

Issue Monitor

미래 에너지 시장의
올라운더(All-rounder)를 꿈꾸는 SMR

January 2024 | 제161호



삼성KPMG 경제연구원

—
home.kpmg/kr

미래 에너지 시장의 올라운더(All-rounder)를 꿈꾸는 SMR

Issue Monitor | January 2024

Contacts

삼성KPMG 경제연구원

엄이슬
책임연구원

Tel: +82 2 2112 3918
yeom@kr.kpmg.com

김나래
수석연구원

Tel: +82 2 2112 7095
nkim15@kr.kpmg.com

정미주
책임연구원

Tel: +82 2 2112 4802
mijujung@kr.kpmg.com

한국원자력협력재단

정흥화
실장

Tel: +82 42 867 0167
hhjeong@konicof.or.kr

이동윤
연구원

Tel: +82 42 867 0169
dylee@konicof.or.kr

감수

한국전력국제원자력대학교(KINGS)

김궁구
석학교수

본 보고서는 삼성KPMG 경제연구원과 한국원자력협력재단이 협력하여 일반적인 정보를 제공할 목적으로 작성되었으며, 보고서에 포함된 자료의 완전성, 정확성 및 신뢰성을 확인하기 위한 절차를 밟은 것은 아닙니다. 본 보고서는 특정 기업이나 개인의 개별 사안에 대한 조언을 제공할 목적으로 작성된 것이 아니므로, 구체적인 의사결정이 필요한 경우에는 당 법인의 전문가와 상의하여 주시기 바랍니다. 삼성KPMG와 한국원자력협력재단의 사전 동의 없이 본 보고서의 전체 또는 일부를 무단 배포, 인용, 발간, 복제할 수 없습니다.

Contents

2023년 8월, 미국 스리마일 섬 사고 이후 신규 건설허가를 받은 최초 원전이 가동을 개시하며 원전 부활의 신호를 알렸다. 원자력의 역할이 넷제로 달성을 위해 필수적인 것으로 인정되는 가운데, 소형모듈원자로(SMR)가 대형원전 대비 강점을 보이며 주목받고 있다. 발전 뿐 아니라 수소 생산, 지역난방과 공정 열, 담수 생산, 그리고 우주 탐사 및 방산 등에서 활약이 기대되는 SMR. 본 고에서는 SMR의 다양한 활용과 성공적인 SMR 시장진출을 위한 고려사항들을 제시하였다.

Page

Infographic Summary

3

넷제로 달성을 위한 하나의 Key, 원자력

4

미국 보글 3호기 원자로의 가동 시작, 원전 부활의 신호탄?

4

원자력, 무기에서 발전에 이르기까지

5

원자력에 대해 지속되는 찬반 논쟁

6

그럼에도 불구하고, 다시 원자력

7

SMR, 원전 크기는 작아지고 시장은 커지고

8

원자력 발전소 해부

8

원자력 시장의 밸류체인(Value Chain) 분석

9

왜 특히 SMR(Small Modular Reactor) 일까?

11

단순히 크기 변화가 다가 아닌 SMR

12

2030년 상용화시 기대되는 SMR의 다양한 활용도

13

발전용 SMR

13

수소 생산용 SMR

19

지역난방과 공정 열, 담수 생산용 SMR

22

우주 탐사 및 방산용 SMR

23

결론 및 시사점

26

성공적인 SMR 시장진출을 위해 고려해야 할 사항들

26

글로벌 SMR 전쟁 속 부진한 국내 상용화 점수, 첫 호기 건설에 집중할 때

27

C2N(Coal to Nuclear) 논의가 활발한 북미, 동유럽 공략이 유리

29

독자모델 개발과 특허 확보에 골든 타임을 놓치지 말 것

31

Infographic Summary

넷제로 달성을 위한 하나의 Key, 원자력

에너지 친환경성

낮은 이산화탄소 등가배출량
(g-CO₂/kWh)

10

원자력

991

석탄

Source: IAEA

에너지 경제성

낮은 국내 정산단가
(원/kWh)

52.5

원자력

299.9

유류

Source: EPSIS

에너지 안보

낮은 가격 변동성(연료비 단가)
(원/kWh)



Source: EPSIS

2030년 상용화시 기대되는 SMR의 다양한 활용도

왜 특히 SMR일까?

부품 수출에 유리

짧은 건설공기

중대사고 확률 축소

분산전원에 적합

민간 주도 사업 가능



발전

- 국내의 SMR 발전소 건설, O&M, 해체
- 발전용 SMR의 주기기 및 부품 수출
- 전기트럭을 위한 EV 충전소



수소 생산

- 다양한 수소 생산 및 생산 플랜트의 수출
- SMR 수소 공급망 구축



지역난방, 공정 열

- SMR 핵에너지의 열로 지역난방 공급
- 산업 공정에 필요한 열에너지 공급



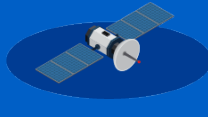
담수 생산

- SMR 핵에너지의 열로 바닷물에서 염분을 제거한 담수 생산



핵추진로켓, 핵추진우주선

- SMR 핵에너지의 열로 추진체를 가열하여 로켓 및 우주선 발사



위성, 우주기지

- SMR 핵에너지의 열로 위성의 추진력을 얻거나 전기 변환을 통해 위성 및 우주기지의 전기 동력원으로 활용

성공적인 SMR 시장진출을 위해서는

부진한 국내 SMR 상용화 점수,
첫 호기 건설에 집중할 때

C2N 논의가 활발한
북미, 동유럽 공략이 유리

독자모델 개발과 특허 확보에
골든 타임을 놓치지 말 것

넷제로 달성을 위한 하나의 Key, 원자력

미국 보글 3호기 원자로의 가동 시작, 원전 부활의 신호탄?

“

美 보글 3호기 원자로의
운전 가동, 원전 부활의
신호탄이 될 것인가?

”

2023년 8월, 미국에서 스리마일 섬 사고('79년) 이후 신규 건설허가를 받은 최초 원전이 가동을 개시했다. 이는 조지아 주에 위치한 보글 3호기로 최대 출력 1,100MW를 보유하여 50만 가가와 기업에 전력을 공급할 수 있다. 스리마일 섬 사고 이후 미국은 한동안 신규 원자로 건설을 승인하지 않다가 2012년 미국 원자력 위원회(Nuclear Regulatory Commission, NRC)가 30여년 만에 원자로 건설을 승인하였는데, 그것이 바로 보글(Vogtle) 원자로이다.

보글 3호기와 함께 건설이 승인된 보글 4호기도 완공이 임박했다. 건설 예산 초과와 투자자 파산으로 예정 시기보다는 늦어졌지만 최근 핵연료 장전 승인이 떨어져 2024년 3월에는 가동에 들어갈 것으로 전망된다. 해당 사업을 맡은 미국 전력기업 조지아 파워(Georgia Power)에 의하면 보글 원자로는 향후 60~80년 간 고객에게 신뢰할 수 있고 배기가스를 배출하지 않는 청정에너지를 제공할 것으로 기대된다. 또한, 미국 원자력에너지협회의 마리아 코르스닉(Maria Korsnick) 대표는 “보글 3호기의 상업 가동은 미국 원자력 산업에 중요한 성과이자 전 세계적으로 깨끗하고 신뢰할 수 있는 에너지 솔루션을 발전시키는 이정표”라고 언급했다.

그러나 상상을 초월하는 원자력의 힘에 대한 우려도 여전히 만만치 않다. “나는 이제 죽음이요, 세상의 파괴자가 되었다.” 원자폭탄을 개발한 오펜하이머는 역사상 최초의 핵실험 이후 힌두교 경전을 인용해 이렇게 말했다고 전해진다. 명암이 확실한 원자력, 미국에서의 신규 원자로 운전은 과연 원전 부활의 신호탄이 될 것인가?

[미국 조지아 주 소재 보글(Vogtle) 원자력 발전소]



Source: Shutterstock

“

원자력의 힘을 유익하게
활용하는 방안, 원자력 발전

”

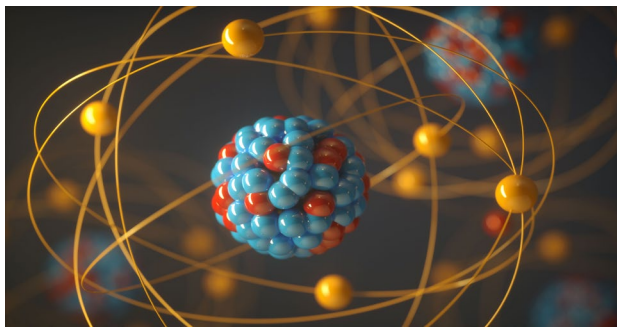
원자력, 무기에서 발전에 이르기까지

먼저, 인류가 원자력을 알게 된 것은 고작 100여년 전 일이다. 1895년 독일 물리학자 뢰트겐이 방사선인 X선을 최초로 발견하였고, 마리 퀴리가 방사성 물질에 대한 연구를 시작하면서 원자력의 존재가 알려진다. 원자력은 하나의 원자핵이 쪼개지거나 (핵분열) 두 개의 원자핵이 합쳐지는(핵융합) ‘핵반응’을 통해 발생하는데, 현재 우리가 사용하고 있는 원자력에너지 기술은 대부분 핵분열 반응을 사용한다. 이때, 핵분열에 필요한 대표적인 물질이 우라늄이며, 우라늄은 지구에 미량으로 존재한다. 또한 우라늄 중에도 핵분열에 필요한 U²³⁵는 자연상태에서 1%도 존재하지 않아 농축과정을 거쳐 추출해야 한다.

매우 큰 원자력 에너지를 가지고 있는 우라늄은 안타깝게도 제2차 세계대전에서 원자폭탄으로 개발되어 많은 이의 목숨을 앗아 가기도 했다. 2022년 기준으로 지구 상 9개국만 핵무기를 보유하고 있으며, 만 개가 넘는 핵탄두가 존재한다.

다행히 인류는 원자력의 엄청난 힘을 유익하게 활용하는 방안을 습득하기도 했는데, 바로 핵분열 원자력 에너지 자원을 사용하여 전력을 생산하는 것이었다. 1954년 최초의 원자력 발전소가 당시 러시아(구 소련)에 설립되었다. 원자력 발전은 기존 화석연료와는 차원이 다른 경제성을 지녔으며, 풍력보다 낮은 이산화탄소 배출로 대기오염에서도 자유롭다. 또한, 우리나라처럼 천연자원이 부족한 국가에게는 에너지 자립도도 높여준다.

[원자의 거대한 에너지: 핵분열]



- 핵분열은 만물을 구성하는 요소인 원자 한가운데 놓인 원자핵이 무거운 원자핵에서 가벼운 원자핵으로 분열되는 현상을 의미
- 원자핵은 원자의 양성자들과 중성자들이 매우 단단하고 강한 힘으로 결합되어 있는데, 이를 분열시키는 과정에서 원자핵을 서로 결합시키고 있던 에너지가 방출됨

Source: 한국원자력연구원

[전 세계 핵무기 보유 현황¹⁾]

구분	국가	핵탄두 수(개)
NPT ²⁾ 인정하의 핵무기 보유 5개국	러시아	5,977
	미국	5,428
	중국	350
	프랑스	290
	영국	225
Non-NPT 핵무기 보유 3개국	파키스탄	165
	인도	160
	이스라엘	90
미발표 1개국	북한(추정)	20
		총계 1만 2,705

Source: 스톡홀름국제평화연구소(SIPRI)

Note 1): 2022년 1월 기준 추정치

Note 2): NPT는 핵확산금지조약(Nuclear Nonproliferation Treaty)

원자력에 대해 지속되는 찬반 논쟁

원자력의 많은 장점에도 불구하고, 원자력을 현실에서 사용할 것인가에 대해서는 오랜 기간 찬반 논쟁이 지속되어 왔다.

찬성 측에서는 원자력의 강점으로 첫째, 원자력의 탄소 배출이 재생에너지와 비슷한 수준으로 깨끗한 청정에너지원임을 강조한다. 두번째 강점은, 우수한 경제성으로 원자력의 국내 정산단가(2022년 기준 53원/kWh)는 발전원 중에서 가장 낮다. 더불어 태양광 및 풍력과 같은 재생에너지 대비 기후, 입지조건 등 외부환경에 둔감한 덕분에 가격변동성이 적어 에너지 안보 측면에서도 우월하다. 실제로 발전량의 70%를 원전에 의존해온 프랑스는 러-우 전쟁 중에서도 러시아산 석유 및 가스 의존도가 높은 다른 유럽 국가들에 비해 상대적으로 국제 에너지 가격변동에 큰 영향을 받지 않고 전력을 생산해올 수 있었다. 즉, 원자력은 탄소 배출이 적은 에너지를 값싸고 안정적으로 생산할 수 있어 에너지 전환의 핵심 3요소를 충족한다.

그러나 미국 스리마일 섬('79년), 우크라이나 체르노빌('86년), 일본 후쿠시마('11년) 등 대규모 사고가 발생하면서 원자력 발전에 대한 위험성이 대두되었으며, 그 밖에도 사용후 핵연료와 같은 방사성 폐기물의 안전성에 대한 문제로 찬반 의견은 팽팽히 대립해왔다. 원전은 한때 글로벌 발전량 17% 이상을 차지하며 영광을 누리던 시절도 있었지만, 대규모 사고 이후로는 반세기 동안 미국과 독일, 벨기에, 스페인 등 일부 유럽 국가를 중심으로 입지가 축소되었다. 그러나 최근 기후위기, 그린플레이션과 에너지 안보가 부각됨에 따라 원자력이 다시 주목받고 있다.

