

파리협정 제6.4조 메커니즘에 따른 ‘제거’ 활동에 대한 우리나라 협상 방향 연구: 직접대기탄소포집(DAC) 기술 관점에서

오채운*[†] · 송예원** · 김래현***

*국가녹색기술연구소 정책연구본부 글로벌사업화센터 책임연구원, **국가녹색기술연구소 정책연구본부 글로벌사업화센터 연구원

***국립산림과학원 국제산림연구과 임업연구관

Analysis of Korea’s negotiating position on removal activities under the Article 6.4 mechanism of the Paris Agreement: From the perspective of direct air capture technologies

Oh, Chaewoon*[†] · Song, Yewon** and Kim, Raehyun***

*Principal Researcher, Center for Global Business, Division of Policy Research, National Institute of Green Technology, Seoul, Korea

**Researcher, Center for Global Business, Division of Policy Research, National Institute of Green Technology, Seoul, Korea

***Senior Researcher, Division of Global Forestry, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

ABSTRACT

Negotiation on ‘removal’ activities on the basis of article 6.4 of the Paris Agreement is underway. Removal refers to mitigation activities to capture CO₂ from atmosphere and store them durably in reservoirs or in products. Recent negotiation agenda has included the extension of eligible removal activities other than afforestation & reforestation and the relevant specific rules under the Article 6.4 Mechanism. The UNFCCC secretariat received stakeholder inputs until October 2022 and national positional reports until March 15, 2023. For this, Korea prepared a national positional report by forming an expert group in relation to land-based removal activities in sectors of forest, ocean, and agriculture and engineering-based removal activities. This study is the outcome of exploring an appropriate national positional setting from the perspective of direct air capture (DAC) technologies as a part of engineering-based activities. Removal activities have failed being admitted as eligible mitigation activities due to the issue of permanence in storage (of GHG or CO₂). There are four distinctive elements regarding the permanence of removal activities: i) diverse reservoirs and removal methods, ii) diverse storage time, iii) fungibility between emission reduction credits and removal credits and between credits from different removal options, and iv) methods to minimize reversal risks. This study attempts to identify the issues and positions of DAC technology-related stakeholders and to establish appropriate national positions on those issues on the basis of Korea’s research, development, and demonstration of DAC technologies. This study concludes by summarizing Korea’s national positions and suggesting future actions.

Key words: Article 6.4 of the Paris Agreement, Article 6.4 Mechanism, Removal, Direct Air Capture (DAC) Technology, Carbon Market

1. 서론

기후변화에 대응하기 위한 ‘감축(mitigation)’ 활동의 유

형은 크게 두 가지로 구분된다. 하나는 배출저감(emission reduction)이고, 다른 하나는 제거(removal)이다. 먼저 ‘배출저감’은 온실가스의 배출원(source)을 특정할 수 있고,

†Corresponding author : chaewoon.oh@gmail.com (National Institute of Green Technology, 14th floor, Yeouido Post Tower, 60 Yeouinaru-ro, Yeongdeungpo-gu, Seoul 07328, Korea. Tel: +82-2-3393-3987)

ORCID 오채운 0000-0003-1357-5519
김래현 0000-0001-7269-7378

송예원 0000-0002-2767-094X

배출원에서 인위적 온실가스의 배출량을 제한하거나 배출원을 조정함으로써 오염물질의 배출을 저감 또는 제한하는 활동이다. 다음으로 ‘제거’는 특정 배출원 없이 대기 중의 온실가스를 흡수원(산림 등)을 통해 제거하는 감축 활동이다(Park et al., 2020). 이러한 두 가지 유형의 감축 행동과 관련하여, 유엔기후변화협약(UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change) 하에서 당사국들은 국가 온실가스 인벤토리를 개발 및 보고하고, 또한 기후변화 완화 조치 차원에서 국가 및 지역 프로그램을 설정하고 이행해야 한다(UNFCCC, 1992, article 4.1(a)(b)). 또한, 교토의정서 하에서는 국가간 협력을 통해 수행한 감축활동과 국제탄소시장의 기반이 되는 교토 메커니즘 차원에서, 당사국들은 감축 활동을 통해 감축 결과물을 생산 및 이전하여 자국의 의무적인 감축 목표 달성에 활용할 수 있었다. 교토 메커니즘을 구성하는 국제 탄소시장 체계 중 하나인 청정개발메커니즘(CDM, Clean Development Mechanism)의 경우, 다양한 배출저감 활동이 감축활동으로 인정되었으나, 대기 중에서 이산화탄소를 ‘제거’하는 흡수원을 활용한 감축활동은 신규조림·재조림(A/R, Afforestation & reforestation) 기술에 대해서만 크레딧(배출권)이 발행되는 감축활동으로 인정되었다(UNFCCC, 2001, para.7.(a)). 이는 다음의 Fig. 1과 같이 정리될 수 있다.

그런데, 파리협정의 온도 목표인 1.5 °C 및 2 °C 목표 달성에 있어서, 기존의 배출원에서의 배출저감 노력 외에 대기중에서의 이산화탄소제거(CDR, carbon dioxide removal) 접근법의 중요성이 매우 커졌다. CDR 접근법은 “대기 중

의 이산화탄소를 인위적으로 제거하고 영속성있게(durably) 일정 기간 동안 지질·육상·해양 저장소(reservoirs) 또는 상품(product)에 저장하는 행위”로 정의된다(IPCC, 2022, p. 1796).¹⁾ CDR 접근법이 중요한 이유는, 이산화탄소 또는 온실가스 배출 넷제로(net zero)를 달성하는 데에 있어, 농업, 항공, 운송, 그리고 산업공정 등 온실가스 배출저감만으로 넷제로를 달성하기 어려운 부분들의 경우, 대기중에서 온실가스를 제거하는 CDR 접근법을 적용함으로써 잔여배출량을 상쇄할 수 있기 때문이다(IPCC, 2023, B.6.2). 또한, CDR 접근법이 잔여배출량을 상쇄할 수 있는 수준보다 더 많이 활용될 경우, 순네거티브(net negative) 이산화탄소 배출을 달성함으로써 지구 온난화 수준을 지속적으로 낮출 수 있기 때문이다(Ibid., B.7.1). 이러한 CDR 접근법에는 다양한 옵션들이 있으며, 산림과 같은 생물학적인 흡수원(sinks)을 매체로 이산화탄소를 흡수·제거(removal)하는 것뿐만 아니라, 직접대기탄소 포집 및 저장(DACCS, direct air carbon dioxide capture and storage)과 같은 공학적 접근법들 역시 포함한다(Ibid.).²⁾ 이와 같이, 다양한 제거 접근법들이 개발 및 시도되고 있는 바, 국제탄소시장에서는 ‘제거’ 접근법을 감축활동으로 인정하고 제거 결과물을 탄소시장에서 거래할 수 있는 범주와 요건들에 대해서 고민하기 시작했다.

이러한 문맥 상에서, 국제탄소시장의 근간이 되는 파리협정 제6조, 그중에서도 특히 파리협정 제6.4조 메커니즘에서 다양한 CDR 접근법들을 감축활동으로 인정할 것인가의 여부와 인정하고자 할 때 고려해야 할 요건들에 대해서 국제적 논의 및 협상이 이루어지고 있다.³⁾ 즉, 제6.4

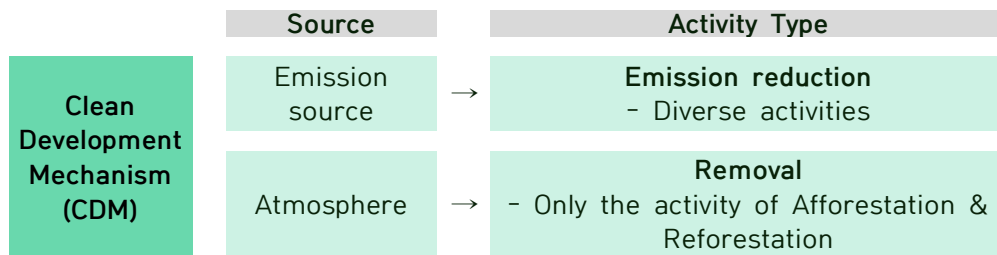


Fig. 1. Types of mitigation activities under the CDM

Source: Formulated by the authors

1) 영어 원문은 다음과 같다: “Anthropogenic activities removing carbon dioxide (CO₂) from the atmosphere and durably storing it in geological, terrestrial, or ocean reservoirs, or in products”
 2) 공학적 접근법에는 기술적으로 가장 앞선 DACCS가 있고, 그 외에 강화된 풍화(EW, enhanced weathering)와 해양 알칼리화(OA, ocean alkalization) 등이 있다. 앞서 언급된 자연적 접근법에는 최근 바이오차(biochar) 및 해양비옥화(OF, ocean fertilization) 등이 비교적 활발히 연구되고 있다.
 3) 파리협정 제6.4조 메커니즘은 지속가능발전메커니즘(sustainable development mechanism)으로 불리기도 한다.

조 메커니즘 하에서 '제거' 활동에 대한 제도 개선 논의가 이루어지고 있는 것이다. 제4차 파리협정 당사국총회(CMA, Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement)는 제6.4조 메커니즘의 감독기구(Supervisory Body)로 하여금 2022년 11월까지 '제거' 활동에 대한 권고안(recommendations)을 도출할 것을 결정하였다. 동 권고안은 제거 활동과 관련된 구체적인 필요요건으로 i) 적절한 모니터링, ii) 보고(reporting), iii) 산정(accounting) 방법론, iv) 크레디팅 기간, v) 역전(reversal) 방지, vi) 누출(leakage) 회피, vii) 다른 부정적인 환경 및 사회적 영향 회피를 포함해야 한다(UNFCCC, 2021, para 6(c)). 이에, 감독기구는 '제거'를 포함한 감축 활동에 대한 입장을 파악하기 위해 이해관계자들의 입장을 2022년 10월까지 받았고(UNFCCC 2022b), 이를 토대로 권고안 초안을 도출하였다(UNFCCC, 2022c).⁴⁾ 동 권고안은 제거에 대한 정의와 필요요건으로 구성되어 있다. 동 권고안을 토대로, 파리협정 당사국총회(CMA)는 파리협정 당사국 및 옵저버 기관들이 '제거를 포함한 활동'에 대한 국가제안서를 2023년 3월 15일까지 제출할 것을 요청하였다(UNFCCC, 2022a, para 19). 이에, 우리나라는 '제거'에 대한 가장 일반적인 접근법인 신규조림·재조림 활동에 대한 국내·외 규칙 및 지침 수립에 관여하고 있는 국립산림과학원을 중심으로, 해양 부문의 해양환경공단, 농업 및 토지 이용 부문에 농촌진흥청, 직접대기탄소포집(DAC, direct air capture) 기술 부문에 국가녹색기술연구소가 참여하는 전문가 그룹을 형성하여 '제거'에 대한 우리나라 국가제안서 초안을 마련하였다. 그리고 외교부가 산림청, 과기부, 농림부, 산업부, 해수부, 환경부 등의 관계부처와 전문가 그룹을 합하여 우리나라 「흡수원 협의체」를 구성하였고, '제거'에 대한 우리나라 국가제안서 작성에 대한 부처 입장을 2023년 3월 조율 및 수립하고, 이를 토대로 국가제안서가 UNFCCC 사무국에 제출되었다.

이 과정에서, 동 논문은 직접대기포집(DAC) 기술에 기반한 제거 활동으로 DACCS 기술과 직접대기탄소포집·활용(DACCU, direct air carbon capture and utilization) 기술을 중심으로, 동 제도 개선을 둘러싼 국제적인 쟁점을 파악하고 이에 대한 DAC 기술 관계자들의 입장을 분석

하며, 이에 대한 우리나라 입장을 수립하고자 한다.⁵⁾ 제2장에서는 우선 CDR 접근법과 DAC 기술에 대해서 개괄적으로 설명한다. 또한, CDR 접근법을 탄소시장에 포함하는 것과 관련한 기존 문헌 연구 현황을 설명하고, 동 연구에서 핵심이 되는 '영구성(permanence)' 개념을 중심으로 고려 요소들을 추출하였다. 이를 토대로, 제거 옵션을 탄소시장에 포함하는 것을 둘러싼 쟁점 분석의 틀을 도출하였다. 이 쟁점 분석틀에 기반하여, 제3장에서는 DAC 기술 관련 이해관계자들의 입장을 i) 온실가스 포집 저장소 및 제거 방식, ii) 저장 기간, iii) 크레딧 대체 가능성,⁶⁾ 그리고 iv) 역전현상 리스크 해결 방안을 중심으로 분석한다. 이를 통해 DAC 기술 관점의 쟁점이 도출된다. 이에 대해 현재 및 향후 우리나라의 DAC 기술 적용 정책과 DAC 기술 R&D 및 활용 현황을 파악한다. 그리고 이를 토대로 우리나라 협상 입장을 도출한다. 마지막으로 제4장에서 정책적 함의를 통해 마무리하고자 한다.

2. 기존 연구와 분석 접근법

2.1. 대기중 이산화탄소제거 접근법

온실가스제거(GGR, greenhouse gas removal) 또는 이산화탄소제거(CDR) 접근법에 기반한 제거 활동이 중요하게 여겨지고 있다.⁷⁾ 다양한 CDR 접근법을 구분하는 방식들이 몇 가지가 있다. 동 논문에서는 기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) 보고서에서 채택한 방식으로 설명하고자 한다. IPCC는 대기 중에서 이산화탄소를 '포집'하는 방법에 따라 크게 네 가지로 구분하는데, 이는 i) 육상 기반 생물학적 방법, ii) 해양 기반 생물학적 방법, iii) 지구화학적 방법, iv) 화학적 방법이다(IPCC, 2022, Cross-Chapter Box 8). 먼저, 육상 기반 생물학적 방법으로는 전통적으로 많이 활용되어 오던 신규조림 및 재조림(A/R, afforestation and reforestation), 산림관리 개선(improved forest management)을 비롯하여, 토양탄소격리(soil carbon sequestration), 바이오차(biochar), 내륙 습지 복원 등이 있다.⁸⁾ 다음으로, 해양 기반 생물학적 방법으로는 블루카본(blue carbon) 관리와 해

4) 권고안 초안의 원 제목은 'Recommendations on guidance for activities involving removals under the Article 6.4 Mechanism'이다.

5) 동 연구는 2023년 상반기 우리나라 국가제안서 작성과정에서 수행한 연구 분석 결과를 토대로 작성되었다.

