

세계원전시장 인사이드

World Nuclear Power Market **INSIGHT**



현안이슈

미국의 원자력 수소 개발 동향과 시사점

1. 들어가며
2. 원자력 수소와 지속가능 수소 조건
3. 미국의 원자력 수소 정책 동향
4. INL의 수소 샷 이행 원자력 수소 연구 동향
5. 한국의 원자력 수소 타당성과 시사점

주요단신

북미 17

- 미국, 러시아산 우라늄 수입제재 반대 움직임
- 미국 DOE, 원자력 포함한 자국 에너지분야 공급망 확보 전략 발표
- 미국 GM, PG&E와 전기차 비상전원 활용을 위한 시범사업 착수
- 기타단신

유럽 23

- 체코, Dukovany 신규 원전 입찰 개시
- IEA, 러시아산 천연가스 의존도 축소 방안을 담은 10대 계획 발표
- 헝가리, 러시아와 Paks 원전 증설 협력 지속 발표
- 영국, Rolls-Royce SMR 설계심사 ... 착수 4년 소요 예상
- 불가리아, 그리스와 신규 건설될 원전의 전력구매계약 협의 시작
- 기타단신

아프리카 29

- 가나, SMR 도입기반 마련 위해 미국과 협력
- 기타단신

아시아 32

- 일본 대법원, 도쿄전력의 후쿠시마 원전 사고 배상 책임 인정
- 일본 여당, 원전 조속한 원전 재가동 촉구
- 필리핀, 원전 포함한 에너지 전환계획에 서명
- 기타단신





세계원전시장 인사이트

World Nuclear Power Market **INSIGHT**

Biweekly 격주간 **2022 03.18**

※ 본 간행물은 한국수력원자력(주) 정책과제의 일환으로 발행되었습니다.

발행인	임춘택		
편집인	박찬국	green@keei.re.kr	052-714-2236
	조주현	joohyun@keei.re.kr	052-714-2035
	남경식	ksnam@keei.re.kr	052-714-2192
	신재정	jjshin@keei.re.kr	052-714-2054
	김선진	sunjin@keei.re.kr	052-714-2018
	김수린	ksr626@keei.re.kr	052-714-2095
	한지혜	jhhan@keei.re.kr	052-714-2089
	김유정	yjkim@keei.re.kr	052-714-2294
	이선미	smlee11@keei.re.kr	052-714-2151
디자인·인쇄	효민디앤피		051-807-5100

본 「세계원전시장 인사이트」에 포함된 주요내용은 연구진 또는 집필자의 개인 견해로서 에너지경제연구원의 공식적인 의견이 아님을 밝혀 둡니다.

미국의 원자력 수소 개발 동향과 시사점

서울대학교 원자력정책센터 박찬오 연구위원 (copark5379@snu.ac.kr)

1. 들어가며

- 한국과 미국을 포함한 주요국은 청정수소, 특히 수전해 수소를 기후위기 대응의 핵심 축으로 인식하고 부존자원과 강점기술 등의 자국 여건에 최적화된 전략과 정책을 수립 및 이행하고 있음.
- 우리 정부는 수소경제 전주기 생태계 구축을 통하여 청정수소경제를 선도하겠다는 비전과 그 이행을 위한 전략과 과제를 담아 2021년에 ‘제1차 수소경제 이행 기본계획¹⁾’을 발표함.
 - 기본계획에서 청정수소 생산 계획, 특히 그린 수전해 수소 생산단가 목표를 도전적으로 설정하고 있으나, 원전에서 발생한 열과 전기를 활용해 생산되는 수소를 청정수소에 포함하지 않고 있음.
 - 계획에 따르면, 2030년 총 수소 수요 390만 톤 중 25만 톤은 생산단가 3,500원/kg 수준의 그린수소로 공급하고 75만 톤은 블루수소로 공급함.
 - 2050년 총 수소 수요 2천 790만 톤 중 300만 톤은 생산단가 2,500원/kg 수준의 그린수소로 공급하고, 200만 톤은 블루수소로 공급함.
 - 청정수소경제가 지속가능하려면 생산된 수소가 기존 산업 연료·원료에 비교해 경쟁력을 갖추고, 무엇보다 보조금을 지급받지 않거나 그 규모가 최소화되는 수준에서의 수익성을 갖추어야 함. 지속가능한 청정수소경제 실현을 위해 한국의 청정 원자력 수소의 기술·경제적 가능성을 확인할 필요가 있음.
 - 기본계획에 따르면, 정부는 그린수소 생산의 경제성 담보를 위하여 수전해 공급인프라 설치 보조와 기타 인센티브 방안을 추진함.

1) 제1차 수소경제 이행 기본계획, 관계부처 합동, 2021.11.26.

- 미국은 2010년대 중반부터 가동원전의 수지 개선 일환으로 원전을 이용한 원자력 수소 생산 타당성을 연구해 왔으며, 바이든 행정부에 들어서는 온실가스 감축의 핵심 수단으로서 청정수소 기술개발과 산업화를 정부가 적극 지원하고 있음.
 - 미국은 아이다호국립연구소(Idaho National Laboratory, INL)을 중심으로 원자력 수소의 기술·경제적 타당성과 수소를 매개로 하는 하이브리드 에너지 시스템을 연구하여 왔으며 근년에는 가동원전을 이용한 수전해 수소 생산 실증을 수행하고 있음.
 - 미국 정부는 2026년까지 청정수소 생산단가를 2달러/kg까지 절감하려는 목표를 담은 인프라 법²⁾을 2021년 11월에 제정하였으며 에너지부(DOE)는 2030년까지 청정수소 생산단가를 1달러/kg까지 낮추는 Hydrogen Shot Initiative를 발표해 2021년 6월부터 추진하고 있음.
- 본고에서는 미국의 청정수소 정책 및 원자력 수소 개발 동향을 분석하고, 한국 원자력 수소의 타당성을 평가하여 수소경제 이행방안의 시사점을 정리하고자 함.
 - 2장에서는 원자력 수소를 포함한 수소 생산 방법 및 전망을 정리하고 수소 경제 성공의 핵심 전제인 청정수소의 지속가능성에 대하여 기술함.
 - 3장에서는 미국의 원자력 수소 사업 추진 배경 및 동향과 작년 말 발효된 인프라 법의 청정 수소 관련 내용을 정리하고 INL의 가동원전활용 원자력 수소 생산 연구내용을 소개함.
 - 4장에서는 한국 원자력 수소의 타당성을 평가하고 시사점과 과제를 정리함.

2. 원자력 수소와 지속가능 수소 조건

- 수소는 지구상에서 수소 원소로 존재하지 않고, 물이나 화석연료 등의 화합물 형태로 존재하며 이로부터 수소를 분리하기 위해서는 상당량의 에너지 투입이 필요함.
 - 수소를 생산하는 방법은 분리 대상 원료(수소 함유 화합물)와 투입 에너지원의 조합에 따라 다양하며 <표 1>에서와 같이 수소 생산 기술을 편의상 색상으로 구분함.
 - 현재 전 세계에서 사용되는 수소는 거의 대부분이 화석연료 기반의 추출 수소(그레이수소 혹은 브라운수소)로 연간 약 9억 톤의 이산화탄소를 배출하고 있음.

2) Public Law 117-58, Infrastructure Investment and Job Act, 2021.11.15.

- IEA 보고서에 따르면, 세계의 수소 수요는 현재 9천만 톤에서 빠르게 확대되어 2050년에는 5억 2천만 톤에 이를 것이며 수소 생산방식도 그레이 수소에서 탄소 저배출 청정수소, 특히 수전해 기술을 활용해 수소를 생산하는 방식으로 빠르게 대체될 것으로 전망하고 있음.³⁾
- 원자력 수소는 초고온가스로(VHTR)를 이용할 경우 가장 높은 에너지 효율을 기대할 수 있으나 VHTR의 기술성 및 경제성 실증이 선결되어야 하므로 2030년대 중반까지는 경수로형 원전에서 생산한 전력으로 수전해 기술을 적용한 수소생산, 특히 고온증기전해를 활용한 핑크 수소가 대체를 이룰 것으로 전망됨.

〈표 1. 수소 생산 방법 및 색상 코드〉

색상 코드	에너지원	원료	공정	결과물
Brown	석탄 (또는 원자력 열)	석탄+수증기+O ₂	가스화(Winkler 공정 800~950°C)	H ₂ +CO ₂ (대기방출)
Gray	천연가스 (또는 원자력 열)	천연가스+수증기	증기개질(800~900°C)	H ₂ +CO ₂ (대기방출)
Blue	천연가스 (또는 원자력 열)	천연가스+수증기	증기개질 + CCS	H ₂ +CO ₂ (% 포집)
Turquoise	천연가스 (또는 원자력 열)	천연가스	열분해(600~900°C)	H ₂ +C(고체)
Red	원자력 열	H ₂ O	열화학분해(~ 950°C)	H ₂ +O ₂
Purple	원자력 열 + 전기	H ₂ O	열화학+전기분해(650~850°C)	H ₂ +O ₂
Pink	원자력 전기 + 열	H ₂ O	전기분해(20~80°C 또는 650~850°C)	H ₂ +O ₂
Yellow	전력망 전기	H ₂ O	전기분해	H ₂ +O ₂
Green	재생에너지 전기	H ₂ O	전기분해	H ₂ +O ₂

※ 자료: Hydrogen Colours codes, <https://www.h2bulletin.com/knowledge/hydrogen-colours-codes/>

- 청정수소 시장 확대와 수소경제 성공의 핵심 전제 조건은 기존 탄소배출 에너지원 대비 청정수소의 가격에서의 경쟁우위 확보라고 볼 수 있음. Hydrogen Council이 제시하는 주요 대체 대상 기술의 손익분기 청정수소 생산단가는 아래 〈표 2〉와 같음.⁴⁾
- 자료에 따르면, 이산화탄소 배출비용으로 100달러/t 부과 시 수소 생산단가가 1달러/kg 이면 전체 대상 업종에서 경쟁력을 갖출 것으로 예상됨.

3) IEA, Global Hydrogen Review 2021

4) Hydrogen Council, Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness 2021.02.

