



## 원자력수소 관련 연구개발 현황



**김찬수**

한국원자력연구원 원자력수소연구실장

- 서울대학교 원자핵공학과 학사·석사·박사
- 한국원자력연구원 박사후연수생
- 한국원자력연구원 선임연구원
- 한국원자력연구원 책임연구원

### 서론

수소는 에너지를 생산하는 과정에서 화석연료와 달리 이산화탄소가 아닌 물을 배출하는 청정한 에너지원이다. 지구에 존재하는 수소는 물과 천연가스와 같은 화합물로 존재하기 때문에 별도의 에너지를 공급해서 화합물로부터 수소를 분리시키는 공정이 필요하다. 전통적으로 수소는 에너지 저장 수단으로 신재생에너지의 간헐성을 보완하고 도입을 가속시키는 수단으로 관심을 받아왔다. 현재 전 세계 수소 생산의 대부분은 천연가스로부터 수소를 추출하는 공정으로 생산되고 있고, 천연가스 채굴 및 운송과정을 포함한 전주기에서 수소 1kg 당 11톤의 이산화탄소를 배출하는 것으로 평가되고 있다. 만약 온실가스 배출 없이 수소를 생산할 수 있다면, 탄

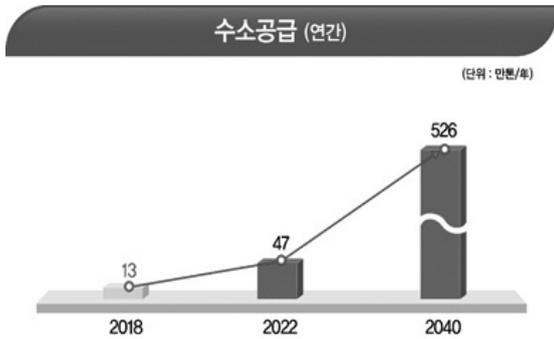
소중립사회에서 수소는 에너지 운반체이자 원료로서 발전, 운송, 제철 등 다양한 분야에서 화석연료를 대체할 수 있다.

### 수소 개발 계획 및 전망

전 세계 주요 선진국들은 이산화탄소 배출 없는 청정 수소 생산 기술 개발 전략 및 관련 투자 계획을 경쟁적으로 발표하고 있다. 한국도 수소차와 연료 전지를 두 축으로 수소 경제 선도 국가로의 도약을 목표로 수소경제활성화 로드맵(2019.01)<sup>1)</sup>을 발표하였으며, 2040년까지 3,000원/kg의 저렴한 수소를 연간 526만톤 공급하는 것을 목표로 하고 있다. 또 수전해, 해외 생산, 수입 등의 그린수소를 2040년 전체 수소 공급량의 70%까지 확대할 계획이다.

그러나 국내 재생에너지 발전단가가 해외보다

1) 한국, 수소경제활성화로드맵, 2019.1.19.



[그림 1] 수소 공급 목표 (수소경제활성화로드맵, 2019)

[표 1] 연간 수소 공급 목표 및 공급 방식 (수소경제활성화로드맵, 2019)

Year		2018	2022	2030	2040
공급량 (만톤 /년)		13	47	194	526
공급 방식	부생수소 수전해 해외생산	1%		50%	70%
	추출수소 (LNG)	99%		50%	30%
수소공급가 (원/kgH <sub>2</sub> )		-	6,000	4,000	3,000

높기 때문에 그린수소 경제성 확보에 불리하며, 한국이 그린수소 해외 의존도가 가장 높은 국가가 될 것으로 전망되고 있다<sup>2)3)</sup>. 최근 국내 대기업들이 청정 수소 생산 관련 투자 계획을 경쟁적으로 발표하고 있으며, 현재까지 공개된 국내 대기업의 2025년 청정수소생산 규모는 연간 56만톤이다. 대부분 블루수소이고, 한화솔루션의 태양광을 이용한 260톤 수전해수소만이 그린수소에 해당한다. 영국의 Aurora라는 회사가 미

래 청정수소생산 시나리오를 분석했을 때, 원자력 수전해 수소생산이 그린수소에 포함되지 않으면, 대부분의 청정수소 생산을 블루수소가 담당할 것이라고 발표한 바 있다<sup>4)</sup>.

