

수시
연구 보고서
23-01

한·일 수소 정책 및 기술 동향 분석

KOREA ENERGY ECONOMICS INSTITUTE

●
이준영



한·일 수소 정책 및 기술 동향 분석

A study on hydrogen policy and technology trends
in Korea and Japan

이준영



에너지경제연구원
Korea Energy Economics Institute

저 자 이준영

연 구 진

연구책임자 이준영(에너지경제연구원 부연구위원)

연구참여자 김기환(에너지경제연구원 연구위원)
안지영(에너지경제연구원 부연구위원)
강지현(에너지경제연구원 위촉연구원)

외부연구진

연구참여자 김규판(대외경제정책연구원 선임연구위원)

기타기여자 김예지나(에너지경제연구원 전문원)

목 차

요약	vii
제1장 서론	1
제2장 일본의 수소 정책 및 기술 현황 분석	3
1. 일본의 수소 관련 정책	3
1.1. 수소기본전략	3
1.2. 수소·연료전지전략 로드맵	6
1.3. 그린성장전략 및 그린이노베이션 기금	7
2. 일본의 수소 생산	9
2.1. 화석연료 개질	9
2.2. 수전해	11
3. 일본의 수소 저장·운송	21
3.1. 액화수소	22
3.2. 유기하이드라이드(유기화합물)	23
3.3. 암모니아	24
4. 일본의 수소 활용	25
4.1. 수소자동차	25
4.2. 수소발전	28
4.3. 연료 암모니아	31
4.4. 산업	37
4.5. 메타네이션	42
5. 소결	52

제3장 한국의 수소 정책 및 기술 현황 분석 53

1. 한국의 수소 관련 정책	53
1.1. 수소경제 활성화 로드맵	53
1.2. 수소경제 육성 및 수소 안전거리에 관한 법률	55
1.3. 수소 기술개발 로드맵	57
1.4. 제1차 수소경제 이행 기본계획	58
1.5. 제5차 수소경제위원회	59
2. 한국의 수소 생산	60
2.1. 현황	60
2.2. 블루수소	60
2.3. 수전해	61
3. 한국의 수소 저장·운송	64
3.1. 현황	64
3.2. 액화수소	64
3.3. 암모니아	65
3.4. 청경수소 인증제	66
3.5. 기술 목표	67
4. 한국의 수소 활용	68
4.1. 수소 자동차	68
4.2. 수소-암모니아 발전	70
4.3. 산업에서의 활용	72
5. 소결	73

제4장 한일 수소 정책 및 기술 현황 비교 및 시사점 검토 75

1. 생산	75
2. 유통·저장	77
3. 활용	78

4. 시사점	79
4.1. 수소 생산 가격 설정	79
4.2. 기초과학 R&D 투자 증대	80
4.3. 종합상사의 활용	81
5. 결론	82

참고문헌	85
-------------	-----------

표 목차

<표 2-1> 일본의 수소기본전략(2017년 12월)	4
<표 2-2> 그린이노베이션 R&D 프로젝트: 수소-암모니아 개발 분야	8
<표 2-3> 알칼리수전해장치를 이용한 수소제조 실증사업: FH2R	13
<표 2-4> H2-YES 프로젝트 개요	14
<표 2-5> 수전해기술의 특징 비교	16
<표 2-6> 연료전지의 종류	17
<표 2-7> 경제산업성의 고온가스로를 활용한 수소 제조기술 실증 사업: 2022년도	20
<표 2-8> 수소캐리어의 비교: 수소에너지의 저장·운반 기술	22
<표 2-9> 일본정부의 수소·연료전지 실증 프로젝트 (2002년~2010년)	26
<표 2-10> SIP 연구개발 성과: 암모니아 직접 연소(혼소)	34
<표 2-11> 그린성장전략상 합성메탄 도입 목표	43
<표 2-12> 일본의 메타네이션 기술개발 현황: 사바티에 반응	44
<표 2-13> INPEX의 메타네이션 실증사업 개요	46
<표 2-14> 일본의 메타네이션 기술개발 현황: 바이오 메타네이션1)	47
<표 2-15> 오사카가스의 바이오 메타네이션 필드시험 개요	48
<표 2-16> 일본의 메타네이션 기술개발 현황: 혁신적 메타네이션1)	49
<표 2-17> 일본의 메타네이션 공급망 구축 현황	51
<표 3-1> 수소 기술개발 로드맵 주요 내용	57
<표 3-2> 7대 핵심 기반 기술	59
<표 3-3> 수소발전 입찰시장 개요	72
<표 3-4> 수소환원제철	73
<표 4-1> 한일 수소 정책 및 기술 현황 비교	78

그림 목차		
	[그림 2-1] 「수소·연료전지 전략 로드맵」(2019.3월)	6
	[그림 2-2] 일본의 수소 성장전략 공정표	7
	[그림 2-3] 수소 제조 방법: 화석연료개질	9
	[그림 2-4] 소형 수증기개질 장치 사례	10
	[그림 2-5] 수증기개질에 의한 수소제조 사례: 하네다 수소충전소	10
	[그림 2-6] 세계 주요 재생에너지 수소 프로젝트	12
	[그림 2-7] 고체산화물형 수전해법(SOEC)의 기본원리 및 구조	16
	[그림 2-8] 일본정부의 차세대혁신형 원자로 기술개발 계획	18
	[그림 2-9] 일본원자력연구개발기구(JAEA)의 고온공학시험연구로 (HTTR)	19
	[그림 2-10] 일본의 호주 수소개발 및 국내 도입 프로젝트(개념도)	23
	[그림 2-11] 수소의 메틸시클로hex산(MCH) 형태로의 운송·저장	24
	[그림 2-12] 수소 모빌리티 분야의 2030년 목표	27
	[그림 2-13] 일본 미쓰비시중공업의 수소가스터빈	30
	[그림 2-14] 내각부의 SIP 연구개발: 암모니아 제조·이용기술	33
	[그림 2-15] JERA Zero Emission 2050:로드맵	35
	[그림 2-16] JERA·IHI의 암모니아 혼소 실증사업	36
	[그림 2-17] 일본제철의 탄소중립 철강생산 프로세스	38
	[그림 2-18] 고로 수소환원기술(COURSE50) 개발: 개념도	40
	[그림 2-19] 고로 수소환원기술(COURSE50) 개발: 외부수소 등 활용	40
	[그림 2-20] 가스의 온도대별 에너지 이용용도	43
	[그림 2-21] 사업이미지	46
	[그림 2-22] 필드시험 이미지	48
	[그림 2-23] 혁신적 메타네이션 기술	49
	[그림 2-24] 일본 메타네이션의 공급망 구축(개념도)	50
	[그림 3-1] 수소경제 활성화 로드맵 연도별 추진 목표	54
	[그림 3-2] 수소경제 활성화 로드맵 연도별 수소 공급 및 가격 목표	55
	[그림 3-3] 국내 수소 경제 정책 정리	56
	[그림 3-4] 해외수소 도입 관련 기술 개발	65

[그림 3-5] 암모니아 인수 거점 및 배관 구축 계획	66
[그림 3-6] 수소 트럭 내구성	69

요약

1. 연구의 필요성 및 목적

■ 연구의 필요성

- 정부는 세계 최초로 수소법을 제정하고, 다양한 정책 및 로드맵으로 수소경제를 활성화 하는 데에 많은 자원을 아끼지 않았으며, 세계1등 국가로 나아가기 위한 수소 전주기 지원 정책을 수립하는 상태
 - 제5차 수소경제위원회를 통해 변함없는 수소 경제 추진 정책을 선보임.
 - 2030 NDC 상향안과 제10차 전력수급기본계획에 포함된 수소·암모니아 혼소 등 수소의 역할이 강조됨.
- 일본 경제산업성의 수소산업 향후 발전과제를 살펴보면, 우리나라와 유사한 점이 많은 것을 확인할 수 있음.
 - 수소 활용처의 다양화, 그린화
 - 자원외교, 인프라 수출 등의 종합 추진

■ 연구의 목적

- 본 연구의 목적은 한·일 수소 관련 정책 및 기술 현황을 분석하고, 우리나라가 가진 고유한 특성을 바탕으로 수소 산업 발전 방향성에 있어, 일본의 장점을 지향하고 단점을 지양하는 데에 있음.

2. 연구내용 및 주요 분석 결과

■ 일본의 수소 관련 정책

○ 일본의 수소 관련 정책

- 일본은 2014년에 ‘수소·연료전지 전략 로드맵’을 시작으로, 2017년에는 세계 최초로 ‘수소기본전략’을 수립. 또한 2016년과 2019년에 로드맵을 개정하였으며, 2023년에는 기본전략을 개정
- 일본의 ‘수소기본전략’은 2050년까지 수소사회 구현을 목표로 하고 있으며, 수소 가격을 저렴하게 만들기 위한 다양한 전략과 계획을 세우고 있음. 이를 위해 일본은 수소 공급망의 개발, 국내 재생에너지의 활용, 산업, 전력, 모빌리티분야에서의 수소 활용 확대 등을 목표
- 2023년에 개정된 ‘수소기본전략’은 중간 목표와 조기 양산, 산업화를 새롭게 설정하였으며, 2030년까지 수소 사용량을 최대 300만톤, 2040년까지 약 1200만톤으로 증가시키는 목표

■ 일본의 수소 생산

○ 일본 수전해 실증 현황

- 전 세계적으로는 주로 유럽 국가들이 재생에너지 전력을 이용한 수소 제조 프로젝트를 진행하고 있지만, 일본 역시 아사히카세이의 FH2R 프로젝트와 히타찌조선의 H2-YES 프로젝트 등을 통해 그린수소 프로젝트를 추진

○ 일본 고온가스를 활용한 수소 생산

- 고온가스로(HTGR)는 2050년까지 수소 제조 비용 목표를 달성하기 위한 수단으로 간주되고, 일본원자력연구개발기구(JAEA)의 HTTR을 통해 기술 개발이 진행
- 경제산업성은 “초고온을 이용한 수소 대량제조기술 실증 사업”을 추진하여 2030년까지 탈탄소수소 제조에 필요한 기술과 안전성을 확보하려는 계획
- 일본 정부는 고온가스의 실증로를 2029년부터 제작·건설하고 2030년에 운전을 시작할 예정이며, 이를 위해 적극적인 예산 지원을 계획

■ 일본의 수소 저장 및 운송

- 현재 수소캐리어 후보로는 수소, 압축수소, 액화수소, MCH/톨루엔, 암모니아, 수소저장합금 등이 있음.
 - 후보들은 각각의 특성을 가지고 있어 하나의 특성으로 집약할 수 없음.
 - 사업자들은 현재 용도에 따라 선택적으로 수소캐리어를 사용하고 있으며, 특정 수소캐리어에 중점을 두거나 기술 혁신을 통해 문제를 해결할 경우 일체화가 진행
 - 수소를 암모니아로 전환하기 위해 대규모 크래킹 기술의 개발이 필요하며, 일본은 해당 기술의 개발을 지원하고 제조 기술 효율화 및 다양한 분야에서 의 이용을 추진

■ 일본의 수소 활용

- 일본은 40여 년간 수소와 연료전지 기술 연구를 통해 세계 최고 수준의 기술과 노하우를 보유
 - 미쓰비시중공업은 수소가스터빈을 개발하고 있으며, 수소의 연소특성에 대응하여 환경성능과 효율성을 갖춘 연소기로 평가
 - 미쓰비시중공업은 암모니아 연소기를 개발하고 실증하고 있으며, 암모니아 혼소실증사업과 암모니아 발전의 상용화를 추진. 일본은 2030년까지 수소-암모니아 발전을 촉진하고 탄소중립을 달성하기 위해 규제와 지원책을 통해 화력발전의 탈탄소화를 목표
 - Mitsubishi Power는 수소발전 기술을 다양한 분야에서 개발하고 있으며, 전 세계적인 수소가스터빈 프로젝트에도 참여. 이러한 연구와 기술개발은 수소를 활용한 클린하고 친환경적인 에너지 발전을 실현하기 위함.

■ 한국의 수소 정책 및 기술 현황

- 한국의 수소 생산
 - 한국의 수소산업은 빠른 성장을 이루고 있으며, 2021년에는 약 240만 톤의

- 수소가 생산되었는데, 그 중 53.3%는 그레이수소, 46.6%는 부생 수소로 생산
- 국내 청정 수소 생산기술의 목표는 시스템 구현과 국산화, 알칼라인과 PEM 수전해 소재의 개선, 수전해 스택과 시스템의 설계 개발, 미래형 수소 생산 기술에 대한 연구와 개발

○ 한국의 수소 운송 및 저장

- 유통 부문에서는 수소 튜브트레일러를 사용하여 배관 외 지역에서 수소를 유통하고 있으며, 현재 국내에는 950대의 수소 튜브트레일러가 운영 중. 전국에는 244개의 수소충전소가 구축되어 있으며, 수소 유통 및 충전 인프라 개발이 중점적으로 이루어짐.
- 유통 및 저장 부문에서는 청정수소의 해외 도입을 위한 인프라 개발이 진행되고 있으며, 암모니아 기반 청정수소 생산 파일럿 플랜트 실증화 프로젝트도 진행 중
- 기술 목표로는 효율적인 수소 운송과 저장 기술 개발, 암모니아 도입을 통한 해외 수소 수입과 활용 기반 기술 개발, 수소 보급과 충전 인프라 구축 등이 계획. 또한, 장거리 운송 기술 개발과 수소 충전 인프라 기술 개발도 추진될 예정

○ 한국의 수소 활용

- 한국의 수소경제 활성화 로드맵은 초기에 수소차와 수소연료전지 산업을 중심으로 진행되었으며, 2023년 5월을 기준으로 수소차는 32,168대가 보급.
- 발전용 연료전지 분야에서는 2023년 5월말까지 약 917.21MW의 발전용 연료전지가 국내에 보급되었으며, 꾸준한 성장이 이루어짐.
- 수소 활용 부문에서는 모빌리티기술 개발과 수소 발전 기술 개발, 인프라 구축 프로젝트가 주요하며, 암모니아 기반 청정수소 발전 실증과 가스터빈을 활용한 수소혼소발전 실증 프로젝트 등이 진행 중
- 기술 목표로는 수소차의 연비 개선과 내구성 향상, 대형 모빌리티를위한 연료전지 대용량화 및 리페키징기술 개발, 수소 철도 및 수소선박, 드론용연료전지 시스템 등의 기술 개발이 계획
- 수소 전소기술의 개발과 수소·암모니아 활용 발전 시스템 구축을 위한 기술 개발도 추진될 예정

3. 결론 및 정책 시사점

■ 결론

- 일본은 앞선 기술력을 바탕으로 많은 수소 분야에서 한국보다 앞서 있음을 확인. 그럼에도 불구하고, 우리나라도 빠르게 뒤쫓고 있어 격차를 줄여나갈 수 있는 여지가 충분히 있다고 보여짐.
 - 일본은 그린수소 활용 프로젝트를 통해 세계적인 선두를 달리고 있으며, 우리나라는 같은 분야에서 일본과의 격차를 메우기 위한 노력이 필요. 부품 국산화 문제 등 추가적인 도전과제도 해결해야 함.
 - 일본은 여러 실증 프로젝트를 통해 수소 운송에 대한 광범위한 기술과 경험을 축적. 우리나라는 이 분야에서 초기 단계에 있지만, 다양한 정책적 계획을 수립하여 개발을 추진
 - 일본은 자동차, 발전 분야에서의 수소 활용을 증대시키고, 그린 수소의 활용 범위를 넓혀 메타네이션에도 적극 활용하고 있음. 한국도 이와 유사하게 수소 모빌리티와 발전 분야에서의 기술 개발을 적극 추진

■ 정책 시사점

- 일본의 수소 기술 선도력은 기초 기술에 대한 철저한 연구와 개발에서 비롯됨. 이는 향후 다양한 사용처에서 이 기술들을 활용할 수 있음을 보여줌.
- 수소 가격에 대한 가이드라인을 계속적으로 보여주는 것이 비용을 고려하여 수익을 내는 기업에게 가장 필요한 정보라고 할 수 있음.
- 일본의 해외 수소 도입 및 안정적인 저장, 운송 경험은 우리나라가 이 분야에서 진전을 이루는데 큰 도움이 될 수 있으며 물산회사와 같은 종합상사 회사들과의 연계가 바람직함.

제1장

서론

탄소 중립 사회로의 전환은 전 세계적인 과제로 다수의 국가들이 전략적으로 대응하고 있다. 이 과제를 수행하기 위한 핵심적인 방안 중 하나는 대체 에너지원의 개발과 활용이며, 수소 에너지는 높은 에너지 효율성과 탄소 중립성을 가진 주요 대안으로 주목받고 있다. 본 보고서에서는 이 혁신적인 에너지 기술을 선도하고 있는 한국과 일본의 수소 정책과 기술을 비교 분석해보고자 한다.

우리나라와 일본은 2019년 일본의 경제제재로 인해 복잡한 관계를 맞이하였으나, 이러한 상황을 극복하고 2023년 6월에는 수소 안전과 산업 분야에서의 정책 협력을 강화하기 위한 국장급 회의를 개최하였다. 이를 통해 두 나라는 관계 개선에 앞장서고 있다. 세계 3위의 경제 대국인 일본은 수소 기술, 특히 연료전지 자동차 분야에서의 선구적 역할을 수행해 왔다. 2017년에 제시되고 2023년에 개정된 '수소 기본 전략'은 2050년까지 수소 기반 사회를 구현하겠다는 야심찬 비전을 담고 있다.

세계적인 경제 강국으로 부상하고 있는 우리나라도 수소 경제의 구현에 앞장서고 있다. 2019년 발표된 '수소경제 로드맵'과 수소경제위원회를 통해, 우리나라는 세계 최대 규모의 수소전기차 생산과 광범위한 수소 충전 인프라 구축을 목표로 하는 대담한 계획을 발표하였다. 특히, 수소전기차, 수소충전소, 발전용 연료전지의 보급에서 세계 1위를 달성하며, 세계 수소 산업의 선두주자로서의 역할을 다하고 있다.

한국과 일본은 동아시아 지역에 위치해 있고, 모두 고도로 산업화된 나라로서

에너지 문제에 직면해 있다는 공통점이 있다. 두 국가는 비슷한 문제를 해결하기 위해 수소를 통한 에너지 전환에 투자하고 있으며, 그 경험과 방향성을 서로 비교 및 참조하는 것은 매우 유의할 수 있다. 이러한 비교의 목적은 크게 세 가지로 볼 수 있다.

첫째로, 벤치마킹이다. 일본은 수소 에너지 분야에서 세계적인 선두주자로서 여러 기술 개발 및 실증을 진행하고 있다. 이런 일본의 선진 사례를 분석하고 이해함으로써, 한국은 자체의 수소 에너지 전략을 개선하고, 수소 기술 개발 및 시장 진입에 있어서 새로운 방향성을 찾는 데 도움이 될 수 있다.

둘째로, 경쟁력 향상이다. 한국과 일본 모두 비슷한 조건 및 환경 하에서 수소 에너지 전환을 추구하고 있다. 이는 두 국가가 수소 에너지 분야에서 리더십을 차지하기 위한 경쟁 상황을 만들고 있음을 의미한다. 일본의 정책 및 기술을 이해하고 분석함으로써 한국은 자신의 수소 에너지 전략의 경쟁력을 평가하고 향상시킬 수 있다.

셋째로, 협력 기회 탐색이다. 만약 한국과 일본이 수소 에너지 분야에서 공통된 목표를 가지고 있다면, 이는 양국 사이의 협력 기회를 제공할 수 있다. 기술 개발, 공급망 구축, 시장 개방 등 다양한 형태의 협력을 통해 한국과 일본은 수소 에너지 전환을 가속화하고, 그로 인해 생기는 기회를 최대한 활용할 수 있을 것이다. 이러한 과정에서 양국은 자신들의 수소 에너지 정책과 전략을 보완하고 개선할 수 있는 방안을 발견할 수 있다.

이 보고서에서는 우리나라와 일본의 수소 정책과 기술에 대해 종합적으로 비교하고, 양국의 수소 기술 및 정책의 현황, 미래 전망, 그리고 과제들을 자세히 분석할 예정이다. 더불어 각 나라가 수소 기반 경제를 구축하기 위해 채택한 구체적 전략, 법적 틀, 민관 협력, 연구 및 개발 단계 등을 살펴볼 것이다.

제2장

일본의 수소 정책 및 기술 현황 분석

제2장은 일본의 수소 관련 정책 및 기술 현황에 대해 분석한다. 수소 및 관련 에너지에 대한 정책을 일본 정부에서 발표한 자료를 바탕으로 살펴본 후, 실증과 기술적 과제에 대해서 어떠한 목표를 세웠는지를 살펴본다.

1. 일본의 수소 관련 정책

일본은 2014년 6월 경제산업성이 책정한 ‘수소·연료전지 전략 로드맵’을 시작으로, 2017년 ‘수소기본전략’을 세계 최초로 수립하며 세계 어느 국가보다 수소 관련 정책에서 빠른 움직임을 보였다. 로드맵도 2016년, 2019년 두 번에 걸쳐 개정하고, 기본전략 또한 2023년 5월에 개정하며 발 빠르게 변화하는 수소 생태계에서 선도 주자로서의 지위를 잃지 않으려고 노력하고 있다. 본 절에서는 일본의 수소 관련 정책을 간략하게 살펴본다.

1.1. 수소기본전략

일본 정부는 2017년 12월 세계 최초의 국가전략으로 ‘수소기본전략’을 발표하여 국가차원의 수소산업 육성을 추진하였다. 이 전략은 수소를 에너지로 활용하는 수소

사회를 실현하기 위한 목표와 2030년까지의 추진계획을 제시하고 있다. 일본은 2050년을 목표로 수소사회 구현에 노력을 하고 있다는 내용을 담고 있다.¹⁾

또한, 일본 정부는 수소 가격을 가솔린이나 LNG와 같은 다른 에너지의 가격 수준으로 인하하고자 구체적인 목표를 설정한다. 현재 수소 충전소에서의 가격은 1N m³당 100엔인데, 2030년까지는 30엔으로 인하되며, 장래에는 20엔까지 낮추고자 한다.

수소 가격을 인하하기 위해 일본 정부는 세 가지 조건을 제시한다. 첫째, 해외 갈탄이나 잉여 재생에너지와 같이 저렴한 원료를 사용하여 수소를 생산하는 것이며, 둘째, 대량 생산과 대량 수송을 위한 수소 공급망을 구축하는 것이다. 마지막으로 수소를 연료로 사용하는 연료전지차(FCV), 발전, 산업 등 대규모 이용을 촉진하는 것이며 이러한 노력을 통해 일본 정부는 수소에너지의 가격을 낮추고, 수소사회의 구현을 위해 다양한 계획과 전략을 추진하고 있다.

〈표 2-1〉 일본의 수소기본전략(2017년 12월)

전략		주요 내용
수소 공급확보	1. 해외 미활용 자원·재생에너지 활용	- 해외의 저렴한 미활용 화석자원(예. 갈탄)의 수소화 혹은 CCS 처리 후 국내 반입
	2. 국제적 수소 공급망 개발	①액화수소 공급망 개발 ②유기화학하이드라이드 공급망 개발 ③에너지캐리어로서 암모니아 활용 ④메타네이션 검토 ⑤기존 파이프라인을 활용한 국내 운송
	3. 국내 재생에너지의 도입확대와 지방창생	- 국내 재생에너지기원의 수소 활용 확대 - 지역자원의 활용 및 지방창생
수소 이용확대	4. 전력분야	- 2030년까지 수소발전비용을 17엔/kWh으로 낮추고, 이에 필요한 수소조달량을 연간 30만톤(1GW의 발전용량)으로 설정
	5. 모빌리티분야	FCV와 수소충전소를 두바퀴로 삼아 추진 재생에너지기원 수소충전소 연료전지버스의 보급확대 연료전지지게차의 보급확대 연료전지트럭의 개발·상용화 연료전지선(船)의 개발·도입
	6. 산업분야	- 산업프로세스(제조공정)·열이용에서 수소활용의 가능성 검토

1) 김규판 외(2022), pp.173-174.

전략	주요 내용
7. 연료전기 기술 활용	가정용 연료전지(‘에네팜’):PEFC(고체고분자형 연료전지)와 SOFC(고체산화물형 연료전지)→해외시장개척. 업무·산업용 연료전지:초기비용절감과 발전효율 개선에 주력
8. 혁신적 기술개발	고효율 수전해·인공광합성, 수소고순도화침투막 등 새로운 수소제조기술 개발 고효율 수소액화기·장수명 액화수소보존재료 개발 저렴하고 고효율의 에너지캐리어 개발 연료전지의 컴팩트화 및 효율·신뢰성·비용절감 추구
9. 국제협력	- 전략적 국제협력 모델 구축: 수소제조에서 운송·저장, 이용에 이르기까지 수소공급망 전체의 기술을 패키지화하여 해외에 수출 - 수소관련 국제기구 등과 협력: 글로벌 기업의 CEO협의체인 수소협의회(Hydrogen Council)와 국제에너지기구(IEA), IPHE(International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy) 등 국제기구를 통한 발언권 확대 - 국제표준화:수소기술의 국제표준 ISO/TC197)1)에 일본 기술의 표준화를 적극 제안. 수소 및 연료전지 자동차에 관한 글로벌기술기준(Global Technical Regulations) 책정에 적극 관여
10. 대국민홍보 강화 및 지역 간 협력	- 수소의 안전성, 수소이용의 의의 등에 대해 대국민 홍보강화 - ‘연료전지자동차 등의 보급촉진을 위한 지자체연계회의’ 등 협의회를 통해 정부와 지자체간 정보공유·소통강화

주: 1)수소의 제조, 저장, 운송, 측정 및 이용 시스템·장치에 관한 표준화를 목적으로 한 위원회.

자료: 김규판 외(2022). pp.173-174.

일본 정부는 2023년 5월, 6년 만에 개정된 ‘수소기본전략’을 발표했다.²⁾ 이번 개정안은 중간 목표와 조기 양산 및 산업화를 새롭게 설정하고 있으며, 물을 전기분해하여 수소를 생산하는 전해조와 수소를 연료로 전기를 생산하는 연료전지 등 9가지 핵심 전략 분야를 설정했다. 일본은 향후 15년 동안 15조엔 이상을 투자하여 수소 사용량을 2030년까지 최대 300만톤, 2040년까지 약 1,200만톤으로 현재 수준의 6배로 증가시키는 목표를 가지고 있다. 또한, 수소 산업의 국제경쟁력 강화를 위해 국내외에 수전해장치 도입 목표량을 설정하고, 탄소중립을 위한 사업 환경 정비 등을 추진할 예정이다.

2) 再生可能エネルギー—水素等関係閣僚会議. (2023). pp.5-39.

그러나 개정안에서, 재생에너지 기반의 수소 충전소 목표가 사라지고, 연료전지 차량 보급 목표가 하향 조정되었으며, 수소 생산설비 비용 절감에 대한 목표들을 달성하지 못해 연기된 부분이 많이 보여, 2017년 전략에 비해 부족하다는 지적이 있다.

1.2. 수소·연료전지전략 로드맵

경제산업성은 수소사회 실현을 위해 2014년 ‘수소·연료전지 전략 로드맵’을 발표하였고, 이후 2016년, 2019년 두 차례에 걸쳐 목표와 대응조치 등을 개정하였다. 로드맵은 2030년까지 80만대의 연료전지자동차 보급목표를 세우고, 2025년까지 수소충전소 320곳을 건설할 것을 명시하였다. 또한 연료전지 버스, 지게차, 선박 등 연료전지의 적용분야를 확대하는 내용을 담고 있지만, 그린수소 도입량에 대한 언급은 부진하였다.3)

[그림 2-1] 「수소·연료전지 전략 로드맵」(2019.3월)

기본전략상 목표		추구해야 할 목표	목표 달성을 위한 대응조치
2030년	화석+CCS 수소비용 30원/Nm ³ (2030년) 20원/ Nm ³ (미래)	2020년대 전반 <ul style="list-style-type: none"> 제조·갈탄 가스화에 의한 제조비용(수 백원/Nm³→12원/Nm³) 저장·운송: 액화수소 탱크의 규모(수 천 m³→ 5만 m³) 수소액화효율 (13.6kWh/kg→6kWh/kg) 	<ul style="list-style-type: none"> 갈탄가스화로의 대형화·고효율화 액화수소탱크의 단열성 제고·대형화
	재생에너지수소 수전해시스템 비용 5만 원/kW(미래)	2030년 <ul style="list-style-type: none"> 수전해시스템 비용(20만 원/kW→5만 원/kW) 수전해 효율 (5kWh/Nm³→4.3kWh/Nm³) 	<ul style="list-style-type: none"> 후쿠시마 나미에미치(浪江町) 실증 성과를 활용한 모델 지역 실증 수전해장치의 고효율화·내구성 제고 지역자원을 활용한 수소공급망 구축
2025년	다목적연료전지 FCV 20만 대(2025년) 80만 대(2030년)	2025년 <ul style="list-style-type: none"> FCV(연료전지차)와 HV(하이브리드차)의 가격차 (300만 원 → 70만 원) FCV 주요 시스템의 제조비용: 연료전지 약 2만 원/kW → 0.5만 원/kW 수소저장 약 70만 원 → 30만 원 	<ul style="list-style-type: none"> 철저한 규제개혁과 기술개발
	수소충전소 320곳(2025년) 900곳(2030년)	2025년 <ul style="list-style-type: none"> 정비·운영비 (정비비 3.5억 원 → 2억 원, 운영비 3.4천 만원 → 1.5천 만 원) 충전소 구성기기 비용 (압축기 0.9억 원 → 0.5억 원, 촉입기 0.5억 원 → 0.1억 원) 	<ul style="list-style-type: none"> 전국적인 수소충전소 네트워크, 주말영업 확대 기술리충전소/민이점 병설 수소충전소 확대
	수소버스 1,200대(2025년)	2020년대 전반 <ul style="list-style-type: none"> FC 버스 차량 가격 (1억 500만 원 → 5,250만 원) ※트럭, 선박, 철도 분야에서 수소이용 확대를 위해 저점액이나 기술개발등을 추진 	<ul style="list-style-type: none"> 수소버스 대응 수소충전소 확대
	연료전지 상용화 (2030년)	2020년 <ul style="list-style-type: none"> 수소 전소발전에서의 발전 효율 (26%→ 27%) ※1MW급 가스터빈 	<ul style="list-style-type: none"> 고효율 연소기 등 개발
연료전지 Grid Parity의 조기 실현	2025년 <ul style="list-style-type: none"> 업무·산업용 연료전지의 Grid Parity 실현 	<ul style="list-style-type: none"> Cell Stack의 기술개발 	

자료: 經濟産業省(2019.6.), p.5.

