

Review on Nuclear Energy
Strategy and Policy

제2권 제1호 2024년 6월

원자력 전략·정책연구

ISSN 2983-1547

[연구논문]

국민참여 원자력안전종합계획 수립 성과와 시사점 | 김혜정

SMR 업계의 국내외 동향과 정책 제언 | 박석빈

비핵화 이행을 위한 우라늄 농축시설 검증절차 및 불능화 방안 제언 |
윤이석·함형필·우승민

지구적 신지정학 시대에 대비한 한국의 대전략 | 전봉근



서울대학교 원자력미래기술정책연구소
SNU Nuclear Research Institute for Future Technology and Policy

Review on Nuclear Energy
Strategy and Policy

제2권 제1호 2024년 6월

원자력 전략·정책연구

차례

[연구논문]

국민참여 원자력안전종합계획 수립 성과와 시사점 김혜정	1
SMR 업계의 국내외 동향과 정책 제언 박석빈	25
비핵화 이행을 위한 우라늄 농축시설 검증절차 및 불능화 방안 제언 윤이석·함형필·우승민	57
지구적 신지정학 시대에 대비한 한국의 대전략 전봉근	75

Contents

[Articles]

Achievements and Implications of Establishing a Comprehensive Nuclear Safety Plan with Public Participation Hyejeong Kim	1
Global Trends and Policy Suggestions in the SMR Industry Seokbin Park	25
Proposed Procedures for Verifying and Disabling Uranium Enrichment Facilities for Denuclearization Yiseock Yoon, Hyeongpil Ham, and Seungmin Woo	57
Korea's Grand Strategy in an Era of Global Neo-geopolitics Bonggeun Jeon	75

국민참여 원자력안전종합계획 수립 성과와 시사점

김혜정*

원자력안전분야는 전문적이고 위험에 대한 규제기관과 대중의 인식 차이가 커서 일반대중의 진입장벽이 높고 논쟁도 첨예하다. 후쿠시마 사고 이후 규제기관 설치 10년이 지났지만 원자력안전 문제가 전문성 논쟁과 정쟁적으로 흐르며 규제기관 독립성이 제대로 확보되지 못하고 있다. 한국은 26기 원전을 가동 중인 세계 6위의 원전 국가이지만 IAEA에서 제시하는 규제 독립성과 규제과정의 대중참여 제도화는 형식적 수준에 머물고 있다. IAEA Safety Standards는 안전문제에 대한 대중의 정당한 관심과 알 권리를 인정하고 규제기관과 대중의 투명한 소통 협력을 강조한다. 미국 NRC와 프랑스 ASN은 규제과정 전반에 걸쳐 대중과 이해관계자의 참여를 제도화하고 대중이 이해하기 쉬운 문서 작성과 투명한 정보공개를 원칙으로 삼고 있다. 2020년 원자력안전위원회는 안전규제의 투명성과 소통강화, 국민 신뢰도 제고를 위해 그동안 정부 주도로 만들어왔던 원자력안전종합계획을 국민과 함께 만드는 방식으로 전환하였다. 일반국민이 원자력안전종합계획의 비전과 정책방향을 제시하고 다분야 전문가와 이해관계자들이 전략과제를 제시한 국민참여 방식의 원자력안전종합계획 수립은 원자력안전규제 역사상 처음으로 시도되어 참여 대중의 지지와 신뢰를 얻은 사례이다. 이 글에서는 국민참여 제3차 원자력안전종합계획 수립 과정과 성과를 살펴보고 향후 안전규제 정책방향의 시사점을 제시하고자 한다.

주제어 원자력안전, 국민참여, 불확실성, 위험 커뮤니케이션, 안전규제

투고일: 2024. 6. 2. 수정일: 2024. 6. 17. 게재확정일: 2024. 6. 19.

* 지속가능발전연구원 공동대표, 전 한국원자력안전재단 이사장(ecokim63@gmail.com)

I. 서론

안전 관점에서 원자력발전이 일반 산업시설과 다른 점은 에너지 생산 과정에서 방사성 물질이 발생한다는 것과 원자로 정지 이후에도 핵연료에서 붕괴열(Decay Heat)이 장기간 발생하는 것이다(한국원자력안전재단, 2021). 독일이 후쿠시마 원전 사고 이후 원전 폐쇄 정책을 결정하게 된 것은 ‘안전한 에너지 공급을 위한 윤리위원회(Ethics Commission for a Safe Energy Suppl, 2011)’가 제기한 “원자력 기술이 제거하지 못하는 잔여위험¹의 학습 불확실성” 때문이다(최영성 외, 2020; 김혜정, 2023). 최병선(1995)은 일반 대중이 원자력위험에 대해 갖는 부정적 인식 특성의 근본적 원인은 원자력이 지니는 높은 불확실성에 기인한다고 설명한다. 미국 원자력규제위원회(U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC)는 ‘NRC 위험 커뮤니케이션 지침’을 통해 ‘위험’에 대해 규제기관과 대중과의 인식 차이를 인정하고 위험 소통을 해야한다고 명시하고 위험에 대한 대중의 의사결정권을 인정한다. 원자력 위험 평가에 있어서도 고유의 ‘불확실성에 대해 솔직’해야 하고, 위험성 평가는 정확한 과학이 아니기에 가능한 현실적이어야 하지만 불확실성을 상쇄하고 대중에게 안전 여부를 제공하기 위해 위험을 높이 평가하는 것이 NRC 위험 커뮤니케이션 정책이라고 밝히고 있다(U.S. NRC, 2004; 송하중 외, 2012).

IAEA(International Atomic Energy Agency, IAEA) Safety Standards²는 일반 대중들이 원자력기술의 안전한 활용에 관해 신뢰를 갖게 되는 경우는 오직 규제 과정들과 의사결정이 공개적으로 이루어질 때 뿐이며, 규제기관 책임 중의 하나는 대중에게 정보를 제공하는 것이라고 제시한다(송하중 외, 2012). IAEA는 Safety Standards Series 전반에서 규제기관이 일반국민, 이해관계자와 소통과 협의에 나설 것을 강조한다. 대중은 규제기관의 가장 중요한 고객 중 하나로 대중의 안전문제에 대한 정당한 관심과 ‘알 권리’가 인정되어야 하고, 규제 과정은 투명하고 적절한 조치를 제공해야 한다(IAEA, 2002). 대중을 포함한 이해당사자가 국내법 및 국제적 의무에 따라 중요한 규제결정을 내리는 과정

1 잔여위험은 위험통제 혹은 위험관리를 통해 위험을 줄인 후에도 남아 있게 되는 위험을 의미한다. 교통이나 건축물 등의 통상적 잔여위험은 현실화된 위험으로부터 교훈을 통해 향후 사전조치를 할 수 있지만 원전에서의 심각한 사고는, 후쿠시마 사고에서 보듯이 파국적이고 미래에 부담을 주는 등의 특성으로 점진적 안전성 향상이라는 개념을 합리적으로 제시하지 못한다고 보았다(최영성 외, 2020).

2 IAEA Safety Standards에서는 규제독립성과 관련된 항목을 정치적·입법적·재정적·역량적·공공정보·국제적 측면으로 나뉘어 그 의미를 상세하게 설명하고 있다(송하중 외, 2012).

에 협의할 기회를 가져야 하고 협의 결과는 규제기관이 투명한 방식으로 고려해야 한다 (IAEA, 2016).

NRC는 대중 참여를 제도화한 연방법과 NRC 규정과 지침, 조직 체계를 통해 대중과 이해관계자, 전문가 등이 참여하는 제도를 운용하고 있다. 규정 제·개정, 신규원전 건설·운영 인허가, 최종 안전성분석보고서 검토 등 단계별 의사결정 체계에서 국민, 이해관계자 등의 의견 수렴을 위한 중층적이고 다양한 제도를 운용한다(김호철, 2019). 또한 정보자유법(The Freedom of Information Act) 등 여러 법률³에서 NRC 규제활동 전반에 대한 정보공개로 하도록 하고 있으며, 특히 ‘알기 쉬운 문서 작성에 관한 법률(Plain Writing Act)’에 따라 NRC 직원들이 원자력의 난해한 기술적 용어를 알기 쉽게 작성하고 설명하도록 하고 있다(U.S. NRC, 2024).

프랑스는 원자력안전 관련 법제를 환경법전에 포함시켜 원자력 사용에 있어 환경법상의 일반원칙인 사전예방의 원칙, 사전배려의 원칙 준수를 강제하는가 하면 원자력 이용의 민주적 정당성 확보와 투명성 보장을 위해 지역단위에서 국가단위까지 원자력에 대한 국민의 정보권을 충분히 보장하고 있다. 지역단위에서는 ‘지역정보위원회(Commission Locale d'Information, CLI)’가 원전건설, 운영, 해체 등에 대해 상시로 모든 정보 확보와 감시를 할 수 있다. 공론화기구인 ‘국가공공토론위원회’가 국민들의 의견 개진을 보장하여 절차적 투명성을 확보하고, ‘원자력안전의 투명성과 정보를 위한 고등위원회’는 ‘지역정보위원회’의 논의와 정보를 국가 차원에서 다시 취합하고 검토한다(김지영, 2013; 김혜정, 2023).

우리나라는 후쿠시마 원전 사고 이후 처음으로 원자력안전규제기관이 독립되었다. 2011년 6월 원자력안전위원회 설치법과 원자력안전법이 제정되면서 그해 10월 대통령 직속 기구로 원자력안전위원회(이하 원안위)가 설치되었다가 2014년 국무총리 산하로 격하되어 현재에 이르고 있다. 원안위는 고리1호기 정전 사고 은폐, 원전 부품 비리, 경주 지진, 라돈 침대 사태, 한빛1호기 수동정지 사건 등을 거치며 원자력 안전규제에 관한 정보공개와 소통을 확대하는 방향으로 제도적 변화를 추진해왔다.

2020년 원안위는 원자력 안전규제의 투명성과 소통강화를 통한 국민 신뢰 제고를

3 정보자유법(The Freedom of Information Act: NRC 규제활동 기록에 대한 공개), 프라이버시법(The Privacy Act: 개인정보 관련 NRC 정보공개), 선샤인법(The Government in Sunshine Act: 위원회 회의 정보공개) 등 법률적 근거를 통해 규제행정에 관한 정보공개와 소통을 의무화 하고 있다.

위해 ‘제3차 원자력안전종합계획’(2022~2026)을 국민참여 방식으로 추진하기로 하였다. 일반국민과 이해관계자들로 구성된 국민참여단이 원자력안전종합계획의 비전과 정책 방향, 전략과제를 제안하고 원안위는 이를 구체화하는 세부계획을 수립하는 체계로 진행되었다(이경용, 2021). 이 글에서는 우리나라 규제기관이 원자력안전정책 수립에서 최초로 시도한 국민참여형 제3차 원자력안전종합계획의 수립 과정과 평가를 통해 향후 원자력안전 정책방향의 시사점을 얻고자 한다.

II. 원자력안전종합계획과 국민참여

1. 원자력안전종합계획 수립과정 비교

원안위는 원자력·방사선 안전관리와 규제를 총괄하며 원자력안전종합계획을 수립한다. 원자력안전종합계획은 원자력·방사선 안전 전반을 아우르는 국가 최상위 법정계획이다. 원안위 설치 이전에도 국내 원자력 안전 확보를 위한 국가 차원의 종합계획의 필요성이 제기되어 왔지만 원자력진흥종합계획에 시행과제 중심으로 포함되어 원자력안전종합계획으로서의 기능이 제대로 수행될 수 없었다(한국원자력안전기술원, 2010). 원안위 설치와 함께 제정된 원자력안전법 제3조에 수립 규정이 마련되면서 원자력안전종합계획(이하 종합계획)의 법적 위상을 가지게 되었다.

제1차 종합계획(2012~2016)과 제2차 종합계획(2017~2021)은 전문기관/관련학회와 행정부서 주도로 계획을 수립한 다음 공청회에서 한두 차례 의견수렴을 거쳐 수립되었다. 제1차 종합계획은 후쿠시마 원전 사고(2011.3), IAEA 통합규제서비스(Integrated Regulatory Review Service, IRRS) 수검결과(2011.7), 원안위 설치(2011.10) 등의 변화된 정책환경을 반영하여 원안위 설치 이전에 마련된 중장기 마스터플랜인 ‘종합계획(2010~2014)’을 원자력안전법에서 규정한 국가 최상위 법정계획의 종합계획으로 수정·보완하는 방식이었다. 기존 종합계획 용역기관인 한국원자력안전기술원(이하 KINS)은 원안위, 한국원자력통제기술원(이하 KINAC) 등 관계기관과 함께 ‘종합계획 수립 TFT(Task Force Team)’를 구성하여 추진위원회⁴(위원장 원안위 부위원장)와 함께 비전 및 목표, 추진전략 등을 수정·보완하였다. 한차례 공청회를 거친 종합계획은 2012년 10월 원안위 제8차 회의에서 의결되었다(한국원자력안전기술원, 2013). 제1차 종합계획의 성격은 교육과학기술부와 원

[표 1] 제1~3차 원자력종합계획 수립과정 비교

	제1차(2012~2016)	제2차(2017~2021)	제3차(2022~2026)
부처	원자력안전위원회	원자력안전위원회	원자력안전위원회
수립 기간	2011.7.7~2012.12	2016.4.12~2016.12.8	2020.2.24~2021.12.17
수립 체계	원안위 설치 이전 수립한 1차 종합계획(2010.3) ⁵ 참조하여 수정·보완 ↓ TFT(원안위, KINS, KINAC 등)검토 ↓ 추진위 검토 (3회 회의) ↓ 공청회(1회)통해 이해당사자 의견수렴	대한방사선방어학회(연구용역기관)가 초안 구성 ↓ 원자력안전 관련 전문기관 및 사업자 등 이해당사자 의견수집 ↓ TFT(원안위, 전문기관, 사업자 등)와 정책방향 협의 ↓ 공청회(2회) ↓ 유관부처 협의(원안위 주관) ↓ 제2차원자력안전종합계획(안)	일반국민이 국민참여단을 통해 제안서 작성 ↓ 제안서 토대로 전문가 워킹그룹이 초안 작성 ↓ 이해당사자 의견 수렴 진행
정책 수립 참여	- TFT: 원안위, 전문기관(KINS, KINAC) 등 관계기관 참여 - 추진위원회: 원안위 부위원장, 외부 전문가(조항희, 김무환, 성풍현, 백원필, 이재기, 전봉근, 허두영)	- TFT: 원안위, 전문기관(KINS, KINAC), 사업자(한수원) 등	- 국민참여단(국민계획단, 전략기획단) • 국민계획단(일반국민): 종합계획 비전 및 정책방향 수립 • 전략기획단(다분야 전문가 및 이해관계자): 국민계획단이 수립한 비전 및 정책방향을 토대로 전략과제 수립 - 총괄조정단: 국민참여단이 수립한 비전과 정책방향, 전략과제를 토대로 세부계획 수립
이해 당사자 및 국민 의견 수렴	- 공청회 ⁶ (1회): 원자력 관련 각분야 관계자 패널토론 및 청중 질의	- 대한방사선학회 홈페이지, 국민신문고, 원자력안전정보공개센터 포털 등 - 주요 원자력관련기관의 품질/안전 책임자와 면담 또는 교신 통해 현안 파악 - 공청회(2회) ⁷ : 각 분야 전문가 패널 토론 및 청중 질의	- 국민참여단 구성 및 운영을 위한 다분야 전문가 참여하는 국민참여위원회 구성 및 활동 - 국민계획단 속의 워크숍(2차) 진행 - 전략기획단 분과 회의 및 총괄 회의(4차) - 국민참여단의 국민제안서 전달(제3차종합계획 추진위) - 제3차 원자력안전종합계획 국민참여단 보고회 등 - 관계부처 온라인의견수렴

출처: 한국원자력안전재단(2023), 저자 재구성

자력안전위원회가 함께 수립한 계획이라고 할 수 있다. 2차 종합계획 역시 1차와 유사한 방식으로 용역기관(대한방사선방어학회)이 초안을 구성하여 원안위와 전문기관, 사업자로 구성된 TF(Task Force)와 정책방향을 협의하고 2차례 공청회를 거쳐 종합계획을 수립하는 체계로 진행되었다. 2차 종합계획은 2016년 12월 제62회 원안위 회의에서 의결되었다.

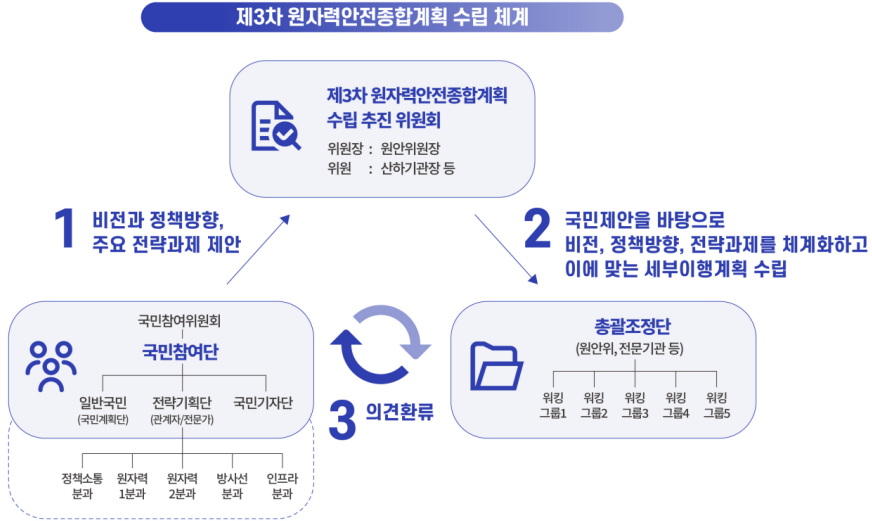
2. 국민참여 원자력안전종합계획

가. 배경과 목적

후쿠시마 원전 사고 이후 원자력안전에 관한 일반 국민의 관심은 원자력발전의 안전성 뿐만 아니라 연구용원자로, 사용후핵연료, 라돈, 후쿠시마 방사성 오염수 등 생활 속 방사선에 이르기까지 원자력·방사선 안전과 관련한 국민의 알 권리와 시민참여 요구가 높아졌다. 이러한 흐름에 따라 원안위는 투명성과 소통을 강화하고 국민신뢰를 제고하기 위해 제3차 종합계획을 국민참여 방식으로 추진하기로 하였다.

-
- 4 추진위원회 구성: 위원장(원안위 부위원장), 조황희(과학기술정책연구원 미래과학기술전략센터장), 김무환(포항공대 기계공학과 교수), 성봉현(한국과학기술원 원자력 및 양자공학과 교수), 백원필(한국원자력연구원 안전연구본부장), 이재기(한양대학교 원자력공학과 교수), 전봉근(외교안보연구원 비확산해안보센터장), 허두영(동아시아연구소 이사)(한국원자력안전기술원, 2013).
 - 5 원안위 설치 이전 교육과학기술부가 원자력안전종합계획(2010~2014) 수립(2010.3)한 이후 후쿠시마 원전 사고(2011.3), IAEA 통합규제서비스(IRRS) 수검 결과(2011.7), 원안위 신설(2011.10) 등 정책 환경의 중요한 변화가 발생하였다. 이러한 상황을 반영하기 위해 원안위와 KINS는 합동 태스크포스팀 구성·운영을 통해 기존 종합계획 내용을 수정·보완하였다. 이 과정에서 제4차 원자력진흥종합계획(2012~2016)과 제4차 원자력연구개발 5개년계획(2012~2016)과의 정합성을 고려하여 종합계획기간을 동일하게 2012~2016년으로 조정하여, 국가 최상위 법정계획으로서 제1차 원자력안전종합계획('12~'16)을 수립(2012.10.29)하였다(한국원자력안전기술원, 2013).
 - 6 공청회 프로그램 및 패널 참석자: 축사: 유국희(원안위 안전정책국장), 종합계획(안) 주요내용 발표(장현섭, KINS 연구책임자), 패널토론: 좌장 김경민(한양대 교수), 엄재식(원안위 안전정책국장), 오성현(KINS 원자력안전본부장), 정범진(한국연구재단 원자력단장), 이종진(한국원자력산업회의 상근부회장), 허두영(동아시아연구소 전무), 박진희(에너지기후정책연구소 소장), 박지영(아산정책연구원 연구위원)(한국원자력안전기술원, 2013).
 - 7 공청회(1차) 패널토론자: 권기현(좌장, 성균관대 교수), 성계용(KINS 부원장), 유호식(KINAC 본부장), 백원필(한국원자력연구원 부원장), 진영후(한국원자력의학원 방사선비상진료센터장), 김범년(한수원 부사장), 안현실(한국경제신문 논설위원), 이상훈(에너지시민연대 정책위원장), 유국희(원안위 안전정책국장). 공청회(2차): 권기현(좌장), 유국희(원안위), 함철훈(한양대), 김무환(포항공대), 이정훈(동아일보 편집위원), 홍혜란(에너지시민연대), 김동일(이런(주)기술교문)(대한방사선방어학회, 2016).

[그림 1] 제3차 원자력안전종합계획 수립 체계



출처: 원자력안전위원회, 한국원자력안전재단(2022)

1, 2차 종합계획은 원자력·방사선 안전관리 전반을 포괄하는 국민안전과 밀접한 핵심 정책임에도 불구하고 정작 일반 국민의 의견과 이해관계자와의 소통과 참여가 제대로 이루어지지 않았다. 이에 2020년 제3차 종합계획 수립에 앞서 원안위는 원자력안전규제정보회의에서 국민을 대표하는 국민참여단이 비전·정책방향·전략과제를 제시하는 방식의 국민참여형 제3차 종합계획 수립계획을 밝혔다(원자력안전위원회, 2020).

나. 추진체계 및 경과

원안위는 국민참여단 사무국인 한국원자력안전재단(이하 안전재단)과 함께 제3차 종합계획 수립에 앞서 전문가 자문 및 사례 조사, 워크숍 등 20여 차례의 의견수렴을 거쳐 국민참여형 종합계획 수립 기틀을 마련하였다. 국민참여단 기획단계부터 공공자문형⁸ 구조로 설계하여, 국민 의견을 적극적으로 수렴하기 위한 절차와 변화를 추진하였다(원자력

8 의제설정단계부터 다양한 그룹의 국민이 정보를 공유하고 공동의 대안을 모색하는 것을 말한다.

