

한-아세안 녹색전환 공동대응을 위한 기후과학기술 협력
거버넌스 구축 연구

아세안 중점협력국 대상 녹색기술협력체계
구축을 통한 RD&D 협력 아젠다 발굴

[모듈 2: 탄소중립 신규 녹색기술 RD&D 적용
가능여건 연구]

A Study on Establishing a Technological Cooperation System to
Facilitate a Green Transition between Korea and ASEAN
[Module 2: Research on Enabling Environment for the RD&D of
new green technologies towards carbon neutrality]

2023. 12.

한-아세안 녹색전환 공동대응을 위한 기후과학기술 협력
거버넌스 구축 연구

아세안 중점협력국 대상 녹색기술협력체계
구축을 통한 RD&D 협력 아젠다 발굴

[모듈 2: 탄소중립 신규 녹색기술 RD&D 적용
가능여건 연구]

A Study on Establishing a Technological Cooperation System to
Facilitate a Green Transition between Korea and ASEAN

[Module 2: Research on Enabling Environment for the RD&D of
new green technologies towards carbon neutrality]

2023. 12.

제 출 문

국가녹색기술연구소 소장 귀하

본 보고서를 “아세안 중점협력국 대상 녹색기술협력체계 구축을 통한 RD&D 협력 아젠다 발굴-(모듈 2) 탄소중립 신규 녹색기술 실증형 RD&D 적용 가능여건 연구”의 보고서로 제출합니다.

2023. 12.

주관연구기관명 : 국가녹색기술연구소

부 서 명 : 글로벌사업화센터

연구책임자 : 박철호 책임연구원

연구 원 : 오채운 책임연구원

: 송예원 연구원

: 김태호 학생연구원

요 약 문

I. 서 론

□ 연구의 배경 및 목표

- 탄소중립 및 녹색성장을 위해서는 녹색기술의 기술개발 및 이전이 중요한 역할을 수행함. 녹색기술의 RD&D 및 활용 활성화를 위해서는 이를 위한 가능여건 조성이 필요함
- 관련하여, 국제적으로는 IPCC 제6차평가보고서 종합보고서가 승인되고 이 보고서에 녹색기술의 개발 및 이전에 대한 정책적 방향성이 포함되어 있음. 또한 국내적으로는 녹색기술에 대한 R&D 정책이 진행되고, 특히 2023년 신규 녹색기술에 대한 원천 R&D 연구가 시작됨
- 이에, 동 연구는 i) 녹색기술의 RD&D 및 활용에 주요한 가능여건으로서 존재하는 IPCC 보고서에 대한 정책지원, ii) IPCC 보고서 상의 녹색기술에 대한 정책적 방향성, 그리고 iii) 우리나라에서 신규 R&D로 2023년 시작되는 대기직접탄소포집(DAC, direct air capture) 기술과 소형모듈원자로(SMR, small modular reactor) 기술에 대한 가능여건을 조성하기 위한 방안을 모색하는 데에 그 목표를 두고자 함

□ 연구내용 및 추진방법

- IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서에 대한 국내·외 정책대응을 진행하고, 우리나라 10대 탄소중립 기술에 대해 IPCC 보고서에서 제시하는 기술정책 함의를 추출함. 또한 국내 차원에서 우리나라 녹색기술 RD&D 정책 방향과 2023년 원천 R&D가 시작되는 DAC 기술 및 SMR 기술에 대한 R&D 정책 현황 연구 수행
- DAC 기술에 대한 가능여건 연구로서, i) 국내 2030 NDC 목표 달성을 위해 DAC 기술 기반 별도 감축 기여분 포함 정책 논의 회의에 참여, ii) 국제 파리협정 제6.4조 메커니즘 하에서 배출권을 도출하는 이산화탄소제거(CDR, carbon dioxide removal) 접근법 범주에 DAC 기술 포함에 대한 협상 논의에 대해 우리나라 국가제안서 작성 참여, 그리고 iii) 이에 대한 우리나라 입장 수립 연구 수행

- SMR 기술에 대한 가능 여건 연구로서, i) SMR 기술 관련 우리나라 국가 R&D 정책 현황 조사와 ii) 우리나라 혁신형 SMR (i-SMR) 모델이 국제경쟁력을 확보하는 데 필요한 설계요소 포함 연구에 대한 분석 연구 수행

II. 녹색기술 RD&D 적용 가능여건

- 녹색기술의 (국제적) 기술이전과 관련한 가능여건(enabling environment) 또는 장애요소(barrier)의 의미, 종류, 그리고 관계성에 대한 문헌 연구

III. 국내/외 녹색기술 RD&D 정책 방향

□ 제1절 (국제) IPCC 제6차평가보고서 기반 녹색기술 RD&D 정책방향

- 기후변화의 과학적 규명을 위하여 설립된 국제협의체인 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)는 전 세계의 과학자들이 수행한 기후변화에 관한 연구 결과물을 총망라한 제6차 평가보고서 종합보고서를 올해 3월에 발간
- 우리나라는 효과적인 보고서 대응을 위하여 기상청 산하에 IPCC 국내대응 협의회를 두고 있으며, 동 협의회 지원을 위하여 전문위원회를 두고 있는데, 국가녹색기술연구소(NIGT, National Institute of Green Technology)는 제3실무그룹(완화) 전문위원회의 공동주관기관 역할을 수행 중
- IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서의 정부검토 과정에 참여하여 보고서 상에 우리나라의 입장이 충실히 반영되도록 지원하였으며, 제68차 IPCC 총회 정부대표단에 참여하여 종합보고서의 최종 수정 및 승인 과정을 지원하였고, 이후 언론브리핑, 포럼 개최 지원, 뉴스 대담 참여, 보고서 국문번역 지원 등으로 총회 결과 및 보고서 내용 확산에 기여
- 종합보고서 중 주요 탄소중립 기술에 대한 내용을 추출하여 각 기술에 대한 국제적 동향 및 접근 방법을 정리하였으며, 이러한 기술 관련 내용을 토대로 녹색기술 RD&D 정책방향을 도출

□ 제2절 (국내) 우리나라 녹색기술 RD&D 정책 방향

- 2021년 3월 과기정통부는 ‘탄소중립 기술혁신 추진전략’을 발표하며 탄소중립 10대 핵심기술로 태양광·풍력, 수소, 바이오에너지, 철강·시멘트, 석유화학, 산업공정 고도화, 수송효율, 건물효율, CCUS를 선정
- RD&D 차원에서 기존의 단일 부처 중심의 기술개발 추진 체계를 탈피하여 범부처 협업 지원 체계를 강화하고자 2023년 5월에 관계부처 합동으로 ‘한국형 탄소중립 100대 핵심기술을 도출하였는데, 여기에는 해외에서는 상용화가 이루어졌으나 아직 우리나라에서는 실증이 이루어지지 않은 기술(예: DAC 기술)과 전 세계적으로 실증이 충분히 이루어지지 않았으나 온실가스 감축 효과가 있을 것으로 기대받는 기술(예: SMR 기술)도 포함

- 제3절 (국내) 2023년도 원천 R&D 시작 녹색기술: DAC 기술 및 SMR 기술
 - (DAC 기술) 우리나라는 2050 탄소중립 시나리오 및 한국형 탄소중립 100대 핵심기술을 통해 DAC 기술을 활용할 것을 명시하였으며, 이에 2023년 한국연구재단의 ‘DACU 원천기술개발사업’을 통해 DAC 기술에 대한 원천기술 R&D를 국내 최초로 추진
 - (SMR 기술) 중앙집중형 전력 생산을 목적으로 한 대형 원전 중심의 원자력 연구가 주로 이루어지고 있었으나 최근 소형모듈원자로(SMR, small modular reactor)의 중요성이 강조되며, 세계 최고 수준의 경쟁력을 갖춘 혁신형 SMR(i-SMR)을 적기에 개발하여 국제시장에 진출할 수 있도록 이에 대한 정부 R&D를 올해부터 시작

IV. DAC 기술: 국제감축사업화를 위한 제도수립 방안 연구

- 제1절 (국내) DAC 기술 기반 NDC 국가 감축목표 설정 정책 논의
 - 탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가기본계획」수립을 앞두고, 우리나라 탄소중립녹색성장위원회(이하 ‘탄녹위’)는 CCUS 기술 기반 감축목표 조정 과정에서 DAC 기술을 포함한 신규기술의 2030 NDC 감축목표 기여분 설정 가능성 여부에 대해 정책 논의 제시
 - 국가녹색기술연구소(NIGT, National Institute of Green Technology)는 탄녹위 주관 전문가 회의에 참여하면서 DAC 기술의 국내/외 RD&D 현황 소개 및 DAC 기술을 활용하여 2030 NDC 목표 달성 기여분에 대해 발표
 - 전문가 논의에서서의 DAC 기술에 대한 비판적 의견들에 대해 종합적으로 파악하고 정책적으로 대응
 - DAC 기술 기반 관계기관 간 간담회를 개최하여 DAC 기술에 기반한 2030 NDC 목표 달성 기여분에 대해서 현실적이면서도 의욕적인 목표 설정 가능성을 논의하고 합의된 목표치 도출하고, 이를 정부 및 전문가들에게 제시
- 제2절 (국제) 파리협정 제6.4조 메커니즘 국가제안서 작성 정책 논의 과정:
 - ‘제거’ 활동에 DAC 기술 포함 사항
 - 파리협정 당사국총회(CMA)는 파리협정 당사국 및 옵저버 기관들이 파리협정 제6.4조 메커니즘에 ‘제거를 포함한 활동’에 대한 국가제안서를 2023년 3월 15일까지 제출할 것을 요청
 - 파리협정 제6.4조 메커니즘 ‘흡수원/제거’에 대한 국가제안서를 작성하기 위한 국내 연구협의회가 결성. 또한 외교부 중심의 ‘흡수원 협의체’ 구성. 국가녹색기술연구소(NIGT)는 동 연구협의회와 흡수원 협의체 회의에 참여하여, DAC 기술 기반의 제거 접근법에 대한 국가제안서 작성 방향을 제시하고 작성에 참여

- 제3절 (국제) 파리협정 제6.4조 메커니즘 ‘제거 활동’ 으로 DAC 기술 포함에 관한 우리나라 협상 입장 연구
 - DAC 기술이 파리협정 제6.4조 메커니즘 하에서 인정받는 CDR 기술옵션이 되어야 하는가에 대한 국제정책 논의에 대해서, 기존 문헌 연구를 토대로, 가장 핵심 개념인 영구성(permanence)’ 를 중심으로 4가지 측면을 도출하고, 각 측면에 대해 이해관계자들의 입장과 협상 쟁점사항을 파악하고, 우리나라 DAC 기술 RD&D 현황을 토대로 우리나라 입장을 수립

V. SMR 기술: 국제경쟁력 확보를 위한 R&D 설계 방안 연구

- 제1절 (국내) SMR 기술 관련 국가 R&D 정책 현황
 - 소형모듈원자로(SMR)에 대한 국내 정책 현황을 정리하고, 우리나라에서 개발중인 SMR 10종에 대한 현황 조사
- 제2절 소형모듈원자로(SMR) 기술:
 - 국제경쟁력 확보를 위한 R&D 설계 방안 연구
 - 우리나라는 2023년부터 혁신형 SMR의 원천 R&D를 2023년 시작. 2022년 9월 기준 전세계 18개국에서 80여종의 SMR 모델이 개발중임. 글로벌 SMR 개발 각축 상황에서, 우리나라의 SMR이 기술우위를 통한 시장경쟁력을 갖추기 위해서는 국제적으로 통용될 수 있는 기술적 설계요소 측면의 강점을 가지고 있어야 할 뿐만 아니라, 국내·외 제도 및 정책과의 상용성 역시 필요함
 - 우리나라가 개발중인 혁신형 SMR(i-SMR) 모델의 R&D 설계 방향이 국제경쟁력을 담보있는 지를 분석함. 이 때, SMR이 경쟁력을 갖기 위해 고려해야 할 요소로서 4가지 측면으로 i) 비용(경제성), ii) 안전성, iii) 방사성폐기물 저감, iv) 핵확산 방지를 설정하고 각 측면에 대한 고려요소들을 도출. 이 고려요소들에 대해서 우리나라 혁신형 SMR R&D 설계 현황에 적용하여 분석
 - 분석 결과, 전반적으로 고려사항들이 상당히 많이 반영되어 설계중인 것으로 도출됨. 다만, 사용후핵연료 저감과 핵확산 방지 기준에 대해서는 재처리와 관련된 고려사항들이 있는데, 우리나라가 사용후핵연료 재처리가 허용되지 않는 국가인 바, 이 부분들은 혁신형 SMR 설계 시 고려될 수 없는 요소로서 간주함

VI. 결론

- 동 연구과제의 연구 성과를 개괄 및 향후 연구 방향성 도출

S U M M A R Y

I . Introduction

Research background and purpose

- For carbon neutrality and green growth, technology development and transfer of green technologies plays an important role. In order to promote the research, development and deployment (RD&D) and utilization of green technologies, it is necessary to create enabling environments for this.
- In this regard, internationally, the IPCC Sixth Assessment Report Synthesis Report was approved in March 2023, and the report includes policy directions for the development and transfer of green technologies. Also, domestically, the R&D policy for green technologies is in progress, and in particular, the original R&D study for new green technologies has been launched in 2023.
- Therefore, this study aims to explore i) policy support for the review and approval process of IPCC report, ii) policy directions for green technologies, which exist as major enabling conditions for the RD&D and utilization of green technologies, and iii) ways to create enabling conditions for direct air capture (DAC) technology and small modular reactor (SMR) technology, whose national R&D projects began in 2023 in Korea.

Research content and method.

- We conducted domestic and international policy responses to the IPCC 6th Assessment Report Synthesis Report and extracted technology policy implications of the IPCC report for Korea's top 10 carbon neutral technologies. At the domestic level, we also conducted a study on the direction of Korea's green technology RD&D policy and the current status of R&D policies for DAC and SMR technologies, whose original national R&D projects began in 2023.
- We conducted an enabling environment study on DAC technology by: i) participating in the policy discussion meetings on the inclusion of a separate mitigation contribution based on DAC technology to achieve the domestic

2030 NDC target; ii) participating in the preparation of the Korean national proposal for the negotiations on the inclusion of DAC technology in the eligible mitigation activities of carbon dioxide removal (CDR) approaches to derive credits under the Article 6.4 mechanism of the Paris Agreement; and iii) formulating the Korean position on this issue.

- We conducted analytical studies on the enabling environment for SMR technology, including i) a study on the current status of Korea's national R&D policy on SMR technology, and ii) a study on the inclusion of design elements necessary for Korea's innovative SMR (i-SMR) model to be internationally competitive.

II. Enabling environment for green technology RD&D and deployment

- We studied the literature on the meaning, types, and relationships of enabling environments or barriers to (international) technology transfer of green technologies in terms of RD&D and deployment.

III. RD&D policy direction for international/domestic green technology

□ Section 1: (International) RD&D policy direction for green technology based on IPCC 6th Assessment Report

- The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), an international organization established for the scientific investigation of climate change, published its 6th Assessment Report in March this year, which summarizes the results of research on climate change conducted by scientists around the world.
- Korea has IPCC Government Council under Korea Meteorological Administration to effectively respond to the IPCC report processes, and specialized committees are in place to support the council, where the National Institute of Green Technology (NIGT) is serving as a co-lead agency for the 3rd Working Group (Mitigation) Specialized Committee.
- We participated in the government review process of the IPCC's 6th Assessment Report Synthesis Report to ensure that Korea's position is well

reflected in the report, and also participated in the government delegation to the 58th Session of IPCC to support the final revision and approval process of the Synthesis Report, and subsequently contributed to the dissemination of the results of the Session and the contents of the report by briefing the media, supporting the holding of forums, participating in news interviews, and supporting the translation of the report into Korean.

- We extracted the contents regarding major carbon neutral technologies from the Synthesis Report and summarized international trends and approaches for each technology, and derived policy directions for green technology RD&D based on the contents of these technologies.

□ Section 2: (Domestic) Korea's RD&D policy direction for green technology

- In March 2021, MSIT announced “Carbon Neutral Technology Innovation Promotion Strategy” and selected solar and wind power, hydrogen, bioenergy, steel and cement industry, petrochemical industry, industrial process advancement, transportation efficiency, building efficiency, and CCUS as the 10 core technologies for carbon neutrality.
- In order to strengthen the interagency collaboration support system by moving beyond the existing single ministry-centered technology development promotion system at the RD&D level, the relevant ministries jointly derived the “Korean carbon-neutral 100 core technologies” in May 2023, including technologies that have been commercialized overseas but have not yet been demonstrated in Korea (e.g. DAC technology) and technologies that have not been sufficiently demonstrated globally but are expected to have a greenhouse gas reduction effect (e.g. SMR technology).

□ Section 3: (Domestic) Green technologies to start original R&D in 2023: DAC technology and SMR technology

- (DAC technology) Korea has specified in the 2050 carbon neutrality scenario and the 100 core technologies for Korean carbon neutrality that DAC technology should be utilized, and in response, the National Research Foundation's “DACU Original Technology Development Project” is started in 2023 as the first original technology R&D for DAC technology in Korea.
- (SMR technology) Nuclear power research has been mainly focused on large nuclear power plants for centralized power generation, but recently, the

importance of small modular reactors (SMRs) has been emphasized, and government R&D on this has begun this year so that innovative SMRs (i-SMRs) with world-class competitiveness can be developed in a timely manner and enter the international market.

IV. DAC technology: Study on institutional arrangements for technology project

□ Section 1: (Domestic) Discussion on policy for setting a separate national mitigation targets for 2030 NDCs based on DAC technology

- Ahead of the establishment of the National Strategy for Carbon Neutrality and Green Growth and the First National Basic Plan, the Presidential Commission on Carbon Neutrality and Green Growth (hereinafter referred to as PCCNGG) proposed a policy suggestion on the possibility of setting the contribution targets of new technologies, including DAC technology, to the 2030 NDC mitigation target in the process of adjusting the CCUS technology-based mitigation target.
- The National Institute of Green Technology (NIGT) participated in an expert meeting organized by the PCCNGG, introducing the current status of domestic and international RD&D of DAC technology and presenting the ambitious and expected contribution amount of DAC technology to achieving the 2030 NDC target.
- We comprehensively grasped critical opinions on DAC technology in expert discussions and responded to them policy-wise.
- We held a meeting amongst DAC technology relevant organizations to discuss the possibility of setting realistic and motivating targets for the contribution of DAC technology to the achievement of the 2030 NDC goals, derived consensus targets, and presented them to governments and experts.

□ Section 2: A policy discussion process for the preparation of national position report under the Article 6.4 mechanism: Inclusion of DAC technologies as an eligible activity of mitigation

- The Conference of the Parties to the Paris Agreement (CMA) invited Parties and observer organizations to submit national position reports for the Article 6.4 mechanism on activities including removal by March 15, 2023.

- A Research Consultative Group to prepare a national position report for the Article 6.4 mechanism ‘Sinks/Removal’ of the Paris Agreement was established. Also, a ‘Sinks/Removal Council’ centered on the Ministry of Foreign Affairs in Korea was established. The NIGT participated in the meetings of the research consultative group and Sinks/removal Council to provide direction and prepared the national position report on CDR approaches, particularly, from the perspective of DAC technologies.

□ Section 3: Research on Korea’s negotiating position on the inclusion of DAC technologies as an eligible mitigation activity as a part of CDR approaches under the Article 6.4 of the Paris Agreement.

- Regarding the international policy debate on whether DAC technology should be a recognized and eligible CDR technology option under the Article 6.4 mechanism of the Paris Agreement, we explored the existing literature, identified four analytical aspects centered on the core concept of permanence. The, with this analytical pillars, we analyzed stakeholders’ positions and negotiation issues for each aspect, and established Korea’s appropriate negotiation position based on the current status of Korea’s DAC technology RD&D.

V. SMR Technology: Research on R&D Design Options to Secure International Competitiveness

□ Section 1: (Domestic) Status of national R&D policies related to SMR technology

- We summarized the current status of domestic policy on small modular reactors (SMRs) and investigate the status of 10 SMRs under development in Korea.

□ Section 2: Small Modular Reactor (SMR) Technology:

Study of R&D design options for international competitiveness

- Korea started an original R&D project of an innovative SMR (i-SMR) model in 2023. As of September 2022, more than 80 SMR models are being developed in 18 countries around the world. In the context of global SMR technology development, in order for Korea’s SMR to have global market competitiveness through technological superiority, it is necessary both to have strengths in terms of technical design elements that can be used internationally and to be compatible with domestic and foreign systems and policies.

- This study analyzed whether the R&D design direction of i-SMR model being developed by Korea can ensure international competitiveness. This study identifies four aspects that should be considered for SMRs to be competitive: i) cost (affordability), ii) safety, iii) radioactive waste reduction, and iv) nuclear nonproliferation, and derives consideration factors for each aspect. These factors are analyzed by applying them to the current status of innovative SMR R&D design in Korea.
- As a result of the analysis, it is found that the overall consideration factors are being taken into account in the design. However, for some factors in the spent fuel reduction and non-proliferation aspects, there are considerations related to reprocessing, and since Korea is a country where reprocessing of spent nuclear fuel is not allowed, these are factors that cannot be considered in the design of innovative SMRs.

VI. Conclusion

- Research results are outlined, and future research directions are suggested.

목 차

제1장 서론	1
제 1 절 연구의 배경 및 목표	1
제 2 절 연구내용 및 추진방법	5
제2장 녹색기술 RD&D 및 활용 가능여건	8
제3장 국내/외 녹색기술 RD&D 정책 방향	13
제1절 (국제) IPCC 제6차 평가보고서 기반 녹색기술 RD&D 정책 방향	13
1. IPCC 제6차 평가보고서 개요	13
2. 국가녹색기술연구소 IPCC 제6차 평가보고서 관련 대응 활동	16
2.1. IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 정부 검토 참여	16
2.2. 기상청 주관 IPCC 국내대응협의회 참여	20
2.3. 기상청 주관 종합보고서 대응 TF 참여	24
2.4. 제58차 IPCC 총회에 정부대표단으로 참여	24
2.5. 제58차 IPCC 총회 결과 확산	32
3. IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 주요 내용	34
3.1. 지구온난화 현황 및 추세	35
3.2. 장기 기후변화, 리스크 및 대응	35
3.3. 단기 대응	37
4. IPCC 제6차 평가보고서 기반 기후기술 RD&D 정책 방향 도출	39
4.1. 주요 탄소중립 기술에 대한 IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서의 내용	39
4.2. 기후기술 RD&D 정책 방향 도출	45
제2절 (국내) 우리나라 녹색기술 RD&D 정책 방향	48
1. 탄소중립 10대 핵심기술 도출	48
2. 한국형 탄소중립 100대 핵심기술 도출	50
제3절 (국내) 2023년도 원천 R&D 시작 녹색기술: DAC 기술 및 SMR 기술	51
1. DAC 기술의 개념과 원천 R&D 시작 배경	51
2. SMR 기술의 개념과 원천 R&D 시작 배경	53

제4장 직접대기탄소포집(DAC) 기술:

국제감축사업화를 위한 제도 수립 방안 연구 54

제1절 (국내) DAC 기술 기반 NDC 국가 감축목표 설정 정책 논의 55

제2절 (국제) 3파리협정 제6.4조 메커니즘 국가제안서 작성 정책 논의 과정:

‘제거 활동’에 DAC 기술 포함에 관한 사항 62

제3절 (국제) 파리협정 6.4조 메커니즘 ‘제거 활동’으로 DAC 기술 포함에 관한

우리나라 협상 입장 연구 91

1. 서론 91

2. 기존연구와 분석 접근법 93

2.1. 대기중 이산화탄소제거 접근법 93

2.2. 제거와 영구성 95

2.3. 분석 접근법 98

3. DAC 기술 관련 제도 수립 쟁점 및 우리나라 입장 도출 99

3.1. 제거 방식 및 저장 매체 99

3.2. 저장 기간 104

3.3. 대체 가능성 105

3.4. 역전현상 해결 방안 109

3.5. 소결 109

4. 결론 110

제5장 소형모듈원자로(SMR) 기술:

국제경쟁력 확보를 위한 R&D 설계 방안 연구 114

제1절 (국내) SMR 기술 관련 국가 정책 현황 114

제2절 (국제) 우리나라 혁신형 소형모듈원자로(i-SMR)에 대한 국제경쟁력

확보를 위한 R&D 설계 현황 고찰 116

1. 서론 116

2. SMR 문헌조사 및 분석틀 도출 118

2.1. SMR 주요 특징 118

2.2. 분석틀 120

3. 우리나라가 개발중인 혁신형 SMR(i-SMR) 분석	123
3.1. 비용 (경제성)	126
3.2. 안전성	129
3.3. 방사성 폐기물 저감	131
3.4. 핵확산 방지	133
3.5. 소결	134
4. 결론	137
제6장 결론	139
참고문헌	146

표 목 차

<표 1-1> IPCC 정부 정책 지원 활동	2
<표 1-2> DAC 기술 관련 정부 정책 논의	3
<표 1-3> 전세계 국가별 R&D 진행중인 SMR 모델 현황	4
<표 1-4> 연구 계획(안)	6
<표 2-1> 기술이전 장애요소 항목들	8
<표 2-2> 장애요소 해결과 가능여건 조성 관계	9
<표 2-3> 기술이전에 대한 장애요소에 대한 구조적 모델링	10
<표 2-4> 기술이전 활성화를 방해하는 장애요소와 해결 난이도 수준	11
<표 2-5> 청정 에너지 기술의 R&D 협력 가능여건	12
<표 3-1> IPCC 평가보고서 발간 시기 및 주요 기여 내용	14
<표 3-2> IPCC 제6차 평가주기에 발간된 보고서	14
<표 3-3> IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서의 구성	15
<표 3-4> 2023년 상반기, IPCC 정부 대응 정책에 대한 국가녹색기술연구소 참여 활동	16
<표 3-5> IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 최종정부안 검토 의견	17
<표 3-6> IPCC 국내대응협의회의 구성	21
<표 3-7> IPCC 국내대응협의회의 전문위원회 주관기관 및 담당부서	22
<표 3-8> IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 승인을 위한 담당기관별 의제 분장	26
<표 3-9> 제58차 IPCC 총회 출장 주요 일정	27
<표 3-10> 제58차 IPCC 총회에서 국가녹색기술연구소 담당 의제에 대한 상세 논의사항	29
<표 3-11> 지구온난화 제한을 위한 전 지구적 온실가스 감축량 수준(2019년 대비)	36
<표 3-12> IPCC 제6차 평가보고서에서의 ‘기술’에 대한 중요성 강조	38
<표 3-13> IPCC 제6차 평가보고서 중 주요 탄소중립 기술에 관한 부분	39
<표 3-14> IPCC 제6차 평가보고서 제3실무그룹 보고서 중 주요 탄소중립 기술 내용	40
<표 3-15> 탄소중립 기술혁신 10대 핵심기술의 기술별 목표 및 개발방향	49
<표 4-1> DAC 기술 관련 정부 정책 논의	54
<표 4-2> (‘23.2.9일자) DAC 기술 기반 2030 NDC 목표 달성 기여 가능 여부	56
<표 4-3> DAC 기술 기반 별도 감축목표 설정에 대한 전문가 찬/반 의견	58
<표 4-4> DAC 기술 기반 별도 감축목표 설정에 대한 전문가 찬/반 의견	59
<표 4-5> (‘23.2.17일자) DAC 기술 기반 2030 NDC 목표 달성 기여(안)	60
<표 4-6> 국가제안서 작성 활동	62
<표 4-7> (‘23.1.26일자) 국가녹색기술연구소 제출 의견서	64
<표 4-8> (‘23.2.9일자) 국가제안서 작성 방향 외교부 논의자료	68
<표 4-9> (‘23.2.16일자) 국가녹색기술연구소가 DAC 기술 기반 국가제안서 수정 제안본	74
<표 4-10> (‘23.4.7일자) 국가제안서 제출본	77
<표 4-11> 제거 활동을 탄소시장에 포함할 때의 리스크	96

<표 4-12> 제거 활동을 탄소시장에 포함할 때 ‘영구성’ 관점에서 고려되어야 할 요소	98
<표 4-13> 한국에서의 DAC 기술 현황	101
<표 5-1> 한국의 SMR 모델 개발 현황	115
<표 5-2> 대형원전과 비교한 SMR의 특징	119
<표 5-3> SMR 설계시 고려 요소	122
<표 5-4> APR1400, SMART and i-SMR 모델 간 비교	125
<표 5-5> 한국의 혁신형 SMR의 설계요인 분석 결과	136
<표 6-1> ASEAN 과제 ‘모듈 2’ 연구 결과 정리	140

그림 목 차

[그림 1-1] 연구 도식표	7
[그림 3-1] IPCC의 조직 구성	13
[그림 3-2] IPCC 국내대응협의회 참석 요청 공문	23
[그림 3-3] IPCC 국내대응협의회 회의 모습	23
[그림 3-4] IPCC 정부대표단 사전점검회의 발표자료 내용	25
[그림 3-5] 제58차 IPCC 총회 대한민국 정부대표단 논의 및 발언 사진	28
[그림 3-6] 제58차 IPCC 총회 결과에 대한 국내기자단 언론브리핑(화상회의)	32
[그림 3-7] 제58차 IPCC 총회 결과에 대한 YTN 뉴스와이드 대담	33
[그림 3-8] IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 승인 기념 포럼 프로그램	33
[그림 3-9] IPCC 제6차 평가보고서 국문번역본 감수	34
[그림 3-10] 탄소중립 10대 핵심기술 도출 방향	48
[그림 3-11] DAC 설비의 예시(캐나다 카본엔지니어링사가 미국에 건설 중인 설비의 조감도)	51
[그림 3-12] 2050 탄소중립 시나리오에서 밝히고 있는 DAC 활용 계획	52
[그림 3-13] SMR 설비의 예시(미국 NuScale社의 SMR 조감도)	53
[그림 4-1] 2030 NDC 목표 달성 부문별 목표 수정	55
[그림 4-2] CDM 하에서의 감축활동 유형	91
[그림 5-1] 전세계 SMR 기술 개발 및 활용 (83개 모델)	116
[그림 5-2] 규모의 비경제를 보완하는 SMR의 주요경제적 요인	120
[그림 5-3] 혁신형 SMR (i-SMR)의 구조 개념도	124

C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction	1
Section 1 Research background and purpose	1
Section 2 Research content and method	5
Chapter 2 Enabling environment for green technology RD&D and deployment	8
Chapter 3 RD&D policy direction for international/domestic green technology	13
Section 1 (International) RD&D policy direction for green technology based on IPCC 6th Assessment Report	13
1. Overview of the IPCC 6 th Assessment Report	13
2. NIGT' s role in response to the IPCC 6 th Assessment Report	16
2.1. Participating in government review process of the IPCC 6 th Assessment Report	16
2.2. Participating in IPCC Government Council	20
2.3. Participating in the Task Force for the Synthesis Report	24
2.4. Participating as government delegates in the 58 th Session of IPCC	24
2.5. Disseminating the results of the 58 th Session of IPCC	32
3. Key contents of the IPCC 6 th Assessment Report Synthesis Report	34
3.1. Current status and trends	35
3.2. Future climate change, risks, and long-term responses	35
3.3. Responses in the near term	37
4. Deriving climate technology RD&D policy direction from the IPCC 6 th Assessment Report	39
4.1. Key technologies in IPCC 6 th Assessment Report Synthesis Report	39
4.2. Climate technology RD&D policy direction	45

Section 2 (Domestic) Korea's RD&D policy direction for green technology	48
1. 10 key technologies for carbon neutrality	48
2. 100 key technologies for carbon neutrality	50
Section 3 (Domestic) Green technologies to start original R&D in 2023	
: DAC technology and SMR technology	51
1. Concepts and backgrounds of DAC technology R&D in Korea	51
2. Concepts and backgrounds of SMR technology R&D in Korea	53
Chapter 4 DAC technology: Study on institutional arrangements	
for technology project	54
Section 1 (Domestic) Discussion on policy for setting a separate national mitigation targets for 2030 NDCs based on DAC technology	55
Section 2 A policy discussion process for the preparation of national position report under the Article 6.4 mechanism: Inclusion of DAC technologies as an eligible activity of mitigation	62
Section 3 Research on Korea's negotiating position on the inclusion of DAC technologies as an eligible mitigation activity under the Article 6.4 of the Paris Agreement	91
1. Introduction	91
2. Previous literature and analytical approach	93
2.1. Carbon dioxide removal approaches	93
2.2. Removal and permanence	95
2.3. Analytical approach	98
3. Key negotiation topics and Korea's position formulation	99
3.1. Removal methods and reservoirs	99
3.2. Storage time	104
3.3. Substitution	105
3.4. Addressing reversal	109
3.5. Summary	109
4. Conclusion	110

Chapter 5 SMR Technology: Research on R&D Design Options to Secure International Competitiveness	114
Section 1 (Domestic) Status of national R&D policies related to SMR technology	114
Section 2 Small Modular Reactor (SMR) Technology: Study of R&D design options for international competitiveness ...	116
1. Introduction	116
2. SMR previous literature & analytical approach	118
2.1. Key characteristics of SMR	118
2.2. Analytical approach	120
3. Analysis on Korea' s i-SMR	123
3.1. Cost (Economic aspect)	126
3.2. Safety	129
3.3. Nuclear spent fuel reduction	131
3.4. Non-proliferation	133
3.5. Summary	134
4. Conclusion	137
Chapter 6 Conclusion	139
References	146

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경 및 목표

본 연구는 ‘아세안 중점협력국 대상 녹색기술 협력체계 구축을 통한 RD&D 협력 아젠다 발굴’이라는 연구과제의 두 번째 모듈로써, ‘탄소중립 신규 녹색기술 RD&D 적용 가능여건’에 초점을 맞추고 있다. 본 과제의 첫 번째 모듈의 목표는 아세안 중점협력국 대상 녹색기술 협력체계를 구축하고 녹색기술 RD&D 아젠다를 발굴하는 데에 초점을 맞추고 있다. 그런데, 이는 아세안 ‘지역’에 중점을 두고 있지만, 이를 진행하기 전에 ‘국제적’으로 그리고 ‘국내적’으로 녹색기술 RD&D에 대한 ‘정책적 방향’이 우리나라 녹색기술이 해외진출의 주요한 ‘가능여건’이 될 수 있기 때문이다.

이러한 정책적 방향을 살펴보면, 먼저, 국제적으로 2023년은 기후변화 대응을 위한 국제적 행동에 있어서 특별한 의미를 갖는다. 그 이유는 먼저 기후변화에 관한 국가간 패널(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)은 제6차 평가보고서(AR6, Sixth Assessment Report) 종합보고서(synthesis report)가 2023년 3월 최종 승인되기 때문이다. 그리고, 제6차 평가보고서는 2023년 11월 개최되는 파리협정 이행에 대한 전지구적인 평가과정인 전지구적 이행점검(Global stocktake)에 핵심적으로 활용된다.¹⁾ 우리나라 기상청은 IPCC 보고서를 검토하고 우리나라 입장을 반영하기 위해, 2020년에 「IPCC 국내대응협의회」를 설립하였다. 그리고 이 정부 협의체를 지원하기 위해 제1 실무그룹(과학), 제2실무그룹(적응), 제3실무그룹(완화) 별로전문가로 구성된 전문위원회를 구성하였다. 국가녹색기술연구소는 제3실무그룹 전문위원회의 주관기관으로서 2022년부터 2023년에 걸쳐 종합보고서 검토 작업에 참여 및 전문가 의견을 종합하는 역할을 리드하고, 우리나라 의견이 보고서에 반영될 수 있도록 노력하였다. IPCC 제6차 평가주기에 국가녹색기술 연구소가 주요하게 참여할 수 있었던 이유는 이번 평가주기에서 ‘기술 개발 및 이전, 그리고 혁신’이 기후변화 대응에 있어 중요한 요소로 자리매김하기 때문이다. 특히, 보고서 전반에 걸쳐 녹색기술의 R&D·실증·활용과 관련하여 다양한 연구 및 정책적 함의가 포함되어 있다.

다음으로, 국내적으로는 기후변화에 대응하여 우리나라에서 녹색성장 및 탄소중립에 대응하여, 2021년 3월 ‘탄소중립 기술혁신 추진전략’을 통해 탄소중립 10대 핵심기술이 선정되고, 이에 대한 2050년까지의 목표와 확보전략이 제시되었다. 이어, 한국형 탄소중립 100대 핵심기술을 발표되었다. 특히, 2023년에 ‘신규’로 시작되는 녹색기술에 대한 원천 R&D 항목들을 살펴보면, ‘혁신 선도기술’이자 ‘청정 에너지’ 차원에서 차세대원전(SMR)에 대한 연구로 혁신형소형모듈원자로 기술, ‘미래도전 기술’ 차원에서 수소의 발전용가스터빈의 수소혼소전

1) IPCC는 기후 변화와 관련된 과학을 평가하는 국제기구로, IPCC는 1988년 세계 기상기구(WMO)와 유엔 환경 계획(UNEP)에 의해 정책 입안자에게 기후 변화의 과학적 기초, 향후 미치는 영향과 위해성, 적응 및 감축에 대한 정기적인 평가를 제공하기 위해 설립되었다. IPCC는 평가보고서를 통해 모든 수준의 정부가 기후 관련 정책을 개발할 수 있는 과학적 근거를 제공하며, 유엔 기후변화협약(UNFCCC)에서 협상 진행의 근거로 이용된다.

환 기술, ‘저탄소 생태계’ 차원에서 탄소중립산업핵심기술개발과 대기직접포집 및 활용(DACU, direct air capture & utilization) 기술, ‘적용 흡수·자원순환’ 차원에서 디지털 기반 기후변화 예측 및 피해 최소화 기술 개발이 포함되었다 (과기정통부 2023, p.7, 8, and 10). 이러한 기술들에 대한 원천 R&D가 새로이 시작된다는 것은 이러한 기술들의 향후 활용/적용 필요성과 가능성이 높기 때문이다. 따라서, 이러한 기술들을 중심으로 향후 국내·외 실증과 활용을 활성화하기 위한 가능여건에 대한 연구가 필요할 수 있다.

따라서, 이는 두 가지 측면에서 연구의 필요성을 일으킨다. 하나는 이번에 도출된 IPCC 제6차평가보고서의 ‘종합보고서’의 검토와 IPCC 제58차 총회를 통한 승인과정에 대한 정부 정책지원이 국내 및 국제적으로 어떻게 이루어졌으며, 이 보고서가 녹색기술의 RD&D 및 활용 차원에서 주는 정책적 시사점이 무엇인가에 대해서 연구할 필요가 있다. IPCC 보고서는 매 보고서마다 정책결정자를 위한 요약서(Summary for Policymakers)를 도출하고 이에 대해서 연구자와 당사국들의 정책입안자들이 함께 논의를 통해 최종 승인되는 만큼, 녹색기술에 대한 향후 RD&D 및 활용에 있어서 핵심 근거자료이자 가능여건으로서 역할을 하게 되기 때문이다. 특히, 종합보고서에 대한 정책지원 활동이 2023년 상반기 매우 다양하게 포집되어 있다. 이는 다음의 <표 1-1>과 같다.

<표 1-1> IPCC 정부 정책 지원 활동

구분	정책 지원 활동
보고서 검토	(‘22.11.21~’23.1.15) IPCC 제6차평가보고서 종합보고서 정부검토안(FGD) 검토작업 실시
국내대응 협의회	(‘23.1.12/ 기상청 국제회의실) 제4차 국내 대응 협의회 - 국가녹색기술연구소는 감축부문 내용 및 검토의견 발표
태스크포스 회의	(‘23. 1.9/기상청 국제회의실) IPCC 제6차 종합보고서 대응 태스크포스 회의 - IPCC 제6차 종합보고서 대응 제 2차 TF 회의 참여 및 발표
IPCC 총회	(총회 사전회의) IPCC AR6 종합보고서 SPM 국제 웨비나 2회 참석 (‘22.12.14, 16, 및 21)
	(기상청 주관 우리나라 정부대표단 사전 점검회의) ‘23.3.2일 개최 및 참석
	(총회 본회의) 제58차 총회 정부대표단 참여 (‘23.3.13-19/스위스 인터라켄) - IPCC AR6 종합보고서 검토에 대한 국제회의 참여
	(총회 종료 직후) - 국내 기자단 사전 브리핑 기상청 발표 지원 및 질의응답 대응
보고서 확산활동	(포럼 개최) - (주최) 기상청, 탄소중립녹색성장위원회, 국회기후변화포럼 - (후원) 에너지경제연구원, 국가녹색기술연구소 - (포럼명) IPCC AR6 종합보고서 승인가념 포럼 - (국가녹색기술연구소 역할) 후원 기관 역할 및 소속기관 본부장 토론 지원 (종합보고서 국문번역 지원)

자료: 저자 작성

다른 하나는 IPCC 보고서에 대한 국제적 논의에 참여하면서 동시에 우리나라의 녹색기술에 대한 신규 R&D 기술들을 보면서, 현재 국제사회에서 가장 주목받는 동시에 우리나라에서 아직 기술 실증 및 활용이 더딘 대표 기술들을 추출하고, 이 기술들의 RD&D 및 활용과 관련한 정책 논의들에 참여하면서 연구할 필요가 있다. 앞서 언급된 기술들 중에서 올해 특히 정책적 측면에서 주목을 받는 기술은 DAC 기술과 SMR 기술이었다.

DAC 기술의 경우, 먼저 국내 차원에서 탄녹위를 중심으로 2030 국가결정기여(NDC, nationally determined contribution)의 감축목표 달성을 위해 부문별로 감축목표를 조정하는 과정에서 이산화탄소포집·활용·저장(CCUS, carbon capture·utilization·storage) 기술에 할당된 감축목표 달성에 DAC 기술이 기여할 수 있는가에 대한 정책차원의 질의와 전문가 논의가 진행되었다. 또한 국제적으로는 파리협정 제6.4조 메커니즘 하에서 배출권으로 인정받을 수 있는 이산화탄소제거(CDR, carbon dioxide removal) 접근법 옵션 중에 DAC 기술에 기반한 감축사업이 포함되는 것이 필요한가의 여부에 대한 협상논의가 진행되었다. 더 나아가 당사국들은 CDR 접근법에서 허용가능한 옵션이 무엇이어야 하는가에 대한 국가제안서를 2023년 3월까지 제출하도록 요청받았다. DAC 기술을 둘러싼 이러한 국내/외 정책적 논의는 DAC 기술의 R&D와는 별개로, DAC 기술의 실증과 활용에 직접적으로 영향을 주는 가능여건에 속한다.

<표 1-2> DAC 기술 관련 정부 정책 논의

구분	정책 논의 질문
국내정책	- (논의 제시 주체) 2023년 1월, 우리나라 탄소중립녹색성장위에서 DAC 기술 관련 사항 제시. 이를 토대로 CCUS 부문 전문위원회/NDC 기술작업반 통합회의에서 동 사항 논의 시작
	- (정책논의) 2030 NDC 목표 상의 부문별 조정 과정에서 CCUS에 할당된 감축목표와 별개로 DAC 기술을 통한 감축목표 설정이 가능한가의 여부
국제정책	- (논의 제시 주체: 국제) 2022년 11월 파리협정 당사국총회에서 파리협정 제6.4조 메커니즘에서 '제거'에 대한 국가제안서 작성 요청
	- (논의 제시 주체: 국내) 2022년 12월, 우리나라 외교부를 중심으로 '제거' 옵션*에 관련된 기관들에 국가제안서 작성 요청 * 이산화탄소제거 옵션에 DAC 기술이 포함 (DACCS 및 DACCU 기술)
	- (정책논의) 파리협정 제6.4조 메커니즘 하에서 배출권으로 인정받을 수 있는 이산화탄소제거(CDR) 접근법 옵션 중에 DACCS 또는 DACCU 기술이 포함되는 것이 필요한가의 여부

자료: 저자 작성

한편, SMR 기술과 관련하여 우리나라 모델인 혁신형 SMR 모델에 대한 원천 R&D 연구가 2023년 시작되었다. 그런데, SMR 모델에 대해서 전세계에서 SMR 연구를 경쟁적으로 진행하고 있으며 (<표 1-3> 참조), 더더군다나 선진국들을 중심으로 자국에서 대표적으로 밀고 있는 SRM 모델을 해외에 실증 및 적용 즉 해외수출을 하기 위해 다각적으로 외교 및 협력 활동을 진행하고 있다. 따라서, 우리나라가 개발하고 있는 혁신형 SMR의 해외 실증 및 활용을 활성화 하기 위한 가능여건에 대한 연구 보다도, 사전적으로 혁신형 SMR 모델이 국제적으로 경쟁력 있는 ‘기술’로서 갖추어야 할 설계 요소들을 갖추고 있는 지에 대한 연구가 선행될 필요가 있다. 기술적 경쟁력이 확보된 이후에 가능여건을 조성하는 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 보이기 때문이다.

<표 1-3> 전세계 국가별 R&D 진행중인 SMR 모델 현황

국가 (83 SMR models)	SMR 모델명
미국 (21개)	VOYGR, BWRX-300, SMR-160, Westinghouse SMR, mPower, OPEN20, FMR, EM ² , Xe-100, SC-HTGR, Westinghouse LFR, KP-FHR, MK1 PB-FHR, MCFSR, LFTR, THORCON, AURORA, HOLOS-QUAD, MARVEL, MMR, Westinghouse eVinci
러시아 (17개)	KARAT-45, ABV-6E, VBER-300, MHR-T, SVBR, RITM-200N, KARAT-100, KLT-40S, SHELF-M, MHR-100, ELENA, VK-300, RUTA-70, RITM-200M, GT-MHR, BREST-OD-300, UNITHERM
중국 (10개)	ACP100, ACPR 505, CAP 200, ACP1005, DHR400, HTR-PM, HAPPY200, HTR-10, NHR200-II, smTMSR-400
일본 (7개)	HTTR, 4S, IMR, BWRX-300, FUJI, GTHTTR300, MovelluX
캐나다 (5개)	CANDU SMR, ARC-100, STARCORE, IMSR400, SSR-W
영국 (4개)	Rolls-Royce SMR, SSR-U, LFR-TL-X, U-Battery
한국 (4개)	i-SMR, SMART, BANDI-60, microURANUS
남아프리카 (4개)	AHTR 100, PBMR-400, HTMR100, AMR
프랑스 (2개)	NUWARD, Jimmy
덴마크 (2개)	CA WB, CMSR
체코 (2개)	TEPLATOR, ENERGY WEII
인도네시아 (2개)	PeLUit/RDE, THORCON
스위스 (1개)	STAR
이탈리아 (1개)	LFR-AS-200
아르헨티나 (1개)	CAREM
네덜란드 (1개)	THORIZON
스웨덴 (1개)	SEALER-55
사우디 아라비아 (1)	SMART

자료: IAEA(2022)의 p.353의 Figure I-1을 토대로 저자 작성

앞서 언급된 연구의 필요성을 토대로, 동 연구는 i) 녹색기술의 RD&D 및 활용에 주요한 가능여건으로서 존재하는 IPCC 보고서에 대한 정책지원과 녹색기술에 대한 정책적 방향성과 ii) 우리나라에서 신규 R&D로 2023년 시작되는 DAC 기술과 SMR 기술에 대한 가능여건을 조성하기 위한 방안을 모색하는 데에 그 목표를 두고자 한다.

제 2 절 연구내용 및 추진방법

앞서 언급된 연구 필요성에 따라, 동 연구는 다음과 같이 연구가 진행될 예정이다.

먼저 제 2장은 ‘가능여건’의 의미, 유형, 관계성에 대해서 기존 문헌 연구를 진행한다.

다음으로, 제3장은 IPCC 제6차 평가보고서에 대한 정책대응 제고 연구 결과가 기술될 예정이다. 먼저, 제3장 1절에서는 국제 차원에서 RD&D 정책 방향성을 살펴보기 위하여 우리 기관이 IPCC 국내대응협의회 제3실무그룹 전문위원회 주관기관으로서 제6차 평가보고서 종합보고서를 검토하고 정책대응한 내용이 포함될 예정이다. 이 과정에서 우리 기관이 수행한 i) IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 정부검토 과정 참여, ii) 종합보고서 TF 회의 참여 및 국내대응협의회 개최 지원, iii) 제58차 IPCC 총회 당시의 IPCC 협상회의 대응 사항, iv) IPCC 총회 결과 및 종합보고서 내용 확산을 위한 언론브리핑, 뉴스대담, 포럼 개최지원, 국문번역 감수, iv) 종합보고서에 기반한 RD&D 정책 방향성 도출 내용이 정리되었다. 제3장 2절에서는 국내 차원에서 우리나라가 탄소중립 달성을 위한 핵심기술을 선정하고 정책적으로 지원하는 내용을 정리하였다. 그리고 제3장 3절에서는 2023년도 원천 R&D가 시작된 대표적인 녹색기술인 DAC 기술 및 SMR 기술에 대해서 설명하고자 한다.

이어, 제4장에서는 DAC 기술에 대한 가능여건 연구가 진행될 예정이다. 먼저 제4장 1절은 ‘국내 정책 논의’ 차원에서 우리나라 탄소중립녹색성장위원회가 DAC 기술 기반 NDC 국가 감축목표 설정이 가능한가의 여부에 대해서 국가녹색기술연구소가 정책적으로 대응한 연구 결과가 포함될 예정이다. 이어, 제4장 2절에서는 ‘국제 정책 논의’ 차원에서 파리협정 제6.4조 메커니즘 하에서 배출권으로 인정받을 수 있는 이산화탄소제거(CDR) 접근법에 대한 국가제안서 작성 정책 논의 과정에 국가녹색기술연구소가 DAC 기술 옵션을 포함하는 것과 관련하여 국가제안서 작성에 참여한 정책 연구 결과가 포함될 예정이다. 제4장 3절에서는 파리협정 제6.4조 메커니즘 ‘제거 활동’으로 DAC 기술 포함에 관한 우리나라 협상 입장에 대해서 ‘영구성(permanence)’ 관점에서 고려해야 할 네 가지 요소에 대해서, 우리나라의 DAC 기술의 RD&D 현황을 토대로 우리나라의 협상입장을 중점적으로 연구한 내용이 담길 예정이다.

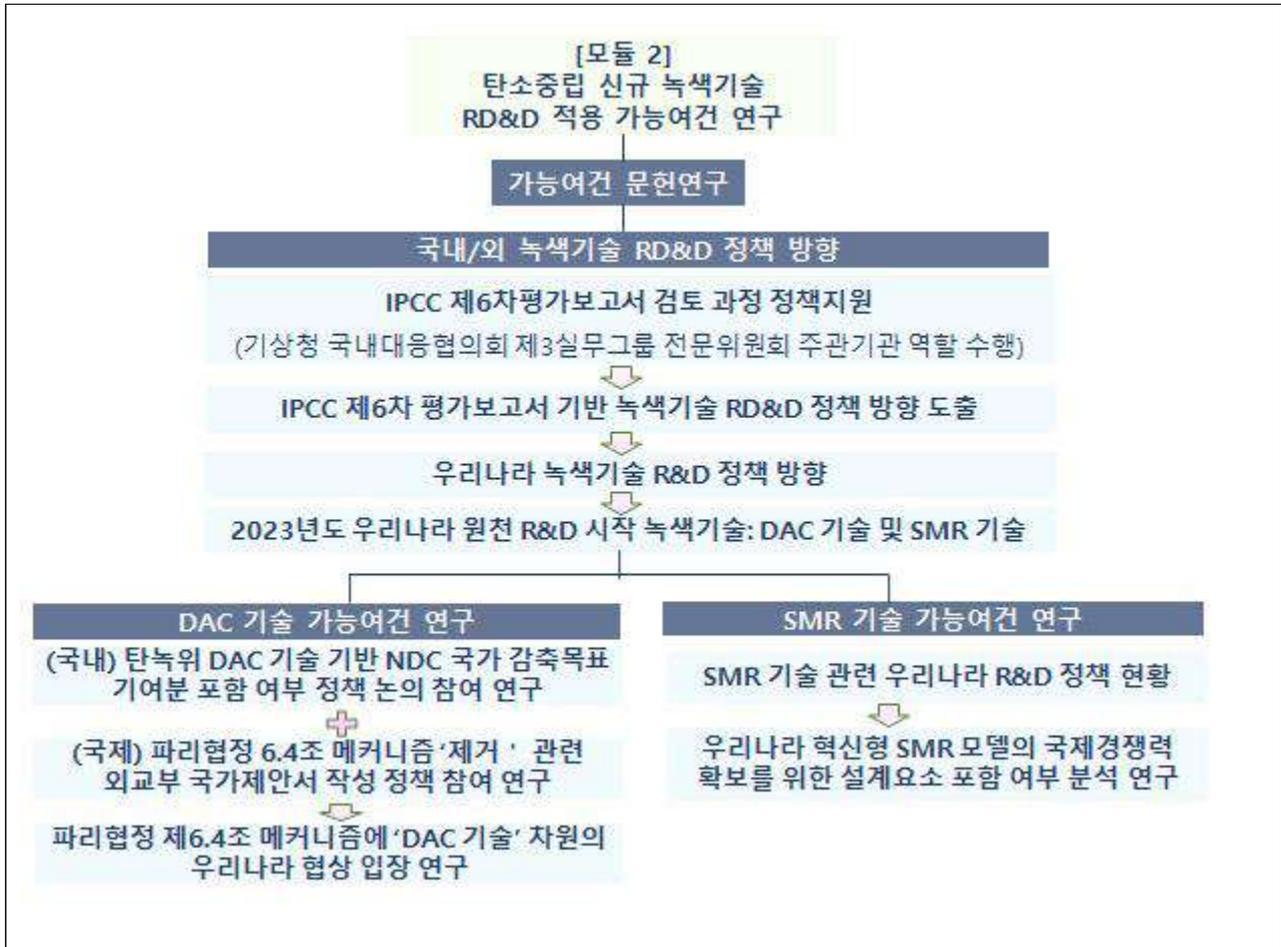
다음으로, 제5장에서는 SMR 기술에 대한 가능여건 연구가 진행될 예정이다. 제5장 1절에서는 SMR 기술 관련 우리나라 국가 R&D 정책 현황에 대한 연구결과가 포함될 예정이다. 그리고 제5장 2절에서는 현재 R&D 단계인 우리나라 혁신형 SMR 기술의 R&D 설계방향이 국제경쟁력을 담보하고 있는지의 여부를 분석하는 연구가 포함될 예정이다.

상기 언급된 내용을 토대로 정리한 동 연구보고서의 연구 추진 체계는 다음의 <표 1-4>과 같다. 또한, 이를 도식화한 연구 추진 체계는 [그림 1-1]과 같다.

<표 1-4> 연구 계획(안)

섹션		정책지원 및 연구결과	
1장	서론		
2장	- 녹색기술 RD&D의 가능여건/장애요소에 대한 기존 문헌연구		
3장	1절	정책 지원	(국제) IPCC 제6차평가보고서 정책 지원 및 IPCC 보고서 기반 녹색기술 RD&D 국제 정책 방향 도출
	2절	정책 지원	(국내) 우리나라 녹색기술 RD&D 정책 방향
	3절	정책 지원	(국내) 2023년도 원천 R&D 시작 녹색기술: DAC 기술 및 SMR 기술
4장	1절	정책 지원	(국내) DAC 기술 기반 NDC 국가 감축목표 설정 정책 논의
		- (연구내용) · 「탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가기본계획」 수립을 앞두고, CCUS 기술 기반 감축목표 조정 과정에서 DAC 기술을 포함한 신규기술의 2030 NDC 감축목표 기여 가능성 여부에 대해 정부 타진에 대해 대응한 연구	
	2절	정책 지원	(국제) 파리협정 제6.4조 메커니즘 국가제안서 작성 정책 논의 과정 정책지원: '제거 활동'에 DAC 기술 포함 사항 - (연구내용) · 파리협정 당사국총회(CMA)는 파리협정 제6.4조 메커니즘에 '제거를 포함한 활동'에 대한 국가제안서를 2023년 3월 15일까지 제출할 것을 요청한 바, DAC 기술 관점에서 국가제안서 작성에 참여한 연구 내용
3절	중점 연구	파리협정 제6.4조 메커니즘 '제거 활동'으로 DAC 기술 포함에 관한 우리나라 협상 입장 연구	
	- (연구질문) · DAC 기반 기술인 DACCS와 DACCU 기술을 둘러싸고, 파리협정 제6.4조 메커니즘 하에서 인정받는 기술옵션이 되어야 하는가에 대한, 이해관계자들의 입장과 협상 쟁점사항이 무엇인가? · 우리나라의 DAC 기술의 RD&D 현황을 토대로, 쟁점사항별로 우리나라가 취해야 하는 협상 입장은 무엇인가? - (분석틀) · 이산화탄소 제거 접근법을 탄소시장에 포함하는 것과 관련된 기존 문헌 연구를 토대로, 가장 핵심 개념인 영구성(permanence)'를 중심으로 4가지 측면을 도출 : i) 온실가스 포집 저장소 및 제거 방식, ii) 저장 기간, iii) 크레딧 대체 가능성, iv) 역전현상 리스크		
5장	1절	연구	(국내) SMR 기술 관련 국가 R&D 정책 현황
	2절	중점 연구	SMR 기술: 국제감축사업화 제도 수립 방안 연구 (현재 R&D 단계인 우리나라 혁신형 SMR 기술의 R&D 설계방향이 국제경쟁력을 담보하고 있는지의 여부를 분석) - (연구질문) · 우리나라가 개발중인 혁신형 SMR(i-SMR) 모델의 R&D 설계 방향이 국제경쟁력을 담보하고 있는가? - (분석틀) · SRM 모델들의 비교 평가하는 기존 문헌과 이러한 문헌에서 활용된 분석틀을 토대로, SMR이 경쟁력을 갖기 위해 고려해야 할 요소로서 4가지 측면을 설정하고 각 측면별로 세부 고려요소들을 설정 : i) 비용(경제성) 측면, ii) 안전성 측면, iii) 방사성폐기물 저감, iv) 핵확산(proliferation) 방지
6장	-	결론	

자료: 저자 작성



[그림 1-1] 연구 도식표

자료: 저자 작성

제 2 장 녹색기술 RD&D 및 활용 가능여건

신규 기술에 대한 개발과 적용에 투자하는 것은 경제성장의 엔진 역할과 다름없다. 그러나 기술개발에는 자원, 지식, 그리고 스킬이 필요하며 이는 모든 국가들이 보유하고 있는 것은 아니다 (Khan et al. 2017, p.512). 따라서, 기술개발에는 결국 기술을 보유한 주체로부터 기술을 수요로 하는 국가로의 국제적인 기술이전이 필요할 수 밖에 없다. 즉, 기술개발을 하지만 이는 기술이전에 기반하는 것이다. 사실, 새로운 기술이 개발되고 상업화 되어가는 기술 주기(technology cycle)는 일반적으로 기술개발과 기술이전으로 구분되는데, 여기서 기술개발에는 기술 연구(research), 개발(development), 실증(demonstration)이 포함되고, 기술이전에는 기술의 활용(deployment), 확산(diffusion), 상업성을 가지고 이전(transfer)되는 단계(stages)로 구분된다 (UNFCCC 2010, para 115). 그런데 앞서 언급된 바와 같이 ‘국제기술이전’ 또는 ‘국제기술협력’의 관점에서는 이전 또는 협력되는 기술이 해당되는 단계가 ‘기술개발’ 단계이기도 하고 ‘기술이전’ 단계이기도 하다. 따라서, 동 연구에서는 국제기술이전 또는 국제기술협력의 관점에서 접근하여, ‘기술이전’ 되는 기술의 단계가 RD&D, 활용 그리고 확산를 모두 포함하는 것으로 바라보고자 한다.

기술보유자와 기술수혜자 간의 기술이전이라는 행위 자체에 주목하면 이는 매우 다양하며 복잡하다 하더라도, 그 과정에는 (협력대상의) 수요 파악, 기술 선택, 기술이전 환경 평가, 계약, 이행, 평가, 현지 상황에 따른 조정, 그리고 복제(replication)의 단계들이 있다 (IPCC 2000, p.4). 그리고, 기술이전이 이루어지는 과정 각 단계마다 장애요소(barrier)가 발생하며, 장애요소가 발생하는 제반환경도 다 다르다 (Ibid.). 따라서, 이 각 단계별로 장애요소를 해결하기 위한 노력이 필요하다. 특히 국제기술이전(international technology transfer)에는 기술접근성에 대한 제한, 수요 부족, 자원 부족, 기술 흡수역량 부족, 관련 인프라 부족, 관련 기술의 부족 등의 장애요소가 있다. 이러한 장애요소는 여러 가지가 있으며, 이를 기술적, 제도적, 재정·경제적, 사회·문화적인 측면에서 분류하면 다음의 <표 2-1>과 같이 정리될 수 있다.

