

탄소중립 실현을 위한
해양분야 수소정책 개선방안 연구

2024년 4월

해양수산부

이인자

차 례

제1장 서론	10
제1절 연구의 목적	10
제2절 연구의 범위	12
제3절 논의배경 및 문헌검토	17
제2장 연구방법론	46
제3장 한국의 수소경제 정책에 대한 진단	48
제1절 연혁 및 개요	48
제2절 한국의 수소정책 및 프로젝트	49
제3절 한국의 해양분야 수소정책 및 프로젝트 .	54

제4장 주요국의 수소정책	60
제1절 독일	60
제2절 일본	65
제3절 미국	69
제4절 소결 : 3국의 수소정책에 대한 비교	75
제5장 정책 제언	85
제6장 결론	90
참고문헌	92

표 목차

<표 1> NACE Rev.2 분류	13
<표 2> 제1차 수소경제 이행 기본계획(해양분야) 이행체계	56
<표 3> 한국의 해양분야 수소정책의 분야별 평가	58
<표 4> 독일의 수소기본전략(2023년 수정 전략)의 주요 내용 요약	62
<표 5> 일본의 수소기본전략(2023년 수정 전략)의 주요 내용 요약	67
<표 6> 미국 국가 청정 수소 전략 및 로드맵 요약	70
<표 7> 미국의 수소 분야 투자 계획	72
<표 8> 미국의 수소전략 이행을 위한 기관별 역할	72
<표 9> 독일, 일본, 미국의 수소정책 비교	76
<표 10> 3국의 재정적 인센티브 도입 현황	78
<표 11> 기존 및 계획된 규제 프레임워크 및 인증 시스템	82

그림 목차

<그림 1> 해양 경제의 활동 그룹과 NACE Rev.2 분류	13
<그림 2> 탄소중립시나리오에서의 수소의 중요성	18
<그림 3> 수소 응용 분야의 비용 경쟁력 전망	19
<그림 4> 수소 생산 (2020-2022년)	20

<그림 5> 저배출 수소 생산 프로젝트 분포	21
<그림 6> 2030년까지 발표된 전 세계 정부의 생산 목표와 잠재 수요	23
<그림 7> 수소 사용 분야별 비교 (2020-2030목표)	23
<그림 8> 수송용 수소 비용의 진화	24
<그림 9> 저배출 수소 무역 규모 전망(IEA, 2030-2040)	25
<그림 10> 수소항만인프라 구조도	29
<그림 11> 전 세계 해양 선단의 총 CO2 배출량(2012-2022)	30
<그림 12> 선박 GHG 배출 감소에 관한 IMO 주요 규제	31
<그림 13> 국가 차원의 수소정책 발표 동향	32
<그림 14> 수소 가치사슬에 대한 정책 및 규제 개입 유형	34
<그림 15> 수소 수요 창출 지원 정책 발표 및 시행 부문별 수(2021-2023)	35
<그림 16> 지역별 수소 기술에 대한 정부 RD&D 지출(2018-2022)	37
<그림 17> 수소에 대한 정부 간 협력 협정	39
<그림 18> 제1차 수소경제 이행 기본계획의 비전체계	49
<그림 19> 재생에너지 관련 주요 부문의 기술 수준	57

국외훈련 개요

1. 훈련국 : 미국
2. 훈련기관명 : 플로리다 주립 대학교
(Florida State University)
3. 훈련과정 : 장기 일반과정(영어권)
4. 훈련기간 : 2022.08.08. ~ 2024.05.24.

훈련기관 개요

1. 기관명 : Florida State University (플로리다 주립 대학교)

- 위치 : 플로리다 주도(主都)인 탤러해시(Tallahassee)
- 주소 : 600 W. College Avenue, Tallahassee, FL 32306
- 홈페이지 : <https://www.fsu.edu/>
- 전화번호 : (850) 644-2525

2. 미션, 핵심 가치, 비전

○ 미션 :

- 교육, 연구, 창의적 노력 및 봉사 분야에서 우수성 추구
- 자유로운 탐구 장려
- 다양성을 포용하는 커뮤니티 내에서 평생 학습, 개인적 책임감, 지속적인 성취에 필수적인 힘, 기술, 인성 함양

○ 핵심 가치 :

- 혁신적인 대담함
- 영감을 주는 우수성
- 역동적인 포용성
- 책임감 있는 스투어드십
- 참여형 커뮤니티

○ 비전 :

- 플로리다 주립대학교는 미국에서 가장 기업가적이고 혁신적인 대학 중 하나가 되어 학생들의 삶을 변화시키고 탁월한 교육, 연구, 창의적 활동 및 봉사를 통해 우리 주와 사회의 미래를 형성

3. 연혁

- 1851년 설립
- 1858년 텔러해시 여성아카데미를 흡수하면서 남녀공학으로 전환
- 1905년 백인여성들만을 위한 플로리다주립 여자단과대학을 거쳐 1947년 현재의 교명인 Florida State University 이름으로 변경
- 1959년 비즈니스, 저널리즘, 교육학과, 가정경제학, 사회복지학과 등 신설
- 2001년 의과대학 신설

4. 특이사항

- 면적은 텔러해시 메인 캠퍼스 기준으로 486 에이커(약 60만평)
- 플로리다주와 140 개국의 41,867 명의 학생들이 재학
- 교수진은 2,360 여 명이며, 총 직원은 14,079명
- 학사, 석사, 박사, 전문가를 양성하는 351개의 학위 프로그램 운영

- 플로리다주의 고등교육기관 중, 국제적으로 공신력 있는 카네기 분류에 따르면 전미 최상위 연구중심 종합대학 Carnegie Tier 1 (R1)에 속해 있음

5. Askew School of Public administration and Policy

- 현재 행정학과가 포함된 단과대
- 플로리다 주의 제37대 주지사인 Askew의 이름을 딴 것.
 - * Askew 주지사 : 플로리다 주에 최초로 법인세를 도입, the Sunshine Amendment을 제정하는 등 업적

요 약

탄소 중립은 전 세계 정부가 화석 연료 의존 경제와 산업 생태계에서 친환경 에너지원으로 전환하기 위해 노력하면서 중요한 글로벌 문제로 대두되었다. 이러한 전환으로 인해 수소경제가 많은 국가에서 비전과 정책 목표로 채택되면서 대안으로 수소가 고려되고 있다.

우리나라는 수소경제 활성화를 위한 목표를 설정하고 로드맵을 개발해 왔지만, 여전히 기술적 한계, 정책 일관성 등 다양한 과제에 직면해 있다. 특히 해양분야의 수소경제는 새로운 가능성을 제시하고 있지만, 효과적인 정부 조정, 시장 창출, 기술 개발에 관한 과제는 여전히 남아 있다.

따라서 본 연구보고서의 목적은 독일, 일본, 미국의 정책을 비교 분석한 결과를 참고하여 기존 정책을 진단하고 보다 효과적인 방향으로 정책 개선을 위한 제안을 개발하는 것이다. 본 연구보고서를 통해와 수행된 연구와 검토, 이에 따라 도출된 정책제안은 우리나라 해양분야의 수소전환을 위한 포괄적이고 효과적인 정책의 수립과 실행에 기여할 것으로 기대한다.

제1장 서론

제1절 연구의 목적

탄소 중립이 중요한 글로벌 이슈로 떠오르고 있다. 이에 세계 각국 정부는 탄소중립을 추구하고 화석에너지에 의존해 온 경제와 산업생태계를 그린에너지 기반으로 전환하기 위해 노력하고 있다. 국제에너지기구(IEA)의 보고서에 따르면 전 세계적으로 재생 가능한 전력 용량의 증가는 더욱 가속화될 것으로 예상되며, 2026년까지 전 세계 전력 용량 증가의 거의 95%를 차지하는 수준으로 성장할 것으로 예상된다. 특히, 이러한 성장은 태양광과 육상 및 해상 풍력에 의해 주도될 것으로 보이는데, IEA의 전망에 따르면, 전체 해상풍력 용량은 2026년까지 3배 이상 증가해 세계 풍력시장의 약 5분의 1 수준으로 성장할 것으로 전망된다¹⁾.

그러나 신재생 발전량은 계절이나 시기에 따라 변동이 심하고, 이를 교통수단에 적용하려면 경량, 고밀도 에너지 저장 장치의 개발이 필요한 단점이 있다. 따라서 이러한 문제를 극복하기 위한 대안으로 수소가 제안되었다²⁾.

그러나 기술 미성숙으로 인한 단기 수익의 불확실성과 막대한 초기 투자 비용으로 인해 민간 투자가 위축되기 때문에 민간이 수소경제를 주도적으로 추진하는 것은 사실상 제약이 크므로, 수소경제가 본 궤도에 정착하기 전까지는 정부 및 공공부문의 적극적 개입과 주도가 필수적이다.

이러한 정부 정책 결정은 민간 기업의 투자 결정과는 달리, 단기 수익정보보다는 탈탄소화, 수소 생태계의 조성 등 거시적이고 장기적 발전 가능성을 고려할 수 있다는 점을 상기할 필요가 있다. 따라서 정책 입안자들의 수소 에너지의 비용 효율성을 보장하고 수소와 다른 자원 간의

1) International Energy Association [IEA], 2021.

2) The National Renewable Energy Laboratory, 1995.

복잡한 시너지 효과를 유도하여야 하는 정책 과제에 직면해 있다³⁾.

우리나라는 2050년까지 수소 공급량의 80%를 그린수소로 대체하는 것을 목표로 2019년 수소경제 활성화 로드맵을 수립했다⁴⁾. 이 로드맵은 전체 수소 사슬을 포괄하고 있으며, 이후 국가 차원의 수소정책에 대한 기본 틀을 제공하고 있으며, 이후 후속 및 하위 전략들이 개발되어 실행되고 있다. 무엇보다 2021년 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」을 제정함으로써, 로드맵과 후속 계획들의 일관성 있는 실행을 위한 입법적 기반이 마련되었으며, 이에 근거한 ‘제1차 수소경제 이행 기본계획’이 수립되었다.

본 연구보고서의 목적은 우리나라를 포함한 주요 국가의 수소경제 실현을 위한 정책을 검토하고 이를 통해 정책 개선사항을 발굴하고 이에 대한 정책방안을 마련하는 데 있다. 수소경제 구현 초기인 현재 단계에서 우리나라의 수소정책과 프로그램의 실효성을 평가하는 것은 다소 시 기상조인 것이 사실이다. 그러나 본 연구보고서를 통해 이러한 정책들이 얼마나 구체적이고 긴밀하게 상호 연관되어 있는지 검토함으로써, 향후 정책의 효과성을 높이는 데 기여할 수 있을 것이다.

3) Hanley et al., 2018

4) 산업통상자원부(MEIT), 2019

제2절 연구의 범위

본 연구보고서는 수소경제로의 전환을 위한 정부와 정책의 역할에 주목하고자 한다. 국가 차원의 수소정책과 프로그램이 어떠한 동인에 의해 채택되었으며, 어떠한 정책 목표를 가지고 수행되고 있는지, 그리고 정책의 이행체계에 대해 초점을 맞춘다.

또한, 국가 수준의 수소정책의 전반적인 사항뿐만 아니라 가능한 해양분야에 보다 초점을 맞추고자 한다. 정책 또는 행정의 영역으로서의 해양은 해양 자원의 지속 가능한 개발과 관련이 된다. 따라서 해양 정책은 해양환경·생태계의 보호, 해양 자원의 이용·개발 활동(해양경제 활동 또는 해양산업), 해양영토 및 국제 관계를 중요한 정책 영역으로 포함한다.

해양경제 활동 또한 해양산업에 대한 일반적인 정의는 존재하지 않는다. 다만, 유럽 연합의 경제 활동의 통계적 명명법을 제정하는 규정인 개정된 NACE(the Statistical Classification of Economic Activities in the European Community)에서는 해양활동 그룹을 3가지로 구분하고 있다. “완전한 해양활동”인 그룹 1은 해양 자원에 직접 의존하는 별도의 산업 부문을 구성하며, “주로 해양활동”에 해당하는 그룹 2은 해당 산업과 시설이 주로 해안 지역에 위치하거나 해안에 근접한 활동들을 포함한다. 따라서 이러한 점을 고려할 때, 해양산업은 해양 자원을 직접 투입요소로 활용하여 상품이나 서비스를 생산하거나, 지리적으로 사업체나 시설의 입지나, 활동의 공간이 해상 또는 해안일 것을 요구한다⁵⁾.

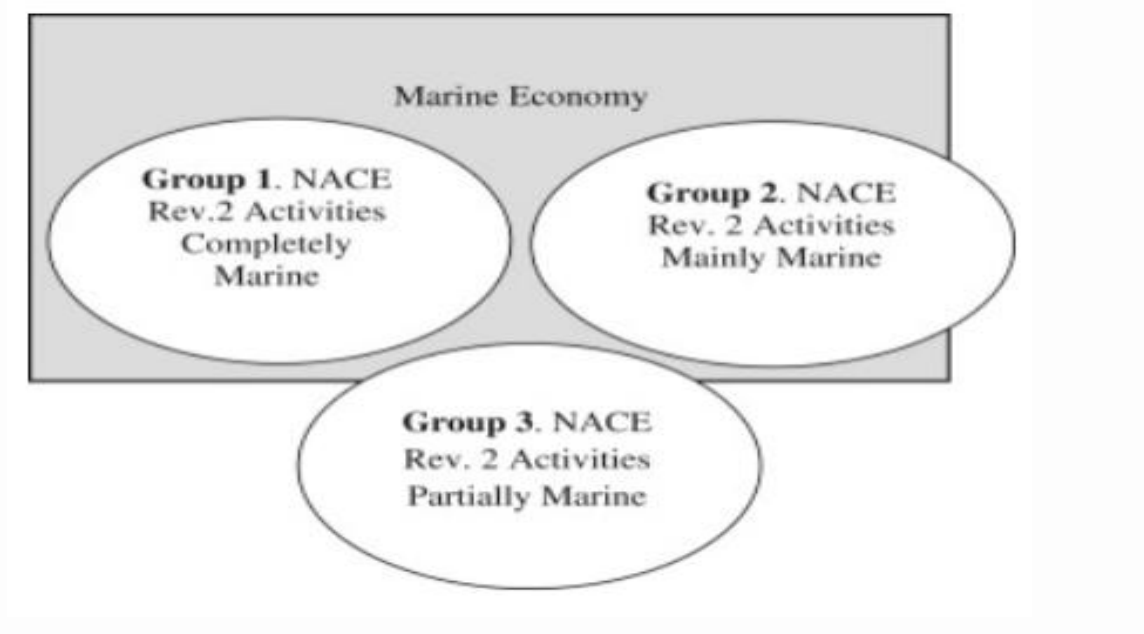
따라서 수소경제의 전환이라는 큰 틀에서는, 수소 가치사슬 내에서의 해양자원⁶⁾의 이용과 개발, 해양경제활동에서의 수소의 적극적 도입, 주요 인프라의 해양 및 연안 입지 시 해양공간관리 및 해양환경과

5) Suris-Regueiro et al., 2013.

6) 「해양수산발전기본법」 제3조 2. “해양수산자원”이란 개발·이용이 가능한 해양생물자원·해양광물자원·해양에너지·해양관광자원 및 해양공간자원 등 국가경제 및 국민생활에 유용한 자원을 말한다.

관련한 이슈가 중요한 정책 문제로 부상할 수 있다.

<그림 1> 해양경제의 활동 그룹과 NACE Rev.2 분류



< 표 1 > NACE Rev.2 분류

	해양분야	해양산업	Marine Activities in NACE Rev.2
Group1	Living resources	해양 어업	해양 어류, 갑각류, 연체동물 및 기타 수생 동물, 유기체 및 재료(천연 진주, 해면, 산호 및 조류)의 낚시 및 채취.
		해양 양식업	해수에서의 수생생물(어류, 연체동물, 갑각류)의 양식 또는 양식, 김 및 기타 식용 해조류의 재배, 기수역, 탱크, 저수지, 어류 부화장 등에서의 기타 활동
		해산물 가공	어류, 갑각류 및 연체동물의 가공 및 보존
		해산물 판매	어류, 갑각류, 연체동물 등 기타 식품 도매·소매 판매
	선박 제조	조선	선박 및 부유식 구조물 건조

	해양분야	해양산업	Marine Activities in NACE Rev.2
Group 2		선박 제작	레저용 보트 및 스포츠용 보트 제작
		수리 및 유지	선박 및 보트의 수리 및 유지 관리
	운송	해상여객운송	해상 및 연안수역을 통한 여객운송
		해상화물운송	해상 및 연안 해상을 통한 화물 운송
	비생명자원	석유·가스 탐사 및 생산	원유 및 천연가스 추출 및 그 지원 활동
		자갈 및 모래 추출	점토, 산업용 골재 등 추출, 준설 및 자갈 파쇄
소금 추출		해수에서 소금생산	
건설	해양 건설	수로, 항만, 마리나, 수문 등의 건설	
운송	교통서비스 활동	수상운송에 따른 서비스 활동(항만 등 터미널 시설 운영, 항해, 도선 및 정박 서비스, 인양, 등대 등) 수상운송장비 임대 및 운영	

수소정책을 검토할 때 해양 부문을 별도로 논의하는 것은 다음의 측면에서 의미 있다.

우선, 그린수소 생산에서의 해양재생에너지원의 활용 가능성에 주목할 필요가 있다. 특히, 지금까지 재생에너지 성장의 주요 동력이었던 태양광과 풍력 에너지는 2050년 순 제로 목표 달성에 역부족일 수 있다는 점을 고려하면, 정부의 정책은 활용 가능한 재생에너지원을 확대하는 방향으로 전환될 필요가 있다⁷⁾. 이러한 상황에서 2050년까지 전 세계적으로 최대 300GW의 설치 용량을 제공할 수 있을 것으로 전망되는 해상

7) IEA, 2021

풍력, 조력, 파력 등과 같은 해양에너지원⁸⁾은 그린수소 생산을 위한 대안으로 검토될 수 있다.

또한, 전 세계 온실가스 배출량의 최대 3%를 차지하는 해상운송 부문에서도 탈탄소화에 대한 요구가 높아지고 있는 점도 중요하다. 국제해사기구(IMO)는 2050년까지 연간 총 온실가스 배출량을 2008년 대비 50% 이상 감축하겠다는 목표를 설정하고 점진적인 감축을 위한 틀 마련에 착수했다⁹⁾. 세계 해운 및 조선업계에서는 이러한 과제를 해결하기 위한 대안으로 수소를 포함한 대체 연료의 도입을 적극적으로 고려하고 있다¹⁰⁾.

아울러, 수소 인프라의 중요한 입지로서 해양과 연안이 고려되고 있는 점도 주목해야 한다. 수소 저장, 탄소 포집 및 저장(CCS)과 같은 대규모 인프라의 중요한 입지로서 해상과 연안의 기존 항만 및 석유화학 시설이 고려되고 있다. 무엇보다 단기적으로 수소 생산의 경제성이 확보되지 않으면 수소 수입에 의존하게 될 수 있는 한국의 상황을 고려할 때, 수소 공급망에서 중요한 역할을 수행할 것이다.

무엇보다도 해양분야를 단일한 정책 분야로 상정하고 있는 한국 정책·행정 맥락을 고려할 필요가 있다. 한국은 해양분야의 통합 행정의 중요성을 인식하고 해양 부문과 관련된 정책과 행정기능을 통합하는 해양수산부¹¹⁾를 설치·운영하고 있다. 이러한 점을 고려하면, 한국의 수소경제 정책에서 해양분야를 별도의 하위분야로 논의하는 것이 타당하다.

이러한 수소경제 전환에서의 해양분야의 중요성에도 불구하고, 해양분야에서의 수소 도입은 여러 가지 어려움에 직면해 있다. 해양재생에너지를 활용한 그린수소 생산, 해양산업 분야의 수소 도입 확대를 위한 노력은 다른 분야의 그린수소 도입과 공통적인 문제, 즉, 생산 효율성

8) Ocean Energy System, 2017

9) 국제해사기구(IMO), 2018

10) Xing et al., 2020

11) 「정부조직법」 제44조(해양수산부) ① 해양수산부장관은 해양정책, 수산, 어촌개발 및 수산물 유통, 해운·항만, 해양환경, 해양조사, 해양수산자원개발, 해양과학기술 연구·개발 및 해양안전심판에 관한 사무를 관장한다. <개정 2017. 4. 18.>

문제, 관련 공급망을 형성하기 위한 관련 산업 생태계 부족, 소비 인센티브 부재 등의 문제에 직면해 있다. 이에 더해, 해양그린수소에 가장 적합한 방식인 해상풍력발전소 건설과 관련된 해양환경 및 생태계 파괴, 인근 어업과의 갈등 등의 문제를 해결하는 것이 필요해 보인다.

더욱이, 해양분야의 행정 체계상의 복잡성의 문제도 우려된다. 해양수산부(MOF)는 2020년 바이오수소 생산, 수소선박 개발, 해양수소병커링 터미널 건설 등을 추진하기 위해 '해양수산 수소경제 이행 로드맵'을 수립했다. 그럼에도 불구하고, 산업통상자원부(MTIE)와 과학기술정보통신부(MSIT) 간 협력을 통해 정책 일관성을 확보하는 것이 필요하다. 이는 해양분야의 수소정책이 포괄적인 에너지 정책 프레임워크의 더 넓은 맥락 내에서 조율되어야 한다는 점을 고려할 때 이는 더욱 중요한 의미가 있다. 특히, 수소 도입 활성화를 위해서는 수요 시장 창출과 연구·개발 투자가 중추적인 역할을 한다는 점에서 관련 부처 간의 협력을 통해 응집력 있는 정책 수립이 요구된다.

지금까지의 논의의 맥락을 반영하여, 본 연구보고서는 다음과 같은 질문을 해결하는 데 초점을 맞추고자 한다.

(1) 해양 부문에서 수소 활성화를 위한 정부의 역할과 과제는 무엇인가?

(2) 해양 부문에서의 수소 활성화를 위한 정부 정책은 어떻게 추진하고 있나? 한국 정부의 주도를 비전, 목표 설정, 실행체계, 정책 수단 등의 측면에서 검토한다.

(3) 현재 한국의 정책과 프로그램에 대해 제안된 과제와 개선 방향은 무엇인가? 이를 위해 다른 수소정책과 프로그램 수행에 있어서 선도 국가로 분류되는 주요국의 정책과 프로그램에 대해 검토한다.

제3절 논의 배경 및 문헌연구

1. 논의의 배경

(1) 수소경제로의 전환

‘수소경제’의 개념은 각국의 정책이나 연구자에 따라 강조하는 요소가 조금씩 상이하다. 다만, 일반적으로는 수소를 에너지 운반체로 널리 활용하는 국가 경제 시스템¹²⁾으로 이해할 수 있다. 수소 기반 에너지 시스템의 아이디어는 1970년대 석유 위기를 계기로 공식화 되었으며, 운송 부문의 미래 연료 공급과 관련한 용어로 부상하였다¹³⁾.

