

유의사항: 이 보고서는 그린피스 일본사무소와 그린피스 동아시아 서울사무소의 의뢰로 작성되었으나, 보고서에 담긴 필자의 가정과 견해는 그린피스의 의견과 반드시 일치하지 않습니다.

후쿠시마 제1원전 폐로 기술 분석

플랜 A에서 플랜 B로, 이제는 플랜 B에서 플랜 C로

저자

사토시 사토(Satoshi Sato)
(前) GE 원자력 기술 전문가

2021. 3. 4.

저자 소개

사토시 사토시(Satoshi Sato)는 GE 원자력 사업부에서 기술 및 현장 엔지니어링 관리 책임을 맡았던 원자력 기술 전문가이다. 2002년까지 총 18년의 현장 경력 기간 중 그는 일본 전역에 걸쳐 비등형원자로에 대한 100회 이상의 검사와 평가를 수행했다. 그는 후쿠시마 제1원전의 GE 현장 대표였다. 그의 작품에는 결합 평가, 수리, 검사가 포함되었다.

서문

도쿄전력(TEPCO)은 후쿠시마 제1원전에서 원자로 3기의 핵연료가 녹아내린지 9개월 만인 2011년 12월 발표를 통해 향후 30~40년 이내 원전 폐로를 완료할 것이라 선언했다. 일본의 시민들은 2041년에서 2051년 사이에 이 사고 원전 부지가 '녹지'로 반환될 것이라고 들었다. 지난 10년 동안 후쿠시마 제1원전 부지 방사성 오염의 복잡성과 해결할 수 없는 문제의 규모가 서서히 명확해졌지만 여전히 인간의 기술력으로 해결 불가능한 미지의 영역이 많다. 후쿠시마 제1원전 현장의 원자로 해체 작업은 일본 정부가 겪어보지 못한 사회적 문제나 기술적 난제를 생산하고 있다는 점에서 매우 독특하다. 그러나 도쿄전력과 일본 정부는 여전히 원전 폐로 계획에 대한 사고를 2011년에서 조금도 개선하지 않았다.

후쿠시마 제1원전 폐로 중장기 로드맵이 처한 현실과 그 대안은 무엇일까? 그린피스 일본사무소와 그린피스 동아시아 서울사무소는 후쿠시마 제1원전 폐로 계획의 기술적 한계와 대안을 더 잘 이해하기 위해 컨설팅 엔지니어이자 보고서 저자인 사토시 사토에게 기술 분석을 의뢰했다. 그는 컨설팅 엔지니어이자 관리자로 18년간 GE의 원자력 사업부에서 근무했고, GE는 히타치, 도시바와 협력한 후쿠시마 제1원전의 주요 계약업체이자 설계업체다.

보고서 저자의 분석은 도쿄전력과 일본 정부의 현재 폐로 중장기 로드맵에 관한 많은 기술적 문제점을 지적하고 있다. 그는 40년 간 사고 원전을 자연상태로 복원하는 것을 목표로 하는 현재의 로드맵은 달성할 수 없다고 대안인 “플랜 C”를 추천한다.

후쿠시마 제1원전 사고의 재앙이 10년째 지속되고 있는 지금, 도쿄전력과 일본 정부는 이것이 21세기 최악의 원전 사고라는 사실을 신속히 인정하고 수십 년 안에 해결할 것이라는 망상을 버려야 한다.

손 버니
그린피스 동아시아 원자력 수석 전문가

목차

0.	요약	3
1.	후쿠시마 제1원전: 3.11 사고 이후 10년, 그리고 앞으로의 미래	6
1.1.	40년 내 자연상태 복원	6
1.2.	1차 폐로 로드맵 - 2011년 및 플랜 A	6
1.3.	국제원자력폐로연구소 설립 및 플랜 B	9
1.4.	플랜 B 의 의미	16
1.5.	현행 로드맵의 대안과 전략계획 - 플랜 C의 필요성	17
2.	후쿠시마 제1원전 폐로를 위한 로드맵 및 기술전략	20
2.1.	오염수 관리	24
2.2.	사용후 핵연료 수조에서 핵연료 집합체 제거	29
2.3.	연료파편 회수	32
2.3.1.	일반 현황	32
2.3.2.	원자로 2호기 현황	36
2.3.3.	원자로 3호기 현황	37
2.3.4.	원자로 1호기 현황	37
2.3.5.	중단 위기의 플랜 B	39
2.4.	후쿠시마 제1원전 소내/소외 폐기물 관리	53
2.4.1.	후쿠시마 제1원전 폐기물 저장 계획	55
2.4.2.	폐로 원전에서 발생하는 폐기물의 양	53
2.4.3.	연료파편 이외의 폐기물	57
3.	대안 전략	60
3.1.	미래의 첨단 휴머노이드 로봇 도입	65
3.2.	원자로 건물의 밀폐 및 방수 기능 강화	65
3.3.	방사성 물질이 남아있는 건물의 내구성	66
4.	결론 및 제언	67

요약

후쿠시마 제1원전 사고 후 10년이 지났다. 일본 정부는 2011년 발표한 원전 폐로 일정을 기반해 앞으로 폐로 작업을 30~40년 내 완수하여 사고 전과 같은 자연상태로의 복원을 이룬다는 목표를 고수하고 있다. 지난 10년간 발전소 부지에서 얼마간의 진행이 있었던 것은 사실이지만 현재 일본 정부의 원전 폐로 중장기 로드맵은 실현 불가하다는 것이 이 보고서의 분석 결과이다. 본 보고서에서 다룬 내용은 다음과 같다.

1. 사용후 핵연료 제거
2. 오염수 저감
3. 연료파편 제거작업 50~100년간 연기
4. 격납기능이 있는 드라이 아일랜드 설치
5. 후쿠시마 제1원전을 핵폐기물 시설로 장기 관리하는 방안

우리가 이 보고서를 통해 『원자력 피해 보상 및 폐로 추진회사^{NDF}(이하 폐로추진회사NDF)』 등 일본 정부 기관과 도쿄전력의 논리를 비판하는 이유는 그들의 현행 계획이 수십년 내에 성공할 가능성이 없기 때문이다. 소위 “폐로 작업”은 연료파편 회수 작업을 시작하는 것부터 해당된다. 연료파편은 2011년 3월 발생한 노심 용융^{melt-through} 결과 원자로압력용기^{Reactor Pressure Vessel(원자로압력용기RPV)} 아래 받침대^{Pedestal} 내부의 고농도의 노심 연료가 쌓여 형성된 것이다.

폐로추진회사NDF는 타당성 없는 기존 계획을 수정하는 것을 주저하고 있다. 플랜 A는 “침수식 상부 접근방식^{Flooded Top Access}”으로서, 원자로압력용기RPV 상부에서 접근한 후 격납용기에 물을 채워 수중에서 파편을 회수하는 방식이다. 해당 계획은 2018년에 결국 폐기되고, 플랜 B “건식 측면 접근방식^{Dry Lateral Access}”으로 대체되었다. 연료파편 시료를 제거하는 시범 호기로 후쿠시마 제1원전 2호기를 선정했다. 기존에는 2019년 하반기에 개시할 예정이었으나, 이 작업은 결국 2021년으로 연기되었다. 하지만 2020년 12월, 2022년으로 연기 결정을 내렸다.

현행 플랜 B는 실험용으로 적용할 수는 있으나 이는 소량의 파편 시료를 제거하는 것에만 용이하다. 따라서 원자로 용기 내부 및 하단에 남아있는 다량의 연료파편을 필요한 수준으로 회수하는데 효과가 없을 것이다. 결국 일본 정부가 제시한 플랜 A와 플랜 B 모두 계획대로 30-40년 안에 폐로 작업을 이행하기에 부적절하다는 판단이다. 전면적인 회수는 여전히 가능성이 낮으며, 1, 3호기에서 시료를 소량 채취하는 방법에 대해서는 아직 계획조차 없다. 1차 격납용기^{Primary Containment(PC)} 내부의 방사성 준위도 과도하게 높은 상태다.

지난 10년 간 후쿠시마 제1원전 상황에서 가장 눈에 띄는 변화가 있다면, 1천 개 이상의 대형 탱크로 구성된 탱크팜(tank farm)이다. 이는 연료파편을 냉각하기 위해 지속적으로 주입한 냉각수가 동토벽과 격리되었어야 할 지하수와 섞여 오염수 양이 늘어난 결과다. 오염수의 일 발생량 감축을 위한 목표를 설정했으나 이를 완전히 해결하기 위한 효과적인 방법은 제시된 바 없다.

사용후 핵연료 수조의 위험요인에 대해서는 해야 할 작업이 아직 많이 남아있다. 4호기 사용후 핵연료 수조에서 1,533개의 핵연료 집합체를 제거하는 작업이 2013년 11월에 시작되었고 2014년 12월에 완료되었다. 공학적, 기술적 문제 때문에 1, 2호기 수조에서 사용후 핵연료를 제거하는 작업이 2024-2026년, 2027-2028년으로 각각 예정되어 있긴 하다. 3호기의 경우 사용후 핵연료 집합체를 제거하는 작업이 2019년 4월에 시작되었으나 중단된 상태다. 2020년 12월 29일 기준으로 566개 집합체 중 112개가 사용후 핵연료 수조 안에 남아있다. 사용후 핵연료 수조에서 공동 수조(Common Pool)로 운반된 집합체는 결국 건식 저장 캐스크로 옮겨진다.

다른 방사성 오염 물질이나 핵 폐기물과 마찬가지로, 사용후 핵연료는 일본 내 다른 지역으로 운송할 곳이 없어 부지 내에 무기한 남아있게 된다. 연료파편을 회수한다 하더라도, 이 또한 마찬가지로 부지 내에 남게된다. 후쿠시마 제1원전은 이미 핵폐기물 장기 저장소이며 앞으로도 그렇게 사용되어야 할 것이다. 현행 로드맵은 이러한 현실적인 상황을 신뢰할 만한 수준으로 다루지 못하고 있다.

현행 폐로 계획의 근본적인 단점은 폐로추진회사NDF에 문제를 제기하거나 지원 및 비판적 기술자문을 하는 기구가 없다는 것이다. 도쿄전력의 후쿠시마 제1원전 폐로와 관련해 『폐로 및 오염수 관리에 관한 관계장관회의』는 경제산업성, 부흥청, 외무성, 교육성, 문부과학성, 후생노동성, 농림수산업성, 국토교통성, 관방장관, 후쿠시마 현 지사, 도쿄전력 사장으로 구성되어 있다. 이 중 어떤 기관도 주도적인 책임을 수행하는데 필요한 기술적 전문성을 보유하고 있지 않으며, 그러한 준비 또는 역량도 없는 상태다.

중장기 로드맵은 관계장관회의에서 공식적으로 발표하는 자료로, 이에 대한 실행 계획은 폐로추진회사NDF가 기술전략계획을 수립하고 매년 업데이트한다. 하지만, 실제로 이 로드맵은 폐로추진회사NDF가 따라야 할 지침도 아니고, 기술전략계획의 상위 문서도 아니며, 계획의 요약본에 불과하다. 즉, 로드맵의 내용은 기술전략계획에서 뽑아낸 논의사항의 요약에 지나지 않는다. 폐로추진회사NDF를 감독하는, 적절한 역량을 갖춘 기관도 없으며, 폐로추진회사NDF의 기술전략 검토 또는 의사 결정 과정에 외부의 실질적인 참여가 전혀 또는 거의 없다는 의미다.

로드맵은 목표 달성을 위한 길을 제시하는 것이어야 한다. 연료파편 관리 및 부지 내 기타 문제를 해결할 수 있는, 신뢰할 만한 기술적 전략을 제시해야 한다. 그러나, 폐로추진회사NDF는 이와 관련해, 예정대로 작업이 진행되고 있으며 목표 달성 중이라는 것을 확실하게 제시한 적이 없다. 급진적인 사고의 전환을

해야만 후쿠시마 제1원전의 해결책이 존재한다는 것이 이 보고서의 결론이다. 이 보고서는 플랜 B를 폐기할 수 밖에 없으므로 플랜 C가 필요하다고 제안한다. “드라이 아일랜드”라는 새로운 방식을 통해 지하수가 부지 내부로 유입되는 것을 막는 방식이다.

장기적으로는 기존 원자로 건물을 위한 새로운 격납 기능 등 여러 구조물을 설치해야 할 것이다. 단기적으로 중요한 첫 번째 단계는 먼저 연료파편 회수를 위한 현행 계획을 재고하는 것이다. 작업을 연기해 작업자에 대한 방사선 위험을 줄이고, 기술개발을 동시에 추진해 50~100년 내 또는 그 이후가 되더라도 첨단 로봇기술을 적용하는 것이다.

향후 수십년 내 폐로를 완료한다는 불가능한 목표를 포기하는 것이 단순히 실패를 인정하는 것은 아니다. 사고가 발생한 원전을 처리하는데 이와 같은 변동과 시행착오는 항상 불가피한 일이었다. 일본 정부와 도쿄전력은 그동안의 조치로 인한 결과를 인정하고 완전한 책임을 질 수 있는 방향으로 대대적인 전환을 해야한다. 보고서를 통해 제안한 플랜 C 방식이 또 다른 대안이 될 수 있는가 하는 차원의 문제가 아니다. 결함이 있는 현행 방식에 대해서는 반드시 대안이 존재하며 그 대안을 이행해야 한다. 플랜 A와 B와 플랜 C는 가장 큰 차이점은 후쿠시마 제1원전의 복잡한 현실을 반영했는지의 유무이다. 이제는 변화가 필요한 시점이다.

1. 후쿠시마 제1원전: 3.11 사고 이후 10년, 그리고 앞으로의 미래

1.1. 40년 내 자연상태 복원

2011년 3월 11일, 동일본 대지진으로 후쿠시마 제1원전에서 중대한 원자로 사고가 발생했다. 이 충격적인 사고 후 얼마되지 않아 원자로압력용기RPV, 1차 격납용기, 원자로 건물의 구조건전성이 손상되었고 환경으로 심각한 방사성 유출이 발생했다. 2011년 12월 [후쿠시마 제1원전의 소유주인 도쿄전력은 “40년 내 자연상태 복원 완료” 계획을 발표했다](#). 폐로 및 모든 오염물질 제거 작업을 2050년까지 완료하겠다는 것이었다. 도쿄전력이 1차 폐로 로드맵을 발표한 2011년 12월 이후 해당 계획은 이후 4차례 변경되었다.¹

본 보고서는 이러한 40년 후의 목표 달성 가능성, 이외의 대안 존재 여부를 검토하고 있다. 후쿠시마 제1원전에서 일한 경험이 있는 엔지니어로서, 나는(사토시 사토, Satoshi Sato - 보고서 저자) 2011년 당시 도쿄전력의 발표가 사고 피해자와 국민들의 분노를 분산시키기 위한 정치적 선언에 불과하다고 판단했다. 폐로 일정을 맞추기 위한 아무런 구체적 계획도 없었다. 저자는 도쿄전력이 발표한 원전 폐로 중장기 로드맵은 달성하기 어려운 정도가 아니라 달성 불가능한 약속이며, 도쿄전력이 공식적으로 이를 발표한 것은 무책임한 짓이라는 생각이 들었다.

미국 내 상업용 원전 폐로에 공통적으로 적용되는 미 환경청^{EPA} 기준에 따르면, 후쿠시마 제1원전을 “자연상태로 복원”하기 위해서는 선량을 연간 0.04 mSv (또는 시간당 약 0.000005mSv) 정도의 매우 낮은 수준으로 줄여야 한다. 이 정도 수준의 선량은 자연환경에 쉽게 숨겨져 계측기로 직접 측정이 어렵기 때문에, 오염 가능성이 있는 토양의 방사성 핵종 당량 농도^{equivalent concentration}를 측정했을 때 7.4Bq/kg미만이 되는지 확인해야 한다. 원전 사고 후 8,000Bq/kg 또는 심지어 사고 전 100Bq/kg인 해제기준보다 훨씬 낮은 수준이다. 오염 토양이 7.4 Bq/kg를 초과하여 이를 폐로 부지에서 모두 제거해야 하는 경우, 후쿠시마 제1원전 오염 토양의 양은 1천만m³에 달할 것이다.

1.2. 1차 폐로 로드맵 – 2011 및 플랜 A

후쿠시마 제1원전 폐로 과정 중 가장 어려운 작업은 1, 2, 3호기 노심 용융으로 원자로압력용기RPV에서 발생한 핵연료파편을 회수하는 것이라고 알려져 있다. 처음에 도쿄전력은 1979년 쓰리마일 아일랜드^{TMI} 2호기 사고 때 성공했던 방법을

¹ METI, “Mid-and-Long-Term Roadmap archives”, as of March 2021, see https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/archive_mltr.html

똑같이 도입하려고 했다. 해당 방법은 다음과 같이 진행된다.

- i) 원자로압력용기RPV 상부 헤드 제거
- ii) 방사선 차폐를 위해 용기 침수
- iii) 다양한 원격/수중 도구를 사용해 원자로 노심 접근
- iv) 연료 파편 제거
- v) 제거한 파편을 차폐된 컨테이너에 실어 운반

이 방법은 원자로압력용기RPV에 손상이 없는 상태에서는 안전하게 안정적으로 실행할 수 있으며, 노심 상단에 위치한 손상된 습분 분리기 Moisture Separator 와 증기 건조기 Steam Dryer 를 제거하기 위해 시간이 좀 더 소요될 수도 있다. 본 보고서에서는 이러한 정통 폐로 방식을 “플랜 A”로 칭하기로 한다.

저자는 도쿄전력 등 대응팀의 기술적 역량과 의사 결정 과정에 대해 상당히 회의적이었다. 자사 원자로에 적용가능한지 신속한 의사 결정을 내리지 못했기 때문이다. 기술적인 세부 사항을 모두 확인할 수는 없었지만, 플랜 A를 후쿠시마 제1원전 1~3호기에 적용하지 못한 것은 이미 너무나 확실하다. 원자로의 기능 상실 수준이 스리마일 아일랜드 원전 사고보다 훨씬 심각했기 때문이다.

먼저, 원자로압력용기RPV 바닥에 커다란 구멍이 나서, 용융된 연료 파편이 흘러 나왔다. 따라서 원자로압력용기RPV에 물을 채울 수 없었다. 어느 정도 물을 채운다 하더라도, 제거해야 할 연료 파편은 대부분 원자로압력용기RPV 내부에 없었다. 도쿄전력팀은 플랜 A를 수정하기로 결정하고, 1차 격납용기를 “침수 경계”로 재설정하는 것으로 입장을 선회했다. 당시 계획은 여전히 원자로압력용기RPV를 상부에서 접근해 원격 수중 장비로 연료파편을 제거하는 것이었다.

도쿄전력은 플랜 A는 추진할 만한 가치가 없다는 사실을 이미 알고 있었을 것이다. 1차 격납용기는 사고 당시 고압, 고온 환경에 노출되었기 때문에, 그들은 여러 곳에 손상 및 열화가 발생했음을 알고 있었다. 물을 장기간 안전하게 저장할 수 없는 상태라는 것도 알고 있었다.

실제로 주입한 냉각수가 원자로압력용기RPV에서 누출되었는데, 1차 격납용기 안에 보관되지 않고 즉시 흘러나왔다. 1차 격납용기는 비교적 얇은 탄소강 판 수백 조각을 용접하고, 부식을 막기 위해 코팅 처리를 한 대형 철제 구조물이기 때문에 당연한 결과였다. 고온/고압 노출 외에도, 열팽창으로 인해 복잡한 하중이 가해졌다. 코팅도 벗겨졌다. 손상된 철제 표면이 사고 당시 유입된 부식성 해수에 노출되었다. 점검 및 수리를 위한 접근이 완전히 불가능하지는 않더라도, 극히 제한적이고 어려운 상황이다. 그런 컨테이너에 물을 채워 넣고, 열화 또는 지진으로 인한 대규모 파열 가능성에 대해 계속 걱정하면서, 몇 년에 걸쳐

연료파편을 제거하는 방법은 시도할 가치조차 없다. 그럼에도 불구하고, 도쿄전력팀은² 이러한 위험하고 실현 불가능한 플랜 A를 포기하지 못했다.

지하수, 처리 및 핵 연료 냉각

2011년부터 도쿄전력은 열을 발생시키는 연료파편을 냉각하기 위해 원자로압력용기RPV 내부로 냉각수를 계속해서 주입해 왔다. 구멍 난 1~3호기 원자로압력용기RPV 내부로의 냉각수 주입은 현재까지 계속되고 있다. 그로 인한 결과 중 하나는 냉각수 주입으로 연료파편의 잔열은 제거할 수 있으나, 세슘, 스트론튬, 삼중수소 등 수용성 방사성 핵종이 누출되었다는 것이다. 이는 1차 격납용기 및 원자로 건물에서 누출되어 결국 지하 수로를 통해 터빈 건물 지하에서 방출되었다. 이것이 모두 오염수가 된다.

오염수는 지하수와 섞이게 되는데, 후쿠시마 제1원전 서쪽에 위치한 아부쿠마 고원^{Abukuma Heights}의 빗물이 지하수면을 따라 후쿠시마 제1원전까지 흘러내려와 결국 태평양으로 흘러간다. 그렇기 때문에 원자로압력용기RPV에 주입되는 냉각수보다 원자로 부지 전체에서 항상 더 많은 양을 퍼내야만 했다. 이렇게 퍼 올린 물에는, 특히 초기에는 더 많은 기름 성분과 염분이 포함되어 있었기 때문에 다양한 설비로 처리 후 철강 탱크에 저장하기 전에 기름과 염분을 오염수에서 제거해야 한다.

앞서 논의한 바와 같이, 연료파편은 냉각수를 주입해 냉각해야 했는데 냉각수에는 사고 후 긴급조치로 주입된 해수로 인해 일부 염분과 고농도 방사성 핵종이 포함되어 있다. 이 냉각수는 터빈 건물 지하로 계속 유입된다. 터빈 건물에서 이 물은 지하수와 혼합되어, 처리해야 할 오염수의 양이 계속 늘어난다. 도쿄전력은 처리된 오염수 중 소량을 1~3호기 원자로압력용기RPV에 다시 주입해 냉각에 사용하고 있다. 냉각에 사용되지 않은 나머지 대부분의 오염수는 부지 내 저장 탱크로 옮겨야 한다. 이로 인해 향후 수십년 간 연료파편을 냉각하고 이동시키면 후쿠시마 제1원전 부지의 오염수 저장탱크팍은 계속 늘어나게 될 것이다.

위와 같은 작업을 통해 1천 톤을 저장할 수 있는 탄소강 탱크는 3일 만에 가득 차기 때문에 최근 몇 년 간 매년 100개 이상의 탱크를 신규 건설해 사용중이다. 초기 오염수 처리 설비는 화학작용제를 사용해 방사성 핵종을 침전시키는 보조계통, 대부분의 방사성 세슘을 흡수하는 제올라이트 용기, 해양 염분을

² 2011년 도쿄전력팀은 회사 대표, 자원에너지청 Agency for Natural Resources and Energy(ANRE), 원자력안전보안원 Nuclear Industry and Safety Agency (NISA)으로 구성되어 있었다.

See, TEPCO, "Mid-and-long-Term Roadmap towards the Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Units 1-4, TEPCO", 21 December 2011,

https://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu11_e/images/111221e14.pdf.

폐로 일정을 처음 언급한 것은 도쿄전력 후쿠시마 제1원전 중장기 조치를 위한 전문가 그룹이었다. 이는 2011년 8월 일본 원자력연구개발기구 Japan Atomic Energy Commission가 설립한 것이다. 전문가 그룹은 "10년 이내에 연료파편 제거 작업을 시작하는 것이 목표다. 폐로 완료는 최소 30년이 소요될 것으로 예상된다."라고 결론을 내렸다.

분리하는 역삼투압(RO) 막으로 이루어졌다. 채취한 슬러지/침전물 및 사용후 제올라이트 흡착제는 고농도의 방사성 물질이 되기 때문에 온도가 위험 수준으로 상승했으며, 안전한 저장을 위해 지정된 장소가 필요했다. 도쿄전력은 오염수에 허용 농도 이상의 방사성 물질이 여전히 포함되어 있었기 때문에 더 우수한 설비가 필요하다는 것 정도만 확인했다.

사용후 핵연료 수조 등 구조적 지원

초기 계획의 또 다른 측면은 잔존 원자로 건물의 구조건전성을 확보하는 부분이었다. 원자로 사고로 인해 1, 2, 3호기의 노심이 직접 손상되었다. 수소 폭발로 원자로 건물이 파괴된 것은 1, 3, 4호기였다. 2호기 원자로 건물은 폭발하지 않았는데, 1호기 원자로 건물 폭발 시 2호기 배출패널이 개방되면서 개구부를 통해 수소 환기가 원활히 이루어져 폭발 한계 이상으로 축적되지 않았기 때문이다.

반면, 4호기 원자로 건물은 원자로압력용기RPV가 비어있었으며, 공용 덕트 접점에서 배기 덕트를 통해 역유입된 수소로 인해 폭발 및 파괴되었다. 환기 시, 3호기 1차 격납용기에서 폭발성 수소가 유입된 것이다. 수소 폭발은 원자로 건물 꼭대기의 지붕과 벽부를 산산조각 낼 정도로 강력했다. 파편은 방사성 물질로 오염되어 있었고, 사방으로 멀리 까지 흩어졌다. 3호기의 경우 대형 덩어리 여러 개가 떨어져, 터빈 건물 지붕을 관통했다. 이로 인해, 커다란 구멍이 생겼고 빗물이 건물 안으로 유입되었다.

1호기의 경우 지붕과 벽부 외에, 바닥 구조물도 손상되었다. 수소 폭발이 일어난 모든 원자로 건물에서 천장 크레인과 연료취급 설비가 손상되었다. 이는 폭발잔해 조각들과 함께 사용후 핵연료 수조에 떨어졌다.

4호기의 경우, 사용후 핵연료 집합체가 가장 많이 보관되어 있었고, 폭발로 인한 구조적 열화는 저층부에서도 심각한 것으로 파악되었다. 수조에서는 그 무게를 안전하게 지탱하기 어려울 수 있다는 우려가 제기되었다. 사용후 핵연료 수조 붕괴를 막기 위해 구조물을 보강하기로 결정한 후 신속한 조치가 이루어졌다. 또한, 4호기의 사용후 핵연료 집합체를 이송하는 것이 우선순위로 판단되어, 긴급 실행 계획을 수립했다.

1.3. 국제원자력폐로연구소 설립 및 플랜 B

도쿄전력의 최초 적용 기술인 “플랜 A-침수식 상부 접근방식”은 신뢰할 수 없었으며 초기에 중단했어야 했다. 보다 현실적인 계획에 자원을 집중했어야 한다. 당시 (2011년 후반~2012년) 도쿄전력 및 그 외 관련 기관 팀은 내부적으로 기존의 접근 방식을 재고하는 것을 고려하지 않았다. 2013년 8월, 총 18개 기관 (원자력연구개발기구_{JAEA}, 전력회사 전체 (오키나와 전력 제외) 및 원자력

발전회사 전체)은 『국제 원자력 폐로 연구소(IRID)』³라는 새로운 기관을 설립하고, 후쿠시마 제1원전 폐로를 위해 필요한 R&D를 주도한다는 구체적인 임무를 부여했다.

국제 원자력 폐로 연구소(IRID)는 후쿠시마 제1원전 폐로 작업과 관련된 다양한 분야에서 기초기술 개발 제안을 받겠다고 공식 발표했다. 이러한 요청에 응해, 저자는 2013년 10월 23일 『후쿠시마 폐쇄 계획 Fukushima Closure Plan』이라는 210 페이지 분량의 보고서를 제출했다.⁴ 특별한 기술 개발을 제안하는 것 대신, 도쿄전력의 기존 플랜 A를 완전히 대체하는 새로운 개념을 담았다. 관련해 본 보고서에서 강조할 몇 가지 주요 사항을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 연료파편 냉각 및 회수 방법, 오염수 관리 방법은 모두 상호 연관되어 있다. 이를 개별적으로 다룰 것이 아니라, 전반적인 폐로 전략 수립 시 모두 통합적으로 고려해야 한다.
- (2) 1차 격납용기를 완전히 물에 침수시켜 원자로 건물 꼭대기에서 연료파편을 제거할 수 있다는 전제라면 연료파편 냉각도 동시에 진행할 수 있는 방안일 것이다. 그러나 위험이 과도하게 높으며, 위험 저감을 위한 예방조치는 실행하기 어렵다. 따라서 1차 격납용기를 침수시키는 방안은 추진하지 말아야 한다.
- (3) 물을 사용해 연료파편을 냉각하는 한, 오염수는 계속 발생할 것이다. 오염수 발생을 막기 위해 중요한 전제조건 중 하나는 물이 아닌 공기를 통한 냉각으로 전략을 바꾸는 것이다. 공기 냉각 방식을 선택해 실행한 후에는, 건조 상태에서 연료파편을 회수해야 한다. 또한, 건물 내로 유입되는 지하수도 차단해야 한다.
- (4) 연료파편을 공기로 냉각하는 것은 쉽게 달성가능한 것으로 평가되고 있다. 방출되는 열은 1차 격납용기 외부 표면에서 쉽게 소산될 것이다. 1차 격납용기외부 표면에서 열 소산을 유지하는 한 가지 방법은 1차 격납용기와 원자로 건물 사이 공극을 통해 이동하는 기류를 활용하는 것이다. 이러한 방식으로 1차 격납용기 경계 모든 지점의 온도가 충분히 낮게 유지된다. 특정 설비 및 구조물은 국지적으로 온도가 상승할 수 있다. 하지만, 냉각시 반드시 물만 사용해야 경우는 없다. 사실, 국지적으로 고온 상태라고 해서 온도가 과도하게 높다고 볼 수는 없다. 연료파편과 직접 접한 철근 콘크리트에도 수많은 철근이 뿔뿔하게 들어가 있는데 이들은 단열재보다는 열 전도체 역할을 할 것으로 예상되기 때문이다. 따라서, 원자로 구조건전성에 문제가 생기거나 열화가 발생할 정도로 고온에 도달할 가능성은 낮다. 필요한 경우, 이러한 추정치는 분석을 통해 입증할 수 있을 것이다.