6) 크레딧 대체 가능성은 배출저감 크레딧과 제거 크레딧 간의 대체 가능성, 그리고 서로 다른 CDR 옵션 크레딧 간의 대체 가능성을 의미한다.

7) 2022년 도출된 IPCC 제6차평가보고서 제3실무그룹(완화) 보고서에서는 이산화탄소제거(CDR) 접근법이라는 표현을 사용하고 있는 바, 동 원고에서도 CDR 용어를 사용하도록 하겠다.

양비옥화(ocean fertilization)가 대표적이다.⁹⁾ 지구화학적 방법으로는 광물과 이산화탄소의 화학적 반응을 활용하는 강화된 풍화(enhanced weathering)와 해양 알칼리화(ocean alkalization)가 있다.¹⁰⁾ 마지막으로 화학적 방법으로는 대기 중의 이산화탄소를 습식 또는 건식 포집제를 활용하여 화학적으로 포집하는 직접대기포집(DAC) 기반의 활동들이 포함되며, 이는 앞서 언급된 DACCS와 DACCU 기술이 해당된다(Ibid., Sec. 12.3). 한편, 제6.4조 메커니즘의 감독기구의 경우, 상기 네 가지 CDR 방법들 중에서 육상 기반 생물학적 방법과 해양 기반 생물학적 방법을 ‘토지 기반 제거 활동(land-based removal activities)’이라고 하고,¹¹⁾ 지구화학적 방법 및 화학적 방법을 아울러 ‘공학 기반 제거 활동(engineering-based removal activities)’으로 칭하고 있다(UNFCCC, 2022d).

최근 공학 기반 접근법에 대한 관심이 높아지고 있고(IPCC, 2022, Sec. 12.3), 공학적 접근법 중에서도 DAC 기술에 기반한 접근법들에 대한 관심이 높아지고 있다(Ibid., Sec. 12.3.1.1). DAC 기술 기반 접근법들은 대기 중의 이산화탄소를 포집한 이후에, 이를 향후 어떻게 저장 또는 격리하느냐에 따라 직접대기 탄소포집·저장(DACCS) 기술과 직접대기 탄소포집·활용(DACCU) 기술로 구분된다. 먼저, DAC 기술은 사용하는 포집제에 따라 크게 습식 포집과 건식 포집으로 구분할 수 있다. 습식 포집은 이산화탄소가 물에 비교적 잘 녹으며 물에 녹아 탄산 이온을 형성하는 특성을 활용하는 포집 방법으로, 탄산 이온과 쉽게 결합하는 강염기 물질을 물에 용해시켜 만든 수용액을 대기와 접촉시킴으로 이산화탄소를 포집한다.¹²⁾ 이후 높은 열을 가하는 재생 과정을 거쳐 포집체로부터 이산화탄소만을 분리해낼 수 있다. 한편, 건식 포집은 이산화탄소를 물리적으로 끌어당길 수 있는 고체 형태의 포집제를 활용하여 이산화탄소를 포집하는 방법이다. 보통은 다공성(porous) 지지체에 이산화탄소를 포집할 수 있는 화학물질을 담지한(impregnated) 포집제를 사용하는데,

동 포집제와 대기가 접촉할 때 이산화탄소를 선별적으로 포집하게 되며, 이후 이산화탄소가 결합된 포집제에 온도나 압력을 변화시켜 이산화탄소만을 분리해낼 수 있다(Song and Oh, 2022b, pp. 14-20).

다음으로, 이 DAC 기술을 활용한 DACCS 기술은 대기 중에 있는 이산화탄소를 포집하여 지중에 저장하여 격리하는 기술이다. 즉, DACCS 기술은 대기중에서 이산화탄소를 포집하는 기술, 포집된 이산화탄소를 수송하는 기술, 그리고 이를 지중에 저장하는 기술이 결합된 체인 기술이다(Song and Oh, 2022a).

그리고, DACCU 기술은 대기 중의 이산화탄소를 포집하는 DAC 기술을 활용한다는 점은 DACCS 기술과 동일하나, 포집된 이산화탄소를 지중저장소에 저장하는 대신 중간 생산품 또는 최종 생산품으로 제품화(product)함으로써, 이산화탄소를 대기로부터 장기간 혹은 일시적으로 격리하는 기술이다(UNFCCC, 2022d, Appendix H para. 3). 따라서, 포집된 이산화탄소를 산업공정 상에서 ‘자원’으로 활용함으로써, 합성연료 생성 등의 화학 전환, 유용 광물을 생성하는 광물화, 미세조류 배양 등의 생물전환 등 다양한 이산화탄소 활용 기술들이 DAC 기술에 이어 접목된다. 이는 응용 분야가 다양하다는 장점이 있으나 기술 특성상 실제 제거량 산정이 어려워 추가적인 연구가 필요한 분야이다(Interagency, 2021; Mac Dowell et al., 2017).

2.2. 제거와 영구성

앞서 언급된 바와 같이, CDR 접근법에는 다양한 옵션들이 존재하며, 이 각각의 옵션들의 연구·개발·실증·활용 수준 역시 모두 다양하다. 이에 따라, 기존에는 이러한 CDR 접근법들을 대규모로 활용하는 데에 있어서 물리적·기술적·경제적 가능성(feasibility)을 탐색하는 연구가 이루어졌다. 그런데, 최근에는 사회적·정치적 측면에서의 가능성(또는 수용성)을 강조하는 연구들이 이루어지고 있다(Honegger et al., 2022; Waller et al., 2020). 또한,

- 8) 또한, 작물을 이용한 바이오에너지를 이산화탄소 포집·저장(CCS, carbon capture and storage)과 결합시킨 바이오에너지탄소포집저장(BECCS, bioenergy with carbon capture and storage)도 육상 기반 생물학적 방법으로 분류된다.
- 9) 블루카본 관리란 탄소 흡수율이 좋은 갯벌(tidal marsh), 맹그로브, 해초 등의 연안 식생을 통해 각 식생이 심어진 해저 토양에 탄소를 저장하는 것을 의미한다. 해양비옥화란 바다 표층부(near-surface)에 인위적으로 영양분 공급을 증가시켜 대기 중의 이산화탄소를 흡수하는 식물성 플랑크톤을 증식시켜 이산화탄소를 저장하는 방법이다.
- 10) 강화된 풍화란 이산화탄소가 자연적으로 쉽게 결합하는 규산염 및 탄산염 광물을 갈아 표면적을 증가시켜 대기와의 접촉 면적을 넓힌 후 토양, 강, 바다에 뿌리는 방법이다. 특히 이러한 알칼리성 광물을 바다에 살사할 경우 해수면의 알칼리도를 증가시켜 해수의 이산화탄소 흡수율을 높일 수 있는데 이를 해양 알칼리화라고 한다.
- 11) 통상적으로는 ‘자연 기반 생물학적 방법’이라는 용어도 자주 사용된다. 그런데, 제6.4조 메커니즘 감독기구에서는 육상 및 해양 기반 생물학적 방법을 통칭하여 ‘토지 기반 제거 활동’으로 칭하고 있으므로, 동 원고에서는 ‘토지 기반 제거 활동’으로 작성하겠다.
- 12) 강염기 물질에는 수산화나트륨(NaOH)이나 수산화칼륨(KOH) 등이 있다.

CDR 접근법에 대해서 기술적인 측면과 사회적 측면을 동시에 고려하는 기술사회적 접근법이 강조되어, 해당 CDR 옵션에 대해서 모델링 평가, 사회적 수용성, 혁신, 그리고 정책을 동시에 고려하는 연구도 있다(Sovacool et al., 2023). 중요한 점은 CDR 접근법의 활용 촉진 연구에 있어서 기술적 가능성 뿐만 아니라 사회적·정치적 가능성 측면에 대한 중요성이 커지고 있으며, 사회적·정치적 가능성 측면의 정책수단에 대한 연구가 진행되고 있다는 점이다. 그 중에서도 CDR 접근법을 적용한 결과로 도출된 제거 결과물을 거래할 수 있는 '탄소시장(carbon market)' 설계 연구가 주를 이루고 있다는 점이다.¹³⁾

탄소시장 연구의 핵심은 다양한 CDR 옵션들에 기반한 '제거' 활동을 통해 도출된 감축 결과물을 기존 탄소시장에서 인정할 경우에 발생할 수 있는 리스크를 중심으로 이루어지고 있다. Cox and Edwards (2019)는 제거 활동을 탄소시장에서 인정할 경우 이는 기존의 온실가스 배출 집약적인 활동 및 방식을 변화하지 않고 대기중으로부터 온실가스를 제거하는 행동을 선호하게 되는 도덕적 해이(moral hazard)로 이어질 수 있다는 위험을 언급하였다. 더 나아가, Burke and Gambhir (2022)는 배출저감 활동과 제거 활동 간의 도덕적 해이 리스크 외에, 두 가지 리스크를 더 언급하였다. 하나는 다양한 CDR 옵션 중에서도 비용이 낮은 CDR 옵션이 우선적으로 이행될 가능성이 높고, 이로 인해 더 비용이 높은 제거 옵션의 대규모 실증 및 상용화에 필요한 시장 수요가 충분하지 않을 리스크가 존재한다. 또 다른 리스크는 잠재적으로 낮은 비용의 제거 옵션에 기반한 감축 결과물이 너무 이르게 즉 시기상으로 탄소시장에 투입될 경우, 탄소시장 가격이 전반적으로 낮아지는 리스크가 존재한다는 것이다. 한편, 배출원에서 발생하는 배출에 대한 온실가스 배출저감(emission reduction) 활동이 '추가성'에 기반하여 엄격한 산정과 인증 차원의 측정·보고·검증(MRV, monitoring·reporting·verification)이 이루어지고 있는 반면, Carton et al. (2020)은 CDR 옵션들에 대한 MRV가 아직 부족하며, 이 부분에 대한 개선이 더욱 필요하다고 주장한다. 더 나아가, Carton et al. (2021)은 탄소시장에 유입되는 제거 결과물들이 모두 동등한 가치를 가지지 못한다고 주장했다. 즉, CDR 접근법 옵션들 사이에서도 i) 해당 옵션이 자연 기반

옵션인지 아니면 공학 기반 옵션인지에 따라 제거 결과물의 성격이 다르고, ii) 동일한 CDR 옵션이라도 지역에 따라서 그 제거 결과물이 다를 수 있으며, iii) 영구성(permanence)의 수준이 다를 수 있다는 의견이다. 이를 정리하면 다음의 Table 1과 같다.

이러한 CDR 옵션을 활용한 제거 활동을 탄소시장에 포함시키는 것에 대한 우려를 담은 기존 연구들에도 불구하고, 기후변화 대응을 위한 CDR 옵션이 점점 더 중요해짐에 따라, CDR 옵션을 적용하기 위해 '탄소시장'이 중요한 정책수단으로 떠오르고 있다. 다만, 모든 CDR 옵션들을 탄소시장에서 감축활동으로 인정하기에는 아직 무리가 있는 것으로 보인다. 이에, 이러한 다양한 CDR 옵션들에 대해 일련의 기준을 적용하여 비교 분석하는 연구들이 있다. 이러한 기준에는 대표적으로 이산화탄소 제거 효율성(efficiency), 소요 시간(timing), 그리고 영구성(permanence)이 있다. 여기서, 이산화탄소 제거 효율성은 대기중 이산화탄소 포집분 대비 포집 및 추후 과정에서 발생하는 온실가스 배출 산정분을 의미한다. 소요시간은 제거 활동 적용과 효과적인 이산화탄소 제거 사이에 소요되는 시간을 의미한다. 그리고 영구성은 이산화탄소 제거가 “영향

Table 1. Risks in the incorporation of removal activities into carbon market

| | |
|------|--|
| i) | Preference of removal activities to emission reduction activities can lead to moral hazard of deferring immediate emission reduction actions. |
| ii) | Preference of CDR options with low costs to CDR options with high cost can lead to the lack of market demand for the CDR options with high cost and the less technological advancement. |
| iii) | Credit price can plunge by the influx of removal credits. |
| iv) | There is a lack of MRV of CDR options in comparison with the high level of MRV of emission reduction activities. |
| v) | Qualities of credits from different CDR options are different , e.g. credits from nature-based removal activities and those from engineering-based removal activities |

Source: Formulated by the authors based on Cox and Edwards (2019), Burke and Gambhir (2022), Carton et al. (2020, 2021)

13) 탄소시장에서 거래되는 탄소배출권은 크게 거래 접근법(cap-and-trade approach)과 상쇄 접근법(baseline-and-credit approach)을 통해 형성된다(OECD, 2023). 거래접근법은 배출업체에 대한 배출 상한선(upper limit) 또는 캡(cap)이 고정되고, 이에 기반해 배출허용권이 (유상) 경매되거나 또는 무상 할당된다. 반면, 상쇄접근법에서는 배출량에 대한 캡이 부재하고, 기존 배출량(baseline, 감축사업이 부재한다고 가정했을 때의 온실가스 예상 배출량)에 대해서 감축사업을 통해 감축하여 크레딧(credits)을 확보 및 판매할 수 있다(OECD, 2023).

을 미치는 시간(the time over which it will remain impactful)”을 의미한다(Chiquier et al., 2022, p. 2).

이 세 가지 기준 중에서, ‘영구성’은 탄소시장에서 ‘제거’를 둘러싼 논의에서 가장 큰 의미를 갖는 기준 요소이다. 영구성은 앞서, 이산화탄소 제거가 영향을 미치는 시간이라고 언급되었지만, 보다 간단히 설명하면 포집된 이산화탄소 또는 온실가스를 특정 매체에 “저장하는 기간(time lengths of storage)”을 의미한다(Sovacool et al., 2023).¹⁴⁾ 탄소시장에서 ‘영구성’이 의미를 갖는 핵심 이유는 바로 CDR 옵션에 의한 제거 결과물이 ‘탄소시장에 포함되어도 되는가’에 대한 기준이 되기 때문이다. 이 기준과 관련해서는 조금 더 구체적으로 살펴볼 수 있다.

