

KIER CT Brief

Climate Technology Brief No.45

원자력 수소 정책 및 산업 동향 2022.05

한국에너지기술연구원
국가기후기술정책센터



1. 배경 및 필요성

- 최근 **탄소중립 달성**의 시급성 및 러시아의 우크라이나 침공으로 인한 **에너지 안보**의 중요성이 전 세계적으로 대두, 미래 사회의 주요 에너지원 중 하나로 **청정수소**를 주목
 - **(탄소중립)** 넷제로(Net-zero) 시나리오 하에서 전 세계 최종에너지 소비 내 수소·수소기반연료 비중이 2020년 0.1% 이하에서 2030년 2%, 2050년 10%로 꾸준히 확대될 것으로 예측(IEA, '21)
 - **(에너지 안보)** 러시아의 우크라이나 침공으로 촉발된 **천연가스 가격 급등**으로 전 세계적으로 천연가스 의존도를 낮추는 추세이며, 선진국을 중심으로 **청정수소가 천연가스를 점진적으로 대체**할 것으로 전망
 - ※ (예: 독일) 러시아의 우크라이나 침공 이래로 독일의 러시아 천연가스 의존도는 55%에서 35%로 감소¹⁾, 독일 정부는 노르웨이를 잇는 그린수소 파이프라인 설치 추진을 발표('22.3.16)하는 등 청정수소 공급망 확보에 나섬²⁾
- 현 정부는 지난 5월 3일 「윤석열 정부 110대 국정과제」를 발표, **청정수소·재생에너지** 등 다양한 에너지원 확보를 통한 **신산업·신시장 창출**을 명시(제20대 대통령직인수위원회, '22)
 - **(수소경제 실현)** 세계 1등 수소산업 육성을 강조, 국내 수소 생산·공급·활용 기반을 마련할 방침
 - ※ (국정과제내 관련내용) △수소환원제철 실증로 구축, △수소 초격차 기술 확보, △수소차 보급 확대 및 클러스터 구축, △폐플라스틱 열분해 수소생산 허용, △중동지역 수소 협력을 확립, △청정수소 교역기반 확대 등
 - **(공급망 강화)** 윤석열 대통령은 지난 5월 24일 세계가스총회 개최축사를 통해 **에너지 안보**의 중요성 강조, 국내·외 수소생산 기반 확보를 통해 안정적인 수소 공급망을 구축할 것임을 시사
- 국내에서는 탄소중립 달성 및 에너지 안보 강화의 관점에서 **원자력을 활용한 수소생산**(이하 '원자력 수소')이 주요 이슈로 부상
 - **(수소법 개정안 본회의 통과)** 지난 1월 원자력 수소의 청정수소 불포함을 이유로 당시 야당(현 여당)의 반대에 부결됐으나, 지난 5월 29일 개정안이 **국회 본회의를 통과**하며 사실상 원자력 수소가 청정수소에 포함될 것으로 예상³⁾
 - ※ (수소법 개정안 주요 내용) 청정수소인증제, 청정수소발전의무화제도(CHPS) 도입 등을 주요 골자로 하며, 청정수소 범위에 관한 세부내용을 해당 법 시행령에 규율하도록 위임(시행령은 연내 개정할 방침)
 - **(원자력 수소 지원 움직임 관측)** 지난 4월 산업부는 한국수력원자력에 원자력 수소 생산·저장 플랜트 설계 및 안전성 분석을 위한 용역과제를 발주(~'24), 이후 수소생산용 차세대 원자로 설계 완료('26) 및 원자력 수소 실증설비 운영('27~)을 계획⁴⁾
- 본 브리프를 통해서는 원자력 수소 기술의 개요 및 국내외 정책·산업 동향을 간략히 정리 및 분석하고자 하며, 국내 원자력 수소 관련 기술개발 정책 수립을 위한 시사점을 도출하고자 함

1) BBC, Could hydrogen ease Germany's reliance on Russian gas?, 2022. 5. 25.

2) 월간수소경제, 독일-노르웨이, 그린수소 파이프라인 설치 추진, 2022. 3. 18.

3) 에너지경제, "수소경제 길 열렸다"…수소법 국회 본회의 통과, 2022. 5. 30.

