

SMR-AI 융합 시대의 원자력 확산과 에너지 지정학 : 해양세력-대륙세력 구도의 재구성*

김현정** · 김대중***

• 요 약•

본 논문은 인공지능(AI)과 소형모듈원자로(SMR)의 융합이 21세기 에너지 지정학의 구조를 어떻게 재편하고 있는가를 분석한다. SMR-AI 결합은 단순한 기술혁신이 아니라, 에너지 생산·운영·통제의 지능화를 통해 권력의 공간적 분포와 기술체계의 위계질서를 근본적으로 변화시키는 요인으로 작용한다. 연구는 해양세력과 대륙세력이라는 고전적 구도를 기술지정학의 관점에서 재해석하고, 각 세력의 SMR-AI 전략을 기술체계, 거버넌스, 규범전략의 세 축으로 비교하였다. 분석 결과, 해양세력(미국·영국·일본)은 개방형 기술체계를 기반으로 국제 검증과 신뢰 가능한 AI 구축을 중시하며, 기술표준을 외교적 수단으로 활용하는 ‘개방-검증-규범수출형(Open-Validation-Normative Export)’ 모델을 형성하였다. 반면 대륙세력(중국·러시아)은 자율운전과 실증 중심의 폐쇄형 기술체계를 구축하고, 데이터 통제와 기술 자립을 핵심으로 하는 ‘폐쇄-실증-주권통제형(Closed-Proof-Sovereign Control)’ 모델을 채택하였다. 이러한 이중 구조는 SMR-AI 융합이 ‘물리적 분산-디지털 집중’이라는 역설적 권력질서를 형성하고 있음을 보여준다. 결론적으로 SMR-AI 융합은 에너지·기술·데이터가 결합된 복합 권력체계의 형성을 통해 기존 해양세력-대륙세력 구도를 기술체계 경쟁의 구도로 전환시키며, 이는 향후 국제에너지 거버넌스의 재편과 규범경쟁의 심화를 촉진할 것으로 보인다.

주제어 : 소형모듈원자로, 인공지능, 기술지정학, 해양세력, 대륙세력

I. 서론

21세기 에너지 패권 경쟁은 단순한 자원 확보 경쟁을 넘어, 기술적 지능화와 데이터 통

* 이 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

** 동아대학교 국제전문대학원 부교수 : 제1저자

*** 동아대학교 국제전문대학원 교수 : 교신저자

제가 결합된 새로운 형태의 지정학으로 전환되고 있다. 인공지능(AI: artificial intelligence)과 소형모듈원자로(SMR: Small Modular Reactor)의 결합은 에너지 생산, 운영, 통제 전반을 혁신하며, 에너지가 더 이상 물리적 인프라가 아니라 지능화된 국가 역량의 일부로 기능하는 시대를 열었다. SMR은 모듈화·소형화·안전성·기동성 면에서 기존 대형 원전에 비해 유연성을 제공하고, AI는 이러한 시스템의 예측정비, 사이버보안, 자동화 제어를 가능하게 하면서 원자력의 지속가능성을 떠받치는 핵심 전제가 되고 있다.¹⁾

이와 같은 기술 융합은 국제정치의 권력 구조를 재편하는 동력이 되고 있다. 전통적으로 해양세력은 기술개방과 글로벌 네트워크를 통한 영향력 확장을 중시해 왔으며, 대륙 세력은 자원 자급과 폐쇄형 공급망 구축을 기반으로 전략적 자율성을 추구해 왔다.²⁾ SMR-AI 융합은 이러한 양극 구도를 다시 활성화시키고 있다. 미국·영국·일본 등 해양세력은 기술표준의 국제화를 통해 ‘개방형 기술동맹(tech alliance)’을 추진하고, 러시아·중국 등 대륙세력은 핵연료 공급망과 기술자립을 중심으로 ‘국가자립형 기술체제(tech autarky)’를 강화하고 있다. 그 결과, 에너지 기술은 더 이상 경제적 자산이 아니라 전략적 질서의 매개체로서 기능하며, 해양세력-대륙세력의 균열선은 ‘핵과 데이터’라는 새로운 자원 축을 따라 재구성되고 있다.

기존의 에너지 지정학 논의는 석유와 가스 등 화석연료 중심의 공급망 경쟁에 초점을 맞추었지만,³⁾ 오늘날의 원자력 확산은 기술적 융합과 인프라의 지능화라는 차원을 통해 새로운 패권 구조를 형성한다.⁴⁾ 특히 SMR-AI 결합은 ‘분산형 패권(distributed hegemony)’이라는 개념으로 설명될 수 있다. 이는 에너지의 공간적 집중이 아닌 기술 네트워크를 통한 다극적 영향력의 확산을 의미한다.⁵⁾ 다시 말해, 과거의 해양-대륙 구도가 물리적 영토의 확보 경쟁이었다면, 현재의 구도는 데이터, 알고리즘, 그리고 에너지 기술표준을 둘러싼 지정학적 네트워크 경쟁으로 전환되고 있는 것이다.

본 논문은 이러한 문제의식 아래, SMR-AI 융합이 해양세력과 대륙세력 간 전략적 차

-
- 1) International Atomic Energy Agency, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments: 2022 Edition*, Vienna: IAEA, 2020, pp.15-19.
 - 2) Alfred Thayer Mahan, *The Influence of Sea Power upon History, 1660~1783*, Boston: Little, Brown and Company 1890, pp.29-35; Halford J. Mackinder, “The Geographical Pivot of History”, *The Geographical Journal*, vol.23, no.4, 1904, pp.421-437.
 - 3) Daniel Yergin, *The New Map: Energy, Climate, and the Clash of Nations*, New York: Penguin Press, 2020, pp.56-63.
 - 4) Dörte Ohlhorst, “Germany’s Energy Transition Policy between National Targets and Decentralized Responsibilities”, *Journal of Integrative Environmental Sciences*, vol.12, no.4, 2015, pp.303-322.
 - 5) Daniel Deudney, *Bounding Power: Republican Security Theory from the Polis to the Global Village*, Princeton: Princeton University Press, 2006, pp.214-219.

이를 어떻게 드러내며, 에너지 지정학의 구조를 어떠한 방식으로 재편하는가를 분석한다. 이를 위해 첫째, 고전적 해양세력론(Mahan)과 대륙세력론(Mackinder)을 기술지정학(technological geopolitics)의 관점에서 재해석하고, 둘째, 해양·대륙세력 블록별 SMR-AI 확산 전략을 비교한다. 나아가 셋째, 이러한 기술-에너지 융합이 새로운 형태의 패권 질서를 창출하고 있음을 보여준다. 이 분석은 단순한 기술경쟁을 넘어, AI와 원자력이 결합된 ‘에너지-지정학 복합체(techno-energy complex)⁶⁾’가 21세기 국제질서의 핵심 분석단위가 되고 있음을 밝히는 데 목적이 있다. 본 연구는 해양세력형과 대륙세력형이라는 기술지정학적 구도에 따라 대표국(미국·영국·일본 / 중국·러시아)을 선정하였으며, 각국의 SMR-AI 전략은 기술체제, 거버넌스, 규범 전략의 세 축을 기준으로 비교·범주화하였다. 분석자료는 IAEA·OECD-NEA의 기술 보고서, 각국의 규제 문헌 및 개발 로드맵을 중심으로 수집하였으며, 이를 토대로 국가별 전략의 구조적 차이를 비교하는 서술적 분석 방식을 채택하였다. 본 논문에서 제시하는 해양세력-대륙세력 구도의 재구성은 기존 영토 기반의 갈등구조를 반복이 아니라, SMR-AI 기술체제가 도입되면서 경쟁의 중심이 영토에서 기술표준·데이터·디지털 주권으로 이동한 변화를 설명하는 데 목적이 있다. 즉, 전통적 공간구조가 유지되더라도 경쟁 방식과 권력의 매개가 기술적·제도적 장치로 전환된 점을 강조한다.

II. 이론적 틀: 해양세력-대륙세력 구도와 기술지정학의 결합

1. 전통적 세력구도와 공간적 권력 개념

해양세력-대륙세력 구도는 20세기 국제정치의 구조적 패턴을 설명한 대표적 이론적 틀이다. Mahan은 『해양력의 역사적 영향(The Influence of Sea Power upon History, 1660~1783)』에서 해양 교통로의 통제가 곧 국가의 번영과 세계 패권의 원천이라고 주장하였다.⁷⁾ 그는 해군력, 상업항로, 해상무역의 결합을 통해 해양세력이 개방성과 연결성을 바탕으로 한 국제질서를 형성한다고 보았다. 반면 Mackinder는 1904년 「The Geographical Pivot of History」에서 유라시아의 심장지대(Heartland)를 지배하는 세력이 세계를 지배할 것이라고 주장하며, 대륙세력이 자원과 영토에 기반한 전략적 자율성을 확보할 수 있

6) Joseph S. Nye, “Power and Foreign Policy”, *Journal of Political Power*, vol.4, no.1, 2011, pp.11-23.

7) Mahan, *op. cit.*, pp.29-35.

다고 보았다.⁸⁾ Spykman은 이후 해양과 대륙 사이의 ‘연안지대(Rimland)’의 중요성을 강조하며, 이 지역의 세력균형이 세계 질서의 안정성을 좌우한다고 분석하였다.⁹⁾

이러한 고전적 구도는 냉전기의 봉쇄 전략과 세력균형 논리를 뒷받침했지만, 21세기에 들어 정보기술·에너지혁신·데이터 네트워크의 확산은 권력의 공간적 개념을 근본적으로 변화시켰다. 기술과 에너지가 결합한 현대의 패권은 더 이상 군사력의 지리적 확장에 의해 결정되지 않고, 기술체제(techno-regime)의 범위와 상호연결성에 의해 결정된다고 할 수 있다. 결국, 21세기 기술·에너지 융합이 공간 권력의 기반을 근본적으로 변화시키고 있는 만큼, 전통적 해양세력-대륙세력 이론은 물리적 영토 경쟁을 넘어 기술 체제와 네트워크 권력의 상호작용을 포괄하는 새로운 이론적 해석틀로 재구성될 필요가 있다.

2. 기술지정학의 부상과 에너지 - 데이터 패권

‘기술지정학(technological geopolitics)’은 전통적 공간지정학이 영토를 중심으로 권력 관계를 이해했던 틀을, 기술과 데이터의 통제권이라는 새로운 권력 자원으로 확장하는 접근이다. Ruggie는 근대 국제질서를 ‘영토성(territoriality)’이라는 조직원리로 규정했으나, 오늘날 국가의 영향력은 영토를 넘어 기술표준, 알고리즘, 공급망이라는 비물질적 영역으로 확장되고 있다.¹⁰⁾ Deudney(2006) 또한 기술 발전이 정치 권력의 공간을 확장시키는 새로운 제도적 힘으로 작용한다고 보았다.¹¹⁾

에너지 분야에서도 이러한 변화는 분명하다. 학자들은 핵 및 재생에너지 확산이 단순한 자원 이동이 아니라 기술 인프라와 규범의 경쟁으로 바뀌었다고 분석하며, 에너지 지정학을 기술·정치 복합체로 재정의하여 왔다. Ohlhorst(2015) 역시 독일의 에너지전환(Energiewende) 사례를 통해 기술혁신이 국가정책의 범위를 넘어 국제정치적 파급력을 가진다고 설명하였다.¹²⁾ Yergin(2020)은 이를 “에너지와 데이터의 융합된 세계지도(the new map)”로 묘사하며, 디지털화된 에너지 체제가 새로운 형태의 글로벌 권력 구조를 형성하고 있음을 강조했다.¹³⁾

8) Mackinder, *op. cit.*, pp.421-437.

