충전소를 건설하기 위한 작업에 착수
- 2021년 예산은 2021-22년에 시작하여 5년에 걸쳐 5,610만 달러를 제공할 예정, 남은 상각액은 1,630만 달러이고 연간 1,300만 달러는 계속 진행 중

- Measurement Canada는 미국과 같은 국제 파트너와 협력하여 소매 ZEV 충전소 및 주유소에 대한 일련의 코드 및 표준을 개발하고 구현, 표준을 준수하는 데 필요한 인증 및 검사 프레임워크도 포함

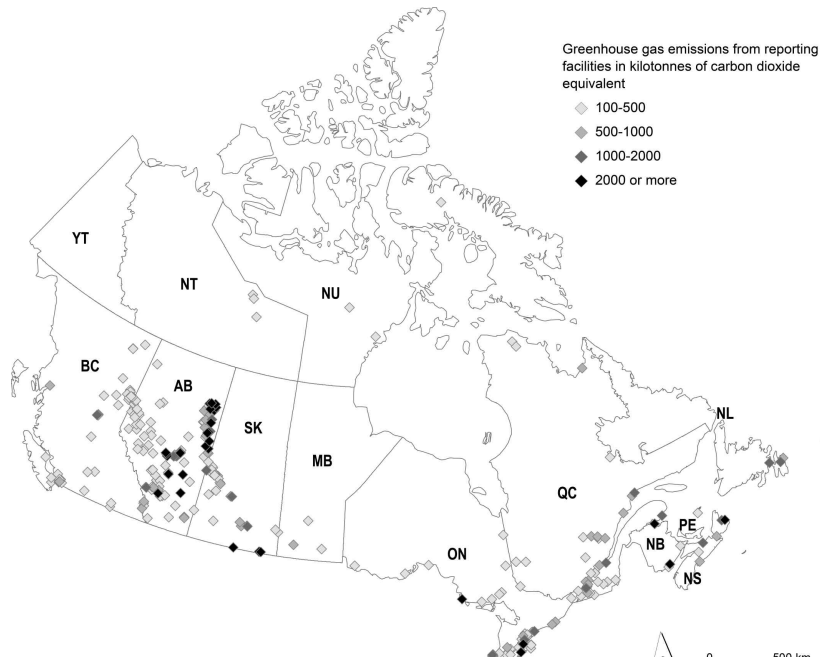
산림기반 바이오 경제에 대한 투자

- 목재 기반 혁신은 캐나다의 저탄소 경제 발전을 주도. 바이오 연료, 바이오 플라스틱, 건축 자재 등에 사용
- 예산 2021은 2021-22년부터 2년에 걸쳐 캐나다 천연 자원부에 5,480만 달러를 제공하여 새로운 산림 기반 경제 기회에 대비한 지방 자치 단체 및 지역 사회 조직과의 협력을 포함하여 산림 산업 혁신에 대한 투자 프로그램의 역량을 강화

청정 산업의 미래에 대한 투자

- 캐나다 온실가스 배출량의 거의 30%는 캐나다 전역의 비교적 소수의 대규모 산업시설에서 발생
- 이러한 시설의 탈탄소화는 실현될 경우 캐나다를 전 세계적으로 청정에너지 및 청정기술 솔루션을 제공하는 리더로 자리매김할 경제적 및 환경적 기회
- 산업배출을 줄이기 위해 탄소 포집, 활용 및 저장(CCUS)과 저탄소 연료 기술에 투자
- 탄소 포집, 활용 및 저장 : 캐나다는 현재 매년 4메가톤의 탄소를 포집
- Alberta Carbon Trunk Line과 같은 기반 시설과 노바 스코샤의 CarbonCure와 같은 혁신적인 회사를 포함, 앨버타와 서스캐처원은 고배출 시설의 탄소를 효율적으로 포획, 운송, 저장 또는 사용할 수 있는 새로운 '허브'를 구축

〈그림2〉 2018년 캐나다 대형 시설의 온실가스 배출량



탄소 포집, 활용 및 저장 기술의 발전

- 캐나다는 이미 수백만 톤의 CO₂를 포집 및 저장한 국내 프로젝트를 통해 CCUS의 리더임
- 2021년 예산은 탄소 포집, 활용 및 저장의 상업적 실행 가능성을 향상시킬 연구, 개발 및 시연을 지원하기 위해 캐나다 천연자원부에 150만 달러의 잔여 상각을 포함하여 2021-22년에 시작하여 7년에 걸쳐 3억 1,900만 달러를 제공

브리티시 컬럼비아의 혁신 및 청정에너지 센터 지원

- 2018년에 브리티시 컬럼비아주 정부는 2007년 수준을 기준으로 2030년까지 온실가스 배출량을 40% 줄이려는 주의 목표를 달성하기 위한 계획인 CleanBC를 발표
- CleanBC 계획의 일환으로 브리티시 컬럼비아는 최근 탄소 포집, 활용, 저장, 청정 연료를 포함한 청정기술의 연구, 개발 및 시연을 조정하기 위해 새로운 혁신 및 청정에너지 센터를 설립할 계획
- 정부는 브리티시 컬럼비아 정부와 협력하여 BC주에서 청정기술의 규모 확대 및 상업화를 촉진하기 위해 혁신 및 청정에너지 센터를 설립하는 데 최대 3,500만 달러를 제공

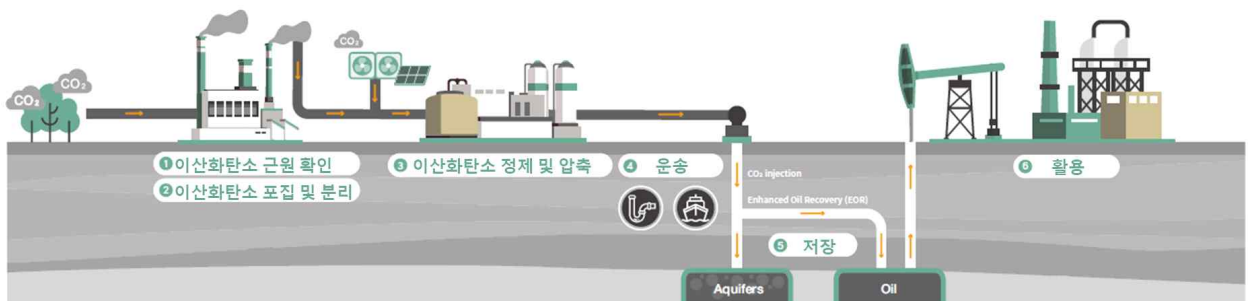
3

CCUS 개관

CCUS는 지속 가능한 저탄소 에너지 사회로의 전환에 있어 핵심적인 기술로 아래와 같이 포집, 활용, 그리고 저장의 세 가지 기술로 분류됨

- 포집(Capture): 화석연료 기반 에너지를 대규모로 사용하는 시설에서 발생된 가스에서 이산화탄소를 분리하여 포집하는 기술
- 활용(Utilization): 포집된 이산화탄소를 사용하여 원유 회수 증진 (Enhanced Oil Recovery, 이하 EOR) 공정에 활용하거나 변환시켜 메탄올, 플라스틱, 콘크리트 같은 물질을 생산하는데 활용하는 기술
- 저장(Storage): 운반된 이산화탄소를 다양한 지질 저장소 (염류 대수층, 고갈된 가스전 및 유전, 채광 불가능한 탄층)에 영구적으로 저장하는 기술

〈그림3〉 일반적인 CCUS 개념도 [5]

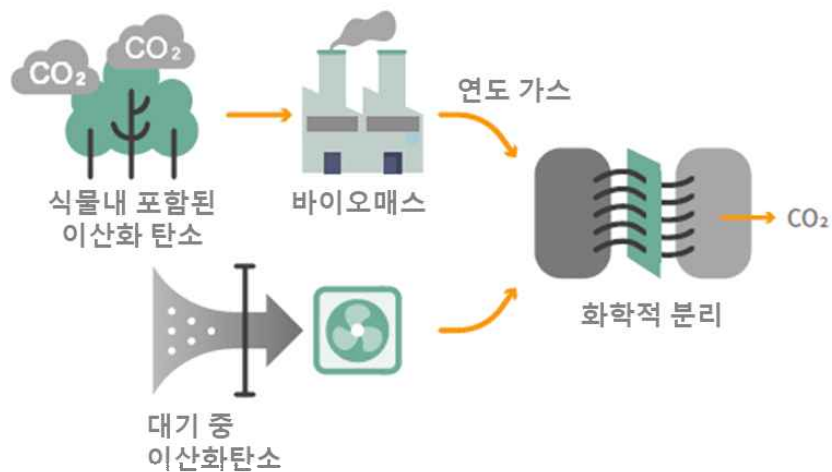


포집(Capture) 기술의 예

- 이산화탄소를 포집은 바이오매스를 이용한 BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage)와 공기중의 이산화탄소를 직접 포집하는 DACCS (Direct Air Capture with Carbon Capture and Storage) 방법으로 나누어짐
- BECCS는 식물이 광합성과정으로 포집한 이산화탄소를 내재한 상태에서 연소과정을 통해 에너지를 발생할 때 발생하는 이산화탄소를 포집하는 방법으로, 바이오매스를 이용하면 에너지도 얻고 추가적으로 외부에 이산화탄소도 줄이는 효과를 갖음

- DACCS는 액체 용제나 고체 흡착제를 사용하여 대기에서 직접 이산화탄소를 포집하는데, 이 과정에서 상당한 양의 에너지가 사용되는 단점이 있음 [5]
- BECCS는 이산화탄소 포집 및 보관 비용이 \$50-200달러/tCO₂, DASCSS는 약 두배 정도 비용이 들것으로 예상됨 [5]

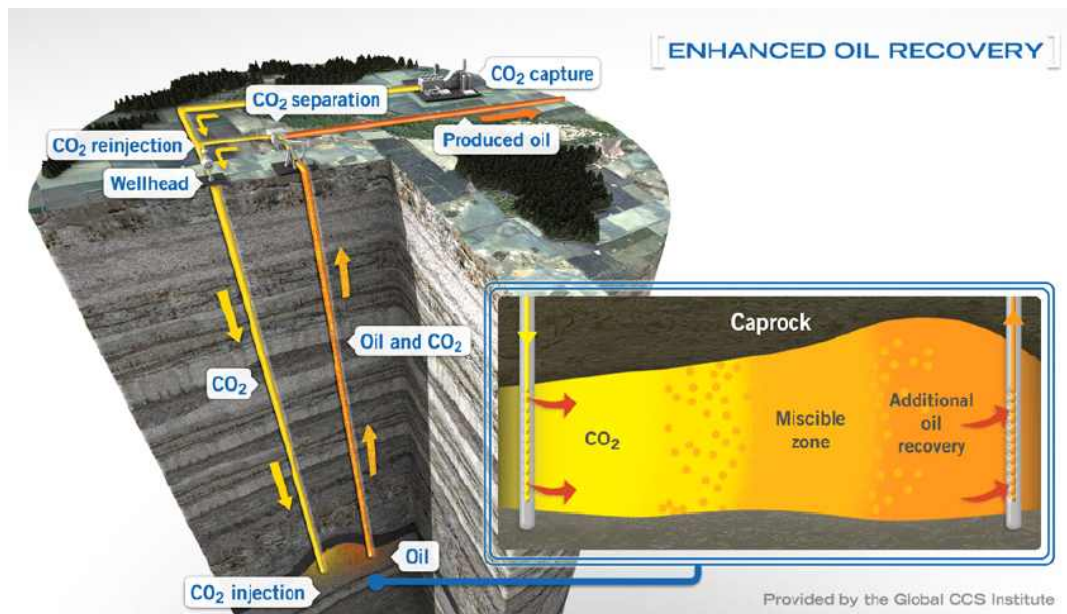
〈그림 4〉 이산화탄소 포집(Capture) 기술 (BECCS, DACCS) 모식도 [5]



활용(Utilization) 기술의 예

- EOR은 포집된 이산화탄소를 활용하는 대표적인 방법으로 채굴로 인해 압력이 낮아진 유정과 가스정에 이산화탄소 주입을 통해 내부압력을 증가시켜 원유 및 가스 채취율을 높이는 기술임. 이는 자원 회수율을 높일 뿐 아니라 이산화탄소를 유정 및 가스정에 봉인하여 저장시킬 수 있는 효율적인 기술로 평가됨
- 지표면 하부 700m 이상의 깊이에서는 이산화탄소가 초임계 상태가 되어 암석 지층에서 원유와 가스를 방출시키고, 또한 원유의 점도를 줄여 오일 생산을 용이하게함. 이는 특히 점도가 높은 증유의 경우 뜨거운 수증기를 이용하여 점도를 낮추어 생산하는 방식을 취하는데 이산화탄소를 이용하면 수증기의 열을 이용할 필요가 없어지게 되어 에너지 절약 측면에서도 효율적임[6]

〈그림 5〉 이산화탄소를 활용한 EOR 개요 [7]

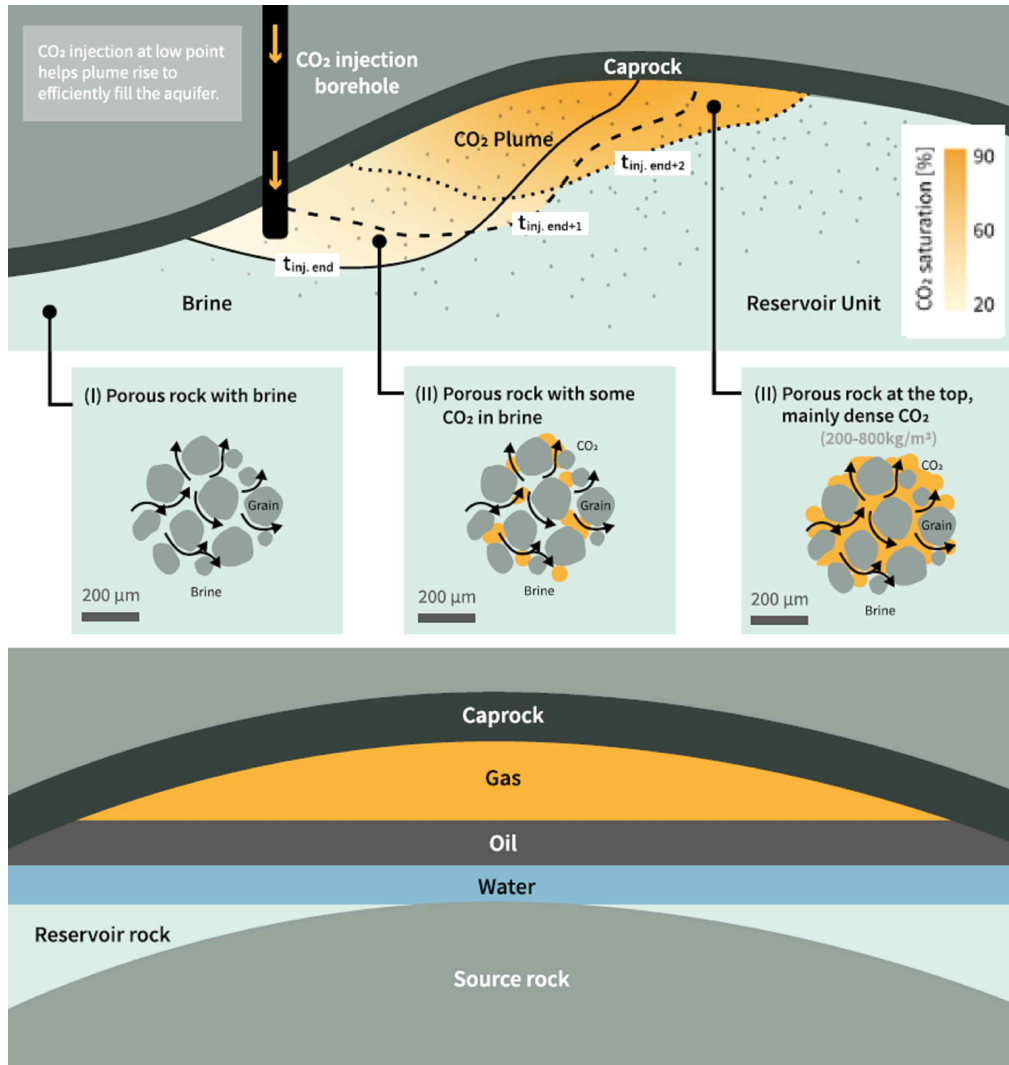


- EOR에 활용된 이산화탄소는 고갈된 유정 및 가스정에 수천년간 저장할 수 있다는 장점을 지니고있어 탄소 저감에 핵심적인 기술임
- 원유시추 생산성 증대를 위한 EOR은 열을 이용한 방법, 화학물질을 이용한 방법, 폴리머를 이용하는 방법이 있는데 이산화탄소를 이용한 EOR은 이산화탄소를 저장할 수 있는 장점이 있지만, 다른 방법 대비 상대적으로 높은 자본비용으로 인한 초기 투자비용 회수 기간 및 이산화탄소 조달 기술에 제한이 있음

저장(Storage) 기술의 예

- 염수 대수층(saline aquifer)은 다공성 암석에 염수가 함유된 지질학적인 특징을 가지고 있는데 이는 불투과성 층인 캡록(Caprock) 아래 있는 퇴적암에 위치해 있음 (그림 6)

〈그림 6〉 염수 대수층에 이산화탄소 주입에 따른 암석의 반응과정을 나타낸 모식도 [5]



- 일반적으로 1km이상의 깊이에서 발견되는 이 층은 전 세계에서 발견되는데, 이 층에 이산화탄소를 주입하면 영구적으로 보관할 수 있는 지역으로 평가됨
- 발전소 및 산업시설에서 포집된 이산화탄소는 염수 대수층에 주입하여 영구적으로 봉인하거나 원유 및 가스 채굴시설의 원유 회수 증진 (Enhanced Oil Recovery, 이하 EOR) 공정에 사용함. 염수 대수층은 다공성 암석과 염수로 이루어져있는데, 이 지층에 이산화탄소를 주입해서 암석과 이산화탄소 화학반응을 통한 광물 탄산화를 통한 영구적인 이산화탄소 저장이 가능함

- 이산화탄소를 200~800kg/m³의 밀도로 가압해서 이 층에 주입하게되면, 이 층에 있던 염수에 용해되어 산성화되고 수만년 이상 장기간 보관 시 이산화탄소는 다공성 암석과 반응하여 분필 같은 형태의 암석 (Chalk Stone)으로 변하게 됨 (그림 7)

〈그림 7〉 White Chalk Stone [8]



