

글로벌 원전 시장 보고서

Small Modular Reactor Market Analysis

소형 모듈식 원자로(SMR) 시장 분석 보고서

원전수출정보시스템
(K-neiss)





I. SMR 시장 규모

1. 글로벌 SMR 시장 규모
2. 노형별 SMR 개발 현황
3. 국가별 SMR 개발 현황

II. 노형별 분석

1. 주요 개발 노형별 기술 개발 현황
2. 주요 노형 설계 개요 및 특징

III. 국가별 SMR 도입 계획

1. 북미 (미국/캐나다)
2. 유럽 (루마니아/스웨덴)
3. 동남아시아 (인도네시아/말레이시아)
4. 중동·아프리카 (사우디아라비아/케냐)

IV. SMR 주요 노형 개발 기업

1. EDF
2. Rolls-Royce SMR
3. GE-Hitachi
4. Westinghouse
5. NuScale Power
6. TerraPower
7. Ultra Safe Nuclear
8. Holtec International
9. Seaborg Technologies
10. Rosatom

V. 전문가 인터뷰

※ 참고문헌

I . SMR 시장 규모

1. 글로벌 SMR 시장 규모
2. 노형별 SMR 개발 현황
3. 국가별 SMR 개발 현황

1. 글로벌 SMR 시장 규모

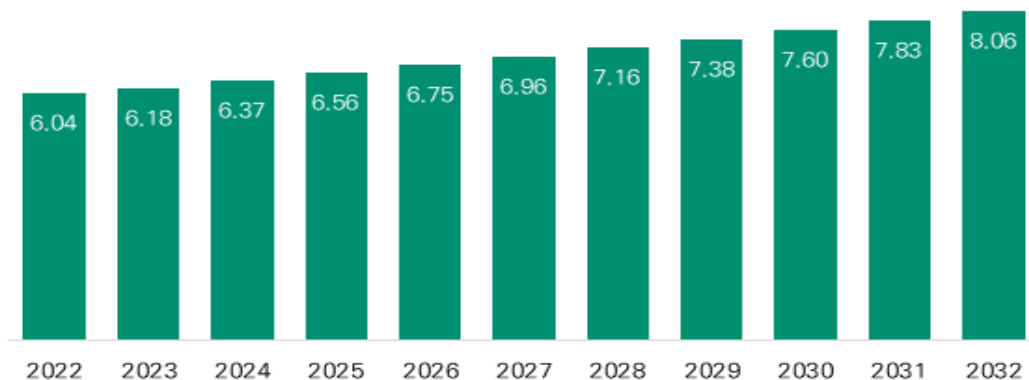
국제원자력기구(IAEA)는 소형 모듈식 원자로(SMR)를 전력 출력이 기존 원자로 용량의 약 1/3 수준인 1기당 최대 300MW의 발전용량을 갖춘 첨단 핵분열 원자로로 정의함. SMR의 장점은 '소형'과 '모듈형'이라는 설계 특성에서 비롯되는데, 대형 원전에는 적합하지 않은 위치에도 설치할 수 있고 주요 구조물, 계통, 기기 등의 모듈을 공장 제작 방식으로 제작한 후 건설 현장에 이송하여 조립 및 설치가 가능함.¹⁾ 모듈화 설계 및 제작을 통해 맞춤형 설계인 기존 원자로에 비해 설계 단순화 및 표준화, 건설 공기 단축과 건설비 절감이 가능하며, 증가하는 에너지 수요에 맞춰 발전소 규모를 유연하게 조정할 수 있음. 모듈화는 새로운 공급 모델을 촉진하며, 공장 생산을 통해 단가를 낮출 수 있을 것으로 기대됨

글로벌 SMR 시장 규모와 전망

OECD NEA는 2035년 전 세계 SMR 시장 규모가 21GW에 달할 것으로 전망한 바 있음.²⁾ 2023년 12월, 영국 싱크탱크 NNWI(New Nuclear Watch Institute)는 2050년 전 세계 SMR 설비용량이 낙관적인 시나리오의 경우 약 350GW에 달해 전체 원전의 최대 40%를 차지하고 기본 시나리오에서는 이보다 낮은 150~170GW에 이를 것으로 추정함.³⁾ 한편 시장조사업체 Precedence Research는 2022년 SMR 시장 규모를 약 60억 4,000만 달러로 추산하고, 2023~2032년 기간 동안 연평균 성장률(CAGR) 3%로 성장하여 2032년에는 약 80억 6,000만 달러에 달할 것으로 전망함.⁴⁾

[표] 글로벌 SMR 시장 규모 (2022~2032)

(단위: 십억 달러)



출처: Precedence Research

1) Energy Monitor, Small modular reactors: What is taking so long?, 2023.08.12.

2) NEA, The NEA Small Modular Reactor (SMR) Strategy, 2022.10.21.

3) NNWI, Scaling Success: Navigating the Future of Small Modular Reactors in Competitive Global Low-Carbon Energy Markets, 2023.12.27.

4) Precedence Research, Small Modular Reactor Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2023-2032, 2023.05.

2. 노형별 SMR 개발 현황

2022년 IAEA가 발간한 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」(이하 SMR Book) 기준으로 현재 18개국에서 83종의 SMR이 개발되고 있음.⁵⁾ SMR 개발은 기존 상용 원전의 입증된 기술을 활용하는 동시에, 기존 설계 개념을 일부 보완하여 안전성과 경제성을 높이는 ‘진화형 원자로(Evolutionary reactor)’와 재료 및/또는 연료 사용, 운영 환경 및 조건, 시스템 구성에 있어 기존 원전 대비 혁신적인 설계 개념 및 신기술을 개발하는 ‘혁신적 원자로(Innovative reactor)’ 설계로 구분할 수 있음.⁶⁾ 현재 전 세계 상용 원전의 약 70%를 차지하는 가압경수로(Pressurized Water Reactor, PWR) 기술에 기반해 설계 완성도가 상대적으로 높은 경수형 SMR이 전자에 속하고, 소듐냉각고속로(Sodium Cooled Fast Reactor, SFR), 납냉각고속로(Lead Cooled Fast Reactor, LFR) 등 비경수로형 4세대 노형들이 후자에 속함

노형별 SMR 개발 현황... PWR 가장 큰 비중

IAEA의 첨단원자로정보시스템(ARIS)에 따르면, 실험용·데모/프로토타입·상업용 원자로를 모두 합쳐 현재 러시아, 중국, 미국 등에서 건설 중인 SMR은 7종, 러시아와 중국 등에서 가동 중인 SMR은 3종으로 파악됨. 개발 중인 SMR 가운데 가장 큰 비중을 차지하는 노형은 가압경수로(PWR)이며, 납냉각고속로(LFR), 소듐냉각고속로(SFR), 용융염로(MSR)가 뒤를 잇는 것으로 나타남. 또한 용도별로는 상업용 원자로가 56종으로 가장 많으며 데모 원자로가 18종, 실험용 원자로가 4종으로 집계됨

[표] 노형별 첨단 원자로 개발 주요 현황



출처: IAEA ARIS

5) IAEA, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2022.

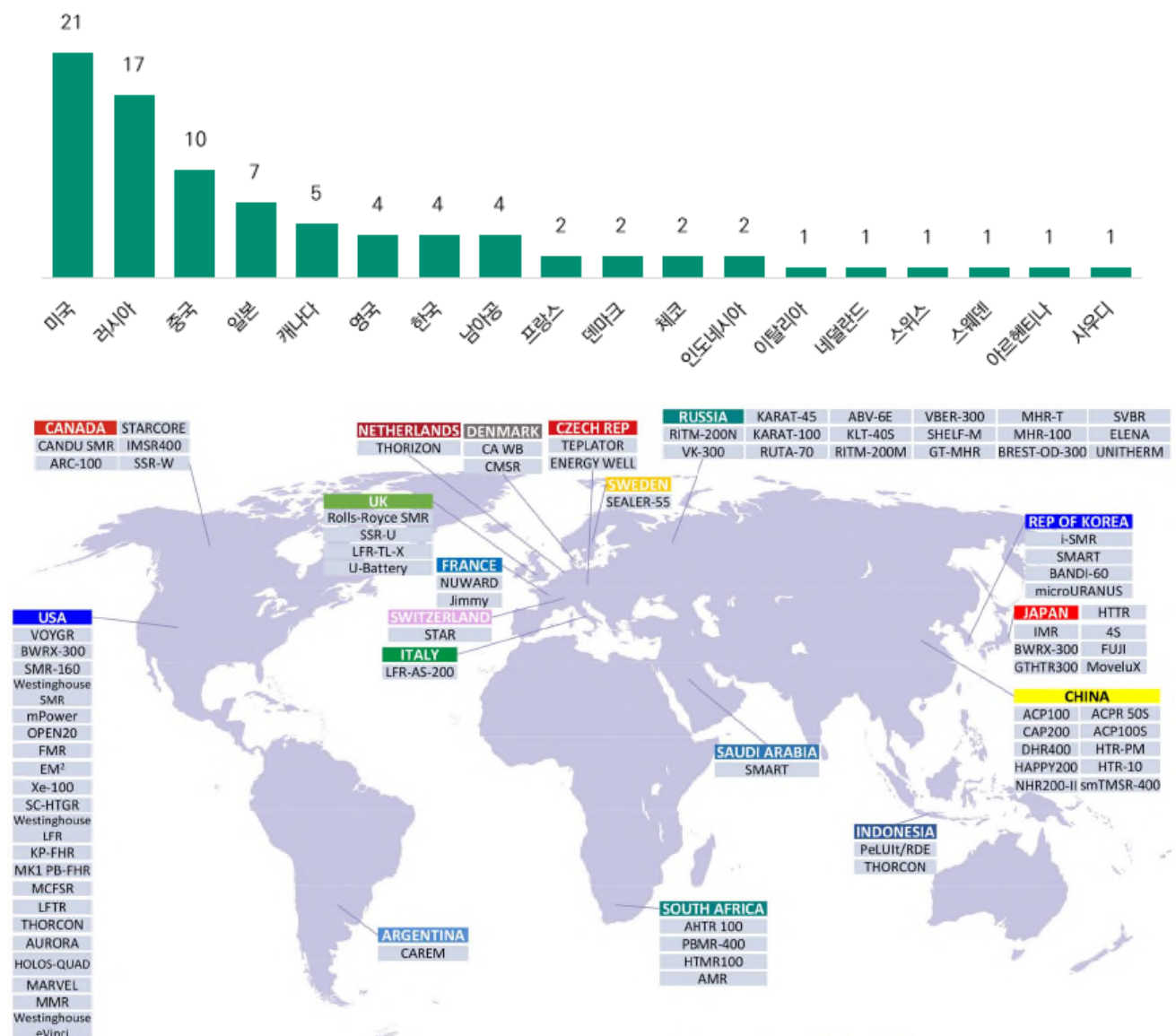
6) IAEA ARIS

3. 국가별 SMR 개발 현황

국가별 SMR 개발 현황... 숫자는 미국, 진척도는 러시아 앞서

IAEA SMR Book(2022)에 따르면 SMR을 가장 많이 개발하고 있는 국가는 미국으로, 20종의 SMR을 개발 중임. 이어 러시아(17종), 중국(10종), 일본(7종), 캐나다(5종)가 뒤를 이었음. 미국의 NuScale Power Module™은 2020년 9월 미국 원자력규제위원회(NRC)로부터 표준설계 승인을 획득함. 반면 러시아의 Akademik Lomonosov 부유식 발전소의 KLT-40S는 2019년 12월에 전력망에 연결되어 2020년 5월 이미 상업운전을 시작함. 중국의 HTR-PM 실증 원자로는 2021년 12월 전력망에 연결되었으며, ACP100은 2021년 7월 건설을 시작하여 2026년 말 상업운전을 목표로 하고 있음.

[표] 국가별 SMR 개발 현황



출처: IAEA

Ⅱ. 노형별 분석

1. 주요 노형별 기술 개발 현황
2. 주요 노형 설계 개요 및 특징

1. 주요 노형별 기술 개발 현황

IAEA는 SMR Book에서 전 세계적으로 현재 개발이 진행되고 있는 SMR 기술 현황과 함께 주요 개발 노형으로 △육상 수냉식 소형 모듈식 원자로 △해상 수냉식 소형 모듈식 원자로 △고온가스냉각 소형 모듈식 원자로 △액체금속냉각 고속중성자 스펙트럼 소형 모듈식 원자로 △용융염 소형 모듈식 원자로 △초소형 원자로 등을 소개함.

육상 수냉식 소형 모듈식 원자로(Land-based water-cooled SMR)

SMR Book에서는 다양한 구성의 경수로(Light Water Reactor, LWR)와 중수로(Heavy Water Reactor, HWR) 기술 가운데 주목할 만한 수냉식 SMR 설계를 소개함. 이러한 설계는 현재 가동 중인 대부분의 대형 원자력 발전소가 수냉식 원자로로 구성되어 있으므로 성숙한 기술을 활용한다고 할 수 있음. 이러한 설계에는 일체형가압경수로(iPWR), 가압중수로(PHWR), 소형 가압경수로(PWR), 루프형 PWR, 비등수형원자로(BWR), 지역난방용 풀타입(pool-type) PWR 등이 포함됨.

SMR Book은 IAEA 12개 회원국이 개발 중인 25종의 육상 수냉식 SMR 설계를 소개하고 있음. 이 가운데 대표적인 iPWR인 CAREM은 자연 순환 방식을 채택했으며 2026년 최초 임계를 목표로 건설 중임. 또 다른 iPWR인 중국의 ACP100은 2021년 착공하여 2026년 상업운전을 목표로 하고 있음. 미국의 NuScale VOYGR와 BWRX-300, 영국의 Rolls-Royce SMR, 프랑스의 NUWARD 등의 다양한 설계가 조기 배치를 목표로 개발 중임

[표] 육상 수냉식 소형 모듈식 원자로 개발 현황

*열출력 규모

설계	출력(MWe)	노형	설계자	국가	진행 상황
CAREM	30	iPWR	CNEA	아르헨티나	건설 중
ACP100	125	iPWR	CNNC/NPIC	중국	건설 중
CANDU SMR	300	PHWR	Candu Energy Inc.	캐나다	개념설계
CAP200	> 200	PWR	SPIC/SNERDI	중국	기본설계
DHR400	400MW(t)*	PWR (풀타입)	CNNC	중국	기본설계
HAPPY200	200MW(t)*	PWR	SPIC	중국	상세설계
NHR200-II	200MW(t)*	iPWR	칭화대/CGN	중국	기본설계
TEPLATOR	< 150MW(t)	HWR	UWB Pilsen & CIIRC CTU	체코	개념설계
NUWARD	2 × 170	iPWR	EDF	프랑스	개념설계
IMR	350	PWR	MHI	일본	개념설계 완료
i-SMR	170	iPWR	KHNP, KAERI	한국	개념설계
SMART	107	iPWR	KAERI, K.A.CARE	한국, 사우디	상세설계
RITM-200N	55	iPWR	JSC Afrikantov OKBM, Rosatom	러시아	상세설계 완료

VK-300	250	BWR	NIKIET	러시아	상세설계
KARAT-45	45 ~ 50	BWR	NIKIET	러시아	개념설계
KARAT-100	100	BWR	NIKIET	러시아	개념설계
RUTA-70	70MW(t)*	PWR (플타입)	NIKIET	러시아	개념설계
STAR	10	LWR (압력 튜브)	STAR ENERGY SA	스위스	기본설계
Rolls-Royce SMR	470	PWR	Rolls-Royce SMR Ltd.	영국	상세설계
VOYGR	4/6/12 × 77	iPWR	NuScale Power Corporation	미국	기기 제작 중
BWRX-300	270 ~ 290	BWR	GE-Hitachi Nuclear Energy, Hitachi-GE Nuclear Energy	미국, 일본	상세설계
SMR-160	160	PWR	Holtec International	미국	예비설계 완료
AP300	300	PWR	Westinghouse Electric Company LLC	미국	개념설계
mPower	2 × 195	iPWR	BWX Technologies, Inc	미국	개념설계
OPEN20	22	PWR	Last Energy Inc.	미국	상세설계

출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

해상 수냉식 소형 모듈식 원자로(Marine-based water-cooled SMR)

해상 수냉식 소형 모듈식 원자로는 바지선 탑재 부유식원전 또는 침수형 수중 해상원전 등 해양 환경에 적용할 수 있는 원자로로, 다른 노형에 비해 유연하게 배치할 수 있다는 장점을 제공함. 2022년 SMR Book은 8종의 해상 수냉식 소형 모듈식 원자로를 소개하고 있으며, 이 가운데 일부는 원자력 쇄빙선에 적용됨. 2020년 5월 러시아 Pevek에서 상업운전을 개시한 Akademik Lomonosov 부유식원전에 배치된 KLT-40S는 이 유형에 속한 SMR 설계 중에서 최초로 전력망에 연결됨.

[표] 해상 수냉식 소형 모듈식 원자로 개발 현황

설계	출력(MWe)	노형	설계자	국가	진행 상황
KLT-40S	2 × 35	PWR	ROSATOM, Afrikantov OKBM	러시아	상업운전
ACPR50S	50	PWR(루프형)	CGNPC	중국	상세설계
ACP100S	125	iPWR	CNNC/NPIC	중국	기본설계
BANDI-60	60	PWR	KEPCO E&C	한국	개념설계
ABV-6E	6 ~ 9	PWR	JSC Afrikantov OKBM, Rosatom	러시아	최종설계
RITM-200M	50	iPWR	JSC Afrikantov OKBM, Rosatom	러시아	기본설계 완료
VBER-300	325	iPWR	JSC Afrikantov OKBM, Rosatom	러시아	인허가 단계
SHELF-M	최대 10	iPWR	NIKIET	러시아	기본설계

출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

고온가스냉각 소형 모듈식 원자로(High Temperature Gas Cooled SMR)

현재 개발 또는 건설 중인 고온가스냉각 소형 모듈식 원자로(High Temperature Gas Cooled Reactor, HTGR)는 750도 이상의 고온에서 효율적으로 전력을 생산하여 열병합발전을 비롯한 다양한 산업에서 활용할 수 있음. SMR Book은 2021년 12월 상업운전을 개시한 중국의 HTR-PM을 비롯하여 총 17종의 HTGR SMR 설계를 소개함. 여기에는 일본과 중국에서 각각 20년 이상 기술 테스트 목적으로 시험운전 중인 HTGR 시험 원자로도 포함됨.

[표] 고온가스냉각 소형 모듈식 원자로 개발 현황

*열출력 규모

설계	출력(MWe)	노형	설계자	국가	진행 상황
HTR-PM	210	HTGR (폐블베드형)	INET, 칭화대	중국	상업운전
STARCORE	14/20/60	HTGR (블록형)	StarCore Nuclear	캐나다	예비 개념설계
JIMMY	10~20MW(t)*	HTGR (블록형)	JIMMY ENERGY SAS	프랑스	상세설계
GTHTR300	100 ~ 300	HTGR (블록형)	JAEA Consortium	일본	기본설계
GT-MHR	288	HTGR (블록형)	JSC Afrikanov OKBM	러시아	예비설계 완료
MHR-T	4 × 205.5	HTGR	JSC Afrikanov OKBM	러시아	개념설계
MHR-100	25 ~ 87	HTGR	JSC Afrikanov OKBM	러시아	개념설계
AHTR-100	50	HTGR (폐블베드형)	Eskom Holdings SOC Ltd.	남아공	개념설계 완료
PBMR-400	165	HTGR (폐블베드형)	PBMR SOC Ltd.	남아공	예비설계 완료
HTMR100	35	HTGR (폐블베드형)	STL Nuclear (Pty) Ltd.	남아공	기본설계
EM ²	265	GFR	General Atomics	미국	개념설계
FMR	50	GFR	General Atomics	미국	개념설계
Xe-100	82.5	HTGR (폐블베드형)	X-Energy LLC	미국	기본설계
SC-HTGR	272	HTGR (블록형)	Framatome, Inc.	미국	예비설계
PeLUit / RDE	40MW(t)*	HTGR (폐블베드형)	BRIN	인도네시아	개념설계
HTR-10	2.5	HTGR (폐블베드형)	INET, 칭화대	중국	시험운전
HTTR	30MW(t)*	HTGR (블록형)	JAEA	일본	운전 중

출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

액체금속냉각 고속중성자 스펙트럼 소형 모듈식 원자로(Liquid metal-cooled fast neutron spectrum SMR)

액체금속냉각 고속중성자 스펙트럼 소형 모듈식 원자로(LMFR)는 나트륨, 중금속(예: 납, 납-비스무스) 등을 포함한 액체금속 냉각재가 적용됨. SMR Book은 8종의 설계를 제시하고 있으며, 해당 노형의 기술 개발 및 구축에 있어 가시적인 진전이 이루어지고 있음. 납냉각 고속중성자 원자로인 BREST-OD-300은 폐쇄형 연료 주기를 입증하는 실증 프로젝트의 일환으로 현재 러시아의 Seversk 지역에 건설되고 있으며, 2026년 완공될 예정임.

[표] 액체금속냉각 고속중성자 스펙트럼 소형 모듈식 원자로 개발 현황

*열출력 규모

설계	출력(MWe)	노형	설계자	국가	진행 상황
BREST-OD-300	300	LMFR (폴타입)	NIKIET	러시아	건설 중
ARC-100	100	LMFR (폴타입)	ARC Clean Energy	캐나다	예비설계
4S	10	LMFR (폴타입)	Toshiba Energy Systems, Solutions Corporation	일본	상세설계
MicroURANUS	20	LBR	UNIST	한국	개념설계
LFR-AS-200	200	LMFR	newcleo srl	이탈리아	개념설계
SVBR	100	LMFR	JSC AKME Engineering	러시아	상세설계
SEALER-55	55	LMFR	LeadCold	스웨덴	개념설계
Westinghouse LFR	450	LMFR (폴타입)	Westinghouse Electric Company, LLC.	미국	개념설계

출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

용융염 소형 모듈식 원자로(Molten Salt SMR)

용융염 소형 모듈식 원자로(MSR)는 용융염 고유의 특성에 따른 안전성 향상, 대형 격납용기가 필요 없는 저압 단상 냉각재 계통, 고효율의 고온 시스템, 유연한 연료 주기 등 많은 장점이 있음. 여러 MSR 설계가 캐나다, 덴마크, 네덜란드, 영국, 미국 규제 기관과 예비 인허가 단계를 진행하고 있으며, SMR Book에서는 주요 MSR 설계로 13종을 소개함.

[표] 용융염 소형 모듈식 원자로 개발 현황

*열출력 규모

설계	출력(MWe)	노형	설계자	국가	진행 상황
IMSR400	2 × 195	MSR	Terrestrial Energy Inc.	캐나다	상세설계
SSR-W	300	MSR (정적 연료)	Moltex Energy	캐나다	개념설계
smTMSR-400	168	MSR	CAS/SINAP	중국	예비 개념설계
CMSR	100	MSR	Seaborg Technologies ApS	덴마크	개념설계
Copenhagen Atomics Waste Burner	20MW(t)*	MSR	Copenhagen Atomics	덴마크	상세설계

FUJI	200	MSR	ITMSF	일본	예비설계 완료
THORIZON	40 ~ 120	MSR	THORIZON	네덜란드	개념설계
SSR-U	16	MSR	Moltex Energy	영국	기본설계
KP-FHR	140	FHR	KAIIROS Power, LLC.	미국	개념설계
Mk1 PB-FHR	100	FHR	UC Berkeley	미국	예비 개념설계
MCSFR	50 / 200 / 400 / 1200	MSR (고속로)	Elysium Industries	미국	개념설계
LFTR	250	MSR	Flibe Energy, Inc.	미국	개념설계
ThorCon	250	MSR	ThorCon International	미국, 인도네시아	예비설계 완료

출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

초소형 원자로(Microreactors)

일반적으로 최대 10MWe의 전력을 생산하도록 설계된 초소형 SMR은 전례 없이 빠른 속도로 개발이 이루어지고 있으며, 경수로, 헬륨, 용융염, 액체금속, 히트 파이프 등 다양한 유형의 냉각 방식을 채택하고 있음. 캐나다와 미국에서는 일부 설계의 조기 도입을 위한 인허가 과정이 진행되고 있으며, 특히 2019년 캐나다 Global First Power(GFP)社は Chalk River 연구소 부지에 USNC社의 초소형 모듈원자로(MMR) 기술을 이용한 SMR 1기의 부지 허가 신청서를 캐나다 원자력안전위원회(CNSC)에 제출함. 초소형 원자로는 마이크로그리드 및 오프그리드 격오지에 전력을 공급하고, 자연재해의 영향을 받은 지역사회의 전력을 신속하게 복구하며, 병원, 상수도, 해수 담수화 등 중요 서비스의 신속한 복구를 지원하는 등 미래의 전력 및 난방 틈새시장에 서비스를 제공할 것으로 전망됨. SMR Book에는 12종의 초소형 원자로가 소개됨.

[표] 초소형 원자로 개발 현황

설계	출력(MWe)	노형	설계자	국가	진행 상황
Energy Well	8	FHTR	Centrum výzkumu Řež	체코	예비 개념설계
MoveluX	3 ~ 4	Heat Pipe (sodium)	Toshiba Energy Systems, Solutions Corporation	일본	개념설계
ELENA	0.068	PWR	National Research Centre "Kurchatov Institute"	러시아	개념설계
UNITHERM	6.6	PWR	NIKIET	러시아	개념설계
AMR	3	HTGR(블록형)	STL Nuclear (Pty) Ltd.	남아공	예비 개념설계
LFR-TL-30	30	LMFR	newcleo Ltd.	영국	개념설계
U-Battery	4	HTGR	Urenco	영국	개념설계
Aurora	1.5 ~ 50	LMFR	OKLO, Inc.	미국	상세설계
HOLOS-QUAD	10	HTGR	HolosGen LLC	미국	상세설계
MARVEL	0.015 ~ 0.027	LMFR	Idaho National Laboratory	미국	기기 제작중
MMR	> 5 및 > 10	HTGR	Ultra Safe Nuclear Corporation	미국	기본설계
Westinghouse eVinci	2 ~ 3.5	Heat Pipe	Westinghouse Electric Company, LLC.	미국	개념설계 완료

출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

2. 주요 노형 설계 개요 및 특징

본 보고서에서는 아래 10개 주요 노형의 설계 개요 및 특징을 알아보고자 함. 이 가운데 IAEA의 SMR Book에서 다루어지지 않은 미국 TerraPower社의 Natrium의 경우, 용융염 원자로(MSR)의 일종인 용융염화물 고속원자로(Molten Chloride Fast Reactor, MCFR)로 용융염이 연료와 냉각수 역할을 모두 하는 방식임. 개념설계 단계를 거쳐 2016년 1월 미국 에너지부가 TerraPower社의 지속적인 연구개발을 지원함에 따라 데모 프로젝트로 확장되었음. 에너지부 산하 원자력에너지국(NE)은 ‘용융염화물 원자로 실험(Molten Chloride Reactor Experiment, MCRE)’ 프로그램의 일환으로 이 프로젝트에 자금을 지원함.⁷⁾

[표] 주요 노형 개요 정보

원자로	국가	개발자	노형	출력(MWe)	개발 단계
NUWARD	프랑스	EDF	iPWR	2 × 170	개념설계
Rolls-Royce SMR	영국	Rolls-Royce SMR Ltd.	PWR	470	상세설계
BWRX-300	미국, 일본	GE-Hitachi	BWR	270 ~ 290	상세설계
Westinghouse eVinci	미국	Westinghouse Electric Company LLC	Heat Pipe	2 ~ 3.5	개념설계 완료
VOYGR	미국	NuScale Power	iPWR	4/6/12 × 77	기기 제작 중
Natrium	미국	TerraPower	MSR (MCFR)	345	상세설계
MMR	미국	Ultra Safe Nuclear Corporation	HTGR	> 5 및 > 10	기본설계
SMR-160	미국	Holtec	PWR	160	예비설계 완료
CMSR	덴마크	Seaborg Technologies	MSR	100	개념설계
KLT-40S	러시아	ROSATOM, OKBM	PWR	2 × 35	상업운전

출처: IAEA, NEA

7) NRC, Molten Chloride Fast Reactor (MCFR), 2023.02.01.

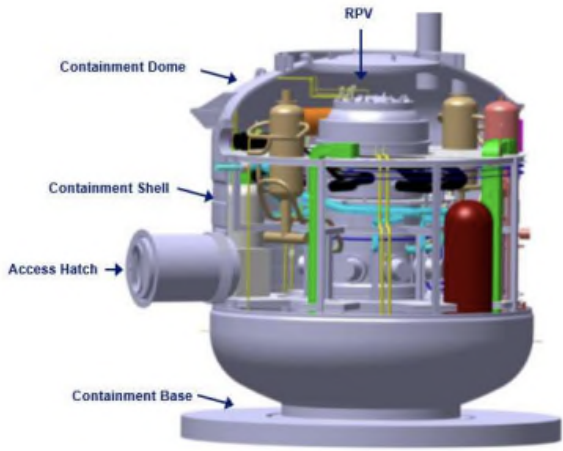
2-1. NUWARD / EDF

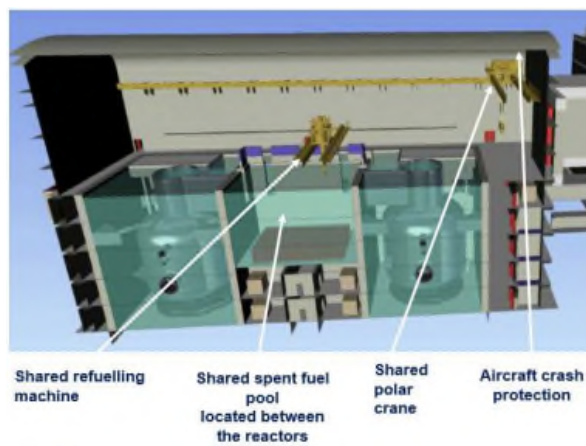
NUWARD는 2개의 독립적인 원자로 장치에서 340MWe를 생성하는 일체형 PWR 설계임. 이 설계에는 제어봉 구동장치(CRDM), 소형 판형 증기발생기(CSG), 가압기를 포함한 핵증기 공급계통(NSSS)의 주요 구성 요소가 모두 원자로 압력용기(RPV) 내에 포함되어 있음. 이 RPV는 추가 강철 격납층 내에 설치되고 이 구조물은 수조에 잠겨짐. NUWARD 설계에는 외부 전원 공급 장치 없이 피동 계통을 사용하여 설계 기준 조건(DBC)에 대처할 수 있는 기능이 포함되어 있음

개발 용도 및 특징

NUWARD 설계는 300-400MWe 범위의 화석연료 발전소를 대체하기 위해 개발되었으며, 격오지 및 에너지 집약적 산업 현장에 전력을 공급하는 것을 목적으로 함. 제한된 용량의 전력망에 전력을 공급할 수 있으며, 열병합발전, 수소생산, 지역난방, 담수화 등에 활용 가능한 다목적 SMR임. 이 설계는 재생 에너지원과 통합할 수 있도록 기저부하 및 부하 추종 기능을 제공함.

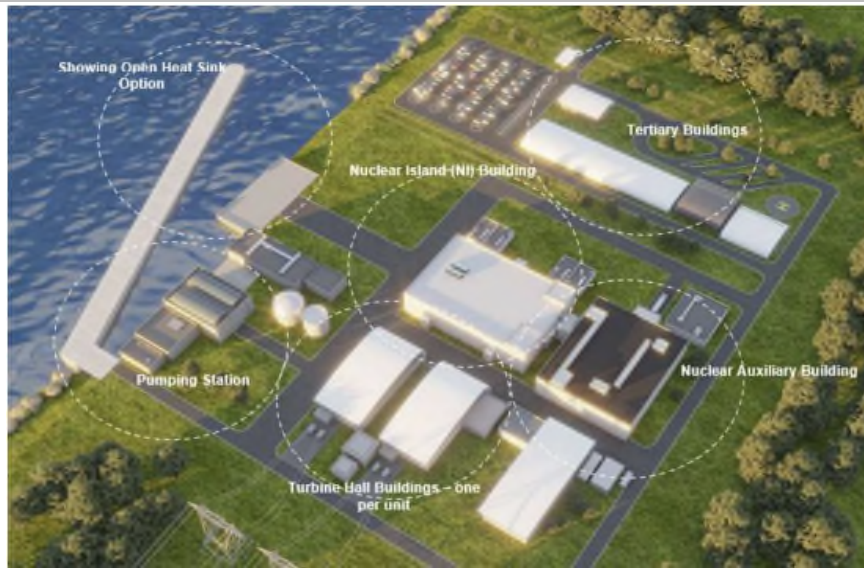
[표] NUWARD 설계 특성

기술 개발국가	프랑스	
기술 개발자	EDF	
노형	일체형 가압경수로(iPWR)	
냉각재 및 감속재	경수/경수	
열·전기 출력	2x540MW(t) / 2x170MW(e)	
1차측 순환	강제순환	
NSSS 운전 압력(1차/2차측)	15 / 4.5 MPa	
노심 입구/출구 냉각재 온도	280℃ / 307℃	
연료 유형 및 집합체 형태	UO2 / 사각 배열(17x17)	
노심의 연료 집합체 수	76	
연료 농축도	< 5%	
재장전 주기	24개월	
반응도 제어	제어봉 구동장치(CRDM), 가연성 독봉	
안전계통	피동	
설계수명	60년	
건축면적	3,500㎡	
RPV 높이/지름	15/5m	
RPV 무게	310ton	
내진 설계(SSE)	0.3g	
설계 단계	개념설계	
특징	수중 격납장치가 포함된 통합 NSSS, 반매장형 1차 계통	



출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

[그림] NUWARD 발전소 배치



출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

발전소 배치 설계

NUWARD 발전소에서 1차 계통(Nuclear Island)은 외부 위험과 악의적 행위로부터 보호하기 위해 지하에 위치하며 시공 용이성을 높였음. 1차 계통에는 2개의 독립 장치와 공유 연료 저장조가 있음. NUWARD 발전소는 기존의 오픈 루프 콘덴서 냉각 방식의 해안/호수 또는 강변 부지뿐만 아니라 공기 콘덴서 방식의 내륙 부지에도 적합함. 기본 그리드 인터페이스는 유럽 송전 시스템 운영자 네트워크(ENTSO-E) 및 유럽 요건(일반적으로 225kV/400kV 및 50Hz)을 준수함

설계 및 인허가 현황

NUWARD는 개념설계 단계가 거의 완료되었으며 프랑스 원자력안전청(ASN), 핀란드 방사능·원자력안전청(STUK), 체코 국가원자력안전청(SUJB)이 NUWARD 원자로 설계의 인허가 사전 검토를 위해 협력하고 있음. 이 공동 사전 검토에는 폴란드 국립원자력청(PAA), 스웨덴 방사능안전청(SSM), 네덜란드 원자력안전·방사능방호청(ANVS) 등 3개 규제기관이 추가로 합류할 예정임.⁸⁾ 2023~2026년은 기본설계 단계, 2026~2030년 상세설계 단계를 거친다는 계획임. 또한 EDF는 NUWARD의 초도호기(FOAK)에 적합한 인허가 원전 부지를 18개 소유하고 있으며, 프랑스 정부와의 협의를 통해 2030년 착공을 계획 중임. 2023년 7월, EDF는 ASN에 NUWARD 원자로의 안전 목표, 운영 및 위험 관리에 대한 주요 원칙을 제시하는 문서인 ‘안전 옵션 파일’을 제출하며 예비 인허가 절차를 개시함⁹⁾

8) World Nuclear News, More countries set to join Nuward SMR joint early review, 2023.09.26

9) World Nuclear News, Prelicensing process for Nuward SMR begins, 2023.07.21

2-2. Rolls-Royce SMR / Rolls-Royce SMR Ltd.

