후쿠시마 오염수 방사선 영향평가(**RIA**)에 대한 검토 의견서

그린피스 동아시아 지부

요약본

2021년 **12**월 **16**일

서론

본 내용은 2021년 11월 도쿄전력(TEPCO)이 공개한 방사선 영향평가 보고서 초안(이하 RIA)에 대한 검토 의견서 요약본이다. 도쿄전력은 2021년 12월 18일까지 공개적으로 RIA에 대한 의견을 영어, 일어 형태로 모집한다. 그린피스 동아시아 지부는 본 요약본과 전체 분석 의견서를 도쿄전력에 제출하며, RIA의 협소하고 제한된 평가 접근 방식을 비롯해 도쿄전력이 의도적으로 외면한 핵심 쟁점을 분석했다.

첫째, 2023년부터 태평양에 방사성 오염수를 방출한다는 계획은 잘못된 전제에 기반하고 있다. 도쿄전력이 주장하는 오염수 방류의 불가피성은, 비현실적인 2050 후쿠시마 원전 부지 복구를 전제하고 있기 때문이다. 현재 후쿠시마 원전의 1-3호기 원자로는 잔류한 핵연료 파편의 종류, 양, 방사능 농도, 기하학적 형질 등 분명한 분석이 불가한 상황이며, 향후 최소 반 세기 동안 완전한 폐로가 이뤄질 가능성은 없다. 따라서, 폐로 작업에 따라 저장 부지가 부족하다는 이유를 들어, 향후 최소 수백 년간 태평양의 방사성 오염을 야기할 수 있는 오염수를 해양에 방류한다는 결정은 불합리한 결정이다.

둘째, 도쿄전력은 최소 수십 년간 지속될 오염수 해양 방류가 태평양에 세기를 넘는 시간까지 미칠 수 있는 방사성 오염 피해를 종합적으로 평가하지 못했다. 후쿠시마 원전 부지 뿐만 아니라 인접한 오쿠마 및 후타바 지역에도 늘어나는 오염수를 장기 저장할 충분한 공간이 존재한다. 이는 2018년 도쿄전력이, 그리고 2020년 일본 경제산업성 오염수 소위원회가 제출한 보고서에서 언급한 사실이다. 그러나, 장기 저장이 불가한 기술적 근거 없이, 오염수 해양 방류만을 전제한 것이다.

셋째, 오염수 해양 방류 결정은 환경에 미칠 위험을 차단하는 사전 예방의 원칙에 위배되며, 인접국에 미칠 방사성 오염 피해를 최소화 할 국제법적 의무를 위반한다. 또, 국제 사회가 합의한 방사선 방호의 주요 3원칙에도 위배된다.

이에 더해, RIA가 기본 원칙으로 고려했다고 밝힌 IAEA의 일반안전지침 'No. GSG-9'를 선택적으로 차용하여, 해당 조건을 충족하지 못하고 있다. IAEA 지침에 따르면, 현재의 RIA는 후쿠시마 현 주변의 현재 방사성 오염 수준과 오염수 해양 방류로 야기될 수 있는 다양한 방식의 생태계 오염을 제대로 평가하지 못했기 때문에 접근 방식부터 전면 수정되어야 하는 수준이다.

현재의 RIA는 "국제적으로 승인된 기술 문서를 참고하여 (IAEA 안전기준, 국제 방사선 방호 위원회 권고안 등) 오염수 방류로 인한 방사선 영향을 평가"한다고 밝힌 목표를 달성하지 못했다.

넷째, 도쿄전력이 발표한 오염수 방류시 방사선 영향평가는 유엔 국제해양법이 권고하는 환경영향평가의 조건을 충족하지 못한다. 따라서, 오염수 해양 방류로 인한 환경영향평가는 여전히 필수적이며 방류 이행 전에 마련되어야 한다.

결과적으로, 현재 도쿄전력의 RIA는 오염수 방류시 방사선 영향 평가에 접근법과 평가 대상과 기준, 평가 결과에 있어 상당한 오류를 보이고 있다. 도쿄전력의 방사선 영향평가 범위가 매우 제한적이라는 것은, 한국을 비롯한 인접국 시민들과 더 광범위한 피해의 파급 영향을 고려하지 못했다는 의미이다.