‘수소경제’의 개념에서 보면, 궁극적으로는 탄소 배출이 없는 수소로서 이른바 ‘그린수소’를 지향한다. 그린수소에 대해 일반적인 정의는 없으나, 재생에너지에서 생산된 수소를 의미하는 ‘재생 가능한 수소’와 동의어로 사용된다. 하지만, 일부의 경우 화석연료 및 원자력 기반의 수소 생산의 경우에도 온실가스 배출량이 충분히 낮을 때 ‘청정’ 또는 ‘블루 수소’로 분류하고 정책 대상으로 포함한다¹⁴⁾.

현재의 수소에 대한 관심은 탄소 배출 제어, 에너지 안보를 실현할 수단이자, 에너지 운반체로서의 광범위한 사용가능성이라는 세가지 관점에서 논의되고 있다.

첫째, 수소는 탄소 중립을 달성하기 위한 중요한 수단으로서 부상하였다. CO₂ 농도를 550ppm 미만으로 안정화함으로써 지구 온도 상승을 산업화 이전 수준보다 2°C로 제한하는 등의 도전적인 기후 변화 목표를 달성하기 위해서는 2050년까지 CO₂ 배출량을 1990년 배출량의 60~80% 수준으로 크게 줄여야 한다. 이러한 기후 변화 목표를 실현하려면 모든 부문에 걸쳐 다양한 기술과 완화 전략을 구현하는 것이 필수적이다. 이러한 전략에는 에너지 효율성 향상, 탄소 포집 및 저장(CCS) 배치, 재생 가능 에너지원 또는 원자력 에너지 활용이 포함¹⁵⁾되며, 수소의

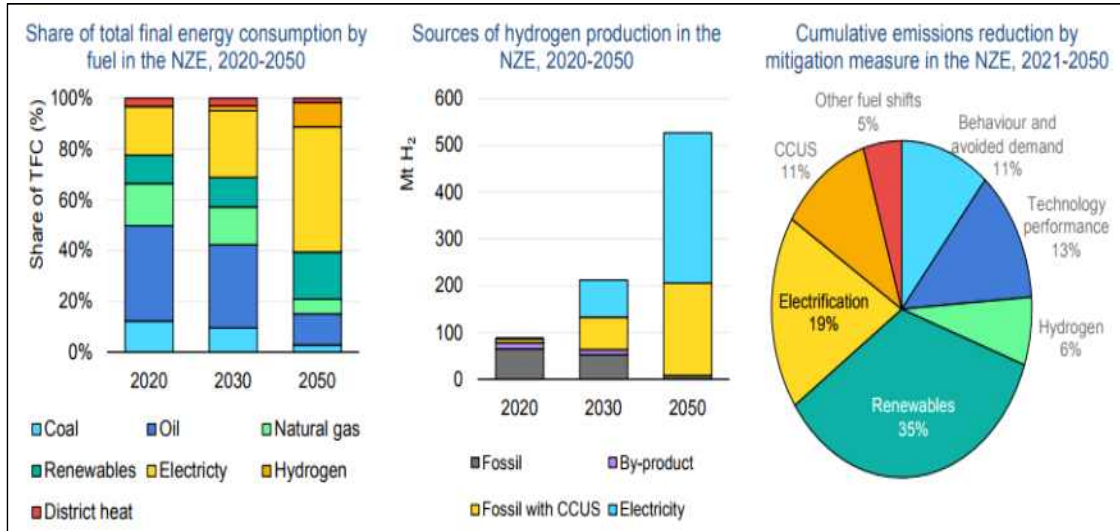
12) Ekins & Hughes, 2009

13) Ball & Wietschel, 2009

14) Velazquez Abad & Dodds, 2020

활용은 이러한 전략의 중요한 요소로 간주된다.

<그림 2> 탄소중립시나리오에서의 수소의 중요성



* NZE = Net zero Emissions Scenario. TFC = total final energy consumption.

* 출처: IEA, 2023

둘째, 수소는 석유를 대체함으로써 에너지 안보를 강화하는 대안이라 할 수 있다. 아시아 등 지역의 급속한 산업화와 석유 수요의 증가, 최근 석유 공급 동향 등을 고려할 때 잠재적인 석유 공급 부족이 발생할 수 있다. 더욱이 경제적, 지정학적 영향으로 인해 석유 공급에 대한 우려가 커지면서 수소와 같은 대체 연료에 대한 탐색이 촉발되었다. 국제 수소 시장의 발전은 잠재적 에너지 공급자의 다양성을 더하여 특히 에너지 수입국의 에너지 안보를 강화할 수 있다.

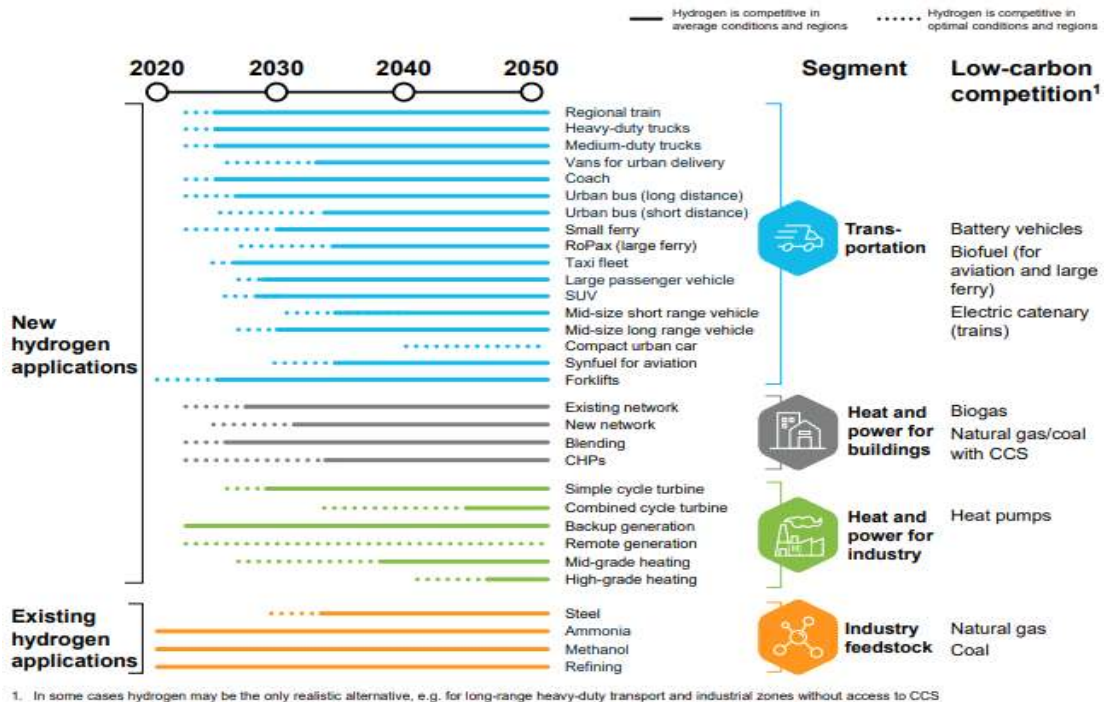
셋째, 타 대체 연료와 달리 수소는 1차 에너지원에서 생산할 수 있는 다목적 2차 에너지 운반체로서 기능할 수 있다는 점에서 각광받고 있다. 무게와 고속충전 측면에서의 이점을 가진 수소 연료전지 차량은 전기 배터리 차량보다 장거리 및 대규모 운송에 실현 가능한 대안으로 부상하고 있다. 뿐만 아니라, 수소는 전력 수요가 낮을 때 잉여 재생 에너지를 저장하여 그리드 균형을 최적화할 수 있기 때문에, 풍력과 재생 에너지의 공급 변동을 보완하기 위한 전기 저장 솔루션으로 기능하면서,

15) Ball & Wietschel, 2009

수요와 공급 간의 일시적인 불균형을 시정함으로써 재생 가능 에너지의 활용 확대에 기여할 것으로 기대된다¹⁶⁾.

이러한 수소에 관한 관심은 청정수소 채택에 대한 비용이 급격히 개선됨에 따라 더욱 부각되고 있다. 재생가능 에너지를 활용한 전기 분해는 저탄소 및 재생 가능한 전기 가격이 하락하고 전기분해 용량의 규모화에 따라 60% 더 저렴해졌다. 재생 가능한 수소 생산 비용의 가장 큰 원동력인 태양광과 풍력 발전 비용은 지난 10년 동안 80% 감소했으며, 재생 에너지에 대한 이러한 비용 하락 추세는 계속될 것으로 전망된다. 동시에 전기분해 용량도 가속화되기 시작하여 2015년 대비 2025년까지 최소 55배 더 많은 용량이 예상되며, 이는 전기분해 자본 지출에서도 유사한 비용 절감을 실현할 수 있다는 것을 의미한다¹⁷⁾.

<그림 3> 수소 응용 분야의 비용 경쟁력 전망



* 출처 : Hydrogen Council, 2020

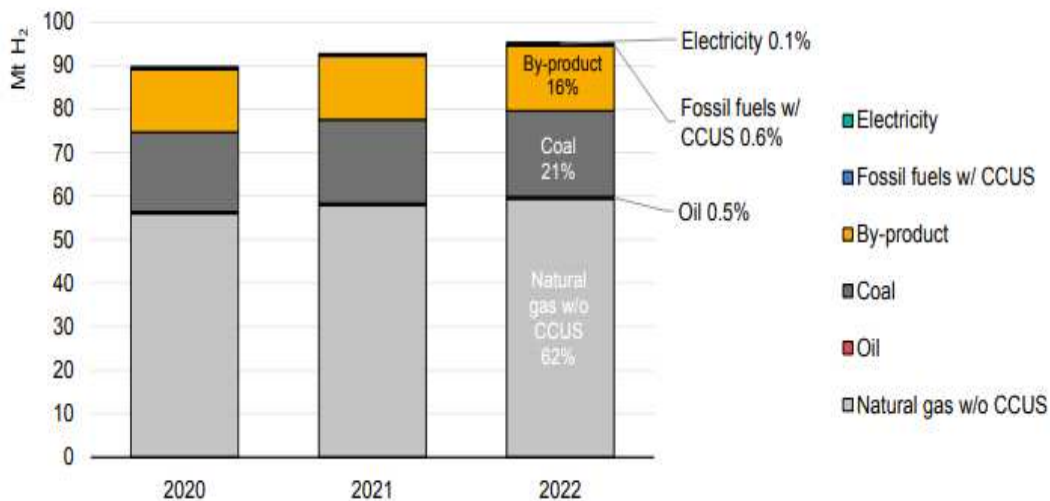
16) Ball & Weeda, 2015

17) Hydrogen Council, 2020

(2) 수소 생산

수소는 물과 탄화수소에서 가장 자주 발생하는 화합물의 형태로 자연적으로 발생하며 여러 공정을 통해 화석 연료 또는 재생 가능 에너지원에서 생산이 가능하다. 오늘날 입증된 산업화된 생산 방식은 천연가스 개질, 석탄 가스화 및 물 전기 분해에 의한 생산이 활용된다.

<그림 4> 수소 생산 (2020-2022년)



* CCU = carbon capture, utilisation and storage

* 출처 : IEA, 2023

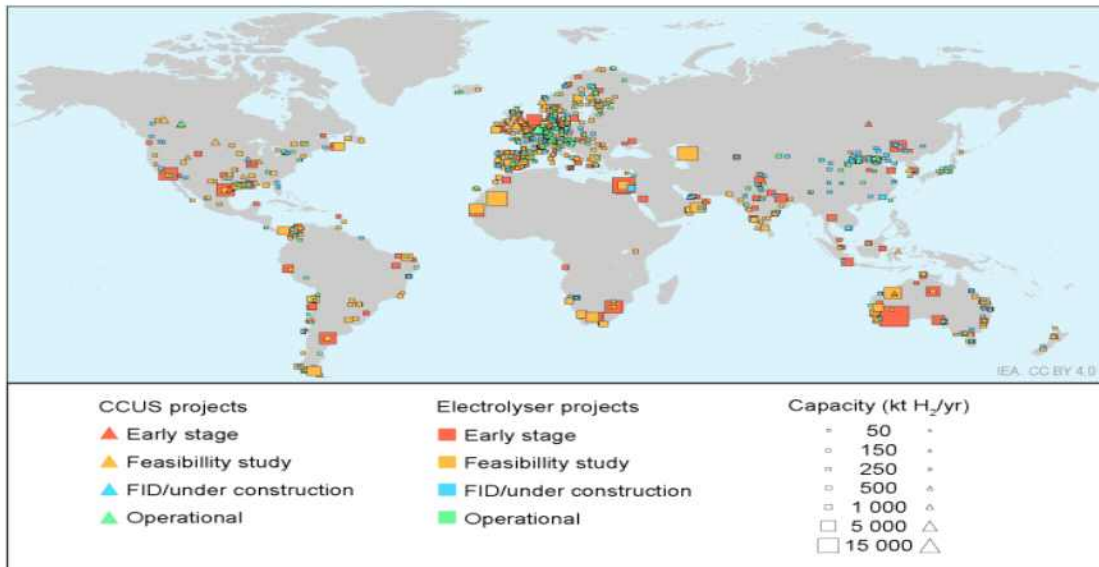
물 전기분해의 경우, 사용된 전기의 CO₂의 집약도에 의해 생산된 CO₂ 발자국이 결정된다. 재생 가능한 전기를 사용하는 물 전기 분해를 통해 수소를 생산하는 방식은 CO₂ 배출이 없지만, 가장 비용이 많이 든다. 반면, 천연가스 증기 개질(SMR)은 가장 널리 사용되고 가장 저렴한 생산 방법이며 CCS가 없이도 기존 연료에 비해 약 30%의 CO₂ 감소가 가능하다. 석탄 가스화의 경우, 자원의 가용성 및 경제성 측면에서 이점이 있을 수 있으나, CCS와 결합되지 않는 경우, CO₂ 저감 상의 이점은 크지 않다.

다만, 시장에서의 수소 생산 기술 개발은 자원의 가용성, 정책 지원 및 CO₂ 배출에 대한 정부 규제에 크게 영향을 받는다. 화석 연료에

기반한 수소생산은 그린 수소 생산에 대한 충분한 경제성 확보를 위한 기술과 인프라가 개발되는 동안은 가장 저렴한 대안일 뿐만 아니라 기존 용량을 사용할 수 있기 때문에 단기적으로 선호될 수 있다. 하지만 에너지 시스템의 CO₂ 배출을 최소화하려는 관점에서, 궁극적으로는 재생가능한 에너지를 통한 수소, 즉 그린 수소의 생산을 최종적인 목표로 한다. 따라서 정부가 장기적으로 그린 수소로의 전환을 추진하기 위해서는 적절한 규제와 인센티브를 제공하는 것이 필수적이다.

IEA의 전망에 따르면, 저배출 수소 생산은 2030년까지 크게 증가하여, 2030년에 저배출 수소의 연간 생산량은 38Mt에 달할 것으로 전망된다. 이 중 27Mt는 전기 분해 및 저배출 전기를 기반으로 하는 반면, 10Mt는 탄소 포집, 활용 및 저장(CCUS)와 결합한 화석 연료를 기반으로 생산될 것으로 예상된다¹⁸⁾. 하지만 이들 생산 프로젝트들은 비용 증가에 따라 지연될 우려가 있다. 특히, 인플레이션은 자본 및 금융 비용을 증가시켜 자본 집약적인 수소 가치사슬 전반에 걸쳐 프로젝트의 자원 조달 가능성에 위협이 되고 있다.

<그림 5> 저배출 수소 생산 프로젝트 분포



* 출처 : IEA, 2023

18) IEA, 2023

북미와 유럽은 저배출 수소 생산을 실현하는데 선도적인 역할을 하고 있다. 미국 수소 생산 세액 공제(US Hydrogen Production Tax Credit), 유럽 공통 이익의 EU 중요 프로젝트(EU Important Projects of Common European Interest) 및 영국 저탄소 수소 비즈니스 모델(UK Low Carbon Hydrogen Business Model)과 같은 프로젝트는 그린 수소 생산에 대한 정부의 강력한 지원을 예고하고 있다.

다만, 이러한 프로젝트가 효과적으로 실현되기 위해서 정부 차원의 신속한 의사결정 프로세스의 진행, 관련 규제의 명확성 제고 등을 통해 프로젝트 실행에 대한 불확실성을 조기에 해소하는 것이 필요하다.

(3) 수소 사용

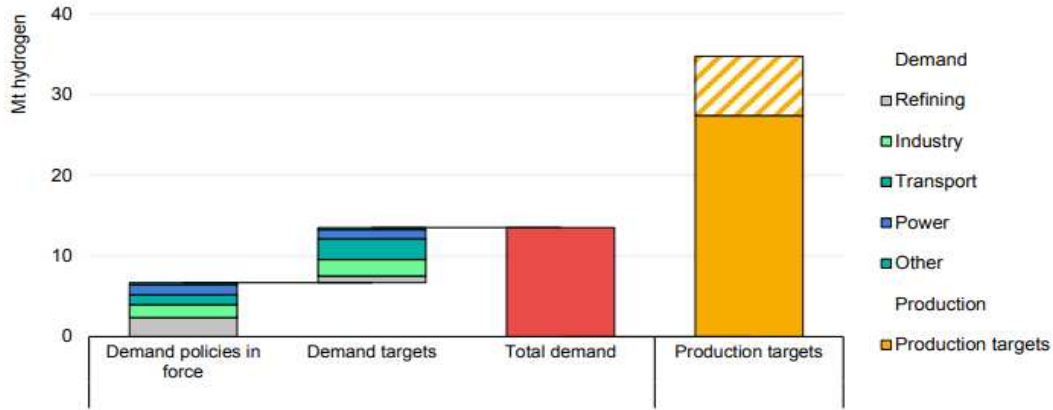
전 세계 수소 사용량은 증가 추세를 보이고 있다. IEA에 따르면, 2022년 전 세계 수소 사용량은 95Mt로 전년 대비 약 3% 증가했다. 이러한 수소사용은 산업 및 정유 부문에 집중되어 있는 반면, 중공업, 운송 또는 발전 등의 새로운 응용 분야에서의 수소 사용은 0.1% 미만이다. 더구나, 저배출 수요는 총 수요의 0.7%에 불과하다¹⁹⁾. 이는 아직도 수소 생산 및 사용이 상당량의 CO₂ 배출과 관련이 있음을 시사한다.

이런 상황에서 각국 정부의 수소정책에서는 새로운 응용분야에서의 수소 도입을 적극적으로 지원하는 조치들을 예정하고 있으나, IEA의 조사에 따르면, 수소 수요 창출에 대한 모든 정부의 목표의 총합은 14Mt으로, 이는 2030년까지 2050년까지 순배출 제로 시나리오²⁰⁾ 실현을 위해 요구되는 저배출 수소 사용량의 5분의 1에 불과하다.

19) IEA,2023

20) 2050년까지 순배출 제로 시나리오(NZE 시나리오)는 지구 평균 기온을 산업화 이전 수준보다 1.5°C 높은 수준으로 안정화하기 위한 경로를 제시하는 규범적 시나리오이다. 특히, IEA의 NZE 시나리오에 따르면, 에너지 부문 외부의 배출량 감축에 의존하지 않고 2050년까지 글로벌 에너지 부문 CO₂ 배출량 제로를 달성한다.

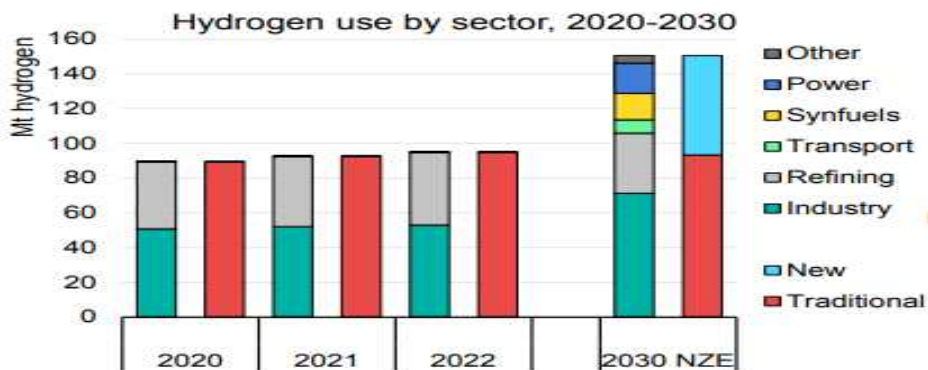
<그림 6> 2030년까지 발표된 전 세계 정부의 생산 목표와 잠재 수요



* 출처 : IEA, 2023

따라서 정부는 기존 산업에서의 수소 사용을 확대함으로써 생산공정이 CO₂ 배출을 저감하는 방식으로 전환하도록 촉진하고, 기존 분야 외에도 새로운 분야에서의 수소 사용이 확산될 수 있도록 하는 정책과 프로그램을 개발할 필요가 있다. 정부는 기존 산업 분야에서 저배출 수소 사용을 강제하는 규제 조치를 채택할 수 있다. 반면, 수소 사용을 위한 새로운 응용분야를 개발하기 위해서는 기술 개발 및 실증, 인프라 구축에 대한 지원뿐만 아니라, 관련 표준의 채택 등과 같은 조치들이 시행될 필요가 있다.

<그림 7> 수소 사용 분야별 비교 (2020-2030목표)



* NZE = 2050년까지 순 배출 제로 시나리오.

