

국가연구개발 과제정보를 활용한 탄소 포집 및 활용·저장기술에 관한 연구현황 및 키워드 분석연구

이정현

한국과학기술정보연구원 국가과학기술데이터본부 NTIS센터 연구원

Study on research trend and keyword of CCUS (Carbon Capture, Utilization & Storage) technology through national R&D projects

Lee, Jeonghyun

Researcher, Div. of National S&T Data, Korea Institute of Science and Technology Information, Daejeon, Korea

ABSTRACT

Climate change warns us of the climate crisis. Various research and technology developments related to CCUS are underway, and large-scale CCUS(carbon capture, utilization & storage) projects are being conducted with major countries such as the United States, Europe, and China. In the current status of CCUS projects carried out by major countries, but there are no large-scale projects related to CCUS in Korea, and a variety of individual studies on CCUS are being conducted, but there is still a lack of research on technology trends across the country. Therefore, in this study, by analyzing the status of CCUS-related national R&D(Research and Development) projects conducted over the past decade, we identified the proportion of research funds and technology trends through a number of information registered in individual research projects. In addition, domestic technological innovation cases, carbon neutrality policies and related laws, and social acceptance efforts were also reviewed. This study aims to support the effective achievement of national R&D goals by presenting the need for research funding management at each research stage and stakeholder cooperation. In the future, we expected it will be used as research materials for commercialization and pilot projects of CCUS technologies and strengthening the national governance model related to CCUS technology in Korea.

Key words : CCUS Technology Innovation, CCUS International Cooperation, CCUS Social Acceptance, Climate Change

1. 서론

2015년 파리협정을 채택한 유엔기후변화협약 (UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change)에서는 기후변화에 관한 정부 간 협의체 (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)의 2018년 특별보고서에 지구적 온도상승을 산업화 이전 수준 대비 1.5℃를 넘지 않도록 하는 목표를 담았고, 전 지구적으로 이산화탄소 순 배출량 제로(Net zero emission)

를 2050년까지 달성하는 것을 강조하고 있다.

한편 현재의 기후변화(Climate change)는 기후위기 (Climate crisis)를 넘어 기후재앙(Climate disaster)의 수준으로 우리에게 경고하며 지구온난화(Global Warming) 시대는 끝났고 지구가 끓는 시대(Era of global boiling)가 도래했다고 UN사무총장은 2023년 7월 선언한 바 있다(The Guardian, 2023).

이산화탄소 순 배출량 제로라는 목표의 가시적인 실적이 되기 위해서는 CCUS 분야의 대규모 프로젝트 시설이

†Corresponding author : tosca20d@gmail.com (KISTI, 245 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34141, Korea. Tel. +82-42-869-0651) ORCID [이정현 0009-0002-2021-6266](https://orcid.org/0009-0002-2021-6266)

실증을 거쳐 적재적소에 구축 및 운영되어야 한다. 그러나 국내에서는 관련 대규모 프로젝트 사업이 계획단계로 머물러 있거나 부재한 현실이고, CCUS 관련 개별 연구는 다양하게 수행되는 반면에 국내 전반에 걸친 기술 흐름에 관한 연구는 제한적이다.

기후변화 대응을 위한 국가 현안 해결이나 CCUS와 같은 과학기술 도약을 위한 국가적인 목표 달성을 위해서는 국가R&D 사업 및 과제계획 수립과 이를 위한 정책과 자원이 투입되므로 국가R&D 정보를 기반으로 한 연구과제 현황과 연구개발에 대한 방향성을 점검해 볼 필요성이 있다.

본 논문의 2장에서는 연구배경을 다루고, 3장에서는 선도국가들이 추진하고 있는 CCUS 관련 대규모 프로젝트 현황과 국제에너지기구(IEA)에서 분류한 기술 및 기술준비수준(TRL) 정보를 확인하였다. 또한 탄소중립을 위한 국내 기술혁신 사례와 관련 추진전략 및 관련법 그리고 사회적 수용을 위한 연구 사례를 확인하였으며 국가R&D 과제상세정보를 제공하는 NTIS서비스의 역할과 성과를 소개하였다. 4장은 NTIS서비스에서 제공되는 국가R&D 과제정보와 개별 연구과제에 입력된 키워드 정보를 통해 CCUS 분야의 최근 10년간 국가R&D 연구현황과 기술 트렌드를 분석하였다. 이를 통해 국내 CCUS 분야 연구과제의 연구 단계별 연구비 배분과 확충을 위한 방향성을 제시하며 국가R&D 연구과제 목표의 효과적인 달성을 지원하고자 한다.

본 연구는 향후 국내 CCUS 주력 기술의 상용화와 대규모 프로젝트의 시범운영 및 CCUS 기술 관련 국가 전반의 거버넌스 모델 강화를 위한 기초연구로 활용될 것으로 기대한다.

2. 연구 배경

최근 CCUS 분야의 대규모 프로젝트는 선도국가를 중심으로 추진되고 있고, 다국적 협력을 통해 프로젝트 계획이 수립되는 추세이다.

IEA에서 정의된 CCUS 유형별 세부기술 및 개별 기술의 기술준비수준(TRL: Technology Readiness Level)과 국내 CCUS 분야의 국가R&D 현황을 보면, 국제적 기후변화 대응을 위해 국제적으로 추진되는 추세 대비 국내 국가R&D가 어떤 포지션에 있는지 알 수 있다.

CCUS(이산화탄소 포집 및 활용-저장) 기술은 대기중 온실가스 또는 산업시설에서 발생하는 CO₂를 저감 시킬 수 있는 핵심기술이고, 기후 목표는 기술혁신과 적극적인

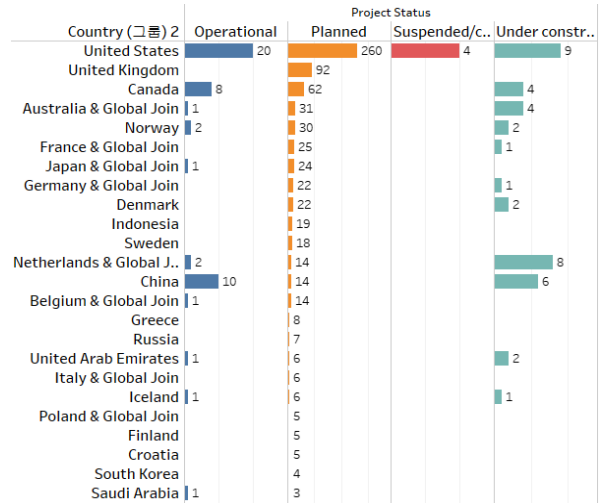


Fig. 1. Projects status for CCUS in the world (IEA, 2024)

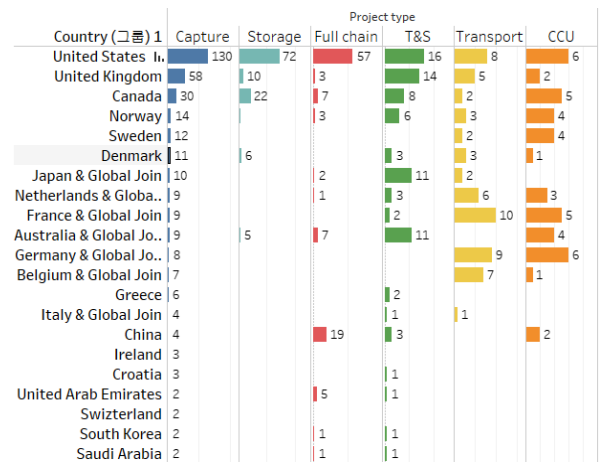


Fig. 2. Project type for CCUS in the world (IEA, 2024)

투자, 그리고 국내·외 협력을 통해 달성될 수 있다.

