

SMR 업계의 국내외 동향과 정책 제언

박석빈*

SMR(Small Modular Reactor) 개발은 전 세계적으로 많은 주목을 받고 있다. 여러 국가에서는 SMR을 통해 탄소 중립 목표 달성, 에너지 안보 강화, 국제 경쟁력 확보 등의 정책적, 경제적 이익을 기대하고 있다. 이러한 기대는 SMR의 특징적인 장점에서 비롯되며, 주요 특징으로는 건설의 단순화 및 효율성, 안전성 강화, 유연한 설치 및 운영, 규모의 유연성과 환경 영향 최소화가 있다. 국제적으로 SMR의 개발은 에너지 시장의 새로운 동향으로 자리 잡고 있으며, SMR 선도 국가들이 이를 전략적으로 개발 중이다. 예를 들어, 미국, 캐나다, 영국은 각각의 국가적 요구와 시장 상황에 맞춰 다양한 SMR 프로젝트를 진행 중이다. 우리나라도 이러한 글로벌 경향에 발맞추어 SMR 기술의 개발 및 상용화에 힘쓰고 있으며, 특히 국제 협력을 통한 기술 개발 및 확산에 집중하고 있다. 이러한 상황을 고려하여 시급한 국내 정책 제언으로 민간과 정부의 협력 체계 강화, 기술 이전 활성화, 국제 시장에서의 경쟁력 확보, 그리고 연구 및 산업 기반 강화가 있으며, 이러한 정책들은 SMR이 국내외 에너지 시장에서 중요한 역할을 하고, 지속 가능한 에너지 해법이 될 수 있도록 할 것이다.

주제어 소형 모듈형 원자로, 초소형 모듈형 원자로, 경수로형 원자로, 소듐냉각고속로, 고온가스냉각원자로

투고일: 2024. 4. 27. 수정일: 2024. 6. 10. 게재확정일: 2024. 6. 14.

* 서울대학교 원자력정책센터 연구위원(h107626@snu.ac.kr)

I. 서론

원자로 개발 및 Small Modular Reactor(SMR) 기술의 발전은 에너지 분야에서 중요한 이슈 중 하나이다. 다양한 나라와 기업에서 SMR 개발에 힘을 기울이고 있으며, 우리나라도 i-SMR(Integrated Small Modular Reactor) 및 다른 형태의 SMR 개발에 관심이 있다. 이러한 상황에서 최적의 SMR을 개발하기 위해 SMR 업계의 국내외 동향과 이를 바탕으로 정책 제언을 해 보고자 한다.

SMR은 300MWe 이하의 전기 출력을 가지는 원전(IAEA, 2024)으로, 원전 내에 있는 구성기기/계통들이 원전 부지에 각각 설치되는 것이 아니라, 공장에서 사전 제작된 후 수송되어 원전 부지에 일괄 설치되는 것으로 건설 부문의 단순화를 통해 신뢰성 및 경제성 향상을 도모한다. 이러한 개념을 모듈형이라고 하는데, 모듈형 설계, 제조 및 건설 방식은 정해진 방식이기보다는 ‘공장제작/현장조립’ 혹은 ‘공장 작업 최대화/현장 작업 최소화’라는 개념으로 이해될 수 있다. 최근 주목받고 있는 모듈형 건설의 경우 외부에서 사전 제작한 건설 부재를 현장에서 조립하는 방식을 가리키며, 현장 투입 인력 감소, 생산성 향상, 공사 기간 단축 등의 이점이 있어 변화된 건설 산업 생산 여건에 대응할 수 있는 효과적인 대안으로 재조명받고 있다. 공장제작을 통한 현장 투입 인력소요 감소, 통제된 생산 환경에 따른 기상·기후 영향 최소화, 사업 초기 단계의 공기 및 공사비 예측 가능성 향상, 작업 현장의 안전성 향상 및 생산 과정의 폐기물 배출 감소 등의 효과를 기대할 수 있다. 즉, SMR은 미국과 프랑스가 겪고 있는 신규원전 건설의 ‘긴 건설 공기’ 문제와 ‘높은 초기 투자 불확실성’ 문제를 획기적으로 줄여줄 수 있는 해결책이 된다.

SMR은 대형원전과 비교해 출력이 낮고, 외부 전원이 불필요한 피동안전계통을 채택하여 안전성이 대형원전보다 뛰어나다. 또한 SMR 자체가 모듈화되어 있어서 규모를 키울 경우, SMR 모듈을 다중 배치할 수 있도록 설계되었다. 단일 SMR 크기가 대형원전 대비 매우 작아 지하 매립 방식, 냉각 수조 방식, 해양 부유 방식 등 다양한 방식의 활용이 가능하며, 공공에의 누출 방사성 물질의 양의 최소화도 가능하다.

SMR은 수송 및 설치 기간이 짧아 독립전원으로서 극지 및 오지에의 전력공급 수단으로 활용할 수 있다. 고온 SMR의 채택 시, 지역사회에 대량의 수소 공급이나 해수 담수화를 통한 청정수 공급이 가능하며, 산업단지에 필요한 공정열(산업용 증기 포함)을 공급할 수 있다. 또한, 신속 부하추종 특성을 갖는 장주기 연료 교체형 SMR의 활용을 통해 선박 및 우주 추진 분야에 활용할 수도 있다.

SMR은 활용 관점에서 보면 기존 전력 그리드의 한 부분으로서의 분산 전원 역할 수행, 독립된 지역의 전력원 제공, 산업용 공정열(수소생산 포함) 제공 역할의 세 가지로 구분될 수 있다. 최근 청정에너지 및 분산 전원의 비중이 커지는 전력시장의 환경 변화가 진행되고 있는 가운데, 전력 그리드에 연결되지 못한 오지의 광산, 주민 거주지 또는 군사기지의 전력원으로 또는 대형원전의 비상 전원 등에 사용되는 디젤 발전을 대체할 목적으로 SMR이 개발되고 있다. 앞으로의 전력시장은 전력 그리드 연결 방식용 대규모 기저 발전의 추가 수요는 둔화하고 격지(오지, 극지, 도서) 대상 분산형 에너지 공급 수요는 확대되는 추세가 지속하면서 소규모 분산 전원 시대가 오고 있다.

또한, 재생에너지의 간헐성으로 인한 전력 수급 불안정 문제 및 기존 화석연료 발전의 미세먼지 및 온실가스 배출 현안을 해결하기 위하여 안정적이면서 친환경적인 SMR의 필요성이 주목받고 있다. 가까운 미래에 급격한 수요 증가가 예상되는 분산 전원 시장의 필요 기술로서 SMR의 활용성이 기대되고 있다. 이러한 SMR의 혁신적 기술에는 원격지 에너지원으로 수명 기간까지 핵연료를 교체하지 않는 초장 주기 원자로 기술 및 원격 운전이 가능한 중대사고 배제하는 안전 기술, 독립 분산 전원 가능 부하추종 기술 및 다양한 에너지 생산 활용이 가능한 공정열 기술 등 기존 대형원전 기술과 차별화된 특성들이 있다. 미래의 원자력 신산업으로 SMR이 부상하고 있으나 원자력 기술 선진국도 개발 단계이기 때문에, 우리나라도 그동안 확보한 차세대 원자력 기술과 우수한 전문인력을 기반으로 기술 개발에 착수한다면 단기간에 기술 선도국으로 진입할 수 있을 것으로 예상된다.

II. SMR 개발 현황

1. 해외

SMR은 미국, 영국, 캐나다, 중국, 러시아 등이 상용화를 추진 중이고, 대형원전과 같이 기술 및 시장 확보 경쟁이 격화되고 있으며, 현재 상용화 직전 개발 단계 수준이므로, 선 기술 확보 국가가 시장을 주도할 수 있다. 이렇게 SMR이 주목받는 사유는 대형원전의 건설 기간 장기화와 이로 인한 건설비의 계획 대비 초과 문제로 주춤해진 원전 시장의 해결 수단으로 SMR 개발이 고려되고 있기 때문이다.

[그림 1] 전 세계 SMR 기술 개발 투자 현황



출처: 강일용, 정석준(2022)

영국에서는 2035년 약 300기의 SMR 시장을 예상하고, 2018년 SMR 개발을 위해 Rolls-Royce 주도 컨소시엄에 최대 1,800만 파운드 지원을 발표하면서, 총 SMR 개발 프로그램에 4,000만 파운드를 추가 지원하기로 하였다. 캐나다에서는 2030~40년대 전 세계 70,000개 격지(격리 도서 지역 포함) 및 비-전력망 지역에 전력 및 에너지를 공급하기 위해 연간 300억 불(CAD)의 열/전력 공급시장을 예측하고, 19개 기관에서 SMR 개발에 대한 참여 의향서를 접수 및 검토하고 있으며, 이 중에서 7개 노형이 CNSC(Canadian Nuclear Safety Commission)의 사전 인허가 검토 절차인 VDR(Vender Design Review)을 신청했다. 미국에서는 SMR에 추가하여 MMR(Micro Modular Reactor)의 후보 기술로서 U-Battery, MegaPower, eVinci, HOLOS 등을 검토하고 있다.

2. 국내

정부의 에너지전환 정책에 따라 대형원전 건설이나 신규 시스템 개발이 현실적으로 어려운 상황에서 그동안 확보한 미래 원자력 핵심기술의 역량 유지와 활용 방안이 필요하다. 에너지전환 정책에도 불구하고 정부는 ‘3차 에너지기본계획’을 통하여 원전산업 생태계 유지와 원전 수출시장 개척을 적극적 추진하고 있으며, 또한 재생에너지 백업-전원을 신기후체제에 온실가스 감축 목표에 부합하는 수단으로 마련하고자 한다. 2035년 까지 분산 전원·수요관리 등의 기술에 4조 원 투자, 원천기술 투자 규모는 2022년까지

3배 이상 확대 계획이며, 국내 청정 도서 지역의 디젤 발전을 대체할 수 있는 분산형 청정 전력/에너지 공급원으로 SMR 수요가 가능하다. 또한 향후 남북문제 해결 후 북한의 비 전력망 지역 개발 등 다양한 활용 분야가 있을 것으로 기대된다. 국내 보유한 미래원자력시스템 기술 역량과 세계 최고 수준의 원전 기반을 구축한 원자력 산업체가 협력하여 10년 이내에 세계 최고 성능의 SMR 기술개발과 실증을 완수한다면 해외 수출시장 개척뿐만 아니라 국내 군사기지 또는 도서 지역 분산 에너지원으로 미래 활용 가치가 높은 기술을 확보하게 된다. 국방 분야에서도 미래 국방 전력 변화에 대응하기 위한 높은 출력밀도의 안정적 에너지원 수요, 격자 또는 특수목적 적용 분야(공군 비행장 등)의 비상/독립전원 및 열공급 에너지원 수요, 지속적인 연료 보급이 어려운 조건에서 장기 에너지원에 대한 수요가 있을 것으로 전망된다.