³ IRID, “Greeting in Commemoration of the Founding of the Organization”, 8 August 2013, see https://irid.or.jp/_pdf/en/20130808_greeting.pdf

⁴ Satoshi-Sato, “Fukushima Closure Plan” 23 October 2013.

- (5) 냉각수 주입이 종료되면 연료파편을 단계적으로 건조 시킨다. 건조기를 사용해 대기를 재순환시키지만 하면, 1차 격납용기 내부에 남아있는 모든 물과 습기가 제거된다.
- (6) 탑-다운 방식 대신, 원자로 하부에서 원자로압력용기RPV 중심축을 따라 상향식으로 진행하면서 연료파편을 회수한다. 이를 위해, 연속적으로 연결된 지하 핫셀_{hot cell}을 사전에 굴착한다. 굴착을 위한 핫셀은 안내관을 통해 1차 격납용기 경계와 연결한다. 핫셀은 기존에 연구실에서 사용되던 일반적인 차폐실로, 국내외에서 사용후 핵연료 재처리 설비에도 사용된다. 보통 조작기계가 설치되어 있어, 운전원들이 두꺼운 납유리 벽을 사이에 두고 외부에서 직접 관찰하며 내부의 장비 또는 물질을 취급할 수 있다.
- (7) 지하 작업실은 4개의 핫셀 구역으로 나누어진다. 첫 번째 구역에는 로봇 말단장치가 설치되어 있는데, 텅스텐 카바이드로 만들어진 드릴 비트를 들고 있으며 진공 헤드가 다축 로봇 팔에 부착되어 있다. 안내관_{Guide Tube}을 통해 팔을 뻗어 연료파편을 작은 조각으로 절단한 후, 동시에 빨아들여 회수한다. 회수한 조각은 중성자 흡수재(탄화붕소)와 동일하게 혼합해, 임계상태 발생을 막는다. 핵분열성 물질 성분을 분석하기 위해 시료를 채취한다. 두 번째 구역에서는 회수한 입자를 사각 파이프 캡슐에 집어 넣는다. 이러한 파이프는 외부 단면의 크기가 일반적인 가압경수로(PWR) 연료 집합체와 동일하나 길이는 절반에 불과하다. 세 번째 구역에는 입자를 넣은 캡슐 상부에 덮개를 설치하고 용접한 후, 차폐된 수송용기에 넣는다. 마지막으로 네 번째 구역에서는 캡슐을 담은 차폐 수송용기를 운반하기 위해 들어올린다.
- (8) 캡슐을 핫셀에서 들어올린 다음 차폐된 수송용기에 넣은 후 수심이 깊은 수조가 있는 건물까지 트럭으로 운반한다. 수조는 방사선을 차폐할 수 있을 만큼 충분히 깊고, 캡슐을 가압경수로(PWR) 사용후 핵연료 집합체를 저장하기 위한 캐니스터에 넣는 작업이 가능해야 한다. 캐니스터는 37개의 셀로 구성되어 있다. 각 셀에 캡슐을 2개씩 수직으로 세워 넣는다. 캐니스터에 74개의 캡슐을 모두 채우면, 차폐된 수송용기와 함께 오버헤드 크레인으로 들어 올린다. 폐로 원전의 연료 재장전 층에서 처리하는 방식과 동일하다. 캐니스터는 특수 트럭으로 저장 시설로 운반하며, 보관을 위해 콘크리트 건식 캐스크에 넣는다. 이 또한 폐로 원전에서의 처리 방식과 동일하다.
- (9) **오염수 발생을 보다 효과적으로 통제하기 위해, 건물 내로 유입되는 지하수를 차단해야 한다.** 동토벽은 지하수학적 조건이 가변적이어서 장기적으로 도입하기에는 최적의 방안은 아니다. 보다 안정적인 대안은 수로를 설치해 발전소 주변의 해양과 연결하는 것으로, 아부카마 고원에서 유입되는 지하수를 더욱 효과적으로 차단할 수 있다. 이러한 수로가 설치되면 후쿠시마 제1원전 부지 전체가 하나의 섬처럼 물리적으로 차단되는 셈이다. **섬 표면을 비투과성 소재로 덮고 체계적인 배수 설비를 갖춰 우수가 지하로 흡수되는 것을 막는다면, 지하수위는 서서히 꾸준히 해수면까지 낮아져 발전소 부지 전체가 “드라이 아일랜드_{Dry Island}”이 될 것이다.**

- (10) 후쿠시마 제1원전을 자연상태로 복원하는 목표를 포기하는 것이 후퇴처럼 생각될 수도 있으나, 고립된 “드라이 아일랜드”를 만들면 다양한 장점이 있다. 지하수면 위로 다량의 방사성 폐기물을 저장할 수 있는 깊은 지하 갱도를 설치할 수 있다는 것이다. 지하수가 적으면 더 용이하게 지하 핫셀을 설치할 수 있다. 수로는 보안 경계로도 더욱 효과적일 것이다. 그 밖의 장점은 하단에서 논의하겠다.
- (11) 처리 후 오염수에서는 삼중수소를 제외한 모든 방사성 핵종이 제거되어야 한다. 2013년 저자는 이러한 삼중수소수 중 일부를 사용해, 수로 주변에 보호 방벽을 설치할 콘크리트 블록 제작에 사용하는 방안을 제안했다. 나머지 삼중수소수의 활용 방안은 아직 결정되지 않은 상태다. 2020년 정부 TF는 태평양 방류 등 환경 방출을 권고했다. 이는 후쿠시마 지역 주민들이 강력하게 반대하고 있다.
- (12) 원자로 건물 내 잔존 오염수는 펌프로 퍼내고 처리 후 저장한다. 발전소 부지 전체가 “드라이 아일랜드”가 되면, 지하수의 움직임이 멈춘다. 원자로 건물 내로 유입되어 계속해서 더 많은 오염수를 발생시키는 일이 더 이상 발생하지 않는다. 건물 내 다수의 수조 중, 응축실^{suppression chamber} 내부의 물은 사고 초기부터 희석 또는 담수 냉각수로 교체 없이 그대로 있었다. 처리를 위해 펌프로 빼낼 때는 방사능 위험이 높아, 반드시 특별한 주의가 필요하다.
- (13) 부지 내 모든 건물을 제염처리한다. 사용하지 않는 건물은 해체하고, 폐기물 저장에 적합한 건물은 필요한 정비 작업을 거쳐 최대한 재활용한다.

저자가 제출한 이 같은 『후쿠시마 폐쇄 계획』에 대해 국제 원자력 폐로 연구소(IRID)는 부적합하다는 판단을 내렸다. 10개월 후 국제 원자력 폐로 연구소(IRID) 관계자들에게 7.5분 간 발표를 할 수 있는 기회를 얻었으나, 결국 이 제안은 서류 더미에 묻히고 말았다. 당시 국제 원자력 폐로 연구소(IRID)는 플랜 A를 고집하고 있었다. 하지만 얼마 지나지 않아 도쿄전력 팀은 플랜A를 파기하고 저자가 제출한 『후쿠시마 폐쇄 계획』 제안과 일부 유사한 컨셉으로 방향을 수정하기 시작했다. 그들이 수정된 로드맵에서 제시한 새로운 컨셉이 바로 “플랜 B - 건식 측면 접근방식”이다.

원자력 피해 보상 및 폐로 추진회사(NDF) 창립과 플랜B

플랜 B 수립 경과는 다음과 같이 정리해볼 수 있다. 사고 발생 직후인 2011년 9월, 공공/민간 기관인 『핵 배상금 책임 펀드^{Nuclear Damage Liability Facilitation Fund}』가 설립되었다. 2014년 8월 재편을 통해 폐로 및 오염수 관리에 대한 업무가 추가되었고, 『원자력 피해 보상 및 폐로추진회사^{NDF}』로 명칭이 변경되었다. 2014년 이후, 폐로추진회사NDF는 기술전략계획을 수립하고 매년 업데이트하는 일을 맡고 있으며, 정부는 중장기 로드맵을 발표하는 역할을 담당한다.

페로추진회사NDF는 2015년 4월 30일 『도쿄전력 후쿠시마 제1원전 페로 기술전략계획 2015 ~ 2015 종장기 로드맵 개정 대비』 라는 보고서를 발표했다. 페로추진회사NDF의 보고서는 검토 후 심도 있게 추진해야 할 연료파편 회수 방법론으로서 다음의 3가지를 제시하고 있다.

1. 침수식 상부 접근방식
2. 건식 상부 접근방식
3. 건식 측부 접근방식

이러한 개념적 방법론 중, 3번은 연료파편을 원자로 건물 1층 1차 격납용기의 측면에서 제거하는 방법이다. 2016년 도쿄전력은 조직 개편을 단행했고, 새로운 사명인 『도쿄전력 홀딩스 Tokyo Electric Power Company Holdings』 를 발표했다. 이에 따라, 보고서의 제목은 『도쿄전력 홀딩스 후쿠시마 제1원전 페로 기술전략계획』 (이하 “20XX 기술전략계획”)로 변경되었다.

2016년 7월 13일 발표된 2016기술전략계획에는 세 가지 방법론이 동일하게 기재되어 있었으며, “건식 측면 접근방식”이 건정_{Drywell} 하단(받침대 벽부_{pedestal wall} 내외부 모두)에 위치한 연료파편 회수에 적합하나, 원자로압력용기RPV 내부에 위치한 연료파편에 접근하는 것은 난이도가 너무 높다고 설명했다.

『후쿠시마 폐쇄 계획』 에서 설명한 개념은 세 가지 방안과 비교하자면 “건식 하부 접근방식”으로 볼 수 있다. 저자도 측면 접근 가능성에 대해 고민했으나, PRV 내부로의 접근성 및 이동성이 극히 제한되어 있어, 아무리 최신의 다축 로봇팔 기술을 적용하더라도 어려울 것으로 판단하고, 대신 하부 접근방식을 제안한 것이다. 접근성/이동성 문제를 해결할 수 있다면, 저자는 측면 접근방식을 크게 반대하지는 않았을 것이다.

그 다음 기술전략계획은 2017년 8월 31일에 발표되었다. 마찬가지로 동일한 세 가지 방법론을 다루고 있었다. 원격으로 누수를 수리하기 위해서는 상당히 고난도의 기술을 개발해야 하며, 침수식 상부 접근방식은 방사능 피폭 위험이 너무 높다고 설명했다. 그리고, 2018년 10월 2일에 발표된 2018기술전략계획에서 페로추진회사NDF는 결국 세 가지 방안 중 침수식 상부 접근방식(플랜 A)을 제외하고, 건식 접근방식에만 집중하겠다는 의사를 밝히며 특히 건식 측면 접근방식을 강조했다.

2019년 9월 9일, 기술전략계획이 발표되었다. 소규모 실증시험을 위한 연료파편 회수, 컨테이너 탑재, 운송 및 저장 등 일련의 절차에 대한 세부 사항이 담겨있었다. 먼저, 회수를 위해 X-6 관통부_{Penetration}를 통해 1차 격납용기에 접근하는 방법을 제시했다. X-6 관통부와 외함_{Enclosure}을 밀봉부로 연결해, 1차 격납용기와 경계가 같아지도록 한다. 연료파편을 회수해 외함 내 용기에 넣는다. 해당 용기는 원격제어 카트에 실어, 원자로 건물에서 반출해 정해진 저장시설로

운반한다. 저장시설에서는 분석용 시료를 채취한 후, 외부로 운반한다. 용기에 담은 연료파편은 임시 저장실에 최종 보관하게 된다.

2020년 10월 6일 NDF는 2020기술전략계획 을 발표했다. 실증시험을 위한 세부사항을 수립했으며, 특히 2호기를 시범 호기로 선정했다. 실증시험에서는 접근 도구로 로봇팔 개발, 철제 브러쉬, 진공 용기로 연료파편을 제거하는 방안을 선택했으며, 실제 환경에서는 그리퍼^{gripper} 및 그라인더^{grinder} 툴을 사용해 회수하는 것을 제안했다.

앞서 논의한 바와 같이, 2020년 10월 현재 연료파편 회수 기술 개발은 2호기 실증시험을 위한 개념적 방법론으로 진전되는 단계까지 밖에 이르지 못했다. 1, 3호기는 1차 격납용기 내부의 방사선 환경과 조건이 2호기와 상이하기 때문에, 다른 방안을 놓고 별도의 논의가 이루어져야 한다. 실증시험을 통해 어떤 사실을 확인하든 간에, 이를 실제 환경에 그대로 적용할 수는 없다. 또한, 동일하거나 수정된 방법으로 성공적으로 회수할 수 있는 가능성을 높여주지도 못한다.

실증시험의 목적을 달성하는 것은 상대적으로 용이하다. X-6 관통부를 통해 접근로만 확보하면, 가장 접근하기 가까운/쉬운 위치에서 수거하기 가장 쉬운 형태로 시료를 채취하는 것은 어렵지 않을 것이다. 하지만, 실제 환경 적용은 완전히 다른 이야기다.

예를 들어, 1차 격납용기 내 X-6 관통부 바로 하단이나, 받침대 벽부 내부 특정 지점은 도달하기 어렵다. 원자로압력용기RPV 내부는 더욱 접근하기 어렵다. 원자로압력용기RPV 전면에는 CRD(제어봉구동장치 하우징, The Control Rod Drive) 외함, ICM 외함, 그리고 이들을 복잡한 방식으로 단단하게 연결하는 안정화 장치 등 접근을 방해하는 요소들이 많다. 원자로압력용기RPV 안으로 접근하기 위해서는 이를 모두 제거해야 한다. 원자로압력용기RPV에 어떻게든 접근하더라도, 연료파편이 복잡한 형태로 내부 부품과 단단하게 들러 붙어 있을 것이다. 이것도 제거해야 한다. 이를 위해 로봇팔을 사용하려면, 유연성을 높이기 위해 실증시험에서 사용한 것보다 관절이 더 많아야 한다. 로봇팔 자체와 말단장치의 운동제어는 훨씬 더 복잡할 것이다. 장비 고장 확률도 높아진다.

원자로압력용기RPV의 내부 부품과 연료파편이 들러 붙으면 상당히 단단해질 수 있기 때문에, 이를 제거하거나 그라인더로 분쇄하는 데는 상당한 시간이 걸린다. 선택한 방법론이 실제 환경에서도 효과가 있다고 합리적으로 확신하기 위해서는, 시범 테스트를 성공적으로 완료한 후 추가적으로 단계적인 실증이 진행되어야 한다.

향후 다양한 어려움이 예상됨을 고려하면, 페로추진회사NDF의 플랜 B가 시범 테스트 차원에서 장점이 많다고 하더라도, 실제 환경에서의 적용을 위한 엔지니어링 기술 수준이 아직 미숙한 단계라서 저자는 이것이 결국 상당한 약점이 될 것이라고 본다.

연료파편 회수 외 기타 폐로 작업

도쿄전력은 지하수 유입을 막기 위해 2014년 6월 소위 “동토벽”이라는 비침투성 내륙 벽 건설을 시작했고⁵ 2016년 3월 운영을 시작했다.⁶

도쿄전력과 일본 정부는 동토벽이 기능을 제대로 하고 있다고 계속 주장하고 있다. 하지만 동토벽은 오염된 지하수가 계속 축적되는 것을 막지 못했으며, 이것이 비용효과적인 방법임을 입증하기도 매우 어려워보인다. 장기간 사용되어야 하기 때문에, 1천500 개의 냉동관^{freezing tube} 중 한 개 이상에서 열화 및 고장이 발생하는 것은 시간 문제다. 검사, 정비, 교체와 관련된 비용과 방사선 피폭 위험도 높아질 것이다.

결국, 지하수 유출 차단에 실패하면 원자로 건물 내부로 누수가 계속될 것이며, 대량의 오염수가 끝도 없이 매일 발생할 것이다. 부지로 유입되는 지하수 양을 2025년까지 일 100톤으로 계속해서 줄이려는 노력은 있으나, 지속가능하지 않은 방안이며 장기적인 계획은 여전히 부재하다.

핵연료 집합체를 사용후 핵연료 수조에서 꺼내 운반하는 것은 성공 사례도 있으며 그다지 어렵지 않게 일상적으로 수행할 수 있는 작업에 해당한다. 기존에 설치한 취급장비 사용이 가능하고 자유로운 접근과 운동을 방해하는 물체가 중간에 가로막고 있지 않다면 큰 문제가 없다. 하지만, 핵연료취급기_{FHM}와 오버헤드 크레인이 소실되고, 다량의 폭발파편이 수조에 떨어져 있기 때문에, 작업 환경과 조건이 심각하게 악화된 상황이다.

2021년 2월 28일 도쿄전력은 마침내 3호기 사용후연료저장조로부터 566개의 핵연료 집합체를 이전 완료하였다. 4호기에서의 활동이 끝난 후 오랜 지연 끝에 2019년 4월에 시작한 작업이었다.

1, 2호기의 사용후 핵연료 제거 작업 개시는 기존 일정에서 상당히 지연되었다. 이를 폐로추진회사NDF의 탓으로 돌리는 것은 의미도 없고 필요하지도 않다. 다만, 이들이 계획과 실제 사이에는 항상 간극이 존재하며, 이로 인해 예상치 못한 문제와 장애물이 발생할 수 있다는 사실을 배우거나 깨닫는 것은 중요하다. 작업 환경과 조건이 상당히 악화되었어도, 작업 자체는 간단하면서도 매우 정교한 기술을 필요로 한다. 그럼에도 불구하고, 원자로 건물에서 사용후 핵연료 제거 중간 단계까지 오는데도 10년이나 걸렸다.

후쿠시마 제1원전 내에서 발생한 폐기물 관리와 관련해, 저장 설비, 소각 설비, 압축 설비 등 필요한 인프라 구축은 꾸준히 진행되고 있다. 그러나, 중요한 점이 있다. 이러한 작업의 일차적 목적은 현재 옥외에 임시 매립되어 있어 주변 환경에 직접 노출된 방사성 폐기물을 건물 내에 보관하는 것이며, 인프라를 건설한다고

⁵ TEPCO, “Construction Of Water-Blocking Ice Wall Starts At Fukushima”, 3 June 2014, see https://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2014/1237060_5892.html

⁶ TEPCO, “Freezing started for the Landside Impermeable Wall (Ice Wall)”, 31 March 2016, see <https://www.tepco.co.jp/en/nu/>

해서 지금까지 발생한 모든 폐기물을 건물 내에 체계적으로 저장할 수 있는 것은 아니다. 오히려, “기준치 이하”의 저준위 방사성 폐기물과 더불어 콘크리트 잔해, 철근, 빔, 파이프 스크랩 등 일반적인 산업 폐기물 등은 시설 내 보관 가능한 양보다 훨씬 많아서 그대로 두게 될 것이다. 페로추진회사NDF는 이를 “재활용 가능”하다고 하지만, 재활용 가능한 품목별로 구체적인 사용처를 결정하고 사용자에게 이를 보내기 전까지는 어쨌든 소내에 계속 남아있게 되는 것이다.

1.4. 플랜 B의 의미

페로추진회사NDF의 기술전략계획을 바탕으로, 개략적으로 다음과 같은 의미를 도출해볼 수 있다.

- 후쿠시마 제1원전을 자연상태로 복원하는 것은 불가능한 목표다.
“40년 내에 자연상태 복원”의 원래 의미는 해제된 구역을 새로운 용도로 사용함에 있어 더 이상 어떠한 제한이나 조건도 없다는 뜻이어야 한다. 그러나 현재 계획을 성공적으로 이행하고 주요 건물을 모두 해체하며, 말그대로 부지를 자연 상태로 만들기 위해 녹지로 덮는다고 해도, 주거지, 농업, 산업/상업 활동, 학교, 공공 건물, 야구 등 체육 시설, 공원 등을 위한 공간으로 사용될 리 없다. 해제 구역을 그러한 용도로 사용하기 위해서는 선량한도 기준이 유럽에서 일반적으로 적용하는 연간 선량한도 10 μSv 범위 내에 있어야 한다. 하지만, 후쿠시마 제1원전의 현 오염 수준으로는 이 기준을 충족시키는 것이 불가능하다.

이것이 새로운 사실일까? 그렇지 않다. 2011년 3월 원자로 사고가 시작된 날부터 이미 알려져 있었던 사실이다. 이것이 불가능한 이유는 40년이 너무 짧아서가 아니다. 방사능 세슘Cs-137의 반감기가 거의 30.1년에 달하고 연간 10 μSv 라는 기준을 맞추기 위해 제거해야 하는 오염된 토양의 양을 고려하면, 무조건적 해제라는 목표는 80년, 120년, 160년이 지나도 불가능함을 쉽게 알 수 있다.

이런 비현실적인 목표는 처음부터 제시하지 말았어야 한다. 그러한 목표를 달성하기 위해 끝없이 자원을 쏟아 붓는 것은 지양해야 한다. 이것은 사고 피해자의 상황을 개선하는 방법이 아니다. 도쿄전력과 일본정부는 현실을 바탕으로 정직한 논의를 시작해야 할 것이다.

- 2호기 파편제거 실증 시험이 성공했다고 해서, 실제 환경에서도 연료파편 회수에 반드시 성공할 수 있는 것은 아니다.
앞서 설명한 바와 같이, 실증시험과 실제 제거 작업 사이에는 큰 갭이 존재한다. 페로추진회사NDF가 선택한 작업 방식(건식 측면 접근)은 실증시험에서는 가능할지 모르나, 실제 환경에서는 불가능할 수 있다.

- 사용후 핵연료 수조에서 연료 집합체를 전량 분리한 후 다음 단계는?
사용후 핵연료 수조에서 연료 집합체를 전량 빼내는 것은 현재 3, 4호기에서 완료되었다. 하지만, 사용후 핵연료 공동 수조 Common Spent Fuel Pool 로 옮긴 것에

불과하기 때문에 사용후 핵연료 관리의 50%에도 못 미치는 것이다. 모든 핵연료 집합체는 건식 저장 캐스크로 옮겨야 하는데, 그것으로 끝이 아니다. 궁극적으로는 현행 계획에 따라 후쿠시마 제1원전 부지 외부로 모두 운반해야 한다. 이것이 언제, 그리고 실제로 진행될지의 여부는 일본 정부의 백엔드 정책^{Backend Policy}에 달려있지만, 아직 완전히 수립되지 않은 상태다. 정책 수립이 완료될 때까지, 건식 저장 캐스크 안의 핵연료 집합체는 계속 부지에 보관하거나 인근 임시저장시설로 운반하게 될 것이다.

- 연료파편 회수 후 다음 단계는?

모든 문제를 극복하고 성공적으로 연료파편을 회수한다고 해도, 사용후 핵연료 집합체 최종 처분과 동일한 문제가 발생한다. 연료파편은 계속 부지에 보관하거나 인근 임시저장시설로 운송되어야 한다. 중요한 점은, 손상되지 않은 사용후 핵연료 집합체를 위해 특수 개발 및 설치된 룩카쇼무라 화학적 재처리 공장에서 연료파편을 처리할 가능성이 거의 없다는 점이다. 연료파편의 화학적 성분을 정확히 알 수 없기 때문이다. 즉, 연료파편을 후쿠시마 제1원전에 장기간 보관해야 할 수도 있다는 뜻이다. 언젠가 심층처분시설 부지가 결정되면, 시설을 완공 후 반입 준비를 하게 될 것이다.

- 저장시설에 보관되지 않은 폐기물 포함, 모든 고체 폐기물은 적절히 처분해야 한다.

앞서 설명한 사용후 핵연료 집합체와 연료파편의 최종 처분과 동일한 문제가 방사성 폐기물에서도 발생한다. 후쿠시마 제1원전 부지 내 저장 시설에 보관되어야 하는 방사성 폐기물뿐만 아니라, 저장 시설을 필요로 하지 않는 콘크리트 파편, 철강 스크랩 등 기타 폐기물도 옥외에 아무런 방호 조치 없이 그대로 노출되어 있는 상태다.

1.5. 현행 로드맵의 대안과 전략계획 - 플랜 C의 필요성

앞서 언급한 바와 같이 장기간 발생가능한 문제점을 모두 고려하면, 소위 플랜 B라는 도쿄전력의 중장기 계획, 페로추진회사NDF 전략계획에서 현재 구상한 대로 연료파편을 회수하는 것이 과연 최적의 선택인지 의구심이 든다. 연료파편 회수는 최종 목표가 아님을 기억해야 한다. 플랜 B에 따라 연료파편 회수를 완료한 후에도, 방사능 때문에 부지에서 아무 작업도 할 수 없는 상황이 발생할 것이다.

페로추진회사NDF는 기술전략계획에서 속도가 생명임을 강조하고 있으나, 연료파편회수 완료를 서두르는 것의 장점은 확실하지 않다. 차라리 향후 100년 또는 그 이상의 기간은 부지 및 구조물의 격납 및 격리를 위한 물리적 조치에 집중해, 연료파편에서 방사능 물질이 확산되는 것을 막는 것이 대안이 될 수 있다. 동시에 새로 개발 및 개선되는 신기술을 검토해 연료파편 제거에 적합한지 검토하는 것이다.

저자는 7년 전 『후쿠시마 폐쇄 계획』 과 본 보고서를 작성한 입장에서 위험한 핵분열 생성물과 핵분열성 물질로 구성된 연료파편이 고장난 원자로압력용기RPV 또는 1차 격납용기 내에 여기저기 흩어져 있도록 그냥 두어서는 안 된다고 처음에는 생각했었다. 지금도 조기 회수를 완전히 배제해서는 안 된다는 것이 나의 입장이다.

하지만 안전하고 확실하게, 그리고 비용 효과적으로 목표를 달성하기에는 현행 첨단 기술이 충분한 성숙 단계가 아니므로 연료파편을 그대로 두는 방안을 포함해 차선책을 찾아야 한다. 이를 위해서는 도쿄전력과 NDF가 방향을 급격히 전환해야 한다. 후퇴로만 여길 것이 아니라 혁신적인 패러다임 시프트로 긍정적으로 볼 수 있을 것이다.

특히, 저자가 플랜 C로 칭한 이 새로운 방안에서는 1차 격납용기 성능이 약화되기는 했음에도 1차 경계로 간주하며, 원자로 건물의 외부 표면은 정상적인 2차 경계로서의 격납 성능을 개선하기 위해 변경되었다. 당연히 플랜C는 방사성 물질 격납을 위한 임시 방책일 뿐 영구적인 해결책은 아니다. 그러나, 원자로 건물의 구조건전성과 격납 성능을 100~150년간 유지하는 것은 그렇게 어려운 일만은 아니다.

이제 중요한 것은 이러한 방식 도입 시 어떤 중요한 장점을 얻을 수 있느냐는 것이다. 주기적인 검사와 정비를 끝없이 실시해 원자로 건물의 구조건전성과 격납 성능을 유지하는 것이 반감기가 훨씬 긴 알파 핵종에 효과적이라고 보기는 어렵다. 방사선 독성을 어느 정도 중화할 기술이 발명되기만을 막연히 기대해서는 안 된다. 하지만, 로봇 기술은 제조업, 건설업, 의학, 간병, 심지어 보안 등 다양한 분야에서 필수적인 기술로 이미 자리잡았기에, 앞으로도 계속해서 급속하게 발전할 것으로 보인다.

채광 로봇과 해저 로봇은 10년 넘게 성공적으로 사용되어 왔으며, 계속해서 성능이 발전하고 있다. 미국 NASA는 달과 화성 표면을 탐사하기 위한 로봇을 개발하고 있다. 하지만 후쿠시마 제1원전 1차 격납용기 내부 작업용 로봇은 더 뛰어난 성능이 필요할 수도 있다. 계단/사다리를 오르내리는 기능, 다양한 구조물과 장비 장애물을 회피하는 기능 등이 필요할 것이다.

예를 들어, 보스턴 다이내믹스^{Boston Dynamics}가 개발한 휴머노이드 로봇 “아틀라스^{ATLAS}”가 몇 년 전 출시되었다. 여러 개의 관절이 있으며 거동이 자유로운 편이다 (자유도 28에 달한다). 운동기능은 두 다리로 보행하는 것뿐만 아니라, 물구나무 서기, 앞구르기, 점프, 공중제비 돌기 등 인간 체조선수와 같은 동작이 가능하다. 문을 열고 닫고, 전자 도구를 사용하며, 밸브 손잡이 개폐 조작, 배관 연결 등 여러 가지 복잡한 작업이 가능하다. 레이저/플라즈마 용접/절단 기능을 추가하는 것도 시간 문제다.

1차 격납용기 관통부를 통해 로봇팔로 받침대 벽부에 접근하는 것은 원시적이고 이미 구식인 개념이다. 아마도 100년 내에는 엔지니어들이 원하는 작업에 필요한 기술을 갖춘 휴머노이드 로봇 팀을 구성할 수 있으리라 본다. 받침대 벽부 및 원자로압력용기RPV 내부에 들어가 작업을 진행하고, 도구를 조작해 연료파편을 능숙하게 제거할 수 있을 것이다.

현재 페로추진회사NDF는 기능이 제한적이고 자유도가 낮은 로봇 팔로 연료파편을 제거하는 방법을 연구하고 있다. 하지만 머지 않아 휴머노이드 로봇팀이 이를 훨씬 간단하고 효율적으로 할 수 있게 될 것이다. 노동재해 또는 방사선 노출도 걱정할 필요가 없다.