〈표 2. 손익분기 청정수소 생산 단가(\$/kg-H₂)〉

기존 경쟁 기술	탄소비용 미부과	탄소비용 부과 (\$100/t CO ₂)
디젤 엔진 버스	\$4.40	\$5.40
디젤 엔진 기차	\$3.80	\$5.10
디젤 엔진 SUV	\$2.20	\$4.40
디젤 엔진 트럭	\$2.20	\$2.80
암모니아(천연가스 SMR)	\$1.40	\$2.20
석유정제(천연가스 SMR)	\$1.40	\$2.20
천연가스 발전	\$0.80	\$1.40
석탄 환원 제철	\$0.60	\$4.60
디젤 엔진	\$0.60	\$2.30
등유 엔진 항공기	\$0.60	\$1.00
천연가스 난방	\$0.50	\$1.20
디젤 엔진 선박	\$0.30	\$1.00

※ 자료 : Hydrogen Council, Hydrogen Insights, 2021.02.

3. 미국의 원자력 수소 정책 동향

■ 가동원전을 이용한 원자력 수소 연구는 주로 원전의 경영 수지 개선을 목적으로 INL을 중심으로 수행되어 왔으며, 바이든 행정부 들어서면서 청정수소가 기후변화 대응의 중요한 축으로 자리 잡음에 따라 원자력 수소의 역할도 증대됨.

- 미국의 가동원전은 저렴한 가스 발전과 비용이 지속 하락중인 재생에너지와의 경쟁 상태이며, 지역에 따라 특히 전력시장 자유화 지역에서는 조기 폐쇄를 고려할 만큼 수지가 악화됨.⁵⁾
 - 한 민간그룹의 보고서에서는 천연가스 가격이 \$3/MMBtu 이하로 유지될 시 2030년까지 전체 가동원전의 1/3(32GW) 이상이 폐쇄될 것으로 예측함.⁶⁾
 - 바이든 행정부는 가동원전의 경영난 완화를 위하여 지난해 11월 발효된 ‘인프라 법’의 Title III Subtitle C(원자력 인프라)를 통하여 2026년까지 60억 달러(약 7.4조 원)의 보조금을 지원할 예정임.

5) 미국 원자력협회(Nuclear Energy Institute, NEI)에 따르면, 원전이 운영되는 28개 주 중 10개 주의 전력시장이 자유화되어 있음.

6) Rhodium Group, Taking Stock 2021; US Greenhouse Gas Emissions Outlook under Current Federal and State Policy, 2021.07.15.

- 가동원전을 이용한 원자력 수소생산과 관련하여 미국 정부가 지원한 주요 연구 및 실증은 아래와 같음. (<표 3> 참조)
 - 2000년대 중반, INL은 아리조나 주의 Palo Verde 원전을 이용한 저온 수전해 기반의 원자력 수소생산 타당성 연구를 수행하였으며, 수소설비 설치를 원전부지 안과 밖으로 구분하여 안전 규제 및 인허가성 검토도 함께 수행함.⁷⁾
 - 2010년대 중반, 원자력 수소를 포함하는 원자력·재생 하이브리드 에너지 시스템(NR-HES) 타당성 등의 다양한 연구가 진행되었음.
 - 2019년에는 INL이 가동원전을 이용한 고온증기전해 기반 수소생산의 기술·경제적 타당성 평가 보고서⁸⁾를 발간하였으며 여기에는 수소계통의 기술사양과 원전 계통과의 연계가 비교적 자세히 상술되어 있음.(보다 자세한 내용은 제 4장 참조)
 - 2010년대 후반부터 저온 수전해 및 고온 증기전해 기반의 원자력 수소 실증 연구가 4개 원자력 발전사와 INL과의 협업으로 진행되어 왔음.

<표 3. 원자력 수소 생산 기반마련을 위한 미국 정부의 주요 연구 및 실증 지원 현황>

착수 년월	지원 금액	수행 기관/발전사(원전)	목적
'19. 9	1,148만 달러	Energy Harbor(David Besse)	저온수전해 실증(2MW PEM)
		Xcel Energy(Prairie Island)	고온증기전해 실증
		APS(Palo Verde)	저온수전해 및 수소가스터빈 실증
'20. 4	360만 달러	Exelon(Nine Mile Poit)	저온수전해(1MW PEM) 실증
'20. 10	1,380만 달러	Xcel Energy(Prairie Island)	고온증기전해 실증
	1,250만 달러	FuelCell Energy	250kW 고온증기전해시스템
'21. 10	2,000만 달러	PNW+APS(Palo Verde)	저온수전해, 6톤 수소 저장 및 수소가스터빈 실증

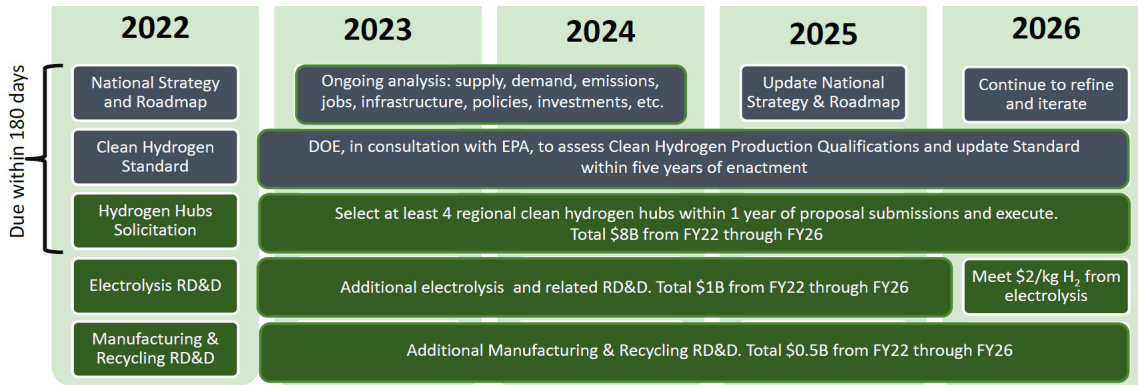
■ 원자력 수소를 포함한 바이든 행정부의 청정수소 정책은 ‘인프라 법’의 Title III Subtitle B(수소 연구개발)에 자세히 설명되어 있으며 주요 내용은 아래와 같음.

- 청정수소의 정의와 전해수소 생산단가 목표를 아래와 같이 법으로 정함.
 - 청정수소 정의: 생산현장 기준으로 CO₂ 배출이 수소 1kg 생산당 2kg 이하인 수소
 - 전해수소 생산단가 목표: 2026년까지 \$2/kg-H₂ 이하

7) INL, Feasibility Study of Hydrogen Production at Existing Nuclear Power Plants, INL/EXT-09-1623, 2009.07.
 8) INL, Evaluation of Hydrogen Production Feasibility for a Light Water Reactor in the Midwest, 2019.09.

- 청정수소 사업의 항목별 주요 일정은 아래 <그림 1>과 같음.
 - 에너지부는 법 발효 이후 180일 이내(2022년 5월까지)에 국가 청정수소 전략 및 로드맵 수립, 청정수소 표준 개발, 지역 청정수소 허브 제안서 제출 공고를 해야 함.
 - 지역 수소 허브는 수소 생산원의 다양성, 수소 사용처의 다양성, 지역의 다양성, 고용 등을 고려하여 최소 4개를 선정하되 원자력 수소 허브를 적어도 1개 선정해야 함.
- 청정수소 연구개발 예산은 5년(2022~2026년)간 95억 달러(약 11.8조 원)이고 그 내역은 아래와 같음.
 - 청정수소 지역허브 조성: 80억 달러
 - 수전해 기술 연구 개발: 10억 달러
 - 제조 및 재순환 기술 연구 개발: 5억 달러
- DOE는 2022년 1월에 215억 달러 수권예산(탄소포집저장 및 원전지원 등 포함) 집행을 위한 전담 부서(OCED: Office of Clean Energy Demonstrations)를 신설하였으며 2월에는 지역 수소 허브 조성을 위한 정보공개요청서(RFI, Request for Information)를 발표함.

<그림 1. 미국의 청정수소 개발 일정>



※자료 : DOE 수소연료전지실(HFTO) 2021.12., <https://bit.ly/36pFPPrj>

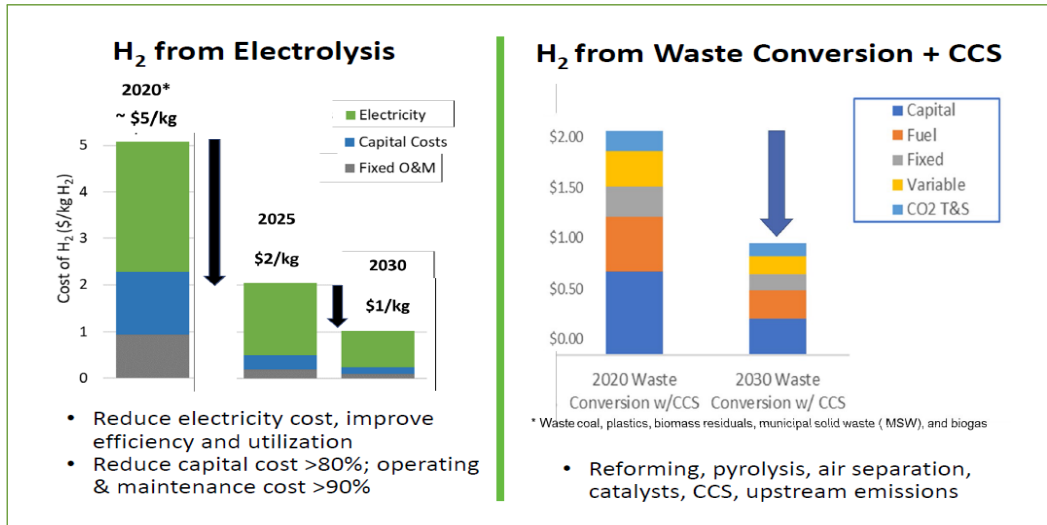
- 이밖에 청정수소 생산 장려를 위하여 2030년까지 한시적으로 수소 1kg당 최대 3달러의 세액 공제를 규정하는 ‘Build Back Better Bill’은 2021년 11월에 하원을 통과하고 현재 상원에서 계류 중임.
 - 세액 공제는 1kg 수소 생산 당 전 수명 주기에 걸친 온실가스 배출량에 따라 차등 적용됨.
 - 즉, 0.45kgCO₂ 미만 배출이면 3달러, 0.45~1.5kgCO₂ 이면 1달러, 1.5~2.5kgCO₂이면 0.75달러, 2.5~4kgCO₂ 이면 0.6달러이고 4~6kgCO₂ 이면 0.45달러를 적용함.