<표 2-1> 기술이전 장애요소 항목들

기술적	소유권의 부족, 기술에 대한 제한적 접근, 기술에 대한 지식 및 전문성 부족, 기술기준의 부족, 코드 및 검증 기관 부족, 연구기관, 학술기관, 그리고 기업 간 조정 부족
제도적	규제지원 부족, 정치적 불안정, 정책결정에 이해관계자 관(참)여 부족, 지역 주민의 차여 부족, 화석연료 보조금, 저탄소 기술 이전을 지원 및 규제하기 위한 인프라 부족
재정/경제적	재정자원 부족, 높은 생산 비용, 저탄소 기술 관련 프로젝트에 대한 금융기관의 인식 및 관심 부족, 상업적 실행 가능성 부족, 저탄소 기술 지원을 위한 재정기관 부족, 제한적인 시장규모, 자유화 및 투명성 부족
사회/문화적	저탄소 기술에 대한 소비자의 인식 및 정보 부족, 신규 기술의 평가, 신규기술 채택 및 흡수 능력 부족, 운영 및 유지를 위한 지식 부족 등

자료: Ockwell et al. (2009), Painuly and Fenhann (2002), Painuly (2001) 자료 기반으로 저자 정리

그런데, 이 장애요소와 함께 논의되는 사항이 바로 가능여건(enabling environment)이다. 기술이전을 촉진하기 위해서는 가능여건과 장애요소를 파악하여, 가능여건을 구축하고, 구체적인 장애요소를 시스템적으로 극복하기 위해 노력해야 한다고 언급된다 (Benioff et al. 2010). 그렇다면, ‘장애요소’와 ‘가능여건’은 서로 어떠한 관계인가.

먼저, 유엔기후변화협약(UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change) 하에서 수립된 기술이전프레임워크 차원에서 규정된 ‘가능여건’은 ‘장애요소’를 포괄하는 상위개념으로써 정의되고 있다. 가능여건은 공공섹터 및 민간섹터의 기술이전에 이익이 되는 환경을 조성하는 모든 정부 행동을 의미하며, 여기에는 공정무역 정책, 기술적/법적/행정적 장애요소 제거, 건전한 경제 정책, 규제 체계 및 투명성 등이 포함된다고 언급되어 있다 (UNFCCC 2001, Annex, para 12). 이는 장애요소를 극복하는 것이 결국엔 가능요인(enabler) 또는 가능여건을 조성하는 행위라고 보는 관점과 일맥상통한다 (Khan et al. 2017, p.517).

한편, 기술이전에 있어 세부적인 (또는 미시적인) ‘장애요소’를 극복하기 위해 필요한 정책적 접근은 곧 기술이전을 촉진하는 거시적인 ‘가능여건’ 조성이라는 정책적 접근으로 바라보는 관점도 있다. 이는 장애요소 제거 정책과 가능여건 조성 정책이 동시에 병렬적으로 접근되어야 한다는 관점이라고 볼 수 있다. 장애요소 그리고 더 나아가 가능여건 조성을 위한 정책 연구의 최종 목표는 기술-경제적 잠재성(techno-economic potential)을 높이는 데에 있다. 여기서 기술-경제적 잠재성이란 “기술적으로 실현가능하고 경제적으로 가능한 기술이 경쟁시장에서 널리 활용될 수 있으며, 기술 활용에 있어 소비자 선호도, 사회/제도적 장애요소, 재정적 방해요소 등과 같은 제한이 존재하지 않는 경우”를 의미한다 (Painuly 2001, p.76). 기술잠재성 제고를 위한 정책적 접근은 직접적 접근과 간접적 접근으로 구분되나, 장애요소에 대한 ‘직접적’인 정책적 접근은 미시적 수준에서 이루어지고, 장애요소에 대한 ‘간접적’인 정책적 접근은 거시적 수준에서 가능환경을 만드는데 초점이 맞추어진다 (Ibid., p.84).

이 두 가지 관점을 정리하면 다음의 <표 2-2>와 같다. 그런데, 동 연구에서는 가능여건과 장애요소가 병렬적 관계라는 측면에서 좀 더 접근하고자 한다. 그 이유는 UNFCCC에서 접근한 관계도는 선-개도국 간 ‘장애요소’라는 단어를 둘러싼 논쟁에 기반해서, 가능여건이 우세한 개념으로 받아들여졌기 때문이다. 또한, 분명 국제기술이전에서 미시적 접근을 해결해야 하는 사항과 거시적 접근을 통해 환경을 조성해야 하는 사항들이 구분되어 존재하기 때문이다.

<표 2-2> 장애요소 해결과 가능여건 조성 관계

관계	정책적 접근법		
	장애요소 해결	가능여건 조성	목표
상위-하위 관계 (가능여건 ⊃ 장애요소)	기술적/법적/규제적/행정적 장애요소 해결	기술이전 환경 조성	기술이전 활성화
병렬적 관계 (가능여건 ~ 장애요소)	정책적 접근	수준	행동
	직접적 접근법	미시적	장애요소 해결
	간접적 접근법	거시적	가능여건 조성
			기술-경제적 잠재성 제고

자료: 상기 본문 내용을 토대로 저자 정리

물론, 장애요소 해결 속하는 항목과 가능여건에 속하는 항목을 구분하는 것은 쉽지 않다. 어떠한 국가에서는 미시적으로 해결가능한 항목이 다른 국가에서는 거시적으로 새롭게 환경을 조성해야 하는 항목일 수도 있다. 따라서, 세부적인 항목으로 들어가는 연구에서는 이를 구분하기 보다는 기술이전 활성화에 필요한 항목들을 전체적으로 파악하는 경우가 있다. 그리고, 최근의 연구는 이러한 가능여건/장애요소 항목들에 대해서 이들 간의 관계와 우선순위 등에 대해서 접근하는 경향이 있다.

대표적으로, Khan et al. (2017)은 17개의 장애요소들을 추출하고 이 요소들간의 구조적 모델링을 시도하였다. 하단의 <표 2-2>에서 레벨이 낮은 요인들이 구조에서 가장 낮은 위치에 놓여 있고, 레벨이 높은 요인들이 구조상에서 가장 높은 위치에 놓여 있다. 이를 순서대로 보면, 가장 허들이 낮은 1단계 요소로는 최고경영진의 지원 부족 그리고 변화에 대한 저항이다. 2단계 요소로는 문화적 장애요인과 인프라의 부족이다. 3단계는 커뮤니케이션의 부족이다. 4단계는 인적자원의 부족과 파트너 간의 신뢰 부족이다. 이어, 5단계는 인식 부족이다. 6단계는 신규기술을 이행하는 데에 필요한 지침이 불충분한 경우이고, 또한 정부의 과도한 개입 또는 규제이다. 7단계는 R&D와 개별 역량 부족이다. 8단계는 부적절한 기술이전 시스템으로 정보 및 기술 시스템이 부족한 것이다. 또한, 예측 및 기획이 제한된 경우이다. 9단계는 명확한 수요가 부족한 경우이다. 10단계는 국가 리스크와 투자비용이다. 그리고 마지막 가장 허들이 높은 11단계는 조직 리스크이다. 각 장애요소에 대한 설명은 다음의 <표 2-3>과 같이 정리될 수 있다.

<표 2-3> 기술이전에 대한 장애요소에 대한 구조적 모델링



자료: Khan et al.(2017)의 p.525의 Figure 1을 토대로 저자가 번역 및 정리

앞서 언급된 Khan et al. (2017)이 제시한 장애요소들의 해결 난이도 수준에 따른 항목과 그에 대한 구체적인 내용은 다음의 <표 2-4>와 같이 정리될 수 있다.

<표 2-4> 기술이전 활성화를 방해하는 장애요소와 해결 난이도 수준

1단계 (낮음)	최고경영진의 지원 부족	- 최고경영진의 재정 및 자원 준비과정에서의 참여가 고객 만족으로 이어지고 프로세스 효율성, 경쟁우위, 그리고 인적자원관리에 긍정적 영향
	변화에 대한 저항	- 많은 제조업 회사들은 신규 기술이 도입될 때마다 저항을 경험. 지속적 교육 및 훈련이 신규 기술채택에 대한 저항 완화에 도움
2단계	문화적 장애요인	- 조직문화 항목으로는 경영진의 다양한 환경에서의 운영 역량, 변화에 대한 원활한 수용, 경영진 역할에 대한 장기적 관점 등이 포함됨
	인프라의 부족	- 전력, 교통, 커뮤니케이션, 보안 기술과 같은 필수적인 인프라 부족
3단계	커뮤니케이션의 부족	- 열린 커뮤니케이션이 조직 내에서 공통의 문화 및 혁신 활동을 촉진
		- 조직내에서 모든 단계에서의 효과적인 커뮤니케이션이 신규 기술 이행에 도움
4단계	인적자원의 부족	- 교육 및 훈련이 성공적인 기술이전에 핵심 요건
	파트너 간의 신뢰 부족	- 다른 파트너 조직이 해당 조직을 상호관계에 헌신하려는 신뢰성있는 조직으로 인식하게 하고 싶다면, 해당 조직은 이를 위한 방안을 모색해야 함
5단계	기술혜택 인식 부족	- 신규기술의 경제적·조직적·환경적 혜택에 대한 인식 부족은 기술이전 이행의 주요한 장애요소임
6단계	신규 기술 이행 지침 불충분	- 신규기술을 수혜국 입장에서는 기술이전이 새로운 프로세스이나, 특정 국가들 대상으로 한 신규기술의 이전 정책·지침이 따로 마련되지 않음
	정부 개입·규제	- 정부 규제는 혁신기술 채택을 장려 또는 억제 가능 - 사전 문서화 및 신고는 매우 번거롭고 시간이 소요되는 과정 - 대부분 기업들은 이러한 정책을 신규 기술 적용의 장애요소로 간주
7단계	R&D와 개별 역량의 부족	- R&D는 신규 상품 및 서비스의 발생, 생산, 그리고 상업화 과정의 지식 집약도를 높이고 여러 분야에서의 혁신을 조성함
8단계	부적절한 정보·기술 시스템	- 효율적인 정보 및 기술 시스템은 다양한 단계에서의 신규 기술을 지원하는데 필수적임
	예측 및 계획이 제한	- 많은 기업들이 상품 및 흐름의 다양성 수준 때문에 예측 및 계획에 어려움을 겪음
9단계	수요 부족	- 명확한 수요는 손익분기점 분석에 도움이 되는 기술이전 과정을 개선하고 가속화함
10단계	국가 리스크	- 가장 두드러진 위험은 사회/정치/법적 체계와 필요로 하는 인프라의 가용성과 관계됨
	투자비용	- 기술의 구매, 설치, 운영, 유지하는 비용이 높음
11단계 (높음)	조직 리스크	- 필요로 하는 기술을 흡수하고 이행하는 조직역량의 부족. 이는 기술 역량이면서 동시에 인적 역량임

자료: Khan et al.(2017)의 pp. 514-517의 Table 1의 내용을 토대로 저자 재정리.

동 연구는 이 11계 단계 중에서 제 6단계 그리고 7단계에 주목하고자 한다. 이는 해당 국가의 정부 정책적 역량과 기술적 역량이 직접적으로 관련된 부분이기 때문이다.

먼저, 6단계는 정부 정책적 역량과 관련된 사항이다. 신규 기술에 대한 기술이전에 있어서 수혜국이 관련된 정책이나 지침이 부재할 경우, 기술이 있다 해도 이를 이행할 수 없게 된다. 따라서, 신규기술의 RD&D 및 활용을 위한 정책이나 이행지침을 마련하는 규제적 환경을 조성할 필요가 있다. 예를 들어, 이를 청정에너지 기술에 대한 R&D 협력에 적용해 보면, 국가간 R&D 협력의 유형에 따라 필요한 가능여건이 다양할 수 있다. R&D 로드맵을 설정하기 위해서는 해당 기술에 대한 국가의 기술 도입 방향 설정을 위한 기반 기술 정책이 필요하고, 다국간 R&D 협력 프로그램을 위해서는 국가 차원에서 기술을 활용하는 정책 프로그램이 설정되어야 하고, 기술 실증 협력을 위해서는 해당 기술이 실제 실증될 경우에 발생할 수 있는 리스크를 저감하기 위해 지적재산권 제도의 도입와 이행활성화가 필요하다. 이는 공통적으로 해당 국가의 기술도입을 위한 정책이 필요하고 이를 실행하는 정책적 역량이 필요한 것이다 (Benioff et al. 2010). 동시에, 신규 기술에 대한 기술 이전에 있어서 수혜국이 제한적이거나 매우 규제적인 정책이 존재하고 이에 따라 길고 복잡한 행정적 프로세스로까지 이어진다면 이는 규제적인 측면의 장애요소가 된다. 사실 이러한 가능여건/장애요소에 대한 사항은 수혜국에서만 필요한 요건이 아니라 기술을 보유하고 이를 이전하려는 국가에도 해당되는 것이라고 본다. 이러한 실제 정책적 경험을 통해서 기술 이전시 발생하는 문제가 해결될 수 있는 것이다. 특히 R&D 단계의 기술의 경우에는 기술을 선진적으로 보유하고 있는 국가라 하더라도 신규 기술이기 때문에 가능여건/장애요소에 대해서 동일하게 맞닥뜨릴 수 있는 문제일 수 있다.

<표 2-5> 청정 에너지 기술의 R&D 협력 가능여건

R&D 협력 유형	가능여건
R&D 네트워크 및 로드맵	국가 정책
다자 R&D 협력	다자협력이 이루어지는 부문별 기술 활용 프로그램
기술 실증 파트너십	지적재산권(IPR) 제도

자료: Benioff et al. (2010)의 Table ES-1의 내용을 토대로 저자 정리

한편, 6단계가 신규기술에 대한 정부 차원의 장애요소/가능여건이라면, 7단계는 R&D와 개별 역량과 관련된다. 앞서 <표 2-4>에서 언급된 바와 같이, R&D는 신규 상품 및 서비스의 발생, 생산, 그리고 상업화 과정의 지식 집약도를 높이고 여러 분야에서의 혁신을 조성한다. 따라서, 신규 기술에 대한 R&D를 수행하고 이를 통해 결과물을 도출해 낼 수 있는 기술적 역량 역시 매우 중요한 항목일 수 있다. 그리고 이러한 R&D를 이끌어낼 수 있도록 하는 데에는 그 이면에 어떠한 기술을 어떠한 방향으로 RD&D를 수행할 것인가에 기술적 R&D 설계 방향과 동시에 정책적 방향이 필요한 것이다.

동 연구보고서에서 담고 있는 연구는 탄소중립 및 녹색성장을 위한 녹색기술의 도입과 관련하여, 국내/외 정책적 가능여건으로 작용하는 정책들을 살펴보고, 특히 DAC 기술과 SMR 기술에 대한 정책적 및 기술적 역량에 대한 가능여건에 대해 모색해 보고자 한다.

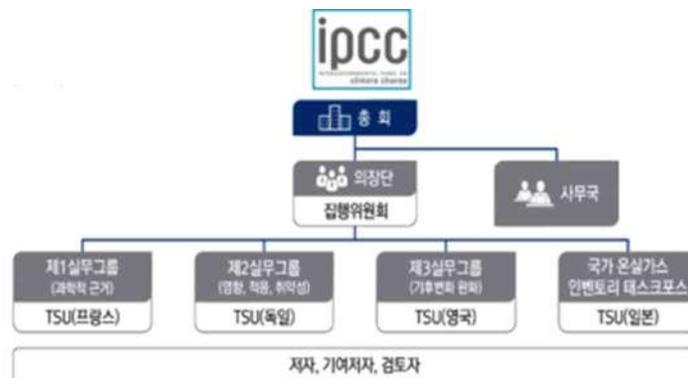
제 3 장 국내/외 녹색기술 RD&D 정책 방향

제2장에서 살펴본 바와 같이 기술이전 장애요인은 매우 다양하게 존재하며, 이를 극복하기 위한 정부의 역할은 매우 중요하다. 정부는 적절한 정책 도구를 활용하여 기술의 RD&D 및 활용을 촉진할 수도 있고 규제할 수도 있기 때문이다. 본 장에서는 녹색기술 RD&D 정책 방향에 대해 살펴보기 위하여 국제 수준에서는 ‘기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)’를 중심으로, 국내 수준에서는 우리나라의 탄소중립 핵심기술 및 신규 원천기술 R&D 관련 정보를 중심으로 연구한 결과를 정리·소개한다.

제 1 절 (국제) IPCC 제6차 평가보고서 기반 녹색기술 RD&D 정책 방향

1. IPCC 제6차 평가보고서 개요

기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC)는 기후변화의 과학적 규명을 위하여 세계기상기구(WMO, World Meteorological Organization)와 유엔환경계획(UNEP, United Nations Environment Programme)이 1988년에 공동으로 설립한 국제협의체이다. IPCC의 사무국은 스위스 제네바에 위치하고 있으며 (IPCC, 2021), 약 6~8년의 평가주기마다 전 세계의 과학자들이 수행한 기후변화에 대한 연구 결과물을 총망라하여 정리한 평가보고서 (Assessment Report)를 발간하는 것이 주요 기능이다 (기상청, 2023). IPCC 평가주기 별로 해당 평가주기에 지정 또는 선출된 의장이 평가보고서 및 종합보고서 작성을 리드하는데, 이번 제6차 평가주기 동안의 의장은 우리나라 고려대학교 이희성 교수가 선출되어 이번 보고서 작성의 전 과정을 총괄하였다. 의장은 의장단을 꾸리며, 의장단 산하에는 [그림 3-1]과 같이 세 개의 실무그룹(WG, working group)이 존재한다. 이 세 개의 실무그룹은 제1실무그룹(WGI, 과학적 근거), 제2실무그룹(WGII, 기후변화 영향·적응·취약성), 제3실무그룹(WGIII, 기후변화 완화)이며, 이외에도 추가적으로 국가온실가스인벤토리 태스크포스(TFI, Task Force on National Greenhouse Gas Inventories)가 있다.



[그림 3-1] IPCC의 조직 구성

출처: 기상청(2020)에서 발췌

IPCC의 주요활동으로는 기후변화의 추세, 원인 규명, 영향 평가, 그리고 대응 전략에 대한 전 세계 연구 결과물을 검토하고 집대성하여 약 6~8년간의 평가주기로 평가보고서를 발간한다. 또한 필요에 따라 시의적절한 주제로 특별보고서 및 방법론보고서를 발간하기도 한다. 현재까지 6번의 평가주기가 있었으며, 각 평가주기의 최종 산출물인 평가보고서는 <표 3-1>과 같이 유엔기후변화협약(UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change) 협상 시 주요한 과학적 근거로 활용되며 (IPCC, 2017), 또한 전 세계 정부들이 기후변화 대응을 위한 정책 수립 및 적용에 필요한 과학적 정보로써 활용된다.

<표 3-1> IPCC 평가보고서 발간 시기 및 주요 기여 내용

평가보고서	발간 시기	주요 기여 내용
제1차 평가보고서(FAR)	1990년	유엔기후변화협약(UNFCCC) 채택
제2차 평가보고서(SAR)	1995년	교토의정서 채택
제3차 평가보고서(TAR)	2001년	2°C 온도 목표에 대한 UNFCCC 차원의 논의 촉발
제4차 평가보고서(AR4)	2007년	교토의정서 후속체제에 대한 근거 제공
제5차 평가보고서(AR5)	2013~2014년	파리협정 채택
제6차 평가보고서(AR6)	2021~2023년	전 지구적 이행점검(GST, Global Stocktake)의 평가근거 제공

자료: 오채운 외(2022)의 <표 2-1>을 발췌한 것으로 원출처는 IPCC(2017)

올해는 IPCC의 제6차 평가주기(2015~2023년)가 마무리되는 연도이다. 이번 제6차 평가주기 동안에는 특별보고서 3권, 방법론보고서 1권, 그리고 평가보고서 4권이 발간되었다. 이 중에서도 평가보고서에는 3개 실무그룹별로 각기 1권씩 발간된 실무그룹 보고서 3권과 종합보고서(SYR, synthesis report)가 있다. 이 중, 종합보고서는 평가주기 내에 발간된 모든 특별보고서 및 평가보고서를 총망라하여 작성되는데, 이번 제6차 평가보고서의 종합보고서는 올해 3월에 발간되었다. 한편, 각 보고서 내용이 방대하기 때문에 각 특별보고서 및 평가보고서는 보고서 핵심 내용이 담긴 ‘정책결정자를 위한 요약서(SPM, summary for policymakers)’가 함께 발간된다. 이러한 제6차 평가주기에 발간된 보고서는 <표 3-2>와 같이 정리할 수 있다.

<표 3-2> IPCC 제6차 평가주기에 발간된 보고서

보고서 종류	발간 일시	관련 UNFCCC 회의
특별보고서	1.5°C(SR15)	2018.10.(제48차 총회)
	토지(SRCCL)	2019.08.(제50차 총회)
	해양 및 빙권(SROCC)	2019.09.(제51차 총회)
국가온실가스인벤토리 지침 2019 개선본	2019.05.(제49차 총회)	제25차 당사국총회(COP25)

보고서 종류		발간 일시	관련 UNFCCC 회의
평가보고서	제1실무그룹(WGI) 보고서	2021.08.(제54차 총회)	제26차 당사국총회(COP26)
	제2실무그룹(WGII) 보고서	2022.02.(제55차 총회)	제27차 당사국총회(COP27)
	제3실무그룹(WGIII) 보고서	2022.04.(제56차 총회)	
	종합보고서(SYR)	2023.03.(제58차 총회)	제1차 전지구적 이행점검

자료: 저자 작성

IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서(SYR)는 제6차 평가주기에 발간된 모든 보고서를 총망라하여 기후변화 과학·적응·완화의 현황 및 대응방안에 대한 종합적인 정보를 제공하고, 향후 각국 정부의 정책적 대응 방향에 대한 핵심적 시사점을 제공해 준다. 종합보고서는 본보고서(LR, Longer Report)와 정책결정자를 위한 요약서(SPM)로 구성되어 있다. IPCC 총회에서 종합보고서 SPM의 경우 문장 단위(line-by-line)로, 본보고서(LR)의 경우 섹션 단위(section-by-section)로 승인이 이루어지는데, 이번 제6차 평가보고서 종합보고서의 모든 내용 역시 2023년 3월 13~19일 스위스 인터라켄에서 개최된 제58차 IPCC 총회에서 모든 정부의 만장일치로 승인되었다. 모든 정부대표단이 각 내용에 대해 합의가 이루어져 만장일치 승인되어야 해당 내용이 보고서에 포함될 수 있다. 이번 종합보고서의 구성은 <표 3-3>과 같다.

<표 3-3> IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서의 구성

구성	주요 내용
(A) 지구온난화 현황 및 추세	• 인간에 의한 기후변화의 관측된 증거 및 요인과 영향, 현재 시행된 적응 및 완화 반응에 대한 평가
(B) 장기 기후변화, 리스크 및 대응	• 미래 사회경제 발전상에 따른 2100년까지의 기후변화에 대한 평가 결과 제시
(C) 단기 대응	• 단기(2040년까지)에 적용가능한 적응과 완화 행동 옵션들에 대한 평가 및 확대 방안 제시

자료: IPCC(2023)의 내용을 바탕으로, 저자 작성

지금까지 살펴본 바와 같이 IPCC에서 발간하는 보고서는 국제적으로는 기후변화 협상에 매우 중요한 투입자료로 활용되며, 국내적으로는 다양한 기후변화의 정책적 결정에 활용되는 매우 중요한 보고서이다. 또한 이러한 보고서의 최종 승인에는 전 세계의 모든 정부의 보고서 내용에 대한 검토 및 승인이 있어야 하는 바, 정부의 역할 역시 매우 중요하다고 할 수 있다.

2. 국가녹색기술연구소 IPCC 제6차 평가보고서 관련 대응 활동

이러한 IPCC 보고서 제6차 평가 프로세스에서 우리나라 기상청이 정부 차원의 대응을 진행하였다. 이 과정에서 국가녹색기술연구소는 다음의 <표 3-4>와 같이 전반적인 정책지원을 수행하였다. 각각의 활동에 대해서 차례대로 알아보도록 하겠다.

<표 3-4> 2023년 상반기, IPCC 정부 대응 정책에 대한 국가녹색기술연구소 참여 활동

구분	정책 지원 활동
보고서 검토	(‘22.11.21~’23.1.15) IPCC 제6차평가보고서 종합보고서 정부검토안(FGD) 검토작업 실시
국내대응 협의회	(‘23.1.12/ 기상청 국제회의실) 제4차 국내 대응 협의회 - 국가녹색기술연구소는 감축부문 내용 및 검토의견 발표
태스크포스 회의	(‘23. 1.9/기상청 국제회의실) IPCC 제6차 종합보고서 대응 태스크포스 - IPCC 제6차 종합보고서 대응 제 2차 TF 회의 참여 및 발표
IPCC 총회	(총회 사전회의) IPCC AR6 종합보고서 SPM 국제 웨비나 2회 참석 (‘22.12.14, 16, 및 21)
	(기상청 주관 우리나라 정부대표단 사전 점검회의) ‘23.3.2일 개최 및 참석
	(총회 본회의) 제58차 총회 정부대표단 참여 (‘23.3.13-19/스위스 인터라켄) - IPCC AR6 종합보고서 검토에 대한 국제회의 참여
보고서 확산활동	(총회 종료 직후) - 국내 기자단 사전 브리핑 기상청 발표 지원 및 질의응답 대응
	(포럼 개최) - (주최) 기상청, 탄소중립녹색성장위원회, 국회기후변화포럼 - (후원) 에너지경제연구원, 국가녹색기술연구소
	- (포럼명) IPCC AR6 종합보고서 승인가념 포럼 - (국가녹색기술연구소 역할) 후원 기관 역할 및 소속기관 본부장 토론 지원
	(종합보고서 국문번역 지원)

자료: 저자 작성

2.1. IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 정부 검토 참여

앞서 살펴본 바와 같이 IPCC에서 발간하는 보고서는 각국 정부의 내용 검토 및 승인을 통해 최종 발간이 이루어진다. 이번에 발간된 제6차 평가보고서 종합보고서 역시 최종적인 보고서 발간에 앞서 전문가뿐만 아니라 정부의 검토 작업이 매우 심층적으로 이루어졌다. 이번 종합보고서의 최종정부안(FGD, final government distribution)에 대한 검토과정은 작년 12월부터 올해 1월까지 진행되었으며, 우리기관은 IPCC 국내대응협의회 제3실무그룹 전문위원회 주관기관으로서 본 정부검토 과정에서 제3실무그룹(감축) 관련 내용에 대한 검토를 리드하며 수행하였다.

동 최종정부안 정부검토는 제3실무그룹 전문위원회에 참여하고 있는 전문가분들의 담당 분야에 맞추어 종합보고서 최종정부안을 검토하는 방식으로 수행되었다. 제3실무그룹 보고서의 장별로 전문위원들의 전문분야가 배정되어 있는데, 우리기관은 제12장 다분야중첩, 제14장 국제협력, 그리고 제16장 혁신 및 과학기술개발이전에 해당하는 부분을 담당하고 있다. 이에 종합보고서를 검토하며 상기 세 분야의 내용이 공정하게 서술되었는지, 최신의 연구결과를 잘 반영하고 있는지, 더 나아가 우리나라 입장에서 부정적으로 서술된 내용은 없는지 세밀하게 살펴보았다.

이렇게 우리기관이 검토한 내용과 다른 전문위원들의 검토 결과를 합쳐 주요 내용을 추출해보면 <표 3-5>와 같다. 이러한 제3실무그룹 전문위원회의 검토결과는 최종적으로 IPCC 사무국에 올해 1월 15일에 제출되었다.

<표 3-5> IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 최종정부안 검토 의견

□ 주요 검토 의견

- IPCC 총회 논의 대상인 AR6 SYR SPM의 내용은 기존의 WGI, WGII, WGIII 각각의 SPM을 토대로 작성되었음. 기존 실무그룹별 SPM 내용과 비교해, 크게 문제될 사항은 없다고 판단. 다만, 기존 SPM에 등장하지 않은 내용/표현, 불충분하게 반영된 내용, 이해하기 쉽지 않은 표현들을 중심으로 검토 의견을 준비
- 도입 (Introduction)
 - SPM의 구성이 A섹션(현황 및 경향), B섹션(장기 기후변화, 위험 및 대응), C섹션(단기 대응)으로 이루어진 바, 각 섹션 별로 중점적으로 다루는 내용에 대해 간단히 개괄적 설명이 필요
 - AR6 보고서의 배경이 되는 파리협정, 지속가능발전목표 등이 각 섹션의 주제들과 어떠한 연관성이 있는 지 반영하는 설명이 필요
- A. 현황 및 경향(Current Status and Trends)
 - (A.4.2: 이행격차) 이행격차가 존재하는 것은 사실이지만, 한국을 비롯한 많은 국가들이 NDC 갱신본을 통해 감축의욕을 상향하고 있다는 점에 대해 인정언급해 줄 필요가 있음. 동 문단 시작에 앞서 “국가들이 NDC 갱신본을 통해 의욕을 향상하고 있지만”이라는 표현을 삽입해줄 것을 제안함. 또한 우리나라 역시 2050 탄소중립 목표를 법제화하였으므로, 넷제로 선언에 대한 내용이 강조되는 것을 지지한다는 점을 밝힘
 - (A.4.4: 기후금융) 투자요건이 부족하다는 내용이 명확하게 이해되지 않는 내용인 바, 이 부분을 “2020~2030년 2°C 혹은 1.5°C 온난화 제한 시나리오 상의 투자요건과 맞지 않다”고 구체화할 것을 제안함
- B. 장기 기후변화, 위험 및 대응(Long-Term Climate Change, Risks, and Responses)
 - (B.5.1: 넷제로) 감축이 어려운 부문의 잔여 배출량 상쇄를 위하여 CDR이 필요하다고 너무 간단히 서술되어 있음. WGIII 보고서에서 주요하게 다룬 세 가지 CDR 방법인 조림재조림(A/R), 바이오에너지탄소포집저장(BECCS), 직접대기탄소포집저장(DACCS)을 예시로 들어줄 것을 제안함
 - (B.6.4: 산림관리) 사회경제환경적 기여가 가능한 감축활동 예시에 재조림(reforestation), 토양탄소격리, 그리고 블루카본관리 외에, ‘산림관리 개선’과 ‘이탄지(peatland) 복원’을 추가할 것을

제안함. 또한, 조림(afforestation) 뒤에 ‘of naturally unforested land’를 추가하여 의미를 명확히 할 것을 제안함

- (B.6.4: **완화전략**) 보다 효율적으로 자원을 활용하고 지속가능발전으로 국제개발을 전회하는 모델 경로가 더 적은 도전과제를 가지고 있는데, 여기에 ‘dependence on CDR’이 포함되어 있음. 여기서, ‘dependence on CDR’을 도전과제로 쓰는 것이 꼭 필요한 지에 대해 의문을 제기함. CDR 활용이 어려울 수는 있지만, 이것이 도전과제의 예시로 표현되기에는 부적절하다고 판단되는 바, 다른 예시를 넣기를 제안함
- (B.7.3: **순-네거티브 배출**) 동 문단은 ‘높은 신뢰도’ 문단임에도, ‘신속하게 넷제로 CO₂ 달성 및 비CO₂ 배출 감축하는 것이 온난화 피크 수준을 제한할 것(would limit)’이라고 다소 모호하게 서술되어 있음. 그러나 동 표현은 더 확실하게 표현해도 되는 내용이라 사료되므로, would 대신 can을 사용하거나 조동사 없이 ‘제한한다(limit)’로 수정하는 것을 제안함

○ C. 단기 대응(Responses in the Near Term)

- (C.1.1: **개발 전환**) 가능조건 이행 시 개발경로의 전환 방향이 ‘지속가능성과 기후탄력적 개발’이라고 표현되었는데, 이를 ‘지속가능성과 더 낮은 배출 및 기후탄력적 개발(towards sustainability and lower emissions and climate resilient development)’로 변경을 제안. 기후탄력성은 적응과 관련되고, 감축과 관련된 ‘저배출’이 포함되어야 한다는 입장에서 제안함. 적응과 기후탄력성 구분 여부 논의 필요
- (C.1.1) 기후변화를 매우 큰 국제 공공재 외부효과로 표현한 데 대해서, ‘부정적 외부효과(negative externality)’로 표현할 것을 제안함
- (C.1.1) Figure SPM.6에서 가능요인에 사회적 및 국제협력(social and international cooperation)을 포함해야 한다고 제안함
- (C.3.3: **시스템 전환-산업**) WGIII SPM에서 CCS가 중요하게 다루어졌으나 CCU 역시 자주 언급되었음. 우리나라는 CCUS를 강조하고 있으므로, 동 문단에 CCU가 반영될 수 있도록 문안 수정을 제안함
- (C.5.4: **형평성-행태변화**) 행태변화의 온실가스 감축 기여 및 기후회복적 개발에 대한 기여가 서술되어 있으나, 본보고서(4.5.6절)의 수치와 Figure SPM.7(a) 등을 활용하여 수요 측면 행태 변화가 완화에 기여하는 중요성, 가능여건 등을 명시적으로 제시할 필요가 있음. 한편, 동 내용이 C.5(형평성)에서 다루어지는 것이 적절한지 의문이며, 그 중요성을 고려할 때 C.2(단기대응 중요성)에서 다루어질 필요가 있음
- (C.7.2: **기후금융**) 금융격차를 해소하기 위해 ‘기후리스크에 대한 저평가(underpricing)’를 전환해야 한다는 표현에 대해서, WGIII SPM에서는 ‘부적절한 평가(inadequate assessment)’라고 표현되어 있었음. 표현 변경 이유를 묻고, 두 개 표현이 모두 들어가야 한다고 제안함. 그 이유는 저평가(underpricing) 여부를 판단하기 위해서는 전환-물리적 기후리스크에 대한 스트레스 테스트 및 영향분석이 완료되어야 하며, 저평가 여부 판단을 위한 근거가 필요하며, 저평가(underpricing) 용어를 쓸 수 있는 곳은 EU와 같은 일부 선진국이고, 한국을 포함한 다수 국가는 부적절(불충분; inadequate) 용어가 적합하기 때문임

- (C.7.5: 국제협력) ‘기후클럽(climate clubs)’이라는 용어가 등장하는데, 동 용어가 WGIII SPM에는 등장하지 않으며, ‘초국가 파트너십 및 부문별 협력/제도/이니셔티브’라는 단어가 활용되었음. 또한, 이 부분에 대해서 부정적 측면 없이 감축 잠재력만 언급. 이에 WGIII에서 활용된 용어의 사용과 균형적인 서술을 제안함. 한편, 금융기술 협력 외에도 원료, 에너지, 자원 등의 협력도 필요함을 언급해줄 것을 제안함

□ 정책적 시사점

- (감축목표 점검) SYR에 의욕격차와 이행격차가 반복적으로 언급되며, 향후 감축 노력의 가속화가 필요함을 강조함
 - 보고서에 담긴 감축 가속화를 가능케 하는 다양한 수단을 참고하여 NDC 목표 및 2050 탄소중립 달성을 위한 이행 강화 필요. 이를 위해 국가 차원의 중단기 배출 경로 설정과 미래 배출 전망 작업을 토대로 주기적으로 국가/부문별 이행격차를 점검하고 감축 가속화 방안 검토
 - 2025년 3월까지 2035년 목표치 NDC 제출 예정이므로, SPM에 제시된 2035년 경로 배출량을 참고하여 진행 필요(1.5°C 경로에서는 2035년까지 2019년 배출량 대비 60%, 2°C 경로에서는 37% 감축이 제시됨)
- (에너지) SYR에서 에너지 시스템의 완화와 적응 옵션이 함께 다뤄짐
 - 에너지 전환을 위한 상세부문별 온실가스 감축 노력뿐만 아니라 지속가능한 에너지 시스템을 위한 기후변화 적응 노력 논의 병행 필요
 - 지속가능한 에너지 전환을 위한 사회적 수용성 제고, 거버넌스·제도 개편, 연구·개발·혁신, 기후-에너지 산업 활성화, 산업성장 동력 확보 등 정책 방향 고려 필요
- (AFOLU) IPCC AR6가 제시한 다양한 흡수제거 활동들과 그 잠재량을 근거로, 흡수 및 제거 활동들이 파리협정 6조 탄소시장 하의 감축활동으로 인정받을 수 있도록 유엔기후변화 협상에서 활용 필요
- (기후금융) 기후금융 격차를 해소하기 위한 방안 중 하나로 기후리스크 저평가(underpricing) 전환이 포함되었음. 국제적으로, EU 내 일부 선진국들은 전환-물리적 기후리스크에 대한 스트레스 테스트 및 영향분석을 완료하였음. 한국의 경우, 전환-물리적 기후리스크에 대한 스트레스 테스트가 한국은행 중심으로 진행 중인 단계이며, 영향분석은 일부 금융지주 외 전무한 상황이라 “저평가” 여부 판단이 어려운 ‘부적절(inadequate)’ 상황으로 판단되고 있는 상황임. 이에, 향후 금융기관을 중심으로 한 기후리스크 평가 활동과 평가 결과를 실제 적용하는 과정이 더욱 중요해 지는 바, 이에 대한 대응 필요
- (기술혁신) AR6에서 기술혁신의 중요성이 매우 강조되고 있음.
 - 특히 기술혁신에 대한 국제협력의 필요성이 언급되고 있는 바, 향후 우리나라의 기후기술에 대한 RD&D, 활용 및 확산과 관련하여, 우리나라 기술의 확산을 위한 기술혁신 국제협력력을 도모할 필요가 있음
 - 또한 기후기술 혁신에는 규제 및 시장기반(인센티브 및 시장기회 형성) 정책도구가 병행되어야 하는 바, 기후기술의 실증·활용을 촉진하기 위한 제도 및 정책들을 적극적으로 검토 및

적용 노력이 필요함

- **(기후 정책 주류화)** 포용적 거버넌스를 통해 리더십, 제도, 법, 전략, 예산, 금융을 기후 적응, 완화, 지속가능한 개발 통합에 활용해야 함
 - NDC 목표 설정만큼 이행의 중요성이 강조되고 있음. 이행 사항을 각 부문별로 모니터링하여 규제나 인센티브 부여를 검토할 필요 있음
- **(국제협력)** 기후 정책은 국제협력 주제의 첨병임. 기존 국가들과의 기술, 금융, 정책 협력과 개발도상국의 개발 협력 확대가 필요함
 - 탄소국경세, ETS 연계, 비무역장벽에 해당하는 정책에 기반한 협력 제도들이 ‘기후클럽’이라는 단어 하에서 긍정적으로만 서술되고 있음. 우리나라는 탄소국경세 등 이러한 상향식(bottom-up) 접근법에 대해서 산업계의 대응이 쉽지 않으므로 IPCC 논의에 조심스럽게 접근 필요
- **(지속가능발전)** 본 보고서는 기후변화 대응과 지속가능발전 간 연계의 중요성을 단기 및 장기적 관점에서 모두 강조하고 있음
 - 우리나라의 NDC 및 탄소중립 관련 계획도 감축목표와 지속가능발전을 보다 통합적인 관점에서 고려하여 국제적인 동향에 발맞출 필요 있음
 - 특히, AR6 전반에 걸쳐, 통합적 정책 및 완화·적응·지속가능발전의 시너지 효과와 중요성이 강조됨에 따라, 다수의 목표를 동시에 고려할 수 있는 기후변화 정책 패키지화 고려해 볼 필요 있음
 - 이러한 과정에서 형평성이 충분히 고려되고 보장되고 있는지, 공정성, 분배적 함의 등에 대한 정책적·사회적 고려가 필요함

자료: 저자 작성

2.2. 기상청 주관 IPCC 국내대응협의회 참여

IPCC에 대한 우리나라의 전담부처는 기상청이다. 기상청은 원래 IPCC 보고서에 대한 이해 확산과 정부 차원의 체계적 대응을 위해, 2016년 비상설 조직인 ‘IPCC 대응을 위한 국내 전문가 포럼’을 운영한 바 있다. 그런데, 시범 운영 결과, 실무그룹 보고서 관련 현안에 대한 실질적인 대응에 대한 필요성이 대두되었고, 이에 2017년 실무그룹 보고서별로 전문가로 구성된 ‘분과위원회’를 설립하여, 기존의 국내 전문가 포럼을 확대 개편하였다. 동 분과위원회에는 실무그룹 별로 간사기관이 설정되었는데, 제1실무그룹 전문가 분과위원회는 국립기상과학원(기후연구과), 제12실무그룹 전문가 분과위원회는 현재의 환경연구원인 한국환경정책평가연구원(국가기후변화적응센터), 제3실무그룹 전문가 분과위원회는 에너지경제연구원(기후변화연구실)과 당시 명칭이 녹색기술센터였던 우리기관(정책연구부)이 지정되었다.

이러한 확대개편에도 불구하고 이러한 ‘전문가 포럼’이 비상설 조직이었기 때문에 IPCC 현안 대응에 어려움이 있었다. 이에, IPCC 보고서에 대한 우리나라 정부 차원의 보다 체계적인 검토와 대응의 필요성을 절감하고, 제6차 평가보고서 검토 기간에 맞추어 우리나라 기상청은

2020년 5월 ‘IPCC 국내 대응 협의회’를 구성하였다(기상청, 2023a). 따라서 이 협의회를 통해, 보고서 검토와 관련된 현안에 대해 전문가 및 관계부처 협의를 통해 신속하고 체계적으로 대응하고, IPCC 보고서 작성에 참여하는 한국인 저자 지원 등이 이루어지게 되었다.

IPCC 국내 대응 협의회의 구성을 살펴보면, 동 협의회는 기상청 기후과학국장을 위원장으로 하고, 정부 14개 부처의 기후변화 업무를 담당하는 유관부서의 장을 위원으로하여 <표 3-6>과 같이 구성된다. 과학기술정보통신부의 경우 원천기술과장이 위원으로 참여하고 있다(기후업무규정, 2022, 제34조).

<표 3-6> IPCC 국내대응협의회의 구성

구분	부/처/청	담당 부서장	
위원장	기상청	기후과학국장	
위원	국무조정실	2050탄소중립·녹색성장위원회 기획총괄국장	
	기획재정부	녹색기후기획과장	
	과학기술정보통신부	원천기술과장	
	외교부	기후변화외교과장	
	행정안전부	재난영향분석과장	
	농림축산식품부	농촌재생에너지팀장	
	산업통상자원부	온실가스감축팀장	
	환경부		기후변화국제협력팀장
			신기후체제대응팀장
	국토교통부	미래전략일자리담당관	
	해양수산부	해양환경정책과장	
	농촌진흥청	연구운영과장	
	질병관리청	미래질병대비과장	
	산림청	국제협력담당관	
	기상청		기후정책과장
			기후변화감시과장
총 1개 실, 9개 부, 4개 청 소속의 16개 부서의 장으로 구성			

자료: 기후업무규정(2022) 제34조를 바탕으로 저자 작성

또한, 정부 위원으로 구성된 협의회의 결정을 지원하기 위해, IPCC 보고서 세 개 실무그룹별로 각기 담당하는 전문가 그룹인 제1실무그룹 전문위원회, 제2실무그룹 전문위원회, 제3실무그룹 전문위원회가 <표 3-7>과 같이 구성되었다. 전문위원회는 총 약 70명의 전문가로 구성되어 있으며, IPCC 보고서의 검토, 보고서 수정의견 작성 및 제출, 한국 기후변화 평가보고서²⁾ 집필 및 검토 등을 담당하여, 정부 부처 관계자들로 구성된 협의회를 지원하는

2) 우리나라는 매 5년마다 수립되고 있는 국가 기후변화 적응대책 등의 국가 정책을 지원하기 위해 IPCC 평가보고서 등을 바탕으로 한반도와 관련된 기후변화 연구결과를 집대성해 2010년부터 약 5년 간격으로 ‘한국 기후변화 평가보고서’를 발간하고 있다. 지금까지 2010, 2014, 2020년에 각각 발간되어 총 3번 발간되었다.

것을 목적으로 한다 (기후업무규정, 2022, 제37~39조).

<표 3-7> IPCC 국내대응협의회 전문위원회 주관기관 및 담당부서

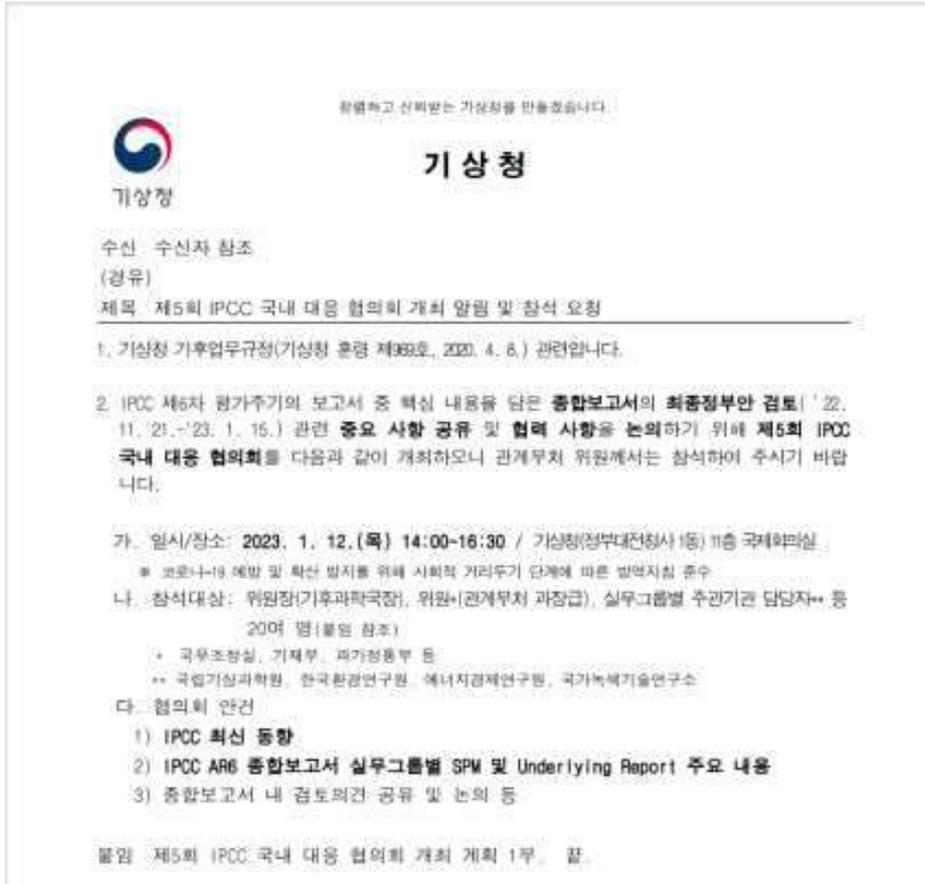
전문위원회	주관기관	담당부서
제1실무그룹(WGI) 전문위원회	국립기상과학원	기후연구과
제2실무그룹(WGII) 전문위원회	한국환경연구원	국가기후변화적응센터
제3실무그룹(WGIII) 전문위원회	국가녹색기술연구소	글로벌사업화센터
	에너지경제연구원	기후변화정책연구팀

자료: 기후업무규정(2022) 제39조를 바탕으로 저자 작성

IPCC 국내대응협의회는 약 연 2회 이상 운영되며, IPCC 보고서 작성을 위한 전문가 추천, 보고서 초안에 대한 검토, 국내 정책적 대응 방향 논의, 보고서 내용에 대한 핵심 내용 홍보 등의 활동을 수행한다. 이때 주의해야 할 사항으로는 IPCC 국내대응협의회는 IPCC 보고서 작성에 참여하는 저자들의 활동에 직접 관여해서는 안 된다는 점이다. IPCC 보고서의 공정성 및 투명성 등을 이유로, IPCC 보고서 저자들에게 정부가 작성 방향에 대한 조언을 제시하는 것을 IPCC가 엄격히 금지하고 있기 때문이다.

올해에는 동 IPCC 제6차평가보고서에 대한 정부검토 작업이 있었으며, 검토 결과를 공유하고 IPCC 보고서 검토의견 제출 및 총회 대응 방향을 논의하는 제4차 국내대응협의회가 올해 1월 12일에 대전에 있는 기상청 국제회의실에서 개최되었다. 이번 회의는 IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 최종정부안의 검토의견을 IPCC 사무국에 제출하기 전에, 보고서 및 검토의견에 대한 각 부처의 입장을 확인하고 최종적으로 조율하는 데에 목적을 두었다. 동 회의는 앞서 <표 3-6>에서 살펴본 부처의 담당 부서장 및 사무관이 참여하였으며, 기후정책국장이 의장으로서 전체 회의를 총괄하며 진행되었다.

우리기관은 [그림 3-2]와 같이 기상청의 요청에 따라 동 회의에 제3실무그룹 전문위원회 차원에서의 검토 결과를 공유하고, 관련 부처의 질문 및 요청사항 중 제3실무그룹(완화) 관련 사항에 대응하기 위하여 참여하였다. 실무그룹별 검토 결과에 더해 부처 자체적인 보고서 검토 결과가 동 회의에서 공유되었으며, 각 검토의견에 대하여 부처별로 보완할 사항에 대해 많은 논의가 오갔으며, 이러한 과정을 통해 우리나라의 공식적인 검토의견이 최종적으로 도출되었다. 이러한 회의의 모습은 [그림 3-3]과 같다.



[그림 3-2] IPCC 국내대응협의회 참석 요청 공문



[그림 3-3] IPCC 국내대응협의회 회의 모습

2.3. 기상청 주관 종합보고서 대응 TF 참여

바로 앞 섹션에서 살펴본 바와 같이, 우리기관은 IPCC 국내대응협의회 제3실무그룹 전문위원회 주관기관으로서 제3실무그룹(완화) 입장에서 종합보고서를 검토하였다. 그러나 종합보고서는 기후변화 완화 관련 내용만 있는 것이 아니라 제1실무그룹(과학적 근거)과 제2실무그룹(기후변화 적응·영향·취약성) 관련 내용이 포괄적으로 정리되어 있기 때문에 다른 실무그룹 입장에서의 검토 결과를 함께 고려할 필요가 있다.

우리나라 IPCC 국내대응협의회 하에서 제1실무그룹 전문위원회는 국립기상과학원이, 제2실무그룹 전문위원회는 환경연구원이 주관기관으로 역할을 하고 있다. 이에 주관기관들이 함께 모여 각 실무그룹의 IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 검토 결과를 공유하고 최종적으로 검토 의견을 조율하기 위한 ‘종합보고서 대응 TF’ 회의가 올해 1월 9일 대전에 위치한 기상청 국제회의실에서 개최되었다. 동 회의에서는 실무그룹별 검토의견을 발표하는 시간을 가졌으며, 우리기관은 제3실무그룹을 대표하여 제3실무그룹 차원의 검토의견을 정리하여 발표하였다. 이후 각 실무그룹에서 제기된 IPCC 보고서 수정요청사항 하나하나에 대하여 검토하며 우리나라가 관련 사항에 대하여 최종적으로 의견을 제출할지 결정하였다. 또한, 정부 관계자들을 대상으로 보고서 검토의견을 공유하는 ‘국내대응협의회’ 회의를 준비하는 시간을 가졌다.

2.4. 제58차 IPCC 총회에 정부대표단으로 참여

IPCC 국내대응협의회 제3실무그룹 전문위원회 주관기관으로서 제3실무그룹(완화) 관련 내용에 대하여 과기부 및 기상청의 검토 과정을 지원하여 도출한 IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 ‘최종정부안’의 정부검토 의견은 기상청을 통해 IPCC 사무국에 올해 1월 15일에 제출되었다. IPCC는 각국 정부에서 접수된 검토의견을 최종적으로 검토하여 약 두 달간 내부적으로 보고서 수정 절차를 수행하여 동 보고서의 최종 승인 과정이 있는 제58차 IPCC 총회 직전에 ‘총회안(floor draft)’을 도출하였다. 이렇게 도출된 총회안은 IPCC 총회에서 문장 단위(line by line, SPM의 경우) 혹은 섹션 단위(section by section, 본보고서의 경우)로 모든 정부대표단이 함께 검토하여 최종적으로 표현을 수정하고 승인하였다.

우리기관은 제3실무그룹 전문위원회 주관기관으로서 이러한 보고서의 최종 수정 및 문안 수정 과정을 지원하기 위하여 3월 13~19일 스위스 인터라켄에서 개최된 제58차 IPCC 총회에 정부대표단으로 참여하였다. IPCC 총회 참여활동은 크게 사전회의 참석, 총회 본회의 참석, 그리고 총회 종료 직후 국내 기자단 사전 브리핑 회의를 포함한 국내 확산 활동으로 구분된다. 이를 차례대로 정리해 보고자 한다.

2.4.1 IPCC 총회 사전회의(웨비나) 참석

IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 검토 차원에서 보고서의 작성 방향 및 편집 의도에 대하여 검토위원들에게 설명하기 위한 비공식 웨비나가 2022년 12월 14일, 16일, 21일(한국시간 기준) 3일에 걸쳐 온라인으로 진행되었다. 동 웨비나를 통하여 이번 보고서에서 다루는 시나리오 및 경로를 비롯하여 실무그룹별로 서술 방법이 상이한 부분들을 어떻게 통합할 것인지 결정된 사항에 대하여 저자들이 검토위원들에게 설명하였다. 또한 SPM에 들어가는 그림의 편집 의도에 대해 디자이너의 설명 또한 있었다. 아울러 보고서 SPM 전반에 걸친 질의응답이 있어 검토 과정에서 생긴 의문에 대해 저자와 논의하는 시간을 가졌다.

2.4.2 IPCC 정부대표단 사전점검회의

IPCC 총회를 위하여 스위스로 출국하기 일주일 정도 앞둔 3월 2일에 이번 제58차 IPCC 총회에 참여하는 우리나라 정부대표단이 함께 모여 총회 대응을 위한 사전대응회의를 진행하였다. 이번 제6차 평가보고서는 이전 평가보고서와 달리 실무그룹별로 섹션이 구성되지 않고 모든 실무그룹의 내용이 통합적으로 구분되기 때문에, 동일한 섹션 내에 다양한 실무그룹의 내용이 섞여 있어 서로 다른 실무그룹의 내용 역시 잘 알 필요가 있기 때문에 다시 한 번 보고서 전체의 내용을 각 실무그룹 전문위원회 주관기관에서 발표하며 보고서 전체 내용을 다시 살펴 보았다. 우리기관 역시 제3실무그룹 내용에 대하여 [그림 3-4]와 같은 발표자료를 준비하여 발표하였고, 이를 통해 정부대표단에 참여하는 정부 관계자 및 전문위원들에게 관련 내용을 공유하였다.



[그림 3-4] IPCC 정부대표단 사전점검회의 발표자료 내용

출처: 저자 작성

또한 보고서 내용이 방대하기 때문에 종합보고서의 하위섹션 단위로 담당기관을 선정하였다. 전체적으로 제1실무그룹(과학적 근거) 관련 내용은 국립기상과학원, APEC 기후센터 및 기상

청에서 주도적으로 담당하였으며, 제2실무그룹(기후변화 적응·위험·취약성) 관련 내용은 환경연구원과 환경공단이 주로 담당하였다. 마지막으로 제3실무그룹(기후변화 완화) 관련 내용은 제3실무그룹 전문위원회 주관기관인 우리기관과 에너지경제연구원이 주도적으로 담당하였다. 특히 우리기관은 섹션 C.4(지속가능발전과의 시너지 및 상쇄효과), C.6(거버넌스 및 정책), C.7(금융, 기술, 국제협력) 부분의 주 담당기관으로 참여하였으며, 총회안(floor draft)에서 새로 추가된 Box SPM.1(시나리오 및 모델링된 경로의 활용) 역시 우리 기관이 메인으로 담당하기로 하였다. 이외에도 B.5(잔여 탄소배출허용량)과 B.6(배출경로) 부분의 검토를 보조하며 지원하기로 하였다. 이러한 사항을 표로 정리하면 다음 <표 3-8>과 같이 정리할 수 있다.

<표 3-8> IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 승인을 위한 담당기관별 의제 분장

SPM 섹션	섹션명	담당기관(정, 부)
A. Current Status and Trends	A.1 Observed Warming and its Causes	기상청
	A.2 Observed Changes and Impacts	환경부, 해수부
	A.3 Current Progress in Adaptation and Gaps and Challenges	환경부
	Box SPM.1 The use of scenarios and modelled pathways in the AR6 Synthesis Report	과기부(NIGT)
	A.4 Current Mitigation Progress, Gaps and Challenges	환경부, 산업부
B. Future Climate Change, Risks, and Long-Term Responses	B.1 Future Climate Change	기상청, 해수부
	B.2 Climate Change Impacts and Climate-Related Risks	환경부, 해수부
	B.3 Likelihood and Risks of Unavoidable, Irreversible or Abrupt Changes	해수부
	B.4 Adaptation Options and their Limits in a Warmer World	환경부
	B.5 Carbon Budgets and Net Zero Emissions	산업부, 과기부(NIGT)
	B.6 Mitigation Pathways	산업부, 과기부(NIGT)
	B.7 Overshoot: Exceeding a Warming Level and Returning	기상청, 환경부
C. Responses in the Near Term	C.1 Urgency of Near-Term Integrated Climate Action	환경부
	C.2 The Benefits of Near-Term Action	환경부
	C.3 Mitigation and Adaptation Options across Systems	기상청, 환경부
	C.4 Synergies and Trade-Offs with Sustainable Development	과기부(NIGT)
	C.5 Equity and Inclusion	기상청, 환경부
	C.6 Governance and Policies	과기부(NIGT)
	C.7 Finance, Technology and International Cooperation	과기부(NIGT)

자료: 제58차 IPCC 총회 정부대표단 사전점검회의 결과를 바탕으로 저자 정리

2.4.3 제58차 IPCC 총회 정부대표단 참여

제58차 IPCC 총회는 3.13.(월)에 개최하여 예정보다 이틀 늦어진 3.19.(일)에 폐회하였다. 동 회의를 통해 이번 제6차 평가보고서 기간의 마지막 보고서이자 동 평가기간 동안의 모든 보고서를 종합한 ‘제6차 평가보고서(AR6) 종합보고서’를 모든 정부의 만장일치로 승인하였다. 이번 총회에는 보고서 검토라는 매우 중요한 의제가 있기 때문에 195개국 650여 명의 대표단이 참가하였다. 제3실무그룹 공동주관기관인 우리기관은 기상청, 외교부, 환경부, 국립기상과학원(제1실무그룹 주관기관), 한국환경연구원(제2실무그룹 주관기관), 에너지경제연구원(제3실무그룹 공동주관기관), 국립수산과학원, 극지연구소, 한국환경공단, 아시아태평양경제협력체(APEC) 기후센터 등 관계부처와 전문기관으로 구성된 대표단이 참여하였다. 3월 13일에 시작되는 제58차 총회에 참석하기 위하여 우리기관은 3월 12일 새벽에 출국하여 도하를 거쳐 총회가 개최되는 스위스에 도착하였다. 도착 바로 다음 날부터 총회에 참여하였으며, 매일 아침 총회 개최 전에는 우리나라 정부대표단의 준비 회의에 참여하여 그날의 의제를 다시 점검하고 대응 방향에 대해 심도깊은 논의를 진행하였다. IPCC 총회의 특성 상 짧은 시간 안에 방대한 보고서의 모든 내용을 검토해야 하기 때문에 총회 넷째 날부터는 새벽 및 심야회의가, 원래의 예정된 종료일자를 초과한 여섯째 날부터는 철야회의가 진행되었다. 총회의 주요 일정을 정리해보면 <표 3-9>와 같다.