수십 년 간 연료파편 제거를 연기하기로 결정하면, 페로추진회사NDF는 다음과 같은 작업에 집중해야 한다. 공기로 파편을 냉각시키고 건물 내 남아있는 잔류 오염수를 처리하는 것, 건물 제염, 불필요한 가연성 부품을 모두 제거하고 화재방호계통을 설치하는 것, 1차 격납용기 및 원자로 건물의 구조건전성과 격납 기능을 강화하는 것이다. 연료파편 회수를 위한 기존의 개발 프로그램은 조기 중단이 어렵다면 2호기 실증시험이 완료되는 대로 종료해야 한다.

현 세대가 야기한 후쿠시마 제1원전 문제의 해결을 미래 세대에게 떠넘기는 것에 대한, 윤리적인 부분은 어떠한가? 하지만 많은 비용을 들여 미성숙한 기술 때문을 도입하고, 이러한 비용을 충당하기 위해 수많은 정부채를 발행하고, 미래 세대에게 이를 상환할 것을 강요하는 것은 더 비윤리적인듯 하다. 오히려 그 비용을 아껴 재원을 마련해 둬으로써, 미래 세대가 발전된 미래 기술을 활용할 수 있도록 대비하는 것이 더 나은 선택이다.

2. 후쿠시마 제1원전 폐로를 위한 로드맵 및 기술전략

후쿠시마 제1원전 폐로 사업은 공공/민간 기관인 폐로추진회사NDF의 지시에 따라 도쿄전력 홀딩스가 수행하고 있다. 『폐로 및 오염수 관리에 관한 관계장관회의』는 일본 정부를 대표해 자금을 지원하나 폐로추진회사NDF에 대한 감독 책임은 없다. 관계장관회의 사무국은 경제산업성_{METI}으로, 『도쿄전력 홀딩스 후쿠시마 제1원전 폐로를 위한 중장기 로드맵』을 수시로 발표 및 업데이트하며, 폐로추진회사NDF는 『도쿄전력 홀딩스 후쿠시마 제1원전 폐로 기술전략계획』을 매년 발표하고 있다.

중장기 로드맵 최신 버전은 2019년 12월 27일 작성된 5차 로드맵이다.⁷ 기술전략계획 최신버전은 2020년 10월 6일에 작성되었다. 로드맵의 내용은 기술전략계획 요약본과 거의 대부분 중복된다. 중장기 로드맵은 전체적인 폐로 일정을 1-2-3기 단계로 구분하고 있다.

로드맵 수립 전, 사고 발생 직후 상황을 통제/안정화시키기 위한 긴급조치기간이 별도로 있었다. 이 기간은 1단계(방사성 준위가 지속적으로 감소하는 상태)와 2단계 (방사성 물질 확산이 통제되고 방사성 준위가 크게 감소한 상태)로 구성된다. 두 단계는 각각 2011년 7월, 2011년 12월에 도달한 것으로 공식 발표되었다. 1기는 2단계 완료 후부터 1호기에서 사용후 핵연료 제거를 시작하는 시점까지 해당한다. 1기 완료는 1차 핵연료 집합체 분리 작업이 시작된 2013년 11월에 발표되었다. 2기는 1호기의 연료파편 제거 시작 시점까지이다.

폐로추진회사NDF는 2호기 실증시험이 시작되는 2021년 12월까지 이를 완료할 계획이라고 밝혔다 (도쿄전력은 2020년 12월 24일 해당 목표일을 연기했으며, 2022년 이후에 준비가 될 것으로 보인다고 발표했다). 그 이후의 모든 폐로 작업은 3기에 해당한다. 3기 완료 일정은 2단계 완료 후 30~40년이다. 하지만 3기 작업 범위가 너무 모호하기 때문에, 이 일정도 정확히 추적하기 어렵다. 따라서 폐로추진회사NDF는 3기 중에서 3-1기를 구분해 다음과 같이 4단계 작업에 대한 마일스톤_{milestone}을 수립했다.

1. 오염수 관리
 - 오염수 일 발생량을 100m³ 이하로 줄인다 (2025년까지)
 - 원자로 건물 내 잔류 오염수양을 2020년 말 수준의 50%로 줄인다 (2022~2024)
2. 사용후 핵연료 수조에서 핵연료 집합체 제거
 - 2호기 핵연료 집합체 제거 시작 (2024~2026)
 - 1호기 핵연료 집합체 제거 시작 (2027~2028)
 - 1~6호기 핵연료 집합체 작업 완료 (2031)

⁷ METI, "Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station", December 27, 2019, The Inter-Ministerial Council for Contaminated Water and Decommissioning Issues, see https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20191227_3.pdf

3. 연료파편 회수

- 2호기 연료파편 제거 개시 (2021)
앞서 언급한 바와 같이, 도쿄전력은 2020년 12월 24일, 해당 일정 연기를 발표했다. 작업 개시는 2022년 이후에 준비될 것이라고 밝혔다.

4. 폐기물 관리

- 야드에 임시 저장된 콘크리트 파편, 철강 스크랩, 기타 폐기물을 저장건물에 저장 (2028)

위와 같이 4단계로 구분한 근거는 폐로추진회사NDF의 기술전략계획에 다음과 같이 설명되어 있다. 먼저, 폐로추진회사NDF는 영국 원전해체청^{Nuclear Decommissioning Authority} 이 방사성 물질 위험을 저감하기 위한 정량적 평가 방법론으로 개발한 안전 및 환경 피해량^{Safety and Environmental Detriment (SED)} 방법을 도입하기로 결정했다. SED는 다음 공식에 따라 계산한다.

$$SED = (\text{잠재적 영향}) \times (\text{통제 중요성})$$

*잠재적 영향: 방사능 물질 섭취로 인한 내부 피폭 시, 인체에 미치는 영향의 심각도를 나타내는 지표

*통제 중요성: 해당 사건이 발생할 확률을 나타내는 지표

SED 계산 결과에 따라, 다음의 3대 위험원을 우선순위로 선정했다.

1. 건물 내부 잔류 오염수, 수조 내 핵연료 집합체 (상대적으로 고위험, 우선순위)
2. 연료파편 (현재로서는 급격하게 고위험이 될 가능성은 낮음. 성급하게 처분하면 위험도가 높아질 수 있음)
3. 오염수 처리 시스템에서 발생하는 슬러지 등 고체 방사능 폐기물 (향후에도 고위험이 될 가능성은 낮으나, 폐로 단계에서 적절한 처분 필요)

저자의 입장에서, 일본 정부 및 폐로추진회사NDF가 중장기 로드맵과 마일스톤에 대해 논리적인 설명을 제시했다고 보기 어려운 것은 2가지 이유 때문이다. 먼저, 로드맵에 대한 최종 단계를 명확히 제시한 적이 없다. 다시 말해, 이 로드맵에는 최종 목적지가 없다. 두번째, 그들의 로드맵은 수행 예정 작업을 무작위로 명시하고 있다. 로드맵은 그 정의와 같이, 최상의 경로에 해당하는 구체적인 활동을 시작부터 종료까지 순차적으로 명확히 보여주어야 한다.

최종 상태가 제시되지 않은 폐로 로드맵

로드맵은 일정에 관해 다음과 같이 명확히 밝히고 있다. “2단계 완료 후 30~40년 내” 3기를 완료하는 것이다. 하지만 정말 이상하게도 이 로드맵을 통해 결국 어디에 도달하고자 하는지는 찾아볼 수 없다. 목적지 주변의 상황이 여전히 안개 같고, 그들의 설명만으로는 그림을 그리기 어렵다.

로드맵은 후쿠시마 제1원전 폐로 완료를 위한 길을 제시하는 것이기 때문에 예상되는 최종 상태는 부지 전체 또는 적어도 대부분을 무조건적으로 해제하는 것이어야 한다. 즉, 향후 토지 사용에 대한 제한이 전혀 없어야 한다. 해제 후에는 주거, 농업 등이 아무런 제한 없이 가능해야 한다.

이러한 기대와 반대로, 중장기 로드맵을 보면 3기 완료 후에도 그러한 최종 상태에 도달할 수 없음이 분명하다. 연료파편 제거 작업이 그 때까지 기적적으로 완료된다고 하더라도, 연료파편 외에 건식 캐스크에 보관된 수많은 사용후 핵연료 집합체가 여전히 부지 내에 남아있게 된다. 또한, 고체 방사성 폐기물을 저장하기 위한 10개 이상의 대형 저장 시설도 남아있다. “기준치 이하”의 콘크리트 파편과 철근/빔 스크랩 더미가 부지 어딘가에 매립되어 있을 것이다.

부지의 전반적인 방사성 준위는 유럽국가 기준 연간 10 micro-Sv나 미국 환경청 기준 연간 40 micro-Sv를 충족시키지 못할 것이다. 따라서, 여가 또는 산업 용도로 사용될 수 없다. 결국 해제 여부와 관계 없이 이 부지는 단순히 사용후 핵연료 및 기타 방사성 폐기물 처분 또는 저장 시설로 전환을 고려하는 게 자연스러운 선택이나 로드맵은 그런 내용에 대해서는 아무런 언급이 없다.

이는 폐로 원전의 최종 상태에 관한 방사성 준위 기준/요건 논란을 일본이 의도적으로 피하고 있기 때문일 것이다. 세계원자력협회^{WNA}는 2019년 2월, 폐기물 관리 및 폐로 실무반이 작성한 보고서를 발표했다. 『원전 폐로로 인한 물질 및 폐기물 관리 방법』⁸이라는 제목의 이 보고서는 『첨부B: 국가별 최종 상태 요건』에서 벨기에, 캐나다, 중국, 프랑스, 독일, 이탈리아, 인도, 네덜란드, 러시아, 스페인, 영국, 미국 등 다양한 국가의 현황 및 요건을 다루고 있다.

일본은 포함되어 있지 않다. 해당 보고서에 따르면, 사례별로 대응하는 국가들도 적지 않으나, 벨기에, 이탈리아, 네덜란드, 영국은 자연상태 복원을 위한 방사선 준위로 연간 10 micro-Sv 를 명시하고 있다.

일본 원자력규제위원회^{NRA}는 2012년 11월 고시 『특수원자력시설 지정으로 인한 도쿄전력 후쿠시마 제1원전 시행 예정 조치』 및 2014년 2월 26일자 고시 『도쿄전력 부지 경계의 유효선량한도 준수를 위한 규제요건』에서, 후쿠시마 제1원전 부지 저장 오염수 및 파편에서 방출되는 방사선으로 인한 주변 환경의 선량 증가한도를 “부지 경계 기준 연간 1 mSv 미만”으로 명시했다. 일본 원자력규제위원회^{NRA}는 잘못된 해석 가능성을 방지하기 위해 “부지 경계 기준 연간 1 mSv 미만”이 특수한 기준이며, 폐로 원전의 최종 상태에는 적용하지 않음을 명확히 해야 한다.

⁸ WMA, “Methodology to Manage Material and Waste from Nuclear Decommissioning Waste Management & Decommissioning Working Group” 2019, see <https://www.world-nuclear.org/getmedia/e81d115f-70c2-4c47-b208-242acc799121/methodology-to-manage-material-and-waste-report.pdf.aspx>

최적 경로가 없는 목표점

페로추진회사NDF의 사례와 같이 사업 종료가 아닌 시작 시점을 마일스톤으로 잡는 경우는 흔치 않다. 명시한 마일스톤 자체도 서로 상관관계나 순서가 없다는 것도 흔치 않은 경우다. 따라서, 달성 시점까지 얼마나 남았는지, 또는 3기 완료 목표까지 얼마나 남았는지 파악할 수 없다. 페로추진회사NDF가 안전 및 환경 피해량SED를 적용해 우선순위를 파악한 것은 긍정적이다. 그러나, 3기 완료 목표를 최대한 빨리 달성하기 위한 최적 경로를 따라, 필요한 세부작업을 파악하는 것도 필요하다. 최적 경로에 해당하는 각 세부작업은 목표 완료일을 설정하고, 페로 일정의 마일스톤으로 삼아야 한다.

페로추진회사NDF는 최적 경로에서의 중요성 및 상관관계에 대한 아무런 설명도 없이, 작업을 4개 범주로만 분류했다. 다음 장에서는 각 작업에 대해 살펴보고, 다른 대안과 비교해 그 단점과 수행 난이도에 대해 살펴보기로 한다.

2.1. 오염수 관리

오염수 관련 추진경과

특정 기간 중에 오염수양이 증가한 것은 건물에서 펌프로 빼낸 오염수양과 후쿠시마 제1원전 원자로 내부로 재순환되는 냉각수양의 차이 때문이다. 건물 내로 유입되는 지하수 및 우수의 양이 0이라면 둘은 동일할 것이다. 하지만 실제로, 건물로 유입되는 지하수 및 우수의 양이 재순환되는 냉각수보다 훨씬 많다. 따라서 처리해야 할 오염수가 계속 증가하는 것이다.

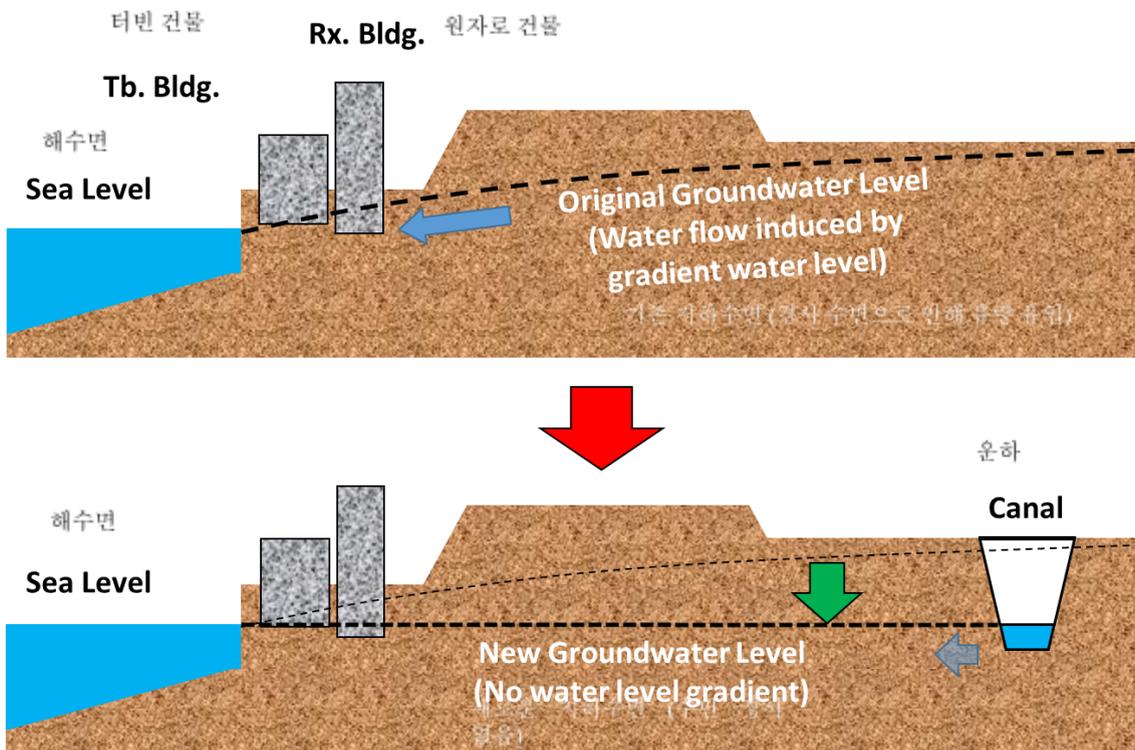
이에 대한 대응방안으로 2013년 동토벽이라는 개념이 제안되었다. 일본에서 가장 오래된 대형 건설사 중 하나인 카지마 건설^{Kajima Corporation}과 도쿄전력은 11월까지 함께 건설 계획을 수립하기로 했다. 처음에는 동토벽을 완성하면 외부에서 유입되는 지하수를 완벽히 차단할 수 있을 것으로 기대했다. 하지만 일부 토목 전문가들은 그러한 낙관적 기대를 경계하며, 일부 지하수가 동토벽을 통과해 균열 구역으로 빠져나올 수 있다고 경고했다. 그럼에도 불구하고 345억 엔(3억 3,000만 달러)을 투자해 동토벽을 설치했다. 그들은 2017년 8월 동토벽을 완공했다고 밝혔다. 총 1,500개의 냉동관을 지표에서 30m 깊이까지, 1~4호기 건물 전체 주변 1.5km 를 따라 설치했다. 영하 30도까지 내려갈 수 있도록 화학 용액을 파이프에 주입해, 토양 내 습기를 얼려 지하에 벽을 만든 것이다.

도쿄전력에 따르면 2017년 동토벽 완공 후 첫 번째 동절기 3개월 간 내부누설량은 일평균 110 미터톤이었으나, 2015년 동 기간에는 490 미터톤으로 380톤이나 감소했다. 도쿄전력은 이것이 전적으로 동토벽 때문만은 아님을 알고 있었다. 지표를 비투과성 소재로 덮거나 상류 양수정의 지하수를 퍼내는 등 그 외의 작업이 더 도움을 주었다. 도쿄전력은 동토벽 만의 효과는 일일 95톤 감소라는 결론을 내렸다. 하지만 로이터가 최근 독립적인 데이터 분석을 수행한 결과, 2018년 3월에는 141톤이었지만, 동토벽 사용 전 9개월 간 평균 일 132톤이 감소한 것으로 나타났다. 즉 내부 누설을 막는데 동토벽이 효과적인 역할을 하지 못한다는 뜻이다.

지하수량이 강우로 인해 계절 및 연도 별로 큰 차이를 보인다는 것은 사실이다. 건조했던 2018년 1월에는 일 83톤(월 평균)에 불과했으나, 태풍으로 인해 비가 많이 내렸던 2017년 10월 20~26일에는 일 866톤(주 평균)에 달했다. 마찬가지로, 2019년 10월 24-30일에는 지하수 및 강우로 인한 내부 누설량이 일 505톤 (주 평균)을 기록했다. 이 중 132톤은 오염된 건물의 하류에 위치한 지하수 양수정에서 퍼낸 것이기 때문에 해당 기간에 처리된 오염수의 총량(주 평균)은 일 637톤이었다. 동 기간 총 강우량은 158mm 였다. 2020년 지하수 및 강우로 인한 내부누설량, 하류 지하 양수정에서 끌어올린 지하수, 그리고 총량은 각각 일 360톤, 7톤, 367톤이었다. 동 기간 총 강우량은 145mm 였다. 11월 26일~ 12월 2일 기간에는 각각 131톤, 6톤, 137톤이었다. 이 주에는 강우량이 0이었다.

상기 데이터에서 명확히 알 수 있듯이 터빈 건물로의 오염수 내부 누설은 동토벽 건설 완공 발표 후 3년 넘게 계속되고 있다. 페로추진회사NDF는 “2025년 내에 오염수 일일 발생량을 100m³로 감축”이라는 마일스톤을 정했지만, 2020년 10월 6일 페로추진회사NDF가 발표한 최신 2020 기술전략계획에서는 구체적인 개선/시정 조치를 찾아볼 수 없다. 이 마일스톤을 달성하기 위한 기술 전략이 존재하지 않는다.

효과적인 기술 전략이 없다면, 마일스톤 달성 여부를 확신할 수 없다. 저자는 2013년 10월 국제 원자력 페로 연구소(IRID)에 제출한 『후쿠시마 폐쇄 계획』에서 동토벽이 지하수 유입을 효과적으로 차단할 좋은 방안이 되지 못할 것이라고 밝혔고, “드라이 아일랜드_{Dry Island}”라는 대안을 제시했다. 전체 부지 주변에 해수면보다 낮게 7km의 해자를 파는 방법이다. 간단히 설명하자면 아래 그림과 같다.



이 방법을 통해 방대한 영구적 “드라이 아일랜드”를 구축하면, 오염수를 효과적으로 관리할 수 있을 뿐만 아니라, 지하수면이 낮아 다른 용도로도 사용할 수 있다. 예를 들어, 소내에 저준위 방사성 폐기물 영구 저장을 위한 대규모의 지하갱도_{trench}를 구축하면 외부에 저장 부지를 찾을 필요가 없다. 또한, 낮은 지하수면은 연료파편 회수를 위한 지하 핫셀을 설치하기에도 최적의 조건이다.

중세 시대 성에 해자를 구축했던 것처럼, 효과적인 보안 경계 역할을 할 수 있다. 이러한 방식을 도입함에 있어, 후쿠시마 제1원전 부지를 얼마나 오랫동안 핵시설로 관리해야 하는지를 고려하면, 이 같은 해자를 구축하는 것은 지금도 기술적으로 전혀 늦지 않았다. 하지만, NDF는 매우 주저할 것이다. 특히, 이미

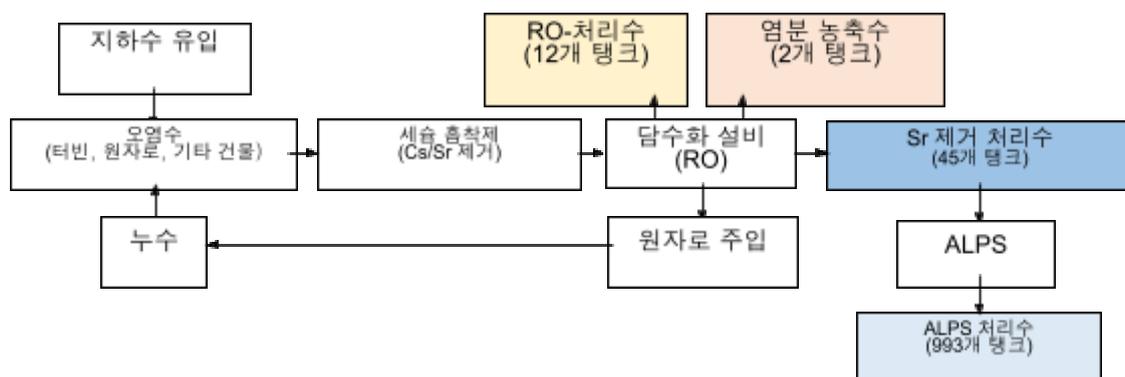
동토벽에 대규모 투자를 했기 때문에 계획 수정을 정당화하기 쉽지 않을 것이다. 동토벽을 그대로 둔 채 오염수 발생을 줄일 수 있는, 효과적이고 신뢰할 만한 다른 대안이 있는가? 잔열을 제거하기 위해 냉매를 물에서 공기로 바꾸면, 더 이상 연료파편에서 방사성 물질을 추출하지 않아도 된다. 터빈 건물로 유입되는 방사성 물질의 유일한 출처는 누수 건물 인근의 토양이다. 토양에 흡수된 잔류 방사성 물질은 지하수로 방출된다. 수중 방사능 농도는 점차 감소할 것이다. 농도가 충분히 낮아질 때까지 얼마나 걸릴지는 예측하기 어렵다. 하지만, 일단 그 수준으로 떨어져서 안정적으로 유지되면, 터빈 건물의 양수 작업은 마침내 종료된다. 이것이 CY2025 전/후 언제 가능한지와 관계 없이, 조만간 공기 냉각으로 전환할 필요가 있다.

동토벽을 유지하기 위해 냉각 시스템을 계속 작동하는 것이 바람직한가? 앞서 언급한 바와 같이, 냉각 시스템은 많은 구축 비용이 소요되었다. 하지만, 시스템을 계속 작동하는데도 시스템 운영, 모니터링, 수리, 예방정비, 연간운영비용 등 여전히 많은 비용이 소요된다. 전체적으로 10억 엔에 달한다. 시스템을 계속 사용하다 보면 열화 현상이 나타나는 것은 단지 시간 문제다. 전체적인 가치, 장기적 신뢰도, 운영/검사/정비 비용 등을 모두 고려한 재평가가 필요하다. 해자를 설치하는 방안도 함께 고려되어야 한다.

오염수 처리 및 저장 현황

도쿄전력 홀딩스가 운영하는 “오염수 포털 사이트” (<https://www.tepco.co.jp/en/decommission/progress/watertreatment/index-e.html>)에 따르면, 2020년 11월 19일 현재 오염수 처리 및 저장 현황은 다음과 같다.

- 저장된 처리수 : 1,236,874m³
- ALPS 처리 후 저장 : 1,211,875m³ (993개 탱크)
- Sr 제거 처리수: 24,999m³ (45개 탱크)
- 기타 처리수 : RO-처리 (12개 탱크), 염분 농축수 (2개 탱크)



참고: ALPS는 다핵종 제거설비(Advanced Liquid Processing System)를 뜻함

도쿄전력의 원래 예상에 따르면, 탱크를 증설해 저장용량을 2020년 말까지 약 137만 m^3 로 늘릴 수는 있지만, 2022년 여름이면 그마저 모두 용량 한계에 도달한다. 후쿠시마 제1원전 부지 내 추가 용지 가용여부, 오염수 축적량 감소로 인한 변화의 조짐도 있다.

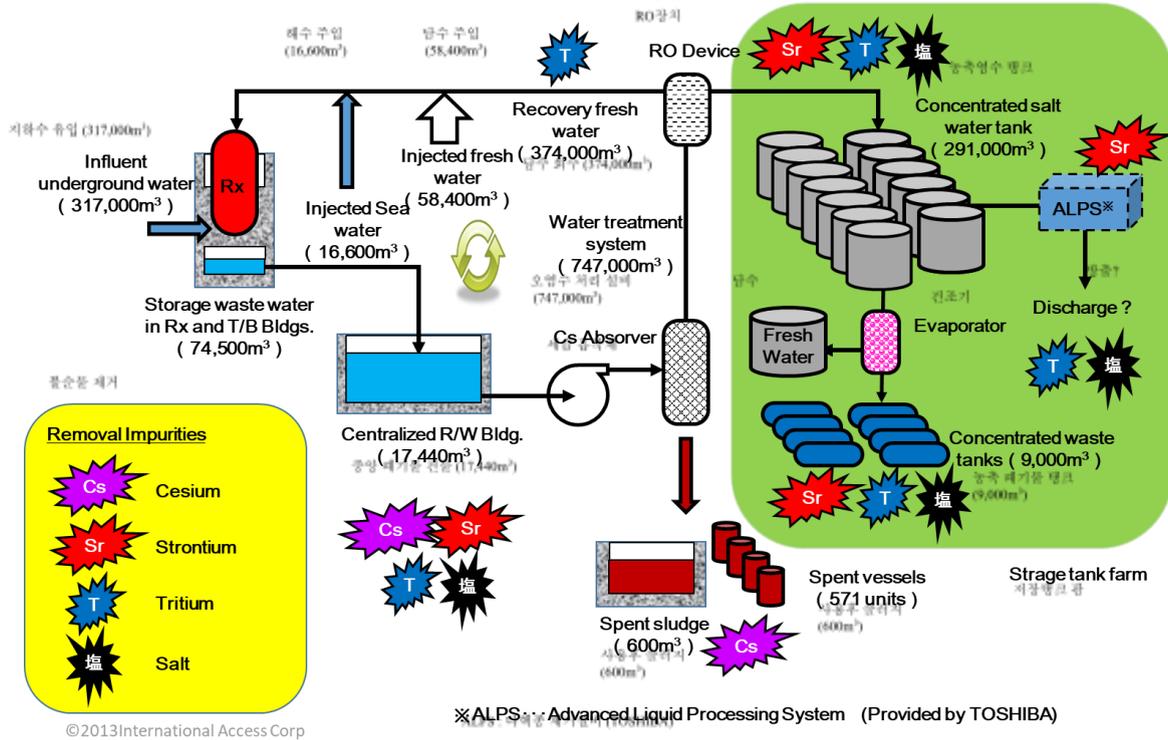
저장된 처리수 전체의 98%는 ALPS 처리수이다. 하지만, ALPS 처리수가 모두 방출기준을 충족하는 것은 아님을 기억해야 한다. 처리수를 방출하려면 모든 개별 핵종 농도비의 합이 1 이하여야 한다. 이 기준을 충족하지 못하는 이유 중 하나는 삼중수소 농도가 기준 초과이기 때문이다. 뿐만 아니라, 삼중수소 영향을 완전히 배제하더라도, 2020년 9월 30일 현재 ALPS 처리수(1,122,900 m^3) 중 방출한도 이하인 것은 27%(295,000 m^3)에 불과하다. 기준치보다 농도가 1~5배 높은 것은 34% (374,100 m^3), 5~10배 높은 것은 19% (207,000 m^3), 10~100배 높은 것은 15% (161,700 m^3), 100~19,909배 높은 것은 6% (63,200 m^3)나 된다. 오염수 63,200 m^3 를 1/150 비율로 희석하는데 얼마나 많은 정수가 필요할까? 거의 1억 m^3 이다. 1/1,500 비율로 희석하려면 약 10억 m^3 의 정수가 필요하다. 희석 후 방출은 법적으로 허용된다 하더라도 현실적인 방안은 아니다.

삼중수소의 경우, 일본의 방출허용농도는 60,000Bq/L이다. WHO 음용수 수질기준(2004)에서는 10,000Bq/L이다. 탱크 전체의 농도 측정값은 131,000~2,500,000Bq/L로 다양하며, 모두 기준 초과에 해당한다. 방사성 스트론튬(Sr-90)의 방출허용한도는 30Bq/L이다. 그러나 FY2013에 기존 ALPS 설비 필터 고장이 발생해, 탄산염 침전물 슬러리가 방출물에 혼합되어, 매우 높은 수치인 433,000Bq/L를 기록했다.

경제산업성 『삼중수소수 TF』는 2016년 6월 발표한 보고서에서 “해양방류” 등 5가지 방안을 제시했다. 그러나, 지역 어민들의 강력한 반발로 지금까지 아무런 결정도 이루어지지 않고 있다. 저자가 『후쿠시마 폐쇄 계획』을 작성할 때, 이 부분이 어려운 문제였다. 당시 ALPS는 아직 운영 개시 전이었다. 오염수는 세슘_{Cs} 흡착제와 RO 장비만으로 처리했다. 중간처리 후 여전히 스트론튬, 삼중수소, 고농도 염분이 포함된 오염수는 “농축 염수 탱크”에 저장되었는데, 2013년 9월 24일 기준 그 양이 291,000 m^3 에 달했다 (하단 그림 참조).