국제법이 권고하는 환경영향평가**(EIA)** 조건 불충족

도쿄전력의 RIA는 1982 해양법에 관한 협약 206조가 요구하는 환경영향평가로 볼 수 없다. 1982 해양법에 관한 협약 206조는 "자국 관할권 또는 통제 하에 예정된 활동이 해양 환경의 상당한 오염 또는 이에 대한 심각하고 유해한 변화를 야기할 수 있다는 합리적인 근거가 있는 경우, 예정된 활동이 해양 환경에 미치는 잠재적 영향을 최대한 평가하고, 205조에 명시된 방법에 따라 평가의 결과 보고서를 공유"할 것을 명시하고 있다.

그러나 현재의 RIA는 방사성 오염수 해양 방류를 옹호하는 도쿄전력의 방사선 평가에 불과하며, 해양 환경 방출 시 예상되는 잠재적 환경 영향 평가에 대한 결과를 담지 못했다. 오염수 방류로 인해 해양으로 수십 년간 방출될 방사성 핵종은 세기를 넘어서까지 생태계에 영향을 미칠 것이나, 생태계 유입시 예상 결과와 피해나 방사성 핵종의 생물종 누적 영향 등은 전혀 언급되지 않았다.

또, 총량이 그대로 오염수와 방출될 탄소-14와 삼중수소가 해양 생물에 장기적으로 미칠 영향을 다룬 최신의 연구 결과나 상향된 국제 기준을 다루지 않았다. 특히, 삼중수소가 생물에 유입되어 유기결합삼중수소(OBT)로 치환됐을 때, 복구할 수 없는 유전적 변이가 일어날 수 있는 위험도 고려되지 않았다.

더불어, 원전 사고 이후부터 지금까지 제염되지 못한 자연 환경에서 지속 유입되고 있는 고농도의 세슘이 후쿠시마 현에 마주한 태평양 연안과 강하류에 미치고 있는 방사성 오염 위험이나 퇴적물과 광물 결합된 세슘에 의해 피폭되는 생물종(하구에 서식하는 어패류 등) 피해도 전혀 평가되지 않았다.

현재 RIA의 결론은 후쿠시마 오염수 방류가 해양 환경과 생물종, 어업 등 광범위한 영역에 미칠 부정적 영향이 전혀 없다는 결론을 내리고 있다.

2차 **ALPS** 처리 결과의 불확실성

도쿄전력의 RIA 및 방류 계획은 오염수 2차 처리 시 성공적으로 ALPS를 진행한다는 것을 전제로 한다. 그러나 성공하지 못했을 때의 계획은 다루고 있지 않다.

도쿄전력의 RIA는 ALPS 처리수의 약 70% (2019년 12월 31일까지 채워진 수조 인벤토리 기준)가 "재정화 대상 처리수"로서, 환경 방출 기준을 초과하는 방사능 물질 (삼중수소 제외)을 포함하고 있음을 인정하고 있다. 간단히 말해서, 처리 후 오염수의 70%가 여전히

방류 기준을 초과한다는 의미다. 하지만, 도쿄전력 RIA는 2차 처리의 복잡성과 불확실성, 실패 시 영향 (향후 발생문제, 오염수의 부지 내 저장 등)에 대해서는 언급하지 않고 있다.

2021년 11월 25일 현재, 도쿄전력에 따르면 ALPS 오염수 1,284,284m^{3}가 수조에 저장되어 있다. 그 중 832,900m^3 (67%)는 Sr-90, I-129, Ru-105 등의 방사성 핵종 농도를 낮추기 위해 ALPS 2차 처리를 거쳐야 하는데, 이는 수 년이 소요되며 그 일정에 대해서는 구체적 내용이 제시되지 않았다.

따라서, 현 단계에서는 2차 처리 완료 후 오염수의 총 방사능 인벤토리 수준을 추정할 수 없다. 수조마다 인벤토리가 달라서, 최종 농도는 각기 다를 것이기 때문이다.