<표 3-9> 제58차 IPCC 총회 출장 주요 일정

날짜	시간	내용	비고
3.12(일)	00:25-05:15	인천 → 도하 항공 이동	QR 859
	08:50-13:25	도하 → 취리히 항공 이동	QR 95
	14:45-16:58	취리히 공항역 → 인터라켄 동역 철도 이동	IC 81
3.13(월) - 3.19(일)	8:30-9:30	대표단 오전 회의 진행	Hotel Artos
	(3.13-3.15) 10:00-22:30	<과기부 담당 의제 회의 참여> - Box 1. The use of scenarios and modelled pathways in the AR6 Synthesis Report - B.5 Remaining carbon budgets and net zero emissions* - B.6 Emissions pathways* - C.5 Equity and Inclusion - C.6 Governance and Policies - C.7 Finance, Technology and International Cooperation * 산업부 주 담당 의제로, 과기부는 부 담당	Congress Kursaal
	(3.16-3.17) 06:00-02:00(+1)		
	(3.18-3.19) 06:00-19:30(+1) (철야회의)		
	<WGIII 주관기관 역할 수행> - 기타 WGIII 주제에 대하여 주관기관으로 우리나라 의견수립 및 발언 지원		

날짜	시간	내용	비고
3.20(월)	09:00-13:00	국내 기자단 언론브리핑	Hotel Artos
3.21(화) - 3.22(수)	10:00-12:14	인터라켄 동역 → 취리히 공항역 철도 이동	ICE, IC 8
	15:55-23:45	취리히 → 도하 항공 이동	QR 96
	02:15(+1)-16:55(+1)	도하 → 인천 항공 이동	QR 858

자료: 저자 작성

총회는 보고서 내용의 SPM의 문장 단위(line-by-line) 승인 및 본보고서의 섹션 단위(section-by-section) 승인이 이루어지는 본회의(Plenary)와 보고서 문장별 세부 내용에 대한 토의 및 문안 조정이 이루어지는 컨택그룹(Contact Group) 회의가 병렬적으로 진행되었다. 우리나라 정부대표단은 앞서 살펴본 <표 3-8>과 같은 정부부처 및 전문기관별 업무분장에 따라 담당 내용이 진행되는 본회의 및 컨택그룹에 [그림 3-5]와 같이 참여하였다. 우리기관은 과학기술정보통신부 담당 의제에 참여하며 우리나라 정부의 의견을 개진하고, 문안 합의 및 승인 과정에 참여하였다. 담당 의제에 대해 회의에서 논의한 내용을 정리해보면 <표 3-10>과 같이 정리해볼 수 있다.



[그림 3-5] 제58차 IPCC 총회 대한민국 정부대표단 논의 및 발언 사진

〈표 3-10〉 제58차 IPCC 총회에서 국가녹색기술연구소 담당 의제에 대한 상세 논의사항

1. Box SPM.1 The use of scenarios and modelled pathways in the AR6 Synthesis Report

- (개요) 시나리오 및 경로의 정의와 차이점에 대해서 Box 형태로 다루는 것이 필요하다는 국가들의 강력한 요청에 따라, 해당 내용이 Box로 삽입되었음. 그러나 동 Box 내에 얼마나 많은 정보를 제공할 것인지, 제공하는 정보의 표현 방법을 어떻게 할 것인지에 대해 국가 간 이견이 있었으며, 많은 논의를 통해 최종 합의를 도출하였음
- (주요 쟁점) 동 Box에 대하여 △시나리오/경로 표현, △시나리오/경로 가정시 미고려 사항, △최저비용 저감 옵션(least cost abatement option) 표현 방법, △활용된 경로 개수 포함 여부, 지구온난화 수준(GWL, global warming level) 포함 여부 등에 대하여 쟁점이 있었음
 - (시나리오/경로 표현) 인도와 사우디는 시나리오 및 경로 모두 '모델링된 (modelled)'이라는 수식어를 붙이고자 하였으나, 저자는 WG1에서 시나리오와 모델이 별도로 의미로 별개로 사용된다고 언급. 최종적으로 경로에 대해서만 해당 수식어가 삽입됨
 - (시나리오/경로 가정시 미고려 사항) 시나리오 및 경로 설정시 활용된 가정 (assumptions)에 활용된 요소들에 대해, 개도국(인도, 사우디)은 형평성 및 분배 등이 고려되지 않았다는 내용이 각주가 아닌 본문에 명시적으로 표현되기를 주장하고, 선진국(독일, 캐나다, 뉴질랜드 등)은 고려되지 않은 다른 요소들을 더 삽입하고자 하였으나, 최종적으로 개도국 입장으로 합의됨
 - (최저비용 저감 옵션 표현 방법) 저감(abatement) 표현에 대해 저자가 더 일반적인 표현인 완화(mitigation)를 활용할 것을 제안하고, 사우디는 WGIII SPM에서 사용된 abatement를 사용해야 한다고 주장하였고, 독일은 저자의 의견을 지지. 최종적으로 '완화/저감 (mitigation/abatement)'을 모두 서술하는 것으로 합의됨
 - (활용된 경로 개수 포함 여부) 인도는 WGIII에 제출된 총 2,425개 경로 중에서 1,202개만이 채택되었다는 사실이 언급되어야 하며, 또한 표에 각 배출경로 범주별로 분류된 경로 개수가 명시되어야 한다고 주장함. 그러나, 많은 국가들은 불필요한 정보라며 반대하였음. 최종적으로는 '더 많은 경로들이 평가되었으며, 그 중 1,202개 경로가 온난화 수준에 따라 분류되었음'이라는 표현으로 본문을 수정하되, 표에는 경로 개수를 추가하지 않는 것으로 합의됨
 - (지구온난화 수준 포함 여부) 캐나다가 GWL 내용의 필요성을 주장하고, 저자가 WG1 보고서 표현을 활용해 제시한 문안으로 합의됨

2. C.4 Synergies and Trade-Offs with Sustainable Development

- (개요) 기후변화 대응을 위하여 가속화되고 형평성 있는 완화 및 적응 행동이 지속가능 발전의 핵심임을 다루는 섹션으로, 각국이 처한 다양한 상황을 고려한 완화 및 적응 노력을 통해 각국의 지속가능 발전을 촉진할 수 있다는 내용을 담고 있음. 그러나 동 내용이 개도국이 처한 현실을 간과하거나 각국의 발전 정책에 개입적일 수 있다는 우려가 있어 많은 논의 끝에 합의에 도달하였음
- (주요 쟁점) 동 섹션 전체적으로, 각국이 처한 다양한 상황(different context)에 대해 개도국을 중심으로 예시 추가, 표현 수정 요구가 강하게 제기되며 합의에 도달하기까지 많은 시간이 소요됨. 또한 지속가능 발전을 강조하는 것이 각국 발전 정책에 개입적일 수

있다는 우려로 인해 일부 표현(“시너지가 상충효과보다 더 많다” 등) 역시 많은 논의를 거쳤음

- (감축) 발전(개발) 상황 상의 감축 노력이 배출저감의 속도·수준·범위를 증대시킬 수 있다는 내용에 대해, 개도국(인도, 중국)은 동 문장이 삭제되어야 한다고 주장하였으나, 선진국(미국, 덴마크)은 좋은 시작점이 되는 문장이라고 유지되어야 한다고 주장하여 기존문장 유지로 합의됨
- (다양한 상황) 다양한 상황 요소 중 국제적 환경(international environment)에 대해 개도국(인도, 에콰도르, 중국, 브라질 등)은 재정/기술/역량배양을 포함한 이행수단에 대한 접근 내용 추가를 요청하였으나, 선진국(미국)이 반대하였고, 저자들 역시 해당 내용은 다른 섹션에서 다루고 있음을 밝히며 수용 어려움을 밝힘. 역사(history)에 대해 개도국(중국, 브라질, 볼리비아, 인도)은 역사적 배출량 또는 역사적 책임, 잔여배출허용량으로 변경을 주장하고, 선진국(미국, 독일, 호주)은 반대하였으며, 한국은 역사적 다양성(historical divergence)으로 절충을 주장하였으나, 최종적으로는 저자들의 제안에 따라 '기존 개발(prior development)'로 수정하는 것으로 합의되었음
- (공정전환) 화석연료 고의존 국가의 경우 '공정전환' 정책이 필요하다는 내용에 대하여, 선진국(룩셈부르크, 미국, 스위스, 에스토니아)은 '공정전환 원칙(just transition principles)을 적용한다'로 수정을 요구하였으나, 개도국(사우디, 인도)이 반대함. 일부 개도국(인도)은 공정전환에 산업개발을 위한 에너지 접근을 함께 언급한 것을 주장하였으나, 저자는 용어집 상의 공정전환 정의에 포함된 바 본문 추가를 미수용함. 최종적으로는 '공정전환 원칙'으로 서술하되, 공정전환을 복수형(just transitions)으로 표현하여 이를 강조하는 것으로 합의되었음
- (시너지와 상충효과의 비교) 완화적응 행동과 지속가능발전목표 간의 시너지가 상충효과보다 크다는 내용이 기반보고서(underlying reports)에서 근거를 찾기 어렵다는 의견이 다수(일본, 사우디, 인도, 프랑스, 덴마크) 제기되었으며, 특히 개도국(사우디, 인도, 중국)은 동 문장의 근거 부족을 주장하며 삭제를 요청함. 그러나 저자의 설명 후 일부 표현을 수정하는 것으로 합의되었음
- (상충효과 최소화 방안) 상충효과 최소화 방안에 포함된 요소들에 대해 개도국은 기후정의(멕시코, 칠레), 지식공유(필리핀), 가구(households) 배출량(니카라과) 등이 다뤄져야 한다고 주장하였으나, 최종적으로 요소들 간의 나열 순서만 바뀌고 거의 원안대로 합의되었음
- (상충효과 고려) 일부 개도국(인도)은 국가 발전 맥락에 따라 상충효과 대응 외에도 다양한 발전 우선순위(산업 발전, 에너지 접근 등)가 고려되어야 한다는 의견이 있었으나 저자의 의도 설명 후 수정 없이 수용하였음

3. C.6 Governance and Policies

- (개요) 효과적인 기후 행동은 정치적 공약, 다층 거버넌스, 제도, 법, 정책 및 전략, 재정·기술에의 접근으로 가능해진다는 내용이 다루어지는 섹션으로, 일부 정책(화석연료 보조금 등)에 대한 내용 외에는 전반적으로 국가 간 큰 이견 없이 합의에 도달하였음
- (주요 쟁점) 전반적으로 큰 이견은 없었으나, △국제 및 국가 수준 거버넌스의 표현 방법, △기후제도의 다양한 수준, △화석연료 보조금과 관련하여 일부 쟁점이 있었음
 - (국제 및 국가 수준) 효과적인 기후 거버넌스의 기능에 대해, 중국과 인도는 국제협력의 맥락 안에서(in the context of cooperation) 거버넌스가 효과적이라는 표현이 추가되길 원하였으나, 사우디는 국가 상황(national circumstances)에 달려있다는 내용과 충돌한다는 점에서, 미국은 근거가 정확

하지 않다는 점에서 추가를 반대하였음. 최종적으로 국제협력과 국가 상황이 모두 강조되도록 문장 재구성 후 합의에 이룸

- (기후제도의 다양한 수준) 다양한 수준(지역, 지방, 국가, 하위국가)의 기후제도에 대하여, 사우디는 ‘국가’ 수준의 제도만 명시되길 원하였으나, 많은 국가(핀란드, 미국, 세인트키츠네비스)는 지역·도시 수준의 제도가 중요하다며 반대하였음. 최종적으로 원안대로 제도의 다양한 수준이 모두 포함됨
- (화석연료 보조금) 사우디는 보조금 제거의 효과로 배출저감 수치가 구체적으로 제공되는 문장에 대해, 특정 정책만 강조하는(overly focused) 것은 적절하지 않으므로 삭제를 요청했으나, 도서국 및 선진국 (세인트키츠네비스, 네덜란드, 핀란드, 스위스, 스웨덴, 일본)을 중심으로 반대하였음. 최종적으로 정량적 수치는 각주로만 표현되는 것으로 합의에 이룸

4. C.7 Finance, Technology and International Cooperation

- (개요) 재정, 기술 및 국제 협력이 가속화된 기후 행동의 핵심 가능여건이라는 내용에 대하여 다루는 섹션으로, 다양한 분야에서 일어나는 실질적인 국가 간의 협력에 대한 내용을 다루는 만큼 많은 쟁점이 있었음
- (주요 쟁점) 동 섹션 전반적으로 △미래의 재정 원천, △투자요건 전망, △개도국의 재정 격차, △시장 기반 정책 수단, △재정과 기후 행동의 연계, △개도국 명시, △마지막 문장의 표현 등에서 다양한 쟁점이 있었음. 많은 부분은 저자의 확인 및 설득을 통해 원안대로 승인되었으나, 일부 표현이 수정되어 합의되었음
 - (미래의 재정 원천) 공공재정이 완화/적응의 주요 가능요건이라는 표현에 대하여, 선진국(독일, 미국, 벨기에)은 공공재정만 강조되는 것에 부정적이었고 또한 이는 과거 및 현재까지의 현상 분석 일뿐 미래 전망이 아니라는 것을 명확히 표현하고자 하였으나 개도국(브라질, 케냐, 인도, 중국)이 반대함. 저자의 제안으로 공공재정이 민간재정을 확대(leverage)할 수 있다는 내용이 추가되는 것으로 합의됨
 - (투자요건 전망) 완화 부문의 투자가 현재 수준보다 3~6배 더 필요하다는 내용에 대하여, 일부 개도국(인도)은 이 분석이 ‘지역적 가정(regional assumptions)’에 의한 분석 결과라는 점이 명시되길 원하였음. 저자는 사용된 가정이 지역적 가정만 있는 것은 아니므로 ‘지역적’이라는 표현 명시 없이 ‘시나리오 가정’을 기반으로 한다는 내용을 각주에 추가하는 것을 제안하였고 합의됨
 - (개도국의 재정 격차) 개도국에 재정격차가 가장 크다는 내용에 대하여, 개도국(인도, 브라질)은 동 표현이 유지되길 원하였으나 선진국(미국, 프랑스, 스위스)은 WGIII에서 승인된 표현인 재정격차 ‘해소의 장애요인(challenges of closing gaps)’이 가장 크다는 표현으로 수정되어야 함을 주장하였음. 선진국의 주장대로 WGIII의 표현이 그대로 활용되는 것으로 합의되었음
 - (시장 기반 정책수단) 규제·시장 정책수단이 기술훈련 및 R&D를 지원할 수 있다는 내용에 대하여, 개도국(사우디, 볼리비아)은 시장 기반 정책수단의 삭제를 요청하였으나, WGIII 보고서를 근거로 해당 내용이 필요하다는 저자 설명을 수용하며 원안대로 합의되었음
 - (재정과 기후행동의 연계) 선진국(독일, 룩셈부르크)은 재정협력에 대하여 ‘재정과 의욕적인 기후행동의 연계’가 명시되어야 함을 주장하였고, 일부 표현을 수정(aligning finance flows for climate action to be consistent with ambition levels)하여 합의되었음
 - (개도국 명시) 개도국은 취약지역과 함께 개도국이 언급되어야 하고(중국, 인도, 브라질), 재정흐름이 ‘개도국으로의 재정흐름’이라고 명시되어야 한다고 하였으나(인도, 볼리비아), 선진국(독일, 미국,

스위스, 노르웨이, 호주, 일본 등이 반대함. 최종적으로 개도국을 취약지역과 함께 언급하되, ‘개도국으로의 재정흐름’으로 수정하지는 않는 것으로 합의되었음

- (마지막 문장의 표현) 제일 마지막 문장은 다양한 형태의 국제협력에는 효과와 불확실성이 모두 존재한다는 표현으로, 쟁점보다도 SPM 제일 마지막 문장이 불확실성에 대한 서술보다는 긍정적인 메시지로 마무리되면 좋겠다는 국가들(우크라이나, 뉴질랜드 등)의 요청에 따라 국제협력의 긍정적 효과가 나중에 언급되는 것으로 문장이 재구성되어 합의되었음

자료: 저자 정리

2.5 제58차 IPCC 총회 결과 확산

제58차 IPCC 총회가 종료된 바로 다음 날, 기상청 및 환경부 출입 기자단을 대상으로 회의장소인 스위스 인터라켄 현지에서 화상으로 [그림 3-6]과 같이 언론브리핑을 진행하였다. 기상청 기후과학국 이미션 국장의 보고서 내용 발표 후, 기자 질의응답 때 제3실무그룹 관련 내용을 우리기관에서 담당하여 답변하였다. 또한 IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서의 주요내용을 정리하여 보도자료 작성 및 배포에도 참여하였다 (기상청, 2023b).



[그림 3-6] 제58차 IPCC 총회 결과에 대한 국내기자단 언론브리핑(화상회의)

본 총회의 중요성으로 인해, 특히 코로나 팬데믹으로 예정보다 보고서 발간이 2년여 늦어지며 보고서의 내용을 전 세계적으로 기다려왔기 때문에 언론에서도 많은 관심을 기울였다. 특히 3월 25일에는 생방송으로 진행된 YTN 방송의 ‘뉴스와이드’에 우리기관의 오채운 책임연구원이 [그림 3-7]과 같이 대담자로 참여하여 제58차 IPCC 총회의 내용과 이를 통해 승인되어 최종적으로 도출된 IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서의 주요내용 및 시사점에 대하여 설명하

였다.



[그림 3-7] 제58차 IPCC 총회 결과에 대한 YTN 뉴스와이드 대담

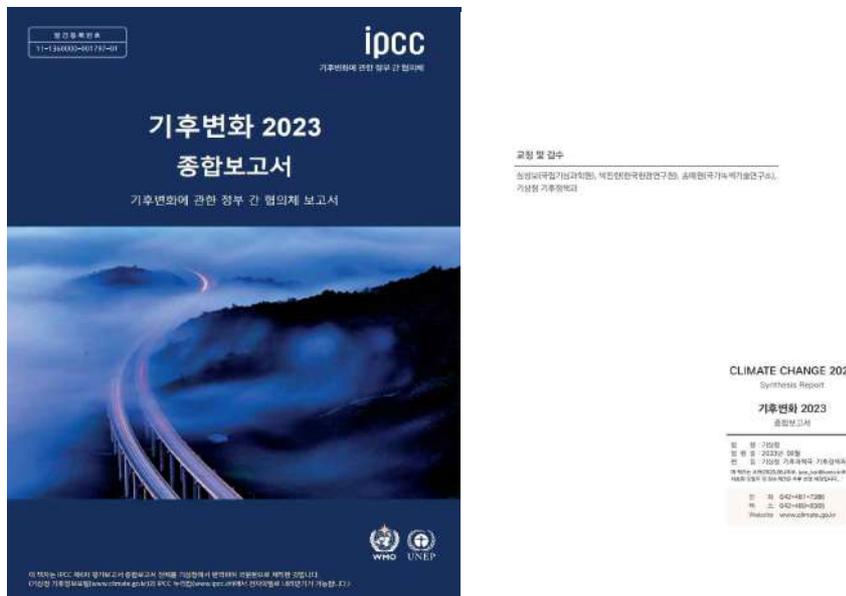
4월 12일에는 이번 종합보고서의 주요내용과 우리나라에 대한 시사점에 대해 공유하고 논의하는 ‘IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 승인 기념 포럼’이 전경련회관 다이아몬드홀에서 개최되었다. 동 포럼은 기상청, 2050 탄소중립녹색성장위원회, 국회기후변화포럼의 정부기관을 중심으로 주최되었으며, 우리기관과 에너지경제연구원은 후원기관으로 참여하였다. 기조연설은 이번 IPCC 제6차 평가주기를 성공적으로 이끈 이회성 IPCC 의장이 종합보고서 주요 내용 및 시사점에 대하여 발표하였다. 또한 패널토론에는 우리기관의 박철호 정책연구본부장이 참여하여 이번 종합보고서가 우리나라 기후변화 대응 정책에서 가지는 의미를 논하고 향후 정책을 제언하였다. 동 포럼의 전체 프로그램은 [그림 3-8]과 같다.

I. 개막행사 및 해인배선		
14:00 ~ 14:05	▶ 개회식	
14:05 ~ 14:40	▶ 환영사 및 축사 - 개회사: 유희동 기상청장 - 환영사: 김성철 탄소중립녹색성장위원회 공동위원장 - 환영사: 한창애 국회의원(국회기후변화포럼 공동대표) - 축사: 차성호 국회의원 - 축사: 한희진 환경부 장관	
	▶ VR 드로잉 퍼포먼스	
	▶ 기념 촬영	
14:40 ~ 15:00	▶ 기조연설: 이회성 IPCC 의장 - IPCC 제6차 종합보고서 주요 내용 - 우리나라 탄소중립 정책에 주는 시사점	
15:00 ~ 15:50	▶ 휴식	
II. 세무세션: IPCC AR6 종합보고서 및 정책 제언		
16:00 ~ 17:20	▶ 패널토론 - 좌: 장·윤재홍 교수(서울대, 국회IP(국제화포럼, 공명대표) - 좌: 남·유연철 사무총장(UNGC 한국협회, 전 기후변화 대사) 김성근 원장(국립기상과학원) 양익석 부원장(에너지경제연구원) 박철호 정책연구본부장(국가녹색기술연구소) 정수홍 교수(서울대학교, 탄소위 위원) 이형석 교수(서울여대대학교) 김종남 원장(한국에너지기술연구원)	
	▶ 폐회	
	17:20 ~ 17:30	▶ 폐회

[그림 3-8] IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 승인 기념 포럼 프로그램

출처: 기상청 외(2023)에서 발췌

IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 발간된 이후, 동 보고서의 중요성을 고려하여 보고서가 국내 독자들에게도 효과적으로 확산될 수 있도록 보고서 전체 내용에 대한 국문번역본 발간이 추진되었다. 전반적인 보고서 내용에 대하여는 전문번역가가 번역을 하였으나 보고서 상에 전문적인 내용이 많기 때문에, 이번 총회에 참석한 전문가들 중 세 개의 실무그룹별로 한 명씩 감수위원으로 참여하여 보고서 국문번역본의 발간을 지원하였다. 제1실무그룹에서는 국립기상과학원의 심성보 주무관이, 제2실무그룹에서는 한국환경연구원의 박진한 부연구위원이 감수위원으로 참여하였으며, 제3실무그룹에서는 우리기관의 송예원 연구원이 참여하여 보고서 번역 및 확산을 지원하였다. 동 국문번역본은 [그림 3-9]와 같이 올해 9월에 완성되어 기후정보포털에 공개되어 있다.



[그림 3-9] IPCC 제6차 평가보고서 국문번역본 감수

출처: IPCC(2023) 국문번역본에서 발췌

3. IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 주요 내용

이전 절에서 살펴본 바와 같이, IPCC는 이번 6차 평가주기에 발간된 세 개의 특별보고서(1.5°C 특별보고서, 토지 특별보고서, 해양 및 빙권 특별보고서)와 기후변화의 과학적 근거를 다루는 제1실무그룹(WGI) 보고서, 기후변화 적응·영향·취약성을 다루는 제2실무그룹(WGII) 보고서, 기후변화 완화를 다루는 제3실무그룹(WGIII) 보고서의 내용을 총 망라하여 “제6차 평가보고서 종합보고서(Synthesis Report)”를 발간하였다. 제6차 평가주기까지의 전 지구 기후변화 연구 결과를 통합적으로 정리한 이번 종합보고서는 크게 세 개 섹션으로 구성되어 있는데, 이는 ①지구온난화 현황 및 추세, ②장기 기후변화, 리스크 및 대응, ③단기 대응이다. 지금까지의 종합보고서는

주로 실무그룹별로 섹션이 구분되었으나, 이번 제6차 평가주기에서는 실무그룹 간의 연계를 강조하며, 전체를 하나의 스토리라인으로 구성할 필요성이 대두되었다. 이에 이번 제6차 평가보고서 종합보고서에서는 실무그룹별 조사 및 분석 결과를 하나로 통합하여 앞서 언급한 세 개의 섹션으로 정리하게 되었다. 섹션별 주요 내용은 다음과 같다.

3.1. 지구온난화 현황 및 추세

먼저 전 지구적인 온실가스 배출 현황을 살펴보면 다음과 같다. 인간 활동으로 인한(anthropogenic) 온실가스 배출로 전 지구 지표 온도는 1850~1900년 대비 현재의 10년 평균(2011~2020년) 온도 기준으로 약 1.1°C 상승하였으며, 과거와 현재 모두 전 지구 온실가스 배출량의 지역·국가·개인에 따른 기여도는 균등하지 않은 것으로 IPCC 보고서는 분석한다. 현재의 전 지구 평균온도 상승량(약 1.1°C) 중 이산화탄소는 0.8°C, 메탄은 0.5°C, 질소산화물은 0.1°C, 불화가스는 0.1°C 정도 기여한 것으로 분석되며, 기타 인간 유발 물질(에어로졸 등) 및 자연적 인자는 일정 부분 냉각 효과로 기여한 것으로 분석된다. 역사적 배출량을 살펴보면, 1850~2019년까지의 총 누적 탄소 배출량은 2400±240 GtCO₂이다. 최근의 배출량 추세를 확인하기 위하여 2019년 기준 전체 온실가스의 연간 배출량을 살펴보면, 59±6.6 GtCO₂-eq로, 이는 2010년 대비 12% 증가한 수치이다.

이러한 기후변화에 대응하기 위하여 다양한 노력들이 전개되어 오고 있으나, 일부 노력은 한계를 보이기도 한다. 적응 측면의 한계를 살펴보자면 대표적으로 오적응(maladaptation)을 들 수 있다. 오적응이란 적응노력의 의도한 결과와는 다르게 결과적으로 온실가스 증가, 기후변화에 대한 취약성 증가, 더 불평등한 결과 또는 복지 감소 등으로 이어지는 현상을 의미한다. 이러한 오적응의 증거가 모든 부문 및 지역들에서 발현되고 있다. 또한 기후변화 적응을 위한 전지구 재원 흐름이 개도국 적응 행동으로의 연계가 잘 이루어지지 않는 점 또한 적응 측면의 한계라고 할 수 있다. 다음으로 완화 측면에서 살펴보면 대표적인 대응 노력의 한계로 배출격차를 들 수 있다. 파리협정 하의 당사국들은 국가감축목표를 담은 국가결정기여(NDC, nationally determined contribution)를 작성 및 제출해오고 있다. 그런데 당사국들이 2021년 기준 설정 및 갱신한 NDC를 모두 이행한다고 전제하더라도 2030년 전지구 온실가스 배출량이 지구온난화를 1.5°C 또는 2°C로 제한하는 경로상의 2030년 전지구 온실가스 배출량보다 월등히 높은 것으로 나타났다. 이는 상당한 배출격차(emissions gap)가 존재하는 것으로 이해될 수 있음

3.2. 장기 기후변화, 리스크 및 대응

앞서 살펴본 배출현황을 바탕으로 2100년까지의 장기적인 기후변화 경로는 무엇이며 어떠한 리스크가 있으며, 더 나아가 대응은 어떻게 이루어지고 있는지 살펴보면 다음과 같다. 먼저 지구온난화가 진행되어 1.5°C가 도달되는 시점에 대해 살펴보고자 한다. 지속되어온 온실가스 배출로 인해 온난화가 심화되어 거의 모든 미래 배출 시나리오에서 가까운 미래(2021~2040년)에 1.5°C에 도달할 것으로 분석된다. 현재까지의 심화된 기후변화로 인해 해수면 상승, 남극 빙상 붕괴, 생물다양성 손실 등의 다양한 비가역적 변화가 이미 발생하였다. 이러한 이미 발생한 비가역적 변화는 지금 당장 지구온난화를 제한한다 하더라도 돌이킬 수 없다. 향후 지구온난화 제한 노력이 지연되어 온난화가 심화될 수록 이러한 급격하고 비가역적인 변화가 일어날 가능

성이 높아지고, 손실과 피해는 증가하며, 적응 한계에 도달하게 된다.

다음으로 탄소배출허용총량(carbon budget)에 대해 살펴보고자 한다. 지구온난화를 1.5°C로 제한하기 위한 경로에 의하면 2020년 초 이후의 잔여 탄소배출허용량(remaining carbon budget)은 500 GtCO₂(50% 확률)이고, 2°C 미만으로 제한하기 위한 경로에 의하면 잔여 탄소배출허용량은 1,150 GtCO₂(67% 확률)로 분석된다. 그러나 이러한 잔여 탄소배출허용량, 특히 1.5°C 목표 달성을 위한 잔여 탄소배출허용량은 현재 이미 계획되어 있는 화석연료 인프라에서 발생할 것으로 추산되는 이산화탄소 잠재 배출량만으로도 초과할 것으로 분석되어 시급한 행동을 요구한다고 할 수 있다.

따라서 이번 종합보고서는 지구 온난화를 제한하기 위한 행동의 방향성을 다음과 같이 제시한다. 먼저 넷제로(net zero) 필요성을 강조한다. 온실가스 넷제로란 전체 온실가스의 배출 및 제거량을 이산화탄소 환산량으로 계산했을 때, 배출량과 제거량의 상쇄되어 순 배출량이 0이 되는 것을 의미한다. 인간이 유발한 온난화를 제한하려면 이산화탄소를 포함한 전체 온실가스의 배출량이 넷제로가 되어야 한다. 다음으로는 이러한 넷제로 배출을 달성할 수 있도록 다양한 이산화탄소 감축 전략을 활용하는 것이 필요하다고 강조한다. 이러한 이산화탄소 감축 전략은 크게 ①공급 부문 관리, ②수요 관리 및 효율 향상, ③이산화탄소 제거(CDR, carbon dioxide removal) 접근법으로 구분될 수 있다. 먼저 공급 부문 관리로는 에너지, 산업, 도시, 건물, 수송, 농업·임업·기타토지이용(AFOLU, agriculture, forestry, and other land use) 부문의 온실가스 감축을 증대하기 위한 다양한 활동들이 포함될 수 있다. 대표적인 예로는 탄소배출저감기술을 활용하지 않은(unabated) 화석연료를 재생에너지 보급 또는 탄소 포집 및 저장(CCS, carbon capture and storage) 기술 등을 활용하여 저탄소·무탄소 전원으로 전환하는 것을 들 수 있다. 다음으로는 수요 관리 및 효율 향상은, 사회문화 및 행태적 변화를 추구하고, 이러한 변화를 유도할 수 있도록 인프라를 활용하며, 최종소비자가 기후친화적인 기술을 채택할 수 있도록 관리하거나 소비자의 변화를 유도하여 배출량을 저감하는 것을 의미한다. 마지막으로 이산화탄소 제거는 대기 중에서 온실가스를 직접적으로 포집하여 토지·지중·해양 저장소 또는 상품에 저장함으로써 대기 중으로부터 이산화탄소를 제거하는 감축 활동을 의미한다.

이러한 지구온난화 제한을 위한 행동을 통해 전 지구 평균 온도상승을 1.5°C 또는 2°C로 제한하기 위해서는 <표 3-11>과 같은 전 지구적 온실가스 감축량 수준이 필요한 것으로 분석되었다.

<표 3-11> 지구온난화 제한을 위한 전 지구적 온실가스 감축량 수준(2019년 대비)

구분		2030	2035	2040	2050
1.5°C 제한	GHG	43%	60%	69%	84%
	CO ₂	48%	65%	80%	99%
2°C 제한	GHG	21%	35%	46%	64%
	CO ₂	22%	37%	51%	74%

자료: IPCC(2023)의 Table SPM.1을 바탕으로 저자 정리

3.3. 단기 대응

직전 섹션에서는 2100년까지의 장기 기후변화에 대해 살펴보았다면, 동 섹션에서는 2030년까지의 단기 내에서의 기후변화 대응 방안에 대해 살펴본다. 단기 대응의 핵심은 지속가능발전을 위한 탄력적 개발 경로의 선택이라 할 수 있으며, 이를 위하여 모든 부문에 걸친 시스템 전환이 필요하다.

먼저 기후탄력적 개발 경로(CRD, climate resilient development)가 강조된다. 기후탄력적 개발 경로란, 전 지구적으로 추구해야 할 경로 차원에서 지속가능발전을 향한 적응 및 완화 행동을 통합한 경로이다. 지속가능한 미래를 확보하기 위해 행동할 수 있는 시간은 빠르게 줄고 있으며, 기후탄력적 개발 경로로의 전환을 위해서는 시민사회 및 민간 부문과 함께 정부의 역할이 중요하다. 특히 기후변화 완화 차원에서 볼 때, 심층적이고 지속적인 배출량 감축이 필요한데, 이는 지속가능한 미래를 확보하기 위해 모든 부문 및 시스템에 걸친 신속한 전환이 필수적이기 때문이다. 에너지, 산업 및 교통, 도시·정주지·인프라, 토지·해양·식품·물, 건강 및 영양, 사회·생계·경제 부문 등에서 다양한 완화 및 적응 옵션을 크게 확대해야 한다. 다행인 것은 대부분의 부문에서 적합하고 효과적인 저비용 옵션이 이미 존재한다는 점이다.

이처럼 기후변화 완화 및 적응 옵션을 확대할 때에는 형평성(equity)을 고려하는 것이 중요하다. 의욕적인 감축은 경제구조의 대규모 및 급격한 전환을 수반하기에, 분배 문제 해결을 위해 형평성에 의거한 재분배 정책, 사회 안전망, 포용성(inclusion), 공정전환(just transition)에 대한 고려 및 적용이 필요하다.

기후변화 대응에 있어 각 부문의 온실가스 배출량을 감축하는 기술적 조치 외에도 거버넌스 및 정책의 역할이 매우 중요하다. 법·제도 등을 활용한 효과적인 기후 거버넌스는 국가 상황에 기반하여 전반적인 방향을 제공해주고, 목표 및 우선순위 설정을 지원하며, 기후 행동을 주류화하고, 모니터링·평가와 규제 of 확실성을 강화해주고, 포용성·투명성·형평성 있는 의사결정을 우선화하도록 도와주며, 재정과 기술에 대한 접근성 증진을 통해 완화와 적응을 가능하게 해준다. 이러한 거버넌스 하에서 다양한 규제적 및 경제적 정책수단의 적용을 확대하는 것이 필요하다. 이러한 정책에는 보조금, 세제 혜택, 탄소가격제(탄소세, 배출권 거래제 등) 등이 존재한다. 특히 탄소가격제는 저비용 온실가스 배출량 감축 조치를 장려해 왔으며, 이로 인한 형평성 및 분배 문제는 탄소가격제 수익을 저소득 가구를 지원함으로써 대응할 수 있다는 특징이 있다.

또한 기후변화 대응에 있어 재정과 기술, 국제협력의 중요성 역시 강조되었다. 먼저 전 지구적 기후행동 촉진을 위해 금융의 역할이 중요하다. 지구온난화를 1.5°C 또는 2°C로 제한하기 위한 시나리오 상에서 2020~2030년 기간 중 완화를 위한 연간 평균 투자비는 현재 수준보다 3-6배 증가해야 한다고 분석되었다. 특히 공공재원은 완화 및 적응의 중요한 가능여건이며 민간 자원 조달에도 영향을 준다. 다음으로 기술에 대해 살펴보면, 온실가스 저배출 기술의 혁신 및 확산이 기후변화 대응에 매우 중요한데, 이를 위해서는 적절한 정책 패키지가 국가적 상황 및 기술적 특성에 적합하게 시행되어야 한다. 또한 기술혁신시스템의 강화가 중요한데, 여기에서 기술혁신시스템이란 특정 목표(새로운 지식 생산, 신제품 개발 등)를 달성하기 위해 상호 작용하는 다양한 행위자(산·학·연, 정부기관, 시민사회단체 등) 및 관련 제도를 포괄하는 집합(시스템)을 의미한다.

이러한 기술의 중요성 및 역할은 <표 3-12>와 같이 정리해볼 수 있다. 마지막으로 국제협력의 중요성에 대해 살펴보면, 재정·기술·역량배양에 관한 국제협력을 통해 더 높은 감축의욕을 설정하고 달성할 수 있다, 이를 위해서는 다양한 국제협력 채널을 활용하는 것이 중요하다.

<표 3-12> IPCC 제6차 평가보고서에서의 ‘기술’에 대한 중요성 강조

구분	내용
근거 및 의의	<ul style="list-style-type: none"> • (근거) IPCC 제6차 평가보고서 제3실무그룹(완화) 보고서 중 제16장이 ‘혁신, 기술개발 및 이전’을 다루고 있음 • (의의) IPCC 평가보고서에 ‘기술’이 별도 챕터(제3실무그룹 보고서 제16장)로 최초로 포함되었으며, 이는 기후변화 대응행동에서 ‘기술’의 중요성이 강조됨을 시사
기술비용 하락 추세	<ul style="list-style-type: none"> • 저배출 기술의 단가가 2010년 이래 꾸준히 하락하고 보급량이 증대되고 있음 (예: 태양광 단가 85% 하락 및 보급량 10배 증가, 배터리 단가 85% 하락 및 보급량 100배 증가)
기술혁신시스템	<ul style="list-style-type: none"> • 기술혁신시스템이 기술비용 하락을 가능하게 하며, 이를 통해 저배출 성장, 사회 및 환경적 공편익, 지속가능발전목표(SDGs)에 대한 달성 기회를 제공함
기술혁신 정책 강조	<ul style="list-style-type: none"> • (기술주도 정책) 교육·훈련, 공공 R&D 투자, 실증 및 시범 사업 비용 지원 • (수요견인 정책) 보조금 지원, 세제 혜택(세금 환급 등), 에너지 효율 가전제품에 대한 표준 및 라벨링 프로그램 등
기술혁신의 지속가능발전과의 상충효과(trade-off)	<ul style="list-style-type: none"> • 기술혁신의 부정적 측면*들이 있으므로, 이를 해결하기 위한 거버넌스와 정책이 필요함 * 부정적 외부효과(환경오염과 사회적 불평등), 분배의 영향, 리바운드 효과(기술혁신으로 효율성이 높아져 더 많이 소비하는 행태), 해외 지식 및 제공자에 대한 의존 증대 등
개도국 협력	<ul style="list-style-type: none"> • 개도국들은 저배출 기술 혁신 및 채택에서 다소 늦은 바, 이는 개도국의 약한 가능여건(enabling environment)*에 기인하는 바, 기술혁신 협력 필요 * 투명성, 중앙은행 역할(통화 및 거시경제정책), 효율적인 금융 시장 및 금융규제, 자원 부족, 기술적 시스템 및 인프라 부족, 계획 및 이행 역량 부족, 인적 자원 활용 제약, 기타 개발 우선순위, 환경 영향, 저부가가치 일자리 및 대외의존도 등

자료: IPCC(2022)의 제16장 및 IPCC(2023)의 SPM을 바탕으로 저자 정리

4. IPCC 제6차 평가보고서 기반 기후기술 RD&D 정책 방향 도출³⁾

4.1. 주요 탄소중립 기술에 대한 IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서의 내용

IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 중 우리나라에서도 강조되며 활용되고 있는 주요 탄소중립 기술⁴⁾과 관련된 내용이 서술된 부분을 정리해보면 <표 3-13>와 같다. 추가적으로, 2022년 4월에 먼저 발간되었던 IPCC 제6차 평가보고서 제3실무그룹 보고서는 개별 기술에 대해 훨씬 상세히 다루고 있으므로 제3실무그룹 보고서에서 해당 기술을 주요하게 다루는 부분 역시 <표 3-13>에 함께 기술하였다. 참고로, IPCC 제6차 평가보고서 제3실무그룹 보고서(완화) 보고서에서 이러한 주요 탄소중립 기술에 대한 내용만 따로 정리해보면 <표 3-14>와 같이 정리된다. 다음으로는 각 기술에 대하여 IPCC 보고서에서 어떻게 서술하고 있는지 살펴보고자 한다.

<표 3-13> IPCC 제6차 평가보고서 중 주요 탄소중립 기술에 관한 부분

부문	10대 핵심기술	IPCC 제6차평가보고서 종합보고서		제3실무그룹 보고서
		SPM	Longer Report	
에너지 전환	태양광·풍력	A.4.2, C.3.2	Sec. 2.2.2, Sec. 4.5.1	Ch. 6, Ch. 12 등
	수소	C.3.3	4.5.2	Ch.6, Ch.10, Ch.11
	바이오에너지	B.6.4, C.3.3	3.4.1, 4.5.1, 4.5.3, 4.6	Ch.6, Ch.10, Ch.11
산업 저탄소화	철강·시멘트	B.6.3	4.5.2	Ch.11
	석유화학	B.6.3	2.2.2	Ch.6, Ch.7, Ch.11
	산업공정 고도화	C.3.3	4.5.2	Ch.11
에너지 효율	수송효율	C.3.3	4.5.3	Ch.10 등
	건물효율	C.3.4	4.5.3	Ch.9
	디지털화	-	2.2.2, 4.5.3, 4.8.3	Ch.9, Ch.12 등
CCUS	탄소포집·저장·활용(CCUS)	B.6.3	3.3.3	Ch.6, Ch.11 등

자료: IPCC(2023), IPCC(2022) 내용을 바탕으로 저자 정리

3) 동 섹션의 내용은 2023년 동 과제 차원에서 진행된 연구 결과로 2023년 8월 도출 및 발간된 정기간행물 NIGT Focus 제1권 1호 「오채운·송예원·김태호. (2023). IPCC 제6차 평가 보고서 종합보고서 기반, 기후기술 대응 시사점」의 내용을 토대로 작성되었다. 2023년 올해 연구결과로 진행된 내용인바, 동 발간물의 내용이 제3절에 약간의 수정을 거쳐 그대로 삽입되었다. 동 자료의 ISSN 번호는 2983-4406 (온라인)과 2983-2330(인쇄본)이다.

4) 우리나라의 탄소중립 핵심기술에 관하여는 동 장 제2절에서 다루도록 하겠다.

〈표 3-14〉 IPCC 제6차 평가보고서 제3실무그룹 보고서 중 주요 탄소중립 기술 내용

구분	기술	내용
에너지 전환	태양광	<ul style="list-style-type: none"> 태양광 발전은 국가별 저배출 전략 및 감축목표, 감축 시나리오의 핵심 구성요소로 포함되고 있음 (챕터 4, 챕터 16) 범분야적으로 활용이 가능한 저탄소 에너지 기술로 (챕터 12), 기술력 수준과 가격 경쟁력 측면에서 선두주자로, 현 세기 내 요구되는 에너지량을 능가하는 잠재력을 지님 (챕터 6, 챕터 15) 물 부족에 대한 영향이 적어 물-에너지-식량 넥서스 차원에서 장기적으로 물 사용량을 감축할 수 있는 기술로 기대가 됨 (챕터 17) 건물에 설치하여 건물의 에너지 소비 및 온실가스 배출 감축이 가능함 (챕터 9) 국제협력 이니셔티브로 다양한 국가들이 감축역량을 증대하기 위하여 태양광 발전을 활용하고 있음(예: ETIP PV) (챕터 16)
	태양광·풍력	
	풍력	<ul style="list-style-type: none"> 범분야적으로 활용이 가능한 저탄소 에너지 기술로 (챕터 12), 가격 경쟁력이 확보되었으나 (Ch. 6, Ch. 장), 환경 및 사회적 영향에서의 심각성이 높을 수 있음 (챕터 6, 챕터 17) 풍력 발전은 대용량 터빈을 사용하고, 회전 날개(rotor)의 직경과 허브의 높이를 키워 발전량을 증대하고 비용을 절감할 수 있음 (챕터 6) 물 부족에 대한 영향이 적어 물-에너지-식량 넥서스(nexus) 차원에서 장기적으로 물 사용량을 감축할 수 있는 기술로 기대가 됨 (챕터 17)
	수소	<ul style="list-style-type: none"> 저탄소 전력망을 위한 에너지 저장기술로 수소의 잠재력이 높을 것으로 분석되나, 생산 및 저장·운반에 대한 장애요인을 극복해야 함 (챕터 6) 생산 측면에서 배출량 감축을 위해서는 그린수소와 블루수소를 활용하여야 함 (챕터 6) 저장·운반 측면에서, 합성 탄화수소(SHC), 액상 유기물 수소 저장체(LOHC), 암모니아 등 다양한 기술들이 연구되고 있으며, 특히 암모니아가 강조되고 있음 (챕터 6) 수송 부문에서 트럭 및 철도에서 발생하는 배출량은 저탄소 전력 및 저탄소 수소로 구동할 시 현저히 저감될 수 있음 (챕터 10)
	바이오에너지	<ul style="list-style-type: none"> 성장 추세에 있는 기술로, 화석연료 대체 옵션이 제한적인 부문 등에서 유용함. 다만 규모 확대를 위해서는 고급기술이 필요함 (챕터 6) CO₂ 제로/네거티브를 위한 급전(dispatchable) 에너지원으로 활용가능함 CCS 설비와 함께 BECCS로 전력생산 및 네거티브 배출 달성 가능함 (챕터 6) 수송 부문의 탈탄소화 차원에서 대체연료로 바이오연료를 활용 가능함 (챕터 10) 산업 부문의 탈탄소화를 위해 액체연료 및 고온의 열을 바이오매스로부터 공급받는 것으로 전환 가능함 (챕터 6, 챕터 11)

구분	기술	내용
산업 저탄소화	철강· 시멘트	<ul style="list-style-type: none"> • 생산 공정에서의 탄소 집약도는 최적가용기술(BAT)이 발전됨에 따라 개선되고 있으나, 추가적인 감축을 위해 혁신적인 신기술이 필요함 (챕터 11) • 활용 가능한 감축 기술은 CCS, 수소환원제철, 합성연료 등이 있으며, 특히 시멘트 산업에서 CCS 기술이 중요함 (챕터 11) • 전기화와 CCUS의 경우, 아직 기술 수준이 초기단계에 머물러 있음 (챕터 11)
	석유화학	<ul style="list-style-type: none"> • 석유화학 부문은 CCS를 활용하여야 함 (챕터 6) • 기존 원료를 대체하기 위해 바이오 기반 화학합성 기술, 미생물 활용 기술, 단백질 생명공학 기술 등이 중요해짐 (챕터 7)
	산업공정 고도화	<ul style="list-style-type: none"> • 철강, 화학, 시멘트 등 에너지 집약 산업에서의 기술(특히 BAT) 적용을 통해 에너지 효율성을 향상시키는 것이 중요함 (챕터 11) • 산업공정의 에너지 효율성 개선을 위하여 디지털화와 폐열 활용 기술(waste heat to power (WHP) 기술 등)의 역할 중요 (챕터 11)
에너지 효율	수송효율	<ul style="list-style-type: none"> • 완화 수단으로 전기 모빌리티(EV)의 역할이 중요하며 (챕터 6, 챕터 8, 챕터 10), 관련 인프라(충전 설비 등) 구축이 중요함 (챕터 10) • 내연기관의 효율 개선 및 대체연료(천연가스, 바이오 연료 등) 기술을 통해 기존 기술이 EV 등의 신기술과 양립 가능함
	건물효율	<ul style="list-style-type: none"> • 냉난방 및 건물 외피 열효율 향상, 정보통신기술 등을 활용해 에너지 고효율 건물 신축 및 기존 건물의 심층 개조를 통해 효율 향상 및 비용 절감 가능 (챕터 9) • 탄소중립 건물 기술은 Sufficiency(에너지를 필요로 하지 않음)-Efficiency(에너지 효율 향상)-Renewables (재생에너지로 기후 영향에 대한 회복탄력성 증대)를 의미하는 SER 프레임워크로 표현할 수 있음 (챕터 9) • 3D 프린팅과 같은 기술로 더 빠르고 저렴하며 지속가능한 건축을 가능하게 할 수 있음 (챕터 9)
	디지털화	<ul style="list-style-type: none"> • AI, IoT, 빅데이터 등 정보통신기술(ICT)이 범분야적 에너지 효율 개선에 활용되나, 디지털화로 에너지 수요가 증가할 수 있어 적절한 관리가 필요함 (챕터 9, 챕터 11, 챕터 17) • 온실가스 감축에 다양한 이해관계자들의 정보 공유 및 소통이 중요하며, 디지털화는 이를 가능하게 해줌 (챕터 11)
CCUS	탄소포집·저장· 활용(CCUS)	<ul style="list-style-type: none"> • 기존 화석연료·수소 설비에 CCS를 부착하여 저탄소 에너지 생산 가능함 (챕터 6) • 화석연료 발전소의 폐쇄 추세를 고려할 시 화석연료 발전 설비에 CCS를 활용하는 것보다 BECCS가 매력적일 수 있음 (챕터 6) • 시멘트 산업에서 CCS 기술이 특히 중요함 (챕터 11) • CO₂ 제거(CDR) 기술로(BECCS, DACCS) 잔여 배출량 상쇄 가능함 (챕터 6, 챕터 12) • 저배출 기술에 대한 공공 RD&D로 CCUS 기술개발 필요함 (챕터 16) • 대규모 공급 중심 기술로, 기술적 위험성과 사회환경 영향에 대한 우려가 있음 (챕터 5). 물 사용이 많을 수 있어 물 관리 기술이 중요함 (챕터 3, 챕터 6, 챕터 17)

자료: IPCC(2022) 내용을 저자 정리

4.1.1. 태양광·풍력

먼저 IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서는 태양광·풍력의 보급 현황을 소개한다. 등의 완화 옵션이 기술적으로 활용 가능하고 비용효과성 및 수용성이 높아지고 있다. 특히 2010~2019년 동안 태양광은 85%, 풍력은 55%의 단가 하락이 있었으며, 보급량 또한 태양광은 10배 이상 증가하였다. 단가 하락 및 보급 증대를 위한 정책 믹스에는 공공 R&D, 실증 자금 조달, 보조금 등의 수요 견인 조치들이 포함된다 (IPCC, 2023, SPM A.4.2; LR Sec. 2.2.2)

다음으로는 태양광 및 풍력 발전이 저비용 옵션으로서 적응 옵션과의 연계가 필요하며, 공급 및 수요관리 필요하다는 점을 언급하고 있다. 태양광·풍력, 에너지 효율 개선, 메탄 감축(석탄 채굴, 석유 및 가스, 폐기물)은 저비용 기술(20 USD/tCO₂-eq)의 주요 요소이다. 또한 기존 및 신규 발전 시스템을 위해 인프라 탄력성, 신뢰 가능한 전력 시스템, 효과적인 수자원 사용 등의 적절한 적응 옵션도 필요하다. 한편, 발전원 다변화(예: 풍력, 태양광, 소수력 등을 통해) 및 수요 측면 관리(예: 저장, 에너지 효율 개선)는 에너지 신뢰도를 증대시키면서 기후변화 취약성을 경감시킬 수 있다 (IPCC, 2023, SPM C.3.2; LR, Sec. 4.5.1).

4.1.2. 수소

이번 IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서는 수소의 역할로 연료 생산 및 전환 차원을 강조하고 있다. 교통 부문에서, 지속가능한 바이오연료, 저배출 수소 및 파생물(암모니아, 합성연료 등)은 해운, 항공, 중량(heavy-duty) 육상교통의 이산화탄소 배출 완화에 도움을 줄 수 있으나, 공정 과정의 개선과 비용 저감이 필요하다 (IPCC, 2023, SPM C.3.3; LR, Sec. 4.5.2).

또한 산업에서의 연료전환의 정의를 설명하며 수소의 기능을 강조하고 있다. 이러한 연료전환은 기존의 연료를 전기, 수소, 바이오에너지, 천연가스로 전환하는 것을 의미한다 (IPCC, 2023, Figure SPM.7)

4.1.3. 바이오에너지

보고서는 바이오에너지를 교통부문에서 수소와 함께 연료전환 차원에서 언급한다. 지속가능한 바이오연료는 단기 및 중기에 육상교통에서 추가적인 완화 이익을 제공한다 (IPCC, 2023, SPM C.3.3; LR, Sec. 4.5.3)

그러나 바이오에너지를 생산하는 데에 부정적 영향도 발생할 수 있다. 신규조립이나 바이오에너지용 작물생산은, 특히 대규모로 진행되고 임차권이 불안정할 경우, 부정적인 사회경제 및 환경적 영향(생물다양성, 식량 및 수자원 안보, 지역 생계, 토착민 권리 등)을 불러올 수 있다. 대규모 신규조립 및 바이오에너지 옵션의 활용이 식량, 생물다양성 및 생태계, 생계에 위협을 가하게 되는 상쇄효과를 제한하기 위해 효과적인 거버넌스가 필요하다 (IPCC, 2023, SPM B.6.4; LR, Sec. 3.4.1, 4.6)

따라서 이러한 부정적 영향을 최소화하기 위하여 기후변화 적응 노력과 통합적으로 접근할 필요가 있다. 기후변화 및 관련 극한 현상은 미래 에너지 시스템(수력 발전, 바이오에너지

생산, 열발전 효율, 냉난방 수요 등)에 영향을 미친다. 가장 적절한 에너지 시스템 적응 옵션은 기존 및 신규 발전 시스템에 대하여 인프라 탄력성, 신뢰가능한 전력 시스템, 효율적인 수자원 사용을 지원한다 (IPCC, 2023, LR Sec. 4.5.1).

4.1.4. 철강·시멘트

철강 및 시멘트 분야에서 활용 가능한 대표적인 감축 기술은 CCS이다. 그러나 CCS는 가스 공정 및 원유회수증진(EOR, enhanced oil recovery)에 대해서는 성숙한 기술이나, CCS가 핵심적인 완화 옵션이 되는 발전·시멘트·화학물질 생산 분야에 대해서는 덜 성숙하였다 (IPCC, 2023, SPM B.6.3). 특히 시멘트 공정 배출량의 심층적 감축은 시멘트계 원료의 대체와 새로운 화학 기술이 개발 및 보급되기 전까지는 CCS 가용성에 달려 있다 (IPCC, 2023, LR Sec. 4.5.2).

4.1.5. 석유화학

종합보고서에서 석유화학은 많은 경우 다른 산업 부문과 함께 다루어지므로 바로 앞 절인 “2.1.4 철강·시멘트” 부분을 참고할 수 있다.

석유화학 중에서도 소재 분야를 살펴보면, 거의 모든 기초소재(금속, 건설재, 화학제품 등)의 경우, 온실가스 배출이 적거나 없는 다양한 생산공정이 파일럿~준상용화 수준에 있으며, 일부는 상용화 단계에 있기도 하지만, 아직 이들이 산업표준으로 확립되지는 않았다 (IPCC, 2023, LR Sec. 2.2.2).

4.1.6. 산업공정 고도화

산업 온실가스 배출 감축에는 수요 관리, 에너지 및 소재 효율성, 순환 소재 흐름, 감축(abatement) 기술, 생산공정의 변혁적 전환(transformational change) 등, 모든 완화 옵션을 촉진할 수 있도록 가치사슬 전반에 걸친 일관된 행동이 필요하다 (IPCC, 2023, SPM C.3.3; LR, Sec. 4.5.2).

4.1.7. 수송효율

수송 부문에서는 전기차의 중요성이 강조되었다. 온실가스 배출이 낮은 전기로 구동되는 전기차는 육상교통 온실가스 배출량 감축 잠재력이 크기 때문이다. 배터리 기술 고도화는 중량 트럭의 전기화를 촉진할 수 있으며, 기존의 전기 철도 시스템을 보완할 수도 있다. 그러나 배터리 생산의 환경 발자국 및 핵심광물에 대한 우려의 증가가 존재하나, 소재 및 공급 다각화 전략, 에너지 및 소재 효율성 개선, 순환 소재 흐름을 통해 대응할 수 있다 (IPCC, 2023, SPM C.3.3; LR, Sec. 4.5.3).

4.1.8. 건물효율

건물 부문에서 건물 효율 개선은 저비용 범주(100 USD/tCO₂-eq)에서도 일정 부분 완화 잠재력을 가진다 (IPCC, 2023, Figure SPM.7). 특히 건물의 효율은 수요관리 노력의 일환으로 접근할 수도 있다. 수요 측면 완화 및 최종 서비스 제공에 대한 새로운 방법들은 최종 사용 부문(건물, 육상교통, 식품)의 전지구 온실가스 배출량을 2050년까지 베이스라인 시나리오 대비 40~70% 저감할 수 있다. 다른 부문의 전기화로 인해 전력 수요가 증가할 것으로 전망되는데, 인프라 활용, 사회문화적 요소 부문의 수요 측면 완화 조치로 전력 수요 증가를 회피할 수 있다 (IPCC, 2023, Figure SPM.7).

또한 완화 옵션과 적응 옵션의 통합적 접근 차원에서 건물을 활용할 수 있다. 도시의 핵심 적응 및 완화 요소에는, 주거지를 설계할 때 정부 및 민간기관에서 제공하는 기후서비스 등을 통해 기후변화 영향 및 위험을 고려하는 것, 콤팩트 도시 및 직주근접(co-location of jobs and housing)을 위한 토지사용 계획, 대중교통 및 능동 모빌리티(걷기, 자전거 등) 지원, 건물의 효율적인 설계·건축·개조·활용, 에너지 및 소재 사용 저감 및 전환, 전기화 등이 있다 (IPCC, 2023, SPM C.3.4; LR,Sec. 4.5.3).

4.1.9. 디지털화

디지털 기술의 활용과 결합된 설계 및 공정 혁신은 건물, 교통, 산업 부문에서 많은 저·무배출 옵션의 가용성을 준상용화 수준까지 이끌었다. 센서, 사물인터넷(IoT, internet of things), 로봇, 인공지능 등의 디지털 기술은 모든 부문의 에너지 관리를 개선할 수 있어, 에너지 효율을 개선하고 저배출 기술(분산 재생에너지 등)의 도입을 촉진하면서 경제적 기회를 창출할 수 있다. 반면, 완화 잠재력 일부는 디지털 장비의 활용으로 인한 상품 및 서비스 수요 증대로 인해 경감되거나 상쇄될 수 있다 (IPCC, 2023, LR Sec. 2.2.2).

수요관리 차원에서도 디지털화는 중요하다. 도시 형태의 변화, 자전거 및 도보를 위한 거리 공간 확보, 디지털화(예: 원격근무), 소비자 행태 변화 촉진 프로그램은 교통 서비스 수요를 저감하고 더 에너지 효율적인 교통 방법으로의 전환을 도모하기 때문이다 (IPCC, 2023, LR Sec. 4.5.3).

그러나 디지털 기술은 서비스 간의 조화 및 경제적 전환을 통해 에너지 효율을 크게 향상시킬 수 있지만, 사회적 디지털화는 상품 및 에너지의 소비, 전자제품 폐기물의 증대를 야기하고 노동시장에의 부정적인 영향, 국가내 및 국가간 비형평성 악화도 불러올 수 있다. 이에, 디지털화는 적절한 거버넌스와 정책이 필요하다 (IPCC, 2023, LR Sec. 4.8.3).

한편, 디지털 기술이 토지 부문의 감축에도 기여할 수 있다. 토지사용 모니터링, 지속가능한 토지 관리, 농업 생산성 향상을 위한 디지털 기술의 기술이전은 산림전용 및 토지사용 변화로 인한 배출량 저감을 도우면서 온실가스 산정 및 표준화도 개선시킨다 (IPCC, 2023, LR Sec. 4.8.3).

4.1.10. 탄소포집·저장·활용(CCUS)

이번 IPCC 보고서에서는 온실가스 감축 경로에 CCS가 중요한 감축 옵션으로 포함되었다. 이산화탄소 및 온실가스 넷제로에 도달하는 모델링된 전지구 완화 경로에는 CCS를 미적용한 화석연료를 극저 및 저탄소 에너지원(재생에너지, CCS를 적용한 화석연료 등)으로 전환하는 것, 수요 측면 조치 및 효율을 개선하는 것, 비이산화탄소 온실가스를 감축하는 것, 이산화탄소 제거(CDR, carbon dioxide removal)를 활용하는 것이 보고서에 포함되었다 (IPCC, 2023, SPM B.6.3; LR, Sec. 3.3.3).

전 지구적으로 이산화탄소 지중저장소의 기술적 용량은 1,000 GtCO₂ 수준으로 예상되며, 이는 지구온난화를 1.5° C로 제한하기 위해 필요한 이산화탄소 저장량보다 많은 양이다. 지중저장 공간이 적절하게 선정되고 관리된다면 이산화탄소를 대기로부터 영구적으로 고립시킬 수 있을 것으로 예상된다 (IPCC, 2023, SPM B.6.3; LR, Sec. 3.3.3).

앞서 살펴본 바와 같이 CCS는 가스 공정 및 원유회수증진(EOR)에 대해서는 성숙한 기술이나, CCS가 핵심적인 완화 옵션이 되는 발전·시멘트·화학물질 생산 분야에 대해서는 덜 성숙하였다. CCS의 활용은 현재 기술적, 경제적, 제도적, 생태환경적, 사회문화적 장애요소에 직면해 있으며, 정책도구, 더 높은 수용성, 기술혁신과 같은 가능여건이 이러한 장애요소를 경감시킬 수 있다 (IPCC, 2023, SPM B.6.3; LR, Sec. 3.3.3).