* 출처 : IEA, 2023

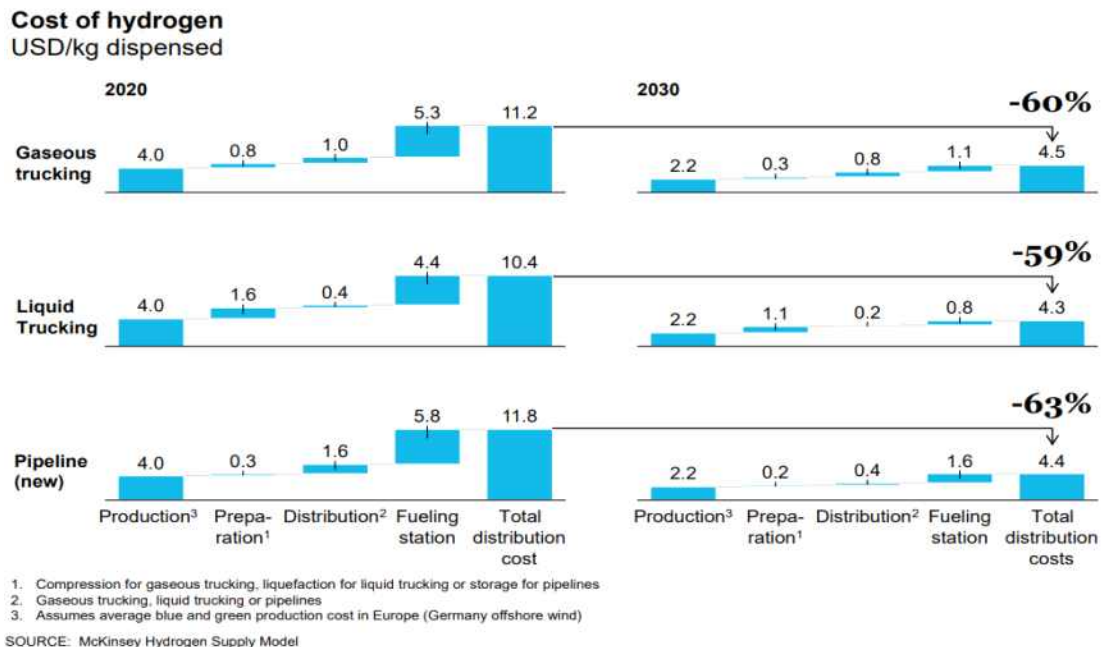
(4) 수소 수송 및 분배

수소는 체적 에너지 밀도가 상대적으로 낮고 액화 온도가 낮기 때문에 수소를 액화 또는 압축하거나 수소를 암모니아 또는 액체 유기 수소 운반체(LOHC)와 같은 운반체로 변환하는 것이 필요하다.

수소의 수송 및 분배 방식은, 거리에 따른 경제성, 안전성에 따라 좌우된다. 특히, 라스트 마일이 분배 측면에서의 비용의 50% 이상을 좌우하는 것으로 나타난다²¹⁾.

일반적으로 국내 수소 분배에는 압축 수소 트럭 운송, 액화 수소 트럭 운송, 파이프라인의 세 가지 대안이 검토된다. 단거리의 경우 압축 기체 수소가 가장 저렴한 반면, 300-400km 이상의 거리에서는 액화수소 트럭 운송 방식이 가장 경제적이다²²⁾. 이러한 이유에서 미국은 국내 수소 운송으로 액화 수소 트레일러 운송 방식을 가장 선호하고 있다.

<그림 8> 수송용 수소 비용의 진화



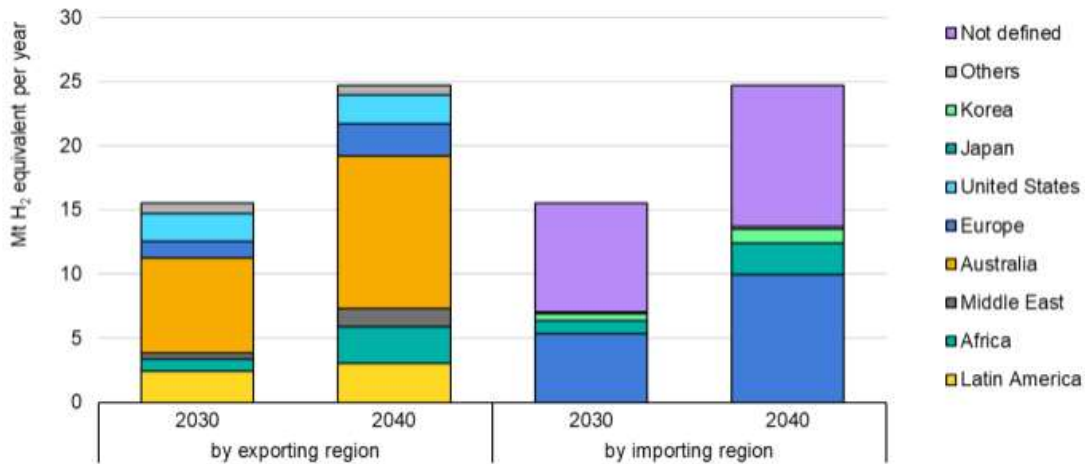
21) Hydrogen Council, 2020

22) Hydrogen Council, 2020

파이프라인은 장거리 운송에서 선호되는데, 기존의 천연가스 파이프라인을 활용 할 수 있다는 점도 중요한 이점이다. 오늘날 전 세계적으로 약 16,000km의 수소 파이프라인이 정유 공장과 화학 공장에 수소를 공급하고 있으며, 이미 벨기에, 프랑스, 네덜란드, 독일의 루르 지역 또는 미국의 걸프 연안에는 조밀한 파이프라인 네트워크가 존재한다²³⁾.

특히, 수소의 운송 분야는 수소의 국제무역이 확대될 것이라는 전망에 따라 더욱 중요하게 부상하고 있다. IEA에 따르면, 각국이 발표한 수소 수출 프로젝트는 저배출 수소 생산량의 40%에 해당하며, 이는 수출 시장이 수소 생산 프로젝트 개발과 실현에 강력한 동기로 작용하고 있음을 시사한다²⁴⁾.

<그림 9> 저배출 수소 무역 규모 전망(IEA, 2030-2040)



* 출처 : IEA, 2023

글로벌 공급망은 장거리 파이프라인 또는 해상운송에 의존할 가능성이 크다. 파이프라인은 앞서 언급한 바와 같이 기존의 천연가스 수송라인을 활용할 수 있으므로, 러시아나 노르웨이의 천연가스에서 추출한 저탄소 수소를 중부 유럽으로 운송하는 경우 중요한 수송방식으로 고려되고 있다²⁵⁾.

23) Ball & Weeda, 2015

24) IEA, 2023

현재까지 해상운송은 액체 수소(LH₂), 암모니아(NH₃) 및 액체 유기 수소 운반체(LOHC; Liquid Organic Hydrogen Carrier) 방식이 개발되어 있다. 액체 수소의 경우, LNG 운송에 사용되는 기술과 유사하다는 점을 감안할 때, 빠르게 기술 개선과 선박 운송용량 확대가 전망된다. 또한 액체 수소로 운송 시에는 도착지에서 수소로의 추가 전환이 필요하기 않기 때문에 가치사슬 다음 단계에 이점을 제공할 수 있다.

반면, 암모니아를 수소 운반체로 사용하는 방식은 이들 중 가장 잘 확립된 기술로서, 기존 인프라를 활용할 수 있다는 장점이 있다. 다만, 도착지 항구에서 수소로의 추가 재변환 작업이 요구된다. 따라서 이 방식의 수송방식의 경제성은 항구에서의 재전환 단계에서의 추가 비용 발생 정도에 따라 좌우될 수 있다.

메틸시클로헥산(Methyl Cyclohexane, MCH)과 같은 다양한 화합물을 기반으로 하는 LOHC 운송은 기존 운송 인프라를 활용하고 수소를 액체로 운송 및 저장할 수 있다는 이점이 있으나, 암모니아와 마찬가지로 탈수소화 단계에는 규모 수준의 개발과 수입 대상에서 상당한 에너지 투입이 필요하다는 점이 기술적인 과제로 남아있다. 또한, LOHC 기술은 여러 가지로 구성되어 있어 규모의 경제를 확립하기 위해서는 글로벌 표준화가 선행될 필요가 있다²⁶⁾.

결국, 어떤 해운 기술이 가장 저렴한 옵션이 될 것인지는 최종 용도, 필요한 육상 운송, 규모 확장 및 기술 개발에 따라 다르다. 수소가 최종 용도라면 LH₂는 2030년까지 가치 사슬 전반에 걸쳐 성숙에 가장 가깝고 가장 저렴한 대안이 될 것으로 보이지만, 상당한 규모 확장이 비용 절감을 위한 중요한 전제 조건이 될 것이다²⁷⁾.

25) Hydrogen Council, 2020

26) Hydrogen Council, 2020

27) Hydrogen Council, 2020

(5) 해양분야의 수소경제

해양그린수소 생산

해양부문의 수소경제로의 전환은 해양재생에너지를 활용한 그린수소 생산에서 가장 두드러진다. 해양그린수소는 해양에너지원에서 생산된 전기를 바탕으로 담수화된 수소를 분해해 생산한 수소를 말한다. 특히, 그린 수소와 해양 에너지의 통합은 해양, 해양 및 육상 산업의 청정 에너지로의 전환을 촉진하는 동시에 에너지 시스템의 지속 가능성을 향상시킬 수 있는 잠재력을 가진 것으로 평가된다²⁸⁾.

해양 신재생에너지는 해상풍력, 해양 열에너지 변환, 파력, 조력 에너지 등을 포함하며, 각 에너지원의 잠재 발전량과 경제성은 지역별 환경 여건과 관련 기술의 성숙도에 따라 결정된다²⁹⁾.

해양 신재생에너지는 태양광, 태양광, 풍력 등 육상 기반의 신재생 에너지원에 비해 아직 기술 성숙도가 낮을 뿐만 아니라, 인프라 건설의 어려운 입지 여건과 높은 비용과 같은 과제를 극복해야 한다. 하지만, 발전 잠재력이 높은 신재생 에너지원의 확보, 육상 기반의 신재생에너지원의 입지·물리적 한계, 해양산업과 수소에너지 간 시너지 가능성 등을 고려할 때, 해양 그린수소 생산 확대에 주목할 필요가 있다.

현재까지는 해상풍력을 기반으로 한 수소생산 프로젝트들이 유럽 국가들을 중심으로 진행되고 있다. 예를 들면, 노르웨이에서는 해상풍력을 이용하여 수소 생산과 저장, 연료전지를 활용하여 전기와 수소를 생산하는 시스템을 개발하기 위한 프로젝트인 Deep Purple Pilot 프로젝트가 진행 중이며, 덴마크는 북해 상의 인공섬 건설하고 이를 여러개의 해상풍력발전 단지과 연결하여 그린수소를 생산하기 위한 시스템으로 개발하려는 계획을 밝혔다³⁰⁾.

28) Kumar et al., 2023

29) Pelc & Fujita, 2002

30) Lee et al., 2022

해양블루수소 생산

기존 해상 천연가스전을 활용하는 해양 블루수소 역시 현재의 수소 수요를 충족시키기 위한 현실적인 대안으로 주목받고 있다. 블루수소는 천연가스 단독 대비 최대 80%까지 온실가스 배출을 줄일 수 있을 것으로 예상되는데, 이 효과는 블루수소 생산 과정에서 발생하는 이산화탄소 포집률에 따라 달라진다³¹⁾. 해양의 탄소 저장은 육상에 비해 저장 용량 측면에서 이점을 가질 뿐만 아니라, 심해 환경을 활용한 안정적인 저장이 가능하며, 그 입지가 인구 밀집 지역에서 벗어나 있어 사회적 위험이 낮다는 점에서 장점이 있다³²⁾.

수소의 국제 해상운송

글로벌 수소 공급망에서 해상운송 및 항만의 중요성도 간과할 수 없다. 글로벌 수소 공급과 수요의 불균형으로 인해 국제 수소 무역의 가능성이 높아지고 있으며, 국제 수소무역의 가장 중요한 수송경로로 암모니아 수송선이 대안으로 부상하고 있다. 항만은 글로벌 공급원과 현지 생산 및 소비 시장을 연결하는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

다만, 수소의 국제무역에 대비한 수소항만의 구축은 초기 단계에 있는 것으로 보인다. 암모니아 또는 액체 유기 수소 운반체(LOHC)와 같은 운반체를 활용한 해상운송이 활성화되는 경우, 항만은 이러한 선박들의 안전하고 효율적인 접안과 선·하역 서비스를 제공할 수 있어야 한다.

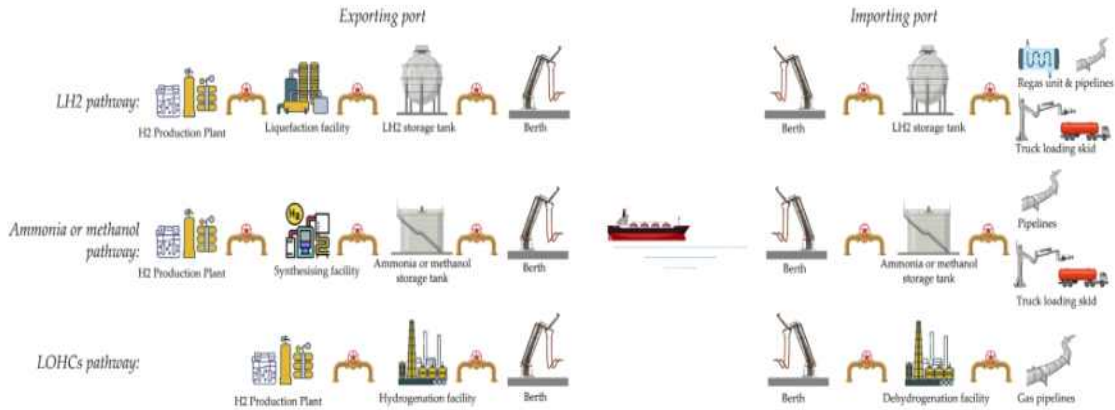
또한 수출입 항만에서의 수소화 및 탈수소화 작업을 위한 대규모 인프라가 요구되므로 국제 수소 공급망에서 항만의 잠재적 경쟁력은 국가의 수소 생산 또는 수요 규모뿐만 아니라 항구에 수소 인프라를 구축하기 위한 국가 전략이 좌우할 수 있다. 이러한 국가 전략에는 인프라 건설 또는 개조, 위험 관리 조치, 규정 및 표준 수립, 교육 및 훈련 등을

31) Pettersen et al., 2022

32) Luo et al., 2023

포괄하는 것이 요구된다³³⁾.

<그림 10> 수소항만인프라 구조도



* 출처 : Chen et al., 2023

해양산업에서의 수소활용

다양한 해양산업에 수소에너지를 활용하는 방안도 활발히 연구되고 있다. 예를 들어, 원해 양식과 해양 재생에너지를 기반으로 한 전기 분해 수소생산 플랜트 및 연료전지 기술을 결합한다면, 이는 양식장에 안정적인 청정 전력 공급을 위한 솔루션일 뿐만 아니라, 양어장에 필수적인 산소 공급 수단으로서도 활용이 가능한 점에서 유망하게 검토된다³⁴⁾.

해운 부문에서도 새로운 해양 연료 대안으로 수소나 수소 연료전지를 적극적으로 고려하고 있다. IMO에 따르면 2012년 선박으로 인한 온실가스 배출량은 전 세계 인위적 온실가스 배출량의 약 2.2%를 차지했으며, 이 배출량은 2050년까지 최대 250% 증가할 것으로 추정된다³⁵⁾. 일부 전문가들은 해상운송에서의 CO₂ 배출량이 2050년까지 총 CO₂ 배

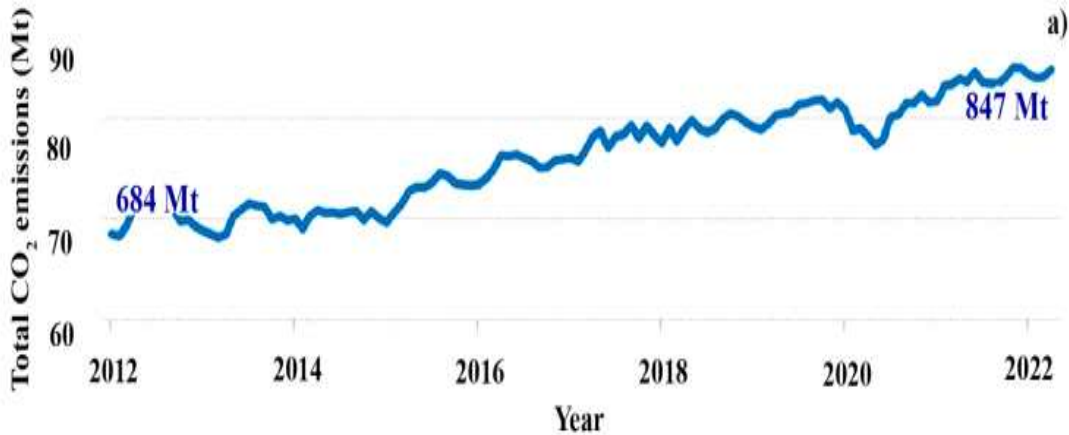
33) Chen et al., 2023

34) Kumar et al., 2023

35) IMO, 2015

출량의 18%를 차지할 것으로 예상하기도 한다.

<그림 11> 전 세계 해양 선단의 총 CO₂ 배출량(2012-2022)



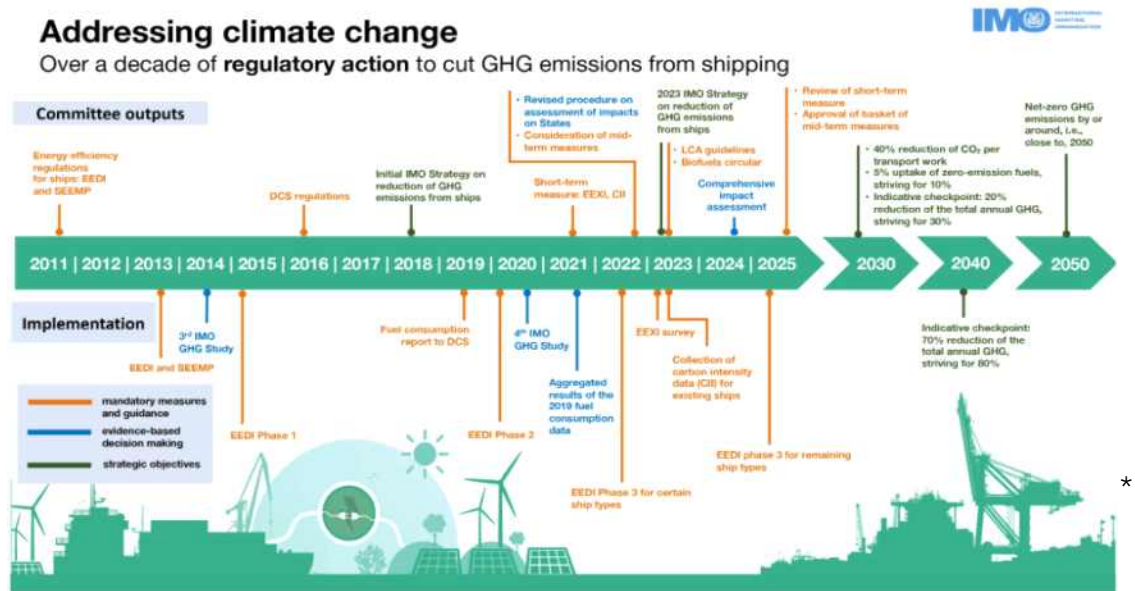
* 출처 : Hoang et al., 2023

뿐만 아니라, 현재 전 세계 NO_x 배출량의 최대 15%가 외항 선박에서 발생하며, 효과적인 통제 및 예방 조치가 채택되지 않을 경우 더욱 급증할 것으로 예상된다.

이와 관련하여, IMO는 2030년까지 국제해운에서 발생하는 탄소배출량을 최소 40% 감축하는 것을 목표로 선박 연료 기준, 해운에서의 온실가스 배출 가격의 책정 메커니즘 등 온실가스 중장기 감축 방안을 마련하고 있다³⁶⁾

36) IMO, 2023

<그림 12> 선박 GHG 배출 감소에 관한 IMO 주요 규제



출처: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx>

다만, 이렇게 엄격해진 에너지 효율과 배출가스 기준을 충족하기 위한 대안으로 수소의 적용이 거론되고 있지만, 아직 필요한 기술 개발은 초기 단계에 불과하다. 해운에서 수소 기술의 상용화를 위해서는 수소 연료 생산, 연료전지 개발, 수소 동력 해양 선박을 포함하는 전체 가치사슬에 대한 포괄적인 노력이 요구되며, 여기에는 선박 소유자의 적극적인 투자, 항만 운영자의 적절한 항만 인프라 구축 노력, 선박 엔진 관련 산업계와 연구계의 기술 개발 분야 협력, 국내 및 국제 규제 기관의 일관된 정책이 전제되어야 한다³⁷⁾.

항만산업에서도 수소를 적극적으로 도입할 수 있다. 수소는 항만을 통해 순환하는 상품일 뿐만 아니라 항만과 이에 인접한 산업인프라의 탈탄소화 기회를 제공한다. 항만 내의 차량, 서비스 선박, 항만 기계 및 해안 전력 시설의 에너지를 수소로 전환하는 시도가 진행 중이다. 중국 칭다오항, 일본 요코하마항, 미국 로스앤젤레스항 등 일부 항구가 그 예이다. 이러한 수소항만은 연안에 입지한 여러 산업들의 수소 공급의 전진 기지로서 활용될 수 있다.

37) Hoang et al., 2023

(6) 정부의 수소정책 동향

탈탄소화 및 대체 에너지원 사용에 대한 정부의 정책은 일반적으로 기술의 성숙도가 낮고 수익이 불확실한 대규모 투자에 의존하는 초기 프로젝트가 요구될 때 더욱 커진다³⁸⁾. 정부 정책과 프로그램은 새로운 에너지원 도입과 관련한 기술개발과 인프라 투자에 있어서 거시경제 문제에 대한 부정적인 영향을 완화함으로써, 새로운 에너지원에 대한 경제적·재정적 이점을 부각할 수 있다. 다시 말해, 규제와 경제·금융 지원과 같은 정부의 정책들은 수소경제 발전에 있어서의 지속 가능한 경로에 대한 예측 가능성을 높인다.

국가 차원의 수소전략의 수립

이러한 맥락에서 온실가스 순 제로 배출 전략을 채택한 75개국에서는 수소를 중요한 요소로 도입하고 있으며, 2021년 초까지 30개 이상의 국가가 국가 차원에서 수소 로드맵이나 전략을 수립했다³⁹⁾.

<그림 13> 국가 차원의 수소정책 발표 동향



* 출처 : Cader et al., 2021

38) Cader et al., 2021

39) Cader et al., 2021

장기 정책 비전과 목표 제시 및 단계별 접근

각 전략은 각국의 수소경제의 비전과 이를 실현하기 위한 종합적인 목표를 제안한다. 일반적으로 각국이 수립한 수소전략은 일반적으로 수소의 가치사슬 각각에 대한 비전과 목표를 제시한다. 특히, 이러한 국가 전략들은 국가 에너지 시스템에서 수소가 운송 및 산업 부문의 탈탄소화에 중요한 역할을 할 것이라는 인식을 공유한다.

대부분의 국가는 장기 목표를 확정하기 위한 단기, 중기 목표를 채택하는 단계적 접근방식을 채택하고 있다. 단계를 정의하는 것을 다양하지만, 일반적으로는 확장 및 시장기반 마련 시기(2020 초반) - 광범위한 채택 및 시장 성숙(2020년대 후반-2030년대 초반) - 완전한 수소경제의 구현(2030년대 이후)로 상정하고 있는 것으로 보인다⁴⁰⁾.