[표 2] 원자력안전 국민참여 추진체계

기획 (2020.2~9)	국민참여단 1단계 운영 (2020.9~12)	국민참여단 2단계 운영 (2021.1~6)	소통 및 환류 (2021.6~10)
<ul style="list-style-type: none"> - 내·외부전문가 회의 - 이해관계자 의견수렴 - 일반국민 인식도 조사 	<ul style="list-style-type: none"> - 참여단 모집·구성 - 숙의프로그램 운영 <ul style="list-style-type: none"> • 발대식 • 워크숍 • 자가 숙의 	<ul style="list-style-type: none"> - 전략기획단분과회의 <ul style="list-style-type: none"> • 정책.소통 • 원자력안전(1) • 원자력안전(2) • 방사선 안전 • 안전규제 인프라 	<ul style="list-style-type: none"> - 국민제안서 전달식 - 국민참여단 보고회
<ul style="list-style-type: none"> - 국민참여단 구성 및 운영방향 수립 - 숙의 프로그램 구성 	비전·정책방향제시	전략과제 제시	지속적 의견수렴

출처: 한국원자력안전재단(2023)

안전위원회, 한국원자력안전재단, 2022).

제3차 종합계획의 수립 체계는 국민참여단이 원자력안전의 비전과 정책방향, 주요 전략과제를 제안하면, 원안위와 산하기관 전문가로 구성되는 총괄조정단이 세부계획을 수립하면서 참여단과 의견을 환류하는 체계로 구성되었다. 2020년 10월 국민참여단이 출범하면서 2021년 6월까지 숙의 과정을 거쳐 비전, 정책방향, 전략과제를 담은 국민제안서가 종합계획 수립추진위원회에 전달되었다. 총괄조정단은 제안서를 토대로 세부 이행계획을 수립했으며, 제3차 종합계획 초안은 다시 참여단 보고회와 의견수렴 등의 절차를 거쳐 같은 해 12월 최종 결정되는 과정을 밟았다(원자력안전위원회, 2021).

다. 국민참여단 구성 및 역할

국민참여단의 구성 체계는 국민참여단 구성·운영을 위한 의사결정기구로 국민참여위원회(위원장 한국원자력안전재단 이사장)⁹를 두고, 국민참여단은 국민계획단, 전략기획단, 국민기자단으로 구성하였다. 공론화 및 관련분야 전문가 등으로 구성된 국민참여위원회

9 국민참여위원회 구성: 김혜정(위원장, 한국원자력안전재단 이사장), 김학린(단국대학교 경영대학원 교수), 민병주(울산과학기술원 기계항공 및 원자력공학부 교수), 안재훈(환경운동연합 에너지후국 국장), 이영희(가톨릭대학교 사회학과 교수), 정재학(경희대학교 원자력공학과 교수), 조공장(한국환경연구원 사회환경연구실 선임연구원), 최은순(법률사무소 디케 변호사), 한병섭((사)원자력안전방재연구조합 이사), 이경용(원자력안전위원회 안전정책과 과장), 하종태(한국원자력안전기술원 원자력안전본부 본부장), 이나영(한국원자력통제기술원 핵안보본부 본부장)(원자력안전국민참여위원회, 2021).

는 국민참여단의 운영에 필요한 제반 사항의 결정과 각 단계별 주요 산출물 검토와 주요사항을 논의하고, 국민참여단 구성·운영계획, 분과위원회 구성(안) 등 사전 의사결정과 각 숙의단계별 진행결과를 검토하였다. 국민계획단은 일반국민의 대표성과 공정성을 우선하여 표본설계를 통해 80명을 무작위 추출하고 적극적 의사가 있는 국민에게도 기회를 부여하고자 홈페이지 등 모집 공고를 통해 신청·선정한 일반국민 등 총 138명의 국민계획단을 선정¹⁰하였다. 국민계획단은 원자력관련 특정 입장에 편중되지 않는 2중 추출 방식과 원자력시설 인근 지역주민의 참여를 확대하기 위한 비례배분 방식¹¹이 활용되었다. 이렇게 구성된 국민계획단은 원자력안전종합계획의 비전과 정책방향을 제안하는 역할을 했다(원자력안전위원회, 한국원자력안전재단, 2022).

지역주민 및 관련단체, 다분야 전문가 등으로 구성된 전략기획단은 국민계획단이 제안한 비전과 정책방향을 바탕으로 전략과제를 제안했다. 전략기획단의 구성은 원전 주변지역 조직인 원자력안전협의회, 원자력학회, 기계공학회, 토목학회, 사회학회, 법조계, 원자력·방사선진흥기관, 시민단체 등 원자력·방사선 관련 분야 기관·단체 및 학회 등에 공식 요청을 통해 추천된 인사로 구성하였다. 국민계획단의 일반국민 10여 명이 전략기획단에도 참여하여 전략계획 수립에 함께 하였다. 국민기자단은 홈페이지 모집 공고를 통해 신청자를 받아 참여단 사무국(안전재단)에서 선정¹²하였는데, 모니터링 및 기록, SNS(Social Network Service)를 통한 홍보활동을 담당하였다. 한편 국민참여단 속의 지원을 위해 국민참여단 운영사무국 및 원안위와 산하기관 전문가로 구성된 정책기

10 국민계획단은 총 120명을 목표로 이 중 40명은 자발적 신청 및 심사를 통해 선정하고, 80명은 무작위 추출을 통해 선정하였다. 자발적 신청과 무작위 추출은 비율을 1:2로 설계하고, 표본설계는 일반국민을 권역(5개), 성(2개), 연령대(3개) 범주를 기준으로 30개 층을 구성한 후, 층별 주민등록인구 수를 기준(2020.8.31 주민등록인구 기준), 인구 비례방식으로 120명을 배분하였다. 자발적 신청자는 홈페이지 모집 공고를 통해 모집하고, 신청자의 지역/연령/성별과 신청서에 대한 평가를 통해 선정하되, 선정의 객관성과 공정성을 위해 선정위원회를 구성하였다. 신청서의 성실성과 적합성을 평가하되 대표성 확보를 우선적 선발기준으로 구성하였다. 무작위 추출을 통한 선발은 인구통계학적 대표성 및 원자력·방사선 관련 특정 입장에 편중되지 않도록 2중 추출 방식으로 진행하였다. 유·무선 RDD(Random Digit Dialing)를 활용한 전화번호를 이용, 면접원에 의한 전화면접조사(Computer Assisted Telephone Interviewing, CATI) 방식으로 인구특성 요인들과 숙의 프로그램 참석 의향 확인을 거쳐 1차 조사 참여자 중 참석 의향자를 대상으로 2차 조사를 통해 참여 의향 확인 후 최종 138명의 국민계획단이 확정되었다(원자력안전위원회, 한국원자력안전재단, 2022).

11 원자력시설 인근 지역주민의 참여를 확대하기 위해 영남 지역은 대구경북과 부산경남의 2유형으로 분리하고, 계급권 비례배분방식을 활용하였다(원자력안전위원회, 한국원자력안전재단, 2022).

12 이웃 팔로워 수, SNS 게시 건수 등 정량 평가(80점)와 자기소개서, 성실도 등 정성평가를 합산하고 지역 및 연령을 고려하여 선정하였다(원자력안전위원회, 한국원자력안전재단, 2022).

[표 3] 국민참여단 역할 및 구성

구분		역할	구성	인원 (명)
국민참여위원회		참여단 운영관련 제반 의사결정	위원장(한국원자력안전재단 이사장), 원안위, 원안위 산하기관, 공론화 전문가 등	12
국민 참여단	국민 계획단	숙의를 통한 비전/정책 방향 제시(1단계)	- 일반 국민: 무작위 추출+자발적 신청자 • 나이, 성별, 거주지 고려 공정성/대표성 확보 • 제곱근비례배분방식의 원전인근주민참여확대	138
	전략 기획단	숙의를 통한 전략과제 제안 (2단계)	- 지역주민 • 원전주변 7개 지역 원자력안전협의회 추천 대표 - 전문가 • 원자력/방사선:원자력/방사선/폐기물관련학회 • 사회과학:갈등/법률/행정·정책관련학회 • 이공학:기계/전기/건축·토목관련학회 등으로부터 복수추천 통해 활동분야/소속기관 중복 등을 종합적 고려하여 구성 - 시민단체: 시민사회단체연대회의가 지역 고려하여 추천한 인사 - 원자력방사선이용자: 원자력·방사선이용 및 진흥기관 추천 인사	50 + 10 ¹³
	국민 기자단	국민참여단 활동 모니터링, SNS 공유/확산	일반 국민(일반공고를 통한 자발적 신청자 중 선정)	30
정책기술 지원단	교육자료, 발제 등 전문 지식 관련 질의 답변	원안위, 원안위 산하기관 전문가	31	
사무국	참여단 운영총괄	산하기관(한국원자력안전재단)	5	
총계				266

출처: 한국원자력안전재단(2023), 저자 재구성

술지원단을 운영하였다(원자력안전위원회, 한국원자력안전재단, 2022).

위에서 살펴본 대로 국민참여단은 일반국민이 도출한 비전과 정책방향을 기반으로 전략기획단이 전략과제를 만드는 2단계 방식으로 진행되었다. 국민참여단 제안서는 국민참여위원회의 의결을 거쳐 원안위 ‘제3차 종합계획수립추진위원회’에 제안되었고, 원안위가 작성한 종합계획의 초안은 참여단의 의견수렴을 거쳐 세부 이행계획을 수립하는 과정을 밟았다. 국민참여단 운영기관인 안전재단은 종합계획 최종 수립 이후에도

13 국민계획단에서 활동한 일반국민이 분과별 2인씩 참여한 수

매년 국민참여단 모니터링단을 운영하며 종합계획 이행에 대한 국민의견 수렴을 지속하고 있다.

라. 속의 과정

원자력안전은 기술적 용어 등 난해한 부분이 많아 일반인의 진입장벽이 매우 높고, 원자력발전에 대해 찬반 의견도 첨예한 영역이다. 일반국민의 접근성을 높이고 원자력 찬반 입장을 넘어 안전 규제분야에 집중할 수 있도록 참여단 구성과 프로그램, 운영 방식을 공정하게 수립하여 참여자의 수용성을 높이는 것이 중요하다. 이에 국민참여단 운영 원칙으로 정책관련 지식을 지원하며 진입장벽을 완화하되 인식 방향을 유도하지 않고, 원자력안전 분야로 논의 대상과 방향성을 명확히 하였다. 1단계로 진행된 국민계획단 활동은 사전 학습 과정을 거쳐 발대식과 1박 2일 워크숍 등 두 차례에 걸쳐 진행되었다. 국민계획단 속의 토론은 발대식에서만 총 188건의 질의가 나오는 등 시중 열띤 질의와 토론을 통해 비전과 정책방향이 마련되었다.

2단계로 추진된 전략기획단은 분야별 전문가, 이해당사자, 지역주민으로 구성되었다. 전략기획단은 정책·소통분과, 원자력안전(1)분과, 원자력안전(2)분과, 방사선안전분과, 안전규제/인프라분과 등 총 5개 분과로 나뉘어 각각 3차례 토론을 진행하였다. 각

[표 4] 국민계획단 속의를 위한 발제 구성

구분	발제	발제자
발대식 (2020.10.31.)	원자력안전국민참여단 출범 배경과 역할	김혜정(한국원자력안전재단 이사장, 국민참여위원회 위원장)
	원자력안전위원회 소개	임종윤(원자력안전위원회 기획재정담당관)
	원자력 안전관리	이경용(원자력안전위원회 안전정책과장)
	방사선 안전관리	정희천(원자력안전위원회 방사선안전과 서기관)
	핵비확산과 핵안보	황윤조(원자력안전위원회 원자력통제과장)
워크숍 (2020.11.14.~11.15.)	원자력안전규제철학	이진호(한국원자력안전기술원 부원장)
	원자력이용·개발과 안전규제	정재학(경희대학교 원자력공학과 교수)
	국민이 생각하는 원자력안전	이영희(가톨릭대학교 사회학과 교수)
	제2차 원자력안전종합계획 개요 및 성과	이경용(원자력안전위원회 안전정책과장)

출처: 원자력안전국민참여위원회(2021)

[표 5] 전략기획단 단계별 논의 과정(2021.3.24.~5.14.)

1차 회의	2차회의	3차 회의	4차(총괄분과*)
<ul style="list-style-type: none"> • 공통발제 <ul style="list-style-type: none"> - 국민참여단 개요·경과 및 전략기획단 운영계획 • 분과별 발제 <ul style="list-style-type: none"> - 분과별 과제발제(정책기술지원단) - 국민참여단 제안 및 2차 종합계획 공유 • 분과별 초점질문(규제기관 역할 등) 토의 	<ul style="list-style-type: none"> • 추가자료 및 정보 공유 • 분과별 초점질문(규제기관이 해야 할 일)에 대한 개선 필요 사항과 해결 방안 논의 	<ul style="list-style-type: none"> • 분과별 논의결과를 전략과제로 구체화하여 과제별 주요내용 작성 	<ul style="list-style-type: none"> • 각 분과 대표 5인 으로 구성 • 분과별 제안 취지 및 제안내용 공유, 분과별 논의 중 타 분과 이관 내용 상호검토 • 국민계획단 도출 정책방향 및 주요 키워드와 전략과제를 토대로 정책방향 및 전략과제의 정합성 제고

* 정책방향 및 전략과제의 정합성 제고를 위해 국민참여위원회 위원장, 정책기술지원단 참여
출처: 원자력안전국민참여위원회(2021), 저자 재구성

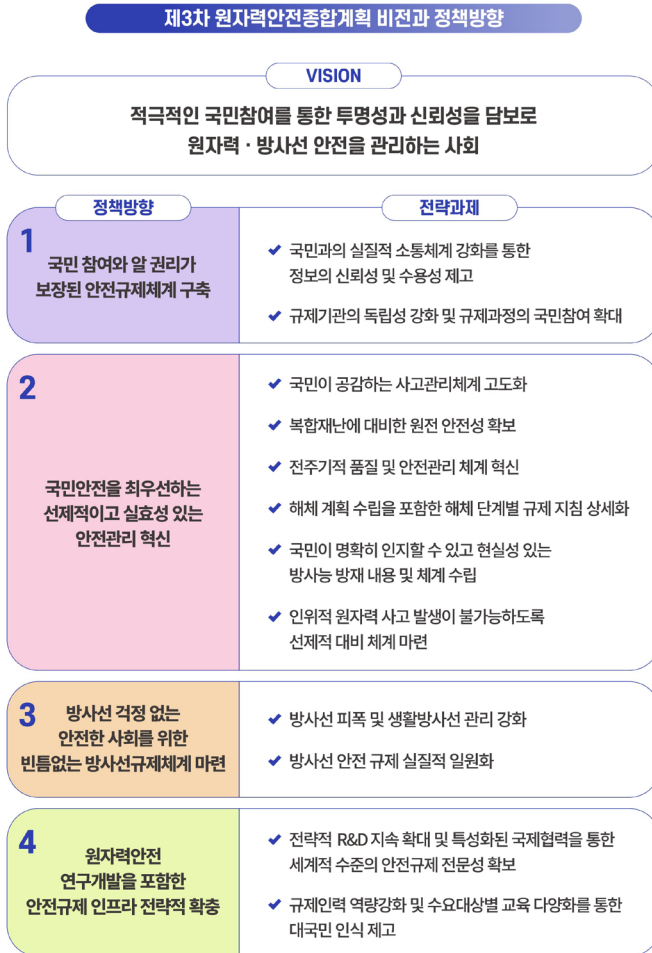
분과별 논의 이후 분과대표(분과 추천)와 국민참여위원회 위원장, 정책기술지원단이 참여하는 총괄분과 회의를 통해 각 분과 간 전략과제의 유기적 연계 및 국민계획단의 정책방향과 전략과제의 정합성을 제고하였다. 총괄분과회의에서 도출한 정책방향·전략과제는 다시 각 분과의 검토 과정을 거쳐 최종적으로 국민참여위원회에서 결정되는 과정을 밟았다(원자력안전위원회, 한국원자력안전재단, 2022).

한편, 원안위는 원안위와 산하기관 관련 전문가로 구성된 정책기술지원단 운영을 통해 국민계획단과 전략기획단의 정책 및 전략과제 수립 과정을 지원하였다. 정책기술지원단은 발대식, 자가숙의, 워크숍 숙의단계에 맞춰 학습·발제 기획 및 자료작성과 온오프라인 질의응답 등 일반국민의 숙의 학습 및 토론 지원 활동을 했다. 국민계획단의 비전·정책방향 도출 이후에는 이를 구체화하기 위한 전략기획단 구성·운영과 전문적 숙의 지원계획을 수립하고 전략기획단 분과회의 요구자료 지원 및 기술·행정 분야 질의 답변 등의 활동을 하였다(원자력안전위원회, 한국원자력안전재단, 2022).

마. 국민제안과 후속 모니터링 활동

국민참여위원회는 국민이 만든 비전·정책방향, 전략과제, 소감과 제안 등을 담은 국민제안서를 채택한 다음 ‘제3차 원자력안전종합계획수립추진위원장(원자력안전위원회 위원장)’에게 전달하였다. 총괄조정단은 7개 워킹그룹을 통해 국민제안서에 기반한 세부계획을 수립하였다. 이렇게 수립된 종합계획은 국민참여단 보고회를 거친 이후 원안위 의결(2021.12)을 통해 최종 확정되었다. 원안위는 매년 추진계획을 수립하고 실적을 점검하

[그림 2] 국민참여단 제안: 제3차 원자력안전종합계획 비전과 정책방향



출처: 원자력안전위원회, 한국원자력안전재단(2022)

고 있다. 국민참여단의 활동은 정책제안에 그치지 않고 종합계획의 이행 과정 모니터링¹⁴ 역할도 수행하고 있다. 국민참여단 운영기관인 안전재단은 종합계획 수립에 참여한 일

14 한국원자력안전재단은 국민참여단 중 지역, 성별, 연령, 활동분과에 무관하게 참여의사가 있는 희망자를 중심으로 국민모니터링단을 모집하고, 설문조사 및 의견수렴을 진행하였다. 2022년, 2023년 두 차례에 걸쳐 우수 모니터 시민을 시상하는 등 국민참여단 활동의 지속성을 이어나가고 있다.(한국원자력안전재단, 2024).

반국민 가운데 희망자를 중심으로 구성된 모니터링단을 구성하여 종합계획이 시행된 2022년부터 지금까지 4대 정책방향에 대한 이행 평가 및 정책 관련 아이디어 제안 등 쌍방향 모니터링 활동을 지속하고 있다(한국원자력안전재단, 2023; 2024).

3. 국민참여단 평가와 의미

우리나라 규제기관의 정보공개와 소통은 원자력·방사선 사건·사고를 거치며 변화되어 왔다. 고리1호기 정전사고를 비롯하여 원전부품 비리 사건 등으로 원안위가 정보공개와 지역 소통을 위해 원자력안전정보공개센터와 원자력안전협의회를 설치·운영해 왔다. 하지만 기술적 용어로 집결된 심사보고서 중심의 정보공개와 법적 근거가 없었던 안전협의회 운영은 일반국민과 지역주민의 알 권리 충족과 소통과는 괴리가 컸다.

원자력안전분야 최상위 법정계획인 종합계획을 수립하는 과정에서도 국민소통과 알 권리는 형식적 수준에 그쳤다. 1, 2차 종합계획의 경우 전문기관·학회가 정부로부터 용역을 발주받아 행정부처와 TF를 구성하여 초안을 작성하고 한두 차례 공청회를 거쳐 종합계획을 수립하였다. 1, 2차 종합계획 수립과정에서 원자력사업자를 포함한 유관기관의 의견 수렴 및 참여는 보장되었지만, 국민의견 수렴과정으로 진행된 공청회의 경우 원전주변지역 주민 및 비판적 환경단체 참여는 사실상 제외되었다. 그럼에도 불구하고, 1, 2차 종합계획은 비전과 정책방향에서 ‘국민신뢰’와 ‘국민안심’, ‘국민공감’, ‘투명하고 신뢰받는 규제행정’을 강조하였다. 원안위 발족이후 수립한 1, 2, 3차 종합계획의 기조는 모두 ‘국민신뢰’, ‘국민공감’, ‘투명하고 신뢰받는 규제정책’을 표방하고 있다. 하지만 이러한 정책기조가 종합계획 비전과 정책방향으로 포함된다고 하여 스스로 구현되는 것이 아니다. 이런 점에서 1, 2차 종합계획과 3차 종합계획의 가장 큰 차이는 공감과 신뢰를 얻어야 하는 대상인 국민과 함께 종합계획을 수립한 것이다. 원안위는 일반국민과 다양한 이해관계자들이 참여한 종합계획 수립으로 ‘국민공감’의 장을 마련하고, 원자력 안전규제에 대한 인식 향상을 통해 ‘규제행정의 투명성과 신뢰도’를 높이며, ‘국민신뢰’형성에 한발짝 다가서게 되었다.

사실 국민참여단 활동을 시작하기 전 원자력 안전 문제의 전문성 및 이슈 자체의 참여함 때문에 원안위와 관계기관의 우려가 많았던 것도 사실이다. 하지만, 종합계획 수립과 국민참여단 활동 종료 이후 국민참여 전 과정에 대한 국민참여단(국민계획단, 전략기획단, 국민기자단) 모두를 대상으로 한 설문조사¹⁵에서 일반 참여자의 경우 90.1%가 ‘전

반적으로 만족한다'고 응답했으며 '원자력안전 이슈에 대한 관심이 늘었다'(95.0%), '원자력안전 이슈에 대한 지식이 늘었다'(95.0%)고 답변하였다. 국민참여단에서 도출된 '제3차 원자력종합계획'과 정부에 대한 기대 부분에서는 '토의에서 도출한 의견이 잘 반영되었다'(83.2%), '구성과 내용에 만족한다'(85.1%), '내년 원자력안전 관리 수준 변화에 대한 기대'에 대해서도 87.1%가 '나아질 것'으로 응답했다. 참여단 운영 의견에서는 '분임간 의견교환'(85.1%), '전 과정 투명한 공유'(85.1%)가 잘 되었다고 평가하며, 82.2%가 '향후 원자력안전위원회 주최 활동 참여 의향'을 나타냈다. 특히 워크숍에 참석한 국민계획단 설문조사¹⁶에서는 96.7%가 '향후 국민참여단 참여 의향'을 나타냈으며, 40대 이상은 100% 참여 의사를 밝혔다(원자력안전위원회, 한국원자력안전재단, 2022). 정부의 우려와 달리 참여단 활동을 통해 일반 국민들의 원자력안전에 대한 인식 확대는 물론 규제기관의 정책 신뢰도가 높아졌다는 것이 확인되었다.

