

2020.10.

2020년, 오염수 해양 방류를 차단하라

후쿠시마 방사성 오염수 위기의 현실

Stemming the tide 2020

The reality of the Fukushima radioactive water crisis



손 배니(Shaun Burnie) - 그린피스 독일사무소 선임 캠페인 전문가



목차

감사인사	04
요약	05
보고서 주요 내용	06
서론	08
원자로 냉각	09
원자로 건물 내로 유입되는 지하수/빗물의 문제점	09
다핵종제거설비(ALPS)의 실패	10
잘못된 오염수 처리 전략과 선택	11
2020년 ALPS 2차 처리	13
스트론튬-90 및 기타 유해물질	14
오염수 내 방사성 탄소-14	14
도쿄전력, 중대한 오차 발생 사실 인정	16
삼중수소 위험 분석의 문제점	17
삼중수소 분리 기술	20
오염수 해양 방류 대안인 장기 저장	21
오염수 소위원회의 2020 보고서	22
오염수 방류에 대한 소위원회 입장	24
후쿠시마 오염수 해양 방류의 인권 위협	25
결론	27
별첨	29
각주	30

저자

숀 버니(Shaun Burnie)_그린피스 독일사무소 선임 원자력 전문가

발간

그린피스

감사인사

2020 후쿠시마 현지조사 후원자명단

이번 후쿠시마 오염수 신규 보고서 발간은 총 159명 후원자님의 특별후원으로 만들어졌습니다. 성명 기재에 동의하신 총89분의 성함과 보고서를 발간합니다. 극심한 코로나19 확산 상황에서도 그린피스와 함께해주신 모든 후원자님께 깊이 감사드립니다.

구 담 정	김 영 은	서 현 우	이 종 현
김 미 정	김 영 조	손 석 호	이 지 은
백 경 재	김 예 린	신 영 미	이 지 행
양 은 혜	김 종 현	신 우 용	이 현 경
윤 혜 정	김 주 신	신 재 용	임 다 정
은 성 경	김 주 현	신 혜 아	임 지 수
정 현 진	김 지 형	안 현 정	정 다 영
강 석 렬	김 진 영	안 현 호	정 옥 분
강 인 속	김 한 시	양 한 슬	정 지 은
강 정 속	김 해 나	유 나 겸	조 민 희
고 희 정	김 호 선	유 은 실	조 순 희
곽 레 오	남 경 민	유 팔 복	조 윤 지
권 보 미	노 승 방	윤 거 레	최 순 희
권 순 호	류 형 민	윤 선 경	추 은 미
권 은 희	민 경 민	윤 세 현	편 태 장
김 경 미	박 다 혜	윤 아 나	한 혜 경
김 광 종	박 민 정	윤 하 원	허 금
김 규 정	박 정 우	이 광 수	허 한 별
김 상 현	박 진 속	이 서 현	형 소 정
김 수 민	박 혜 영	이 선 환	황 미 리
김 수 정	백 송 업	이 수 진	
김 영 수	변 춘 속	이 용 재	
김 영 옥	서 상 문	이 재 은	

요약

그린피스가 2019년 발표한 첫 번째 보고서를 통해 일본 정부의 후쿠시마 오염수 해양 방류 계획을 폭로한 지 거의 2년이 지났다. 100만 톤이 훌쩍 넘는 오염수는 재앙에 가까운 방사성 사고를 경험한 후쿠시마 제1원전 부지에 그대로 있다. 일본 정부는 스트론튬-90과 탄소-14 등 처리할 수 없는 방사성 핵종이 포함된 오염수를 태평양 바다에 버리기로 했다. 이는 후쿠시마 뿐 아니라 광범위한 지역 환경에 장기적으로 치명적인 오염을 일으키는 무책임한 결정이다. 일본 정부의 바람대로라면 오염수 방류는 2022년 말부터 2050년대 중반까지 계속될 것이다.

일본 정부와 도쿄전력은 백만 톤 이상의 오염수 처리를 둘러싸고 ‘신화’를 만들어내는 데 성공했다. 2022년이 되면 오염수를 저장할 공간이 더는 없다는 것, 방사성 삼중수소가 오염수 내 유일한 방사성 핵종이고 그것이 무해하다는 것, ‘처리수’이지 ‘오염수’가 아니라는 것, 방류 외에 다른 대안이 없다는 것 등이 신화의 내용이다.

2019년 발표한 첫 번째 보고서와 같이 이번 보고서도 일본 정부와 도쿄전력이 거대한 거짓말로 세상을 속이고 있다는 사실을 드러내고자 노력했다. 그들은 재정적, 정치적 이유로 거짓말을 이어가는 중이다. 오염수를 바다에 방류하는 선택은 일본 정부에 가장 저렴한 선택이고 후쿠시마 사고 피해는 모두 수습됐다고 거짓으로 홍보하려는 목적에 부합하기 때문이다. 하지만 일본 정부의 바람과는 달리 후쿠시마 원전은 지역 주민과 환경은 물론 일본 전역, 나아가 국제 사회에 악영향을 끼치는 위험으로 남을 것이다. 후쿠시마 오염수 위기는 긴 세월 동안 인류를 괴롭히는 위협을 초래할 것이다.

어떤 나라나 기업도 2011년 후쿠시마 원전 사고와 이로 인한 피해 여파를 직면한 적은 없었다. 시간이 흐르면서, 도쿄전력과 일본 정부 기관들은 이 위기를 악화시킬 음모를 꾸민 것 같다. 오랜 기간의 은폐 끝에 도쿄전력은 최근야 자신들의 처리 기술이 제대로 작동하지 않는다는 사실을 시인했다. 또, 사고 후 거의 10년이 지난 최근야 들어서야(2020년 8월) 다핵종제거기술(이하 ALPS)로 처리할 수 없는 탄소-14가 오염수에 잔류하고 있다고 밝혔다¹.

오염수를 바다로 흘려보내는 것에 대해 후쿠시마 주민들은 물론 일본의 전국 어업협동조합연맹², 후쿠시마의 40여개 지자체, 그리고 일본 사회 전역에서 반대와 우려가 계속되고 있다. 일본의 최인접 국가들, 특히 한국의 반대는 이 문제가 일본 밖의 사람들과 공동체에도 영향을 미친다는 사실을 보여준다. 또한 이 결정은 국제 해양법 및 세계 해양 보호 원칙에도 저촉된다. 일본 정부는 오염수를 방류하기로 이미 마음 먹었지만, 반대 움직임은 계속될 것이다.

현재 갖추어진 제반 조건과 환경을 면밀히 분석한 결과 그린피스가 제안하는, 유일하게 실현 가능한 대안은 장기 저장과 함께 지속적으로 오염수를 처리 및 정화 하는 것이다. 이는 충분히 실현 가능한 방안이며, 장기 대안을 통해 더 개선된 기술이 개발되고 적용되기까지 필요한 시간도 벌 수 있다. 또, 삼중수소처럼 저장 기간이 늘어나는 것만으로 반감의 효과가 있는 방사성 핵종의 위험도 지금보다 통제가능해질 것으로 본다. 오염수를 장기적으로 저장 및 처리하는 것은 후쿠시마 주민, 일본 국민, 나아가 국제사회 공동체의 건강 및 환경, 인권 보호를 위해 수용할 수 있는 유일한 방안이다.

보고서 주요 내용

오염수의 지속적인 증가 상황

- * 지하수 오염 문제가 미해결 상태로 계속 진전됨에 따라, 오염 문제의 끝이 보이지 않고 있다. 후쿠시마의 산악지대 및 범람원에서 원전 부지로 유입되는 지하수의 양은 다소 감소했으나, 2018년 일평균 유입량 140톤 이상을 유지하고 있다. 특히 태풍 이후에는 급격하게 증가했다. 예를 들어, 2019년 10월 태풍 하기비스 발생 당시에는 일 650m³ 이상으로 늘어났다. 총 오염수 양은 2020년 말까지 137만 m³으로 늘어날 것으로 보인다.
- * 용융된 연료가 지하수와 냉각수에 노출되어 있는 한, 오염수 문제는 계속될 것이다. 추가적인 지하수 오염을 막지 못한다면, 2030년까지 추가적으로 축적되는 오염수 양이 50만~100만 톤에 달할 것으로 보인다.³

다핵종제거설비(ALPS)의 결함

- * 도쿄전력은 이미 2011년에 스트론튬-90과 같은 가장 유해한 방사성 핵종 농도를 불검출 수준으로 낮추는데 성공한 미국 기업 퓨로라이트를 거부했던 사실이 있다⁴. 퓨로라이트는 방사성 물질을 제거하는 수처리 분야에서 수십년의 경험을 보유하고 있으나, 도쿄전력은 도시바와 히타치GE 원자력에너지(히타치GE/ 이하 히타치GE)처럼 경험이 전무한 기업과 계약을 했다.
- * 결함이 있는 ALPS 기술을 도입함에 따라, 도쿄전력과 일본정부는 방사성 농도를 불검출 수준으로 낮추길 포기하고 배출허용기준을 상향했다.
- * ALPS의 효과에 대해서는 여전히 의문점이 존재하는 상황에서 오염수 72%에 해당하는 수십만 톤의 오염수 2차 처리를 위한 테스트가 2020년 10월 예정되어 있다.
- * 일본 외무성(MOFA)은 후쿠시마 제1원전 오염수 문제를 제기한 UN인권특별보고관들에게 계속해서 왜곡된 정보로 소통했다. 예를 들어, 그들은 2020년 6월에 “삼중수소를 제외한 대부분의 방사성 핵종을 알프스에서 제거한 후, 탱크 내에 처리수를 안전하게 저장한다. 따라서 탱크에 저장된 처리수는 오염수에 해당하지 않는다⁵”며 사실과 다른 정보를 전달했다.

왜곡되는 탄소-14와 스트론튬-90의 유해성

- * 2020년 8월, 도쿄전력은 스트론튬-90 등 유해한 고준위 방사성 핵종 외에도 1차 정화 처리를 마친 오염수에 고농도의 탄소-14가 존재한다는 사실을 처음으로 인정했다.⁶

- * 탄소-14는 장기적인 방사성 오염의 주요 원인이 될 물질이지만 알프스는 이를 제거하도록 설계되지 않았다. 오염수를 태평양에 방류하는 경우, 오염수 내 탄소-14 전량이 환경에 유입된다. 탄소-14의 반감기는 5,730년이며, 세계 인체 집단선량의 주요 원인이기도 하다. 환경에 유입된 탄소-14는 수 세대에 걸쳐 지방, 지역 및 세계 인구에 전달될 것이다.⁷
- * 도쿄전력은 방사성 삼중수소에 대한 기본적인 과학적 사실을 계속해서 왜곡하고 무시하고 있다. 특히, 유전자 변이를 일으키는 유기결합삼중수소(OBT)의 생태계 악영향을 의도적으로 무시하고 있기 때문에 오염수 방류 시의 방사성 오염에 대한 정확한 분석 결과를 제시하지 않을 것이다.

평가 절하된 오염수 처분의 유일한 대안, 장기 저장

- * 그린피스가 경제산업성 소위원회의 오염수 보고서를 분석한 결과, 소위원회는 2022년 이후에도 오염수를 발전소 내/외에 모두 추가 저장하는 것이 가능하다는 점을 확인했으나 “상당한 조율과 시간”이 소요된다는 이유로 이를 배제했다.
- * 또한, 소위원회는 오염수를 장기간 보관하면 적어도 삼중수소가 야기할 방사성 오염 피해는 줄일 수 있음을 확인했다. 삼중수소의 반감기(12.5년)가 상대적으로 짧은 점과 일본 정부가 보고서를 통해 대략 제시한 삼중수소의 연간 방류량 22TBq를 기준으로 할 때, 2035년까지 방류 개시 결정을 보류하면 2020년에 방류 개시하는 것에 비해 완료 시점의 지연은 3년 정도다.

일본 내부의 반대 여론과 UN 인권이사회의 문제 제기

- * 위 두 가지만 보더라도, 오염수를 태평양에 방류하라는 경제산업성 소위원회 권고는 환경의 방사성 영향에 대한 올바른 과학적 분석에 기반한 것이 아니라 일본 정부의 정치적 이해관계만 고려한 것임이 분명하다.
- * 후쿠시마의 40여 개 지자체와 어민 협회, 일본 국민 중 다수가 일체의 환경 방류에 대해 강하게 반대하고 있다. 바스쿠트 툰캅(Baskut Tuncak) UN 인권특별보고관은 “인간 존엄성이 확보되는 삶을 영위하고, 문화를 향유하며, 추가적인 방사성 오염으로부터 스스로 보호하는 것은 환경에 대한 그들의 인권에 해당한다. 이러한 권리는 일본 정부가 무시해서는 안 되는 것이며 전적으로 존중받아야 한다.”⁸ 고 언급했다.



© Shaun Burnie / Greenpeace

서론

도쿄전력에 따르면 2020년 8월 20일 기준으로 후쿠시마 제1원전 1,041개 탱크에 오염수가 저장되어 있다. 알프스 처리된 오염수 저장탱크 944개, 세슘/스트론튬 정화 처리된 오염수 저장탱크 71개, 역삼투압(Reverse Osmosis) 처리 담수 저장탱크 24개, 오염된 해수를 위한 탱크 2개에 해당한다.⁹ 2020년 8월 27일 현재 후쿠시마 제1원전(1-4호기) 저장탱크 내 오염수는 총 1,235,907톤이다.¹⁰ 또한, 2019년 중반 보고된 바에 따르면 원자로 지하 등 다른 장소에 축적되어 있는 고준위 오염수도 16,110톤에 달하며¹¹ 태평양으로 직접 유출될 위험이 있다.

손상된 1-3호기 원자로 내부에는 용융 핵연료가 남아있는데, 도쿄전력은 이를 냉각하기 위해 하루에 수 톤의 냉각수를 계속해서 펌프로 주입하고 있다. 후쿠시마 제1원전 1-3호기의 코륨량(콘크리트, 철을 포함한 용융 핵연료 혼합물)은 609톤에서 최대 1,141 톤으로 추정된다. 공칭값(nominal value) 880톤을 기준으로 보면, 3개 원자로에 원래 있었던 연료량보다 3.4배 많은 것이다.¹² 이 용융된 핵연료에 투입되는 냉각수는 고스란히 고준위 오염수가 된다. 후쿠시마의 산악지대 및 범람원에서 원전 부지로 유입되는 지하수의 양은 감소하기는 했으나, 2019년 원자로 건물로의 일평균 지하수 유입량은 180m³이었다.