국내 SMR 개발의 대표주자는 한국원자력연구원이 개발하고 있는 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)로 100MWe 출력의 소형모듈원전이다. SMART는 국내에서 설계 인허가를 획득한 상황이며, 사우디아라비아와의 협력으로 ‘건설 전 설계(Pre-Project Engineering, PPE)’ 사업을 진행하였다. 국내의 SMR 기술은 국외에 비하면 뒤쳐져 있는 편이며, 그동안 한국원자력연구원과 한국과학기술원에서 수행된 SMR 중 가스로나 열전도관 원자로 개발은 개념 연구 수준(Technology Readiness Level, TRL 1~2)이며, 초소형원전연구단(울산과학기술원 등)의 초소형 납냉각로의 경우 2019년부터 개념설계에 착수한 상태이다. 한국원자력연구원은 2012년부터 2014년까지 우주 및 오지용 열전도관 냉각 원자로 노심 설계 개념 연구를 수행하였다. 2017년 한국원자력연구원은 10MWe급 초소형가스로 개념 연구를 착수하여 20년 장주기 노심 및 피동안전성 개념을 개발하고 있다. 한국과학기술원은 2013년부터 12MWe급 CO₂ 가스로 방식의 일체형 초소형원자로 개념 연구를 수행하고 있다. 울산과학기술원의 초소형원전연구단은 2019년부터 20MWe급 해양조선용 초소형 납냉각고속로 개발에 착수하였다.

III. 시장성

1. 잠재 시장 규모 평가

영국의 SMR 검토보고서(Rolls-Royce, 2017)에 따르면, 잠재적인 글로벌 SMR 시장의 규

모는 2035년까지 약 65,000~85,000MW로 2,500~4,000억 파운드 정도로 예상했다. 2016년 OECD/NEA(Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency)는 2035년까지 건설되는 SMR 설비용량을 1,000~21,000MW로 평가했다(OECD/NEA, 2016). 소형원전을 개발하고 있는 NuScale은 2035년까지 세계 SMR 시장을 55,000~75,000MW 규모로 평가했다(NuScale, 2017). SMR Start Consortium은 2035년 미국 SMR 시장 규모를 6,000~15,000MWe 규모로 평가했다(SMR Start, 2017). Power Engineering Magazine은 2035년까지 세계 SMR 시장을 1조 달러 규모로 평가했다(Ray, 2018).

캐나다의 SMR Roadmap(Canadian SMR Roadmap Steering Committee, 2018)에서는 전세계의 SMR 시장의 잠재력을 2030~2040년 사이에 연 1,500억 캐나다인 달러로 추정하면서 사용 분야를 다음과 같이 구분했다.

- (1) 석탄 화력 발전소 대체 시, 지구 온도 2℃ 상승 시나리오를 만족하려면 1,100GWe의 수요 예상(연간 1천억 달러가 넘는 시장)
- (2) 원격 도서지방 및 전력망이 없는 지역사회는 7만 개 이상의 지역이 해당(연간 3백억 달러의 시장)
- (3) 광산지역의 열 및 전기생산 용도에 SMR 활용(연간 35억 달러 규모의 시장)
- (4) 중공업 산업단지에서의 증기 공급(연간 120억 달러 규모의 시장)

2019년 NEI(Nuclear Energy Institute) 보고서(NEI, 2019)는 미국의 원격지에 대한 MMR 활용의 잠재 시장을 아래와 같이 분석했다.

- (1) 알래스카(Alaska)에는 작은 전력망을 가졌으나 다른 지역 전력망과의 미연결 지역이 300개 있으며, 이들 지역은 디젤 발전이 주요 발전원으로 전력생산단가는 Nome지역의 0.41달러/kWh로부터 Takotna의 1.02달러/kWh(미국 타 지역 전력생산가의 16배)이고, 비교적 전력망이 큰 지역인 Ketchikan(수력 주력)이 0.1달러/kWh, Anchorage(천연가스 주력) 0.14달러/kWh, Fairbanks(디젤/석탄 주력) 0.23달러/kWh임.
- (2) 하와이(Hawaii), 푸에르토리코(Puerto Rico), 괌(Guam)의 전력요금은 0.20~0.40달러/kWh로 전적으로 수입되는 디젤, 천연가스, 석탄에 의존하고 있어 전력생

산가가 높고 에너지 안보가 취약함.

- (3) 광산의 운영비의 대부분은 전력으로, 특히 전력망이 없는 오지 광산의 운영은 전력공급의 안정성이 무엇보다 중요하고, 이들 지역의 전력 생산가는 0.20~0.50달러/kWh로 높은 편이며, 광산의 수명은 광물의 종류, 품위 등에 따라 달라져 수년에서 10~20년(금광), 70년(구리광)인데, MMR와 같은 저렴한 발전원을 활용할 경우 광산의 수명 연장 가능.
- (4) 미 국방부는 500여 개의 고정된 공군, 육군, 해군 및 해병 군사기지를 운영하고 있는데, 이들 에너지 소비는 연방정부 총 에너지 소비량의 21%를 사용하고, 구성비는 53%가 전력, 32%가 천연가스, 나머지 15%가 석유와 석탄이라, 이들 시설 중 90% 가량이 40MWe 정도의 발전시설로 에너지를 공급할 수 있는 수준이므로 2~10MWe 규모의 MMR 다수기 운영으로 해결 가능.

영국 DECC(Department of Energy and Climate Changes) 발간 보고서(Edson, Willson, Rakshi and Kekwick, 2016)에 따르면, MMR 잠재 시장 규모를 2035년까지 약 30,000MW(1기당 5MW로 할 경우, 570기)로 예상하였으며, 용처별 예상 수요는 [표 1]과 같이 추정하였다.

이상에서 언급한 바와 같이 SMR 선도국의 전문 조사 기관들은 SMR 시장이 방대하게 커질 것임을 모두 예상한다.

2. 실증 및 상용화 동향

미국의 SMR 실증 및 상용화 시작은 UAMPS(Utah Associated Municipal Power System)와 TVA(Tennessee Valley Authority)에 의한 SMR 건설 프로젝트부터이다. UAMPS는 INL(Idaho National Laboratory) 부지에 NuScale 건설을 추진하고 있으며, TVA는 Clinch River 부지에 대한 사전 부지 정지 허가를 신청하여 2016년 12월 NRC(U.S. Nuclear Regulatory Commission)로부터 발급받았다. TVA는 Clinch River 부지에 BWRX-300을 포함한 여러 형태의 SMR의 건설을 추진 중이다. 미국의 DOE(Department of Energy)는 SMR 개발을 위하여 7.55억 불의 예산을 확보하였고, 미 의회는 MMR 건설 관련 NDAA(National Defense Authorization Act)의 통과와 함께, MMR 최소 1기 건설/운영용 Pilot Program의 수립/제출을 요구했다(Charles, 2018). 이에 NEI는 기술보고서에서 MMR Pilot Program

[표 1] MMR 사용분야별 필요규모 및 시장규모

사용분야	필요 규모 (MW)	필요 이유	시장 규모 (MW)	30~35년 예상 기수 (5MW)
대형원전 예비전원	10	자율성, 전원교체 가능성	2,360	230
데이터 센터	10	경제성, 자율성, 전원교체 가능성	2,500	50
군사기지	20	자율성, 안정된 연료공급, 전원교체 가능성	1,200	60
광산 지역	high	원격지, 자율성, 안정된 연료공급	1,200	25
	low	경제성, 원격지, 안정된 연료공급	1,500	30
고립된 도서	10-50	경제성, 원격지, 안정된 연료공급	2,500	50
철강 산업		경제성, 안정된 연료공급, 열/전원공급	8,500	0
대규모 상업시설	5-15	경제성, 열/전원공급	2,000	0
원유/가스 터미널	10-100	경제성, 자율성	-	0
대형 화학단지	10-100	경제성, 열/전원공급	3,000	0
해수 담수화	10-50	경제성	2,500	25
유동성 기저 전원	10-50	경제성, 안정된 연료공급, 유연성	5,000	100
합계			30,460	570

에 대한 Guideline을 제시하면서, 2027년 12월 말까지 MMR 한 기 건설을 제안했다 (NEI, 2018).

캐나다의 CNL(Canadian Nuclear Laboratories)은 2026년까지 CNL 부지에 SMR 건설 계획을 2017년에 수립하고, 캐나다 국내 및 외국의 Stakeholder로부터 REI(Request for Expressions of Interest)를 착수하여, 학계, 전력회사, 잠재적인 수요자, SMR 유치 희망 지역, 기기공급업체 등으로부터 80개의 답변을 받았으며, 이중 19개의 기술개발자로부터 원형로 또는 실증로 건설에의 참여 의사를 받아 기술개발자들을 프로젝트에의 참여 초청 절차를 밟았다. CNL의 SMR Race에는 Global First Power(Ontario Power Generation, Ultra Safe Nuclear Corporation) 주도로 5MWe HTGR인 MMR을 Chalk River Site에 건설 하겠다는 제안을 하여 2019년 7월 기준으로 3단계(Stage-3) 업무인 CNSC의 환경평가가 시작되었고, Star Core Nuclear Design이 Whiteshell 및 Chalk River site 두 곳에 14MWe HTGR 2기 건설을 제안하여 사업에 참여(19.2.15. 1단계 통과), Terrestrial Energy는 190MWe IMSR(Integral Molten Salt Reactor) 건설사업 제안(1단계 통과, 19.2.15.), University of Manchester와 Delft University of Technology 등이 주관으로 4MW HTGR인

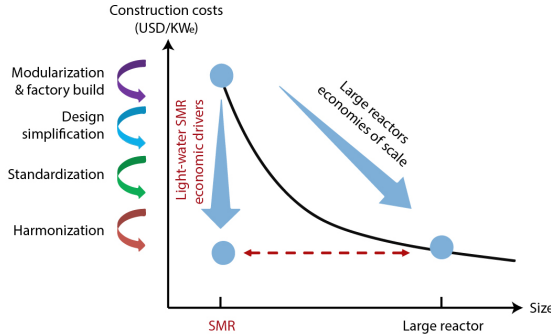
U-battery 건설 제안 (1단계 최근 참여) 등이 진행중이다. 또한 CNSC는 CNL의 SMR 사업과는 별개로 개발하고 있는 SMR도 Pre-licensing Vendor Review를 수행 중이다. 위의 CNL 사업, CNSC의 Vendor Review와는 별도로 캐나다는 2018년 11월 전략적 국제 SMR 시장의 교두보 역할을 할 것을 기대하면서, 산업체, 정부, 발전사 및 관련 사업체 전문가들이 10개월간 활동하여 “Canadian Roadmap for Small Modular Reactors”를 수립하고, Roadmap이 실행으로 옮겨지기까지 필요한 3단계 조치를 제안했다(Canadian SMR Roadmap Steering Committee, 2018). 이 로드맵에서는 SMR이 Canada 경제에 미치는 효과를 2030~2040년 사이에 연간 6천 개의 직/간접 일자리, 100억 불 규모의 직접 경제 효과 및 연간 90억 불의 간접 경제효과가 있는 것으로 평가된다.