9) Nicholas J. Spykman, *America's Strategy in World Politics: The United States and the Balance of Power*, New York: Harcourt, Brace, and Company, 1942, pp. 43-48.

10) John G. Ruggie, “Territoriality and Beyond: Problematizing Modernity in International Relations”, *International Organization*, vol.47, no.1, 1993, pp.139-174.

11) Deudney, *op. cit.*, pp. 217-220.

12) Ohlhorst, *op. cit.*, pp.102-110.

이러한 기술지정학적 관점에서 볼 때, SMR-AI 융합은 해양세력-대륙세력 구도를 재구성하는 핵심 기제가 된다. 해양세력은 기술표준을 개방적으로 확산시켜 연합형 공급망을 구축하는 반면, 대륙세력은 기술자립과 핵연료 통제를 통해 폐쇄적 구조를 강화한다. 이는 단순한 에너지 정책의 차이가 아니라, 기술과 데이터 주권을 둘러싼 가치체계의 충돌을 의미한다.

3. SMR 기술과 AI의 결합: 분산형 패권의 기술적 기반

SMR은 전통적인 대형 원전과 달리 모듈화(modularization)와 소형화(scaling down)를 통해 생산·운영의 분산(distributed operation)을 가능하게 한 차세대 원자력 기술이다. 국제원자력기구(IAEA)에 따르면, SMR은 건설 기간 단축, 비용 효율성, 지역별 분산 배치, 안전성 강화 등의 장점을 통해 기존 원자력 공급망의 구조를 근본적으로 바꾸고 있다.¹⁴⁾ 특히 소형모듈형 구조는 각 국가가 자국 내 기술생산과 연료주기를 관리할 수 있는 여지를 넓히며, ‘에너지 주권’의 분권화를 촉진한다.

여기에 AI 기술이 결합되면, 원전의 운영 패러다임 자체가 달라진다. AI는 SMR의 디지털 트윈(digital twin) 구축, 예측정비(predictive maintenance), 사이버보안(cybersecurity), 운전 최적화(operation optimization)를 가능하게 하며, 에너지 시스템의 자율성과 실시간 대응능력을 극대화한다.¹⁵⁾ 또한 AI는 국제협력 및 원전 수출 과정에서도 안전성 검증과 데이터 표준화의 핵심 요소로 작동한다.

〈표 1〉 SMR-AI 융합 단계별 기술 적용 수준 및 구현 범위

구분	주요 기술 요소	기술 내용	구현 단계(TRL)	적용 예시	지정학적 함의
1단계	디지털 트윈 (Digital Twin)	SMR 시스템 전주기(설계-운전-유지보수)의 가상 모델링을 통해 실시간 시뮬레이션 및 데이터 피드백 구현	TRL 7-8 (실증단계)	미국 NuScale, 영국 Rolls-Royce SMR	설계 표준화 및 기술주권 확보

13) Daniel Yergin, *op. cit.*, pp.56-63.

14) International Atomic Energy Agency, *op. cit.*, pp.15-19.

15) Raymon van Dinter, Bedir Tekinerdogan, Cagatay Catal, and Bilge Kaan Kuzu, “Predictive Maintenance Using Digital Twins: A Systematic Literature Review”, *Information and Software Technology*, vol.151, 2022.

구분	주요 기술 요소	기술 내용	구현 단계(TRL)	적용 예시	지정학적 함의
2단계	예측정비 (Predictive Maintenance)	센서·AI 알고리즘 기반으로 부품 수명 및 이상 징후를 조기 예측	TRL 6-8 (운영단계 도입 중)	한국 i-SMR, 캐나다 ARC Clean Technology	운영 효율성 및 안전성 향상
3단계	사이버보안 (Cybersecurity)	AI 기반 침입 탐지, 이상 징후 대응, 데이터 무결성 검증	TRL 5-7 (적용 확산 중)	OECD-NEA 공동 프로젝트, EU SMR 협력망	데이터 주권 및 기술동맹 강화
4단계	운전 최적화 (Operational Optimization)	AI가 운전 데이터를 분석하여 출력, 연료주기, 냉각 효율 최적화	TRL 6-8 (실증·상용화 단계)	프랑스 EDF SMR, 일본 JAEA 협력 연구	AI 통합 운전체계로의 전환
5단계	자율운전· 안전관리 (Autonomous Operation)	AI가 운영 의사결정, 위험대응, 비상상황 시나리오를 실시간 수행	TRL 4-5 (개념·시험 단계)	IAEA AI-NPP 프로젝트(2023)	기술체제 간 신뢰와 규범경쟁 촉발

주: ‘적용 예시’는 상용화된 사례가 아니라, 해당 기술 수준에 도달했거나 이를 목표로 개발 중인 프로젝트를 의미함.

출처: 아래 문헌을 토대로 저자 재작성. IAEA (2022, 2023), 각국 SMR 개발 로드맵 종합.

이러한 기술적 결합은 기존의 중앙집중형 에너지 체제에서 벗어나, ‘분산형 패권(distributed hegemony)’이라는 새로운 구조를 형성한다. SMR-AI 융합은 에너지 생산의 지역적 분산과 기술 통제의 글로벌 집중을 동시에 유발하며, 이는 해양세력과 대륙세력 모두에게 전략적 딜레마를 안긴다. 해양세력은 AI 기반 글로벌 표준을 통해 기술적 개방성을 추구 하지만, 공급망 취약성을 감수해야 하고, 대륙세력은 자급적 기술체제를 강화하지만, 국제표준 경쟁에서 고립될 위험을 감수한다. 따라서 SMR-AI 융합은 단순한 에너지 혁신이 아니라, 국가의 기술체제와 가치체계가 맞물린 지정학적 경쟁의 장(場)을 창출하고 있다.

4. 기술지정학적 전환과 세력별 비교분석틀

21세기 에너지 지정학은 기존의 공간 기반 권력 구도에 기술체제(technological system) 경쟁이라는 새로운 차원을 결합시키고 있다. 특히 SMR과 AI의 융합은 에너지 공급의

물리적 구조를 재편할 뿐 아니라, 데이터 주권·기술표준·운영 거버넌스 등 다양한 정치·경제적 권력 관계를 새롭게 형성한다. 이는 단순한 기술혁신이 아니라, 기술체제의 정치적 구성(technopolitics)을 둘러싼 세력 간 경쟁으로 이해될 필요가 있다.

기존의 해양세력-대륙세력 구도는 주로 자원접근성, 해상교통로, 공급망 통제 등 물리적 공간의 장악을 중심으로 설명되어 왔다. 그러나 SMR-AI 융합의 확산은 이 같은 공간 중심의 권력 구조를 넘어, 기술과 데이터의 통제구조로 권력의 중심을 이동시키고 있다. 즉, 에너지 시스템이 디지털화될수록 권력은 물리적 자원, 디지털 표준, 기술규범 순으로 재배치된다. 이에 따라 본 연구는 ‘기술지정학적 비교틀(technopolitical comparison framework)’을 설정하여 국가 간 SMR-AI 전략을 구조적으로 분석하고자 한다.

SMR-AI 융합을 둘러싼 국가별 전략은 다음의 〈표 2〉 세 가지 분석 축에서 비교될 수 있다.

〈표 2〉 SMR-AI 융합을 둘러싼 국가별 전략 분석축

구분	핵심 내용	주요 비교 질문
기술체제 축 (Technological System)	각 세력이 구축하는 SMR-AI 기술 아키텍처의 구조적 특징. 개방형(open) 혹은 폐쇄형(closed), 검증 중심(validation-oriented) 혹은 실증 중심(proof-oriented) 접근 여부를 구분	- AI가 SMR 운영에 어떻게 통합되는가? - 기술개발의 우선순위는 안전성인가, 실증성과 자율성인가?
거버넌스 축 (Governance Logic)	기술 운영 및 데이터 관리에서 국가·시장·국제기구의 역할 분담. 규제체계와 산업의 자율성이 어떤 비율로 결합되어 있는지를 평가	- 규제기관이 AI 검증을 주도하는가, 산업이 자율적으로 통제하는가? - 데이터 투명성과 검증 절차가 확보되어 있는가?
규범·전략 축 (Normative Strategy)	기술체제가 국가전략 및 외교정책과 결합되는 방식. 개방형 규범 수출 모델과 폐쇄형 자국 통제 모델의 대비를 분석	- 기술은 민주적 신뢰 구축의 수단인가, 주권적 통제의 도구인가? - 기술표준과 외교전략이 어떻게 연계되는가?

출처: 필자 정리

이 세 축은 단순히 기술적 성숙도나 상업화 수준을 비교하기 위한 것이 아니라, 각국의 SMR-AI 전략이 어떤 정치적 논리와 제도적 배치 위에서 작동하는지를 규명하기 위한 이론적 틀이다. 또한 이 비교틀을 통해 본 연구는 SMR-AI 융합을 추진하는 주요 세

력을 ‘해양세력(Maritime Powers)’과 ‘대륙세력(Continental Powers)’의 두 집단으로 유형화한다. 이는 지정학적 구분이 아니라, 기술체제의 운영 철학과 규범 전략에 따른 구분이다.

〈표 3〉 해양세력과 대륙세력의 기술체제 유형

구분	기술체제 유형	거버넌스 구조	규범 전략	대표국
해양세력형 (Open-Validation-Normative Export Model)	개방형 기술 아키텍처, 국제 검증 절차 중시	다자 규범 중심, 민간·국제기구 협력	기술표준의 외교적 수출, 투명성·신뢰성 강조	미국, 영국, 일본
대륙세력형 (Closed-Proof-Sovereign Control Model)	폐쇄형 기술체제, 실증 중심의 자율운전 추구	국가 독점형, 중앙집중적 통제	기술자립 및 디지털 주권 확보, 외부 의존 최소화	중국, 러시아

출처: 필자 정리

해양세력형 모델은 국제기구(IAEA, OECD-NEA)와의 규범적 연계를 중시하며, AI의 신뢰성·투명성·검증 가능성을 기술 발전의 핵심 가치로 본다. 반면 대륙세력형 모델은 실증과 자율화를 우선시하고, 데이터 접근 및 기술통제권을 자국 내부에 집중시켜 ‘디지털 주권’을 강화한다.

이와 같은 비교분석 틀은 본문에서 각 국가의 사례를 분석하는 기준으로 작동한다. 즉, 각국의 SMR-AI 전략이 기술체제·거버넌스·규범 전략의 세 축 중 어느 방향에 위치하는지를 식별함으로써, 기술지정학적 균열의 구조를 실증적으로 드러내는 것이 목적이다. 나아가 이 틀은 단순한 기술정책 비교를 넘어, 에너지 전환 시대의 ‘정치적 기술구조(political techno-structure)’가 국제질서 재편에 어떠한 영향을 미치는지를 설명하는 분석 도구로 기능한다.