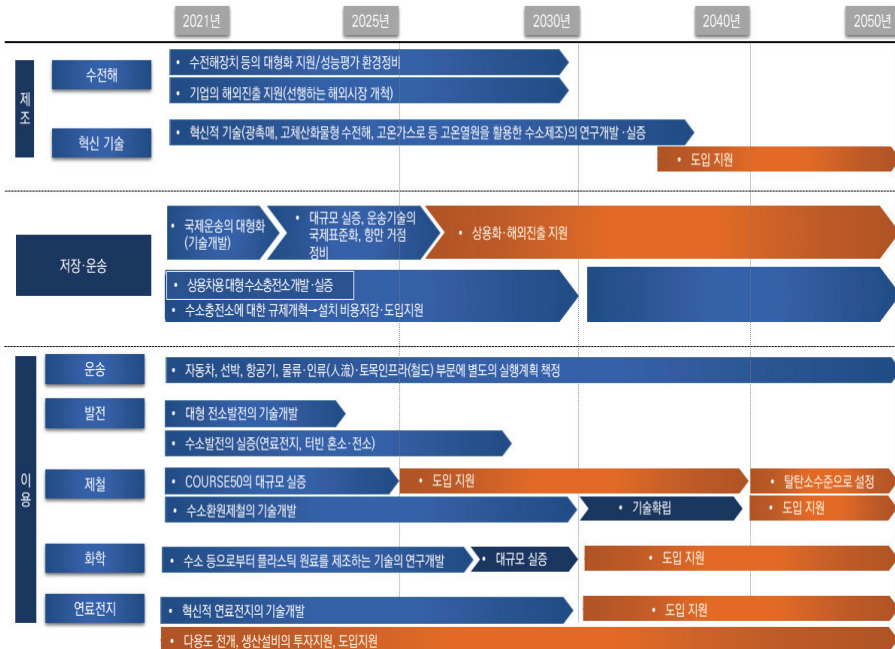
3) 經濟産業省(2019.6.), p.16.

1.3. 그린성장전략 및 그린이노베이션 기금

일본의 그린성장전략은 2020년에 발표되고 2021년에 재개정 되었으며 향후 성장이 예상되는 수소를 포함한 14개 분야를 중점분야로 선정하여 각 분야별 성장목표를 정해 연구개발, 실증사업, 도입확대, 자립·상용화 등의 4단계별 실행계획을 책정하는 특징을 보여준다. 특히 수소에 관해서는 발전, 산업, 운송 등 폭넓게 활용되는 탄소중립 기술의 핵심으로써 국내 도입량을 확대하고 수소발전비용을 가스터빈 이하로 저감시키려는 확고한 목표를 설정하였다.⁴⁾

경제산업성은 그린성장전략에서 제시하고 있는 14개의 중점분야를 지원하기 위해 2021년 2조엔 규모의 그린이노베이션 기금을 NEDO(신에너지·산업기술종합개발기구)에 설치하였다.

[그림 2-2] 일본의 수소 성장전략 공정표



자료: 經濟産業省(2021). 「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」pp.139-140.

4) 일본의 그린성장전략에 관한 구체적 내용은 經濟産業省(2021.6) 참고.

〈표 2-2〉 그린이노베이션 R&D 프로젝트: 수소·암모니아 개발 분야

분야	연구개발 항목	프로젝트:사업체
대규모 수소공급망 구축	①국제수소공급망기술의 확립 및 액화수소관련기기의 평가기반 정비	①수소수송기술의 대형화·고효율화 → i)MCH서플라이체인실증: ENEOS, ii)액화수소 서플라이체인의 상용화실증: 일본수소에너지·ENEOS·이와타니산업, ②액화수소관련기기의 연구개발 관련 재료평가기반의 정비: 물질재료연구기구(NIMS) ③혁신적 액화, 수소화, 탈수소기술의 개발→ i)직접 MCH전해합성(Direct MCH) 기술개발: ENEOS, ii)수소액화기용 대형고효율기기의 개발:가와사키중공업
	②수소발전기술(혼소, 전소)을 실현하기 위한 기술 확립	①수소발전기술(혼소, 전소)의 기술실증→ i)대규모 수소서플라이체인구축 관련 수소혼소발전의 기술검증:JERA, ii)기설화력발전소를 활용한 수소혼소/전소발전실증:간사이전력, iii)CO ₂ -free 수소발전실증:ENEOS
재생에너지유래의 전력을 활용한 수전해에 의한 수소제조	①수전해장치의 대형화기술 개발, Power-to-X 대규모실증:수전해장치의 대형화·모듈화 기술개발, 뛰어난 신부품·소재 장치에 대한 실장기술 개발, 열수요나 산업프로세스의 탈탄소화 실증	①대규모 알칼리 수전해수소제조 시스템 개발 및 Green Chemical Plant 실증:아사히카세아·닛키홀딩스, ②대규모 P2G 시스템*에 의한 에너지효율전환·이용기술 개발:야마나시현기업국·도쿄전력·도레이·히타찌조선·지멘스에너지·미우라공업·카지테크 * 태양광 등 재생에너지전력을 활용하여 물을 전기분해하여 수소를 제조하는 기술
	②수전해장치의 성능평가기술 확립 프로젝트	①수전해장치의 성능평가기술 확립:산업기술종합연구소(AIST)
제철프로세스에서의 수소활용	①고로에 대한 수소환원기술의 적용	①제철소내 수소를 활용한 수소환원기술 등의 개발:일본제철·JFE스틸·고베제강소·금속계재료연구개발센터, ②외부수소나 고로배기가스에 포함된 CO ₂ 를 활용한 저탄소화기술 등의 개발:일본제철·JFE스틸·고베제강소·금속계재료연구개발센터
	②수소만으로 저품위의 철광석을 환원하는 직접수소환원기술의 개발	①직접수소환원기술의 개발:일본제철·JFE스틸·금속계재료연구개발센터, ②직접환원철을 활용한 전로의 불순물제거 기술개발:일본제철·JFE스틸·고베제강소·금속계재료연구개발센터
연료암모니아 공급망의 구축	①암모니아 공급비용 절감 사업	①암모니아제조 신축매 개발·실증: 연료암모니아서플라이체인 구축에 관한 암모니아제조 신축매의 개발·기술실증: 차오다화학건설·JERA, 도쿄전력, ②그린암모니아 전해합성: 상온·상압하 그린암모니아 제조기술 개발: 이데미츠혼산·도쿄대학·도쿄공대·오사카대학·큐슈대학
	②암모니아 발전이용에서의 고(高)혼소화·전소화	①석탄보일러에서의 암모니아고혼소기술의 개발·실증 → i)사업용 화력발전소에서의 암모니아 고혼소화 기술확립을 위한 실기실증연구: IHI·JERA, ii)암모니아전소버너를 활용한 화력발전소에서의 고혼소 실기실증:미쓰비시중공업·JERA, ②가스터빈에서의 암모니아전소기술의 개발·실증:암모니아전소 가스터빈의 연구개발:IHI·도호쿠대학·산업기술종합연구소(AIST)

자료: NEDO 웹사이트(『Green Japan, Green Innovation』(<https://green-innovation.nedo.go.jp/>)(최종접속일 :2023. 5.19.)를 참고로 작성

2. 일본의 수소 생산

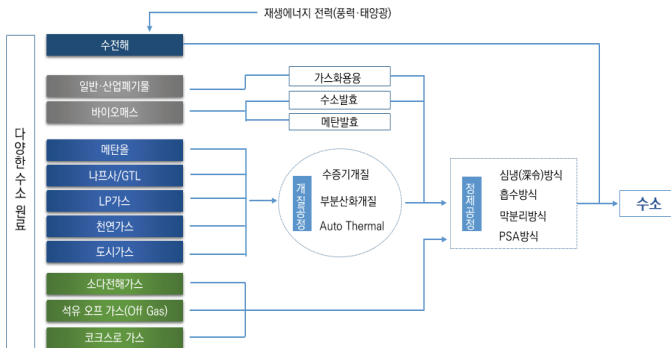
수소는 다양한 에너지와 자원으로부터 제조될 수 있으며, 각 수소제조기술은 안정성, 환경성, 경제성 등의 측면에서 장단점이 있고, 기술의 상용화 수준이 다르다. 최근 탄소배출량을 기준으로 수소를 구분하기 위해, 화석연료를 사용한 그레이수소와 화석연료를 활용하지만 CCS 등을 통해 이산화탄소를 회수한 블루수소와 재생에너지를 이용한 그린수소가 있다.

현재 전 세계의 대부분의 수소는 그레이수소이며, OECD(2019)에 따르면 매년 70Mt의 수소가 활용되고 있다. 일반적인 수소생산방식에는 부생수소, 화석연료개질, 수전해, 바이오매스, 열분해, 광촉매 등이 있으며, 그 중 일본의 수소생산방식 중 화석연료 개질과 수전해 방식에 한정하여 분석한다.

2.1. 화석연료 개질

화석연료개질이란 천연가스, 납사, 석탄 등의 화석연료를 개질하여 수소를 생산하는 방식으로, 대표적으로 수증기 개질법이 있다.⁵⁾ 현재 정유소나 암모니아 생산 시 공업용으로 필요한 수소를 제조하는 데에 가장 많이 활용되고 있는 방식으로 메탄과 물을 1:3으로 반응시켜 수소와 이산화탄소를 얻는 시프트반응을 이용한다.

[그림 2-3] 수소 제조 방법: 화석연료개질

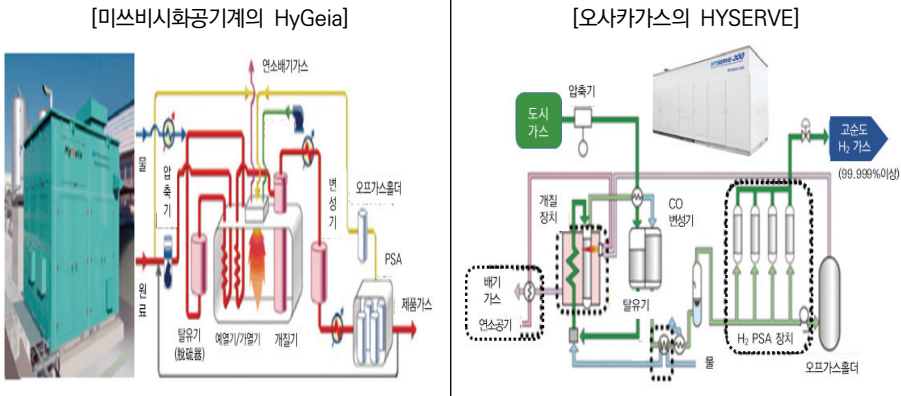


자료: 岩谷産業(2020). p. 18.

5) NEDO(2015.3). pp.102-103.

이미 기술적으로 확립되어 있기 때문에, 수소공급에 가장 유리하고 비용이 낮지만, 제조 시에 이산화탄소 배출을 하기 때문에 CCS 등을 활용해야 수소를 활용하려는 목적에 부합한다. 일본 내 개질 수소에 관한 연구는 추가적인 비용절감과 고효율화에 대한 내용이 주를 이루고 있다.

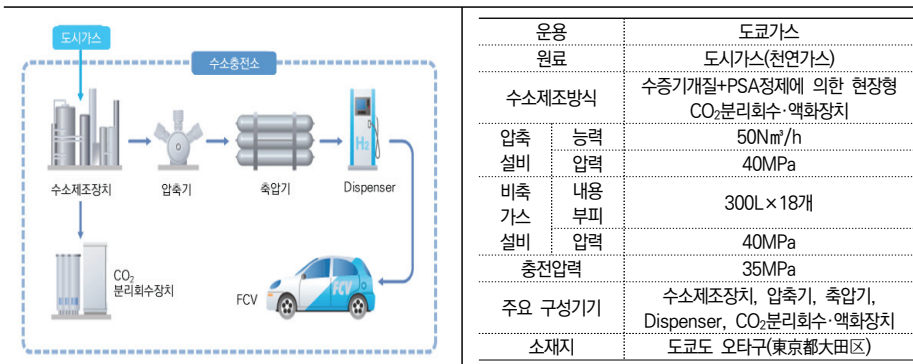
[그림 2-4] 소형 수증기개질 장치 사례



자료: NEDO(2015). p.107

경제산업성은 2011년부터 3년간 ‘수소·연료전지실증프렉트’를 통해 일본 국내 곳곳에 수소충전소를 정비하는 사업을 추진하였으며, 그 중 하나다 수소충전소는 부생 이산화탄소를 회수하여 공업용으로 재이용하고 있어 대표적인 CCS 사례로 주목받고 있다.

[그림 2-5] 수증기개질에 의한 수소제조 사례: 하네다 수소충전소



자료: HySUT 웹사이트「羽田水素ステーション」(<http://hysut.or.jp/archive/business/2011/station/haneda.html>). 최종 접속일: 2023.5.10.)

개정된 ‘수소 기본전략(안)’에 따르면, 그린이노베이션 기금을 적극 활용하여 탄소 재활용 기술확립을 지원하며, 2030년까지 연간 600~1,200만 톤의 저장량을 확보하는 것을 목표로 하고 있다.⁶⁾

2.2. 수전해

수전해기술은 물을 전기분해하여 수소와 산소를 분리하는 기술로써, 대표적으로 알칼라인, 고분자전해질, 고체산화물 수전해가 있다. 이는 대표적인 그린수소를 생산하기 위한 기술이다.⁷⁾

2.2.1. 일본 내 수전해 관련 프로젝트

2021년 말 기준, 전 세계적으로 재생에너지 전력을 이용한 수소제조 프로젝트는 대부분 유럽국가들에 의해서 진행되어 왔다. 특히, 영국의 ITM Power의 ‘Green Hydrogen for Glasgow’ 프로젝트와 REFHYNE 프로젝트, 미국 Cummins의 Becancour Plant, 스페인의 Nel의 Puertollano Plant 및 HySynergy 프로젝트, 그리고 덴마크의 HySynergy 프로젝트는 대규모 수전해장치를 활용한 그린수소 제조 프로젝트를 주도하고 있는 것을 확인할 수 있다.

일본의 수소 프로젝트 중에서는 아사히카세이(旭化成)의 알칼리 수전해장치를 활용한 FH2R 프로젝트와 히타치조선(日立造船)의 고체분자형 수전해장치를 이용한 H2-YES 프로젝트가 세계적으로 주요한 그린수소 프로젝트로 이름을 올린 것을 확인할 수 있다.

일본 정부는 NEDO⁸⁾의 수소사회 구축 기술개발 사업 일환으로 수소에너지 시스템 기술개발 및 재생에너지 이용 수소시스템의 사업모델 구축과 대규모 실증 관련 기술개발 사업을 2016년부터 2020년까지 실시했다.

이 사업의 일환으로 2018년 8월에는 후쿠시마현 나미에초에 ‘후쿠시마 수소에너지 연구필드’라는 프로젝트(FH2R 프로젝트)의 건설을 시작했다. 2020년 3월에 가동이 시작되었고, FH2R은 180,000m²의 면적에 설치된 20MW 태양광 발전 전력을

6) 再生可能エネルギー-水素等関係閣僚会議(2023.6.6.). pp.13-14.

7) NEDO(2015). pp.102-103.

8) 新エネルギー-産業技術総合開発機構. 신에너지 산업기술개발기구.

이용하여 10MW 수소제조장치에서 수전해하여 시간당 1,200Nm³의 수소를 생산하며 연간 최대 900톤의 수소를 저장 및 공급할 수 있는 용량을 갖추고 있다.9)

[그림 2-6] 세계 주요 재생에너지 수소 프로젝트

프로젝트	수전해장치 용량(MW)	제조업체	실증개시 년도(상용화)	장소
Green Hydrogen for Glasgow	20	ITM Power	2021년(23년~)	영국(글래스고)
Becancour Plant	20	Cummins/Hydrogenics	2019년(21년~)	캐나다(베강쿠호)
Puertollano Plant	20	Nel	2022년	스페인(푸에르토야노)
HySynergy	20	Nel	2021년(22년~)	덴마크(프레데리시아)
Hydrogen Holland I	20	Thyssenkrupp	2022년(24년~)	네덜란드(로테르담)
REFHYNE	10	ITM Power	2018년	독일(베셀링)
FH2R	10	Toshiba Energy/Asahi Kasei	2016년~20년	일본(후쿠시마현)
Energierpark Mainz	6.3	Siemens	2018년~상용화	독일(마인츠)
H2Future	6	Siemens	2017년	오스트리아(린츠)
WindH2	2.5	Siemens	2021년	독일(질츠기타)
HAEOLUS	2	Cummins/Hydrogenics	2021년	노르웨이(바랑게르반도)
Windgas Falkenhagen	2	Cummins/Hydrogenics	2016년~20년	독일(팔켄하겐)
Carbon2Chem	1.5	Thyssenkrupp	2018년	독일(노르트라인)
Windgas Hanburg	1.5	Cummins/Hydrogenics	2015년	독일(함부르크)
BIG HIT	1.25	ITM Power	2016년~22년	영국(옥스니섬)
H2-YES	1.25	Hitachi Zosen(Toray)	2016년~20년	일본(야마나시현)
DEWA Green Hydrogen Plant	1.2	Siemens	2021년	UAE(두바이)
Windgas Hassfurt	1	Siemens	2016년~상용화	독일(하스푸르트)
HyBalance	0.5	Cummins/Hydrogenics	2015년~20년	덴마크(홀브로)
PosHYdon	0.315	Nel	2019년	네덜란드(스헤브닝겐)
Western Sydney Green Gas	0.2	Cummins/Hydrogenics	2020년~상용화	호주(뉴사우스웨일스)
Frankfurt am Main	0.15	ITM Power	2014년~17년	독일(프랑크푸르트)
Shiranuka PJ*	0.15	Toshiba Energy	2015년~20년	일본(후쿠이도)
Ibberburn		ITM Power	2015년	독일(이벤부렌)
Don Quichote		Cummins/Hydrogenics	2018년~상용화	노르웨이(베레레보그)

주: 용량(MW단위)은 Nm³ 단위의 공표치를 1MW=200Nm³/h 기준으로 환산
 자료: 環境省(2021). p.1


FH2R 시설은 재생에너지 전력의 출력 변동을 최대한 활용하고 저비용의 청정수소 제조 기술을 개발하는 데 초점을 두며, 생산된 수소는 후쿠시마현이나 도쿄도 등의 수요지로 운송되어 발전용도인 정치용 연료전지, 모빌리티 용도인 연료전지차나

9) 環境省(2021). p.2 및 NEDO(2020.3.7.) 「再エネを利用した世界最大級の水素製造施設‘FH2R’が完成」. (https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101293.html. 최종접속일:2023.5.1.) 참고

연료전지 버스, 산업용도인 공장 등에서 사용된다. FH2R 프로젝트의 주체는 도시바 에너지시스템, 이와타니산업, 토호쿠전력 등 3개의 기업이다. 도시바에너지시스템은 프로젝트 총괄과 수소에너지 시스템을 담당하며, 이와타니산업은 수소 수요 예측 시스템 및 수소 저장 및 공급과 관련된 분야를 담당하고, 토호쿠전력은 전력계통 관련 제어시스템과 전력계통 분야를 담당한다.¹⁰⁾

또한, 이들 3사는 NEDO와 함께 재생에너지 도입으로 발생하는 잉여전력을 수소로 변환하여 저장하고 이용하는 Power-to-Gas 기술의 기술실증을 실시하고 있으며 아사히카세이 엔지니어링은 2020년 4월에 FH2R에 세계 최대 규모인 10MW급 대형 알칼리 수전해장치를 납입하였다.

〈표 2-3〉 알칼리수전해장치를 이용한 수소제조 실증사업: FH2R

사업명	수소사회구축 기술개발 사업/수소 에너지시스템 기술개발/재생에너지 이용 수소시스템의 사업 모델 구축과 대규모 실증 관련 기술개발		
사업주체	NEDO, 도시바에너지시스템즈, 토호쿠전력, 이와타니산업		
목적	- 전력계통에 대한 수급조정을 실시하고 출력변동이 큰 재생에너지 전력을 최대한 이용 - 청정하고 저렴한 수소제조 기술의 확립	수소 제조	- 태양광발전을 이용하여 수급조정 수단으로서 수소를 이용 · 축전지(배터리)를 사용하지 않고 전력의 출력변동을 흡수 - 수전해장치는 최대 10MW로 하고 수급조정 시장최저 입찰용량 5MW에 대응 · 상하 DR(Demand Response)→ ±5MW에서 최대 10MW의 입력전력이 필요
기간	2016년~2020년		
지역	일본 후쿠시마현 나미에쵸(福島県浪江町)(재해복구지역 내)		
시설명	후쿠시마 수소에너지 연구필드(FH2R) Fukushima Hydrogen Energy Research Field	(수전해 장치)	- 규모: 10MW(정격출력으로는 1,200Nm ³ /h) - 기술: 알칼리 수전해법(AWE) - 제조업체: 아사히카세이(旭化成)
시설전경		수소 이용	- 태평양연안인 하마도오리(浜通り)지역을 비롯한 후쿠시마현 내부지역 ※ 발전용, 모빌리티용, 산업용으로 공급 예정

자료: 環境省(2021). p.2

10) NEDO(2020.3.7.). 전게서.

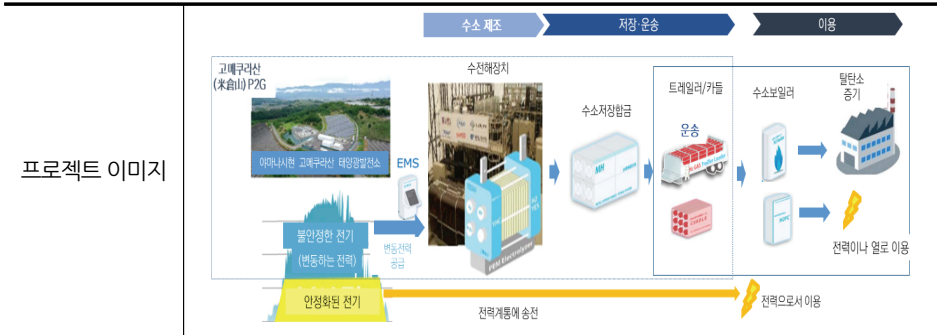
일본 야마나시현은 2016년부터 NEDO의 지원을 받아 도레이, 도쿄전력, 도코다 카오카 등 기업과의 민관 협력으로 H2-YES 프로젝트를 시작했다. 이 프로젝트는 히타찌조선의 고분자 수전해장치를 사용하여 그린수소를 생산하는 것이 특징이다. 2021년에는 태양광 발전에서 그린수소를 생산하는 시스템의 시운전을 개시하였으며, 이후에는 실증사업으로 진행될 예정이다.¹¹⁾

2022년 2월에는 야마나시현, 도쿄전력, 도레이가 지금까지 개발한 P2G(Power-to-Gas) 시스템의 성과를 발전시키고 탄소 중립을 실현하기 위해 국내 최초로 P2G 사업 회사인 ‘야마나시하이드로젠컴파니(YHC)’를 설립하였다. YHC는 수소 제조, 공급, 판매 및 에너지 서비스에 관한 사업, 수소 제조, 저장, 수송 관련 기술 개발과 실증사업, 수소 이용 보급과 확대 등을 전개하는 방침을 가지고 있다.

〈표 2-4〉 H2-YES 프로젝트 개요

프로젝트 명칭	H2-YES 프로젝트	추진 장소	야마나시현 고후시(甲府市) 고메쿠라산의 전력저장기술연구 부지
사업형태	NEDO 위탁사업	추진 주체	야마나시현, 도레이, 도쿄전력, 도코다카오카
개요	<ul style="list-style-type: none"> - H2-YES 프로젝트로서 P2G(Power-to-Gas) 시스템의 시범운전 개시 제조에서 이용까지의 수소공급망을 구축하여, 수소에너지 개발에서 과제로 지적되고 있는 비용절감 문제를 검증 · 도쿄전력의 대규모 태양광발전소인 「야마나시현 고메쿠라산 태양광발전소」(출력 10MW)와 히타찌조선(日立造船)의 고분자 수전해장치, 수소저장합금 시스템을 활용 · 공장이나 슈퍼마켓에 수소를 공급 - 2021년 가을경까지 시범운전에 들어가고, 2021년도말까지 실험 규모를 확대. 당초 계획인 1시간 당 300Nm³, 연간 45만Nm³의 수소제조 등 본격적인 실증시험으로 이행 예정 - 탄소중립사회의 실현을 위해 P2G 시스템의 고효율화와 대용량화, 그리고 국내외 보급 확산을 도모할 예정 		

11) 環境省(2021) p.3.



자료: 山梨県 웹사이트 「新エネルギー推進室」(<https://www.pref.yamanashi.jp/newene-sys/>). 최종접속일:2023.5.14.) 및 環境省(2021).p.3.

2.2.2. 기술적 과제

일본 정부는 수전해를 통한 수소 제조에서 전기 요금이 수소 요금에 직접적으로 영향을 주기 때문에 고효율화가 중요한 과제로 인식되고 있다. 이를 위해 고분자형 수전해장치의 고압화를 고려한 바가 있으나, 시스템 내구성과 고압에서 발생하는 수소와 산소의 적절한 제어 기술의 필요성을 인식하게 되었다. 다시 말해 고압화로 효율성을 높이려면 장치 제조 비용이 상승하는 효율성과 제조 비용 간의 상충 문제에 직면하게 된다. 그린수소 제조는 재생 에너지 전력을 사용하여 저탄소 수소를 생산하는 과정에서 출력 변동이 큰 전력을 사용하므로 막과 전극의 내구성 강화와 함께 보조 기기의 정상 운영을 보장하는 과제도 가지고 있다.

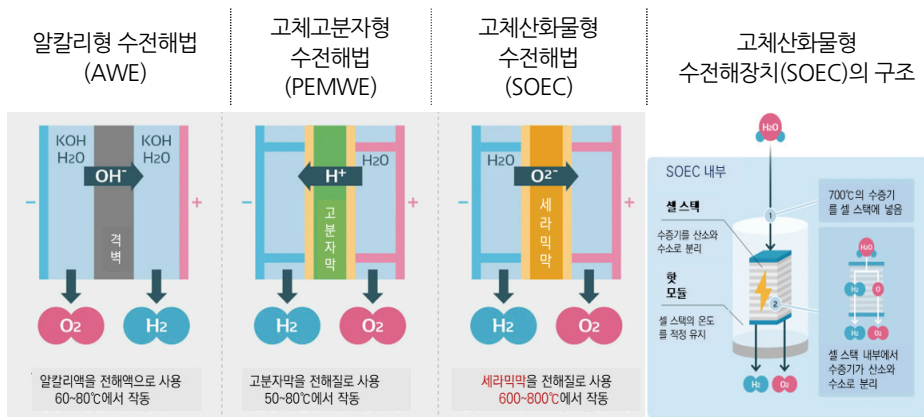
2023년 5월 개정된 ‘수소 기본전략(안)’에 따르면, 2030년까지 알칼리형 5.2만 엔/kW 와 PEM 수전해 6.5만 엔/kW를 달성하기 위해서는 전기비용 절감뿐만 아니라 장치 비용의 절감과 성능 향상에 적극적으로 투자해야한다는 것을 강조한다. 특히 잉여 재생에너지를 적기에 조달하여 전해조의 가동률을 높이고, 재생에너지의 과제인 계통문제를 해결할 수 있는 방안이라고 제시하고 있다.¹²⁾

고체산화물형 수전해법(Solid Oxide Electrolyzer Cell)은 물을 고온에서 분해할 수 있는 특성을 이용하여 수소 제조에 필요한 전력량을 최소화할 수 있는 장점을 가지고 있다. SOEC는 세라믹을 사용하여 연료극, 전해질막, 공기극 등의 셀로 구성된 셀 스택(Cell Stack)을 만들어 고온을 유지하는 ‘핫 모듈(Hot Module)’에 배치하고,

12) 再生可能エネルギー—水素等関係閣僚会議(2023.6.6.). p.26.

거기에 700℃의 고온 수증기를 공급하여 전기분해를 수행하는 구조다. 도시바(TOSHIBA)와 덴소(DENSO)는 고체산화물형 전해 셀 개발에 적극적으로 참여하고 있으며, 저탄소 전력이 항상 공급되거나 배열이 가능한 환경에서는 저온 수전해 방식(Alkaline Water Electrolysis(AWE), Proton Exchange Membrane Water Electrolysis(PEMWE))에 비해 높은 효율성을 갖는 장점을 강조하고 있다. 하지만 기술적인 장벽이 낮아지지 않아 아직까지는 보급 단계에 도달하지는 못했다.

[그림 2-7] 고체산화물형 수전해법(SOEC)의 기본원리 및 구조



자료: DENSO(2023.1.24.) 「水素社会の未来を見据えデンソが挑む電解装置 SOEC 開発」, (<https://www.denso.com/jp/ja/driven-base/tech-design/soec/> 최종접속일:2023.5.8.)

<표 2-5> 수전해기술의 특징 비교

	AWE ¹⁾	PEMWE ²⁾	AEMWE ³⁾	SOEC ⁴⁾
고출력·부하변동	X 격막: 누출(leak)에 의한 저출력	O 고출력 고속기동	O 전해질막: 누출이 없고, 고출력화 가능. 저온에서 고속기동 가능	X 고온: 기동시간이 길
비용	O 8.5만 엔/kW	X 13.5만 엔/kW	O ≤10만 엔/kW	△ 연구단계
효율(LHV)	△ 70%	O 75%	O >80%	O 80%
전해질	X 격막누출로 H ₂ 순도 저하	O 고내구성	O 고내구성의 아니온막	△ 연구단계
전극촉매	O 저렴	X 고비용 (귀금속)	O 저렴 (비귀금속)	△ 연구단계

	AWE ¹⁾	PEMWE ²⁾	AEMWE ³⁾	SOEC ⁴⁾
기타	전해액이 농(濃) 알칼리여서 위험	고비용 Pt 코트 Ti 세퍼레이터	AEM·저비용 촉매의 개발 및 MEA 구축	고온에서의 재료열화. 폐열이용이 필수

주: 1) AWE(Alkaline Water Electrolysis). 알칼리수전해. 2) PEMWE(Proton Exchange Membrane Water Electrolysis). 고체고분자형 수전해. 3) AEMWE(Anion Exchange Membrane Water Electrolysis). 아노이온교환막수전해 4) SOEC(Solid Oxide Electrolysis Cells). 고체산화물전해
 자료: 宮武健治(2022.7.29.). p.3.

일본은 이미 고효율의 수전해장치를 개발하고 있는 다수의 기업이 존재하며, 소재 기술과 연료전지 분야에서 기술 경쟁력을 확보하고 있다. NEDO는 이러한 강점을 바탕으로 AWE와 PEMWE 기술을 활용하여 선진 기술인 아노이온 교환막 수전해(Anion Exchange Membrane Water Electrolysis)의 개발을 통해 경쟁력을 확보하려고 한다. 또한, 일본은 고체고분자형 연료전지 기술 분야에서도 경쟁력을 가지고 있으며, 토요타의 MIRAI, 혼다의 CLARITY, 파나소닉의 ENE-FARM 등의 제품이 대표적이다. 일본은 수전해장치의 재료 기술과 생산 기술로 고체산화물형 연료전지(Solid Oxide Fuel Cells) 기술을 활용하는 계획을 가지고 있다.

