

해외 전문가 칼럼 | 2024년 2월

후쿠시마 원전 사고 이후 일본의 원자력 산업

들어가며

2011년 후쿠시마 원전 사고 이후 정체기에 빠졌던 일본 원자력 산업은 기시다 총리의 주도 아래 다시 활기를 되찾고 있다. 일본은 국제 협력을 통해 다양한 원자력 프로젝트를 추진하고 있으며, 향후 일본과 협력할 수 있는 분야를 살펴본다.



사고 이후 원자력 업계에 불어온 변화

2011년 3월 후쿠시마 다이치 원전 사고가 발생한 이후 일본의 원자력 발전 산업은 약 10년간 답보상태에 빠졌다. 사고 이후 모든 상업용 원전이 폐쇄됐으며, 원자력 규제 정책에 근본적인 변화가 일어났다. 원자력 규제 당국이 원전 사업자의 이익에 영향했다는 비판이 일자 독립 기관인 원자력규제위원회(NRA)가 2012년 신설됐다. 2013년에는 원자로를 검토 및

허가할 때 중대 사고에 대비한 안전 조치를 보장해야 한다는 원자력규제 위원회의 새로운 규제요건이 마련됐다. 지진, 쓰나미 같은 자연재해 뿐 아니라 테러 공격 등 심각한 사고에 대비하는 대규모 안전 시설을 갖춰야 한다는 규정은 전력업체들에 막대한 부담을 야기하므로 결국 전기요금의 인상이 뒤따를 수밖에 없다. 따라서 일본의 원자력 산업은 다양한 안전 조치에 대한 투자와 막대한 필수 비용을 최적으로 산정해야 한다. 2024년 1월 기준 상업용 원전 50기 중 24기가 폐쇄됐고,

Masako Ikegami

· 일본 도쿄공업대학
환경사회학부 교수

12기는 가동을 재개했으며, 10기는 검토 중, 9기는 아직 허가 미신청 상태, 5기는 설치 변경 허가를 받았다¹⁾.

2022년 8월 기시다 후미오 일본 총리는 원전 재가동, 신규 원전 건설, 소형모듈원전(SMR)을 포함한 신규 원전 연구개발 확대 등을 통해 일본 원자력 산업의 부활 계획을 발표했다²⁾. 그의 정책 이니셔티브는 2023년 5월 31일 승인된 일본의 ‘녹색전환(Green Transformation, GX) 및 탈탄소화전력원법(GX脱炭素電源法)’으로 발전했다. 이 법은 재생에너지 도입을 촉진하는 동시에 원전 이용을 극대화한다는 점에서 특별하다. 일본에서 원자력과 재생에너지가 양립할 수 없다고 생각돼 왔던 기존의 입장에서 탈피한 것이다.

이 법은 또한 원전의 가동, 유지보수, 관리 등 모든 측면에서 안전을 보장하는 것이 선결과제를 강조하고 있다. 원전은 원자력규제위원회의 안전 검사를 반드시 통과해야 하며, 원자로 재가동을 위해서 현지 지역사회와의 합의가 필요하다. ‘녹색 전환 및 탈탄소화’는 현재 일본의 황금률로서, 재생에너지와 원자력 에너지 모두를 위한 혁신 기술 연구개발(R&D)에 대한 다양한 투자를 주도하고 있는 원칙이다. 국제 협력이 필요한 3가지 주요 프로젝트 분야는 다음과 같다.

국제 협력이 필요한 3가지 주요 프로젝트 분야

1) 해체 및 제염

후쿠시마 다이치 원자로의 해체 및 제염에 일본 정부와 도쿄전력은 상당한 자원을 투입하고 있다. 1호~3호기 내부에 녹아 내린 핵연료, 구조재 등 핵연료 잔해의 총량은 880톤 규모로 추산되며, 정부와 도쿄전력은 시범적으로 2호기의 잔해물을 제거하는 작업을 처음 시작할 계획이다³⁾. 정부와 도쿄전력은 이번 회계연도 말까지 2호기의 핵연료 잔해 반출 작업을 개시하기를 바라고 있지만, 로봇 팔을 투입할 배관 내부가 퇴적물로 메워져 있어 난항을 겪었다. 2024년 1월 퇴적물을 제거하는 작업이 시작됐으나, 예상과 달리 그 과정은 험난했다.