첫째, CDR 접근법은 이산화탄소를 포집하여 특정 저장소(reservoir)에 일정 기간 저장하는 접근법이다.¹⁵⁾ 따라서, 이산화탄소를 포집 및 저장하는 ‘방식’과 이때 활용되는 저장소에 의해 CDR 접근법의 특성이 결정되고 제거량이 결정된다. 그런데 이 ‘저장소’가 매우 다양하다는 점이다. 즉, 다양한 ‘매체’를 활용하여 이산화탄소가 저장되는데, 생물학적 방법들은 보통 식생이나 토양 및 해양 등을 매체로, 지구화학적 방법은 광물을, 화학적 방법은 지중저장소나 제품 등을 매체로 하여 각 매체의 탄소 저장량(carbon stock)의 증대를 통해 이산화탄소가 포집 및 저장된다(IPCC, 2022, Sec. 12.3). 이러한 다양한 매체들이 존재하는데, 기존의 CDM에서는 ‘산림’을 저장소로 활용한 제거 활동에 대해서만 인정을 하였다(UNFCCC, 2001, para.7(a)). 그런데, 탄소시장에서 어느 저장소를 활용해서 어느 방식까지 제거 활동으로 인정하는가에 대해서는 이제 막 협상 논의가 이루어지는 것이다.

둘째, 이 저장소의 특성과 제거 방식에 따라 ‘저장 기간’이 영향을 받는다. 우리가 말하는 영속성 여부를 판단하는 데에 대해서 탄소시장에서는 100년(ton-year with a 100-year horizon)이 일반적인 접근이기는 하지만(IPCC, 2007, Chapter 2 Table 2.14; UNFCCC, 2011a, para. 5), 다양한 저장 기간(42 ~ 150년)이 제시되기도 하였다(IPCC, 2000, Chapter 2.3.6.3). CDR 접근법에 속하는 옵션들의

저장기간도 마찬가지로 100년에 한참 미치지 못하는 옵션부터 100년을 훌쩍 넘는 옵션까지 매우 다양하다. 즉, CDR 옵션들 간의 저장 기간이 매우 다양하다는 점이다. 이에 따라서, 영구성의 ‘기간’에 대한 기준을 일관되게 적용하기가 쉽지 않다.

셋째, 영구성은 제거 활동에 의한 네거티브 배출 결과물(negative emission units)과 저감 기술 기반 활동에 의한 양의 배출 결과물(positive emission units) 간의 대체 가능성(fungibility) 측면에서 설명된다(Burke and Gambhir, 2022, pp. 4-5). 기존 탄소시장에서는 ‘배출원’에서 온실가스 배출을 차단 및 줄이는 배출저감(emission reduction) 활동의 결과로 감축 크레딧이 주어지는데, 이를 증명하기 위해서 중요한 기준은 ‘추가성(additionality)’이다. 추가성이란 배출저감량이 감축사업 활동 부재 시 발생했을 배출 수준에 비해 추가적이어야 한다는 것을 의미한다(UNFCCC, 1997, Article 12.5(c)).¹⁶⁾ 그런데, ‘대기중’ 온실가스 제거 활동에 대해서 배출저감 활동과 동일한 감축 크레딧이 주어지기 위해서는 ‘영구성’이라는 기준에 의해서 판단되는 것이다. 그런데 ‘추가성’에 기반한 배출저감 활동으로부터의 크레딧과 ‘영구성’에 기반한 온실가스 제거 활동으로부터의 크레딧이 대체 가능한가의 여부 그래서 탄소시장에서 등가로 거래될 수 있는가의 여부에 대해서 논란이 있다. 이를 해결하기 위해, 배출저감 탄소시장과 제거 탄소시장을 분리하여 교환·대체 가능성을 차단하거나(McLaren et al., 2019), 또는 교환·대체 비율을 저감 크레딧 2개와 제거 크레딧 1개로 설정해야 한다는 주장도 있다(Burke and Gambhir, 2022).

넷째, CDR 접근법에 다양한 옵션들이 존재하므로, 이 CDR 옵션들을 통해 도출된 제거 결과물들 간의 상호 대체 가능성에 대해서도 문제를 제기하는 연구가 있다. 현재 이러한 다양한 CDR 옵션들 각각에 대해서 명확하고 국제적으로 공인된 이산화탄소 제거 산정 방법론과 검증 절차가 상당히 부족한 바 이를 개선 및 개발해야 할 필요성이 언급되고 있다(Carton et al., 2020).

다섯째, 대기중의 온실가스가 포집 및 저장되어 영구적

14) 물론, 엄밀하게는 포집된 이산화탄소를 ‘저장’하는 것과 ‘영구적으로 제거’하는 것은 사뭇 다르다(Chiquier et al., 2022). 또한, 지구 전체적인 관점에서 볼 때, 영구적인 제거가 아닌 일시적인(temporary) 제거가 의미가 없는 것은 아니다. 영구적인 저장 활동을 추진하는 데에 필요한 시간을 벌고 해당 역량을 높이기 위한 메커니즘으로써 일시적인 저장 활동을 활용할 수 있다(Scott et al., 2015, p. 422). 또한, 만약 지구 온난화 수준이 정점 온도(peak)에 도달할 경우, 재빠른 대응을 위해 일시적인 저장/제거 활동이 긍정적인 영향을 줄 수 있다. 물론, 정점 온도에 도달하지 않은 경우, 일시적 저장을 허용할 경우 이는 실제 필요한 배출저감 활동의 유인을 낮추거나 연기하게 하는 부정적 영향을 미칠 수 있다(Chiquier et al., 2022).

15) 동 원고에서는 제거에서 일반적으로 쓰이는 저장소(reservoir)라는 표현을 쓰고자 한다.

16) 원문은 “Reductions in emissions are additional to any that would occur in the absence of the certified project activity”이다.

으로 제거되어야 할 온실가스가 대기중으로 다시 배출되는 역전(reversal) 현상 등이 발생하는 리스크가 발생할 수 있다.¹⁷⁾ 이는 탄소시장에서 배출저감에 의한 결과물과 제거에 의한 결과물이 동일한 가치를 갖지 않아 상호 대체가 능성이 없어지는 것이기 때문이다. 이에 리스크를 해결하기 위한 조치방안들은 계속적으로 논의되고 있다(UNFCCC, 2014, Chapter III.B).

이러한 '영구성' 관점에서 제거 활동을 탄소시장에 포함시키는 것에 대해서 고려해야 할 사항들을 상기 언급하였고, 이를 정리하면 다음의 Table 2와 같다.

2.3. 분석 접근법

동 원고는 상기 2.2절에서 도출된 '영구성' 관점에서 고려되어야 할 다섯 가지 쟁점 요소를 네 가지로 다음과 같이 정리하였다. 네 가지 쟁점요소는 i) 저장소 및 제거 방식, ii) 저장 기간, iii) 크레딧 대체 가능성 (배출저감과 제거 크레딧 간의 대체 가능성 및 서로 다른 CDR 옵션 크레딧 간의 대체 가능성), 그리고 iv) 역전현상(reversal) 리스크 해결 방안으로, 이를 분석틀로 설정하고자 한다. 이를 활용하여, 현재 '대기직접포집(DAC)' 기술에 기반한 제거 접근법을 중심으로 국제사회에서 논의되는 이해관계자들의 입장을 분석 및 정리하고자 한다.

분석대상은 2022년 10월까지 '제거'를 포함한 감축활동에 대해 유엔기후변화협약 사무국에 입장(안)을 제출한 이해관계자로서, 카본 엔지니어링(사)(Carbon Engineering),

Table 2. Factors to be considered for removal activities to be incorporated into carbon market from the perspective of 'permanence'

| | |
|------|--|
| i) | Diverse reservoirs and removal methods |
| ii) | Diverse storage time |
| iii) | Fungibility between emission reduction credits and removal credits |
| iv) | Fungibility between credits from different removal options |
| v) | Methods to minimize non-permanence (such as reversals) |

Source: Formulated by the authors based on Burke and Gambhir (2022), McLaren et al. (2019), Carton et al. (2020).

17) 역전은 탄소 주입 또는 저장 후 자연의 탄소 순환 과정 상에서 탄소가 다시 대기중으로 누출되는 현상을 말한다.

18) 우리나라에서 deforestation을 산림벌채로 번역하기도 하나, 보다 적절한 번역은 산림전용이다.

클라임웍스사(사)(Climeworks), 국제배출권거래협회(IETA, International Emissions Trading Association), DAC 연합(DAC Coalition), 에어캡처(사)(AirCapture), 그리고 비제로카본(BeZeroCarbon)이다.

분석 방법은, 첫째, 상기 쟁점요소에 따라 이해관계자들이 제시한 입장(안)을 통해 DAC 기술 관점의 쟁점요소를 추출하고 이해관계자들의 입장안을 분석한다. 둘째, DAC 기술 관점의 입장을 2022년 11월 감독기구가 도출한 '권고안'과 비교한다. 셋째, 현재 우리나라의 DAC 기술 적용 정책과 DAC 기술의 R&D 및 활용 현황과 비교한다. 넷째, 우리나라의 DAC 기술 적용 현황 및 전망을 고려하여, 쟁점 요소에 대한 우리나라의 협상 입장을 수립하고자 한다.

3. 쟁점 분석 및 우리나라 입장안 도출 연구

3.1. 제거 방식 및 저장 매체

첫 번째 쟁점은 제거의 정의와 관련된다. 유엔기후변화협약 하에서 '제거'는 정확히는 '흡수원에 의한 제거(removals by sink)'를 의미한다. 즉, 대기 중 온실가스 농도 안정화 목표를 위해, 당사국들의 의무 이행의 대상은 i) 온실가스의 '배출원에 의한 인위적 배출(anthropogenic emissions by sources)'과 '흡수원의 의한 제거(removals by sinks)'로 한정되었다(UNFCCC, 1992, article 4.1(a)(b)). 이후, 당사국의 의무 감축행동에 대한 규칙을 담은 교토 의정서 제3.3조에 따르면, "인위적·직접적인 토지이용의 변화와 임업활동(1990년 이후의 신규조림·재조림 및 산림전용에 한한다)에 기인하는 온실가스의 배출원에 의한 배출량과 흡수원에 의한 제거량 간의 순변화량은, 각 공약기간마다 탄소저장량의 검증가능한 변화량으로 측정되며, 부속서 I의 당사자가 이 제3.3조의 공약을 달성하는데 사용된다"라고 되어 있다(Korean Law Information Center, 2023; UNFCCC, 1997, Article 3.3).¹⁸⁾ 즉, '흡수원에 의한 제거' 활동의 '매체'가 '산림'으로 한정되어 있고, CDM에서 실제 이를 활용한 활동은 신규조림과 재조림으로 한정되어 있다.

그런데, 파리협정 제6.4조 메커니즘 하에서 논의하고 있는 대상은 '제거'이므로, 이는 '흡수원에 의한 제거'보다 더 큰 개념으로 볼 수 있다. 최근, 학계에서는 제거,

‘온실가스 제거(greenhouse gas removal)’, 또는 ‘이산화탄소 제거(carbon dioxide removal)’라고 표현한다. 그런데, 2022년 도출된 IPCC 제6차 평가보고서는 이산화탄소 제거(CDR)라는 표현을 사용하고 있고, 이를 “대기 중에 존재하는 이산화탄소를 인위적으로 제거하여 일정 기간 동안(durably) 지중·토양·해양 저장소 또는 제품에 저장하는 것”이라고 정의내리고 있다(Burns, 2018; IPCC, 2022, p. 1796). 여기서 중요한 점은 두 가지이다. 하나는 이산화탄소를 제거하여 저장하는 매체가 ‘지중·토양·해양 저장소 또는 제품’으로 확대되어 있다는 점이다. 이는 기존의 산림이라는 매체이자 저장소를 넘어선다. 또한, 생물학적인 흡수원에 의한 제거 접근법뿐만 아니라 지구화학적(geochemical) 또는 화학적(chemical) 기술을 활용한 제거 접근법을 포괄한다는 것으로 볼 수 있다. 다른 하나는 인간의 인위적인 행동이 아닌 자연적인 이산화탄소 흡수는 ‘제거’에 포함되지 않는다는 점이다(IPCC, 2022, p. 1796). 이는 학계에서 ‘제거’를 정의할 때, 제거 활동에서 고려되어야 하는 저장 ‘매체’와 매체에 저장하는 ‘방식’을 크게 확대하고 있다는 것을 알 수 있다.

파리협정 제6.4조 메커니즘 하의 제거에 대한 ‘정의’와 관련하여, DAC 기술 관련 이해관계자들은 다양한 제거 활동들이 인정받을 수 있도록 포괄적인 정의를 내려야 한다는 입장을 밝혔다. 특히, 제거 ‘방식’과 관련하여, DAC

기술에 기반한 제거 접근법이 기존의 생물학적인 흡수원 매체에 의한 제거 접근법에 속하지 않고 공학 기반(engineering-based) 제거 접근법에 속하며, 이 공학기반 제거 접근법이 기존의 제거 활동을 보완할 것이라는 입장이다. 이러한 포괄적인 정의에 기반하여, UNFCCC 하의 온실가스 산정 체계와 국가 온실가스 인벤토리 체계가 공학 기반 제거 접근법을 인정해야 하고, 다양한 유형과 규모를 가진 제거 활동들이 동등하게 다루어져야 한다고 주장하였다(Carbon Engineering, 2022; Climeworks, 2022; IETA, 2022).

또한, 제거의 ‘매체’와 관련하여, DAC 기술 이해관계자들은 DAC 기술을 DACCS 기술과 DACCU 기술을 분류하여 각 기술 측면에서 제거에 대한 정의에 대해 보다 세부적인 의견을 내세우고 있다. 먼저, DACCS 기술에 대해서는 포집된 이산화탄소를 저장하는 ‘매체’인 ‘지중 저장(geological storage)’과 관련하여, 포집된 이산화탄소를 액체 또는 기체¹⁹⁾ 상태로 지중에 주입하여 저장하는 방식 외에도, 포집한 이산화탄소를 광물과 화학반응시켜 고체화하는 현장외(外) 광물화(ex-situ mineralization)를 통한 저장 방식이 인정되어야 한다고 주장하였다(AirCapture, 2022; DAC Coalition, 2022). 다음으로, DACCU 기술에 대해서는, 포집된 이산화탄소를 저장하는 제거 활동이 인정되어야 하며, 이를 위해서 DACCU에 의해 포집된 이산

Table 3. Current trends of DAC technology in Korea

| Sector | Name | Description | Date |
|---------|--|---|-----------|
| Public | 2050 Carbon Neutrality Scenario | Production of e-fuel by DACCU technologies was included in Scenario B. | Oct. 2021 |
| | 100 Key Technologies for Carbon Neutrality of Korea | DAC technology was included as a part of CCUS sector. | Oct. 2022 |
| | Technology Innovation Strategy Roadmap for CCUS Sector | A roadmap for DAC capture capacity was established. (Year 2030: 1-4 ktCO ₂ /yr, Year 2040: 50 ktCO ₂ /yr, Year 2050: 500 ktCO ₂ /yr) | Nov. 2022 |
| | DACU Original Technology Development Project | A new R&D project was announced by the Ministry of Science and ICT. | Mar. 2023 |
| Private | Low Carbon | A module for a DAC facility called “Zero-C” was commercialized. | 2022 |
| | GS Engineering | A technology to produce concrete with captured CO ₂ was transferred to GS Engineering from CarbonCure, a DACCU start-up in Canada. | Aug. 2022 |

Source: Arranged by the authors

19) 정확히는 포집한 이산화탄소를 초임계 유체(supercritical fluid) 상태로 지중저장소에 주입하는 것이 일반적이다. 초임계 상태란, 물질이 고유의 임계점(critical point)을 초과하는 온도 및 압력 하에서 가지게 되는 상태로 액체와 기체의 중간 상태를 띠는 것을 의미한다. 동 논문에서는 편의상 ‘액체 또는 기체 상태’로 표현하였다.