〈표 2-6〉 연료전지의 종류

	PEFC ¹⁾	PAFC ²⁾	MCFC ³⁾	SOFC ⁴⁾
전해질	고체고분자막(이온교환막)	인산(H ₃ PO ₄)	탄산리튬(Li ₂ CO ₃) 등	안정화 지르코니아(ZrO ₂ +Y ₂ O ₃)
연료	수소	수소	수소, 일산화탄소	수소, 연료전지
작업온도	상온~약 90℃	약 200℃	약 650℃	약 1,000℃
발전출력	~50kw	~1,000kw	1~10만kw	1~10만kw
발전효율	30~40%	35~42%	40~60%	40~66%
특징	<ul style="list-style-type: none"> 상온에서 작동 소형경량화가 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 운전실적이 최다(4만시간 이상) 비교적 소규모이고 발전효율이 높음 	<ul style="list-style-type: none"> 다양한 연료 사용 가능 배열의 이용가치가 높음 	<ul style="list-style-type: none"> 발전효율이 높음 개질기가 불요
용도	<ul style="list-style-type: none"> 가정용, 자동차, 휴대기기, 자동판매기 등 	<ul style="list-style-type: none"> 업무용(병원, 호텔, 빌딩 등) 	<ul style="list-style-type: none"> 분산전원, 공장, 화력발전소의 대체 등 	<ul style="list-style-type: none"> 가정용, 업무용, 분산전원, 화력발전소의 대체

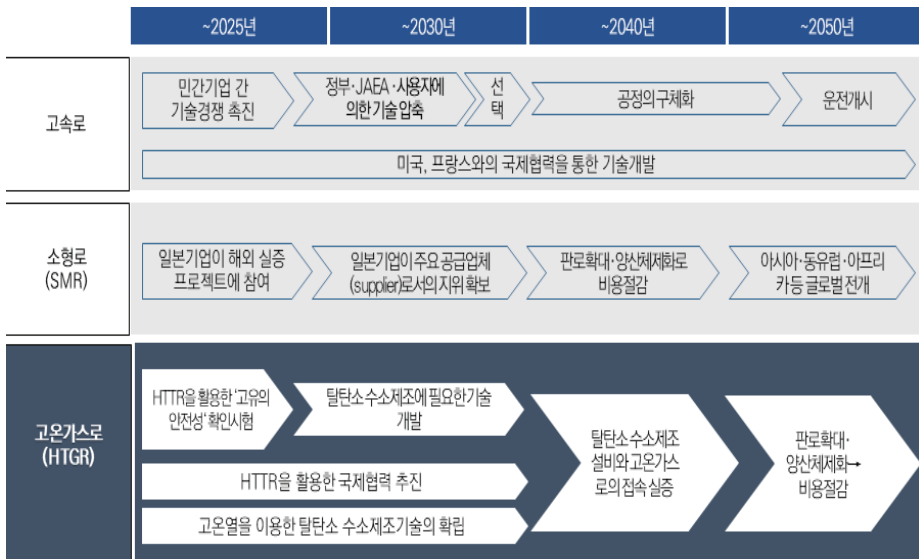
주: 1) PEFC(Polymer Electrolyte Fuel Cell). 고체고분자형 연료전지. 2) PAFC(Phosphoric Acid Fuel Cell). 인산형 연료전지. 3) MCFC(Molten Carbonate Fuel Cell). 용융탄산염형 연료전지. 4) SOFC(Solid Oxide Fuel Cell). 고체산화물형 연료전지.

자료: 東北大学 Tokumas Lab 웹 사이트(<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/nanoint/jpn/about/contents3/index.html>). 최종접속일 :2023.4.19.)

2.2.3. 고온가스로를 이용한 수소제조

일본 정부는 차세대 원자력 기술을 고속로, 소형로(Small Modular Reactor, SMR), 고온가스로, 핵융합로 네 가지로 나누었다. 고온가스로(High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR)에 대해서는 2050년 수소 제조 비용 목표인 12엔/Nm³을 달성하기 위한 수단으로써, 일본원자력연구개발기구(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)의 고압공학시험연구로(High Temperature Engineering Test Reactor, HTTR)을 통한 기술개발을 진행하고 있다. 2023년까지 HTTR을 활용한 고온가스로의 안정성 확인 시험을 하고, 2030년까지 고온열을 이용한 저탄소 수소 제조에 필요한 기술개발 확립을 마치고, 그 이후에 상용화단계에 들어가는 계획을 가지고 있다.¹³⁾

[그림 2-8] 일본정부의 차세대혁신형 원자로 기술개발 계획



주: 1) 고온가스로(HTGR(high-temperature gas-cooled reactor)는 노심의 주요 구성재료에 흑연을 중심으로 한 세라믹 재료를 사용하여 핵분열에서 발생하는 열을 밖으로 빼내기 위한 냉각재에 헬륨 가스를 이용하는 원자로임. 경수로(300℃ 정도)에 비해 훨씬 높은 고온(최대 950℃)의 열을 추출할 수 있는 원자로임. 고온가스로는 노심의 출력밀도가 낮기 때문에, 즉 출력에 비해 원자로 사이즈가 크기 때문에 만일의 사고 시에도 노심내의 열을 원자로 외부 표면에서 자연스럽게 방열·제거할 수 있어 노심용융이 발생하지 않는 안전성이 뛰어난 원자로임. (三菱重工 웹사이트)

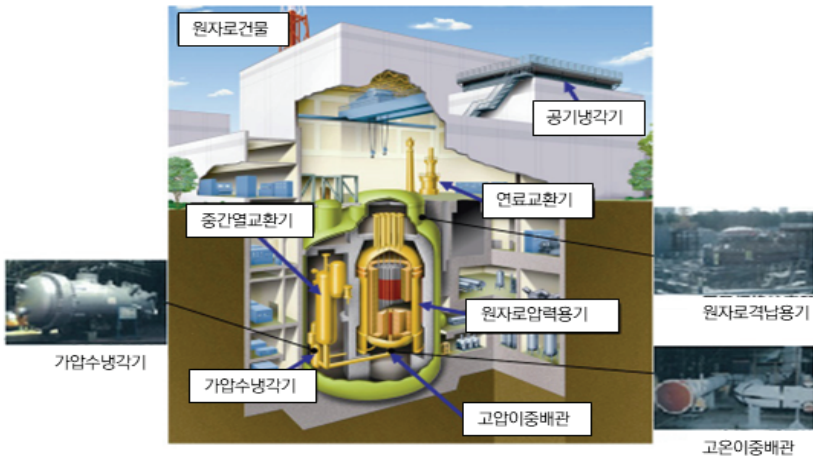
2) 핵융합로에 관해서는 로드맵이 완성되지 않음.

자료: 村上朋子(2022). p.27.

13) 村上朋子(2022). pp.26-27. 참고

JAEA는 1969년부터 핵 열의 다목적 이용을 위해 고온가스로에 대한 연구개발을 시작했다. 1991년에는 HTTR라는 고온가스로시험로를 건설하였다. HTTR은 일본에서 유일한 고온가스로시험로로, 원자력 출력이 30MW인 시설이다. 1998년에는 초임계 상태를 달성하였으며, 2001년에는 원자로 출구 냉각재 온도 850℃, 2004년에는 원자로 출구 냉각재 온도 950℃를 세계 최초로 달성했다. JAEA는 HTTR을 활용하여 고온가스로의 기술 기반을 확립하고, 온실가스를 배출하지 않는 혁신적인 열화학 수소제조법의 열원으로서 원자력에너지를 주력으로 활용하고 있다.

[그림 2-9] 일본원자력연구개발기구(JAEA)의 고온공학시험연구로(HTTR)



주: HTTR의 주요 설비로는 △원자로 본체(내경 약 5.5미터, 높이 약 13.2미터의 원자로 압력용기 내부에 흑연인 반사체 등 노심구조물을 설치) △냉각계통 △중양제어실 △연료교환기를 들 수 있음. 그림의 주요 기기(격납용기, 냉각설비, 고온이중배관, 가압수냉각기, 헬륨순환기 등은 미쓰비시중공업(三菱重工)이 제조·납품함.

자료: JAEA웹사이트 「高温工学試験研究炉(HTTR)の概要」(<https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/jp/faq/htrr.html>). 최종 접속일: 2023.6.2.)

경제산업성은 「초고온을 이용한 수소 대량제조기술 실증 사업」을 2022년부터 2031년까지 10년 동안 추진하기로 결정했다. 이는 일본 정부가 자국 산업이 글로벌 공급망에서 생존하기 위해 수소 공급이 중요하다고 판단하고, 산업 부문에 탈탄소 고온열원을 활용한 수소를 공급원으로 주목하기 때문이다. 일본 정부는 2050년까지 수소 제조 비용을 약 12엔/Nm³로 대폭 낮춰서 제철이나 화학 산업 등에서 수소를 보편화하기 위해 800℃ 이상의 탈탄소 고온열원인 고온가스로 태양열, 핵융합

등을 활용한 탈탄소 수소 제조법을 확립할 계획이다.¹⁴⁾

경제산업성의 「초고온을 이용한 수소 대량제조기술 실증 사업」은 2050년의 목표 달성을 위해 2030년까지 800℃ 이상의 고온을 이용한 탈탄소 수소 제조법인 IS법, 메탄열분해법, 고온수증기전해 등의 타당성 조사를 실시하고, 800℃ 이상의 탈탄소 고온열원과 상용화에 진입한 메탄수증기개질법을 사용한 수소 제조기술에서 안전성을 높이기 위한 접속 기술과 평가 방법을 확립하는 데 초점을 맞추고 있다. 이 사업은 JAEA의 HTTR를 활용하여 초고온의 탈탄소 수소 제조법을 개발하고, 향후 실증 규모의 탈탄소 수소 제조 시설과의 접속을 고려하여 기기의 대형화 가능성을 확인하기 위해 개념설계를 수행하는 것이 특징이다.¹⁵⁾

〈표 2-7〉 경제산업성의 고온가스로를 활용한 수소 제조기술 실증 사업: 2022년도

개발 항목		세부 항목	개요
1	HTTR과 수소제조시설(메탄수증기개질법)의 접속기술 개발	플랜트 기본계획의 검토	HTTR-열이용시험시설에서 실시하는 수소제조 시험 항목 및 실시내용, 플랜트 기본사양 작성 등
		플랜트 기본설계	HTTR-열이용시험시설의 기본 설계(설계, 수소제조 시설과의 접속 설계, 수소제조에 관한 계통설계, 주요 기기의 구조, 주요 배관 루트)
		기기 개발	고온격리판(高温隔離弁), 헬륨순환기, 고온단열배관
2	접속설비기기의 대형화 관련 개념설계	검토 대상 기기(고온격리판, 헬륨순환기, 고온단열배관)의 대형화 관련 개발 계획 수립(개념설계)→ 고온가스로를 포함한 탈탄소 고온열원을 이용한 수소제조의 실용화	
3	탈탄소 수소제조기술의 FS(타당성조사)	초고온열을 이용한 수소제조 기술을 조사하고 제조법을 검토	

자료: 資源エネルギー庁(2023.2.22.a) 전계서 참고

2022년 4월에 상기 「초고온을 이용한 수소 대량제조기술 실증 사업」의 사업자로서 JAEA와 미쓰비시중공업(三菱重工業)이 선정되었다. 이 프로젝트의 목표는 JAEA의 HTTR(고압공학시험연구로)와 수소 제조 시설(플랜트)을 접속하여 HTTR에서 발생하는 고온열을 활용한 수소 제조 기술을 개발하는 것이다. JAEA와 미쓰비시중공업은 2022년에 HTTR과 수소 제조 시설을 접속하기 위한 개조 내용을 구체화하고,

14) 資源エネルギー庁(2023.2.22.a) 「高温ガス炉実証炉開発事業を担う中核企業の選定に係る公募の事前周知について」. https://www.enecho.meti.go.jp/appli/submission/2022/0222_01.html. 최종접속일:2023.5.25.)

15) 資源エネルギー庁(2023.2.22.a) 전계서 참고

인허가 절차, 설비 개조 및 시험을 단계적으로 진행할 계획이다. 또한, 고온가스로 실증로를 고려한 수소 제조 기술의 고도화를 위해 대량의 수소 제조에 대응 가능한 일부 기기(고온격리판 등)의 대형화 및 고온가스로에 적합한 탈탄소 수소 제조 기술의 조사 사업도 예정되어 있다.¹⁶⁾

일본 정부는 고온가스로의 실증로를 2029년부터 제작·건설하고 2030년에 운전을 시작하는 계획을 가지고 있다. 이에 따라 ‘고온가스로 실증로 개발사업’이 2023년부터 2026년 3월까지 진행될 예정이다. 경제산업성은 2023년도 예산안에서 ‘고온가스실증로개발사업’을 위해 48억 엔을 할당하였으며, 2025년까지 3년간 총 431억 엔을 지원할 계획이다.¹⁷⁾ 2023년도 예산의 대부분은 고온가스로의 실증로 설계와 HTTR의 수소제조 실증에 투자되며, 나머지는 연료가공 공장 쇄신에 할당될 예정이다.

3. 일본의 수소 저장·운송

수소는 상온·상압에서 기체 형태를 가지므로 저장 및 운반을 위해서는 액화나 초고압 압축과 같은 공정이 필요하다. 수소캐리어(Hydrogen Carrier)는 수소를 다른 상태나 물질로 변환하여 저장 및 운반하는 기술을 의미한다. 메틸시클로hex산(MCH), 암모니아, 수소저장합금 등은 수소를 포함하는 물질로 변환되어 수소를 효율적으로 운반하고 저장할 수 있어 이러한 물질들을 수소캐리어라고 한다. 현재 수소캐리어 후보는 비압축 상태의 수소를 포함하여 6가지(수소, 압축수소, 액화수소, MCH/톨루엔, 암모니아, 수소저장합금) 이상의 종류가 있다. 후보들은 각각의 특성을 갖고 있어 하나의 특성으로 집약할 수 없다. 예를 들어, 암모니아는 콤팩트한 측면에서 우수하지만 수소로부터 변환 시 에너지 손실이 크고 악취 발생과 인체에 해로운 영향이 있다. 수소저장합금은 무거운 단점이 있다. 따라서 사업자들은 현재 용도에 따라 선택적으로 수소캐리어를 사용하고 있다. 그러나 특정 수소캐리어에 중점을 두거나 기술 혁신을 통해 문제를 해결할 경우 일체화가 진행될 수도 있다.

16) NEDO. 2022.7.29. 「低炭素社会実現に向けた水素専焼対応型 Dry Low NOx高温ガスタービン発電設備の研究開発」. (<https://www.nedo.go.jp/content/100950556.pdf>. 최종접속일:2023.5.20.)

17) 資源エネルギー庁(2023.2.22.b). 「高温ガス炉実証炉開発事業」 https://www.meti.go.jp/main/yosan/yosan_fy2023/pr/gx/gx_denga_02.pdf. 최종접속일:2023.4.10.)

〈표 2-8〉 수소캐리어의 비교: 수소에너지의 저장·운반 기술

에너지캐리어	수소 ¹⁾	압축수소	액화수소	MCH/ 톨루엔	암모니아 (NH ₃)	수소저장 합금
체적밀도	×	△	○	◎	◎	◎
상온상압에서의 상태	기체	존재 불가	존재 불가	액체	기체 (20℃, 8.5기압에서 액화)	고체
비점(沸點)(상압시)	-253℃	-253℃	-253℃	MCH: 101℃ 톨루엔: 110.6℃	-33.34℃	n.a
융점(融點)	n.a	n.a	n.a	MCH: -126℃ 톨루엔: -95℃	-77.73℃	MgH ₂ →100℃
부식성	다소 존재	존재	다소 존재	없음	존재	재료에 의존
직접연소에 의한 발전	가능	가능	가능 (기화 후)	불가	가능	불가
규제	고압가스보안법, 소방법, 노동안전위생법, 건축기준법, 석유コンビ나트 등 재해방지법, 도로운송차량법, 도로교통법, 항촉법			소방법 (위험물 제4류 제1석유류) ²⁾ , 건축기준법	독물 및 극물 단속법	고압가스보 안법, 소방법
에너지손실	◎ (운송시는 △)	△	△ (장기보존은 ×)	○ (장기저장은 ◎)	△ (기술혁신으로 개선)	◎ (적음)
무게	◎	△	○	○	○	× (무거움)

주: 1) 비압축 또는 10기압 이하의 저압압축.

2) 기술린 등과 같은 분류. ◎:매우 뛰어남. ○:뛰어남. △:다소 과제 있음. ×:과제 많음.

자료: 日経クロステック(2021). 「水素の貯蔵法は7種類以上用途に応じて一長一短」. (<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01513/00001/> 최종접속일: 2023.4.3.) 및 HATCH. 웹사이트「再生可能エネルギーを運搬・貯蔵する技術水素キャリアとは?」(2022.11.1.)(https://shizen-hatch.net/2022/11/01/hydrogen_export/ 최종접속일: 2023.4.3.)

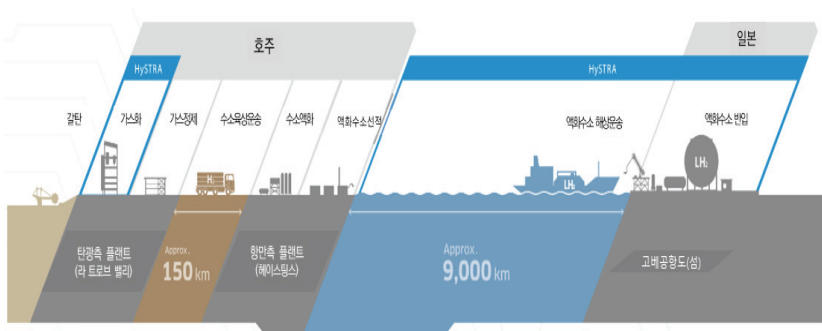
3.1. 액화수소

수소는 가장 가벼운 원소이므로 기체 상태에서의 저장은 대용량 탱크를 필요로 한다. 일반적으로 수소는 압축하여 고압가스 형태로 저장·운반되며, 이를 위해 특수 금속이 필요하다는 비용 문제가 있다. 액화수소는 수소가스를 -253℃로 냉각하여 액화한 것으로, 수소의 체적이 상압 가스 상태에 비해 약 1/800로 압축되므로 대규모 저장·운송에 적합하다. 그러나 대규모 액화설비와 에너지 손실 억제 기술이 필요

하다는 설비투자비용 부담이 있다. 액화수소는 주로 우주기술 분야에 사용되었지만, 최근에는 산업용·공업용 수소 운송 방법으로서 인기를 얻고 있으며, 일본 기업이 이 분야에서 기술 개발에 성공하고 있다.

일본의 기술연구조합(Hydrogen Energy Supply-chain Technology Research Association, HySTRA)는 2020년부터 2021년까지 2년 동안 호주의 갈탄을 활용한 수소 공급망 구축 사업을 실증하였다. 이 실증 사업은 갈탄 가스화 기술, 액화수소의 장거리 대량 운송 기술, 액화수소 하역 기술 개발에 초점을 두었다. 주요 참여 기업은 이와타니산업, 가와사키중공업, Shell Japan, 전원개발(J-POWER), 마루베니, ENEOS, 가와사키기선 등이며, 각각의 기업은 갈탄 가스화, 수소 정제, 수소 액화, 액화수소 저장 및 운반, 그리고 시장 조사 및 상용화를 담당하였다. 이 프로젝트를 통해 일본은 탄소 중립 수소 공급망 구축에 대한 중요한 경험을 쌓은 것으로 보인다.¹⁸⁾

[그림 2-10] 일본의 호주 수소개발 및 국내 도입 프로젝트(개념도)



자료: 김규판 외(2022), pp. 175-176.

3.2. 유기하이드라이드(유기화합물)

유기하이드라이드는 일정량의 수소를 가역적으로 흡수하고 방출하는 유기화합물로, 이를 활용해 수소를 저장하고 운송하는 신기술이 주목받고 있다. 일본은 안전성과 편리성을 고려하여, 수소와 톨루엔을 화합한 메틸시클로헥산(Methyl-cyclohexane, MCH)을 수소 저장·운송에 활용하는 기술을 개발하고 있다. MCH는 수소가스를

18) 김규판 외(2022), pp.175-176

상온·상압에서 약 1/500의 체적의 액체로 변환할 수 있어, 액체유기수소캐리어(Liquid. Organic Hydrogen Carrier, LOHC)라고도 불린다. MCH는 수소를 체적 당 500배 이상 포함하고 있으며, 석유와 유사한 성질과 형상 때문에 기존의 석유 인프라를 활용하는 장점이 있다. 일본의 기술연구조합은 2020년 6월에 브루나이의 미활용 에너지 기원의 수소를 MCH를 활용하여 국내로 운송하는 실증 사업을 진행하였다.

[그림 2-11] 수소의 메틸시클로헥산(MCH) 형태로의 운송·저장



자료: HATCH.웹사이트「再生可能エネルギーを運搬・貯蔵する技術水素キャリアとは?」(2022.11.1.) (https://shizen-hatch.net/2022/11/01/hydrogen_export/ 최종접속일: 2023.4.3.)

3.3. 암모니아

암모니아의 경우 비료용이나 화학제품의 원료로 공급망이 이미 존재하여, 암모니아의 직접 이용 및 수소 운반체로서의 도입이 비교적 용이하다. 암모니아를 이용하여 수소로 전환하기 위해서는 대규모의 크래킹 기술 확립이 필요하기 때문에, 수소 기본전략(안)에서는 해당 기술의 개발을 지원하며, 제조기술의 효율화, 화력발전 및 용광로, 선박터빈 등의 이용확대에 대한 기술 개발 또한 추진한다.

미쓰비시 상사는 사우디 아라비아의 ARAMCO LNG 플랜트에서 수소를 추출하여 암모니아 형태로 일본으로 운반하는 프로젝트를 진행하고 있다. 이 프로젝트는 암모니아의 다양한 활용도와 탄소중립 에너지 수급의 안정성을 고려한 것이다. 암모니아는 일본의 석탄 및 가스 화력 발전소에서 연료로 사용되며 이러한 시도는 2020년 9월에 실증시험을 통해 검증되었다.¹⁹⁾

한편, 이토추 상사는 러시아의 이르쿠츠크 석유공사(IOC)의 플랜트에서 수소를

19) 조항(2021), pp.2-5.

추출하여 암모니아 형태로 일본으로 운반하는 프로젝트를 수행하였다. 이 프로젝트는 일본석유천연가스금속광물기구(JOGMEC)와 도요 엔지니어링(미쓰이 물산의 최대 주주)도 참여하였다. 이 프로젝트의 실증시험은 2020년 12월에 실시되었고, 석탄화력발전소에서 암모니아 혼합 연료의 사용 가능성을 검증하였다.

4. 일본의 수소 활용

4.1. 수소자동차

일본은 1970년대의 오일쇼크 이후 40여 년간 수소와 연료전지 관련 기술 연구개발을 지속하며 세계 최고 수준의 기술, 지식, 그리고 노하우를 쌓았다고 평가하고 있다. 일본 정부의 주요 수소모빌리티 기술개발 지원 프로젝트로는 경제산업성의 수소·연료전지실증프로젝트(2002년~2010년)가 있다.

수소·연료전지 실증프로젝트는 ‘연료전지 자동차 실증연구’와 ‘수소인프라 실증연구’로 나누어 수행되었다. 이 프로젝트의 목적은 연료전지차의 양산과 보급 확대를 위해 다양한 원료로부터 수소제조 방법을 연구하고, 실제 사용 조건에서의 연료전지자동차(FCV)의 성능, 환경 특성, 에너지 효율, 안전성 등에 대한 기초 데이터를 수집하는 것이며, 이를 공유하기 위한 연구와 보급활동을 병행하였다. 프로젝트의 첫 번째 단계(2002년~2005년)에서는 연료전지차의 에너지효율 개선에 초점을 맞췄다. 두 번째 단계(2006년~2010년)에서는 연료전지차(연료전지소형이동체, 수소엔진자동차 포함)의 개발과 수소제조설비·공급설비 개발에 주목하였다.²⁰⁾

20) JFHC(水素燃料電池実証プロジェクト) 웹사이트.(<https://www.jari.or.jp/jhfc/jhfc/index.html>. 최종접속일:2023.2.18.)

〈표 2-9〉 일본정부의 수소·연료전지 실증 프로젝트(2002년~2010년)

	제1기(2002년~2005년)	제2기(2006년~2010년)
추진단체	<ul style="list-style-type: none"> 재단법인 일본자동차연구소 FC-EV 연구부 재단법인 엔지니어링진흥협회 	<ul style="list-style-type: none"> 석유산업활성화센터(2009년부터 참여) 일본가스협회(2009년부터 참여)
주요 성과	<ul style="list-style-type: none"> FCV의 자동차로서의 높은 에너지효율성을 입증 FCV나 수소충전소의 실증 데이터를 이용하여 Well to Wheel 종합효율1)을 입증 	<ul style="list-style-type: none"> 연료전지차(연료전지 소형 이동체, 수소 엔진자동차 포함) 및 수소제조 설비·공급설비 분야에서 ①에너지효율성(연비), 환경부담 절감 효과 확인 ②기술, 정책 동향의 파악 ③실용화 과제 식별 ④규격, 법규, 기준 작성에 필요한 데이터 취득
프로젝트 참여 차량	<p>TOYOTA FCHV, NISSAN X-TRAIL FCV, HONDA FCX, F-Cell(다임러 AG), Hydrogen3(GM Japan), FCHV-BUS(도요타자동차/히노자동차), MRwagon-FCV(스즈키), MITSUBISHI FCV</p>	<p>TOYOTA FCHV-adv, NISSAN X-TRAIL FCV, FCX 클라리티(혼다), F-Cel(다임러 AG), Chevrolet Equinox Fuel Cell(GM Japan), FCHV-BUS(도요타자동차/히노자동차), SX4-FCV(스즈키), MRwagon-FCV(스즈키), Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid(마츠다), RX-8 HydrogenRE(마츠다), Hydrogen7(BMW, 2007년부터 참여). 소형이동체(구리모토철공소, 2006년~2008년 참여)</p>
운용 수소충전소	<p>JHFC요코하마·다이고쿠 수소충전소, JHFC요코하마·아사히 수소충전소, JHFC센주 수소충전소, JHFC 아리아키 수소충전소, JHFC 가와사키 수소충전소, JHFC 가스가미가세키 수소충전소, JHFC요코하마·츠루미 수소충전소, JHFC 히다노 수소충전소, JHFC 사가미하라 수소충전소, JHFC 후나바시 수소충전소, JHFC 아이치 만박 수소충전소, 액체수소제조설비</p>	<p>JHFC요코하마·다이고쿠 수소충전소, JHFC요코하마·아사히 수소충전소, JHFC센주 수소충전소, JHFC 아리아키 수소충전소, JHFC 가와사키 수소충전소, JHFC 가스가미가세키 수소충전소, JHFC 사가미하라 수소충전소, JHFC 후나바시 수소충전소, JHFC 센트레아 수소충전소, JHFC 오사카 수소충전소, JHFC 간사이공항 수소충전소</p>
프로젝트 참여 기업	<p>도요타자동차, 닛산자동차, 혼다, 메르세데스·벤츠일본, GM Japan, 히노자동차, 스즈키, 미쓰비시자동차, 코스모스석유, 신일본석유, 쇼와셀석유, 도쿄가스, 이와타니산업, 일본에어리키드, 타이오니산(大陽日酸), 신일본제철, 구리다공업, 시나엔, 이토츠크에넥스, Babcock-Hitachi, 쓰루미소다, 도호가스</p>	<p>마츠다(2006년부터 참여), BMW(2007년부터 참여), 구리모토철공소(2006년~2008년 참여)</p>

주: 1) Well to Wheel 종합효율: 1차 에너지의 채굴에서 연료제조, 운송, 차량에 대한 충전을 거쳐 최종적으로 차량주행에 이르는 모든 에너지 소비를 고려한 종합적인 에너지 효율

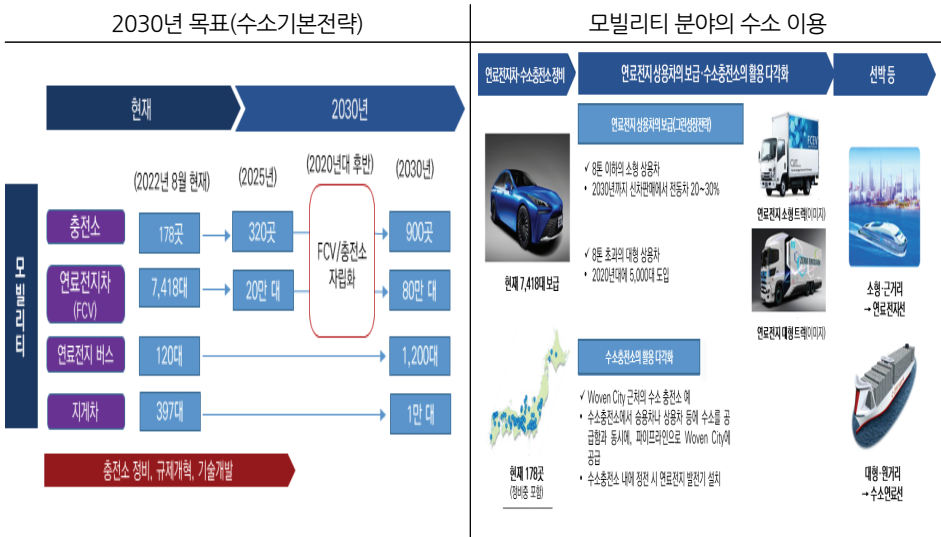
자료: JFHC(水素燃料電池実証プロジェクト) 웹사이트.(<https://www.jari.or.jp/jhfc/jhfc/index.html>). 최종접속일: 2023. 2.18.)

2014년부터 일본은 세계 최초로 도요타자동차의 연료전지차(FCV) 상용화를 이뤄 내며, 수소충전소의 정비를 진행하였다. 이에 따라 일본 정부는 수소공급설비보조금 사업, CEV(전기자동차, 플러그인하이브리드자동차, 연료전지자동차, 클린디젤자동차를 포함) 구입 보조금, 충전인프라보조금 등을 통해 FCV의 시장 확대를 위한 정책 방향을 제시하였다.

최근 일본 정부의 수소모빌리티 정책 역시 2035년까지 승용차의 신차 판매를 전기자동차, 연료전지자동차, 플러그인하이브리드 자동차 및 하이브리드 자동차로 100% 전환하는 목표를 가지고 있으며, 이를 위해 구매 보조금 지급, 인프라 정비, 배터리의 국내 제조 추진, 중소기업체의 업종 전환 지원에 집중하고 있다.²¹⁾

또한, 일본 경제산업성은 2022년 9월에 발표한 수소연료전지차 보급 목표(2030년)를 통해 수소모빌리티 정책이 충전소 정비와 규제개혁 등으로 중점을 이동하면서, 수소와 암모니아 활용에 대한 정부 지원이 연료전지 트럭, 선박, 비행기 등으로 전환되고 있음을 보여주고 있다.²²⁾

[그림 2-12] 수소 모빌리티 분야의 2030년 목표



자료: 經濟産業省(2022). p.13 및 p.15

21) 内閣府(2022). p. 22.

22) 經濟産業省(2022. 9). p. 15

2023년 개정된 수소 기본전략(안)에 따르면, 연료전지자동차(Fuel Cell Vehicle, FCV)의 보급과 수소충전소 설치를 확대하기 위한 노력이 계속되고 있다.²³⁾ 특히 승용차뿐만 아니라 수소 수요가 많고 FCV의 장점을 최대한 활용할 수 있는 상용차 분야에 대한 지원을 강화할 계획이다. 민관협의체는 수요 예측, 생산 투자, 스테이션 투자 등의 어려움을 극복하기 위해 FC트럭의 생산과 도입을 위한 로드맵을 작성하고, 이를 공개할 예정이다.

