

NATIONAL RESEARCH COUNCIL FOR ECONOMICS,
HUMANITIES AND SOCIAL SCIENCES

신산업정책 연구

신산업과 수소경제 :
중소형 원자로 활용 방안

New Industry Policy Research –
New Industries and the Hydrogen
Economy: Utilization Strategies for
Small and Medium-Sized Reactors

에너지경제연구원 안지영, 김재경, 김기환

이 보고서는 「경제인문사회연구회 협동연구사업」의 일환으로 수행된 연구과제 중 하나입니다.

이 보고서에 수록된 내용은 집필자의 개인적인 견해이며, 경제인문사회연구회의 공식적인 입장이 아님을 밝힙니다.

경제·인문사회연구회 협동연구총서

“신산업정책 연구”

1. 협동연구총서 시리즈

협동연구총서 일련번호	연구보고서명	연구기관
24-06-01	신산업정책 연구: 신산업정책 총론	한국개발연구원
24-06-02	신산업정책 연구: 미·중 전략경쟁 시대 신 산업정책	산업연구원
24-06-03	신산업정책 연구: 신산업 스타트업 정책	산업연구원
24-06-04	신산업정책 연구: 신산업과 수소경제 : 중소형 원자로 활용 방안	에너지경제연구원

2. 참여연구진

연구기관		연구책임자	공동연구원	연구보조원
저 자		송영관, 윤여창, 이승협, 김동수, 문종철, 박병열, 최정환, 장재기, 박문수, 이순학, 안지영, 김재경, 김기환		
주관 연구기관	한국개발연구원	송영관 선임연구위원 (총괄책임자) (Song, Yeongkwan)	윤여창 부연구위원 이승협 부연구위원	장지수 연구원 류현정 연구원
협력 연구기관	산업연구원	김동수 선임연구위원	문종철 연구위원 박병열 부연구위원 최정환 부연구위원 장재기 부연구위원	
	산업연구원	박문수 연구위원	이순학 전문연구원	
	에너지경제연구원	안지영 연구위원	김재경 선임연구위원 김기환 연구위원	김예지나 전문원

제 출 문

경제·인문사회연구회 이사장 귀하

본 보고서를 “신산업정책 연구: 신산업과 수소경제: 중소형
원자로 활용 방안”의 최종보고서로 제출합니다.

2024년 6월

한국개발연구원
원장 조 동 철

국문요약

기후변화 대응과 에너지 전환이 전 세계적인 화두로 떠오르면서 우리나라는 산업 육성과 에너지 전환 노력을 병행해야 하는 과제에 직면해 있다. 수소에너지는 이러한 에너지 전환과 산업 육성을 동시에 가능하게 하는 신성장동력으로 인식되고 있으며, 특히 앞으로의 국제적 에너지 전환요구에 대응하기 위해서는 국내 청정수소 생산 관련된 산업 생태계를 구축하는 것이 중요하다. 본 연구는 대규모 수소 수요를 충족시키기 위한 국내 청정수소 공급 여건을 검토하고, 무탄소 발전원으로 주목받고 있는 원전과 중소형 원자로(SMR)를 활용한 청정수소 생산 가능성을 탐색하여 국내 청정수소경제 활성화 방안 및 정책적 시사점을 도출하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 본 연구에서는 국제기구 보고서, 국가별 정책자료, 선행 연구자료 등을 기반으로 한 문헌분석을 토대로 원전 및 중소형 원자로를 활용한 국내 청정수소의 균등화 생산 비용(Levelized Cost of Hydrogen, LCOH)을 추정하고, 신산업으로서 원전 및 중소형 원자로 기반 수소의 시장 규모를 전망하고자 하였다.

본 연구의 제 1장에서는 연구의 개요에 대해 설명하고, 본격적인 연구 내용은 제 2장부터 제시하였다. 제 2장에서는 최근 도래한 글로벌 에너지 전환 요구 동향에 대해 살펴보고, 에너지 전환 요구에 대한 대응수단으로서 수소경제의 역할에 대해 탐구하였다. 수소에너지의 기본적인 특징과 수소경제의 밸류체인 전반에 대해 살펴보고, 에너지 전환 시대의 온실가스 감축수단으로서 수소가 가지는 의미에 대해 짚어보았다. 연소과정에서 온실가스가 발생하지 않으면서도 기존 화석연료를 대체할 수 있다는 수소에너지의 장점으로 인해 향후 에너지시스템에서 수소에너지의 역할이 클 것으로 예상된다. 다만, 이러한 수소에너지가 청정한 생산 경로를 통해 이루어져야만 진정한 에너지 전환이 가능할 것임을 확인하였다.

제 3장에서는 우리나라의 수소경제 정책 추진 동향을 신산업정책과 기후·에너지 정책으로 구분하여 살펴보았다. 특히 최근 전 세계적으로 화두가 되고 있는 우리나라의 청정수소 인증제의 수립 및 운영 동향을 소개하고, 주요국 수소 인증제와의 공통점 및 차이점 분석을 통해 향후 국내 청정수소 생산 및 활용에 대한 시사점을 제시하였다. 우리나라의 청정수소 인증제는 다른 국가의 수소인증제 보다 광범위한 수소 생산 기술을 포괄하고 있어 원전 및 중소형 원자로 기반의 수소 등과 같이 다양한 생산 경로의 확대에도 긍정적인 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

제 4장에서는 국내의 원전 및 중소형 원자로 정책 추진 현황을 정리하였다. 무탄소 전원에 대한 수요가 증가함에 따라 주요국에서는 기존 대형원전의 수명을 연장하거나 신규 원전을 확대하는 등 원전 시장을 확대해나가고 있다. 또한, 안정성과 활용성 측면에서 대형원전 보다 유용하다고 평가되는 중소

형 원자력에 대한 기술 개발 및 보급 정책도 활발히 이루어지고 있음을 확인하였다.

제 5장에서는 원전과 수소 산업의 연계 가능성을 검토하기 위해 원전 수소의 생산 가능성을 기술적·경제적 관점에서 검토하였다. 원전과 중소형원자료를 수소 생산 목적으로 활용하는 것은 전력계통의 안정성 확보, 국내 에너지 안보 강화, 수소 산업 생태계 조성 측면에서 유용성이 크다. 이러한 유용성으로 인해 미국, 영국, 일본 등 주요국에서 원전 수소 프로젝트를 추진하고 있으며 국내에서도 원전 수소 실증 프로젝트를 진행 및 계획하고 있었다. 국내 원전 수소의 경제성 분석 결과 원전과 중소형 원자료를 청정수소를 생산하는 경우 균등화 수소 생산단가는 수전해기에 투입되는 전기의 가격에 따라 결정된다는 것을 확인하였다. 대형원전의 평균적인 정산단가인 1kWh당 56.3원을 적용할 시 알카라인 수전해는 5,237원/kgH₂, PEM 수전해는 5,395원/kgH₂, 고온수전해는 5,873원/kgH₂ 수준의 수소생산단가를 보여 해외 도입 청정수소(수소 1kg당 4,581원~5,380원)와의 가격 경쟁력이 있을 것으로 예상된다. 그러나 현재 가동원전의 경우 수전해 수소 생산을 위해서는 원전 전력이 아닌 그리드에 연결된 전력을 수전 받아 공급해야한다. 이때 산업용 전기요금(을)이 적용되어 약 136.4원/kWh의 전기 가격이 수소 생산단가에 반영되어 수소 생산 단가는 10,000원/kgH₂ 이상으로 높아져 가격 경쟁력 확보가 어려움을 확인하였다.

앞 장의 분석결과를 토대로 제 6장에서는 원전-수소 연계 신산업 생태계 조성을 위한 선결과제를 제시하였다. 특히 원전 수소 경제성 확보방안 및 법·제도적 선결과제 등을 검토하여 원전-수소 연계 신산업 창출을 위한 정책적 시사점을 제시하였다. 본 연구에서는 원전 및 중소형 원자로 기반 수소의 경제성을 확보할 수 있는 지원 체계를 마련하고, 산업부문에서 수소 활용을 촉진하여 안정적인 수요처를 확보하는 것이 중요하다는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 원전 수소 산업 생태계 조성을 위해 선결되어야 할 법·제도적 개선 및 주민수용성 확보 등을 위한 정부·민간·학계의 지속적인 노력이 필수적임을 강조하며 향후 국내에서의 원전-수소 신산업에 대한 희망적인 기대를 내비친다.

키워드 : 원전, 중소형원자로, 청정수소, 핑크수소

Abstract

As climate change and energy transitions become global priorities, our country faces the challenge of balancing industrial growth with energy transition efforts. Hydrogen is recognized as a new growth engine that can simultaneously enable energy transition and industrial development. Particularly, to meet future international demands for energy transition, it is crucial to establish an industrial ecosystem related to domestic clean hydrogen production. This study aims to review the conditions for domestic clean hydrogen supply to meet large-scale hydrogen demand and to explore the feasibility of clean hydrogen production using nuclear power plants and small modular reactors (SMRs), which are gaining attention as carbon-free power sources. The study also seeks to derive strategies and policy implications for activating the domestic clean hydrogen economy.

To this end, this study estimated the Levelized Cost of Hydrogen (LCOH) for domestic clean hydrogen production using nuclear power plants and SMRs based on a literature analysis of international organization reports, national policy documents, and prior research materials. Additionally, it aimed to forecast the market size for hydrogen produced from nuclear power and SMRs as a new industry.

Chapter 1 of the study outlines the research overview, with the main content presented from Chapter 2 onwards. Chapter 2 examines the recent trends in global energy transition demands and explores the role of the hydrogen economy as a response measure. It discusses the basic characteristics of hydrogen and the overall value chain of the hydrogen economy, highlighting the significance of hydrogen as a greenhouse gas reduction measure in the era of energy transition. This study suggests that true energy transition can only be achieved if hydrogen is produced through clean production pathways, given its advantage of not emitting greenhouse gases during combustion and its potential to replace conventional fossil fuels.

Chapter 3 reviews the trends in hydrogen economy policy in Korea, dividing them into industrial policies and climate and energy policies. It introduces the Korea's clean hydrogen certification system, which has enacted since 2024, and presents insights for future domestic clean hydrogen production and utilization through a comparative analysis with major countries' hydro

gen certification systems. Korea's clean hydrogen certification system is expected to positively contribute to the expansion of various production pathways, including hydrogen based on nuclear power and SMRs, as it encompasses a wider range of hydrogen production technologies compared to other countries' certification systems.

Chapter 4 summarizes the current status of nuclear power and SMR policy both domestically and internationally. As the demand for carbon-free power sources increases, major countries are expanding the nuclear market by extending the lifespan of existing large nuclear power plants or building new ones. It also finds out that there is active technological development policy for SMRs, which are evaluated as more useful than large nuclear power plants in terms of stability and applicability.

Chapter 5 examines the feasibility of producing hydrogen from nuclear power from a technical and economic perspective to explore the linkage between nuclear power and the hydrogen industry. Utilizing nuclear power and SMRs for hydrogen production is highly useful for securing grid stability, enhancing national energy security, and fostering the hydrogen industrial ecosystem. Due to these benefits, major countries such as the United States, the United Kingdom, and Japan are pursuing nuclear hydrogen projects, and similar demonstration projects are being conducted and planned in Korea. The economic analysis of domestic nuclear hydrogen revealed that the levelized cost of hydrogen production from nuclear power and SMRs is determined by the price of electricity input into electrolysis. When applying the average settlement price of large nuclear power plants, 56.3 KRW/kWh, the hydrogen production cost was 5,237 KRW/kgH₂ for alkaline electrolysis, 5,395 KRW/kgH₂ for PEM electrolysis, and 5,873KRW/kgH₂ for high-temperature electrolysis, indicating potential price competitiveness with imported clean hydrogen (4,581 ~ 5,380 KRW per kg of hydrogen). However, for current operating nuclear power plants, grid-connected electricity must be supplied for electrolysis hydrogen production, reflecting the industrial electricity rate, which increases the hydrogen production cost to over 10,000 KRW/kgH₂, making it challenging to secure price competitiveness.

Based on the analysis results from previous chapters, Chapter 6 presents preliminary tasks

for creating a new industrial ecosystem linking nuclear power and hydrogen. It reviews measures to secure the economic feasibility of nuclear hydrogen and identifies necessary legal and institutional tasks to propose policy implications for creating a new industry linking nuclear power and hydrogen. The study emphasizes the importance of establishing support systems to secure the economic feasibility of hydrogen based on nuclear power and SMRs and promoting hydrogen use in the industrial sector to secure stable demand. The study highlights the need for continuous efforts from the government, private sector, and academia to improve legal and institutional frameworks and secure public acceptance to foster the nuclear hydrogen industrial ecosystem, expressing hopeful expectations for the future of the nuclear hydrogen new industry in Korea.

Keyword : Nuclear Power, Small Modular Reactor, Clean Hydrogen, Pink Hydrogen

정책 제안

1) 원전 수소의 경제성 확보 방안

- (원전 전력 활용 유연성 확보) 원전 및 SMR 전력에 대한 직·간접 PPA를 허용하거나 무탄소 에너지 인증제도 등 무탄소 전력임을 증빙할 수 있는 제도를 설계하여 청정수소 생산에 원전 전력을 유연하게 활용할 수 있도록 지원
- (원전 수소 생산에 대한 가격 지원) 수전해용 전기요금제도를 도입하여 청정수소 생산 비용을 낮추는 방안을 마련하거나 원전에서 공급되는 전력 사용을 소내전력으로 인정하여 원전 정산단가 수준의 전기요금을 적용하여 원전 수소의 생산 비용 절감
- (청정수소 인증제 기반 인센티브 제공) 청정수소 인증등급에 따른 차등 지원방안을 조속히 마련하여 원전사업자가 원전 전력을 수소 생산 목적으로 활용하도록 경제적 인센티브 제공

2) 원전 수소 산업 생태계 활성화 방안

- (정부 및 공기업 주도의 대규모 사업 개발) 현존 유일한 원전사업자인 한수원과 정부가 대규모 원전 수소 프로젝트를 개발하고 지원하여 원전 수소 관련 밸류체인 전반에 대한 활성화 필요
- (SMR 수소 수요처 확보) 분산에너지 특구 지역 내 수요처를 조기 발굴하여 수요기관을 중심으로 사업 공동개발 및 공동 지분투자를 통한 장기계약 물량 체결 유도
- (원전 수소 활용에 대한 인센티브 제공) 산업부문의 원전 수소 활용 촉진을 위해 탄소차액거래계약이나 공공조달의 형태로 청정수소 활용에 따른 사업 불확실성 경감

3) 법·제도적 선결과제

- (민간기업의 원전사업 허가 검토) 중소형 원자로의 시장경쟁력 향상을 위해 민간기업의 시장 참여 확대 및 경쟁 시장 체제 도입 필요
- (입지계약 및 주민수용성 확보) 사용후핵연료 처리방안 및 고준위방사선펜기물 특별법에 대한 면밀한 검토 및 조속한 처리로 주민 수용성 확보 방안 모색 필요
- (이격거리 및 안전영향평가) 원전 인근에 수소생산 설비 설치를 위한 이격거리 산정 및 안전영향 평가 규정 마련 필요

제1장 서론

제1절 연구 배경 및 필요성	3
1. 연구 배경	3
2. 연구 필요성	4
3. 연구 목적	5
제2절 연구 내용 및 연구 방법	7
1. 연구 범위 및 연구 내용	7
2. 연구 방법	7

제2장 에너지전환과 수소경제

제1절 국제사회에서의 에너지전환 요구	11
1. 신기후통상체제의 도래	11
2. 글로벌 이니셔티브	15
제2절 에너지전환 요구 대응 수단으로서의 수소경제	19
1. 수소에너지의 특징	19
2. 수소경제의 밸류체인 전망	22
3. 온실가스 감축수단으로서 수소의 의미	37
제3절 소결	41

제3장 우리나라 수소경제 정책 추진 동향

제1절 신산업정책으로서 수소경제 정책	45
1. 우리나라 최초의 수소산업 육성 정책	45
2. 수소 전주기 산업경쟁력 강화 정책	49

CONTENTS

제2절 기후·에너지 정책으로서 수소경제 정책	52
1. 청정에너지로서의 수소의 중요성	52
2. 청정수소경제로의 전환 노력	54
3. 청정수소 인증제의 도입	57
제3절 소결	65

제4장 원전 및 중소형 원자로 정책 추진 현황

제1절 국내외 원자력 시장 동향	71
1. 원자력 시장 개요	71
2. 주요국 원전 정책 추진 현황	74
제2절 중소형 원자로 기술 및 정책 현황	78
1. 중소형 원자로 기술 동향	80
2. 중소형 원자로 정책	86
제3절 소결	98

제5장 원전-수소 연계 가능성 검토

제1절 원전 수소 생산 가능성 검토	103
1. 원자력 청정수소 생산 기술	103
2. 원전-SMR 수소 생산의 편익	108
3. 국내외 원전 수소 생산 프로젝트 사례	112
제2절 국내 원전 수소 경제성 분석	119
1. 원전 수소 생산의 경제성 분석	119
2. 원전 수소 시장 및 밸류체인 전망	129
제3절 소결	132

제6장 결론 및 정책적 시사점

제1절 원전-수소 연계 신산업 생태계 조성을 위한 선결과제	137
1. 원전 수소 경제성 확보 및 산업 생태계 조성을 위한 정책 과제	137
2. 원전 수소 생산 및 밸류체인 구축을 위한 법·제도적 선결과제	141
제2절 결론	145
■ 참고문헌	148
■ 부 록	157

표 차례

<표 2-1> 미국 IRA 조문 구성	14
<표 2-2> RE100과 24/7 CFE 비교	17
<표 2-3> 수소의 물리적 특성 및 타에너지원과의 비교	20
<표 2-4> 탄소경제와 수소경제의 비교	21
<표 2-5> 수소운반체별 특징 비교	30
<표 2-6> 수소 운송 방식 비교	31
<표 2-7> 수소의 부문별 기준 수요	32
<표 3-1> 수소의 전·후방 산업 예시	46
<표 3-2> 수소 기술개발 로드맵 주요 내용	47
<표 3-3> 「수소경제 활성화 로드맵」 과 「수소 기술개발 로드맵」 주요내용	48
<표 3-4> 「세계 1등 수소산업 육성 전략」 주요 내용	49
<표 3-5> 「제1차 수소경제이행 기본 계획」 주요내용	54
<표 3-6> 「청정수소 생태계 조성방안」 주요 내용	56
<표 3-7> 청정수소 인증제 등급별 온실가스 배출량 기준	59
<표 3-8> 국가별 수소관련 인증제도 현황	60
<표 3-9> 타 수소 인증제 주요 요구조건 및 우리나라 청정수소 인증제와의 비교	62
<표 4-1> COP28 넷제로 원자력 이니셔티브 선언국 분류	71
<표 4-2> 주요국의 원전 정책 동향	75
<표 4-3> 대형원전과 SMR 비교	78
<표 4-4> 우리나라의 소형모듈원자로(SMR, Small Modular Reactor)에 대한 기술분류	81
<표 4-5> 주요국에서 현재 개발 중인 대표적인 소형모듈원전(SMR) 모델 및 현황	82
<표 4-6> 국내 기업의 해외 SMR 투자 현황	85
<표 4-7> 주요국의 소형모듈원전(SMR) 기술개발 정책 및 지원	95
<표 4-8> EU SMR Industrial Alliance 추진 내용	96
<표 5-1> 원전 수소 생산 기술 유형 구분	103
<표 5-2> 주요 수전해 기술별 특성	105
<표 5-3> 수소 플랜트의 수전해기 선정	107

<표 5- 4> 2023년 국내 원전본부별 감축발전량	109
<표 5- 5> 주요 원전수소 프로젝트 사례	113
<표 5- 6> 미국 H2Hub 중 원전수소 계획된 Hub	114
<표 5- 7> 한국수력원자력의 원전수소 기술개발 로드맵	117
<표 5- 8> 대형 원전 기반 청정수소 생산가능 지역	118
<표 5- 9> 원전 수소생산단가 추정을 위한 비용 항목	121
<표 5-10> 원전 수소생산단가 추정을 위한 기본 가정	121
<표 5-11> 원전 수소 생산 방식에 따른 경제성	122
<표 5-12> 원전 수소 생산 방식에 따른 경제성 - 산소 판매 시나리오	123
<표 5-13> 산업용전력(을) 전기요금표	123
<표 5-14> 원전 수소 LCOH _ 산업용 전기요금: 산업용 전기요금 적용 시	124
<표 5-15> 전기요금에 따른 원자력 청정수소 생산 단가 - 90% 이용률 기준	125
<표 5-16> 이용률에 따른 원자력 청정수소 생산 단가 - 원전 정산단가 기준	126
<표 5-17> 균등화 수소 생산단가 비용구조(단위: 원/kgH ₂)	127
<표 5-18> 2030년 수소시장 크기	130
<표 6- 1> 직접 PPA 주요 내용	137
<표 부록-1> 수소 기업의 세부 사업 현황	157

그림 차례

[그림 2- 1] 철강산업에서 CBAM 영향 범위	12
[그림 2- 2] 수소에너지 전주기 밸류체인 도식	24
[그림 2- 3] 탄화수소 기반의 수소 생산 방식	25
[그림 2- 4] 수소생산 기술별 이산화탄소 배출량	26
[그림 2- 5] 수전해 셀의 원리	27
[그림 2- 6] 부문별 수소 활용 현황 및 전망(2020-2030)	32
[그림 2- 7] 수소연료전지의 원리	34
[그림 2- 8] 철강 산업의 주요 CO2 배출 공정	35
[그림 2- 9] 수소환원제철의 개념	36
[그림 2-10] 그린수소 활용 납사 대체 기술의 온실가스 감축 원리	37
[그림 2-11] 2050년 탄소중립 달성을 위한 온실가스 감축 조치별 기여율	38
[그림 2-12] 2050 탄소중립 달성을 위한 수소 수요 및 공급량 전망	38
[그림 2-13] 2050 탄소중립 달성을 위한 수소 수요의 부문별 비중	39
[그림 3- 1] 수소산업 소부장 육성전략 주요내용	51
[그림 3- 2] 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획 주요 추진과제	53
[그림 3- 3] “Well-to-Gate” 산정범위	58
[그림 3- 4] 주요 수소인증제 별 온실가스 산정범위 및 임계점	61
[그림 3- 5] 전 세계 국가별 수소 관련 기업 수 분포	66
[그림 4- 1] 글로벌 원전 시장 전망	72
[그림 4- 2] 글로벌 원전 산업 발전 추이	73
[그림 4- 3] 글로벌 원전 설비-기수 : 운영 및 중단 현황	74
[그림 4- 4] 글로벌 원전 SMR 기술유형별 기술성숙도(TRL)	82
[그림 4- 5] CFPP 사업의 목표 전력 생산 비용(/MWh)의 변화	84
[그림 4- 6] 우리나라 12대 국가전략기술·50개 세부 중점기술 목록	87
[그림 4- 7] 일본 ‘2050년 탄소중립에 따른 녹색성장전략’ 중 SMR 성장전략 로드맵 (‘21.6.)	94

[그림 5- 1] 초온가스로 원전수소 생산 경로	106
[그림 5- 2] 원전수소 생산의 타당성	108
[그림 5- 3] 대형 원전과 SMR의 부지 및 설계 차이	111
[그림 5- 4] 대형 원자력 기반 청정수소생산 가능 지역	118
[그림 5- 5] 원자력 청정수소 - 경제성 분석 범위	119
[그림 5- 6] 원자력 청정수소 생산 단가 산정 과정	120
[그림 5- 7] 전기요금에 따른 원자력 청정수소 생산 단가	125
[그림 5- 8] 이용률에 따른 원자력 청정수소 생산 단가	126
[그림 5- 9] 수소생산비용의 항목별 구성비	128
[그림 5-10] 원전수소 밸류체인 전망	131

01



서론



제1절 연구 배경 및 필요성



1. 연구 배경

기후변화 대응이 전 세계적인 화두로 떠오르면서 산업부문에서도 경제적 가치 창출을 넘어서 환경적 가치에 대한 인식이 확산되어 가고 있다. 이에 전통적인 에너지를 기반으로 한 산업 활동이 축소되고 친환경 에너지를 기반으로 한 새로운 산업 활동의 필요성이 증대되기 시작하였다. 이러한 에너지 전환 기조 하에서 우리 사회는 경제활동을 위한 산업 육성과 기후변화 대응을 위한 에너지전환 노력을 함께 이룩하여야 하는 난관에 봉착하게 되었다. 또한, 오늘날 산업 환경은 더 이상 산업과 과학 기술 등에만 국한된 것이 아니라 경제 안보를 둘러싼 글로벌 밸류체인 동맹의 기조에서 이루어져야 하는 상황으로 빠르게 변화하고 있다. 이러한 국제적 흐름의 변화 속에서 신산업과 첨단산업에서의 경쟁력 확보는 신성장동력의 확보와 더불어 세계 상품 시장에서 우리나라 상품을 필수교역재화하여 경제안보에도 기여할 수 있을 것으로 예상되고 있다.

이렇듯 새로운 에너지 및 산업 환경 변화에서 전 세계적으로 수소에 대한 관심이 높아지고 있다. 수소는 산업육성과 에너지전환 목표를 모두 가능케 하는 신성장동력으로 인식되고 있는 친환경에너지원으로 수소에너지를 생산·유통·활용하는 과정에서 새로운 전·후방 산업이 창출될 것으로 기대되고 있다. 특히, 수소생산 시 온실가스 배출량을 저감하여 생산된 청정수소(혹은 저탄소 수소)의 밸류체인을 구축하는 과정에서 새로운 기술이 개발되고 신산업이 창출될 것으로 예상되며, 기존에 전통적인 에너지를 기반으로 한 산업 및 기술 밸류체인에서 수소를 새로운 에너지원으로 활용하기 위해서도 신기술 개발과 신산업이 창출될 것으로 전망되고 있다.

수소에너지의 경제적·환경적 가치가 높아짐에 따라 우리 정부에서는 2019년 이후 적극적인 수소경제 정책을 추진해오고 있다. 그럼에도 불구하고 국내 청정수소 생산 기반은 여전히 부족하다고 평가되고 있다. 주요 선도국에 비해 기술 경쟁력이 낮고, 청정수소 생산 관련 산업이 충분히 활성화 되지 못하고 있는 실정이다. 이에 국내 청정수소 생산 기반 조성을 위해서는 첫째, 핵심 기술 개발, 둘째, 안정적 공급망 확보가 중요할 것이다. 국내 청정수소 산업의 경쟁력을 강화하려면 주요 핵심 기술의 국산화를 기반으로 전·후방 산업을 육성하여 수소 산업 밸류체인을 활성화 시

킬 필요성이 있다.

현재 청정수소 생산 산업에서 가장 핵심이 되는 분야는 ‘수전해’ 분야로 물을 전기분해하여 수소를 생산하는 방식이다. 수소 생산과정에서 온실가스 배출이 없기 때문에 가장 친환경적인 수소 에너지 생산 기술로 인식되고 있다. 수전해 기술을 활용한 수소 생산 시 전기분해에 투입되는 전력의 발전원 또한 무탄소 발전원이 활용되는 것이 가장 바람직한데, 대표적인 무탄소 발전원이 재생에너지와 원자력으로 일컬어지고 있다.

우리나라는 국내 재생에너지 생산여건이 좋지 않아, 원자력발전이 기저발전으로 전원믹스에서 상당부분을 차지하고 있다는 점에서 수소 생산에 활용할 무탄소 발전원으로서의 원자력 발전의 활용 가능성에 대한 논의가 상당히 진행되고 있다. 청정수소 산업 생태계 조성에서 핵심적인 수전해 기술 개발을 위해서는 재생에너지 및 원자력 발전의 연계활용의 역할이 크기 때문이다. 원자력 발전은 전력수요에 대응하는 저탄소 발전원으로서 수전해 장치를 연계 시 변동성과 간헐성이 높은 재생에너지 보급 확대에 따른 부하추종 및 청정수소 생산에 용이하다는 장점이 있다.

태양광·풍력 대비 핵심광물 이용이 적은 원전을 통한 청정수소 생산은 에너지 공급망 안정화 측면에서도 긍정적인 기여도가 존재한다. 또한 우리나라는 글로벌 수준의 독자적인 전주기 원전 기술력을 보유하고 있다는 점에서 원자력수소의 선도적·선행적인 이용증진 방안 마련은 국내 원전산업 생태계 회복뿐만 아니라 더 나아가 그 발전에도 주요한 영향을 미칠 수 있는 국가현안으로 인식되고 있다. 이렇듯 수소산업과 원자력 산업을 연계한 신산업을 전망하고, 활성화 할 수 있는 방안을 모색하는 것이 청정수소 생산 연관 산업의 기술력과 산업경쟁력 제고에 기여 할 수 있을 것이다.

최근에는 기존의 대형원전에 비해 안정성이 한층 강화되고 타부문 연계 활용 가능성이 높은 중소형원자로(Small and Medium Reactor, SMR)에 대한 관심도가 높아지고 있다. 분산형 전원으로서 수요지 인근에서 입지제약 및 법·제도적 제약 등 기존의 틀에서 벗어난 새로운 여건 하에서 전력과 수소를 공급하는 공급원으로써 활용될 수 있을 거라는 기대감으로 인해 혁신형 신기술로 주목받고 있다. 본 연구에서는 이러한 산업·에너지 환경 변화 속에서 수소와 중소형원자로 산업의 혁신 생태계 조성을 위한 정책적 시사점을 도출하고자 한다.

2. 연구 필요성

우리나라는 2019년부터 수소 경제 활성화를 위한 로드맵을 제시하며, 수소 산업 육성을 위한 다양한 정책을 추진해왔다. 그 중 국내 청정수소 생산 기반 조성은 주된 정책 목표로써 국내 수소 산업 생태계 조성과 에너지 안보 강화를 위한 필수 요소로 여겨지고 있다. 이에 원전을 기반으로

한 수소 생산 및 국내 수소 자급률 제고에 대한 기대감이 확산되고 있다. 특히 2022년 발표된 새 정부 110대 국정과제에 “탈원전 정책 폐기 및 원자력산업 생태계 강화”가 포함됨으로써 수소 생산에 원자력발전을 활용할 수 있는 정책적 모멘텀이 강화되기 시작하였다. 이렇듯 원전과 같은 무탄소 발전원을 활용한 수소 생산은 국내 청정수소 생산 기반을 조성하는데 큰 역할을 수행할 것으로 예상된다. 그러나 지난 몇 년간 원전 비중 확대에 대한 부정적 여론과 정책 방향으로 인하여 수소경제 활성화를 위한 수단으로서의 원자력 발전의 활용에 대한 연구는 기술 부문에 국한되어 있었다. 즉, 수소산업과 원자력산업의 융합이 가지는 정책적·경제적·환경적 관점에서 의미에 대한 분석이 부재한 상황이다. 아직까지 원전을 활용한 수소 생산이 실현될 경우 수소-원전 연계 신산업이 어떻게 창출 될 것인지, 원전 기반 수소 생산의 경제성이 확보될 수 있을지, 이로 인한 사회·경제적 파급효과가 어떻게 나타날 것인지 등에 대한 심층적인 분석이 이루어지지 않고 있다.

또한, 국내 원전설비를 이용한 수소 생산 기반은 원자력안전위원회 허가가 필수불가결한 사항으로 정책적·제도적·경제적 합리성과 주민수용성을 사전 확보하는 것이 관건이다. 이러한 관점에서 에너지 전환과 탄소중립 달성을 위해 청정수소의 수요가 높아짐에 따라 국내 청정수소 생산 및 공급 기반에 대한 환경 분석이 필요하다. 국내 수소 경제를 앞당기고, 청정수소 자급률을 높이기 위해 국내 청정수소 생산 필요성이 대두됨에 따라 청정 발전원으로 각광 받는 원전 기반, 특히 혁신 생태계 조성에 가장 큰 역할을 할 것으로 주목받고 있는 중소형 원자로 기반 수소 생산에 대한 정책 연구가 필요한 시점이다.

3. 연구 목적

본 연구의 목적은 대규모 수소 수요를 충족시키기 위한 국내 청정수소 공급 여건을 검토하고, 특히 중소형 원자로를 활용한 청정수소 생산의 가능성을 탐색하는 것이다. 이에 본 연구에서는 다음과 같은 세 가지 주요 연구 질문을 다룬다.

첫째, 본 연구에서는 수소경제 활성화 및 신산업 창출 수단으로 원자력 발전(원전)의 활용 방안을 검토한다. 이 과정에서 대규모 수소 수요를 충족시키기 위한 국내 청정수소 공급 여건을 살펴보고, 국내 청정수소 생산 및 공급 경로 중 중소형 원자로 활용의 가능성을 점검한다. 이는 분산형 수소 생산기지로서 중소형 원자로의 활용 가능성뿐만 아니라, 청정수소 공급 방안의 현실성을 검토하는 것을 포함한다.

둘째, 중소형 원자로를 활용한 청정수소 생산의 법적, 기술적, 경제적 여건을 분석한다. 이를 통해 중소형 원자로 기반의 청정수소 생산의 장단점을 검토하고, 이와 관련된 정책적 시사점을 제시한다. 이 과정에서 수소, 원전, SMR에 대한 정책과 산업 동향을 파악하고, 원전-수소 연계 신산업

에 대한 전망을 수행한다.

셋째, 수소-원전 연계 신산업 활성화를 위한 선결과제를 파악하고, 이를 바탕으로 정책적 시사점을 도출한다. 이는 탄소중립을 위한 에너지전환에 필요한 수소 관련 수요를 충분히 공급할 수 있는 방안을 모색하는 것으로, 국내 수소 생산 경로 중 SMR 기반 수소 생산 경로의 경제성 분석 및 파급효과 전망을 통해 학술적 기여도를 기대한다.

본 연구는 원전을 활용한 수소경제 활성화와 신산업 창출에 중점을 두고, 수소와 원자력을 결합한 새로운 산업 모델의 타당성을 검증하며, 이를 통해 수소산업의 지속 가능한 성장을 도모하는 것을 목표로 한다.

제2절

연구 내용 및 연구 방법



1. 연구 범위 및 연구 내용

본 연구는 중소형 원자료를 이용한 청정수소 생산이라는 주제에 대해 심층적이고 포괄적인 분석을 수행하는 것을 목표로 한다. 이 연구는 과거에 수행된 원자료를 활용한 수소 생산에 관한 연구들과는 다르게, 최근에 수소가 재조명 받는 경제정책 연구의 상대적 부족함을 해소하고자 한다. 특히, 이 연구는 중소형 원자료를 중심으로 한 청정수소 생산의 법적, 기술적, 경제적 여건을 면밀히 검토하는 것을 목표로 한다.

본 연구의 첫 단계에서는 우리나라 산업 및 에너지 정책의 맥락에서 수소와 원전 정책을 심도 있게 검토하고, 수소와 원전 및 중소형 원자료가 신산업 창출의 수단으로 어느 정도 활용될 수 있는지에 대한 폭넓은 분석을 진행한다. 이를 통해 수소와 원전의 통합이 새로운 산업 기회를 어떻게 창출할 수 있는지에 대한 근거를 마련한다.

다음으로, 수소와 원전 산업의 융합을 통해 창출될 수 있는 새로운 산업에 대한 전망을 수립하고자 한다. 이 과정에서 기존 원전 산업과 수소 산업의 밸류체인을 상세히 분석하고, 원전과 수소 산업이 연계되었을 때 형성될 수 있는 새로운 밸류체인과 잠재적인 비즈니스 모델을 탐색한다. 이를 통해 원전 기반 수소 및 SMR 기반 수소 생산이 경제적으로 타당한지를 검토하고, 수소와 원전 연계 밸류체인 모델이 구성될 경우 국내 경제 및 사회에 미치는 과급효과를 종합적으로 평가한다.

마지막으로, 본 연구는 수소와 원전을 기반으로 한 신산업을 활성화하기 위해 필요한 선결 과제를 심도 있게 파악하고자 한다. 이러한 연구는 과거 원자료를 이용한 수소 생산에 관한 연구들과는 달리 최근 수소가 재조명 받는 경제정책 연구의 부족한 상황에서 중소형 원자료를 집중하여 법적, 기술적 이슈들과 경제적 효과를 종합적으로 검토하는 것을 포함한다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 국내외 수소경제 관련 자료 및 중소형 원자로 관련 자료를 수집하고 분석함으로써 공신력 있는 벤치마크 자료를 활용하였다. 이를 위해 IEA, IRENA, IAEA 등 국제 에너지 관련 기구의 연구보고서 및 데이터를 활용하고, 중소형 원자로의 경제성 및 활용도 분석과 관련된 선행

연구들을 분석하였다. 또한, 유관기관 및 관련 연구진과의 협의를 통해 연구결과의 전문성을 확보하기 위해 노력하였다. 한국원자력연구원, 에너지기술연구원, 한국수력원자력 등 유관기관과의 연구협의회 및 전문가 자문회의 등을 통해 원전 수소 및 중소형 원자로 관련 정책 및 기술 동향을 파악하고자 하였다. 원전수소의 경제성 분석에 있어서는 대표적인 원자력 기반 수소생산 모형에 대한 LCOH(균등화수소생산단가, Levelized Cost of Hydrogen)를 추정하였다. 이를 바탕으로 재생에너지 기반으로 생산된 국내 청정수소 혹은 해외 청정수소와의 가격 경쟁력 측면에서 원전 수소 및 SMR 기반 수소가 강점이 있을지를 파악하였다. 마지막으로 이러한 원전-수소 연계 신산업을 창출하고 활성화하는 과정에서 발생할 수 있는 법·제도적 애로사항과 개선 방향을 포함한 정책적 시사점 도출을 위해서는 분야별 전문가 자문을 주된 연구 방법으로 활용하였다.

이어지는 제 2장에서는 최근 산업계가 직면하고 있는 에너지전환 요구에 대해 알아보고, 수소 에너지와 수소경제가 에너지전환의 수단으로 어떻게 활용될 수 있는지를 짚어본다. 이어서 제 3장에서는 우리나라가 수소경제로의 전환을 위해 추진해 온 수소경제 관련 정책을 살펴본다. 그리고 제 4장에서는 국내외 원전 산업과 중소형 원자로 산업에 대한 정책동향과 산업 동향을 살펴본다. 그리고 제 5장에서는 원전과 중소형 원자로를 활용한 수소 생산에 대한 경제성을 검토하고, 형성될 수 있는 원전-수소 연계 밸류체인과 그 파급효과를 분석한다. 마지막으로, 제 6장에서는 원전과 수소 연계 신산업을 활성화하기 위한 정책과 법·제도적 선결과제를 다룬다. 이러한 내용을 바탕으로 제 7장에서는 본 연구의 결론을 도출한다.



에너지 전환과 수소경제



제1절

국제사회에서의 에너지전환 요구



기후변화, 지정학적 위기, WTO 등 다자주의 체제의 붕괴 등 신기후통상체제를 직면하고 있는 이때, 각 국은 자국을 보호하기 위해 신 보호주의 무역 정책 및 일방조치 등을 취하고 있으며 자국 산업보호를 위한 정부 주도의 산업정책을 추진하고 있다. 또한 민간부문에서는 RE100, CFE, ESG 등 글로벌 투자자와 공급망으로부터 에너지전환 요구가 증가하고 있다. 이에 밸류체인 전반에서의 에너지전환의 필요성이 대두되기 시작하였다. 즉, 기업이 재생에너지, 청정에너지를 사용하도록 대내외적인 압력이 증가하고 있다. 에너지전환 및 탄소중립이 산업부문에서는 비용증가가 수반되는 위기요인으로 작용할 수 있다. 특히 화석연료 비중이 높은 한국의 에너지 구조에서 에너지전환 요구는 산업계에 큰 위기요인으로 작용할 것으로 예상된다. 이 상황은 에너지수입국이자 수출의존도가 높은 한국의 에너지, 산업 구조 상 크나큰 위기가 될 수밖에 없다. 우리나라는 자동차, 조선, 철강 등 전통적인 주력산업이 에너지다소비 및 난감축 업종이라 이러한 글로벌 환경규제에 대한 민감도가 높은 편이다. 다배출 및 난감축 산업이 국가 GDP에서 차지하는 비중이 높은 만큼 에너지전환에 대응하기 위한 산업계의 전략 수립이 필수적인 상황이다. 이러한 상황을 타개하기 위한 우리나라의 전략에 대한 고민이 필요한 시점이다.

1. 신기후통상체제의 도래

최근 EU와 미국 등 선진국을 중심으로 자국의 산업과 제품을 보호하기 위해 다른 국가에 대한 탄소 배출 감축 노력을 일방적으로 규제하는 제도를 도입하는 움직임이 있다.¹⁾ 기존의 국제 무역 체계가 국제무역기구(WTO)를 대표로 하는 다자주의 체계였으나 기후변화 대응 및 지정학적 위기가 도래하면서 이러한 다자주의 체계가 붕괴되고 자국 산업을 보호하려는 고도화된 보호주의 무역 정책이 등장하고 있다. 이러한 통상환경의 변화를 '신기후통상'으로 일컫는데, 가장 큰 특징은 국제통상 및 공급망 관련 규범에 기후변화 대응 및 에너지전환을 위한 정책 목표가 포함되었다는 것이다. 앞으로 기후변화 대응을 위해서 새로운 기술이 개발·보급 되어야하며, 환경 규제도 강화 되어야 한다. 특히 최근의 환경 규제는 특정 제품이 아닌 공급망 전반에 걸쳐 환경적 관리가 되

1) 손인성 외(2023). p.59.

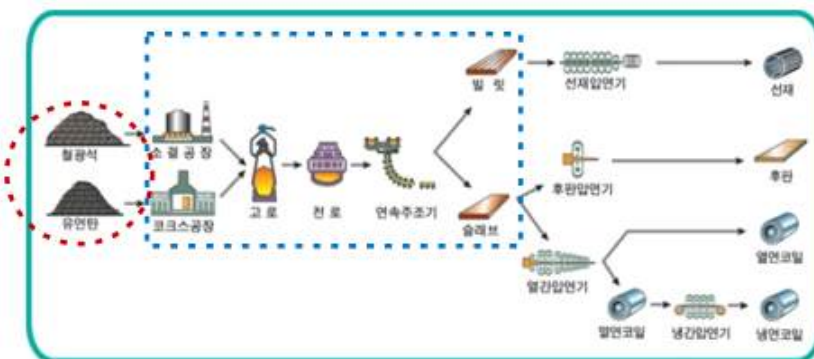
도록 강화되고 있는데, 이는 산업부문이 신기후통상 체제에서 겪게 될 주된 어려움이 될 것이다.

기후변화 대응과 에너지 전환 요구에 부응하기 위해 산업계가 위기에 처해질수록 이러한 신 기 후 통상 체제 하에서는 자국의 산업과 환경을 보호하기 위한 일방주의적 조치가 많아질 수밖에 없 을 것이다.

가. EU의 탄소국경조정제도(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)

대표적인 일방 조치가 EU에서 발표한 탄소국경조정제도(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)이다. CBAM은 탄소배출규제가 EU보다 약한 국가로부터 EU로 수출되는 제품에 탄소배출에 대한 비용을 부과하여 탄소배출규제로 인해 산업경쟁력이 약해진 EU 역내의 제품이 EU 역외 제품과 공정하게 경쟁할 수 있는 환경을 조성하기 위해 도입된 무역 제한 조치이다.²⁾ CBAM은 우선적으로 6개 제품에 적용된다. 적용 제품은 1) 철강, 2) 알루미늄, 3) 시멘트, 4)비료, 5) 전력, 6)수소이며, 우리나라가 EU에 수출하던 제품 중 철강과 알루미늄이 가장 직접적인 영향을 받게 되었다. 이에 EU로 해당 제품을 수입하고자 하는 사업자는 CBAM 인증서를 구매하는 형태로 실제 시장 가격에 탄소배출로 인한 일부 비용을 추가하여 구매하게 된다. 2026년 본격 시행되는 CBAM은 일단은 직접배출만을 대상으로 하지만, 향후 간접 배출까지 CBAM의 범위로 포함될 가능성이 있다.³⁾ 즉, 철강 및 알루미늄 제품을 EU로 수출하기 위해서는 생산 공정에서의 직·간접 배출을 최대한 줄여야한다는 의미이다. 예를 들어 [그림 2-1]에서는 철강산업에서 CBAM의 영향 범위를 도식으로 보여준다.

[그림 2-1] 철강산업에서 CBAM 영향 범위



주: EU CBAM 영향 범위를 푸른색 점적으로 표기

자료: 손인성 외(2023), 기후변화 관련 통상 규제 확산에 따른 대응 방안 연구, p.69.

2) 손인성 외(2023). pp.59-61.

3) 손인성 외(2023). p.64.

우선 직접 배출만 대상으로 적용될 때는 푸른색 점선으로 표시된 범위에서 배출량을 저감하는 것이 중요하다. 향후 간접 배출이 CBAM의 적용 대상이 될 경우에는 빨간색 점선으로 표시된 연료 및 원료의 채굴·생산 과정에서 발생하는 온실가스 배출량도 모두 포함될 것이다.

이러한 일방적인 기후통상적 규제 조치는 우리나라와 같이 EU에 비해 낮은 탄소감축규제를 가지고 있으며, EU로 GDP 기여율이 높은 제품을 수출해야 하는 국가에 직접적인 타격을 주게 된다. 이에 많은 기업들이 산업 생산 공정에서 발생하는 직·간접 배출을 줄이기 위한 다양한 혁신 기술을 개발, 보급, 투자하고 있다.

한편, 철강 산업에서 가장 직접적인 영향을 준 CBAM은 오히려 철강 업계가 수소환원제철에 대한 적극적인 관심을 갖도록 유도하기도 하였다. 현재 철강 부문에서 온실가스를 감축하려면, 고로에 투입되는 연료를 청정에너지로 전환하는 것이 필수적인데 가장 대표적인 연료전환이 수소에너지로 전환하는 것이다. 철강부문에서의 수소 활용은 다음 절에서 자세히 다루도록 하겠다.

나. 미국의 인플레이션감축법(Inflation Reduction Act, IRA)

미국 바이든 행정부는 2050년 탄소중립 실현을 위해 세율을 인상하고, 확보된 세수를 활용하여 미국 내 청정에너지 기술 역량 강화 및 청정에너지 보급 확대를 목표로 인플레이션감축 법안(IRA)을 발표하였다. 2022년 8월 발표된 이 법안은 1) 에너지 안보 제고 및 기후변화 대응, 2) 의료보건 접근성 개선, 3) 조세 공정성 증대 등을 위한 규범으로 구성되어 있는데, 대부분의 규정이 제1의 목표인 에너지안보 제고 및 기후변화 대응과 관련이 있다.⁴⁾

IRA에는 미국 내 청정에너지 보급을 위한 인센티브 제도가 포함되어 있다. 가장 대표적으로 청정수소 생산에 대한 세액공제제도를 꼽을 수 있다. IRA 하에서 청정수소(수소 1kg 당 온실가스 배출 4kgCO₂eq 이하에 해당)를 생산 할 경우, 수소 1kg 당 최대 \$3의 생산세액공제(Production Tax Credit)를 받을 수 있고, 수전해기 투자에 대한 투자세액공제(Investment Tax Credit)도 받을 수 있다.⁵⁾

IRA에 포함된 청정에너지 기술 관련 지원제도를 보면 미국이 자국의 청정에너지 산업 활성화를 위해 적극적인 정책을 마련하고 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 지원제도의 이면에는 미국 외 국가의 산업에 대한 규제적 측면이 포함되어 있다. IRA의 경우 첨단 및 청정에너지 산업 분야에 대해 미국산 부품 사용 요건을 포함하고 있다.⁶⁾ IRA에서 세액공제 등의 지원을 받으려면 미국

4) 손인성 외(2023). pp.79-80.

5) 김기환·안지영(2022). pp.67-69.

6) 손인성 외(2023). p.84.

산 부품을 사용하고, 최종 조립이 북미 지역에서 이루어져야 한다는 요건을 만족해야 한다. 친환경 경차, 태양광, 풍력, 수소, 원자력 등 무탄소 전원을 통해 전력을 생산하는 사업 혹은 관련 설비 건설에 대한 투자 시에도 미국산 부품을 사용할 시 추가적인 지원이 가능하도록 설계되어 있다⁷⁾. 이는 청정에너지 관련 기술의 밸류체인을 미국 중심으로 구축하고 이렇게 생산된 제품이 시장경쟁력을 가지도록 하겠다는 의미로 해석할 수 있다.

<표 2-1> 미국 IRA 조문 구성

항목	내용	
Title I 기획재정위원회	Subtitle A 재정적자 감축	Part 1 법인세 개혁
		Part 2 자사주 매입에 대한 소비세 부과
		Part 3 국세청(IRS) 자금 지원 및 납세자 규정준수 개선
	Subtitle B 처방약 가격 책정 개혁	Part 1 약품 가격 협상을 통한 가격 인하
		Part 2 처방약 인플레이션 환급
		Part 3 메디케어(Medicare) 수혜자의 본인부담액 상한제
		Part 4 처방약 환급 규정 시행의 지속적 지원
		Part 5 기타
	Subtitle C 건강보험개혁법(Affordable Care Act) 보조금	
	Subtitle D 에너지안보	Part 1 청정 전기 및 탄소 배출 감소
		Part 2 청정 연료
		Part 3 개인에 대한 청정에너지 및 에너지효율 인센티브
		Part 4 청정자동차
		Part 5 청정에너지 제조 및 에너지안보에 대한 투자
		Part 6 슈퍼 펀드 * 환경오염 방지 사업 지원을 위한 대규모 자금
		Part 7 청정 전기 및 청정 운송을 위한 인센티브
		Part 8 세액공제(credit) 수익화 및 지출 승인
		Part 9 기타 조항
	Title II 농업·영양 위원회	Subtitle A 일반 규정
Subtitle B 보존(Conservation)		
Subtitle C 농촌 개발 및 농업 공제		
Subtitle D 임업		
Title III 은행·주택·도시위원회		
Title IV 통상·과학·교통위원회		

7) 손인성 외(2023). p.86.

항목		내용
Title V 에너지· 천연자원 위원회	Subtitle A 에너지	Part 1 일반규정·에너지부(DoE) 자금지원
		Part 2 주거 효율성 및 전기화 환급
		Part 3 건물 효율성 및 회복 탄력성
		Part 4 에너지부(DoE) 대출 및 보조금 프로그램
		Part 5 송전(transmission)
		Part 6 산업 관련
		Part 7 기타 에너지 관련 사항
	Subtitle B 천연자원	Part 1 일반규정
		Part 2 공유지
		Part 3 가뭄 대응 및 대비
		Part 4 도서 지역 관련 사항
		Part 5 해상 풍력
		Part 6 화석연료 자원
		Part 7 미국 지질 조사국
Subtitle C 환경성 검토		
Title VI 환경·공공사업 위원회	Subtitle A 대기오염	
	Subtitle B 유해물질	
	Subtitle C 미국 어류 및 야생 동물 서비스	
	Subtitle D 백악관 환경위원회	
	Subtitle E 교통 및 인프라	
Title VII 국토안보·정부문제 위원회		
Title VIII 인디언 문제 위원회		

주: 에너지안보 및 기후변화 관련 부분은 파란색 음영으로 표시

자료: Senate Democrats(2022), "The Inflation Reduction Act of 2022". 손인성 외(2023), 기후변화 관련 통상규제 확산에 따른 대응 방안 연구, pp.79-80.에서 재인용.

그러나 이러한 일방적 조치는 기후변화 대응을 명분으로 자국 산업을 보호하고자 하는 신 보호주의 무역의 한 형태로 평가된다. 재생에너지, 수소, 원자력 등의 산업은 우리나라에서도 향후 미래 신산업 창출을 위해 안정적 밸류체인을 구축해야하는 분야이다. 우리나라 내에서 소재·부품·장비 등의 에너지 신산업 관련 연관산업을 육성하기 위해서라도 미국의 IRA와 같은 일방적 조치에 지속적으로 관심을 갖고 살펴야 할 것이다. 우리나라와 밀접하게 연관된 국가에서의 일방적 조치인 만큼 각 부문별로 우리나라 산업계에 어떤 영향이 있을지, 어떤 기회요인과 위기요인이 있을지를 파악해야 할 것이다.

2. 글로벌 이니셔티브

에너지전환에 대한 요구는 공공부문에서 정책적으로 견인되는 것만은 아니다. 최근에는 민간 부문에서 자발적인 캠페인으로서 에너지전환에 대한 목표설정과 이행 요구 등이 확대되고 있다. 대표적인 사례가 RE100과 CFE이다. 이는 우리가 소비하는 에너지를 재생에너지 혹은 무탄소 에너지원으로 전환하자는 국제적 움직임이며, 非청정에너지소비기업에서 기후변화 대응과 에너지 전환에 앞장서기 위해 청정에너지 소비를 하겠다는 일종의 선언적인 이니셔티브라고 볼 수 있다.