오염수 처리 설비 운영 결과 (2013년 9월 24일 현재)

Operating Results of Contaminated Water Processing System as of 09/24/2013



삼중수소는 ALPS를 거치더라도 최종 제거되지 않기 때문에, 저자는 처리수에 삼중수소만 남아있을 것으로 추정했다. 그래서, 해자 부식 방지용 콘크리트 블록을 만드는데 이를 최대한 사용하는 방식을 제안했다. 삼중수소는 침투력이 낮은 저에너지 베타선만 방출하는, 특이한 동위원소다. 위 방식을 도입하면 삼중수소의 방사선 독성을 차단할 수 있다. 관련 문헌을 일부 검토해 정해진 농도의 해수를 섞으면 콘크리트 강도를 높일 수 있다는 것도 확인했다. 하지만, 당시에도 처리해야 할 오염수 양이 이미 너무 많은 상태였다. 도교전력은 결국 총 오염수 양의 1/4만 이러한 방식으로 사용하고, 나머지는 희석 방출법을 사용해야 한다는 결론을 내렸다.

오염수와 관련된 문제는 부지 내 탱크에 저장된 오염수를 최종 처분하는 것으로 끝나지 않는다. 화학적으로 생성된 강우침전물 및 고건전성 용기_{HIC}에 보관된 ALPS 흡수재 등 처리설비에서 발생하는 2차 폐기물의 양이 늘어나고 있으며, 현재 대규모 저장 공간이 필요한 상황이다. 오염수 장기 관리를 위해서는 후쿠시마 현 지역사회와의 전적인 협의, 그리고 투명한 절차가 필요하다.

2.2. 사용후 핵연료 수조에서 핵연료 집합체 제거

사용후 핵연료 저장량

사고 직전, 후쿠시마 제1원전 1호기 원자로에는 핵연료 집합체 400개, 사용후 핵연료 수조에는 사용후 핵연료 집합체 292개, 신연료 집합체 100개가 남아있었다. 마찬가지로, 후쿠시마 제1원전 2호기 원자로에는 각각 548개, 587개, 28개가 있었고, 후쿠시마 제1원전 3호기에는 548개, 514개, 52개가 있었다. 4호기에서는 원자로 내부구조물 변경 작업이 진행중이었다. 모든 핵연료 집합체는 원자로압력용기RPV 제거했고, 4호기의 사용후 핵연료 수조에는 조사 핵연료 집합체 1,331개, 신(비 조사)연료 집합체 202개가 들어있었다. 사고로 인해, 1~3호기 내 1,496개의 핵연료 집합체가 손상되었다.

사고 영향을 받지 않은 사용후 핵연료 집합체와 신연료 집합체에 대해서는 다음과 같은 회수 작업이 진행되고 있다. 먼저, 4호기는 2013년 11월 18일 총 1,533개의 집합체에 대해 회수 작업이 개시되었고, 2014년 12월 22일 완료되었다. 그 다음 작업은 3호기를 대상으로, 2019년 4월 15일에 개시되었다. 그 이후 다수의 고장 및 운전정지가 발생했다. 여러 번의 시행착오와 상당한 기간의 지연 끝에 2021년 2월 28일 3호기 사용후 핵연료 수조 내 566개의 핵연료 집합체 전량이 제거됐다.

1, 2호기의 경우, 상당한 시간이 소요되는 준비 작업이 남아있다. 최신 중장기 로드맵에 따르면, 2호기 (핵연료 집합체 615개) 작업은 2024~2026년 사이, 1호기(핵연료 집합체 392개)는 2027~2028년쯤 개시 예정이다. 2018기술전략계획 (2018.10.2)은 3호기 작업은 FY2018 중반, 1, 2호기는 FY2023년에 개시할 것으로 예상했다. 즉, 지난 2년 사이에도 1, 2호기 작업 개시가 상당히 지연되었다는 뜻이다.

후쿠시마 제1원전 내에 동일하게 위치한 5, 6호기는 사고의 직접적인 영향을 받지 않아 손상되지 않았음에도, 폐로 결정이 공식 발표되었다. 그 이후, 모든 핵연료 집합체를 5, 6호기 사용후 핵연료 수조로 운반했다. 5호기 수조에는 현재 사용후 핵연료 및 신연료 집합체 1,374개가 저장되어 있다. 6호기에는 수조에 사용후 핵연료 집합체 1,456개 및 신연료 집합체 198개, 신연료 저장실^{New Fuel Vault}에는 신연료 집합체 230개가 추가적으로 보관되어 있다. 1호기 연료이송작업이 완료될 때까지 보관중이다.

지금까지 각 호기에서 운반된 사용후 핵연료 및 신연료 집합체 대부분은 동일 부지 내 공동수조에 저장되어 있다. 그 결과, 2020년 9월 30일 현재 공동수조 내 핵연료 집합체 수(사고 전 기존 저장분 포함)는 사용후 핵연료 집합체 6,365개, 신연료 집합체 76개이다. 1~6호기에서 이송해 건식 캐스크에 보관된 2,033개의 사용후 핵연료 집합체도 추가적으로 부지 내에 보관중이다. 따라서, 1~3호기 원자로압력용기RPV에 원래 저장되어 있다가 사고로 용융된 1,496개의 핵연료

집합체를 제외하면, 총 13,137개의 사용후 핵연료 또는 신연료 집합체가 사용후 핵연료 수조, 신연료 저장실, 공동 수조 또는 건식 캐스크에 저장되어 있는 셈이다. 도쿄전력은 결국 사용후 핵연료 집합체 전량을 건식 캐스크에 넣어, 약 21,000m²의 소내 임시저장시설에 저장할 계획이다. 1, 2, 3호기 연료파편 회수 후 이를 저장할 임시저장시설을 설치하기 위해, 더 넓은 약 60,000m²의 부지도 확보한 상태다.

후쿠시마 제1원전에서 다수의 핵연료 집합체를 최종 처분하는 것과 관련해, 도쿄전력은 사용후 핵연료 수조에서 핵연료 집합체를 회수하는 것을 마일스톤으로 설정하고 있으나, 이를 완료한 후에도 더 큰 문제에 직면할 수 있다.

사고 대응 중 발생한 핵연료 열화/손상 가능성

핵연료 집합체를 원자로 건물 내 사용후 핵연료 수조에서 공동 수조로 이송할 때는 특수 설계한 운반 캐스크를 사용해야 한다. 그리고 중간저장을 위해서는 또 다른 유형의 캐스크 (건식저장 캐스크)를 사용한다. 이 두 가지 캐스크는 설치 및 운영 방식에 근본적인 차이가 있다. 건식저장 캐스크의 경우, 사용후 핵연료 집합체가 들어있는 원통형 셀 “캐니스터”에 두꺼운 대형 뚜껑을 덮고, 여기에 환기 및 배수를 위한 소형 관통부가 있다. 뚜껑을 셀에 용접한 후, 배수 및 진공건조를 진행하고 헬륨 가스로 압력을 높인다. 관통부를 덮기 위해 소형 포트 커버_{port cover}를 용접으로 연결한다. 이렇게 해서 캐니스터의 격납형 경계를 만든다. 캐니스터에 저장된 핵연료 집합체 중 연료봉 피복에 침투성 결함이 발생하면, 진공 건조 단계에서 연료봉 내부의 기체성 방사성 물질(Kr-85)을 추출해 환경으로 배출한다.

3~4호기 사고 당시 사용후 핵연료 수조의 수위는 정상 수준에서 크게 떨어졌으며, 유실된 냉각수를 보충하기 위해 해수를 대량 살수 또는 주입했다. 일부 염분은 연료 피복 표면에 결정화되었다. 이후 핵연료 집합체는 장기간 염수에 담겨 있었는데, 이 때 화학적 열화가 진행되었을 수 있다. 또한, 수소 폭발 시 상부에서 콘크리트 파편이 떨어져 손상되었을 가능성도 있다. 그럼에도 불구하고, 운반용 캐스크에 실을 당시, 하나씩 검사를 시행하지 않았다. 그렇게 할 필요가 없었다. 운반용 캐스크와 달리, 건식 저장 캐스크 캐니스터에 사용후 핵연료 집합체를 담을 때는, 손상이 없는지 확인하고 필요하면 검사를 거쳐야 한다. 캐니스터를 진공 건조해야 하기 때문이다. 연료 피복에 사소한 결함이라도 있으면, 피복 내부의 기체성 방사성 물질을 추출할 때, 특정 진공도_{vacuum level}에 도달하는 시간이 오래 걸릴 수 있다. 이로 인해 탑재작업이 방사성 물질의 영향을 받거나 지연될 수 있다.

이러한 잠재적 문제를 해결하려면, 캐니스터에 실기 전 각 핵연료 집합체에 특별한 검사(진공 흡입_{vacuum sipping})를 실시하면 된다. 하지만, 해당 검사는 많은 시간이 소요되며, 결함이 발생한 핵연료 집합체 등을 안전하게 취급하는 절차를

별도로 마련해야 한다는 문제가 있다. 연료 피복은 시간이 지나면서 매일 경미한 열 사이클링이 진행되어, 금속 열화가 발생하기 쉽다. 이는 지르코늄 피복 내부의 수소화물 결정의 방향이 원주 방향에서 수직 방향으로 재배치 되면서, 원주 응력^{hoop stress}에 대한 기계적 강도를 잃기 때문이다. 이러한 과정이 장기간 염수 등 열악한 환경에서 함께 진행되는 경우, 장기 저장에 어떤 시너지 효과를 가져올지 알 수 없다. 그렇기 때문에, 어찌되었든 진공흡입을 시행해야 한다.

장기 또는 무기한 건조 저장

도쿄전력은 결국 건식 캐스크에 13,000개 이상의 핵연료 집합체를 모두 성공적으로 운송해 후쿠시마 제1원전 저장시설에 이를 보관할 수 있었지만, 과연 얼마나 오랫동안 그 상태로 보관해야 할까? 저장을 중단하고 실질적인 최종 처분을 진행하려면 어떤 문제를 해결해야 하는가? 이러한 질문에 대한 해답을 찾기 전에, 백엔드 정책을 수립하고 이를 지원할 기술을 개발해야 한다. 하지만 국가적으로 아직 합의가 이루어지지 않은 상황이다. 최종 처분을 위해 어떤 방안을 선택하더라도, 이에 대한 입증된 기술도 없는 상태다.

한편, 21,000m²의 공간에 약 200개의 건식 저장 캐스크가 밀집되어 있는 상황이 발생할 것이다. 이것이 안전 및 환경 피해량SED 평가에 따른 것이라고 해도, 효과적인 보안 절차를 수립해 이행하지 않는 한, 국민의 지지를 기대하기 어렵다. 이는 분명히 페로추진회사NDF의 재량권과 경제산업성의 관할권을 넘어서는 사안이다. 보다 철저한, 정부 간 검토가 필요하다.

2.3. 연료파편 회수

2.3.1. 일반 현황

일본 정부의 증장기 로드맵과 페로추진회사NDF의 기술전략계획에 따르면, 안전 및 환경 피해량SED 평가 프로세스를 통해 선정한 위험저감 우선순위 작업을 진행할 때 다음과 같은 5가지 기본 원칙을 고려해야 한다.

1. 안전성 : 방사선 위험 저감 및 산업안전 강화
2. 신뢰성 : 신뢰도가 매우 높으며 유연한 기술
3. 최적화 : 효과적인 자원배분 (인력, 자재, 예산, 공간)
4. 신속성 : 일정 준수
5. 현실성 : 주어진 환경 및 조건에서 엄밀한 현실성 확보

이를 바탕으로, 구체적 방법론 수립 시 확인해야 할 연료파편의 특징은 다음과 같다. 페로추진회사NDF도 연료파편 회수 방법 개발 시 이를 고려했다고 밝히고 있다.

- 알파 방출체 등 다량의 방사성 물질은 주로 흡입을 통한 인체 피폭 원인이 될 수 있다. 이러한 물질이 밀봉 조치 없이 원전 전체에 다양하고 특이한 형태로 존재한다.
- 원자로 건물 및 1차 격납용기의 기능이 열화되고 있다.
- (용융된 노심에 오염된)구조물과 부품의 격납 경계 무결성을 알 수 없다.
- 방사성 준위가 높기 때문에 원전 접근가능성이 제한되어 있다. 발전소 조건을 원격으로 모니터링하기 위한 계측 장비 설치도 어렵다.
- 격납 경계의 추가적인 열화가 진행될 수 있으므로 신속한 조치가 필요하다.

파편 회수를 위한 접근경로

원자로압력용기RPV 하단 헤드에 발생한 문제로 이를 통해 대부분의 연료파편이 떨어져 나와 받침대 벽부 안 쪽에 쌓인 것으로 확인됐다. 사고 발생 초기부터 지금까지 이 구역은 냉각수를 주입해 냉각하고 있다.

받침대는 건정_{drywell} 하단에 위치한 두꺼운 원통형 구조물이다. 원자로압력용기RPV, 받침대, 1차 격납용기는 모두 하나의 축으로 연결되어 있다. 받침대는 원자로압력용기RPV의 무게를 수직으로 지탱하도록 설계되어 있으며, 철근 콘크리트로 이루어져 있다. 콘크리트 내부에는 두꺼운 철근이 뺨뺨하게 자리잡고 있다. 2, 3호기 받침대 안지름의 크기는 약 5.4m이며, 1호기는 이보다 1m 작다.

받침대 안에는 회전형 플랫폼이 설치되어 있어, 정기점검 시 제어봉 구동장치_{CRD}를 탈착 및 재설치하거나, 노내중성자검출기_{in-core neutron detector} 신호 케이블 교체시 절단 및 재연결을 위해 사용한다. 받침대 바닥부터 플랫폼의 높이는 약 3.2m이다. 연료파편을 회수하려면 받침대 내부로 진입해야 한다.

저자는 1~3호기 원자로압력용기RPV와 1차 격납용기에서 연료파편을 회수하는 구체적인 방법을 연구하면서, 연료파편 분포 차이, 1차 격납용기 내부 수위, X-6 관통부를 통한 접근성, 주변의 방사선 준위 등을 신중히 검토하고 고려했다. 원자로압력용기RPV 내부 하단 헤드 및 노심 구역의 연료파편 분포를 파악하기 위해, 우주선 뮤온 검출시스템_{Cosmic-ray Muon Radiography}을 사용했다. 해상도가 좋지 않았음에도 불구하고, 유용한 정보를 얻을 수 있었다. 희소한 우주 방사선에 장기간 노출시키는 작업이었다. 1호기에서는 뮤온 검출법을 2회 수행했으며, 그 기간은 1차 2015년 2~5월, 2차 5~9월이었다. 2호기에서는 2016년 3~7월, 3호기는 2017년 5~9월이었다.

X-6 관통부는 1차 격납용기 위의 개구부인데, 카트 위 긴 박스에 담긴 CRD를 정비 작업시 탈착했다가 작업 후 재설치하는 통로로 사용된다. 원활한 작업을 위해 레일이 달린 경사 터널을 만들었다. 터널의 끝은 받침대 벽부 사각 개구부에 회전 플랫폼과 동일한 높이에 설치되어 있다. 이 관통부는 정기 점검 및 정비를 위한 계획정지_{outage}시에만 개방되고, 운전 중에는 안전하게 닫혀 있다. X-6 관통부를 개방하면, 외부 1차 격납용기에서 받침대 내부로 직접 연결되는 최단 경로를 확보할 수 있다.

회전 플랫폼과 동일한 높이에는 이러한 소형 사각 개구부가 설치되어 있으며, 그 외에도 작업자 출입을 위해 받침대 벽부 하단에 문 크기의 개구부가 있다. 정비 작업자는 건정 하부층에서 이를 통해 받침대 내부로 출입할 수 있다. 받침대 내부 하부층에는 배수조 2개, 기기 배수관 1개, 바닥 배수관 1개가 설치되어 있다.

받침대 내부 조사

지금까지는 1호기 받침대 내부에 쌓인 연료파편 상태를 조사하기 위한 원격탐사가 시도된 바 없으나, 2호기의 경우, 3회 (2017년 1월, 2018년 1월, 2019년 2월), 3호기는 1회 (2017년 7월) 실시되었다. 2017년 7월 3호기 조사에서, 핵연료 집합체 상단 타이 판_{Tie-Plate}, CRD 인덱스판, CRD 안내관, 제어봉 속도제어기 캐스팅 등 원자로 내부 부품과 상단에서 그레이팅 바닥_{grating floor} 조각 등 다양한 기타 파편이 떨어진 것이 발견되었다. 모래, 자갈, 연료파편 침전물 더미와 섞여 있는 상태였다.

가장 상세한 원격 탐사는 2호기에서 진행되었다. 2018년 1월 조사 시, 받침대 하단에 쌓인 연료파편, 진흙 및 자갈 더미에, 핵연료 집합체 상단 타이판이 묻혀있는 것을 발견했다. 스프링도 발견되었는데, 핵연료에 있던 것인지 기동영역 중성자속 모니터_{SRNM}에서 나온 것인지는 확인되지 않았다. 해당 탐사

중 촬영된 영상을 보면 CRD 교체 카트의 케이블 트레이와 그레이팅 등 여러 부품과 구조물이 부서지고 변형되어, 여기저기 흩어져 있는 것을 볼 수 있었다.

검사기 위치를 플랫폼에서 약 2m 낮춰 상세하게 관찰했다. 컬러 사진은 꽤 선명했다. 가장 최근 수행된 2019년 2월 탐사에서는 그라플^{grapple}을 사용한 물리적 테스트도 수행했다. 그라플에는 움직일 수 있는 손가락이 달려 있었다. 조사팀은 자갈 침전물은 비교적 쉽게 움직일 수 있었으나, 큰 덩어리는 움직이기 어려웠다고 밝혔다. 큰 덩어리는 단단하고, 그라플 손가락으로 표면에 접촉점을 표시할 수 없었기 때문이다. 방사선량도 측정했는데 약 6.4~7.6Gy/h 범위로, 받침대 내부는 균일한 수준이었다.

받침대 외부의 선량 수치는 내부보다 높은 43Gy/h였다. 이는 우리의 예상과 반대인 것처럼 보이고 도쿄전력은 해당 문서에서 기술적 설명을 제시하지 않았으나, 저자는 받침대 내부의 선량이 외부보다 낮은 이유가 베타선에 대한 물의 차폐효과 때문이라고 예상한다. **받침대 내부의 연료파편을 건조시키면 선량이 급격히 증가할 수 있다는 의미다.**

건식 측면 접근방식

2018년 10월 발표된 기술전략계획에서 페로추진회사NDF는 결국 원자로 건물 1층에서 “건식 측면 접근방식”으로 연료파편을 회수하는 방법에 집중하겠다는 뜻을 밝혔다.⁹ 저자는 이들의 결정을 두고 판단할 때, 페로추진회사NDF 팀이 일단 받침대 내부 어디서든 연료파편 시료를 채취하는 데만 관심이 있을 뿐, 실제 환경에서 실행해 연료파편 전체를 완전히 회수할 생각은 없다는 인상을 받았다. 장기적인 계획이 부재했기 때문이다. 현실성이 떨어진다고 판단했다. 페로추진회사NDF팀이 플랜 B 건식 측면 접근 방식을 제대로 추진하려면, 관절이 많고 자유도가 높은 세밀한 로봇팔이 필요했다.

1~3호기 차이점과 실증시험 후보 호기 선정

1~3호기에서 사고 진행 양상이 다르게 나타난 것은 각 원자로의 SCRAM(an emergency shutdown of a nuclear reactor affected by immediately terminating the fission reaction.) 직후 시행한 조치의 순서가 각기 다르기 때문이다. 구체적으로 설명하자면, 가장 중요한 요인은 격리응축기계통^{Isolation Condenser System(IC)}에서 1호기 노심냉각 작동 시간, 그리고 노심격리 냉각계통^{Reactor Core Isolation Cooling System (RCIC)}의 냉각기능 상실 전까지 2, 3호기에서 작동한 시간이다.

1호기 IC(격리응축기) 계통 기능이 가장 먼저 상실되었고, 그 다음 RCIC(냉각계통) 기능이 3호기, 그리고 마지막으로 2호기였다. 1호기가 가장 먼저였기 때문에, 원자로압력용기RPV 하단에 연료파편이 매우 적게 남아있었고 연료

⁹ NDF, “Strategic Plan 2018”, 2 October 2018, see <http://www.dd.ndf.go.jp/en/strategic-plan/index2018.html>

파편 대부분은 액체 형태로 받침대 구역으로 흘러 내려갔다. 그 중 상당수는 하층부의 작업자 출입로를 통해 빠져나가기도 하고, 건정 바닥으로 퍼졌다. 3호기 RCIC 계통은 1호기 IC 계통보다 더 오래 살아남아, 원자로압력용기RPV 하단에 일부 연료파편이 남아있었고, 이로 인해 받침대 구역으로 배수되는 양이 줄었다. 따라서 하단의 작업자 출입로를 통해 누출된 연료파편은 더 적었다.

2호기 RCIC 계통은 3호기보다 더 오래 유지되었으며, 원자로압력용기RPV 하단에 남은 연료파편이 3호기보다 많았던 것으로 판단된다. 그렇기 때문에, 받침대 구역으로 배수되는 양이 더 줄어들었다. 배수 후의 연료파편은 모두 받침대 구역 내부에 남아있는 것으로 추정된다.

1차 격납용기 내부 수위는 사고 피해 규모에 따라 달라진다. 1호기의 경우, 수위가 건정 바닥보다 약 2m 낮은 것으로 판단되었다. X-6 관통부는 침수되지 않았다. 반면, 응축 수조(토러스)_{torus}는 완전히 침수된 것으로 보인다. 3호기는 수위가 건정 바닥보다 약 6m 낮았기 때문에 X-6 관통부가 물에 잠겼고, 응축 수조(토러스)는 거의 침수된 것으로 보인다. 2호기의 경우는 노심 열화가 진행되면서 1차 격납용기 내부 압력이 크게 감소했다. 이는 1차 격납용기 압력경계에 심각한 손상이 발생한 것으로 볼 수 있다. 수위는 건정 바닥에서 불과 20cm밖에 떨어져 있지 않았다. 이는 배기관 바닥과 같은 수준인데, 배기관은 응축실 Suppression Chamber 또는 습정 Wetwell 이라고도 하는 응축 수조(토러스)과 건정을 구조적으로 연결한다. 압력 과도상태 때문에 응축 수조(토러스) 수위는 크게 낮아진 것으로 추정되며, 급수관 Downcomer Pipes 하단은 기상 vapor phase 에 노출되어 있기 때문에 건정 내부의 대기는 응축 수조(토러스)로 자유롭게 이동할 수 있다.

“건식 측면 접근방식”을 사용하면 원자로 건물 1층에서 주요 작업이 진행되는데, 1호기의 경우 특히 X-6 관통부 주변의 방사성 오염이 극심하기 때문에 작업 공간으로 적합하지 않다. 선량은 630 mSv/h에 달한다. 3호기 동일 구역의 선량도 높은 편이어서 계속 작업하기 어렵다. 수 십 mSv/h에 해당하는 핫스팟도 존재한다. 제염 또는 차폐를 하더라도, 작업자들은 생산적으로 작업을 수행할 수 없다.

결국 소규모 작업을 할 만한 공간은 2호기에서만 간신히 확보할 수 있는 수준이다. 일반구역 선량은 5 mSv/h 이하로 감소했다. 보통 이 정도의 선량은 충분히 낮다고 볼 수는 없으나, 페로추진회사NDF팀은 소규모 실증시험 작업에는 적합한 기준치 이내라고 결론을 내렸을 것이다.

이 모든 요소를 고려해, 연료파편 회수 실증시험 대상으로 2호기를 선정했다. 1, 3호기는 여전히 준비 단계에 있으며, 더 많은 정보를 수집하기 위해 추가적인 노력이 필요하다. 따라서, 2호기 실증시험이 성공적이라 하더라도, 동일한 방법론이 이러한 원자로에 마찬가지로 효과가 있다고 장담할 수는 없다. 또한, 실증시험을 단순히 확대하기만 하면 실제 환경에 적용할 수 있다고 생각해서도 안 된다. 불확실한 난관들이 너무나 많이 존재한다.

2.3.2. 원자로 2호기 현황

후쿠시마 제1원전 2호기는 연료파편 시료 채취에 가장 좋은 조건을 갖고 있다. 도쿄전력 홀딩스가 발표한 『2호기 연료파편 시료 채취 준비 현황 및 1차 격납용기 내부 조사』(2020.10.29) 자료에는 상세한 내용이 기재되어 있다. 이에 저자의 설명을 추가하여 아래와 같이 요약해 보았다.

경과 및 향후 계획

2호기 X-6 관통부 활용 타당성을 판단하기 위해, 2017년 1월 조사를 진행했고 내부에 침전물이 존재함을 확인했다. 침전물의 특성을 파악해야 했기 때문에, 제거 절차를 확인했다. 2017년 조사에서는 X-6 관통부에 작은 구멍을 타공해 안내관을 설치했다. 침전물 상태를 시각적으로 확인하기 위해, 안내관을 통해 검사기를 삽입했다.

2020년 10월 28일, 침전물을 손으로 직접 확인하는 추가적인 조사를 실시했다. 그 결과, 침전물은 부드러운 형태로, 손으로 만지면 금방 형태가 바뀌지만 끈적임은 없었다. 관통부 안에서는 케이블도 발견되었다. 유연하고 자유자재로 움직일 수 있었다. 검사기에는 다양한 관절, 손가락 3개, 조명이 설치되어 있었는데, 이를 사용해 들어올릴 수 있는 정도였다. 검사기 설치 작업을 했던 기술자 한 명은 당일 피폭량이 1.5mSv였다.

X-6 관통부 내부에서 침전물 제거 작업 시, 방호 조치가 없으면 대기 중 방사능이 발생할 것으로 예상된다. 이를 방지하기 위해 페로추진회사NDF는 향후 작업을 위해 X-6 관통부 인근 및 상부에 위치한 X-53 관통부에 스프레이 장치를 설치할 계획이다. X-53 관통부에는 직경 50mm의 기존 시추공이 있다. 하지만 스프레이 장치의 외경은 기존 시추공의 내경보다 큰 100mm이다. 페로추진회사NDF는 원통톱을 사용해 X-53 관통부를 130mm까지 확장해, X-53 관통부에 스프레이 장치를 설치할 예정이다. 그리고 살수 스프레이를 작동해 X-6 관통부 위에 스프레이 커튼을 만든다. 그 다음 X-6 관통부에서 침전물 제거를 시도한다.

연료파편 회수

X-53 관통부에 스프레이 장치를 설치하는 작업은 2021년으로 예정되어 있다. 스프레이 장치 설치 완료 후에는, 격리실^{Isolation Chamber}을 설치하고 X-6 관통부 내부 조사, 침전물 제거, 그리고 마지막으로 연료파편을 회수한다. 이것은 계획을 뿐이다. 실제 연료파편 회수는 아직 요원한 일이다. X-6 관통부 안에서 침전물 사전 검사를 하는데도 기술자는 1.5 mSv의 방사선에 피폭되었고, 침전물을 제거하기 위해 스프레이 커튼도 필요했다는 사실은, 앞으로 상당한 장애요인이 발생할 수 있음을 알려준다.

실제로 2018기술전략계획(2018.10.2) 이행 현황과 앞서 설명한 계획을 비교해보면, 계획이 일부 지연 및 변경되었음을 알 수 있다. 기술전략계획에서는 X-6 관통부 내부 침전물을 실제로 손으로 만져서 조사하는 소위 “접촉 검사^{Contact Examination}”를 FY2018 하반기에 계획하고 있었으며, FY2019 하반기에 받침대 구역에서 연료파편 시료를 채취하기로 되어 있었다. 또한, 양을 늘려 더 많은 시료를 채취하는 작업을 FY2020에 다시 실행한 후, 파편제거기(레일을 따라 팔로 조작)를 설치할 목적으로 X-6 관통부를 확장하는 변경작업은 FY2021년에 시작해 실제 환경에 적용할 예정이었다.

2.3.3. 원자로 3 호기 현황

3호기의 경우, 연료파편 회수를 위한 중요한 접근로 중 하나인 X-6 관통부가 완전히 침수되었다. 하여 받침대 내부 환경 조사가 2017년 7월에 진행되었다. X-6 관통부 바로 위에 위치한 X-53 관통부를 사용했다. 이 관통부를 통해 원격조종 수중로봇^{ROV}을 삽입했다. 원격조종 수중로봇^{ROV}로 확보한 이미지 정보를 바탕으로, 받침대 내부의 3D 기하학적 구조를 그래픽으로 구성하는 분석을 수행했다.

하지만, 영상 촬영이 충분히 여유있게 진행되지 않았고 사진이 흐릿한데다 부분적이었기 때문에, 많은 부분을 확인하기 어려웠고 위치도 파악하지 못했다. 계획했던 3D 그래픽 재현은 실패였다. 그 이후로는 3호기에서는 1차 격납용기 내부 조사가 추가적으로 이루어지지 않았다. 따라서 현재로서는 연료파편 회수 계획이 없으며 언제 계획을 수립할지 조차도 알 수 없다.

2.3.4. 원자로 1호기 현황

초기 대응 시 발생한 치명적인 운전 오류 때문에 1호기에서 사고 피해 진행 속도가 가장 빨랐다. 앞서 언급한 바와 같이, 원자로압력용기^{RPV} 내부의 연료파편 대부분은 받침대 구역으로 흘러 내려간 것으로 추정된다. 내부에는 극히 일부만 남아있다. 이는 앞서 설명한 저자의 우주선 무온 검출시스템 결과와 일치한다.

