

새로운 CO₂ 포집 태스크포스 보고서

2011년 12월

ANLEC R&D

Brown Coal Innovation, Australia



새로운 CO₂ 포집 태스크포스 보고서는 편의를 위해 영어에서 한국어로 번역되었다.
글로벌 CCS 연구소는 한국어로 번역된 보고서의 정확도, 진위성과 완성도를 보장하지 않는다.



요약

정부의 CO₂ 배출 감축 목표를 달성하기 위해서는 저탄소 기술 포트폴리오를 개발해야 한다. 호주의 전력 에너지 대부분이 석탄을 이용하여 생산되고 있으며, 천연가스 사용이 점차 늘어나고 있는 추세이다. 호주에서는 이러한 화석연료로부터 배출되는 CO₂의 지중 저장에 관하여 대대적으로 연구하고 있다. 이 연구는 지질학적 저장의 대안 수단으로서 CO₂ 포집 및 저장을 조사하기 위해 ¹BCIA, ²ANLECR& D, ³GCCSI의 지원 하에 수행되고 있다. 태스크포스(Task Force)에 의해 발견된 새로운 CO₂ 포집 기술 분야는 바이오 분리 및 미네랄 분리이며, 그 정의는 다음과 같다.

*바이오 분리(Bio-sequestration)*는 바이오 공정을 통해 대기 중의 CO₂를 포집 및 저장하는 것이다. 이는 증가한 광합성[재식림(re-forestation), 혹은 재식림 감축(decreased de-forestation)을 통해]과 농업 분야에서 포집되는 토양 탄소나 산업 공정에서 배출되는 CO₂를 흡수하기 위한 조류 바이오 처리를 통해 이루어질 것이다.

미네랄 분리(Mineral sequestration) 혹은 *미네랄 탄화(mineral carbonation)*는 현재 일반적으로 볼 수 있는 금속 산화물과 CO₂의 반응을 포함하고 있는데, 이는 자연적으로 암석에서 발생하는 것이다. 이 과정은 자연 풍화 현상과 비슷하며 지질 연대표상 안정적인 자연 탄화물이 생성된다.

태스크포스 연구는 2011년 1월에 착수되어 2011년 8월에 종료되었다. 첫 활동은 산업, 대학, CSIRO 소속의 개별 전문가들을 워크숍에 소집하여 연구 활동 계획을 세우는 것으로 시작했다. 워크숍 활동의 일환인 가설 및 답변이 연구 활동 계획의 주요 내용으로서 진행되었다. 연구 기간 동안 태스크포스로 진행된 가설 및 이에 대한 답변은 다음과 같다.

가설 1 : "태스크포스의 실행 가능성 평가 및 다양한 공정에 대한 우선순위 선정이 가능한 탄소 포집 신기술과 관련된 충분한 과학적·기술적 문헌이 존재한다."

답변 : "확실히 그렇다."

가설 2 : "2020년까지 상용화급 신규 CCS 프로젝트가 가동되어 이윤을 창출할 수 있다."

답변 : "아니다."

가설 3 : "사용할 수 있는 CCS 신기술의 지속 가능성과 영구성에 대해 2015년까지 과학적 합의에 도달할 것이다."

답변 : 일반적으로 "아니다."

¹ Brown Coal Innovation Australia Limited, Melbourne

² Australian Low Emission Coal Research and Development, Canberra

³ Global Carbon Capture and Storage Institute Limited, Canberra

가설 4: "석탄은 새로운 탄소 포집 및 저장 방법으로 2020년까지의 온실가스 감축 목표에 공헌할 수 있는 충분한 저장 용량을 갖추고 있으며, 150kg/MWh 을 배출하는 호주의 기저부하용 발전(base-load power) 부문에서 가장 저렴한 비용 옵션이 될 것이다."

답변: "아니다."

가설 5: "2015년까지 탄소 포집 및 저장 신기술은 효과적인 회담 및 교육, 사회적 동의 고시를 통해 지역사회와 규제 담당자들에게 수용될 것이다."

답변: "아니다."

가설 6: "2015년까지 HC 저장 시스템 SPE 2007 과 유사하면서 국제적으로 보급될 수 있는 CO₂ 처리량 증가 방법이 개발될 것이다."