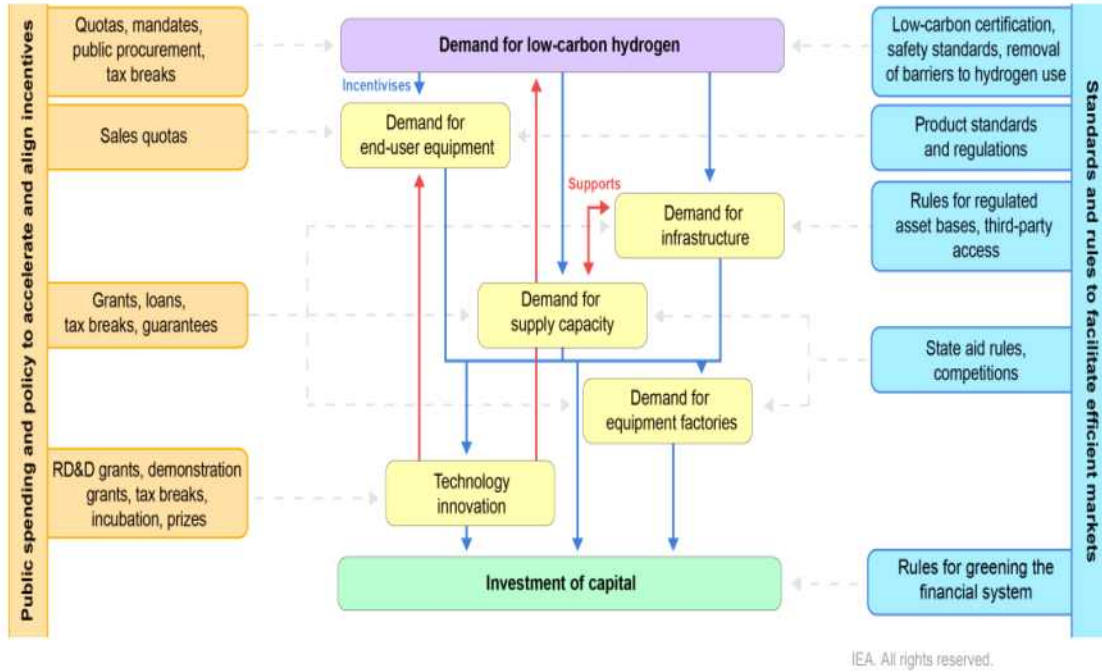
수소정책의 대상으로서의 “수소”를 어떻게 정의할 것인가는 각국이 선호하는 수소 생산방식에 의해 달라질 수 있다. 전기를 통한 수소 생산은 모든 전략에 공통적으로 장기적인 목표로 제시되고 있다. 다만, 단기적으로 수소 생산에 사용되는 전력의 출처에 대해서는 각국은 상이한 입장을 보여준다. 상당수의 정부가 CCUS를 통해 화석 연료에서 수소를 생산하는 것을 단기·중기적 대안으로 명시하고 있다.

IEA는 현재까지 대부분의 정부 목표와 정책이 수소 공급 확대에만 집중되어 있다는 점은 비효율적인 정책 지원을 초래할 수 있다는 점을 지적한다⁴¹⁾. 수소 수요의 충분한 확대가 전제되지 않으면, 산업 응용 분야에서 수소 채택은 제한될 수밖에 없으며, 이는 규모의 경제를 통한 비용 절감을 방해함으로써 궁극적으로 저탄소 수소 공급 능력 개발과 수소경제의 실현이 지연될 수밖에 없다.

40) IEA, 2021

41) IEA, 2021

<그림 14> 수소 가치사슬에 대한 정책 및 규제 개입 유형



* 출처 : IEA, 2021

수소 수요 창출

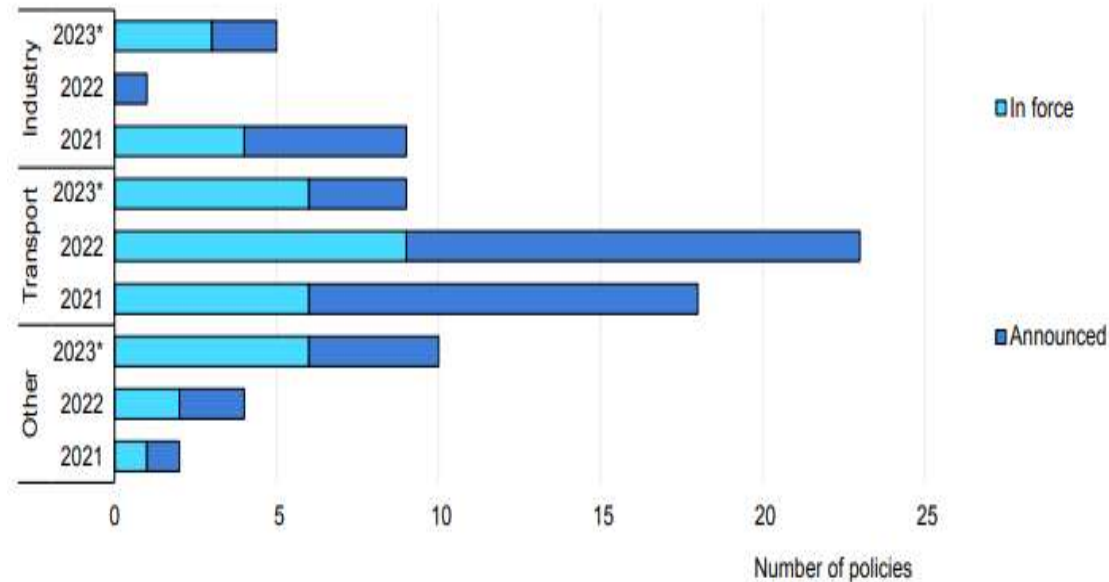
상용화 단계의 수소 기술이 각 산업분야에서 채택되기 위해서는 기존 기술과의 가격 격차를 조기에 줄이기 위한 노력이 필요하므로 수소 수요 창출을 위한 정부의 정책은 이 부분에 초점을 맞춘다.

대부분의 국가에서 특히, 운송분야에서의 수소 수요 확대를 적극적으로 추진한다. 운송분야에서 운송 분야의 경우, 대부분의 정부가 중대형 운송을 강조하고 있으며, 특히, 일본과 한국에서 수소차에 대한 관심이 두드러진다. 국가에 따라서 해운, 항공, 철도 운송 등 타 운송 분야에서 수소 사용을 중요하게 고려하기도 한다.

반면, 국가 단위의 수소 전략에 반영되는 산업은 국가 주요 산업에 초점을 맞추는데, 이러한 결과는 국가의 산업경제 발전의 전략적 선

택의 결과이다. 기술과 시장의 성숙도, 경제성, 잠재적 성장가능성, 국가 경제 또는 CO2 배출의 비중 등이 중요한 고려요소인 것으로 보인다.

<그림 15> 수소 수요 창출 지원 정책 발표 및 시행 부문별 수(2021-2023)



* 출처 : IEA, 2023

수소 수요 창출을 위한 정책수단은 최종 사용자에게 대한 재정적 인센티브 제공과 규제가 함께 고려된다. 구매 보조금, 세금 감면 등과 같은 재정적 인센티브는 특히 운송분야를 중심으로 광범위하게 채택되고 있다. 이러한 재정적 인센티브는 사용자의 수소 기술 사용에 대한 총비용을 절감시킴으로써 기존 기술에서 수소기술로의 전환을 유도한다. 반면, 규제는 수소 또는 친환경 연료 사용에 대한 할당량을 부과하거나 사용 연료 또는 배출가스에 대한 강화된 기준을 채택함으로써 새로운 기술의 채택을 유도한다.

자본 및 운영 비용과 관련된 위험 완화

대부분의 국가에서 수소 관련 프로젝트 개발자의 위험을 완화하기 위한 조치를 시행하거나 시행을 예정하고 있다.

네덜란드는 수소를 지속 가능한 에너지 생산 및 기후 전환 인센티브(SDE++)⁴²⁾에 포함시키고, CO2 배출 허용량에 대한 현재 요율과 CO2를 지하에 포집, 운송 및 저장하는 데 관련된 비용 간의 격차를 해소하기 위한 Porthos 프로젝트에 21억 유로를 지원할 계획이다⁴³⁾.

유럽위원회도 100MW 규모의 전기분해 플랜트 건설 프로젝트를 진행하고 있으며, 유럽연합 공동이익 중요 프로젝트(IPCEI) 계획에 수소를 포함함으로써 국가의 경계를 넘는 지원이 가능하도록 했다. 뿐만 아니라, 캐나다는 청장 연료 생산시설에 대한 초기 자본 비용 장벽을 극복할 수 있도록 지원하는 새로운 청정 연료 기금을 발표하고 최소 10개 이상의 수소 프로젝트를 지원할 계획이다⁴⁴⁾.

정부의 직접적 지원 외에도 공공금융기관에 의한 조치들도 시행되고 있다. 예를 들면, 호주정부는 청정에너지금융공사(Clean Energy Finance Corporation)를 통해 수소발전기금(Advancing Hydrogen Fund)을 통해 생산 및 최종 용도를 확대하기 위한 수소 프로젝트에 3억 호주달러를 지원할 것을 밝혔다.

이외에도 수소기반 제품에 대한 정부의 구매 계약, 탄소 차액 계약(Carbon Contracts for Difference; CCfD)과 같은 수단들도 고려되고 있다. 독일은 이를 도입하였으며, 네덜란드와 폴란드, 유럽연합 집행위원회를 포함한 다른 정부들도 이러한 유형의 정책 수단을 도입할 것이라고 발표하였다⁴⁵⁾.

42) 지속 가능한 에너지 생산 및 기후 전환 인센티브 제도(SDE++)는 재생 에너지를 생산하거나 대규모로 CO2 배출을 줄이는 기업 및 비영리 단체에 대해 보조금을 지급한다.

43) IEA, 2022

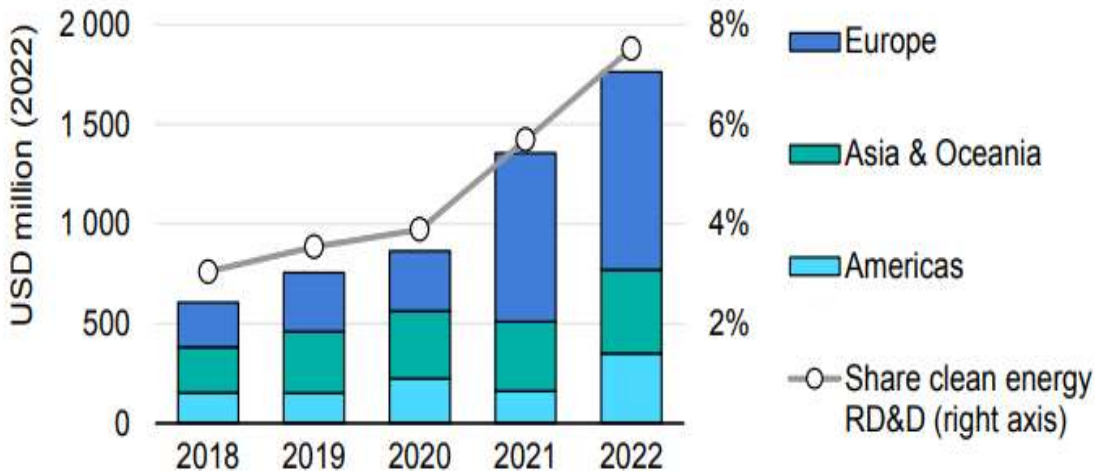
44) IEA, 2021

45) IEA, 2022

기술혁신 지원 및 민-관, 국제 파트너십 구축

상당수의 정부가 수소 가치 사슬 전반에 걸친 기술 R&D를 지원하고 있다. IEA에 따르면, 세계 정부의 청정에너지 RD&D 예산에서 수소 기술 개발에 할당된 비중은 2022년에 7.5%에 이르는 수준으로 증가했다⁴⁶⁾. 특히, 최근의 수소 기술에 대한 R&D 증가는 상당 부분 미국이 주도하고 있다.

<그림 16> 지역별 수소 기술에 대한 정부 RD&D 지출(2018-2022)



*출처 : IEA, 2023

다만, IEA는 자금의 제약, 기술 및 시장성속도의 차이 등에 따라 가치사슬의 일부로 공공R&D가 집중되고 있어, 가치사슬의 병목현상을 피하기 위한 통합적 정책 고려가 요구된다고 지적하고 있다⁴⁷⁾.

한편, 정부와 업계의 협력은 강력한 혁신 프로그램의 구현을 보장하는 데 매우 중요하다. EU는 유럽연합 집행위원회와 연료전지 및 수소 산업계, 및 연구 커뮤니티를 포괄하는 ‘청정수소 파트너십(The Clean Hydrogen Partnership)’을 구축하고 이를 통해 R&D 및 기술 시연을 지원한다⁴⁸⁾.

46) IEA, 2023

47) IEA, 2021

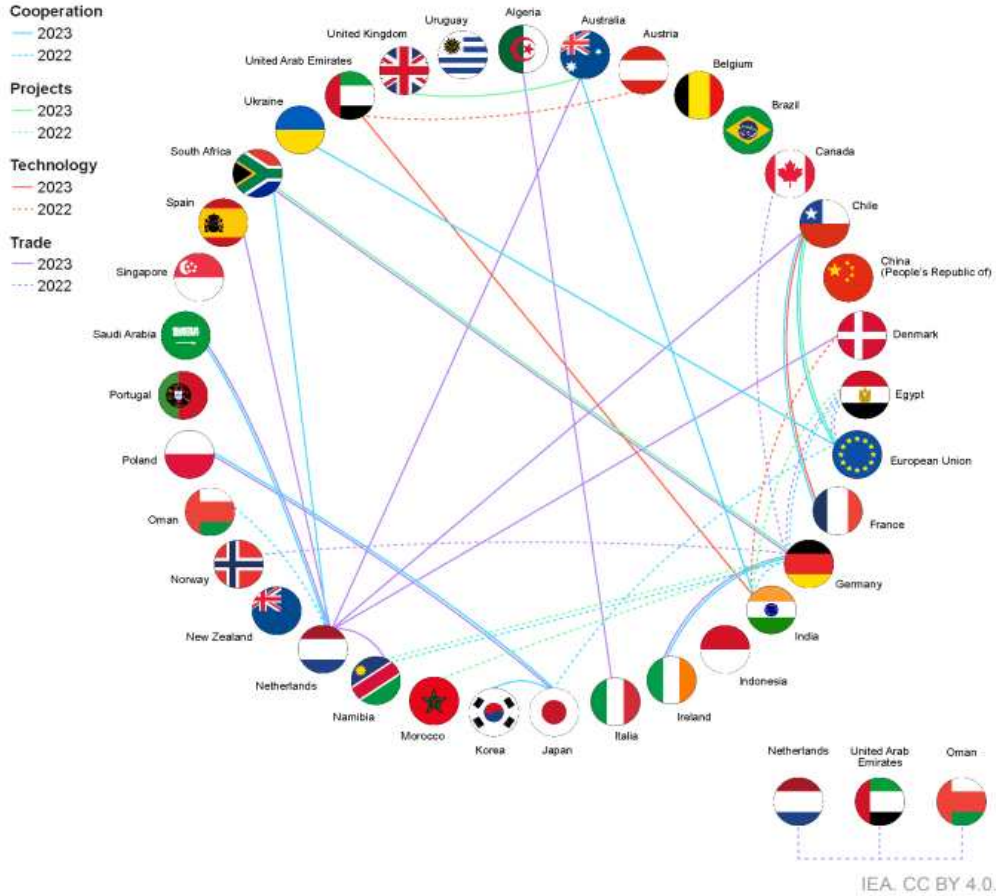
또한 미국 에너지부(DOE)는 2030년까지 청정 수소 비용을 80%(1.00달러/kg H₂)까지 절감하는 것을 목표로 이해 관계자를 모아 수소 전용 First Energy Earthshot을 출범시켰다⁴⁹⁾.

다자간 이니셔티브 및 프로젝트는 지식 공유와 모범 사례 개발을 촉진할 수 있다. 최근 몇 년 동안 정부 간에 체결된 여러 양자 협정 외에도 정부와 민간 부문 간에 국제 협력 협정이 체결되고 있으며, 이들 모두는 비용 절감을 위해 지식, 모범 사례 및 기술 개발을 공유하기 위해 협력하는 단기 및 중기 목표를 가지고 있다. 또한 수소 및 수소 유래 연료의 무역 발전을 보장하기 위해 미래 국제 수소 공급망의 기반을 마련한다는 장기적인 목표를 공유한다.

48) https://www.clean-hydrogen.europa.eu/about-us/who-we-are_en

49) IEA, 2021

<그림 17> 수소에 대한 정부 간 협력 협정



* 출처 : IEA, 2023

적절한 인증, 표준화 및 규제 체제 수립

수소 관련 규제에 대한 논의는 수소의 생산과 사용을 제한하는 기존 규제에 대한 정비 또는 완화, 그리고 수소의 생산, 사용 및 국제무역을 위한 법적 프레임워크를 구축하는 두 가지 측면에서 논의된다.

CO₂ 배출이 많은 산업분야에서의 탄소 배출에 대한 기준을 수립하거나 친환경 연료에 대한 채택에 대한 의무 할당량을 부과하는 것과

같은 규제들은 직접적으로 기업들이 수소를 채택하도록 독려한다. 예를 들면, 영국은 2021년 지속 가능한 항공 연료 의무화(Sustainable Aviation Fuel Mandate; SAF)에 대한 협의에 착수했는데, 이 법안은 수소 유래 연료에 대한 2차 목표를 포함하여 2025년부터 제트 연료 공급업체가 항공 연료에 지속가능 연료를 혼합하는 비율을 의무화한다⁵⁰⁾. 이러한 조치들은 주로 재정적 인센티브와 결합된다.

이러한 점은 현재의 각 정부의 규제의 목표가 수소 시장을 조성하고 관련 인프라 등에 대한 투자를 촉진하는데 초점을 맞추고 있는 점을 반영한다. 향후 수소 가치사슬 전반에 대한 규제의 필요성이 확대되겠지만, 현재까지는 수소 저장 및 사용 분야에서의 안전, 수소 인프라의 입지 규제 등과 같은 분야에 대한 검토가 본격적으로 이루어지고 있지는 않다.

기술 채택에 대한 표준과 인증의 도입은, 수소에 대한 정부 지원 대상에 대한 명확한 기준을 제시함으로써 수소 기술의 확산을 촉진할 수 있다. 한편, 수소 사용 확대에 따른 안전과 관련한 규제의 도입에 대한 관심도 높아지고 있다. 안전한 수소 사용을 보장하는 것은 대중의 신뢰를 확보하고 수용성을 높이기 위해 필수적이다. 다만, 수소 시장 개발의 초기 단계를 감안할 때 엄격한 규제는 규제 실패 또는 규제 단절의 위험이 있으므로 주기적인 시장 모니터링에 따른 점진적인 규제 접근방식이 요구된다.

뿐만 아니라, 저탄소 수소에 대한 국제 무역을 위해서도 여러 분야의 표준 개발이 요구된다. 특히, 수소 생산의 탄소 발자국을 계산하는 방법론에 대한 국제적 합의는 글로벌 인증서 시장이 발전할 수 있는 기반이기 때문에 중요성이 크다⁵¹⁾. 이와 관련하여, IPHE(International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy)는 수소의 생산, 전환 및 운송과 관련된 온실가스 배출량을 결정하기 위한 글로벌 방법론을 확정하였으며, 이는 향후 국제 표준화 기구(ISO)의 국제 표

50) IEA, 2022

51) IEA, 2021

준 개발에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. ISO는 2023년 말까지 기술 사양을 발표하고 2024년 말까지 국제표준 초안을 발표할 예정이다⁵²⁾.

(7) 해양정책의 복잡성

수소경제 정책의 수립에 있어서 해양분야를 별도로 검토하는 것은 특히, 한국의 정부조직의 특수성을 고려한다는 점에서 의의가 있다. 한국의 경우, 연안 및 해양 통합관리의 필요성이 대두되면서, 해양 행정 기능을 통합한 단일 행정기구인 해양수산부를 설립하였다. 정부조직법에 따르면, 해양수산부는 수산, 해운, 항만, 해양환경보전, 해양연구, 해양자원개발, 해양과학기술연구개발(R&D) 및 해양안전의 기능을 담당하고 있으며, 해양경찰청을 산하에 두고 있다⁵³⁾.

그러나 '해양'이라는 말에도 불구하고 해양정책은 기능적으로뿐만 아니라 공간적으로, 즉 육지와 바다를 넘나들며 포괄적이고 통합되어야 한다는 점에서 해양정책의 복잡성을 함께 고려해야 한다⁵⁴⁾. 이러한 맥락에서 해양분야에서의 수소 융합은 수소경제로의 이행이라는 큰 틀에서 논의되는 한편, 해양 에너지, 해양 공간 등을 포괄하는 해양자원 및 연안 개발과 해양환경 및 생태계의 보전이라는 특수성과 중첩되면서 정책적 맥락의 복잡성을 가중시킨다.

52) IEA, 2023

53) 정부조직법

54) Cho, 2006

2. 문헌검토

(1) 수소경제 프로젝트 및 정책과 관련한 연구 동향

수소경제에 대한 연구는 주로 수소의 생산, 저장, 유통 또는 운송, 활용 측면에 중점을 두고 있으며, 각 분야의 활성화 프로그램과 장벽 제거를 위한 안전규정 제정 등의 정책을 중심으로 이루어져 왔다⁵⁵⁾.

이러한 연구는 국가 및 지역별로도 수행되고 있다. 예를 들면, Milani et al. (2020)은 호주의 자원, 용량 및 잠재력에 초점을 맞춰 가능한 수소 생산 경로에 대한 시나리오를 검토하고 지속 가능한 상업적 생산을 위한 가능한 옵션을 제안하고 있다. Zhizninet al. (2020)은 환경적 이점, 대규모 생산 잠재력 및 비용 효율성 측면에서 원자력 기반의 수소 생산의 장점을 지적하면서 러시아의 핵-수소 에너지 생성 가능성에 대해 논의한다.

아직 수소경제가 성숙 단계에 이르지 못했다는 점을 감안할 때, 수소경제 활성화의 원동력은 정부의 규제 개선과 지원에서 나올 가능성이 높다. 이러한 맥락에서 다양한 분야의 연구에서는 수소경제 전망에 있어 중요한 역할을 담당하는 정부의 역할을 다루고 있다.

Brandon and Kurban (2017)의 연구에서는 대규모 저탄소 수소 생산을 위해서는 정부 목표와 정책 메커니즘이 필수적임을 밝히고 있다. 또한, Falcone et al. (2021)은 그린 수소 시장을 형성하기 위한 정부 노력의 필요성을 강조하면서, 국가 인센티브가 주로 수소 생산 및 운송 분야의 적용을 촉진하는 데 집중하는 반면, 재생 에너지 기반 수소의 산업적 적용에 대한 지원은 제한적이라는 점을 지적한다.