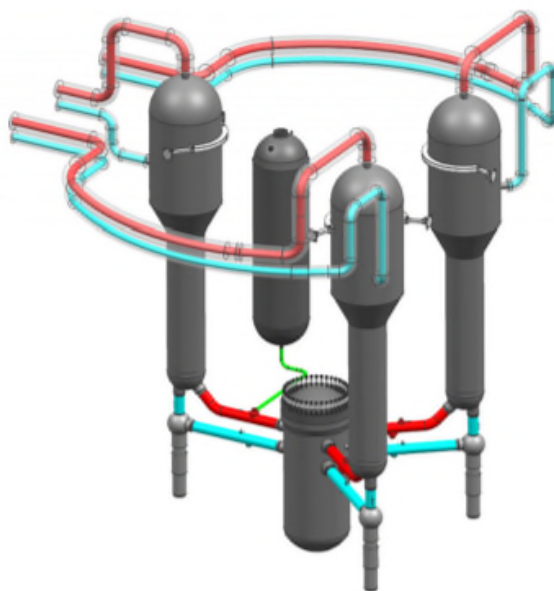
Rolls-Royce SMR은 시장 중심적이고 저렴한 저탄소 에너지 생산을 제공하기 위해 개발됨. 검증된 원자력 기술을 사용하여 반복 생산이 가능한 공장 제작 방식의 발전소를 생산할 수 있어 기존의 맞춤형 원전 설계 및 건설 기술보다 훨씬 더 신속한 건설 및 운영이 가능함. 이를 통해 비용을 낮추고 개발자의 불확실성과 위험을 줄일 수 있음. 제조 및 조립 단계의 약 90%를 공장에서 수행함으로써 높은 품질의 제품을 유지하고 해외 건설 프로젝트를 지원하는 데 용이함

개발 용도 및 특징

Rolls-Royce SMR은 주로 해안 및 내륙 부지에 기저부하 전력을 공급하는 목적으로 설계됨. 또한 많은 열이 필요한 응용 분야나 열병합발전 응용 분야를 지원할 뿐만 아니라 합성 연료 생산을 위한 1차, 무탄소 전원을 제공하도록 설계를 구성할 수 있음

[표] Rolls-Royce SMR 설계 특성

기술 개발국가	영국
기술 개발자	Rolls-Royce SMR Ltd.
노형	3루프 가압경수로(PWR)
냉각재 및 감속재	경수/경수
열·전기 출력	1,358MW(t) / 470MW(e)
1차측 순환	강제순환
NSSS 운전 압력(1차/2차측)	15.5 / 7.8 MPa
노심 입구/출구 냉각재 온도	295℃ / 325℃
연료 유형 및 집합체 형태	UO ₂ / 사각 배열(17x17)
노심의 연료 집합체 수	121
연료 농축도	< 4.95%
연료 연소도	50~60GWd/ton
재장전 주기	18개월
반응도 제어	제어봉
안전계통	피동 및 능동
설계수명	60년
건축면적	40,000㎡
RPV 높이/지름	7.9 / 4.2 m
RPV 무게	150ton
내진 설계(SSE)	> 0.3g
연료주기 요건 및 적용방식	개방형 연료주기
설계 단계	상세설계
특징	모듈식으로 신속하고 비용 효율적인 건설 가능



출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

[그림] Rolls-Royce SMR 발전소 배치



출처: Rolls-Royce SMR Ltd.

발전소 배치 설계

Rolls-Royce SMR 발전소는 약 40,000㎡의 컴팩트한 부지 면적을 유지하면서 다양한 부지 조건에 따라 광범위한 내륙 및 해안 부지에 건설할 수 있도록 설계됨. 이러한 유연성은 주요 안전 시설에 대한 지진격리와 같은 설계 기능을 통해 구현됨. 원자로는 터빈 아일랜드(Turbine Island)와 인접한 원자로 아일랜드(Reactor Island)에 위치하며 냉각수 아일랜드(Cooling Water Island)가 그 뒤를 따름. 지원 건물과 보조 서비스는 부지 주변을 감싸고 외부 위험으로부터 한 겹의 보호막을 제공하는 둔덕(berm) 안에 위치함

설계 및 인허가 현황

Rolls-Royce SMR은 2015년 초기 참조 설계 개발에 들어갔으며, 2016년 전체 발전소 개념설계를 위한 컨소시엄을 구성함. 2022년 설계인증 신청서를 영국 원자력규제청(ONR)에 제출하여 당국의 일반설계평가(GDA) 절차 1단계를 시작했으며 2026년 초도호기 착공, 2030년 초도호기 상업운전 개시를 목표로 하고 있음.

영국 원자력해체청(Nuclear Decommissioning Authority, NDA)은 영국 정부의 에너지 안보 전략을 지원하기 위해 NDA 부지를 활용할 수 있는 기회를 모색하고 있으며, 여기에는 NDA 부지에 Rolls-Royce SMR을 건설하는 방안도 포함됨. Rolls-Royce SMR Ltd는 Wylfa, Trawsfynydd 등 NDA 소유의 부지 4곳을 최종 후보지로 선정함.

2-3. BWRX-300 / GE-Hitachi

GE-Hitachi사의 BWRX-300은 단순한 자연현상 기반의 안전계통을 활용한 300MWe 규모의 수냉식 자연순환 형식의 SMR로 설계되었음. 10세대 비등수형원자로(BWR)이며 1955년 GE사가 원자로를 개발하기 시작한 이래 가장 단순한 BWR 설계임. BWRX-300은 미국 원자력규제위원회(NRC) 인증을 받은 1,520MWe 규모 ESBWR(Economic Simplified Boiling Water Reactor)에서 진보된 노형임.

개발 용도 및 특징

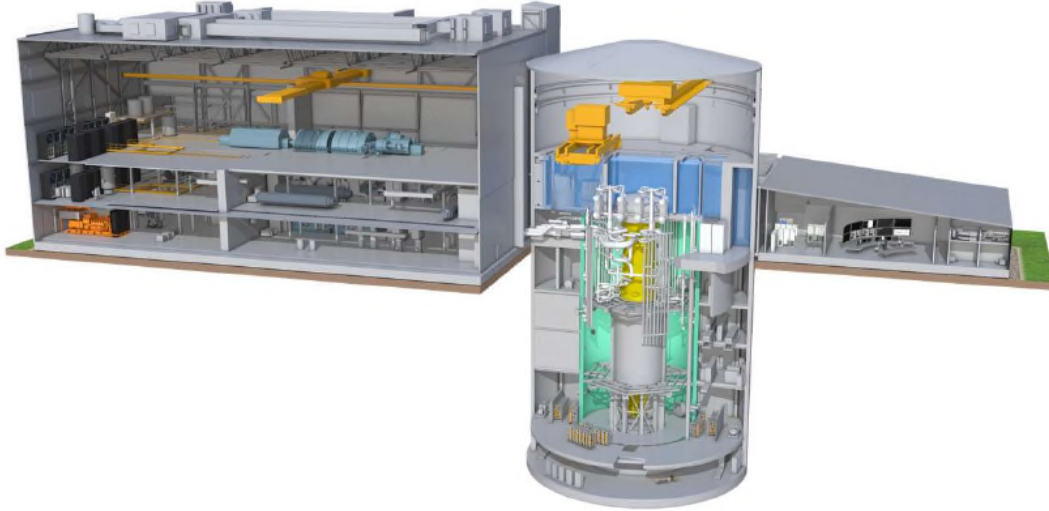
BWRX-300의 적용 대상에는 기저부하 전력 생산, 50~100% 전력 범위 내 전기부하, 지역난방, 합성 연료 생산, 수소 생산, 기타 공정열 공급이 포함됨. BWRX-300은 검증된 재료, 기성 부품, 기존 BWR 경험의 범위 내에서 비용 효율적인 설계 결정을 기반으로 개발됨. 2028년 상업운전에 들어갈 계획이며, 냉각재 보존 전략을 활용하여 냉각재 손실을 완화함으로써 구조와 시스템을 크게 간소화함.

[표] BWRX-300 설계 특성

기술 개발국가	미국, 일본	
기술 개발자	GE-Hitachi	
노형	비등경수로형원자로(BWR)	
냉각재 및 감속재	경수/경수	
열·전기 출력	870MW(t) / 270~290MW(e)	
1차측 순환	자연순환	
NSSS 운전 압력(1차/2차측)	7.2 MPa	
노심 입구/출구 냉각재 온도	270℃ / 288℃	
연료 유형 및 집합체 형태	UO ₂ / 사각 배열(10x10)	
노심의 연료 집합체 수	240	
연료 농축도	평균 3.81%, 최대 4.95%	
연료 연소도	49.6GWd/ton	
재장전 주기	12~24개월	
반응도 제어	제어봉 및 가연성 독봉	
안전계통	피동	
설계수명	60년	
건축면적	9,800m ²	
RPV 높이/지름	26/4m	
RPV 무게	485ton	
내진 설계(SSE)	0.3g	
연료주기 요건 및 적용방식	표준 BWR 연료 사용, 개방형 연료 주기	
설계 단계	상세설계	
특징	자연순환 BWR, 일체형 RPV 격리밸브 및 격리 콘덴서	

출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

[그림] BWRX-300 발전소 배치



출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

발전소 배치 설계

BWRX-300의 참고 부지는 260m x 332m 규모로, 원자로 건물(RB), 터빈 건물(TB), 제어 건물(CB), 방사성폐기물 건물(Radwaste Building, RwB)로 구성됨. 이러한 파워 블록의 설치 면적은 약 140m x 70m임. 1차 격납용기(PCV)와 원자로 압력용기(RPV)는 원자로 건물 내 지반 아래에 위치하며, PCV 위에는 수조(water pool)를 배치함. 세 개의 격리 콘덴서 시스템(ICS) 수조는 PCV 위의 수조 옆에 위치하며 각 수조에 하나의 격리 콘덴서(IC)가 있음. 제어 건물에는 제어실, 전기·제어·계측 장비가 배치됨. 터빈 건물에는 터빈, 발전기, 주콘덴서, 응축수 및 급수계통, 응축수 정화계통 등이 위치함

설계 및 인허가 현황

BWRX-300은 영국 원자력규제청(ONR), 미국 원자력규제위원회(NRC), 캐나다 원자력안전위원회(CNSC) 등 3개국에서 인허가 작업이 진행되고 있음. 영국에서는 전 기업에너지산업전략부(BEIS)가 지원한 성숙단계 조달평가(Mature Technology Evaluation)가 완료됨. 미국에서는 규제 위험이 높은 것으로 간주되는 설계 특징 및 분석 방법에 대한 5개의 인허가 특정기술주제 보고서(Licensing Topical Report, LTR)를 제출함. 캐나다에서는 공급자설계검토(Vendor Design Review, VDR) 1, 2단계 통합심사가 진행 중으로, 2022년 10월, 온타리오 전력발전(OPG, 온타리오 주정부가 전액 출자하고 지원하는 주정부 공기업)은 CNSC에 온타리오주 달링턴(Darlington)에 위치한 신규 원전 프로젝트 DNNP-1에 BWRX-300 건설 허가 신청서를 제출함. 폴란드에서는 ORLEN Synthos Green Energy(OSGE)가 폴란드 원자력에너지청에 BWRX-300의 평가 신청서를 제출하여 예비 인허가 절차를 개시함. GE-Hitachi社は 국제적인 인허가를 거쳐 2027년 혹은 2028년에 최초 상업운전을 개시한다는 목표임.

2-4. Westinghouse eVinci / Westinghouse Electric

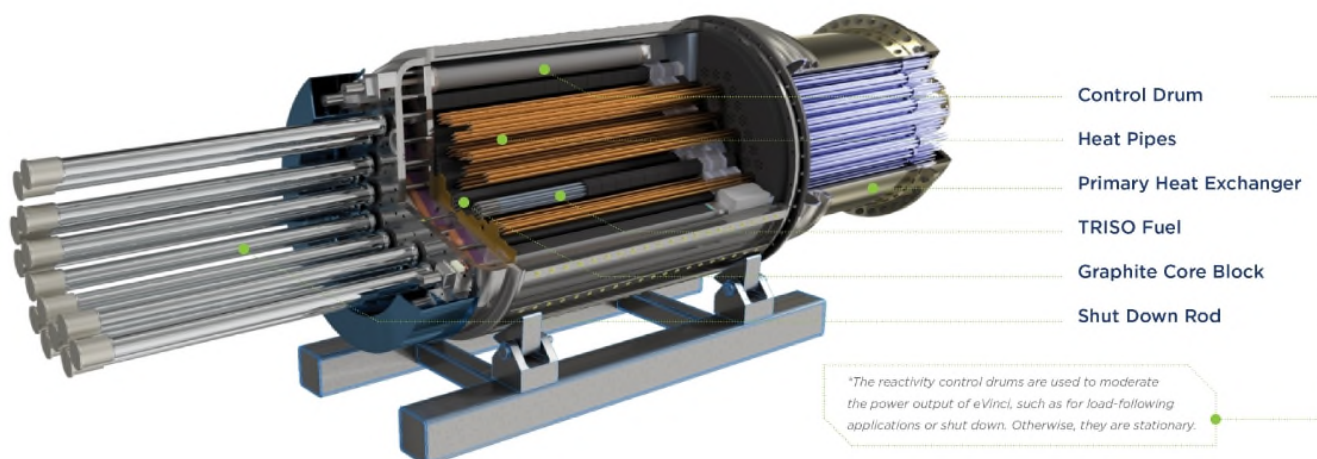
Westinghouse Electric社의 eVinci 초소형원자로는 격오지나 고립된 지역에서 에너지를 생산할 수 있도록 설계되었음. 이 설계의 핵심적인 특성은 철도, 바지선, 트럭 등을 통해 표준 선적 컨테이너로 운송이 가능하다는 점이며, 로스알라모스 국립연구소(Los Alamos National Laboratory)에서 우주용으로 개발 및 테스트한 히트파이프 원자로 기술을 기반으로 함. 컴팩트하고 간소화된 설계로 eVinci 초소형원자로는 공장에서 제조 및 연료 장전 후 최종 현장으로 운송됨

개발 용도 및 특징

eVinci 초소형원자로는 격오지에 위치한 주거지나 광산 운영, 산업공정열, 군사 시설, 기타 중요 인프라 등에 서비스를 제공하도록 설계됨. 열 생산 및 발전 기능을 결합하여 이러한 분산형 및 오프그리드 시장의 다양한 에너지 수요를 해결할 수 있음. 냉각수 대신 히트파이프를 사용하여 노심에서 열을 제거하여 움직이는 부품의 수를 줄여 전체적으로 간소화된 플랜트를 제공함

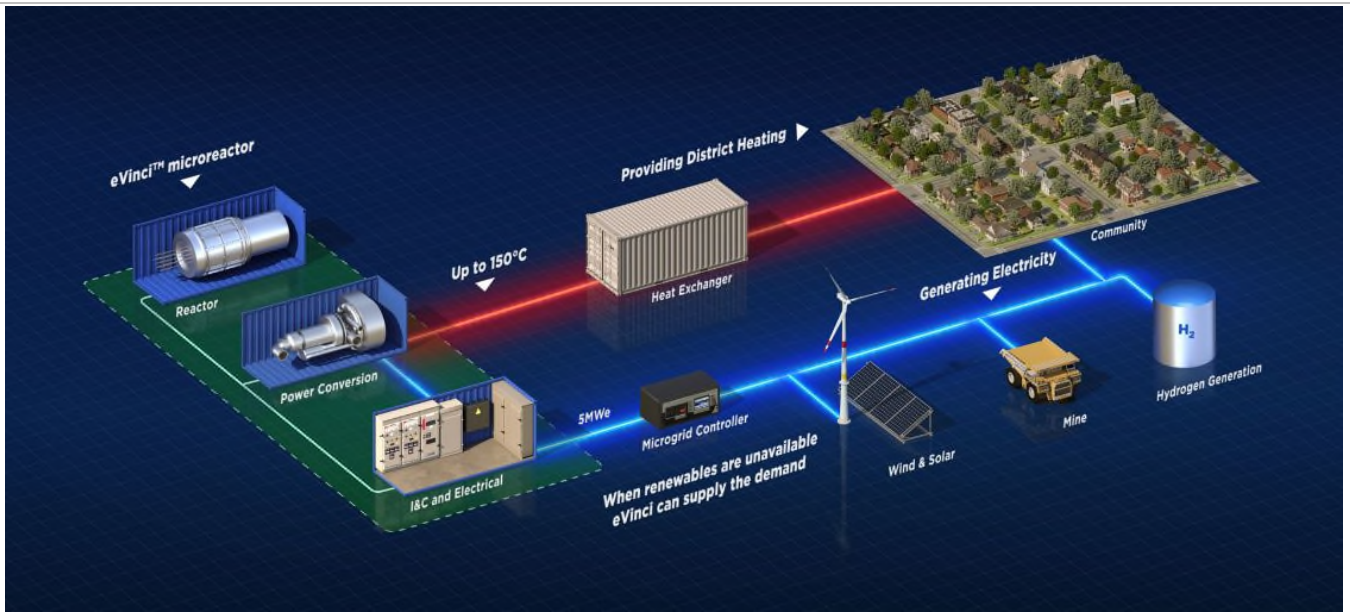
[표] Westinghouse eVinci 설계 특성

기술 개발국가	미국	연료 연소도	N/A
기술 개발자	Westinghouse Electric	재장전 주기	> 36개월
노형	히트파이프 냉각	반응도 제어	노외(ex-core) 제어 드럼
냉각재 및 감속재	히트파이프 / 금속수소화합물 감속재	안전계통	고유 안전 피동
열·전기 출력	7~12MW(t)/2~3.5MW(e)	설계수명	40년
1차측 순환	히트파이프	건축면적	< 4,000㎡
NSSS 운전압력(1차/2차측)	N/A	RPV 높이/지름	N/A
노심 온도	NA800℃	내진 설계(SSE)	IBC Zone 4 Category F
연료 유형 및 집합체 형태	TRISO 또는 기타 캡슐화	설계 단계	개념설계 완료
노심의 연료 집합체 수	단일체 노심	특징	자율적으로 작동할 수 있는 이동식 원자로
연료 농축도	5~19.75%		



출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

[그림] Westinghouse eVinci 발전소 배치



출처: Westinghouse (www.westinghousenuclear.com)

발전소 배치 설계

eVinci 초소형원자로는 현장 시공을 최소화하여 물류 작업이 용이하도록 설계됨. eVinci가 탑재된 컨테이너를 현장에 설치한 후, 열 또는 전력을 활용할 수 있도록 파이프 연결만 하면 됨. 원자로 컨테이너에는 차폐 구조가 적용되어 작업자의 방사능 노출을 제한함. 격오지 배치를 위해 설계된 eVinci는 필요한 전력 수요에 맞춰 구성할 수 있음. 여러 대의 eVinci 시스템이 필요한 경우 하나의 현장에 여러 대를 설치할 수 있으며 각 장치는 독립적으로 작동함. 또한 현장에서 연료를 재장전할 필요가 없으므로 연료 보급에 필요한 추가 현장 시설 및 구조물이 필요하지 않음. 연료 주기가 끝나면 연료 재장전 또는 장기 보관을 위해 공장으로 다시 운반됨

설계 및 인허가 현황

eVinci 개발 프로그램은 개념설계 단계를 완료했으며, Westinghouse社は 기술 준비 수준과 제조 준비 수준을 모두 평가하여 설계의 성숙도를 높이고 있음. 또한 현재 미국 원자력규제위원회(NRC) 및 캐나다 원자력안전위원회(CNSC)와 협력하여 설계 및 기술 인허가를 취득하기 위한 신청 예비 과정 논의를 진행하고 있음. 2023년 7월 Westinghouse社は CNSC에 eVinci에 대한 첫 번째 공급자 설계검토(Vendor Design Review) 문서를 제출했으며, CNSC와 NRC 간의 업무협약에 따른 공동 검토 보고서도 제출할 계획이라고 발표함

2-5. VOYGR / NuScale Power Corporation

NuScale Power의 NuScale Power Module(NPM)은 모듈형 · 일체형 가압경수로(PWR) 노형으로, NuScale VOYGR SMR 발전소는 사용자의 수요에 맞춰 다양한 수의 NPM을 수용하도록 건설할 수 있음. NuScale 표준 발전소에는 308MWe의 VOYGR-4, 462MWe의 VOYGR-6, 924MWe의 VOYGR-12가 포함됨. 6개 모듈구성은 표준 발전소 설계 승인을 위한 설계 및 인허가를 위한 참조발전소 규모로, 각 NPM은 다중 모듈 구성에서 다른 모듈과 독립적으로 작동함. 모든 모듈은 단일 제어실에서 관리됨.

개발 용도 및 특징

NuScale 설계는 전기 생산을 위한 모듈형 원자로로, 부하에 따라 유연하게 작동할 수 있으며 열과 전기의 열병합 발전을 포함한 산업용 공정열생산에 사용할 수 있음

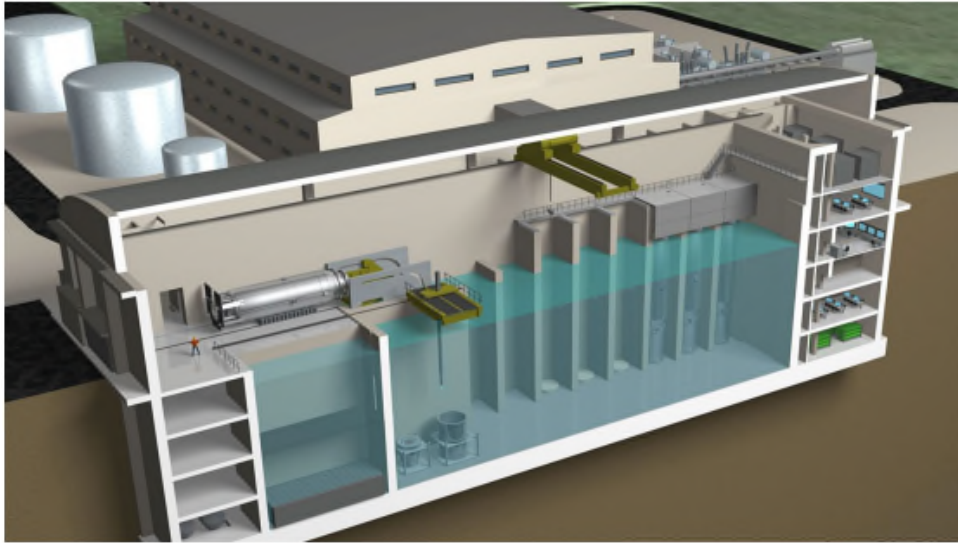
[표] VOYGR 설계 특성

기술 개발국가	미국
기술 개발자	NuScale Power Corporation
노형	일체형 가압경수로(iPWR)
냉각재 및 감속재	경수/경수
열·전기 출력	250MW(t) / 77MW(e)
1차측 순환	자연순환
NSSS 운전 압력(1차/2차측)	13.8/4.3MPa
노심 입구/출구 냉각재 온도	249℃ / 316℃
연료 유형 및 집합체 형태	UO ₂ / 사각 배열(17x17)
노심의 연료 집합체 수	37
연료 농축도	최대 4.95%
연료 연소도	최소 45GWd/ton
재장전 주기	18개월
반응도 제어	제어봉, 붕소
안전계통	피동
설계수명	60년
건축면적	140,000m ²
RPV 높이/지름	17.7/2.7m
RPV 무게	추후 확정
내진 설계(SSE)	0.5g
연료주기 요건 및 적용방식	3-batch
설계 단계	기기 제작 중
특징	AC/DC 전원, 보충수 주입, 운전원 조치 없이 무제한 노심냉각 유지



출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

[그림] VOYGR 발전소 배치



출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

발전소 배치 설계

VOYGR 발전소는 원자로 건물, 제어 건물, 2개의 터빈-발전기 건물, 방사성폐기물 처리 건물, 냉각탑, 변전소, 사용후핵연료 건식저장고 등으로 구성됨. 원자로 건물은 최대 12개의 모듈과 모듈 조립/분해 설비, 연료설비 및 사용후연료 저장조로 이루어져 있음. 각 NPM은 공통 원자로 수조 내에서 각 베이(bay)별로 잠겨있으며, 베이 상부는 차폐 역할을 하는 콘크리트 덮개가 갖춰져 있음. 주 제어실은 원자로 건물에 인접한 제어 건물에 위치하며, 모든 NPM은 단일 제어실에서 제어됨. VOYGR 원전은 2개의 별도 터빈 건물이 있으며 각 건물은 최대 6개의 터빈과 공랭식 발전기로 이루어져 있음. 터빈 건물은 터빈-발전기와 부속 설비인 응축기, 응축 계통, 급수 계통으로 구성되며, 각 터빈-발전기는 단일 NPM과 연결되며 전용 응축수 펌프 및 급수 펌프로 구성됨

설계 및 인허가 현황

2016년 12월, NuScale Power社は NRC에 설계인증 신청서(DCA)를 제출함. 2020년 9월, NRC는 NuScale Power의 DCA에 대한 표준 설계 승인을 발급했으며, SMR 최초로 NRC 설계 승인을 획득함. 첫 번째 발전소는 아이다호주 아이다호폴스(Idaho Falls) 인근 아이다호국립연구소 부지에 위치한 VOYGR-6 발전소로, 소유주는 유타주 공공전력시스템(Utah Associated Municipal Power Systems, UAMPS)이며 상업운전 목표 시점은 2029년이었음. 그러나 해당 프로젝트는 경제적 타당성 확보 실패로 2023년 11월 취소가 결정됨. NuScale Power社は 우크라이나, 캐나다, 루마니아, 폴란드 등의 국가에서도 예비 인허가 활동을 진행 중임. 2023년 8월 루마니아 원자력통제위원회(CNCAN)는 VOYGR-6 SMR 발전소에 대한 라이선스 기초 문서를 승인함¹⁰⁾

10) World Nuclear News, Romania sets out roadmap for licensing of NuScale VOYGR, 2023.10.02.

2-6. Natrium / TerraPower

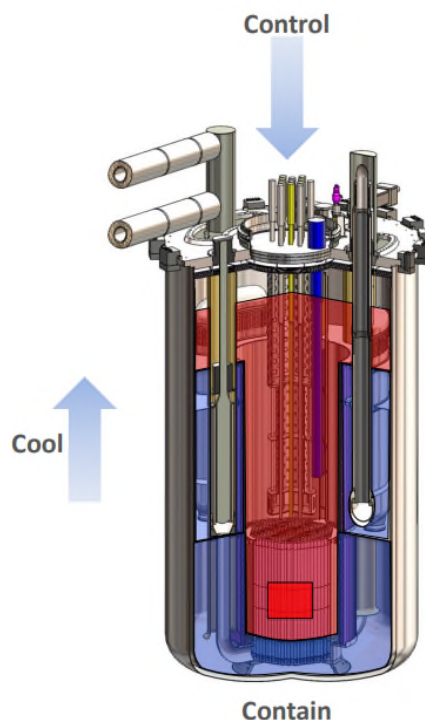
TerraPower社の Natrium은 GE Hitachi와 공동 개발한 SMR 설계로, 소듐고속원자로와 용융염 에너지 저장 시스템을 결합하였음. Natrium은 용융염원자로(MSR)의 일종인 용융염화물고속원자로(Molten Chloride Fast Reactor, MCFR)로 용융염이 연료와 냉각수 역할을 모두 하는 방식임. 개념설계 단계를 거쳐 2016년 1월 미국 에너지부가 TerraPower社の 지속적인 연구개발을 지원함에 따라 데모 프로젝트로 확장되었음. 에너지부 산하 원자력에너지국(NE)은 ‘용융염화물원자로 실험(Molten Chloride Reactor Experiment, MCRE)’ 프로그램의 일환으로 프로젝트에 자금을 지원함¹¹⁾

개발 용도 및 특징

TerraPower社は Natrium을 통해 청정 에너지를 빠르고 저렴하게 공급할 수 있다는 점을 강조하고 있음. 345MWe의 전기 출력으로 상황에 맞게 최적화할 수 있으며 축열 장치를 갖추고 있어 필요 시 시스템 출력을 5시간 30분 이상 500MWe로 높일 수 있음. 이를 통해 일일 전력 부하를 추종하는 원전 설계가 가능하며, 재생 에너지의 변동성을 보완할 수 있는 기술로 주목됨

[표] Natrium 설계 특성

기술 개발국가	미국
기술 개발자	TerraPower
노형	용융염화물고속원자로(MCFR)
냉각재 및 감속재	소듐(1차), 용융염(2차)
열·전기 출력	840MWt / 345MWe
1차측 순환	자연순환
NSSS 운전 압력(1차/2차측)	저압
노심 입구/출구 냉각재 온도	500℃ (출구)
연료 유형 및 집합체 형태	Metallic U-Zr alloy
노심의 연료 집합체 수	HALEU
연료 농축도	19.75%
재장전 주기	24개월 ¹²⁾
반응도 제어	제어봉, 부온도계수
안전계통	피동
건축면적	178,000㎡
설계 단계	상세설계
특징	5.5시간 이상 전기 출력을 500MWe까지 향상 가능

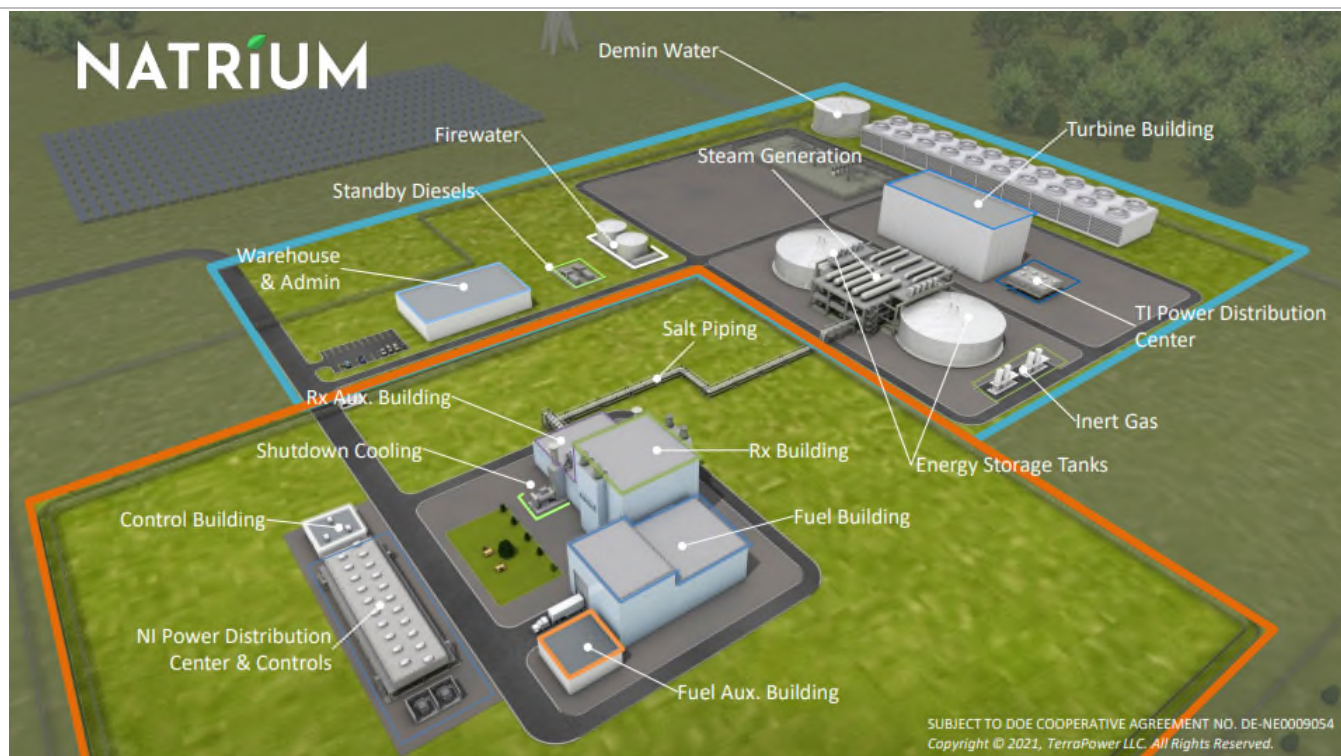


출처: TerraPower / OECD-NEA, 「Small Modular Reactor Dashboard」, 2023.

11) NRC, Molten Chloride Fast Reactor (MCFR), 2023.02.01.

12) Nuclear Innovation Alliance, Advanced Nuclear Reactor Technology – A Primer, 2022.07.

[그림] Natrium 발전소 배치



출처: TerraPower

발전소 배치 설계

Natrium 발전소 배치는 크게 원자로 구역과 터빈 구역으로 구분되며, 원자로 구역은 원자로 건물, 원자로 보조건물, 연료 취급 건물로 구성됨. Natrium 원전은 소듐냉각고속원자로를 열원으로 사용하며 원자로에서 나오는 열은 원자로 내부의 용융염을 통해 원자로 건물 외부의 축열 탱크로 운반되어 필요에 따라 전기 생산이나 산업공정에 활용됨. 그 결과 발전소 전체가 부하 추종이 가능해 최적의 원자로 출력을 일정하게 유지하면서 발전소의 수익과 가치를 높일 수 있음. 동시에 원전 외부의 많은 시스템이 원자력 안전 등급을 받을 필요가 없으므로 전체 플랜트 비용이 절감됨

설계 및 인허가 현황

Natrium 기술은 미국 원자력규제위원회(NRC)와 예비 인허가 단계를 진행 중임. 안전성 사례를 뒷받침하기 위해 여러 백서와 인허가 특정기술주제 보고서(Licensing Topical Report, LTR)를 제출했으며, 그 중 일부에 대한 규제당국의 피드백을 수취함. TerraPower는 2024년 미국 원자력규제위원회(NRC)에 와이오밍주 케머러(Kemmerer)의 Natrium 실증로 프로젝트 건설허가를 신청할 예정이며, 2026년 3월 운영허가 신청을 거쳐 2030년 가동에 들어간다는 계획임

2-7. MMR / Ultra Safe Nuclear Corporation

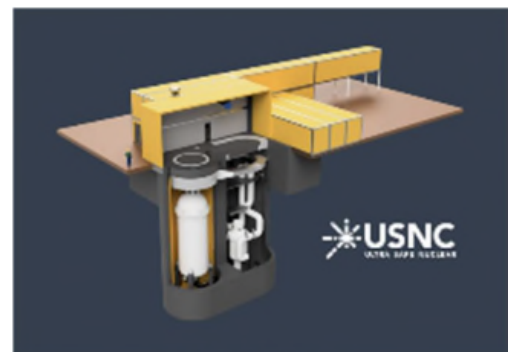
Ultra Safe Nuclear Corporation(USNC)사의 MMR 시스템은 외딴 광산, 산업 현장, 지역사회 등에 안전하고 깨끗하며 비용 효율적인 전기와 열을 공급하는 SMR임. 이 시스템은 원자력 발전소와 인접한 비원자력 발전소, 두 개의 발전소로 구성됨. 원자력 발전소는 인접 발전소와 독립적으로 운영되며, 인접 발전소는 고객의 요구사항에 따라 산업용 공정열을 전력 또는 기타 형태의 에너지로 변환하는 장비와 시스템으로 구성됨. 원자력 발전소는 전력을 공급하거나 최종 사용자에게 난방을 공급할 수 있는 약 15MWt의 공정열을 생성하며, 전력을 지역 전력망에 공급할 수도 있음. 연료 수명은 20년이며 추가로 20년 주기로 재장전할 수 있음

개발 용도 및 특징

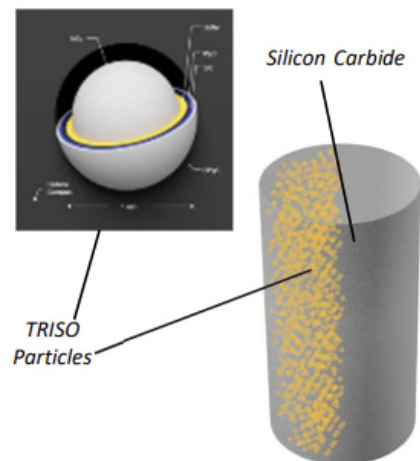
MMR 발전소는 독립형 마이크로그리드로서 격오지 또는 산업용 공정열, 수소 생산과 같은 중공업 분야를 위해 설계됨. MMR 에너지 시스템은 동일한 현장에 여러 대의 설비를 설치하여 수요에 맞게 확장할 수 있음.