잦은 태풍으로 폭우가 발생하면 유입량은 급격히 증가한다. 향후 지하수 오염을 막지 못하면 2030년까지 80만 톤의 오염수가 추가적으로 축적될 것으로 예상된다.¹³ 강조해서 언급할 필요가 있는 부분이다. 일본 정부가 태평양으로 방출하겠다고 위협하고 있는 오염수는 이미 100만톤 이상이며 향후 10년 내 200만 톤으로 늘어날 수 있다. 연간 오염수 저장비용은 현재 1,000억엔(9억 달러)을 약간 상회한다.¹⁴

원자로 냉각

2020년 9월 14일 기준으로 원자로 냉각수 주입 속도는 1호기 2.8 m³/h, 2호기 2.8 m³/h, 3호기 3.1 m³/h이다.¹⁵ 일 216m³의 속도라면, 주 평균 1,512 m³의 냉각수가 3개 호기의 냉각계를 순환하게 되는 것이다. 원자로 하단의 측정온도는 27~36°C이다.

원자로 건물 내로 유입되는 지하수/빗물의 문제점

근본적인 문제는 매일 추가적인 오염수가 계속해서 발생한다는 것인데, 오염수 해양 방류 처분은 이를 해결하지 못한다. 그린피스가 2019 보고서에서 상세히 설명한 바와 같이, 도쿄전력의 조치로 인해 원전 사고 발생 초기에는 지하수 유입량이 감소했다.

후쿠시마 제1원전 부지로 유입되는 지하수와 원자로 내부로 주입하는 냉각수가 직접 혼합될 수 있는 가능성에 대해, 도쿄전력은 그동안 분명한 입장을 표명하지 않았다. 하지만 이제는 “산에서 유입되는 지하수가 원자로 건물로 침투해 냉각수 및 용융 핵연료와 혼합되고 경화된다. 이로 인해 고준위 방사성 물질을 함유한 물(“오염수”)이 매일 발생한다”고 공개적으로 밝히고 있다.

지하수 문제는 여전히 해결되지 않은 상태다. 따라서, 탱크 내 저장된 오염수 처분 결정 후에도 오염수는 계속 늘어날 것이다. 부지로 유입되는 지하수 및 빗물의 경우, 기상 및 계절적 요인(ex. 융설) 관련 편차가 크다.

2020년 3월 도쿄전력은 다음과 같이 보고했다. “원자로/터빈 건물로 유입되는 지하수와 빗물의 양이 일 106m³, 지하수 배수 시설에서 원자로/터빈 건물로 이동하는 물의 양이 매일 7 m³이므로 매일 113톤의 오염수가 발생¹⁶한다”는 것인데 해당 수치는 강수량이 0이었던 주간에 측정된 것이다. 2020년 8월 보고 내용은 다음과 같다. “원자로/터빈 건물로 유입되는 지하수와 빗물의 양이 매일 41 m³, 지하수 배수 시설에서 원자로/터빈 건물로 이동하는 물의 양이 매일 6톤으로 매일 47톤이 만들어진다”¹⁷

원전 부지로 유입되어 오염되는 물의 양은 태풍 시즌에 변동이 더 심해질 수 있다. 예를 들면, 2019년 10월 태풍 하키비스의 영향으로 일 650m³ 이상으로 증가했다. 상당히 많은 양이다. 분명한 것은 지하수 오염이 계속 진행되고 있기 때문에, 도쿄전력이 당분간은 오염수를 계속 저장(및 처리)해야 한다는 것이다. 2019년 1월 그린피스가 발표한 바와 같이, 진행 중인 지하수 오염을 2014년에 도쿄전력이 주장한 대로 ‘0’으로 줄이는 것은 도쿄전력의 현재 기술로는 불가능하다. 따라서 도쿄전력은 앞으로 원전 부지에 오염수가 무서운 속도로 축적되는 상황을 맞게 될 것이다.

용융된 핵연료가 남아있는 한, 지하수 오염은 계속된다. 앞으로 만들어질 오염수의 방사성 준위가 훨씬 심각할 것이다. 예를 들어, 후쿠시마 제1원전의 3개 원자로 노심의 경우, 용융 전 스트론튬-90의 농도가 520PBq였던 것으로 추정된다.¹⁸ 그중 태평양으로 방출된 것은 1~3%이다.¹⁹ 나머지 약 90% 이상의 스트론튬-90 대부분은 발전소 내 용융된 노심에 남아있으며, 일본 정부의 오염수 방류 계획에 따라 처분되는 것보다 1,730만 배 많은 양이다. 이 엄청난 양의 스트론튬은 환경에 유입되지 않도록 막아야만 한다.

그러나 이미 일부가 발전소로 흘러들어온 지하수와 섞였고, 도쿄전력은 지하수 오염을 중단시킬 확실한 계획이 없음이 분명하다. 삼중수소와 스트론튬-90은 반감기(방사성이 50%로 붕괴하는 데 걸리는 시간)가 각각 12.5년, 28.8년으로, 이 두개의 방사성 핵종에만 방사성 위험이 약 125~290년 간 존재한다는 뜻이다(일반적으로 반감기 10회까지 위험기간으로 간주). 하지만 오염수에는 그 밖에도 반감기가 더 긴 방사성 핵종들이 다수 포함되어 있다. 예를 들어, 갑상선암을 유발하는 방사성 핵종으로 알려진 요오드-129는 반감기가 1,300만 년에 달한다.



© Shaun Burnie / Greenpeace

다핵종제거 설비(ALPS)의 실패

“오염된 해수와 세슘 제거 설비를 거친 오염수로 1차 테스트를 진행했다. 그 결과, 62개 방사성 핵종을 불검출 수준으로 제거할 수 있는 것이 확인됐다.”²⁰

후쿠시마 제1원전의 다핵종제거설비(이하 ALPS) 3대를 사용한 오염수 처리로 방사성 농도를 낮추는 데 실패했다는 사실이 2018년 8월 공개되었다.²¹ 2018년 9월 28일 도쿄전력은 저장된 오염수 수십만 톤에 위험한 방사성 물질이 포함되어 있으며, 그 농도는 해양 방출 허용 기준보다 높다는 사실을 인정했다.²² 2020년에는 저장된 오염수 72%에 해당하는 78만 톤을 2차 처리하겠다고 발표했다.²³

도쿄전력에 따르면, 처리수 6만 5천 톤 중 스트론튬-90의 농도는 규제기준보다 100배 이상 높다. 일부 탱크는 기준치의 2만 배 수준이다. 스트론튬은 가장 유해한 방사성 핵종에 속하며, 동식물 및 인체에 농축되므로 절대 환경에 유입되어서는 안 된다. 칼슘과 유사한 성질을 보이기 때문에 항골성 물질(bone seeker)이라고 불리며, 백혈병 또는 혈액암 위험을 높인다. 도쿄전력은 그동안 ALPS 처리기술로 방사성 농도를 “배출허용 기준 이하”로 낮출 수 있는지를 분명히 밝히지 않았다. 도쿄전력은 2018년 ALPS의 실패를 인정했다. 공개된 여러 문서를 보면 ALPS가 불검출 수준으로 오염수를 처리 및 정화하지 못한다는 문제를 2013년에 이미 인지하고 있다.²⁵

ALPS 설비가 실패한 데는 이유가 있다. 최선의 기술을 선택한 것이 아니라 가장 저렴한 기술을 선택했기 때문이다. 그린피스는 도쿄전력이 후쿠시마 제1원전 방사성핵종 제거 기술의 효율성을 판단하는 제염계수(DF) 처리 결과를 투명하게 공개하지 않는다는 의혹이 사실이었음을 확인했다.

2018년 6월 컨설팅 엔지니어 존 라지(John Large)는 그린피스 일본사무소의 의뢰를 받아 도쿄전력이 제공한 공개자료 일부를 검토했다. 도쿄전력은 2011년부터 다양한 데이터를 발표해 왔으나, 그 정확성을 독립적으로 입증하는 것은 거의 불가능한 상황이다. 1차 분석 후 그는 도쿄전력 데이터의 정확성이 심각하게 의심된다는 결론을 내렸다. 예를 들면, 2016년 데이터 표에 처리 후 세슘-137의 농도가 30Bq/l로 표기되어 있으며 “해양 배출 허용 기준에 놀랄 정도로 적합한 값”이라고 거의 일관되게 언급되어 있다.²⁶ 도쿄전력은 ALPS 등 처리설비의 제염계수 편차가 크다는 사실을 알고 있었음에도, 어떻게 실제와 다른 정보를 발표한 것일까?

이에 대한 많은 의문과 함께, 도쿄전력이 적어도 5년 전부터 알았던 ALPS의 실패를 7-8년 뒤에야 인정한 이유도 의혹으로 남아 있다.

잘못된 오염수 처리 전략과 선택

퓨로라이트는 원자력 분야에서 다양한 글로벌 경험을 보유한 미국의 용수 분리 기업이다. 2011년 퓨로라이트는 히타치GE 원자력 에너지(HGNE, 이하 히타치GE)와 함께 후쿠시마 제1원전에서 초기 ALPS 테스트 설비를 운영했다. 결과는 긍정적이었다. 퓨로라이트에 따르면, 삼중수소를 제외한 62개 방사성 핵종을 모두 제거할 수 있었다.²⁷ 하지만 ALPS 설비의 구축 및 운영 계약을 따낸 것은 퓨로라이트가 아니라 도시바(최종적으로 히타치GE가 선정)였다. 퓨로라이트는 배제됐다.

이것은 도쿄전력의 의사결정 오점을 입증할 중대한 사실이다. 퓨로라이트는 수처리 분야에서 수십 년 간의 경험이 있으나 도시바와 히타치GE는 경험이 전무했다. 이후 퓨로라이트는 피해 보상 소송을 제기했다. 히타치GE가 퓨로라이트의 영업기밀에 해당하는 설계 정보를 허가 없이 제3자에게 제공하고, 이 정보를 사용해 고성능 ALPS를 설계 및 운영함으로써 비밀 유지 계약을 위반했다는 내용이었다.

퓨로라이트가 히타치GE를 상대로 제기한 소송의 증거자료를 보면, 도쿄전력이 기술, 경험 면에서 더 우수한 것으로 판단되는 설비를 도입하지 않음으로써, ALPS 성능에 부정적인 영향이 있었다. 퓨로라이트는 자사의 기술로 2011년 테스트 가동 중 63개 방사성핵종 중 62개에 대해 불검출 수준에 도달하는 데 성공했으며, 이는 도쿄전력의 시방서와 일치한다고 밝혔다.²⁸ 목표치는 도쿄전력이 명시한 것으로, 도쿄전력은 2014년 말까지도 “²⁹새로운 고성능 수처리 설비로...스트론튬 농도를 불검출 수준까지 낮출 것이다”라는 입장이었다.

중요한 사실은, 도쿄전력이 ALPS의 실패로 추후 검출 목표치를 상향 조정했다는 것이다. 구체적으로 말하자면, 도쿄전력이 원래는 제거하려 했던 위험한 방사성 핵종이 오염수 방류 시 함께 방출된다는 의미다. 계획대로 오염수를 2차 처리한다고 해도, 스트론튬-90, 요오드-129와 같은 방사성핵종의 농도는 2011년 퓨로라이트 기술로 성공했을 때보다 훨씬 높을 것이다.

퓨로라이트는 2017년 7월 도쿄법원 비공개 진술에서 다음과 같이 밝혔다.

“퓨로라이트를 제외하면 도쿄전력이 당초 제시한 검출 기준을 맞출 수 있는 기업이 없다는 사실에는 논란의 여지가 없다. 실제로 도시바, 히타치GE 및 기타 기업들이 나중에 수처리에 실패한 이유도 바로 그 때문이다.”³⁰

퓨로라이트의 처리 기술이 도쿄전력의 목표치를 충족시킨 사실은 2012년 2월 일본 원자력연구개발기구(JAEA)가 독립적으로 확인한 바 있다.³¹ 증거자료에 따르면, 도쿄전력은 2012년에 이미 오염수(삼중수소 제외) 내 알파, 베타, 감마 방출 방사성 핵종 62개 전부의 농도를 줄이는 기술을 확보할 수 있었다. 도쿄전력이 퓨로라이트와 파트너십 계약을 유지하지 않고 도시바와 계약한 것은 ALPS 처리 실패가 발생한 중대 요인이었을 것으로 보이며, 도쿄전력 내부적으로도 이를 우려하고 있었다. 2017년 퓨로라이트는 도쿄전력의 야마시타가 “도시바 그룹이 향후 10년 이상 계속해서 검출 기준을 맞출 수 있을지 매우 우려된다.”³²라고 밝힌 의견을 인용했다.

퓨로라이트가 도쿄지방법원에 제출한 증거 자료에는 자사의 수처리 기술력과 전문성을 상세히 기술한 내용도 포함되어 있는데, 히타치GE 또는 도시바에는 알려지지 않은 내용이었다.³³ 그린피스의 2019년 1월 보고서에 자세히 언급된 바와 같이, 여기에는 흡수제 접촉 시간, pH 조절 등 오염수 처리 기술상 중요한 내용도 포함되어 있었다.

흡수제 접촉 시간에 대해 퓨로라이트는 법정에서 다음과 같이 진술했다. “접촉시간, 또는 흡수제가 오염수와 접촉 상태에 있는 시간을 계산하는 방법은 흡수용량을 흡수탑에 유입되는 오염수의 양으로 나누는 것이다(분당 흡수제를 통과하는 오염수의 양). 테스트에서는 흡수제에서 가장 효과적인 흡수가 가능한 접촉 시간을 찾기 위해 2개 값을

조정했다. 접촉시간이 길어야 하는 흡수제는 처리 시간이 제한적인 설비에서는 사용할 수가 없다. 반대로 접촉시간이 너무 짧으면 다핵종이 충분히 흡수되지 않은 상태에서 물이 흘러나오기 때문에, 흡수제의 실제 성능을 평가할 수 없다. 따라서, 고반응성 비상 정화설비 개발 시 중요한 부분은, 흡수제 평가를 위한 접촉 시간을 설정할 때 너무 길거나 짧지 않게 적절한 균형점을 찾는 것이다. 또한, 최적 접촉 시간 계산에 있어, 실제 설비 규모로 확장할 때 접촉 시간을 그대로 유지해야 한다. 이는 테스트에서 실제 설비 사양을 파악하는 데 매우 중요한 정보가 된다.”

퓨로라이트는 pH-수화학 측면에서 이렇게 주장한다. “이렇게(원고 측 정보3[4]) 각 단계 간 pH를 여러 차례 조절하는 방식은 당시 업계에서 흔히 사용하는 오염수 처리방법과 반대였다. 단계 간 pH를 여러 번 조절하는 것이 최적의 방법이라는 것은 업계에 알려지지 않은 사실이었다...”

퓨로라이트가 설명한 바와 같이,

“방사성 핵종 제거 프로세스에서 각 단계 사이에 pH를 수차례 조절하도록 설계하는 것은 업계의 일반적 방식이 아니었다. 이 방법은 본 건과 일부 유사한, 다른 원전의 용융 사고에 적용된 방법과도 다르다. 다른 오염수 처리 방법을 보면 pH조절을 아예 하지 않거나 최소한으로 하는 경향이 있다. pH를 조절하려면 추가적인 설비, 공정 관리가 필요하고, 작업자들도 더 많은 주의가 필요하며 산성 및 부식성 물질을 취급해야 하기 때문이다.