III. SMR-AI 융합의 구조와 의미

1. SMR - AI 융합의 기술 구조와 운영 체계

SMR-AI 융합의 핵심은 데이터 기반의 자율운전 체제 구축에 있다. 기존 대형 원전이 중앙집중식 제어에 의존했다면, SMR은 센서, 제어기, 알고리즘이 통합된 지능형 분산 운영(intelligent distributed operation) 구조를 기반으로 한다. IAEA의 2022년 보고서에 따르면, AI는 설계·운전·유지보수의 전 주기에 걸쳐 네 가지 단계로 작동한다: (1) 데이터 수집 및 모델링, (2) 이상 탐지 및 예측정비, (3) 운전 최적화, (4) 자율 의사결정 지원이다.¹⁶⁾

〈표 4〉 SMR-AI 융합의 운영 단계와 핵심 기능

단계	주요 기능	적용 기술·방법	인간의 개입 수준	기대 효과
(1) 데이터 수집 및 모델링	센서로부터 실시간 운전·환경 데이터를 수집하고 물리적 시스템의 가상 모델 (디지털 트윈)을 구축	IoT 센서, 데이터 수집 게이트웨이, AI 기반 물리모델링	높음 (설계·모델링 단계에서 엔지니어 감독 필수)	실시간 상태 모니터링, 설계·운전 데이터 통합
(2) 이상 탐지 및 예측정비	수집된 데이터로 이상 패턴을 탐지하고 부품 수명·고장 시점을 예측	머신러닝 기반 이상탐지 알고리즘, 예측정비(AI-PM) 모듈	중간 (정비 계획 수립 시 인간 겸종 필요)	고장 사전 방지, 정비비용 절감
(3) 운전 최적화	출력·냉각효율·연료주 기 등을 AI가 실시간 분석해 최적 운전조건 산출	강화학습 (Deep RL), 데이터 피드백 루프	낮음 (자동 권고값 기반 운전 가능)	연료 효율성 향상, 에너지 손실 감소
(4) 자율 의사결정 지원	긴급 상황이나 운전 불확실성에 대해 AI가 대응 시나리오를 제시·수행	딥러닝 기반 의사결정 보조시스템, 자동제어 (Autonomous Control)	매우 낮음 (비상 시 자동 대응, 사후 인간 겸종)	인적 오류 감소, 운전 안전성 제고

출처: 아래 문헌을 토대로 저자 재작성. IAEA (2023)

16) IAEA, *Considerations for Deploying Artificial Intelligence in Nuclear Applications*, Vienna: IAEA, 2022, pp. 3-9.

첫 단계에서는 SMR의 모듈별 온도·압력·방사선량·유량 데이터가 초단위로 수집되며, AI가 이를 기초로 디지털 트윈(digital twin) 모델을 생성한다. 이 가상 복제모델은 실제 플랜트의 열유체역학 거동을 시뮬레이션하여 설계 오류를 조기에 발견하고, 운전 중단 없이 가상의 사고 시나리오를 검증할 수 있게 한다. 이 단계의 주요 목표는 물리적 시스템의 디지털화와 데이터 피드백 루프 정립이다.¹⁷⁾ 두 번째 단계에서는 기계학습 모델이 누적 운전 데이터를 분석하여 이상 패턴과 고장 전조 신호를 탐지한다. AI는 부품 진동, 냉각재 온도 편차, 증성자속 변동 등 다양한 센서 데이터를 통합적으로 처리하여 사람이 식별하기 어려운 비선형 상관관계를 자동 탐지한다. 이러한 ‘AI 기반 예측정비(predictive maintenance)’ 기법은 발전·산업 설비 분야에서 정비 효율을 크게 향상시키는 것으로 알려져 있으며, 기존 연구에 따르면 운영·유지보수(O&M) 비용을 약 25~30% 절감할 수 있는 것으로 보고된 바 있다.¹⁸⁾¹⁹⁾ 세 번째 단계에서는 AI가 냉각재 유량·출력 변수·연료주기 데이터를 통합해 실시간 운전 최적화를 수행한다. 강화학습(Deep Reinforcement Learning) 알고리즘은 발전 출력과 안전 한계 사이의 균형을 학습하여, 냉각효율 및 연료 사용량을 동적으로 조정한다. Jin and Bang(2024)은 이 단계에서 운전 효율성이 약 10~15% 향상될 수 있다고 평가하였다.²⁰⁾ 마지막 단계는 자율 의사결정 지원(Autonomous Decision Support)이다. AI는 딥러닝 모델을 통해 비상상황에서의 의사결정 트리를 실시간 생성하고, 비상냉각수 공급, 출력 감속, 방사선 차폐 등의 대응을 자동으로 수행한다. 이 시스템은 ‘휴먼-온-더-루프(human-on-the-loop)’ 구조를 유지하여 사람의 최종 승인을 거치지만, 기본적인 판단과 실행은 AI가 담당한다. 결과적으로 AI의 역할은 단순 모니터링 보조 수준에서 운전 제어 및 위기 대응 핵심 주체로 진화하고 있다.²¹⁾ 이러한 기술적 진전은 원전의 운영 패러다임을 ‘감시-제어형’에서 ‘예측-자율형’으로 전환시키며, AI 신뢰성과 데이터 투명성에 대한 국제규범 논의를 촉진하고 있다.

2. SMR - AI 융합의 글로벌 확산 경로

SMR-AI 융합기술의 확산은 전통적 해양세력-대륙세력 구도에 따라 상이한 양상을 보

17) *Ibid.*

18) Van Dinter *et. al.*, *op. cit.*

19) Ilk Jae Jin and In Cheol Bang, “The time for revolutionizing small modular reactors: Cost reduction strategies from innovations in operation and maintenance”, *Progress in Nuclear Energy*, vol.174, 2024.

20) *Ibid.*, 44-46.

21) IAEA, *op. cit.*

인다. 해양세력(미·영·일)은 개방형 표준화 전략을 통해 기술 협력망을 형성한다. 미국의 NuScale Power는 AI 기반 예측정비 시스템을 설계에 적용하였고, 영국의 Rolls-Royce SMR은 ‘디지털 트윈-AI 통합 설계’를 통해 건설 비용 절감을 추진하고 있다. 일본은 JAEA(Japan Atomic Energy Agency)를 중심으로 AI 제어 알고리즘 검증 플랫폼을 운영하며, 투명한 데이터 검증체계를 국제기준화와 연계한다.²²⁾ 이러한 전략은 AI 기술을 운영 효율성과 신뢰 확보의 수단으로 활용하는 것이 특징이다.

〈표 5〉 SMR-AI 융합의 글로벌 확산 경로: 해양세력 vs 대륙세력 비교

구분	해양세력 블록 (미·영·일)	대륙세력 블록 (중·러)
정책 기조	개방형 기술표준, 투명한 데이터 공유, 국제규범 참여 중시	자급적 기술체제, 데이터 통제 강화, 기술주권 우선
대표 기관·기업	NuScale Power (미), Rolls-Royce SMR (영), JAEA·MHI (일)	CNNC·Linglong One (중), Rosatom·RITM-200 (러)
AI 활용 방향	설계·운전 데이터의 디지털 트윈 및 예측정비 중심	자율운전 및 사이버보안 통제 중심
협력 네트워크	AUKUS Clean Energy Partnership, IAEA AI-Nuclear Forum, OECD-NEA	BRICS Energy Alliance, CNNC-Rosatom 협력
규범 접근	안전성·투명성 기반 국제표준 주도	데이터 비공개 및 국가 검증체계 유지
지정학적 의미	기술개방 → 연합형 공급망 형성 및 기술동맹 심화	기술자립 → 폐쇄형 공급망 및 주권 기반 기술블록화

출처: 아래 문헌을 토대로 필자 재구성. IAEA(2022), Langdon(2023), CNNC (2023), EDF (2023)

반면 대륙세력(중·러)은 기술 주권 확보를 목표로 폐쇄형 자립 체제를 강화한다. 중국 핵공업공사(China National Nuclear Corporation 이하 CNNC, 中国核工业集团公司)는 AI운전알고리즘이 내장된 Linglong One(SMR-200)을 개발하였고, 러시아의 RITM-200과 Shelf-M 프로젝트는 국내 설계-운전 데이터 통제구조를 유지하고 있다.

이러한 양상은 SMR-AI 기술이 단순한 에너지 혁신이 아니라, 각 세력이 지향하는 정치·경제적 질서 모델을 반영한다는 점을 보여준다. 이를 요약하면 다음 〈표 5〉와 같다.

22) Ken Langdon, “NuScale Small Modular Reactor(SMR) Overview”, presentation at the INPRO Dialogue Forum on Opportunities and Challenges in Small Modular Reactors, Ulsan, Republic of Korea, 2-5 July 2019, International Atomic Energy Agency(IAEA), <https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df17/IV.5-KenLangdon-NuScale.pdf>(검색일: 2025.10.10).

표는 SMR-AI 융합이 각 세력의 정치경제적 논리에 따라 서로 다른 방향으로 확산되고 있음을 보여준다. 해양세력은 AI를 통해 국제협력과 신뢰 확보를 추구하며, AI 거버넌스의 핵심 원리를 ‘개방성과 투명성’으로 정의한다. 반대로 대륙세력은 AI를 국가 자율성 확보 수단으로 활용하며, 데이터 통제와 기술주권을 우선시한다. 이러한 차이는 단순한 기술 선택의 문제를 넘어, SMR-AI 체제가 국가전략 문화와 지정학적 이념의 투영체로 작용하고 있음을 나타낸다.

최근 SMR-AI 융합은 수소 생산, 산업용 열공급, 지역 전력망 연계 등으로 확장되며 탄소중립 체제 구축의 핵심으로 부상했다. AI 제어는 전력 생산과 수전해 공정을 통합 관리하며, 국가 단위의 에너지 자립과 국제협력을 동시에 가능하게 한다. 이는 ‘기술-에너지-데이터’가 결합된 분산형 패권(distributed hegemony) 구조의 현실 구현이라 할 수 있다.

3. SMR - AI 융합의 지정학적 의미

SMR-AI 융합은 단순한 기술혁신을 넘어, 권력의 구조·동맹의 형태·규범의 질서를 재편하는 새로운 지정학적 패러다임을 형성하고 있다. 이는 기존 에너지 지정학이 화석연료의 지리적 분포에 의해 결정되던 것과 달리, 기술·데이터·규제의 통제권을 중심으로 재구성되고 있다는 점에서 질적 전환을 보여준다.

첫째, SMR-AI 기술은 권력의 공간적 분산과 디지털 집중을 초래한다. SMR-AI 융합은 물리적 권력의 분산과 디지털 권력의 집중이라는 이중구조를 형성한다. 소형모듈원전은 중앙집중식 대형 발전소의 한계를 극복하고 지역 단위에서 전력 자급을 가능케 하면서, 에너지 주권의 분권화(decentralization)를 촉진한다. 그러나 동시에 SMR의 운영·안전·검증을 담당하는 AI 시스템은 데이터·알고리즘·클라우드 인프라를 통제하는 소수 기술 강국(미국, 영국, 프랑스, 일본 등)에 집중되어 있다. 이로 인해 에너지 생산은 지역화 되지만, 기술 의존 구조는 오히려 심화되어, ‘물리적 분산-디지털 집중’의 역설적 권력 구조가 나타난다. 이 구조는 단순한 에너지 독립이 아니라, 데이터 주권과 알고리즘 표준을 둘러싼 새로운 형태의 종속관계를 야기한다.