4) 전자신문, 정부, '수소법 개정안' 후속 조치 속도…원전도 청정수소 범위 포함 전망, 2022. 5. 17.

2. 원자력 수소 기술 개요

- 원자력 수소 기술은 원자로에서 생성되는 열과 전기를 활용하여 수소를 대량으로 생산하는 기술을 지칭
 - (원자로) 원자력 수소에 활용되는 원자로는 크게 경수로형(LWR)과 비경수로형 원자로로 나눌 수 있으며, 비경수로형 원자로는 소듐냉각고속로(SFR), 용융염원자로(MSR), 초고온가스로(VHTR) 등이 존재
 - ▶ (소듐냉각고속로, SFR) 액체금속인 소듐(나트륨)을 냉각재로 활용하는 고속로로, 사용후 핵연료 방사능 저감과 핵연료의 효율적 이용을 위해 개발
 - ▶ (용융염원자로, MSR) 용융염을 냉각재로 활용하는 원자로로 액체형태의 핵연료 활용이 가능하며, 고속로로 설계 시 고준위 폐기물 저감에 활용될 수 있고 토륨 핵주기는 경제성 및 핵비확산성 측면에서 강점
 - ▶ (초고온가스로, VHTR) 피복입자 핵연료, 흑연 감속재 및 반사체, 헬륨 냉각재 등을 활용하는 원자로로, 높은 출구온도(700~950 °C)로 인해 고효율 수소생산, 산업용 증기 및 공정열 공급에 유용
 - (수소생산 공정) 수소생산 공정은 천연가스 수증기 개질, 저온 수전해(PEM, AEM 등), 고온 수전해(SOEC), 열화학, 메탄 열분해 등이 있으며, 원자력 수소는 주로 저온 및 고온 수전해 공정을 활용(IAEA, '12)
 - ▶ (저온 수전해) 원전에서 생산한 전력을 활용하여 저온(≤ 100°C)의 물을 전기분해
 - ▶ (고온 수전해) 원전에서 생산되는 증기와 전력을 함께 사용하여 고온(≥ 600°C)의 수증기를 전기분해
- 아래 표는 원자로 노형 및 수소생산 공정에 따른 시스템 소비 전력량과 전체효율을 나타내며, 원자로의 출구 온도가 높을수록 소비 전력량이 감소하고 시스템 전체 효율이 향상(Bragg-Sittion & Boardman, '20)

[원자로 및 수전해 방식에 따른 전체 효율 차이(Bragg-Sittion & Boardman, 2020)]

원자로 노형 (수전해 공정)	출구온도 [°C]	소비 전력량 [kWh/kgH ₂]	전체 효율 [%]
경수로형 (PEM)	N/A	39	26%
경수로형 (SOEC)	~300	32	38%
소듐냉각고속로 (SOEC)	~500	30	54%
용융염원자로 (SOEC)	~700	29.5	62%
초고온가스로 (SOEC)	~900	29	70%

- 특히 일반적인 경수로보다 출구온도가 높은 초고온가스로의 경우, 천연가스 수증기 개질 공정과 같이 고온의 열에너지가 필요한 공정에 열 공급원으로 활용 가능
 - 초고온가스로에서 발생하는 열에너지를 천연가스 수증기 개질에 활용할 시, 천연가스 연소를 통한 열에너지 공급 과정을 거치지 않아 기존 대비 간편하고 효율적으로 탄소포집 공정 수행 가능