이처럼 전례 없는 상황 속에서 일본은 예전 사고의 경험을 토대로 국내 기술 뿐만 아니라 해외의 첨단 기술을 결합시켜야 한다⁴⁾. 미국 에너지솔루션스(U.S. Energy Solutions)와 도시바(Toshiba)가 공동 개발한 다핵종 제거 고급 액체 처리 시스템(Advanced Liquid Processing System, ALPS), 미국 큐리온(Kurion)과 프랑스 베올리아(Veolia)의 세슘·스트론튬 제거 장비, 미국 아이로봇(iRobot)의 내부 검사용 소형 로봇 등 이미 많은 외국기업들이 협력하고 있거나 장비를 공급하고 있다.

1) 일본 자원에너지청([Japanese Agency for Natural Resources and Energy](#))

2) 미국 국제무역청, [일본-국가산업 가이드: 민간 원자력 발전](#)

3) NHK, 2024년 1월 25일

4) 미쓰비시종합연구소([Mitsubishi Research Institute](#))

일본자원에너지청(Japanese Agency for Natural Resources and Energy)은 IBC어드밴스드 테크놀로지스(IBC Advanced Technologies), 아레바(AREVA), 카벤디시뉴클리어(Cavendish Nuclear), 코멕스 뉴클레어(COMEX NUCLEAIRE), 러시아 연방 핵폐기물처리공사(Russian Federal State Unitary Enterprise) 등 여러 해외 기업들과 다양한 응용 연구 프로젝트를 수행해왔다. 일본원자력연구개발기구(Japan Atomic Energy Agency)는 2015년 후쿠시마 연구 및 개발 분야를 다루는 첨단해체과학협력 연구소(Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science, CLADS)를 설립했다⁵⁾. CLADS는 연료 잔해, 방사성 폐기물 관리, 환경 복원, 일반 방사선 과학 등 4가지 R&D 분야의 문제 해결에 주력하고 있다. CLADS는 해체 과학에 대한 보조금을 제공하며 국제 협력을 장려한다. 2023년 일본원자력연구개발기구는 영국 카벤디시뉴클리어, 제이콥스 클린 에너지(Jacobs Clean Energy Limited)와 2018년 폐로가 결정된 프로토타입 고속증식로 몬주(Monju)의 해체 지원을 위한 계약을 체결했다. 해당 계약은 산업 재활용을 위해 몬주 나트륨을 처리하는 새로운 시설의 설계, 건설, 운영, 최종 해체에 대한 것으로, 영국 원자력해체청(Nuclear Decommissioning Authority) 산하 INSJ(International Nuclear Services Japan)의 지원을 받고 영국 파트너인 제이콥스 클린에너지와 협력하는 방안을 담고 있다⁶⁾.