[표] MMR 설계 특성

기술 개발국가	미국
기술 개발자	Ultra Safe Nuclear Corporation
노형	고온가스냉각로(HTGR) / 초소형원자로(Microreactor)
냉각재 및 감속재	헬륨 / 흑연
열·전기 출력	15MW(t) / >5MW(e), 30MW(t) / >10MW(e)
1차측 순환	강제순환
NHSS 운전 압력(1차/2차측)	3 / 0.1 MPa
노심 입구/출구 냉각재 온도	헬륨 300℃ / 630℃
연료 유형 및 집합체 형태	FCM (TRISO 기준) 흑연 / 육각 배열
연료 농축도	HALEU 19.75%
연료 연소도	> 60GWd/ton
재장전 주기	240개월(20년)
반응도 제어	제어봉 삽입, 부온도계수 피동(카테고리A), 움직이는 부품 없음
안전계통	
설계수명	20년(노심), 40년(RPV)
건축면적	80x80m ² , 130x96m ²
RPV 높이/지름	13.25 / 3.5m
RPV 무게	30.1ton
내진 설계(SSE)	0.3g
연료주기 요건 및 적용방식	20년 노심 수명, 추가 20년 주기로 재장전 가능
설계 단계	기본설계
특징	노심 용융 없음, 모듈형 원자로 및 발전소, 현장에서 6개월 내 조립 가능

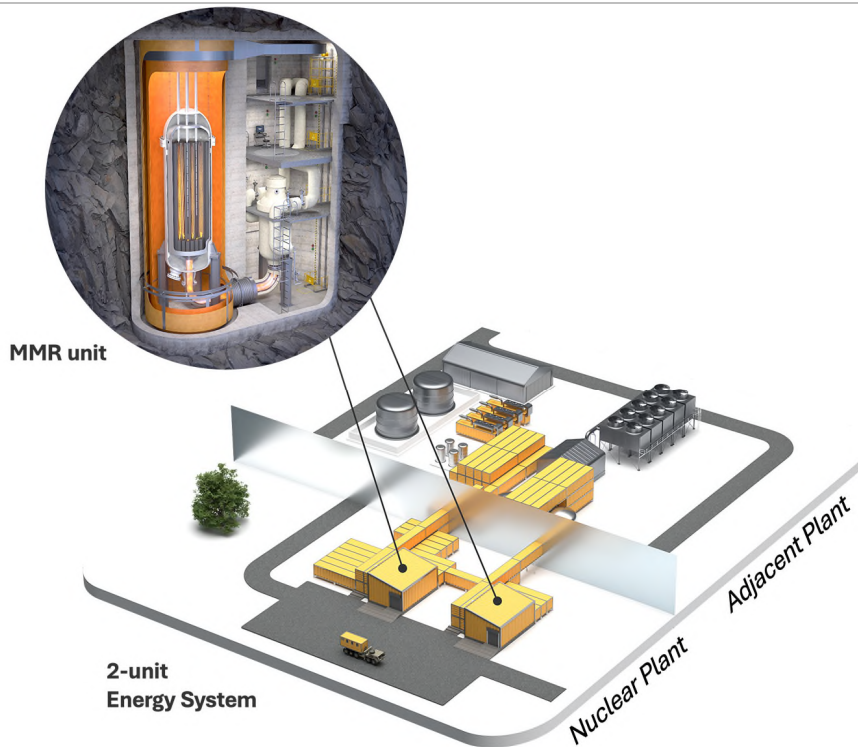


MMR Unit



출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

[그림] MMR 발전소 배치



출처: USNC

발전소 배치 설계

MMR 시설은 MMR 원자로를 포함하는 원자력 발전소, 프로젝트와 관련된 주요 물리적 작업 시설인 인접 발전소로 구성됨. 원자력 발전소는 고객의 요구사항에 따라 전력 및/또는 열로 변환되는 인접 발전소에 공정열을 제공함. 원자력 발전소에는 MMR 원자로와 관련 원자력 열 공급 시스템이 있는 원자력 건물과 시타델 건물(Citadel Building)이 있음. 시타델 건물은 원자로와 중간 열교환기를 외부 및 시타델 건물 내부의 위험으로부터 보호하며, 벽은 생물학적 차폐 기능을 제공함. 인접 발전소 건물에는 원자력 발전소에서 공급되는 열로 전기를 생산하고 고객의 최종 사용 시설과 연결하기 위해 필요한 장비가 포함되어 있음. 인접 발전소의 용융염 축열 시스템은 원자력 발전소에서 생성된 열을 운반 및 저장하고 고객을 위한 전력 및 열을 생성하기 위해 증기 사이클로 전달하는 중개 역할을 함

설계 및 인허가 현황

USNC는 MMR에 대해 캐나다 원자력안전위원회(CNSC)의 사전 인허가 공급자설계검토(Vendor Design Review, VDR) 절차 1단계를 완료했으며 현재 2단계 평가가 진행 중임. 또한 CNSC에 초크리버(Chalk River) 부지의 MMR 데모 발전소에 대한 '부지 초기 신청 준비 허가서'를 제출함. 이에 따라 캐나다 초크리버 MMR 프로젝트에 대한 공식 인허가 절차가 진행 중임. 미국에서는 원자력규제위원회(NRC)에 규제 참여 계획을 제출하기 위해 일리노이대와 협력하고 있음.

2-8. SMR-160 / Holtec International

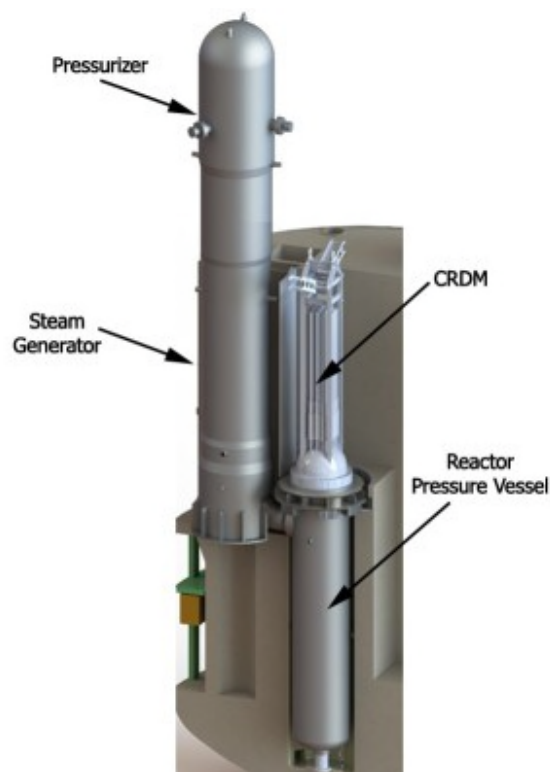
Holtec International이 개발한 SMR-160은 차세대 가압경수형(PWR) SMR로 525MWt의 열출력 및 160MWe의 전력을 생산함. 동 원전의 설계는 강력한 피동안전 계통을 통해 모든 사고, 사보타지 또는 부주의한 행동의 위험성에 대비하는 신뢰도 높은 설계를 확보함. SMR-160은 운전원의 별도의 조치 없이도 설계상 사고 대처와 잔열제거를 안전하게 할 수 있도록 설계됨. 기존의 원전에 비해 크게 단순화되어 제작성, 시공성, 유지보수성이 향상되었으며, 완전피동 안전계통과 자연순환 방식의 1차측 루프(loop) 설계를 적용함. SMR-160의 모듈식 시공계획은 운송이 가능한 범위 내에서 부품을 최대 크기로 제작하여 시공현장에 반입되도록 설계됨. 각 호기마다 24개월의 건설공기가 예상됨

개발 용도 및 특징

SMR-160의 주요 적용 분야는 선택적 병합설비(예: 수소 생산, 열 에너지 저장, 지역난방, 해수담수화)로 전력을 생산하는 것임. 동 원전의 설계는 Holtec社의 공기냉각 콘덴서기술을 이용해 물이 부족한 곳에서도 쉽게 적용할 수 있도록 구성이 가능함. SMR-160은 자력기동(black start)과 단독 운전이 모두 가능하므로, 전력망이 불안정한 지역이나 전력망이 존재하지 않는 곳에 이상적임

[표] SMR-160 설계 특성

기술 개발국가	미국
기술 개발자	Holtec International
노형	가압 경수로(PWR)
냉각재 및 감속재	경수/경수
열·전기 출력	525MW(t) / 160MW(e)
1차측 순환	자연순환
NSSS 운전 압력(1차/2차측)	15.5/3.4MPa
노심 입구/출구 냉각재 온도	243℃ / 321℃
연료 유형 및 집합체 형태	UO ₂ / 사각 배열
노심의 연료 집합체 수	57
연료 농축도	평균 4.0%
연료 연소도	45GWd/ton
재장전 주기	24개월
반응도 제어	제어봉, 붕소
안전계통	완전 피동
설계수명	80년
건축면적	28,000m ²
RPV 높이/지름	15/3m
RPV 무게	295ton
내진 설계(SSE)	0.5g
연료주기 요건 및 적용방식	1/3 batch
설계 단계	예비설계 완료
특징	피동형 안전냉각계통 및 능동형 비안전 계통을 통한 심층 방호설계, 주요기기 지하 배치



출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

[그림] SMR-160 발전소 배치



출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

발전소 배치 설계

SMR-160 플랜트는 원자로 건물, 원자로 보조건물, 보조설비 건물 등으로 구성됨. SMR-160 원자로는 강철 콘크리트 모듈로 구성된 격납인클로저구조(CES)로 보호되는 격납구조물(CS) 안에 위치함. CES와 CS의 절반 정도는 지하에 매설되어 있음. 이러한 2중 격납구조물은 모든 안전계통과 사용후연료 저장조를 수용하고 있음. 원자로 보조건물은 다수의 플랜트 보조계통을 수용하고 있으며, 표준설계의 변경 없이 사용후핵연료를 Holtec International HI STORM UMAX 모듈(지하 건식 사용후연료 저장조 기술)에 중간 건식 저장할 수 있도록 설계됨

보조설비(BOP)의 경우, 증기터빈 및 관련 계통들은 터빈 건물 구조 내 지상층에 위치함. SMR-160은 축방향 및 측면방향 배기증기터빈을 옵션으로 공기 냉각식 응축시스템을 선택적으로 구성할 수 있음. 전력계통은 격리모드(island mode)에서의 단독운전뿐만 아니라 전력망과 독립적인 기동운전 혹은 자력기동을 허용하도록 설계됨

설계 및 인허가 현황

SMR-160은 2015년 개념설계를 완료하고 2020년 예비설계를 완료함. 2023년 현재는 상용화 준비를 위한 건설 허가 절차를 진행 중임. SMR-160은 캐나다 원자력안전위원회(CNSC)의 사전 인허가 공급자설계검토(VDR) 1단계를 완료했으며 미국 원자력규제위원회(NRC)에서도 사전 인허가 활동을 진행하고 있음. 2023년 1월에는 영국 일반설계평가(GDA) 절차에 SMR-160 설계를 제출함.

2-9. CMSR / Seaborg Technologies

덴마크 Seaborg Technologies社의 CMSR(Compact Molten Salt Reactor)은 액체 플루오린화염 연료와 특허받은 용융 수산화물 감속재를 사용하는 것이 특징인 소형모듈식용융염원자로(MSR)임. CMSR은 열 중성자 스펙트럼에서 고순도·저농축우라늄(HALEU)의 핵분열을 통해 약 250MWt의 에너지를 출력함. CMSR의 설계 수명은 12년이며 이 기간 동안 재장전이 필요하지 않음. 연료 및 감속재로 사용하는 용융염은 융점이 높아 순환에 필요한 압력 이상으로 가압할 필요가 없음. CMSR은 설계 수명이 24년인 표준화된 모듈식 바지선에 배치되며, 200MWe~800MWe 범위로 확장 가능함

개발 용도 및 특징

CMSR Power Barge는 전력망 및 수소 전기분해와 같은 산업 응용 분야를 위한 전력을 생산하도록 설계됨. 또한 지역난방, 담수화, 산업공정 등 비전력 응용 분야에 고온의 열을 공급할 수도 있음

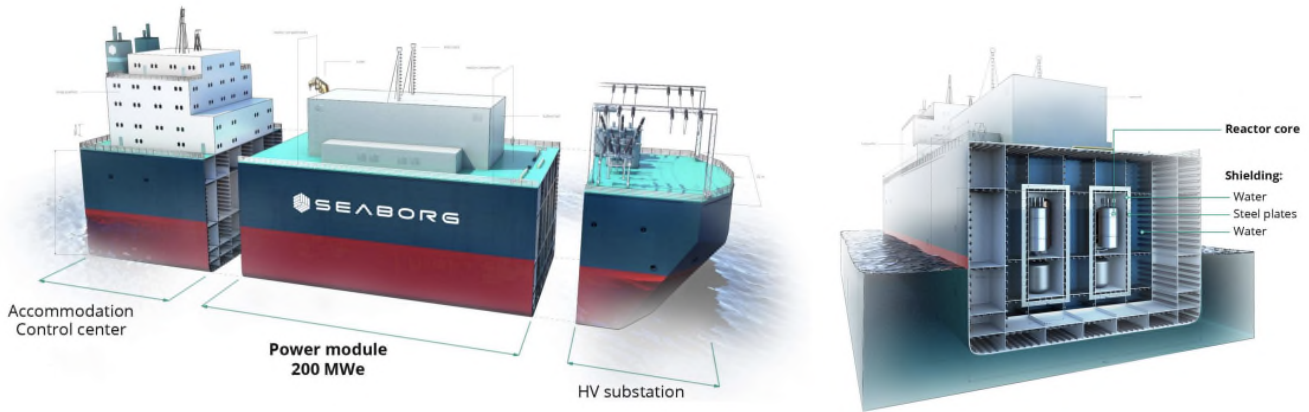
[표] CMSR 설계 특성

기술 개발국가	덴마크
기술 개발자	Seaborg Technologies
노형	용융염원자로(MSR)
냉각재 및 감속재	플루오린화염 / 수산화나트륨
열·전기 출력	250MW(t) / 100MW(e)
1차측 순환	강제순환
운전 압력(1차/2차측/NSSS)	0.45 / 1.05 / 18 MPa
노심 입구/출구 냉각재 온도	600℃ / 670℃
연료 유형 및 집합체 형태	HALEU / 용융염 연료
출력 변환 프로세스	과열 증기 구동 터빈/발전기(랭킨사이클)
연료 농축도	HALEU
연료 연소도	연료 농축 선택 보류 중
재장전 주기	운전 중 재장전 불가 (1회 연료 주기 144개월)
반응도 제어	부온도계수, 조절 및 안전봉, 연료염 배출
안전계통	자동 섯다운, 피동 냉각
설계수명	CMSR 12년, 파워바지선 24년
건축면적	200~800MWe: 5,000~14,000㎡ 바지선 모델에 따라 다름
RPV 높이/지름	5.5 / 2.5m
RPV 무게	50~60ton
내진 설계(SSE)	검토 중
연료주기 요건 및 적용방식	HALEU 1회 주기, 부지 밖 재처리
설계 단계	개념설계
특징	부유식 무동력 바지선에 통합, 12년 후 CMSR 교체



출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

[그림] CMSR 발전소 배치



출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

발전소 배치 설계

CMSR Power Barge는 후미 모듈(숙소, 사무실, 회의실, 주 제어실, 보조 제어실, 비상 전력 및 바지선 전력설비)과 고전압 변전소가 위치하는 전방 모듈에 연결된 하나 이상의 출력 모듈로 구성됨. 선체 전체가 완전한 이중 선체로 설계되어 격납(safety enclosure), CMSR 보조 시스템, 비상 디젤 발전기, 디젤 탱크 및 배전반을 보호함. CMSR Power Barge는 자체 추진식이 아니므로 적절한 견인 및 계류 시설을 갖추고 있어야 함

설계 및 인허가 현황

CMSR은 개념설계 단계에 있으며, 최초의 CMSR 인허가를 지원하고 설계를 간소화하며 규제 위험을 줄이기 위해 테스트 시설 개발을 통한 연구개발 접근 방식에 중점을 두고 있음. 최초의 CMSR 인허가는 기술을 포괄하는 국제 프레임워크에 기반한 표준 설계 평가에 초점을 맞추고 있으며 위험 정보에 기반한 성능 기반 접근법의 지속적인 개발로 보완되고 있음. 세계 여러 곳에 배치를 위해 여러 국가 규제 기관과 동시에 예비 평가를 진행 중임. Seaborg Technologies社は 2024년 개념 검증을 종료하고 2026년 설계 단계를 종료한 다음 2028년 첫 바지선을 인도하는 것을 목표로 하고 있음

또한 Seaborg Technologies社は 국제 해양 법규와 관련한 자격 인증 활동을 진행하고 있음. 미국선급협회(ABS)는 신기술 인증 프로세스를 통해 CMSR을 평가했으며, 2020년에 5단계 중 첫 번째 단계인 타당성 단계를 충족함. 2022년 ABS는 삼성중공업에 CMSR Power Barge에 대한 기본인증(Approval in Principle)을 부여함. 앞서 2022년 1월 삼성중공업은 Seaborg Technologies와 업무협약을 맺고 부유식 원자력 발전 설비 개발에 착수함

2-10. KLT-40S / ROSATOM

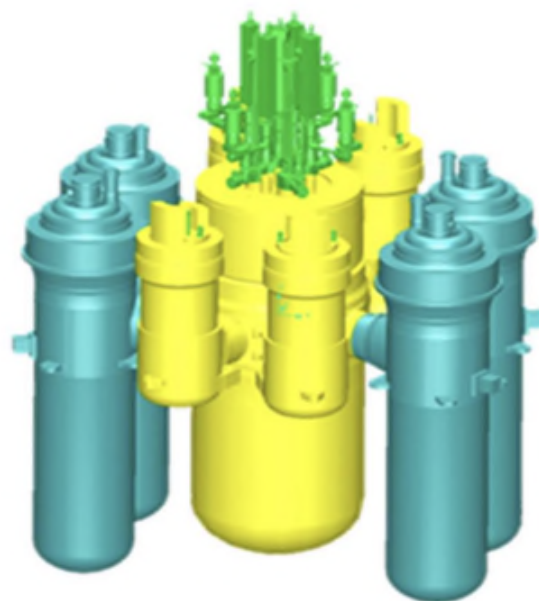
KLT-40S는 모듈당 35MWe를 출력하는 부유식 원전(Floating Nuclear Power Plant, FNPP)용으로 개발된 가압경수로(PWR)임. 이 노형은 3세대 선박 추진용 원자로인 KLT-40 설계를 기반으로 개발되었으며, 일반 원전에 비해 가혹한 환경에서 장기간 가동할 수 있도록 설계된 발전된 형태의 원자로임. KLT-40S가 장착된 FNPP는 조선소에서 제작된 후 조립 및 시험을 거쳐 가동 준비가 완료된 상태로 현장에 공급될 수 있음. 따라서 운송 및 송전 인프라는 물론 기존 원전에서 요구되던 사전 인프라를 개발할 필요가 없으며, 해안 지역 어디든 위치할 수 있다는 점에서 입지 선정에 제약이 없다는 장점이 있음

개발 용도 및 특징

KLT-40S가 장착된 FNPP는 중앙 집중식 전력 공급이 어려운 격오지의 고립된 소비자들에게 열병합 발전으로 전력과 열을 제공하기 위해 개발됨. 또한 해수 담수화 및 석유 시추 플랫폼으로 활용하여 독자적인 전력 공급도 가능함

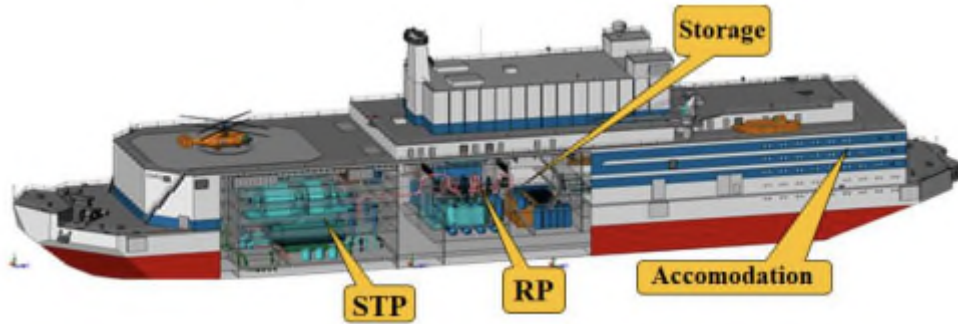
[표] KLT-40S 설계 특성

기술 개발국가	러시아
기술 개발자	Rosatom, OKBM Afrikantov
노형	가압경수로(PWR)
냉각재 및 감속재	경수/경수
열·전기 출력	150MW(t) / 35MW(e)
1차측 순환	강제순환
NSSS 운전 압력(1차/2차측)	12.7 MPa
노심 입구/출구 냉각재 온도	280℃ / 316℃
연료 유형 및 집합체 형태	UO ₂ / Silumin 배열
노심의 연료 집합체 수	121
연료 농축도	18.6%
연료 연소도	45.4GWd/ton
재장전 주기	30~36개월
반응도 제어	제어봉
안전계통	능동 (부분 피동)
설계수명	40년
건축면적	4,320㎡
RPV 높이/지름	4.8/2.0m
RPV 무게	미공개
내진 설계(MSK)	진도 9
설계 단계	2019년 12월 전력망 연결 2020년 5월 상업운전 개시
특징	부유식 열병합 발전, 자체 연료재장전 설비, 사용후연료 보관



출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

[그림] 부유식 생산설비(FPU) 측면도



출처: IAEA, 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」, 2022.

발전소 배치 설계

FNPP의 접안 설비는 전력과 열을 소비자에게 공급하고, 열을 보조건물에 공급하는 복합 공정건물임. 온수 저장탱크, 폐수저장 탱크, 냉각탑, 출입통제실, 조명탑 등이 설치되어 있으나 핵물질 및 방사성 물질 처리 설비는 배치되지 않음. 부유식 발전설비(Floating Power Unit, FPU)는 선체와 다층의 갑판실로 이루어진 비자력 추진(non-self-propelled) 선박임. FPU의 중간 부분에는 원자로격실과 연료처리격실이 배치되어 있음. 발전기실과 전기실은 원자로 격실을 기준으로 선수부에, 보조 설비실과 숙박시설은 선미에 위치함. 각 원자로 플랜트(Reactor Plant, RP)는 강철제 격납용기 내에 배치되며, 사고 시 발생할 수 있는 최대 압력을 견디도록 설계됨

KLT-40S 노형은 중앙제어실에 있는 제어 패널을 통해 자동 워크스테이션으로 통제됨. 중앙제어실에서 통제가 불가능할 경우에는 중앙제어실 외부에 위치한 비상냉각제어패널에서 원자로의 상태를 확인하고, 원자로를 정지시키고 발전소를 냉각시키는 등의 안전계통을 작동시킬 수 있음. 증기터빈 플랜트(Stream Turbine Plant, STP)는 KLT-40S 노형에서 얻어진 열출력을 전기 및 열로 변환하여 열병합 가열시스템에 공급함. FNPP는 2개의 증기터빈 플랜트(STP)를 갖추고 있는 구조이며, 각 STP는 독립적으로 KLT-40S에 연결됨

설계 및 인허가 현황

KLT-40S는 현존하는 FNPP 설계 중 상용화에 가장 근접한 설계로, Akademik Lomonosov FNPP를 통해 해당 노형이 공급됨. KLT-40S는 러시아 채빙선 추진체 KLT-40을 변형한 노형으로, 2002년 러시아 천연자원부는 KLT-40S의 환경영향평가를 승인함. 2003년에는 KLT-40S를 사용하는 최초의 부유식원전이 러시아 연방환경산업원자력감독청(Rostekhnadzor)으로부터 부지 및 건설 허가를 받음. Akademik Lomonosov FNPP는 2017년 완공되어 2019년 12월 러시아 극동부 Chukotka 지역 Pevek에서 최초로 전력망에 연결되었으며 2020년 5월 상업운전을 개시함. Rostekhnadzor는 2019년, Rosenergoatom에 2029년까지 Akademik Lomonosov를 운영할 수 있는 10년 라이선스를 발급함

Ⅲ. 국가별 SMR 도입 계획

1. 북미 (미국/캐나다)
2. 유럽 (루마니아/스웨덴)
3. 동남아시아 (인도네시아/말레이시아)
4. 중동·아프리카 (사우디아라비아/케냐)

북미

1. 미국

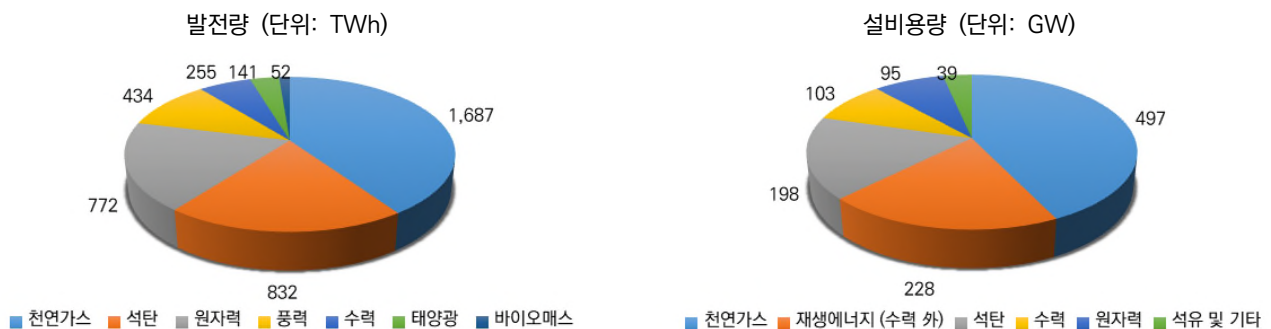
에너지 믹스 현황

2022년 미국 전체 발전량은 4,231TWh로, 이 가운데 약 60%는 천연가스, 석탄, 석유 및 기타 가스 등 화석연료에서 생산됨. 약 18%는 원자력 에너지, 약 21%는 재생에너지원에서 생산된 것으로 나타남.¹³⁾ 같은 해 발전 설비용량은 총 1,154GW로, 천연가스(43%), 수력 이외 재생에너지(20%), 석탄(17%) 순으로 나타났으며 원자력 에너지는 약 8%를 차지함. 미국의 2022년 원자력 발전량은 772TWh로 세계 원자력 발전 1위 국가임

첨단 원자로 규제 확립 노력

미국은 2019년 새로운 예산 및 수수료 체계를 수립하고, 첨단 원자로에 대한 개정된 인허가 규제 체계를 개발하여 미국 원자력규제위원회(NRC)의 기능을 현대화하는 것을 목적으로 하는 ‘원자력 에너지 혁신 및 현대화법(Nuclear Energy Innovation and Modernization Act, NEIMA)’을 도입함.¹⁴⁾ 이는 NRC의 보다 공평하고 투명한 자금 조달 구조를 확립하여 운영 중인 원자로와 향후 인허가 취득자에게 혜택을 부여하고, 첨단 원자로에 대한 효율적이고 안정적인 규제 구조를 확립하기 위한 조치임. 또한 NEIMA는 NRC로 하여금 2027년까지 첨단 원자로 설계자가 이용할 수 있는 ‘기술 포괄 인허가 규제 체계’를 완성할 것을 지시함으로써, 새로운 원자로 기술의 상용화를 가속화할 것으로 기대됨

[그래프] 미국 발전원별 에너지 믹스 (2022년)



출처: 미국 에너지정보청(EIA)

13) EIA, What is U.S. electricity generation by energy source?, 2023.

14) Nuclear Energy Institute, President Signs Bipartisan Bill to Modernize Nuclear Regulation, 2019.01.16.

미 정부, 국내외 SMR 프로젝트 지원 박차

미국 정부는 미국 및 글로벌 시장에서 SMR 프로젝트 지원에 박차를 가하고 있음. 미국은 시장 가치가 1,800억 달러 이상인 SMR 밸류체인¹⁵⁾ 내 원자재 및 OEM 부문에서 글로벌 경쟁업체들 가운데 우위를 점하고 있음. 특히 초당적인프라법(Bipartisan Infrastructure Law) 및 인플레이션감축법(IRA)에 따른 대규모 연방 투자는 '차세대 원자로 실증 프로그램(ARDP)'을 통해 OEM 역량의 성장과 지식재산권 개발로 이어지고 있음

NRC, 세계 최초 SMR 설계 인증제도 도입

미국 원자력규제위원회(NRC)는 연방관보(Federal Register)에 세계 최초 SMR 설계 인증제도를 공개하고 NuScale Power의 SMR을 인증함. NuScale의 전력 모듈은 NRC가 인증한 최초의 SMR 설계이며, 미국 내 사용이 승인된 7번째 원자로 설계임. 이 인증은 2023년 2월 21일 발효됐고, 이에 따라 전력업체들은 원자로 건설 및 운영을 위한 통합 라이선스를 신청할 때 NuScale의 SMR 설계를 참조 가능함. 이 설계는 각 전력 모듈이 50MW의 전기를 생성할 수 있는 첨단 경수 SMR임

[표] 최근 미국 국내외 SMR 분야 지원 동향

시기	국가	내용
2019	미국	미국 정부는 NRC에 첨단 원자로에 대한 새로운 기술을 포함하는 라이선스 프레임워크를 구축 의무를 부과하는 '원자력 에너지 혁신 및 현대화법(NEIMA)' 발효
2020.05	미국	미국 에너지부는 원자력 에너지국 내에서 '차세대 원자로 실증 프로그램(ARDP)'을 개시 - 의회는 첨단 원자로에 대한 신규 실증 프로그램 개시를 위해 2억 3,000만 달러 배정
2020.07	미국	미국 상원 원자력리더십법(NELA) 통과. NELA는 첨단 원자로 시연에 중점을 두고 원자력 분야에서 미국의 리더십을 재확립하는 것이 목표
2021.07	미국	미국 에너지부는 국립원자력혁신센터(NRIC)의 ACT(Advanced Construction Technology) 이니셔티브의 첫 번째 프로젝트로 GE-Hitachi 등과 협력함. 이는 비용 부담 민관 파트너십으로 신규 원자로 건설 비용을 10% 이상 절감하고 일정한 리스크와 불확실성을 크게 낮춤
2021.04	미국	미국 국무부는 파트너 국가에 역량 구축 지원을 제공하기 위해 'SMR 기술의 책임 있는 사용을 위한 기초 인프라(FIRST)' 프로그램 개시를 발표함. 국무부는 우선 FIRST 프로젝트를 위해 530만 달러를 지원한다고 밝힘
2021.11	루마니아	미국과 루마니아는 COP26에서 최초의 미국 SMR을 루마니아에 도입한다는 계획을 발표함. NuScale은 루마니아 Nuclearelectrica와 5기의 원자로를 건설해 4.5GW의 석탄 발전을 대체 방침
2022.12	미국	국제 원자력 에너지법(International Nuclear Energy Act) 상원 발의 - 원자력 수출 시장에서 러시아·중국의 영향력 확대에 대응하기 위한 사무국 설립 지원
2023.03	인도네시아	미국 무역개발청(USTDA)은 인도네시아 최초의 SMR 개발과 관련해 기술 지원을 제공하도록 PLN인도네시아파워(PLN Indonesia Power)에 보조금을 제공한다고 발표 - Indonesia Power는 Fluor Corporation의 자회사 및 JGC Corporation과 협력해 지원을 수행하기 위해 NuScale Power를 선정
2023.09	체코·폴란드·슬로바키아	프로젝트 피닉스(Project Phoenix) 하에서 석탄발전소를 SMR로 전환하는 사업의 타당성 조사에 미국 지원을 받을 국가로 체코, 폴란드, 슬로바키아 선정 - 미국은 SMR 도입 결정을 앞두고 있는 유럽·유라시아 국가 지원을 위해 원스톱 슝 구축 방침

출처: 정부 발표·언론 보도 내용 취합

15) Third Way, Advanced Nuclear Reactors: Policies to Help America Lead, 2023.01.25.

SMR 프로젝트 추진 요약

현재 미국에서는 군사, 산업, 발전 용도의 SMR 개발 프로젝트가 다수 발표되었으며, 2023년 5월 기준으로 총 26기, 2.9GW 규모에 달함.¹⁶⁾ 이 가운데 NuScale Power만이 미국 최초로 원자력규제위원회(NRC)로부터 SMR에 대한 설계인증을 확보함¹⁷⁾

그러나 아직 건설이나 상업운전을 시작한 프로젝트는 없음. 싱크탱크 RAP(Regulatory Assistance Project)의 마이크 호건(Mike Hogan) 자문위원에 따르면, 아이다호국립연구소(Idaho National Laboratory)에 건설될 Carbon Free Power Project는 일정이 지연되고 예산도 초과했으며 프로젝트의 경제적 타당성을 보장할 만큼 충분한 고객을 유치하는 데 실패함. 다른 프로젝트 대부분은 규제 인허가를 확보하려면 아직 수년이 걸릴 것으로 예상됨. 또한 호건은 “미국이 SMR 개념의 핵심 전제인 표준화된 시스템을 비용을 낮출 수 있을 만큼 충분한 규모로 공장 생산할 수 있는 역량을 갖추는 것은 2030년대 중반이 되어서야 가능할 것”이라고 전망함

Carbon Free Power Project 취소

이러한 가운데 2023년 11월, NuScale Power는 유타주 공공전력시스템(UAMPS)와 Carbon Free Power Project를 종료하기로 합의했다고 밝힘.¹⁸⁾ 2020년 미국 에너지부는 이 프로젝트에 10년간 13억 5,000만 달러를 지원하기로 승인한 바 있음. 해당 프로젝트는 NRC로부터 건설 허가를 획득할 최초의 SMR 프로젝트가 될 것으로 예상되었으나, 건설을 지속할 수 있을 만큼 충분한 고객을 확보하는 데 실패하면서 결국 프로젝트가 무산됨. 2023년 1월 NuScale Power는 이 발전소의 전력 목표 가격이 MWh당 89달러로 이전 예상치인 58달러에서 53% 상승했으며, 이는 고객들의 지불 의지에 우려를 불러일으킨다고 밝힌 바 있음.

[표] 미국 SMR 건설 프로젝트 추진 현황 (2023)

프로젝트 추진 주체	SMR 개발사	SMR 수
Carbon Free Power Project (취소)	NuScale Power	6
Tennessee Valley Authority	GE Hitachi Nuclear Energy	4
Holtec International	Holtec International	4
X-energy	X-energy	4
Dow	X-energy	4
Copper Valley Electric Association	Ultra Safe Nuclear Corporation	1
TerraPower	TerraPower	1
Oklo Power	Oklo Power	1
美 국방부(DoD)	개발사 다수	1

출처: GlobalData

16) GlobalData, Why a new era for US nuclear looks unlikely, 2023.05.26.

17) Reuters, U.S. approves design for NuScale small modular nuclear reactor, 2023.01.20

18) Reuters, NuScale ends Utah project, in blow to US nuclear power ambitions, 2023.11.08.