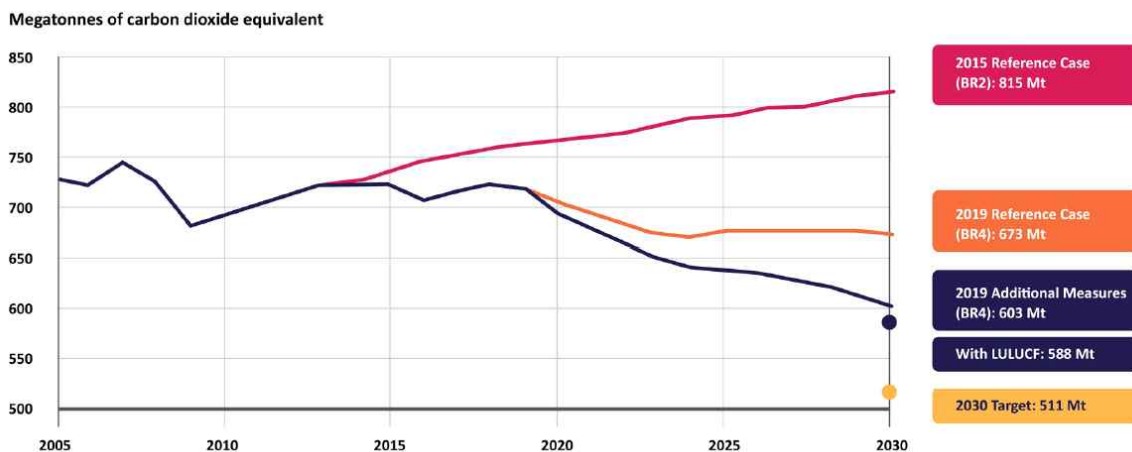
- 산성화된 염수는 주변 암반에 영향을 주어 암반의 강도를 취약하게할 가능성이 있는데, 이는 대수층에 저장된 이산화탄소의 누출에 대한 잠재적인 위험 요소임. 이산화탄소나 산성화된 염수의 누출은 식수 및 토양의 오염을 일으키게 되기 때문에, 이산화탄소가 용해된 염수의 상태, 주입지점 지질학적 상태, 이산화탄소 주입 시 및 주입 후 누출 상태 모니터링의 중요성이 요구됨

4

캐나다 CCUS 기술개발 동향 및 현황 개관

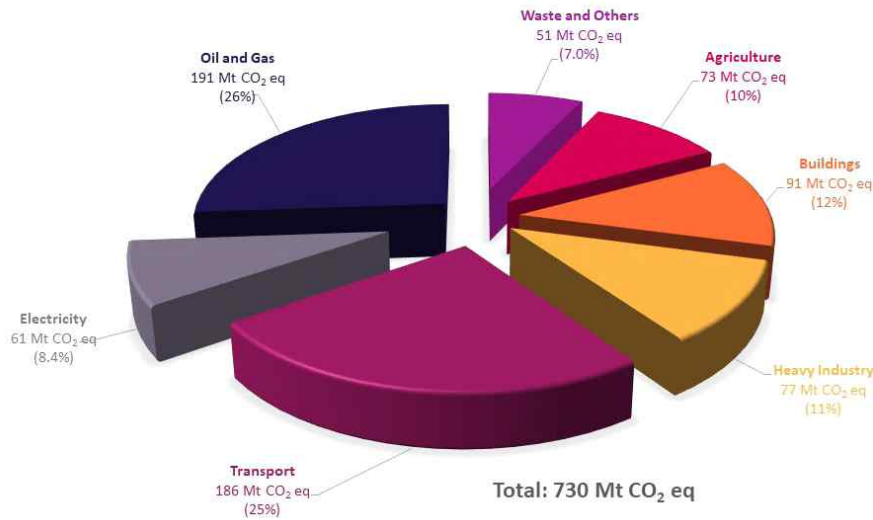
- 캐나다 정부는 2050년 탄소 배출량 제로화 (Net Zero) 달성을 위해 캐나다 전역에 CCUS 지원 의사를 밝히며, 2021년 연방정부 예산 중 3.19억 캐나다 달러 (약 3천억원)를 향후 7년간 CCUS 연구개발에 투자계획 발표함[9]
- 캐나다 정부에서 발표한 국가 온실가스 인벤토리 보고서 (National Inventory Report)에 따르면 2019년 캐나다 온실가스 배출량은 운송과 화석연료 사용 증가로 인해 등가 이산화탄소 배출량 기준 기존 700~720 CO₂eq Mt 대비 730 CO₂eq Mt으로 증가한 것으로 보고되었음[10]
- 지구 온난화에 따른 기후 변화에 대응하기위해 캐나다 정부는 온실가스 배출 감소를 목표로 2030년까지 연간 5억 1,100만 톤 CO₂eq 으로 줄이는데 초점을둠 (그림 8)

〈그림 8〉 캐나다의 온실가스 배출량 및 저감 목표 추정치 [11]



- 2019년 캐나다 내 주요 온실가스 배출은 석유 및 가스 부문에서 전체 배출량 대비 26% (1억 9,100만톤), 운송 부문에서 25% (1억 8천 6백만톤)을 차지하고 있으며, 산업에서 발생하는 대량의 이산화탄소 저감이 필요한 상황임(그림 9)

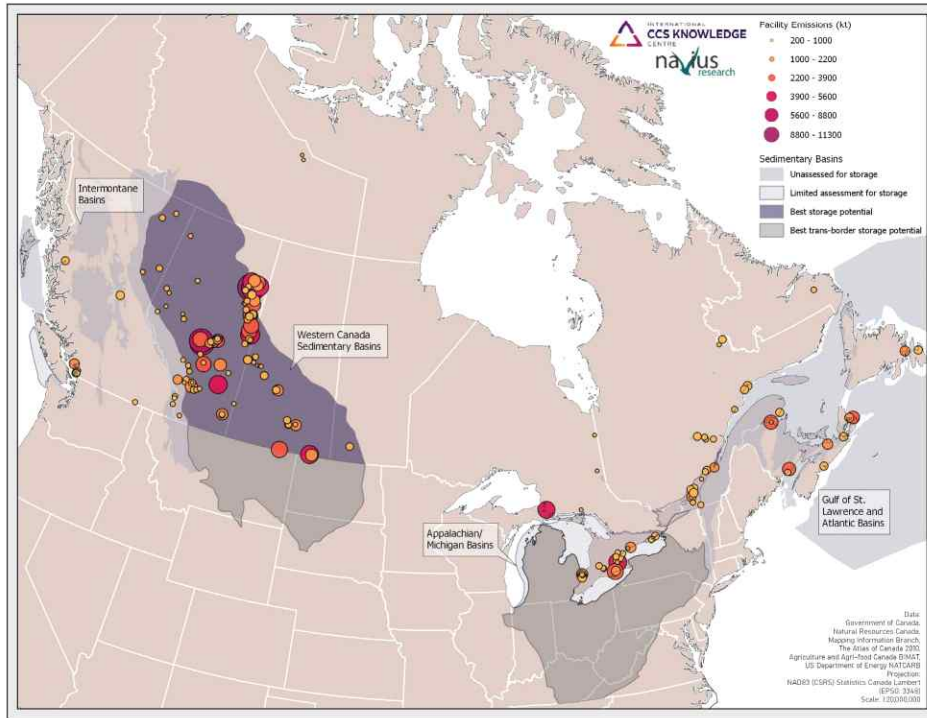
〈그림 9〉 캐나다 산업 부문별 온실 가스 배출량 [11]



캐나다는 대량의 퇴적 암반층을 보유하고 있어 대량의 이산화탄소를 안전하고 영구적으로 저장할 수 있는 지질학적 잠재력을 보유하고 있음

- 이 지형들은 고갈된 천연가스 및 원유 저장소, 염류 대수층에서 볼 수 있는데, 주로 캐나다 알버타 및 사스케추원 지역에 390 Gt, 동부의 퀘벡 및 미시간 분지 지역에서 8Gt의 이산화탄소를 저장할 수 있는 용량을 보유함 [11]
- 잠재적인 이산화탄소 매장 지역은 주로 알버타-사스케추원 지역 분포되어 있음과 동시에 산업으로부터 발생하는 이산화탄소 배출량도 많기때문에 캐나다 내 이산화탄소 포집 및 저장시설(Carbon Capture Storage, 이하 CCS)은 이 지역에 주로 설치되어 있음
- 사스케추원주에는 염류 대수층이 넓게 분포하여 이산화탄소의 지질학적 저장 잠재성이 큼
- 전 세계적으로 대규모 상업용 CCUS 시설이 18개가 가동되고 있으며 이 중 캐나다에서 7개의 시설을 보유하고 있음
- 캐나다의 CCUS 시설은 기존 유전에 원유시추 효율을 증대시키기 위해 이산화탄소를 유전에 주입시켜 가압하는데 활용하는 EOR 기술에 활용하거나 다공성 퇴적 암반층에 이산화탄소를 주입하는 방식을 이용하고 있음

〈그림 10〉 캐나다의 이산화탄소 잠재적 보유하고 및 주요 이산화 탄소 발생 지역 분포 [11]



〈표1〉 캐나다의 주요 CCUS 설비 현황 [12-14]

No	프로젝트 명	이산화탄소 포집량(Mtpa)	운영사	가동연도	저장 방식
1	Great Plains Synfuel Plant and Weyburn-Midale	3	Cenovus, Dakota Gas	2000	EOR
2	Alberta Carbon Trunk Line with North West Sturgeon Refinery CO2 Stream	1.2-1.4	Enhance Energy, Wolf Midstream	2020	EOR
3	Quest	1	Shell-Canada	2015	지하 매설 (염류 대수층)
4	Boundary Dam Carbon Capture and Storage	1	SaskPower	2014	EOR
5	Alberta Carbon Trunk Line (ACTL) with Nutrien CO2 Stream	0.3-0.6	Enhance Energy, Wolf Midstream	2020	EOR
6	Husky Energy Lashburn and Tangleflags CO2 Injection in Heavy Oil Reservoirs	0.2	Husky Energy	2012	EOR
7	Inventys and Husky Energy Veloxotherm Capture Process Test	0.1	Inventys Thermal Technologies Incorporated	2018	EOR

CCUS 프로젝트

- 2015년에 시작된 Shell 사의 Quest 프로젝트(그림 11a)는 캐나다에서 가장 큰 CCS 프로젝트로 에드먼튼 근교에 위치한 비투멘 (Bitumen) 제품 업그레이더에서 발생하는 이산화탄소를 포집하여 65km 북쪽으로 운반하여 지표면 2km아래 지하 저장고에 주입하고 있음
- 이 프로젝트는 연간 최대 108만톤의 이산화탄소를 포집하는 것으로 설계되었는데, 이 양은 업그레이더에서 발생하는 이산화탄소의 35%에 해당하는 수치임[15]

〈그림 11〉 Shell Canada사의 Quest프로젝트[15] 및 SaskPower사의 Carbon Capture and Storage설비 [16]



a. Quest 프로젝트 (Shell Canada) b. Boundary Dam CCS (SaskPower)

- 가장 최근 프로젝트인 Alberta Carbon Trunk Line (이하 ACTL)은 Sturgeon 정유공장과 Agrium 비료공장에서 발생된 이산화탄소를 포집하여 알버타 중심부에 있는 EOR 시설로 운송하기 위해 240km의 이산화탄소 배관설치하여 산업으로 발생된 이산화탄소를 직접 지하에 저장함 (그림 12)
- 알버타 주 정부는 상업용 탄소 포집 및 저장 부분 두 개의 프로젝트 (Quest, ACTL)에 총 12억 4천만 달러를 투자하여 알버타 주 내, 오일샌드 및 비료 생산에서 다량으로 발생하는 이산화탄소 배출량을 저감시켜 매년 276만톤의 이산화탄소량을 줄이는 것을 목표로 함

- CCUS는 정부의 초기 투자와 관계 법령 및 정책부분이 뒷받침 되어야하는 산업으로, 알버타 주정부에서는 CCUS 산업을 보조하기 위하여 투자와 관리에 대한 정책 부분을 관리하고 있음
- 지난 2011년, 알버타 주정부에서는 CCUS 산업 관련 안전하고 환경적으로 책임있는 규제 환경을 조성하기위해 산업, 학계, 환경 단체 및 정부 등에서 활동하고 있는 100명 이상의 글로벌 전문가로부터 알버타의 탄소 포집 및 저장 규제 법령에대해 평가 자문을 받아 CCUS산업에 대한 법령 보완에 준비해왔음 [19]

〈그림 12〉 ACTL 프로젝트 [18]




- 또한 사스케추완 지역의 Boundary Dam 프로젝트는 기존 석탄 화력 발전소를 CCS기술로 개조하여 연간 백만톤 이상의 이산화탄소 배출량을 줄이고 있음 (그림 11b)

II

이산화탄소 포집기술(Capture) 현황

1

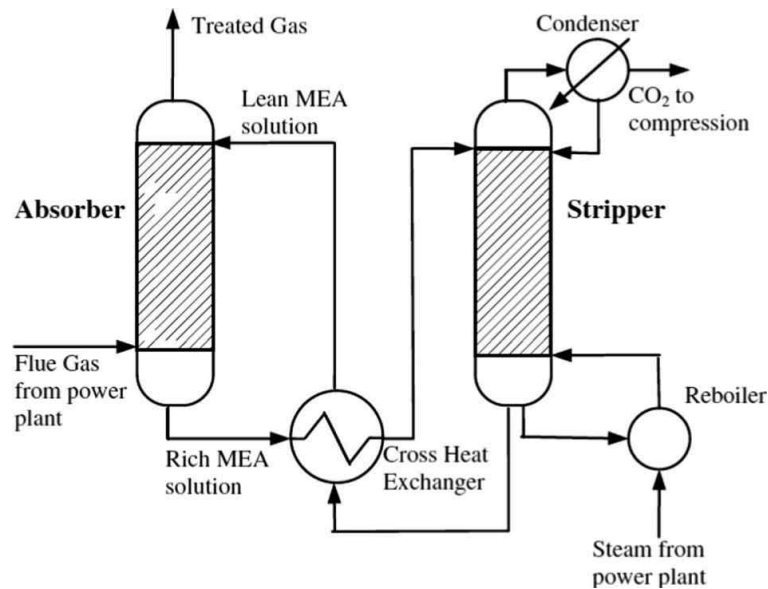
이산화탄소 포집기술(Capture)

 탄소포집(Carbon Capture)은 CCUS의 첫단계로서 유기물질의 연소과정에서 발생하는 CO₂를 분리/포집하는 기술

- 일반적으로 연소과정 후 배기가스내 포함된 CO₂를 포집하는 “연소 후 포집기술 (post-combustion capture)”, 연료를 연소전에 부분 산화나 개질과정을 거쳐 수소와 일산화탄소 (CO)를 생산하고, 수상가스 전환반응 (water gas shift reaction, WGSR)을 거쳐 수소와 CO₂로 구성된 혼합기체에서 CO₂를 포집하는 연소 전 포집기술 (pre-combustion capture), 연료를 대기중에서 연소하지 않고 산소환경에서 연소시킴으로써 수증기와 CO₂를 배출하여 고순도 이산화탄소를 포집하는 산소연소 포집기술(oxyfuel combustion capture)로 나뉨[19]
- 가장 널리 사용되는 포집공정으로는 화학적 흡수법 (Chemical Absorption), 물리적 분리법 (Physical Separation)이 있으며, 그 외에 산소 연소법 (Oxyfuel Combustion), 격막 분리법 (Membrane Separation)과 화학적 루핑법/칼슘 루핑법 (Chemical Looping/Calcium Looping)등이 연구개발 중에 있으며 파일럿 프로젝트를 통해 포집성능을 확인하고 있음
- 이들 탄소포집 기술은 CO₂ 배출공정의 종류 및 관련 산업의 규모에 맞는 경제성을 고려하여 선택, 적용하게 됨

가. 화학적 흡수법 (Chemical Absorption)

- ❏ 화학적 흡수법은 모노에탄올아민 (monoethanolamine, MEA), 메틸디에탄올아민 (methyldiethanolamine, MDEA) 등 아민류 유기 흡수제나 알칼리탄산염 (K_2CO_3) 등 무기 흡수제를 이용한 합성용매와의 화학반응을 통해 CO_2 를 포집하는 방법
- 용매가 CO_2 를 흡수하여 아민탄산염을 형성하는 공정부와 이를 고온가열하여 고순도 CO_2 를 분리한 후 포집하고 반응용매를 회수하는 공정부의 두 부분으로 이루어짐

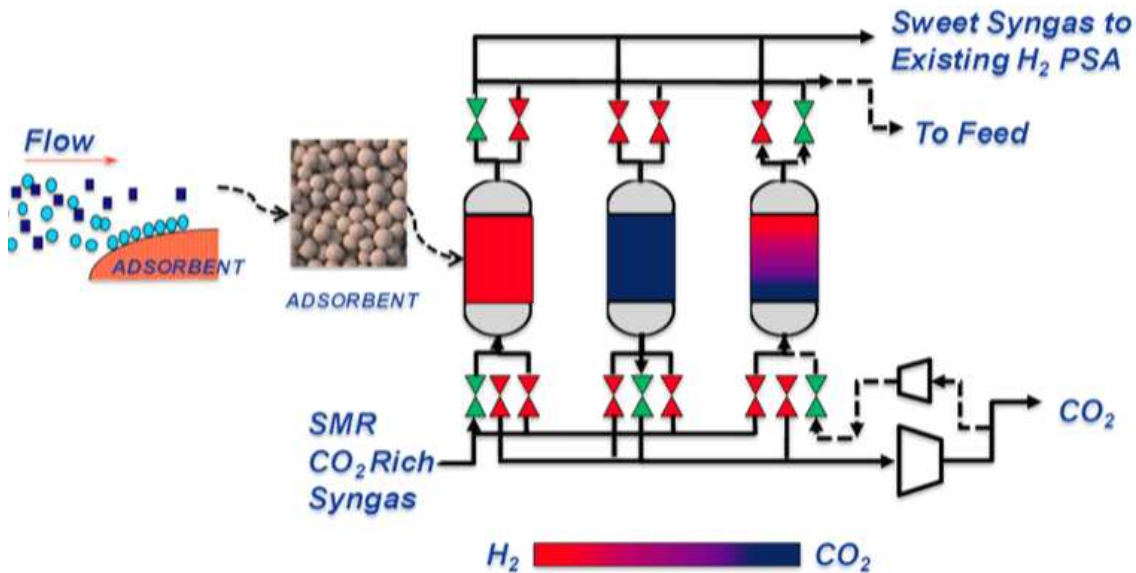


- 화학적 흡수법은 기술적 완성도 (Technology Readiness Level, TRL 9-11 단계)가 높아 가장 일반적으로 적용되는 탄소포집기술로서 화력발전, 천연가스등의 연료 생산 및 전환, 제철등 여러 산업 분야에서 탄소저감 프로젝트가 진행중에 있음[20]
- 캐나다에서는 화학적 흡수법을 기반으로 하여 석유회사인 셸 캐나다(Shell Canada)가 알버타주 북부의 애서베스카 (Athabasca) 오일샌드 개발지역에서 연간 백만톤규모의 탄소포집 및 저장 (CCS)을 목표로 진행하는 Quest 프로젝트와 사스캐처원주 화력발전 공기업인 사스크파워 (SaskPower)가 소유한 화력발전소에서 발생하는 CO_2 를 포집하는 바운더리담 (Boundary Dam) 프로젝트가 진행되고 있음

나. 물리적 분리법 (Physical Separation)