3. 정책 및 산업 동향

- 원자력 수소는 대체로 **고유가**로 인해 **대체 에너지 자원이 주목받는 시기에** 연구가 활성화되는 경향이 있으며, 최근에는 탄소중립 달성 및 에너지 안보 이슈로 인해 관련 연구가 추진되는 추세
 - (1970년대) 해당 시기 미국과 독일은 상용 고온가스로를 건설, 미국은 황-요오드 열화학공정을 효율적인 수소생산 공정으로 선정했으며 독일은 천연가스 수증기 개질 공정과 연계하는 공학규모 실증연구를 완료
 - ※ (독일) EVA-II 시험설비에서 초고온 헬륨을 활용한 천연가스 수증기 개질 공정을 고온 조건에서 6,100시간 운전, ADAM이라는 메탄올 생산 플랜트와 연계해서 4,500시간 운전(J. Singh et al., '84)
 - (2000년대) 중동지역의 정세 불안으로 유가가 폭등, 에너지 확보 및 화석연료 대체를 위해 미국을 중심으로 초고온가스로와 연계한 황-요오드 열화학 공정(S-I Cycle) 연구에 착수
 - (2010년대) 셰일가스 개발이 본격화되며 원자력 수소 연구는 축소되는 추세였으나, 파리기후협약('16)을 기점으로 수소경제에 대한 요구가 커지며 원자력 수소 연구가 재활성화
- 수전해 기술이 점차 고도화됨에 따라, 재생에너지가 풍부한 나라 역시 기존에 가동 중인 경수로의 저렴한 유훈 전기를 활용한 수전해 수소생산 실증 연구를 추진 중
 - (실증 추진) 수소생산 효율 극대화를 위해 초고온가스로 등의 **차세대 원자로** 실증 연구에 착수하고 있으며, 천연가스 수증기 개질, 황-요오드 열화학 공정 등 **다양한 수소생산 공정**의 실증 연구 역시 추진

[주요국별 원자력 수소 정책 및 산업 동향 정리]

국가	주요 내용
미국	<ul style="list-style-type: none"> • 에너지부는 H2@Scale Initiative를 통해 수소 생산, 저장, 수송 분야에서 국립연구소와 기업 간 협력 사업을 발굴하여 지원하고 실별 수소생산 기술 개발 프로그램을 발표했으며(DOE, '20), 청정 수소 기술의 일환으로 VHTR형 소형모듈원자로(SMR) 실증을 지원 중 • INL은 2010년대 후반부터 4개 원자력발전사와 협업, 가동원전 연계 수전해 실증 및 타당성 평가 수행 중 <ul style="list-style-type: none"> ※ △Nine Mile Point: MW급 PEM 수전해 (~'22), △Davis-Besse: MW급 PEM 수전해(~'24), △Prairie Island: 150kW급 SOEC 수전해 (~'24), △Palo Verde: 15~20MW급 PEM 수전해(~'24) • INL은 FuelCell Energy社 및 Bloom Energy社와 협력하여 250kW급 SOEC 대용량화 연구를 수행 중이며, '30년까지 GW급 규모로 확장할 계획 • X-energy社의 Xe-100은 '27년 미국 워싱턴주에서 실증될 계획, 캐나다와 협력하여 캐나다 내 오지에서 수소를 생산하는 연구도 진행 중
캐나다	<ul style="list-style-type: none"> • 캐나다 수소 전략('20)에 온타리오주와 뉴브런즈윅주에서 가동 중인 중수로를 활용한 수소생산과 각 주에서 개발되고 있는 SMR을 활용한 수소생산 계획이 포함 • 원자로에서 생산된 증기를 천연가스 수증기 개질에 활용하는 방안도 고려