Fig. 1은 주요 산업 및 제조 부문에서 주요 국가별로 CCUS 프로젝트를 실증에 투자하고 국제적인 협력 현황을 프로젝트 단계별로 보여준다. 미국, 중국, 캐나다 등에서는 EOR (원유회수증진, Enhanced Oil Recovery) 기술과 바이오연료, DAC (직접대기포집, Direct Air Capture) 등과 관련된 실증 및 운영 단계의 프로젝트를 주도하고 있다. 또한 호주, 프랑스, 독일 등에서 국제협력 형태의 프로젝트 계획이 다수 수립되었고, 네덜란드 등에서도 건설 및 구축 단계의 프로젝트가 확인된다.

Fig. 2에서는 CCUS 프로젝트의 유형별 현황을 보여준

다. 미국과 영국, 캐나다 등에서 Capture (CO₂ 포집 전용) 유형의 프로젝트를 주도하고 있고, Storage(EOR을 포함한 CO₂ 저장 전용)와 T&S (CO₂ 수송 및 저장을 포함), CCU(요소생산을 제외하고 CO₂에 대한 출처가 명확히 식별된 프로젝트) 유형들은 일본, 네덜란드, 프랑스, 호주, 독일 등에서 국제협력 형태의 프로젝트가 다수 확인되었다. Full chain (포집부터 저장시설까지 하나의 프로젝트에 포함)의 경우, 미국에 이어 중국에서 프로젝트가 추진 중인 것으로 나타났다. 이 중 가장 주목할 만한 프로젝트 구축 사례는 노르웨이의 Full-Scale 프로젝트로 실물 크기의 탄소 포집 발전소를 예로 들 수 있다.

해당 프로젝트는 첨단 포집기술을 사용하여 CCUS 기술의 실현 가능성을 지속적으로 향상시키고 있고, 향후 유사한 프로젝트에 대해 경험과 참고자료를 공유할 수 있다(Liu et al., 2024). 일본의 경우 500톤 이상의 CO₂를 회수하는 실증사업을 진행하고 있고, 이는 일본 최대 규모의 화력발전소에 적용 가능한 규모이다. 또한 폐기물 처리시설에서 회수한 이산화탄소를 활용해 메탄을 합성하는 기술에 대한 실증사업을 진행하고 있다(Kim, 2022).

글로벌 CCUS 프로젝트에서 국내 현황은 아직 부진한 실적을 나타내고 있다. 국내의 경우 계획단계에 있는 4건의 프로젝트가 식별되었고 이는 Capture와 Full chain, T&S 유형으로 확인된다. 그리고 운영단계의 대규모 프로젝트가 부재한데, 이러한 부분은 국내 CCUS 실증사업 및 관련 시설 구축을 위한 영향력 있는 국가R&D 사업·과제의 확대와 연구비 확충, 그리고 국제협력 등을 통해 해결되어야 할 과제이다.

3. 기존 연구

3.1. 글로벌 CCUS 기술 현황

온실가스 감축 목표 달성을 위해 다양한 CCUS 기술이 존재한다. IEA ETP Clean Energy Technology Guide (IEA, 2023)에서는 Net-zero 달성에 기여하는 550여개 기술정보가 현행화된다. 해당 정보는 CCUS 기술 분류와 TRL 정보, 선도기술을 보유한 주요 국가 그리고 연계기술에 대한 정보를 확인할 수 있다. 해당 기술정보 중 CO₂ 관리부문(CO₂ management)과 연계기술(Cross-cutting theme) 내 CCUS 분야를 선별하여 Table 1과 같이 CCUS 기술목록을 구성하고 상세정보를 분석하였다.

포집 부문에서는 화학적 흡수를 통한 기술과 광물자원

Table 1. CCUS technologies classified by IEA

Class	Name	TRL
Capture	Boilers with CCUS	5
	Calcium looping	7
	CCUS (smelting)	7
	CCUS using post-combustion capture (process heater)	3-4
	Chemical absorption (ammonia)	11
	Chemical absorption (DRI)	9
	Chemical absorption (full capture rates)	7
	Chemical absorption (high value chemicals)	7
	Chemical absorption (methanol)	9
	Chemical absorption, partial capture rates (less than 20%)	8
	Chemical looping combustion (coal)	4-5
	CO ₂ sequestration in inert carbonate materials (mineralisation)	9
	Cryogenic capture	6
	Cryogenic capture (ammonia)	7
	Direct separation	6-7
	Liquid DAC (L-DAC)	6
	Membrane separation	4
	Novel physical adsorption (silica or organic-based)	6
	Oxy-fuelling	6
	Oxy-fuelling (coal)	7
	Oxy-fuelling carbon capture (cracking)	5
	Physical absorption (ammonia)	9
	Physical absorption (high value chemicals)	7
	Physical absorption (methanol)	7
	Physical adsorption (ammonia)	5
	Physical adsorption (DRI)	5
	Physical adsorption (methanol)	8
	Post-combustion carbon capture (cracking)	3-4
	Post-combustion: chemical absorption (biomass with CCUS)	6-7
	Post-combustion: chemical absorption (coal with CCUS)	8-9
	Post-combustion: chemical absorption (natural gas with CCUS)	8
	Post-combustion: membranes polymeric (coal with CCUS)	6
Pre-combustion: physical absorption (biomass with CCUS)	3	
Pre-combustion: physical absorption (coal with CCUS)	7	

Table 1. CCUS technologies classified by IEA
(Continued)

Class	Name	TRL
Capture	Primary smelting with CCUS	3
	Solid DAC (S-DAC)	7
	Supercritical CO ₂ cycle (coal with CCUS)	5-6
	Supercritical CO ₂ cycle (natural gas with CCUS)	5-6
Storage	Advanced monitoring technologies	7-8
	CO ₂ -Enhanced oil recovery	11
	Depleted oil and gas reservoir	7-8
	Dissolved CO ₂ injections	5
	Saline formation	9
	Supercritical CO ₂ injections	3
Utilization	Biological CO ₂ methanation	7
	Chemical absorption - Process gas hydrogen enrichment and CO ₂ removal for use or storage (blast furnace)	5
	CO ₂ and H ₂ O co-electrolysis	6
	CO ₂ reduction	6
	Concentrating solar fuels	4
	Conversion of steel offgases to chemicals (blast furnace)	7
	Conversion of steel offgases to fuel (blast furnace)	8
	Direct CO ₂ to dimethyl ether	3
	Electrolyser-based process for decarbonating calcium carbonate prior to clinker production in the kiln	3
Transport	Pipeline	10
	Shipping	6-7

Source: Arranged by author based on IEA (IEA, 2023)

에 CO₂를 반응시켜 격리하는 기술 등이 TRL이 높고, 저장 부문에서는 원유회수증진(EOR: Enhanced Oil Recovery) 기술과 심해 염분층 저장기술 등이 진보되어 왔으며, 활용 부문에서는 제철산업 생산공정에서 발생하는 배가스를 합성가스로 재활용하는 기술 등이 상용화를 앞둔 것으로 나타났다.