화탄소를 저장하는 '매체'인 '상품'이 반드시 정의에 포함되어야 한다는 입장이다(IETA, 2022). DACCU는 대기중에서 포집한 이산화탄소를 화학적 전환 또는 고체화를 통해 일련의 '상품'에 저장시키는 것으로, 고체 탄소나 콘크리트 등과 같이 내구성(durability)이 있는 수명이 긴 제품에 저장시키는 활동뿐만 아니라, 탄산음료와 같이 내구성이 짧은 제품을 생산하는 DACCU 기술 기반 제거 활동들에 대해서도 감축사업으로 인정해주어야 한다는 입장이다(AirCapture, 2022; IETA, 2022).

이러한 산업계의 핵심 주장과 관련하여, 제거에 대한 '정의'를 둘러싼 산업계의 핵심 주장은 다음과 같이 정리될 수 있다.

(1) 제거의 '방식'과 관련하여, 기존의 생물학적 흡수원에 기반한 제거 활동 외에 공학 기반 제거(engineering-based removal) 활동을 제6.4조 메커니즘의 제거 활동으로 인정해야 한다.

(2) DACCS 기술을 고려할 때, 저장 '매체'인 지중 저장과 관련하여, 이산화탄소의 액체·기체화 주입에 의한 지중저장 외에 고체화 주입에 의한 지중저장을 제거 활동으로 인정해야 한다.

(3) DACCU 기술을 고려할 때, 공학 기반 제거 활동에서 DACCU 기술을 제거 활동으로 인정해야 하며, 이를 위해 저장 '매체'로 '상품(product)'이 포함되어야 한다.

이러한 이해관계자의 주장에 기반한 핵심 쟁점에 대해서, 우리나라의 현황을 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 파리협정 제6.4조 메커니즘에 공학기반 제거 접근법을 인정해야 한다는 첫 번째 주장에 대해서, 우리나라의 공학기반 제거 접근법에 대한 정책 및 사업화 현황을 살펴볼 필요가 있다. 최근 우리나라는 DAC 기술을 활용한 감축행동과 관련하여, 정부와 민간 섹터에서 관련 노력을 진행해왔다. 공공섹터에서는, 2021년 10월 도출된 「2050 탄소중립 시나리오」 중 시나리오 B안의 '수송 부문'에, 수송 부문의 잔여 배출량을 상쇄하기 위한 방안으로 대기중 이산화탄소를 포집하여 차량용 합성연료(e-fuel)로 변환하는 DACCU 기술을 활용하는 계획이 포함되어 있다(CNC, 2021, p. 63). 2022년 10월 도출된 「탄소중립 녹색성장 기술 혁신 전략」에 '한국형 탄소중립 10대 핵심기술'이 포

함되었는데, 동 핵심기술 목록에 DAC 기술이 포함되었다. 또한, 2022년 11월 도출된 「CCUS 분야 기술혁신 전략 로드맵」에서는 DAC 기술을 활용한 이산화탄소 제거량 목표치가 2030년 연간 포집량 1천~4천 tCO₂, 2040년 연간 포집량 5만 tCO₂, 그리고 2050년 연간 포집량 50만 tCO₂로 설정되었다(Interagency, 2022, p. 39; Ministry of Science and ICT, 2022). 더 나아가 우리나라 과학기술정보통신부는 DACCU 기술에 대한 정부 R&D를 2023년부터 2025년까지 지원할 계획이다(NRF, 2022).²⁰⁾ 다음으로, 민간 부분에서의 노력을 살펴보면, 중소기업인 (주)로우카본은 DAC 설비를 국내 최초로 상용화하였다(Song and Oh, 2022b, p. 25). 대기업으로는 GS건설(주)이 캐나다 DACCU 기술 스타트업인 카본큐어社(Carbon Cure)와 협력하여 포집한 이산화탄소를 콘크리트 생산에 활용하는 기술을 도입하였다. 이러한 우리나라의 DAC 기술 기반 준비 현황을 정리해 보면 Table 3과 같다. 이러한 우리나라 준비 현황을 근거로, 제6.4조 메커니즘에 공학 기반 제거(engineering-based removal) 활동이 인정되는 것이 우리나라에도 유리하다고 판단될 수 있다.

다음으로, DACCS 기술에서 이산화탄소의 액체·기체화 주입에 의한 지중저장 외에 고체화 주입에 의한 지중저장을 제거 활동으로 인정해야 한다는 주장에 대해서, 마찬가지로 우리나라의 기술적용 현황을 고려할 필요가 있다. DAC 기술뿐만 아니라 화석연료 사용에서 발생하는 온실가스 저감을 위한 일반적인 이산화탄소 포집 및 저장(CCS, carbon capture and storage) 기술에서도 포집한 이산화탄소를 저장하기 위한 저장소를 찾는 것이 쉽지 않으며, 이는 CCS 기술의 활용 및 확산을 막는 주요한 장애요인이다(Budinis et al., 2018). 우리나라에도 포항 분지, 군산 분지, 동해가스전 등 잠재력이 높은 것으로 평가되는 지중저장소가 존재한다(Kwon and Shinn, 2018). 또한, 기존의 지중저장 기술 외에, 현무암 탄산화(basalt carbonation)와 같은 신규 저장 기술에 대한 잠재력 검토 역시 수행되었다(Shinn et al., 2019). 이러한 신규 저장 기술에 대한 관심이 부상하는 이유는 기존에 고압으로 이산화탄소를 지중에 저장하는 기술이 지진 발생 등의 위험을 일으킬 수도 있다는 인식으로 인해 사회적 수용성이 낮기 때문으로,²¹⁾ 2017년 지열발전으로 촉발된 포항 지진 이후 지열

20) 2023년 3월에는 DACCU 기술의 원천기술개발을 목표로, 정부 R&D 사업인 「DACCU 원천기술개발사업」의 신규과제 공모가 시작되었다.

21) 기존 지중저장 기술은 이산화탄소를 지중에 저장하는 기술로, 지하의 염수층이나 폐유전/가스전 등의 누수가 없는 공극에 저장하는 방법이 대표적이다. 그러나 지하에 너무 많은 양의 이산화탄소를 주입하는 것은 지반을 불안하게 하고 지진을 유발할 수 있다(Zoback and Gorelick, 2012). 이에, 이산화탄소를 지하 공극에 가두어놓는 방법이 아니라, 지하의 광물과 화학적으로 결합하여 광물

발전 기술과 유사하게 수행되는 이산화탄소 지중저장 기술에 대해서도 많은 우려가 제기되었다. 또한 기존 지중저장 기술보다 훨씬 안정적으로 저장이 가능한 현장 광물화(in-situ mineralization) 기술이 전 세계적으로 다양하게 검토되고 있는 만큼, 우리나라에서도 이에 대한 검토가 수행되었다(Ibid.). 그러나 아무리 광물화라 할지라도 지중에 고압의 이산화탄소를 주입해야 한다는 점은 동일하므로, 저장소로 활용가능한 지층을 찾아야하는 문제 외에도 지진을 야기하지 않도록 관리해야 하는 장애요인이 완전히 해소되지는 않았다. 이에, 우리나라 역시 현장외(外) 광물화(ex-situ mineralization)를 고려하는 것이 필요한 상황이다. 현장외 광물화는 저장소 외부에서 이산화탄소와 광물의 화학적 결합이 이루어지는 방법으로, 이후 저장소에 보관하여 영구적으로 격리할 수 있다(Bodénan et al., 2014).²²⁾ 현장외 광물화를 통해 저장할 수 있는 다양한 방법이 있을 수 있지만, 우리나라에서는 폐광산 채움재(backfilling material 또는 reclamation filler)로 활용하는 것을 검토하는 중으로, 특히 한국지질자원연구원이 포집된 이산화탄소를 현장외 광물화 방식을 통해 폐광산 채움재로 활용하는 것에 대한 원천기술 개발을 수행 중이다(Jung et al., 2021; KIGAM, 2021). 다만, 현장외 광물화 기술은 반응 속도가 느리고 비용이 상대적으로 높다는 점이 단점으로 지적되며(Romanov et al., 2015, p. 15),²³⁾ 현장외 광물화를 통한 이산화탄소 저장에 대해 공인된 감축 방법론이 부재해 이를 통한 감축실적을 아직 인정받기 어려운 점 역시 단점이다. 그럼에도 불구하고 우리나라에는 다수의 폐광산이 존재하므로 이러한 기술을 잘 활용시 확실한 지중저장의 대안으로 활용될 수 있다. 따라서, DACCS 기술에서 이산화탄소의 고체화를 통한 지중저장 방식을 제거 활동으로 인정해야 한다는 주장에 대해서 우리나라는 찬성하는 입장을 가질 필요가 있다. 물론, 공인된 감축방법론을 도출하기 위한 전문가 참여 및 외교적 노력이 수반되어야 할 필요가 있는 것은 사실이다.

마지막으로, 공학 기반 제거 활동에 DACCU 기술을 인정해야 하고, 이를 위해 저장 매체로 ‘상품(product)’이 포

합되어야 한다는 주장에 대해, 역시 우리나라의 기술적 현황을 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 온실가스 배출저감 활동 하에서, CCS 기술의 경우, 포집된 이산화탄소를 지중 ‘저장’하는 것과 관련하여 저장량 계산 및 모니터링이 비교적 명확하여 감축 활동으로 인정받는 것이 어렵지 않다. 그러나, 이산화탄소 포집 및 활용(CCU, carbon capture and utilization) 기술의 경우, 포집된 이산화탄소를 ‘상품’에 저장하므로 이산화탄소의 저장량 및 저장 기간 산정, 모니터링이 쉽지 않아 국제감축활동으로 인정받지 못했다(Park et al., 2020). 그러나 우리나라와 일본 등 지중저장소 확보가 용이하지 않은 국가들을 중심으로 CCU 기술의 활용이 불가피함을 역설하고 있다(Global CCS Institute, 2022). 그럼에도 우리나라는, CCU 세부기술 별로 기술개발 편차가 크고, 전반적인 기술 수준은 최고기술 보유국 대비 80% 수준에 머물러 있으며(Yeo and Kim, 2022, p. 5), CCU 기술의 제도적 기반도 빈약하여 개별법 없이 40여개의 관련법을 준용해야 할 정도로 기술 및 제도적으로 미진한 상황이다(Ministry of Trade, Industry and Energy, 2022). 이러한 상황을 타개하기 위하여 2021년 「이산화탄소 포집·활용(CCU) 기술혁신 로드맵」을 발표하였으며(Interagency, 2021), CCUS 기술 전반에 대한 제도적 기반을 구축하기 위한 노력도 계속되고 있어(Ministry of Trade, Industry and Energy, 2022), 우리나라의 CCU 기술의 R&D 및 활용 상황은 점차 개선될 것으로 기대된다. 이러한 맥락에서, 대기중에서 포집된 이산화탄소를 활용하는 DACCU 기술 역시 활용 방안을 다각화하고 동 기술을 활용한 탄소중립 달성이 가능하도록 ‘제거 활동’으로 인정되는 것이 우리나라에 유리하다고 할 수 있다(Song and Oh, 2022a). 사실, 우리나라서 DACCU 기술에 대한 R&D 및 사업화 사례가 많지는 않지만(Lee and Lee, 2022),²⁴⁾ 대표적으로 2022년 민간기업인 (주)로우카본에서 대기 중의 이산화탄소를 포집하여 탄산나트륨(Na_2CO_3) 및 탄산칼륨(K_2CO_3)으로 활용하는 기술을 사업화하기도 하였고(Song and Oh, 2022b), 한국연구재단에서는 우리나라 최초의 DACCU 국가 R&D를 추진하고 있고(NRF,

내로 이산화탄소를 흡수하는 현장 광물화 방식의 지중저장 방식이 주목을 받고 있다.

22) 광물화 산출물이 상업적으로 가치가 있을 경우, 이를 저장소에 격리하는 대신 상품으로 활용할 수 있다(Interagency, 2021). 이에 대해서는 다음 섹션에서 DACCU 기술과 함께 다루도록 하겠다.

23) 현장외 광물화는 저장 비용이 약 50-300 USD/tCO₂로 분석되는데, 이는 현장내 광물화(17 USD/tCO₂) 및 일반 지중저장(8 USD/tCO₂)보다 월등히 비싸다(Romanov et al., 2015, p. 4, 15)

24) 동 문장에 활용된 문헌은 e-fuel 연구개발 현황을 다루는 논문이 아니며, DACCU 자체에 대한 연구 결과를 담고 있는 것은 아니다. 다만, e-fuel의 원천이 되는 이산화탄소를 DAC로 공급하는 것이 전세계적으로 활발히 논의되나 아직 우리나라에서는 이런 논의가 충분히 이루어지지 않고 있다는 내용이 담겨 있다.

2022), 이미 앞서 언급된 바와 같이 우리나라 탄소중립 시나리오 B에 대기 중에서 이산화탄소를 포집해 합성연료로 활용하는 DACCU 기술이 포함된 바(CNC, 2021, p. 63), 점차 DACCU 기술에 대한 우리나라의 R&D 및 사업화 사례가 증가할 것으로 보인다. 이에, 우리나라는 DACCU 기술 역시 '제거 활동'으로 인정되어야 한다는 입장을 취할 필요가 있다.