4.2. 기후기술 RD&D 정책 방향 도출

이번 IPCC 제6차 평가보고서에는 우리나라에서도 탄소중립 핵심기술로 주목하고 있는 다양한 기술에 대한 사항들이 중요하게 다루어지고 있으며, 탄소중립 목표의 달성을 위하여 동 기술들에 대한 연구·개발·실증(RD&D, research, development & demonstration)과 적용을 강조하고 있다. 따라서, 동 기술들이 보유하고 있는 감축 잠재력의 실현과 동 기술들이 실제 적용될 수 있도록 기술단가를 하락시키기 위한 정책적 접근의 역할이 중요해지고 있다.

탄소중립 기술에는 상당한 감축 잠재력이 존재하지만, 동시에 이 기술들을 보급(diffusion)하는 데에 장애요소(기술, 경제, 제도, 생태환경, 사회문화적 측면)가 함께 존재한다. 이러한 장애요소를 극복하기 위해 각 기술의 RD&D를 활성화하는 가능여건 조성 정책이 강조되고 있다. 또한 같은 기술이라도 각 기술이 활용(deployment)되는 부문별로 기술성숙도가 다른바, 각 기술에 대한 R&D 투자 및 보급 촉진을 위해서는 부문별 특성을 고려한 접근 및 정책 설계가 필요하다. 이러한 사항들을 고려하여 이번 IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서를 통해 우리나라 ‘과학기술’ 분야에 대해 ①탄소중립 기술 R&D 방향성, ②감축기술과 적응기술의 통합적 접근, ③선-개도국 대상 기후기술 국제협력 측면에서 시사점을 도출해볼 수 있다. 하나씩 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 탄소중립 기술 R&D 방향성에 대해 살펴보고자 한다. ‘신규’ 탄소중립 기술에 대한 공공 R&D 투자는 향후 민간 섹터의 ‘실증 및 활용’ 까지 연계한 설계가 필요하다. 한편, ‘기존’ 탄소중립 기술에 대해서는 ‘단가 하락’ 을 고려한 R&D 투자에 우선적으로 집중할

필요가 있으며, 해당 기술들의 실증 및 활용 증대를 위한 정책연구를 함께 설계하는 것이 필요하다. 우리나라 과기정통부는 2021년 3월 ‘탄소중립 기술혁신 추진전략’을 통해 탄소중립 10대 핵심기술을 선정하고 이에 대한 2050년까지의 목표와 확보전략을 제시하였으며 또한 관계부처합동으로 2022년 10월 탄소중립 100대 기술을 선정한 바,⁵⁾ 이 기술들에 대한 과기부 차원의 R&D 정책을 고려 시, 신규 기술에 대한 R&D 뿐만 아니라, 기존 기술의 단가 하락을 위한 R&D 역시 고려할 필요가 있다.

이뿐만 아니라 기술 및 기술혁신시스템에 대한 정책 역시 중요하게 강조되고 있다. 이번 IPCC 제6차 평가보고서 제3실무그룹(완화) 보고서에는 ‘기술’이 별도 챕터(제16장)로 최초로 포함된 것으로 볼 때, 기후변화 대응 행동 차원에서 ‘기술’의 중요성이 강조되고 있다는 것을 알 수 있다. 특히, 저배출 기술의 활용이 매우 중요한데, 이를 위해서는 이 기술들의 단가 하락이 중요하다. 단가하락을 가능하게 하는 국가 및 기술 혁신시스템(national or technological innovation system)의 중요성이 강조되고 있다. 이를 위해 시스템 차원에서 기술주도(technology-push)와 수요견인(demand-pull) 정책을 활용하고, 국가 상황 및 기술적 특성에 맞는 정책 패키지 구성 및 활용하는 것이 필요하다. 여기에서 기술주도 정책으로는 교육·훈련, 공공 R&D 투자, 실증 및 시범사업 비용 지원 등을 예시로 들 수 있으며, 수요견인 정책으로는 보조금 지원, 세제 혜택, 에너지 효율 제품 표준·라벨링 프로그램 등이 있을 수 있다. 이러한 정책적 도움으로 1 tCO₂를 감축하는 데에 \$100 이하만 소요되는 저비용 옵션들이 이미 다양하게 존재하게 되었다. 이러한 저비용 옵션들을 활용하는 것만으로도 2030년까지 2019년 배출량 대비 절반 이상을 감축하는 것이 가능하다고 IPCC 보고서는 분석한다. 이에, 우리나라에서 활용가능한 저비용 옵션들이 무엇인지 도출하고 기술별 감축 잠재력을 실현시키기 위한 방안에 대한 연구가 필요하다.

그러나 기후변화 대응을 위한 기술을 활용할 때 부정적인 측면들 역시 존재한다. 이러한 부정적인 측면의 예시로는 환경적 영향, 사회적 불평등, 해외 지식 및 제공자에 대한 과도한 의존, 분배의 영향, 리바운드 효과(기술혁신으로 효율성이 높아져 이전보다 더 많이 소비하는 행태) 등을 들 수 있다. 따라서 우리나라에서 활용하는, 혹은 앞으로 활용하려는 탄소중립 기술별로 기술 활용 시에 나타날 수 있는 부정적인 측면들을 파악하고 이를 해결하기 위한 거버넌스와 정책이 필요하다.

두 번째 시사점으로 감축기술과 적응기술의 통합적 접근에 대해 살펴보고자 한다. 우리나라는 지금까지 탄소중립 기술의 R&D 투자 시에 대부분의 경우는 감축기술과 적응기술에 대한 R&D가 별도로 진행되었다. 그러나 이번 IPCC 제6차 평가보고서는 지속가능발전을 향한 적응 및 완화 행동을 통합한 ‘기후탄력적 개발(climate resilient development)’ 경로의 중요성을 강조하고 있다. 즉, 감축행동과 적응행동이 유리되어 진행되기보다는 통합적으로 접근해야 한다는 점이 강조되고 있는 것이다. 따라서, 기후 위기를 상정하고, 별개로 개발된 감축기술과 적응기술을 통합적으로 활용한 모범 사례를 구축하여 확산하는 것이 필요하다. 또한, 감축과 적응에 동시에 필요한 융복합 기술의 R&D 투자와 이에 대한 연구 결과를 적극적으로 활용하는 것이 필요하다.

특히 기술에 대하여 감축과 적응의 측면을 동시에 고려해야 하는 이유는, 감축을 위해 활용한 기술이 오히려 기후변화에 대한 적응에는 장애요인으로 작용할 수 있는 ‘상충효과’가

5) 우리나라의 이러한 정책에 대해서는 동 장의 제2절에서 자세히 다루도록 하겠다.

발생할 수 있기 때문이다. IPCC 보고서는 이러한 상충효과에 대해서도 매우 중요하게 다루고 있는데, 특히 온실가스 저배출 에너지 시스템 분야 예시로 수력발전과 바이오에너지, 열발전 효율이 대표적인 사례로 소개되고 있다. 수력발전의 경우, 수력발전소 건설 시에 기후변화로 홍수, 가뭄이 심해지질 수 있으며 이로 인해 전력 생산에도 차질이 있을 수 있다. 바이오에너지의 경우, 원료가 되는 작물생산에 차질이 있거나 또는 원료가 되는 작물생산에 너무 많은 물과 토지가 소요되어 해당 지역주민들의 물과 식량공급에 차질이 있을 수 있다. 열발전 효율의 경우, 기후변화로 인해 기온이 상승하면 발전효율 하락할 수 있다.

한편, 과기정통부와 국가녹색기술연구소가 2017년에 수립한 기후기술 분류체계는 기후기술을 감축 기술, 적응 기술, 감축·적응 융·복합(mitigation/adaptation convergence) 기술의 세 종류로 구분하고 있다. 동 분류체계 상의 융복합 기술은 온실가스 감축에 기여하거나, 기후변화로 인한 피해를 예방하기 위한 활동으로 감축 및 적응 부문 기술이 병용되거나 다기술이 융·복합된 분야의 기술로 정의되며, 여기에는 신재생에너지 하이브리드, 저전력 소모 장비, 에너지 하베스팅, 인공광합성, 기타 기술이 포함된다 (염성찬 외, 2017). 이번 IPCC 보고서에서 정의하고 있는 감축과 적응의 통합적 접근이 현재 우리나라에서 활용되고 있는 감축·적응 융·복합 기술보다 훨씬 넓은 범위를 포괄하는 표현이므로, 우리나라 역시 감축 및 적응을 통합적으로 고려하는 것을 모든 기술 수준으로 넓혀 폭넓게 접근하는 것이 필요하다.

세 번째 시사점으로는 선-개도국 대상 기후기술 국제협력에 대해 살펴보고자 한다. 이번 제6차 평가보고서는 재정·기술·역량배양에 대한 국제협력과 다양한 국제협력 채널 활용을 강조하고 있다. 특히, 개도국과의 기술혁신 협력의 필요성이 강조되었는데, 이는 개도국들의 약한 가능여건들로 인해 저배출 기술혁신 및 채택이 다소 느리기 때문이다. 이러한 약한 가능여건의 예시로는 자원 부족, 기술적 시스템 및 인프라 부족, 계획 및 이행 역량 부족, 인적 자원 활용 제약, 기타 개발 우선순위, 환경 영향, 저부가가치 일자리 및 대외의존도 등이 있다. 따라서, 향후 우리나라가 개도국과의 기후기술 협력 방향 설정 시, 협력 대상인 개도국의 약한 가능여건을 파악하고, 이후 다양한 다자협력 채널들의 효율성·효과성 및 채널별 특성을 고려하여 협력 전략을 수립하여야 한다. 개도국과의 양자협력은 우리나라가 원천 보유하고 있는 기술의 해외실증 및 현지화를 도모하고, 동 기술의 적용에 수반되어야 하는 정책 수립을 목적으로 한 개도국 기술혁신시스템 구축 지원 방향의 협력 필요하다.

한편 우리나라는 다양한 협력 채널을 통해 기후기술협력을 추진하고 있다. 대표적으로, 다자 차원에서는 UNFCCC 하의 기후기술센터네트워크(CTCN) 기술지원 사업, 녹색기후기금(GCF) 역량배양 및 사업준비기금 사업, 그리고 탄소시장메커니즘 사업들을 진행 중이다. 또한 CTCN 협력연락사무소를 인천 송도에 유치하여 GCF와 CTCN 간 협력을 도모하고, 동시에 기후기술 연구·개발·실증에 대한 개도국 지원의 확대 및 활성화를 도모하고 있다. UNFCCC 바깥에서 형성된 P4G, GGGI, 다자개발은행 등의 기후대응사업에도 참여하고 있으며, ASEAN, EU 등의 지역기구를 활용한 사업에도 참여하고, 또한 양자간 과기공동위를 통해 사업을 개발하고 참여하고 있다. 따라서 향후 우리나라가 개도국과의 기술협력 사업을 추진할 때, 이번 제6차 평가보고서를 통해 강조된 기후기술 국제협력의 중요성을 고려하여, 기후변화 대응에 효과적인 사업을 우선적으로 고려할 필요가 있다.

제 2 절 (국내) 우리나라 녹색기술 RD&D 정책 방향6)

1. 탄소중립 10대 핵심기술 도출

IPCC 보고서에서도 강조된 바와 같이, 기후변화 대응을 위하여 기술의 역할이 강조되고 있음에 따라 우리나라 과기정통부는 2021년 3월에 ‘탄소중립 기술혁신 추진전략’을 발표하였다. 석탄발전 및 제조업의 비중이 높은 우리나라의 특성상 도전적인 탄소중립 목표의 실현을 위해 기술혁신이 무엇보다 중요하다는 판단이 이러한 기술혁신 추진전략을 마련하게 된 배경이 되었다 (과기정통부, 2021). 동 추진전략 마련을 위하여, 우리나라의 장기저탄소 발전전략(LEDS, long-term low greenhouse gas emission development strategies)을 기반으로 기술 부문별 현황과 감축 기여도, 주력산업 연관성, 정책환경을 고려하여 [그림 3-10]과 같이 탄소중립에 핵심적 기여가 가능한 핵심기술을 도출하였다. 이때, 각 핵심기술에 대한 현장 수요를 최대한 반영하기 위하여 산·학·연 전문가 88명이 동 전략 수립에 참여하였다. 그 결과, 탄소중립 10대 핵심기술로 ①태양광·풍력, ②수소, ③바이오에너지, ④철강·시멘트, ⑤석유화학, ⑥산업공정 고도화, ⑦수송 효율, ⑧건물 효율, ⑨디지털화, ⑩탄소포집·활용·저장(CCUS, carbon capture, utilization & storage) 기술이 최종 선정되었다.



[그림 3-10] 탄소중립 10대 핵심기술 도출 방향

출처: 과기정통부(2021) p. 3에서 발췌

탄소중립 10대 핵심기술 선정에서 더 나아가 우리나라 과기정통부는 2021년 9월에 각 기술의 기술혁신 추진전략을 구체화하여 한국에너지기술연구원과 함께 ‘탄소중립 기술혁신

6) 동 섹션의 내용은 2023년 동 과제 차원에서 진행된 연구 결과로 2023년 8월 도출 및 발간된 정기간행물 NIGT Focus 제1권 1호 「오채운·송예원·김태호. (2023). IPCC 제6차 평가 보고서 종합보고서 기반, 기후기술 대응 시사점」의 내용을 토대로 작성되었다. 2023년 올해 연구결과로 진행된 내용인바, 동 발간물의 내용이 약간의 수정을 거쳐 삽입되었다.

추진전략 - 10대 핵심기술 개발방향’ 보고서를 도출하였다. 동 보고서의 내용 중 10대 핵심기술에 대한 개발전략은 <표 3-15>와 같이 정리될 수 있다.

<표 3-15> 탄소중립 기술혁신 10대 핵심기술의 기술별 목표 및 개발방향

구분	10대 기술	개발 전략
에너지 전환	태양광·풍력	<ul style="list-style-type: none"> 태양전지 효율: (現) 27%(상용 '23) →('30) 35% →('50) 40% 풍력발전기 용량: (現) 5.5MW →('30) 15MW →('40) 20MW
	수소	<ul style="list-style-type: none"> 수소충전소 공급가(원/kg): (現) 7,000 →('30) 4,000 →('40) 3,000 수소 발전단가(원/kWh): (現) 250 →('30) 141 →('40) 131
	바이오 에너지	<ul style="list-style-type: none"> 바이오연료 가격경쟁력(동종 화석연료 대비): (現) 120~150% →('30) 100% →('40) 85%
산업 저탄소화	철강·시멘트	<ul style="list-style-type: none"> 수소환원제철 기술 연·원료 대체율(수소): (現) 0% →('40) 100% 시멘트 석회석 대체 가능성: (現) 0% →('40) 8% 시멘트 순환연료 대체가능율: (現) 24% →('40) 65%
	석유화학	<ul style="list-style-type: none"> 탄소중립원료 제품 가격경쟁력(동종 석유화학제품 대비): (現) 150% →('40) 100%
	산업공정 고도화	<ul style="list-style-type: none"> 반도체·디스플레이 공정가스 배출저감 기술 효율: (現) 80% →('40) 95% 산업공정 에너지효율 설계 오차: (現) 30% →('30) 5%
에너지 효율	수송효율	<ul style="list-style-type: none"> 차세대전지 배터리 밀도: (現) 250Wh/kg →('45) 600Wh/kg(상용화) 수소 고속충전 기술: (現) 1.6kg/분 →('30) 7.2kg/분
	건물효율	<ul style="list-style-type: none"> 건물 에너지 효율: ('30) 30% 향상 기술 확보 제로 에너지 건축비(리모델링 대비): (現) 130% →('45) 105%
	디지털화	<ul style="list-style-type: none"> 데이터 센터 전력 소모: ('30) 20% 이상 저감 계통 운영시스템 적용: ('40) AI 기반 차세대 계통 운영 시스템 적용
CCUS	CCUS	<ul style="list-style-type: none"> CO₂ 상용급 포집 가격 경쟁력: (現) \$60/톤 →('30) \$30/톤 →('50) \$20/톤 CO₂ 전환제품 가격 경쟁력: (現) 연구중 →('40) 100%

자료: 한국에너지기술연구원(2021) p. 44의 내용을 바탕으로 저자 정리

2. 한국형 탄소중립 10대 핵심기술 도출

앞서 살펴본 탄소중립 10대 핵심기술은 탄소중립 목표를 달성하기 위하여 우리나라의 과기정통부에서 선정한 핵심기술이었다. 그러나 기존의 단일 부처 중심의 기술개발 추진 체계를 탈피해야 하며 기술 실현(실증·사업화)까지 고려한 범부처 협업 지원 체계를 강화해야 한다는 필요성이 제기되었다. 이에, 단일 부처를 넘어 범부처 차원의 탄소중립 기술개발 방향성을 담은 ‘탄소중립 녹색성장 기술혁신 전략’을 관계부처 합동으로 2022년 10월에 발표하게 되었다(관계부처합동, 2022). 동 전략에는 17개 중점 분야에서 총 100개의 핵심기술(안)이 포함되어 있으며, 이는 2023년 5월 19일 국가과학기술자문회의 산하 ‘탄소중립 기술특별위원회’ 회의에서 최종 확정되었다. 여기에는 에너지 전환 부문의 8개 분야(태양광, 풍력, 수소 공급, 무탄소전력공급, 전력저장, 전력망, 에너지통합시스템, 원자력)의 35개 기술, 산업 5개 분야(철강, 시멘트, 석유화학, CCUS, 산업일반)에서 44개 기술, 수송·교통 2개 분야(친환경 자동차, 탄소중립 선박)에서 13개 기술, 건물·환경 2개 분야(제로에너지건물(ZEB), 환경)에서 8개 기술이 선정되었다(과기정통부 2023). 동 100대 핵심기술은, 먼저 선정된 10대 핵심기술이 이전 정부의 정책기조 하에서 과기부 중심으로 선정된 점과 달리, 2022년 들어선 새 정부의 기조에 따라 관계부처 합동으로 선정되었기에 부문 및 기술 선정에 있어 차이가 있다. 특히, 에너지 생산원의 다변화, 에너지 공급 인프라의 강조, 에너지 시스템 통합 등을 고려하는 등, 에너지 전환 부문의 변화가 뚜렷하다.

여기에서 주지할 사항은 동 100대 핵심기술은 이미 활용되고 있는 녹색기술뿐만 아니라 해외에서는 실증 및 상용화가 이루어지고 있으나 아직 우리나라에서는 실증연구가 이루어지지 않고 이제야 막 원천 R&D가 시작되는 기술이 있다. 100대 핵심기술 중 이러한 기술의 대표적인 예시로는 대기 중의 이산화탄소를 직접 포집하는 기술(DAC, direct air capture) 기술과 소형모듈원자로(SMR, small modular reactor) 기술이 있다. 이 두 기술은 2023년에 ‘신규’로 시작되는 녹색기술에 대한 원천 R&D 항목들에 속해 있다.

2023년에 신규로 새롭게 시작되는 녹색기술에 대한 원천 R&D 항목들을 살펴보면, 혁신 선도기술이자 청정 에너지 차원에서 차세대원전(SMR)에 대한 연구로 ‘혁신형소형모듈원자로’ 기술, 미래도전 기술 차원에서 수소의 발전용가스터빈의 ‘수소혼소전환 기술’, 저탄소 생태계 차원에서 ‘탄소중립산업핵심기술개발’과 ‘대기직접포집 및 활용(DACU, direct air capture & utilization) 기술’, 적응 흡수·자원순환 차원에서 ‘디지털 기반 기후변화 예측 및 피해 최소화 기술’ 개발이 포함되었다(과기정통부 2023, p.7, 8, and 10). 이러한 기술들에 대한 원천 R&D가 새로이 시작된다는 것은 이러한 기술들의 향후 활용/적용 필요성과 가능성이 높기 때문이다. 따라서, 이러한 기술들을 중심으로 향후 국내·외 실증과 활용을 활성화하기 위한 가능여건에 대한 연구가 필요할 수 있다.

따라서, 동 보고서에서는 올해 신규로 시작되는 녹색기술 중에서 감축과 관련된 대기직접포집 기술과 소형모듈원자로 기술을 중심으로 가능여건 관련 연구에 초점을 두고자 한다.

제 3 절 (국내) 2023년도 원천 R&D 시작 녹색기술: DAC 기술 및 SMR 기술

앞서 살펴본 바와 같이 한국형 탄소중립 100대 핵심기술에는 아직까지 우리나라에서 공식적으로 원천기술 R&D가 진행된 적이 없었던 기술들 역시 탄소중립에 효과가 있을 것으로 기대가 되면 포함되기도 하였다. 이로 인해 이러한 기술들에 다양한 정책적 관심 역시 증가하고 있으며, 몇몇 기술은 올해부터 정부 R&D 예산을 활용한 원천기술 연구가 공식적으로 시작되기도 하였다. 그 대표적인 기술이 DAC와 SMR이다. 본 절에서는 이 두 기술의 개념과 원천 R&D가 시작하게 된 배경에 대해서 살펴보려고 한다.

1. DAC 기술의 개념과 원천 R&D 시작 배경

DAC 기술은 대기 중의 이산화탄소를 제거하는 CDR 접근법의 일종으로, [그림 3-11]과 같이 대기 중의 공기를 흡수하여 화학적 방법으로 대기 중의 이산화탄소를 포집하는 기술을 의미한다. IPCC 보고서에서는 대표적인 CDR 접근법의 세 가지 기술(조림 및 재조림, 바이오에너지 탄소포집저장(BECCS), DACCS) 중 하나로 다루어지고 있다. IPCC는 전 지구적으로 온난화를 1.5°C로 제한하는 목표를 달성하기 위해서는 다양한 CDR 접근법을 반드시 활용해야 한다고 말하고 있으며, 그 중 DAC는 다른 CDR 접근법과 비교했을 때, 이산화탄소를 포집하는 데에 필요한 면적이 작고, 기술 및 설비를 어디든 쉽게 설치 및 활용할 수 있는 입지 자유도가 크다는 장점이 있다 (IPCC, 2022, Sec. 12.3.1.1). 이러한 DAC 기술은 단독으로 활용되기보다는 포집된 대기 중의 이산화탄소를 지중저장소 등의 저장소에 영구적으로 저장하는 직접대기포집저장(DACCS, direct air carbon capture and storage) 기술과, 포집된 이산화탄소를 활용하여 유용한 제품을 만듦으로써 제품 안에 이산화탄소를 저장하는 직접대기포집활용(DACCU, direct air carbon capture and utilization, 또는 DACU, direct air capture + utilization)으로 구분된다 (송예원·오채운, 2022, p. 11). 국제에너지기구(IEA, International Energy Agency)는 2050년에는 전 지구적으로 매년 약 1 GtCO₂ 상당의 이산화탄소가 DAC 기술을 이용해 제거될 것이라고 전망하였으며, 이를 위하여 DAC 기술에 대한 실증 연구가 2020년대에 활발하게 이루어져야 함을 강조하였다 (IEA, 2022).



[그림 3-11] DAC 설비의 예시(캐나다 카본엔지니어링社가 미국에 건설 중인 설비의 조감도)
출처: CE (2022)에서 발췌

우리나라 역시 2050 탄소중립 시나리오의 B안에 수송부문의 탄소중립 전략으로 DAC 기술의 활용에 대한 내용이 포함되어 있다. 수송부문의 온실가스 감축을 위해 다양한 감축 기술을 도입하여 활용되더라도 2050년 7.4 MtCO₂ 상당의 잔여배출량이 존재할 것으로 전망되기에, 이를 제거하기 위하여 DACCU 기술을 활용해 수송부문의 잔여배출량을 포집하여 이를 재생가능 연료(e-fuel)로 전환하여 다시 수송부문에서 활용하겠다는 것이다. 이러한 전략이 실현되면 수송부문의 배출량으로 다시 수송부문에서 활용될 연료를 만들게 되는 것으로, [그림 3-12]와 같이 닫힌 탄소 루프를 형성하게 될 것으로 기대를 모으고 있다 (2050탄소중립위원회, 2021, pp. 31-32, 63).



[그림 3-12] 2050 탄소중립 시나리오에서 밝히고 있는 DAC 활용 계획
출처: 2050탄소중립위원회(2021)의 p. 63에서 발췌

이에 우리나라는 올해에 처음으로 DAC 기술에 대한 원천기술 R&D를 추진하게 되었다. 지금까지 대학 및 연구기관의 자체 예산 혹은 CCUS 기술에 대한 연구예산의 일부를 활용하여 DAC 관련 기술에 대한 연구가 소규모로 존재하였던 적은 있으나, 우리나라에서 DAC 기술에 특화된 원천기술 연구는 최초로 시행되었다. 한국연구재단은 ‘DACU 원천기술개발사업’을 올해 초에 공고하였고, 최종적으로 한국과학기술연구원을 주관기관으로 하고 국가녹색기술연구소를 비롯한 여러 기관이 공동 및 위탁연구기관으로 참여하는 ‘공기 중 이산화탄소 동시 포집-전환 원천기술개발’ 컨소시엄이 선정되어 현재 사업을 진행하는 중에 있다.

2. SMR 기술의 개념과 원천 R&D 시작 배경

전 지구적으로 기후변화 대응과 에너지 안보 확보에 대한 관심이 급증하며 원자력에 대한 수요 역시 매우 커지고 있다. 우리나라뿐만 아니라 다른 나라에서도 기존의 원자력 발전에 대한 연구는 대형 원자력 발전소를 중심으로 한 중앙집중형 전력 생산에 대한 연구에 집중해왔다. 그러나 최근에는 이러한 대형 원전 대신, 소규모 분산형 전력원으로 원자력 발전을 활용할 수 있다는 가능성을 실현시키려는 시도가 이어지고 있다. 우리나라 역시 국가 전략기술 중 하나로 ‘차세대 원자력’이 선정되었으며 (과기정통부, 2022), 앞서 언급한 한국형 탄소중립 100대 기술에도 SMR이 이름을 올리게 되었다.

SMR은 기존 대형 원자로 출력량의 3분의 1 정도의 규모에 해당하는 ‘소형’ 원자로로 구성된다. 기존 대형 원자로의 출력량이 약 1,000~1,500 MWe 정도였으나 SMR은 통상 300 MWe 이하의 출력량을 가지는 원자로로 정의되며, [그림 3-13]과 같이 여러 원자로를 연결하여 활용하기도 한다. 또한 자연 물리 현상만으로 노심 냉각이 가능해 능동형 안전계통이 불필요하며 결과적으로 안전성이 향상될 수 있다는 장점이 있다. 또한 원자로의 크기가 작기 때문에 지하 매립, 해양 부유식 등 기존 대형 원전이 접근하기 어려웠던 장소에도 설치가 가능하며 이를 이용해 혹시 모를 방사능 누출로부터의 위험으로부터의 안전성이 더 향상되었다고 할 수 있다 (이태준, 2022).

이러한 전 지구적 배경과 SMR의 특징에 기인하여 우리나라 역시 가압경수로, 소듐냉각고속로, 납냉각고속로 등 다양한 형태의 SMR에 대한 연구를 수행해오고 있다. 그러나 대부분의 연구는 실험실 중심의 소규모 연구 단계에 있거나(소듐냉각고속로, 납냉각고속로 등), 다소 오래 전에 개발되어 최신의 기술을 활용하지 못하고 있어(가압경수로 유형 중 SMART 노형) 최신의 기술에 기반한 정부주도의 대규모 연구가 진행될 필요가 있었다. 이에 우리나라 정부는 세계 최고 수준의 경쟁력을 갖춘 ‘혁신형 SMR(i-SMR)’을 적기에 개발하여 이를 바탕으로 국제시장에 진출하기 위하여 정부 R&D 사업을 기획하였고, 올해부터 과기부와 산업부가 공동으로 혁신형 SMR에 대한 R&D를 공식적으로 시작하였다.

다음 장인 제4장에서는 우리나라에서 올해부터 원천 R&D가 공식적으로 시작된 DAC와 SMR의 두 기술을 사례로 하여 RD&D 가능여건에 대해 연구한 내용을 살펴해보도록 하겠다.



[그림 3-13] SMR 설비의 예시(미국 NuScale社의 SMR 조감도)

출처: DOE(2023)에서 발췌

제 4 장 직접대기탄소포집(DAC) 기술: 국제감축사업화를 위한 제도 수립 방안 연구

직접대기포집(DAC, direct air capture) 기술과 관련하여, 현재 우리나라의 기술 보유현황을 간략히 보면, 민간 기업이 습식기술에 대해서 자체 DACCU 기술을 보유하고 실증단계에 있으며, 정부 차원에서는 건식기술에 대해서 DAC 기술과 DACCU 기술에 대해서 2023년부터 원천 R&D가 시작되었다. 그런데, 이 DAC 기술을 중심으로, 우리나라에서는 정부 차원에서 두 가지 핵심 논의가 있었다. 첫째는 ‘국내’ 정책 차원에서 2030 국가결정기여(NDC) 목표 상의 부문별 조정을 하는 과정에서 DAC 기술에 기반한 별도의 감축목표 설정이 가능한가의 여부를 중심으로 정부 주관 전문가 논의가 있었다. 이는 제거/흡수에 포함된 CCUS 기술에 할당된 감축 목표 외에 DAC 기술을 활용한 별도 감축목표를 설정할 것인가의 여부를 둘러싼 논의이다. 이 정부 논의과정에 국가녹색기술연구소가 참여하였다.

둘째는 ‘국제’ 정책 신기후체제 하의 국제탄소시장 형성의 근간이 되는 파리협정 6조와 관련하여, 파리협정 제6.4조 메커니즘(지속가능발전메커니즘)에서 이산화탄소제거(CDR, carbon dioxide removal) 접근에 기반한 다양한 옵션들 중에서 배출권이 생산될 수 있도록 하는 활동에 DAC 기반 기술을 포함할 것인가의 여부에 대한 국제협상이 진행되었다. DAC 기반 기술로는 대기직접포집 및 저장(DACCS, direct air carbon capture and storage) 기술과 대기직접포집 및 활용(DACCU, DACCS, direct air carbon capture and utilization) 기술이 있다. 특히, 파리협정 제6.4조 메커니즘에 대한 CDR 옵션에 대해서는 유엔기후변화협약 사무국에 국가제안서를 제출해야 하는 바, 이를 위한 정부 차원의 대응이 있었고, 이에 국가녹색기술연구소가 참여하였다.

이 두 가지 측면의 참여과정과 연구결과를 구분하여 제1장과 2장에서 다루도록 하겠다.

<표 4-1> DAC 기술 관련 정부 정책 논의

구분	정책 논의 질문
국내정책	- (질문) 2030 NDC 목표 상의 부문별 조정 과정에서 CCUS에 할당된 감축목표와 별개로 DAC 기술을 통한 감축목표 설정이 가능한가의 여부
	- (정부 대응) 탄소중립녹색성장위를 중심으로 한 CCUS 부문 전문위원회/NDC 기술작업반 통합회의에서 동 사항 논의
국제정책	- (질문) 파리협정 제6.4조 메커니즘 하에서 배출권으로 인정받을 수 있는 이산화탄소제거(CDR) 접근법 옵션 중에 DACCS 또는 DACCU 기술이 포함되는 것이 필요한가의 여부
	- (정부 대응) 외교부를 중심으로 국내 ‘흡수원 협의체 회의’가 결성되고, 또한 이를 지원하는 연구 협의회*가 결성되어, 연구협의회를 통해 구체 국가제안서가 작성되고, 국내 흡수원 협의체를 통해 정책 방향을 조정하고, 이후 부처 회람을 통해 국가제안서 작성

자료: 저자 작성

제 1 절 (국내) DAC 기술 기반 NDC 국가 감축목표 설정 정책 논의

우리나라는 올해 초인 2023년 4월 「탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가기본계획」을 발표하였다 (Interagency 2023). 우리나라 정부가 동 계획을 도출한 가장 큰 목적은 우리나라가 2021년에 제출한 2030 국가결정기여(NDC, nationally determined contribution) 갱신본에 포함된 2018년 배출량 기준 대비 2030까지 40% 감축 목표에 대해서 부문별 감축목표를 조정하고, 연도별 감축목표를 설정하기 위함이다. 이 중에서 ‘부문별’ 감축목표를 보면, 배출 및 흡수·제거로 구분된 부문별 항목에 대해서 2021년 당초 계획 대비 감축 또는 제거량이 2023년 수정된 것을 볼 수 있다. 이는 하단의 [그림 4-1]을 참조할 수 있다. 그런데, 2023년 4월 이 내용이 도출되기 이전, 2023년 1월 탄소중립녹색성장위원회(이하 ‘탄녹위’)는 ‘흡수·제거’ 구분에 속한 이산화탄소포집·활용·저장(CCUS, carbon capture·utilization·storage) 기술에 대해서, 동 기술을 통한 2021년 당초 감축량이 적정한 것인지 아니면 과도한 것인지에 대해서 다시 기술적·경제적인 측면들을 전문가 회의를 통해 고려하였다. 동시에, 다른 혁신적인 기술적 수단들을 통해서 이 CCUS 기술을 활용한 감축목표를 달성할 수 있는 지 여부가 고려되기 시작했다.

구분	부문	2018년 배출량	2030 목표	
			기존 NDC ('21.10)	수정 NDC ('23.3)
배출량 합계		727.6	436.6 (40.0%)	436.6 (40.0%)
배출	전 환	269.6	149.9 (44.4%)	145.9 (45.9%) ¹⁾
	산 업	260.5	222.6 (14.5%)	230.7 (11.4%)
	건 물	52.1	35.0 (32.8%)	35.0 (32.8%)
	수 송	98.1	61.0 (37.8%)	61.0 (37.8%)
	농축수산	24.7	18.0 (27.1%)	18.0 (27.1%)
	폐기물	17.1	9.1 (46.8%)	9.1 (46.8%)
	수 소	(-)	7.6	8.4 ²⁾
	탈루 등	5.6	3.9	3.9
흡수	흡수원	(-41.3)	-26.7	-26.7
	CCUS	(-)	-10.3	-11.2 ³⁾
제거	국제감축	(-)	-33.5	-37.5 ⁴⁾

[그림 4-1] 2030 NDC 목표 달성 부문별 목표 수정

자료: Interagency(2023)의 p.10의 표를 그대로 발췌

이에 2023년 2월 13일 탄녹위 경제산업기술과 주관으로 개최된 「CCUS 부문 전문위원회 /NDC 기술 작업반 통합회의」에서 직접대기포집(DAC, direct air capture) 기술의 국내·외 RD&D 및 활용 현황과 이를 토대로 우리나라의 2030 온실가스 감축목표 기여 가능 여부에 대해서 국가녹색기술연구소에서 발표를 하게 되었다. 이 때 준비된 내용은 우리나라의 DAC 기술에 대한 R&D 현황을 우선 언급하고, 이후 해외에서 DAC 기술에 기반한 대규모 실증 및 활용 사업들이 성공적으로 수행된 사례를 언급하고, 이 때 이 기업들이 맞닥뜨린 장애요소와 이를 극복한 방식(정책 활용 포함)을 언급하였다. 그리고 이를 토대로, 우리나라가 자체 원천 R&D가 종료되는 2025년 이후 실증사업 전개 시 우리나라에서 2030까지 달성할 수 있는 감축목표를 예측하

여 발표하였다. 특히 이 발표전에 탄녹위 측에서 되도록 도전적으로 목표 달성을 요청한 바, 이를 반영하여 목표치를 ‘2028~2030년 DACCS 기술로 연포집량 400ktCO₂, DACCU 기술로 400ktCO₂ 포집 예상’ 한다고 발표하였다. 물론, 이를 달성하는 데에는 DACCS 기술과 DACCU 기술 별로 정책적·방법론적·인프라 측면에서의 전제조건들이 필요하다는 점을 함께 언급하였다. 이 때 발표된 내용은 다음의 <표 4-2>와 같다. 동 회의 때, DAC 기술만 발표된 것이 아니므로 많은 논의가 이루어지지 않는 않았으나, 다만 동 기술의 기술적 성숙도를 중심으로 논의가 짧게 있었다. 우리나라의 DAC 기술 성숙도가 너무 낮아 2030 NDC 감축목표에 DAC 기술을 반영하기에 무리가 있다는 내용이였다. 특히, 우리나라 민간업체인 (주)로우카본이 자체 DACCU 기술을 보유하고 이의 실증사업을 진행하고 있는 점에 대해서 매우 소규모로 진행되고 있다는 점과 우리나라 정부 차원의 원천 R&D가 이제 시작되었다는 점이 그 근거였다. 이에 대해서, 국가녹색기술연구소는 발표자료에 명시된 바와 같이, ‘기술성숙도’를 국내기술에 한정할 경우 아직 대규모로 이루어지지 않았고, ‘건식기술’에 기반한 우리나라 원천 R&D가 이제 시작한 점을 인정하나, 해외 기술의 경우 대규모 실증 및 활용이 진행되고 있으며, 우리나라 대기업들은 기술 라이선싱이 가능한 해외 ‘습식기술’을 중심으로 정부지원이 있을 시 실증사업을 진행하고자 하는 의향과 의지를 확인한 바 있다고 언급하였다. 동 회의는 다양하고 신규 기술 옵션의 가능성을 소개하는 자리인 바, 본격적인 논의는 그 다음 회의부터 진행되었다.

<표 4-2> (‘23.2.9일자) DAC 기술 기반 2030 NDC 목표 달성 기여 가능 여부

DAC 기술 기반 2030 NDC 목표달성 기여 가능 여부

<‘23. 2.9.(목) / 국가녹색기술연구소 오채운 책임, 송예원 연구원>

□ 우리나라 직접대기포집(DAC, Direct Air Capture) 기술 R&D 현황

- (‘21.10) 2050 탄소중립 시나리오 B안 수송부문 내연기관 차량 온실가스 배출 상쇄를 위해 DAC 기술 활용
- (‘22.10) 한국형 탄소중립 100대 핵심기술의 CCUS 분야*에 DAC 기술 포함
 - * 2030년 CCUS 분야 10.3백만톤 감축 목표 설정. CCS는 국내 대요량 저장소 확보 및 해외 폐가스전·폐유전 저장소 확보. CCU는 상용화 R&D 및 다양한 제도적 지원을 통한 민간 확산 접근
- (‘23~‘25) 한국연구재단 과학기술분야 DACCU 기술 R&D 연구 수행 예정

□ 해외 DAC 기술 실증·활용 성공 사례

- (사례) 캐나다 카본엔지니어링社*, 스위스 클라임웍스社** 등 민간기업 중심으로 자체 DAC 원천 기술 기반 대규모 실증 및 활용 사업 추진
 - * (습식) 美 텍사스에 연포집량 1백만CO₂ 규모로 건설 중(‘24년 구동 예정), 30백만CO₂ 규모 추가건설 추진
 - ** (건식) 아이슬란드에 연포집량 4천CO₂ 규모로 구동 및 36천CO₂ 규모로 건설 중

- (장애요소) ①사업 경제성 확보 (실증 적용 시 포집비용 증대 및 수익창출 비즈니스 사업화)
 - ②DAC 기술 적용 시, CO₂ 제거량의 정량화를 위한 국제 LCA 방법론 부재
 - (극복방식) ①사업화: 기술 라이선싱, 선구매 제도, 규제제도(환경규제*/탄소시장), 세제 혜택**
 - ②자발적·의무적 탄소시장에서 DAC 기술 사업화 인정 및 방법론 개발 제언
 - * (美 캘리포니아 저탄소연료표준) 연료기업의 연료 온실가스 배출치 제한 허용되는 감축사업 기술에 DAC 포함
 - ** (미국 45Q 세액공제) DAC 기술 도입 회사에 CO₂ 1톤당 최대 50달러(IRA 하에서는 최대 180달러) 공제
- NDC 목표 달성 기여 가능성 타진**
- (기여분) 2028~2030년 DACCS 기술로 연포집량 400ktCO₂*, DACCU 기술로 400ktCO₂ 포집**
 - 예상
 - * 국내 원천 R&D 3년 수행후 DAC 중규모 실증시설 건설 2년 소요 예상('26~'27). 현재 동해가스전의 CCS 실증이 연 40ktCO₂ 이상 규모로 추진 중으로, 이를 우선 활용할 경우, 2028년부터 감축량 확보 가능
 - ** 2023년 (주)로우카본에서 일포집량 10tCO₂(약 연간 4ktCO₂) 규모 실증 시설 완공. DACCU 기술 개발이 확대되고 있고 많은 기업들이 동 기술을 적용할 경우, 2030년까지 40ktCO₂ 확보 가능할 것으로 예상
 - (전제조건)
 - (DACCS 기술) ①저장소 확보, ②포집에 사용되는 열·전력 에너지 공급 및 접근 용이성, ③무탄소에너지(재생에너지, 원자력 등) 활용, ③국제적으로 공인된 LCA 방법론 설정
 - (DACCU 기술) ①지원 정책 다양화&차별화, ②배출회피 개념 인정, ③LCA 방법론 설정
 - (실증 및 적용사업에 대한 기업 의지) 국내 민간기업 (주)로우카본이 자체 습식포집 DAC 기술로 소규모 기술실증 성공 및 대규모 기술실증 추진중. 또한, 민간 대기업(예시: GS 건설 등)들은 우리나라 원천기술 또는 해외 기술 라이선싱을 통해 기술실증 희망

자료: 저자 작성

이후, 2023년 2월 15일 탄녹위 경제산업기술과 주관으로 「CCUS 부문 전문위원회 회의」가 개최되었고, 이 때 DAC 기술에 기반한 별도 2030 NDC 감축목표 설정에 대한 논의가 이루어졌다. 동 논의 당시, 부처 관계자, (기술 또는 정책) 전문가, 민간섹터 관계들 간에 DAC 기술에 대해서 긍정적인 관점과 부정적인 관점으로 의견이 구분되었다. 이러한 논의를 세부 주제로 나누면 크게 네 가지 측면으로 볼 수 있다. 첫째는 기술성숙도, 둘째는 환경적 효과성, 셋째는

투자 효과성, 넷째는 국제 방법론 존재 여부이다. 논의된 사항을 정리하면 다음의 <표 4-3>과 같이 정리될 수 있다. 부정적 의견이 먼저 언급되고 이를 반박하는 긍정적 의견이 제시되었으나, 이러한 긍/부정적 의견의 대립으로 DAC 기술에 대한 별도의 NDC 감축목표 설정에 대해서 합의점에 이르지 못했다.

<표 4-3> DAC 기술 기반 별도 감축목표 설정에 대한 전문가 찬/반 의견

구분	정책 논의 질문
기술 성숙도	- (부정) 국내 기술 성숙도가 매우 낮음 · (주)로우카본이 보유한 기술의 기술실현성에 대한 검증이 아직 미비하며, 소규모로 진행되고 있음 · DAC 기술에 대한 국내 원천 R&D가 2023년에 시작됨
	- (긍정) 국내 기술 성숙도가 낮을 수 있으나 해외 기술의 경우 대규모 실증 및 활용이 이루어지고 있음 · 해외기술 라이선싱을 통해 실증사업을 원하는 국내기업들이 존재함. 다만, 기 기술에 대한 실증에 많은 비용이 필요한데 정부 지원을 희망중 · DAC 기술 기반 NDC 목표가 설정될 경우, 이에 대한 대규모 실증을 위한 재정 지원 등이 확보되어 기술성숙도가 가속될 수 있음
환경적 효과성	- (부정) DACCS 기술의 경우 대기중에서 이산화탄소를 포집하더라도 포집에 들어가는 에너지가 커서 그만큼 이산화탄소 배출이 있는 바, 실제 '제거'가 이루어지는 지 불확실함
	- (긍정) DACCS 기술로 대규모 실증에 성공한 해외기업들의 경우로 설명 · 우선 에너지를 재생에너지를 활용하고 있으며, · 다음으로 에너지 및 전기 사용 등에 의한 배출량을 제하더라도 '제거량(removal amount)'이 월등히 많으며, · 자체 LCA를 통한 방법론을 구축하여 공개하고 있음
투자효과성	- (부정) CCUS는 고농도 CO2에서 이산화탄소를 포집·저장하는데, 이 때 고농도에서 포집하는 것이 훨씬 투자 대비 효과성이 높은데, 왜 대기중 저농도에서 CO2를 포집하는 데에 부족한 예산을 할당해야 하는가로 비판
	- (긍정) CCUS는 배출원에서 이산화탄소를 저감하는 배출저감(emission reduction) 활동이고, DAC는 대기중에서 이산화탄소를 제거하여 저장하는 제거(removal) 활동으로 엄연히 구분된 감축 활동임을 강조. 배출저감을 아무리 해도 배출을 줄일 수 없는 산업 부문에 '제거' 활동을 진행할 수 있는 옵션을 제공하는 것이 중요
국제적 방법론	- (부정) DAC 기술을 활용해 제거하는 활동 대해서 국제적으로 인정받는 방법론이 부재
	- (긍정) 자발적 탄소시장에서는 방법론이 존재하며, 현재 파리협정 제6.4조에서도 제거 활동으로 인정받는 옵션에 DAC 기술이 논의되고 있다고 언급하며, 인정받게 될 경우 국제적으로 인정받는 방법론 구축 작업이 진행될 것으로 예상된다고 언급

자료: 저자 작성

이후, 2023년 2월 16일 「DAC 기술 관계기관 간의 별도의 간담회」가 개최되었다. 기존의

전문가 회의가 대부분 CCUS 전문가들로 구성된 회의인 바, DAC 기술에 대한 R&D 주체 그리고 동 기술로 향후 사업화에 관심이 있는 주체들이 DAC 만의 별도 2030 NDC 감축목표 설정이 필요한가에 대한 논의하여 합의점을 찾는 것이 필요하다고 인식하였기 때문이다. 이에, 탄녹위 경제산업기술과, (주)로우카본, GS 건설, 에너지기술연구원, 한국과학기술원, 고등기술원, 그리고 국가녹색기술연구소가 참여하는 간담회가 개최되었다. 이번 회의에서의 논의 내용을 그러나 「CCUS 부문 전문위원회 회의」와 달리 대부분의 우려가 기술성속도와 정책의 필요성을 중심으로 이루어졌다는 점이 주목할만하다. 이는 다음의 <표 4-4>에 정리되어 있다. 부정적인 측면에서 별도 DAC 기술 기반 목표 설정에 매우 조심스러웠으나, 향후 추가 R&D 및 실증을 위한 정부 지원의 필요성을 인식하면서 별도 감축 목표 설정과 동시에 도전적인 목표 설정으로 방향을 선회하게 되었다.

<표 4-4> DAC 기술 기반 별도 감축목표 설정에 대한 전문가 찬/반 의견

구분	정책 논의 질문
기술 성속도	- (부정) 국내 기술이 아직 성속도가 매우 낮음 → 낮은 기술성속도를 기반으로 적절한 목표가 이미 설정되었다는 입장 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px 0;"> 「CCUS 탄소중립 기술혁신 전략 로드맵(안)」에서 DAC 기반 2030 포집 목표 설정* * 2030년 연간 포집량 1천~4천tCO₂, 2040년 연간 포집량 5만tCO₂, 2050년 연간 포집량 50만tCO₂ </div> → 단기의 2030 NDC 목표가 아닌 2050 장기저탄소전략에 따라 진행한 것이 필요하다는 입장
	- (긍정) 국내 기술 성속도가 낮을 수 있으나 해외 기술의 경우 대규모 실증 및 활용이 이루어지고 있음 → 국내기술과 해외기술을 모두 활용한 투트랙(two track) 접근이 필요하다는 입장 · 국내기술인 원천 R&D가 종료된 후 추후 실증을 위한 재원이 필요 · 해외에서는 대규모 실증과 활용 사업으로 진행중인데 국내에서는 이것이 진행되지 않는 바 국제경쟁력이 떨어질 수 있음. 이에, 해외기술을 라이선싱해서 실증사업을 해보는 것이 우선적으로 필요하며 이를 위해서는 정부 재정지원이 필요 → 이 두 개 접근 모두 정부 재정지원이 필요한 데, 2030 NDC 목표에 DAC 기술이 포함되지 않으면, 재정지원을 받을 수 있는 정책적 근거가 부재하게 됨. 따라서, DAC에 대한 별도 감축 목표 설정이 필요함
국제적 방법론	- (부정) DAC 기술을 활용해 제거하는 활동 대해서 국제적으로 인정받는 방법론이 부재
	- (긍정) 자발적 탄소시장에서는 방법론이 존재하며, 현재 파리협정 제6.4조에서도 제거 활동으로 인정받는 옵션에 DAC 기술이 논의되고 있다고 언급하며, 인정받게 될 경우 국제적으로 인정받는 방법론 구축 작업이 진행될 것으로 예상된다고 언급

자료: 저자 작성

이를 토대로, 2023년 2월 17일 탄녹위 경제산업기술과 주관으로 「CCUS 부문 전문위원회

회의」가 다시 개최된 바, 이 때 NDC 목표 달성 기여분에 대해서 DAC 기술 전문가 간담회를 통해 합의된 ‘2030년 기준 CCUS 감축분의 0.5%(50ktCO₂ 상당량)를 DAC 기술 사업으로 포집 및 제거’ 한다는 목표가 발표되었다. 발표된 사항은 다음의 <표 4-5>과 같다.

<표 4-5> (‘23.2.17일자) DAC 기술 기반 2030 NDC 목표 달성 기여(안)

CCUS 회의: DAC 기술 기반 2030 NDC 목표달성 기여(안)

<‘23. 2.17.(금) / 국가녹색기술연구소 오채운 책임연구원, 송예원 연구원>

□ 우리나라 직접대기포집(DAC, Direct Air Capture) 기술 위상

- (‘21.10) 2050 탄소중립 시나리오 B안 수송부문 내연기관 차량 온실가스 배출 상쇄를 위해 DAC 기술 활용(e-fuel 생산 및 활용)
- (‘22.10) 한국형 탄소중립 100대 핵심기술의 CCUS 분야*에 DAC 기술 포함
* 2030년 CCUS 분야 10.3백만톤 감축 목표 설정. CCS는 국내 대용량 저장소 확보 및 해외 폐가스전-폐유전 저장소 확보. CCU는 상용화 R&D 및 다양한 제도적 지원을 통한 민간 확산 접근
- (‘22.11) CCUS 탄소중립 기술혁신 전략 로드맵(안)에서 DAC 기반 2030 포집 목표 설정*
* 2030년 연간 포집량 1천~4천CO₂, 2040년 연간 포집량 5만CO₂, 2050년 연간 포집량 50만CO₂
- (‘23~‘25) 한국연구재단 과학기술분야 DAC 기술 기반 국가 주도 R&D 연구 예정
- (민간 자체 연구) (주)로우카본이 자체 습식포집 DAC 기술로 소규모 기술실증 완료. 2023년 (주)로우카본에서 일포집량 10tCO₂(약 연간 4ktCO₂) 규모 실증 시설 건설중

□ 해외 DAC 기술 실증·활용 성공 사례

- (사례) 캐나다 카본엔지니어링社*, 스위스 클라임웍스社** 등 민간기업 중심으로
자체 DAC 원천 기술 기반 대규모 실증 및 활용 사업 추진
* (습식) 美 텍사스에 연포집량 1백만CO₂ 규모로 건설 중(‘24년 구동 예정), 30백만CO₂ 규모 추가건설 추진
** (건식) 아이슬란드에 연포집량 4천CO₂ 규모로 구동 및 36천CO₂ 규모로 건설 중
- (장애요소) ①사업 경제성 확보 (실증 적용 시 포집비용 충당 및 수익창출 비즈니스 사업화)
②DAC 기술 적용 시, CO₂ 제거량의 정량화를 위한 국제 LCA 방법론 부재
- (극복방식) ①사업화: 기술 라이선싱, 선구매 제도, 규제제도(환경규제*/탄소시장), 세계 혜택**
②자발적·의무적 탄소시장에서 DAC 기술 사업화 인정 및 방법론 개발 제언

* (美 캘리포니아 저탄소연료표준) 연료기업의 연료 온실가스 배출치 제한. 허용되는 감축사업 기술에 DAC 포함

** (미국 45Q 세액공제) DAC 기술 도입 회사에 CO₂ 1톤당 최대 50달러(IRA 하에서는 최대 180달러) 공제

□ NDC 목표 달성 기여분

○ (기여분*) 2030년 기준 CCUS 감축분의 0.5%(50ktCO₂ 상당량)를

DAC 기술 사업**으로 포집 및 제거

* DAC 관계기관(정부, 민간, 연구계)이 2030 DAC 기여분에 대해 간담회('2.16)를 갖고 도출

** ①DAC 기술 사업은 DACCS와 DACCU 기술 기반 사업으로 구분하여 접근하되, 별도 목표는 미설정

②1세대 DAC 기술 라이선싱 기반 실증사업 수행과 2세대 DAC 원천기술 R&D 확대 병행(two-track) 접근

③DACCU 기술은 광물화 사업 우선 추진하고, 화학전환 사업은 R&D 추진을 고려하여 장기적 접근

○ (전제조건) 정부 R&D 및 실증 지원과 국내/외 제거 방법론 인증 노력

- (DACCS 기술) ①저장소 확보, ②포집에 사용되는 열·전력 에너지 공급 및 접근 용이성, ③무탄소에너지(재생에너지, 원자력 등) 활용, ③국제적으로 공인된 LCA 방법론 설정

- (DACCU 기술) ①지원 정책 다양화&차별화, ②배출회피 개념 인정, ③LCA 방법론 설정

자료: 저자 작성

이러한 정부 차원의 심도있는 논의와 고려에도 불구하고, 2023년 4월 발표된 「탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가기본계획」에 DAC에 대한 별도 감축목표는 최종적으로 포함되지 못했다. 정부정책에 반영되기 위해서는 정부/전문가/이해관계자들 간의 합의가 이루어져야 하는데, 결국 찬/반의 의견 대립으로 합의에 이르지 못했기 때문이다. 그러나, 이번 DAC 기술에 기반한 별도 감축목표 설정에 대한 논의는 많은 합의를 갖는다. 첫째, 2030 NDC 목표 달성을 위해 정부가 다양한 옵션들을 고려하고 있으며, DAC 기술과 같은 신규의 혁신기술에 대해서도 그 가능성을 열어둔다는 점이다. 둘째, 전세계적으로 DAC 기술에 대한 대규모 실증과 활용 사업의 성공으로 DAC 기술이 주목을 받고 있으며, 이러한 성공 뒤에는 해당 국가 정부들의 다양한 지원정책이 있었다는 점이다. DAC 이해관계자들이 DAC 기술을 2030 NDC 목표에 넣고자 한 이유는 이 기술의 감축 기여도 보다도, 이 기술에 대한 R&D 및 실증에 대한 ‘지원’이 시급하기 때문이다. 따라서, 비록 2030 NDC 목표에 포함되지는 못했다 하더라도, 이를 통해 DAC 기술의 감축노력의 일환으로써의 의미와 정부지원의 필요성에 대해서 정부 및 전문가들 사이에 인식 및 확산되었다는 것만으로도 의의가 있다. 셋째, 국제적인 DAC 기술 관련 현황과 우리나라의 DAC 기술에 대한 민간 및 공공 RD&D 현황을 보면서 우리나라에 필요한 DAC 기술 RD&D 활성화 정책 방향을 모색할 필요가 있다. 또한, 차기 2035 NDC 목표에 대한

설정 역시 향후 논의될 예정인 바, 차후 논의 때에는 DAC 기술이 별도의 감축 목표 달성 옵션으로 들어갈 수 있도록 하기 위해 다른 정책적 접근법에 대한 고민이 필요할 수 있다.

제 2 절 (국제) 3파리협정 제6.4조 메커니즘 국가제안서 작성 정책 논의 과정: ‘제거 활동’ 에 DAC 기술 포함에 관한 사항

파리협정 제6.4조 메커니즘 하에서 ‘제거(removal)’ 활동에 대한 제도 개선 논의가 이루어지고 있다. 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 권고안을 도출할 것을 결정하였다. 이에, 감독기구는 ‘제거’에 대한 입장을 파악하기 위해 이해관계자(stakeholder)들의 입장을 2022년 10월까지 받고 (UNFCCC 2022b) 이를 토대로 권고안 초안을 도출하였다 (UNFCCC, 2022c).⁷⁾ 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, 우리나라에서는 2022년 12월부터 이산화탄소 ‘제거’ 관련된 연구기관들 간의 논의가 시작되었다. 이 때부터, 신규조림·재조림 활동에 대한 국내·외 규칙 및 지침 수립에 관여하고 있는 국립산림과학원, 해양 부문의 해양환경공단, 농업 및 토지 이용 부문에 농촌진흥청, 내륙습지에 한국환경원, 그리고 직접대기탄소포집(DAC, direct air capture) 기술 부문에 국가녹색기술연구소가 참여하는 전문가 그룹이자 연구협의회가 형성되었다.⁸⁾ 그리고 이 연구협의회의 첫 번째 회의(‘22.12.14)에 관계부처인 외교부와 농림부, 그리고 추가 기관으로 서울대와 한국에너지공단이 참여하였다. 동 회의에서 국가제안서 작성의 필요성과 준비방안에 대한 논의가 이루어졌고, 내용적인 측면에서 국가제안서 작성에 대해서는 연구협의회가 리드를 하고, 이어 정부 차원의 검토와 대응에 외교부를 중심으로 한 정부 협의체인 ‘흡수원(removal) 협의체’를 구성하여 대응하는 것으로 하였다. 대응 일정은 다음의 <표 4-6>과 같다.

<표 4-6> 국가제안서 작성 활동

구분	활동
----	----

7) 권고안 초안의 원 제목은 ‘Recommendations on guidance for activities involving removals under the Article 6.4 Mechanism’이다.

8) 동 연구협의회를 ‘파리협정 제6.4조 흡수원 의제 대응 연구협의회’이다.

구분	활동
연구협의회	- (2022.12.14.) 6.4조 메커니즘 흡수/·제거 관련 논의 경과와 동향 공유 및 국가제안서 작성 필요성 논의* · 논의 주체: 외교부, 농림축산식품부, 국립농업과학원, 국립산림과학원, 한국에너지공단, 한국환경연구원, 해양환경공단, 국가녹색기술연구소, 서울대 등
외교부 주재 회의	- (2023.1.19. 서울역 근처 회의실) · 제6.4조 메커니즘 관련 국제협상 현황 및 이산화탄소제거 접근법 국가제안서 작성 방안 논의
연구협의회	- (2023.1.26.) 분야별 국가제안서 작성 항목과 작성 방향 공유
연구협의회	- (2023.2.2.) 분야별* 국가제안서(안) 초안 검토 및 논의 * (육상) 국립산림과학원, 한국환경연구원, (해양)해양환경공단, (공학) 국가녹색기술연구소
외교부 흡수원 협의체	- (2023.2.9. 외교부) · 파리협정 제6.4조 흡수원 의제 대응을 위한 제1차 흡수원 협의체 개최
연구협의회	- (2023.2.20., 포룸더모스트) · 파리협정 제6.4조 흡수원 활동 관련 활동에 관한 국가제안서(안) 검토 및 부처간 쟁점사항 논의
연구협의회	- (2023.2.28.) 국가제안서 초안 마련
외교부 흡수원 협의체	- (2023.3.6. 국립산림과학원 산림과학관 회의실) · 파리협정 제6.4조 흡수원 의제 대응을 위한 제2차 흡수원 협의체 개최
외교부	- (2023.3.6.~3.12) 국가제안서 관계부처 회람 및 수정 작업 · 국가녹색기술연구소는 외교부/산업부 의견에 따라 내용 수정
연구협의회	- (2023.3.15.) 국가제안서 국내 차원의 최종 수정본 완료
외교부	- (2023.3.13. 이후) 외교부가 국가제안서에 대해 우리나라가 속한 협상그룹인 환경건전성그룹(EIG)에 회람 및 논의
흡수원 협의체	- (2023.4.7.) 외교부에서 ‘한국’ 단독으로 국가제안서 제출 · (내용) 파리협정 6.4조 메커니즘에서 감축활동 유형의 ‘제거/흡수(removal)’의 정의와 요건에 대한 우리나라 국가 입장

구분	활동
	<ul style="list-style-type: none"> · (영문명) Views on rules, modalities and procedures for the mechanism established by Article 6, paragraph 4, of the Paris Agreement · (국문명) 파리협정 6.4조 메커니즘을 위한 규칙/양식/절차에 대한 견해
연구협의회	<ul style="list-style-type: none"> - (2023.9.25., 서울역 공유와 공감) · 제출된 국가제안서 기반, 파리협정 제6.4조 감독기구 논의 동향 · 각 분야별* 추진현황 및 향후 계획 논의 * 산림, 해양, 농업, 내륙습지, DAC 기술

자료: 본문 내용 토대로 저자 정리

진행사항에 대해 좀 더 자세히 살펴보면, 연구협의회는 1월 중에 국가제안서 작성 방향과 쟁점 사항들을 추출하고 우리나라 입장 가(안)을 수립하였다. 1월 26일 개최된 연구협의회에서 국가녹색기술연구소가 제출한 자료는 다음의 <표 4-7>과 같다.