받침대 구역에 떨어진 연료파편 일부는 작업자 출입로를 통해 흘러나와 건정 바닥까지 퍼졌다. 이를 입증이라도 하듯, 원자로 건물 1층 X-6 관통부 근처 선량은 630mSv/h로 매우 높았다. 이 관통부를 통해 1차 격납용기 내부 조사를 진행하는 것은 비현실적인 것으로 판단되었다. 대신, X-2 관통부(작업자 출입을 위한 이중 공기차폐식 문^{Air-Lock Door})를 통해 1차 격납용기에 접근하는 방안을 선택했다.

1호기 X-2 관통부는 방위각 270도에 위치하고 있다. 약 160도에 해당하는 X-6 관통부의 방위각과는 큰 차이가 있다. 즉, X-2 관통부를 통해 성공적으로 진입해

1차 격납용기 내부 조사를 성공적으로 마친다 하더라도, 받침대 구역에서 파편 회수 접근로를 확보하는 것은 또 다른 이야기다.

경과 및 향후 계획

도쿄전력이 작성한 발표자료 『1호기 1차 격납용기 내부 조사를 위한 장애물 제거 작업 현황』(2020.10.29)에 따르면, X-2 관통부의 내부분과 외부분(작업자용 공기차폐식)에 모두 타공을 해야 한다. 1차 격납용기 내부 조사를 위해 검사기를 삽입하고, 장애물 제거 작업에 필요한 도구의 접근성 확보를 위해서이다. 케이블 드럼, 차폐 박스, 격리 밸브, 연결 덕트, 안내관, 설치 도구, 내부 조사 장비 등으로 구성된 장비를 설치해야 한다. 안내관은 X-2 관통부의 내부분과 외부분 모두를 통과한다.

문에 타공하는 작업은 2019년 4월 8일에 시작되었다. 먼저 내부분부터 시작했다. 고압 연마제 워터젯(Abrasive Water Jet (AWJ))을 선택했다. 2019년 6월 4일 AWJ 장비를 가동해 지름 210mm의 구멍을 뚫었다. 이 공정을 통해 1차 격납용기 내부의 공기 중 농도를 모니터링했는데, 곧 통제기준치인 $1.7 \times 10^{-2} \text{Bq/cm}^3$ 에 도달했다. 타공작업을 중지하고, 공기 중 농도를 긴밀하게 모니터링 하면서 재개했다.

마침내 2020년 4월 22일 내부분 타공 작업이 완료되었다. 그 후 8월 25일, 또 다른 장애물인 그레이팅 바닥을 뚫었다. 고압 연마제 워터젯(AWJ) 방법을 적용해 그레이팅 바닥 아래의 철강재를 절단했다. 하지만 연마 피더(abrasive feeder)에 문제가 생겨, 9월 4일에 작업을 중단했다. 9월 29일, 절단 작업을 재개할 준비가 되었으나, 절단 작업구역 인근에서 원자로 재순환 계통의 계측용 관을 발견했다. 그래서 다시 작업을 중단하고 계획을 변경했다. 다른 위치를 잡았다. 새로운 계획에 따라 세정 작업을 진행하면서, 또 다른 철강재, 전기도관, 손잡이를 순차적으로 절단할 예정이다.

모든 준비 작업이 완료되면, X-2 관통부의 공기개폐식 문에는 3개의 안내관이 설치된다. 1차 격납용기 내부 조사 장비에 탐사용 원격조종 수중로봇(ROV)을 연결해 삽입하는데 이 안내관을 사용할 예정이다.

폐로추진회사(NDF) 기술전략계획(2018.10.2)에 따른 원래 계획은 구조물 상황 및 받침대 외부의 침전물 분포 평가, 시료 채취 등을 위한 작업을 FY2019 상반기에 시작하는 것이었다.

연료파편 회수

앞서 자세히 설명한 바와 같이, 1호기에서 X-6 관통부를 연료회수에 사용할 수 있는지 여부는 현재, 그리고 미래에도 당분간은 알 수 없다. 따라서, 연료파편 회수가 언제 시작될지 예측할 수 없다. 심지어 X-2 관통부를 통해 1차 격납용기 내부를 확인하는 작업도 아직 시작되지 않았다. 원자로압력용기(RPV) 내부에는

소량의 연료파편이 남아있으며, 받침대 구역으로 흘러내려 간 연료파편 상당량은 작업자 출입구까지 이동해 건정 바닥을 덮어 버렸다. 연료파편이 흩어져 있는 공간 전체에서 회수 작업을 진행하기에 로봇팔을 사용한 “건식 측면 접근방식”이 과연 타당한지, 그리고 이를 선택하는 것이 옳은 판단인지 매우 의구심이 든다.

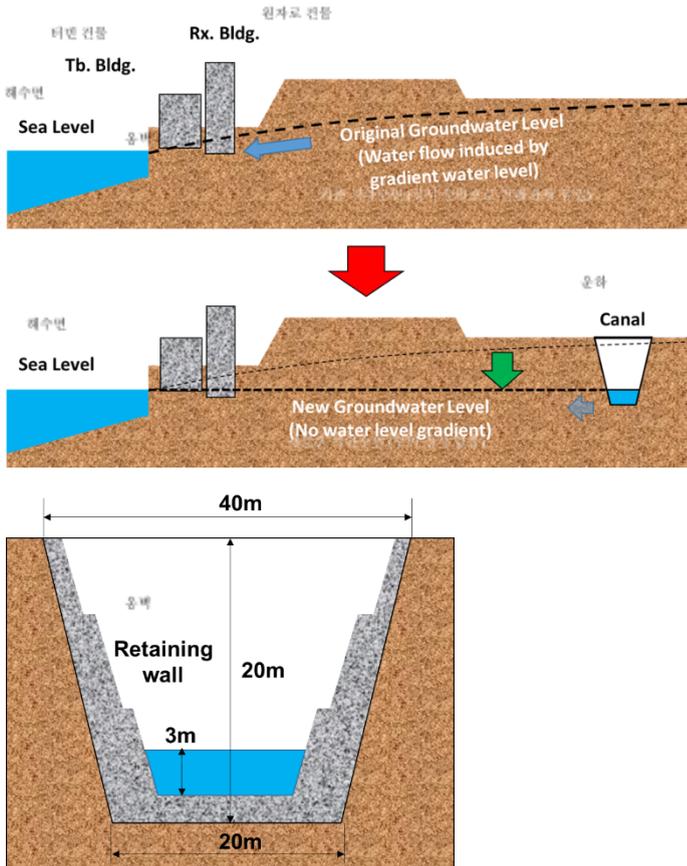
특히 1호기의 경우, 원자로압력용기RPV 하부 헤드 고장은 아주 초기에, 냉각수 주입 시도 전부터 발생한 것이다. 받침대 구역으로 흘러간 고온 용융상태의 연료파편은 바닥의 배수조 2개를 가득 채우고 콘크리트 깊은 곳까지 약화시켰을 것이다. “건식 측면 접근방식”으로 접근하는 것은 매우 어려워보인다. 따라서 현재 도쿄전력은 대안이 없는 상태라고 볼 수 있다

2.3.5. 중단 위기의 플랜 B

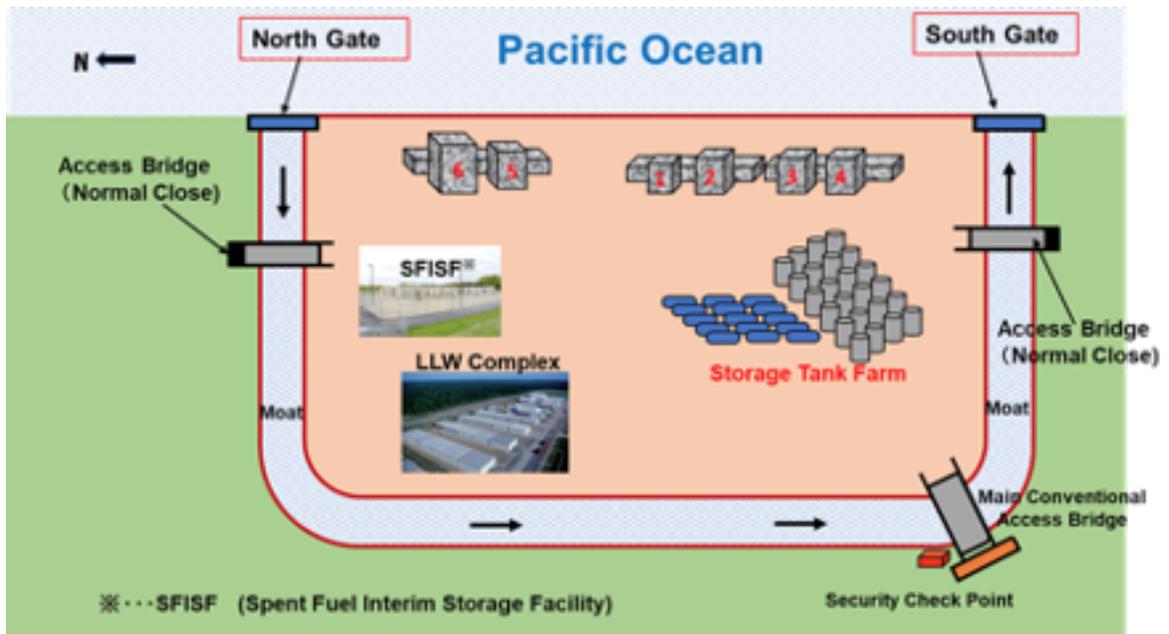
저자가 부지 전체 주변에 해자를 파서 “드라이 아일랜드”로 만드는 개념을 제안한 것은 오염수 문제에 대한 피동적, 영구적 대응책이었다. 연료파편 냉각 시물이 아닌 공기 냉각 방식으로 변경하는 것도 제안했다. 또, 연료파편 회수 대안으로서 지하 핫셀을 설치하는 방안을 제안했다. 핫셀 외부 일반작업구역의 방사선 환경은 원자로 건물보다 훨씬 양호하기 때문에, 작업자들은 방사선 피폭 때문에 작업 시간을 제한할 필요도, 오염 차단을 위한 무거운 방호복을 입을 필요도, 기체 상태의 고농도 방사성 물질로부터 보호하기 위한 방독면을 착용할 필요도 없기 때문이다. 회수 장비는 핫셀 내부에 설치하고, 외부 작업실에서 작업자가 100% 원격 조종한다. 회수 장비는 받침대와 원자로압력용기RPV 중심축을 따라 위쪽으로 망원경 팔을 뻗을 수 있다

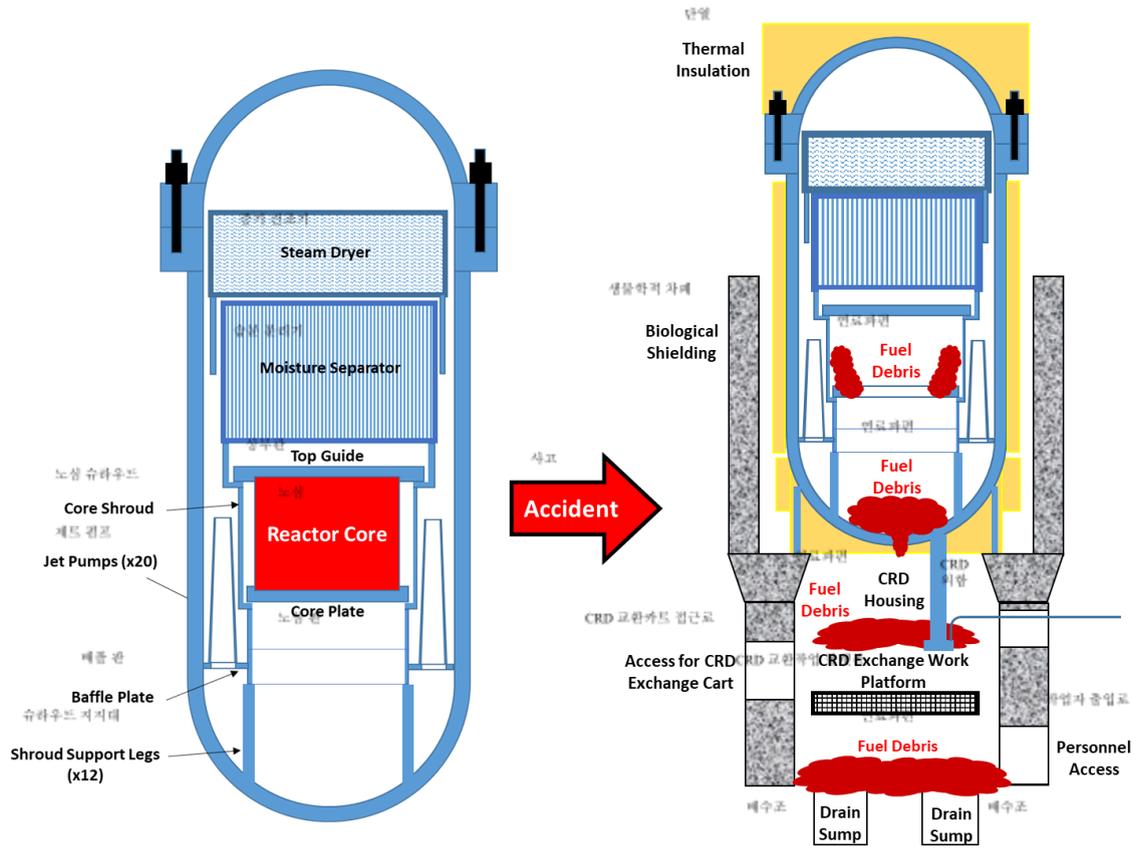
비교를 위해 폐로추진회사NDF 팀의 방법을 비교하면 다음과 같다 (폐로추진회사NDF 팀은 주로 도쿄전력 엔지니어로 구성되어 있다). 2018년 도쿄전력은 전통적인 “침수식 상부 접근방식”을 결국 포기하기로 하고, 새로운 “건식 측면 접근방식”으로 변경했다. 건물 내부로 지하수가 유입되는 것을 차단하기 위한 동토벽은 기대했던 바와 달리 오염수 문제 해결에 도움이 되지 못했다. 연료파편으로 인한 잔열을 제거하기 위해, 원자로압력용기RPV에 계속해서 냉각수를 주입했다. 하지만 건물 내부로의 지하수 유입과 냉각수 주입이 끝없는 오염수 문제의 근본 원인이 되었다.

폐로추진회사NDF는 냉각수 주입이 근본원인 중 하나임을 인정했지만, 이 사안을 심각하게 받아들이는 것을 주저했으며 중단여부를 아직 결정하지 못한 상태다. 플랜 B인 “건식 측면 접근방식”을 통한 연료파편 회수 전략도 긍정적으로 보기 어렵다. 기존에 알고 있는, 그리고 아직 파악하지 못한 다양한 문제점들이 나타날 것이다. 사실 이들이 선택한 어떤 기술도 오염수 제어, 연료파편 냉각 및 회수를 위해 기술적으로 타당하거나, 신뢰할 만하고 지속가능 하거나, 현실적이지 않다.

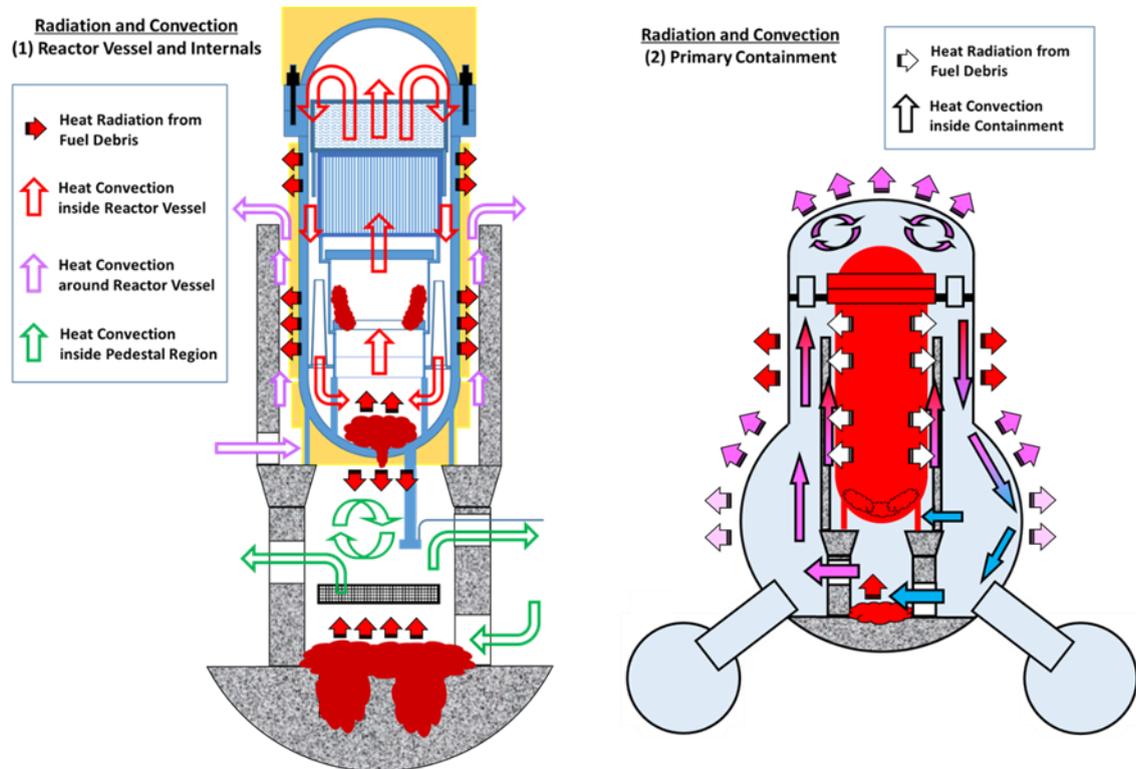


저자가 “후쿠시마 폐쇄 계획”에서 제안한 해자 개념





저자가 제안한 “후쿠시마 폐쇄 계획”에서 추정된 연료파편 분포



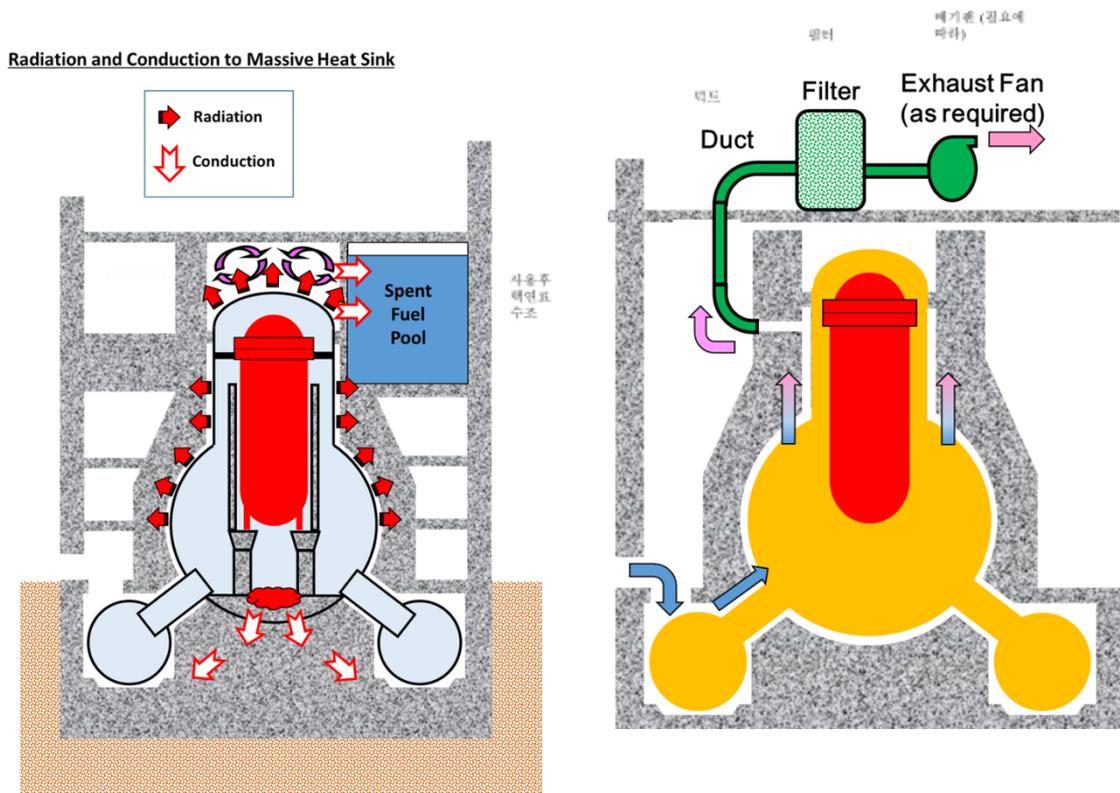
복사 및 대류 (1) 원자로 용기 및 내부구조

- 연료파편으로부터의 열 복사
- 원자로 용기 내부의 열 대류
- 원자로 용기 주변의 열 대류
- 받침대 구역 내부의 열 대류

복사 및 대류 (2) 1차 격납

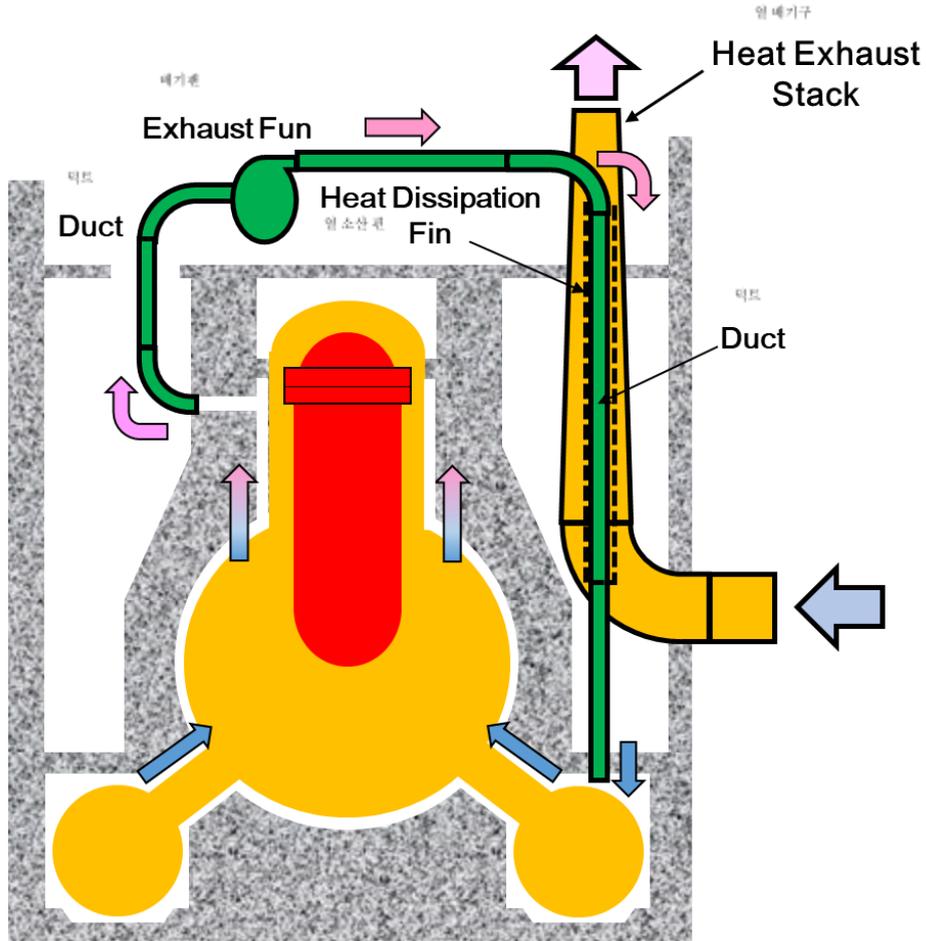
- 연료파편으로부터의 열 복사
- 격납 내부의 열 대류

“후쿠시마 폐쇄 계획”에서 고려한 열 대류 및 복사 현상

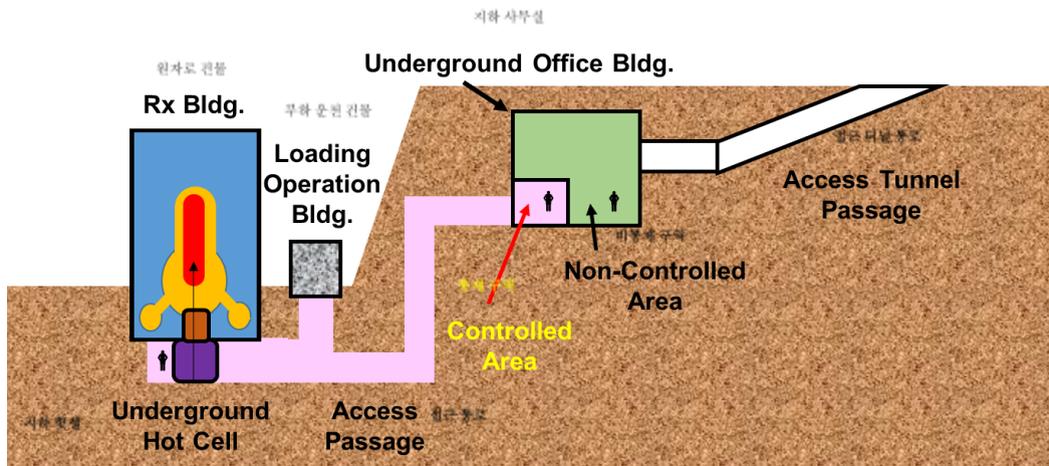


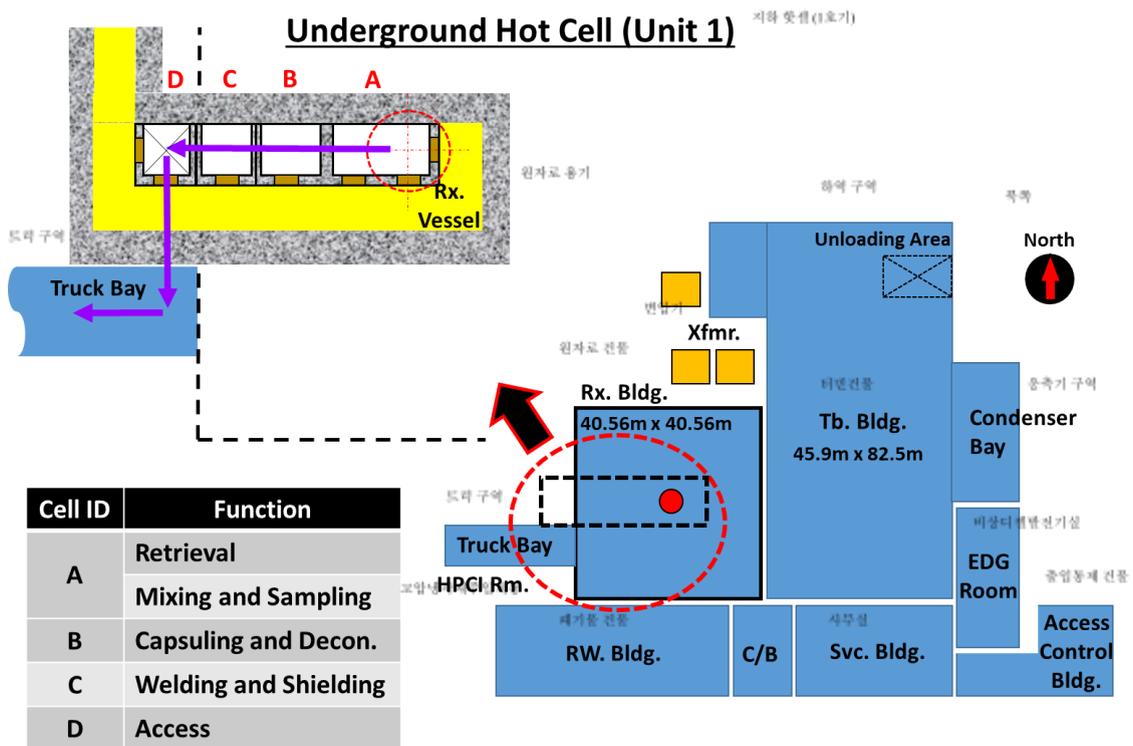
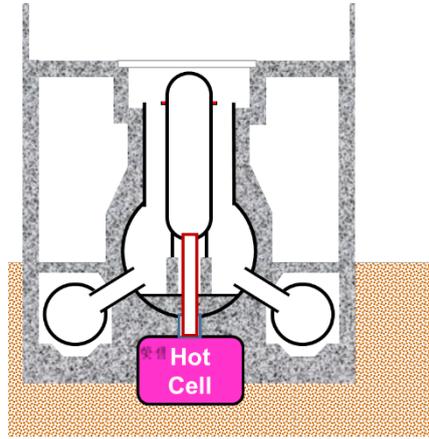
복사 및 대규모 열제거원으로서의 전도