3.2. 국내 CCUS 기술 현황

CCUS는 통상 탄소저장(CCS: Carbon Capture and Storage 또는 Carbon Capture and Sequestration) 기술과 탄소포집 및 활용(CCU: Carbon Capture & Utilization) 기

술로 세분하여 포집·저장·활용기술을 정의하고 있다. 이중 CCS는 탄소 포집 및 저장 측면에서 화석연료를 연소시킬 때 발생하는 이산화탄소를 물리·화학적인 방법을 통해 분리·압축·수송하여 검증된 지중·해양 저장소에 저장하는 기술이고, CCU는 화력발전소, 시멘트 및 석유화학공장 등과 같은 대규모 배출원에서 발생하는 CO₂를 산업적인 용도로 직접 이용하거나 고부가가치 제품 또는 다른 유용한 물질로 전환하여 활용(Utilization)하는 기술로 정의된다(Shim, 2016).

탄소중립 달성을 위한 국내의 시나리오 분석 및 정책에 관한 연구(Park et al., 2023)에서는 탄소저감 목표달성을 위한 핵심기술 현황을 분석하면서 신재생에너지의 획기적 보급 및 확대가 어려운 상황과 화석연료 기반의 전통적인 에너지 전환 공정들이 여전히 필요한 국내 상황을 언급하면서 적극적인 CCUS 활용을 통해 선제적 이산화탄소 저감대책 수립의 중요성과 CCUS 기술의 성숙화, 첨단기술 개발, 정책 수립 및 이행을 주장하였다.

CCUS 기술 분야의 핵심적인 동력원은 기술혁신이다. 최근 기술혁신 사례 중 국내 최초의 CCS 실증사업으로 추진되고 있는 동해-1 가스전 대상 이산화탄소 주입 시물레이션에 관한 연구(Kim et al., 2023)는 국내 E&P (Exploration and Production) 분야 연구 중 가장 많은 실측자료를 활용하여 실증사업에 필요한 전체 시스템의 유체 및 유동 분석을 수행하였고, 이를 통해 현지 시설물 설계 및 구축과 향후 실증사업에서도 지속적으로 사용될 예정이라는 점에서 의미가 큰 연구 성과로 볼 수 있다. 또한 CCS의 세부 기술 중 하나인 석유회수증진(EOR) 기술에 관한 동향 연구(Park and Jang, 2023) 석유회수증진 기술의 효과와 미국과 캐나다, 중국에 구축된 EOR 프로젝트 현장에 대한 현황을 분석하면서 향후 시물레이션 연구를 통한 주입 압력 설계 및 누출에 관한 모니터링과 지표면 용기에 대응할 수 있는 방안을 위한 심층연구의 필요성을 주장하였다.

차세대 포집 기술로 조망되고 있는 직접 공기 포집 기술(DAC, 직접 대기 포집: Direct air Capture 또는 DACS : direct air capture with storage, DACCS: direct air carbon capture with storage)에 관한 연구(Song and Oh, 2022)에서는 경우 이산화탄소 배출원이 아닌 대기중의 이산화탄소를 포집하는 기술로써 전통적인 포집 기술보다 진보된 방식이다. 이는 이산화탄소를 분리 및 흡착할 수 있는 효과적인 기술로 평가되며 경제성과 환경성 측면에서 실증적인 연구결과가 검토되고 있다. 국내에서 DAC

기술을 직접적으로 다루는 R&D 사업은 현재까지 전무한 실정이나, DAC 기술과 호환될 수 있는 개별 기술에 대한 연구가 수행되었다.

3.3. CCUS 정책 및 이슈

기후변화 대응을 위한 국가R&D 사업·과제는 국가 전략으로부터 수립된다. 2020년 국가 전략은 ‘2050 탄소중립 추진 전략’¹⁾으로써 3대 정책 방향(경제구조의 저탄소화, 신유망 저탄소산업 생태계 조성, 탄소중립 사회로의 공정전환)과 10대 과제로 구성되었고 탄소중립 분야에 대한 투자전략이 포함된다. 또한 2021년 ‘탄소중립 기술혁신 추진전략’²⁾을 통해 범부처 추진체계와 10대 핵심기술(태양광·풍력, 수소, 바이오에너지, 철강·시멘트, 석유화학, 산업공정 고도화, CCUS, 수송효율, 건물효율, 디지털화) 확보전략을 기반으로 기술혁신 중점 과제를 도출하였다. 2022년 ‘제1차 기후변화 대응 기술개발 기본계획(’23~’32)’³⁾에서는 3대 전략(온실가스 감축, 기후변화 적응, 혁신생태계 조성)을 포함하는 세부추진 과제를 기반으로 온실가스 감축을 위한 태양광 모듈 전환효율과 수전해 시스템 효율, 그리고 이산화탄소 포집비용을 절감하는 기술 확보를 통한 국내 2030 NDC 목표를 제시하였다.

국내 탄소중립 기술을 위한 전략은 ‘한국형 탄소중립 100대 핵심기술 선정(안)’⁴⁾에서 자원 및 지리적 여건, 산업구조, 국내외 기술 수준을 고려하여 4개 부문, 17개 분야, 100개 핵심기술을 필수 기술로 선정하였다. 해당 핵심기술 중 CCUS 기술은 국가 탄소배출 감축에 매우 중요한 분야이기 때문에 감격차 기술 선정 및 빠른 기술 추격을 통해 선도국과의 기술 격차 해소 및 기술 내재화하는 계획을 포함하고 있다.

2023년 ‘제1차 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획’⁵⁾에서는 2030 NDC 온실가스 감축목표를 부문별로 조정하면서, 4대 국가전략(책임감 있는 탄소중립, 민간 주도 혁신적인 탄소중립·녹색성장, 공감과 협력으로 함께하는 탄소중립, 능동적인 탄소중립)을 설정하였다. 세부적으로 ‘온실가스 증장기 감축’ 정책에서 10개 부문의 37개 과제를 수립하였고 ‘탄소중립·녹색성장 사회로의 이행기반’ 정책에서 6개 부문의 45개 과제를 구성하였으며, 2018년

Table 2. Socio-political challenges of CCUS

Class	Details
Policy and regulation improvement	Establish clear regulations to standardize the application of CCUS technology (including approval procedures, environmental standards, etc.) Activate corporate investment motivation through economic support such as tax policies and financial incentives
Social acceptance	- Establish effective communication channels with local residents (communication on the safety and environmental impact of CCUS technology) - Design fair compensation mechanisms
International cooperation and governance	Support the establishment of integrated standards and regulations for borderless climate change response Reduce CCUS project costs and strengthen execution capabilities through sharing experiences and technologies on leading technologies

Source: Arranged by author based on (Liu et al., 2024)

부터 2030년까지의 연도별 온실가스 감축목표를 제시하였다.

한편, CCUS 관련법 및 규정의 수립과 개선은 국가정책의 연속성·예견가능성이 높아지는 동시에 국민과 지방공공단체, 사업자 등이 보다 확신을 가지고 지구온난화 대책의 대응 및 혁신을 가속화 할 수 있는 기반이 된다 (Kim, 2022). 따라서 CCUS를 위한 국내 관련법의 경우, 이산화탄소의 효율적 포집 및 지중 저장 또는 CCU 기술 개발과 산업화에 필요한 사항을 종합적으로 규율하기 위해 2024년 2월, 이산화탄소 저장 활용법을 제정하였다. 이 법은 이산화탄소의 포집·수송·저장·활용 및 수송관 등에 대한 정의를 명확히 하고 있으며, 이산화탄소 포집시설의 설치 허가, 수송사업의 승인, 육상 또는 해양지중저장소 탐사와 승인, 폐쇄 등에 관한 사항을 규정하였다. 이는 이산화탄소 공급 특례, CCU 기술 및 제품에 대한 인증 제도를 도입 그리고 실증사업의 실시와 특례제도를 도입하였다는 점에서 의미를 가진다(Jin and Yun, 2024). 이는 CCUS 기술 관련 시설 운영 및 사후관리에 관한 규정 등 CCUS 산업 육성 및 기술혁신을 위한 정책적 기반 강화와

1) ‘2050 탄소중립 추진 전략’, 관계부처 합동, 2020년 12월

2) ‘탄소중립 기술혁신 추진전략 - 10대 핵심기술 개발 방향’, 한국에너지기술연구원, 2021년 9월

3) ‘제1차 기후변화대응 기술개발 기본계획(’23~’32)’ 관련 보도자료, 과학기술정보통신부, 2022년 12월

4) ‘국가과학기술자문회의 산하 제7회 탄소중립기술특별위원회 개최’(보도자료), 과학기술정보통신부, 2023년 5월

5) ‘제1차 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획(’23~’42)’ 관련 보도자료, 탄소중립녹색성장위원회, 2023년 3월

향후 CCUS 관련 대규모 프로젝트의 시범운영 및 프로토타입 구축사업 등이 활발히 추진될 수 있는 기반이 마련되었다고 볼 수 있다.