3.2. 저장 기간

두 번째 쟁점은 바로 공기중에서 포집된 온실가스를 저장하는 매체의 '저장 기간(storage time)'과 관련된다. 저장기간과 관련하여, DAC 관련 이해관계자들이 제시하는 것은 '영구성의 기간'에 대한 기준이다. 영구성 기간이 중요한 이유는 배출저감에 의해 이산화탄소 1톤이 영원히 감축되는 것과 같은 효과를 창출하기 위해서는 그에 상응하는 수준으로 이산화탄소가 대기중에서 영구적으로 제거되어야 하기 때문이다(UNFCCC, 2022d, para 10(f)). 따라서, 영구성 기간은 이 제거 활동의 영구성을 판단하기 위한 시간적 경계(temporal boundary)이다(Ibid., para 10(e)). 감독기구가 제시한 정보노트에서는 이 영구성 기간을 40 ~ 100년으로 설정하고 있다.

이에 대해서, 이해관계자들의 입장을 추출해보면, 클라임웍스(사)는 자신들이 보유한 DACCS 기술의 경우, 300 ~ 1000년의 이산화탄소 저장 기간 능력이 있는 바, DACCS 기술 기반 제거 활동에 40-100년의 시간적 경계를 적용하는 것에 의문을 제기하고, 이에 대한 구체성이 마련되어야 한다는 입장이다(Climeworks, 2022). 더 나아가, 에어캡처(사)는 DACCU 기술 관점에서 영구성 수준의 차이를 언급하였다. DACCU 기술의 경우, 영구성이 높은 상품(콘크리트 등)과 영구성이 낮은 상품(음료 탄산화, 실내 농업, 합성 연료, 드라이아이스 등)이 존재한다. 영구성이 낮은 제품에 이산화탄소를 저장할 경우, 이는 40 ~ 100년에도 미치지 못하는 저장 기간이다(AirCapture, 2022). 즉, 저장기간의 관점에서 DACCS의 경우 300 ~ 1000년의 상대적으로 매우 오랜 저장기간을 가지고, DACCU 기술의 경우 상품의 특성에 따라 저장기간이 매우 짧은 경우부터 상대적으로 오랜 기간을 가진 경우로 다양하다. 이러한 저장기간의 다양성은 크레디팅 인정 기간(crediting period)과 관련한 규칙을 둘러싸고 쟁점을 불러일으킨다.

크레디팅 기간은 사업에서 감축 크레디트가 발행될 수 있는 기간을 의미한다. 파리협정 제6.4조 메커니즘의 경우, 배출저감 사업의 크레디팅 기간은, 갱신형은 최초 5년 기간에 2회 갱신 가능으로 최대 15년이고, 비갱신형은 10년이다. 한편, 제6.4조 메커니즘 '제거' 활동에 대해서, 영구성 기간에 대해 100년의 시간적 경계를 중심으로 논의하고 있다. 이를 바탕으로, 제거 활동에 대한 크레디팅 기간은 갱신형만 존재하며, 이는 15년 기간에 2회 갱신 가능으로 최대 45년이다(UNFCCC, 2021, Annex para 31(f)).²⁵⁾ 교토의정서 CDM 하에서의 배출저감 사업의 크레디팅 기간이 15년간 3회로 최대 45년이고, 신규조립 및 재조립 CDM의 경우, 20년 두 번 갱신(총 60년) 또는 30년인 것과 비교하면, 제6.4조 메커니즘의 크레디팅 기간이 상당히 줄어든 것을 알 수 있다(UNFCCC, 2005, para 23). 앞서 언급한 바와 같이, DACCS 기술을 보유한 기업들의 경우, 현재 제거 활동에 기반한 사업에 대한 크레디팅 인정 기간이 너무 짧다는 입장이며, 이에 대해서 CDR 옵션별로 크레디팅 기간에 대해 차등을 두는 유연성을 가져야 한다고 주장하였다(Climeworks, 2022).

크레디팅 기간과 관련하여, 파리협정 제6.4조 메커니즘의 세부이행규칙이 2021년 12월 도출되었고, '제거' 활동 인정 여부에 대한 국제협상이 이제 시작하였기 때문에, 우리나라에서는 다양한 CDR 접근법들에 대한 제거 결과물 산정 방법론과 크레디팅 기간에 대한 구체적인 연구가 아직 충분히 이루어지지 않았다. 물론 신규조립 및 재조립에 대한 사항은 예외다. 그러나 일반적으로, 크레디팅 기간이 길어야 투자비용 회수기간 역시 길어 민간투자자의 사업 참여를 유도할 수 있으며(Moon et al., 2016), 서로 다른 감축사업 간의 형평성과 일관성을 유지하면서도 사업별 특성을 고려한 정책 수립이 필요하다(Kim et al., 2018). 만약, 우리나라가 DACCS 기술에 기반한 시설을 건설하고 이 시설에서 포집한 이산화탄소를 저장한다고 가정할 경우, 시설 부지에 대한 주민수용 작업, 부지 선정, 시설 건설, 저장까지 많은 시간·노력·비용이 투입되어야 한다. 특히, 지중저장의 방식을 채택할 경우 지중저장의 영구적 기간이 400 ~ 1000년인 점을 고려할 때, 현재의 제거 크레디팅 기간이 다소 짧다고 볼 수 있다. 이에, 우리나라 역시 크레디팅 기간에 대해서 CDR 옵션별로 차등화를 두는 유연성 접근이 필요하다는 입장을 취할 필요가 있다.

25) 제6.4조 메커니즘 하에서의 '제거' 활동에 대한 감독기구 권고안에서는, 크레디팅 기간 갱신 시, 제거 활동은 적용가능한 방법론의 최신 버전을 적용해야 한다는 매우 간단한 내용이 적혀 있다(UNFCCC, 2022c, para 18).

3.3. 대체 가능성

대체 가능성에 대해서는 크게 두 가지 쟁점이 존재한다. 첫 번째 쟁점은 DAC 기술에 기반한 제거 결과물이 온실가스 배출저감 결과물과 대체 가능성(fungibility)을 가져도 되는가의 여부이다. 두 번째 쟁점은 동일한 DAC 기술에 기반한다고 하더라도 DACCS 기술에 기반한 제거 결과물과 DACCU 기술에 기반한 제거 결과물 간의 대체 가능성을 가정해도 되는가의 여부이다. 이러한 대체 가능성을 결정하기 위해서는 바로 제거 결과물에 대해서 국제적으로 인정받는 산정 방법론(accounting methodologies)이 있다는 전제가 필요하다.

현재, 기존 CDM 상에서는 DAC 기술 기반 제거에 대해 인정받는 산정 방법론이 부재한다. 이에 대해서, DACCS 기술 기반 대규모 실증사업을 추진한 기업인 카본엔지니어링(사)와 클라임웍스(사)는 이해관계자 제안서에서 DAC 기술에 대해 생애주기평가(LCA, life cycle assessment) 접근법을 적용해야 한다고 주장하며, 국제적으로 공인받은 산정방법론의 필요성을 간접적으로 표출하였다. 한편, DAC 기술에 기반하여 상당한 이산화탄소 배출회피(emission avoidance)로 이어질 수 있는 활동을 제6.4조 메커니즘에 포함해야 한다는 주장이 있었다(AirCapture, 2022).

이러한 이해관계자 주장을 토대로 감독기구가 도출한 제거활동에 대한 권고안 초안에서는 산정방법론에 대한 세 가지 사항을 제안하고 있다. 첫째 항목은 크레딧 계산 방식으로, 제거를 통해 생산되는 크레딧은 기준배출량(베이스라인)을 초과한 값이며, 다른 활동으로 인한 배출량 및 탄소누출 배출량을 제한하고 되어 있다. 둘째, 어떠한 탄소 저장고(carbon pools)나 온실가스는 산정에서 제외될 수 있는데, 이는 제외가 순 제거량을 보다 보수적으로 계산할 수 있는 경우에 해당한다.²⁶⁾ 셋째, 만약 제거를 포함한 활동이 배출저감(emission reduction)으로 이어진다면, 감독기구가 개발한 조항에 따라 해당 활동에 적용될 수 있는 관련된 방법론 또는 방법론 조합을 통해 관련 지침이 적용될 수 있다(UNFCCC, 2022c, paras 15-17). 이는 ‘제거’에 대한 산정 방법론에 대한 매우 기본적인 내용을 담고 있다.

이에 대해서, DACCS 및 DACCU 기술 관점에서 우리나라는 네 가지 사항에 대해서 입장을 정리할 필요가 있다. 첫째, 제거 접근법 옵션별로 별도의 산정방법론을 설

정하기 위한 제반이 마련되어야 한다는 DAC 기술 산업계 이해관계자들과의 의견과 같은 입장을 취할 필요가 있다. DAC 기술 기반 제거 활동에 대한 산정 방법론의 경우, 생애주기평가(LCA) 방법론이 필수적이다. 현재로서는 DAC 기반 시스템에 대해서 구체적인 생애주기 이산화탄소 인벤토리 정보를 찾기 쉽지 않으며, 이로 인해 DAC 기술 기반 사업에 대한 투명성이 부족하다. 따라서, DAC 기술 기반 시스템 적용 시 관련 데이터 제공에 있어서 더 높은 투명성이 요구된다(Terlouw et al., 2021, p. 1709). LCA의 목적은 “상품 또는 서비스의 전 생애에 걸친 환경적 영향을 결정”하는 것이다(Ibid., p. 1703). DACCS 기술에 대한 LCA 차원에서 중요한 핵심은 바로 시스템 경계(system boundaries)이다. 기존의 CDR 접근법에서는 요람에서-게이트까지 접근법(cradle-to-gate approach)을 적용해 왔으나, 여기서 더 나아가 사업 종료 이후의 환경적 영향까지 고려하는 요람에서-무덤까지 접근(cradle-to-grave approach)이 필요하다(Ibid., p. 1709, 1713). 한편, DACCU 기술 차원에서는 포집된 이산화탄소를 제품화하는 과정에 투입되는 원료(합성연료의 경우 수소 등 포함)도 시스템 경계에 포함시켜야 한다. 또한, DACCU 과정의 산출물로 나온 제품이 사용될 때 발생하는 영향 역시 고려할 필요가 있으나 이는 DACCU 기반 제품에 대한 시장이 충분히 형성되어야 한다는 점에서 산정이 어려울 수 있다(Daniel et al., 2022). 따라서 DACCS 및 DACCU 기술 기반 사업들의 전 과정에 대하여 시스템 경계를 명확히 설정하여 사업의 MRV를 수행하며, 이때 LCA 과정을 고려하여 정확한 제거량과 이에 기반한 감축 크레딧을 계산해야 한다. 이때, 역전이나 누출이 일어난 온실가스가 국가 간 경계를 벗어날 수 있어, 이는 UNFCCC 하에서 복잡하고 새로운 협상 주제가 될 수 있으며(C2G, 2021), 이에 대해서는 다음 섹션에서 별도로 다루고자 한다.

둘째, 제거 결과물과 배출저감 결과물 간의 대체 가능성에 대한 쟁점과 관련하여, 이미 제거 및 배출저감 결과물 간의 대체 가능성에 대한 리스크가 많은 문헌에서 등장하고 있다. 이 리스크를 줄이는 방안으로, 제거 결과물과 배출저감 결과물을 상호 거래하는 것이 아니라, 제거 목표와 배출저감 목표를 분리하거나, 제거 시장과 배출저감 시장을 분리하여 접근하는 등의 해결 방식이 제시되고 있다. 이에 파리협정 제6.4조 메커니즘의 운영에 있어서 이러한 접근을 고려할 필요가 있다. 기존 CDM에서는 제

26) 원문은 다음과 같다: “Any carbon pools and GHGs may be optionally excluded from accounting if such exclusion results in a more conservative calculation of net removals”.

거 활동으로 조림·재조림만 인정되었고, 조림·재조림 결과물에 대해서 비영구성 문제를 해결하기 위하여 유효기간이 정해져 있는 단기 기한부 배출권(tCER, temporary CER) 또는 장기 기한부 배출권(ICER, long-term CER)을 선택하여 발행하였다. 이는 배출저감 활동에 기반한 일반 배출권(CER)과 구분된다. tCER은 CDM 차기 공약기간이 끝나면서 함께 만료되고, ICER은 배출권 인정기간이 끝나면 함께 만료된다. 만료된 tCER이나 ICER은 유효기간이 없는 다른 배출권이나 만료되지 않은 tCER 또는 ICER로 대체하여 상환해야 한다(UNFCCC, 2005, para. 36-50). 따라서, CDM 하에서는 배출저감 결과물과 제거 결과물 간의 대체 가능성이 열려 있으나, 제거 결과물의 유효기간이 제한적인 바 간접적으로는 두 개 시장이 구분되어 있다고도 볼 수 있다. 그런데, 파리협정 제6.4조 메커니즘에서는 이 tCER이나 ICER 방식이 적용되지 않는다. 이 경우, 배출저감 결과물과 제거 결과물 간의 상호 대체성을 어떻게 해야 하는가에 대해서는 아직 답이 내려지지 않았다. 가장 쉬운 방법은 대체가능성을 없애고 두 개의 시장을 분리하여 운영하는 것이다. 배출저감 활동만으로 감축목표 및 탄소중립 달성이 어렵다고 보는 우리나라 입장에서는 '제거' 활동에 기반한 결과물이 통용되는 장이 꼭 필요하며, 배출저감-제거 대체가능성이 문제가 된다면, 두 개 시장을 분리하는 것도 나쁘지는 않다고 볼 수 있다. 이에 대한 국제협상 진행을 추이를 보면서, 우리나라 차원에서 고민하고 추후 이에 대한 협상 입장을 도출하는 것이 필요하다.²⁷⁾

셋째, 제거 결과물 내에서의 대체 가능성에 대한 쟁점과 관련하여, 일차적으로는 제거 결과물들을 비교할 수 있는 각각의 산정 방법론이 필요하다. 앞서, DAC 기반 기술을 적용한 제거 사업 시 LCA가 필수적이며, 이 차원에서 중요한 또 하나의 개념은 기능적 단위(functional unit)이다. 기능적 단위의 중요성은 이 단위가 DAC 기술 기반 제거 결과물 뿐만 아니라 다른 CDR 기술을 적용했을 때 도출되는 제거 결과물 간에 비교를 가능하게 하기 때문이다. 가장 적절한 단위는 배출저감(emission reduction)과

별도로 구분하여, 이산화탄소 제거 톤(per ton of CO₂-removal)을 활용할 수 있다(Ibid., pp. 1709, 1713, 1716).