답변: "아니다."

가설 7: "적합한 것으로 분류되는 호주의 광물화 원료 맵이 제작될 수 있다."

답변: "확실히 그렇다."

위 가설의 답변에 대한 상세 설명은 보고서의 주요 항목에서 다뤄질 것이다. 태스크포스는 가설에 답하기 위해 다양한 관점에서 문제를 고려하고 있다. 이는 열람 가능한 일반적인 공식 문헌, 기술 상용화 지지자들과의 논의, 각 분야 과학 전문가들과의 이슈 검토, 벤처 자본 공급자와 금융가, 옵션 가치 및 기타 분석 방법에 따른 태스크포스의 금융 분석을 포함한다. 이 모든 측면들은 보고서의 세부 항목에서 다뤄질 것이다.

전문가 및 기술자의 문헌 조사와 논의를 통해 볼 때, 태스크포스가 고려하고 있는 기술들은 현재 대부분 '개념적'이고 '초기 단계'에 있는 것으로 여겨져 왔다. '개념적'인 기술들은 철저히 과학적인 데이터와 분석 보다는 아이디어에 기반을 둔 것이다. '초기' 기술들은 지지자들의 주장을 뒷받침하기 위한 벤처 규모의 과학 실험 데이터를 보유하고 있다. 이러한 맥락에서, 대다수 기술들은 주요 경쟁 이점을 제공할 수 있는 상용화의 초기 단계는커녕 그 개발 수준이 아직 파일럿 단계에도 이르지 못했다. 이는 위의 가설에 대한 답변 대부분이 부정적인 이유 중 하나이다.

해조류 재배 기술은 기능 식품과 같은 고부가가치 상품 생산을 위해 개발되었다. 해당 기술 중 일부는 대기 중의 CO₂를 활용하고 해조류를 재배하기 위해 상당히 외진 곳에 위치한 큰 연못을 활용한다. 하지만 CO₂를 보다 집중적으로 활용하는 고생산성의 해조류 공정은 초기 단계에 있다. 해조류 슬러리(algal slurries) 축진을 위한 개방 연못의 답차 수로식 양식장(paddlewheel raceways)을 주로 사용하는 이러한 공정에 대해 기술한 수많은 출판물이 지난 수십 년간 발간되어 왔다. 아직까지 이러한 공정은 석탄 화력발전소 배출 CO₂ 포집에 요구되는 규모로 확장되지 않았다. 보고된 생산성에 비추어 볼 때, 활용을 위해 필요한 육지 영역은 매우 광대할 뿐만 아니라, 이를 설치하기 위해서는 일반적으로 CO₂ 백만 톤당 수천 헥타르의 부지가 필요하다. 일 년에 1 천만 톤이 넘는 CO₂를 배출하는 전면적 규모 발전소의 경우, 해당 기술 활용을 위해 어마어마한 규모의 부지가 필요하다는 것은 매우 분명한 사실이다. 더욱이 태스크포스는 생산성의 범위가

넓다는 것을 확인하였는데, 이는 곧 상용화 규모의 시스템에 대한 불확실성을 의미한다. 태스크포스가 추산한 바에 따르면, 광합성 기반의 대규모 미세 해조류는 태양광을 이용해야 한다는 한계로 인해 하루 24 시간 중 일부 동안만 CO₂를 소비할 수 있다는 것이 밝혀졌다. 이러한 결과로 볼 때, 연도 가스의 저장은 실현이 어렵기 때문에 CO₂의 20~25%만을 포집할 수 있을 것이다. 그러므로 다른 부지와 비용 문제를 떠나 해조류 재배는 CCS 문제의 부분적인 해결책에 불과할 수밖에 없다. 그러나 발전소에 대한 CO₂ 이용 해조류 재배 틈새시장 적용은 해조류 오일과 공급 원료 같은 부가가치 상품의 생산에 초점을 둔 상용화의 활용에는 적절할 것이다.