탄소중립을 위한 CCUS의 진보는 기술적인 문제뿐만 아니라 경제적, 사회적, 정치적 요인에 의해 어려움에 직면하고 있다. 국내 환경에 CCUS 시설의 시범운영이나 대규모 프로젝트가 추진되기 위해서는 CCUS 기술 관련 정책 및 규정과 더불어 Table 2의 내용과 같이 사회참여 및 사회적 수용 측면을 적극적으로 고려하고, 기술혁신을 위한 국제협력과 관리 및 통제를 위한 거버넌스를 확보해야 CCUS 기술이 지속 가능하며 탄소중립 목표에 유리한 환경을 조성할 수 있다(Liu et al., 2024).

국내 CCUS 산업생태계 조성 및 활성화 방안에 관한 연구(Seo et al., 2022)에서는 국내 CCUS 산업의 주요 이슈 및 현안 발굴을 위해 CCUS 관련 기업 종사자와 연구기관 재직자를 대상으로 1차 설문조사 및 분석을 진행한 후, 2차 전문가 서면 자문을 실시하였다. 이를 통해 국내 CCUS 산업에 대한 현안 이슈와 실태를 분석하여 국내 CCUS 산업생태계 조성 및 활성화를 위한 8대 주요 정책 방안을 제시하였다. 해당 방안은 ‘CCUS 산업추진을 위한 법안 마련’과 ‘차별화된 CCUS R&D 지원제도 수립’, ‘시장활성화와 수요처 확대를 위한 제도 마련’, ‘CCUS 산업 활성화를 위한 산업클러스터 조성’, ‘감축량 산정 방안 마련 및 국제적 합의’, ‘국내 CCUS 관련 컨트롤타워 수립’, ‘CCUS에 대한 사회적 수용성 제고’, 그리고 ‘CCUS 관련 협력체계 구축 및 교류의 장 마련’에 대한 정책 방안을 강조하였다. 또한 국내 녹색기후기술과 관련된 4개 분야의 사회문제(환경, 재난, 에너지, 주거·교통)에 대한 전반적인 인식 파악을 위해 설문조사(6)를 실시한 연구(Moon et al., 2020)에서는 녹색기후 기술과 관련된 사회문제가 공공성과 공익성이 매우 중요한 분야로써 이를 위한 문제해결은 무엇보다 정부 역할이 중요하므로 정책 수립 및 기술개발 투자 등 정부 주도의 다각적 지원이 중요함을 강조했다.

온실가스 감축을 위해 세계 각국은 다양한 CCUS 기술 개발 및 연구에 대규모 투자가 이루어졌다. 그러나 탈탄소화의 추진은 국민과 국가, 지방공공단체, 기업 및 민간단체 등의 밀접한 연계 하에 이루어져야 한다는 것을 명확히 해야 하고, 탄소중립의 실현을 위해서는 국민의 이해와 협력이 대전제가 된다는 점이 중요하다(Kim, 2022).

이미 성숙단계에 있는 국내 CCUS 기술뿐만 아니라 국가 R&D 과제들의 연구결과와 기술력 또한 경제성, 환경성, 그리고 사회적 수용성이 함께 고려되고 진척될 때 국내 실정에 반영될 수 있다(Kim and Nah, 2019).

3.4. 국가과학기술 지식정보서비스(NTIS)

기후변화 대응과 같은 국가 현안은 과학기술 분야의 국가정책 및 전략을 통해 국가R&D 사업계획 및 연구 예산이 수립된다. CCUS 기술 관련 연구개발 현황은 국가 R&D 사업 및 과제정보를 통해 파악할 수 있다.

NTIS서비스(www.ntis.go.kr)는 17개 부처·청(17개 대표전문기관)의 국가R&D 정보(과제, 인력, 시설·장비, 성과 등)를 종합 서비스하는 세계 최초의 R&D정보 지식포털이다. NTIS서비스는 국가R&D 사업의 투명성을 강화하고 유사·중복 과제수행 방지 및 유휴·불용장비 공동활용을 통해 R&D 투자효율성을 강화하였으며, 연구자 간 공동연구 촉진 및 성과 활용·확산 지원을 통해 연구생산성을 제고하는 등 소기의 성과를 달성하였다(KISTI, 2015).

NTIS서비스는 437개 정보표준으로 이루어진 국가 R&D 정보로써 사업·과제 및 성과정보와 기관 및 연구자정보 등을 통합 제공하고 있다.

Fig. 3에서와 같이 2024년 11월 기준으로 국가R&D 사업정보는 1.7만건, 연구과제정보 112.3만건, 국가연구개발 성과정보 751.2만건, 연구자정보 82.4만건, 국가연구개발 기관정보 4.9만건 등을 제공하여 범부처 또는 대표전문기관에서 필요로하는 중장기계획 및 정책 수립, 연구동향 분석 등을 지원하고 있다.

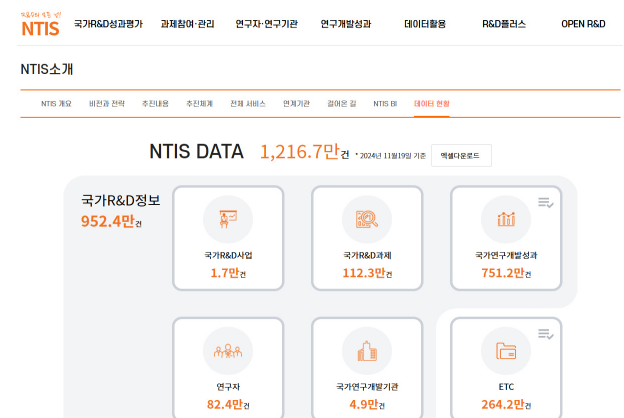


Fig. 3. NTIS Service (NTIS, 2024)

6) 국내 일반인 400명과 녹색기후기술 분야의 전문가 150명을 대상으로 설문조사가 진행됨. 2019년 9월10일~27일(12일)

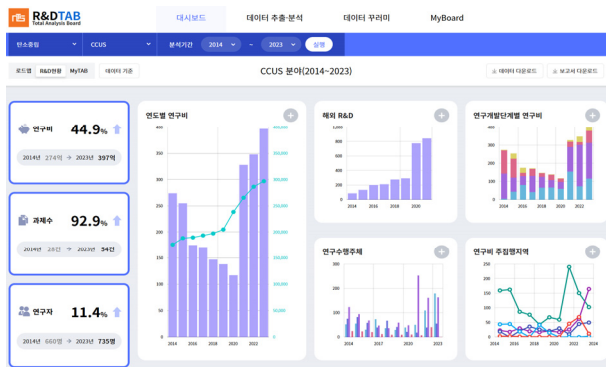


Fig. 4. CCUS status on NTIS R&DTAB Service (NTIS, 2024)

또한 NTIS 6.0 정보화전략계획(ISP: Information Strategy Planning)에 따라 국내 주요 현안에 대한 국가 R&D 세부현황과 관련 동향 등을 대시보드 형태로 제공하는 분석서비스(R&D TAB)가 2024년에 공개되었다.