“ 원자력에 대한 찬반 논쟁이 지속돼 온 가운데 최근 기후위기, 그린플레이션, 에너지 안보 부각에 따라 다시 주목

”

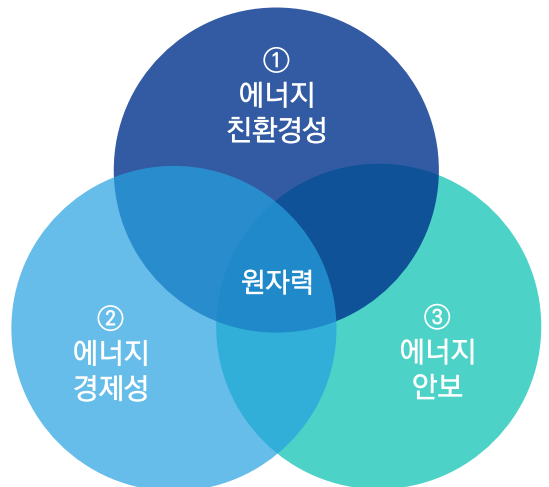
[발전원별 이산화탄소 등가배출량]

(g-CO₂/kWh)



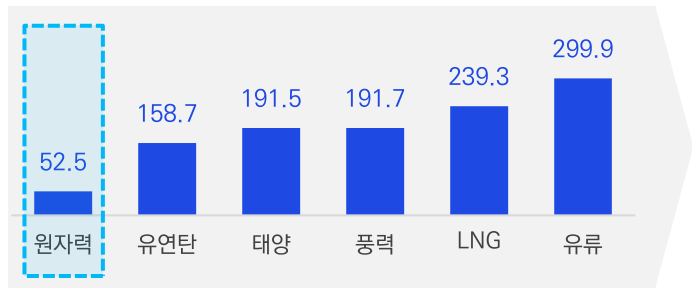
Source: 국제원자력기구(IAEA)

[에너지 전환의 핵심 3요소를 충족하는 원자력]



[국내 발전원별 정산단가 비교]

(원/kWh)



Source: 전력통계정보시스템(EPSS)

Note: 2022년 기준

Source: 삼정KPMG 경제연구원



EU와 한국 택소노미에
원자력이 포함되고,
주요국들이 강력한 원자력
부양 의지를 보이고 있음



그럼에도 불구하고, 다시 원자력

EC의 자문기구인 공동연구센터(Joint Research Center, JRC)에서 원자력이 다른 에너지원에 비해 건강과 환경에 더 해롭다는 과학적인 근거가 없다는 결론을 발표한 후 EU는 종합적인 검토 끝에 2022년 원자력과 천연가스를 EU 택소노미(Taxonomy)에 조건부로 포함하기로 결정했다. 택소노미는 녹색 경제활동을 판별하는 기준으로 이에 포함되지 않은 업종들은 투자에서 전략적으로 배제 가능한 반면 포함된 업종에 대한 투자는 격려된다. 따라서 방사성 폐기물의 안전관리와 같은 조건을 만족하면 원자력 사업에 대한 친환경 투자자금의 유입이 용이해진 것이다.

한국에서도 2022년 원자력이 천연가스와 함께 한국형 녹색분류체계인 K-택소노미에 포함됐다. 이러한 결정은 원자력이 인류가 최종 지향점으로서 추구해 나가야 할 에너지원은 아니지만 그린 전환에 도움되는 절충안이 된다는 점을 시사하는 것이다. 2023년 11월 기준 글로벌 원자력 발전소는 436기(392GW)가 운영되고 있으며, 석탄과 함께 원자력을 기저발전으로 활용하는 한국에서는 25기가 운영되고 있다.

최근 주요국들은 원전에 다시 손을 내밀고 있다. 2021년 미국 에너지부는 원자력을 무탄소 발전원으로 정의하면서 현존 원전을 지속하고, 차세대 원전인 소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR)를 2029년 미국 최초로 상업운전 개시한다는 계획을 발표했다. 유럽에서는 프랑스, 영국 등도 적극적인 원자력 정책을 발표했다. 또한, 중국은 500조 원에 달하는 투자 계획과 150기의 원전 설립목표를 밝히고 일본도 원전 비중 목표를 높였다. 각국의 강력한 원자력 부양 의지에 따른 구체적인 움직임들은 후술하도록 하겠다.

[EU 택소노미에 포함된 원자력 관련 경제활동]

구분	주요내용
경제활동	안전기준을 강화하고 방사성 폐기물을 최소화하기 위한 폐쇄형 연료주기의 4세대 원자로 기술 개발
	신규 원자력 발전시설(3세대)은 2025년까지 건설 허가 가능
	수명연장을 위한 기존 원자력 발전시설의 설비개선은 2040년까지 가능

[주요국 원전 운영 및 건설 현황]

구분	운영 중		건설 중		원자력 발전 비중 ¹⁾ %
	대	GW	대	GW	
미국	93	95.8	1	1.3	19.4
프랑스	56	61.4	1	1.7	66.5
중국	55	53.3	25	28.5	4.7
러시아	37	27.7	3	2.8	19.9
한국	25	24.5	3	4.2	27.9
인도	22	6.8	8	6.7	2.9
일본	33	31.7	2	2.8	4.3
영국	9	5.9	2	3.4	16.1

Source: European Commission

Source: World Nuclear Association(2023.11)
Note 1): 각국의 원자력 발전 비중은 2020년 기준

SMR, 원전 크기는 작아지고 시장은 커지고

원자력 발전소 해부

본 보고서는 SMR에 대한 이야기를 하기 전에 먼저 대형원전의 종류 및 구조를 해부하고, 밸류체인 전반을 분석하고자 한다. 이를 통해서 대형원전 대비 SMR이 갖는 차별화된 강점을 파악하고, 밸류체인 부문별 동향과 함께 어느 부문의 진입장벽이 높은 상황인지 알아보기 위함이다. 더불어 향후 SMR의 활용도 및 시장 유망성과 이에 따른 정부와 기업들의 대응방향 및 고려사항들을 제시하겠다.

먼저, 원자로는 노심, 연료, 냉각재, 감속재 등에 따라서 다양한 노형으로 나뉜다. 노심은 핵연료로 핵분열을 일으키는 공간이며, 여기서 발생하는 열을 열교환기로 전달하는 냉각재가 원자로 안정성의 핵심이다. 냉각재로는 주로 물을 사용하며, 열 전달 방식에 따라 두가지 대표 노형인 가압경수로(Pressurized Water Reactor, PWR), 비등경수로(Boiling Water Reactor, BWR)로 구분된다.

원래 원자로의 시작은 군사용이었다. 미 해군에서는 최초의 원자력 잠수함 건조를 위해 GE와 웨스팅하우스(Westinghouse)를 경쟁시켰는데, 당시 웨스팅하우스에서 개발한 가압경수로가 원자력 잠수함 노틸러스 호에 채택되었다. 가압경수로는 냉각수에 압력을 가해 물이 끓지 않도록 하는 구조로 고압에서 작동하므로 높은 부품성능이 필요하지만 운전 안정성이 크다는 강점을 가진다. 이후 1950년대 웨스팅하우스는 펜실베니아 주에 상업용 원자력발전소를 건설하여 전기를 공급하게 되었는데, 이러한 웨스팅하우스 모델이 전 세계로 수출되는 과정에서 가압경수로가 가장 보편적인 원자로 형태가 되었고 한국에서도 대부분 이 모델을 채택하고 있다.

“
美 해군 원자력 잠수함에 채택된 웨스팅하우스의 가압경수로(PWR)가 전 세계 가장 보편적인 원자로 노형



[글로벌 대표 원자로(Nuclear Reactor) 노형 비교]

구분	가압경수로	비등경수로
	Pressurized Water Reactor	Boiling Water Reactor
노심 높이/지름(m)	4.2/ 3.4	3.7/ 4.7
용기 형태	실린더	실린더
연료	이산화우라늄	이산화우라늄
농축도	농축 우라늄 (3~5%)	농축 우라늄 (3~5%)
냉각재	경수	경수
냉각재 온도(°C)	330	285
감속재	경수	경수
열효율(%)	31~36	30~35

Source: 한국전력기술

[원자력 시스템의 변천사]

1세대	'50~'60년대 초기	다양한 노형으로 개발된 원전들의 실증로 미국의 쉬핑포트(Shippingport) 러시아 오비니스크(Obninsk)
2세대	'70년대 상용화	대용량 상용 원전 PWR, CANDU, BWR 고리, 월성(한국)
3세대	'90년대 이후	설계 개선으로 안전성과 경제성 향상 System80+(미국) APR1400(한국)
3+세대	'00년대 이후	혁신개념 적용으로 안전성과 경제성 향상 AP1000(미국), APR+(한국)
4세대 ¹⁾	'30년경 상용화 목표	혁신 기술목표를 만족할 차세대 원자로

Source: 한전원자력연료, 한국전력기술
Note 1): 원자력 선진국으로 구성된 제4세대 원자력시스템국제포럼 (Generation IV International Forum, GIF)은 전문가의 검토를 거쳐 6개 원자로형을 4세대 방식으로 선정하고, 2030년경 상용화를 목표로 공동연구를 추진하고 있음

“ 소듐냉각고속로(SFR), 초고온가스로(VHTR) 등 6개 노형이 가장 최신인 4세대 방식으로 선정 ”

한편, GE의 비등경수로는 원자로에서 직접 물을 끓여 증기를 생산하는 방식의 원자로다. 이 모델 또한 높은 안정성과 경제성을 입증 받아 많은 기업들의 수요 요청을 받으며 확산되었는데, 글로벌 기준 약 10%가 비등경수로 모델을 따르고 있다. 다만, 냉각재 누출 시 방사선 유출 가능성이 상대적으로 높다는 단점이 있는데, 2011년 후쿠시마 원자력 발전소 사고 당시의 원자로가 바로 비등경수로였다. 물론 PWR도 냉각재 누출 시 방사선 누출 가능성은 존재하나 BWR에서는 노심 냉각재가 증기로 변환되어 터빈에 분사되기 때문에 터빈건물도 방사선 차폐가 필요하다는 단점이 있다.

이렇게 보편적인 모델로 등장한 PWR, BWR 등이 1990년대 이후 표준·개량화를 거쳐 미국의 AP1000, 한국의 APR+ 등으로 진화했고 이들이 3세대+ 원자로에 속한다. 이후 원자력 선진국으로 구성된 원자력시스템국제포럼(Generation IV International Forum, GIF)은 소듐냉각고속로(Sodium-cooled Fast Reactor, SFR), 초고온가스로(Very High Temperature Gas-cooled Reactor, VHTR) 등 6개 노형을 4세대 방식으로 선정하고, 2030년경 이내 상용화를 추진하고 있다.

원자력 시장의 밸류체인(Value Chain) 분석

원자력 시장의 밸류체인을 살펴보면 핵연료 → 설계 → 기기제조 → 시공 → 운영 →

[원자력 밸류체인(Value Chain) 생태계¹⁾]

핵연료	설계	기기제조	시공	운영	해체
<ul style="list-style-type: none"> 선행 핵연료 주기는 채광 → 정련 → 농축 → 성형가공의 순서 핵분열을 일으키는 우라늄 U²³⁵를 얻기 위한 작업 핵확산 방지를 위해 농축시설은 특정국에만 위치 '30년까지 우라늄 초과수요 예상 우라늄 농축도를 5~10%로 높인 차세대 핵연료 개발 중 	<ul style="list-style-type: none"> 미국 GE, Westinghouse 등 소수기업만 원자로 설계기술 개발, 수출 미국의 원전기술을 수입한 일본, 독일, 프랑스, 한국, 중국은 Tier 2단계까지 내재화 성공 	<p>[기기제조]</p> <ul style="list-style-type: none"> 원자로 압력용기: 심장인 원자로 노심을 보호하는 원자로 갈비뼈 역할, 생산설비 확보에 대규모 자금이 필요하고 기술력이 요구되므로 소수 업체에서 생산 원전 제어장비: 기기 검증의 어려움으로 소수업체만 존재 증기발생기, 터빈: 설계 복잡성 등으로 소수업체만 존재 제어봉, 냉각재 펌프: 개발 비용 대비 수요가 한정적이어서 개발이 제한 <p>[시공]</p> <ul style="list-style-type: none"> 국내외 건설사들 참여 활발 <p>[운영]</p> <ul style="list-style-type: none"> 국내외 기존 발전설비사 참여 활발 	<ul style="list-style-type: none"> 후행 핵연료 주기는 재처리 → 처분 또는 직접 처분 두 가지²⁾ 재처리: 사용후 핵연료에서 재활용 가능한 우라늄과 플루토늄을 추출 처분: 방사선 폐기물을 저·중·고준위로 분류하여 처리 원전 해체: 초기 원전 도입국 중심으로 본격 확대될 시점이 도래 		

Source: 삼성KPMG 경제연구원

Note 1): 한 기업이 밸류체인 전반에 걸친 경우에는 대표적인 사업 부문에만 표기

Note 2): 한국은 재처리를 하지 못하기 때문에 직접 처분 또는 파이로 공정후 처분을 검토 중

“

벨류체인인 핵심인 설계
 부문은 미국기업의 활약이
 독보적이며,
 국내기업은 주로 기기제작,
 설치 및 시공, 운영 부문을
 담당

”

해체 단계로 구성된다. 그러나 그간 글로벌 탈원전 추세로 많은 기업들이 시장에서 퇴출되었고, 스리마일 섬 사고 이후 미국에선 기자재 공급 및 시공 기업들은 사라지고 대부분 핵연료, 설계, 운영, 해체 관련 기업들만 남았다. 미국의 웨스팅하우스, GE와 같은 설계기업들은 고유의 원전설계 기술을 수출하면서 주변국과 패권관계를 맺어왔고, 한국은 그 과정에서 기술을 이전 받아 상당 부분 내재화에 성공했다. 미국 컨버스천 엔지니어링(Combustion Engineering)의 기술을 기반으로 개발된 한국형 원전 APR1400은 2009년 아랍에미리트(UAE)로 수출된 바 있으며, 최근 체코와 폴란드로 수주도 검토되고 있다.

기기제조 부문을 살펴보면 우선 원자로 압력용기는 심장인 원자로를 보호하는 갈비뼈 역할을 하는데, 생산설비에 대규모 자금이 필요하고 높은 기술력이 요구된다. 현재 일본의 미쓰비시(Mitsubishi)와 IHI, 프랑스 아레바(Areva), 스페인 엔사(Ensa) 등 소수 업체에서만 생산되는 상황이며, 국내에서는 두산에너지빌리티가 유일한 생산기업이다. 원전 제어장비의 경우에도 기기 검증의 어려움으로 소수업체만 존재하는 상황이며, 설계가 복잡한 증기발생기와 화력발전소 보다 더 큰 출력이 필요한 대형터빈도 생산업체가 소수이다. 또한, 제어봉 및 냉각재 펌프의 경우에도 개발비용 대비 수요가 한정적이기 때문에 개발이 제한되고 있다.

핵연료 부문도 중국의 CNNC, 러시아의 로사톰(Rosatom), 캐나다의 카메코(Cameco) 등 소수 기업들이 독점하고 있다. 우라늄 매장국가가 한정적이고 핵확산을 막기 위해 국제적으로 농축시설이 특정국에만 위치하도록 허가되어 있기 때문에 국내기업은 해당사항이 없다. 그런데 최근 다시 원자력 붐이 개화되면서 채광, 농축 등 선행 핵연료 부문이 아닌 사용후 핵연료 처분 및 재사용과 원전 해체 부문이 벨류체인 내에서 조명을 받고 있다. 핵연료부터 발전소 건설까지 모두 다루던 프랑스 아레바는 사명을 오라노(Orano)로 바꾼 뒤 원전 건설에서 손을 떼고 후행 핵연료와 원전 해체 시장에 뛰어들고 있다. 이에 국내기업들도 원전 해체 경험은 없지만 기보유한 발전소 건설 역량을 활용하여 빠르게 대응하고 있다.