가. RE100 및 CFE

RE100은 'Renewable Energy 100%'의 약자로, 글로벌 기업들이 100% 재생 가능 에너지로 운영할 것을 목표로 하는 이니셔티브이다. 이는 2014년 영국의 비영리 단체인 클라이밋 그룹(The Climate Group)과 탄소 공개 프로젝트(CDP, Carbon Disclosure Project)에 의해 시작되었다. RE100의 목표는 기업들이 재생 가능 에너지 사용을 통해 탄소 배출을 줄이고, 지속 가능한 비즈니스 모델을 구축하며, 전 세계적으로 재생 가능 에너지 시장을 확대하는 것이다. 이에 RE100 참여 기업은 특정 연도까지 자사의 전력 사용량의 100%를 재생에너지로 전환하겠다고 선언하고, 매년 재생에너지 사용현황을 자발적으로 보고하고, 목표 달성 여부를 공개한다. RE100 달성은 물리적으로 재생에너지를 연계하여 전력을 공급하는 방식은 아니며, 재생에너지 인증서 구매나 전력구매계약(PPA) 등을 통해 소비전력의 100%에 해당하는 전력량에 대하여 재생에너지를 활용했다는 증빙을 하면서도 달성 가능하다.

이후 재생에너지 보급 확대에 대한 어려움과 기타 무탄소 발전원에 대한 투자 활성화를 위한 수단으로 RE100에서 보다 확장된 범위인 CFE(Carbon-Free Energy)에 대한 관심이 증대되었다. 기존 재생가능에너지원만을 고려하고 있는 RE100에 대하여 각 국가별·지역별로 재생가능에너지원의 보급 여건을 고려하고 그 한계를 인정하면서도 진정한 의미에서의 탄소중립을 위한 무탄소에너지 이니셔티브(CFE, Carbon Free Energy)에 대한 논의가 본격화되고 있는 추세이다. 이는 재생가능에너지원을 포함한 원전, 수소, 연료전지 등 무탄소 발전원의 이용과 보급이 더욱 폭넓게 활성화되어야 한다는 취지를 담은 것으로서 2021년 UN에너지(UN의 에너지분야 협력기구)와 구글 주도로 '24/7 CFE 이니셔티브'의 형태로 공식 출범되었다. 무탄소에너지는 재생에너지를 포함하여, 원자력, 청정수소, 탄소포집·활용·저장(CCUS, Carbon Capture Utilization and Storage)까지 직접적으로 탄소를 배출하지 않는 모든 에너지원을 포함하는 기술중립적 개념이다.

이는 전력 공급기업과 전력시스템 운영 및 기술 솔루션 기업이 다수 참여하고 있으며 재생에너지 수요기업이 대부분을 차지하고 있는 RE100과의 차이를 보이고 있다. 기존 RE100과 마찬가지로 무탄소에너지원에 대한 이용·보급의 확산이 민간차원에서 이루어질 수 있도록 하는 캠페인

의 형태로 본격 추진될 전망이고 원자력과 수소 등 탄소중립의 다양한 수단을 인정하고, 국가·지역별 상이한 재생에너지 발전 여건이 고려되지 못하는 한계를 극복하기 위한 또 다른 캠페인이다

<표 2-2> RE100과 24/7 CFE 비교

구분	RE100	24/7 CFE
의미	재생 가능한 전기 100% (Renewable Electricity 100)	무탄소 에너지 (Carbon-Free Energy)
주관기관	The Climate Group, CDP 위원회	SEforAll, UN, UN Energy
목표	2050년까지 기업의 전력수요 100%를 재생에너지로 조달 (‘30년 60%, ‘40년 90% 중간목표)	전력 시스템의 탈탄소화 (전력 부문에서 탄소 완전 제거)
주요 에너지원	태양광, 풍력, 수력, 지열, 바이오 에너지 등 재생에너지	재생에너지, 원자력, 연료전지, CCS 기술 적용한 발전 등 무탄소 에너지원
참여 자격	연간 100GWh 이상 또는 영향력 있는 기업 (Fortune 1,000대 기업)	없음 (정부/기업/에너지 솔루션 제공업체 등 모두 참여 가능)
참여 및 보고 절차	1) RE100 참여 선언(기업) 2) 자격검토(CDP) 3) 연 1회 실적 제출(기업→CDP) 4) 이행현황 발표(CDP)	24/7 CFE 참여(서약) (서약 이후 별도의 실적 보고 절차는 없음)
참여 현황 (‘23년 7월)	414개 기업 (SK, 삼성, LG 등 국내 34개 기업 참여 중)	구글, Microsoft, Orsted 등 125개 (엔라인트, 한국수력원자력 참여)
발족 시기	2014년	2021년

자료: 산업통상자원부(2023), 탄소중립을 위한 국제 Initiative (24/7 CFE 중심) 조사·분석, p.33.

자발적으로 참여했다고 하더라도 RE100, CFE와 같은 이니셔티브에 참여하고 목표달성을 위해 에너지전환을 이행해 나가는 과정에서 기업은 상당한 비용 증가를 직면할 수밖에 없을 것이다. 그러나 글로벌 투자환경이 변화함에 따라 RE100, CFE와 같은 글로벌 에너지전환 요구를 무시할 수 없을 것이다.

나. ESG 투자

기업들이 자발적으로 에너지전환 노력을 기울이는 것은 비단 기후통상체제의 새로운 환경 규제 때문만은 아니다. 기후변화 대응과 에너지 전환이 요구되는 시대에 글로벌 투자자들은 단순히 경제적 가치만 고려하지 않는다. 장기적인 관점에서 해당 기업이 이렇게 환경 규제가 강화되는 상황에서 지속가능할 것인가를 고려하여 투자 의사결정을 하게 된다. 이에 전 세계적으로 기후변화 리스크(기후변화로 인해 기업의 존재가 흔들리는 위험)를 줄이기 위한 자금 흐름 및 투자에 대한

요구와 중요성이 커지고 있다.⁸⁾ 이에 글로벌 투자자 및 금융기관은 투자 및 대출 심사에서 책임투자자와 환경·사회·지배구조(Environmental, Social, Governance, ESG) 요소를 비재무적 요소로 평가하고 있다.⁹⁾

기업의 ESG 경영이란 ESG 지표에 맞춘 사회책임경영이고, ESG 투자란 ESG 경영성과를 바탕으로 투자하는 것을 의미한다. 그 중 기후변화와 에너지전환과 관련된 지표는 E(환경)성과 지표로, 에너지사용량, 탄소배출량, 청정에너지 기술 활용 여부, 온실가스 배출 저감 노력 등 다양한 에너지·환경적 노력을 정량적 및 정성적으로 평가하고 있다. ESG 투자자는 기업의 재무적 성과 외에 이러한 환경적 노력을 함께 고려하여 기업에 투자할 수 있다.

최근의 ESG 경영 및 ESG 투자는 특정 기업의 범위를 넘어서 공급망 전반으로 확대되고 있다. 즉, 기업이 ESG 관리를 해야 하는 대상과 범위가 자신이 포함된 공급망 전체가 되었다는 의미이다. 이러한 글로벌 투자환경이 확대됨에 따라서 RE100, CFE 혹은 기타 에너지전환 노력, 기후변화 대응 노력이 없는 기업은 투자를 못 받을 뿐만 아니라 사업이 축소될 수 있는 위기에 처할 수 있다.

신기후통상체제로 인한 일방적 환경규제, 무역규제와 ESG 투자와 같은 글로벌 투자환경의 변화로 인해 산업계는 기후리스크에 노출 될 수 밖에 없다. 자신의 사업 영역 안에서 온실가스를 감축하고, 청정에너지 활용을 확대하며, 이와 관련한 청정에너지 투자를 촉진하는 등 적극적으로 기후변화 대응과 에너지전환에 앞장 설 수밖에 없을 것이다.

8) 허예진·안지영(2022). pp.1-2.

9) 허예진·안지영(2022). pp.1-2.

제2절

에너지전환 요구 대응 수단으로서의 수소경제



본 절에서는 국제적인 에너지전환 요구에 대응하기 위한 수단으로서 수소경제가 어떤 역할을 할 수 있을지에 대해 살펴본다. 우선 수소에너지가 무엇인지, 어떤 특징을 가지는지를 살펴보고 수소경제가 에너지전환 및 기후변화 대응에 어떻게 연관되는지를 설명하고자 한다.

1. 수소에너지의 특징

수소(Hydrogen)는 우주 전체 질량의 75%를 구성하는 가장 풍부한 원소이다. 수소는 현존하는 원소 중 가장 가벼운 원소이며, 대부분 다른 원소 및 분자와 결합된 화합물 상태로 존재한다.¹⁰⁾ 지구상에서 수소는 탄소와 결합되어 탄화수소(hydrocarbon) 형태로 존재하기도 하는데 이러한 탄화수소가 우리가 전통적으로 에너지원으로 사용하던 대표적인 화석연료를 포함한다. 천연가스, 석유, 석탄 등 탄화수소 자원은 탄소(C)원자와 수소(H)원자의 결합으로 구성되기 때문에 이를 에너지원으로 활용하기 위해 연소하는 과정에서 온실가스인 이산화탄소(CO₂)가 발생한다. 이렇듯 탄소가 포함된 에너지원은 인간의 경제활동을 위해 많이 활용하면 할수록 지구온난화를 심화시킨다는 단점이 있다.

이에 연소과정에서 탄소가 배출되지 않는 청정에너지원인 '수소 에너지'에 대한 관심이 증대되었다. 정확히 말하자면 우리가 청정에너지로서 활용하고자 하는 '수소에너지'는 수소 원자 2개가 결합되어 이루어진 수소분자(H₂)를 의미한다. 수소분자는 분자구조상 탄소를 포함하고 있지 않음에도 불구하고 질량당 에너지가 높아 최근 도래한 에너지전환 시대의 주요 에너지원이 될 것으로 기대되고 있다. 연소과정에서 온실가스를 배출하지 않는다는 가장 큰 장점을 바탕으로 수소에너지는 연료나 원료로 활용되면서 난감축산업의 온실가스 배출을 줄이는 역할을 수행할 수 있을 것으로 예상된다.

가. 수소의 물리적 특성

10) 에너지경제연구원(2020). p.3.

수소는 질량당 에너지가 우리가 흔히 에너지원으로 사용하는 천연가스나 휘발유보다 더 많이 함유되어 있어서 청정에너지원으로서의 활용가능성이 높다고 평가되고 있다.¹¹⁾ 수소의 질량당 에너지는 kg당 120.1MJ로 휘발유의 약 3배에 상응한다. 그러나 수소는 앞서 설명한 것과 같이 지구상에서 가장 가벼운 원소이기 때문에 단위 부피당 에너지 밀도가 낮다. 기체상태일 때 수소는 천연가스의 약 1/10의 밀도를 가지고, 액체상태일 때 수소는 액화천연가스의 약 1/6의 밀도를 가진다. 즉, 다른 에너지원과 동일한 에너지 수요를 충족시키기 위해서는 훨씬 더 큰 부피의 수소에너지가 필요하다는 의미이다. 즉, 수소에너지로 타 에너지원을 대체하기 위해서는 더 큰 용량의 인프라가 조성되어야 한다는 것을 의미한다. 수소를 압축하거나 액화시키거나 더 높은 에너지 밀도를 가진 채 운반되거나 사용되도록 전환할 수도 있지만 이러한 변환 및 재변환 과정에서 일부 에너지가 소비될 수 있다. 또한 수소는 화염 속도가 빠르고, 점화 범위가 넓어 관리 및 통제가 타 에너지원에 비해 까다롭다는 특성이 있다.

<표 2-3> 수소의 물리적 특성 및 타에너지원과의 비교

특징	수소	타 에너지원과의 비교
밀도(기체상태)	0.089 kg/m ³ (0°C, 1 bar)	천연가스의 약 1/10 천연가스보다 기체 상태에서 훨씬 가벼움
밀도(액체상태)	70.79 kg/m ³ (-253°C, 1 bar)	액화 천연가스(LNG)의 약 1/6
끓는점	-252.76°C (1 bar)	LNG보다 약 90도 낮음
질량당에너지(LHV)	120.1 MJ/kg	휘발유의 3배에 해당
기압상태에서의 에너지 밀도(LHV)	0.01 MJ/L	천연가스의 1/3
특정 에너지(액화, LHV)	8.5 MJ/L	LNG의 1/3
화염 속도	346 cm/s	메탄의 8배
점화 범위	공기 중 부피비로 4~77%	메탄보다 6배 넓은 범위에서 점화 가능
자동점화 온도	585°C	휘발유의 자동 점화 온도인 220°C보다 높음
점화 에너지	0.02 MJ	메탄의 1/10에 해당

주: cm/s = centimetre per second; kg/m³ = kilograms per cubic metre; LHV = lower heating value;

MJ = megajoule; MJ/kg = megajoules per kilogram; MJ/L = megajoules per litre.

자료: IEA(2019), The Future of Hydrogen, p.35.

이러한 수소의 물리적인 특성을 고려할 때, 청정에너지원으로서 수소를 활용하기 위해서는 타 에너지원을 활용할 때보다 더 많은 제반 설비와 기술 및 관리 방안 등이 필요할 것이다. 이는 수소를 에너지로 쓰면서 파생되는 연관산업이 많아진다는 의미로도 해석할 수 있다.

11) IEA(2019). p.35.

나. 수소경제의 정의

수소경제(Hydrogen Economy)란 수소를 주요 에너지원으로 사용하는 경제·산업 구조를 의미한다. 수소경제로의 전환은 탄소자원 대신 수소에너지를 경제활동 및 국민생활에 주요한 에너지원으로 활용함으로써 국가 경제 및 사회 전반에 근본적인 변화를 만들고자 하는 움직임이다. 즉, 수소경제는 화석연료와 같은 탄소자원 중심의 현재 에너지 시스템을 지양하고 전기 및 열 생산, 수송, 산업 등에서 수소에너지를 활용함으로써 새로운 신산업을 창출하고, 이를 바탕으로 경제성장을 이룩하고자 하는 패러다임으로 정의할 수 있다.

<표 2-4>는 2019년 정부에서 발표한 「수소경제 활성화 로드맵」에서 수소경제의 의미와 중요성을 설명하기 위해 제시된 표이다. 2019년 당시 우리나라에 수소경제라는 개념이 처음 도입되었을 때 탄소경제와의 비교를 위해 작성된 것으로 현재의 수소분야의 논의와 일부 맞지 않는 부분을 제외하고 탄소경제와의 차이점을 뚜렷하게 보여줄 수 있는 항목들만 선별하여 제시하였다.

<표 2-4> 탄소경제와 수소경제의 비교

구분	탄소경제	수소경제
에너지 패러다임	<ul style="list-style-type: none"> 탄소자원(석유, 석탄, 가스 등) 중심 매장자원 부존량에 따라 수출입 결정 	<ul style="list-style-type: none"> 탈탄소화 청정에너지(수소) 중심 온실가스 저감 기술력, 재생에너지 잠재력에 따라 수출입 결정
경쟁양상	<ul style="list-style-type: none"> 자원 개발 및 에너지 확보 경쟁 	<ul style="list-style-type: none"> 기술경쟁력 확보 및 규모의 경제 경쟁
환경성	<ul style="list-style-type: none"> 탄소자원 소비과정에서 온실가스, 대기 오염물질 배출 	<ul style="list-style-type: none"> 수소에너지 소비과정에서 직접배출량이 적어 친환경적

자료: 관계부처합동(2019a), 수소경제 활성화 로드맵, p.1. 바탕으로 저자 작성

이렇듯 수소경제는 지구온난화 대응과 신산업 창출 두 가지 목적을 모두 달성하고자 하는 사회구조의 변화라고 할 수 있다. 탄소집약도가 높은 기존의 화석연료 기반 에너지를 수소로 대체하여 온실가스 저감에 기여한다는 목적 하에 수소경제로의 전환은 청정에너지원인 수소를 생산, 유통, 저장 및 활용하는 일련의 밸류체인이 구축되는 것을 전제로 한다. 수소경제가 정착되는 과정에서 자연스럽게 온실가스 저감을 위한 혁신 기술이 개발 및 보급되며, 이를 통해 새로운 산업과 일자리가 창출되는 등 에너지전환 시대에 걸 맞는 새로운 경제·산업 구조가 생겨날 수 있다.

또한, 석유, 석탄, 천연가스 등 기존의 탄소자원의 경우 매장자원이기 때문에 부존량이 특정 국가에 편중되어 있었다. 이러한 지역적 편중은 국제 자원 무역의 시작이기도 했지만 자원 중심의 글로벌 헤게모니(hegemony)가 탄생한 배경이 되기도 하였다. 매장자원이 부족한 국가의 경우 대부분의 자원을 해외에서 수입해야 하므로 수입 의존도가 높아 에너지 자립도가 낮아진다는 문제가 있다. 석유, 석탄, 천연가스와 같은 탄소자원이 경제활동의 주요 에너지원으로 활용되는 상

황에서 자원 안보는 국가 안보에서 매우 중요한 이슈로 대두되었다.

수소경제는 이러한 자원 중심의 글로벌 헤게모니를 재편하게 되는 계기가 되기도 한다. 자원 부존량에 종속되지 않는 청정 에너지를 생산함으로써 매장자원이 부족한 국가도 수소에너지 생산 역량과 기술 확보를 통해 자원 안보를 강화할 수 있기 때문이다. 특히, 재생에너지가 풍부하여 재생에너지를 활용해 수소에너지를 대량으로 생산할 수 있는 국가의 경우 수소경제가 도래하면 국제사회에서 청정에너지 수출국으로서 국제적 위상을 가질 수 있을 것이다.

이러한 이유로 우리나라를 포함한 주요국은 수소경제 혹은 수소사회로의 전환을 목표로 국가 차원의 수소전략 및 수소 로드맵을 수립하고, 관련 제도를 정비해 나가고 있다. IEA(2023a)에 따르면 현재까지 총 41개국이 에너지전환 전략의 일환으로 국가 수소전략을 마련하고 수소경제로의 전환을 추진하고 있다.¹²⁾ 아직까지 초기 단계에 머물러 있는 다양한 수소 관련 기술을 개발하고 보급하고, 제반 인프라를 구축하는데 대규모 정부 재정을 투입하는 등 탄소경제에서 수소경제로의 전환을 가속화하기 위해 적극적으로 노력하고 있다.

수소경제라는 개념은 비교적 최근에 등장하였고, 기후변화 대응 및 에너지 전환 논의가 활발해짐에 따라 그 중요성이 더 커지게 되었다. 이에 수소경제 및 산업 생태계가 어떻게 구성이 되어있는지, 향후 어떻게 발전될 것인가에 대한 논의는 매우 초기 단계에 머물러 있다.

2. 수소경제의 밸류체인 전망

수소가 생산되고 유통되어 소비되기까지의 일련의 과정을 살펴보면 밸류체인 단계별로 복수의 옵션이 존재한다는 것을 알 수 있다.([그림 2-2]). 수소는 자연상태에서 곧 바로 에너지원으로 활용하는 것이 어렵기 때문에 열화학적 변환, 전기화학적 변환 등의 기술을 이용하여 타에너지원에서 추출하여 생산해야한다¹³⁾. 수소는 주로 수소를 포함하고 있는 탄소자원에서부터 열화학적으로 생산되거나 무탄소에너지를 활용하여 물을 전기분해해서 생산된다. 또한, 수소는 운반을 위해 다른 탄소자원 혹은 무탄소자원으로 전환되거나 전환된 형태로 활용되기도 한다. 대표적으로 수소는 수소 기반 연료(hydrogen-based fuel)로 일컬어지는 화합물의 형태로 활용될 수 있다. 수소 기반의 연료는 크게 2가지 형태로 구분할 수 있다. 첫 번째는 이산화탄소와 합성하여 e-메탄 혹은 e-메탄올 형태의 에너지원으로 전환되는 것이고, 두 번째는 공기 중의 질소와 합성하여 암모니아(NH₃) 형태로 전환되는 것이다. 현재 국제에너지기구(IEA)를 비롯한 국제 사회에서 에너지전환 수단으로서 수소에너지를 정의 할 때 순수한 기체 수소뿐만 아니라 수소 기반의 연료도 포

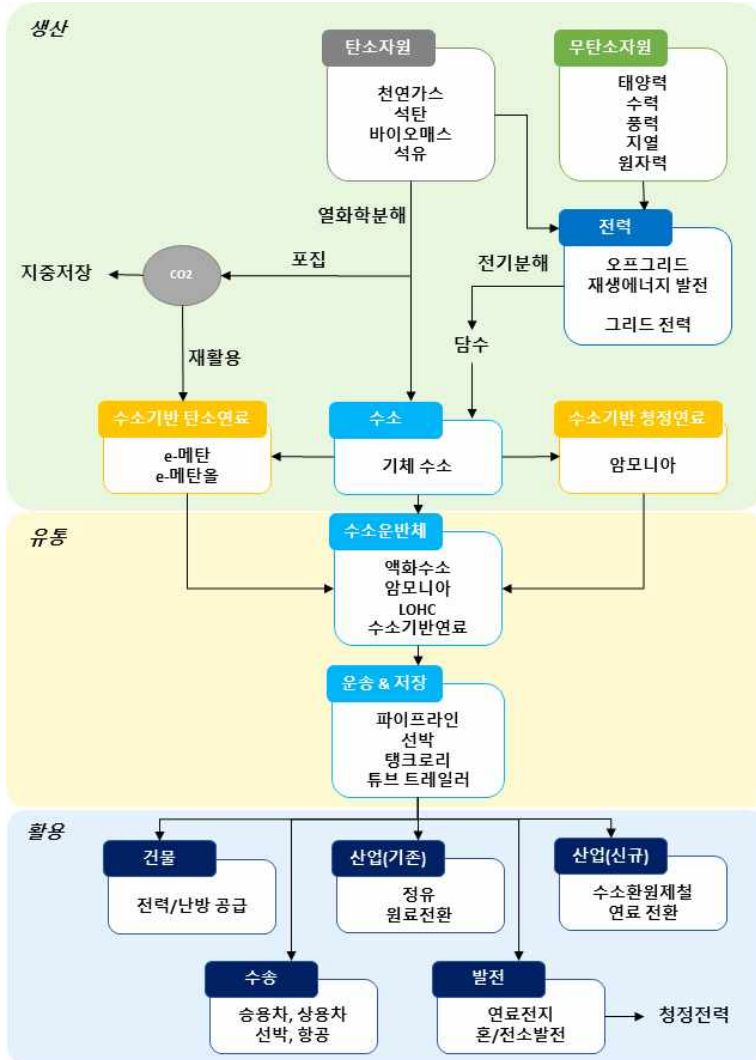
12) IEA(2023a), p.148.

13) 에너지경제연구원(2019), p.5.

함하여 수소에너지를 정의하고 있다.

이렇게 생산 및 유통된 수소 및 수소기반연료는 건물, 산업, 수송, 발전 등 다양한 부문에서 연료 혹은 원료로서 기존의 탄소 자원을 대체하는데 활용될 수 있다. 이렇듯 수소의 밸류체인은 다양한 경로를 통해 구성된다. [그림 2-2]에서는 수소가 생산되어 전환·유통되고 활용되기까지의 일련의 과정을 나타낸다. 이 도식에서 나타내는 수소의 밸류체인은 기후변화대응을 위한 온실가스 감축 목적에 역행하지 않는 기술만을 포함하고 있다. 즉, 온실가스 배출이 적은 수소 생산 방식, 온실가스 감축을 위한 수소 활용, 이에 필요한 제반 유통 과정 등으로만 구성된 밸류체인을 보여준다.

[그림 2-2] 수소에너지 전주기 밸류체인 도식



자료: IEA(2019). The Future of Hydrogen, p.29. Figure 5 바탕으로 저자 작성

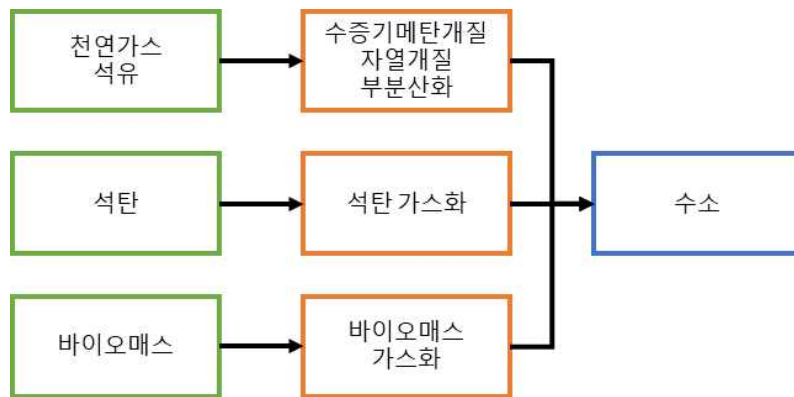
가. 수소의 생산

1) 탄화수소(Hydrocarbon) 기반의 수소 생산

가장 전통적인 방식의 수소 생산은 탄화수소 기반의 수소 생산이다. 탄화수소란 탄소와 수소만으로 이루어진 유기화합물로, 가장 단순한 구조의 탄화수소는 탄소 1개, 수소4개로 구성된 메탄

(CH₄)이며, 메탄을 주 성분으로 하는 화석연료가 천연가스이다. 탄소와 수소의 결합 방식에 따라 석유, 휘발유, 경유, 부탄, 프로판 등 다양한 에너지원으로 일컬어진다. 이러한 탄화수소에 포함된 수소를 화학적으로 분해하여 수소를 추출하는 것이 가장 일반적인 수소 생산 방식이다.

[그림 2-3] 탄화수소 기반의 수소 생산 방식



자료: 저자작성

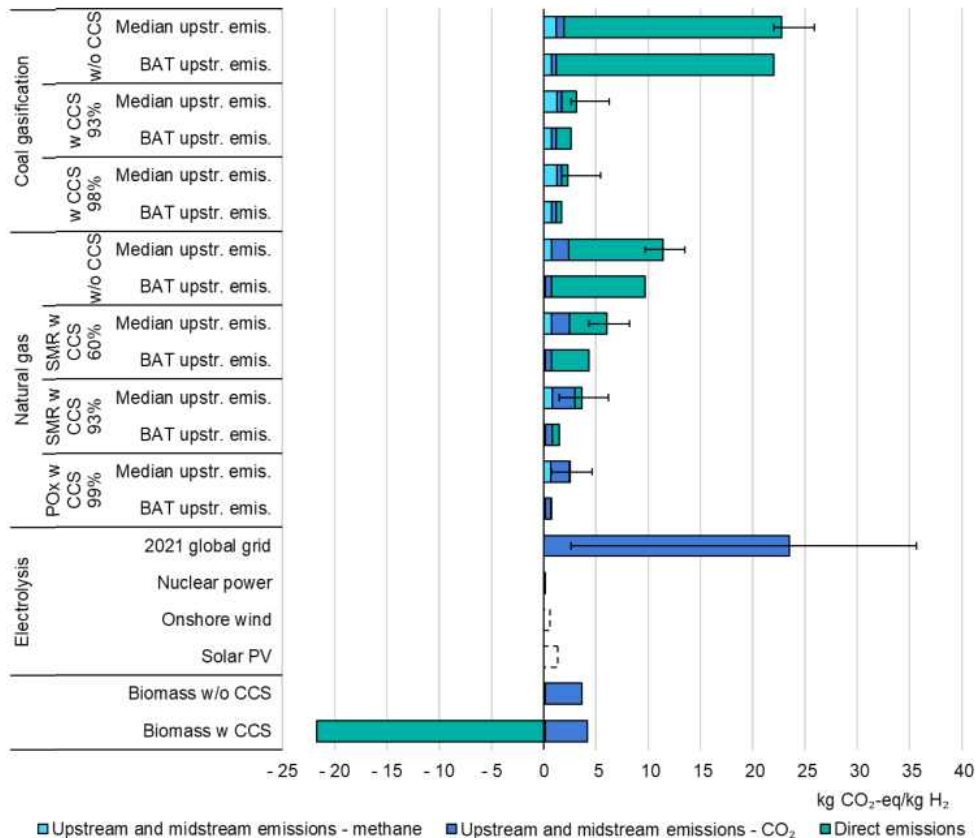
[그림 2-3]에서 알 수 있듯이 탄화수소에서 수소를 추출하기 위해서는 1) 개질(reforming), 2) 부분산화(partial oxidation), 3) 가스화(gasification)이라는 과정을 거쳐야 한다. 고온의 수증기를 활용하여 화학적으로 탄소와 수소를 분리하거나, 공기 중의 산소를 고온에서 메탄과 반응시키는 방식, 혹은 탄화수소 자원을 가스화시켜 수소 가스를 분리해내는 방식이다. 현재로서 대규모 수소 생산을 위한 가장 효율적이고 경제적인 방식으로 알려져 있다. 그러나 탄화수소 기반의 수소 생산 과정에서 오롯이 수소만 추출되는 것이 아니라는 점이 가장 큰 문제로 지적되어왔다. 태생적으로 탄소(C)를 포함하고 있는 탄화수소를 열화학적으로 분해하는 과정에서 온실가스인 이산화탄소(CO₂)가 배출된다.

배출되는 이산화탄소에 대한 특별한 조치 없이(w/o CCS) 수소를 생산한다면, 석탄 가스화를 통한 수소 생산의 경우 수소 생산 공정의 직접배출만하더라도 수소 1kg 생산 당 20kgCO₂eq의 온실가스가 배출되며, 천연가스 개질의 경우에도 수소 1kg 생산 시 직접배출 8.6kgCO₂eq가 배출된다¹⁴⁾([그림 2-4]). 즉, 석탄과 천연가스에서 수소를 추출하는 과정에서 배출되는 이산화탄소 배출량을 고려할 때, 동일 열량을 발생시키기 위해 천연가스 자체를 연소하는 것 보다 더 많은 이산화탄소가 배출된다.¹⁵⁾

14) IEA(2023c). pp.40-41.

15) IEA(2021b). pp.48-50.

[그림 2-4] 수소생산 기술별 이산화탄소 배출량



주: BAT = best available technology(최적가용기술); CCS = carbon capture and storage(이산화탄소 포집 및 저장); SMR = steam methane reforming(수증기 메탄 개질); POx = partial oxidation(부분산화); Median upstr. emis. = 2021년 상류 및 중류 배출의 글로벌 중위값; BAT upstr. emis. = 최적가용기술 적용 시 상류 및 중류 배출량
 자료: IEA(2023c), Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity, p.41.

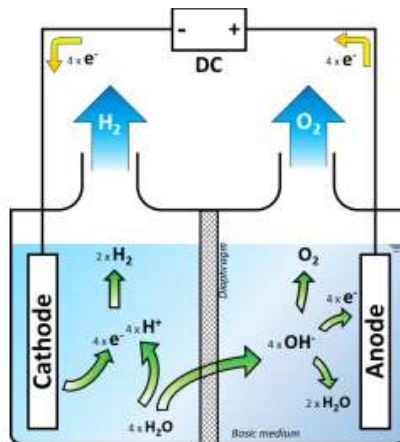
이에 탄화수소에서 수소를 생산할 때는 수소생산 공정에서 발생하는 이산화탄소를 포집하여 영구 저장하는 Carbon Capture and Storage(CCS) 기술이 함께 활용되어야 한다. 수소 생산 과정에서 발생하는 이산화탄소를 90% 이상 포집하여 영구적으로 저장할 수 있을 때 생산된 수소가 청정에너지원으로서 의미를 가지게 된다. 현재 국제사회 및 주요국에서는 수소 생산과정에서 발생하는 온실가스 총 배출량을 바탕으로 수소 인증제를 도입하고자 한다. 수소인증제를 통해 수소 생산과정에서 발생하는 온실가스 배출량을 산정하고, 일정 기준치 이하로 배출하는 경우에만 청정에너지원으로서 의미 있는 수소임을 인증해줌으로써 수소경제를 추진하는 것이 기후변화 대응 노력에 역행하지 않도록 주시하고 있다. 수소 인증제가 온실가스 배출량을 기준으로 운영됨에 따

라 CCS를 통한 이산화탄소 포집률 및 영구저장 여부가 중요한 기술 요건으로 자리 잡을 것으로 예상된다.

2) 수전해 기술 기반의 수소 생산

생산과정에서 필연적으로 온실가스가 배출되는 탄화수소 기반의 수소 생산에 대한 지속가능성이 이슈가 됨에 따라 보다 청정하게 수소를 생산할 수 있는 방식에 대한 관심이 높아졌다. 이에 전기분해를 활용한 수소 생산 방식(수전해)이 각광받고 있다. 수전해 방식은 수소원자(H) 2개와 산소원자(O) 1개로 구성된 물(H₂O)에 전기에너지를 가해 산소원자와 수소원자를 분리하는 전기화학적인 수소 생산 방식이다.

[그림 2-5] 수전해 셀의 원리



자료: Holst et al.(2021), p.15. ; 김종우·이태의(2022).. p.21. 재인용

수전해 셀에 충분히 높은 전압이 공급되면 음극(Cathode)에서 환원반응을 통해 수소가 생산되고, 양극(Anode)에서 산화반응을 통해 수소가 생산되는 것이 수전해의 가장 기본적인 원리이다.¹⁶⁾ 이때 전기분해를 위해 활용하는 전해질(electrolyte)과 이온(ion)이 무엇이냐에 따라 수전해 기술과 설비가 구분된다. 사용되는 전해질에 따라 알칼라인 수전해(Alkaline electrolysis, AEC), 고분자전해질막 수전해(Polymer electrolyte membrane electrolysis, PEM), 고체산화물 수전해(Solid oxide electrolysis, SOEC) 등으로 구분할 수 있다.¹⁷⁾

수전해 방식으로 수소를 생산하는 것은 수소 생산 과정에서 산소 이외에 다른 물질이 배출되지 않기 때문에 가장 친환경적인 수소 생산 방식으로 간주된다. 그러나 수소 생산에 따른 온실가스

16) 김종우·이태의(2022). p.21.

17) 김종우·이태의(2022). p.23.

배출량은 전과정평가(Life Cycle Assessment) 관점으로 본다면 수소 생산 시에는 수전해에 투입되는 전력원의 ‘청정성’도 수전해 수소를 청정에너지원으로 받아들일 수 있는가에 중요한 요소가 될 것이다. 이에 전기 생산 과정에서 온실가스 배출이 없는 무탄소 전력(Carbon-free Electricity)이 수소 생산에 투입되는 가장 바람직한 전력원으로 인식되고 있다. [그림 2-4]에서는 수전해(electrolysis) 기술을 통한 수소생산 과정에서 발생하는 온실가스 배출량도 제시하고 있다. 2021년 기준으로 그리드 전력에서 전기를 공급받아 수전해 수소를 생산하는 경우 수전해 단계에서의 직접배출은 0이지만, 투입되는 전기 생산 과정에서 발생하는 간접배출이 20kgCO₂eq를 초과하기도 한다. 반면, 상대적으로 무탄소 혹은 저탄소 배출 전력원이라고 여겨지는 원자력 발전, 태양광 발전, 풍력 발전에서 전력을 공급받아 수소를 생산하는 경우 관련 온실가스 배출이 매우 적거나 거의 없는 것으로 확인된다.¹⁸⁾ 이에 가장 바람직한 수전해 수소 생산은 그리드와 연계하지 않고 독립적인 무탄소 전력원에 수전해 설비를 장착하여 생산하는 방식(오프그리드)이 될 것이다.

나. 수소의 유통·저장

1) 수소운반체

수소는 상압 및 상온에서 기체 형태로 존재하여 부피당 에너지 밀도가 높지 않다는 특징이 있다. 이렇듯 기체형태로 생산된 수소는 가볍고 부피가 크고, 낮은 에너지밀도로 인해 대량의 에너지원으로서 수소를 운반하는 것이 용이하지 않다. 수소경제가 활성화되면 수소 생산 위치와 소비 위치는 점차 멀어지고 운송 방식과 형태도 다양화 될 것이다. 이에 경제적이고 에너지효율적인 수소 운반 방식에 대한 검토가 필요하다.

수소를 운반하기 위해서는 1) 수소의 물성은 유지한 채 압력이나 온도 조건을 변화하여 운반에 용이한 형태로 전환하거나, 2) 수소를 다른 분자와 결합시켜 운반에 용이한 다른 물질을 수소 운반체로 활용하였다가 다시 수소를 분리하는 방식을 활용할 수 있다.

우선, 수소의 물성은 유지한 채 압력이나 온도조건을 변화하는 방식으로는 ‘고압(high-pressure)’으로 압축하거나 ‘액화(Liquefaction)’하는 방법이 있다. 고압으로 압축하는 경우 기체 형태로 운송되며, 액화하는 경우 액체형태로 운송된다. 특히 대량의 장거리 운송을 목적으로는 기체 수소보다는 단위부피당 더 많은 수소를 운반할 수 있는 액화 수소가 더 효율적인

18) 원자력 발전으로 수전해를 하는 경우에도 우라늄 채굴 및 농축과정에서 발생하는 온실가스가 상류부문의 간접배출량으로 잡혀 일정량의 온실가스가 배출되는 것으로 평가되고 있다.

수소 운반 방식으로 여겨진다. 그러나 수소를 액화하기 위해서는 영하 253도씨의 낮은 온도가 필요하며, 이 과정에서 상당히 많은 에너지가 소비된다. 기체수소를 액화하는데 25~35%의 수소가 소비된다는 점¹⁹⁾은 수소를 액화하여 운반하는 데 수반되는 경제적 비용과 에너지 손실이 크다는 것을 의미한다. 특히 이러한 경제적 비용과 에너지 손실은 운송거리가 멀고 시간이 오래 걸릴수록 커지게 되는데 IEA(2022)에 따르면, 수소를 액화하여 8,000km 거리를 해상운송하여 다시 기체수소로 재기화 하는데 까지 약 21~27%의 수소에너지 손실이 발생 할 것이라 전망하였다.²⁰⁾

이러한 수소의 물리적 제약으로 인해 대안 수단으로서 액상유기수소운반체(Liquid organic hydrogen carrier; LOHC)와 암모니아의 활용가능성이 대두되었다. 액상유기수소운반체(LOHC)는 상온·상압에서 수소를 흡수했다가 방출하는 사이클을 가지는 물질로 대표적으로 메틸사이클로헥산(MCH)과 디벤질톨루엔(DBT) 등이 있다. 해당 유기분자들이 수소를 흡수하는 수소화(hydrogenation)와 수소를 방출하는 탈수소화(de-hydrogenation) 과정에서 이산화탄소가 배출되지 않아 친환경적인 수소 운반 방식으로 간주된다. 그러나 LOHC 방식을 활용한 수소 운반은 아직까지 실증 단계에 머물러 있으며, 특히 탈수소화 과정에서 에너지 손실을 최소화하며 수소를 분리할 수 있는 기술이 충분히 성숙되지 않았다는 단점이 있다²¹⁾.

이에 현재 수소 운반체로 가장 주목 받는 방식은 ‘암모니아’ 형태로 수소를 운반 하는 방식이다. 암모니아는 공기 중의 질소(N)를 수소에 합성하여 생산되는데, 가장 일반적인 합성 방법은 하버-보슈(Haber-Boshch) 합성법으로 100여 년 전부터 암모니아 생산을 위해 활용된 기술이다.²²⁾ 암모니아는 단위부피당 수소밀도가 크고, -33도씨에서 액화되므로 대량의 수소에너지를 운반하기 위한 경제적이고 효율적인 수소운반체로 평가된다. 또한 암모니아의 물리적 특성은 LPG와 유사하여 LPG 인프라를 활용할 수 있다는 점에서 기술성숙도가 매우 높은 수소 운반체이며 관련 인프라가 이미 상당히 구축되어 있다. 암모니아는 이미 비료생산, 화학제품 생산 등을 목적으로 국제 교역이 활발한 공산품으로 연간 약 2,000만 톤(2019년 기준)의 암모니아가 국제적으로 거래되고 있다²³⁾. 즉, 암모니아 운반을 위한 부두, 선박, 저장탱크 등이 이미 상용화되어 있다는 의미이다. 이러한 기술성숙도는 수소운반체로서 암모니아의 유용성을 뒷받침해주고 있다.

19) IEA(2021a). p.74.

20) IEA(2022). p.140.

21) IEA(2023a). p.142.

22) 안지영·이태의(2023). pp.27-29.

23) IEA(2021a). p.24.

<표 2-5> 수소운반체별 특징 비교

구 분	액화수소	MCH (LOHC)	암모니아
밀도(kg/m ³)	70.8	769	682(1bar)
끓는점(°C)	-252.9	101	-33.34
중량수소밀도(wt%)	100	6.16	17.8
단위부피당 수소밀도(kgH ₂ ·m ³)	70.9	47.1	120.3
탈수온도(°C)	-252.9	200~400	350~900
수소화 온도(°C)	-	100~200	400~600

자료 : 이수영·이혜진(2019), 미래 수소에너지 공급 산업에서 암모니아의 활용성, Table 1 바탕으로 저자 작성

수소분자를 포함하는 특정 화합물은 수소를 운반하기 위한 수소 운반체로 활용되기도 하지만 그 자체로 화석연료를 대체하기 위한 청정에너지원으로 쓰이기도 한다. 이를 수소기반연료(hydrogen-based fuel)이라고 일컬으며 대표적인 수소기반연료에는 e-fuel과 암모니아가 있다. 우선 e-fuel의 경우 청정하게 생산된 수소에 이산화탄소(CO₂)를 다시 합성하여 탄화수소를 생산하는 것이다. 단, 이때 탄화수소 생산에 활용되는 이산화탄소는 수소생산 혹은 기타 탄소배출 공정에서 포집한 이산화탄소를 재활용한 것이어야 한다. 즉, 대기 중에 배출될 수 있었던 이산화탄소를 포집하여 한 번 더 활용함으로써 신규 탄소자원을 채굴 및 활용하지 않도록 한다는 점에서 온실가스 감축에 기여하게 된다. e-fuel에는 e-메탄올, e-가솔린, e-디젤, e-메탄, e-항공등유 등이 있으며, 충분히 생산된다면 기존의 메탄올, 가솔린, 디젤, 메탄, 항공 등유 등 신규 탄소자원의 활용을 줄일 수 있을 것이다.

암모니아의 경우 앞서 설명하였듯이 대기 중의 질소를 수소와 합성하여 생산되는데, 암모니아는 분자구조상 탄소원자를 포함하고 있지 않기 때문에 연소 시에도 이산화탄소가 배출되지 않는다. 이에 수소와 더불어 청정에너지원으로서의 활용가능성이 주목 받고 있다. IEA(2023b)에 따르면, 다양한 분야에서 대체 연료로서의 활용가능성이 높으며, 특히 선박 부문의 탈탄소화에 중추적인 저탄소 연료가 될 것이다.²⁴⁾ 바이오연료와 수소가 연료로서 상대적으로 높은 비용으로 인해 그 활용이 제한 될 때 암모니아가 그 역할을 대신 수행할 수 있을 것으로 예상된다. 우리나라에서는 석탄화력발전기에 석탄 일부를 암모니아로 대체하여 연소하는 것을 무탄소 발전계획에 포함하고 있다.²⁵⁾

24) IEA(2023b). p.88.

25) 관계부처합동(2022b).

2) 수소 운송 방식

수소는 운송 규모와 거리에 따라 다양한 형태로 운송될 수 있다. 특히 내륙 운송의 경우 수소운반체로 전환하였다가 재전환하는 과정 없이 기체나 액체 형태의 수소로 운송하는 방식이 더 적합할 수 있다. 기체 수소는 배관이나 튜브트레일러 형태로 운송될 수 있는데, 배관을 통한 운송의 경우 수요처에서 수소 수요가 지속적으로 발생해야 한다는 특징이 있다. 이에 산업단지와 같이 수소 공급이 연속적으로 필요한 수요처를 중심으로 배관이 구축되는 경향이 있다. 연간 수소 이송량에 따라 배관의 관경과 압력 조건 등이 상이하므로 운송 규모, 거리 등에 따라 경제성이 달라질 수 있다. 튜브트레일러의 경우 간헐적으로 수소 수요가 발생하거나 분산되어 있는 수요처에 공급하기 적합한 운송 방식이다. 다만, 기체 형태로 운송이 되기 때문에 대규모 수소 공급에는 적합하지 않다. 주로 차량용 수소 충전소와 같이 지역적으로 분산되어 있고, 수요량이 크지 않은 수요처에 수소를 운송할 때 튜브트레일러가 활용된다. 반면, 육상운송으로 수소를 운송하는데 튜브트레일러보다 대규모 수소 운송이 필요한 경우 수소를 액화하여 액체 상태로 운송해야 한다. 이때 액화 수소 운송은 탱크로리를 활용하게 된다.

<표 2-6> 수소 운송 방식 비교

운송 상태	운송방식	적합한 운송 조건
기체	배관	<ul style="list-style-type: none"> 소규모, 단거리 수요처에 연속 공급할 경우 대규모, 장거리 수요처에 연속 공급할 경우
	튜브트레일러	<ul style="list-style-type: none"> 중·소규모, 중·장거리 수요처에 간헐적으로 공급할 경우
액체	탱크로리	<ul style="list-style-type: none"> 액화 제조 및 저장 시설과 연계될 경우 중·대규모, 중·장거리 수요처에 공급할 경우

자료: 유영돈(2019), 수소의 저장, 운송 및 충전; 에너지경제연구원(2020), 수소경제가 온다-쉽게 읽히는 수소경제의 동향과 전망 p.11. 바탕으로 저자작성

다. 수소의 활용

1) 기존 수요

이제까지 수소는 다양한 목적으로 활용되어 왔다. 수소경제에 대한 논의가 본격화되기 이전인 2018년에 전 세계 수소 수요는 약 1억 1,500만 톤 규모로 그 중 순 수소(pure hydrogen)는 7,200만 톤을 차지하고 있고, 나머지는 수소가 포함된 합성 가스의 형태로 소비되었다.²⁶⁾ 수소는 암모니아, 염산, 메탄올 등 화학제품을 생산하는데 원료로 활용되거나, 정유공장의 중질유 분해

및 탈황공정에도 활용되는 등 대부분이 산업용 수요로 소비되고 있다.²⁷⁾ 2018년 기준으로 전 세계 수소 수요의 33%(3,800만 톤)는 정유 공정에서 발생하였고, 암모니아 생산 27%(3,100만 톤), 메탄올 생산 11%(1,200만 톤), 직접환원철(DRI) 생산 3%(400만 톤) 비중으로 수소가 소비되었다.²⁸⁾ 이렇듯 수소의 기존 수요는 대부분 산업 공정에서 원료(feedstock)로 소비되는데 수요처가 국한되어 있다.(<표 2-7>)

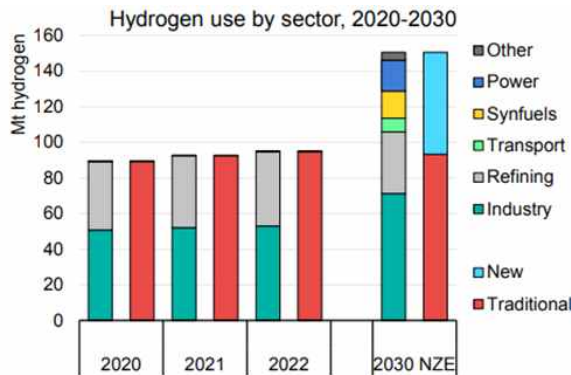
<표 2-7> 수소의 부문별 기존 수요

부문	수소 활용 형태
정유	원유에서 황과 같은 불순물을 제거하기 위해 활용
화학	암모니아, 메탄올 생산의 주요 원료로 활용되며, 기타 소규모 화학 공정(에틸렌, 프로필렌, 벤젠, 톨루엔 등)에 활용
철강	직접환원철(Direct Reduced Iron) 생산 시 철광석에서 산소를 분리하기 위한 환원제로 활용
고온열	철강 및 화학 산업 공정에서 발생하는 오프가스(off-gas)에 포함된 수소를 열원으로 활용

자료: IEA(2019), The Future of Hydrogen, p.90. 바탕으로 저자 작성.

이러한 현황은 수소경제 논의가 활발해진 지금까지도 이어져 오고 있다. [그림 2-5]에서는 2020년부터 2022년까지 글로벌 총 수소 수요의 현황을 부문별로 보여 주고 있다.

[그림 2-6] 부문별 수소 활용 현황 및 전망(2020-2030)



자료: IEA(2023a), Global Hydrogen Review 2023, p.20.

26) IEA(2019). p.32.

27) 에너지경제연구원(2020). p14.

28) IEA(2019). pp.89-122.

2022년 글로벌 총 수소 수요는 약 9,500만 톤으로 정유공정에 4,100만 톤, 화학·철강 등 산업 부문에서 5,300만 톤 소비되는 등 여전히 대부분의 수요가 기존 수요에 국한되어 있음을 알 수 있다. IEA(2023a)에서는 2050년 탄소중립 달성을 위해 2030년 도달해야 할 수소 수요가 약 1억 5천만 톤에 달한다고 전망하고 있다. 특히 기존수요 9,500만 톤에 추가하여 신규수요 5,500만 톤이 발전부문, 수송부문, 합성연료 부문, 정유부문 등에서 창출되어야 한다고 제시하고 있다.²⁹⁾

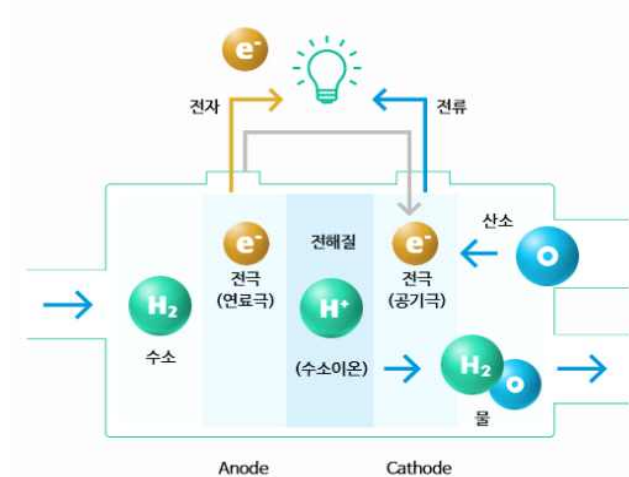
2) 신규 수요

에너지전환을 위해서는 다양한 분야에서의 수소 활용이 뒷받침되어야 한다. 수소를 수송부문의 연료로 활용하거나, 수소기반 연료로 전환하여 화석연료를 대체하거나, 발전용 연료로 활용할 수 있다. 혹은 산업부문에서 100% 수소환원철 생산을 위한 환원제로 활용하거나, 고온열 열원으로 활용할 수 있다. 이러한 수소의 신규 수요는 온실가스 다배출 업종 및 난감축(hard-to-abate) 부문에서 온실가스가 배출되던 탄소자원을 수소로 대체함으로써 발생하며, 수소의 활용이 온실가스 배출 저감에 기여하게 된다.

수소경제 논의 초반에는 수소를 에너지원으로 활용하기 위한 수단으로 ‘연료전지’ 기술이 주목 받았다. 연료전지란 전기에너지를 수소로 전환하는 ‘수전해’ 기술을 거꾸로 적용하여 수소를 전기에너지로 전환하기 위한 기술이다. 수소연료전지는 전해질(electrolyte) 막과 양쪽에 놓여진 연료극(anode)과 공기극(cathode)으로 구성되어 있다. 연료극에 투입된 수소는 촉매에 의해 수소 양이온과 전자로 분리되고, 수소이온만 통과시키는 전해질 막을 통해 수소이온이 공기극으로 이동한다. 전해질을 통과한 수소 양이온과 공기극으로 투입된 산소(O)가 결합하여 물(H₂O)이 생성된다. 이때 연료극에서 분리된 전자가 외부의 회로를 통해 공기극으로 이동하는 과정에서 전기가 생성되는 구조이다. 즉, 수소 연료전지는 청정 에너지원인 수소를 투입하여 전기에너지를 발생시킬 수 있는 기술로 전기에너지가 필요한 모든 곳에서 활용가능하다.

29) IEA(2023a). pp.20-22.

[그림 2-7] 수소연료전지의 원리



자료: 두산퓨얼셀 홈페이지(<https://www.doosanfuelcell.com/kr/tech/tech-0101/>). (검색일: 2024. 05. 20.)