2. 캐나다

에너지 믹스 현황

2022년 캐나다의 전체 발전량은 약 640TWh로, 전력 생산의 대부분을 수력발전에 의존하고 있음. 2022년 수력발전이 392.5TWh로 발전량 가운데 가장 큰 비중(61.3%)을 차지했으며, 원자력 발전은 82.28TWh로 전체의 약 12.9%를 기록함. 2021년 기준 캐나다의 발전 설비용량은 약 149GW였으며 2035년에는 170GW에 달할 것으로 예상됨. 캐나다의 SMR 로드맵은 이 목표를 달성하는 데 결정적인 역할을 할 것으로 전망됨.¹⁹⁾ 또한 캐나다의 전력 수요가 2021~2050년 기간 47% 증가할 것으로 예상되고 있어²⁰⁾ 원자력 기술의 비용 효율적인 개발 및 도입이 시급할 것으로 보고 있음

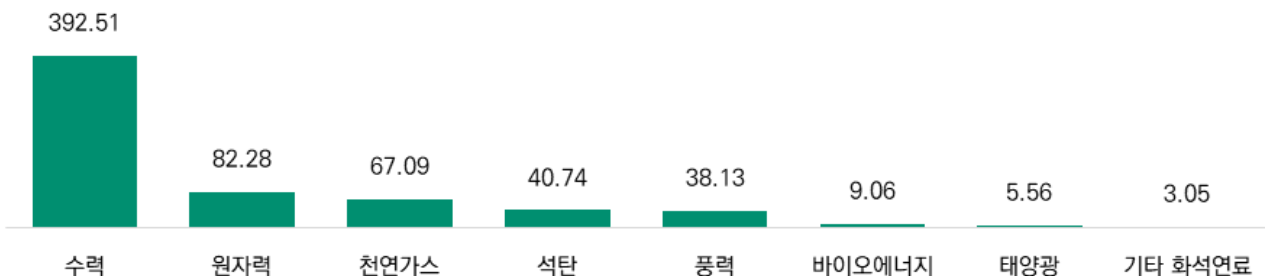
캐나다 에너지 정책

캐나다 정부는 원자력을 다양한 에너지 믹스의 중요한 구성 요소로 간주하고 있으며, 현재와 미래의 에너지 수요를 충족하는 데 있어 지속 가능한 에너지원으로서 원자력을 장기적으로 발전시키기 위해 필요한 조치를 취하고 있음.²¹⁾

이에 따라 2018년 캐나다 천연자원부(NRCan)는 원자력 개발에 관심 있는 주·준주정부, 업계, 유틸리티, 기타 관심 있는 이해관계자들을 모아 10개월간 캐나다의 SMR 기회에 대한 협의를 진행하고 ‘SMR 로드맵’ 보고서를 발표함. 보고서는 △(실증 및 배치) 연방정부 및 주정부의 SMR 실증 프로젝트 자금지원 촉구 △(정책·입법·규제) 영향 평가 절차에 따른 우선 조치 파악 △(역량·참여·대중 신뢰) 원주민 참여 우선 보장 △(국제 파트너십) SMR에 대한 강력하고 효과적인 국제적 참여를 위한 프레임워크 수립 등을 권고함.

[그래프] 캐나다 발전원별 전력 믹스 (2022년)

단위: TWh



출처: Statista

19) ITA, Canada – Country Commercial Guide, 2023.11.03.

20) Canada Energy Regulator, Canada's Energy Future 2021, 2021.

21) Government of Canada, Nuclear Energy

캐나다 정부의 SMR 개발 추진 계획

SMR은 혁신적인 기술이지만, 타당성, 비용, 기회, 도전과제 등이 아직 규명되지 않았고 현재 연구개발(R&D) 단계에 있음. 캐나다는 지난 몇 년간 SMR 개발을 지원하기 위해 3가지 이니셔티브를 도입함. 3가지 이니셔티브는 첫째, 캐나다에서 원자력 에너지에 대한 장기 비전을 수립하기 위한 캐나다의 SMR 로드맵(SMR Roadmap), 둘째, SMR 타당성 조사를 토대로 소형 원전 도입을 위한 전략 계획 및 온타리오, 앨버타, 서스캐처원, 뉴브런즈윅 등 4개 주의 양해각서(MoU) 체결, 셋째, 캐나다와 세계 시장에서 SMR 개발·시연·도입을 위한 캐나다의 SMR 액션플랜(SMR Action Plan) 등임

캐나다 4개주 SMR 프로젝트 추진

서스캐처원, 온타리오, 뉴브런즈윅, 앨버타주 등 캐나다 4개 주는 SMR 개발을 통해 원자력 산업을 확대한다는 공동 전략 계획을 발표함. 이에 따라 온타리오주에 첫 SMR이 건설되며, 2023~24년 서스캐처원주에 4기가 추가 건설될 예정임. 돈 모건(Don Morgan) 서스캐처원주 전력 장관은 SMR 1기 건설비가 50억 달러에 달할 것으로 전망함. 4개 주 공동 전략 계획은 캐나다가 SMR 기술의 글로벌 수출국으로 자리매김하는 것을 목표로 하고 있으며, 방사성폐기물 관리 프로그램 등 규제 필요성도 강조함.

[표] 최근 캐나다 SMR 분야 지원 동향

시기	내용
2022.03	서스캐처원, 온타리오, 뉴브런즈윅, 앨버타 등 캐나다 4개 주 SMR 중심의 전략 계획 발표
2022.10	캐나다 정부는 OPG(Ontario Power Generation)가 개발하는 Darlington SMR 프로젝트에 9억 7,000만 캐나다달러 자금 지원 제공 발표 -이 프로젝트는 GE Hitachi가 설계한 것으로 2030년 말 가동되면 30만 가구에 전력을 공급할 예정
2023.02	캐나다 정부는 SMR 제조와 연료 공급 및 보안을 위한 공급망을 개발하고 안전한 SMR 폐기물 관리 솔루션 연구에 자금을 지원하는 'SMR 활성화 프로그램(Enabling Small Modular Reactors Program)'을 추진함. 캐나다 천연자원부(NRCan)는 4년간 2,960만 캐나다달러를 할당받아 SMR 상업 개발 지원 프로그램을 지원 -프로그램 신청자는 R&D 프로젝트에 최대 500만 캐나다 달러를 요청할 수 있음. 이 프로그램은 총 프로젝트 비용의 최대 75% 또는 지역민 신청자가 주도하는 프로젝트에 대해 최대 100%를 지원 -프로젝트의 평균 자금지원은 규모, 범위, 일정, 활용 자금에 따라 50만~250만 캐나다달러로 예상
2023.08	조나단 윌킨슨(Jonathan Wilkinson) 캐나다 천연자원부 장관은 서스캐처원 주 전력업체 SaskPower가 주도하는 SMR 프로젝트 개발을 위해 최대 7,400만 달러의 연방기금을 승인 -예비 엔지니어링 작업, 기술 연구, 환경 평가, 규제 연구, 지역사회 및 원주민 참여를 지원함 -초기 계획 단계에 있으며 라이선스 신청은 아직 접수되지 않은 상태

출처: 정부 발표·언론 보도 내용 취합

현재 추진 중인 SMR 프로젝트

SMR에 대한 관심이 높아짐에 따라 캐나다 원자력안전위원회(CNSC)는 캐나다에서 도입을 고려 중인 SMR 기술 및 이와 관련된 규제 활동에 대한 정보를 지속적으로 공유하고 있음. 캐나다의 여러 주에서 SMR 도입 계획 및 프로젝트 개발이 진행되고 있으며, CNSC에서 검토 중이거나 향후 검토가 예상되는 프로젝트는 다음과 같음.

Global First Power

Global First Power(GFP)는 온타리오주 초크리버연구소(Chalk River Laboratories) 부지에 USNC가 설계한 Micro Modular Reactor(MMR) 건설을 위해 2021년 3월 부지 준비 허가 승인을 신청함. 이 프로젝트는 고온가스냉각로(HTGR) 1기를 통해 약 15MW(t)의 공정열을 인근 공장에 공급하고 20년간 전력 및 열을 생산할 계획임. 상업운전 착수는 2028~2029년을 목표로 하고 있음

NB Power의 ARC-100 프로젝트

New Brunswick Power(NB Power)는 ARC Clean Technology Canada와 협력하여 뉴브런즈윅의 Point Lepreau 원자력 발전소 부지에 ARC-100 SMR 1기를 건설할 계획으로, 2023년 6월 부지 마련을 위한 인허가 신청을 제출함

OPG의 Darlington 신규 원전 프로젝트

Ontario Power Generation(OPG)의 Darlington 신규 원전 프로젝트(DNNP)는 GE Hitachi의 BWRX-300 기술을 사용하는 SMR 프로젝트로, 2022년 10월 OPG는 BWRX-300 원자로 1기 건설 허가를 신청함. DNNP는 온타리오주 클래링턴(Clarington)에 위치한 기존 Darlington 원자력 발전소에 인접해 있음

SaskPower의 SMR 프로젝트

서스캐처원주 전력회사 SaskPower는 2030년대 상업운전을 목표로 하는 SMR 프로젝트 노형으로 GE Hitachi BWRX-300을 선정함. 필요한 규제 승인을 받은 후 2029년까지 SMR 건설 여부에 대한 최종투자결정을 내릴 계획임. 후보 부지 위치로 에스테반(Estevan)과 엘보우(Elbow) 지역을 평가하고 있음. 아직 프로젝트 초기 계획 단계로 인허가 신청은 제출하지 않음

[표] CNSC 검토 SMR 프로젝트 현황 (2023)

프로젝트 추진 주체	위치	노형	모듈 수	용량	설계수명	인허가 상태
Global First Power	온타리오	MMR	1기	15MW(t)	20년	부지 승인 심사 중
NB Power	뉴브런즈윅	ARC-100	1기	100MW(e)	60년	부지 승인 심사 중
Ontario Power Generation	온타리오	BWRX-300	최대 4기	최대 1,200MW(e)	60년	부지 허가 완료, 건설 허가 심사 중
SaskPower	서스캐처원	BWRX-300	미정	미정	60년	인허가 신청 전

출처: CNSC

유럽

3. 루마니아

에너지 믹스 현황

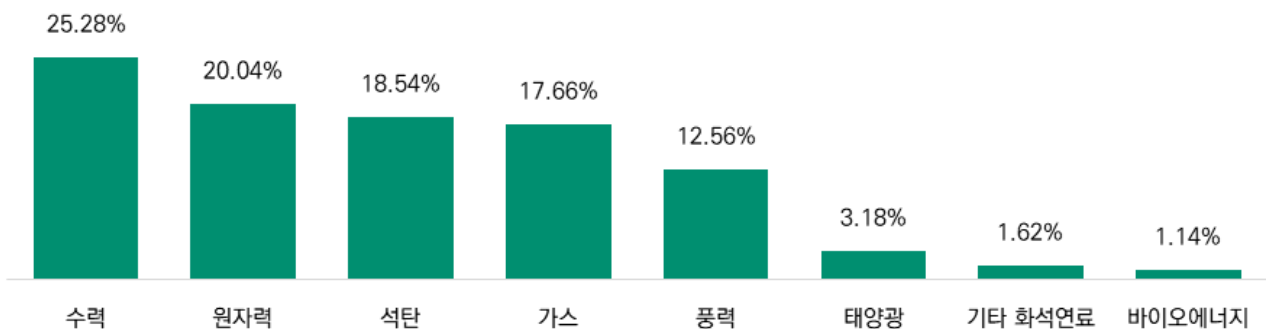
2022년 루마니아의 발전원별 에너지 믹스는 수력(25.28%), 원자력(20.04%), 석탄(18.54%), 가스(17.66%), 풍력(12.56%) 순으로 나타남.²²⁾ 루마니아의 에너지 전략은 연료 수입과 국내 조달을 통해 공급을 확보하고 청정 석탄 기술, 원자력, 재생에너지 확대 및 셰일가스 개발을 촉진하여 균형 잡힌 에너지 자원 포트폴리오를 유지하는 것임²³⁾

원자력 에너지 정책

루마니아는 전체 발전량의 약 20%를 생산하는 원자로 2기를 보유하고 있음. 루마니아 최초의 상업용 원자로인 체르나보다 1호기(Cernavoda 1)는 1996년, 체르나보다 2호기(Cernavoda 2)는 2007년 운전을 개시함. 2021년 10월 루마니아 정부는 에너지 및 기후변화에 대한 통합 국가 계획(Integrated National Plan for Energy and Climate Change)을 채택하고, 건설을 중단했던 원전 2기(Cernavoda 3·4)를 2031년까지 건설하는 계획을 확정함. 또한 체르나보다 부지에 위치한 기존 원전 2기를 개조하여 각각 30년간 추가로 가동하기로 함²⁴⁾

[그래프] 루마니아 발전원별 에너지 믹스 (2022년)

단위: %



출처: Statista

22) Statista, Distribution of electricity generation in Romania in 2022, by source, 2023.05.08.

23) EIA, Romania - Analysis

24) World Nuclear Association, Nuclear Power in Romania, 2023.10.

SMR 프로젝트 개발 논의

체르나보다 원전을 운영하는 루마니아 국영원자력회사 Nuclearelectrica는 2019년 3월 SMR의 개발, 인허가, 건설을 평가하기 위해 미국 NuScale Power와 양해각서(MOU)를 체결함. 이어 2021년 11월에는 모듈 12개로 구성된 NuScale SMR 발전소 건설 협약을 체결했음. 2022년 5월에는 도이체슈티(Doicești)에 루마니아 최초의 SMR 발전소 부지를 선정하고 루마니아 Nuclearelectrica와 NuScale Power 간 MOU를 체결, E-INFRA(루마니아 인프라 개발기업)와 함께 현장에서 엔지니어링 연구, 기술 분석, 인허가 활동을 수행하기로 함. 또한 미국 무역개발청(USTDA)은 NuScale Power와 협력하여 2022년 6월 루마니아의 SMR 엔지니어링 및 설계 연구에 1,400만 달러를 지원하기로 합의함

루마니아, 유럽 최초로 SMR 발전소 가동 기대

2022년 12월 RoPower(Nuclearelectrica와 Nova Power & Gas의 합작회사)와 NuScale Power는 도이체슈티에 위치할 발전소(VOYGR 모듈 6기)의 프론트엔드 엔지니어링 및 설계 작업에 대한 계약을 체결함. 같은 달 NuScale Power는 VOYGR의 표준 발전소 설계를 완료했다고 발표함. 2023년 5월 G7 정상회의에서 미국은 일본, 한국, 아랍에미리트(UAE)의 다국적 민관 파트너와 함께 루마니아의 SMR 발전소 건설에 최대 2억 7,500만 달러의 자금을 지원한다고 발표함. 미 국무부는 이 같은 다국적 협력이 2029년까지 루마니아에 NuScale社의 기술을 적용한 SMR을 도입하는 사업을 가속화할 것이라고 밝힘.²⁵⁾

같은 달 NuScale은 루마니아 부쿠레슈티 국립공과대학(University Politehnica of Bucharest)에 VOYGR SMR 발전소 제어실용 시뮬레이터인 'NuScale Energy Exploration Centre(E2 Centre)'를 개소함. 또한 루마니아는 이곳에서 유럽 전역에서 온 원자력 전문가를 양성할 예정임.²⁶⁾

또한 2023년 6월 삼성물산은 Nuclearelectrica, E-INFRA, Nova Power & Gas, Fluor Enterprises, NuScale Power 등 5개사와 도이체슈티 VOYGR 발전소(모듈 6기, 총 462MW급) 건설 사업을 공동으로 추진하는 협약을 체결함. 삼성물산은 기본설계(FEED)를 시작으로 설계·조달·시공(EPC) 전반에 참여할 방침임. 또한 삼성물산을 비롯한 6개사는 루마니아를 비롯하여 중동부 유럽 지역으로 SMR 사업을 확대하기 위한 협력을 강화하기로 함.²⁷⁾

25) World Nuclear News, Romania's NuScale SMR plan gets USD275 million boost, 2023.05.22.

26) Euronews, Romania is the first country in Europe to get this new nuclear energy technology, 2023.09.11.

27) World Nuclear News, Nuclearelectrica and partners sign MoU for NuScale plants, 2023.06.14.

루마니아 VOYGR SMR 프로젝트 인허가 현황

2023년 8월, 루마니아의 국가원자력규제위원회(National Commission for Nuclear Activities Control, CNCAN)는 NuScale VOYGR 발전소에 대한 인허가 기초문서(Licensing Basis Document, LBD)를 승인함.²⁸⁾ LBD는 VOYGR 발전소 프로젝트의 인허가 요건, 적용 가능한 국내외 규제 문서, 규정 및 표준, 원자력 안전 요건 및 기준의 이행을 보장하는 프로젝트 특성을 설정함. 현재 RoPower와 NuScale Power는 도이체슈테에 위치한 과거 석탄발전소 부지를 우선순위 후보 부지로 선정하고 이를 분석하는 기본설계(FEED) 1단계를 진행 중임. 2023년 5월 확보한 신규 자금은 프로젝트 인허가 프로세스를 시작하는 2단계 연구를 지원할 것으로 보임.

미국 ‘프로젝트 피닉스’의 일환인 루마니아 SMR 프로젝트

루마니아 SMR 프로젝트는 중동부 유럽의 석탄화력 발전소를 SMR로 대체하는 것을 목표로 하는 미국의 ‘프로젝트 피닉스(Project Phoenix)’ 계획의 일환임.²⁹⁾ 프로젝트 피닉스는 2022년 유엔 기후변화협약 당사국총회(COP27)에서 존 케리(John Kerry) 미국 기후특사가 처음 발표함. 케리 특사는 2023년 9월 7일 부쿠레슈티 국립공과대학에서 루마니아에 이어 체코, 슬로바키아, 폴란드가 프로젝트 피닉스에 참여하기로 했으며, 석탄화력 발전소를 SMR로 전환하는 프로젝트의 타당성 조사에 대한 지원을 받게 될 것이라고 밝힘.

[표] 루마니아 SMR 협력 관련 동향

시기	국가	협력 대상 기관/기업	협력 내용
2019.03	미국	NuScale Power	Nuclearelectrica와 SMR 개발, 인허가, 건설 평가를 위한 MOU
2021.11	미국		Nuclearelectrica와 NuScale SMR 발전소 건설 협약 체결
2022.05	미국		Nuclearelectrica·E-INFA와 엔지니어링 연구, 기술 검토, 인허가 활동 MOU
2022.12	미국		RoPower와 VOYGR 발전소 건설 예정지 프론트엔드 엔지니어링 및 설계 작업 계약
2023.05	미국	수출입은행(EXIM), 국제개발금융공사(DFC)	루마니아 SMR 사업에 최대 2억 7,500만 달러 지원 미국 EXIM 30억 달러, DFC 10억 달러의 금융 지원 의향서 발부
	일본	국제협력은행(JBIC)	
	한국	DS프라이빗에쿼티	
	UAE	원자력공사(ENEC)	
2023.06	한국	삼성물산	Nuclearelectrica·E-INFA·Nova Power & Gas·NuScale Power·Fluor Enterprises와 루마니아 등 중동부유럽에서 NuScale SMR 건설 협력 MOU

출처: 정부 발표·언론 보도 내용 취합

28) World Nuclear News, Romania sets out roadmap for licensing of NuScale VOYGR, 2023.10.02.

29) Euractiv, US aiming to deploy Europe's first small modular reactor 'in late 2020s', official says, 2023.09.29.

4. 스웨덴

에너지 믹스 현황

2022년 스웨덴의 주요 전력 공급원은 수력 및 원자력 발전으로, 각각 전체 전력 공급량의 41%와 29%를 차지함. 스웨덴은 수력, 원자력, 풍력, 태양광 등 청정 에너지원이 전력 믹스의 약 90%를 차지하는 탈탄소화 부문의 글로벌 리더 중 하나임. 스웨덴은 다른 스칸디나비아 국가들과 함께 유럽에서 1인당 전력 소비량이 가장 많은 국가 중 하나로, 1인당 연간 13MWh 이상의 전력을 소비하고 있음. 스웨덴의 전체 전력 소비량은 지난 10년간 증가세를 보였으며 2021년 약 177TWh로 정점을 기록함³⁰⁾

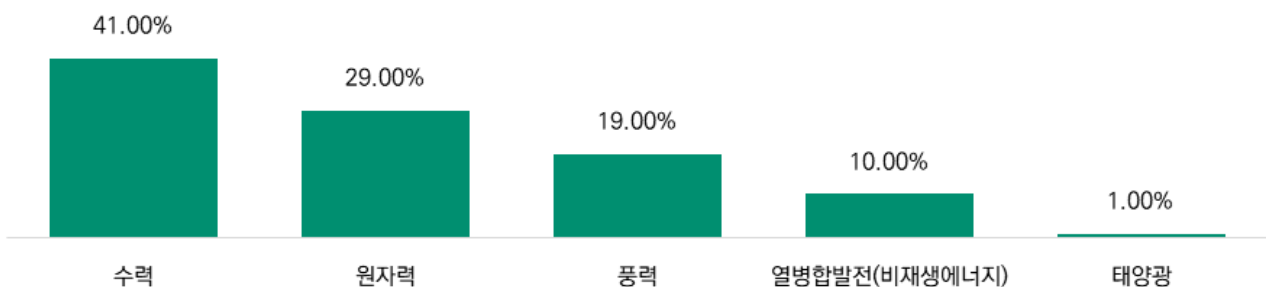
스웨덴 에너지 정책

2022년 10월 스웨덴의 중도우파 연립 정부는 원자력에 대해 긍정적인 입장을 취하고 에너지 정책 목표를 “100% 재생에너지에서 100% 탈화석 에너지로 변경”한다는 내용의 정책 합의문인 이른바 ‘티도 협정(Tidö Agreement)’을 발표함. 이 협정은 또한 스웨덴에서 SMR을 건설하고 운영할 수 있는 여건을 조성하기 위해 필요한 규정을 개발해야 하며, 원전 허가 절차도 단축되어야 한다는 것을 명시함.

2023년 10월 스웨덴 정부는 원자력 관련법 개정안을 의회에 제출함. 새로운 법안은 운영 중인 원자로 수를 10기로 제한하는 현행법을 개정하여 기존 부지뿐만 아니라 새로운 부지에도 원자로 건설을 허용하는 것을 골자로 함.³¹⁾ 스웨덴 정부는 이번 개정안은 “영구 폐쇄된 원자로를 대체하고 기존 원자로가 위치한 부지에 건설되는 경우에만 신규 원자로를 허가할 수 있다는 환경법 조항이 삭제되는 것”이라고 설명함.

[그래프] 스웨덴 발전원별 전력 믹스 (2022년)

단위: %



출처: Statista

30) Statista, Distribution of electricity generation in Sweden in 2022, by source, 2023.10.17.

31) World Nuclear News, Swedish nuclear: Government moves to change law, 2023.10.05.

스웨덴 의회는 전력 생산 확대 및 에너지 안보 강화를 위해 2023년 6월 환경법(Environmental Code) 개정안을 채택해 2024년 1월 1일부터 시행됨. 이에 따라 40년 전 원자력 발전의 단계적 폐지를 결정했던 스웨덴은 신규 원전 건설 허용으로 정책 방향을 전환함. 스웨덴 정부는 2040년까지 300TWh로 2배 늘어날 전력 수요를 충당하고 2045년까지 넷제로 배출을 달성하기 위해 ‘100% 신재생에너지 전력’에서 ‘100% 화석연료 없는 전력’으로 목표를 변경함.³²⁾

이에 따라 스웨덴 국영전력사 Vattenfall은 스웨덴 남부 연안 링할스(Ringhals) 지역 기존 원전 부지에 SMR 최소 2기를 건설하는 방안을 검토 중임. 이러한 계획의 연장선으로 Vattenfall은 2022년 12월 스웨덴 전력청(Svenska Kraftnaet)에 2.8GW 규모의 신규 원전을 건설하여 2032년부터 전력망에 연결한다는 계획에 대한 통지서를 제출함.³³⁾ 스웨덴은 2016년 기존 원전에서만 신규 원전을 건설할 수 있도록 하기로 합의했으나, 이번 개정안으로 이 합의는 폐지됨.

SMR 프로젝트 개발 논의

- 2022년 6월 Vattenfall은 링할스(Ringhals) 원자력 발전소 인접 부지에 최소 2기의 SMR 건설을 평가하기 위한 파일럿 연구를 진행하고 있다고 발표함. 새로운 SMR은 가동이 중단된 원자로인 링할스 1·2호기를 대체할 것으로 예상되며, 2023년 말이나 2024년 초까지 타당성 조사 작업을 완료할 계획임.³⁴⁾ 2023년 3월, Vattenfall은 2030년대 초 첫 SMR 상업운전 개시를 목표로 SMR 기술 공급업체와 접촉하고 있다고 밝힘.³⁵⁾

- 전력회사 Uniper Sweden은 2021년 2월 SMR 개발업체인 LeadCold, 스웨덴 왕립공과대학(KTH)과 2030년까지 스웨덴 오스카르스함(Oskarshamn) 부지에 데모 SMR을 건설하는 계약을 체결함. LeadCold SEALER SMR은 연료 재장전 없이 10~30년 동안 3~10MW의 전력을 생산하도록 설계되었으며, 2030년대에 상업운전을 달성하는 것을 목표로 하고 있음.³⁶⁾ LeadCold는 1996년부터 납냉각 원자로 시스템을 개발해 온 KTH에서 분사한 회사로 2013년 설립되었으며, 캐나다 자회사로 LeadCold Reactors가 있음.

- 2022년 3월 스웨덴에서 스칸디나비아 최초로 SMR 프로젝트 개발회사 Kärnfull Next가 출범함. Kärnfull Next는 스웨덴에 BWRX-300 SMR을 도입하기 위해 GE Hitachi와 협력하기로 함.³⁷⁾ 2022년 12월 Kärnfull Next는 핀란드 전력회사 Fortum과 스웨덴 내 SMR 개발 기회 공동 모색을 위한 양해각서(MOU)를 체결함.³⁸⁾ 양사는 이번 협력을 통해 구체적인 타당성 조사로 이어질 수 있는 스웨덴 SMR 프로젝트에 공동으로 대응할 것이라고 밝힘.

32) Euractiv, Sweden adopts '100% fossil-free' energy target, easing way for nuclear. 2023.6.21.

33) Reuters, Sweden's Vattenfall investigates new 2.8 GW nuclear capacity at Ringhals, 2023.01.25.

34) Vattenfall, Vattenfall begins feasibility study on construction of small modular reactors at Ringhals, 2022.06.28.

35) NUCNET, Vattenfall Talking To Reactor Suppliers For SMR Deployment At Ringhals In Early 2030s, 2023.03.09.

36) World Nuclear News, Joint venture formed to spur SMR deployment in Sweden, 2021.02.15.

37) World Nuclear News, Kärnfull teams up with GE-Hitachi for SMR deployment, 2022.03.14.

38) World Nuclear News, Fortum and Kärnfull to explore SMR deployment in Sweden, 2022.12.15.

스웨덴-영국, 원자력 분야 협력 강화에 합의

2023년 10월 13일 스웨덴과 영국은 정상회담을 통해 안보 및 국방, 혁신, 과학, 에너지 및 기후, 인적 교류, 무역 및 투자 등 양국 관계 전반에 걸친 협력을 활성화하고 심화하는 것을 목표로 하는 전략적 파트너십을 체결함. 여기에는 SMR을 포함한 원자력 기술 협력과 핵연료 공급 다각화가 포함됨.³⁹⁾ 양국은 민간 원자력 및 재생에너지 기술, 녹색 경제로의 전환에 기여하는 기타 연구 분야에서 협력할 것이라고 밝힘. 협정문은 “양국 정부는 기존 및 신규 원자력 발전소의 중요성과 민간 원자력 부문의 미래를 구성하고 각자의 국가 목표에 따라 탄소중립을 달성하기 위해 개발될 SMR을 포함한 새로운 원자력 에너지 기술의 잠재력을 인정한다”고 명시함.

또한 스웨덴과 영국은 첨단 원자력 기술을 포함한 민간 원자력 협력에 관한 협의체를 구축할 것이며, 이 협의체는 규제 교차 평가, 파이낸싱 및 펀딩 모델, 부지 선정, 발전소 운영, 원자력 기술 및 공급망을 포함하여 새로운 원자력 도입에 대한 학습, 통찰력, 경험의 공유를 촉진할 것이라고 밝힘. 이어 양국은 SMR 도입에 있어 규제 교류의 중요성을 인식하고 있으며, 영국 원자력규제청(Office for Nuclear Regulation)과 스웨덴 방사능안전청(Radiation Safety Authority)의 민간 원자력 규제 문제에 대한 협력 및 정보 교환 노력을 지지한다고 전함.

[표] 스웨덴 SMR 협력 관련 동향

시기	국가	협력 대상 기관/기업	협력 내용
2022	미국	GE Hitachi	SMR 프로젝트 개발회사 Karnfull Next와 BWRX-300 도입 협력
2022	핀란드	Fortum	Karnfull Next와 스웨덴 내 SMR 개발 기회 공동 모색 MOU
2023	영국	영국 정부	SMR 등 원자력 기술 협력을 포함한 전략적 파트너십 협정 체결

출처: 정부 발표·언론 보도 내용 취합

39) World Nuclear News, Sweden and UK agree to enhance cooperation in nuclear, 2023.10.17.

동남아시아

5. 인도네시아

에너지 믹스 현황

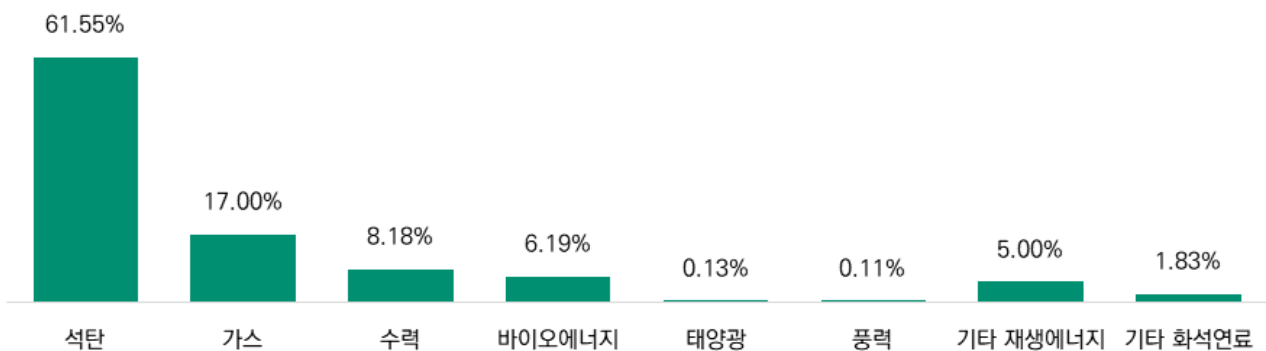
2022년 인도네시아의 발전 설비용량은 약 81.2GW, 발전량은 308TWh로, 2027년에는 약 500TWh 이상의 전력을 생산할 것으로 예상됨. 현재 인도네시아의 전력 믹스는 여전히 석탄에 크게 의존하고 있으며(61.55%), 천연가스, 수력, 기타 재생에너지가 그 뒤를 잇고 있음.⁴⁰⁾

에너지 정책

인도네시아의 국가전력계획은 2025년까지 전력 믹스에서 재생에너지 비중을 23%로 높이는 것을 목표로 하고 있음. 2021년 10월 인도네시아 에너지광물자원부는 국영전력회사 PLN의 2021~2030년 전력공급사업계획(Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik, RUPTL)을 승인함. PLN은 화석연료 발전용량 21GW를 재생에너지로 대체하는 것을 목표로 하는 한편, 화석연료에서 벗어나기 위한 잠재적 옵션으로 SMR을 제시함. 2022년 12월 인도네시아 정부는 2039년까지 원자력 발전소를 개발하겠다는 목표를 발표하고, 원자력 규제기관 BAPETEN은 발전소 건설에 필요한 자금을 지원할 투자자 확보를 모색하고 있음.⁴¹⁾

[그래프] 인도네시아 발전원별 에너지 믹스 (2022년)

단위: %



출처: Statista

40) Statista, Total electricity generation capacity in Indonesia from 2014 to 2022 with target for 2023, 2023.01.

41) World Nuclear Association, Nuclear Power in Indonesia, 2022.12.

인도네시아, 원자력 발전소 개발 전략 준비 중

2023년 8월 인도네시아 국립연구혁신청(National Research and Innovation Agency, BRIN)의 메고 피난디토(Mego Pinandito) 개발정책 담당 부국장은 정부가 신재생에너지원 중 하나로 원자력 기술을 논의해왔으며, 현재 원자력 에너지 개발을 위해 필요한 인적 자원, 기술력, 부지 선정 등을 준비하고 있다고 밝힘.⁴²⁾ 그는 인도네시아의 막대한 전력 수요를 충족하려면 원자력 발전소가 필요하다는 “군도 국가라는 특성과 계절적 특성 등을 고려하여 효과적이고 효율적이면서 위험성이 가장 낮은 기술을 구현하기를 희망한다”고 설명함.

2023년 10월 BRIN의 로하디 아왈루딘(Rohadi Awaludin) 원자력 에너지 연구기구 책임자는 인도네시아가 2030년대에 원자력 발전소를 건설할 계획이라고 전함.⁴³⁾ 그는 이를 위해 에너지광물자원부(ESDM)와 국가개발계획청(BAPPENAS)을 비롯한 다양한 기관이 논의 중이며, 인구가 적은 지역을 위한 소형 원전과 도시 지역에 에너지를 공급하기 위한 대형 원전 등 두 가지 유형의 원자력 발전소가 건설될 수 있다고 언급함. 이어 대형 원전은 최대 1,000MW, 소형 원전은 100~200MW 규모이며 일부는 100MW 미만이 될 것이라고 덧붙임.

SMR 프로젝트 개발 논의 이력

2016년 8월 인도네시아 국립원자력청(BATAN)은 중국핵공업집단공사(CNEC)와 인도네시아에서 고온가스냉각로(HTGR) 공동 개발 협약을 체결함.⁴⁴⁾ BATAN은 인구가 많은 발리, 자바, 마두라, 수마트라 섬에 대형 경수로를 가동하고, 칼리만탄, 술라웨시, 기타 섬에는 최대 100MW 규모의 소형 HTGR을 도입하여 산업용 전력과 열을 공급할 계획이라고 밝힘. 당시 BATAN은 상업용 원전 도입에 앞서 전기출력 3~10MWe, 열출력 10~30MWt 규모의 시험 및 데모 HTGR을 건설하는 방안을 고려하고 있다고 전함.

2018년 3월, BATAN은 실험용 원자로(Reaktor Daya Eksperimental, RDE)의 상세 엔지니어링 설계 개발 로드맵을 시작했다고 발표함.⁴⁵⁾ 당시 BATAN의 발표에 따르면 RDE 기본설계는 2017년 완료되었으며, 해당 RDE는 TRISO 연료를 사용하는 소형 펄스베드 HTGR로 전해짐. BATAN은 2015년 러시아-인도네시아 컨소시엄인 RENUKO와 개념설계에 협력하여 프로젝트 예비 단계에 착수함. RENUKO 컨소시엄에는 인도네시아 기업 Rekayasa Engineering社, Kogas Driyap社, 러시아 국영 원자력 기업 Rosatom 자회사, 독일 NUKEM Technologies社가 참여함.

42) TEMPO.co, Indonesia is Preparing Nuclear Power Plant Development Strategy, Says BRIN, 2023.08.22.

43) Antara News, Indonesia planning to build nuclear power plants in 2030s: BRIN, 2023.10.13.

44) World Nuclear News, China and Indonesia to jointly develop HTGR, 2016.08.04.

45) Nuclear Engineering, Indonesia looks to SMRs, 2018.03.21.