특히, DACCU 기술에 기반한 제거 결과물이 제6.4조 메커니즘의 감축 결과물로 인정받기 위해서는 '배출회피(emission avoidance)' 개념에 대한 인정이 필요하다. 만약 이 개념에 대한 인정이 어렵다면, '대체효과(substitute effect)'라는 다른 개념을 활용할 필요가 있다. 파리협정 제6조 하에서 감축활동으로 인정받는 감축유형은 '배출저감'과 '제거' 단 두 가지이다. 파리협정 제6조 협상 시, 또 다른 감축유형으로 '배출회피'에 대한 논의가 있었으나, 국제적으로 인정된 단일화된 정의가 부재할 뿐만 아니라, 당시 협상회의에서도 국가들마다 제시하는 정의나 접근법이 달라 포함되지 못하였다. 이에, 세부 추가 협상에서 '배출회피'가 다시 논의되었으며, 파리협정 당사국총회는 파리협정 당사국 및 옵저버 기관들이 '배출회피' 대한 국가제안서를 2023년 3월 15일까지 제출할 것을 요청하였다. 이렇게 배출회피에 대한 국가제안서 요청 작업이 있게 된 이유는 이를 접근하는 방식에 따라 그 개념이 크게 달라지기 때문이다. 예를 들어, 탄소시장 협상에서 필리핀의 경우, 일차적으로 감축활동으로 인정받는 '배출저감'과 '제거' 외에 '배출회피'가 포함되어야 한다고 주장한다.²⁸⁾ 필리핀은 개도국의 사회경제적 개발권(right to develop socio-economically)에 대한 보상차원에서 접근하고 있다(Philippine, 2022, pp. 1-2). 필리핀은 배출회피를 다차원적으로 접근하고 있는데, 예를 들어 온실가스 無배출 기술을 활용하여 배출이 회피될 수도 있고, 또한 에너지 생산·수송 산업에서 화석연료에 기반하여 이미 계획된 사업을 하지 않을 경우, 이 역시 배출회피로 설명한다(Ibid., p. 2). 즉 유전을 개발하여 화석연료를 추출할 수 있으나, 유전을 개발하지 않을 경우, 개발했을 때의 이산화탄소 배출량만큼을 배출권으로 인정받아야 한다는 의미이다.²⁹⁾ 이는 '사업' 레벨 뿐만 아니라 국가 차원의 '정책(policies)' 레벨에서 배출회피를 접근한 것이다. 반면, 학계에서는 배출회피를 '사업' 레벨에서 "화석연료 사용을 줄이는 행위인 에너지 효율 제고, 에너지 절약 강화, 非화석 에너지원

27) 만약 제6.4조 메커니즘이 기존 CDM과 같이 제거 결과물에 대해서만 유효기간을 두거나, 만료 시 대체 상환하는 방식을 적용한다면 CDM과 같이 제거 사업이 활성화되기는 어려울 것이다. 2023년 7월 31일 기준으로, CDM 하에서 발행된 전체 CER 대비 ICER과 ICER의 발행 규모는 각각 0.4%와 0.1%에 불과했었다는 점이 바로 그 근거이다.

28) 필리핀이 제시한 배출회피의 정의는 “에너지, 수송, 제조, 농업, 인간에 의한 산림파괴, 그리고 다른 온실가스 배출 개발 활동에 있어서(기준에) 계획된 온실가스 배출 행동에 의해 생산될 것으로 예상된 온실가스 배출의 완전한 대체 또는 방지(full displacement or prevention of GHG emissions expected to be generated by planned GHG emitting actions in energy, transport, manufacturing, agriculture, human induced deforestation, and other GHG emitting development activities)”이다(Philippine, 2023).

29) 동 사항은 필리핀이 2022년과 2023년에 제출한 국가제안서의 내용을 바탕으로 작성되었다.

으로 전환 등을 통해 회피된 배출 활동”으로 접근하고 있다(Herzog et al., 2003; Park et al., 2020). 따라서, 사업 레벨에서의 배출회피는 에너지 자원 대체효과로서 이해될 수 있는 여지가 있다.

여기서 ‘사업’ 레벨에서의 ‘배출회피’ 개념은 DACCU 기술이 ‘제거’ 결과물로 인정 받는 데에 있어서 핵심적인 개념이다. 그 이유는 DACCU 기술에 기반한 제거가 상대적으로 영구성이 낮기 때문이다. 즉, 대기중에서 포집한 이산화탄소를 상품에 저장할 때, 이 저장 기간이 상대적으로 일시적일 수 있다는 의미이다. 일시적 상품저장의 대표적인 예시는 음료 탄산화를 들 수 있는데, 이는 i) DAC 기술을 활용해 대기중으로부터 CO₂를 포집하고, ii) 포집된 CO₂를 음료탄산화에 활용함으로써, 기존 자원·에너지 사용을 대체하는 배출회피가 발생하며, iii) 탄산음료를 소비 시 음료에 저장된 CO₂가 대기중으로 바로 역전되므로, iv) 여기서는 ‘제거량’이 제로(0)이고, 자원·에너지 사용을 대체한 ‘배출회피량’만을 계산하여 감축결과물이 도출될 수 있다(Hosseini et al., 2023; Peres et al., 2022, p. 1200). 상대적으로 장기적인 상품저장의 예시는 콘크리트를 들 수 있는데, 이는 i) CO₂를 대기에서 포집하고, ii) 포집된 CO₂를 콘크리트 블록 내 저장함으로써 이산화탄소를 ‘제거’하고, iii) 동시에 콘크리트 블록 생산에 필요한 시멘트 사용량을 이산화탄소로 대체함으로써 신규 콘크리트 생산을 감소시켜 CO₂ 배출을 ‘회피’한 바,³⁰⁾ iii) 최종적으로 콘크리트 블록 상품을 건물 건설시 활용하게 되면 ‘제거량’과 ‘회피량’을 합산하여 계산하면 감축 결과물이 될 수 있다(Verra, 2021, pp. 10-13).³¹⁾ 즉, DAC 기술에 기반해 포집된 이산화탄소를 산업공정에 활용하여 화학연료에 기반한 탄소 공급원료를 대체한다면 이는 감축 효과로 보아야 한다는 입장이다. 따라서, ‘배출회피’ 또는 ‘대체효과’에 대한 개념이 인정될 수 있다면, DACCU 기술에 기반한 다양한 활동들이 파리협정 제6.4조 메커니즘 하의 감축사업화로 이어질 가능성이 높아지는 것이다. 따라서, 이러한 DACCU 기술을 적용했을 때, 감축 결과물로 인정받기 위해서는 배출회피에 대한 인정이 필수적이다.

그러나 앞서 언급한 배출회피에 대한 개념정의를 둘러싼 합의가 아직 이루어지지 않았다(Larrea and Warnars,

2009; Philippine, 2022). 이로 인해, 제거량과 회피량을 합산하는 감축량 계산 방법론이 의무적 탄소시장에서는 인정되지 못하고 있다. 앞서 언급한 콘크리트의 예시는 자발적 탄소시장에서 승인된 특정 방법론을 예시로 든 것으로, 아직 일반화된 방법론이라고 볼 수 없다. 따라서, DACCU 기반 감축활동에 대해, 배출회피 개념과 이에 기반한 공인된 방법론이 필요하다. 이를 위해 LCA에 기반하여 제거량과 회피량을 합산하는 것이 타당함을 증명하고, 이를 방법론으로 인정받아야 할 수 있다. 이 뿐만 아니라 CDR 접근법을 적용할 때, 배출회피(avoided emission)와 배출흡수(negative emission) 간의 구분이 필요하다. 이러한 구분을 통해 CDR 접근법이 보다 명확히 정량화 될 수 있기 때문이다(Terlouw et al., 2021, p. 1716). 이에 따라, 현재 감독기구에서 제시한 권고안에서 배출저감으로 이어지는 제거 활동만을 설명하고 있는데, ‘배출회피’로 이어지는 제거 활동 역시 추가할 것을 제안할 필요가 있다.

넷째, DAC 기술 기반 DACCS 기술과 DACCU 기술에 대한 제거 사업의 산정 방법론과 관련하여 현재 국제적으로 통용되는 산정 방법론(accounting methodologies)이 부재한다. 또한, DAC 기반 기술이 현재 매우 빠른 속도로 개발되고 있고 기술혁신이 이루어지고 있는 바, 이러한 기술 기반 전문가 풀을 구성하고 DAC 기술 기반 표준화된 산정 방법론에 대해서 논의 및 도출할 수 있는 체계 마련을 제안할 필요가 있다.

3.4. 역전현상 해결 방안

네 번째 쟁점은 역전현상 리스크에 대한 해결 방식이다.³²⁾ 파리협정 제6.4조 메커니즘의 세부이행규칙에 따르면 동 메커니즘 하의 사업은 국가결정기여(NDC) 기간에 걸쳐서 감축결과물의 비영구성의 위험도를 최소화하고, 배출저감 및 제거 사업에서 역전(reversal)이 발생할 때 이를 전면 해결해야 한다고 명시하고 있다(UNFCCC, 2021, para. 31(d)(ii)). 즉, 역전현상 발생 시, 이를 어떻게 해결해야 하는가에 대한 사항이 주를 이루고 있다.

이 역전현상 리스크에 대해서, DAC 관련 이해관계자들은 명확한 입장을 제시하고 있지는 않은 상태이다. 감독기구가 제시한 권고안에서 역전방지(addressing reversals)

30) 이를 시멘트 사용량 대신 이산화탄소가 활용되었다고 하여 자원 대체 효과(substitution effect)로 보기도 한다.

31) 이는 캐나다 카본큐어(사)가 자발적 탄소시장인 베라(VERRA)의 인증을 받은 콘크리트 강화 기술 라이선싱에 기반한 감축사업의 일환으로, 제거량과 회피량을 별도로 접근하여 감축량을 계산하는 방식이다(Verra, 2021, pp. 10-13).

32) CMA 권고안에서는 역전현상에 대해서 ‘비영구성(non-permanence)’으로 표현하고 있다. 그런데, 동 논문이 ‘영구성’과 관련된 쟁점을 다루는 바, 동 섹션에서는 직접적으로 ‘역전현상 리스크’로 표현하고자 한다.

가 포함되었는데, 제거 활동 참여자는 다년도 NDC 이행 기간에 걸쳐 제거의 비영구성 리스크를 최소화해야 하며, 역전이 발생할 경우 역전을 모두 해결하기 위한 요건을 따라야 한다고 되어있으나, 구체적인 요건은 기재되지 않았다(UNFCCC, 2022c, para 19). 따라서, DAC 기술 관점에서는 역전현상 리스크는 아직 쟁점화되지는 않았다. 그럼에도 불구하고, DAC 기술에 대해서 특히 DACCS 기술과 관련하여 역전현상 리스크가 존재하는 바, 이에 대한 우리나라의 정책 제안 입장을 정리해 볼 필요가 있다.

역전 방지와 관련하여, DACCS 기술 관점에서는 최종 형태가 일반적으로는 지중 저장인 바, 별도의 역전 방지 규칙을 세우기보다는 기존 CDM 하에서 CCS 감축 사업의 역전현상 해결 방안을 활용하는 것이 적절할 것으로 보인다. CCS의 경우, 역전이 발생할 경우, '완충 크레딧 풀(buffer credit pool)' 옵션과 '국가보증(country guarantee)' 옵션을 혼합하는 방식을 적용하고 있다. 먼저, '완충 크레딧 풀' 차원에서, CCS 감축사업으로 저장된 탄소가 대기 중으로 역전될 경우, 발행된 배출권을 CDM 등록부의 준비계좌(reserve account),³³⁾ 잠정계좌(pending account), 그리고 사업참여자의 보유계좌(holding account)에서 역전된 배출량까지 순차적으로 취소한다(Oh et al., 2022; UNFCCC, 2011b, Annex paras 24-28). 만약 조치가 부족하다면, '국가 보증'차원에서, 사업유치국 또는 CCS 감축사업 배출권을 보유하고 있는 부속서 I 국가의 취소계정(cancellation account)에서 조치가 필요한 양만큼을 추가적으로 취소하도록 하고 있다(Ibid.).

3.5. 소결

앞서 분석된 내용을 토대로 도출된 우리나라 입장을 전체적으로 정리하면 다음과 같다. 첫째, 제거 방식 및 저장 매체 관점에서, 우리나라가 DAC 기반 기술에 대한 정부 차원의 원천기술 연구·개발을 진행하고 있고, 민간 섹터에서도 자체 기술 또는 해외 기술을 활용한 실증사업을 도모하고 있는 바, DAC 기술을 활용한 제거 활동이 파리협정 제6.4조 메커니즘 하에서 인정받는 것이 필요하다는 입장이다. 특히, 지중저장소가 부족한 우리나라는 신규 저장 기술에 기반한 DACCS 기술과 더 나아가 다양한 상품으로 활용하는 DACCU 기술이 모두 제거 활동으로 인정받는 것이 필요하다는 입장이다. 둘째, 저장기간과 관련하여, DACCS 기술 기반 사업의 영구성이 상당히 길고,

DACCU 기술 기반 사업의 경우 상품의 유형에 따라 영구성이 다양하므로, 제거 사업의 크레딧 기간을 일률적으로 적용하기보다는 기술 옵션에 따라 차별화하여 적용해야 한다는 입장을 도출하였다. 셋째, 대체가능성과 관련하여, DAC 기술 기반 제거 활동이 온실가스 배출저감 결과물과의 대체 가능성 그리고 다른 제거 결과물과의 대체 가능성을 주장하기 위해서는 국제적으로 인정받는 산정 방법론이 전제되어야 한다. 파리협정 제6.4조 메커니즘과 같은 국제 의무적 탄소시장에서 제거 활동에 대해 제거량을 명확하게 산정할 수 있는 공인된 방법론이 우선적으로 도출되어야 한다. 이에 대해 우리나라는 DAC 기반 제거 활동에 대하여 LCA 전과정을 고려한 산정방법론 설정이 필요하고, 특히, 온실가스 저감 크레딧과 제거 크레딧 간의 대체 가능성을 향상시키기 위한 방법론 개발에 노력해야 하며, 더 나아가 감축 크레딧 시장에서 제거와 배출저감을 통해 달성할 감축목표를 분리·설정하는 방법을 고려할 수도 있다는 입장이다. 또한, 제거 결과물들을 비교할 수 있는 각각의 산정방법론 설정이 필요하며, DAC 기술에 기반한 국제적으로 표준화된 산정 방법론을 도출하기 위해 전문가 풀 구성 및 논의 체계가 조속히 필요하다는 입장이다. 특히, DACCU 기술기반 제거 활동의 결과물이 크레딧화 되기 위해서는 배출회피 개념 또는 대체효과 개념이 인정되어야 하는 바, 이에 대해서도 국제적인 합의가 조속히 필요하다는 입장이다. 넷째, 마지막으로 역전현상 리스크 해결과 관련하여, 우리나라는 역전 방지 차원에서, DACCS 기술 관점에서 이미 CDM 하에서 역전 방지 방식이 존재하는 바, 기존의 방식을 적용해야 한다는 입장이다.