정부의 수소정책에 대한 비교연구도 수행되고 있다. 이러한 연구는 각 국가의 수소경제 로드맵에 설명된 정책 목표, 예측 시나리오, 주요 정책 방향 또는 내용, 정책 구현을 촉진하는 요소를 비교한다. Pingkuo and Xue (2022)가 수행한 연구는 중국, 미국, 독일, 일본 4개

55) Kar et al., 2022

국의 에너지 전환 정책을 제도, 경제, 기술, 인간 행동이라는 네 가지 측면에서 비교하였다. Moura and Soares (2023)는 수소 활성화를 위한 정책 접근 방식과 수소 목표 달성을 위한 공공 자금 조달 이니셔티브의 차이점을 식별하는 것을 목표로 EU, 영국, 미국의 국가 수소 전략에 대한 비교 분석을 수행하였다. 반면, 미국, 중국, 일본, 한국 등 9개국을 대상으로 인구, GDP, CO2 배출량 등 수소경제로의 전환에 영향을 미치는 요인을 다중회귀분석 및 상관분석을 통해 밝히려는 연구도 수행된 바 있다⁵⁶⁾.

반면, 개별 국가의 정책을 검토하고 정책 개선을 제안하기 위한 연구도 진행되고 있는데. 이러한 연구는 정부 정책의 중요성을 강조하고 각국의 수소정책의 효과적인 수립과 이행을 위한 통찰력을 얻기 위해 국제 사례를 참조하는 방식으로 수행된다. Renet et al. (2020)은 호주와 일본의 로드맵과 대조하여 중국의 수소경제 전략을 비교 평가한 결과를 바탕으로 중국의 수소경제 실현과 관련된 장애물을 설명하였다.

한국의 정책을 중심으로 한 연구 사례도 있다. Shin (2022)은 한국의 수소 전략을 수소 생성, 저장, 운송, 활용이라는 수소 가치사슬 측면에서 검토한다. Chu et al. (2022)은 한국의 그린수소경제 구축을 위한 전략적 방법론을 제시하면서, 미국, 일본, 유럽연합의 수소정책 로드맵과 종합적인 비교 분석을 통해 한국의 정책 속성을 조사한다. 또한 Cheon and Kim (2020)은 독일, 영국, EU 등 주요 국가의 수소경제 지원 정책을 검토하여 우리나라 수소경제 활성화를 위한 제안을 도출하였다.

56) Cader et al., 2021

(2) 해양분야 수소경제 프로젝트 및 정책과 관련한 연구동향

해양분야 중에서는 해양 그린수소 생산이 가장 주목받고 있으며, 주로 해양에너지원 중에서도 해상풍력을 활용하는 해양 그린수소 생산 방식의 경제성을 검토하는 연구가 수행되고 있다. Perez-Vigueraset al. (2023)은 그린 수소 생산을 위한 해상 풍력 에너지에 초점을 맞춰 해양 에너지원의 활용 가능성과 잠재력, 관련 기술의 개발 상황에 대한 포괄적인 검토를 제공한다. Gondal (2019)은 수소 생산과 해상 풍력 발전을 통합하는데 있어서의 경제적 타당성을 보장하기 위한 기술적 대안으로 CCS와 메탄화 공정의 결합을 제안하고 있다.

이러한 해양 그린수소 생산에 대한 경제적 타당성에 대한 연구는 특정 프로젝트를 대상으로도 수행되었다. 예를 들어, Loisel et al. (2015)은 프랑스 Pays de la Loire 지역의 해양 시설과 수소 생산-저장 시스템으로 구성된 하이브리드 발전소의 경제성 평가를 수행하였다. 이러한 연구에서는 기술 발전과 인프라 비용을 고려한 해양 그린 수소의 생산 비용과 유가 등 시장 상황 변화의 시나리오를 고려하여 경제성을 평가한다. 반면, Kumar et al. (2023)은 양식업, 해운, 항만 등 해양 산업의 지속 가능한 성장 맥락에서 그린 수소 통합의 장점과 한계를 분석한다.

다만, 해양 그린 수소와 관련된 정책을 구체적으로 다루는 연구 사례는 제한적이다. Lee et al. (2022)에서는 한국의 해양 그린수소 추진전략과 주요국의 해양 그린수소 사업을 검토하여 우리나라에 대한 정책 방향을 제안한다.

(3) 소결

수소와 관련한 연구들은 수소 가치사슬 각각에서의 기술개발 동향에 초점을 맞춘다. 이러한 연구들은 수소 관련 연구들은 특히 수소경제가 아직 성숙 단계에 이르지 못한 상황에서는 정부의 역할이 더욱 중요하며, 이를 위해 정부의 목표와 정책 메커니즘이 필수적이라는 데 공통적인 인식을 가지고 있는 것으로 보인다.

여러 연구 사례들에서, 각국은 탄소 배출 목표, 수소 관련 기술 및 시장의 성숙도, 기타 상황적 요인에 따라 정책에 다양한 중점을 두고 있음을 종합적으로 확인할 수 있다.

각국의 정책은 정책 대상의 범위와 전략의 구체성 측면에서 상당한 차이를 보인다⁵⁷⁾. 따라서 각 국가의 정책에 대한 비교 연구에는 일반적으로 정책 목표, 예측 시나리오, 주요 정책 방향 또는 내용, 정책 실행을 이끄는 요인에 대한 광범위한 비교가 포함된다. 반면, 실행 시스템, 계획의 법적 지위, 계획 실행을 위한 거버넌스 메커니즘에 대한 검토는 상대적으로 부족하다.

해양분야에서는 해상 풍력을 활용한 해양 그린수소 생산과 같은 분야에서의 기술의 경제적 타당성을 검토하는 연구들은 상당히 수행되었으나, 본 연구보고서의 주요 초점인 해양 부문의 정부 정책과 프로그램에 초점을 맞춘 연구는 아직 제한적이며, 이 부분에 대한 보다 깊은 연구와 분석이 필요하다.

57) Capurso et al., 2022

제2장 연구 방법론

본 연구보고서의 목적은 우리나라의 수소경제 전략의 맥락에서 해양분야의 수소 관련 정책을 분석하고, 주요 국가의 사례 비교 검토를 통해 정책제안을 도출하기 위한 것이다. 이 연구는 크게 (1) 해양분야를 중심으로 한 한국의 수소경제 정책 분석, (2) 주요 국가의 정책 비교 및 벤치마크 파악으로 진행된다. 따라서 이 연구보고서는 구성은 다음과 같다.

제3장 한국의 수소경제 정책에 대한 진단

제4장 주요국의 수소정책

제5장 정책 제언

제3장에서는 해양분야를 중심으로 한국 정부의 수소정책을 검토한다. 이를 통해 한국의 수소정책의 한계점과 개선사항을, 특히 해양분야를 중심으로 도출하고자 한다.

이 부문에서는 현재 수립되어 진행 중인 수소정책에 대한 검토는 다음 사항에 중점을 두고 있다.

- (1) 정책의 비전과 목표가 일관되고 구체적인가?
- (2) 정책내용이 정책목표에 부합하는가?
- (3) 이행 프레임워크와 관련하여 정책 이행을 담당하는 다양한 주체 간의 조정은 어떻게 수행되나? 특히, 이행 프레임워크와 관련한 부분을 살펴보는 것은 한국의 해양 수소정책의 이행 체계의 특수성을 고려한다.

제4장에서는 독일, 일본, 미국 등 수소경제에 대한 이행이 비교적 앞서 있는 국가들의 정책을 비교 검토한다. 따라서 여기에서는 각국의

정책을 종합적으로 개관하고, 비전과 전략의 내용과 구체성, 정책 대상 영역, 중점 영역, 관련 정책 유형, 추진 체계 등의 유사점과 차이점을 비교함으로써 중요한 벤치마킹 요소들을 확인하고자 하였다. 특히, 해양 부문으로 특정할 수 있는 정책이 있는 경우 여기에 더욱 주목할 것이다. 비교 연구는 각 국가의 개별 정책 발표, 관련 학술 문헌, 보도 자료 및 기타 권위 있는 출처의 데이터를 활용하고자 한다.

최종적으로 제5장에서는 한국 한국의 수소정책에서 발견된 과제를 해결하기 위한 정책 권장 사항을 제시한다. 정책 제언은 주요국의 정책 비교 연구를 통해 개발된다. 다만, 해양분야 수소경제 실현이라는 정책 목표를 달성하기 위한 효과성과 한국의 정치, 경제, 사회, 행정적 맥락에서의 실현 가능성을 고려하고자 한다.

이 연구를 위해 다양한 국가와 국제기구의 정책 문서, 보도 자료 및 관련 문헌을 포괄적으로 검토하는 작업을 수행하였다. 다만, 이러한 노력에도 불구하고 수소경제의 구현이 아직은 초기 단계에 머물러 있기 때문에, 이 분야에 대한 정보, 특히 정책의 효과성과 실효성에 대한 검증된 정보는 제한적이다. 더욱이, 국가 차원의 정책과 지침이 지속적으로 발전하고 있다는 점을 고려할 때, 본 연구보고서의 향후 유용성은 변경되기 쉬운 데이터에 대한 의존성에 의해 제한될 수 있다.

제3장 한국의 수소경제 정책 진단

제1절 연혁 및 개요

수소 관련 연구개발에 대한 한국 정부의 지원은 2000년대 초반부터 뚜렷이 나타난다. ‘제2차 신재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획(2003~2012)’에서는 수소, 연료전지 등 4개 신재생에너지를 새로운 정책 대상으로 추가하고, 수소 관련 분야에서 선진국과의 기술격차 해소를 위한 연구개발 지원 방안을 포함하였다⁵⁸⁾. 그러나 수소경제로의 전환을 목표로 하는 종합적인 국가계획은 2019년까지 수립되지 않았다.

이후, 문재인 정부는 2019년 수소경제를 혁신적 경제 성장의 중추적 동력으로서의 발전 가능성을 인식하고 ‘수소경제 활성화 로드맵’을 발표하였다. 이 로드맵은 수소 산업 가치사슬의 각 단계에서의 종합적이고 구체적인 개발 전략과 목표를 제공함으로써 한국이 수소경제의 글로벌 리더가 되기 위한 비전을 제시한다. 특히, 수소자동차, 연료전지, 그린수소 생산을 주요 중점 분야로 다루고 있다⁵⁹⁾.

로드맵에서 제시된 전략의 안정적이고 일관성 있는 실행을 위한 입법적 기반으로 2021년 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」을 제정하였다. 따라서 이 법은 그 입법 목적을 수소경제 이행 촉진을 위한 기반을 조성하고 수소 산업의 체계적 육성뿐만 아니라 수소의 안전관리에 관한 사항을 규정하기 위함으로 명시하고 있다⁶⁰⁾.

한국 정부는 이 법에 근거하여, 2021년에 ‘제1차 수소경제 이행 기본계획’을 수립함으로써 기존의 로드맵을 더욱 구체화하였다. 이 계획에는 수소생산시설, 수소경제 구현을 위한 제도 신설·개선, 공공·민간 필요자금 조달계획, 시장 창출을 위한 기업 및 인력 육성 등 공급계획을 포괄한다.

58) MTIE, 2003

59) MTIE, 2019

60) 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」

제2절 한국의 수소정책 및 프로젝트

이하에서는 ‘제1차 수소경제 이행 기본계획(이하 1차 기본계획)’을 중심으로 한국의 수소정책에 대해 검토한다. 다만, 기본계획의 이행을 위한 하위 및 연관 계획이 있는 경우, 이를 함께 검토한다.

1. 개괄

한국의 수소경제 이행 전략의 주요 배경에는 탄소 중립의 실현, 미래 성장 산업으로서의 수소 시장에 대한 산업적 중요성 부각, 에너지 안보 측면이 강조되고 있다. 이에 따라, 제1차 기본계획은 ‘수소경제 전주기 생태계 구축으로 청정수소경제 선도’를 비전으로 제시하면서, 이를 실현하기 위한 4대 전략과 15대 과제를 제시하였다.

<그림 18> 제1차 수소경제 이행 기본계획의 비전체계



2. 분야별 주요 정책 및 프로젝트

(1) 청정수소의 생산

한국의 그린수소, 블루수소 생산 기술은 선진국과 4~7년 정도의 기술격차가 존재하는 상황으로 기술 격차 해소를 위한 프로젝트들이 진행 중이다. 대규모 석유화학단지를 활용한 부생, 추출수소의 공급 인프라를 확대하고 있다. 현재 500kW급 수전해 기술 수준을 단계적으로 향상시켜 2030년까지 10MW급 스택 개발 및 실증으로 대용량화를 추진하기 위한 기술개발을 추진하고 있다. 다만, 현재 수전해 수소 생산 시스템 등과 같은 그린수소, 블루수소 생산을 위한 CCUS 생산 프로젝트는, 정부 지원 R&D 사업을 통한 실증의 수준에 머물고 있다.

또한 부족한 국내 수소 생산을 보완하기 위한 해외 청정수소 수입 프로젝트를 검토하고 있으나, 대규모 수소 수송선의 상용화 시점에 대응하여 추진한다는 대략적 로드맵 만이 제안되고 있다. 또한 청정수소의 검인증 체계 및 국제거래소 설립을 위한 노력은 가시화하고 있다.

(2) 운송 및 유통

정부 주도로 수소충전소 위주의 보급망을 확대하고 있다. 충전소는 2030년까지 전국에 660기를 설치하는 것을 목표로 하고 있다. 이와 함께, 기존 주유소나 LPG충전소를 활용한 충전망 확보를 시도하고 있으나, 민간기업의 참여를 유인하기 위한 재정적 인센티브나 관련 규제 정비가 과제로 남아있다. 충전소 외에도 수소공급기지를 기반으로 한 지역 배관망을 구축한다는 계획이나, 현재는 구체적인 프로젝트 착수에 앞서 안정성과 영향도 분석을 실시 중에 있다.

이와 함께 수소 거래의 안정성 확보를 위한 제도적 기반도 마련 중이다. 수송용 수소를 중심으로 온라인 거래 플랫폼, 정량검사를 위한 시스템을 마련하고 있다.

(3) 수소 활용

모든 일상에서의 수소 활용을 목표로 수소발전, 수소 모빌리티, 철강, 석유화학, 시멘트 분야에서의 수소활용 확대 계획을 포괄하고 있다.

발전 분야와 관련해서 석탄과 암모니아 혼합연소에 대한 민관 합동 RD&D 프로젝트가 진행 중이며, 기반으로 2030년까지 암모니아 혼소 비율을 20% 까지 높이겠다는 목표를 가지고 있다. 이러한 목표는 제10차 전력 수급 에너지 기본계획에서는 2030년까지 수소 및 암모니아로 총 전력 생산량의 2.1%, 2036년까지 7.1%를 달성한다는 목표를 제시하였다. 전력시장에서의 청정수소에 대한 수요 창출을 독려하기 위해 관련 기술의 상용화 단계에 맞춰 RPS 제도 개편 및 FIT, CfD의 도입, 탄소연료에 대한 제세부담금 조정, 암모니아 혼소 관련 규제 정비 등을 추진할 예정이다.

수소차를 중심으로 관련 프로젝트가 진행 중이며, 2028년까지 수소차 전 차종에 대한 생산능력을 확보한다는 계획이다. 수소상용차 보급을 위한 친환경차 구매 보조금, 상용차(버스, 택시, 트럭)에 대한 연료보조금, 렌터카 등 관련 사업자에 대한 구매 목표제를 도입하는 등 재정적 인센티브를 제공한다. 수소차 외의 활용 분야, 발전, 연료전지 등의 분야에 대한 중장기 계획과 목표를 설정하고 이를 위한 R&D프로젝트를 진행한다.

3 이행 체계

한국 정부는 총괄적 수소경제와 관련한 국가 전략을 수립하고 이행하기 위한 범 정부, 민-간 합동 의사기구로서 수소경제위원회를 구성하여 운영하고 있다. 위원회는 국무총리가 위원장이며, 관계 중앙행정기관의 장과 수소 산업 육성에 관련한 산, 학, 연 전문가로 구성된다. 위원회의 지원을 위해 산업통상자원부 산하에 수소경제실무추진단을 설립하여, 구체적인 정책 사항들

에 대한 협력과 조정, 이행관리를 담당하고 있다.

반면, 각 세부 정책 프로그램은 관계부처 및 지방자치단체가 추진한다⁶¹⁾. 각 부처 및 지자체의 정책의 기본 방향은 수소경제 이행의 기본 계획의 큰 틀에서 조정되지만, 각 세부적인 사항에서는 느슨한 협력 관계인 것으로 보인다.

4. 소결 : 한국 수소정책의 평가와 과제

한국의 수소경제 정책은 탄소중립 달성 수단으로서의 수소의 잠재력과 수소차 등 관련 산업 분야 국내 기업의 경쟁력 확보를 통한 글로벌 시장 공략 기회라는 두 가지 동인에 의해 추진되고 있는 것으로 보인다. 따라서 한국의 수소경제 구현을 위한 국가 전략은 생산, 운송, 활용 등 수소 가치사슬 전반을 포괄하지만, 저배출 수소 도입을 통해 관련 시장에서 경쟁 우위를 확보할 수 있는 산업에 대해 정책 및 지원 프로그램이 집중하는 양상을 보인다.

한국 정부는 기본계획을 통해 청정수소의 공급 여건을 개선하고 수소 활용 수요를 확대를 위한 부문별 장기정책 목표와 함께 마일스톤을 명시적으로 제시하고 있다. 또한 각 프로그램의 대략적인 착수 시기에 대해서도 명시적으로 제시하고 있다. 이러한 점은 수소경제로의 이행을 위한 정부의 정책적 의지를 구체적으로 보여주는 것일 뿐만 아니라, 계획의 구체성과 실행 가능성을 보장하는데 기여할 것으로 보인다.

각 분야의 정책과 프로그램의 계획이 얼마나 구체적인가 하는 점은 각 분야의 기술 성숙도와 산업기반 수준에 따라 결정될 것으로 보인다. 기술 성숙도와 산업기반이 미약한 경우, 정부의 역할은 핵심기술의 조기확보를 위한 연구개발의 지원으로 제한될 수밖에 없는 반면, 이미 상용화 기술이 존재하는 경우에는 실증을 넘어 적극적 시장 형성을 위한 다양한 재정적 인센티브를 고려할 수 있다.

61) 수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률

이러한 관점에서 기본계획의 내용을 살펴보면, 대부분의 정책 분야에서 정부 정책의 내용은 기술 개발 및 실증 지원이나 사업 타당성 조사에 국한되어 있다. 정부는 수소 인프라 펀드 등 금융·세제 인센티브 도입의 필요성을 인식하면서도 구체적인 시스템 설계를 위한 연구에 착수하겠다는 방향성만을 제시하고 있다.

마찬가지로 청정수소 발전 의무화, 안전관리 지침 등 규제에 경우에도 구체적인 도입할 계획의 수립의 전단계로서 관련 규제 도입에 대한 검토를 향후 과제 정도로 제안하는 수준이다. 다만, 가장 진전이 있는 분야 중 하나인 수소차와 관련해서는 기 도입된 전기차와 관련한 규제를 수소차까지 확대하는 것을 예정하였다.

제3절 해양분야 수소정책 및 프로젝트

1. 해양분야 수소정책 : 제1차 수소기본계획 반영 내용을 중심으로

현재의 수소경제 이행 기본계획은 각 벨류체인별로 해양분야에서의 프로젝트를 포함하고 있다.

수소생산 분야에서는 해양 그린수소 생산의 확대를 포함한다. 기존 조성된 연안 고정식 파력발전소와 연계한 해상 그린수소 생산시스템을 시운전 중이며, 해상풍력을 활용한 그린수소 생산을 위한 해상 부유식 수소생산 플랜트 개발 등을 위한 R&D를 추진 중이다⁶²⁾.

또한, 수소 해상운송을 지원하기 위한 수출입 거점으로서 수소항만 선도사업을 2028년까지 2개소에서 시행할 계획이다⁶³⁾. 이 프로젝트를 추진하기 위해 해양수산부를 비롯한 관계부처는 2021년 11월 수소항만 조성방안을 수립하였는데, 여기에서는 수소항만은 청정 수소의 수출입 허브로서 기능할 뿐만 아니라, 항만 내 기 건설된 LNG 기지와 CCS기술을 연계한 블루수소의 생산과 항만내 물류 모빌리티를 수소기반 동력원으로 전환하는 것을 포괄하고 있다⁶⁴⁾. 이로써 수소항만에 대한 청사진은 마련되었으나, 현재는 항만 내 LNG 개질을 통한 블루수소 생산과 수소연료전지 발전시설을 건설하는 초기 단계의 수소항만 구축을 위한 시범사업을 위한 후보지 선정과 타당성 검토 단계에 있다.

활용 분야에서 두드러지는 논의는 수소선박의 개발이다. 주요 기자재 개발과 소형 수소추진선박의 시험선 건조를 위한 연구개발에 착수할 예정이다⁶⁵⁾ 이와 함께 해양수산부는 수소선박 운용의 안전성 확보를 위한 연료공급제어시스템의 개발과 관련 안전기준 및 평가, 검증기술 개

62) MTIE, 2021

63) MTIE, 2021

64) Ministry of Oceans and Fisheries [MOF], 2021

65) MTIE, 2023a ; MTIE, 2023b

발을 추진하기 위한 연구개발 사업을 추진한다.

일부 지자체 차원에서의 프로젝트도 진행 중이다. 전라남도 역시 수소연료전지 기반의 레저선박에 대한 건조 및 실증을 진행 중이다⁶⁶⁾. 수소선박과 관련해서는 해운산업 보다는 조선산업의 새로운 성장동력의 확보 측면에서 추진되고 있는 성격이 강하며, 현재 본격적인 상용화 기술이 개발되지 않았기 때문에 연구개발과 실증, 향후 상용화를 위한 제도적 기반을 우선적으로 마련하고 있는 단계이다.

2. 해양분야 수소정책 추진체계

해양분야에서의 수소정책은 수소정책 추진의 일반적 프레임워크 내에서 수행된다. 즉, 관계 부처 및 지자체 등에서 권한 범위 내에서 수소정책과 프로그램을 추진한다. 관계 부처간의 권한 범위는 정부조직법, 업무 관행 등에 따라 결정될 수 있다. 부처간의 정책조정은 국무조정실 또는 국무회의를 통할 수 있을 것으로 보인다.