또한, 이러한 요인들로 인해 문제 발생 가능성이 더 커진다. 후쿠시마 제1원전에서는 발전소 내 여러 저장 탱크에 보관된 냉각수 약 10만m³에서 방사성 핵종을 제거해야 하는 상황이었다. 더군다나 냉각수에 해수와 담수가 혼합되어 있고 염분 농도가 해수 수준으로 높아서 원자로에서 방출되는 방사성 핵종을 제거하는 속도가 느려진다. 담수에서 방사성핵종을 제거했던 타 용융 사례와 비교해서도, 이런 이유로 인해 본 건은 성격이 달랐다.”

퓨로라이트가 도쿄 지방법원에 제출한 증거자료에 따르면, 퓨로라이트는 “후쿠시마 제1원전의 오염수 처리 시, 단계 간 pH조절을 여러 차례 수행하는 것이 최적임을 알아내고 이를 실행하기 위한 가장 효과적인 방법을 실제로 발견함으로써, 오염수 처리 산업의 일반적 관행을 뒤집는 데 성공했다.”

법원은 퓨로라이트에 대한 패소 판결과 함께 흥미로운 결론을 내렸다. 효과적인 흡수제 개발 및 흡수탑 배열 설계에 있어 히타치GE가 퓨로라이트의 정보를 사용했다고 판단할 근거가 불충분하다는 것이었다. 하지만 히타치GE와 도쿄전력은 효과적인 ALPS 설비를 구축 및 운영하지 않았다는 것, 이로 인해 모든 오염수 내 방사성 물질을 불검출 수준으로 처리하는 데 실패했다는 것, 오염수의 72%는 2차 ALPS 처리를 해야 한다는 것이 현실이다. 퓨로라이트 주요 관계자들은 도쿄전력 또는 경제산업성에 자사의 수처리 노하우 및 기술을 공급하기 위해 여러 차례 노력을 기울였다고 밝히고 있다. 소송 전부터 판결 이후에도 이러한 제안은 이루어졌지만, 퓨로라이트는 그때마다 거절당했다고 밝혔다.



2020년 ALPS 2차 처리

도쿄전력은 2020년 10월부터 오염수 2차 처리를 위한 파일럿 테스트를 시작할 예정이다.³⁴ 테스트 처리의 목적은 스트론튬-90, 요오드-129 등 방사성핵종 농도를 배출허용 기준 이하로 낮추는 것이다. 도쿄전력에 따르면, 농도가 배출허용기준의 100배 이상인 오염수 2,000m³를 테스트에 사용하게 된다.³⁵

중요한 것은, 과거 실패 사례를 볼 때 과연 얼마나 효과적일 수 있느냐이다.

이것이 중요한 이유는 고준위의 오염수가 태평양의 방사성 오염을 가중할 상당한 위험이 있기 때문이다. 과거에 실패했던 기술을 동일하게 적용한다면 또 실패하고 말 것이다. 이 경우 오염수는 어떻게 될 것인가? 일본 정부는 이대로 방출할 생각마저 가진 것일까? 후쿠시마 제1원전 탱크에 보관된 오염수의 방사성 핵종 실제 함량은 독립적으로 확인된 바 없다. 그동안의 은폐 사례와 불투명한 정보 공개를 생각하면, 이것은 심각한 문제다.

2020년 3월 도쿄전력은 오염수 2차 처리 목적이 “환경으로 방출되는 방사성 물질의 양을 최대한 줄이기 위해서”라고 설명한 바 있다.³⁶ 이는 도쿄전력이 ALPS 설비를 통한 처리에 실패했음을 사실상 인정하고, 오염수의 방사성 물질 함량을 불검출 수준으로 낮추겠다는 기존의 약속을 철회하는 것이다. 퓨로라이트 CEO 스티브 브로디(Steve Brodie)가 2012년 경고했듯이, “오염수를 정화하여 해양으로 안전하게 방출하기 위해, 62개 방사성핵종 모두 불검출 수준으로 낮추는 것은 지역사회, 어민, 농민, 인접국, 정부 기관에 모두 중요한 사안이다. 62개 방사성 핵종 중 어느 하나라도 불검출 수준에 도달하지 못하면, 도쿄전력은 저장 탱크를 추가 설치해야 할 것이고, 만족스러운 솔루션이 개발될 때까지 탱크 파열, 누수 위험에 노출될 수밖에 없다.”³⁷

ALPS 실패로 인해 오염수 위기는 후쿠시마, 기타 일본 지역, 그리고 국제적으로 여전히 큰 논란이 되고 있다. 2차 처리가 오염수의 위험한 방사성 핵종 농도를 배출허용기준 이하로 낮추는 데 성공할 수 있을지는 지켜볼 일이다. 도쿄전력은 검출 기준을 상향 조정하여 방사성 물질을 최대한 없앤다는 약속을 이미 오래전에 저버렸다.

스트론튬-90 및 기타 유해물질

일본 정부는 환경으로 방출될 방사성 핵종의 위험성을 의도적으로 축소하고 있다. 유해 방사성 핵종에는 방사성 스트론튬, 요오드, 플루토늄이 포함된다. 스트론튬-90은 가장 유해한 방사성 핵종에 속하며, 동식물 및 인체에 농축되므로 절대 환경에 유입되어서는 안 된다. 칼슘과 유사한 성질을 보이기 때문에 항골성 물질(bone seeker)이라고도 불리며, 백혈병 또는 혈액암 위험을 높인다.

우즈홀 해양연구소(Woods Hole Oceanographic Institute)의 켄 뷔슬러(Ken Buessler)가 최근 보고한 내용에 따르면,³⁸ 스트론튬과 같은 고준위 방사성 물질은 해양 생물 또는 해저 침전물에 더 쉽게 유입된다. 예를 들어, 탄소-14는 어류 내 생물농축 계수가 삼중수소보다 5만 배 높다.³⁹ 또한, 코발트-60 등의 동위원소는 최종적으로 해저 침전물에 혼합될 가능성이 30만 배 높다.⁴⁰ 따라서 해수 중 삼중수소의 거동 모델은 다른 방사성 물질의 이동을 파악하는 데 사용할 수 없다. 삼중수소는 빠르게 확산 및 희석되기 때문이다. 방사성 오염수의 방류 영향을 평가하기 위해서는 각 탱크에 남아있는 동위원소를 어떠한 방식으로든 2차 처리한 후 전체적으로 파악해야 한다. 현재 보고된 9개 동위원소 뿐만 아니라, 플루토늄 등 다양한 방사성 물질의 양을 면밀히 파악해야 한다.⁴¹

일본 정부가 후쿠시마 제1원전에서 고준위 방사성 오염수를 방류하기로 한 배경은 전체적인 맥락에서 살펴보아야 한다. 한 예는, 2011년 3월 이후 이미 막대한 양의 방사성 물질이 태평양에 방류되었다는 사실이다. 예를 들어, 2011년 5월부터 2014년 12월까지 세슘-137의 방류량은 6개 호기를 운영했던 유럽 최대 원전 그라블린에서 50만 년 동안 방류한 양에 해당한다.⁴²

더 위협적인 사실은 기존의 오염수 방사성 물질이 발전소 내 잔존 방사성 물질 중 극히 일부에 불과하다는 것이다. 예를 들어, 후쿠시마 제1원전 3개 원자로 노심에는 용융 전 520PBq의 스트론튬-90이 남아있다.⁴³ 이후 태평양으로 방출된 것은 1~3%로 그 자체도 상당한 양이다.⁴⁴ 하지만 스트론튬-90 대부분은 발전소 내 용융된 노심에 남아 있으며, 이는 일본 정부의 오염수 100만 톤 방류 계획에 따라 처분되는 것보다 1,730만 배 많다. 이 엄청난 양의 스트론튬-90은 환경에 유입되지 않도록 막아야만 한다. 그러나 이미 일부가 발전소로 흘러들어온 지하수와 섞였고, 설명한 바와 같이 도쿄전력은 지하수 오염을 중단시킬 확실한 계획이 없음이 분명하다. 스트론튬-90과 삼중수소는 반감기(방사성이 50%로 붕괴하는 데 걸리는 시간)가 각각 28.8년, 12.5년으로, 이 두 개의 방사성핵종에만 방사성 위험이 약 125~290년 존재한다는 뜻이다 (일반적으로 반감기 10회까지 위험기간으로 간주). 하지만 오염수에는 그 밖에도 반감기가 더 긴 방사성핵종도 다수 포함되어 있다. 예를 들어, 요오드-129는 반감기가 1,350만 년에 달한다.

오염수 내 방사성 탄소-14

“탄소-14의 반감기는 5,730년이기 때문에, 환경으로 유입된 탄소-14로 인한 선량은 수 세대에 걸쳐 지방, 지역, 세계 인구에 전달될 것이다.”⁴⁵

도쿄전력과 일본 정부는 후쿠시마 제1원전의 오염수 관련 정보를 소통할 때, 주로 삼중수소만 다루고 스트론튬, 세슘, 요오드, 플루토늄 등에 대해서는 그만큼 언급하지 않는다. 또, ALPS가 62개 방사성핵종을 제거할 수 있는 시스템이라고 홍보해왔다. ALPS에서 제거되지 않는 한 가지 방사성 동위원소는 삼중수소이며, 이는 방류해도 된다는 것이었다. 하지만 이는 실제와 다르다.

원자로 가동 중 생성되는 주요 방사성 물질 중 탄소-14(C-14)가 있다. 탄소-14는 반감기가 5,730년이며, 베타 방사선을 방출한다. 사용 후 핵연료 내 탄소-14의 주요 생성원은 질소 (연료 내 불순물 및/또는 첨가제) 및 산소 (연료 내 UO₂) 중성자 활성화이다. 탄소-14는 사용 후 핵연료 내에 유지된다. 사용 후 핵연료를 화학적으로 재처리하면 탄소-14는 기체 및 액체 형태로 방출된다(실제로 지구 환경에 유입되는 탄소-14의 가장 큰 원인은 재처리 시설로, 프랑스 라 헤이그, 영국 셀라필드 등 주로 유럽에 위치하고 있다). 후쿠시마 사고로 인해 기체 및 액체 탄소-14가 후쿠시마 및 기타 일본 지역의 환경으로 방출되었다.

탄소-14는 탄소 순환 사이클에 유입되는데, 이는 고체, 액체, 기체 상태의 유기 및 무기 산소 때문에 매우 복잡하다. 간단히 말해, 탄소-14는 모든 생물체에 유입되며 농축 계수는 각기 다르다.⁴⁶ IAEA 보고 내용과 같이, “인체 내에서 탄소-14의 물질대사와 동적 특성은 일반적인 탄소와 동일하다. 흡입한 탄소-14는 폐 내 공기와 빠르게 균형을 이루어, 체내 조직의 여러 부분으로 유입된다. 탄소-14의 생물학적 반감기는 약 40 일이다. 호흡을 통해 체내에 축적되는 탄소-14는 오염된 음식 섭취로 인한 것에 비하면 미미한 것으로 나타났다. 또한, 탄소-14는 먹이사슬에 쉽게 축적될 수 있다. 연구에 따르면, 어류와 연체동물의 농축계수는 5,000, 토양 침전물은 2,000이다.”⁴⁷

반감기가 5,730년이며 모든 생명 물질의 기본 구성요소 중 하나인 탄소-14는 장기간에 걸쳐 세계 인체집단선량의 주요 원인이 된다. 세계 인체집단선량은 피폭인구 집단 전체에 대한 총 선량에 해당하는데, 선형선량 반응 관계에 따라 인체 영향을 나타내는 숫자로 표시할 수 있다.⁴⁸ 프랑스 원자력안전방사선방호연구소(IRSN)의 설명에 따르면, “탄소-14는 세포 구성성분(단백질, 핵산), 특히 세포 DNA에 유입되기 때문에 방사선 생물학 관점에서 흥미로운 물질이다.”⁴⁹ 이로 인해 DNA가 손상되면 분자 분열이 일어나며, 세포가 망가지거나 유전적 돌연변이가 발생할 수 있다.”⁵⁰

이 사실이 후쿠시마 제1원전 오염수 문제와 어떤 관련이 있을까?

ALPS는 탄소-14를 제거하도록 설계되지 않았다. 2차 처리를 통해서도 탄소-14는 제거되지 못할 것이다. 따라서, 일본 정부가 오염수를 태평양에 방류하는 계획을 그대로 실행한다면, 탱크 내 탄소-14 전체가 환경에 방류되는 것이다. 지난 10년간 ALPS를 기술 성공 사례로 홍보해왔지만, 도쿄전력, 경제산업성 및 기타 일본 정부 기관은 믿기 힘들 정도로 이를 사실대로 설명하지 않았다. 이들은 대부분 탄소-14를 언급하지 않는다. 일본 정부는 ALPS 처리 후 남아있는 동위원소는 삼중수소이며 이로 인한 영향이 없다고 계속해서 강조해 왔다. 최근 2020년 6월에만 해도 일본 외무성은 UN 인권특별보고관에게 “삼중수소를 제외한 대부분의 방사성 핵종을 본 정화시스템(ALPS)에서 제거한 후, 탱크 내에 ALPS 처리수를 안전하게 저장한다... 따라서 탱크에 저장된 ALPS 처리수는 오염수에 해당하지 않는다.”⁵¹ 라고 설명한 바 있다.

일본 정부의 주장과 달리, 다량의 방사성 탄소-14, 스트론튬-90, 플루토늄, 삼중수소 등 기타 방사성 물질이 포함된 지금의 저장량은 고준위 방사성에 오염되었다고 표현할 수 밖에 없다.

도쿄전력, 중대한 오차 발생 사실 인정

2020년 8월 27일 도쿄전력은 탄소-14의 존재가 저장된 오염수의 베타 방사선 측정의 주요 요인임을 처음으로 인정했다.⁵² 이후 2020년 9월 10일 또 다른 문서가 발표되었다.⁵³ 도쿄전력은 탄소-14 문제를 인정하기까지 왜 그렇게 오랜 시간이 걸렸는지는 설명하지 않았다. 8월에 발표된 문서에서 도쿄전력은 “...ALPS 배출구 검사에서 측정된 법규에 따른 비율의 합계와 탱크 샘플링을 통해 파악한 법규에 따른 농도의 합계 사이에 큰 편차가 있음이 발견되었다.”⁵⁴ 다시 말해 총 베타 방사선량이 이전까지 측정된 모든 베타 동위원소의 합보다 컸다는 것이다. 또한 일본 정부는 “총 베타 값과 초기 핵종 측정 값 사이에 편차가 발생한 원인이 탄소-14”임을 확인했다.