결국 기존 원자력 시장의 벨류체인을 평가해보면 국내 원전 관련 기업들이 비교 우위를 갖는데 한계가 있음을 알 수 있다. 특히 핵심이 되는 설계부문의 경우 미국기업의 활약이 독보적이며, 국내기업은 주로 기기제작, 설치 및 시공, 원자로 운영 부분에서 강점을 보이고 있다. 원자로 설계의 원천기술이 없었던 우리나라는 원천기술에 대한 명확한 기술이전 협약이 없었기 때문에 우리 원자로 노형에 대한 기술 특허문제가 현재도 이슈화되고 있다. 최근 웨스팅하우스가 APR1400 기술에 대한 원천기술 소유권을 주장하면서 한수원에 대하여 원전 수출금지과 손해배상 책임소송을 내면서 대형원전 수출에 대한 불확실성이 증대되고 있는 상황이다.





300MW 이하의
중소형·모듈형 원자로를
통칭하는 SMR은 기존
대형원전 대비 여러 강점을
갖음



왜 특히 SMR(Small Modular Reactor) 일까?

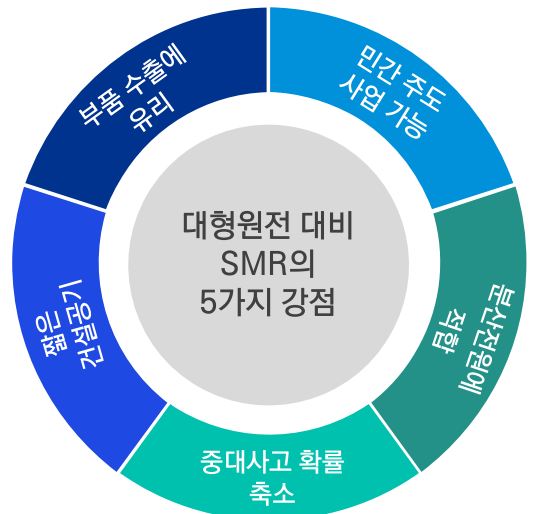
앞서서는 무탄소 에너지원으로서 원자력의 친환경성, 경제성, 그리고 에너지 안보 측면의 우수성을 살피고, 현재 시장에 나와있는 대형원전의 종류 및 구조와 밸류체인을 분석했다. 그러나 대형원전은 대용량으로 인해 건설비가 상승하여 초기 투자비가 크고, 건설 기간이 길고, 인허가 불확실성이 존재하기 때문에 건설사업의 리스크가 크다. 따라서 모든 국가가 원전을 건설하기에는 한계가 있는 가운데 이를 해결하기 위한 대안으로 최근 소형모듈원전(Small Modular Reactor, SMR)이 대두되고 있다.

SMR은 기존 원전대비 적은 용량(300MW 이하)의 중소형·모듈형 원자로를 통칭한다. SMR은 대형원전과 비교하면 상대적으로 설계가 단순하고 최대 80% 단계까지 공장에서 제작이 가능하다. 가장 큰 차이는 SMR의 경우 주요 배관의 용접 등 현장에서의 작업량이 확실히 줄어들기 때문에 건설공기가 짧아진다는 점인데, 이로 인해 초기 건설비용도 절감이 가능하다. 짧은 공기, 적은 초기비용은 정부 뿐 아니라 민간이 사업을 주도하는 것을 가능하게 하는 핵심이 된다. 또한, SMR은 인간의 개입을 배제한 피동형 안전설계와 원전 사고에서 가장 흔한 냉각재 배관 파손으로 인한 방사능 유출 가능성을 제거할 수 있는 일체형 설계로 사고 리스크도 크게 줄였다.

대형원전은 방사능 누출 시 주민 보호를 위해 반경 20~30km의 방사선비상계획구역(Emergency Planning Zone, EPZ)을 확보해야 하지만 SMR은 안전성이 높아 EPZ가 부지경계로 축소돼 수요 지 인근 건설이 가능하다는 것도 강점이다. 설계 특성상 부하 추종 운전이 용이해서 신재생에너지의 간헐성 극복을 위한 에너지원으로 활용이 가능한데, 이렇게 인구 밀집지역 근처에 적은 부지로 건설이 가능하기 때문에 분산전원에 적합하다는 점도 SMR이 미래 에너지원으로 각광받는 이유다.

[대형원전 VS. SMR 비교]

구분	대형원전	SMR
출력	1,200~1,600MW	300MW 이하
부지면적	573m ² /MW (APR1400 기준)	대형원전 대비 절반
건설 리스크	현장에서 발전소 건설	모듈형 생산방식
건설기간&사업비	긴 공기(6년 이상)와 높은 초기비용	짧은 공기(3년 이하)와 적은 초기비용
안전성	인간 개입이 있어 사고발생 위험 존재	피동형 안전설계 ¹⁾ , 일체형 설계 등으로 사고발생 위험 낮춤
경제성 확보	규모의 경제	대량생산
운영 탄력성	대용량 출력 고정 (기저부하)	부하 추종 운전이 용이
활용 부문	발전	발전, 수송, 수소생산 등 산업에 다양하게 적용



Source: 삼성KPMG 경제연구원

Note 1): 피동형 안전설계는 인간의 개입 없이 중력, 대류현상으로 작동하는 원자력 발전소 안정장치로 인간의 조작 실수 및 대처능력 미흡으로 인한 사고를 방지



SMR이 에너지 시장의
게임 체인저로 주목받는
이유는 단순히 크기의
문제가 아니라 혁신적인
활용도 때문



단순히 크기 변화가 다가 아닌 SMR

2030년도 상용화를 목표로 전 세계에서 경쟁적으로 개발되고 있는 SMR은 2040년 까지 3,000억 달러 규모로 성장할 것으로 예측된다. 미국 아이다호국립연구소에서는 분산전원 시스템에 대한 수요 확대로 2030년에는 신규원전 중 SMR이 차지하는 비중이 30% 수준으로 증가할 것이라고 전망하는데, 2050년에 이르면 글로벌 신규원전의 절반이 SMR이 될 것으로 예측하고 있다.

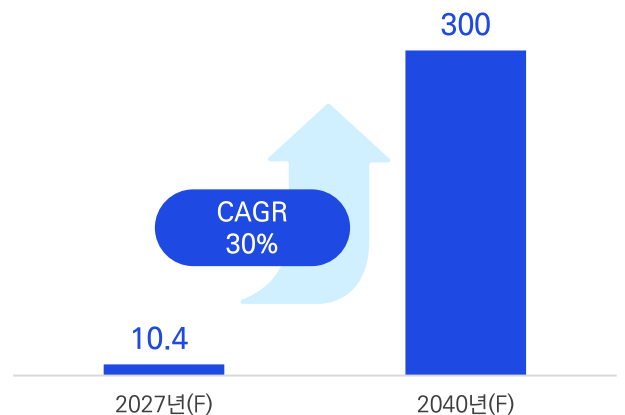
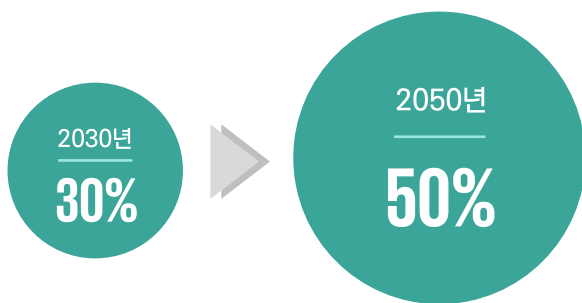
원래 원자로는 선박용으로 개발된 것이기 때문에 작은 크기로 만드는 것이 사실 최신 기술은 아니다. 그럼에도 SMR이 최근 들어 게임 체인저로 주목받는 이유는 단순히 크기의 문제가 아니라 혁신적으로 다양한 활용도가 기대되기 때문이다. SMR은 발전 뿐 아니라 수소 생산, 지역난방 및 공정 열 공급, 담수 생산 등이 가능하다. 이때, SMR 중에서도 크기가 더욱 작은 10MW 이하 규모는 초소형모듈원자로(Micro Modular Reactor, MMR)로 분류되는데, 이는 우주 발사체에 싣기가 용이하여 특히 우주 공간에서의 활약도 기대된다. 따라서 핵추진로켓과 핵추진우주선, 위성 및 우주기지까지 광범위한 용도에서 활용이 가능한 것이 SMR의 큰 장점이다.

IAEA(2022) 기준 약 80여종의 SMR이 개발 중에 있으며, 기술표준은 부재하는 상황이다. 현재 주력으로 개발중인 원자로는 크게 4가지로 구분되는데, 기존의 가압경수로 기술 기반, 가스냉각로(Gas Cooled Reactor) 기술 기반, 고체 핵연료 대신 염화물에 핵연료를 녹여서 원자로 연료로 사용하는 용융염원자로(Molten Salt Reactor, MSR) 기술 기반, 그리고 냉각재로 납을 사용하는 납냉각고속로(Lead-Cooled Fast Reactor, LFR)나 소듐냉각고속로(Sodium-Cooled Fast Reactor, SFR) 등 액체금속냉각로 기술 기반으로 분류된다.

[신규원전 중 SMR 건설 비중 전망]

[글로벌 SMR 시장규모 전망]

(십억 달러)



Source: 아이다호국립연구소
Note: 2021년 기준

Source: 세계경제포럼

2030년 상용화시 기대되는 SMR의 다양한 활용도



SMR은 발전 뿐 아니라 수소 생산, 지역난방 및 공정 열 공급, 담수 생산, 핵추진로켓·우주선, 위성 및 우주기지 등 다양한 용도에서 활용

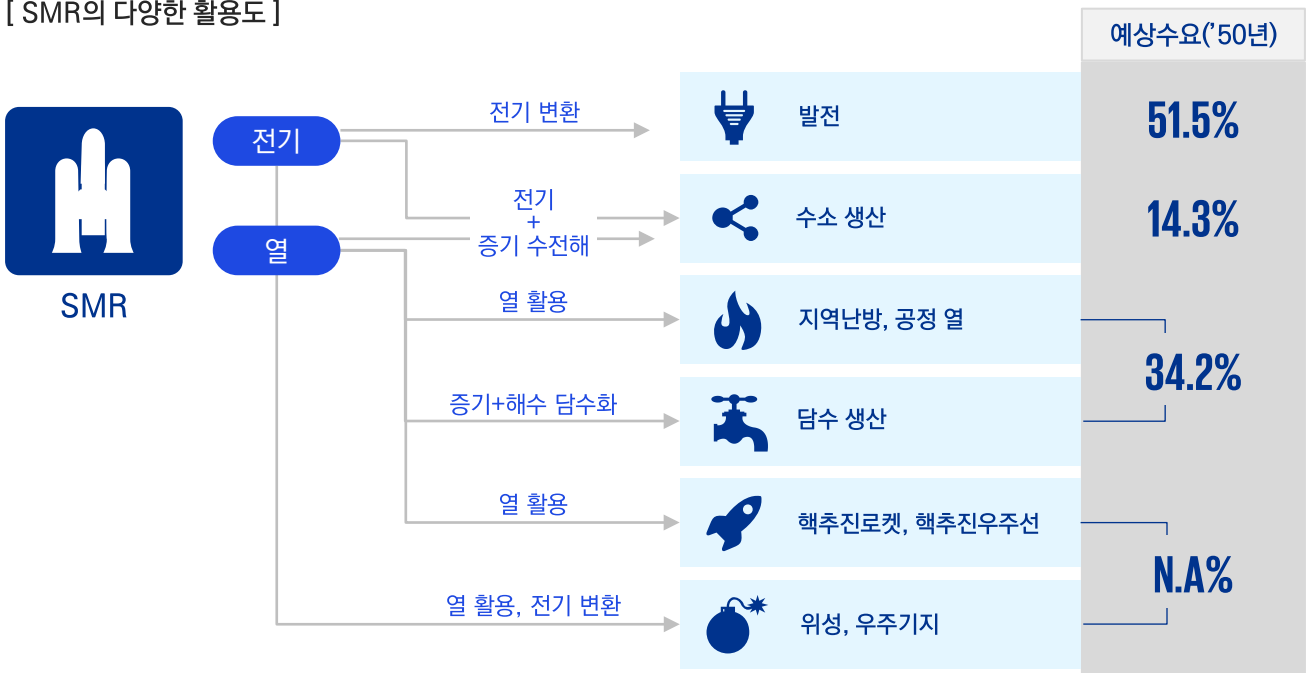


SMR이 적극적으로 사용될 다양한 분야를 살펴보면, 단연 발전 부문을 들 수 있다. 핵분열을 일으키는 과정에서 막강한 열에너지가 발생하는데, 이때의 열로 물을 증발시켜 생긴 수증기 압력을 통해 터빈을 돌려 전기 생산을 하는 것이 바로 원자력 발전이다. 한편, 이러한 전기 변환 외에 방출된 원자력 자체의 열과 증기를 통해 수소 혹은 담수를 생산하거나, 지역난방 혹은 산업공정에 필요한 열을 공급할 수 있다. 또한, 원자력을 동력 삼는 핵추진로켓이나 핵추진우주선을 통해 더욱 적극적인 우주 탐사가 가능하고, 위성이나 우주기지 동력원으로서도 활용이 무궁무진하다. 핵추진을 활용한 선박 및 잠수함은 사실 대형원전 이전부터 사용되어 오던 오래된 활용 처이므로 SMR이 앞으로 다양하게 활용될 시장 분석에서는 제외하도록 하겠다.

발전용 SMR

기후변화에 관한 정부간협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 지구 평균온도 상승을 1.5°C로 제한하기 위해서는 2050년까지 원자력을 2010년 대비 최대 6배 증가시켜야 한다고 평가했다. 넷제로를 위해서 원전 사용이 불가피한 것 뿐 아니라 오히려 적극 사용해야 한다는 입장이다. 국제에너지기구(International Energy Agency, IEA)도 넷제로 달성을 위해선 신재생에너지와 원전이 대부분의 화석연료를 대체해야 할 것임을 강조했다. IEA에 따르면 원자력 발전량은 2030년까지 20년 전 대비 21.6% 이상 확대될 것이며, 그 이후엔 증가세가 더욱 가팔라질 것으로 예측된다.