가장 큰 장애 요인은 저장을 위한 부지 확보이며, "실제 건설 전까지, 저장시설의 입지를 결정하고 방사능 폐기물 저장 시설 설치 승인을 위해, 지자체 등으로부터 이해를 구하는 작업에 상당한 조율과 시간이 소요될 것이다."[1] 즉, 부지 확보는 어렵지만 가능하다.

태평양으로 방류하지 않고 부지 내에 오염수를 유지하는 비용은 최대 51조 엔 또는 4,800억 달러로 추정되었다.[2] 도쿄전력 입장에서 태평양 방류는 확실히 비용이 적은 방안이다. 마찬가지로, 일본 국내 및 외국 어민, 그리고 환경에 대한 경제적 비용은 측정되지 않았다.

후쿠시마의 문제를 해결할 수 있는 기술을 확대, 지원하겠다는 다양한 제안이 있었으나, 일본 정부는 삼중수소를 저장수에서 제거하기 위한 처리 또는 탈질화(denitration)를 피상적으로만 검토했다. 미국 업체 퓨로라이트의 이온교환 기술은 오염수의 방사성 핵종 농도를 비검출 수준으로 낮출 수 있는 것으로 확인되었다.[3]

후쿠시마 오염수 방출의 국제법적 위법성

각 국가는 해양법에 관한 협약 192조에 따라 해양환경을 보호 및 보존할 의무가 있다.[4] 국가는 해양환경의 보호 및 보존과 관련된 국제 의무를 이행할 책임이 있으며, 국제법에 따라 책임을 져야 한다.[5] 국제법은 타 국가의 영토뿐만 아니라 국내 관할권 외 구역에 대한, 심각한 초국경적 환경 피해를 금지하고 있다.

---

[1] METI, "The Subcommittee on Handling of the ALPS Treated Water Report" 10 February 2020 (Provisional Translation).

[2] CER, "Contaminated water strategy of critical importance", Japan Center for Economic Research, March 7, 2019, (in Japanese).

[3] John Large, "Preliminary analysis of TEPCO processed water data sheets", June 21st 2018, Large & Associates, London for Shaun Burnie, Greenpeace Germany.

[4] United Nations Convention on the Law of the Sea, Dec.10, 1982, entered into force Nov. 16, 1994, UN Doc. A/CONF.62/122 (1982), 21 I.L.M. 1261 (1982). At http://www.un.org/Depts/los/convention_agreements/convention_overview_convention.htmhttp://www.un.org/Depts/los/convention_agreements/convention_overview_convention.htm.

[5] Law of the Sea Convention, Article 235(1).

한국과 일본 정부가 모두 비준한 유엔 해양법 협약(UNCLOS) 194(2)조는 다음과 같이 명시하고 있다.

> "국가는 자국의 관할권 또는 통제 하의 활동이 타 국가 또는 그 환경에 오염으로 인한 피해를 야기하지 않고, 또한 자국의 관할권 또는 통제 하의 활동이나 사건으로 인한 오염이 해당 국가가 본 협약에 따라 주권을 행사하는 구역을 넘어 확산되지 않도록 하기 위해, 필요한 모든 조치를 이행해야 한다."

도쿄전력이 향후 최소 수십 년간 오염수를 해양에 방류하면, RIA에서 평가된 10km2 구역을 넘어선 해역까지 장기적인 방사성 오염에 노출될 것이 자명하다.

또 다른 금지조항은 UNCLOS의 195조이다. "해양 환경의 오염을 방지, 저감 및 통제하기 위한 조치를 이행함에 있어, 국가는 피해 또는 위험이 어느 한 구역에서 다른 구역으로, 또는 어느 한 유형의 오염이 다른 오염으로 직접 또는 간접적으로 이전되지 않도록 해야 한다."

ICJ(국제사법재판소)는 가브시코보-나지마로스 사건[6]에서 "자국 관할권 및 통제 내의 활동에 있어 타 국가 또는 국가 통제 외 구역의 환경을 존중해야 한다는 국가의 일반의무는 환경 관련 국제법의 근간을 이루고 있다."고 밝혔다. 도쿄전력은 오염수 해양 방류 결정과 그 결과가 위의 국제법적 요건을 위배하는 행위임을 외면하고 있다.