현재 CO₂의 해조류 “재활용”이 실제로 분리에 해당하는지 대해 대중들 사이에 논쟁이 일고 있다. 태스크포스는 메탄, 해조류 오일과 같은 해조류 에너지 상품이 화석연료 등과 동등한 것들로 대체될 것이라는 태도를 취해 왔다. 이는 대체된 화석연료가 여전히 지하에 매장되어 있음을 의미한다. 이러한 상황에서 CO₂의 해조류 포집은 전력 생산을 위한 바이오 매스 연소와 같은 방식으로 여겨질 수 있다.

CO₂를 이용한 암석 내 마그네슘과 칼슘의 광물 탄산화는 수 년 간 연구되어 왔다. CO₂와 암석 간 화학 반응은 매우 느리게 진행되며, 간혹 열을 이용한 암석의 활성화 작용이 필요한 경우도 있다. 탄산화 반응을 일으키기 위해 고압, 고열이 필요하다는 것이 연구에서 밝혀졌다. 호주 NSW 주에서 발견된 다량의 적합한 암석은 전력 생산소 인근에서 이용될 수 있다. CO₂ 1톤 당 약 3톤의 암석이 필요하기 때문에 광물 탄산화 운영 규모는 상당히 크다. 예를 들어, NSW 주 헌터 밸리(Hunter Valley) 발전소에서 배출된 CO₂를 포집하기 위해서는 매년 3천만 톤 이상의 암석이 채굴되어야 하며, 정제된 탄산 찌꺼기는 거의 4천만 톤에 달한다. 이러한 기술이 환경에 미치는 영향은 매우 크며, 기술의 사회적 수용에도 영향을 미칠 수 있다. 다량의 원료 및 가스가 필요하기 때문에 광물 탄산화 공정은 위치의 영향을 크게 받을 가능성이 높다. 일반적으로 이러한 시설은 마그네슘 산화물 자원 인근에 위치해야 한다는 것을 의미한다.

철, 크롬, 니켈, 산화니켈, 암석 등으로부터 부가가치 상품을 생산할 수 있으며, 이는 해당 공정의 잠재적인 경제성 실현을 돕는다. 그럼에도 불구하고, 문헌상으로는 해당 기술의 자본과 운영 비용이 일반적으로 높은 것으로 드러난다. 태스크포스가 진행한 경제성 분석에 의하면, 기존 공정이 합리적인 수익률 수준의 경제적인 공정이 되기 위해서는 높은 CO₂ 가격 책정이 필요하다는 점을 보여 준다. 하지만 광물 탄산화에 대한 과학적·화학적 엔지니어링 연구는 여전히 초기 단계이며, 벤치 규모에 머물러 있다. 효율성을 높이고 비용을 줄이기 위한 새로운 기술은 현재 개발 중이다. 태스크포스는 효율성 개선에 필요한 만큼 규모를 확대하는 것이 광물 탄산화에 커다란 변화를 가져올 것이라고 생각하고 있다. 하지만 향후 공정의 실행 가능성과 지속 가능성은 분명히 필요하다.

이보다 고효율, 저비용의 화학 및 플로시트 기반 기타 새로운 광물 탄산화 공정이 있다. 이러한 공정은 더 높이 평가되는 이유는 광물 탄산화가 수백 년간 필요한 양의 CO₂를 실제로 영구 분리할 수 있는 충분한 규모와 원자재를 동반하는 몇 안 되는 기술들 중 하나이기 때문이다.

삼림 관리는 대기 중의 CO₂ 처리를 위해 현재 사용할 수 있는 성숙한 기술이다. 실제로 일반인들은 대중교통에서의 CO₂ 배출을 상쇄할 수 있는 CO₂ 배출권(credit)을 구입할 수 있다. 이는 호주의 자발적 기준에 근거하여 상대적으로 낮게 책정된 CO₂ 가격과, 삼림 관리를 통해 상업적 CO₂ 처리를 활용하고 있는 호주 대기업들과 관련한 것이다. 태스크포스는 상업적 이윤 선에서 CO₂ 가격이 세계 탄소 배출권거래제 상의 예상 가격에 근접하다는 사실을 밝혀냈다. 이는 투자자들에게 해당 사업과 관련하여 합리적인 토지 비용과 납득 가능한 수준의 삼림 생산성을 제공한다는 경제성 측면에서 상대적인 매력으로 작용한다. 그러나 호주 토지의 이용 가능성은 낮으며, 농업과 임업 부문은 계획된 국가 탄소 거래제에 아직 포함되지 않았다. 태스크포스는 석탄 화력발전소를 위한 삼림에서의 CO₂ 처리에 대해 전체적인 기여 가능성이 상대적으로 낮은 것으로 평가하였다. 더욱이, 삼림을 통한 CO₂ 활용 및 처리는 숲이 생성된 지 10~20 년 후나 최고조에 이를 수 있으며 비선형적이다.