둘째, SMR-AI 체제는 기술 네트워크를 통한 동맹 재편을 촉구한다. SMR-AI 융합은 기술 네트워크를 매개로 한 동맹 질서의 재편을 촉진한다. 해양세력은 AI 기반 원전 기술의 신뢰성과 투명성을 앞세워 기술표준 연합(standard alliance)을 강화하고 있다. 미국, 영국, 일본은 AUKUS Clean Energy Partnership과 OECD-NEA를 중심으로 협력하

며, 기술 규제와 사이버보안 기준을 공유한다. 이들은 ‘기술을 통한 신뢰(techno-trust)’를 핵심 가치로 설정해, AI-SMR 시스템의 상호인증(interoperability)을 국제동맹의 매개로 활용한다. 반면 대륙세력(중국, 러시아)은 자율적 기술생태계 구축에 집중하며, 자국 중심의 AI 데이터센터 및 폐쇄형 클라우드 체계를 운영한다. 특히 중국은 ‘디지털 원자력 주권(digital nuclear sovereignty)’ 개념을 정책적으로 제시하여, AI 알고리즘과 운전데이터의 외부 공유를 제한하고 있다. 이러한 상반된 기술 연합 구조는 전통적 군사·경제 동맹이 아닌 ‘기술기반 동맹(techno-alignment)’의 시대로의 이행을 예고한다.²³⁾

셋째, SMR-AI 기술은 에너지 규범의 재구성과 제도 경쟁을 초래한다. SMR-AI 융합은 국제 에너지 거버넌스의 규범 체계를 재구성하고 있다. IAEA와 OECD-NEA는 2023년부터 ‘AI 신뢰성·투명성 원칙’을 중심으로 한 공동 규범 논의를 추진하며, AI 운영과 안전성 검증에 관한 국제표준을 마련하고 있다. 해양세력은 데이터 공개와 제3자 검증을 강조하는 반면, 대륙세력은 자국 규제기관 중심의 폐쇄적 검증체계를 유지하고 있어, 규범경쟁이 불가피하다. 이러한 갈등은 단순한 기술표준의 차이를 넘어, AI 거버넌스의 철학—즉, 투명성 대 통제, 개방성 대 주권—의 충돌을 반영한다.

결국 SMR-AI 기술의 확산은 국가 간 기술표준과 규범질서를 둘러싼 경쟁을 심화시키며, 이는 향후 국제에너지기구(IEA·IAEA·OECD-NEA)의 구조에도 영향을 미칠 가능성 이 높다. 즉 SMR-AI 융합은 ‘기술체제의 경쟁’이자 ‘가치체제의 경쟁’으로서 21세기 에너지 지정학의 새로운 축을 형성하고 있다. 이 기술은 에너지 공급망의 재편을 넘어, 대이터 주권·기술동맹·국제규범을 둘러싼 복합적 권력경쟁의 중심에 서 있으며, 이는 장기적으로 해양세력-대륙세력 구도의 구조적 변화를 초래할 가능성이 크다.

IV. 해양세력-대륙세력 구도 속 SMR-AI 전략 비교

1. 해양세력 - 대륙세력 구도 속 SMR - AI 전략 비교

1) 미국: NuScale 중심의 상용화-규범화 병행 전략

미국은 SMR-AI 융합 분야에서 기술적·제도적 선도국으로, NuScale Power의 VOYGR 프로젝트를 중심으로 상용화와 규제 표준화를 병행하고 있다.²⁴⁾ NuScale은 2020년 8월

23) Yergin, *op. cit.*, pp.211-220.

24) U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Design Certification – NuScale US600,” NRC, <https://www.nrc.gov/reactors/design-certification/nuscale-us600>

미국 원자력규제위원회(NRC)로부터 50 MWe급 모듈형 설계에 대한 설계인증(Design Certification, DC)을 최초로 획득하여, SMR 기술의 안전성과 성숙도를 공식적으로 인정 받았다.²⁵⁾ 이후 상업 모델인 VOYGR 시리즈에서는 모듈 출력력을 77 MWe로 상향 조정하고, 2023년 1월에는 VOYGR-6(6개 모듈 구성)에 대한 표준설계승인(Standard Design Approval, SDA) 신청을 제출하였다. NRC는 2025년 5월 해당 설계가 규제 요건을 충족 한다는 최종 안전평가보고서(Final Safety Evaluation Report)를 승인하며, NuScale은 SMR 분야에서 미국 내 첫 완전 인허가 모델로 자리매김했다.²⁶⁾ 이는 SMR 기술이 실증단계를 넘어 상용화 국면에 진입했음을 의미한다.

NuScale의 설계는 기존 대형 원전 대비 자연순환 냉각과 모듈화 구조를 채택해 본질적 안전성을 강화했으며, 여기에 AI 기반 예측정비(predictive maintenance)와 운전 최적화(operational optimization) 기술을 결합함으로써 운전 효율성과 안전성을 동시에 제고한다. 수천 개의 센서가 수집하는 온도, 압력, 방사선량, 유량 데이터를 AI가 실시간 분석하여 고장 시점을 예측·정비함으로써 비계획 정지를 최소화하고, 부하 변동에 따라 연료 주기와 출력 제어를 자동화한다.²⁷⁾ 이러한 AI-SMR 통합 시스템은 미국 에너지부(DOE)가 지원하는 ‘AI 신뢰성 검증 및 안전성(Verification & Validation, V&V)’ 테스트베드 프로그램 내에서 검증되고 있으며, 원전 운영에 AI를 적용하기 위한 규제적 신뢰 기반을 형성하고 있다.²⁸⁾ DOE는 IAEA와 OECD-NEA와 협력하여 AI 활용 원전의 검증 및 인허가 절차 표준화를 주도하고 있으며, 이를 통해 미국식 규제 프레임워크를 국제표준으로 확산시키는 데 주력하고 있다. 이러한 전략은 NuScale의 상업화 노력과 DOE의 제도적 주도력을 결합하여, SMR-AI 기술을 ‘상업화 가능한 기술패권’이자 ‘규범을 수출하는 기술체제’로 구축하는 것이다. 즉, 미국은 자국 기술의 상업화와 글로벌 규

ctors/new-reactors/advanced/who-were-working-with/past-license-activities/nuscale.html(검색일: 2025.10.15).

- 25) NuScale Power, “U.S. Nuclear Regulatory Commission Accepts NuScale Power’s Standard Design Approval Application for Formal Review,” NuScale Power, <https://www.nuscalepower.com/press-releases/2023/u.s.-nuclear-regulatory-commission-accepts-nuscale-powers-standard-design-approval-application>(검색일: 2025.10.15).
- 26) NuScale Power, “NuScale Power’s Small Modular Reactor (SMR) Achieves Standard Design Approval from U.S. Nuclear Regulatory Commission for 77 MWe,” NuScale Power, <https://www.nuscalepower.com/press-releases/2025/nuscale-powers-small-modular-reactor-smr-achieves-standard-design-approval-from-us-nuclear-regulatory-commission-for-77-mwe>(검색일: 2025.10.15).
- 27) Langdon, *op. cit.*
- 28) U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Energy, “New AI Tools Could Save Constellation Reactor Fleet Millions”, DOE, <https://www.energy.gov/ne/articles/new-ai-tools-could-save-constellation-reactor-fleet-millions>(검색일: 2025.10.15).

범화의 동시 추진을 통해 경제적 우위뿐 아니라 제도적 혜계모니를 강화하고 있다.²⁹⁾

2) 영국: 디지털 트윈 기반의 글로벌 공급망 허브 전략

영국은 Rolls-Royce SMR(RRSMR) 프로젝트를 중심으로 SMR-AI 융합을 제조업 부흥과 에너지 안보의 양축으로 추진하고 있다. RRSMR은 “소형이지만 완전한 발전소(Small yet complete power station)”를 목표로 하며, 모듈식 생산과 디지털 설계 혁신을 결합해 ‘제조혁신-에너지안보-수출확대’를 동시에 달성하려는 국가전략의 핵심이다.³⁰⁾

① 디지털 트윈 및 모듈식 제조 혁신

Rolls-Royce SMR은 공장 기반의 대량 생산과 현장 조립 방식을 결합한 모듈형 제조 체계(modular manufacturing)를 채택하고 있다. 이 구조의 성공적 구현을 위해, 2022년 발표된 「Digital Engineering Strategy」가 핵심 기반이 된다. 이 전략의 중심은 디지털 트윈(Digital Twin) 아키텍처로, 설계·건설·운영 단계에서 생성되는 모든 데이터를 AI로 통합 관리하는 가상 복제 시스템이다.³¹⁾ 이 디지털 트윈은 설계 오류를 사전에 탐지하고, 건설 전 전체 공정을 시뮬레이션하며, 운전 단계에서는 예측정비(predictive maintenance)와 운전 최적화(operational optimization)를 지원한다.³²⁾ 또한 RRSMR의 AI 시스템은 플랫폼 거버넌스(Platform Governance) 구조 하에 표준화된 모듈 부품의 제작과 공급망을 실시간 관리한다. 이로써 프로젝트의 일정 예측성과 비용 효율성이 대폭 향상되며, 최종 고객에게 경쟁력 있는 가격과 단축된 건설 기간을 제공할 수 있다. 이러한 AI-공급망 통합형 디지털 관리체계는 RRSMR이 단순한 원자로 제조기업이 아니라 데이터 기반 제조 플랫폼 기업으로 진화하고 있음을 보여준다.³³⁾

② 글로벌 공급망 허브 육성 전략

영국 정부는 RRSMR을 단순한 에너지 기술이 아닌, 글로벌 공급망의 전략 허브로 육성하고 있다. RRSMR은 영국 내 공장에서 약 90%의 모듈 부품을 제작하고, 이를 해외

29) OECD-NEA(Nuclear Energy Agency), *Benchmark on Artificial Intelligence and Machine Learning for Scientific Computing in Nuclear Engineering* (NEA/WKP(2023)1), Paris: OECD-NEA, 2024.

30) Department for Energy Security and Net Zero, *Civil Nuclear: Roadmap to 2050*, London: Department for Energy Security and Net Zero, 2024.

31) Rolls-Royce SMR, *Rolls-Royce SMR Design Overview White Paper*, Derby: Rolls-Royce SMR, 2025.

32) *Ibid.*

33) OECD-NEA, *op. cit.*

프로젝트 현장으로 수출하는 모델을 채택함으로써 ‘국내 제조-국제 조립’ 구조를 확립했다.³⁴⁾ 이 모델은 영국이 SMR 제조 중심국으로 부상하는 동시에 국내 고속령 일자리와 첨단 엔지니어링 생태계를 강화하는 효과를 지닌다. 영국 정부는 이를 뒷받침하기 위해 영국수출금융공사(UK Export Finance, UKF)를 통한 수출금융·보증 지원을 확대하고 있으며, RRSMR 프로젝트를 외교 및 통상정책의 핵심 수단으로 활용하고 있다.³⁵⁾ 이러한 산업-외교 연계 구조는 SMR을 통해 ‘기술-외교 복합형 국가브랜드 전략’을 구현하는 사례로 평가된다.

③ AUKUS 기술외교 및 보안 프레임워크

영국의 SMR-AI 전략은 군사안보 동맹을 넘어선 기술외교(techno-diplomacy)의 확장과도 맞물려 있다. AUKUS(호주-영국-미국) 동맹은 단순한 군사협력을 넘어, 원자력·AI·사이버보안 등 첨단 기술의 공동 개발과 상호 견증을 포함한다.³⁶⁾ 특히 SMR 시스템은 핵심 인프라로서 사이버공격에 취약할 수 있기 때문에, AUKUS는 AI 제어시스템의 상호 견증 및 사이버보안 공동 표준화 체계를 추진하고 있다.³⁷⁾ 이는 기술적 안전성을 상호 보증하고, 서방 중심의 AI-원전 기술표준 동맹을 제도화하려는 움직임이다. 이 과정에서 영국은 개방성과 안전성의 조화를 전략 기조로 삼는다. 즉, 국제 시장에는 개방적 기술동맹을 제안하면서도, AI와 디지털 기술에 대해서는 엄격한 보안·신뢰성 기준을 적용함으로써 중국·러시아 등 비(非)서방 국가와의 기술적 차별성을 확보한다.³⁸⁾

결국 RRSMR은 산업정책-외교정책-안보정책이 통합된 기술국가 모델의 상징으로, 영국이 SMR-AI 시대의 글로벌 공급망 질서에서 규범적 리더십(normative leadership)을 강화하는 기반이 되고 있다.