2) 핵연료

롯데카쇼(Rokkasho) 재처리 공장은 일본 최초의 상업용 재처리 공장이다. 확산 리스크를 줄이기 위해 롯데카쇼 재처리 공장은 플루토늄-우라늄 공동 추출 기술을 채택했다. 이는 우라늄과 플루토늄을 개별 분리해 결합한 후 탈질산을 거치는 기술이며, 그 과정에서 플루토늄은 우라늄-플루토늄 혼합 산화물(MOX)로 전환된다⁷⁾. 동일본 대지진 여파로 롯데카쇼 재처리 공장이 2008년 능동 테스트(원전의 경우 시운전에 해당)를 중단한 이후 50년이 지났다. 이 기업의 직원들 중 절반 이상은 능동 테스트 경험이 없는 상태다. 2023년 12월 JNFL(Japan Nuclear Fuel Limited)은 설계 및 건설 계획 승인 신청서를 원자력규제위원회에 제출했고, 현재 2024회계연도 내로 최대한 빠른 시일 안에 완공하기 위한 최종 단계에 있다⁸⁾. 앞서 2022년 12월, JNFL은 일본 아오모리 현 롯데카쇼에서 건설 중인 재처리 공장이 당초 예정됐던 2022년이 아닌 2024년 상업운전을 시작할 것으로 예상된다고 발표했다⁹⁾. 롯데카쇼 재처리 공장 건설은 1993년 시작됐고 원래 1997년 완공될 예정이었다. 그러나 건설과 시범가동이 몇 차례 지연되었고 2011년 3월 후쿠시마 다이치 원전 사고가 발생한 후, 2013년 12월 핵연료주기 시설에 대한 새로운 안전 기준이 시행됐다. 이러한 가운데 롯데카쇼 재처리 공장 건설 지연은 일본의 핵연료 재활용 시스템 전체에 영향을 미치고 있다.

5) <https://clads.jaea.go.jp/en/about/outline.html>

6) <https://www.jaea.go.jp/04/sefard/situation/2023/202305.html>

7) <https://www.jnfl.co.jp/en/business/reprocessing/>

8) 원자력산업신문(Genshinyoku Sangyo Shimbun) 2024년 1월 19일자

9) <https://world-nuclear-news.org/Articles/Rokkasho-reprocessing-plant-completion-delayed-aga>

제28차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP28)에서 캐나다, 일본, 프랑스, 영국, 미국 등 5개국이 결성한 '삿포로5(Sapporo 5)'는 러시아산 원료에 의존하지 않고 농축 우라늄 생산능력에 대한 민관 투자를 촉진하겠다고 선언했다. 이들 5개국은 세계 우라늄 변환 및 농축 생산능력의 50%를 차지하고 있다. 삿포로5는 러시아의 영향력이나 다른 국가의 정치적 영향에서 벗어나 탄력적인 글로벌 우라늄 공급 시장을 구축하는 것이 목표다¹⁰⁾. 5개국은 동 프로젝트를 위해 향후 3년간 우라늄 농축 및 변환에 42억 달러를 투자할 예정이다. SMR 등 첨단 기술에 필요한 고순도 저농축 우라늄(High-Assay Low-Enriched Uranium, HALEU)의 경우 현재 러시아와 중국만이 대규모 생산 인프라를 보유하고 있다¹¹⁾. 미국 에너지부는 2024년 1월 자국 내 HALEU 공급을 확보하기 위해 우라늄 농축 서비스에 대한 제안요청서(RFP)를 발표했다¹²⁾.

3) 차세대 첨단 원자로

JAEA는 몬주, 조요(Joyo) 고속실험로 등 소듐냉각 고속로(SFR, 액체로 용해된 상태의 금속 소듐(Na)을 냉각재로 사용하는 고속로)를 가동한 역사를 갖고 있다. 그러나 일본 정부는 1995년 소듐 냉각재 누출 등 문제가 발생하자 2016년 몬주 폐로를 결정했고, 이에 따라 일본의 고속로 개발이 중단됐다. 그러나 2018년 일본 내각은 다양한 종류의 고속로 개발 효과성을 평가하고 있다고 밝혔다.

일본원자력연구개발 기구는 고속로 개발의 전략적 로드맵에서 주도적인 역할을 하고 있으며, 효과적인 개발을 추진하려면 고속로 개발에 관한 미-일 협력을 촉진하는 등의 국제 협력이 핵심적이다. 2023년 11월 미국 테라파워(TerraPower), 일본원자력연구개발기구, 미쓰비시중공업(MHI), 미쓰비시FBR 시스템스(MFBR)는 2022년 1월 체결했던 소듐냉각 고속로 개발에 관한 기존 양해각서의 범위를 확대하기로 합의했다¹³⁾.