- 복사
- 전도



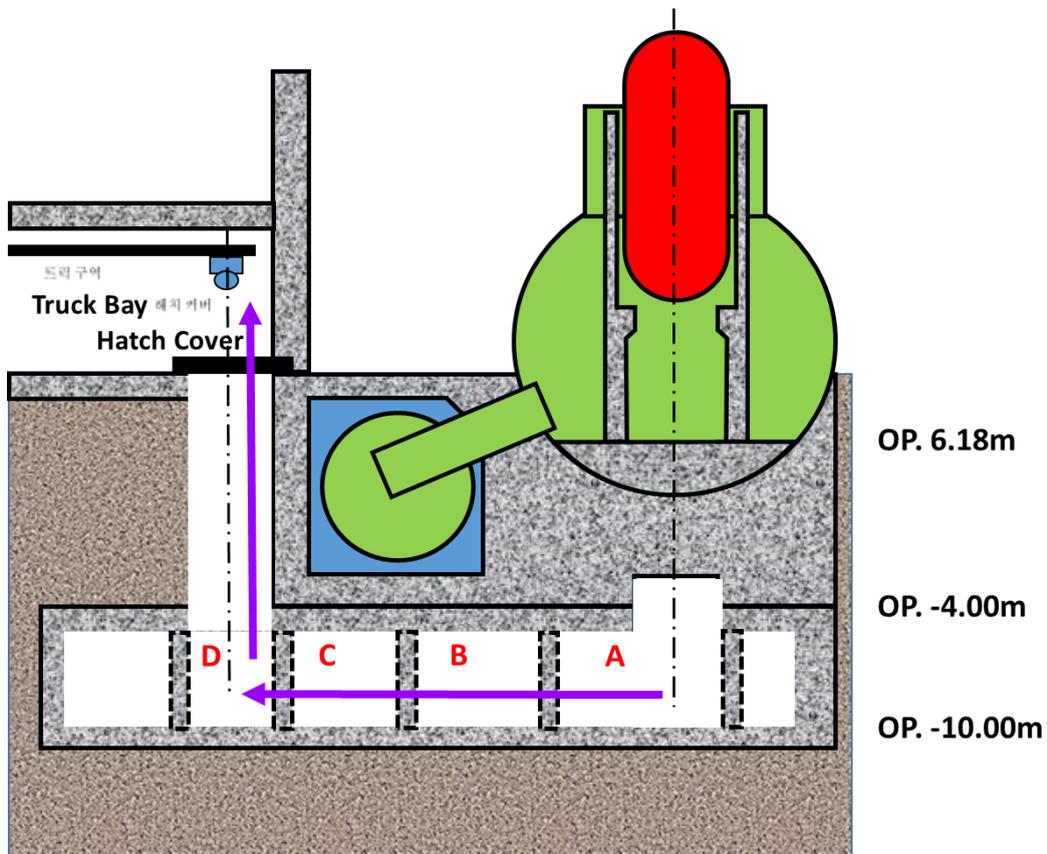
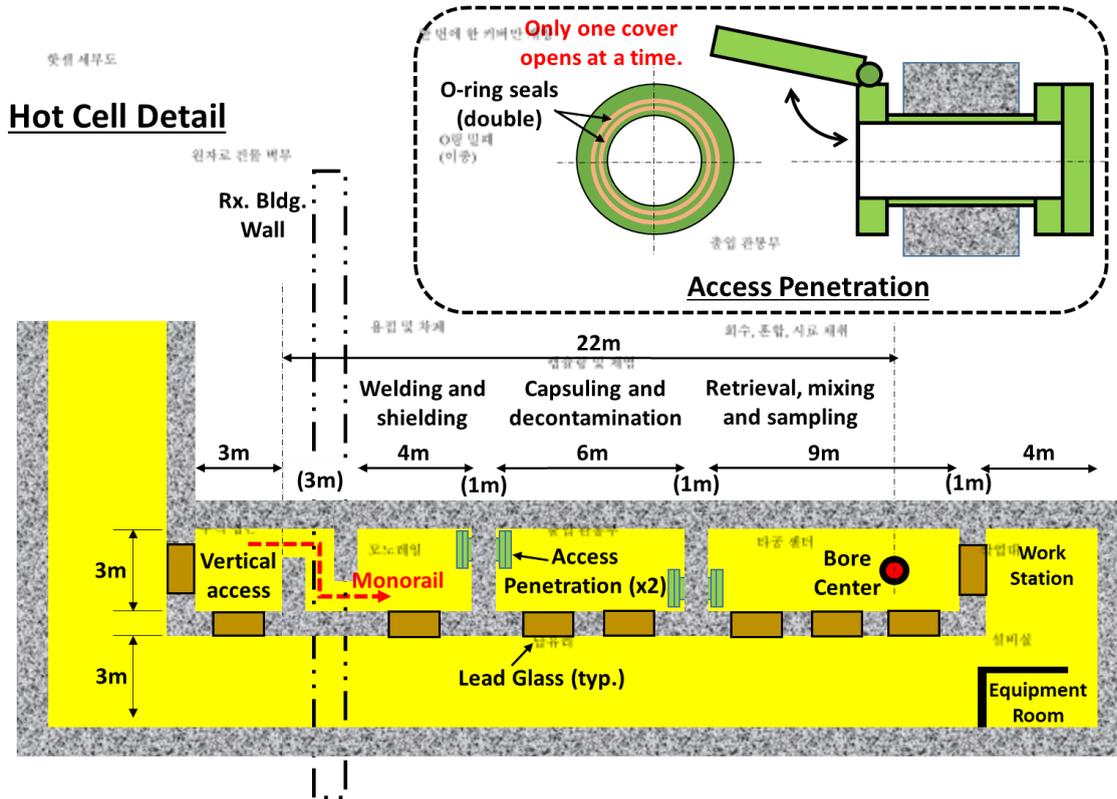
저자가 “후쿠시마 폐쇄 계획”에서 고려한 1차 격납용기 내부 열 소산 방식





셀 ID	기능
A	회수
	혼합 및 시료 채취
B	캡슐링 및 제염
C	용접 및 차폐
D	접근

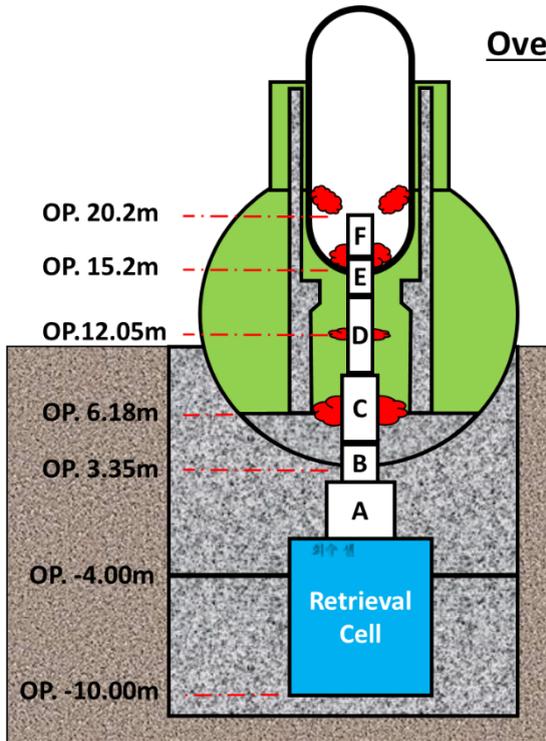
저자가 “후쿠시마 폐쇄 계획”에서 제안한 지하 핫셀 방식



저자가 "후쿠시마 폐쇄 계획"에서 제안한 지하 핫셀 세부도

Overhead Bore Hole (Unit 1)

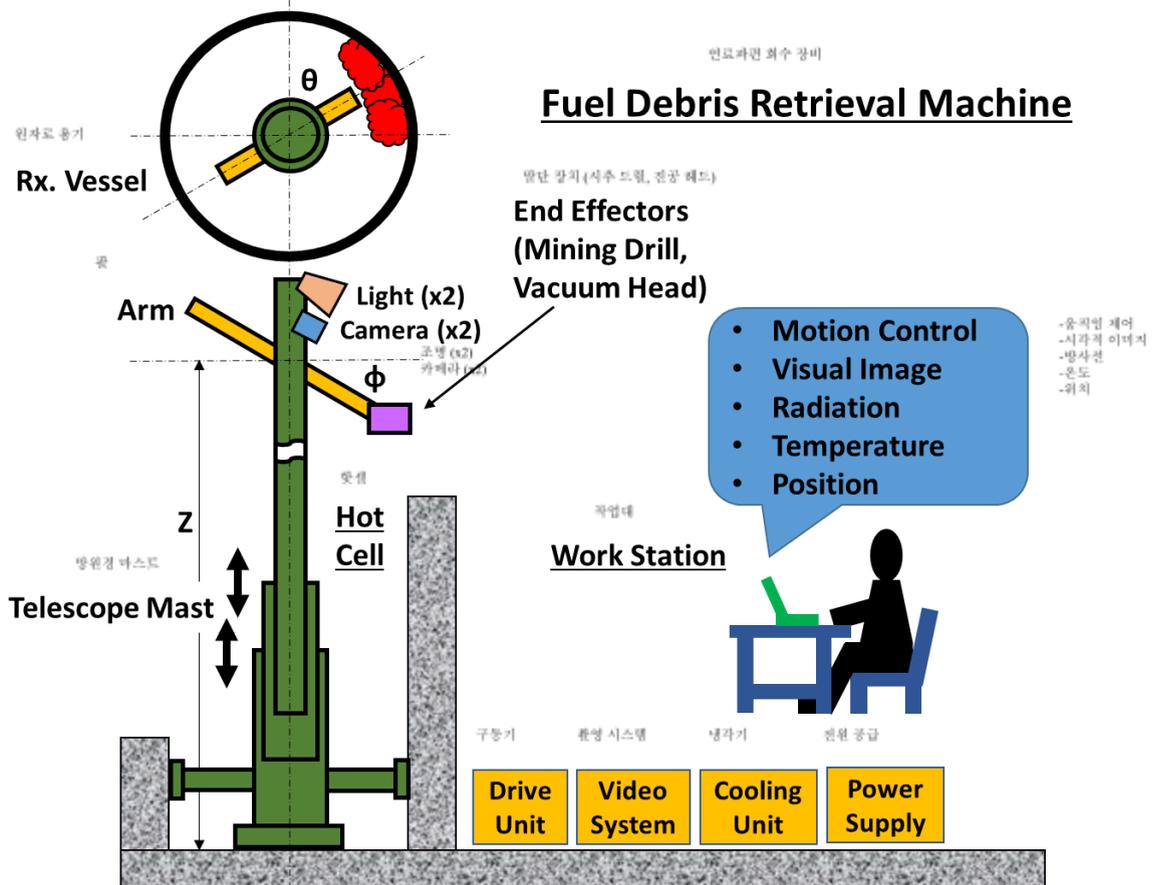
오버헤드 시추공 (1호기)



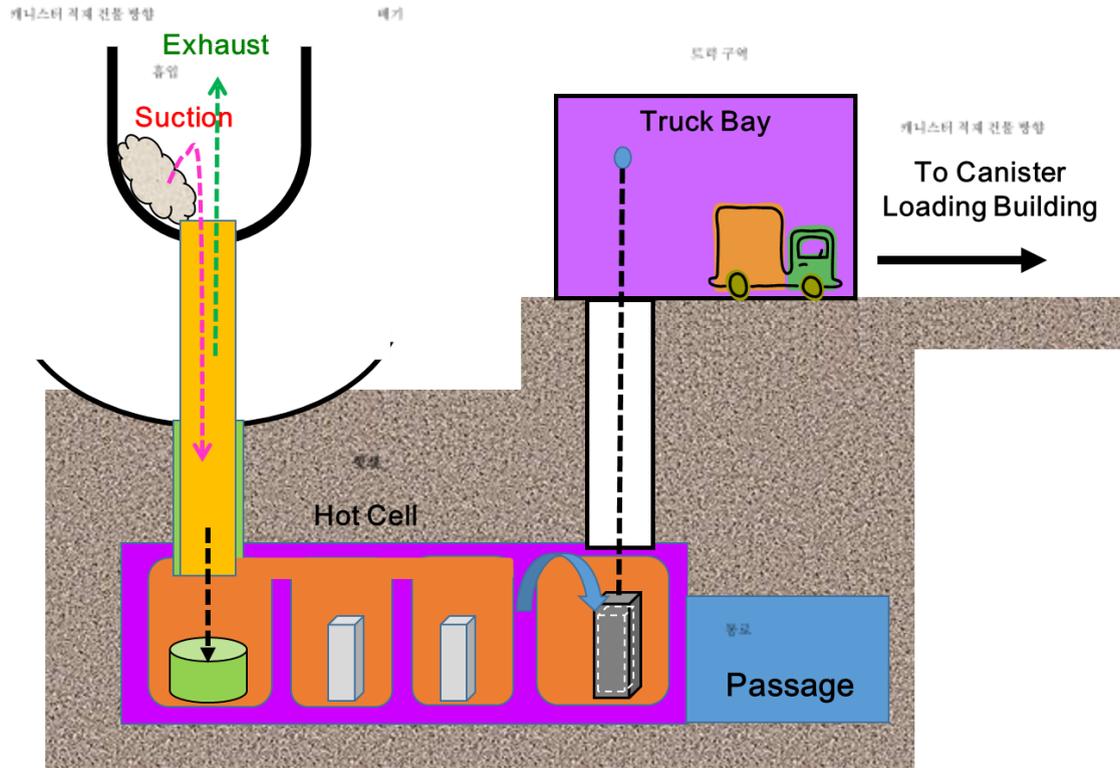
Sect.	Elevation		Height	Bore ID
	Bottom	Top		
-	-10.0	-3.0	-	-
A	-3.0	2.0	5.0m	1000mm
B	2.0	4.0	2.0	300
C	4.0	8.0	4.0	300
D	8.0	14.5	6.5	150
E	14.5	17.0	2.5	150
F	17.0	20.2	3.2	150

Fuel Debris Retrieval Machine

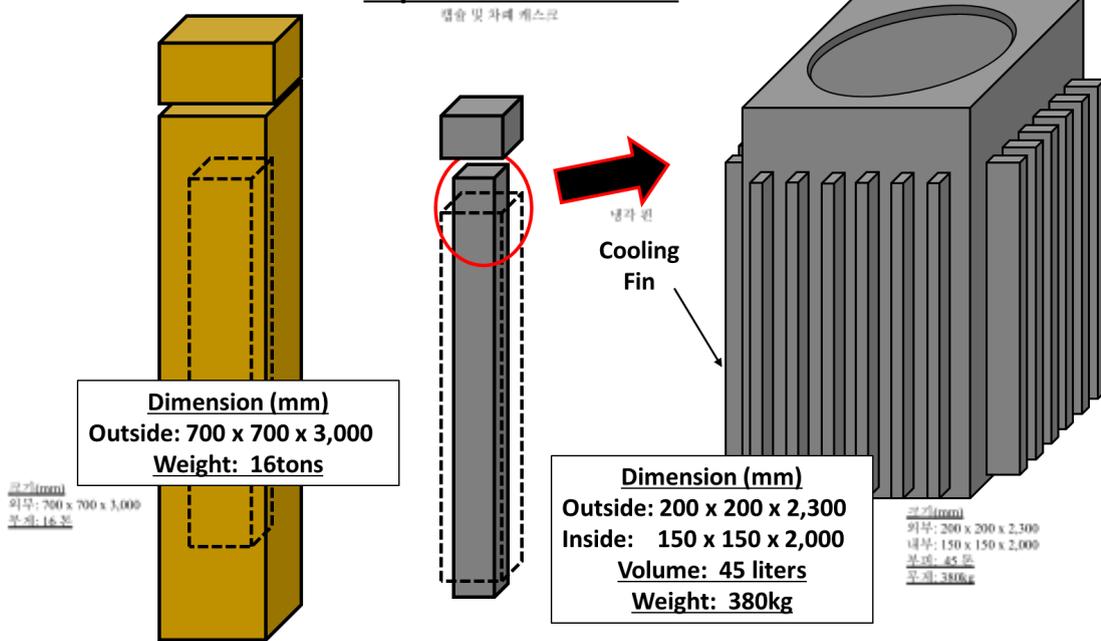
연료파편 회수 장비



“후쿠시마 폐쇄 계획”에서 제안한, 핫셀의 연료파편 회수 방법



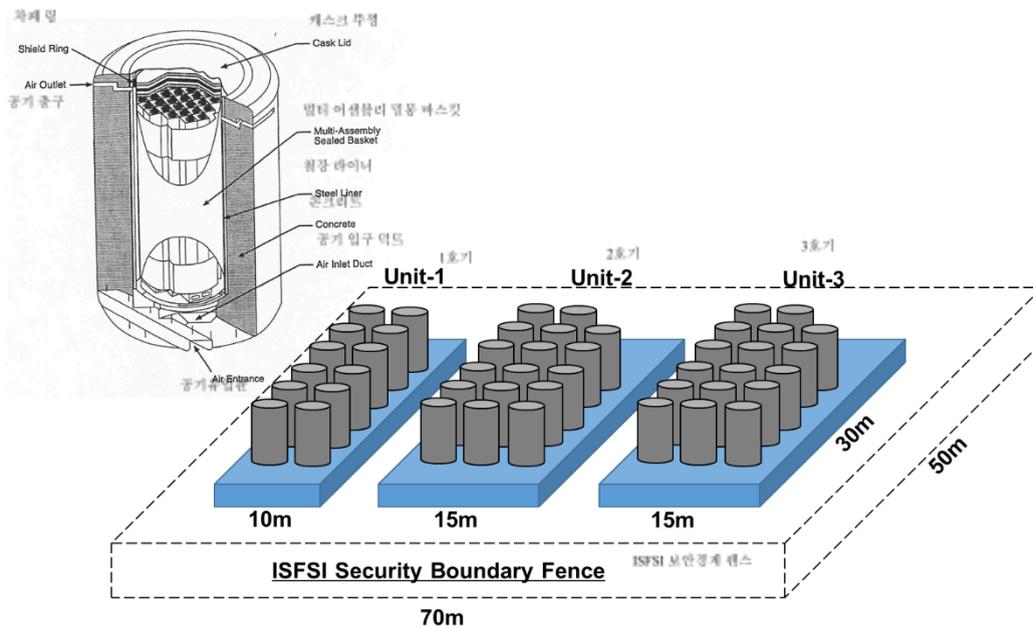
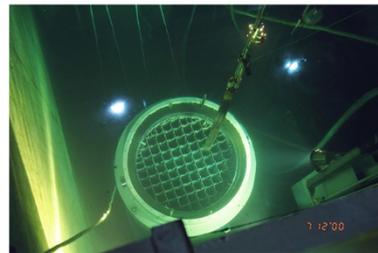
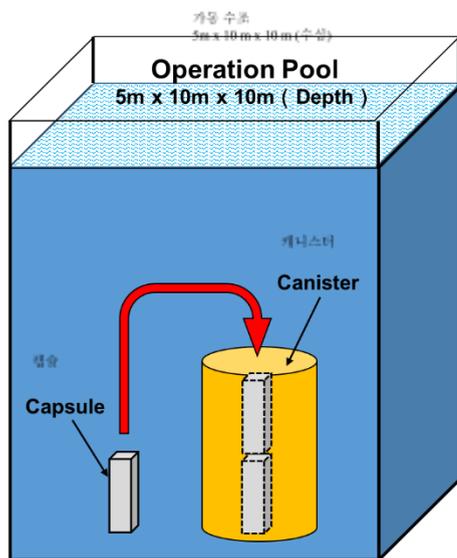
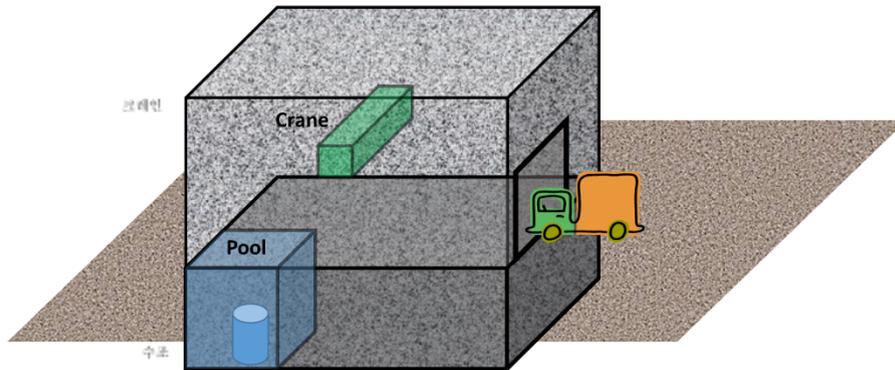
Capsule & Shield Cask



저자가 “후쿠시마 폐쇄 계획”에서 제안한,
 연료파편 이송을 위한 캡슐 및 차폐 컨테이너 방식

Canister Loading Building

캐니스터 적재 건물



저자가 “후쿠시마 폐쇄 계획”에서 제안한, 캐스크 내 캡슐 적재 및 캡슐 보관 방식

연료파편 냉각

페로추진회사NDF가 명확하게 밝힌 적은 없지만, 물을 사용한 연료파편 냉각 방식에서 공기 냉각 방식으로 변경하기를 꺼리는 이유는 당연하다. 잔열로 인해 건조된 연료파편은 먼지입자를 발생시키고, 방사성 물질이 대류 흐름에 의해 1차 격납용기 내부 전체로 이동할 것이다. 배수 후 배기관을 따라 응축 수조(토러스) 내부 공간 등으로 이동하면서, 장비 및 구조물의 노출된 표면을 모두 오염시킨다. 그러한 공기중 방사성 물질에는 핵분열성 물질로 분류되는 알파 핵종도 포함된다.

구체적으로, 방사성 동위원소인 플루토늄(Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241), 아메리슘(Am-241, Am-242, Am-243), 퀴륨(Cm-242, Cm-243, Cm-244)이다. 각 핵종은 화학, 물리, 방사선적 특성에 따라 다양한 문제를 야기한다.

먼저, 알파 핵종의 방사선 독성은 베타 핵종보다 훨씬 높다. 정확한 측정도 더 어렵고, 급성 및 지연성 인체 위험으로부터 작업자들을 보호하기 위해서는 더 엄격한 통제가 필요하다. 예를 들어, 전통적인 GM 계수기(기체 충전형 검출기로 주로 감마선과 베타선 측정에 사용)가 아닌 ZnS(은_{Ag}) 신틸레이션 계수기 등 특수 계측 장비가 있어야만 알파 핵종을 검출 및 측정해 작업 환경을 모니터링할 수 있다. 또 신체 부하량 검출 및 측정 시, 일반적인 전신 계측기가 아닌 생체 검정법 등 다른 기법이 필요하다.

게다가 알파 핵종으로 오염된 방사성 폐기물 취급 절차는 알파 핵종이 없는 경우보다 더 복잡하며, 이의 밀도에 따라 달라진다. 심한 경우, C급 초과폐기물^{Greater Than Class C} (GTCC)로 분류되어, 정상적인 천층처분이 불가능하다. 마지막으로 알파 핵종은 핵분열성 물질이기 때문에, 각 핵종에 대해 엄격한 측정소급성^{traceability} 관리가 필요하다.

연료파편을 건조만 하는 경우에도 방사성 물질이 대기로 방출될 위험이 있다. 회수를 위해 대기 중에서 과도하게 절단 또는 분쇄하는 경우, 위험도는 상당히 높아질 것이다. 연료파편 회수를 위해 수중에서 절단 또는 분쇄하면 작업 시 수 톤의 미세입자가 발생하게 되어, 알파 핵종을 포함한 수용성 및 불용성 방사성 물질이 물로 배출된다. 연료파편을 물로 냉각하면 오염수 처리 설비 전체를 오염시키는 것이다. 이 작업을 계속하는 한, 고농도 오염수는 계속 발생할 것이다.

냉각수에는 용해된 기체가 일부 포함되는데, 오염수 처리 설비의 재순환 루프에 탈기 장치가 있기 때문임을 기억해야 한다. 1차 격납용기 내부의 공기는 비활성 상태지만, 냉각수에는 산소와 이산화탄소가 들어있어, 보호장치 없는 철강 및 콘크리트 표면에서는 충분한 비활성 상태가 아닐 수도 있다.

요약하자면, 연료파편을 물 또는 공기로 냉각하는 방식 모두 각기 다른 본질적 한계를 안고 있다. 하지만, 오염수의 추가적인 발생을 중단하기 위해서는, 물을 사용한 냉각에서 공기 냉각 방식으로 변경하는 것이 필수적이다.

연료파편 회수 방법

플랜 B “건식 측면 접근방식”은 페로추진회사NDF가 추진해온 연료파편 회수 방식으로, X-6 관통부로 접근해 1차 격납용기 내부에서 로봇팔로 작업을 수행하는 방법이다. 이 방법은 2호기 실증시험에서 성공적일지 모르지만, 앞서 설명한 여러 문제점 때문에, 페로추진회사NDF팀이 그 경험을 통해 어떤 것을 발견했는지와 관계 없이, 실제 환경에서는 성공을 장담할 수 없다.

받침대 내부에서 연료파편 시료를 제거하는 것은 상대적으로 쉽다. 하지만 현실에서는 연료파편이 원자로압력용기RPV 하단, 원자로 내부구조물 일부에 유착되었을 수도 있다. 마찬가지로, 고장난 원자로압력용기RPV 하부 헤드에서 연료파편이 흘러 내려와 넓게 퍼졌을 수도 있다. 또한, CRD 외함, CRD 구속 빔^{restraint beam}, 기타 관련 부속품뿐만 아니라, 그레이팅 바닥, CRD 제거 및 설치 작업대 케이블 트레이 등 원자로 외부 하드웨어 부품으로 형성된 복잡한 구조물과 U자형 고리에 갇혀있을 수도 있다.

또 중요한 사실은 대부분의 연료파편은 받침대 구역 내에 남아있었지만, 일부는 하단의 작업자 출입구를 통해 빠져나가 건정 바닥에 넓게 퍼졌다는 것이다. 받침대 벽부와 바닥, 건정 바닥은 모두 콘크리트로 이루어져 있다. 용융된 노심, 또는 소위 “코름”(용융 금속과 산화 우라늄 혼합물)이 흘러가면서 콘크리트를 녹이고 용융물을 형성한다.

체르노빌 4호기에서는 암석과 같은 고체 용융물이 다량 발견되었는데, 이를 “체르노빌라이트”라고 한다. 후쿠시마 1~3호기에서도 용융 코름이 흘러 이동하는 과정에서 체르노빌라이트와 유사한 물질이 생성되었을 수 있다. 또 다른 용융 코름이 배수조를 채우며 더 멀고 깊은 곳까지 뿔어내려갔을 것이다. 이것을 모두 제거하려면, 로봇팔에는 여러 개의 관절과 높은 자유도가 필요하다. 하지만 그렇게 설계하고 만든 로봇팔이 있다 하더라도, 의도한대로 작동하리라고 보장할 수는 없다. 신뢰도를 높이기 위해서는 원형^{prototype}을 만들고, 생각할 수 있는 모든 구조물과 형상에 대해 실물 크기로 실증을 진행해 성공적인 결과를 도출한 후에 적용해야 한다. 또한, 아래 설명할 바와 같이, 원자로압력용기RPV에 접근하고 연료파편 회수 작업을 진행하는 데는 그 외의 다른 어려움들도 예상된다.

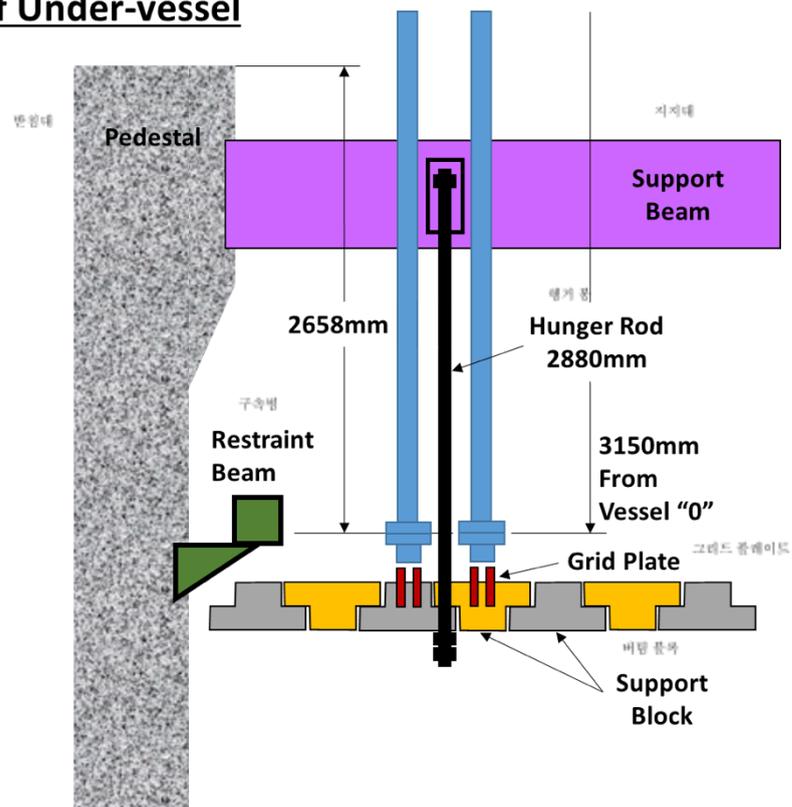
받침대 내부에서 카메라를 사용해 상부를 관찰하는 시도는 없었다. 카메라의 설계가 해당 작업에 부적합하기 때문이다. 따라서, 연료파편이 흘러나온 곳의 위치, 개구부 숫자/형태/크기 등을 추정할 정보가 없다. 페로추진회사NDF는 여러 지점에서 물이 떨어지고 있는 상화에 따라 다수의 개구부가 있을 것으로

추정한다. 그들이 맞을 수도 있고 아닐 수도 있다. 하단 헤드와 물 표면 사이에는 너무 많은 요소들이 복잡한 망을 형성하고 있어서, 낙수 지점의 수와 구멍 숫자가 동일하지는 않다. 하지만, 상단 타이판이 통과할 수 있을 정도로 충분히 큰 구멍이 적어도 한 개는 있다는 것은 확실하다.

아직 불확실한 것들이 너무나 많다. 아래에 도식화한 바와 같이, 원자로압력용기RPV 하단에 위치한 CRD 외함, ICM 외함, CRD 구속물 등의 구조물과 부품은 연료파편이 이동하면서 기계적 부하, 열 부하가 발생해, 상당히 변형되었을 것이 분명하다. 로봇팔을 통해 이 구멍에 닿으려면 직선이 아니라 복잡한 입체 궤도 형태로 추적해야 할 것이다.