9월 발표된 문서에서는 ALPS 2차 테스트를 10월 중 진행 예정이며, 오염수 중 “방사성 탄소(C-14)와 삼중수소(H-3) 외에, 제거 대상 방사성 핵종 62종” 검출 여부를 측정할 것이라고 설명하고 있다. 이는 2차 ALPS 처리된 오염수에서 탄소-14를 특정하여 측정하겠다는 도쿄전력의 계획이 처음으로 알려진 사례였다. 사실 2011년 이후 탄소-14에 대해 드물게 언급한 것이 2014년이었는데, 도쿄전력은 “오염수 내 탄소-14 농도는 불검출 수준이었다”⁵⁵고 보고했다. 이것은 탄소-14를 실제로 측정해 얻은 값이 아니라, 값을 추정하기 위한 참고 값으로 전-후 세슘 농도를 사용해 계산한 값이었다.

방사성 탄소-14의 장기적 위험을 볼 때, 그리고 후쿠시마 제1원전 재난이 시작된 지 거의 10년이 되었음을 고려할 때, 이것은 도쿄전력과 일본 정부의 또 다른 대대적인 실패라고 할 수 있다. 방사성 탄소-14 방류는 한반도와 중국 해역 뿐만 아니라, 후쿠시마, 기타 일본 지역의 해안에 서식하는 해양 생물에 방사성 물질이 지속해서 생물에 축적되는 불가피한 결과를 낳을 것이다. 설명한 바와 같이, 탄소-14 해양 방류로 집단 선량에 영향을 주는 주된 경로는 인간이 오염된 해산물을 섭취하는 경우다. 반감기가 길다는 것은 장기간 해류를 따라 세계적으로 확산할 수 있음을 의미한다. 일본 정부는 후쿠시마나 기타 일본 지역 주민에게도, 국제사회에도 이러한 중요한 사실을 제대로 알리지 않고 있다.

사실 저자가 후쿠시마 오염수 관련 탄소-14의 유해성에 관해 알게 된 것도 2019년 11월이었다. 경제산업성이 삼중수소 방류로 인한 위험이 낮다는 것을 설명하기 위해, “생물체”에 더 큰 영향을 주는 방사성 동위원소로 탄소-14를 예로 든 것이다.⁵⁶ 당시 정확한 의도는 파악하기 어려웠으나, “삼중수소와 주요 방사성 핵종이 생명체에 미치는 영향 비교”라는 표를 통해 경제산업성은 삼중수소의 값을 1로, 탄소-14의 값을 32로 표기했다. 이를 통해 탄소-14가 삼중수소보다 생명체에 32배 더 유해하다는 것을 스스로 보여준 것이다. 그린피스도 탄소-14가 삼중수소보다 인체에 더 심각한 영향을 준다는 경제산업성의 분석 결과에 동의한다.

액체 폐기물에서 탄소-14 제거가 가능하다는 사실 때문에 문제는 더 복잡해진다.⁵⁷ 도쿄전력과 일본 정부는 탄소-14 제거 방안을 수립하지 않기로 이미 결정한 듯 하다. 그 결과, 오염수 방류가 진행되면 탄소-14 전체가 환경으로 유입되고, 이로 인한 피폭 영향이 발생하여 수만 년 동안 지속될 것이다.

삼중수소 위험 분석의 문제점

도쿄전력은 방사성 삼중수소에 관한 과학적 사실을 왜곡하며 무시하고 있다. 도쿄전력은 일어 및 영어로 발표한 문서에서 삼중수소가 “대부분 물 분자 내 수소로 존재한다”고 설명하고 있다.⁵⁸ 경제산업성 소위원회는 삼중수소 일부가 유기결합삼중수소(OBT)가 된다는 것을 인정하고 있으나, 도쿄전력은 이 내용을 구체적으로 설명하지 않는다. 삼중수소에 대한 도쿄전력의 설명을 보면, 삼중수소가 어떤 형태로든 인체에 유입되어 조금이라도 방사선 영향을 주는 것은 불가능하다는 느낌을 받게 된다.

일본 정부는 처리된 오염수의 방류 계획을 정당화하고자 2019년 9월 다음과 같이 사실을 왜곡하는 내용을 발표했다. “삼중수소는 물과 유사한 성질을 갖기 때문에, 삼중수소가 인체 및 특정 생물체 내 축적되는 경우는 발견된 바 없다.”⁵⁹

일본 환경청은 유기결합삼중수소에 관한 일체의 언급을 생략했다. 유기결합삼중수소 등 오염수 내 방사성 물질에 대해 그린피스를 포함한 일본 시민단체들의 문제 제기가 있자 소위원회는 오염수 관리 방안을 검토하는 업무를 맡았으며 적어도 다음과 같은 사실을 인정했다.

“삼중수소는 약한 베타선만 방출하며, 내부 피폭을 통해 인체에 영향을 줄 수 있다.”, “인체에 유입된 삼중수소수 중, 전환 효과를 고려하면 유기결합삼중수소로 전환되는 비율은 약 5~6%이다... 유기체 내 유기결합삼중수소의 반감기는 40일 또는 약 1년 두 가지로 나뉜다... 이를 볼 때, 유기결합삼중수소의 영향은 삼중수소수보다 2~5배 크다.”⁶⁰

하지만 소위원회는 해양 방류에 대한 유기결합삼중수소 영향 검토 내용은 더 다루지 않는 것으로 보인다. 이는 잘못된 것이다. 2020년 2월 소위원회는 “해양 방류 시, 최소검출농도 이하인 방사성 농도는 불검출 혹은 0으로 추정된다. 수증기 방출 시, 삼중수소수(HTO)에서 전환된 유기결합삼중수소의 영향도 고려한다.”라고 보고했다.⁶¹

일본정부와 도쿄전력은 삼중수소의 위험성을 의도적으로 축소 및 왜곡하고 있다. 유기결합삼중수소의 역할을 제대로 설명하지 않음으로써, 향후 오염수 방류로 인한 잠재적 영향에 대해 정확한 과학적 정보를 제공하지 않고 있다. 이안 페리(Ian Fairlie) 박사는, “ICRP/IAEA 선량 모델은 일회적인 방류를 위한 것이며, 다회 방류 시에는 유기결합삼중수소 농도가 점차 증가한다는 것이 문제”⁶²라고 지적한다.

이러한 사실이 해양 방류 선량 계산에 의미하는 바는 무엇일까? 오염된 해산물 소비로 인한 유기결합삼중수소 선량을 일본 정부와 도쿄전력이 과소평가하고 있다는 의미다.⁶³ 페리 박사는 다음과 같이 설명한다.

“현행 ICRP 모델(1989)에서는 삼중수소수(HTO) 섭취 후 100% 흡수되어 혈액에 유입된다고 가정한다. 삼중수소수의 전환반감기는 10일로 추정된다. 섭취한 삼중수소수의 5%는 유기결합삼중수소가 되며, 삼중수소수 섭취로 인한 유기결합삼중수소 선량은 무시해도 안전한 수준이라고 가정하고 있다. 동물 실험에서 유용한 결과를 얻었는데, 유기결합삼중수소 선량을 반드시 고려해야 한다는 것이 확인된 것이다. Commerford et al (1982)은 쥐를 순간적으로 삼중수소수에 피폭시킨 지 8주 후, 모든 잔여 삼중수소가 DNA 및 히스톤과 결합했음을 발견했다.⁶⁴ 유기결합삼중수소와 결합한 세포 핵단백질은 수명이 훨씬 길었다. 논문 저자들은 유기결합삼중수소 선량이 삼중수소수 선량을 초과할 것이라는 결론을 내렸다. 또한, Trivedi et al (1997)은 인체에 삼중수소수 급성 투여 시 유기결합삼중수소 결합 비율이 ICRP가 추정할 5%가 아닌 3~9% 범위라는 결론을 내렸다.”⁶⁵

문제는 ICRP의 생물동학적 모델에서는 삼중수소에 대한 만성 피폭을 고려하지 않는다는 점이다. 삼중수소를 하루 24시간 방출하는 시설로부터 바람이 부는 방향에 있는 생



© Shaun Burnie / Greenpeace

물체의 경우에는 중요한 부분이다. ICRP는 급성 피폭이 단순히 반복되는 것을 만성피폭으로 본다.

즉, 각 사례에서 선량 대부분이 삼중수소수이고 유기결합삼중수소로 인한 영향은 전혀 없으며, 다음 급성 피폭 전에 삼중수소수와 유기결합삼중수소가 배설된다는 주장이다. 하지만 이것은 사실과 다르다. 동물 실험에 따르면, 삼중수소수 만성 피폭 이후 대부분의 선량은 유기결합삼중수소에서 기인한다. 예를 들어, Commerford, Carsten and Cronkite (1977)는 쥐에 장기간 삼중수소를 만성 투여하던 것을 중단한 지 2~3일만에 대부분의 삼중수소 선량이 유기결합삼중수소에서 발생한 것임을 확인했다.⁶⁶ Rodgers (1992)는 유기결합삼중수소의 제거 속도가 훨씬 느리기 때문에 만성 피폭 후 쥐의 추정 방사선량에서 유기결합삼중수소가 1차적 결정 요인이 된다는 결론을 내렸다.⁶⁷

페리 박사는 삼중수소수 만성 투여 시 유기결합삼중수소 농도는 더 높아지는데, 투여 기간에 따라 달라진다. 수개월 간의 만성 피폭 사례에서, 거의 50년 전의 연구 결과를 보면 체내에서 교환가능한 수소 결합 비율이 고정되어 있어(~30%) 삼중수소에 의한 생체분자 T-라벨링은 이론상 최댓값이 존재했다.⁶⁸ 이를 뒷받침하는 증거도 있다. Rodgers (1992)는 쥐에 삼중수소수를 투여해 안정적인 T전환 상태를 확인하고자 했다. 56일 후 유기결합삼중수소 농도는 체내 삼중수소수 농도의 22%까지 상승했다.

실험이 계속되었다면 결과가 어떻게 되었을지는 분명하지 않다. 많은 근거자료에 따르면, 대사 반응으로 삼중수소가 계속 소진되면서 유기결합삼중수소 농도가 서서히 지속해서 증가했을 것으로 보인다. 반감기가 매우 길기 때문에 결국 유기결합삼중수소 농도는 체내 삼중수소수 농도와 균형을 이룰 것이다. 이러한 균형 농도에 대한 자료는 첨부 3에 기재되어 있다. 가장 중요한 것은 유기결합삼중수소/삼중수소수 비율이 1에 해당 하는, 자연 발생 삼중수소 피폭 연구 결과다. 본질적으로, 동물실험에서 얻은 증거와 주변 삼중수소 농도/환경 연구에서 얻은 증거 사이에는 차이가 있다. 기존의 생물동학 실험 기간이 제한적이기 때문일 것이다. 체내 유기결합삼중수소 반감기는 몇 년에 이르는 긴 기간이기 때문에 이러한 실험은 몇 년간 지속할 필요가 있을 것이다.⁶⁹

프랑스 칸에 위치한 ACRO 방사선 연구소의 데이빗 보일리(David Boilley) 박사는 일본정부와 도쿄전력의 접근법에 문제가 있다고 말한다. “지속적 해양 방류를 전제하며 일반적으로 총 수소 중 방사성 수소의 비율이 해수와 유기체에서 동일한 것으로 가정했다. ...경제산업성 그룹이 어떻게 계산한 것인지 모르겠다. 세부적인 설명이 없다.

유기물질 내 삼중수소의 생물축적 문제에 대해서는 프랑스에서 활발한 논의가 있었다.⁷¹ 일부 해양 동물에서 농도가 예상보다 높은 것으로 나타났기 때문이다... 만약 (정부가) “평판이 저해되는 것”을 막고자 한다면, 계산법에 대해 상세히 설명해야 할 것이다.” 유기결합삼중수소에 대해 잘못된 보고를 하는 것을 놓고 내릴 수 있는 결론은 하나뿐이다. 일본 정부가 오염수 방류 계획에 반대하는 목소리를 의도적으로 줄이려 한다는 것이다.

2019년 12월 삼중수소의 환경적 거동에 대해 과학적 분석이 중요함을 강조하는 연구가 발표되었다. 이에 따르면, 삼중수소는 퇴적이 발생하는 저수지에 유기결합 형태로 수십년간 잔류한다.⁷² 네이처(Nature)에 발표된 이 연구에 따르면, “퇴적이 발생하는 저수지에 삼중수소가 유기결합삼중수소로 장기간 잔류한다는 직접적인 증거는, 비록 가설이기는 하나 이것만큼 중요한 발견으로서, 우리가 알기로는 지금까지 확인된 바가 없었다.”

논문 저자들은 “일부 유기결합삼중수소(<30%)는 주변 환경의 물분자와 쉽게 교환될 수 있으나, 대부분의 유기결합삼중수소는 장기간 분리된다. 유기물(OM) 내에서 존속 여부는, 해당 유기 혼합물의 생분해 속도에 주로 달려있다. 토양 및 하천계에서는 미립자 OBT에 영향을 주는 생분해 프로세스때문에, 용존 유기결합삼중수소 그리고 그 다음에는 자유 이동성 수소가 발생해, 삼중수소수 물분자로 빠르게 산화될 수 있다. 대부분의 자연환경계를 구성하는 생화학적 균형에 따라, 자유 및 결합 형태의 삼중수소 농도는 유사할 것으로 보이므로 유기결합삼중수소/삼중수소수 비율도 거의 일치할 것이다. 그럼에도 불구하고, 삼중수소를 환경에 인공적으로 주입함으로 인해 발생하는 미세한 변화 때문에 이러한 균형은 바뀔 수 있다. 수괴(water mass)는 유기물보다 더 빠른 속도로 재활용되기 때문이다. 논문 저자들의 결론은 “유기결합삼중수소/삼중수소수 불균형에 대해 현재로서 합의된 바는 다음과 같다. 자유 형태의 삼중수소는 주변 환경과 빠른 속도로 교환되나, 유기물에 통합된 삼중수소는 장기간 존속된다는 것이다.”⁷³

Eyrolle, F et al은 “사고 후 삼중수소 배출 관리에 대해 즉각적인 우려를 제기하게 하며, 이는 후쿠시마 사고에 직접 적용되는 부분이다.”⁷⁴라고 결론을 내리고 있다.

일본 정부와 도쿄전력이 유기결합삼중수소를 포함한 방사성 삼중수소의 해양 방류 영향 제대로 설명하지 못하는 것은 어떤 식으로도 정당화될 수 없다.

삼중수소 분리 기술

ALPS 설비의 실패는 처리된 오염수에서 방사성 삼중수소를 제거하는 기술을 개발하지 않기로 한 결정으로 악화됐다. 그린피스가 2019년 1월 보고서에서 설명한 바와 같이, 도쿄전력은 삼중수소 제거기술을 개발할 수 있었다. 그러나, 도쿄전력과 일본 정부 기관들은 미국 에너지부뿐만 아니라 큐리온 등 국제 원자력 기업이 제안한 기술을 무시해버렸다. 큐리온의 경우 자사의 모듈러 탈삼중수소 시스템(MDSTM)이 “오염수 80만m³에서 삼중수소수를 제거하여 잔존 방사성 물질의 양을 1m³까지 줄일 수 있다”고 일본 정부에 설명했다.⁷⁵ 예상 소요 기간은 5~8년, 설비 설치 비용은 약 10억 달러에 연간 운영 비용 수억 달러가 추가적으로 필요했다.