### 원자력수소

원자력 수소는 탄소중립에너지원인 원자력에서 생산된 열과 전기를 활용하여 생산한 수소이다. 원자력수소에 활용될 수 있는 수소생산공정은 수전해수소, 열분해수소, 천연가스-증기개질, 메탄열분해 등이다. 수전해 수소생산은 저온수전해와 고온수전해로 분류할 수 있다. 저온수전해는 100℃ 이하의 물을 전기분해 하는 방식이고, 고온수전해는 650℃ 이상의 고온 수증기를 전기 분해하여 수소 생산하는 방식이다. 저온수전해는 경수로에서 생산한 저렴한 전기를 사용하고, 고온수전해는 원자력으로 생산한 증기와 전기를 함께 사용한다.

수전해 수소생산 단가는 [그림 2]<sup>5)</sup>와 같이 운영률 및 수전해에 필요한 전기요금에 의해 결정된다. 재생에너지 같이 운영률이 낮을 경우, 수전해 설비용과 기타 운영비에 의해 단가가 결정되며, 원자력과 같이 운영률이 높을 경우에는 전기요금에 의해 결정된다. 수전해 수소 생산 단가를 낮추려면, 운영률이 높은 원자력에너지원을 활용하고, 고온증기를 활용한 고온수전해공정

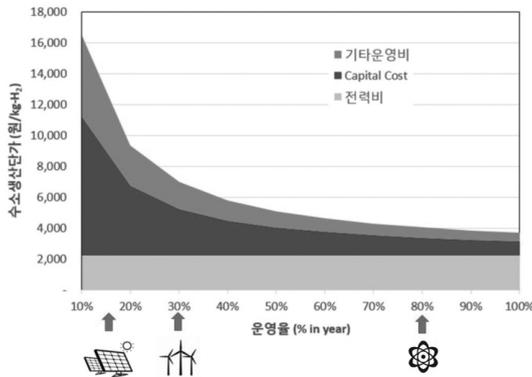
2) 최용호, 국제 그린수소시장 동향, 2021 수소모빌리티+수소 국제수소컨퍼런스, 고양시, 2021.

3) Y. Anouti, S. Elborai, R. Kombargi, R. Hage, The Dawn of Green Hydrogen: Maintaining the GCC's edge in a decarbonized world. Strategy&, 2020.

4) F. Chow-Kambitsch, Decarbonising Hydrogen in a Net Zero Economy, IAEAGC 65 Slide Event, 2021.

5) 김창희, 한국의 그린수소 개발방향, 2021 수소모빌리티+수소 국제수소컨퍼런스, 고양시, 2021.

으로 필요한 전력소모량을 최소화시켜야 한다. 아래의 <표 2><sup>61)</sup>는 아이다호국립연구소가 분석한 원자로 노형에 따른 수소생산에 필요한 전력량과 시스템 전체효율을 보여주고 있다.



[그림 2] 수전해 수소생산단가(김창희, 2021)

<표 2> 원자로형 및 수전해에 따른 효율 (Bragg-Sitton & Boardman, 2020)

원자로형 (수전해방식)	출구 온도 [°C]	수전해 전력량 [kWh/kgH <sub>2</sub> ]	전체 효율 [%]
LWR (PEM)	N/A	39	26%
LWR (HTSE)	300	32	38%
SFR (HTSE)	500	30	54%
AHTR (HTSE)	700	29.5	62%
VHTR (HTSE)	900	29	70%

특히 일반적인 경수로보다 운전온도가 높은 초고온가스로의 경우, 수전해 수소생산뿐만 아니라 수소 생산 열화학공정에도 고온의 열에너지를 공급할 수 있다. 수소 생산 열화학공정에는 현재 상용화된 수소 생산 공정인 증기-천연가스 개질뿐만 아니라 천연가스 열분해, 황-요오

드 열화학사이클 등이 있다. 초고온가스로의 열에너지를 증기-천연가스 개질에 활용할 경우 아래의 그림과 같이 천연가스의 연소 반응을 배제시켜, 탄소포집이 개질 반응 가스 공정에서 이루어지게 되어 기존 공정에 비해 보다 효율적이고 간단하게 이루어질 수 있다.