<표 4-7> ('23.1.26일자) 국가녹색기술연구소 제출 의견서

<p>(Suggestion) National view on ‘removal’ from Republic of Korea</p> <p>January 26, 2023</p> <p style="text-align: right;">National Institute of Green Technology Chaewoon Oh, Yewon Song</p> <p>Korea would like to express our utmost appreciation for this opportunity to provide Korean view on activities involving removals on the ground of paragraph 19 of FCCC/PA/CMA/2022/L.14 (UNFCCC 2022). Along this line, Korea would like to express our gratitude to the Supervisory Body for formulating ‘recommendations on guidance for activities involving removals under the Article 6.4 Mechanism’ .</p> <p>1. Context</p> <p>Korea thinks that Article 6.4 Mechanism is a venue to deploy removal activities with great mitigation potentials. Also, the acknowledgement of extended activities of removal and the formulation of regulatory requirements for mitigation outcomes will expand a compliance carbon market and also give a clear regulatory standard on the variety of removal activities undertaken and credits generated by dispersed voluntary carbon market systems.</p> <p>2. Definition</p> <p>2.1 Definition on “removal”</p>

Korea thinks that the current definition on ‘removal’ will be a good starting point for further definitional development. The current definition as indicated in the recommendation is well inclusive of all anthropogenic removal activities and well reflexive of the definition on carbon dioxide removal (CDR) made by the IPCC sixth assessment report WGIII (mitigation).

It is because ‘definition’ on ‘removal’ needs to be inclusive of all removal activities by scope, type, and scale and in consideration of future technological innovation. Particularly, definition needs to be comprehensive enough to include direct air carbon capture and storage (DACCS) and direct air capture and carbon utilization (DACCU) technologies (or technological processes) as eligible activities. Direct air capture with ‘carbon utilization’ will be an indispensable mitigation option for countries which do not have sizable geological, terrestrial, or ocean storage site. In this regard, including ‘product’ as a durable storage and implying the eligibility of DACCU technology is a major step forward in this definitional approach.

2.2 Definition on removal options (types and activities)

There can be a variety of removal types and activities. Korea thinks that essential removal types need to be enumerated, and they need specific definitions. The types of removal activities that require definitional approaches are as follows:

- Land-based approaches
- Ocean-based approaches
- Engineering-based approaches
 - Type: Direct air capture (DAC) technology-based removal activities
 - Specific activities: DACCS, DACCU

For the definition of DAC, DAC technology is a technology to be connected to be stored in a geological, terrestrial, or ocean reservoirs or product. If capture CO₂ is (transported and) stored in a geological, terrestrial, or ocean reservoirs, DAC becomes a DACCS technology. Meanwhile, if capture CO₂ is (transported and) converted and stored into a product, DAC becomes a DACCU technology. In this regard, DACCS technology is differentiated from CCS technology. (Further elaborated later)

3. Requirements

3.1 Monitoring

Korea thinks that paras 6~10 well capture the basic requirements for monitoring the removal activities. (para 6 & 10이 DAC 기술 관련과 핵심)

Regarding technological removals by DACCS technologies, monitoring for geological storage can rely on the existing monitoring requirements and regulations of the CCS technology-based mitigation activities of the Clean Development Mechanism.

3.2 Reporting

Korea thinks that paras 11~14 well capture the basic requirements for formulating monitoring

reports.

3.3 Accounting for removals

Regarding para 15, Korea thinks that this well captures the basic accounting approach for removal activities by setting baseline and deducting activity emissions and leakage emissions. In advance, particular types of removal activities such as DACCS and DACCU require more specific accounting methods because DACCS and DACCU are technology-based CDR approaches. In the first place, a cradle-to-grave life cycle assessment (LCA) approach is supported. In the second place, DAC-based removal activities are experiencing on-going and rapid technological innovation and advancement. Therefore, Korea thinks that LCA approach to representative removal activities (including DACCS and DACCU) needs to be prepared by a group of experts and acknowledged by Supervisory Body. Regarding para 17, this deals with an activity involving removals that results in emission reductions. Korea thinks that, in addition to para 17, there should a separate para that deals with an activity involving removals that result sin emission avoidance. In the specific case of DACCU where CO₂ is captured from the atmosphere and stored into a product temporarily, CO₂ is utilized as alternative resources to CO₂ emitting resources. In this case, net CO₂ removal can be zero due to temporary storage, but the effects of emission avoidance remain.

3.4 Crediting period

Regarding para 18, Korea thinks that there should be an additional requirement that crediting period is applied in a flexible manner based on removal activity types and activities. Also, Korea thinks that huge time and energy that are required for the removal project preparation need to be considered. Also, by the types of removal activities, the way to approach crediting period can be varied.

3.5 Addressing reversals

Permanence is the most challenging barrier in removal activities. Therefore, reversal, which is the cause of non-permanence, is something to be addressed. In this regard, Korea thinks that this section on ‘addressing reversal’ needs to consider the specification of requirement on ‘permanence’ as well.

Different types of removal activities generate credits in different degrees of durability (non-permanence). Korea thinks that allowing the generation of credits in different degrees of durability (non-permanence) will push the experimentation and deployment of removal technologies. In this regard, Korea hopes that the way to manage the different degree of durability (or non-permanence) by the different types of removal activities needs to be considered. Even within the type of removal activity of DACCU, there are cases of low permanence such as beverage carbonation or synthetic fuel, while there are cases of high permanence such as concrete hardening or mineralization.

In advance, regarding permanence period, Korea thinks that permanence period is differently acknowledged by different types and activities of removal. For the fungibility of removal credits, Korea thinks that there should be a standard permanence period.

3.6 Avoidance of leakage

Korea thinks that para 20 well captures the requirement to avoid leakage. Specific requirement on the adjustment factors needs to be inserted later.

3.7 Avoidance of other negative environmental and social impacts

Currently, the Supervisory Body review the sustainable development tools in use in existing market-based mechanisms with a view to developing similar tools for the mechanism (UNFCCC 2021, para 5(c)). Korea thinks that tools to be developed can be applied to the removal activities.

References

IPCC. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change.

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf. Accessed on January 26, 2023.

UNFCCC. (2021). Rules, modalities and procedures for the mechanism established by Article 6, paragraph 4, of the Paris Agreement. <https://unfccc.int/event/cma-3?item=12%20b>. Accessed on January 26, 2023.

UNFCCC. (2022). Rules, modalities and procedures for the mechanism established by Article 6, paragraph 4, of the Paris Agreement. <https://unfccc.int/event/cma-4?item=14>. Accessed on January 26, 2023.

자료: 저자 작성

연구협의체의 논의를 토대로, 외교부 주관 제1차 흡수원 협의체(‘23.2.9)에서 쟁점 별로 우리나라 입장(안)을 발표하였다. 이때 외교부에서 발표된 자료는 다음의 <표 4-8>과 같다. 이 때 논의된 사항을 토대로, 연구협의회에서 국가제안서 초안을 작성하였다. 이 때 국가녹색기술연구소는 DAC 기술을 중심으로 국가제안서 수정사항을 공유(‘23.2.16)하였다 (<표 4-9> 참조). 이후, 연구협의회 해당 기관 별로 초안에 대한 내용과 상호 검토 회의(‘23.2.20)가 개최되었다. 이후, 국가제안서의 내용 조정 및 수정 작업이 계속해서 이루어지고, ‘23.2.28일 국가제안서 초안이 마련되었고, 이에 대해 제2차 흡수원 협의체가 개최(‘23.3.6)되었다. 이 논의를 통해 수정 작업이 다시 이루어진 국가제안서에 대해서 외교부가 관계부처 회람을 통해 의견을 받아 이를 토대로 연구협의회가 수정작업을 가졌다. 이후 우리나라가 속한 UNFCCC 협상그룹인 환경건전성그룹(EIG, Environmental Integrity Group)에 대한 회람 및 논의가 있었으며, 최종적으로 협상그룹이 아닌 우리나라 단독으로 국가제안서가 <표 4-10>과 같이 UNFCCC 사무국에 제출되었다.

<표 4-8> ('23.2.9일자) 국가제안서 작성 방향 외교부 논의자료

파리협정 제6조: 6.4조 메커니즘 下 흡수원 관련 국가제안서(안)

국립산림과학원 국제산림연구과 김래현 연구관, 송민경 연구사
국가녹색기술연구소 오채운 책임연구원, 송예원 연구원
해양환경공단 이숙희 차장, 함주영 대리
한국환경연구원 명수정 선임연구위원
국립농업과학원 정현철 연구관

국가제안서 요청 사항

- 흡수원 활동에 대한 당사국과 옵저버들의 의견 제출 요청(~2023.3.15.)
 - 흡수·제거 활동, 모니터링, 보고, 흡수량 계정, 인증 기간, 역배출 처리 방안, 누출 방지 방안, 환경·사회에 대한 부정적 영향 방지 방안 등

FCCC/PA/CMA/2022/L.14 (Para.19)

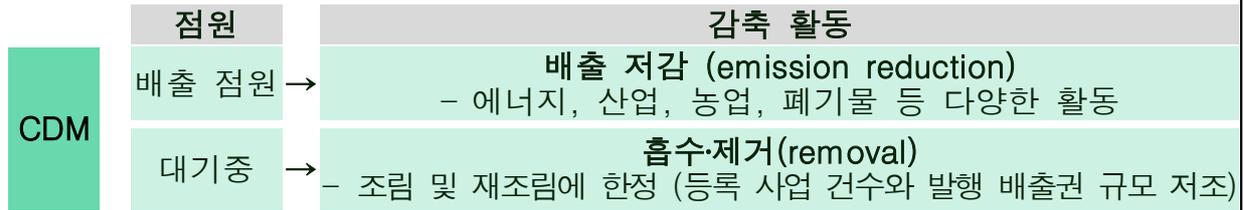
Invites Parties and admitted observer organizations to submit, via the submission portal, by 15 March 2023, their views on **activities involving removals**, including appropriate **monitoring, reporting, accounting for removals and crediting periods, addressing reversals, avoidance of leakage, and avoidance of other negative environmental and social impacts**, in addition to the activities referred to in chapter V of the rules, modalities and procedures;

1. 배경

- **(COP26)** CMA 3은 CMA 4(2022.11)에서 채택할 수 있도록 흡수원 관련 활동에 관한 권고안을 개발할 것을 6.4 감독기구에게 요청(Decision 3/CMA.3, 6(c))
 - 감독기구(SB, supervisory body)는 ‘6.4 메커니즘 下 흡수원 활동에 관한 컨셉 노트’를 작성하고 1차 SB 회의 개최(2022.07.25.-28)
 - 비공식 흡수원 작업반을 운영하여 2차 SB회의(2022.09) 이전까지 권고 초안(사업 절차 관련 사항은 미포함)을 준비하기로 함.
 - 2차 SB회의(2022.09.19-22)는 ‘흡수원 관련 활동에 관한 메커니즘 방법론 개발 및 평가를 위한 요구사항’에 대한 권고 초안과 ‘6.4 메커니즘 하 흡수원 활동에 관한 Information note’ 문서를 검토함.
 - 비공식 흡수원 작업반이 3차 SB회의(2022.11)까지 권고안을 준비하기로 함.
 - 사무국은 권고 초안과 Information note 및 회의 중 작업 문서⁹⁾에 대한 이해관계자들의 의견을 수렴하기 위하여 Open Call을 개설함(2022.09.27.-10.11)
- **(COP27)** SB는 3차 SB회의를 개최하고(2022.11.3.-5), ‘6.4 메커니즘 下 흡수원 관련 활동 지침’에 대한 최종 권고안*을 발표함.
 - * 흡수원 활동 분야(육상해양 및 공학 기반 등)별로 필요한 세부 요구사항들을 개발하기 위해 추가적인 작업이 요구됨

Box 1. 흡수원 활동 분야 확대

- (CDM) 감축사업은 배출저감(emission reduction)과 흡수제거(removal)로 구분. 흡수제거의 경우, 흡수(조림과 재조림) 활동으로만 제한적으로 사업 운영



- (IPCC) 제6차 평가 보고서에서 파리협정의 1.5°C 및 2°C 목표 달성을 위해 이산화탄소제거(CDR carbon dioxide removal) 접근법 강조
- (COP27) Sharm el-Sheikh 이행계획에서 자연기반해법(NbS, nature-based solutions), 생태계기반접근(EbA, ecosystem-based approaches) 권고

- SB는 Open Call을 통해 제출된 의견들에 대한 요약문서를 검토하고, Information note 개정 시 관련 의견을 반영할 것을 사무국에 요청함.
- 향후 여러 의견을 반영, 세부적인 정보를 기술한 Information note의 형태로 SB에서 지속적 논의 예상

□ (COP27(CMA 4), 파리협정 제6.4조 RMP 결정문 초안) FCCC/PA/CMA/2022/L.14

- CMA 4는 당사국과 인가된 옵저버들을 대상으로, 2023년 3월 15일까지 모니터링, 보고, 흡수량 계정, 인증 기간, 역전 처리방안, 누출 방지방안, 환경·사회에 대한 부정적 영향 방지방안을 포함한 흡수원 관련 활동에 대해 의견을 제출하도록 하였음 (*Invites, draft Decision-/CMA.4, para 19*)
- CMA 5에 채택될 흡수원 관련 활동 권고안을 개발하는 과정에서, SB에게 주어진 의무사항(RMP 24(a)(ix)¹⁰)과, 구조화된 공공 협의 절차를 통해 제시되는 이해관계자들의 광범위한 의견을 고려할 것을 요청함(*Requests, draft Decision-/CMA.4, para 20, 22*)

2. 추진 경과

- 6.4조 SB의 흡수원 의제 대응 세미나(2022.12.14.)
 - 6.4조 SB 흡수제거 관련 논의 경과와 동향 공유 및 산림 관련 이슈 논의
 - ※ 외교부, 농림축산식품부, 국립농업과학원, 국립산림과학원, 한국에너지공단, 한국환경연구원, 해양환경공단, 국가녹색기술연구소, 서울대 등
- 흡수원 활동 국가제안서 작성 관련 연구협의회
 - (1차, 1.26.) 분야별 국가제안서 작성 항목과 작성 방향 공유
 - (2차, 2.2.) 분야별* 국가제안서(안) 초안 검토 및 논의
 - * (육상)국립산림과학원, 한국환경연구원, (해양)해양환경공단, (공학)국가녹색기술연구소

3. 국가제안서(안) 주요 내용

3.1 서문(공통)

- 6.4조 메커니즘에 **흡수·제거 활동의 포함 근거*** 제시
 - * 기후변화협약, 교토의정서, 파리협정, CMA 결정문 관련 조항
- 흡수·제거 관련 활동은 NbS와 CDR 등 **다양한 활동이 포함되어야** 하며, 향후에도 추가할 수 있도록 **사업 유형의 확장성 확보**를 요구.
 - COP26은 육상분야의 온실가스 배출량 감축 수단으로 NbS를 주목
 - IPCC AR6(WG3)는 육상·CDR 활동을 감축 수단으로 명시, 잠재량*도 제시
 - * IPCC가 각 활동의 잠재량 평가에 적용한 과학적 방법론 활용 가능

3.2 육상 분야(국립산림과학원, 한국환경연구원, 국립농업과학원)

1) (흡수 활동) 적합한 흡수 활동의 추가 제안(구체적인 정의 포함)

- 교토체제가 승인한 LULUCF 활동(Decision 16/CMP.1 등)과 IPCC AR6 등을 근거로, 6.4조 메커니즘에 추가 가능한 **육상분야 흡수원 활동을 제시**

[산림]	[농업]	[습지(inland wetland)]
· 산림전용 방지 및 복원	· 생물숯(biochar)	· 습지 복원 활동
· 식생복구(Revegetation)	· 토양탄소 증진 및 관리	· 습지 조성
· 도시숲 조성		· 습지 관리 및 강화
· 혼농임업(Agroforestry)		· 맹그로브·이탄지 복원 및 관리
· 산림목축(Silvopastoral-practice)		
· 산림경영 개선 (Improved forest management)		
· 토양탄소 증진 및 관리		
· 산림 및 생태계 복원 등		

Box 2. KP LULUCF 흡수원 활동 정의

- (1) “산림(forest)”은 성숙 시의 잠재적 최소 수고가 2-5m에 도달하는 수목들로 이루어졌고, 수관울폐도(혹은 해당하는 임목축적도)가 10-30% 이상이며, 최소면적이 0.05-1.0ha인 토지를 말한다. 산림은 다양한 층위와 하층식생이 지표의 대부분을 차지하는 피복림(closed forest) 또는 노천림(open forest)을 포함한다. 수확과 같은 인위적인 간섭 또는 자연적 원인의 결과 일시적으로 임목축적을 잃어 수관울폐도 10-30% 또는 최소수고 2-5m의 산림 기준에 미치지 못하는 어린 천연 임분과 모든 조림지도 앞으로 산림으로 환원될 것으로 기대되는 경우 산림에 포함된다.
- (2) “신규조림(afforestation)”은 50년 이상 산림 이외의 용도로 이용해 온 토지에 조림, 파종, 인위적 천연갱신 촉진 등을 통해 직접적이고 인위적으로(direct-human induced) 새로이 산림을 조성하는 것이다.
- (3) “재조림(reforestation)”은 본래 산림이었다가 산림 이외의 용도로 전환되어 이용해 온 토지에 조림, 파종, 인위적 천연갱신촉진 등을 통해 직접적이고 인위적으로 다시 산림을 조성하는 것이다. 제1차 공약기간에 재조림 활동은 1989년 12월 31일 당시 산림이 아니었던 토지에 재조림하는 것으로 제한한다.
- (4) “산림전용(deforestation)”은 직접적이고 인위적으로 산림을 산림 이외의 용도로 전환하는 것이다.
- (5) “식생복구(revegetation)”는 신규조림이나 재조림의 정의에 부합하지 않지만 최소 0.05ha 면적 이상의 식생 조성을 통해 그 입지에서의 탄소축적량을 증가시키는 직접적인 인위적 활동을 의미한다.
- (6) “산림경영(forest management)”는 산림의 생태적(생물다양성을 포함하여), 경제적, 사회적 기능을 충족시킬

목적으로 산림을 지속가능한 방식으로 관리·이용하기 위한 사업시스템이다.

(7) “농경지 관리(cropland management)”는 작물 생산을 목적으로 농작물이 자라고 있거나 잠시 휴경하고 있는 토지에서의 사업시스템이다.

(8) “목초지 관리(grazing land management)”는 식생 및 가축의 양과 형태를 조절할 목적으로 축산물 생산에 사용되는 토지에서의 사업시스템이다.

(9) “습지 배수와 재침수(wetland drainage and rewetting)”는 최소면적 1ha를 덮는 유기질 토지를 대상으로 배수와 재침수하는 시스템을 말한다. 이 활동은 1990년 이래 배수 상태였던 토지, 재침수 상태였고 이 부속서에서 정의된 어떤 활동도 산정되지 않았던 모든 토지에 적용한다. 배수는 직접적이고 인위적으로 soil water table을 낮추는 것이고 재침수는 전체 혹은 부분적 배수의 반대로 직접적이고 인위적이다.

출처: Decision 16/CMP.1 & Decision 2/CMP.7

2) (인증기간) tCERs/ICERs 적용 반대

- CDM에서 조림/재조림 사업에만 적용되었던 tCERs/ICERs은 파리체제 下 제6.4조 세부이행규칙*에 따라 NDC에 사용될 수 없으므로, **반영 불가*** (Annex para. 75(f), Decision 3/CMA.3, FCCC.PA.CMA/2021/Add.1)
- tCERs/ICERs은 조림/재조림 CDM 사업이 활성화되지 않은 요인 중 하나
 - * A/R CDM 등록 건수: 68건(전체 대비 0.78%)
 - ** A/R CDM 배출권 발행량: 12,782,996 CO2t-eq(전체 대비 0.67%)

3) (역배출=비영속성 처리방안) 통합적 비영속성 처리방안 적용 필요성 강조

- 육상, 해양 및 공학적 사업의 비영속성 문제는 모두 산불이나 지진과 같은 자연해재에 기인한 문제로, 분야별로 처리방안을 구분하지 않고 **통합적인 비영속성 처리 방안 도입 필요**
- CDM 하 CCS 사업에서 적용 중*이고, 조림 CDM 활성화와 비영속성 해결 방안으로 논의되었던 ‘버퍼 계정’ 과 ‘국가보증’ 방식을 통합적으로 적용하는 방안 제시 * (Annex paras. 24-28, Decision 10/CMP.7)

3.3 해양 분야(해양환경공단)

1) (분야 추가) 흡수·제거 사업 분야에 해양분야 추가(육상·해양 및 공학)

- 사업분야의 하나로 해양분야를 추가하고, 육상과 공학분야에 포함된 해양분야 활동을 구분

2) (흡수 활동) 적합한 흡수 활동의 추가 제안(구체적인 정의 포함)

- IPCC에서 인정받는 흡수원 및 추가 가능한 **해양부문 흡수원 활동 제시**

[연안습지(coastal wetland)] · 맹그로브 복원 및 관리 · 염습지(salt march) · 바다숲(해조류)(seaweed, algae) · 해초대(seagrass)	[해양] · 해양시비 · 해양알카리화	[대체효과] · 굴패각, 산호초 등
---	----------------------------	------------------------

- IPCC 국가 온실가스 가이드라인(2014)에 따르면 연안 생물자원으로 맹그로브, 염습지, 해초대

- 및 그 서식지를 국가 온실가스 인벤토리 내 탄소저장소로 인정
- CDM 집행위원회도 육상 및 연안 습지의 조립 및 재조립에 대한 활동 인정(방법론 AR-AMS0003)
- 식생 없이 해안 퇴적물에 유기탄소 저장을 할 수 있다는 최근 연구 결과를 근거로, 해안 퇴적물을 활용한 흡수-제거 활동 추가 제안 가능

3.4 공학 분야 (국가녹색기술연구소)

1) (정의) 흡수-제거

- 권고안 상 흡수-제거의 정의(대기 중에서 제거한 온실가스를 지중·육상·해양 저장소 또는 상품에 저장하는 과정)에 ‘**상품(product)**’ 이 포함됨으로써 DACCU 기술의 인정 가능성이 담보되어 이를 지지

2) (제거 활동) 적합한 제거 활동의 추가 제안(구체적인 정의 포함)

- 공학 기반 제거 활동으로 **DAC 기술을 제시**하고, 구체적인 정의 제시

[제거]	[배출회피]
· 직접대기 포집 및 저장(DACCS)	· 직접대기 포집 및 이용(DACCU)
* direct air capture and storage	* direct air capture and utilization

3) (모니터링)

- DACCS 지중 저장에 대한 모니터링은 CDM 규칙 활용 제안
- ~주기적 모니터링: 크레디팅 기간 이후 모니터링은 DACCS에는 해당될 수 있으나, DACCU에는 해당되지 않는 바, 권고안 para 10의 **주기적 모니터링은 제거 활동별로 접근할 것을 제안**

4) (계정(accounting))

- ~요람에서 무덤까지(cradle-to-life) **생애주기평가(LCA) 접근법 적용 필요** 제안. 또한, 현재 및 향후 기술혁신을 고려하여 전문가 그룹을 형성하여 국제적인 산정 방법론 설정 필요 제안

5) (인증 기간) 제거 활동 별로 **유연하게 크레디팅 기간 적용 제안**

- 6) ~(부정적인 환경 및 사회적 영향 회피) 6.4조 협상에서 개발 논의 중인 **지속가능발전 평가 틀을 동일하게 적용하는 방안 제안**

4. 쟁점 및 논의 사항

쟁점 1. 연안습지와 내륙습지의 구분 여부

- 우리나라는 국가 온실가스 인벤토리 상 습지를 연안습지와 내륙습지로 구분하여 보고하지 않고 있으나, 국가 상황에 따라 연안습지와 내륙습지를 구분하는 국가가 존재함.

- 특히, 맹그로브는 연안습지와 내륙습지에 모두 존재하여 분야 구분이 애매한 문제 해결 필요

□ 논의사항 1. 인증 기간은 유연하게 늘릴 수 있는가?

- 활동 유형에 따라 인증 기간이 유연하게 적용되어야 함.
- CDM 下 채택한 방법론에 따른 기간(15년간 3회, 최대 45년)이 너무 짧아 해양 및 공학분야에 그대로 적용하기 어려운 문제가 있음.
- ※ 예) 공학 부문

DACCS	토양 탄소의 경우 수백년 이상 저장 가능한 것으로 추정. 15년이 너무 짧다는 것이 관련 산업계의 전반적인 견해
DACCU	단기간의 사업으로, 15년도 긴 것으로 평가됨.

□ 논의사항 2. 배출회피 추가 필요 * 질문. 배출회피도 crediting 영역인가?

- DAC 기반 기술 중 DACCS 뿐만 아니라 DACCU 기술까지 제거 접근법으로 포함되기 위해서는, 배출회피* 개념 포함 필요.
- 권고안 Para 17의 ‘배출저감’으로 이어지는 제거 활동 뿐만 아니라, ‘배출회피’로 이어지는 제거 활동 역시 추가할 것을 제안할 필요
- 배출회피 활동을 통한 즉시적인 제거 결과물 도출·거래 보다도, 감축 활동으로의 인정 가능성을 열고, DACCU에 대한 국제적인 LCA 방법론에 대한 전문가 논의 및 표준화 방안 마련의 기반 조성 제안

*개념	감축활동에 배출저감(emission reduction)과 제거(removal)가 있음. 배출회피는 화석연료 사용을 줄이는 행위인 에너지 효율 제고, 에너지 절약 강화, 非화석에너지원으로 전환 등을 통해 회피된 배출 활동을 의미
예시 1	(일시적 상품저장) ①DAC 기반 대기중으로부터 포집, ②CO2를 음료탄산화에 활용함으로써, 기존 자원/에너지 사용 대체, ③음료 소비시, CO2가 대기중으로 바로 역전, ④회피량을 계산
예시 2	(장기 상품저장) ①CO2를 대기 포집, ②포집된 CO2를 콘크리트 블록 내 저장함으로써, 콘크리트 사용량 감소로 신규 콘크리트 생산을 감소시켜 CO2 배출 회피, ④제거량과 회피량을 합산

5. 향후 추진계획

- 2월 17일: 제2회 흡수원 협의체 - 관계부처 합동 국가제안서 초안 도출
- 2월 24일: 제3회 흡수원 협의체 - 국가제안서 초안 검토
- 2월 28일: 국가제안서 최종안 제출(외교부)

자료: 저자 작성

9) Draft Recommendation - Recommendations for activities involving removals under the Article 6.4 mechanism(2022.09.22./at meeting version)

10) The eleventh preambular paragraph of the Paris Agreement, acknowledging that climate change is a common concern of humankind, Parties should, when taking action to address climate change, respect, promote and consider their respective obligations on human rights, the right to health, the rights of indigenous peoples, local communities, migrants, children, persons with disabilities and people in vulnerable situations and the right to development, as well as gender equality, empowerment of women and intergenerational equity;

<표 4-9> (' 23.2.16일자) 국가녹색기술연구소가 DAC 기술 기반 국가제안서 수정 제안본

3. Definition

3.1 Definition on removal

Regarding the current definition on ‘removal’, Korea thinks this definitional approach will be a good starting point for further definitional development. The current definition as indicated in the recommendation is well inclusive of all anthropogenic removal activities and well reflexive of the definition on carbon dioxide removal (CDR) made by the IPCC sixth assessment report WGIII (mitigation). It is because ‘definition’ on ‘removal’ needs to be inclusive of all removal activities by scope, type, and scale and in consideration of future technological innovation. Particularly, definition needs to be comprehensive enough to include direct air carbon capture and storage (DACCS) and direct air capture and carbon utilization (DACCU) technologies (or technological processes) as eligible activities. Direct air capture with ‘carbon utilization’ will be an indispensable mitigation option for countries which do not have sizable geological, terrestrial, or ocean storage site. In this regard, including ‘product’ as a durable storage and implying the eligibility of DACCU technology is a major step forward in this definitional approach.

Regarding specific removal activities, Korea hopes that current removal activity classification can go through a slight change. The latest version of the Information Note on removal activities under the Article 6.4 mechanism (version 02.0) classifies the types or removal activities into two: land-based and engineering-based activities (UNFCCC 2022b). Korea thinks that it is worth considering the removal process and particularly the unique characteristics of ocean-based removal activities on the ground of the IPCC 6th Assessment Report WG III report.¹¹⁾ On the basis of this, Korea would like to suggest the revision of classification as shown in the table 1 below.

Table 1. Classification of removal activities

Type of removal activities	Exemplary activities
Land-based	Afforestation/reforestation, improved forest management, soil carbon sequestration, etc.
Ocean-based	Blue carbon management, ocean fertilization, ¹²⁾ etc
Engineering-based	Direct air capture (DAC)-based removal activities (DACCS and DACCU), enhanced weathering, ocean alkalization, etc.

Source: Reformulated on the basis of Figure 1 of Cross-Chapter Box 8 of IPCC(2022)

3.4 Types of removal activities (Engineering-based)

Regarding engineering-based removal activities, there can be a variety of removal types and activities. Korea thinks that engineering-based removal activities can be enumerated but only essential engineering-based removal activities need specific definitions.

In this regard, Korea thinks that DAC-based removal activities qualify specific definitional approach. In reference to the definition of IPCC Glossary, DAC is defined as “chemical process by which a pure CO₂ stream is produced by capturing CO₂ from the ambient air”. DACCS is defined as “chemical process by which CO₂ is captured directly from the ambient air, with subsequent storage (i.e. geological, terrestrial, or ocean reservoir)” (IPCC 2022b, Glossary). Meanwhile, DACCU needs to be newly defined. Korea would like to suggest the DACCU definition by “chemical process by which CO₂ is captured directly from the ambient air with subsequent conversion and storage in a product in the industrial process” .

4. Requirements

4.1 Monitoring

Korea thinks that paragraphs 6~ 9 well capture the basic requirements for monitoring the removal activities.

Regarding technological removals by DACCS technologies, monitoring for geological storage can rely on the existing monitoring requirements and regulations of the CCS technology-based mitigation activities of the Clean Development Mechanism.

Regarding paragraph 10, Korea would like to point out that some engineering-based removal activities might not be appropriate for the monitoring after the end of the crediting period. This applies to DACCU activities with low permanence.¹³⁾ Some products from DACCU technology-based activities may release their stocked CO₂ back into the atmosphere as they are consumed.¹⁴⁾ Yet, the utilization of CO₂ captured from the atmosphere replaces unburned fossil fuels, yielding a permanent greenhouse gas emission avoidance. Therefore, monitoring the removal activities by DACCU technologies is required to focus on the manufacturing process for the CO₂-utilized products. This means the concept of periodic monitoring after the end of the crediting period is not applied in the case of DACCU technology-based removal activities.

Therefore, regarding paragraph 10, Korea thinks that Supervisory Body needs to elaborate the periodic monitoring requirements on a case by case. In the case of engineering-based approaches, long-lasting (or long durable) products from DACCU technologies require periodic monitoring after the end of the crediting period. Yet, undurable products from DACCU technologies such as synthetic fuels or carbonated drinks (beverage carbonation) does not require periodic monitoring after the end of the crediting period.

4.3 Accounting for removals

Regarding paragraph 15, Korea thinks that this well captures the basic accounting approach for removal activities by setting baseline and deducting activity emissions and leakage emissions. In advance, particular types of removal activities such as DACCS and DACCU technologies require more specific accounting methods because DACCS and DACCU are engineering-based CDR approaches. In the first place, a cradle-to-grave life cycle assessment (LCA) approach is supported. In the second place, DAC-based removal activities are experiencing on-going and rapid technological innovation and advancement. Therefore, Korea thinks that LCA approach to representative removal activities (including DACCS and DACCU) needs to be prepared by a group of experts and acknowledged by Supervisory Body.

Regarding paragraph 17, this deals with an activity involving removals that results in emission reductions. Korea thinks that, in addition to paragraph 17, there should a separate paragraph that deals with an activity involving removals that results in ‘emission avoidance’. In the specific case of DACCU where CO₂ is captured from the atmosphere and stored into a product temporarily, CO₂ is utilized as alternative resources to CO₂ emitting resources. Such activities may realize avoided emission of greenhouse gas that would otherwise be emitted to the atmosphere. In this case, net CO₂ removal can be zero due to temporary storage, but the effects of emission avoidance remain.

4.4 Crediting period

Regarding paragraph 18, Korea thinks that there should be an additional requirement that crediting period is applied in a flexible manner based on removal activity types and activities. Also, Korea thinks that huge time and energy that are required for the removal project preparation need to be considered. Also, by the types of removal activities, the way to approach crediting period can be varied.

4.5 Addressing reversals

Permanence is the most important concept in removal activities. Along this line, reversal, which is the cause of non-permanence, is something to be addressed. In this regard, Korea thinks that this section on ‘addressing reversal’ needs to consider the specification of requirement on ‘permanence’ as well.

Different types of removal activities generate credits in different degrees of durability (or non-permanence). Korea thinks that allowing the generation of credits in different degrees of durability will push the experimentation and deployment of removal technologies. In this regard, Korea hopes that the way to manage the different degree of durability by the different types of removal activities needs to be considered. Even within the type of removal activity of DACCU, there are cases of low permanence such as beverage carbonation or synthetic fuel,¹⁵⁾ while there are cases of high permanence such as concrete hardening or mineralization.

In advance, regarding permanence period, Korea thinks that permanence period is differently acknowledged by different types and activities of removal. For the fungibility of removal credits, Korea thinks that there should be a standard permanence period.

4.6 Avoidance of leakage

Korea thinks that paragraph 20 well captures the requirement to avoid leakage. Specific requirement on the adjustment factors needs to be inserted later.

4.7 Avoidance of other negative environmental and social impacts

Currently, the Supervisory Body reviews sustainable development tools in use in existing market-based mechanisms with a view to developing similar tools for the mechanism (UNFCCC 2021, para 5(c)). Korea thinks that tools to be developed can be applied to the removal activities.

자료: 저자 작성

- 11) There can be a variety of removal types and activities. Korea thinks that essential removal types need to be enumerated, and they need specific definitions.
- 12) Korea would like to suggest that ocean fertilization should be in the category “ocean-based removal activities” as it is a method of facilitating a specific part of ocean ecosystem, rather than utilizing geochemical or chemical approaches.
- 13) Regarding permanence, please refer Section 3.5 “Addressing reversals” of this document for a detailed view of the Republic of Korea.
- 14) Exemplary product is synthetic fuels. They are produced with captured CO₂ from the atmosphere, but the stocked CO₂ are emitted back into the atmosphere when fuels are burned.
- 15) Regarding beverage carbonation and synthetic fuel, the captured CO₂ is stored in the products only for a while and releases nearly all the stocked carbon back into the atmosphere when used. However, these activities significantly reduce the dependence on carbon-intensive materials, i.e., fossil fuels. Acknowledging these short-term DACCU activities can be achieved by allowing the concept of emission avoidance in removal activities by providing removal credits to the DAC project operators.

<표 4-10> (' 23.4.7일자) 국가제안서 제출본

**Submission by the Republic of Korea
April 7, 2023**

**Views on Rules, modalities and procedures for the mechanism established
by Article 6, paragraph 4, of the Paris Agreement**

In response to the call for submission under the item rules, modalities and procedures for the mechanism established by Article 6, paragraph 4, of the Paris Agreement (PA); the Republic of Korea (ROK) is pleased to submit our views on activities involving removals, including appropriate monitoring, reporting, accounting for removals and crediting periods, addressing reversals, avoidance of leakage, and avoidance of other negative environmental and social impacts, in addition to the activities referred to in chapter V of the rules, modalities and procedures.

The ROK hopes this submission could contribute to expanding the scope of removal activities and strengthening the role of removals in combating climate change and achieving carbon neutrality.

Essentials of the ROK views are as follows, and Korean views in this national submission are confined to the ‘removal’ activities at the project level:

- (Definition) The ROK supports the current comprehensive definition of removal which provides a room for direct air carbon capture and storage (DACCS) and direct air capture and carbon utilization (DACCU) technologies to be included as eligible removal activities.
- (Categorization) The ROK suggests re-categorization of greenhouse gas removal activities from land- and engineering-based removal activities to land-, ocean-, and engineering-based removal activities.
- (Specific removal activities) The ROK thinks that various removal activities should be considered and examined in tandem with technological development and innovation in the future.
- (Periodic monitoring) The ROK suggest that periodic monitoring regarding the Recommendation para 10 can be applied depending on the types of removal activities.
- (Accounting) Regarding para 17 of the Recommendation, the ROK suggests an additional separate paragraph that deals with an activity involving removals that results in ‘substitution effects.’
- (Crediting period) Regarding crediting period (maximum of 15 years renewable a maximum of twice), the ROK would like to suggest a flexible approach, depending on removal activities.
- (Addressing reversals) The ROK supports the permanence buffer backed up by host Party guarantee option as a common approach across all removal activities.
- (Avoidance of other negative environmental and social impacts) The ROK suggests the

title of section 3.7 in the Recommendation to be newly formatted by 'consideration of environmental and social impacts' and the alignment with the sustainable development tools for the Article 6.4 mechanism.

1. Introduction

The ROK thinks that emission reductions and removals are two crucial types of mitigation activities. Emission reductions means the reduction of greenhouse gas released into the atmosphere from specific emission sources, while removals get rid of greenhouse gas directly from the atmosphere. Salient role of removals in climate change mitigation has been confirmed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) special reports, indicating terrestrial ecosystems remove 11.2 GtCO₂-eq (about 29% of global CO₂ emissions) per year (IPCC 2019), and ocean has taken up between 20~30% of total anthropogenic CO₂ emissions since the 1980s (IPCC 2019).

The role of removals does appear in the legal documents of the UN-based climate institutions. The Convention highlights the role and importance of terrestrial and marine ecosystems as sinks and reservoirs of greenhouse gases, and also requires that promote sustainable management, and promote and cooperate in the conservation and enhancement of sinks and reservoirs of greenhouse gases, including biomass, forests and oceans as well as other terrestrial, coastal and marine ecosystems (UNFCCC 1992, Article 4.1(d)).

The Kyoto Protocol approved that the net changes in greenhouse gas emissions by source and removals by sinks resulting from Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF) activities shall be used to meet the commitments of Parties in Annex I (KP 1997, Article 3.3 and 3.4). Various removal activities¹⁶⁾ in forest land, cropland, grazing land, and wetland were defined in accordance with decision 16/CMP.1 & 2/CMP.7. Therefore, Annex I countries used the removals by LULUCF activities to achieve their national mitigation targets from 2008 to 2020. However, among the various removal activities approved by the Kyoto Protocol, the Clean Development Mechanism (CDM) approved only afforestation and reforestation as removal projects.

The Paris Agreement requires the Parties to achieve a balance between anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases in the second half of this century (PA 2015, Article 4.1). This means that the sink was recognized as the other important pillar of carbon neutrality. In this context, the Paris Agreement newly established an independent clause (Article 5) that calls for the conservation and strengthening of greenhouse gas sinks and reservoirs.

Recently, the IPCC 6th Assessment Report indicated that the deployment of carbon dioxide removal (CDR) to counterbalance hard-to-abate residual emissions is unavoidable if net zero CO₂ or GHG emissions are to be achieved. IPCC also suggested that, to achieve net negative emissions, existing biological or geochemical sinks as well as new technologies such as BECCS and DACCS should be extensively used in the AFOLU, energy and the industry sector.

Along the line of the continued recognition of removals as important type of mitigation activities, the ROK believes that eligible removal activities should be further expanded under the A6.4 mechanism not only for 2030 nationally determined contributions (NDCs) goal but also for the 2050 carbon neutrality. We would like to propose following contents for further development in A6.4 mechanism.

2. Definition

Regarding the current definition on ‘removal’, the ROK thinks this definitional approach will be a good starting point for further definitional development. The current definition as indicated in the Recommendation on activities involving removals under the Article 6.4 mechanism (version 01.0) is well inclusive of all anthropogenic removal activities and well reflexive of the definition on carbon dioxide removal (CDR) made by the IPCC 6th Assessment Report WG III (mitigation). It is because ‘definition’ on ‘removal’ needs to be inclusive of all removal activities by scope, type, and scale and in consideration of future technological innovation.

Particularly, definition needs to be comprehensive enough to include direct air carbon capture and storage (DACCS) and direct air capture and carbon utilization (DACCU) technologies (or technological processes) as eligible activities. Direct air capture with ‘carbon utilization’ will be an indispensable mitigation option for countries which do not have sizable geological, terrestrial, or ocean storage site. In this regard, including ‘product’ as a durable storage and implying the eligibility of DACCU technology is a major step forward in this definitional approach.

3. Removal activities

The ROK suggests the following three points in discussing removal activities eligible for implementation under the A6.4 mechanism project.

- 1) Development and addition of various removal activities to achieve the purpose of the Paris Agreement and carbon neutrality by the second half of this century
- 2) Develop procedures and modalities for removal activities to add eligible activities rather than confirmation list of removal activities

Recently, various removal activities have been highlighted for their potential to contribute to global mitigation. However, few removal activities have developed specific methodologies on monitoring and evaluation that meet the requirements of A6.4 mechanism project in this time. Therefore, it is necessary to develop a procedure and modalities that can add removal activities that have eligible for the A6.4 mechanism project through future technology development.

- 3) Re-categorizing greenhouse gas removal activities from land- and engineering-based removal activities which are currently divided, to land-, ocean- and engineering-based removal activities

The ROK hopes that current removal activity classification can go through a slight change. The latest version of the Information Note on removal activities under the Article 6.4 mechanism (version 02.0) classifies the types of removal activities into two: land-based and engineering-based activities (UNFCCC 2022d). The ROK thinks that it is worth considering the removal process and particularly the unique characteristics of ocean-based removal activities on the ground of the IPCC

6th AR WG III report. On the basis of this, the ROK would like to suggest the revision of classification as shown in the table 1 below.

Table 1. Classification of removal activities

Categories	Exemplary activities
Land-based	Afforestation/reforestation, improved forest management, soil carbon sequestration, inland wetland restoration, etc.
Ocean-based	Blue carbon management, ocean fertilization, ¹⁷⁾ etc.
Engineering-based	Direct air capture (DAC)-based removal activities (DACCS and DACCU), enhanced weathering, ocean alkalization, etc.

Source: Reformulated on the basis of Figure 1 of Cross-Chapter Box 8 of IPCC (2022)

With the afore-mentioned classification, there can be a variety of removal activities. The ROK thinks that only essential removal activities need to be enumerated with the formulation of their specific definitions.

3.1 Land-based removal activities

The UNFCCC categorizes the land sector into six land use types (forestland, cropland, grassland, wetlands, settlements and other land) based on their land use characteristics. Various removal activities included as LULUCF activities under the Kyoto Protocol can be applied in land sector. Each land use type involves various management purposes and practices, which can result in greenhouse gas (GHG) mitigation either through an increase in carbon stocks in carbon pools as sinks or through a reduction in GHG emissions by sources depending on how it is managed.

The ROK suggests possible removal activities for each land use type as follows and notes that possible project activities could apply the modalities and procedures of the CDM.

3.1.1. Forest land

Forest have been approved as sinks in the KP regime, and afforestation and reforestation are being implemented as removal activities in the CDM. Forest management and revegetation are already recognized as removal activities in the KP and related decisions (Decision16/CMP.1 and 2/CMP.7), which became the basis for approval of afforestation and reforestation as removal activities under the CDM. In the KP regime, forest management and revegetation activities have already been used to achieve the national reduction target of Annex I for 13 years, since there is no methodological problem. If it is to be subdivided into project-scale removal activities rather than national-scale, UNFCCC’s technical report on 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 (FCCC/TP/2014/2), it is suggested to refer to ‘possible additional LULUCF activities and related mitigation practices’ .

Table 2. Descriptions of forest land-based removal activities

Removal activities	Descriptions	References
Afforestation	direct human-induced conversion of land that has not been forested for a period of at least 50 years to	Decision16 / C M P . 1

Removal activities	Descriptions	References
	forested land through planting, seeding and/or the human-induced promotion of natural seed sources	Decision 2/CMP.7a
Reforestation	direct human-induced conversion of non-forested land to forested land through planting, seeding and/or the human-induced promotion of natural seed sources, on land that was forested but that has been converted to non-forested land	
Revegetation	direct human-induced activity to increase carbon stocks on sites through the establishment of vegetation that covers a minimum area of 0.05 hectares and does not meet the definitions of afforestation and reforestation	
Forest management	system of practices for stewardship and use of forest land aimed at fulfilling relevant ecological (including biological diversity), economic and social functions of the forest in a sustainable manner	

In addition, there was a discussion particularly about adding revegetation as a removal project under CDM. A more specific definition and criteria of revegetation activity were developed and presented in CDM-EB85, followed by the existing definition of revegetation in Decision 16/CMP.1.

Table 3. Specific definition and criteria on revegetation by CDM-EB85

The definition of “revegetation” is not included in paragraph 1. However, if mutatis mutandis application implies replacing every occurrence of words “afforestation and reforestation” with the words “afforestation, reforestation and revegetation”, this issue gets addressed. The terms “forest”, “reforestation” and “afforestation” under paragraph 1 have been defined in decision 16/CPM.1. However, while the definition of “reforestation” contained in decision 16/CMP.1 includes a second sentence that limits reforestation activities to “reforestation occurring on those lands that did not contain forest on 31 December 1989, the definition of “revegetation” contained in decision 16/CMP.1 does not prescribe any such limitation. As a result, a corresponding land eligibility criterion will be required to be specified if the same modalities and procedures are applied to project activities involving revegetation.

(para60(a)) The activity eligibility criteria for any revegetation activity are the following:

- (1) It is a direct human-induced activity that is likely to increase carbon stocks on sites
- (2) It involves establishment of vegetation that covers a minimum area of 0.05 hectares
- (3) The vegetation to be established is not expected to reach the forest thresholds selected by the host Party in which the activity is to be implemented.

The land eligibility criterion for a revegetation activity should be the same as the land eligibility criterion for afforestation/reforestation project activities, viz. revegetation activities under the CDM should be limited to the revegetation activities occurring on land that did

not contain forest on 31 December 1989.

Sources: CDM-ARWG41-A01

3.1.2. Agricultural land

The IPCC presented the mitigation potential of AFOLU options in AR6 WGIII.

Table 4. AFOLU options projected in IPCC AR6 WGIII

reduced deforestation, conservation, improved management, and restoration of forests and other ecosystems (coastal wetlands, peatlands, savannas and grasslands), improved and sustainable crop and livestock management, carbon sequestration, soil carbon management in croplands and grasslands, agroforestry, biochar

Source: Reformulated on the basis of C.9.1/SPM/IPCC AR6 WGIII

The ROK are expecting to develop a methodology applicable to A6.4 mechanism based on the methodology that assessed the mitigation potential of activities in table 5.

Table 5. Descriptions of land-based removal activities

Removal activities	Descriptions	References
Cropland management	system of practices on land on which agricultural crops are grown and on land that is set aside or temporarily not being used for crop production	Decision16/CMP .1 Decision 2/CMP.7
Grazing land management	system of practices on land used for livestock production aimed at manipulating the amount and type of vegetation and livestock produced	
Soil carbon management	In cropland, soil management affects soil carbon stocks to varying degrees. (e.g., residue management, tillage management, fertilizer management (both mineral fertilizers and organic amendments), choice of crop and intensity of cropping management (e.g., continuous cropping versus cropping rotations with periods of bare fallow), irrigation management, mixed systems with cropping, and drainage management	IPCC(2006): Vol.4 Ch.5 Cropland
Soil carbon sequestration by biochar	Biochar is formed by recalcitrant (i.e., very stable) organic carbon obtained from pyrolysis, which, applied to soil, can increase soil carbon sequestration leading to improved soil fertility properties	IPCC Special report : Global warming of 1.5 °C

3.1.3. Inland wetland

The 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories defined that “wetlands include any land that is covered or saturated by water for all or part of the year” and included peatlands and reservoirs (IPCC, 2006). Inland wetlands composed of biomass, soil and dead organic matters have a high carbon storage rate on a per unit area basis (Nahlik and Fennessy, 2016). Wetlands including peatlands have the largest carbon storage and therefore their protection is the key to climate change mitigation (UNFCCC, 2021).

All wetlands can capture and store carbon through photosynthesis, organic soil and dead organic matters. Inundation of wetland soil slows down the dissolving rate, which allows more carbon to be captured and stored in the sediment of wetlands (Australian Government, 2012). Wetland flora capture carbon through photosynthesis and produce plant biomass, which can add to organic matters in the soil (Fennessy and Lei, 2018).

Wetland restoration, conservation and wise use are effective climate change mitigation approaches and are the essential part of achieving NDCs. Inland wetlands not only ensure GHGs sequestration, but also provide co-benefits by maintaining biodiversity and a range of ecosystem services, including disaster risk reduction.

Therefore, we propose wetland restoration, creation and conservation, wetland enhancement, and wetland biomass utilization as inland wetland-based removal activities.

Table 6. Descriptions of inland wetland-based carbon removal activities

Removal activities	Descriptions	References
Wetland restoration	Activities to reduce GHG emission and increase carbon stocks for damaged or drained wetlands by converting them to pre-disturbed conditions by restoring hydrology, vegetation, and soils.	2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands
Creation of wetland (artificial or constructed wetland)	Activities aims to create wetlands that can function as sinks in areas that previously had other land use	Reformulated on the basis of Were et al. (2019)
Wetland conservation	Activities to maintain the functions of wetlands that are vulnerable to climate change, natural disturbances and human intervention by designating protected areas, etc.	Reformulated on the basis of Were et al. (2019)
Wetland enhancement	Activities in increase carbon storage of wetlands by controlling hydrology, addition of inhibitory compounds, or management of vegetation and soil	Reformulated on the basis of Freeman et

		al. (2012)
Utilization of biomass from wetlands	Activities to use harvested biomass from wetlands (use as biochar, compost, etc.)	Reformulated on the basis of Pyke et al. (2008)

3.2. Ocean-based removal activities

The IPCC Special Report on Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC) and IPCC AR6 WGIII include as methods for mitigation potential through marine ecosystems: the management of coastal vegetation ecosystems (mangroves, salt marshes, and seagrass beds; with the carbon stored in these ecosystems being known as “blue carbon”); the creation, cultivation, and use of seaweed/macroalgae; land-based nutrient management and control of sediment disturbance (IPCC, 2019 Ch. 5.5.1, IPCC AR6 WGIII Ch. 12.3). Of these options, those that can secure real, verified and additional mitigation outcome can be classified as ocean-based carbon removal activities.

According to the 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, coastal wetlands generally consist of soils that are covered or saturated, for all or part of the year, by tidal freshwater or brackish or saline water and are vegetated by vascular plants. The boundary of coastal wetlands may extend to the landward extent of tidal inundation and may extend seaward to the maximum depth of vascular plant vegetation.

The carbon stored in mangroves, saltmarshes, and seagrass meadows, which are defined as coastal wetlands by the IPCC guidelines, is known as “coastal blue carbon,” a key method of ocean-based carbon removal. Activities to restore coastal wetlands can therefore be categorized as ocean-based removal activities.

Based on the above, we propose the ocean-based removal activities as shown in the table 7 below.

Table 7. Descriptions of ocean-based carbon removal activities

Removal activities	Descriptions	References
Coastal wetland restoration	Restoration of damaged coastal wetlands including mangroves, salt marshes, and seagrass meadows for the purpose of sequestering blue carbon in vegetation and soil	IPCC(2022): AR6 WGIII Ch.7
Blue carbon* management * Coastal vegetation: mangroves, salt marshes, and seagrass meadows	Absorption and sequestration of greenhouse gases through the restoration, conservation, and expansion of habitats for coastal vegetation such as mangroves, halophyte, and seagrass.	IPCC(2022): AR6 WGIII Ch.12 IPCC(2019): SROCC Ch.5
Creation of seaweed/macroalga	Transfer/sequestration of seaweed detritus, an outcome of photosynthesis, to sedimentary sites	IPCC(2019): SROCC Ch.5

e habitat		
Cultivation and use of marine biomass (macroalgae etc)	Cultivation of seaweed or macroalgae for use in the production of biofuel, biogas, or biochar or to be stored in deep sea areas	IPCC(2022): AR6 WGIII Ch.12
Conservation and restoration of tidal flats and marine sediment	Storage/Sequestration of greenhouse gases by conserving and restoring ecosystems (especially those designated as protected areas)	Lovelock and Duarte(2019)

The ROK included coastal wetlands in national greenhouse gas inventory and as a means of ocean-based carbon removal in the 2030 Nationally Determined Contributions (NDCs).

On the other hand, other removal activities, such as oyster aquaculture and utilizing shells, need more scientific evidences.

3.3. Engineering-based removal activities

Regarding engineering-based removal activities, there can be a variety of removal types and activities. The ROK thinks that engineering-based removal activities can be enumerated but only essential engineering-based removal activities need specific definitions.

In this regard, the ROK thinks that DAC-based removal activities qualify specific definitional approach. In reference to the definition of IPCC Glossary, DAC is defined as “chemical process by which a pure CO₂ stream is produced by capturing CO₂ from the ambient air”. DACCS is defined as “chemical process by which CO₂ is captured directly from the ambient air, with subsequent storage (i.e. geological, terrestrial, or ocean reservoir)” (IPCC 2022, Glossary). Meanwhile, DACCU needs to be newly defined. The ROK would like to suggest the DACCU definition by “chemical process by which CO₂ is captured directly from the ambient air with subsequent conversion and storage in a product in the industrial process”.

Table 8. Descriptions of engineering-based removal activities

Removal activities	Descriptions	References
Direct air carbon capture and storage (DACCS)	Chemical process by which CO ₂ is captured directly from the ambient air, with subsequent storage (i.e. geological, terrestrial, or ocean reservoir)	IPCC 2022b, Glossary
Direct air carbon capture and utilization (DACCU)	Chemical process by which CO ₂ is captured directly from the ambient air, with subsequent conversion and storage in a product in the industrial process	Modified from the definition of DACCS (IPCC 2022b, Glossary)

4. Requirements

4.1. Monitoring

The ROK thinks that paragraphs 6~9 in the Recommendation well capture the basic requirements for monitoring the removal activities.

Regarding removals by DACCS technologies, monitoring for geological storage can rely on the existing monitoring requirements and regulations of the CCS technology-based mitigation activities of the Clean Development Mechanism.

Regarding paragraph 10, the ROK would like to point out that some engineering-based removal activities might not be appropriate for the monitoring after the end of the crediting period. This applies to DACCU activities with low permanence.¹⁸⁾ Some products from DACCU technology-based activities may release their stocked CO₂ back into the atmosphere as they are consumed.¹⁹⁾ Yet, the utilization of CO₂ captured from the atmosphere replaces unburned fossil fuels, which can lead to a permanent substitution effect.²⁰⁾ Therefore, monitoring the removal activities by DACCU technologies is required to focus on the manufacturing process for the CO₂-utilized products. This means the concept of periodic monitoring after the end of the crediting period is not applied in the case of DACCU technology-based removal activities.

Therefore, regarding paragraph 10, the ROK thinks that Supervisory Body needs to elaborate the periodic monitoring requirements on a case by case. In the case of engineering-based approaches, long-lasting (or long durable) products from DACCU technologies require periodic monitoring after the end of the crediting period. Yet, undurable products from DACCU technologies such as synthetic fuels or carbonated drinks (beverage carbonation) does not require periodic monitoring after the end of the crediting period.

4.2. Reporting

The ROK thinks that paragraphs 11~14 well capture the basic requirements for reporting removal activities.

Regarding paragraph 12(f) on safeguards and paragraph 12(g) on sustainable development, the ROK thinks that these can be related to paragraph 21. The ROK hopes that reporting rules on safeguards and sustainable development can be aligned with the outcomes from the rule-making process on sustainable development by the Supervisory Body. This will be indicated again at the section 4.7.

4.3. Accounting for removals

Regarding paragraph 15 in the Recommendation, the ROK thinks that this well captures the basic accounting approach for removal activities by setting baseline and deducting activity emissions and leakage emissions.

In advance, engineering-based removal activities such as DACCS and DACCU technologies require more specific accounting methods. In the first place, a cradle-to-grave life cycle assessment (LCA)

approach is supported. In the second place, DAC-based removal activities are experiencing on-going and rapid technological innovation and advancement. Therefore, the ROK thinks that the LCA approach to engineering-based removal activities (including DACCS and DACCU) needs to be prepared by a group of experts and acknowledged by Supervisory Body.

Regarding paragraph 17, this deals with an activity involving removals that results in emission reductions. The ROK thinks that, in addition to paragraph 17, there should be a separate paragraph that deals with an activity involving removals that results in ‘substitution effects’. Substitution effects refer to the practice that carbon-intensive fuels or materials are replaced by captured CO₂ from removal activities as alternative resources. In the specific case of DACCU where CO₂ is captured from the atmosphere and stored into a product temporarily, CO₂ is utilized as alternative resources to CO₂ emitting resources. Such activities may realize substitution effects by avoiding emission of greenhouse gas that would otherwise be emitted to the atmosphere. In this case, net CO₂ removal can be zero due to temporary storage, but the substitution effects still remain.

4.4 Crediting period

Crediting period for removal activities was decided to be a maximum of 15 years renewable a maximum of twice, that is appropriate to the activity (UNFCCC 2021, Annex para 31(f)). Regarding this, the ROK would like to suggest a flexible approach, depending on removal activities. In the case of DACCS-based removal activity, this requires considerable costs in siting, social acceptance, facility-building, etc. Also, DACCS boasts for high permanence in comparison with other removal activities. Therefore, a longer crediting period for DACCS technology needs to be considered.

4.5. Addressing reversals

Permanence is the most important concept in removal activities. Along this line, reversal, which is the cause of non-permanence, is something to be addressed. In this regard, the ROK thinks that this section on ‘addressing reversal’ needs to consider the specification of requirement on ‘permanence’ as well.

4.5.1. Different degrees of durability

Different types of removal activities generate credits in different degrees of durability (or non-permanence). The ROK thinks that allowing the generation of credits in different degrees of durability will push the experimentation and deployment of innovative removal technologies. In this regard, the ROK hopes that the way to manage the different degree of durability by the different types of removal activities needs to be considered. Even within the type of removal activity of DACCU, there are cases of low permanence such as beverage carbonation or synthetic fuel,²¹⁾ while there are cases of high permanence such as concrete hardening or mineralization.

4.5.2. Standard permanence period

In advance, regarding permanence period, the ROK thinks that permanence period is differently acknowledged by different types and activities of removal. For the fungibility of removal credits,

the ROK thinks that a standard permanence period should be in place.

4.5.3. Common approach

Like well-known examples of reversals such as forest fires in A/R CDM sector and earthquakes in geo-engineering sector, the non-permanence issue of land/ocean/engineering (CCS)-based activities is mostly attributed to the natural disasters. Thus, rather than differentiating applying options for addressing reversals by each sector, introducing common method is necessary to promote various removal activities in different sectors.

Under the Kyoto Protocol, different approaches to address non-permanence were applied depending on the project sector. In the case of A/R CDM, “Replacement Credit (tCERs/ICERs)” option was applied. Unlike other CER without an expiry date, this method issues temporary or long-term CERs with a fixed expiry date to solve the problem of non-permanence of A/R CDM credits.

Each tCERs expires at the end of its commitment period, while each ICER expires at the end of its crediting period. Expired tCERs and ICERs must be redeemed by replacing it with other CER either with no expiry date or non-expired tCERs/ICERs (Annex para. 36-50, Decision 5/CMP.1). Due to the expiration of these credits and procedural complexity, the A/R CDM projects were not active compared to other projects in different sectors.

Note. Removal activities of CDM under Kyoto Protocol

- the number of registered A/R CDM projects: 68 (0.78%)
- total amount of issuance of CER from A/R CDM projects: 12,782,996 CO₂t-eq (0.67%)

Source: cdm.unfccc.int

The 6.4 SB under the PA is crucial in developing and adding various removal activities to enhance the role of sinks. However, if the tCERs/ICERs options are applied to the A6.4 mechanism, it could act as a barrier to adding various removal activities. In addition, tCERs and ICERs shall not be used toward NDC in accordance with Annex para. 75(f), Decision 3/CMA.3.