3) 일본: 안전성 견증 중심의 신뢰 확보 전략

일본은 후쿠시마 원전 사고의 교훈을 바탕으로, 소형모듈원자로(SMR) 도입에서 AI 기

34) UK Export Finance(UKEF), “Written evidence from Rolls-Royce SMR (IND0024),” UK Parliament, <https://committees.parliament.uk/writtenevidence/137672/pdf>(검색일: 2025.10.15).

35) *Ibid.*

36) Prime Minister of Australia, “Joint Leaders Statement On AUKUS”, <https://www.pm.gov.au/media/joint-leaders-statement-aokus>(검색일: 2025.10.15).

37) Wyatt, A., “Towards AUKUS Collaboration on Responsible Military AI and Advanced Capabilities”, RAND Corporation, https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RRA3000/RRA3079-1/RAND_RRA3079-1.pdf(검색일: 2025.10.15).

38) UK National Cyber Security Centre(NCSC), “Guidelines for Secure AI System Development”, <https://www.ncsc.gov.uk/collection/guidelines-secure-ai-system-development>(검색일: 2025.10.15).

반 안전성 검증과 사회적 수용성 확보를 핵심 전략으로 설정하였다. 기술혁신보다 국민 신뢰의 회복을 정책의 우선순위에 두며, AI를 원전 안전성의 검증·보완 도구로 활용하는 점에서 다른 해양세력과 차별화된다.³⁹⁾

① AI Safety Validation Platform의 역할

일본원자력기구(JAEA)가 2023년부터 운영 중인 AI Safety Validation Platform은 SMR 설계 및 운영에 적용될 AI 시스템의 신뢰성과 안전성을 검증하기 위한 기술적 인프라이다.⁴⁰⁾ 이 플랫폼은 클라우드 기반 가상 시뮬레이션 환경에서 정상 및 비정상 운전 시나리오를 재현하여, AI 제어 알고리즘의 응답 패턴과 오류 발생 가능성을 검증한다. 특히 현실에서는 재현하기 어려운 극단적 사고 상황(예: 냉각재 상실, 급격한 압력 상승)을 디지털 트윈 모델로 모사함으로써 예측 정비(predictive maintenance), 자율운전(autonomous control)의 안정성을 평가한다.⁴¹⁾ 핵심 목표는 AI의 설명 가능성(Explainability) 확보이다. 일본정부는 후쿠시마 사고 이후 원전 안전성에 대한 국민적 신뢰 회복을 최우선 과제로 삼고 있으며, 소형모듈원자로(SMR) 도입에서도 AI를 안전성 보완 도구로 활용하는 방향을 강화하고 있다. JAEA는 디지털 기술을 활용해 설계·평가·운전 데이터를 통합 관리하는 시스템 개발을 추진하고 있으며, 원자력 규제위원회(NRA) 역시 AI 활용 시 설명 가능성(Explainability)과 검증 절차 확보의 필요성을 강조하고 있다. 이러한 접근은 기술 고도화보다 ‘절차적 투명성’과 ‘사회적 수용성’을 우선하는 일본 특유의 안전성 중심 전략을 보여준다.⁴²⁾

② ‘기술의 사회적 수용성’과 국민 신뢰 회복

후쿠시마 사고 이후 일본 사회는 원자력 안전에 대한 깊은 불신을 겪었다. 이에 일본 정부는 SMR 상용화의 성공 여부를 기술의 우위보다 사회적 수용성(social acceptability)에 달린 문제로 규정했다. AI는 이 맥락에서 인적 오류 제거와 실시간 안전 모니터링을

39) Japan Atomic Energy Agency, “Annual Report Japan Atomic Energy Agency 2024 (Business Report FY2023)”, https://www.jaea.go.jp/english/publication/annual_report/2024.pdf(검색일: 2025.10.15).

40) Masaaki Tanaka *et al.*, “Development of element functions and design optimization procedures for knowledge- and AI-aided advanced reactor lifecycle optimization method, ARKADIA”, *Mechanical Engineering Journal*, vol.11, no.2, 2024.

41) OECD-NEA, *op. cit.*

42) 日本原子力研究開発機構(JAEA), 『2024年度年次報告書(事業報告 FY2023)』, 茨城: JAEA, 2024; 原子力規制委員会(NRA), 『発電用原子炉施設の安全対策に関する審査ガイド(デジタル計装・制御系)』, 東京: NRA, 2023; 中村恵美子, 「原子力発電所におけるデジタル技術の安全性評価と説明可能性の課題」, 『日本原子力学会誌』, 第65巻 第12号, 2023.

통한 ‘절대 안전(absolute safety)’ 구현의 수단으로 활용된다.⁴³⁾ AI의 도입은 SMR의 본 질적 안전성(passive safety)을 보완하며, 운전 데이터를 투명하게 공개하고 외부 검증을 협용함으로써 대중과의 신뢰를 재구축한다. JAEA는 SMR 도입 과정에서 AI를 포함한 디지털 기술의 안전성 검증을 위해 기술적 기준과 평가 절차를 단계적으로 정비하고 있으며, 검증 결과와 절차는 관련 보고서를 통해 공개된다. 일본 정부와 규제기관은 후쿠시마 이후 ‘투명성 확보’와 ‘과학적 검증’을 신뢰 회복의 핵심으로 보고, 검증 과정의 문서 공개와 외부 전문가 참여를 확대하고 있다.⁴⁴⁾ 이는 과거의 폐쇄적 기술 거버넌스에서 벗어나 ‘참여적 규제문화(participatory regulation)’로의 전환을 시도한 사례이다.

③ 국제공동검증 및 기술 파트너십

일본은 자국의 검증체계를 국제적으로 확산시키기 위해 미국 GE-Hitachi(GEH)와의 협력을 통해 기술개발 및 규제조화 전략을 병행하고 있다. GEH가 개발 중인 BWRX-300 SMR 프로젝트에 일본 기업(JAEA·히타치·미쓰비시 등)이 참여하면서, 미국의 규제 경험과 글로벌 공급망을 활용하는 공동개발형 상용화 모델이 구축되었다.⁴⁵⁾ 이 협력은 기술의 공동개발뿐 아니라, 일본식 AI 검증 프레임워크를 국제원자력기구(IAEA) 및 OECD-NEA의 규제조화(Regulatory Harmonization) 논의에 반영하기 위한 전략적 발판이 된다. 일본은 현행 해 비핵화 및 안전 규범을 유지하려는 규범적 성향을 공유하며, 향후 원전 수출 사업과 국제규범 형성 과정에서 보다 핵심적인 역할을 담당할 수 있는 국가로 평가된다.⁴⁶⁾ 즉, 일본은 후쿠시마 이후의 기술 불신을 ‘검증의 제도화’와 ‘국제협력의 표준화’로 극복하려 하고 있으며, 이를 통해 SMR-AI 안전 규범의 새로운 기준을 제시하는 규범 리더십(normative leadership)을 확립하려 하고 있다.

2. 대륙세력의 SMR - AI 전략: 기술주권과 폐쇄적 자립체제

1) 중국: ‘디지털 원자력 주권’ 구현 전략

중국은 Linglong One(ACP100) 프로젝트를 통해 SMR과 AI 기술을 결합하며, 에너지

43) 原子力規制庁(NRA)「原子力分野における人工知能の動向に係る調査報告 (Technical Note NTEN-2024-10 02)」, 東京 : NRA, 令和6(2024)年9月, p.4.

44) Japan Atomic Energy Agency(JAEA), 『JAEA-Review 2023-012: バックエンド技術開発戦略ロードマップ』, 東京 : JAEA, 2023.

45) 日本原子力研究開発機構(JAEA)『JAEA Review 2024-040: 小型モジュール炉(SMR)展開に向けた基盤技術と国際協力の現状』, 東京 : JAEA, 2024年, p.45.

46) James E. Platte, “Exporting Nuclear Norms: Japan and South Korea in the International Nuclear-Energy Market”, *Journal of Indo-Pacific Affairs*, vol. 3, no. 2, 2020, p.133.

차립 및 디지털 주권을 동시에 추구하는 국가주도형 기술체제를 구축하고 있다. 이는 검증보다 실증을 우선시하는 ‘proof-first’ 전략으로, 해양세력이 채택한 규제 중심 접근과는 뚜렷이 대비된다.⁴⁷⁾

① Linglong One의 기술적 의의(ACP100)

Linglong One은 중국핵공업집단공사(CNNC)가 독자 개발한 소형 가압경수로형(SMR-PWR)으로, 2021년 7월 하이난성 창장(昌江) 원자력발전소 부지에서 착공된 이후 주요 기기 설치와 계통 통합 단계가 지속적으로 진행되어 왔다. CNNC는 해당 프로젝트가 2025년 중 상업 운전을 목표로 개발이 마무리 단계에 있다고 발표한 바 있다.⁴⁸⁾ 2025년 10월 주요 시운전 절차인 저온기능시험을 성공적으로 완료했으며, 현재 연료 장전 및 상업 운전을 위한 후속 단계들을 진행하고 있다.⁴⁹⁾ 이는 세계 최초의 실제 건설 단계에 진입한 SMR 프로젝트 중 하나로, 중국이 서방 기술에 의존하지 않고 원전 설계·제어·건설 전 과정을 자력으로 수행하고 있음을 상징한다.⁵⁰⁾ Linglong One은 고급 디지털 계측제어(I&C) 시스템과 AI 기반 운전 보조모듈을 탑재해 운전 효율성과 안전성을 향상시킨다. AI는 센서 데이터를 이용해 핵심 계통(냉각재, 압력, 온도)을 실시간 모니터링하고, 비정상 신호를 조기에 감지해 자동제어를 수행한다. 다만 완전한 자율운전(autonomous operation) 단계에는 이르지 않았으며, 현재는 운전원 보조 중심의 부분적 자동화(semi-autonomous control) 수준에 머물고 있다. 즉, 중국은 서방국가가 규제 기반의 AI 검증체계를 먼저 확립한 것과 달리, AI의 안전성 검증보다 협장 실증을 통한 경험 축적과 기술 확장을 우선시하고 있다.

② ‘디지털 원자력 주권’과 데이터 통제

중국 SMR 전략의 핵심은 디지털 주권(digital sovereignty)을 내세워 원전 계측제어

47) XU Bin, “CNNC’s ACP100 SMR: Technique Features and Progress”, CNNC Presentation, https://nucleus.iae.org/sites/INPRO/df13/Presentations/011_CNNC%27s%20ACP100%20SMR-Technique%20Features%20and%20Progress%20in%20China.pdf (검색일: 2025.10.15).

48) China National Nuclear Corporation (CNNC), “World’s first commercial on-shore small reactor starts construction”, July 14, 2021, available at: https://en.cnnc.com.cn/2021-07/14/c_1023245.htm(accessed: 18 November 2025).

49) Global Times, “China’s ‘Linglong One’ small modular reactor completes key cold performance test”, [https://www.globaltimes.cn/page/202510/1345805.shtml#:~:text=China%20National%20Nuclear%20Corporation%20\(CNNC\)%20announced%20on,its%20fuel%20loading%20and%20future%20commercial%20operation.](https://www.globaltimes.cn/page/202510/1345805.shtml#:~:text=China%20National%20Nuclear%20Corporation%20(CNNC)%20announced%20on,its%20fuel%20loading%20and%20future%20commercial%20operation.) (검색일: 2025.10.25).