에너지 절약법의 개정을 통해 특정 운송업체와 특정 화물차 소유자에게 비화석 에너지 자동차 도입을 위한 증장기 계획과 정기 보고를 의무화하였다. 이를 통해 운송 부문에서의 FC트럭 도입을 촉진하고, FCV의 보급 상황과 전망에 따라 1톤 이상의 트럭에 대한 전환 목표와 충전 인프라 도입 기준을 검토할 예정이다.

또한, 선제적으로 투자를 결정하는 물류 및 화물차 사업자에 대해 특별 지원을 검토하고 있다. FC 트럭 외에도 버스, 택시, 경찰차 등의 상용차와 관용차, 그리고 수소를 직접 연료로 사용하는 수소엔진차에 대한 개발도 진행 중이다. 이를 통해 모빌리티 분야에서의 수소 수요를 확대하기 위한 노력이 이루어지고 있다. 이러한 전략들을 통해 2030년까지 승용차 환산 80만대(수소 소비량 8만톤/년)의 FCV 보급과 1,000개의 수소충전소 설치를 목표로 하고 있다.

4.2. 수소발전

수소발전은 화석연료 대신 수소를 연료로 사용하여 발전하는 과정이다. 수소는 연소되어 터빈을 돌리고, 이를 통해 동력을 생성하여 발전기로 전기를 생산한다. 기본적인 원리는 기존의 화력발전과 유사하지만, 혼소 발전과 전소 발전으로 나뉘어진다. 혼소 발전은 다른 연료(예: 천연가스)에 수소를 첨가하여 사용하는 방식으로, 현재는 실험적인 연구나 상용화 과정에 있다. 반면, 전소 발전은 순수한 수소만을 연소시키는 방식으로, 이는 CO₂ 배출을 크게 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 전소 발전은 아직까지는 세계적으로 사례가 드물며, 기술 개발의 여지가 많이 남아 있다.

일본 정부는 수소를 에너지원으로 활용하는 것이 장기적으로 대규모 수소 수요를

23) 이하는 再生可能エネルギー—水素等関係閣僚会議(2023.6.6.), pp.32-35.를 참고

증가시키는 중요한 요소이며, 2030년까지 일본 국내에서 저렴한 대규모 수소 공급망을 구축하는 역할을 할 것을 기대하고 있다.²⁴⁾ 특히, 일본은 수소발전 기술이 선진화되어 있으며, 수소발전 터빈 시장의 규모는 약 23조 엔(2050년까지의 누적)로 예상되고 있다. 그러나 수소발전 기술의 상용화에는 혼소와 전소와 함께, 수소의 연소 속도가 빠른 특성에 대응하는 연소기 개발과 터빈에서의 장기적이고 안전한 운전을 검증하는 필요성이 강조되고 있다.

일본의 미쓰비시중공업은 수소가스터빈을 개발 중이며, 이는 수소발전 관련 기술 개발의 대표적인 사례로 언급되고 있다. 이 수소가스터빈은 수소의 연소특성인 역화와 연소진동 등에 대응하며, 환경성능(NOx 배출과 미연소 등)과 효율성을 충족시키는 연소기로 평가받고 있다. 특히, 미쓰비시중공업은 다음과 같은 이점을 강조하고 있다. 첫째로, 투자비용의 최소화를 추구하고 있고, 둘째로, 캐리어에 대한 유연성을 갖고 있어 다양한 수소원료에 대응할 수 있다. 마지막으로, 수소가스터빈을 도입함으로써 수소 수요를 촉진하는 효과를 가져올 수 있다. 미쓰비시중공업은 이러한 이점들을 홍보하고 있다.

미쓰비시중공업과 NEDO(일본 경제산업성)의 프로젝트에서는 수소를 활용한 기술 개발과 연구를 진행하고 있다.²⁵⁾ 2016년부터 2019년까지는 “수소이용 등 선도 연구 개발사업/대규모 수소이용기술의 연구개발” 프로젝트에서 수소전소 대형 가스 터빈용 클러스터 버너의 개발과 검증이 이루어졌다. 이어서 2020년 7월부터 2023년 3월까지 “수소사회구축 기술개발 사업/대규모 수소에너지 이용기술 연구개발” 프로젝트에서 수소 전소 대응형 Dry Low-NOx 고온가스터빈 발전설비의 연구개발을 진행하고 있다. 이는 수소전소 Dry Low-NOx 연소방식(클러스터 버너 채용)을 활용한 가스터빈 발전설비 설계에 필요한 연구개발이다.

미쓰비시중공업의 자회사인 Mitsubishi Power는 다양한 분야에서 수소발전 기술 개발에 참여하고 있다. 2018년에는 대규모 화력발전(500MW급)에서 수소 혼소를 20%를 달성하였으며, 2020년부터는 수소전소 발전 기술 개발에 집중하고 있다.²⁶⁾ 지역의 열병합발전(1MW급)에서는 수소를 천연가스와 자유롭게 혼소할 수 있는 기술을 개발하여 2018년에는 수소전소에 의한 열·전기 공급을 실시하였으며,

24) 経済産業省(2023.2.13.), p.9

25) NEDO(2022.7.29.), p.6.

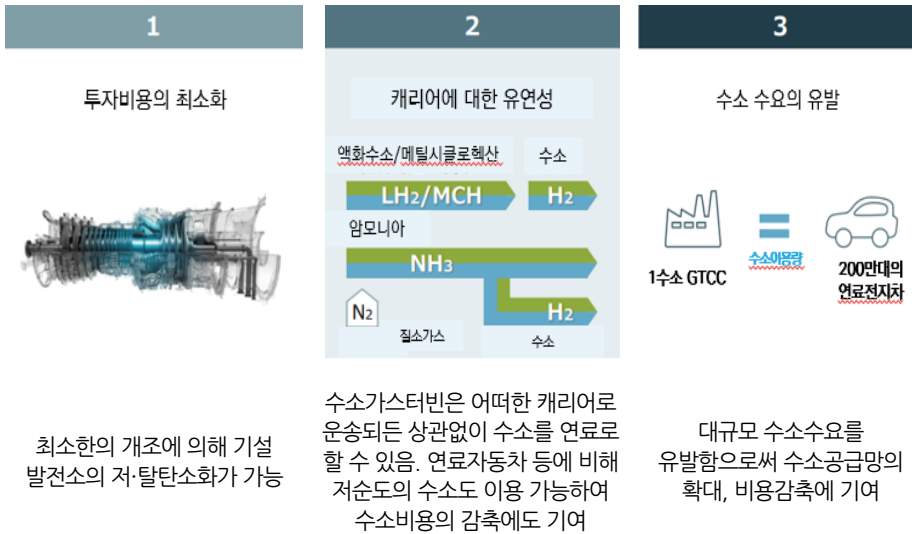
26) 三菱パワー株式会社(2020.10.6.)「水素ガスタービン」. (https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/2050_gas_jigyo/pdf/002_07_00.pdf, 최종접속일: 2023.4.15.)

2019년부터는 고효율의 수소전소 발전 기술 개발에 착수하였다.

또한, Mitsubishi Power는 전 세계적으로 진행 중인 수소가스터빈(H2 GT) 프로젝트에 참여하고 있다. 이 프로젝트는 다양한 국가와 지역에서 이루어지고 있으며, 각각의 프로젝트에서 Mitsubishi Power의 가스터빈 기술이 활용되고 있다. 예를 들어 영국의 Zero Carbon Humber 프로젝트, 네덜란드의 H2M(Magnum) 프로젝트, 싱가포르의 Keppel Data Canter(Tri-generation plant with H2 GT), 호주의 H2U Carbon-free ammonia production project with H2 GT, 미국의 Energy Decarbonization 프로젝트 및 Intermountain Power 프로젝트 등에서 Mitsubishi Power의 기술이 활용되고 있다.

이러한 프로젝트들은 수소를 활용하여 클린하고 친환경적인 에너지 발전 방식을 개발하고 실현하기 위한 연구 및 기술개발을 목표로 하고 있다.

[그림 2-13] 일본 미쓰비시중공업의 수소가스터빈



주: GTCC:Gas Turbine Combined Cycle.
 자료: 三菱パワー株式会社(2020). p.11.

4.3. 연료 암모니아

암모니아는 일본에서 약 108만 톤이 소비되고 있으며, 이 중 약 80%는 일본내에서 생산되고 나머지 약 20%는 인도네시아와 말레이시아로부터 수입되고 있다. 주로 비료로 사용되는데 약 80%가 비료로 사용되고 있고, 나머지 20%는 멜라민 수지나 합성섬유의 나일론 등의 공업용 원료로 사용되고 있다. 암모니아는 화학공장에서 생산되고 있으며, 안전한 운송 기술은 이미 확립되어 있다. 하지만 암모니아를 합성하기 위해서는 현재 주로 화석연료 기원의 수소인 천연가스를 사용하고 있다. 암모니아는 화학식으로 $3H_2 + N_2 \rightarrow 2NH_3$ 로 표현되며, 수소가 필요한 과정이다.

일본 정부는 암모니아의 새로운 용도로서 에너지 분야에서의 활용에 주목하고 있다. 앞서 언급한 것처럼 첫 번째로는 수소캐리어로서 수소를 운송하는 매개체로 사용될 수 있다. 두 번째로는 암모니아를 연료로 사용하는 것이며, 암모니아는 연소 시 CO_2 를 배출하지 않는 탈탄소 연료로 주목받고 있고, 석탄화력발전이 혼소하여 사용하면 CO_2 배출량을 억제하는 장점이 있다. 일본 정부는 암모니아 연료의 대규모 도입이 CO_2 배출 감축에 매우 효과적일 것으로 보고 있다. 예를 들어, 일본 국내의 대형 석탄화력발전소에서 20% 혼소를 시행하면 약 4,000만 톤의 CO_2 배출을 감소시킬 수 있고, 100% 전소를 시행하면 약 2억 톤의 CO_2 배출을 감소시킬 수 있다고 보고하고 있다. 암모니아 발전 비용도 낮아 암모니아 연료가 수소 전소 발전 비용보다 경제적으로 유리하다고 보고되고 있다.

그러나 암모니아를 연료로 사용하기 위해서는 대량의 암모니아 생산이 필요하며, 현재 이는 가장 큰 과제 중 하나다. 예상되는 암모니아 발전에는 약 2,000만 톤의 암모니아 소비가 필요하며, 100% 전소 시에는 약 1억 톤의 암모니아 소비가 필요하다. 이는 현재의 암모니아 생산량인 약 2억 톤과 비교하면 매우 큰 수치다.²⁷⁾ 따라서 암모니아 제조에 대한 기술과 생산량 증가가 가장 중요한 과제로 꼽힌다.

수소 기본전략 개정(안)에 따르면, 수소-암모니아를 발전 분야에서 활용하는 것은 탄소중립 및 탈탄소 사회 전환을 지원하고 안정적인 에너지 공급을 확보하는 역할을 기대할 수 있으며, 대량의 수소 수요를 예측한다. 이에 따라 일본은 차기 에너지 기본계획에서 2030년까지 수소-암모니아 발전을 전체 전원 구성의 약 30% 정도로

27) 資源エネルギー庁(2021.1.29.)「アンモニアが“燃料”になる?! (後編)」. https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteiky/ammonia_02.html. 최종접속일:2023.5.12.)

설정하는 목표를 가지고 있다. 이를 위해 대규모 퍼스트 서플라이 체인 구축을 통해 수요 확대와 공급비용 절감을 견인할 것으로 보인다.²⁸⁾

미쓰비시중공업은 현재까지 소형 가스터빈부터 대형 가스터빈까지 수소발전을 위한 연소기를 개발하고 실증까지 진행해왔다. 특히, 대형 가스터빈에서도 30% 혼소 및 전소연소 연소기 개발을 진행하고 있으며, EU 택소노미 가스화력 기준에 부합하는 30% 이상의 연소기 개발도 계획하고 있다.

암모니아 발전 분야에서는 2021년부터 석탄화력발전예 암모니아 혼소 실증사업을 시작하였으며, 2023년부터는 상업운전 중인 100만kW급 실기에서 20% 혼소시험을 진행하여 2020년대 후반에 상업운전을 목표로 하고 있다. 또한, GI 기금을 통해 50% 이상의 혼소를 실현과 전소 버너 개발이 진행되고 있다. 소형 가스 터빈에서는 전소 기술이 확인되어 온실가스 저감을 위한 대형화 검토가 예정되어 있다.

2020년대 후반부터 2030년까지 수소-암모니아 발전 분야에서는 기존의 혼소를 뿐만 아니라 전소를 포함한 폭넓은 혼소율을 실현하여 수요자의 탈탄소화 움직임에 부합하는 다양한 선택지를 제공하여 수요 창출을 촉진할 계획이다. 미쓰비시중공업은 빠른 실증을 거쳐 사회 구현으로 이어지는 연소기 개발을 진행하며, 2050년까지 기존의 화력 발전을 수소-암모니아 등 탈탄소 연료와 CCUS/탄소재활용을 통한 탈탄소형 화력으로 대체하는 것을 목표로 하고 있다. 또한, 전기 소매사업자 등에게 비화석 전원의 비율을 2030년까지 44% 이상으로 요구하는 등 규제를 통해 이용을 촉진하고, 2023년에는 장기 탈탄소 전원 경매 등의 지원책을 통해 2050년 탄소중립을 위해 혼소에서 전소를 추진하여 화력발전의 탈탄소화를 목표로 한다. 또한, 수소-암모니아의 잠재 수요지로 예상되는 지역과의 연계도 추진할 예정이다.

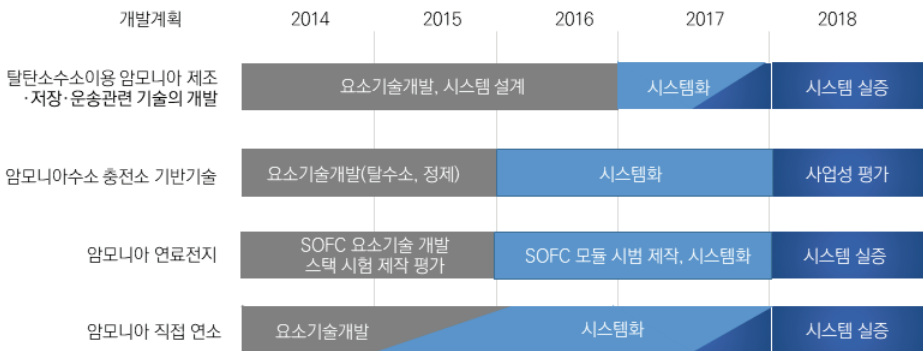
4.3.1. 내각부 SIP의 암모니아 혼소 기술개발 프로젝트

일본 정부는 암모니아를 연료로 활용하는 분야로서 발전분야, 산업분야, 운송분야에 역점을 두고 있다. 특히, 발전분야에서는 석탄화력발전의 보일러에 암모니아를 혼소시키는 기술 개발이 가장 앞서고 있다. 기존의 암모니아 제조, 운송, 저장 기술을 활용한 인프라가 이미 구축되어 있고, 화력혼소의 경우에는 버너 등을 교환함으로써 적용이 비교적 용이하다는 장점을 갖고 있다.²⁹⁾

28) 再生可能エネルギー—水素等関係閣僚会議(2023.6.6.), p.16.

일본 정부는 2014년에 개시된 에너지 캐리어 분야의 연구개발 프로그램인 SIP (Strategic Innovation Promotion Program)³⁰⁾를 통해 암모니아 제조, 저장, 운송 관련 기술 개발, 암모니아 수소 충전소 기반기술, 암모니아 연료전지, 암모니아 직접 연소 등 4개 프로젝트를 진행하였다. 이를 통해 암모니아 제조와 활용 기술에 대한 연구개발에 착수하였다.

[그림 2-14] 내각부의 SIP 연구개발: 암모니아 제조·이용기술



자료: 内閣府(2019), p.110.

일본 정부의 내각부가 공개한 연구개발 성과는 다음과 같다.³¹⁾ 1) 50kW급 마이크로 가스터빈에서 암모니아 전소발전에 성공하였다. 2) 2MW급 가스터빈에서는 열량비율 20%의 암모니아와 천연가스 혼소에 성공하였으며, 동시에 NO_x 발생을 억제하였다. 3) 재생에너지를 이용하여 제조한 암모니아를 전소연료로 하는 가스터빈으로 발전(47kW)하여 세계 최초로 탈탄소 암모니아의 가치사슬을 모의적으로 실증하였다. 4) 미분탄과 암모니아(열량비 20%)의 혼소 실험에서 NO_x 발생을 억제하였으며, 이를 활용하여 실제 운영 중인 석탄화력발전소에서 암모니아의 혼소발전을 실증하였다. 5) 암모니아를 연료로 사용하여 직접 공급하는 연료전지 시스템을 개발하여 1kW의 발전에 성공하였으며, 이는 업무 및 산업용 시스템의 대형화 가능성을 보여주었다.

29) 内閣府(2019), p.120.

30) SIP(전략적 이노베이션 창조프로그램, Cross-Ministrial Strategic Innovation Promotion Program). 내각부가 주도하고 있는 과학기술에 관한 중장기(5년) 연구개발 프로그램.

31) 内閣府(2019), pp.120~126.

〈표 2-10〉 SIP 연구개발 성과: 암모니아 직접 연소(혼소)

기술개발 목표	성과	비고
암모니아를 연료로 한 직접연소(전소 및 혼소) 기술을 개발하고, 가스터빈(수10kW~수MW), 공업로, 화력발전소 등에서 실용화할 수 있도록 장치개발	<ul style="list-style-type: none"> (암모니아 연소) 일반적인 마이크로 터빈을 이용하여 100% 암모니아연료에 의한 50kW급의 발전출력을 실현(10ppm 이하의 저질소산화물(NOx) 배출) 	
	<ul style="list-style-type: none"> (암모니아와 천연가스의 혼소) 2018년 3월 2MW급 가스터빈에서 세계최초로 열량비율 20%의 혼소에 성공. 기존의 연소기를 암모니아 혼소용으로 개량하여 연소속도가 다른 암모니아와 천연가스의 연소안정성을 확보하였고 NOx 배출 억제에도 성공함. 	그림. IHI의 암모니아 혼소 가스터빈 시험설비(요코하마) 
	<ul style="list-style-type: none"> (석탄화력발전소에서의 암모니아 연료 이용) 2017년 12월 IHI 가 대용량의 연소시험 설비에서 암모니아와 석탄화력발전의 연료인 미분탄(微粉炭)의 혼소시험 실시 <ul style="list-style-type: none"> →세계 최고수준인 열량비율 20%의 혼소에 성공 - 암모니아와 미분탄의 혼소에서는 기존 발전소에 대한 소규모의 개량만으로도 NOx 배출농도를 기존 석탄화력발전소의 경우와 비슷한 수준으로 유지 - 2017년 7월에는 추고쿠전력(中国電力)이 미즈마 화력발전소 2호기에서 암모니아 혼소시험→실제 조업중인 석탄화력발전소에서 암모니아 1% 혼소 발전에 성공 	그림. IHI의 대용량 연소시험 설비(소마시) 
<ul style="list-style-type: none"> (공업로) 2016년 10월 태양일본산소(Taiyo Nippon Sanso)는 오사카대학교와 공동으로 10kW의 모델 공업로에서, NOx 발생을 환경기준치 이하로 억제함과 동시에 화염의 전열을 강화하는 암모니아 연소기술의 개발에 성공 <ul style="list-style-type: none"> - 다만, 공업로의 종류는 매우 다양하여 모델 공업로에서의 개발 성과를 실제 공업로에 직접 적용하기에는 시간이 소요될 전망 - 공업로에서의 암모니아 이용을 구체적으로 적용한 사례로서는 2017년 6월 태양일본산소, 닛신제강(日新製鋼), 오사카대학이 강판탈지(脱脂) 목적으로 개발한 암모니아 혼소충돌분류식 탈지로의 버너가 대표적임. 	그림. 태양일본산소의 10kW 모델 연소로 	

자료: 内閣府(2019), pp.120~126.

4.3.2. 암모니아 혼소 실증 사업

일본의 주도적인 암모니아 혼소 실증사업을 이끌고 있는 기업은 JERA다. JERA는 일본의 최대 화력발전 회사로, 2015년에 도쿄전력 FUEL&POWER와 추부전력이 합병하여 설립되었다. 2020년 10월, JERA는 “JERA Zero Emission 2050”이라는 로드맵을 발표하여 국내외 사업에서의 CO₂ 배출량을 2050년까지 실질적으로 제로로 줄이는 계획을 제시했다.³²⁾ 이 로드맵에서는 비효율적인 석탄화력발전소(초임계 이하)를 2030년까지 모두 폐지하는 것을 선언하였다. 그리고 고효율 발전소(초초임계)에 대해서는 암모니아 혼소를 도입하여, 2030년 전반까지 혼소비율을 20%까지 높이고, 2040년대부터 암모니아 전소화를 시작하는 계획을 세우고 있다. 이를 통해 JERA는 탄소중립화를 위한 암모니아 혼소 기술의 개발과 도입을 이끌어나가고 있다.

[그림 2-15] JERA Zero Emission 2050:로드맵



자료: JERA, 2020.10.13. 「2050年におけるゼロエミッションへの挑戦について」, (https://www.jera.co.jp/news/information/20201013_539, 최종접속일: 2023.4.10.)

32) JERA, 2020.10.13. 「2050年におけるゼロエミッションへの挑戦について」, (https://www.jera.co.jp/news/information/20201013_539, 최종접속일: 2023.4.10.)

JERA와 IHI는 2021년부터 아이치현 헤키난 화력발전소(100만kW)에서 협력하여 20% 암모니아 혼소의 실증시험을 진행하고 있다. 이는 NEDO의 연료암모니아 대규모 혼소기술의 확립을 위한 정부 보조사업인 실증사업으로, 이전의 소규모 시험 결과를 바탕으로 실제 설비를 활용하여 진행되고 있다. JERA와 IHI가 이 실증사업에 역점을 둔 이유는 연료암모니아 대규모 혼소에 필요한 설비인 버너, 탱크, 배관 등의 설치 공정을 단축하기 위함이다. 2022년 5월, JERA와 IHI는 이전까지의 실증사업이 순조로움을 보였으며, 헤키난 화력발전소 4호기에서의 암모니아 대규모 혼소(열량비 20%)를 2023년으로 계획보다 1년 앞당겨 진행하기로 결정했다.³³⁾

[그림 2-16] JERA·IHI의 암모니아 혼소 실증사업



자료: JERA(2022).

4.3.3. 가스터빈 발전에서의 암모니아 이용

최근 일본의 연구기관과 기업들은 암모니아를 직접 연소하여 가스터빈 발전에 활용하는 기술을 개발하고 있다. 이 기술은 석탄화력발전과 마찬가지로 암모니아와 LNG 등의 연료를 혼소하는 방식으로 연구되고 있으며, 50~2,000kW급 중소규모 가스터빈을 대상으로 진행되고 있다. 또한, 암모니아만을 태워 발전하는 전소기술의 연구뿐만 아니라, 대형 가스터빈에서 액체 암모니아를 수소와 질소로 분해하여 연소하는 연구도 진행 중이다. 일본 정부는 대형 가스터빈에서의 암모니아 연소에 대한

33) JERA(2020.10.13.). 전계서

연구가 성공하면 연간 110만 톤의 CO₂ 배출량을 감축할 수 있다고 기대하고 있다.³⁴⁾

2022년 6월, IHI는 2,000kW급 가스터빈에서 액체 암모니아만을 연료로 사용하여 탈탄소 발전을 성공적으로 실현했다고 발표했다. 이에 따라 온실가스 배출량을 99% 이상 감축하는 결과를 얻었으며, 70~100%의 높은 암모니아 혼소율에서도 이를 달성했다. 이를 통해 액체 암모니아만을 사용하여 2,000kW의 발전이 가능하다는 것을 실증하였다.³⁵⁾ 이전부터 IHI는 가스터빈의 연소기 내에 액체 암모니아를 직접 분무하는 연소 방식에 주력해왔으며, 암모니아 저장 탱크에서 가스터빈까지의 공급 시스템의 간소성과 제어 측면에서의 장점을 갖추고 있다. 그러나 액체 암모니아는 연소성이 낮고 잘 타지 않는 특성을 가지기 때문에 높은 암모니아 혼소율에서 안정적인 암모니아 연소와 배기가스의 온실가스 배출 억제가 도전이었다. 지금까지 70% 이상의 높은 암모니아 혼소율에서 운전 시 아산화질소(N₂O)라는 온실가스가 발생하여 온실가스 감축이 제한되는 문제가 있었다. 향후에는 NO_x 배출량을 줄이고 운용성을 개선하며 장기간의 내구성 평가를 통해 2025년까지 액체 암모니아 100% 연소 가스터빈을 상용화하는 것이 계획이다. 2023년 1월에는 IHI가 미국 GE와 암모니아 전소 대형 가스터빈 개발을 위한 양해각서를 체결했다. 이를 통해 GE의 6F.03, 7F 및 9F 가스터빈에서 100% 암모니아 전소가 가능하도록 연소기술을 개발하는 협력을 이룰 예정이다.³⁶⁾

4.4. 산업

산업 분야는 전체 에너지 소비의 40%를 차지하며, 이 중 75%는 온실가스 감축이 어려운 산업에 속한다. 수소 기본 전략 개정(안)에 따르면, 중-고온 영역의 열 수요는 수소-암모니아 등의 활용이 중요하므로 이를 고려한 기술개발과 실증을 진행한다. 수소 확보가 가능한 지역에서는 수소 가스 터빈을 사용한 열병합발전 시스템 도입을 추진하며, 내륙지역 공장 등에는 수전해 시스템을 도입하여 수소를 제조하고

34) 資源エネルギー庁(2021.1.29.), p.3.

35) IHI. 2022.6.16. 「世界初, 液体アンモニア100%燃焼によるガスタービンで, CO₂フリー発電を達成」, プレスリリース(보도 자료) (https://www.ihico.jp/all_news/2022/resources_energy_environment/1197937_3473.html). 최종접속일: 2023.6.3.)

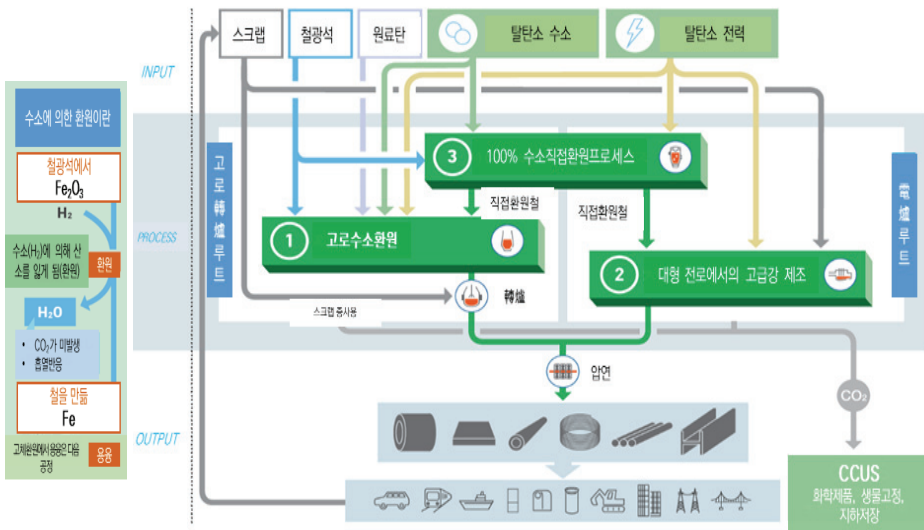
36) 2023년 1월 IHI는 미국 GE와 암모니아 전소 대형 가스터빈 개발에 관한 양해각서를 체결함. GE제 6F.03, 7F 및 9F 가스터빈에서 100% 암모니아 전소를 가능하게 하는 연소기술 개발에 협력하기로 한 것임. IHI. 2023.1.18. 「IHIとGEアンモニア専焼大型ガスタービン開発に関する覚書を締結」, プレスリリース. (https://www.ihico.jp/all_news/2022/resources_energy_environment/1198147_3473.html). 최종접속일: 2023.6.3.)

활용한다. 또한, 자가발전용 화력발전에서도 수소-암모니아를 촉진하여 탄소중립을 실현한다. 에너지 절약법 개정을 통해 비화석에너지 전환 계획 제출과 보고를 의무화하고, 에너지 사용량이 높은 주요 산업부문에 대한 비화석에너지 전환 목표를 설정하여 사업자를 지원한다. 합성 메탄과 합성 연료의 활용을 확대하기 위해 국제-국내 규칙을 조정하고, LP 가스와 GI 기금을 활용한 연구 지원을 추진하며 실용화와 저비용화를 위한 다양한 지원 방안을 검토한다.

4.4.1. 철강

현재 일본의 제철소에서 사용되는 고로법은 철광석과 코크스를 사용하여 철을 추출하는 과정에서 많은 양의 CO₂를 배출한다. 이에 대한 해결책으로, 수소를 환원제로 사용하여 CO₂ 배출을 감축하는 연구가 진행되고 있다. 직접환원법은 철광석을 고체 상태로 유지하면서 환원가스로 환원하는 방법이며, 이를 위해 천연가스나 석탄 가스 등을 대체할 수 있는 기술개발이 진행 중이다.³⁷⁾

[그림 2-17] 일본제철의 탄소중립 철강생산 프로세스



자료: 日本製鉄(2021), p.7.

37) 철광석을 고체 상태 그대로 환원가스를 이용하여 환원하는 방법

2021년 3월에 일본제철은 “일본제철 탄소중립 비전 2050”을 발표했다. 이 비전에서는 탄소중립 철강 생산을 위해 세 가지 혁신적인 기술인 고로수소환원, 대형전로에서의 고급강 제조, 그리고 수소직접환원프로세스의 개발을 제시하고 있다.³⁸⁾

수소환원제철 기술은 코크스 사용 대신 수소를 이용하여 철광석을 환원하는 방법으로 CO₂ 배출을 줄일 수 있다. 이러한 기술은 아직까지 완전히 확립되지 않은 상태이지만, 일본 정부는 2008년에 “수소활용 환원 프로세스 기술 (COURSE50)” 프로젝트를 시작했다. 이 프로젝트는 제철소 내에서 발생하는 수소를 주로 활용하는 프로젝트이며, 코크스 사용을 최소화하고 외부 수소도 활용하는 기술 개발도 진행 중이다. 최근에는 고로의 배기가스에서 분리하고 회수한 CO₂와 수소를 반응시켜 메탄을 생성하여 고로에 투입하여 환원제로 사용하는 기술도 개발되고 있다.