[SMR의 다양한 활용도]



Source: 산업통상자원부, 삼성KPMG 경제연구원 재구성



미국에서 상용화에 가장 앞서 있다고 평가받는 뉴스케일은 2029년 SMR 상업운전을 목표로 다양한 프로젝트 추진 중



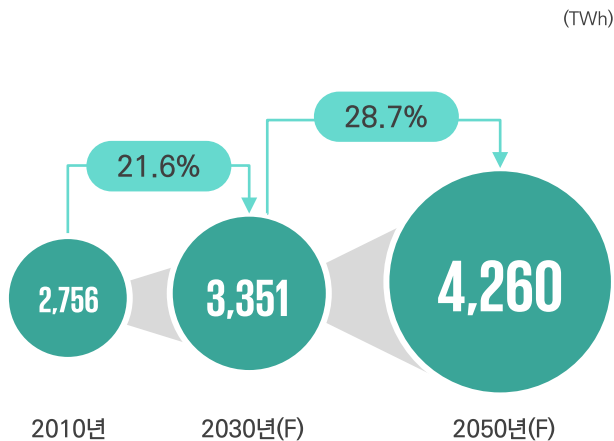
원자력 발전이 이미 친환경성, 경제성, 에너지 안보라는 에너지 전환의 핵심 세 가지 요소를 충족하는 가운데 특히 SMR은 이를 더욱 가속화할 수 있다. SMR은 대형 원전과는 다르게 전력의 수급변동에 따라 발전량 조절이 가능하며 재생에너지의 불안정한 간헐성을 보조하면서 분산전원의 역할을 하기도 매우 적합하기 때문이다. 입지 제약도 상대적으로 적어 오지, 심해, 나아가 우주 공간에서의 발전 연료로서 역할도 기대된다. 또한, 대형 전기트럭 충전을 위해 EV 충전소에서의 활용성도 주목받으면서 발전 부문에 활용될 SMR 예상수요는 2050년까지 51.5% 증가한 72GW에 이를 것으로 전망된다.

① SMR 상용화에 앞장서고 있는 미국

따라서 SMR을 활용한 발전에 전 세계적으로 드라이브가 걸리고 있는 것은 자연스러운 흐름이다. 먼저 미국은 원자력을 무탄소 발전원으로 정의하면서 2021년 원전의 조기 폐쇄 방지와 미래형 원전 개발을 위한 60억 달러 규모의 ‘상업원전 지원책’을 수립하고, 2022년에는 차세대 원자로, SMR R&D 등에 16.5억 달러 예산을 배정했다. 또한, 자국 대표 원자력 기업인 뉴스케일(NuScale), 엑스에너지(X-Energy), 테라파워(TerraPower) 등이 추진 중인 SMR 프로젝트를 적극적으로 지원하고 있다.

미국에서 SMR 상용화에 가장 앞서 있다고 평가받는 기업은 뉴스케일로 미국 최초로 원자력규제 위원회로부터 SMR 설계인증을 받았다. 뉴스케일은 2029년 미국 최초 상업운전을 목표로 다양한 프로젝트에서 상용화 속도를 높이던 가운데, 예상 발전비용이 처음 보다 늘어남에 따라 유타 주 발전사업자 UAMPS가 2023년 11월

[IEA의 20년 간 원자력 발전 증감률 전망]



Source: IEA(2022)
 Note: STEPS(Stated Policies Scenario, 선언정책시나리오) 기준으로 정부가 실제로 실행했거나 개발 중인 정책 효과를 반영

[2030년 이후 발전시장을 주도할 주요 SMR]

설계명	개발주체	국가
SMART	한국원자력연구원, 한국수력원자력 외	한국, 사우디아라비아
i-SMART	한국수력원자력, 한국원자력연구원 외	한국
NuScale	NuScale	미국
UK SMR	Rolls Royce 외	영국
RITM-200N	Rosatom	러시아
NUWARD	EDF 외	프랑스
BWRX-300	GE-Hitachi	미국
ACP100	CNNC	중국
Xe-100	X-energy	미국
HTR-PM	CNNC	중국
Sodium	TerraPower	미국
BREST-OD-300	NIKIET	러시아

Source: 에너지경제연구원, KISTEP 외 삼성KPMG 경제연구원 재구성



영국 SMR의 다크호스
롤스로이스는 2050년까지
자국내 SMR 16기 건설
계획



뉴스케일의 SMR 건설사업을 중단한다고 발표했다. 다만, 루마니아 등 다른 지역에서 뉴스케일이 추진하는 프로젝트는 정상적으로 진행 중이며 미국 철강업체 누코(Nucor)와 MOU를 맺어 향후 SMR 발전전력을 제철소에 공급하기로 했다. 한편, 노형의 개발에 더해 미국은 자국 내에 원전 제조기반을 확보하기 위한 기술개발과 설비투자에도 적극적이다. 현재 정부는 전력연구원을 통해 자국내 SMR 건설 시 납기를 단축하고 품질을 높일 수 있는 혁신제조 기술 개발을 지원하고 있는데, 홀텍(Holtec)이 미국내 SMR 제조공장을 건설할 계획을 밝혔다.

② 컨소시엄 중심으로 움직이는 영국과 해상용 SMR을 조준하는 러시아

유럽의 경우 러시아에 대한 에너지 의존을 낮추고자 하는 영국이 2035년까지 모든 전력을 저탄소 발전원으로 충당하겠다고 밝히면서 원자력 산업의 성장을 지원하며 SMR 개발에 집중하고 있다. 이때, 영국 SMR의 다크호스로는 롤스로이스(Rolls-Royce)가 주목된다. 이를 중심으로 원전운영사, 터빈설계사, 연구기관 등 컨소시엄이 설립되어 SMR 건설을 추진하고 있는 가운데 롤스로이스는 2050년까지 자국내 SMR 16기를 건설할 계획을 밝혔다. 또한, 우주기지 발전을 위해 자동차 크기만한 소형 원자로를 만들어 2029년까지 달에 보내는 프로젝트도 추진하고 있다. 이에 영국 정부도 원자력 자금조달 법 시행, 롤스로이스 컨소시엄에 자금 지원 등 SMR 개발에 적극적인 보조를 하고 있다.

[SMR을 지원하는 주요국 정책 및 기업 개발 동향]

구분	주요 정책	주요 기업 개발 동향
미국	-원전의 조기 폐쇄 방지와 미래형 원전 개발을 위한 60억 달러 규모의 '상업원전 지원책'을 수립('21) -차세대 원자로, SMR R&D 등에 16.5억 달러 예산을 배정('22)	-뉴스케일, 엑스에너지, 테라파워 등: 미국 최초로 SMR 설계인증 받은 뉴스케일을 필두로 2030년 이내 SMR 상용화를 위해 다양한 프로젝트 실시 중 -홀텍: 미국내 SMR 제조공장 건설 계획
영국	-녹색경제 활성화를 위한 10가지 녹색 계획 중 '신규 원자력 프로젝트' 추진 -원자력 자금조달법의 시행으로 원전 건설 단계부터 소비자로부터 건설비용의 조달 가능해짐('22)	-롤스로이스를 중심으로 원전운영사, 터빈설계사, 연구기관 등 컨소시엄을 설립하여 SMR 건설 추진 -2029년까지 1호기 상용화, 2050년까지 자국내 SMR 16기 건설 계획 발표
러시아	-세계 최대 원자력 추진 쇄빙선 함대 보유국(SMR 장착 쇄빙선은 총 9척) -5,060억 루블 규모 원자력 기술 개발 계획에 SMR 파일럿 프로젝트 시행 등 관련 내용 다수 포함('22)	-세계 최초 SMR 부유식 발전소 건설 성공('19) 이후 다양한 SMR 생산라인을 보유하는 가운데 해상용 SMR 기술개발 역량 보유 -로사툼: 원자력 쇄빙선의 노형을 개조하여 러시아 최초 육상 SMR 건설 승인 받음('23)
중국	-500조 원에 달하는 투자로 150기의 원전 설립목표 발표 -정부 주도로 3세대, 4세대 다양한 SMR 건설 및 운영 중	-CNNC: SMR 링롱 1호(설계명 ACP100) 2023년 8월 원자로 모듈 설치 완료, 2026년 본격 가동 예상
일본	-6차 에너지기본 계획에서 원전 비중을 10년내 20~22% 달성할 것을 선언('21) -기존 원자로 추가, SMR 등 차세대 원자로 개발이라는 투 트랙 전략 수립	-GE-히타치(미국 GE와 일본 히타치 합작법인): 3세대 노형의 SMR 개발 중. 캐나다 온타리오 주에 2028년까지 첫 호기를 건설 목표

Source: 한국에너지기술연구원, 한국원자력연구원 외, 삼정KPMG 경제연구원 재구성

“

러시아는 5,060억 루블
규모의 SMR 포함 원자력
기술 개발 계획을 발표

”

한편, SMR 실용화를 이끄는 국가로 러시아를 빼놓을 수 없다. 세계 최대 원자력 추진 쇠빙선 함대 보유국인 러시아는 이미 2019년부터 세계 최초로 상업운전에 성공한 SMR 기반 부유식 원전 ‘아카데미 로모노소프(Akademik Lomonosov)’호로 극동 지역에 전력을 공급하고 있다. 다만 35MW 규모 원자로 2기로만 구성돼 아직 육상 원전을 대체할 만한 수준은 아니라는 평가를 받는다.

육상 SMR의 경우 원자력부를 대신하는 러시아 국영 원자력기업 로사톰(Rosatom)이 원자력 쇠빙선에 쓰인 노형을 개조한 모델로 2023년 러시아 최초 육상 SMR 건설 승인을 받았고 2028년부터 건설할 계획이다. 2022년에 발표한 5,060억 루블 규모 원자력 기술 개발 계획에 SMR 관련 내용이 다수 포함되어 있는데, 자국 각지에서 파일럿 프로젝트를 실시하고 이를 바탕으로 해외 시장으로 수출을 확대하겠다는 전략이다.

③ 메이드 인 차이나를 꿈꾸는 중국과 해상용 SMR에 집중하는 일본

500조 원에 달하는 투자로 150기의 원전 설립목표를 발표한 중국의 경우 국영기업 중국핵공업진단공사(CNNC)가 추진하던 SMR 링롱 1호의 원자로 모듈 설치가 2023년 8월 완료되었다. 이는 CNCC 산하에서 자체 설계와 자재 구매를 맡고, 다렌원전석유화학공이 건설을 맡아 100% 중국 제조로 탄생했다. 이로써 중국은 원전기술과 설비 분야에서 더 이상 추격자가 아니라 선두주자로 자리매김했음을 세계에 알렸고, 적극적인 해외진출도 검토하고 있는 상황이다.

한편, 후쿠시마 사고 이후 원전에 조심스러워진 일본은 제6차 에너지기본계획에서 원전 비중을 10년내 20~22% 달성할 것을 선언했고, 그린 성장전략에 따르면 장기적으로도 원자력의 확대를 명확히 하고 있다. 특히, 일본은 선박과 원전을 결합한 부유식 원전을 밀고 있는데, 13개 조선기업들이 부유식 원전 개발에 8,000만 달러를 출자하면서 해상에 띄우기 유리한 SMR에 개발속도를 내고 있다. 2021년에는 플랜트기업 닛키홀딩스가 뉴스케일의 사업에 참여하면서 글로벌 SMR 시장에 대한 일본의 본격적인 합류를 알렸다.



“

i-SMR은 정부가 6년간 약 4,000억 원을 투자하고, 원자력 기관과 민간 기업도 개발에 참여하는 한국형 혁신 SMR

”

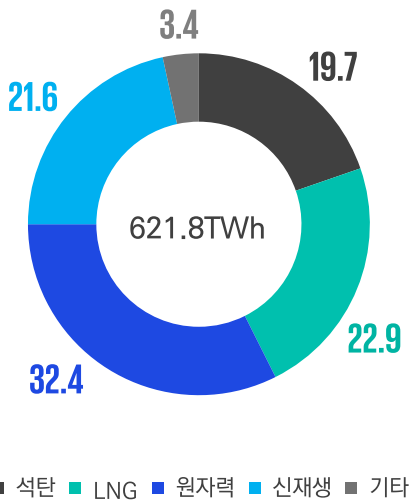
④ 파트너십을 통해 SMR 파운드리 기업으로 도약을 시도하는 한국

국내 원자력 발전 시장은 2008년~2010년 1차 원자력 붐으로 성장을 이룬다 수년간 위축되었으나, 탈원전 정책 폐기를 선언한 정부가 원전 비중을 2030년 32.4%로 상향하면서 다시 원자력 붐이 기대되는 상황이다. 2022년에는 12대 국가전략기술 중 하나로 SMR 및 4세대 원자로 등 차세대 원자력을 발표하고, 제6차 원자력진흥종합계획의 기본방향으로 SMR 신시장 개척과 원전 수출시장 확장을 제시했다. 2023년 7월, 정부 및 공공기관과 SK(주), GS에너지, 삼성물산, 대우건설, 두산에너지빌리티 등 SMR 얼라이언스를 맺고 SMR 비즈니스 모델 수립과 생태계 구축을 위한 노력을 함께하기로 했다.

이러한 정책적 지원을 바탕으로 국내 SMR 개발이 진행되고 있다. 한국전력기술, 한국원자력연구원, UNIST 등이 SMR을 개발해왔는데, 한국원자력연구원의 SMART는 2012년 세계 최초 SMR 설계인증을 획득한 바 있다. 이렇게 산학연 모두 독자적인 SMR을 개발해오다 최근 정부 주도로 뭉쳤는데, 그것이 바로 i-SMR이다. i-SMR은 정부가 2023년부터 6년간 약 4,000억 원을 투자하고 한국수력원자력 등 원자력 기관 주도로 민간 기업도 개발에 참여하는 한국형 혁신 SMR으로 2028년 표준설계인가를 획득하는 것을 목표로 개발 중이다.

국내기업들은 글로벌 기업과 적극적으로 협력하면서 SMR 레이스에 참여하고 있다. 특히, 글로벌 SMR 파운드리 기업으로 도약하겠다는 두산에너지빌리티는 대형원전 주기기 제작 역량을 바탕으로 글로벌 SMR 개발사의 파트너가 되어 SMR 주기기 생산에 주력하고 있다. 2019년에는 국내 투자사들과 함께 뉴스케일에 지분을 투자하여 수 조원 규모 기자재 우선공급권을 확보했으며 최근 2029년 상용화를

[국내 2030년 Energy Mix 발전량 전망]



Source: 제10차 전력수급기본계획(2023)
Note: 발전량 기준, 기타에는 유류, 양수 등 포함

[제6차 원자력연구개발 5개년 계획]



Source: 한국원자력학회
Note: 제6차 원자력진흥계획을 체계적으로 이행하기 위해 제6차 원자력연구개발 5개년 계획('22~'26) 발표

목표하는 미국 최초 SMR의 단조품 생산을 시작했다고 밝혔다. 발전소 건설역량을 가진 삼성중공업, 발전소 운영능력을 보유한 GS에너지도 두산에너지빌리티와 함께 드림팀을 구성하여 뉴스케일 SMR 프로젝트에 참여하기로 했는데 이를 통해 영국 등 글로벌 SMR 시장진출을 뉴스케일과 함께 공동으로 추진하게 되었다. 뉴스케일은 2031년까지 한국 경북 지역에 SMR 6기 건설도 계획 중이다.