2016년 4월 19일, 일본 정부의 오염수 소위원회는 이러한 삼중수소 제거 기술 중 어떤 것도 후쿠시마 제1원전에 적용할 수 없다는 잘못된 결정을 내리게 된다.⁷⁶

이번에도 일본 정부는 기술의 가용성을 기준으로 판단하지 않고, 삼중수소를 제거하는 것이 불가능하다고 밝히며 계속 기만적인 태도를 유지하고 있다. 이러한 결정의 배경은 오로지 비용이다. 태평양 방류가 저준위 삼중수소수 처리에 최적이라는 결론을 내린 것도 이 때문이다.⁷⁷ 당시 큐리온의 최고기술책임자 개탄 본험(Gaetan Bonhomme)은 “비용이 과하다고 생각하는 사람도 있을 것이다. 하지만 무언가에 비해서 비싸다는 것인가? 이 오염수를 방류해야 한다고 말하는 사람들을 만나서 비용에 관해 얘기해보고 싶다... 어떤 방법을 도입하려고 하는가? 영향은 무엇인가? 피해 입을 사람들에게 어떻게 보상할 것인가...”⁷⁸

비용은 높은 것은 사실이다. 후쿠시마 제1원전 오염수의 경우, 100만 톤을 처리하는데 드는 예상 비용은 상당히 범위가 넓다. 큐리온에 따르면, 설비 건설 비용 10억달러에 운영 비용 연간 1억달러가 필요하다.⁷⁹ 미 에너지부PPNL이 제안한 기술을 도입하면 예상 비용은 더 높아지는데, 리터 당 60~180달러로 총 500~1,800억달러에 달한다.⁸⁰ 이것이 원전 운영으로 인한 비용이자 위험이다. 후쿠시마 제1원전 사고 수습에는 앞으로도 수천억 달러의 비용이 들 것이다.

2019년 3월 일본경제연구센터(JCER)는 오염수 보관 비용을 포함, 후쿠시마 제1원전 핵 재난 비용 추산을 수정 발표했다. 총 비용은 35~81조 엔(3,100~7,200억달러)으로 추산되었다.⁸¹ 태평양 방류 없이 발전소 내에 오염수를 저장하는 비용은 51조 엔(4,800억 달러)로 예상된다. 이것은 t당 2,000만 엔(17만 9,000달러) 기준으로, 미 에너지부 기술 도입 시 소요되는 최대 비용에 가깝다. 방류의 경우 40년 간 3,000억엔(27억달러)의 비용이 예상되므로, 일본 정부가 왜 방류를 선호하는지 쉽게 짐작할 수 있다.

일본 정부는 후쿠시마 제1원전의 오염수 위기 해결 일정으로 2020년을 목표로 삼고 있다. 전혀 신빙성이 없다. 오염수 전체를 재처리하는 데만 약 5~6년이 소요되며, 그 효과성에 대한 의문도 여전히 남아있다. 오염수의 양은 앞으로 계속 늘어날 것이다. 중/장기적으로 탱크에 저장하면서 처리 기술을 동시에 개발하는 것이 유일한 대안이다.



Shaun Burnie / Greenpeace

오염수 해양 방류 대안인 장기 저장

일본 정부가 오염수 해양 방류를 주장하는 주된 근거로 장기 저장이 불가능하다는 점을 든다. 경제산업성의 『ALPS처리수 취급에 관한 소위원회』는 일본 정부 기관 중에서 이 사안을 가장 많이 검토했다고 할 수 있다.⁸² 소위원회가 제출하는 보고서는 정부의 사결정의 근거가 되는 것인데 다양한 저장 방안이 가능하다고 제시하고 있다. 문제점도 있고 시간도 소요되지만, 장기 저장은 실현 가능한 대안이다. 하지만 근본적으로는 그 어떤 대안도 지금과 같은 고준위 방사성 오염수가 생기지 않도록 하는 것에 비해 턱없이 부족한 것임은 맞다. 이것이 후쿠시마 제1원전 3개 호기 원자로 용융으로 발생한, 현재 진행형인 재난의 현실이다.

그린피스는 일본 정부의 전문가 패널 역시 장기 저장이 가능함을 제시하고 있다는 점에 주목한다. 장기 저장을 통해 삼중수소를 포함한 일부 방사성 물질의 방사능 위험은 줄일 수 있다. 장기 저장이 환경을 방사성 오염에 노출하지 않은 가장 피해가 적은 방식이다.

오염수 소위원회의 2020 보고서

2020년 정부 소위원회는 “기존 계획에 따라 2020년 말까지 총용량 137만 m³의 탱크를 추가 설치하더라도, 2022년 여름이면 용량 한계에 도달할 것으로 예상되어 계획 이상의 탱크 설치에 공간 제약이 있다.”⁸³라고 보고했다.

소위원회는 후쿠시마 제1원전 부지에 대용량 탱크를 설치하는 방안을 검토했으며, 기존 부지 내에 설치하는 한 “일반 탱크 대비 저장용량이 유의미하게 늘어난다고 볼 수 없다”는 결론을 내렸다.⁸⁴ 그러나, 후쿠시마 발전소 내 계속 저장과 소외 저장, 이 두 가지는 환경 방류에 대한 대안이 될 수 있다는 근거를 제시하고 있다.

소위원회는 후쿠시마 제1원전 경계 바깥에 추가 부지를 확보하는 방안을 중요한 분석 내용으로 다루고 있다. 그린피스를 포함한 여러 단체가 언급한 바와 같이, 후타바 및 오쿠마 마을은 후쿠시마 제1원전이 위치한 지역으로 방사성 고오염 지역이며 거주민들이 대부분 철거한 상태다. 지난 몇 년간 2개의 대형 핵폐기물 저장 부지를 건설 중인데, 이러한 “임시 저장 시설”은 거의 10년에 걸친 제염 작업에서 발생하는 오염토 수백만 톤을 저장하기 위해 지정한 곳이다.

소위원회는 소외 저장 방안을 검토하면서 규제 요건뿐만 아니라, 파이프라인 및 차량 이동도 함께 고려하고 있다. 후쿠시마 제1원전에서 소외 부지로 오염수를 운반하는 경우, “법 요건에 맞는 운반 설비도 구축해야 하며, 운반로 상에 있는 지자체의 이해도 구해야 한다.”⁸⁵

규제 측면에서는 “ALPS 처리수를 저장한다는 것은 방사성 물질 취급을 의미하므로, 『핵원료물질, 핵연료물질 및 원자로 규제에 관한 법(이하 “원자로 규제법”)』에 따라 방사성 폐기물 저장 시설로서 사업 허가를 득하고, 해당 법에 따라 방사선 질병 예방 조치, 안전 검사 및 물리 방호 검사 등을 이행해야 한다. 방사성 물질 저장 시설을 신규 설치하기 위해서는 적절한 설비, 다양한 사전 조율, 승인 절차 등이 필요하며 이를 위해서는 상당한 시간이 소요될 것”⁸⁶이라는 내용이 포함되어 있다.

소위원회는 필요한 사항을 정확히 파악하고 있을 뿐 아니라 이것이 효과적인 방안임을 인정하고 있다. 오염수 저장을 위한 보호 조치가 필요하다는 평가는 ALPS 처리 오염수의 위험성을 분명히 보여주는 것이다.

소위원회는 오쿠마와 후타바의 임시 저장 시설 설치와 부지를 확보하는 구체적 방안도 검토했다. 원전이 위치한 지역, 후쿠시마현 그리고 중앙 정부 간의 합의에 따라, 핵폐기물을 영구처분하기 위한 최종 부지를 후쿠시마현 외부에 30년 내, 즉 2050년까지 확보할 예정이다. 소위원회는 “중장기 로드맵에 따르면 후쿠시마 제1원전 폐로 작업은 30~40년 내에 완료하는 것이 목표다. ALPS 처리 오염수의 처분은 원자로 규제법 폐로 관련 조항에 명시된 “핵연료물질로 오염된 물질의 처분”에 해당한다. ALPS 처리 오염수 처분은 폐로 작업에 속하며, 폐로 작업 자체도 ‘후쿠시마 재건’과 ‘폐로’라는 2대 원칙을 전제로 마무리되어야 한다. 따라서, 폐로 완료 시점까지 오염수를 계속 저장해야 한다.”⁸⁷

물론 이러한 중장기 로드맵은 신빙성이 없고, 향후 수십 년에 걸쳐 여러 차례 수정이 예상된다. 어떤 정부 기관도 언급하고 있지는 않지만, 이는 자명한 사실이다. 오쿠마와 후타바로 운반된 핵폐기물 토사 수백만 톤은 30년 이내 제거는 확실히 어렵다. 일본에는 후쿠시마 제1원전의 폐기물을 받아줄 다른 현이나 장소가 없다. 오염수 장기 저장 방안은 일본 정부와 도쿄전력의 주장을 약화하는 것이다. 이들은 수백만 톤의 용융 연료와 수백만 톤의 오염된 토양 등 후쿠시마 제1원전 재난으로 인해 발생한 핵폐기물 전체를 이번 세기 중반까지 제거할 수 있다고 주장해왔다. 2011년 3월 발생한 후쿠시마 사고 10주년을 앞둔 상황에서, 정부의 우선순위는 수조 엔을 쏟아 부어가며

만들어 낸 이 주장을 프로파간다의 핵심으로 유지하는 것이다. 수십 년 내에 후쿠시마 제1원전의 효과적이고 완전한 폐로가 가능하다는 것이다.

소위원회는 “오염 토양과 폐기물을 저장하기 위해 부지 매입 및 시설 준비 작업을 계속 진행해야 한다. 소외 부지는 이미 임시 저장 시설 목적으로 확보된 것이기 때문에 다른 목적으로 이를 사용하여 후쿠시마 제1원전 부지를 확장하는 것은 어려워 보인다.”라고 밝히고 있다.⁸⁸

ALPS 처리 오염수 저장 공간 확보에는 기술적, 공학적 또는 법적 장벽이 존재하지 않는다. 정치적 의지의 문제일 뿐이다. 하지만 정부가 저장 방안을 마련하지 않기로 결정한 것은 편의주의에 기반한다. 오염수의 해양 방류가 가장 저렴한 방안이기 때문이다.

추가적인 저장 부지 확보를 위해 “방사성 폐기물을 소외로 반출하거나 탱크 내 계속 저장을 위해 부지를 확장하기 위해서는 상당한 조율 작업과 시간이 소요될 것이다. 지자체 등의 이해를 구하는 것과 더불어, 저장 시설 위치 결정, 방사성 폐기물 저장 시설 승인 확보 등이 필요하기 때문”⁸⁹이라는 소위원회의 분석이 틀린 것은 아니다. 그러나 소위원회가 시간이 흐르면 ALPS 처리 오염수의 방사선 위험, 적어도 삼중수소에 대해서는 위험이 줄어든다고 확인한 것은 자신의 논리를 뒤집는 내용이라고 보인다. 소위원회는 의도적으로 소외 저장 방안을 배제하고 후쿠시마 제1원전 내 추가 부지 확보 등 계속 저장 방안만을 남겨둔 것이다.

“도쿄전력에 따르면 발전소 내에서 추가 부지를 확보할 방안이 있다. 처리수 저장 탱크 구역의 효율성 개선(기존 플랜지 탱크 설치 공간 활용), 폐기물 처분 등의 성과가 있었기 때문이다. 그러나 폐로 작업 진행에 따라 시료 분석 시설, 용융 핵연료 잔해 회수 장비 보관 시설, 용융 핵연료 잔해 회수 모의시설, 교육 시설, 폐기물 재활용 시설 등 폐로 용 시설뿐만 아니라, ALPS 처리 오염수 저장 탱크, 사용 후 핵연료 등의 임시 저장 시설을 위한 부지가 될 것이다.”⁹⁰

근본적인 문제는 도쿄전력, 소위원회 그리고 궁극적으로는 일본 정부가 잘못된 내용을 전제로 판단하고 있다는 사실이다. 이들은 현행 중장기 로드맵의 의미를 이미 지정한 부지(예: 용융 원료 최대 1,100톤 저장용도 등)가 향후 수십 년 간 필요하다는 의미로 받아들이고 있다. 그린피스가 다른 보고서에서 언급했듯이,⁹¹ 도쿄전력이 시도하고 있는 방법은 선례가 없다. 용융 연료 제거 작업을 2021년부터 시작해 2031년에 완료한다는 현행 일정은 전혀 현실성이 없으며, 용융 연료 또는 그 대부분을 제거하는 것이 불가능할 가능성이 높다.⁹² 따라서, 후쿠시마 제1원전 내에는 오염수를 저장할 추가 부지가 있으며, 적어도 수십 년, 아니 더 확실하게는 그보다 훨씬 오랫동안 그대로 남아있을 가능성이 크다.

오염수 방류에 대한 소위원회 입장

소위원회는 보고서에서 의사 결정을 보류해야 한다는 의사를 제시한 것으로 보인다. 아래 표는 소위원회가 방류 시작일 및 연간 처분량에 따라 오염수 처분에 필요한 기간(완료 시점까지)을 대략 밝힌 것이다.⁹³

처분시작연도 \ 처분량	22TBq/년*1	50TBq/년	100TBq/년	최대저장량*2
2020*3	33년 (2052)	19년 (2038)	10년 (2029)	약 130m ³
2025	33년 (2053)	33년 (2041)	9년 (2033)	약 147m ³
2030	33년 (2054)	33년 (2043)	8년 (2037)	약 165m ³
2035	33년 (2055)	33년 (2046)	7년 (2041)	약 183m ³

소위원회가 보고서에 명시한 것처럼 2020년에 방류를 시작하는 것은 아니지만 이를 참고치로 제시했다는 것이 주목할 부분이다. 위 표의 핵심은 2035년부터 연간 최대 22TBq를 방류하면 완료 시점이 2055년이라는 것이다. 반면, 2020년부터 동일하게 최대 22TBq를 방출하는 경우에는 2052년에 완료된다. 다시 말해, 2035년까지 15년간 방출을 보류하면 방류 완료까지 21년이 걸린다. 반면 2020년에 결정하면 방류작업이 33년 걸린다.

2020년에 시작했을 때 14년이 더 걸리는 가장 큰 이유는 2035년까지 기다리는 기간(15년)이 삼중수소의 반감기 1회(12.5년)보다 길기 때문에, 붕괴가 진행되어 총 방사선 잔량이 현재 수준의 절반 이하로 낮아지기 때문이다. 이미 파악된 삼중수소의 위해성 측면에서도, 방류 결정을 보류해야 한다는 주장이다.