분석서비스 내에서는 여러 국가 현안에 대한 과제정보가 포함되어 있고, 각 현안에 해당되는 사업·과제의 식별 및 분류는 NTIS센터와 유관기관 간의 협업을 통해 구성되었다. 제공되는 현안 중 탄소중립의 경우 철강, 석유화학, 시멘트, CCUS, 수소공급, 무탄소 전력공급 그리고 친환경 자동차 분야에 대해 국가R&D 현황정보를 제공한다. 이 중 CCUS 분야는 Fig. 4에서와 같이 연도별, 연구개발 단계별, 연구수행 주체별 연구비와 주요 성과정보 등을 차트와 표형태로 출력하고 있고 세부 데이터를 다운로드 할 수 있다.

CCUS 관련 혁신기술과 대규모 프로젝트의 상업적 구현, 그리고 탄소관리 경제성에 가장 큰 영향을 주는 것은 데이터베이스의 구축을 통한 기술정보 공유이다. 여기에는 개념단계의 기술부터 상업적 활용이 가능한 기술에 이르기까지 다양한 단계의 연구 정보가 존재하고, 이러한 정보공유는 낮은 TRL의 R&D 프로젝트에 대해 잠재적인 투자 참여를 이끌어 낼 수 있는 근본적이고 이론적인 출처와 지표가 될 수 있다(Dziejarski et al., 2023). 국내 CCUS 디지털화 부문의 확장 측면에서도 해당 기술에 대한 추가 상세정보가 산·학·연·간에 공유 및 확산될 수 있도록 NTIS 서비스가 더욱 확대되고 성장할 수 있어야 한다.

4. 분석

앞서 Fig. 1 글로벌 CCUS 프로젝트 현황에서 CCUS 운영단계의 국내 프로젝트가 부재한 것으로 확인되었듯이, 최근 국내 CCUS 관련 연구는 세부 기술 또는 개별 기술에 관한 다양한 연구가 진행되어 온 반면, CCS 통합실증 및 CCU 상용화로 이어질 수 있는 실질적인 프로젝트 및 관련 시설 구축에 관한 국가R&D 과제수행이 제한적이다.

본 연구에서는 CCUS 분야에 대한 연구현황과 기술 트렌드 분석을 위해 국가R&D 과제정보를 활용하였다. CCUS 분야에 해당되는 국가R&D 과제의 구성은 ‘탄소중립 기술혁신 추진전략’ 기반으로 국내 CCUS 정책 및 기술개발을 주도하고 있는 유관기관이 과제 분류를 수행하였다. 이러한 데이터를 반영하여 최근 10년간의 연구과제 현황 및 기술 키워드에 대한 분석을 수행하고 연구개발 단계별 연구현황과 기술 트렌드 분석을 통해 CCUS 기술 상용화 또는 실증연구 및 대규모 프로젝트를 지원할 수 있는 방향성을 제시하고자 한다.

4.1. 자료 수집 및 분석 방법

본 연구에서는 국가R&D 과제에 등록된 다양한 상세정보를 활용하여 분석 작업을 수행하였고, 자료 수집은 NTIS R&DTAB 서비스에서 제공되는 CCUS 분야의 국가R&D 과제정보를 다운로드하여 확보하였다. 분석대상 데이터는 2014~2023년에 수행된 330개의 연구과제로써, 포함된 세부 정보 중 연구과제가 수행된 기준연도와 연구비, 연구개발 단계, 연구과제 성격, 영문키워드를 활용하였다. 키워드의 경우 연구과제당 5개의 핵심단어가 필수 입력되어 있고, 이는 해당 연구의 소주제에 해당하는 의미를 가지고 있다.

지구적 온도상승을 산업화 이전 수준 대비 1.5°C로 제한하는 IPCC 특별보고서가 발표된 2018년은 탄소중립 2050 측면에서 중요한 기점이기 때문에 2018년을 기준으로 전반기 5년(2014~2018년)과 후반기 5년(2019~2023년)에 해당되는 연구과제를 분할하였다. 이를 통해 CCUS 분야 국가R&D 과제를 대상으로 연구개발 성격별 비중과 연구개발 단계별 키워드를 통해 CCUS 세부 기술에 대한 최근 10년간의 트렌드를 분석하였다.

7) 국가R&D 과제상세정보는 필수입력 항목이 지정되어 있고, 연구책임자 등 과제수행 주체가 NTIS서비스에 직접 입력함

4.2. 분석 결과

국내 최근 10년간 탄소중립 관련 기술들은 저탄소·녹색성장 정책을 시작으로 지속적인 연구개발이 진행되어 왔다. Table 3은 최근 10년간 수행된 CCUS 분야의 국가 R&D 연구과제 현황이고, 총연구비는 민간연구비와 정부 투자연구비의 합계이다. 2014년에는 28건의 과제와 총연구비 338억 원 규모로 연구과제가 수행된 반면, 2023년에는

54건의 연구과제와 총연구비 500억원 규모로 연구과제가 수행되었다.

매년 국가R&D 전체 대비 CCUS 연구과제의 건수는 0.03%~0.08% 수준으로 비중이 적은 편이고, 총연구비는 0.05%~0.16% 수준으로 연구과제가 수행되고 있다.

Table 4에서는 연구개발 단계별 정부투자연구비 현황을 나타내고 있다. 전반기에 해당하는 2014~2018년의 기초연구 정부투자연구비는 243억 원이고 개발연구는 415억 원, 응용연구가 309억 원으로 연구과제가 수행된 반면, 후반기에 해당하는 2019~2023년의 기초연구에서는 477억 원, 개발연구가 642억 원으로 전반기보다 증가하였으며, 응용연구는 158억 원으로 전반기보다 축소되었다. 이는 2018년 이후 국내 탄소중립 추진전략을 기반으로 기초연구와 개발연구 부문에 투자가 집중되는 경향을 확인할 수 있다.

또한 Table 3에서의 2023년 총연구비가 500억 원이고 Table 4에서 같은 연도의 정부투자연구비 합계가 398억 원임을 감안하면, 민간투자연구비가 102억 원 추가 지원되어 연구과제가 수행되었음을 알 수 있다.

Table 5에서는 연구개발 단계별 과제 건수를 보여준다. 전반기에서는 146건의 과제가 수행된 반면, 후반기에서는 184건의 연구과제가 수행되었다. 후반기의 기초연구는 99건, 개발연구는 54건으로 전반기보다 과제 수가 증가하였고, 응용연구는 25건으로 전반기보다 축소되었다.