또한 인도네시아는 소형 용융염원자로(MSR)도 검토 중임. 2017년 Pertamina, PLN, Inuki 등 3개 국영 기업이 기술 예비타당성조사를 완료한 결과, 미국 Martingale이 제안한 ThorCon MSR 노형이 안전하고 저렴하며 깨끗한 에너지를 제공할 수 있다는 결론을 내림. Martingale은 2015년 인도네시아 Thorium 컨소시엄과 원자로 공동 개발 협약을 체결함.

인도네시아, 최근 SMR 개발 협력 활발

코로나19로 주춤했던 인도네시아의 SMR 프로젝트 개발 논의는 2023년 들어 활발히 나타나고 있음. 2023년 3월 미국과 인도네시아는 인도네시아의 원자력 에너지 프로그램 개발을 지원하기 위한 전략적 파트너십을 발표함.⁴⁶⁾ 미국무역개발청(USTDA)은 PLN社에 100만 달러 규모의 보조금을 지급하고 인도네시아 서칼리만탄에 건설될 원자력 발전소의 기술적, 경제적 타당성 평가를 지원하기로 함. 여기에는 부지 선정 계획, 발전소 및 연결 계통 설계, 사회·환경 영향 예비 평가, 위험 평가, 비용 추정, 규제 검토 등이 포함됨. PLN은 해당 지원을 수행할 업체로 미국 NuScale Power를 선정했으며, NuScale Power Module 기반의 462MW 규모 VOYGR 발전소를 건설할 계획임.

2023년 5월 덴마크 4개 기업(Copenhagen Atomics, Aalborg CSP, Alfa Laval, Topsoe)은 인도네시아 암모니아 생산업체 PKT, Pertamina NRE와 동칼리만탄 보르네오 섬 본탕(Bontang)에 암모니아 생산시설 건설을 검토하기 위한 양해각서(MoU)를 체결함.⁴⁷⁾ 2028년 가동이 예상되는 이 시설은 Copenhagen Atomics社가 공급할 토륨 용융염 SMR로 구동될 예정으로, SMR 모듈 25기로 구성되어 총 1GW 규모임. 약 40억 달러가 투자되어 연간 100만 톤의 암모니아를 생산할 것으로 예상됨

2023년 9월 Pertamina NRE는 덴마크 Seaborg社와 MoU를 체결하고 Seaborg의 소형 용융염원자로(CMSR) 발전 바지선 배치 방안을 검토 중임.⁴⁸⁾ 양사는 검토를 통해 상업적으로 실행 가능한 초기 프로젝트의 범위를 정할 계획으로, 200~800MW 규모의 개발 협력을 고려할 방침임

[표] 인도네시아 SMR 협력 관련 동향

시기	국가	협력 대상 기관/기업	협력 내용
2015	러시아	Rosatom	인도네시아 기업이 참여하는 RENUKO 컨소시엄과 HTGR 데모 원자로 개발 협력
2015	미국	Martingale	인도네시아 Thorium 컨소시엄과 ThorCon 원자로 공동 개발 협약
2016	중국	중국핵공업집단공사 (CNEC)	HTGR 프로젝트 공동 개발 협약
2023	미국	USTDA NuScale Power	서칼리만탄 VOYGR SMR 발전소 건설을 위한 타당성 평가 지원
2023	덴마크	Copenhagen Atomics, Aalborg CSP, Alfa Laval, Topsoe	토륨 용융염 SMR 기반 암모니아 생산시설 건설 협력
2023	덴마크	Seaborg	Seaborg의 CMSR 부유식 바지선 도입 검토를 위한 MoU 체결

출처: 정부 발표·언론 보도 내용 취합

46) World Nuclear News, USA, Indonesia announce partnership on SMRs, 2023.03.20

47) NUCNET, Indonesia / Danish Companies Sign Agreement For \$4 Billion Thorium SMR In Borneo, 2023.05.22.

48) World Nuclear News, Seaborg power barge considered for use in Indonesia, 2023.09.12.

6. 말레이시아

에너지 믹스 현황

2022년 말레이시아의 주요 발전원은 석탄으로, 76.4TWh의 전력을 석탄에서 생산함. 천연가스 발전이 68.4TWh로 그 뒤를 이었음. 이는 전체 발전량 183TWh 가운데 각각 41.7%, 37.3%로, 말레이시아 전력 믹스에서 화석연료가 차지하는 비중은 압도적임. 2021년 말레이시아는 2035년까지 전력 믹스에서 재생에너지 비중을 40%까지 끌어올린다는 목표를 세웠음.⁴⁹⁾ 말레이시아는 2050년 탄소 중립을 목표로 하고 있으며, 이를 위해서는 에너지 인프라와 정책의 대대적인 변화가 필요함. 또한 말레이시아 정부는 2050년까지 전력 생산의 70%를 재생에너지로 충당한다는 목표를 수립함.

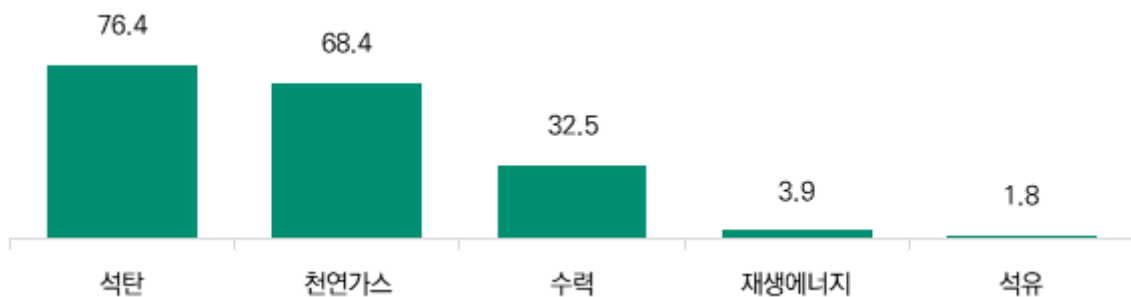
말레이시아 원자력 개발 프로그램

2008년 말레이시아 정부는 원자력개발운영위원회를 발족하고, 2009년 나지브 라작(Najib Razak) 총리는 소규모 원자로 건설 계획을 발표함. 2011년에는 원자력 에너지 프로그램 이행기관(Nuclear Energy Program Implementing Organization, NEPIO)으로서 말레이시아 원자력공사(MNPC)가 설립됨. 총리실 산하에 소속된 MNPC는 원자력개발운영위원회 기능을 수행함. 말레이시아는 MNPC 설립과 더불어 2010~2012년 769만 달러의 예산을 투입하는 등, 원전 개발에 강한 의지를 보임.⁵⁰⁾

Nuclear Business Platform에 따르면 말레이시아 원자력 프로그램에서 원전 운영은 TNB社 같은 주요 전력회사가 맡게 될 가능성이 높음. TNB는 원자력 발전을 위한 예비 조사, 부지 선정, 인력 개발, 환경 영향 평가, 건설 계획 등을 준비해 왔음. 2009년 TNB는 한국전력공사와 양해각서(MoU)를 체결하고 말레이시아 원자력 프로그램에 대한 예비타당성 조사(Pre-FS) 컨설팅에 착수하여 2010년까지 1년간 공동으로 Pre-FS를 수행함. 프로젝트 기간 TNB는 한국전력공사가 주관한 프로젝트 관리 및 프로젝트 엔지니어링 연수를 위해 총 20명의 Pre-FS 조사원을 한국에 파견함.

[그래프] 말레이시아 발전원별 연간 발전량 (2022년)

단위: TWh



출처: Statista

49) Enerdata, Malaysia sets new target to reach 70% of renewables in the power mix by 2050, 2023.05.12.

50) Nuclear Business Platform, Reviving Malaysia's Nuclear Energy Program, 2023.10.14.

2014년 TNB는 프랑스전력공사(EDF)와 규제 연구 및 원자력 기술 분야에서 협력하기 위한 양해각서(MoU)를 체결하고 종합적인 TNB 원자력 로드맵을 개발함. 이는 정부의 원전 개발 결정이 내려질 경우 TNB가 말레이시아 최초의 원전 소유주이자 개발자, 운영사로서의 역할을 준비하기 위해 수행됨. 또한 2014년 7월, 총리실의 다토 마 시우 켕(Dato' Mah Siew Keong) 장관은 10년 내 원자력 발전소 건설을 목표로 하는 종합 타당성 조사를 발표함. 그러나 2018년 라작 총리의 임기가 끝난 후, 후임자인 마하티르 모하마드(Mahathir Mohamad) 총리가 원자력 발전소 건설을 추진하지 않겠다고 선언하면서 2021년까지 원전 2기 건설을 목표로 한 말레이시아의 원자력 개발 프로그램은 무기한 연기되었고 결국 2018년 말레이시아 원자력공사(MNPC)가 해체됨.⁵¹⁾

그러나 탈탄소화와 에너지원 다변화가 시급한 상황에서 최근 원자력 개발의 필요성이 다시 대두되고 있음. 라피지 람리(Rafizi Ramli) 경제부 장관과 닉 나즈미 닉 아흐마드(Nik Nazmi Nik Ahmad) 천연자원에너지기후변화부 장관은 에너지 전환 계획의 일환으로 원자력을 고려하고 있다고 밝힘.⁵²⁾ 2023년 8월, 라피지 장관은 원자력이 조만간 말레이시아 에너지 전환 계획의 일부가 될 것이라고 생각한다고 발언함. 그는 정책 차원에서 말레이시아 에너지 전환 계획에 원자력을 도입할 가능성을 검토하고 있으며, 국가에너지위원회(National Energy Council)에서 최종 심의를 맡게 될 것이라고 언급함. 닉 나즈미 장관은 “원자력은 탄소 배출이 전혀 없지만 안전에 대한 대중의 우려가 존재하므로 신중히 고려해야 한다”면서도, “SMR과 같은 기술이 발전하고 있기 때문에 완전히 배제할 수 없다”고 덧붙임.

말레이시아는 원자력을 청정에너지 목표를 달성하고 화석연료에서 벗어나는 에너지 전환을 뒷받침할 수 있을 것으로 보고 있음. 원자력은 간헐적 특성이 있는 재생에너지를 보완하는 안정적인 기저부하 전력을 제공할 수 있으며, 에너지 공급을 다변화하고 수입 화석연료에 대한 의존도를 낮출 수 있음. 또한 SMR 설계는 건설 비용이 보다 저렴하고 안전하게 운영하기 쉬워 대중의 우려를 해소하기 용이하다는 점에 주목하고 있음

51) MalayMail, As 2020 comes a-knocking, whither Malaysia's nuclear power plan?, 2020.01.03.

52) The Edge Malaysia, Nuclear still on the cards in Malaysia's energy transition, 2023.08.29.

중동·아프리카

7. 사우디아라비아

에너지 믹스 현황

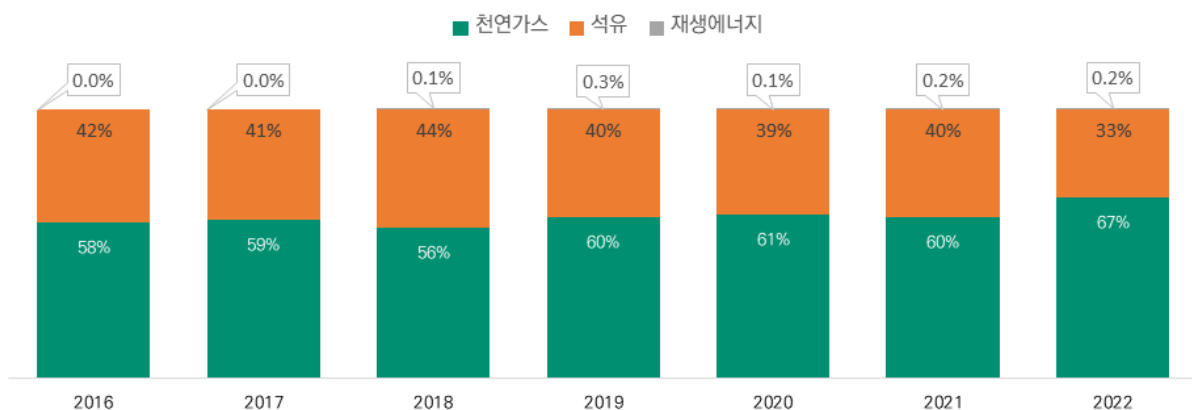
사우디아라비아는 세계 3위 원유 및 콘덴세이트 생산국이자 세계 1위 원유 수출국으로, 2022년 OPEC 최대 원유 생산국임. 사우디아라비아는 2022년 약 374TWh의 전력을 생산했는데, 이는 2021년 367TWh보다 2% 증가한 수치임. 2022년 사우디는 전력의 67%를 천연가스에서 생산했으며 33%는 석유, 재생에너지 발전은 1% 미만에 그침.⁵³⁾

에너지 정책

2016년 4월 발표된 사우디아라비아의 경제 개혁 플랜 ‘비전 2030(Vision 2030)’은 미래 석유자원 고갈을 대비하고 성공적인 경제 다각화를 달성하기 위해 사우디 전역에서 광범위한 재생에너지 개발을 지원하고 석유·천연가스 화력발전을 줄이고 재생에너지원 발전을 장려하는 것을 목표로 하고 있음. 또한 사우디아라비아는 2023년까지 9.5GW 규모의 재생에너지 발전용량을 구축한다는 ‘국가 재생에너지 프로그램(NREP)’을 발표했으며, 2021년 사우디 에너지부는 2030년까지 재생에너지 발전 비중을 50%로 높일 것이라는 목표를 발표함

[그래프] 사우디아라비아 발전원별 연간 발전 비중 (2016~2022년)

단위: %



출처: 미 에너지정보청(EIA)

53) EIA, SAUDI ARABIA – Analysis, 2023.10.

사우디, 2040년 원자력 발전용량 17GW 목표

사우디는 2040년까지 원자력 발전용량을 17GW로 늘리는 것을 목표로, 우선 1.4GW 규모의 원자로 2기를 건설할 계획임. 2023년 9월 사우디는 최초의 원자력 발전소 건설을 추진하면서 국제원자력기구(IAEA)의 원자력 안전 조치를 철저히 이행할 계획이라며 원자력 에너지 개발 계획을 재확인함.⁵⁴⁾ 사우디는 원자력 및 방사성폐기물 프로젝트 관련 업무 감독 기관으로 2010년 사우디왕립원자력·재생에너지원(KA-CARE)을 설립했으며, 2022년 2월 원자력 개발업체 역할을 할 원자력지주회사(Nuclear Holding Company)의 설립을 확정함

SMR 프로젝트 개발 논의

2015년 3월 한국과 사우디 정부간 SMART원자로 공동설계와 사우디 내 시범원자로 건설을 통해 한국과 사우디가 SMART 기술을 공유하고 이후 전 세계를 상대로 공동 상용화를 추진하기 위한 파트너십 구축 MOU를 체결함.⁵⁵⁾ 2015년 9월 한국원자력연구원(KAERI)와 사우디 KA-CARE는 사우디 내 SMART 1,2호기 건설허가를 위한 공학설계 예비안전성분석보고서(PSAR) 및 건설제약서 작성을 목표로 하는 SMART 건설전 설계(PPE) 협약을 체결하고, 2015년 12월부터 2018년 11월까지 1억 3,000만 달러를 투자하여 수행하였음. 2020년 1월 과기정통부는 사우디 내 SMART 상용화 및 건설을 위한 합작법인 설립 계획을 발표하였으며, 이에 따라 KAERI와 KA-CARE간 SMART PPE 협약을 개정하였음

2016년 1월 KA-CARE는 중국핵공업집단공사(CNEC)와 현재 CNEC가 중국에서 건설 중인 고온가스냉각 SMR 노형 HTR-PM을 기반으로 사우디에 고온가스냉각로(HTGR)를 건설하는 계약을 체결하고, 이를 위해 2017년 3월 공급망의 현지화 및 타당성 조사 수행을 포함한 추가 협력 계약을 체결함. 2018년 11월 KA-CARE는 호주 Worley Parsons社와 사우디 원자력 프로젝트에 대한 컨설팅 서비스 제공 계약을 체결했으며, 여기에는 대형 원전, SMR 및 핵연료 주기 전반에 걸친 프로젝트 거버넌스, 자원 관리, 프로젝트 서비스, 교육 및 규정 준수 등이 포함됨. 2023년 10월 DL이앤씨는 사우디아라비아 해수담수청(SWCC)과 담수화 플랜트에 SMR을 적용하기 위한 상호협력 업무협약(MoU)을 체결함

[표] 사우디 SMR 협력 관련 동향

시기	국가	협력 대상 기관/기업	협력 내용
2015	한국	한국원자력연구원 (KAERI)	한국형 SMART 원전 건설을 위한 파트너십 체결
2016	중국	중국핵공업집단공사 (CNEC)	CNEC의 SMR 설계인 HTR-PM 기반의 원자로 건설 협력 계약
2016	호주	Worley Parsons	대형 원전, SMR, 프로젝트 거버넌스, 자원 관리, 프로젝트 서비스, 교육, 규정 준수 등 사우디 원자력 프로젝트에 대한 컨설팅 서비스 제공
2020	한국	과기정통부	사우디 내 SMART 상용화 및 건설을 위한 합작법인 설립을 계획함에 따라 SMART PPE 협약을 개정
2023	한국	DL이앤씨	담수화 플랜트에 SMR을 적용하기 위한 최적의 솔루션 공동 모색

출처: 정부 발표·언론 보도 내용 취합

8. 케냐

에너지 믹스 현황

케냐의 에너지 믹스는 친환경 에너지 비중이 매우 큰 것이 특징임. 연간(2022년 7월~2023년 6월) 발전량은 총 126억 3,900만kWh이며 지열(47.7%), 수력(20.3%), 풍력(17.4%), 화력(11.0%), 태양광(3.5%) 순으로 비중이 큼. 연료가 값비싼 석유화력 발전소를 줄이고, 가뭄 기간에 어려움을 겪는 수력 발전에 대한 의존도를 낮추는 것이 향후 과제임.

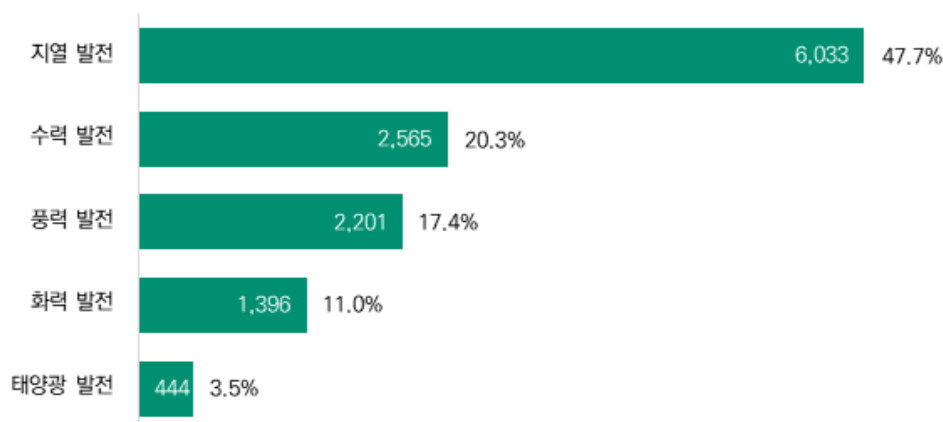
에너지 정책

케냐 에너지부는 2022년 7월 ‘케냐 에너지 부문 로드맵 2040(Kenya Energy Sector Roadmap 2040)’을 발표함. 이에 따르면 케냐는 모든 국민들에게 신뢰할 수 있고 저렴한 전력을 제공하면서 저탄소 전환을 촉진하는 것이 목표임. 특히 2040년까지 발전 설비용량을 100GW로 끌어올릴 계획임. 이를 위해 케냐는 2022~2040년 연평균 5GW의 신규 용량을 도입할 계획으로, 그린 파이낸싱 등을 통해 3,000억 달러 이상의 투자를 유치한다는 방침임⁵⁶⁾

2022년 9월 취임한 윌리엄 루토(William Ruto) 케냐 대통령은 취임사에서 2030년까지 100% 청정에너지 사용을 달성하겠다고 밝힘. 코로나19의 영향에서 회복되면서 케냐의 전력 수요는 2023년 1월 역대 최고치인 2,132.29MW를 기록하는 등 지속적인 증가세를 보이고 있음.⁵⁷⁾ 케냐가 증가하는 에너지 수요를 충당하면서 청정에너지 사용 확대를 위해 원자력 발전소 건설 계획을 진행하기로 결정한다면 국가 전력망을 업그레이드해야 할 것으로 분석됨. 케냐 원자력 프로그램에 대한 전략적 환경 및 사회 평가(SES) 연구에서는 현 전력망이 원전을 지원하기에 불충분한 것으로 나타남⁵⁸⁾

[그래프] 케냐의 발전원별 연간 발전량 (2022년 7월~2023년 6월)

단위: 백만kWh



출처: Central Bank of Kenya, 「Monthly Economic Indicators」, 2023.07.

54) World Nuclear News, Saudi Arabia reiterates plans for nuclear energy, 2023.09.28

55) World Nuclear Association, Nuclear Power in Saudi Arabia, 2023.10.

56) Enerdata, Kenya targets 100 GW of installed capacity by 2040, 2022.08.02.

케냐, 2038년 첫 원자력 발전소 가동 목표

케냐는 2010년부터 원자력 발전소 도입을 검토했으며, 증가하는 전력 수요에 발맞추기 위해 2034년까지 케냐 최초의 원자력 발전소를 가동하는 것을 목표로 하고 있음.⁵⁹⁾⁶⁰⁾ 케냐 원자력에너지청(Nuclear Power and Energy Agency, NuPEA)에 따르면 2038년까지 1,000MW급 원자력 발전소를 건설할 예정임. 2023년 9월, 케냐 NuPEA는 2027년부터 1,000MW 규모 신규원전 건설을 개시할 예정이라고 밝힘

NuPEA의 주스트스 와부야보(Justus Wabuyabo) CEO 대행은 에너지 인프라 강화를 위해 원전 건설을 추진, 2027년에 건설을 시작할 계획이라고 밝힘.⁶¹⁾ 그는 “2026~2027년에 입찰 단계를 거쳐 2027년에 건설을 시작할 것”이라며, 원전 부지 후보로 인도양 근처에 위치한 크왈리(Kwale)와 킬리피(Kilifi) 지역을 고려하고 있다고 전함. NuPEA는 케냐의 급증하는 에너지 수요와 지속 가능한 친환경 에너지원 전환에 대한 전 세계적 요구에 따라 원전 도입을 결정했다고 설명함. 새로운 원자력 발전소는 1,000MW의 전력을 생산할 것으로 예상되며 전체 프로젝트에 약 5,000억~6,000억 케냐실링(1케냐실링=약 9원)의 자금이 소요될 것으로 추정됨

SMR 프로젝트 개발 논의

SMR 부문에서 케냐는 규제 문제를 우선시하는 신중한 접근 방식을 채택하고 있음. 케냐는 SMR 기술에 큰 관심을 가지고 있으며 2028년까지 최초의 상용화된 SMR을 도입한다는 목표로 국제 파트너들과 논의를 진행 중임. NuPEA의 전략·계획 책임자 윈프레드 은두바이(Winfred Ndubai)는 “케냐의 전력망은 약 3,200MW에 불과하고 발전소 1기가 전체 시스템 용량의 10%를 초과해서는 안 되기 때문에 케냐 전력망에 가장 적합한 원전 기술은 SMR일 것”이라고 언급함⁶²⁾

[표] 케냐 원전 협력 관련 동향

시기	국가	협력 대상 기관/기업	협력 내용
2015	중국	CGN	케냐 원자력전력위원회(KNEB)*, 중국 CGN과 화롱(Hualong) 1호기 원전 건설 조사 협약 체결
2016	러시아	Rosatom	케냐 원자력 에너지 인프라 개발 지원, 기초 및 응용 연구 등 광범위한 분야를 포괄하는 계약 체결
2016	한국	한국전력공사	KNEB와 원자력 정책/사업 개발 협력, 원전 설계·건설·운영·유지보수 부문 협력, 원전분야 신기술/인력양성 협력 등 상호협력 양해각서 체결
2023.08	미국	Excel Services Corporation	케냐 원자력규제청(KNRA)은 미국 원자력 기업 Excel Services Corporation과 케냐의 원자력 규제 안전 개선 협력 파트너십을 체결

*2019년 케냐 원자력에너지청(NuPEA)으로 전환

출처: 정부 발표·언론 보도 내용 취합

57) Business Daily, Kenya's demand for electricity hits new record in New Year, 2023.01.30.

58) Business Daily, Kenya nuclear plan to cost billions in grid upgrades, 2023.03.15.

59) Nuclear Business Platform, Kenya's Nuclear Power Program: A Collaborative Approach for Energy Sustainability, 2023.10.02.

60) Kenya News Agency, Kenya Aims To Have Its First Nuclear Power Plant By 2038, 2022.10.18.

61) Anadolu Ajansi, Kenya sets sights for nuclear power plant construction starting in 2027, 2023.09.26.

62) Nation, Power to the people: Kenya looks to nuclear energy, 2023.10.06.

IV. SMR 주요 개발 기업

1. EDF
2. Rolls-Royce SMR
3. GE Hitachi Nuclear Energy
4. Westinghouse
5. NuScale Power
6. TerraPower
7. Ultra Safe Nuclear Corporation
8. Holtec International
9. Seaborg Technologies
10. Rosatom

1. EDF (프랑스)

프랑스전력공사(Électricité de France, EDF)는 기후변화에 대응하는 저탄소 고효율의 에너지 모델 개발을 목표로, 저탄소 사회를 위한 핵심 솔루션으로 원자력을 활용함. 프랑스 및 국제적으로 차세대 발전소 설계와 건설, 기존 원자로 운영과 폐쇄 및 해체에 필요한 기술을 보유하고 있음. EDF는 2022년 431.7TWh의 전력을 생산하고 2022년 전체 전력 생산량 중 원자력이 차지하는 비중은 85.7%로 세계 평균인 76% 대비 높은 수준임('23.12.31). 2023년 9월 기준 원자력 누적 출력은 233TWh로 2022년 동월(209.2TWh) 대비 11.4% 증가세를 보이고 있으며, 이는 응력부식 작업을 최적화한 관리 덕분이라고 평가함. 2023년 말 기준 19곳의 원자력 발전소를 운용 중에 있음

주요 사업

EDF는 2023년 3월 전액 출자 자회사 NUWARD를 설립함으로써 2030년 첫 SMR 콘크리트 타설 예정임. 이는 단일 원자력 건물에 2개의 독립 원자로(각각 170MWe)를 갖춘 340MWe SMR 발전소로, 상호 기기 사용 최적화를 추진함. EDF는 영국의 British Energy Group 인수를 통해 영국 내 저탄소 전력 전환을 18년간 주도함. 또한 영국의 탄소중립 달성을 위해 Hinkley Point C 신규 원전을 건설하고, Suffolk의 Sizewell C 신규 발전소를 건설하는 등 영국의 원자력 르네상스를 선도하고 있음

[표] EDF 일반 정보

기업명	EDF Group	
국가	프랑스	
본사 소재지	프랑스 파리	
설립연도	1946년	
매출액	1,435억 유로(2022)	
개발 노형	NUWARD, EPR	
주요 사업	원자력 발전소 설계 건설, 운영, 폐쇄 및 해체	
주요 연혁	(2009) 폴란드 최대 전력회사인 Polska Grupa Energetyczna와 양해각서 체결 (2010) 프랑스 남부 원자로 4기의 40년간 가동 허가 (2011) 2020년까지 세계 최고의 설비용량을 보유한 전력공급업체 목표 수립 (2018) Barakah 원전 4기 운영 및 유지 (2019) NUWARD 프로젝트 착수 및 프랑스 원자력 산업 부활 촉구 (2020) 코로나19 사태로 연간 생산 예측 300TWh로 하향 조정 (2022) 마크롱 프랑스 대통령, SMR 모델 수출을 위한 5억 유로 재정지원 발표	

출처: EDF (www.edfenergy.com)

주요 개발 SMR 노형

NUWARD: p.14 참고

정부 지원 및 파이낸싱

프랑스 정부는 NUWARD 개발을 위해 5억 유로 이상의 자금을 지원할 계획으로, 2022년 2월 마크롱 대통령은 NUWARD SMR 원자로 프로젝트 및 차세대 원자로 개발에 2030년까지 10억 유로를 지원할 것이라고 밝힌 바 있음. 2023년 8월, 슬로바키아 국영 기업 JAVYS는 EDF와 대형 원자력 발전소와 SMR을 모두 포함하여 슬로바키아의 신규 원전 개발을 모색하기 위한 기본협력계약(FCA)을 체결함. 2023년 10월, 이탈리아 에너지 기업 Edison은 2030~2040년 기간 EDF의 NUWARD 기술을 기반으로 한 SMR 2기를 건설하겠다는 계획을 발표함. 또한 EDF는 폴란드에서 NUWARD 건설 부지 조사를 수행하기 위해 Respect Energy와 협력 계약을 체결함.

각국 도입 계획 및 협력

EDF는 NUWARD 원자로와 관련하여 다양한 기관 및 기업과 파트너십을 맺고 있음. 원자력·대체에너지위원회(CEA)와 연구 및 검증 부문에서 협력하고 있으며, 소형 원자로 설계 경험을 보유한 TechnicAtome, 원자로 노심 및 연료 설계에 전문성을 보유한 Framatome, 발전소 보조설비(BOP)를 담당하는 Tractebel 등과 협력 관계임. 그 밖에도 핀란드·스웨덴의 신규 원전 프로젝트 개발을 위해 핀란드 국영 기업 Fortum과 협약을 체결했으며, 체코 ČEZ와도 SMR 기술 준비, 에너지 기술 타당성 평가, 인허가 협력을 위한 양해각서(MoU)를 체결함

EDF는 2021년 12월 국제 NUWARD 자문위원회(INAB) 출범을 발표했음, INAB는 기술 기능, 산업 접근방식 및 경제성과 관련한 가치 중심의 통찰력, 비판적 분석 및 조언을 제공하기 위해 유럽 및 전 세계의 산학연 기관에서 경험이 풍부한 대표자들의 의견을 수렴함. 참여 기관으로는 인도의 DAE, TATA Consulting Engineers, 캐나다의 ONTARIO POWER, 프랑스의 CEA, 이탈리아 POLITECNICO MILANO 1963, 핀란드의 FORTUM, TVO, 미국 MIT, 체코 UJV GROUP 등이 있음

2022년 6월, EDF의 이니셔티브에 따라 NUWARD SMR 원자로 설계는 체코 공화국(SUJB) 및 핀란드(STUK) 규제기관과 공동으로 검토하는 최초의 사례가 될 것으로 발표함. 프랑스 원자력안전청(ASN)이 주도하여, 유럽 최초의 예비 인허가 접근방식으로 참여하고 유럽 협력을 통해 국제 SMR 인허가 절차 가속화를 지원함. 이는 현재 NUWARD 수출을 목표로 한 주요 단계로, 초국적 협력을 통해 유럽 기술에 대한 규제 조화 촉진을 통해 선도적이고 경쟁력 있는 제품을 만드는 목표 달성을 촉진할 것으로 전망함

이 협력을 통해 각국의 현행 국가 규정과 최고 수준의 국제 안전 목표 및 참조 수준, 최신 지식 및 관련 모범 사례를 공유할 것이며, 기술 논의를 통해 ASN, STUK 및 SUJB가 유럽 수준에서 서로의 규제 관행에 대한 이해도를 증진하고, 국제 인허가의 과제 예측과 미래 시장 요구를 충족하는 NUWARD의 능력 향상을 도모함

[표] NUWARD 관련 협력 현황

국가	기관/기업	협력 내용
프랑스	원자력안전청(ASN)	NUWARD 설계의 인허가 사전 검토 협력
체코	국가원자력안전청(SUJB)	
핀란드	방사능·원자력안전청(STUK)	
	Fortum	핀란드·스웨덴의 신규 원전 프로젝트 개발
폴란드	Respect Energy	NUWARD 건설 부지 조사 수행 협력
체코	ČEZ	SMR 기술 준비, 에너지·기술 타당성 평가, 인허가 협력
이탈리아	Edison, Ansaldo Energia, Ansaldo Nucleare	이탈리아 SMR 원전 개발을 위한 협력 의향서 체결
슬로바키아	JAVYS	신규 원전 건설을 위한 기본협력계약(FCA) 체결
벨기에	Tractebel	NUWARD 엔지니어링 관련 기본협력계약 체결

출처: 언론 보도 내용 취합

2. Rolls-Royce SMR (영국)

Rolls-Royce SMR은 혁신적인 SMR 솔루션을 제공한다는 목표로 Rolls-Royce를 주축으로 설립된 회사임. 기존의 지식재산권 및 자원 전문지식을 원자력 솔루션 설계 및 제공 분야의 기반으로 활용하여 저렴하고 깨끗한 에너지를 제공할 원자력 발전소를 설계하고 있음. 개발 초기 단계에서 통합된 원자력 발전소 솔루션 개발을 지원하기 위해 업계 파트너 컨소시엄을 설립했으며, 발전소, 엔지니어링, 토목 설계, 연료, 첨단 제조, 프로젝트 납품 및 원자력 기술 전문가가 참여함

주요 사업

Rolls-Royce SMR은 글로벌 시장을 목표로, 저렴한 비용, 위험 저감, 저위험 솔루션 중심으로 시장을 공략하고 있음. 현장 작업 최소화를 위해 외부 공장에서 제조 및 테스트된 약 1,500개의 표준 이동형 모듈을 사용하여 건설됨. 각 SMR은 21,500m² 또는 5.3에이커 규모의 부지 '캐노피'에 적합함. 2029년까지 최초의 소형 모듈식 원자로(SMR)를 가동할 계획으로 원자로의 인허가 절차는 2024년 중반에 완료 예정임. 영국 정부는 Rolls-Royce의 SMR 개발에 2억 7,400만 달러(2억 1,000만 파운드)를 지원했으며, 영국 원자력 규제당국에 Rolls-Royce의 SMR 설계에 대한 승인 절차를 진행하도록 요청함. 동사는 2035년까지 최대 10기의 SMR을 완성하는 것을 목표로 함

[표] Rolls-Royce SMR 일반 정보

기업명	Rolls-Royce SMR Ltd	
국가	영국	
본사 소재지	영국 맨체스터	
설립연도	2015	
매출액	미공개	
개발 노형	Rolls-Royce SMR	
주요 사업	원자로 설계, 폐기물 관리	
주요 연혁	(2015) SMR 프로젝트 팀 구성	
	(2016) ROV Technologies 인수를 발표	
	(2017) 요르단과 중동 국가에서 Rolls-Royce SMR 건설 기술 타당성 조사 수행 양해각서 체결	
	(2020) 민간 원자력 계측 및 제어(I&C) 사업을 프랑스의 Framatome에 매각하는 계약을 체결	
	(2021) 영국 정부는 디자인 추가 개발을 위해 2억 1천만 파운드의 자금을 제공	
	(2022) 2026년 완료되는 규제 일반 설계 평가(GDA) 시작	
	(2023) 2024년 말까지 프로그램 자금 5억 파운드가 소진될 것으로 예상하여 정부에 지원 요청	

출처: Rolls-Royce SMR(rolls-royce-smr.com)

주요 개발 SMR 노형

Rolls-Royce SMR: p.16 참고

정부 지원 및 파이낸싱

영국 정부는 '영국 연구·혁신기금(UK Research and Innovation funding)'을 통해 Rolls-Royce SMR에 2억 1,000만 파운드의 자금을 지원함.