의사 결정을 보류해도 반감기 수명이 긴 방사성 물질들의 위험성은 감소하지 않는다. 스트론튬-90의 반감기 30년, 플루토늄-239의 반감기 24,500년, 요오드-129의 반감기 1,400만 년 등이 단적인 예다. 하지만 일본 정부는 마치 다른 방사성 핵종은 존재하지 않은 것처럼 삼중수소수에 대해서만 언급을 하고 있다. 소위원회는 위의 표를 통해 적어도 15년은 의사 결정을 보류해야 한다는, 명확하고 일관성 있는 근거를 제시하고 있다. 이는 물론 일본 정부가 꿈꾸는 폐로 계획보다 일정을 늦추겠지만 후쿠시마 제1원전의 기존 부지를 오염수 저장에 사용하는 문제, 저장 방안 협의에 필요한 상당한 시간이 소요되는 문제 등을 보완해주는 이점도 있다.

안타깝게도 소위원회는 모든 의사 결정을 보류하라는 확실한 권고는 하지 않고, “일본 정부는 일정과 관련된 다양한 요인, 평판 영향, 관계자의 의견 등을 고려하여, 적절한 처분 개시 시점과 그 기간을 결정할 책임이 있다.”⁹⁴고 언급하는 데 그치고 있다.

후쿠시마 오염수 해양 방류의 인권 위협

“일본 국내의 시민들에게 영향을 끼칠 수 있는 오염수 처분과 관련한 논의의 장과 기회를 마련할 것을 우리는 일본 정부에 요청한다. 또한, 정보에 기반해 자유롭게 사전 동의할 수 있는 주민들의 권리를 존중하고, 주민들이 집회 및 결사의 권리를 가짐을 존중할 것을 일본 정부에 요청한다.” UN 인권특별보고관, 2020.6.9⁹⁵

UN 인권최고대표사무소(OHCHR) 특별보고관(Special Rapporteur)들이 개입하여 오염수 해양 방류가 인권 침해 문제라는 의견을 표명했다.

2020년 6월 9일, UN 특별보고관 4명은 일본 정부에 “COVID-19 위기가 진정되고 적절한 국제 협의가 진행될 수 있을 때까지 고준위 방사성 오염수의 해양 방류 처분에 대해 결정을 보류할 것”⁹⁶을 촉구했다. 2020년 4월 UN 특별보고관들은 공개서한을 통해 우려를 표명했다.⁹⁷

“도쿄전력은 일체의 방류 전에 대량의 오염수를 2차 처리할 계획이나 스트론튬 등 방사성 물질 상당량이 남을 것이다. 후쿠시마 원전 사고 재앙으로 발생한 오염수를 해양 또는 대기 중에 방류하는 것은 수많은 사람의 인권, 그리고 지역 사회의 생계를 위협하는 일이다. 주민들은 소득원 및 생계 수단으로서 어업에 크게 의존해 왔기 때문이다. 해양 방류 결정은 원전 재난 후 어업 재건을 위해 상당한 노력을 기울여온 어민들의 인권과 생계에 심각한 타격을 줄 것이다.”⁹⁸

UN 특별보고관들의 우려에 대해 일본 정부는 인권의 기본 원칙을 사실상 무시하는 반응을 보였다. ALPS 처리 오염수의 방사선 함량을 정확히 기재하지 않았으며, 심지어 “정화 시스템(ALPS)에서 삼중수소 외 방사성 핵종 대부분을 제거한 후 (아래 그림의 박스 1, 2번 참조), ALPS 처리수를 탱크 안에 안전하게 보관한다. 따라서, 탱크 내 저장된 ALPS 처리수는 오염수에 해당하지 않는다.”⁹⁹고 전했다.

일본정부가 UN 특별보고관들에게 이렇게 사실과 다른 주장을 한 의도가 무엇이었는지는 확실치 않다. 하지만 분명한 것은 ALPS 처리를 거친 오염수 대부분을 포함해 후쿠시마 제1원전에 현재 저장되어 있는 물은 여전히 방사성 오염수라는 것이다.

오염수 문제는 단순히 기술적인 문제가 아니라 사회적 문제라는 지적에 대해 일본 정부는 “현재 정부는 ALPS 처리수 취급에 대한 기본 정책을 수립하기 위해 주관 부처의 권고 고려하여 지역 주민 등 여러 관계자의 의견을 계속해서 청취하고 있다.”는 내용이다.

안타깝게도 일본 정부는 지역 주민의 의견을 청취한다는 게 그 의견을 따른다는 의미가 아님을 UN 특별보고관들에게 설명하지는 않았다. 후쿠시마 제1원전 폐로를 담당하는 경제산업성 마사토 키노(Masato Kino) 국장이 3월에 설명한 바와 같이, “우리는 지역 주민의 동의를 얻기보다는, 협의를 통해 대책을 이행할 것”¹⁰⁰이란게 일본 정부가 주민들의 의견을 다루는 방식이다.

후쿠시마 지역 주민들은 일본 정부에 명확한 입장을 표명한 바 있다. 2020년 3월부터 여러 지자체가 오염수 방류에 대한 우려 및 반대 입장을 표명하는 결의안을 통과시켰다. 해양 오염 방지 시민 연합(Citizens' Alliance Stop Polluting the Ocean)이 보고한 바와 같이, 2020년 7월 3일 기준 59개 지자체를 대표하는 20개 지방 의회가 의견을 채택했다. (번역자 주: 현재 기준으로 40개 지방 의회) 일체의 방류에 명백히 반대한다는 내용 등 다양한 의견이 포함되어 있으며, 경제산업성 소위원회의 제안을 즉시 수용할 수 없다는 입장이다. 해양 오염 방지 시민연합이 설명한 바와 같이, “이러한 반대 의견이 내륙 지역을 포함한 후쿠시마현 곳곳에서 나타나고 있음에 주목할 필요가 있다. 고가네이 시 의회(도쿄 지역)는 해양방류에 반대하며 육상 시설 저장을 요구하는 결의안을 채택했다. 2020년 6월 23일 전국 어업협동조합 정기총회에서, 그리고 2020



© Shaun Burnie / Greenpeace

결론

후쿠시마 오염수에 관한 그린피스의 첫 번째 보고서가 나오고 거의 2년 만에 일본 정부는 오염수를 태평양에 방류하기로 결정했다. 계획대로라면 오염수 방류는 2022년 말부터 2050년대 중반까지 계속될 것이다. 하지만 후쿠시마 제1원전에 많은 문제가 있기 때문에 예정대로 오염수 해양 방류가 진행되지 않을 가능성도 있다.

일본 정부와 도쿄전력은 백만 톤 이상의 오염수 처리를 둘러싸고 ‘신화’를 만들어내는데 성공했다. 2022년이 되면 더 이상 오염수를 저장할 공간이 없다는 것, 방사성 삼중수소가 오염수 내 유일한 방사성 핵종이고 그것이 무해하다는 것, ‘처리수’이지 ‘오염수’가 아니라는 것, 방류 외에 다른 대안이 없다는 것 등이 신화의 내용이다.

2019년 첫번째 보고서 발표 때와 같이 이번 보고서도 일본 정부와 도쿄전력이 거대한 거짓말로 세상을 속이고 있다는 사실을 드러내고자 노력했다. 그들은 재정적, 정치적 이유로 거짓말을 이어가는 중이다. 오염수를 바다에 방류하는 선택은 일본 정부에게 가장 저렴한 선택이고 2011년 원전 사고의 영향이 단기적이고 제한적이라는 인식을 퍼뜨리려는 일본 정부의 목적에 부합하기 때문이다. 하지만 일본 정부의 바람과는 달리 후쿠시마 원전은 지역 주민과 환경은 물론 일본 전역, 나아가 국제 사회에 악영향을 끼치는 위험으로 남을 것이다. 후쿠시마 오염수 위기는 긴 세월동안 인류를 괴롭히는 위협의 전형이 될 것이다.

이 보고서에 상세히 기술돼 있듯이, 오염수 내의 여러 방사성 핵종 중 가장 위험한 두 가지는 스트론튬-90과 탄소-14다. 이들의 반감기는 각각 30년, 5,730년으로, 태평양으로 흘러들 오염수에 남아 있을 것이다. 알프스를 도입할 때부터 도쿄전력과 일본 정부는 스트론튬-90을 제대로 처리할 수 없다는 사실을 알고 있었다. 그럼에도 일본 기업인 도시바와 히타치에 사업권을 주기 위해 해당 기술을 쓰기로 결정했다.

스트론튬을 비롯한 방사성 핵종 농도를 ‘불검출 가능’ 수준으로 낮춘 미국 기업 퓨어라이트의 기술은 선택받지 못했다. 훨씬 낮은 사양의 기술이 선택된 이후엔 ‘완화된 처리 목표’를 적용하라는 요구가 등장했다. 더 높은 수준의 방사성 물질이 잔류하는 것을 허락하도록 말이다. 그 결과 항골성(bone-seeking) 원소인 스트론튬-90, 탄소-14를 비롯한 대규모의 위험한 방사성 핵종을 수십 년간 태평양에 의도적으로 방류하게 되는 것이다. 오염수 해양 방류의 과학적 안정성과 그것의 파급 효과는 아직 밝혀진 바 없다. 심지어 도쿄전력이나 일본 정부도 스트론튬-90, 탄소-14가 안전한 방사성 핵종이라 말할 수 없을 것이다.

탄소-14의 경우는 더하다. 일본 정부와 도쿄전력은 사고가 나고 거의 10년이 지난 2020년 8월에야 도쿄전력은 오염수에 탄소-14 문제가 있다고 인정했다. 이것은 심각한 문제다. ALPS가 탄소-14를 제거하도록 설계되지 않았기 때문이다. 오염수가 태평양으로 방류되면, 오염수에 포함된 탄소-14가 모조리 바다로 흘러들 것이다. 탄소-14는 생태계의 탄소 순환 과정에 통합된다. 간단히 말해, 다양한 농도로 모든 생물의 체내로 흡수된다.

우리가 2019년 보고서에서 결론 내렸듯이, 후쿠시마 제1원전에서 계속되는 오염수 위기는 여러 잘못된 결정의 복합적인 결과다. 50여 년 전 원전 부지를 낮추기로 한 결정부터 지진과 쓰나미가 원전에 중대 위험이라는 증거를 무시한 결정, 그리고 2011년 3월 11일 사건 이후의 결정들이 그것이다. 어떤 나라나 기업도 2011년 일어난 사고와 같은 규모의 도전에 직면한 적은 없었다. 시간이 흐르면서, 도쿄전력과 일본 정부 기관들은 이 위기를 악화시킬 음모를 꾸민 것 같다. 잘못된 보고와 오랜 기간의 은폐 끝에, 도쿄전력은 최근야 자신들의 처리 기술이 제대로 작동하지 않는다는 사실을 시인했다.

년 6월 26일 후쿠시마현 어업조합 정기총회에서, “오염수 해양 방류에 강력히 반대”하는 특별 결의안이 만장일치로 가결¹⁰¹됐다.

2020년 3월 11일 발표된 이시가와 마을의 선언문은 한 어민의 발언 내용을 다음과 같이 인용했다. “원전 사고로 심각한 피해를 본 피해자들은 오염수 해양 방류 조치에 좌절해서는 안 된다. 생산자들은 후쿠시마현에서 생산된 농산물, 축산물, 수산물의 안전을 지키고, 루머로 인한 피해를 극복하기 위해 싸워왔다. 이번 조치는 그러한 노력과 미래에 대한 희망을 근본적으로 무력화시키는 것이다.”¹⁰² 이시가와 마을에서 아베 총리에게 보낸 서한은 다음과 같은 요청으로 끝을 맺고 있다. “궁극적으로는 폐로 처리를 목표로 장기 저장하는 것과 삼중수소 분리를 포함한 처분 방법을 연구, 개발할 것을 우리는 강력히 촉구한다. 우리는 삼중수소가 포함된 오염수를 해양 방류하는 것에 반대한다.”¹⁰³

바스쿠트 툰캅(Baskut Tuncak)¹⁰⁴은 2020년 7월 8일 “2011년 3월 11일의 끔찍한 사고로 폐허가 된 후쿠시마의 지역 사회는 오염수를 환경에 방출하는 것에 대해 우려와 반대 입장을 표명했다. 인간 존엄성이 확보되는 삶을 영위하고, 문화를 향유하며, 추가적인 방사성 오염에 노출되지 않는 것은 환경에 대한 그들의 인권이다. 이러한 권리는 일본 정부가 무시해서는 안 되는 것이며, 전적으로 존중 받아야 한다.”¹⁰⁵는 입장을 밝혔다.

UN 특별보고관들이 일본 정부에 이러한 중대한 사안을 제기하고, 후쿠시마 지역 주민을 포함한 일본 국내외 시민들의 인권을 보호하기 위해 노력하는 것은 전적으로 타당하다.

일본 정부의 의도가 방류 쪽으로 굳어지면서, 오염수 문제에 대한 의도적인 오보 및 사실 왜곡이 계속됐다. 일본 정부는 유엔 인권 전문가들에게 제출하는 증거 등에서 후쿠시마 제1원전 알프스 수조 안에 있는 물이 오염수가 아니라고 주장해 왔다. 이러한 주장은 명백히 사실과 다르다. 방사성 삼중수소의 일부는 유기결합삼중수소가 되고, 이는 유전적 결함을 야기할 수 있다. 일본 정부와 도쿄전력은 이런 부분을 설명한 적이 없다. 오염수 방류로 가장 큰 영향을 받을 후쿠시마 주민을 지원해 준 것은 유엔의 인권 특별 조사위원들이었다.

일본 경제산업성의 소위원회는 후쿠시마 원전 부지 안팎에 추가 저장소를 확보하는 다른 방안이 있다고 인정했다. 그러나 복잡한 협상과 소요 시간을 이유로 그러한 방안들은 배제되었다. 오염수를 포함해 후쿠시마 원전 사고로 초래된 모든 문제는 복잡하다. 문제 해결을 위해 수 세기 또는 그 이상의 시간이 걸릴 것이다. 오염원인 수백 톤의 용융 연료, 이른바 녹아내린 핵연료 잔해(debris)에는 반감기가 24,500년인 플루토늄-239 등 방사성 핵종이 들어 있다. 이 같은 잔해를 향후 몇 년 안에 제거할 해결책도 없고, 안전하게 보관할 방법 역시 어디에도 없다.

장기 저장은 해양 방류를 대체할 실현 가능한 방안이다. 하지만 일본 정부로서는 정치적으로 힘든 선택이다. 오염수를 계속 저장해 둔다면, 국민들이 계속 원전 운영의 위험과 복잡성을 인식하게 될 것이기 때문이다. 오염수를 태평양에 쏟아 붓는 것은 아무것도 해결하지 못하지만, 도쿄에 있는 정책 입안자들에게는 후쿠시마 원자로 조기 폐쇄에 있어 상당한 진전이 있다는 선전의 소재로 쓸모가 있다. 일본 정부와 도쿄전력은 과학적 사실과는 동떨어진, 자기들만의 공상 과학영화를 찍으려 하는 것이다.