일본과 미국은 또한 소듐냉각재를 사용하는 다목적 시험고속로(VTR) 개발에도 협력하고 있다. 미국 에너지부는 소듐 외에도 용융염, 가스 냉각재 등의 노심 내 테스트를 수행할 수 있는 VTR 건설을 추진하고 있다. VTR은 빠른 중성자 조사(neutron irradiation)가 가능한 금속 연료를 사용하는 고속로이며, 전력을 생산하지 않는다. 미국 에너지부 백서에 따르면, 소듐냉각고속로와 VTR을 연달아 건설하면 100~200억 달러의 비용을 절감할 수 있을 것으로 예상된다. VTR 원자로의 설계 및 건설은 소듐 원자로와 마찬가지로 벡텔(Bechtel), GE히타치(GE Hitachi), 테라파워 컨소시엄이 수행했으며 GE히타치뉴클리어에너지(GE Hitachi Nuclear Energy)의 PRISM 원자로 설계 기술을 기반으로 하고 있다¹⁴⁾.

2023년 일본 경제산업성 장관과 프랑스 에너지전환부

10) 삿포로5 <https://www.meti.go.jp/press/2023/12/20231208006/20231208006-e.pdf>

11) [https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/high-assay-low-enriched-uranium-\(haleu\).aspx](https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/high-assay-low-enriched-uranium-(haleu).aspx)

12) <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-next-steps-build-domestic-uranium-supply-advanced-nuclear-reactors-part>

13) <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/TerraPower-expands-cooperation-with-japan-on-fast>

14) <https://www.nuctcu.ac.jp/wp-content/uploads/2022/07/a3e66cc2a3193774f8dc4a875be838fe.pdf>

장관은 안전한 장기운전(LTO)을 위한 R&D 분야 원자력 에너지 협력 및 기존 원자로의 안전 개선에 관한 공동 성명서를 발표했다. 동 성명서에는 후쿠시마 다이치 원전 해체를 위한 안전 보장 등 원전의 지속적이며 효율적인 해체, 원자로 부품과 핵연료를 포함한 공급망 유지 및 강화, 폐기물을 최소화하고 천연 우라늄의 수요를 줄이는 재처리 정책 촉진, MOX 폐연료(SFMOX) 재처리에 대한 핵연료주기 기술 협력, 특히 소듐냉각고속로와 관련해 차세대 첨단로 개발을 위한 R&D 협력 등이 포함된다¹⁵⁾.

일본원자력연구개발기구, 일본 전력중앙연구소(Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI), 미쓰비시중공업, 미쓰비시FBR 시스템스는 2024년 1월 미국 아르곤국립연구소(Argonne National Laboratory)와 고속로의 금속연료 및 건식 재처리에 관한 공동 연구를 수행할 것이라고 발표했다. 아르곤국립연구소는 고속 실험로 EBR-2를 보유하고 있으며, 폐금속연료의 고온화학 재처리 분야의 경험을 갖고 있어, 4개사에게 금속연료 제조, 조사, 중대 사고 테스트 등 분야의 전문기술을 제공할 예정이며, 일본 기업들은 설계 평가 등의 비용을 부담할 예정이다¹⁶⁾.

핵융합로는 일본에서 R&D 투자의 또 다른 중요한 부분을 차지하고 있다. 일본핵융합과학연구소(NIFS)가 기초연구를 주도하고 있지만, 현재 많은 스타트업들과 벤처 기업들이 융합로를 개발하고 있다. 히타치, 미쓰비시중공업, 도시바를 비롯해 교토퓨저니어링(Kyoto Fusionengineering) 등 스타트업 3곳을 포함하여 총 17개 기업이 융합로를 개발하고 있다¹⁷⁾.