### 초고온가스로

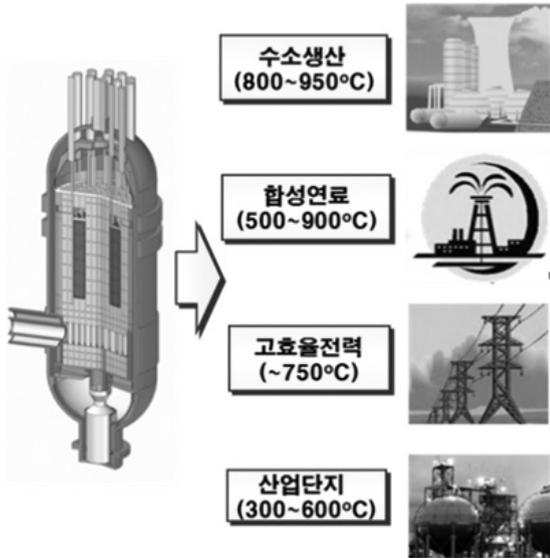
제4세대원자로의 노형 중 하나인 초고온가스로는 핵연료로 피복입자핵연료를, 감속재와 반사체로 흑연을, 냉각재로 헬륨을 사용하고 원자로 출구온도가 700~950°C인 열중성자로이다. 앞에서 설명한 바와 같이 수소생산 효율을 극대화시킬 수 있는 고온의 열에너지를 화석연료 연소 반응 없이 공급할 수 있는 원자로이다.

초고온가스로는 일반적인 경수로와 달리 수소 생산을 포함한 여러 가지 산업공정에 활용될 수 있는 고온의 열에너지를 공급할 수 있기 때문에, 탄소중립사회에서 원자력의 비전력 분야 활용을 위해서는 필수적으로 개발되어야 할 원자로이다. 한계온도가 매우 높은 피복입자핵연료, 열용량이 큰 흑연, 낮은 출력밀도로 인해 원자로 내부 열전도, 원자로용기로부터의 복사열전달, 외부 공기 자연순환 등 자연적인 현상으로 원자로의 잔열을 제거할 수 있는 매우 안전한 원자로이다. 안전성 측면에서는 타 노형에 비해 월등하게 안전하다고 평가할 수 있다. 특히 핵연료로

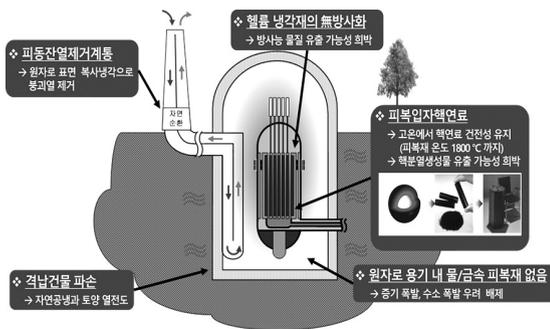
61) S. Bragg-Sitton and R. Boardman, Integrated Energy Systems for Hydrogen & Chemicals Production, Hydrogen and Fuel Cell EEnergy Annual Merit Review, May 2020.



활용되는 피복입자핵연료는 1만년 이상의 피복 재가 손상되지 않고, 1600°C에서도 피복재 손상으로 핵분열생성물이 누출되는 일이 없다. 현재 미국 국방부는 안전성과 재처리 난이도에 따른 핵확산저항성 때문에 군사기지용 이동형 초소형원자로 핵연료로 피복입자핵연료를 고려하고 있다.



[그림 3] 초고온가스로 활용분야



[그림 4] 초고온가스로 안전성

위와 같은 장점들에도 불구하고 초고온가스로는 출력밀도가 경수로의 1/10 수준이기 때문에 상대적으로 큰 압력용기를 요구하고, 대형화에 한계가 있다. 이를 이유로 초고온가스로를 활용한 전력생산은 기존 대형경수로 전력생산에 비해 가격경쟁력이 약하지만, 초고온가스로의 고온 열에너지는 화석연료 대체 및 대형경수로 전력보다 저렴하기 때문에 에너지원 수요지 근처에 건설이 가능하다면 경쟁력이 충분하다고 볼 수 있다. 피복입자핵연료는 핵확산저항성이 우수하지만, 반대로 재처리가 너무 어렵고 기존 경수로 핵연료에 비해 제조단가가 비싼 단점이 있다. 감속재인 흑연 블록으로 인해 폐기물 부피가 기존 경수로에 비해 크게 증가할 우려가 있으나, 흑연블록과 핵연료 분리 및 사용후 핵연료 저장조 관련 기술 개발로 폐기물 부피 저감은 가능할 것으로 평가된다.