오염수를 바다로 흘려보내는 것에 대해 후쿠시마 주민들은 물론 일본의 전국 어업협동조합연맹, 후쿠시마현 산하 대다수 지방 의회, 그리고 일본 사회 전역에서 반대와 우려가 계속되고 있다. 일본의 최인접 국가들, 특히 한국의 반대는 이 문제가 일본 밖의 사람들과 공동체에도 영향을 미친다는 사실을 보여준다. 또한 국제 해양법 및 세계 해양 보호에도 저촉된다. 일본 정부는 오염수를 방류하기로 마음먹었지만, 반대 움직임은 계속될 것이다. 후쿠시마 주민, 일본 국민, 나아가 국제사회 공동체의 건강 및 환경, 인권 보호를 위해 수용할 수 있는 유일한 방안은 오염수를 장기적으로 저장 및 처리하는 것이다.

첨부

ALPS 설비를 통해 배출허용기준 이하로 “제거” 대상인 방사성핵종 62개 목록

번호	동위원소	반감기	번호	동위원소	반감기
1	루비듐 86 (Rb-86)	19 일	32	바륨140 (Ba-140)	13 일
2	스트론튬 89 (Sr-89)	51 일	33	세륨 141 (Ce-141)	33 일
3	스트론튬 90	29 년	34	세륨 144 (Ce-144)	284 일
4	이트륨 90 (Y-90)	64 시간	35	프라세오디뮴 144 (Pr-144)	17 분
5	이트륨91 (Y-91)	58 일	36	프라세오디뮴 144m (Pr144m)	7.2 분
6	니오븀 95 (Nb-95)	35 일	37	프로메튬 146 (Pm-146)	6 일
7	테크네튬 99 (TC-99)	211,000 년	38	프로메튬147 (Pm-147)	6 일
8	루테튬 103 (Ru-103)	39 일	39	프로메튬 148 (Pm-148)	5 일
9	루테튬 106 (Ru-106)	374 일	40	프로메튬 148m (Pm-148m)	43 일
10	로듐 103m (Rh-103m)	56 분	41	사마륨 151 (Sm-151)	89 년
11	로듐 106 (Rh-103)	30 초	42	유로퓸152 (Eu-152)	13 년
12	Silver 110m (Ag-110m)	250 일	43	유로퓸 154 (Eu-154)	9 년
13	카드뮴 113m (Cd- 113m)	14 년	44	유로퓸 155 (Eu-155)	5 년
14	카드뮴 115m (Cd- 115m)	45 일	45	가돌리늄 153 (Gd-153)	240 일
15	주석 119m (Sn 119m)	293 일	46	테르븀 160 (Tb-160)	72 일
16	주석 123 (Sn-123)	130 일	47	플루토늄 238 (Pu-238)	88 년
17	주석 126 (Sn-126)	100,000 년	48	플루토늄 239 (Pu-239)	24,000 년
18	안티몬 124 (Sb-124)	60 일	49	플루토늄 240 (Pu-240)	656 년
19	안티몬 125(Sb-125)	3 일	50	플루토늄 241 (Pu-241)	14 년
20	텔루륨 123m (Te-123m)	120 일	51	아메리슘 241 (Am-241)	430 년
21	텔루륨 125m (Te-125m)	58 일	52	아메리슘 242m (Am-242m)	141 년
22	텔루륨 127 (Te-127)	9 시간	53	아메리슘 243 (Am-243)	7,470 년
23	텔루륨 127m (Te-127m)	110 일	54	퀴륨 242 (Cm-242)	160 일
24	텔루륨 129 (Te-129)	70 일	55	퀴륨 243 (Cm-243)	29 년
25	텔루륨 129m (Te-129m)	34 일	56	퀴륨 244 (Cm-244)	18 년
26	요오드 129 (I-129)	1570 만 년	57	망간 54 (Mn-54)	312 일
27	세슘 134 (Cs-134)	2 년	58	철 59 (Fe-59)	45 일
28	세슘 135 (Cs-135)	230 만 년	59	코발트 58 (Co-58)	71 일
29	세슘 136 (Cs-136)	13 일	60	코발트 60 (Co-60)	5 년
30	세슘 137 (Cs-137)	30 년	61	니켈 63 (Ni-63)	100 년
31	바륨137m (Ba-137m)	3 분	62	지르코늄 65 (Zn-65)	244 일

각주

1. CNIC, "Revelation of Endless N-damage Cover-ups: the "TEPCO scandal" and the adverse trend of easing inspection standards", November/December 2002, see <http://www.cnic.jp/english/newsletter/pdf/nit92.pdf>; and Greenpeace International, "Japanese nuclear safety scandal uncovered", 30 August 2002, see <https://www.greenpeace.org/archive-international/en/news/features/japanese-nuclear-safety-scanda/>
2. Mainichi Shimbun, "Japan's fishing industry firmly opposes release of tainted Fukushima water at sea", 9 October 2020, see <https://mainichi.jp/english/articles/20201009/p2a/00m/0na/039000c>
3. JCER, "Contaminated water strategy of critical importance", Japan Center for Economic Research, March 7, 2019, see <https://www.jcer.or.jp/policy-proposals/2019037.html> (in Japanese)
4. John Large, "Preliminary analysis of TEPCO processed water data sheets", June 21st 2018, Large&Associates, London for Shaun Burnie, Greenpeace Germany
5. MOFA, "Response to the Joint Communication from Special Procedures from the Government of Japan", 12 June 2020, see <https://www.mofa.go.jp/files/100064087.pdf>
6. TEPCO, "ALPS-Treated Water> Updated Data for Storage Amounts broken down by the Sum of Ratios for Concentrations Required by Law", 27 August 2020, see <https://www4.tepco.co.jp/en/decommission/progress/watertreatment/images/200827.pdf>
7. European Parliament, "Possible Toxic Effects From The Nuclear Reprocessing Plants At Sellafield (UK) and Cap de la Hague (France)", A first contribution to the scientific debate, Schneider, M., Study team: Coeytaux, X., Fa'ïd, Y.B., Marignac, Y., Rouy, E., Thompson, G. (IRSS, Cambridge, USA) Fairlie, I., Lowry, D., Sumner, D. (Independent consultants), European Parliament Directorate General for Research Directorate A The STOA Programme, November 2001, see http://www.wise-paris.org/index.html?/english/stoa_en.html&/english/frame/menu.html&/english/frame/band.html
8. Kyodo News, "OPINION: Fukushima nuclear waste decision also a human rights issue", 8 July 2020, see <https://english.kyodonews.net/news/2020/07/1145e5b3970f-opinion-fukushima-nuclear-waste-decision-also-a-human-rights-issue.html>
9. TEPCO, "Treated Water Portal Site", see <https://www4.tepco.co.jp/en/decommission/progress/watertreatment/index-e.html>
10. TEPCO, "Situation of Storage and Treatment of Accumulated Water containing Highly Concentrated Radioactive Materials at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (465th Release) 24, August 2020. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc., see https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/information/newsrelease/watermanagement/pdf/2020/watermanagement_20200824-e.pdf
11. Asahi Shimbun, "Toxic water level at Fukushima plant still not under control", 28 July 2019, see <http://www.asahi.com/ajw/articles/AJ201907280040.html>
12. 국제원전폐로연구소(IRID)는 후쿠시마 제1원전의 3개 원자로 용융 상황 모델링을 감독하고, 원자로 자체에 대한 제한적 조사를 진행했다. 우주선(cosmic ray) 뮤온(Muon) 스캐닝도 포함되었다. 이를 통해, IRID는 용융 원료("코롬"으로 알려져 있으며, 콘크리트, 철을 포함한 용융연료 혼합물)의 양을 추정했다. 총 용융연료/코롬량 추정은 사고 시뮬레이션, 뮤온 등 여러 요인을 관찰하여 진행했다. 이러한 계산에 따르면, 총 코롬 질량 추정치는 1호기 232~357톤(공칭값 279톤), 2호기 189~390톤(공칭값 237톤), 3호기 188~394톤(공칭값 364톤)이다. 3호기의 용융 연료에는 플루토늄 235kg과 함께 플루토늄 MOX 연료 집합체 32개가 포함되어 있다. 코롬 함량이 기존 연료량 1호기 69톤, 2호기 및 3호기 각각 94톤보다 많은 이유는 코롬에는 기존 연료외에 용강(molten steel) 및 콘크리트가 포함되어 있기 때문이다. 따라서, 코롬 질량은 원래의 연료보다 2.5~4배 많다.
13. JCER, "Contaminated water strategy of critical importance", Japan Center for Economic Research, March 7, 2019, see <https://www.jcer.or.jp/policy-proposals/2019037.html> (in Japanese)
14. Ibid.
15. TEPCO, "Plant-related parameters - Real-time data", 27 August 2020, see https://www.tepco.co.jp/decommission/data/plant_data/
16. TEPCO, "Changes in the amount of water transferred from groundwater drains to reactor and turbine buildings and in the amount of groundwater and rainwater flowing into the buildings", 30 March 2020, see https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/information/newsrelease/groundwaterdrain_transition/pdf/2020/tr_200330_01-e.pdf
17. TEPCO, "Changes in the amount of water transferred from groundwater drains to reactor and turbine buildings and in the amount of groundwater and rainwater flowing into the buildings", 24 August 2020, https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/information/newsrelease/groundwaterdrain_transition/pdf/2020/groundwaterdrain_20200824-e.pdf
18. Journal of Nuclear Science and Technology "Radionuclide release to stagnant water in the Fukushima-1 nuclear power plant1", Kenji Nishihara, Isao Yamagishi, Kenichiro Yasuda, Kenichiro Ishimori, Kiwamu Tanaka, Takehiko Kuno, Satoshi Inada & Yuichi Gotoh (2015) , 52:3, 301-307, DOI: 10.1080/00223131.2014.946455, see <https://doi.org/10.1080/00223131.2014.946455>
19. Ibid.
20. IAEA, "Mission Report IAEA International Peer Review Mission On Mid-And-Long-Term Roadmap Towards The Decommissioning Of Tepco's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4 (Third Mission)", Tokyo and Fukushima Prefecture, Japan, 9 - 17 February 2015 see <https://www.iaea.org/sites/default/files/missionreport130515.pdf>
21. 다핵종제거설비(ALPS)는 후쿠시마 제1원전에 축적된 오염수를 처리하는 데 사용된다. 2013년 9월 가동을 시작한 이후 여러 차례 수정을 거쳐, 2014년 말부터는 개량 ALPS 및 고성능 ALPS가 가동되었다. The Japan Times, "ALPS system at Fukushima No. 1 plant failing to remove more than tritium from toxic cooling water", Kyodo, 19 August, 2018, see https://www.japantimes.co.jp/news/2018/08/19/national/alps-system-fukushima-no-1-plant-failing-remove-tritium-toxic-cooling-water/?utm_source=Daily+News+Up-dates&utm_campaign=65c5c70dd4-Monday_email_updates20_08_2018&utm_medium=email&utm_term=0_c5a6080d40-65c5c70dd4-332761853
22. Julian Ryall, "Japan plans to flush Fukushima water 'containing radioactive material above permitted levels' into the ocean", 16 October 2018, Daily Telegraph, see <https://www.telegraph.co.uk/news/2018/10/16/japan-plans-flush-fukushima-water-containing-radioactive-material/>
23. TEPCO, "TEPCO Draft Study Responding to the Subcommittee Report on Handling ALPS Treated Water", 24 March 2020, see <https://www.tepco.co.jp/en/decommission/progress/watertreatment/images/200324.pdf>
24. Atomic Energy Society Japan, "Treatment of contaminated water stored in Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant", Division of Water Chemistry, Fusion Engineering Division, 10 September 2013, see <http://www.aesj.or.jp/jikocho/Treatmentofcontaminated-water.pdf>
25. Op.cit. Nuclear Emergency Response Headquarters, 3 September 2013.
26. John Large, "Preliminary analysis of TEPCO processed water data sheets", June 21st 2018, Large&Associates, London for Shaun Burnie, Greenpeace Germany
27. Purelite, "Purolite Develops Solution to Fukushima Radioactive Water Clean-up", 23 March 2012, see <https://www.prnewswire.com/news-releases/purolite-develops-solution-to-fukushima-radioactive-water-clean-up-143961516.html>
28. Purelite, "Purolite Core Technology achieved ND in the onsite test (Extract from Purolite presentation at Tokyo District Court on 18 July 2017)
29. TEPCO, "Fukushima Daiichi NPS Prompt Report (Oct 21, 2014) Recent topics: New High-Performance Water Treatment System At Fukushima Set To Increase Capacity By A Third While Cutting Waste 90 Percent", see https://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2014/1243241_5892.html
30. Opcit. Purelit, 18 July 2017.
31. Opcit. Purelit, 18 July 2017.
32. Opcit. Purelit, 18 July 2017.
33. Judgment rendered on 20 September 2019 by the Intellectual Property High Court, original received on the same day by Court Clerk Case No: 30th yr. of Heisei (2019) (Ne) No.10049 Case regarding Claim for Damages (Original case heard in Tokyo District Court: 26th yr. of Heisei (2014) (Wa) No. 29490) Date of Conclusion of Oral Arguments: 18 July 2019
34. MOFA, "Response to the Joint Communication from Special Procedures from the Government of Japan", 9 June 2020, see <https://www.mofa.go.jp/files/100064087.pdf>; and TEPCO, "Tank Reuse Policy in light of the Results of Analysis of Water in Tanks to be repurposed", 30 July 2020, see <https://www.tepco.co.jp/en/decommission/progress/watertreatment/images/200730.pdf>
35. TEPCO, "TEPCO Draft Study Responding to the Subcommittee Report on Handling ALPS Treated Water", 24 March 2020, see <https://www.tepco.co.jp/en/decommission/progress/watertreatment/images/200324.pdf>
36. Opcit. TEPCO, 24 March 2020.
37. Opcit. Purelite, 23 March 2012.
38. Ken O. Buesseler. "Opening the floodgates at Fukushima", Science 7 Aug 2020: Vol. 369, Issue 6504, pp. 621-622 DOI: 10.1126/science.abc1507, see <https://science.sciencemag.org/content/369/6504/621>
39. IAEA, "Sediment Distribution Coefficients And Concentration Factors For Biota In The Marine Environment", Technical Reports Series No. 422, International Atomic Energy Agency Vienna, 2004, see https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS422_web.pdf
40. Ibid.
41. Opcit. Ken O. Buesseler. 7 Aug 2020.
42. The Graveline six nuclear PWR reactors discharged 0.000066 TBq of Cs-137 for the year of 2008.
43. Journal of Nuclear Science and Technology "Radionuclide release to stagnant water in the Fukushima-1 nuclear power plant1", Kenji Nishihara, Isao Yamagishi, Kenichiro Yasuda, Kenichiro Ishimori, Kiwamu Tanaka, Takehiko Kuno, Satoshi Inada & Yuichi Gotoh (2015) , 52:3, 301-307, DOI: 10.1080/00223131.2014.946455. At <https://doi.org/10.1080/00223131.2014.946455>
44. Ibid.
45. European Parliament, "Possible Toxic Effects From The Nuclear Reprocessing Plants At Sellafield (UK) and Cap de la Hague (France)", A first contribution to the scientific debate, Schneider, M., Study team: Coeytaux, X., Fa'ïd, Y.B., Marignac, Y., Rouy, E., Thompson, G. (IRSS, Cambridge, USA) Fairlie, I., Lowry, D., Sumner, D. (Independent consultants), European Parliament Directorate General for Research Directorate A The STOA Programme, November 2001, see http://www.wise-paris.org/index.html?/english/stoa_en.html&/english/frame/menu.html&/english/frame/band.html
46. 식물류에서 탄소-14의 이동 메커니즘은 광합성에 의해 결정되며, 동물에서는 음식 섭취에 따라 이루어진다. 해조류, 어류, 갑각류, 연체류의 탄소-14 농축 계수는 다음을 참조: OSPAR, "French Implementation Report of PARCOM Recommendation 91/4 on radioactive discharges", 2019, see <https://www.ospar.org/documents?v=40984>
47. IAEA, Management Of Waste Containing Tritium And Carbon-14, Technical Report Series 421, International Atomic Energy Agency Vienna, 2004, see https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS421_web.pdf
48. 선량율은 선량전환계수(DCCs, µGy.h-1 per Bq.unit-1 of mass or volume)를 피폭 환경 또는 생물체 내 방사성 핵종 농도(Bq.unit-1 of mass or volume)에 적용하여 계산한다.
49. As cited by IRSN (see reference below, Le Dizès-Maurel S, Maro D, Lebaron-Jacobs L, Masson M (2009). « Carbone 14 », in Chapitre 31, Toxicologie nucléaire environnementale et humaine. Ménager M.T., Garnier-Laplace J., Goyffon M. (Coord). Editions Tex&Doc - Lavoisier., 603-618.
50. "Radionuclide fact sheet Carbon-14 and the environment", August 2012, see <https://www.irsn.fr/EN/Research/publications-documentation/radionuclides-sheets/environment/Pages/carbon14-environment.aspx>,
51. MOFA, "Response to the Joint Communication from Special Procedures from the Government of Japan", 12 June 2020, see <https://www.mofa.go.jp/files/100064087.pdf>