- 물리적 분리법은 그래파이트, 알루미나, 금속산화물등과 같은 흡착제 (adsorbent) 의 활성화된 표면에 CO₂를 흡착하거나, 메탄올기반의 렉티솔 (Rectisol®), 디메틸 에테르 기반의 셀렉솔 (selexol®)과 같은 물리용매를 사용하여 CO₂를 흡수한 후에, 가열 (temperature swing adsorption, TSA)이나 감압 (pressure swing adsorption, PSA)과정을 통해 이를 분리, 포집하는 기술임
- 물리적 분리법도 화학적 흡수법과 같이 탄소포집능력이 기술적으로 확립되어 (TRL9-11 단계) 여러 탄소저감 프로젝트에 운용되고 있으며, 주로 천연가스 생산공정이나 에탄올, 메탄올 및 수소 생산공정과 적용되고 있고 그림 13은 물리적으로 흡착된 CO₂를 PSA 공법으로 분리하는 과정을 보여주고 있음

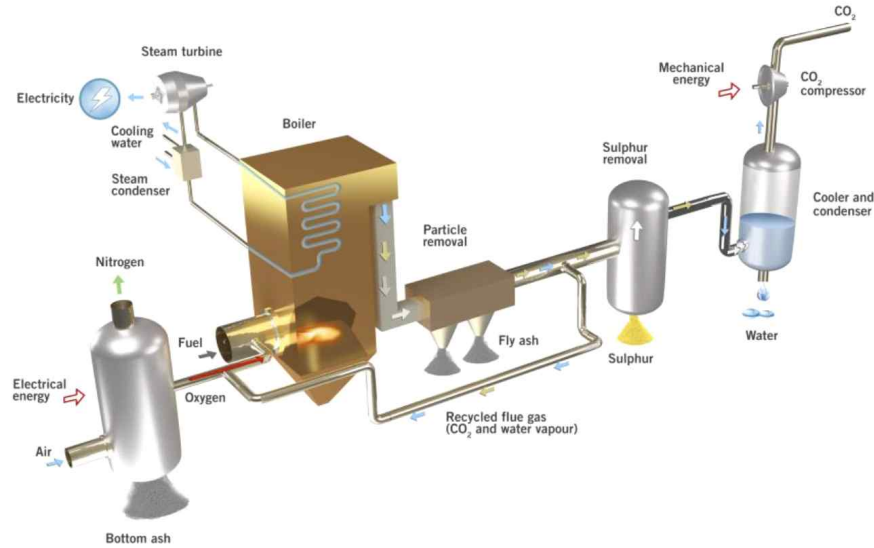
〈그림 13〉 물리적으로 흡착된 CO₂를 감압처리를 이용해 분리하는 PSA 공정 모식도 [22]



다. 산소 연소법 (Oxyfuel Combustion)

- 산소 연소법은 연료의 연소 시 일반 대기가 아닌 순수 산소환경에서 연소가 일어나면 연도가스(flue gas)가 주로 수증기와 이산화탄소만 배출하게 되어, 이후 탈수과정을 거쳐 비교적 용이하게 고순도의 CO₂를 포집하는 기술임 (그림 14 참조)

〈그림 14〉 산소 연소를 이용한 CO2 포집공정 모식도 [19]



- 하지만 이 방법은 공정에 사용되는 산소를 공기중에서 추출하여 공급하기 위한 냉각공기 분리장치(Cryogenic air separation unit, CASU)가 많은 에너지를 소모하는 경제적인 문제를 가지고 있음
- 따라서 산소 가스터빈이나 고압 산소 연소법등 에너지 효율을 최적화하기 위한 다양한 연구개발이 시도되고 있고 현재 기술성숙도는 대형 프로토타입이나 시연단계 (TRL 5-7)로 석탄발전과 시멘트 생산공정에서의 CO2 포집에 적용되고 있음

라. 격막 분리법(Membrane Separation)

- ⚙️ 격막 분리법은 CO2만을 선택적으로 투과시키는 폴리머나 무기질 격막을 사용하여 연소가스에서 CO2를 분리, 포집하는 기술
 - 격막 분리법은 공 정화나 천연가스 정제에 오랫동안 사용되어 온 기술이기 때문에 기술적 개념 확립
 - CO2 분리에 적용되는 경우, 이산화황과 질소산화물이 포함된 연소가스에 노출되는 가혹조건 하에서 장시간의 동작안정성과 수명을 확보해야하는 문제와 사용연료나 연소공정 조건에 맞는 격막을 개발하는 문제로 인해 현재는 개발된 격막물질에 대한 CO2/N2를 분리 성능을 시연과 업스케일링하는 단계 (TRL 6-7)에 있음


마. 칼슘 루핑법/화학적 루핑법 (Calcium Looping /Chemical Looping)


 칼슘 루핑법과 화학적 루핑법은 두 반응공정부로 구성

- 칼슘 루핑의 경우, 산화칼슘(CaO)을 흡착제로 사용하여 배기가스내의 CO₂와 반응시키게 되면 탄산칼슘 (CaCO₃)으로 전환되는데, 이를 두번째 고온 공정부에서 900oC 이상의 고온으로 가열하면 흡착제는 CaO로 재생되면서 첫번째 공정부로 회수되고 재생과정에서 배출되는 CO₂를 포집하는 기술임
- 화학적 루핑법은 산소 연소법에서 산소를 직접 공급하는 대신에 철이나 망간과 같은 금속을 산소운반체로 활용하여 연소과정의 산소공급을 담당하는 기술로서, 첫번째 공정부에서 금속을 산화시킨 후, 두번째 공정부에서 연료가 연소될 때 산소를 공급하여 수증기와 CO₂를 배출한 후 환원된 금속을 첫번째 공정부로 회수하여 재활용하게 됨
- 칼슘 루핑법은 반복된 반응/재생 과정에서 흡착활성저하 및 CaO 손실제어에 관한 연구개발이 진행되고 있지만 (TRL 5-6), 높은 CO₂ 포집성능으로 대형 플랜트에 상용화가 이루어질 것으로 예상되고있음

2

캐나다 이산화탄소 포집 실증 프로젝트

 캐나다는 원유매장량(오일샌드) 세계 3위, 천연가스(세일가스) 매장량 4위의 화석연료 자원보유국으로서 원료수출이 캐나다 무역에 가장 큰 비중을 차지하는 국가이지만, 한편으로 전세계적인 기후변화와 온실가스감축 노력에도 적극적으로 참여

 CCUS 기술 또한 초기부터 연구개발과 실증을 지원해 오고 있으며, 세계 최초의 대규모 화력발전 대상 상용 CCS 프로젝트로 사스캐처원 (Saskatchewan, SK) 주에서 진행되고 있는 Boundary Dam 3 프로젝트를 비롯하여, 2020년 기준 전세계 CCUS 실증프로젝트 중에 20% 정도가 캐나다에서 운영되고 있음 [13]

캐나다는 석탄 화력발전과 천연가스 기반의 화력발전, 난방, 수소생산으로부터 발생하는 CO2를 대상으로 하는 CCUS에 집중해 옴에 따라 실증프로젝트 또한 이들 지역을 중심으로 진행되어왔음

표 2는 캐나다에서 운영중인 탄소포집 실증프로젝트들을 보여주고 있음

〈표 2〉 캐나다내 탄소포집 실증 프로젝트

프로젝트	운영지역	시작년도	적용산업	포집용량 (백만톤/년)
ACTL* with North West Sturgeon Refinery	Redwater, AB	2020	수소생산	1.3 ~ 1.6
ACTL* with Nutrien's CO2 Stream	Redwater, AB	2020	비료생산	0.2 ~ 0.3
Boundary Dam 3	Estevan, SK	2014	화력발전	0.8 ~ 1.0
Quest	Fort Saskatchewan, AB	2015	수소생산	1.2 ~ 1.2
Great Plains Synfuel Plant and Weyburn-Midale	Weyburn-Midale, SK	2020	천연가스	3.0 ~ 3.0
Husky Energy Lashburn	Lashburn, SK	2015	원유생산	0.2 ~ 0.2
Inventys and Husky Energy VeloxoTherm	Lashburn, SK	2018	원유정유	0.1 ~ 0.1

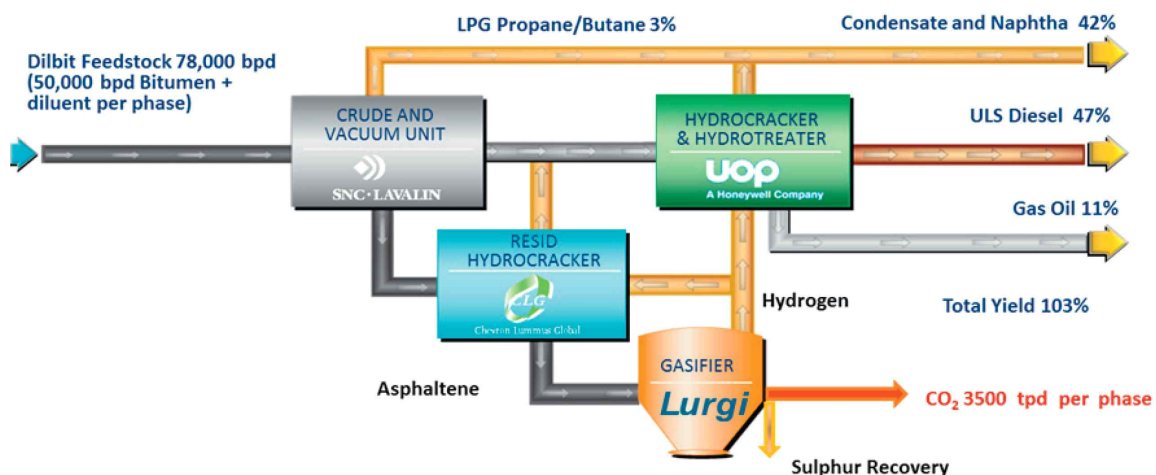
가. 캐나다 대형 탄소포집 실증프로젝트

ACTL with North West Sturgeon Refinery (NWSR) 프로젝트

- 적용 CO2 포집공정: 렉티솔 기반의 물리적 흡착공정
- 참여기관: 연방정부, 알버타 주정부, Enhanced Energy (민간기업), North West Redwater Partnership (민간기업)
- NWSR 프로젝트는 캐나다 알버타 주의 오일샌드로부터 추출된 높은 점도의 원유역청 (bitumen)을 정제하는 과정에서 발생하는 CO2를 포집한 후, 원유매장 지역의 시추공에 주입하여 EOR에 활용하기 위하여 개발되었음 [24]

- 이를 위해 Enhanced Energy와 North West Redwater Partnership (NWR)사는 정유시설 건설단계에서 탄소포집 설비를 결합하는 통합 CCS 프로젝트인 Alberta Carbon Trunk Line (ACTL)을 개발한 후 캐나다 연방정부 (CAD\$63.3M)와 알버타 주정부(CAD\$495M)의 지원을 받아 프로젝트를 수행하였음
- 그림 15는 탄소포집 공정을 포함 NWSR 프로젝트의 정유공정 흐름을 보여줌. Sturgeon 정유시설에 적용된 포집기술은 렉티솔 용매를 이용한 물리적 흡착법으로, 기화공정 (gasification) 후에 생성된 고온 합성가스 (syngas)내 일산화탄소 (CO)와 수소에 수증기를 주입하여 CO를 CO2로 전환한 후 물리적으로 용매에 흡착시켜 수소와 CO2를 분리하게 됨. 이 포집공정을 통해 95%이상의 CO2를 제거할 수 있는 것으로 확인되었음 [25]

〈그림 15〉 NWSR 정유공정 모식도 [25]



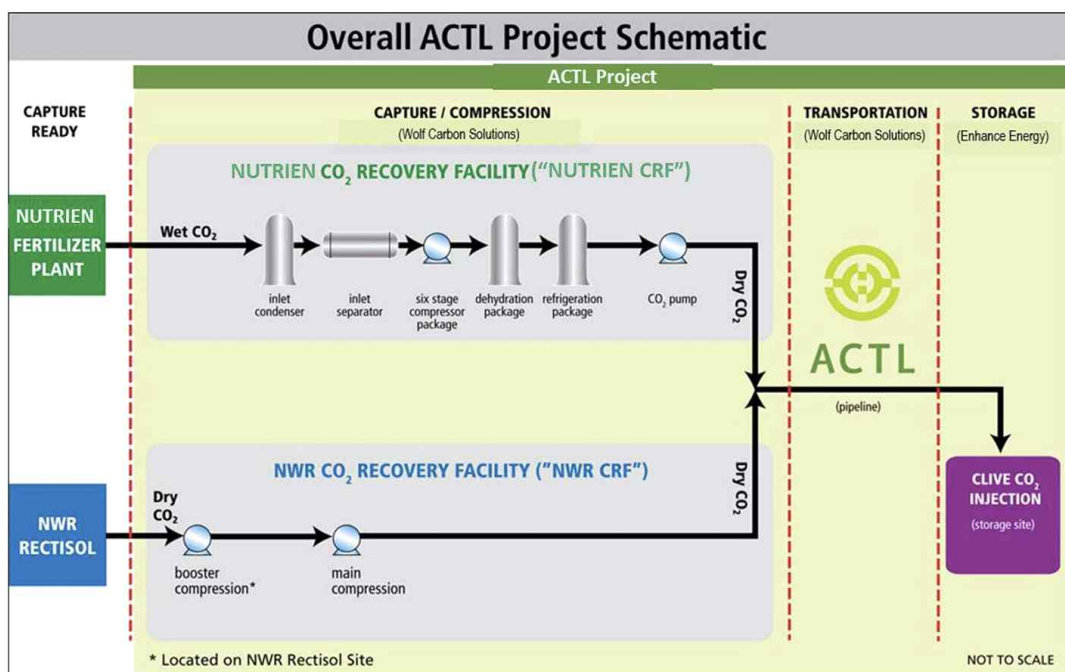
- Sturgeon 정유시설은 NWSR 프로젝트를 통해 하루 3500톤 가량의 CO2를 포집하여 최소 연간 130만톤의 포집용량을 확보하는 것을 목표로 하고 있음

ACTL with Nutrien CO2 Stream (NCS) 프로젝트

- 적용 CO2 포집공정: 무기용매를 이용한 벤필드(Benfield)공법 기반의 화학적 흡수공정

- 참여기관: 연방정부, 알버타 주정부, Enhanced Energy (민간기업), North West Redwater Partnership (민간기업), Nutrien (민간기업)
- NCS 프로젝트는 Enhanced Energy와 NWR에서 개발한 ACTL 프로젝트 중 하나로 질소비료 원료생산기업인 Nutrien사의 암모니아 생산공정에 탄소포집공정을 결합한 사례임
- 암모니아 생산공정은 부산물로 CO₂가 발생하게 되는데, 이렇게 발생된 CO₂는 다시 요소비료 (urea)를 만드는데 재사용된 후 습식이산화탄소 (wet CO₂)로 배출되게 됨 (그림 16)

〈그림 16〉 ACTL의 Nutrien 프로젝트와 North West Sturgeon Refinery 프로젝트 개념도 [24]

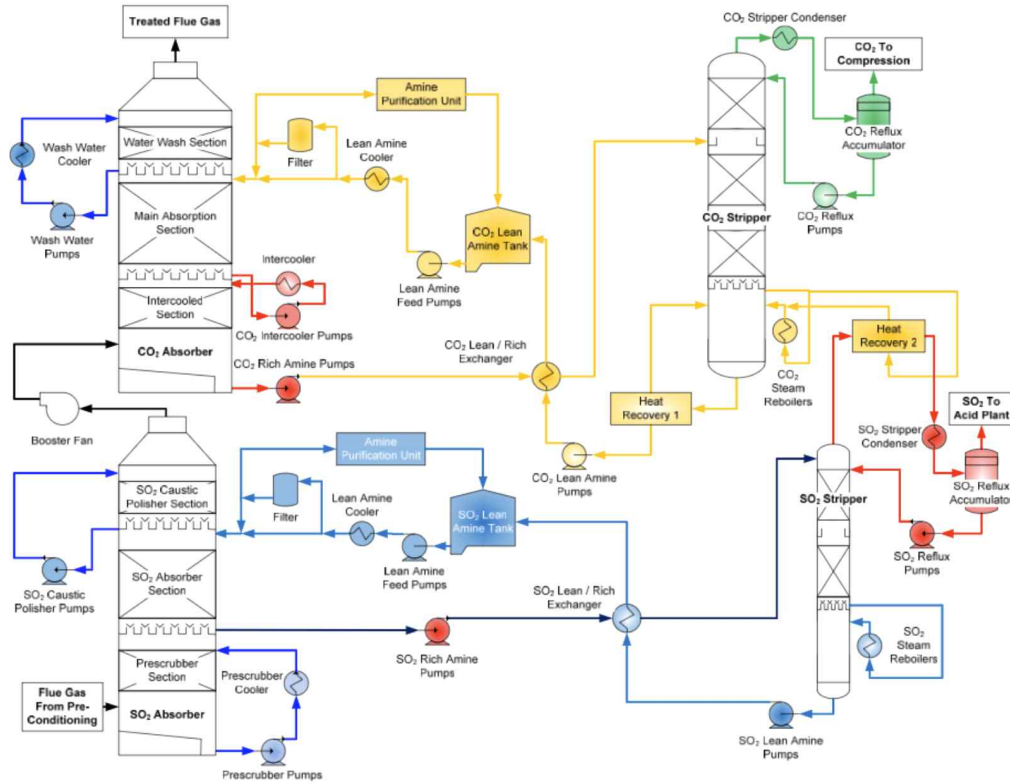


- NCS 프로젝트는 벤필트 공법으로 CO₂를 탄산염 형태로 흡수하는 화학적 흡수공정을 적용하였으며 이를 통해 하루 500톤 규모로 연간 25만톤의 CO₂를 포집하여 원유매장지역으로 수송한 후 EOR에 활용하는 것을 목표로 하고 있음

Boundary Dam 3 프로젝트

- 적용 CO2 포집공정: MEA 기반의 화학적 흡수공정
- 참여기관: 연방정부, SaskPower (사스캐처원주 공영전력기업), Shell Canada (민간기업)
- Boundary Dam 은 캐나다 사스캐처원주 남부의 Estevan 지역에 위치한 824MW 규모의 석탄 화력발전소임. 이 프로젝트는 캐나다 정부의 온실가스 저감정책의 일환으로 대규모 CO2 배출시설인 화력발전소에 탄소포집기술을 세계 최초로 적용한 상용 CCS 실증프로젝트임
- 이를 위해 Boundary Dam을 소유한 SaskPower사에서 CAD\$354M를 직접 투자하고 연방정부에서 CAD\$240M를 지원하여 110MW 규모의 발전3호기 (Boundary Dam 3)를 탄소포집 설비를 포함하도록 개조하여 2014년 가동에 들어갔음
- Boundary Dam 3 프로젝트는 탄소포집을 위해 습식 MEA 기반의 화학적 흡수공정을 이용한 Shell사의 Cansolv 연소 후 포집기술이 적용되었고 90%의 탄소포집율을 실증하였음[26]
- 특히 Calsolv 공정은 증기터빈에서 배출되는 CO2와 이산화황 (SO2)을 모두 포집하도록 설계되었으며 포집된 SO2는 황산생산의 원료로 재활용될 예정임[27]
- 그림 17는 Calsolv 탄소포집공정 흐름도를 보여주고 있음. 프로젝트를 통해 연간 100만톤의 CO2를 포집하고 있으며, 포집된 CO2는 인근 Weyburn 원유 사추공에 EOR을 위해 활용되고 있음