Rolls-Royce SMR은 영국 웨스트컴브리아(West Cumbria)에 SMR을 건설할 계획인 Solway Community Power Company의 우선 검토 기술로 선정됨. 에스토니아 원자력 기업 Fermi Energia는 에스토니아의 SMR 도입과 관련된 입찰을 통해 Rolls-Royce SMR을 최종 후보로 선정했으며, 2023년 최종 기술 결정이 이루어질 예정임. 이 밖에도 체코 ČEZ, 네덜란드 ULC-Energy, 튀르키예 EUAS International ICC, 요르단 원자력에너지위원회(Jordan Atomic Energy Commission) 등과 Rolls-Royce SMR의 잠재적 배치를 모색하기 위한 양해각서(MoU)를 체결함

각국 도입 계획 및 협력

2022년 4월 Rolls-Royce SMR의 470MW 소형 모듈식 원자로(SMR)에 대한 일반설계평가(GDA) 1단계를 시작하였으며, 2023년 4월 영국 독립 원자력 규제기관의 평가 첫 번째 단계를 성공적으로 완료한 후 2단계 일반설계평가(GDA)를 진행 중임. UKRI의 보조금 지원을 받는 Rolls-Royce SMR은 영국에서 가동할 SMR에 대한 규제 승인 확보에 있어 유리한 고지를 점령함

2023년 10월 Rolls-Royce SMR은 영국원자력청(GBN) SMR 기술 선정 프로세스의 최종 후보에 올랐음. 또한 Rolls-Royce SMR은 영국 원자력 규제기관이 진행 중인 일반설계평가(GDA)의 핵심 부분인 소형 모듈식 원자로(SMR)용 연료 설계를 개발하기 위해 Westinghouse Electric Company UK Ltd와 계약을 체결함

Rolls-Royce SMR은 Westinghouse와 SMR 연료 설계 개발 협약을 체결하는 한편, 영국 국립물리연구소(National Physical Laboratory)와 파트너십을 맺고 SMR의 안전한 원자로 운영 자동화를 연구하고 있음.⁶³⁾ 영국과 미국에서 공동으로 수행되는 Westinghouse와의 연료 설계 작업에는 관련 핵심 부품이 포함되며 기존 Westinghouse 가압경수로(PWR) 연료집합체 설계를 기반으로 할 예정임. 또한 캐나다 SNC-Lavalin은 Rolls-Royce SMR의 설계 및 납품 관련 작업을 지원하고 있으며, 영국 Sheffield Forgemasters는 370만 파운드 규모의 자재 납품 계약을 체결함

[표] Rolls-Royce SMR 관련 협력 현황

국가	기관/기업	협력 내용
영국	Solway Community Power Company	영국 웨스트컴브리아 SMR 프로젝트 우선 검토 기술 선정
	National Physical Laboratory	SMR의 안전한 원자로 운영 자동화 연구 협력
	Sheffield Forgemasters	370만 파운드 규모 자재 납품 계약
미국	Westinghouse	Rolls-Royce SMR 연료 설계 개발 협력
캐나다	SNC-Lavalin	Rolls-Royce SMR 설계 및 납품 지원
폴란드	Industria	폴란드 SMR 도입을 위한 협력 의향서(MoI) 체결
우크라이나	Energatom	SMR 발전소 도입을 통한 우크라이나의 전후 복구 지원
에스토니아	Fermi Energia	SMR 도입 관련 Rolls-Royce SMR 최종 후보 선정
네덜란드	ULC-Energy	SMR 기술 공급업체로 Rolls-Royce SMR 선정
체코	ČEZ	SMR 도입을 위한 협력 양해각서(MoU) 체결

출처: 언론 보도 내용 취합

63) World Nuclear News, Rolls-Royce partners for SMR fuel design and analytics, 2023.10.11.

3. GE Hitachi Nuclear Energy (미국/일본)

미국 General Electric(GE)와 일본 히타치는 2007년 각자의 원자력 사업 부문을 통합하여 합작회사 GE Hitachi Nuclear Energy(GEH)를 설립함. 미국 노스캐롤라이나주 윌밍턴(Wilmington)에 본사를 두고 있으며, 전 세계에 원자로, 연료, 원자력 서비스를 제공해 온 GE의 설계 전문성과 히타치의 첨단 모듈식 건설 경험을 결합하여 전 세계 고객에게 원자로 성능, 전기 출력, 안전성을 효과적으로 향상시키는 데 필요한 기술 리더십을 제공하는 것을 목표로 함

주요 사업

GE-Hitachi는 미국 윌밍턴과 새너제이(San Jose)에 교육 시설을 운영하고 있으며, GE가 주도하는 합작회사인 Global Nuclear Fuel(GNF)은 윌밍턴과 일본 구리하마에서 연료 제조 시설을 운영하고 있음. GNF는 스페인 핵연료 제조기업 ENUSA와의 합작 투자를 통해 스페인 후즈바도(Juzbado)의 시설에서 제조된 유럽 내 발전소용 연료를 판매함. 캐나다 온타리오주 마컴(Markham)에 본사를 둔 자회사 GEH SMR Technologies Canada社は 캐나다에서 BWRX-300 SMR의 건설을 지원하고 있음. 또한 GE-Hitachi는 사실상 미국 유일의 고준위 방사성 폐기물 저장소인 Morris Operation을 소유하고 있음

[표] GE-Hitachi 일반 정보

기업명	GE Hitachi Nuclear Energy (GEH)
국가	미국/일본
본사 소재지	미국 노스캐롤라이나주 윌밍턴
설립연도	2007
매출액	미공개
개발 노형	BWRX-300, PRISM, ESBWR, ABWR, NATRIUM(TerraPower와 공동 개발)
주요 사업	원자로 개발, 원전 유지보수, 원전 성능 및 전기 출력 조정, 연료 제품 및 서비스 공급
주요 연혁	(2007) GE Hitachi Nuclear Energy (GEH)社 설립
	(2016) BWX Technologies에 GE Hitachi Nuclear Energy Canada 매각
	(2018) Dominion Energy, BWRX-300 상용화에 자금 투자
	(2019) 캐나다 원자력안전위원회(CNSC)에 BWRX-300 공급업체 설계 검토 신청서 제출
	(2020) BWRX-300의 미국 인허가 절차 개시
	(2021) GEH SMR Technologies Canada 설립
	(2022) 加 서스캐처원주, 신규 원전 노형으로 BWRX-300 선정
	(2023) 加 Ontario Power Generation (OPG)·SNC-Lavalin·Aecon과 BWRX-300 건설 계약



출처: GE-Hitachi (nuclear.gepower.com)

주요 개발 SMR 노형

- ① BWRX-300: p.18 참고
- ② Natrium: GE-Hitachi와 TerraPower는 부하 추종, 에너지 저장 및 산업 열공정을 지원하는 가격경쟁력 있고 유연한 설계인 Natrium 원자로 및 에너지 시스템을 개발함. 345MWe 규모의 소듐고속로(SFR)이자, 통합 에너지 저장 및 유연한 전력 생산 기능을 갖춘 Natrium 기술은 경쟁력 있는 비용으로 무탄소 에너지를 제공함
- ③ PRISM: 고에너지 중성자(고속) 원자로로, 사용 후 핵연료와 잉여 플루토늄을 처리하는 혁신적인 솔루션을 제공함. 풀타임 금속 연료 소형 모듈식 소듐고속로(SFR)로서 전기 출력은 311MWe임. 액체 나트륨을 냉각재로 사용하며, 사용 후 핵연료에 포함된 우라늄과 초우라늄을 재활용함으로써 방사성폐기물의 장기적인 방사능 독성을 줄일 수 있음

정부 지원 및 파이낸싱

GE-Hitachi는 온타리오주 달링턴에 BWRX-300의 초도호기(First-of-a-Kind, FOAK)를 배치하기 위해 민간 및 공공 자금을 유치함. 여기에는 캐나다 연방정부로부터 약 10억 캐나다달러 규모의 공공 자금 지원과 미국 에너지부 ARPA-E(Advanced Research Projects Agency-Energy) 기금을 통한 추가 지원이 포함됨. 또한 GE-Hitachi는 BWRX-300 도입 계획과 관련하여 에스토니아 Fermi Energia, 체코의 ČEZ, 스웨덴의 Karnfall Next와 양해각서(MOU)를 체결함.⁶⁴⁾

각국 도입 계획 및 협력

GE-Hitachi는 2023년 1월, 캐나다의 Ontario Power Generation(OPG), SNC-Lavalin, Aecon社와 OPG의 달링턴(Darlington) 신규 원전 프로젝트 부지에 BWRX-300 SMR을 도입하는 계약을 체결함.⁶⁵⁾ 이는 북미 최초의 그리드 규모 SMR 상업 계약임. GE-Hitachi가 원자로 설계를 제공하는 이 다자간 계약에는 설계, 엔지니어링 인허가 지원, 건설, 테스트, 교육 및 시운전을 포함한 다양한 프로젝트 활동이 포함됨.

또한 2022년 8월, 미국 Tennessee Valley Authority(TVA)는 테네시주 클린치리버(Clinch River) 부지에 BWRX-300을 도입하기 위한 계획 및 예비 인허가를 시작함. 미국 원자력규제위원회(NRC)와 캐나다 원자력안전위원회(CNSC)는 두 프로젝트의 인허가를 위해 협력 중임. 2022년 6월 캐나다 서스캐처원주 유틸리티 SaskPower는 2030년대 중반 가동을 목표로 하는 신규 원전으로 BWRX-300을 선정했다고 발표함.

64) OECD-NEA, The NEA Small Modular Reactor Dashboard, 2023.

65) GE-Hitachi, GE Hitachi Signs Contract for the First North American Small Modular Reactor, 2023.01.27.

폴란드에서는 ORLEN Synthos Green Energy(OSGE)가 폴란드 원자력에너지청에 BWRX-300의 평가 신청서를 제출하여 예비 인허가 절차를 개시했으며, GE-Hitachi는 영국에서도 BWRX-300에 대한 인허가 절차를 시작함. 이 밖에도 GE-Hitachi는 BWRX-300 도입 계획과 관련하여 에스토니아 Fermi Energia, 체코의 ČEZ, 스웨덴의 Karnfall Next와 양해각서(MOU)를 체결함.⁶⁶⁾

연료 부문에서는 Cameco社와 우라늄 연료 공급을 위한 MOU를 체결하여 BWRX-300 연료 공급 방안을 마련함.

[표] BWRX-300 관련 협력 현황

국가	기관/기업	내용
캐나다	Ontario Power Generation (OPG)	신규 원전 프로젝트 DNNP-1의 설계 및 인허가 준비 협력
	SaskPower	서스캐처원주 신규 원전 설계로 BWRX-300 선정
	BWX Technologies	BWRX-300 RPV 엔지니어링 분석·설계 지원·제조·조달
	Cameco	우라늄 연료 공급에 관한 MOU
미국	Tennessee Valley Authority (TVA)	정보 및 모범 사례 공유, 설계 및 인허가 요건 조율
폴란드	ORLEN Synthos Green Energy (OSGE)	BWRX-300 도입 협력 의향서 체결
에스토니아	Fermi Energia	신규 원전 설계로 BWRX-300 선택
체코	ČEZ	BWRX-300 건설 경제적·기술적 타당성 검토 MOU
스웨덴	Karnfall Next	BWRX-300 도입 협력을 위한 MOU 체결

출처: 언론 보도 내용 취합

66) OECD-NEA, The NEA Small Modular Reactor Dashboard, 2023.

4. Westinghouse Electric (미국)

Westinghouse Electric Company는 1886년에 설립된 Westinghouse Electric Corporation의 원자력 사업부에서 미국의 원자력 발전 회사로 분리되었으며, 원자력 발전소의 핵연료, 서비스 및 유지 관리, 계측, 제어 및 설계를 포함하여 국제적으로 전력회사에 원자력 제품과 서비스를 제공함. 1957년 펜실베이니아주 쉬핑포트에 세계 최초의 상업용 가압경수로를 건설하였으며, 현재 동사의 기술이 사용된 430개의 원자로가 전 세계적으로 운영 중이며, 순 설치 용량은 370,543MWe임

주요 사업

AP1000 원자로는 3세대+ 가압경수로(PWR)로 피동안전계통을 적용하였으며, 다른 원자로 설계에 비해 안전성, 경제성, 효율성에서 이점을 제공함. 주요 구성요소로는 증기 발생기, 디지털 계측 및 제어, 연료, 가압기, 원자로 용기 등을 포함하고, 단순화를 주요 설계 목표로 하여 안전 밸브와 배관, 제어 케이블, 펌프 수를 줄였으며, 내진 건물 부피를 감소시킴. AP1000 원자로는 이미 중국에서 4기가 운영 중이며, 6기가 더 건설 중에 있음. 또한 AP1000 원자로 1기는 조지아주 Vogtle 발전소에서 가동 중이며 두 번째 원자로를 완공을 앞두고 있음. 2023년 소형 버전인 AP300과 eVinci Microreactor 제조시설 설립을 발표함

[표] Westinghouse Electric 일반 정보

기업명	Westinghouse Electric comp
국가	미국
본사 소재지	미국 펜실베이니아 피츠버그
설립연도	1886
매출액	83억 6200억 달러(2022년)
개발 노형	AP1000 PWR, AP300™, eVinci Microreactor, LFR
주요 사업	핵연료, 서비스 및 유지 관리, 계측, 제어 및 설계
주요 연혁	(2009) 日, 핵연료 제조업체인 NFI의 지분 52%를 1억 달러에 매입
	(2014) 佛, EDF에 수천 톤의 연료를 제공하는 장기 계약을 체결
	(2016) 한국수력원자력과 양자간 기술협력 양해각서 체결
	(2017) 사고 방지 핵연료 솔루션인 EnCore Fuel 출시
	(2018) Energoatom과 우크라이나 VVER 원자력 발전소에 핵연료 공급 2025년까지 연장
	(2021) 캐나다 회사인 Laveer Engineering을 인수했으며, Technatom의 지분 50% 인수
	(2022) BHI 에너지를 인수
	(2023) AP1000의 소형버전인 AP300 신형 원자로 발표와 eVinci Microreactor 제조시설 설립



출처: Westinghouse Electric (www.westinghousenuclear.com)

주요 개발 SMR 노형

- ① eVinci Microreactor: p.20. 참고
- ② AP300: AP300 SMR은 AP1000 가압 경수로 기술을 기반으로 인허가를 진행하고 운영함. AP1000 원자로 개발의 운영 경험을 활용하며 효율적인 건설 일정을 위한 소규모 모듈형 구조와 함께 최첨단 안전 기술 및 신뢰성을 제공함. 예컨대, AP1000 PWR 기술의 이점을 더 작은 전력 출력으로 활용하여 지역 사회 에너지 시스템을 강화하고, 보다 깨끗한 에너지 믹스, 에너지 보안, 그리드의 유연성 및 안정화를 위해 AP1000 원자로를 보완하여 제공하며 4년 주기로 연료를 재장전함
- ③ 납냉각고속로(LFR): 낮은 초기 자본 비용으로 가격경쟁력 있는 전력 생산을 위해 개발된 중형 피동안전 모듈형 원자로임. 혁신적인 설계를 통해 플랜트를 단순화하여 건설 일정을 단축하여 경제성을 제고하였으며, 끓는점이 1700°C를 이상의 납을 냉각수로 사용하여 냉각수에 대한 우려를 제거하여 가압 시스템에 비해 높은 안전성을 달성함. Westinghouse의 EnCore Fuel 프로그램에서 개발 중인 일부 제품을 기반으로 고온 성능을 갖춘 연료 및 피복재(cladding)를 활용하여 운영함

정부 지원 및 파이낸싱

2015년 Westinghouse는 영국 국립원자력연구소(NNL)가 수행한 SMR 도입 타당성 조사 2단계에서 SMR 도입 협력을 제안함.⁶⁷⁾ Westinghouse는 자사가 SMR 개념설계를 제공한 다음, 영국 정부 및 업계가 협력하여 이를 완성, 허가, 건설하는 ‘공유 설계 및 개발 모델’을 제안했다고 밝힘. 2023년 초 원자력 발전 프로그램을 위해 설립된 영국원자력청(Great British Nuclear, GBN)은 어떤 SMR 설계를 도입할지 선정하는 과정에 착수하고, 2029년 최종투자결정(FID)을 목표로 Westinghouse를 포함한 6개 기업⁶⁸⁾을 후보로 선정함.⁶⁹⁾ 한편 2023년 5월 Westinghouse는 SMR 설계 ‘AP300’을 발표하고 핀란드, 슬로바키아, 우크라이나 등과 관련 협약을 활발히 진행하고 있음

각국 도입 계획 및 협력

2016년 3월, Westinghouse는 영국 원자력첨단제조연구센터(Nuclear Advanced Manufacturing Research Centre, NAMRC)와 영국에서 SMR용 원자로 압력용기(RPV) 생산 검토 연구를 진행했다고 발표함. NAMRC는 민간 원자력 제조 공급망 전반의 학계 및 산업계 파트너가 협력하는 단체로 영국 제조업체의 수주를 지원하는 것을 목표로 함. 2023년 10월 영국 SMR 기업 Rolls-Royce SMR은 Westinghouse와 SMR의 연료 설계 개발을 위한 협약을 체결함⁷⁰⁾

67) World Nuclear News, Westinghouse proposes UK deployment of small modular reactor, 2015.10.21.

68) EDF, GE-Hitachi Nuclear Energy International, Holtec Britain Limited, NuScale Power, Rolls Royce SMR, Westinghouse Electric Company UK Limited.

69) World Nuclear News, UK SMR selection contest: Six companies into next stage, 2023.10.02.

70) World Nuclear News, Rolls-Royce partners for SMR fuel design and analytics, 2023.10.11.

2022년 12월 폴란드 AP1000 원자로 건설을 위한 첫 계약 체결 이후, 2023년 2월 폴란드 국영 전력회사 Polskie Elektrownie Jądrowe(PEJ)와 새로운 원자력 에너지 프로그램을 위한 계약을 체결함. 동사는 이미 폴란드 내 35개 회사와 역내 75개 회사와 계약을 체결하였으며, 폴란드에 주요 엔지니어링 센터를 설립하여, 폴란드의 원자력 인재, 인력 및 공급 기반의 교육 및 개발을 지원하기 위해 추가 산업 투자 예정임

2023년 5월 AP300™ 소형 모듈식 원자로(SMR)에 대해 미국 원자력규제위원회(NRC)에 사전 인허가 신청서를 제출했으며, 9월, 우크라이나 국영 원자력 발전소인 Energoatom은 AP300 소형 모듈식 원자로(SMR)의 개발 및 배치를 위한 양해각서(MOU)에 서명함. 이번 협약을 통해 계약, 인허가, 현지 공급망 등의 분야에서 협력하기 위한 공동 실무 그룹을 구성함

2023년 4월 캐나다 Tecnatom 및 Accelerant Solutions와 미국과 캐나다의 전력회사를 위한 원자력 훈련 프로그램인 NEXA™(Nuclear Excellence Academy)을 시작하기 위한 팀 구성 계약에 서명했다고 발표함

[표] Westinghouse SMR 관련 협력 현황

국가	기관/기업	협력 내용
영국	원자력첨단제조연구센터(NAMRC)	영국 내 SMR용 RPV 생산 검토 연구 협력
	Rolls-Royce SMR	SMR용 연료 설계 개발 협력
핀란드	Fortum	SMR을 포함한 핀란드·스웨덴 신규 원전 타당성 조사
슬로바키아	JAVYS	SMR을 포함한 잠재적 원전 도입에 관한 MoU 체결
우크라이나	Energoatom	우크라이나 SMR 개발 및 건설에 관한 MoU 체결

출처: 언론 보도 내용 취합

5. NuScale Power (미국)

NuScale Power는 소형 모듈식 원자로(SMR)를 설계하고 판매하는 미국 상장회사로 본사는 오리건주 포틀랜드에 위치함. NuScale의 50MWe SMR 설계는 2023년 1월 미국 원자력규제위원회(NRC)의 인증을 받았으며, 2029년과 2030년에 아이다호국립연구소 내에 원자로를 건설하기로 합의함. 캐나다, 유럽, 중동, 아시아 등 전 세계 12개 정부 및 조직과 협력하고 있음

주요 사업

NuScale Power는 VOYGR 플랜트와 시뮬레이터 센터인 E2를 운영함. 또한 VOYGR 플랜트 고객을 위해 인허가, 건설 및 시운전, 플랜트 운영 및 유지보수(O&M)를 포괄하는 11가지 서비스를 제공함. 서비스는 사전서비스(Pre-Commercial Operation Date), 사후서비스(Post-Commercial Operation Date)로 구분하여 제공하고 있음. 사전서비스의 경우 시작 및 테스트, 검사·시험·분석·승인기준 (Inspections, Tests, Analyses & Acceptance Criteria, ITAAC) 관리, 통합인허가신청(Combined License Application, COLA) 관리가 있으며, 고객들은 상업화 이후 설계 엔지니어링 관리와 O&M 엔지니어링 프로그램 관리, 자격 교육 및 시뮬레이터 지원, 조달 및 예비 부품 관리, 재장전 및 시스템 검증 서비스 이용이 가능함

[표] NuScale Power 일반 정보

기업명	NuScale Power Corporation
국가	미국
본사 소재지	미국 오리건주 포틀랜드
설립연도	2007
매출액	1,180만 달러(2022)
개발 노형	NuScale Power Module(NPM)
주요 사업	주요 설계, 라이선스 및 상업 개발 과제
주요 연혁	(2007) NuScale Power 社 설립
	(2011) 2011년까지 3,500만 달러 투자 유치, NRC에 SMR 개발 계획 제출
	(2013) 미국 에너지부의 원자로 개발, 인허가 및 상용화 비용 지원 프로젝트 대상 선정
	(2019) 두산중공업과 NPM 및 기타 장비 공급을 위한 '사업 협력 계약'을 체결
	(2020) 캐나다 원자력 규제기관에 공급업체 설계 검토 신청 제출
	(2021) 아이다호 국립 연구소에 SMR 배치 프로젝트 개발을 촉진하기 위한 합의 발표
	(2022) 일본은행은 Fluor의 지분 매입을 통해 NUSCALE에 1억 1천만 달러의 전략적 투자
	(2023) 두산에너지빌리티에 최초의 상부 원자로 압력 용기 장납 재료 생산 주문



출처: NuScale Power (www.nuscalepower.com)

주요 개발 SMR 노형

- ① NuScale Power Module(NPM): VOYGR 원전에 장착되는 혁신적인 경수용 SMR로 높이 76ft, 직경 15ft의 크기이며 77MWe의 전력 생산이 가능함
- ② VOYGR: p.22. 참고

정부 지원 및 파이낸싱

2013년 미국 에너지부(DOE)는 NuScale Power의 설계 개발 및 NRC 설계인증 획득을 위해 최대 2억 2,600만 달러의 자금을 지원한다고 발표함. 이어 2020년 DOE는 아이다호 국립연구소 부지에 NuScale Power 원자력 발전소 개발 및 건설을 위해 Carbon Free Power Project(CFPP)에 다년간 13억 5,500만 달러의 자금 지원을 승인함

또한 2021년 NuScale Power는 루마니아 도이체슈티(Doicești)에 VOYGR-6 원전을 건설하는데 필요한 인허가 활동을 수행하기 위해 루마니아 국영 원자력 기업 Nuclearelectrica社와 양해각서(MoU)를 체결하고, 해당 프로젝트의 부지 선정 활동과 관련하여 RoPower Nuclear와도 계약을 체결함. 2021년 미국 무역개발청(USTDA)은 잠재적 부지를 파악하고 평가하기 위해 루마니아 Nuclearelectrica에 120만 달러의 보조금을 지급한다고 발표함

2023년 5월 GS에너지는 울진 원자력 수소 국가산업단지 예정지에 열과 전력을 공급하기 위해 NuScale Power의 SMR 기술을 활용하는 방안을 검토하기 위한 MoU를 체결하고, 이에 따라 VOYGR-6 SMR 발전소 건설을 위한 타당성 조사에 협력하기로 함⁷¹⁾

각국 도입 계획 및 협력

NuScale Power는 기술을 글로벌 에너지 시장에 선보이기 위해 캐나다, 유럽, 중동, 아시아 등 전 세계 정부 및 조직과 협력하고 있음. 미국의 경우, 유타주 공공전력시스템(Utah Associated Municipal Power Systems, UAMPS)이 주도하는 CFPP(Carbon Free Power Project)가 미국 최초의 VOYGR-6 원전으로 2029년 상업운전 예정이었으나 경제적 타당성 확보 실패로 2023년 11월 취소가 결정됨

71) World Nuclear News, Korea considers deployment of NuScale SMR for hydrogen production, 2023.05.10.

또한, 캐나다의 Prodigy Clean Energy Ltd. 및 Kinectrics Incorporated와 협력하여 Prodigy Marine Power Station™(MPS)의 인허가 및 배치를 위한 규제 프레임워크를 개발했으며, MPS는 1-12기의 NuScale Power Modules™을 해양 기반 원자력 발전소 시스템에 통합 가능함

유럽의 경우, 루마니아의 RoPower, 폴란드 KGHM Polska Miedz, Getka와 UNIMOT, 불가리아 Kozloduy, 우크라이나 Engergoatom 등과 협력 중임. 루마니아는 Nuclearelectrica 및 Nova Power & Gas SA가 소유한 RoPower와 협력하여 10년 안에 루마니아 도이체스티에 VOYGR-6 SMR 발전소를 배치할 계획이며, 462MWe의 무탄소 전력을 생산하고 193개의 영구 발전소 일자리, 1,500개의 건설 일자리, 2,300개의 제조 일자리를 창출할 것으로 기대함. 2023년 6월 NuScale Power와 Nuclearelectrica는 삼성물산, 루마니아 E-INFRA, Nova Power & Gas, 미국 Fluor Enterprises 등과 루마니아를 비롯한 중동부 유럽에서 VOYGR-6 원전 건설에 협력하기 위한 MoU를 체결함.⁷²⁾ 폴란드의 경우 석탄 발전소 용도 변경 솔루션과 신규 원자력 발전소 건설을 위한 SMR 기술을 검토하는 Getka Group과 UNIMOT SA를 지원하고 있으며, 기술적, 경제적, 법적, 규제적, 재정적, 조직적 요인에 대한 분석이 포함됨

아시아의 경우 인도네시아, 한국, 카자흐스탄 등과 협력하고 있으며, 한국의 경우 한국 경상북도 울진에 SMR 공장을 건설하기 위해 GS에너지와 협력 중이며, VOYGR-6 SMR 발전소 건설은 빠르면 2028년에 시작되어 2030년까지 완료 예정임. 두산에너지빌리티는 NuScale Power와 기기 공급을 위한 업무제휴 협약을 체결하고 2022년 첫 원자로 압력용기(RPV) 생산을 수주한 데 이어 2023년 CFPP의 VOYGR-6 발전소에 배치될 첫 번째 모듈의 단조 생산에 착수함

[표] VOYGR 관련 협력 현황

국가	기관/기업	협력 내용
미국	미국 에너지부	NuScale Power에 2억 2,600만 달러 지원
		Carbon Free Power Project에 13억 5,500만 달러 지원
	무역개발청(USTDA)	VOYGR 원전 도입 관련 Nuclearelectrica에 보조금 지급
	Fluor Enterprises	미국 CFPP 설계·조달·시공 합작
루마니아	Nuclearelectrica	VOYGR-6 원전을 건설에 필요한 인허가 활동 수행
	RoPower Nuclear	VOYGR-6 원전 부지 선정 활동 협력
한국	삼성물산	루마니아 VOYGR-6 원전 건설 협력 MoU (NuScale에 7,000만 달러 투자)
	GS에너지	울진 VOYGR-6 원전 건설 타당성 조사 협력 (NuScale에 4,000만 달러 투자)
	두산에너지빌리티	CFPP VOYGR-6용 단조 생산 (국내 투자사들과 총 1억 400만 달러 지분투자)

출처: 언론 보도 내용 취합

72) World Nuclear News, Nuclearelectrica and partners sign MoU for NuScale plants, 2023.06.14.

6. TerraPower (미국)

TerraPower는 워싱턴주 벨뷰에 본사를 둔 미국의 원자로 설계 및 개발 엔지니어링 회사로, 진행파 원자로(TWR)라고 불리는 일종의 고속원자로를 개발하고 있음. 2015년 9월, TerraPower는 2018년부터 2025년까지 중국 푸젠성 Xiapu에 프로토타입 600MWe 원자로 유닛을 건설하기로 중국 국가원자력공사(China National Nuclear Corporation)와 계약을 체결함. 약 1,150MWe 규모의 상용원전은 2020년대 후반에 완료 예정이었으나, 2019년 1월 트럼프 행정부의 기술 이전 제한으로 인해 프로젝트가 중단되었다고 발표함

주요 사업

TerraPower의 주요 기술로는 Natrium™ 원자로 및 통합 에너지저장장치, 진행파 원자로(TWR) 설계, 용융염화고속로(MCFR, Moten Chloride Fast Reactor) 설계 등이 있음. TWR은 비농축 우라늄 연료로 수세기 동안 운영 가능하며, 사용 후 연료를 재처리하는 데 따른 안전 및 확산 문제 없이 일회성 핵 주기를 기반으로 우라늄을 30배 더 효율적으로 사용하고 폐기물은 5배 감소함. MCFR은 기존 원자로보다 더 높은 온도에서 작동하므로 배출가스 없이 더 효율적으로 전기를 생산하며, 유틸리티 및 산업이 탈탄소화 목표를 달성할 수 있도록 돕는 고효율, 저비용, 무탄소 에너지 솔루션임

[표] TerraPower 일반 정보

기업명	TerraPower
국가	미국
본사 소재지	미국 워싱턴주 벨뷰
설립연도	2006
매출액	8억 3,000만 달러 (2022)
개발 노형	NATRIUM(GE-Hitach와 공동 개발),TWR, MCFR
주요 사업	원자로 설계, 통합 에너지 저장장치 설계, 용융 염화물 고속 반응기 설계
주요 연혁	(2006) TerraPower社 설립
	(2014) 美 에너지부(DoE)의 첨단원자로 기술 지원 파트너십에 선정
	(2015) 中 국가원자력공사(CNNC)와 진행파 원자로(TWR) 개발을 위한 양해각서(MOU)를 체결
	(2020) Natrium 컨셉을 출시 및 발표하였으며, 10년 후까지 상용화 목표 설정
	(2021) 와이오밍주 케머러(Kemmerer)를 실증 프로젝트 후보 부지로 선정
	(2022) 韓 SK그룹, 2억 5,000만 달러 투자 및 8억 3,000만 달러 민간자금 조달
	(2023) Natrium 데모 프로젝트 공급업체 선정 및 韓美 SMR 협력 협약 체결



출처: TerraPower (terrapower.com)

주요 개발 SMR 노형

NATRIUM: p.24. 참고

정부 지원 및 파이낸싱

TerraPower는 2020년 10월 미국 에너지부(DOE)의 첨단 원자로 실증 프로그램(Advanced Reactor Demonstration Program, ARDP) 지원 대상 기업으로 선정되어 8,000만 달러의 초기 자금을 지원받음. 현재 ARDP는 Natrium 실증로 프로젝트를 위해 7년간 12억 3,000만 달러를 지원하기로 승인함. 미국 전력회사 PacificCorp는 와이오밍주 케머러에 위치한 노후 석탄화력 발전소를 원자력 발전소로 대체하는 프로젝트에 Natrium 기술을 선택함.

각국 도입 계획 및 협력

Natrium은 다양한 전략적 파트너십을 통해 공급망을 확장하고 있음. Natrium 실증로 프로젝트에는 Bechtel Power, GE Hitachi Nuclear Energy, Energy Northwest, Duke Energy, Ontario Federal Services 등 16개의 산학연 기관이 참여함.⁷³⁾ 또한 TerraPower는 2023년 8월 Natrium 실증로 프로젝트를 지원할 공급업체로 Western Service Corporation(WSC), James Fisher Technologies, BWXT Canada, Curtiss-Wright Flow Control Service 등 4개사를 선정함

SK(주)와 SK이노베이션은 2022년 8월 TerraPower에 2억 5,000만 달러를 공동 투자함. 이어 2023년 4월 한국수력원자력, SK(주), SK이노베이션은 TerraPower와 ‘차세대 원전 기술 개발 및 사업화를 위한 상호협력 계약’을 체결함. 계약에는 Natrium의 실증 및 상용 원자로 개발을 위한 협력 내용이 담겼음. 또한 TerraPower는 2022년 1월 일본원자력기구(JAEA), 미쓰비시중공업(MHI) 과 소듐냉각고속로(SFR) 기술 개발 협력을 위한 양해각서(MOU)를 체결했으며, 2023년 11월 이를 확장한 MOU에 서명함. 확장된 MOU를 통해 TerraPower와 일본은 공통의 원자로 설계 개념에 대해 협력할 기회를 모색할 계획임

73) TerraPower, DEMONSTRATING THE NATRIUM™ REACTOR AND INTEGRATED ENERGY SYSTEM, 2023.