### 해외 원자력수소 역사 및 동향

원자력수소는 역사적으로 고유가시대에 수소가 화석연료를 대체하는 에너지 운반체로 주목받을 때마다, 관련 연구가 활발히 진행되어왔다. 1970년대 고유가 시대에 미국과 독일은 상용(초)고온가스로를 건설하였고, 미국 GA社は 수십여개의 물분해 열화학공정을 평가하여 가장 효율적인 공정으로 황-요오드 열화학공정을 선정하였다. 독일은 (초)고온가스로와 천연가스-증기개질 공정을 연계하는 파일럿 규모의 실증 연구를 완료하였다. 1985년 이후 유가가 안정

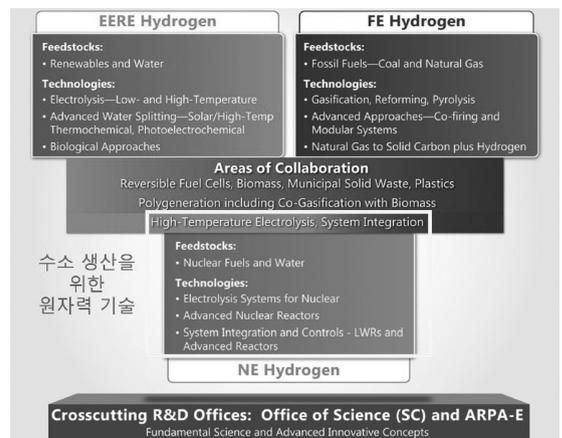
되면서, 미국과 독일은 (초)고온가스로 운전을 경제적인 이유로 중단하였다. 2000년대 중동 정세 불안으로 유가가 폭등하면서, 에너지 안보 확보 및 화석연료 대체를 위해 미국을 중심으로 원자력수소 연구가 착수되었으며, 초고온가스로가 수소생산을 위해 제4세대 원전의 노형 중 하나로 포함되어 개발이 시작되었다. 2010년대 이후 셰일가스 개발이 본격화되면서 수소 관련 연구가 대폭 축소되었다가, 파리기후협약(15.12) 이후 탄소 중립 사회가 강조되면서, 원자력 수소 관련 연구 및 사업이 다시 활발해졌다. 우리와 에너지 환경이 유사한 일본과 중국은 각각 1969년, 1979년부터 초고온가스로 및 수소 생산 연구를 꾸준히 수행해왔다.

과거와 다르게, 수전해 기술이 고도화되면서 초고온가스로를 활용한 수소 생산뿐만 아니라, 기존 가동 중인 경수로의 저렴한 유류 전기를 이용한 수전해 수소생산 실증연구가 미국 등의 재생에너지원이 풍부한 선진국들을 중심으로 수소 경제 가속화를 위해 수행되고 있다.

2020년 11월, 미국 에너지부는 부 산하 실의 수소 관련 세부 기술 개발 계획 및 전략 등을 통합한 DOE 수소프로그램 계획<sup>7)</sup>을 발표하였다. 원자력실은 단기적으로 가동원전 이용 수소 생산 실증을 지원하고, 장기적으로는 경제적인 수소 생산에 활용할 수 있는 고온가스로형 선진 원자로 개발 및 실증을 추진하고 있다. 현재 가동 중인 Davis-Besse, Nine Mile Point 경수

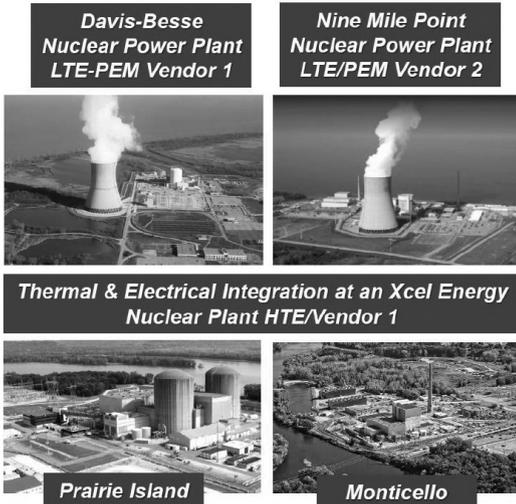
로 전기를 활용한 MW급 저온수전해 PEM 수소 생산 실증 사업이 추진되고 있다. Xcel Energy社의 Praire Island, Monticello 경수로의 열에너지와 전기에너지를 활용한 고온수전해 타당성 연구가 진행되고 있다. 미국의 아이다호국립연구소는 Fuel Cell社와 Bloom Energy社와 협력하여 원자력 활용 대용량 고온수전해 실증(250kW급) 및 고온선진원자로를 포함한 통합 에너지시스템 개발 관련 연구를 수행하고 있다. X-energy社, USNC社, BWXT社 등 미국의 여러 산업체들은 고온의 열을 생산할 수 있는 고온 선진원자로 실증 및 관련 개념 개발을 활발히 수행하고 있다. 2030년 이후가 되면, 고온선진원자로와 GW급 대용량 고온수전해 실증이 완료되어 상업화가 될 것으로 전망된다.