영국은 SMR 개발을 위해 2015년 11월에 Initiative(SMR Competition)를 착수하였다. 이에는 경제적 효율성이 가장 좋은 SMR 설계를 완성하는 프로그램 착수, 5년간 2.5억 파운드(4억 2천만 달러)를 원자력 R&D(Research and Development)에 투자하는 내용이 포함된다. 2018년 6월에는 2억 파운드 규모의 Nuclear Sector Deal을 발표하였는데, 이 Deal에는 개량형 모듈러 원자로 개발과 인허가를 위한 0.56억 파운드, Canada의 SMR 경쟁을 위해 제작분야의 연구개발 지원금 0.32억 파운드가 포함된다. 8개의 비경수로(non-LWR) 설계회사에게 각각 기술적 및 상업적 타당성 검토를 상세히 하도록 4백만 파운드를 지원하였으며, 2019년에 8개 사 중 3~4개 사에 SMR 개발 지원예산을 2년간 0.4억 파운드를 추가 지원할 계획이다. 또한 영국 내 규제기관에는 새로운 원자로 인허가를 위해 5백만 파운드와 추가로 7백만 파운드를 지원할 예정이다.

3. 경제성

NEI 보고서(NEI, 2019)에 따르면, MMR의 발전단가가 0.14~0.41 달러/kWh로 디젤발전 단가의 0.15~0.60달러/kWh보다 가격 경쟁력이 있다고 하면서, MMR을 반복적으로 건설하면 발전단가는 0.09~0.33달러/kWh로 더 낮아진다고 하였다. 그 다음해 NEI 보고서에 언급된 [그림 2]을 보면, SMR의 경제성 확보를 위해, 모듈화, 설계 단순화 및 표준화와 규제 합리화(Harmonization)가 요구된다고 하였다. 미 국방성 보고서(U.S. Department of Defense, 2016)에서는 정기적으로 디젤연료를 수송할 필요가 없는 대체에너지원으로 MMR을 주목하였고, MMR 형태 중 고온가스로, 열전도관냉각원자로, 방사성동위원소 발전기가 기존 디젤발전보다 비용 등 면에서 우위라고 [표 2]와 같이 평가하였다.

[그림 2] SMR 경제성 확보 방안



출처: OECD/NEA(2021)

[표 2] MMR 군사기지 적용성 평가

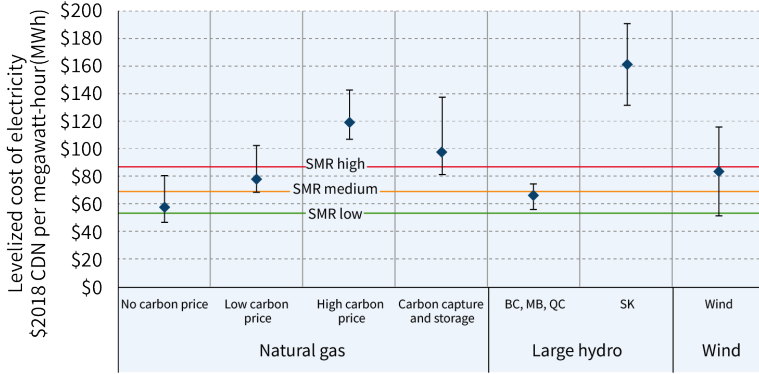
항목	고온가스로	열전도관냉각원자로	방사성동위원소발전기
연료선적감소량	5MWe 1기당 연간 1287 tankers	2MWe 1기당 연간 515 tankers	0.2MWe 1기당 연간 50 tankers
디젤발전 대비 면적	35%	50%	180%
작동 후 운송시간	7일 이상	~4일	< 1일
조약 및 정책	필요	필요	불필요
디젤발전 대비 비용	35%	32%	42%
방어 수준	High	High	Moderate
선행 투자 비용	Large	Large	Moderate-Large

캐나다의 SMR Roadmap에서는 SMR의 전력 생산 단가가 [그림 3], [그림 4]에서 보듯이 다른 전력원(천연가스, 수력, 풍력)에 비해 경쟁력을 갖출 수 있음을 보여준다.

IV. 주요 SMR 개발 현황

현재 연구개발 중인 SMR 중에서 가까운 시간에 상용화가 가능한 SMR들을 우선 검토해 보았다. SMR은 크게 대형원전에서 파생된 경수로형과 4세대 원자력 시스템과 연계

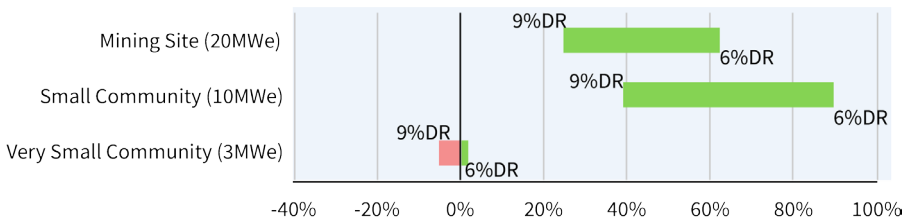
[그림 3] on-grid SMR 전력생산단가 비교(6% 할인율 가정)



BC: British Columbia, MB: Manitoba, QC: Quebec, SK: Saskatchewan

출처: City of Edmonton(2019)

[그림 4] off-grid SMR 디젤발전 대비 전력생산단가 비교(6 및 9% 할인율 가정)



출처: Canadian SMR Roadmap Steering Committee(2018)

된 차세대 SMR로 구분된다.

1. 경수로형 SMR

경수로형 SMR은 냉각재와 감속재로 물을 사용하는 원전으로서 1차 계통에서 수증기를 직접 생산하여 증기터빈을 통해 전기를 생산하는 비등경수로형과 1차 계통의 고온 고압의 냉각재를 2차 계통과 열교환을 통해 간접적으로 증기를 생산하는 가압경수로형이 있다. 대형경수로와 비교하였을 때 경수로형 SMR은 출력 대비 충분한 냉각수를 보

유하고 있고 주요 구성기기를 압력용기 내에 배치하는 일체형 원전 형태를 주로 채택하여 획기적으로 안전성을 높였다. 경수로형 SMR은 기존에 널리 상용화되어 있는 대형원전 기술과 연계하여 60년 이상의 원전 운영 경험을 보유하고 있으며, 대형원전 관련 인허가 경험을 통한 경수로형 SMR 인허가의 적용 용이성이 매우 높다. 대형원전에 사용되는 핵연료 설계 및 제작의 기반, 증기발생기, 원자로냉각재펌프, 압력용기와 같이 핵증기공급계통 요소기술 설계 및 제작의 기반을 보유하고 있어서 경수로형 SMR 요소기술에 대한 높은 신뢰성을 확보하고 있다. 대형원전 관련 전 세계에 구축된 공급, 기술, 인력 기반을 활용하여 추가 투자를 최소화할 수 있어서 경제적이다. SMR 온도가 320℃ 정도로 제한되어 있어 낮은 열효율을 가지며 원자력의 열을 이용하는 다양한 적용성은 제한된다.

가. NuScale

NuScale은 원자력 발전 분야에서 혁신적인 접근법을 제시하며, 여러 주요 설계 특성으로 주목받고 있다. 이러한 특성들은 NuScale의 고유한 효율성과 안전성을 강조하며, 그중 일체화, 모듈화, 단순화, 안전성 강화가 핵심이다. NuScale Power Module(NPM)은 원자로, 증기 발생기, 가압기 등을 하나의 장치로 통합하여 핵반응과 증기 생성을 동시에 수행할 수 있다. 이 모듈은 전력 출력을 유연하게 조절할 수 있도록 설계되어, 최대 12개의 모듈로 구성 시, 총 924MWe의 전력을 생산할 수 있다. NuScale은 복잡한 부품과 시스템을 줄여 대형 배관 파단 사고의 가능성을 원천적으로 차단하는 단순화된 설계를 채택했다. 또한 완전 피동형 설계 시스템을 도입하여 중대 사고 시에도 안전성을 확보할 수 있다. 이러한 특성들은 NuScale을 전기생산뿐만 아니라 해수 담수화 및 공정열 생산에도 적용할 수 있게 한다.

NuScale은 2017년 미국 원자력규제위원회(NRC)에 설계인증을 신청한 이후 여러 중요한 이정표를 달성했다. 2020년에는 NRC로부터 50MWe NPM의 설계인증 신청 검토를 받았고, 이어서 표준설계승인(Standard Design Approval, SDA)을 받았다. 이후 NuScale은 자사의 SMR 이름을 VOYGR로 결정하고, 표준 발전소 설계(SPD)를 완성했다. 또한 NuScale은 GS에너지, 두산중공업, 삼성물산 등으로부터의 투자 유치, Spring Valley Acquisition Corp와의 합병을 통해 NuScale Power Corp(NPC)를 설립하고 나스닥에 상장하는 등의 성과를 이루었다.

- NuScale의 최근 동향

- 2017년 NRC 설계인증 신청 및 UAMPS는 INL 부지에 NPM 건설계획 수립
- 2020년 8월, NRC의 50MWe NPM 설계인증 신청에 대한 검토 완료, 이후 9월에 SDA 발급
- 2021년 12월, NuScale은 자사 SMR의 이름을 VOYGR로 결정
- 2022년 12월, 표준발전소 설계(Standard Plant Design, SPD) 완성
- 투자 및 합병: NuScale은 GS에너지, 두산중공업, 삼성물산 등으로부터 투자 유치, 2021년 말에는 Spring Valley Acquisition Corp와 합병하여 NuScale Power Corp (NPC)를 설립하고 2022년에 나스닥에 상장
- 미국 에너지부(DOE)로부터 NuScale 개발지원금으로 13억 5,550만 달러의 지원금 수령
- NPM 50MWe 모듈에 이어 77MWe 모듈의 SDA 진행
- 2022년 2월, UAMPS는 INL 부지에 NPM 건설용 COL(Combined License)의 2024년 신청 계획 표명
- 2022년 7월 29일, NRC의 NuScale SMR DC(Design Certification) 발급 요청
- 2023년 2월 21일, NuScale SMR DC 효력 발생(U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2023)

- NuScale SMR의 주요 협력사

- BWXT(Babcock & Wilcox Technologies): 원자로 상부 및 증기 발생기에 대한 설계 및 제작
- 두산에너지빌리티: 원자로 단조 소재 및 원자로 제작
- Framatome: 핵연료 저장 및 취급 설비 설계 및 제작

NuScale SMR의 비상계획구역(Emergency Planning Zone, EPZ) 설정 방식은 U.S. NRC의 승인을 받았으며, 이는 대형원전에 비해 작은 EPZ 설정이 가능함을 의미하며, 이는 NuScale SMR의 향상된 안전성과 수동 안전 시스템 덕분이다.