On the other hand, CCS CDM project applied a combined method of buffer and Party guarantee (Annex paras. 24-28, Decision 10/CMP.7). Applying the insurance option, method applied to CCS project and a combination of these methods to the A/R CDM was negotiated, but the PA was adopted without a specific method being introduced. (para. 49-89, FCCC/TP/2014/2).

The ROK supports permanence buffer backed up by host Party guarantee option as a eligible common approach to addressing the risk of non-permanence for across all removal sectors.

4.6. Avoidance of leakage

The ROK thinks that paragraph 20 in the Recommendation well captures the requirement to avoid leakage. Specific requirement on the adjustment factors needs to be inserted later.

4.7. Consideration of environmental and social impacts

Regarding the title of section 3.7 in the Recommendation, the ROK would like to suggest a new formulation by ‘Consideration of environmental and social impacts’.

With this new formulation, the ROK suggest that paragraph 21 needs to insert the efforts to pursue positive environmental and social impacts for a balanced approach between positive and negative effects.

In addition, currently, the Supervisory Body reviews sustainable development tools in use in existing market-based mechanisms with a view to developing similar tools for the mechanism (UNFCCC 2021, para 5(c)). The ROK thinks that tools to be developed can be utilized to the removal activities. Therefore, this can be reflected in the paragraph 21 as well.

5. References

IPCC. (2019a) Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.001>. Accessed on March 12, 2023.

IPCC. (2019b) Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-35. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.001>. Accessed on March 12, 2023.

IPCC. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf. Accessed on March 3, 2023.

KP (Kyoto Protocol). (1997). Kyoto Protocol. <https://unfccc.int/documents/2409>. Accessed on March 6, 2023.

PA (Paris Agreement). (2015). Paris Agreement. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf. Accessed on March 6, 2023.

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). (1992). United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>. Accessed on March 6, 2023.

UNFCCC. (2005). Land use, land-use change and forestry. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/2005/cmpl/eng/08a03.pdf>. Accessed on January 26, 2023.

UNFCCC. (2006). Modalities and procedures for afforestation and reforestation project activities under the clean development mechanism in the first commitment period of the Kyoto Protocol. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/2005/cmpl/eng/08a01.pdf>. Accessed on January 26, 2023.

UNFCCC. (2011a). Modalities and procedures for carbon dioxide capture and storage in geological formations as clean development mechanism project activities.

<https://unfccc.int/resource/docs/2011/cmp7/eng/10a02.pdf#page=13>. Accessed on January 26, 2023.

UNFCCC. (2011b). Land use, land-use change and forestry.

<https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/2011/cmp7/eng/10a01.pdf>. Accessed on January 26, 2023.

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. <https://unfccc.int/resource/docs/2014/tp/02.pdf>. Accessed on January 26, 2023.

UNFCCC. (2021). Rules, modalities and procedures for the mechanism established by Article 6, paragraph 4, of the Paris Agreement. <https://unfccc.int/event/cma-3?item=12%20b>. Accessed on January 26, 2023.

UNFCCC. (2022a). Recommendation on Activities involving removals under the Article 6.4 Mechanism.(A6.4-SB003-AA-03).

<https://unfccc.int/sites/default/files/resource/a64-sb003-a03.pdf>. Accessed on January 26, 2023.

UNFCCC. (2022b). Rules, modalities and procedures for the mechanism established by Article 6, paragraph 4, of the Paris Agreement. <https://unfccc.int/event/cma-4?item=14>. Accessed on January 26, 2023.

UNFCCC. (2022c). Rules, modalities and procedures for the mechanism established by Article 6, paragraph 4, of the Paris Agreement.

https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021_10a01E.pdf. Accessed on January 26, 2023.

UNFCCC. (2022d). Information note: Removal activities under the Article 6.4 mechanism (version 02.0) (A6.4-SB003-AA-A04).

<https://unfccc.int/sites/default/files/resource/a64-sb003-aa-a04.pdf>. Accessed on January 26, 2023.

- 16) KP-LULUCF activities: afforestation, reforestation, deforestation, revegetation, forest management, cropland management, grazing land management, wetland drainage and rewetting
- 17) The ROK would like to suggest that ocean fertilization should be in the category “ocean-based removal activities” as it is a method of facilitating a specific part of ocean ecosystem, rather than utilizing geochemical or chemical approaches.
- 18) Regarding permanence, please refer to Section 3.5 “Addressing reversals” of this document for a detailed view of the ROK.
- 19) Exemplary product is synthetic fuels. They are produced with captured CO₂ from the atmosphere, but the stocked CO₂ are emitted back into the atmosphere when fuels are burned.
- 20) This substitution effect can be replaced by the concept of ‘emission avoidance’. Though there is a wide latitude in definitional approach to emission avoidance, at the project level, emission avoidance relates with “reduced use of fossil fuels” by resource substitutes. This conceptual approach to equate substitution effect and emission avoidance is confined only to ‘removal’ activities at the project level.

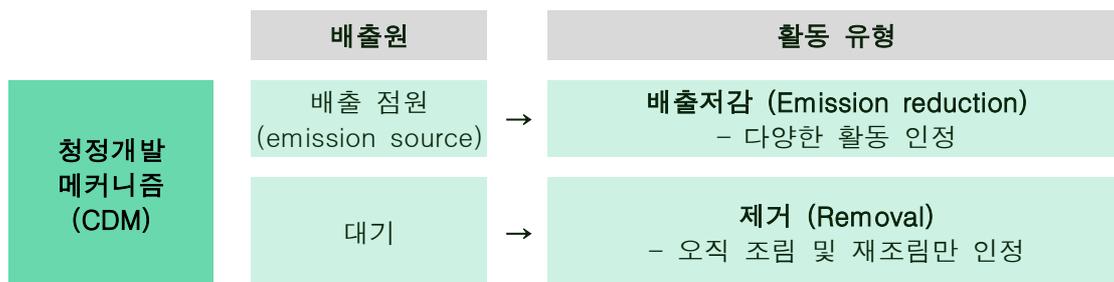
자료: 우리나라가 제출한 국가제안서인 UNFCCC(2003) 내용을 그대로 삽입

-
- 21) Regarding beverage carbonation and synthetic fuel, the captured CO₂ is stored in the products only for a while and releases nearly all the stocked carbon back into the atmosphere when used. However, these activities significantly reduce the dependence on carbon-intensive materials, i.e., fossil fuels. Acknowledging these short-term DACCU activities can be achieved by allowing the concept of emission avoidance in removal activities by providing removal credits to the DAC project operators.

제 3 절 (국제) 파리협정 6.4조 메커니즘 ‘제거 활동’ 으로 DAC 기술 포함에 관한 우리나라 협상 입장 연구²²⁾

1. 서론

기후변화에 대응하기 위한 ‘감축(mitigation)’ 활동의 유형은 크게 두 가지로 구분된다. 하나는 배출저감(emission reduction)이고, 다른 하나는 제거(removal)이다. 먼저 ‘배출저감’은 온실가스의 배출원(source)을 특정할 수 있고, 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 감축 활동과 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 [그림 4-2]와 같이 정리될 수 있다.



[그림 4-2] CDM 하에서의 감축활동 유형

자료: 저자 작성

22) 제4장3절의 내용은 2023년 동 연구과제를 통해 수행된 중점연구이다. 동 연구과제 수행 결과 도출된 연구 결과물은 「오채운·송예원·김래현. (2023). 파리협정 제6.4조 메커니즘에 따른 ‘제거’ 활동에 대한 우리나라 협상 방향 연구: 직접대기탄소포집(DAC) 기술 관점에서. 한국기후변화학회, 14(5), 521-541」의 논문으로 2023년 10월에 발간되었다. 이와 관련하여, 동 논문이 2023년 수행한 연구결과물로 도출되었기 때문에 동 연구보고서에 실기 위해 한국기후변화학회에 이차출판 동의서 요청서를 제출하였고, 이후 학회 측으로부터 이차출판 동의 확인서를 수신하였다. 이에, 동 논문의 내용이 동 제3절에 삽입되었고, 동 절 마지막 페이지에 이차출판 동의서를 삽입하였다.

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 중의 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).²³⁾ 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 부문들의 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)과 같은 공학적 접근법들 역시 포함한다 (Ibid.).²⁴⁾ 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.²⁵⁾ 즉, 제6.4조 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 감축활동에 대한 입장을 파악하기 위해 이해관계자들의 입장을 2022년 10월까지 받았고 (UNFCCC 2022b), 이를 토대로 권고안 초안을 도출하였다 (UNFCCC, 2022c).²⁶⁾ 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 신규조립·재조립 활동에 대한 국내·외 규칙 및 지침 수립에 관여하고 있는 국립산림과학원을 중심으로, 해양 부문의 해양환경공단, 농업 및 토지 이용

23) 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”

24) 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.

25) 파리협정 제6.4조 메커니즘은 지속가능발전메커니즘(sustainable development mechanism)으로 불리기도 한다.

26) 권고안 초안의 원 제목은 ‘Recommendations on guidance for activities involving removals under the Article 6.4 Mechanism’이다.

부문에 농촌진흥청, 직접대기탄소포집(DAC) 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 수렴하고, 이를 토대로 국가제안서가 UNFCCC 사무국에 제출되었다.

이 과정에서, 동 논문은 직접대기포집(DAC) 기술에 기반한 제거 활동으로 DACCS 기술과 직접대기탄소포집·활용(DACCU) 기술을 중심으로, 동 제도 개선을 둘러싼 국제적인 쟁점을 파악하고 이에 대한 DAC 기술 관계자들의 입장을 분석하며, 이에 대한 우리나라 입장을 수립하고자 한다.²⁷⁾ 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,²⁸⁾ 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. 기존연구와 분석 접근법

2.1. 대기중 이산화탄소제거 접근법

온실가스제거(GGR, greenhouse gas removal) 또는 이산화탄소제거(CDR) 접근법에 기반한 제거 활동이 중요하게 여겨지고 있다.²⁹⁾ 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.³⁰⁾ 다음으로, 해양 기반 생물학적 방법

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

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

29) 2022년 도출된 IPCC 제6차평가보고서 제3실무그룹(완화) 보고서에서는 이산화탄소제거(CDR) 접근법이라는 표현을 사용하고 있는 바, 동 원고에서도 CDR 용어를 사용하도록 하겠다.

으로는 블루카본(blue carbon) 관리와 해양비옥화(ocean fertilization)가 대표적이다.³¹⁾ 지구화학적 방법으로는 광물과 이산화탄소의 화학적 반응을 활용하는 강화된 풍화(enhanced weathering)와 해양 알칼리화(ocean alkalization)가 있다.³²⁾ 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,³³⁾ 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.³⁴⁾ 이후 높은 열을 가하는 재생 과정을 거쳐 포집제로부터 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

30) 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.

31) 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.

32) 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.

33) 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.

34) 강염기 물질에는 수산화나트륨(NaOH)이나 수산화칼륨(KOH) 등이 있다.

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, 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 (Waller et al., 2020; Honegger et al., 2022). 또한, 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.³⁵⁾

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 시기상조로 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

35) 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, 기준 배출량(baseline, 감축사업이 부재한다고 가정했을 때의 온실가스 예상 배출량)에 대해서 감축사업을 통해 감축하여 크레딧(credits)을 확보 및 판매할 수 있다 (OECD, 2023).

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 <표 4-11>과 같다.

<표 4-11> 제거 활동을 탄소시장에 포함할 때의 리스크

i)	배출저감 활동 대신 제거 활동을 선호하는 것은 즉각적인 배출저감 행동을 유보/연기하는 도덕적 해이로 이어질 수 있다.
ii)	고비용 보다 저비용이 드는 CDR 옵션을 선호하는 것은 고비용 CDR 옵션에 대한 시장수요를 부족하게 하고 기술진보를 늦출 수 있다.
iii)	제거 크레딧으로 인해, 크레딧 가격이 폭락할 수 있다.
iv)	배출저감 활동의 높은 수준의 MRV와 비교할 때, CDR 옵션에 대한 MRV가 부족할 수 있다.
v)	다양한 CDR 옵션으로부터의 크레딧 품질들이 다 다를 수 있다. 예를 들어 자연기반 제거 활동과 공학기반 제거 활동으로부터의 크레딧 품질이 다를 수 있다.

자료: Cox and Edwards(2019), Burke and Gambhir(2022), Carton et al. (2020), and Carton et al.(2021)를 토대로 저자 정리

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 “영향을 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., 2022).³⁶⁾ 탄소시장에서 ‘영구성’

36) 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).

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.³⁷⁾ 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 (UNFCCC, 2011a, para. 5; IPCC, 2007, Chapter 2 Table 2.14), 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 감축 사업 활동 부재 시 발생했을 배출 수준에 비해 추가적이어야 한다는 것을 의미한다 (KP, 1997, Article 12.5(c)).³⁸⁾ 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). 더 나아가,

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

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

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 영구적으로 제거되어야 할 온실가스가 대기중으로 다시 배출되는 역전(reversal) 현상 등이 발생하는 리스크가 발생할 수 있다.³⁹⁾ 이는 탄소시장에서 배출저감에 의한 결과물과 제거에 의한 결과물이 동일한 가치를 갖지 않아 상호 대체가능성이 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 <표 4-12>과 같다.

<표 4-12> 제거 활동을 탄소시장에 포함할 때 ‘영구성’ 관점에서 고려되어야 할 요소

i)	다양한 저장매체 및 제거 옵션들
ii)	다양한 저장 기간
iii)	배출저감 크레딧과 제거 크레딧 간의 대체 가능성(Fungibility)
iv)	다양한 제거 옵션들로부터 도출된 크레딧 간의 대체 가능성
v)	역전현상을 최소화/해결하기 위한 방안

자료: Burke and Gambhir(2022), McLaren et al.(2019), Carton et al.(2020)을 토대로 저자 정리

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 분석 틀로 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), 클라임웍스(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

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

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. DAC 기술 관련 제도 수립 쟁점 및 우리나라 입장 도출

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 교토의정서 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 (KP, 1997, Article 3.3; KLIC, 2023).⁴⁰⁾ 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 이산화탄소제거(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 (IPCC 2022, p.1796; Burns 2018). 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 생물학적

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

인 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 (CE, 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 기체⁴¹⁾ 상태로 지중에 주입하여 저장하는 방식 외에도, 포집한 이산화탄소를 광물과 화학반응시켜 고체화하는 현장외(外) 광물화(ex-situ mineralization)를 통한 저장 방식이 인정되어야 한다고 주장하였다 (DAC Coalition, 2022; AirCapture, 2022). 다음으로, DACCU 기술에 대해서는, 포집된 이산화탄소를 저장하는 제거 활동이 인정되어야 하며, 이를 위해서 DACCU에 의해 포집된 이산화탄소를 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 (IETA, 2022; AirCapture, 2022).

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

- 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.*
- (1) *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.*
- (2) *DACCU 기술을 고려할 때, 공학 기반 제거 활동에서 DACCU 기술을 제거 활동으로 인정해야 하며, 이를 위해 저장 ‘매체’로 ‘상품(product)’이 포함되어야 한다.*
- (3)

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 진행해 왔다. 공공섹터에서는, 2021년 10월 도출된 「2050 탄소중립 시나리오」

41) 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.

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 100대 핵심기술’이 포함되어었는데, 동 핵심기술 목록에 DAC 기술이 포함되어었다. 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, MSIT, 2022). 더 나아가 우리나라 과학기술정보통신부는 DACCU 기술에 대한 정부 R&D를 2023년부터 2025년까지 지원할 계획이다 (NRF, 2022).⁴²⁾ 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 <표 4-13>과 같다. 이러한 우리나라 준비 현황을 근거로, 제6.4조 메커니즘에 공학 기반 제거(engineering-based removal) 활동이 인정되는 것이 우리나라에도 유리하다고 판단될 수 있다.

<표 4-13> 한국에서의 DAC 기술 현황

부문	이름	내용	시기
공공	2050 탄소중립 시나리오	시나리오 B안 수송부문 내연기관 차량 온실가스 배출 상쇄를 위해 DAC 기술 활용(e-fuel 생산 및 활용)	2021년 10월
	한국형 탄소중립 100대 핵심기술	CCUS 분야*에 DAC 기술 포함 * 2030년 CCUS 분야 10.3백만톤 감축 목표 설정. CCS는 국내 대용량 저장소 확보 및 해외 폐가스전-폐유전 저장소 확보. CCU는 상용화 R&D 및 다양한 제도적 지원을 통한 민간 확산 접근	2022년 10월
	CCUS 탄소중립 기술혁신 전략 로드맵(안)	DAC 기반 2030 포집 목표 설정* * 2030년 연간 포집량 1천~4천CO ₂ , 2040년 연간 포집량 5만CO ₂ , 2050년 연간 포집량 50만CO ₂	2022년 11월
	DACU 원천기술 개발 사업	과기정통부가 DAC 기술에 대한 신규 R&D 시작	2023년 3월
민간	(주)로우카본	자체 습식포집 DAC 기술로 소규모 기술실증 완료. ‘Zero-C’라는 모듈 상업화	2022년
	GS 건설	카본큐어 (캐나다의 DACCU 기술 스타트업 회사)로부터 GS 건설로 포집된 이산화탄소를 활용해 콘크리트를 생산하는 기술 이전	2022년 8월

42) 2023년 3월에는 DACCU 기술의 원천기술개발을 목표로, 정부 R&D 사업인 「DACCU 원천기술개발사업」의 신규과제 공모가 시작되었다.

자료: 본문 내용 토대로 저자 정리

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,⁴³⁾ 2017년 지열발전으로 촉발된 포항 지진 이후 지열발전 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 찾아야 하는 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).⁴⁴⁾ 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 한국지질자원연구원 이 포집한 이산화탄소를 현장외 광물화 방식을 통해 폐광산 채움재로 활용하는 것에 대한 원천기술 개발을 수행 중이다 (KIGAM 2021; Jung et al., 2021). 다만, 현장외 광물화 기술은 반응 속도가 느리고 비용이 상대적으로 높다는 점이 단점으로 지적되며 (Romanov et al., 2015, p. 15),⁴⁵⁾ 현장외 광물화를 통한 이산화탄소 저장에 대해 공인된 감축방법론이 부재해 이를 통한 감축실적을 아직 인정받기 어려운 점 역시 단점이다. 그럼에도 불구하고 우리나라에는 다수의 폐광산이 존재하므로 이러한 기술을 잘 활용시 불확실한 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

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

44) 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.

45) 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 & p.15)

사실이다.

마지막으로, 공학 기반 제거 활동에 DACCU 기술을 인정해야 하고, 이를 위해 저장 매체로 ‘상품(product)’이 포함되어야 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 못해 왔다 (Park et al., 2020). 그러나 우리나라와 일본 등 지중저장소 확보가 용이하지 않은 국가들을 중심으로 CCU 기술의 활용이 불가피함을 역설하고 있다 (GCI, 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 (MOTIE, 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 (MOTIE, 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),⁴⁶⁾ 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, 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.

46) 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.

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 크레딧이 발행될 수 있는 기간을 의미한다. 파리협정 제 6.4조 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)).⁴⁷⁾ 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

47) 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).

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.

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.⁴⁸⁾ 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, 16, and 17). 이는 ‘제거’에 대한 산정 방법론에 대한 매우 기본적인 내용을 담고 있다.

48) 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”.

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

소중립 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.⁴⁹⁾

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 제 6조 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 국가 제안서를 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.⁵⁰⁾ 필리핀은 개도국의 사회경제적 개발권(right to develop socio-economically)에 대한 보상차원에서 접근하고 있다 (Philippine, 2022, p.1 & p.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.⁵¹⁾ 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

49) 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 tCER과 ICER의 발행 규모는 각각 0.4%와 0.1%에 불과했었다는 점이 바로 그 근거이다.

50) 필리핀이 제시한 배출회피의 정의는 “에너지, 수송, 제조, 농업, 인간에 의한 산림파괴, 그리고 다른 온실가스 배출 개발 활동에 있어서 (기존에) 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).

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

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

여기서 ‘사업’ 레벨에서의 ‘배출회피’ 개념은 DACCU 기술이 ‘제거’ 결과물로 인정받는 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,⁵²⁾ 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).⁵³⁾ 즉, DAC 기술에 기반해 포집된 이산화탄소를 산업공정에 활용하여 화석연료에 기반한 탄소 공급원료를 대체한다면 이는 감축효과로 보아야 한다는 입장이다. 따라서, ‘배출회피’ 또는 ‘대체효과’에 대한 개념이 인정될 수 있다면, DACCU 기술에 기반한 다양한 활동들이 파리협정 제 6.4조 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 개념 정의를 둘러싼 합의가 아직 이루어지지 않았다 (Philippine, 2022; Larrea and Warnars, 2009). 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

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

53) 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).

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.⁵⁴⁾ 파리협정 제6.4조 메커니즘의 세부 이행규칙에 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)가 포함되었는데, 제거 활동 참여자는 다년도 NDC 이행기간에 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 지중저장인 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 대기중으로 역전될 경우, 발행된 배출권을 CDM 등록부의 준비계좌(reserve account),⁵⁵⁾ 잠정계좌(pending account), 그리고 사업 참여자 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

54) 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.

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

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 크레디팅 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 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 다른아닌 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.

과리협정 제6.4조 메커니즘과 같은 의무적 탄소시장에서 논의되는 제거 활동의 확대 논의와 DAC 기술에 대한 논의는 현재 우리나라에 많은 시사점을 제시한다. 첫째, 우리나라의 감축 정책 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 행위에 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),⁵⁶⁾ 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’ 구분 하에 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.⁵⁷⁾ 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. 하지

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

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

만, 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 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 카테고리 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 ‘제거’ 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.



(사)한국기후변화학회

06609 서울특별시 서초구 효령로53길 18 석담 401호 (사)한국기후변화학회
TEL : 02-557-7897 FAX : 02-557-7893 e-mail: ksoc_edit@ksoc.re.kr 홈페이지: www.ksoc.re.kr

이차출판 동의확인서

발행연도/권호 : 2023년 제14권 5호

논문제목 : 파리협정 제6.4조 메커니즘에 따른 '제거' 활동에 대한 우리나라 협
상 방향 연구: 직접대기탄소포집(DAC) 기술 관점에서

저 자 : 오채운† · 송예원 · 김래현

한국기후변화학회는 한국기후변화학회지에 게재된 본인의 논문을 학위논문 및 연구보고서 등에 그 일부 혹은 전부를 사용할 경우 이를 일종의 이차출판 (secondary publication)으로 간주하고, 학회의 동의와 함께 이차출판 사실을 명기 할 것을 요구합니다. 이러한 원칙과 저자의 요구에 따라 위 논문의 이차출판에 동의합니다.

2024. 1. 3.

사단법인 한국기후변화학회
한국기후변화학회 편집위원회 위원장

제 5 장 소형모듈원자로(SMR) 기술: 국제경쟁력 확보를 위한 R&D 설계 방안 연구

제 1 절 (국내) SMR 기술 관련 국가 정책 현황

전세계적으로 탄소중립 달성 및 에너지 안보 확보를 위한 수단으로 원자력에 대한 수요가 증가하고 있다. 원자력의 기존 역할은 중앙집중형 기저 전원으로 전력생산에 국한되어 활용되었던 것에 반해서, 최근에는 원자력의 역할이 격·오지 등에 대한 소규모 분산형 전력원, 수소 생산, 지역난방, 공정열 공급, 해수담수화 및 노후화력발전의 대체 등으로 확대되고 있다 (KANS, 2016). 특히, 온실가스 배출규제가 전력생산의 전환 뿐만 아니라 산업, 수송, 건물, 해양 등 광범위한 부문들에 걸쳐 있으며, 이에 따라 조선해양·철강·석유화학·수소·우주 분야 등에서도 원자력에 대한 수요가 급증하고 있다 (Auh, 2022; IAEA, 2022). 한편, 1970년대 석유파동 및 최근 우크라이나-러시아 전쟁으로 글로벌 에너지 공급 불안과 지정학적 위기를 겪으며 에너지 안보 확보가 국가 경쟁력의 핵심 요소가 되었다. 이러한 이유로 미국 등 세계 각국은 원자력을 전략기술로 선정하고 자국의 환경에 맞는 원자력 정책을 수립 및 추진하고 있다. 기존에 사회적 수용성이 낮았던 원자력을 주요한 에너지원으로 바라보는 유럽 국가들이 등장하기도 하였다 (IAEA, 2022).

이러한 관점에서, 세계에서 6번째로 많은 원전을 운영 중인 우리나라도 2050년 탄소중립 달성과 에너지 안보 강화를 위해서 또한 미래 글로벌 원자력 산업 시장에 적극 진출하기 위해 원자력에 다시 많은 관심을 두고 있다. 특히, 2022년 10월 12대 국가전략기술 중 하나로 ‘차세대 원자력’이 선정되었으며, 이는 한국형 SMR 독자 모델인 혁신형 SMR(i-SMR) 개발과 관련된다 (MSIT, 2022). 또한, 2023년 5월에 확정된 한국형 탄소중립 100대 핵심기술에 원자력 기술이 포함되었다는 점을 주목할 필요가 있다. 동 원자력 기술에는 소형모듈원자로(SMR, Small Modular Reactor) 기술, 선진 원자력 시스템 기술, 그리고 원자력 폐기물 관리 기술이 포함되었다 (MSIT, 2023).

현재, 우리나라에서 개발중인 SMR은 다음의 <표 5-1>과 같이 총 10종으로, 크게 물 냉각재를 쓰는 원자로와 그 외의 원자로로 구분하였다. 이 중에서 국제원자력기구(IAEA, International Atomic Energy Agency)에서 한국이 개발하고 있다고 제시한 SMR은 4종으로, 이는 i) 스마트(SMART, system-integrated modular advanced reactor), ii) 혁신형 SMR(i-SMR), iii) BANDI-60, 그리고 iv) MicroURANUS이다 (IAEA 2022a).⁵⁸⁾ 이 중에서, 혁신형 SMR(i-SMR)은 물을 냉각재로 사용하는 가압경수로(pressurized water reactor)형 SMR로, 윤석열 정부의 ‘新성장 4.0 전략 추진계획’의 15대 프로젝트 중 하나로 ‘에너지 신기술’ 개발 대상으로도 포함되었다. 세계 최고 수준의 경

58) IAEA SMR booklet은 SMR을 개발하는 주체가 IAEA 시스템에 직접 신청하여 등재한다.

쟁력을 갖춘 차세대 한국형 SMR인 혁신형 SMR을 적기 개발하고 글로벌 시장에 진출하기 위해서, 2022년 6월 총 사업비 3,992억 규모의 예비타당성평가를 통과하여 2023년부터 과기부와 산업부가 공동으로 혁신형 SMR 기술개발사업에 착수하였다. 동 사업은 2028년 표준설계인가 획득을 목표로 한다 (MoEF 2022; KISTEP, 2022).

<표 5-1> 한국의 SMR 모델 개발 현황

원자로 유형		SMR 모델명	개발기관*
경수로 (LWR)	가압경수로 (PWR, Pressurized Water Reactor)	SMART	KAERI
		i-SMR (= Innovative SMR)	KHNP & KAERI
		BANDI-60	KEPCO E&C
		REX-10	SNU
非경수로	소듐 냉각 고속로 (SFR, Sodium-cooled Fast Reactor)	PGSFR (Prototype Gen-IV SFR)	KAERI
		SALUS	KAERI
	초고온 가스 냉각로 (HTGR, High-Temperature Gas-cooled Reactor)	(To be determined)	KAERI
	용융염 원자로 (MSR, Molten Salt Reactor)	K-MSR (Tentative name)	KAERI
	납냉각 고속로 (LFR, Lead-cooled Fast Reactor)	MicroURANUS	UNIST
초임계 CO ₂ 냉각 원자로 (Supercritical CO ₂ -cooled Reactor)	KAIST-MMR	KAIST	

자료: 저자 작성

참고: KAERI(Korea Atomic Energy Research Institute), KHNP(Korea Hydro & Nuclear Power), KEPCO E&C(Korea Electric Power Corporation Engineering & Construction), SNU(Seoul National University), UNIST(Ulsan National Institute of Science and Technology), KAIST(Korea Advanced Institute of Science and Technology)

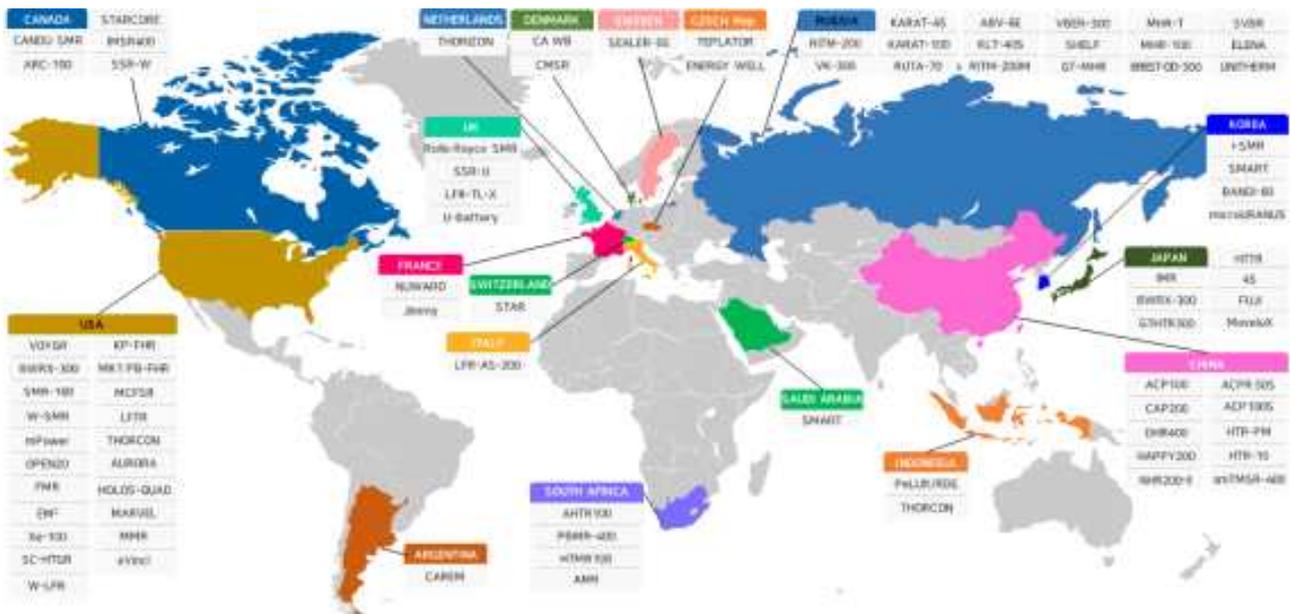
이 중에서, 혁신형 SMR(i-SMR)은 물을 냉각재로 사용하는 가압경수로(pressurized water reactor)형 SMR로, 윤석열 정부의 ‘新성장 4.0 전략 추진계획’의 15대 프로젝트 중 하나로 ‘에너지 신기술’ 개발 대상으로도 포함되었다. 세계 최고 수준의 경쟁력을 갖춘 차세대 한국형 SMR인 혁신형 SMR을 적기 개발하고 글로벌 시장에 진출하기 위해서, 2022년 6월 총 사업비 3,992억 규모의 예비타당성평가를 통과하여 2023년부터 과기부와 산업부가 공동으로 혁신형 SMR 기술개발사업에 착수하였다. 동 사업은 2028년 표준설계인가 획득을 목표로 한다 (MoEF 2022; KISTEP, 2022).

제 2 절 (국제) 우리나라 혁신형 소형모듈원자로(i-SMR)에 대한 국제경쟁력 확보를 위한 R&D 설계 현황 고찰

1. 서론

SMR은 기존 대형원전과 차별화되는 원전 유형이다. 먼저 전기출력 관점에서, 기존 가압경수로형 대형원전의 전기출력이 1,000~1,500MWe 수준임을 감안하면, SMR은 전기출력이 300MWe 이하로 대형원전 발전의 3분의 1 규모 이하이다 (IAEA, 2009). 다음으로 안전계통 관점에서, 기존 대형원전의 노심 냉각에 능동형(active) 안전계통이 필요한 반면, SMR은 출력이 작아 출력 조절이 용이하며 자연 물리 현상을 노심 냉각에 활용하는 피동형(passive) 안전계통을 채택할 수 있어 안전성이 향상되는 장점이 있다. 또한 원자로 부피 자체가 작아 지하 매립, 냉각 수조, 해양 부유식과 같은 다양한 기술을 차용해 대중 위험도를 더욱 줄일 수 있다 (Lee, 2022). 그리고 건설방식 측면에서, SMR은 공장(제조 시설)에서 주요기기를 생산하여 현장에서 설치·조립하는 모듈성에 기반해 건설하므로, 제작성을 높이고 건설 리스크를 줄일 수 있다 (Ibid.).

전세계적으로 개발되고 있는 SMR 유형은 매우 다양하며 2022년 9월 기준 전세계 18개국에서 80여종의 모델이 개발되고 있으며 일부는 이미 활용되고 있다 (IAEA, 2022). 우리나라 노형이 포함된 자료를 토대로 정리하면, [그림 5-1]과 같이 정리될 수 있다.



[그림 5-1] 전세계 SMR 기술 개발 및 활용 (83개 모델)

자료: IAEA (2022)의 p.353의 Figure I-1을 토대로 저자가 그림

SMR의 원자로 노형을 결정하는 핵심요소는 냉각재(coolant)의 종류로, 보통 수냉각로(water-cooled), 가스냉각로(gas-cooled), 액체금속냉각로(liquid metal cooled) 등으로 구분된다 (KAERI, 2022; IAEA, 2006). 이들 중 가장 많은 노형은 수냉각로형으로서 약 40% 이상인 33종이 개발 중이며, 이는 수냉각로형이 전세계적으로 오랜 기간동안 축적된 대형원전 운전경험 및 입증된 기술을 바탕으로 함에 기인한다.⁵⁹⁾ 현재 미국 NuScale社의 모듈당 77MWe급 가압경수로형 SMR인 VOYGR 모델이 기술성 및 사업성 측면에서 가장 앞서있다고 평가되며 2029년 첫 호기 완공 및 운영 개시를 목표로 개발 중이다 (IAEA, 2022).⁶⁰⁾

글로벌 SMR 개발 각축 상황에서, 우리나라의 SMR이 기술우위를 통한 시장경쟁력을 갖추기 위해서는 국제적으로 통용될 수 있는 기술적 설계요소 측면의 강점을 가지고 있어야 할 뿐만 아니라, 국내·외 제도 및 정책과의 상용성 역시 필요하다.⁶¹⁾ 그러나, 현재 우리나라가 핵심적으로 개발중인 혁신형 SMR에 대해서 향후 경쟁력 확보를 위해 기술 및 정책 방향성을 통합적으로 제시하는 연구는 아직 부재하다. 이는 아직 동 모형들이 여전히 R&D 단계에 있기 때문이기도 하다.⁶²⁾ 이에, 동 5장 2절에서는 국제 경쟁력을 확보하기 위해 SMR 설계시 고려해야 할 R&D 핵심 요소들을 중심으로, 우리나라가 R&D를 중점적으로 추진하고 있는 혁신형 SMR이 이러한 고려요소들을 반영하고 있는 지 여부를 살펴보고자 한다. 우선 제2 섹션에서는 SMR에 대한 문헌 연구를 통해 SMR의 기술적 특징들을 개괄하고, 가압경수로형 SMR 평가를 위한 분석틀을 도출한다. 분석틀은 4가지 측면인 i) 비용, ii) 안전성 확보, iii) 폐기물 관리 (사용 후핵연료 중심), 그리고 iv) 핵비확산성(non-proliferation) 각각에 대해서 세부 고려요소들을 도출하였다. 제3 섹션에서는 이 고려요소들을 혁신형 SMR에 적용하여 분석하였다. 마지막으로 제4 섹션에서는 혁신형 SMR의 강점 및 개선점을 파악하여 향후 국제 경쟁력 확보 및 글로벌 시장 진출을 위해 필요한 기술적 및 정책적 대응 방향을 정리하였다.

59) 특히 가압경수로형 SMR이 선호되는 또다른 이유는 비경수로형 SMR에 비해 상대적으로 용이한 인·허가 절차를 통한 빠른 시장진입 가능성 때문이다. 비경수로형이 시장에 본격 진입 시기가 2040년으로 예상되는 바, 2040년대까지는 경수로형 SMR이 시장을 지배할 것으로 전망된다 (Chun et al., 2022). 한편, 소듐냉각고속로(SFR) SMR과 초고온가스로(VHTR) SMR은 전세계적으로 빨라야 2030년대 중후반부터 시장에 나올 것으로 전망되고 있다.

60) 미국은 VOYGR의 첫 운전 개시 예상 시점을 2029년으로 보고 있다. 우리나라 두산에너지빌리티와 국내 투자사들(IBK 투자증권 포함)은 공동으로 NuScale에 한화 520억원(\$44M)의 지분투자를 2019년 실시하였고, 2021년 한화 712억원(\$60M)의 지분투자를 실시하였다. 두산중공업은 현재 NuScale 주기기 제작을 준비중에 있다 (Kim, 2021).

61) 우리나라 혁신형 SMR의 경쟁상대로는 미국 NuScale社의 VOYGR 외에도, GE-Hitachi社의 BWRX-300, Holtec社의 SMR-160, 영국 Rolls-Royce社의 UK SMR 등이 있다 (Chun et al., 2022).

62) 해외에서는 미국 NuScale Power社의 SMR을 활용해 다양한 연구들이 진행되고 있다.

2. SMR 문헌조사 및 분석틀 도출

2.1. SMR 주요 특징

SMR이란 Small Modular Reactor의 약자로 소규모 원자로다. 이름에서 나타나듯이 소규모(Small)와 모듈식(Modular)으로 설계함으로써 얻는 특징을 적용한 원자로이며, 전기출력이 일반적으로 300MWe 이하이고 주요기기를 모듈화한 원자로이다 (IAEA, 2021b). SMR의 특징이자 장점은 기존의 대형원자로(large reactors)와 비교하여 도출되는데, 기존 문헌들이 다루고 있는 SMR 장점을 크게 세 가지로 구분하여 정리하면 다음의 <표 5-2>와 같다.

첫 번째로, 경제성(비용) 측면에서는 대형원전 건설에 비해 건설사업 초기 재원조달 경감에 유리하다. 초기 대규모 투자비, 건설지연 리스크, 투자비 회수 리스크가 존재하는 기존 대형원전과 달리, SMR은 초기 투자비용 경감 및 건설지연 리스크 완화 등으로 투자 용이성을 확보할 수 있다. 또한, SMR의 모듈성(modularity)으로 인해, 공기가 짧고,⁶³⁾ 공장 제작 및 건설 현장설치 강화로 학습효과(learning-by-doing)의 경제를 기대할 수 있고, 또한 건설 소요시간도 줄어들어 경제적 이익이 있다. 또한, 핵연료 재장전 요건이 줄어들어,⁶⁴⁾ 핵연료 비용이 줄어든다 (Locatelli et al., 2014). 그리고 SMR의 규모가 작아 운영 및 유지 비용도 낮출 수 있다 (Vujić et al., 2012). 한편, 낮은 위험성에 따라 최종소비자(수요자) 인근에 건설할 수 있으므로 배전망 설치 비용을 경감할 수 있고, 에너지 수송 시 발생하는 에너지 손실을 줄일 수 있다 (Locatelli et al., 2014). 이는 배전망 시설이 부족하고 투자 재원이 제한된 개도국에게 매력적인 선택사항일 수 있다 (Hidayatullah et al., 2015). 또한, 전력뿐만 아니라 해수담수화, 수소생산, 산업 공정열(process heat) 공급, 지역난방 등 함께 생산 가능하다는 장점도 있다 (OECD, 2023; Locatelli et al., 2014).

두 번째로, 안전성 측면에서는, 먼저, 가압경수형 SMR의 경우 주요기기를 일체형으로 설계할 수 있어,⁶⁵⁾ 중대사고를 유발하는 요인들(예: 냉각재 순환계통 배관)을 제거하여 방사능이 유출되는 중대사고를 실질적으로 배제할 수 있다 (Kim, 2021).⁶⁶⁾ 또한, 만약 사고가 발생하여도, 출력이 낮아 제거해야 할 붕괴열(decay heat)이 작고 (Ramana and Mian 2014),⁶⁷⁾ 대류현상 등 자연력으로도 노심 냉각이 가능하다. 이는 SMR의 피동형(passive) 안전 개념으로써, 사고발생 시 외부 전원 및 별도의 조작 없이도 안전성을 유지함을 의미한다 (Kim, 2021, p.3; Vujić et al., 2012; Hidayatullah et al., 2015). 이러한 안전성으로 인해, 주민대피가 필요한 방사선비상계획구역(emergency planning zones)의 축소가 가능하다 (OECD, 2023).

세 번째로, 설계의 단순성 및 건설 유연성 측면에서, SMR은 모듈성의 강점을 살려, 공장에서 모듈을 제작하고, 현장으로 이동 및 조립하는 것이 용이하며, 건설부지에 모듈을 일괄 설치하고, 재배치하는 것이 가능하다 (Locatelli et al., 2014). 또한, 송배전망(grid)과의 연계가 크게

63) 건설공사 계약의 착수일로부터 완료일까지 기간을 말한다. - 공공 건설공사의 공사기간 산정기준

64) 핵연료 재장전 주기가 길어지거나, 재장전이 필요가 없도록 설계하는 것을 의미한다.

65) 노형에 따라 주요기기 배치 설계가 다르다. 고온가스로의 경우, 원자로와 열교환기가 연결된 구조로 설계된다.

66) 일체형 설계란 주요기기(원자로, 증기발생기, 가압기, 냉각재펌프 등)가 원자로 압력용기 내에 배치된 것을 의미한다 (Krall et al., 2022, p.4).

67) SMR은 열출력 대비 냉각수 표면적이 큰 점, 또는 열출력 부피 밀도 자체가 낮은 점으로 인해 대형원전보다 상대적으로 냉각 능력이 우월하다.

문제가 되지 않으므로, 수송 인프라가 없거나 접근이 용이하지 않는 지역 등 부지선택에 대한 제한성이 낮다 (Ramana and mian 2014; Vujić et al. 2012). 또한, 다수 모듈배치로 전력수요 증대에 맞추어 SMR을 모듈 개수를 유연하게 증대하여 유연하게 출력을 구현할 수 있다 (Locatelli et al. 2014). 또한, 태양광과 풍력 등 간헐적 재생에너지와 효과적으로 연계할 수 있다 (OECD, 2023).

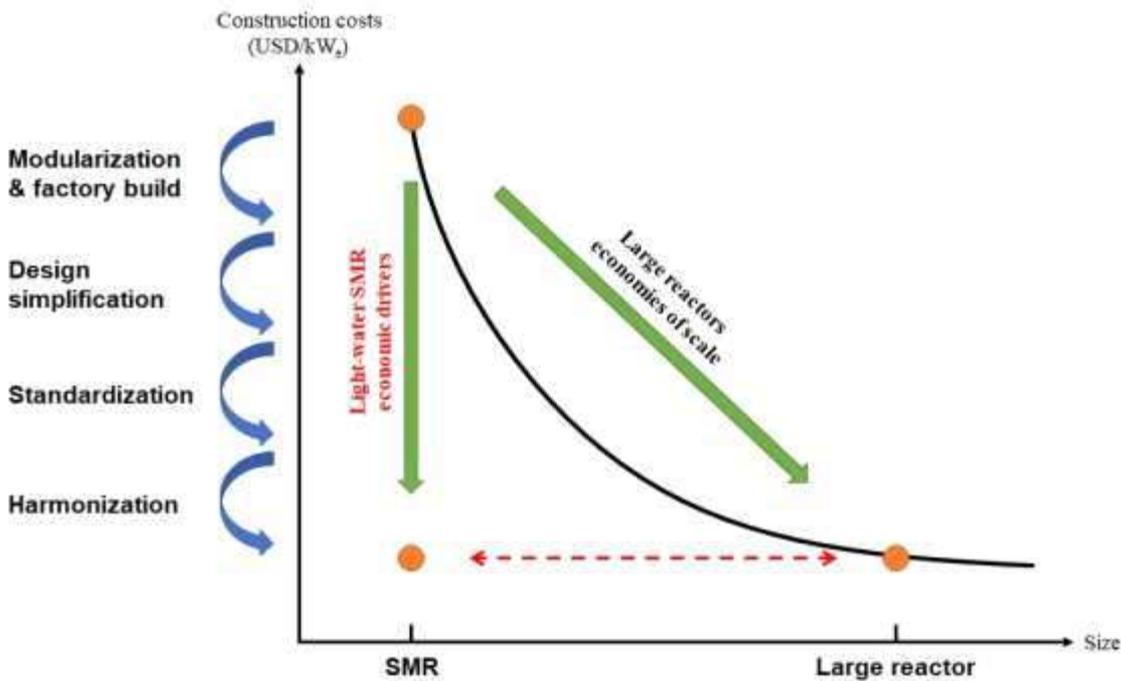
<표 5-2> 대형원전과 비교한 SMR의 특징

기준 항목	특징	관련 문헌
경제적 부담	<ul style="list-style-type: none"> - 제한된 자원 · 낮은 자본 위험 및 초기 자본 투자 요구사항 감소 · 실습을 통한 산업 현장 학습 및 모듈화를 통한 구축 시간 단축 · 시스템 비용 절감 (예시: i) 배전 인프라 업그레이드 비용 회피, ii) 최종 소비자 와 가까운 위치로 인한 에너지 손실 감소, iii) 전기 외에 담수화, 수소 생산 또는 공정 열의 코제너레이션) - 재연료 공급 필요성 감소로 연료 비용 절감 	Locatelli et al.(2014), IAEA(2021), Ramana and mian(2014), Vujić et al.(2012), Hidayatullah et al.(2015)
안전성	<ul style="list-style-type: none"> - 설계를 통한 안전성 강화 - 작은 규모의 총 전력출력 - 수동형(Passive) 안전 기능/특징(features) - 비상계획구역(EPZ) 감소 	Ramana and Mian(2014), Vujić et al.(2012), Hidayatullah et al.(2015), OECD(2023)
단순성 및 유연성	<ul style="list-style-type: none"> - 모듈화 · 공장 제조, 운송 가능성(저렴한 배송), 현장 조립을 통한 현장 준비 및 재배치 가능성 - 그리드 의존성 감소 - 수요 증가에 맞춰 용량을 증설하여 운영 유연성 향상 - 가변(variable) 재생 에너지의 높은 점유율 지원 	Locatelli et al.(2014), Ramana and mian(2014), OECD(2023)

자료: 표에 기재된 출처들을 토대로 저자 작성

물론, 모든 측면에서 대형원전 대비 SMR이 유리한 것은 아니다. 먼저, 경제성(비용) 측면에서는, SMR의 경우 규모의 경제(economy-of-scale)가 줄어들어 건설단가가 기존의 대형원전보다 높다. SMR의 건설 및 운영비용이 대형원전과 비교해 심지어 더 크다는 연구결과도 존재한다 (Locatelli et al. 2014). 이를 극복하기 위해서 SMR은 제작성 향상에 기반한 양산의 경제(economy-of-mass-production)를 추구해야 하며, 이러한 양산의 경제가 실효성을 갖추기 위해서는 충분한 수요(SMR 수주 확보)가 필요하다. 기존 연구에 의하면, <Figure 2>과 같이 대형원전의 규모의 경제를 보상하기 위해서 SMR의 모듈화(modularization), 설계의 단순화(simplification), 표준화(standardization) 등이 핵심 요소라고 평가된 바 있다

(OECD, 2023). 또한, SMR의 안전성이 높다고 하더라도 원전은 접근이 통제되는 국가중요시설로 지정된 현 정책을 적용한다면 부지 선정 과정과 관리에 드는 사회적 비용이 상당할 수 있다 (ETF 2021, p.7). 다음으로, 방사성폐기물 관리 측면에서, SMR의 건설 및 운영으로 인해 폐기물 생산 및 관리 지역이 늘어날 뿐만 아니라, 운송이 어려운 원거리 지역에 폐기물이 산발적으로 존재함에 따라 이의 안전성 관리의 문제가 발생할 수 있다. 또한, SMR 역시 대형원전과 마찬가지로 대중·사회적 수용도에 대한 문제가 발생할 수 있다. 마지막으로, SMR 설계 모델이 매우 다양하며, 특히 경수형이 아닌 비경수형 SMR 모델에 대한 인증 및 인허가 과정이 길고 어려울 것으로 예상된다 (Vujčić et al. 2012).⁶⁸⁾



[그림 5-2] 규모의 비경제를 보완하는 SMR의 주요경제적 요인

자료: OECD(2023)의 p.16의 Figure 4를 토대로 저자가 다시 그림

2.2. 분석틀

전세계적으로 개발되고 있는 다양한 SMR 모델들을 비교하여 평가하기 위한 분석틀이 다수 존재한다. 대표적으로 IAEA(2007)는 SMR을 안전성, 경제성, 핵확산 저항성(proliferation resistance), 그리고 다른 기타 측면에서 검토하였다. 또한, IAEA(2020)는 SMR 모델별로, 안전성, 경제성, 운영성(operational performances), 설계 및 인허가 현황, 핵연료주기 접근법(Fuel cycle

68) 제3세대 원자로는 대부분 '경수형'으로, 고온의 핵연료를 냉각하고, 핵분열로 발생한 열에너지를 전달하는 매개체 역할을 하는 냉각재로 물(water)을 사용한다. 한편, 제4세대 원자로는 냉각재로 액체금속, 가스, 염(salt) 등 물 외 다양한 물질을 사용하기 때문에 비(非)경수형으로 구분된다 (Park, 2022). 제4세대 원자로로 물을 사용하는 초임계압수냉각로(super-critical water cooled reactor)도 있다.

approach), 폐기물 관리 및 처리 계획 등으로 비교 기준을 설정하였다. Vujić et al.(2012)는 설계 단순성, 안전성, 경제성 측면을, Liu and Fan(2014)는 경수로형 SMR에 대해 안전성, 경제성, 운영성 측면을 평가 및 비교하였다. Ramana and Mian(2014)는 SMR 설계시 비용, 안전성, 폐기물 처리, 그리고 핵확산(proliferation) 측면에서 필수적으로 고려해야 할 요소들을 개괄하고 있다. 이처럼 통합적 분석 접근법을 제시한 연구가 있는 한편, 최근에는 폐기물 처리 (Krall et al., 2022), 핵비확산성 (Prasad et al., 2015; Wu et al., 2020) 등 개별 요소들에 대해 보다 세부적으로 분석하는 연구가 진행되고 있다.

본 원고에서는 기존 대형원전 대비 SMR이 개선해야 할 핵심 요소로서 Ramana and Mian(2014)가 제시한 네 가지 기준인 i) 비용 (경제성), ii) 안전성, iii) 방사성폐기물 저감, 그리고 iv) 핵확산(proliferation) 방지에 주목하였다. SMR 설계시 고려 요소들을 상기 네 가지에 따라 정리해 보면 다음과 같다.

첫째, ‘비용 감소’와 관련한 고려요소로는 i) 건설비용, ii) 전력 생산을 통한 이익, iii) 가격 경쟁력을 고려하여 전력 수요에 탄력적으로 대응하는 유연성, iv) 공기(건설기간), v) 핵연료 비용, vi) 유지보수 비용, 그리고 vii) 외부 요소로,⁶⁹⁾ 여기에는 전력망의 용량, 부지 선정 제한, 국가산업시스템 영향, 그리고 고용창출 효과 등이 포함된다 (Ramana and Mian, 2014).⁷⁰⁾

둘째, ‘안전성 향상’과 관련한 요소로는 i) 설계단계에서부터 미리 안전성 향상을 감안하는 접근법, ii) 출력 감소,⁷¹⁾ iii) 고유 안전성 및 피동형 안전(passive safety) 설계,⁷²⁾ 그리고 iv) 주민대피를 위한 방사선비상계획구역 범위이다 (Ibid.).

셋째, ‘방사성폐기물 저감’과 관련한 요소로는 i) 고속중성자를 활용하는 원자로 설계,⁷³⁾ ii) 더 높은 핵연료 연소도(burn-up), iii) 여러 세대에 걸쳐 연료 사용, iv) 기존 폐기물의 에너지화(에너지로 변환),⁷⁴⁾ 그리고 (선택적으로) 재처리 과정 (비용적으로 값비싼 과정)의 적용 필요성이다.

넷째, ‘핵비확산(non-proliferation) 강화’를 위하여 먼저 재장전 주기를 최소화하는 것이 필요하며,⁷⁵⁾ 이를 위해 고려해야 할 요소로는 i) 최초 발전(first generation)만을 위한 농축을 통해 현장 재장전 없이 운영, ii) 장주기(long periods) 원자로 및 장수명 노심 설계⁷⁶⁾, iii) 재장전 모니터링 등 강력한 세이프가드 실시가 있다.

69) 외부요소는 정확히는 비(非)재정적 요소를 의미한다.

70) 중복되는 항목들에 대해서는 자체적으로 통합하였다.

71) 이는 노심에 방사성 물질의 양이 더 적음을 의미하며, 사고발생 시 제거해야 할 붕괴열이 더 적음을 의미한다.

72) 피동형 안전 설계의 대표적인 예시로는 경수로형의 경우 물 순환 시스템이 대류현상 등을 통해 자연적으로 작동하도록 설계하는 것이다.

73) 고속로(fast reactor)는 우라늄 장전량을 감소시키고, 폐기물 생산량을 감소시키고, 사용후핵연료 재처리가 필요하지 않으며, 최종 처리로 폐기물의 상당량을 감소시킬 수 있다. 물론, 이는 일련의 복잡한 선행조건이 필요하다.

74) 재처리 과정을 통한 플루토늄 재활용 등이 해당될 수 있다.

75) 핵비확산의 핵심은 핵연료를 핵무기용 핵연료로 전용하는 것을 원천 차단하는 것이다. SMR은 핵확산 방지를 위한 기술적 장점과 단점을 모두 보유하고 있다. 장점으로는 i) SMR이 사용후핵연료를 핵확산에 덜 매력적으로 만든다는 점, ii) SMR의 밀봉된 설계(sealed design) 방식이 원자로 노심에 대한 접근성을 차단한다는 점, 그리고 iii) 연료 재장전의 빈도수를 낮춘다는 점이다. 그러나, 단점으로는 i) 특정 유형의 SMR의 경우 고농축 핵연료를 사용한다는 점으로, 예를 들어, 5% 농축 핵연료보다 20% 농축 핵연료가 핵무기 개발시 필요한 자원이 덜 들어간다는 점, ii) SMR의 활용 및 확산이 증가되면 그만큼 전세계적으로 유통되는 핵연료 수량이 증가하고 관리되어야 할 SMR의 지리적 분포도 넓어진다는 점, 마지막으로 iii) 특정 SMR의 냉각재와 밀봉된 설계 방식의 불투명성으로 인해 원자로 내부에 대한 모니터링이 어려워진다는 점이다 (Prasad et al. 2015).

76) 이 방식은 농축도가 더 높은 핵연료가 필요하다.

앞서 언급된 내용을 정리하면, 다음의 <표 5-3>과 같다. 이는 기존의 대형원전에 대비하여 SMR이 경쟁력을 갖기 위해 고려해야 할 요소들을 전반적으로 총 망라하고 있다. 그런데, 현재 개발되고 있는 SMR 모델들이 다양하며, 각 모델들이 이러한 요소들을 모두 갖추기는 쉽지 않다. 그러나 이러한 요소들을 고려하여 설계할수록 SMR 시장에서 국제 경쟁력을 확보할 가능성이 높아진다. 이에, 이러한 전반적인 고려요소들을 토대로, 우리나라가 핵심적으로 R&D를 추진하고 있는 ‘혁신형 SMR’ 모델의 설계방향을 살펴보고, 향후 기술적 및 정책적으로 대응해야 할 방향을 모색하고자 한다. 다만, Ramana and Mian(2014)은 SMR 유형과 관계없이 전반적인 고려요소들을 모두 담고 있는 바, 다음 섹션에서 우리나라 혁신형 SMR을 분석하는 과정에서 일부 고려항목들은 삭제하고자 한다.

<표 5-3> SMR 설계시 고려 요소

기준	설계 요소
비용	비용 저감
	i) SMR 건설 비용 ii) 전력 생산 수익 iii) 전력 수요에 대한 유연성(수요 증가에 따른 용량 증설) 및 가격 경쟁력 iv) 건설 시간 v) 연료 비용 vi) 유지보수 비용 vii) 비재무적 요인 - 전력망 용량, 입지(공동 입지 포함), 국가 산업 시스템에 미치는 영향, ⁷⁷⁾ 일자리 창출 효과
안전성	안전성 향상
	i) 설계를 통한 안전성 ii) 전력 용량/출력 감소 iii) 고유한 자체 보호 및 수동적 안전 특성 (펌프의 능동적 설계 또는 비상 발전기 설치 포함) iv) 대피를 위한 비상 계획 구역의 크기
폐기물 발생	폐기물 발생량 감소
	i) 고속중성자를 사용하는 원자로 ii) 더 높은 번업 iii) 여러 세대에 걸친 연료 사용 (선택 사항) 재처리를 통한 에너지 전환 ⁷⁸⁾
핵확산 리스크 (연료 전용)	핵확산 방지 향상 (재장전 주기 최소화를 통해)
	i) 1세대만을 위한 농축 (현장 급유 없이 운영) ii) 연료 재급유 간격이 긴 원자로 설계 (단, 우라늄 농축 또는 플루토늄 농축이 높은 신선한 연료 사용) 20년 이상(장수명) 노심 설계 iii) 연료 주입 모니터링을 통한 강력한 안전 장치

자료: Ramana and Mian (2014)을 토대로 저자 정리

3. 우리나라가 개발중인 혁신형 SMR(i-SMR) 분석

우리나라는 1997년부터 가압경수로 기반의 일체형 SMR인 SMART를 개발해왔으며,⁷⁹⁾ 세계 최초로 2012년 우리나라 규제기관으로부터 표준설계인가를 획득한 바 있다. 그러나 2030년대에 본격적으로 펼쳐질 글로벌 SMR 시장에 적기 진입하여 기술우위를 통한 시장선점을 하기 위해서는 경쟁력의 대폭 향상이 필요함을 인식하였다 (KISTEP, 2022).⁸⁰⁾ 이에 추진된 혁신형 SMR(i-SMR) 개발 계획은 2019년부터 산·학·연 협동으로 구축되었고 2021년 국회 포럼 등을 통해 구체화되었으며 2022년 6월 예비타당성조사를 최종 통과하였다. SMART 개발 경험과 기술력을 바탕으로, 2023년 현재 ‘혁신형 소형모듈원자로 기술개발사업단’을 중심으로 안전성, 경제성, 유연성 측면에서 기술 경쟁력을 갖춘 혁신형 SMR을 2028년까지 표준설계인가 획득을 목표로 개발 중이다.

혁신형 SMR은 기본적으로 가압경수로형으로 설계된다. 가압경수로는 현존하는 대형원전의 상당수를 차지하는데,⁸¹⁾ 이는 냉각재 및 감속재로 사용되는 물(경수)이 인류에게 물리적 특성이 잘 알려진 물질일 뿐만 아니라 오랜 운전 경험을 통해 그 성능과 안전성이 충분히 검증되었기 때문이다. 혁신형 SMR은 SMART의 원천기술을 활용하고, 대형원전인 APR1400의 상용기술을 접목해 개발하고 있으며,⁸²⁾ 뛰어난 탄력 운전 능력을 바탕으로 신재생 에너지와 연계한 전력 생산망 구축에도 유리한 장점이 있어 탄소중립을 실현하는데 주안을 두고 있다 (MEJ, 2021). 또한, 기존 가압경수로와는 달리, 혁신형 SMR은 무(無)붕산 노심설계를 채택하여 복잡한 붕산 처리 계통을 제거하여 설계를 단순화한다. 이 외에도 무한냉각, 모듈화, 혁신 핵연료, 혁신 제조기술, 자율운전, 디지털 트윈,⁸³⁾ 통합제어실, 재생에너지 연계 등의 혁신 기술을 적극적으로 도입한다 (Lee et al., 2022; KAERI, 2022). 혁신형 SMR 설계 모형의 개념적 구조는 다음의 [그림 5-3] 같다.

77) 동 연구에서는 이 부분에 대해서는 다루지 않기로 하였다.

78) 우리나라는 사용후핵연료를 재처리하지 않으므로, 동 연구에서는 이 부분에 대해서는 다루지 않기로 하였다.