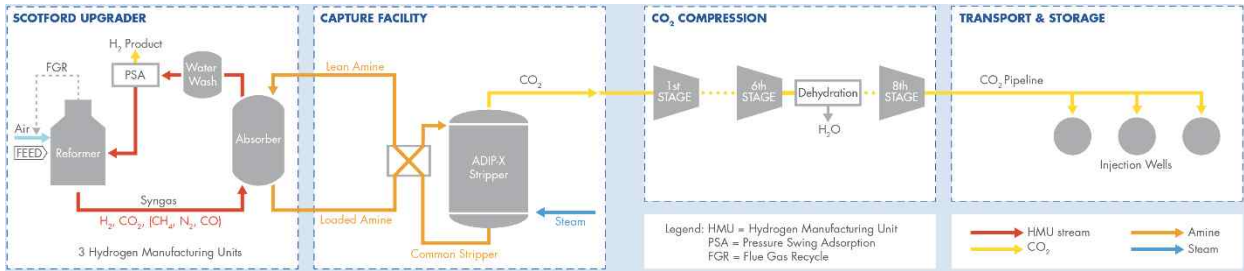
〈그림 17〉 Shell사의 Consolv 화학적 탄소포집 공정 흐름도 [26]



Quest 프로젝트

- 적용 CO2 포집공정: MDEA 기반의 화학적 흡수공정
- 참여기관: 캐나다 연방정부, 알버타 주정부, Shell Canada (민간 기업), Chevron Canada Ltd. (민간기업), Marathon Canadian Oil Sand Holding Ltd. (민간기업)
- Quest 프로젝트는 Shell Canada 사의 정유시설인 Scotford 정제소 (Upgrader)에서 원유역청 (bitumen)을 가솔린, 케로신과 같은 경질유로 전화하는데 필요한 수소생산 공정에서 배출되는 CO2를 포집하기 위해 개발되었음
- 이를 위해 프로젝트 운영사인 Shell Canada는 Chevron Canada, Marathon Canadian Oil Sands 와 함께 합작법인을 설립하여 연방정부(CAD\$120M)와 알버타 주정부(CAD\$745M)의 지원을 받아 2011년 출범하였고, 2015년부터 가동에 들어갔음
- 탄소포집에는 MDEA를 흡수제로 사용하는 화학적 흡수공정으로 Shell사에서 개발한 ADIP-X 공정을 적용하여 98%의 탄소포집율을 실증하였음 (그림 18) [28]

〈그림 18〉 Scotford 정제소에 적용된 Quest 탄소포집 프로젝트 흐름도 [29]



- 이 프로젝트를 통해 Scotford 정제소에서 배출하는 CO2의 1/3에 해당하는 연간 100만톤이 포집되고 있으며, 포집된 CO2는 지하 2km 깊이에 저장됨. 특히 Quest 프로젝트의 저장지는 염수 대수층 (saline aquifer)으로 이는 북미 최소의 염수 대수층 지중저장 실증 사례임

Great Plains Synfuel Plant and Weyburn-Midale 프로젝트

- 적용 CO2 포집공정: 연소 전 포집공정(Pre-combustion capture)
- 참여기관: Dakota Gasification Company (민간기업)
- Great Plains Synfuel 프로젝트는 실제 CO2 포집은 미국 노스다코타주 (North Dakota)에 소재한 석탄기화공정으로 수소와 합성원료를 생산하는 Dakota Gasification 사에서 이루어 지지만 전체 프로젝트는 캐나다 사스캐처원주의 Weyburn-Midale지역의 탄소저장사업과 연계되어 여기에 포함하였음
- Great Plains 합성원료 생산플랜트는 갈탄 (lignite)으로부터 메탄과 수소를 생산하기 위하여 1987년 건설되었으며, 이후 생산과정의 CO2배출저감의 일환으로 2000년부터 CCS 프로젝트를 가동하고 있음
- 이 프로젝트는 석탄기화공정에 적용하기 적합한 연소 전 탄소포집공정을 사용하고 있으며, 갈탄의 부분 산화과정을 통해 생산된 합성가스를 70oC 의 메탄올에 통과시켜 CO2를 포집하는 방법으로 96%의 탄소포집율을 실증하였고 하루 8000톤, 연간 300만톤의 CO2를 포집하고 있음

- 이는 Great Plains생산플랜트에서 배출되는 CO2의 50%에 해당하는 양으로, 이렇게 포집된 CO2는 압축과정을 거친 후 파이프라인을 통해 330km 떨어진 캐나다 사스캐처원주의 Weyburn/Midale 유전지역으로 보내져 EOR에 활용되고 있음[30]

나. 캐나다 소형 탄소포집 시연 프로젝트

Husky Energy Lashburn 프로젝트

- 적용 CO2 포집공정: 아민계열 유기용매를 기반으로 한 화학적 흡수법
- 참여기관: Husky Energy (민간기업), HTC Extraction Systems (민간기업), Emission Reduction Alberta (비영리법인)
- Husky Energy Lashburn 프로젝트는 HTC Extraction Systems사의 아민계열 유기용매의 탄소포집성능을 평가하기 위해 2015년부터 진행된 시연프로젝트임
- 사업시행사로 선정된 Husky Energy는 알버타주 Lashburn 지역에 소재한 자사의 정제소에 탄소포집설비를 설치하여 HTC사의 화학적 흡수공정의 운영비용, 기술검증, 탄소포집율, 포집된 CO2, 용매손실, 대기배출물에 대한 실증을 2017년까지 2년간 수행하였음 (그림 19)

〈그림 19〉 Husky Energy사의 Lashburn에서 가동중인 탄소포집설비 [31]

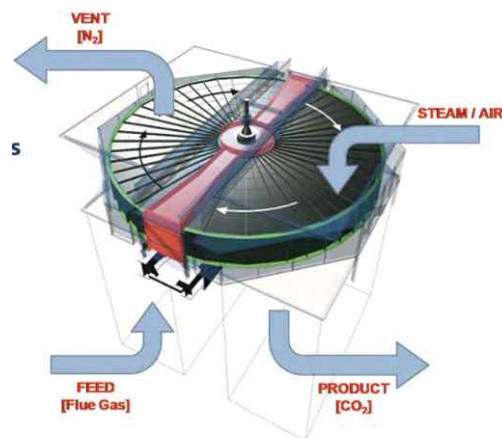


- 계획단계에서는 연간 2만톤의 탄소포집 성능을 예상했지만, 실제 시연에서 최대 하루 30톤, 연간 1.1만톤의 탄소포집에 그쳤음 [31]

Inventys and Husky Energy VeloxoTherm프로젝트

- 적용 CO2 포집공정: 연소 후 물리적 흡착공정
- 참여기관: Husky Energy (민간기업), Inventys Thermal Technologies Inc. (민간기업), Emission Reduction Alberta(비영리법인)
- 이 프로젝트는 Inventys Thermal Technologies(후에 Svante로 변경)에서 중질유 (heavy oil) 출공정에 필요한 증기발생기에서 배출되는 CO2 포집을 위해 개발한VeloxoThermTM 공정의 탄소포집 성능평가를 위해 진행된 시연프로젝트임
- VeloxoTherm 공정은 연도가스에 포함된 CO2를 구조화된 흡수체 (structured adsorbent)에 흡착시킨 후 증기를 이용하여 회수하는 방식으로 흡수체는 물리적인 재생을 반복하기 때문에 영구적으로 사용할 수 있고, 유해한 화학물질을 사용하지 않는다는 장점을 가지고있음 (그림 20)

〈그림 20〉 VeloxoThermTM 공정설비의 작동원리 및 시제품



- Inventys Thermal Technologies는 ERA로부터 CAD\$3M을 지원받아 VeloxoTherm 공정설비를 Husky Energy상의 정제소에 설치한 후 2018년부터 시연프로젝트를 진행하고 있음. 이를 통해 공정설비 1기당 하루 30톤, 연간 1만톤의 탄소포집성능을 확보하는 것을 목표로 하고있음

다. 가동계획중인 캐나다내 탄소포집 실증 프로젝트

- ❏ 지금까지 캐나다는 주요 탄소배출 산업분야가 석유개발, 화력발전이 중심인 알버타주와 사스캐처원주에 집중적으로 탄소포집 실증프로젝트가 진행되고 있고, 적용분야도 원유시추, 정제, 합성원료, 수소생산 및 화력발전로 제한되어왔음
- ❏ 하지만 제조업과 소재산업이 발달된 온타리오주와 퀘벡주의 경우에도 온실가스저감에 대한 요구가 커지고 기존 실증프로젝트를 통해 여러 포집기술들의 포집율과 경제성이 확인됨에 따라 향후 탄소포집 적용분야와 지역이 더욱 확대될 것으로 예상됨
- ❏ 표 3에서는 현재 가동계획중인 탄소포집 실증프로젝트를 소개함

〈표 3〉 가동계획중인 캐나다내 탄소포집 실증 프로젝트

프로젝트	운영상태	가동예상년도	적용산업	CO2 포집용량 (백만톤/년)
Naticol Energy Blue Methanol	개발초기	2025대 후반	메탄올생산	1.0 ~ 1.0
Saskatchewan NET Power Plant	개발초기	2020대 후반	발전	0.95 ~ 0.95
Polaris CCS Project	개발초기	2020대 중반	수소생산	0.75 ~ 0.75
Caroline Carbon Capture Power Complex	개발초기	2020대 중반	발전	1.0 ~ 3.0

- ❏ 표 4에서는 탄소포집 기술별로 적용가능한 산업과 해당 산업을 대상으로 한 기술성숙도 (Technology Readiness Level, TRL)를 정리하였음 [23]

〈표 4〉 적용산업에 따른 탄소포집기술 유형별 기술성숙도

CO2 포집유형	포집기술 적용산업	적용 CO2 포집법	기술성숙도*
CO2 capture in chemicals	암모니아 생산	화학적 흡착법	성숙
	암모니아 생산	물리적 분리법	적용초기, 대형시제품
	메탄올 생산	화학적 흡착법	적용초기
	메탄올 생산	물리적 분리법	적용초기, 시연
	고부가화합물 제조	화학적 흡착법	시연
	고부가화합물 제조	물리적 분리법	시연
CO2 capture in iron and steel	직접환원철 (DRI) 생산	화학적 흡착법	적용초기
	직접환원철 (DRI) 생산	물리적 분리법	대형시제품
	환원제련 공정	물리적 분리법	시연
	용광로제련 공정	화학적 흡착법	대형시제품
CO2 capture in cement	시멘트 생산	화학적 흡착법	시연
	시멘트 생산	칼슘 루핑법	시연
	시멘트 생산	산소 연소법	대형시제품
	시멘트 생산	물리적 분리법	대형시제품
	시멘트 생산	직접 분리법	대형시제품
CO2 capture in air	대기중 이산화탄소 포집	직접포집법(액체/고체)	대형시제품
CO2 capture in fuel production	천연가스 개질공정	직접포집법	성숙
	가스중 수소 발생공정	직접포집법	적용초기
	바이오메탄 생산공정	직접포집법	시연
	바이오에탄올 생산공정	직접포집법	시연, 대형시제품
	석탄중 수소 발생공정	직접포집법	대형시제품
CO2 capture in power generation	석탄화력발전	화학적 흡착법	적용초기
	석탄화력발전	산소 연소법	시연
	석탄화력발전	연소전 포집법	시연
	LNG 화력발전	화학적 흡착법	시연
	바이오매스 발전	화학적 흡착법	시연

*기술성숙도(TRL) 단계: 성숙 (Mature): TRL 11, 적용초기 (Early Adoption): TRL 9-10, 시연 (Demonstration): TRL 7-8, 대형시제품 (Large Prototype): TRL 5-6



가. 탄소포집 공정개발 기업

HTC Extraction Systems

- 소재지: Regina, Saskatchewan
- 포집관련 기술개요
 - HTC Extraction Systems사는 바이오매스에서 에탄올을 추출, 정제하는 기술기업으로 보유한 기술을 바탕으로 CO2 포집기술 중에서 화학적 흡수법에 사용되는 아민계열의 유기용매(MEA와 MEG)가 연도가스와 고온에 노출되면서 분해된 불순물로 인해 흡수능력이 저하되는 것을 방지하는 열재생공정 (thermal reclaiming process)를 개발하였음[32]
 - Husky Energy 정유사와 탄소포집 성능시연 프로젝트를 진행하였지만 아직 상용화에는 이르지 못하고 있음
- 홈페이지: <https://htcextraction.com/>

Carbon Corp

- 소재지: Calgary, Alberta
- 포집관련 기술개요
 - Carbon Corp.는 산화알루미늄 광물(ore)로부터 금속알루미늄을 생산하는 전기분해공정 (electrolysis process)을 응용한, 대기중이나 산업공정에서 포집된 CO2를 전기분해하여 기존 비용보다 저렴하고 고품질의 탄소섬유, 탄소나노튜브 등 다양한 탄소소재로 전환하는 C2CNT 공정기술을 개발한 기술기업임[33]
 - 이 기업에서 개발한 C2CNT Genesis Device™ 공정기술은 글로벌 비영리 단체인 엑스프라이즈 (XPRIZE)재단에서 CO2 배출 대응기술 개발을 위해 개최한 2,000만달러 상금의 NRG COSIA Carbon XPRIZE 경연대회 최종결승에 진출하여 X-Factor 상에 선정되기도 하였음
- 홈페이지: <https://www.c2cnt.com/>

Carbon Engineering Ltd.

- 소재지: Squamish, British Columbia
- 포집관련 기술개요
 - Carbon Engineering은 대기를 팬을 사용하여 강제 유입시킨 후 수산화칼륨 수용액을 사용하여 CO₂를 포집하는 Direct Air Capture (DAC) 공정과 물을 전기분해하여 얻은 수소를 포집된 CO₂와 반응시켜 가솔린, 디젤과 같은 연료로 전환가능한 탄화수소를 생산하는 AIR TO FUELSTM 공정을 개발한 기술기업임
 - 2015년부터 파일럿 플랜트에서 DAC CO₂ 포집과 2017년부터 AIR TO FUELSTM 공정의 연료전환 시연프로젝트를 진행해 오고 있고, 2021년부터는 캐나다 국적항공사인 에어캐나다와 항공연료 개발을 위한 양해각서를 체결하는 등 상용화에 접근하고 있음[34]
- 홈페이지: <https://carbonengineering.com/>

CO₂ Solutions

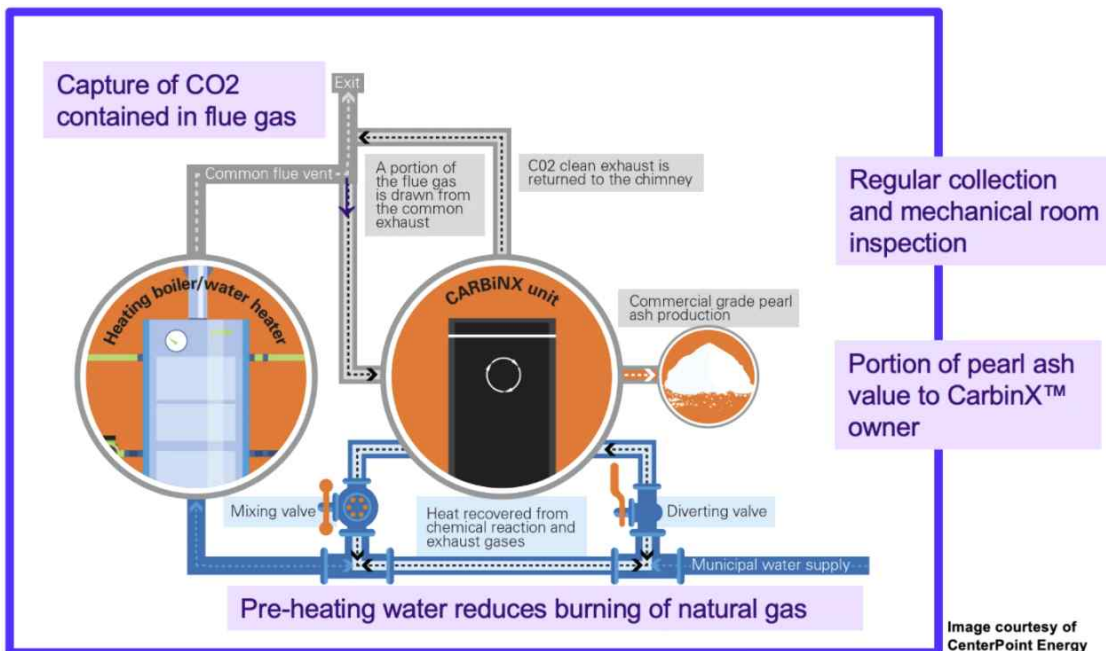
- 소재지: Quebec city, Quebec
- 포집관련 기술개요
 - CO₂ Solutions는 생물효소 기반의 무독성 탄소포집 기술을 개발보유한 기업으로 생물내에 존재하며 이산화탄소 교환에 촉매작용을 하는 탄산무수화효소 (carbonic anhydrase enzyme)를 탄소포집에 활용하였음
 - CO₂ Solutions는 탄소포집율을 가속화하기 위하여 새로운 1T1 효소를 개발하였고, 기존의 유기용매대신에 무해한 소금용액을 사용한 연소 후 탄소포집공정을 시도하였음
 - 캐나다 국가연구위원회 (National Research Council of Canada, NRC)의 산업연구 지원프로그램 (Industrial Research Assistance Program, IRAP)의 지원을 받아 탄소포집 성능 최적화를 검증한 후 발전소를 비롯한 고정 탄소 배출원을 대상으로 상용화를 시도하고 있음
- 홈페이지: <https://co2solutions.com/en/>

나. 탄소포집 설비 플랫폼 기업

CleanO2 Carbon Capture Technologies

- 소재지: Calgary, Alberta
- 포집관련 기술개요
 - CleanO2 Carbon Capture Technologies는 주거용/빌딩용 난방설비에 연결되는 중소형 상용 탄소포집장비 (CarbinXTM)를 개발 생산하고 있는 제조기업임
 - CarbinX 장비는 포집된 CO2를 조제탄산칼륨 (pearl ash)로 전환하면서 발생하는 열을 공급하여 난방설비의 열효율을 높이는 동시에 장비의 크기에 따라 최대 연간 9톤의 CO2를 포집하여 6.3톤의 조제탄산칼륨을 만들어낼 수 있음 (그림 21)
 - CleanO2 Carbon Capture Technologies는 이렇게 발생된 조제탄산칼륨을 세제, 비료 등에 재활용하는 업사이클링 사업도 진행하고있음
- 홈페이지: <https://cleano2.ca/>

〈그림 21〉 CleanO2 Carbon Capture Technologies의 CarbinXTM 작동원리 [35]



Hyperion Global Energy Corp.