한편, 두산에너지빌리티는 엑스에너지와도 2021년에 주기기제작설계 용역 계약을 체결했는데, 현재 시제품 제작 및 설계 최적화 방안 연구를 시행 중이다. SK그룹은 2022년 테라파워와 SMR 동맹을 맺어 공동 기술개발과 국내외 SMR 시장 진출에 협력하고 있다. 현대건설은 2021년에 홀텍과 SMR 개발 및 프로젝트 동반 진출을 위한 파트너십을 체결했다.

현재 국내 10대 그룹 계열사 절반이 넘는 6곳, 한화가 한화오션(전 대우조선해양)이 인도네시아에서 해상 SMR 사업을 추진하는 것을 감안하면 10대 그룹 중 7곳이 SMR 시장에 뛰어드는 모습을 보이고 있다.

[국내에서 개발중인 주요 SMR]

설계명	노형 타입	개발주체
SMART	가압경수로	한국원자력연구원
BANDI-60	가압경수로	한국전력기술
i-SMR	가압경수로	한국수력원자력 외
Micro URANUS	납냉각고속로	UNIST

Source: KISTEP(2022)

[i-SMR 사업 추진 타임라인]

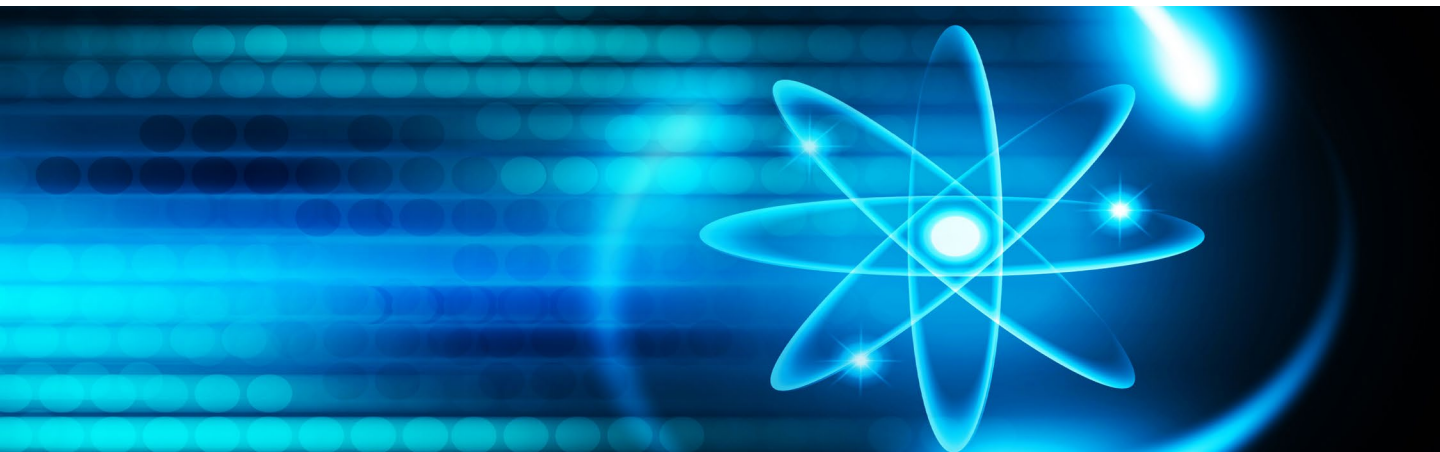


Source: 한국수력원자력

[국내기업의 해외 SMR 투자 현황]

개발사	기업명	투자규모
NUSCALE	DOOSAN	1억 380만 달러
	GS에너지	4,000만 달러
	SAMSUNG	7,000만 달러
TerraPower	SK innovation	2억 5,000만 달러
	HD한국조선해양	3,000만 달러
energy	DOOSAN	500만 달러
	IDL E&C	2,000만 달러
HOLTEC INTERNATIONAL	HYUNDAI ENGINEERING & CONSTRUCTION	3,000만 달러

Source: 언론보도 종합
Note: 2023년 3월 기준



수소 생산용 SMR

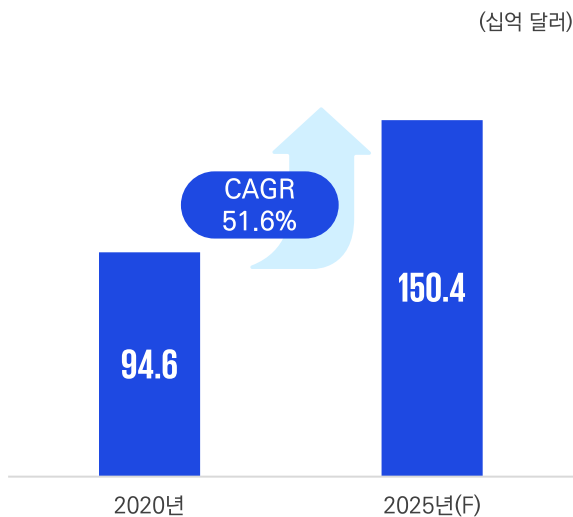
SMR의 유망성이 기대되는 이유는 차세대 에너지원으로 부각되는 수소 생산에도 사용되기 때문이다. 생산 부문만 2025년 1,500억 달러 수준으로 확대될 수소는 넷제로 달성과 에너지 자립, 신사업 창출 관점에서 폭발적인 성장이 예측된다. 각국이 앞다투어 수소사회 실현을 가속화하고 있는 가운데, 원자력으로 수소를 생산하는 방식이 주목받고 있다. 원자력 수소 생산 시 부산물이 산소(O₂)뿐 이어서 천연가스로 만든 수소보다 친환경적이다.

“ 원자력을 활용하여 생산한 수소는 천연가스로 만든 수소보다 친환경적이고 가격도 저렴 ”

뿐만 아니라, 가격도 저렴하다. 미국의 경우 2030년에 이르면 SMR로 생산한 수소가격이 1.28\$/kg로 가장 저렴할 것으로 예측됐는데, 국내에서도 이러한 순서는 유사할 전망이다. 정부는 2050년까지 연간 2,790만 톤 청정수소 공급계획 아래 그 중 300만 톤은 그린수소로 공급한다고 발표했지만, 국내 수소가격이 1,800원/kg 수준이 되어 경제성이 확보될 것으로 분석되는 상황에서 2,500원/kg로 예상되는 그린수소는 여전히 비싸다. 이때, 저탄소 발전원 중 가장 저렴한 원자력을 활용하면 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

원자력 수소는 생산공정에 따라 원자력 열을 이용하는 레드수소, 원자력 전기를 활용하여 저온수전해 공정을 거치는 핑크수소, 원자력의 열과 전기를 모두 활용하는 퍼플수소로 분류된다. 이때, SMR은 레드, 핑크, 퍼플 수소 생산이 다 가능하다. 노형별로는, 초고온가스로 기반 SMR의 경우 가장 에너지 효율도가 높아 세 가지 컬러 수소 생산이 모두 가능한 한편, 고온가스로, 용융염원자로, 액체금속냉각로 기반 SMR은 핑크와 퍼플수소 생산이 가능하고 PWR 기반 SMR은 핑크수소 생산이 가능하다. 한편, 가동 중인 대형원전에서는 핑크수소를 생산하는 실증 프로젝트가 진행 중이다.

[글로벌 수소 생산 시장규모]



[수소 생산에 활용되는 원자력]

색상 ¹⁾	에너지원	원료	공정	결과물
블랙/브라운 수소	석탄	석탄, 수증기, O ₂	가스화	H ₂ +CO ₂
레드수소	원자력 열	H ₂ O	열화학 분해	H ₂ +O ₂
핑크수소	원자력 전기	H ₂ O	전기분해	H ₂ +O ₂
퍼플수소	원자력 열+전기	H ₂ O	열화학 전기분해	H ₂ +O ₂
그린수소	재생 에너지 전기	H ₂ O	전기 분해	H ₂ +O ₂

Source: KOTRA

Source: H2 Bulletin, Ricardo, 한국원자력연구원 외
Note 1): 수소의 색상 분류는 국가마다 상이



대형원전을 통한 수소 생산
경험이 축적되면서 보다
효율적인 SMR 수소 생산도
가속화될 전망



이에 미국, 유럽, 일본 등도 원자력을 활용한 수소 생산을 개발 중이다. 먼저, 미국은 2010년대 중반부터 에너지부의 지원을 받아 아이다호국립연구소를 중심으로 원자력 수소 생산을 연구해왔는데, 엑셀에너지(Xcel Energy), 블룸에너지(Bloom Energy), 퓨얼셀에너지(Fuelcell Energy) 등 여러 기업들이 고온수전해 설비로 원자력 수소 생산 실증을 지속해오고 있다.

또한, 미국 정부는 인프라법안에 따라 2026년까지 총 80억 달러를 투입하여 4개 이상의 수소산업 허브를 조성하기로 했는데, 그 중 하나가 애리조나주 소재 팔로 바디(Palo Verde) 대형원전이다. 그 외 오하이오주 소재 데이비스베세(Davis-Besse), 미네소타주 소재 프레리 아일랜드(Prairie Island) 등 가동 중인 원전을 활용하여 수소 생산 실증을 진행하고 있다. 이러한 대형원전을 통한 수소 생산 경험이 축적되면서 보다 효율적인 SMR 수소 생산도 가속화될 전망이다.

유럽의 경우 대표적인 원전 우호국 프랑스는 5년간 300억 유로 투자계획인 ‘프랑스 2030’에 원전을 포함하고, 2035년 상업운전을 목표로 SMR 누워드(Nuward) 프로젝트를 지원할 만큼 원자력에 힘을 주는 모습이다. 마크롱(Macron) 프랑스 대통령은 원자력을 전략 에너지원으로 지정하고 이를 통해 수소를 생산하여 프랑스를 수소 최강국으로 만들겠다는 목표를 내세웠다. 이러한 의지는 원자력 수소를 포함한 70억 유로 규모의 청정수소 생산 정책에 담겼다. 한편, 전력공사 EDF는 자회사 하이나믹스(Hynamics)를 설립하여 가동원전을 이용한 수소 생산을 진행하고 있고,

[원자력 수소 생산을 지원하는 주요국 정책 및 연구기관, 기업 개발 동향]

구분	주요 정책 및 연구기관	주요 기업
미국	-인프라법안에 따라 2026년까지 80억 달러 투입하여 조성하기로 한 수소산업 허브 중 하나로 애리조나주 소재 대형원전 선정 -아이다호국립연구소 외: 팔로 바디, 데이비스베세, 프레리 아일랜드 등 가동 대형원전을 이용한 수소 생산 실증 추진	-엑셀에너지: 원자력 발전 전력을 고온수전해 공정에 활용하여 3~5년내 그린수소 상용화 목표로 프로젝트 진행 -퓨얼셀에너지: 고온수전해 공정으로 원자력 수소 생산 실증 프로젝트 진행
프랑스	-프랑스를 수소 최강국으로 만들겠다는 목표아래 원자력 수소를 포함한 70억 유로 규모의 청정수소 생산 정책 발표('20)	-EDF: 원자력 수소 생산 사업을 위한 자회사 ‘하이나믹스’ 설립, 가동 대형원전을 이용한 수소 생산 실증 및 사업화 추진
일본	-그린성장 전략에서 2050년 2,000만 톤의 수소 생산역량 확보를 목표로 제시하고, 수소 로드맵에 원자력 수소를 포함('20) -일본원자력기술개발기구: 후쿠시마 사고로 중단되었던 고온가스시험로(HTR)를 재가동하여 수소 생산 연구 진행('21)	-미쓰비시: 철강기업 수소환원제철을 위해 일본원자력연구소에 실증을 제안 -간사이전력공사: 원전을 활용한 무탄소 수소 생산 실증 사업 시작('22)
한국	-제1차 수소경제 이행 기본 계획에서 2050년까지 연간 2,790만 톤 청정수소 공급 목표를 제시('21) -제6차 원자력진흥종합계획에 SMR을 활용한 청정수소 생산과 선진 고온 원자력시스템 기술 개발 내용이 포함('21)	-현대엔지니어링: 미국 USNC 등과 협력해 캐나다 소재 연구소에 초도호기 건설 프로젝트 진행

Source: 한국에너지기술연구원, 한국원자력연구원 외, 삼정KPMG 경제연구원 재구성

“

2050년까지 목표한 연간
2,790만 톤 청정수소 공급
목표를 SMR 수소생산을
활용해 달성할 수 있음

”

더욱 효율적으로 수소를 추출하기 위해 SMR을 활용한 수소 생산 연구에 박차를 가하고 있는 상황이다. 이러한 원자력 수소에 대한 프랑스의 적극적인 노력으로 2023년 2월 유럽 의회는 ‘저탄소 수소(Low Carbon Hydrogen)’에 원자력 수소를 포함하기로 결정했다.

일본에서도 ‘그린성장 전략’에서 2050년 2,000만 톤의 수소 생산역량 확보를 목표로 하고, 수소 로드맵에 원자력 수소를 포함하는 등 원자력 수소를 향한 정부와 기업들의 적극적인 움직임이 포착되고 있다. 일본원자력연구소는 2030년 내 완료를 목표로 고온가스로를 활용한 수소 생산에 집중하고 있으며, 미쓰비시(Mitsubishi)로부터 철강기업 수소환원제철을 위해 실증을 제안을 받아 검토 중이다. 2022년, 간사이 전력공사는 원전을 활용한 무탄소 수소 생산 실증 사업을 시작했다고 밝히면서 앞으로도 원전을 활용한 수소 공급망 구축 관련 논의를 지속할 예정이다.

2050년까지 연간 2,790만 톤 청정수소를 공급하겠다는 목표를 선언한 한국은 그린수소의 단점인 경제성 문제를 해결할 수 있는 대안으로 원자력 수소의 잠재력을 높이 평가하고 있다. 제6차 원자력진흥종합계획에는 SMR을 활용한 청정수소 생산과 선진 고온 원자력시스템 기술 개발 내용이 포함되었고, 2030년까지 조성될 동해안 수소경제벨트에 울진군 소재 상용원전인 한울원전과 연계한 원자력 수소 생산과 고온가스로를 활용한 수소 생산 실증을 단계적으로 추진하기로 했다. 원자력 수소 생산은 원전 수출과 연계하여 수소 생산 플랜트의 수출산업화도 동시에 도모할 수 있어서 국내기업에 잠재성이 높은 시장으로 평가된다.

한편, 효율적인 수소 생산이 가능한 초고온가스로를 연구해 온 한국원자력연구원이 현대엔지니어링, 미국 USNC와 협력해 캐나다 소재 연구소에 초도호기 건설 프로젝트를 진행 중이다. 국내에서 개발 중인 SMR인 SMART도 저온수전해 및 고온수전해 등을 적용하여 수소 생산 전용으로 활용할 수 있는 잠재력을 보유하고 있다고 평가되는데, 전력망에 연계하지 않고 수소 생산 전용으로 활용할 수 있어서 수소 수요가 많은 지역에 별도 송배전망 없이 수소를 생산하고 공급하는 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.