수소연료전지는 규모에 따라 다양한 목적으로 활용될 수 있다. 주택·건물에 분산용 전원 혹은 비상전원으로 활용되며 전기 및 열을 공급할 수도 있고, 대규모 연료전지 발전소를 건설하여 전력 계통에 전기를 공급할 수도 있다. 또한, 소규모 및 이동용으로 설계된 수소연료전지는 수송부문에서 활용도가 높다. 현재 수소를 연료로 움직이는 차량을 일반적으로 ‘수소차’라고 지칭하는데, 정확한 명칭은 ‘수소 연료전지 전기차(Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle)’이다. 즉, 수소를 연료로 전기를 생산한 뒤 전기로 차량을 움직인다는 의미이다. 차량 연료로 휘발유나 경유 대신 수소충전소에서 수소를 충전하면, 수소가 연료전지에 공급되어 전기가 발생하고, 이 전기가 모터에 공급된다는 점이 차량 내 리튬배터리를 충전하여 작동하는 일반적인 전기차와의 차이점이다. 모빌리티용 수소연료전지는 일반 승용차나 외에도 수송부문의 다양한 활용처에서 적용이 가능하다. 버스, 트럭, 트램, 철도, 선박, 드론 등 기존에 화석연료를 주 에너지로 쓰던 분야에서 전기화(electrification) 이외의 에너지전환 수단으로 수소연료전지를 활용할 수 있다. 특히, 버스, 트럭 등과 같이 상업용 중대형 운송수단의 경우 운행거리가 길기 때문에 1회 충전 가능한 배터리 최대 용량 및 배터리 무게를 고려하면, 배터리로 구동하는 전기차로 전환하기가 어렵다. 이에 운행이 잦으며 1회 운행 시 장거리 운행을 하는 상업용 차량은 수소탱크를 장착하고 수소를 연료로 구동하는 것이 더욱 효율적일 것이다.

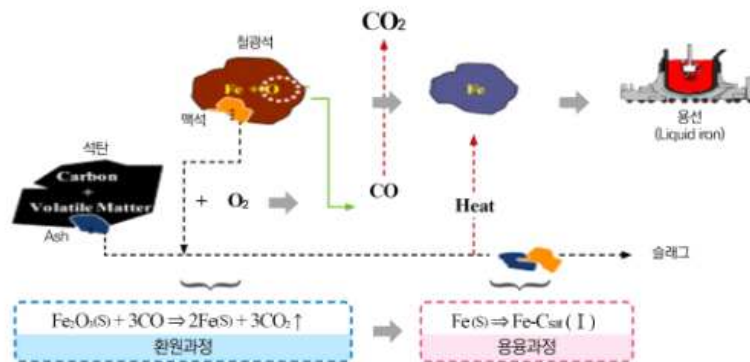
수소경제 논의 초기에는 대부분의 수소 활용처가 건물용 및 발전용 수소연료전지와 수소 연료전지 전기차에 국한되어 있었다. 그러나 온실가스 감축 수단으로 수소에너지의 활용의 중요성이 커짐에 따라서 수소를 전기 및 열에너지로 전환하기 위한 다양한 기술이 소개되었고, 이에 따라 수소의

활용처가 확장되기 시작하였다. 우선, 수소를 전기나 열에너지로 전환하는 방식으로 수소 터빈, 수소 엔진, 수소 보일러 등이 논의 되었다. 이는 기존에 화석연료가 투입되던 것을 직접적으로 수소로 대체할 수 있다는 의미이고, 이를 ‘수소를 활용한 연료전환’으로 부를 수 있다. 터빈, 엔진, 보일러에 기존 연료를 대체하여 수소가 투입되어 필요한 에너지를 발생 시킬 수 있다는 것은 기존에 이러한 기술이 활용되던 발전부문 및 산업부문에서 대규모 수소 활용이 가능하다는 의미이다.

우리나라에서 가장 주목하고 있는 수소 활용 기술은 수소 및 수소화합물인 암모니아를 기존의 가스 및 석탄을 대체하여 화력발전기에 투입하는 기술이다. 온실가스 배출의 주범으로 지목되고 있는 석탄화력발전기와 가스터빈발전기, 혹은 열병합발전기에 기존에 투입되던 화석연료의 일부 혹은 전부를 청정 에너지로 대체하여도 동일한 에너지를 공급할 수 있다면 전환부문의 온실가스 배출을 줄이는 가장 핵심적인 수단이 될 것이다.

그 외 산업부문에서도 수소를 활용해 화석연료를 대체하고자 하는 시도가 이루어지고 있다. 대표적인 수소 수요 산업은 철강업종이 될 것이다. 현재 철강 생산 공정은 1) 전로강 공정과 2) 전기로강 공정으로 구분할 수 있다. 전로강 생산 공정의 경우 철광석과 원료탄을 이용하여 선철을 생산하고, 선철의 탄소 함량을 조절하여 강을 만드는 공정이다.³⁰⁾ 이때, 고로(blast furnace)에서 용선을 추출하는 과정에서 철광석에서 산소를 분리하는 환원 과정을 거치게 되는데 이 과정에서 온실가스가 배출된다. 전로강 공정은 고철을 전기 아크열이나 저항열, 유도열 등으로 녹여 강을 만드는 방식인데, 전로강 공정에 비해 온실가스 배출이 적다는 장점이 있으나 고급 철강재 생산이 어렵다는 단점이 있다.³¹⁾

[그림 2-8] 철강 산업의 주요 CO2 배출 공정



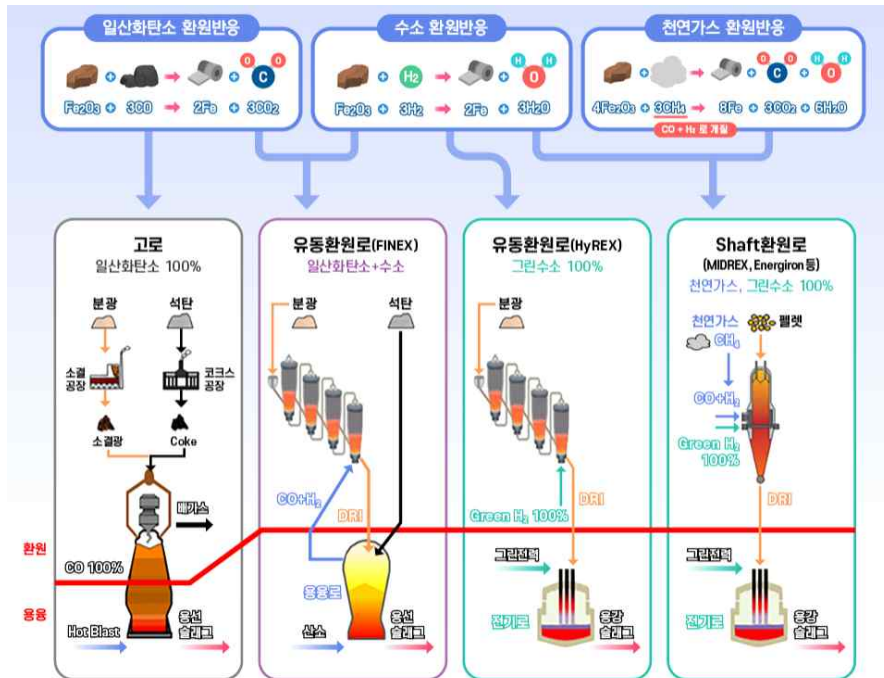
자료: 이태의·임정민·이수민(2022), 그린에너지 통합 시스템(섹터커플링)의 탄소중립 기여도 분석: P2G 기술을 중심으로, p.91.

30) 강병욱(2022).

31) 강병욱(2022).

철강 생산 공정에서 수소를 활용하는 것은 ‘수소환원제철’ 생산 기술을 활용하는 것인데 이는 산화철인 철광석에서 산소를 분리하여 철을 만들 때 환원제로 탄소 대신 수소를 활용한다는 특징이 있다.

[그림 2-9] 수소환원제철의 개념



자료: 포스코뉴스룸(2022.05.10.), 포스코 HyREX 수소환원제철 기술 심층 소개, <https://newsroom.posco.com/kr/%EC%A0%80%ED%83%84%EC%86%8C-%EC%B9%9C%ED%99%98%EA%B2%BD-%EC%A0%9C%EC%B2%A0-%ED%94%84%EB%A1%9C%EC%84%B8%EC%8A%A4-%EB%8C%80%EC%A0%84%ED%99%98-%ED%8A%B9%EC%A7%91-%EA%B8%B0%ED%9A%8D-%E2%91%A0-hyrex/> (검색일: 2024.05.20.)

앞서 기존 수요 부분에서도 설명하였듯이 화학 산업에서는 이미 다양한 용도로 수소를 소비하고 있다. 그러나 화학 산업에서도 기존 수요 외 연료전환 및 원료전환을 통한 신규 수요가 발생할 수 있다. 일반적으로 석유화학 산업에서는 공정에서 발생하는 부생가스에서 수소를 추출하여 열원으로 수소를 소비하기도 하며, 화학제품을 생산하기 위한 원료로 수소를 투입하고 있다. 향후 에너지전환을 위한 수소 활용에 대한 요구가 강화된다면 석유화학 산업은 기존에 청정하지 않게 생산된 수소 소비분을 청정하게 생산된 수소로 대체하여 소비하게 되며 이 과정에서 기존 수요를

대체하는 신규 수요가 발생할 수 있을 것이다. 특히, 납사(Naphtha) 원료를 수소로 전환하고, 수소와 재활용 이산화탄소의 화학적 반응을 통해 화학제품을 생산하는 기술의 활용 가능성을 주목하고 있다. 이러한 ‘수소의 원료전환’은 온실가스 다배출 공정인 납사분해공정의 온실가스 직접 발생량을 줄이는데 기여함과 동시에 대규모 수소 신규 수요 창출에 기여할 수 있을 것이다.

[그림 2-10] 그린수소 활용 납사 대체 기술의 온실가스 감축 원리



자료: 이태의·임정민·이수민(2022), 그린에너지 통합 시스템(섹터커플링)의 탄소중립 기여도 분석: P2G 기술을 중심으로, p.99.

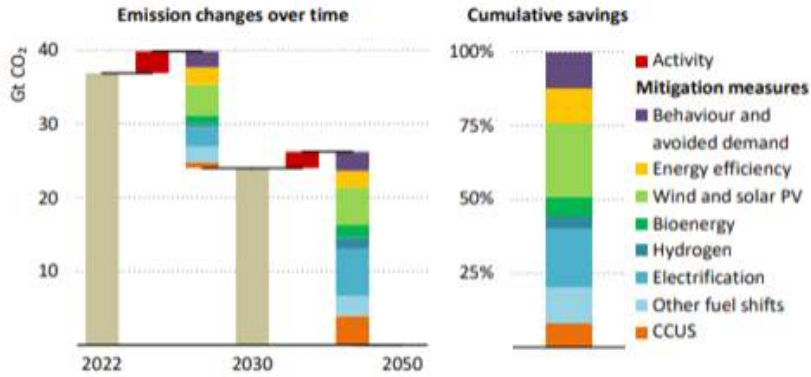
3. 온실가스 감축수단으로서 수소의 의미

국제에너지기구(IEA)가 제시한 지구온도 상승을 1.5°C 이하로 유지하기 위한 감축 경로(pathway)에 따르면 2050년 글로벌 탄소중립 달성을 위해 수소와 수소기반 연료가 최종에너지 소비에서 차지하는 비중이 2030년 1%, 2050년 8%가 되어야 한다. 전 세계 총 에너지소비가 2030년 410EJ(9,793Mtoe), 2050년 340EJ(8,121Mtoe)임을 고려할 때, 수소 및 수소기반 연료의 총 에너지소비량은 2030년 4.1EJ(98Mtoe), 2050년 3.4EJ(81Mtoe)가 될 것이다.³²⁾ 2022년부터 2050년까지 달성해야 하는 총 온실가스 감축량에서 수소와 CCUS 기술의 온실가스 감축 기여율은 약 15% 정도로 예상된다.³³⁾ 이는 2022년 기준 수소는 정유, 화학 산업 등 기존 수요처에서 대부분 소비되고 있는데 온실가스 감축을 위해서는 수소 및 수소기반 연료가 지금보다 다양한 수요처에서 화석연료를 대체해야 한다는 의미이다. 즉, 앞서 소개한 수송부문, 전환부문, 산업부문에서 신규 수소 수요를 창출하기 위한 기술 개발 및 보급이 지속적으로 확대되어 수소 수요가 창출되어야 글로벌 탄소중립 달성을 위한 이정표대로 나아갈 수 있을 것이다.

32) IEA(2023b). p.58.

33) IEA(2023b). p.67.

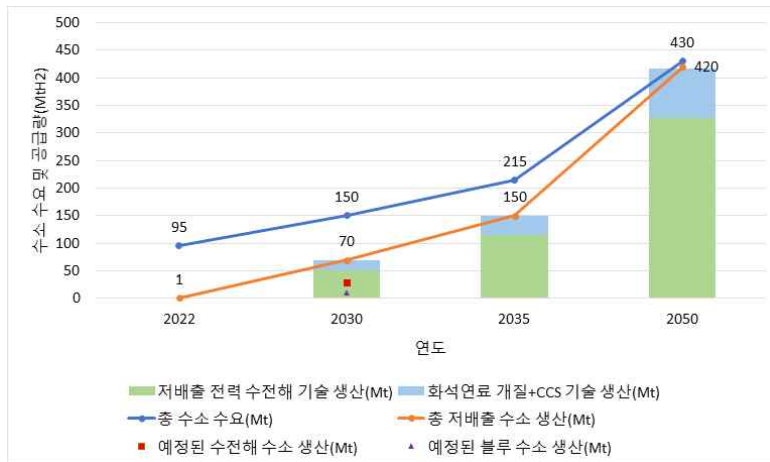
[그림 2-11] 2050년 탄소중립 달성을 위한 온실가스 감축 조치별 기여율



자료: IEA(2023b), Net Zero Roadmap: A global Pathway to Keep the 1.5 Goal in Reach(2023 Update), p.67.

[그림 2-12]은 2050년 탄소중립 달성을 위해 2030년과 2035년에 소비 및 생산되어야 하는 청정수소의 규모를 나타내고 있다. 2030년 전 세계 총 수소 수요는 약 1억 5천만 톤이 필요하고, 2050년에는 약 4억 3천만 톤이 창출되어야 한다.([그림 2-13] 참고)

[그림 2-12] 2050 탄소중립 달성을 위한 수소 수요 및 공급량 전망

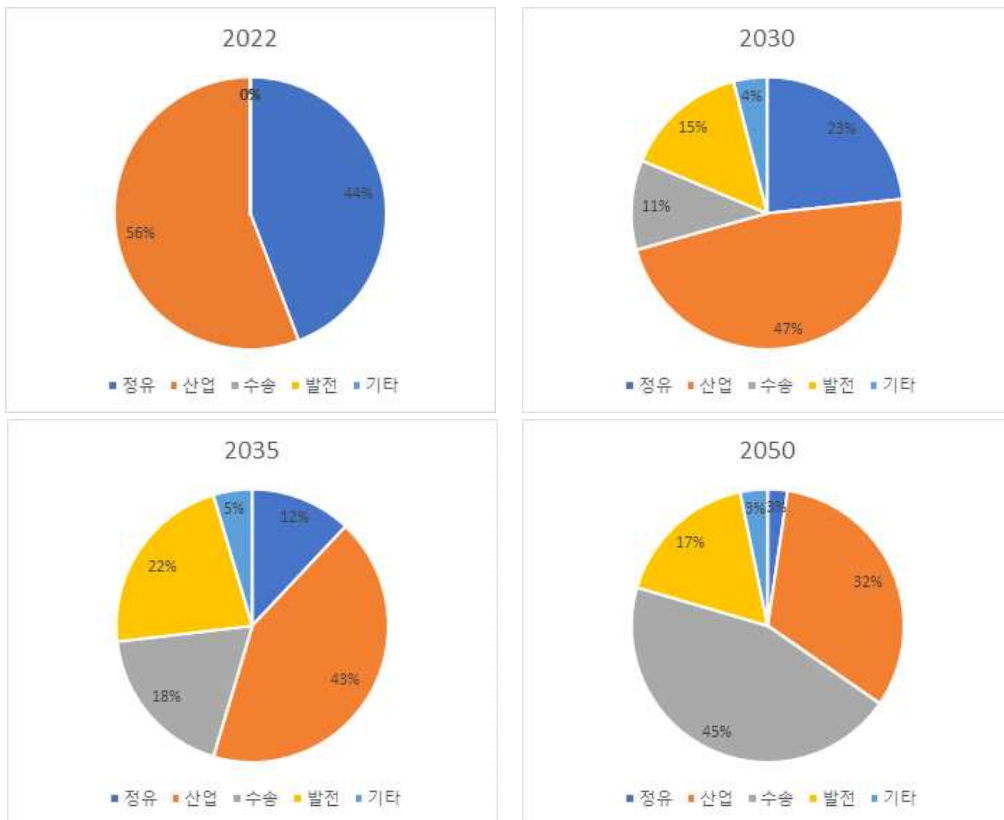


자료: 안지영. (2024). 글로벌 수소경제 추진 현황 및 과제, 경제·인문사회연구회 글로벌 이슈브리프 Vol.18, p.92

이는 기존 수요 외 다양한 부문에서 화석연료를 수소로 대체하는 수요가 대규모로 창출되어야 함을 의미한다. 화물수송, 선박, 항공 등에서의 수소기반 연료 활용, 수소 혹은 암모니아 발전, 수소환원제철 등 난감축 분야에서의 연료대체를 통한 충분한 수소 수요가 창출되

어야 한다. [그림 2-13]에서는 2050년 탄소중립 달성을 위해 수소와 수소기반 연료가 어떤 산업에서 쓰여야 하는지를 연도별로 보여준다. 수소에너지가 확대되고 온실가스 감축 경로 대로 다양한 수요처에서 수소가 활용되어야 국제사회 및 주요국에서 세운 탄소중립 목표가 달성 될 수 있을 것이다.

[그림 2-13] 2050 탄소중립 달성을 위한 수소 수요의 부문별 비중



자료: IEA(2023b), Net Zero Roadmap: A global Pathway to Keep the 1.5 Goal in Reach(2023 Update), 바탕으로 저자 작성

한편, 우리가 지향하는 청정 에너지원인 수소에너지는 친환경적인 생산 경로를 통해 생산되어야 할 것이다. 그러나 IEA(2023a)에 따르면, 2022년 기준 글로벌 수소 생산량은 연간 약 9천 5백만 톤이고, 수전해 및 CCUS 기술을 활용한 저배출 생산경로를 통해 생산된 수소의 비중은 여전히 전체의 약 1% 수준으로 확인된다. 즉, 대부분의 수소가 아직까지는 온실가스를 배출하는 전통적인 생산 경로를 통해 공급되고 있다는 의미이다.

2050년 탄소중립 달성을 위해 IEA가 제시한 연도별 이정표에서는 2030년에는 약 7천만 톤의 청정수소가 생산되어야 하며, 2050년에는 약 4억 2천만 톤의 수소가 거의 청정수소로만 생산 되어야 한다.

제3절 소결



우리나라에서는 국제사회의 에너지전환 요구가 다른 나라보다 더 큰 리스크로 작용할 수 있다. 우리나라는 경제 및 산업 구조상 에너지 다소비·온실가스 다배출 산업이 GDP의 상당부분을 차지하고 있다. 신기후통상과 글로벌 에너지전환 요구 등 우리 산업계가 처한 경영 환경의 변화는 우리기업의 비용 증가, 산업경쟁력 약화, 투자 저조 등의 위기로 찾아올 수 있다. 이러한 상황 속에서 수소경제는 1) 우리 기업이 기존에 온실가스를 다량으로 배출하던 에너지를 수소에너지로 전환하도록 유도한다는 점에서 에너지 전환의 수단으로 활용될 수 있고, 2) 신기후통상체제에서 수소산업 생태계라는 신산업으로 국가경쟁력을 강화하는 수단으로도 활용될 수 있다. 이에 우리나라의 수소경제 활성화를 위해서는 국내 수소산업 생태계가 원활히 조성되어야 할 것이다. 즉, 국내에서 수소를 생산하고 유통하고, 소비하는 일련의 산업이 발달하여 청정 에너지원인 수소에너지가 어느 곳에서나 쓰일 수 있게 되어야 할 것이다. 글로벌 환경규제 강화에 따라 산업부문 에너지전환을 위해 재생에너지 및 청정에너지 활용이 필수적이다. 그러나 우리나라는 재생에너지가 풍부한 여건을 갖추지 못하고 있어, 국내 에너지 수요를 재생에너지 및 무탄소에너지로 조달하지 못하는 실정이다.

특히 우리나라는 수소 생산에 필요한 메탄 기반의 자원과 CO₂ 저장용량, 재생에너지 자원이 모두 부족한 실정이다. 수소생산에 필요한 천연가스를 수입하고, 수소생산과정에서 포집한 CO₂는 해외로 수출(혹은 해외 저장소 대여) 해야 하며, 경제성 있는 수전해 수소를 생산할 만큼 재생에너지 잉여 전력이 풍부한 것도 아니다. 국가온실가스감축 목표 및 수소경제 이행 목표 달성을 위한 국내의 청정수소 수요는 지속적으로 증가할 것으로 예상되나, 국내 청정수소 공급 기반 구축은 비교적 더디게 확대될 것으로 예상된다. 현재 운영·계획 중인 국내 수소 공급 설비는 '28년 이후 급증하는 수송부문 수소 수요를 충당하지 못할 것으로 예상된다. '27년부터 본격화되는 청정수소·암모니아 혼소발전용 수소 수요를 충당하기 위해서는 해외 청정수소를 도입할 수밖에 없다.

그렇다면 온실가스 감축을 위해 필요한 청정수소를 전량 수입에 의존해야 할 것인가? 우리나라는 기존 에너지 시스템에서도 대부분의 에너지를 해외에서 수입해 오는 국가였다. 기후변화 대응과 에너지 전환이 주요 화두가 되고, 글로벌 에너지 패러다임이 바뀌는 이 시점에도 계속 수입의존도를 높이며 에너지자립도와 자원 안보를 악화시키는 것은 바람직하

지 않은 방향일 것이다. 에너지 패러다임이 화석연료에서 친환경에너지로 바뀌는 시기가 도래함에 따라 에너지 자립도를 제고하기 위해 친환경에너지 자급률을 높일 필요가 있다. 우리나라는 과거 석유과동 때부터 최근 러-우 전쟁까지 국제 에너지 시장 변동성이 커졌을 때, 에너지 수입국인 한국은 영향이 매우 컸음을 우리는 경험적으로 체득해왔다. 국내 청정 에너지 시장의 안정적 안착과 산업계의 에너지 전환을 위해서라도 국내에서 청정 에너지, 즉 청정수소를 공급할 수 있는 생산기반이 마련되어야 한다. 국내에서 일정량의 청정수소를 생산해야 에너지 자립도도 올라가고, 에너지 안보도 확보할 수 있으며, 유사시 대응이 가능할 것이다.

이에 해외 도입 청정수소와 별개로 부문별 목표수요 달성을 위한 국내 수소 공급 여건을 점검하고 체계적인 공급 방안 도출도 필요한 실정이며, 국내 청정수소 공급 목표 달성을 위한 안정적 수소 공급 체계를 마련해야 한다.



우리나라 수소경제 정책 추진
동향



제1절

신산업정책으로서 수소경제 정책



우리나라가 수소경제에 대한 정책적 노력을 시작한 것은 2005년으로 거슬러 올라간다. 당시 유가 상승과 기후 변화 협약을 대비하여 친환경에너지원인 ‘수소에너지’에 대한 관심이 높아져 2005년 9월 「친환경 수소경제 마스터플랜」을 발표하고 수소 분야의 기술개발을 추진하고자 했으나, 유가 안정과 후속 정책의 부재로 정책적 노력이 지속되지 못하였다.³⁴⁾ 이후 수소경제 관련 논의가 다시 본격화되기 시작한 것은 2019년으로 우리나라는 2019년 1월 국가적 차원의 수소경제 로드맵인 「수소경제 활성화 로드맵」을 수립하며, 새로운 성장 동력이자 친환경 에너지로서의 ‘수소에너지’의 중요성을 다시금 강조하기 시작하였다. 그 이후 2050년 탄소중립 달성 및 에너지전환의 수단으로서 ‘수소’의 역할이 증대됨에 따라 수소경제를 기반으로 한 새로운 생태계 조성 및 국가온실가스감축이라는 두 마리 토끼를 모두 잡는다는 정책 방향을 견지해오고 있다.

1. 우리나라 최초의 수소산업 육성 정책

수소산업의 육성은 성공적인 수소 경제 실현을 위한 필수적 요건이자, 탄소경제를 수소경제로 전환하는 데 중추적인 역할을 수행한다. 또한 수소는 전·후방 파급효과가 커 에너지전환이 주요 화두로 자리 잡은 시대에 미래 성장동력으로 인식되어오고 있다. 전통적인 탄소자원(석유, 석탄, 가스 등)을 활용하던 산업, 기술, 제품이 수소를 활용하기 위해 전방산업에서 새로운 기술이 개발되고 제품이 생산되는 등 신산업이 창출되고 있다. 또한, 이러한 기술과 제품이 생산되기 위해 후방 산업에서도 다양한 소재·부품·장비 및 인력에 대한 수요가 증가하는 등 수소 산업은 전·후방 양쪽으로 경제적·산업적 파급효과를 창출해내는 신산업으로서 주목 받고 있다. 이러한 산업적 중요성으로 인해 정부는 수소 산업 육성을 위한 정책을 꾸준히 추진해오고 있다.

34) 전자신문, 2019.01.17. <https://www.etnews.com/20190117000180> (검색일: 2024.05.20.).

<표 3-1> 수소의 전·후방 산업 예시

구분	기대효과
전방산업	수소차, 수소열차, 선박, 건설기계 등 수송 분야 고효율로 전기와 열을 생산하는 연료전지 등 에너지 분야 수소는 재생에너지의 변동성을 보완하는 친환경적 발전원 다배출·난감축 산업 공정에서의 친환경 연료, 원료
후방산업	수소 모빌리티 충전 인프라 구축 산업 및 협력 소재·부품·장비업체 다수, 대부분 중소·중견 기업 인프라 구축, 금속, 화학, 기계 설비 등

자료: 저자작성

가. 수소경제 활성화 로드맵(2019.01)

「수소경제 활성화 로드맵」의 비전은 한국을 세계 최고 수준의 수소경제 선도 국가로 발전시키는 것이다. 이 로드맵은 수소차와 연료전지의 생산 및 공급 목표를 명확하게 제시하였다. 2019년, 전 세계적인 수소 정책 추진과 친환경 에너지 수요 증가에 따라, 한국의 수소 활용 제품의 글로벌 시장 경쟁력 강화를 위한 산업 육성 정책의 일환으로 수립되었다. 이 로드맵은 수소 활용 부문에서 시장 창출과 산업 육성에 중점을 두는 수소경제 이행의 마스터플랜이다. 주요 정책 목표로는 수소 모빌리티와 연료전지의 보급 확대가 포함되었다. 2018년에 1,800대였던 수소차 보급은 2022년에는 8.1만 대, 2040년에는 620만 대까지 확대하고자 하였다. 또한, 314MW 규모의 연료전지 보급은 2040년까지 약 17.1GW 규모로 확대될 계획하였다. 이를 위해 2022년에는 연간 약 47만 톤, 2030년에는 약 194만 톤, 2040년에는 연간 526만 톤 이상의 수소 공급을 목표로 하였다. 2019년 수소경제 활성화 로드맵은 청정수소에 국한하지 않고 부생 수소와 추출 수소를 모두 포함한 수소 공급 계획을 수립하였다. 2022년부터는 수전해 수소가 일부 공급되기 시작하였고, 2030년부터는 수전해 수소와 해외 생산 수소 공급을 확대하여 장기적으로 그레이수소 중심에서 그린수소 중심으로의 수소 공급 체계 전환을 목표로 하였다.

나. 수소 기술개발 로드맵(2019.10)

정부는 2019년 1월 「수소경제 활성화 로드맵」을 수립한 이후, 국내 수소에너지 분야의 기술 경쟁력을 강화하기 위해 2019년 10월에 범부처 차원의 수소 기술개발 로드맵³⁵⁾을 마련하였다. 이 로드맵은 정부의 수소경제 정책 목표 달성을 위한 수소 산업 전 주기에 걸친 핵심 기술을 도출

35) 관계부처합동(2019b).

하고, 2040년까지의 중장기 기술 개발 전략을 제시하기 위해 수립되었다. 민·관 합동 추진체계 하에 과학기술정보통신부 주관으로 산업부, 국토부, 환경부, 해수부, 특허청 등 다양한 관계부처가 참여하여 수소 기술개발 로드맵의 총괄위원회를 구성하고 운영하였다. 또한, 산·학·연 전문가의 의견을 수렴하여 세부 기술별 전문가위원회를 통해 단기, 중기, 장기 기술개발 추진 전략을 도출하였다.

「수소 기술개발 로드맵」은 「수소경제 활성화 로드맵」의 기본 방향을 바탕으로, 수소 기술을 5개 대분류(생산, 저장·운송, 활용(수송수단), 활용(발전·산업), 안전·환경·인프라), 18개 중분류, 49개 소분류로 나누는 기술 분류 체계를 정립하였다. 각 대분류별로 구체적인 목표가 수립되어 있으며, 이는 수소경제의 효율적이고 체계적인 발전을 위한 기술적 기반을 마련하는 데 중점을 두고 있다.

<표 3-2> 수소 기술개발 로드맵 주요 내용

기술 분류	추진전략	목표
생산	<ul style="list-style-type: none"> 수소 수요량에 대응하고 화석연료 수준의 가격경쟁력을 확보함과 동시에 온실가스 저감 등 기후변화 대응을 위해, 단계별 기술 개발을 추진하여 친환경 수소로 점진적 전환 	<ul style="list-style-type: none"> '30년 평균 생산단가 3,500/kg, 평균 공급가격 4,000/kg '40년 평균 생산단가 2,500/kg, 평균 공급가격 3,000/kg
저장·운송	<ul style="list-style-type: none"> 수소 운송량 증대를 위해 기체저장 및 운송 기술을 고도화하고, 수소를 대량으로 안정성 있게 저장·운송할 수 있는 액체수소, 액상수소 화물 저장·운송에 대한 기술 개발도 추진 	<ul style="list-style-type: none"> '30년 차량용 탱크가격 45만 원/kg '40년 배관망 구축비용 4억 원/km(100bar)
활용 (수송수단)	<ul style="list-style-type: none"> 확장성이 큰 연료전지시스템을 전략적으로 활용하여 중북투자 방지, 가격저감을 유도하고 독점성 높은 부품은 국산화 	<ul style="list-style-type: none"> '30년 육상수송수단, 연안선박, 수소 드론 상용화 '40년 대양선박, 유인항공기 상용화 가능한 원천·제품화 기술 개발
활용 (발전·산업)	<ul style="list-style-type: none"> 발전용 연료전지 시스템의 경제성 확보를 통해 설치비와 발전단가를 절감하고, 수입의존도가 높은 주요 소재·부품은 국산화 및 고도화 추진 	<ul style="list-style-type: none"> '30년 발전용 발전단가 141원/kwh, '40년 131원/kwh 가정·건물용 설치비 '30년 800만 원/kW, '40년 600만 원/kW
안전·환경·인프라	<ul style="list-style-type: none"> 수소 전 주기 기술개발을 위한 기반 '30년까지 완비 	<ul style="list-style-type: none"> '30년 안전확보를 위한 데이터베이스 100% 구축 '30년 충전소 구축비용 300만 원/kg

자료: 관계부처합동(2019b). 수소 기술개발 로드맵(안). 바탕으로 저자 작성

「수소 기술개발 로드맵」에 따르면, 다음과 같은 구체적인 목표와 전략이 설정되어 있다.

- 생산 부문: 저비용 대량 수소 생산 기술의 상용화와 그린수소 생산 기술 개발이 목표다. 2030년까지 평균 수소 생산단가를 kg당 3,500원, 평균 공급가격을 kg당 4,000원으로 낮

추고, 2040년까지는 평균 수소 단가를 kg당 2,500원, 평균 공급가격을 kg당 3,000원 수준까지 하향 조정하는 것을 목표로 삼았다.

- 저장·운송 부문: 다양한 저장 및 운송 핵심기술 확보와 운송 인프라 구축이 중점이다. 2030~2040년까지 차량용 수소탱크, 트레일러 운송비, 배관망 구축비용을 절반 이상 감소 시키는 것을 목표로 한다.
- 수송 수단 활용 부문: 연료전지시스템 기반의 수송 수단 다양화를 추진한다. 수소 승용차와 상용차 외에도 다양한 육상, 해상, 항공 운송 수단 기술을 개발하여 수송 수단의 저변을 확대하고자 한다.
- 발전용 연료전지시스템 부문: 발전용 연료전지시스템의 효율 개선 및 저가화 기술 확보를 목표로 한다. 이를 통해 설치비용과 발전 단가를 낮추고자 한다.
- 안전·환경·인프라 부문: 수소 안전 및 제도, 기술 표준 마련을 위한 기반 조성과 수소 기술 보급을 위한 인프라 확대를 추진한다.

이 로드맵은 수소 산업 전 주기에 걸쳐 필요한 핵심기술 개발을 중점 추진 전략으로 삼고, 분야별 핵심 기술을 단계별로 개발하여 국내 수소 기술 역량을 강화하고자 한다. 단기, 중기, 장기 핵심 기술 개발 전략을 수립하고, 정부 집중 지원이 필요한 사업과 시기를 제시하여 정부 지원 체계의 효율성을 높이고, 국내 수소산업 생태계의 글로벌 경쟁력을 강화하고자 한다. 또한, 고압 기체 수소 복합재 저장용기, 수소차 및 발전용 연료전지 소재, 수소 충전소 기자재 등 수소 산업 전 주기에 걸친 핵심 소재·부품을 2030년까지 국산화하고, 내구성, 품질, 경제성을 개선하기 위한 엔지니어링 기술을 개발하여 국내 기술 수준을 선진국 수준까지 끌어올리는 것이 목표다.

<표 3-3> 「수소경제 활성화 로드맵」 과 「수소 기술개발 로드맵」 주요내용

구분	수소경제활성화로드맵· 수소기술개발로드맵
비전·목표	강점이 있는 수소차·연료전지를 양대 축으로 수소경제 선도
수급 목표	(2030년) 194만 톤 (2040년) 526만 톤 이상
목표 가격	(2030년) 생산 3,500원/kg, 공급 4,000원/kg (2040년) 생산 2,500원/kg, 공급 3,000원/kg
수소 공급 방식	(2030년) 추출 수소(50%), 부생 수소+수전해 수소+해외 생산(50%) (2040년) 추출 수소(30%), 부생 수소+수전해 수소+해외 생산 수소(70%)
생산	(그레이수소) 부생 수소 활용 및 대규모 추출 수소 생산 (그린수소) 수전해 수소 대량 생산 및 경제성 확보 (해외도입) 해외 CO2-free 수소 도입

저장·운송·인프라	(튜브트레일러) 액화, 액상 및 고체 수소 저장·운송 기술 확보 (파이프라인) 전국단위 고압용 수소 파이프라인 구축
활용	- 모빌리티 (2030년) 수소 열차, 선박, 드론 상용화 (2040년) 수소차 290만 대 보급, 330만 대 수출, 수소충전소 1200개소 구축 - 에너지 (2030년) 수소 가스터빈 기술개발 완료 및 상용 발전('35) (2040년) 발전용 연료전지 8GW 이상 보급, 7GW 이상 수출, 가정·건물용 연료전지 2.1GW 이상 보급
안전, 산업생태계	기술혁신, 전문인력, 표준화, 전 주기 안전관리 체계, 기반조성, 법적기반, 국제협력, 수출산업, 생태계

자료: 관계부처합동(2019a), 수소경제 활성화 로드맵. 관계부처합동(2019b), 수소 기술개발 로드맵(안). 바탕으로 저자 작성, 김기환·안지영(2022), 시장주도 수소경제 조기 정착을 위한 연구(3/3), pp.29-32. 재인용

2. 수소 전주기 산업경쟁력 강화 정책

가. 세계 1등 수소산업 육성 전략(2022.11)

2022년에 발표된 새 정부의 국정과제 중 하나는 '에너지안보 확립 및 에너지 新산업·新 시장 창출'이었으며, 이와 관련하여 '세계 1등 수소산업 육성'이라는 정책 목표가 수립되었다. 이에 따라 2022년 11월 9일에 열린 제5차 수소경제위원회에서는 「세계 1등 수소산업 육성 전략」을 제2호 안건으로 의결하고, 한국을 수소산업의 글로벌 선도국가로 도약시키기 위한 3대 목표와 4대 추진 전략을 발표하였다.

특히 주목할 점은, 이 전략에 원전을 이용한 수소 생산에 대한 정책과 계획이 최초로 포함되었다는 것이다. 이는 기존 수소경제 및 수소 기술 관련 정책에서 논의되지 않았던 새로운 접근으로, 수소산업의 다양한 생산 방식을 포괄하고 이를 통해 에너지 다변화와 에너지 안보를 강화하는 데 중점을 두고 있다. 이러한 원전을 활용한 수소 생산 전략은 한국의 수소 산업을 세계적 수준으로 발전시키는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

<표 3-4> 「세계 1등 수소산업 육성 전략」 주요 내용

주요 전략	추진과제	추진 전략 및 주요 목표
선진국 수준의 핵심 기반 기술	7대 전략분야 기반 기술 집중 지원	<ul style="list-style-type: none"> (핵심 기술) 수전해, 액화수소 운송선, 운송 트레일러, 수소 충전소, 연료전지(모빌리티), 연료전지(발전), 수소터빈 기술 집중 지원

주요 전략	추진과제	추진 전략 및 주요 목표
확보	원전 수소 생산을 위한 기반연구 및 실증	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (원전+수전해 연계) 기동 원전을 활용한 원전수소 생산 실증으로 청정수소 생산 방식 다양화
수소산업 생태계 조성	수소기업 육성 및 금융·세제 지원	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (수소전문기업) '30년까지 수소 전문기업 600개 육성 ▪ (금융·세제 지원) 수소펀드를 통한 핵심 기술 개발 투자, 수소 신기술에 대한 세액공제 강화
	수소 전문인력 양성	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (석·박사급) '30년까지 수소융합대학원 5개, 수소혁신 연구센터 4개 신설 ▪ (기초인력) 지역 특화 분야 연계한 수소학과 '30년까지 20개 신설
	수소산업 클러스터 및 인프라 구축	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (클러스터) 지역별 특화된 수소 클러스터 조성 및 원전 수소 포함한 추가 수소 클러스터 조성 ▪ (수소기술연구원) 수소기업 지원을 위한 전문생산기술연구소 설립 추진, 지역 수소 시험평가센터와 연계 추진
민간투자 촉진을 위한 규제 완화	기업규제 애로 발굴 및 해소	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (상시 규제 개선) 수소산업 관련 규제 수시 발굴 및 개선 추진 ▪ (규제 지도) 수소산업 전 주기 규제 지도 서비스 구축 및 제공('22.12)
	신속한 안전검증 및 기준 마련	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (안전기준) 규제자유특구, 규제샌드박스 등을 통한 신속 안전성 검증 후 기준 마련
해외진출 유망분야 수출산업화	수소 모빌리티	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (상용화 확대) 수소 상용차 시장 집중 공략 및 수소트램, 수소선박, K-방산 등 모빌리티 기술 실증
	발전용 연료전지	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (수출 확대) 고효율, 고내구성 모델 개발로 미국 및 유럽 수출 확대, 국산 소재·부품 해외 진출 추진
	수전해	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (국내 생산역량 확충) 수전해 수소 실증을 통한 국내 생산·운영 기술 확보 ▪ (수출 지원) 해외 그린수소 도입 프로젝트 시 국산 수전해 설비 적용 지원
	액화수소 운송선	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (상용 운송선 건조·운용) '29년까지 액화수소 운송선 시범 건조 ▪ (기자재 공급기반 마련) 액화수소 운송선 생산용 핵심 기자재 국산화
	수소충전소	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (표준모델 개발) 한국형 수소충전소 표준모델 개발 ▪ (수출지원) 수소차 수출과 연계하여 주요국 시장 진출 지원

자료: 관계부처합동(2022a), 세계 1등 수소산업 육성 전략, 바탕으로 저자 작성, 김기환·안지영(2022), 시장주도 수소 경제 조기 정착을 위한 연구(3/3), pp.37-38. 재인용

나. 수소산업 소부장 육성 전략(2023.12)

우리나라의 수소산업을 세계 선도 수준으로 육성하고, 산업 경쟁력을 강화하기 위해서는 초기 단계부터 국내 소재·부품·장비 산업의 동반성장이 필수적이다. 이에 정부에서는 10대 분야 40대 핵심 품목을 선정하고, 이를 중심으로 국내 소재·부품·장비 산업 생태계를 구축하기 위한 전략을 수립하였다.³⁶⁾ 이는 2022년 11월 제5차 수소경제위원회에서 발표된 「세계 1등 수소산업 육성

전략」을 뒷받침하기 위한 후속 전략으로, 수소산업 육성과정에서 국내 소재·부품·장비 산업을 포함한 밸류체인 전반의 동반성장을 통해 산업경쟁력과 부가가치를 제고하는 것이 가장 주된 목표이다. 이 전략은 수소 소재·부품·장비산업(이하 ‘소부장’)을 집중적으로 지원하여 수전해, 액체수소 운반선, 수소터빈 등 수소산업 10대 분야 40대 핵심품목의 원천기술 확보와 사업화 촉진, 공급망 강화에 초점을 맞추고 있다. 정부는 이를 통해 2030년까지 소부장 국산화율 80%를 달성하고, 글로벌 소부장기업 20개사를 육성함으로써 수소산업 소부장 생태계를 강화하고 기업들의 해외시장 진출을 촉진할 계획이다. 특히, 이번 전략은 수요기업 중심의 R&D 지원체계를 도입하고 특화단지 등 국내 사업화 지원 기반을 확충하는 한편, 수소산업 핵심광물의 수급 관리도 강화하는데 기여할 것으로 예상된다.

[그림 3-1] 수소산업 소부장 육성전략 주요내용

비전	✓ 세계 1등 수소산업 육성을 뒷받침하기 위한 소부장 생태계 구축	
목표	✓ '30년 10대 전략분야 소부장 국산화율 80% 달성' ('22년 40%) ✓ '30년 글로벌 수소 소부장기업 20개사 육성' ('22년 2개)	
추진 과제	1 핵심 소부장 원천기술 확보	① 범부처 연계 지원 강화 ② R&D 지원 체계 혁신 ③ 미래 원천기술 확보 지원 ④ 해외 기술제휴 지원
	2 개발된 기술의 사업화 촉진	⑤ 초기수요 창출 ⑥ 규제개선 ⑦ 사업화 기반 확충 ⑧ 수소 전문인력 양성
	3 글로벌 소부장 공급망 강화	⑨ 핵심광물 수급 관리 강화 ⑩ 공급망 상시 관리 도입 ⑪ 해외 GVC 참여 지원 ⑫ 글로벌 소부장기업 육성

자료: 관계부처합동(2023a), 수소산업 소부장 육성 전략.

제2절

기후·에너지 정책으로서 수소경제 정책



1. 청정에너지로서의 수소의 중요성

가. 제1차 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획(23.03)

2023년 3월에 수립된 '제1차 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획'은 2050년까지 탄소중립을 달성하고 녹색성장을 실현하기 위한 한국의 국가 전략을 제시하고 있다. 동 계획은 2030년까지의 온실가스 감축 목표 및 실행 방안을 제시하며, 다양한 부문에서 장기적인 온실가스 감축 정책을 마련한다. 동 계획을 통해 우리나라는 2050년까지 탄소중립을 목표로 하여 환경과 경제의 조화로운 발전을 도모하겠다는 국가 비전을 발표한 바 있으며, 이를 이행하기 위한 4대 전략과 12대 과제를 제기하였다.

특히 4대 전략 중 첫 번째 전략으로 “구체적·효율적 방식으로 온실가스를 감축하는 책임감 있는 탄소중립”을 제시하였는데, 핵심 과제로 원전과 재생에너지의 조화로운 활용을 통한 전환부문의 온실가스 감축이 포함되었다. 또한, 두 번째 전략인 “민간이 이끌어가는 혁신적인 탄소중립·녹색성장” 전략을 이행하기 위한 정책 과제에는 기후기술 개발을 기반으로 한 핵심 산업 육성을 주요 정책과제로 제시하고 있고, 원전과 수소 산업 육성에 대한 정책 목표가 탄소중립 달성과 같은 환경적 성과와 양립할 수 있도록 적극적인 정책 지원을 하고자 하는 정부의 의지가 반영되었다.

[그림 3-2] 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획 주요 추진과제



자료: 탄소중립녹색성장위원회(2023), 제1차 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획.

2. 청정수소경제로의 전환 노력

가. 제1차 수소경제 이행 기본계획

「제1차 수소경제 이행 기본 계획」은 기존의 「수소경제활성화 로드맵」과 「수소기술개발 로드맵」을 청정수소 중심으로 수정하고 보완하는 방향으로 수립되었다. 김재경(2018)에 의하면, 초기의 「수소경제활성화 로드맵」은 주로 경제적 가치 창출과 첨단산업 육성에 중점을 두고 있었다. 그러나 2020년 10월 한국의 2050 탄소중립 목표 선언 이후, 수소경제 이행의 정당성이 경제적 가치 창출에서 탈탄소화로 전환되었다. 이에 따라 기존 수소경제 정책은 유지하되 청정수소 산업을 중심으로 하는 방향으로 재편되었다고 김재경과 장성혁(2021)은 밝혔다.³⁷⁾

이러한 정책 방향 전환은 「제1차 수소경제 이행 기본 계획」에서 명확히 나타난다. 이 계획은 2050 탄소중립 및 2030 국가온실가스감축목표(NDC) 상향 조정 등 수소경제 구축과 관련된 정책 환경 변화에 따라 청정수소 중심으로 정책 방향을 변경할 필요성에 대응하여 수립되었다. 초기 수소경제 마중물 역할로 사용된 추출 수소와 부생 수소 대신, 온실가스 배출이 적거나 없는 블루 수소와 그린수소 중심으로 정책을 재정립하는 요구가 증가하였다. 이에 따라, 해외에서 저렴한 가격으로 생산된 청정수소를 국내로 도입하기 위한 공급망 구축이 필요해졌으며, 기존 계획에 비해 추가적인 기술 개발, 세무 지원 제도 마련, 국제 협력 등이 필요하게 되었다.

「제1차 수소경제 이행 기본 계획」은 수소 부문에서 수립된 최초의 법정 기본 계획으로, 2050년까지 청정수소 생산, 운송, 저장, 활용 전 부문에 걸친 종합적인 정책 방향과 추진 전략을 제시한다. 계획은 2030년과 2050년까지의 국내 청정수소 수요와 공급 목표를 설정하고, 이를 달성하기 위한 4대 전략과 15대 과제를 마련하였다. 2030년까지의 국내 수소 수요 및 공급 목표는 390만 톤으로 설정되었으며, 이 중 91%가 발전 부문에서 소비될 예정이다. 2050년에는 총 2,790만 톤의 수소 수요를 창출할 것을 목표로 하고 있으며, 발전 부문(48%)과 산업 부문(38%)에서 수소 수요가 높을 것으로 예상된다. 정부는 2050년 수소 수요를 100% 청정수소로 충당할 계획이며, 이를 위해 국내 생산 수소 500만 톤은 전량 블루 혹은 그린수소로만 생산하고, 나머지 2,290만 톤은 해외 청정수소를 도입할 계획이다. 이는 2050년 목표 공급량의 약 82%에 해당한다.

<표 3-5> 「제1차 수소경제이행 기본 계획」 주요내용

구분	제1차 수소경제 이행 기본 계획
----	-------------------

37) 김재경·장성혁(2021) p.9.

비전·목표	수소경제 전 주기 생태계 구축으로 청정수소경제 선도
수급 목표	(2030년) 390만 톤 (2050년) 2,790만 톤
목표 가격	(2030년) 생산 3,500원/kg (그린), CCS 비용 \$64~71/tCO2 목표(블루) (2050년) 생산 2,500원/kg (그린)
수소 공급 방식	(2030년) 추출+부생(24.1%), 블루(19.2%), 그린(6.4%), 해외생산(50.3%) (2050년) 블루(7.2%), 그린(10.8%), 해외생산(82%)
생산	(그린수소) 대규모 그린수소 생산 기반 구축 및 경제성 확보 (블루수소) CCUS 기술 개발로 생산 거점 구축, 탄소 저장소 발굴 (해외도입) 해외 청정수소 공급망 구축, 수소 자급률 확보
저장·운송·인프라	(수소 항만) 수소·암모니아 도입 인프라 구축 (수소 액화·변환) 액화플랜트, 암모니아 크래킹 기술 확보 및 건설 (수소 배관망) 거점지역 중심 지역 배관망 구축, LNG 배관 수소 혼입 (수소 충전소) 수소 충전소, 융복합 충전소 보급 확대, 유통 기반(유통센터, 출하센터, 거래소 등) 구축
활용	-모빌리티 (2030년) 37만 톤 소비, 수소차 88만 대 보급, 수소 엔진 기술 확보, 수소충전소 660기 수소트램, 수소 드론, 수소·암모니아 운반선 및 추진선 개발 (2050년) 220만 톤 소비, 수소차 625만 대 보급, 수소충전소 2,000기 이상 -발전 (2030년) 353만 톤 소비, 암모니아 20% 혼소발전, 수소 50% 혼소 발전 (2050년) 1,350만 톤 소비, 암모니아, 수소 전소 발전 -산업 (2030년) 실증 기술 개발 (2050년) 1,060만 톤 소비, 철강, 석유화학, 시멘트 산업 연료 및 원료 전환
안전, 산업생태계	기술개발/인력양성/표준화, 수소 안정성, 정책기반 구축/국민 수용성 제고 국제협력, 수소전문기업 육성 및 금융활성화, 수소클러스터, 도시, 규제특구

자료: 관계부처합동(2021), 제1차 수소경제 이행 기본 계획. 바탕으로 저자 작성, 김기환·안지영(2022), 시장 주도 수소경제 조기 정착을 위한 연구(3/3). pp.29-32. 재인용

나. 청정수소 생태계 조성방안

청정수소경제 이행을 위한 「청정수소 생태계 조성방안」에서는 기존 기본 계획의 추진 전략을 대체로 유지하면서도, 구체적인 시점과 규모에 대해 더 명확한 내용을 제시하고 있다. 이 계획에서는 청정수소발전 입찰시장과 청정수소 인증제의 도입 시점 및 운영 방식에 대해 보다 상세한 정보를 포함하고 있으며, 액화 수소 및 암모니아 운반선, 인수기지, 배관망 등 해외 청정수소 도입 인프라에 대한 구체적인 사업 계획도 제시하고 있다. 특히 주목할 점은, 발전 부문에서의 수소 수요를 상당 부분 차지하고 있는 10차 전력수급기본 계획을 반영하여 수소 발전량에 대한 구체적인

목표를 설정했다는 것이다. 이는 수소 발전 부문에서의 명확한 목표 설정을 통해 전력 생산에서의 수소 활용을 증진시킬 수 있는 방안을 제시한다.

그러나 이 계획의 가장 큰 차별점은 원자력 수소에 대한 추진 전략의 포함이다. 청정수소 생산 방식 다양화의 일환으로, 원자력 발전과 수전해 기술을 연계하여 온실가스 배출이 없는 수소를 생산하는 기술 개발을 계획하고 있다. 이는 기존의 청정수소 생산 방식에 대한 새로운 접근이며, 온실가스 감축 및 지속 가능한 에너지 생산을 위한 중요한 전략이 될 수 있다. 이러한 원자력을 이용한 수소 생산 방식은 청정수소 생산의 범위를 확장하고, 탄소중립 목표 달성에 기여할 수 있는 혁신적인 접근으로 평가될 수 있다.