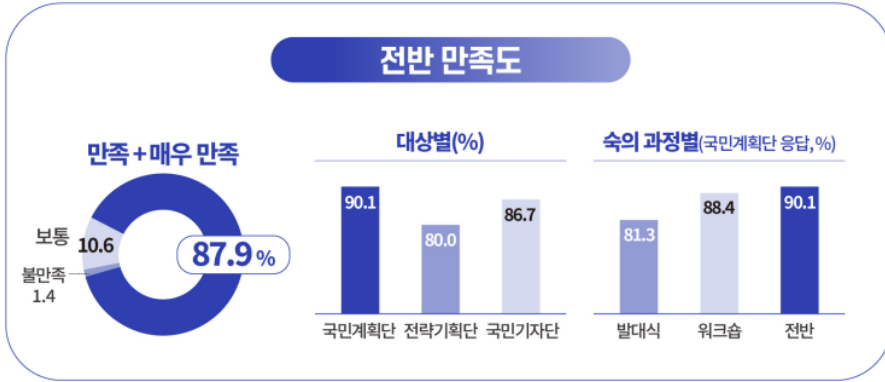
국민참여단의 특징인 2단계 전략기획단의 운영의 경우 원자력에 대한 상이한 입장과 갈등 관계로 관련 구성원들이 한 자리에 모여 논의하는 것 자체도 어려운 상황이었다. 전략기획단의 원활한 논의와 전략과제 합의 여부가 국민참여단 활동의 주요한 관건이었다. 이에 전략기획단¹⁷ 구성 과정에서 원자력·사회과학 등 관련 학회와 지역별 원

15 국민참여단 설문조사는 원자력안전 국민참여 전 과정에 대한 국민참여단 모두(국민계획단, 전략기획단, 국민기자단)의 만족도 파악 및 '제3차 원자력안전종합계획(안)'의 충분한 숙의성 평가를 통해 향후 사업 추진의 기초 데이터를 활용하기 위해 진행하였다. 조사 문항은 전반 만족도와 향후 참여의향, 국민참여단 숙의성, '제3차 원자력안전종합계획(안)'에 대한 의견, 정부에 대한 기대 등의 질문으로 구성되었다. 조사는 2021년 12월 23일부터 12월 31일까지 약 9일간 국민참여단 휴대전화를 이용한 모바일 조사방식으로 진행하여, 조사대상 국민참여단 214명(국민계획단 138명, 전략기획단 50명, 국민기자단 26명) 중 총 141명(국민계획단 101명, 전략기획단 25명, 국민기자단 15명)이 조사에 참여하였다(원자력안전위원회, 한국원자력안전재단, 2022).

16 국민참여단 사무국은 워크숍에 참여한 국민계획단 121명을 대상으로 설문조사를 진행하였다. 2020년 11월 15일 워크숍 마지막 세션에 워크숍 전반 만족도 및 사유, 상호작용성, 숙의자료 도움 정도, 토의 충실성, 숙의성 등으로 문항을 구성하여 워크숍의 숙의성과 국민참여단 만족도 등을 조사하였다(원자력안전위원회, 한국원자력안전재단, 2022).

17 전략기획단 참여자: 김동규(영광원자력안전협의회 간사), 김동산(한국원자력연구원 리스크신뢰도평가연구실 실장), 김서용(아주대학교 행정학과 교수), 김성중(한양대학교 원자력공학과 부교수), 김용국(영광핵발전소안전성확보를 위한 공동행동 집행위원장), 김용균(한양대학교 원자력공학과 교수), 김유창(동의대학교 산업경영학과 교수), 김일출(한울원자력안전협의회 부위원장), 김재동(월성원자력안전협의회 위원장), 김재민(전남대학교 토목공학과 교수), 김진욱(혜전대학교 사회복지과 부교수), 김희령(울산과학기술원 원자력공학과 부교수), 민은주(부산환경운동연합 사무처장), 박주호(새울원자력안전협의회 부위원장), 박진표(법무법인(유한)태평양 변호사), 박태현(강원대학교 법학전문대학원 교수), 박태현(고리원자력안전협의회 위원), 방민철(울산과학기술원 원자력공학과 교수), 신재환(새울원자력안전협의회 위원장), 염기수(한국방사선진흥협회 상근부회장), 오창환(전북대학교 지구환경과학과 교수), 용석복(탈핵울산시민공동행동 집행위원장), 유태영(대전원자력안전협의

[그림 3] 전반적 만족도



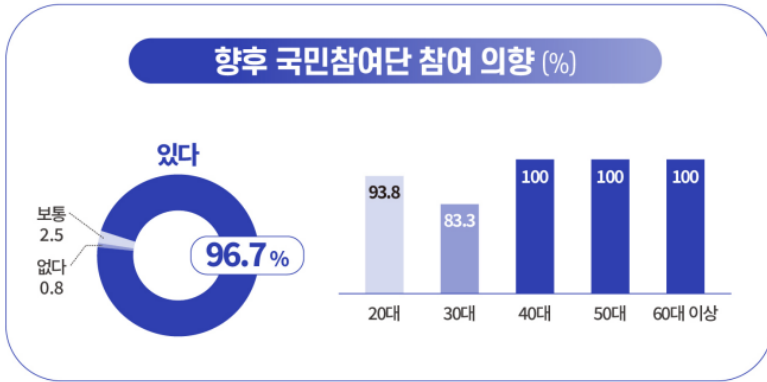
출처: 원자력안전위원회, 한국원자력안전재단(2022)

자력안전협의회, 원자력/방사선진흥기관, 시민사회단체연대회의 등의 추천 방식으로 중립성을 확보하고 지역별 배분, 원자력이용 찬반 단체의 형평성있는 반영 등으로 원자력 안전 관련 입장을 개진할 수 있는 이해관계자들을 두루 포함하였다. 평소 입장이 상이한 이해관계자에게서 전략기획단 구성의 형평성에 대한 문제 제기가 없어야 성공적인 출발을 할 수 있었다. 환경단체와 일부 지역 원자력안전협의회회의의 경우 그간의 규제행정과 소통방식에 대한 신뢰가 낮아 정부가 추진하는 국민참여단 활동에 대해 비판적이었다.

안전재단은 국민참여단 준비 기간 동안 각 지역 원자력안전협의회와 지역별 환경

회 부위원장, 윤성복(한국사회갈등해소센터 연구위원), 이경호(대전원자력안전협의회 위원), 이나영(고창원자력안전협의회 위원), 이두희(건국대학교 전기전자공학부 조교수), 이상홍(경주환경운동연합 사무국장), 이승모(지방자치단체개발원 원내교수), 이영경(에너지정의행동 사무국장), 이영일(한국원자력문화진흥원 원장), 이창기(대전대학교 행정학과 객원교수), 이채근(월성원자력안전협의회 간사), 임성희(녹색연합 에너지환경팀장), 장경배(고려사이버대학교 기계제어공학과 교수), 장유덕(한울원자력안전협의회 위원장), 정용훈(한국과학기술원 원자력 및 양자공학과 교수), 정윤선(한양대학교 원자력공학과 부교수), 정재호(가천대학교 기계공학과 조교수), 조용준(대전환경운동연합 국장), 조원호(고리원자력안전협의회 위원장), 주성관(고려대학교 전기전자공학부 교수), 진영우(한국원자력의학원 방사선비상진료센터 특임의사), 채종진(영광원자력안전협의회 부위원장), 최병정(경기대학교 건축공학과 교수), 최성열(한국과학기술원 원자력 및 양자공학과 교수), 표주원(고창원자력안전협의회 위원장), 한상진(울산대학교 사회복지학과 교수), 홍덕화(충북대학교 사회학과 교수), 황승식(서울대 보건대학원 보건학과 교수)(원자력안전위원회, 한국원자력안전재단, 2022).

[그림 4] 향후 일반국민의 국민참여단 참여 의향(%)



출처: 원자력안전위원회, 한국원자력안전재단(2022)

단체 순회 방문·면담을 통해 국민참여 종합계획 수립 취지 소개와 실질적 국민참여 방식 운영을 약속하며 참여를 제안하였다. 원자력/방사선산업 관련 기관 및 관련 학회 등에도 직접 방문 및 수차례 제안을 통해 추천과 참여를 요청하였다. 원자력규제행정에 비판적인 환경단체와 이해관계자 지역주민의 참여와 원자력전문가 및 이용기관 등 원자력 안전 관련 다양한 주체가 참여할 때만이 국민참여 종합계획 수립 취지가 구현될 수 있었기 때문이다.

이러한 과정을 거쳐 구성된 전략기획단은 일부 분과 논의에서 원자력 찬반 입장의 구성원들 간 치열한 격론이 있기도 하였지만 수차례 논의를 거치며 합의된 전략과제를 도출할 수 있었다. 원자력안전 분야에서 원자력이용자, 관련 전문가, 시민사회, 지역주민 등 첨예한 입장의 이해관계자들이 토론을 통해 실질적 전략과제 합의를 도출한 것은 처음 있는 일로 큰 성과라 할 수 있다. 정부 규제행정에 대한 비판적 태도를 견지해왔던 시민단체와 지역대표 등의 참여는 원자력이용 찬반을 넘어 원자력 안전분야 사회적 합의의 가능성을 보여준 사례라 할 것이다. 또한, 기획단계에서는 생각하지 못했지만 분과별 전략과제의 유기적 연계 및 정책방향과의 정합성을 갖추기 위해 분과별 대표(분과에서 자발적 추천)가 참여한 총괄분과 운영은 전략기획단의 진일보한 역할 수행으로 평가된다.

원자력안전에 대한 전문성이 있거나 상대적 관심도가 높은 전략기획단 구성원들

도 국민참여단 설문조사에서 ‘전반적으로 만족’(80.0%)하며, ‘향후 원자력안전위원회 주 최 활동 참여 의향’(72%)을 보여주었다. 종합계획과 운영과정 등에 대해서도 ‘토의에서 도출한 의견이 잘 반영되었다’(84%), ‘구성과 내용에 만족한다’(80.0%), ‘분임간 의견교환이 잘 이루어졌다’(88.0%), ‘전 과정이 투명하게 공유되었다’(88.0%)며 ‘국민참여단 참여로 원자력안전 이슈에 관심이 늘었다’(88.0%)고 응답하는 등 국민참여단 활동의 성공적 평가 근거를 제공하였다(원자력안전위원회, 한국원자력안전재단, 2022).

국민참여단 향후 참여 의향 등에서 보여주듯이 국민들은 3차 종합계획 정책방향에서 “국민참여와 알 권리가 보장된 원자력안전체계 구축”을 명확히 제시하였다. 1, 2차 종합계획에는 선언적으로 제시되었던 국민과의 소통강화 부분이 ‘국민참여’와 ‘알 권리’로 구체화된 것이다. 정책방향에 따른 2개의 전략과제도 “국민과의 실질적 소통체계 강화를 통한 정보의 신뢰성 및 수용성 제고”와 “규제기관의 독립성 강화 및 규제과정의 국민참여 확대”로 구성되었다. 전략기획단 정책·소통분과는 전략과제 수행을 위한 구체적인 과제로 ‘지역소통기구 역할 명확화 및 기능강화와 참여범위 확대, 정보공개·비공개 범위 재평가 및 결정체계 강화, 정보생산·검수체계 마련, 참여기회 확대를 위한 국민참여 플랫폼 구축’과 ‘규제기관의 보고의무 강화 및 보고채널 다양화, 지역주민 권환과 참여 다층화를 통한 분권화, 규제기관 위상강화 및 상임위원회 실시, 실질적 소통창구 구축, 새로운 규제 대상 및 영역 확대’ 등을 제시하며 다층적 소통체계와 국민참여의 제도화를 촉구하였다(원자력안전국민참여위원회, 2021).

원안위와 안전재단은 국민참여단을 운영하면서 처음부터 끝까지 국민참여단 구성과 운영에 어떠한 의도도 배제하고 공정하고 투명한 운영을 원칙으로 활동하였다. 이를 통해 원자력안전에 대한 국민의 관심을 높이는 계기를 마련하였고, 갈등관계의 첨예한 이해관계자들의 합의를 이루어내는 결과를 만들어냈다. 국민참여단 설문조사 결과에서 보듯이 전문적이고 첨예한 쟁점이 있는 원자력안전 의제라 하더라도 정부가 투명하게 정보를 공개하고 일반대중과 이해관계자 의견을 충분히 수렴하는 정책수립 과정을 거치면 안전 이슈의 이해와 규제기관 신뢰도를 높일 수 있음을 확인할 수 있었다.

III. 결론 및 시사점

일반국민과 이해관계자들이 국민참여단 활동을 통해 전문적이고 논쟁도 첨예한 원자력

안전분야 종합계획의 합의를 도출해냈다. 정부는 국민참여 종합계획 수립을 통해 원자력안전에 대한 이해와 규제기관 신뢰를 높이는 계기를 마련하였다. 원자력이용 찬반과 관련없이 확보되어야 할 원자력안전에 있어 상이한 입장의 다양한 이해관계자들이 국민이 제시한 비전과 정책방향을 토대로 전략과제를 도출한 것은 원자력안전규제분야에서 이루어낸 값진 성과이다. 정부가 국민참여단 기획 및 논의 과정에 개입하지 않고 공론화 및 각분야 전문가로 구성된 국민참여위원회의 결정과 국민참여단 논의 결과를 존중한다는 원칙을 지켜왔기 때문에 가능한 결과였다. 정부와 산하기관이 국민참여단 활동 전반의 충분한 숙의와 논의의 지원을 위해 자료 제공을 포함 전반적인 지원 역할에 집중한 효과도 있다. 특히 종합계획의 수립이후에도 모니터링단을 통해 종합계획의 정책 이행 평가와 정책 제안 활동을 이어나가는 것은 국민참여단 활동의 지속성을 이어가는데 큰 의미가 있다.

NRC는 ‘알기 쉬운 문서 작성에 관한 법률’에 따라 직원 교육훈련 등을 통해 일반국민이 이해할 수 있는 문서를 작성하고, 프랑스 지역정보위원회(CLI)도 지역주민들에게 난해한 원자력 이슈를 쉽게 전달하도록 지나친 전문화를 지양하는 원칙을 지키고 있다. 국민참여 종합계획 수립을 통해 정부의 정책의지에 따라 원자력안전과 같은 어려운 이슈도 국민의 이해를 높일 수 있다는 것이 확인되었다. 원자력 이슈를 전문가의 영역으로만 국한하고 일반 국민을 도외시하면 원자력에 대한 위험 인식과 불확실성은 가속화되어 단순한 고장 사건과 대책도 불안과 불신을 불러오게 되는 원인이 된다.

대한민국은 세계 6대 원자력국가로 원자력밀집도가 세계 최고이다. 좁은 국토에 26기 원전이 가동 중인 나라에서 원자력안전의 중요성은 아무리 강조해도 지나침이 없다. NRC가 ‘대중을 적법한 동반자로 인정하고 참여시키는 것이 효과적인 위험 커뮤니케이션’이라고 강조하듯이 처음으로 대중의 지지를 받은 국민참여 안전정책 수립이 일회성에 그쳐서는 안 될 것이다. 규제기관이 국민의 원자력안전에 대한 알 권리를 존중하고 투명한 정보공개와 함께 규제과정에 대중과 이해관계자들의 소통과 참여를 제도화하는 것이 필요하다.

진정한 소통은 정해진 결론에 대해 국민을 설득하는 과정이 아닌 투명한 정보공유를 바탕으로 상호 신뢰하에 합리적인 결정에 도달하는 과정이다. 국민참여형 원자력안전종합계획 수립은 이러한 원칙 아래서 수행된 소중한 한 걸음이었으며 이는 정부정책과 관계없이 앞으로도 지속되어야 할 중요한 안전규제 정책의 방향이라고 할 것이다.

국민참여 안전정책 수립이 법적 근거나 제도적 장치가 부재하여 정부 정책에 따라

좌지우지된다면 안전규제에 대한 불안과 불신이 커져갈 것이다. 원자력안전에 대한 대중의 알 권리 인정과 규제과정에서의 일반대중과 이해관계자의 참여를 제도화하기 위한 법적 근거 마련이 필요하다.

참고문헌

- 김지영, “프랑스 원자력안전법제의 현황과 과제: 우리나라 원자력안전법제로의 시사점 도출을 중심으로,” 『환경법연구』, 35(3), pp.169-208, 2013.
- 김호철, “국민 눈높이에 맞는 원자력안전규제 정보공개 및 소통,” 『2019 원자력안전규제정보회의』, 원자력안전위원회, 2019.
- 김혜정, “원자력안전 확보를 위한 거버넌스 발전방향,” 세종대학교, 2023.
- 대한방사선방어학회, “2017-2021 원자력안전종합계획 수립 방안 연구,” 원자력안전위원회, 2016.
- 송하중 외, “해외 원자력안전규제기관의 조직·인력·운영에 관한 조사연구,” 경희대학교 산학협력단, 교육과학기술부, 2012.
- 원자력안전국민참여위원회, “제3차 원자력안전종합계획수립을 위한 국민제안서,” 한국원자력안전재단, 2021.
- 원자력안전위원회, “제3차 원자력안전종합계획안(’22~’26),” 『제150회 원자력안전위원회』, 원자력안전위원회, 2021.
- 원자력안전위원회, 한국원자력안전재단, “원자력안전 국민참여 백서,” 한국원자력안전재단, 2022.
- 이경용, “원자력안전위원회 출범 10년의 역사,” 『2021 원자력안전규제정보회의』, 원자력안전위원회, 2021.
- 최병선, “원자력 안전규제와 행정체계,” 행정논총, 33(1), 1995.
- 최영성 외, “규제기관의 안전문화 - 원자력 안전규제 제도의 보완적 역할로서의 기대와 한계,” 『규제연구』, 29(2), 2020.
- 한국원자력안전기술원, “원자력안전종합계획수립방안연구,” 교육과학기술부, 2010.
- 한국원자력안전기술원, “원자력안전종합계획보완기획연구,” 교육과학기술부, 2013.
- 한국원자력안전재단, “원자력안전규제체계,” 2021.
- 한국원자력안전재단, “원자력안전정책수립과 이행과정에서 국민참여확대방안연구,” 2023.
- 한국원자력안전재단, “원자력안전국민참여,” 2024 (<<https://ourplan.nssc.go.kr/>> (검색일: 2024.5.20)).
- Ethics Commission for a Safe Energy Supply, “Germany’s Energy Transition: A Colletive Project for the Future,” 2011.
- IAEA, “Communication Planning by the Nuclear Regulatory Body,” Safety Reports Series, No. 24, 2.2, IAEA, 2002.
- IAEA, “Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety,” IAEA Safety Standrrds Series No.GSR Part 1 (Rev. 1), 4.67, IAEA, 2016.
- U.S. NRC, “Effective Risk Commnication: The Nuclear Regulatory Communication’s Guidelines for External Risk Communication,” NUREC/BR-0308, NRC, 2004.

U.S. NRC, “Plain Writing at the NRC,” 2024 (<https://www.nrc.gov/public-involve/open/plain-writing.html>)(검색일: 2024.5.29).

Abstract

Achievements and Implications of Establishing a Comprehensive Nuclear Safety Plan with Public Participation

Hyejeong Kim*

The nuclear safety is a highly specialized and controversial issue with big barriers and wide gaps in risk perceptions between the general public and regulatory agencies. The independence of regulatory agencies, which were established after the Fukushima disaster 10 years ago, have not been properly secured as the nuclear safety issue has become a matter of debate over expertise and politicization. South Korea is the world's 6th largest nuclear power country with 26 nuclear power plants in operation, however, the independence of regulatory agencies and institutionalization of public participation in the regulatory process suggested by the IAEA remain at a formal level. The IAEA Safety Standards emphasize to guarantee the public interest and right to know about safety issues and recommend the transparent communication between regulatory agencies and the public. The U.S. NRC and the French ASN institutionalize the participation of the public and stakeholders throughout the regulatory process and adhere to the principles of publicly understandable documentation and transparent disclosure of information. In 2020, the Nuclear Safety and Security Commission changed the method of establishing the Nuclear Safety Comprehensive Plan, which had been led by the government, to the method of creating it with the public to enhance transparency and communication in safety regulations and improve public trust. The establishment of the Nuclear Safety Comprehensive Plan with public participation, in which the general public presents the vision and policy direction and experts and stakeholders propose strategic tasks, is the first case in the history of nuclear safety regulation and is the case that participating citizens supported and trusted. This article examines the process and outcomes of the 3rd Nuclear Safety Comprehensive Plan through public participation and suggests implications for future safety regulation policy directions.