Table 6에서는 국가R&D 전체와 CCUS 분야 연구과제를 연구비 성격별로 구분하였다. 이러한 세부과제 성격은

Table 3. Overview of national R&D research projects

Year	Total national R&D		CCUS area			
	Number of Project	Total funds (hundred million won)	Number of Project	(%)	Total funds (hundred million won)	(%)
2023	71,804	342,321	54	0.08	500	0.15
2022	76,052	317,684	42	0.06	444	0.14
2021	74,745	299,703	32	0.04	404	0.13
2020	73,501	270,246	25	0.03	149	0.05
2019	70,327	236,316	31	0.04	177	0.07
Sub Total	366,105	1,457,245	184	0.05	1,673	0.11
2018	63,697	231,001	25	0.04	199	0.09
2017	61,280	227,144	33	0.05	219	0.10
2016	54,827	224,285	34	0.06	213	0.09
2015	54,433	230,384	26	0.05	277	0.12
2014	53,493	211,559	28	0.05	338	0.16
Sub Total	287,730	1,124,372	146	0.05	1,246	0.11

Table 4. Amount of gov. funds on CCUS research project

Year	Amount of gov. funds on CCUS research project (hundred millions of won)				
	Basic research	Develop. research	Applied research	etc	Sum of gov. funds
2023	117	198	67	16	398
2022	75	229	15	29	348
2021	156	136	29	7	328
2020	61	38	18	0	117
2019	68	41	29	0	138
Sub Total	477	642	158	52	1,329
2018	67	60	20	0	147
2017	43	89	39	0	171
2016	82	49	18	26	175
2015	45	78	104	27	254
2014	6	139	128	1	274
Sub Total	243	415	309	54	1,021

Table 5. Number of research stage on CCUS area

Year	Number of research stage on CCUS area				
	Basic research	Develop. research	Applied research	etc	Total
2023	27	14	10	3	54
2022	20	17	3	2	42
2021	16	11	4	1	32
2020	16	6	3	-	25
2019	20	6	5	-	31
Sub Total	99	54	25	6	184
2018	17	5	3	-	25
2017	18	8	6	1	33
2016	22	7	4	1	34
2015	10	5	10	1	26
2014	2	11	14	1	28
Sub Total	69	36	37	4	146

Table 6. Status of R&D research nature class

Research nature class	Year	Total national R&D			CCUS area		
		Num. of project	Total funds	avg. fund	Num. of project	Total funds	avg. fund
			(hundred million won)			(hundred million won)	
Research and development	2023	68,182	280,879	4	43	404	9
	2022	73,041	255,067	3	42	444	11
	2021	70,838	230,297	3	32	404	13
	2020	69,183	210,655	3	25	149	6
	2019	63,263	184,060	3	31	177	6
	2018	55,239	176,107	3	25	199	8
	2017	55,201	173,665	3	32	217	7
	2016	43,584	159,498	4	33	187	6
	2015	42,979	160,305	4	25	250	10
	2014	42,159	152,029	4	27	337	12
Research management	2023	1,780	36,439	20	1	21	21
	2022	1,000	35,075	35	-	-	-
	2021	1,495	33,792	23	-	-	-
	2020	1,757	33,126	19	-	-	-
	2019	1,438	29,657	21	-	-	-
	2018	1,757	30,318	17	-	-	-
	2017	2,053	26,966	13	1	2	2
	2016	3,749	37,735	10	1	26	26
	2015	3,598	43,808	12	1	27	27
2014	3,477	34,067	10	1	1	1	
Purchase & maintenance of research facilities & equipment	2023	352	12,244	35	-	-	-
	2022	543	15,514	29	-	-	-
	2021	793	23,446	30	-	-	-
	2020	540	14,796	27	-	-	-
	2019	455	9,796	22	-	-	-
	2018	546	11,959	22	-	-	-
	2017	577	14,646	25	-	-	-
	2016	456	13,957	31	-	-	-
	2015	428	12,559	29	-	-	-
	2014	229	11,959	52	-	-	-

연구개발⁸⁾, 연구관리⁹⁾, 연구시설·장비 구입 및 유지비¹⁰⁾로 나뉘고 기타에 해당되는 연구과제는 제외하였다.

세부적으로 보면 ‘연구개발’ 성격에 해당되는 연구과제의 경우 2023년 국가R&D 전체의 과제수는 68,182건, 총 연구비는 28조이고, 과제당 평균 연구비는 4억 원이다. CCUS 분야 연구과제의 경우 과제수는 43건이고 총연구비는 404억 원, 과제당 연구비는 9억 원으로 확인되었다.

‘연구관리’ 성격에 해당되는 연구과제는 2014~2017년까지 수행되다가 중단되었고, 이후 2023년에 21억 원 규모로 1건의 연구과제가 수행되었다. 또한 ‘연구시설·장

Table 7. Trends on keyword of basic research

No.	2014 ~ 2018		2019 ~ 2023	
	Keyword	Freq. rate	Keyword	Freq. rate
1	Membrane	9.6%	Carbon dioxide	10.9%
2	Carbon dioxide	9.6%	Membrane	4.9%
3	Absorbent	5.5%	Storage efficiency	4.3%
4	Flue gas	4.8%	Geologic CO ₂ sequestration	4.3%
5	Membrane process	4.1%	CO ₂ conversion	4.3%
6	CO ₂ conversion	3.4%	CO ₂ geological storage	2.7%
7	Micro algae	3.4%	Absorbent	2.7%
8	Transportation simulation	3.4%	Optimization	2.7%
9	Big data	2.7%	In tube heat transfer coefficient supercritical fluid	2.2%
10	Target geologic formation system	2.7%	Thermodynamics	2.2%
11	Post combustion capture	2.7%	Microfluidic experiments	2.2%
12	Carbon dioxide capture	2.7%	Choke flow	2.2%
13	Capillary	2.7%	Carbon capture and storage	2.2%
14	Hybrid process	2.7%	CO ₂ compressor	2.2%
15	Pilot-scale test bed	2.7%	Machine learning	2.2%
16	Inorganic	2.7%	Big data	2.2%
17	Surface modification	2.7%	CCS	2.2%
18	CCS	2.7%	Bioenergy	2.2%
19	Membrane contactor	2.7%	Fracture flow	2.2%
20	Ultrathin	2.7%	CO ₂ mixture condensation boiling	2.2%

비 구입 및 유지비’ 성격에 해당되는 과제의 경우, 국가 R&D 전체에서의 2023년 과제당 연구비는 35억 원 규모로 연구과제가 수행되었고, CCUS 분야에서는 2014~2023년 동안 해당 성격의 과제수행 내역이 존재하지 않았다.

탄소중립 수소 분야의 경우 ‘연구시설·장비 구입 및 유지비’ 성격에 해당되는 ‘수소버스용 충전소 실증사업’이라는 연구과제에서 2020년에 60억 원 규모로 수행되었고, ‘액화수소 규제자유특구 R&D 실증을 위한 인프라 구축사업’이라는 연구과제의 경우는 2021년 62억, 2022년에

8) 연구시설·장비 구입 및 유지비, 연구관리비를 제외한 모든 연구개발비

9) 연구과제 평가 및 관리비, 국립연구연구소와 출연연구소의 인건비, 경상비, 연구개발 관련 사무국 운영비 등

10) 연구시설 구축 및 유지비, 연구장비 구입 및 유지비, 시설·장비의 차입금 상환 등

Table 8. Trends on keyword of development research

No.	2014~2018		2019~2023	
	Keyword	Freq. rate	Keyword	Freq. rate
1	Carbon dioxide	5.5%	Carbon dioxide	12.5%
2	Membrane	3.4%	Formic acid	3.3%
3	Porous materials	3.4%	Membrane	2.7%
4	Membrane module	3.4%	Process design	2.7%
5	Nanocarbon	3.4%	CO ₂ capture	2.7%
6	Gas separation	3.4%	Process simulation	2.2%
7	Separation processes	3.4%	CO ₂	2.2%
8	Pohang basin	2.7%	Capture	2.2%
9	Janggi basin	2.7%	Mineral carbonation	2.2%
10	Graphene	2.7%	Greenhouse gas	2.2%
11	CO ₂ capture process	2.7%	Thermodynamic modeling	1.6%
12	Graphene oxide	2.7%	Methane reformer	1.6%
13	Track record	2.7%	Bio-diesel	1.6%
14	CCS	2.1%	Boiler	1.6%
15	CO ₂ underground storage	2.1%	Oxygen carrier	1.6%
16	CO ₂ geological storage	2.1%	Building conceptual	1.6%
17	CO ₂ storage	2.1%	Flue gas	1.6%
18	Hydraulic testing in deep borehole	2.1%	CaCO ₃	1.6%
19	Capture	2.1%	Large-scale integrated CCS model	1.6%
20	Cost storage characterization	1.4%	Calcium carbonate	1.6%

56억 원 규모로 수행된 바 있다. 이는 CCUS 분야와 비교했을 때 차별성이 보이는 부분이라 할 수 있다.