- 천연가스의 주성분인 메탄가스의 이산화탄소 대비 높은 온실효과(약 86배)와 천연가스의 채굴 및 취급과정에서 생기는 상당량의 손실물(미국 평균 2.3%, 텍사스 퍼미안 분지 2.7%)을 고려하면, 블루수소라도 세액공제 혜택은 0.6달러 이하일 것으로 예상됨.
- 반면에 원자력 수소(핑크 수소)나 그린 수소는 3달러 전액을 수혜 받을 것으로 예상되므로 이런 청정수소 생산 인센티브 제도는 초기 원자력 수소 시장 형성과 함께 기술혁신, 생산 단가하락, 시장 확대의 선순환을 유발하는 요소로 작용할 것으로 전망됨.

■ DOE는 인프라 법의 2026년 목표 외에 청정수소 생산단가를 2030년까지 추가적으로 인하하는 Hydrogen Shot 즉 “1 1 1”⁹⁾ 계획을 2021년 6월에 발표함.

- 해당 계획에서는 2030년까지 청정수소 생산단가를 1달러/kg으로 낮추는 것을 목표로 함.

〈그림 2. DOE의 Hydrogen Shot 구상〉



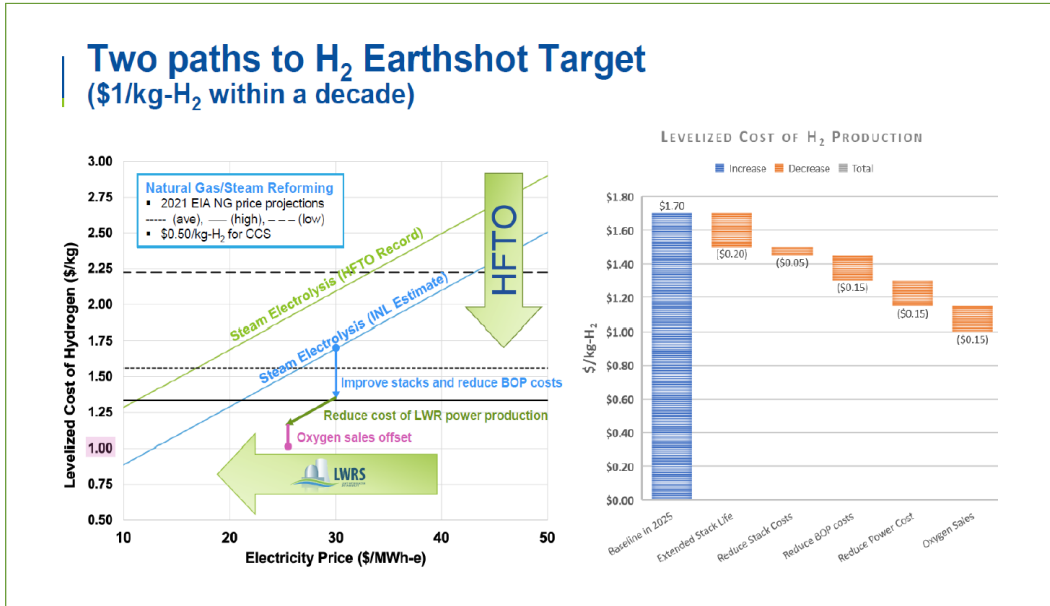
※ 자료 : DOE 수소연료전지실(HFTO) 2021.12., <https://bit.ly/36pFPrj>

4. INL의 수소 샷이행 원자력 수소 연구 동향

- INL은 원자력 수소의 Hydrogen Shot 이행 구상을 발표함.
 - 수전해 설비 양산에 의한 설비비(CAPEX) 감소, 전해 스택 수명 증가에 의한 운영비(OPEX) 감소와 생산원가 비중이 가장 큰 원전발전 비용 감소로 고온중기전해 원자력 수소 생산 단가를 1달러/kg까지 낮출 수 있을 것으로 전망함. (〈그림 3〉 참고)

9) \$1 for 1kg clean hydrogen in 1 decade.

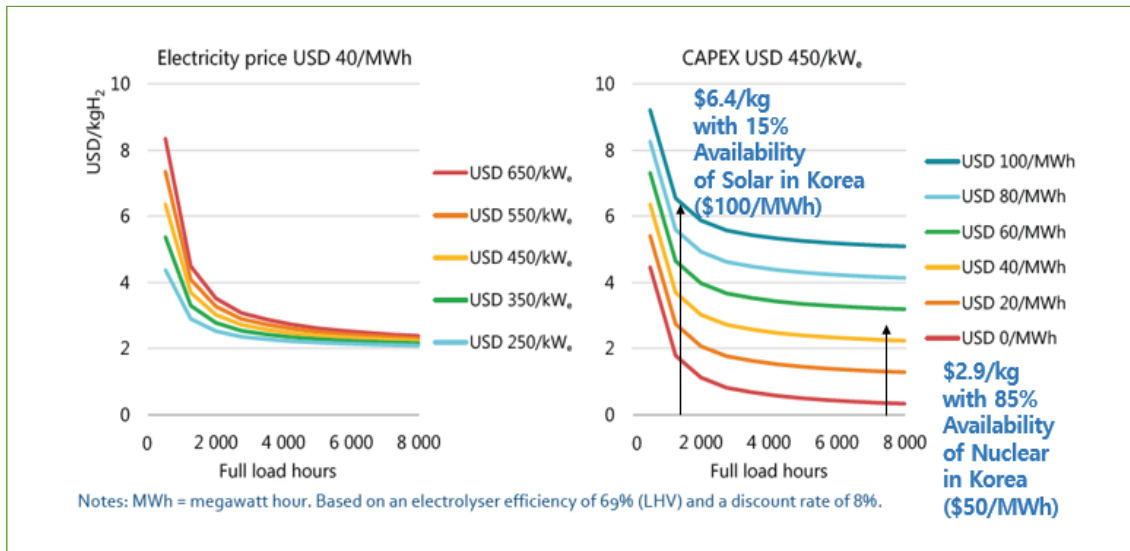
〈그림 3. INL의 원자력 수소 Hydrogen Shot〉



※ 자료 : 65차 IAEA 정기총회, 2021.09.21., <https://bit.ly/3q9tRsk>

- 수전해 수소 생산단가를 결정하는 인자는 전기요금, 설비비, 설비 이용률, 설비 성능(전기 효율, 스택 내구성) 등 임. 인자별 주요 이슈는 아래와 같으며 단가에 미치는 영향은 〈그림 4〉와 같음.

〈그림 4. CAPEX, 수전가격, 이용률에 따른 수전해 수소 생산 단가 추이〉



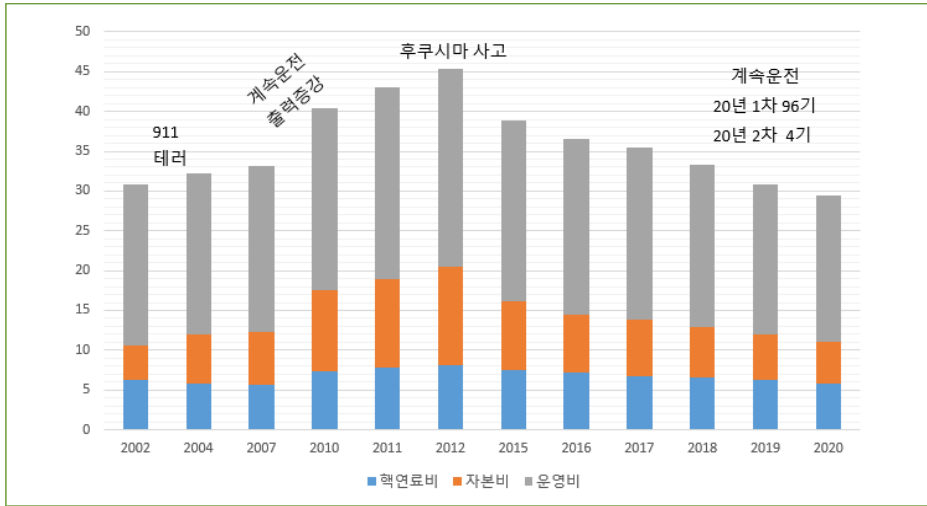
※ 자료 : IEA, The Future of Hydrogen, 2019.06.

▷ 전력생산가격

원가비중이 가장 큰 인자로 원자력 전기의 경우 설계수명 종료 이후 계속운전 시 하락¹⁰⁾ 발전단가 반영 여하와 소내 전력 이용 문제가 주요 이슈임.

※ 미국 원전의 발전단가는 [그림 5]와 같이 후쿠시마 후속조치로 인한 안전 시설투자 시기를 정점으로 완만하게 하락하는 추세를 보이고 있음.

〈그림 5. 미국원전의 발전비용(\$/MWh)〉



※ 자료 : NEI, Nuclear Costs in Context, 2021.11.

▷ 설비비

현재 고온증기전해 설비는 상용화 초입단계로 설치비 포함 설비비가 2,000달러/kW 이상이므로 향후 시장규모 확대와 이에 따른 설비 가격 하락 속도 여하가 이슈임. 청정수소 인센티브 제도 등의 정부지원 정책이 초기 시장형성과 규모 확대에 기여할 것으로 보임.

▷ 설비 이용률

수전해 수소생산단가는 <그림 4>와 같이 수소설비 이용률이 30%를 밑돌 때 민감하게 영향을 주지만 60%를 상회하면 민감하지 않음. 이용률이 높은 원자력 수소 설비를 플러스 수요반응 설비로 활용할 경우 원전의 경제성을 유지하면서 재생에너지 출력제약을 줄일 수 있는 하이브리드 시스템 타당성이 이슈임.

▷ 설비 성능

생산단가와 전해 효율(kWh/kg-H₂)이 비례관계에 있으므로 효율 개선 속도는 설비비 인하 속도와 함께 주요 관심사임. 고온증기 전해가 저온 수전해에 비하여 20~30% 정도 효율이 좋으나 전해 스택 수명이 상대적으로 짧아 내구성 향상 속도 여부가 주요 이슈임.

10) IEA가 2020년 발표한 전원별 평준화 발전비용 보고서에 따르면 러시아 신규원전의 LCOE는 \$42/MWh이며, 10년 계속운전할 경우 세계 평균이 \$33/MWh, 20년의 경우 \$31/MWh임.