* Co-president, Sustainable Development Research Center (ecokim63@gmail.com)

Keywords Nuclear Safety, Public Participation, Uncertainty, Risk Communication, Safety Regulation Policy

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

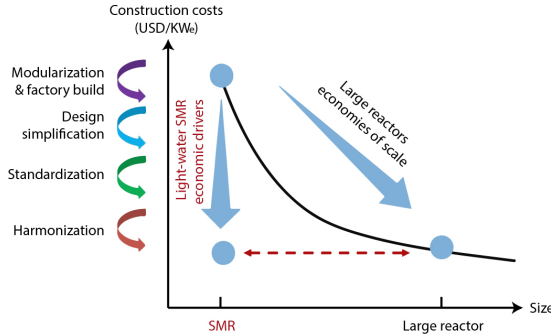
U-battery 건설 제안 (1단계 최근 참여) 등이 진행중이다. 또한 CNSC는 CNL의 SMR 사업과는 별개로 개발하고 있는 SMR도 Pre-licensing Vendor Review를 수행 중이다. 위의 CNL 사업, CNSC의 Vendor Review와는 별도로 캐나다는 2018년 11월 전략적 국제 SMR 시장의 교두보 역할을 할 것을 기대하면서, 산업체, 정부, 발전사 및 관련 사업체 전문가들이 10개월간 활동하여 “Canadian Roadmap for Small Modular Reactors”를 수립하고, Roadmap이 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

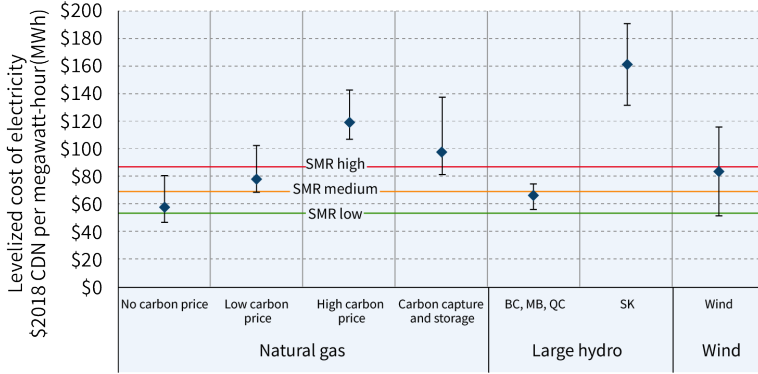
항목	고온가스로	열전도관냉각원자로	방사성동위원소발전기
연료선적감소량	5MWe 1기당 연간 1287 tankers	2MWe 1기당 연간 515 tankers	0.2MWe 1기당 연간 50 tankers
디젤발전 대비 면적	35%	50%	180%
작동 후 운송시간	7일 이상	~4일	< 1일
조약 및 정책	필요	필요	불필요
디젤발전 대비 비용	35%	32%	42%
방어 수준	High	High	Moderate
선행 투자 비용	Large	Large	Moderate-Large

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

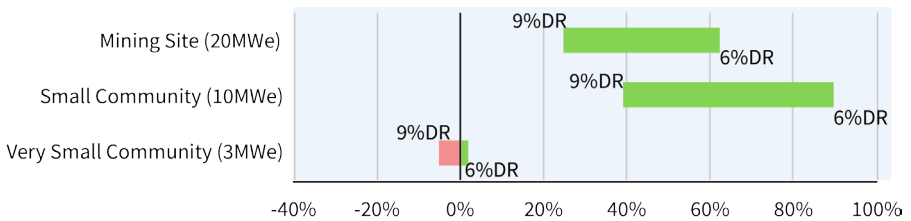
[그림 3] on-grid SMR 전력생산단가 비교(6% 할인율 가정)



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 가압경수로형 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 다목적용 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)

비핵화 이행을 위한 우라늄 농축시설 검증절차 및 불능화 방안 제안

윤이석*·함형필**·우승민***

2018년 개최된 평창 동계올림픽 이후 남북정상회담, 북미정상회담 등을 거쳐 북한 비핵화에 대한 논의가 이루어졌다. 다만, 북핵 관련 협상 이후 사찰과 불능화 및 폐기 단계에 해당하는 구체적인 이행절차는 실시된 전례가 없다. 따라서 추후 비핵화 협상의 순간이 찾아올 때 적합한 검증 및 폐기를 완료하기 위해 자체적인 비핵화 관련 매뉴얼이 필요하다. 본 논문은 남아공과 이란의 비핵화 사례, 일반적인 비핵화 절차를 소개했으며, IAEA의 사찰 기술 및 절차를 바탕으로 비핵화 방안에 대해 논의했다. 요약하자면, 북한 우라늄 농축시설을 대상으로 적용할 수 있는 초기·주기적 검증절차 및 불능화 방안에 대해 기술했다.

주제어 검증, 농축시설, 불능화, 비핵화

투고일: 2024. 3. 29. 수정일: 2024. 6. 10. 게재확정일: 2024. 6. 19.

* 경희대학교 원자력공학과 학사과정(skdmld98@khu.ac.kr)

** 한국국방연구원 안보전략연구센터 책임연구위원(hhp11149@gmail.com)

*** 경희대학교 원자력공학과 교수(woosm@khu.ac.kr)

I. 서론

2018년 개최되었던 평창 동계올림픽에 북한 김여정을 포함한 대표단은 대한민국을 방문했다. 이 방문을 시작으로 남북 관계 개선을 위해 남북이 상호 노력하기 시작했다. 2018년 제1차 남북정상회담이 판문점 평화의 집에서 개최되었으며, 같은 해에 2차, 3차 회담이 각각 판문점과 평양에서 진행되었다. 남북정상회담뿐만 아니라 2018년 싱가포르, 2019년 하노이에서 개최된 북미정상회담을 통해 북미 관계 개선(이계영, 김홍태, 2018)에 대한 초석이 마련되었다. 위 정상회담의 공통적인 목적 중 한 가지는 한반도의 지속적인 평화 유지이고 이를 위해 남북과 북미 전부 한반도 내의 비핵화에 초점을 맞추었다. 실제로 북미정상회담에서 영변 핵시설 폐기, 핵신고 등의 내용이 상세히 논의되었다(최원기, 2018). 하지만 당시 하노이 북미정상회담의 협상은 결렬되었고 2024년 현재 이러한 분위기는 사라지고 북한은 미사일 도발과 군사적 행위를 통해 한반도 긴장을 높이고 있다.

남북 간에 비핵화에 대한 논의는 이번이 처음이 아녘다. 남북 비핵화공동선언과 남북 상호핵사찰 추진을 통해 남북은 91.12.26~31간 3차에 걸친 핵협상을 진행했다. 그 결과 『한반도 비핵화 공동선언』에 합의했으며 이후 북한은 92.5.4 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)에 최초신고서를 제출하였다(이우탁, 2023). 또한, 미국과 북한은 1994년 ‘제네바 합의’를 통해 미북 간 북핵 동결 조치를 적용했으며 IAEA는 북한의 5개 핵시설(5MWe 원자로, 재처리시설, 핵연료제조공장, 50MWe 원자로, 200MWe 원자로)에 대한 동결(김일수, 2007)을 감시하기 위해 전문가를 파견했다. 추가로 북한은 2005년 6자회담에서 ‘9.19 공동성명’을 이행하기 위한 합의 도출에 협력했으며, 2008년에는 두 번째로 핵 프로그램 신고서를 의장국(중국)에 제출했다(문성준, 2020).¹ 하지만 사찰장비 반입과 의혹시설에 대한 사찰활동 허용 여부에 관해 이견이 발생해 6자회담 당사국들과 북한의 검증 협상이 최종 결렬되었다.² 이처럼 이전부터 한국과 미국을 포함한 국제사회는 북한과 비핵화에 대한 협상을 지속해왔으나 최종적인 비핵화는 달성되

-
- 1 제출한 신고서에는 핵관련 시설목록, 플루토늄 추출량/사용처/보유량, 우라늄 재고량 등의 내용이 포함되었음.
 - 2 북한은 신고된 핵시설 방문과 기술인력 인터뷰는 허용하지만 시료 채취·분석과 사찰장비 반입, 의혹시설에 대한 접근은 거부하였음.

지 않았다.

따라서 협상 이후 최종적인 비핵화를 달성하기 위한 구체적인 절차와 방법론이 필요하다. 더불어 미래 다시 올 수 있는 비핵화 순간을 준비하기 위해서는 비핵화 관련 준비서 및 절차서가 필요한 상황이므로 즉각적인 이행을 위해 지금부터 그 방안에 대한 연구가 필요하다.

이러한 준비를 위해서 다른 나라의 비핵화 사례를 검토해 볼 필요가 있다(전봉근, 2020). 첫 번째 사례로 남아공 비핵화 사례이다. 남아공은 1957년 미국이 주도하는 ‘평화를 위한 원자력(Atoms for Peace)’ 프로그램의 지원을 받아 원자로와 핵연료를 제공받았다. 이후 국립원자력연구센터를 설립해 비밀리에 농축기술을 개발하기 시작하며 핵개발에 착수했다. 하지만 1989년 드클러크(De Klerk) 대통령이 취임하면서 대외관계의 정상화 및 타국과의 경제협력을 위해 핵개발 프로그램의 종료와 핵무기 폐기를 지시했다(한인택, 2011). 1991년 핵무기 해체작업이 완료된 후 핵확산금지조약(Nuclear Nonproliferation Treaty, NPT)에 가입할 수 있었으며 사찰 의무를 수용하기 위해 IAEA와 안전조치협정을 체결했다. 이후 남아공이 제출한 초기신고서(설계정보, 계량관리보고서, 핵물질 리스트 포함)를 토대로 IAEA 사찰이 시행되었다. 물론 남아공은 IAEA의 검증이 이루어지기 이전에 핵무기 폐기를 진행했기 때문에 공식적으로 핵무기 보유를 인정하지 않은 상태였으며, 그들이 보유했던 핵 프로그램 관련 정보들이 상당 부분 폐기된 상태였다. 그러므로 핵무기 보유 이력이 있는 것으로 의심되는 남아공을 대상으로 IAEA는 북한과 이라크에 대한 핵이력 사찰 실패 경험을 교훈 삼아 핵무기 개발 프로그램의 현황, 핵무기 폐기의 완전성, 핵무기용 고농축우라늄 완전 회수 여부 등을 확인했으며 남아공이 제출한 초기신고서를 기반으로 핵물질재고량을 검증했다. 또한, 핵무기시험시설과 주변의 환경시료를 수집해 미신고 핵활동이 있었는지 검증했다. 이러한 과정을 통해 필수 관련 장비들의 불능화 작업을 수행했으며 1993년 핵무기 부품의 분해와 폐기 및 관련 기술자료들의 폐기가 완료되었다. 하지만 여기서 끝이 아니었다. 2007년 11월 남아공에서 고농축우라늄 750kg을 보관 중인 원자력연구센터에 무장 괴한 4명이 침입한 사건이 발생했다. 여기서 남아공이 고농축우라늄 상당량을 그대로 보관했다는 점을 교훈 삼아 북한의 비핵화 이행시 적절한 검증 절차를 구상할 수 있어야 한다.

두 번째 사례로 이란이 있다. 이란은 완전한 비핵화는 아니지만 기존 핵프로그램을 평화적 이용으로 전환한 첫 번째 사례로 평가된다. 이란은 남아공과 마찬가지로 미국의 ‘평화를 위한 원자력(Atoms for Peace)’ 프로그램 지원을 받아 개발을 시작했다. 이후

우라늄 농축에 관심을 가져 1980년대 후반부터 A.Q. 칸(Khan)으로부터 농축기술 및 관련 기기를 획득했다.³ 그러나 이란의 반정부 단체가 자국의 비밀 농축시설에 대해 폭로 하면서 IAEA의 사찰이 실시되었다. 본격적인 비핵화는 이란의 국제사회로부터의 제재에 대한 탈피와 미국이 주도하는 강력한 경제·금융제재로부터의 독립, 경제난 해소 등의 이유로 2013년 ‘공동행동계획(Joint Plan of Action, JPOA)’ 합의, 2015년 ‘공동포괄행동계획(Joint Comprehensive Plan of Action Regarding the Islamic Republic of Iran’s Nuclear Program, JCPOA)’ 타결과 함께 시작되었다. 최종 합의에 따라 이란은 핵물질과 핵활동을 크게 감축하고 강화된 국제 검증활동을 받았다. 핵투명성을 보장하기 위해 IAEA의 안전조치와 추가의정서를 수용했으며, 의심시설에 대한 접근도 허용했다. 이후 이란은 국제사회의 제재를 해소할 수 있었으며(도경욱 외, 2023), 국제사회는 핵무기 개발을 위한 농축·재처리 경로에 대한 감축과 봉쇄라는 해결책을 얻을 수 있었다. 하지만 이란의 경우도 JCPOA 합의 이후 미국이 트럼프 대통령 체제로 변화함에 따라 JCPOA를 일방적으로 파기하는 등 합의에 어려움을 겪었다. 따라서 이러한 정책적 시사점 또한 비핵화에 중요한 요소가 될 수 있다.

남아공과 이란 사례를 참고하여 북한의 비핵화 전략 수립을 진행할 수 있지만 두 사례가 북한의 사례와 기술적으로, 국제정치학적으로, 지정학적으로 다르기 때문에 북한의 상황에 맞는 전략 수립이 필요하다고 생각한다. 또한 북한의 경우 이란과 남아공보다 더 많은 핵물질을 생산해온 것으로 판단되며, 다수의 핵탄두를 보유한 것으로 전문가들은 판단하고 있다(Kristensen and Korda, 2023).⁴ 그리고 본 연구에서는 중점적으로 다루지는 않겠지만 북한의 경우 플루토늄 생산, 추출, 제작 시설들이 있다. 하지만 남아공과 이란의 경우 우라늄 농축시설만 운영한 경험이 있기에 차이가 존재한다. 그러므로 우리는 북한 상황에 맞는 비핵화 프로세스 또는 매뉴얼 개발이 필요하다. 따라서 본 논문은 비핵화 이행을 위한 초기 검증 절차, 주기적 검증 절차, 불능화 방안 등에 대해 정리하고 제안하고자 한다. 핵물질을 생산하는 시설에는 우라늄 농축시설, 재처리시설, 화학분석실 등이 있지만 우라늄 농축시설의 대표적인 특징인 핵물질 다량 생산성, 장기

3 농축시설의 대표적인 농축 방법으로는 원심분리기 사용이 있음. 원심분리기는 U-235와 U-238의 질량 차이를 통해 U-235를 농축하는 원리이며, 고농축우라늄 생산을 위해 수 천 개의 원심분리기가 연결되어야 함. 필수 부품으로 회전자(Rotor), 전력공급장치, 고압밀균기(Auto Claves) 등이 있음.

4 스톡홀름국제평화연구소(Stockholm International Peace Research Institute, SIPRI)는 북한이 30기의 핵탄두를 보유하고 있는 것으로 추정함.

간 운영, 비공개성을 고려해 그 첫 단계로 우리나라 농축시설에 초점을 맞춰 기술했다.

II. 비핵화의 개략적 절차

북한의 상황에 맞는 비핵화 전략 수립에 앞서 미국의 전략(Carlson, 2019)과 한국국방연구원의 전략(조남훈, 2018)을 참고해 비핵화의 일반적인 절차와 과정에 대해 정리해 보겠다.

신고와 검증 단계 이전에 협상국들 간의 비핵화 로드맵 합의와 핵 프로그램 동결 단계가 선행될 수 있다. 또한 불능화와 폐기 단계까지 완료되면 북한과 같은 NPT 비가입 국가들은 NPT 복귀도 가능하다. 이러한 내용과 위 참고자료를 기반으로 북한의 비핵화 이행을 위해 상정할 수 있는 일반적인 절차는 [비핵화 로드맵 합의]-[동결]-[신고]-[검증]-[폐기(해체·파괴·반출)]-[NPT 복귀] 순이다. 위와 같은 절차는 북한과 관련국 간 합의점을 조화롭게 엮어 비핵화를 이끌 수 있도록 도와주는 제도적 장치이다. 첫 번째 단계인 로드맵 합의 이후 동결 조치를 통해 폐기 대상이 되는 모든 핵시설의 가동을 중단하고 폐쇄하며 신고서를 통해 핵 프로그램에 대한 모든 현황을 문서로 확인할 수 있다. 여기서 북한 신고서의 정확성과 완전성을 확인하기 위해 신고서를 검증하며 대북 사찰을 시행한다. 하지만 이전과 달리 북핵 프로그램이 비교할 수 없을 만큼 확장되었으므로 확인해야 할 사항이 대폭 증가되었다. 때문에 소수의 IAEA 사찰팀만을 가지고서는 완전한 검증이 이루어지기 어려울 것으로 판단된다. 따라서 북핵 검증을 위해 IAEA와 공동 또는 별도의 검증단 구성이 필요하며, 이런 검증에 관한 사항은 검증 의정서(protocol) 합의가 전제되어야 한다.⁵ 이후 가장 중요한 불능화·폐기 단계는 비핵화를 실질적으로 이행하는 단계로써 시설 및 장비, 물질의 해체, 파괴, 반출, 처리(변환, 처분) 등을 포함한다. 북한의 핵물질, 핵시설, 핵무기, 관련 문서 등이 폐기되거나 반출되며 각 대상별로 적합한 조치를 취해야 한다. 핵무기와 핵분열 물질은 해체, 반출 등을 적용하며 핵시설은 해체와 제염 과정을 거친다. 핵물질은 변환이나 처분 등의 조치를 적용한다. 실물뿐만 아니라 설계정보, 소프트웨어, 문서 등의 데이터 역시 폐기 조치를 적

5 IAEA와 함께 검증단을 구성하는 것의 장점으로 1) IAEA의 경험, 2) 우리나라와 북한의 물리적 거리, 3) 북한의 언어와 문화에 대한 우리나라의 이해력 등이 있음.

용한다.

III. 북한 우라늄 농축시설에 대한 비핵화 프로세스

앞서 언급했듯, 현재 북한이 운영 중인 핵시설의 종류 및 용량, 운영 기간, 핵물질 및 핵 무기 추정 보유량은 이전 사례와 비교해 전례 없는 규모가 예상된다(홍민, 2018). 다만 북한의 우라늄 농축시설에 대한 기본적인 검증절차를 수립하는 것은 과거 남아공 사례와 현재 IAEA가 우라늄 농축시설에 적용 중인 사찰절차를 참고하는 것이 유용한 접근이 될 것으로 판단된다.

1. 우라늄 농축시설에 대한 검증절차 제안

가. 초기 검증절차

북한의 사찰과정에서 첫 번째로 중요한 것은 북한이 제출하는 신고서이다.⁶ 신고서에는 북한에 존재하는 모든 농축시설의 목록(연구시설, 실증시설, 가동시설 등에 관한 위치 및 현황)이 필수적이며, 이를 통해 검증의 완전성과 정확성을 확보할 수 있다. 또한, 남아공의 사례에서 볼 수 있듯이 북한은 설계정보, 계량관리보고서, 핵물질 리스트 등과 같은 초기신고자료를 필히 제공해야 한다. 초기신고자료에 반드시 포함되어야 하는 목록으로는 1) 모든 우라늄 농축시설 목록, 2) 우라늄 농축시설 별 설계정보, 3) 우라늄 농축시설 별 계량관리 보고서, 4) 우라늄 농축시설 별 핵물질 현황 목록, 5) 우라늄 농축시설 별 운전 기록 등이 있다.

초기 신고 이후 초기설계정보검사(Design Information Verification, DIV)와 초기 핵물질재고량의 검증이 이루어져야 하며, 검증 완료 후 감시 활동이 이루어져야 한다. 현재 IAEA는 우라늄 재고량, 초기신고서에 신고된 총량, 농도 및 농축도를 수량검증(Item Counting), 무게평가(Weighing), 비파괴분석(Non-Destructive Analysis, NDA), 파괴분석(Destructive Analysis, DA) 등을 통해 검증하고 있다. 이러한 초기신고자료 작성 시 참고

6 미신고 시설에 대한 분석은 중요하지만 한계성이 존재함. 본 연구는 신고된 자료를 기반으로 검증하고 안전조치를 적용하는 방안에 대해 우선적으로 고려함.

가 될 수 있는 기존 IAEA 문서(U.S. NRC, 2020)로 우라늄 농축시설에 대한 설계정보설문(Design Information Questionnaire, DIQ)이 있다. DIQ 목록에 명시된 사항들을 북한의 농축시설에 그대로 적용하는 것이 바람직하지만 북한이 정보를 온전히 제공하지 않을 가능성을 고려하면 모든 DIQ 목록의 정보는 제한될 것이다. 그러므로 우라늄 농축에 가장 중요한 ‘고농축우라늄 농축도’와 ‘총생산량’과 관련된 최소한의 정보를 요구하고 이를 토대로 효과적인 검증을 진행하는 것이 현실적이다. 위와 관련된 필수 DIQ 목록은 [표 1]과 같다.

또한, 북한은 DIQ 이외에도 계량관리보고서를 함께 제출해야 한다. 현재 IAEA 안전조치 이행을 위해 요구하는 계량관리보고서는 물질수지구역간 핵물질 이동내역, 재고 변동 사항을 작성하는 재고변동보고서, 물질수지구역에 존재하는 핵물질 목록을 작

[표 1] 북한 우라늄 농축시설 사찰에 필요한 최소한의 DIQ

Overall process parameters			
13. Facility description (indicating all process stages, storage areas and feed, product, tail, and waste points)	General flow diagram(s)		
14. Process description (identifying sampling and key measurement points; MBAs; Inventory locations)	Flow sheet(s)		
15. Design capacity as a function of year (throughput and energy consumption)	MTUSW/annum MW		
Nuclear material description and flow			
17. Main material description	Feed	Product	Tails
i) chemical and physical form			
ii) throughput and enrichment ranges as a function of year			
iii) Batch size/flow rate and campaign period			
iv) storage inventory			
18. Waste material			
i) Source and form (indicating major contributors; liquid or solid; range of constituents; enrichment range; include contaminated equipment)			
ii) Storage inventory range, Method and frequency of recovery/disposal			
19. Container and storage area description			

출처: U.S. NRC(2020)

성하는 물자재고목록, 물질수지구역의 물질수지기간동안 핵물질의 재고변동과 현황에 대해 작성하는 물질수지보고서, 추가적인 설명이 필요한 사항을 작성하는 추가설명서로 구성되어있다(IAEA, 1976).

북한이 DIQ를 통해 제공한 시설별 네 가지 사항을 제출하는 것이 가장 이상적이다. 하지만 북한이 모든 사항을 제공하는데 동의하지 않는 경우, 최소한 시설별 연간 물자 재고목록과 연간 물질수지보고서를 제출하도록 요구하는 것이 필요하다고 판단된다.

핵물질 현황 목록은 앞에서 제공한 우라늄 농축시설에서 생산 또는 관리 중인 고농축우라늄 외의 보유·사용 중인 다른 핵물질에 대한 정보를 포함해야 한다. 마지막으로 농축시설 운전 기록은 우라늄의 물자재고검사(Physical Inventory Verification, PIV)와 같은 검증의 용이성을 위해 신고된 농축시설의 운전 이력과 현황을 포함해야 한다.