52. TEPCO, "ALPS-Treated Water> Updated Data for Storage Amounts broken down by the Sum of Ratios for Concentrations Required by Law", 27 August 2020, see <https://www4.tepco.co.jp/en/decommission/progress/watertreatment/images/200827.pdf>
53. TEPCO, "Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Performance confirmation tests of the secondary treatment of water treated with multi-nuclide removal equipment", 10 September 2020, see <https://www4.tepco.co.jp/en/decommission/progress/watertreatment/images/200910.pdf>
54. Opcit. TEPCO, 27 August 2020.
55. TEPCO, "Status of Contaminated Water Status of Contaminated Water Treatment and Tritium at Fukushima Treatment and Tritium at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Daiichi Nuclear Power Station Tokyo Electric Power Company, Inc. 24 April 2014, see https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/140424/140424_02_008.pdf
56. METI, "The Outline of the Handling of ALPS Treated Water at Fukushima Daiichi NPS (FDNPS)", Agency for Natural Resources and Energy METI, 21 November, 2019, see https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20191121_current_status.pdf
57. 수용성 액체 폐기물 내 탄소-14는 용액 pH에 따라 보통 탄산염 및/또는 중탄산염이라는 화학적 형태로 존재한다. 따라서, 이온교환 등 전통적인 수처리 프로세스에서는 액체 스트림에서 HCO₃⁻¹ / CO₃⁻² 형태로 충분히 14C를 제거할 수 있다. 참조: Opcit. IAEA 2004.
58. Opcit. TEPCO, 24 March 2020.
59. ANRE, "The current status and future process of the domestic study of ALPS treated water at Fukushima Daiichi NPS", Agency for Natural Resources and Energy, METI September, 2019, see https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20190904_current_status.pdf
60. METI, "The Subcommittee on Handling of the ALPS Treated Water Report 10, February 2020, see https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20200210_alps.pdf
61. Ibid.
62. Rodgers DW, "Tritium Dynamics in Mice exposed to Tritiated Water and Diet." Health Physics, 63, 331-337 1992, see https://journals.lww.com/health-physics/Abstract/1992/09000/Tritium_Dynamics_in_Mice_Exposed_to_Tritiated_9.aspx
63. Opinion of Dr Ian Fairlie, personal communication with Shaun Burnie, 25 August 2020.
64. S. L. Commerford; A. L. Carsten; E. P. Cronkite, "The Turnover of Tritium in Cell Nuclei, Chromatin, DNA, and Histone", Radiation Res (1982) 92 (3): 521-529, see <https://doi.org/10.2307/3575924>
65. Duong, T., Trivedi, A. "Evaluation of storage conditions for tritiated thymidine as reference organically-bound tritium in urine", J Radioanal Nucl Chem 226, 229-231 (1997), see <https://doi.org/10.1007/BF02063653>
66. S. L. Commerford; A. L. Carsten; E. P. Cronkite, "The Distribution of Tritium in the Glycogen, Hemoglobin, and Chromatin of Mice Receiving Tritium in Their Drinking Water", Radiat Res (1977) 72 (2): 333-342, see <https://doi.org/10.2307/3574703>
67. Opcit. Fairlie, 25 August 2020.
68. R. V. Osborne, "Permissible Levels of Tritium in Man and the Environment" Radiation Research Vol. 50, No. 1 (Apr., 1972), pp. 197-211 (15 pages), Radiation Research Society DOI: 10.2307/3573479, see <https://www.jstor.org/stable/3573479>
69. Opcit. Fairlie, 25 August 2020.
70. Autorité de Sûreté Nucléaire, Livre Blanc Tritium, July 2010, <http://livre-blanc-tritium.asn.fr/plus/english-version.html>
71. Dr David Boiley, personal communication with Shaun Burnie, 31 August 2020; see also <https://www.acro.eu.org/international/japon/actualites-fukushima/>
72. Eyrolle, F., Copard, Y., Lepage, H. et al. Evidence for tritium persistence as organically bound forms in river sediments since the past nuclear weapon tests. Sci Rep 9, 11487 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-478211>
73. Eyrolle, F. et al. An updated review on tritium in the environment.", Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), PSE-ENV, SRTE, BP 3, 13115 Saint-Paul-lez-Durance, France, J. Environ. Radioactiv. 181, 128-137 (2018), see <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X17307956?via%3Dihub>
74. Opcit. Eyrolle, F. 2019.
75. Kurion technical officer, Gaetan Bonhomme, cited in Los Angeles Times, "4 years after Fukushima, Japan considers restarting nuclear facilities", 30 March 2015, see <http://www.latimes.com/world/asia/la-fg-japan-nuclear-20150330-story.html>
76. METI, "Committee on Countermeasures for Contaminated Water Treatment", 19th April 2016, 14th meeting, see http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/tritium_tusk/pdf/160419_07.pdf (in Japanese)
77. International Research Institute for Nuclear Decommissioning (IRID), "Previous Discussions on the Management for Tritiated Water", 3 June, 2014 Ministry of Economy, Trade and Industry Agency for Natural Resources and Energy (Cabinet Office, Management Office of the Team for Decommissioning and Contaminated Water Countermeasures), see <https://www.mri.co.jp/english/news/2014060212E.pdf>
78. Opcit. Los Angeles Times, March 2015.
79. Opcit. Los Angeles Times, March 2015.
80. U.S.DOE, "Separation of Tritiated Water Using Graphene Oxide Membrane" Prepared for U.S. Department of Energy Fuel Cycle Research and Development Material Recovery and Waste Form Development Campaign GJ Sevigny, RK Motkuri, DW Gotthold, LS Fifield Pacific Northwest National Laboratory AP Frost, W Brattun Kurion June 2015 FCRD- MRWFD-2015-000773 PNNL-24411, see https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-24411.pdf
81. Op.cit. JCER, 7 March 2019.
82. METI, "The Subcommittee on Handling of the ALPS Treated Water Report" 10 February 2020 (Provisional Translation), see https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20200210_alps.pdf
83. 소위원회는 "ALPS 처리수 및 ALPS 정화처리 예정인 스트론튬 제거 처리수의 총량은 2019년 10월 31현재 약 117만 m³이며, 삼중수소의 양과 농도는 평균 856 TBq, 0.73 MBq/L이다"라고 보고했다.
84. Opcit. METI, 10 February 2020.
85. Opcit. METI, 10 February 2020.
86. Opcit. METI, 10 February 2020.
87. Opcit. METI, 10 February 2020.
88. Opcit. METI, 10 February 2020.
89. Opcit. METI, 10 February 2020.
90. Opcit. METI, 10 February 2020.
91. Greenpeace Germany, "Decommissioning plans for the Fukushima Daiichi Nuclear Plant Analysis of IAEA Mission Report and NDF Strategic Plan", Shaun Burnie, March 2019, see <https://storage.googleapis.com/planet4-japan-stateless/2020/09/866bd062-tepco-water-crisis.pdf>
92. TEPCO, "Roadmap on the Way to Decommissioning - Milestones on the Mid- to Long-Term Roadmap", see <https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/project/roadmap/index-e.html>
93. 표는 2020년 2월 소위원회 보고서에 인용된 문서 3: 16차 ALPS 소위원회 회의 내용에서 발췌한 것이다. 해당 표에는 다음 주석도 함께 기재되어 있다.
* 상기 수치는 다양한 가정에 따라 계산된 추정치임에 유의해야 할 것이다. 후쿠시마 제1원전 원자로 건물의 삼중수소 대부분은 사고 전 1-3 호기에서 발생했기 때문에, 최대한 시험 계산값을 적용하기는 했으나 사고 전 존재했던 삼중수소의 총량이 오염수에 포함되어 있을 수 있다.
* 처분기간은 건물 내 연료잔해 및 기타 물질에 남아있는 삼중수소양에 따라 달라질 수 있다.
* 추가 발생하는 오염수와 일일 방사능 감시를 고려해야 한다.
* 탱크에 저장된 ALPS 처리수 처분이 완료된 후에도, 폐로 작업이 완료될 때까지 처리수는 계속 발생한다는 사실도 주목해야 한다.
* 1 연간처분량이 후쿠시마 제1원전의 사고전 방류통제 표준값과 동일한 기간
* 2 현행 탱크설치계획에서는 2020년 말까지 137m³를 추가적으로 설치하는 것을 고려하고 있다.
* 3 처분작업이 2020년에 개시될 가능성은 없으므로, 해당 열은 연간처분량과 기간의 관계를 보여주는 참고치로 제시하였다.
94. Opcit. METI, 10 February 2020.
95. UN OHCHR, "Fukushima: Japan must not ignore human rights obligations on nuclear waste disposal - UN experts", 9 June 2020, see [https://www.ohchr.org/EN/NewsEvents/Pages/DisplayNews.aspx?NewsID=25940&LangID=E; and Kyodo News, "U.N. experts urge Japan not to rush discharge of radioactive water", 9 June 2020, see https://english.kyodonews.net/news/2020/06/6f6afd-14d6a4-un-experts-urge-japan-not-to-rush-discharge-of-radioactive-water.html](https://www.ohchr.org/EN/NewsEvents/Pages/DisplayNews.aspx?NewsID=25940&LangID=E; and Kyodo News,)
96. The four Special Rapporteurs were: Mr. Baskut Tuncak, Special Rapporteur on the implications for human rights of the environmentally sound management and disposal of hazardous substances and wastes; Mr. Michael Fakhri, Special Rapporteur on the right to food; Mr. Clément Nyaletsossi Voule, Special Rapporteur on the rights to freedom of peaceful assembly and of association; and Mr. José Francisco Calí Tzay, Special Rapporteur on the rights of indigenous peoples.
97. OHCHR, "Joint Communication from Special Procedures", 20 April 2020, see <https://www.mofa.go.jp/files/100064085.pdf>
98. Ibid.
99. MOFA, "Response to the Joint Communication from Special Procedures from the Government of Japan", 12 June 2020, see <https://www.mofa.go.jp/files/100064087.pdf>
100. Nucleonics Week, "Japanese government likely to start water disposal preparations in summer", 19 March 2020.
101. Citizens' Alliance Stop Polluting the Ocean!, "Communication to to Mr.Baskut Tuncak,Special Rapporteur on the implications for human rights of the environmentally sound management and disposal of hazardous substances and wastes Mr. Michael Fakhri Special Rapporteur on the right to food Mr. Clément Nyaletsossi Voule, Special Rapporteur on the rights to freedom of peaceful assembly and of association Mr. Francisco Calí Tzay, Special Rapporteur on the rights of indigenous peoples, 10 July 2020.
102. Ishikawa Town, "Opinion against the release of tritium-contaminated water stored on the premises of the TEPCO Daiichi Nuclear Power Plant to protect the lives of fisheries and fishermen in Fukushima Prefecture", 11 March 2020, (in Japanese), see <https://www.greenpeace.org/japan/sustainable/story/2020/07/14/17127/>
103. Ibid.
104. Baskut Tuncak served U.N. special rapporteur on the implications for human rights of the environmentally sound management and disposal of hazardous substances and wastes from 2014 to 2020.
105. Kyodo News, "OPINION: Fukushima nuclear waste decision also a human rights issue", 8 July 2020, see <https://english.kyodonews.net/news/2020/07/1145e5b3970f-opinion-fukushima-nuclear-waste-decision-also-a-human-rights-issue.html>

GREENPEACE

그린피스는 전 지구적인 환경문제의 원인을 밝혀내고 해결하기 위해 비폭력적이고 창의적인 방식으로 대응하는 독립적인 글로벌 캠페인 단체입니다. 그린피스는 환경보호와 평화를 증진하기 위해 행동을 통한 사회의 긍정적인 변화를 꾀합니다.

Greenpeace East Asia Seoul Office

서울시 용산구 한강대로 257 청룡빌딩 6층 (04322)

문의:

얀 반데푸트(Jan Vande Putte), 그린피스 벨기에

jan.vande.putte@greenpeace.org

하인츠 스미탈(Heinz Smital), 그린피스 독일

heinz.smital@greenpeace.org

숀 버니(Shaun Burnie), 그린피스 독일

shaun.burnie@greenpeace.org

스즈키 카즈에(Kazue Suzuki), 그린피스 일본

energy.jp@greenpeace.org

장마리(Mari Chang), 그린피스 동아시아 서울사무소

mari.chang@greenpeace.org

<https://www.greenpeace.org/korea>