COURSE50 프로젝트는 고로수소환원기술과 CO₂ 분리회수기술로 구성되어 있다. 고로수소환원기술은 석탄 연소 과정에서 생성되는 가스 중 메탄(CH₄)에서 수소(H₂)를 추출하여 코크스 일부를 수소로 대체한다. 이렇게 대체된 수소(H₂)는 철광석(Fe₂O₃)에서 산소(O₂)와 반응하여 물(H₂O)을 생성하여 철광석의 환원을 일으키는 원리다. CO₂ 분리회수기술은 고로에서 코크스를 사용하여 고열로 연소하여 철을 추출할 때 발생하는 CO₂를 분리하고 회수하는 기술을 의미한다. 이 분리 과정에서는 폐기되는 낮은 온도의 열에너지(미이용저온열)를 활용한다.

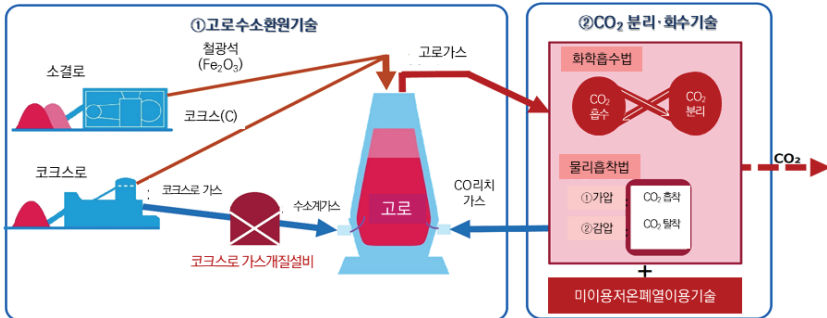
일본 정부는 2008년부터 NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization)의 COURSE50 연구개발 프로젝트를 통해 제철 공정에서 발생하는 CO₂ 감축을 위한 기술 개발을 진행하고 있다. 이 프로젝트는 현재 Phase 3에 있으며, 2030년을 목표로 실용화를 계획하고 있다.³⁹⁾

이 프로젝트에서는 제철소 내에서 부차적으로 발생하는 가스를 활용하여 수소를 증폭시키거나, 수소를 포함한 가스를 고로에 흡입하는 방법 등을 통해 수소환원 비율을 향상시키는 연구도 진행되고 있다. 또한, CO₂ 회수를 위해 화학적인 흡수법이나 물리적인 흡착제를 사용하는 방법에 대한 기술 개발도 진행 중이다.

38) 日本製鉄(2021.3.30.), 「日本製鉄カーボニュートラルビジョン2050」. (https://www.nipponsteel.com/ir/library/pdf/20210330_ZC.pdf. 최종접속일: 2023.4.21.)

39) COURSE50 개발로드맵에 따라 2016년 완성한 시험고로(실제의 1/400 규모)에서 연구개발을 거쳐 현재는 Phase3 단계이고 2030년경의 실용화가 목표임. Phase 1(2008년~2017/2018년): 요소기술개발(시험고로에 의한 수소환원과 CO₂ 분리회수를 포함한 CO₂ 감축효과의 기초원리 확인). Phase 2(~2025년): 요소기술의 조합에 의한 종합기술개발(고정밀 시뮬레이션 및 상용 고로의 일부를 사용한 실증. Phase 3(~2030년): 실용화(2030년경까지 1호기 가동). Phase 4(~2050년): 보급(고로관련 설비의 갱신 시점을 고려하여 2050년경까지 보급을 목표)

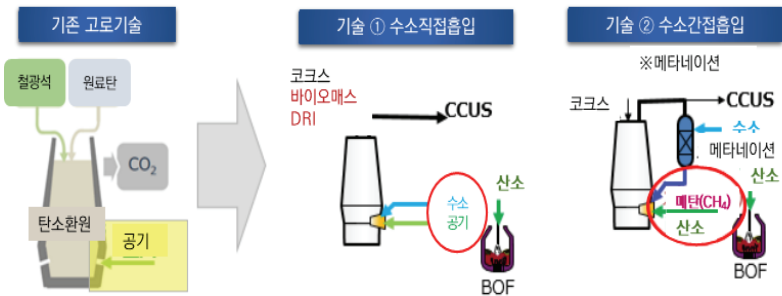
[그림 2-18] 고로 수소환원기술(COURSE50) 개발: 개념도



자료: 資源エネルギー庁(2018.6.28.) 「水素を使った革新的技術で鉄鋼業の低炭素化に挑戦」 (<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteiky/course50.html>. 최종접속일: 2023.5.13.)

일본제철(JFE Steel), 고베제강소(Kobe Steel), 금속재료연구개발센터(Metal Material Research Institute) 등이 참여하는 사업체에서 ‘제철소 내 수소를 활용한 수소환원기술의 개발’ 프로젝트가 진행 중이다. 이 프로젝트는 2021년부터 2029년까지 약 353억 엔의 예산을 가지고 진행되며, 정부의 지원 규모는 약 140억 엔이다. 목표는 2030년까지 제철소 내에서 수소를 이용한 고로에서의 수소환원 기술과 CO₂ 분리 회수 기술을 도입하여 제철프로세스에서 배출되는 CO₂를 약 30% 감축하는 것이다.⁴⁰⁾

[그림 2-19] 고로 수소환원기술(COURSE50) 개발: 외부수소 등 활용



자료: NEDO(2022). 「高炉を用いた水素還元技術の開発」 (<https://www.nedo.go.jp/content/100940993.pdf>. 최종접속일: 2023.5.13.)

40) NEDO(2022). 전게서. p.1.

외부수소 및 고로 배기가스에 포함된 CO₂를 활용한 저탄소화 기술의 개발은 일본 제철업체들이 주도하여 진행되고 있으며, 2021년부터 2030년까지 약 2,9183억 엔의 예산이 투입된다. 이 프로젝트는 2030년까지 중규모 시험고로에서 외부수소나 고로 배기가스에 포함된 CO₂를 활용한 저탄소화 기술의 개발과 함께 바이오매스나 환원철 등을 일부 원료로 활용하는 저탄소화 기술을 조합하여 제철프로세스에서 배출되는 CO₂를 50% 이상 감축하는 것을 목표로 하고 있다.

직접환원법은 천연가스를 사용하여 철광석을 고체 상태 그대로 환원하고, 이후에 전로에서 용해하는 방법을 말한다. 이 방법은 코크스를 사용하지 않아 CO₂ 발생을 낮출 수 있어 이점이 있지만, 철광석의 환원과 용해를 하나의 고로에서 수행할 수 없어 에너지 효율이 낮다는 단점이 있다. 또한, 전로에서 불순물을 제거하는 것이 어려워 불순물을 다량 함유한 저품위의 철광석을 사용할 수 없는 제약도 있다.

현재 일본에서는 NEDO의 직접수소환원기술의 개발과 직접환원철을 활용한 전로의 불순물제거 기술 개발 프로젝트를 진행하고 있다. 직접수소환원기술 개발 프로젝트는 일본제철, JFE스틸, 금속계재료연구개발센터가 참여하며, 2021년부터 2030년까지 10년간 진행된다. 이 프로젝트의 목표는 저품위 철광석을 수로로 직접 환원하여 중규모 직접환원로에서 CO₂ 배출량을 현행 고로법에 비해 약 50% 감축하는 것이다.⁴¹⁾

또한, 직접환원철을 활용한 전로의 불순물제거 기술 개발 프로젝트는 일본제철, 고베제강소, 금속계재료연구개발센터가 참여하며, 2021년부터 2030년까지 10년간 진행된다. 이 프로젝트의 목표는 대형 전로일관프로세스에서 불순물의 농도를 고로법 수준으로 제어하여 자동차의 외판 등에 사용 가능한 고급강을 제조하는 것이다.⁴²⁾

수소 기본전략 개정(안)에 따르면 철강 산업은 2050년까지 탄소 중립을 달성하기 위해 고로에서 전기로로의 생산 체제 전환 등을 검토하고 있지만, 전기로만으로는 글로벌 철강 수요를 충족시키기 어려워 철광석 환원재를 석탄이나 코크스 대신 수소로 대체하는 수소환원 제철 기술의 개발이 필요하다. 그러나 수소환원 제철은 흡열반응이기 때문에 철을 녹여 빼내기 위해 지속적인 열 공급이 필요하므로 높은 생산성을 유지하면서 실용화하는 것은 어려운 문제다.

현재 세계적으로 사회 구현을 위한 기술 개발이 진행 중이며, 일본에서는 CO₂ 배

41)NEDO(2022). 전게서. p.3.

42)NEDO(2022). 전게서. p.4.

출을 10% 감축하는 수소활용 기술인 COURSE50의 실증을 위한 연구와 개발이 진행되고 있다. COURSE50 프로젝트는 수소 주입량 증가를 통해 CO₂ 배출을 50% 감축하는 SuperCOURSE50 및 수소 직접 환원 기술에 대한 연구도 추진하고 있다.⁴³⁾ 세계적으로는 수소 직접 환원 기술을 활용한 대규모 프로젝트가 진행되고 있으며, 국내에서도 국제 경쟁력을 고려하여 지원 확대를 검토해야 한다. 철강업계에서는 2020년대 후반부터 점진적인 수소 수요 증가가 예상되지만, 본격적인 수소 활용은 2030년대에 가능할 것으로 보인다. 이에 필요한 수소 공급 안정성과 저렴한 비용, 국내 투자 판단 요소로서의 국내와 해외의 조건 비교가 중요하다.

4.5. 메타네이션

4.5.1. 일본 정부의 메타네이션에 대한 인식

메타네이션은 촉매를 통해 이산화탄소와 수소를 반응시켜 천연가스의 주성분인 메탄을 생성하는 방법이다. 이 과정에서 이산화탄소는 제철소, 화력발전소, 공장, 소각장 등에서 포집되며, 수소는 재생에너지로 생성된다. 일본은 이 기술에 주목하는데, 그 이유는 가스가 일본의 민생부문과 산업부문에서 광범위한 열수요를 충족시키는데 이용되며, 특히 천연가스 연소 시 이산화탄소 배출량이 석탄이나 석유보다 적기 때문이다. 따라서 가스의 탈탄소화를 통해 탄소 중립을 달성할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 이 중에서도 메타네이션은 수소와 이산화탄소를 반응시켜 천연가스를 합성하는 가장 유력한 탈탄소화 기술로 여겨지고 있다.⁴⁴⁾

43) NEDO. 웹사이트 「環境調和型プロセス技術の開発」(https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100050.html). 최종접속일: 2023.5.19.)

44) 資源エネルギー庁(2021.11.26.) 「ガスのカーボンニュートラル化を実現するメタネーション技術」. (<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/methanation.html>). 최종접속일: 2023.5.31.)

4.5.2. 메타네이션 기술 개발 현황

메타네이션은 촉매를 통해 수소와 이산화탄소를 반응시켜 합성메탄을 생성하는 사바티에 반응을 일반적으로 의미한다. 일본은 이런 방식의 합성메탄 생성에 1995년 세계 최초로 성공하였으며, 그 이후로도 연구 개발을 지속하고 있다. 2017년부터 2021년까지 NEDO의 실증사업으로 히타찌조선과 INPEX에서 기반기술 개발을 주도하고 있으며, 오사카가스 역시 합성메탄 제조를 위한 선도적 연구를 수행 중이다.

〈표 2-12〉 일본의 메타네이션 기술개발 현황: 사바티에 반응

사명	개요	비고
INPEX	<ul style="list-style-type: none"> 2021년 10월 INPEX는 오사카가스와 공동으로 NEDO의 보조금사업(도시가스의 탄소중립화를 위한 CO₂-메타네이션 시스템의 실용화를 목표로 한 기술개발사업)에 착수 INPEX는 2017년부터 나가오카 가스전에서 회수한 이산화탄소(CO₂)를 활용한 합성메탄 제조기술(제조능력은 8Nm³/h)을 개발 중이고 도관주입 예정 	<ul style="list-style-type: none"> 표 2-14 참조
히타찌조선 (日立造船)	①환경성 사업. 2022년 6월 오다와라시의 쓰레기처리시설에서 회수한 이산화탄소(CO ₂)를 활용한 메타네이션 설비의 실증 운전 개시	<ul style="list-style-type: none"> 합성메탄 제조능력: 125Nm³/h
	②2020년 12월 중국 산시성 위린경제기술개발구와 메타네이션 기술의 중국 국내에서의 실증사업에 관한 양해각서 체결. 2021년 메타네이션의 대형화 실증에 관한 Pre FS 개시	<ul style="list-style-type: none"> 중국 산시성 위린시 등 화동지역을 모색 중. 합성메탄 제조능력: 500Nm³/h
IH	①후쿠시마 현 소우마 IH 그린에너지센터에서 재생에너지에서 메타네이션에 이르는 전(全) 공정을 실증 중	<ul style="list-style-type: none"> 합성메탄 제조능력: 12.5Nm³/h→2025년 이후에는 수백~수만 Nm³/h급으로 스케일업 예정
	②이바라키현 모리야시 아사히그룹연구개발센터에 메타네이션 장치를 도입. 2021년 9월부터 공장에서 회수한 이산화탄소(CO ₂)를 활용하는 실증 개시	
	③2023년 1월 세계최초로 합성메탄을 연료로 사용하여 자동차를 구동하는 실증실험 개시	<ul style="list-style-type: none"> 후쿠시마현 미나미소우마시 커뮤니티 버스의 연료를 합성메탄으로 교체
덴소	<ul style="list-style-type: none"> 2021년 4월 아이치현 안조 공장에서 메타네이션을 활용한 공장내 CO₂ 순환을 실증 	

사명	개요	비고
아이신	<ul style="list-style-type: none"> 2023년 6월 아이치현 니시오 공장에서 알루미늄을 녹이는 용해로의 배기가스로부터 회수한 이산화탄소(CO₂)를 활용하여 메탄을 합성하는 메타네이션 개시. 수소는 공장내 태양광 발전 전기로 생성. 	<ul style="list-style-type: none"> 2025년 용해로 1대에서 발생하는 이산화탄소(CO₂)를 전량 회수하는 장치 개발 예정. 합성메탄 제조능력: 12Nm³/h
도쿄(東京) 가스	<ul style="list-style-type: none"> 2022년 3월 도쿄가스 요코하마 테크노스테이션에서 메타네이션 시설 개소식. 사바티에 실증 및 혁신기술의 연구개발 실시 	<ul style="list-style-type: none"> 합성메탄 제조능력: 12.5Nm³/h
도호(東邦) 가스	<ul style="list-style-type: none"> 2023년부터 2026년까지 4년에 걸쳐 아이치현 치타시 남부정화센터에서 발생하는 바이오가스 기원의 이산화탄소(CO₂)와 치타 LNG 공동기지의 냉열발전 전력을 활용하여 제조하는 수소를 원료로 합성메탄을 제조하는 실증 사업 개시 예정 	<ul style="list-style-type: none"> 2022년 6월 아이치현 치타시와 메타네이션 실증 협정 조인 합성메탄 제조능력: 5Nm³/h. 수소제조: 20Nm³/h 도시가스제조소 주입형 메타네이션
UBE 미쓰비시 시멘트	<ul style="list-style-type: none"> 규슈공장 구로자키지구에서 시멘트킬른 배기가스로부터 CO₂를 회수하여 수소와 반응시켜 메탄을 합성하는 메타네이션 적응성 평가 실시 	<ul style="list-style-type: none"> UBE미쓰비시시멘트는 메타네이션 이외에도 CO₂회수-탈산염화기술 개발, 킬른 에너지전환 기술의 개발(암모니아 혼소)도 추진 중
오사카(大阪) 가스	<ul style="list-style-type: none"> 환경성 사업. 2022년 3월 오사카시 마이시마 쓰레기처리시설과 오사카간사이 만박에서 재생에너지 기원 수소와 쓰레기 기원의 바이오가스를 활용하여, 바이오 메타네이션과 사바티에 메타네이션을 병행하는 실증 	<ul style="list-style-type: none"> 합성메탄 제조능력: 5Nm³/h 도관주입형 메타네이션

주: 1) 사바티에반응(Sabatier reaction)이란 촉매를 매개로 수소(H₂)와 이산화탄소(CO₂)를 반응시켜 합성메탄(CH₄)을 생성하는 것을 말함.

자료: 資源エネルギー庁(2022.11.(b)). 「メタネーション取組マップ2023」. (https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/009_04_02.pdf, 최종접속일: 2023.5.29.)

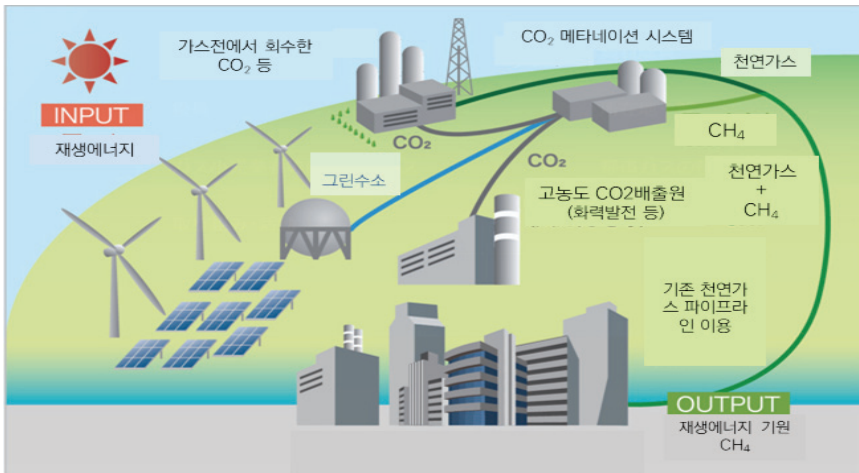
2021년 10월, INPEX와 오사카가스는 NEDO의 보조금사업을 통해 CO₂-메타네이션 시스템의 실용화를 목표로 한 기술개발에 착수하였다. INPEX는 2017년부터 합성메탄 제조능력 8Nm³/h의 CO₂-메타네이션 기술을 개발하였고, 오사카가스는 석유계 원료를 이용한 도시가스나 천연가스 대체제조 및 합성메탄 제조에 대한 촉매 기술과 스케일업 노하우 등 엔지니어링 기술을 보유하고 있다. 2025년부터 INPEX 나가오카 가스전에서 회수한 CO₂를 이용한 합성메탄 제조 실증실험이 시작될 예정이며, 이를 INPEX의 도시가스 파이프라인에 주입해 수요자에게 공급할 계획이다. 2023년 6월에는 치오다화공건설과 EPC 계약을 체결하고, 세계 최대 규모

인 가정용 1만 세대분에 해당하는 400Nm³-CO₂/h의 시험설비 건설을 시작하였다. 이 시험설비는 메타네이션, 원료공급 및 커뮤니티 설비 등으로 구성되며, 나가오카 광장 고시지하라 플랜트에 접속될 예정이다.

〈표 2-13〉 INPEX의 메타네이션 실증사업 개요

구분	내용
NEDO의 보조금 사업명	<ul style="list-style-type: none"> 기체연료에 대한 CO₂ 이용 기술개발/대규모 CO₂-메타네이션 시스템을 활용한 도관주입의 실용화 기술개발
체제	<ul style="list-style-type: none"> 주식회사 INPEX: 상업용 스케일 적용성 검토. 오사카가스 주식회사(INPEX가 위탁): 반응프로세스 기술개발. 국립대학법인 나고야대학(INPEX가 위탁): 시뮬레이션 기술개발
기간	<ul style="list-style-type: none"> 2021년도 하반기~2025년도 말(예정)
장소	<ul style="list-style-type: none"> 니가타현 INPEX 나가오카 가스전 고시지하라(越路原) 플랜트에 접속하여 시험설비를 구축
개요	<ol style="list-style-type: none"> 촉매에 의한 CO₂-메타네이션 반응을 파악하기 위한 반응 시뮬레이션 기술개발 프로세스의 기본성능과 촉매의 장기내구성 등을 평가·확립하기 위한 대규모 CO₂-메타네이션 반응 프로세스 기술개발 상업용 규모로의 대형화, 적용성 및 경제성 등을 평가하기 위한 반응 시스템의 스케일업 등 적용성 검토

[그림 2-21] 사업이미지



자료: 大阪ガス(2023.6.16.)『世界最大級のメタネーションによるCO₂排出削減・有効利用実用化技術開発事業における試験設備の建設開始について:都市ガスのカーボンニュートラル化の実現に向けて.』(https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr2023/1768098_54087.html). 최종접속일: 2023.6.21.)

또 다른 메타네이션 방법인 바이오 메타네이션은 바이오반응기에 미생물을 보존하고, 수소와 이산화탄소의 혼합가스를 주입하여 합성메탄을 생성하는 과정을 의미한다. 이 방법은 소규모 시설에서 적합하며, 특히 하수처리장의 소화가스 대상으로 유용하다는 평가를 받고 있다. 일본에서는 이 분야를 오사카가스와 도쿄가스가 선도하고 있다.

〈표 2-14〉 일본의 메타네이션 기술개발 현황: 바이오 메타네이션¹⁾

사명	개요
오사카가스	<ul style="list-style-type: none"> 국토교통성 사업. 2022년 3월 교토대학, NJS, 오사카시와 공동으로 오사카시의 에비에 하수처리장에서 바이오 메타네이션에 관한 필드 시험 사업자로 채택
도쿄가스	<ul style="list-style-type: none"> 2021년 10월 도쿄공업대학, Synthetic Gestalt와 공동으로 바이오반응기에 의한 메타네이션의 기술실증 개시

자료: 資源エネルギー庁(2022.11.(b).) 전계서

2022년 3월, 오사카가스는 교토대학, NJS, 오사카시와 함께 하수처리장에서 발생하는 바이오가스를 활용한 바이오 메타네이션 필드시험에 착수했다. 이 시험은 국토교통성의 하수도응용연구 지원사업에 채택되었다.⁴⁶⁾ 이 프로젝트에서 오사카가스는 바이오가스에서 미이용 CO₂를 활용한 메타네이션 기술 개발에 주력하였다. 필드 시험은 오사카시의 에비에 하수처리장에서 이루어졌으며, 새롭게 설치된 소규모 시험장치에서 하수오니와 수소를 바이오가스화하고, 이를 이용해 바이오가스 내의 CO₂와 수소를 미생물을 이용해 메탄으로 합성하는 'in-Situ 방식'의 바이오 메타네이션을 실시했다.

2023년에는 이 시험장치에 폐기 바이오플라스틱의 분해물인 유산을 투입하여 바이오가스의 발생량을 증가시키는 필드시험을 계획하고 있다. 이를 통해 하수오니에서 추출하는 메탄 양을 약 3배 증가시키고 메탄 농도를 85% 이상으로 높일 계획이다.

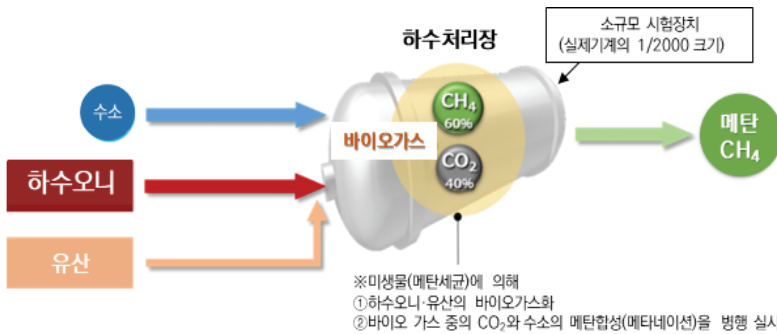
46) 大阪ガス(2022.3.28.) 「メタネーションに関する下水処理場でのフィールド試験の開始について:国土交通省の令和4年度下水道応用研究に採択」. (https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr2022/1305412_49634.html. 최종접속일:2023.5.8.)

<표 2-15> 오사카가스의 바이오 메타네이션 필드시험 개요

내용	
장소	• 오사카시의 에비에(海老江) 하수처리장
기간	• 2022년도 상반기~2024년 3월(예정)
개요	1) 하수오니를 활용한 메타네이션(2022년도) · 소규모 시험장치(소화조)를 새로 설치 · 소화조에 하수오니와 수소(시판 수소보통 사용)를 투입하여 동 소화조내에서 아래 ①②를 시험 ① 메탄세균에 의한 하수오니의 바이오 가스화 ② 메탄세균에 의한 바이오가스 중의 CO ₂ 와 수소의 메탄합성(바이오 메타네이션) 2) 폐기 바이오플라스틱의 분해물을 활용한 메타네이션(2023년도) · 하수오니와 수소가 존재하는 소화조에 폐기 바이오플라스틱의 분해물인 유산을 투입하여 동 소화조 내에서 아래 ①②를 시험 ① 메탄세균에 의한 유산의 바이오 가스화 ② 메탄세균에 의한 바이오가스 중의 CO ₂ 와 수소의 메탄합성(바이오 메타네이션)

자료: 大阪ガス(2022.3.28.)「メタネーションに関する下水処理場でのフィールド試験の開始について」国土交通省の令和4年度下水道応用研究に採択. (https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr2022/1305412_49634.html, 최종접속일: 2023.5.8.)

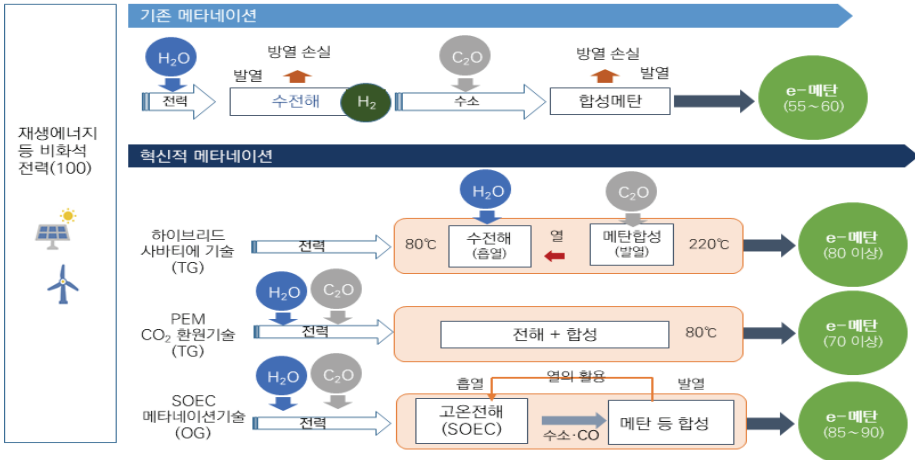
[그림 2-22] 필드시험 이미지



자료: 大阪ガス(2022. 3.28.). 전계서

마지막으로 혁신적 메타네이션은 수소와 이산화탄소를 사용하는 사바티에 반응 대신, 물과 이산화탄소로부터 합성메탄을 생성하는 기술을 의미한다. 이 기술은 도료가스와 오사카가스에 의해 주도되며, 제조 과정의 통합과 배열 이용으로 에너지 변환 효율을 높일 수 있다는 장점이 있다. 또한, 수소 조달이 필요 없어서 물과 이산화탄소만으로 직접 효율적으로 합성메탄을 제조할 수 있는 강점이 있다.

[그림 2-23] 혁신적 메타네이션 기술



자료: TOKYO GAS(2022.12.20.)『2050년 탄소중립을 위한 혁신적 메타네이션 기술 사회장기 검토위원회 (공동위원회)의 설치について』(https://reinforz.co.jp/bizmedia/2025/. 최종접속일: 2023.5.11.)

<표 2-16> 일본의 메타네이션 기술개발 현황: 혁신적 메타네이션1)

사명	개요	비고
도쿄가스·IH·JAXA·오사카대학	저온프로세스에 의한 혁신적 메탄 제조 기술 개발. 도쿄가스는 전체 관리와 실증, IH는 사회실장을 위한 시스템 개발	하이브리드 사바티에, PEM CO ₂ 환원
오사카가스 ¹⁾	오사카시의 카본뉴트리얼리서치 허브에서 SOEC 메타네이션의 연구개발	요소기술 개발. 합성메탄 제조능력: 0.1Nm ³ /h→2020년대 후반 10Nm ³ /h급
JFE스틸	소형시험설비(치바지구)에서 메타네이션을 활용한 카본리사이클 고로의 기술개발. 대형화 개발 후 수소수급 등을 감안하여 실증된 기술부터 순차적으로 실장	요소기술 개발·부분실증 후 2020년대 후반에 소형 고로실형 목표
태평양시멘트·IH	시멘트 제조시에 발생하는 CO ₂ 를 활용하는 메타네이션 설비의 개발·실증. 시멘트 제조공정의 열에너지로서 합성메탄을 재이용	2022년 1월 NEDO의 그린노베이션 기금사업(제조프로세스에서의 CO ₂ 회수기술의 설계·실증)에 선정됨.
히로시마가스·히로시마대학	암모니아 또는 수소로부터 저발열 합성메탄이 제조가능한 촉매와 프로세스의 연구	요소기술 개발·실증

주: 1) 2022년 4월 오사카가스는 AIST(산업기술종합연구소)와 공동으로 NEDO의 그린노베이션 기금사업자로 선정됨. 사업명은 「CO₂를 활용한 연료제조기술개발-합성메탄제조관련 혁신적 기술개발-SOEC* 메타네이션기술혁신사업.임. 사업기간은 2022년부터 2030년까지이고, 사업목표는 세계최고 수준의 에너지변환효율을 구현하는 합성메탄 제조기술 확립임.

*SOEC: Solid Oxide Electrolysis Cel. 고체산화물을 이용하여 수증기나 CO₂를 고온에서 전기분해하는 소자

자료: 資源エネルギー庁(2022.11.(b.)) 전계서

4.5.3. 공급망 구축

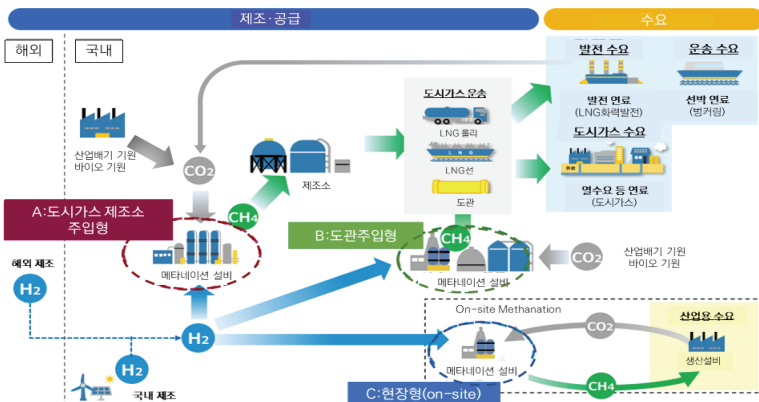
합성메탄은 다양한 용도로 사용될 수 있고, 일본의 메타네이션 공급망은 수소와 CO₂의 조달 방법이나 제조 위치에 따라 다양한 형태를 가지고 있다. 주요 공급망 유형은 도시가스 제조소 주입형, 도관주입형, 그리고 현장(온사이트)형이 있다.⁴⁷⁾

도시가스제조소 주입형은 기존 도시가스 제조소 근처에서 메타네이션을 진행하며, 기존 인프라를 최대한 활용하여 제조소에 직접 주입한다. 이 방법은 해외 수소, 부생수소, 국내 재생에너지 기반의 수소, 화력발전이나 산업용 CO₂에 쉽게 접근할 수 있고 대량 제조가 가능하다는 장점이 있지만, 도시가스 제조소 근처에 메타네이션 설비를 설치해야 한다는 단점이 있다.