- NuScale SMR의 EPZ를 부지 경계로 제한하는 방법의 인허가 취득(World Nuclear News, 2022a)

- 발전된 안전 해석 도구로 SMR용 EPZ 크기를 보다 체계적으로 결정 가능
- 대형 원전 대비 방사성 또는 위험 물질이 적어, 작은 EPZ 가능
- 향상된 안전 여유와 수동 안전 시스템으로 더 작은 EPZ 구현
- Risk-Informed 방법론에 따른 일관된 EPZ 크기 확인
- 『부지 경계 = EPZ』 개념의 구현으로 실사용자의 근접 허용 및 비상 계획 비용 감소

해외 시장 개척 노력의 하나로, NuScale은 루마니아와 폴란드와의 협력을 통해 유럽 시장에서의 입지를 확장하고 있다. 루마니아에서는 2027/2028년까지 첫 NuScale 원전을 건설할 계획이며, 폴란드에서는 2029년까지 NuScale VOYGR 원전을 건설할 예정이다. 그러나 NuScale은 UAMPS와의 협력하에 개발 중이던 Carbon Free Power Project(CFPP)를 비용 상승과 참여 도시의 철수로 인해 종료하기로 했다. 이 결정은 전력 목표 가격의 상승과 다른 국내외 프로젝트로의 방향 전환 계획에 따른 것으로 보인다.

- 루마니아와의 협력: NuScale Power와 루마니아의 국립 원자력 회사 Nuclearelectrica는 루마니아에서 NuScale의 SMR 기술을 배치하기 위한 팀 협약 체결(협약 목표: 2027/2028년까지 루마니아에 첫 번째 NuScale 6 Module, 462MWe 규모의 원전건설)(World Nuclear News, 2021a)
- 폴란드와의 협력: NuScale은 폴란드의 구리 및 은 생산업체 KGHM과 협약 체결(협약 목표: 2029년까지 폴란드에 NuScale VOYGR™ 원전건설)(Business Wire, 2022)
- NuScale Power는 유타주의 CFPP를 종료하기로 결정:
 - NuScale은 UAMPS와 협력하여 462MWe 규모의 원전건설 프로젝트를 개발하고 2030년에 가동할 계획이었으나 비용 상승으로 인해 여러 참여 도시가 프로젝트에서 철수하면서 계획에 차질이 발생하였으며, NuScale과 UAMPS가 합의하여 프로젝트 종료 결정(Choi, 2023)
 - ▶비용 상승: 전력 목표 가격이 MWh당 \$89로, 이전 추정치 \$58 대비 53% 상승
 - ▶계획 변경: NuScale CEO는 다른 국내외 프로젝트로 방향 전환 계획

나. SMART(스마트파워, 2022)

SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)는 한국에서 개발된 100MW 규모의 소형 모듈형 원자로(SMR)이다. 이 원자로는 전기생산과 해수 담수화 모두에 적용할

수 있으며, 2012년 한국의 인허가기관으로부터 표준설계인가를 취득했다. 특히, 한국 원자력연구원(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)은 2015년에 사우디아라비아의 K.A.CARE(King Abdullah City for Atomic and Renewable Energy)와 2기의 SMART 건설을 위한 MOU(Memorandum of Understanding)를 체결하고, 2019년에는 사우디아라비아와 SMART 관련 기술개발 협력 협정을 체결하며 이 기술의 국제적 협력과 확산에 박차를 가하고 있다.

SMART는 일체형 디자인을 채택하여 가압기, 증기 발생기, 원자로 냉각재 펌프 등 주요 기기를 원자로 압력 용기 내부에 배치함으로써 대형 냉각재 상실 사고의 가능성을 근본적으로 차단하였다. 이 일체형 구조는 원자로의 안전성을 대폭 향상하는 동시에 경제성도 개선한다.

SMART는 우리나라 기술로 자체 개발된 330MWt의 중소형 일체형 원자로로, 기존 가압경수로 대비 약 100배의 안전성을 갖추고 있다. 이 원자로는 전력 생산과 더불어 해수 담수화 에너지원도 제공할 수 있으며, 담수 계통에서는 하루 최대 40,000톤의 담수를 생산할 수 있고, 전력 계통에서는 최대 90,000kW의 전력을 생산할 수 있어 인구 10만 명 규모의 도시에 필요한 물과 전력을 공급할 수 있다.

추가 R&D를 통해, 2011년 3월에 발생한 후쿠시마 원전 사고 이후 추가된 후속 조치를 반영하여 2012년 3월부터 완전 피동 안전 계통을 접목하는 등의 추가 연구개발을 수행하여 수출경쟁력을 강화한 SMART는 그 독특한 설계와 기술적 이점을 통해 국내외에서 주목받고 있으며, 국제 협력을 통한 기술 전파와 상업적 활용을 모색하고 있다.

다. i-SMR

i-SMR(Integrated Small Modular Reactor)은 혁신적인 소형 모듈형 원자로(SMR)로서 여러 가지 특징적인 설계 특성을 가지고 있다. 이 원자로는 최상위 요구사항으로 170MWe 급 일체형 가압경수로로서 증기 발생기, 냉각재 펌프, 가압기를 내장하고 있으며, 기본적으로 4개의 호기를 배치하여 총 680MWe의 전력을 생산할 수 있도록 설계되어 있다. 또한, 이 설계는 EPZ를 부지 경계까지 확장하여 주민 대피가 필요 없는 수준의 안전성을 제공한다. i-SMR의 혁신성은 무봉산 운전, 내장형 제어봉 구동장치, 탄력적인 운전 능력 및 수소 생산 가능성을 포함한다. 이러한 혁신적 특성들은 장기적인 피동 냉각을 가능하게 하고, 액체 폐기물의 발생량을 줄이며, 이탈 사고의 방지에 이바지한다. 또한, i-SMR은 경제성을 고려하여 건설단가 목표를 kW당 3,500\$로 설정하고, 24개월 이내

에 건설을 완료할 수 있도록 계획하고 있으며, 모든 구성 요소는 육상운송이 가능하도록 설계되었다. i-SMR의 설계는 피동형 안전 계통을 포함하여, 전력이나 조작 없이도 안전을 유지할 수 있는 시스템을 통해 사고 가능성을 현재의 대비 1/100 이하로 줄이는 것을 목표로 한다. 이 피동형 시스템과 일체형 설계는 공장생산과 현장조립을 최적화하며, 정비 수요를 줄인다. 복수 모듈 배치 전략을 통해 i-SMR은 운영 인력의 필요성을 줄이고, 대형 기기 및 계통을 공유함으로써 효율성을 높인다. 이러한 배치는 통합된 주 제어실을 통해 관리된다.

- 설계 특성

- (최상위요건) 170MWe급 일체형(증기 발생기, 냉각재 펌프, 가압기 내장) 가압경수로
- (기본 배치) 4개 호기 배치 기준(총 680MWe, 변경 가능)
- (안전성 향상) 주민소개 불필요
 - ▶ EPZ(비상계획구역) = 부지 경계
 - ▶ 피동 격납용기 냉각
- (혁신성) 무봉산, 내장형 제어봉 구동장치, 탄력 운전, 수소 생산
- (경제성) 건설단가 3,500\$/kW 목표, 24개월 공기, 육상운송 가능

개발 전략 측면에서 i-SMR은 대형 상용 경수로의 입증된 기술과 한국에서 개발된 SMART 원자로의 표준설계인가를 접목하여 안전성, 경제성, 유연성을 향상하기 위한 핵심기술의 개발과 검증은 목표로 하고 있다. 연구개발 일정은 2023년에 시작하여 혁신 기술개발과 표준설계를 수행하며, 2028년까지 인허가 획득을 목표로 하고 있다. 이러한 i-SMR의 개발은 원자력 발전의 미래에 있어 중요한 단계를 나타내며, SMR 기술의 전반적인 발전에 중요한 이바지를 할 것으로 기대된다.

라. ACP100(XU, 2016)

ACP100, 또는 “Linglong One”으로 알려진 중국의 소형 모듈형 원자로(SMR)는 다양한 용도로 설계된 혁신적인 SMR 중의 하나다. 약 100MWe의 출력을 가진 이 가압경수형 SMR은 소규모 전기 발전을 위해 최적화되어 있으며, 전기 발전 외에도 지역난방과 해수 담수화 등에 활용될 수 있다. ACP100은 비상시에 운전원의 개입 없이도 안전 정지가 가능한 설계로, 그 안전성에 중점을 두고 있다.

ACP100의 개발 이력을 살펴보면, 이 프로젝트는 2010년 CNNC(China National Nuclear Corporation)에 의해 시작되었습니다. 설계는 2014년에 완료되었고, 중국의 제12차 5개년 계획에서 ‘핵심 프로젝트’로 지정되어 중국 내에서 중요한 발전 프로젝트로 인식되었다. 2016년에는 국제원자력기구(IAEA)로부터 독립적인 안전 평가를 통과하여 국제적인 기준에 부합하는 안전성을 인증받았다. 2021년에는 중국 하이난섬 Changjiang에서 ACP100의 건설이 시작되었으며, 이는 중국 국가위원회에 의해 승인된 과학기술 시연 프로젝트의 일환으로서, 건설은 2022년 기자재 설치 공사에 이어 2023년에 원자로 건물 내부 구조물 설치가 완료되었다. 이 프로젝트는 2025년에 약 65개월의 건설 기간을 거쳐 운전을 시작할 예정이다. 이러한 ACP100의 실증은 중국 내에서뿐만 아니라 전 세계적으로 SMR 기술의 상용화와 실용화를 앞당기는 중요한 단계가 될 것이다. ACP100의 성공적인 개발과 실증은 전기 발전, 지역난방, 해수 담수화 등 다양한 분야에서 원자력의 활용도를 높이는 데 이바지할 것으로 기대된다(NEI, 2022a; World Nuclear News, 2023a).