Complexity of Under-vessel

용기 하단의 복잡한 구조



용기하단의 복잡한 구조

앞서 언급한 접근성 확보 문제를 어느 정도 해결하고 로봇팔이 원자로압력용기RPV 내부로 진입할 수 있다고 해도 더 많은 난관이 기다리고 있다. 하단 헤드 내부의 구조, 그리고 원자로 내부구조물 잔해 상황은 알 수 없다. 잔여 연료잔해가 어디에 어떻게 고정, 부착, 유착되었는지도 모두 알 수 없다. 일부 연료파편은 CRD 외함, ICM 외함, 하단 헤드 배수 노즐 내부의 좁은 틈으로 들어갔을 수도 있다. 어디까지 퍼져서 침투했는지와 관계 없이 절단기 또는 그라인딩 스톤을 사용하려면 연료잔해가 머물고 있는 곳까지 접근을 해야 한다.

원자로압력용기RPV 및 1차 격납용기 내부의 연료파편 분포는 각 호기마다 다른 것으로 추정된다. 1호기에서는 암석 형태의 “체르노빌라이트”가 많이 분포되어 있으나, 2호기는 연료파편 상당수가 원자로압력용기RPV 내부에 남아있고 3호기에는 둘 다 어느 정도 존재하는 것으로 예상된다.

현재까지 연료파편 특성을 파악하기 위한 작업은 받침대 구역 내부의 침전물 상부에서만 진행되었다. 페로추진회사NDF팀은 이것이 자갈, 모래, 진흙 형태로 이루어져 있다는 결론을 내렸다. 하지만, 용융 금속, 콘크리트 또는 그 혼합물 안에는 더 큰 덩어리들이 들어있을 수 있다. “체르노빌라이트”와 유사한 큰 덩어리가 하단에 두꺼운 층을 이루고 있을 수도 있다. X-6 관통부 근처에 차폐박스 등 다양한 장비로 구성된 시설을 구축할 필요가 있다. 하지만 작업구역 선량을 보면 작업자들이 과도한 피폭에 노출될 위험이 있다.

저자가 제안한 플랜 C의 해자 방법 대비 동토벽은 지하수 차단 효과가 낮으며 비용도 더 많이 든다. 동토벽은 해자처럼 피동적 설계가 아니기 때문에 완공 후 운영, 모니터링, 점검 및 정비에 추가적인 비용과 인력이 필요할 것이다. 이는 피폭 위험도 크다는 것을 의미한다.

동토벽은 해자 설계와 같이 부가 가치도 창출되지 않는다. 이것은 필수는 아니고 선택 사항이지만, “드라이 아일랜드”가 완성되면 지하수위가 낮아진 것을 활용해 깊은 지하갱도를 설치하여 저준위 방사성 폐기물을 매립할 수 있다. 해자 자체가 강력한 보안 경계 역할도 할 수 있을 것이다.

현행 “플랜B-건식 측면 접근방식”에서 제안된 차폐 박스는 원자로 건물 1층에 설치되며, 지하 핫셀 대비 비용이 적게 드는 듯하다. 하지만 차폐 박스 인근의 방사선 환경은 2호기에서도 심각했고, 3호기에서는 더 안 좋았으며, 1호기에서는 가장 심각했다. 작업자들은 무거운 방호복을 입고 전면 방독면을 착용해야 한다. 작업자들은 작업 착수 전에 로봇팔 작동 및 정비 자격을 갖추기 위한 광범위한 교육 프로그램을 이수해야 한다. 이 모든 것을 다 갖추어도 피폭 한계 때문에 작업구역에 너무 오래 머무를 수 없다.

원자로압력용기RPV와 받침대의 중심선은 회전대칭인데, 망원경 마스트의 경우 이를 따라 축 방향으로 연장할 수 있다. 하지만 로봇팔은 이와 다르다. 로봇팔이 X-6 관통부를 통해 원자로압력용기RPV 내부로 진입해 연료파편을 회수하려면, 복잡한 입체 궤도를 따라 움직일 수 있는 다양한 관절과 자유도가 필요하다. 현재의 로봇팔 기술과는 상당한 차이가 있다.

좀 더 단순한 망원경 마스트 설계가 연료파편 회수에 더 유용할 수도 있다. 하지만 저자는 앞서 설명한 다양한 형상 대안들을 검토해 보았으나 충분한 커버리지를 확보할 수 있을지 확신하기 어렵다는 결론을 내렸다. 반면, 지난 7년간 다른 로봇 기술 분야들이 최근 빠르게 발전해 온 것은 고무적이라는 판단이다. 향후 수십년 간 그러한 기술 발전을 적용하면, 연료파편 회수에 적용할

수 있는, 충분히 성숙한 기술이 될 수 있다고 본다. 지금 단계에서 미성숙한 기술들을 조합해 전략을 수립하기 보다는 새로운 방법을 연구해야한다. 이를 저자가 보고서를 통해 제안하는 “플랜 C”로 부르기로 하고, 이후 좀 더 자세히 설명하겠다.

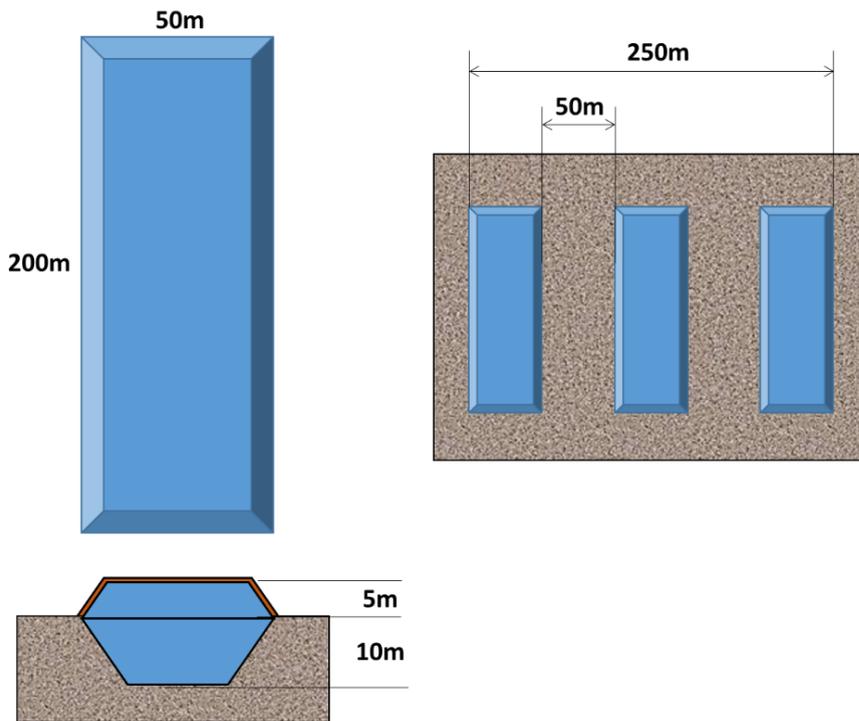
2.4. 후쿠시마 제1원전 소내/소의 폐기물 관리

2013년 동토벽을 선택한 근거는 지하에 영구 구조물을 남겨두지 않고 원래의 상태를 완전히 복구할 수 있다는 점이 정치적 명분으로서 특히 강조되었다. 도쿄전력은 동토벽을 선택하며 마치 부지 내의 지상 또는 지하 건물을 모두 제거하겠다는 인상을 주었고, 자신들이 제시한 이 기본 원칙에 맞지 않는 방법론은 모두 수용하지 않겠다는 의지로 비춰졌다.

하지만 그들의 계획을 그대로 적용한다고 해도 기존에 폐로추진회사NDF가 추진중인 폐기물 관리 계획과도 모순된다. 도쿄전력은 부지 내에 인프라를 계속해서 확장하고 있으며, 부지 전체는 아니더라도 대부분의 공간을 자연상태로 복원하는 것에는 관심이 없어 보이기 때문이다. 특히, 아래에 도식화한 폐기물저장 계획과 같이, 도쿄전력은 공격적으로 계속해서 대형 저장시설을 짓고 있는데, 영구 구조물 단지 형태를 하고 있다. 자연상태 복원을 위해 실제로, 진심으로 노력하고 있다면, 부지에서 발생한 폐기물과 동일한 양을 결국 처분시설로 옮겨야 한다. 아니면, 건물을 신축하기보다는, 터빈 건물 등 이미 갖춰져 있는 기존 시설의 빈 공간을 최대한 활용해야 한다.

그들이 수립한 폐로 계획과 상반되는 현재의 결정들은 폐로의 궁극적인 목표로 자원상태 복원을 추진하지 않겠다는 암묵적인 의사의 표현으로 해석될 수 있다고 본다. 폐로추진회사NDF는 정부 자금으로 운영되기 때문에 폐로추진회사NDF의 계획은 국민들에게 완전히 투명하게 공개되고 있다. 폐로추진회사NDF 및 일본 경제산업성이 더 이상 자연상태 복원을 목표로 하지 않는다면, 기술전략계획과 로드맵에 각각 이를 명시해야 할 것이다.

결국, 자연상태 복원은 현실성도 없고 근거도 없는, 10년이나 된 허황된 공약인 셈이다. 토양 오염수준만 보더라도 확실히 알 수 있었을 것이다. 이러한 현실을 공개적으로 인정하고 동의한다면, 폐로 사업은 전반적으로 더 유연하고, 효율적이며, 비용효과적으로 진행될 수 있다. “드라이 아일랜드” 방식을 도입해 지하수위를 해수면 수준으로 낮추면, 저장용 지하갱도를 설치해 저준위 방사성 폐기물 보관 시설의 수도 최소화할 수 있을 것으로 판단한다.



“후쿠시마 폐쇄 계획”에서 제안한 폐기물 저장용 대형 지하탱크

2.4.1. 후쿠시마 제1원전 폐기물 저장 계획

도쿄전력의 『후쿠시마 제1원전 고체폐기물 저장 관리 계획 - FY2020 개정본(2020.9.14)』에 따르면, 기존의 고체폐기물 저장 시설 1~8호 외에, 2018년 2월부터 9호 시설이 가동되었다. 10호, 11호 시설(“고체폐기물 저장시설 부속건물”)은 FY2022 이후 완공되어 가동 예정이다. 해당 발표 자료는 2032년 3월까지 후쿠시마 제1원전에서 총 784,000m³의 방사성 폐기물이 발생할 것으로 예상하고 있다. 이 중 약 203,000m³은 재활용 가능한 것으로 표시되어 있으며, 나머지 581,000m³는 압축 처리 후 부지 내에 저장된다는 계획이다. 도쿄전력은 261,000m³까지 양이 감소할 것으로 추정하고 있다.

재활용 가능한 폐기물은 문턱선량^{threshold level}이 0.005mSv/h 이하여야 하며, 대부분 용수보관탱크(그 때까지 해당 탱크를 배수 및 해체한다는 것을 가정. 약 62,000m³), HIC 스텐인리스 스틸 아머, “블루 탱크” (제염 후), 철강 스크랩 등에 해당한다. 이들이 141,000m³에 해당할 것으로 예상된다. 탱크팜 면적을 넓히기 위해 제거한 수목, 사용 후 방호복 등을 기타 가연성 폐기물의 부피를 줄이기 위해 소각시설을 사용하는 계획이다. FY2020 내에 완공하는 것으로 계획되어 있으며, 이는 부피를 줄이는데 사용할 예정이다.

도쿄전력은 전처리한 폐기물 274,000m³이 21,000m³로 줄어들 것으로 추정하고 있다. 기타 비가연성 폐기물의 경우, 콘크리트 파쇄기와 금속 절단기가 설치된, 새로운 유형의 압축시설을 FY2022년 내에 완공할 계획으로 본다. 폐기물 발생 예상량 136,000m³을 69,000m³로 줄일 예정이라고 밝혔다.

비압축성 방사성 폐기물에는 오염된 토양 53,000m³이 포함되어 있다. 이는 금속 컨테이너에 넣어 저장시설 10호 (용량: 80,000m³)에 보관할 예정이다. 문턱선량(118,000m³) 이상의 오염 금속/콘크리트 잔해 일부는 현재 컨테이너에 저장되어 있으나, 나머지는 임시시설에 매립하거나 비닐 시트로 덮어 야드에 보관중이다. 이는 저장시설 10, 11호 (용량: 115,000m³)에 최종 보관할 예정이다. 이러한 작업을 완료하여 현재 옥외에 보관되어 있는 모든 폐기물은 FY2028년까지 실내로 반입되어 오염 확산 위험을 영구적으로 저감하겠다는 목표다.

오염수 처리 설비 가동 시 발생한 2차 폐기물은 화학적으로 생성된 침전물과 사용후 ALPS 흡수제(약 6,200개)에 해당한다. 이는 앞서 언급한 고체 폐기물 저장시설 부속건물과 별개의 대형폐기물 저장시설에 저장된다. 현재 건설작업이 진행중이며, 완공된 저장시설은 FY2021년부터 사용 예정이라고 밝혔다.

후쿠시마 제1원전은 2032년경에도 여전히 부지 내에 다수의 대규모 시설이 남아있을 것임을 쉽게 예상할 수 있다. 1~6호기의 원자로 및 터빈 건물, 주 처리 시설, 고온 소각 시설 뿐만 아니라, 11개의 대형 고체폐기물 저장 시설, 대형폐기물 저장시설이 추가적으로 설치된다. 사고 전보다 더 많은 건물이 들어서게 된다. 처리수를 계속 보관할 것인지 아니면 그 전에 배수할 것인지에 따라, 용접형 탱크도 여전히 부지 내에 남아있을 수도 있고 아닐 수도 있다.

지금 도쿄전력이 목표하는 대로 남아있는 원자로 건물, 터빈 건물을 향후 20년만에 걸쳐 해체한다고 해서 어떤 장점을 기대할 수 있는가? 더 많은 작업은 더 많은 폐기물을 발생시키고, 더 많은 저장 설비가 필요해질 뿐이다.

2.4.2. 페로 원전에서 발생하는 폐기물의 양

폐기물 관리 및 페로 실무반이 작성한 WNA 보고서 『원전 페로로 인한 폐기물 및 물질 관리 방안(2019.2)』 본문을 보면, 독일 비등형경수로(BWR) 원전인 뷔르가센 원자력 발전소 (순수 설비용량: 640MWe, 상업운전기간: 1975.11.11.~1994.8.26.) 페로로 인해 발생한 폐기물을 예시로 들고 있다. 이를 대략적으로 정리하면 다음과 같다.

- 무조건적 해제: 255,500 톤
- 재활용을 위한 조건적 해제: 3,000 톤
- 방사성 폐기물: 4,600 톤

운전 기간 중 심각한 고장 또는 사고가 없었다면, 원자로 건물 및 터빈 건물의

철근 구조물 해체 시 발생하는 대부분의 잔해는 위와 같이 해제될 수 있다. 폐기물 양은 호기 당 250,000톤에 달한다.

또, 해당 WNA 보고서의 『첨부 6: 스페인의 페로 폐기물 관리』를 보면, 스페인의 호세 까브레라^{José Cabrera} (“조리타^{Zorita}”) 원자력 발전소에 관한 상세한 내용을 확인할 수 있다. 웨스팅하우스의 소형 가압경수로(PWR) 원전으로 (순수 설비용량: 141MWe, 상업운전기간: 1969~2006), 페로 작업은 2010년에 시작되었다. 원래는 2016년까지 완공하는 계획이었으나, 해체 작업이 2018년까지 계속되었다. 이후 부지 복원 및 확인 작업이 진행되었다. 페로 작업 시 발생한 폐기물 양은 다음과 같다.

- 콘크리트 잔해 95,300톤(간척에 사용)
- 강철 스크랩 4,700톤(재활용)
- VLLW, LLW, ILW 4,000톤(ENRESA로 운송)
- 사용후 핵연료 175톤(ISFSI)
- 원자로 내부구조물 43톤(ISFSI)
- 유해 폐기물 소량

상기 내용에 따르면, 후쿠시마 제1원전 1~6호기 해체 시 약 150~200만 톤의 콘크리트 잔해와 철강 스크랩이 발생할 것으로 예상된다. 일반적인 페로 원전과 달리 대기 및 수중 방사능에 노출되었기 때문에 보수적인 관점에서 오염된 것으로 보아야 할 것이다. 그중 일부를 무조건적으로 해제하려, 알파 방출제 등 잠재적인 오염 핵종 전체에 대해 고민감도 계측기로 극저준위 이하에서 신중하고 정확하게 스크리닝 해야 한다. 그렇지 않으면, 부분 제거를 모두 기술적으로 입증해야 할 것이다. 총 처리 대상량은 약 150~200톤에 달한다. 150~200톤을 매일 스크리닝 한다 하더라도 10,000일(30년 이내)이 소요된다. 또한, 사전에 저장부지를 선정하고 이동 수단을 결정하지 않으면, 소외 반출이 허용되지 않는다.

기존의 건물들을 수많은 콘크리트 잔해와 강철 스크랩으로 해체해, 무조건적 해제를 위해 한 조각씩 스크리닝 한 후 트럭이나 선박을 통해 재활용 작업장으로 운반한다는 발상은 너무나 비현실적인 방법이다. 그렇게 한다고 해도 자연상태 복원이 완료되는 것도 아니다. 대량의 오염 토양이 남아있다. 오염 핵종이 바람(대기)을 타고 지표면에 넓게 확산되고 지하수를 통해 지하수면(수중)을 따라 이동하고 강우를 통해 토양 내부로 깊이 스며들었을 것이 분명하다.

일본원연주식회사^{Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL)}는 아오모리현 록카쇼촌에 저준위 방사성 폐기물 처분센터를 소유 및 운영하고 있다. 해당 시설의 용량은 600,000m³까지 늘릴 수 있으나, 현재는 1호, 2호, 두 개의 처분시설만 운영하고 있다. 이들의 용량은 각각 40,000m³이다. 일본원연주식회사(JNFL)는 설계용량 42,000m³의 3호 시설을 설치할 계획이다. 해당 시설은 일본 내 모든 원전 시설에서 사용하도록 만든 것이기 때문에, 후쿠시마 제1원전 페로 사업이 시설을 독점적으로 사용해서는 안 될 것이다. 게다가 후쿠시마 제1원전에서 발생할

폐기물을 록카쇼 저준위 센터에서 소화하는 것은 어차피 불가능하다. 후쿠시마 제1원전 외부에는 오염된 토양을 보관할 곳이 없다.

결국 대량의 폐기물을 보관할 장소가 일본 내에 없다면, 후쿠시마 제1원전 부지 전체를 자연상태로 복원하는 것은 이번 세기 내에는 실현 불가능한 꿈에 불과하다. 이 불가능한 꿈에 도전하기 위해 소중한 자원을 투입하는 것이 비용-편익 차원에서 타당하거나 장점이 있는 것도 아니다. 10년 전 내세운 비현실적인 과대 공약은 비합리적인 정치적, 심리적 기대를 낳았다. 이제는 이러한 방식을 재고하고, 과학 및 공학적 평가 없이 만들어낸 비합리적인 기대를 버려야 한다.

일본 정부의 중장기 로드맵 및 페로추진회사NDF의 기술전략계획에 언급된 5대 기본 원칙 중 “신속성”의 중요성을 재고해야 할 것이다. 100년 이상의 기간 동안 기술적, 경제적 타당성을 바탕으로 실용성과 달성가능성의 관점에서 사업 전체를 다시 고민하고 계획을 재수립해야 한다. 저자는 계획의 재수립을 통해 부지 주변에 해자를 설치해 격리시키고 “드라이 아일랜드”로 전환하는 방법이 좀 더 효율적이고 효과적이며 안전하고 경제적으로도 손쉬운 것이라고 본다.

2.4.3. 연료파편 이외의 폐기물

페로추진회사NDF의 2020기술전략계획에 언급된 바와 같이, **2019년 12월 주처리건물 및 고온소각건물 지하층에서 제올라이트 샌드백이 발견되었다. 접촉 시 수치가 각각 3 Sv/h 및 4 Sv/h에 달했다.** 발견 직후, 페로추진회사NDF는 갑자기 회수 방법에 대한 문제가 발생했다고 밝혔다. **하지만 고방사선 제올라이트 샌드백 외에도 회수 및 취급이 어려운 기타 방사성 폐기물들이 다량으로 존재한다.**

예를 들어, 1~6호기 사용후 핵연료 수조에는 사용후(폐기) 제어봉 등 사용후 핵연료 집합체, 노내 중성자 감시기, 가동 중성자 선원, 고방사능 슬러지 진공 흡입에 사용한 필터외에도 수많은 고방사선 부품과 폐기물이 존재한다. 방사성 폐기물 시설에는 고방사선 필터 슬러지, 사용 후 레진이 저장 탱크에 보관되어 있다. 공동 수조에는 다량의 사용후 핵연료 집합체, 제어봉, 채널 박스가 저장되어 있다. 원자로 내부구조물 교체 사업이 90년대 말 1~3호기, 5호기에서 수행되었다. 노심 슈라우드, 상부 안내구조물, 제트 펌프 등 방사능 내부구조물 중 조사부품 대부분을 제거 및 파쇄한 후, 바스켓에 담아 공동 수조 안에 저장했다.

2011년 3월 11일 4호기에서 동일한 작업을 진행하던 중 후쿠시마 제1원전은 지진에 이어 해일이 덮쳤다. 진행중이던 작업을 갑자기 중단함에 따라, 연료 재장전 층(원자로 건물 최상층)의 건조 분리기 피트(Dryer Separator Pit(DSP))에 과다조사된 원자로 내부구조물 부품이 다수 남겨졌다. 그 중 일부는 저준위 방사능 폐기물_{LLW} 중 GTCC(저준위 방사성 폐기물 구분 용어로 C등급 이상을 의미함/

greater-than-Class C)로 분류된다. LLW(저준위 방사성 폐기물)는 비방사능^{specific activity} 수준에 따라 A, B, C 등급으로 나뉜다. GTCC로 분류되면 C등급보다 수치가 높다는 것이고, 사용후 핵연료와 마찬가지로 심층저장시설에 처분해야 한다. 즉, GTCC 폐기물은 일본원연주식회사(JNFL)의 록카쇼 시설에 보관할 수 없다는 의미다. 미국의 경우, GTCC 폐기물은 사용후 핵연료 집합체와 같이 건식 캐스크에 넣어, 독립형 사용후 핵연료 저장 시설 Independent Spent Fuel Storage Installation (ISFSI)이라는 지정된 장소에 보관한다.

GTCC 폐기물 처리를 복잡하게 만드는 또 다른 요인이 있다. **폐기물이 특정 농도 이상으로 알파 핵종에 심각하게 오염되어 있으면, 선량과 관계 없이 GTCC로 분류되어 심층처분해야한다. 2019년 3월 이후 도쿄전력 팀이 진행한 현장 조사 결과에 따르면, 2, 3호기 원자로 건물 지하의 응축 수조(토러스)에는 고농도의 알파 핵종을 포함한 오염수가 가득 차 있었다.**

이러한 오염수의 양은 각 호기 당 약 6,000m₃로 추정되었다. 구체적으로, 이러한 알파 핵종은 플루토늄(Pu-238, Pu-239, Pu-240), 아메리슘(Am-241, Am-242m, Am-243), 퀴륨 (Cm-242, Cm-243, Cm-244)에 해당했다. 0.1마이크론 필터를 사용해 대부분 분리했지만, 채취한 시료 안에는 0.1 마이크론 이하의 입자와 이온 원소도 포함된 것으로 추정되었다.

예를 들어, 2호기에서 채취한 시료의 경우, 알파 핵종 농도는 2.61x10⁵ Bq/L였으며, 알파를 포함한 모든 핵종의 농도는 1x10⁹ Bq/L였다. 이러한 분석 결과는 알파 핵종이 매우 소량에 불과하다는 뜻일 수도 있지만, 알파 핵종의 방사선 독성이 높다는 점을 고려하면 무시할 수 없는 수준이다.

도쿄전력은 1-3호기 원자로 건물 지하, 주처리건물, 고온소각건물 내의 모든 잔류 오염수에 포함된 방사성 물질 총량이 6.9x10¹⁴ Bq라고 밝혔다. 배수 후 바닥에 남아 공기 중에 노출된 슬러지에는 1.9x10¹³ Bq이 들어있다. 여기에도 알파 핵종이 일부 포함되어 있다.

상기 내용은 건물에 현재 저장된 잔류 오염수를 처리하는 경우 뿐만 아니라 다른 경우에도 마찬가지로 중요하다. **연료파편 회수를 위해 대대적인 절단 및 분쇄 작업을 하는 경우, 대기 및 수중에 고농도(TBq) 알파 핵종이 방출된다. 따라서, 응축 수조(응축 수조(토러스))를 포함해 1차 격납용기 전체에 알파 핵종 오염이 확산되어, 폐로 시 처리가 훨씬 힘든 GTCC 폐기물양이 크게 늘어나는 결과를 가져올 수 있다. 폐로 작업 중 의도치 않게 알파 핵종이 작업자의 신체에 유입될 가능성도 높아진다.**

앞서 설명한 바와 같이, 모든 사용후 핵연료 집합체를 제거한 후에도 사용후 핵연료 수조는 즉시 배수 및 해체할 수 없다. 마찬가지로, 연료파편 회수 완료 후에도, 원자로압력용기RPV 및 1차 격납용기(받침대를 포함한 건정, 응축 수조(응축 수조(토러스)))는 즉시 해체할 수 없다. 그러한 회수 작업은 절대 완벽할

수 없다. 원자로압력용기RPV 내부 공간에는 연료파편 잔여물의 존재와 관계 없이 상당히 많은 GTCC 가능 부품(상부 안내구조물, 노심 슈라우드 등)이 남아있어 매우 복잡한 상태일 것이다.

방사성 농도는 제염 작업자들에게 치명적인 수준으로 높다. 원자로 건물과 터빈 건물의 지하 바닥/벽부는 고방사성 슬러지로 얇게 덮여 있을 가능성이 높다. 이온 형태 또는 소립자 형태의 방사성 물질이 철강, 콘크리트 구조물 표면에 흡수되었을 가능성이 있기 때문에 제염을 위한 대대적인 기계적 및/또는 화학적 처리(고압 워터젯, 콘크리트 파쇄^{chipping} 등)를 통해 선량을 충분히 낮춰야만 한다. 일부 방사성 물질이 미세한 크랙을 통해 지하 바닥/벽부로 스며들어 플룸^{plume}을 형성해 지하수면을 따라 지하수와 함께 넓은 구역에 깊은 곳까지 이동했을 가능성이 있다.

다시 한 번, 100년의 기간을 두고 기술적, 경제적 타당성을 바탕으로 현실성 및 달성가능성 관점에서 이 프로그램 전체를 다시 검토해본다면, 알파 핵종이 포함된 고방사선 폐기물과 고오염 폐기물로 인한 피폭 위험에도 불구하고, 서둘러 처리하는 것이 과연 현명한 결정일까? 이 잘못된 방법을 더 열심히 추진할수록, 작업자들이 불필요하게 피폭되고 신체에 알파 핵종이 유입될 위험이 높아진다. 또한, 방호 또는 위험 저감을 위해 더 많은 노력과 비용이 소요될 것이다.

비등형경수로(BWR) 핵연료에 포함된 알파 핵종은 원자로 정지 직후 저장량 순으로 Pu-241, Cm-242, Pu-238, Cm-244, Pu-239, Pu-240, Am-241이다. 상위 4개 핵종의 반감기는 각각 14년, 160일, 87.74년, 18.1년이다. 이러한 반감기는 저장량 5위 이하의 핵종보다 훨씬 짧다. 즉, 50~100년 동안 크게 줄어든다는 의미다.

현재의 기술 발전 속도로는 굳이 100년, 심지어 50년까지 기다리지 않아도, 다양한 산업군과 인간 사회에서 일상적으로 첨단 휴머노이드 로봇이 중요한 역할을 할 것임을 알 수 있다. 고방사성 제올라이트 샌드백, 알파 핵종이 포함/미포함된 GTCC 폐기물을 처리하는 데도 사용할 수 있을 것이다. 그러므로 30-40년 내에 후쿠시마 제1원전 자연복원 상태로 만들겠다는 허황된 꿈 때문에 더없이 위험한 선택을 할 필요가 없는 것이다.

3. 대안 전략

폐로추진회사NDF 관리자들은 2018년 “플랜 A - 침수식 상부 접근방식”을 최종 포기하기까지 너무 많은 시간과 자원을 낭비했다. 동토벽의 향후 성능에 대해서도 많은 우려가 있었고, 결국 현실로 나타났다. **폐로추진회사NDF는 현재 연료파편 회수를 위해 플랜 B “건식 측면 접근방식”에 주력하고 있지만 시범 작업은 시료를 채취하는 것이 목적이고, 이는 실제 회수와 난이도 면에서 큰 차이가 있다.**

그들도 이미 알고 있겠지만 폐로추진회사NDF의 야심찬 그리고 비현실적이고 낙관적인 계획은 곧 실패로 끝날 것이다. 대대적인 노력을 통해 어떻게든 그 목표를 달성한다고 하더라도, 사용후 핵연료 및 저준위 방사성 폐기물 최종 처분을 위한 일본의 정책과 인프라가 미비한 상황에서는 회수된 연료 파편을 외부로 옮길 수도 없다. 회수된 연료 파편을 저장 캐스크에 넣어, 앞으로 장기간 그대로 부지에 두어야 한다.

사고 직후 발표했었던 “40년 내 자연상태 복원”이라는 약속은 시간이 갈수록 더 불분명해지고 있다. 정치적 이유에서 수립한 목표이기 때문에 최종 상태에 대한 기술적 정의를 논의하지도 확정하지도 않았다. 지금 분명한 한 가지 사실은 그 목표만으로는 연간 10 μ Sv라는 선량 기준을 충족하거나, 과거 해외 원전에서 실행했던, 아무런 제한 없는 무조건적 해제 상태가 될 수 없다는 것이다.

따라서 정부가 시급히 수행해야 할 가장 중요한 조치는 국민들이 폐로 최종 상태에 대한 오해에서 벗어나게 하는 일이다. 멋진 “자연상태 복원”과는 거리가 멀다. 불가능한 목표를 추진하는 척하는 것도 중단해야 한다. 기술적, 경제적 타당성을 바탕으로 현실성과 달성가능성 관점에서 새로운 로드맵을 다시 수립해야 한다. 기술적으로나 경제적으로나 40년이라는 시간 제한 같은 것은 없다.