50) China National Nuclear Corporation (CNNC), *op. cit.*

(DCS)와 데이터 인프라를 국산 디지털 플랫폼을 중심으로 자주·통제 가능하게(自主可控) 구축하는 데 있다.⁵¹⁾ Linglong One의 디지털 계측제어 시스템은 중국이 독자 지식재산권을 보유한 ‘룽린(龙鳞)’·‘룽치(龙鳍)’ 플랫폼을 채택하고 있으며, 중국핵건설·중국핵전력 등은 ‘디지털 핵산업’ 건설 과정에서 네트워크 보안 요구를 강화하고 데이터·소프트웨어의 자주성과 안정성(自主可控、安全稳定)을 반복적으로 강조하고 있다.⁵²⁾ 외부 네트워크 와의 연결은 차단되어 있으며, 핵심 제어 모듈은 자국산 CPU와 암호화 칩을 탑재한 보안형 운영체계(secure OS) 위에서만 작동한다. 이러한 폐쇄 전략은 외국 기술 및 데이터 종속을 근본적으로 차단하고, AI 기반 원전 시스템이 직면할 수 있는 사이버 공격 가능성을 최소화하려는 목적을 가진다. 결국 ‘디지털 원자력 주권(Digital Nuclear Sovereignty)’은 기술자립·데이터보안·정치통제를 통합한 국가보안형 기술거버넌스 모델로 기능한다.

③ ‘원자력 굴기’와 기술 자립 전략

중국핵공업집단(中国核工业集团有限公司)이 하이난성 창장에 건설 중인 Linglong One (ACP100) 시범사업은 ‘혁신 주도형 발전 전략’ 아래 추진되는 대표적인 소형모듈원자로(SMR) 프로젝트로, 중국이 이른바 ‘원자력 굴기(核电崛起)’를 표방하며 원자력·디지털 기술 역량을 강화하는 핵심 사례로 평가된다.⁵³⁾ 중국은 대형 원전 의존도를 줄이고 분산형 SMR 네트워크를 전국 전력망에 도입함으로써 에너지 공급의 안정성과 지리적 균형을 확보하려 한다. 이러한 SMR의 분산적 특성은 기술 자급자족(technological autarky) 전략과 결합되어, 국가 차원의 산업 자립 체계를 가속화한다. 또한 중국은 Linglong One의 상업 운전 후 동남아시아, 중동, 아프리카 등으로의 수출을 모색하고 있으며, 이를 통해 자국 SMR-AI 표준을 글로벌 시장에 확산시키려 한다.⁵⁴⁾ 이 전략은 단순한 에너지 산업 수출을 넘어, 중국식 기술 거버넌스 모델을 국제규범 체계의 대안으로 제시하려는 정치적 의도를 함의한다.

51) 国家核安全局, “玲龙一号全球首堆“大脑”正式启动”, https://nnsa.mee.gov.cn/ywdt/hyzx/202405/t20240523_1073935.html(검색일: 2025.10.15).

52) 国家核安全局, “中国核建：加快推进数字化转型进程推动核电工程建造高质量发展”, https://nnsa.mee.gov.cn/ywdt/hyzx/202411/t20241120_1095741.html(검색일: 2025.10.15).

53) China National Nuclear Corporation (CNNC), “World's first commercial Linglong One onshore small reactor starts construction”, https://en.cnnc.com.cn/2021-07/14/c_1023245.htm(검색일: 2025.10.15).

54) Futureworld, “China wins the small nuclear race: First true small modular reactor connected to grid, leaving America behind”, <https://futureworld.org/mindbullets/china-wins-smr-nuclear-race/>(검색일: 2025.10.15).

2) 러시아: 에너지 자립과 전략적 통제 결합 전략

러시아의 SMR 전략은 북극 해역과 극지방의 전략적 중요성에 기반하여, 부유식 원전과 쇄빙선용 소형원자로를 통해 민간 전력공급과 자원개발, 그리고 북극항로(NSR) 통제를 동시에 뒷받침하는 군민복합형 에너지 인프라를 구축하는 데 초점을 두고 있다.⁵⁵⁾

① RITM-200 시리즈와 북극 인프라

러시아 국영 원자력 기업 로사톰(Rosatom)은 세계 최초이자 현재 유일한 상업 운전 부유식 원자력 발전소인 ‘아카데미크 로모노소프(Akademik Lomonosov)’를 운영하며, 이를 통해 러시아 북극 추코트카 자치구(Chukotka Autonomous Okrug) 지역에 전력과 열을 공급하고 있다.⁵⁶⁾ 또한 로사톰 산하 아톰플로트(Atomflot)가 운용하는 프로젝트 22220형 원자력 쇄빙선 함대에는 RITM-200 계열 소형 가압경수로(SMR)가 탑재되어 북극항로(Северный морской путь)의 연중 항행과 극지방 자원개발을 위한 안정적 전력을 제공한다.⁵⁷⁾ RITM-200은 러시아 OKBM Afrikantov가 설계한 통합형 가압경수로형 (SMR)으로, 약 50 MWe급(열출력 165 MWt, 전기출력 53 MWe)의 출력을 가지며, 러시아 쇄빙선과 북극 해역용 원전에서 운전되도록 설계된 III+ 세대 소형모듈원자로이다.⁵⁸⁾ 이는 단순한 에너지 공급 기술이 아니라, 북극 해역의 해상 운항·군사 기지·광물 채굴 거점 등 러시아의 북극 주권 확보 전략과 직결된다.

② AI 기반 극한 환경 제어

로사톰은 극한 환경에서의 원격 운전을 위해 AI 기반 자율 제어시스템 개발에 집중하고 있다. 이 시스템은 해수 온도, 얼음 두께, 항로 조건 등 실시간 데이터를 수집하여 냉각재 흐름과 출력 조정을 자동화하는 자율 제어 알고리즘(autonomous control algorithm)을 운용한다.⁵⁹⁾ 국제적으로 논의되는 AI 기반 예측정비 및 운전 최적화 개념을 적용하면,

55) Merkulov, Viktor, Nikolay Didenko, Djamilia Skripnuk, and Sergey Kulik, “Analysis of Small Modular Reactor Technologies and Socio-Economic Aspects of their Application in the Russian Arctic in the Era of Digital Transformation”, E3S Web of Conferences, vol.402, 2023.

56) Nuclear Engineering International, “Akademik Lomonosov begins commercial operation”, <https://www.neimagazine.com/news/akademik-lomonosov-begins-commercial-operation-7938482/?cf-view>(검색일: 2025.10.15).

57) World Nuclear News(WNN), “Nuclear Power in Russia”, https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-power?utm_source=chatgpt.com(검색일: 2025.10.15).

58) International Atomic Energy Agency, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*, Vienna: IAEA, 2020, p.57.

59) *Ibid.*

센서 네트워크를 통해 선체·추진계·냉각계통 등의 실시간 상태 데이터를 수집·분석하여 이상 징후를 조기에 탐지하고, 출력·터빈 부하를 동기화함으로써 연료 효율과 안전성을 동시에 제고할 수 있다. 이러한 AI 기반 실시간 운전 최적화와 예측정비(predictive maintenance)는 이미 원전 및 해양 운송 분야에서 기술적 타당성이 입증되고 있으며, 극지 환경에서의 인적 개입 한계와 운항 불확실성을 완화하는 핵심 수단으로 간주된다.⁶⁰⁾

③ 국방산업형 기술체제와 전략적 통제

러시아의 SMR-AI 체제는 국가가 소유·통제하는 로사톰(State Atomic Energy Corporation Rosatom)을 중심으로 구축된 국가 통제형 기술 생태계(state-controlled technosystem)로 이해할 수 있다. 로사톰은 원전 설계·연료주기·건설·운영·수출까지 포괄하는 통합 국영기업으로, 부유식 원전과 쇄빙선용 소형로 등 북극 인프라를 통해 민간 전력 공급과 안보·군사 전략을 동시에 뒷받침한다.⁶¹⁾ 이러한 구조는 에너지 안보와 국방 전략이 결합된 군민복합형 기술체제(military-industrial technosystem)의 성격을 띠며, 북극 해역에서의 기동성과 통제력을 강화하는 핵심 수단으로 활용되고 있다.⁶²⁾ 이는 서방의 상업화 중심 접근과 달리, 국가안보-산업기술 일체화 모델을 형성한다. SMR은 북극 기지와 극지 도시의 전력 자립을 보장함과 동시에, 러시아가 북극항로 전역에 대한 지속적 주권적 존재(persistent sovereign presence)를 유지할 수 있는 핵심 인프라로 작동한다.

3. 국가별·세력별 비교 및 지정학적 함의

앞 장에서 살펴본 바와 같이, SMR-AI 융합은 단순한 기술혁신이 아니라 에너지 시스템의 디지털화가 권력 구조를 재편하는 과정이다. 각국은 이를 자국의 산업정책·안보전략·외교정책과 결합시켜 서로 다른 기술체제 유형을 형성하였다. 본 절은 2장 4절의 ‘기술지정학적 비교틀’에 따라 해양세력형(미국·영국·일본)과 대륙세력형(중국·러시아)의 전략적 차이와 지정학적 함의를 분석한다.

해양세력형은 기술의 신뢰성과 규범성을, 대륙세력형은 기술의 실증성과 주권성을 우선시한다. 양 세력은 모두 SMR-AI 융합을 국가전략의 핵심축으로 두고 있으나, 기술의

60) Hu, Guang, Taotao Zhou, and Qianfeng Liu, “Data-Driven Machine Learning for Fault Detection and Diagnosis in Nuclear Power Plants: A Review”, *Frontiers in Energy Research*, vol.9, 2021.

61) World Nuclear News(WNN), *op. cit.*

62) Goodman, Sherri and Katarina Kertysova, “The Nuclearisation of the Russian Arctic: New Reactors, New Risks”, *Euro-Atlantic Security Policy Brief*, European Leadership Network, 2020, pp.1-4.

개방성·데이터 투명성·국제 검증 메커니즘에서 뚜렷한 대조를 보인다.

〈표 6〉 세력별 기술체제의 구조적 대비

구분	기술체제 유형	주요 특징	대표 사례
해양세력형	개방형 기술체제, 국제 검증 및 신뢰 확보 우선	SMR의 AI 융합 과정에서 ‘신뢰 가능한 AI(Trustworthy AI)’를 강조하고, 국제규범 및 표준화를 통해 상호 검증체계를 구축함.	미국(NuScale-DOE), 영국(RRS MR-UKEF), 일본(JAEA-GEH)
대륙세력형	폐쇄형 기술체제, 실증 중심의 자율운전 추구	AI를 활용해 실증성과 자율운전을 극대화하되, 데이터·제어권을 국가 내부에 집중시켜 ‘디지털 주권’을 강화함.	중국(CNNC-ACP100), 러시아(RITM-200)

출처: 필자 작성

〈표 6〉은 앞서 제2장에서 제시한 ‘기술지정학적 비교틀’을 실제 국가별 사례에 적용한 결과이다. 이는 본 논문의 분석틀에서 개념적으로 구분된 해양세력형(개방-검증-규범수출형)과 대륙세력형(폐쇄-실증-주권통제형)의 구분이 각국의 SMR-AI 전략에서 구체적으로 어떻게 구현되고 있는지를 보여준다.

해양세력형(미국·영국·일본)은 검증과 신뢰 확보를 기술경쟁의 전제조건으로 삼는다. 이들은 국제기구(IAEA, OECD-NEA)와의 공동 검증체계를 통해 SMR과 AI의 결합을 ‘투명하고 예측 가능한 기술’로 제도화하고자 한다. AI는 설계 오류 탐지, 운전 최적화, 예측정비 등 보조적 안전 기술로 작동하며, 핵심은 ‘AI의 신뢰성(Trustworthy AI)’ 확보이다. 이러한 접근은 기술혁신을 사회적 합의 속에서 제도화하려는 민주주의 국가들의 정책 특징을 반영한다.