다. BWRX-300

BWRX-300은 GE-Hitachi에 의해 개발된 300MWe급 자연순환 피동 안전 소형 모듈형 원자로(SMR)이다. 이 설계는 기존의 1,520MWe급 경제형 비등수 원자로(Economic Simplified Boiling Water Reactor, ESBWR) 설계를 기반으로 하여 소형화 및 단순화된 형태로 개발되었다(IAEA, 2019). 주요 설계 특성으로는, 비등수를 냉각재로 사용하는 비등경수로 기반 설계, 외부 전력이나 운전원의 개입 없이도 작동이 가능한 자연순환 냉각 시스템, 설치와 유지보수가 쉽도록 간소화된 설비, 전력 수요 변동에 따른 출력 조절 능력, 장기간 안정적 운영을 통한 에너지 공급의 안정성 및 경제성 제고, 그리고 온실가스 미배출을 통한 환경친화적 운영 등이 포함된다.

개발 과정을 살펴보면, 2014년에 ESBWR 설계에 대한 NRC의 설계 인증(DC)이 발급된 이후, 2017년부터 BWRX-300의 소형화 및 단순화 개발이 시작되었다. 이어서 2018년에는 영국의 원자력 규제기관인 ONR(Office for Nuclear Regulation)과 사전 인증 절차에 참여를 시작했으며, 2019년에는 미국 NRC에 사전 인증을 위한 참여 및 인증 주제 보고서를 제출했다. 2020년에는 캐나다의 CNSC에서 VDR(Vendor Design Review)¹ 1, 2

1 캐나다 CNSC가 제안된 원자로의 인허가 가능성을 사전 평가하는 업무임. 인허가 시, 문제점이나 장애물

단계를 시작했으며, 2022년에는 미국 및 캐나다에서 건설 허가 신청서를 제출했다. 계획에 따르면, 2024/2025년경에 건설이 시작되어 2027/2028년경에는 미국 및 캐나다에서 상업 운영이 시작될 예정이다.

최근 현황으로는, BWRX-300이 캐나다의 Ontario Power Generation과 Sask Power에 의해 각각 Darlington과 Saskatchewan 부지에 건설될 SMR로 선정되었다. 또한, 에스토니아, 폴란드, 체코, 스웨덴 등 여러 국가의 기업들과 SMR 건설에 관한 MOU를 체결하였으며, 캐나다와 폴란드에서 BWRX-300을 건설하기 위한 캐나다 부품 공급망을 활용하는 협력이 추진되고 있다. BWRX-300은 영국 BEIS²에 GDA(Generic Design Assessment)³를 신청하여 현재 진행 중이다. 이러한 활동들은 BWRX-300이 전 세계적으로 확산하고 있음을 알 수 있다(World Nuclear News, 2020; 2021b; 2021c; 2022b; 2023b; Largue, 2022).

2. 차세대 SMR

가. 소듐 냉각 SMR - SFR(Sodium-cooled Fast Reactor)

SFR은 중성자 감속 능력이 없고 열전도율이 좋은 소듐을 냉각재로 하여 고속중성자의 감속 없이 원자력에너지를 생산하는 고속로이다. 소듐은 물보다 전열 성능이 매우 우수하여 고온의 원자력에너지를 효율적으로 활용할 수 있고 대기압에서 비등점이 약 883℃이기 때문에, 가압 없이 높은 온도의 원자력에너지 생산이 가능하다. 타 금속과의

을 사전에 식별하고 해결하는 역할 담당. 세 단계로 구성되며, 1단계는 규제 요구사항 준수에 대한 사전 인허가 평가로 제안된 원자로 기술의 캐나다의 모든 CNSC 규제 문서와 캐나다 코드 및 표준과 비교하는 전반적인 평가를 수행하고, 2단계는 잠재적인 인허가 장애물에 대한 사전 인허가 평가로 세부 사항에 더 깊이 들어가면서, 캐나다에서 인허가 취득에 있어 잠재적인 장애물을 확인하며, 3단계는 사전 인허가 공급업체 설계검토의 진행 상황에 대한 검토로 이전 단계에서 발생한 모든 조치나 권고사항의 진행과 완료를 모니터링하고 검증하는 것뿐만 아니라, 설계 과정 전반에 걸쳐 공급업체에 피드백과 지침을 제공하는 단계임. 이러한 VDR을 거치면 실질적으로 캐나다에서 인허가 가능 원자로로 인정받게 됨.

- 2 사업·에너지·산업전략부(Department for Business, Energy and Industrial Strategy)의 약자로, 영국 정부의 행정부처로 2016년 7월 14일 에너지·기후변화부와 사업·혁신·기술부를 통합해 신설.
- 3 영국에서 원전건설을 신청하기 전에 규제기관에 신규원전의 안전성, 보안성 및 환경 영향을 사전에 평가하게 하는 프로세스임. GDA는 규제상 강제 사항이 아니라 원자로 공급사의 자발적인 결정에 따라 참여하는 프로세스로 영국은 2017년부터 GDA를 실시하고 있음. GDA 프로세스는 완료하는데 1단계 시작으로부터 5년 정도 소요된다고 예상되며, 평가 완료 후에도 약 12개월이 소요된다고 함.

화학 반응도가 낮아 소듐이 있는 구조재와 기기들의 부식 문제없이 안정적인 운전이 가능하다. 고속중성자 영역에서는 반감기가 긴 고준위 방사성 물질인 초우라늄 원소가 효과적으로 소각되기 때문에 사용후핵연료의 방사능 저감과 핵연료의 효율적 이용이 가능하게 한다. SFR은 원자로 용기 내에 다량의 소듐냉각재를 보유하여 과도 출력 시에도 냉각재의 열-관성에 의해 온도변화가 심하지 않도록 하며 원자로 정지 초기의 높은 붕괴열을 일차 계통의 소듐냉각재가 흡수하도록 설계된다. 원자력에너지를 얻기 위해 상대적으로 높은 농축도의 핵연료를 사용해야 하며 소듐 누출 시를 고려하여 공기 중에 있는 수분 혹은 증기 계통에 있는 물과 격렬한 반응할 경우를 대비하는 대처 설계 및 안전 설비가 필요하다.

(1) TerraPower Natrium

TerraPower와 GEH(GE Hitachi Nuclear Energy)가 공동 개발 중인 NatriumTM은 고도의 혁신적인 원자로 설계로 주목받고 있다. 이는 소듐 냉각 고속 원자로(SFR)와 용융염 에너지 저장 시스템을 결합하여, 기저부하에서 345MWe의 출력을 제공하고, 필요시 최대 5.5시간 이상 동안 500MWe까지 출력을 증가시킬 수 있는 능력을 갖추고 있다. 그뿐만 아니라 총에너지 저장 용량은 850MWh에 달한다. 주요 설계 특성으로는, 소듐을 냉각재로 사용함으로써 높은 열 전도성과 고온에서의 안정적 작동 능력을 보유하고 있고, 용융염 에너지 저장 시스템과의 결합은 전기를 열로 변환하여 저장할 수 있으며, 피크 수요 시에는 이를 다시 전기로 변환하여 출력을 증가시킬 수 있는 특성이 있다. 이러한 특성은 에너지 수요의 변동에 효과적으로 대응할 수 있는 유연성을 제공하고, 또한, 핵연료의 효율적 사용을 통해 전통적인 원자로에 비해 적은 양의 방사성 폐기물을 생성하며, 고온에서도 높은 안전성을 유지하고 대규모 압력 관련 사고의 위험이 없다는 특성이 있다. NatriumTM은 첨단 원자력 기술의 혁신적인 예로서, 기존의 원자력 발전 방식과는 차별화된 접근 방식을 제시하며, 에너지 안보 강화 및 온실가스 배출 감소에 이바지할 수 있는 잠재력을 지니고 있다.

개발 경위를 살펴보면, 2019년에 TerraPower와 GEH가 공동 개발을 시작했다. 이후 2020년에는 미국 에너지부의 ARDP(Advanced Reactor Demonstration Program)⁴에 선정

4. 첨단 원자로 기술의 개발과 상용화 촉진하기 위한 계획으로 ① 첨단 원자로 기술의 실증 및 검증, ② 자금 지원 및 협력 관계 구축, ③ 다양한 유형의 첨단 원자로 기술 지원(예: SMR, 고속 원자로, MSR 등), ④ 미국의

되어 초기 자금을 지원받았다. 2021년에는 와이오밍주 Kemmerer 부지에서 PacifiCorp와 협력하여 실증로 건설계획을 발표했다. 2022년에는 부지 지하 조사를 완료하고, 노스캐롤라이나에서 Natrium 핵연료 제조시설의 착공이 이루어졌다. 그리고 일본과 우리나라에서 추가 협력이 확대되었는데, JAEA 및 미쓰비시중공업과의 협력 확대와 SK 및 SK이노베이션과의 SMR 기술 공동 개발을 위한 양해각서 체결, 그리고 한국조선해양과의 투자 계약 체결이다. 그러나 HALEU(High-Assay Low-Enriched Uranium)⁵ 연료의 미국 내 제조 역량 부족과 러시아와의 연료 공급망 단절로 인해 실증로의 운영 개시일이 최소 2년 지연될 것으로 예상된다. 2023년에는 건설 허가 신청이 이루어져 Docketing⁶ 중이며, 2026년에는 운영 허가 신청이 예정되어 있다.

나. 고온가스형 SMR - HTGR(High Temperature Gas-cooled Reactor)

HTGR는 직경 0.5mm의 우라늄 커널을 삼중 코팅한 TRISO(TRi-structural ISotropic)⁷ 핵연료를 사용하여 1,000℃ 수준의 초고온에서도 핵연료의 건전성을 유지하므로, 높은 핵비확산성과 방사성 물질의 외부 방출 방지 기능을 제공한다. 비활성 기체인 헬륨을 냉각재로 사용하고 있어 냉각재 누설이 되어도 방사능의 방출이 거의 없고, 고온에서도 상변화와 화학반응이 없다. 높은 중성자 감속능력과 열용량을 가지는 흑연 감속재를 사용하여 노심이 낮은 출력밀도를 가지게 되고, 사고 시 핵연료 최대온도 도달 시간이 낮은 출력밀도와 흑연으로 인해서 지연된다. 원자로 공동냉각계를 설치하여 사고 시 피동적으로 원자로 표면에서 복사열전달을 통해 지속해서 열 제거뿐만 아니라 지하 건설

에너지 안보 강화와 온실가스 배출 감소와 같은 환경 목표 달성 지원, ⑤ 상용화 가속화에 목표를 둔.