캐나다 수소 계획에도 원자력수소가 포함되어 있으며, 온타리오, 뉴브런즈윅주는 가동원전을 활용한 수전해 수소 생산을 고려하고 있고, 천연



[그림 5] DOE 실별 수소 생산 기술개발 프로그램

7) 미국 에너지부, Department of Energy Hydrogen Program Plan, 2020.



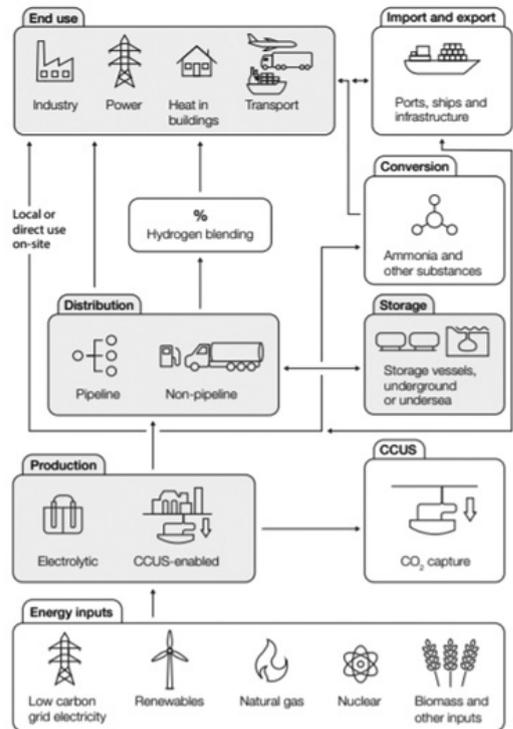
[그림 6] 미국 LWR 수전해 프로그램<sup>8)</sup>

가스-증기 개질 공정에 공급되는 증기를 원자력 에너지를 활용하여 생산할 계획도 가지고 있다.

영국은 자국의 에너지백서에서 2030년까지 5GW의 저탄소 청정 수소 생산 목표를 발표하였고, 신규 대형경수로 건설 재개와 롤스로이스를 중심으로 경수형 SMR 개발 착수를 결정하였다. 2021년 8월 영국은 그린수소에 재생에너지 뿐만 아니라 원자력을 수전해 에너지원으로 포함했으며<sup>9)</sup>, 수소 생산 계획에 [그림 7]과 같이 원자력 활용을 명시하였다. 2021년 7월 영국의 산업부는 탄소중립을 위한 수소 생산과 공정열 공급을 위해 초고온가스로 개발 착수를 발표하였고<sup>10)</sup>, 관련 세부 계획을 준비 중에 있다.

프랑스는 원자력을 포함한 70억 유로 규모의 그린 수소 생산 정책을 2020년 9월에 발표

한 바 있으며, 프랑스 원전 운영사인 EDF는 영국의 가동 원전 이용 수소 생산 실증 및 사업화를 적극 추진하고 있다. 이를 위해 원자력 수소를 위한 자회사 Hynamics를 설립하였고, H2H(Hydrogen to Heysham) 컨소시엄을 통해 [그림 8]과 같이 영국 Lancashire 원전부지에서 수전해 수소 생산 시설 적용 타당성 입증 사업을 수행 중이다. 이와 별도로 현재 영국 Sizewell C 원전의 수소생산 파트너를 확보 중에 있다.

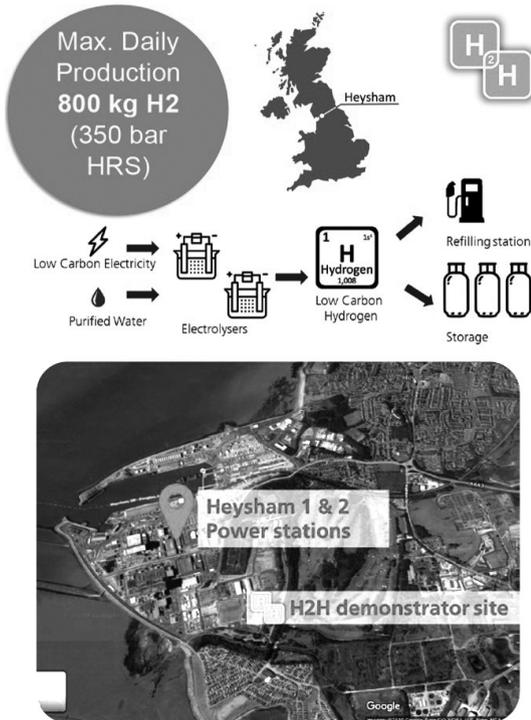


[그림 7] 영국의 수소 가치 사슬 계획

8) R. Boardman, S. Bragg-sitton, Innovations in the Production and Use of Nuclear Energy for Zero-Emissions Products, 65th IAEA General Conference, Innovations in the Production and Use of Nuclear Hydrogen for a Clean Energy Transition, 21 September 2021.