한편, CCUS 분야 국가R&D에 대한 세부 기술들의 키워드 분석은 Table 7부터 Table 9까지이다. 지난 10년간의 연구과제를 전·후반기로 나누고 연구개발 단계별로 구분하여 키워드를 분석하였다. 해당 영문 키워드는 연구과제당 5개씩 필수 입력되어 있고, 해당 키워드 데이터를 추출하여 공백 제거, 소문자 통일, 단·복수 표기를 전처리하였다. 빈도율¹¹⁾은 전·후반기별 과제 수 합계와 개별 키워드의 출현 빈도를 통해 집계되었다. 각 키워드의 연구 단계별 포지션과 빈도율을 통해 국가R&D 내 CCUS 분야의 주요 기술에 대한 비중과 트렌드를 분석하였다.

Table 7에서는 ‘기초연구’ 단계의 상위 20개 키워드 현

Table 9. Trends on keyword of applied research

No.	2014~2018		2019~2023	
	Keyword	Freq. rate	Keyword	Freq. rate
1	Carbon dioxide	12.3%	Carbon dioxide	3.3%
2	Offshore geological storage	8.2%	Membrane process	1.6%
3	Sequestration	8.2%	Artificial photosynthesis	1.6%
4	Climate change	8.2%	Micro algae	1.6%
5	CO ₂ capture and storage	8.2%	Adhesive	1.1%
6	Biofuel	3.4%	Reaction and separation process	1.1%
7	Micro algae	2.7%	pilot plant	1.1%
8	Gene expression	2.1%	Carbon dioxide fixation	1.1%
9	Polyimide	2.1%	Large-scale demonstration	1.1%
10	Meta bolic engineering	2.1%	CCU hybrid process	1.1%
11	Bio-diesel	2.1%	Organic waste	1.1%
12	CCS	2.1%	CO ₂ recovery	1.1%
13	Cofixation	2.1%	Polyurethane	1.1%
14	Cyanobacteria	2.1%	CO ₂ from flue gas	1.1%
15	Synthetic biology	2.1%	Solvent-based CO ₂ capture	1.1%
16	Coconversion	2.1%	Membrane-psa hybrid process	1.1%
17	Genetic engineering	2.1%	Biochemical production	1.1%
18	Membrane processes	1.4%	Mineralization	1.1%
19	Otway	1.4%	Nanomaterials	1.1%
20	Minimal genome	1.4%	Compact capture system	1.1%

황이다. 상위에 있는 멤브레인 기술과 흡수제 관련 연구의 경우 후반기에서 4.9%와 2.7%의 비중이 되었다. 이산화탄소 지중 저장에 관한 연구와 저장 효율성 및 최적화에 관련된 연구는 4.3%와 2.7%의 비중으로 후반기에서 확인되며, 이는 전반기 2.7%의 비중을 차지하는 대상 지층 형성에 관한 연구가 계속된 것으로 연결될 수 있다.

또한 전반기의 미세조류에 관한 연구와 파일럿 규모의 테스트베드 관련 연구는 후반기에 개발연구와 응용연구로 전환된 것으로 볼 수 있다.

11) 기초연구 후반기의 키워드 carbon dioxide의 빈도율 산출 예: 키워드 출현빈도 20건 ÷ 과제 수 합계 184건 (2019 ~ 2023년) = 10.9%

Table 8은 ‘개발연구’ 단계의 상위 20개 키워드 현황이다. 상위에 위치하는 키워드는 포름산과 멤브레인 관련 기술이 후반기 연구과제에서 3.3%와 2.7%의 비중을 나타낸다. 멤브레인 기술의 경우 기초연구와 개발연구가 병행됨을 알 수 있다. 이어서 후반기의 광물탄산화 기술이 2.2%의 비중으로 신규 기술로서 위치하고 대규모 통합형 CCS 모델에 관한 연구 또한 1.6%의 비중으로 분석되었다.

전반기의 3.4%의 비중을 차지하던 기체 분리에 관한 기술은 후반기에 응용연구로 계속되고 이산화탄소 지중 저장에 관한 연구 또한 기초연구의 연구과제로 후반기에 계속되는 형태로 볼 수 있다.

Table 9는 ‘응용연구’ 단계의 상위 20개 키워드 현황이다. 해당 기술 키워드 중 전반기의 상위 키워드는 해양지중 저장에 관한 연구로 8.2% 비중을 차지했다. 이는 후반기의 기초연구로 계속되는 것으로 볼 수 있고, 전반기의 바이오연료의 경우 3.4%의 비중으로 수행되었으나 후반기 기초연구의 바이오에너지 기술로 통합된 것으로 확인된다.

후반기 상위 키워드는 멤브레인 공정과 인공광합성에 관한 연구가 1.6%의 비중으로 확인되었고, 파일럿 플랜트와 대규모 시범운영에 관한 연구는 1.1%의 비중으로 소규모 형태의 연구과제가 수행되었다.

응용연구의 경우 전반기 대비 후반기 키워드의 비중이 전반적으로 축소되었다. 이는 응용연구의 후반기 과제 수가 적어진 반면, 과제당 연구비는 다소 비중이 큰 경향과 2018년 이후 국가 추진전략 수립에 따라 기초연구와 개발연구에 집중된 결과로 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 글로벌 대규모 CCUS 프로젝트의 현황과 IEA에서 현행화된 CCUS 세부기술을 확인하였다. 국내 국가R&D 연구과제 현황과 키워드 분석을 통해 CCUS 관련 주요 기술이 어떤 연구개발 단계에서 어느 정도의 비중으로 발전되었는지에 대한 트렌드를 분석하였다.

정부에서 수립한 탄소중립 기술혁신 추진 전략을 시작으로 산·학·연에서의 연구과제 수행 및 기술개발, 지자체 및 사회의 협력과 수용 등 모든 부문의 공동 노력의 결과는 현재 시점에서의 CCUS 기술 상용화와 대규모 프로젝트를 추진할 수 있는 성숙도를 의미한다. 이는 국내 탄소중립의 실현이 관련 기술의 혁신이나 연구개발 진척만의 문제가 아니라 관련 법의 지속적인 보완과 더불어 사회적

인식이나 공감대 형성, 그리고 대국민 수용성 문제 또한 직면해야 할 해결 과제로서 중요성을 가진다.