도관주입형은 수소 등의 원료가 있지만, 제조소가 근처에 없고 자체 소비나 현장 수요가 적은 경우에 도관에 직접 합성메탄을 주입한다. 하지만 이 방법은 도시가스 도관 근처에 메타네이션 설비를 별도로 설치하고, 부취 처리 등의 비용 문제가 있어 합성메탄의 대량 제조에는 한계가 있다.

온사이트(현장)형은 합성메탄의 수요지가 도시가스 제조소나 도관에서 멀리 떨어져 있지만 수요 규모가 큰 경우, 수요지 근처에 메타네이션 설비를 설치하여 공급한다. 그러나 수소 거점이 근처에 존재하지 않는 경우에는 대량의 수소 조달이 어렵다.

[그림 2-24] 일본 메타네이션의 공급망 구축(개념도)



자료: 日本ガス協会(2022.8.5.)전게서, p.6.

47) 日本ガス協会(2022.8.5.)「国内メタネーションの普及拡大の早期化に向けて」(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/kokunai_tf/pdf/003_04_00.pdf, 최종접속일: 2023.6.18.)

〈표 2-17〉 일본의 메타네이션 공급망 구축 현황

	사명	개요
국내	태평양시멘트·도쿄가스	• 2022년 3월 도쿄가스와 태평양시멘트는 시멘트 제조공정에서 회수되는 고농도 CO ₂ 를 원료로 하여 합성되는 메탄을 도시가스 인프라를 활용하여 공급하는 메타네이션 사업의 타당성조사에 착수
	후지필름·도쿄가스·미나미아시하라시	• 2022년 3월 후지필름, 도쿄가스, 가나가와현 미나미아시하라시(南足柄市)가 탈탄소사회 실현을 위한 포괄연계협정을 체결. 후지필름의 미나미아시하라 공장에 대한 메타네이션 도입 FS 개시에 합의
	간사이(関西) 전력	• 2021년 9월 간사이전력은 NEDO의 「수소사회구축 기술개발 사업/지역수소활용 기술개발/수조제조·활용 Potential 조사」 사업자로 채택. 그 사업의 일환으로 사카이(堺)지역내 간사이전력 계열사의 설비(△사카이 메가솔라(10MW), △사카이 LNG:LNG 수입(受入)기지, △하이드로엣지:블루수조제조시설, △사카이하 발전소(2,000MW))을 활용한 메타네이션 실증 관련 FS 조사를 실시
	도호가스·덴소·아이신	• 2022년 11월 도호가스, 덴소, 아이신은 내륙부의 공장지대(도시가스 수요)에서 회수한 CO ₂ 를 항만지대의 LNG 기지로 운반하여 합성메탄을 제조하고, 도시가스 도관을 이용하여 해당 수요지에 공급하는 CO ₂ 순환모델에 관한 FS 조사를 실시
	세이부(西部) 가스	• 2022년 9월 세이부가스는 기타큐슈시와 탄소중립 실현을 위한 연계협정을 체결하고 세이부가스의 히비키 LNG기지에서의 메타네이션 실증을 검토중이라고 발표
해외	JERA	• 2021년 6월 JERA는 NEDO의 「카본리사이클 관련 기술 및 선진적 화력발전 기술 등의 해외전개 가능성 조사」 사업자로 채택. 그 일환으로 미국에서 재생에너지 기원의 수소와 화력발전소 등에서 회수한 CO ₂ 로부터 합성메탄을 제조·공급하는 사업에 대한 FS조사를 실시
	도호가스·도요타통상·토탈에너지	• 2022년 6월 도호가스, 도요타통상, 토탈에너지(프랑스)는 수소·합성메탄 등을 일본에 도입하기 위해 FS 조사 개시에 합의. 토탈에너지가 제조하는 수소·합성메탄 등의 해상운송, 국내반입·배송·이용 등 가치사슬 전반에 걸친 협력사업 추진에 합의
	도쿄가스·오사카가스·셸	• 2022년 6월 도쿄가스는 영국 셸과 탈탄소분야(메타네이션, 수소, 바이오메탄, CCUS)의 공동검토에 관한 각서를 체결. 메타네이션 분야에서는 오사카가스를 포함하여 협력 방안을 검토하기로 합의
	오사카가스·마루베니	• 2022년 7월 오사카가스와 마루베니는 PERU LNG와 페루에서의 합성메탄 제조에 관한 사업조사를 개시
	오사카가스	• ①(호주) 2021년 12월 ATCO Australia와 호주에서 제조한 합성메탄을 호주 및 일본으로 반입하는 사업에 대해 FS 실시 • ②(호주) 2023년 3월 Santos와 합성메탄을 제조하고 일본 등지에 수출하는 사업의 상세검토(Pre-FEED) 계약 체결. 2030년→년간 약 6만톤(8,000만Nm ³ /년) 수출 예정 • ③(싱가포르) 2022년 3월 City Energy 등이 싱가포르에서 합성메탄을 제조하고 현재의 가스수요에 충당하는 비즈니스모델 등의 검토 개시
플랫폼	오사카가스·미쓰비시중공업·일본IBM	• 2022년 10월 미쓰비시중공업과 일본IBM이 구축 중인 디지털플랫폼(CO ₂ NNEX)을 활용하여, 공급망 전체에서의 합성메탄의 CO ₂ 배출량을 가시화하고, 환경가치의 유통·이전 관련 시스템의 개념실증(PoC)을 3사가 실시하기로 합의

자료: 資源エネルギー庁(2022.11.22.), 전기서

5. 소결

일본은 2017년 세계 최초로 '수소 기본전략'을 수립하여 연료전지 자동차, 가정용 연료전지 등에서 세계적인 선도 역할을 하고 있다. 2020년에는 2050년 탄소중립을 목표로 선언하며 수소-암모니아의 중요성을 강조했고, 이에 따른 1조원 규모의 그린 이노베이션 펀드를 통해 약 7,000억 원을 수소 기술에 투입하고 있다. 개정된 수소 기본전략을 통해, 러시아의 우크라이나 침공 이후 글로벌 에너지 수급이 크게 변화, 수소의 중요성이 인식하였고, 이러한 배경 하에 일본은 수소 기술을 확립하고 국내외 시장을 공략하며, 지속적인 전략 수정과 재검토를 통해 세계 수소 시장에서의 위치를 더욱 강화하는 노력을 하고 있다. 이를 바탕으로 다음 장에서 국내 수소 정책 및 기술 현황을 분석하여, 비교하고 시사점을 찾는 방식으로 논의를 이어가고자 한다.

제3장

한국의 수소 정책 및 기술 현황 분석

제3장에서는 우리나라의 수소 정책 및 기술 현황에 대해 분석한다. 정부에서 발표한 내용을 바탕으로 정리하고, 실증과 기술적 과제에 대한 목표를 분석한다.

1. 한국의 수소 관련 정책

1.1. 수소경제 활성화 로드맵

우리나라는 2019년 1월 ‘수소경제 활성화 로드맵’을 통해 수소경제를 정의하고 추진 전략을 제시했다.⁴⁸⁾ 2005년에 ‘친환경 수소경제 구현을 위한 마스터플랜’을 수립하긴 했지만, 이는 주로 기술 개발에 초점을 맞추었다.⁴⁹⁾ 하지만 수소 제품의 기술 향상과 상용화가 진행됨에 따라, 시장 조성과 산업 육성의 필요성이 대두되었다.

‘수소경제’는 에너지전환 기조와 연결되어 탄소자원 중심의 에너지 시장을 탈탄소화하고, 수소를 중심으로 에너지 패러다임을 재편하는 새로운 경제체제다.⁵⁰⁾ 이런 배경 하에서 ‘수소경제 활성화 로드맵’이 등장하였고, 이를 통해 우리나라는 본격적

48) 관계부처합동(2019a)

49) 김재경 외 (2019). pp.8-9.

50) 관계부처합동(2019a). p.1

으로 수소경제로의 전환을 시작했다.

해당 로드맵의 비전은 우리나라를 세계 최고 수준의 수소경제 선도 국가로 만드는 것이며, 특히 수소차 및 연료전지 생산·공급 목표를 명확히 제시했다. 이 로드맵은 친환경 에너지 수요 증가와 글로벌 수소 정책 흐름에 따라 우리나라의 수소 활용 제품의 경쟁력을 높이기 위해 작성되었다. 주요 목표는 수소 모빌리티 및 연료전지 보급 확대로, 2018년 1,800대였던 수소차 보급을 2022년 8.1만 대, 2040년 620만 대로, 그리고 314MW였던 연료전지를 2040년 17.1GW로 확대하는 것을 목표로 하였다.

[그림 3-1] 수소경제 활성화 로드맵 연도별 추진 목표

		2018년	2022년	2040년	
목표	수 소 차 (수출) (내수)	1.8천대 (0.9천대) (0.9천대)	8.1만대 (1.4만대) (6.7만대)	620만대 (330만대) (290만대)	
	연 료 전 지	발전용 (내수)	307MW (전체)	1.5GW (1GW)	15GW (8GW)
		가정·건물용	7MW	50MW	2.1GW
	수 소 공 급	13만톤/年	47만톤/年	526만톤/年 이상	
	수 소 가 격	-	6,000원/kg	3,000원/kg	

자료: 관계부처합동(2019a), p.16.

우리나라는 2022년에 연간 약 47만 톤, 2030년에 연간 약 194만 톤, 그리고 2040년에 연간 약 526만 톤 이상의 수소를 공급하는 목표를 세웠다. 2019년 ‘수소경제 활성화 로드맵’ 작성 시에는 ‘청정수소’에만 집중하지 않고, 부생 수소와 그레이수소를 포함한 모든 형태의 수소를 고려하여 공급 계획을 수립했다. 2022년부터는 수전해 수소의 공급이 시작되며, 2030년부터는 수전해 수소와 해외에서 생산된 수소의 공급을 확대할 계획이다. 장기적으로는 그레이수소 중심의 공급 체계에서 그린수소 중심의 공급 체계로 전환하려는 계획을 세웠다.

[그림 3-2] 수소경제 활성화 로드맵 연도별 수소 공급 및 가격 목표

		2018년	2022년	2030년	2040년
공급 · 가격	공급량 (=수요량)	13만톤/年	47만톤/年	194만톤/年	526만톤/年 이상
	공급방식	①부생수소(1%) ②추출수소(99%)	①부생수소 ②추출수소 ③수전해	①부생수소 ②추출수소 ③수전해 ④해외생산 ※ ①+②+③ : 50% ④ : 50%	①부생수소 ②추출수소 ③수전해 ④해외생산 ※ ①+②+③ : 70% ④ : 30%
	수소가격	- (정책가격)	6,000원/kg (시장화 초기가격)	4,000원/kg	3,000원/kg

자료: 관계부처합동(2019a), p.17.

1.2. 수소경제 육성 및 수소 안전거리에 관한 법률

2019년의 ‘수소경제 활성화 로드맵’에서 제시된 체계적인 법제도적 기반 마련의 일환으로 2020년에 ‘수소법’이 제정되어, 2021년부터 시행되었다.⁵¹⁾ 이는 수소경제를 선도하기 위한 우리나라의 첫 수소 관련 법률로, 수소경제의 추진 체계, 수소 전문기업 육성, 수소연료공급시설 설치, 그리고 안전관리에 대한 규정을 포함하고 있다.

수소법의 시행에 따라 수소경제위원회가 구성되어 수소 경제 기본 계획을 수립하고 주요 정책을 수립하고 추진한다. 위원회는 국무총리를 위원장으로 하며, 여러 부처 장관과 민간위원 등으로 구성되어 있다. 위원회는 이미 5차례의 정례 회의를 개최하였으며, 수소산업 진흥, 수소 유통, 수소안전 관리 등의 업무를 분담하였다.

또한, 청정수소 경제로의 전환을 위해 2022년 6월에 수소법이 일부 개정되었다. 이 개정안은 청정수소 중심의 생산·공급체제와 활용 촉진을 위한 법적·제도적 기반을 제공하며, 청정수소 인증제와 청정수소발전 의무화제도(Clean Hydrogen Portfolio Standard) 수립·운영에 관한 근거 규정을 마련하는 것을 목표로 하고 있다. 청정수소 인증제는 2024년에, 청정수소발전 의무화제도는 2023년에 시행될 예정이다.

51) 관계부처합동(2019a)

[그림 3-3] 국내 수소 경제 정책 정리



자료: 김기환-안지영(2022), p10.

1.3. 수소 기술개발 로드맵

정부는 2019년에 「수소경제 활성화 로드맵」을 수립하고, 이를 위해 2019년 10월에는 「수소 기술개발 로드맵」을 마련하여 국내 수소 에너지 기술 경쟁력을 확보하였다. 이 로드맵은 수소 산업의 전 주기에 대한 핵심 기술을 도출하고 2040년까지의 기술 개발 전략을 제시했다.

로드맵에서는 수소 기술을 생산, 저장·운송, 활용(수송수단), 활용(발전·산업), 안전·환경·인프라로 5개의 대분류로 구분하였고, 각 대분류 내에서 구체적인 목표를 설정하였다. 이를 위해 필요한 핵심 기술 개발을 중점 추진 전략으로 삼았고, 분야별 핵심 기술을 파악하여 단계별 기술 개발을 통해 국내 수소 기술 역량을 확보하려고 했다.

그러나 2021년 11월에 발표된 「제1차 수소경제 이행 기본 계획」 이후에는 수소 기술 분류체계를 재조정하고 새롭게 제시된 수소 기술 분야에 대한 기술 개발 전략을 수립할 필요성이 대두되었다. 이에 따라 관계부처는 「수소 기술개발 로드맵 2.0(안)」을 수립하고 있으며, 2019년에 수립된 기존 로드맵을 보완하여 새로운 수소 기술 개발 로드맵 및 추진 전략을 발표할 예정이다.

〈표 3-1〉 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, 액상수소화를 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

기술 분류	추진전략	목표
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: 김기환·안지영(2022), p17.

1.4. 제1차 수소경제 이행 기본계획

2019년에 제정된 「수소경제 활성화 로드맵」은 초기에는 추출 수소와 부생 수소를 이용하는 것을 목표로 했으나, 탄소중립과 온실가스 감축 목표 등에 따라 청정수소 중심의 정책으로 변경하였다. 이에 따라 2050년까지 청정수소 생산·운송·저장·활용 전 부문에 걸친 정책 방향과 추진 전략을 제시한 「제1차 수소경제 이행 기본계획」이 수립되었다.⁵²⁾ 이 계획의 목표는 2030년까지 국내에서 194만 톤, 해외에서 196만 톤의 수소를 생산하거나 도입하고, 2050년에는 총 2,790만 톤의 수소를 수요 및 공급하는 것이다.

계획의 주요 전략은 청정수소 생산, 유통 및 저장 인프라 구축, 활용 확대, 산업 생태계 기반 강화 등이며, 이 중 “H2STAR(H2 Supply, Transportation, Application, Relationship) 프로젝트”를 통해 해외에서 청정수소를 생산하여 국내로 도입하는 것이 포함되어 있다. 또한, 안정적인 수소 유통망을 구축하기 위해 수소 유통 인프라를 확대하고 수소 충전소 설치를 늘릴 계획이다. 이 외에도 수요가 높은 석탄발전소 및 산업단지를 중심으로 수소 도입 인프라를 건설하고, 도시가스 배관에 수소를 혼입하여 온실가스 배출량을 저감하려 한다.

또한, 발전, 산업, 수송 부문에서 수소 활용을 확대하며, 이를 위해 석탄화력 발전기에 암모니아를 혼소하는 기술을 확보하고, 수소차의 생산 능력 확대와 성능 개선, 차세대 수소 모빌리티 개발 등을 추진하려 한다. 산업 부문에서는 철강, 석유화학, 시멘트 등에서 수소 활용을 통해 온실가스 저감 기술을 확보하며, 수소 산업 생태계 전반에 걸친 역량 강화와 기반 구축을 위한 인력 양성, 표준화, 국제협력 등이 계획에 포함되어 있다.

52) 관계부처합동(2021a).

1.5. 제5차 수소경제위원회

2022년 11월 9일에 열린 제5차 수소경제위원회에서는 새 정부의 수소경제 정책을 반영한 후속 정책을 발표했다.⁵³⁾ 주요 안건으로는 청정수소 생태계 조성방안, 세계 1등 수소산업 육성전략, 수소기술 미래 전략 등 총 3가지가 있었고, 이를 통해 수소 산업의 성장 전략으로 규모·범위의 성장(Scale-Up), 인프라·제도의 성장(Build-Up), 산업·기술의 성장(Level-Up)을 제시하였다.

규모·범위의 성장 전략에서는 수소 상용차 부문에 대한 지원을 강화하여 대규모 수소 수요를 창출하고, 글로벌 수소 공급망을 구축하는 것을 목표로 하였다. 인프라·제도의 성장 전략에서는 액화 수소 플랜트와 충전소 구축, 청정수소발전 입찰 시장 개설 및 청정수소 인증제 도입 등을 목표로 제시하였다. 산업·기술의 성장 전략에서는 세계 1등 수소산업을 육성하고, 핵심 기술을 국산화하여 수출을 촉진하고자 하였다.

이로써 정부는 제1차 수소경제 이행 기본 계획의 세부 추진 전략을 3개의 로드맵을 통해 구체화하였다. 이 중 청정수소경제 이행 부문과 산업 육성 부문으로 나뉘어 구체화되었고, 기존 계획보다 구체적인 시점과 규모를 명시한 부분이 많았다. 예를 들어, 청정수소 발전 입찰시장과 인증제 등의 도입 시점과 운영 방식이 더 구체적으로 제시되었다.

〈표 3-2〉 7대 핵심 기반 기술

전략 분야		주요 핵심 기반기술 개발 목표('30)
생산	① 수전해	• (단위스택 용량) 10MW(現 0.5~1MW), (전력소비) 10% 저감
	② 액화수소 운송선	• (액화수소 운송선) 연간 10만톤 규모 해외 도입
저장 운송	③ 운송 트레일러	• (기체튜브 압력) 700기압(現 200기압), (액화탱크 운송량) 3톤(現 0)
	④ 수소충전소	• (국산화율) 100%(現 40%), (최대충전유량) 180g/초(現 60g/초)
활용	⑤ 연료전지(모빌리티)	• (효율) 상용차 65%(現 55%), 선박 60%(現 50%)
	⑥ 연료전지(발전)	• (발전단가) 160원/kWh(현 250원/kWh)
	⑦ 수소터빈	• (수소 혼소비율) 50%(現 0%)

마지막으로, 산업 육성 부문에서는 수소차와 수소연료전지에 국한되어 있던 수출 전략을 확장하여 국내 청정수소 생태계 전 주기에 걸친 기술 및 제품에 대한 수출

53) 국무조정실(2022).

전략을 수립하였다. 이를 통해 해외 의존도를 낮추고 국내 기술 자생력을 높이며, 연관 산업 전반의 동반성장을 위한 전략도 포함하였다.

2. 한국의 수소 생산

2.1. 현황

우리나라의 수소산업은 정부의 적극적인 육성정책에 힘입어 빠르게 성장하고 있다. 2019년부터 2021년까지 전국적으로 12개의 수소 생산 기지가 건설되었고, 2021년에 생산된 수소의 총 양은 약 240만 톤으로 추정된다. 그 중 53.3%는 그레이수소로 제조되었고, 46.6%는 산업 공정에서 배출된 합성가스를 정제하여 생산된 부생 수소였다. 그러나 이 중 공정 내 자체 소비를 제외한 외부로 공급된 수소의 양은 약 73.3만 톤으로 집계되었다.⁵⁴⁾

2.2. 블루수소

제1차 수소경제 이행 기본계획에 따르면, 정부는 2050년까지 연간 2,790만 톤의 청정수소를 공급하며, 그 중 블루수소 생산을 2030년에는 75만 톤, 2050년에는 200만 톤으로 확대할 계획이다.⁵⁵⁾ 이를 위해 LNG 인수기지 인근에 블루수소 클러스터를 조성하고, 2025년까지 신규 수소클러스터를 추가로 구축할 예정이다. 특히 국내에 이미 있는 LNG 인수기지를 활용하여 블루수소 산업의 생태계를 조성하려고 한다. 또한, 민간 기업인 포스코와 SK 역시 자가용 LNG를 수입하여 LNG 터미널을 건설하고 운영 중으로 생산 확대의 가능성을 엿볼 수 있다.

정부는 블루수소의 핵심인 CCS(탄소 포집과 저장) 기술을 상용화하기 위해 동해 고갈가스전을 활용한 연간 40만 톤의 이산화탄소를 포집하여 저장하는 프로젝트를 추진하고 있다. 이 프로젝트는 국내 최초의 상용 규모 CCS 프로젝트로, 2025년부터 연간 40만 톤의 이산화탄소를 저장할 계획이다. 국내외 탄소 저장소의 확보와

54) 수소경제종합포털, <https://www.h2hub.or.kr/main/pageLoad.do>(최종 접속일: 2023.7.13.)

55) 관계부처합동(2021a).

비용 절감도 중요한 목표로, 2023년에는 국내에서 1억 톤, 2030년에는 9억 톤 이상의 탄소 저장소를 확보하려고 한다. 또한, 국제 협력을 통해 해외 저장소도 발굴할 계획이다.

소규모 블루수소 생산기지 구축사업도 주목을 받고 있다. 산업통상자원부는 2019년부터 모빌리티에 필요한 수소를 도심 근처에서 공급하기 위한 천연가스 개질 수소생산기지를 국비 지원으로 추진해왔다. 현재 창원, 삼척, 평택 등에서는 수소생산기지가 이미 운영 중이며, 추가로 10곳에서도 생산기지와 출하센터를 구축 중이다. 또한, 국내에서 포집된 이산화탄소를 해외 저장소로 이송하기 위한 국가 간 협정도 본격적으로 추진하고 있다. 이를 통해 수소 경제의 확립과 온실가스 배출 저감을 동시에 추진하려고 한다.⁵⁶⁾

블루수소는 중부발전과 SK E&S가 ‘보령 친환경 청정수소 생산 기반 구축’ 프로젝트를 추진 중이다. 이 프로젝트에서는 5조 원을 투자하여 2025년부터 연간 약 25만 톤의 블루수소를 생산할 계획이며, 이 중 20만 톤은 연료전지 발전용으로, 5만 톤은 수소차에 공급될 예정이다.⁵⁷⁾

해외 청정수소 생산에서 대표적으로 ‘말레이시아 사라왁 H2biscus 그린수소 및 암모니아 프로젝트’는 국내 민간기업 컨소시엄이 말레이시아의 재생에너지 발전 설비를 활용하여 연간 총 20만 톤의 청정수소를 생산하는 프로젝트이다. 이 중 그린수소 7천 톤은 제외하고 나머지는 암모니아로 전환되어 국내로 도입될 예정이다.⁵⁸⁾

2.3. 수전해

현재 수전해에서 0.5~1MW에 달하는 단위시스템 용량을 30년까지 10MW로 늘리는 것이 제5차 수소경제위원회의 주된 목표 중 하나다.⁵⁹⁾ 엘캠텍(주)는 국내에서 유일하게 PEM수전해 시스템을 개발하는 업체로, 정부 연구개발 프로젝트에 참여하여 기술력을 높였으며 현재 1.0 MW규모의 PEM수전해 단일 스택을 시험 중에 있다. 수소에너지젠은 1.0 MW급 알칼라인 수전해 기술을 개발하여 평가 중이며, 이엠

56) 월간수소경제(2023b). <https://www.h2news.kr/mobile/article.html?no=10696>(최종접속일: 2023.9.5.)

57) SK E&S 보도자료(2021). <https://news.einfomax.co.kr/news/articleView.html?idxno=4185801>(최종접속일: 2022. 10. 10.)

58) 전기신문(2022). <https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=308611>(최종접속일: 2022.10.10.)

59) 관계부처합동(2022c). p.8.

솔루션(주)도 500 kW급 알칼라인 수전해 전해조를 개발에 성공했다.⁶⁰⁾

국내에서는 2027년까지 새만금에서 100 MW, 2030년까지 전남 해상풍력 단지에서 10.0 GW의 재생에너지 기반 그린수소 생산을 목표로 하고 있다. 또한 수자원 공사와 한국수력원자력은 각각 정수장의 소수력과 원자력 폐열을 활용한 그린수소 생산에 대한 연구를 진행 중이다.

그린수소의 경우 제주도에서 진행되는 '10MW 재생에너지 연계 대규모 그린수소 실증 기술 개발' 프로젝트와 전북 부안 재생에너지 단지에서의 프로젝트가 대표적이다.⁶¹⁾ 제주도 프로젝트는 2026년까지 연간 1,000톤의 그린수소를 생산할 계획이며, 총 사업비는 약 623억 원으로, 이 중 299억 원을 국비 지원받는다.

제5차 수소경제위원회에서 발표된 「수소기술 미래전략」에 따르면, 국내 청정 수소 생산기술의 목표는 다음과 같이 네 가지로 요약할 수 있다.⁶²⁾ 우선 시스템 구현과 국산화를 통해 민간 중심으로 단기에 MW급 스택, 10MW급 모듈 시스템을 구현하고, 증장기에 수십MW급 시스템으로 대용량화를 추구한다. 또한, 시스템을 국산화하고 성능을 향상시키는 기술을 확보하려 한다.

두 번째로는 알칼라인과 PEM 수전해 소재를 국산화하고 성능을 향상시켜 생산비용을 절감하려 한다. 알칼라인 수전해의 고효율화와 PEM 수전해의 촉매량 감소를 목표로 하고 있다. 셋째로는 수전해 스택과 시스템의 설계, 운전 기술을 개발하여 시스템의 내구성과 안전성을 향상시키려 한다. 알칼라인 수전해와 PEM 수전해의 신뢰도 향상을 목표로 하고 있다. 마지막으로 광분해, 열분해, 바이오 수소, 폐자원 가스화 등 미래형 수소 생산 기술에 대한 연구와 개발을 추진하려 한다. 광전기화학, 광화학, 광생물학을 활용한 기술개발과 천연가스 열분해, 바이오 수소 생산, 폐자원 가스화 등의 원천기술을 확보하려 한다.

2.3.1. 원자력을 이용한 수소 생산

한국은 원자력 분야에서 고도의 기술력과 자체 설계 능력을 지니고 있어, 안전하고 효율적인 원자력 발전을 실현하고 있다. 이러한 기술력은 정부의 지속적인 연구 개발 지원과 국내외 다양한 협력을 통해 더욱 강화되고 있으며 안전 문화의 정착과

60) 서중수 외(2022), p.257.

61) 산업통상자원부 보도자료 (2022.4.6.) p.2.

62) 관계부처합동(2022c), p.10-13.

비용 효율성 또한 한국의 원자력 발전소가 세계적으로 높은 신뢰도를 갖는 이유다. 또한, 한국은 자체 원자력 기술을 성공적으로 다른 국가에 수출함으로써 원자력 강국으로의 위치를 공고히 하고 있다. 이러한 다양한 요인들이 결합되어 한국을 원자력 분야의 강국으로 만들고 있다.

원자력을 이용한 수소 생산은 이러한 원전 전력을 직접 이용하여 저탄소 수소를 생산할 수 있어, 이를 통해 탄소중립과 수소경제로의 전환이 가능하다. 또한 재생에너지의 확대로 발생하는 전력계통의 불안정성을 원전을 활용하여 해소하는 데에 큰 역할을 할 수 있다. 예를 들어, 원전의 출력을 제한하거나 부하에 대응하는 등의 방법이 있다.

「수소 기술개발 로드맵」에서도 수전해 수소생산 로드맵에 초고온 시험로 기술개발을 포함하였으며, 「제6차 원자력진흥종합계획」에서도 SMR을 활용한 청정수소 생산 기반 기술과 선진 고온 원자력시스템 기술 개발을 포함시켰다. 대부분의 신형원자로(초고온가스로, 소듐냉각고속로, 용융염원자로, 중소형원자로)이 수소생산에 활용될 수 있지만, 그 중 출구온도가 가장 높아 과열기가 필요 없는 초고온가스로(VHTR) 위주로 개발되고 있다.⁶³⁾

특히 이번 제5차 수소경제위원회 두 번째 안건이었던「세계 1등 수소산업 육성 전략」에서 원전수소 생산을 위한 기반연구 및 실증이 강조되었다.⁶⁴⁾ 원전과 수전해를 연계한 원전수소 생산 실증 사업이 계획되고 있으며, 저온수전해를 활용한 기반 연구 결과를 토대로 2024년부터 10MW급의 실증사업이 시작될 예정이다. 이 기반연구에는 원전과 수전해 시스템의 연계, 인허가와 안전성 분석, 법과 제도 개선방안 등이 포함된다. 또한, 고온수전해 기술의 성숙도를 고려하여 2025년 이후에도 실증 사업을 추진할 계획이며, 이 방법은 원자력 전기에 고온 증기를 추가하여 수전해 효율을 높이는 것을 목표로 하고 있다.

63) 김찬수·박효인(2022). p.15.

64) 관계부처합동(2022a). p.10.

3. 한국의 수소 저장·운송

3.1. 현황

우리나라의 수소 유통 부문에서는 아직 전국 수소 배관망이 완전히 구축되지 않았으며, 일부 산업단지에 수소 배관이 설치되어 있다. 전체 수소 배관 길이는 약 410km로, 대규모 산업단지가 있는 울산과 여수에 주로 설치되어 있다. 특히 울산은 국내 수소 배관 중 가장 긴 약 216km의 배관이 있고, 여수에는 102km의 배관이 있다. 배관 외 지역에서는 수소 튜브트레일러를 사용하여 수소를 유통하며, 현재 국내에는 총 950대의 수소 튜브트레일러가 운영 중이다.⁶⁵⁾ 2023년 5월말 기준으로 전국의 수소충전소 구축 현황은 244기에 달한다.⁶⁶⁾

3.2. 액화수소

제5차 수소경제위원회 첫 번째 안건인「청정수소 생태계 조성방안」에 따르면, 2023년까지 연간 4만톤의 수소를 액화할 수 있는 액화플랜트를 구축하는 계획이 있으며, 이미 2022년에는 약 5천톤의 수소를 공급 중이다. SK E&S, 효성-린데, 창원산업진흥원-두산에너지빌리티 등 다양한 기업들이 참여하고 있으며, 각기 다른 규모와 시기로 플랜트를 운영할 예정이다.⁶⁷⁾

액화수소 충전소 구축을 위한 보조금은 2022년 5개소에서 2023년에는 10개소로 확대될 예정이며 기존의 기체수소 충전소를 액화수소 충전소로 전환하는 지원 방안도 마련되어 있다. 정부는 새로운 액화수소 충전 모델을 개발하여 다양한 유형과 목적에 맞게 적용할 계획이다. 여기에는 지하 매몰형 액화수소 충전소, 이동형 액화수소 충전소, 그리고 수소복합스테이션 등이 포함되며, 이러한 다양한 모델은 수소 충전의 효율성을 높이고 주민 수용성을 극대화할 것으로 예상된다.⁶⁸⁾

또한 정부는 액화수소 운송선 분야에서 조선산업의 경쟁력을 활용하여 시장을 창출하고 선도할 계획이다.⁶⁹⁾ 2050년까지 국제 액화수소 운송·교역량은 17백만 톤으

65) 수소경제종합포털, <https://www.h2hub.or.kr/main/pageLoad.do>(최종접속일: 2022.10.10.)