토양 내 이산화탄소의 처리는 현재 정치적으로 큰 이슈가 되고 있다. 또한 과학적 불확실성과 관련된 주제이기도 하다. 토양 내 이산화탄소가 농업 생산성을 향상시킨다는 증거 사례가 고대, 현대에 모두 존재한다. 탄소 경작 이니셔티브(Carbon Farming Initiative)와 같은 프로젝트에서의 농업적 관행을 통해 호주의 토양 탄소를 증가시키려는 목적이 생산성에 긍정적인 영향을 끼칠 것이라는 점은 분명하다.

대기로부터 탄소를 처리하기 위해 토양에 탄소를 주입하는 문제는 더욱 논란이 많다. 토양 탄소는 영구적이지 않으며 호주 토양 내 탄소는 지난 200 년간 감소 추세였다. 문헌에 의하면, 탄소는 그 특성에 따라 토양에서 이탈했다가 다시 대기로 상대적으로 빨리 되돌아와 분리 현혹 현상을 일으킬 수 있다. 반면에 바이오숯에서 만들어지는 고농도 목탄(charcoal)은 수 세기 동안 토양에 포함되어 있을 수 있고,⁴ 내생적인 토양 탄소 요소를 강화할 수 있다. 이는 특히 갈탄(lignite) 같은 화석연료 파생물을 이용한 토양 탄소의 증진과 관련이 있다. 갈탄 파생물 주입과 같은 기술은 농업 생산성을 높이지만, 장기간에 걸쳐 대기 중에 있는 다량의 CO₂를 처리할 수 있을지에 대해서는 아직 보장할 수 없다. 태스크포스는 해당 분야에 대해 보다 양질의 과학적 연구가 필요함을 느끼고 있다.

불확실한 토양 탄소 분야에서 살펴볼 사항이 두 가지 있다. 우선, 대기로 배출 및 유입되는 토양 탄소 이동의 과학은 다소 이해하기 어렵다. 이는 공간적·시간적으로 모두 변화한다. 즉, 토양 탄소 에너지는 지역과 시간, 특히 가뭄 같은 계절적 재해의 영향을 받는다. 둘째, 이러한 현상이 아직 잘 파악되지 않는 원인 중 하나는 토양 탄소 측정 기술에 소요되는 고비용, 저효율성과 관련 있다. 태스크포스는 토양 탄소 에너지에 대해 심도있게 이해하고자 하는 차원에서, 원격 센서를 이용한 토양 탄소 유출 측정 기술을 개발하는 것이 국가적으로 최우선 과제라는 입장이다.

태스크포스는 신기술과 관련하여 많은 권고 사항들을 만들었다. 이러한 권고 사항들은 다음 섹션에서 살펴볼 것이다.

⁴ 식물 뿌리 및 토양 내에 서식하는 생물 활동과 같은 토양 자체의 내부 요인에 의해 토양 내에 탄소가 생성됨

권고 사항

태스크포스의 권고 사항은 다음과 같다.

1. 광합성을 이용하여 석탄 화력발전소 배출 CO₂의 소비를 통해 해조류를 재배하는 것은 전반적인 CO₂ 배출량에 상대적으로 일조할 수 있다. 해조류 관련 R&D는 CO₂ 배출량을 완화하기 위해 다음의 분야에 주력해야 할 것이다.

— 신종 해조류를 포함한 해조류 생산성 증진 연구

— 자본 비용과 원자재의 조건 완화

— 저밀도 CO₂의 생물 반응기(bio-reactor) 내 CO₂ 흡수를 위한 대규모 전환의 효율성

2. 태스크포스는 호주의 광물 탄산화 기술이 다음의 두 가지 분야로 나뉜다는 것을 밝혀냈다.