9) HM Government, UK Hydrogen Strategy, CP475, Aug 2021.

10) UK BEIS, Advanced Modular Reactor Research Development & Demonstration Programme, Sep 2021.



[그림 8] EDF 영국 원전 수전해 타당성 연구<sup>11)</sup>

유럽연합은 Horizon 2020 자금 지원으로 폴란드 화공단지 온실가스 감축을 위해 고온 고압 증기 공급용 초고온가스로 개념설계와 실증사업 추진을 위한 GEMINI+ 과제를 착수하였다. 폴란드는 초고온가스로를 단기적으로 화공단지 석탄발전 대체에 활용하고, 장기적으로는 수소 생산에 활용할 계획이다.

러시아 정부는 2024년까지 러시아 수소 에너지 개발계획을 승인하였고, 이 수소 생산 계획에 러시아 국영 원자력회사인 ROSATOM社의 원자력 기술 활용이 포함되어 있다. 단기적으로는

경수로 잉여전력을 활용한 수전해 기술을 개발하고, 장기적으로는 초고온가스로를 이용한 수소 생산 화학공정과 탄소 포집/저장이 고려된 천연가스 증개 개질 공정 기술을 개발한다. 러시아 Kola 경수로가 50MW급 저온수전해 모듈에 전기를 공급하여 수소를 생산하는 실증사업이 진행되고 있다.

일본은 JAEA를 중심으로 1997년 초고온시험로(HTTR)를 건설하고, 2005년 초고온헬륨 루프를 이용하여 가압 천연가스-증기개질 수소 생산 공정을 실증한 바 있다. 2010년에 세계 최초로 초고온시험로 950℃ 연속 운전을 달성하였으며, 2019년 1월 실험실 규모 가압수소생산(30NL/hr) 황-요오드 공정 150시간 연속 운전에 성공하였다. 후쿠시마 사고 이후 HTTR은 가동이 중단되었으나, 2020년 6월 3일에 HTTR 재가동 관련하여 일본 규제기관 NRA의 승인을 받았고 2021년에 HTTR은 재가동되었다. 재가동 후 JAEA는 후쿠시마 사고 이후 지연되었던 OECD/NEA 국제 공동연구인 HTTR 안전성 검증시험을 재착수하였으며, [그림 10]과 같이 2030년까지 HTTR과 천연가스-증기 개질 연계 실증 연구를 완료하고 2040년까지 HTTR와 황-요오드 공정 연계 실증 연구를 완료할 계획이다<sup>12)</sup>.

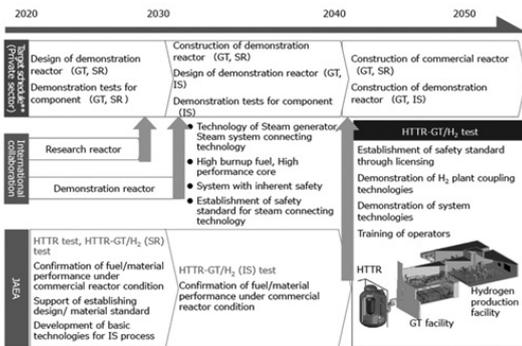
중국은 1979년 독일의 페블형 고온가스로 기술을 도입하여, 중국 INET은 2000년에 페블형

11) T. Dawood, Hydrogen from Nuclear: The EDF Experience, The New Nuclear Watch Institute Webinar, The Synergy of the Hydrogen Economy and Nuclear Energy, 17 December 2020.

12) K. Kunitomi, R&D Activities in JAEA for HTGR Developments, Japan-U.S. Nuclear Research and Development Cooperation Symposium, Oct 22, 2020.



고온시험로 HTR-10을 건설하였다. HTR-10 기술을 기반으로 중국은 웨이하이시에 열출력 200MWth 2기로 구성된 HTR-PM 실증로를 건설하여 2021년 말까지 전력망에 전력을 공급할 계획이다. 2021년 9월에 HTR-PM은 첫 임계를 달성하였다. INET은 현재 초고온가스 기술 국산화 연구 및 HTR-PM 개발에 활용되었던 HTR-10은 수소생산 연구를 위해 출구온도를 기존 750℃에서 950℃로 높이기 위한 설계 개선 연구를 수행하고, 고효율 황-요오드 공정 연계를 위해 100kW급 헬륨루프를 건조하고 있다.