- INL은 가동중인 웨스팅하우스 4-loop 원전(3411 MWt)을 수소생산 전용으로 전환 시 기술·경제적 타당성을 평가하였으며 주요 내용은 아래와 같음.
 - 원전과 고온증기전해설비간 계통통합 모델 개발을 제시함.
 - 수소시설은 원자로에서 약 1km 떨어진 곳에 설치하되, 수소설비 증기 loop과 원전에서 추가된 증기 loop을 물리적으로 분리 구성하여 방사성 물질의 잠재적 외부 누설을 방지함. 열교환기를 통하여 수소 설비 loop 증기를 280°C 정도로 가열시킴.
 - 원전에서 오는 280°C 증기는 예비 가열 열교환기(recuperator)와 전기 히터(topping heater)를 이용하여 고온증기전해 운전온도(735°C)까지 가열시킴.
 - 계통 통합 모델 분석 주요 결과는 다음과 같음.
 - 터빈 발전에 사용되지 않고 우회되어 전해조 가열용으로 사용되는 원전 증기는 전체 발생량의 3.2%로 나타남.
 - 전기히터 및 BOP를 포함한 전해조 시스템에 사용되는 1kg 수소 생산 당 소요 전력은 38kWh¹¹⁾임.
 - 전 출력 운전 시 수소 생산량은 7.8kg/초로 연간으로는 85% 이용률 가정 시 약 21만 톤임.
 - 다양한 케이스에 대한 경제성 분석 결과, 대부분의 경우 전기만 판매하는 방식보다 수소와 전기를 함께 판매하는 방식이 더 수익성이 좋은 것으로 나타남.
 - 자본비용은 전해 시스템 설치, 증기 이송 시스템 등의 직접비와 엔지니어링 등의 간접비와 토지비를 포함하여 600달러/kW로 계상함.
 - 운영비는 스택 교체 주기를 7년으로 하고 유지보수, 인건비, 기술료, 보험료 등을 포함하여 78달러/kWh로 계상함.
- INL은 원전 및 전력망 환경을 모사할 수 있는 자체의 종합 시험시설¹²⁾을 활용하여 2022년 중으로 250kW급 고온증기전해 시스템을 실증한 후, 이를 바탕으로 2026년까지 200MW급 이상으로 양산 보급을 지원할 계획임.

5. 한국의 원자력 수소 타당성과 시사점

- 한국의 원자력 수소의 경우, 정부가 목표로 하는 청정수소 생산 단가 대비 평준화 수소생산 단가 (Levelized Cost Of Hydrogen, LCOH)와 공급 효율성, 재생에너지와의 상생을 기준으로 할 때 타당성이 충분한 것으로 판단됨.

11) 고온증기전해 시스템 구성은 전문 협력업체인 FuelCell Energy의 SOEC 시스템을 기반으로 함.

12) Dynamic Energy Transport and Integration Lab(DETAIL)

- 고온증기전해 기반 원자력 수소의 참조 LCOH 평가를 위한 기본 자료는 <표 4>와 같음.

<표 4. 원자력 수소 참조 LCOH 평가용 기본 자료>

구분	항목	INL	단위
수전해 설비 성능	초기 수전해 시스템 전기효율	38	kWh/kgH ₂
	천시간당 열화율	0.4%	%/kh
	초기 스택 수명	50,000	시간
비용	공사비 포함 설비단가(CAPEX)	1,400	백만 원/MW
	스택교체비용 제외 운영비(OPEX)	2%	*CAPEX
	시스템 수명	40	년
	CAPEX 상환/감가상각 기간	40	년

※ 스택(Stack) 수명과 교체비용은 기술발전과 생산규모 확대를 고려하고¹³⁾ 스택 원가비중은 CAPEX의 67%로 가정함.

- 상기 표 비용을 전제로 한 100MW급 원자력 고온증기전해의 2030년 기준 참조 LCOH는 아래 <표 5>와 같이 수소 1kg당 3,635원으로 나타남.

<표 5. 고온증기전해 원자력 수소 LCOH 기준 평가 결과>

구분	항목	값	단위	
전제	수전해 용량	100	MW	
	할인율	4.5%		
	원자력 전기가격	60.0	원/kWh	
	시설 이용률	85%		
비용	금융비용	스택제외 초기건설비(건설 할인 포함)	478	억 원
		(연간 균등상환/감가상각)	12	억 원
		상환기간중 이자비용 현가화 합	401	억 원
		상환기간중 금융비용 현가화 합	625	억 원
	스택비용	최초 스택의 균등상환 현가화 합	1,086	억 원
		스택 교체 횟수	3회 교체	
		스택 교체 비용 현가화 합	1,736	억 원
		스택 비용 현가화 총합	2,821	억 원
	O&M	연간운영비	28	억 원
		연간 전기요금	447	억 원
수명기간중 O&M 비용 현가화 합		8,931	억 원	
합계	수명기간중 현가화 비용 총합	12,377	억 원	
평준화 수소 생산가	생산량	연간수소생산량	19,595	톤-H ₂
		수명기간중 현가화 수소생산량 총합	340,530	톤-H ₂
	LCOH	평준화 생산단가	3,635	원/kg-H ₂

13) 스택 수명: 최초 스택 5만 시간, 1차 교체 스택 8만 시간, 2차 교체 스택 10만 시간, 3차 교체 스택 12만 시간

- 주요 변수 값의 변화에 의한 LCOH 민감도 평가결과는 아래 <표 6>과 같음.

<표 6. 고온증기전해 원자력 수소 LCOH 민감도 분석>

CAPEX (억 원/MW)	CAPEX 중 스택비중	OPEX (스택교체 비용별도)	시설수명	할인률	수전가격 (원/kWh)	열화율 (%/kh)	LCOH (원/kg-H ₂)	비고
14	67%	2%	40년	4.50%	60	0.4	3,635	기준가
10							3,305	
7							3,078	INL 가격
	40%						3,462	
		3%					3,712	
			20년				3,864	
				3%			3,392	
					30		2,401	계속운전
7					30		1,844	
						1	4,001	
						0.2	3,527	

- 고온증기전해 설비 가격은 대량생산을 통하여 가격인하가 급속히 진행될 것으로 전망되며, INL 보고서의 CAPEX(7억 원/MWh)를 적용할 경우 정부의 2030년 생산 단가 목표(3,500원/kg)를 충족하는 것으로 나타남.
- 그린 텍소노미 등의 인센티브 수혜로 낮은 할인율(3%)이 원자력 수소에 적용되더라도 정부의 2030년 생산 단가 목표를 충족함.
- 계속운전 등으로 원전의 전력생산비용이 지금보다 현저히 낮아질 경우(30원/kWh), 2050년 청정수소 생산단가 목표(2,500원/kg)를 충족하고, 여기에 스택 내구성 향상과 CAPEX 인하가 동반된다면 그린제철 등 대부분의 감축여력이 많지 않은 산업의 손익분기 단가도 도달 가능할 것으로 평가됨.
- 공급 효율성 측면에서 볼 때, 원전의 계속운전이 허용되고 이를 원자력 수소 생산 전용으로 활용할 경우, 재생에너지 기반의 전해수소 정부 공급 목표량은 별도의 발전 설비 건설없이 <표 7>과 같이 원자력 수소로 비용 효과적인 대체가 가능할 것임.

〈표 7. 한국의 수전해 수소 수급 방안 비교〉

구분		2030년	2050년
수전해 수소소요(만 톤)		25	300
태양광 수소로 공급시 ¹⁴⁾	발전소요(GW)	9.3	111.9
	설치비용(조 원)	10	120.2
원자력 수소로 공급시 ¹⁵⁾	발전소요(GW)	1.3	15.3
	가용 계속운전 원전용량(GW)	6.6	17.3

- 또한, 원자력 수소 설비를 플러스 수요반응(DR) 자원으로 활용하는 솔라-원자력 하이브리드 시스템으로 운영시 원전의 경제성과 수소 생산단가를 유사하게 유지하면서 2030년 0.4TWh, 2050년 4.8TWh의 태양광 출력제약을 회피할 수 있을 것으로 평가됨.¹⁶⁾

■ 시사점과 과제는 다음과 같음.

- 미국의 청정수소 생산가 목표인 2026년까지 2달러/kg, 2030년까지 1달러/kg는 실현 가능성이 높은 것으로 평가되며, 해당 목표 달성 시 탈탄소 사회로의 글로벌 에너지 체제 변혁은 가속화될 것으로 기대됨.
- 한국도 경쟁력을 갖춘 원자력 수소를 수소경제 이행의 주요 축으로 채택·개발하여 현실성 있는 지속가능 청정수소 생산 생태계 조성이 시급한 것으로 판단되며, 이를 달성하기 위해 관련 규제 개선, 인프라 구축, 수용성 제고 등을 위한 중장기적 전략 마련 및 실행이 필요할 것으로 보임.
 - 수소법, 전기사업법, 녹색분류체계 등 관련 법제도 개선을 통하여 원자력 수소 개발·실증·사업이 용이한 환경 조성이 필요함.
 - 고온증기 전해 성능(내구성 및 효율) 혁신을 위한 기술 개발과 수소 설비 가격 인하의 마중물 역할을 할 수 있는 100MW급 이상의 원자력 수소 실증 단지 조성이 필요함.
 - 중장기적으로 수소 생산과 활용이 유기적으로 연동된 지역 원자력 수소허브 조성이 필요함.
 - 원자력과 수소 시설의 인접 설치 안전성은 기술적으로 큰 문제가 되지 않지만 주민과 시민단체 등 이해관계자와의 선제적 소통과 홍보가 필요함.

14) 태양광 수소설비 이용률 15%, 수전해 효율 49kWh/kg-H₂, 태양광 설치비 107.4만 원/kW(에너지경제연구원, 2020.12.)

15) 원자력 수소설비 이용률 85%, 증기전해효율 38kWh/kg-H₂

16) 하루 4시간 태양광 잉여전력을 25% 정격출력분 만큼 추가로 수전 가정함(수소설비는 평상시 정격용량의 75%로 운전).

참고문헌



- 제1차 수소경제 이행 기본계획, 2021. 11. 26., 관계부처 합동
- Infrastructure Investment and Job Act, Public Law 117-58. 2021. 11. 15., 미국 의회
- Global Hydrogen Review 2021, IEA
- Hydrogen Insights, 2021. 2., Hydrogen Council
- US Greenhouse Gas Emissions Outlook under Current Federal and State Policy, 2021. 7., Rhodium Group
- Feasibility Study of Hydrogen Production at Existing Nuclear Power Plants, 2009. 7., INL
- Evaluation of Hydrogen Production Feasibility for a Light Water Reactor in the Midwest, 2019. 9., INL
- The Future of Hydrogen , 2019. 6., IEA
- Nuclear Costs in Context, 2021. 10., NEI
- Hydrogen Colours codes, <https://www.h2bulletin.com/knowledge/hydrogen-colours-codes/>

주요단신

북미
North America

◎ 미국, 러시아산 우라늄 수입제재 반대 움직임

S&P Global 2020.10.06., EIA Nuclear Explained 2021.07.02., Bloomberg Law 2022.03.02.,
Reuters 2022.03.03., POWER Magazine 2022.03.10., Bloomberg 2022.03.12.