지역난방과 공정 열, 담수 생산용 SMR

SMR이 활발하게 활용될 또 다른 분야는 지역난방과 공정 열, 담수 생산 부문이다. 즉, SMR의 뜨거운 열로 난방을 공급하고, 공장을 돌리며, 바닷물에서 염분을 제거할 수 있다는 것이다. 핵분열로 발생한 막대한 열에너지를 활용할 수 있어서 SMR을 열 수요지 인근에 건설하면, 고온의 대용량 열이 필요한 곳에 열에너지를 저렴하고 안정적으로 공급할 수 있다. IAEA에 따르면 비발전 수요 증가에 따라 해당 부문의 누적 수요는 2050년까지 34.2% 증가한 47GW를 달성할 것으로 예측되는데, 화석연료 외 고온 열 생산 대체수단이 마땅치 않은 산업계의 넷제로 달성에 큰 도움이 될 것이다.

“

SMR은 화석연료 외
고온 열 생산 대체수단이
마땅치 않은 산업계의
넷제로 달성에 큰 도움 될 것

”

특히, 고온가스로는 원자료를 식히는 냉각재로 물 대신 헬륨 기체를 쓰는데, 헬륨은 배출되는 열의 온도가 300°C 안팎까지 올라가는 물과 달리 950°C까지 올라가기 때문에 활용할 곳이 더욱 다양하다. 발전기 근처에 설비를 배치하는 것만으로도 열원 문제를 해결할 수 있다. 따라서 우선 130~150°C가 요구되는 지역난방과 해수 담수화에 활용이 기대되며 펄프·제지(400°C), 석유정제(500°C), 암모니아 생산(600°C), 알루미늄 생산(800°C) 등 산업공정에도 바로 활용이 가능하다. 그 외 상기 부문들 보다 다소 높은 온도가 필요한 석회·유리·시멘트·비철금속·세라믹(800~1,500°C) 분야에서도 원자력을 통한 고온의 열을 활용할 수 있는데, 이때는 열원을 조금만 추가하면 되기 때문에 투입 비용을 절감할 수 있다.

이미 캐나다, 독일, 노르웨이, 영국, 인도 등에서는 가동원전 증기를 제지회사 등 산업용 공정열로 활용한 바 있다. 스위스는 현재 45MWth(메가와트열단위)의 열에너지를 카드 제조 공장용 중압 증기 생산에 활용해 연간 2만 3,000톤의 석유를 대체하고 있다. 한편, 미국에서는 멕시코만 화공플랜트 부지에 엑스에너지의 SMR 4기를 건설하여 550°C 이상의 고온과 고압 증기를 활용할 계획이다. 핀란드 에너지기업 스테디 에너지(Steady Energy)는 2030년 완공을 목표로 세계 최초로 SMR의 열을 활용하는 지역난방 발전소를 건설을 계획하고 있다.

국내에서는 탄소배출량이 높은 철강, 석유화학 산업계를 중심으로 화석연료를 대체해 고온의 열을 생산할 방법을 찾고 있는데 SMR이 유망하다. 최근 경상북도와 현대엔지니어링, SK에코플랜트, 포스코홀딩스, 포스코이앤씨, GS건설 등 산·연·지자체가 원자력 열 이용 협의체를 맺어 SMR로 산업 공정에 필요한 열을 생산하고 이용할 수 있는 기술을 개발하고 사업화 역량을 높이기 위해 협력한다는 계획을 세웠다. 지금까지 국내에서 원자력 열은 전력 생산을 위한 용도로 대부분이 사용되어 왔는데, 지역난방이나 담수화 등 비(非) 발전분야 이용률은 0.5% 수준에 불과하기 때문에 잠재력이 무궁무진하다고 평가된다.



우주 탐사 및 방산용 SMR

SMR이 활발하게 활용될 마지막 분야는 우주 공간이다. 민간 기업이 주도하는 뉴스페이스(New Space) 시대의 개막으로 글로벌 우주산업 시장규모는 2021년 3,860억 달러까지 성장했고 2040년에는 1조 달러에 이를 것으로 전망된다. 기술 발전으로 발사 비용은 낮아지고 수송 능력은 높아지고 있는 가운데 미국 항공우주국(NASA)이 2023년 7월, 2027년 발사계획인 핵추진로켓 개발 사업 드라코(DRACO)를 최대 방산기업 록히드 마틴(Lockheed Martin)에 맡기면서 우주 공간에서의 원자력 경쟁시대를 알렸다.

우주개발 선도국이 핵추진로켓 개발에 집중하는 이유는 원자력이 우주 탐사에 있어 매우 효율적인 에너지원이기 때문이다. 핵추진로켓은 수소, 메탄 등과 산화제의 화학 반응으로 추진력을 얻었던 기존의 화학 엔진과는 달리 핵분열 반응 시 발생하는 열로 추진체를 가열해 분사하여 추진력을 얻는 방식이다. 기존 화학 엔진과 달리 추진체를 연소시키지 않아 별도의 산화제가 필요 없고, 로켓 추진체의 성능을 나타내는 비추력이 화학 엔진보다 2배 이상 높다.

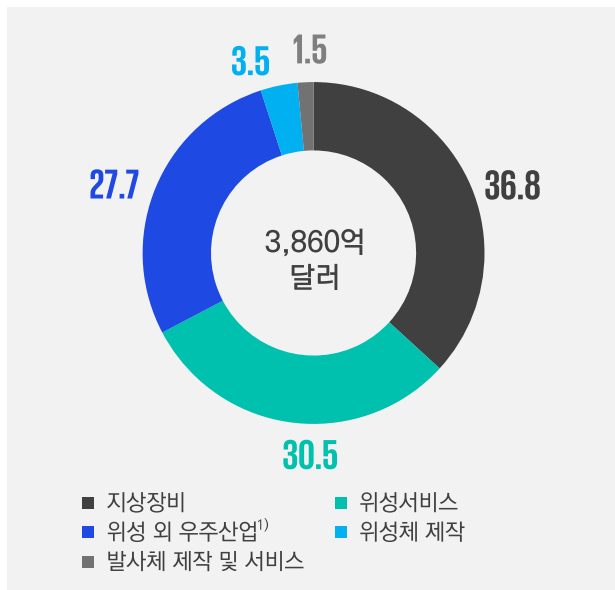
물론 화석연료를 사용하는 로켓으로도 우주 탐사는 가능하다. 하지만 엄청난 양의 연료를 싣고 발사해야 해서 거액의 연료 구입비용이 든다. 그러나 핵추진로켓의 경우 1kg의 우라늄 연료로 200kW의 에너지를 13년간 낼 수 있고, 특히 SMR은 적은 연료로 막대한 에너지를 발생시키는 동시에 가벼워서 로켓이나 우주선 등 발사체에 싣기에 안성맞춤이다. 현재 기술로 화성까지 도달하는 데 약 7개월이 걸리는데 핵추진 기술로는 시간을 크게 단축할 수 있어 향후 우주 개발 역사의 패러다임이 바뀔

“
원자력은
우주 탐사에
매우 효율적인 에너지원

”

[글로벌 우주산업 분야별 시장규모]

(%)

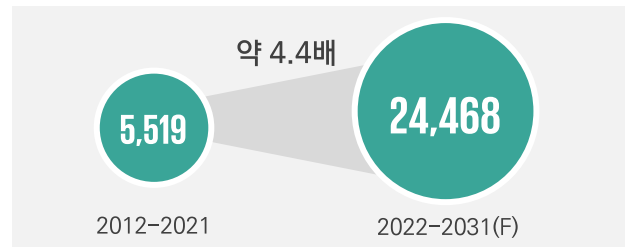


Source: 2021년 기준

Note 1): 위성 외 우주산업에는 우주 탐사, 우주보험 등이 포함

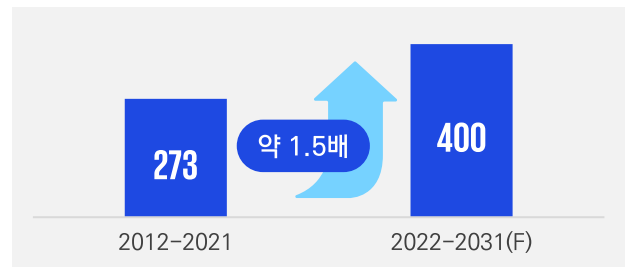
[글로벌 위성 발사 수]

(기)



[글로벌 위성산업 시장규모]

(십억 달러)



Source: Euroconsult

“

궤도를 자주 변경해야 하는 군사위성에 강력한 동력을 줄 수 있는 SMR 활용 시 이점이 매우 큼

”

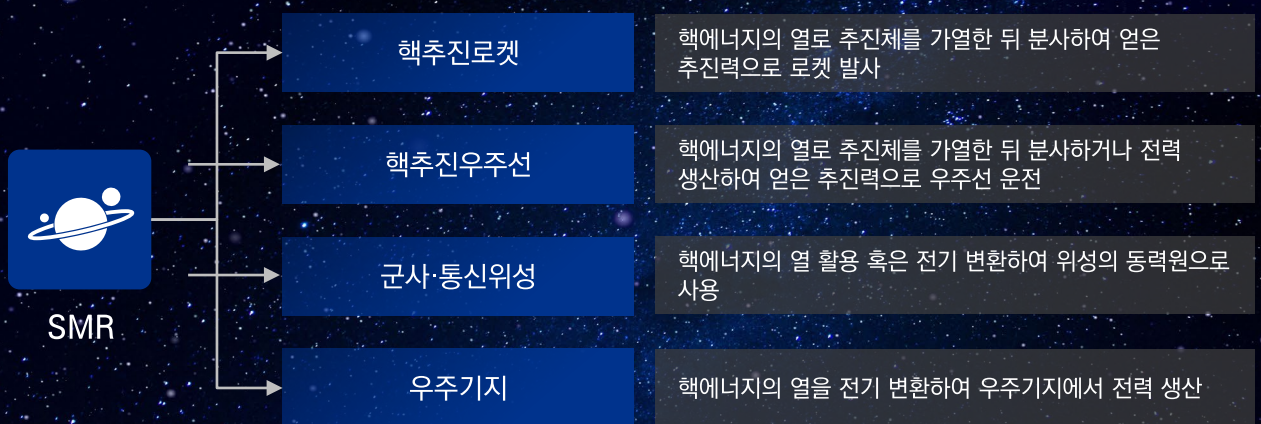
것으로 기대되는 상황이다.

우주탐사용 우주선에도 원자력이 추진기관으로서 효과적이다. NASA는 2022년 아이다호국립연구소를 통해 제너럴 아토믹스 등에 원자력 열 추진 우주선에 들어갈 원자로 설계를 발주했다. 2026년 시험 발사에정인 핵추진우주선 파드메(PADME)가 완성되면, 화학연료를 쓰는 우주선 보다 화성까지의 이동시간이 3개월 단축될 것으로 예측된다.

한편, SMR은 우주로 쓰아지는 또 다른 발사체인 인공위성의 동력원으로도 활용성이 기대된다. 지난 10년간 군사, 통신 등의 목적으로 인류가 쏘아 올린 위성은 약 5,000개가 넘는데 현재 정상 작동하는 인공위성은 절반 뿐인 이유는 궤도나 자세를 바꾸기 위한 연료가 소진되면 폐기되었기 때문이다. 따라서 연료교체 주기가 긴 원자로가 위성 동력원으로서 부각되었고, 러시아가 고장 난 위성을 미사일로 파괴하는 일이 발생하자 미국이 군사위성을 보호할 방안을 모색하면서 궤도를 빠르게 이동시키는 데 유리한 원자력 전기 추진 위성에 대한 연구가 가속화되고 있다.

미국 국방부 산하 방위고등연구계획국(DARPA)은 2025년 시험발사를 목표로 군사위성에 SMR을 장착하는 프로젝트를 진행하고 있다. 통신위성 궤도인 3만 6,000km까지 현재 기술로 위성이 이동하려면 몇일이 소요되지만, 핵분열 에너지를 활용하면 단 몇 시간만에 이동이 가능하다. 특히, 군사위성의 경우 궤도를 자주 변경해야 하기 때문에 적은 연료로 순식간에 궤도를 옮길 수 있는 강력한 동력을 주는 SMR을 활용할 경우 이점이 매우 크다고 할 수 있다. 이렇게 군사위성에 소형 원자로를 싣고 순간 기동에 필요한 동력을 쓰는 원자력 열 추진 프로젝트에는 록히드 마틴, 제너럴 아토믹스(General Atomics), 그리고 아마존 창업자 제프 베이조스가 이끄는 민간 우주개발기업 블루 오리진(Blue Origin) 등도 참여하고 있다.

[우주 공간에서 SMR의 다양한 활용도]



Source: 삼정KPMG 경제연구원

“

SMR은
우주탐사 경쟁에서 선두를
잡기위한 필수불가결한
핵심 키(Key)로 작동할 전망

”

한편, 군사위성 뿐만 아니라 자율주행 및 커넥티드 카, UAM 등 초고속, 초저지연 무선통신이 필요한 다양한 하드웨어가 개발되면서 정부 및 민간 통신위성의 필요성도 더욱 늘어나고 있다. Euroconsult에 따르면 향후 10년(2022~2031년)간 위성산업 시장규모는 지난 10년(2012~2021년)에 비하여 약 1.5배 확대될 것으로 예측되면서 SMR의 무궁무진한 활용도가 점쳐지는 상황이다. 위성 인터넷 등 500km 정도의 낮은 고도를 가진 저궤도 통신위성이 대량으로 실용화되면 이의 위치유지와 수명연장을 위한 추진기로 이온 엔진은 가장 유력한 수단이 될 것이다. 이때, 미국 국방부는 전기를 만들어 이온 엔진에 적용하는 방식에 기존의 태양전지판이 아닌 소형 원자로를 활용할 계획을 발표하였는데 앞으로 우주 공간에서의 원자력의 활약이 기대되는 대목이다.

원자력은 우주기지에서의 연료로서 행성에 우주인이 체류하기 위한 환경을 조성할 때도 이점이 상당하다. 우주공간에서의 탐사활동은 생명 보조장치와 통신수단을 비롯한 갖가지 장비를 장기간 작동시키기 위해 안정적으로 대량의 연료를 공급받아야 하는 것이 관건이다. 그러나 지금까지 달 탐사선이나 화성 탐사용 로봇의 발전원으로 사용된 태양전지는 밤이나 겨울에 사용할 수 없어 발전량이 불충분하다는 결정적인 단점이 있다. 이때, 원자력은 기존 문제를 일거에 해결할 수 있는데 예를 들어 달탐사선에 원자력 전지를 사용하면 태양광 발전이 불가능한 밤에도 위성장비가 어는 것을 방지하고 전기 생산이 가능하기 때문에 임무기간을 2주 이상 늘릴 수 있다.