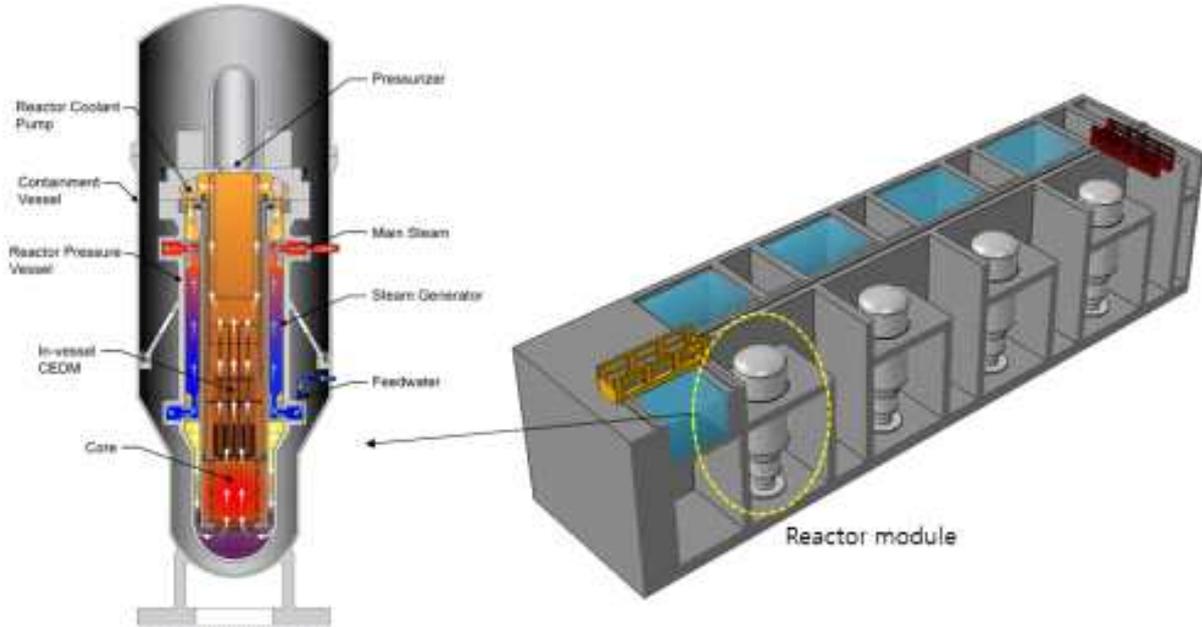
79) SMART는 System-integrated Modular Advanced Reactor의 약자로 110 MWe급 가압경수로형 SMR이며, 노심, 증기발생기, 가압기, 냉각재펌프가 하나의 원자로용기에 집약된 일체형 원자로이다. 현재 캐나다, 우즈벡 등 해외시장 진출을 위한 노력중이다.

80) SMART와 대비하여 혁신형 SMR 개발에 고려되어야 할 점으로, (i) ‘시장성’ 측면에서, 시장이 제한되지 않도록 모듈성 및 확장성을 고려하여 설계할 것, (ii) ‘혁신성’ 측면에서, 최근 해외에서 개발 중인 SMR에 대비하여 기술적 혁신성을 가질 것, (iii) ‘경제성’ 측면에서, 격납용기 단위의 모듈화를 달성하고, 전력수요에 따른 부하추종을 고려하여 설계할 것 등이 제시되었다 (KISTEP 2022, p. 108; MOTIE 2023).

81) 전 세계에서 운영하는 442기의 원전 중 365기, 건설 중인 52기 중 45기가 경수로이다. 또한 운전 중인 경수로 중에서 약 83%가 가압경수로에 해당한다 (IAEA 2021). 우리나라는 현재 총 25기의 원자력발전소가 운영중이며 이 중 22기가 가압경수로이다 (KHNP).

82) APR1400은 우리나라 최초의 한국표준형원전인 OPR1000을 개량하여 개발한 원전으로, 2006년 8월 신고리 3,4호기에 최초적용된 이후 지속적으로 건설 중인 원자로 모델이다 (KEPCO E&C, 2023).

83) 디지털 트윈(digital twin)은 물리적인 물체 또는 시스템을 디지털로 표현한 것으로, 실물 객체의 동작과 행동을 실시간으로 쌍둥이 가상 객체의 수행 역할 모델로 시뮬레이션 혹은 복제하는 기술을 일컫는다.



[그림 5-3] 혁신형 SMR (i-SMR)의 구조 개념도

자료: 한국원자력연구소 제공

혁신형 SMR은 2028년경 표준설계가 완료될 예정으로, 이미 설계가 완성된 SMART와 두 개 트랙(two track) 방식으로 해외시장 진출 전략을 취하고 있다. 먼저, SMART는 당장 건설이 필요한 시장을 주로 공략하되, 110MWe급 한 기 또는 두 기로 구성된 형태로 220MWe 이내의 시장(소규모 발전, 해수담수화, 공정열 공급, 오일샌드 채굴 증기 공급 등)을 목표로 해외진출을 모색한다. 한편, 혁신형 SMR은 170MWe급 모듈을 최대 4기까지 한 세트로 구성하여 주로 신규 발전시장 및 노후 석탄화력 대체 시장에 진입하는 방식으로 해외진출을 모색한다 (Chun et al. 2022). 기존 SMART와 i-SMR의 차이점은 다음의 <표 5-4>와 같이 정리될 수 있으며, 대형원전과의 비교를 위해 APR1400 설계 항목을 기준으로 세웠다. 이러한 혁신형 SMR의 특징을 토대로, 앞서 분석틀에서 제시하는 i) 비용 (경제성), ii) 안전성, iii) 방사성폐기물 저감, 그리고 iv) 핵확산 방지 네 가지 측면의 고려요소를 분석하고자 한다.

<표 5-4> APR1400, SMART and i-SMR 모델 간 비교

요소		APR1400 ⁸⁴⁾	SMART	i-SMR (예상치)	
개발자		KEPCO E&C	KAERI	KHNP & KAERI	
유형 (냉각재 기반)		Pressurized Water Reactor			
설계 목표	(열) 출력 ⁸⁵⁾	4,000 MWt	365 MWt/module	540 MWt/module	
	(전기) 출력 ⁸⁶⁾	1,400 MWe	110 MWe/module x module 1~2	170 MWe/module x 4 modules = 680 MWe	
	노심 손상 빈도	~ 1.0e-6 /R·Y	1.0e-7 /R·Y	1.0e-9 /R·Y	
	건설비용	5 trillion KRW per unit (based on the construction of multiple units)	1 trillion KRW per unit (Based on the construction of the first unit)	Not estimated yet	
		[construction unit price] \$3,000 /kWe	\$8,000 /kWe	Under \$3,500 /kWe	
		[generation unit price] \$53.3 /MWh	Not estimated yet	\$59 /MWh	
건설 기간	84 months (Case: Shin-Gori 3)	36 months	24 months (1 module), 42 months (all modules)		
시스템 설계 특징	반응성 제어	Control rods + Burnable poison + Water-soluble boron ⁸⁷⁾	Control rods + Burnable poison + Water-soluble boron	Control rods + Burnable poison + Boron free ⁸⁸⁾	
	연료와 노심	16x16 UO ₂ / 241 assembly / 3.8m length / 18 months reloading cycle	17x17 UO ₂ / 57 assembly / 2m length / 30 months reloading cycle	17x17 UO ₂ / 69 assembly / 2.4m length / 24 months reloading cycle	
	안전성 시스템	Active	Completely Passive	Completely Passive	
목표 시장		Electricity supply	Small-scale power generation, seawater desalination, process heat supply, heat supply, oil sand mining steam supply, fresh water production	Distributed power generation, alternative to coal-fired power plants, provision of process heat for industrial use	

84) KIST(20190의 p.28의 내용을 참고로 작성하였다.

85) 열 용량으로서의 단위 (kWth, Kilo Watts thermal)

86) 전기 용량으로서의 단위 (kWe, Kilo Watts electrical)

87) 반응성 제어(reactivity control)을 위한 원소는 붕소(boron)이며, 붕소를 넣기 위한 화학적 수단이 붕산(boric acid)이다.

88) 노심에서 붕소가 없다는 것이 반응성 제어의 방법은 아니나, 다만, 이 붕소를 사용하지 않는다는 점이 기존 가압경수로와 가장 큰 차이점이다.

자료: KAERI(2007), KAERI(2020), KISTEP(2022), KEEI(2022), KIST(2019), Lee(2021) 내용을 토대로
저자 정리

3.1. 비용 (경제성)

먼저, 비용감소라는 경제성 측면에서 총 일곱 가지 항목에 대해서 우리나라 혁신형 SMR의 R&D 설계현황과 그 의미를 분석하도록 하겠다.

첫째, 건설비용 측면에서 보면, 기존 대형원전 대비 초기 자금조달 부담이 적어 금융 비즈니스 측면의 투자 확대와 함께 금융이자 감소를 기대할 수 있다. 또한 투자 용이성 측면에선 전력수요에 따른 소용량 원전의 선택 및 설계 단순화, 모듈화, 공장 사전제작과 내륙수송을 통한 현장 조립 등과 같은 SMR의 특징을 바탕으로 공기가 짧아져 건설비용이 낮춰진다는 장점도 존재한다 (Kang, 2022, p.7). 혁신형 SMR의 경우, 앞에서 언급한 장점 뿐만 아니라, 안전계통·화학 및 체적계통 단순화와 더불어 다수 모듈에서 제어실이나 폐기물 계통 등을 공유하도록 설계하여 경제성을 확보하려는 노력 중이다 (KISTEP, 2022, p.119; Lee, 2021, p.18).

사실, 대형원전과 SMR의 건설비용의 단순한 비교는 쉽지 않다. 기존 연구에 따르면, 1개 대형원전과 4개 SMR의 건설에 필요한 자본비용이 같거나, 또는 SMR의 비용이 더 높을 수도 있다는 연구 결과도 있다 (Locatelli et al. 2014, p.80). 또한, SMR의 600MWe 규모의 SMR 첫호기(FOAK, First-Of-A-Kind)의 비용이 \$5,000M라면, 이후 건설되는 호기(NOAK, Nth-Of-A-Kind)에 대해서는 경험축적 및 학습효과로 \$3,000M 수준으로 감소한다는 연구결과도 있다 (Ibid.). 즉, 몇 번째 호기로 건설되는 SMR인지에 따라 대형원전과 가격 우위가 달라질 수 있다. 우리나라는 기존의 많은 운전경험을 통해 대형원전 APR1400의 건설단가를 \$3,000/kWe로 추산하고 있다 (IEA, 2020). 현재 우리나라 혁신형 SMR에 대한 건설단가 목표치를 \$3,500/kWe로 제시하고 있다 (KEI, 2022, p. 119).⁸⁹⁾ 출력이 낮은 SMR 특성상 대형원전 대비 낮을 수 밖에 없는 경제성의 한계를 극복하기 위해, 하나의 건물 안에 다수의 원자로 모듈을 배치하여, 출력 범위를 유연성 있게 확보하면서 전체 건설 물량의 절약으로 경제성을 확보하는 방법 등의 다양한 전략이 논의되고 있다 (Kim, 2021).

그런데 국제 SMR 시장에서의 건설단가를 고려할 때, 우리나라 혁신형 SMR의 건설비용 경쟁력이 있을 것으로 보인다. 그 이유는 우리나라는 대형원전 건설에서 타 국가 대비 가장 낮은 건설단가인 \$2,410/kWe로 건설한 경험도 있기 때문이다 (IEA, 2020; KISTEP, 2022, p.120).⁹⁰⁾ 우리나라 혁신형 SMR은 대형원전인 APR1400 노형과 같이 동일한 가압경수로형이다. 현재, 미국 NuScale社 SMR인 VOYGR의 건설단가 목표치는 \$3,600/kWe으로 제시된다 (KISTEP, 2022, p.117; UOI, 2019, p.8).⁹¹⁾ 우리나라 혁신형 SMR의 건설단가는 미국 NuScale社 SMR과 비슷하거나 더 낮은 건설단가가 추산되고 있다. 물론, 혁신형 SMR과 VOYGR는 서로 다른 기술, 제조방식, 형태, 성능 등이 다른 바, 단순히 추산된 비용만으로 경제성을 비교하는 것을 어려울 수 있다.

둘째, 전력생산을 통한 이익 측면과 관련하여, 혁신형 SMR의 발전단가 목표치는 \$59/MWh

89) 170MWe급 모듈 4개로 680MWe 기준으로 계산한다.

90) APR1400 원자로 건설에 대한 비용은 건설되는 국가 및 시기마다 다양하다. 2021년 운전 개시한 UAE의 Barakah는 2012년부터 10년간 200억 달러가 투입되었다 (KEEI, 2021, p.21).

91) 이는 2019년 당시 60MWe급 12개 모듈로 720MWe 기준으로 계산되었다.

이다. 한국과학기술기획평가원(KISTEP)에서 작성한 예비타당성조사 보고서에서는 \$59/MWh를 ‘도전적인 수치’로 평가했으며, 첫호기(FOAK)의 발전단가는 \$81.6/MWh, 이후 건설되는 호기(NOAK)의 발전단가는 \$74.8/MWh로 산출하고 있다 (KISTEP, 2022, p. 118). 물론 KISTEP의 산출값에는 이용률 90%, 60년 운전, 할인을 7%가 특정적으로 가정된 값이라는 점을 고려할 필요가 있다. 상용화된 대표 대형원전인 APR1400의 균등화발전비용(LCOE, levelized cost of energy) 중앙값이 \$53.3/MWh인 점을 고려할 때 (IEA, 2020, pp. 58-59), 혁신형 SMR의 발전단가 목표치는 대형원전의 그것과 유사하다는 점에서 매우 도전적이다. 그러나, 현재 시점에서 우리나라의 다양한 발전소의 발전단가를 비교해 보면, 가스화력 \$86.76/MWh, 석탄화력 \$75.59/MWh, 태양광 \$96.56/MWh, 육상풍력 \$113.33/MWh, 해상풍력 \$160.98/MWh이므로, 여타 발전원보다는 SMR이 가격 경쟁력을 갖는다고 할 수 있다 (Ibid., pp. 55-68). 더불어, 혁신형 SMR의 발전단가는 국내 건설을 가정했을 때의 예측값이다.⁹²⁾ 혁신형 SMR은 해외수출을 목표로 하고 있기 때문에, 수출대상국 별 수출 목표 용량(MWe)을 염두하고 있으며 (KISTEP 2022, p.212), 실제 해외 건설 및 운영 시의 발전단가는 변동될 수 있다.⁹³⁾

셋째, 가격 경쟁력을 고려하여 전력 수요에 탄력적으로 대응하는 유연성 측면에서 보면, 혁신형 SMR은 전력수요 대응과 재생에너지 발전의 간헐성을 완화할 수 있도록 부하추종 및 모듈별 탄력운전 설계로 탄력운전 성능을 내재했다.⁹⁴⁾ 그리고 수요처 요구에 따른 맞춤형 모듈배치로 용량조절 및 다양한 용도로 활용 가능하다. 예를 들어 혁신형 SMR을 기존 전력망에 연결한다면 폐지(phase-out) 예정인 노후 석탄 화력 발전설비를 대체해 추가 송전설비 투자가 불필요해 탄소중립 달성에 기여 가능하며, 계절주기 같은 전력수요 변동에 따라 잉여 전력의 지역 냉난방, 공정열 활용, 담수화, 에너지 저장, 수소생산과 같은 다목적 에너지 활용 수요 증가에 대응할 수 있다 (Kang, 2022, p.7; Lee, 2021, p.20). 설계구조 상에서도 [그림 5-3]처럼 4개의 원자로 모듈을 복수 배치할 수 있게 되면서 170 ~ 680 MWe라는 넓은 출력범위의 전력 생산을 탄력적으로 운용할 수 있고, 기기 공동 활용이 가능할 뿐만 아니라, 사용후핵연료 저장조까지 함께 배치해 공간 최적화를 할 수 있다 (Lee, 2021, p.18). 또한 혁신형 SMR은 최저 20%에서 100% 범위 내에서 분당 5%의 속도로 출력을 조절할 수 있도록 설계되므로 재생에너지의 간헐성을 보완할 수 있는 유연한 부하추종 운전이 가능할 것으로 기대된다 (Kim, 2022).

넷째, 공기(건설기간) 측면에서, 건설 전 준비기간을 제외한 원전의 공기를 APR1400 사례(신고리3 호기)의 공기 84개월과 비교할 때, 혁신형 SMR은 첫 호기(FOAK)는 1개 모듈에 24개월, 전체 4개 모듈에 42개월이 필요할 것으로 계획되었다 (<표 5-4> 참조). 첫 호기 건설에서 발생하는 시행착오를 거치면, 이후 건설되는 호기(NOAK)에 대해서는 추가되는 개별 모듈에 24개월, 전체에 42개월로 공기가 축소되리라 예상된다 (KISTEP 2022, p. 161). 한편, NuScale社は 최초 콘크리트 타설(first concrete)부터 기계적 완공까지 36개월 미만이 소요될

92) 동 예측값은 ‘국내’ ‘대형원전’ 운영 경험을 통해 얻은 데이터를 계산에 활용한 것이다. 발전단가 계산, 즉 경제성 평가에 필요한 데이터(운전유지비, 고정비, 연료비, 사후처리비, 예비비, 건설중 이자, 물가상승비, 할인율, 이용률, 설계수명, 원자력연구기금 등등)를 적용함에 있어, 국내 OPR1000 또는 ARP1400의 운영 경험을 통해 얻어진 데이터를 일부는 동일하게 적용하고, 일부는 용량보정하여 적용하는 등 합리적 방법론을 적용하여 계산한 것이다.

93) 건설단가는 현지 상황에 따른 인건비 및 기자재 조달비에 따라 변동될 수 있고, 운영 시 발전단가 역시 현지 상황에 영향을 받는다.

94) 부하추종이란 ‘Load Follow Operation’으로, 발전소로부터 인출되는 전력의 변동에 대응하는 것을 의미한다.

것으로 제시하고 있다 (NuScale, 2021, p.4). NuScale社は 첫 호기(FOAK)의 불확실성을 고려한다면 조금 길어진 42~54개월 안에 건설이 가능할 것이라 주장하고 있는데, 이러한 주장은 너무 낙관적이라는 평가가 존재한다 (Schlissel and Wamsted, 2022, p. 7).⁹⁵⁾ 가압경수로로는 현존하는 원전 중에서 가장 보편적인 유형이다. 따라서 다른 SMR 유형에 비해 가압경수로형에 기반한 혁신형 SMR 역시 인허가도 상대적으로 빠르게 진행될 수 있을 것으로 보인다. 이는 개발단계에서 상업 운전까지 행정 소요 기간을 단축할 수 있다는 장점으로 이어진다 (KISTEP, 2022, p.73). 물론, 대형원전과 같이 가압경수로형이라 하더라도 SMR의 설계방식이나 적용기술의 상이성으로 인해서 인허가 체계 설정 자체가 도전적이라는 점은 부인할 수 없다.

다섯째, 핵연료 비용 면에서, 혁신형 SMR은 APR-1400 대형원전에서 사용하는 연료와 같은 형태의 연료(5% 이내 농축도 핵연료)를 사용 가능할 것으로 보인다. 다만, SMR의 경우, 핵연료의 절대량 대비 격납공간의 면적이 기존 대형원전보다 훨씬 크다. 이는 SMR의 안전성 측면에서는 긍정적이지만 핵연료를 연소하여 발생한 열에너지를 전달해야 하는 측면에서는 부정적인 영향을 미친다 (Ramana and Man, 2014). 그리고, 기존의 대형원전은 통상적으로 45 MWd/kgU 내외의 연소도(burn-up)를 가지는 반면, 가압경수로형 SMR의 연소도는 약 30~40 MWd/kgU에 머물 것으로 분석되고 있다 (Yun, 2022, p. 5). 한편, 혁신형 SMR의 최상위 요건은 사고저항성핵연료(ATF, accident tolerant fuel)를 사용하는 것이다 (Heo, 2021).⁹⁶⁾ 만약 혁신형 SMR에 사고저항성핵연료를 사용하게 된다면 이는 사고저항성핵연료를 사용하지 않던 기존 APR1400보다 핵연료 비용이 증가할 가능성도 있다.

여섯째, 유지보수 비용 측면에서, 비용을 낮추기 위해서는, 높은 수준의 원자로 자율운전 기술을 개발해 모든 운전영역에서 자율운전을 가능하도록 개발하는 것이 필요하다. 최근 ‘운영인력의 저감’을 통해서 SMR의 경제성을 확보하는 방안이 제안되었다 (Choi, 2023). 혁신형 SMR에 적용되는 다수 원자로 모듈(4개 모듈)을 한 공간의 제어실에서 통합 감시 및 제어하는 통합형 제어실을 통해 관리 인원의 최소화함으로써 유지보수에 필요한 인건비를 최대한 낮추고자 한다. 통합주제어실을 운영해 4개의 모듈당 3인 이하로 운전하는 것을 목표로 하고 있다 (Heo, 2021). 한편, 디지털 트윈을 구축하여 조기결함 진단으로 재고 관리 최적화, 혁신제조기술을 통한 가동중 검사 최소화 등을 통해 유지보수의 용이성을 높여 비용을 절감할 수 있다 (KISTEP, 2022, p.119). 그런데, 디지털 트윈 기술은 최종적으로 혁신형 SMR의 예타 사업 범위에서 제외되었다.

일곱째, 외부적 요소로, 여기에는 전력망 용량 제한, 부지 선정 제한(공동 부지 선정 포함), 그리고 고용창출 효과이다. 먼저, 전력망 용량 제한 측면에서, SMR은 기존 대형 원전보다 계통연계의 부담이 훨씬 적다. 기존 APR1400의 경우 원자로 하나의 출력이 1400 MWe가 되는 등, 원자로 하나당 출력이 크기 때문에, 여러 개의 원자로가 모여 있는 원자력 발전단지 별로 살펴보면 약 5,000~6,000 MW의 막대한 양의 전력이 전력망으로 공급되고 있다. 그러나 우리나라의 지역별 전력수요를 살펴보면, 전체 공급량 중 40%가 수도권에서 소요되고 있는 반면, 대부분의

95) NuScale社は 동 기간이 몇 기의 모듈을 건설하는 데 대한 공기인지 밝히고 있지 않다.

96) 사고저항성핵연료는 개발 및 인허가 기간이 향후 수년 이상 소요될 것으로 예상되어, 혁신형 SMR 예타사업의 표준설계 인허가에는 포함되지 않을 것으로 보인다.

원자력발전소는 한반도 동남부에 위치하고 있는바, 공급처와 수요처의 불균형이 매우 심하다. 따라서 원자력발전소가 위치한 한반도 동남부에서부터 수도권까지의 송전선로 건설이 불가피했다. 이에, 2023년 4월에 발표된 “제10차 장기 송변전설비계획(안)”에 따르면, 주요 추진 과제 중 첫 번째로 “신규 및 계속운전 원전의 전력계통 수용” 차원에서 신규 원전 건설에 따른 영동권·영남권·호남권과 수도권을 연결하는 송전선로 건설이 필수적임을 들고 있다 (KEPCO 2023, p. 3). 그러나 SMR은 규모가 작고 안전성이 개선되므로 전력 수요처 인근에 건설하기 용이해 장거리 송전선로가 필요하지 않으며, 기존 대규모 원전보다 출력이 낮아 전력망을 추가로 확보해야 할 부담이 적다. 한편, 이러한 송전선로 건설 비용은 전력평준화비용(LCOE) 계산에 포함되지 않으므로, 대형원전이 고용량 장거리 송전선로를 필요로 한다는 점은 원전 발전단가의 숨겨진 비용으로 여겨지기도 한다 (Kim and Park, 2019, pp. 41-42).⁹⁷⁾ 이러한 점을 고려할 때, 수요처 인근에서 전기를 생산할 수 있는 혁신형 SMR은 직접적인 비용은 아니지만 장거리 송전선로 설치가 불필요하다는 점에서 경제적으로 더 매력적이라 할 수 있다. 이는, SMR이 부지선정에 있어서도 송전선로 연계 측면에서는 제한이 작다고 볼 수 있다. 또한, 혁신형 SMR은 가압경수로형으로 원자로 냉각에 기본적으로 물을 사용하므로 물에 대한 ‘접근성’은 필요하나, 대형경수로처럼 해안에 건설할 필요 없다는 측면에서 부지선정에 대한 제한성이 크지 않다. 마지막으로, 고용창출과 관련하여, SMR 분야에 기술 개발 및 산업 부분의 고용창출 측면의 장점이 있을 수 있다. 특히, SMR에 필요한 모듈 생산공정과 건설 과정에 신규 고용창출이 가능할 것으로 보인다.

3.2. 안전성

다음으로는 ‘안전성 증대’를 위한 설계요소들을 중심으로, 혁신형 SMR을 크게 네 가지 측면에서 살펴보도록 하겠다.

첫 번째 설계요소는 설계단계에서부터 미리 안전성 향상을 감안하는 접근법이다. 이는 설비의 최소화로 안전계통·화학 및 체적계통(volume control) 설계를 단순화해 각종 고장요소를 제거하는 것을 포함한다. 혁신형 SMR의 경우, 현재 설계 단계에서부터 안전계통 설계를 단순화하여 각종 고장요소를 제거하고, 고내압 철제 격납용기를 활용하여 방사능 누출을 방지한다. 또한 소형화 및 모듈성을 활용해 원자력 설비를 지하에 설치하여 내진 성능과 외부 테러 공격 대비 안전성을 획기적으로 향상시킬 수 있음을 고려하고 있다 (Kang, 2022, p.6). 기존 대형원전의 내진설계는 일반적으로 0.2 ~ 0.3g 수준이나 혁신형 SMR의 경우 0.5g에 달한다 (Lee, 2021, p.17). 또한, 우리나라 혁신형 SMR의 경우 노심손상빈도(CDF, core damage frequency)⁹⁸⁾를 대형원전보다 약 100배 낮은 10억분의 1, 즉 1.0e-9/R·Y⁹⁹⁾까지 낮추는 것을 최우선 성과 목표로 개발하고 있다 (Heo, 2021). 이 수치는 경쟁 모델인 미국 NuScale社의 SMR의 노심손상빈도 목표치인 100억분의 3(즉, 3.0e-10)보다는 다소 높으나, 타 경쟁 노형 대비 세계 최고 수준이다.¹⁰⁰⁾

97) 물론, 이는 모든 발전원에 해당되는 조건이라고 볼 수 있다. 신재생에너지의 경우에도, 많은 배전망과 간헐성 등으로 발생하는 관리비용 등이 발전단가에 포함되어 있지는 않는다.

98) 원전의 노심손상 가능성을 나타내는 지표로 사고 시나리오별 원자로 모든 계통의 손상확률을 종합하여 산출되는 값이다.

99) R·Y는 Reactor·Year의 약자로서, 1.0e-9/R·Y는 원자로 1기당 노심손상이 10억년에 1번 발생할 확률임을 의미한다.

한편, SMR 설비 자체에 대한 안전성 설계요소는 아니나, 혁신형 SMR 개발사업의 주관부처인 과기정통부 및 산업부는 사고저항성핵연료를 혁신형 SMR 수출에 적용할 계획을 제시하기도 했다 (KISTEP, 2022, p.166). 이는 혁신형 SMR과 별도로 개발 중인 정부과제이지만 혁신형 SMR 첫 호기의 최종안전성분석보고서에 적용하기 위해 사고저항성핵연료 개발 일정을 단축하는 계획도 함께 제시됐다.¹⁰¹⁾ 사고저항성핵연료 적용이 원전 수출 시 고려할 필요가 있는 이유는 EU 택소노미(EU Taxonomy)에 따라 EU 지역 내 회원국에서 원전 사업시 사고저항성핵연료의 사용이 인허가 기술심사(technical screening) 요건으로 포함되며, 사고저항성핵연료가 2025년부터 적용되기 때문이다 (EU, 2022, para 7, para 8, Annex I 4.27(2) and 4.28(2)).¹⁰²⁾ 따라서, 혁신형 SMR의 해외수출 목표에 일부 EU 회원국이 포함된 것을 고려할 때 (KISTEP, 2022, p.212), 사고저항성핵연료가 적용된다면 노심 내 핵적 특성변화는 출력분포에 미치는 영향은 미미하지만, 사고저항성은 크게 향상될 것으로 기대된다 (Ibid., p.167). 다만, 현실적인 여건을 고려할 때, 사고저항성핵연료 개발은 현재 혁신형 SMR 개발 일정보다 더 걸릴 수도 있다는 의견이 있다.

둘째, 출력 감소 측면에서, 발전용량이 감소하면 노심의 열 에너지를 제어하기가 용이해진다.¹⁰³⁾ 우리나라 혁신형 SMR의 경우, 1개 모듈은 170 MWe로 다른 나라에서 개발 중인 주요 경쟁 노형과 비교하여 평균 이하 수준이다.¹⁰⁴⁾ 따라서, 단순히 모듈당 출력이 상대적으로 낮다는 점으로만 보면, 혁신형 SMR의 안전성이 높다는 장점이 있다고도 할 수 있다. 그런데, 여기서 출력이 낮은 원자로가 반드시 안전성이 높다는 결론은 조심스럽게 접근할 필요가 있다. 안전성은 안전계통의 구조와 성능, 노심냉각 성능 등을 통해 결정되기 때문이다.

셋째, 고유 안전성 및 피동형 안전(passive safety) 설계와 관련하여, 혁신형 SMR은 자연재해 등으로 인한 송전시설 피해 발생 시에도, 중력 및 대류 등 자연현상에 의해 안전계통이 스스로 작동하도록 설계해 핵연료를 장기간 안전한 상태로 유지할 수 있다. SMR의 경우 대형원전보다 크기가 작고 출력이 작으므로, 핵연료의 열을 제거하기 위한 펌프의 필요성, 혹은 중단된 전력을 공급하기 위한 비상 발전기의 필요성이 대형원전 대비 현저히 작다고 할 수 있다. 특히 혁신형 SMR의 경우 완전 피동형 안전계통을 적용해 자연순환 냉각이 가능하도록 설계되므로 전력공급이 없을지라도 비상 상태에 안전 설비가 정상적으로 구동될 수 있어 비상 발전기가 불필요하다. 게다가 주요기기를 모듈화하여 일체형으로 설계하므로 대형원전의 배관 파단사고 가능성을 원천 배제할 수 있으며, 무(無)붕산¹⁰⁵⁾ 노심설계 적용에 따라 붕산 주입·회수 계통 등이 불필요하고 붕소희석사고를 배제할 수 있다.

100) 이는 안전계통 단순화, 완전피동/무한냉각 구현, 고신뢰도 기기 개발, 내진성능 향상 등을 통해 달성한다는 목표이다. 영국과 프랑스의 대표 가압경수로형 SMR 모델인 UK SMR 및 NUWARD의 경우 노심손상빈도 목표치가 각각 1.0e-7 및 1.0e-5 수준이며, 미국-일본 공동 개발 중인 BWRX-300 모델은 1.0e-7 수준이다.

101) 사고저항성핵연료 상용화 목표를 기존 2032년에서 첫 수주계약 예상년도인 2029년으로 맞춰 3년 앞당겼다. (KISTEP, 2022, p.165)

102) 현재 EU에서는 경제적 활동과 관련된 원자력에 대해 기술심사요건을 적용하는데 이 때 제3세대 원자로를 포함한 신규 원자로 설계에 있어 상당한 안전성 강화를 요구하고 있다. EU 택소노미에선 EU 회원국으로의 원전 수출 시 과도기적 녹색투자로 분류되기 위해서는 사고저항성핵연료 적용이 필요하다 (EU, 2022, paras 7 and 8).

103) 이는 노심에 방사성 물질이 더 적어지게 됨에 따라 붕괴열을 제어하기가 용이해진다는 것을 의미한다.

104) 예를 들어, 미국 NuScale社의 VOYGR는 77 MWe이다. 다른 미국 회사인 Holtec社의 SMR-160은 160 MWe, GE-Hitachi社의 BWRX-300은 300 MWe이다. 영국의 UK SMR은 470 MWe, 프랑스의 NUWARD는 170 MWe, 중국의 ACP100은 100 MWe로 알려져 있다.

105) 무(無)붕산 운전은 혁신형 SMR의 핵심기술이며, 그로 인해, 감속재 온도 상승에 따른 반응도 케환효과(feedback effect)를 제거할 수 있는 고유 안전성이 있다.

넷째, 주민대피를 위한 방사선비상계획구역(EPZ, Emergency Planning Zone) 범위와 관련하여, 혁신형 SMR은 주민대피가 불필요하기에 방사선비상계획구역을 축소할 수 있다.¹⁰⁶⁾ 즉, SMR의 고유 안전성 및 다중 방호 강화로 방사성물질의 누출을 실질적으로 배제하고 방사선비상계획구역 최소화 기술개발을 통해 기존 대형원전에서 20~30km가 필요했던 방사선비상계획구역을 혁신형 SMR의 경우 부지경계인 1km 이내로 축소할 수 있다 (Lee 2021, p.17). 이러한 방사선 비상계획구역 설정은 미국 NuScale社의 SMR의 사례에서도 찾을 수 있다. 미국 Tennessee Valley Authority가 NuScale社 SMR 모델을 기준으로 연구를 수행한 결과, 동 모델은 기존 대형 원전과 같은 광범위한 방사선비상계획구역 설정은 불필요하며, 부지의 경계와 방사선비상계획 구역을 일치시키는 것으로 충분하다고 결론을 지었고, 미국 원자력 규제 위원회(NRC, Nuclear Regulatory Commission) 역시 이러한 연구 결과에 동의하였다 (Langdon 2019). 우리나라 혁신형 SMR의 경우, 방사선비상계획구역을 SMR 부지의 경계보다도 작게 개발하는 것으로 명시되어 있다 (Heo 2021).¹⁰⁷⁾

3.3. 방사성 폐기물 저감

방사성폐기물 저감에 대한 동 섹션은 사용후핵연료 저감 측면에서 접근하고자 한다. 대형원전과 SMR 구분없이, 원자력 이용의 대가로 필수불가결하게 사용후핵연료가 발생한다. 사용후핵연료는 일반적으로 “상업용 또는 연구용 원자로에서 연료로 사용된 핵연료 물질 또는 기타의 방법으로 핵분열 시킨 핵연료 물질”을 말한다 (Wikipedia, 2023). 사용후핵연료 내에는 중성자와 우라늄(U-235)의 핵분열 반응으로 생성된 세슘(Cs-137), 스트론튬(Sr-90)과 같은 붕괴열(decay heat) 고방출 핵종(nuclide)들 뿐만 아니라, 넵튬(Np-237)과 큐륨(Cm-247)과 같은 장반감기(long-lived) 핵종 등 수많은 방사성 핵종들이 존재한다. 이러한 핵종들은 안정화되는 과정에서 지속적으로 방사선과 열을 방출하므로, 원자로에서 인출된 사용후핵연료는 안전하게 관리해야 한다. 사용후핵연료 발생량 저감을 위해 고려해야 할 요소 네 가지를 중심으로 우리나라 혁신형 SMR의 설계 현황에 대해 분석하고자 한다.

첫 번째 요소는 고속중성자(fast neutron)를 활용하는 ‘고속로(fast reactor) 유형의 원자로를 설계’ 하는 것이다.¹⁰⁸⁾ 그런데, 우리나라 혁신형 SMR의 경우, 기존 대형원전에서 입증된, 경수(light water)를 감속재로 사용하여 고속중성자를 감속시켜 열중성자(thermal neutron)로 만든 후 이를 우라늄(U-235)의 핵분열에 활용하는 열중성자로(thermal reactor) 유형으로 설계되고 있으므로 이 고려사항은 혁신형 SMR에 해당되지 않는다.

두 번째 고려 설계요소는 ‘고연소·장주기 운전’을 하는 것이다. 기존의 대형원전은 통상적으로 45MWd/kgU 내외의 연소도를 가지는 반면,¹⁰⁹⁾ 가압경수로형 SMR의 연소도는 약

106) 원자력안전법, 방사능방재법 등 관련 법령 개정이 필요하다.

107) 한편, 우리나라 혁신형 SMR의 대량 조기 방사성물질 방출빈도(LERF, large early release frequency)에 대해서는 목표치를 역시 대형원전보다 100억분의 1(즉 1.0e-10/R·Y)로 설정하여 방사성물질이 방출될 가능성을 크게 줄이고자 하고 있다.

108) 열중성자로는 열중성자(≈0.025 eV)를 이용하는 것에 반해, 고속로는 고속중성자(>100 keV)를 이용하므로 핵원료성(fertile) 물질(U-238, Th-232 등)을 핵분열성(fissile) 물질(Pu-239, U-233 등)로 변환하여 핵연료 이용률을 높일 수 있고, 고독성·장반감기 핵종을 연소시켜 관리 부담을 줄일 수 있다. 고속로는 냉각재로 물이 아닌 액체금속(소듐, 납) 또는 기체(헬륨, 이산화탄소)를 사용한다.

30~40MWd/kgU에 머물 것으로 분석되고 있다 (Yun, 2022, p. 5). 이렇듯 SMR의 연소도가 낮은 근본적인 이유는, 노심의 크기가 대형원전에 비해 물리적으로 작아 U-235의 핵분열에 필요한 중성자가 노심 밖으로 누설될 확률이 높아져 중성자 경제(neutron economy)에 불리하기 때문이다. 따라서, SMR의 연소도가 낮다는 것은 같은 양의 핵연료로 더 적은 양의 에너지를 추출한다는 것이다. 다시 말해, 같은 양의 에너지를 발생시키기 위해 더 많은 양의 핵연료가 필요하다는 의미이며, 이로 인해 단위출력당 사용후핵연료 발생량의 증가를 초래한다. 따라서 핵연료 연소도를 높이고¹¹⁰⁾ 장주기 운전을 하는 것이 경제성 및 핵연료 이용률을 향상시키고, 이에 따라 단위출력당 사용후핵연료 발생량을 저감하는데 유리하다. 연소도를 높이기 위해서는 i) 농축도를 올려 핵분열성 물질인 U-235의 양 자체를 늘이면 된다. 이점을 고려할 때, 혁신형 SMR의 경우, 24개월 주기 운전 및 출력밀도 등을 고려할 때 농축도 상한값을 4.95% 수준으로 고려하고 있으며, 농축도가 보다 높은 LEU+ 핵연료 개발 및 적용을 추가로 고려할 수 있다.¹¹¹⁾ 그 이외에도, ii) 반사체(reflector)를 보강함으로써,¹¹²⁾ 노심 밖으로 누출되는 중성자를 줄여 중성자 경제를 높이거나, iii) 핵연료 장전모형을 최적화 하는 등의 방안이 있다.

세 번째 고려 요소는 ‘연료를 여러 세대에 걸쳐 사용(multiple generation)’ 하는 것이다.¹¹³⁾ 대형원전의 경우, 일반적으로 18개월 주기로 노심 핵연료의¹¹⁴⁾ 약 3분의 1을 새 핵연료로 교체하며, 핵연료는 최적 장전모형에 따라 3주기에 걸쳐 연소된다. 혁신형 SMR의 경우, 24개월 주기로 노심 핵연료의 일부를 교체하며, 최적의 핵설계를 통해 효율적으로 핵연료가 연소될 수 있도록 배치할 예정이다. 다만 대형원전과 비교하여 3주기 이상의 세대에 걸쳐 핵연료를 사용하기는 어려울 것으로 예상된다.

사실, SMR 사용후핵연료에 대해서 최근 가장 쟁점이 되는 사항은 대형원전과 SMR의 사용후핵연료 발생량이다. 최근 도출된 연구에 따르면, 미국 웨스팅하우스社의 3,400MWth급 가압경수로형 대형원전 AP1000 대비 NuScale社의 SMR이 얼마나 많은 사용후핵연료를 발생시키는지를 평가하였다 (Krall et al., 2022). 55MWd/kgU의 핵연료 연소도를 갖는 AP1000 노형이 연간 단위출력당 6.5MT의 사용후핵연료를 발생시키는 것을 기준으로 할 때, NuScale社의 SMR은 연소도가 약 26~34MWd/kgU로 낮고 원자로 모듈당 열출력이 160MWth 수준으로 평가하면 사용후핵연료 발생량은 연간 단위출력당 11MT 정도로 추정되며, 이는 AP1000 대비 1.7배 큰 수치라는 결과이다. 이에, NuScale社는 자사 SMR의 열출력이 160MWth가 아닌 250MWth이며, 평균 핵연료 연소도가 약 45MWd/kgU 수준으로서 해당 논문의 결과와 신뢰성 자체를 비판한 바 있다. 곧 이어 미국 아르곤국립연구소와 아이다호국립연구소가 수행한 분석결과에 따르면, 참조된 가압경수로형 대형원전 대비 NuScale社의 SMR이 작은 노심 크기, 약간 높은 농축도, 약간 낮은 연소도 등의 이유로 사용후핵연료 발생량이 1.1배 수준밖에 되지 않는다고 발표하였다

109) 연소도의 단위는 일반적으로 MWd/MTU(megawatt-days per metric ton of uranium)으로 우라늄 핵연료로부터 얼마나 많은 에너지를 추출(extract)했는지를 나타내며, MWd/kgU 또는 GWd/MTU 등으로 표현할 수 있다.

110) 핵연료 연소도를 무작정 높일 수는 없다. 대형원전의 경우 일반적으로 60 MWd/kgU 이상일 때 핵연료의 구조적 건전성 및 성능 열화의 가속 현상이 관찰된다.

111) LEU+ 핵연료는 Low-Enriched Uranium plus의 약자로, 이 핵연료의 농축도는 5~10%이다.

112) 열중성자원에 사용되는 반사체로는 경수, 베릴륨(Be), 탄소(C) 등이 있다.

113) 이 방법 이외에도, 발생한 사용후핵연료를 재처리하여 재활용하는 방안 등을 고려할 수 있으나, 우리나라는 재처리가 허용되지 않으므로 본 원고에서 다루지 않는다.

114) 기존 대형원전의 경우 노심에 약 4m 길이의 핵연료집합체가 약 240개 장전되며, 혁신형 SMR의 경우 약 2.4m 길이의 핵연료집합체가 약 69개 장전될 것으로 예상된다.

(Kim et al., 2022). 따라서 현재 과학적 평가 결과로는 대형원전 대비 NuScale社의 SMR의 사용 후핵연료 발생량이 얼마나 더 많은가에 대해 확정적이지 않다. 우리나라 혁신형 SMR의 경우에도, 대형원전 대비 노심의 크기가 작다는 근원적인 물리적 차이로 인해 중성자 이용률이 감소하므로 대형원전 대비 단위출력당 사용후핵연료 발생량이 다소 높을 것으로 예상된다. 이에, 사용후핵연료 발생량을 낮추기 위한 방안으로, 설계 과정에서 핵연료 장전 모형 최적화, 허용 연소도를 높일 수 있는 차세대 핵연료 피복관 적용, 농축도 향상 등의 요소를 고려하여 핵연료 이용률을 높이고 사용후핵연료 발생량 저감할 수 있도록 다각적으로 노력 중이다.

한편, SMR의 사용후핵연료 관리 방안과 관련하여, 혁신형 SMR의 핵연료는 기존 대형원전에서 사용하는 핵연료와 제원(specification)이 거의 유사하다. 그 이유는 대형원전과 혁신형 SMR 둘 다 5% 이하의 농축도를 가진 UO_2 핵연료 사용, 일반적으로 60MWd/MTU 이하의 연소도, 16×16 또는 17×17 핵연료봉으로 구성된 핵연료집합체 등의 특징을 갖기 때문이다. 다만, 노심의 크기 차이로 인해 대형원전과 i-SMR의 핵연료봉 길이가 각각 약 4m와 2.4m로 다르다. 이에 따라, 사용후핵연료의 특징 차이도 거의 없을 것으로 예상된다. 가압경수형 대형원전의 경우, 노심에서 인출된 사용후핵연료는 붕괴열 냉각 및 방사선 차폐를 위해 원자로 건물에서 습식저장을 하게 된다. 이러한 방식은 핵임계 방지, 붕괴열 제거, 내진설계 최적화 등 지난 수십년간 쌓아온 풍부한 경험을 바탕으로 안전성이 입증되어 있다. 혁신형 SMR의 사용후핵연료는 연소도와 농축도 등의 측면에서 기존 대형원전의 사용후핵연료 안전관리 범주 내에 충분히 포함되므로 기존 안전관리 대책을 준용하는 것이 가능하며, 습식저장 이후의 중간저장, 처분 등 후행핵주기 안전관리 또한 마찬가지로 될 것으로 예상된다.

3.4. 핵확산 방지

핵확산 방지를 차원에서 필요한 재장전(refueling) 빈도 최소화를 위해 고려해야 할 세 가지 설계 요소를 토대로, 우리나라 혁신형 SMR을 대상으로 분석하고자 한다.

첫째는 최초 발전(first generation)만을 위한 농축도 향상을 통해 재장전 없이 운영하는 것이다. 그러나 혁신형 SMR의 경우, 기존 대형원전의 핵연료와 유사하게 5% 이내로 농축된 핵연료를 사용할 계획이며 재장전이 필수적이므로 동 고려사항을 달성하기 어렵다.

두 번째 설계요소는 장주기(long periods) 원자로 및 장수명 노심 설계이다. 원자력발전소의 핵연료를 자주 교체할수록, 핵연료에 접근하는 빈도가 늘어나게 된다. 또한, 핵분열의 결과로 생성되며 무기화가 가능한 플루토늄에 접근할 가능성이 증가하게 된다. 용융염원자로 등 일부 제4세대 원자로의 경우, 노심의 특성에 따라 핵연료 교체없이 장기간 운영 가능하도록 설계되고 있다.¹¹⁵⁾ 특히 격·오지의 전력공급 전용이거나 선박·우주용으로 개발되는 특수목적의 원자로의 경우, 장주기 노심 설계 경향이 있다. 우리나라의 혁신형 SMR의 경우, 가압경수로형이므로 농축도 5% 이내의 핵연료를 사용하여 모듈당 170MWe을 출력을 내면서 수년 이상의 장주기 운전은 하기에는 한계가 있으나¹¹⁶⁾, 그럼에도 불구하고 기존 대형원전의 핵연료 교체주기

115) 영국의 용융염원자로형 SMR인 SSR-U 모델은 재장전 주기가 20년으로 설계되고 있으며, 캐나다의 소듐냉각고속로형 SMR인 ARC-100 모델 역시 20년이다.

116) 가압경수로형 SMR의 경우 대부분 핵연료 재장전 주기가 24개월 이내인 것으로 보고되고 있다. 러시아의 해양용 SMR인 RITM-200은 가압경수로형임에도 농축도가 20%에 달하며 출력이 50 MWe로 낮아 재장전 주기를 10년까지 연장

인 18개월보다 연장된 24개월로 설계되고 있다 (Kang, 2022, p.10).

셋째는 재장전 모니터링 등 강력한 세이프가드 실시이다. 이에 대해서는 아직 국제적인 규칙이 도출되지 않았다. 다만, 기존의 IAEA의 국제 안전조치 이행 규칙과 관행을 고려할 때, 기존 대형원전과 같은 가압경수로형이고 육상에 건설된다는 점에서 현행과 유사한 방식의 국제 안전조치가 혁신형 SMR에 적용될 가능성이 높다. 다만 앞서 두 번째 요소로 언급한 재장전 주기의 변화에 따라 IAEA의 검사 주기가 달라질 것이며, 하나의 건물에 다수 모듈(최대 4개)이 설치되기 때문에 IAEA 감시 카메라의 운영 방식이 다소 바뀔 가능성도 있다. 또한 핵연료집합체의 길이가 짧아짐으로 인해 핵물질 전용 경로 분석이 다소 어려워질 가능성, 사용후핵연료의 이송 또는 삼중 적재 가능성, 중성자 누설 증가로 인한 설계정보의 추가 검토 가능성 등 몇 가지 난관이 존재할 것으로 보인다. 그러나, 큰 틀에서 기존 대형원전의 검사 방식을 벗어나지는 않을 것으로 예상된다.

3.5. 소결

먼저, 비용 측면에서, 첫째, 혁신형 SMR의 ‘건설단가’는 대형원전의 건설단가와 단순 비교는 어려우나, 상대적으로 초기 자금조달 부담이 적다. 우리나라는 낮은 단가로의 국내외 원전건설 경험이 있고, 해외 유사한 유형의 SMR 모델과 비교시, 역시 건설단가를 단순 비교하기는 어려우나, 비슷하거나 더 낮은 건설단가가 추산된다. 둘째, 혁신형 SMR ‘발전단가’의 목표치는 \$59/MWh로 대형원전(\$53/MWh)보다 살짝 높으며 이는 매우 도전적이 목표치이다. 이는 다른 발전원의 단가보다 상당히 낮으며, 해외 수출 시 발전단가는 변동 가능성이 있다. 셋째, 가격 경쟁력을 고려하여 전력수요에 대한 탄력적 대응을 위한 운전 설계, 모듈 추가 재배치 가능, 재생에너지 간헐성 보완 운전이 가능하다. 넷째, ‘공기’의 경우, 혁신형 SMR의 NOAK 호기의 전체 4개 모듈에 42개월이 걸리는데, 미국의 NuScale社의 경우 불확실성을 고려한 NOAK 호기에 42~54개월이 걸린다는 추정치와 비교할 때 비슷한 수준일 것으로 예상된다. 다섯째, ‘핵연료 비용’의 경우 가압경수로형 대형원전에서 사용되는 핵연료와 같은 형태의 연료(5% 이내 농축도 핵연료)를 사용 가능하므로 비용 부담이 적다. 그러나, 사고저항성핵연료를 개발해서 사용해야 할 경우 이는 비용부담으로 이어질 수 있으며, 이의 개발 속도가 빠르지는 않다. 여섯째, ‘유지보수 비용’ 측면에서, 혁신형 SMR은 통합형 제어실을 고려하고 있고, 디지털 트윈의 경우 핵심기술로 고려되었으나 예타사업에서는 제외되었다. 일곱째, 그 외 외부적 요소로서, 장거리 송전소 설치 및 연계 필요성이 낮고, 부지 선정에 제한이 덜하며, 고용창출의 가능성도 존재한다.

다음으로, 안전성 측면에서는, 첫째, 무(無)방산 운전을 통한 계통 단순화, 모듈화, 그리고 내진설계 강화 등을 통해 설계단계에서부터 미리 안전성 강화를 도모하고 있다. 둘째, 출력 감소 측면에서, 혁신형 SMR의 경우, 1개 모듈은 170 MWe로 다른 나라에서 개발중인 주요 경쟁 노형과 비교하여 평균 이하 수준인 바, 단순히 모듈당 출력으로만 본다면 노심열 에너지 제어 용이성이 커지므로 안전성이 높다고도 판단할 수 있다. 셋째, 고유 안전성 및 피동형 안전 설계 측면에서, 혁신형 SMR은 자연현상(중력 및 대류)에 의해 안전계통이 스스로 작동하여 핵

가능하다 (IAEA, 2022, p.364~365).

연료를 장기간 안전한 상태로 유지할 수 있도록 설계되어 있다. 또한 완전 피동형 안전계통을 적용해 전력이 끊기는 비상사태 시에도 안전설비가 정상적으로 구동될 수 있도록 설계된다. 넷째, 주민대피를 위한 방사선비상계획구역 범위와 관련하여, 혁신형 SMR은 안전계통 단순화, 완전 피동/무한냉각 구현, 고신뢰도 기기 개발, 내진성능 향상 등을 통해 노심손상빈도를 $1.0e-9/R\cdot Y$ 수준으로 낮추는 것을 목표로 하고 있으며 방사선비상계획구역을 부지경계인 1km 이내로 축소할 수 있다.

다음으로, 방사성폐기물(특히, 사용후핵연료) 저감 측면에서, 첫째, ‘고속로 유형’의 원자로 설계 요소에 대해, 우리나라 혁신형 SMR은 열중성자로 유형으로 설계된 바, 이는 혁신형 SMR에 해당되지 않는다. 둘째, ‘고연소·장주기 운전’과 관련해서 우리나라 혁신형 SMR 설계시 연소도를 높이기 위해, 먼저 농축도 상한값을 4.95% 수준으로 고려하고, 농축도가 보다 높은 LEU+ 핵연료 개발 및 적용을 추가로 고려할 수 있다. 이 외에도, 반사체(reflector)를 보강하여 노심 밖으로 누출되는 중성자를 감소시키거나, 핵연료 장전모형을 최적화 하는 등의 방안 등이 고려될 수 있다. 그리고 셋째 고려사항인 ‘핵연료의 다세대 사용’은 대형원전의 경우, 일반적으로 18개월 주기로 노심 핵연료의 약 3분의 1을 새 핵연료로 교체하며, 핵연료는 최적 장전모형에 따라 3주기에 걸쳐 연소되나, 혁신형 SMR의 경우, 24개월 주기로 노심 핵연료의 일부를 교체하도록 설계될 예정이다. 그러나 3주기 이상의 세대에 걸쳐 핵연료를 사용하기는 어려울 것으로 예상된다. 이외에도 사용후핵연료 재처리를 통해 핵연료를 재활용할 수 있으나 우리나라는 현재 고려할 수 없는 방법이다. 한편, 이미 발생한 사용후핵연료의 관리 방안 관련해서, 우리나라 혁신형 SMR은 기존 대형원전에서 활용되는 핵연료와 유사한 제원인 바, 이의 관리에 대해서는 기존 대형원전의 관리방식과 경험에 따라 진행될 예정이다.

마지막으로, 핵확산 방지를 위한 설계 고려요소 측면에서, 첫째, ‘핵연료 재장전 없는 운영’에 대해서, 우리나라 혁신형 SMR은 재장전을 고려한 설계인 바, 동 항목을 충족하지 못한다. 둘째, 재장전 사이의 ‘장주기 원자로 및 장수명 노심설계’와 관련하여, 혁신형 SMR은 가압경수로형이므로 농축도 5% 이내의 핵연료를 사용하여 모듈당 170MWe을 출력을 내면서 수년 이상의 장주기 운전을 하기에는 한계가 있다. 대신, 기존 대형원전의 핵연료 교체주기인 18개월보다 연장된 24개월로 설계되고 있다. 셋째, 강력한 세이프가드 실시와 관련하여, 혁신형 SMR이 대형원전과 동일한 가압경수로형이고 육상 건설이 예정된 바, 기존의 대형원전에 대한 안전조치 방식에서 크게 벗어나지는 않을 것으로 보인다.

종합하면, 우리나라 i-SMR은 경제성 측면에서 대형원전 및 경쟁 SMR 모델과 비교했을 때 상당히 경쟁력있게 설계되고 있다. 안전성 측면도 마찬가지로, SMR 자체의 장점을 살려 안전성 향상에 요구되는 고려사항들이 설계상 대부분 포함되어 있다. 한편, 사용후핵연료 발생량 저감을 위하여, 핵연료 농축도를 높이거나 반사체 보강을 통해 중성자 경제를 높이는 방법을 설계에 고려할 수 있다. 발생한 사용후핵연료를 재처리한 후 재활용하는 등의 방안은 한미원자력협정에 의해 근본적으로 고려하지 않는다. 핵확산 방지에 대해서는 모든 요건을 만족하지는 못하나, 다만 기존 IAEA의 세이프가드 방식이 적용되고 또한 핵연료 교체주기 연장을 위한 사항이 설계상 고려된다는 점에서 핵확산방지를 위한 노력이 설계상 반영되고 있다고 볼 수 있다. 앞서 분석된 사항들을 정리하면 다음의 <표 5-5>이 정리될 수 있다.

더 나아가, 우리나라 혁신형 SMR의 보다 더 큰 경쟁력을 확보하기 위해서는 다음의 사항

을 고려할 필요가 있다. 혁신형 SMR의 개발단계가 NuScale社 등의 경쟁사에 늦은 감이 있는 바, SMART 기술개발로 축적한 R&D 역량에 기반해 속도감을 올리는 것이 필요하다. 또한 해외 경쟁사 모델 대비 우수한 혁신기술¹¹⁷⁾을 적용하고 차별화하여 혁신형 SMR의 기술우위를 토대로 해외 수출 기회를 모색해야 한다. 무엇보다도 우리나라는 한수원을 중심으로 국내 원자력 기업들이 광범위하게 참여하여 수십년간의 원전 개발 및 건설운영 경험을 축적한 바, 이 경험을 혁신형 SMR의 개발 및 실증에 있어서도 통합적·체계적·전략적인 접근으로 이어져야 할 필요가 있다.

<표 5-5> 한국의 혁신형 SMR의 설계요인 분석 결과

항목	요인	i-SMR 설계 분석 결과	
비용 감소	i) 건설비용	(O)	- 초기 재정 동원에 대한 적은 부담 - 건설 관련 전략과 경험 보유
	ii) 전력 생산을 통한 이익	(△)	- 대형 원자로보다 높은 발전 비용, 다른 발전원보다 낮은 발전 비용
	iii) 가격 경쟁력을 고려하여 전력 수요에 탄력적으로 대응하는 유연성	(O)	a) 내장형(built-in) 유연성 운영 설계, b) 유연한 모듈 배치, c) 재생 에너지 간헐성(intermitency)에 대한 보상
	iv) 건설기간	(O)	- NOAK의 경우 1개 모듈 24개월, 4개 모듈 42개월
	v) 핵연료 비용	(△)	- APR1400 대형 원자로에 사용되는 것과 동일한 연료 유형이 사용 - 그러나 사고 내성 연료를 개발하여 사용할 경우 비용 부담이 발생 가능
	vi) 유지보수 비용	(△)	- 통합 제어실이 고려됨 - 디지털 트윈도 고려되지만 사전 타당성 조사에는 포함되지 않음
	vii) 외부(비재정적) 요소	(O)	a) 전력망 용량 요건에 대한 제약이 적음 b) 부지 선정에 대한 제약이 적음 c) 일자리 창출 기회가 기대
안정성 향상	i) 설계단계에서부터 미리 안전성 향상을 감안하는 접근법	(O)	a) 시스템 단순화 b) 모듈화 c) 지하 설치
	ii) 출력 감소	(△)	- 모듈당 180MWe의 전력 용량은 다른 경쟁 외국산 SMR 모델보다 적음.
	iii) 고유 안전성 및 피동형 안전 설계	(O)	- 간소화된 수동형(paasive) 안전 시스템이 적용되어 전기 공급 없이도 비상시 자연 순환 냉방이 가능하도록 설계
	iv) 주민대피를 위한 방사선비상계획구역 범위	(O)	- 노심손상 빈도를 낮추고 대규모 조기 방출 빈도도 낮추도록 설계되어 대피를 위한 비상 계획 구역의 크기를 줄일 수 있습니다.
방사성 폐기물 저감	i) 고속중성자를 활용하는 원자로 설계	-	- 고려되지 않음
	ii) 더 높은 핵연료 연소도	(O)	연소량 증가를 위해서는 a) 농축도를 높인 핵연료 개발 및 적용, b) 반사경 설치 강화를 통한 중성자 누출 감소, c) 핵연료 장전 모델 최적화 등이 필요

117) 무(無)봉산 운전 기술, 낮은 노심손상빈도 기술, 4차 산업혁명 기술(디지털 트윈, 자율운전), 모듈확장형 설계 기술 등

항목	요인	i-SMR 설계 분석 결과	
	iii) 여러 세대에 걸쳐 연료 사용	(△)	- 혁신형 SMR만의 설계 특징을 고려 - 혁신형 SMR의 연료는 24개월마다 부분적으로 교체하는 반면, APR1400의 연료는 18개월마다 교체
	iv) 기존 폐기물의 에너지화 & (선택적으로) 재처리 과정의 적용 여부	(△)	- 재처리 관점에서 완전히 고려될 수 없음 - 혁신형 SMR의 사용후핵연료는 대형 원자로 사용후 핵연료 관리의 이전 관행과 경험을 바탕으로 관리 예상
핵비확산 강화	i) 최초 발전만을 위한 농축을 통해 현장 재장전 없이 운영	(X)	- 재장전 설계
	ii) 장주기 원자로 및 장수명 노심 설계	(△)	- 혁신형 SMR은 연료 주입 주기가 긴 원자로 설계가 쉽지 않음 - 대신 대형 원자로의 18개월보다 더 긴 24개월로 급유 주기를 설계
	iii) 재장전 모니터링	(O)	- 대형 원자로에 대한 IAEA 안전조치는 동일한 유형의 가압경수로이기 때문에 i-SMR에도 유사한 방식과 수준으로 적용될 것으로 예상

자료: 저자 작성

4. 결론

본 연구는 우리나라가 개발하고 있는 혁신형 SMR의 개발 방향이 국제경쟁력을 갖추고 있는지를 분석하였다. 이를 위해 본 원고는 i) 비용(경제성), ii) 안전성, iii) 방사성폐기물(특히, 사용후핵연료) 저감, 그리고 iv) 핵확산 방지라는 네 가지 기준에서 경쟁력 확보에 요구되는 세부 고려요소들이 혁신형 SMR 설계에 어느 수준으로 반영되었는지를 살펴보았다. 그 결과 전반적으로 각 기준들의 고려사항이 상당히 많이 반영되어 설계 중인 것으로 나타났다. 다만, 사용후핵연료 저감과 핵확산 방지 기준에 대해서는 재처리와 관련된 고려사항들이 있는데, 우리나라가 사용후핵연료 재처리가 허용되지 않는 국가인 바, 이 부분들은 혁신형 SMR 설계 시 고려될 수 없는 즉 배제해야 할 요소들이다. 다만 재처리 외의 고려요소들에 대해서는 반영되고 있거나 또는 반영하기 위한 방안들이 논의되고 있다.