- 소재지: Ottawa, Ontario
- 포집관련 기술개요
 - Hyperion Global Energy Corp.는 모듈형 탄소포집 및 전환설비를 개발하는 기업으로 발전, 시멘트 생산, 산업제조공정에서 배출된 CO2 직접 포집한 후, 이를 탄소함유 미네랄로 전환하여 재활용하는 사업을 진행하고 있음
- 홈페이지: <https://hyperionenergy.ca/>

Pond Technologies

- 소재지: Markham, Ontario
- 포집관련 기술개요
 - Pond Technologies는 조류 (algae)를 이용한 생물반응기 (bioreactors)를 탄소배출원에 설치하여 조류의 재배와 성장과정에서 CO2를 포집하는 기술을 최초로 상용화하였음
 - 특히 다양한 조류를 활용하여 탄소포집을 기능식품, 동물의 먹이, 바이오연료등 다양한 제품으로 전환시킬 수 있는 기술을 확보하고 있음
- 홈페이지: <https://www.pondtech.com/>

Svante Inc.

- 소재지: Burnaby, British Columbia
- 포집관련 기술개요
 - Svante Inc.는 구조화된 흡수체 기반의 VeloxoTherm™ 탄소포집공정을 개발한 Inventys Inc. 사의 후신으로 해당 공정의 시연프로젝트를 마친 후, 약 1cm³의 각설탕 부피의 흡수체에 축구장 크기에 달하는 면적을 가지는 나노다공성 (nanoporous) 흡착소재를 개발하고, 60초내에 CO2 분자의 표면 흡착과 해제를 완료할 수 있도록 소재특성을 개선하여 상용화 회전 VeloxoTherm™ 설비를 출시하였음
 - 본사의 흡착베드 생산공장에서는 최대 5000톤/일의 CO2 포집용량을 소화하는 흡착베드를 생산하고 있고, 1기의 VeloxoTherm™ 포집설비당 3000톤/일의 포집용량을 확보하고 있음
- 홈페이지: <https://svanteinc.com/>

가. 캐나다 자원부 (Natural Resources Canada)

CanmetEnergy 연구소

- 온타리오주 오타와에 소재한 캐나다자원부 산하의 CanmetEnergy 연구소는 CCUS 연구개발프로그램을 관련기업과 대학과 함께 직접 운영하고 있음
- 탄소포집 분야의 경우 기존에 사용되는 연소 후 CO2 포집기술과 액화 공정 (liquefaction)의 가동 경제성, 에너지 효율을 평가하고 공정을 개선하는 부분에 주력하고, 아울러 첨단 초임계 (supercritical) CO2 동력 사이클을 개발하여 관련기업의 대규모 초임계 CO2 동력 사이클 기술의 시연프로젝트를 지원하고 있음

Energy Innovation Program (EIP) 산하 CCUS Front-End Engineering (FEED) 프로젝트 지원

- 캐나다 자원부는 2021년 EIP 예산을 통해 CCUS 기술의 상용화 경쟁력을 강화하는 연구개발시연 (Research, Development and Demonstration, RDD) 프로젝트들에 총 CAD\$319M을 지원할 예정임
- 2021년 8월에 공고된 정부의 탄소중립 2050 달성목표에 부합하는 프로젝트의 경우 대학, 기업, 비영리재단, 정부출연 연구소 모두에게 지원을 개방하고 있음
- 이 프로그램은 주요 목표는 1. 발전부터 최종 사용단계까지 탄소배출을 저감하기 위한 효율과 프로세스 개선, 2. 저탄소 배출 기술의 최대 육성과 이들 기술의 전력 및 난방분야 적용, 3. 청정탄화수소 및 재생연료 생산기술 개발, 4. 글로벌 기후변화 대책에 따른 변화하는 에너지분야 전망에 대한 탄력적 대응기술 개발임

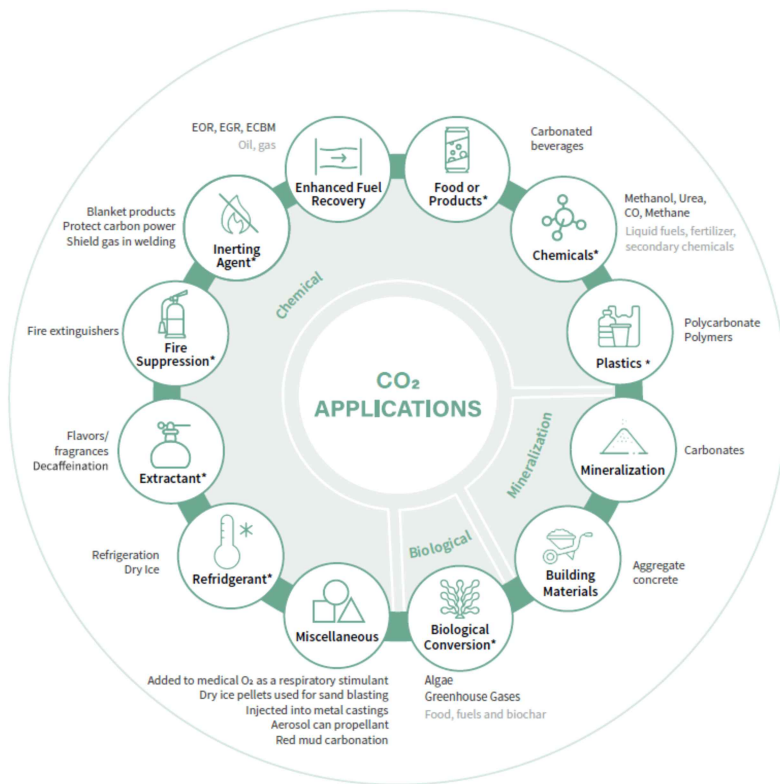
III

이산화탄소 활용기술(Utilization) 현황

1 이산화탄소 활용기술(Utilization)


탄소 활용(Carbon utilization)은 경제적 가치를 가지는 상품을 만드는데 이산화탄소를 사용하는 기술을 총칭하며 현재까지 가장 널리 적용된 분야는 이산화탄소를 사용한 원유 회수 증진 분야임

〈그림 22〉 이산화탄소 활용의 예 [5]



Source: Mission Innovation Carbon Capture, Utilization, and Storage Workshop, September 2017

현재 가장 널리 사용되는 탄소 활용기술은 1. 화학적 변환, 2. 광물화, 3. 생물학적 변환으로 나눌 수 있으며 콘크리트나 탄산염같은 물질을 만들어 활용하는 것은 반영구적인 이산화탄소 활용이 될 수 있으나 화학적 변환을 통한 연료나 화학제품을 만들어 사용하는 것은 연료 사용시 다시 이산화탄소가 배출되므로 단기적인 이산화탄소 활용법임 (그림 22)

- 
 현재 이산화탄소를 활용하여 상품을 만드는 시장은 작은편이나 향후 기후변화에 대응하기 위한 GHG 감축에 기여하기 위해 현재 화석연료를 사용하여 만드는 플라스틱이나 화학제품을 생산하는데 이산화탄소 활용기술이 적극적으로 사용되어야함

가. 화학적 변환 기술

이산화탄소를 사용한 원유 회수 증진 기술 (EOR by CO2 injection)

- 이산화탄소를 사용하는 EOR은 포집된 이산화탄소를 활용하는 대표적인 방법으로 채굴로 인해 압력이 낮아진 유정과 가스정에 이산화탄소 주입을 통해 내부압력을 증가시켜 원유 및 가스 채취율을 높이는 기술임. 이는 자원 회수율을 높일 뿐 아니라 이산화탄소를 유정 및 가스정에 봉인하여 저장시킬 수 있는 효율적인 기술로 평가됨 (그림 4 참조)
- 원유 회수 증진 기술은 1972년에 처음으로 시도되었고 최근 10년동안 이산화탄소를 오래된 유정이나 가스정에 주입함으로 남아있는 기름이나 가스를 더 채취할 수 있는 기술이 사용되고 있음
- EOR by CO2 injection에 활용된 이산화탄소는 고갈된 유정 및 가스정에 수천년간 저장할 수 있다는 장점을 지니고있어 탄소 저감에 핵심적인 기술임

이산화탄소를 사용한 제품 생산 기술

- 현재 이산화탄소는 요소비료 (urea fertilizer)를 만들거나 특별한 폴리머, 탄소를 기반으로하는 고부가가치 소재를 만드는데 소량으로 사용되고 있으나 미래에 다가올 수소 경제 시대에는 수소와 함께 사용되어 합성연료, 합성가스, 메탄올, 에탄올 같은 기본 화학공정 공급원료를 만들 수 있을 것으로 예측됨
- 메탄올이나 에탄올같은 제품 생산은 연료로 사용시 다시 이산화탄소가 배출되므로 단기적인 이산화탄소 활용법이며 장기적으로 이산화탄소를 저감시키기 위해서는 DACCS나 BECCS, 또는 그린 수소와 결합시켜 화석연료의 사용을 대체하는 대체연료 생산이 필요함

나. 광물화 기술 (Mineralization)

이산화탄소를 건축자재에 통합하는 기술

- 이산화탄소를 콘크리트에 집어넣어 건축재료로 사용하는 방법이 단기적으로는 이산화탄소 활용기술의 주류가 될 가능성이 큼
- 하지만 현재 콘크리트같은 건축자재의 가격이 낮다는 점이 이런 이산화탄소 활용기술이 널리 사용되는데 걸림돌이되고 있음

다. 생물학적 변환 기술 (Biological Conversion)




식물이나 조류 (algae)의 생장을 촉진시키는데 이산화탄소를 사용하거나 바이오 숯 (biochar)를 이용하여 토양 속에 이산화탄소를 포집함으로써 토양의 질을 높이는 방법이 현재 적용되고 있음

2

캐나다 이산화탄소 활용 실증 프로젝트

이산화탄소를 사용한 원유 회수 증진 기술 실증 프로젝트는 본 보고서 2장 2절에서 설명한 캐나다 탄소포집 기술 실증 대형 프로젝트 중에 탄소포집만이 아니라 포집된 이산화탄소를 EOR에 사용한 Alberta Carbon Trunk Line with North West Sturgeon Refinery 프로젝트와 Boundary Dam 3 프로젝트, Weyburn-Midale 프로젝트가 있음

이산화탄소 변환 및 활용 기술 개발을 위한 NRG COSIA Carbon XPRIZE 경연이 2015년 9월 30일에 시작되었고 2021년 4월 19일 이산화탄소를 주입하여 콘크리트를 생산하는 기술을 개발한 캐나다의 Carboncure Technologies Inc. 와 미국의 Carbonbuilt 팀이 최종 승자로 각각 750만불의 상금을 받음

-  NRG COSIA Carbon XPRIZE 경연의 top 10에 들어간 팀중 최종 승자인 Carboncure Technologies Inc. 이외의 캐나다팀은 이산화탄소 첨가 시멘트, 내마모 코팅재, 그리고 플라스틱 생산 기술을 시연한 Carbon Upcycling Technologies와 이산화탄소를 전기화학적으로 변환시켜 기본 화학공정 공급원료 생산 기술을 시연한 Carbon Electro-Recycling Toronto (CERT) 팀이 있음.
-  University British Columbia의 연구팀은 이산화탄소와 산업폐수를 활용한 전기화학반응을 통해 유전에서 고부가 가치 물질인 탄산염과 산 (acids)등을 생산함 [36]
-  University of Alberta의 연구팀은 천연가스와 이산화탄소 그리고 공기를 사용하는 연료전지를 만들어 전기와 물 그리고 일산화탄소를 배출하는 기술을 시연하였고 이 연료전지는 전기를 생산한다는 것 뿐아니라 다른 산업용 화학물질을 만드는 원재료가 사용될 수 있는 일산화탄소를 만든다는 것이 큰 장점임 [37]

3

캐나다 소재 이산화탄소 활용기술 기업 현황

가. 탄소 변환 및 활용기술 기업

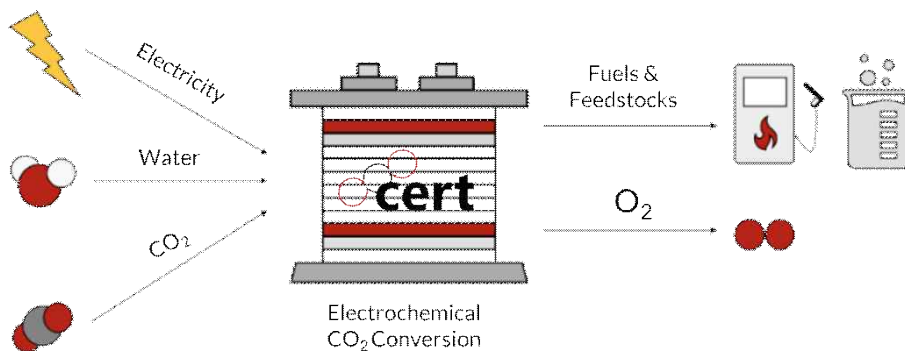
 CarbonCure Technologies Inc.

- 소재지: Dartmouth, Nova Scotia
- 변환 및 활용관련 기술개요
 - CarbonCure Technologies Inc.는 콘크리트 생산회사들이 이산화탄소 배출을 줄이도록 이산화탄소 첨가 콘크리트 생산 기술을 개발한 기술 기업으로 최적화된 이산화탄소 주입으로 콘크리트의 압축강도를 향상시킴
 - 2021년 4월 NRG COSIA Carbon XPRIZE 경연 공동 우승자로 750만불의 상금을 받은 후 현재 이 기업은 전세계 콘크리트 생산회사들이 이산화탄소 배출을 줄이고 지속가능한 생산을 계속할 수 있도록 탄소활용 기술을 수출하고 있음
- 홈페이지: <https://www.carboncure.com/>

Carbon Electro-Recycling Toronto (CERT) Systems Inc.

- 소재지: Toronto, Ontario
- 변환 및 활용관련 기술개요
 - CERT는 Carbon Upcycling Technologies는 전극전해질 접합체 (membrane electrode assembly)를 이용한 전기화학장치를 이용해 이산화탄소를 변환시켜 연료 및 기본 화학공정 공급원료를 생산함 (그림 23)
- 홈페이지: <https://co2cert.com/>

〈그림 23〉 CERT의 전기화학적 이산화탄소 변환 모식도



Source: <https://co2cert.com/about/cert-technology/>

Pond Technologies

- 소재지: Markham, Ontario
- 변환 및 활용관련 기술개요
 - Pond Technologies는 실질적으로 어느종류의 조류 (algae)라도 최적화된 조건에서 성장시킬 수 있는 범용 플랫폼을 개발하였고 이 플랫폼은 조류의 성장을 위해 이산화탄소를 사용함
 - 또한 이 회사는 St Mary Cement와 NRC Canada와 함께 산업시설에서 발생하는 이산화탄소를 줄이는데 조류 성장 플랫폼을 사용할 수 있다는 것을 실증하였음.
- 홈페이지: <https://pondtechnologiesinc.com/>

Carbon Upcycling Technologies

- 소재지: Calgary, Alberta
- 변환 및 활용관련 기술개요
 - Carbon Upcycling Technologies는 폐유리, 철강부산물, 발전소등의 연소과정에서 발생하는 비산재(flying ash)등을 고압환경에서 CO2를 주입하여 탄소첨가 시멘트, 내마모 코팅제, 플라스틱으로 업사이클하는 Mechanically Assisted Chemical Exfoliation (MACE) 공정을 개발한 기술기업으로 2015년 50g의 공정설비 시제품을 시작으로 스케일업을 거쳐 현재는 20톤 용량의 공정설비를 가동중에 있음
- 홈페이지: <https://carbonupcycling.com/>

Carbonova Corp.

- 소재지: Calgary, Alberta
- 변환 및 활용관련 기술개요
 - Carbonova Corp.는 기존의 포집된 CO2와 메탄을 이용하여 고품질 탄소섬유 (Carbonova Fiber™)를 생산하는 공정을 개발보유한 기업임
 - 현재 이 기업은 탄소섬유 생산공정을 공개하지 않고 있어 탄소섬유의 직접 생산을 계획하고 있는 것으로 보여짐
- 홈페이지: <https://www.carbonova.com/>

Quantiam Technologies Inc.

- 소재지: Edmonton, Alberta
- 변환 및 활용관련 기술개요
 - Quantiam Technologies Inc.는 기능성 나노물질과 촉매 그리고 코팅을 개발하는 기업으로 최근 이산화탄소와 물, 그리고 태양전지를 사용해 생산된 그린 수소를 이용하여 메탄올을 생산하는 기술을 개발함

- 현재 이 기업은 태양전지를 사용하는 수전해기술과 이산화탄소 변환 기술을 차세대 유망기술로 선정하고 연구개발에 주력하고 있음

- 홈페이지: <http://www.quantiam.com/>

Agora Energy Technologies Inc.