NASA는 웨스팅하우스, BWX 테크놀로지스, 록히드 마틴 등과 함께 2018년 SMR 보다 더 소규모 원자로로 10MW 이하의 출력을 내는 초소형원자로(Micro Modular Reactor, MMR) 킬로파워 기술 테스트에 성공했는데, 이를 우주용 원자로로 2028년 달에 설치할 계획이다. 롤스로이스도 영국 우주국으로부터 2029년 달 탐사의 전력원으로 쓰일 SMR 개발에 46억 원을 지원받기로 하면서 우주 개발에 박차를 가하고 있다. 중국 역시 2019년부터 1MW 우주 원자로를 개발해왔는데 현재 성능 기준으로 10개의 우주정거장을 유지하기에 충분한 전력을 공급할 수 있다고 평가된다. 이렇듯 앞으로 개화하는 시장인 우주산업에서 골든 타임은 향후 3년이라고 평가되는 가운데, SMR은 우주탐사 경쟁에서 선두를 잡기위한 필수불가결한 핵심 키(Key)로 작동할 전망이다.



결론 및 시사점



SMR이 주목받는 이유는
미래 에너지 시장에서
‘올라운더(All-rounder)’의
역할이 기대되기 때문



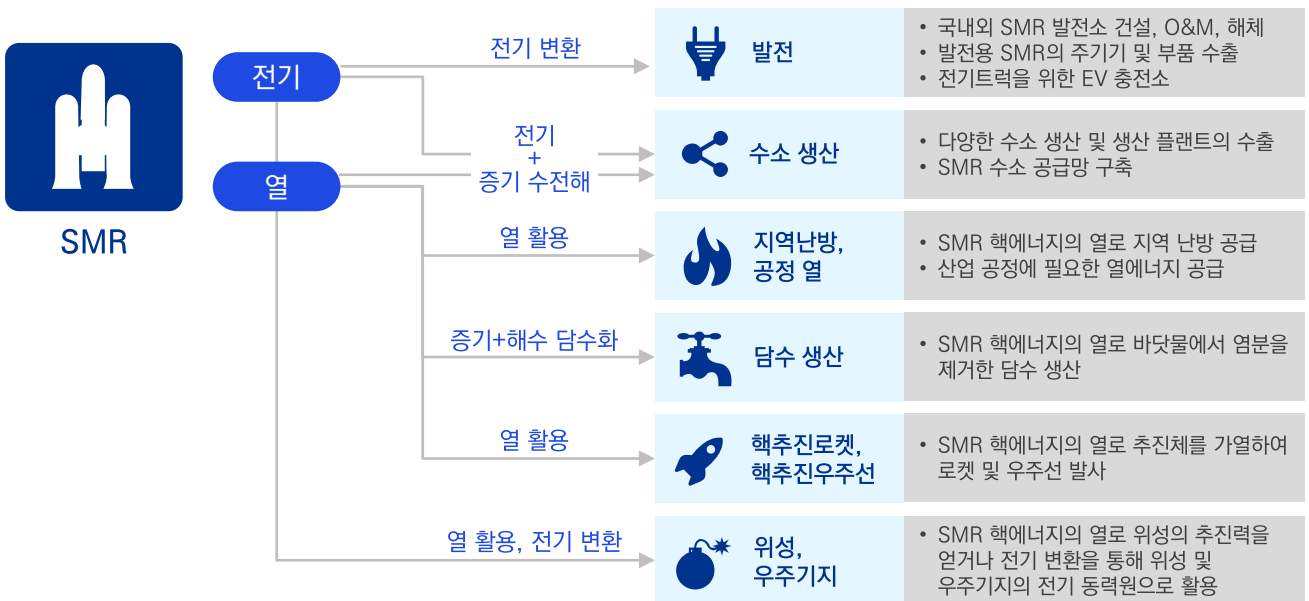
성공적인 SMR 시장진출을 위해 고려해야 할 사항들

결국 SMR이 차세대 에너지원으로 주목받는 이유를 한 마디로 정의하면 무엇일까? 바로 ‘올라운더(All-rounder)’의 역할이 기대된다는 점이다. 저탄소 및 수소경제 등의 흐름 속에서 앞으로 에너지 시장은 단순히 발전만 가능한 에너지원이 아니라 다양한 에너지 수요를 충족시킬 수 있는 멀티 에너지원을 요구할 것이다. 발전부터 군사용까지 열원 이용의 유연성이 높고, 태양광·풍력, 수소 등 신재생에너지원과 상호보완적으로 쓰일 수 있는 SMR은 미래 에너지 시장에 더욱 혁신적으로 기능할 것이므로, 기업들은 이를 둘러싼 새로운 비즈니스 기회들에 대비해야 한다.

구체적으로, 발전 부문에서는 부품 수출에 머무는 것이 아니라 해외 SMR 발전소 수출 사업까지 적극적으로 검토할 수 있다. 이때, 발전소 건설 뿐 아니라 이후 운영 및 관리(Operating & Maintenance, O&M), 해체와 사용후 핵연료 처리 사업까지도 성장성이 무궁무진하다고 평가된다. SMR을 EV 충전소 발전원으로 활용하는 전기트럭 충전을 위한 비즈니스도 검토되고 있다. 한편, 수소 생산 부문에서는 SMR을 활용하여 다양한 방법의 수소를 생산하고, 구축한 생산 플랜트 및 수소 공급망 자체를 수출하는 사업도 기대된다. 더불어 SMR의 핵분열시 발생한 열로 지역 난방 혹은 산업 공정에 필요한 열을 공급하고, 로켓 및 우주선을 발사하거나 위성, 우주기지의 동력원으로 활용하는 사업도 추진되고 있다.

이렇게 많은 부문에서 SMR을 둘러싼 다양한 비즈니스 기회가 검토되는 가운데, 본 보고서는 SMR 시장을 적극적으로 견인하고자 하는 우리 정부와 국내기업들에 몇 가지 고민해야 할 고려사항을 제시하고자 한다.

[SMR의 다양한 활용도]



Source: 삼정KPMG 경제연구원

글로벌 SMR 전쟁 속 부진한 국내 상용화 점수, 첫 호기 건설에 집중할 때

2023년 7월, 원자력기구(Nuclear Energy Agency, NEA)가 글로벌 42개 SMR을 대상으로 개발 및 보급 상황에 대한 평가결과를 발표했다. NEA는 기술적 실현 가능성을 넘어 인허가, 부지 확보, 자금 조달, 공급망, 지역 참여, 핵연료 수급의 6가지 평가척도를 바탕으로 각국 SMR의 진행상황을 분석했다. 이때, 정보의 대부분은 정부, 규제기관, 금융기관 등 제3자의 참고자료를 근거했으며, SMR 설계자의 정보는 배제해 독립성을 유지했다는 측면에서 의미가 있다.

NEA의 평가결과 한국원자력연구원에서 개발하고 있는 한국 SMART는 총점 36점 만점 기준에 20점을 받았다. 가장 점수가 높은 국가는 러시아와 중국(각각 30점)으로 프로젝트의 진행속도가 전 세계에서 가장 빠른 것으로 평가됐으며, 미국 첫 SMR이 될 가능성이 높은 뉴스케일의 VOYAR가 26점의 점수를 받았다.

한국의 SMR 프로젝트가 비교적 낮은 점수를 받은 이유는 ‘부지 확보’와 ‘지역 참여’ 부분에서 낮은 점수를 보였기 때문이다. 2012년에 표준설계승인을 받은 SMART의 인허가, 자금 조달, 회 회 공급망, 핵연료 수급 점수는 평균보다 높은 수준이었으나 부지 확보, 지역 참여 부분은 평균보다 낮은 점수를 받았다. 현재 국내 안전규제에 따르면 원자력 발전소는 일반인 출입 및 거주를 통제하는 제한구역경계(Exclusion Area Boundary, EAB) 등을 확보해야 하는 것으로 명시되어 있어 부지확보에 제약이 있는 상황이다. 다만, 이러한 원자력 규제는 1960~70년대 원전 기술을 기준으로 만들어졌기 때문에, 현재 SMR의 기술 수준이 과거 보다 높아진 만큼 안전규제도 이를 반영하여 완화될 부분은 없는지 적극적인 검토가 필요하다.

“
원자력기구(NEA)는
글로벌 42개의 SMR을
대상으로 종합평가를 실시.
한국은 36점 만점의 20점

”

[NEA의 6가지 SMR 평가척도]



[NEA의 글로벌 주요 SMR 상용화 점수¹⁾]

30점 ²⁾		- KLT40S (Rosatom) - 인허가, 부지 확보, 핵연료 수급 우수
30점 ²⁾		- HTR-PM (INET) - 부지 확보, 핵연료 수급 우수, 지역 참여 평균 이하
26점		- VOYGR (Nuscale) - 지역 참여 우수, 그 외 평균 이상
20점		- SMART (한국원자력연구원) - 부지 확보, 지역 참여 평균 이하

Source: Nuclear Energy Agency
Note: 2023년 7월 평가기준

Source: Nuclear Energy Agency
Note 1): 전 세계 42개 SMR 대상, 36점 만점 기준
Note 2): 러시아와 중국은 공동 1위

“

한국이 SMR 선두주자로
나서기 위해서는
국내 SMR 첫 호기 건설을
적극적으로 추진하는 것이
중요한 시점

”

한편, NEA의 평가는 건설을 중심으로 평가한 것이기에 건설이 진행중인 SMR들이 높은 점수를 얻은 것은 사실 당연한 결과인 것으로도 판단된다. 한국의 SMART의 경우 한-사우디 SMART 글로벌 협력이 보류상태에 있어 후속 건설이 추진되지 않고 있는 상황이다. 과거 2015년에는 한국이 세계에서 가장 빨리 상용 건설을 추진하는 상황이었으나, 이후 탈원전 정책, 코로나19 확산, 글로벌 저유가로 인한 사우디의 재정 압박 등으로 건설이 당초 계획대로 추진되지 않아 이러한 점이 NEA 평가에서 부진한 점수를 획득한 주된 이유로 해석된다.

따라서 한국이 SMR 선두주자로 나서기 위해서는 앞서 언급한 규제완화도 중요하지만, 지금은 국내 혹은 해외에서 국내 SMR 첫 호기 건설을 적극적으로 추진하는 것이 중요한 시점이라고 할 수 있다. 중국과 러시아의 SMR이 NEA 평가에서 최고 점수를 받은 것은 건설 중이거나 이미 운영 중이기 때문인 측면이 크고, 구체적인 건설 계획 없이는 어떠한 SMR을 개발하여도 부진한 평가를 받을 것이다. 이때, 해외 건설의 경우 유럽과 북미 국가들이 SMR에 관심을 가지고 있지만, 뉴스케일과 GE-히타치 (Hitachi)처럼 파격적인 건설단가를 주장하는 다른 기업들의 SMR 홍보자료가 부각되는 한 당장 국내에서 개발한 SMR을 해외에 건설하는 것은 쉽지 않아 보인다. 이러한 현실적인 면을 감안하면 한국이 개발중인 i-SMR의 경우 일단 국내에서 첫 호기를 건설하는 방안도 적극적으로 고려해 볼 수 있다.

결국 SMR 시장의 선도 위치를 점하기 위해서 근본적으로는 국내 첫 호기 건설이 더욱 중요하다. 그리고 이를 추진하기 위한 다양한 제도 변화도 동시에 뒷받침되어야 할 것이다. SMR은 짧은 건설공기와 상대적으로 적은 초기비용으로 민간 기업이 적극적으로 나설 수 있기에 국내 첫 호기 건설을 지금의 원자력 공기업이나 민간 주도로 안전한 SMR을 상용화 할 수 있도록 하는 제도적 장치 마련을 고민해야 한다.



C2N(Coal to Nuclear) 논의가 활발한 북미, 동유럽 공략이 유리

대형 원자로가 SMR로 진화하는 과정에서 원자력 밸류체인에 나타난 가장 큰 변화는 국내기업들이 조선, 철강, 자동차 등 기존 제조업 부품처럼 SMR을 전 세계로 수출하며 글로벌 공급망을 확보하는 것에 용이 해졌다는 점이다. 대형원전의 경우 공사현장에서 건설단계의 대부분이 진행되었고, 부품의 물리적 크기로 인해 수출 지역에 지리적 제한이 있었지만 이제 K-원전의 글로벌 수출 영토가 확대되었다고 할 수 있다. 그렇다면 어떤 지역을 수출대상국으로 공략하는 것이 유리할까?

2023년 1월, 뉴스케일과 유타 주 전력청(UAMPS)은 SMR 첫 호기에 대한 경제성 평가결과를 발표했다. 많은 기관들의 이목이 집중된 가운데 발표된 SMR 예상 전력요금은 MWh당 89달러로 2021년 평가결과 보다 50% 이상 상승한 것으로 나타났다. 이는 글로벌 공급망 대란과 원자재 가격 상승으로 인한 건설비용 증가에 기인하는 것으로 분석되는데, 인플레이션감축법(Inflation Reduction Act, IRA) 보조금을 반영한 금액이기 때문에 본래의 전력요금은 MWh당 100달러 이상의 수준에 형성될 것으로 예상된다. 결국 불어난 발전비용 때문에 SMR로 생산한 전력의 수요처를 확보하지 못하고 해당 사업은 2023년 11월에 공식 중단되었다.

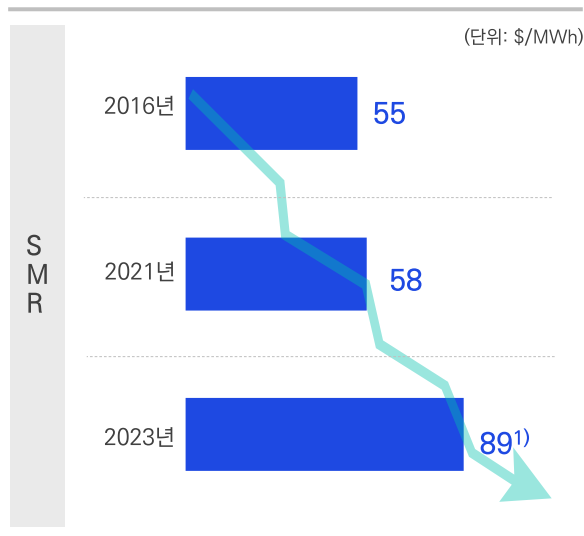
따라서 앞으로 성공적인 SMR 해외 진출을 위해서는 비용 효율성 장벽을 넘는 것이 중요하며, 사업 경제성을 확보할 수 있는 수출대상국을 모색하는 것이 보다 중요하다. 이러한 점을 고려할 때 향후 SMR 수출은 전 세계 원자력 발전량의 약 40%를 차지하는 북미 또는 원전 성숙도가 높은 유럽과 같이 원전 운영 경험이 있고, 전력 인프라가 이미 갖춰진 선진국 시장에 먼저 초점을 두며 시작해야 할 것이다.