한국의 법·제도적 맥락에서 보면, 해양분야에서의 수소정책은 해양수산부, 산업통상자원부, 과학기술정보통신부 등 다양한 부처에서 분산적으로 추진되고 있다. 해양수산 분야를 별도의 정책 분야로 인식하고 해양수산 관련 분야의 행정기능을 통합한 해양수산부가 존재하지만, 산업통상자원부, 과학기술정보통신부 등에서 해양산업 진흥과 과학기술 개발 등의 분야에서 중첩적인 권한을 행사하고 있음을 확인할 수 있다.

또한 해상 및 인프라의 개발에 있어서도 산업통상자원부와 해양수산부가 관련이 있다. 여기에서 해양수산부는 해상 및 연안에 입지한 해양수산산업의 진흥 뿐만 아니라 해양환경과 생태계 보호라는 측면을 동시에 고려해야 한다⁶⁷⁾.

66) MOF, 2024

67) 정부조직법

제29조(과학기술정보통신부) ① 과학기술정보통신부장관은 과학기술정책의 수립·총괄·조정·평가, 과학기술의 연구개발·협력·진흥, 과학기술인력 양성, 원자

<표 2> 제1차 수소경제 이행 기본계획(해양분야) 이행체계

정책 내용	관계 부처
- 해양그린 수소 생산 확대	산업부/해수부
- LNG 개질 + CCS 활용한 블루 수소 생산	산업부/해수부
- CCS 기술 조기 상용화	산업부/해수부/과기부
- CCS 입지 확보	산업부/해수부/외교부
- 수소항만 구축	해수부/산업부/국토부
- 암모니아/수소 운반선·추진선 개발	산업부/해수부/과기부

3. 소결 : 해양분야 수소정책의 평가와 과제

해양분야는 기본계획에서 전체의 수소 가치사슬의 틀에서 부분적으로 반영된다. 또한 관련 부처의 하위 계획에서도 일부 분야를 구체화할 뿐이며, 해양분야 전체를 종합적으로 다루는 범정부적 전략은 부재한 상황이다.

그러나 해양부문은 수소경제의 전반적인 실현에 있어서 중요한 부분으로 고려할 필요가 있다. 이러한 점은 한국의 수입에 의존적인 수소 공급여건, 육상의 산업과 발전 입지 개발의 한계, 조기 기술 격차 해소 가능성 등을 고려할 때 더 큰 의미를 가진다.

력 연구·개발·생산·이용, 국가정보화 기획·정보보호·정보문화, 방송·통신의 융합·진흥 및 전파관리, 정보통신산업, 우편·우편환 및 우편대체에 관한 사무를 관장한다.

제38조(산업통상자원부) ① 산업통상자원부장관은 상업·무역·공업·통상, 통상교섭 및 통상교섭에 관한 총괄·조정, 외국인 투자, 중견기업, 산업기술 연구개발 정책 및 에너지·지하자원에 관한 사무를 관장한다.

제44조(해양수산부) ① 해양수산부장관은 해양정책, 수산, 어촌개발 및 수산물 유통, 해운·항만, 해양환경, 해양조사, 해양수산자원개발, 해양과학기술연구·개발 및 해양안전심판에 관한 사무를 관장한다.

<그림 19> 재생에너지 관련 주요 부문의 기술 수준

기술	단위: %				
	한국	중국	일본	EU	미국
풍력발전	75.0	80.0	76.5	100.0	90.0
수소·연료전지	75.0	70.0	100.0	95.0	95.0
해양에너지	81.0	79.5	83.5	100.0	90.0

* 출처 : Lee et al. (2022)

또한 해운, 항만 등 해양산업뿐만 아니라 연안 및 해상에 입지한 산업들의 수소 사용 측면도 중요하게 고려해야 할 정책 대상이다. 이러한 영역들은 해양 자원의 개발과 이용, 해양 환경과 생태계, 연안 지역 경제의 지속가능한 성장을 지원한다는 점에서 서로 긴밀하게 연계되어 있다. 따라서 전체 수소경제 전략의 큰 틀을 유지하면서, 해양분야를 별도의 독자적이고 종합적인 정책 목표영역으로 인식할 필요가 있다.

해양분야 수소정책을 정책대상 부문별로 살펴보면, 기본계획에 반영된 요소를 중심으로 개별 하위계획이 수립·시행되고 있음을 알 수 있다. 그러나 정책 목표와 전략의 구체성과 실행 수준은 부문별로 상이하다. 해양 그린수소의 생산 관련 기술과 인프라의 구축, 수소항만의 구축, 수소선박의 개발 등 분야는 국가 전략에 상당한 비중으로 반영되어 있으며, 하위 계획도 비교적 구체적으로 마련되었다.

수소항만 구축과 관련하여, 관계부처 합동으로 ‘수소항만 조성방안’을 수립(2021.11)하였다. 수소선박과 관련하여, 산업부의 ‘K-조선 차세대 선도 전략(2023.11)⁶⁸⁾’과 해수부의 ‘2024년 한국형 친환경선박(Greenship-K) 보급 시행계획(2024.1)⁶⁹⁾’이 수립되었다. 이러한 점은 국내 생산이 상대적으로 부족한 상황에서 국제 운송을 통해 해외에서 수

68) ‘K-조선 차세대 선도 전략(2023.11)’에는 암모니아 선박 및 수소선박의 상용화 기술 확보, 액화수소 운반선 관련 기술 확보와 관련한 사항이 포함되었다.

69) ‘2024년 한국형 친환경선박(Greenship-K) 보급 시행계획’에는 수소·암모니아 등 무탄소 선박 기술 개발, 수소선박 안전기준 개발, 선박수소연료전지 설비 기준 마련, 수소연료전지 선박의 핵심기자재 시험평가기준 개발 등이 포함되었다.

소를 수입해야 할 필요성과 한국 경제에서 조선산업의 중요성을 반영한 것이다. 반면, 일부 분야는 아직 대략적인 방향만 정립된 단계에 머물러 추가적인 정책적 고려가 필요한 부분도 있다.

<표 3> 은 해양수소정책 분야별 정책 목표와 전략의 구체성 정도를 요약한 것이다. 이러한 평가는 주관적이며 대략적일 뿐만 아니라 관련 정책의 지속적인 업데이트 과정에서 변경될 가능성이 있다. 다만, 이전 논의를 기반으로 해양분야에서의 정책 개선 사항을 발견하기 위한 통찰력을 제공하기 위한 목적으로 제시한다.

<표 3> 한국의 해양분야 수소정책의 분야별 평가

정책 부문	정책 내용	평가
수소 생산	· 해양 재생 에너지를 이용한 청정 수소 생산	+++
	· 연안, 항만, 해양 인프라를 활용한 수소 생산	++
수소 공급망	· 해상을 통한 수소 수입 루트 확보	++
	· 수소 해상운송 기술 개발	+++
	· “해상운송-항구-최종소비자”를 연결한 수소 전달 경로 구축	++
활용	· 배송	+++
	· 포트	+++
	· 수산업	+
	· 섬의 전력과 난방 공급	+
수요 창출	· 투자 위험 완화를 위한 재정적 인센티브	++
	· 연구개발 및 실증에 대한 보조금 또는 정부 프로젝트	+++
	· 규제	++

- * (+++++) 구체적인 목표와 마일스톤 설정되었고 연간계획과 투자계획 확정
- (++++) 구체적인 목표와 마일스톤이 있으나 대략적인 계획만 존재
- (+++) 대략적인 목표와 마일스톤이 제시, 이행 시기가 불확실한 모호한 계획
- (++) 대략적인 정책 계획 존재
- (+) 제1차 기본계획에 미반영

해양분야의 정책과 프로그램을 추진하는 데 있어서, 해양수산부, 산업통상자원부, 과학기술정보통신부 간의 정책 조정이 중요할 것으로 보인다.

현재 관련 기술에 대한 연구개발 단계이기 때문에 해양수산부와 과학기술정보통신부 간의 R&D 및 실증사업의 추진 과정에서의 협업과 고정이 요구된다. 일반적으로 과학기술정보통신부가 국가 연구개발사업을 총괄하고 개별 부처가 전체 프로그램의 조정과 실행을 각각 담당하는 형태로 역할이 구분된다. 특히, 해양수산부는 해양수산과학기술에 대한 연구개발 사업을 추진하고 있으므로, 구체적인 사업 실행의 효과적인 수행을 위해서는 양 부처의 협력이 필수적이다.

수소 활용 분야에서, 산업통상자원부와 해양수산부의 관계는 보다 복잡한 역할 관계를 가지는 것으로 보인다. 수산을 제외한 해양산업의 경우, 양 부처의 정책 대상 영역의 중첩이 발생한다. 특히, 수소선박 분야에서 이러한 복잡성이 두드러지는데, 일반적으로 수소선박의 건조 부분에서는 산업부가 수소선박의 운영과 활용 측면에서는 해양수산부가 주도하고 있는 것으로 보인다. 다만, 소형 선박과 기자재 분야에 있어서는 그 역할의 분담이 모호하다.

수소항만과 수소 생산을 위한 해양플랜트 개발과 건설 분야에서 이러한 복잡성은 유사하게 나타난다. 해양플랜트의 설계와 건조 분야의 정책은 산업부가 주도하고 있으나 해양플랜트의 운영 측면에서는 해양수산부가 주도한다. 해양 그린수소와 관련해서는 기반이 되는 해양에너지원에 따라 역할이 분담되는 것으로 보인다. 해양 재생에너지 중 해상풍력은 산업부가 주도하고 있으나, 나머지 파력, 조력 등에서는 해양수산부가 주도하고 있어, 두 부처 간의 회색지대가 존재한다.

제4장 주요국의 수소정책

본 연구보고서에서는 한국의 수소정책 과제를 해결하기 위한 정책제안을 개발하기 위해 독일, 일본, 미국의 주요 3개국의 사례를 검토한다. 이들 국가는 수소경제로의 전환을 가장 적극적으로 추진하고 있는 국가로 평가되고 있으며, 수소 이니셔티브(H2I)에 소속되어 있다. 수소 이니셔티브는 국가 경제의 모든 부문에서 수소 기술 채택을 촉진하기 위한 정책과 프로그램을 발전시키려는 자발적인 다정부 이니셔티브이다⁷⁰⁾. 따라서 이들 국가는 강력한 기후 완화 목표를 달성하기 위해 수소 개발 및 배치에 대한 공통 정책 동인을 공유하는 한편, 세부적인 정책 강조점과 구체적인 정책 프로그램은 상이하게 채택된다⁷¹⁾.

제1절 독일

1. 개괄

독일은 2050년까지 온실가스 중립 달성을 목표로 재생 에너지로의 전환을 추진하고 있다. 따라서 독일의 수소정책도 이러한 맥락의 일부로 추진되고 있다.

독일의 수소정책은 초기에는 독일정부 산하 수소연료전지기술기구(NOW)에서 주도한 수소 및 연료전지 기술을 위한 국가혁신프로그램(NIP)에 의해 추진되었다. 독일의 국가차원의 수소전략은 2020년에 채택되었다. 2026년까지 시행될 예정인 'NIP II'는 운송 부문에서의 수소의 활용 확대에 초점을 맞추고 있는 반면, 국가 수소전략은 운송 분야에 국한되지 않은 포괄적인 수소 활용을 위한 조치들을 포함한다⁷²⁾.

70) IEA, 2023

71) Vijayakumar et al., 2022

2. 주요 정책 및 프로그램

2023년 수정된 국가 수소전략은 수소 기술을 활용하여 산업, 운송 및 에너지 부문 전반에서 CO 배출량을 줄이는 동시에 독일의 경제 경쟁력을 강화하는 것을 목표로 한다. 독일의 국가수소기본전략의 주요 내용은 <표 4>와 같다.

이 전략에 기초하여 독일 정부는 전력 부문과 철강을 포함한 산업 분야의 수소 수요에 보조금을 지원한다. 특히, 열병합발전소나 가스발전소의 수소 도입, 수소발전소 건립에 대한 인센티브는 개정된 열병합발전법, 재생 에너지법 등을 통해 뒷받침된다⁷³⁾.

또한 각 산업분야별로 수소 도입을 확대하기 위해 RD&D 지원도 추진되고 있다. 철강 생산의 탈탄소화와 재생 가능한 수소 사용 확대를 위한 재정 지원이 승인되었다. 뿐만 아니라, ‘Reallabore der Energiewende’와 같은 프로그램은 수소에 대한 특정 요구사항을 충족하는 산업 실증에 대한 지원을 제공한다⁷⁴⁾.

신뢰 가능한 투자 기반을 조성하기 위해, 독일 정부는 이러한 보조금 정책 외에도 중공업의 탄소중립 에너지원 전환을 지원하기 위해 차액탄소계약(CCfD)과 같은 재정적 인센티브를 도입하였다. 차액탄소계약 제도 하에서 기업은 배출량과 CO₂ 배출 톤당 발생하는 추가 추정 비용을 기준으로 경매에 입찰하며, 정부가 추가 추정비용을 낙찰자에게 지불하게 된다⁷⁵⁾.

72) Vijayakumar et al., 2022

73) IEA, 2023

74) IEA, 2023

75) IEA, 2023

<표 4> 독일의 수소기본전략(2023년 수정 전략)의 주요 내용 요약

구분	주요 내용
배경	<ul style="list-style-type: none"> • 에너지 안보 • 지속 가능한 일자리 기반 • 기후 목표 달성
정책 대상	<p>암모니아, 메탄올 또는 합성 연료와 같은 수소 및 그 파생물</p>
전략 1	<p>충분한 수소 가용성 보장</p>
	<p>(1) 수소 생산 규모 확대:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2030년까지 그린수소 생산을 최소 10GW(현재의 두 배 수준)로 확대할 수 있도록 자금 및 투자 인센티브 제공 <p>(2) 안정적인 수소 수입 공급망 구축</p> <ul style="list-style-type: none"> - 파이프라인, 선박 등을 활용한 운송망 구축, 수입원 다변화를 위한 국제협력 등을 추진
전략 2	<p>효율적인 수소 인프라 구축</p>
	<p>(1) 국가 수소 인프라</p> <p>(2) 유럽의 수소 백본 네트워크</p> <p>(3) 유럽 외 국가로부터의 수소 수입 인프라</p> <ul style="list-style-type: none"> - 수소의 해상운송 지원을 위한 항만 등 인프라 구축
전략 3	<p>수소 활용 확대</p>

구분	주요 내용
	(1) 산업 분야 - CCfD , IPCEI 프로젝트 및 기타 지원 프로그램 (2) 교통 분야 - 수소 및 연료전지 기술, 항공, 해상교통 등 (3) 전력 분야 - 발전원료의 수소전환 지원, - 전해조의 폐열전위 활용
전략 4	효과적인 프레임워크
	(1) 계획 및 승인 절차와 관련된 규제 장애물 감소 (2) 지속가능성 표준 및 인증 (3) 연구, 숙련된 인력 확대를 위한 혁신과 훈련 지원

* 해양분야와 관련한 사항에 대해 음영처리

3. 추진체계

수소기본전략의 이행에서 연방 교육연구부, 경제부, 교통부는 각자의 권한 범위의 프로젝트들에 대해 중요한 역할을 수행한다. 연방 교육연구부는 수소경제의 근본적인 문제에 중점을 두고 생산, 저장, 운송 및 효율적인 활용과 관련된 이니셔티브를 지원한다. 반면, 경제부는 에너지 전환을 위한 시범 프로젝트를 지원함으로써 기업과 연구 기관이 산업 규모에서 신기술을 개발하고 테스트할 수 있도록 지원한다. 교통부는 특히, 다양한 운송 부문의 수소 프로젝트에 대한 지원을 제공한다.

이러한 각 부처의 전략 이행을 지원하기 위해 독일 정부는 수소 조정 사무소(Die Leitstelle Wasserstoff)를 운영한다. 수소 조정사무소는 국가 수소전략 이행 과정에서 각 정부부처 지원, 독일 국가 수소 위

원회의 권고안 공식화, 국가 수소전략 이행 모니터링을 수행한다.

최종적인 수소정책 조정·결정은 수소 관련 국무위원회에서 이루어지며, 이를 지원하기 위한 자문위원회로서 국가 수소 위원회(Nationaler Wasserstoffrat)가 설립되었다. 국가 수소 위원회는 정부 소속이 아닌 산업, 과학 및 시민 사회의 고위급 전문가 26명으로 구성되었으며, 국가 수소 전략의 이행 및 추가 개발을 위한 제안과 자문 역할을 수행한다⁷⁶⁾.

각 부처에서 분산적으로 수행하고 있는 지원 프로젝트들에 대한 접근성을 제고하기 위해 수소 파일럿 사무소(Hydrogen Pilot Office)를 설립하여 투자기업에 대한 컨설팅 서비스를 제공하며, 정보 제공을 위한 온라인 플랫폼을 개발하였다.

76) <https://www.wasserstoffrat.de/en/>

제2절 일본

1. 개괄

일본은 2017년 수소기본전략을 수립함으로써 "hydrogen society"가 되기 위한 구체적인 계획을 제시하였다. 이 수소 기본전략은 국가차원에서 수립된 세계 최초의 수소 전략이다.

일본의 수소기본전략은 에너지 자급 문제와 2050년까지 온실가스 80% 감축 목표라는 환경적, 경제적 문제를 모두 해결하는 것을 목표로 한다⁷⁷⁾. 따라서 수소기본전략은 2050년까지 수소사회를 구현하기 위한 비전과 실천 방안을 포괄함으로써 하향식 수소정책의 수립과 이행을 위한 큰 틀을 제공한다는데 의의가 있다.

2. 주요 정책 내용

2023년 6월에 개정된 기본전략에서는 2030년과 2050년 목표를 유지하면서 2040년 약 1,200만톤이라는 새로운 수소 도입 목표를 설정했다. 공급비용에 대해서는 수소기본전략에 그린혁신기금 활용, 기술개발 선진화, 수소기본전략을 기반으로 한 다양한 대책을 동원해 수요 진작과 민간투자 촉진 등을 통해 공급비용을 더욱 절감하겠다는 목표를 명시했다.

개정된 기본전략은 기존 전략과 달리, 일본 국내 수소시장의 확대의 한계에 대해 인식하고 이에 따른 정책 방향의 전환을 보여준다. 기존 전략은 일본 국내 수소 시장을 조성하는 것을 전제하고 있는 반면, 2023년 수정 전략에서는 국내 시장의 규모의 한계를 고려하여 세계 시장으로의 진출을 본격적으로 고려하고 있다는 점에서 차이가 있다.

77) Vijayakumar et al., 2022

이러한 맥락에서 개정된 기본전략은, 시장의 확장성이 전망되면서 일본 기업의 기술적 우위가 확보된 분야들을 핵심영역으로 지정하고 있으며, 핵심분야에는 수소 생산 및 공급망 구축, 탈탄소 발전, 연료전지, 수소 직접 사용, 수소화합물 사용 등이 포함된다⁷⁸⁾. 특히, 수소 응용 분야, 특히 철강 및 석유화학 산업에서 수소 사용을 적극적으로 추구한다는 점에서 수소전기차에서 수소 사용으로 초점을 전환함을 시사한다⁷⁹⁾.

이러한 정책 방향을 뒷받침하기 위해 일본 정부는 다양한 지원 조치를 취하고 있다. 일본 신에너지 산업기술종합개발기구(NEDO)는 호주와 일본 간의 액화 수소 공급망 프로젝트에 2,200억 엔(일본 엔)(~17억 달러)을 지원한다.

또한, 수소 분야 민간 투자를 활성화하기 위해 저탄소 수소나 암모니아를 공급하는 기업을 대상으로 재생에너지 기반 수소와 화석연료 기반 수소의 가격차를 기반으로 하는 CCfD를 도입할 예정이다⁸⁰⁾. 또한 이 외에도 투자 위험 완화를 위해 수소 및 암모니아 제조 저장 프로젝트에 대한 출자와 채무 보증 및 다양한 공적 금융기관에 의한 지원을 검토하고 있다⁸¹⁾.

2023년 6월 개정된 현행 일본 수소기본전략의 내용은 <표 5>과 같다.

<표 5> 일본의 수소기본전략(2023년 수정 전략)의 주요 내용 요약

구분	주요 내용
정책대상	수소 및 암모니아 또는 합성 메탄, 탄소 재활용 제품 등
배경	<ul style="list-style-type: none"> • 안전한 에너지 공급 • 국제 산업 경쟁력 강화 • 2050년까지 탄소 중립 달성

78) 경제 산업 부장관 [METI], 2023

79) IEA, 2023

80) IEA, 2023

81) METI, 2023

구분	주요 내용
전략 1	수소사회 실현 가속화 <ul style="list-style-type: none"> (1) 수소 (암모니아 포함) 도입 확대 <ul style="list-style-type: none"> - (2030년) 300만톤 → (2040년) 1,200만톤 → (2050년) 2,000만톤 (2) 수소공급 비용 저감 <ul style="list-style-type: none"> - 2030년 약 334엔/kg → 2050년 약 222엔/kg(가스 화력 이하) (3) 수요 창출 <ul style="list-style-type: none"> - 발전, 연료전지, 열 및 원료 이용 등 분야에서의 수소 수요 확대 지원 (4) 대규모 공급망 구축을 위한 자금 지원 및 인프라 정비 (5) 지역 차원의 수소 사회 모델 확산 (6) 연구개발 지원 및 국제 협력 강화
전략 2	수소산업 경쟁력 강화 <ul style="list-style-type: none"> (1) 수소 생산 및 공급망 <ul style="list-style-type: none"> - 수전해 장치의 비용 및 재생 가능 에너지 유래 수소의 경제성 확보, - 수전해 분야 신기술 개발 - 국제 공급망 구축을 위한 해외 파트너십 구축 - 국제 표준 책정에 기여 - 수소 전용 트레일러 등 국내 운송망 구축을 위한 기술 개발 - 수소의 국내외 해상운송 조기 실현 (2) 탈탄소형 발전 <ul style="list-style-type: none"> - 대형 가스터빈을 활용한 수소 혼소 발전 기술 선도 - 수소발전 기술개발 및 실증 지원 (3) 연료전지

구분	주요 내용
	<ul style="list-style-type: none"> - 연료전지의 국제경쟁력 획득 - 차량, 선박, 철도, 항만 하역기계의 연료전지 적용 - 수소스테이션 확대·정비, 가정·업무·산업용 연료전지 <p>(4) 수소의 직접 이용</p> <ul style="list-style-type: none"> - 철강, 화학제품, 수소연료전 <p>(5) 수소화합물의 활용</p> <ul style="list-style-type: none"> - 연료 암모니아, 카본리사이클 제품
전략 3	수소 활용의 안전성
	<p>수소 이용을 촉진하는 규제환경 조성</p> <p>인증, 검사 기반, 인재 육성 등</p>

제3절 미국

1. 개괄

미국은 탈탄소화 목표에 기여하기 위해 경제 부문에 청정 수소를 채택하기 위한 전략적 프레임워크를 구축하려는 목적으로 국가 청정수소 전략 및 로드맵(the US National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap)을 채택하였다.