- 5 일부 첨단 원자로에서 사용되는 핵연료 유형으로 주요 특성은 ① U-235 농축도 5%에서 20% 사이(대부분의 상용 원전 사용 3~5% 농축도보다는 높지만, 고농축으로 간주하는 20% 이하이므로 상용에서 활용 가능), ② 낮은 농축 우라늄보다 높은 에너지 밀도 보유(장기간 운전 가능), ③ 높은 에너지 밀도로 더 작고 효율적인 원자로 가능(활용성 증대: 전기생산, 열생산, 해양 환경 추진 등), ④ 제한된 가용성 - 현재 HALEU 생산 가능 시설 부족으로 기반 시설 개발에 상당한 투자 필요, ⑤ SMR 및 마이크로 원자로와 같은 첨단 원자로에 유연하고 비용 효과적
- 6 인허가 서류의 완전함에 대한 검토 과정을 말하며, TerraPower의 Natrium 원자로에 대한 인허가 문서 접수는 NRC와의 사전 신청 과정에서 다양한 문서를 제출하고 검토하는 과정이며, 규제 해석, 품질 보증 보고서, 연료 조립체 자격 계획, 기타 기술적 및 안전 평가 등 다양한 인허가 검토 활동을 포함함. 이러한 문서의 현재 상태는 NRC Dockets 99902100과 99902087에서 확인 가능
- 7 저밀도 PyC, SiC, 고밀도 PyC 층을 핵연료 입자에 피복하여 1,000~1,300℃의 고온에도 파손되지 않는 특성 보유

시 토양의 열전도를 통해 피동적으로 열 제거가 가능하다. 900℃ 이상의 고온열을 이용한 고온 전기분해 또는 황-요오드 열화학 물 분해 방법으로 수소의 수요가 있는 지역에 CO₂ 배출 없이 대량 공급할 수 있다. 높은 온도를 기반으로 오지 및 산업단지에 고효율 전력 생산 및 산업용 공정열 활용이 가능하다. HTGR는 출력밀도가 낮아서 단위 출력 당 많은 부피가 필요하므로 소형화 및 모듈화 관련 혁신적인 기술개발이 필요하다.

(1) HTR-PM

HTR-PM 프로젝트는 고온가스냉각원자로 기술의 발전과 실용화를 위한 중요한 단계를 대표한다. 이 프로젝트는 중국 중앙 칭화대학교의 INET(Institute of Nuclear and New Energy Technology) 연구소에 의해 개발되었으며, 이전에 개발된 10MWt 규모의 HTR-10 고온가스냉각시험로의 성공적인 운영 경험을 기반으로 하고 있다.

HTR-PM의 주요 설계 특성은 다음과 같다.

- ① 원자로 모듈 구성: HTR-PM은 두 개의 원자로 모듈로 구성되며, 각 모듈은 원자로 압력용기, 흑연 감속재, 핵연료 포함
- ② 냉각 시스템: 헬륨냉각재를 사용하며, 냉각재는 7.0MPa의 압력에서 작동
- ③ 열 성능: 헬륨냉각재의 정격 질량 유량은 96kg/s. 헬륨은 원자로 압력용기의 바닥 영역에서 250℃의 온도로 유입되어, 노심에서 가열된 후 750℃의 온도로 원자로에서 방출
- ④ 핵연료: Pebble 형태의 핵연료는 8.5%의 농축도. 연료 교환은 운전 중 연속적으로 이루어지며, 삼입은 위쪽에서, 배출은 아래쪽으로 진행
- ⑤ 전력: 210MW(e)의 전기를 생산할 수 있는 증기터빈과 연결
- ⑥ 증기: 증기터빈 입구의 증기는 13.25MPa/567℃ 상태의 증기
- ⑦ 안전성 및 효율성: 고온가스냉각로의 안전성과 효율성 제공

주요 개발 이력은 2012년에 산둥성 시다오 만 원전에서 실증로의 건설이 시작되었고, 2020년에 두 개의 원자로 압력용기가 설치되었으며, 2021년에는 고온기능시험을 성공적으로 마친 후 핵연료를 장전하고, 임계 상태에 도달하여 계통병입에 성공했으며, 2022년 12월 9일에는 100% 출력에 성공했다.

HTR-PM 프로젝트는 단순히 기술적 성과를 넘어, HTGR의 상업용 원자로로의

발전 가능성을 시사한다. 특히, 200, 600, 또는 1,000MW(e)의 전기생산을 위해 여러 개의 원자로 모듈을 하나의 증기터빈에 연결하는 방식의 상업용 원자로 개발 계획이 진행 중인데, 이는 HTGR 기술이 향후 에너지 시장에서 중요한 역할을 할 수 있음을 보여준다.

(2) Xe-100

Xe-100은 X-energy가 개발 중인 pebble bed 형태의 고온가스냉각로로, 헬륨을 냉각재로 사용하며, 아래의 주요 설계 특성이 있다.

- 주요 설계 특성

- Pebble Bed Reactor Design: 소형의 연료 입자가 포함된 세라믹 Pebble로 구성되며, Pebble들이 원자로 코어를 통해 순환
- 고온가스냉각로: 고온의 헬륨 가스를 냉각재로 사용(원자로의 열효율을 높이고, 고온에서 안전하게 작동 가능)
- TRISO 연료 사용: 각각의 우라늄 연료 입자를 여러 층의 보호 재료로 둘러싸고 있어, 방사성 물질의 누출을 방지하고 안전성 향상
- 모듈: 모듈식 원자로로 여러 개의 원자로 모듈을 결합하여 발전소의 전력 출력 조절 가능(표준형 - 4개의 원자로 모듈로 구성, 총 300MWe의 전력 생산)
- 유연성: 변동하는 전력 수요에 맞춰 전력 출력을 조절 가능 유연성 제공(재생에너지원과의 통합 용이, 전력망 안정성 지원)
- 안전성 및 신뢰성: 중대사고 불가능

개발 경위는 다음과 같다.

- ① 2009년: X-Energy는 Kam Ghaffarian에 의해 설립된 미국의 민간 회사로 Xe-100 개발착수
- ② 2016년: DOE의 Advanced Reactor Concept Cooperative Agreement를 통해 최대 4천만 달러의 5년간 보조금 수혜
- ③ 2019년: 미국 국방부로부터 전진 기지에서 사용할 작은 군용 원자로 개발을 위한 자금 지원 수혜(Harper, 2020)

- ④ 2020년: DOE의 ARDP를 통해 4억 달러에서 40억 달러에 이르는 Matching Grant⁸ 수혜자로 선정됨. 해당 자금은 Xe-100 실증로 건설비용임
- ⑤ 2022년: Curtiss-Wright는 Xe-100 원자로의 3개 주요 구성 요소의 우선 공급자로 선정
- ⑥ 2023년: 미국 걸프만에 있는 Dow의 한 부지에 Xe-100 건설 합의(Gardner, 2023)

인허가는 2023년 현재, X-energy가 개발 중인 Xe-100 원자로의 인허가 상태는 주로 미국 원자력규제위원회(NRC)와의 사전 신청 단계에 있는데, 2018년 9월부터 NRC와 사전 신청 활동 진행했으며, 건설 허가를 신청 준비 중이고, 2028년에 운영하고자 추진 중이며(World Nuclear News, 2022c), 상세 추진 내역은 다음과 같다.

- X-energy는 Energy Northwest의 컬럼비아 원전 부지에 Xe-100 원전건설을 하기 위해 미국 DOE로부터 7년간 약 12억 3천만 달러의 지원을 받을 예정(World Nuclear News, 2021d)
- 2021년 4월, Xe-100 개발 및 실증을 지원하기 위해 Energy Northwest와 워싱턴주 그랜트카운티의 공공 유틸리티 지구(PUD, Public Utility District)와 협력 협정(MOU) 체결 (Gran PUD, 2021)
- Xe-100의 실증로 부지는 워싱턴주 리치랜드에 있는 Energy Northwest 소유의 콜롬비아 원전 인근으로 잠정 결정
- 2022년 12월, X-energy는 약 20억 달러 규모의 Ares Acquisition Corporation과의 합병 발표(Reuters, 2022)(완료 후, 회사명 X-Energy Inc로 변경)
- 2022년 2월, X-energy는 Rock Creek Innovations와 협력하여 Xe-100 SMR용 RPS (Reactor Protection System)의 첫 번째 프로토타입 세트 제작, 12월에는 이 RPS 프로토타입을 완성해 메릴랜드주 락빌에 위치한 Xe-100 제어실 시뮬레이터에 설치(World Nuclear News, 2022d)
- 2022년 7월, X-energy는 Xe-100 원전건설을 위해 Zachry Group, Burns & McDon-

8 하나의 조직이나 기관이 특정 프로젝트나 목적을 위해 자금을 제공할 때, 다른 조직이나 기관이 일정 비율로 해당 자금을 대등하게 제공하는 형태의 재정 지원 방식이고, 보통 비영리 기관, 연구 프로젝트, 교육 기관 등에서 흔히 사용되며, 특정 목표 달성용 자금 확보에 효과적인 수단으로 활용.

- nell, Day & Zimmermann으로 구성된 건설 팀 선정(World Nuclear News, 2022e). 같은 해 9월, Curtiss-Wright Corporation을 NSSS 개발 및 공급을 위한 전략적 파트너로 선택(ANS, 2022a)
- 2022년 4월, X-energy의 자회사인 TRISO-X는 상업용 HALEU 핵연료 제조시설의 인허가 신청서 NRC에 제출(ANS, 2022b)(미국 최초의 상업용 HALEU 기반 핵연료 제조시설).
 - 2022년 5월, 영국의 캐번디시 원자력과 고온가스냉각로(HTR) 배치를 위한 MOU 체결.(World Nuclear News, 2022f)
 - 2022년 6월, 메릴랜드 주 에너지국은 X-energy와 Frostburg 주립대학에 자금을 지원하여 석탄 발전소 시설을 Xe-100 SMR로 변경하는 방안 평가 지원(World Nuclear News, 2022g)
 - 2022년 7월, X-energy는 온타리오발전과 캐나다에서 Xe-100 SMR의 배치를 통한 탈탄소화 기회 모색을 위한 협약 체결(Dalton, 2022), 같은 달, 캐나다 새스캐처원 산업·광산협회와 협력 약속(NEI, 2022b)
 - 2022년 8월, 다우와 Xe-100 SMR 개발 및 배치를 통한 탄소 감축 협력에 대한 의향서 체결(World Nuclear News, 2023c)

다. 용융염냉각 SMR - MSR(Molten Salt cooled Reactor)

MSR은 토륨, 우라늄, 플루토늄 혹은 초우라늄 원소들을 불소 또는 염소화합물의 염과 혼합하여 공용 상태의 핵연료로 사용하는 SMR로 핵연료 물질 비산을 막아주는 피복관이 없고 핵연료 용융염 자체가 열전달 매체로 사용된다. 제어봉 없이 액체 상태의 핵연료 유량을 제어하여 출력을 제어한다. 원자로 내에 피복관 및 핵연료봉 지지구조물이 없어서 중성자 손실이 적으며 운전 중 핵연료 추가와 핵분열 생성물의 분리가 가능하다. MSR에 우라늄을 연료로 사용하는 경우보다 자원이 풍부한 토륨 연료의 활용 시 경제성 측면에서 유리한 것으로 알려져 있다. 대기압 원자로 운전이 가능하고 잉여 반응도를 낮게 유지하여 높은 안전성 유지가 가능하다. 용융염이 방사성 물질을 구속하고 핵분열 생성물이 운전 중에 지속적으로 제거되어서 원자로 정지 시의 잔열도 고체 핵연료 대비 40% 정도로 줄어들어서 더 높은 안전성을 확보한다. 사고 시에 퓨즈 밸브의 개방으로 용융염을 모두 배출하여 사고를 방지하는 배출 탱크 설치와 순환 펌프의 회전수와 용융염 보유량으로 출력을 조절하여 제어봉 이탈사고를 원천적으로 배제하는 피동-안전성을 보유하며, 출력밀도가 높아서 소형 제작이 가능하다. 단, 핵분열 시 발생하는 핵

분열 생성물이 용융염에 혼재하고 있어서 노심 내 구조물과 화학반응을 일으키며 노심 내 피복관 및 지지구조물의 부재로 배관 및 기타 구조물들이 높은 중성자속에 피폭되어 추가의 방사성폐기물이 생성된다는 단점이 있다.