[표] Natrium 관련 협력 현황

국가	기관/기업	협력 내용
미국	PacificCorp	Natrium 실증로 프로젝트 개발 협력
	Western Service Corporation(WSC)	Natrium 엔지니어링 시뮬레이터에 소프트웨어 플랫폼과 엔지니어링 서비스 제공
	James Fisher Technologies	TerraPower의 Everett 연구소 사출주조로 설계 및 건설
	Curtiss-Wright Flow Control Service	원자로보호계통(RPS) 개발
캐나다	BWXT Canada	Natrium 실증로 중간열교환기 설계
한국	SK(주), SK이노베이션	TerraPower에 2억 5,000만 달러 공동 투자
	한국수력원자력	SK와 함께 차세대 원전 기술 개발 협력 계약 체결
일본	일본원자력기구(JAEA), 미쓰비시중공업	SFR 기술 개발 협력 MOU 체결

출처: 언론 보도 내용 취합

7. Ultra Safe Nuclear (미국)

Ultra Safe Nuclear Corporation(USNC)는 안전하고 상업적으로 경쟁력이 있으며 깨끗하고 신뢰할 수 있는 원자력 에너지를 전 세계 전력 및 산업 시장에 제공하기 위해 노력하고 있음. 연료, 재료 및 설계의 혁신을 추진하기 위해 고유한 안전 원칙을 기반으로 첨단 방사성 동위원소 발전, 원자력 열 추진 시스템 및 첨단 재료에 대해 NASA 및 국방부와 협력하고 있음. 동 기업은 TRISO 및 FCM 연료를 생산하는 유일한 민간 기업임

주요 사업

주요 이니셔티브에는 마이크로 모듈형 원자로(MMR®), 완전 세라믹 마이크로 캡슐화(FCM®) 핵연료, 우주 탐사를 위한 핵열추진엔진(NTP), 핵 충전 가능 세라믹 EmberCore 등 제품 및 서비스를 제공함. 2022년 4월 미국 초고온 부품 시험시설로 USNC 첨단 기술을 선정함. 현재 온타리오전력발전과 함께 캐나다 원자력 연구소와 일리노이 대학교(University of Illinois, Urbana Champaign)에서 MMR 에너지 시스템을 시연 중에 있음. 또한 미국, 캐나다, 유럽에서 새로운 배치 프로젝트가 진행 중임

[표] USNC 일반 정보

기업명	USNC Corporation
국가	미국
본사 소재지	미국 시애틀
설립연도	2011
매출액	미공개
개발 노형	MMJR, FCM, NTP, EmberCore
주요 사업	연료 공급, 재료 및 설계 개발, 열 추진 시스템 및 첨단 재료 개발
주요 연혁	(2011) USNC 설립 및 FCM Fuel, MMR Reactor 특허 취득
	(2016) 원자로 및 발전소 엔지니어 팀과 협력하여 마이크로 모듈형 원자로 개념화
	(2017) 우주 중점 부서의 보조금과 수상
	(2018) 전력회사인 Ontario Power Generation과 캐나다 합작 파트너십을 체결
	(2019) 캐나다 원자력 안전위원회와 MMR 1단계 공급자설계검토 완료
	(2020) Ontario Power Generation과 Chalk River Laboratories가 제안한 MMR 시연
	(2021) NASA 프로젝트인 핵열추진(NTP) 엔진 개발을 위해 아이다호 국립연구소와 협업
	(2022) 美 국방부의 핵추진우주선 프로토타입 개발에 선정 및 현대엔지니어링과 계약 체결
	(2023) 英 에너지안보탄소중립부와 고온가스냉각원자로 기술 개발 보조금 2,900만 달러 지원 확정

출처: USNC (usnc.com)



주요 개발 SMR 노형

Micro Modular Reactor(MMR): p.26. 참고

정부 지원 및 파이낸싱

USNC와 Ontario Power Generation(OPG)의 합작회사인 Global First Power(GFP)는 캐나다 초크리버연구소(Chalk River Laboratories)와 프로젝트 호스팅 계약(Project Hosting Agreement)을 체결함. GFP와 USNC는 또한 캐나다 온타리오주 맥마스터 대학교(McMaster University)와 양해각서(MoU)를 체결하여 맥마스터 캠퍼스에 USNC MMR을 건설하는 타당성을 검토하고 있음

미국에서는 일리노이대 어바나-샴페인 캠퍼스에 MMR 원자로를 건설하기 위한 건설 허가 신청서 제출 의향서를 NRC에 제출함

또한 미국 알래스카에 MMR을 건설하기 위한 타당성 조사를 위해 코퍼밸리전기협회(Copper Valley Electric Association)와 협력하고 있음. 이 밖에도 MMR 기술은 영국 정부의 고급 모듈형 원자로 연구, 개발 및 실증 프로그램(Advanced Modular Reactor Research, Development and Demonstration programme)을 통해 지원금을 받음

각국 도입 계획 및 협력

USNC에는 코어(Core), 파워(Power), 기술(Tech)의 3개의 부문이 있음. Core 부문은 연료 및 소재를 개발하고, Power 부문은 에너지 시스템을 개발하며, Tech 부문은 우주 응용 분야를 대상으로 첨단 기술을 개발하고 있으며 각각 EmberCore, MMR, 핵열추진(NTP) 엔진 등이 있음

이를 바탕으로, 2023년 7월 USNC와 현대엔지니어링은 MMR(Micro-Modular Reactor) 기술을 포함한 폴란드 원자력 발전 협력에 관한 예비 협약을 체결했으며, 협정 당사국들은 화학산업 분야에서 USNC의 MMR 기술 구현, 모듈식 원자로 기반의 에너지 시스템 구축, 수소 생산을 위한 배출가스 제로 원자력 에너지 사용 등에서 긴밀한 협력을 전제로 함

또한, 2023년 10월 NASA로부터 500만 달러 규모의 핵열추진(NTP) 시스템 개발 및 발전 계약을 수주했으며, 내부 연구 개발 노력을 통해 자사가 개발한 고급 독점 연료를 제조 및 테스트하게 됨. 이와 동시에 상용 파트너인 BLUE ORIGIN과 협력하여 단기 토목 및 달 탐사 임무에 최적화된 NTP 엔진의 설계를 발전시킬 예정임

한편 현대엔지니어링은 USNC에 3,000만 달러 규모의 지분투자를 통해 MMR 기술과 관련된 설계·조달·시공(EPC) 사업에 대한 독점권을 갖기로 합의함. 한편 USNC는 캐나다에서 MMR 기술의 배포를 지원하기 위한 자문위원회를 구성했으며, 여기에는 CNSC, 캐나다은행, 캐나다 원자력공사(AECL), CanArctic Inuit Networks 등 다양한 전문성을 갖춘 파트너들이 참여함

[표] MMR 관련 협력 현황

국가	기관/기업	협력 내용
미국	University of Illinois	NRC 규제 준수 준비 과정 협력
	Copper Valley Electric Association	알래스카 MMR 건설 타당성 조사
캐나다	Ontario Power Generation (OPG)	합작회사 Global First Power를 통해 인허가 협력
	Chalk River Laboratories	MMR 데모 발전소 프로젝트 호스팅 계약 체결
	McMaster University	캠퍼스 내 MMR 건설 타당성 검토
	CNSC, 캐나다은행, AECL 등	캐나다 내 MMR 배포를 위한 자문위원회 구성
한국	현대엔지니어링	USNC에 투자, MMR 관련 EPC 사업 독점권

출처: 언론 보도 내용 취합

8. Holtec International (미국)

Holtec International은 1986년 뉴저지주에서 설립되어 열교환장치 흐름 유발 진동 및 부식과 같은 발전소 운영 문제에 대한 솔루션을 개발하는 데에 중점을 둠. 이후, 에너지 산업의 원자력 기기 및 시스템을 완전 통합 공급하는 기업으로 발전하여 설계, 분석, 인허가(인증), 조달, 테스트, 제조, 배송, 설치, 현장 서비스 및 시운전을 포함한 회사 활동의 전체 영역을 포괄할 수 있는 자체 역량을 보유함. SMR-160 소형 모듈식 원자로는 뉴저지주 캠든에 있는 Holtec의 Krishna P. Singh 기술 캠퍼스에서 설계 및 제조되었으며, 델라웨어 강변 시설에 최첨단 제조 공장과 엔지니어링 사무실이 자리하고 있음

주요 사업

핵연료 및 폐기물 관리, 원자력 발전소 해체, 열전달 장비 및 서비스를 제공함. 핵연료 및 폐기물 관리 부분의 경우 건식저장과 습식저장 시설로 구분됨. 건식저장 및 운송 시설의 경우 HI-STROM, HI-STAR, 다목적 캐스터(Multi-Purpose Canisters), HI-TRAC, HI-SAFE 등이 있고, 습식연료저장시설의 경우 고밀도연료저장시설(Hight Density Spent Fuel Storage Systems), 차폐식이송캐스크(Shielded Transfer Cask), DREAM Inserts for Enhanced Pool Reactivity Control 등이 있음

[표] Holtec International 일반 정보

기업명	Holtec International	
국가	미국	
본사 소재지	미국 뉴저지주 마운트 로렐	
설립연도	1986년	
매출액	2억 4,000만 달러(2022)	
개발 노형	SMR-160	
주요 사업	핵연료 및 폐기물 관리, 원자력 발전소 해체, 열전달 장비 및 서비스, 부지 서비스, 토목건축	
주요 연혁	(1986) Holtec International社 설립	
	(1979) 재처리 금지조치로 Detuned Honeycomb High Density Fuel Rack 기술 도입	
	(1992) 건식 저장 및 운송 캐스크 제품 라인을 출시	
	(2005) 캐스크 보관 및 운반에 사용되는 연료 바스켓인 나노기술 기반 Metamic-HT 출시	
	(2011) 지하 소형 모듈식 원자로 설계 발표	
	(2020) 로봇 용접기 도입 및 GE-Hitachi와 사용 후 연료 관리를 위한 양해각서 체결	
	(2021) SMR-160 플랜트의 전 세계 터키 공급을 위해 현대건설과 계약을 체결	
	(2022) 현대건설과 체코 Holtec SMR-160 건설 계획 수립, 미국 원전해체 시장 공동 진출 합의	

출처: HOLTEC INTERNATIONAL (holtecinternational.com)

주요 개발 SMR 노형

SMR-160: p.28. 참고

정부 지원 및 파이낸싱

Holtec International은 미국 에너지부(DOE)의 첨단 원자로 실증 프로그램(Advanced Reactor Demonstration Program, ARDP)을 통해 1억 1,600만 달러의 지원을 확보하여 SMR-160의 초기 단계 설계, 엔지니어링, 인허가 절차를 진행함

또한 영국 정부는 2050년까지 원자력 에너지 용량을 24GW로 확장할 계획으로, SMR이 이 전략의 핵심 부분을 차지하고 있음. 2023년 초 영국원자력청(Great British Nuclear, GBN)은 어떤 SMR 설계를 도입할지 선정하는 과정에 착수하고, 2029년 최종투자결정(FID)을 목표로 Holtec社를 포함한 6개 기업을 후보로 선정함.⁷⁴⁾ 이 밖에도 우크라이나 국영 원자력 사업자 Energoatom은 2018년 Holtec과 제조 허브 건설을 위한 양해각서(MoU) 체결에 이어, 2023년 4월에는 최대 20기의 SMR-160 건설을 위한 MoU를 체결함.⁷⁵⁾ 첫 번째 발전소는 2029년 3월까지 전력 공급을 시작할 계획임

각국 도입 계획 및 협력

2023년 Holtec International의 사업부인 Holtec Britain와 Sheffield Forgemasters는 SMR-160 SMR용 부품 개발에 관해 미국과 협력하기 위한 양해각서(MOU)를 체결했으며, 2050년까지 영국에 5GW 규모의 SMR-160을 배치하여 900만 가구에 안정적이고 저렴한 전력을 공급할 계획임⁷⁶⁾. 2023년 4월 우크라이나 국가 원자력 운영업체인 Energoatom이 체결한 협력 계약에 따라 최대 20기의 Holtec SMR-160 발전소가 우크라이나에 건설될 예정이며, 5월 한국무역보험공사와 한국수출입은행 등 국가 금융기관과 현대건설이 SMR-160 프로젝트에 금융 지원을 제공하기로 협약을 체결함⁷⁷⁾

74) World Nuclear News, UK SMR selection contest: Six companies into next stage, 2023.10.02.

75) World Nuclear News, Mass deployment of Holtec SMRs in Ukraine is part of accord's aims, 2023.04.24.

76) WNN, Holtec, Sheffield Forgemasters team up on SMR forgings, 2023.02.13

77) WNN, Team Holtec signs agreements with Korean financial firms, 2023.05.03.

또한, 2023년 5월 동월, 폐쇄된 미시간주의 Palisades 발전소의 전력 운영에 대한 재승인을 위해 원자력규제위원회에 서류를 제출하였으며, 승인이 될 경우 미국에서 처음으로 성공적으로 재가동된 원자력 발전소가 될 것으로 예상함. 9월 체결된 Holtec Palisades Energy와 비영리 Wolverine Power Cooperative가 체결한 장기 전력 구매 계약은 동 발전소를 재가동 하는 데 중요한 역할을 할 것으로 전망함⁷⁸⁾ Holtec은 미국 전력회사 Entergy와 합의각서(MoA)를 체결하고 Entergy 부지에 SMR-160을 건설하는 방안에 대한 타당성 평가를 진행하기로 함

또한 Holtec은 체코 원자력 운영사 ČEZ와 체코 테멜린(Temelin)에 위치한 ČEZ 소유 원자력 발전소 부지에 하나 이상의 SMR-160을 배치하는 타당성을 평가하기 위한 합의각서(MoA)를 체결함. 현대건설은 Holtec과 2021년 11월 협력 계약을 체결하고 SMR-160의 설계·구매·시공에 대한 사업 독점 권한을 확보했으며 국내 건설사 최초로 SMR-160의 상업화를 위한 표준모델 상세설계에 직접 참여 중임

[표] SMR-160 관련 협력 현황

국가	기관/기업	내용
미국	Entergy	Entergy 부지 SMR-160 건설 타당성 평가
	미국 에너지부	ARDP를 통해 1억 1,600만 달러 지원
	아이다호국립연구소(INL)	플랜트 시뮬레이터 개발
	Global Nuclear Fuel	SMR-160용 핵연료 및 제어봉 구동 메커니즘 개발 협력
한국	현대건설	설계·구매·시공 사업 독점권 확보, 상세설계 참여
	한국무역보험공사·한국수출입은행	SMR-160 채택을 촉진하기 위한 금융 지원 협약
영국	Great British Nuclear	도입 예정 SMR 설계 선정 후보에 SMR-160 포함
우크라이나	Energatom	최대 20기의 SMR-160 도입 협력
체코	ČEZ	ČEZ 소유 원전 부지 SMR-160 배치 타당성 평가
일본	미쓰비시전기	SMR-160의 디지털 계측 및 제어 시스템 개발 계약

출처: 언론 보도 내용 취합

78) WNN, Palisades restart takes 'giant step' with Holtec-Wolverine deal, 2023.09.13.

9. Seaborg Technologies (덴마크)

Seaborg Tehcnologies는 에너지 빈곤을 종식시키려는 물리학자 그룹에 의해 2014년 코펜하겐에서 설립되었으며, 소형 용융염원자로(CMSR)라고 불리는 안전한 차세대 원자로를 개발과 상용화를 목표로 함. 초기 연구개발의 주요 분야는 원자로의 작동 수명 동안 용융염을 함유하는 방법을 찾기 위한 재료 부식 제어였으며, MSR 분야에 기존 흑연의 사용에서 수산화나트륨(NaOH) 사용으로 전환함. 부유식 Power Barge를 통해 깨끗하고 비용 경쟁력 있는 전력을 공급하여 에너지 시장이 성장할 수 있도록 국가를 지원하고자 함

주요 사업

Seaborg는 2020년부터 CMSR의 개념설계 작업을 진행해 왔으며, 이는 우라늄 기반 연료를 1차 냉각재로도 사용하는 열스펙트럼 원자로로 액체 감속재인 용융 수산화나트륨(NaOH)을 사용함. 첨단 재료 및 부식 제어 방법과 함께 용융된 수산화나트륨을 사용하면 단일 CMSR의 수명이 12년까지 유지됨. Seaborg의 장기 목표는 사용된 연료염을 재처리 및 재활용하여 폐기물 발자국을 최소화하고 폐기물의 수명을 약 300년으로 제한하는 것으로, 모든 폐기물은 기존 원자력 해체 프레임워크 내에서 처리되며, 핵폐기물은 불소염에 함유되어 있어 안정적임. Power Barge를 구성하는 모듈은 원자로 유닛과 차폐물만 방사성으로 구성되며, 발전소의 나머지 부분은 다른 비원자력 발전소와 마찬가지로 해체 가능함

[표] Seaborg Technologies 일반 정보

기업명	Seaborg Technologies
국가	덴마크
본사 소재지	덴마크 코펜하겐
설립연도	2014
매출액	미공개
개발 노형	CMSR
주요 사업	원자로 개발
주요 연혁	(2014) Seaborg Technologies 설립
	(2018) 외부 투자금 확보
	(2020.11) CMSR 개념 설계 진행 및 민간투자자 그룹으로 시드머니 확보
	(2020.12) 원자력 바지선의 해상 배치에 대한 최초의 규정 이정표 달성
	(2021.03) 덴마크 정부, Seaborg 주식 매각으로 이익 창출
	(2021.05) Hyme Energy Aps 자회사 출범
	(2022.07) 삼성중공업과 소형용융염원자로를 결합한 부유식 원자로에 대한 파트너십 체결
	(2022.10) EU 혁신 보조금 대상으로 선정
	(2023.07) 노르웨이 Norsk Kjernekraft와 소형 용융염원자로 배치를 위한 조사 의향서에 서명



출처: SEABORG (seaborg.com)

주요 개발 SMR 노형

CMSR: p.30. 참고

정부 지원 및 파이낸싱

Seaborg Technologies는 2020년 덴마크 정부의 투자 펀드인 Vaekstfonden으로부터 두 건의 투자를 확보함. 2022년에는 유럽혁신위원회(EIC)로부터 250만 유로의 보조금과 2022 EIC 액셀러레이터(Accelerator) 프로그램을 통해 1,500만 유로의 투자를 확보함

Seaborg Technologies는 동남아시아 국가를 중심으로 CMSR 도입을 활발히 모색 중임. 필리핀 원자력연구소(Philippines Nuclear Research Institute)와 필리핀 내 CMSR 배치 가능성과 관련한 양해각서(MoU) 초안을 두고 논의 중임. 또한 인도네시아 원자력에너지청 BATAN(Badan Tenaga Nuklir Nasional)과도 협력하여 인도네시아에 CMSR 건설 가능성을 모색하고 있음. 베트남에서는 Siemens Energy 및 베트남 전력 엔지니어링 컨설팅 회사인 PECC2와 공동 연구를 수행하여 베트남 부유식 원전 건설을 위한 요건을 조사함. 여기에는 환경영향평가 준비와 잠재적 부지 식별 작업이 포함됨

각국 도입 계획 및 협력

Seaborg Technologies와 2022년 1월 부유식 원자력 발전 설비 개발 업무협약을 체결한 삼성중공업은 2023년 1월 CMSR Power Barge의 개념설계를 완료함. 이어 2023년 4월 Seaborg Technologies는 삼성중공업 및 한국수력원자력과 CMSR 개발 컨소시엄을 구성했으며, 이 컨소시엄은 2023년 9월 인도네시아 국영 석유공사 Pertamina와 CMSR Power Barge의 현지 배치를 조사하기 위한 MoU를 체결함. 한편 Seaborg Technologies는 덴마크 공과대학(DTU)과 협력하여 용융 수산화나트륨으로 인한 부식에 대한 연구를 진행하고 있음

2023년 7월 Seaborg는 고순도 저농축 우라늄(HALEU)의 충분한 공급 및 개발과 관련된 위험 때문에 초기 동력 바지선의 연료 유형을 고순도저농축우라늄(HALEU)에서 저농축우라늄(LEU)으로 변경하기로 결정함. HALEU에서 LEU로의 전환은 또한 소형용융염 원자로(CMSR)의 감속재가 수산화나트륨에서 흑연으로 변경된다는 것을 의미하며, 이를 위해 한전원자력연료, GS건설과 국내 LEU 연료염 생산시설 개발 타당성 조사에 협력하기 위한 양해각서(MOU)를 체결함⁷⁹⁾

79) WNN, Seaborg switches fuel plans because of HALEU timeline risks, 2023.07.05.

또한, 2023년 7월 노르웨이에 SMR 발전소를 건설·소유·운영하는 것을 목표로 하는 회사인 Norsk Kjekraft와 급속도로 증가하고 있는 에너지 솔루션 수요를 충족하기 위한 용융염 원자로 건설 가능성 조사 의향서에 서명함.⁸⁰⁾ 이후 2024년 상업용 프로토타입 제작 후 2026년부터 Power Barges의 상업 생산을 시작하는 것을 목표로 바지선 제작을 위해 삼성중공업과 계약을 체결함⁸¹⁾. 이는 삼성중공업의 조선 전문성과 Seaborg의 CMSR을 결합해 턴키 방식의 발전소 제조 및 판매를 위한 양해각서(MOU)임

[표] CMSR 관련 협력 현황

국가	기관/기업	협력 내용
EU	European Innovation Council (EIC)	250만 유로 보조금 확보, 1,500만 유로 투자 지원
덴마크	Vækstfonden	덴마크 정부 투자 펀드로부터 대출 확보
	Technical University of Denmark (DTU)	용융 수산화나트륨으로 인한 부식에 대한 연구
한국	삼성중공업	부유식 원자력 발전 설비 개발 업무협약
	한국수력원자력	삼성중공업과 함께 CMSR 개발 컨소시엄 구성
필리핀	Philippines Nuclear Research Institute	필리핀 내 CMSR 배치 가능성 관련 MoU 초안 작성
인도네시아	BATAN	인도네시아 CMSR 건설 가능성 모색
	Pertamina	삼성중공업·한수원 컨소시엄과 CMSR 도입 조사 MoU
베트남	Siemens Energy, PECC2	베트남 부유식 원전 건설 요건 조사

출처: 언론 보도 내용 취합

80) SEABORG, Nordic co-operation for implementing advanced nuclear power in Norway, 2023.07.17.

81) WNN, Seaborg and BEES sign MoU relating to floating Compact Molten Salt Reactor, 2022.05.19.

10. Rosatom (러시아)

모스크바에 본사를 둔 러시아 국영 기업으로 원자력 에너지를 전문으로 하며, 에너지 제품 및 하이테크 제품을 개발 및 생산함. 비영리 과학 연구기관, 핵무기 단지, 세계 유일의 원자력 쇄빙선을 포함해 350개 이상의 기업으로 구성되어 있음. 러시아 최대 전력 생산 회사로 러시아 전체 전력 생산량의 20.28%인 215.746TWh의 전력을 생산하며, 전 세계 원자력 기술 수출의 76%를 담당하는 해외 원전 건설 부문 1위 기업으로 2020년 12월 기준으로 12개국에서 35개의 원자력 발전소의 다양한 개발 단계에 참여 중임

주요 사업

Rosatom은 러시아 및 외국 파트너가 참여하는 통합 생태계 개발을 통해 2030년까지 매출을 4조 루블로 늘리겠다는 야심찬 목표를 설정했으며, 매출의 절반 이상을 해외 사업에서 창출하고, 신제품 비중은 40% 이상이 될 것으로 예상함. 이에, 글로벌 고객에게 국가 원자력 프로그램의 모든 단계를 지원하고 향상시키기 위한 통합 솔루션 및 서비스 패키지는 원자력 발전소의 전체 서비스 수명 동안 단일 공급업체의 전체 제품 및 서비스 라인에 접근 가능함. 원자력 발전소의 설계 및 건설과 함께 고객 국가의 원자력 인프라 개발, 원자력 규제 체계 수립 지원, 인재 육성, 현지 기업 참여, 연료 공급, 원자력 시설의 운영 및 유지 관리, 원자력에 대한 대중의 수용성을 높이는 것을 목표로 하는 관리 및 프로그램 및 사후핵연료 관리 등이 포함됨

[표] Rosatom 일반 정보

기업명	Rosatom State Nuclear Energy Corporation	 ROSATOM
국가	러시아	
본사 소재지	러시아 모스크바	
설립연도	2007	
매출액	6,975억 루블(72억 달러, 2022)	
개발 노형	KLT-40S, RITM-200M, RITM-200N, RITM-200S, 등이 주요 SMR	
주요 사업	원자력 발전소 건설, 원자로 및 연료 공급, 해체 또는 폐기물 처리, 에너지 솔루션 및 인재육성	
주요 연혁	(2007) Rosatom社 창설에 관한 법률 비준 및 채택	
	(2014) 핀란드 Hanhikivi 원자력 발전소 건설 제안사인 Fennovoima의 지분 34% 인수	
	(2017) 프랑스 방사성폐기물 관리청(Andra)과 방사성폐기물의 최종 분리에 관한 협력협정 체결	
	(2019) 방글라데시 Rooppur 원자력 발전소 1호기의 원자로 압력 용기 상부 제작 완료	
	(2020) 로사툼 기술 아카데미 IAEA협력센터 분야 원자력 과학, 응용, 안보, 원자력 에너지로 확장	
	(2021) 아르헨티나에서 Tolillar 리튬 매장지를 개발하기 위한 합작투자 회사 설립	
	(2022) 용융염연구로, 납냉각고속중성자원자로 BREST-OD-300 및 삼중수소의 연구 성공	
	(2023) 러시아와 미얀마 간 민간 SMR 원자력 협력에 관한 정부간 협정 체결	

출처: Rosatom (www.rosatom.ru/en)

주요 개발 SMR 노형

- ① KLT-40S: p.32. 참고
- ② RITM-200N: 발전량 190MW으로 연료 주기는 5~6년, 설계 수명은 60년이며 2027년 시운전을 목표로 개발 중인 육상 원전임
- ③ RITM-200M: 발전량 175MW이며, 연료주기는 10년으로 개념설계가 완료된 상태로 2027/2028년 시운전을 목표로 진행 중임
- ④ RITM-200S: 업그레이드된 부유식 원전에는 각각 198MW의 발전량을 갖춘 2기의 RITM-200S 원자로가 포함됨. 연료 주기는 현재 KLT-40S 원자로의 노심보다 4배 많은 에너지를 갖게 될 뿐만 아니라 핵연료 사용 수명도 거의 두 배로 늘어나 약 5년마다 재장전이 필요하며, RITM-200S 원자로를 수용할 첫 번째 바지선은 길이는 140미터, 너비는 30미터로 중국 조선소에서 2023년 말 완료 예정으로 건설 중임

정부 지원 및 파이낸싱

Akademik Lomonosov는 러시아 연방 예산위원회(17%)와 국영 원전 운영사인 Rosenergoatom (83%)로부터 자금을 지원받음. 최근 러시아는 해상원전 수출을 추진하고 있음. 국영 원자력 회사 Rosatom은 해외 시장을 대상으로 최소 100MWe의 용량과 최대 60년의 설계수명을 갖춘 FPU를 건설하고, 이후 진출 국가에서 FPU의 전력을 판매하는 것을 목표로 한 합작회사를 설립하기 위해 TSS Group(러시아 최대 유정 개발 종합 솔루션 업체)과 계약을 체결함.⁸²⁾ 중동, 동남아시아, 아프리카 국가를 목표 시장으로 고려하고 있는 것으로 전해짐

각국 도입 계획 및 협력

Akademik Lomonosov 부유식 원전은 Pevek에 배치되어 도시에 열과 전력을 공급하고 있으며, 각각 35MWe를 생산하는 두 개의 KLT-40S 원자로를 기반으로 함. Cape Nagloynyn과 같은 '현대화된 부유식 원전'은 최신 쇄빙선에 사용되는 새로운 RITM 시리즈의 원자로를 사용하며, RITM 장치는 육상에서도 사용할 수 있음⁸³⁾

82) World Nuclear News, Russian export push for floating nuclear power plants, 2023.06.16.

83) WNN, Russian export push for floating nuclear power plants, 2023.06.16.

KLT-40S 개발을 위해 상당한 공급망 역량이 개발되었으며 여러 조직이 Akademik Lomonosov 부유식 원전 및 KLT-40S 원자로 건설에 기여함. 여기에는 소유주이자 운영사인 Rosenergoatom, 엔지니어링 업체이자 패키지 공급업체인 Afrikantov OKB Mechanical Engineering, 원자로 설계 감독을 담당한 Kurchatov Institute, Krylov Shipbuilding Research Institute, 부유식 해상원전 건설사인 Baltiysky Zavod, 해안 및 유압 엔지니어링 시설 설계업체 Atomenergo, 터빈 세트의 총괄 설계 및 공급사인 Kalouzhsky Turbine Plant 등이 있음.

KLT-40S 설계는 기존 KLT-40M 기술을 기반으로 하고 있어 이미 잘 구축된 연료 공급망을 확보하고 있음. 특히 Akademik Lomonosov의 연료는 러시아 연료 제조업체인 TVEL의 자회사인 Mashinostroitelny Zavod(MSZ)에서 생산함. KLT-40S 2기로 구성된 Akademik Lomonosov는 2023년 10월 TVEL이 핵연료를 공급하여 2023년 내로 원자로 1기의 연료를 재장전할 계획이며 나머지 1기는 2024년 연료 공급 및 재장전이 이루어질 예정임⁸⁴⁾

84) World Nuclear News, Floating nuclear power plant set for first refuelling, 2023.10.13.

V. 전문가 인터뷰

1. 김한곤 단장 (한국, 혁신형소형모듈원자로기술개발사업단)
2. Chirayu Batra (영국, TerraPraxis)
3. Akira Tokuhiko (캐나다, 前 NuScale Power)

1.

김한곤 단장

김한곤 단장

혁신형소형모듈원자로
기술개발사업단

Q1. 글로벌 SMR 기술 개발의 현재 트렌드는 무엇인가?

지금까지 원자력은 경제적인 전원이라는 장점과 방사선 사고의 두려움 및 사용후 연료의 처리 문제 등과 관련된 단점 사이에서 추진과 중단이 반복되어 왔다. 1960~70대 세계적인 원자력 시대는, 1979년에 발생한 TMI 사고로 침체기에 들었고, 2000년대 들어 경제적 전원이라는 장점이 부각되면서 개발 및 건설 붐이 있었던 시대는 2011년 후쿠시마 사고로 침체기를 맞게 되었다.

하지만, 현재 전 세계적으로 추진되고 있는 SMR 개발은 기존과는 다른 이유가 존재한다. 기후변화의 위험이 현실이 되어 가고 있는 상황에서 신재생에너지와 함께 거의 유일한 무탄소 전원이라는 점이 강조되고 있는 것이다. 이것은 기존의 경제성 논리와는 차원을 달리한다. 경제성 논리는 언제든지 다른 요인에 의해 번복될 수 있다. 지금까지도 그래왔고, 일반적으로 볼 때도 싸다는 것은 인간이 선택하는 여러 요인 중 하나일 뿐이기 때문에 다른 요인에 의해 언제든지 바뀔 수 있다. 하지만 현재의 탄소중립 이슈는 쉽게 대체되기도 어렵고, 단기간에 달성되기도 어려운 장기적인 목표다. 즉, 현재의 SMR 개발은 탄소중립이라는 쉽사리 대체되기 어려운 강력한 장점을 가지고 있고, 2050년 달성이라는 상당히 긴 목표를 가지고 추진되고 있다.

앞으로의 시장이 강력한 동기를 가지고 있고 장기간에 걸쳐 진행된다는 특징 때문에 초기 시장을 선점하기 위한 개발사 간 무한 경쟁이 이루어지고 있다. 이런 측면에서 비교적 단기간(10년 내외)의 목표를 가지고 개발되는 원자로들은 대부분은 물을 냉각재로 사용하는 경수로형이다. 경수로형 SMR들은 비교적 잘 입증된 기술을 사용하기 때문에 단기간에 개발이 가능한 장점이 있다. 이들 경수로형 SMR들은 피동안전계통을 적극적으로 개발하여 사고 시 외부전원이 필요없도록 개발하는 것이 대세이며, 운영비용을 절감하기 위한 다양한 계측기술 및 자동화 기술이 점차 확대되는 추세다.

경수로형 SMR 시장과는 별개로 보다 장기적인 차원에서 흔히 제4세대 원자로라고 불리는 비경수로형 SMR들로 개발 중이다. 하지만 이러한 비경수로형 SMR들이 시장에 출현하기 위해서는 규제 제도의 대대적인 개편, 핵연료의 실증, 계통의 실증 등 풀어야 할 난제들이 산적해 있어서 아직 특징적인 트렌드를 형성하고 있다고 보기는 어렵다.

Q2. 글로벌 SMR 규제 및 정책 프레임워크는 어떻게 발전하고 있나?

원자력은 대표적으로 규제가 산업의 키를 쥐고 있는 분야다. 어떤 원자로의 허가를 받는데 소요되는 기간도 수년이 넘고, 비용도 수천억원을 호가하는 매우 어려운 분야다. 기존과 같이 원전의 가격이 10조원을 넘어서는 경우에는 사업자가 수천억원의 비용과 수년의 시간을 인허가에 소요하는 위험을 감수할 충분한 가치가 있다. 하지만 SMR은 그와는 다른 시장이다. 수주액이 1조원도 안되는 SMR을 수출하기 위해 수입국 규제기관의 인허가를 위해 수년의 시간과 수천억원의 비용을 부담할 사업자는 없다. 이런 이유 때문에 글로벌 규제의 기본적인 프레임이 변화하지 않으면 SMR이 세계시장을 주도하는 것은 불가능하다.

현재의 글로벌 규제 프레임은 IAEA가 주장하는 바와 같이 표준화(Standardization)와 조화(Harmonization)라 할 수 있다. 표준화는 국제적으로 SMR에 사용되는 설계 기준과 부품의 사양 등을 표준화해서 사업자가 한번 개발하면 세계 어디서든지 동일한 설계를 적용할 수 있도록 하는 것을 궁극적인 목표로 삼는다. 현재는 크게 미국이 주도하는 표준체계와 유럽이 주도하는 표준체계로 전 세계가 양분되어 있는 상태다. 조화는 규제는 해당국의 고유 권한이므로 각국의 규제체계를 동일하게 만들 수는 없으나 조화를 이루도록 해서 어느 국가에서 허가를 받으면 이후의 허가 기간이나 비용이 대폭 감소할 수 있는 국제적인 프레임을 만드는 것이다.

기본적으로 SMR의 개발은 민간이 주도하고 있으므로 (한국, 프랑스 등 국가 주도도 존재), 글로벌한 정책 프레임은 규제 프레임과 궤를 같이하고 있다.

Q3. SMR 시장에 진출할 때 어떤 잠재적 파트너를 고려해야 하나?

흔히, 원전 수출은 대통령이 세일즈하는 품목이라고 한다. 원전의 가격이 매우 고가(10조원 이상)이기도 하지만, 핵물질 및 민감기술이 이전되는 측면에서 국가 간의 관계 자체가 격상되는 측면도 있기 때문이다.

향후 SMR 시장은 이와는 다르게 전개될 가능성이 많다. 일부 개도국의 경우에는 iSMR 1기의 수입을 원하는 경우도 있을 것인데 이 정도면 정부가 나설 규모가 되지 않고, 다양한 용도로 SMR을 원할 경우에 빠르게 대처할 수 있는 민간이 정부보다는 효율적일 것이라는 예측이 설득력이 있다.

따라서 앞으로는 SMR 기술을 개발하는 주체와 이를 시장에 파는 주체가 다르게 추진될 것이고, 따라서 SMR 개발자 입장에서는 특정 국가의 또는 글로벌 시장에서의 비즈니스를 강화할 수 있는 파트너를 고려할 가능성이 크다.

Q4, SMR 시장 진출 시 고려해야 할 비즈니스 협력 모델에는 어떤 것이 있나?

현재 글로벌 SMR 개발사들은 보면 개발사가 설계, 제작, 건설, 운영을 다 지원할 수 있는 능력을 가지고 있는 회사는 한국과 프랑스 두 곳 뿐이다. 나머지 개발사들은 설계 능력만을 가지고 있는 경우가 대부분이다. 따라서 초창기에 SMR을 수주할 경우 한국, 프랑스 등이 상대적으로 효과적으로 또 적은 비용으로 SMR 건설할 수 있을 것으로 예상된다. 하지만 SMR 시장이 본격화되었을 경우, 예들 들어 연간 60GW의 SMR이 매년 필요한 시기가 도래하면 1~2개 개발사가 이 전체를 설계부터 제작, 건설까지 하는 것은 어려울 것으로 판단된다.

결국, 개발사들은 핵심이 되는 설계, 제작 기술만을 보유하고, 나머지 분야는 다양한 협력, 다양한 이합집산이 이루어질 것이다. 이미 두산에너지빌리티는 SMR 제작에서의 파운드리 업체가 될 것을 선언한 상태이고, SMR에 소요되는 공통된 부품의 글로벌 경쟁력을 가지고 있는 업체들 역시 특정 SMR 개발사에 소속되기 보다는 다양한 SMR에 공급할 수 있는 부품 개발을 하게 될 것으로 전망된다. 결국, 글로벌 SMR 시장이 본격화되면 기존의 원전 산업과는 전혀 다른 사업모델들이 현실화될 것으로 본다.

2.

Chirayu Batra (영국)

Chirayu Batra

- ▶ 원자력 엔지니어
- ▶ TerraPraxis CTO
- ▶ 前 IAEA SMR 도입 지원 프로젝트 책임자

Q1. 글로벌 SMR 기술 개발의 현재 트렌드는 무엇인가?

SMR의 영역은 매우 광범위하지만, 국제원자력기구(IAEA)에서 근무한 경험을 통해 파악한 전 세계 SMR 개발 트렌드는 다음과 같다.

1) 일체형 가압경수로(IPWR): SMR 기술의 선두주자로, 단기간에 배치할 수 있다는 장점이 있어 여러 국가에서 주목하고 있다. 주목할만한 설계로는 이미 설계인증을 확보하고 건설부지를 지정한 NuScale(미국)을 비롯하여 NUWARD(프랑스), SMART, iSMR(한국), RITM(러시아), CAREM(아르헨티나), ACP100(중국) 등이 대표적이다. 특히 CAREM, ACP100과 지난 2년간 운영 중인 러시아의 KLT40S는 개념에서 배치 및 운전까지 SMR 기술의 진전을 잘 보여준다.

2) 고온가스냉각원자로(HTGR): HTGR은 첨단 기능으로 업계의 상상력을 사로잡고 있다. 중국의 HTR-PM은 이 기술의 운영 가능성을 입증하는 사례다. X-Energy(미국)는 이미 인허가 단계에 있으며 건설부지를 확보하여 주목할 만한 기업이다.