66) 월간수소경제(2023a). <https://www.h2news.kr/mobile/article.html?no=11081>(최종접속일: 2023.7.13.)

67) 관계부처합동(2022b). p.18.

68) 관계부처합동(2022b). p.9.

로 예상되며, 이를 통해 약 400억 달러 규모의 운송선 시장이 형성될 것으로 보인다. 이 중, 국내에 2029년까지 약 10만 톤 규모의 인수와 저장설비를 구축할 계획이며, 이는 주로 수도권의 LNG 발전지역에 공급될 예정이다. 정부는 항만특성과 수소기술의 성숙도를 고려하여 수소항만을 구축할 전략을 수립할 예정이다. 이에 따른 인센티브로는 항만 사용료 감면과 관련 입주기업 지원이 포함되며, 이 항만은 수소 에너지 생태를 완전히 갖춘 수소 생산, 물류, 소비의 거점이 될 것으로 보인다.

[그림 3-4] 해외수소 도입 관련 기술 개발



자료: 관계부처합동(2022c), p.14.

한국은 세계 최고 수준의 선박 건조 기술과 조선산업 공급망을 갖추고 있으며, 액화수소 화물창의 극저온 기술은 이미 우리나라의 강점인 LNG 선박 기술과 유사하다. 2029년까지는 4만m³(수소 3천톤) 규모의 액화수소 운송선을 시범 건조할 계획이며, 이를 통해 건조 및 운용 실적을 축적하여 수출을 추진할 예정이다.

마지막으로, 정부는 액화수소용 화물창, 열교환기, 펌프 등의 핵심 기자재를 국산화하여 안정적인 공급기반을 마련할 계획이다. 이를 위해 액체수소 운송선 시범 건조 사업과 연계하여 국산 핵심 기자재의 시험 및 성능평가 시설을 구축할 계획도 가지고 있다.

3.3. 암모니아

「청정수소 생태계 조성방안」에 의하면, 정부는 해외에서 대규모의 수소와 암모니아를 도입할 예정이며, 이에 따라 발전기가 밀집된 지역에 새로운 발전용 인프라를 구축할 계획이다.⁷⁰⁾ 암모니아의 경우, 석탄발전이 밀집된 서해, 동해, 남해의 3개 거점에 대규모 인수와 저장설비를 2027년까지 약 110만 톤, 2030년까지 약 400만 톤 규모로 구축할 예정이며, 각 거점에는 암모니아 15일분을 비축할 계획이며, 총

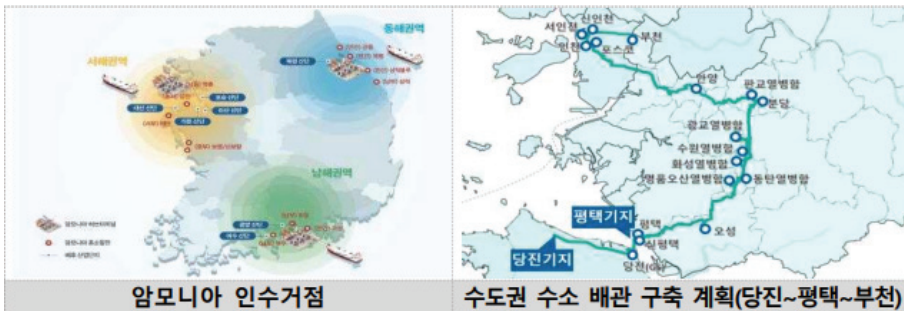
69) 관계부처합동(2022a), p.15.

70) 관계부처합동(2022b), p.19.

18만 톤이 비축될 예정이다. 또한, 암모니아를 수소로 전환할 수 있는 크래킹 설비를 2027년부터 구축하여 수소발전에 활용할 계획을 가지고 있다.

특히 강원도의 액화 수소산업, 창원의 액화 플랜트 구축 사업, 울산의 암모니아 크래킹 실증사업 등이 포함되어 있다. 롯데정밀화학의 울산 공장에서는 ‘암모니아 기반 청정수소 생산 파일럿 플랜트 실증화’ 프로젝트를 진행 중이다.⁷¹⁾ 이 프로젝트는 해외에서 생산된 청정수소를 암모니아 형태로 운반한 후, 다시 수소로 분해하는 기술을 실증하는 것으로, 해외에서 생산된 청정수소를 국내로 공급하는데 필수적인 사업이라고 할 수 있다.

[그림 3-5] 암모니아 인수 거점 및 배관 구축 계획



자료: 관계부처합동(2022b). p.19.

3.4. 청정수소 인증제

이 제도는 수소의 생산이나 수입 과정에서 온실가스 배출이 일정 수준 이하일 경우 해당 수소를 ‘청정수소’로 인증하고 인센티브를 지원한다. 제5차 수소경제위원회에 따르면 정부는 청정수소 인증제를 통해 온실가스 배출량에 따른 청정수소 기준을 설정하고, 다양한 인센티브 지원 방안을 검토할 계획이다.⁷²⁾ 또한, 인증제도의 효율적 운영을 위해 전반적인 관리체계를 구축하고, 다양한 수소생산 방식(그린, 블루, 원자력, 바이오 등)을 고려한 인증기관의 자격요건과 지정방안을 마련할 예정이다. 국제적으로는 청정수소 인증에 대한 양자 및 다자 협력을 통해 한국형 청정수소 인증제를 개발하고, 인증기준에 대한 국제 공감대를 형성할 계획이다. 이를 통해 인

71) 월간수소경제(2021). <https://h2news.kr/mobile/article.html?no=9464>(최종접속일: 2022.10.10.)

72) 관계부처합동(2022b). p.15.

증 및 검증 절차의 비용을 최소화하기 위한 상호인정 협정도 추진할 예정이다.

2023년 4월 코엑스에서 산업통상자원부는 약 70여개의 기업과 공공기관이 참여한 청정수소 인증제도 설명회가 개최하였다.⁷³⁾ 서울대, 고려대, H2KOREA, KTL 등의 연구진이 참여하여 그간의 연구 결과와 향후 계획을 발표하였다. 주요국들도 탄소국경조정제도(CBAM)나 인플레이션 감축법(IRA) 등을 통해 청정수소를 촉진하고 있고, 한국도 이를 탄소감축 수단으로 중요하게 보고 있다.

설명회에서 한국에서 청정수소로 인증받기 위한 온실가스 배출량 기준은 $4\text{kgCO}_2\text{eq/kgH}_2$ 로 제시되고, 수소 원료(천연가스 등)의 채굴부터 수소 생산까지를 배출량 산정범위(Well-to-Gate)로 제안되었다.⁷⁴⁾ 제안에 따르면, 인증은 '인증운영기관'과 '인증시험평가기관' 두 가지 기관으로 구분되어 운영될 것이다. 주요 사항은 산업부가 구성할 인증운영위원회에서 심사될 예정이며, 이를 통해 인증제도가 효율적이고 객관적으로 운영될 것으로 예상된다. 마지막으로 청정수소에 대한 지원방안은 차액과 정액 두 가지 방식으로 제안되었다. 이는 초기 청정수소 생산의 경제성이 부족한 문제를 해결하기 위한 것이며, 영국, 독일, 일본 등은 차액지원방식을, 미국은 정액지원방식을 사용하고 있다. 한국도 국내 산업의 실정에 맞는 지원방식을 확정하기 위해 제안된 두 방식에 대한 심층 연구를 진행할 예정이라고 언급되었다. 산업통상자원부는 현재 청정수소 인증제를 위한 제도 설계를 지속적으로 추진하고 있으며, 법적 근거와 세부 사항을 더욱 강화할 계획이다.⁷⁵⁾

3.5. 기술 목표

「수소기술 미래전략」에 따르면, 해외로부터 대규모 수소 수입을 위해 효율적인 수소 운송과 저장 기술을 개발하고, 암모니아 도입을 통해 중단기적으로 해외 수소 수입과 활용 기반 기술을 개발하는 계획이 있다. 암모니아 수소추출 고도화와 수소 액화를 위한 기술 개발도 추진될 예정이다. 또한, 대량의 수소를 상온·상압에서 효율적으로 저장하고 장거리 운송하는 수소 저장 혁신기술을 조기 확보할 계획이다.⁷⁶⁾

해외 수소 운송에서의 장거리 운송 단점을 최소화하고 인수지 인프라를 확보하기

73) 산업통상자원부 보도자료 (2023.4.17.)

74) 에너지플랫폼뉴스(2023). <https://www.e-platform.net/news/articleView.html?idxno=77977> (최종접속일: 2023. 9. 7)

75) 산업통상자원부 보도자료 (2023.4.17.)

76) 관계부처합동(2022c). p.12.

위한 기술 개발도 진행될 예정이다. 이를 위해 장거리 운송 기술 개발과 인수기지 수소 적하역 기술 개발이 추진될 것이다.

국내에서는 전국 수요처 내 수소 보급을 위한 기술 개발과 수소 공급망 구축이 계획되어 있다. 이를 위해 육상 수소 운송과 배관망 수소 이송, 그리고 수소 충전 인프라 기술의 개발이 이루어질 예정이다. 육상 수소 운송은 기체수소 운반차와 액체수소 운반차의 기술을 개발하고, 배관망 수소 이송은 기존 천연가스 배관망을 활용하고 수소전용 배관망을 구축하여 수소를 이송할 계획이다. 또한, 수소 충전 인프라 기술 개발도 효율적인 수소 충전을 위해 추진될 예정이다.

해상용 수소 충전소와 항공용 수소 충전시스템도 개발 계획에 포함되어 있다. 이를 통해 해상 충전소를 상용화하고 선박 및 항공기에 수소를 충전할 수 있는 시스템을 구축할 예정이다.

4. 한국의 수소 활용

4.1. 수소 자동차

제5차 수소경제위원회에 따르면, 버스와 트럭 같은 상용차는 승용차에 비해 연간 온실가스 배출량이 높아, 친환경으로의 전환이 필수적이다. 예를 들어, 승용차는 연간 1.4톤의 온실가스를 배출하는 반면, 시내버스는 47.3톤을 배출한다.⁷⁷⁾ 이러한 상황을 고려하여, 수소차는 고중량 적재와 장거리 주행에 장점이 있기 때문에 상용차의 친환경 전환에 적합하다고 판단되며, 이는 세계적인 추세와도 일치한다.

정부는 수소버스의 보급을 확대하기 위해 구매보조금을 상향 조정하고, 2023년까지 700대의 수소버스를 보급할 계획이다.⁷⁸⁾ 이를 위해 정부와 지자체의 부담 비율을 재조정할 예정이며, 수소버스와 충전소의 구축을 지원하기 위해 시범사업을 진행할 계획이고 이에 대한 보조금도 지급할 예정이다.

특수차량의 경우에도 구매보조금을 확대하여 수소트럭과 수소청소차의 보급을 촉진할 계획이며, 이와 관련하여 고압가스안전관리법도 개정할 예정이다. 또한, 정부

77) 관계부처합동(2022b), p.5.

78) 관계부처합동(2022b), p.5.

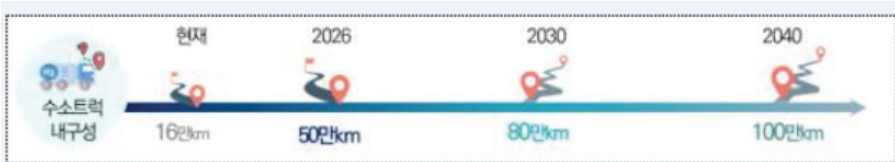
는 수소서비스의 보급을 촉진하기 위한 다양한 제도적 개선을 추진하고 있다. 예를 들어, 전기차와 비슷하게 취득세 감면, 액화수소 충전소 설치, 고속도로 통행료 감면 등의 인센티브를 제공할 계획이 있다. 이러한 노력은 상용차의 친환경 전환을 가속화하고, 온실가스 배출을 줄이는 데 기여할 것으로 예상된다.

수소차 글로벌 시장 규모가 2030년까지 급증할 것이라는 전망과 함께, 다양한 모델의 상용차를 생산하고 대량 생산을 통해 가격 경쟁력을 확보할 계획을 가지고 있다. 정부는 국제 협력을 활발히 추진하여, 미국의 캘리포니아 항만에 친환경 트럭을 공급할 예정이다. 액화수소 운송선 분야에서는 글로벌 시장을 선점하기 위해 다양한 제품을 조기에 상용화하려고 한다. 여기에는 공공용 및 수송용 소형 선박을 우선으로 실증 지원이 포함된다.

마지막으로, 방산 분야에서는 연료전지 기술을 기동 무기체계에 적용하여 수출을 지원할 계획을 세우고 있다. 이 기술은 작전 거리, 충전 시간, 저소음 등의 장점을 가지고 있어 내연기관을 대체할 수 있다. 군용 차량과 전차, 차륜형 장갑차 등을 대상으로 실증을 우선 수행하고, 차세대 기동 무기체계에도 이 기술을 적용할 계획이 있다.

「수소기술 미래전략」에 따르면, 수소전기차와 수소상용차 분야에서 다양한 기술 개발이 진행 중이다.⁷⁹⁾ 승용차 분야에서는 연비를 개선하기 위해 연료전지 스택의 효율을 높이고, 공기공급장치의 소비전력을 줄이는 연구가 진행 중이며, 이를 통해 2030년까지 승용차의 운영 효율을 70%, 상용차는 65%까지 향상시킬 계획이다. 또한 연료전지의 내구성을 향상시켜 승용차는 30만km, 상용차는 80만km의 수명을 확보할 예정이며, 차량용 액체수소 저장기술을 개발하여 현재의 고압기체수소 대비 3배 이상 저장할 수 있도록 할 계획이다.

[그림 3-6] 수소 트럭 내구성



자료: 국무조정실(2022). p.19.

79) 관계부처합동(2022c). p.17.

상용차 분야에서는 연료전지의 대용량화와 리패키징 기술을 개발하여 대형 모빌리티에 활용할 수 있도록 하고 있다. 수소저장용기의 탑재용량을 늘릴 수 있는 전용 플랫폼을 개발 지원하고, 수소상용차를 위한 200kW급 전용 연료전지시스템을 개발하려고 한다. 2023년에는 이러한 연료전지를 적용한 수소버스의 실증을 시작할 예정이다.

4.2. 수소·암모니아 발전

LNG와 석탄 발전은, 현재 전체 발전 비중의 63.5%를 차지하고 있으며, 이를 탈탄소화하고 좌초자산화를 방지하기 위해 수소와 암모니아 등 무탄소 연료로의 전환이 필요하다고 강조된다. 특히, 수도권과 같이 송배전망 비용이 높은 지역에서는 분산형 수소발전이 더욱 효과적일 것이라고 지적된다.⁸⁰⁾

이에 국내에서는 2023년부터 2025년까지, LNG 가스터빈과 석탄 보일러에서 수소와 암모니아를 각각 50%, 20% 이상 혼합할 수 있도록 핵심 부품을 개발할 계획이다. 이를 위해 민간이 주도하여 2027년까지 대형급 가스터빈의 수소전환 기술개발을 추진할 예정이다.⁸¹⁾

또한 2023년에는 주요 유형별 발전소(가스터빈, 보일러 등)를 실증 대상으로 선정하고, 2026~2027년에는 최적 혼합 비율을 적용할 계획이다. 선정 기준에는 발전설비의 개보수 여건, 연료공급 방안, 지역 주민 수용성 등이 포함된다. 소규모 파일럿 설비를 통한 실증도 2021년부터 2024년까지 병행될 예정이며, 이를 통해 현재의 발전설비를 그대로 유지하면서도 수소 15%, 암모니아 20% 이하로 혼소가 가능한지 연구할 계획이다.⁸²⁾

분산형 수소발전의 확산은 연료전지와 수소터빈, 수소엔진을 중심으로 진행될 예정이다. 연료전지 분야에서는 "에너지슈퍼스테이션"이라는 개념이 도입된다. 이는 주유소나 LPG 충전소에 태양광, 풍력 등 재생에너지와 연료전지를 함께 설치하여, 전기차 충전 수요를 충족하는 융복합 충전소를 의미한다. 2035년까지 1,500개의 에너지 슈퍼스테이션을 구축할 계획이며, 이를 위해 여러 가지 제도적 지원이 이루어

80) 관계부처합동(2022b), p.15-16.

81) 관계부처합동(2022b), p.6.

82) 관계부처합동(2022b), p.6-7.

어질 예정이다. 예를 들어, 주유소나 LPG 충전소 내에서 수소 연료전지 설치를 허용하거나, 자체 신재생에너지를 활용한 전기차 충전사업을 허용하는 등의 법적 개선이 계획되어 있다.⁸³⁾

수소터빈과 수소엔진 분야에서는 발전기의 출력조정이 유연하고 발전효율이 우수한 소형 수소터빈과 수소엔진을 개발하여 분산 자원으로 활용할 계획이다. 수소터빈은 수MW 이하의 고효율 터빈 개발이 추진되며, 수소엔진은 2022년부터 2024년까지 선박용으로 개발된 이후, 분산발전용으로 확장될 예정이다.⁸⁴⁾

수소의 발전 부문에서의 역할이 확대되며, 한국전력과 국내 발전공기업들은 2021년 11월에 ‘수소·암모니아 발전 실증 추진단’을 설립하였다. 이를 통해 암모니아 저장 시설의 구축과 수소·암모니아 발전 기술의 상용화를 공동으로 추진하고 있다. 구체적인 프로젝트로는 남부발전과 한국전력공사의 ‘암모니아 혼소 발전 실증을 위한 액화 암모니아 저장 인프라 구축사업’이 있으며, 또한 서부발전은 한화임팩트와 함께 ‘가스터빈을 활용한 수소혼소 발전 실증 사업’을 진행 중이다. 이러한 프로젝트들은 수소의 발전 부문에서의 활용을 증대시키기 위한 중요한 단계로 볼 수 있다.⁸⁵⁾

4.2.1. 수소발전입찰시장

수소발전이 무탄소 발전원 중 하나로 주목받고 있지만, 태양광이나 풍력과는 달리 연료비가 들어가므로 기존의 신재생에너지 공급 의무화 제도(RPS)와는 별도의 체계가 필요하다. 이에 따라 ‘수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률’(수소법)과 그 시행령이 2022년에 개정되어, 수소발전을 RPS에서 분리하고 별도의 수소발전 입찰시장을 도입하였다. 2023년 3월에는 이를 구체화하기 위한 ‘수소발전 입찰시장 연도별 구매량 산정 등에 관한 고시’ 제정안이 행정예고되었으며 이러한 변화는 수소발전량의 구매와 공급 방법, 그리고 수소발전 입찰시장의 개설 등을 명확하게 정하는 방향으로 진행된다.

산업통상자원부에 따르면, 올해(2023년) 일반수소 발전시장은 상반기와 하반기에 각각 한 번씩 개설될 예정이며, 이에 대한 입찰분은 한국전력공사가 100% 구매한다. 청정수소 발전시장은 2024년 초에 관련 법령 마련 이후 처음으로 개설될 예정

83) 관계부처합동(2022b). p.7.

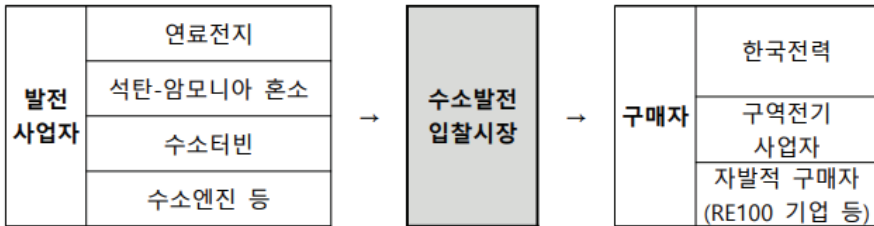
84) 관계부처합동(2022b). p.7.

85) 김기환·안지영(2022). p.47.

으로 보인다.⁸⁶⁾ 현재 청정수소 시장과 발전용 연료 공급 인프라가 아직 미형성된 상태이므로, 일반수소 발전시장이 병행하여 개설되겠지만, 추후에는 분산에너지 보급 추이와 청정수소 공급 가능성을 고려하여 일반수소 발전시장을 점진적으로 축소할 계획이다.

2023년 8월 9일, 정부가 세계 최초로 일반수소발전 경쟁입찰을 개설한결과가 발표되었다. 전력거래소는 2023년 상반기 일반수소발전에 대한 경쟁입찰에서 총 발전량 715GWh를 나타낼 5개의 발전소를 최종 낙찰자로 선정했다. 이번 입찰에는 총 73개의 발전소(43개사)가 발전량 3,878GWh(설비용량 518MW) 규모로 참여했고, 경쟁률은 5.97대 1이었다. 산업통상자원부는 이번 입찰로 발전단가가 인하된 점을 긍정적으로 평가하고 있다. 신재생에너지 공급 의무화 제도(RPS)와 비교할 때 이번 낙찰의 평균 입찰가격은 약 10% 낮아졌다고 발표했다. 또한, 이번 입찰을 통해 분산형 전원 설치가 유도되었다고 보여진다. 선정된 발전설비의 용량은 40MW 미만으로 분산형 전원 기준에 부합했고, 전력 수요가 공급에 비해 부족한 수도권 등의 수요지 인근에 발전소가 선정되었다.⁸⁷⁾

〈표 3-3〉 수소발전 입찰시장 개요



자료: 관계부처합동(2022b). p.22.

4.3. 산업에서의 활용

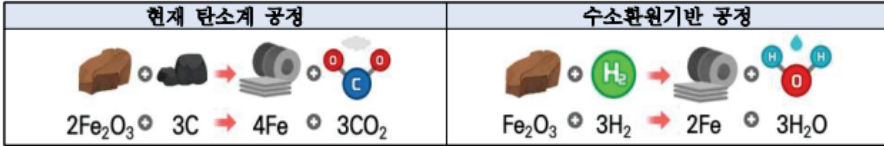
제5차 수소경제위원회에 따르면, 산업 분야에서 저탄소화를 추진하기 위해 여러 전략과 계획이 있다. 첫째, 철강 분야에서는 기존의 탄소를 사용하는 고로 공정을 수소환원제철로 전환하려고 한다. 이를 위해 2023년부터 2025년까지 공정설계 기

86) 산업통상자원부(2023a).

87) 월간수소경제(2023c). <https://www.h2news.kr/news/article.html?no=11191>(최종접속일: 2023. 9. 6)

초기술을 우선 지원할 예정이며, 후속 기술개발과 실증을 지원할 계획이다. 계획은 크게 세 단계로 나뉘어, 2030년까지 기술개발과 실증, 2040년까지 규모 확대, 2050년까지 기존 다배출 설비를 전환하는 것을 목표로 한다.⁸⁸⁾

〈표 3-4〉 수소환원제철



자료: 관계부처합동(2022b), p.8.

둘째, 석유화학 분야에서는 기존의 연료를 수소로 전부 또는 일부 전환하려고 한다. 정부는 이를 위한 민관협의체 구성과 법, 제도적 기반을 마련할 계획을 가지고 있다. 이 또한 세 단계 계획으로, 첫 단계에서는 수소혼소 실증과 수소NCC 기술개발을, 두 번째 단계에서는 수소혼소의 본격적인 상용화와 수소NCC 실증을, 마지막 단계에서는 수소NCC의 본격 상용화를 목표로 하고 있다. 이러한 계획은 탄소 중립을 위한 핵심 기술 개발과 실증을 통해 산업 분야의 탄소 배출을 줄이는 것을 최종 목표로 한다.

5. 소결

우리나라는 수소경제를 선도하기 위해 다양한 노력을 기울이고 있는 것으로 보인다. 2019년에는 ‘수소경제 활성화 로드맵’을 발표하여 연료전지와 수소차 보급 등을 통해 세계적인 수소경제 선도국가가 될 계획을 세웠으며, 법적 기반도 2020년에 수소산업의 기반 조성과 안전 관리를 위한 규정을 담고 있는 ‘수소법’을 제정하여 마련했다. 새 정부는 2022년 11월에 제5차 수소경제위원회를 개최하고, ‘청정수소 생태계 조성방안’, ‘세계 1등 수소산업 육성전략’, ‘수소기술 미래 전략’ 등 3개의 로드맵을 발표하여 ‘제1차 수소경제 이행 기본 계획’을 구체화했다.

정부는 2050년까지 탄소중립을 목표로 하고 있어, 수소 경제 활성화 전략이 이에

88) 관계부처합동(2022b), p.8.

맞춰 수정되고 보완되고 있으며, ‘제1차 수소경제 이행 기본 계획’을 통해 2030년과 2050년까지의 수소 수요 및 공급 목표를 설정하였고, 이를 위한 여러 전략과 과제를 제시했다. 현재까지 다양한 실증 프로젝트와 연구가 진행 중이며, 수소산업이 꾸준히 확대되고 있다. 그러나 아직 목표 달성률은 낮고 초기 단계에 있어, 앞으로 법적·제도적 기반을 더욱 강화하고 민간투자를 촉진할 필요하다.

제4장

한·일 수소 정책 및 기술 현황 비교 및 시사점 검토

제4장은 앞서 정리한 내용을 바탕으로 한·일 수소 정책 및 기술 현황에 대해 비교하고, 국내 정책 수립에 도움이 될 수 있는 시사점에 대해 간략히 논의해보도록 한다.

1. 생산

일본의 그레이수소를 주로 사용하는 수소 생산 현황과 마찬가지로 우리나라도 대부분 화석 연료 기반의 수소를 활용하고 있다. 그러나 그린수소인 재생에너지를 활용한 수소 생산 측면에서 일본이 앞서고 있는 것으로 보인다. 아사히카세이의 FH2R 프로젝트와 히타치조선의 H2-YES 프로젝트는 재생에너지를 활용한 수소 생산을 위해 알칼리 수전해 장치와 고체분자형 수전해장치를 활용하는 프로젝트로 세계적인 주목을 받고 있다. 2020년 4월에는 아사히카세이가 FH2R 프로젝트에 세계 최대규모의 10MW급 알칼리 수전해 장치를 성공적으로 납입했다.

우리나라의 경우에도 그린수소를 활용한 수소 생산 프로젝트가 진행되고 있지만, 일본에 비해 격차가 보인다. 예를 들어, 제주도의 10MW 재생에너지 연계 실증 기술 개발 프로젝트는 2026년까지 1000톤의 그린수소를 생산하는 계획이 있다. 그러나 일본은 이미 2020년에 10MW급 수전해 장치를 성공적으로 납입한 것으로 보아,

아직까지 2030년까지 10MW 수전해장치 개발을 목표로 하고 있어 일정한 격차가 있는 것으로 판단된다.

수전해 장치를 결합한 그린수소 생산이 우리의 최종 목적이긴 하지만, 당분간 많은 양의 수소 수요를 감당하기 위해서는 그레이, 블루수소 등에 의존할 수 밖에 없는 사실이다. 일본 정부가 기존의 그레이, 블루 수소에 대한 투자를 게을리 하지 않듯, 한국 정부와 민간기업은 블루수소와 CCS(탄소 포집과 저장)에 대한 다양한 프로젝트를 추진 중이다. 동해 고갈가스전을 이용한 연간 40만 톤의 이산화탄소 포집과 중부발전, SK E&S의 '보령 친환경 청정수소 생산 기반 구축' 프로젝트 등이 대표적이며, 도심 근처에서 블루수소를 생산하기 위한 소규모 생산기지 구축과 국제 협력을 통한 해외 저장소 발굴도 활발히 이루어지고 있다.

정책적인 목표에서 일본은 알칼리형 5.2만엔/kW와 PEM 수전해 6.5만엔/kW를 2030년까지 달성하고자 한다. 이를 위해 전기비용 절감, 장치비용 절감, 성능 향상에 투자하고 잉여 재생에너지 관리와 전해조 가동률을 높이는 노력을 기울인다.⁸⁹⁾ 한편, 우리나라에서도 수전해 시스템 가격을 현재 200만원/kW에서 2030년까지 70만 원선으로 낮추는 계획을 가지고 있어서 수전해 시스템 가격의 목표는 비슷한 것으로 보인다.⁹⁰⁾ 다만, 우리나라는 일본보다 더 큰 부품 국산화 문제에 직면하고 있어 성능 개발을 위한 R&D뿐만 아니라 해결해야 할 문제가 더 많은 상황으로 보여진다.

두 국가 모두, 재생에너지 단가가 비싸기 때문에, 원자력을 이용한 수소 생산에도 관심이 많으며, 특히 한국은 원자력 분야에서 고도의 기술력과 자체 설계 능력을 가지고 있어 안전하고 효율적인 원자력 발전을 구현하고 있어, 이는 우리나라의 장점이라고 할 수 있다. 다만 일본은 원자력 R&D에 약 36.3%의 에너지 기술 예산을 투자하며, 이를 특별 세금과 지방세로 지원하고 있다. 한편, 한국은 원자력 R&D 재원이 오래된 기준을 유지하고 있어, 새로운 환경 변화에 대응하기 위한 재원 확대가 필요하다는 지적이 있다.⁹¹⁾

89) 再生可能エネルギー—水素等関係閣僚会議. (2023). p. 13.

90) 관계부처합동(2022c). p.8.

91) 조홍중(2022). p.9.

2. 유통·저장

수소의 저장 및 운송 분야에서 일본은 이미 실증 단계를 넘어서고 있다. HySTRA 프로젝트를 통해 202년부터 2021년까지 호주에서 액화수소를 해상 운송으로 일본에 세계 최초로 도입하였고, 이로써 상당한 기술과 경험을 쌓았다. 또한, MCH를 활용하여 브루나이에서 수소를 운송하는 실증 사업을 성공적으로 진행하였다. 특히 암모니아 분야에서 일본의 기업들은 선제적인 공급망을 확보하는 데에 성공하였으며, 미쓰비시와 이토추 등의 기업들이 사우디아라비아와 러시아에서 암모니아 형태의 수소를 일본으로 운반하는 프로젝트를 진행하였다.

반면, 우리나라는 액화수소와 암모니아의 도입을 위한 국내 인프라 개발에 주력하고 있지만, 해외에서 직접 수소를 도입하는 실증 사업에 대한 구체적인 계획이 아직 미비한 상황이다. 그러나 최근 발표된 ‘수소기술 미래전략’에서는 해외에서 대규모의 수소 및 암모니아 수입을 위한 기반 기술 개발에 대한 계획이 포함되어 있어, 우리나라도 이 분야에서 충분히 경쟁력을 갖출 수 있다는 전망이 있다. 특히 우리나라도 10만 톤급 액화수소 운송선에 대한 실증을 완료하였으며, 정부주도의 R&D를 통해 리스크를 분산하는 등 30년까지 선진국 수준에 도달하겠다는 의지를 보인다.

다만 한국 정부는 수소의 온실가스 배출량에 따라 ‘청정수소’를 인증하고 인센티브를 지원할 수 있는 청정수소 인증제도를 빠르게 도입하려고 준비 중에 있다. 이를 위한 국내외 협력과 관리체계를 구축하여, 국제적으로는 비용 절감과 효율성을 위해 청정수소 인증의 상호인정 협정도 추진할 계획이다. 이는 기업들에게 인프라 구축과 기술 개발에 대한 충분한 인센티브를 줄 수 있는 제도적 기반으로 보여진다.