리우 선언의 제15 원칙은 다음과 같은 사전예방 원칙을 명시하고 있다.

> 환경을 보호하기 위해, 국가는 각국의 역량에 따라 사전예방 원칙을 광범위하게 적용해야 한다. 심각한 또는 돌이킬 수 없는 피해의 위험이 있는 경우, 명확한 과학적 증거가 부족하다는 것이 환경 피해 예방을 위한 비용효과적 조치를 미루는 사유로 이용되어서는 안 된다.

심해저에 관한 분쟁에 대해 강제관할권을 갖는국제해양법재판소(ITLOS) 해저분쟁재판부[7]는 다음과 같이 언급했다.

> "본 재판부는 사전예방 원칙이 더 많은 국제조약 및 기타 법률문서에 반영되고 있으며 그 중 상당수가 리우 선언의 제15 원칙을 적용하고 있음을 확인한다. 본 재판부는 이를 제15 원칙이 관습국제법의 일부로 포함하는 추세임을 확인한다."

사전예방 원칙에 따르면, 오염수 해양 방류의 환경 영향에 대한 과학적 불확실성이 있으므로, 오염수 방류 결정이 이행되어서는 안 된다.

결론적으로, 오염수 해양 방류는 한국, 중국, 태평양 연안국 등 인접국 수역 뿐만 아니라 공해에 대한 오염 피해를 야기하지 않을 국제법적 의무를 위반하는 처사다.

---

[6] Gabčíkovo-Nagymaros Project (Hungary/Slovakia) [1997] ICJ Rep 7, para. 53. At https://www.icj-cij.org/en/case/92/judgments. Citing Legality of the Threat or Use of Nuclear Weapons (Advisory Opinion) [1996] ICJ Rep 1996 226, 241 -242.

[7] Case 17. Para 135

도쿄전력이 무시한 정당화 및 최적화 원칙

도쿄전력의 RIA 초안은 국제 사회가 약속한 기본적인 방사선 방호 원칙(ICRP 103[8])을 적용하지 않고 있다.

ICRP(국제 방사선 방호 위원회, International Commission for Radiological Protection)는 방사선방호의 기본 3원칙 즉, 정당화(Justification), 최적화(Optimization) 및 선량한도(Dose Limit) 적용 원칙을 준수하며, 피폭을 주는 방사선원과 피폭하는 개인에게 이 원칙의 적용이 수반되어야 함을 명확히 권고하고 있다.

정당화**(justification)** 원칙은 방사선 피폭을 수반하는 행위는, 이로 인한 리스크를 충분히 상쇄하는 이득을 줄 수 있어야만 허용된다고 명시된다.

원자력 사고로 인한 방사성 오염수를 고의적으로 해양에 방출하는 행위가, 이로 인해 피폭 피해를 입을 개인 또는 사회에 대한 순효용이 방사선 피해를 상쇄하기에 충분하지 않을 경우, 오염수 해양 방류의 정당성은 확보되지 못하는 것이다[9].

도쿄전력과 일본 정부는 방류를 막을 수 있는 신규 기술뿐만 아니라, 장기 저장이라는 대안이 있음에도 오염수 해양 방류를 정당화하는 사회적 순효용(일본 국내와 피해가 예상되는 국외 영역 포함)을 입증하지 못하고 있다.

“정당화 과정은 EU 과학위원회[10]가 명시하듯 오염수 해양 방류로 인해 피해를 입을 일본 국내외 시민들에 대한 사회적 순효용을 명확히 입증해야한다.

최적화**(Optimization)** 원칙은 경제 및 사회적 요인을 고려[11]하여, 피폭 발생 가능성, 피폭자 수, 개인 피폭선량 등을 모두 합리적으로 가능한 최소 수준으로 유지해야 함을 뜻한다. 또한, 최적화 절차의 일환으로, ICRP는 특정 방사선원으로 인한 개인 선량에 제한을 둘 것을 권고하고 있으며, 이는 선량한도**(Dose Limit)** 원칙과 연결된다.