국내 탄소중립 목표를 위해서는 국제 사회의 기준을 지향하는 동시에 CCUS 기술개발의 중요성을 강조하고 있지만, 본 연구의 분석 결과와 같이 현재 시점에서의 탄소중립 관련 국내 R&D의 가시적인 실적은 부족한 실정이다. 연구개발 단계별 분석에서는 기초연구와 개발연구에 비중이 있었으나 CCUS 관련 시설 구축이나 시범운영을 위해서는 ‘연구시설·장비 구입 및 유지비’ 성격의 연구과제가 수행되어야 함에도 2014~2023년 동안 해당 연구과제가 존재하지 않았고, 수용성에 관한 실질적인 연구과제 또한 수행되지 않은 것으로 확인되었다. 또한 CO₂ 포집 부문의 연소후 포집 기술 측면에서는 다양한 흡수·흡착제를 통한 연구와 기술개발이 진행되었지만, 연소전 포집 기술이나 순산소 연소기술 등은 추가적인 연구가 필요한 전망이다. 그리고 저장 및 활용 부문에서는 CO₂ 저장기술과 광물화 기술이 주요한 연구로 확인되었다.

앞서 살펴본 선진 사례와 같이 기술혁신이 국내 환경에 반영되기 위해서는 기술개발만이 핵심적인 것이 아니라 CCUS 관련 법제도 및 규정의 지속적인 개선과 사회적 수용을 위한 지자체 등과의 다양한 활동 그리고 국제협력 등이 병행되어야 함을 확인하였다. 현재 시점에서 CCUS 관련 대규모 프로젝트 추진 및 시범운영과 이러한 사업을 지원할 수 있는 국가R&D 과제수행을 위해 다음과 같이 제안한다.

첫째, 국가R&D 전체 대비 CCUS 분야 연구과제의 총 연구비는 2023년 기준 0.15%에 불과하다. 우선적인 기술 상용화 대상 및 영향력 있는 연구과제에 대해 정부의 적극적인 투자가 필요하며, 특히 가스전 대상 이산화탄소 주입에 관한 실증연구나 석유회수증진(EOR)기술, 그리고 직접 대기 포집(DAC) 관련 연구과제 등은 장기 계속 과제일 경우, 연구개발 단계의 전환 정책을 통해 기초연구를 일정 기간 거치면 개발연구 또는 응용연구 단계로의 전환을 통해 기술혁신을 독려해야 한다.

둘째, 기후변화는 국경이 없다. 이에 대응하기 위해서 빠르게 보급 가능한 기술부터 고도화를 이끌어내야 하는 영역까지 글로벌 기술에 대해 틈새 전략을 펼치는 등 국제협력을 통한 전략적인 R&D 계획 수립이 필요하다. Fig. 1과 Fig. 2에서 확인되는 바와 같이, 국내 실정은 국제협력의 필요성이 절실히 제기된다. CCUS 기술개발에 대한 국제적인 협업 및 경험 공유를 통한 대규모 프로젝트의 안정성 확보, 구축 및 운영비용 절감을 위한 효율성

에 관한 연구가 수행되어야 한다. 이러한 추진 실적을 통해 국내 기업이 글로벌 시장에 참여할 수 있는 기회를 지원해야 한다.

셋째, NDC 목표 달성을 위한 노력은 기술혁신뿐만 아니라 정부와 산·학·연, 시민사회 부문 간의 협력 없이는 불가능한 도전과제이며 모든 이해관계자의 협업과 노력이 병행되어야 달성될 수 있다는 것에 대해 컨센서스가 수반되어야 한다. 따라서 수용성 제고를 위한 연구과제 계획 수립과 해당 연구과제의 결과 및 실적에 대해 투명한 정보공개·공유가 필요하다. 또한 국내 CCUS 기술 및 실증을 위한 다양한 연구과제가 추진되는 과정에서 국가의 공동 목표에 대한 실질적인 인식과 더불어 상기 제시안의 추진을 위해 정부의 적극적인 지원 및 부처 간의 협력도 수반되어야 한다.

본 연구는 앞서 언급했던 글로벌 대규모 프로젝트 현황에 대한 예산정보 측면에서 한계점이 있다. 향후에는 국내 CCUS 추진전략에 포함된 디지털화 부문을 확장하는 측면에서 국내 세부 기술별 TRL 정보 등과 연계된 기술 정보를 산·학·연 간에 공유할 수 있고, 국가 전반의 거버넌스를 지원할 수 있는 전사적 데이터베이스 설계에 관한 연구를 수행하고자 한다.

사사

본 연구는 한국과학기술정보연구원의 2024년도 ‘국가과학기술지식정보서비스 사업’ 연구과제(N24NM014-241)를 통해 수행되었음.

Reference

- Dziejarski B, Krzyżyńska R, Andersson K. 2023. Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment. *Fuel* 342: 127776. doi: 10.1016/j.fuel.2023.127776
- IEA (International Energy Agency). 2023. Energy technology perspectives. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>
- IEA (International Energy Agency). 2024. CCUS projects database. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/ccus-projects-database>
- Jin YH, Yun SR. 2024. Current status and improvement suggestions of CCUS law in China (in Korean with English abstract). *Chin Law Rev* 55: 1-35.
- Kim GS. 2022. Japan's response and implication for early realization of CCS & CCUS (in Korean with English abstract). *Kyungpook Natl Univ Law J* 77: 45-73. doi: 10.17248/knulaw..77.202204.45
- Kim HM, Nah IW. 2019. Brief review on carbon dioxide capture and utilization technology (in Korean with English abstract). *Korean Chem Eng Res* 57(5): 589-595. doi: 10.9713/kcer.2019.57.5.589
- Kim JS, Cho JK, Lee WC, Seo ES, Kim JH, Lee HS, Lee HS. 2023. A numerical modeling of CO₂ injection into the depleted Donghae-1 gas field (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Miner Energy Resour Eng* 60(5): 429-443. doi: 10.32390/ksmer.2023.60.5.429
- KISTI (Korea Institute of Science and Technology Information). 2015. NTIS(National Science & Technology Information Service) white paper (10th anniversary: 2006~2015).
- Liu H, Yuan X, Zheng L, Zhu S. 2024. Current status and challenges of CCUS technology development from a global perspective. *J Sci Technol Soc* 3(1): 17-25. doi: 10.57237/j.jsts.2024.01.003
- Moon MR, Ha SJ, Park CH. 2020. A survey of public and expert perceptions for the solution of social problems in green-climate technology (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 11(4): 285-296. doi: 10.15531/kscer.2020.11.4.285
- NTIS (National Science & Technology Information Service). 2024. NTIS service. <https://www.ntis.go.kr>
- Park HR, Jang HC. 2023. A review of enhanced oil recovery technology with CCS and field cases (in Korean with English abstract). *J Korean Inst Gas* 27(3): 59-71. doi: 10.7842/kigas.2023.27.3.59
- Park HS, An JW, Lee HE, Park HJ, Oh SS, Ling JLJ, Lee SH. 2023. Scenario analysis, technology assessment, and policy review for achieving carbon neutrality in the energy sector (in Korean with English abstract). *Korean Chem Eng Res* 61(4): 496-504. doi:

10.9713/kcer.2023.61.4.496

Seo SJ, Kim J, Park CH. 2022. Creation and promotion planning for a domestic CCUS industrial ecosystem (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 13(3): 311-324. doi: 10.15531/KSCCR.2022.13.3.311

Shim JG. 2016. Current status of CCU technology development (in Korean with English abstract). *KEPCO J Electr Power Energy* 2(4): 517-523. doi: 10.18770/KEPCO.2016.02.04.517

Song YW, Oh CW. 2022. Korea's policy direction on the research & development of Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) technologies: Focusing on DAC technologies (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 13(1): 75-96. doi: 10.15531/kscrcr.2022.13.1.075

The Guardian. 2023. Article 27 Jul. <https://www.theguardian.com/science>