<p>EU</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 지난 1월 세계 최초로 스웨덴의 Uniper社와 Fortum社이 소유한 원자력 발전소(OKG3)에서 생산된 원자력 수소가 상업적 계약을 통해 판매됨(구매사: Linde, 생산량: 12kg/day) • 프랑스는 원자력을 포함한 70억유로 규모의 그린수소 생산 정책을 2020년 9월에 발표 • 프랑스 원전 운영사 EDF社는 원자력수소 사업을 위한 자회사 'Hynamics'를 설립, 가동원전 이용 수소생산 실증 및 사업화를 적극 추진 - 영국 Landcarshire 원전부지에 H2H(Hydrogen to Heysham) 컨소시엄을 통해 수전해 수소생산 시설 적용 타당성 입증 사업을 수행 - 영국 내 가동 중인 Sizewell B와 계획 중인 Sizewell C 발전소를 활용, '30년까지 1GW급 수전해 시스템 연계 원자력 수소 사업을 진행 • 폴란드는 화학공단 공정열 공급용으로 석탄화력을 대체하는 초고온가스로 개발을 국제 공동 연구를 수행 중이며, 장기적으로는 수소생산에 활용할 예정
<p>영국</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 영국은 자국의 수소전략에 수전해 그린수소에 원자력을 포함(HM Government, '21) • 지난 2021년 7월에 수소생산과 공정열 공급을 위한 초고온가스로 개발 착수를 발표(BEIS, '21)
<p>러시아</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 러시아 정부는 2024년까지 러시아 수소 에너지 개발 계획을 승인하였고, 러시아 국영 원자력회사인 ROSATOM社의 원자력 기술 활용이 포함 • ROSATOM社는 러시아 수소 에너지 개발계획에 따라 단기적으로 가동 원전 수전해 수소생산과 장기적으로 초고온가스로-천연가스 수증기개질을 개발 중 - 가동 중인 Kola원전을 활용하여 수십MW 수전해 수소생산 및 저장/공급 통합계통 사업 투자를 검토 중 - 200MW_{th}급 VHTR 활용 천연가스 수증기 개질(150,000Nm³/hr규모) 실증을 '30년대 초반 완료 계획
<p>일본</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 일본 정부는 '30년까지 300만톤(30엔/Nm³), '50년 2천만톤(20엔/Nm³)의 수소생산 역량 확보를 목표로 제시, 관련 로드맵에 VHTR을 포함한 원자력 수소를 포함(JP Ministry of Economy, '20) • JAEA는 VHTR과 천연가스 수증기 개질을 연계하는 실증연구를 '30년 내 완료 계획 • 미쓰비시社は 철강회사 수소 환원 제철을 위해 일본원자력연구원에 천연가스 수증기 개질 실증 제안
<p>중국</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 중국은 세계 최초로 초고온가스로형 선진원자로 HTR-PM을 웨이하이시에 건설하여, 2021년 12월에 자국 전력망에 전력을 공급 • 2021년 9월에 HTR-10을 보유한 칭화대, 중국원자력회사, 중국 철강회사 등이 초고온가스로 탄소 중립 수소생산을 위한 산업협의를 설립, HTR-PM의 후속 사업인 6모듈로 구성된 HTR-PM600의 경우 2개의 모듈은 전력을 생산하고 나머지 4개의 공정열을 생산할 계획 • HTR-PM 실증을 위해 건설되었던 INET의 시험로 HTR-10의 출구온도를 수소생산 연구를 위해 750°C에서 950°C로 높이는 인허가를 준비 중
<p>한국</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 과기정통부는 지난 2004년부터 한국원자력연구원 주관으로 초고온가스로 연계 원자력 수소생산 핵심기술 개발연구를 추진(연구기간: '04-'19, 연구비 총액: 9,861억원) • 지난 2019년 10월에 발표된「수소기술 개발 로드맵」에 초고온가스로는 '초고온시험로'라는 명칭으로 고온 수전해 등과 함께 수소생산 분야 미래형 기술에 포함(관계부처 합동, '19) • 경북 울진군은「대규모 청정 수소 생산 실증단지 조성사업」을 기획 및 예비타당성조사 신청 예정, 원자력 수소를 위한 △저온 수전해 수소생산 실증, △고온수전해(SOEC) 스택 개발·실증, △원자력-신재생에너지 연계 수소생산실증 등을 추진, 관련 연구개발 인프라를 구축할 계획을 밝힘⁵⁾ • 한국원자력연구원은 2020년부터 과기부 지원으로 미래선진원자로핵심요소기술개발사업의 내역 사업으로 초고온시스템 핵심기술 개발을 수행, 초고온가스로와 고온 수전해 연계 기술개발 수행

5) 울진뉴스, 울진군 『대규모 그린수소 생산실증단지 조성』 사업 지원 및 참여 MOU 체결, 2021.12.06.