반면 대륙세력형(중국·러시아)은 실증과 자율운전을 기술경쟁의 중심으로 둔다. AI는 보조 기능을 넘어 주요 제어 알고리즘으로 통합되며, 데이터와 제어권은 폐쇄된 국가 사 이버망 안에서 관리된다. 이는 기술검증보다는 운용 경험의 축적을 통해 신뢰를 구축하려는 ‘실증 우선주의(proof-oriented logic)’의 전형이다.

결국 두 세력 모두 기술자립을 추구하지만 해양세력은 국제규범을 통한 신뢰의 자립, 대륙세력은 데이터 통제를 통한 주권의 자립을 지향한다는 점이다.

〈표 7〉 SMR-AI 융합의 글로벌 확산 경로: 해양세력 vs 대륙세력 비교

비교축	해양세력형 (미·영·일)	대륙세력형 (중·러)
① 기술체제	디지털 트윈-예측정비-운전 최적화 중심. AI를 보조적 안전장치로 사용하며, 검증 절차를 상업화 단계 이전에 완비.	자율운전-실증시험 중심. 검증보다 운용·실험을 통해 빠른 기술 축적을 지향. AI를 핵심 제어기술로 통합.
② 거버넌스	규제기관(NRC, ONR, JAEA)과 기업 간 협력형 구조. 국제기구(IAEA, OECD-NEA) 검증 참여로 다층 거버넌스 형성.	국가 독점형 체제. Rosatom, CNNC가 연구·건설·운영을 일괄 수행. 외부 접근 제한, 폐쇄형 데이터 거버넌스 유지.
③ 규범전략	AI 신뢰성, 투명성, 안전성 확보를 통한 규범 수출. 기술표준을 외교정책 및 공급망 외교의 수단으로 활용.	기술자립, 주권 통제, 사이버보안 강화. ‘디지털 원자력 주권’을 내세워 기술표준의 독자화 추진.

출처: 필자 작성

〈표 7〉은 앞선 구조 비교를 세부적으로 확장하여, 각 세력이 선택한 기술체제·거버넌스·규범전략의 차이를 종합적으로 보여준다. 이 표는 2장에서 설정한 세 축(technological system / governance logic / normative strategy)을 실제 사례의 경험적 자료로 채워 넣은 결과로서, 각 세력이 어떤 정치경제적 논리 속에서 SMR-AI 융합을 추진하는지를 명확히 드러낸다.

첫째, 기술체제 축에서 해양세력은 디지털 트윈과 예측정비 등 AI의 운영 보조적 활용에 초점을 맞추며, 기술의 안전성과 검증성을 강조한다. 이에 비해 대륙세력은 자율운전과 실증시험을 통해 빠른 상용화를 추구하고, AI를 핵심 제어수단으로 통합한다. 둘째, 거버넌스 축에서 해양세력은 규제기관과 산업 간 다층 협력체계를 구축한다. 미국 DOE-NRC, 영국 ONR-Rolls-Royce, 일본 JAEA-GEH 협력이 그 예이다. 반면 대륙세력은 Rosatom, CNNC 등 국영기업 중심의 국가 독점형 체제를 유지하며, 데이터 접근은 폐쇄형 내부망에서만 가능하다. 셋째, 규범전략 축에서 해양세력은 기술의 국제규범화를 외교전략과 연계한다. 신뢰 가능한 AI 규범을 선점함으로써 기술표준을 수출하고, 이를 새로운 기술외교(tech diplomacy)의 자산으로 활용한다. 반대로 대륙세력은 기술표준의 독자화를 추구하며, ‘디지털 원자력 주권’이라는 담론을 통해 서방 규범에 대한 대안을 제시한다. 이처럼 표는 단순한 기술 비교가 아니라, AI의 정치화(politicization of AI)와 거버넌스의 이념적 분화라는 구조적 현상을 실증적으로 보여준다. 결과적으로, SMR-AI 융

합의 세계화는 하나의 단일 기술체계가 아니라 복수의 기술체제(technological regimes)로 전개되고 있음을 확인할 수 있다.

SMR-AI 융합을 둘러싼 기술경쟁은 단순한 병렬적 발전이 아니라, 상호 경쟁과 견제를 통해 형성되는 비대칭적 상호작용(asymmetric interaction)의 양상을 띠고 있다. 해양 세력형(미·영·일)과 대륙세력형(중·러)은 서로 다른 기술체제와 규범 전략을 바탕으로 다음 세 가지 차원에서 경쟁 구도를 형성하고 있다.

첫째, 양측은 검증과 실증의 영역에서 기술표준 경쟁을 하고 있다. 해양세력형은 AI의 검증가능성(validatability)을 기술표준의 핵심으로 설정한다. 미국 DOE와 OECD-NEA 가 주도하는 Trustworthy AI 규범은 SMR 운영에서 알고리즘의 투명성·재현성을 보장하는 것을 국제표준으로 삼고 있다. 반면 중국과 러시아는 실증 기반의 기술표준을 우선시하며, ‘신뢰보다는 성능(Performance over Trust)’을 내세워 독자적 기술표준체계를 구축하고 있다. 이로 인해 국제원자력기구(IAEA)가 추진하는 AI 안전성 검증 협력(Verification Network for AI in Nuclear Operations)은 해양세력 중심의 규범으로 수렴되는 경향을 보이지만, 중·러는 참여를 제한하거나 별도의 지역 협력체(BRICS Nuclear Innovation Forum 등)를 통한 대체 규범을 제시하며 표준의 양극화(standard bifurcation)를 초래하고 있다.

둘째, 양측은 데이터 주권과 기술외교를 경합한다. AI가 통제하는 SMR 시스템의 핵심은 운전데이터이며, 이는 곧 에너지 안보와 기술주권을 연결하는 전략자산으로 기능한다. 해양세력은 데이터의 개방적 공유와 국제 검증을 통해 ‘신뢰의 네트워크’를 구축하지만, 대륙세력은 데이터 접근을 철저히 통제하여 ‘디지털 주권(digital sovereignty)’을 확보한다. 특히 중국은 Linglong One의 운전데이터를 국가 사이버망 내부에서만 처리하며, AI 학습 데이터셋을 외부에 공개하지 않는다. 반면 미국과 영국은 AI 모델의 학습결과를 OECD-NEA 데이터 포맷으로 공유함으로써 기술외교의 핵심 자산으로 활용한다. 이러한 차이는 데이터 접근권의 외교화(diplomatization of data governance)라는 새로운 국제정치적 현상을 낳고 있다.

셋째, 양측은 규범 충돌과 거버넌스 균열을 촉발한다. AI-SMR 융합은 국제 규제체계에 새로운 유형의 규범 충돌(normative conflict)을 초래하고 있다. IAEA와 OECD-NEA가 추진하는 ‘AI 검증·안전성 국제 기준’은 해양세력 중심의 투명성·설명가능성 원칙에 기반하지만, 중·러는 이를 ‘정치적 검증(political verification)’으로 간주하며 반발한다. 이들은 AI 검증의 ‘내재적 비공개성’을 주장하며, 자국의 기술표준을 ‘국가기술보호체제(National Tech Protection Regime)’ 안에 위치시킨다. 결과적으로 국제원자력거버넌

스는 개방·검증형 네트워크(서방 중심)와 폐쇄·자립형 생태계(비서방 중심)로 분리되고 있다. 이 두 거버넌스 모델은 상호 호환성이 제한적이며, 향후 SMR 수출·기술이전·운영 인허가 등 국제 거래 구조에서도 규범적 비대칭(regulatory asymmetry)을 심화시킬 가능성이 높다.

세력 간 상호작용은 결국 기술의 정치화(technopoliticization)와 규범의 전략화(strategization of norms)로 귀결된다. 해양세력형은 국제 협력과 규범 수출을 통해 기술적 신뢰를 제도화하려는 반면, 대륙세력형은 기술자립과 폐쇄형 네트워크를 통해 주권적 통제를 제도화한다. 이러한 상반된 접근은 ‘검증의 정치’와 ‘자립의 정치’라는 두 축으로 21세기 에너지-기술 지정학의 균열선을 형성하고 있다. SMR-AI 융합의 글로벌 확산은 따라서 기술발전의 문제가 아니라, 기술체제를 누가 설계하고 통제하느냐의 문제로 전환되고 있다. 이는 향후 국제원자력 규범체계뿐 아니라, AI 거버넌스·데이터 안보·기술동맹의 재편 등 다양한 영역에서 지정학적 재조정의 핵심 요인으로 작용할 것이다.

V. 결론

본 논문은 SMR-AI 융합 시대의 에너지 지정학적 구조 변화를 해양세력과 대륙세력의 전략 비교를 통해 분석한 글이다. 기존의 해양세력-대륙세력 구도는 주로 자원과 물리적 공간의 통제에 기반했으나, 본 연구는 기술체제의 정치화라는 관점에서 이 구도를 재해석하였다. SMR과 AI의 결합은 단순한 에너지 기술혁신이 아니라, 기술 표준과 데이터 주권, 그리고 규범 거버넌스를 둘러싼 복합 권력 경쟁으로 전환되고 있었다.

연구 결과, 첫째로 해양세력형(미국, 영국, 일본)은 개방형 기술체제를 기반으로 AI의 신뢰성과 검증 가능성을 제도화하며, 국제기구를 통한 다중 협력 거버넌스를 구축하였다. 이들은 기술을 국제 공공재로 규정하고 ‘신뢰 가능한 AI(Trustworthy AI)’를 중심으로 한 규범 수출 전략을 추진함으로써 기술표준의 외교적 확산을 시도하고 있다. 반면 대륙 세력형(중국, 러시아)은 실증과 자율운전을 우선시하는 폐쇄형 기술체제를 구축하고, 데이터와 알고리즘을 국가 내부망에서 통제함으로써 디지털 주권을 강화한다. 이들은 AI를 핵심 제어기술로 통합하여 빠른 기술 축적을 이루는 대신, 외부 검증과 국제 표준화에는 소극적인 입장을 취하고 있다. 둘째로 AI는 SMR 운영의 안전성, 효율성, 지속가능성을 결정짓는 핵심 기술로 작동하며, 디지털 트윈, 예측정비, 운전 최적화 등 각 단계에서 SMR의 성능을 향상시킨다. 그러나 AI의 통제력은 단순한 기술적 보조 기능을 넘어, 국

가별 정책철학과 규제체계의 방향성을 반영하는 정치적 변수로 작용한다. 셋째로 민주주의와 권위주의 체제는 SMR-AI 도입의 속도와 사회적 수용성에서 뚜렷한 차이를 보였다. 민주주의 체제는 기술검증과 국민적 신뢰를 우선시하여 상용화 과정이 느리지만, 투명성과 사회적 정당성을 확보한다. 반면 권위주의 체제는 정부 주도의 실증정책을 통해 신속히 상용화를 추진하나, 기술의 안전성과 사회적 수용성에 대한 외부 검증의 한계가 존재한다. 이러한 결과는 SMR-AI 융합이 단순한 기술개발의 문제가 아니라, 기술체제를 어떻게 통제하고 신뢰를 제도화하느냐의 문제임을 보여준다.