(1) CMSR(Compact Molten Salt Reactor)

덴마크의 Seaborg Technologies는 바지선에 설치 가능한 CMSR을 개발하고 있다. 이 원자로는 100MWe급의 열중성자 원자로로, 우라늄 기반 불화 연료를 사용하며, 냉각재 역할도 수행한다. 특히, 용융 수산화나트륨(NaOH)을 감속재로 사용하여 원자로의 효율을 높이는 동시에, 부식 방지 가능 고급 재료와 부식 제어 방법의 적용 시, CMSR 한 대의 수명을 최대 12년까지 연장할 수 있다. CMSR 설계는 바지선에 2~8기를 탑재하여 확장할 수 있으며, 최대 800MWe까지 전력을 생산할 수 있다. 바지선은 각각의 전원 모듈에 2기의 CMSR를 장착하며, 추가 공간을 확보해 두어 12년 주기로 CMSR를 교체하거나 추가 설치가 가능하다. 이를 통해 최대 24년간 운영할 수 있으며, 가동 종료 후 전력 바지선은 해체 시설로 이송되고 원전 부지는 원 상태로 돌아가므로, 해체가 기존 원자로보다 매우 간단하다. CMSR는 감속재로 흑연 대신 용융 수산화나트륨을 사용하여 감속재가 조사 손상되지 않도록 하였으나, 용융 수산화나트륨이 적절하게 제어되지 않으면, 고온에서 원자로 용기와 튜브를 부식시킬 수 있기에, Seaborg Technologies는 수산화나트륨 부식성 제어에 대해 광범위한 실험 수행 중이다.

2022년 4월, Seaborg Technologies는 삼성중공업과 함께 CMSR를 이용한 원전 모듈의 제작 및 판매를 위한 양해각서를 체결했다. 이 협력은 삼성중공업의 조선 전문성과 Seaborg Technologies의 차세대 원자로 기술을 결합한 것으로, 일괄 원전 모듈 제조·판매 및 수소와 암모니아 생산공장의 개발에 중점을 두고 있다. Seaborg Technologies는 2020년 미국 해운국으로부터 기술 타당성에 대한 승인을 받은 이후 빠르게 성장하고 있으며, 현재 거의 100명의 인력을 보유하고 있으며, 2026년에 CMSR의 상업 운영 목표를 가지고 있다.

3. 초소형 SMR - MMR(Micro Modular Reactor)

MMR은 전기 출력 10MW 출력 내외의 원전으로 설치 및 운전이 쉽고 극지 및 오지 분산 전원 공급 및 다목적 열원 제공 기능을 갖추었다. 매우 작은 관계로 전체를 일체형 모

들로 제작하여 트럭, 바지선, 트레일러 등과 같이 통상적인 이동 수단을 통해 MMR 부지에 운송하는 개념을 채택한다. 모듈화, 단순화, 표준화를 통해 공기를 단축하여 경제성을 확보한다. 발전, 수소 및 담수 생산, 지역난방, 산업용 공정열 제공 등 시장에서 다목적용을 갖도록 설계하며 또한 군사기지, 우주탐사 등의 특수 목적에 역시 적합한 원전이기 때문에 넓은 범위에서 시장수요 및 전략적 수요를 만족한다. MMR이 활용되는 지역은 수요 변동이 자주 급격하게 일어나므로 이에 부합하도록 출력의 자율 조정 설계가 요구된다. 핵연료 교체 및 유지보수/검사 최소화를 통해 장기간 운영 가능한 장수명 노심이 필요하며, 적용 특성상 최소한의 운전원이 상주하기 때문에 다중성과 다양성을 갖춘 피동형 안전계통이 필수이다. MMR은 그 규모가 작아서 대형원전보다 건설비 등 투자비용이 적게 들어 소규모의 전력회사나 재정 규모가 작은 나라가 운영할 수 있다는 점이 장점이고, 그 반대로 규모가 작아 규모의 경제성이 없는 관계로 에너지 생산 단가가 비싸다는 점과 혁신 개념의 원전에 대한 인허가의 보수성으로 인한 투자 위험부담이 크다는 점과 소형으로 대량으로 제작되어 설치되다 보니 핵확산 위험성 및 대중 수용성 사안이 단점이라고 볼 수 있다.

가. MMR

MMR은 여러 혁신적인 기술을 도입한 15MWt의 초소형 블록형 고온가스로 개발에 초점을 맞추고 있다. 이 고온가스로는 20년 주기의 고농축 저농축 우라늄(HALEU) 핵연료를 사용하며, 별도의 핵연료 저장시설이 필요 없는 설계이며, 흑연 대신 고온에서의 안정성이 뛰어난 탄화규소를 사용한 TRISO 핵연료를 사용한다. MMR은 헬륨, 용융염, 그리고 물(또는 증기)을 통해 열을 전달하며, 용융염 탱크에 열을 저장해 전력과 공정열을 수요에 따라 유연하게 공급할 수 있고, 전력 생산은 물론 공정열 및 수소 생산에도 활용될 수 있는 다목적 원자로로의 발전 가능성을 내포하고 있다.

현재 MMR 기술은 캐나다와 미국에서 인허가 절차를 진행 중이며, 캐나다의 초크리버 원자력연구소에서 2026년까지 실증사업을 추진 중이고, 미국 일리노이 대학교와의 MOU 체결을 통해 교육 및 연구 협력도 강화하고 있으며, 폴란드에서는 고온가스로 건설을 추진하고 있다. 이와 관련하여 현대엔지니어링(EPC 업무 수행)과 협력 중이다(서미숙, 2022).

V. 정책 제언

파리협정을 이행하여 지구온난화에 대비하기 위해서는 간헐적이고 변동성 많은 재생에너지에 전적으로 의존할 수 없으므로 원자력의 활용은 불가피하다. 대형원전의 경우 원자력 이용 국가 중에서 중국과 인도 등 일부 국가를 제외하고는 부지, 투자비용 등의 문제로 신규 대형원전의 수요가 클 것으로 예상되지 않으며, 원자력 신규 도입 나라에서는 출력 규모가 국가 전력망 크기에 비해 상대적으로 거대하고, 이들 국가의 재정 능력이 원전을 감당할 만큼 확보되어 있지 않아 대형원전이 다수 건설되기는 어려움이 있다. 한편, SMR은 규모가 작아져서 전체 투자비는 적게 들고, 전력망이 비교적 적은 곳에서도 수용이 가능하다는 장점이 있다. SMR은 산업 공정열 생산 등에도 활용할 수 있도록 설계 단계에서 고려하고 있어 발전 외의 여러 분야로 활용할 수 있다. 예상되는 SMR 수요는 원자력 이용 국가 및 전력 그리드가 작은 국가의 발전원으로 신규 및 화력 발전 대체, 그리고 산업 공정열, 해수 담수화, 수소 생산 등 발전 외 산업적 이용 등 대형 원전과 차별되는 틈새시장에 이용될 수 있다. 특히 출력이 10MWe 이하인 MMR은 대형원전용 비상 전력, Data Center 전원, 군사 기지용 전원 및 에너지 공급원, 광산 지역용 전원, 도서 지역, 철강 산업 에너지 및 대규모 전력원, 대형 화학단지나 상용 단지 전원 등 특유의 틈새시장이 존재한다. 따라서 기후 온난화 대비하여 필요한 무탄소 에너지원 중의 하나인 원자력의 활용은 대형원전뿐 아니라 SMR에도 그 역할이 주어질 것으로 예상된다. SMR은 규모가 작은 특성 때문에 계통의 단순화 및 피동 계통을 활용하여 안전성 제고, 모듈이나 전제품을 공장제작 후 현지에서 운반 설치하여 제작비/건설비 절감으로 투자위험도가 낮다는 장점이 있다. SMR의 경제성 평가는 원자로가 건설되기 전으로 불확실성이 크지만 이에 대한 전망자료를 바탕으로 추정해 볼 때, 대형원전에는 미치지 못하지만, 특정 국가에서는 디젤 등 화력발전과는 경쟁력이 있는 것으로 평가되고 있다. 대형원전에 비해 에너지 생산 단가가 비싸진다는 점과 새로운 원자로에 대한 인허가 과정에서의 위험도가 가장 큰 단점이 있지만 소형원전 자체의 특성으로 인해 아래와 같은 개발의 필요성이 있다.

- ① 최근 급격히 성장하고 있는 재생에너지(태양광, 풍력 중심)의 간헐성을 보완하는 에너지 믹스 구축에 활용이 용이하고 온실가스 감축목표에 부합하는 무탄소 에너지원

- ② 출력이 작고 모듈화되어 수송 수단 이용 모듈 운송 가능으로 분산형 전력원에 가장 적합하며, 계통 단순화, 피동 냉각 안전성 구현 및 운전 자율성 접목으로 극지에서 활용 가능한 안정된 에너지원으로 전력 생산뿐만 아니라 산업체 공정 열 및 지역난방용 열, 담수 공급 가능

SMR 기술 개발 효과는 다음과 같다.