방사선 피폭을 합리적으로 가능한 최저 수준으로 유지한다는 것은, 도쿄전력이 오염수를 장기 저장하며 최신의 기술로 지속적인 정화 처리를 해야함을 의미한다. 오염수 해양 방류 결정은 위의 국제 방사선 방호 원칙에 모두 위배된다.

유해 물질 및 폐기물 처분에 관한 UN 특별보고관은 “존엄한 삶을 가능하게 하며 문화를

---

[8] https://www.icrp.org/docs/P103_Korean.pdf

[9] What are the current guidelines for radiation protection – see European Commission, 2. The Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks, 2012, see (SCENIHR)https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/security-scanners/en/l-3/2-radiation-protection.htm

[10] Ibid.

[11] ICRP, 2009. Application of the Commission's Recommendations to the Protection of People Living in Long-term Contaminated Areas After a Nuclear Accident or a Radiation Emergency. ICRP Publication 111. Ann. ICRP 39 (3). See https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20111

즐기고 추가적인 방사능 오염에 의도적으로 피폭되지 않는 것은 인간의 환경권에 해당한다. 도쿄 정부는 이러한 권리를 온전히 존중해야 하며, 무시해서는 안 된다."[12] 고 지적했다.

후쿠시마 원전 폐로와 오염수 해양 방류의 연관성 제외

도쿄전력 RIA는 오염수 방류에 따른 환경 영향과 직결된 후쿠시마 제1원전의 폐로 문제를 전혀 고려하지 못했다.

현재 도쿄전력이 채택한 폐로 기술은 오염수의 양과 독성을 모두 증가시키는 방식이다. 후쿠시마 원전 폐로를 위해서는 폭발한 원자로 3기에 잔류한 핵연료 파편을 제거해야 한다. 현재 원자로의 오염 상태는 사람이 노출되면 1시간 내 사망하는 수준으로 기계조차 이겨내지 못한 고선량 방사선이 방출된다.

이에 도쿄전력은 원자로에 대량의 냉각수를 투입하고 로봇 팔이 연료 파편을 채취하는 폐로 방식을 택했다. 올해 3월, 그린피스는 후쿠시마 제1 원전 폐로 기술을 분석한 보고서[13]를 발표하고, 폐로 과정에서 원자로에 남은 대부분의 스트론튬90과 플루토늄, 우라늄 등 엄청난 독성의 알파 핵종이 모두 오염수가 된다는 점을 지적했다.

후쿠시마 제1원전 1~3호기 내 잔류한 핵연료 파편의 정확한 위치와 상태, 양은 여전히 불확실하다. 또, 추가 폭발을 예측할 임계 지점, 방사능 농도, 화학적 특성과 기하학적 형태 등의 불명확[14]하여, 현재로선 가장 효율적이고 안전한 폐로 방법을 결정할 수 없는 상황이다.

일본 정부는 2050년 내 원전 부지 복구를 위해 오염수를 해양에 방류할 수밖에 없다는 입장을 고수하고 있다. 그러나 우크라이나 정부는 용융된 노심 연료의 양이 후쿠시마 원전의 절반 수준인 체르노빌 원전 폐로까지 앞으로 100년의 시간이 걸린다고 예측했다. 앞으로 30년간 천문학적인 비용을 들여 폐로를 진행해도, 후쿠시마 원자로 3기의 방사성 물질을 처리하는 것은 과학적으로 불가능하다. 완전한 폐로가 이루어질 때까지 앞으로 고독성의 오염수는 끊임없이 증가할 것이다.

도쿄전력은 후쿠시마 원전 부지의 심각한 오염된 물질을 처리하는 새로운 접근법이 필요하다. 부지를 사고 이전의 자연상태(greenfield)로 돌리는 것은 불가능하며, 현재의 후쿠시마 원전 부지를 장기 핵폐기물 저장소로 활용해야 한다. 그린피스는 지난 3월 발표한 보고서를 통해, 비현실적이고 불가능한 일정을 위해 위험한 폐로 과정에서의 피폭 피해나 천문학적인 자금 투입을 고집하는 것이 아니라 장기적이며 전략적 방안을 새로 수립할 것을 요구했다.