<표 3-6> 「청정수소 생태계 조성방안」 주요 내용

주요 전략	추진과제	추진 전략 및 주요 목표
대규모 수소 수요 창출	수소버스 등 수소 상용차 보급 활성화	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (수소버스) 구매보조금 확대, 지자체 시범사업 운영 등 ▪ (특수차) 구매보조금 확대, 수소지게차 여건 마련 ▪ (확산기반) 사업용 차량 전환 로드맵 수립 및 제도 개선
	석탄-LNG 발전소의 연료 전환	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (기술개발) 연소기, 버너 등 혼소 핵심 부품 개발 ▪ (유형별 실증) 혼소 가능 발전설비 파악 및 실증 추진 ▪ (상용화 확산) 단계적 설비전환 추진
	연료전지 등 분산형 수소발전 확산	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (연료전지) 에너지 슈퍼스테이션 확산 ▪ (수소터빈·엔진) 수소 혼소·전소 기술 개발
	온실가스 다배출 산업의 수소 적용 준비	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (철강) 수소환원제철 전환 ▪ (석유화학) 설비 연료 전환
수요 기반 유통 인프라 구축	액화수소 기반 인프라 마련	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (액화플랜트) '23년까지 연간 4만 톤 액화 수소 생산 플랜트 구축 ▪ (액화충전소 확대) 액화 충전소 구축 보조금 확대, 기술개발 및 개조 지원
	수소·암모니아 발전용 인프라 구축	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (인수기지) 발전소 밀집지역 인수기지 구축 ▪ (수소 배관망) 액화수소 인수기지-수도권 LNG 발전소 간 단계적 배관망 구축
국내·외 청정수소 공급망 구축	국내 청정수소 생산기반 확충	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (그린수소) 고효율대량생산 기술력 확보 및 생산기지 시범 구축 ▪ (블루수소) 대규모 생산기지 구축 및 CO₂ 해외 운송 지원 ▪ (원자력 수소) 원전연계 실증 및 상용화 추진
	해외 청정수소 생산 본격화	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (시범사업) 유형별 대표 프로젝트 추진, 해외 청정수소 생산시설 구축 지원 ▪ (운반선) 암모니아 및 액화수소 운반선 건조 추진 ▪ (해외 수소 개발 지원) 해외 수소 개발 지원 근거 마련 및 지원체계 구축

주요 전략	추진과제	추진 전략 및 주요 목표
수소시장 제도적 기반 마련	수소발전 입찰시장 개설	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (수소발전량) 수소 발전 비중 '30년 2.1%, '36년 7.1% ▪ (구매자) 한전·구역전기사업자 의무구매, 일반기업도 참여 가능. RE100 연계 제도 마련 ▪ (공급자) 연료전지, 수소터빈, 석탄-암모니아, 수소엔진 등 발전사업자
	수소 유통 기반 구축	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (수소사업법) 수소사업에 관한 법적 기반 마련 ▪ (유통질서 확립) 수소거래시장 개설
	청정수소 인증·운영체계 마련	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (청정수소 인증제) '23년 제도 마련 및 '24년 시행(온실가스 배출 최대 5kg CO₂eq./kgH₂이하)

자료: 관계부처합동(2022b), 청정수소 생태계 조성방안. 바탕으로 저자 작성. 김기환·안지영(2022), 시장주도 수소경제 조기 정착을 위한 연구(3/3). pp.35-36. 재인용

3. 청정수소 인증제의 도입

가. 한국형 청정수소 인증제

정부는 2023년 12월 제 6차 수소경제위원회를 통해 「청정수소 인증제 운영 방안」을 발표하였다. 청정수소 인증제란 수소의 생산·유통 등 전 과정에 걸쳐 발생하는 온실가스의 총량을 산정하여, 정해진 임계점보다 온실가스를 더 적게 배출하는 경우 생산된 수소가 '청정'함을 인증해주는 제도이다. 우리나라는 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」(이하 수소법)에서 '청정수소'에 대한 법적 정의를 정하고 있다. 수소법에서는 '청정수소'를 수소법 제 25조의 2(청정수소의 인증 등)에 따라 수소 생산·수입 등의 과정에서 온실가스³⁸⁾를 배출하지 않거나 대통령령(「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률 시행령 일부개정령」(23.11.30),³⁹⁾⁴⁰⁾으로 정하는 기준(kgCO₂eq/kgH₂ 단위) 이하로 배출하는 수소와 이를 포함하는 수소 화합물(암모니아 및 액상 유기화합물)을 청정수소로 정의하고 있다.⁴¹⁾ 곧이어 시행령에서 위임된 구체적인 규정을 포함하여 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률 시행규칙」이 2023년 12월 11일자로 개정 및 발효되었다.⁴²⁾ 이렇게 개정된 시행령 및 시행규칙을 근거로 2024년부터 한국형 청정수소 인증제가 본격 시행되었다.

우리나라의 청정수소 인증제는 국내의 생산을 모두 포함하여 Well-to-Gate(원료 채굴~생산)

38) 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」 제2조제5호에 따른 온실가스

39) 산업통상자원부 보도자료. 2023.11.14. 청정수소 인증제 도입한다. (검색일: 2024.05.20.)

40) 대통령령 제33882호, 2023.11.21. 일부개정, 2023.11.30. 시행

41) 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」 제25조의2

42) 산업통상자원부령 제534호, 2023.12.11. 일부개정, 2023.12.11. 시행

로 청정수소의 온실가스 배출에 대한 전과정평가(Life Cycle Assessment)를 하게 된다.⁴³⁾ 즉, 수소 생산에 필요한 원료 채굴(천연가스, 재생에너지, 우라늄 등) 과정에서 발생하는 온실가스 배출량부터 원료 및 연료의 이동, 정제, CO₂ 포집 및 저장, 수소 생산까지 배출되는 온실가스 배출량을 모두 합산하여 온실가스 배출량 기준(임계점)이 충족되는지를 판단한다는 의미이다.⁴⁴⁾

우리나라에서 청정수소 인증을 받기 위한 온실가스 배출량 기준은 4kgCO₂eq/kgH₂로 정해져 있다. 즉, 수소 생산자는 수소 생산 공정(Well-to-Gate 범위)에서 발생하는 모든 온실가스 배출량을 합산한 뒤 최종 생산물(수소)의 수량으로 나누어 수소 1kg당 발생하는 온실가스 배출량(CO₂eq)을 계산하고 이 기준치(4kgCO₂eq/kgH₂)를 초과하는지 평가받게 된다.

[그림 3-3] “Well-to-Gate” 산정범위



자료: 관계부처합동(2023b), 청정수소 인증제 운영방안, p. 6.

국내 청정수소 인증제에서는 인증된 청정수소를 온실가스 배출량 수준에 따라서 4개 등급으로 구분한다. 청정수소의 생산 경로와는 관계없이 수소 생산 시의 온실가스 배출량만을 고려하여 등급이 부여된다. <표 2-7>에서는 청정수소 인증제의 등급별 온실가스 배출량 기준과 해당 등급을 받기 위한 예상 생산 경로가 제시되어 있다.

다른 국가의 수소 인증제와 차별화되는 우리나라의 청정수소 인증제의 가장 큰 특징은 ‘기술중립성’을 표방한다는 것이다. 우리나라의 청정수소 인증제는 청정수소 인증 과정에서 생산 기술에 대한 요구조건을 정하지 않아 다양한 청정수소 생산 기술이 제약 없이 활용될 수 있도록 설계되었다. 즉, 어떤 기술을 활용하여 수소를 생산하더라도 법적으로 정해진 온실가스 산정 방법에 따라 온실가스 배출량 기준을 만족한다면, 청정수소로 인증한다는 의미이다. 이는 국내에서 필요한 청정수소를 해외에서 조달해야 하는 우리나라의 입장에서 다양한 국가에서 다양한 기술을 통해 생산된 청정수소를 최대한 많이 확보할 수 있도록 하기 위한 전략이기도 하다.

43) 관계부처합동(2023b), p.6.

44) 안지영·이태의(2023).

<표 3-7> 청정수소 인증제 등급별 온실가스 배출량 기준

등급	온실가스 배출량 기준 (kgCO ₂ eq/kgH ₂)	예상 생산 경로
1등급	0.00 ~ 0.10	재생에너지발전+수전해
2등급	0.11 ~ 1.00	원자력 발전+수전해
3등급	1.01 ~ 2.00	천연가스 개질+CCS(포집률 高)
4등급	2.01 ~ 4.00	천연가스 개질+CCS

자료: 안지영·이태의(2023), 청정 암모니아 밸류체인 전주기 체계 구축 연구. 바탕으로 저자 작성

원자력 발전을 활용한 수소 생산의 경우 수소 생산 과정에서 발생하는 온실가스 배출은 없지만, 원자력 발전에 투입되는 원료인 우라늄 채굴 및 전처리하는 과정에서 에너지 소비가 있기 때문에 전 과정 평가에 well-to-gate 산정범위를 적용할 시 온실가스 배출량이 0.1kgCO₂eq 보다 커지게 된다. 평균적으로 우라늄 채굴, 전환, 농축, 성형 과정에서 약 2.4-6.9g CO₂eq/kWh가 배출된다.⁴⁵⁾ 이는 1kg의 원전 수소의 생산 직전 단계에서 약 0.1-0.3kgCO₂eq가 온실가스 배출량이 발생한다는 의미이다. 즉, 우리나라 청정수소 인증제에서 원전 수소는 대략 2등급의 인증 등급을 부여받을 것으로 예상된다.

현재 우리나라 청정수소 인증제에서는 인증 등급에 대한 차등지원 여부 등이 확정되지 않았다. 향후 청정수소 인증 등급에 따라 차등 지원(안)이 설계된다면, 원전 수소는 재생에너지 기반의 수소보다는 낮게, 화석연료 및 CCUS 기술을 활용한 수소보다는 높은 수준으로 지원 받을 수 있을 것으로 생각된다.

나. 주요국 수소 인증제와의 비교

수소인증제는 다양한 이름으로 각 국에서 수립 및 운영되고 있다. 수소인증과 관련한 주요 코디네이터 기관인 IPHE(국제 수소·연료전지 파트너십)의 수소 인증 매키니즘 TF(H₂CM TF)에 따르면, 현재까지 약 12개국 혹은 지역에서 23개의 수소 인증제가 수립 중인 것으로 확인된다.

각 국은 자국의 에너지시스템 여건, 기후·에너지 정책 목표, 수소 공급 목표, 예산 등에 따라 수소인증제를 다양하게 설계하고 있다. 각 국은 IPHE에서 협의된 표준적인 온실가스 배출량 산정 방법론을 따르고 있지만, 자국의 상황에 따라 온실가스 배출량 산정범위, 인증 기준(임계점), 허용 기술 및 연료의 범위, 의무화 여부, 인센티브 유무 등을 결정하여 제도를 수립하고 있다.

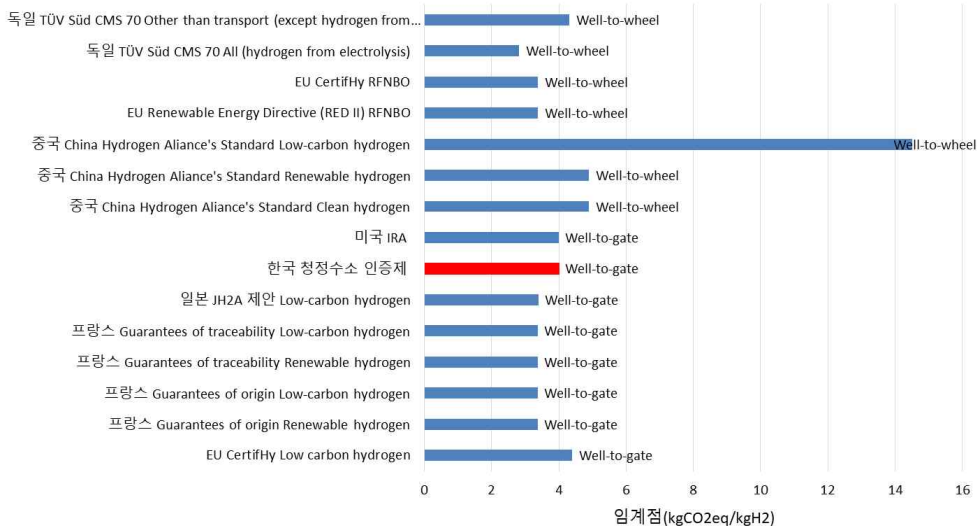
45) IEA(2023c). p.40.

<표 3-8> 국가별 수소관련 인증제도 현황

국가	인증제도
호주	Product guarantee of origin
	Zero carbon certification scheme
오스트리아	TÜV Austria green hydrogen certification scheme
	TÜV Austria low carbon hydrogen certification scheme
캐나다	Clean Hydrogen Investment Tax Credit
중국	China Hydrogen Alliance's Standard
EU	CertifHy(Biofuels and renewable fuels of non-biological origin)
	ISCC EU (RFNBO)
	RedCert EU (RFNBO)
프랑스	Guarantees of origin scheme
	Guarantees of traceability scheme
독일	Dena Bioregister
	H2 Global
	TÜV Süd CMS 70
일본	Japan Basic Hydrogen Strategy (METI)
	Low-carbon hydrogen certification (Chubu Region)
한국	Clean Hydrogen Certification System
영국	UK Low Carbon Hydrogen Certification
	UK Renewable Transport Fuel Obligation
미국	Low Carbon Fuel Standard (California)
	Inflation Reduction Act - tax credit for production of clean hydrogen
	Colorado clean hydrogen tax credit
Green Hydrogen Organisation	Green hydrogen, green ammonia

자료: IPHE(2023b), Hydrogen Certification Mechanisms Task Force Results, p10.

[그림 3-4] 주요 수소인증제 별 온실가스 산정범위 및 임계점



주: Well-to-Gate(원료채굴~수소생산) / Well-to-Wheel(원료채굴~수소사용)
 자료: IPHE(2023a), 3rd draft Inventory of Certification Mechanisms. 바탕으로 저자작성.

[그림 2-4]에서는 주요 수소 인증제의 온실가스 산정범위와 인증을 위한 임계점을 나타내고 있다. 각 국은 수소 인증제 운영의 목적과 정책 목표에 따라서 우리나라보다 더 넓은 범위인 Well-to-Wheel(원료 채굴부터 수소 활용 단계까지)에서 더 낮은 임계점을 지정하기도 하였다. 특히 유럽 국가가 보다 넓은 범위의 온실가스 산정범위를 정하고 있는데, 이는 유럽에서는 수소 생산 이후 수소 활용 단계까지의 수소 유통을 대부분 배관을 통해 공급하는 것으로 계획 중이기 때문이다. 배관을 통한 수소 공급 시에는 수소 유통을 위해 다른 수소 화합물로 전환할 필요도 없으며, 육상운송에 따른 온실가스 배출도 발생하지 않기 때문에 상대적으로 하류부문(downstream)에서의 배출량이 적다. 또한, 유럽의 경우 대부분의 청정수소를 풍부한 재생 에너지를 바탕으로 생산할 것으로 예상된다. 이에 수소 생산 단계에서의 온실가스 배출량이 현저히 낮아지므로 온실가스 산정범위를 확장하더라도 낮은 임계점을 기준으로 제시하는 것이 가능하다. 그러나 한국과 일본과 같이 재생에너지 여력이 적고, 대부분의 에너지를 수입에 의존하는 국가의 경우 유럽과 같은 기준을 적용하기가 어렵다. 특히 수소를 수입해 올 때 1) 액화 후 재기화, 2) 암모니아 합성 후 크래킹, 3) LOHC 수소화 및 탈수소화 중 하나의 경로를 선택할 수밖에 없는데, 어느 경로든 대량의 에너지가 소비되며, 이때 투입되는 에너지의 종류에 따라 온실가스가 상당히 많이 배출된다. 이런 국가들은 비교적 수소 생산 단계(gate)까지만 온실가스를 산정하고자 제도를 설계하고 있다.

또한 수소 인증제 별로 인증된 수소에 대한 라벨을 어떻게 붙일 것 인가에도 차이가 있다. 우리나라의 청정수소 인증제의 경우 인증기준을 통과한 수소를 ‘청정(clean) 수소’라고 지칭하게 되는데, 일부 국가에서는 그린수소, 재생가능수소, 저탄소 수소 등 다양한 명칭으로 지칭된다. 이는 각국이 제한하는 수소생산 기술과 연료의 조건과 연계되어 결정되는 것으로 확인된다. 특히, 상당수의 수소인증제가 수전해 수소에 공급하는 전력에 대한 요구조건을 명시하고 있다. 주요국의 수소 인증제는 수전해 수소에 대해 1) 전력공급원 조건, 2) 전력 유연성 허용 수준 등에 차이가 있다. 재생에너지 전력만 인정할 것인지, 원전을 포함한 무탄소 발전원의 전력까지 인정할 것인지, 그리드 전력을 일부 활용할 수 있는 지 등에 대해서는 각국의 에너지 시스템 여건에 따라 상이하게 나타난다는 의미이다. 각국의 여건에 따라 원전을 바라보는 시각이 상이하여 수전해 수소의 전력 공급원으로 원전을 허용할 것인가의 문제는 아직까지도 정해지지 않은 경우가 많다.

<표 3-9> 타 수소 인증제 주요 요구조건 및 우리나라 청정수소 인증제와의 비교

조건	확인된 인증제 수	조건 적용 현황	우리나라 인증제와의 비교
기술 및 연료 조건	8	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 재생에너지만 인정: 2 ▪ 재생에너지 및 CCS 인정: 1 ▪ 모든 기술 및 연료 인정: 5 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 모든 기술 및 연료 인정
그리드 연계 허용	14	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PPA/REC 허용: 2 ▪ PPA/RE 불허: 12 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PPA/REC 허용(단, 전체 소비전력의 10% 이내)
추가성 조건	7	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 의무 혹은 인센티브: 4 ▪ 불요: 3 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 한시적 면제 ▪ 추후 검토
시간적 상관성	9	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 15분 단위 매칭: 1 ▪ 30분 단위 매칭: 2 ▪ 12개월 단위 매칭: 1 ▪ 불요: 3 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 한시적 면제 ▪ 1개월 단위 매칭 (2030년 이후 생산 개시 설비 대상)
공간적 상관성	8	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 동일 그리드 한정: 3 ▪ 기타: 2 ▪ 불요: 3 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 동일 그리드 한정

자료: IPHE(2023b), Hydrogen Certification Mechanisms Task Force Results. 및 에너지경제연구원 (2024), 인증제 운영방안 및 시범사업 안내(2024.02.29.). 바탕으로 저자작성.

직접연계 재생에너지 전력만을 인정할 경우 재생에너지 발전원의 변동성과 간헐성으로 인해 수소 생산 효율이 낮아질 수 있다. 이에 PPA(전력구매계약)와 vPPA(가상 전력구매계약), REC(재생에너지인증서) 구매 등 시장거래 매커니즘을 통한 전력 유연성 확보를 허용할 것인가가 국가별 수소 인증제의 가장 큰 차이점이 될 것이다. 또한, 시간적·공간적 상관성과 추가성 조건에 대한 논의도 활발히 이루어지고 있다. 시간적 상관성이란 재생에너지 및 무탄소 전력 사용 여부에 대한 정산을 어느 정도 기간마다 할 것인가를 의미한다. 짧은 주기로 정산하는 경우 지속적으로

재생에너지와 무탄소 전력이 공급되어야 할 것이고, 정산 주기가 길어질수록 전력공급을 유연하게 할 수 있어 계통 내에서의 전력 수급 상황에 따라 유연하게 대처 가능할 것이다. 공간적 상관성이란 연계된 재생에너지 혹은 무탄소 발전원의 범위를 어디까지 인정할 것인가를 의미한다. 수소 생산 설비와 동일한 그리드 내에 있는 경우에만 허용할 것인지, 국가 혹은 지역 간 전력 거래를 통해 그리드 밖에서 공급되는 전력도 허용 할 것인가 등이 이 조건에 의해 결정된다.

추가성이란 신규 건설된 발전원으로 생산된 수소만 청정수소로 인정할 것인가에 대한 조건이다. 이 추가성 조건은 이미 무탄소 전력을 공급하던 재생에너지 혹은 원자력 발전소가 수소를 생산하기 위해 기존에 공급하던 무탄소 전력을 사용함으로써 동일한 규모의 전력이 무탄소 발전원 외의 발전원에서 공급되는 것을 방지하기 위해 요구되는 조건이다. 즉, 수소 생산으로 인해 기타 발전원에서 온실가스가 배출되는 것일 방지하는 것이다. 또한 재생에너지의 지속적인 확대를 위해 신규 재생에너지 발전소를 건설하기 위한 수단으로 활용될 것이다. 이러한 추가성 조건은 현재 우리나라에서 한시적으로 면제되고 있으나, 향후 국제 사회의 요구가 높아지는 경우 국내 제도에 도 추가성 조건을 포함해야 할 가능성이 있다. 그러나 이 추가성 조건은 원전 수소 설비의 확대에는 제약으로 작용할 가능성이 크다. 국내에서 방사선편기물 문제 및 주민수용성 문제 등으로 인해 새로운 대형원전을 지속적으로 추가 건설하는 것이 어려운 상황에서 원전 수소 생산 설비가 추가성 조건을 만족시키기가 쉽지 않을 것으로 예상된다.

미국의 경우 인플레이션감축법안(IRA)의 일환으로 청정수소생산표준(Clean Hydrogen Production Standards, CHPS)를 제시하고, 청정수소 생산 사업자에 대한 투자세액공제 및 생산세액공제를 발표하였다. IRA에서 세액공제를 받기 위해서는 미국 에너지부에서 정하는 청정수소생산표준(CHPS)의 기준에 부합하여야 하는데, 미국 CHPS에서는 청정수소 생산에 대한 특별한 기술 및 연료 조건을 정하고 있지 않다.⁴⁶⁾ 재생에너지, 원전 등의 무탄소 전력원과 연계된 수전해 수소, 화석연료와 CCS 기반의 블루수소 생산을 모두 포함하여 온실가스 배출량 기준을 충족하는 모든 생산 방식을 허용한다. 다만 수전해기에 공급되는 전력에 대한 전력조건을 강하게 설정하고 있다.⁴⁷⁾ 미국 CHPS에서는 수소 생산 이전 36개월 이내에 신규 건설된 발전설비만 인정하는 등 추가성 조건을 유예기간 없이 즉시 적용하고 있으며, 2027년까지 시간적 상관성을 한시적으로 연단위로 정산하지만, 2028년부터는 시간단위로 정산하는 것으로 조건을 점차 강화해 나갈 계획이다.⁴⁸⁾

EU의 경우에는 EU 재생에너지지침(REDD II) 및 개정안을 통해 재생가능수소 인증기준을 제시

46) U.S. Department of the Treasury 홈페이지. Inflation Reduction Act. (검색일: 2024.05.20.)

47) U.S. Department of the Treasury 홈페이지. Inflation Reduction Act. (검색일: 2024.05.20.)

48) U.S. Department of the Treasury 홈페이지. Inflation Reduction Act. (검색일: 2024.05.20.)

하고 있다.⁴⁹⁾ 재생가능수소로 인증 받기 위해서는 저탄소 전력을 이용해야 하며, EU에서도 이에 대한 전력 조건을 제시하고 있다. 재생에너지지침 위임법(2023/1184)에 따르면 EU의 재생수소 인증 기준에는 미국과 유사하게 36개월 내 건설된 신규 발전설비를 이용해야 한다는 추가성 조건이 포함되어 있지만, 2028년 이전에 가동되는 설비에 대해서는 10년 간 추가성 조건을 면제하고 있다⁵⁰⁾. 또한 EU는 2029년까지 재생에너지 전력 사용에 대해 월 단위 정산을 의무화하였고, 2030년부터는 시간단위 정산을 요구하고 있다. 다만, EU의 재생에너지지침(RED II)의 경우 EU 회원국에서 국내법으로 수용하기까지 시간이 걸리고, 회원국마다 재생에너지 및 저탄소 전력에 대한 정의가 상이하다는 점에서 EU 회원국 별로 재생수소에 대한 인증 조건이 어떻게 설정될지에 대해서는 추이를 지켜볼 필요가 있다.

49) EUR-Lex 홈페이지. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) (Text with EEA relevance)Text with EEA relevance. (검색일: 2024. 05. 20.)

50) EUR-Lex 홈페이지. Commission Delegated Regulation (EU) 2023/1184. (검색일: 2024. 05. 20.)

제3절 소결



정부의 적극적인 수소 산업 육성정책을 바탕으로 초기 한국의 수소산업은 빠르게 성장해 왔다. 생산 부문에서는 청정수소의 역할이 크지 않았으므로 부생 수소 및 그레이수소 중심의 수소 생산 설비 보급이 빠르게 이루어졌다. 현재까지 전국적으로 총 7개의 수소 생산 기지가 건설되어 상업 가동 중이며,⁵¹⁾ 11개의 생산지(소규모 생산기지 1개소, 중대규모 생산기지 3개소, 수소 출하센터 2개소, 수전해 기반 수소생산기지 4개소, 탄소포집형 생산기지 1개소 등)가 추가로 건설될 예정이다. 건설 예정 수소 생산 기지를 살펴보면 수전해 기반과 탄소포집형 생산기지 등 청정수소 생산을 위한 생산기지도 계획이 되어있다는 점에서 산업육성과 기후·에너지 정책의 목표 달성을 위한 정부의 적극적인 의지가 실현되고 있음을 알 수 있다. 유통 부문에서는 전국 수소 배관망은 아직 건설되지 않았고 일부 산업단지를 중심으로 수소 배관이 건설되어 있다. 현재 국내에 건설된 수소 배관 길이는 약 248km이며, 대규모 산업단지가 조성되어 있는 울산 및 여수에 가장 많이 설치되어 있다.⁵²⁾ 배관이 설치된 지역 밖으로 수소 유통을 위해서는 수소 튜브트레이러를 활용하고 있는데, 2023년 말 기준 국내 수소 튜브트레이러는 총 917대가 보급되어 있다.⁵³⁾ 「수소경제 활성화 로드맵」의 정책 방향이 수소차 및 수소연료전지 중심의 산업 육성이었으므로 초기 수소경제 추진 실적은 수소차와 수소 연료전지 보급 성과를 통해 확인할 수 있을 것이다. 수소경제종합포털에 따르면 2023년 12월 기준 수소차 보급 대수는 총 34,258대로, 승용차 33,591대, 승합, 화물 특수용목적용 수소차가 총 667대가 보급되어 있다.⁵⁴⁾ 또한, 2023년 말 기준 한국의 상업용 수소충전소는 총 267개로 파악되는 등 2019년 이후 그 수가 급격히 증가하고 있다. 수소 연료전지는 현재까지 총 930MW가 전국적으로 보급되어 있다⁵⁵⁾.(2023년 6월 기준)

현재 우리 정부는 정책적 지원을 통해 수소 산업을 적극적으로 육성하고 있다. 이를 위해 '수소 전문기업'을 선정하고 지원하며, 이는 수소의 생산, 저장, 운송, 충전, 판매 등 전 주기 밸류체인에서 활동하는 기업 중 특정 기준을 충족하는 기업을 의미한다. 이러한 노력의 일환으로, 정부는 "수소 플러스 1000" 프로젝트를 통해 2040년까지 1,000개의 수소전문기업을 육성할 계획이다. 이

51) 수소경제종합포털, 국내 수소 생산기지 및 출하센터 구축 현황. (검색일: 2024.05.20.)

52) 수소경제종합포털, 국내 수소배관 현황(권역별). (검색일: 2024.05.20.)

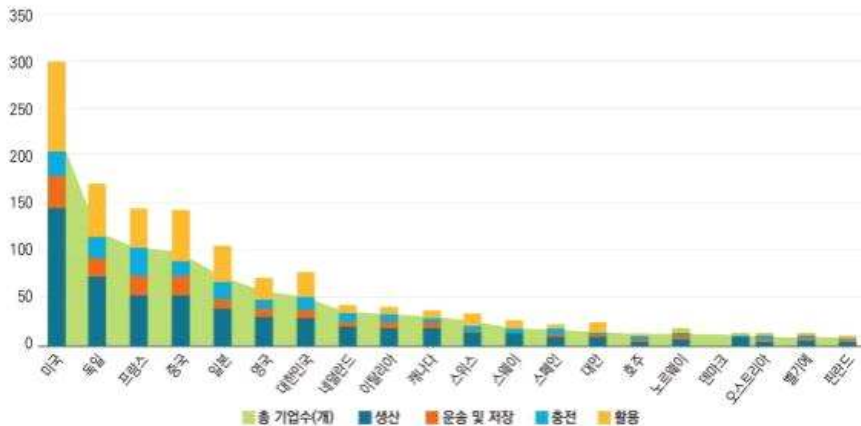
53) 수소경제종합포털, 국내 수소튜브트레이러 현황(권역별). (검색일: 2024.05.20.)

54) 수소경제종합포털, 국내 수소차 등록현황. (검색일: 2024.05.20..)

55) 산업통상자원부 제공자료.(2023년 6월 기준)

프로젝트는 수소전문기업에 특화된 지원 사업을 통해 이루어지며, 이를 통해 수소 사업에 참여하는 기업의 수가 증가하고 있다.⁵⁶⁾ 이러한 수소 산업 육성 정책은 국내뿐만 아니라 전 세계적으로 추진되어 왔는데, 이러한 전 세계 적인 수소 산업 활성화에 따라 수소 산업에 참여하는 사업체들이 등장하기 시작했다. EnerData가 제공하는 Hydrogen Company DB에 따르면, 2022년 7월 기준으로 수소 밸류체인 관련 사업체가 가장 많은 국가는 미국이며, 총 227개의 기업이 수소 관련 산업에 참여하고 있거나 기술·제품을 개발하고 있다. 미국에 이어 독일, 프랑스, 중국, 일본, 영국 순으로 수소 사업체 수가 많았고, 한국은 51개의 수소 기업을 보유하여 세계 7위를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 이는 2022년 7월 기준 한국의 수소전문기업 개수와 동일하다.

[그림 3-5] 전 세계 국가별 수소 관련 기업 수 분포



주: 밸류체인 단계별 사업체 수(막대그래프)는 중복을 포함함

자료: Enerdata Hydrogen Company DB(<https://www.enerdata.net/research/h2-database.html>) (최종검색일: 2024.05.20.) 바탕으로 저자 작성

한국의 수소기업 51개의 세부 사업 추진 현황을 분석한 결과 크게 ①소재/부품, ②수소생산, ③수소 전환, ④수소저장, ⑤수소충전, ⑥수소활용으로 구분되는 밸류체인에서 1개 이상의 사업을 영위하고 있음을 확인할 수 있었다.⁵⁷⁾ 국내에서 수소 제품에 필요한 소재와 부품을 개발하거나 생산하는 산업에 참여하고 있는 사업체는 소재분야 10개, 부품분야 17개가 있는 것으로 확인되었다. 국내 소재 기업의 경우 전해질, 촉매, 분리막 등 수전해 혹은 연료전지에 투입되는 소재를 중심으로 사업을 운영하는 기업이 다수를 차지하고 있었다. 국내 부품 기업의 경우 분리막 전극

56) 산업통상자원부 보도자료. 2021.06.01. 수소법상 “수소전문기업” 11개 최초 지정. (검색일: 2024.05.20.)

57) 밸류체인 별 기업 현황은 부록의 <표 부록-1>에 제시함.

조립체(MEA) 생산 기업이 가장 많았으며, 연결부/양극성판 생산 기업이 그 다음을 차지하고 있었다. 다음으로 청정수소 생산의 핵심 기술로 여겨지는 수전해 분야에서는 총 9개 사업체가 확인되었는데, 대부분의 기업이 알칼라인(ALK)과 고분자전해질막(PEM) 수전해기를 생산하는 기업으로 확인되었다. 차세대 수전해 기술로 여겨지는 음이온교환막(AEM) 수전해와 고체산화물수전해(SOEC)기를 개발·생산·판매 하는 기업은 거의 존재하지 않는 것으로 확인되었다. 이를 통해 국내 청정수소 생태계에서 청정수소 생산에 참여하는 사업체의 수에 기술별 불균형이 있음을 알 수 있다.

기타부문에서 국내 수소기업의 사업현황을 살펴보면, 수소 충전 분야와 연료전지 분야에서 가장 많은 사업체가 사업을 운영하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 초기 우리나라의 수소정책이 수소차와 수소연료전지 중심의 산업육성 정책으로 이루어졌기 때문이라 생각된다. 이는 기술개발 지원과 조세·금융 지원, 보급 지원 사업 등 정부의 적극적인 정책이 기업들로 하여금 수소 산업에 참여할 유인을 제공하고, 수소 산업 생태계가 조성될 수 있는 기반을 충분히 조성했음을 시사한다. 이를 통해 신산업 생태계를 조성함에 있어서 정부의 적극적인 정책 추진의 역할이 크다는 것을 다시 한 번 확인할 수 있다.

이렇듯 수소산업은 에너지전환 시대에 필요한 기술집약적 산업이고 아직까지 초기단계에 머물러 있는 기술이 많기 때문에 시장 주도적으로 생태계가 조성되기 어렵다. 현재 국내 수소산업 생태계 조성 현황을 미루어 볼 때, 향후 청정수소 산업 생태계 조성을 위해 필수적인 청정수소 생산 기업 육성을 위한 정책적 노력이 반드시 필요할 것이다. 국내 청정수소 생산 관련 프로젝트를 다수 개발하고 정부 차원에서의 적극적인 육성 정책이 수반될 필요가 있을 것이다. 국내 수소생산이 활성화 되어 에너지원으로서 수소가 안정적으로 쓰이려면 국내 수소 생태계가 조속히 조성되어야 할 것이다. 즉, 단순히 국내 청정수소생산에만 국한할 것이 아니라 수소 생산-유통-저장-활용 전주기에 걸친 국내 수소 생태계 조성이 필수적이다.

청정수소 생산에 대한 기술개발, 사업화, 투자활성화가 되려면 수소 유통(인프라), 활용에 대한 사업 불확실성이 제거되어야 한다. 동시에 수소 활용 기술 및 제품 개발을 위해서도 수소 유통 인프라 및 안정적 공급처 확보가 우선시 되어야한다. 즉, 원전 및 SMR로 청정수소를 생산하는 신기술의 개발과 보급 확대를 위해서 청정수소 생산에 대한 지원 이외에 원전 수소의 수요처 확보, 인프라 조성 지원 등을 모두 고려하여 지원 체계를 만들어 나가야할 것이다.



원전 및 중소형 원자로 정책 추진 현황



제1절

국내외 원자력 시장 동향



1. 원자력 시장 개요

2022년 러시아-우크라이나 전쟁으로 인해 발생한 에너지 수급 불안은 전 세계 에너지 시장에 큰 변화를 가져왔다. 특히 유럽은 러시아에 대한 높은 에너지 의존도로 인해 심각한 영향을 받았고 에너지 안보적 관점에서 원자력 에너지의 역할에 다시 주목하였다. 2022년 7월 EU는 지속 가능한 투자를 위한 녹색분류체계(Green Taxonomy)에 원자력 에너지를 포함시키면서 지속 가능한 에너지원으로 인정하였다. 2023년 12월 두바이에서 열린 COP28에서 한국을 포함한 25개국이 “2050년까지 2020년 대비 세계 전체 원자력 발전용량을 3배로 한다”는 내용의 넷제로 뉴클리어 이니셔티브(NetZero Nuclear Initiative) 공동 선언을 발표하였다. 이 선언은 당면한 기후 위기 해결을 위해 원전을 청정에너지로 인정하고, 2050년까지 전 세계 원전 용량을 2020년의 370GW 수준의 3배인 1100GW로 확대하기 위한 국가 간 협력을 약속하며 이를 위한 금융, 재정, 기술개발, 공급망 확보 등의 국가적 지원을 촉구하는 글로벌 기후 아젠다이다⁵⁸⁾. 공동선언에 참여한 국가 중에는 원자력 발전 설비가 없는 국가도 6개국이 포함되어 있다. 이러한 아젠다가 국제적으로 채택된 배경에는 세계 경제가 탄소중립으로 이행하는 과정에서 재생에너지와 함께 다양하고 현실적인 대안을 함께 고려할 필요가 있다는 인식을 공유하였기 때문으로 풀이된다.

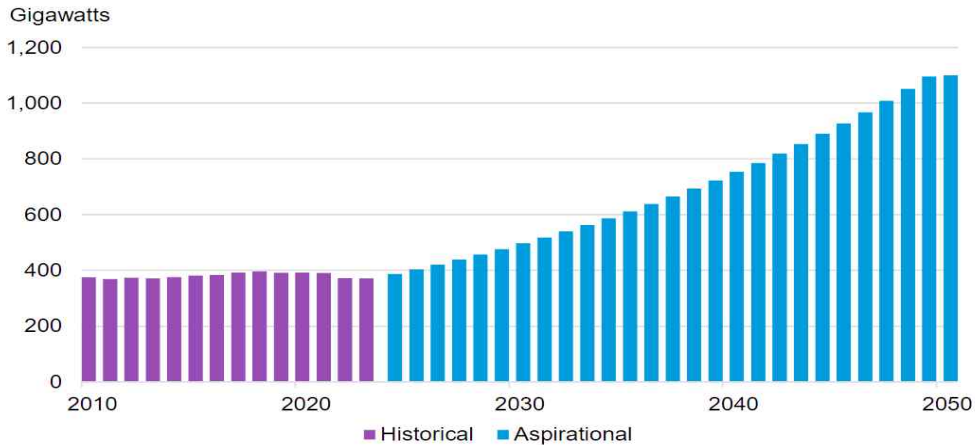
<표 4-1> COP28 넷제로 원자력 이니셔티브 선언국 분류

원전 기 보유국	미국, 영국, 프랑스, 캐나다, 아르메니아, 불가리아, 체코, 핀란드, 가나, 헝가리, 네덜란드, 루마니아, 슬로바키아, 슬로베니아, 스웨덴, 우크라이나, 아랍에미레이트연합, 일본, 한국
원전 미보유국	크로아티아, 자메이카, 몰도바, 몽고, 모로코, 폴란드

자료: BNEF (2024), Nuclear Market Outlook 1H 2024, pp.2-3.

58) 대한민국 정책브리핑, 2023.12.04. 한국·미국·영국 등 22개국, 원자력 발전 용량 3배 확대 동참. (검색일: 2024.05.20.)

[그림 4-1] 글로벌 원전 시장 전망



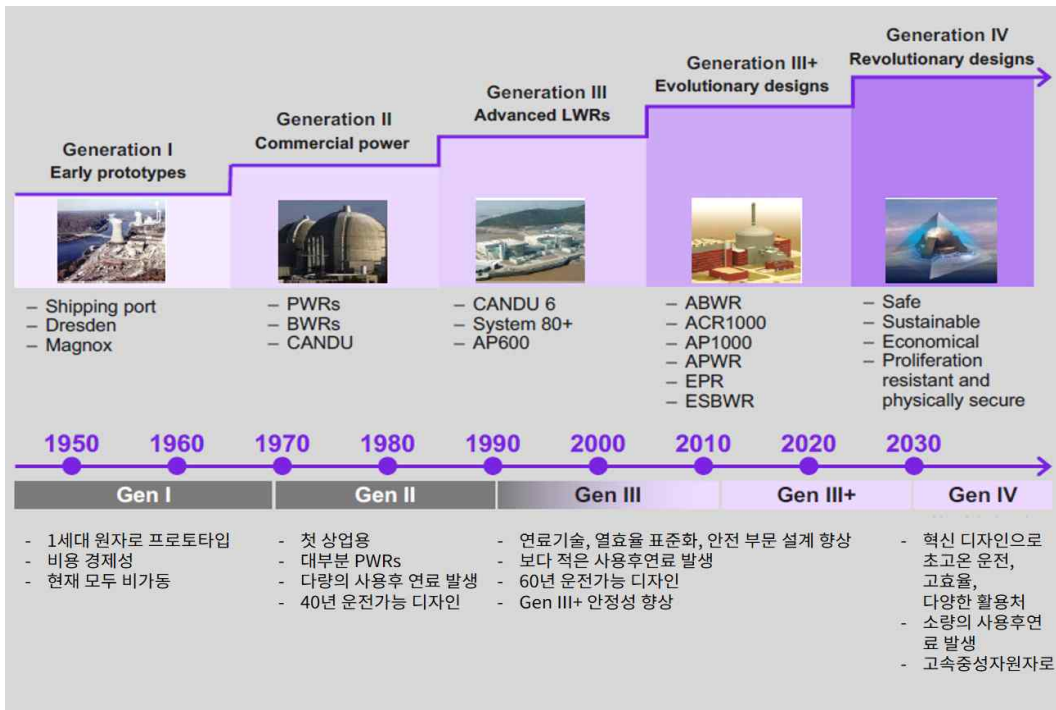
자료: BNEF(2024), Nuclear Market Outlook 1H 2024. p.3.

1950년대에서 1970년대까지 건설된 대부분의 원자력발전소는 1세대와 2세대 원자력발전소로 분류된다. 초기 세대의 원자력발전소는 주로 다양한 방식의 원자력에너지를 이용할 수 있는 원자로의 실증과 경제성을 달성하기 위한 대형화 기술 개발에 주력하였다. 하지만 미국의 스리마일 섬 사고, 러시아의 체르노빌 사고, 일본의 후쿠시마 사고를 경험하며, 원자력발전소의 안전성을 보완할 수 있는 필요성이 대두되었다. 3세대와 3.5세대 원자력발전소는 이런 필요성에 따라서 안전성을 강화하는 다양한 기술이 적용된 원자력발전소이다. 3세대에 속하는 대부분의 원자력발전소는 주로 물을 냉각재로 사용한다. 2000년대 초반부터 제안되기 시작한 4세대 원전은 물 이외의 냉각재를 사용하여 `비경수로형 원자로`라고도 일컫는다. 해당 원자로는 대형원전 수준의 경제성 확보가 아직 미흡한 상황이나 보다 더 높은 안전성을 보유하면서도 사용후핵연료의 배출량 절감 및 처리 등 고준위방사성폐기물 관리의 한계를 극복할 수 있도록 제안되었다. 또한 이는 대형원전 대비 경직성이 덜해 재생에너지원과 함께 조화를 이루며 효율적인 전원믹스를 지원할 것으로 기대된다.

원자력 산업계의 다양한 원자로 개념개발과 더불어 변화하는 전력시장에서 원자력에너지의 역할에 대한 배경을 토대로 중소형(모듈)원전 (Small Modular Reactor: SMR)이 제시되었다. 중소형원자로는 일반적으로 대형원전이 1,000MW 이상의 출력을 내는데 반해 SMR은 모듈타입으로 300MW 수준이나 그 이하의 상대적으로 적은 출력과 더 안전하게 설계된 원자로를 의미한다. 러시아, 중국, 미국을 중심으로 다양한 형태의 SMR이 2000년대에 제안되었으며, 현재 전 세계적으로 약 80여 종 이상의 SMR이 개발 중이다. 기존의 대형 원자력발전소는 냉각재로 물을 사용

하였으나, SMR기술은 물 이외에 헬륨, 나트륨, 납, 용융염 등의 다양한 종류의 냉각재를 사용하여 안전성을 높이고 더 높은 고온열을 활용할 수 있도록 설계되고 있다.

[그림 4-2] 글로벌 원전 산업 발전 추이

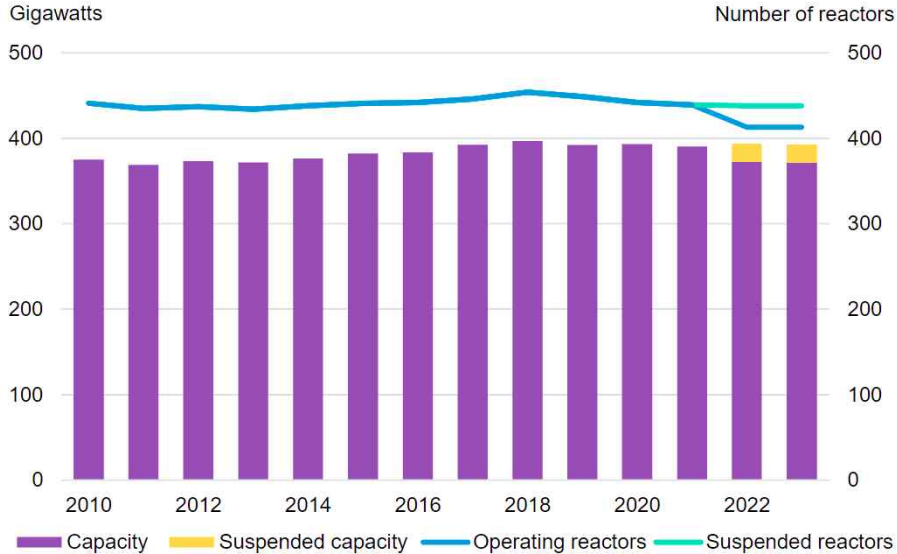


자료: Kearney (2023), Nuclear small modular reactors (SMRs).

국제원자력기구(IAEA)의 2022년도 전 세계 원전설비 운영 현황⁵⁹⁾ 자료에 따르면 전 세계의 원전 설비는 438기, 설비용량은 393.8GW가 운영되고 있으며, 이 설비에서 약 2,486.8TWh의 전기를 생산하여 연간 약 1.25Gt의 온실가스 배출을 저감한 것으로 발표하였다. 향후 추가적으로 신규 건설 예정인 원전에 대해서도 발표하였다. 각 국가별로 살펴본다면, 먼저 자국 내 원전을 보유하고 있지 않은 벨라루스 1기, 이집트 2기, 터키 4기의 7기와 원전 보유국 중 추가적인 원전 건설을 추진하는 아르헨티나(1), 방글라데시(2), 브라질(1), 중국(20), 프랑스(1), 인도(8), 이란(1), 일본(2), 한국(3), 러시아(3), 슬로바키아(2), 우크라이나(2), 아랍에미리트(1), 영국(2), 미국(2) 등 51기 등으로 전체 58기에 대한 설비용량이 59.3GW인 것으로 보고하였다.

59) IAEA(2022b).

[그림 4-3] 글로벌 원전 설비-기수 : 운영 및 중단 현황



자료: BNEF (2024), Nuclear Market Outlook 1H 2024, p.4.

2. 주요국 원전 정책 추진 현황

지난 2015년 12월, 기존 교토의정서 상에서의 일부 선진국의 참여 거부 및 개발도상국 감축의 무 부재 등의 체제 한계를 극복하여 산업화 이전 대비 지구의 평균온도 상승을 2°C보다 낮은 상태로 유지하고 나아가 1.5°C 이내로 억제하고자 선진국과 개발도상국이 모두 참여하는 새로운 기후 변화 대응 체제로서 전환을 추구하는 파리협정이 채택되었다. 해당 파리협정이 채택되어진 바로 직후인 2016년도 국제사회에서 배출된 온실가스 총량은 494억 톤(49.4billion tonnes CO₂eq.)으로 집계되었으며 이 중에서 에너지부문이 전체의 73.2%로 가장 높았다.⁶⁰⁾ 이러한 에너지부문에서도 철강, 화학, 섬유화학, 종이와 펄프 등을 포함하고 있는 산업 내 에너지사용 분야가 24.2%로 높은 수준을 보이고 있어 친환경성을 고려한 에너지(믹스) 전환과 관련한 이슈가 큰 화두로 부상했다. 아울러 파리협정이 채택되기 이전인 2011년 3월 일본 후쿠시마에서는 예기치 못한 원전사고가 발생했었던 터라 지속가능한 친환경으로의 에너지 전환에 있어 무탄소 경제발전원인 원전에 대한 범국가적·범사회적인 수용성이 쇠퇴되어진 상황 속에서 전 세계적으로 태양광과 풍력 등 재생가능에너지원에 대한 이용·보급이 급격히 활성화되는 계기가 마련되었다. 하지

60) Climate Watch(2020).

만 가변성과 변동성을 지닌 해당 재생가능에너지원의 보급이 가속화될수록 이것만으로는 자국의 안정적인 전력수급 여건을 유지·발전시키는데 그 한계가 존재한다는 점에서 이를 보완하기 위한 수력, 양수, 가스복합을 포함하여 값비싼 ESS, 연료전지 등 다양한 백업전원들의 융·복합적인 계통접속이 함께 증가되어야만 하는 상황이 발생되었다.

이로 인하여 전기요금의 증가세 추이가 형성되었으며 상시 안정적인 계통운영에 있어 일부 차질이 발생하여 정전사태(16.9월 호주와 19.8월 영국 등)가 발생하거나 그 위협이 커지는 사례도 생겨나기 시작했다. 또한 재생가능에너지 보급을 선도하고 있는 독일에서는 태양광과 풍력으로 부터 생산된 전력량이 과잉되어 계통운영의 안정성을 확보하기 위하여 이웃 국가인 오스트리아, 스위스, 체코, 네덜란드 그리고 폴란드 등으로 긴급히 덤핑형태로 kW/h당 약5.7유로센트인 생산단가보다 낮은 kW/h당 약3.5유로센트 가격으로 수출(2017년도)하기도 하는 것으로 분석되었다.⁶¹⁾

이렇듯 무탄소 발전원에 대한 필요성과 재생에너지 발전의 제한적인 확대 가능성으로 인해 많은 국가에서 무탄소 발전원으로서 원전을 가동하는 것에 대한 중요성을 인지하기 시작하였다. 기존에 원전을 활용하던 국가들은 무탄소 발전원 확대를 위해 신규 원전을 건설하거나, 기존의 가동 원전에 대한 수명을 연장하는 등 자국 내 전력 믹스에서 원전의 역할을 확대할 수 있도록 에너지 계획을 수립 및 추진하였다. 특히 한국과 미국 등은 기존의 대형원전 외 차세대 원전을 개발 하는 등 자국 내 에너지 시스템 내에서 원전의 역할을 강화하기 위한 기술 개발도 적극적으로 지원하고 있다. (<표 4-2>)

<표 4-2> 주요국의 원전 정책 동향

국가	주요 내용	국가	주요 내용
----	-------	----	-------

61) 윤경수(2020).

<p>한국</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ 신한울 3,4호기 건설 재개 ■ 운영허가 만료원전의 계속운전 등 원전비중 상향 ⇒ 계속운전 신청기한을 수명 만료일 2-5년 전에서 5-10년 전으로 변경 ■ '30년까지 10기 수출 목표로 수주활동 전개 ■ 한미 원전동맹 강화 및 SMR분야 대외협력력 구체화 ■ SMR 노형개발 및 4세대 원자로·핵융합·원전 연계 수소생산 등 미래 원전 기술 확보 지원 ■ 원전 발전비중 '18년 23.4% → '30년 32.4% 확대 	<p>미국</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ '23년 신규 원전 2기(보그틀 3·4호기) 건설 ■ 원전 계속운전 승인(6기, 60→80년), 원자력 조기폐쇄방지(60억불), 차세대원자로 도입(25억불) 지원 ■ 원전을 CFE(Carbon Pollution Free Electricity)에 포함, 상업원전 지원 확대 ■ SMR 등 차세대 원전 집중 개발, 우방국들과 원자력동맹 강화 ■ 미국의 와이오밍주 산업용 기계업체인 L&H Industrial과 BWXT Advanced Technologies는 산업부문에 열과 전력을 제공하기 위해 BWXT의 SMR인 Advanced Nuclear Reactor(BANR)를 와이오밍주부터 잠재적으로 배치하는 업무에 협력을 추진할 예정('24.4월)
<p>영국</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ '50년까지 신규 원전 최대 8기 건설 ⇒ '19년 17.5% (7.3GW) → '50년 25% (24GW) ■ 총 전력생산 중 원전비중을 현재 15% → 25% 확대 ■ Rolls-Royce SMR은 사우스요크셔주 Sheffield에 프로토타입 SMR모듈을 제작하고 시험하기 위한 시설 구축 계획 발표('24.5월) 	<p>캐나다</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ 최대 300MWe 용량의 5→10개 소형원자로 개발 ■ 설비개선공사('33년 完), 운전기간 연장('64년까지) ■ SMR 개발을 위한 주정부간 전략 계획을 발표('22.3월) ■ 온타리오발전(OPG)은 SMR 건설 작업이 2025년에 시작될 것으로 전망('24.5월)
<p>체코</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ '40년까지 신규 원전 최대 4기 건설 ⇒ '21년 36.6% → '40년 46~58% 	<p>프랑스</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ '50년까지 신규원전 최대 14기 건설 ■ '30년까지 원전 연구개발 등에 10억 유로 투자 ■ '15년 이래 원전비중 축소정책('35년 75→50%) 폐기
<p>핀란드</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ '23년 신규원전 1기 운전개시, 가동원전 2기 '50년까지 수명연장 ⇒ '21년 32.8% → '30년 60% 이상 ■ 핀란드 전력사 Fortum는 자사의 로비사(Loviisa) 원전 인근 칼라(Kailla) 지역에 수소생산 파일럿 플랜트를 건설할 계획('24.4월) 	<p>스웨덴</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ '40년까지 재생e 100%→비화석연료 100% 추진 ■ 가동원전기수 상한폐지, 신규부지에 원전 건설 허용 ⇒ 원전 단계적 감축정책 폐기 ■ Oskarshamn 원전에서 생산된 전기로 수전해 기반수소생산을 하고 있으며, 잉여수소를 수소충전소로 공급하는 계약을 Hynion과 체결('24.5월)

네덜란드	<ul style="list-style-type: none"> ■ '35년까지 신규 원전 2기 건설 ⇨ '21년 3.1%(482MW) → '35년 13% 추가(1,000~1,650MW) ■ ULC-Energy는 SMR-SOEC 조합으로 생산한 수소가격 추정치 산출('24.5월) ⇨ 3.50유로/kg(3.80달러/kg) 및 다른 대체 방법보다도 가장 저렴하다고 결론 	슬로바키아	<ul style="list-style-type: none"> ■ 신규 원전 2기 건설중('23년, '25년 가동) ⇨ '21년 4기 총 1,868MW(53.1%) → '25년 880MW 추가
벨기에	<ul style="list-style-type: none"> ■ 원전 2기에 대한 계속운전 기한을 기존 '25년에서 '35년으로 연장 	독일	<ul style="list-style-type: none"> ■ 남은 원전 3기 모두 '22년 제로화 예정에서 '23년 4월로 연기
일본	<ul style="list-style-type: none"> ■ 안전 검증 후 점차적 이용 확대 (현재 10기 가동 재개 완료) ■ '21년 7.2% → '30년 20~22% 	슬로베니아	<ul style="list-style-type: none"> ■ 신규 원전 1기(JEK2) 건설 추진 ⇨ '21년 1기 총 688MW(36%) → 1,100MW 추가

자료: 윤경수(2023), 우리나라 CF100체제 도입의 필요성.