미국의 국가 청정수소 전략 및 로드맵은 산업 및 운송과 같은 부문의 주요 응용 분야를 목표로 하고, 혁신과 규모의 경제를 실현함으로써 청정수소의 사용 비용을 절감하고, 생산 및 최종 사용을 위한 지역 네트워크에 초점을 맞추기 위한 주요 전략을 포함한다. 이 전략은 인프라 투자 및 일자리법(초당적 인프라법; BIL)에 따라 다양한 이해관계자와 정부 부문의 의견을 반영하여 최소 3년마다 업데이트될 예정이다⁸²⁾.

2. 주요 정책 내용

미국의 수소전략은 2035년까지 저탄소 수소의 생산, 운송, 저장 및 소비를 촉진을 위한 사항들을 포괄하며, 정책 입안자, 업계, 규제 기관 및 기타 관계자의 다각적인 협력적 조치들을 강조하고 있다.

미국은 수소정책은 재생가능 에너지 및 원자력 기반의 그린수소 뿐만 아니라, 화석 연료 기반의 CCS 결합 형태의 수소생산까지 포괄하는 “청정”수소를 정책대상으로 강조하며, 대규모 R&D 지원을 통해 전기 분해 기술을 개발하는 동시에 비용 절감을 극대화하겠다는 목표를 국가 청정수소 전략 및 로드맵에 반영하였다. 따라서 이 로드맵에서 미국 정부는 여러 응용 분야 및 부문에서 시장 장벽과 복잡성을 줄여, 수소를 채택하도록 하기 위한 비용 및 성능 목표를 제시하고 있다. 미국의 국가

82) 에너지부 [DOE], 2023

청정수소 전략 및 로드맵의 주요 내용은 <표 6> 와 같다.

<표 6> 미국 국가 청정 수소 전략 및 로드맵 요약

구분	주요 내용
비전	탄소 제로 미래와 지속 가능하고 탄력적이며 공평한 경제를 위한 저렴한 청정 수소
전략	(1) 전략적이고 영향력이 큰 최종 용도 확대
	<ul style="list-style-type: none"> • 산업 응용 분야: 화학, 제강, 산업 열 • 운송: 중대형 차량, 해상, 항공, 철도 • 전력 부문 애플리케이션: 그리드 서비스, 백업 전력 및 장기 에너지 저장
	(2) 청정수소 비용 절감
	<p>수소 생산 비용</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2026년까지 - kg당 2달러 • 2031년까지 - kg당 1달러 <p>온보드 스토리지 비용</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2030년까지 - kWh당 9달러(700바) 배송 및 분배 비용 • 2030년까지 - kg당 2달러
	(3) 지역 네트워크 중심
<p>지역 청정 수소 허브</p> <ul style="list-style-type: none"> • 사용자 근처에서 대규모 청정 수소 생산 • 개발 시작 <p>경제적 이익</p> <ul style="list-style-type: none"> • 경제를 위한 좋은 일자리와 세수 창출 • 수소 생산자와 소비자 네트워크 구축 	

미국은 이 전략을 지원하기 위해 강력한 재정적 인센티브를 도입하고 있다. 이러한 조치에는 보조금, 세금 공제 등이 포함된다. 정부 R&D 프로그램 중 하나인 Hydrogen Shot은 수소 운반체, 온보드 저장 시스템, 액체 수소 및 막-전극 어셈블리를 위한 이송 및 연료 공급을 포함한 R&D 분야에 4,700만 달러가 지원함으로써 2031년까지 청정 수소 비용을 kg당 1달러로 낮추는 것을 목표로 하고 있다⁸³⁾.

특히, 지역 네트워크와 관련한 주요 프로젝트는 청정수소 허브 프로그램이다. 수소허브는 청정 수소 생산자, 잠재적 청정 수소 소비자, 근접한 연결 인프라로 구성된 네트워크를 말한다⁸⁴⁾. 2022년 발효된 인플레이션 감축법(IRA)에 포함된 80억 달러 규모의 자금이 이 청정수소 허브 프로그램에 지원될 예정이다.

뿐만 아니라, IRA는 수소 및 수소 기반 연료 생산에 대한 강력한 세금 공제를 제공한다. 이 법에는 수소를 포함한 광범위한 청정 에너지 기술의 도입을 가속화하기 위한 수많은 인센티브가 포함되어 있는데, 특히, 청정 수소 생산과 관련해서 주목할 만한 사항은 2033년 이전에 착수되는 청정 수소 생산 프로젝트에 대한 10년간의 세금 공제를 부여하는 새로운 청정 수소 생산 세액 공제(45V)이다. 45V 세금 공제 외에도 수소 생산, 투자 또는 관련 장비 프로젝트에 관련된 이해 관계자가 제공하는 기타 세금 인센티브도 포함한다⁸⁵⁾.

83) DOE, 2023

84) DOE, 2023

85) IEA, 2023

<표 7> 미국의 수소 분야 투자 계획(~2026)

분야	\$	목표
Hydrogen Hubs development	\$ 8 billion	대규모의 청정 수소 생산과 근접한 최종 사용 가능성 확대
Electrolysis R&D	\$ 1 billion	전기분해 기술의 효율성과 비용 효과성 향상
Manufacturing & Recycling R&D	\$ 500 million	청정 H2 장비 제조 효율성 향상 프로젝트 지원 핵심 부품에 대한 국내 공급망 지원

* 출처 : Moural and Soares (2023)

3. 추진체계

미국 국가전략 및 로드맵은 범정부적 접근을 강조하면서, 이를 뒷받침하기 위해 관계 부처간 태스크포스(Hydrogen Interagency Task Force; HIT)을 구성하는 사항을 포함한다⁸⁶⁾.

또한 수소 수요 창출을 위한 민간과의 파트너십을 위해, 총 100건 이상의 구매 약속을 한 80개 이상의 기업 회원사로 구성된 퍼스트 무버 연합(First Movers Coalition)을 설립하였다⁸⁷⁾.

<표 8> 미국의 수소전략 이행을 위한 기관별 역할

기관명	역할
Department of Agriculture	- 농업 생산자 및 지역 소기업을 위한 재생에너지 시스템에 대한 보증 대출 및 그랜트를 제공하는 재생에너지 프로그램 실행

86) DOE, 2023

87) <https://www.hydrogen.energy.gov/interagency>

기관명	역할
	<ul style="list-style-type: none"> - 농업 장비에 대한 청정수소 사용 확대
Department of Commerce	<ul style="list-style-type: none"> - (미국 국립표준기술연구소) 수소의 안전하고 경제적인 운송, 전달 저장을 위한 데이터 제공 - (국제무역청) 수소 수출시장을 위한 국내 공급망 개발 - (경제발전청) 지역 산업 발전, 인력 개발 및 훈련 등을 위해 지역 연합에 보조금을 제공
Department of Defense	<ul style="list-style-type: none"> - 휴대용 및 보조 전력, 전술 차량, 고정식 애플리케이션 및 중요 인프라를 위한 마이크로그리드 등 다양한 응용 분야를 위한 수소 및 연료 전지 기술에 관한 R&D
Department of Energy	<ul style="list-style-type: none"> - 수소 및 연료 전지 기술 분야 선도 기관으로 가치 사슬 전반을 포괄하는 RD&D 주도(BIL을 통해 지역 청정 수소 허브에 80억 달러, 전해조 개발에 10억 달러, 청정 수소 제조 및 재활용에 5억 달러 등 청정 수소에 95억 달러를 투자) - 운송, 산업, 에너지 저장, 발전 등 여러 분야의 수소 공급관련 RD&D - 저장 및 응용 분야와 안전, 코드 및 표준 개발
Department of the Interior	<ul style="list-style-type: none"> - 해양풍력 및 해양 에너지 활용
Department of Labor	<ul style="list-style-type: none"> - 수소 가치사슬에 관련된 좋은 일자리 및 공정한 고용 기회 촉진 - (산업안전보건청) 대규모 수소 저장 등에서의 근로자 안전 보장
Department of Transportation	<ul style="list-style-type: none"> - (연방교통국) 연료전지 버스 및 수소충전소 시범 사업 - (연방고속도로관리국) 수소충전소를 포함하는 연료 공급로를 위한 지원프로그램 - (해양청) 부두 측 연료전지 발전 프로젝트 및 수소 및 연료전지와 관련된 다양한 선박 프로젝트 지원

기관명	역할
Environmental Protection Agency	<ul style="list-style-type: none"> - 청정 수소 생산 및 사용에 관련된 규제 제정 - 수소 차량 및 인프라에 대한 자금 지원 프로그램 실행.
National Aeronautics and Space Administration	<ul style="list-style-type: none"> - 우주 응용을 위한 수소 및 연료 전지 기술 개발
Small Business Administration	<ul style="list-style-type: none"> - 중소기업 혁신 연구(SBIR)/중소기업 기술 이전(STTR) 프로그램을 통한 연구 및 상용화 자금 제공.
State Department	<ul style="list-style-type: none"> - 국내 및 해외의 수소 산업 확장을 위한 외교적 지원 및 기술 지원. - First Movers Coalition을 통한 기업들의 청정 수소 수요 촉진

* 출처 : <https://www.hydrogen.energy.gov/interagency>

제4절 소결 : 3국의 수소정책에 대한 비교

독일, 일본, 미국 정부는 수소가 탈탄소화 목표를 달성하는 데 중요한 요소라는 공통 인식 하에서 국가 차원의 전략과 정책 목표를 채택하고 있다. 그리고 이러한 정책 목표를 실현하기 위해 다양한 정책 수단을 도입하여 시행 중이거나, 시행을 예정하고 있다.

정부 차원의 적극적 정책 계획이 제시되는 것은 정부가 수소 시장의 환경 이슈 해결의 가능성, 잠재적 성장 가능성에 대한 긍정적인 전망을 가지고 있을 뿐만 아니라, 수소 분야에서의 경쟁력을 높이기 위해서 정부의 적극적인 개입과 지원이 요구된다는 공통적인 인식에 기초한 것으로 보인다. 이러한 이유로 각국의 정책 방향과 그 수단은 상당한 공통성을 보인다. 다만, 구체적인 정책의 동인과 사회·정치적, 산업·경제적 맥락의 차이에 따라 구체적으로 핵심영역으로 설정되는 분야와 세부적 정책 수단의 채택은 상이하게 나타난다.

1. 정책 동인 및 목표

독일, 일본, 미국 3국은 경제와 산업 전반에 수소를 도입은 탈탄소 목표의 실현, 경제적 이익이라는 두 가지 기둥에 의해 지지되는 것으로 보인다. 양자 중 어디에 더 높은 비중을 두어 추진하는지는 환경 목표에 대해 그 사회와 정부가 얼마나 엄격한 가치를 부여하는지, 각국이 처한 사회경제적 맥락, 청정수소 생산 기술과 국내 시장환경에 따라 달라질 수 있다. 특히, 러시아의 우크라이나 침공에 따른 에너지 안보 위기가 수소 전환을 위한 새로운 동인으로 부상하고 있음을 독일과 일본의 예에서 확인할 수 있다.

각 국 정부의 정책은 수소의 생산부터 운송과 저장, 활용, 포괄하는 수소 가치사슬 전반을 대상으로 하고 있다는 점에서 공통점을 가진

다. 하지만 세부적인 생산과 수요 확대에 대한 각 분야별 목표, 시장 및 산업 환경, 기술의 성숙도 등에 따라 핵심 타깃 분야는 차이가 있다.

<표 9> 독일, 일본, 미국의 수소정책 비교

	개발 목표	정책 대상	핵심 분야
독일	10 GW of electrolysers by 2030	Electrolysis (renewable)	Aviation Electricity Industry Refining Shipping Transport
일본	Hydrogendemand -3 Mt by 2030 -12 Mt by 2040 -20 Mt by 2050 -1% of the gas supply in existing networks with synthetic methane by 2030 Hydrogensupply -15 GW of electrolysis globally	Electrolysis Fossil fuels with CCUS	Buildings Electricity Industry(steel) Refining Shipping Transport
미국	10 Mt of “clean” hydrogen by 2030 20 Mt by 2040 and 50 Mt by 2050.	Electrolysis (renewable, nuclear, Fossil fuels with CCUS)	Chemicals Steelmaking Industrial Heat Transportation Regional Hydrogen Hubs

특히, 수소 사용 확대에서 핵심 분야의 발굴과 관련하여 살펴보면, 독일 정부는 수소 사용이 절대적으로 필요하거나 대안이 없는 분야

에 집중되어야 한다는 방향을 명시하는 반면, 일본의 경우에는 국내 시장에서 해외 시장 진출로 정책 목표를 전환함에 따라 시장 확장을 통한 경제적 이익 증가 가능성을 고려하여 중점 분야를 도출하였다. 미국의 경우 주요 분야는 수소를 도입함으로써 탈탄소의 목표에 효과적으로 접근할 수 있는지가 중요하게 고려되었다.

정책 목표의 설정의 측면에서 보면, 각 국은 모두 청정 수소의 공급 목표와 중장기 마일스톤을 구체적으로 제시하고 있다. 다만, 수요 측면에서 수소 사용 확대를 위한 방향성과 이를 위한 정책 내용과 계획에 대해서는 구체적으로 제시하고 있는 반면, 수소 사용에 대한 목표는 구체적으로 정하고 있지는 않다는 점이 공통적으로 지적될 수 있다. 다만, 일본은 2030년까지 기존 네트워크의 가스 공급량의 1%를 합성 메탄으로 전환한다는 목표를 제시하였다⁸⁸⁾.

2. 정책 수단

세 국가 모두 국가 수소 전략을 구현하기 위해 다양한 정책 수단을 도입하고 있다. 무엇보다 가장 강력한 정책 수단은 재정적 인센티브로, 정부 구매, 보조금, 세금 공제 등이 고려된다. 이러한 금융지원 조치는 중장기적으로 민간부문에 안정적인 투자환경을 제공할 목적으로 도입되었다⁸⁹⁾.

수요 창출을 위한 지원 기준 마련을 위한 규제를 도입하는 한편, 수소에 대한 기술 개발과 투자를 저해하는 기존 규제의 개편도 추진하고 있다. 반면, 국제무역 관련 규제, 안전 확보 기준, 검사인증 도입, 기반 시설 입지 등에 대해서는 상대적으로 다루지 않거나 간략한 방향만 제시하고 있다. 특히 일본은 수소 분야의 국제경쟁력 강화를 위해 국제표준 확립에 기여하겠다는 전략적 접근 방식을 취하고 있다.

88) METI, 2023

89) IEA, 2023

<표 10> 3국의 재정적 인센티브 도입 현황

재정적 인센티브		독일	일본	미국
Grants	실행 여부	√ (In force)	√ (In force)	√ (In force)
	대상	생산자		전체 가치 사슬
	지원 내용	- 'ThyssenKrupp Steel Europe'의 철강 생산의 탈탄소화 및 재생가능 수소 도입을 지원하기 위해 550백만 유로(~5억 7,900만 달러)의 직접 보조금과 최대 14억 5천만 유로(~15억 3천만 달러)의 조건부 지불 메커니즘을 승인('23)	- 신에너지·산업기술종합개발 기구(NEDO)는 호주-일본 액화수소공급망 프로젝트 지원을 위해 2,200억 엔(~17억 달러)를 투자('23)	- 지역 청정수소 허브에 대한 지역 요청 시작('22.9) - 6~10개 수소 허브 구축에 70억 달러 지원 예정
Tax incentives	실행 여부	√ (In force)	-	√ (In force)

재정적 인센티브		독일	일본	미국
	대상	생산자/최종 소비자		생산자
	지원 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 재생 가능한 전기로 생산된 수소에 대한 청정 전력 지원 기금 조성을 위한 부담금 면제 - 모든 전기 및 수소 자동차에 대해 10년 동안 유통세 면제 		<ul style="list-style-type: none"> - 인플레이션 감축법(IRA) 발효(2022.8) : "청정 수소(수소 생산의 탄소 집약도를 기준으로 USD 0.6-3/kg H2)" 생산 프로젝트에 대한 10년간의 세금 공제 - 콜로라도주, 일리노이주 : 화석연료를 대체하여 저배출 수소를 사용하는 기업에 대한 세금공제를 위한 법률 입법
Loan guarantees	실행 여부	-	-	√ (In force)

재정적 인센티브		독일	일본	미국
	대상	-	-	전체 가치사슬
	지원 내용	-	-	<ul style="list-style-type: none"> - 저배출 수소 프로젝트에 대한 대출 보증에 400억 달러 규모의 가용 부채 자본 활용가능 - DOE는 유타주의 저배출 수소 저장 프로젝트에 대한 5억 달러 규모의 대출 보증 지급('22.6)
Contracts for Difference (CfD)	실행 여부	√ (In force)	√ (Announced)	-
	대상	생산, 운송 및 최종 사용	공급자	-

재정적 인센티브		독일	일본	미국
	지원 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 탄소 중립 에너지원으로 전환하는 중공업 기업에 대해 CfD 적용 발표('23.6) - 기업들은 배출량과 CO2 배출량 1톤당 발생하는 추가 추정 비용을 기준으로 경매에 입찰하고, 정부가 이 차액을 낙찰자에게 지급. 	<ul style="list-style-type: none"> - 탄소 가격 벤치 없이 재생 가능 수소와 화석 연료 기반 수소의 가격 차이를 기반으로 하는 CfD 제도를 도입할 예정 	
	기타	<p>H2 Global programme</p> <ul style="list-style-type: none"> - 수소 기반 제품에 대한 10년 구매 계약 (총 9억 유로 수준 예산 투입 전망) 	<p>Green Innovation Fund</p> <ul style="list-style-type: none"> - 대규모 수소 및 파생상품 공급망, 철강 생산 및 재생 가능한 수소 생산에 2조 엔(미화 160억 달러) 	

<표 11> 기존 및 계획된 규제 프레임워크 및 인증 시스템

	문서명	목적	대상	진행경과	기준
일본	Basic Hydrogen Strategy	Regulatory, access to public support	Hydrogen, hydrogen-based fuel	Under development	Production with emissions intensity <3.4 g CO ₂ -eq/g H ₂
미국	Clean Hydrogen Production Standard; Tax Credit	Regulatory, access to public support	Hydrogen	Under development	Production below certain emissions intensity levels (<0.45, 0.45-1.5, 1.5-2.5, 2.5-4 g CO ₂ -eq/g H ₂) eligible for different levels of investment tax credits support

세 정부 모두 국제 협력의 중요성을 강조하고 있다. 그러나 각국의 수소생산 기술과 인프라 여건이 국제협력의 방향과 강도에 영향을 미친다. 특히 수소 수입을 강요받는 일본과 독일은 안정적인 국제 공급망 구축을 위해 해외 협력의 중요성을 인식하고 있다. 하지만 일본의 경우 수소 응용 분야의 해외 시장 확대에도 중점을 두고 있다.

3. 이행체계

각 정부의 수소전략은 범정부적 접근을 지향한다는 점에서 공통점을 가진다. 국가 전략의 큰 틀에서 각 부처가 해당 분야의 정책과 프로그램을 주도하되, 큰 틀에서의 부처간 협력과 조정을 위한 체계를 갖추고 있다.

미국의 경우, 명시적으로 국가 수소전략에서 관계기관을 통합한 수소 부처간 태스크포스(Hydrogen Intergency Task Force; HIT)의 구성을 포함하고 있으며, 전략의 실행 과정, HIT의 활동 본격화에 따라 관계기관은 확대될 가능성을 열어두고 있다. 유사하게 독일의 경우도 수소 조정사무소와 수소 관련 국무위원회를 통해 관계 부처간 정책과 프로그램의 조정, 국수소기본전략의 이행상황에 대한 모니터링을 실시한다. 일본의 경우에도 재생 가능 에너지, 수소 및 관련 문제에 관한 각료회의를 통해 국가 수소전략이 논의되고 있다.

4. 해양분야 수소정책

3개 국에서 해양분야에 대한 별도의 국가 차원의 전략이나 정책 목표는 발견되지 않는다. 다만, 해양분야 관련 사항이 개별적으로 국가 전략에 반영되고 있으며, 이는 각국의 정책 우선순위를 반영한 것으로 보인다. 그럼에도 불구하고 수소의 운송과 응용분야에서 부분적이지만 해양분야가 비중있게 다루어지고 있다.

특히, 독일과 일본은 수소 공급망 구축과 응용 분야에서 해운과 항만이 중요하게 다루고 있다. 이러한 차이는 수소의 해외 도입 여건과 자국의 해운 및 조선산업의 국가경제에서 차지하는 비중의 차이에서 발생하는 것일 수 있다. 독일의 경우, 2030년 까지 수소 수입은 주로 선박으로 이루어 질 것으로 전망하고, 국가전략에서 해상 운송을 위한 선박과 항만 인프라의 구축을 중요하게 다루고 있다. 뿐만 아니라 선박에 대한 수소 및 연료전지의 도입 확대를 위한 지원도 상당한 비중으로 다루고 있다.

유사하게 일본도 해상운송을 통한 수소의 국제 공급망 구축을 강하게 추진하고 있으므로, 수소 운반선, 연료 전지 및 수소 연료 선박의 개발과 상용화, 항만 하역기계의 연료전지 적용을 국가 전략에서 명시하고 있다. 일본 정부는 2020년 발표한 '국제 해운 무배출 로드맵'에서도 2028년까지 1세대 무공해 선박 도입을 목표 발표한 바 있다⁹⁰⁾. 2022년 2월 세계 최초로 호주에서 일본으로 액화 수소 수송에 성공한 바 있다⁹¹⁾.

반면, 해양 그린 수소의 생산과 관련해서는 상대적으로 적은 비중으로 다루어지고 있다. 독일의 경우, 해상풍력을 활용한 그린 수소 생산을 프로젝트의 계획 및 승인 절차에서의 불필요한 관료주의를 줄이기 위한 조치를 취할 예정이다⁹²⁾

90) IEA, 2021

91) IEA, 2022

92) The Federal Ministry for Economic Affairs, Germany, 2023

제5장 정책 제언

이 장에서는 제3장에서 도출된 한국의 수소정책의 과제를 해소하기 위한 정책 방향을 제안하고자 한다. 특히, 한국의 수소정책은 해양분야의 종합적이고 일관성있는 전략의 부재, 부처간 협업체계의 복잡성, 효과적 정책수단의 미흡 등과 같은 한계를 지니고 있음이 확인되었다. 따라서 이러한 문제를 해소하기 위해 독일, 일본, 미국 정책의 비교에서 도출된 사항들을 참조하여 개발된 다음의 정책 조치들을 제안한다.