본 연구의 가장 큰 의미는 우리나라 혁신형 SMR 개발 현황 및 방향에 대해 매우 포괄적인 측면에서 상세하게 살펴보았다는 점이다. 혁신형 SMR 설계를 둘러싼 기존 논의가 대부분 ‘안전성’을 중심으로 한 점을 고려한다면, 본 연구는 ‘비용(경제성)’을 가장 우선적으로 살펴보았다. 또한, SMR에 대한 우려와 관련하여 ‘방사성폐기물 감소’와 ‘핵비확산성’에 대한 논란이 있는 바, 이에 대한 혁신형 SMR의 설계 현황에도 주목함으로써 향후 해외수출 시 부족한 점이 있다면 이의 대응방안을 미리 준비할 수 있다고 본다.

물론 본 연구의 한계점도 존재한다. 혁신형 SMR이 아직 R&D 단계이므로, 구체적인 정보가 많이 부족한 상황이며, 특히 실증단계까지 가지 않았기 때문에 방사성폐기물 및 사용후핵연료 발생량 등에 대해 구체적인 정보가 부족한 점 역시 아쉬운 부분이다. 또한, 우리나라 대형 원전의 ‘수치’를 토대로 혁신형 SMR에 대한 예측치를 활용할 수 밖에 없었다. 또한, 해외에

서 개발되고 있는 SMR 모델들의 경우도 실증단계까지 도달한 모델들이 거의 없는 바, 이의 수치를 비교함으로써 경쟁력을 비교하는 연구가 어려웠다.

확실히 하고자 하는 바는 본 연구는 현재 우리나라가 개발하고 있는 혁신형 SMR을 단순히 평가하는 데에 있는 것이 아니다. 본 연구에서 분석틀로 활용된 Ramana and Mian(2014)가 정리한 SMR 설계시 고려사항들의 경우, 전세계에서 활용되는 다양한 SMR 모델들을 살펴보면 정리한 것이다. 이는 현재 전세계적으로 개발되고 있는 그 어떤 SMR 모델도 Ramana and Mian(2014)가 제시한 요건들을 모두 충족시킬 수 없다는 것이다. 즉, 각 모델들은 각기의 설계장단점을 가지고 국제 SMR 시장에서 강조하는 부분이 다를 것이다. 따라서, 우리나라 혁신형 SMR에 대해 전반적으로 그리고 세부적으로 살펴봄으로써, 향후 설계과정에서 어떠한 부분들을 더 고려해야 하는 지에 대한 전체 방향을 볼 수 있고, 또한 향후 해외시장 진출을 고려할 때 우리가 어떠한 부분을 설계적 측면에서 더 강조하고 보완해야 하는 지를 파악하기 위함에 있다.

동 연구를 토대로, 향후 더 구체화가 필요한 연구들은 다양하다. 첫째, 현재 SMR을 개발하고 있는 다른 선진국들이 이미 해외 실증 및 수출을 하기 위한 전략과 제도를 마련하고 자국의 다양한 정책과 해외협력 활동들을 전개하고 있는 바, 이러한 활동들을 분석하고 우리나라 혁신형 SMR의 해외진출을 위한 전략 마련 연구가 필요할 것으로 보인다. 둘째, 향후 혁신형 SMR의 해외 실증이 이루어질 것으로 예상되는 바, 우리나라와 경쟁하게 될 해외 핵심 SMR 모델들과의 실측치 비교 등의 연구 역시 필요할 것이다. 셋째, 국제사회에서 원자력이 다시 주요한 에너지원으로 부상하면서 원전수출이 증가되는 분위기이나, 동시에 원전수출에 대한 규제 역시 강조되고 있다. 이에 원전수출에 대한 국제규제 현황을 살펴보고, 이에 대응하기 위한 전략 연구가 필요할 것으로 보인다. 특히, EU 회원국으로의 원전 수출 시 과도기적 녹색투자로 분류되기 위해서는 사고저항성핵연료 적용이 필요한 바, 이러한 규제현황과 사고저항성핵연료에 대한 우리나라 R&D 추진방향 연구 역시 필요할 것으로 보인다. 넷째, 해외 사업시에는 사회적 수용성(social acceptance) 역시 중요한 고려사항이다. SMR이 기존 원전과 달리 ‘소형’이기 때문에, 이 규모의 차이에서 오는 특성들에 대한 고민 역시 필요하다. 즉, 소형이기 때문에 더 많은 부지선정 결정이 필요하고, 에너지 소비자와의 근접성에 대한 고려가 필요할 수 있다는 점이다.¹¹⁸⁾ 우리나라 혁신형 SMR 수출 목표 국가들을 대상으로 이러한 사회적 수용성에 대한 연구를 추진하는 것도 중요할 것으로 보인다.

118) 이는 신재생 에너지 발전소 건설이 다른 기존 에너지 발전소(화석연료 발전소 및 대형 원자력 발전소)와 비교했을 때 ‘소규모’라는 점에서 사회적 수용성 차원에서 이슈 및 논의되었던 사항에 기반하여 (Wüstenhagen et al. 2007, p.2684), 이를 SMR에도 적용해 본 것이다

제 6 장 결 론

동 연구 보고서는 ‘아세안 중점협력국 대상 녹색기술협력체계 구축을 통한 RD&D 협력 아젠다 발굴’이라는 연구과제의 두 번째 모듈로써, ‘탄소중립 신규 녹색기술 RD&D 적용 가능여건’에 초점을 맞추고 진행된 연구 결과를 담고 있다. 동 연구는 크게 2가지 측면에서 진행되었다.

하나는 ‘녹색기술’에 대한 ‘국내/외 정책 현황’을 살펴보는 것이다. 먼저 국제 차원에서는 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)의 제6차 평가보고서의 종합보고서(synthesis report)의 승인을 둘러싸고 국가녹색기술연구소가 IPCC 국내대응협의회 제3실무그룹 주관기관이자 동시에 IPCC 제6차 종합보고서 대응 정부 태스크포스(TF) 참여 기관으로 정책대응 과정에서 수행된 연구결과를 담고 있다. 다음으로 국내 차원에서, 녹색기술에 대한 우리나라 정책적 방향을 정리한 결과를 담고 있다. 그리고, 우리나라가 추진하고자 하는 신규 녹색기술 중에서 2023년 원천 R&D가 시작되는 대표적인 2개 기술인 대기직접탄소포집(DAC) 기술과 소형모듈원자로(SMR) 기술에 집중하였다.

다른 하나는 앞서 언급된 DAC 기술과 SMR 기술이라는 ‘세부기술’에 대한 우리나라 R&D의 가능여건을 중심으로 연구를 진행하는 것이다. 먼저, ‘DAC 기술’에 대해서는 국내 정책 차원에서 NDC 국가감축 목표에 DAC 기술 기반 별도 감축목표 설정 가능 여부에 대한 탄핵위 정책 논의와 국제 정책 차원에서 파리협정 제6.4조 베커니즘에서 제거 활동으로 인정하는 범위에 DAC 기술 포함 여부에 대한 국가제안서 작성에 참여한 정책 지원 차원의 연구결과가 담겨 있다. 특히, 국가제안서 작성 과정에서 파리협정 제6.4조 메커니즘 제거 활동으로 DAC 기술을 포함해야 하는가에 관한 우리나라 협상 입장에 대해 추진한 중점 연구 결과가 포함되었다. 다음으로, ‘SMR 기술’에 대해서는 국내 정책으로 SMR 기술 R&D에 대한 정책 현황을 살펴보고, 이후 SMR 기술개발을 둘러싼 국제적 경쟁 각축 속에서 우리나라에서 R&D에 들어간 SMR 모델인 혁신형 SMR(i-SMR)이 국제경쟁력을 담보할 수 있는 설계요소들을 포함하고 있는지를 분석한 결과가 포함되었다.

1. 연구 성과

동 보고서에 담긴 2023년도 연구 내용이 각 섹션 별로 결과들이 이미 본문에서 도출된 바, 동 결론 섹션에서는 이 결과에 대해서 모두 구체적으로 서술하지는 않을 예정이다. 대신, 연구결과에 대한 종합적인 정리를 위해, 다음의 <표 6-1>과 같이 연구 결과를 정리하였다.

<표 6-1> ASEAN 과제 ‘모듈 2’ 연구 결과 정리

섹션	정책지원 및 연구결과																					
1장	서론																					
2장	- 녹색기술 RD&D의 가능여건/장애요소에 대한 기존 문헌연구 · 녹색기술 기술개발 및 이전 · 가능여건과 장애요소의 의미 · 녹색기술 RD&D와 가능여건/장애요소의 유형 및 관계																					
3장	1절	<table border="1"> <tr> <td>정책 지원</td> <td>(국제) IPCC 제6차평가보고서 정책 지원 및 IPCC 보고서 기반 녹색기술 RD&D 국제 정책 방향 도출</td> </tr> </table> - (IPCC 국내대응협의회) · NIGT는 IPCC 국내대응협의회 제3실무그룹 전문위원회 공동주관기관으로, IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 검토 및 승인 과정을 지원 <table border="1"> <tr> <th>일시</th> <th>수행 내용</th> </tr> <tr> <td>‘22.12~’23.1.</td> <td>IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 정부검토 참여</td> </tr> <tr> <td>‘23.1.9.</td> <td>종합보고서 대응 TF 참여</td> </tr> <tr> <td>‘23.1.12.</td> <td>IPCC 국내대응협의회 개최 지원 및 발표</td> </tr> </table> - (IPCC 총회) · 종합보고서 최종 수정 및 승인 과정을 지원하기 위하여 제58차 IPCC 총회 정부대표단으로 참여 <table border="1"> <tr> <th>일시</th> <th>수행 내용</th> </tr> <tr> <td>‘22.12.14&16 &21</td> <td>IPCC 총회 사전회의(웨비나)</td> </tr> <tr> <td>‘23.3.2.</td> <td>IPCC 정부대표단 사전점검회의</td> </tr> <tr> <td>‘23.3.13-19.</td> <td>제58차 IPCC 총회 정부대표단 참여</td> </tr> <tr> <td>총회 이후</td> <td>IPCC 총회 결과 확산(언론브리핑, 뉴스 대담, 포럼, 보고서 번역)</td> </tr> </table> - (기후기술 RD&D 정책 방향 도출) · 탄소중립 기술 R&D 방향성 → 민간 섹터의 ‘실증 및 활용’까지 고려해야 하며 단가하락을 고려한 R&D에 우선 투자할 필요 있음 · 감축기술과 적응기술의 통합적 접근 → 기후탄력적 개발 차원에서 기술의 감축과 적응 측면을 동시에 고려해 시너지 극대화 및 상충효과 최소화 필요 · 선-개도국 대상 기후기술 국제협력 → 개도국의 약한 가능여건을 파악하고, 다양한 다자협력 채널들의 효율성·효과성 등을 고려하여 협력 전략 수립 필요	정책 지원	(국제) IPCC 제6차평가보고서 정책 지원 및 IPCC 보고서 기반 녹색기술 RD&D 국제 정책 방향 도출	일시	수행 내용	‘22.12~’23.1.	IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 정부검토 참여	‘23.1.9.	종합보고서 대응 TF 참여	‘23.1.12.	IPCC 국내대응협의회 개최 지원 및 발표	일시	수행 내용	‘22.12.14&16 &21	IPCC 총회 사전회의(웨비나)	‘23.3.2.	IPCC 정부대표단 사전점검회의	‘23.3.13-19.	제58차 IPCC 총회 정부대표단 참여	총회 이후	IPCC 총회 결과 확산(언론브리핑, 뉴스 대담, 포럼, 보고서 번역)
	정책 지원	(국제) IPCC 제6차평가보고서 정책 지원 및 IPCC 보고서 기반 녹색기술 RD&D 국제 정책 방향 도출																				
일시	수행 내용																					
‘22.12~’23.1.	IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 정부검토 참여																					
‘23.1.9.	종합보고서 대응 TF 참여																					
‘23.1.12.	IPCC 국내대응협의회 개최 지원 및 발표																					
일시	수행 내용																					
‘22.12.14&16 &21	IPCC 총회 사전회의(웨비나)																					
‘23.3.2.	IPCC 정부대표단 사전점검회의																					
‘23.3.13-19.	제58차 IPCC 총회 정부대표단 참여																					
총회 이후	IPCC 총회 결과 확산(언론브리핑, 뉴스 대담, 포럼, 보고서 번역)																					
2절	<table border="1"> <tr> <td>정책 지원</td> <td>(국내) 우리나라 녹색기술 RD&D 정책 방향</td> </tr> </table> - (탄소중립 10대 핵심기술) · 2021년 3월, 과기정통부는 ‘탄소중립 기술혁신 추진전략’을 발표하며 ①태양광·풍력, ②수소, ③바이오에너지, ④철강·시멘트, ⑤석유화학, ⑥산업공정 고도화, ⑦수송 효율, ⑧건물 효율, ⑨디지털화, ⑩CCUS 기술을 탄소중립 10대 핵심기술로 선정 - (한국형 탄소중립 100대 핵심기술) · 2023년 5월, 관계부처 합동으로 한국형 탄소중립 100대 핵심기술을 도출하였으며, 현재 활용되고 있는 기술뿐만 아니라 아직 실증이 이루어지지 않았으나 온실가스 감축 효과가 있을 것으로 기대받고 이는 기술(DAC 기술 및 SMR 기술	정책 지원	(국내) 우리나라 녹색기술 RD&D 정책 방향																			
정책 지원	(국내) 우리나라 녹색기술 RD&D 정책 방향																					

섹션	정책지원 및 연구결과									
3절		등)도 포함								
	정책 지원	<p>(국내) 2023년도 원천 R&D 시작 녹색기술: DAC 기술 및 SMR 기술</p> <p>- (원천기술 R&D 시작)</p> <ul style="list-style-type: none"> 한국형 탄소중립 100대 핵심기술에 포함되었으나 아직 우리나라에서 실증이 이루어지지 않았던 DAC 기술 및 혁신형 SMR 기술에 대한 원천기술 R&D가 올해 시작 								
4장	1절	<p>정책 지원 (국내) DAC 기술 기반 NDC 국가 감축목표 설정 정책 논의</p> <p>- (연구배경)</p> <ul style="list-style-type: none"> 「탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가기본계획」 수립을 앞두고, CCUS 기술 기반 감축목표 조정 과정에서 DAC 기술을 포함한 신규기술의 2030 NDC 감축목표 기여 가능성 여부에 대해 정부 타진 (2023년 2월 정부 정책 논의 협의체 회의에 국가녹색기술연구소 참석 및 발표) <ul style="list-style-type: none"> 「CCUS 부문 전문위원회/NDC 기술 작업반 통합회의」 <ul style="list-style-type: none"> → 탄독위 요청에 따라 DAC 기술에 대한 국내외 RD&D 현황을 소개하고, DAC 기술을 활용하여 2030 NDC 목표 달성 기여분에 대해 발표 → DAC 기술을 둘러싼 전문가들의 비판에 대해 정책적 필요성과 기술적 함의에 대해서 대응 발언 「CCUS 부문 전문위원회 회의」 <ul style="list-style-type: none"> → DAC 기술을 둘러싸고 정부 및 전문가들부터 부정적 의견이 크게 4가지 측면에서 이루어지며, 이에 대해서 ‘긍정적’인 입장에서 대응 발언 <table border="1" data-bbox="485 1048 1294 1189"> <tr> <td>i)</td> <td>기술 성숙도</td> </tr> <tr> <td>ii)</td> <td>환경적 효과성 (감축 실현성)</td> </tr> <tr> <td>iii)</td> <td>투자 효과성</td> </tr> <tr> <td>iv)</td> <td>국제 방법론</td> </tr> </table> (DAC 기술 기반 관계기관 간 간담회 개최) <ul style="list-style-type: none"> 정부(탄독위), 민간으로 (주)로우카본, GS 건설, DAC 기술 R&D를 실제 수행하는 연구기관으로 에너지기술연구원, 한국과학기술원, 연구기관이면서 정책적 견지의 고등기술원, 그리고 정책 측면의 국가녹색기술연구소가 DAC 기술에 기반한 2030 NDC 목표 달성 기여분에 대해서 현실적이면서도 의욕적인 목표 설정 가능성을 논의하고 합의된 목표치 도출 동 합의된 목표치를 「CCUS 부문 전문위원회 회의」에서 발표 (결과) <ul style="list-style-type: none"> 2023년 4월 수립된 「탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가기본계획」에 DAC 기술에 기반한 별도의 감축기여분이 포함되지는 못함 DAC 기술의 감축목표 달성을 위한 정부의 수요가 존재함을 확인하고, 향후 이를 위한 R&D 추진과 실증사업 지원을 위한 정책적 방향성 확인 	i)	기술 성숙도	ii)	환경적 효과성 (감축 실현성)	iii)	투자 효과성	iv)	국제 방법론
		i)	기술 성숙도							
ii)	환경적 효과성 (감축 실현성)									
iii)	투자 효과성									
iv)	국제 방법론									
2절	<p>정책 지원 (국제) 파리협정 제6.4조 메커니즘 국가제안서 작성 정책 논의 과정</p> <p>정책지원: ‘제거 활동’에 DAC 기술 포함 사항</p> <p>- (연구배경)</p> <ul style="list-style-type: none"> 파리협정 당사국총회(CMA)는 파리협정 당사국 및 옵저버 기관들이 파리협정 제6.4조 메커니즘에 ‘제거를 포함한 활동’에 대한 국가제안서를 2023년 3월 15일까지 제출할 것을 요청 <p>- (정부 정책 논의 협의체 구성 및 참여)</p> <ul style="list-style-type: none"> 우리나라 국가제안서 작성을 위한 국내 연구협의체* 구성** 및 논의 회의 참여 <ul style="list-style-type: none"> * ‘파리협정 제6.4조 흡수원 의제 대응 연구 협의회’ ** (산림) 국립산림과학원, (해양) 해양환경공단, (농업) 농촌진흥청, (내륙습지) 한국환경연구원, (공학) 국가녹색기술연구소 									

섹션	정책지원 및 연구결과										
	<ul style="list-style-type: none"> · 우리나라 국가제안서 작성 방향 수립·검토·제출을 위한 외교부 중심의 ‘흡수원 협의체’ 구성* <ul style="list-style-type: none"> ** 외교부, 산림청, 산업부, 환경부, 과기부, <u>연구협의회 소속 기관 모두, 한국에너지공단 등</u> - (정부 정책 지원 활동) <ul style="list-style-type: none"> · DAC 기술 기반의 제거 접근법에 대한 국가제안서 방향 제시 · 국가제안서 DAC 기술 부문 초안 작성 · 국내 연구협의회 및 외교부 흡수원 협의체 회의 참여를 통해 우리나라 입장안 수정 · 국가제안서 전체 취합본 검토 작업 - (결과) <ul style="list-style-type: none"> · 파리협정 제6.4조 메커니즘 흡수원/제거(removal)에 대한 우리나라 국가제안서 최종 제출 (‘23.4.7) 										
3절	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%; text-align: center;">중점 연구</td> <td style="text-align: center;">파리협정 제6.4조 메커니즘 ‘제거 활동’으로 DAC 기술 포함에 관한 우리나라 협상 입장 연구</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> - (연구배경) <ul style="list-style-type: none"> · 다양한 ‘흡수원/제거’ 활동에 대해 파리협정 제6.4조 메커니즘에서 배출권으로 도출될 수 있는 옵션을 어디까지 인정할 것인가에 대한 협상 논의 진행 · ‘흡수원/제거’에 대한 이해관계자 입장을 UNFCCC 사무국이 2022년 10월까지 수신 · 제6.4조 메커니즘의 감독기구(Supervisory Body)가 2022년 11월까지 ‘제거’ 활동에 대한 권고안(recommendations)을 도출 · 동 권고안에 대해, 파리협정 당사국총회(CMA)는 파리협정 당사국 및 옵저버 기관들이 ‘제거를 포함한 활동’에 대한 국가제안서를 2023년 3월 15일까지 제출할 것을 요청 · 국가녹색기술연구소는 파리협정 제6.4조 흡수원 의제 대응 연구 협의회와 외교부 주관의 ‘흡수원 협의체’에 참여를 요청 받아, DAC 기술에 기반하여 우리나라 입장을 수립해야 했음 · 기존의 CDM 하에서 ‘흡수원/제거’ 활동으로 인정받은 기술은 조림 및 재조림 (afforestation & reforestation)에 불과함 - (연구질문) <ul style="list-style-type: none"> · DAC 기반 기술인 DACCS와 DACCU 기술을 둘러싸고, 파리협정 제6.4조 메커니즘 하에서 인정받는 기술옵션이 되어야 하는가에 대한, 이해관계자들의 입장과 협상 쟁점사항이 무엇인가? · 우리나라의 DAC 기술의 RD&D 현황을 토대로, 쟁점사항별로 우리나라가 취해야 하는 협상 입장은 무엇인가? - (분석틀) <ul style="list-style-type: none"> · 이산화탄소 제거 접근법을 탄소시장에 포함하는 것과 관련된 기존 문헌 연구를 토대로, 가장 핵심 개념인 영구성(permanence)’를 중심으로 4가지 측면을 도출 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <tr> <td style="width: 10%; text-align: center;">i)</td> <td>온실가스 포집 저장소 및 제거 방식</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">ii)</td> <td>저장 기간</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">iii)</td> <td>크레딧 대체 가능성</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">iv)</td> <td>역전현상 리스크</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> · 상기 4가지 측면에 대해서 이해관계자들의 입장 도출 · 상기 4가지 측면에 대해 우리나라 DAC 기술 RD&D 및 정책 현황 분석 · 우리나라 협상 입장 도출 - (분석결과) 동 사항은 해당 챕터 분석결과 참조 <ul style="list-style-type: none"> · 파리협정 제6.4조 메커니즘에서 흡수원/제거에 대해, 	중점 연구	파리협정 제6.4조 메커니즘 ‘제거 활동’으로 DAC 기술 포함에 관한 우리나라 협상 입장 연구	i)	온실가스 포집 저장소 및 제거 방식	ii)	저장 기간	iii)	크레딧 대체 가능성	iv)	역전현상 리스크
중점 연구	파리협정 제6.4조 메커니즘 ‘제거 활동’으로 DAC 기술 포함에 관한 우리나라 협상 입장 연구										
i)	온실가스 포집 저장소 및 제거 방식										
ii)	저장 기간										
iii)	크레딧 대체 가능성										
iv)	역전현상 리스크										

섹션		정책지원 및 연구결과							
		DAC 기술 기반의 우리나라 입장 도출 및 향후 정책적 대응 방향 도출							
5장	1절	연구	(국내) SMR 기술 관련 국가 R&D 정책 현황						
			<ul style="list-style-type: none"> - (배경) 원자력에 대한 관심도 증대 - (SMR 정책) 소형모듈원자로(SMR)에 대한 국내 정책 현황 정리 - (SMR R&D 현황) 10종에 대한 SMR 개발 현황 정리 						
5장	2절	중점 연구	SMR 기술: 국제감축사업화 제도 수립 방안 연구 (현재 R&D 단계인 우리나라 혁신형 SMR 기술의 R&D 설계방향이 국제경쟁력을 담보하고 있는지의 여부를 분석)						
			<ul style="list-style-type: none"> - (연구배경) <ul style="list-style-type: none"> · 윤석열 정부의 ‘新성장 4.0 전략 추진계획’의 15대 프로젝트 중 하나로 세계적 경쟁력을 갖춘 차세대 한국형 SMR인 혁신형 SMR의 원천 R&D가 2023년 시작 · 2022년 9월 기준 전세계 18개국에서 80여종의 SMR 모델이 개발 · 글로벌 SMR 개발 각축 상황에서, 우리나라의 SMR이 기술우위를 통한 시장경쟁력을 갖추기 위해서는 국제적으로 통용될 수 있는 기술적 설계요소 측면의 강점을 가지고 있어야 할 뿐만 아니라, 국내·외 제도 및 정책과의 상응성 역시 필요 · 우리나라 ‘혁신형 SMR’ 모델의 R&D 설계에 대한 포괄적 연구가 부재하고, 또한 R&D 설계가 국제경쟁력이 있는 지에 대한 분석 연구 부재 - (연구질문) <ul style="list-style-type: none"> · 우리나라가 개발중인 혁신형 SMR(i-SMR) 모델의 R&D 설계 방향이 국제경쟁력을 담보하고 있는가? - (분석틀) <ul style="list-style-type: none"> · SRM 모델들의 비교 평가하는 기존 문헌과 이러한 문헌에서 활용된 분석틀을 토대로, SMR이 경쟁력을 갖기 위해 고려해야 할 요소로서 4가지 측면을 설정하고 각 측면별로 세부 고려요소들을 설정 <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td>i)</td> <td>비용(경제성) 측면</td> </tr> <tr> <td>ii)</td> <td>안전성 측면</td> </tr> <tr> <td>iii)</td> <td>방사성폐기물 저감</td> </tr> <tr> <td>iv)</td> <td>핵확산(proliferation) 방지</td> </tr> </table> - (분석결과) 동 사항은 해당 챕터 분석결과 참조 <ul style="list-style-type: none"> · 전반적으로 고려사항들이 상당히 많이 반영되어 설계중인 것으로 분석 · 다만, 사용후핵연료 저감과 핵확산 방지 기준에 대해서는 재처리와 관련된 고려사항들이 있는데, 우리나라가 사용후핵연료 재처리가 허용되지 않는 국가인 바, 이 부분들은 혁신형 SMR 설계 시 고려될 수 없는 요소로서 간주 	i)	비용(경제성) 측면	ii)	안전성 측면	iii)	방사성폐기물 저감
i)	비용(경제성) 측면								
ii)	안전성 측면								
iii)	방사성폐기물 저감								
iv)	핵확산(proliferation) 방지								
6장	-	결론							

출처: 동 보고서 본문 내용을 토대로 저자가 정리.

2. 올해 연구의 특징과 향후 연구 방향성

2023년도에 수행된 연구과제는 기후변화에 관한 국가간 패널(IPCC)에 대한 정책 업무를 대응하는 과정에서의 정책연구와, IPCC 제6차평가보고서에 대한 검토 및 논의과정에서 핵심적으로 중요한 세 가지 연구주제를 별도로 추출하여 중점 연구를 수행하였다. 각각의 세부과제에 대해서 살펴보면 다음과 같다.

먼저, 국내/외 녹색기술 가능여건과 관련하여, 먼저 ‘국제적’ 측면에서는 IPCC 제6차평가보고서 종합보고서 승인을 둘러싸고 올해는 관련 정책지원과 관련한 녹색기술 방향성 연구가 진행되었다. IPCC 보고서에 대한 연구는 국가녹색기술연구소에서 2017년부터 시작되어 2023년 현재까지 계속적으로 진행된 연구로서, 2018년 단독 과제화 되었던 때를 제외하고는 모두 세부연구로 포함되어 진행되어 왔다. 기상청이 IPCC 국내 대응협의회를 2020년 신설하고, 국가녹색기술연구소는 에너지경제연구원과 함께 IPCC 국내 대응협의회 제3실무그룹 전문위원회의 주관기관으로 선정되었다. IPCC 제6차 평가보고서 검토가 2020년부터 2023년 3월까지 이루어졌고, 이에 대한 정부대응과 관련한 세부 중점연구가 수행되었다. IPCC 제6차 보고서에 대한 승인이 2021년 실무그룹I(과학) 보고서, 2022년 2월 실무그룹II(적응) 보고서, 2022년 4월 실무그룹III(완화) 보고서, 그리고 2023년 3월 종합보고서(synthesis report) 순으로 차례대로 이루어졌다. 이 종합보고서가 최종 승인됨으로써, IPCC 보고서 제 6차 평가주기(assessment cycle)가 2023년 6월 완료되었다. 국가녹색기술연구소는 올해 있었던 종합보고서 검토과정, 동 보고서를 승인하기 위한 IPCC 총회, 그리고 보고서의 최종 승인 이후 이의 국내 확산 과정에 적극적으로 참여하였다. 그리고 제 7차 평가주기를 이끌어 나갈 새로운 의장으로 Jim Skea 교수가 2023년 7월 26일 선임됨에 따라, IPCC 제7차 평가주기가 2023년 7월부터 시작되었다. 2024년부터는 제 7차 평가보고서 준비를 위한 비전 및 범주 보고서에 대한 부분들이 시작될 예정이다. 또한 6차 평가보고서에서 국제적으로나 또는 우리나라 입장에서나 쟁점이 되는 핵심연구 주제들이 있으며, 이 주제들은 7차 평가보고서에서도 등장할 것으로 예상되는 바, 이에 대한 우리나라 입장을 디펜스 할 수 있는 근거 연구를 수행하여 연구문헌화 하는 전략적인 노력이 매우 필요하다고 본다.

다음으로, 이산화탄소제거 접근법 차원에서 진행된 ‘직접대기포집(DAC) 기술’에 대해 우리나라는 올해 2023년부터 원천 R&D가 시작되었다. 그런데, DAC 기술에 기반한 감축노력과 감축 결과물에 대한 기대감이 높아지면서 DAC 기술의 실증 및 활용이 탄력을 받을 수 있는 정책적 시도들이 국내 및 국제적으로 올해 진행되었다. 국내적으로는 국가 2030 NDC 목표에 CCUS 기술 기반 감축목표와 별개로 DAC 기술에 기반한 감축기여분을 상정할 수 있는가에 대해서 처음 정책적으로 전문가 기반 논의가 이루어졌다. 국제적으로는 파리협정 제6.4조 메커니즘에서 배출권을 생산하는 이산화탄소제거 접근법을 확대하고자 하는 협상 논의에서 DAC 기술 기반 공학적 접근법을 인정하는 것이 필요하가에 대해서 아직 협상 논의가 진행되고 있다. 이 국내/외적인 정책 과정에 참여하면서 우리나라의 DAC 기술 R&D 현황을 중심으로 우리나라의 국내/외 입장을 수립하는 연구가 올해 진행되었다. 국내적으로는 최종적으로 2030 NDC 목표 달성을 위한 「탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가기본계획」에 DAC 기술 기반 감축기여분이 포함되지 않았지만, 향후 2035 NDC 또는 2040 NDC 목표 수립 시 DAC 기술 기반 감축 목표 기여 여부 및 기여분에 대해 논의가 다시 등장할 수 있다. 물론 우리나라 DAC

기술의 원천 R&D 연구가 2023년부터 진행중이고 동 연구의 일환으로 ‘DAC 기술 집반 실증 및 활용 활성화’를 위한 정책연구가 함께 진행되고 있다. 그러나, NDC 목표 설정에 DAC 기술 포함 여부에 특화하여 이에 대한 대응연구가 필요할 것으로 보인다. 그리고, 파리협정 제6.4조 메커니즘 하의 협상 차원에서 2023년 올해 우리나라는 국가제안서를 제출하고 여기에 DAC 기술 기반 제거 접근법의 포함에 대한 우리나라의 입장이 담겨 있다. 그런데, 동 사안에 대해서는 아직 협상이 진행중이다. 이에 대한 협상이 2024년에도 계속 진행될 것으로 예상되는 바, 협상 추이를 보면서 우리나라 협상 입장과 우리나라 대응 방안 역시 함께 모색되어야 할 것으로 보인다.

마지막으로, SMR의 연구와 관련하여, SMR 기술에 대해서 현재 우리나라는 R&D 이후 국내 기술실증 계획이 없다. 즉, 혁신형 SMR 모델에 대한 실증은 해외에서 이루어져야 한다는 것을 의미한다. 전세계 80여개의 모델이 R&D 단계 속에서 경쟁 각축을 벌이고 있는 바, 우리나라 혁신형 SMR이 해외에서 실증 및 활용되기 위해서는 그만큼 국제 경쟁력 가진 기술적 설계요소를 담보하고 있어야 하는 바, 이에 대해서 총괄적으로 분석하였다. 그런데, 이러한 ‘기술적’ 경쟁력 외에, 미국 등 선진국들은 자국의 SMR 기술의 해외진출을 위해 정부 및 기업이 다각도의 외교 및 협력적 노력을 기울이고 있다. 대표적으로, 미국의 경우, 우선 부처간 협력 프로그램을 시작하였다. 국무부(DOS, Department of State)는 2021년 FIRST(Foundational Infrastructure for Responsible Use of Small Modular Reactor Technology) 프로그램을 창설하였는데, 이는 미국 정부 다부처 이니셔티브로, 이는 다른 협력국가가 SMR 또는 다른 첨단 원자로를 안전하고 책임있게 건설하도록 돕기 위한 ‘역량배양 지원’을 협력국에 제공한다 (FIRST 2023a). 또한, FIRST 하의 하위 프로그램으로 NEXT(Nuclear Expediting the Energy Transition Support) 프로그램을 창설하였는데, 이는 특정 원자로를 도입하고자 하는 국가에 미국 정부가 지원하는 사업 준비 톨(재정, 규제, 기술 자문 서비스), SMR 타당성 및 부지 특성 조사, 기본설계(FEED, front-end engineering and design) 연구, SMR 시뮬레이션, 훈련 허브, 학술 파트너십을 제공한다 (FIRST 2023b). 2022년 2월, 미국은 가나와 ‘소형 모듈 원전의 책임 있는 사용을 위한 기초 인프라 정책 (Foundational Infrastructure for Responsible Use of Small Modular Reactor Technology, FIRST)’ 협약을 체결하고 가나가 SMR을 도입할 수 있도록 이해관계자 참여, 인허가 규제 마련, 자금 조달, 인적 자원 양성, 원자력 안전 교육, 기술 협력, 프로젝트 평가 및 기획 등을 지원하기로 하였다. 2022년 4월 4일, 미국과 라트비아는 FIRST 도입을 포함한 협력 공동선언문을 채택하였다. 미국은 자국 산학연 네트워크를 바탕으로 라트비아가 기후 변화에 대응할 수 있는 에너지 계획을 구성하는 데 협력할 예정이다. 즉, 미국은 자국의 SMR 모델이 해외에서 실증 및 도입될 수 있는 ‘가능여건’을 조성하고 있는 것이다. 미국 등의 이러한 선진국들의 외교 및 협력적 활동을 통해 자국 SMR 모델이 해외진출할 수 있는 가능여건을 조성하는 노력들에 대해서 차후 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

<1장>

과기정통부. (2023). 2023년 정부 연구개발 사업 부처 합동 설명회.

https://www.kistep.re.kr/mjbs/mjbsDownload.es?mjbs_seq=7&mjbs_detail_seq=71&file_seq=128.

Accessed on January 20, 2023.

IAEA. (2022). Advances in small modular reactor technology developments.

https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf. Accessed on April 27, 2023.

<2장>

Benioff, R., de Coninck, H., et al. (2010). Strengthening Clean Energy Technology Cooperation under the UNFCCC: Steps toward Implementation. National Renewable Energy Laboratory.

<http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/48596.pdf>. Accessed on November 17, 2023.

IPCC. (2000a). IPCC Special Report: Methodological and Technological Issues in Technology Transfer (Summary for Policymakers).

<https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srtp-en.pdf>. Accessed on November 17, 2023.

Khan, J., Haleem, A., and Husain, Z. (2017). Barriers to technology transfer: A total interpretative structural model approach. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 31(6), 511-536.

Painuly, J.P. (2001). Barriers to renewable energy penetration; a framework for analysis. *Renewable Energy*, 2001, 73-89.

Painuly, J.P., Fenhann, J.V. (2002). Implementation of Renewable Energy Technologies Opportunities and Barriers. UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment, Risø National Laboratory, Roskilde.

UNFCCC. (2001). Decision 4/CP.7 Development and transfer of technologies (decisions 4/CP.4 and 9/CP.5). <https://unfccc.int/decisions?f%5B0%5D=conference%3A3614>. Accessed on November 17, 2023.

UNFCCC. (2010). Report of the Conference of the Parties on its sixteenth session, held in Cancun from 29 November to 10 December 2010.

<https://unfccc.int/resource/docs/2010/cop16/eng/07a01.pdf>. Accessed on November 17, 2023.

<3장>

CE [Carbon Engineering] (2022). Our Technology.

<https://carbonengineering.com/our-technology/>

DOE [Department of Energy] (2023). Advanced Small Modular Reactors (SMRs).

<https://www.energy.gov/ne/advanced-small-modular-reactors-smrs>

IPCC (2017). The IPCC and the Sixth Assessment Cycle.

https://archive.ipcc.ch/pdf/ar6_material/AC6_brochure_en.pdf (2023.8.14. 검색)

IPCC (2021). IPCC Factsheet: What is the IPCC?

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/07/AR6_FS_What_is_IPCC.pdf (2023.8.14. 검색)

IPCC (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change.

<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/> (2023.8.14. 검색)

IPCC (2023). AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023.

<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> (2023.8.14. 검색)

관계부처합동 (2022). 탄소중립 녹색성장 기술 혁신 전략.

<https://www.korea.kr/common/download.do?fileId=197055126&tblKey=GMN> (2023.8.14. 검색)

과기정통부 (2021). 『탄소중립 기술혁신 추진전략』 수립(보도자료 2021.4.1. 조건).

과기정통부(2022). 12대 국가전략기술, 대한민국 기술주권 책임진다.

<https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=user&mId=113&mPid=112&pageIndex=&bbsSeqNo=94&nttSeqNo=3182291&searchOpt=ALL&searchTxt>

과기정통부 (2023). 한국형 탄소중립 기술개발 청사진 공개... 100대 핵심기술 확정.

<https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148915321> (2023.8.14. 검색)

기상청 (2020). 제52차 IPCC 총회의 열기 속으로! https://blog.naver.com/kma_131/221846304813 (2023.8.14. 검색)

기상청 (2023a). IPCC. <http://www.climate.go.kr/home/cooperation/lpcc.php> (2023.8.14. 검색)

기상청(2023b). 향후 10년의 기후 행동이 온난화 제한을 결정한다 - 기후변화에 관한 정부 간 협의체, 제6차 평가보고서 종합보고서 승인(기상청 보도자료 2023.3.20.).

기상청, 2050탄소중립녹색성장위원회, 국회기후변화포럼(2023). IPCC AR6 종합보고서 승인 기념 포럼(프로그램북).

기후업무규정 (2022). 기후업무규정(기상청훈령 제1046호, 2022.6.16., 일부개정).

<https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?chrClsCd=&admRulSeq=2100000212260> (2023.8.14. 검색)

- Budinis S, Krevor S, Mac Dowell N, Brandon N, Hawkes A. 2018. An assessment of CCS costs, barriers and potential. *Energy Strategy Reviews* 22: 61-81.
<https://doi.org/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 and Climate Change* 3: 100074.
<https://doi.org/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>
- Carbon W, Lund JF, Dooley K. 2021. Undoing equivalence: Rethinking carbon accounting for just carbon removal. *Frontiers in Climate* 3: 664130.
<https://doi.org/10.3389/fclim.2021.664130>
- CE [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 & Environmental Science* 15: 4389. <https://doi.org/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> (in Korean)
- Cox E, Edwards NR. 2019. Beyond carbon pricing: policy levers for negative emissions technologies. *Climate Policy* 19: 1144-1156. <https://doi.org/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 Science & Technology* 2: 100025. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2021.100025>
- GCI [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. *Climate Change* 59: 293-310. https://sequestration.mit.edu/pdf/climatic_change.pdf
- 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. *Frontiers in Climate* 4: 884163. <https://doi.org/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 Reports* 9: 414-436. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.200>
- Interagency. 2021. CCU Technology Innovation Roadmap; [accessed 2023 Jul 4]. <https://www.korea.kr/common/download.do?fileId=195009538&tblKey=GMN> (in Korean)
- 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> (in Korean)
- Interagency. 2023. National Strategy for Carbon Neutral and Green Growth and the First National Basic Plan (탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획 요약); [accessed 2023 Jul 4]. <https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=2&boardNo=1462&menuLevel=2&menuNo=16>
- IPCC. 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. 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. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.

- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Kanagawa, Japan: IGES.
- IPCC. 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Kanagawa, Japan: IGES.
- IPCC. 2022. Climate change 2022: Mitigation of climate change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.
- IPCC. 2023. Summary for Policymakers. In: 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, Switzerland: IPCC. (in press).
- Jung S, Lee S, Park P, Lee M, Jang J. 2021. Economic evaluation of carbon mineralization technology from the LCA perspective. *Journal of Energy Engineering* 30(1): 38-50. <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2021.30.1.038> (in Korean with English abstract)
- KLIC (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&query=교토%20의정서#licTrty2149> (in Korean)
- 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 (in Korean)
- Kim MS. 2021. Development of Innovative Small Modular Reactor Concept and Study for Priority. Proceedings of 2021 Korean Energy Society Spring Conference; 2021 Apr 29~Apr 30; EXCO, Daego, Korea.
- 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. *Journal of Climate Change Research* 9(4): 453-460. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2018.9.4.453>
- KP [Kyoto Protocol]. 1997. Kyoto Protocol; [accessed 2023 Jul 4]. <https://unfccc.int/documents/2409>

- Kwon YK, Shinn YJ. 2018. Suggestion for technology development and commercialization strategy of CO₂ capture and storage in Korea. *Economic and Environmental Geology* 51(4): 381-392. <https://doi.org/10.9719/EEG.2018.51.4.381> (in Korean with English abstract)
- Larrea C, Warnars L. 2009. Ecuador's Yasuni-ITT Initiative: avoiding emissions by keeping petroleum underground. *Energy for Sustainable Development*, 13(3), 219-223. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2009.08.003>
- Lee J, Lee BJ. 2022. Survey on research and development of e-fuel. *Journal of Korean Society of Combustion* 27(1): 37-57. <https://doi.org/10.15231/jksc.2022.27.1.037> (in Korean with English abstract)
- Mac Dowell N, Fennell PS, Shah N, Maitland GC. 2017. The role of CO₂ capture and utilization in mitigating climate change. *Nature Climate Change* 7: 243-249. <https://doi.org/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, US: Carnegie Climate Governance Initiative (C2G).
- 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. *Frontiers in Climate* 1: 1-5. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00004>
- Moon JY, Jung J, Song J, Lee S. 2016. Utilization of International Carbon Market under the Paris Agreement. KIEP Research Paper, Policy Analyses 16-14. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2946735> (in Korean with English abstract)
- MOTIE [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> (in Korean)
- MSIT [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> (in Korean)
- 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 (in Korean)

- 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 and 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. *Journal of Climate Change Research* 13(6): 755-780.
<https://doi.org/10.15531/KSCCR.2022.13.6.755> (in Korean with English abstract)
- 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. *Journal of Climate Change Research* 11(5-2): 563-581.
<https://doi.org/10.15531/kscrcr.2020.11.5.563> (in Korean with English abstract)
- 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 Technologies* 4(4): 1193-1207. <https://doi.org/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*MTY4NzkzMzcxNy45LjEuMTY4NzkzNDk4Ny4wLjAuMA
- 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. United States. <https://www.osti.gov/biblio/1187926>
- Scott V, Haszeldine RS, Tett SFB, Oschlies A. 2015. Fossil fuels in a trillion tonne world. *Nature Climate Change* 5: 419-423. <https://doi.org/10.1038/nclimate2578>
- Shinn YJ, Kang MH, Kim GY, Kim SY, Kim JC, ..., Hwang GD. 2019. Evaluation of Large-scale CO2 Geological Storage Potential (GP2017-027-2019). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.

- 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. *Journal of Climate Change Research* 13(1): 75–96. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2022.13.1.075> (in Korean with English abstract)
- Song Y, Oh C. 2022b. Demonstration and dissemination of direct air capture (Technology suggestion insight 2022-02). Carbon Neutrality and Green Growth Commission. http://www.ideanetzero.org/?module=Board&action=SiteBoard&sMode=VIEW_FORM&iBrdNo=4&iBrdContNo=22&sBrdContRe=0&sSearchField=&sSearchValue=&CurrentPage=1 (in Korean)
- Sovacool BK, Baum CM, Low S. 2023. Reviewing the sociotechnical dynamics of carbon removal. *Joule* 7(1): 57–82. <https://doi.org/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 & Environmental Science*, 14: 1701–1721. <https://doi.org/10.1039/D0EE03757E>
- 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>. Accessed on January 26, 2023.

- 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/>
- UNFCCC. 2003. Calls for submissions, elections and statements for consideration at upcoming sessions (1). <https://www4.unfccc.int/sites/submissionsstaging/Pages/Home.aspx>.
- Waller L, Rayner T, Chilvers J, Gough CA, Lorenzoni I, Jordan A et al. 2020. Contested framings of greenhouse gas removal and its feasibility: Social and political dimensions. *WIREs Climate Change* 11(4): e649. <https://doi.org/10.1002/wcc.649>
- Yeo J, Kim T, 2022. Technology Trends: CCU (carbon dioxide utilization) (KISTEP Brief 26). Korea Institute of Science and Technology Evaluation and Planning.
https://www.kistep.re.kr/board.es?mid=a10306010000&bid=0031&act=view&list_no=42847 (in Korean)
- Zoback MD, Gorelick SM. 2012. Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109(26): 10164-10168. <https://doi.org/10.1073/pnas.1202473109>

<5장>

- Auh GS. (2022). 다시 생각하는 원자력: 원자력의 올바른 이해를 위하여. p.202-205.
https://books.google.co.kr/books?id=5WmcEAAAQBAJ&dq=%EC%9B%90%EC%9E%90%EB%A0%A5+%EC%88%98%EC%9A%94+%ED%83%84%EC%86%8C%EC%A4%91%EB%A6%BD+%EC%9A%B0%EC%A3%BC+%ED%95%B4%EC%96%91+%EC%88%98%EC%86%8C&hl=ko&source=gbs_navlinks_s
- Choi, GS. (2023). I-SMR technological status and development direction.
<https://company.etoday.co.kr/business/view/2887>. Accessed on April 27, 2023.
- Chun JH, Lee TH, Kang HO, and Kim JW. (2022). Lead-off of the SMRMarket, Light Water SMR. Physics and Advanced Technology. https://webzine.kps.or.kr/?p=5_view&idx=16717
- DN (Danbi News). (2022). Pyroprocessing, abandoned by many countries, but Korea invests a large amount. <http://www.danbinews.com/news/articleView.html?idxno=21380>. Accessed on February 5, 2023.
- EN (Electricity News). (2022). Pyroprocessing in veil.
<https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=309351>. Accessed on February 5, 2023.
- ETF (Energy Transformation Forum). (2021). Review of SMR (Small Small Modular Reactor). https://energytransitionkorea.org/sites/default/files/2021-07/210715_%EB%B3%B4%EB%8F%84%EC%9E%90%EB%A3%8C_SMR%EB%B0%94%EB%A1%9C%EC%9E%A1%EA%B8%B0_%EC%B5%9C%EC%A2%85_0.pdf. Accessed on March 1, 2023.
- EU (European Union). (2022). Regulations.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022R1214&from=EN>. Accessed on March 2, 2023.
- FKI (The Federation of Korean Industries). (2021). SMR: Status of major countries and Korea's challenge. Global Insight. Vol.48. 2021.06.24.
http://www.fki.or.kr/images/kakao/insight_48/insight_48.pdf
- Heo S. 2021. Current status of the development and the deployment for the Innovative SMR. Nuclear Safety & Security Information Conference 2021.
<https://nsic.nssc.go.kr/down.do?atchmfnlSn=46186&departmentCode=I2&ordrSeq=227>
- Hidayatullah, H., Susyadi, S., and Subki, M.H. (2015). Design and technology development for small modular reactors - safety expectations, prospects and impediments of their deployment. Progress in Nuclear, 79, 127-135.

- IAEA. (2006). Status of Innovative Small and Medium Sized Reactor Designs 2005. Reactors with Conventional Refuelling Schemes. IAEA-TECDOC-1485.
- IAEA. (2007). Nuclear technology review 2007.
- IAEA. (2009). Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants. IAEA-TECDOC-1624.
- IAEA (2021a). Nuclear Power Reactors in the World.
- IAEA (2021b). What are Small Modular Reactors (SMRs)?. 2022.11.4.
<https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>
- IAEA. 2022a. IEA Press Release. 2020.06.30.
- IAEA. (2022). Advances in small modular reactor technology developments.
https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf. Accessed on April 27, 2023.
- IEA. (2020). Projected Costs of Generating Electricity 2020 Edition
- Je SY., Chang YS., Oh CS., and Choi YH. (2018). Analysis of classification standards of nuclear facilities. 2022.05.24. 한국압력기기공학회 논문집
- Jo, JH., Jeong, JY., Han, JH., and Kim, YJ. (2022). Update on world nuclear power policies. World Nuclear Power Market INSIGHT. 2022.11.04. Korea Energy Economics Institute
<http://www.keei.re.kr/keei/download/nprd/WNPMI221104.pdf>
- Joo HK & Eoh JH. (2022). Sodium-cooled Small Modular Reactors. Physics & High Technology, 31(6), 7-11.
- KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute). (2020). 한국형 소형원전 SMART 개발 및 수출시장 진출을 위한 노력. Brief Report 2020-06.
- KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute). (2007). A study on the Nuclear Policy: Economic Analysis of Nuclear Energy (원자력 경제성 분석 연구). 2007.12.
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/067/41067693.pdf
- Kang, HN. (2022). Key points and implications of Innovative SMR development plan. World Nuclear Power Market INSIGHT. 2022.07.08. Korea Energy Economics Institute.
[https://www.keei.re.kr/web_keei/d_results.nsf/0/89FA06B6FAA61BBC4925887A000609FC/\\$file/WNP MI220708.PDF](https://www.keei.re.kr/web_keei/d_results.nsf/0/89FA06B6FAA61BBC4925887A000609FC/$file/WNP MI220708.PDF)
- KANS (Korea Academy of Nuclear Safety). (2016). A Study on future policy recommendations on small and medium sized reactors. (2016.09.30.)

- KEA (Korea Electric Association). (2021). [Monthly Electrical Journal - Special Issue] 혁신형 SMR 개발 현황 및 목표. 2021.06.
- KEEI. (2022). World Nuclear Power Market INSIGHT. 2022.12.16. Korea Energy Economics Institute [https://www.keei.re.kr/web_keei/d_results.nsf/0/66C2C7AE2D60CB974925891B001CF655/\\$file/WNPMI221216.PDF](https://www.keei.re.kr/web_keei/d_results.nsf/0/66C2C7AE2D60CB974925891B001CF655/$file/WNPMI221216.PDF)
- KEEI (2021). World Nuclear Power Market INSIGHT. 2021.04.16. Korea Energy Economics Institute. <http://www.keei.re.kr/keei/download/nprd/WNPMI210430.pdf>
- KEPCO (Korea Electric Power Corporation) (2023). Long-term Plan (2022-2036) for Electricity Transmission and Transformation based on the 10th Basic Plan for Long-term Electricity. https://home.kepco.co.kr/kepco/PR/ntcob/ntcobView.do?pageIndex=1&boardCd=BRD_000117&boardSeq=21061873&menuCd=FN06030103
- KEPCO E&C. (2022). SMART technology. <https://www.kepco-enc.com/portal/contents.do?key=1245>
- KEPCO E&C. (2022). APR 1400. <https://www.kepco-enc.com/portal/contents.do?key=1240>.
- KHNP. (2023.01.03.) <https://npp.khnp.co.kr/index.khnp>
- Kim AR, Park MD (2019). LCOE calculations, trends and implication. Energy Focus, 16(4). http://www.keei.re.kr/keei/download/focus/ef1912/ef1912_31.pdf (in Korean)
- Kim, SH. (2021). SMR technology development and project development status. World Nuclear Power Market INSIGHT. 2021.10.22. Korea Energy Economics Institute. <http://www.keei.re.kr/keei/download/nprd/WNPMI211022.pdf>
- Kim Y. 2022. Technology development trends and strategy for small modular reactors. Nuclear Safety & Security Information Conference 2022. <https://nsic.nssc.go.kr/down.do?atchmnfISn=48529&departmentCode=S7&ordrSeq=254>
- Kim TK, Boing, L., Halsey, W., Dixon, B. 2022. Nuclear Waste Attributes of SMRs Scheduled for Near-Term Deployment, Nov. 18, 2022, ANL/NSE-22/98.
- KIST (Korea Institute of Science and Technology). (2019). Research Planning on the innovative SMART development to improve the export competitiveness). (2019.09.27.)
- KISTEP (Korea Institute of S&T Evaluation and Planning) (2022). 2021 Preliminary feasibility study report on innovative small module reactor (i-SMR) technology development project. (2022.07.28.) https://www.kistep.re.kr/reportDetail.es?mid=a10305070000&rpt_tp=831-003&rpt_no=RES0220220131

- MoEF (Ministry of Economy and Finance). (2022). New Growth 4.0 Strategy Promotion Plan (2022.12.21.).
https://www.moef.go.kr/nw/nes/detailNesDtaView.do?searchBbsId=MOSFBBS_000000000028&menuNo=4010100&searchNttId=MOSF_000000000062296
- Moon HR, Park SH. 2022a. A sensitivity analysis of core damage frequency for innovative small modular reactor. 2022 KOES Autumn Conference. <https://kosee.or.kr/19/11530774>
- Moon HR, Park SH. 2022b. A study on emergency planning zone for inovative small modular reactor. 2022 KOES Autumn Conference. <https://kosee.or.kr/19/11530774>
- MoTIE (Ministry of Trade, Industry and Energy). (2023). Selectio of the head of innovative SMR technology development project (2023.1.10.).
<https://blog.naver.com/mocienews/222980136997>
- MSIT (Ministry of Science and ICT). 2022. Announcement of national strategic technology development plan.
<https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=user&mId=113&mPid=112&pageIndex=&bbsSeqNo=94&nttSeqNo=3182291&searchOpt=ALL&searchTxt=>
- MSIT. (2023). Korea's 100 Core Technologies for Carbon Neutralization Confirmed Presenting a blueprint for full-scale carbon-neutral technology development.
<https://eiec.kdi.re.kr/policy/materialView.do?num=238761&pg=&pp=20&topic=P>
- NuScale. 2021. NuScale SMR technology: An ideal solution for repurposing U.S. coal plant infrastructure and revitalizing communities; [accessed on August 22, 2023].
<https://www.nuscalepower.com/-/media/nuscale/pdf/publications/nuscale-smr-technology-an-ideal-solution-for-coal-plant-replacement.pdf>
- NuScale. (2022). Small modular Reactor Fact Sheets. Accessed on March 11, 2023.
<https://www.nuscalepower.com/-/media/nuscale/pdf/fact-sheets/smr-fact-sheet.pdf>
- OECD. 2006. Physics and Safety of Transmutation Systems: A Status Report. 6090.
https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_14098
- OECD. 2023. The NEA small modular reactor dashboard.
https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_78743/the-nea-small-modular-reactor-dashboard?details=true
- OECD IAEA-NEA. (2015). Projected Costs of Generating Electricity.
https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_14756/projected-costs-of-generating-electricity-2015-edition?details=true

- Park, GY. (2022). Is the fourth generation reactor (GenIV) a future technology? *Technology & Innovation, Special Issue*, 2.
- Parmentola J, Rawls J. 2012. Energy Multiplier Module (EM2) - Capping the waste problem and using the energy in U-238. *Fusion Science and Technology*, 61, 9-14.
<https://doi.org/10.13182/FST12-A13389>
- Prasad, S., Abdulla, A., Morgan, M.G., and Azevedo, I.L. (2015). Nonproliferation improvements and challenges presented by small modular reactors. *Progress in Nuclear Energy*, 80 (2015), 102-109.
- Ramana, M.V. and Mian, Z. (2014). One size doesn't fit all: Social priorities and technical conflicts for small modular reactors. *Energy Research & Social Science*, 2014, 115-124.
- Schlissel D, Wamsted D. 2022. NuScale's Small Modular Reactor - Risks of Rising Costs, Likely Delays, and Increasing Competition Cast Doubt on Long-Running Development Effort. Institute for Energy Economics and Financial Analysis.
https://ieefa.org/wp-content/uploads/2022/02/NuScales-Small-Modular-Reactor_February-2022.pdf
- SNEPC. (2022). Molten salt reactor.
<https://atomic.snu.ac.kr/index.php/%EC%9A%A9%EC%9C%B5%EC%97%BC%EC%9B%90%EC%9E%90%EB%A1%9C>. Accessed on February 5, 2023.
- S&T GPS. (2018). Management of spent nuclear fuel and its waste.
<https://now.k2base.re.kr/portal/trend/ovseaTrend/view.do?poliTrndId=TRND0000000000033315&menuNo=200043&pageUnit=10&pageIndex=612>
- UOI (University of Idaho). (2019). Economic Impacts of SMRs: Construction and Operation of a Small Modular Reactor Electric Power Generation Facility at the Idaho National Laboratory Site, Butte County, Idaho. Accessed on March 11, 2023.
<https://www.uidaho.edu/president/direct-reports/mcclure-center/publications/research-reports/smr>
<https://www.nuscalepower.com/-/media/nuscale/pdf/publications/economicimpactreportconstructionandoperationofasmallmodularreactorelectricpowergenerationfacilityatt.pdf>
- Vujić, J., Bergmann, R.M., Skoda, R., and Miletić, M. (2012). Small modular reactors: Simpler, safer, cheaper? *Energy*, 45 (1), 288-295.
- Wigeland, R., Taiwo, T., Ludewig, H., Todosow, M., Halsey, W., Gehin, J., Jubin, R., Buelt, J., Stockinger, S., Jenni, K., Oakley, B. (2014). Nuclear fuel cycle evaluation and screening-Final report: Appendix C (Evaluation criteria and metrics). Idaho National Laboratory.
<https://fuelcycleevaluation.inl.gov/Shared%20Documents/ES%20Appendix%20C.pdf>

Wikipedia. 2023. Spent nuclear fuel; [Accessed 2023 November 1]

<https://ko.wikipedia.org/wiki/%EC%82%AC%EC%9A%A9%ED%9B%84%ED%95%B5%EC%97%B0%EB%A3%8C>

Wu, J., Ma, Y., Yu, C., Zou, C., Cai, X., and Chen J. (2020). Nuclear non-proliferation review and improving proliferation resistance assessment in the future. *International Journal of Energy Research*, 45 (8), 11347-12473.

Wüstenhagen, R., Wolsink, M., and Bürer, M.J. (2007). Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy Policy*, 35, 2683-2691.

Yun J. 2022. Small modular reactor, the next-generation nuclear power plant. *Weekly KDB Report* (25 July 2022).

<https://rd.kdb.co.kr/fileView?groupId=985CADB2-02C1-0293-FEE2-7CE633A040D6&fileId=B1495D5C-A78D-6715-E177-DA40E80FFE01>

<6장>

FIRST. (2023a). Foundational Infrastructure for Responsible Use of Small Modular Reactor Technology. <https://www.smr-first-program.net/>. Accessed on July 4, 2023.

FIRST. (2023b). FIRST/NEXT/WECAN. <https://www.smr-first-program.net/partners/>. Accessed on July 4, 2023.

아세안 중점협력국 대상 녹색기술협력체계
구축을 통한 RD&D 협력 아젠다 발굴
[모듈 2: 탄소중립 신규 녹색기술 RD&D
적용 가능여건 연구]

인 쇄 | 2023년 12월

발 행 | 2023년 12월

발행인 | 이상협

발행처 | 국가녹색기술연구소

인쇄처 | 주식회사 동진문화사

※ 동 보고서의 내용에 문의 사항이 있는 경우 아래로 연락주시기 바랍니다.

국가녹색기술연구소(NIGT) 글로벌전략센터

- 주소 서울특별시 영등포구 여의나루로 60,
여의도포스트타워 14층(우 07328)
- 전화 02-3393-3900
- 이메일 nigt@nigt.re.kr