- 소재지: Vancouver, British Columbia

• 변환 및 활용관련 기술개요

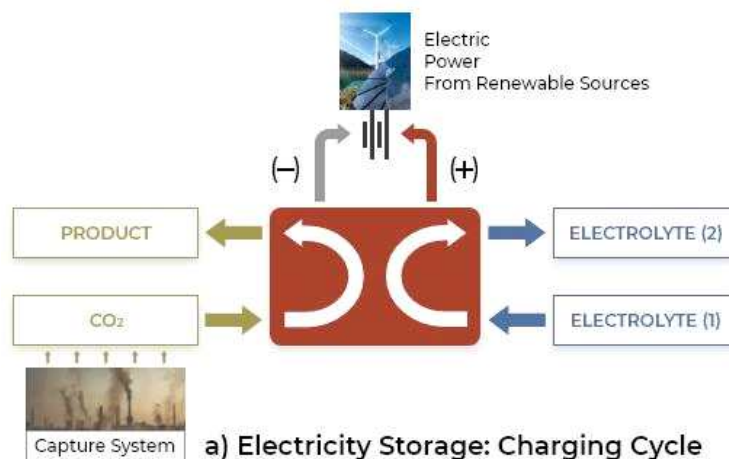
- Agora Energy Technologies Inc.는 충전시 이산화탄소를 사용하는 산화환원 흐름 배터리 (Redox Flow Battery)를 생산하는 기술을 개발함 (그림 24)

- 이산화탄소를 사용하는 전기화학반응은 재생에너지원으로 부터 나오는 전기를 사용하여 일어나는 반응임

- 이 기술은 재생에너지원으로부터 발생하는 전기에너지 저장이라는 문제와 이산화탄소 감축이라는 두개의 문제를 한번에 해결할 수 있는 새로운 해결책임

- 홈페이지: <https://agoraenergy.ca/>

<그림 24> 전기 충전시 이산화탄소를 사용하는 산화환원 흐름 배터리 작동 모식도



Source: <https://agoraenergy.ca/technology/>

IV

이산화탄소 저장기술(Storage) 현황

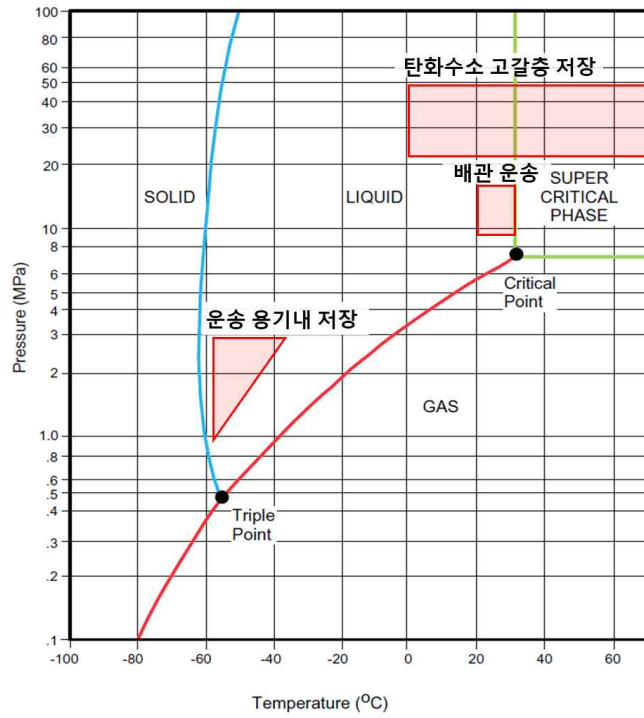
- ▣ 알버타 주는 천연가스 및 오일 고갈층 및 염류 대수층 등 잠재적으로 이산화탄소를 저장할 수 있는 지질학적 지역을 많이 보유하고 있으며, 특히 이산화탄소를 포집하여 배관으로 저장 및 운송하고 있음
- ▣ 이산화탄소의 열역학적 특성과 지질학적 정보를 이용하면 최적의 이산화탄소 저장소를 선정 할 수 있음. 또한, 저장 및 운송 시설에서 이산화탄소의 누출은 심각한 환경 문제 및 인체에 해로운 독성 가스를 배출하기 때문에 모니터링 기술도 필요함
- ▣ 이 장에서는 이산화탄소의 열역학적 특성, 저장 기술 및 모니터링 기술에 대해 소개하고자함

1

이산화탄소의 열역학적 특성

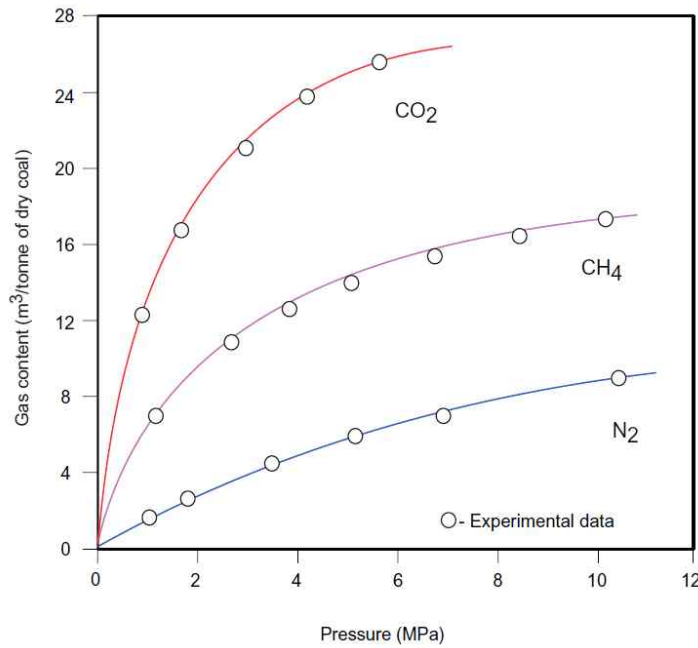
- ▣ 일반 대기압 조건에서 이산화탄소는 공기에 비해 열역학적으로 매우 안정적이고 밀도가 높은 무거운 기체임
 - 이산화탄소 상태도에 따르면, 임계점 (온도 31.1°C 및 압력 7.38 MPa) 미만에서는 온도와 압력에 따라 기체 또는 액체 상태로 존재하지만, 임계점 이상의 구간인 초임계 상태에서는 이산화탄소는 기체상태로 저장가능하지만 압력과 온도에 따라 물과 비슷한 높은 밀도초임계 상태의 (CO₂ 밀도: 200 ~ 900 kg/m³, 물의 밀도: 997 kg/m³)를 가지게 되는 독특한 특성을 지님 (그림 25)[38]
- ▣ 석탄층에는 탄층 메탄가스 (Coal bed methane, CBM)가 석탄에 흡착된 상태로 있는데 이산화탄소는 메탄가스보다 석탄에 대한 흡착력이 높아 석탄층에 이산화탄소를 저장할 수 있는 잠재력을 지님

〈그림 25〉 이산화탄소의 상태도 [39,40]



- 석탄에 대한 이산화탄소의 친화력은 석탄층에서 풍부하게 발견되는 가스인 메탄보다 약 두 배 높음 (그림 26)

〈그림 26〉 등온조건의 기체별 석탄 친화도 그래프



2

지질학적 저장소

- ❗ 이산화탄소의 열물리학적 특징에 따라 여러 지질학적 지형이 잠재적인 이산화탄소 저장 지역으로 고려
- 주로 석탄층 (Coal Seam), 소금 광산 (Salt Cavern or Salt Dome), 염류 대수층 (Saline Aquifer), 탄화수소 고갈층 (Depleted Hydrocarbon Field)가 고려되고 있으며 각 지형별 특징은 표5에 요약됨

〈표 5〉 이산화탄소 지질학적 저장소 특징 [41, 42]

지형 구분	전세계 CO2저장용량	장점	단점
탄화수소 고갈층	930 Gt	안전성 Enhanced Oil recovery (EOR) 기존 설비 이용	2상 기체 발생시 제한 지리적 제한
석탄층	40 Gt	큰 저장용량 석탄층 메탄회수 증진법	고비용 지리적 제한
소금광산	-	저장 안전성 이상적인 지리적 조건	고비용 지리적 제한
염류 대수층	400-10,000Gt	큰 저장용량 지리적으로 넓게 분포	안전성 입증되지 않음

가. 탄화수소 고갈층

- ❗ 탄화수소 저장소(유전 및 가스전)는 구조적으로 층상형태를 이루고 있어 탄화수소를 장기간동안 저장할 수 있게 하는 지질학적 장점을 가지고있음
- ❗ 고갈된 탄화수소 저장소에 이산화탄소를 주입하면 장기간 이산화탄소 저장 가능.
- ❗ 고갈된 탄화수소 저장소에는 기존에 원유 및 가스 채굴시 사용된 설비를 사용해서 지하에 저장할 수 있기때문에 경제적으로도 장점이 있음
- ❗ 고갈층에 이산화탄소를 저장하는 방식은 지하의 이산화탄소가 지표면으로 누출되지 않게 하는 것이 관건이며, 더불어 원래 저장소의 압력 이상으로 압력을 증가시키지 않아야함 [43]

나. 원유 회수 증진 (EOR by CO₂ injection)

- ❏ 이산화탄소는 원유의 점도와 계면 장력 (모세혈관 압력)을 감소시키기 때문에, 원유 저장층에 이산화탄소를 주입하여 원유 채굴 속도를 향상시키는데 사용되며, 동시에 이산화탄소를 원유 저장층에 매립함으로써 이산화탄소 저장 효과도 지님
- ❏ EOR에 사용되는 이산화탄소는 경질유 (25μAPI 이상)에 대해 제한됨. 대부분의 이산화탄소는 탱크에 저장된 상태로 사용되지만, 이산화탄소를 이용하여 원유 채굴 시, 회수된 오일에 이산화탄소가 포함되어 있기 때문에 생산 유정 시스템에 재사용 되어야함
- ❏ 유정에 저장시킬수 있는 이산화탄소의 체류 기간은 비교적 짧으며 (수개월 ~ 수년), 다른 이산화탄소 저장/격리 방법에 비해 EOR에서 이산화탄소를 격리할 수 있는 양은 매우 적음[39]

다. 석탄층 (Coal Bed)

- ❏ 이산화탄소는 다른 기체에 비해 석탄과의 흡착성이 높아 석탄층에 주입하여 저장할 수 있는 잠재력을 가짐
- ❏ 메탄으로 가득찬 석탄층에 이산화탄소 주입 시 메탄가스를 회수 (석탄층 메탄회수 증진법, ECBMR)를 할 수 있는데, 메탄가스는 낮은 탄소 함량을 지니고 있어 친환경 연료로 석탄을 대체하여 사용될 수 있음
- ❏ 대부분의 석탄층은 복잡한 지질학적 구조로 인해 불투과성질을 가지고 있어 [44] 중장기적인 이산화탄소 저장의 잠재성을 보유함

라. 소금 광산

- ❏ 이미 사용된 소금 광산은 이산화탄소 저장에 있어 장기적인 해결책을 제공할 수 있음
- ❏ 이 기술은 이미 개발되어 석유, 천연가스, 압축 공기의 지하 저장고 [45, 46]와 공공 및 산업용 소금 채굴에 적용됨

- ❗ 알버타주와 서스캐처원주에서 LPG와 가스 저장을 위해 소금 동굴이 사용되었음 (Crossley, 1998). 현재 단일 소금 동굴의 부피는 최대 500,000 m³ 이며, 균열 임계값의 최대 80%의 압력으로 유체를 저장할 수 있음
- ❗ 소금과 암석 동굴은 이론적으로 저장 용량이 크지만 관련 비용이 매우 높고 암석 및 염류 처리와 관련된 환경 문제가 존재함

마. 염수 대수층 (Saline Aquifer)

- ❗ 퇴적 분지의 깊은 염수 대수층은 고염도의 물이 존재하는데 액체 폐기물 주입에 주로 사용됨
- ❗ 고압의 깊은 염류 대수층은 이산화탄소 주입에 용이하며 이산화탄소가 물에 용해되고 (최대 29%) 나머지는 대수층 위로 이동하는 플룸을 형성함
- ❗ 이 형성된 플룸은 장시간에 걸쳐 주변 암석과 반응하여 광물 고정화를 하게되어 이산화탄소를 영구적으로 저장할 수 있음
- ❗ 대수층과 고갈된 저장소의 이산화탄소 주입 기술은 이미 개발되어 있으며 비교적 쉽게 적용할 수 있음. 예를 들어, 산성 가스(CO₂-H₂S 혼합물)는 알버타의 깊은 식염수 대수층과 고갈된 탄화수소 저장고에 주입됨 [47]

3

이산화탄소 배관

- ❗ 각 지역에서 포집된 이산화탄소는 초임계 상태로 배관을 이용하여 이산화탄소 저장소에 경제적으로 운송되고 있으며, 운송중인 배관안에 있는 이산화탄소는 저장의 개념으로 이용됨 (Line Pack)
- ❗ 이 장에서는 이산화탄소 배관설치 현황과 잠재적 위험 및 누출 시 감지방법에 대해 기술함

가. 이산화탄소 배관설치 현황

- 대부분의 이산화탄소 배관은 오일 및 가스 산업의 EOR 프로젝트를 위한 이산화탄소 운송에 사용되었으며 주로 북아메리카 지역에 집중되어 있음
- EOR 및 이산화탄소 저장 기술의 발전으로 이산화탄소 배관은 2010년 (3,862km) 대비 2018년 (8,046km)에 2배 이상 증가되었음[49]

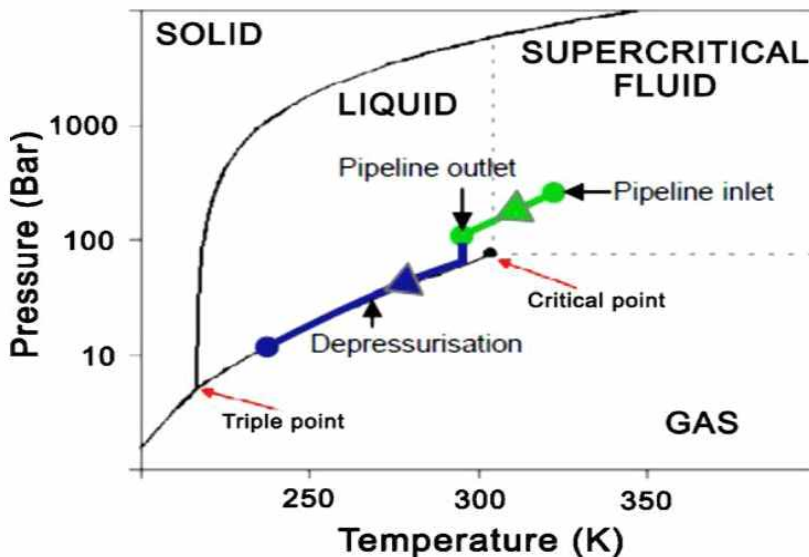
〈표 6〉 기존에 운영중인 배관 및 건설 예정인 배관 리스트 [49]

Project Name	Country	Status	Length (km)	Capacity (MtCO ₂ /yr)
Quest	Canada	Planned	240	1.8
Alberta Trunkline	Canada	Planned	240	14.6
Weyburn	Canada	Operational	330	2
SaskPower Boundary Dam	Canada	Planned	66	1.2
Shute Creek	USA	Operational	142	4.5
Monell	USA	Operational	53	1.6
Bairoil	USA	Operational	258	23
West Texas	USA	Operational	204	1.9
Transpetco	USA	Operational	193	7.3
Salt Creek	USA	Operational	201	4.3
Sheep Mountain	USA	Operational	656	11
Val Verde	USA	Operational	130	2.5
Slaughter	USA	Operational	56	2.6
Cortez	USA	Operational	808	24
Central Basin	USA	Operational	232	27
Canyon Reef Carriers	USA	Operational	225	1.1
NEJD	USA	Operational	294	7
Dectaur	USA	Operational	1.9	1.1
Eastern Shelf	USA	Operational	91	1.1
GreenCore	USA	Operational	232	2.65
GreenLine	USA	Operational	314	9.30
Delta	USA	Operational	108	2.2
Snohvit	Norway	Operational	153	0.7
OCAP	Netherlands	Operational	97	0.4
Lacq	France	Operational	27	0.06
Rhourde Nouss	Algeria	Planned	30	0.5
Qinshui	China	Planned	116	0.5
Gorgon	Australia	Planned	8.4	0.5
Bravo	USA	Operational	350	7.3
Bati Raman	Turkey	Operational	90	1.1
Este	USA	Operational	191	4.8

나. 배관 압력 조건

- 초임계 상태에서 이산화탄소는 액체의 밀도와 기체의 점도의 특성을 지니고 있어 부피당 운송되는 이산화탄소의 양이 극대화됨
- 초임계 상태에서 운송은 임계 압력보다 높은 압력을 가하여 이산화탄소가 2상으로 변하는 것을 방지해야함
- 포집된 이산화탄소의 불순물은 이산화탄소 상변화에 영향을 미쳐 순수 이산화탄소 운송시 필요한 힘보다 더 많은 용량의 힘을 필요로함
- 이산화탄소 운송의 적절한 압력은 50-100bar 사이로 제안되는데 (그림 27 참조) 그 이유는 그 압력에서 물이 용해되는 한계는 0.3×10^{-2} to 0.4×10^{-2} (몰기준)으로 제한되기 때문임

〈그림 27〉 이산화탄소 운송 배관의 운전 조건



다. 잠재적 위험성

- 이산화탄소 배관은 기순가스 배관과 설계 및 재질 기준을 가지고 있음
- 그러나 이산화탄소 운송 배관은 다양한 불순물 (물, O₂, N₂, Ar, SO_x, NO_x, H₂, CO)을 포함할 수 있는데, 불순물 종류 및 함량에 따라 아래와 같이 운송 및 설비 건전성에 영향을 줄 수 있음

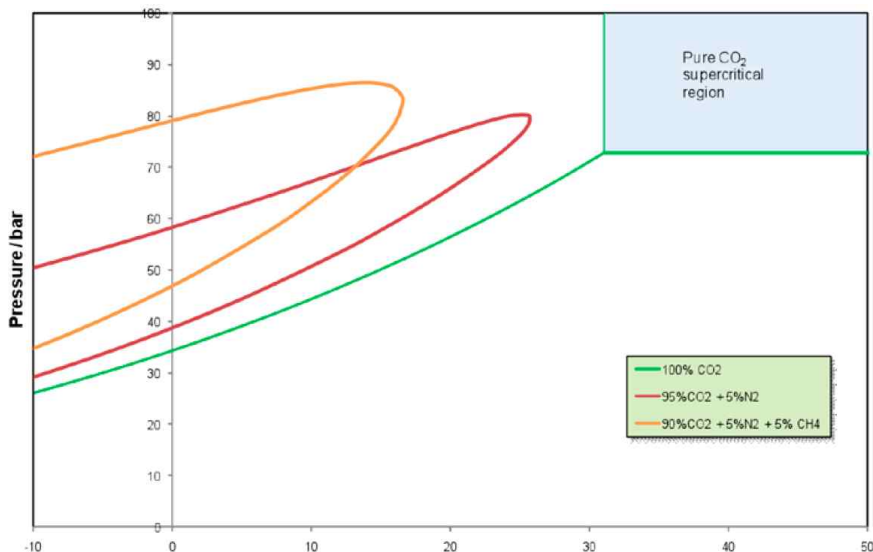
〈표 7〉 CCS 기술별 기체 조성 [52]

기체 종류	Post-combustion	Pre-combustion	Oxyfuel
CO ₂	>99 vol%	>95.6 vol%	>90 vol%
CH ₄	<100ppmv	<350 ppmv	-
N ₂	<0.17 vol%	<0.6 vol%	<7 vol%
H ₂ S	Trace	3.4 vol%	Trace
CO	<10ppmv	<0.4 vol%	Trace
O ₂	<0.01 vol%	Trace	<3 vol%
NO _x	<50 ppmv	-	<0.25 vol%
SO _x	<10 ppmv	-	<2.5 vol%
Ar	Trace	<0.05 vol%	<5 vol%

이산화탄소 상태도

- 이산화탄소 배관 내의 불순물은 이산화탄소의 열물리학적 특성과 상태도를 변화시킴
- 불순물 혼입에 따라 열확산율, 점도 및 마찰력에 따른 상변화 발생되며 이산화탄소 운송 비용 및 잠재적 안전 문제를 야기시킴
- 이산화탄소 내 불순물의 전반적인 영향은 그림 28과 같이 위상경계를 이동시키고 2상 지역을 만들어 피해야 하는 위험지역을 크게 증가시킴

〈그림 28〉 불순물 혼입에 따른 이산화탄소 상태도 [53]