(i)이전에 미국에서 수행된, 암석의 CO₂ 반응 후 열 활성화에 관한 연구, (ii)산화 및 플로시트 기반 기술. 태스크포스는 해당 기술이 암석 자원 인근 석탄 화력발전소에 CO₂ 포집이 가능한 규모와 영구성을 제공하기 때문에 다음의 분야에서 다양한 옵션을 가질 수 있도록 정부가 RD&D를 지속적으로 추진할 것을 권장한다.

— 개념 단계를 벗어나 화학 신기술 접근으로 나아가기 위한 심도 있는 벤치급 기초 연구

— 소규모 성과를 통해 더 큰 성과도 거둘 수 있다는 사실을 실증하기 위한 벤치 혹은 실험실 수준 이상으로 규모를 확대

— 자본 비용 감축 및 원자재 및 에너지 사용의 효율성 증진을 위해 RD&D에 주력. 이는 암석 활성화, 분쇄, 탄소화, 입자 분리 기술, 탈수 잔해물, 그리고 잔여물 처리를 포함해야 함.

— 다른 과정의 광물 탄산화 비용에 대한 독립적인 재검토. RD&D와 혁신적인 개선을 통해 효율성 향상에 대한 기대 내포.

3. CO₂ 포집의 신뢰도와 관련하여 환경은 투자의 확실성을 제공하기 위해 대기 중의 CO₂ 산림 처리 규제에 대해 해결할 것을 권장한다. 임업 분야의 RD&D는 토양 탄소 효과를 포함하여 탄소 측정 생애 주기에 주력할 것을 권장한다. 자연재해 영향과 관련한 위험성 관리 또한 수행하여야 할 것이다.

4. 토양 탄소 증진을 통한 처리는 CO₂ 배출 완화와 농업 생산성 향상에 기여할 수 있는 잠재력이 있다. 하지만 필요한 시간 척도에서의 토양 탄소 영구성에 대한 문제가 있다. RD&D는 다음과 같은 분야에서 수행할 것을 권장한다.

— CO₂ 등 기타 온실가스가 토양으로 유입 및 유출되는 것을 모니터링하기 위해 원격 기술을 포함한 효과적이고 효율적인 토양 탄소 측정 방법

— 시·공간에 따른 토양 탄소 균형을 모니터링하기 위한 벤치급 및 실제 상황 실험. 바뀐 토양 탄소 유형 및 농업 이윤 효과의 동시적인 과학 측정과 관련된 범위를 포함한다.

5. 바이오숯(biochar)은 농업 생산성을 향상시키는 동시에 영구성을 제공할 수 있는 잠재적인 결과물이다. 바이오숯의 영구성은 변할 수 있지만, 이러한 변동성은 일부 조건에서 수 세기 동안만 가능하다는 것이 분명하다. 바이오숯과 관련한 다음 분야에서 RD&D 를 진행할 것을 권장한다.

— 위의 토양 탄소에 관한 권고 사항에서 볼 수 있듯이, 실제 실험은 바이오숯이 주입된 토양에서 혹은 토양으로 유입되는 탄소를 조사하기 위해 각기 다른 바이오숯으로 진행해야 한다. 이는 화석 자원으로부터 생산된 바이오숯과 부식 물질의 경우에 특히 중요하다.

— 바이오숯을 생산하기 위해 열분해와 화학 처리 공정이 확대되어야 하고, 여기서 만들어진 바이오숯은 숯 특성에 따른 기능으로 과학적인 영구성 기준을 정립하는 데 이용해야 한다.

— 외인에 의해 생성된 토양 탄소와 내인적으로 생성된 토양 탄소 간의 균형은 바이오숯 유형, 토양 유형, 공간, 시간에 따라 과학적으로 조사해야 한다.

— 대규모 열분해 비용을 줄일 수 있는지 여부를 판단하기 위해 기존의 열분해 공정 확대에 대한 조사가 이루어져야 한다.

6. CO₂의 대기 배출에 관한 생애 주기 분석(LCA) 과 CO₂ 영구 처리는 조사 대상이 되는 모든 기술의 공통적인 주제이다. 위의 기술로 엄격한 LCA 분석을 CO₂ 처리 분석에 정기적으로 사용할 것을 권장하는 바이다.