- 로이터 통신은 Duke Energy Corp.와 Exelon Corp. 등으로 구성된 미국원자력협회(Nuclear Energy Institute, NEI)가 백악관을 상대로 러시아산 우라늄 수입을 제한하지 못하도록 로비중이라고 보도함.
 - 3월 8일, Biden 대통령은 우크라이나 사태에 대한 대러 경제 제재로서, 러시아산 원유 · 액화천연가스 · 석탄 등의 수입을 제한하는 시행령에 서명하였음.
 - 해당 시행령에서 러시아산 천연 · 농축 우라늄 수입 제한은 제외되었으나, NEI는 우크라이나 사태가 지속될 경우 우라늄 추가 제재에 대한 불확실성을 배제할 수 없는 상황으로 보고 있음.
 - 2020년 기준, 미국은 러시아 · 카자흐스탄 · 우즈베키스탄에서 상업원전용 우라늄 전체 4천 890만 파운드(약 2천 킬로그램)의 절반에 가까운 2천 280만 파운드(약 1천 킬로그램)를 수입하였고, 이 중 20%가 발전용으로 사용되었음.
 - 미국 에너지 정보청에 따르면, 2020년 기준, 미국은 캐나다 및 카자흐스탄(각 22%), 러시아(16%) 미국 및 기타 국가(14%), 호주(11%), 우즈베키스탄(8%), 나미비아(5%)에서 우라늄을 수입함.
 - 한편, Constellation Energy Corp.는 수년간 사용할 수 있는 핵연료 양을 바탕으로, 행정부의 우라늄 수입 제재 조치시 협력하겠다는 뜻을 밝힘.
- 현재 미국은 러시아산 우라늄 수입을 미국 원전 수요의 17%로 제한하는 수입제한제도(Russian Suspension Agreement, RSA)를 2021년부터 적용하고 있으며, 러시아와의 협의를 통해 해당 제도를 2035년까지 연장함.

- RSA에 따르면, 미국은 연간 러시아산 우라늄 수입량을 점차 단계적으로 줄여나갈 예정이며, 러시아산 농축우라늄의 경우 2026년에는 미국내 우라늄 수요의 5~7% 가량을 차지할 것으로 전망됨.

■ 한편, 러시아산 우라늄 수입 제재시, 미국 에너지부(DOE)가 주도하는 차세대원자로실증프로그램을 통해 개발중인 차세대원자로(Advanced Reactor, AR)의 연료로 사용될 고순도저농축우라늄(HALEU) 확보에 단기적 영향을 미칠 것으로 예상되어 우라늄 수급 다변화의 필요성의 제기됨.

- 현재 미국에서 HALEU의 상업적 사용은 금지되어 있으며, DOE 보유고를 제외하면 러시아 수입산으로만 조달 가능함.
- DOE 원자력국과 국가핵안보청(NNSA)은 러시아에 우라늄 수입을 의존하지 않도록 다양한 수급 방안을 모색중이라고 밝힘.
 - 2020년, 미 의회는 AR 연료개발 지원안을 상정하고 2021년, 전략적우라늄보전책(Strategic Uranium Reserve Program)에 7천 5백만 달러(약 930억 원¹⁾)를 배정한 바 있음.

◎ 미국 DOE, 원자력 포함한 자국 에너지분야 공급망 확보 전략 발표

Department of Energy 2022.02.24., World Nuclear News 2022.02.25.

- 2월 24일, 미국 DOE는 견고한 청정에너지로의 전환을 위한 공급망 확보 전략(America's Strategy to Secure the Supply Chain for a Robust Clean Energy Transition)을 발표하여, 자국 원전 산업의 위험요소를 파악하고 이를 개선하기 위한 범정부적 전략을 제시함.
- 보고서에서 미국의 원전산업은 세계 최고 수준의 효율성과 안전기준을 토대로 청정에너지로의 전환에서도 선도적인 역할을 담당할 수 있으나, 이를 지원하기 위해 원자력 공급망에 연방정부와 의회의 지원이 필요하다고 역설함.
 - 세계 시장에 보급하는 다양한 첨단 기술과 공급망에서의 미국의 리더십은 탄소중립 달성에 다른 대안이 없는 지역에 탄소중립 달성을 위한 기술을 제공할 수 있으며, 원자력에 최고수준의 안전성, 품질, 비확산 기준을 확보할 수 있다고 제시함.

1) 환율 검색일: 2022년 3월 15일

- 이번 전략수립을 위해 사전 수행된 기술별 심층 평가에 따르면, 원전이 다른 에너지원에 비해 더 많은 지역 일자리를 창출하고 높은 평균임금을 제공하므로 에너지전환에서 원전의 중요성을 강조함.
- 그러나 현재 규제 체계와 자금 조달의 어려움 등으로 원전을 포함한 수력 설비 및 전력망의 노후화에 대응한 설비교체 실적이 저조하고, 해당 분야의 대규모 설비개선이 특수철강과 터빈 등 기존의 소재·부품 관련 공급망에 대한 압박으로 작용할 가능성이 높은 것으로 분석됨.
- 이를 개선하기 위한 정책 전략과 전략적 공급망 목표 달성을 위한 정부정책과 의회에 대한 권장사항이 제시됨.
 - 연방정부 정책에 관련해서는 원자력 관련 제조능력 향상 보조를 위한 재정지원 정책, 연방정부 차원의 사용후핵연료 관리 처분 프로그램 개발, 차세대 원전개발 지원을 제시함.
 - 보고서는 미 의회를 대상으로 고속중성자 조사 원자로, 다목적 시험로 등 주요 R&D 승인, 정부의 통합폐기물전략 실행을 위한 원자력폐기물정책법(NWPA) 개정, 혁신적인 원자력 시스템의 개발과 구축 가속화를 위한 유관 기관 지원 등을 요구함.
- **금번 발표된 전략은 탄소포집·고압직류송전(HVDC)을 포함한 전력망·에너지저장·연료전지 및 수전해·양수발전을 포함한 수력발전·네오디뮴 자석·원자력·희귀금속류·반도체·태양광·풍력 등 11개의 에너지분야를 대상으로 자국 내 에너지부문 공급망의 위험요인과 취약점을 식별하고, 이를 개선하기 위한 정책과 의회 권고사항을 제시함.**
 - 2021년 2월, Biden 대통령은 행정명령을 통해 범정부적으로 자국 내 공급망의 취약점 파악과 회복력 강화 방안 제시를 지시함.
 - 이에 DOE는 에너지부문 복수의 이해관계자와 국립연구소가 수행한 기술별 심층 평가 보고서를 기반으로, 해당 보고서를 작성함.

정책 전략 및 의회 권고사항	담당 기관
(자국 내 제조능력 향상) 청정에너지 전환에 필요한 제조 프로그램 인식 제고 - 원자로 부품에 대한 경쟁력 제고를 위한 보조금, 직접대출, 대출보증 등의 자금조달 메커니즘 확대	SBA, DOE, DOD, DOC, DOL
사후핵연료의 처분 전 중간저장을 위한 연방 시설의 부지 선정을 위해 ‘동의 기반 부지 선정(consent-based siting process)’에 초점을 둔 통합 폐기물 처리 전략 개발	DOE, NRC, EPA
NRC와의 협업을 통한 적시에 차세대 원자로 개발 지원 - 국가 연구소와 민간부문 파트너십을 통해 새로운 원자로 개념을 시연하고 NRC와 기술 전문지식을 공유할 수 있도록 원전혁신역량법(NICA) 제정 - 원자력 혁신 및 현대화법(NEIMA)을 전면 시행하여 단기간 차세대 기술의 성공적이고 효율적인 라이선스 보장 - 민간부문에서 시의적절한 신기술 상용화 지원을 위한 높은 수준의 실증사업과 고순도 저농축우라늄(HALEU) 활용지원을 위한 DOE 프로그램 구현	DOE, NRC, DOD
차세대 원자로 소재를 제조세액공제(48C) 대상에 포함시키고 HALEU 및 첨단 핵연료를 포함한 원자로 소재 및 부품 제조에 대한 혁신적인 연구, 개발, 실증 자금 지원	의회
고속중성자 조사 원자로(fast neutron irradiation reactor) 및 다목적시험로(Versatile Test Reactor, VTR)를 포함한 R&D 기반 시설 확보까지의 격차 극복을 위한 자금 지원	
원자력폐기물정책법(NWPA)을 개정하여 DOE가 통합 폐기물 처리 전략 시행	
혁신적인 원자력 시스템의 개발과 구축을 가속화하기 위해 기관(DOD, NASA 및 DOE)에 대한 RDD&D 자금 지원	

※ 중소기업청(SBA), 에너지부(DOE), 원자력규제위원회(NRC), 환경보호청(EPA), 국방부(DOD), 상무부(DOC), 노동부(DOL) 자료: DOE(2022.02.24.) 자료를 토대로 작성함.

◎ 미국 GM, PG&E와 전기차 비상전원 활용을 위한 시범사업 착수

GM Corporate Newsroom/Canary Media 2022.03.08., Vox 2022.03.09.

■ GM과 미국 서부 최대 전력회사 PG&E(Pacific Gas and Electric)는 대형 산불로 인한 정전시 전력공급과 서머타임과 같은 특정 시기의 첨두부하 발생시 GM 전기차를 활용하기 위한 시범 사업을 발표함.

- 일정에 따르면, 2022년 여름, 전기차를 가정용 전력공급원으로 활용하는 V2H(Vehicle-to-Home) 방식이 구현 가능한 전기차와 충전기에 대한 테스트를 완료하고, 2022년 말, PG&E의 소비자를 대상으로 시범사업을 진행할 예정임.

- 전문가들에 따르면 시범사업 성공 시, 시장 규모로 테스트되는 첫 V2G가 될 것이며, 이후 관련 사업 진행 시 유의미한 사례가 될 수 있다고 분석함.
- 2009년 DOE 지원 과제로 GM과 협력한 바 있는 미국 전력연구소(Electric Power Research Institute, EPRI)는 V2H 실용화를 위해서는 전력사의 양방향 충전시스템 구축과 전류 전환, 차량 충전에 대한 제어·통신에 대한 표준화 작업이 선행되어야 한다고 지적함.
 - PG&E를 비롯한 대부분의 전력사의 시스템은 송배전망에서 각 가정으로 전력을 보내는 일방향 시스템이므로, 반대로 전기차 배터리를 전력망과 연결하여 전력망에 전력을 보내는 양방향 시스템 구축과 양방향 전력 공급 제어에 대한 대비가 필요함.
 - 또한, DC중심의 전기차 커넥터를 AC방식으로 가정에 연결하기 위해, 인버터와 같은 전류변환장치가 설치되어야 할 필요가 있음.
 - 표준화 작업에 대해서는 국제표준화기구(ISO)와 국제전기기술위원회(IEC)가 V2G를 구현하기 위한 ISO/IEC 15118을 공동으로 확립 중임.