위 정보를 북한이 온전히 제공했을 경우, 이를 효과적으로 검증하기 위해 적절한 규모의 사찰팀이 필요하다. 우라늄 농축시설에 대한 사찰팀의 구성은 시설별 규모에 의존하지만, IAEA 안전조치 이행과 관련된 사찰인원 구성을 참고할 수 있다. IAEA는 물자재고검사 및 설계정보검사를 위해 3~4명의 사찰관을 편성하고 있다. 여기에 더해 1명의 산업공학 전문가가 필요할 것으로 판단된다. 산업공학 전문가는 시설의 운영, 재무관리, 물질관리, 인력관리, 회계관리 등의 전반적인 시스템 운영에 대한 높은 이해도를 기반으로 시설의 운영과 관련된 검증에 도움을 줄 수 있다. 그러므로 북한의 우라늄 농축시설에도 최소 4~5명 정도의 사찰관이 편성되어야 할 것이다. 만약 우라늄 농축시설이 복수의 도시에 분산되어 있으면 각 시설별로 일주일 정도의 사찰 기간을 두고 위의 팀원들이 이동하면서 사찰을 수행하는 것을 제안한다.

위와 같이 사찰팀이 구성되었다면 효과적인 검증 활동을 위해 적절한 장비를 구비해야 한다. [표 2]는 90년대 북핵 사찰 준비 시 식별했던 장비를 참고해 현재 상황에 맞게 재구성한 표이다. 이전 장비들과 달라진 점은 장비들의 핵물질 계측 불확실성의 감소, 장비의 이동성 등이 있다. 따라서 우라늄 정량평가 목적과 관련된 장비들이 추가되었으며, 고성능의 계측 장비들이 추가되었다. 또한 90년대 검증을 준비할 당시 우라늄 농축시설의 존재에 대해 확인하지 못했을 뿐 아니라 재처리시설의 존재를 추정하고 계획을 세웠으므로 현재 상황에 맞게 재구성해 플루토늄 정량평가와 관련된 장비는 제외되었다.

[표 2] 우라늄 농축시설 사찰에 필요한 장비

장비명	목적	비고
HM-5	우라늄 특성 파악	비파괴분석
ECGS	우라늄 농축도 파악	비파괴분석
IMCN		비파괴분석
IMCG		비파괴분석
COMPUCEA		파괴분석
ULTG		우라늄 용기 두께 파악
LCBS	질량평가	비파괴분석
환경시료채취키트	과거 시설에서 생산한 우라늄 농축도 추정	
CCTV(XCAM)	비핵화 후 시설의 감시목적	
CHEM(or OLEM)	비핵화 후 시설의 product 감시 목적	비파괴분석
노트북	계측정보기록	
통신장비	사찰관들 간의 통신 목적	
디지털카메라	설계정보검사를 위한 목적	
Seal 장비	비핵화 후 시설 내 핵물질의 격납 목적	
개인피폭선량계	사찰관 피폭선량 평가 목적	
나침반(GPS)	시설 탐색 활용	
다목적 칼	시설 탐색 활용	
지도	시설 탐색 활용	
각종기록양식지 및 장비 사용절차서	사찰활동 기록	
통신요령서	사찰관들 간의 원활한 통신 목적	
비상구급의료	비상구급의료장비	
손전등	시설 탐색 활용	
줄자(Laser meter)	시설 탐색 활용	
방사선방호용구	사찰관 보호	
사찰규정 및 합의서	사찰활동 목적	
노트와 필기구	사찰활동 기록	

- HM-5: 휴대용 다목적 감마 분광기(비파괴분석)
- IMCN: NaI 검출기와 결합된 Inspector 2000 다중채널 분석기(비파괴분석)
- IMCG: HPGe 검출기와 결합된 Inspector 2000 다중채널 분석기(비파괴분석)
- ECGS: 전기 냉각 게르마늄 시스템(Electrically Cooled Germanium System)(비파괴분석)
- ULTG: 초음파 두께 측정기(The Ultrasonic Thickness Gauge)(비파괴분석)
- LCBS: Load cell 기반 계량 시스템(비파괴분석)
- COMPUCEA: 우라늄 농도 및 농축 분석법(COMBined Procedure for Uranium Concentration and Enrichment Assay)(파괴분석)

나. 주기적 검증절차

일반적으로 농축시설에 대한 초기신고서 검증은 사찰기구의 판단 기준을 충족할 때까지 진행된다. 전반적인 검증기간과 범위는 북한 최초신고서의 정확성, 완전성 및 복잡성 여부에 따라 달라진다. 최초신고서에 대한 사찰과 검증이 종료되면 일반적으로 피사찰국의 의무이행 확인 여부 및 감시검증을 위해 정기사찰에 돌입하게 된다. 이때 상세한 내용은 북한과의 협의 결과에 따라 달라지겠지만 IAEA 주기적 검증절차를 고려하면 매월 1회(IAEA, 2019)의 설계정보검사, 중간검사(제고 및 재고변동 확인), 무통보사찰 등이 수행될 것으로 판단된다. 보통 무통보사찰과 설계정보검사의 이행 주기는 시설이 생산하는 핵물질의 농축도와 연관이 있으며 통상 5% 이하의 농축 핵물질의 경우에는 월 1회의 무통보사찰과 설계정보검사가 수행된다. 추가로 농축과 관련된 농축 핵심구역만 확인하는 일일접근도 월 3회의 빈도로 수행되는데, 이 또한 북한과의 협의가 별도로 선행되어야 한다.

북한 농축시설의 주기적 검증을 구상하기 위해 현재 IAEA가 적용하고 있는 신고된 우라늄 농축시설의 사찰과정과 방법을 활용할 수 있다. 농축시설을 보유하고 있는 국가의 상황과 해당 시설의 처리량에 따라 IAEA 사찰방식은 달라진다. 예를 들어, IAEA가 해당 국가를 투명하다고 판단하면 아무리 큰 상업용 농축시설일지라도 연 1회 정도의 설계정보검사가 시행되며, 매달 정기(중간)검사(Interim Inspection) 및 무통보불시사찰((Limited Frequency Unannounced Access, LFUA)을 시행한다. 또한, 정기검사 사이의 감시 공백을 보완하기 위해 IAEA는 감시카메라를 특정 구역에 설치해 UF₆ 실린더의 농축 핵심구역 내부·외부로의 이동을 감시한다. IAEA가 평화적으로 사용 중인 우라늄 농축시설에 적용하는 주기적 사찰과정(검증절차)은 아래와 같다.

- (1) 설계정보검사는 연 1회 정도 실시하며 현재의 설계정보가 유효한지, 지난 1년간 시설의 변경사항은 없는지 육안검사를 통해 확인한다. 이를 위해 설계정보에 수록된 모든 시설 내의 장소에 대해 접근이 보장되어야 한다. 또한, 캐스케이드 홀, Feed/Withdrawal Station, 화학분석실 등의 장소에서 환경시료 채취를 통해 미신고 핵 활동, 즉 신고된 농축도 이상의 핵물질 생산 여부에 대한 확인이 가능하다. 의심 국가의 경우, 5% 이하 핵물질을 생산하는 시설은 월 1회, 5~60% 핵물질을 생산하는 시설의 경우는 생산량에 따라 월 1~2회 정도의 검사를 실시한다. 설계정보검사는 사찰관이 시설에서 설계정보서의 정확성과 완

전성을 확인하기 위한 검사활동으로서 피사찰국가에서 제공한 설계정보대로 시설이 운전되는지, 설계정보의 변경이 신고되면 변경사항이 IAEA가 적용하고 있는 안전조치 접근법에 얼마나 영향을 미치는지 검증한다.

- (2) 중간검사는 지난 한 달간의 유량 변화를 검증하기 위해 월 1회 정도 실시한다. 지난 중간검사 이후 외부에서 유입된 Feed 실린더와 새롭게 생산되어 외부로 반출될 Product와 Tail 실린더들에 대한 수량검증과 태그식별, 샘플링 검사 방식에 따라 무작위로 파괴분석과 비파괴분석, 무게평가를 실시한다. Heels 실린더에 대해서는 수량검증, 태그식별, 공진 검사를 수행한다. 의심 국가의 경우 위 검사 외의 무게평가를 추가로 실시한다.
- (3) 의심 국가의 농축시설 내에 있는 Process 핵물질을 제외한 모든 핵물질에 대해 100% 수량검증, 태그식별 후, 무작위로 소수의 실린더를 선택해 봉인을 교체하여 검증하는 봉인검증을 실시한다. 모든 핵물질은 움직이지 못하도록 고정되어 봉인한다. 또한, 농축시설의 모든 핵물질 반출 통로에 감시카메라를 설치해 24시간 녹화하며 이를 주기적으로 검토함으로써 사전 통보 없이 무작위로 반출되는 핵물질의 여부를 확인한다. 그리고 Product Cold box로 들어오는 파이프에 무인 비파괴분석 장비를 부착해서 농축도를 감시하며, Load Cell을 설치하여 농축우라늄의 생산량을 감시한다.
- (4) 무통보불시사찰은 미신고 Feed를 사용하여 신고된 농축시설의 오용을 막고 캐스케이드 홀을 방문해 미신고 변경사항을 확인함과 동시에 환경시료 채취를 통해 미신고 고농축 우라늄의 생산 활동을 조기에 탐지하기 위한 사찰과정으로 통상 월 1회 정도 실시한다. 의심 국가의 경우 월 1회의 불시사찰(UI: Unannounced Inspection)을 통해 캐스케이드 홀과 Feed/Withdrawal Station들이 신고된 대로 운전되는지 육안검사를 통해 확인하며, Product와 Tail을 파괴분석 샘플로 채취하여 확인한다. 5~20% 이상의 농축도를 가진 Product의 경우에 불시사찰은 월 2회, 20% 이상의 경우는 월 4회의 감시를 실시한다.
- (5) 물자재고검사는 연 1회 실시하며, 시설 내의 모든 핵물질에 대한 재고 검증이 이루어진다. 대규모의 상업농축시설인 경우, 검사를 위해 생산을 중단하는 것은 무리가 있으므로 운전 중 어느 한 시점을 정해 해당 시설 내의 모든 핵물질의 재고량을 검사한다. 공정 중의 핵물질도 물자재고검사의 대상이며, 파이프 내부의 핵물질량을 정확하게 평가하기는 어렵지만 설계값으로 IAEA에 제공

되어야 한다. 이러한 물자재고검사를 통해 해당 시설에서 Feed로 사용된 핵물질량과 Product, Tail 및 Waste 양을 검증하여 물질수지평가를 통해 해당 시설의 미계량핵물질(Material Unaccounted For, MUF)을 계산한다. MUF량은 일정하지 않고 0을 기준으로 클 수도 적을 수도 있지만 증가 또는 감소의 일정한 경향을 가지면 안된다.

북한의 비핵화 과정은 두 가지 시나리오로 예측할 수 있다. 첫 번째는 농축시설을 폐기 대상으로서 불능화를 실시하는 경우이다. 이러한 경우 주기적 사찰은 설계정보검사만으로 충분할 것이다. 두 번째 시나리오는 이란의 JCPOA 사례와 같이 우리나라 농축시설을 평화적 이용 대상으로서 지속적으로 가동하는 경우이다. 지속 가동을 위해 위에서 살펴본 바와 같이 IAEA의 정기적 사찰절차를 준용할 수 있다. 따라서 북한의 우리나라 농축시설에 대한 주기적 사찰 예상 시나리오는 다음과 같이 정리할 수 있다.

[표 3] 우리나라 농축시설의 평화적 이용 시 주기적 검증 방안

	기간	대상	활동 사항	명수	장비
설계정보 검사 & 물자재고 검사	2~3주/년	<ul style="list-style-type: none"> • Storage • 캐스케이드 홀 • Feed/Withdrawal Station • 화학분석실 • Heels cylinder • 폐기물저장고 	<ul style="list-style-type: none"> • 설계사항 육안검사 • 수량검증 • 태그식별 • 무게평가 • 환경 시료 채취 • 파괴분석 • 비파괴분석 	3~4명	<ul style="list-style-type: none"> • HM-5 • ECGS • LCBS • ULTG • 환경 시료 채취 장비 • COMPUCEA
중간검사	3일/월	<ul style="list-style-type: none"> • 캐스케이드 홀 • Feed/Withdrawal Station • Heels Cylinder • 화학분석실 	<ul style="list-style-type: none"> • 100% 수량검증 • 태그식별 • 공진 검사 • 비파괴분석 • 무게평가 • 파괴분석 	2명	<ul style="list-style-type: none"> • HM-5 • ECGS • LCBS • ULTG • 환경 시료 채취 장비
무통보사찰	1일/월	<ul style="list-style-type: none"> • 캐스케이드 홀 	<ul style="list-style-type: none"> • 설계사항 육안검사 • 환경 시료 채취 	2명	<ul style="list-style-type: none"> • 환경 시료 채취 장비
UI	1회/월	<ul style="list-style-type: none"> • 캐스케이드 홀 • Feed/Withdrawal Station • Product & Tail 	<ul style="list-style-type: none"> • 설계사항 육안검사 • 파괴분석 	2명	<ul style="list-style-type: none"> • 환경 시료 채취 장비

- (1) 비핵화 이후 우리나라 농축시설의 불능화: 설계정보검사 위주의 주기적 사찰 적용
- (2) 비핵화 이후 우리나라 농축시설의 평화적 이용: [표 3]에 나타난 주기적 사찰 절차 적용

2. 우리나라 농축시설에 대한 불능화 방안 제안

불능화는 감시 및 감찰하에 시설의 일부분을 파손시켜 재가동에 시간을 두는 조치와 복구를 위한 노력이 새로운 시설을 건설하는 것과 다름없는 폐기 수준의 조치까지 세부적으로 나눌 수 있다(한국원자력통제기술원, 2011). 또한, 직접적인 파손뿐만 아니라 시설에 활용될 수 있는 컴퓨터와 문서 등의 소프트웨어적 요소의 제거 또한 불능화에 포함된다. 이처럼 다양한 불능화 단계를 구체적으로 이행하기 위해 6자회담 이후 북한 핵시설을 대상으로 시행되었던 불능화 절차에 대해 살펴볼 필요가 있다. 6자회담에서 논의된 불능화는 복구에 상당한 시간과 노력이 필요하도록 일부의 중요부품과 장치를 제거하는 조치였다(한국원자력통제기술원, 2011). [표 4]는 한국원자력통제기술원에서 제공한 북한 핵시설 불능화 현황에 관한 내용이다.

[표 4] 6자회담 이후 북한 핵시설의 불능화 현황

시설명	불능화 조치	완료 여부
5MWe 원자로	2차 냉각계통 냉각탑 철거	완료
	사용후핵연료 인출(6500/8000)	미완료
	제어봉 구동기구 및 사용후핵연료 인출기 제거	
	신연료 장전기 사용불가 조치	
방사화학실험실	사용후핵연료 적재 운반차량 구동장치 제거·보관	완료
	사용후핵연료 운반 기중기 및 차폐문 작동기 제거·보관	
	총 4개중 2개의 증기라인 분리	
	핵연료봉 절단기 제거·보관	
핵연료제조공장	주요 우라늄 용해조 제거·보관	완료
	5톤 UO ₃ 저장 및 감시, 신연료 처리	미완료
	우라늄 금속변환로 제거·보관, 단열벽돌과 모르타르 모래 보관	완료
	우라늄 금속 주조로의 제거·보관, 선반기기 제거·보관	

출처: 한국원자력통제기술원(2011)

타 시설의 불능화 조치를 기반으로 우리나라 농축시설에 적용할 수 있는 불능화 절차를 구상할 수 있다. 북한의 대표적인 우리나라 농축시설은 원심분리기 기반 시설이다. 불능화를 위해 원심분리기의 연결관 및 원심분리기 주요 구조물 자체를 절단하는 작업이 필요하다. 북한이 사용 중인 농축시설의 원심분리기는 2,000개 이상으로 알려져 있으며, 이들의 캐스케이드 배관 접합부를 절단하면 원심분리기의 일시적인 불능화를 달성할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 북한은 다량의 알루미늄 파이프를 러시아로부터 수입했는데, 이는 기체 원심분리기의 외부 구조물로 사용된다(Albright and Hinderstein, 2006). 알루미늄 파이프의 절단 역시 일시적인 불능화에 적용될 수 있다. 전력공급장치, Autoclaves, Desublimers 등과 같은 필수 부품의 제거도 원심분리기 불능화에 사용될 수 있다. 또한, 원심분리기 부품 제작과 관련된 수출통제항목을 추가하는 방법이 있다. 대표적인 북한의 수출통제 품목으로 유동성형기기(Flow Forming Machine)가 있는데, 이는 원심분리기의 핵심 부품인 회전자를 생산한다(문성준, 2020). 품질관리 장비와 필수부품 제작기기의 사용 불가 조치 또한 하나의 방법이 될 수 있다.

효율적인 불능화를 위해 북한의 원심분리기에 대한 부품, 원자재, 공정 과정에 대한 목록화가 필요하며, 이를 통해 불능화의 정도에 따른 절차를 수립할 수 있다.

IV. 결론

국제사회가 북핵 문제에 관심을 갖게 된 이후 30여 년 동안 비핵화에 대한 논의가 지속되었으나 그 사이 북한의 핵능력은 고도화를 이루어냈다. 한반도의 평화를 위해 비핵화는 필수적인 과정이며 이러한 과정에 조금 더 도움이 되고자 본 논문을 작성했다. 본 논문은 과거 진행되었던 북한 비핵화 관련 협상 사례와 일반적인 비핵화 절차를 소개했으며, 협상 단계 이후 농축시설의 구체적인 초기·주기적 검증절차 및 불능화 방안에 대해 기술했다.

검증절차에 첫 번째로 중요한 것은 북한이 제출하는 신고서이다. 신고서에는 농축시설 목록·설계정보·계량관리보고서·핵물질 현황·운전 기록 등이 포함되어야 한다. 상세한 농축시설 검증을 위해 위 정보들의 온전한 확보가 선행되어야 한다. 또한 효과적인 검증을 위해 4~5명의 사찰팀이 필요하다. 이후 진행되는 검증절차 및 불능화 방안은 IAEA의 사찰 기술과 경험, 주요 원자력 선진국의 최신 기술과 비핵화 사례를 활용할 수

있다.

다만 위와 같은 비핵화 프로세스를 적용하기에 앞서 필요한 부분들이 존재한다. 첫 번째로 핵관련 정보를 입수하기 위한 방안이 필요하다. 시설의 특성을 고려하면, 북한의 우라늄 농축시설을 포함한 핵시설들을 은밀하게 설치해 운영할 가능성이 존재한다. 비밀리에 운영된 시설 내에 은닉해둔 핵물질 또한 적발하기 위해 기술적으로 많은 어려움이 존재한다. 결국, 이러한 핵관련 정보들의 입수 여부가 북핵 비핵화에 큰 비중을 차지한다. 두 번째로 비핵화와 관련된 전문가 인력양성이 필요하다. 관련 전공자와 전문가의 부족은 미래의 비핵화 이행 시 경험 부족으로 인한 결점을 발생시킬 가능성을 높인다. 따라서 전공 지식을 함유한 전문가를 육성해 비핵화에 대한 방안을 모색하는 과정이 필요하다. 세 번째로 핵시설에 관한 연구가 필요하다. 현재 한미원자력협정으로 인해 농축시설, 재처리시설 등에 관한 깊이 있는 연구가 불가능한 상황이다(이병철, 2017). 이러한 시설들은 북한의 핵심 핵시설로 우리나라 또한 자체적인 비핵화 매뉴얼을 만들기 위해 관련 연구를 진행할 필요가 있다.

위와 같은 결점이 해결된다면 효율적인 비핵화 수행을 위해 우리나라 다양한 기관들의 역할 분담을 고려할 수 있다. 각 기관의 수행 능력을 고려하면, 원자력안전위원회가 총괄하는 것이 적절할 것이다. 또한 한국원자력통제기술원과 한국원자력연구원이 참여해 핵시설과 핵물질, 검증절차에 관련된 데이터와 연구 목록을 제공한다면 효율적이고 현실적인 비핵화 진행을 기대할 수 있을 것이다. 추가로 IAEA와의 협력을 위해 한국원자력통제기술원과 외교부의 역할도 중요할 것으로 판단된다. 제안된 내용을 토대로 연구를 지속적으로 수행하며 결점을 보완한다면 향후 한반도의 평화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.⁷

7 본 논문은 한국원자력통제기술원 위탁보고서 “핵주기시설의 검증 절차 수립을 위한 기반 연구”를 기반으로 재구성한 것임을 밝히는 바입니다.