- ① 기술적 측면: 극지 오지 등 특수 환경에 사용될 수 있는 국내 고유의 SMR 기술 확보
- ② 안전성 측면: 피동 냉각 잔열제거로 노심용융사고 가능성이 없는 SMR 개발로 원자력 안전성 향상 기술 제고
- ③ 활용성 측면: 고온/기기 재료에 관한 초고온 실험연구로 관련 기술력을 확보하고 미래사회를 위한 다목적 열원 응용 기술(공정열, 합성연료 및 수소 생산)로 활용
- ④ 군사적 측면: 신속 수송, 신속 설치 및 1회 연료 장전으로 설계수명기간 또는 10년 이상 핵연료 교체 없이 운용이 가능하여 장기간에 걸쳐 연료 운송이 필요 없이 독립적이고 안정적인 전력 및 열에너지(담수, 증기) 공급 가능하여 군사기지 에너지원으로 적합

미국, 중국, 러시아 등의 원자력기술보유국들은 SMR 시장 확대에 대비하여 관련 연구개발을 진행하고 있으나, 국내 원자력기술은 대부분 대형 원전 관련 에너지 시장에 국한되어 있어, 미래 에너지원 시장의 한 영역이 될 SMR 시장에 대한 준비가 부족하다. 해외 선진국과의 기술격차가 크지 않은 현재 시점, 국내 기존 원자력 기술력을 기반으로 SMR연구를 가속화하면, 빠른 시일 내에 40년 이상 확보한 대형 원전 기술 및 중단 없이 진행해 온 SMR기술의 실증/상용화로 세계 시장 진출을 대비한 수출 가능한 SMR이 완성될 것이다.

이상의 내용을 종합해 보면, SMR 개발은 전 세계적으로 탄소 중립 목표 달성, 에너지 안보 강화, 국제 경쟁력 확보, 미래 시장 기회 창출, 그리고 국내 산업 역량의 결집이라는 여러 중요한 측면에서 큰 의미가 있고, SMR 개발 선도국에서 이미 이러한 SMR의 의미를 인지하면서 중요한 정책들을 시행하고 있다는 것이 확인되는 현 상황에서, 국내에서의 SMR 개발이 단순히 에너지 생산의 다양화를 넘어 국가 경제에 중대한 영향을

미칠 수 있는 중추적 함수 역할을 할 것으로 예상되므로, 다음과 같은 효과적인 개발과 실용화 정책이 시급하게 시행되어야 한다고 제언하는 바이다. 첫째, 민간과 정부가 협력하여 빠른 실증과 상용화를 추진할 수 있는 체계를 마련해야 하며, 이를 위해 정부는 법적, 제도적 지원을 강화하고, 민간 기업은 SMR 기술 개발에 더욱 적극적으로 참여할 수 있도록 해야 한다. 둘째, 이미 개발된 원자력 기술을 민간 기업에 효과적으로 이전함으로써 민간의 기술 개발 역량을 강화하고, 이를 통해 민간 주도의 원자력 기술혁신과 생태계 활성화를 촉진해야 한다. 셋째, SMR 기술을 전통적인 전력 생산 이외에도 수소 생산, 공정열 활용, 해양 및 우주탐사 등 다양한 산업에 적용할 수 있는 기술로 확장해야 하며, 이를 위해 공적 부문의 연구·개발 역량과 민간의 사업화 전략을 효과적으로 결합할 필요가 있다. 넷째, 세계 시장에서의 경쟁력을 확보하기 위해 국내 개발 SMR의 국제 기준 및 안전성을 확보하고, 해외 시장 진출을 위한 전략적 파트너십을 구축해야 한다. 다섯째, 관련 정부 기관, 산업계, 학계, 연구 기관 간의 협력을 통해 연구 및 개발, 실증 등을 진행하여 국내에서의 기술적 역량을 집중적으로 강화해야 한다.

이러한 정책들의 시행을 통해 SMR 개발은 국가 에너지 정책뿐만 아니라 국가 경제 전반에 긍정적인 영향을 미칠 수 있으며, 지속 가능한 에너지 공급원으로서의 함수 역할을 할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 강일용, 정석준, “[종합] 원전산업 부활 중심에 ‘차세대 SMR’ 있다,” *아주경제*, 2022.
- 서미숙, “현대엔지니어링, 미국 USNC 4세대 초소형모듈원전 시공권 확보,” 『연합뉴스』, 2022.
- 스마트파워, “SMART 개발사업의 고찰과 평가,” 2022.
- ANS, “Curtiss-Wright, X-energy Team up to Advance Xe-100 Deployment,” *NuclearNewswire*, 2022a.
- ANS, “TRISO-X Applies for Advanced Reactor Fuel Facility License,” *Nuclear Newswire*, 2022b.
- Business Wire, “ADDING MULTIMEDIA NuScale to Announce Historic Agreement with KGHM to Initiate the Deployment of the First Small Modular Reactor in Poland,” 2022.
- Canadian SMR Roadmap Steering Committee, “A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors,” Canadian Nuclear Association, 2018.
- Charles, Chris, “Micro-Reactors Could Power Remote Military Bases Within a Decade,” Nuclear Energy Institute, 2018.
- Choi, Jasmine, “NuScale Power Halts SMR Project: Impact on South Korean Investors,” *BusinessKorea*, 2023.
- City of Edmonton, “Is there a Role For Nuclear?,” *Urban Form and Corporate Strategic Development*, Canadian Urban Sustainability Practitioners, 2019.
- Dalton, David, “Canada / OPG and X-energy Join Forces in Drive to Deploy Xe-100 SMRs,” NUCNET, 2022.
- Edson, Nicola, Paul Willson, Biplab Rakshi and Ian Kekwick, “Market and Technical Assessment of Micro Nuclear Reactors,” NUVIA, 2016.
- Gardner, Timothy, “Dow and X-energy to Build U.S. Gulf Coast Nuclear Demonstration Plant,” *Reuters*, 2023.
- Gran PUD, “Energy Northwest, Grant County PUD and X-energy Announce TRi Energy Partnership,” 2021.
- Harper, Jon, “Safety Concerns Could Stymie Nuclear Reactor Plans,” *National Defense*, 2020.
- IAEA, “Status Report – BWRX-300(GE Hitachi and Hitachi GE Nuclear Energy),” 2019.
- IAEA, “Small Modular Reactors: Flexible and Affordable Power Generation,” 2024 <<https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>> (검색일: 2024.4.15).
- Largue, Pamela, “Karnfull Next and GE Hitachi Partner on Swedish SMR Roll-out,” *Power Engineering International*, 2022.
- NEI, “Road Map for the Deployment of Micro-Reactors for U.S. Department of Defense Domestic Installations,” 2018.

- NEI, “Cost Competitiveness of Micro-Reactors for Remote Markets,” 2019.
- NEI, “Milestone for China’s ACP-100 SMR,” 2022a.
- NEI, “X-energy Canada and SIMSA Support Potential Deployment of Xe-100 SMRs,” 2022b.
- NuScale, “NuScale Submits First Ever Small Modular Reactor Design Certification Application,” 2017.
- OECD/NEA, “Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment,” *Nuclear Development*, OECD Publishing, 2016.
- OECD/NEA, “Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities,” *Nuclear Technology Development and Economics*, OECD Publishing, 2021.
- Ray, Russell, “Can SMR Technology Revitalize the Business of Nuclear Power?,” *POWER Engineering*, 2018.
- Rolls-Royce, “Small Modular Reactors – Once in a Lifetime Opportunity for the UK,” 2017.
- Saini, Manya, “X-energy to Go Public via \$2 Billion Blank-Check Deal,” *Reuters*, 2022.
- SMR Start, *The Economics of Small Modular Reactors*, 2017.
- U.S. Department of Defense, “Task Force on Energy Systems for Forward/Remote Operating Bases,” *Final Report of the Defense Science Board*, 2016.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission, “NuScale Small Modular Reactor Design Certification,” *Federal Register*, Vol. 88, No. 12, 2023.
- World Nuclear News, “GEH Promotes BWRX-300 Design in Czech Republic,” 2020.
- World Nuclear News, “Teaming Agreement Signed for Romanian SMR Deployment, New Nuclear,” 2021a.
- World Nuclear News, “OPG Chooses BWRX-300 SMR for Darlington New Build,” 2021b.
- World Nuclear News, “Polish Companies Sign MoUs on SMR Deployment and Supply Chain,” 2021c.
- World Nuclear News, “X-energy Formally Begins SMR Partnership with DOE,” 2021d.
- World Nuclear News, “US Regulator Approves Methodology for SMR Emergency Planning, Regulation & Safety,” 2022a.
- World Nuclear News, “GE Hitachi Nuclear Energy’s BWRX-300 SMR Selected for Saskatchewan,” 2022b.
- World Nuclear News, “DOE Marks Milestone as Xe-100 Basic Design Completed,” 2022c.
- World Nuclear News, ““Prototype SMR Safety System Ready for Field Testing,” 2022d.
- World Nuclear News, “X-energy Selects Constructors of Initial Xe-100 Reactors,” 2022e.
- World Nuclear News, “X-energy, Cavendish Team Up for UK HTGR Deployment,” 2022f.
- World Nuclear News, “Maryland and X-energy Examine Coal-to-nuclear Switch,” 2022g.
- World Nuclear News, “Core Module Completed for Chinese SMR,” 2023a.
- World Nuclear News, “BWRX-300 Selected for Estonia’s First Nuclear Power Plant,” 2023b.
- World Nuclear News, ““Dow, X-energy SMR Deployment Project Progresses,” 2023c.
- XU, Bin, “CNNC’s ACP100 SMR: Technical Features and Progress in China,” *Nuclear Power Institute of China*, 2016.

Abstract

Global Trends and Policy Suggestions in the SMR Industry

Seokbin Park*

SMR (Small Modular Reactor) development is receiving significant attention globally. Many countries anticipate policy and economic benefits through SMRs, including achieving carbon neutrality, strengthening energy security, and enhancing international competitiveness. These expectations stem from the inherent advantages of SMRs, such as simplified and efficient construction, enhanced safety, flexible installation and operation, scalability, and minimal environmental impact. Internationally, the development of SMRs is becoming a new trend in the energy market, with leading countries strategically advancing various SMR projects. For instance, the USA, Canada, and the UK are progressing various SMR projects tailored to their national requirements and market situations. South Korea is also aligning with this global trend by focusing on the development and commercialization of SMR technology, particularly through international cooperation for technological development and dissemination. Considering these situations, urgent domestic policy proposals include strengthening the cooperation system between the private sector and government, activating technology transfer, securing competitiveness in international markets, and enhancing research and industrial bases. These policies will ensure that SMRs play a crucial role in both domestic and international energy markets and contribute to sustainable energy solutions.

Keywords Small Modular Reactor, Micro Modular Reactor, Light Water Reactor, Sodium-cooled Fast Reactor, High Temperature Gas-cooled Reactor

* Research Fellow, Nuclear Energy Policy Center, Seoul National University (h107626@snu.ac.kr)