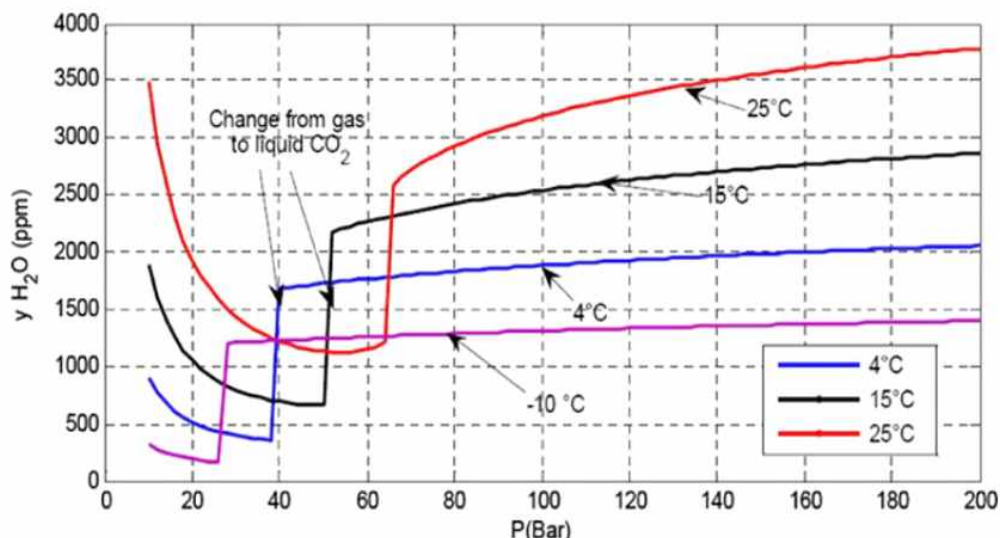
압축기 건전성

- 불순물 주입에 따른 이산화탄소 상태도 변화는 2상 유체 (액체-기체) 상태를 만들어 내어 컴프레서 프로펠러 근처에서 케비테이션 같은 운전상의 문제를 야기시킬 수 있음
- 이산화탄소와 황화수소 (H₂S)의 혼합 유체의 경우 이슬점 온도를 증가하는 현상을 보여줌
- 이는 액체 상태로 운송 시 액체 상태로 유지하기위해 더 높은 압력을 배관내부로 가해주어야 하며, 이는 기존 배관 설계 사항 변경을 요구하게 됨

배관 건전성

- 이산화탄소 배관 내 불순물은 취성, 부식, 연성 파손 문제를 야기시킬 수 있음
- 수소는 배관 재료의 격자 내에 침투하여 연성 및 강도를 저하시켜 취성 파괴를 일으킴
- 이산화탄소는 수분에 용해되어 탄산 (H₂CO₃)을 형성하여 배관 내부를 산성화시키며, 탄소강 배관인 경우 전면 부식 또는 국부 부식을 일으킴 [54]
- 산소, 황화수소, 이산화황, 질소산화물의 불순물도 부식을 일으키는 인자로 작용함.
- 초임계 상태의 이산화탄소는 매우 효율적인 용매의 특성을 지니기 때문에 잠재적인 위험 인자로 작용함[55]

〈그림 29〉 이산화탄소의 압력 및 온도에 따른 물 용해 곡선 [52]



❏ 파단 전파

- 취성 및 부식 등의 결함으로 인해 배관 누출 발생 시, 줄 톰슨 효과로 인해 누출 주변은 빠르게 냉각되고 국부적으로 재질의 인성치를 감소시켜 파단 (Fracture)을 일으킴
- 초임계 상태의 이산화탄소가 누출로 인해 갑자기 팽창하게 되면 파단 전파를 위한 상당한 힘이 발생함
- 배관 길이를 따라 일정한 간격으로 균열 방지기 (Crack Arrestor)를 설치하여 파단 전파에 따른 손상을 줄일 수 있음
- 하지만, 균열 방지기의 부적절한 위치 선정은 방지기 설치에 따른 모멘텀이 배관의 파손된 부분에 충격을 주어 긴 전파 파단형태가 발생할 수 있음[56]

〈그림 30〉 균열 방지기를 이용한 배관 보수 [56]





❏ 이산화탄소 누출

- 1상 이산화탄소 기체는 줄-톰슨 이론에 따라 압력 강하에 따른 기체 팽창 시, 주변 온도가 감소하게 되는데 ($27^{\circ}\text{C} - 1.030 \text{ K/bar}$, $75^{\circ}\text{C} - 0.770 \text{ K/bar}$), 고압의 이산화탄소 배관이 파열 될경우 고압의 이산화탄소가 팽창하면서 주변을 냉각시키고 주변 지역에 심각한 환경 문제를 야기시킬 수 있는 위험이 잠재


- 심각한 경우 대기 중에 이산화탄소 구름이 형성되거나 지상에 고체 이산화탄소 침전물이 존재하여 이산화탄소 누출이 분명하게 나타날 수 있음
- 이렇게 높은 농도와 부피의 이산화탄소가 누출되면 환경, 생태계, 특히 인구 밀도가 높은 지역에서 작업자와 일반인의 건강과 안전에 심각한 영향을 미침

라. 이산화탄소 배관 누출 감지

-  이산화탄소 배관의 누출 시, 이를 감지하고 정량화하기 위한 측정 방법이 필수
 - 탱크로 주입한 후에는 저장 부위의 지속적인 무결성을 보장하기 위해 지질학적 모니터링이 필요함
 - 배관 내부의 이산화탄소의 기체 열물리학적 특성을 모델링하여 이산화탄소 누출시 압력, 유량, 진동 등 특성과 차이 변화를 감지하여 실시간 위험을 감지하는 방법도 사용됨
-  캘거리대학교 배관 연구센터에서는 액체, 기체 및 2상 유체(액-기체)에 대해 인공지능 및 다양한 센서를 이용하여 배관 누출 감지 시스템 개발 및 연구하고 있음
 - 더불어 이 연구기관은 알버타 지역 오일 및 가스 산업 계와 긴밀히 협력하여 배관 건전성 관리 시스템을 개발하고 있음

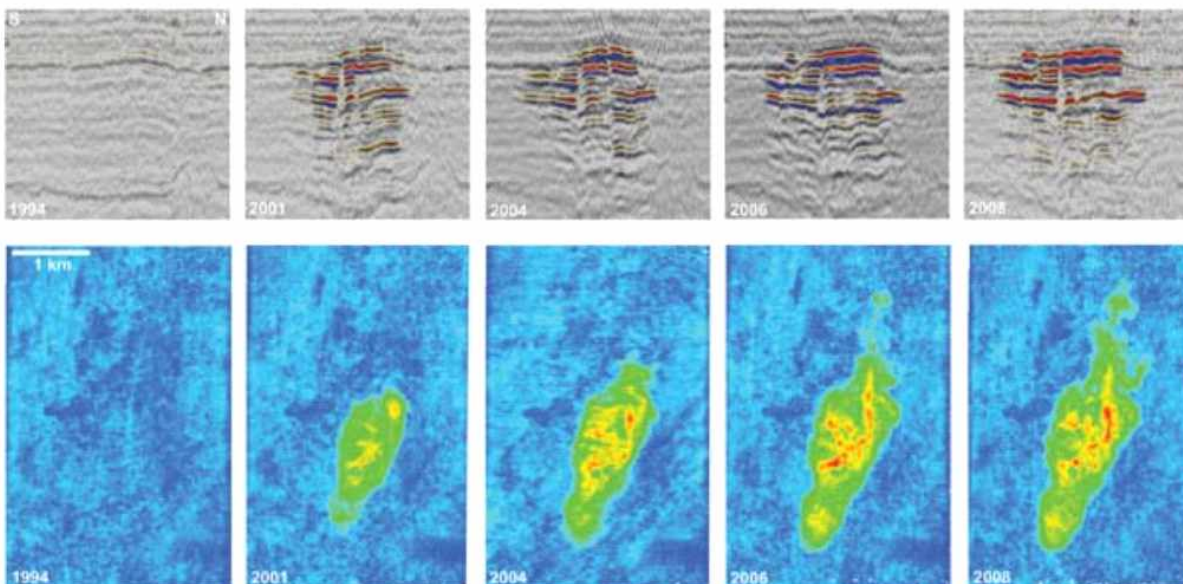
4

이산화탄소 모니터링

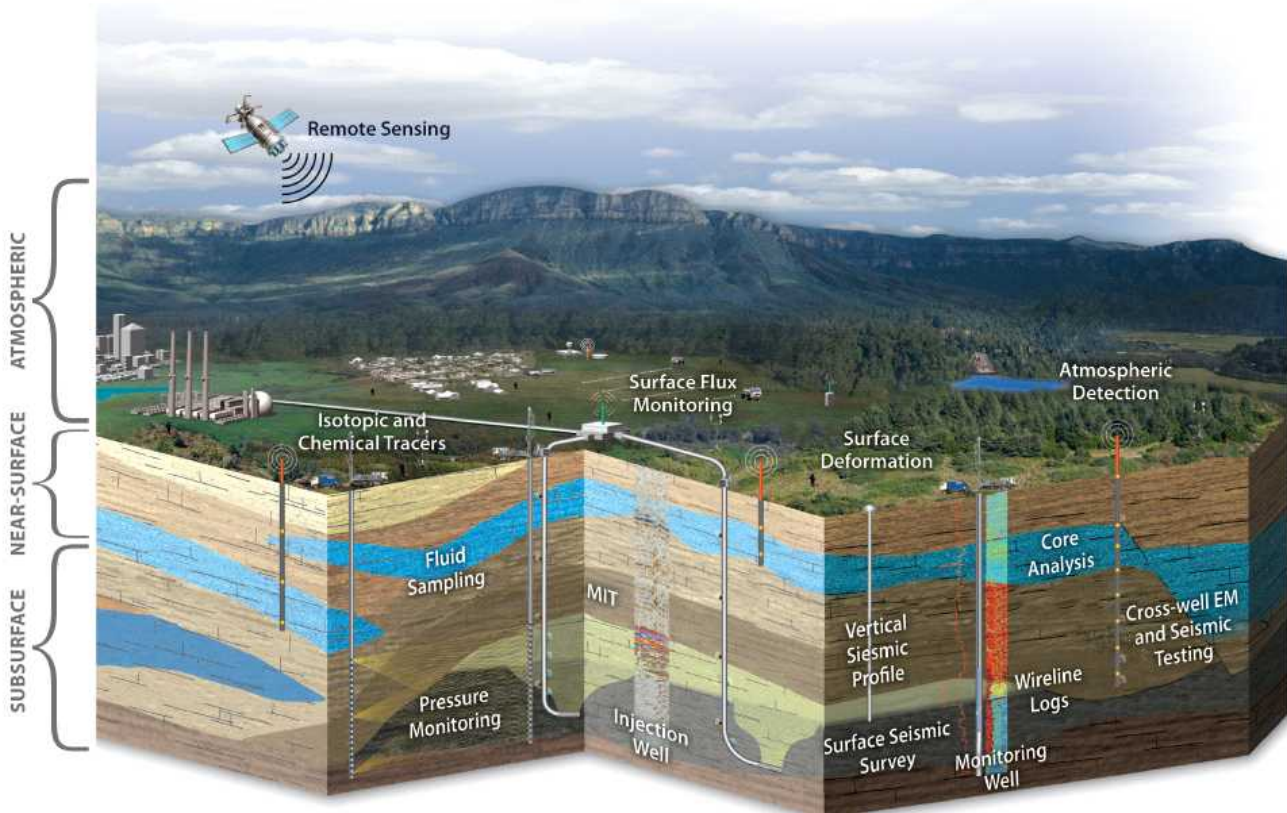
-  CCUS에 의해 저장된 이산화탄소가 지표면으로 유출되는 경우 심각한 인명 피해를 줄 수 있고, 지하수 및 생태계에 치명적으로 오염시키기 때문에 저장된 이산화탄소의 모니터링이 매우 중요함

- ▣ 주요 모니터링 항목으로는 지하에 주입된 이산화탄소의 플룸 위치 추적, 주입 및 이산화탄소가 저장되어있는 폐정에서 누출 여부 확인, 지하에 주입된 이산화탄소 양 측정이 있음
- ▣ 또한 인위적으로 이산화탄소를 주입함에 따라 지표면 하부의 내압의 증가로 발생하는 유도성 지진 같은 진동의 위험이 발생할 우려가 있음 [57]
- ▣ 미국 국가 에너지 기술 연구소 (National Energy Technology Laboratory, NETL)의 탄소 저장 프로그램 [57]
 - CCUS 관련 대기 모니터링, 지표면 모니터링, 지표면 하부 모니터링, 지능형 모니터링 총 4개 분야 모니터링 방법에 대해 지원함
 - 모니터링을 통해 자연적으로 발생된 이산화탄소와 인위적으로 발생된 이산화탄소를 구분하고 이산화탄소 플룸과 압력 변동을 확인하고, 이산화탄소 봉쇄 효과를 검증함
- ▣ 노르웨이 북해 Sleipner 지역 이산화탄소 주입 프로젝트
 - 1994년부터 2008년까지 삼차원 지진 모니터링을 수행하여 이산화탄소의 플룸 이동 추적 및 이산화탄소 봉쇄가 잘되었는지 확인하며 정량적인 정보를 제공함 (그림 31참조) [58]

〈그림 31〉 이산화탄소 플룸의 시간적 변화 [58]



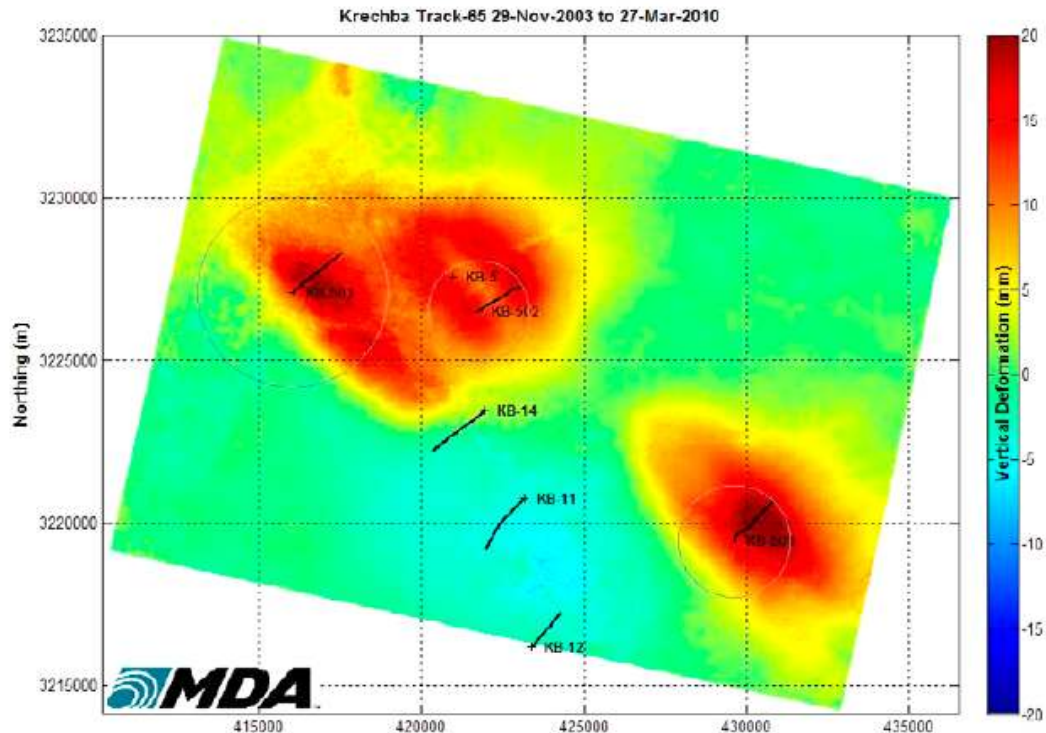
〈그림 32〉 CCUS 모니터링 방법에 따른 위치를 나타낸 모식도 [57]



알제리 Salah 프로젝트

- 가스전에서 발생된 이산화탄소를 알제리 Krechba 지역 1850m 깊이에 있는 암석층에 저장하였고 인공위성 기반 간섭계 합성 개구 레이더 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 기술을 이용하여 이산화탄소 주입에 따른 지표면 변화를 감지하는데 사용됨
- 그림 33은 이산화탄소 주입에 따른 지표면상승을 인공위성을 이용하여 이미지화 한 것으로 빨간색 영역은 지표면 상승을 나타냄[59]

〈그림 33〉 인공위성을 활용한 이산화탄소 저장 위치 추적을 나타낸 데이터 [58]

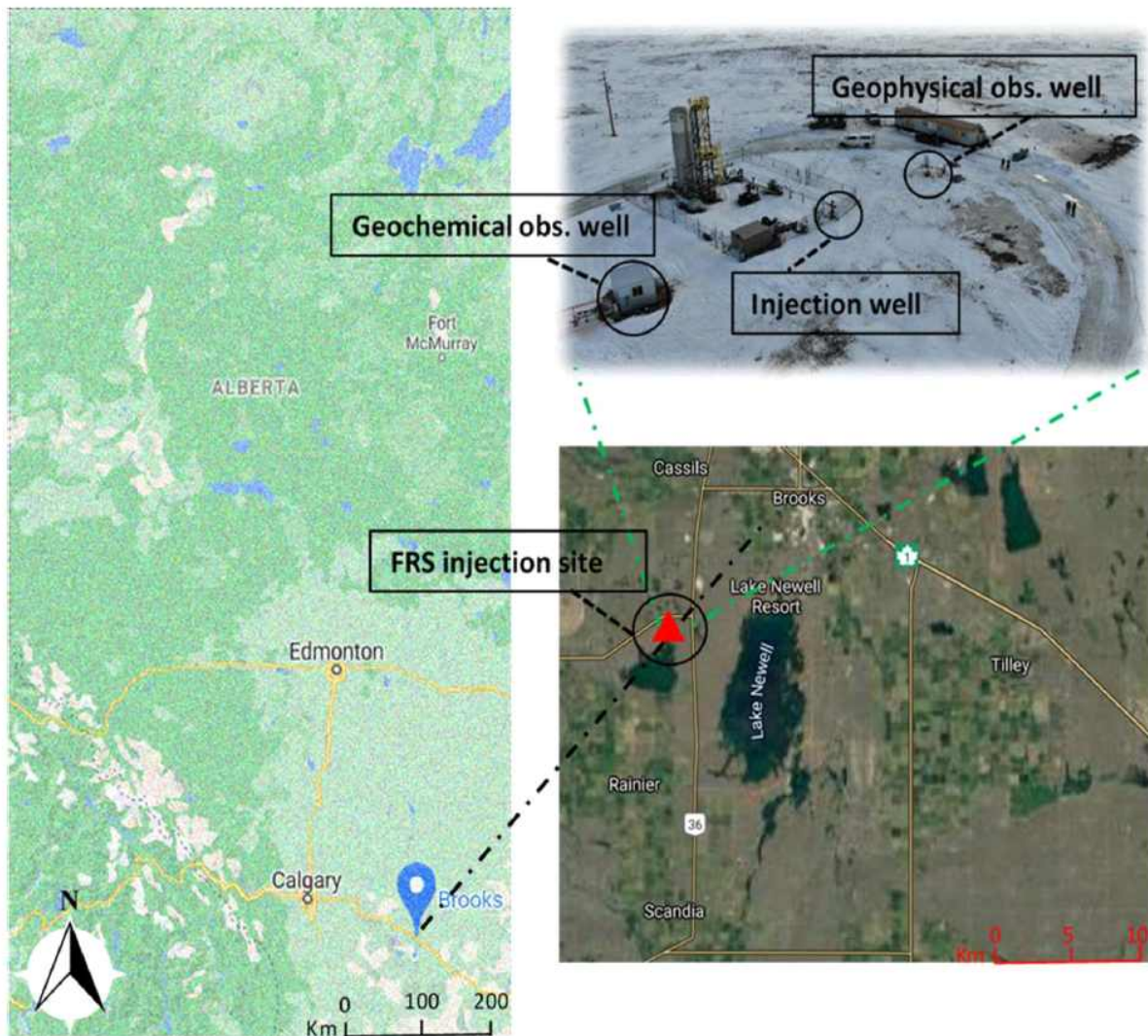


캐나다의 CAMI (The Containment and Monitoring Institute) 프로젝트

- CAMI는 캘거리대학교와 함께 이산화탄소의 안전한 봉쇄를 위한 모니터링 및 검증 기술 발전을 위한 현장 연구 기지를 공동으로 운영하고 있음
- 알버타주 브룩(Brook) 부근 BBRs (Basal Belly River Sandstone) 지역에 지하 300m 깊이로 세 개의 수직 Well (1개의 주입용, 2개의 관측용)을 설치하여 매일 1톤 이하의 이산화탄소 주입하고 있음 (그림 34)
- 이산화탄소가 주입되는 지역은 백악기 시대 생성된 염수 포화 사암이며 셰일, 혼합석, 및 석탄으로 이루어진 캡록 (Caprock)층에 아래에 존재함[60]
- 총 200헥타르 규모의 이산화탄소 주입 현장에 있는 이 연구 시설에서는 지하에 저장된 이산화탄소 추적 및 검출 임계값을 결정하고 이산화탄소 주입이 지하수에 미치는 영향을 평가하기 위한 이산화탄소 측정 및 기술 테스트를 개발하고 있음