4. 결론

파리협정 제6.4조 메커니즘 하에서 다양한 제거(removal) 활동을 감축사업으로 인정할 것인가의 여부를 둘러싸고 협상이 이루어지고 있으며, 우리나라를 포함해 많은 국가들이 국가제안서를 2023년 3월 15일까지 제출하였다. 국제탄소시장 체계의 일환인 청정개발메커니즘에서 '신규조립 및 재조립' 사업에 대해서만 제거 사업으로 인정받았던 것과 달리, 제6.4조 메커니즘에서 다양한 제거 사업이 인정받을 수 있는 가능성이 열려 있다. 이에 현재 공학 기반의 제거 활동으로 대기직접포집(DAC) 기술을 활용한

33) 준비계좌는 저장된 이산화탄소의 역전에 대비하여 산정하기 위한 목적으로 설정되어 있다(UNFCCC, 2011b, para 24(a)(i)).

제거 결과물이 크레딧으로 인정받을 수 있게 된다면, 동 기술에 대한 향후 R&D·실증·사업화를 위해 국가 및 민간 차원에서 많은 투자가 이루어질 것으로 예상된다. 이에, 동 원고에서는 우리나라가 국가제안서를 작성하는 과정에서 DAC 기술 관점에서 핵심 쟁점 사항이 무엇이고 이에 대한 우리나라 협상 입장을 도출하고자 하였다. 이때, 이산화탄소 제거(CDR) 접근법이 탄소시장에 통합될 때 우려되는 쟁점 사항들의 핵심 개념은 다른 영구성(permanence)인 바, 영구성과 관련된 쟁점사항을 i) 저장소 및 방식, ii) 저장 기간, iii) 크레딧 대체 가능성, 그리고 iv) 역전현상 리스크 해결 방안으로 구분하여, 각 쟁점별로 DAC 기술 측면에서의 이해관계자들의 입장을 분석하고, 이에 대한 우리나라의 DAC 기술 기반 정책 및 연구·개발·실증 현황 관점에서 우리나라의 입장을 도출하였다.

파리협정 제6.4조 메커니즘과 같은 의무적 탄소시장에서 논의되는 제거 활동의 확대 논의와 DAC 기술에 대한 논의는 현재 우리나라에 많은 시사점을 제시한다. 첫째, 우리나라의 감축정책 수립 시, ‘배출저감’ 활동과 ‘제거’ 활동을 보다 명확히 정의하고 구분할 필요가 있다. 이 과정에서 ‘제거’ 활동에 속하는 접근법들을 구체화하고, DAC 기술을 ‘제거’ 접근법 차원에서 바라보는 정책 수립이 필요하다. 우리나라는 2023년 초 「탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획」을 수립하는 과정에서 2030 NDC 목표 상 감축 수단별 이행 가능성 등을 고려하여 부문간 및 부문내 일부 조정작업이 있었다(Interagency, 2023). 우리나라 감축활동은 ‘배출’과 ‘흡수·제거’로 구분되고, 흡수·제거 하에 ‘흡수원’, ‘CCUS’, ‘국제감축’이 포함되어 있다. 상기 기본계획이 도출되기 이전, 부문별 목표 조정 작업과정에서 CCUS 부문의 목표 재설정 논의 과정에서, DAC 기술에 기반한 별도 목표 설정에 대한 제안이 있었다. 특정 배출원에 적용되는 CCUS 기술 기반 감축 사업은 ‘배출저감’이고 대기중 온실가스를 제거하는 DAC 기술 기반 감축사업은 ‘제거’이므로, 엄밀히 얘기하면 CCUS 감축 노력은 ‘흡수·제거’가 아니다. 그러나, 우리나라에서는 이산화탄소를 포집하는 포집 행위를 초점을 두고 CCUS 기술을 ‘흡수·제거’로 구분하고 있으며 CCUS와 DAC 기술을 한데 묶어서 접근하고 있다. 따라서, DAC 기술에 대한 별도 목표 설정에 대해서 ‘CCUS

부문’하에서 논의가 이루어졌다. 최종적으로는 DAC 기술에 대한 별도 목표 설정에 대한 제안은 채택되지 못했다. 그런데, ‘흡수·제거’에 포함되는 ‘흡수원’ 부문에서는 현재 산림, 해양, 신규흡수원 활동이 포함되어 있는데(Interagency, 2023, p. 17),³⁴⁾ 이는 모두 생태 기반 접근법이다. 따라서, 공학적 제거 접근법에 속하는 DAC 기술에 기반한 활동이 ‘흡수원’ 부문에 포함될 수 없으며, 앞서 언급된 바와 같이 배출저감 활동에 속하는 CCUS 부문에 속하는 것 역시 엄밀히 말하면 적절하지 않을 수 있다. 현재로서는 DAC는 어느 부문에도 명시적으로 포함되어 있지 않다. 따라서, 현재의 구분/부문 방식이 고수된다고 한다면, CCUS 부문에 DAC에 대한 사항이 별도 감축 목표가 아니더라도 명시적으로 표현되는 것이 필요하다. 만약, 현재 구분·부문 방식이 고수되지 않고 변경될 수 있다면, 일차적으로 ‘흡수·제거’ 구분은 ‘제거(removal)’로 통일하고 여기에 산림·해양·농업·공학 기반 제거 활동이 모두 포함되는 것이 적절하다. 그리고 CCUS는 ‘배출’ 구분에 별도 부문으로 편입되는 것이 바람직하다. 더불어 ‘흡수·제거’ 구분에 ‘국제감축’ 부문이 들어가 있는 것 역시 적절하지 않으며, 국제감축은 배출과 제거 별도로 구분되는 것이 적절할 것으로 보인다.

둘째, 국가 인벤토리 상에서 CDR 접근법의 상당수가 대부분 토지 기반 접근법인 바, 이는 2006 IPCC 국가온실가스인벤토리 지침에 따르면, 농업·임업 및 기타 토지이용(AFOLU, agriculture, forestry and other land use) 부문으로 산정이 이루어지게 된다.³⁵⁾ 우리나라는 현재까지는 2003 IPCC 우수실행지침에 따라, 농업과 토지이용·토지이용변화 및 임업부문(LULUCF, land use, land-use change and forestry)이 분리되어 있다. 이에, 현재까지는 산림 제거 활동과 해양 제거 활동(연안습지 및 맹그로브 등)은 LULUCF 부문의 산림지와 습지 범주에서 산정되고 있다. 그러나, 농업 제거 활동(바이오차 등)은 농업 부문 또는 LULUCF 부문에서 모두 산정 가능하다. 하지만, 파리협정 하의 2024년 제출하는 국가인벤토리보고서부터는 2006 IPCC 지침이 적용되어야 하므로, 산림, 해양, 농업의 제거 활동은 모두 AFOLU로 산정이 이루어질 예정이다.

한편, 특정 배출원에 적용되는 CCUS 기술 활용 사업을 통해 온실가스 배출 저감이 이루어진 경우, CCUS에 대한

34) 해양에는 연안습지 복원 및 보호, 바다숲 조성 등 해양 흡수원 확대가 들어가 있고, 신규 흡수원에는 도시숲, 내륙 습지 및 유헤토지 조립 등이 포함되어 있다(Interagency, 2023, p. 7).

35) AFOLU (agriculture, forestry and other land use)는 농업과 토지이용·토지이용변화 및 산림(LULUCF, land use, land-use change and forestry)부문을 통합한 것이다.

별도 국가 인벤토리 부문이 마련되어 있는 것이 아니라 '에너지' 부문 또는 '산업공정(IPPU, Industrial Processes and Product Use)' 부문으로 산정이 이루어진다. 그런데, CDR 접근법의 공학기반인 DAC 기술의 경우, 현재의 IPCC 지침상으로는 산정 부문이 규정되어 있지 않다. 2006 IPCC 지침과 동 지침의 2019 개정본(2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines on National Greenhouse Gas Inventories)은 별도의 '흡수-제거'에 해당하는 배출부문 카테고리들을 구분하고 있지 않으며, '에너지', '산업공정(IPPU)', 'AFOLU', '폐기물'의 네 개의 부문별로 배출량과 흡수·제거량을 보고하도록 하고 있다(IPCC, 2019, vol. 1, Annex 8A.2). 기존의 배출저감 활동으로서의 CCUS 기술은 각 배출원이 속하는 부문에 따라 구분되어 보고될 수 있다. 동 연구에서의 분류 방법은 아니나 경우에 따라 공학 기반 제거 활동으로 구분되기도 하는 바이오에너지탄소포집저장(BECCS, bioenergy with CCS)의 경우 에너지 부문으로 순제거량(net removal)이 보고될 수 있다(IPCC, 2006, vol. 2, ch. 5, p. 8). 그러나 아직까지는 DAC 기반의 제거 활동을 비롯하여, 순수하게 '대기 중의 이산화탄소 제거'만을 목적으로 하는 활동이 분류될 수 있는 산정 부문이 존재하지 않는다(Mace et al., 2021, p. 23). 이는, 파리협정 하에서는 다양한 CDR 방법과 관련된 다양한 거버넌스 이슈에 대한 대응이 이루어지고 있으나 아직 IPCC 국가온실가스인벤토리 지침은 이러한 국제적 흐름에 합류하고 있지 않다는 점을 의미한다(Ibid., p. 28). 이에, IPCC 국가온실가스인벤토리 지침에 제거(removals) 부문이 별도로 만들어져야 할 필요가 있으며 구체적으로는 DAC 기반 감축활동이 국가온실가스인벤토리에 포함될 수 있도록 산정 방법론 등의 가이드라인이 마련되어야 할 것으로 보인다. 이에, 우리나라가 향후 DAC 기술을 활용하고자 한다면, DAC 기술에 적극적인 다른 국가들과 함께 국제사회에서 이러한 사항을 공론화하는 것을 검토하여야 하며, DAC 기술이 본격적으로 활용될 것으로 예상되는 시점 이전에 관련 가이드라인이 확립되어 우리나라의 감축활동이 온전히 보고될 수 있도록 기반 마련이 필요하다. 또는, IPCC 지침과 별개로, 우리나라의 DAC 기술 기반 제거 활동을 산정할 수 있는 별도 '부문'을 자체적으로 설정하는 시도가 필요할 수도 있다.

셋째, 유럽 배출권거래제에서는 온실가스 배출 저감 활동 뿐만 아니라 '제거' 활동의 확대와 관련하여 여러 가지 논의가 이루어지고 있다. 그런데, 우리나라 배출권거래제(K-ETS)에서는 아직 감축 활동으로 인정받을 수 있는 '제

거' 활동의 확대에 대한 논의가 활발하게 이루어지고 있지 않다. 산림, 해양, 농업, 그리고 DAC 기반 공학 분야의 다양한 이산화탄소 제거 접근법들에 대해 국제사회의 논의 흐름에 따라, 우리나라 국내 배출권거래제에서 어떠한 활동들을 어떠한 수준으로 어떠한 방법론에 따라 인정하고 활용할 것인지에 대한 논의가 필요할 것으로 보인다.

사사

본 연구는 국가녹색기술연구소 2022년 연구과제 「IPCC 제6차 보고서를 기반으로 한 기후기술 정책 대응 연구(R2210202)」의 지원과 2023년 연구과제 「한-아세안 녹색 전환 촉진을 위한 기후과학기술 협력체계 구축 연구(C2320401)」의 지원에 의해 수행되었으며, 동 연구보고서들의 내용을 토대로 작성되었습니다. 동 연구내용은 한국 기후변화학회 2023년 상반기학술대회 기획세션 「파리협정 제6조의 흡수-제거(removal) 감축 활동에 대한 국제협상 현황과 우리나라의 입장('23.6.23)」에서 발표되었습니다.

References

- AirCapture. 2022. Carbon utilization as durable storage under engineering methods; [accessed 2023 Jul 4]. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/article-64-mechanism/calls-for-input/sb002-removals-activities>
- Bodéan F, Bourgeois F, Petiot C, Augé T, Bonfils B, Julcour-Lebigue C, Guyot F, Boukary A, Tremosa J, Lassin A, Gaucher EC, Chiquet P. 2014. Ex situ mineral carbonation for CO₂ mitigation: Evaluation of mining waste resources, aqueous carbonation processability and life cycle assessment (Carmex project). *Miner Eng* 59: 52-63. doi: 10.1016/j.mineng.2014.01.011
- Budinis S, Krevor S, Mac Dowell N, Brandon N, Hawkes A. 2018. An assessment of CCS costs, barriers and potential. *Energy Strategy Rev* 22: 61-81. doi: 10.1016/j.esr.2018.08.003
- Burke J, Gambhir A. 2022. Policy incentives for greenhouse gas removal techniques: The risks of premature inclusion in carbon markets and the need for a multi-pronged policy framework. *Energy Clim Change* 3: 100074.