기타단신

◎ 미국 국무부, 필리핀 정부와 원전 협력 양해각서 체결

UxC 2022.03.14., the Manila Times 2022.03.16.

■ 미국 국무부는 10일, 필리핀 정부와 전략적원전협력(Strategic Civil Nuclear Cooperation) 양해각서를 체결했다고 발표함.

- 해당 양해각서를 바탕으로 양국은 에너지 안보, 외교 관계 및 경제 협력을 강화할 것이라고 밝힘.
 - Gerardo Erguiza Jr. 필리핀 에너지부 차관보는 금번 양해각서를 바탕으로 한 미국과의 협력 강화와 기술지원이 자국의 원전 인프라 개선에 기여할 것이라고 밝힘.
 - Bonnie Jenkins 미국 국무부 군축 및 국제안보 담당 차관은 필리핀의 에너지 전환계획에 신규 원전 건설 및 Bataan 원전 재개 가능성이 포함된 점을 언급하며, 핵비확산 및 기후 변화 대응 관련 양국의 공통된 비전을 발전시켜 나가 기쁘다고 밝힘.

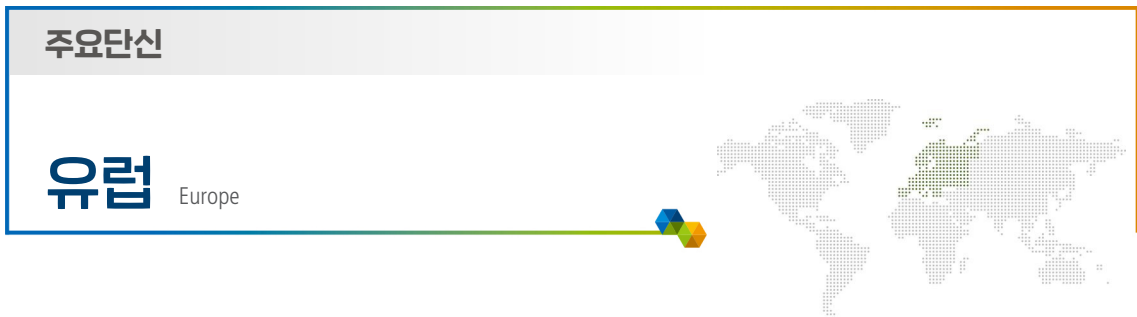
◎ 캐나다 OPG, Darlington 원전 부지 내 SMR 부지 개발 계약 체결

Yahoo Finance 2022.03.11.

■ 캐나다 원전사업자 Ontario Power Generation(OPG)는 캐나다 에너지기업 E.S. Fox Limited와 Darlington 신규 원전프로젝트의 부지선정과 기반구조 탐사 지원을 위한 3천 2백만 달러(약 396억 원²⁾)의 계약을 체결함.

- 부지의 경우, OPG가 캐나다 원자력안전위원회(CNSC)로부터 SMR 가동 허가를 받은 후 올해 안으로 선정될 예정이며, 이후 용수확보·발전·IT·도로망 등의 기반시설이 건설될 예정임.

2) 환율 검색일: 2022년 3월 15일



◎ 체코, Dukovany 신규 원전 입찰 개시

ABC news, Euractive 2022.03.18.

■ 2022년 3월 17일 체코 국영기업 CEZ은 Dukovany에 신규원전 건설을 위한 입찰을 시작함.

- 체코산업통상부는 원전 후보 입찰 3사인 EDF, 한국수력원자력, Westinghouse을 대상으로 '21년 4월~12월 까지 안전성 평가를 진행한 후 프로젝트 입찰을 공식 승인함.
 - Jozef Sikela 산업통상부 장관은 약 60억 유로(약 8조원¹⁾) 규모의 이번 프로젝트는 자국의 단일 투자 중 역대 최대 규모라고 밝힘.
 - 프로젝트 예상 비용 중 70%는 정부의 무이자 대출로, 30%는 CEZ 자체조달로 마련될 계획임.
- CEZ는 상기 후보 기업들이 오는 11월 말까지 예비 입찰서를 제출하면, 최종 낙찰자 선정까지 20개월이 추가로 소요될 계획이라고 설명함.
- Petr Fiala 총리는 2024년 공급업체 선정, 2029년 건설허가 승인, 2036년 가동을 목표로 하고 있다고 밝히며, 러시아군의 우크라이나 침공 이후 에너지 안보에 핵심인 원전 건설에 러시아가 참여하는 것은 상상할 수 없다는 입장을 표명함.
 - 체코 정부는 국가 안보를 이유로 2021년 1월에 중국 CGN을, 같은 해 4월에는 러시아 Rosatom을 입찰 후보에서 배제한 바 있음.
- 체코는 2022년 3월 기준 Dukovany원전과 Temelín 원전에서 총 6기(3,934MW)를 가동해 전체 전력의 34%를 공급하고 있으며, Temelin 원전에도 신규 원전 증설을 검토 중임.
 - IEA²⁾에 따르면, 2021년 체코의 총 발전량은 81,443GWh를 기록했으며, 주요 전원별 발전 비중은 석탄 43%, 원자력 37%, LNG 8.4% 등임.

1) 환율검색일: 2022/3/18

2) <https://www.iea.org/countries/czech-republic>

◎ IEA, 러시아산 천연가스 의존도 축소 방안을 담은 10대 계획 발표

Nucnet 2022.03.04., Nuclear Engineering International 2022.03.07.

- 2022년 3월 3일 국제에너지기구(IEA)는 EU가 1년 내로 러시아산 천연가스 의존도를 3분의 1 이상 축소하기 위한 10대 계획을 수립함.
 - 2021년 EU는 러시아로부터 약 1,550억 입방미터(155Bcm)의 천연가스를 수입함. 이는 EU 전체 천연가스 수입량의 약 45%, 전체 천연가스 소비량의 약 40%를 차지함.
 - IEA는 러시아의 우크라이나 침공에 따른 에너지 공급 위기와 관련해 EU의 천연가스 네트워크의 단기 회복력을 강화하고 천연가스 가격 상승에 따른 전력소비자의 부담을 최소화 하면서 러시아산 천연가스 의존도 감축을 위한 일련의 조치를 제안했다고 밝힘.
- IEA의 러시아 천연가스 의존도 축소를 위한 10대 계획에는 원전 등 대체전원 활용을 통한 천연가스 소비량 감축, 러시아와의 신규 가스공급 계약 중단 및 대체제 확보, 소비부문의 효율성 제고 등을 포함함.
 - 구체적으로는 러시아와 신규 가스 공급 계약 체결 중단, 러시아 천연가스 대체 전원 확보, 최소 천연가스 비축 의무 도입, 풍력 및 태양광 신규 보급 가속화, 바이오에너지 및 원자력 최대한 활용, 가스보일러 대체용 히트펌프 보급 가속화, 건물 및 산업 에너지 효율 제고 가속화, 실내 온도 1°C 낮추기, 전력계통 공급망 다변화 및 탄소중립화 제고의 10가지 대안을 제시함.
- IEA는 10대 계획 중 탄소 저배출 전원인 원자력을 최대한으로 활용할 것과 영구정지 예정인 원전의 정지시점 연기를 권고함.
 - IEA는 유지 보수 및 안전 점검을 위해 가동이 정지된 원전과 핀란드의 Olkiluoto 3호기 신규 원전을 동시 가동하면 올해 EU의 원자력 발전량이 최대 20TWh까지 증가할 수 있고, 해당 증분의 천연가스 수요 대체를 통해 약 10억 달러(약 1.2조 원)를 절감할 수 있을 것으로 진단함.
 - 그러나, 독일과 벨기에에서 올해와 내년에 총 4기의 원전 폐쇄를 앞두고 있어, IEA가 제시한 원전의 최대 활용 대안에는 한계가 있을 것으로 분석됨.
 - 2022년 원전 4기(독일 Emsland · Isar 2 · Neckarwestheim 2 원전 및 벨기에 Doel 3호기)와 2023년 원전 1기(벨기에 Tihange 2호기)가 영구정지를 앞두고 있음.

◎ 헝가리, 러시아와 Paks 원전 증설 협력 지속 발표

BNEF 2022.02.28., Reuters 2022.03.02., Nucnet 2022.03.03.

- 2022년 3월 2일 Peter Szijjarto 외무부장은 러시아와의 천연가스 수입 협정을 고수하고 Rosatom과 진행 중인 125억 유로(약 16.9조 원) 규모의 Paks 5·6호기(각 1,200MW, PWR) 프로젝트를 취소할 계획이 없다는 입장을 밝힘.
 - Szijjarto 외무부장은 좌파 정치인들이 Paks 신규 원전 건설 추진 중단을 요구하고 있지만, 신규 원전이 건설되지 않으면 전력비용이 증가하기 때문에, 러시아-우크라이나 분쟁으로 인해 발생한 에너지 급등 사태로 자국민에게 재정적인 부담을 줄 수 없다고 밝힘.
 - Szijjarto 장관은 헝가리가 러시아산 천연가스 수입을 중단할 수 없는 상황이라고 밝히며, 2021년 연간 45억 입방미터(4.5Bcm)의 천연가스 수입을 위한 장기 계약을 신규로 체결했다고 덧붙임.
 - 현재 헝가리는 VVER-440 원자로 4기(PWR)로 구성된 Paks 원전을 가동하여 자국 전력의 48%를 공급하고 있음.
- 헝가리는 2014년 러시아와 Paks 원전 증설 프로젝트를 체결함. 프로젝트 비용(총 125억 유로) 가운데 100억 유로(약 13.5조 원)를 러시아가 차관 형태로 제공하고, 헝가리가 25억 유로(약 3.3조 원)를 조달하기로 함.
 - Paks 5·6호기 프로젝트는 2017년 EU집행위원회로부터 헝가리의 국가 보조금 지급 승인을 취득했으나 헝가리 규제기관의 인허가 허가 승인이 지연된 상태임.
 - 해당 프로젝트는 2016년 9월 말에 환경 허가, 2017년 3월에 부지 허가를 취득했으나 2021년 추가 분석을 이유로 헝가리 원자력청(Hungary Atomic Energy Authority, HAEA) 으로부터의 Paks 5·6호기 증설 허가 신청 승인이 보류됨.
 - 러시아 국영 매체 Tass에 따르면 Rosatom은 해당 프로젝트의 증설 허가 취득을 위해 HAEA에 제출할 추가 정보를 준비 중임.