해상 부유식 원전도 일본과 다른 국가에서 많은 주목을 받고 있는 새로운 기술이다. 일레로 오노미치조선(Onomichi Shipbuilding)과 이마바리조선(Imabari Shipbuilding)은 2023년 5월, 영국 스타트업 코어파워(Core Power)의 해상 부유식 원전에 8,000만 달러를 투자했다고 밝혔다¹⁸⁾. 코어파워는 마이크로소프트(MS)의 설립자 빌 게이츠(Bill Gates)가 지분을 보유하고 있는 미국 테라파워, 미국 전력·가스기업 서던컴퍼니(Southern Company), 프랑스의 핵연료 사이클 기업 오라노(Orano) 등과 협력해 해상 부유식 원전을 개발하고 있다¹⁹⁾.

15) https://www.meti.go.jp/press/2023/05/20230503001/20230503001_3.pdf
<https://www.jaea.go.jp/04/sefard/situation/2023/202305.html>

16) 덴류쿠신문(Denryoku Shimbun) 2024년 1월 24일자

17) <https://www.nikkei.com/compass/search/Y2F0ZWdvcnk9Y29tcGFueS20aGVhZT0zOTIwMA>

18) <https://asia.nikkei.com/Business/Technology/Japan-s-Onomichi-Dockyard-leads-80m-bet-on-floating-nuclear-plants>

19) <https://www.jaea.go.jp/04/sefard/situation/2023/202305.html>

제언

후쿠시마 다이치 원자로의 해체 및 제염은 인류 역사상 전례 없는 도전과제이며, 안전하고 효과적인 해체 방안을 개발하기 위해 막대한 자금이 투입되고 있다. 이는 첨단 원자력 과학, 로봇, 기계 엔지니어링 등이 요구되는 복잡하고 포괄적인 과정이다. 안전하고 효과적인 조치들이 마련된다면 전 세계 노후 원전 해체에 적용될 수 있으며, 원자력 산업에 잠재적인 사업 기회가 될 것이다.

2023년 2월 일본 내각은 해체 예정인 발전소가 있는 부지에 새로운 안전 메커니즘을 갖춘 차세대 첨단로를 건설하여 기존 발전소를 대체할 수 있도록 개발을 촉진해야 한다면서 ‘녹색 전환 달성을 위한 기본 정책(Basic Policy Towards Realizing the Green Transformation)’을 승인했다²⁰⁾. 일본 정부는 이러한 이니셔티브를 통해 2030~2040년 차세대 첨단로의 시운전 및 상업운전을 개시할 계획이다.

혁신경수로(ILWR)는 기존의 경수로 기술을 기반으로 하므로 기술적으로 가장 성숙한 원자로이며 일본에서 가장 선호되고 있다. 혁신경수로의 상업

운전은 2030년대 말에 예정돼 있다. 고온가스냉각로 (HTGR)가 그 다음 가동되며, 고속중성자로(Fast Neutron Reactor)와 SMR이 2040년대 초, 융합로를 그 다음으로 가동(목표 시기는 구체적으로 공개되지 않음)한다는 목표다²¹⁾. 차세대 첨단로 R&D에 대한 투자가 활발히 이뤄지고 있으며, 미국 국제무역 관 리 청 (International Trade Administration) 은 일본에서 진행되고 있는 국제 협력 사례를 사업 기회로 보고 있다²²⁾.

[참고문헌]

- [The federation of Electric Power Companies of Japan](#)
- [Nuclear Regulation Authority, Japan](#)
- [The U.S. International Trade Administration, Japan-Country Commercial Guide](#)
- [Nuclear Power in Japan](#)

20) <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/japan-civil-nuclear-power>

21) <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/japan-civil-nuclear-power>

22) <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/japan-civil-nuclear-power>

해당 원고에 대해 사전 동의 없이 상업 상 또는 다른 목적으로 무단 전재·변경·제 3자 배포 등을 금합니다.
또한 본 원고를 인용하시거나 활용하실 경우 △출처 표기 △원본 변경 불가 등의 이용 규칙을 지켜셔야 합니다.
해당 원고의 내용은 집필자 개인의 의견으로 한국원전수출산업협회의 공식견해가 아님을 밝힙니다.