- doi: 10.1016/j.egycc.2022.100074
- Burns W. 2018. The royal society's new report on greenhouse gas removal; [accessed 2023 Jul 4]. <http://ceassessment.org/the-royal-societys-new-report-on-greenhouse-gas-removal/>
- C2G (Carnegie Climate Governance Initiative). 2021. Policy brief: Direct air carbon dioxide capture & storage (DACCS); [accessed 2023 Jul 4]. <https://www.c2g2.net/wp-content/uploads/DACCS-Policy-Brief.pdf>
- Carton W, Asiyambi A., Beck S, Buck HJ, Lund JF. 2020. Negative emissions and the long history of carbon removal. *WIREs Clim Change* 11(6): e671. doi: 10.1002/wcc.671
- Carton W, Lund JF, Dooley K. 2021. Undoing equivalence: Rethinking carbon accounting for just carbon removal. *Front Clim* 3: 664130. doi: 10.3389/fclim.2021.664130
- Carbon Engineering. 2022. Role of DACCS removal activities; [accessed 2023 Jul 4]. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/SB002-call-for-input-CarbonEngineering_0.pdf
- Chiquier S, Patrizio P, Bui M, Sunny N, Mac Dowell N. 2022. A comparative analysis of the efficiency, timing, and permanence of CO₂ removal pathways. *Energy Environ Sci* 15(10): 4389-4403. doi: 10.1039/d2ee01021f
- Climeworks. 2022. Response to the documents regarding removals under Article 6.4; [accessed 2023 Jul 4]. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/SB002-call-for-input-Climeworks.pdf>
- CNC (2050 Carbon Neutrality and Green Growth Committee). 2021. 2050 carbon neutrality scenario; [accessed 2023 Jul 4]. <https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=4&boardNo=101&searchCategory=&page=1&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=15>
- Cox E, Edwards NR. 2019. Beyond carbon pricing: Policy levers for negative emissions technologies. *Clim Policy* 19(9): 1144-1156. doi: 10.1080/14693062.2019.1634509
- DAC Coalition. 2022. Recommendations from direct air capture coalition; [accessed 2023 Jul 4]. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/SB002-call-for-input-DACCoalition.pdf>
- Daniel T, Masini A, Milne C, Nourshagh N, Iranpour C, Xuan J. 2022. Techno-economic analysis of direct air carbon capture with CO₂ utilisation. *Carbon Capture Sci Technol* 2: 100025. doi: 10.1016/j.ccst.2021.100025
- Global CCS Institute. 2022. Global status of CCS 2022; [accessed 2023 Jul 4]. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-of-ccs-2022/>
- Herzog H, Caldeira K, Reilly J. 2003. An issue of permanence: Assessing the effectiveness of temporary carbon storage. *Clim Change* 59(3): 293-310. doi: 10.1023/A:1024801618900
- Honegger M, Baatz C, Eberenz S, Holland-Cunz A, Michaelowa A, Pokorny B, Poralla M, Winkler M. 2022. The ABC of governance principles for carbon dioxide removal policy. *Front Clim* 4: 884163. doi: 10.3389/fclim.2022.884163
- Hosseini SM, Aslani A, Kasaeian A. 2023. Life cycle cost and environmental assessment of CO₂ utilization in the beverage industry: A natural gas-fired power plant equipped with post-combustion CO₂ capture. *Energy Rep* 9: 414-436. doi: 10.1016/j.egy.2022.11.200
- IETA (International Emissions Trading Association). 2022. IETA response to call for input: Activities involving removals under the Article 6.4 mechanism; [accessed 2023 Jul 4] <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/SB002-call-for-input-IETA.pdf>
- Interagency. 2021. CCU Technology innovation roadmap; [accessed 2023 Jul 4]. <https://www.korea.kr/common/download.do?fileId=195009538&tblKey=GMN>
- Interagency. 2022. Technology innovation strategy for carbon neutral green growth; [accessed 2023 Jul 4]. <https://www.korea.kr/common/download.do?fileId=197055126&tblKey=GMN>
- Interagency. 2023. National strategy for carbon neutral and green growth and the first national basic plan; [accessed 2023 Jul 4]. <https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=2&boardNo=1462&menuLevel=2&menuNo=16>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2000. Special report on land use, land-use change and

- forestry; [accessed 2023 Jul 4]. https://archive.ipcc.ch/ipccreports/sres/land_use/index.php?idp=38
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Kanagawa: IGES (Institute for Global Environmental Strategies).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2019. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Kanagawa: IGES (Institute for Global Environmental Strategies).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2022. Climate change 2022: Mitigation of climate change. Working group III contribution to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. Summary for policymakers. In: The Core Writing Team, Lee H, Romero J (eds). Climate change 2023: Synthesis report. A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: Author. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Jung S, Lee S, Park PJ, Lee M, Jang JG. 2021. Economic evaluation of carbon mineralization technology from the LCA perspective. *J Energy Eng* 30(1): 38-50 (in Korean with English abstract). doi: 10.5855/ENERGY.2021.30.1.038
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Researches). 2021. A new methodology for carbon mineralization original technologies is approved by UNFCCC and selected as a representative climate technology; [accessed 2023 Jul 4]. https://www.kigam.re.kr/board.es?mid=a10703040000&bid=0025&list_no=50871&act=view
- Kim W, Son Y, Lee WK, Cho Y. 2018. Analyzing the potential of offset credits in the Korean emission trading scheme focusing on clean development mechanism projects. *J Clim Change Res* 9(4): 453-460 (in Korean with English abstract). doi: 10.15531/KSCCR.2018.9.4.453
- Korean Law Information Center. 2023. Kyoto protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change; [accessed 2023 Jul 4]. <https://www.law.go.kr/trtySc.do?menuId=1&subMenuId=25&tabMenuId=135&qury=%EA%B5%90%ED%86%A0%20%EC%9D%98%EC%A0%95%EC%84%9C#>
- Kwon YK, Shinn YJ. 2018. Suggestion for technology development and commercialization strategy of CO₂ capture and storage in Korea. *Econ Environ Geol* 51(4): 381-392 (in Korean with English abstract). doi: 10.9719/EEG.2018.51.4.381
- Larrea C, Warnars L. 2009. Ecuador’s Yasuni-ITT Initiative: Avoiding emissions by keeping petroleum underground. *Energy Sustain Dev* 13(3), 219-223. doi: 10.1016/j.esd.2009.08.003
- Lee J, Lee BJ. 2022. Survey on research and development of e-fuel. *J Korean Soc Combust* 27(1): 37-57 (in Korean with English abstract). doi: 10.15231/jksc.2022.27.1.037
- Mac Dowell N, Fennell PS, Shah N, Maitland GC. 2017. The role of CO₂ capture and utilization in mitigating climate change. *Nat Clim Change* 7: 243-249. doi: 10.1038/NCLIMATE3231
- Mace MJ, Fyson CL, Schaeffer M, Hare WL. 2021. Governing large-scale carbon dioxide removal: Are we ready? - An update. New York: C2G (Carnegie Climate Governance Initiative).
- McLaren DP, Tyfield DP, Willis R, Szerszynski B, Markusson NO. 2019. Beyond “Net-Zero”: A case for separate targets for emissions reduction and negative emissions. *Front Clim* 1: 4. doi: 10.3389/fclim.2019.00004
- Ministry of Science and ICT. 2022. Technology innovation

- strategy roadmap for CCUS sector; [accessed 2023 Jul 4]. <https://www.korea.kr/docViewer/skin/doc.html?fn=4820e09eae06754599b327c641f0573a&rs=/docViewer/result/2022.11/21/4820e09eae06754599b327c641f0573a>
- Ministry of Trade, Industry and Energy. 2022. A taskforce launched to establish institutional basis for CCUS technology and commercialization; [accessed 2023 Jul 4]. <https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156507214>
- Moon JY, Jung J, Song J, Lee S. 2016. Utilization of international carbon market under the Paris agreement. Sejong, Korea: KIEP (Korea Institute for International Economic Policy). KIEP Research Paper, Policy Analyses 16-14 (in Korean with English abstract). doi: 10.2139/ssrn.2946735
- NRF (National Research Foundation of Korea). 2022. DACU original technology development project; [accessed 2023 Jul 4]. https://www.nrf.re.kr/biz/info/info/view?menu_no=378&biz_no=570
- OECD. 2023. Emission trading systems; [accessed 2023 Jul 4]. <https://www.oecd.org/env/tools-evaluation/emissiontradingsystems.htm>
- Oh CW, Song YW, Kim RH, Choi KH, Choi KL. 2022. Application of environmental integrity to the institutional design of Korea's global carbon market mechanism under article 6.2 of the Paris agreement. *J Clim Change Res* 13(6): 755-780 (in Korean with English abstract). doi: 10.15531/KSCCR.2022.13.6.755
- Park S, Oh C, Shin K. 2020. Research on Korea's negotiating position on types of mitigation based on carbon capture, utilization, and storage technology under article 6 of the Paris agreement. *J Clim Change Res* 11(5-2): 563-581 (in Korean with English abstract). doi: 10.15531/kscrcr.2020.11.5.563
- Peres CB, Resende PMR, Nunes LJR, de Morais LC. 2022. Advances in carbon capture and use (CCU) technologies: A comprehensive review and CO₂ mitigation potential analysis. *Clean Technol* 4(4): 1193-1207. doi: 10.3390/cleantechnol4040073
- Philippine. 2022. Philippine submission on SBSTA 56 agenda item 13: Guidance on cooperative approaches referred to in article 6, paragraph 4, of the Paris agreement and decision 3/CMA.3 (Emissions Avoidance Issue): August 2022; [accessed 2023 Jul 4]. https://www4.unfccc.int/sites/SubmissionsStaging/Documents/202209071126---Philippine%20Submission%20on%20SBSTA%2056%20Agenda%20Item%2013%20re%20Emissions%20Avoidance%20in%20Article%206.4_August%202022.pdf?_gl=1*w9r3pt*_ga*MjAwNTMxODg0LjE2NzQ2MzYwMDU.*_ga_7ZZWT14N79*MTY4NzkzMzcxNy45LjE1uMTY4NzkzNDk4Ny4wLjAuMA
- Philippine. 2023. Philippine submission on emissions avoidance: 14 April 2023; [accessed 2023 Jul 4]. <https://www4.unfccc.int/sites/SubmissionsStaging/Documents/202304151951---Philippines%20-%20Emissions%20Avoidance%20-%202023.pdf>
- Romanov V, Soong Y, Carney C, Rush G, Nielsen B, O'Connor W. 2015. Mineralization of carbon dioxide: Literature review. Washington DC, US: U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information. NETL-PUB-1161.
- Scott V, Haszeldine RS, Tett SFB, Oschlies A. 2015. Fossil fuels in a trillion tonne world. *Nat Clim Change* 5: 419-423. doi: 10.1038/nclimate2578
- Shinn YJ, Kang MH, Kim GY, Kim SI et al. 2019. Evaluation of large-scale CO₂ geological storage potential. Daejeon, Korea: Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. GP2017-027-2019.
- Song Y, Oh C. 2022a. Korea's policy direction on the research & development of direct air carbon capture and storage (DACCS) technologies: Focusing on DAC technologies. *J Clim Change Res* 13(1): 75-96 (in Korean with English abstract). doi: 10.15531/KSCCR.2022.13.1.075
- Song Y, Oh C. 2022b. Demonstration and dissemination of direct air capture. Sejong, Korea: Carbon Neutrality and Green Growth Commission. Technology suggestion insight 2022-02.
- Sovacool BK, Baum CM, Low S. 2023. Reviewing the sociotechnical dynamics of carbon removal. *Joule* 7(1):

- 57-82. doi: 10.1016/j.joule.2022.11.008
- Terlouw T, Bauer C, Rosa L, Mazzotti M. 2021. Life cycle assessment of carbon dioxide removal technologies: a critical review. *Energy Environ Sci* 14(4): 1701-1721. doi: 10.1039/D0EE03757E
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 1992. United Nations Framework Convention on Climate Change; [accessed 2023 Jul 4]. https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf
- UNFCCC. 1997. Kyoto protocol; [accessed 2023 Jul 4]. <https://unfccc.int/documents/2409>
- UNFCCC. 2001. Modalities and procedures for clean development mechanism as defined in article 12 of the Kyoto protocol (Decision 17/CP.7); [accessed 2023 Jul 4]. <https://unfccc.int/documents/2518>
- UNFCCC. 2005. Modalities and procedures for afforestation and reforestation project activities under the clean development mechanism in the first commitment period of the Kyoto protocol (Decision 5/CMP.1); [accessed 2023 Jul 4]. <https://unfccc.int/resource/docs/2005/cmp1/eng/08a01.pdf#page=61>
- UNFCCC. 2011a. Greenhouse gases, sectors and source categories, common metrics to calculate the carbon dioxide equivalence of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks, and other methodological issues (Decision 4/CMP.7); [accessed 2023 Jul 4]. <https://unfccc.int/documents/7112>
- UNFCCC. 2011b. Modalities and procedures for carbon dioxide capture and storage in geological formations as clean development mechanism project activities (Decision 10/CMP.7); [accessed 2023 Jul 4]. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/2011/cmp7/eng/10a02.pdf>
- UNFCCC. 2014. Options for possible additional land use, land-use change and forestry activities and alternative approaches to addressing the risk of non-permanence under the clean development mechanism; [accessed 2023 Jul 4]. <https://unfccc.int/resource/docs/2014/tp/02.pdf>
- UNFCCC. 2021. Rules, modalities and procedures for the mechanism established by Article 6, paragraph 4, of the Paris agreement; [accessed 2023 Jul 4]. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021_L19E.pdf
- UNFCCC. 2022a. Rules, modalities and procedures for the mechanism established by article 6, paragraph 4, of the Paris agreement (FCCC/PA/CMA/2022/L.14); [accessed 2023 Jul 4]. <https://unfccc.int/event/cma-4?item=14>
- UNFCCC. 2022b. Call for input 2022 - Activities involving removals under the article 6.4 mechanism of the Paris agreement; [accessed 2023 Jul 4]. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/article-64-mechanism/calls-for-input/sb002-removals-activities>
- UNFCCC. 2022c. Recommendation: Activities involving removals under the article 6.4 mechanism (Version 01.0); [accessed 2023 Jul 4]. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/a64-sb003-a03.pdf>
- UNFCCC. 2022d. Information note: Removal activities under the article 6.4 mechanism (Version 02.0); [accessed 2023 Jul 4]. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/a64-sb003-aa-a04.pdf>
- Verra. 2021. Methodology for CO2 utilization in concrete production (VM0043, v1.0); [accessed 2023 Jul 4]. <https://verra.org/methodologies/methodology-for-co2-utilization-in-concrete-production/>
- Waller L, Rayner T, Chilvers J, Gough CA, Lorenzoni I, Jordan A, Vaughan N. 2020. Contested framings of greenhouse gas removal and its feasibility: Social and political dimensions. *WIREs Clim Change* 11(4): e649. doi: 10.1002/wcc.649
- Yeo J, Kim T. 2022. Technology trends: CCU (Carbon dioxide utilization). Eumseong, Korea: KISTEP (Korea Institute of Science and Technology Evaluation and Planning). KISTEP Brief 26.
- Zoback MD, Gorelick SM. 2012. Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide. *Proc Natl Acad Sci* 109(26): 10164-10168. doi: 10.1073/pnas.1202473109