● 영국, Rolls-Royce SMR 설계심사... 착수 4년 소요 예상

World Nuclear News, Office for Nuclear Regulation 2022.03.07., NuclearNewswire 2022.03.10.

- 2022년 3월 7일 영국원자력규제청(ONR)·환경청(Environment Agency)·웨일스 천연자원 관리청(Natural Resources Wales)은 영국 기업·에너지·산업전략부(BEIS)의 정식 요청에 따라 Rolls-Royce SMR Ltd의 SMR에 대한 일반설계평가(Generic Design Assessment, GDA)를 시작함.
 - BEIS는 2021년 11월 Rolls-Royce SMR Ltd가 제출한 GDA 의향서를 검토한 후 GDA 절차 진입 개시를 승인함.
 - Rolls-Royce SMR Ltd는 영국 엔지니어링 기업 Rolls-Royce가 Rolls-Royce SMR 보급 및 상용화를 위해 설립한 특수목적법인임.
 - Rolls-Royce SMR의 설계수명은 60년으로, 전력과 수소생산 외에도 지역 난방 공급, 담수화, 항공 합성연료(synthetic jet fuel) 제조 등 다목적으로 활용될 수 있도록 설계 될 계획임.
 - SMR 1기 비용은 초기 22억 파운드(약 3.5조 원)에서 5기 건설 후 18억 파운드(약 2.9조 원)로 인하될 것으로 예상됨.
- GDA는 신규 원전 프로젝트 허가 과정의 일부로, 규제기관이 신규 원자로 설계 부분의 안전, 보안, 환경 보호 측면 등을 평가하며 3단계로 이루어진 절차는 완료까지 통상 4년이 소요됨.³⁾
 - 신규 원전 프로젝트 허가 요건은 GDA, 원자력 부지 인허가, 개발 동의명령, 환경 허가 취득으로 구성됨.
 - 1단계는 GDA 개시 파트로 12개월이 소요됨. 신청자는 GDA 신청서 작성 및 제출 준비를 진행함. 이와 더불어 신청자와 ONR은 GDA 범위와 일정을 합의하고, ONR과 환경청은 원자로 설계·안전·보안·환경 보호 사례를 검토함.
 - 2단계는 GDA 절차의 실질적인 기술 평가 파트로 12개월이 소요됨. 이 단계에서 설계·안전·보안 사례에 대한 평가를 진행하며 방법론, 코드, 표준 등의 적합성을 중점적으로 검토가 이루어짐.

3) ONR, New Nuclear Power Plants: Generic Design Assessment Guidance to Requesting Parties(2019.10) 및 BEIS, Entry to Generic Design Assessment for Advanced Nuclear Technologies Instructions and Guidance for Requesting Parties(2022.02.)

- 3단계는 GDA 절차의 상세평가 파트로 24개월이 소요됨. 이 단계는 샘플링을 기반으로 설계·안전·보안 사례를 심층 평가함. ONR은 설계 적합성에 대한 결론을 내리기 위해 규제 요건에 비추어 설계·안전·보안 사례를 검토함. 검토결과를 토대로 규제요건을 충족했을 경우 설계승인확인서(Design Acceptance Confirmation, DAC)나 임시설계 승인확인서(interim Design Acceptance Confirmation, iDAC)를 발급함.
 - DAC는 GDA 사안이 만족스럽게 해결된 경우 발급되며, iDAC는 설계·안전·보안 사례가 대체적으로 만족스럽지만 보완해야하는 안전 또는 보안 문제가 있을 경우에 발급됨.

◎ 불가리아, 그리스와 신규 건설될 원전의 전력구매계약 협의 시작

Nucnet 2022.02.28., BNEF 2022.03.03.

- 2022년 2월 27일 Asen Vasilev 불가리아 재무장관 겸 부총리는 그리스와 신규 원전 프로젝트에 관한 논의를 시작했다고 밝힘.
 - Vasilev 부총리는 그리스가 20년 장기 고정가격으로 불가리아 신규 원전이 공급하는 전력을 구매하기로 합의해, 신규 원전 프로젝트가 신속히 추진될 가능성이 높아졌다고 밝힘.
 - 그리스는 불가리아의 주요 전력수입국으로, 2019년 기준 그리스의 발전원별 비중은 천연가스 34%, 석탄 24%, 재생에너지(풍력, 태양광, 지열) 22%, 석유 11%, 수력 8%, 바이오매스 1%임.⁴⁾
 - 한편, 불가리아는 기존 Kozloduy 원전과 Belene 부지에 신규 원전을 건설하는 방안을 고려해왔으나, 2월 초 Kiril Petkov 불가리아 신임 총리는 Belene 원전 건설을 철회하고 Kozloduy 신규 원전을 증설한다는 계획을 발표함.
 - Petkov 총리는 Belene 프로젝트가 이전 정부의 비합리적 지출과 부패의 사례라고 지적하며, Kozloduy 7호기 건설로 그리스와 세르비아를 전력 구매 고객으로 삼는 방안을 고려한 바 있음.

4) Enerdata, Country Energy Report Switzerland 2021.11.

기타단신

◎ 핀란드 TVO, Olkiluoto 3호기 계통연계

Nucnet, World Nuclear News 2022.03.14.

- 핀란드 전력사 TVO는 2022년 3월 12일 Olkiluoto 3호기(1600MW, PWR)가 계통 연결에 성공해 4개월의 테스트 기간 동안 출력을 1,600MW까지 증강할 계획이라고 밝힘.
- TVO는 오늘 7월 Olkiluoto 3호기의 상업운전을 개시할 경우 자국 전체 전력 수요의 14%를 충족해 러시아, 스웨덴, 노르웨이로부터의 전력 수입이 감소할 것으로 분석함.
- Olkiluoto 3호기는 프랑스의 EPR 노형이 적용된 첫 해외 원전으로, 2005년에 착공되어, 당초 2009년에 가동될 예정이었으나 기술적인 문제로 지연되어왔으며 프로젝트 비용도 32억 유로(약 4.3조 원)에서 85억 유로(약 11.5조 원)로 늘어난 바 있음.

주요단신

아프리카 Africa



◎ 가나, SMR 도입기반 마련 위해 미국과 협력

Nuclear Engineering International 2022.03.10., World Nuclear News 2022.03.11.

- 2022년 2월 25일 주가나 미국대사관은 가나가 미국이 추진하는 ‘소형 모듈 원전 기술의 책임 있는 사용을 위한 기초 인프라’ (Foundational Infrastructure for Responsible Use of Small Modular Reactor Technology, FIRST) 프로그램을 통해 SMR 도입기반 마련을 위한 협력을 시작하기로 했다고 발표함.
 - 해당 프로그램은 파트너 국가가 원자력 안전·보안·비확산 부문의 국제 표준에 부합해 원자력 프로그램 개발 시 이를 지원하는 역량 강화 프로그램임. 현재까지 미국무부는 해당 프로그램을 통해 협력국가들에 약 730만 달러(약 89억 원)를 지원해옴.
 - 대사관에 따르면 가나는 미국무부가 주도하는 FIRST 프로그램에 참여해 이해관계자 참여 지원, 첨단기술협력, 프로젝트 평가 및 기획 등 SMR 도입에 필요한 지원을 받을 예정이라고 밝힘.
 - 올해 가나는 이해관계자 참여, 인허가, 규제 개발, 자금 조달, 인력 개발, 원자력 안전, 안보, 비확산을 주제로 교육을 제공받을 예정임.
 - Matthew Opoku Prempeh 가나 에너지부 장관은 원전 건설을 위해 원전 운영사인 Nuclear Power Ghana Limited를 설립했다고 밝히며, 이번 프로그램이 자국 원전의 건설 및 운영을 위한 Nuclear Power Ghana Limited의 역량 개발에 기여할 것이라고 전망함.
 - 가나는 이미 최초 원전을 고려하거나 계획 중인 국가를 지원하는 국제원자력기구 (IAEA)의 ‘주요 목표(Milestones)’ 접근법을 채택하고 있음. 가나 정부는 FIRST 프로그램이 IAEA 프로그램을 보완할 것이라고 전망함.

- 가나는 현재 소형연구로(30kW)를 운영 중이며, 산업 발전을 위한 경제적인 에너지 공급 및 파리 협정에 따른 온실가스 감축 의무 이행을 위해 원전 건설 및 운영을 위한 원자력 프로그램을 추진 중임.
 - 2021년 자국의 최초 원전 건설을 위해 정보제공요청서를 발행했으며, 5개 공급업체(미국, 러시아, 캐나다, 한국)가 참여함.
 - 현재 가나는 총 3단계로 구성된 원자력 개발 프로그램 중 2단계를 진행 중임.
 - 1단계(예비 타당성 조사, 기반 시설 · 자금 조달 · 원자로 · 안전 · 보안 · 부지 선정 평가)를 완료하고, 현재 2단계(공급업체 참여, 부지 평가, 계약, 직원 채용 및 교육)를 진행 중임.
 - 이후 3단계(원전 시운전 · 가동, 계약, 인허가, 건설에 필요한 활동)도 진행할 예정임.
 - 한편, 2020년 기준 가나의 발전원별 비중은 천연가스 58%, 수력 38%, 석유 4%임.⁵⁾

5) Enerdata, Country Energy Report Ghana 2021.12.

기타단신

◎ 나이지리아, 최대 4,000 MW 규모의 최초 원전 건설 입찰 개시

Nucnet 2022.03.02., Global Construciton Review 2022.03.03.

- 2022년 3월 1일 나이지리아 정부는 최초 원전(최대 4,000 MW 규모, 4기) 건설을 위한 입찰을 개시함.
 - 나이지리아는 현재 상업용 원전은 보유하고 있지 않지만 중부 지역 Ahmadu에 위치한 에너지연구훈련센터에서 저전력 연구로(NIRR-1)를 2004년부터 가동 중임.
 - 나이지리아는 최초 원전 건설에 대해 IAEA 및 러시아와 논의를 진행한 바가 있음.
 - 나이지리아는 1964년 국제원자력기구(IAEA)에 가입함. 전력 수요 증가 충족 및 경제 발전 지원을 위해 2025년까지 4,000MW 규모 원전 도입 계획을 수립하고자 IAEA의 지원을 요청하였으며, IAEA는 2015년과 2017년 두 차례 통합원자력인프라심사(Integrated Nuclear Infrastructure Review, INIR)를 시행함.
 - 러시아와는 2017년 상업 원전 및 다목적 연구로를 포함한 원자력 연구센터의 건설 및 운영에 관한 협정을 체결했으며, 21년 8월에는 건설·운영·이전(BOT) 기반의 최초 원전 프로젝트에 대해 논의를 진행한 바가 있음.
 - 나이지리아 원자력규제청은 자국의 원전 건설 관리 역량이 부족하다는 우려를 일축하고, 자국이 원전 건설 매커니즘을 갖추고 있다고 강조함.