제2절

중소형 원자로 기술 및 정책 현황



국제원자력기구(IAEA)는 소형모듈원자로(SMR)와 관련하여 기존 대비 물리적으로 규모(Size)가 작고 원자로와 증기발생기, 냉각재 펌프, 가압기 등 시스템과 구성요소를 공장에서 제작·조립하여 하나의 단위(Modular)로 설치장소로 운송되어 원자력분열에 의한 열로 에너지를 생산하는 원자로(Reactors)로 정의하고 있다. 또한 중소형모듈원자로 중 전기출력 규모에 따라 700MW 미만을 중형으로, 그 중에서도 300MW 미만을 소형으로 분류하고 있다.

SMR은 대형원전과 달리 시스템 내의 기기들이 제조 시설에서 모듈로 제작되어 설치장소까지 운송이 가능하므로 설계·인허가 단순화 및 공정화를 통한 학습효과 등으로 경제성 향상이 가능한 영역이 존재한다. 더불어, SMR은 자연 순환 냉각이 가능한 수준으로 단일 모듈의 설비용량이 작아 기존 대형원전과 차별화되는 방사선비상계획구역(EPZ, Emergency Planning Zone)을 설정함으로써 입지자유도를 높여 수요처 인근으로의 기술도입이 가능할 것으로 여겨진다. 극저·오지에 전력 및 에너지 공급과 함께 선박 및 우주선 추진, 해양플랜트 설비의 전력 및 열 공급, 해수담수화를 통한 수자원 공급이나 지역난방 공급도 가능하다. 그 외에도 특정 SMR 기술은 1-2년 만에 연료를 교체하는 대형 원전에 비해 더 긴, 3-7년 혹은 20년에 한 번씩 연료 교체가 가능하면서도 발전단위당 사용후핵연료의 발생량을 줄여 운영비용을 낮출 수 있다.

<표 4-3> 대형원전과 SMR 비교

	대형원전	SMR
안전성	체르노빌, 후쿠시마 등 대형 원전 사고의 이력이 있음	소형화, 수동형 안전장치로 사고 발생 위험을 낮춤
운영탄력성	대용량 출력이 고정됨(기저부하)	용량의 탄력적 구성이 가능하고 부하추종 운전이 가능하여 분산 전원 및 재생 전원과 연계 활용 가능성이 높음
건설 Risk	현장작업의 비중이 높아 건설 Risk 높음	공장 작업 비중이 높아 건설비 Risk 낮음
부지면적	573m ² /MW(APR1400 기준)	대형원전 대비 단위 출력 당 필요 부지면적 1/2
활용 분야	발전용	수소생산 화학-정유 산업 고온열 활용 선박 추진용 해수 담수화

자료: 에너지경제연구원(2021), 세계원전시장 인사이트. 2021.10.22.

현재 SMR은 가변적인 재생 에너지나 대규모 원자력 에너지가 사용되기에 한계가 있는 難 감축 부문과 응용 분야를 대상으로 활발히 개발되고 있다. SMR과 차세대 원자로의 대형원전 대비 유용성은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 온그리드 전력의 석탄 대체: 전 세계적으로 3,000개가 넘는 석탄 발전소는 향후 10년 내에 단계적으로 폐지될 것으로 예상된다. 이에 200~300메가와트 범위의 중형 SMR 발전소는 대규모 석탄 발전소에 대한 대체를 가능케 하며 2~3기 설치로 500~1000MW를 대체할 수 있는 용량 측면에서도 적합할 수 있으며, 기 설치된 발전소의 지역 인프라를 적극적으로 활용하여 비용을 절감할 수 있다.
- 산업을 위한 화석 연료 발전 대체: 많은 SMR 설계는 고온이나 초고온열을 생산할 수 있는 특징을 갖는다. 따라서 산업부문에서 사용되는 탄소 열을 해당 SMR 기반의 고온으로 공급되는 청정 열로 대체할 수 있다. 산업부문에서의 열병합 전력 솔루션을 제공함으로써 오일샌드, 석유화학, 암모니아 부문은 SMR 상용화를 통한 신시장 창출이 가능한 분야로 주목받고 있다.
- 수소 및 합성 연료 생산을 위한 에너지원: 대형원전이나 SMR을 통해서 공급되는 온실가스가 포함되지 않은 전력으로 청정수소를 생산할 수 있다. 예를 들어, 고온 반응기는 고온 전기 분해 또는 열화학 사이클을 통해 대규모 수소 생산이 가능해졌다. 수소 수요가 큰 산업 단지 주변에서의 SMR을 통한 수소 생산 및 공급이 가능하다면, 운송 및 유통비용을 절감하면서도 청정수소 산업 생태계를 조성할 수 있는 기반을 마련할 수 있을 것이다.
- 해수 담수화: 원자력 담수화는 기술적으로 건전하고 경제성이 있는 것으로 입증되었고, 전 세계적으로 대규모 원자로를 물과 결합한 담수화 플랜트에 적용한 경험이 축적되어 있습니다. 해수 담수화는 에너지 집약적인 공정으로, 열 담수화 공정이나 혼합 담수화 공정(열과 전기 모두 사용)을 통해 염도가 높은 물에서 증류액을 분리하기 위해 에너지를 사용하고, 역으로 멤브레인과 고압을 사용하여 물에서 염분을 분리하는 역삼투압 또는 하이브리드 공정이다. 환경, 에너지 공급 안정성, 식수의 필요성, 그리고 에너지 수요의 현저한 증가와 같은 일련의 요인으로 인해 원자력이나 SMR은 높은 잠재력이 있다고 평가된다.

글로벌 SMR 시장규모의 전망치는 각 기관별로 다소 차이가 존재하나 국제원자력기구(IAEA)는 2050년에는 SMR이 전 세계에 최대 약 1,000기 가량 설치되면서 그 시장규모가 400조원에 이를 수 있다는 전망치를 제시하였다. 또한 영국원자력연구소는 이보다 앞선

2035년 약 390조에서 620조 원 규모까지 성장할 가능성도 있다고 예측하였다. 캐나다 SMR 위원회는 2030년부터 2040년까지 글로벌 SMR 수출시장 규모를 연간 150조원 규모로 추정하였고, 이는 부문별로 화석발전 대체시장이 연간 100조원, 원격지 분산발전 30조원, 산업부문 열공급 12조원, 광산지역 에너지 공급 3.5조원으로 추정하였다⁶²⁾.

1. 중소형 원자로 기술 동향

현재 개발되고 있는 SMR은 크게 냉각제로 물을 사용하는 경수형 SMR과 비경수형 SMR로 나눌 수 있다. 이러한 SMR은 미국(20기), 러시아(17기), 중국(9기), 일본(6기), 캐나다(5기), 영국과 대한민국(4기)을 포함하여 약 80 여 종이 개발되고 있으며, 해당 SMR에 대한 기술개발-실증 완료 시점은 2028~30년을 목표로 하고 있다.

여기서 경수형 SMR은 가압경수로(Pressurized Water Reactor; PWR), 비등수형(Boiling water reactor; BWR), 가압중수형(Pressurized heavy water reactor; PHWR) 등으로 나뉘며, 비경수형 SMR은 고온가스로(High temperature gas cooled reactors; HTGR), 가스냉각고속로(Gas Cooled Fast Reactor; GCR), 액체금속고속로(Liquid Metal Fast Reactor; LMFR), 용융염원자로(Molten Salt Reactor; MSR)의 다른 냉각제를 사용한 기술이 개발되고 있다. 경수로만큼의 운전과 규제 경험이 없지만 비경수형 SMR은 경수형 보다 더 안전한 기술적 특성을 갖는다. 또한 전력생산 목적 이외에도 비경수형 SMR의 높은 원자로 출구온도를 활용하여 산업 분야에 상대적으로 적용이 가능하여 수요지 인근에 위치할 수 있는 잠재력이 있는 것으로 평가받고 있다.

이러한 원자력 SMR 기술들의 글로벌 차원의 기술성숙도를 [그림 4-5]에서 확인할 수 있다. X 축은 기술성숙도 수준으로 초기 개념설계에서 연구개발 단계, 실증 단계, 보급-상용화 단계를 거쳐 시장 안착 단계인 성숙 단계를 나타내고, Y 축은 기술 개발을 통해 시장화까지의 전반적인 개발 위험도를 나타낸다. 앞서 언급한 경수형 SMR 인 가압경수로(PWR) 원자로의 경우, 실증의 마지막 단계 수준에 이르고 있는 반면, 비경수로형 SMR은 가스냉각고속도(HTGR), 액체금속고속로(LMFR), 용융염원자로(MSR) 순의 기술성숙도 수준을 보이고 있다.

62) Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee(2018).

<표 4-4> 우리나라의 소형모듈원자로(SMR, Small Modular Reactor)에 대한 기술분류

	구분		냉각재	설계수명/ 설비용량	특징 및 기술성숙도[1]	
	유형	명칭				
차세대 원자로	3.5 세대 (경수로)	일체형 [5]	물	60년/ 110MWe*2기 (최대 220MWe)	· 일체형원자로 및 완전피동안전계통 도입 · 12년도 세계 최초 표준설계인가 획득 · 19.12월, KAERI-한수원-K.A.CARE(사우디) 공동 SMART100 표준설계인가 신청 · 21.8월, SMART100 표준설계 심사 원안위 보고 및 심사 개시 및 진행중 · TRL 7 수준	
		모듈형 [6]				i-SMR Innovative Small Modular Development
	4.0 세대 (비경수로)	SFR Sodium-cooled Fast Reactor		소듐 (액체금속)	60년[2]/ 150→300MWe급	· 20년가량 장주기 발전 및 발전단위당 사용후핵연료 발생량 소 · 설비용량 증감용이(10~2000MWe) 및 510℃ 수준의 고온 열 생산 가능 · 사용후핵연료 중에서의 고독성·장수명 핵종을 단수명 또는 안정된 핵종으로 변환 이 가능해 고준위방폐물 부피절감 도모 · TRL 5.5 수준 / 32년 실증사업 착수 추진 전망
		HTGR High Temperature Gas-cooled Reactor		헬륨기체	40년 이상/ 27MWe급[4] (15→90MWt)	· 최대 750℃ 수준의 고온 열을 생산 가능 · 민·정출 공동개발 사업추진 전개 · TRL 3~4 수준 / 33년도 이후 운영허가 획득 목표
		MSR Molten Salt Reactor		핵연료와 공용된 용융염	30년/ 30MWe급[3] (100MWt급)	· 핵연료 물질을 용융염에 용해시켜 해당 용융염을 핵연료와 냉각재로 동시 활용 · 600℃대 수준의 고온 열을 생산 가능 · SFR·HTGR 기술적 특징을 접목하는데 유용하다고 이론적 판단 가능 · TRL 1~2 수준 / 28년도 인허가 신청·획득 및 29년도부터 종합실증 추진 목표

주1) 기술성숙도(TRL, Technology Readiness Level): 1~2단계(기초연구), 3~5단계(연구개발), 6단계(시작품), 7단계(실증평가), 8단계(표준화 및 인증), 9단계(양산)

주2) PGSFR 기준의 설계수명

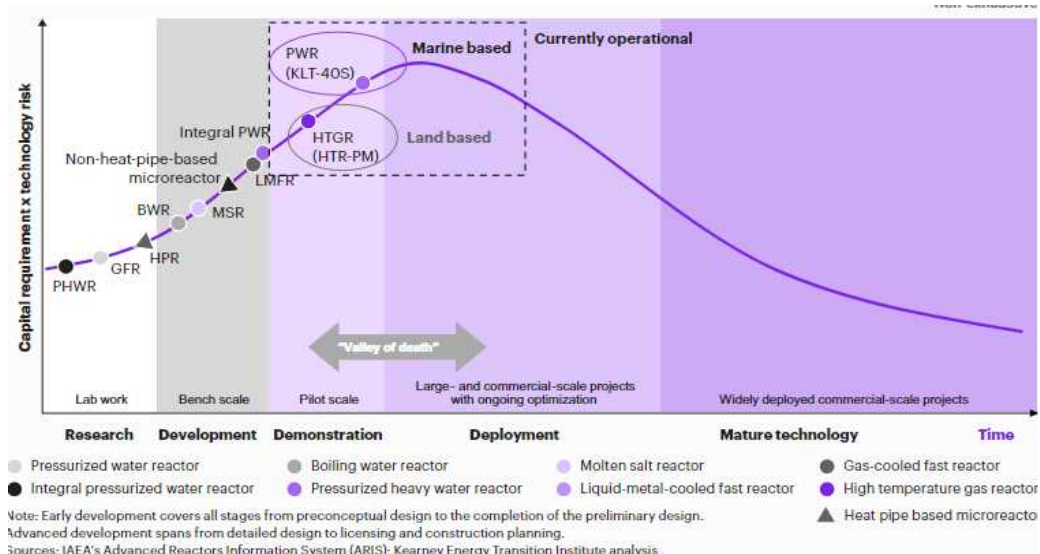
주3) 전기·열 에너지전환효율 계수 값 30.7% 고려 시 100MWth * 0.307 = 30.7MWe

주4) 전기·열 에너지전환효율 계수 값 30.7% 고려 시 90MWth * 0.307 = 27.6MWe

주5) 대형 원전의 원자로 건물 내부에 배치된 주요 기기들이 모두 하나의 원자로 용기 안에 담겨있는 형태

주6) 일체형과 유사한 원자로 형태이면서 공장 제작이 가능하고 모듈식으로 현장 조립으로 가능한 형태

[그림 4-4] 글로벌 원전 SMR 기술유형별 기술성숙도(TRL)



자료: KEARNEY(2023), Nuclear small modular reactors (SMRs).

나. 국내외 주요 중소형 원자로 현황

현재까지 18개국 중 SMR을 운영하고 있는 국가는 러시아와 중국 두 국가이다. 러시아의 가압형 경수로형인 KLT-40S는 현재 러시아 세베로드빈스크에 파일럿 부유식 원자력 열병합 발전소에서 사용을 위해 개발되었으며, 가장 빠르게 계통에 연계된 SMR이고, 중국의 HTR-PM 고온가속로 SMR이 그 뒤를 잇고 있다. 그 다음으로 빠른 진행을 보이는 것은 미국의 NuScale과 아르헨티나의 CAREM 프로젝트, 러시아의 NIKIET의 납냉각고속로와 중국 CNNC의 ACP-100 가압경수로 등 4기가 건설 중이다. 그 외 한국의 SMART를 비롯한 18개의 프로젝트는 대부분 표준설계인가 및 건설계획을 포함한 완공계획이 2030년을 기점으로 전후하고 있다는 것을 함께 살펴볼 수 있다.

<표 4-5> 주요국에서 현재 개발 중인 대표적인 소형모듈원전(SMR) 모델 및 현황

국가	노형	현황	완공계획
러시아 (OKBM)	KLT-40S (35 MW/가압경수로)	해양 부유식 발전함 'Akademik Lomonosov'호에 탑재, 세계 최초 상업운전 시작 ※ 상위 버전인 55 MW 급 RITM-200을 탑재한 원자력 쇄빙선 3척 운용 중(Arktika, Sibir, Ural)	'19년 계통연계, 운영 중

중국 (INET, Tsinghua Univ.)	HTR-PM (210 MW/ 고온가속로)	- HTR-10, 10MW 고온가속로 시작('00) - 중 원안위 운영 허가('21) - HTR-PM600, 650MW 실비 보급 준비	'21년 계통연계, 운영중
아르헨티나 (CAREM)	CAREM-25 (100MW/ 가압경수로)	- 32MW SMR, CAREM-25 - 100~120MW 출력 예상 - 2014년 건설 시작 후 중단	'24~'27년
미국 (NuScale Power)	VOYGRM (77 MW/ 가압경수로)	- DOE 건설 지원금 \$13억5,550만 승인('20.10) - 50 MWe 모듈의 표준설계인가 획득 후 77 MWe 모듈 표준설계 인가 진행 중 - '29년 INL 부지에 최초 모듈 운영 목표	'29년
미국 (Holtec)	SMR-160 (160 MW/ 가압경수로)	ARDP(DOE)으로 1억1,600만 \$ 승인('20.12) NRC 인허가 사전 신청 및 CNSC VDR 1단계 완료 미 Oyster Creek 부지에 건설 고려 중	'30년 이후
미국 (X-Energy)	Xe-100 (80 MW/ 고온가속로)	ARDP(DOE)으로 \$8,000만 승인('20.10) NRC 인허가 신청 및 CNSC VDR 1,2단계 동시 진행 중 美 Washington주 Richland 지역에 건설 발표('21.4)	'30년 이후
미국 (Kairos Power)	KP-FHR (140 MW/ 용융염원자로)	미 Oak Ridge 부지 내 연구로에 대한 건설허가 신청서 제출 및 NRC 인허가 신청서 제출('21.11) Bruce Power, Constellation, Southern Company, TVA와 개발 컨소시엄 결성('22.4)	'30년 이후
캐나다 (ARC)	ARC-100 (100 MW/ 소듐냉각고속로)	CNSC VDR 1단계 완료('19.10) 및 2단계 진행 중 New Brunswick주로부터 개발금 2,000만 CA\$ 승인('21.2) New Brunswick주 Point Lepreau 원전부지에 건설 계획	'29년
캐나다 (Moltex Energy)	Stable Salt Reactor (300 MW/ 용융염원자로)	캐나다 정부로부터 상용화 지원금 5,050만 CA\$ 승인('21.3) CNSC VDR 2단계 진행 중 New Brunswick주 Point Lepreau 원전부지에 건설 계획	'30년 이후
러시아 (NIKIET)	BREST-OD-300 (300 MW/ 납냉각고속로)	인허가 취득('21년) 후 현재 건설 중	'26년
미-일 (TerraPower, GE-Hitachi)	Natrium (345 MW/ 소듐냉각고속로)	ARDP(DOE)으로 8,000만 \$ 승인('20.10) 미 Wyoming주 Kemmerer지역에 실증로 건설 계획('21.11)	'30년 이후
미-일 (GE-Hitachi)	BWRX-300 (300 MW/ 비등경수로)	NRC 인허가 사전신청 및 CNSC VDR 2단계 진행 중 에스토니아, 폴란드 등에 건설을 위한 MOU 체결('21.9) - 캐나다 온타리오주 달링턴 건설허가 신청	'28년
영국 (Rolls-Royce 컨소시엄)	UK SMR (470 MW/ 가압경수로)	- 일반설계평가(GDA) 1단계 절차 완료('23.4) 및 2단계 절차 시작 북부 Wales 또는 서부 Cumbria 지역 건설 고려	'30년 이후
프랑스 (EDF 컨소시엄)	NUWARDTM (340 MW/ 가압경수로)	개념설계 착수('19.9) - 기본설계 수행 중(~'25)	'30년 이후

중국 (CNNC)	ACP100 (125 MW/ 가압경수로)	- IAEA 안전성검토 통과('16) - 하이난성 창장 지역에 건설 중('21.7~)	'26년
--------------	------------------------------	--	------

자료: 이종희 외(2023), 국내 원전산업 생태계 경쟁력 증진 방안 도출을 위한 원전 산업시장 및 공급망 분석. 바탕으로 저자 작성

미국 NuScale의 소형모듈원자로는 기술적으로 검증된 가압경수로를 기반으로 하고 있으며 2023년 초에 원자력규제위원회(NRC, Nuclear Regulatory Commission)로부터 모듈 당 설비용량 50MWe급에 대해 최초로 설계인증(Design Certification) 받았다. 2023년 1월에 기존 대비 모듈 당 설비용량을 키운 77MWe급에 대한 소형모듈원자로의 표준설계인가(Standard Design Approval)를 신청하였고 현재 NRC 검토가 진행 중이다. 미국 DOE(Department of Energy)는 2020년도 NuScale의 SMR에 대한 개발 및 배치 사업에 10년간 13.5억 달러를 지원과 TerraPower와 X-energy에도 각각 20억 달러, 12억 달러를 지원한다고 발표했다.

2023년 11월 8일, NuScale과 유타 주 발전사업자 연합(UAMPS, Utah Associated Municipal Power System)은 아이다호 국립연구소(INL, Idaho National Laboratory) 부지에 SMR 6기(462MWe, 77MWe × 6개 모듈)를 건설하는 CFPP(Carbon Free Power Project)⁶³⁾ 사업을 중단하였다. 사업 중단의 주요 이유는 설계 변경 과정, 즉 모듈의 개수 및 설비용량 변경(50MWe → 60MWe × 12개 모듈 → 77MWe × 6개 모듈) 과정에서 인건비, 원자재 가격이 물가상승에 따라 전반적으로 인상되었기 때문인 것으로 분석하고 있다.

[그림 4-5] CFPP 사업의 목표 전력 생산 비용(/MWh)의 변화



자료: IEEFA(2023), UAMPS Statements, January 3. 2023 Talking Point.

63) SMR 최초의 상용화로 미국 서부 산간 지역에 Carbon Free 청정에너지 공급을 목표로 하고 있으며 해당 사업의 초기 총 33개 회원사가 참여했으나 이중 7개 회원사가 탈퇴해 2023년 3월 기준으로 26개 회원사만 참여하고 있던 상황에서 같은 해 11월 사업 중단이 결정되었다.

<표 4-6> 국내 기업의 해외 SMR 투자 현황

SMR 개발사	노형	기업명	투자규모	참여분야
(미국) NuScale 社	VOYGR · 경수형/77MWe(12모듈) · '29년 상업운전 목표	두산 에너 빌리티	\$1억4백만	<ul style="list-style-type: none"> 수조원대 기자재 공급물량 확보 SMR 활용 수소 및 담수생산 협력
		GS 에너지	\$40백만	<ul style="list-style-type: none"> 사업개발 및 O&M(발전정비·운영) 분야 한국 내 독점사업권 확보(개발, 소유, 운전) 베트남, 카타르 사업개발 협업 권리 확보
		삼성 물산	\$70백만	<ul style="list-style-type: none"> NuScale SMR EPC(설계, 조달, 시공) 일부 사업권 확보
(미국) TerraPow er社	Natrium · 비경수형(SFR)/345MWe · '24년 실증로 건설착수 목표	SK(주) SK 이노베이 션	\$2.5억	<ul style="list-style-type: none"> 우리나라, 동남아 등에서 상용화 사업 참여 SK 계열사가 운영 또는 건설예정인 해외 공장의 무탄소 전력공급원으로 건설 추진 예정
		한국조선 해양	\$30백만	<ul style="list-style-type: none"> 투자 계약 체결
(미국) X-Energy 社	Xe-100 · 비경수형(HTGR)/80MWe · '28년 첫호기 운전 목표 (워싱턴주) · '28년 첫호기 운전 목표 (Dow사 화공단지 내)	두산 에너 빌리티	\$5 백만	<ul style="list-style-type: none"> 주기기 제작을 위한 설계 용역 체결 시제품 제작, 설계 최적화 방안 연구 수행
		DL 이앤씨	\$20백만	<ul style="list-style-type: none"> 상세설계 참여, SMR 활용 신사업계획 수립
(미국) USNC社	MMR · 비경수형(VHTR)/10MWe · '25년 건설착수 목표	현대 ENG	\$30백만	<ul style="list-style-type: none"> USNC MMR 글로벌 EPC (설계, 조달, 시공)사업권 확보 및 실증사업
(덴마크) Seaborg 社	CMSR · 비경수형(MSR)/800MWe (최대) · '28년 첫 부유식 원전 건설 목 표	삼성 중공업	-	<ul style="list-style-type: none"> MSR 기반 '부유식 원자력 발전설비' 제품 개발 CMSR 파워마지 개념 설계 완료 및 미국선 급협회 인증 획득
(미국) Holtec社	SMR-160 · 경수형/160MWe · 미국 인허가 심사 진행 중	현대 건설	-	<ul style="list-style-type: none"> 상업화 모델 공동 개발, 마케팅 및 입찰 공동 참여, 사업 공동 추진 등 협력 미국 뉴저지주 내 건설을 위한 상세설계 참여

자료: 이종희 외(2023). 국내 원전산업 생태계 경쟁력 증진 방안 도출을 위한 원전 산업시장 및 공급망 분석. 바탕으로 저자 작성

2. 중소형 원자로 정책

국제사회는 지구온난화 대응을 위한 탄소중립 실현을 위하여 원전에 대한 역할을 재정립하고 이용을 증진하기 위한 SMR 지원 정책을 수립·추진하고 있다. 기존 대용량 원전사업이 지닌 대규모 자금조달 요구, 장기 건설기간 소요, 신규 송전망 건설 등에 따른 사회적 갈등비용 발생, 적정 부지(입지)선정 애로 등의 다양한 한계를 극복하고 화석연료를 대체하면서도 사고발생위험을 기술적으로 낮춰 보다 더 안전하게 장기간 운영이 가능한 중소형원자로(SMR, Small Modular Reactor)의 시장주도권 확보를 위한 기술개발 투자와 정부 지원을 다양하게 추진하고 있다.

가. 중소형 원자로 정책 추진 현황

주요국은 미래 원전 시장선도를 위하여 기술개발을 가속하고 다가올 SMR 시장 확대와 원전 산업 생태계 조성을 위해 다양한 지원 정책을 추진하고 있다. 아울러 SMR에 대한 초기 기술력을 가지고 있거나 관심을 지닌 민간기업 혹은 스타트업을 중심으로 SMR 설계가 마련되고 일부 사업을 시작하고 있다. 이처럼 시장자유화가 달성된 미국 등 일부 선진국에서의 민간중심 SMR 프로젝트로 기술개발 성숙도에 따라 실증 및 사업화가 자연스럽게 연계되어질 것으로 보고 있다. 이에 우리나라를 포함한 각 국가들은 인허가 등 SMR 시장 선도·선점을 위하여 민간의 참여를 유도하는 지원 정책을 수립하고 있다.

1) 국내 정책 추진 현황

우리 정부는 지난 2023년 3월 21일 「국가전략기술 육성에 관한 특별법」을 제정하고 같은 해 9월 22일부터 본격적인 시행에 들어가면서 국가적으로 중요성이 큰 국가전략기술을 육성하여 미래 신산업의 발전을 촉진하고자 하는 범부처 차원의 다양한 정책적 지원수단 및 혁신·도전적 연구개발을 적극 지원하는 법적인 근거를 마련했다. 이어서 공급망·신산업·외교안보 등 관점에서 전략적 가치가 높고 기술 패권 경쟁에서 살아남기 위해 우리나라가 반드시 확보해야 한다고 판단되는 12대 분야 국가전략기술·50개 세부 중점기술들을 선정했으며 해당 내용을 담은 「국가전략기술 선정(안)」을 지난 2023년 12월 20일 심의·의결했다.⁶⁴⁾ 이러한 12대 국가전략기술은 시급성과 파급력을 기준으로 5년에서 7년 안으로 가시적인 성과창출이 가능하도록 단기와 중장기적인 기술개발 방향을 제시하고 민관협력 중심의 전략기술

64) 과학기술정보통신부 보도자료, 2023.12.20. 기술패권 경쟁에서 우리나라를 지킬 '12대 국가전략기술' 공식 확정. (검색일: 2024. 05. 20.)

개발 거버넌스 구축을 추구한다는 특징을 지닌다.

[그림 4-6] 우리나라 12대 국가전략기술·50개 세부 중점기술 목록

<p>반도체 디스플레이</p> <ul style="list-style-type: none"> 고집적·저항기반 메모리 고성능·저전력 인공지능 반도체 전력반도체 반도체 첨단패키징 차세대 고성능 센서 프리플 디스플레이 무기발광 디스플레이 반도체·디스플레이 소재·부품·장비 	<p>첨단 바이오</p> <ul style="list-style-type: none"> 합성생물학 유전자·세포 치료 감염병 백신·치료 디지털 헬스데이터 분석·활용 대형 다면연소사이클 엔진 	<p>인공지능</p> <ul style="list-style-type: none"> 효율적 학습 및 시인프라 고도화 첨단 AI 모델링·인사결정(자판단·추론) 안전·신뢰 AI 산업 활용·혁신 AI 5G 고도화(5G-Adv)
<p>이차전지</p> <ul style="list-style-type: none"> 리튬이온전지 및 핵심소재 차세대 이차전지 소재·셀 이차전지 모듈·시스템 이차전지 재사용·재활용 	<p>우주항공 해양</p> <ul style="list-style-type: none"> 우주관측·센싱 달착륙·표면탐사 첨단 항공가스터빈 엔진·부품 해양자원탐사 	<p>차세대 통신</p> <ul style="list-style-type: none"> 6G 오픈랜(Open-RAN) 5G-6G 고효율 통신부품 5G-6G 위성통신 로봇 정밀제어·구동 부품·SW
<p>첨단 모빌리티</p> <ul style="list-style-type: none"> 자율주행시스템 도심항공교통(UAM) 전기·수소차 	<p>수소</p> <ul style="list-style-type: none"> 수전해 수소생산 수소 저장·운송 수소연료전지 및 발전 	<p>첨단로봇 제조</p> <ul style="list-style-type: none"> 로봇 자율이동 고난도 자율조작 인간·로봇 상호작용 가상제조 양자컴퓨팅
<p>차세대 원자력</p> <ul style="list-style-type: none"> 소형모듈형원자로(SMR) 선진원자력시스템·폐기물관리 	<p>사이버 보안</p> <ul style="list-style-type: none"> 데이터·AI 보안 디지털 취약점 분석·대응 네트워크·클라우드 보안 산업·가상융합 보안 	<p>양자</p> <ul style="list-style-type: none"> 양자통신 양자센싱

자료: 과학기술정보통신부(2023.12.20.) 기술패권 경쟁에서 우리나라를 지킬 `12대 국가전략기술` 공식 확정 (<https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=user&mId=113&mPid=238&bbsSeqNo=94&nttSeqNo=3183868>). (검색일: 2024.05.20.)

여기서 차세대원자력은 우리 경제와 산업 등 전후방 파급효과가 클 것이라는 전망으로 중추적인 버팀목 기술로서 혁신선도 영역에 포함되어 단기(~5년)적으로 공공·민간 협업으로 세계적 수준의 SMR 제조·핵심기술을 확보하면서도 중장기(5~10년)적으로 SMR 표준설계인가 취득 및 세계시장 진출, 수소·공정열 생산 등 4대세 원자로 기술개발을 추진한다는 계획을 가지고 있어 청정수소경제와의 연계성을 지닌다. 해당 수소는 국가안보 관점에서 중요도가 높고 급격한 성장세를 보일 것이라는 전망으로 미래도전 영역에 포함되어 단기(~5년)적으로 수전해 수소생산 원전기술 확보(1~2MW급), 기체수소 저장·운송 및 수소발전 핵심 기술 개발을 하면서도 중장기(5~10년)적으로 준상용급(10MW) 수전해시스템 실증 및 핵심소재·부품 국산화, 상용급 액화플랜트(5톤/일) 구축 등 계획을 가지고 있다. 현재 개발되고 있는 차세대 원자력의 청정 전력·열을 활용한 수전해 기반 청정수소생산이 가능해진다면 안정적인 청정수소 생산·공급체계를 내재화하여 국가적으로 탄소중립 및 에너지안보 증진에 일조할 수 있을 것으로 전망된다. 또한 민간을 중심으로 사업의 수익성을 고려한 국가전략기술 간의 융합(형) 연계사업이 발굴·고도화되고 활성화된다면 청정 전력·열뿐만 아니라 수소에 대한 시장거래가격 안정화 기능과 함께 지역경제 활성화 및 양질의 일자리 창출 등

긍정적인 파급효과를 연쇄화해 나아갈 수 있을 것으로 기대된다.

2) 국외 정책 추진 현황

1979년 미국의 스리마일섬 원전사고 이후 중지된 신규 Vogtle 원전 건설을 미국원자력규제위원회(NRC)가 2012년에 승인하였고, 2023년 7월부터 Vogtle 3호기, 2024년 3월부터 Vogtle 4호기가 상업운전을 시작하였다. 바이든 미국 대통령은 취임식 당일 파리협정 복귀를 선언하고 기후변화를 국가안보와 외교정책에 대한 핵심 안건으로 공식화하였다. 이렇듯 미국은 탄소중립 달성 및 청정에너지 경제 전환을 위한 혁신기술 중 하나로 SMR을 선정하고 관련 지원 정책을 적극적으로 시행 중이다. 현재 미국은 NuScale, TerraPower, X-Energy의 기업 주도로 미국 정부의 대폭적 지원에 힘입어 글로벌 SMR 기술 혁신을 선도하고 있다.

2016년 6월 미국 에너지부(DOE)의 ‘선진원자로 개발 및 배치를 위한 비전과 전략’⁶⁵⁾에서, 청정에너지 미래에서 원자력이 실질적인 역할을 할 수 있도록 2030년대 초까지 적어도 2개 이상의 비경수형 선진원자로 건설 인허가 검토 완료를 명시하였다. 이를 달성하기 위한 전략목표로 ①원자력 기술 혁신 인프라 강화, ②선진원자로에 대한 성능 입증 및 기술적 위험 제거, ③선진원자로 원자력연료주기 개발 지원, ④선진원자로에 대한 효율적이고 신뢰할 수 있는 규제 체계 구축 지원, ⑤공공-민간 부문의 자원과 정책 인센티브를 효과적으로 활용하여 민간 부문의 선진원자로 배치 가속화 지원, ⑥인적 자본 및 인력 개발 요구사항 해결을 제시하였다. 2020년 DOE의 ‘원자력 산업과 기술 경쟁 우위 회복을 위한 전략’⁶⁶⁾에서는 에너지 유연성과 안보 측면에서 SMR 실증이 매우 중요함을 강조하고, 관련 기술개발사업에 예산 지원이 필요함을 권고하였다. 선진원자로 개발과 관련하여 미국 의회의 법적 지원에 주목할 필요가 있을 것이다. 美의회는 DOE에 선진원자로 개발을 위한 계획수립을 지시하고 선진원자로 개발 지원을 포함하는 「원자력혁신역량강화법(NEICA)」(‘18.9.)과 선진원자로 개발·상용화에 필요한 규제 전문성을 확보하고 규제 체계의 개선과 현대화를 위한 「원자력혁신현대화법(NEIMA)」(‘18.12.)를 제정하였다. 해당 법에서는 선진원자로 개념 검증을 위한 시험로 구축 후 전력 판매 등을 허용하여 사업비 회수를 보장하는 등 민간의 투자를 장려하고 있다. 또한 「에너지법」⁶⁷⁾(‘18.12.)에 선진원자로용 원자력연료 개발 및 선진원자로 실증 등을 명시하고, 「인프라투자및일자리법」⁶⁸⁾(‘21.11.)을 통해 기존 원전의 효율적 사용에 대한 인센티브 제공 및 차세대원자로 개발 투자 확대 등을 지원하고 있다. 이렇듯 미국

65) 미국 에너지부. 2016.06.17. Vision and Strategy for the Development and Deployment of Advanced Reactors. (검색일: 2024.05.20.)

66) 미국 에너지부 홈페이지. 2020. RESTORING AMERICA'S COMPETITIVE NUCLEAR ENERGY ADVANTAGE: A strategy to assure U.S. national security (‘20.). (검색일: 2024.05.20.)

67) EPA(2020).

68) EPA(2021).

DOE는 원자력 기술개발 혁신과 실증, 상용화를 위해 민간-공공 협력 인프라 구축에 노력 중이다. 2015년에는 'GAIN 프로그램'⁶⁹⁾을 출범하여 원자력 산업체 및 대학 등 민간 부문 개발자들이 연방정부 국립연구소 인프라와 자원을 활용하는 것을 지원하기 시작하였다. 2019년에는 「NEICA」에 근거하여 민간-공공 협력 파트너십을 바탕으로 SMR을 포함한 선진원자로 기술의 개발, 실증, 배치를 가속화하기 위한 '국가원자로혁신센터(NRIC)'⁷⁰⁾를 발족하기도 하였다.

한편, 미국 의회와 행정부는 많은 예산이 소요되는 선진원자로 개발과 실증을 산업체의 단독 투자만으로 추진하는 것에 어려움을 인식하고 있다. 이에 DOE는 연방정부의 예산과 산업체의 협력을 기방으로 선진원자로 실증에 집중하기 위한 '선진원자로실증프로그램(ARDP)'⁷¹⁾을 2020년 5월부터 추진하였으며, 미국 주도의 국제협력 사업도 추진 중임. 대표적으로 국무부(DOS)는 대상 국가와의 전략적 협력 강화 및 원자력 기술협력을 위한 인프라·역량 구축 지원 프로그램인 'FIRST 프로그램'⁷²⁾을 런칭하였다. 이는 잠재적 원자력 도입국이 원자력 안전과 원자력안보·원자력비확산 기준에 부합하는 책임 있는 원자력 배치 및 건전한 재정적 준비를 할 수 있도록 지원하며, 미국과의 장기적인 전략적 협력 관계를 구축하는 것을 목적으로 한 것으로 보인다. 이 ARDP 프로그램은 크게 두 SMR 사업을 지원하고 있으며, X-energy사의 Xe-100 reactor와 Terrapower의 Natrium reactor이다.

미국은 우리나라와의 협력도 순조롭게 진행하고 있는데, 2022년 5월 바이든-윤석열 한미 정상회담에서 한미 동맹을 안보·경제·기술을 포괄하는 포괄적 전략동맹으로 격상시키는 데 공감대를 이루었다. 특히 SMR과 관련하여서는, SMR 개발 프로그램에 공동 참여하고 전 세계적 배치를 가속화하기로 공약하였다. 미국은 민간기업의 혁신적 원자로 설계로 전 세계 SMR 기술개발을 선도하고 있으나 기자재 공급망의 악화로 우리나라의 도움이 절실하게 필요한 상황이라 판단된다.

2023년 11월, NuScale과 UAMPS는 아이다호국립연구소(INL) 부지에 VOYGR 6기를 건설하는 CFPP 사업의 중단에 합의했음을 발표하였다. NuScale은 전 세계에서 가장 사업성과 기술력이 뛰어나다고 평가받는 회사이며 해당 사업은 미국 정부가 지원해온 대표적인 SMR 실증사업이었기에, 금번 중단 발표로 미국을 포함한 전 세계 SMR 기술 및 사업 전반의 신뢰성에 대한 논란이 발생하였다. 미국 DOE는 즉각 '청정에너지 목표 달성을 위해 차세대 원자력 기술이 절대적으로 필요'하다며 여론의 부정적 반응에 대응하였으며, 2024년 미국 대선을 앞둔 시점이므로 양당의 원자력 정책 변화를 관찰하는 것이 중요하다고 판단된다.

다음으로 캐나다는 우라늄 채광부터 원전 설계·건설 및 폐기물 관리까지 원자력 전주기에 걸친

69) GIAN 홈페이지. (검색일: 2024.05.20.)

70) National Reactor Innovation Center 홈페이지. (검색일: 2024.05.20.)

71) 미국 에너지부 홈페이지. Advanced Reactor Demonstration Program. (검색일: 2024.05.20.)

72) SMR Action Plan. (검색일: 2024.05.20.)

산업 역량을 갖춘 나라로, 영토가 넓어 광산 등 소규모 기지와 분산된 소도시 등이 많아 SMR의 활용도가 매우 높다고 평가되고 있다. 캐나다는 2018년 ‘SMR 로드맵’⁷³⁾을 발표하고 모든 관련 조직의 역할과 책임을 제시하며 ‘팀 캐나다’로 단결할 것을 천명하였다. 해당 로드맵에서 SMR 도입을 위한 4개의 핵심 축으로 ①SMR 실증·배치, ②관련 정책 및 법령 마련, ③대국민 신뢰 확보, ④국제협력을 제시하고, 이를 실행하기 위한 53개 세부 권고안을 제시하고 있다. 이어 발표된 2020년 12월 ‘SMR 액션플랜’⁷⁴⁾에서는 캐나다 연방정부, 주정부, 전력회사, 연구기관, 규제기관, 시민사회, 학계, 산업계(중공업, 설계·조달·시공, SMR 개발사 등) 등 119개 기관 및 조직이 참여하는 520여개 행동계획을 수립하였다. 이는 ①2020년대 후반 SMR 첫호기 운영, ②‘팀 캐나다’ 연합을 통한 국제 사회로의 영향력 확대, ③저탄소 청정 에너지원과 SMR의 융복합 지향, ④방폐물 최소화, ⑤캐나다의 학계·연구·엔지니어링·제조 등 광범위한 역량 활용 등의 원칙을 선언하고 있다. 또한, 2022년 3월 캐나다 온타리오·서스캐처원·뉴브런즈윅·앨버타 4개 주정부는 ‘SMR 배치 전략계획’⁷⁵⁾을 발표하고 청정기술 및 기후변화 대응 분야의 글로벌 리더·수출국 지위를 목표로 세웠다. 해당 전략계획에서 ①빠른 SMR 도입을 통한 글로벌 SMR 과학기술 허브 및 원자력 혁신의 리더십 확보, ②규제 체계 개발 촉진, ③새로운 SMR 기술에 대한 연방정부의 재정·정책 지원 보장, ④방폐물관리에 대한 협력, ⑤지역사회의 참여 기회 창출 등 다섯 가지 최우선분야를 강조하였으며, 이를 토대로 ①전력망연계 SMR배치, ②선진 SMR실증, ③초소형원자로 실증 등 세 가지 핵심 SMR 프로젝트를 추진 중이다.

한편, 캐나다는 SMR 산업의 발전 촉진을 목적으로 연구계와 산업계의 연계 강화 연구개발 프로그램을 수행하고 있다. 캐나다원자력연구소(CNL)의 ‘원자력연구이니셔티브(CNRI)’⁷⁶⁾는 민간 기업의 혁신 기술개발 가속화를 위해서, 선진원자력연료 및 재료, 혁신원자로설계, 원자로안전 등 주요 분야 개발에 대해 CNL이 보유한 연구시설, 인프라, 인력 등을 공유하고 있다. 해당 프로그램은 2019년에 시작하여 4년차인 2022년 10월부터 지원 대상을 민간 기업에서 대학으로 확장하였다. ‘자연과학및공학연구위원회(NSERC)–천연자원부(NRCAN) 파트너십’⁷⁷⁾은 대학의 연구자 대상 SMR 연구 자금 지원 프로그램으로, 대학의 SMR 관련 연구 역량 강화 및 인력양성을 목표로 삼고 있다. 해당 프로그램에 지원하기 위해서는 반드시 ①SMR 공급망, ②SMR 원자력연료 공급, ③SMR 방폐물 관리 중 적어도 하나의 연구 주제를 제시해야 한다. ‘SMR활성화프로그

73) Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee(2018),

74) SMR Action Plan. (검색일: 2024.05.20.)

75) The Governments of Ontario, New Brunswick, Alberta and Saskatchewan(2022).

76) World Nuclear News. 2019.07.22. CNL starts Canadian Nuclear Research Initiative. (검색일: 2024.05.20.)

77) Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada. NSERC–NRCAN partnership to fund research on small modular reactors, (검색일: 2024.05.20.)

램⁷⁸⁾은 캐나다의 SMR 배치 계획에 기여하는 것을 목적으로 하며, 캐나다에 등록된 법인을 지원 대상으로 한다. 해당 프로그램은 ①SMR 방폐물 관리, ②SMR 공급망에 관련한 연구개발 활동, 타당성 분석, 환경·규제 연구 등을 지원하며, 원자로 자체의 연구개발 및 실증 등을 제외하였다. 2023년 11월, 캐나다는 루마니아의 약 7천억원 규모 원전 사업개선 설비공사 계약을 체결하였으며, 2022년 8월에는 2012년에 세계 최초로 표준설계인가를 획득한 우리나라의 일체형 SMR인 SMART에 대해 캐나다 앨버타주 주지사가 방한하여 과기정통부 장관과 SMART의 앨버타주 도입을 적극적으로 논의한 바 있다. 이렇듯 캐나다 연방정부와 주정부는 원자력 관련 외교적 노력도 적극적으로 추진 중인 것으로 판단된다.

또한 영국은 2050년 탄소중립 달성과 러시아 에너지 의존도 저감 뿐만 아니라, 주변국과의 전력망 연계 제한성을 고려하여 원전 보급 확대 정책을 추진하고 있다. SMR과 관련하여, ‘녹색산업 혁명을 위한 10대 계획’⁷⁹⁾ 및 ‘에너지백서’⁸⁰⁾를 통해 차세대원자로 기술에 대한 투자를 명시하고, 최대 3억 8,500만 파운드의 ‘선진원자로기금(ANF)’을 조성하여 이 중 2억 1,500만 파운드를 SMR 개발에 투자한다고 제시하였다. 현재 민간기업인 롤스로이스 중심의 컨소시엄⁸¹⁾이 영국 대표 SMR인 UK SMR을 개발 중이다. 또한 시의 적절하게 차세대원자로의 시장 진출을 위해 추가로 4,000만 파운드를 투자하여 규제체계 개발 및 영국의 공급망을 지원하겠다고 제시하였다. 이어 ‘넷제로전략’⁸²⁾에서는 발전 분야에서 2035년까지 완전 탈탄소화를 천명하고, SMR 및 차세대 원자로 기술개발을 위해 1억 2천만 파운드 규모의 ‘미래원자력활성화기금(FNEF)’을 조성을 발표하였다. 2022년 4월 ‘에너지안보전략’⁸³⁾에서는 신규 원전 건설을 통해 에너지의 안정적 공급 및 자립을 실현하고, 일자리 창출과 경제 성장을 도모해야 한다고 강조하였다. 이를 위해, 2050년까지 현재 규모 대비 약 3배 이상 확대한 24GW의 원전설비를 갖추어 전체 발전량의 약 25%를 원전으로 공급한다고 제시하였다. 이로써 향후 30년에 걸친 지속적 원전 건설을 통해 비용을 절감하고 원자력 부문에서 글로벌 리더십을 확보한다는 계획이다.

한편, 영국 정부는 ‘에너지안보전략’ 달성을 위해 SMR 및 혁신적 원자력 프로젝트의 전주기를 지원하는 ‘영국원자력부(GBN)’ 출범시켰다.⁸⁴⁾ 1990~2000년대 자국 내 원전 건설이 없었던 추진하지 않아 기자재 공급 역량에 한계가 있어 자국의 생태계 활성화를 위해 자금을 투입해야 하며

78) 캐나다 천연자원부. Enabling Small Modular Reactors Program. (검색일: 2024.05.20.)

79) HM Government(2020a)

80) HM Government(2020b)

81) 영국국립원자력연구원(NNL), Assystem社, Atkins社, Laing O'Rourke社 등

82) HM Government(2021)

83) HM Government(2022)

84) 영국 정부 홈페이지. 2023.03.16. Support for households and energy security at the heart of Budget. (검색일: 2024.05.20.)

글로벌 협력이 필요한 상황으로 보인다. 이에 국가적 계획과 전략 시리즈 발표를 통해 원자력의 중요성을 강조하고 혁신적 SMR 개발에 다방면으로 투자하고 있다. 특히 2023년 11월에는 한·영 양국 간 무탄소에너지 기술 협력을 확대하기 위한 ‘청정에너지파트너십’을 체결하였으며, 원전 분야에서는 신규 원전 건설, 원자력연료, 원전 해체, 방폐물 등 원전 전주기에 걸친 포괄적 협력 관계를 구축하기로 합의하였다. 또한 양국뿐만 아니라 제3국에서 대형원전, SMR, 선진원자로를 개발하기 위한 협력 기회도 모색할 계획이다.⁸⁵⁾

약 70%의 전력을 원전으로 생산하는 원자력 강국인 프랑스는 주요 정책은 ①기존 원전 수명 연장, ②신규 원전 건설, ③SMR 개발 지원에 주안점을 두고 있다. 2026년부터 13GW 규모의 유럽형 가압경수로(EPR) 2타입 원자로 8기의 추가 건설 계획을 통하여 프랑스 전체 에너지원 중 화석연료 비중을 40%까지 낮추는 계획을 추진하고 있다. 프랑스전력공사(EDF) 컨소시엄⁸⁶⁾은 프랑스 대표 SMR인 NUWARD을 개발하고 있으며 이를 통해 미래 원전 수출 시장을 확보하려고 한다. 2021년 10월 마크롱 프랑스 대통령은 300억 유로 규모의 탈탄소 미래산업 육성 투자계획인 ‘프랑스 2030’⁸⁷⁾을 발표하였다. 해당 계획에서는 자국 원자력산업은 역사적으로 경쟁력이 있었으나 혁신적 원자로 개발에는 뒤처져 있음을 인정하고, ①다목적, ②안전성 향상, ③폐기물 관리 개선을 보장하는 SMR 및 선진원자로의 개발을 위해 2030년까지 10억 유로를 투자한다고 명시하였다. 그 중 2027년 초까지 계획되어 있는 R&D에서 전체 5단계 중 3단계의 단계에 진입하고 있다고 밝히며, SMR의 부품과 모듈의 상업화 수준 생산을 위한 검증 비용을 위해 3억 유로의 지원금을 승인하였다(2024.4월). NUWARD 개발 로드맵⁸⁸⁾은 2030년까지 프랑스 내에 실증로 건설 착수를 목표로 하고 있으며, 이는 기존 원전이 위치한 마르쿨 부지 내에 건설될 것으로 발표하였다. NUWARD 설계에 대한 안전성 공동 검토를 위해 EU 3대 안전규제기관인 프랑스 ASN, 체코 SUJB, 핀란드 STUK와의 조기 검토도 진행되는 등 실증로 건설을 위한 인허가 작업이 진행 중이다. 프랑스는 유럽연합에서 원전에 우호적인 11개국⁸⁹⁾을 중심으로 ‘원자력 연합(European Nuclear Alliance)’을 2023년 주도하고 있다. 기후 목표 달성을 위한 필수 수단이자 안정적 전력공급원으로서 원자력을 강조하고, 공동의 원자력 안전 규정 마련 및 SMR을 포함한 신기술 연구와 혁신을 목적으로 한다. 또한 2023년 3월 EDF와 이탈리아 기업들이 협력의향서를 맺고 유럽 내 SMR 개발과 도입에 주력하기로 합의하였다.

85) 대한민국 정책브리핑. 2023.11.22. 한·영, 원전·해상풍력·수소 등 ‘무탄소에너지’ 협력 본격 추진. (검색일: 2024.05.20.)

86) 프랑스원자력청(CEA), Naval group, TechnicAtome社, Framatome社, Tractebel社 등

87) French Minister of Economy, Finance and Industrial and Digital Sovereignty(2021)

88) eDF 홈페이지. The NUWARD™ SMR solution. (검색일: 2024.05.20.)

89) 프랑스, 불가리아, 크로아티아, 체코, 핀란드, 헝가리, 네덜란드, 폴란드, 루마니아, 슬로바키아, 슬로베니아

한편, 우리나라와는 2022년 11월 한·불 원자력공동조정위원회를 개최하여 SMR을 포함한 차세대원자로의 안전 연구 및 산업 경쟁력 강화까지 협력하기로 하고, 12월에는 원자력안전위원회와 프랑스원자력안전청(ASN)의 양자회의를 통해 SMR 안전 규제에 관한 기술협력을 추진키로 하였으며, 2023년 5월 일본과 고속로 개발 협력에 합의하는 등 원자력 분야의 국제 협력을 강화해 나가고 있다. 이는 원자로 부품, 원자력연료 등의 공급망 강화와 고속로 R&D 협력 강화 등을 포함한다. 이처럼 프랑스는 정부의 공격적인 원자력 이용 정책을 토대로, 유럽 내 원자력 최강국 및 수출국으로서의 입지를 유지하고 강화하기 위해 국제협력을 주도하고 있다.