3) TRISO 연료: 수많은 SMR 및 초소형원자로 프로젝트가 삼중피복입자(TRISO) 연료 원자로에 관심을 보이고 있다. 이러한 원자로로는 주로 가스 냉각을 사용하지만 용융염 냉각에 대한 관심도 높아지고 있다.

4) 부유식 SMR: 이름에서 알 수 있듯이 부유식 SMR은 이동성과 유연성을 제공한다. 러시아의 Akademik Lomonosov가 가동 중인 원자로이며, 러시아는 가까운 시일 내에 더 많은 부유식 원자로를 도입할 계획이다.

5) 액체금속냉각 고속원자로(LMFR): LMFR로 통칭되는 소듐냉각 및 납냉각 고속원자로는 모두 엄청난 가능성을 보여준다. TerraPower(미국)의 Natrium은 후반 인허가 단계에 도달하고 건설부지를 지정하여 주목받고 있다.

6) 용융염 원자로(MSR): MSR은 기술적으로 매력적이지만, 널리 보급되는 것은 다소 먼 이야기처럼 보인다. 그러나 SMR 산업의 상황은 매우 역동적이며 대규모 투자가 뒷받침된다면 어떤 기술이라도 추진력을 얻을 수 있다.

7) 기타: Seaborg 소형 용융염 원자로, Copenhagen Atomics 폐기물 버너, Terrestrial Energy의 일체형 용융염 원자로(IMSR)는 단기적으로 배치할 가능성이 있는 설계로 주목받고 있다.

SMR 기술 개발과 관련하여 주요 국가 동향은 다음과 같다.

1) 미국: 미국 에너지부는 NuScale의 설계 개발과 같은 여러 SMR 이니셔티브를 지원했으며, 2020년 미국 원자력규제위원회(NRC)는 NuScale의 설계에 대한 최종 안전성 평가 보고서를 발행했다. X-energy는 Dow chemicals과 계약을 체결하고 첫 번째 Xe-100을 Seadrift 현장에 배치했다.

2) 캐나다: 캐나다는 SMR 개발을 선도하는 국가 중 하나로, 온타리오주, 뉴브런즈윅주, 서스캐처원주 등 여러 주정부가 SMR 개발을 위해 협력하는 양해각서(MOU)를 체결했다. 2018년 발표한 캐나다의 SMR 로드맵은 정부와 업계가 협력할 수 있는 발판을 마련했으며, 사전 인허가 계약인 공급업체 설계 검토에는 여러 SMR 개발업체가 관심을 보여 10개 이상의 설계가 검토 중이다.

3) 영국: 영국도 정부가 연구 개발 자금을 배정하는 등 SMR에 관심을 보이고 있다. Rolls-Royce와 같은 기업들은 SMR 개발을 적극적으로 추진하고 있다. Rolls-Royce는 현장 건설을 최소화하여 훨씬 더 빠른 건설 일정을 달성할 수 있는 흥미로운 구축 모델도 보유하고 있다.

4) 러시아: 러시아는 SMR의 일종으로 볼 수 있는 부유식 원자력 발전소 배치에서 앞서 나가고 있다. Akademik Lomonosov는 2019년 12월에 최초로 부유식 발전소 상업운전을 시작했다. 이 밖에도 육상 및 해상용 RITM-200과 같은 다양한 설계가 개발 중이며 조만간 건설될 예정이다.

5) 중국: 중국은 SMR로 간주할 수 있는 고온 원자로인 HTR-PM의 건설을 진행 중이며, 향후 몇 년 동안 이러한 원자로를 더 많이 건설할 계획도 있다. ACP-100도 건설 중이며, 최근 입수한 정보에 따르면 일정대로 건설이 진행되고 있으며 2026/2027년에 상업운전 개시가 예상된다.

6) 한국: 한국원자력연구원(KAERI)은 SMART 원자로를 개발하고, 사우디아라비아와 같은 국가에 이 기술을 수출할 가능성에 대한 논의가 있다. 현재 캐나다 앨버타주 정부와 캐나다 오일샌드에서 중질유를 채굴하는 데 SMR을 활용하기 위한 논의를 진행 중이다. 또한 약 170MWe의 출력을 가진 iSMR 설계를 보유하고 있다.

Q2. 글로벌 SMR 규제 및 정책 프레임워크는 어떻게 발전하고 있나?

SMR 규제 및 정책 분야는 국가, 지역, 지역 간 차원을 아우르는 여러 측면에서 상당한 변화를 겪고 있다. 규제 당국 사이에는 현재의 규제 모델이 SMR, 특히 비경수로 냉각 방식의 고유한 특성을 수용할 수 있도록 재조정되어야 한다는 공감대가 지배적이다. 기존 프레임워크의 도전 과제는 다음과 같은 항목을 꼽을 수 있다. △기술적 제약: SMR의 핵심인 새로운 기술과 새로운 설계로 인해 기존 규제 표준에 대한 재평가와 점검이 필요하다. △도입 역학: 이러한 원자로의 도입을 가속화해야 하는 시급한 필요성이 있으며, 현재 규정의 비호환성(non-compatible) 및 비적응성(non-adaptive)이 이러한 속도를 방해하고 있다. △인허가 병목 현상: 현재 형태의 규제 방식은 이러한 새로운 기술을 신속하게 인허가할 수 있는 역량을 갖추지 못했으며, 현재 형식의 규제 프로세스와 요건으로 인해 절차에 오랜 시간이 소요되고 있다. △인허가 절차 개혁: 원자로를 대규모로 배치할 수 있는 방식으로 인허가를 신속하게 취득할 수 있도록 인허가 절차를 개혁해야 할 필요가 있다.

위에서 언급한 과제를 해결하기 위해 여러 글로벌 이니셔티브가 추진 중이다. IAEA가 주도하는 '원자력 조화 및 표준화 이니셔티브(NHSI)'가 이러한 방향의 주요한 노력으로 부상하고 있다. NHSI는 원자력 규제에 대한 일관된 접근 방식을 제안하고, SMR과 같은 첨단 기술에 중점을 두고 있다. 이 이니셔티브는 글로벌 협력을 촉진하고 모범사례의 공유를 촉진하며 규제 프로세스를 재구성하는 것을 목표로 한다. 이러한 환경에서는 중복되는 절차 단계가 줄어들어 엄격한 안전 표준을 유지하고 효율적인 리소스 활용을 보장할 수 있다.

NHSI의 종합적인 전략은 규제 트랙과 산업 트랙으로 구분할 수 있다. 규제 트랙은 회원국 간의 협력 노력과 의도를 강화하기 위한 것으로, 효율성을 극대화하고, 중복되는 작업을 제거하며, 공동의 규제 비전을 발전시키는 것을 로드맵으로 한다. 이 전략에서 가장 중요한 것은 원자력 안전에 대한 확고한 의지와 국가 권한 및 자율성에 대한 존중이다. 동 이니셔티브를 통해 이해관계자들에게 비전을 소개하기 위해 SMR 규제기관 간 포럼을 개최하거나 상세하고 통찰력 있는 보고서를 발간하고 있다.

산업 트랙은 개념화부터 운영 단계에 이르기까지 전체 SMR 수명 주기에 대한 표준화된 청사진에 중점을 둔다. 인허가 절차를 가속화하고, 비용 경제를 실현하며, SMR 도입 일정을 촉진하는 등 다양한 임무를 수행한다. 이 트랙은 최근 규정 및 표준 동등성 관점에서 주요 요건을 강조하는 첫 번째 실무 보고서를 발표했다.

IAEA를 넘어 경제협력개발기구 원자력기구(OECD-NEA) 및 세계원자력협회(WNA)와 같은 기관에서도 규제 조화 이니셔티브를 활발히 추진하고 있다. 최근 WNA는 원자력 규제 조화의 요건에 관한 새로운 간행물을 발행했다. 또한 제품 기반 인허가 절차에 대한 보고서를 WNA가 조율하여 올해 안에 발표할 예정이다. 범지역적 협력 메커니즘도 활발하다. 인허가 신청서 검토를 위한 협력 프레임워크를 촉진하기 위해 미국 원자력규제위원회(NRC)와 중국 국가보안위원회(CNSC) 간 협력 각서가 2022년에 체결되었으며, 폴란드도 이 연합에 합류하여 그 범위가 확대되고 있다. 프랑스는 NUWARD 설계를 활용하여 유럽 규제기관 컨소시엄이 참여하는 고유한 모델을 조율하고 있다. 이 접근 방식은 원활한 규제 허가 메커니즘을 제공하여 유럽 대륙 전역에 NUWARD 원자로를 배치할 수 있도록 하는 것을 목표로 한다.

Q3. SMR 시장에 진출할 때 어떤 잠재적 파트너를 고려해야 하나?

한국의 국내 역량과 신중한 국제 전략이 결합하면 글로벌 SMR 시장에서 지배적인 플레이어로 자리매김할 수 있다. 국내 통합과 국제 협력 두 가지를 모두 강조하는 이 접근 방식은 SMR 분야에서 한국이 성공하는 데 핵심이 될 것이다. 아래와 같은 잠재적 파트너를 고려할 수 있다.

- 국내 기술 개발업체 및 대기업: 한국은 원자로 설계 및 건설 분야에서 탄탄한 기술 기반을 자랑한다. 한국전력, 현대, 삼성과 같은 주요 대기업은 귀중한 파트너가 될 수 있다. 이러한 기업들은 기술력뿐만 아니라 국내외 비즈니스 영역에서 상당한 영향력을 가지고 있다. 이러한 대기업과 협력하면 R&D, 자금 조달, 시장 진출 측면에서 많은 이점을 얻을 수 있다.
- 연구개발 기관: 한국원자력연구원(KAERI) 및 한국과학기술원(KAIST)과 같은 기관과의 협업은 필수적이다. 이 기관들은 특히 원자력 에너지 분야에서 기술 혁신의 선두에 서 있다. 이러한 협력은 원자로 설계와 안전 프로토콜의 발전을 가속화하는 동시에 혁신과 산학 시너지 환경을 조성할 수 있다.
- 유틸리티 및 에너지 유통업체: 한국전력공사 및 자회사와 같은 기관은 SMR의 주요 소비자가 될 수 있다. 이러한 기관의 참여는 실제 테스트, 피드백, 국가 전력망에 대한 SMR의 통합을 보장하여 확장성과 광범위한 채택을 위한 로드맵을 제공한다.

- 유틸리티 이외: SMR은 하나의 원자로 설계나 개념이 아니라 전기를 넘어 비전력 응용 분야로 진출할 수 있는 잠재력을 가진 전체 시스템이다. 따라서 SMR 도입 가능성을 모색할 때는 여러 비전통적 파트너를 고려해야 한다.
- 규제 및 정부 기관: 원자력 에너지의 복잡성 때문에 세심한 규제 프레임워크가 필요하다. 과학기술정보통신부와 같은 정부 기관 및 한국원자력안전기술원(KINS)과 같은 규제 기관과 긴밀히 협력하면 승인 절차를 간소화하고 국제 안전 규범을 준수할 수 있다.
- 공급망 및 부품 제조업체: 신뢰할 수 있는 공급망은 SMR을 적시에 효율적으로 출시하기 위한 기본 요소다. 두산중공업과 같은 건실한 부품 제조업체와의 파트너십은 원자로 부품의 일관된 품질과 납품을 보장하고 최종 제품에 대한 신뢰를 높일 수 있다.
- 금융 기관: 원자력 프로젝트에서 파이낸싱은 매우 중요하다. 거대 금융기관과의 협력은 자본 집약적인 중소형 원자로 프로젝트의 특성을 촉진할 수 있다. 또한 이들의 참여는 다른 잠재적 투자자들을 끌어들이는 신뢰의 표시가 되기도 한다.
- 국제 협력 포럼: 세계화 시대에 IAEA와 같은 국제기구 및 원자력 선진국과의 협력은 기술적 시너지, 규제 조화, 지식 교류 등을 통해 세계 무대에서 한국의 SMR 경쟁력을 강화할 수 있다.
- 산업 및 경제특구: 기술 도시 및 산업단지와 같이 현지화된 SMR 구축의 직접적인 혜택을 받을 수 있는 산업 및 경제특구가 참여해야 한다. 이러한 기관은 SMR의 실행 가능성과 이점에 대한 주요 소비자이자 홍보대사 역할을 할 수 있다.
- 인프라 및 해양 기업: 대우조선해양과 현대중공업과 같은 거대 기업이 있는 한국의 해양 산업은 해양 SMR 도입에 대한 기회를 제공한다. 이 분야의 참여는 한국의 조선업 인프라를 활용하여 부유식 SMR과 같은 혁신적인 응용 분야를 위한 길을 열어준다.
- 정책, 홍보 및 옹호 그룹: 원자력 부문은 기술만큼이나 인식이 중요한 영역이기도 하다. 한국원자력학회와 같은 단체와 협력하면 대중의 인식을 형성하고 신뢰를 구축하며 우호적인 정책 환경을 조성할 수 있다.
- 지방 정부 및 주정부: 풀뿌리 차원의 파트너십이 핵심이다. SMR 도입이 확정된 지역의 지방 정부를 참여시키면 승인을 간소화하고 지역 주민의 참여를 보장할 수 있다.
- 국제 파트너십 및 라이선싱: 한국이 글로벌 SMR 시장에 진출하기 위해서는 원자력 에너지를 모색하는 국가들과 제휴해야 한다. 기술 공유, 공동 개발 및 상호 라이선스 계약을 통해 한국의 글로벌 SMR 입지를 가속화할 수 있다.

- 국제 원자력 에너지 협력: 미국, 프랑스, 캐나다, 영국 등 기존 원자력 강대국과의 협력을 통해 한국은 모범 사례, 규제 규범, 기술 공유에 대한 인사이트를 얻을 수 있다. 이러한 참여는 협력 협약, 공동 연구 이니셔티브 및 지식 공유 포럼을 통해 촉진될 수 있다.
- 신흥 원자력 시장과의 협력: 중동, 동남아시아, 아프리카의 국가들은 에너지 포트폴리오를 다각화하기 위한 수단으로 원자력에 대한 관심이 높아지고 있다. 한국은 원자로 설계부터 운영 노하우에 이르는 엔드투엔드(end-to-end) 솔루션을 제공함으로써 이들 지역에 기술 및 지식 제공자로서 입지를 다질 수 있다.
- 국제 규제 조화: 국제원자력기구(IAEA) 및 세계원자력협회와 같은 포럼에 적극적으로 참여하면 한국이 SMR 규정을 글로벌 표준에 맞게 조정하여 한국형 SMR을 해외에 수출하고 배치하는 데 도움이 될 수 있다.
- 글로벌 공급망 통합: SMR의 효율적인 글로벌 배치를 위해서는 국제 공급망과의 통합이 중요하다. 글로벌 공급업체 및 제조업체와 협력하면 비용을 절감하고 부품의 가용성을 보장하며 원자로 건설 및 유지보수에서 일관성을 유지할 수 있다.
- 국제 금융 제휴: 글로벌 금융 시장을 활용하고 국제 은행, 투자 그룹, 개발 은행과 제휴를 맺으면 글로벌 SMR 프로젝트에 필요한 금융 기반을 마련할 수 있다. 아시아인프라투자은행, 아시아개발은행과 같은 기관은 국제 SMR 구축을 위한 잠재적 금융 기관이 될 수 있다.

Q4, SMR 시장 진출 시 고려해야 할 비즈니스 협력 모델에는 어떤 것이 있나?

고려할 수 있는 비즈니스 모델은 여러 가지가 있지만, 한국에 가장 적합한 모델은 건설-소유-운영(Build-Own-Operate, BOO) 모델이다. BOO 모델에서는 민간 기업 또는 컨소시엄이 시설(이 경우 SMR)의 자금조달, 건설, 소유, 운영을 담당한다. 일반적으로 호스트 정부 또는 유틸리티 회사는 민간 기업과 장기 전력구매계약(PPA)을 체결하여 SMR에서 생산된 전력을 미리 정해진 기간 동안 구매하여 수익 안정성을 보장하며, 이 경우 열 또는 증기 구매 계약이 될 수도 있다. 이 모델의 장점은 다음과 같다. △정부의 재정 부담 감소: 정부는 직접적인 자본 비용을 들이지 않고도 민간 부문의 전문성과 자원을 활용할 수 있다. △위험 이전: 건설, 운영 및 재무 위험의 대부분을 민간 기업이 부담하므로 공공 부문은 완충 역할을 할 수 있다. △간소화된 프로세스: 단일 주체가 설계부터 운영까지 여러 측면을 처리하므로 효율성이 향상되고 의사결정이 빨라질 가능성이 높다. △장기적인 수익 안정성: PPA는 BOO 운영자에게 안정적인 수익원을 보장하므로 장기적으로 실행 가능한 비즈니스가 될 수 있다.

BOO는 정부가 원자력 부문에 대한 민간 부문의 참여를 장려하고자 하지만 SMR 건설 및 운영에 직접 투자할 자원이나 의지가 없는 국가 또는 지역에서 특히 매력적이다. SMR BOO 모델의 세부 적용 시나리오는 다음과 같다.

- 1) 신흥 원자력 국가: 원전을 도입하고 싶지만 SMR을 개발하고 운영하는 데 필요한 인프라, 경험 또는 자본이 부족한 국가에게는 BOO 모델이 실행 가능한 솔루션을 제공한다. 경험이 풍부한 원전 운영기업을 초청하여 원자로를 건설하고 운영함으로써, 가파른 학습 곡선과 초기 자본 투자 없이도 이 기술의 이점을 누릴 수 있다.
- 2) 개발도상국의 에너지 믹스 다변화: 많은 개발도상국이 에너지를 다변화하고 탄소 배출을 줄이며 에너지 안보를 확보하기 위해 노력하고 있다. BOO 모델을 통해 이러한 국가들은 민간 부문의 민첩성과 전문성을 활용하여 원자력을 에너지 믹스에 빠르게 통합할 수 있다.
- 3) 산업단지 및 경제특구: 전력 수요가 많은 산업 지역은 일관된 에너지 공급을 보장하기 위해 SMR을 위한 BOO 모델을 모색할 수 있다. 운영자는 국가 전력망을 우회하여 이러한 지역에 직접 전력을 공급할 수 있으므로 해당 지역의 요구에 맞는 보다 안정적인 열 및 전력 공급원을 확보할 수 있다.
- 4) 고립된 전력망 및 격오지: 외딴 섬이나 본토의 격오지 등 전력망 이용이 제한적인 지역에서는 BOO 모델을 사용하여 SMR을 지역화된 전원으로 구축할 수 있다. 대규모 전력망에 연결하기 위한 대규모 인프라 투자 없이도 안정적인 전력 공급을 보장할 수 있다는 장점이 있다.
- 5) 재생에너지 프로젝트와의 협업: 각국이 적극적인 재생에너지 목표를 추구함에 따라 SMR은 태양열이나 풍력 등 재생에너지가 간헐적으로 공급되는 기간 동안 일관된 전력을 공급하여 상호 보완적인 역할을 할 수 있다. 이러한 시나리오에서 BOO 모델은 민간 SMR 사업자가 재생에너지 공급업체와 협력하여 균형 잡힌 에너지 믹스를 보장하는 시너지 파트너십을 가능하게 한다.

Q5. 글로벌 SMR 시장 진출과 관련하여 한국에 하고 싶은 제언은?

한국은 SMR 시장에 진입할 수 있을 뿐만 아니라 시장을 혁신할 수 있는 매우 유리한 위치에 있으며, 이에 대한 주요 권장 사항을 제시하고자 한다. 기술력, 글로벌 명성, 중공업 역량을 갖춘 한국은 SMR 시장에 진입하는 것뿐만 아니라 시장을 재편할 수 있는 독보적인 위치에 있다고 본다. SMR 시장 환경에서 한국의 전략적 포지셔닝 방안은 다음과 같다.

- 1) 고급 SMR 설계 마스터: 한국의 첨단 원전 설계, 특히 SMART와 iSMR은 한국의 원전 포트폴리오에서 중요한 자산으로 자리 잡고 있다. 한국은 이러한 설계에 자원과 전문성을 투입함으로써 설계의 성숙도와 준비성을 더 높은 수준으로 끌어올릴 수 있다. 이러한 설계 우수성 달성은 기술적 견고성을 보장할 뿐만 아니라 글로벌 시장에서 경쟁 차별화 요소로 작용할 수 있다.
- 2) 글로벌 마케팅 및 경제성: 한국의 SMR 기술 발전을 알리기 위한 체계적인 글로벌 캠페인이 필수적이다. 첫 번째 원자로로는 물론 후속 원자로의 비용 효율성에 대한 상세한 경제성 평가를 통해 시장 입지를 확고히 할 수 있다. 또한 SMR 시장에는 다양한 니즈를 가진 여러 고객층이 있다. 많은 고객이 발전 및 열 애플리케이션을 위해 여러 대의 원자로 구매를 고려하고 있다. 이러한 잠재적 대량 구매자와 사전 논의에 참여하고 양해각서(MOU)를 체결하면 장기적인 파트너십을 지원할 수 있다.
- 3) 혁신적인 비즈니스 모델: 고객들이 원자로 자체보다는 전력이나 열을 구매하려는 경향이 강해지고 있다는 점을 인식하고 비즈니스 모델을 다각화하는 것이 전략적이다. 전력구매계약(PPA)과 같은 모델을 개발하면 단순한 장비 판매를 넘어 한국의 제품을 확장하고 더 넓은 시장 선호도를 충족할 수 있다.
- 4) 고온 원자로 및 초소형 원자로: 연구에 따르면, 글로벌 시장에서 고온 원자로와 초소형 원자로에 대한 수요가 증가할 것으로 예상된다. 이러한 특정 설계(자체 개발 중인 경우)를 위한 R&D에 투자하고 특정 고객 수요에 따라 제품을 맞춤화하면 한국이 이 틈새 시장에서 입지를 다질 수 있는 길을 열 수 있다.
- 5) 해양 원전 시장 공략: 한국은 유명한 대기업과 함께 유명한 해운 산업을 자랑하며, 현대와 삼성과 같은 거대 제조 대기업이 상당한 영향력을 보유하고 있다. 국제해사기구(IMO)가 엄격한 배출 기준을 시행하고 있는 지금이야말로 이러한 대기업이 해양 원자력 분야로 전문성을 확장할 수 있는 절호의 기회다. 여러 공급업체가 부유식 원자력 발전소나 원자력 추진 설계에 뛰어들고 있지만, 해양 관련 법률과 조선업의 복잡성 때문에 어려움을 겪는 경우가 많다. 풍부한 해양 유산을 보유한 한국은 이러한 격차를 해소하고 원자력 혁신과 해양 우수성을 결합한 포괄적인 솔루션을 제공할 수 있다.
- 6) 협력적 참여: 한국이 SMR 시장을 진정으로 혁신하기 위해서는 원자력 설계 회사와 거대 조선사 간의 협업을 촉진하는 것이 판도를 바꿀 수 있다. 이러한 파트너십은 새로운 해양 원자력 솔루션을 창출하여 글로벌 시장에 고유한 가치 제안을 제시할 수 있다.

3.

Akira Tokuhiko (캐나다)

Akira Tokuhiko

- ▶ 온타리오 공대 교수
- ▶ 前 NuScale Power (Senior Principal)

Q1. 글로벌 SMR 기술 개발의 현재 트렌드는 무엇인가?

현재 글로벌 SMR 기술 개발은 기존 모델, 접근 방식, 관행이 확장된 것이라 할 수 있다. 즉, 인증, 건설, 운영 가능성이 가장 높은 현재 가동 중인 원자로의 점진적 진화가 "SMR 기술의 완성 형태"일 수 있다. 현재 약 70종 이상의 원자로 설계 개념이 존재하며 수냉식 원자로 설계가 주류를 이루고 있으나 소듐냉각고속로(SFR), 용융염 원자로(MSR), 가스냉각 원자로(GCR) 등 여러 설계가 이전에 제시된 바 있다. 연료 유형(농축 포함) 및 노심 설계에 대한 기존의 저농축 우라늄(LEU) 접근 방식뿐만 아니라 토륨 연료, 혼합 산화물 연료, 고속로(최대 20% 농축) 연료로 작동하는 노형과 같은 아이디어도 있다.

이러한 아이디어의 대부분은 이미 등장했던 것이며, 일부 흥미로운 노형은 1950년대 후반, 1960년대 초반, 1970년대에 데모 원자로로 건설되기도 했다. 이러한 레거시 원자로 개념의 대부분은 경수로 및 중수로 개념에 비해 운전 시간이 훨씬 적다. 즉, 오늘날 원자로 개념의 엔지니어링 및 설계를 진전시키려면 많은 엔지니어(최대 500명)가 필요하고 이를 위해서는 지속적인 자금이 필요하기 때문에 이러한 개념의 기술 준비 수준은 아직 부족하다. 모든 원자로 개념이 상업적 운영을 위해 건설되는 것은 아니며 흥미로운 개념을 실현하고 이상적으로는 운전 데이터를 다른 이해 관계자와 공유할 수 있도록 국립연구소 또는 기술 단지에서 데모 및/또는 테스트 원자로로 건설하는 방안이 제안될 수 있다. 마지막으로, 기술 개발은 보고서나 출판물을 결과물로 내놓는 학술 연구와는 다르다. 글로벌 SMR 기술 개발은 개념을 가시화하는 엔지니어링 실증 과정으로 볼 수 있다고 생각한다. 원자로 개념이 상업적으로 건설 및 운영되지 않을 경우, 이를 국립 연구소 또는 산업 현장에서 도입하는 것이 합리적이다.

Q2. 글로벌 SMR 규제 및 정책 프레임워크는 어떻게 발전하고 있나?

글로벌 규제 및 정책 프레임워크는 중요한 이니셔티브이며 지속되어야 하지만, 빠르게 발전하고 있는 기술 경제 시장(SMR)의 흐름에 발맞추지 못하는 것으로 보인다. 우리는 글로벌 규제 및 정책 프레임워크를 새로 시작하는 단계에 있으며, 세계 각국이 자국만의 규제 체계를 가지고 있고 기존의 (대형) 원전 규제 체계만 존재하는 상황이다. 글로벌 프레임워크는 분열되어 있다. 한편으로는 글로벌 규제 및 정책 프레임워크가 2030년까지 전환하고 2050년 혁신을 달성할 수 있을 만큼 충분히 빠르게 진화하지 못하고 있다. 즉, 2030년, 2035년, 2040년, 2045년, 2050년까지 무엇을 기대할 수 있는지에 대한 실용적인 관점이 필요하다. 여기서 문제는 누가 이 작업을 수행할 것이며, 어떤 글로벌 주체가 이 작업을 존중할 것인가 하는 것이다. 원전 보유국들은 글로벌 규제 및 정책 프레임워크에 대해 치열하고 주기적으로 논의해야 한다. 또한 국익이 글로벌 관점보다 우선시되면 글로벌 이니셔티브는 제대로 발전하지 못하고 제한될 것이다. 이것이 현재 상황이며 자기 성찰을 통해 교훈을 얻을 필요가 있다.

Q3. SMR 시장에 진출할 때 어떤 잠재적 파트너를 고려해야 하나?

SMR 시장에 진입할 때는 적응력이 뛰어나고 유연한 접근 방식을 취하는 것이 좋다. 소규모 팀으로 시작한다는 가정 하에 조직의 지속적인 개선과 변화가 필요할 것이다. 잠재적 파트너를 구축하는 것은 잠재적 파트너가 될 수 있는 사람과 조직에 대한 신뢰와 친숙함의 문제다. 오늘날의 기술 경제 글로벌 시장의 현실을 인식하고, 무엇보다도 인력을 유지하는 데 필요한 자본 투자를 염두에 두어야 한다. 특히 최근 은퇴자나 노년층 파트타임 전문가를 고려해 볼 수 있다. 1) 수소, 2) 재생 가능 기술, 3) 배터리 또는 에너지 저장, 4) 전력망 기술, 5) 인공지능, 머신러닝, 가상현실 기술을 포함한 컴퓨팅 및 소프트웨어, 6) 원자력 및 기술 법률, 7) 규제 및 표준, 8) 팀워크 및 리더십, 9) 프로젝트 관리 및 회계, 10) 기타 아이디어가 있거나 통합에 숙련된 중소기업 등 기술 분야 파트너를 찾아야 한다.

Q4. SMR 시장 진출 시 고려해야 할 비즈니스 협력 모델에는 어떤 것이 있나?

비즈니스 협력 모델은 최종 목표에 따라 달라지며, 예상되는 선행 자본 투자가 가능해야 한다. 예를 들어 최종 목표는 규제 승인 또는 인증일 수 있다. 이는 완성된 플랜트의 건설 및 운영을 보장하지 않는다. 따라서 건설 현장 외부의 상황(예: 정치적 상황)에 관계없이 자본 투자 또는 지속적인 자금 지원이 필요하다. 개인적인 의견으로는 한국이나 원전 보유국 이외의 모든 곳에서 적용할 수 있는 비즈니스 협력 모델은 존재하지 않는다.

원자로는 글로벌하고 시장성이 있으며 엔지니어링된 하드웨어다. 비즈니스 협력 모델에는 '원자력의 평화적 이용'과 같은 상위 원칙이 있어야 하지만, 신규 원전 국가를 대상으로 새로운 고객을 확보하기 위한 구체적인 접근 방식은 특정 고객에 맞게 조정되어야 한다. 예를 들어, 아프리카의 신규 원전 국가와 캐나다 같은 선진국인 신규 원전 국가가 있을 수 있다. 두 경우 모두 자본의 준비가 필요하지만 기존 인력과 정부 기관에 대한 내용은 매우 다를 것이다. 인력(약 5,000명)과 원자력 공급망(전문가 및 기업 최소 1만)을 개발하는 데는 시간이 걸린다. 일부 국가에서는 인력이나 충분한 공급망을 확보하는 것이 불가능할 수도 있다. 한국의 경우 일본(또는 다른 원전 보유국)과의 파트너십을 고려할 수 있다. 대규모 자체 시장을 보유한 중국에 대응하여, 한국과 일본은 같은 원전 보유국으로서 근접성을 기반으로 협력을 통해 시너지 효과를 낼 수 있을 것이다.

Q5. 글로벌 SMR 시장 진출과 관련하여 한국에 하고 싶은 제언은?

다음은 몇 가지 권장 사항이며, 우선순위가 있는 것은 아니다.

- 1) 일본(또는 다른 원자력 국가) 기업 및 원자력 공급업체와 파트너십을 형성하여, 기술성숙도 (Technology Readiness Levels, TRL)가 높은 원자로 기술 개념의 건설 및 운전 가능성을 높인다.
- 2) 이러한 원자로 개념에 대한 공통 규제 검토 및 승인 절차에 신속하게(5-10년 이내를 의미) 합의한다. 즉, 집중 회의와 정기 회의를 통해 신속하게 조율하며, 여기에는 원자력 및 에너지 법률 전문가가 포함되어야 한다.
- 3) 공동 규제 검토 회의 외에도 투자자, 에너지 기술 기업(수소, 태양광, 풍력, 배터리 등), 정책 입안자들과 공동 이해관계자 회의를 개최한다. 이는 조화로운 에너지 믹스에 중요하다.
- 4) 개발도상국, 신규 원전 국가뿐만 아니라 캐나다와 같은 G7 선진국에서도 에너지 및 인프라 개발을 공동으로 추진한다. 예를 들어, 캐나다에는 광산, 작고 고립된 지역사회 등 격오지가 많다. 이러한 지역은 SMR을 유치할 필요가 있지만 지역 주민에 대한 교육이 필요하다.
- 5) 최고 이해관계자 수준에서 이러한 파트너십은 총리 및 대통령 수준의 공동 협약이 필요하다.
- 6) 이견과 입장 차이가 발생할 수밖에 없으므로 제3자 참여의 중요성을 잊어서는 안 된다. 공동 회의를 주최하기 위해서는 사무국이 필요하다.
- 7) 에너지 및 원자력 공학 분야 학계와의 협력도 중요하다. 한국원자력학회와 일본원자력학회 등 일부 단체는 이미 공동 회의를 개최하고 있다. 글로벌 SMR 기업과 새로운 전문가 커뮤니티 간의 더욱 심화된 협업과 협력을 제안한다.

참고문헌

GlobalData, Why a new era for US nuclear looks unlikely, 2023.05.26.

Reuters, U.S. approves design for NuScale small modular nuclear reactor, 2023.01.20.

Energy.gov, NRC Certifies First U.S. Small Modular Reactor Design, 2023.01.20

Federal Register, NuScale Small Modular Reactor Design Certification, 2023.01.19

US Department of State, The United States and Multinational Public-Private Partners Look to Provide Up To \$275 Million to Advance the Romania Small Modular Reactor Project; United States Issues Letters of Interest for Up To \$4 Billion in Project Financing, 2023.05.20

USTDA, USTDA, Indonesia Partner on Nuclear Power, 2023.03.20

World Nuclear News, US furthers overseas support for coal-to-SMR projects, 2023.09.08

World Nuclear News, US State Department launches SMR support programme, 2021.04.29

smractionplan, Canada's small modular reactor-SMR Action plan

Government of Canada, Government of Canada Announces Federal Support for Small Modular Reactor (SMR) Development in Saskatchewan, 2023.04.19

Government of Canada, Canada Launches New Small Modular Reactor Funding Program, 2023.02.23

World Nuclear News, Canadian government launches SMR support programme, 2023.02.24

Reuters, Canada commits C\$970 million to new nuclear power technology, 2022.10.26

CBC, 4 provinces push ahead with plan to build small nuclear reactors to supply power, 2022.03.29

Energy Central, Great Balls of Fire ~ UK to Commit Billions to Build SMRs, 2023.07.23

Gov.uk, British nuclear revival to move towards energy independence, 2023.07.18

Politico, UK government bets on small-scale nuclear , 2023.07.18

Gov.uk, Advanced Nuclear Technologies, 2023.08.15

World Nuclear News, UK launches SMR selection competition, 2023.07.18

Bloomberg, France to Build Small Nuclear Reactors by 2030 in Export Push, 2021.10.12

Fortune, Nuclear plants insulate France from the energy crisis. Now Macron is doubling down on them in a \$35 billion moonshot plan, 2021.10.12

World Nuclear News, EDF creates new Nuward SMR subsidiary, 2023.03.30

Mitsui, France Driving Europe's Nuclear Power Renaissance, 2023.03

World Nuclear News, Prelicensing process for Nuward SMR begins, 2023.07.21

Nucleus, SMR Technology The French approach

World Nuclear News, Core module completed for Chinese SMR, 2023.07.14

Energy Central, Developing countries look to China in push for smaller nuclear reactors, 2023.09.06

South Asian Voices, Building a Case for Small Modular Reactors in Pakistan, 2023.04.18

Global Times, Developing countries look to China in push for smaller nuclear reactors, 2023.09.05

The Diplomat, Nuclear Energy Has Become One of the Priorities in China-France Cooperation, 2023.04.11

US Department of State, United States and Japan Announce Partnership with Ghana to Support its Goal of Being the Mover in Africa for Small Modular Reactor Deployment, 2022.10.26.

World Nuclear News, USA, Japan partner with Ghana on SMR deployment, 2023.10.28.

The Japan Times, Amid energy challenges and green shift, Japan eyes new nuclear tech, 2022.09.13.

Energy Intelligence, Japan's Chubu Invests in US SMR Developer NuScale, 2023.09.08.

Mitsui.com, REEVALUATION OF NUCLEAR POWER BEGINS AROUND THE WORLD, 2023.07.

Science Direct, 14 – Small modular reactors (SMRs): The case of Argentina, 2021

Stanford, Argentina's Nuclear Energy Program, 2022.03.19



(우)05718 서울특별시 송파구 중대로 109, 대동빌딩 6층, 한국원전수출산업협회
Tel: 02-6284-8735 Fax: 02-3416-3951 www.e-kna.org

한국원전수출산업협회

KNA