- 이산화탄소 주입하는 통로에 광섬유 케이블, 열 펄스 케이블 및 전기저항 케이블을 설치하여 내부압력 및 온도 분포 (그림 13), 전기저항 등을 측정하여 이산화탄소 저장 상태를 평가하고 있음[25]

〈그림 34〉 CAMI 시설 위치 [60]



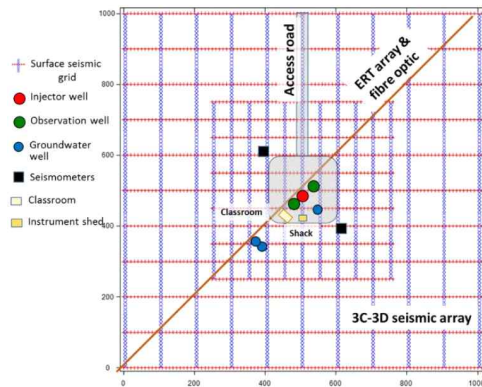
- 이 연구소에서는 이산화탄소 저장탱크 및 응축기 타워 (그림 35a), 이중 주파수 조합 레이저 분광계 (Dual Frequency Comb Laser Spectrometer) (그림 35b)와 Picarro 공동링 다운 분광계 (Picarro cavity ring-down spectrometer), 광학가스 이미징 카메라를 갖춘 메탄 방출 감지 센터가 있으며 이 센터는 7평방 킬로미터 지역에 걸쳐 지속적이고 간헐적인 감지 및 이산화탄소 방출을 정량화 하고 있음 (그림 36) [61]

〈그림 35〉 CAMI 연구소 이산화탄소 감지 설비 [62]

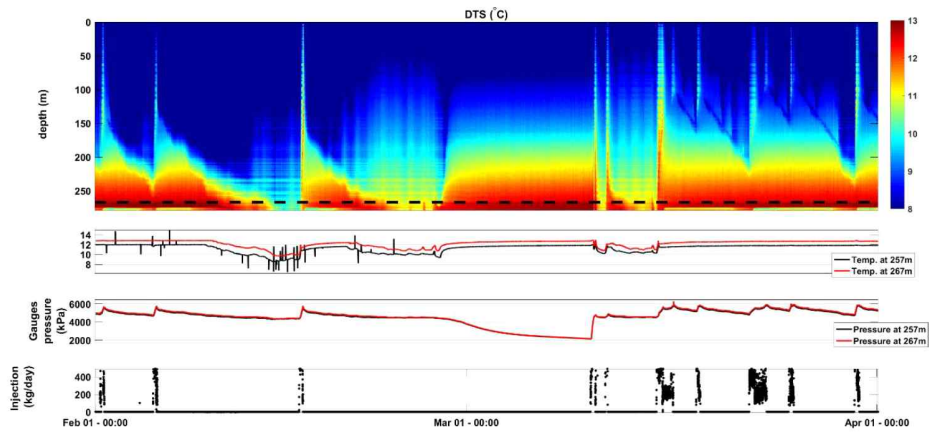


a. 이산화탄소 저장탱크 및 콘덴서 타워 설비 b. 이중 주파수 조합레이저 분광계

〈그림 37〉 CAMI 연구소 지역 및 연구설비 지도 [63]



〈그림 38〉 Distributed Temperature Sensing (DTS)을 활용한 이산화탄소 주입부 온도 분포 결과 [63]





- ❏ 본 보고서에서는 최근 10년간 캐나다에서 개발되고 있는 탄소중립기술 중 CCUS (Carbon Capture, Utilization, and Storage) 관련된 기술들과 프로젝트들을 주로 살펴봄
- ❏ 캐나다는 2050년 탄소 배출량 제로화 (Net Zero) 달성을 위해 캐나다 전역에 CCUS 지원 의사를 밝히며, 2021년 연방정부 예산 중 3.19억 캐나다 달러(약 3천억원)를 향후 7년간 CCUS 연구개발에 투자하기로 발표하였고 주정부에서도 다양한 연구개발 프로젝트를 지원
- ❏ 2050년 탄소 배출량 제로화 정책에 따라, 연방정부의 주정부의 지원으로 다양한 CCUS 기술이 현재 개발되고 있으며, 특히 오일샌드를 통한 중유 생산과 천연가스 생산량이 많은 서부 캐나다 지역에서는 이산화탄소 배출 감축이 심각한 문제로 대두되고 있음에 따라 CCUS 기술개발을 위한 대형 프로젝트들이 진행
- ❏ 따라서, 한국은 캐나다에서 이미 실증하여 증명된 CCUS 기술들을 잘 살펴보고 국제협력사업을 통한 기술 도입 및 민간 기업간의 교류 및 기술개발 투자를 통해 실질적인 노하우를 전수받는 시급한 대응이 필요



참고문헌

- [1] BP Statistical Review of World Energy. 2020. “BP Statistical Review of World Energy.”
<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- [2] US Energy Information Administration. 2019. “International Outlook 2019 with projections to 2050”
- [3] Ziyarati, M., T., Bahramifar, N., Baghmisheh, G., Younesi, H. 2019. Greenhouse gas emission estimation of flaring in a gas processing plant: Technique Development. *Process Safety and Environmental Protection*, 123: 289-298.
- [4] Bryant E. 1997. “Climate Process and Change”, United Kingdom: Cambridge University Press
- [5] UNECE. 2021. “Carbon Capture, Use and Storage (CCUS): Technical Brief
<https://unece.org/sed/documents/2021/03/reports/technology-brief-carbon-capture-use-and-storage-ccus>.
- [6] PTRC. 2020. CCS Potential in the Heavy Oil Regions of Saskatchewan and Alberta, White Paper
<https://ptrc.ca/media/whats-new/ptrc-launches-its-white-paper-ccs-potential-in-the-heavy-oil-regions-of-saskatchewan-and-alberta>
- [7] <https://www.powermag.com/is-eor-a-dead-end-for-carbon-capture/>
- [8] <https://www.drax.com/carbon-capture/how-do-you-store-co2-and-what-happens-to-it-when-you-do/>
- [9] <https://www.canada.ca/en/department-finance/news/2021/06/department-of-finance-launches-consultations-on-investment-tax-credit-for-carbon-capture-utilization-and-storage.html>
- [10] <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/greenhouse-gas-emissions.html>
- [11] International CCS Knowledge Centre. 2021. “Canada’s CO2 Landscape, A Guided Map For Sources and Sinks”
- [12] <https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/energy-markets/market-snapshots/2019/market-snapshot-carbon-capture-utilization-storage-market-developments.html>
- [13] N. Ihejirika, The Oxford Institute for Energy Studies (OIES) Paper: ET02. The Role of CCUS in Accelerating Canada’s Transition to Net-Zero. September 2021.
- [14] <https://www.nrcan.gc.ca/science-and-data/funding-partnerships/funding-opportunities/current-investments/veloxothermtm-co2-capture-process-demonstration/20424>
- [15] <https://open.alberta.ca/dataset/28e8388c-e5eb-431e-acbf-43b32ef0d9b3/resource/67099428-7c35-45e2-a320-69b7f9bfeac8/download/fscs.pdf>

- [16] <https://www.saskpower.com/>
- [17] Enhance Energy Inc, Wolf Carbon Solution, North West Redwater Partnership, (2020), "Knowledge Sharing Report, Division A: Summary Report
<https://open.alberta.ca/dataset/90f61413-0ef1-45a4-9e1c-6bff7c23fd7e/resource/f63e6823-4eec-4a62-9590-b6a091c7a058/download/energy-actl-knowledge-sharing-2019-summary-report.pdf>
- [18] Remtulla, F., Long, D., Cole, S. 2011. The Alberta Carbon Trunk Line (ACTL)
- [19] Global CCS Institute: Capturing CO2. <https://www.globalccsinstitute.com/about/what-is-ccs/capture/>
- [20] IEA ETP Clean Energy Technology Guide, November 4, 2021.
<https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide>
- [21] M. Wang et al., 2015 Process intensification for post-combustion CO2 capture with chemical absorption: A critical review. *Applied Energy* 158: 275–291.
- [22] Green Car Congress: Energy, technologies, issues and policies for sustainable mobility.
<https://www.greencarcongress.com/2013/05/air-products-heralds-successful-operation-of-project-to-capture-co2-from-hydrogen-production-for-use-in-enhanced-oil-recovery.html>
- [23] International Energy Agency (IEA) Energy Technology Perspectives 2020: Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage, September 2020.
- [24] NWR Knowledge Sharing Report–Division A: 2018 Summary Report, Enhance Energy Inc., Wolf Carbon Solutions, and North West Redwater Partnership. March 2019.
- [25] K. Heal and T. Kemp, 2013. North West Sturgeon Refinery Project Overview – Carbon Capture Through Innovative Commercial Structuring in the Canadian Oil Sands. *Energy Procedia* 37: 7046–7055.
- [26] K. Stephenne, 2014. Start-Up of World's First Commercial Post-Combustion Coal Fired CCS Project: Contribution of Shell Cansolv to SaskPower Boundary Dam ICCS Project. *Energy Procedia* 63: 6106–6110.
- [27] Power Technology, SaskPower Boundary Dam and Integrated CCS.
<https://www.power-technology.com/projects/sask-power-boundary-dam/>
- [28] Hydrocarbons Technology, Quest Carbon Capture and Storage Project, Alberta.
<https://www.hydrocarbons-technology.com/projects/quest-carbon-capture-and-storage-project-alberta/>
- [29] The Quest for less CO2: Learning from CCS implementation in Canada, Shell International, 2015.
<https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/196788/quest-less-co2-learning-ccs-implementation-canada.pdf>
- [30] Zero CO2 NO, Great Plains Synfuels Plant. <http://www.zeroco2.no/projects/the-great-plains-synfuels-plant>
- [31] Husky Energy Final Outcomes Report: Lashburn CO2 Capture Demonstration Project, March 2018.
- [32] H. Ju et al., 2018. Development of a facile reclaiming process for degraded alkanolamine and glycol solvents used for CO2 capture systems. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 74: 174–181.

- [33] J. Ren et al., 2015. One-Pot Synthesis of Carbon Nanofibers from CO₂. *Nano Letters* 15: 6142–6148.
- [34] Carbon Engineering News Updates, Air Canada and Carbon Engineering Sign MoU to Explore Commercial Opportunities for Sustainable Aviation Fuel, Carbon Removal and Decarbonization Technology, November 2021. <https://carbonengineering.com/news-updates/air-canada-ce-mou/>
- [35] CenterPoint Energy, Piloting an Innovative New Carbon Capture Technology, 2019. <https://www.centerpointenergy.com/en-us/business/services/clean-energy-innovation/carbon-capture-recycling?sa=TX>
- [36] <https://eralberta.ca/projects/details/coupled-co2-wastewater-treatment-process-create-high-value-gasoil-field/>
- [37] <https://eralberta.ca/projects/details/novel-internal-dry-reforming-solid-oxide-fuel-cell-technology-co2-utilization/>
- [38] Holloway, S. and Savage, D. 1993. The potential for aquifer disposal of carbon dioxide in the UK, *Energy Conversion and Management*, 34:925–932.
- [39] Bachu, S., Brulotte, M., Grobe, M., Stewart, S. 2000. Suitability of the Alberta Subsurface for Carbon-Dioxide Sequestration in Geological Media, *Earth Science Report 2000–11*
- [40] Coquelet, C., Stringari, P., Hajiw, M., Perez, A. G., Pereira, L. M. C., Nazeri, M., Burgass, R., Chapoy, A. 2017., Transport of CO₂ : Presentation of New Thermophysical Property Measurements and Phase Diagrams. *Energy Procedia*, 114, 6844–6859
- [41] Raza, A., Rezaee, R., Gholami, R., Bing, C. H., Nagarajan, R., Hamid, M. A. 2016. A Screening Criterion for Selection of Suitable CO₂ Storage Sites, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 28, 317–327
- [42] Machado, C. X., Ketzer, M., Rockett, G., Centeno, C.I. 2010. Brazilian Atlas on CO₂ Capture, transport and geological storage: Developing methodology, Rio Oil & Gas Expo and Conference 2010
- [43] van der Meer, L.G.H. 1993. The conditions limiting CO₂ storage in aquifers, *Energy Conversion and Management*, 34:959–966.
- [44] Stevens, S.H, Kuuskraa, V.A., Spector, D., and Riemer, P. 1999. CO₂ sequestration in deep coal seams: pilot results and worldwide potential, In *Greenhouse Gas Control Technologies*, Eliasson, B., Riemer
- [45] Tek, M.R. 1989. *Underground Storage of Natural Gas: Theory and Practice* (Boston:Kluwer), NATO ASI Series E, Applied Sciences, 171.
- [46] Bradley, R.A., Watts, E.C., and Williams, E.R. 1991. *Limiting Net Greenhouse Gas Emissions in the U.S.*, Vol. 1, Report to the United States Congress, (Washington: United States Department of Energy).
- [47] Wichert, E. and Royan, T. 1997. Acid gas injection eliminates sulfur recovery expense, *Oil and Gas Journal*, 95(17),67–72.
- [48] Balaji, K. 2020. *Carbon-Dioxide Pipeline Infrastructure Route Optimization and Network Modeling for Carbon Capture Storage and Utilization* (Doctoral dissertation) University of North Dakota, Grand Forks, North Dakota

- [49] Cole I. S., Corrigan, P., Sim, S., Birbilis, N. 2011. Corrosion of pipelines used for CO₂ transport in CCS: Is it a real problem? *International Journal of Greenhouse Gas Control*,5,749–56
- [50] Martynov, S., Talemi, R., Brown, S., Mahgerefteh, H. 2017. Assessment of Fracture Propagation in Pipelines Transporting Impure CO₂ Streams, *Energy Procedia*, 114, 6685–6697
- [51] Oldenburg, C. M. 2006. Joule–Thomson Cooling due to CO₂ Injection into Natural Gas Reservoirs, *Energy Conversion and Management*, 48(6)
- [52] Bilio, M., Brown, S., Fairweather, M., Mahgerefteh, H. 2009. CO₂ Pipelines Material and Safety Considerations, *Institution of Chemical Engineers Symposium Series*, 155, 423–429
- [53] Norman, G., Lynn, H. 2011. Measurement Challenges for Carbon Capture and Storage, *Measurement and Control*, 44, 81–85.
- [54] API 571. 2011. *Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry*, American Petroleum Institute
- [55] <https://www.saskpower.com/>
- [56] Onyebuchi, V.E., Kolios, A., Hanak, D.P., Biliyok, C., Manovic, V. 2018. A systematic review of key challenges of CO₂ transport via pipelines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(2), 2563–2583
- [57] United States Department of Energy. 2013. “Carbon Storage Technology Program Plan”
- [58] Chadwick, A., Williams, G., Delepine, N., Clochard, V., Labat, K., Sturton, S., Buddensiek, M., Dillen, M., Nickel, M., Lima, A. L., Neele, F., Rossi, G. 2010. “Quantitative analysis of time-lapse seismic monitoring data at the Sleipner CO₂ storage operation”, *The Leading Edge*,29(2):170
- [59] Mathieson, A., Midgely, J., Wright, I., Saoula, N., Ringrose, P. 2011. In Salah CO₂ Storage JIP: CO₂ sequestration monitoring and verification technologies applied at Krechba, Algeria, *Energy Procedia*, 4, 3596–3603
- [60] Raad, S. M. J., Lawton, D., Maidment, G., Hassanzadeh, H. 2021. Transient non-isothermal coupled wellbore–reservoir modeling of CO₂ injection — Application to CO₂ injection tests at the CaMI FRS site, Alberta, Canada, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 111
- [61] <https://research.ucalgary.ca/energy/energy-research/containment-and-monitoring-institute-cami>
- [62] <https://cmcghg.com/cami/>
- [63] Carbon Management Canada, (2021, April 19), "Canadian Experience in Intermediate and Deep Subsurface CO₂ Monitoring and Storage Webinar [Video], YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=4QQ5wHgWybM>



캐나다 탄소중립기술 개발 현황

발 행 일 | 2022년 7월

작 성 자 | 워싱턴 거점 김은정 소장 (ejkim@kiat.or.kr)

문 의 처 | KIAT 국제협력기획팀 (jskim11@kiat.or.kr)

-
- ※ 본 자료에 수록된 내용은 한국산업기술진흥원의 공식적인 견해가 아님을 밝힙니다.
 - ※ 본 내용은 무단 전재할 수 없으며, 인용할 경우, 반드시 원문출처를 명시하여야 합니다.
 - ※ 본 자료는 GT온라인 홈페이지(www.gtonline.or.kr)를 통해서도 보실 수 있습니다.



KIAT(한국산업기술진흥원)
미국 워싱턴 D.C. 거점
김은정 소장



KIAT
유럽 벨기에 거점
강주석 소장



KIAT
베트남 하노이 거점
임병혁 소장



KEIT(한국산업기술평가관리원)
미국 실리콘밸리 거점
박성환 소장



KEIT
유럽 독일 거점
박효준 소장



KORIL(한국이스라엘산업연구개발재단)
유럽 이스라엘 거점
최정인 소장