이외에도 중국은 원전굴기 기세에 힘입어 현재 건설 중인 원전 19기를 포함하면 2023년 3월 기준 75기(약 73 GW)로 94기(약 97 GW)의 미국에 이어 중국은 세계 2위의 원자력 대국이다⁹⁰⁾. 2020년 9월 22일, 시진핑 중국 주석은 제75차 UN총회 기조연설에서 ‘2030년 탄소피크⁹¹⁾, 2060년 탄소중립’ 계획을 발표하며 중국의 기후변화 대응 목표를 대외적으로 공식 선언하고 원전을 확대하겠다고 밝힌 바 있다.⁹²⁾ 이어 2021년 10월 발표한 ‘2030년 이전 탄소피크를 위한 행동 계획’⁹³⁾에서 10대 중점과제 중 첫 번째 과제인 ‘청정에너지 및 저탄소 전환 조치’ 부문에서 SMR, 고온가스로, 고속로, 해상부유식원자로 등 선진원자로의 실증사업을 적극 추진할 것으로 명시하였다. 이를 위해 ①원자력 기술자립도 제고, ②핵심 기술·장비의 혁신 가속화, ③첨단 원자력 제조산업 클러스터 육성, ④엄격한 안전 관리감독 기능 강화 등을 강조하였다. 중국은 2015년 1월 원자력 기술개발 60주년을 맞아 원전수출을 국가전략으로 채택한 바 있다.⁹⁴⁾ 이러한 전략을 토대로 미루어볼 때, SMR의 공격적인 실증사업 수행을 토대로 앞으로 펼쳐질 SMR 시장에 신속하게 진입하겠다는 계획으로 풀이된다. 중국은 중국원자력공업집단공사(CNNC)를 중심으로 SMR 기술개발과 실증 및 상용화를 추진하고 있다. 중국 대표 가압경수로형 SMR인 ACP100은 국가발전개혁위원회(NDRC)가 2021년 6월에 건설을 승인하여, 같은 해 7월 중국 하이난성 창장 지역에 세계 최초의 육상용 SMR로서 건설공사에 착수되었다.⁹⁵⁾ 또한 고온가스로형 SMR인 HTR-PM의 실증로가 산둥성에 건설되어 전력망에 연결되었고(’21.12.) 최대 출력에 도달한 것으로 보인다(’22.12.).⁹⁶⁾

90) IAEA 홈페이지. Power Reactor Information System. (검색일: 2024.05.20.)

91) 탄소배출 정점(탄소피크)은 이산화탄소 배출량이 최대치에 이르는 시점을 의미하며, 이후 실질적인 탄소 배출량은 매년 감소하게 됨을 의미함

92) 新华通讯社. 2021.09.22. 习近平出席第七十六届联合国大会一般性辩论并发表重要讲话. (검색일: 2024.05.20.)

93) 중국 정부 홈페이지. 2021.10.26. 国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知. (검색일: 2024.05.20.)

94) 조은정(2022).

95) World Nuclear News. 2022.12.05. Chinese SMR project enters installation phase. (검색일: 2024.05.20.)

96) World Nuclear News. 2022.12.09. China's demonstration HTR-PM reaches full power. (검색일: 2024.05.20.)

일본 정부도 원전에 대한 내각부 원자력위원회(AEC)의 ‘원자력백서’⁹⁷⁾에서 일본의 원자력산업에 대한 기본방침이 나타나있다. 기본적으로 원자력에 대한 사회적 신뢰 회복, 안전성 제고, 폐기물 처리 등의 과제 해결이 필요성을 인지하고, 이를 보완하기 위하여 경수로의 안전성 연구와 차세대 원전기술인 고속로, 고온가스로, 핵융합 연구개발을 지속적으로 추진하고 기반시설과 설비를 강화하여 원자력 이용기반을 강화하겠다고 명시하였다. 2022년 12월 열린 녹색전환(GX) 집행위원회에서 2050년 탄소중립 달성을 위해 폐로를 앞둔 약 20기의 노후 원자로를 SMR을 포함한 차세대 혁신 원자로로 대체할 예정이라는 원전 이용 계획을 발표하였다. 경제산업성이 발표한 ‘2050년 탄소중립에 따른 녹색성장전략’⁹⁸⁾에는, 탄소중립 달성을 위한 14개 중점 분야 중 원자력산업 부분이 담겨 있다. 해당 부분에서 고속로, 고온가스로, SMR, 핵융합을 특정하였는데, 특히 SMR 성장전략 로드맵에 따르면, 제조 역량이 높은 일본 기업이 미국, 영국, 캐나다 등과의 국제협력 프로젝트에 참여하도록 지원하여 SMR을 포함한 차세대원자로 기술 혁신을 가속하겠다는 것이 핵심이다. 이를 위해, 단기적으로는 2020년대 말에 상용 운전 개시를 목표로 하는 해외의 SMR 실증 프로그램에 대하여 안전성, 경제성, 공급망 구축, 규제대응에 초점을 맞춰 일본 기업을 지원하고 그들이 주요 공급자 지위를 획득할 수 있도록 자주적 SMR 개발 역량 향상을 지원하고 있다. 중장기적으로는 본격적인 양산체제를 확립하여 경제성을 확보하고 해외와의 연계를 통해 글로벌 진출을 노린다는 전략으로 보인다.

[그림 4-7] 일본 ‘2050년 탄소중립에 따른 녹색성장전략’ 중 SMR 성장전략 로드맵 (‘21.6.)

	2021	2022	2023	2024	2025	~2030	~2040	~2050
SMR	[입증 단계] 미국·캐나다 등에서 2030년경까지 실용화 → 일본 기업이 해외 실증 프로젝트에 참여				[입증 단계] 일본 기업이 주요 공급자의 지위를 획득		[도입확대·비용절감 단계] 판로확대·양산체제화로 비용 절감	[자립 상용 단계] 아시아·동유럽·아프리카 등 글로벌 전개

자료: 일본 경제산업성(2021. 06), 2050년 탄소중립에 따른 녹색성장전략.

일본은 민간 부문에서도 혁신적인 원자력 기술개발을 이뤄낼 수 있도록 ‘NEXIP이니셔티브’⁹⁹⁾도 함께 추진 중이다. 이는 대학·연구기관 주도의 기초연구 부문과 기업 주도의 실용화 기술을 유기적으로 연계하여 등 기초부터 실용화 전 과정에 활용되는 금융지원, 시설지원, 인적자원개발을 함께 추진하는 문부과학성·경제산업성·일본원자력기구(JAEA) 공동 프로젝트이다. 한편, ‘녹색성장전략’의 국제협력 부문에서와 같이, 일본은 전략적·경제적 파트너로서 미국과 가장 활발하게 원자력 협력을 추진 중인 국가이다. 2021년 4월 CoRe 파트너십 체결을 통해 양국은 산업·기

97) 일본 내각부 원자력위원회, 原子力白書 (‘22.7.)

98) 일본 경제산업성(2021).

99) 일본경제산업성(METI)(2018) Promoting Nuclear Innovation. (검색일: 2024.05.20.)

술 부문에서 제3국 내 산업 파트너십 강화 및 SMR 포함 혁신 원자력 기술개발 협력을 강조하였다. 또한 2021년 JUCEP 파트너십 체결을 통해 청정에너지로의 전환을 강조하며 SMR 등 원자력 분야 협력 및 탈탄소 촉진을 위한 민간 부문의 참여를 주요 요소로 꼽고 있다. 2022년 10월 미·일 양국은 SMR 및 차세대원자로 배치를 지원하기 위한 WECAN 협정을 발표하고, 최우선 목표로 아프리카 가나에 SMR을 배치하기 위한 미-일-가나 3자 협력을 강조하였다. 그 뿐만 아니라 미·일 양국은 2023년 1월 9일 미국 에너지부-일본 경제산업성 장관급 회담, 1월 13일 바이든-기시다 정상회담 등을 통해 SMR을 포함한 원자력 협력 의제를 긴밀하게 논의하고 있다.

<표 4-7> 주요국의 소형모듈원전(SMR) 기술개발 정책 및 지원

국가	현황
미국	<ul style="list-style-type: none"> • DOE 중심, SMR 및 선진원자로 개발 및 실증, ‘민간주도-정부지원’ 체계를 통한 상용화 추진 • ARDP(Advanced Reactor Demonstration Program) : 연방정부의 예산과 산업체의 협력을 기반으로 2개 SMR(Terrapower Natrium, X-energy Xe-100) 실증을 위해 2020년부터 향후 7년간 1.6억불 지원과 25억불 추가지원.
캐나다	<ul style="list-style-type: none"> • 연방(주)정부 주도하에 연구계-산업계가 ‘팀 캐나다’로 단결하여 SMR 실증·배치에 집중 • SMR 로드맵(‘18), SMR 액션플랜(‘20.12) 및 SMR 배치 전략계획(‘22.3)을 발표하고 CNRI*, NSERC-NRCan Partnership**, Enabling SMR Program*** 등 추진 * 민간기업 기술개발 지원을 위해, 국립연구소가 보유한 연구시설, 인프라 공유 ** 대학의 SMR 관련 연구역량 강화 및 인력양성 *** SMR 배치에 기여하는 것을 목적으로 캐나다에 등록된 법인 지원
영국	<ul style="list-style-type: none"> • 정부 기금(Future Nuclear Enabling Funding) 1억2000만 파운드(약2천억 원) 조성 • 영국원자력(GBN) 출범으로 ‘민간-정부지원’ SMR 기술 선정 : Nuward, BWRX-300(, Holtec, Nuscale, Rolls-Royce SMR, Westinghouse AP300
EU	<ul style="list-style-type: none"> • EU SMR Industrial Alliance 설립을 통해 SMR관련 회원국, 산업계, 금융기관 협력을 통해 SME 가치사슬 구축
프랑스	<ul style="list-style-type: none"> • EU 내 원자력 정책 리더국 (EU nuclear alliance 결성, 12개국) • Nuwald 개발 지원(10억 유로)으로 유럽 내 SMR 핵심 수출국으로서의 입지 확보
중국	<ul style="list-style-type: none"> • ‘21년 세계 최초로 HTR-PM 실증로를 전력망에 연결 • 미래 수출시장 진입을 위해 CNNC를 중심으로 SMR 실증·상용화 추진
일본	<ul style="list-style-type: none"> • 국제협력을 통한 민간기업 역량 강화 및 ‘30년까지 SMR 공급자 지위 획득을 추진 • 중장기 SMR 양산체계 확립을 통한 수출시장 진입 전략 수립
러시아	<ul style="list-style-type: none"> • 로사톰(Rosatom)을 중심으로 SMR 개발 및 활성화를 추진 • 세계 최초의 수상 부유식 원전 운영

자료: 이종희 외(2023), 국내 원전산업 생태계 경쟁력 증진 방안 도출을 위한 원전 산업시장 및 공급망 분석. 바탕으로 저자 작성

각국의 SMR 정책은 산업 생태계를 구축하기 위한 산업 정책의 방향으로 진행되고 있다. 미국은 인프라투자-일자리법의 지원을 받는 ARDP 프로그램과 인플레이션감축법 내 원전 생산 세액

공제와 첨단 원전 투자 공제를 통해 지원하고, EU와 영국은 기초 연구개발과 인허가 과정에서의 비용, 투자비용 등을 지원한다. 또한 영국 BWXR-300의 경우, 자국내 SMR 제조 기업과 연계하여 공급망을 구축하는 간접적으로 지원하는 형태를 보인다.

Nuscale 뿐만 아니라, GE-hitachi가 개발한 BWRX-300이 캐나다, 영국, 폴란드 등과 적극적으로 협력하고 설비가 건설될 것으로 보이며, Nuwald(프랑스), Rolls-Royce와 AP300(영국) SMART(한국)의 SMR 기술이 초기 시장에서 복수의 국가들과 계약을 맺으며 해외 SMR 시장이 확대되어 가고 있다.

이러한 경향에 주목할 만한 점은 산업-공급망 구축을 비롯하여 안전규제-인허가 협력, 필요한 력 교육 및 필요 연구 발굴 등 원전 SMR 산업을 효과적으로 구축하기 위해서 전방위적인 노력을 기울이고 있다는 사실이다. EU집행위원회는 2024.2월 EU SMR 산업연합(Industrial Alliance)을 출범시켜 원자력 기술개발, 산업역량, 인허가, 사용후 연료 및 폐기물 관리 등에 대한 다각적인 지원을 발표하였다. SMR 산업연합의 역할에 대해 크게 사업 이해관계자 간의 차이를 확인 해결하고 긴밀한 협력을 촉진하여 유럽의 원자력 공급망을 강화하는 것에 큰 역할을 두었다.

<표 4-8> EU SMR Industrial Alliance 추진 내용

항목	추진 내용
SMR 기술 선정 및 지원	가장 안전하고 비용효과적인 유망한 SMR 기술을 선정 후 SMR 산업연합의 지원
SMR 프로젝트 지원	프로젝트의 시작부터 사업화까지의 지침 제공, 유럽 공급망(연료 및 원자재 포함) 강화
금융 지원	SMR 프로젝트 투자 회피 요인 파악, 금융 기회 분석, SMR 개발을 위한 혼합 금융모델 모색
산업 활용 연계	에너지 집약적 산업, 수소 생산자 등과 같은 잠재적 산업 사용자에게 SMR 활용 방안
연구	유라튬 연구 및 교육 프로그램과 국가 프로그램으로 해결 가능한 공급망의 기술 격차 파악 중소형원자로(SMR)/첨단원자로(AMR) 미래 연구 수요 파악
규제 협력	유럽 원자력 안전 규제 기관 및 각국 규제 당국과의 교류 강화
시민사회 협력	관련 시민사회 단체/NGO와 협력하여 SMR에 대한 대중의 참여를 촉진
기술 협력	넷제로산업법(NetZeroIndustryAct)下的 원자력 기술 아카데미 설립을 촉진하고 미래 역무/기술 개발 필요성 파악
국제협력	관련 국제기구와 협력으로 유럽 SMR 프로젝트의 국제 시장 진출 지원

자료: European Commission 홈페이지(https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/european-industrial-alliance-small-modular-reactors_en). (최종검색일: 2024.05.20.) 바탕으로 저자 정리

국제적으로 승인 표준화된 원자로 설계에 대한 국가 기준과 조화로운 방식으로 인허가에 대한 SMR 기술 채택을 빠르게 할 수 있다. 다자간 설계 평가 프로그램(MDEP)의 도입으로 몇몇 국가에

서 원자로 인허가 방식에 대해 규제 당국 간의 긴밀한 협력이 이루어진 사례가 있다. 캐나다의 CNSC와 미국의 NRC는 BWRX-300에 대해 공동 검토를 통해 구조 설계와 안전 전략을 함께 검토한 사례가 있다. 프랑스의 Nuwald의 경우, 프랑스의 안전규제기관인 ASN, 핀란드의 STUK와 체코의 SUJB 규제 기관과 공동으로 NUWALD 프로젝트의 안전성 검토를 진행하였다. 이러한 설계 검토 및 안전성 검토를 국가 간 추진함으로써 SMR 수출 시 사업 추진 속도를 더 효과적으로 추진할 수 있을 것이다.

제3절 소결



아직까지 국가별로 의견 차이는 존재하지만, 많은 국가에서 무탄소 발전원의 중요성을 인식하고 원전과 중소형원자로에 대한 정책을 활발히 펼치고 있다. 재생에너지의 변동성과 간헐성으로 인해 계통 안정화를 목적의 원전 활용이 더욱 중요해지는 시점이다. 그러나 우리나라는 국토면적이 독일과 일본 대비 각각 3.6배와 3.8배 규모로 좁고 전반적으로 일조량과 바람도 부족해 태양광과 풍력 등 재생가능에너지원에 대한 보급 여건에 있어 불리한 측면이 존재하는 것이 현실이다.

우리나라와 같이 재생에너지 여건이 좋지 않은 국가에서는 전력계통의 탈탄소화를 위해 원전과 SMR이 더욱더 큰 역할을 수행 할 수 있다.

무탄소 기저발전원과 분산전원으로서 원전과 차세대 원전인 SMR에 대한 기술 개발 및 투자 확대를 위해 우리나라는 국제 사회에서 CF연합(CF alliance)을 추진하고 있다. 이를 통해 국제사회로부터의 재생에너지 외 무탄소 발전원의 활용에 대한 공감대를 형성하고자 노력하고 있다. RE100과 같이 재생에너지에만 국한된 에너지 전환은 우리나라 기업에게 너무 무리한 요구가 될 수 있다. 국제 사회에서 원전을 포함한 무탄소 발전원의 활용에 대한 인식을 개선하고 공감대를 얻음으로써 우리나라 산업계가 국제적 기준에 부합하는 에너지 전환을 할 수 있도록 유도할 필요가 있다. 이에 국제사회로부터의 공감대를 형성하여 우리나라가 CFE를 본격적으로 추진할 수 있다면 발전비용이 낮은 원전 이용 확대의 용이성이 극대화되면서 전기요금 안정화 등 기업의 부담을 크게 완화할 수 있게 될 것으로 기대된다.

또한 소형모듈원전(SMR, Small Modular Reactor), 수소 등과 같은 에너지 신산업 창출에 대한 동력을 만들어내는 동시에 자국의 선진 원자력 전주기 독자 기술력을 활용한 수출 활성화로 고부가가치를 창출하여 국익을 극대화하는데 많은 도움이 될 수 있을 것으로 본다. 무엇보다 민간을 중심으로 추진되는 SMR 관련 사업들은 앞선 CFE의 자발적 민간참여형 추진 절차에도 부합하면서 분산형전원의 형태로 각 지자체별 여건과 고유의 특성을 고려해 적합한 용도에 맞게 보급이 가능하다는 점에서 탄소중립 실현을 가시화하고 양질의 일자리 창출 및 인구절벽 대응, 지역균형 발전 등 긍정적인 효과를 볼 수 있을 것으로 전망된다.

천연 우라늄 등 핵심 광물자원에 대한 대외 특정국에 대한 의존도가 높지 않고 연료비가 저렴한 원전을 활용한 전력·수소·열 등의 생산은 그 공급물량에 대한 중장기 안전성을 확보하는 동시에 우리나라의 에너지수입의존도를 낮추기 위한 전략적인 수단으로서 매우 유용하게 활용되

어질 수 있다. 이러한 원전에 대한 잠재적인 긍정 효과성을 가시화시키기 위해 무탄소에너지 인증제도에 대한 국제협력을 강화하여 국가 간 상호 인정되는 범위를 확정하고 내부적으로는 전주기(공급·조달·유통·소비)를 고려한 인증제도 설계와 시행에 관한 법제도적인 틀을 만들어 나아가야 할 것이다.

아울러 원전과 관련하여선 발전자회사 및 민간발전사가 소형모듈원전 운영사업을 추진할 수 있도록 발전사업 허가 등 관련 규제가 조속히 완화되어야 하는 필요성이 존재한다. 이외에도 원전산업의 지속가능한 기반 여건을 조성하는데 있어 매우 중요한 요소라고 할 수 있는 고준위방사선 폐기물 특별법(소위 고준위법)에 대한 국회 논의가 조속히 진척·합의 도출되어야만 원전에 대한 수용성 확보가 한층 개선되어질 것이라고 판단된다. 이를 기반으로 대형원전·중소형원자로 관련 비즈니스 연계 사업모델이 보다 더 다양·다각화되면서 사회·경제적인 편익을 극대화시킬 수 있을 것이다.



원전-수소 연계 가능성 검토



제1절

원전 수소 생산 가능성 검토



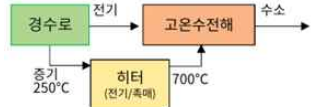
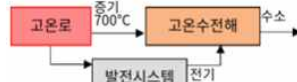
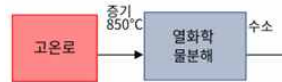
본 절에서는 원전 및 SMR에서 발생하는 전기와 열을 활용하여 청정수소 생산이 가능한지에 대해 검토한다. 우선 원전과 SMR을 활용하여 수소를 생산하는 기술적 원리에 대해 살펴보고, 원전 및 SMR을 수소 생산에 활용함으로써 발생하는 편익을 검토함으로써 원전-수소 산업의 연계 가능성 및 타당성을 확인한다. 마지막으로 실제 원전과 수소 산업을 연계하는 프로젝트 사례를 바탕으로 원전-수소 연계 산업이 얼마나 현실화 될 수 있는지에 대한 시사점을 도출해보고자 한다.

1. 원자력 청정수소 생산 기술

기본적으로 원자력 청정수소라고 하는 것은 수소 생산을 위한 주 에너지원이 원자로에서 발생하는 전기와 증기인 경우를 일컫는다. 이때 수소 생산을 위해 전기 혹은 증기를 발생시키는 원자로의 유형에 따라 1) 경수로형, 2) 고온가스로형으로 구분할 수 있다. 또한 원자로로부터 전기만 공급 받는지, 전기와 증기를 모두 공급받는지, 공급받는 증기의 온도는 어느 정도인지 등에 따라 4가지 유형으로 다시 구분 가능하다. (<표 5-1> 참고)

<표 5-1> 원전 수소 생산 기술 유형 구분

원자로 수전해	경수로	초고온가스로
저온수전해	<pre> graph LR A[경수로] -- 전기 --> B[저온수전해] B -- 수소 --> C[] D[열] --> B </pre> <ul style="list-style-type: none"> 재생에너지/그리드 전력 기반 수전해 수소와 동일 방식 경수로에서 생산된 전기를 저온수전해기에 바로 공급 	

<p>고온수전해</p>	 <ul style="list-style-type: none"> 경수로에서 생산된 전기는 고온수전해기로 바로 공급하고, 증기는 히터를 통해 고온으로 전환하여 고온수전해기에 공급 	 <ul style="list-style-type: none"> (초)고온가스소에서 고온의 증기를 고온수전해기에 바로 공급하고, 필요한 전기는 증기를 활용해 생산하여 공급
<p>열분해</p>		 <ul style="list-style-type: none"> 초고온가스소에서 생산된 고온의 증기를 이용하여 열화학적으로 물을 분해하여 수소를 생산

자료: 두산에너지(2024), 탄소중립달성을 위한 SMR의 역할. 발표 자료를 바탕으로 저자 작성

가. 저온수전해 방식 원자력 청정수소 생산 경로

경수로-저온수전해 방식의 원자력 청정수소는 흔히 그린수소라고 일컬어지는 재생에너지-저온수전해 방식과 같은 방식이다. 다만, 저온수전해기에 공급되는 전력이 재생에너지가 아닌 원자로에서 공급된다는 점에 차이가 있다. 현재 국내 원전을 활용한 수소 생산 방식은 대부분 저온수전해 방식으로 상용화가 논의되고 있다. 대량의 값싼 전력을 생산·공급하는 목적으로 가동 중인 경수로형 대형원전에 저온수전해 장비를 연계하여 감축발전 등 일부 전력을 청정수소 생산을 위하여 활용하도록 운영이 가능하다. 이렇게 생산된 수소는 저장과 수송을 최소화하는 인근 수요처에 공급할 수 있어 가장 효과적이고 효율적인 수소생태계 구축을 지원하게 된다.

저온수전해기에는 크게 알칼라인과 PEM 타입이 있으며, 수전해스택을 구성하는 전해질 종류에 따라 구분된다. 알칼라인 수전해(AEC)는 현재 기술성숙도가 가장 높은 방식으로 인정받고 있다. 이 방식은 이미 상업화되어 있으며 대규모 그린수소 생산을 위해 널리 활용되고 있다. 한편, 고분자전해질막 수전해(PEM)는 상업화된 최신 기술로, 실증 및 상용화 단계에 진입했다고 볼 수 있다. 이는 고도로 발전된 기술로, 효율적인 수소 생산에 중요한 역할을 하고 있다.

나. 고온수전해 방식 원자력 청정수소 생산 경로

고온수전해는 원전에서 생산되는 고온열과 전기에너지를 모두 사용하여 청정수소를 생산하는 방식이다. 이때 원전에서 공급 받는 전기와 열의 공급 방식에 따라 경수로 연계형과 고온가스 연계형으로 구분할 수 있다. 고온수전해는 700°C 이상의 고온열이 투입되어야 하므로 경수로 연계형 고온수전해는 경수로에서 전기는 그대로 공급 받고, 고온수전해에

투입할 만큼 높은 열은 히터를 통해 공급하는 방식이다. 고온가스로 연계형 고온수전해는 고온의 증기를 발생시키는 초고온가스로에서 직접적으로 고온수전해기에 열을 공급하고, 필요한 전기는 별도의 발전시스템을 통해 생산하여 공급하는 방식이다.

고온수전해를 현재 가동 중인 대형 원전에 설치하는 경우 안전하게 고온열을 활용할 수 있도록 설계변경이 필요하다. 반면, 신규로 건설되는 대형원전 혹은 SMR의 경우 경수로 혹은 고온가스로에서 고온열을 안전하고 효율적으로 공급할 수 있도록 초기 설계부터 반영할 수 있을 것이다.

현재 개발 중인 대표적인 고온수전해 기술은 고체산화물(SOEC) 수전해이다. 그러나 SOEC 수전해 기술은 여전히 연구개발 단계에 머물러 있다. 이 기술은 제조 및 상업화에 참여하는 회사가 거의 없어, 기술의 성숙도가 상대적으로 낮은 것으로 평가되고 있다. 즉, 상업적 적용에 널리 사용되기에는 여러 한계를 가지고 있음을 나타낸다. 따라서, 알칼라인과 PEM 수전해 기술에 비해 SOEC 기술은 향후 연구개발과 상업화를 통한 발전이 필요한 상태이다.

<표 5-2> 주요 수전해 기술별 특성

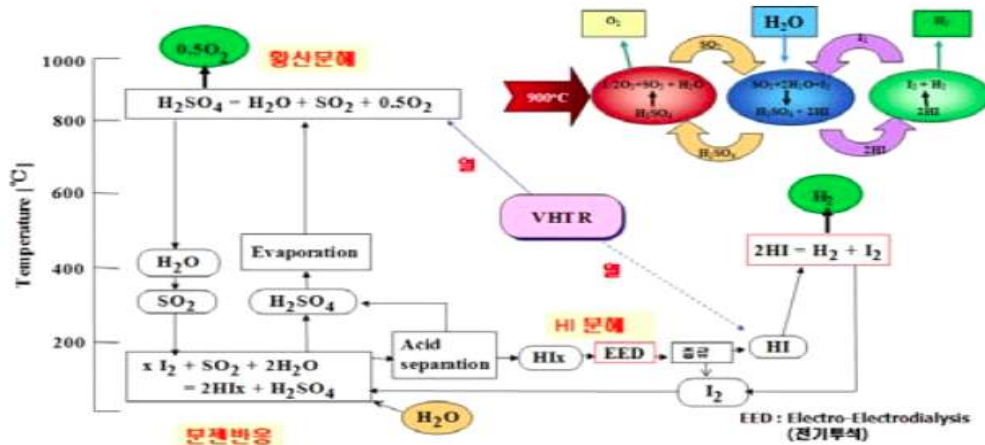
구분	저온수전해		고온수전해
	알칼라인 수전해(AEC)	고분자전해질막 수전해(PEM)	고체산화물 수전해(SOEC)
성과지표	알칼라인 수전해(AEC)	고분자전해질막 수전해(PEM)	고체산화물 수전해(SOEC)
전하 전달	OH ⁻	H ⁺	O ₂ ⁻
전해질	KOH 수용액 (20~40wt.% KOH)	양성자 전도성 막 (PSFA membrane)	산소 전도성 막
온도 범위 (°C)	60~90	RT~90	700~850
전류밀도 (A/cm ²)	0.2~0.6	1.0~2.5	0.3~2.0
기술적 성숙도 (TRL) ¹⁰⁰⁾	8-9	7-8	6-7
운전 압력 (bar)	0~30	0~70	1
스택/모듈 크기 (Nm ³ /h, MWel)	<1000 Nm ³ /h 0.5~2.5 MWel	100 Nm ³ /h 0.1 - 1.5 MWel	none
에너지 소비 (KWh/Nm ³ H ₂)	4.2 ~ 5.8	4.5 ~ 6.8	> 3.7
장점	- 기술성숙도가 가장 높음 - MW 규모의 대용량 시스템 구축 - 상대적으로 저렴	- 상용화된 최신 기술 - 가동 정지(on/off 응답성) 특성이 우수 - 고압 작동에 적합	- 효율이 높음
단점	- 운전 전류밀도가 낮음 - 설치 공간이 큼 - 시스템 가동 시간이 오래 소요	- 귀금속 등 고가의 재료 사용으로 인해 비싼 비용 - 수명	- 낮은 기술성숙도 - 장기 안정성 - 개발단계

자료: 김종우·이태의(2022), 청정수소 생산의 경제성 확보를 위한 수전해의 기술적 제도적 개선 방안 연구. 바탕으로 저자 작성

다. 열화학 방식 원자력 청정수소 생산 경로

초고온가스로나(VHTR)에서 발생하는 초고온열(850°C 이상)을 이용해 열화학 방식으로 수소를 생산할 수 있다. 대표적인 열화학분해 방식으로는 원자력의 고온열원을 이용한 황-요오드(Sulfur-Iodine) 청정수소 생산 경로는 물을 열화학적으로 분해하여 수소를 생산하는 방식이 있다. 황-요오드 분해 공정은 분젠반응공정, 황산분해공정, 요오드산(HI) 분해공정으로 구성된다. 황-요오드 열화학공정은 850도에서 황산을 분해한 뒤 '분젠공정'을 통해 요오드화수소산(HI)을 만들고, HI에서 요오드와 수소를 분리해 수소를 생산하는 방법이다. 황-요오드 열화학수소생산공정에서 황산(H₂SO₄)과 요오드(I₂)는 내부 순환물질이며, 물을 분해하여 수소가 생산되고 부산물로 산소가 나오게 된다. 황-요오드 열화학공정은 전기분해에 비해 저렴하며 많은 양의 수소를 생산할 수 있고, 물에서 27%의 수소만을 얻을 수 있는 수전해에 비해 40%로 생산 효율도 높다고 알려져 있어 효율적인 원전 수소 생산 방식으로 논의되고 있다.

[그림 5-1] 초고온가스로나 원전수소 생산 경로



자료: 김용완 외 (2015), 초고온가스로나를 이용한 원자력수소생산 기술개발.

그러나 초고온가스로나 기술은 초고온소재 확보 및 경제성 등의 문제로 기술개발이 지연되고 있다. 즉, 초고온가스로나 자체가 아직까지는 기술 성숙도가 낮다는 점에서 초고온가스로나 기반의 원

100) EU의 연구재정프로그램인 Horizon 2020은 R&D의 기술준비수준(technology readiness levels, TRL)을 다음과 같이 9단계로 구분함. TRL 1(기본 원칙), TRL 2(기술 개념의 공식화), TRL 3(개념의 실험적 증명), TRL 4(실험실에서의 기술 유효성), TRL 5(유사 환경에서 기술 유효성), TRL 6(유사 환경에서 기술 데모), TRL 7(운영 환경에서 시스템 프로토타입 데모), TRL 8(시스템 환경 및 검증), TRL 9(운영 환경에서 입증된 실제 시스템).

전 수소 생산은 상용화까지 오랜 시간이 걸릴 것으로 예상된다.

라. 원자력 청정수소 생산을 위한 수전해 기술 간 비교

주요 수전해기 유형에 따라 온도 및 압력조건, 에너지소비량 등이 상이하므로 발전원의 부하패턴에 따라 최적으로 활용할 수 있는 수전해기 유형에도 차이가 있을 수 있다. 일반적으로 알칼라인 수전해기는 변동성이 적은 대량 부하에, PEM 타입은 변동성이 있는 재생 전기를 활용한 전기를 이용하여 수소를 생산하는데 적합하다고 알려져 있다. 이에 현재 재생에너지 발전원과 대형원전의 경우 이미 상용화 단계에 접어든 알칼라인수전해 혹은 고분자전해질막수전해와 같은 저온수전해 기술을 활용하는 것이 가장 안정적이라고 평가되고 있다. 본 연구의 중점 분석대상인 중소형 원자로의 경우 발전과정에서 수반되는 고온열을 활용하여 고체산화물 수전해를 수소생산에 활용하는 것이 효율적이라고 평가되고 있으나, 해당 노형별 실증단계까지 모든 가능성을 열어두고 있는 상황이다.

<표 5-3> 수소 플랜트의 수전해기 선정

구분	2020			2050 목표		
	LTE(저온)		HTE(고온)	LTE(저온)		HTE(고온)
	Alkaline	PEM	SOEC	Alkaline	PEM	SOEC
효율 (kWh/kg H ₂)	50~78	50~83	45~55	< 45	< 45	< 40
기대수명 (hours)	60,000	50,000 ~60,000	< 20,000	100,000	100,000 ~120,000	80,000

자료: IRENA(2020), Green Hydrogen Cost Reduction. 바탕으로 저자 정리

구체적으로 이 중 저온전기분해(LTE)에는 PEM(polymer electrolyte membrane) 수전해 기술이, 고온수증기전기분해(HTSE)에는 주로 SOEC(solid oxide electrolysis cell) 기술이 사용된다. 저온전기분해는 원자력발전소의 전기만 필요한 반면, HTSE는 전기와 열이 모두 필요하며 시스템 운전 온도는 500~1000℃이다. 저온전기분해는 HTSE처럼 원전의 열에너지를 이용하기 위해 복잡한 엔지니어링 설계와 시스템 통합을 필요로 하지 않지만, 사용되는 PEM 수전해는 값비싼 촉매를 사용한다. 현재 SOEC 기반 수전해 기술은 기술 성숙도가 낮으나, 고온수전해를 사용한 수소 생산의 효율성이 더 높으므로(90% 이상, LTE는 65%), 개발이 완료될 경우 기술의 안정성이 향상되고 비용이 더 저감될 것이다. 기존 원자로의 자본 비용이 오래 전에 회수되었기 때문에 초기 수소 생산에서는 기존 원자로와 저온수전해의 사업모델 대비 선진 원자로와 SOEC의

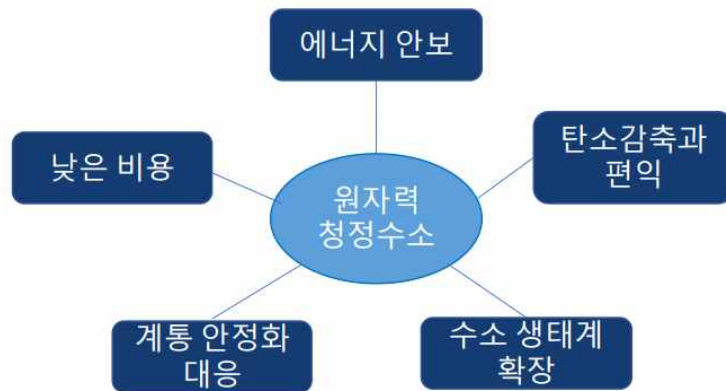
결합이 경쟁 열위를 보일 것이나, 미래의 선진 원자로는 기술적인 관점에서 SOEC 기반 수소 생산과 통합하기에 훨씬 더 적합하며, 선진 원자로의 비용 절감과 SOEC 공정의 성능 향상으로 인해 경쟁력 확보가 가능하다.

그러나 아직까지 고온가스로, 초고온가스로 기술에 대한 불확실성이 큰 실정이며, 특히 이론적으로 수소 생산에 유리하다고 평가되는 고온가스로 기반의 SMR이 수소 생산 목적으로 상용화되는 것에는 해결해야 할 난제들이 남아있다. 이러한 기술적 한계 및 상용화 불확실성 등으로 인해 국내에서 대량으로 청정수소를 확보하기 위한 방안으로 경수로 기반의 대형원전이나 SMR을 활용하여 저온수전해 및 고온수전해 기술로 수소를 생산하는 것이 가장 현실적인 대안이 될 것이다.

2. 원전-SMR 수소 생산의 편익

원전수소의 경제성을 분석하기 이전에 원전 수소를 생산하기 위한 다양한 측면에서 접근할 수 있다. 원전수소는 우리나라의 탄소중립 이행을 위한 수소경제 활성화와 에너지안보 증진 기여도 등의 측면에서 그 필요성이 증대되고 있는 상황이다. 원전 수소는 다음과 같은 분야에서의 편익이 있을 것으로 예상된다.

[그림 5-2] 원전수소 생산의 타당성



자료: 저자작성

첫째, 에너지 안보 측면에서 보면, 국내에서 대규모로 생산된 청정수소는 해외 수입에 의존하는 수소의 양을 대체함으로써 국가의 에너지 자립도를 높일 수 있다. 둘째, 경제적 관점에서는 국내에서 생산된 청정수소가 해외에서 도입되는 수소에 비해 가격 경쟁력이 있으므로, 비용 효율적인 청정수소 공급이 가능하다. 셋째, 시스템 안정성 측면에서는 원자력 발

전과 수소 생산 설비의 부하 추종 운전을 통해 감발 대응 능력을 향상시켜 지역 및 국가 전력망의 안정성에 기여할 수 있다. 이러한 접근은 에너지 자립, 경제적 효율성 및 시스템 안정성을 동시에 달성하면서 수소 경제 생태계를 확장하고, 지역 경제를 활성화하는 데에도 중요한 역할을 한다.

원전 수소의 중요성과 필요성이 높아지고 있는 배경에는 국내 원전에 대해 전력시장에서 종종 공급을 줄여서 시장에 공급해달라는 요청이 잦아진 것에 기인한다. 재생에너지 발전원의 확대와 전력 수요의 변동성이 높아짐에 따라 기저발전원인 원자력 발전도 감발 운전이 불가피하게 되었다. 2020년 이후 봄철 연휴기간 동안 4회의 감발운전이 이루어진 이후 2021-22년 동안 2회 감발 운전이 이루어졌다. 2023년에는 총 원전 설비 크기도 커졌고 요청 시간도 증가하였다. 이렇듯 국내 전력 계통의 안정화를 위한 감발 요청이 증가함에 따라 재생에너지가 확대되는 중장기에는 더욱 유연한 계통 운영의 필요성이 높아질 것이고, 원전 또한 수소 생산과의 연계를 통해 계통에 유연하게 전력을 공급하는 방안도 대두되기 시작하였다. 물론, 현재 원전에 대한 감발 요청이 봄철기에 한정된 만큼 또한 불규칙적으로 이루어지고 있기 때문에 수전해기를 안정적으로 가동할 수 있는 수준이 아니며, 수소 생산량이 경제성을 확보할 만큼 충분하지 않다는 문제가 있다. 그럼에도 불구하고 향후 재생에너지가 지속적으로 확대되고 원전에 대한 감발 요청이 더욱 잦아지게 되는 경우에는 계통 안정화를 위해서라도 원전가동과 수소 생산을 연계하는 것이 필수적인 상황이 올 것이다. 미국 Holtec International의 경우는 기존 석탄발전소 부지와 전력시스템을 활용하여 원전의 도입비용을 최소화하면서도 원자력과 태양광의 장점을 결합한 새로운 CNSP(Combined Nuclear/Solar Plant) 설계를 2024년 2월에 발표한 바 있다¹⁰¹⁾. 이렇듯, 주간 피크부하시간대 태양광 전력을, 이외 시간대는 원전 전력을 저온수전해로 공급하는 융합형 사업화 모델을 통해 원자력의 예기치 못한 감축발전을 최소화하면서도 24시 365일 저온수전해 설비를 효율적으로 가동하는 기반을 구축해 나아가는 것도 모색해 볼 수 있다.

<표 5-4> 2023년 국내 원전본부별 감축발전량

일시	총감발(MW)	발전기명	사유
1.21(토) 12:00~ 1.23(월) 15:00(51H)	550	신한울 #1	설 경부하기
1.21(토) 1:00~ 1.24(화) 17:00(88H)		새울 #1	
		새울 #2	
3.19(일)	980	한빛 #1,2,3,6	봄철 주말

101) 혁신형 소형모듈원자로 기술개발 사업단 SMR 뉴스레터(2024. 02. 05). Holtec社, 원자력-태양광 하이브리드 발전소 설계 공개.(검색일. 2024. 05. 20.)

10:00~15:00(약5H)		신고리 #2	경부하기
		새울 #2	
3.26(일) 12:50~15:30(약2.7H)	500	한빛 #2,3,6	봄철 주말 경부하기
4.2(일) 10:00~15:00(약5H)	320	한빛 #2,3	봄철 주말 경부하기
4.9(일) 10:00~15:00(약5H)	680	한빛 #2,3,6	봄철 주말 경부하기
		신고리 #2	
4.30(일) 10:00~15:00(약5H)	1,100	한빛 #3,6	봄철 주말 경부하기
		신월성 #1	
		신고리 #2	
		새울 #2	

출처 : 저자정리

또한, 수소 생태계 확장 측면에서 원전 수소 생산은 국내 수전해 시장 활성화에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 예상된다. 국내에서 재생에너지 연계 수소 생산은 제주도 12.5MW 실증 외 진행되고 있는 프로젝트 여건을 고려할 때, 재생에너지의 높은 단가와 낮은 이용률을 통해 경제적인 청정수소 생산이 이루어지는데 기간이 소요될 것으로 보인다. 이러한 국내 재생에너지-수소 생산 시장을 기다린다면 초기 수전해기 시장에서 주도권을 원자력 기반 청정수소 생산과 이를 활용 부문에 연계하여 청정수소 활용 시장을 만들 수 있다면, 초기 수전해기 시장을 활용할 수 있게 될 것이다. 2022년 기준 전 세계 수전해기 제조사의 연간 공급가능설비는 약 13.6GW 규모로 추산되나, 이 중 0.8GW만이 공급된 것으로 확인된다. 이는 수전해 제조가능설비에 비해 아직까지 수전해기를 실제로 수요하는 프로젝트가 많지 않음을 시사한다. BNEF(2023)의 전망에 따르면 2023년 전 세계 수전해기 생산능력은 41.1GW로 증가할 것으로 예상되지만, 그럼에도 불구하고 3GW 수준의 수전해기가 공급될 것으로 예상되고 있다. 또한, 현재 전 세계적인 수전해기 제조는 중국과 유럽 기업을 중심으로 이루어지고 있어 국내 수전해 산업 생태계 기반이 매우 취약한 실정이다. 이를 국내에서 원전 기반 수소 생산과 활용을 통해 수전해기 시장 기반을 구축할 수 있다. 또한, 국내 수전해기 기업뿐만 아니라 해외 수전해 기업들의 국내 투자도 이어질 수 있다.

중소형원자로(SMR)을 활용하는 경우, 대형원전을 활용하는 것과 다른 새로운 편익을 고려할 수 있다. SMR은 동일하게 1GW규모로 건설한다고 하더라도 대형원전에 비해 적은 소요부지로서 입지 제약이 상대적으로 적으므로, 일부는 수소 생산, 일부는 전력 공급 등 모듈별 용도를 다양하게 활용 가능하며, 수요처에 따라 다양한 용량 구성이 가능하다. 구체적으로 대형원전의 경우

1GW 규모로 건설하는 경우 발전소 부지가 약 3.3km², 비상대피구역이 803km²(반경 16km)이 필요한 반면, SMR의 경우 동일 규모 건설 시 부지 약 0.1km², 비상대피구역 약 0.2km²(반경 230m)대형 원전에 비해 상대적으로 입지가 용이한 편이다.¹⁰²⁾

SMR은 대형원전 대비 소요부지가 작고, 공장에서 모듈형으로 제작하여 건설되기 때문에 현장 시공이 용이하고 건설 기간이 단축된다는 장점이 있다. 기존의 대형원전에 필요한 콘크리트 돔 구조물이 필요 없어지고, 모듈화 설계로 현장설치 설비를 축소함으로써 대형원전에 비해 빠른 속도로 무탄소 발전 설비를 보급 및 확대하기 위한 수단으로 충분히 활용가능하다. 특히 플랜트 당 설치모듈의 수량을 조절하면서 다양한 용량으로 발전설비를 건설할 수 있고, 각 모듈을 다목적으로 활용할 수 있다는 점에서 송전제약이 있는 off-grid 지역에서 에너지 공급 목적의 분산형 전원으로 활용 가능성이 높다. 계통 제약이 있는 지역에서 전력 공급, 열 공급, 수소 공급이 모두 가능한 SMR을 건설함으로써 다용도 에너지 공급원으로 충분히 활용될 수 있을 것이다.

[그림 5-3] 대형 원전과 SMR의 부지 및 설계 차이



자료: 두산에너지빌리티(2024), 탄소중립달성을 위한 SMR의 역할, p.7.

계통에서 독립적으로 설치가 가능하며, 안정적이고 지속적인 전력공급이 가능하다는 점은 오

102) DOE 발표 기준

프그리드 수소 생산 설비의 활용가능성도 높다고 해석할 수 있다. 향후 우리나라의 청정수소 인증제를 포함한 주요국의 수소인증제가 수소 생산에 투입되는 전력원의 추가성 조건을 강화하는 경우, 무탄소 발전원 기반의 수소 생산 설비 확대에 큰 제약이 될 것이다. 이때, SMR 기반의 수소 생산 설비를 구축함으로써 국내 청정수소 생산 역량을 제고하고, 신규 무탄소 발전원도 확대할 수 있을 것이다. 글로벌 기준에 부합하는 국내 청정수소 생산 기반을 강화하기 위해서라도 SMR을 활용한 수소 생산에 대한 가능성을 지속적으로 검토하고 기술 개발, 상용화, 보급 확대를 위한 정책적 노력을 기울여야 할 것이다.

3. 국내외 원전 수소 생산 프로젝트 사례

가. 해외 원자력수소 사업추진 사례

미국 바이든 행정부는 미국 경제를 탈탄소화하기 위해서 청정수소 경제를 구축하기 위하여 다양한 정책을 추진하고 있다. 이 중에서도 원자력은 CO₂ 배출 없이 수소를 생산할 수 있다는 점에서 에너지부(DOE)를 중심으로 원자력의 열과 전기를 이용한 수소 생산을 계획하고 있다.

아르곤국립연구소(ANL, Argonne National Laboratory)와 Constellation Energy Corporation社は Nine Mile Point 원전부지 내에서 저온 수전해 설비 설비를 활용하여 청정수소 생산을 최초로 개시함으로써 원자력 청정수소 생산 프로젝트를 성공적으로 추진하였다(‘23.2월).¹⁰³⁾ 백업전력, 운송 및 기타 응용 분야에서 에너지로 사용하기 위해 원자력수소 협력 사업을 추진 중으로, 시간 당 1.25 MW의 전력을 사용하여 하루에 560kg의 청정수소를 생산하였다. 해당 원전설비는 2025년에 뉴욕에너지연구개발청(NYSERDA, New York State Energy Research and Development Authority)과 별도의 파트너십을 맺고 연료전지에 전력을 공급하는 사업을 추진할 예정이다.¹⁰⁴⁾

미국에서 원자력 연계 청정수소 생산하는 두 번째 사례는 Energy Harbor 주도로 추진하는 사례이다. Energy Harbor는 Davis-Besse 원전부지 내에서 저온수전해 설비를 통한 청정수소 생산의 기술타당성과 경제편익을 실증하여 향후 대형시설로 확대(Scale-up)하는 프로젝트로써, 이렇게 생산된 청정수소는 지역 내 제조공장 및 수송부문에서 연료로 활용될 예정이다.¹⁰⁵⁾

세 번째로 Bloom Energy(사)는 Xcel Energy(사)가 운영 중인 Prairie Island 원전부지 내에

103) Constellation energy 홈페이지. (검색일: 2024.05.20.)

104) Constellation energy 홈페이지. (검색일: 2024.05.20.)

105) Davis-Besse Nuclear Power Station, Unit 1. (검색일: 2024.05.20.)

서 240kW 규모의 고온 수전해(SOEC) 설비를 통해 청정수소 생산 실증을 추진하고 있으며, 2024년 초 청정수소 생산을 개시할 것으로 알려져있다.¹⁰⁶⁾ 이는 240kW 규모의 고온 수전해 실증 장치를 위한 엔지니어링이 진행 중으로 ‘23년 착공되어, ‘24년 운영을 시작할 것으로 알려져 있다.¹⁰⁷⁾

<표 5-5> 주요 원전수소 프로젝트 사례

		
Nine Mile Point Nuclear Power Station (Constellation Energy) ¹⁰⁸⁾	Davis-Besse Nuclear Power Station (Energy Harbor) ¹⁰⁹⁾	Prairie Island Nuclear Generating Plant (Bloom Energy&Xcel Energy) ¹¹⁰⁾
PEM (NEL hydrogen)	2MW PEM (Cummins)	SOEC(BloomEnergy)

이어 2023년 10월 13일 미국 정부는 7개 지역의 청정수소 허브(H2Hubs) 인프라 구축을 가속화한다는 방침을 소개하며 이를 위해 70억 달러의 연방정부 예산을 지원하기로 했다.¹¹¹⁾ 해당 지원 예산은 2021년 11월 15일 발효된 ‘인프라투자 일자리법(IIJA, Infrastructure Investment and Jobs Act, IIJA)’에서 지원된다. 이러한 H2Hubs 사업으로 400억 달러 이상의 민간 투자를 유도하고 수만 개 양질의 일자리를 창출할 것으로 보고하고 있다.¹¹²⁾ 또한 해당 7개 H2Hubs 사업의 최종 사용 단계에서는 연간 2,500만 톤 이상의 이산화탄소 배출을 줄이면서 연간 300만 톤

106) U.S.NRC. Prairie Island Nuclear Generating Plant, Unit 1. (검색일: 2024.05.20.)

107) U.S.NRC. Prairie Island Nuclear Generating Plant, Unit 1. (검색일: 2024.05.20.)

108) Constellation energy 홈페이지. (검색일: 2024.05.20.)

109) Davis-Besse Nuclear Power Station, Unit 1. (검색일: 2024.05.20.)

110) U.S.NRC. Prairie Island Nuclear Generating Plant, Unit 1. 검색일: 2024.05.20.)

111) CSIS(2023.10.20.). “The Hydrogen Hubs Selection SEts off the Dawn of U.S. Hydrogen Economy”. (검색일: 2024. 05. 20).

112) CSIS(2023.10.20.). “The Hydrogen Hubs Selection SEts off the Dawn of U.S. Hydrogen Economy“. (검색일: 2024. 05. 20).

이상의 청정수소를 생산하여 미국의 2030년 청정수소 생산 목표인 1,000만 톤의 약 30%를 달성할 것으로 예상했다.¹¹³⁾ 더 나아가 미에너지부(DOE)는 인프라 법에 따라 청정수소 생산과 관련하여 지속적인 기술개발과 산업육성을 위한 정책적 지원을 유지하면서, 세 곳의 지역 허브에서 원자력수소 생산과 함께 수소 인프라 구축을 통하여 선제적인 청정수소 생산-유통-저장 인프라 구축을 통해 전반적인 청정수소 공급비용 저감에 나서고 있다.¹¹⁴⁾

해당 H2Hubs 사업의 전체 7개 프로젝트에서 원자력을 활용한 프로젝트는 총 3개로 다음과 같다.

<표 5-6> 미국 H2Hub 중 원전수소 계획된 Hub

프로젝트명	주 파트너	연방 정부 부담 비용	최종 사용용도	최종 사용 시 배출량 감소	수송/저장 고려사항	고용효과 (일자리 창출)
Heartland Hydrogen Hub (HH2H)	·미네소타 ·사우스다코타	\$925M	·산업 ·운송 ·전기 ·난방	100만 톤	·파이프라인	3,880
Mid-Atlantic Hydrogen Hub (MACH2)	·펜실베이니아 ·델라웨어 ·뉴저지	\$750M	·산업 ·운송 ·열+전기 생산	100만 톤	·파이프라인 ·주유 스테이션	20,800
Midwest Hydrogen Hub (MachH2)	·일리노이 ·인디애나 ·미시간	\$1B	·산업 ·운송	390만 톤	N/A	13,600

주: 펜실베이니아주는 ARCH2와 MACH2에 공동 소속
 자료: CSIS(2023.10.20.), The Hydrogen Hubs Selection Sets off the Dawn of U.S. Hydrogen Economy.
 (검색일: 2024. 05. 20). 바탕으로 저자작성

영국 정부는 2050년까지 12-13GW 규모 원자력 활용해 연간 75TWh 수소 생산을 계획하고 있다. 이를 위해 녹색 산업 혁명을 위한(for a Green Industrial Revolution) ‘10포인트 그린플랜(10 point green plan)’을 2020년에 발표하였다.¹¹⁵⁾ 이 계획에는 녹색 산업 육성을 위해 약 48억 파운드의 공공-민간 투자를 통해 25만개의 일자리를 만드는 10가지 부문별 목표가 설정되어 있다.¹¹⁶⁾ 첫 번째의 해상풍력 계획에 이어, 두 번째로 수소에너지보급 확대 계획과 세 번째로

113) CSIS(2023.10.20.). “The Hydrogen Hubs Selection Sets off the Dawn of U.S. Hydrogen Economy”. (검색일: 2024. 05. 20).

114) CSIS(2023.10.20.). “The Hydrogen Hubs Selection Sets off the Dawn of U.S. Hydrogen Economy”. (검색일: 2024. 05. 20).

115) HM Government(2020a).

116) HM Government(2020a).