1. 해양 부문에 대한 종합적인 전략 및 로드맵 개발

해양분야 전체를 포괄하는 단일한 수소정책을 수립할 필요가 있다. 이러한 정책 개발은 연안과 해양을 하나의 정책 단위로 인식함으로써, 각 분야 간의 연관성을 고려할 수 있도록 한다. 이러한 노력은 일관된 정책 목표를 가지고 여러 정책수단을 여러 인과관계의 맥락 속에서 고려하도록 함으로써, 정책의 효과성을 높이는 데 기여할 수 있다.

수소의 생산과 공급을 위한 인프라의 입지로서 해양과 연안이 중요하게 거론되고 있으며, 이러한 점은 연안과 해양환경, 연안 지역의 경제와 지역사회에도 중요한 영향을 미친다. 하지만 현재의 수소정책에서는 탈탄소 실현을 위한 목적과 수소의 도입 확대를 위한 전략만을 강조할 뿐, 여기에 수반되는 해양과 연안 자원의 개발과 환경의 문제, 연안 지역사회에 미치는 영향과 그 관리에 대해서는 균형있는 시각을 견지하고 있지 못하다. 따라서 이러한 해양 자원의 개발과 환경이라는 중요한 가치 간의 상충관계를 고려한 종합적 전략이 요구된다.

또한 해양분야의 통합적 수소전략은 해양산업 분야 간의 가치사슬을 전반적으로 다룸으로써 관련 기술의 조기 상용화를 촉진할 수 있다. 국제 수소 해상운송을 전제로한 안정적인 수소 공급망을 구축하는

동시에 친환경 해운을 실현하기 위해서는 조선, 해운, 항만 간의 서로의 관계성을 고려하는 포괄적인 접근이 필수적이다.

현재 한국의 수소경제전략에서 청정 수소 공급망에서 중요한 역할을 담당할 해운과 항만에서의 수소 활용 확대는 국제 규제에 대응하고 산업의 경쟁력을 높이기 위한 과제로서 국가 전략에서 중요하게 반영되어 있다. 하지만, 조선, 해운, 항만에서의 수소경제 촉진전략은 서로 긴밀하게 연계되지 못하고 분산되어 추진되고 있다는 점은 해운·항만-조선으로 연결되는 가치사슬 전반에서의 효과적인 수소 도입을 제한할 수 있다. 그린선박의 상용화의 제약 중 하나로 해운선사가 배제된 조선소 중심의 친환경 선박 기자재 개발에 따른 것이라는 점을 상기할 필요가 있다⁹³⁾.

무엇보다 해양분야에서 포괄적이고 일관성 있는 정책 목표를 제시하고 이를 위한 정책 수단들을 효과성과 실행가능성에 맞춰 종합하는 것이 필요하다. 해양분야 정책 목표에는 해양 그린수소의 공급 목표, 해양산업과 도서 및 연안지역에서의 수소 도입과 이를 통한 탈탄소 목표를 포함해야 한다. 특히, 수요 측면에서의 목표 설정은 저배출 수소 및 수소 기반 연료 시장에 대한 중요한 신호로 작용함으로써 기존 응용 분야에서의 화석 연료 사용을 줄이고 새로운 분야에서는 저배출 수소에 대한 수요를 촉진할 수 있다⁹⁴⁾.

뿐만 아니라, 수소경제 이행을 위해 수반되는 해양 및 연안 개발에 따른 해양 및 연안 환경 변화에 대한 대응 분야도 포괄할 필요가 있다. 수소 인프라의 안전 문제, 해양 및 연안의 인프라 개발 시 환경영향에 대한 평가와 모니터링, 어촌 등 지역사회에 미치는 영향 등에 대한 정책 목표와 필요한 정책 조치에 대한 논의가 포함되어야 한다.

또한 이렇게 설정한 정책목표를 달성하기 위해 요구되는 분야별 기술 및 정책적 지원 조치들이 나열되고 이것들을 유기적으로 연계시킨,

93) Lee & Nam, 2017

94) IEA, 2023

기술 및 정책지도를 만드는 작업이 필수적이다. 이러한 작업을 통해 기존 정책의 중복, 불일치를 극복하고 비효율성을 제고하며 정책 간의 시너지 효과를 높일 수 있을 것으로 기대한다.

2. 정책 이행 프레임워크 개선: 범정부적 접근 방식 강화

현재 한국의 경우, 수소경제위원회에서 수소경제 이행과 관련된 주요 정책과 계획에 대해 심의 조정하고 있다. 위원회 위원은 관련 부처 장관급 정부위원과 민간에서 지명된 위원으로 구성되며, 수소경제위원회의 위원장은 국무총리이다. 따라서 최고 의사결정권자 수준에서의 조정을 위한 체계만을 상정하고 있으므로 실질적인 협업과 조정이 이루어져야 할 실무단계에서의 조정 과정에 대해서는 별도의 공식적 채널이 존재하지 않는다.

더구나 수소경제위원회의 심의는 중요한 의사결정과정의 필수적 요건이지만, 심의 권한은 있으나 조정사항에 대한 의결권한은 없기 때문에 심의 결과에 구속력은 미미할 수 있다는 점도 문제이다. 따라서 실제로 부처 간의 정책간 조정은 다른 정책과 마찬가지로 국무조정실이나 국무회의에 의해 이루어질 가능성이 크며, 위원회는 민간위원들의 참여를 통해 민간 전문가의 의견을 듣는 절차적 정당성을 확보하는 역할에 그칠 가능성이 크다.

하지만 해양분야의 관계 부처 간의 복잡한 역학관계를 고려할 때, 이러한 실무 단계의 조정기구의 부재는 정책의 실효성을 제약할 수 있다. 부처 정책 간의 조정과 조율이 적절하게 이루어지지 못하는 경우, 정책 또는 프로그램간의 중첩에 따른 혼선 및 자원 투입의 비효율, 관련 정책 간의 연계성 부족 등의 문제가 발생할 수 있으며, 이에 따라 정책이 의도한 효과를 충분히 획득하기 어려울 수 있다.

반면, 각 부처가 조정과 갈등을 회피하기 위해 각자의 명확한 권한 범위 내로 정책 대상 범위를 소극적으로 설정하는 경우에는 정책의

사각지대가 발생할 수 있다. 이러한 정책의 사각지대는 수소 가치사슬 전반의 균형있는 발전을 저해할 수 있다.

그러므로 정책의 일관성을 유지하고, 이행의 효과성을 제고하기 위해 해양분야에서의 수소경제 이행을 위한 정책을 조정할 수 있는 부처 간 의사소통을 강화하는 조치가 필요하다. 구체적으로는 정책 이슈나 프로그램별로 부처 간의 이견을 조정하고 협력 사항을 발굴하기 위한 정책 협의회를 구성할 수 있다. 정책협의회의 경우, 별도의 입법적 조치가 필요하지 않으며, 추가적인 인력이나 재원의 투입없이 즉각적으로 시행가능하다, 다만, 결정사항에 대한 구속력이 부족하기 때문에 실제로 부처 간 이해가 첨예한 문제에 대한 실효성있는 조정이 가능하지 못할 수도 있다.

다른 대안으로서, 관련 부처 실무자가 공동으로 참여하는 사업단과 같은 형태의 통합 실행조직의 설립하는 것이 고려될 수 있다. 이를 위해서는 별도의 재원과 인력의 확보가 필요하며, 조직의 형태에 따라서는 입법적 조치가 선행되어야 할 수도 있으므로 즉각적으로 시행되기는 어려울 수 있다.

3. 정부 대책의 다양화 및 확대

IEA에서는 탄소 순배출량 제로 목표 달성을 위한 정책 조치로서 전략과 로드맵 개발을 통한 장기적인 신호 수립, 수소에 대한 상업적 수요 확대를 위한 인센티브, 투자 위험 완화, R&D 및 지식 공유를 촉진, 적절한 인증, 표준화 및 규제 확립을 제안하고 있다⁹⁵⁾. 수소경제 이행에 있어서 선두에 있는 독일, 일본, 미국에서도 공통적으로 이러한 정책적 수단들을 고려하고 있음을 확인할 수 있다.

한국은 관련 정책과 입법 기반을 신속하게 마련해 수소경제 도입에 대한 강력한 메시지를 민간에 효과적으로 전달했다. 그러나 현재 진

95) IEA, 2021

행 중인 정책 조치는 주로 기술 혁신 노력에 대한 보조금 제공 정도에 머무르고 있다. 따라서 금융지원 프로그램의 다양성과 규모를 확대할 필요가 있다.

독일, 일본, 미국의 예에서 보듯이, 경쟁국들이 보다 강력한 자금 지원 프로그램을 도입하고 있다는 점을 고려할 필요가 있다. 수소의 공급과 사용의 확산은 관련 기술의 개발과 확산, 인프라의 규모화를 통한 경제성 확보에 달려 있다. 하지만, 시장의 미성숙에 따른 투자규모 확대의 제약, 기술의 복잡성과 불확실성에 따른 투자위험 등은 민간의 투자의 걸림돌이다.

따라서 이러한 투자위험을 완화하기 위한 여러가지 지원 조치들이 선결될 필요가 있다. 여기에는 관련 인허가 절차 및 규제 완화와 같은 비재정적 조치 뿐만 아니라, 직접 구매 보조금, 세금 공제, 투자에 대한 지급보증, CfD 등과 같은 재정적 지원 조치들을 적극적으로 도입할 필요가 있다.

4. 정부지원 플랫폼 구축

이와 병행하여, 지원 프로그램에 대한 접근성 제고를 위한 단일 창구를 마련할 필요가 있다. 현재 한국의 수소정책은 국가 전략의 큰 틀에서 이행되고 있으나, 각 프로그램은 각 부처에서 개별적으로 실시하고 있다. 따라서 민간의 참여를 확대하고 수소와 관련한 정보를 제공할 수 있는 플랫폼을 구축하는 것이 필요하다.

특히, 해양분야에서는 연구개발과 관련한 프로그램들이 해양수산부와 과학기술정보통신부, 산업통상자원부에서 동시다발적으로 추진되고 있으므로, 이점을 감안하여 정보제공 및 참여 신청 채널이 필요할 수 있다. 이를 위해서는 독일의 Hydrogen Pilot Office의 사례를 참조할 수 있다.

제6장 결론

세계적으로 탄소 중립이 중요한 이슈로 대두되고 있는 가운데, 각국은 지속 가능한 미래를 위한 대안을 모색하고 있다. 각국 정부는 화석 연료에 의존하는 경제와 산업 생태계를 지속 가능한 그린 에너지로의 전환하기 위한 정책을 적극적으로 개발하고 있다. 이러한 정부 정책에는 환경 보호 및 기후 변화 대응을 위해 탄소 중립이 현 세대가 직면한 가장 긴급한 과제 중 하나라는 인식에서 출발한다. 이러한 맥락에서 많은 국가들이 새로운 그린 에너지원으로서의 수소의 잠재력에 주목하고 있으며, 수소경제로의 전환을 위한 국가적 차원의 전략과 계획을 수립하고 있다.

한국 또한 수소경제를 활성화하기 위해 목표를 설정하고 이를 이행하기 위한 로드맵을 마련하고 있다. 그러나 아직은 기술적인 한계와 정책의 연계성 등 여러 과제에 직면하고 있다. 특히 해양분야에서의 수소경제는 새로운 가능성을 제시하고 있지만, 정부의 효과적인 조율과 시장 조성, 기술 개발 등에 대한 과제가 남아 있다.

해양분야는 수소의 생산과 공급망에서 핵심적인 역할을 차지하며, 특히 한국의 수소 공급의 해외 의존도와 국내 생산의 한계를 고려할 때, 그 중요성은 더 커진다. 해양 산업 뿐만 아니라 연안 및 해상 산업의 수소 사용은 해양 자원 개발과 보호, 지속 가능한 경제 성장을 지원한다. 무엇보다, 한국의 경우, 해양분야를 하나의 독립된 정책 분야로 인식하고 관련된 행정기능을 통합한 해양수산부를 운영하고 있다는 독특한 정책적, 행정적 맥락을 고려할 때, 해양분야에서 수소의 전환을 논의하는 것은 매우 의미있다.

하지만, 현재의 한국의 수소정책에서 해양분야는 부분적으로만 반영되어 있으며, 중요한 정책 과제들이 여전히 다뤄지지 못한 채 남아있다. 또한 관계기관간의 권한의 중첩 또는 역할분담의 모호함에 따라 정

책 실행에서의 제약이 있다.

따라서 해양분야의 수소경제를 위한 더 나은 정책을 마련하고 실행하기 위해 포괄적이고 일관된 로드맵과 전략 수립할 필요가 있다. 해양분야에 특화되고 중요한 정책 과제들을 종합한 로드맵의 수립을 통해, 정책간의 중복성을 최소화하고 시너지를 극대화할 수 있다.

이러한 정책의 수행은 범정부적 접근방식에서 효과적으로 실행될 수 있다. 해양수산부, 과학기술정보통신부, 산업통상자원부 간의 긴밀한 협력을 이끌어 낼 수 있는 이행 체계에 대한 고민이 병행될 필요가 있다. 또한 청정 수소의 공급과 수요 확산을 위해 적극적인 재정적, 비재정적 수단을 모색해야 한다. 다양한 정책을 앞서 시행하고 있는 독일, 일본, 미국 등과 같은 선도국가들의 사례를 적극적으로 검토할 필요가 있다.

이러한 정책 개선과 부처 간 협력 강화가 결합될 때 한국은 수소경제 분야에서 세계적인 선도국가로 발전할 수 있을 것이다.

참고문헌

- Ball, M., & Weeda, M. (2015). The hydrogen economy - Vision or reality?
International Journal of Hydrogen Energy, 40, 7903-7919.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.032> 202310211501461352335572
- Ball, M., & Wietschel, M. (2009). The future of hydrogen – opportunities and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 615-627.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.014> 202310211509441753868580
- Brandon, N., & Kurban, Z. (2017). Clean energy and the hydrogen economy.
Philosophical Transactions A, 375(2098).
<https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0400> 202310220106161232540846
- Cader, J., Koneczna, R., & Olczak, P. (2021). The impact of economic, energy, and environmental factors on the development of the Hydrogen Economy. *Energies*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/en14164811>
20231102171215988518119
- Capurso, T., Stefanizzi, M., Torresi, M., & Camporeale, S. M. (2022). Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition. *Energy Conversion and Management*, 251.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114898> 202310211700261992290259
- Chen, P. S., Fan, H., Enshaei, H., Zhang, W., Shi, W., Abdussamie, N., M, T., Q, Z., & Yang, Z. (2023). A review on ports' readiness to facilitate international hydrogen trade. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(46), 17351-17369. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.220>
2024022920451792796802

- Cheon, K., & Kim, J. (2020). Hydrogen Economy in major countries: Policies of promotion and lessons learnt from them. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 57(6), 629-639.
<https://doi.org/10.32390/ksmer.2020.57.6.629> 20231102184713162590503
- Cho, D. (2006). Evaluation of the ocean governance system in Korea. *Marine Policy*, 30, 570-579. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2005.09.003>
202402292110001674675942
- Chu, K. H., Lim, J., Mang, J. S., & Hwang, M. (2022). Evaluation of strategic directions for supply and demand of green hydrogen in South Korea. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(3), 1409-1424.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.107> 202310220007511104371548
- Clean Hydrogen Partnership. (n.d.). *Who we are*.
https://www.clean-hydrogen.europa.eu/about-us/who-we-are_en
- Department of Energy, U.S. (2023, June). *U.S. National clean hydrogen strategy and roadmap*.
<https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/us-national-clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf> 202403240322161561569453
- Ekins, P., & Hughes, N. (2009). The prospects for a hydrogen economy (1): hydrogen futures. *Technology Analysis & Strategic Management*, 21(7), 783-803. <https://doi.org/10.1080/09537320903182264>
202311021737081381331682
- Falcone, P. M., Hiete, M., & Sapio, A. (2021). Hydrogen economy and sustainable development. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 31(100506). <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100506>

20231022080935109560132

The Federal Ministry for Economic Affairs, Germany. (2023, July). *National Hydrogen Strategy*. 202403240338071364997506

Gondal, I. A. (2019). Offshore renewable energy resources and their potential in a green hydrogen supply chain through power-to-gas. *Sustainable Energy & Fuels*, (6), 1468-1489. <https://doi.org/10.1039/c8se00544c>

202311031824571689507485

Government Organization Act, Korea. (2023).

Hanley, E. S., Deane, Jp, & Gallachoir, Bp O. (2018). The role of hydrogen in low carbon energy futures—A review of existing perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3027-3045.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.034> 202310221114551453599215

Hoang, A. T., Pandey, A., Martinez De Oses, F. J., Chen, W., Said, Z., Ng, K. H., Agbulut, U., Tarelko, W., Olcer, A. I., & Nguyen, X. P. (2023). Technological solutions for boosting hydrogen role in decarbonization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113790> 202402292040501137919068

Hydrogen Council. (2020). *Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective*. https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf

Hydrogen economy promotion and hydrogen safety management act. (2021).

IEA. (2021). *Renewables 2021*. <https://www.iea.org/reports/renewables-2021>

IEA. (2021). *Global hydrogen review 2021*.

<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>

- IEA. (2021). *Global hydrogen review 2022*.
<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>
- IEA. (2023). *Global Hydrogen Review 2023*.
<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>
- IMO. (2015). *Third IMO GHG Study 2014*.
<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf>
- IMO. (2018). *IMO adopts an initial strategy on the reduction of greenhouse gas emissions from ships, with a vision which aims to phase them out, as soon as possible in this century*. Retrieved January 21, 2024, from
<https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/06GHGinitialstrategy.aspx> 202401211712471040175676
- IMO. (2023). *2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*.
- Kar, S. K., Harichandan, S., & Roy, B. (2022). Bibliometric analysis of the research on hydrogen economy: An analysis of current findings and roadmap ahead. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(20), 10803-10824. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.137>
- Kumar, S., Baalisampang, T., Arzaghi, E., Garaniya, V., Abbassi, R., & Salehi, F. (2023). Synergy of green hydrogen sector with offshore industries: Opportunities and challenges for a safe and sustainable hydrogen economy. *Journal of Cleaner Production*, 384.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135545> 202310221013281798097969
- Lee, E., Lee, S., & Huh, S. (2022). Marine green hydrogen development strategy

- for carbon neutrality. *KIET Monthly Industrial Economics*, 283, 37-52.
- Lee, T., & Nam, H. (2017). A study on green shipping in major countries: in the view of shipyards, shipping companies, ports, and policies. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 33(4), 253-262.
<https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2017.12.009> 20240330201814508964896
- Loisel, R., Baranger, L., Chemouri, N., Spinu, S., & Pardo, S. (2015). Economic evaluation of hybrid off-shore wind power and hydrogen storage system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(21), 6727-6739.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.117> 20231103175531515889287
- Luo, J., Xie, Y., Hou, M. Z., Xiong, Y., Wu, X., Luddeke, C. T., & Huang, L. (2023). Advances in subsea carbon dioxide utilization and storage. *Energy Reviews*, 2(1). <https://doi.org/10.1016/j.enrev.2023.100016>
- Milani, D., Kiani, A., & Mcnaughton, R. (2020). Renewable-powered hydrogen economy from Australia's perspective. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(46), 24125-24145. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.041>
- Minister of Economy Trade and Industry, Japan. (2023, June 6). *Basic Hydrogen Strategy*.
- Ministry of Oceans and Fisheries, Korea. (2021). *Hydrogen Port Development Plan*.
- Ministry of Oceans and Fisheries, Korea. (2024). *2024 Eco-friendly Ship Utilization Implementation Plan*.
- Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea. (2003). *Basic Plan for the Development and Utilization of New and Renewable Energy (2003-2012)*
- Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea. (2019). *Hydrogen Economy*

Revitalization Roadmap.

- Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea. (2021). *The First Hydrogen Economy Implementation Master Plan*. 20240323220927582451224
- Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea. (2023). *2023 Eco-friendly Ship Development Implementation Plan*. 20240324014712664909839
- Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea. (2023). *K-Shipbuilding's Next Generation Leading Strategy*. 202403240144211271219850Ministry Of Trade Industry And Energy Korea 201920230915151903206038713
- Moura, J., & Soares, I. (2023). Financing low-carbon hydrogen: the role of public policies and strategies in the EU, UK and USA. *Green Finance*, 5(2), 265-297. <https://doi.org/10.3934/GF.2023011>
- The National Renewable Energy Laboratory. (1995). *The Green Hydrogen Report*
- Ocean Energy System. (2017). *An international vision for ocean energy 2017* (III ed.). Lisbon.
<https://www.ocean-energy-systems.org/documents/28066-oes-vision-2017.pdf/>
- Office of the Federal Government, Germany. (n.d.). *National Hydrogen Strategy: Energy from climate-friendly gas*.
<https://www.bundesregierung.de/breg-en/issues/hydrogen-technology-2204238/>
- Pelc, R., & Fujita, R. M. (2002). Renewable energy from the ocean. *Marine Policy*, 26, 471-479.
- Perez-vigueras, M., Sotelo-Boyas, R., Gonzalez-huerta, R. G., & Banuelos-ruedas, F. (2023). Feasibility analysis of green hydrogen production from oceanic energy. *Heliyon*, 9(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20046>
- Pettersen, J., Steeneveldt, R., Grainger, D., Scott, T., Holst, L., & Hamborg, E.

- S. (2022). Blue hydrogen must be done properly. *Energy Science & Engineering*, 10(9), 3220-3236. <https://doi.org/10.1002/ese3.1232>
- Pingkuo, L., & Xue, H. (2022). Comparative analysis on similarities and differences of hydrogen energy development in the World's top 4 largest economies: A novel framework. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(16), 9485-9503. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.038>
- Ren, X., Dong, L., Xu, D., & Hu, B. (2020). Challenges towards hydrogen economy in China. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(59), 34326-346345. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.163>
- Shin, J. (2022). Hydrogen technology development and policy status by value chain in South Korea. *Energies*, 15(23). <https://doi.org/10.3390/en15238983>
- Suri's-Regueiro, J. C., Garza-Gil, M. D., & Varela-Lafuente, M. M. (2013). Marine economy: A proposal for its definition in the European Union. *Marine Policy*, 42. 111-124. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2013.02.010>
- Velazquez Abad, A., & Dodds, P. E. (2020). Green hydrogen characterization initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. *Energy Policy*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111300>
- Vijayakumar, V., Fulton, L., Shams, M., & Sperling, D. (2022, August 30). *Creating a global hydrogen economy: Review of international strategies, targets, and policies with a focus on Japan, Germany, South Korea, and California* (UCD-ITS-RR-22-100). <https://doi.org/10.7922/G2N014VF>
- Xing, H., Spence, S., & Chen, H. (2020). A comprehensive review on countermeasures for CO2 emissions from ships. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110222>

Zhiznin, S. Z., Timokhov, V. M., & Gusev, A. L. (2020). Economic aspects of nuclear and hydrogen energy in the world and Russia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(56), 31353-31366.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.260>