[그림 9] JAEA의 원자력수소 개발 계획



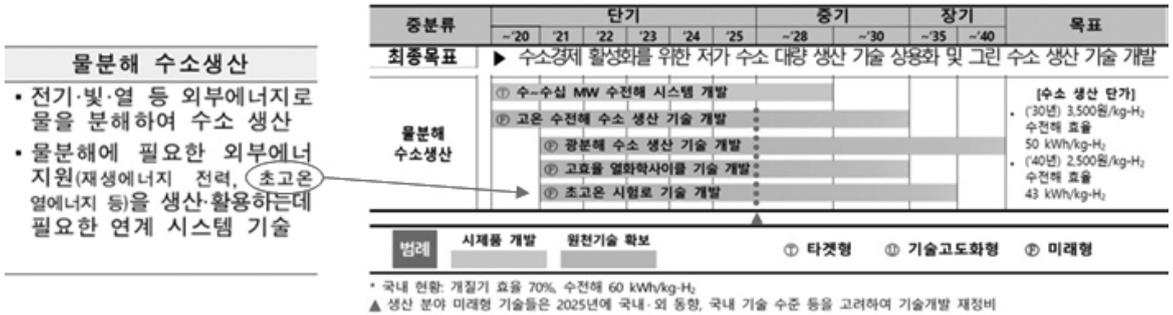
[그림 10] HTR-PM (source: neimegazine)

### 국내 원자력수소 연구 성과 및 현황

2019년 1월 17일 과기정통부 외 5개 부처는 수소경제활성화로드맵 이행을 위한 수소기술개발로드맵<sup>13)</sup>을 2019년 10월 31일에 발표하였다. 수소 생산 기술의 최종목표는 2040년까지 수소 생산 단가를 2,500원/kg수소를 낮추는 것이 목표이고, 단기적으로 증기개질 기술을 개발하고, 2030년까지 300MW급 50kWh/kg수소의 저온수전해 공정을 개발하여, 재생에너지와 연계하여 그린수소를 생산하는 것이 목표이다. 초고온가스로는 [그림 11]과 같이 물분해 수소 생산의 부문별 추진 전략에서 초고온시험로라는 이름으로 고온수전해 기술 등과 함께 미래형 기술로 분류되어 있다. 수소 생산 분야 미래형 기술은 2025년 국내의 기술 개발 동향 및 기술 수준을 고려하여 재정비될 예정이고, 각 기술들은 부처 자체 사업으로 기술수준을 높이는 연구가 진행 중이다.

제4세대 원전 개발이 착수되었던 2000년대 이후, 한국원자력연구원은 한국에너지기술연구원 및 한국과학기술연구원 등과 공동으로 초고온가스를 활용한 물분해 수소생산 핵심기술 개발을 과기정통부 지원의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행하였다. 주요 성과로 아래 그림과 같이 고온가스로 개념설계 사업 착수가 가능한 수준의 초고온가스로 설계기술, TRL 4~5 수준의 초고온 기기 시험이 가능한 중형헬륨루프 건조 및 초고온 시험, 실험실 규모 피복입자

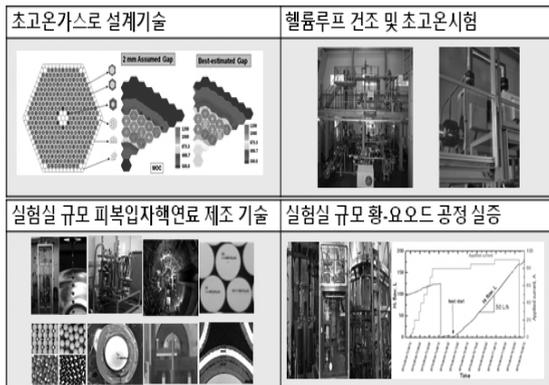
13) 한국, 수소기술개발로드맵, 2019.10.31.



[그림 11] 수소기술개발로드맵-생산분야, 미래형 기술 (수소기술개발로드맵, 2019)

핵연료 제조 기술 확보 및 시제품 조사시험, 세계 최초 실험실 규모(50NL/hr 수소 생산) 가압황-요오드 공정 8시간 연속 운전 등이다. 이외에도 GenIV 재료 연구에 적극참여하여, 초고온가스로 재료 관련 국제 자료기반 구축에 관련 시험자료를 제공하였고, 인쇄기판형 열교환기 기술 개발 및 기술이전으로 관련 국내 산업체 기술력 제고 및 활성화에 기여하였다.