신규 및 차세대 원자력에 대한 계획이 제시되어 있다. 저탄소수소의 성장 촉진의 제목을 달고 있는 수소에너지 부문은 2.4억 파운드의 넷제로수소기금(Net-Zero Hydrogen Fund)을 조성하여 5GW의 수소 생산(수전해기) 설비를 보급하는 목표가 제시되어 있다. 해당 계획에 따라 2022년, 23년 4월 두 차례에 걸쳐 저탄소 수소 생산시설에 대한 경쟁 입찰을 시행했고, 선정된 사업자에 대해 차액지원방식으로 설비에 지원하였다¹¹⁷⁾. 원자력 부문에서도 정부 기금을 조성하여 디자인 설계와 차세대 원전의 R&D 프로그램에 지원을 계획하였고, 구체적으로 총 3억85백만 파운드의 차세대 원자력 기금(Advanced Nuclear Fund)을 이 중 2억15백만 파운드를 SMR 상용화 지원에 사용하고, 1억 7천만 파운드를 차세대 원자로(Advanced Modular Reactor) 연구개발에 지원하는 계획이다. 이러한 지원을 통해 원자력-수소 시장에서의 산업 경쟁력을 확보한다는 계획이다.¹¹⁸⁾

수소 연계 원전 사업에 대해서 영국 정부는 Heysham 2 원전을 활용한 수소 생산 실증사업 설계를 지원하였다. Heysham 2 원전¹¹⁹⁾(각 680MW, AGR 2기)에서 생산된 전기와 고온열을 SOEC 수전해 설비로 수소 생산 후, 영국 기업 Hanson의 Criggion 아스팔트 공장의 연료로 사용하는 Bay Hydrogen Hub-Hydrogen4Hanson 프로젝트에 610만 파운드(약 98억 원)를 지원하였다. 해당 컨소시엄은 SOEC 고온수전해 기술이 기존 양성자 교환막(PEM) 수전해와 비교해 수소 생산 효율을 20% 높일 것으로 전망하며, 향후 몇 달에 걸쳐 SOEC 설비에 대한 설계 작업을 진행하고 Heysham 2 원전에서 필요한 작업 범위와 비용을 검토할 예정이다.

일본 원자력 연구 개발기구(JAEA)는 ‘고온가스시험로(HTTR)’를 이용한 수소생산연구를 진행 개발 추진하여 2030년을 목표로 수소생산 요소기술 개발 추진 중이다.¹²⁰⁾ 이를 위해 후쿠시마 소재 HTTR을 재가동하여 연계된 천연가스-증기개질 수소를 개발 중이다. 일본은 정부의 2018년 성장전략 및 전략에너지 계획에 수소생산을 위한 고온가스로 개발이 포함되어 있고, 일본원자력연구원(JAEA)은 고온가스로형 시험로 HTTR을 활용한 수소생산 실증 연구를 수행하고 있다.¹²¹⁾ 일본 원자력연구원은 HTTR을 1996년에 건설하였고, 2010년에 세계 최초로 50일간 원자로 출구온도 950℃ 실증 운전 성공하여 초고온 운전성을 입증한 바 있다. 후쿠시마 사고로 운영이 중단된 HTTR 재가동 관련하여 일본 원자력규제기관 NRA의 승인을 2020년에 받았고,

117) 영국 정부 홈페이지.(2022.05.18.). Net Zero Hydrogen Fund strands 1 and 2: Round 2 (closed to applications). (검색일: 2024.05.20.)

118) 영국 정부 홈페이지.(2022.05.18.). Net Zero Hydrogen Fund strands 1 and 2: Round 2 (closed to applications). (검색일: 2024.05.20.)

119) Heysham 원전 부지는 별도로 관리되는 Heysham 1 원전(각 625MW, AGR 2기)과 Heysham 2 원전으로 구성되어 있음. Heysham 1·2 원전은 각각 1983년과 1988년에 상업운전을 시작하였으며, 2026년과 2028년에 영구정지를 앞두고 있으나 계속운전 가능성도 검토되고 있음

120) 일본경제산업성(METI)(2018). (검색일: 2024.05.20.)

121) 일본 내각부 원자력위원회(2022).; 일본 경제산업성(2021)

2021년에 재가동을 시작하였다. 현재 후쿠시마 사고로 지연된 고온가스로 안전성 검증 OECD/NEA 국제공동프로젝트를 수행하고 있고, 이후 미쓰비시社의 요청으로 HTTR과 천연가스-증기개질 수소생산 연계를 실증하는 연구를 2030년까지 완료할 계획이고, 주 활용 분야는 수소 환원 제철이다. 일본 간사이전력은 후쿠이현에서 운영 중인 다카하마·미하마·오이원전 총 7기에서 발전한 전력으로 생산한 수소를 원전의 냉각재로 다시 활용하는 실증을 2024년 3월 31일까지 진행한다. 실증 기간 중 간사이전력이 보유한 후쿠이현 내 7기에서 심야 등 저부하 때 발전한 잉여전력을 쓰루가시에 있는 수소스테이션인 'H2One 멀티 시스템'으로 보내고, 해당 시설에서 수전해 설비를 활용하여 생산한 수소 총 약 140kg을 다카하마·미하마·오이원전으로 수송해 발전기 냉각 등에 활용할 계획이다.

캐나다 Ontario 주 정부는 캐나다 원자력엔지니어링 기업 Kinectrics와 미국의 연료전지 제조기업 FuelCell Energy가 공동으로 진행 중인 원자력을 활용한 수소 생산 타당성 연구 지원을 위해 새로 설립된 수소혁신기금(Hydrogen Innovation Fund) 중 25만 캐나다 달러(약 2억 5,000만 원)를 지원할 예정이다.¹²²⁾ 이번 지원은 2023년 2월 Ontario 주 정부가 해당 주의 청정 전력 시스템에 수소를 통합 시키고 청정수소 활성화를 지원하기 위한 3년간 1,500만 캐나다 달러(약 147억 6,000만 원) 규모의 새로운 수소혁신기금에 선정된 프로젝트 일환이다. 1차로 6개 프로젝트에 대해 750만 캐나다 달러(약 73억 8,000만 원)가 지원되었으며, 해당 자금은 Ontario 주의 독립전력시스템운영자(IESO)가 관리한다.¹²³⁾ Bruce Power의 지원을 받는 Kinectrics와 FuelCell Energy의 이번 연구는 원자력을 활용한 수소 생산 가능성과 수소의 운송 능력과 청정 대체 연료로서의 역할에 대해 검증할 예정이다.¹²⁴⁾

나. 국내 원전수소 사업추진 사례

국내 유일 원전 사업자인 한국수력원자력은 현재 가동 중인 대형 원자로를 활용하여 저온 수전해 연계 청정수소생산을 추진하고 있다. 경북, 울주, 전남 지역의 원전 주변에서 생산되는 전기를 연계하여 연중 상시 청정수소생산이 가능하기 때문에 수요처 여건 등을 고려하여 사업지의 위치가 결정될 것으로 보인다. 대용량 상용 플랜트 구축 사업에는 수소 위해도 분석과 전력 계통 관련 분석이 실증 사업의 세부내용으로 포함되어 있다. 수소 위해도

122) The Governments of Ontario, New Brunswick, Alberta and Saskatchewan. 2022.03. 「A strategic Plan for the Deployment of Small Modular Reactors」

123) The Governments of Ontario, New Brunswick, Alberta and Saskatchewan. 2022.03. 「A strategic Plan for the Deployment of Small Modular Reactors」

124) The Governments of Ontario, New Brunswick, Alberta and Saskatchewan. 2022.03. 「A strategic Plan for the Deployment of Small Modular Reactors」

분석은 만에 하나 발생할지 모르는 수전해기 사고로 인해, 인접한 원전의 구조물, 계통 및 기기에 미칠 수 있는 안전성 영향을 분석하여 원전으로부터 수소생산 설비까지의 최소 이격거리를 산정하는 내용이다. 그리고, 특정 지역에 대용량 수전해 플랜트를 구축하였을 때, 그 지역 계통에 미치는 영향을 분석해서 원전의 전력계통 유연성 자원으로의 역할을 모색하고 최적으로 운영가능한 수전해 설비 용량을 산정한다는 계획이다.

<표 5-7> 한국수력원자력의 원전수소 기술개발 로드맵

연도	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
원자력 청정수소		사전 기획									
			기반 연구								
					MW 저온수전해 실증					상용 플랜트 구축, 운영	

- 기반연구 (총 사업비 약 50억 원, 2022년 4월부터 2024년 3월까지)
 - 부지조사, 수소 플랜트 설계, 원전 연계방안 분석, 안전 및 규제 요건 분석, 법, 제도 개선방안 도출 및 경제성 분석
- 실증 추진 (2024년부터~2028년)
 - 가동원전 연계 10MW 저온 수전해 수소 생산 실증

자료: 한국수력원자력(주)(2024. 04. 11). 원자력 청정수소 생산 기술 개발 발표자료. 바탕으로 저자 정리

위 실증사업과는 별도로 경상북도 울진에서 한국수력원자력은 울진군과 협력하여 향후 2030년까지 약 4천억 원의 투자로 158만m2 규모의 원자력 수소 국가산업단지를 조성할 예정이다. 현재 울진 지역에서는 모두 7기의 원전이 가동 중이고, 3기의 원전이 건설 중으로, 원자력을 활용한 고온 수전해 기술개발을 추진할 계획이다.

[그림 5-4] 대형 원자력 기반 청정수소생산 가능 지역



자료: 한국수력원자력(주) (2024. 04. 11). 원자력 청정수소 생산 기술 개발 발표자료, p.27.

<표 5-8> 대형 원전 기반 청정수소 생산가능 지역

원전 본부	지역	현황
한울	울진	7.3GW(운영)
		4.2GW(건설)
월성	경주	4.1GW(운영)
고리/새울	울주	7.35GW(운영)
		2.8GW(건설)
한빛	영광	5.9GW(운영)

자료: 한국수력원자력(주) (2024. 04. 11). “원자력 청정수소 생산 기술 개발” 발표자료 바탕으로 저자 작성

제2절

국내 원전 수소 경제성 분석

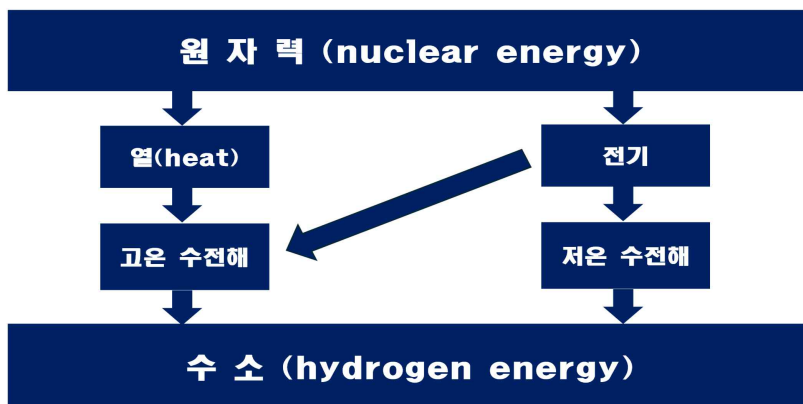


1. 원전 수소 생산의 경제성 분석

가. 경제성 분석 방법

본 절에서 현재 국내외에서 추진되고 있는 원전수소 및 수전해 관련 실증 프로젝트와 국내에서 추진되고 있는 원전기반 저온 수전해 기반 청정수소 실증사업을 고려하여, 국내 원전수소 생산에 활용될 가능성이 높은 대형 원자로에서의 수소 생산 단가를 산정한다. 분석 대상은 크게 대형 원자로의 경우, 알칼라인수전해(ALK)와 고분자전해질막수전해(PEM)의 저온 수전해기에 원전을 공급하여 수소를 생산하는 것과 고온수전해(SOEC)기에 연계하여 수소를 생산하는 경우로 나눈다. 생산 단가의 불확실성이 큰 중소형원자로 SMR의 경우에도, 두 개의 저온수전해 연계시와 고온수전해(SOEC) 연계하여 생산하는 원전수소 단가를 산정하였다.

[그림 5-5] 원자력 청정수소 - 경제성 분석 범위



수소 생산의 경제성은 생산 방식별 비용 수준을 동일한 기준으로 비교하기 위하여 균등화 수소 생산단가(Levelized Cost of Hydrogen, LCOH)를 적용하였다. 균등화 비용은 특정 기술 경로

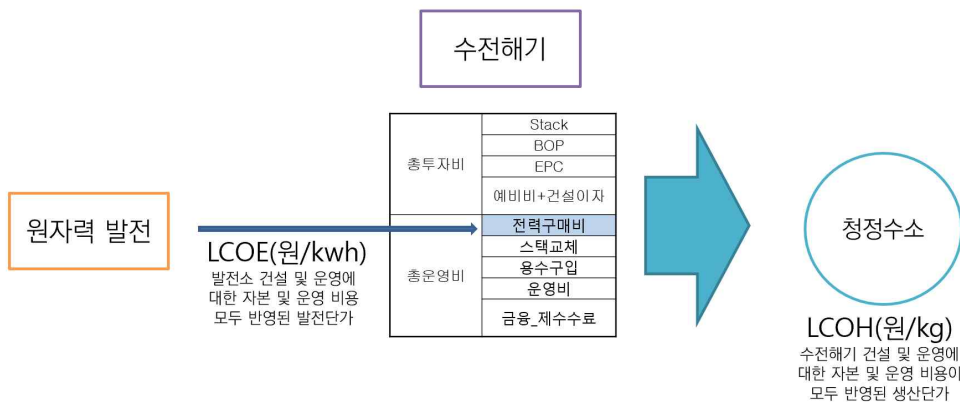
의 경제성을 정량적으로 평가하기 위해 사용하는 지표로 아래 수식과 같이 사업 공사 시작부터 운영하이 끝나는 기간(T) 동안 발생하는 총비용의 현재가치를 총 수소 생산량의 현재가치로 나눈 값으로 생산된 단위 수소 1kg 당의 비용을 분석한다.

$$LCOH = \frac{COST_0 + \sum_{t=1}^T \frac{COST_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{Q_t}{(1+r)^t}}$$

Q_t 는 t 연도의 수소생산량, $COST_t$ 는 t 연도에 발생하는 총 비용을 의미한다. T 은 수소생산설비의 수명 기간, 그리고 r 은 할인율을 나타낸다. $COST_0$ 은 0기에 발생하는 초기 투자비용 또는 고정비용으로 수소생산에 드는 투자비로써, 토지(임대)비, 건설비용 등을 포함한다.

본 분석에서는 전력원별 비용 비교를 위해 사용되는 균등화발전단가(Levelized Cost of Electricity, LCOE)를 수소 생산 비용($COST_t$) 중 운영비(OPEX)에 반영하여 균등화 수소 생산단가(LCOH)를 산정하는 방식으로 진행하였다. 이는 LCOE에 이미 발전소 건설 및 운영에 대한 자본비용과 운영비용이 모두 반영되어 있기 때문에, 원자력 발전에 대한 LCOE가 대형 원전과 SMR 등 기술 성숙도와 규모, 투자비 등이 다른 발전원 간의 비용 비교에 적합한 지표라고 판단했기 때문이다.

[그림 5-6] 원자력 청정수소 생산 단가 산정 과정



나. 원전 수소 경제성 분석 기본 가정

수전해기의 설비용량은 100MW로 설정하였다. 이 수전해기의 Stack 가격과 BOP 가격을 포

합하는 시스템 가격은 IEA(2019)에서 제시하는 2030년 CAPEX 전망치의 중간 값을 사용하였고, 이를 건설하는 비용은 BNEF (2023)에서, 예비비는 총사업비의 5%로 설정하였다. 총사업비 조달은 30%는 자기자본, 70%는 타인자본으로 조달하는 것을 가정하였고, 타인자본 중 선순위 차입 이율은 6%, 후순위 차입 이율은 8%로 가정하였다. 전력구매비와 용수구입비는 각 기술별로 필요한 연간 전력량과 용수량을 산정하였고, 그 외 운영비를 총사업비의 3% 수준으로 책정하였다. 이때 대형원전과 SMR에서 공급받는 전력에 대한 발전단가는 총 운영비 중 전력구매비에 반영하였다. 수전해 스택교체비는 수전해기 스택 비용의 40%를 설정하고, 10년 동안 감가상각이 되는 것으로 가정하였다.

<표 5-9> 원전 수소생산단가 추정을 위한 비용 항목

수전해		항목
경제성 분석	총 투자비	Stack 가격
		BOP 가격
		EPC 가격
		예비비(5%) + 건설이자
	총 운영비	전력구매비
		스택교체비
		용수구입비
		운영비
		금융 제 수수료

수전해기 유형별로 설비비용, 효율, 용수사용량, 수소생산량 등이 상이하므로 이에 따라 동일 용량의 수전해기라도 수소 생산단가에 차이가 발생할 수 있다.

<표 5-10> 원전 수소생산단가 추정을 위한 기본 가정

구분	ALK 수전해	PEM 수전해	SOEC 수전해
규모	100MW	100MW	100MW
Stack 자본비용	\$625/KWe	\$1,075/KWe	\$1,800/KWe
EPC 비용	\$216/KWe	\$205/KWe	\$205/KWe
수명	20년	20년	20년
스택효율	65%	63%	77%
capacity factor	90%	90%	90%
전력소비량	788,400 MWh	788,400 MWh	788,400 MWh
BOP 전력소비량 (스택 전력소비의 10%)	78,840 MWh	78,840 MWh	78,840 MWh
용수사용량	310,582 톤	195,667	150,970

	(수소생산량의 20배)	(수소생산량의 13배)	(수소생산량의 9배)
수소생산량	15,529 톤	15,051톤	16,774 톤
용수구입비	795원/톤	795원/톤	795원/톤
산소판매비	100원/kg	100원/kg	100원/kg

자료: IEA(2019), BNEF(2023) 등을 바탕으로 저자 정리

다. 경제성 분석 결과

2019년부터 2023년의 5년간 대형원전의 경우 전기 1kWh당 평균적으로 56.3원을 정산 받았다.¹²⁵⁾ 이를 평균적인 원전의 전기 생산 비용에 근접하다고 가정할 경우, 이 수치를 일반적인 대형 원전의 공급 전기의 비용(생산단가)으로 가정할 수 있다. SMR 중소형원자로에서 생산되는 전기의 경우에도, 각 개발사가 목표로 하고 있는 전력 생산단가가 공표되고 있지만, 이를 생산하고 있는 사례가 없다. 이렇게 불확실성이 높은 SMR 중소형 원자로의 경우, 시장 진입을 가정하고 가격의 범위를 가정할 수 있을 것이다. 최대한 재생에너지 수준으로 가격이 형성되지 않으면 시장에서 경쟁할 수 없고, 경제성이 좋은 대형 원전 정도까지 높은 효율로 시장에 경쟁할 경우, SMR은 전력시장에서 대형 원전과 경쟁할 수 있을 것이다. 따라서, SMR의 전기 생산 가격은 대형 원전 가격을 최소치로 가정하고 국내 태양광 발전 단가를 최대치로 설정하고, 경제성 분석을 진행하였다.

100MW 수전해기 설비의 2030년 56원 수준의 전기를 공급받아 연간 90%의 이용률을 보일 경우, 알카라인 수전해는 5,237원, PEM 수전해는 5,395원, 고온열을 사용하지 못하는 고온수전해는 5,873원으로 단위 가격으로 분석된다.

<표 5-11> 원전 수소 생산 방식에 따른 경제성

수전해		저온(ALK)	저온(PEM)	고온(SOEC)
원자로		대형, 중소형 SMR		
경제성 분석	LCOE (전력)	56.3원/kWh		
	LCOH (수소)	5,237원/kg	5,395원/kg	5,873원/kg

수전해 과정에서 수소와 수소의 8배에 해당하는 산소가 함께 발생되기 때문에 산소를 판매할 수 있는 수요처가 인근에 있는 경우에 이러한 생산단가를 낮추는 방향으로 작동할 수 있다. 생산되는 산소를 최대한 판매할 수 있는 경우, 수소 1kg 당 797.1원 정도까지 단가를 낮출 수 있다.

125) EPSIS (전력통계정보시스템) (검색일: 2024.05.20.) 제공 자료 바탕으로 저자 계산

즉, 수소를 생산하는 원전사업자가 수소 외 발생하는 부산물 판매를 고려하여 비즈니스 모델을 설계 한다면 경제성 확보에 용이하다는 것을 시사한다.

<표 5-12> 원전 수소 생산 방식에 따른 경제성 - 산소 판매 시나리오

수전해		저온(ALK)	저온(PEM)	고온(SOEC)
원자로		대형, 중소형 SMR		
경제성 분석	LCOE (전력)	56.3원/kWh		
	LCOH (수소)	4,439원/kg	4,598원/kg	5,076원/kg

그러나 실제로 가동 원전에 수소 설비를 설치할 경우, 원전에서 생산된 전기는 전력시장으로 먼저 공급 되었다가 전력시장에서 다시 수전해기로 공급되는 구조이다. 즉, 원전에서 수소를 생산 할 때 원자로에서 직접 수전해기로 전력을 공급하는 전력공급선이 따로 마련되어있지 않는 경우 수전해기는 이미 연결된 국내 전력망에서 전력을 공급받게 된다. 이 경우 해당 전력 공급량에 대해서는 산업용 요금(을)을 적용받게 된다. 전력망에서 전력을 공급받기 때문에 100%의 부하율로 꾸준히 운영하여 이용률 100%를 달성할 수 있지만, 최대부하 시간의 높은 전기요금을 고려하면 이는 바람직한 운영 방식은 아니다. 실제로 경부하 시간대와 중간부하 시간대에는 100% 부하율을 최대부하 시간대에는 60% 부하율로 운영하여 최대부하 시간대의 전기요금 부담을 낮추는 방식의 운영이 더 낮은 생산비용을 보여 이를 기준으로 삼았다. 이 경우 가중평균 전기요금은 136.4원/kWh이며, 평균 90%의 이용률을 보인다.¹²⁶⁾ 참고로 전기 사용량에 관계없이 월 9,810 원/kW의 기본요금을 적용하였다.

<표 5-13> 산업용전력(을) 전기요금표

구분	기본요금	전력량 요금 (원/kWh)				
		시간대	여름철(6~8월)	봄·가을철 (3~5, 9~10월)	겨울철(11~2월)	
고압A	선택 I	7,220	경부하	99.5	99.5	106.5
			중간부하	152.4	122	152.6
			최대부하	234.5	152.7	210.1
	선택 II	8,320	경부하	94	94	101

126) {10시간(경부하)×100% + 8시간(중부하) ×100% + 6시간(최대부하)×60% } /24시간 = 90% 이용률

	선택Ⅲ	9,810	중간부하	146.9	116.5	147.1
			최대부하	229	147.2	204.6
			경부하	93.1	93.1	100.4
			중간부하	149.3	115.2	146.5
			최대부하	216.6	138.9	193.4

자료: 한전ON(2024. 04. 01) 전기요금표 (<https://online.kepco.co.kr/PRM004D00>). 바탕으로 저자 정리

<표 5-14> 원전 수소 LCOH _ 산업용 전기요금: 산업용 전기요금 적용 시

수전해		저온(ALK)	저온(PEM)	고온(SOEC)
원전		대형, 중소형 SMR		
경제성 분석	LCOE (전력)	136.4원/kWh		
	LCOH (수소)	9,076원/kg	9,381원/kg	9,368원/kg

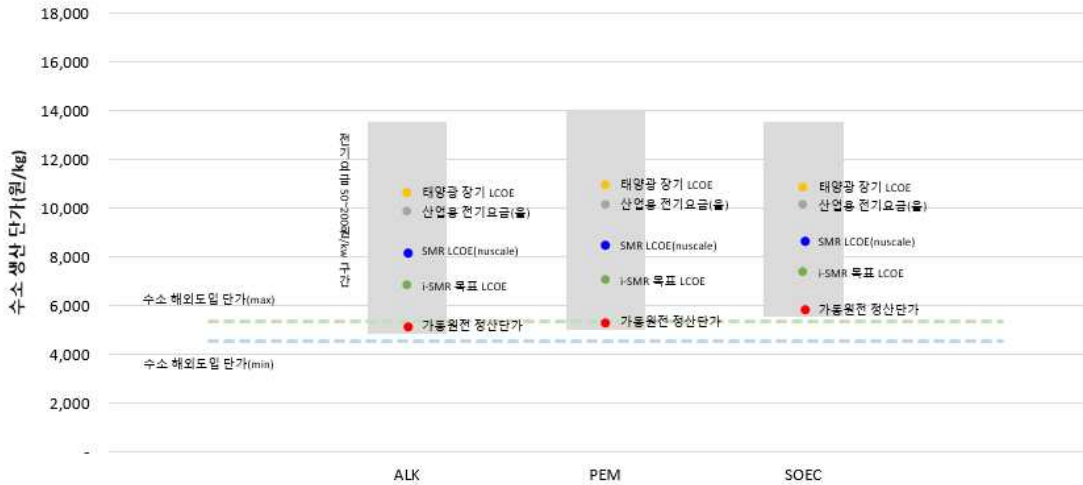
자료: 분석결과 바탕으로 저자 작성

이렇듯 수전해기에 공급되는 전기 가격이 청정수소 생산 단가의 중요한 요인임을 알 수 있다. 이에 다양한 전기 가격 시나리오를 설정하여, 생산단가를 분석하였다. [그림 5-7]에서는 가동원전의 정산단가를 최소화, 태양광 전기의 LCOE를 최대치로 가정하여, iSMR의 목표 생산단가인 84.5원, Nuscale의 생산단가로 추정되는 108.3원, 산업용(을)의 전기요금 136.4원을 가정하였을 때, 수소 생산 단가를 보여준다.

수소 해외도입 단가는 안지영·이태의(2023)에서 추정된 수치를 활용하여 국내 사용될 해외도입 청정수소 가격의 추정치를 계산하였다. 현재 해외에서 청정수소를 도입하기 위해서는 암모니아를 사용하기 때문에 이를 청정암모니아 도입하여 수소 형태로 분해하는(암모니아-수소 크래킹) 과정을 거쳐 사용하는 것으로 가정하였다. 구체적으로 청정암모니아 도입가격에 수소 크래킹 전환비용(\$0.8/kg-H₂, IHS markit추정)을 추가하였다¹²⁷⁾. 해외 도입단가는 해외에서 청정암모니아를 생산하고 수출터미널을 통해 수출, 항만을 통해 경로로 운송하여 수입 항만에서 도입하는 비용을 포함하고 있다. 청정암모니아를 생산하는 국가와 수입량은 사우디, 미국, 호주에서 각각 블루암모니아 200만 톤, 블루암모니아 200만 톤, 그린암모니아 100만 톤이다. 아래 그림의 수소 해외도입가는 이들 가격의 범위로 2030년 기준 수소 1kg당 4,581원에서 5,380원으로 산정되었다.

127) 암모니아 크래킹 비용에 대한 실제 비용 사례가 없어서, 해외 기관 추정치를 활용하였다.

[그림 5-7] 전기요금에 따른 원자력 청정수소 생산 단가



<표 5-15> 전기요금에 따른 원자력 청정수소 생산 단가 - 90% 이용률 기준

	전기요금	ALK	PEM	SOEC
가동원전 정산단가	56	5,237	5,395	5,873
i-SMR 목표 LCOE	85	6,870	7,080	7,385
SMR LCOE(Nuscale)	108	8,252	8,505	8,664
산업용 전기요금(을)	136	9,873	10,178	10,166
태양광 장기 LCOE	150	10,663	10,993	10,897

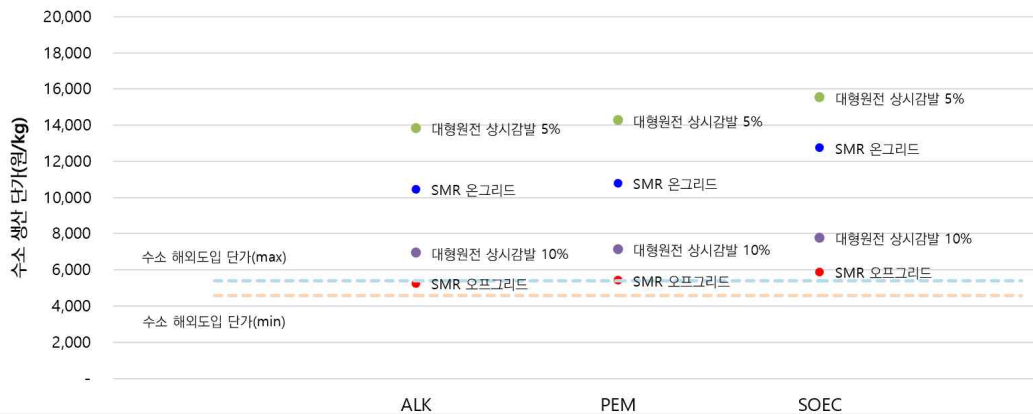
자료: 분석결과 바탕으로 저자 작성

분석결과에 따르면, 가동원전의 정산단가가 적용되지 않는 한 해외에서 도입되는 청정수소와 비교했을 때 국내 원전수소가 가격경쟁력을 갖추기 어려운 것으로 확인되었다. 많은 선행연구에서 원전 수소의 유용성에 대해 언급하며 낮은 생산 단가를 꼽고 있다. 그러나 낮은 수소 생산 단가는 원전의 낮은 발전 단가가 수소 생산 단가에 충분히 반영 될 때만 가능한 것을 확인할 수 있었다. 현재 산업용 전기요금(을)을 적용하여 수소 생산 하는 경우 태양광 장기 LCOE를 적용하였을 때와 유사하게 높은 수소 생산단가를 보였으며, 이는 해외도입 청정수소 가격의 약 2배에 해당 할 정도로 높은 가격 수준이다. SMR을 활용하여 수소를 생산하는 경우 초기투자비용을 고려할 때 현재 가동원전의 LCOE 보다 높은 수준으로 LCOE가 산정될 것이 자명하다. 본 분석에서는 우리나라의 혁신형 SMR과 미국의 Nuscale에서 제시한 목표가를 활용하였음에도 6,870원~8,664원으로 높은 수소 생산 단가가 산정되었다. 향후 SMR이 목표가와 근접한 수준으로 LCOE를 낮추는 데까지 계획보다 오랜 시간이 소요된다면, SMR 수소 생산에 대한 경제적 이점이 크지 않을 것

으로 판단된다.

만일 공급되는 전기 가격을 대형 원전 수준인 56.3원으로 설정하더라도, 수전해기의 이용률 수준, 즉 전기가 하루 동안 설비용량에 맞춰 공급되는지 여부에 따라 수소의 생산단가에 큰 영향을 미친다. 수전해기로 공급되는 전력량이 많을수록 수전해기 가동 효율 및 규모의 경제로 인해 수소 생산단가가 낮아질 것이다. 이에 전기 가격을 고정하고, 원전의 이용률을 변화시키며 수소 생산단가를 비교해 보았다. [그림 5-8]은 대형원전의 5% 상시 감발, 계통에 연계된 SMR, 대형원전 10% 상시 감발, 계통 미연계 SMR 전기 공급의 경우, 청정수소 생산단가를 각 기술별로 비교한 것이다.

[그림 5-8] 이용률에 따른 원자력 청정수소 생산 단가



자료: 분석결과 바탕으로 저자 작성

여기서 대형원전의 설비용량은 1GW로 설정되어 있다. SMR 온그리드의 경우, 계통에 SMR로 생산된 전기를 보내기도 하고 나머지 전기를 수소 생산에 활용하는 가정이다. 오프그리드 SMR은 계통에 전기를 보낼 수 없으므로, 수소 생산에 전기를 최대한 보낼 수 있어, 이용률이 가장 높은 시나리오다. 수소 해외도입 단가 계산은 [그림 5-7]에서 산정된 수치와 같은 수치를 사용한다. 분석 결과, 이용률이 미치는 영향은 전기 투입 가격과 비슷한 수준으로 중요하다.

<표 5-16> 이용률에 따른 원자력 청정수소 생산 단가 - 원전 정산단가 기준

	이용률	ALK	PEM	SOEC
대형원전 상시감발 5%	34%	13,826	14,257	15,531
SMR 온그리드	45%	10,452	10,775	12,737
대형원전 상시감발 10%	68%	6,924	7,136	7,770
SMR 오프그리드	90%	5,237	5,395	5,873

자료: 분석결과 바탕으로 저자 작성

이용률이 34% 수준인 대형원전 5% 상시 감발의 경우와, 이용률이 45%인 SMR 온그리드의 경우, 수소생산단가가 10,000원 이상으로 높아진다. 이는 대형원전의 불규칙한 감발 요청에 대응한 전력 공급으로는 턱없이 부족한 이용률을 보일 것이며, 일정수준의 꾸준한 전력 공급의 뒷받침이 없이는 원전수소의 경제성은 보장되기 어려움을 의미한다. 재생에너지 보급이 확대되어 가동 중인 원전도 상시 감발이 가능한 경우 상시 감발량이 14.7% 이상 되어야 해외도입 청정수소와의 가격경쟁력이 확보될 것으로 예상된다. 혹은 SMR과 같이 수소 전용 원자력 발전원이 활용되어 수전해기 이용률이 90% 이상 확보되었을 때 경제성 있는 국내 청정수소 생산이 가능할 것이다.

물론 국내 청정수소는 해외 청정수소와 가격 측면에서만 경쟁력을 비교할 수는 없다. 국내 에너지 안보 및 산업 기여도 등을 고려할 때 국내 청정수소가 해외 도입 청정수소에 비해 높은 생산 단가를 보이더라도 정책적 지원을 통해 충분히 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

수소생산단가를 구성 요인 별로 차지하는 비중으로 나눠보았을 때, 수전해기 유형에 관계없이 전력구매비가 50% 이상을 차지하여 가장 큰 비중을 차지한다. Stack 가격이 비싼 SOEC의 경우 약 10%의 비용을 차지하고, BOP와 EPC 비용을 모두 고려할 경우 알칼라인은 약 10% 수준, PEM은 13%, SOEC는 약 20% 수준이다. 이는 수전해기의 기술개발이 완료되는 시점이 되어 Stack 및 BOP 가격이 하락하게 되면 전체 수소 비용에서 차지하는 비중이 크지 않을 수 있음을 알 수 있다. 관련 제 비용을 줄이는 것도 생산 비용 저감의 한 요인이 될 것으로 보인다. 또한 수전해 설비의 대규모화를 통해서도 비용을 절감할 수 있을 것이다. 스택 규모가 커짐에 따라서 기타 보조기기나 건설비 등 부수적인 비용도 함께 증가할 수 있지만 규모의 경제 및 시스템 효율 개선 등을 통해 이러한 비용 증가가 선형적으로 나타나지는 않을 것으로 예상된다.

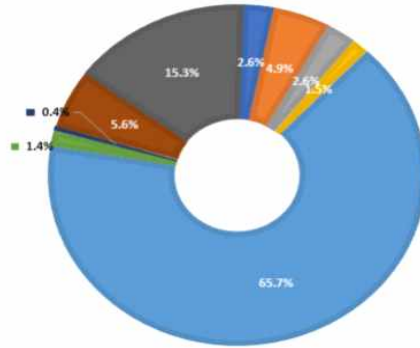
<표 5-17> 균등화 수소 생산단가 비용구조(단위: 원/kgH₂)

	항목	ALK	PEM	SOEC
총사업비	Stack	136	229	537
	BOP	254	428	450
	EPC	135	125	112
	예비비	77	89	99
총운영비	전력구매비	3,440	3,364	3,018
	스택교체	75	74	173
	용수구입	23	14	10
	운영비	292	286	611
	금융비용(제수수료)	804	786	862
균등화 수소생산 단가		5,237	5,395	5,873

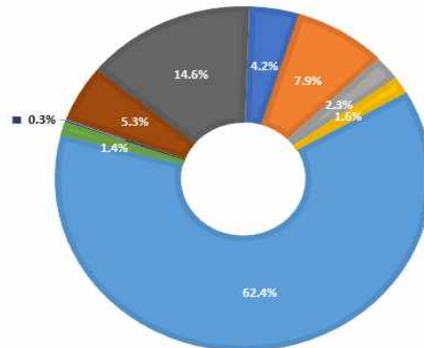
자료: 분석결과 바탕으로 저자 작성

[그림 5-9] 수소생산비용의 항목별 구성비

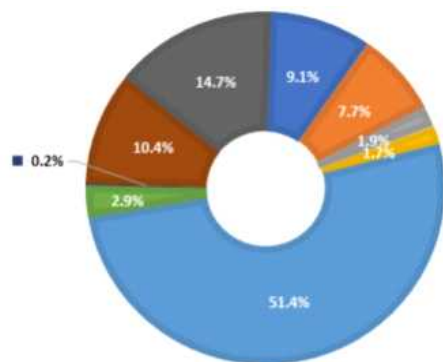
<알칼라인 수전해>



<PEM 수전해>



<SOEC 수전해>



- Stack
- BOP
- EPC
- 예비비
- 전력구매비
- 스택교체
- 용수구입
- 운영비
- 금용비용(채수수료)

자료: 분석결과 바탕으로 저자 작성

2. 원전 수소 시장 및 밸류체인 전망

가. 시장 규모 전망

2030년 국내 수소 생산량 크기에 따라 원전 수소 시장을 산정해볼 수 있다. 국내의 2030년 청정수소 시장 크기를 각각 10만 톤, 20만 톤, 30만 톤으로 가정하면 필요한 전력량과 수전해기 용량을 다음과 같이 산정할 수 있다. 90% 이용률을 가정한 수전해기 설비의 필요설비량은 10만 톤 시장인 경우 총 5,585GWh이고, 이는 2023년도 총 발전량의 약 0.89%에 해당한다. 이를 원전에서 90%의 이용률로 공급한다면 약 708MW의 설비가 필요하다. 필요한 전력을 SMR 원전에서 100% 조달하는 경우, 신규 SMR 시장이 약 3조원 규모로 형성될 것이다.

한편, 신규 SMR 시장이 확대되는 것에 대한 산업 파급효과에 대해서는 조금 더 심도 깊은 고찰이 필요하다. 앞서 설명하였듯이 SMR은 공장에서 모듈형으로 제작되기 때문에 SMR 발전소를 하나 건설하는데 연관된 협력업체가 많지 않을 수 있다. 하나의 대형 SMR 파운더리 제작사의 공장에서 핵에너지를 전기에너지로 전환하는 일련의 과정에 따른 설비들을 한 번에 제작하여 공급하는 형태가 될 것이다. 즉, 기존의 대형원전에서 단계별 설비 구축과 건설 과정으로 인해 많은 연관 산업으로의 파급효과가 발생했던 것과 달리 SMR의 경우 고도화된 기계 제작이 가능한 하나의 기업에서 일괄 생산에 발전소로 바로 납품하는 형태로 산업 생태계가 조성될 가능성이 있다. SMR은 일체형 설계로 시공의 비중이 감소한 반면, 제작에 필요한 기자재 크기가 커지고 복잡해질 뿐만 아니라 더 짧은 납기가 요구되어 제작 경쟁력이 있는 소수의 기업만이 SMR을 생산하고 공급할 것으로 전망된다. 이는 SMR 설비에 대한 후방 산업 효과가 상대적으로 짧게 나타날 수 있음을 시사한다. 또한 상대적으로 작아진 규모와 높아진 안정성으로 인해 관리 인력에 대한 수요도 줄어들 가능성이 있어 동일한 규모의 대형원전에 비해 고용파급효과도 적을 수 있다.

그러나 이것이 대형원전에서 차세대 원전으로 에너지 시스템이 변화하여 전체 산업이 축소되고 고용이 감소할 수 있다는 의미는 아니다. 앞으로 수소 활용 혹은 기타 목적으로 신규 SMR 시장이 확대되면, SMR 활용처 자체가 확대될 것이다. 즉, 동일 규모의 대형원전과 SMR의 경제적 파급효과를 비교하기 보다는 대형원전 보다 훨씬 커진 시장 규모의 SMR의 경제적 파급효과에 주목해야할 것이다. 향후 SMR 기반의 청정수소 시장이 20만 톤과 30만 톤으로 증가할수록 신규 SMR 시장 크기도 확대될 것이다.

<표 5-18> 2030년 수소시장 크기

수소시장크기 (만 톤)	필요전력 (GWh)	총발전량 대비 비중	필요 수전해 설비량(MW) 90% 이용률 가정 시
10	5,584	0.89%	708
20	11,169	1.79%	1,417
30	16,753	2.68%	2,125

자료: 분석결과 바탕으로 저자 작성

또한, 원전 및 SMR 수소 생산의 확대는 국내 수전해 산업에 대한 시장 규모도 증가시키는 효과가 있다. 예를 들어 국내 수소 시장이 10만 톤에서 30만 톤으로 형성될 경우, 수전해기 시장을 알칼라인 기술이 100% 차지한다고 가정하면, 수전해기, BOP와 EPC를 포함하는 청정 수소 시장은 6,500억에서 약 2조 시장이 형성될 것으로 보인다. 2030년 수전해기 시장이 알칼라인, PEM, SOEC 각각 45%, 45%, 10% 시장을 차지한다고 가정할 경우, 9천억(10만 톤), 1조8천억(20만 톤), 2조7천억(30만 톤)의 시장 크기를 추정해 볼 수 있다.

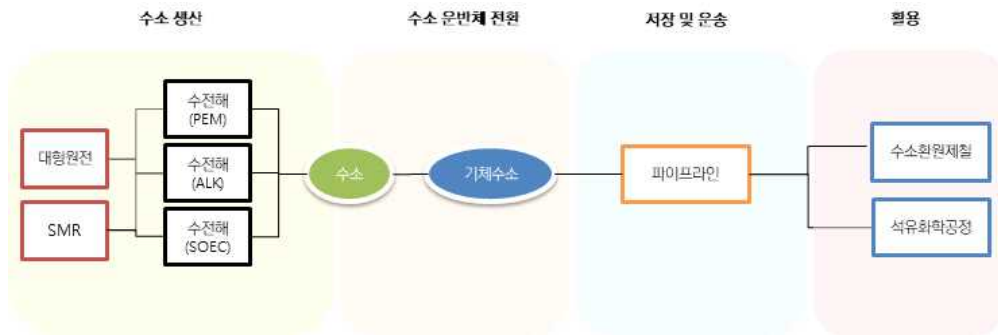
나. 원전 수소 밸류체인 전망

「제 10차 전력수급 기본계획」에 따르면 2030년 총 발전량 621TWh에서 수소 혼소발전량은 6.1TWh로 계획되어 있다. 6.1TWh 수소 혼소 발전을 위해 필요한 청정수소는 약 29만 톤 규모로 이를 국내에서 수전해로 생산하여 모두 조달하기 위해서는 약 1.6TWh의 전력수요가 발생함을 의미한다. 1.6TWh의 전력으로 생산된 수소가 청정수소로 인증 받기 위해서는 1.6TWh의 전력이 대부분 무탄소 전원 혹은 재생에너지 발전원에 기인해야한다는 점을 고려할 때, 발전용 수소 수요를 국내 생산으로 감당하기에는 국내 총 전력 수요에 미치지 될 부담이 매우 높을 수 있다.

또한 수소 혼소발전기는 전력 수요에 따라 응동 전원으로 사용된다. 즉, 수소 수요가 고정적으로 발생하지 않고 전력 시장의 수급상황에 따라 변동적으로 발생한다는 의미이다. 이는 안정적 전력 공급을 통해 꾸준한 수소 생산이 가능한 원전 수소와 발전용 수소 수요를 연계하는 것은 바람직하지 않음을 시사한다. 원자력 발전은 재생에너지 발전과 달리 일정 수준의 부하를 지속적으로 줄 수 있기 때문에, 지속적으로 수소 수요가 발생하는 수요처로 수소를 판매하는 것이 가장 적합할 것이다. 국내 수소 활용처 중 고정적인 수요를 창출 할 수 있는 부문은 산업부문 뿐이다. 철강 산업이나 석유화학산업의 경우 24시간 가동되는 산업 시설을 보유하고 있어, 상시적으로 생산되는 청정수소를 소비할 수 있다. 이에 원전 수소는 대부분 산업 단지로 공급되어 산업 부문의 온실가스 감축을 위해 활용될 가능성이 크다.

단, 상시 생산-소비를 가능케 하려면 청정수소 생산 설비와 청정수소 소비 설비가 파이프라인으로 연결되어 있어야 한다. 즉, 청정수소를 생산하는 원전에서부터 청정수소를 소비해야하는 산업 단지까지 배관을 건설하여 수소 유통 체계를 갖추어야 할 것이다. 이에 원전수소 밸류체인은 [그림 5-10]과 같이 구성될 것으로 예상된다.

[그림 5-10] 원전수소 밸류체인 전망



자료: 저자작성

원전에서 생산된 수소를 산업단지에 공급하기 위해 배관을 건설해야 한다는 점은 수소 생산이 가능한 가동 원전은 산업단지 인근에 위치하는 원전에 한정된다는 것을 의미한다. 즉, 제철소가 있는 포항과 광양, 석유화학단지가 있는 울산, 여수 등 지역 인근에 위치하며, 배관 건설에 어려움이 없는 지역에 한정하여 가동원전 기반의 수소 생산 밸류체인이 구축될 가능성이 크다. SMR의 경우 대형원전에 비해 입지제약이 적다는 점에서 보다 다양한 지역에서 밸류체인이 구축될 가능성이 있지만, SMR 수소의 경우에도 지속적인 수요처를 확보하는 것이 효율성 및 경제성 확보에 유리할 것이다. 다만 SMR의 경우 규모가 작기 때문에 수소 수요가 있는 산업단지 내에 직접적으로 입지 가능하고, 모듈형 생산 설비를 통해 수소 생산량을 상대적으로 조절할 수 있다는 장점이 있으므로 보다 대형원전 보다 다양한 형태로 밸류체인의 하류 부문이 구축 될 수 있을 것이다.

제3절 소결



본 장에서는 원전 및 SMR을 수소 생산 목적으로 활용하는 것에 대한 가능성과 타당성을 분석하였다. 국내 수소경제 기반 확대와 에너지 안보 달성을 위해 국내에서 생산 가능한 원전 수소 생산을 확대할 필요가 있다. 원전 수소는 국내에서 대규모로 생산 가능하여 해외 수입에 의존하는 청정수소의 양을 대체함으로써 에너지 자립도를 제고하는데 기여할 수 있다. 또한 국내의 수전해 기술력을 제고하고 산업 생태계를 조성함에 있어서 원전은 재생에너지 여건이 좋지 않은 우리나라에서 수전해 산업을 활성화 시키는데 강력한 드라이브를 걸 수 있을 것이라 생각된다.

특히 중소형원자로(SMR)를 활용하는 경우 대형원전을 활용하는 것과 다른 새로운 편익이 발생하기도 한다. SMR은 대형원전에 비해 입지제약이 적고 모듈화 설치가 가능하다는 점에서 국내에서 분산형 전원으로서의 역할이 클 것으로 예상된다. 이를 활용하여 수소생산 목적의 SMR 건설 및 운영의 유용성도 있을 것이라 생각된다. 오프그리드 지역에 전력, 열, 수소 등 다양한 에너지를 모두 공급하기 위한 에너지자원으로 SMR은 아주 적합한 대안이 될 것이다. 또한, 청정수소 인증제에서 수소 생산용 전력공급원에 대한 추가성 조건이 강화될 경우 대형 원전 보다는 SMR에 연계한 형태로 국내 청정수소 생산 기반이 확충되어야 한다는 점은 우리가 아직까지는 상용화 되지 않은 SMR과 또 그것과 연계한 수소 생산의 가능성에 대해 계속 관심을 가져야 한다는 것을 시사한다.

본 장에서는 원전 및 SMR을 활용해 수소를 생산하는 경우 경제성이 확보될 수 있는가에 대한 분석도 진행하였다. 분석결과 원전 수소가 우리가 예상한 것만큼 저렴한 수소 생산단가를 보장하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 현재로서는 국내 수많은 발전원 중 기저발전원인 대형원전이 가장 낮은 발전단가를 보여주고 있기 때문에 원전으로 수소를 생산하는 경우 낮은 생산단가로 대규모 청정수소를 생산할 수 있을 것이라고 기대된다. 그러나 본 연구의 분석에 따르면 국내 원전 생산단가를 적용하여 생산하는 경우에만 해외에서 도입되는 청정수소와 가격경쟁력이 있는 수준이고, 현재 제도에 따라 원전 직접연계가 아닌 그리드 전력을 수전 받아 수소를 생산하는 경우에는 재생에너지 수전해 수소와 경제성 측면에서 크게 차이하지 않음을 확인하였다.

한편으로는 국내 청정수소 경제성 확보를 위해 수소 생산 목적의 전력 투입에 대한 가격지원이 가장 효과적일 것이라는 시사점을 얻을 수 있었다. 원전 수소 생산에 투입되는 전력을 소내전력으로

로 인정하여 정산단가로 전기요금을 책정하거나, 이에 상응하는 수준의 전기 가격 체계를 갖출 수 있도록 지원이 필요할 것이다.

이렇게 원전 전력을 정산단가 수준으로 낮게 확보할 수 있는 시장거래 매커니즘 등을 마련함으로써 낮은 수소 생산단가를 달성할 수 있을 것이다. 낮은 수소 생산단가는 원전수소 밸류체인의 하류 부문에서 어떤 안정적인 수요처가 탄생할 것인가를 결정짓는다. 대부분의 원전 수소는 산업 단지에서 소비되는 것이 가장 적절 할 것이라고 판단된다. 그러나 산업부문에서는 청정수소 생산 단가가 높으면 높을수록 에너지 전환의 수단으로 수소를 활용할 유인이 적어진다. 높은 청정수소 가격은 산업계가 연료 및 원료 전환을 수소로 하는 것을 꺼리게 만들 것이다. 더욱이 아직까지는 EU의 CBAM과 같은 통상규제가 산업공정에서 발생하는 직접 배출에 국한되기 때문에 수소환원 제철 등 산업공정에서 소비되는 수소가 반드시 청정수소여야 하는 것은 아니다. 이에 원전 수소가 충분한 경제성을 확보하여 산업부문에서 원전과 연계하여 수소 공급망이 구축될 수 있도록 원전 수소 가격에 대한 지원제도 마련이 시급할 것이다.



결론 및 정책적 시사점



제1절

원전-수소 연계 신산업 생태계 조성을 위한 선결과제



1. 원전 수소 경제성 확보 및 산업 생태계 조성을 위한 정책 과제

가. 원전 전력 활용의 유연성 확보

우리나라는 전기사업법에 의거하여 전력수요자와 전력공급자 간의 전력구매계약(PPA)을 허용하고 있다. 특히 재생에너지 사용을 확대하기 위해 재생에너지 공급자와 재생에너지 수요자 간의 직접 PPA를 허용하고 있다.¹²⁸⁾ 그러나 현행법상 PPA가 가능한 전력은 재생에너지에 한정되어 있다. 즉, 원전에서 생산한 전력은 PPA 대상이 아니기 때문에 원전에서 생산된 전기를 외부로 내보내 수소를 생산하는 것에 대해 발전사업자가 직접 수소 생산을 하지 않는 한 새로운 비즈니스 모델이 창출되기 힘든 상황이다.

<표 6-1> 직접 PPA 주요 내용

구분	내용	비고
재생에너지 전기공급사업 신설	“재생에너지전기공급사업”이란 재생에너지(태양에너지, 풍력 등)를 이용하여 생산한 전기를 전기사용자에게 공급하는 것을 주된 목적으로 하는 사업을 말함.	전기사업법 제2조
재생에너지 전기공급사업 등록	재생에너지공급사업을 하려는 자는 산업통상자원부장관에게 등록해야 함.	전기사업법 제7조의 2
직접PPA	-재생에너지전기공급사업자는 재생에너지를 이용하여 생산한 전기사용자에게 직접 판매 가능 -신재생에너지 공급인증서 발급 불가	전기사업법 제16조의 5

자료: 「전기사업법」 바탕으로 저자 정리

원전사업자가 직접 수소 생산을 하는 경우에도 현재 운영 중인 설비는 대부분 원자로에서 생산된 전기를 전력거래소를 통해 전력시장에 우선 공급했다가 다시 수전 받아서 수소를 생산해야 하는 구조이다. 즉, 원전 수소 생산을 위해 공급되는 전력은 원전 내 소내전력으로 인정되지 않는다

128) 「전기사업법」

는 의미이다. 원전에서 수전해기로 전력을 공급할 때 전력인출점이 전력량계 전인지 후인지에 따라 소내전력 여부가 결정 되는데 현재 가동 중인 대형원전에 수전해 설비를 추가하려면 전력인출을 전력량계를 지난 이후에 해야 하기 때문에 이러한 문제가 발생하는 것이다. 이로 인해 지금의 설비와 제도에서는 전력시장에서 도매가격인 정산단가로 무탄소 에너지인 원전 전력을 판매하고, 소매가격인 산업용 전기요금으로 그리드 전력을 구매해서 수소를 생산하게 된다. 이 경우 높은 전기요금으로 인해 수소 생산 단가가 증가할 뿐만 아니라 수전해기 투입 전력이 그리드를 통해서 공급되었기 때문에 현행 청정수소 인증제에서 청정수소로 인증 받을 수 없다. 그리드 전력으로 수소를 생산하는 경우, 수소 1kg 당 20kgCO₂eq 이상의 온실가스 배출이 있는 것으로 간주 된다.¹²⁹⁾

이에 원전 전력을 무탄소 전력으로 인정하고, 이에 대한 합당한 전기 요금이 부과될 수 있도록 제도 마련이 필요하다. 대표적인 예시로 원전 및 SMR 전력에 대한 직·간접 PPA를 허용할 필요가 있다. 청정수소 생산에 한하여 직접 PPA 제도를 도입하여 원전 전력을 보다 유연하게 활용할 수 있도록 해야 한다. 기저발전원으로 활용되는 기존 가동원전에 대한 PPA 허용이 어렵다면 분산형 전원으로 활용하게 되는 SMR 대상으로라도 우선적으로 PPA와 같은 시장거래 매커니즘이 도입되어야 할 것이다. 혹은 원전 전력이 공급되었음을 인증하기 위해 흡사 재생에너지인증서(REC)와 같은 인증 제도를 활용할 수도 있을 것이다. 우리나라가 국제사회에 무탄소 에너지(CFE)에 대해 적극적으로 알리고 활동하고 있는 만큼, 무탄소 에너지 인증과 같은 제도적 기반을 다져나가야 할 것이다. 현재 우리나라를 중심으로 추진되는 CF 이니셔티브는 원자력 활용을 높이는 계기가 될 수 있으나, 원전 기반의 청정수소 생산에 대해서는 본격적인 논의가 시작되지 않았다. 원자력을 활용한 전기 생산과 이를 사용하는 산업의 경우 CFE를 생산 및 소비한 것으로 인정을 받게 될 수 있지만, 청정수소 생산과의 제도적 연계는 아직까지 논의되고 있지 않다. 만약 CF 이니셔티브에서 무탄소 에너지 인증제도가 수립된다면 우리나라의 대표적인 무탄소 발전원인 원전에 대한 인증 체계가 갖추어 질 것이며, 이것을 청정수소 인증제나 청정수소 생산용 전기요금 체계 설계 시에도 활용할 수 있을 것이다.