5. 시사점

- **(글로벌 동향)** 독일을 제외한 주요 선진국들은 자국 내 **청정수소 계획에 원자력 수소를 적극적으로 반영**하는 추세, 중장기적으로 **차세대 원자로** 기술 개발을 추진
 - 경수로 등 기존 가동 원전에서 발생하는 저렴한 유휴전력 활용을 위해 저온·고온 수전해 시스템과 연계한 수소생산 실증 연구를 지속 수행
 - 미국, 영국 등 원자력 선진국은 차세대 원자로인 초고온가스로 개발을 꾸준히 추진, 수소생산 및 산업공정에 열에너지를 공급하는 방안을 검토
- **(국내 시사점)** 원자력 수소 기술은 수전해 기술과의 연계가 필수적이므로, 관련 분야와의 활발한 협력 연구 및 공동사업 수행을 통해 요소기술(원자로, 수전해)간 연계 및 대용량화를 위한 원천기술 확보 필요
 - **(단기)** 기존 가동 원전과 저온 수전해 시스템 간 연계를 통해 원자력 수소 기반 마련
 - **(중장기)** 초고온가스로 등 차세대 고온형 원자로와 고온 수전해 시스템을 연계한 청정수소 생산 시스템 개발 및 실증을 통해 국내 청정수소 저변 확대 및 에너지 안보 강화
- **(정책적 제언)** 원자력 수소 실증 및 운영 추진 시, 대용량 수전해 시스템의 해외 도입에 따른 국내 산업 생태계로의 영향력을 고려하여 **대용량 수전해 시스템 R&D 투자 강화 및 국산 시스템 적극 도입**을 우선 검토하고, 원자력 발전소 인근 지역에서 대량 생산되는 수소를 저장·운송하여 **활용처로 공급할 방안**을 선제적으로 마련할 필요
 - 현재 울진군에서 예타 조사 신청을 추진 중인 사업의 경우 2030년까지 100MW급 SOEC 시스템 개발 및 실증을 추진할 계획으로 알려져 있으며⁶⁾, 이는 2020년까지 전 세계에 설치된 SOEC 용량(0.8MW)의 약 125배(IEA, '21)
 - 100MW급 수전해 시스템은 연간 약 1.7만톤의 수소를 생산 가능하며⁷⁾, 이는 2023년 SK인천석유화학에 설치 예정인 세계 최대 규모의 수소 액화플랜트(연간 3만톤) 용량의 약 57% 수준⁸⁾
 - ▶ 원자력 수소 실증 및 운영계획 수립 시, 실수요처 및 수소 전주기 관련 업체와의 협력체계 구축 필요

6) 전기뉴스, 국내 최초 원자력 활용 수소생산 실증 '시동', 2022.02.15.

7) IEA, Hydrogen, 2021.11.

8) 매일경제, 세계 최대 액화수소 공장 조성...수소경제 발판 만든다, 2021.12.29.

[참고 문헌]

1. IEA, Global hydrogen demand by production technology in the Net Zero Scenario, 2020-2030, 2021.10.26.
2. 제20대 대통령직인수위원회, 윤석열정부 110대 국정과제, 2022.5.3.
3. IAEA, Hydrogen Production Using Nuclear Energy, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-4.2, 2012.
4. S. Bragg-Sitton, and R. Boardman, Integrated Energy Systems for Hydrogen & Chemical Production, Hydrogen and Fuel Cell Energy Annual Merit Review, 2020.5.
5. J. Singh et al., The nuclear heated steam reformer-Design and semitechnical operating experiences, Nuclear Engineering and Design, 1984.
6. DOE, DOE Hydrogen Program Plan, 2020.
7. HM Government, UK Hydrogen Strategy, 2021.8.
8. BEIS, Advanced Modular Reactor Research Development & Demonstration Programme, 2021.09.
9. JPMinistry of Economy, Trade and Industry, Green Growth Strategy Through Achieving Carbon Neutrality in 2050, 2020.
10. 관계부처 합동, 수소 기술개발 로드맵, 2019.10.31.
11. IEA, Global installed electrolysis capacity by technology, 2015-2020, 2021.10.26.

[저자]

한국에너지기술연구원 국가기후기술정책센터 / Tel. 042-860-3717 / E-mail. jhkang@kier.re.kr

[자문]

한국원자력연구원 원자력수소연구실 김찬수 실장 / Tel. 042-868-8748 / E-mail. kcs1230@kaeri.re.kr

※ 본 "CT Brief"에 게재된 내용은 필자 개인(연구진)의 견해이며, 기관의 공식적인 의견이 아님을 알려드립니다.
또한 본지의 내용을 인용할 때는 출처를 밝혀야 합니다.