지금까지의 논의에서 “플랜 A - 침수식 상부 접근방식” 및 “플랜 B - 건식 측면 접근방식”라는 상징적 용어를 저자가 기존에 일본 정책결정자들에게 제안했던 『후쿠시마 폐쇄 계획』과 함께 비교분석했다. 저자는 40년이라는 기한을 포기한다면 더 나은 대안인 “플랜 C”가 존재한다고 믿는다. 이는 아래 표에 비교한 바와 같다.

<폐로 방안 비교표>

	플랜 A	저자가 제출했던 후쿠시마 폐쇄 계획	플랜 B	플랜 C
현황	2018년 중단	2014년 국제 원자력 폐로 연구소(IRID)에 서 부적합 판정	폐로추진회사 NDF가 수립한 현행 계획	보고서로 제안하는 신규 안
목표 최종 상태	자연상태 복원	최종처분지/ 해자로 분리한 “드라이 아일랜드”	자연상태 복원(?)	최종처분지/ 해자로 분리한 “드라이 아일랜드”
목표 기한	40년	40년	40년	무기한
지하수 차단 방법	동토벽 + 펌프	해자	동토벽 + 펌프	해자 + 밀폐/방수 기능 강화
연료파편 냉각 방법	물 냉각	공기 냉각	의사결정 중단	공기 냉각
연료파편 회수 방법	침수식 상단 접근 연장형 마스트	지하 핫셀 연장형 마스트	건식 측면 접근 다축팔 로봇	휴머노이드 로봇 인체 모션
원자로 압력용기 ^{RPV} 해체 방법		논의되지 않음	논의되지 않음	제염 후 현재 상태 유지 (부분 해체)
1차 격납용기/ 원자로 건물 해체	논의되지 않음	논의되지 않음	논의되지 않음	제염 후 현재 상태 유지 (부분 해체)
달성 가능성	매우 어려움 달성 불가능	어려움 달성 가능	매우 어려움 (불확실)	가장 용이
안전성/피폭	용납하기 어려운 수준으로 위험함	피폭 감소	피폭 증가	피폭 최소

저자가 새로 제안한 “플랜 C”는 대부분 저자가 2013년 국제 원자력 폐로
연구소(IRID)에 제안한 『후쿠시마 폐쇄 계획』에 기반하고 있다. 두 방안의
가장 큰 차이점은 모든 폐로 작업을 40년 이내에 완료해야 한다는 부분이다.
저자는 40년이라는 기한을 두는 것의 장점도 있으나 (시간을 의식하면서 열심히
작업할 수 있음) 아무 의미 없는 그 기한의 제약 때문에 기술적으로 더
효율적이고 안전한 방안을 배제하게 만들 수 있다는 결론을 내렸다.

가장 중요한 것은 도쿄전력, 일본 정부가 모두 기대하고 있는 이 40년이란 목표 기한에는 현재 전략으로는 어차피 달성 불가하다는 사실이다. 저장 캐스트에 보관된 연료 파편과 사용후 핵연료 집합체는 외부에 운반할 곳이 없기 때문에 부지 내에 두어야 한다. 다량의 오염 토양도 부지 내에 보관해야 한다.

“플랜 C”의 핵심 철학은 해외의 일반적인 폐로 원전과 같이 40년 내에 아무런 제한 없는 무조건적 해제를 추진하는 척 하기 보다 후쿠시마 제1원전에 대한 현실적인 목표를 새로 수립해야 한다는 것이다. 즉, 부지 전체를 방사성 폐기물 영구저장시설로 전환하는 것이다. 이것이 상당한 후퇴처럼 들릴 수도 있지만, 재활용가능 폐기물 뿐만 아니라 토지, 건물 및 그 외 기존 인프라를 훨씬 효율적으로 사용할 수 있는 방법이다.

이러한 새로운 목표를 달성하는 데 있어, 현재 최우선순위는 취약한 유리성 방사성 물질의 격납 기능을 강화하는 것이다. 앞으로 AI, 센서 기술과 함께, 로봇 기술은 빠르게 발전할 것으로 예상된다. 고정된 다축 로봇팔이 아닌, 능숙한 휴머노이드 작업 로봇이 개발되면 연료파편 회수에 사용할 수 있다. 이 첨단 기술의 희망적인 응용 사례들을 보면 이것이 향후 후쿠시마 원전 폐로 과정에 중요한 지원이 될 수도 있겠다는 기대를 갖게 한다.

“플랜 C”의 목표는 다음과 같다.

- 지하수 차단 : 해자 / “드라이 아일랜드”가 완성되면, 동토벽을 정지시킨다.
- 연료파편 냉각 : 공기 냉각/ 피동 설계
- 유리성 방사능 물질 격납 : 잔여 오염수를 제거 및 처리한다. 원자로 건물의 방수/밀폐 기능을 강화한다.
- 방사성 폐기물 저장 : 지표 근처 갭도/ “드라이 아일랜드”가 설치되면 지하수면이 낮아져 갭도를 설치할 수 있다.
- 연료파편 회수: 휴머노이드 로봇
- 기존 건물 처분: 방사성 폐기물 저장소로 재사용한다.
- 보안: 해자

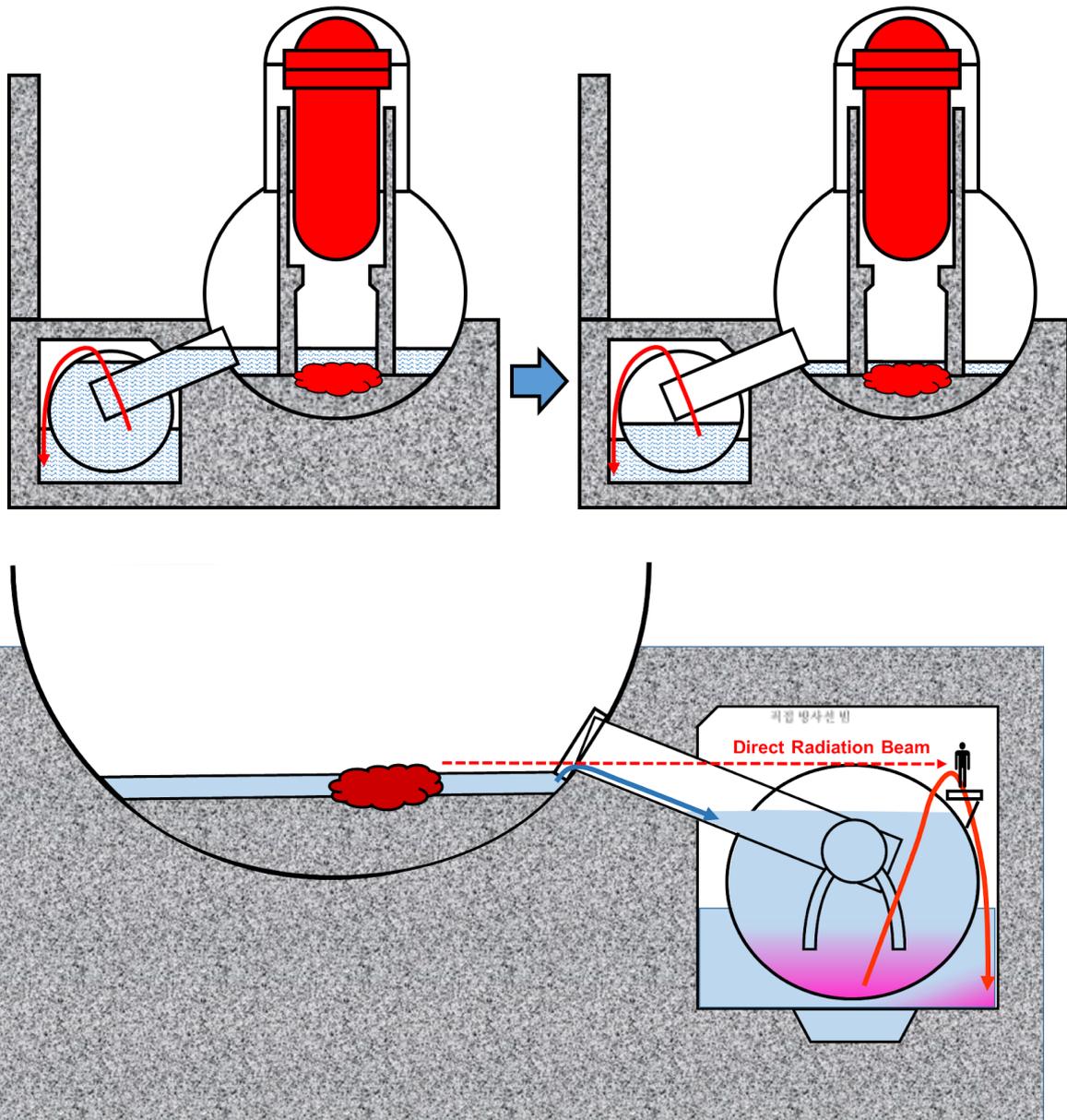
이 중에서 해자, 공기 냉각 방식은 앞서 『후쿠시마 폐쇄 계획』을 설명하면서 이미 다룬 바 있다. “플랜 C”에서는 이러한 방식들이 여전히 유효하다. 지난 7년간 긍정적인 변화 한 가지는 연료파편의 붕괴열이 감소한 것이다. 도쿄전력이 최근 2호기를 평가한 바에 따르면 69kW 이하였다.

건정 및 응축 수조(토러스)에 남아있는 다량의 오염수를 제거하고 처리하는 방법도 『후쿠시마 폐쇄 계획』에서 논의된 바 있다. 먼저 응축 수조(토러스)로 배수된다. 건정에서 배수가 진행될 때 선량이 갑자기 크게 상승할 수 있으므로, 응축 수조(토러스)에서 주의가 필요하다. 응축 수조(토러스)에서 배수가 진행될 때, 수소풍부가스(hydrogen-rich gas)가 응축 수조(토러스)의 기상(vapor phase)에 방출될 수 있으므로 마찬가지로 주의가 필요하다.

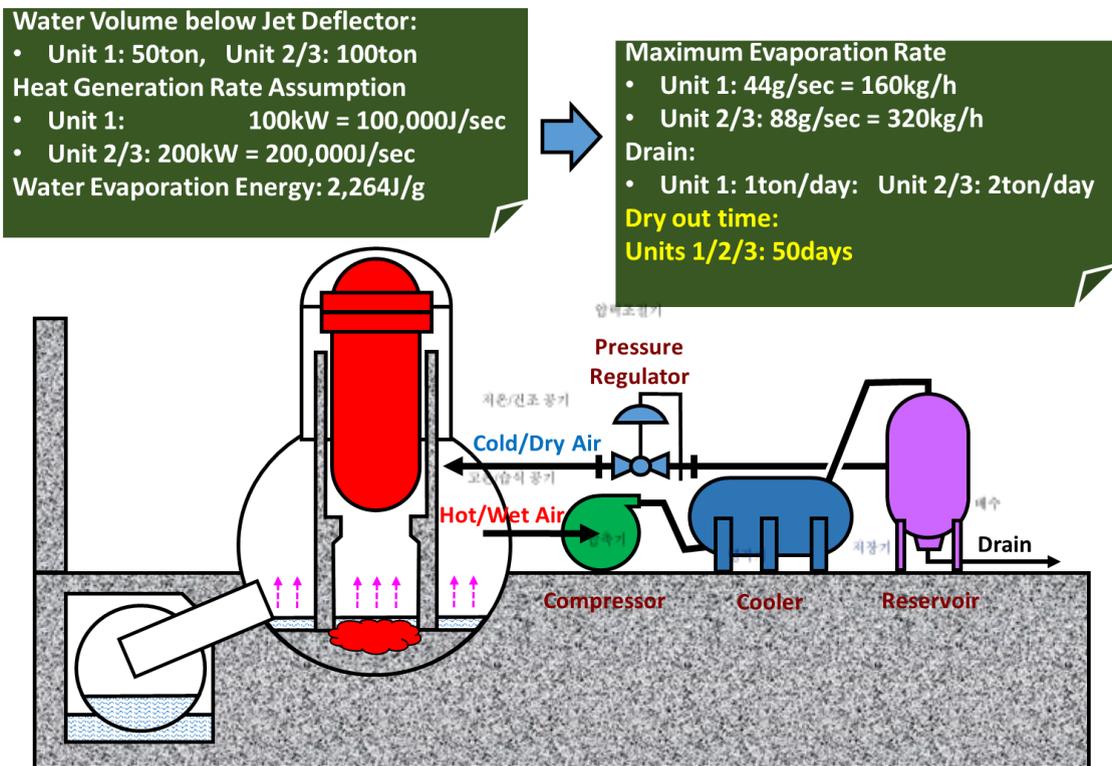
그 다음 습식 공기를 건정에서 분리해, 수증기를 응축하고, 건식 공기를 건정에 다시 공급해야한다. 1차 격납용기는 계통을 재순환시켜 전체를 건조하는 방식이다 (아래 그림 참조).

건정 배수 / 건조

Drywell Drain/Dry out



응축 수조에서 잔류 오염수 배수 시, 주의할 부분
(응축 수조(토러스) 실의 방사선 수치가 크게 증가할 가능성이 있음)



저자가 『후쿠시마 폐쇄 계획』 에서 제안한 잔류 오염수 처리 방법

저자는 “플랜 C”를 반대하는 사람들이 2가지를 지적할 것으로 예상된다. 먼저, 플랜 C는 아무런 제한 없이 부지를 무조건적으로 해제하는 방안을 포기하는 것이라는 점이다. 역사적으로 봤을 때, 후쿠시마 제1원전이 위치한 부지는 최근 민간인이 점유한 적이 없었다. 과거에는 국가가 토지를 점유했었다. 1941년 세계2차대전 당시에는 일본군이 이와키 공항으로 사용했다. 2차 대전 후에는 고쿠도 사가 소유한 염전으로 바뀌었다. 염전 사업은 오래 가지 못했다. 도쿄전력은 단 5억 엔에 이 부지와 인근 산림까지 총 3.2km²를 매입했다. 이러한 역사를 볼 때 민간 목적으로 이 사고 발생 원전 부지를 조금이라도 소유하고자 하는 사람은 아마 없을 것이다. 원래대로 국유지로 되돌리거나, 부지 전체에 대한 소유권을 일본원연주식회사(JNFL)에 이전하는 것이 합리적이다.

두번째는 사고에 책임을 져야 할 세대가 그 책임을 미래 세대에게 미룬다는 윤리적 문제다. 하지만, 신뢰할 만한 기술도 없이 무의미한 R&D와 효과 없는 조치에 더 많은 자금을 계속해서 낭비하며 정부채를 발행하고 국가 채무를 늘려, 다음 세대가 상환하도록 강요하는 것은 옳지 않다. 윤리적 문제는 마찬가지로 존재하지만, 현 세대가 절약한 재원으로 미래 세대가 더 발전된, 비용이 덜 드는 기술과 방식으로 효율적인 조치를 이행하게 하는 것이 더욱 타당하다.

다음은 미래의 로봇 기술(특히 휴머노이드 로봇), 원자로 건물의 밀폐/방수 기능 강화, 방사성 물질이 남아있는 건물의 내구성 등에 대해 다루기로 한다.

3.1. 휴머노이드 로봇 활용

1986년 체르노빌 4호기에서 발생한 원자로 사고에 즉각 대응하기 위해 약 4,000명의 군인을 현장에 파견했다. “바이오 로봇”이라고도 불렸는데 단순하지만 위험한 작업(삽으로 원자로 폭발로 인해 방출된 고방사성 흑연 덩어리를 파내는 일)을 수행해야만 했기 때문이다. 단순한 작업임에도 불구하고, 당시 최첨단의 로봇도 이를 수행할 수 없었다.

체르노빌 사고 이후 35년이 지난 지금, 로봇 기술은 재료공학, 고밀도/용량 배터리, AI 기술, 센서 기술 등 다른 기술/과학 분야와 함께 발전을 이뤘다. 휴머노이드 로봇은 인간과 동일한 크기(키, 무게)에 두 다리로 울퉁불퉁한 지형을 걷고 뒹 수 있으며 계단도 오를 수 있다. 문 개폐, 전자도구 사용, 밸브 손잡이 개폐 조작, 도관 부설 및 그 밖에 다양한 고난도 작업을 할 수 있을 것으로 기대된다. 팀 기능도 활용할 수 있다.

페로추진회사NDF의 플랜 B - 건식 측면 접근방식에 등장하는 다축 로봇팔은 더 이상 첨단 기술이 아니다. 지금으로부터 100년 또는 심지어 50년 안에 기본적인 도구로도 위험한 연료파편을 제거하는 것은 가능할지 모른다. 이는 현재로서는 확실히 불가능하다. 앞으로 수십년 뒤에 고농도의 방사성 피폭을 견뎌내고 인간처럼 움직일 수 있는 맞춤형 휴머노이드 로봇을 활용할 수 있다면 후쿠시마 원전 페로 작업 생산성과 안정성은 크게 개선될 것으로 기대해본다.

3.2. 원자로 건물의 밀폐 및 방수 기능 강화

가장 중요한 작업은 원자로 건물의 밀폐/방수 기능을 강화해 방사성 물질이 대기 및 수중 환경으로 유입되지 않도록 차단하는 것이다. 비등형경수로(BWR) 원전의 원자로 건물은 “2차 격납”으로도 불리며, 건정과 응축실은 “1차 격납”에 해당한다. 용어에서 알 수 있듯이, 원자로 건물은 안전분석에 따라 밀폐 설계되며, 설계기준사고^{Design Basis Accident}에 대비할 수 있다. 하지만, 1, 3, 4호기 원자로 건물의 밀폐 기능은 수소 폭발로 완전히 소실되었다. 2호기의 경우는 사고로 인해 기능이 손실됐다.

원자로 건물의 방수 기능 또한 경년열화, 또는 지질학적/지진학적 원인으로 눈에 띄게 저하되었다. 원자로압력용기RPV로 주입된 냉각수가 1차 격납용기로 흘러가면 원자로 건물로 누출된다. 원자로 건물은 지하에 어느 정도 물이 저장되어 있지만 댐 역할을 했을 뿐이다. 벽부 및/또는 바닥을 통해 외부로 누수가 발생했다. 외부는 투과성 토양으로 둘러싸여 있어, 유출된 오염수가 원자력 건물 하류에 위치한 터빈 건물로 흘러가 터빈 건물 지하에서 솟아나게 된 것이다.

원자로 건물 지상부의 밀폐 기능 복원은 작업, 점검, 정비 가능성뿐만 아니라, 잠재적 누수 발생 시 영향 등을 고려하면 상대적으로 단순하다. 다만, 지하부의 방수 기능을 복원하는 것이 어렵다. 부지 주변 전체에 해자를 파서 지하수면을 낮춤으로써 “드라이 아일랜드”를 구축하면, 누출된 방사성 물질 확산이 줄어드는 순간부터 도움이 된다. 하지만 원자로 건물 지하부의 방수 기능을 추가적으로 강화하는 것은 장기적 건전성 확보에 여전히 중요하다. 두 가지 방법을 생각해 볼 수 있다. 하나는 내부, 나머지는 외부에서 작업하는 것이다. 두 가지를 결합하면 더 효과적일 수 있다.

먼저, 내부에서부터 작업하는 방식은 여러 단계로 구성된다. 준비 단계로서 선량을 줄이기 위한 화학 제염제를 도포한다. 지하에 정수를 주입해 다이버들의 방사선 환경을 더욱 개선한다. 다이버는 수중에서 표면 전처리 및 에폭시 코팅 작업을 하게 된다. 이러한 절차는 CANDU 원자로의 사용후 핵연료 수조에 성공적으로 적용된 바 있다. 이러한 작업을 위해 훈련받고 자격을 갖춘 다이버들이 여러 명 있다.

외부에서부터 작업하는 방법은 개념이 간단하다. 원자로 건물 외부 표면에 스테인리스 스틸 패널 조각을 용접해 완전히 덮는 것이다. 지하에 이러한 방법을 적용하는 것은 어렵게 보일 수도 있지만 장거리 잠수함 터널, 대도시 중심부의 지하철 터널, 현대적인 채광 기술 등 난이도가 더 높은 건설 프로젝트도 성공 사례가 있음을 고려하면 어려운 부분을 쉽게 해결할 수 있다. 저자는 두 가지 방법 모두 기술적으로 타당하다고 본다.

앞서 언급한 바와 같이, 원자로 건물 지상부의 밀폐 기능 복원은 상대적으로 쉽다. “모듈러 공법”을 적용한다. 철강판과 빔을 현장에서 먼저 조립해 대형 패널(예: 15m x 15m)을 만든다. 용접 접합부를 점검하고, 지상에서 보호 코팅을 바른다. 그 다음 대형 크레인으로 벽부와 천정에 패널을 조립한다. 각 패널은 주변 패널과 함께 용접으로 연결해, 원자로 건물 위에 모자 형태의 대형 사각판을 완성한다. 이것을 지표면 바로 아래에서 일라스틱 레진^{elastic resin}으로 원자로 건물에 밀봉한다. 패널은 연료파편의 잔열을 최종 분산하는 역할을 하는 것으로 볼 수 있다. 하지만 단위 면적당 분산되는 열은 10W/m²밖에 되지 않기 때문에, 연료파편이 패널의 표면 온도에 주는 영향은 미미하다.

3.3. 방사성 물질이 남아있는 건물의 내구성

“플랜C”에서 연료파편은 향후 휴머노이드 기술의 활용으로 제거하는 방식이지만 원자로압력용기RPV, 1차 격납용기, 원자로 건물은 해체하지 않고 제염 또는 기타 처리 후 부지 내에 그대로 두어 방사성 오염이 확산되는 것을 막는 방법이다. 원자로 건물의 외부 표면은 철강 패널로 덮어, 먼지 바람, 산성비, 눈/비, 기타 기상 현상, 미생물로부터 보호한다. 따라서 건물 내부 콘크리트 및 철강 구조물의 열화는 많은 시간이 흘러도 발생가능성이 낮으며, 특히 습기를 제거한 건조한 환경에서는 더욱 그렇다. 방사선 준위는 감소하고, 잔열도

감소하는 가운데 기술은 수십년간 더 발전할 것이다. 이 위험한 유산을 해결할 다양한 방법의 개발 속도를 고려하며 더욱 유연하게 대응할 수 있을 것이다.

4. 결론 및 제언

최종 상태

중장기 로드맵 발표 시, 최종 상태 목표를 매우 정확히 명시해서 모두 동일한하고 분명한 이해를 가질 수 있도록 해야했다. 일본 정부와 페로추진회사NDF는 사고 발생 40년 후 후쿠시마 제1원전의 상태에 대해 자연상태 복원이 가능한 것으로 호도해서는 안 된다. 후쿠시마 제1원전은 다른 페로 사업과 다르다. 사고 원전이기 때문이다. 일본 정부는 자연상태 복원을 추진하고 있는 척 해서도 안 된다. 다음과 같은 이유로 “자연상태 복원”은 불가능하다.

- 무조건적 “자연상태 복원” 기준을 충족하기 위해서는, 부지 모든 곳에서 방사선량이 미국 또는 영국 기준으로 각각 연간 40 또는 10 μSv 이하여야 한다. 처분을 위해 부지에서 대량의 오염 토양 (거의 1,000만 m^3)을 제거해야 한다. 이것은 매우 어려운 작업이며 폐기물을 제거해 외부로 옮길만한 곳이 없다.
- 소각 및 기타 처리를 통해 압축한 후에도 방사성 폐기물을 위한 대형 저장 건물이 부지 내에 10개 이상 남아있을 것이다. 부피 때문에 부지 내에 보관해야 한다. 1~6호기 물리적 해체 시 발생하는 방사능 폐기물은 예상 추정치에 포함되지 않았음에 주목한다.
- 1~6호기를 완전히 해체하면, 콘크리트 잔해 및 강철 스크랩이 추가적으로 발생(150~200만 톤)한다. 일본에는 이를 옮길 수 있는 곳이 없다.
- 다수의 건식 캐스크 및 차폐 컨테이너에는 사용후 핵연료 집합체, 과다 조사 원자로 내부 구조물 부품, 폐기 제어봉 및 채널 박스, 오염 폐기물 처리 시 발생하는 2차 폐기물 등이 담겨있다. 이들은 현재 부지에 남아있으며, 최종처분전략을 결정하고 처분 시설을 가동할 때까지 부지에 두어야 한다. 1~3호기에서 연료파편을 회수하면, 이를 저장한 캐스크도 부지에 보관해야 한다.

일본 정부 및 페로추진회사NDF는 후쿠시마 제1원전을 “자연상태 복원”하는 것이 유일한, 최선의 해결책이라는 비현실적인 가정을 바탕으로 자원 낭비를 정당화하려는 시도를 해서는 안 된다. 후쿠시마 제1원전 부지에 대해 향후 가장 현실적인 사용 방안은 여론과 관계 없이 방사성 폐기물 장기 저장 시설로 사용하는 것이다. 이 현실을 받아들이면 위에 언급한 모든 문제점은 자동으로 해결될 것이다.

“플랜 B - 건식 측면 접근방식”을 통한 연료파편 회수

X-6 관통부를 통해 접근하도록 설계된 다축 로봇팔로 2호기 받침대의 연료파편 시료를 소량 채취하는 실증시험은 성공적으로 수행할 수 있다. 하지만 X-6 관통부를 확대해 실제 환경에 적용하는 경우, 난이도는 기하급수적으로 증가한다. 회수 작업은 접근가능한 범위로 제한되며, 원자로압력용기RPV 내부 잔여물은 그대로 남게 된다. 결국, 다른 방안(좀 더 유연하고 접근 가능하며, 효율적이고 생산적인 방안)으로 변경하지 않으면, 연료파편 회수는 불가능하다. 수중 시추, 절단 또는 분쇄를 통해 연료파편 회수를 시도하면, 알파 핵종을 함유한 고농도 오염수가 발생할 것이다. 건조한 환경에서 시도하는 경우, 1차 격납용기 내부 공간 전체가 알파 핵종으로 오염될 수 있다. 이러한 수중 또는 대기 오염에 대한 효과적인 대비책을 수립하고 위험을 줄여야 한다.

실증시험이 성공적으로 완료된다 하더라도, 이를 통해 연료파편의 특성에 대해 얻을 수 있는 정보는 제한적이며 불완전하다. 따라서, 그러한 정보는 다음 단계로 진행하는 데 의미 있는 도움을 주지 못한다. 로봇팔을 사용한 “플랜 B - 건식 측면 접근방식”을 계획대로 적용하는 것은 이번 실증으로 제한하고, 실제 환경 적용은 추진하지 않아야 한다.

연료파편 냉각 방법 및 오염수 문제 해결

물을 사용해 연료파편을 냉각하는 한, 방사성 물질이 흘러 나오고 오염수가 끊임없이 발생할 것이다. 결함이 있는 동토벽에 의존해 원자로 건물 및 터빈 건물로 유입되는 지하수를 차단하려고 한다면, 건물 내 유입 문제는 끝나지 않는다. 오염수 누적량은 강우로 인해 매일 변동되면서 계속 증가할 것이다. 이러한 상황을 영구적으로 해결하기 위해서는 연료파편 냉각 방식을 물에서 공기 냉각으로 바꾸고 동토벽을 해자 시설로 교체할 것을 제안한다. 해자는 아부쿠마 고원에서 시작되는 지하수를 차단해 줄 것이며, 지하수원이 차단되면 부지 내 지하수면은 해수면 수준으로 결국 낮아질 것이다. 원자로 건물 및 터빈 건물로의 지하수 유입은 크게 감소할 것이다.

플랜 C

폐로 프로그램은 각 목표를 별개로 접근해서는 안 된다(목표 1: 오염수 발생 감소, 목표 2: 연료파편 냉각, 목표 3: 연료파편 회수). 이는 모두 상호연관되어 있기 때문에 하나의 패키지로 간주해야 한다. 폐로 프로그램은 부지의 최종 상태가 어떤 모습일지를 기준으로 이에 맞춰 수립해야 한다. 본 보고서에서 제시한 대안 방안은 “플랜 C”이며 그 목표는 다음과 같다.

- 지하수 차단 : 해자/ “드라이 아일랜드”가 완성되면, 동토벽을 정지시킨다.
- 연료파편 냉각 : 공기 냉각/ 피동 설계
- 유리성 방사능 물질 격납 : 잔여 오염수를 제거 및 처리한다. 원자로 건물의 방수/밀폐 기능을 강화한다.

- 방사성 폐기물 처분 및 저장 : 갯도/ “드라이 아일랜드”가 설치되면 지하수면이 낮아져 깊은 지하 갯도를 설치할 수 있다.
- 연료파편 회수 : 휴머노이드 로봇
- 기존 건물 처분 : 방사성 폐기물 저장소로 재사용한다.
- 보안 : 해자 / 해자는 수동 시스템으로 외부 전원이 없어도 사용할 수 있다.

주기적으로 필요한 유일한 정비 작업은 강우 및 해수로 인해 시스템 내부로 유입된 진흙과 모래를 퍼내는 것 뿐이다. 해자가 설치되면 지하수면이 해수면 수준으로 낮아지면서 부지는 고립된 섬이 되고 다양한 용도를 선택하고 유용한 기능을 활용할 수 있다. 수심이 깊은 대형 지하 갯도를 방사성 폐기물 저장/처분 시설로 사용하는 것도 좋은 활용법이다. 건조한 토양 내부에서 방사성 물질이 더 이상 확산되지 않는 것도 또 다른 장점이다. 마찬가지로, 연료파편 공기냉각 방식도 외부 전원 없이 사용할 수 있는, 정비가 필요 없는 피동 시스템으로 설계할 수 있다. 자연적인 열 전도, 대류, 복사 현상만으로 연료파편의 잔열을 줄일 수 있다.

/끝/