참고문헌

- 김일수, “2.13 합의 이후의 북미관계 전망,” 『정치·정보연구』 제10권 제1호, 2007, pp. 149-165.
- 도경옥, 심상민, 안준형, 이동은, “비핵화 합의와 이행의 법·제도적 문제: 주요 비핵화 사례를 중심으로,” 통일연구원, 2023.
- 문성준, “북한 비핵화 과정의 기술적 검증 적용방안에 관한 연구,” 조선대학교 정책대학원 박사학위논문, 2020.
- 이계영, 김홍태, “2018 평창동계올림픽의 평화올림픽 성과와 과제,” 『한국엔터테인먼트산업학회논문지』 제12권 제4호, 2018, pp. 151-166.
- 이병철, “평화적 이용’에 관한 한미원자력협정과 미국의 이중성,” 『평화학연구』 제18권 제4호, 2017, pp. 27-48.
- 이우탁, “북한과 IAEA의 길긴 악연…2009년 이후 연결고리 끊겨,” 『연합뉴스』, 2023.9.26.
- 전봉근, “비핵화의 정치,” 명인문화사, 2020.
- 조남훈, “북한 비핵화 과정 및 전망,” 한국국방연구원, 2018.
- 최원기, “핵신고 문턱에 걸린 2차 미-북 정상회담,” 『Voice of America』, 2018.10.19.
- 한국원자력통제기술원, “북한의 핵프로그램과 검증,” 한국원자력통제기술원, 2011.
- 한인택, “핵폐기 사례연구: 남아프리카공화국 사례의 함의와 한계,” 『한국과국제정치(KWP)』, 제27권 제1호, 2011, pp. 83-108.
- 홍민, “북한의 자발적 비핵화와 정치-기술적 과정,” 통일연구원, 2018.
- Albright, David, and Corey Hinderstein “Dismantling the DPRK’s Nuclear Weapons Program: a Practicable, Verifiable Plan of Action,” *United States Institute of Peace*, 2006.
- Carlson, John, “Denuclearizing North Korea: The Case for a Pragmatic Approach to Nuclear Safeguards and Verification,” *38 North Special Report*, Stimson Center, 2019.
- IAEA, “The Text of the Agreement of 31 October 1975 Between the Republic of Korea and the Agency for the Application of Safeguards in Connection with the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons,” INFCIRC/236, 1976 (<https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infircs/1976/infirc236.pdf>) (검색일: 2024.3.4).
- IAEA, “International Safeguards in the Design of Enrichment Plants,” *IAEA Nuclear Energy Series*, ISSN 1995 7807; no. NF-T-4.10, 2019.
- Kristensen, Hans M., Matt Korda, “7. World Nuclear Forces,” SIPRI Yearbook 2023, 2023.
- U.S. NRC, “IAEA Form N-75 – IAEA Design Information Questionnaire Isotopic Enrichment Plants,” 2020 (<https://www.nrc.gov/docs/ML1430/ML14300A180.pdf>) (검색일: 2024.2.29).

Abstract

Proposed Procedures for Verifying and Disabling Uranium Enrichment Facilities for Denuclearization

Yiseock Yoon,* Hyeongpil Ham,** and Seungmin Woo***

Following the 2018 PyeongChang Winter Olympics, discussions on North Korea's denuclearization took place through inter-Korean summits and North Korea-US summits. However, there have been no instances for concrete implementation steps such as inspection, disablement, and dismantlement following negotiations on North Korea's nuclear program. Therefore, there is a need for a self-developed manual on denuclearization to ensure appropriate verification and disposal when the moment for further denuclearization negotiations arrives. This paper introduces cases of denuclearization in South Africa and Iran, the general denuclearization procedures, and discusses denuclearization measures based on the International Atomic Energy Agency's (IAEA) inspection technology and procedures. In summary, it describes the initial · periodic verification procedures and disablement measurements applicable to North Korea's uranium enrichment facilities.

Keywords Verification, Enrichment Facilities, Disablement, Denuclearization

* B.S., Department of Nuclear Engineering, College of Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Republic of Korea (skdmlid98@khu.ac.kr)

** Senior Research Fellow, Center for Security and Strategy, Korea Institute for Defense Analyses, Seoul, Republic of Korea (hhp11149@gmail.com)

*** Assistant Professor, Department of Nuclear Engineering, College of Engineering Kyung Hee University, Yongin, Republic of Korea (woosm@khu.ac.kr)

지구적 신지정학 시대에 대비한 한국의 대전략*

전봉근**

오늘날 국제질서의 변동과 혼돈 시대에 다수의 지정학적·지경학적 충돌 요인이 동시에 발생하는 동북아에서 어떻게 한국의 안녕과 발전을 보장할 것인가는 모든 한국인의 중대 고민이다. 향후 미중 경쟁과 진영화, 세계적 3분화와 무극화가 초래한 국제질서 변동에 한국 외교가 효과적으로 대응하지 못한다면, 구한말의 악몽이 재현될 가능성이 크다. 동북아 신지정학 시대에 대응하기 위해 한국은 한국형 대전략과 외교 원칙의 수립이 필요하다. 한국이 국가 비전과 국익을 실현하려면 먼저 국가 정체성과 국민 합의에 기반하고 지속 가능한 한국적 외교 원칙과 지침을 먼저 정립해야 한다. 이 글은 한국의 외교 전략으로 한미동맹을 한국 외교의 기본 축으로 하되 중국과 전략적 협력동반자관계를 병행하여 확대 발전시키는 ‘한미동맹 플러스’ 방안을 제시한다.

주제어 미중 경쟁, 중국의 부상, 동북아, 지정학, 대전략

투고일: 2024. 4. 30. 수정일: 2024. 6. 11. 게재확정일: 2024. 6. 16.

* 이 글은 ‘사단법인 유라시아21’이 주최한 ‘우크라이나 전쟁의 장기화와 한국 외교의 과제’ 정책 포럼(2023.11.23.)에서 발표한 “러-우 전쟁 이후 국제질서의 변동”을 수정 보완한 것이다. 또한 이 글은 필자가 집필한 『한반도 국제정치의 비극(박영사, 2023)』, 『신 국제질서와 한국 외교 전략(명인문화사, 공저, 2021)』에서 집중적으로 분석하고 토론한 ‘한국의 국가 정체성과 대전략’에 대한 문제의식과 연장선에 있다.

** 국립외교원 명예교수 · 한국행정정책학회 회장(jun2030@mofa.or.kr)

I. 문제 제기

탈냉전기의 짧았던 미국 패권 시대는 흔히 ‘단극의 순간(Unipolar Moment)’으로 불린다. 2010년대 후반 들어 ‘중국의 부상’과 ‘러시아의 귀환’으로 상징되는 강대국 정치와 지정학적 경쟁의 역사가 반복되었다. 이로써 ‘역사의 종언’과 더불어 기대되었던 영구평화에 대한 인류의 꿈은 일장춘몽으로 끝나고 말았다. 특히 2022년 2월 러시아의 우크라이나 침공은 탈냉전 미국과 서방 진영이 주도한 자유주의적 국제질서와 글로벌 거버넌스의 대단원을 알리는 일대 사건이었다. 바야흐로 전 지구적으로 무질서의 국제질서와 전쟁의 시대가 열렸다(Haass, 2017).

우크라이나 전쟁의 충격파는 유라시아 대륙을 가로질러 반대편에 있는 동북아에도 고스란히 전달되었다. 동북아 지역을 포함하는 유라시아 대륙의 주변부는 전통적으로 강대국의 세력권이 대치하고 충돌하는 지정학적 지진대였다(김태현, 2022; 김상배, 2021; 문정인, 2021; 배기찬, 2017; 신범식 외, 2022; 전봉근, 2019a; 2023; Mackinder, 1904). 2023년 10월 발생한 이스라엘-하마스 충돌과 중동 지역전쟁으로 확전 위험성은 유라시아를 둘러싸고 대륙과 해양 세력이 충돌하는 주변부 전체가 상호 연결된 지정학적 지진대라는 점을 재확인했다(Kaplan, 2012; Marshall, 2016). 국제 무질서 속에서 국가들은 다시 안전보장을 위해 동맹과 진영을 선택했다. 한편, 러-우 전쟁에 대한 대응을 둘러싸고, 진영화를 거부하며 초강대국 사이에서 전략적 자율성을 추구하는 글로벌 사우스와 지역 강국들이 부상(浮上)하면서, 국제체제의 다극화 현상이 촉진되었다.

오늘 같은 국제질서의 변동과 혼돈 시대에 다수의 지정학적·지경학적 충돌 요인이 동시에 발생하는 동북아에서 어떻게 한국의 안녕과 발전을 보장할 것인가는 한국인의 최대 고민이 아닐 수 없다(구대열, 2010; 김명기, 2009; 정하현 외, 2009; 조동준, 2009; 윤영관, 2015; 전병근, 2017; 전봉근, 2015; 2017; 전제성, 2020). 필자는 그 대응이 한국 외교에서 전략적 사고의 빈곤과 대전략의 부재 현상을 되돌아보고, 이를 극복하는데 시작해야 한다고 본다.¹ 만약 한국 외교가 향후 미중 경쟁과 진영화, 세계적 3분화와 무극화 추세가 초래한

1 일반적으로 ‘대전략’은 국가 목표(국익)를 위한 모든 외교·군사·정보·경제적 수단(D-I-M-E)을 동원하고 통합적으로 활용하는 것으로 정의된다. 마이클 그린(*By More Than Providence: Grand Strategy and American Power in the Asia Pacific*)에 따르면, “대전략은 위협과 기회를 면밀히 평가하고, 국가 목표를 달성하기 위해 방법과 수단을 사려 깊게 적용하는 것을 요구한다. 군사전략과 달리 대전략은 전시와 평시의 모든 시기에 외교·정보·군사·경제적 수단을 포괄적으로 접근하며, 전략목표에 우선순위를 부여하고, 장기와 단기 목표

국제질서 변동이 초래하는 거대 도전 요인에 효과적으로 대응하지 못한다면, 구한말의 악몽이 재현될 가능성도 크다. 이런 문제의식에 따라 이 글은 ‘단극의 순간’ 이후 전개되는 국제정치 현상을 분석하고, 이런 상황에서 한국의 지속 가능한 국익을 보장하기 위한 대전략 옵션을 토론하고자 한다.

II. ‘단극의 순간’ 이후 동북아 신냉전과 지구적 다극화 추세

1. ‘역사의 종언’에서 ‘역사의 반복’으로

2010년대 후반의 갑작스러운 국제정세의 악화는 그 이전 탈냉전기의 세계평화와 국제협력 분위기와 크게 대조된다. 1991년 소련이 해체되고 공산 진영이 붕괴하면서, 미국과 서방의 자유 진영이 냉전의 최후 승리자로 떠올랐다. 세인들은 인간 이성과 과학 기술의 발전으로 인류가 탄압과 전쟁과 빈곤의 굴레에서 벗어나, 마침내 자유와 평화와 풍요가 넘치는 역사 발전의 종착역에 도착했다고 믿었다. 프란시스 후쿠야마(Francis Fukuyama)는 기쁜 마음으로 『역사의 종언』(Fukuyama, 1992)을 선언했다.

한편, 이런 자유주의적 낙관론을 거부하는 사조도 있었다. 현실주의 국제정치 이론가로 유명한 존 미어샤이머(John Mearsheimer) 시카고대 교수는 “미래로 복귀”(Mearsheimer, 1990) 논문에서 강대국 정치와 세력 경쟁의 귀환을 예고하며, 인류의 미래는 과거로 복귀할 것이라고 경고했다. 즈비그뉴 브레진스키(Zbigniew Brzezinski) 전 미국 국가안보보좌관도 『그랜드 체스보드』(Brzezinski, 1997)를 발표하여 유라시아 체스보드를 둘러싸고 대륙과 해양 세력 간 충돌이 반복될 것이라고 예고했다. 그는 유라시아 대륙에서 지정학적 충돌이 불가피한 5대 중추 지역(pivot area)을 제시했는데, 이에 우크라이나와 한반도를 포함했다는 점은 현재 양국의 정세에 대해 시사하는 바가 크다.

2010년대 들어 ‘중국의 부상’이 지속되고 미중 경쟁의 조짐을 보이자, 국제정

를 구분하며, 핵심 이익과 부차 이익을 구분해야 한다. 또한 예상 못한 도전에 대해 유연성을 발휘하고, 국가 의지와 자원을 단일 목표를 지향하도록 한다.” 참고로, 전통적으로 ‘정책’은 정치적 영역으로서 중장기 전쟁 목표를 제시하고, ‘전략’은 군사적 영역으로서 목표, 수단, 방법을 조화시키는 장군의 기술이다. 다시 말해, 정책은 목적(왜), 행동 원칙, 가치를 제시하고, 전략은 실행의 영역으로 수단 방법, 효과성을 제시한다.

치학자들의 경고음은 더욱 커졌다. 미어샤이머 교수는 『강대국 국제정치의 비극』(Mearsheimer, 2014)에서 ‘중국의 부상’ 이후 강대국 정치의 속성으로 인해 미중 충돌은 필연적이라고 주장했다. 그레함 엘리슨(Graham Allison) 하버드대 교수도 『예정된 전쟁』(Allison, 2018)에서 지난 500년간 패권국이 16번 교체되었는데, 이 중 12번이 전쟁으로 끝났다고 분석했다. 고대 그리스 역사가 투키디데스가 2,500년 전 아테네와 스파르타의 패권전쟁이 필연적이라고 주장했듯이, 엘리슨 교수는 역사가 반복되어 미중 경쟁도 ‘투키디데스의 함정’에 빠질 것이라고 경고했다.

2. 미중 전략경쟁과 동북아 진영화 추세

21세기에 중국 경제력이 계속 성장하고, 군사력, 특히 미사일 역량과 해군력이 급격히 팽창하면서 동아시아 지정학과 세력균형이 변동 중이다. 종래 미국이 통제했던 동중국해와 남중국해에 중국의 해군력이 침투하고 확장되며 미국의 해상 세력권과 중복되었다. 그 결과, 미국 주도의 동아시아 평화지대가 점차 미중 간 갈등 지대로 변했다.

동북아 신지정학의 연쇄반응을 촉발한 근원에는 중국의 경제력 급성장으로 인한 역내 세력균형의 변동이 있었다. 중국 국내총생산(Gross Domestic Product, GDP)은 1996년만 해도 미국 국내총생산의 10%에 불과했지만, 고도성장을 지속하여 2012년 50%, 2018년 65%, 마침내 2020년에는 70%까지 도달했다. 중국의 구매력 지수(Purchasing Power Parity, PPP) 국내총생산은 2014년에 세계 경제의 16.5%를 차지하여, 15.8%를 차지한 미국을 넘어 세계 1위가 되었고, 그 격차가 계속 벌어졌다. 대다수 전문가는 중국의 국내총생산이 2030년까지 미국을 추월하여 명실상부 세계 1위 경제 대국이 될 것으로 전망했다. 그런데 2020년대 들어 미중 간 경제력 전이 여부를 전망하는데, 코로나19 팬데믹과 미국의 강력한 대중 견제가 새로운 변수로 등장했다. 하지만 이런 신생 변수에도 불구하고, 중국이 2위 초강대국으로 미국과 패권 경쟁을 지속할 것이라는 점은 변함이 없다.

중일 간 급속한 세력전이라도 동북아 지정학의 변동을 초래한 주요 요인이다. 중국의 국내총생산은 1996년까지만 해도 일본 국내총생산의 20%에 불과했으나, 2010년에 일본을 추월하여 세계 2위 경제 대국이 되었다. 중국의 국내총생산은 계속 늘어나, 2018년에는 일본의 2.7배로 팽창했고, 그 격차는 계속 커졌다.

한편, 2020년 이후 코로나 팬데믹으로 인해 중국의 경제 침체가 예상되고, 미국의

중국 견제가 본격화되면서 일부 전문가들은 미중 간 경제력 격차가 오히려 벌어질 가능성을 제기했다. 중국의 경제력이 정점에 이미 도달했다는 ‘차이나 피크’ 주장도 이에 해당한다. 대체로 전문가들은 미국이 중국에 비해 군사력과 경제력의 절대적 우위를 50년 이상 유지할 것으로 전망한다. 필자도 이런 전망에 동의한다. 하지만 미국은 정치·군사적으로 유럽을 중시하는 데다 전 세계적으로 개입해야만 하고, 중국은 군사력을 동아시아와 서태평양에만 집중한다. 따라서 미국이 총량으로 세계 최강의 군사력과 경제력을 보유하고더라도, 국력을 세계적으로 분산하는 데다 대양을 건너야 하는 거리의 불리(不利)를 극복하고 그런 우위를 계속 유지할 것이라고 장담하기 어렵다.

해양 세력을 대표하는 미국은 유라시아 대륙에서 지역 패권 세력의 등장을 거부하는 지전략을 일관되게 추진해왔다. 이런 지전략적 전통에 따라 동아시아와 서태평양에서 중국의 지역 패권국 부상을 저지하기 위해 미일 동맹, 한미동맹, 쿼드, 인도 태평양 전략, G7 등을 통해 중국을 견제한다. 이런 조치는 역내에서 군사적 긴장을 고조시키고, 진영화 현상을 촉발했다. 미국은 ‘국가안보 전략보고서’(The White House, 2017)와 ‘중국에 대한 미국의 전략적 접근 보고서’(The White House, 2020)에서 중국을 ‘전략적 경쟁국’으로 규정했다. 이때 전면적인 전략경쟁이 불가피하다. 2021년 출범한 바이든 행정부는 미중 경쟁을 더욱 확장하고 강화했다. 바이든 행정부는 트럼프 행정부와 달리 동맹국들을 대중 경쟁 전선의 앞에 내세우고, 당근과 채찍을 내보이며 진영적 선택을 요구했다.

한편, 중국은 미국의 봉쇄적 지전략에 대항하여, 이를 타파하고 동아시아와 서태평양에서 세력권을 회복하기 위한 대응 지전략을 추구했다. 미국의 사드 고고도미사일방어체계와 전략무기의 한국 반입 반대, 한미동맹 강화 반대, 북한 체제의 안정 중시, 대북 제재 강화 반대, 벨트로드구상(Belt and Road Initiative, BRI) 확장, 남중국해의 군사화와 내해화, 서태평양 도련선(島鏈線, Sland Chain) 설정 등이 대응 지전략에 해당한다. 동시에 중국은 ‘중국의 부상’에 대한 주변국의 경계심을 낮추고, 미국의 대중 포위망을 타개하기 위해 주변국과 국제사회를 대상으로 경제적·인도적 지원을 증대하고, 인류운명공동체, 유교적 평화(Confucian Peace), 공동안보·포괄안보·협력안보 등과 같은 평화적 담론을 전파하고 있다.

3. 국제사회의 3분화 현상: 글로벌 사우스와 자율적 지역 강국의 부상

탈냉전기 ‘단극의 순간’은 2010년대 들어 미국의 약화와 중국의 부상으로 막을 내렸다.

그렇다면 미국 주도의 단극체제를 대체하는 현 국제체제는 어떤 특징을 갖는가. 한때 미국이 제2의 초강대국 지위에 오른 중국과 지구를 분할하여 각자 세력권을 관리하는 신냉전적 국제체제, 또는 미중 양국이 지구를 협치로 공동관리하는 콘도미니엄 방식 등이 논란되었지만 실현될 가능성은 거의 없다. 오늘 국제체제는 흔히 다수 강대국이 병존하며 서로 경쟁하는 다극 체제 또는 패권국이 없다는 차원에서 무극(無極) 체제로 불린다.

사실 오늘 국제체제는 역사적으로 유례를 찾기 어렵다. 오늘 국제체제는 직전 패권국 미국이 만들었던 자유주의적, 협치적 글로벌 거버넌스가 잔존하고 작동하는 가운데, 미국, 중국, 인도, EU(European Union) 등으로 구성된 다극 체제가 형성되면서 이들이 상호 경쟁하거나 협력하는 과도기적, 유동적 양상을 띠었다. 현 국제체제의 특징으로서 미국 리더십의 부침, 글로벌 거버넌스의 지속, 미중 전략경쟁, 자율적 신흥 강국의 등장, 국제사회의 3분화 등을 들 수 있다. 이 중에서도 인도, 브라질, 남아공, 인도네시아, 튀르키예, 사우디아라비아 등과 같은 ‘자율적 신흥 강국의 등장’은 새로운 국제정치 현상이며 현 국제체제를 이전 체제와 차별화하는 주요 변수인데, 이에 따라 ‘국제사회의 3분화 현상’도 발생했다.

경제력과 군사력 기준을 볼 때, 미국은 여전히 세계 최강국의 지위를 갖고 있으며 21세기 중반까지 그런 지위를 유지할 가능성이 크다. 심지어 미중 간 경제력 역전이 발생하더라도, 군사력, 외교력, 문화력, 과학기술력 등 핵심 국력 요소를 고려할 때 미국의 최고 강대국 지위는 장기간 지속될 전망이다. 또한 미국은 유라시아 강대국 누구도 모방할 수 없는 지정학적, 지전략적 이점을 갖는다. 미국은 대륙 규모의 거대국가이며 자신의 지리적 공간에서 유일한 강대국이고, 해양의 보호를 받는 독보적인 해양 세력이다. 유라시아 강대국은 항시 인접 강대국과 대치하고 충돌하며 국력을 소모하고 상쇄시키지만, 미국은 항상 국력을 온존하며 자신이 선택한 시간과 장소에서 대륙 세력을 상대할 수 있다. 따라서 미국은 패권국의 지위에서 물러났지만, 최강 군사력, 동맹 네트워크, 글로벌 거버넌스 활용, 역외 균형자(Offshore Balancer), 달러의 기축통화 등 주요 외교적·전략적 수단을 활용하여 여전히 현 국제체제에서 최대 상수의 지위를 유지하고 있다.

미국에 최상의 연대 세력인 유럽연합(EU)이 종래 일방적인 대미 의존에서 벗어나 점차 외교적, 전략적 자율성을 모색 중이다(European Parliament, 2022). 탈냉전기 들어 독자적 목소리를 찾던 EU는 우크라이나 전쟁이 발발하자 다시 대미 의존을 높였다. 하지만 대중 정책, 경제 통상문제, 우크라이나 전쟁 대응 등을 두고 미국과 계속 이견을 보였

다. 특히 바이든 행정부가 강력한 중국 견제 정책을 추진하면서 EU에도 동참을 요구했지만, 완전한 호응을 끌어내지는 못했다. 유럽에 중국은 최대 교역 상대이기 때문에 이를 결코 포기할 수 없었다.

미중 경쟁이 한창이었지만, 코로나 국면에서 회복되자마자 독일 올라프 솔츠 총리(2022.11), 페드로 산체스 스페인 총리(2023.3), 프랑스 에마뉘엘 마크롱 대통령과 우르줄라 폰데라이언 EU 집행위원장(2023.4) 등 주요국 정상들의 방중이 이어졌다. 영국 리시 수낙 총리마저 ‘강건한 실용주의(Robust Pragmatism)’를 주창하여 대중 실용 외교를 모색했다. EU와 중국은 우크라이나 전쟁의 초기 종전에도 이해관계가 같았다. EU는 미국의 인플레이션감축법(Inflation Reduction Act, IRA)에 대해서도 그린딜 산업계획으로 맞대응했다. 모든 EU국이 프랑스가 주창하는 ‘전략적 자율성(Strategic Autonomy)’을 수용하지는 않지만, 미국 내 일국주의, 보호무역의 강화에 대한 반작용으로 유럽적 자율성에 관심은 계속 증가일로에 있다(Michaels, 2023).