나. 원전 수소 생산에 대한 가격 지원

원전 및 SMR 수소의 경제성 확보를 위한 보다 직접적인 지원 방법으로는 생산 단가 자체를 낮출 수 있는 지원 제도를 마련하는 것이다. 특히 국내 청정수소 생산 기반을 확대하는 차원에서 가장 필요한 것은 ‘수전해 전용 전기 요금’을 신설 하는 것이다. 김재경 외(2020)에서도 수전해 방

129) IEA(2023c). pp.49-50.

식의 청정수소 생산 원가에서 가장 큰 비중을 차지하는 것은 전기요금임을 지적하며, 수전해 수소의 산업 기반 구축을 위해 수전해 전용 전기 요금제 도입을 제안한 바 있다. 현재 적용되는 산업용 전기요금(을)보다 낮고, 해외 도입 청정수소와의 가격경쟁력을 확보할 수 있을 정도의 전기요금이 적용 될 수 있도록 별도의 요금 체계를 갖출 필요가 있다.

전용 전기 요금 체계를 마련하는 것 이외에는 청정수소 인증제 기반의 생산 보조금 혹은 지원 제도를 활용하는 방식을 생각해 볼 수 있다. 현재 우리나라의 청정수소 인증제는 온실가스 배출량을 바탕으로 4개 등급으로 인증 등급을 부여하도록 설계되어 있다. 그러나 아직까지 인증여부에 따라 정부 지원이 있을지, 인증 등급에 따라 지원 규모가 차등적으로 설정될지 등이 정해지지 않은 상황이다. 앞서 설명하였듯이 국내에서 원전을 활용해 수소를 생산하는 경우 청정수소 인증제에서 2등급의 인증 등급을 받을 수 있을 것으로 예상된다. 이 경우 해외에서 도입 해오는 3,4 등급의 블루 수소보다 생산단가가 더 비싸더라도 인증제 기반의 인센티브 제도를 통해 가격 지원을 받을 수 있다면 충분이 가격경쟁력을 갖출 수도 있음을 의미한다. 현재, 미국 IRA 청정수소 생산 세액 공제, 영국 저탄소수소협약 등의 제도에서 청정수소에 대한 인증 등급 부여 및 차등 지원 방안 등을 발표하였다. 미국 IRA의 경우 청정수소를 온실가스 배출량에 따라 4개 등급으로 부여하고, 등급에 따라 수소 1kg 당 생산세액 공제규모를 차등적으로 설정하고 있다.¹³⁰⁾

이렇게 청정수소 생산에 대한 인센티브를 주는 것은 원전 수소 생산을 촉진하는 것에도 큰 역할을 할 것이다. 현재 원전사업자는 원전에서 생산된 전기를 전력시장에 대부분 공급하는 형태로 활용하고 있는데, 향후 충분한 제도가 갖춰진다면 원전사업자는 원전 전기를 1) 전력시장에 공급하거나, 2) 수소 생산을 하거나, 3) 무탄소 에너지로 다른 에너지 수요처에 공급하는 선택지를 받게 될 것이다. 이때 원전 수소 생산에 대한 경제적 인센티브가 충분히 크지 않다면 원전사업자가 원전에서 생산된 전기를 수소 생산 목적으로 활용할 가능성은 낮을 것이다. 이에 국내 청정수소 생산 기반 확대를 위해서는 원전사업사가 청정수소 생산을 할 수 있도록 충분한 지원이 필요할 것이다.

다. 정부 및 공기업 주도의 대규모 사업 지원

현재 우리나라에서 원전 사업자는 한국수력원자력(주)(이하 한수원)가 유일하다. 우리나라의 경우 SMR 사업을 하기 위해서도 전기위원회에서 원자력 발전사업으로 허가를 받아야 사업운영이 가능하다. 즉, 현재 한수원만 원전 사업자로 인정받고 있는 상황에서 한수원 외 사업자, 특히 민간 기업에게 원전사업을 허가할 것인가의 이슈가 있다. 이러한 상황에서 국내에서 한수원이 원

130) 김기환·안지영(2022). pp.67-69.

전수소 관련 사업개발을 하지 않으면 원전 수소 산업 생태계가 조성되기 어려운 상황이다. 이에 한수원이 다수의 대규모 원전 수소 프로젝트를 개발하고, 정부 차원에서 국내 청정수소 생산 기반 확대 및 에너지 자립도 제고를 목적으로 대규모 원전 수소 프로젝트를 지원할 필요가 있다. 국내 SMR 제작사의 역량을 제고하고 관련 연관 산업의 동반 성장을 위해서라도 유일한 원전사업자인 한수원이 원전 수소 생산에 강력한 모멘텀을 주는 것이 중요할 것이다. 정부는 원전 수소 생태계 조성을 주요 정책 목표로 삼고자 한다면, 한수원을 통해서 국가 R&D 사업으로서 원전 수소, SMR 수소에 대한 적극적인 사업 개발을 추진 및 확대해 나가야 할 것이다.

라. 원전 수소 수요처 확보

중소형원자로라 할지라도 초기투자비가 막대하게 요구되어 민간 사업화를 활성화하는 정부 지원책이 함께 마련되어질 필요가 있다. 우리나라의 경우 혁신형 SMR을 포함하여 아직 실증단계까지 진입한 원자로가 없어 초도호기의 건설단계 등 정확한 정량적 수치데이터를 생성하는데 한계가 존재하지만 대체로 조 단위 사업이 될 것으로 전망하고 있기 때문이다. 또한 앞선 미국의 Nuscale의 사례에서와 같이 실증·사업화 과정에서 예기치 않은 추가적인 비용인상 요인이 발생할 수 있어 이러한 금융 리스크를 해소시켜주기 위한 지원책 마련은 우리나라의 선도적인 중소형 원자로 공급망을 구축하는데 매우 중요하다. 이러한 측면에서 중소형원자로에서 생산된 에너지원에 대한 분산에너지법상의 특구지역 내 수요처를 조기 발굴하여 수요기관들을 중심으로 한 공동지분투자를 통한 장기계약물량을 체결하도록 유도하는 방안도 고려해 볼 만하다는 판단이다.

특히, 원전 수소의 경우 대부분의 수요가 산업부문에서 발생할 가능성이 높다. 산업계에서는 경제적이고 안정적인 청정수소 공급처를 확보하고, 수소생산사업자는 지속적인 청정수소 수요처를 확보한다는 점에서 사업 초기에 공급과 수요를 매칭하여 개발하는 것에 대한 이점이 클 것이다. 다만, 산업부문에서 구매하고자 하는 청정수소의 가격과 원전사업자가 판매하고자 하는 청정수소 가격 사이의 간극이 클 것이다. 이러한 가격 차이는 정부 지원과 시장 매커니즘을 통해 일부 해소될 수 있을 것이다. EU에서는 산업부문에서 수소 활용을 촉진하기 위해 수소 활용함으로써 감축한 이산화탄소에 대해 경제적으로 보상 받을 수 있는 탄소차액거래계약(Carbon CfD)을 도입할 계획을 세우기도 하였다.¹³¹⁾

산업부문에서 수소 활용을 높이기 위해서는 ‘녹색 공공 조달(Green Public Procurement, GPP)’와 같은 형태의 인센티브 제도도 검토 가능할 것이다. 정부 및 공공 부문에서 아직 충분히

131) 김기환·안지영(2022). pp.77-78.

상업화되지 못하여, 시장에서 원하는 만큼 충분히 공급되지 않는 상품에 대한 개발과 구매를 유도하고 수요를 창출하기 위해 사용하는 방식이다. 산업부문에서 원전 수소와 같이 청정수소를 활용하여 생산된 제품 혹은 수소를 활용해 온실가스를 저감하여 생산된 제품을 공공 조달의 형태로 구매함으로써 산업계에서 국내 원전 수소를 활용하는데서 오는 불확실성을 제거할 수 있을 것이다.

2. 원전 수소 생산 및 밸류체인 구축을 위한 법·제도적 선결과제

중소형원자로 기술개발이 단계적 성과를 내는 과정에서 해당 기술을 실전배치하기 위한 법제도적인 고려사항들에는 어떠한 것들이 있는지 선행적으로 살펴보는 것은 매우 큰 의미가 있다. 이러한 고민을 통해 우리나라의 선진 중소형원자로 기술이 국내뿐만 아니라 수출 영역에서도 글로벌 초격차 시장경쟁체내 내 우위를 선점하며 사회적·경제적 고부가가치를 극대화시키는데 도움이 될 것이다. 이 뿐만 아니라, 경수로 기반의 산업생태계를 비경수로로 확대하는 기회를 제공하며 관련된 제반여건을 조기 구축해 중소형원자로의 이용전략을 구체화하고 이에 부합하는 차질 없는 실증·사업화를 달성하는데 기여하게 된다.

가. 원전사업자의 독점적 지위

지난 2001년 전력산업구조개편이 단행되어진 이후로 원자력 부문은 발전형태의 특성과 안전성 문제 등을 감안하여 한수원이라는 별도의 자회사를 두고 지금까지 대용량 원전사업을 중심으로 한 독점적 지위를 운영·유지해왔다. 이에 중소형 원자로의 경우도 원자로라는 기술적 특성을 지니고 있어 이러한 오랜 관행에 영향을 받을만하다. 하지만 해당 중소형 원자로는 기존 대형원전 대비 안전성 상향 기술이 적용되었으며 그 설비용량도 작아 입지제약이 덜한 분산형 전원으로서 기존의 전력뿐만 아니라, 고온의 열을 생산·공급하거나 이러한 전력과 열을 활용하여 청정수소를 생산하는 등 사회적 기능과 역할이 분명히 보다 확장되었다. 이에 국내외 원전시장은 더욱 세분화된 다양·다각적인 비즈니스 모델을 수립해 나아갈 수 있을 전망이며 독점적 시장경제체제 하에서는 속도감 있는 창의적인 사업화 모델이 도출되는데 한계가 있을 것으로 여겨진다. 무엇보다도 대형원전 대비 발전단위당 전력생산단가가 비싼 중소형 원자로에 대한 안전성 기반의 시장경쟁력 향상을 위해선 점진적으로 경쟁시장체제를 도입해 나아가는 것이 유효할 수 있다고 판단된다. 특히 현행 전기사업법상으로 전기사업의 허가(제7조)에 의거하여 전기사업의 종류별 또는 규모별로 산업통상자원부장관 또는 시·도지사의 허가를 받고 동법 제10조에 따라 그 전기설비가 원자력발전소인 경우 원자력안전위원회와의 협의가 이루어지면 되는 등 한수원의 고유사업으로만 인정한다는

입법 사항이 존재하지 않는 점도 고려할 만하다.¹³²⁾

나. 입지제약 및 주민 수용성

현행 분산에너지법상 중소형 원자로도 분산형 전원으로서 송전망 건설을 최소화하며 수요지 인근에 도입하고자 하는 방안을 모색하고 있다. 따라서 대형원전 대비 강도 높은 수준으로의 지역 주민 수용성을 확보하기 위한 새로운 시장접근법이 강구되어질 필요성이 존재하며 이에 걸맞은 정부의 정책적 법안 수리가 요구되는 상황이다. 즉, 중소형 원자로도 대형원전과 마찬가지로 에너지원을 생산하는 과정에서 사용후핵연료가 필연적으로 발생하게 되며 이것을 수요지 인근에서 즉시 반출시켜주는 방안이 마련되어야 한다. 이를 위해선 먼저 해당 반출되어진 사용후핵연료에 대한 최종 도착지가 시급히 마련되어야 할 것이며 기술개발에 있어 시간이 좀 더 요구되는 파이로 기술을 고려한 처리시설(부피저감)이 아니라면, 현행 국회 계류 중인 「고준위방사성폐기물 특별법(소위 고준위법)」 안의 처리를 통한 처분부지를 활용해 나아가는 것이 현실적인 대안이라 할 수 있다. 따라서 기존 대형원전 본부 내 사용후핵연료의 포화시점에 대한 현안 대응을 위한 고준위법, 이외에도 무탄소 분산형 전원으로서 중소형원자로의 수용성 확보를 모색하는 방안으로도 동법은 매우 중요한 의미와 수단으로서 그 가치를 지닌다는 인식이 요구된다.

다. 이격거리 및 안전영향 평가

입지와 관련해서는 「원자력시설 주변에 산업시설 등의 설치 협의에 관한 규정」에 대해서도 살펴볼 필요가 있다. 동 규정에 따르면 원전 인근 8km 이내에 고압가스안전관리법 상 고압가스 제조·판매·저장 시설이 입지할 수 없으며, 관련 시설 설치를 위해서는 원자력안전위원회와 협의가 필요하다고 규정되어 있다.¹³³⁾ 수전해기를 포함한 수소 생산 제반설비는 현재 기체 수소가 고압가스로 분류되어있기 때문에, 고압가스안전관리법에 적용을 받는 고압가스 제조시설이다. 즉, 원전에서 전기 혹은 열을 공급 받아 수소를 생산하는 설비를 원전 인근에 설치하는 것은 원자력안전위원회의 허락이 필요하다는 의미이다. 원자력안전위원회에서 수소생산 설비를 원전 인근 몇 km 까지 허용할 것인가에 대해서는 수소 생산 설비가 원전의 안정적 운영에 어느 정도의 영향을 미칠 수 있는가에 달려있다. 즉, 수소의 위해도, 안전영향 평가, 최소 안전 이격거리 산정 등에 대한 구체적인 규정이 마련되어야 원자력안전위원회에서도 객관적 기준을 가지고 입지를 허용해 줄 것

132) 「전기사업법」

133) 「원자력시설 주변에 산업시설 등의 설치 협의에 관한 규정」

이다.

중소형원자로 기반의 수전해 설비와 연계한 수소생산 시 열 배관 및 송전망 건설을 최소화시키는 사업화 모델이 모색되어질 수 있어야 해당 사업의 초기투자비 절감 등 진입장벽을 조금이라도 낮출 수 있을 것이다. 이를 위해서 대형원전 대비 설비용량이 작고 한층 강화된 안전성 기술이 적용된 중소형원자로에 대한 별도의 방사선비상계획구역(EPZ, Emergency Planning Zone)이 설정되어질 필요성이 제기된다. 대형원전 대비 완화된 EPZ를 적용받게 된다면 사업자는 원전설비와의 근거리 수전해 설비를 도입할 수 있으면서도 주민보상 등 외부비용을 절감시키는데 유리한 사업조건을 가져갈 수 있을 것이며 궁극적으로 수소경제 활성화에도 기여할 수 있을 전망이다.

라. 분산형 전원으로서 중소형 원자로의 법적 지위

분산에너지법상에서의 중소형원자로에 대한 최대 설비용량 기준의 법적 정의가 아직은 모호해 구체화하는 과정이 앞으로 필요하다. 물론 중소형원자로에 대한 기술개발이 아직 추진되는 과정으로서 시장수요처 발굴이 초기단계라는 점에서 중형과 소형 원자로에 대한 각각의 분산전원으로서 설비용량을 확정하는데 따른 부담과 한계가 있는 존재하는 상황은 맞다. 이에 현행 중소형원자로 발전사업의 경우는 전력의 수요와 공급만이 충족되는 사업화 모델이라면 폭넓게 분산형 전원으로 인정한다는 방침이나 궁극적으로 중소형원자로에 대한 사업화 모델을 좀 더 구체화하는데 있어 분명히 단계적으로 신경써야하는 부분이긴 하다.

현행 분산에너지법은 ‘중소형 원자로 발전사업’만을 고려하고 있어 중소형원자로를 활용한 열 생산에 대한 추가적인 고려가 필요한 상황이다. 즉 중소형원자로는 전력생산 이외에도 고온의 청정 열을 생산·공급할 수 있어 동법에서와 함께 「집단에너지법」과 「수소법」 등에서도 폭넓게 고려될 필요가 있을 것이다. 특히, 집단에너지사업법 제2조에서는 집단에너지를 2개 이상의 사용자를 대상으로 공급되는 열 또는 열과 전기를 말한다고 정의하고 있는 상황이라는 점을 참고할 수 있다. 좀 더 구체적으로 동법 시행령 제2조(사업의 구분 및 기준)상에서는 1. 지역냉난방사업: 난방용, 급탕용, 냉방용의 열 또는 열과 전기를 공급하는 사업으로서 자가소비량을 제외한 열생산용량이 시간당 5백만 킬로칼로리 이상일 것, 2. 산업단지집단에너지사업: 산업단지에 공정용의 열 또는 열과 전기를 공급하는 사업으로서 자가소비량을 제외한 열생산용량이 시간당 3천만 킬로칼로리 이상일 것 등으로 그 사업기준을 정하고 있다.¹³⁴⁾ 이에 중소형원자로의 열과 전기를 활용한 청정수소 생산을 위한 사업을 모색해본다면 여타 법안들과의 정합성을 점검해보는 것도 필요하다.

134) 「집단에너지법」

기존 대형원전 기반의 발전용원자로운영자는 「원자력진흥법(제13조)」에 의거하여 원자료를 운전하여 생산되는 전전년도 전력량에 킬로와트시간당 1.2원을 곱한 금액을 초과하지 않는 범위에서 원자력연구개발사업 비용(소위 원기금)을 부담하고 있으나, 중소형원자로에 대한 동법상의 법적의무는 아직 고려되지 않고 있는 실정이다.¹³⁵⁾ 특히 원전으로부터 생산된 열과 관련한 부담금에 대한 법적 기준 조차 논의되고 있지 않아 향후 중소형원자로를 활용한 청정수소 생산 시 투입된 전력과 열에 대한 부담금 확보 규모는 장차 심도 있게 고민해 나아갈 숙제로 남아있는 상황이다. 물론 중소형 원자로가 아직 상용화된 시점이 아니기 때문에 이것을 본격적으로 고민하기 시작하는 것은 시기상조일 수도 있다. 다만, 현재 대형원전 기반의 저온 수전해 설비와 연계한 청정수소 생산을 실증하고 있다는 점에서 최소한 원전을 활용한 수소생산에 투입된 전력에 대해서 원기금의 부담대상으로 고려할 것인지에 대한 고민은 필요한 상황이라고 여겨진다.

135) 「원자력진흥법」

제2절 결론



우리나라는 경제 및 산업 구조상 에너지 다소비와 온실가스 다배출 산업이 GDP의 상당 부분을 차지하고 있어, 국제사회의 에너지 전환 요구에 따라 큰 리스크를 안고 있다. 신기후통상과 글로벌 에너지 전환 요구 등으로 인해 우리 기업들은 비용 증가, 산업 경쟁력 약화, 투자 저조 등의 위기에 직면하게 되었다. 이러한 상황에서 수소경제는 기존의 온실가스를 다량 배출하던 에너지원에서 수소에너지로의 전환을 통해 에너지 전환의 수단으로 활용될 수 있으며, 또한 신기후통상 체제에서 수소산업 생태계를 신산업으로 구축하여 국가경쟁력을 강화하는 수단으로도 활용될 수 있다. 이를 위해서는 국내에서 청정수소를 생산하고 유통하며 소비하는 일련의 산업 생태계가 발달하여 청정 에너지원인 수소에너지가 어디에서나 사용될 수 있도록 하는 것이 중요하다.

그러나 우리나라는 재생에너지가 풍부하지 않기 때문에, 수소 생산에 필요한 천연가스를 수입하고, 수소 생산 과정에서 포집한 CO₂를 해외로 수출해야 하는 상황에서 경제성 있는 수전해 수소를 생산할 만큼 재생에너지 잉여 전력이 풍부하지 않다. 국내 청정수소 수요는 지속적으로 증가할 것으로 예상되나, 청정수소 공급 기반의 확대는 더딜 것으로 예상된다. 현재 운영 중이거나 계획 중인 수소 공급 설비는 2028년 이후 급증하는 수송부문의 수소 수요를 충족하지 못할 것이다. 따라서, 청정수소의 대부분을 수입에 의존해야 하는 상황을 방지하기 위해 국내에서 생산할 수 있는 청정수소의 공급 기반을 확충할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 국내 청정수소 생산을 위한 전력 공급원으로 원전과 중소형원자로의 활용 가능성을 검토하고 원전과 수소 산업을 연계함으로써 발생하는 신산업 창출효과에 대해 분석하고자 하였다. 우선 원전과 중소형 원자로(SMR)를 활용한 청정수소 생산의 가능성을 검토하고, 원전과 SMR을 수소 생산에 활용하기 위한 기술 경로를 살펴보았다. 원전을 수소생산에 활용하기 위한 기술경로는 크게 4가지 유형이 있음을 확인하였다. 각각의 수전해 기술별 특성과 장단점을 비교하여 원전-수소 산업의 연계 가능성을 평가하였다.

경제성 분석 결과, 원전과 SMR을 활용한 청정수소 생산은 수전해기에 투입되는 전기의 가격에 크게 의존한다는 것이 확인되었다. 대형원전의 평균적인 전기 정산단가인 1kWh당 56.3원을 적용할 시, 알칼라인 수전해는 5,237원/kgH₂, PEM 수전해는 5,395원/kgH₂, 고온수전해는 5,873원/kgH₂ 수준의 수소 생산 단가를 보였다. 그러나 산업용 전기요금이 적용될 경우 수소 생산 단가는 10,000원/kgH₂ 이상으로 상승하여, 해외 도입 청정수소와의 가격 경쟁에서 열위에

있음을 확인하였다.

그럼에도 불구하고 원전과 SMR을 수소 생산에 활용함으로써 산업 측면에서 새로운 경제적 가치가 창출될 수 있음을 확인하였다. 2030년 국내 수소 시장 크기를 10만 톤, 20만 톤, 30만 톤으로 가정하면, 각각 필요한 전력량은 5,585GWh, 11,169GWh, 16,753GWh이며, 이를 원전에서 90% 이용률로 공급하기 위해 필요한 설비 용량은 각각 708MW, 1,417MW, 2,125MW이다. 이렇게 필요한 전력을 SMR에서 100% 조달하는 경우, 신규 SMR 시장이 약 3조 원에서 9조 원 규모로 형성될 것으로 전망된다. 국내 수소 시장이 2030년 10만 톤에서 30만 톤으로 형성될 경우, 수전해기 시장은 6,500억 원에서 2조 원 규모로 성장할 것으로 예상된다. 수전해기 시장이 알칼라인, PEM, SOEC 기술로 분할될 경우, 시장 규모는 각각 9천억 원, 1조 8천억 원, 2조 7천억 원에 이르게 된다. 즉, SMR과 수소 생산 사업이 연계되는 경우 청정수소 10만 톤 생산할 때마다 SMR 시장에서 약 3조 원, 수전해기 시장에서 약 6,500억 원의 경제적 가치가 발생한다는 의미이다.

또한 원전 및 SMR 수소 생산 이후 밸류체인이 어떻게 구성될지를 분석한 결과, 원자력 발전은 재생에너지와 달리 일정한 부하를 지속적으로 제공할 수 있어, 안정적인 수요처인 산업 부문에 적합함을 확인하였다. 다만, 이렇게 수소 공급처와 수요처를 연계하기 위해서는 청정수소 생산 설비와 수소 활용 설비를 연결하는 파이프라인이 필요하여 원전과 장거리에 위치한 산업단지에는 수소 공급이 어려울 것으로 예상된다. 대형원전이 아닌 SMR은 대형원전에 비해 입지제약이 적고, 모듈형 생산 설비로 수소 생산량을 조절할 수 있어 다양한 지역에서 밸류체인을 구축할 수 있는 장점이 있어 원전-수소 연계 밸류체인이 확장되는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

그러나 이렇게 경제적 이점이 많은 원전-수소 산업 연계를 위해서는 아직도 넘어야 할 산이 많았다. 우선 원전 수소의 생산 단가가 높아 충분한 수요가 확보되지 않을 수 있다는 점이 가장 큰 장애요인이었고, 원전-수소 연계를 위한 법·제도적 기반이 아직 조성되지 않았다는 점도 원전 수소 산업 생태계 활성화에 걸림돌이 될 것으로 보인다.

이에 본 연구에서는 이상의 연구결과를 종합하여 원전 수소 생태계를 활성화하기 위해서는 원전 및 SMR 전력에 대한 직·간접 PPA(전력구매계약) 허용 및 무탄소 에너지 인증제도 설계가 필요하고, 수전해용 전기요금제도를 도입하여 청정수소 생산 비용을 낮추고, 원전 전력을 소내전력으로 인정하여 원전 정산단가 수준의 전기요금을 적용하는 지원책도 필요하다는 것을 한 번 더 강조하고 싶다. 또한, 민간기업의 원전사업 허가 검토 및 경쟁 시장 체제 도입, 사용후핵연료 처리방안 및 고준위방사성폐기물 특별법 처리로 주민 수용성을 확보하고, 원전 인근 수소생산 설비 설치를 위한 이격거리 산정 및 안전영향 평가 규정 등 법·제도적으로 미비한 부분에 대한 선제적인 대응이 필요할 것이다.

청정수소와 관련된 산업과 밸류체인은 아직까지 상용화되지 않아 불확실성이 높은 기술로 구성되어 있는 것이 일반적이다. 원전과 SMR 뿐만 아니라 재생에너지를 활용한 청정수소 생산 밸류체인도 마찬가지이다. 기존에 에너지로 쓰이지 않았던 수소를 에너지원으로 활용하기 위해서 보다 청정한 방식으로 대규모 생산을 해야 하고, 탄소 자원을 수소로 대체하기 위한 감축 및 적응 기술을 계속 개발해야 하는 상황이다. 아직까지 어느 국가에서도 완벽히 구축된 수소에너지 산업 생태계를 갖추지 못하였다. 우리나라는 정부의 적극적인 정책 수립 및 지원을 바탕으로 국제사회에서 명실공히 청정수소 경제를 선도하는 퍼스트무버(first mover)로서 자리매김하고 있다. 앞으로 중소형원자로와 같은 차세대 에너지 기술을 바탕으로 우리 기업이 더욱 다양한 형태의 청정수소 산업 생태계를 이끌 수 있기를 기대한다.

참고문헌



<국내 문헌>

- 강병욱. (2022). 탄소중립을 위한 철강 생산공정 전환 시나리오 분석 연구. 에너지경제연구원
관계부처합동. (2019a). 수소경제 활성화 로드맵.
- 관계부처합동. (2019b). 수소 기술개발 로드맵(안).
- 관계부처합동. (2021). 제1차 수소경제 이행 기본 계획.
- 관계부처합동. (2022a). 세계 1등 수소산업 육성 전략.
- 관계부처합동. (2022b). 청정수소 생태계 조성방안.
- 관계부처합동. (2023a). 수소산업 소부장 육성 전략
- 관계부처합동. (2023b). 청정수소 인증제 운영방안.
- 김기환·안지영. (2022). 시장주도 수소경제 조기 정착을 위한 연구(3/3). 에너지경제연구원
- 김용완 외. (2015). 초고온가스로를 이용한 원자력수소생산 기술개발. 대한기계학회
- 김재경·장성혁. (2021). 시장주도 수소경제 조기 정착을 위한 연구(2/3). 에너지경제연구원
- 김종우·이태의. (2022). 청정수소 생산의 경제성 확보를 위한 수전해의 기술적 제도적 개선
방안 연구. 에너지경제연구원
- 두산에너지빌리티. (2024). 탄소중립달성을 위한 SMR의 역할. 에너지경제연구원 전문가 세미나 발표
자료(2024.03.26.).
- 산업통상자원부. (2023). 탄소중립을 위한 국제 Initiative (24/7 CFE 중심) 조사·분석.
- 손인성·이수민·최영선·이상준. (2023). 기후변화 관련 통상 규제 확산에 따른 대응 방안 연구. 에너지
경제연구원
- 안지영·이태의. (2023). 청정 암모니아 밸류체인 전주기 체계 구축 연구. 에너지경제연구원
- 안지영. (2024). 글로벌 수소경제 추진 현황 및 과제, 경제·인문사회연구회 글로벌 이슈브리프 Vol.1
8. 경제·인문사회연구회
- 에너지경제연구원. (2020). 수소경제가 온다 - 쉽게 읽히는 수소경제의 동향과 전망.
- 에너지경제연구원. (2021). 세계원전시장 인사이트, 2021.10.22.
- 에너지경제연구원. (2024). 인증제 운영방안 및 시범사업 안내. (2024.02.29.)
- 유영돈. (2019). 수소의 저장, 운송 및 충전. 한국산업기술진흥협회.

- 윤경수. (2020). 탄소배출권 거래제 도입과 탄소배출량을 고려한 유럽의 국가 간 전력교역 결정요인 분석. 숭실대학교
- 윤경수. (2023). 우리나라 CF100체제 도입의 필요성. 원자력 정책 BRIEF REPORT, 2023-03호(통권 68호). 한국원자력연구원
- 이수영·이혜진. (2019). 미래 수소에너지 공급 산업에서 암모니아의 활용성. 공업화학, 제 30권 제 6호.
- 이종희·이영우·윤경수·이지민. (2023). 국내 원전산업 생태계 경쟁력 증진 방안 도출을 위한 원전 산업시장 및 공급망 분석. 원자력 정책 BRIEF REPORT, 2023-02호(통권 67호), 한국원자력연구원
- 이태의·임정민·이수민. (2022). 그린에너지 통합 시스템(섹터커플링)의 탄소중립 기여도 분석: P2G 기술을 중심으로. 에너지경제연구원
- 조은정. (2022). 중국 “원전굴기”의 특징과 전략적 시사점. 국가안보전략연구원
- 탄소중립녹색성장위원회. (2023). 제1차 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획
- 한국수력원자력(주). (2024). 원자력 청정수소 생산 기술 개발. 제 2회 한수원-에경연 공동세미나 발표자료(2024.04.11.)
- 한국원자력연구원. (2019). 한국원자력연구원 60년사
- 한국원전수출산업협회. (2022). 원전수출 경쟁사 현황정보
- 허예진·안지영. (2022). 에너지부문의 ESG 경영 환경 조성을 위한 녹색금융 지원 방안 연구. 에너지경제연구원

<외국 문헌>

- 일본 내각부 원자력위원회. (2022). 原子力白書. 2022.07.
- 일본 경제산업성. (2021). 2050년 탄소중립에 따른 녹색성장전략. 2021.06.
- BNEF. (2024). Nuclear Market Outlook 1H 2024. 2024.04.11.
- Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee. (2018.11). A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors
- Climate Watch. (2020). The World Resources Institute 2020
- EPA. (2020). The Energy Act of 2020
- EPA. (2021). Infrastructure Investment and Jobs Act
- French Minister of Economy, Finance and Industrial and Digital Sovereignty. (2021). France 2030 - plan d'investissement. 2021.10.

- HM Government. (2020a). The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution. 2020.11.
- HM Government. (2020b). Energy white paper: Powering our Net Zero Future. 2020.12.
- HM Government. (2021). Net Zero Strategy: Build Back Greener . 2021.12.
- HM Government. (2022). British Energy Security Strategy. 2022.04.
- The Governments of Ontario, New Brunswick, Alberta and Saskatchewan. (2022). A strategic Plan for the Deployment of Small Modular Reactors. 2022.03
- IAEA. (2022a). Advances in Small Modular Reactor Technology Developments
- IAEA. (2022b). Nuclear Power Status 2022
- IEA, (2018). World Energy Outlook 2018
- IEA. (2019). The Future of Hydrogen
- IEA. (2021a). Ammonia Technology Roadmap
- IEA. (2021b). The role of low-carbon fuels in the clean energy transitions of the power sector
- IEA. (2022). Global Hydrogen Review 2022
- IEA. (2023a). Global Hydrogen Review 2023
- IEA. (2023b). Net Zero Roadmap: A global Pathway to Keep the 1.5 Goal in Reach(2023 Update)
- IEA. (2023c). Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity
- IEEFA. (2023). UAMPS Statements, January 3. 2023 Talking Point
- IPHE. (2023a). 3rd draft Inventory of Certification Mechanisms
- IPHE. (2023b). Hydrogen Certification Mechanisms Task Force Results
- IREANA. (2020). Green Hydrogen Cost Reduction
- KEARNEY. (2023). Nuclear small modular reactors (SMRs)

<웹사이트>

- 과학기술정보통신부. (2023.12.20.). 기술패권 경쟁에서 우리나라를 지킬 '12대 국가전략기술' 공식 확정. <https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=user&mId=113&mPid=238&bbsSeqNo=94&nttSeqNo=3183868> (검색일: 2024. 05. 20.)
- 두산퓨얼셀 홈페이지. <https://www.doosanfuelcell.com/kr/tech/tech-0101/> (검색일: 2024. 05. 20.)
- 대한민국 정책브리핑. (2023.11.22.). 한·영, 원전·해상풍력·수소 등 '무탄소에너지' 협력 본격 추진. <https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148922949> (검색일: 2024.05.20.)

- 대한민국 정책브리핑. (2023.12.04). 한국·미국·영국 등 22개국, 원자력 발전 용량 3배 확대 동참. <https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148923328> (검색일: 2024.05.20.)
- 미국 에너지부 홈페이지. Advanced Reactor Demonstration Program. <https://www.energy.gov/ne/advanced-reactor-demonstration-program> (검색일: 2024.05.20.)
- 미국 에너지부 홈페이지. (2016.06.17.). Vision and Strategy for the Development and Deployment of Advanced Reactors. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f32/DOE%20Vision%20and%20Strategy%20NEAC%2017June2016_golub.pdf (검색일: 2024.05.20.)
- 미국 에너지부 홈페이지. (2020). RESTORING AMERICA'S COMPETITIVE NUCLEAR ENERGY ADVANTAGE: A strategy to assure U.S. national security ('20.) <https://www.energy.gov/articles/restoring-americas-competitive-nuclear-energy-advantage> (검색일: 2024.05.20.)
- 미국 에너지부 홈페이지. (2022.11.09.). 3 Nuclear Power Plants Gearing Up for Clean Hydrogen Production. <https://www.energy.gov/ne/articles/3-nuclear-power-plants-gearing-clean-hydrogen-production> (검색일: 2024.05.20.)
- 미국 에너지부 홈페이지. (2023.03.07.). Nine Mile Point Begins Clean Hydrogen Production. <https://www.energy.gov/ne/articles/nine-mile-point-begins-clean-hydrogen-production> (검색일: 2024.05.20.)
- 법제처. (2023.05.02.). 수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률 시행령 개정(안) 입법예고. 산업통상자원부 공고 제2023-374호. <https://www.moleg.go.kr/lawinfo/makingInfo.mo?mid=a10104010000&lawSeq=72990&lawCd=0&lawType=TYPE5> (검색일: 2024.05.20.)
- 산업통상자원부. (2021.06.01.). 수소법상 "수소전문기업" 11개 최초 지정. <https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCLa3d66de4c/164163/view?mno=&pageIndex=1&categoryList=%5Bkr.go.motie.site.module.category.MecCategoryVo%40386beb30%2C+kr.go.motie.site.module.category.MecCategoryVo%40351db940%5D&rowPageC=0&displayAuthor=&searchCategory=0&schClear=on&startDtD=&endDtD=&searchCondition=1&searchKeyword=11%EA%B0%9C+%EC%B5%9C%EC%B4%88+%EC%A7%80%EC%A0%95> (검색일: 2024.05.20.)
- 산업통상자원부. (2023.1.12.). 제10차 전력수급기본계획(2022~2036) 확정. <https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCL3f49a5a8c/166650/view> (검색일: 2024.05.20.)

- 산업통상자원부. (2023.09.21.). 윤 대통령, UN에서 'CF(무탄소) 연합' 결성 제안. <https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCL3f49a5a8c/167847/view> (검색일: 2024.05.20.)
- 산업통상자원부. (2023.10.27.). 「무탄소(CF) 연합 출범, 국제적 규범 논의 선도한다」. <https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCLa3d66de4c/168007/view?mno=&pageIndex=1&categoryList=%5Bkr.go.motie.site.module.category.MecCategoryVo%40463ba687%2C+kr.go.motie.site.module.category.MecCategoryVo%4076320d16%5D&rowPageC=0&displayAuthor=&searchCategory=0&schClear=on&startDtD=&endDtD=&searchCondition=1&searchKeyword=%EA%B5%AD%EC%A0%9C%EC%A0%81+%EA%B7%9C%EB%B2%94>(검색일: 2024.05.20.)
- 산업통상자원부. (2023.11.14.). 청정수소 인증제 도입한다. <https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCL3f49a5a8c/168121/view> (검색일: 2024.05.20.)
- 수소경제종합포털. 국내 수소 생산기지 및 출하센터 구축 현황. https://www.h2hub.or.kr/main/stat/stat_product_base.do (검색일: 2024.05.20.)
- 수소경제종합포털. 국내 수소배관 현황(권역별). https://www.h2hub.or.kr/main/stat/stat_distribute_area_pipe.do (검색일: 2024.05.20.)
- 수소경제종합포털. 국내 수소튜브트레이러 현황(권역별). https://www.h2hub.or.kr/main/stat/stat_at_distribute_area_tube.do (검색일: 2024.05.20.)
- 수소경제종합포털. 국내 수소차 등록현황. https://www.h2hub.or.kr/main/stat/stat_use_hCar_apply.do (검색일: 2024.05.20.)
- 영국 정부 홈페이지. (2022.05.18.). Net Zero Hydrogen Fund strands 1 and 2: Round 2 (closed to applications). <https://www.gov.uk/government/publications/net-zero-hydrogen-fund-strand-1-and-strand-2> (검색일: 2024.05.20.)
- 영국 정부 홈페이지. (2023.03.16.). Support for households and energy security at the heart of Budget. <https://www.gov.uk/government/news/support-for-households-and-energy-security-at-the-heart-of-budget> (검색일: 2024.05.20.)
- 일본경제산업성(METI). (2018). Promoting Nuclear Innovation. [https://www.jaea.go.jp/04/kokusaiibu/ja/event/20201022/pdf/2.Keynote\(METI\).pdf](https://www.jaea.go.jp/04/kokusaiibu/ja/event/20201022/pdf/2.Keynote(METI).pdf) (검색일: 2024.05.20.)
- 전자신문. (2019.01.17.). [수소경제로드맵] 2005년에 만든 로드맵과 현실은 거리 멀어. <https://www.etnews.com/20190117000180> (검색일: 2024.05.20.)
- 중국 정부 홈페이지. (2021.10.26.). 国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm (검색일: 2024.05.20.)

- 캐나다 천연자원부. Enabling Small Modular Reactors Program. <https://natural-resources.canada.ca/our-natural-resources/energy-sources-distribution/nuclear-energy-uranium/enabling-small-modular-reactors-program/24959> (검색일: 2024.05.20.)
- 포스코뉴스룸. (2022.05.10.). 포스코 HyREX 수소환원제철 기술 심층 소개. <https://newsroom.poco.com/kr/%EC%A0%80%ED%83%84%EC%86%8C-%EC%B9%9C%ED%99%98%EA%B2%BD-%EC%A0%9C%EC%B2%A0-%ED%94%84%EB%A1%9C%EC%84%B8%EC%8A%A4-%EB%8C%80%EC%A0%84%ED%99%98-%ED%8A%B9%EC%A7%91-%EA%B8%B0%ED%9A%8D-%E2%91%A0-hyrex/> (검색일: 2024.05.20.)
- 한전ON. 전기요금표. <https://online.kepco.co.kr/PRM004D00> (검색일: 2024.05.20.)
- 환경부. (2022.9.20.). 한국형 녹색분류체계, 원전 포함 초안 공개, <https://me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=title&searchValue=%ED%95%9C%EA%B5%AD%ED%98%95+%EB%85%B9%EC%83%89%EB%B6%84%EB%A5%98%EC%B2%B4%EA%B3%84%2C+%EC%9B%90%EC%A0%84+%ED%8F%AC%ED%95%A8+%EC%B4%88%EC%95%88+%EA%B3%B5%EA%B0%9C&menuId=10525&orgCd=&boardId=1550040&boardMasterId=1&boardCategoryId=&decorator=> (검색일: 2024.05.20.)
- 혁신형 소형모듈원자로 기술개발 사업단 SMR 뉴스레터. (2024.02.05). Holtec社, 원자력-태양광 하이브리드 발전소 설계 공개. <https://ismr.or.kr/newsletter/139> (검색일: 2024. 05. 20.)
- 24/7 Carbon-Free Energy Compact 홈페이지. <http://www.gocarbonfree247.com> (최종검색일: 2024.05.20.)
- Constellation energy 홈페이지. <https://www.constellationenergy.com/our-company/locations/location-sites/nine-mile-point.html> (검색일: 2024.05.20.)
- Davis-Besse Nuclear Power Station, Unit 1. <https://www.nrc.gov/info-finder/reactors/davis.html> (검색일: 2024.05.20.)
- eDF 홈페이지. The NUWARD™ SMR solution. <https://www.edf.fr/en/the-edf-group/producing-a-climate-friendly-energy/nuclear-energy/shaping-the-future-of-nuclear/the-nuwardtm-smr-solution/development-roadmap> (검색일: 2024.05.20.)
- Enerdata Hydrogen Company DB. <https://www.enerdata.net/research/h2-database.html> (최종검색일: 2024.05.20.)
- EPSIS(전력통계정보시스템). <https://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectEkmaUpsBftChart.do?menuId=040701> (최종검색일: 2024.05.20.)

- European Commission 홈페이지. https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/european-industrial-alliance-small-modular-reactors_en. (검색일: 2024.05.20.)
- EUR-Lex 홈페이지. Commission Delegated Regulation (EU) 2023/1184. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2023/1184/oj (검색일: 2024. 05. 20.)
- EUR-Lex 홈페이지. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) (Text with EEA relevance). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02018L2001-20231120>. (검색일: 2024. 05. 20.)
- FIRST 홈페이지. <https://www.smr-first-program.net/> (검색일: 2024.05.20.)
- GAIN 홈페이지. <https://gain.inl.gov/SitePages/Home.aspx> (검색일: 2024.05.20.)
- National Reactor Innovation Center 홈페이지. <https://nric.inl.gov/> (검색일: 2024.05.20.)
- Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada. NSERC-NRCan partnership to fund research on small modular reactors, https://www.nserc-crsng.gc.ca/Innovate-Innover/NRCAN-RNCAN_eng.asp (검색일: 2024.05.20.)
- SMR Action Plan. <https://smractionplan.ca/> (검색일: 2024.05.20.)
- IAEA 홈페이지. Power Reactor Information System. <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryStatisticsLandingPage.aspx> (검색일: 2024.05.20.)
- U.S. Department of the Treasury 홈페이지. Inflation Reduction Act. <https://home.treasury.gov/policy-issues/inflation-reduction-act> (검색일: 2024.05.20.)
- U.S. NRC. Prairie Island Nuclear Generating Plant, Unit 1. <https://www.nrc.gov/info-finder/reactors/prail.html> (검색일: 2024.05.20.)
- U.S. Senate Democrats. (2022). The Inflation Reduction Act of 2022. https://www.democrats.senate.gov/imo/media/doc/inflation_reduction_act_of_2022.pdf (검색일: 2024.05.20.)
- World Nuclear News. (2019.07.22.). CNL starts Canadian Nuclear Research Initiative. <http://www.world-nuclear-news.org/Articles/CNL-launches-Canadian-Nuclear-Research-Initiative> (검색일: 2024.05.20.)
- World Nuclear News. (2022.12.05.). Chinese SMR project enters installation phase. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Chinese-SMR-project-enters-installation-phase> (검색일: 2024.05.20.)

World Nuclear News. (2022.12.09.). China's demonstration HTR-PM reaches full power. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/China-s-demonstration-HTR-PM-reaches-full-power> (검색일: 2024.05.20.)

新华通讯社. (2021.09.22.). 习近平出席第七十六届联合国大会一般性辩论并发表重要讲话. http://www.news.cn/politics/leaders/2021-09/22/c_1127886752.htm (검색일: 2024.05.20.)

<법령>

기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법. (시행 2024.1.1. 법률 제19208호, 2022.12.31., 타법개정) 제2조제5호. <https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9/%EA%B8%B0%ED%9B%84%EC%9C%84%EA%B8%B0%EB%8C%80%EC%9D%91%EC%9D%84%EC%9C%84%ED%95%9C%ED%83%84%EC%86%8C%EC%A4%91%EB%A6%BD%E3%86%8D%EB%85%B9%EC%83%89%EC%84%B1%EC%9E%A5%EA%B8%B0%EB%B3%B8%EB%B2%95> (검색일: 2024.05.20.)

수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률. (시행 2024.2.1. 법률 제19810호, 2023. 10. 31., 일부개정) 제2조. <https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9/%EC%88%98%EC%86%8C%EA%B2%BD%EC%A0%9C%EC%9C%A1%EC%84%B1%EB%B0%8F%EC%88%98%EC%86%8C%EC%95%88%EC%A0%84%EA%B4%80%EB%A6%AC%EC%97%90%EA%B4%80%ED%95%9C%EB%B2%95%EB%A5%A0> (검색일: 2024.05.20.)

수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률 부칙(시행 2023.11.30. 법률 제18889호, 2022.6.10. 일부개정). <https://www.law.go.kr/lsSc.do?section=&menuId=1&subMenuId=15&tabMenuId=81&eventGubun=060101&query=%EB%B2%95%EB%A5%A0+%EC%A0%9C18889%ED%98%B8#J10356623>. (검색일: 2024.05.20.)

수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률 시행규칙. (시행 2023.12.11. 산업통상자원부령 제534호, 2023.12.11. 일부개정). <https://law.go.kr/LSW//lsLinkCommonInfo.do?lspttninfSeq=165009&chrClsCd=010202#searchId0> (검색일: 2024.05.20.)

수소발전 입찰시장 연도별 구매량 산정 등에 관한 고시. (시행 2023.5.24. 산업통상자원부고시 제2023-98호, 2023. 5. 24., 제정). [https://www.law.go.kr/행정규칙/수소발전입찰시장연도별구매량산정등에관한고시/\(2023-98,20230524\)](https://www.law.go.kr/행정규칙/수소발전입찰시장연도별구매량산정등에관한고시/(2023-98,20230524)) (검색일: 2024.05.20.)

수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률 시행령. (시행 2024.04.09. 대통령령 제34396호, 2024. 4. 9., 일부개정). <https://www.law.go.kr/lsInfoP.do?lsId=014015&ancYnChk=0#0000> (검색일: 2024.05.20.)

원자력시설 주변에 산업시설 등의 설치협약에 관한 규정.(시행 2017. 12. 26. 원자력안전위원회고시 제2017-30호, 2017.12.26., 일부개정). <https://www.law.go.kr/LSW/admRulInfoP.do?admRulSeq=2100000107544> (검색일: 2024.05.20.)

원자력 진흥법. (시행 2024.4.24. 법률 제20064호, 2024. 1. 23., 일부개정). <https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9/%EC%9B%90%EC%9E%90%EB%A0%A5%20%EC%A7%84%ED%9D%A5%EB%B2%95> (검색일: 2024.05.20.)

전기사업법. (시행 2024. 5. 1. 법률 제19813호, 2023. 10. 31., 일부개정) 제2조, 제7조의 2, 제16조의 5. <https://www.law.go.kr/법령/전기사업법> (검색일: 2024.05.20.)

집단에너지사업법. (시행 2023.12.14. 법률 제19440호, 2023. 6. 13., 일부개정]. <https://www.law.go.kr/lsInfoP.do?lsiSeq=251703&efYd=20231214#0000> (검색일: 2024.05.20.)

부록



<표 부록-1> 수소 기업의 세부 사업 현황

밸류체인 구분		기업 수	
소재/ 부품	소재		10
	소재	세라믹(Ceramic)	0
		전해질(Electrolyte)	2
		촉매(Catalyst)	3
		분리막(Membrane)	5
		코팅시스템(Coating system)	0
		기타	2
	부품		16
	부품	GDL(가스 확산 레이어)	2
		GDE(가스 확산 전극)	0
		MEA(분리막 전극 조립체)	7
		연결부/양극성판 (Interconnects / Bipolar plates)	5
		셀(Cell)	2
		밸브(Valve)	2
		파이핑(Piping)	0
기타		0	
생산 시스템		12	
수소 생산	수전해 스택(Electrolyzer Stacks)		1
	수전해 시스템(Electrolyzer Systems)		9
	수전해 기술	Alkaline	3
		PEM	4
		SOEC	0
		AEM	0
		기타	0
	가스 개질(Gas reformer)		2
	부분산화(Partial oxidation)		0
	바이오매스(Biomass to H2)		0
	폐기물(Waste to H2)		1

		기타	0		
하위시스템		물 정화기(H ₂ O Purifier)	0		
		수소 정제기(H ₂ Purifier)	0		
		정류기(Rectifier)	1		
		기타	0		
		전환 기술	1		
수소 전환		액화(Liquefaction)	1		
		기화(Vaporization)	0		
		저장	9		
수소 저장	저장 형태	극저온(Cryogenic) 액화수소		1	
		가스		7	
		가스 실린더 타입	Type I		2
			Type II		0
			Type III		1
			Type IV		2
			Type V		0
		고체 캐리어		0	
		액체 유기수소 운반체(LHC / LOHC)		0	
	기타		1		
	실린더 밸브(Cylinder valve)		0		
		수소 충전기/충전소	13		
수소 충전		압축기(Compressor)	1		
		크라이오 펌프(Cryogenic pump)	0		
		냉각기(Chiller)	1		
		열 교환기(Heat exchanger)	0		
		디스펜서(Dispenser)	1		
		기타	0		
		발주사(Integrator)	6		
		설계, 조달, 시공(EPC)	6		
		운영사(Operator)	3		
		연료전지(Fuel Cells)	18		
수소 활용(연료전지)	연료전지 밸류체인	연료전지 스택(Fuel Cell Stack)		4	
		주변 보조 기기(BOP)	가습기(Humidifier)		0
			수소 재순환 시스템(H ₂ recirculation system)		0
			송풍기(Air blower)		2
			전력 변환(Power conversion)		3
			메탄올 개질기(methanol reformer)		0

		기타	2
		연료전지시스템, 조립 (Fuel Cell Systems)	11
		연료전지 시스템 제조, 통합 (Fuel Cell Integrators)	7
연료전지 기술		SOFC	5
		PEMFC	12
		PAFC	2
		DMFC	2
		AFC	0
		MCFC	2
		기타(Alkaline Fuel Cell, Direct Ethanol Fuel Cells, Direct Oxygen, Liquid Cooled Fuel Cells)	0
연료전지 시장 구분		이동형(Portable)	5
		수송용(Transport)	6
		소형 고정형(~100KW)	10
		대형 고정형(> 100 kW)	3
		수소활용(엔진)	0
수소 활용 (엔진)		수소연료 내연기관	0
		기타	0
		총 기업 수	51

자료: Enerdata(2022. 7) 수소 기업 DB 바탕으로 저자작성.

협동연구총서 24-06-04

**신산업정책 연구: 신산업과 수소 경제 : 중소형 원자로
활용 방안**

발행 2024년 06월
발행처 경제·인문사회연구회
주소 세종특별자치시 시청대로 370 세종국책연구단지 연구지원동
전화 044) 211-1000
홈페이지 www.nrc.re.kr
ISBN 979-11-5567-726-1
979-11-5567-722-3(세트)

* 연구회의 허락 없이 보고서 내용의 일부 또는 전체를 복사하거나 전재하는 행위를 금합니다.