“

SMR의 예상 전력요금
평가에 따르면 성공적인
해외 진출을 위해서 경제성
확보가능한 수출대상국을
모색하는 것이 중요

”

[뉴스케일 SMR의 예상 전력요금(Price of Power)]



[원자력 발전량 상위 10개국]

국가	2021년(TWh)	2022(TWh)	전년대비 증감률(%)
미국	771.6	772.2	0.1
중국	383.2	395.4	3.2
프랑스	363.4	282.1	-22.4
러시아	208.4	209.5	0.5
한국	150.5	167.5	11.3
캐나다	86.8	81.7	-5.9
스페인	54.2	56.0	3.3
일본	61.3	51.9	-15.3
스웨덴	51.4	50.0	-2.7
UK	41.8	43.5	4.1

Source: UAMPS(2023.01)

Note: IRA에 따른 보조금 혜택(30\$/MWh)을 반영한 수치

Source: World Nuclear Association

Note: 중국은 본토 기준

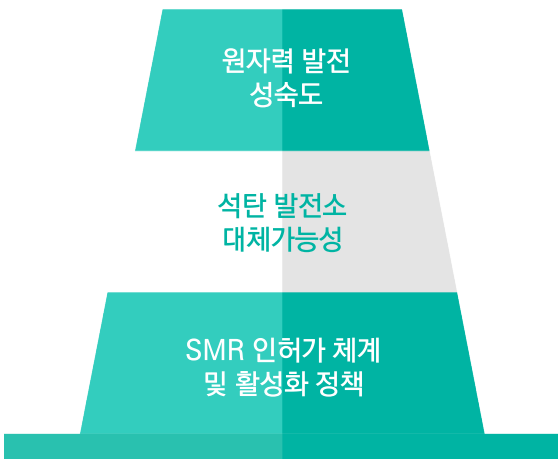
원전 운영 경험이 적은 신흥국의 경우 원전 도입 시 운영인력 교육, 안전규제 및 정책의 도입, 송배전 및 전력 인프라 확충 등 부가적인 요소가 많아 적어도 수 조원 규모의 대형원전 사업은 되어야 경제성이 맞을 수 있기 때문이다. 따라서 아직은 동남아나 아프리카 등 신흥국에 SMR을 건설하는 것은 어렵다고 평가된다.

특히, 석탄 발전소를 원자력 발전소로 전환하는 C2N(Coal to Nuclear) 사업이 활발한 지역을 눈 여겨 볼만 하다. SMR은 석탄 발전소와 입지조건이 유사하다는 측면에서 잠재적인 대체가능성이 높은 것으로 평가되기 때문이다. 미국 에너지부 연구에 따르면 발전소의 보일러만 원자로로 교체하고 설치된 고비용의 발전 및 송배전 설비를 재활용하면 15~30%의 건설비용을 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 이미 허가 받은 부지이기 때문에 인허가 단계 측면에서도 시간 절약이 가능할 것이다. 넷제로로 석탄 발전소의 조기폐쇄 압박이 거세지고 있는 미국은 수많은 석탄 발전소를 SMR로 전면 대체하는 방안을 검토 중인데, 이미 폐지됐거나 운영 중인 석탄발전소의 80%가 C2N 전환에 적합하다고 분석된다.

한편, 원전 성숙도가 높은 국가를 의미하는 원자력 발전 비중 상위국을 살펴보면 대부분 유럽 국가들이 도출되는데, 이 중에서도 석탄 비중이 높은 국가를 눈 여겨 볼 필요가 있다. 기저발전으로 석탄을 사용해왔을 경우 이미 설치된 석탄 발전설비 규모가 상당하여 SMR 발전소로 대체할 때 경제성 확보 잠재력이 풍부할 것으로 판단되기 때문이다. 따라서 원자력과 석탄 발전 비중이 모두 높아 C2N 프로젝트가 활발할 헝가리, 슬로베니아, 체코, 불가리아 등 동유럽 공략도 우선적으로 검토해볼 수 있다. 실제 해당 국가들 모두 SMR 유치를 위해 적극적인 의지를 보이고 있으며, 이에 현대건설은 동유럽 SMR 진출을 위한 전초기지로 폴란드 바르샤바(Warsaw) 지사를 설립할 계획을 밝힌 바 있다.

“
SMR 수출국 선정 시
원자력 발전 성숙도, 석탄
발전소 대체가능성, SMR
인허가 체계 및 활성화 정책
등을 검토해야

[SMR 수출국 선정 시 검토해야 할 주요사항]



Source: 삼정KPMG 경제연구원

[원자력 발전 상위 10개국 중 SMR 수출 유망국]

국가	2021년(%)	2022년(%)	전년대비 증감(%p)	석탄발전 비중(%) ¹⁾
프랑스	69.0	62.5	-6.5	1.8
슬로바키아	52.3	59.2	6.9	8.0
헝가리	46.8	47.0	0.2	11.0
벨기에	50.8	46.4	-4.4	2.0
슬로베니아	36.9	42.6	5.7	24.0
체코	36.6	36.7	0.1	41.0
스위스	28.8	36.4	7.6	-
핀란드	32.8	35	2.2	7.0
불가리아	34.6	32.6	-2.0	33.0
아르메니아	25.3	31.0	5.7	-

Source: World Nuclear Association
Note 1): 석탄발전 비중은 2020년 기준



SMR 분야 국적별 특허출원 현황은 미국(43%), 중국(22%), 유럽(13%), 한국(12%), 일본(6%) 순서



독자모델 개발과 특허 확보에 골든 타임을 놓치지 말 것

2023년 9월, 미국 법원은 웨스팅하우스가 “한국 원전은 폴란드에 지어질 수 없다.”며 한국수력원자력의 독자 원전 수출을 막으려고 제기한 소송을 각하했다. 해당 판결로 K-원전 수출에 한결 부담을 덜었다는 평이 있지만, 사실 아직 변수는 남아있다. 웨스팅하우스의 소 제기 자격 문제로 각하 결정이 내려졌지만, 소송의 쟁점인 한국형 원전이 웨스팅하우스의 기술인지 아니면 한국이 독자적으로 개발한 기술인지에 대한 판결이 난 것은 아니기 때문이다.

웨스팅하우스는 2022년 10월 한수원이 폴란드와 체코에 수출하려고 하는 한국형 원전이 웨스팅하우스 기술을 활용했다며 미국 정부 허가 없이는 수출을 금지할 것을 주장했다. 한국수력원자력은 원전 개발 초기에는 웨스팅하우스의 도움을 받았지만 이후 독자적으로 개발한 모델이라 수출통제 대상이 아니라는 입장이다. 이러한 대형원전의 지적재산권 논쟁에서 볼 수 있듯이 향후 걸림돌 없는 해외 시장진출을 위해서는 독자적인 SMR 모델개발과 특허 확보가 필수적이다.

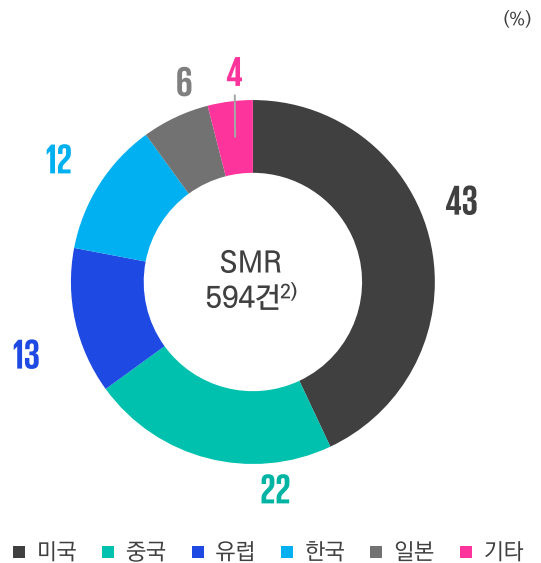
지난 20년간 특허 출원인 상위10개 기관을 원자력 발전 분야 전체로 살펴보면, 한국원자력연구원(2,201건)이 4위, 한국수력원자력(1,844건)이 7위로 한국이 상위권이지만, SMR로 좁혀서 살펴보면 한국전력기술(KEPCO E&C)만이 14건으로 9위에 올랐다. 또한, SMR 분야 국적별 특허출원 현황을 살펴보면 미국의 점유율이 43%(257건)으로 가장 높고, 최근 증가세가 두드러진 중국이 2위를 차지한다. 앞으로 한국은 12%(70건)은 앞으로 유럽, 일본과의 격차는 벌리고, 미국 및 중국과의 격차를 줄이는 방향으로 전략을 수립하는 것이 필요하다.

[SMR 분야 특허 주요 출원인 Top10¹⁾]

순위	출원인	국적	건수
1	Nuscale	미국	57
2	Terra Power	미국	35
3	Westinghouse	미국	26
4	China Nuclear Power Tech Research Institute	중국	17
5	China National Nuclear Corporation	중국	16
6	Advanced Reactor	미국	15
7	Babcock & Wilcox	미국	15
8	Toshiba	일본	15
9	KEPCO E&C	한국	14
10	Central Commission of Nuclear Energy	유럽	12

Source: 한국특허전략개발원
 Note 1): 출원일 기준 2001.01~2020.12을 전체기간으로 함

[SMR 분야 국적별 특허출원 현황¹⁾]



Source: 한국특허전략개발원
 Note 1): 출원일 기준 2001.01~2020.12을 전체기간으로 함
 Note 2): SMR 분야 전 세계 특허출원 건수

“

향후 걸림돌 없는 해외
시장진출을 위해서는
독자적인 SMR 모델개발과
특허 확보가 필수

”

원자력 산업의 패러다임이 기존 대형원전에서 SMR로 진화하는 과정에서 독자 기술을 위한 적기 투자의 기회를 놓쳐서는 안 될 것이다. 다행히도 올해인 2023년 9월, 산업통상부가 긴축 재정 기조에 따라 내년도 R&D 연구예산을 대폭 삭감했지만, 원전 부문 예산만큼은 이러한 원칙에서 열외를 두어 SMR 관련 예산은 8배 늘었다.

SMR 시장은 아직 상용화 모델이 부재한 가운데 각국 정부와 기업이 손을 맞잡고 대략 2030년 상용화를 목표로 경쟁적으로 달리고 있는 상황이다. 전 세계 원자력 발전량 1위인 미국의 경우 SMR 주도권을 쥔 기업들을 중심으로 정부의 지원 아래 자국 외 캐나다, 여러 유럽 지역에서도 사업권을 따내고 있다. 향후 중국·러시아 진영과의 수출 경쟁구도가 예측되는 가운데 국내기업들의 제3국 진출을 위해서는 미국 선도기업과의 파트너십도 중요하지만, 독자기술 개발과 특허 확보에도 타이밍을 놓쳐서는 안 될 것이다.

한편, IEA는 탄소중립 달성과 에너지 전환을 위해 원자력 발전량을 2050년까지 2022년 대비 2배 이상 늘려야 할 것을 강조하고 있다. 이러한 상황에서 SMR은 향후 카본 프리(Carbon Free) 에너지 공급망을 갖출 때 꼭 필요한 키(Key)가 된다. 2050년까지 탄소배출 제로 에너지 공급망을 구성하려면 신재생에너지원이 주 에너지원으로 활용되어야 하지만, 현재 재생에너지원은 지열발전이나 수력발전을 제외하면 간헐성으로 인해 에너지 저장장치가 필수적으로 필요하다는 제약이 존재하기 때문이다.

특히, 간헐성이 큰 태양광과 풍력을 주 에너지원으로 사용한다면 필요한 에너지 저장장치의 용량은 기하급수적으로 증가한다. 우리나라가 풍력과 태양광만으로 전기에너지 공급을 추진한다고 가정할 때 일일 전력수요 변화, 주간 전력수요 변화, 계절수요 변화 등을 감안하면 적어도 30일 이상 사용분량의 전기를 저장할 에너지 저장장치 용량이 필요하지만 이는 현실적으로 확보가 불가능한 양이다. 이때, 간헐성이 없고 이산화탄소 배출이 없는 SMR을 전력 공급망에 추가한다면 필요한 에너지 저장장치의 용량을 획기적으로 줄일 수 있다.

앞으로 궁극적으로는 원자력과 신재생에너지를 조합하여 탈탄소 전력 공급망을 구축하는 방향이 넷제로 달성의 핵심이 될 것이다. 이러한 가운데 신재생에너지원의 간헐성을 보상할 수 있고 다양한 활용이 가능한 SMR이 차세대 에너지원으로 기대되는 것은 자연스러운 흐름으로 보인다. 얼마 전 폐막한 제28차 유엔기후변화 협약 당사국총회(COP28)에서는 넷제로 달성을 위한 수단으로 무탄소에너지인 원자력이 최종 합의문에 최초로 기재되었다.

이러한 국제적 흐름에 따라 앞으로는 SMR을 중심으로 미래 에너지 시장에 다양한 비즈니스 기회들이 창출될 것이며, 이를 선점하는 국가 및 기업이 패권을 가져갈 것으로 예측된다. 한국 정부와 국내기업들이 이러한 골든 타임을 놓치지 않고 새로운 시장을 선점할 기회를 확보하기를 기대한다.

“

궁극적으로는 원자력과
신재생에너지 조합으로
카본 제로 에너지 공급망
구축

”

Business Contacts

원자력 발전 산업 전문팀

강정구
부대표
T 02-2112-7629
E jeonggukang@kr.kpmg.com

허세봉
부대표
T 02-2112-0212
E sebhonghur@kr.kpmg.com

이정수
전무
T 02-2112-0572
E jungsoolee@kr.kpmg.com

김연정
상무
T 02-2112-0297
E yeonjungkim@kr.kpmg.com

이규홍
상무
T 02-2112-6916
E kyuhonglee1@kr.kpmg.com

home.kpmg/kr



The information contained herein is of a general nature and is not intended to address the circumstances of any particular individual or entity. Although we endeavor to provide accurate and timely information, there can be no guarantee that such information is accurate as of the date it is received or that it will continue to be accurate in the future. No one should act on such information without appropriate professional advice after a thorough examination of the particular situation.

© 2024 KPMG Samjong Accounting Corp., a Korea Limited Liability Company and a member firm of the KPMG global organization of independent member firms affiliated with KPMG International Limited, a private English company limited by guarantee. All rights reserved.

The KPMG name and logo are trademarks used under license by the independent member firms of the KPMG global organization.