주요단신

아시아 Asia



○ 일본 대법원, 도쿄전력의 후쿠시마 원전 사고 배상 책임 인정

横浜弁護士会 福島原発事故損害賠償請求に関する説明会 2012.11.10.,
 国立国会図書館 ISSUE BRIEF NO.899 2016.03.01., 毎日新聞 2018.03.17./2021.01.27./2022.03.09.,
 弁護士白書 2019., 議院予算委員会 2019.03.08., 時事ドットコム 2022.03.04./03.08.,
 東京新聞 2020.10.14./2022.03.04./03.08., 朝日新聞 2022.03.05./03.08./03.09.,
 TBS 2022.03.08., 西日本新聞 2022.03.09., 福島県 HP 최종검색 2022.03.16.

- 일본 대법원은 3월 2일과 7일 후쿠시마 제1 원전 사고 피난 주민들이 도쿄전력에 제기한 총 6건의 손해배상 집단 소송에 대해 도쿄전력의 배상 책임을 인정하는 2심 판결을 확정했으며, 구체적인 판결 이유는 제시하지 않았음.
 - 대법원에서는 3월 2일과 3월 7일 피난 주민들이 제기한 집단 소송을 3건씩 병합하여 일괄 처리함.
 - 6건에 대해 대법원은 원자력손해배상법에 근거한 배상 기준인 중간 지침보다 많은 배상액을 지급하도록 지시한 2심의 판결을 인정함.
 - 중간 지침은 2011년 4월 11일 일본 문부과학성에 설치된 원자력손해배상분쟁심사회가 2011년 8월 5일 수립하였으며 원자력 사업자가 책임을 져야 할 원자력손해의 범위에 대해 기재되어 있음.
 - 도쿄전력은 중간 지침을 기초로 하여 배상 기준을 작성해 피해자의 배상 청구를 받아 청구 내용을 심사한 후 배상금을 지급함. 피해자가 배상금에 이의가 있거나 개별 사정에 맞는 배상을 요구할 경우 도쿄전력을 상대로 손해배상 소송을 제기해야 함.
- 3월 2일 선고된 건은 피난 주민들이 도쿄전력과 정부를 대상으로 제기한 3건을 병합하여 판결하였으며, 피난 주민 총 3,600명에게 총 14억 엔(약 145억 9천만 원)¹⁾의 배상을 결정한 2심 판결을 확정함. 또한, 사고에 대한 정부 책임에 대해서는 향후 변론 청취 후 올여름 결정을 내릴 예정임.

1) 2022.03.16. 환율 기준

- 대법원이 향후 정부의 책임도 인정한다면 정부가 약 14억 엔의 배상액을 도쿄전력과 함께 부담해야 함.
- 해당 3건은 1심과 2심에서 정부의 책임을 인정하는 판결과 인정하지 않는 판결이 각각 1건씩 내려진 바가 있음.
 - 지바지법에서 국가 책임을 인정하지 않은 건에 대해 2심에서 도쿄고법이 국가 책임을 인정했으며, 다른 소송 건에서는 반대로 1심에서 마에바시지법이 국가 책임을 인정했지만 2심에서 도쿄고법이 국가 책임을 인정하지 않았음.

■ 한편, 3월 7일 대법원에서는 도쿄전력만 대상으로 제기된 3건의 피해 배상 소송에 대해 판결했으며, 도쿄전력이 약 570명의 피난민에게 총 약 11억 엔(약 114억 5천만 원)을 지급하도록 선고한 2심 판결을 대법관 5명이 만장일치로 확정함.

〈대법원 판결 내려진 후쿠시마 사고 피해배상 소송 진행 경과〉

대법원 판결 확정일	원고 수	피난령 지역 외 주민 포함 여부	1심 (지방법원)	2심 (고등법원)	배상액	비고
3월 2일 확정 (피고 : 도쿄전력과 정부)	3,550명	○	후쿠시마지법 (국가 책임 ○)	센다이고법 (국가 책임 ○)	약 10.1억 엔 (약 105억 3천만 원)	정부 책임에 대한 판결은 2022년 여름경 결정 예정
	90명	○	마에바시지법 (국가 책임 ○)	도쿄고법 (국가 책임 X)	약 1.2억 엔 (약 12억 5천만 원)	
	43명	○	지바지법 (국가 책임 X)	도쿄고법 (국가 책임 ○)	약 2.8억 엔 (약 29억 천만 원)	
3월 7일 확정 (피고: 도쿄전력)	약 50명	○	후쿠시마지법	센다이고법	약 1,200만 엔 (약 1억 2천만 원)	
	약 310명	X	도쿄지법	도쿄고법	약 3.6억 엔 (약 37억 5천만 원)	
	약 210명	X	후쿠시마 이와키지원	센다이고법	약 7.3억 엔 (약 76억 천만 원)	

자료: 毎日新聞 (2018.03.17./2021.01.27.), 弁護士白書 2019., 参議院予算委員会 (2019.03.08.), 朝日新聞 (2022.03.05.), 東京新聞, TBS (2022.03.08.), 西日本新聞 (2022.03.09.)를 토대로 편집·작성

◎ 일본 여당, 원전 조속한 원전 재가동 촉구

産経WEST 2022.02.28., 読売新聞 2022.03.11., JAIF 2022.03.07.

- 일본 여당인 자민당의 전력안정공급 추진의원연맹은 3월 10일 개최된 회의에서 우크라이나 경제 악화로 에너지 가격이 급등 중인 현 상황을 고려하여 원전의 조속한 가동을 요구하는 긴급 결의를 채택했으며, 가까운 시일 내 해당 결의문을 정부에 제출할 예정임.
 - 2022년 3월 기준 일본에서 운영 중인 33기의 원전 중 재가동 심사를 통과해 가동 재개한 원전은 10기에 불과하며 이 중 3기는 정기 검사로 인해 정지 중임.
 - 요미우리신문의 3월 11일 보도에 따르면, 2010년도 일본 발전량에서 차지하는 원전 비중은 25%이었지만 후쿠시마 사고 후 재가동 진행 둔화로 2020년도 원자력 비중은 3.9%가 되었으며 원전을 대신해 천연가스와 석탄의 비중이 늘었음.
- 한편, 야당인 국민민주당과 일본유신회 대표도 원전의 재가동에 대해 찬성하는 의견을 밝혔음.
 - 일본유신회 대표는 2월 28일 기자회견에서 러시아에 대한 경제 제재로 인해 에너지 자원 가격이 급등하여 가계에 영향을 줄 수 있다며 단기적으로는 현재 정지 중인 원전의 재가동이 필요하다는 의견을 밝힘.
 - 국민민주당 대표도 3월 8일 기자회견에서 안전기준을 만족한 원전의 재가동을 인정해야 한다고 발언함.

◎ 필리핀, 원전 포함한 에너지 전환계획에 서명

Nuclear Engineering Institute 2020.07.31., Philippines Official Gazette 2022.02.28.,
World Nuclear News/Reuters 2022.03.03., RSIS Commentary 2022.03.08.

- 2월 28일, Rodrigo Duterte 필리핀 대통령은 단계적으로 석탄화력발전 의존도를 낮추기 위해, 에너지 전환계획에 원전을 포함하는 행정명령164(Executive Order 164)에 서명함.
 - 행정명령164는 Bataan 원전 재가동 및 신규 원전 건설 가능성과 2020년 발효된 행정명령116(Executive Order 116)에서 제안된 원자력에너지프로그램(Nuclear Energy Program, NEP)의 실행과 프로그램을 감독하는 부처별 위원회의 권한 및 역할 제정에 대해 기술하고 있음.

- 필리핀은 1973년 석유파동으로 인한 타격으로 Bataan 2기 건설을 추진하였고, Bataan 1호기(PWR, 621MW)의 경우, 1976년 건설되기 시작하여 1984년 완공되었으나, 4억 6천만 달러(약 5천 7백억 원²⁾)의 건설비용 조달 문제와 지진 등 안전성 문제로 수십년 간 가동되지 않고 있음.
 - NEP는 2016년 IAEA가 회원국의 원전 관련 공공정책을 종합적으로 분석한 보고서 (Building a National Position for a New Nuclear Power Programme)의 권고에 따라 구성되었으며, 부하전원으로써 원자력 발전 활용, 증가하는 전력 수요 충족, 온실가스 배출 감소 및 에너지 부문 탈탄소화 달성을 목적으로 함.
- Alfonso Cusi 필리핀 에너지부 장관은 이번 결정이 필리핀의 불안정한 전력 공급문제를 해결하고, 현재 러시아·한국·미국과 논의 중인 2028년 부유식 SMR 도입 계획에 도움이 될 것이라고 발언함.

2) 환율 검색일: 2022년 3월 15일

기타단신

◎ 일본 도카이 제2원전 안전대책공사와 테러대책시설 설치 완료 시기 연기

読売新聞 2022.02.28., 茨城新聞, 朝日新聞 2022.03.01.

- 일본원자력발전은 재가동을 추진 중인 노후원전 도카이 제2원전(1,100MW, BWR)의 설계 변경으로 안전대책공사 완료 시기를 2022년 12월에서 2024년 9월로 변경하고 테러대책시설 설치 완공 시기도 2023년 10월에서 2024년 9월로 변경한다고 2월 28일 발표함.
- 일본원자력발전은 원자로 건물 등 본체의 안전대책공사와 테러대책시설 공사를 함께 진행 중이며 원자로 건물과 테러대책시설에 사고 발생 시 방사성 물질을 제거하여 배기하는 장치를 각각 설치할 예정이었으나, 규제위의 의견을 수용해 하나의 장치로 두 시설을 겸용할 수 있도록 설계를 변경함.
- 더불어 지진해일 대책을 위해 높이 18~20m인 방조제 건설과 높은 곳에 전원 장치를 설치하는 작업도 예상보다 시간이 소요될 것으로 전망되어 완공 시기를 조정함.

World Nuclear Power Market
INSIGHT



세계원전시장
인사이트