따라서 본 연구는 에너지 지정학의 분석단위를 공간에서 기술체제로 확장시키며, 기술 지정학(technogeopolitics)이라는 새로운 분석틀을 제시하였다. 정책적으로는 세 가지 함의가 도출된다. 첫째, AI 기반 원전 안전성 확보를 위한 국제협력 규범의 복원이 필요하다. IAEA와 OECD-NEA의 공동 검증체계를 제도화하여 AI의 투명성, 데이터 공유, 사이버보안 기준을 조화시켜야 한다. 둘째, 에너지 안보와 기술외교의 연계를 강화해야 한다. 기술표준 선점은 곧 에너지 패권의 재편으로 이어지므로, 신뢰 가능한 AI 규범을 외교적 자산으로 활용하는 전략이 요구된다. 셋째, AI의 사회적 신뢰 확보가 기술수용의 핵심이다. 기술적 안정성뿐 아니라 규제의 투명성, 대중의 이해, 윤리적 설명가능성 확보가 정책의 중심이 되어야 한다. 향후 연구에서는 국가 단위 비교를 넘어, AUKUS·EU·BRICS+ 등 지역 네트워크 간 상호작용을 포함한 거대 기술블록 간 비교분석이 필요하다. 또한 AI와 SMR의 상호작용이 경제성과 탄소중립에 미치는 정량적 효과를 분석하여 기술체제 유형별 성과를 계량화할 필요가 있다. 더 나아가 AI 윤리와 기술외교의 접점을 다학제적으로 연구함으로써, 기술규범이 국제정치의 새로운 언어로 기능하는 과정을 규명해야 한다. 종합하면 SMR-AI 융합은 에너지 패권의 이동이자, 기술-데이터-규범이 결합된 복합 권력체제의 형성 과정이다. 해양세력과 대륙세력의 상반된 전략은 단순한 기술 경로의 차이를 넘어, ‘검증의 정치’와 ‘자립의 정치’라는 두 가지 상반된 기술체제의 철학을 상징한다. 따라서 SMR-AI 융합의 지정학은 결국 기술을 누가, 어떤 방식으로 신뢰하게 만들 것인가의 문제로 귀결되며, 이는 기술지정학 시대의 국제질서가 직면한 핵심적 도전이자 향후 세계정치가 해결해야 할 구조적 과제이다. 한국의 경우에도 SMR-AI 융합은 단순한 기술문제가 아니라 기술표준, 안전검증, 사이버보안 등 규범 기반의 ‘신뢰 아키텍처’를 구축하는 정책과 직결된다. 특히 K-뉴클리어 전략, AI 신뢰성·투명성 제도 정비, IAEA·OECD-NEA 규범 논의 참여 확대는 기술외교적 래버리지로 작동할 수 있다. 한국은 개방형 기술체제와 국제 협력망을 활용해 ‘신뢰 가능한 AI-원전 운영체계’ 구축을 선도할 여지가 있다.

참고문헌

영어문헌

- China National Nuclear Corporation (CNNC), *World's First Commercial Linglong One Onshore Small Reactor Starts Construction*, Beijing: CNNC, 2021.
- China National Nuclear Corporation (CNNC), “World’s first commercial Linglong One onshore small reactor starts construction”, CNNC, https://en.cnnc.com.cn/2021-07/14/c_1023245.htm(검색일: 2025.10.15).
- Deudney, Daniel, *Bounding Power: Republican Security Theory from the Polis to the Global Village*, Princeton: Princeton University Press, 2006.
- Department for Energy Security and Net Zero, *Civil Nuclear: Roadmap to 2050*, London: DESNZ, 2024.
- Dinter, Raymon van, Bedir Tekinerdogan, Cagatay Catal, and Bilge Kaan Kuzu, “Predictive Maintenance Using Digital Twins: A Systematic Literature Review”, *Information and Software Technology*, vol.151, 2022.
- European Leadership Network, Goodman, Sherri and Katarina Kertysova, “The Nuclearisation of the Russian Arctic: New Reactors, New Risks”, *Euro-Atlantic Security Policy Brief*, ELN, 2020.
- Futureworld, “China Wins the Small Nuclear Race: First True Small Modular Reactor Connected to Grid”, Futureworld, <https://futureworld.org/mindbullets/china-wins-smr-nuclear-race/>(검색일: 2025.10.15).
- Global Times, “China's ‘Linglong One’ Small Modular Reactor Completes Key Cold Performance Test”, Global Times, <https://www.globaltimes.cn/page/202510/1345805.shtml>(검색일: 2025.10.25).
- Hu, Guang, Taotao Zhou, and Qianfeng Liu, “Data-Driven Machine Learning for Fault Detection and Diagnosis in Nuclear Power Plants: A Review”, *Frontiers in Energy Research*, vol.9, 2021.
- International Atomic Energy Agency (IAEA), *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments: 2022 Edition*, Vienna: IAEA, 2020.
- International Atomic Energy Agency (IAEA), “NuScale Small Modular Reactor Overview”, IAEA, <https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df17/IV.5-KenLangdon-NuScale.pdf> (검색일: 2025.10.10).
- Jin, Ik Jae and In Cheol Bang, “The Time for Revolutionizing Small Modular Reactors: Cost Reduction Strategies from Innovations in Operation and Maintenance”, *Progress in Nuclear Energy*, vol.174, 2024.
- Japan Atomic Energy Agency(JAEA), *Annual Report Japan Atomic Energy Agency 2024 (Business Report FY2023)*, Ibaraki: JAEA, 2024.
- Mahan, Alfred Thayer, *The Influence of Sea Power upon History, 1660~1783*, Boston: Little, Brown and Company, 1890.
- Merkulov, Viktor, Nikolay Didenko, Djamilia Skripnuk, and Sergey Kulik, “Analysis of Small

- Modular Reactor Technologies and Socio-Economic Aspects of Their Application in the Russian Arctic in the Era of Digital Transformation”, E3S Web of Conferences, vol.402, 2023.
- Ministry of Energy of Australia, Prime Minister of Australia, “Joint Leaders Statement on AUKUS”, Australian Government, <https://www.pm.gov.au/media/joint-leaders-statement-aokus>(검색일: 2025.10.15).
- Nuclear Engineering International, “Akademik Lomonosov Begins Commercial Operation”, NEI, <https://www.neimagazine.com/news/akademik-lomonosov-begins-commercial-operation-7938482/?cf-view>(검색일: 2025.10.15).
- Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), *Benchmark on Artificial Intelligence and Machine Learning for Scientific Computing in Nuclear Engineering (NEA/WKP(2023)1)*, Paris: OECD-NEA, 2024.
- Nye, Joseph S., “Power and Foreign Policy”, *Journal of Political Power*, vol.4, no.1, 2011.
- Ohlhorst, Dörte, “Germany’s Energy Transition Policy between National Targets and Decentralized Responsibilities”, *Journal of Integrative Environmental Sciences*, vol.12, no.4, 2015.
- Platte, James E., “Exporting Nuclear Norms: Japan and South Korea in the International Nuclear-Energy Market”, *Journal of Indo-Pacific Affairs*, vol.3, no.2, 2020.
- Rolls-Royce SMR, *Rolls-Royce SMR Design Overview White Paper*, Derby: Rolls-Royce SMR, 2025.
- Ruggie, John G., “Territoriality and Beyond: Problematizing Modernity in International Relations”, *International Organization*, vol.47, no.1, 1993.
- Spykman, Nicholas J., *America’s Strategy in World Politics: The United States and the Balance of Power*, New York: Harcourt, Brace, and Company, 1942.
- Tanaka, Masaaki et al., “Development of Element Functions and Design Optimization Procedures for Knowledge- and AI-Aided Advanced Reactor Lifecycle Optimization Method, ARKADIA”, *Mechanical Engineering Journal*, vol.11, no.2, 2024.
- UK Export Finance (UKEF), “Written Evidence from Rolls-Royce SMR (IND0024)”, UKEF, <https://committees.parliament.uk/writtenevidence/137672/pdf/>(검색일: 2025.10.15).
- UK National Cyber Security Centre (NCSC), “Guidelines for Secure AI System Development”, NCSC, <https://www.ncsc.gov.uk/collection/guidelines-secure-ai-system-development> (검색일: 2025.10.15).
- U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Energy, “New AI Tools Could Save Constellation Reactor Fleet Millions”, DOE, <https://www.energy.gov/ne/articles/new-ai-tools-could-save-constellation-reactor-fleet-millions> (검색일: 2025.10.15).
- U.S. Nuclear Regulatory Commission(NRC), “Design Certification - NuScale US600”, NRC, <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/advanced/who-were-working-with/past-license-activities/nuscale.html> (검색일: 2025.10.15).
- Wyatt, A., “Towards AUKUS Collaboration on Responsible Military AI and Advanced Capabilities”, RAND Corporation, https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RRA3

000/RRA3079-1/RAND_RRA3079-1.pdf (검색일: 2025.10.15).
XU Bin, “CNNC’s ACP100 SMR: Technique Features and Progress”, IAEA INPRO(온라인), https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df13/Presentations/011_CNNC%27s%20ACP100%20SMR-Techique%20Features%20and%20Progress%20in%20China.pdf (검색일: 2025.10.15.).

일본어 문헌

原子力規制庁(NRA), 「原子力分野における人工知能の動向に係る調査報告 (Technical Note NTEN-2024-1002)」, 東京: NRA, 2024年9月.

原子力規制委員会(NRA), 『発電用原子炉施設の安全対策に関する審査ガイド(デジタル計装・制御系)』, 東京: NRA, 2023.

中村恵美子, 「原子力発電所におけるデジタル技術の安全性評価と説明可能性の課題」, 『日本原子力学会誌』, 第65巻 第12号, 2023.

日本原子力研究開発機構(JAEA), 『2024年度年次報告書(事業報告 FY2023)』, 茨城: JAEA, 2024.

日本原子力研究開発機構(JAEA), 『JAEA Review 2024-040: 小型モジュール炉(SMR)展開に向けた基盤技術と国際協力の現状』, 東京: JAEA, 2024.

Japan Atomic Energy Agency(JAEA), JAEA-Review 2023-012: バックエンド技術開発戦略ロードマップ, 東京: JAEA, 2023.

중국어 문헌

国家核安全局, “玲龙一号全球首堆‘大脑’正式启动”, 国家核安全局, https://nnsa.mee.gov.cn/ywdt/hyzx/202405/t20240523_1073935.html(검색일: 2025.10.15).

国家核安全局, “中国核建：加快推进数字化转型进程推动核电工程建造高质量发展”, 国家核安全, https://nnsa.mee.gov.cn/ywdt/hyzx/202411/t20241120_1095741.html (검색일: 2025.10.15).

【Abstract】

SMR-AI Convergence and the Reconfiguration of Energy Geopolitics : The Maritime-Continental Power Divide Revisited

Kim, Hyunjung · Kim, Daejung

This study examines how the convergence of Artificial Intelligence (AI) and Small Modular Reactors (SMRs) is reshaping 21st-century energy geopolitics. The SMR-AI nexus transforms the spatial distribution of power and the hierarchy of technological regimes through the intelligentization of energy production and control. Reinterpreting the classical dichotomy between maritime and continental powers through technological geopolitics, this study compares their strategies across three dimensions: technological regime, governance, and normative strategy. Maritime powers (the United States, the United Kingdom, Japan) pursue an open-validation-normative export model based on open systems and international verification, while continental powers (China, Russia) adopt a closed-proof-sovereign control model emphasizing autonomous operation and data control. This dual structure reveals a paradoxical order of “physical decentralization and digital concentration.” Ultimately, SMR-AI convergence links energy, technology, and data into a composite power system, transforming the maritime-continental divide into a competition of technological regimes and accelerating the reconfiguration of global energy governance and normative rivalries.

Key Words : Small Modular Reactor(SMR), Artificial Intelligence(AI), Energy Geopolitics, Technological Geopolitics, Maritime Powers, Continental Powers.

• 논문투고일 : 2025년 10월 31일 / 논문심사완료일 : 2025년 11월 13일 / 게재확정일 : 2025년 11월 13일