함한 초고온시스템 핵심기술 개발 사업을 수행하고 있다. 기존 연구 성과인 초고온시스템 설계 기술과 재료 성능 검증 기술의 성능을 향상시키고, 현재 기술 발전 속도가 빠른 수소 생산 공정인 고온수전해와 초고온시스템을 연계시킬 수 있는 기술을 개발하고 있다. 또한 현대엔지니어링(주), 미국의 USNC社와 초고온가스로 개발 및 건설 협력 연구와 (재)포항산업과학연구원과 원자력 고온수전해 실증연구를 수행하고 있다. 특히 기 구축된 헬륨루프를 활용하여 초고온 증기를 생산하고 이를 (재)포항산업과학연구원이 제작한 고온수전해 모듈에 공급하여 수소를 생산하는 실험연구를 2024년 말까지 완료할 계획이며, 향후 지속적 협력으로 대용량 고온수전해 성능 입증연구에 참여할 계획이다.

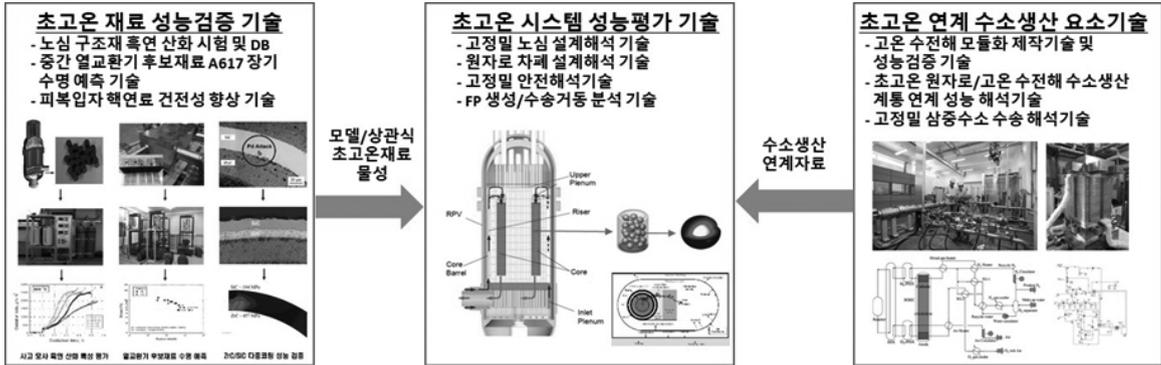


[그림 12] 원자력수소 핵심기술 개발 대표 성과

현재 한국원자력연구원은 과기정통부 지원의 미래선진원자로핵심요소기술개발사업의 내역 사업으로 [그림 13]과 같이 초고온가스로를 포

탄소중립사회에서 원자력 활용 분야는 기존 전력 생산에 국한되지 않고, 수소 생산 및 공정 열 공급으로 확장될 전망이다. 현재 주요 원자력

맺음말



[그림 13] 초고온시스템 핵심기술 개발

선진국들은 원자력을 활용한 수소 생산 기술 개발 및 실증사업을 활발하게 수행하고, 경쟁적으로 투자 계획을 발표하고 있다. 미래 사회에서 수소는 단순히 신재생에너지의 간헐성 흡수를 위한 저장 수단이 아니라, 지금의 석유와 천연가스와 같은 에너지 운반체로 활용될 것이다. 원자력수소는 이전에 경수로가 저렴한 전기를 공급했던 것처럼 미래 산업경쟁력에 필수적인 저렴한 수소를 안정적으로 공급하고, 그린 수소 해외 의존도 감소로 에너지 안보 확보에도 기여할 것으로 기대된다. 따라서, 국내 원자력 산업계는 현재 상용화 단계에 있는 저온수전해 기술에 현재 가동원전의 전기를 이용한 그린 수소 생산으

로 일반 대중과 정책입안자에게 원자력을 활용한 수소 생산이 가능함을 인식시키고, 원전 주변에 대규모 수소생산시설 설치 관련 인허가를 준비해야 한다. 학계와 연구계는 수소 분야와의 협력연구로 수소 생산, 저장 기술의 대용량화를 선도하고, 초고온가스로와 같은 수소생산 효율을 극대화시킬 수 있는 고온 선진원자료를 개발해야 한다. 최종적으로 앞으로 개발될 고온수전해 공정과 초고온가스로와 경수로를 포함한 원자로와 연계해 정부가 목표한 2040년 수소경제활성화를 위한 수소 생산을 위해 저렴하고, 안전한 에너지 공급에 원자력이 기여해야 한다. **KIIF**