현 국제체제의 특징적 현상으로 ‘자율적 신흥강국의 등장’이 있다. 이는 ‘글로벌 사우스’의 등장으로 연결되고, 국제사회의 3분화를 초래했다. 현 국제체제에서 미국과 동맹국(한국 포함)을 포함하는 서방 진영 또는 자유 진영, 그리고 이에 대항하는 중국·러시아 및 친중·친러국가로 구성된 반미·권위주의 진영의 양대 세력이 경쟁 중이다. 여기에 전통적인 비동맹권을 포함하는 ‘글로벌 사우스(Global South: 남반구)’가 제3의 세력권으로 급부상했다. 이들은 냉전기의 비동맹 전통을 계승하며, 강대국 세력 경쟁에 포섭되기를 거부하고 미중 경쟁과 우크라이나 전쟁에서도 편들기를 거부했다. 이들은 전방위 외교, 실용 외교, 자율 외교의 구호를 내세우며, 서방 진영뿐만 아니라 중국과 러시아에도 우호적인 태도를 보이고 경제협력에 적극적이다.

남반구 국가 중에서도 인도, 튀르키예, 이란, 사우디아라비아, 브라질, 인도네시아 등은 신흥강국, 지역 강국을 자처하며, 국제무대에서 제3의 목소리를 대변하고 있다. 남반구의 뿌리가 된 ‘유엔 77그룹(G-77)’은 1964년 형성되어 미·소 초강대국 주도의 진영화와 동맹을 거부하고, 중립적 등거리 외교를 추구했었다. 오늘 남반구 그룹은 과거 G-77만큼 제도화되어 있지는 않지만, 다수의 신흥강국, 지역 강국, 외교 강국을 포함하고 있어 현재의 다극 국제체제와 미중 전략경쟁 속에서 과거 비동맹권보다 더 큰 세력을 과시할 것으로 보인다.

위에서 언급한 자율적인 신흥강국, 지역 강국은 종종 미국 언론에서 ‘담장 위 국가’로 불린다. 이 표현은 이 국가들이 기회주의적이며, 매우 좁은 활동 공간에 갇혀 있거나,

결국 한 진영을 선택할 수밖에 없다고 시사한다. 과연 그럴까?

첫째, 이들은 대부분 오랜 역사를 가지며, 외교안보 노선에 대한 국민적 합의 수준이 높은 국가들이다. 둘째, 이들은 냉전기부터 동서 냉전을 제국주의 세력 간 경쟁으로 보며, 진영 선택을 거부한 뿌리 깊은 비동맹 전통을 갖고 있다. 셋째, 이들은 전통적으로 비강대국으로 대부분 식민지 경험을 공유하여 반제국주의, 반강대국 정치 성향을 보인다. 넷째, 인도와 파키스탄을 제외한 대부분 글로벌 사우스와 지역 강국들은 비핵국으로서 핵무기를 반대하며 비핵지대를 결성했다. 이렇게 볼 때, 글로벌 사우스, 특히 자율적 지역 강국들은 미중 경쟁, 미·러 경쟁에서 진영 참여를 거부할 뿐 아니라, 적극적으로 진영 대립을 이이제이(以夷制夷)로 관리하며 자신의 안보적, 경제적 이익을 극대화하는 진영 간 등거리 외교 전략을 의도적으로 추진하고 있다. 이렇게 볼 때 글로벌 사우스는 미중, 미·러 간 세력 경쟁을 제어하는 제3세력으로서 일종의 평형수 역할을 할 가능성도 있다. 과거 비동맹권은 다수의 약국과 빈국의 집단으로서 반 진영, 반제국주의를 외치는 도덕적 목소리에 불과했다. 하지만 오늘 글로벌 사우스는 내부 다양성으로 인해 한목소리의 진영으로 활동할 수는 없지만, 이미 경제력과 외교력을 갖추어 국제질서의 주요 변수가 되었다.

예를 들면, ‘국제사회의 분화’와 ‘글로벌 사우스의 부상’ 현상은 우크라이나 전쟁에 대한 국가들의 대응을 보면 잘 드러난다(Seshadri, 2023). 전쟁 개전 4일 뒤인 2022년 2월 28일부터 2023년 3월까지 1년간 유엔총회는 우크라이나 전쟁에 대해 7차례 논의와 표결을 반복했다. 유엔 회원국들은 제각기 러시아의 침공에 대한 규탄, 반대, 기권, 러시아 제재 참여, 우크라이나 지원 등에 대해 일관된 태도를 보였다. 첫째, 러시아 규탄 유엔 결의, 우크라이나 지원, 러시아 제재 등에 모두 참여한 국가는 40여 개국인데, 대체로 미국의 동맹국·우방국으로 구성된다. 둘째, 러시아 규탄 결의를 반대한 국가는 중·러 및 친러·친중 국가로서 최대 8개국(러시아, 북한, 벨라루스, 시리아 등)을 넘지 않았다. 이들은 반미 국가들이다.

셋째, 러시아 침공의 규탄 결의안에 대한 찬성은 약 140개국인데, 40여 서방국 이외에 100여 개 남반구 국가도 동참했다. 100여 개 남반구 국가는 중소국으로서 주권 독립과 영토 보존을 위해 국제법의 보호가 필요하므로, 러시아의 불법적 행위를 규탄하는데 동참하는 것은 당연하다.

넷째, 러시아 규탄 결의안에 기권하고, 러시아에 대한 제재도 거부하는 국가군이 있다. 이 그룹에는 중국, 인도, 베트남, 이란, 파키스탄, 알제리, 몽골, 남아프리카, 스리

랑카 등을 포함하여 약 35개국이 속한다. 이들은 반미와 비동맹 성향을 보이며, 중간국 외교, 자율 외교, 실용 외교, 탈이념 외교를 표방한다. 또한 이들은 서방의 대러 경제제재를 자신의 경제적 이득을 얻는 기회로 적극적으로 활용한다.

러시아의 우크라이나 침공은 침략전쟁을 부정하고 영토보전을 보장하는 유엔헌장과 국제법을 위반하고, 미국의 지정학적 이익에 정면으로 도전했다. 미국은 아직 세계 최강국의 타이틀을 갖지만, 우크라이나를 간접적으로 지원할 뿐 러시아와 직접 군사적으로 충돌하고 싶지 않다. 제재 남용 국가로 인해 대러 압박 전선이 새고 있지만, 이들에 대한 미국의 통제력은 거의 없다. 미국과 글로벌 사우스의 우크라이나 전쟁에 대한 대응의 현주소는 국제체제의 분화와 혼돈을 적나라하게 보여주는 대표적인 사례이다.

강대국 세력 경쟁의 재부상과 글로벌 사우스의 세력화는 현 국제 핵질서의 혼란상에도 투영되었다. 러시아는 핵확산금지조약(Nuclear Non-Proliferation Treaty, NPT) 상 5개 핵보유국 중 하나로서 국제 핵 질서를 보존해야 하는 막중한 책임을 지고 있다. 그런데 막상 핵보유국 러시아가 비핵국인 우크라이나를 침공하고 핵무기 사용까지 위협함으로써 NPT의 합의 정신을 크게 훼손했다. 러시아의 핵 사용 위협으로 인해 1945년 이후 굳어진 핵무기 불사용의 ‘핵 금기(Nuclear Taboo)’ 관행도 위협받고 있다.

다른 한편, 글로벌 사우스의 대다수 비핵국은 핵보유국이 NPT 6조의 핵군축 의무를 불이행하자, NPT의 불평등성을 공공연히 비판하여 대안적 핵 질서를 모색했다. 이들의 주도로 2017년 유엔총회는 핵무기를 전면 금지하는 ‘핵무기 금지 조약(Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons, TPNW)’을 122국 찬성으로 채택했다. TPNW는 50개국 기준 기준을 충족시켜 2021년 1월에 발효되었다. TPNW에는 발효했지만, 핵보유국 5개국과 미국의 동맹국이 모두 불참했기 때문에 실효성은 없다. 그렇지만 이 사건은 국제사회의 다수국인 비핵국, 글로벌 사우스, 비동맹국, 비핵지대국들이 독자적 세력권을 구성하여, 핵보유국과 강대국을 상대로 자신의 요구와 대안 체제를 제도적으로 제시했다는 점에서 현 국제체제의 다원적, 분열적 특징을 잘 보여준다.

III. 신지정학 시대를 위한 한국의 대전략 탐색

미중 전략경쟁과 국제체제의 다극화 시대라는 전대미문의 불확실하고 불안정한 국제지형 속에서 한국호의 지속적인 안녕과 번영을 보장하는 것은 국가지도자뿐만 아니라 외

교안보 전문가의 역할과 책임이 아닐 수 없다. 따라서 아래에서는 필자가 외교안보 전문가의 일인으로서 한국이 추구할 국익, 정체성 및 특성 진단과 이를 반영한 전략목표, 외교안보 전략을 선택하는 기준이 되는 가치와 원칙 등을 제시하고자 한다.

1. 한국의 국익과 국가 정체성

국익은 보편적으로 국가 독립, 주권과 영토 보존, 경제성장, 국가경쟁력 증진 등을 말한다. 동서고금을 통틀어 가장 보편적인 국익은 부국강병,国泰民安(國泰民安)이다. 한국의 경우, 안보, 평화, 통일, 번영, 동북아 평화, 세계평화와 공영 등이 국익으로 제시된다.

국가안보전략 보고서를 처음으로 발간했던 노무현 정부는 동 보고서에서 ‘국가이익(국가 목표)’을 “국가의 생존, 번영과 발전 등 어떠한 안보 환경하에서도 지향해야 할 가치”로 정의했다. 그리고 헌법에 근거하여 국가안전보장, 자유민주주의와 인권 신장, 경제 발전과 복리증진, 한반도의 평화적 통일, 세계평화와 인류 공영에 기여 등 5개 항목을 제시했다. 당시 노무현 정부는 국익을 정의하면서, 이를 둘러싼 분쟁을 최소화하고자 헌법에서 5개 국익을 도출했었다(전봉근, 2017). 그 결과, 한국의 국익을 처음으로 명문화하는 데 성공했지만, 한국의 독특한 정체성을 반영하지 못해 매우 일반적인 국익 정의에 그쳤다.

사실 위에서 제시한 국익은 국가의 목적과 방향성을 제시하지만, 구체적인 한국의 외교안보 전략을 선택하는 데 지침 또는 판단기준이 되지 못하는 한계가 있다. 따라서 아래에서는 국익과 외교 전략에 ‘한국적’ 의미를 부여하는 차원에서 개별 이익의 배경이 되는 한국의 국가적 특성 또는 정체성을 들고 이에 부합하는 전략목표를 제시한다. 이 특성 또는 정체성은 한국이 활용할 자신의 강점뿐만 아니라 한국의 외교활동을 제약하는 취약한 특성도 포함한다(전봉근, 2019b).

첫째, 한국의 가장 두드러진 국가적 특성은 ‘분단국’이다. 이에 따라 한국은 북한과 무한 안보 경쟁, 즉 서로 먹고 먹히는 ‘통일 경쟁’을 하며, 수시로 전쟁 위기에 빠졌다. 탈냉전기 내내 한국의 최대 외교안보 과제였던 북한의 핵 개발과 핵 위협도 분단으로 인해 발생한 안보 위협 중 하나이다. 분단이라는 한국의 최대 국가적·안보적 결함으로 인해, 한국은 안보, 평화, 통일의 3개 국가안보 전략목표를 동시에 추구해야 한다. 그중에서, 최우선적인 국가안보 전략은 ‘강한 안보’로 북한의 전쟁 도발을 억제하며, 국가와 국민의 안전을 보장하는 것이 되어야 한다. 그런데 한국 단독으로 북한의 핵 위협과 전쟁

위협을 억제하고, 평화를 정착시키며, 통일을 달성하는 과업을 완수하기는 매우 어렵다. 따라서 한국 안보는 한미동맹에 크게 의존하고 있으며, 한반도 평화와 통일을 달성하려면 주변국과 국제사회 전체의 지원과 지지도 필요하다.

대북 관계에서 국가안보 목표는 전쟁 방지에 그치지 않고, 비핵화, 남북관계 개선, 미북 수교, 군사적 긴장 완화와 신뢰 구축 등을 통해 ‘평화 정착’을 달성하여 한반도 전쟁위험을 해소하고 통일의 기반을 구축하는 것도 포함한다. 나아가 남북관계 정상화, 민족 동질성 회복, 남북 경제공동체, 남북 연합 등을 통해 ‘통일’을 추구하는 것도 주요 대북정책 목표가 되어야 한다.

둘째, 한국은 주변 강대국에 둘러싸인 ‘중소국가’로서 대륙과 해양 세력이 지정학적으로 충돌하는 사이에 놓여 안보가 취약한 ‘끼인 국가’이다. 역사적으로 볼 때, 한반도는 주변 강대국 간 패권 경쟁에 말려들어 대규모 전쟁의 피해를 보고 또한 분할의 위기를 맞았으며, 지금의 분단도 그런 강대국 간 세력 경쟁과 담합의 결과이다. 따라서 강대국 사이에 끼인 중소국가로서 한국은 자강의 국방 태세를 갖추고, 한미동맹을 강화하며, 주변 강대국과 관계를 관리하고, 유엔 등 국제사회와 협력을 통해 국가 독립과 영토보전을 보장해야 하는 숙제가 있다.

셋째, 현대 한국은 통상국가, 세계국가, 개방국가이다. 이 정체성을 포함하는 동전의 뒷면에는 자원 빈국, 경제의 무역 의존도가 80%가 넘는 경제 취약 국가라는 부정적인 정체성이 있다. 자원 빈국의 약점을 극복하기 위해 노력한 결과, 오늘 한국은 경제 규모와 무역 규모가 10위 내외의 경제 대국이 되었다. 하지만 한국 경제는 여전히 경제의 교역 의존도 및 에너지 수입, 식량 수입 의존도가 과도히 높고, 내수시장은 작아서 외부 충격에 매우 민감하고 취약한 결점을 갖고 있다.

다른 대부분 경제 대국은 거대국가이거나, 또는 지역 협력체에 소속되어 외부의 지정학·지경학적 충격에 대한 저항성과 회복성이 한국보다 월등히 크다. 따라서 한국은 다른 어떤 나라보다도 국제경제통상에 대한 위협요인인 지역분쟁, 내전, 핵확산, (핵)테러, 해적, 기후변화 등을 저지하는 국제 안보를 사활적 국익으로 간주해야 한다. 이런 한국의 ‘세계적 국익’을 보장하려면, 세계평화와 공동번영에 적극적으로 이바지해야 한다. 또한 한국의 번영은 세계 경제의 번영, 그리고 국제시장과 자원·에너지 공급지에 대한 안정적인 접근에 달려있어, 이를 위해 경제·통상·에너지·개발 외교를 활성화해야 해야 한다.

넷째, 한국은 세계와 교류하는 ‘개방국가’이자 ‘세계국가’로서 세계화의 혜택을 최

대로 우리는 동시에 세계 분쟁과 테러의 위협과 그로 인한 피해에 크게 노출되어 있다. 세계적으로 활동하고 교류하는 한국민의 생명과 재산을 보호하는 국가의 기본적인 책무를 수행하기 위해, 한국의 국익은 국내에 한정되지 않고, 세계적인 평화와 안정을 유지하는 ‘세계적 국익’으로 확장되어야 한다.

2. 외교안보 정책의 원칙

외교안보의 원칙은 우리가 외교안보 국익과 전략목표를 추구하면서 매일 직면하고 대처해야 할 구체적인 정책 사안에 대한 우리의 견해와 대안을 결정하는데 근거가 되는 기본 지침 또는 평가 기준이 된다. 흔히 국가안보 전략에서 ‘원칙’이란 동 전략을 수행하는데 적용되는 보편적인 운영 원칙에 해당하는데, 주로 외교의 수단·방법을 선택하는 기준과 지침을 제시한다. 우리가 목표 달성을 위해 통과해야 할 미지의 환경에서 갈림길이나 장애물 등 선택의 순간을 만났을 때, 외교 원칙과 가치는 우리가 길을 잃지 않고 목표를 향해 나아갈 수 있게 하는 지침으로서 나침반의 기능을 수행한다. 만약 원칙과 가치가 없다면, 우리는 개별 정책 사안에 대해 일관된 결정을 내릴 수 없고, 또한 이런 원칙 없이 내려진 결정은 끝없는 논쟁에 시달리게 될 것이다. 이런 합의 부재는 남남갈등을 초래하고 정책추진력을 현저히 위축시킬 것이다. 따라서 국가안보 전략, 외교 전략 등을 새로이 수립할 경우, 정책 결정의 경우에 적용할 보편적인 원칙을 제시하고, 이에 대한 정치와 국민의 동의를 확보하는 작업이 필요하다.

여기에서는 한국 외교안보의 원칙으로서 자강, 국민 합의와 지속성, 공동안보와 포괄안보, 글로벌 거버넌스 등 4개를 제시한다. 구체적 내용은 아래와 같다.

첫째, 자강 원칙에 따라, 동북아 세력 경쟁과 북한 핵무장 시대의 매우 열악한 안보 환경에서 한국의 주권과 영토를 지키고 외교·안보적 독자성을 확보하기 위해서는 국방력과 외교력을 포함하는 안보 역량을 극대화해야 한다. 미국 외교정책이 점차 일방주의적, 고립주의적 성향을 보임에 따라, 한국도 미국에 대한 일방적인 안보 의존관계에서 벗어나 자강을 통해 상호적이며 호혜적인 동맹관계로 발전시킬 필요가 있다. 비록 바이든 행정부가 국제주의적 외교 노선으로 선회하고 동맹을 중시하지만, 미국은 더 이상 과거와 같이 관대한 패권국가가 아니다. 바이든 행정부에서도 트럼프 행정부의 ‘미국 제일주의’ 기조가 이어지고, 국내 정치적 불안정성도 커서 한국으로서는 과거와 같이 한미동맹의 바스켓에 모든 달걀을 담기 어렵다. 2010년대 들어 중국이 한미동맹을 견제하

기 위해 한국에 정치·경제적 강압을 행사하고 있어, 한국은 이에 대한 저항성을 높이기 위해 자강 안보 역량을 확충해야 한다.

둘째, 국민 합의와 지속성 원칙에 따라, 주요 국가안보 전략의 입안과 실행은 반드시 국민적 합의 절차를 거치도록 한다. 이때 비로소 대북정책, 대미정책, 대일정책에서 가장 큰 문제점으로 지적된 정권교체에 따른 정책 단절을 지양하고 지속가능성을 보장할 수 있을 것이다. 탈냉전기 들어 안보·통일 정책에 대한 국민 합의의 전통이 깨어졌다. 보수 정부와 진보 정부를 번갈아 거치면서 정책이념의 진폭이 크게 확장되었으나, 정부가 정책이념을 수렴하는 데 실패함으로써 모든 정책 사안에서 남남갈등이 만연하는 실정이다.

남남갈등의 결과, 국내적으로 정책추진의 동력이 현저히 약화하고, 상대국에 대한 협상력을 반감시키고 심지어 상대국의 간섭을 초래하는 부작용을 낳았다. 따라서 남남갈등의 해소는 추가 투입 없이도 외교안보 역량을 획기적으로 증진하는 방책이 될 것이다. 국민 합의와 지속성을 강화하려면 정책 입안 시 정책 여론 수렴, 정책공동체의 검토, 국회의 정책심의 등을 동원하며, 특히 국회와 NGO(Non-Governmental Organization)의 정책 여론 수렴 기능을 적극적으로 활용토록 한다. 위에서 토론했듯이, 국가안보 가치와 원칙에 대한 국민적 합의가 있다면, 개별 정책 사안에 대한 국민적 합의도 쉽게 만들어질 것이다.

셋째, 공동안보와 협력안보의 원칙에 따라, 공동안보를 통해 세력 경쟁에서 필연적으로 동반되는 안보딜레마를 극복하고, 협력안보를 통해 다자안보협력의 기회를 확장한다(전봉근, 2015). ‘공동안보(Common Security)’는 냉전기 미소 핵 대결과 핵전쟁이라는 국가 공멸의 안보 위협에 직면한 유럽국들이 제시한 안보 개념인데, 일명 ‘팔머 보고서’로 불리는 “공동안보: 생존을 위한 청사진”에서 구체화 되었다(The Independent Commission on Disarmament and Security Issue, 1982).

넷째, ‘글로벌 거버넌스’ 원칙에 따라, 세계적, 선도적 중견국인 한국이 국제사회의 공동이익을 보장하기 위해 새로운 평화와 협력의 세계질서를 창출하는 데 앞장선다. 이때 국가행위자뿐만 아니라 비국가행위자도 참여시키고, 경성 국제규범뿐만 아니라 연성 국제규범도 활용한다. ‘글로벌 거버넌스’는 일반적으로 “세계정부가 부재한 상황에서, 세계화의 진전으로 나타나는 새로운 국제 현안 또는 위협 요소들에 대해, 국제사회가 합의에 따라 취하는 집단적 조치들”로 정의된다. 이 개념은 특히 강대국 정치에서 배제된 중견국과 약소국이 선호한다. 강대국은 아니지만, 각종 공식, 비공식의 글로벌 거

버너스 프로세스를 통해 국제정치에 참여하는 효과가 있기 때문이다.

마지막으로, 미중 전략경쟁에 대비한 한국의 외교 가치로서 평화, 공영, 포용, 개방을 제시한다. 한국은 중추국가(끼인 국가), 통상국가, 세계국가, 중견국으로서 투명성·개방성·포용성·법치의 가치와 원칙을 지지한다. 이 가치들은 유엔과 자유주의 국제질서가 추구하는 보편적 가치이고, 특히 중소국이 국익 보호를 위해 보편적으로 채택하고 있으며, 이로써 국제사회의 진영화와 강대국 정치를 거부하고, 평화롭고 개방된 국제질서를 가능케 할 것이다.