〈표 4-1〉 한일 수소 정책 및 기술 현황 비교

구분	한국	일본
수소 생산	2026년까지 1000톤 그린수소 생산 계획, 2030년까지 수전해 시스템 가격을 70만 원으로 낮출 계획, 제주도 10MW 재생에너지 연계 프로젝트 추진 중	2020년에 10MW급 알칼리 수전해 장치 성공적 납입, 2030년까지 알칼리형 5.2만엔/kW, PEM 6.5만엔/kW 목표, FH2R, H2-YES 등 재생에너지 기반 프로젝트 진행 중
수소 저장 및 운송	10만 톤급 액화수소 운송선 실증 완료, '수소기술 미래전략' 발표, 30년까지 선진국 수준 도달 목표, 국내 인프라 개발에 주력, 해외 도입을 위한 기반으로한 정부주도의 기술 개발 계획	HySTRA 프로젝트, MCH 활용 실증 사업, 암모니아 운송 프로젝트 진행중, 액화수소 해상 운송, MCH, 암모니아 등 다양한 수소 운송 방법에 대한 경험, 미쓰비시, 이토추 등 상사들의 참여
수소 활용	'넥쏘' 수소연료전지차, 2023년 5월 기준 약 3만대 판매, 수소 트럭, 버스 등 대형 모빌리티 활용 기술 개발, 청정수소 인증제, 수소발전 입찰시장 등의 제도적 지원	'미라이' 수소연료전지차 상용화, 미쓰비시, JERA가 주도하여 수소 가스터빈과 암모니아 연소기 개발 및 실증, 다양한 혼소울 실현, 메타네이션 등 첨단 기술 개발

출처: 저자작성

3. 활용

수소 활용 분야에서 일본은 다양한 접근법을 취하고 있다. 일본은 수소연료전지차인 '미라이'를 세계 최초로 상용화하였지만, 현대의 '넥쏘'가 2023년 5월 기준으로 약 3만대를 판매하며 상품성에 있어서는 앞서가는 것으로 보인다. 이에 대응하여 일본은 2023년 개정된 수소 기본전략을 통해 수소 충전소의 확대와 상용차에 대한 수요 증가에 집중하여 지원을 강화할 계획이다. 한편, 한국도 수소 트럭과 버스와 같은 대형 모빌리티를 활용한 기술 개발이 주요 정책 목표로 설정되어 있다.

또한, 발전 분야에서 일본은 미쓰비시중공업과 JERA가 주도하여, 일본 경제산업성과 함께 수소 가스터빈과 암모니아 연소기의 개발 및 실증을 가속화하고 있다. 그들은 다양한 혼소울을 실현하여, 수요자의 다양한 필요에 부응하는 공급을 계획하고 있다. 한국 역시 다양한 발전사들이 대기업들과 협력하여 수소 및 암모니아 혼소 실증사업을 진행하고 있으며, 이에 필요한 인프라 구축 역시 진행 중이다. 특히 국내에서 수소발전 입찰시장 등의 개설로 제도적인 지원을 통해 수요가 확보되면 기업

들의 기술 개발과 인프라 구축에 더 큰 힘을 실어 줄 것으로 보인다. 다만 터빈 및 혼소 관련 실증에서 일본이 앞서고 있어, 관련 기술 격차를 좁히는 것이 관건으로 보여진다.

일본에서는 그린 수소의 또다른 활용처로 메타네이션을 주목하고 있다. 도시가스의 주성분인 메탄의 탄소 중립을 실현하기 위한 주요 방법으로 메타네이션을 선택하였는데, 이는 청정 수소의 활용 가능성을 확장한다는 측면에서 주목할 만한 전략이다.

4. 시사점

지금까지 한국과 일본의 수소 정책 및 기술 동향에 대해 증점적으로 살펴보았다. 추가적으로 한·일의 분야별 차이점에 대해서도 간단히 살펴보았다. 2050 탄소중립 달성을 위해서는 수소 및 암모니아의 활용이 절실한 상황이며, 이는 국가 간의 제도적 차이와 에너지산업 현황에 따라 달라질 수 있다고 보인다. 이를 바탕으로 국내에 적용 가능한 몇 가지 시사점을 제시하려고 한다. 먼저 수소 생산 가격에 대해 논의해보고, 기초 과학에 대한 R&D에 대한 중요성을 강조하려고 한다. 마지막으로, 종합상사를 활용하는 방안에 대해 논의하려고 한다.

4.1. 수소 생산 가격 설정

일본은 개정된 수소기본전략을 통해, 수소 공급비용은 2030년에 30엔/Nm³, 2050년에 20엔/Nm³을 각각 목표로 하였다. 이는 처음 수소기본전략이 발표되었을 때의 목표를 재확인하는 것이며, 명확한 가이드라인을 제공한다. 이와 대조적으로 우리나라의 경우 2019년 「제1차 수소경제 이행 기본 계획」이후 가격에 대한 언급을 직접적으로 하는 것을 피하고 있다. 이는 현실적으로 재생에너지를 통한 전기 단가가 높은 우리나라에서 그린수소를 생산하는 비용이 높기 때문에, 현실적인 목표를 세우기가 매우 어려운 점을 고려한 것이긴 하다. 다만, 미국의 경우에도 2021년 초 당적인프라 법안을 통해, 향후 10년 이내에 그린수소의 생산단가를 1kg당 1달러대로 낮춘다는 목표를 가져가고 있으며, 여러 선진국들도 수소 생산단가를 낮추는 데에 집중을 하고 있다.

뿐만 아니라, 국내에서 수소관련 사업을 하는 기업들이 가장 크게 고려하는 부분도 수소의 단가에 있다. 기업이 영속하기 위해서는 수익이 나아하는데, 비용에 대한 정확한 가이드라인이 없는 상태에서 투자를 중용하는 상황이 수소산업에서는 비일비재하다. 다른 에너지 섹터처럼 이미 제도와 유통이 확립되어 있는 경우와 달리, 아무도 걸어가지 못한 길을 걸어가야 하는 수소 분야에서는 정부의 공격적인 가격 정책이 절실하다고 보인다.

수소 산업은 아직 초기 단계에 있어 제도와 유통이 완벽히 확립되지 않았기 때문에, 정부의 명확한 가격 정책과 지원이 필요하다고 볼 수 있다. 정부가 현실적인 가격 목표를 설정하고, 초기 시장 형성을 위해 보조금과 지원금을 제공한다면, 한국도 일본처럼 선도적인 위치를 유지하고 세계 수소 산업에서 앞서 나갈 수 있을 것으로 생각한다.

4.2. 기초과학 R&D 투자 증대

일본과의 비교에서 항상 빼놓을 수 없는 것이 기초과학에 대한 투자 즉, R&D이다. 기초과학 연구와 개발(R&D)의 중요성은 현대 사회에서 무시할 수 없는 요소다. 처음에는 이론적이거나 추상적일 수 있는 기초과학의 발견들이 결국은 신약 개발, 신재생 에너지, 고성능 컴퓨팅과 같은 혁신적인 기술과 제품으로 이어진다. 이는 장기적인 시각에서 볼 때 무시할 수 없는 경제적 가치를 창출합니다. 예를 들어, 양자역학이나 유전학의 초기 연구가 현재의 양자컴퓨터나 유전자 편집 기술로 연결되었다는 점을 생각해보면, 기초과학 연구의 가치는 명백하다. 국가 경쟁력 측면에서도 기초과학 R&D는 필수이며, 과학 기술이 빠르게 발전하는 현재, 연구와 개발에 대한 투자 없이는 국제적인 경쟁에서 뒤처질 위험이 있다. 그래서 많은 선진국들이 기초과학 연구에 대한 투자를 적극적으로 확대하고 있다.

일본의 근대화가 한국보다 먼저 이루어졌으며, 일본은 기초과학 분야에서 여러 노벨상 수상자를 보유할만큼 기초과학에 있어서 앞서나가고 있는 것은 사실이다. 이러한 부분은 사실 수소뿐만 아니라 여러 분야에 영향을 미치는 것으로 중요성을 아무리 강조해도 부족함이 없다. 우리나라의 경우에는 격차를 많이 줄여나가긴 했지만, 여전히 기초과학에 대한 투자가 부족하다고 보여진다. 2019년 38개국을 대상으로 한 과학기술 혁신역량 평가에서 한국과 일본의 격차는 여전히 크다고 나타났다.

일본은 5위에 랭크되었고, 한국은 19위에 랭크되어 있다. 이러한 격차는 주로 공공 연구와 대학에서 더욱 명확하게 나타난다. 반면에 기업 부문에서는 한국이 5위로, 일본이 3위로 랭크되어 있어 격차가 상대적으로 작다. 특히 정부의 혁신을 조정하는 능력, 즉 ‘조정환경’에서는 하위 수준에서 더욱 하락하는 추세를 보이고 있다. 이러한 상황을 고려할 때, 한국 정부는 혁신 주체들이 자율적으로 경쟁하고 성장할 수 있는 환경을 조성하기 위해 더 많은 노력을 기울여야 할 것으로 판단된다.⁹²⁾

일본이 수소기술에서 선도할 수 있었던 이유는 연료전지, 터빈에 대한 기존의 기술들을 활용할 수 있었기 때문이고, 이는 기초 기술에 대한 투자가 이어져 미래의 다양한 사용처에 활용될 수 있었음을 보여준다. 구체적으로 일본의 그린수소 생산 기술과 프로젝트의 성공 사례는 우리나라가 그린수소 분야에서 발전을 이루기 위한 참고 사례가 될 수 있다. 일본은 알칼리 수전해장치와 고체분자형 수전해장치 등의 고급 기술을 활용해 재생에너지 기반의 수소 생산을 확대하고 있다.

4.3. 종합상사의 활용

일본의 대형 종합상사들이 수소 에너지를 주목하며 다양한 프로젝트를 추진 중이다. 미쓰비시와 이토추 상사는 암모니아를 수소의 운반체로 활용하는 사우디 아라비아와 러시아 기반의 프로젝트를 진행하고 있다. 스미토모 상사는 오만과 호주에서 현지에서 수소를 생산하고 소비하는 프로젝트를, 마루베니는 미야기와 후쿠시마에서 그린수소를 중심으로 한 현지 생산-소비 프로젝트를 운영 중이다.⁹³⁾

일본 종합상사가 이 분야에 적극적인 이유는 해외 에너지 프로젝트에서의 노하우와 경험이 있기 때문이다. 현재는 블루수소에 중점을 두고 있지만, 그린수소에 대한 투자도 계획 중이다. 이런 다양한 수소 프로젝트는 일본 종합상사의 전략적인 선택으로, 기존의 화석연료 프로젝트와 연계하여 신속한 추진이 가능하다고 판단되고 있다.

일본의 종합상사 문화는 여러 측면에서 강점을 가진다. 첫째로, 이들은 다양한 산업에 걸쳐 활동하기 때문에 경제적인 리스크를 분산시킬 수 있다. 즉, 한 분야에서 손실이 발생하더라도 다른 분야에서의 수익으로 상쇄할 수 있다. 둘째로, 광범위한

92) 강희중(2019), p87-p92

93) 뉴스투데이(2022). <https://www.news2day.co.kr/article/20221103500122>(최종접속일(2023.9.7.))

산업에 걸친 지식과 경험은 정보의 효율적인 활용을 가능하게 한다. 이는 새로운 시장 기회를 빠르게 파악하고 대응하는 능력을 향상시킬 수 있다.

셋째로, 종합상사는 글로벌 네트워크를 갖추고 있어, 다양한 국가와 산업에서 활동할 수 있는 강점이 있다. 이로 인해 신규 사업 기회를 찾거나 협력 파트너를 구하는 데 유리한 위치에 있다. 넷째로, 그들은 자본과 인력, 기술적 자원이 풍부하여 큰 규모의 프로젝트나 고도의 기술을 요구하는 사업에서도 경쟁력을 유지할 수 있다.

마지막으로, 종합상사는 다양한 분야에서의 활동을 통해 기업 간의 협력을 촉진하고, 기존 사업과 새로운 사업 영역 사이에서도 시너지를 창출할 수 있다. 이런 다양한 장점 덕분에 일본의 종합상사는 유연하게 시장 변화에 대응하면서도 지속적으로 성장하고 있다.

우리나라도, 예전부터 일본 상사문화를 들여와 여러 무역회사들을 키워냈던 것처럼, 무역회사들의 네트워크를 이용하고 정부와 협력을 통해 수소·암모니아 확보에 나서는 것이 에너지수입국으로써 바람직한 방향이라고 생각한다.

5. 결론

수소는 탄소 중립 목표 달성에 중요한 역할을 할 수 있는 에너지 원료다. 순수 수소의 연소나 연료전지에서의 사용은 물을 제외하고는 어떠한 온실가스도 배출하지 않기 때문에, 탄소 중립에 크게 기여할 수 있다. 또한, 수소는 다양한 에너지 수요에 응용될 수 있어, 전력 생산부터 교통, 산업용 열 등 다양한 분야에서 탄소 배출을 줄일 수 있는 솔루션을 제공할 수 있다. 현재 우리가 의존하고 있는 그레이수소 뿐만 아니라, 그린수소, 블루수소 등 여러 수소 생산 방법도 연구되고 있어, 지속 가능한 방법으로 수소를 생산하는 기술이 상용화되면, 탄소 중립화의 중요한 수단으로 자리 잡을 가능성이 높다.

수소 산업을 선도하고 있는 한국과 일본은 과거 2019년 일본의 경제제재로 난관에 부딪혔지만, 2023년 6월 국장급 회의를 통해 수소분야에서 협력을 할 수 있는 계기를 보여주었다. 지정학적으로 비슷한 위치에 놓여 있으며, 에너지를 대부분 수입에 의존하며 재생에너지 가격이 높다는 점에서 수소 사회로 진입하는 데에 장단점을 공유하는 두 국가라고 할 수 있다.

본 보고서에서 한국과 일본의 수소 정책 및 기술 현황을 비교하고 시사점을 도출해냄으로써, 일본이 먼저 경험한 내용들 중에 배울 것이 있다면 배우고, 지양해야 할 것이 있다면 지양하여 효율적으로 정책을 결정하는 데에 도움을 주고자 하였다. 이를 위해 정부가 수소 가격에 대한 가이드 라인을 제시하고, 기초 R&D에 대한 투자를 게을리 하지 않으며, 무역관련 기업들과의 협력이 중요하다는 점을 강조하였다. 특히 탄소중립이라는 공통된 목표를 달성하기 위해, 양국이 경쟁보다는 협력을 통해서 서로의 정책과 전략을 보완하고 개선하는 방안을 마련하는 것이 바람직해 보인다.

참고문헌

〈국내 문헌〉

강희중. 2019. 「통계로 보는 한·일 과학기술 혁신역량」. STEPI 지표통계, 87-92.

관계부처합동. 2019a. 「수소경제 활성화 로드맵」.

_____. 2019b. 「수소 기술개발 로드맵(안)」.

_____. 2021a. 「제1차 수소경제 이행 기본 계획」.

_____. 2021b. 「제6차 원자력진흥 종합계획」.

_____. 2022a. 「세계 1등 수소산업 육성 전략」.

_____. 2022b. 「청정수소 생태계 조성방안」.

_____. 2022c. 「수소기술 미래전략」.

국무조정실. 2020a. 「제1차 수소경제위원회」 보도자료(2020.7.1.).

<https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156398968> (최종접속일: 2023. 7. 6.).

_____. 2020b. 「제2차 수소경제위원회」 보도자료(2020.10.15.). <https://www.korea.kr/briefing/policyBriefingView.do?newsId=148878793#policyBriefing> (최종접속일: 2023. 7. 7.)

_____. 2021a. 「제3차 수소경제위원회」 보도자료(2021.3.2.). https://www.motie.go.kr/motie/gov_info/gov_openinfo/open_cost/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=163862&bbs_cd_n=81 (최종접속일: 2023. 7. 6.).

_____. 2021b. 「제4차 수소경제위원회」 보도자료(2021.11.26.). <https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156482951> (최종접속일: 2023. 7. 7.).

_____. 2022. 「제5차 수소경제위원회」 보도자료(2022.11.9.). <https://www.korea.kr/>

- briefing/pressReleaseView.do?newsId=156535597 (최종접속일: 2023. 7. 8.).
- 김규판·강구상·최원석·오태현·이현진·오종혁·이정은. 2022. 「주요국의 탄소중립과 그린성장 전략에 관한 연구:EU, 미국, 중국, 일본을 중심으로」. 대외경제정책연구원. 연구보고서 22-07.
- 김기환·안지영. 2022. 「시장주도형 수소경제 조기 정착을 위한 전략연구(3/3)」. 에너지경제연구원.
- 김찬수·박효인. 2022. 「청정 수소생산 기술과 원자력의 활용 가능성」. 한국원자력연구원. 원자력 정책 Brief Report. 2022(1).
- 산업통상자원부. 2022a. 「'26년 연간 1,000톤 그린수소 생산 실증 지원」. 보도자료(2022.4.6.). https://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=165477&bbs_cd_n=81¤tPage=1&search_key_n=&cate_n=&dept_v=&search_val_v= (최종접속일: 2023. 6. 7.).
- 산업통상자원부. 2023a. 「수소발전 입찰시장 연도별 구매량 산정 등에 관한 고시 제정」 산업통상자원부 고시.
- 산업통상자원부. 2023b. 「청정수소인증, 첫걸음 내딛다」. 보도자료(2022.4.17.). https://www.motie.go.kr/common/download.do?fid=bbs&bbs_cd_n=81&bbs_seq_n=167093&file_seq_n=3 (최종접속일: 2023. 7. 6.).
- 서종수, 이세찬, 이창수, 이재훈, 김민중, 김상경, 최영우, 조현석. 2022. 「그린수소 생산을 위한 수전해 기술개발 동향」. NICE (News & Information for Chemical Engineers), 40(3), 254-270.
- 조항. 2021. 「수소 제조부터 수송, 현지 판매까지... 한눈에 보는 일본 종합상사의 수소사업」. POSRI Issue Brief. 2021(9), 1-8.
- 조홍중. 2022. 「원자력 R&D 재원 현황 및 개선방안 제언」. 세계원전시장 인사이트, (2022. 08.05). 3-11.

〈일본 문헌〉

- IHI. 2022.6.16. 「世界初, 液体アンモニア100%燃焼によるガスタービンで, CO₂フリー発電を達成」. プレスリリース(보도자료) (https://www.ihl.co.jp/all_news/2022/resources_energy_environment/1197937_3473.html). 최종접속일: 2023.6.3.)

IHI. 2023.1.18. 「IHIとGEアンモニア専焼大型ガスタービン開発に関する覚書を締結」. プレスリリース.(https://www.ihico.jp/all_news/2022/resources_energy_environment/1198147_3473.html. 최종접속일: 2023.6.3.)

岩谷産業. 2020. 「水素エネルギーハンドブック」(第6版). 岩谷産業.

大阪ガス. 2022. 3.28. 「メタネーションに関する下水処理場でのフィールド試験の開始について: 国土交通省の令和4年度下水道応用研究に採択」. (https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr2022/1305412_49634.html. 최종접속일: 2023.5.8.)

_____. 2023. 6.16. 「世界最大級のメタネーションによるCO₂排出削減・有効利用実用化技術開発事業における試験設備の建設開始について: 都市ガスのカーボンニュートラル化の実現に向けて」. (https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr2023/1768098_54087.html. 최종접속일: 2023.6.21.)

川崎重工業. 2022.8. 「事業戦略ビジョン: 実施プロジェクト名: 水素航空機向けコア技術開発」.

_____. 2022.10. 「事業戦略ビジョン: 実施プロジェクト名: 船舶用水素エンジン及びMHFSの開発」.

環境省. 2021. 「注目国内動向」.(https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/2021-featured_domestic_trends.pdf. 최종접속일: 2023.5.10.)

経済産業省. 2019.6. 「水素・燃料電池戦略ロードマップ: 経済産業省の取組について」.

_____. 2021.6. 「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」.

_____. 2021.7.16. 「グリーンイノベーション基金事業: 次世代航空機の開発プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画」.

_____. 2022.9. 「モビリティのカーボンニュートラル実現に向けた水素燃料電池車の普及について」. 모비리티수소국민협회 事務局資料.

_____. 2023.2.13. 「水素を取り巻く国内外情勢と水素政策の現状について」.

_____. 2023.2.24. 「日立造船グループの廃棄物・資源循環分野における脱炭素化の取組」第10回 메타네이션推進국민協議회.

国土交通省. 2021. 7.16. 「グリーンイノベーション基金事業: 次世代船舶の開発プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画」.

再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議. 2023.6.6. 「水素基本戦略(案)」. (https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/20230606_1.pdf. 최종접속일: 2023.6.10.)

資源エネルギー庁. 2018.6.28.. 「水素を使った革新的技術で鉄鋼業の低炭素化に挑戦」(<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteiky/course50.html>. 최종접속일: 2023.5.13.)

_____. 2021.1.15. 「アンモニアが“燃料”になる?! (前編)」. https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteiky/ammonia_01.html. 최종접속일: 2023.5.12.)

_____. 2021.1.29. 「アンモニアが“燃料”になる?! (後編)」. https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteiky/ammonia_02.html. 최종접속일: 2023.5.12.)

_____. 2021.11.26. 「ガスのカーボンニュートラル化を実現するメタネーション技術」. (<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteiky/methanation.html>. 최종접속일: 2023.5.31.)

_____. 2022.2.8. 「令和4年度超高温を利用した水素大量製造技術実証事業に係る入札可能性調査実施要領」. (https://www.enecho.meti.go.jp/appli/public_offer/2021/20220208_004.html. 최종접속일: 2023.5.12.)

_____. 2022.11.(a) 「今後のメタネーションの推進について」. (https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/009_04_01.pdf). 第9回メタネーション推進官民協議会.

_____. 2022.11.(b). 「メタネーション取組マップ2023」. (https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/009_04_02.pdf. 최종접속일: 2023.5.29.)

_____. 2023.2.22.(a). 「高温ガス炉実証炉開発事業を担う中核企業の選定に係る公募の事前周知について」. https://www.enecho.meti.go.jp/appli/submission/2022/0222_01.html. 최종접속일: 2023.5.25.)

_____. 2023.2.22.(b). 「高温ガス炉実証炉開発事業」. https://www.meti.go.jp/main/yosan/yosan_fy2023/pr/gx/gx_denga_02.pdf. 최종접속일: 2023.4.10.)

JERA. 2020.10.13. 「2050年におけるゼロエミッションへの挑戦について」. プレスリリース(보도

- 자료). (https://www.jera.co.jp/news/information/20201013_539. 최종접속일: 2023.5.11.)
- JERA. 2022.5.1. 「碧南火力発電所のアンモニア混焼実証事業における大規模混焼開始時期の前倒しについて」. プレスリリース(보도자료). (https://www.jera.co.jp/news/information/20220531_917. 최종접속일: 2023.5.11.)
- DENSO. 2023.1.24. 「水素社会の未来を見据えデンソーが挑む電解装置 SOEC · 開発」. (<https://www.denso.com/jp/ja/driven-base/tech-design/soec/> 최종접속일: 2023.5.8.)
- TOKYO GAS. 2022.12.20. 「2050年カーボンニュートラル実現に向けた革新的メタネーション技術社会実装検討委員会(共同委員会)の設置について」. プレスリリース(보도자료). (<https://reinforz.co.jp/bizmedia/2025/>. 최종접속일: 2023.5.11.)
- 東京工業大学(2021.4.7.). 「アニオン交換膜を利用した水電解による高性能、高耐久、低コストの水素製造システム」. 東工大ニュース.(보도자료). (<https://www.titech.ac.jp/news/2021/049334>. 최종접속일: 2023.5.23.)
- 内閣府. 2019. 『戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第1期課題評価・最終報告書』. <http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/siphokoku-1.pdf>. 최종접속일: 2023.5.29.)
- _____. 2022.6. 「新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画」.
- 日本ガス協会. 2022.8.5. 「国内メタネーションの普及拡大の早期化に向けて」. (https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/kokunai_tf/pdf/003_04_00.pdf. 최종접속일: 2023.6.18.)
- 日本原子力研究開発機構·三菱重工業. 2022.4.22. 「カーボンニュートラル実現に向けたHTTRによる水素製造実証事業の開始」. プレスリリース.(보도자료)(<https://www.jaea.go.jp/02/press2022/p22042202/>. 최종접속일: 2023.5.18.)
- 日本製鉄(2021.3.30.). 「日本製鉄カーボンニュートラルビジョン2050」. (https://www.nipponsteel.com/ir/library/pdf/20210330_ZC.pdf. 최종접속일: 2023.4.21.)
- 日経クロステック(2021). 「水素の貯蔵法は7種類以上用途に応じて一長一短」. (<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01513/00001/> 최종접속일: 2023.4.3.)
- NEDO. 2015.3. 「水素エネルギー白書」. 新エネルギー · 産業技術総合開発機構

- _____. 2020.3.7. 「再エネを利用した世界最大級の水素製造施設 FH2Rが完成」. (https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101293.html. 최종접속일: 2023.5.1.)
- _____. 2022. 「高炉を用いた水素還元技術の開発」. (<https://www.nedo.go.jp/content/100940993.pdf>. 최종접속일: 2023.5.13.)
- _____. 2022.7.29. 「低炭素社会実現に向けた水素専焼対応型 Dry Low NOx高温ガスタービン発電設備の研究開発」. (<https://www.nedo.go.jp/content/100950556.pdf>. 최종접속일: 2023.5.20.)
- _____. 2023.2. 「NEDO燃料電池·水素技術開発ロードマップ: 水電解技術ロードマップの策定に向けた課題整理 (解説書)」. 新エネルギー·産業技術総合開発機構
- 三菱パワー株式会社. 2020.10.6. 「水素ガスタービン」. (https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/2050_gas_jigyo/pdf/002_07_00.pdf. 최종접속일: 2023.4.15.)
- 宮武健治(2022.7.29.). 「水素利用等先導研究開発事業/水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発/高性能アニオン膜型アルカリ水電解のための材料開発と膜電極接合体に関する研究開発」. NEDO水素·燃料電池成果報告会.
- 村上朋子. 2022.8.23. 「次世代原発バラ色にもてはやされる SMR挑戦し続ける覚悟と信念はあるか」. 『週刊エコノミスト』. 8月23日号 . pp. 26-27.

〈영문 문헌〉

- IEA(International Energy Agency). 2019.6. “The Future of Hydrogen”. (https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf. 최종접속일: 2023.6.19.)
- OECD. 2019. “The Future of Hydrogen: Seizing today’s opportunities”. (<https://www.oecd.org/fr/publications/the-future-of-hydrogen-1e0514c4-en.htm>. 최종접속일: 2023.6.19.)

〈국내 웹사이트〉

- 뉴스투데이. 2022. [일본 종합상사가 눈독 들이는 미래사업은? (11)] 수소, 생산에서 저장·수송까지 Supply Chain 전체를 책임지다! (下). <https://www.news2day.co.kr/article/2022>

- 1103500122 (최종접속일: 2023.9.13.).
- 수소경제종합포털. <https://www.h2hub.or.kr/main/index.do> (최종접속일: 2023.7.13.).
- 월간수소경제. 2021. 롯데케미칼, 암모니아 분해 수소 생산기술 실증 추진(12월21일). <https://h2news.kr/mobile/article.html?no=9464> (최종접속일: 2023.7.13.).
- 월간수소경제. 2023a. 수소산업 주요통계 (2023년 5월 31일 기준)(7월2일) <https://www.h2news.kr/mobile/article.html?no=11081> (최종접속일: 2023.7.13.).
- 월간수소경제. 2023b. 청정수소 전환, 블루수소 생산기지가 책임진다 (1월 31일). <https://www.h2news.kr/mobile/article.html?no=10696> (최종접속일: 2023.9.5.).
- 월간수소경제. 2023c. 올해 첫 일반수소발전 입찰시장, 5개 발전소 낙찰. <https://www.h2news.kr/news/article.html?no=11191> (최종접속일: 2023.9.6.).
- 에너지플랫폼뉴스. 2023. 청정수소 온실가스 배출량 기준 ‘수소 1kg당 4kgCO₂eq’ (4 월 17일) <https://www.e-platform.net/news/articleView.html?idxno=77977> (최종접속일: 2023.9.7)
- 전기신문. 2022. 롯데-삼성-포스코, 2027년부터 말레이 청정수소 도입(9월8일). <https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=308611> (최종접속일: 2022.10.10.).
- SK E&S, 지자체-중부발전 손잡고 세계 최대 ‘보령 청정수소 프로젝트’ 본격화. 보도자료.(2021. 11.26.). <https://news.einfomax.co.kr/news/articleView.html?idxno=4185801> (최종접속일: 2022.10.10.).

〈일본 웹사이트〉

- JAEA 웹사이트 「高温工学試験研究炉(HTR)の概要」(<https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/jp/faq/htrr.html>. 최종접속일: 2023.6.2.)
- JFHC(水素燃料電池実証プロジェクト) 웹사이트.(<https://www.jari.or.jp/jhfc/jhfc/index.html>. 최종접속일: 2023.2.18.)
- 東北大学. Tokumas Lab 웹 사이트(<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/nanoint/jpn/about/contents3/index.html>. 최종접속일: 2023.4.19.)
- 日本ガス協会. 웹사이트. 「ガスの利用」. (<https://www.gas.or.jp/gas-life/kougyoro/jirei/>최

종접속일: 2023.5.30.)

NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構) 웹사이트 「Green Japan, Green Innovation」.
(<https://green-innovation.nedo.go.jp/> 최종접속일: 2023.5.19.)

NEDO. 웹사이트 「環境調和型プロセス技術の開発」(https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100050.html. 최종접속일: 2023.5.19.)

HATCH. 웹사이트. 「再生可能エネルギーを運搬・貯蔵する技術水素キャリアとは?」(2022.11.1.)
(https://shizen-hatch.net/2022/11/01/hydrogen_export/ 최종접속일: 2023.4.3.)

HySUT 웹사이트 「羽田水素ステーション」(<http://hysut.or.jp/archive/business/2011/station/haneda.html>. 최종접속일: 2023.5.10.)

山梨県 웹사이트 「新エネルギー推進室」(<https://www.pref.yamanashi.jp/newene-sys/>. 최종접속일: 2023.5.14.)

이준영 | 現 에너지경제연구원 부연구위원

〈주요저서 및 논문〉

『State Medicaid Expansion and the Self-Employed』, Small Business Economics, 2022

『Employment impacts of the COVID-19 pandemic across metropolitan status and size』, Growth & Change, 2021

수시연구보고서 2023-01

한·일 수소 정책 및 기술 동향 분석

인 쇄 2023년 7월 28일

발 행 2023년 7월 31일

저 자 이 준 영

발행인 김 현 제

발행처 에너지경제연구원

주 소 44543 울산광역시 중구 종가로 405-11

연락처 (052)714-2114(대) FAX (052)714-2028

등 록 제 369-4030000251001992000001 호

인 쇄 (사)아름다운사람들 (02)6948-9650

©에너지경제연구원 2023 ISBN 978-89-5504-895-7 93320

* 파본은 교환해 드립니다.

값 7,000원



KOREA ENERGY ECONOMICS INSTITUTE