3. 미중 전략경쟁 시대에 대한 한국의 옵션과 선택

미중 전략경쟁 사이에서 ‘끼인 국가’ 한국의 외교·안보 전략 옵션은 개념적으로 미국 줄서기(한미동맹 제일주의, 미국 편승), 중국 줄서기(중국 편승), 안미경중(安美經中)의 실용 외교(전략적 모호성, 균형 외교), 중립(등거리 외교, 비동맹) 등 4가지가 있다. 그런데 한국의 역사적 경험, 국민 여론, 경제 상황 등을 고려할 때, 중국 줄서기, 중립(등거리, 비동맹) 등은 현실성이 없는 옵션이다. 결론적으로, 한미동맹 강화, 미중 간 균형 외교와 전략적 모호성 유지, 한미동맹 플러스 헤징 등 3개 옵션이 현실성이 있고, 실제로 논쟁 중이다.

이 글은 한국의 국익(안보·평화·번영·통일)을 보호하고 확장하기 위한 최선의 옵션으로 한미동맹을 한국 외교의 기본 축으로 하되 중국과 전략적 협력동반자관계를 병행하여 확대 발전시키는 ‘미중 관계의 확대 발전’ 또는 ‘한미동맹 플러스’ 전략을 제시한다. 이 전략은 한국의 지정학적 위치, 역사적 경험, 국민 여론, 국력 규모, 경제성장 요구 등에서 도출한 한국의 국가 정체성인 중견국, 끼인 국가, 통상국가, 분단국가, 비핵평화 국가에 부합한다. 또한 이 전략은 한국이 지향하는 ‘글로벌 평화가교국가’ 또는 ‘글로벌 중추국가’를 가능하게 할 것이다.

사실 국내 다수 외교안보 전문가는 전통적 동맹론의 입장에서 한국이 더 늦기 전에 중국을 포기하고 한미동맹을 더욱 강화할 것을 주문한다. 하지만 중국이 적대시하기에는 너무 크고 인접한 초강대국이며, 북한의 배후국이자 준 동맹국이고, 한국의 최대 교역상대국이다(Walt, 1985). 이런 지정학적·지경학적 관계로 인해 중국은 한국에 대체 불가능한 경제적 기회를 제공하는 동시에 감당할 수 없는 경제 통상적·외교안보적 위협을 가할 수도 있다.

만약 중국이 한국에 적대적인 태도를 보이고 생존의 위협을 가한다면, 그때 한국은

미국과 전적으로 연대하며 생존을 도모하지만, 현재는 그런 상황이 아니다. 앞으로도 한국의 전략적 요충지로서 위치로 인해 중국이 한국을 처벌하여 미국 측으로 밀어내는 상황을 만들지는 않을 것으로 본다. 이런 상황에서 한국은 스스로 중국의 과도한 반발과 보복을 초래할 상황을 만들지 않도록 신중해야 한다. 이를 위해 한국은 중국의 역내 강대국 지위를 인정하고 최선의 한중관계를 유지토록 노력해야 한다. 한국에 한미동맹의 중요성은 말할 것도 없고, 이에 대한 국민의 합의도 매우 높다. 미국은 우리에게 대체 불가능한 외교안보와 경제통상 자산이다. 한미동맹이 없는 상태에서 한국이 홀로 남북관계, 한일관계, 한중관계, 한러관계를 어떻게 대처할 것인지를 상상하면 그 가치를 알 수 있다.

‘한미동맹 플러스’와 ‘미중 관계 확대 발전’을 위한 구체적인 외교정책 과제로 동북아에서 지역주의와 평화 협력, 소다자 전략대화, 세계적으로 다자주의 및 유사국(유럽국, 중견국, 기인 국가, 중소기업) 국제연대, 규범 기반 국제질서를 위한 글로벌 거버넌스(핵군축, 핵비확산, 신홍안보, 자유통상 네트워크) 참여 등을 적극적으로 추진해야 한다. 한미동맹과 각종 소다자·다자·지역 협력을 강화하고 활성화하지만, 대중 견제를 명시적 목표로 하는 배타적인 군사·안보·경제 협력체제에 참여하는 것은 매우 신중해야 한다.

미국은 세계국가이므로, 한국이 한미동맹의 (대중) 지역 동맹화를 거부하더라도, 다른 지역과 영역에서 미국과 협력하여 호혜적인 한미동맹을 만들 공간이 많다. 특히 인도태평양 지역과 비전통 안보 및 세계 안보 문제에 대해서 협력을 확대하는 방안을 적극 추진한다. 미국은 한국에 대중 견제를 위한 외교·안보·경제협력을 요구하지만, 사실 미국 자신도 대중 관계에서 이슈별로 대결·경쟁·협력(3C)을 구분하는 복합적 접근 전략을 실행 중이다. 따라서 한국도 고유한 국익과 지정학적 여건을 고려하여, 미국의 대중정책과 일체화해서는 안 되며, 한국의 고유한 국익과 외교 원칙에 따른 유연하고 복합적인 대중전략을 추진해야 한다.

IV. 결론

오늘날 국제질서의 변동과 혼돈 시대에 다수의 지정학적·지경학적 충돌 요인이 동시에 발생하는 동북아에서 어떻게 한국의 안녕과 발전을 보장할 것인가는 모든 한국인의 중대 고민이 아닐 수 없다. 이 고민에 대한 해답을 찾기 위해, 이 글은 한국 외교에서 전

략적 사고의 빈곤과 대전략의 부재 현상을 되돌아보고 이를 극복하는 데서 시작해야 한다고 주장했다. 사실 한국은 지난 75년간 미국의 외교안보 보호망에서 경제 발전과 정치 민주화의 성과를 거두었다. 안타깝게도 그동안에 한국의 대전략 역량, 자율적 외교 역량은 미발달 상태로 남았다. 향후 미중 경쟁과 진영화, 세계적 3분화와 무극화 추세가 초래한 국제질서 변동이 초래하는 거대 도전 요인에 한국 외교가 효과적으로 대응하지 못한다면, 구한말의 악몽이 재현될 가능성이 크다.

요약하면 미중 전략경쟁과 강대국 정치의 신지정학, 그리고 동북아의 신냉전 시대를 맞아 한국이 국가 비전과 국익을 실현하려면 먼저 국가 정체성과 국민 합의에 기반하고 지속 가능한 한국적 외교 원칙과 지침을 먼저 정립해야 한다. 위에서 제시한 시안을 포함하여, 관련 토론이 활성화되기를 기대한다. 나아가 국제질서의 과도기적 불확실성과 돌발 사건에 선제적, 효과적으로 대처하기 위해 정부와 정책공동체의 전략적 사고 역량이 크게 확충되어야 한다. 한국의 안보·평화·통일 국익을 실현하려면, 이를 위한 한국형 외교 대전략을 기획하고 실행하는 전략가의 역할이 중요하다. 특히 오늘 한국이 처한 복합적인 난국을 극복하려면, 냉전기 국제안보체제를 설계한 헨리 키신저 미 국무장관, 19세기 유럽 평화체제를 설계한 클레멘스 폰 메테르니히 오스트리아 외무장관, 독일 통일을 설계한 오토 폰 비스마르크 독일 총리 등이 한꺼번에 필요하다.

참고문헌

- 구대열, 『삼국통일의 정치학』, 까치글방, 2010.
- 김명기, 『정묘병자호란과 동아시아』, 푸른역사, 2009.
- 김삼배 외, 『신국제질서와 한국 외교전략』, 명인문화사, 2021.
- 김태현, “한국 외교정책 50년의 검토와 평가: 중소국 외교론의 관점에서,” 『한국과 국제정치』, 경남대학교 극동문제연구소, 39(1), 2022, pp.79-114.
- 문정인, 『문정인의 미래 시나리오』, 청림출판, 2021.
- 배기찬, 『코리아 생존 전략: 패권경쟁과 전쟁위기 속에서 새우가 아닌 고래가 되기 위한 전략』, 위즈덤하우스, 2017.
- 신병식 외, 『아시아의 지정학적 중간국 외교』, 진인진, 2022.
- 윤영관, 『외교의 시대: 한반도의 길을 묻다』, 미지북스, 2015.
- 전봉근 외, “뉴노멀 시대 미중 전략 경쟁 관계와 한반도와의 함의,” 1부, 2부, 통일연구원 KINU 연구총서, 2017.
- 전봉근, “21세기 한국 국제안보 연구: 개념과 실제,” 국립외교원 외교안보연구소 정책연구시리즈, 2015.
- 전봉근, “국가안보전략의 국익 개념과 체계,” 국립외교원 외교안보연구소, 2017.
- 전봉근, “미중 경쟁시대 한국의 중간국 외교전략 모색,” 국립외교원 외교안보연구소, 2019a.
- 전봉근, “미중 경쟁 시대 정체성 기반 국익과 신 외교원칙 모색,” 국립외교원 외교안보연구소, 2019b.
- 전봉근, 『한반도 국제정치의 비극』, 박영사, 2023.
- 전재성, 『동북아 국제정치이론: 불완전 주권국가들의 국제정치』, 한울아카데미, 2020.
- 정하현 외, 『동북아 관계사의 성격』, 동북아역사재단, 2009.
- 조동준, 『안보위협과 중소국의 선택』, 세계정치 11, 봄여름호, 2009.
- Allison, Graham, *Destined For War*, Mariner Books, 2018.
- Brzezinski, Zbigniew, *The Grand Chessboard: American Primacy and its Geostrategic Imperatives*, Basic Books, 1997.
- European Parliament, “EU Strategic Autonomy 2013-2023: From Concept to Capacity,” 2022 <[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/733589/EPRS_BRI\(2022\)733589_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/733589/EPRS_BRI(2022)733589_EN.pdf)> (검색일: 2024.4.5).
- Fukuyama, Francis, *The End of History and the Last Man*, Free Press, 1992.
- Haass, Richard, *A World in Disarray: American Foreign Policy and the Crisis of the Old Order*, Penguin Press, 2017.
- Kaplan, Robert D., *The Revenge of Geography: What the Map Tells us about Coming Conflicts and the Battle against Fate*, Random House, 2012.

- Mackinder, Halford J., "The Geographical Pivot of History," *The Geographical Journal*, 23(4), 1904.
- Marshall, Tim, *Prisoners of Geography: Ten Maps That Explain Everything about the World*, Scribner, 2016.
- Mearsheimer, John J., "Back to the Future: Instability in Europe after the Cold War," *International Security*, 15(1), 1990.
- Mearsheimer, John J., "The Tragedy of Great Power Politics," Norton, 2014.
- Michaels, Eva, "European Strategic Autonomy 2.0: What Europe Needs to Get Right," 2023 <<https://carnegieeurope.eu/strategieurope/90077>> (검색일: 2024.4.5).
- Seshadri, Chandana, "Western Sanctions on Russia and the Global South's Stance," *The Royal United Services Institute*, 2023.
- The Independent Commission on Disarmament and Security Issue, *Common Security: A Blueprint for Survival*, Simon and Schuster, 1982.
- The White House, "National Security Strategy of the United States of America," The White House, 2017.
- The White House, "United States Strategic Approach to the People's Republic of China," 2020 <<https://trumpwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2020/05/U.S.-Strategic-Approach-to-The-Peoples-Republic-of-China-Report-5.24v1.pdf>> (검색일: 2024.4.5).
- Walt, Stephen M., "Alliance Formation and the Balance of World Power," *International Security*, 9(4), 1985.

Abstract

Korea's Grand Strategy in an Era of Global Neo-geopolitics

Bonggeun Jeon*

In an era of change and uncertainty in the international order and in Northeast Asia where multiple geopolitical and geo-economic threats occur simultaneously, how to ensure Korea's security and prosperity is a major concern for all Koreans. If Korean diplomacy fails to effectively respond to such changes and threats brought about by return of great power politics, international disorder, disintegration of liberal global governance and U.S.-China strategic competition and global bloc-ization, there is a high possibility that the nightmarish fate of the late Joseon Dynasty could be repeated. In order to respond to an era of conflictual neo-geopolitics and neo-economics in Northeast Asia, it is essential for Korea to establish a new Korea-type grand strategy and foreign policy principles. In order for Korea to realize its national vision and national interests effectively and sustainably, these grand strategy and foreign policy principles should be based on Korea's national identity and consensus. As Korea's diplomatic strategy, this article presents the 'ROK-U.S. Alliance Plus,' which places the ROK-U.S. alliance at the core of its grand strategy while simultaneously expanding and developing a strategic cooperative partnership with China.

Keywords U.S.-China Competition, Rise of China, Northeast Asia, Geopolitics, Grand Strategy

* Emeritus Professor at the Korea National Diplomatic Academy and President of the Korea Nuclear Policy Society Korea's Grand Strategy in an Era of Global Neo-geopolitics (jun2030@mofa.or.kr)

“원자력전략·정책연구” 논문의 투고 요령

- 본 학술지는 원자력 전략과 정책 등과 관련된 이론 및 정책 논문을 게재한다.
- 타 학술지에 게재하였거나 투고하여 심사 중인 논문은 투고할 수 없다. 단, 연구기관 발간분석보고서 및 연구용역보고서 등을 논문 형식으로 수정·보완하여 투고한 경우, 편집위원장의 판단을 거쳐 심사를 진행하되 원문의 출처를 밝히고 수록할 수 있다.
- 본 학술지는 연 2회(6월 30일, 12월 31일) 발간하며, 논문은 연중 상시 모집한다.
- 논문을 투고할 때 초록은 핵심내용을 모두 포함한 400자 이내의 국문초록, 200단어 이내의 영문초록, 그리고 국문 및 영문 제목, 5개 이내의 국문 및 영문 주제어를 함께 기재하여 제출한다. 모든 논문은 아래아한글로 작성한다.
- 논문 투고자는 이메일을 통해 투고논문, 연구윤리규정 준수 서약, 투고논문에 대한 저작권재산권 이양 동의서를 제출한다.
- 본 학술지에 게재하는 논문에 대한 저작권재산권은 서울대학교 원자력미래기술정책연구소가 갖는다.

논문의 작성요령

- 논문은 다음 양식에 따라 작성하고, 분량은 본문, 각주, 참고문헌을 포함하여 A4용지 10매 내외로 하며 어떠한 경우라도 15매를 초과할 수 없다. 정해진 분량을 초과한 원고는 심사 전 분량에 맞게 수정을 요청한다.
- 용지: A4, 단면, 좁게, 위/아래/왼쪽/오른쪽 여백 30, 머리말 15, 꼬리말 0, 제본 0
- 문단모양: 좌/우 여백 0, 줄간격 180, 문단 시작 들여쓰기 한글 2글자, 양쪽 혼합, 낱말 간격 0
- 글자모양: 한글(휴먼명조), 본문 글자 크기 11포인트, 각주 글자 크기 9포인트, 장평 100%, 자간 0%
- 본문의 항목 구분은 절, 항, 목의 순으로 배열한다. 항목에 붙는 항번의 경우, 절은 ‘I, II, III, ...’(글자 크기 20포인트)의 순으로, 항은 ‘1, 2, 3, ...’(13포인트)의 순으로, 목은 ‘가, 나, 다, ...’(12.5포인트)의 순으로 번호를 매긴 후, 제목을 표기한다.
- 논문 첫머리의 필자 등의 소개를 위한 각주는 *, **, *** 등의 기호를 사용하고 본문에

서의 일반적인 각주는 1, 2, 3 등으로 표기한다.

- 수식의 경우 번호 매김은 절, 항의 구분 없이 우측 정렬하여(선 없음), 괄호 속의 일련 번호 ‘(1), (2), (3), …’로 표기한다.
- 간단한 인용논문의 표기는 각주로 처리하지 않고 본문 중에서 직접 처리한다. 외국저자의 경우는 국문으로 번역하지 않고 원문 표기를 원칙으로 한다. 저자가 두 명 이상인 경우는 다음 예와 같이 표기한다. “1) Duflo, Kremer, and Robinson(2011)과 최광(2003b)에서 언급한 내용을 정리하면… 2) 기존 연구(옥동석 외, 2010; 고영선, 1999)를 토대로 재정리한 결과는 다음과 같다.”
- 표나 그림에는 일련번호를 부여한다. 예) [표 1], [표 2], …, [그림 1], [그림 2], …
- 본문과 각주에서 언급된 모든 문헌의 자세한 문헌 정보는 논문 말미의 참고문헌에서 밝힌다. 본문과 각주에서 언급되지 않는 문헌은 포함시키지 않는 것을 원칙으로 한다.

참고문헌의 작성요령

- 각 문헌은 한글, 기타 동양어, 영어, 기타 서양어 문헌 순으로 배치하며, 배열의 순서는 동양 문헌은 “가나다 순”으로, 서양 문헌은 “알파벳 순”으로 한다.
- 페이지 표시는 한 면일 경우 p., 여러 면일 경우 pp.로 표시한다.
- 같은 저자의 여러 문헌은 연도순으로 나열하며 같은 해에 발행된 문헌이 둘 이상일 경우에는 글에서 언급된 순서에 따라 발행 연도 뒤에 a, b, c를 첨가하여 구분한다.
- 각각의 문헌의 구체적인 표시는 아래에 제시된 형식에 따라 작성한다. 논문(학위논문 포함), 기사, 인터넷 자료 등은 동양 문헌 및 서양 문헌 모두 큰따옴표(“ ”)로 표시한다.
- 저서 또는 번역서(그리고 편저서, 학회지, 월간지, 주간지, 일간지 등)는 동양 문헌의 경우는 낫표(『 』)로, 서양 문헌의 경우는 기호 없이 이탤릭체(*italic*)로 표기한다.
- 인터넷 자료를 인용하는 경우, 제작자, 주제명, 제작연도, 웹주소(검색일자)의 순으로 한다.

참고문헌 작성 예시

- 고경민, 정범진, “원자력의 경제성: 쟁점 검토와 해결 과제”, 『에너지경제연구』 제11권 제2호, 2012, pp. 191-219.
- 국가통계포털, 국내통계, 2010 <<http://kosis.kr>>(검색일: 2011.11.30).
- 문주현, “핵무기 감축 효과 측면에서 북한의 영변 핵시설 폐기안 평가”, 『국가전략』 제25권 제2호, 2019, pp. 67-90.
- 문주현, “탈원전 굴레 벗은 원전산업이 이룬 성과와 과제”, 에너지경제신문, 2023.1.8.
- 어근선, 『다시 생각하는 원자력』, MID 엠아이디, 2022.
- 원자력진흥위원회, 『제6차 원자력진흥종합계획』, 원자력진흥위원회, 2021.
- 이병철, “한국의 핵농축 권한에 대한 소고”, 『Journal of North Korea Studies』 제6권 제2호, 2020a, pp. 5-22.
- 이병철, “한국 핵무장 담론의 새로운 방향 모색”, 『국방연구』 제63권 제2호, 2020b, pp. 27-58.
- 이지민, “소형모듈원자로 해피 기술개발 동향”, 『원자력 정책 Brife Report』 통권 64호, 한국원자력연구원, 2022.
- 이찬복, 『에너지 상식사전』, MID 엠아이디, 2019.
- 조건우, 『조건우의 방사선방호 이야기』, 집문당, 2020.
- 조규성 역, 『환경주의 생물학자가 바라본 WHY 원자력이 필요한가』(Why We Need Nuclear Power, Michael H. Fox), 글마당, 2000.
- 주필현, 최성열, 이종호, “Analysis of Nuclear Power Build-up Scenario for Net Zero Carbon in 2050”, 『2022 추계학술발표회』, 한국원자력학회, 2022.
- Abousahl, S., P. Carbol, B. Farrar, H. Gerbelova, R. Konings, K. Lubomirova, M. Martin Ramos, V. Matuzas, K. Nilsson, P. Peerani, M. Peinador Veira, V. Rondinella, A. Van Kalleveen, S. Van Winckel, J. Vegh, and F. Wastin, “Technical Assessment of Nuclear Energy with Respect to the ‘Do No Significant Harm’ Criteria of Regulation (EU) 2020/852 (Taxonomy Regulation),” JRC125953, Publications Office of the European Union, 2021.
- Choi, Sungyeol, Eunju Jun, Il Soon Hwang, Anne Starz, Tom Mazour, Soon Heung Chang, and Alex R. Burkart, “Fourteen Lessons Learned from the Successful

Nuclear Power Program of the Republic of Korea,” *Energy Policy*, vol. 37 no. 12, 2009, pp. 5494–5508.

- OECD/NEA, “The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle,” OECD Publishing, 2013.
- Sagan, D. Scott, “The Causes of Nuclear Weapons Proliferation,” *Annual Review of Political Science*, vol. 14, 2011, pp. 225–244.
- Yim, Man-Sung, “Nuclear Waste Management: Science, Technology, and Policy,” *Lecture Notes in Energy*, Springer Nature B.V., 2022.

『원자력전략·정책연구』 편집위원회

편집위원장	문주현(단국대학교 에너지공학과)
편집위원	김진수(한양대학교 자원환경공학과)
	심형진(서울대학교 에너지시스템공학부)
	이병철(경남대학교 극동문제연구소)
	이상민(한국국방연구원 북한군사연구실)
	전은주(한국원자력연구원 국제사업부)
	조비연(한국국방연구원 안보전략연구센터)
	최성열(서울대학교 에너지시스템공학부)
	허균영(경희대학교 원자력공학과)
편집간사	장재환(서울대학교 원자력미래기술정책연구소)

『원자력전략·정책연구』는 6월 30일, 12월 31일 연 2회 발행됩니다.

원자력전략·정책연구

제2권 제1호, 2024년 6월

2024년 6월 30일 발행

발행처	서울대학교 원자력미래기술정책연구소
발행인	김근호
편 집	서울대학교 원자력미래기술정책연구소 원자력전략·정책연구 편집위원회 (08826) 서울시 관악구 관악로 1 서울대학교 공과대학(36동) 411호 전화: 02-880-7231 팩스: 02-880-7386
인 쇄	서울대학교출판문화원 전화: 02-880-5220 팩스: 02-871-9473

ISSN 2983-1547

Review on Nuclear Energy Strategy and Policy

Vol. 2 No. 1, June 2024

Achievements and Implications of Establishing a Comprehensive Nuclear Safety Plan with Public Participation

Hyejeong Kim

Global Trends and Policy Suggestions in the SMR Industry

Seokbin Park

Proposed Procedures for Verifying and Disabling Uranium Enrichment Facilities for Denuclearization

Yiseock Yoon, Hyeongpil Ham, and Seungmin Woo

Korea's Grand Strategy in an Era of Global Neo-geopolitics

Bonggeun Jeon