---

[12] 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

[13] https://www.greenpeace.org/korea/report/16766/report-report-decommissioning-of-the-fukushima-daiichi/

[14] Technical Strategic Plan 2017 for Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.,, August 31, 2017 Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation, see https://www.dd.ndf.go.jp/files/topics/448_ext_02_0.pdf

현재진행형인 후쿠시마 원전 사고 피해 - 해양의 세슘 고함량 미립자

후쿠시마 제1원전 사고로 인한 후쿠시마 주변 지역과 해역, 일본 전체와 아시아 태평양 에 걸친 방사성 오염은 아직도 현재 진행형이다. 이 가운데, 원전 부지에 저장된 약 128만톤 이상의 오염수가 향후 최소 수십 년간 바다로 방출될 위기인 것이다. 삼중수소, 탄소-14 등 기체와 액체 형태 분자 구조에 빠르게 유입되는 베타 핵종과 세슘, 스트론튬 등 퇴적층에 오래 잔류하는 감마 핵종은 끊임없이 생태계 순환 시스템 안에서 재오염을 일으키고, 원전 재난의 영향을 향후 수백 년 간 지속시킬 것이다.

지난 10년 간, 후쿠시마 사고 이후 해양 연안의 퇴적물과 하구의 방사능 농도를 측정하는 여러 연구가 진행됐지만, 생물 종별 피해 영향이나 생물종의 방사능 환경에의 적응도 등 보다 깊이 있고 종합적인 연구는 양적으로 절대 부족한 상황이다. 또, 생태계에 유입된 방사성 핵종의 장기적인 거동이나 향후 피폭 경로 등 여러 불확실성이 존재하기 때문에 아직 입증해나갈 부분이 많다는 것이 관련 학계의 중론이다.

이런 배경에도 불구하고, 도쿄전력의 RIA는 반감기가 매우 긴 고독성의 방사성 핵종들이 복잡한 해양 유기체에 어떤 영향을 미치는지 최신의 연구를 고려하거나, 설명하려는 노력조차 보이지 않고 있다.

한편, 연안의 퇴적물에서 방사성 세슘 농도가 기준치 보다 높게 측정된 사례들이 존재함에도 불구하고, 도쿄전력의 RIA는 후쿠시마 오염수 방류가 환경에 미치는 영향이 없을 거라는 제한적이고 왜곡된 정보를 제시한 셈이다.

후쿠시마 사고의 방사능 피해를 지속적으로 축소해온 일본 정부와 도쿄전력의 행보는 원전 사고 초기부터 지금까지 이어지고 있다. 일본 정부는 후쿠시마현 주민들에 대한 연간 방사선 선량을 세계 권고치인 1mSv/y에서 20mSv/y로 상향 조정했다. 당시, 국내외 전문가들과 UN 인권 특별 보고관, UN 인권이사회 등의 비난이 이어졌다. 2018년 발표된 유엔 인권이사회 국가별 정례인권검토[15](Universal Periodic Review, UPR) 결과, 일본 정부는 다음과 같은 강력한 권고를 받았다.

> "일본 정부는 방사선 허용선량을 1mSv/year로 복구하고, 피난민과 주민들에게 지원을 계속함으로써, 후쿠시마 지역에 거주하는 주민,
> 특히 임산부와 어린이의 신체 및 정신적 건강에 대한 권리를 최대한 존중해야 한다."[16]

후쿠시마현 주민들은 2011년 사고 직후부터 국제 사회가 합의한 허용 기준을 초과하는 수준의 방사선량에 상당히 피폭됐을 가능성이 높지만 주민들에 대한 장기 건강 영향 평가는 제대로 진행되지 못 했다. 특히, 후쿠시마현의 70% 이상을 차지하는 산림을 제염하는 것이 불가한 상황에서, 세슘 고함량 미립자[17](Cesium-rich microparticles, CsMPs)가 다양한

---

[15] 인권이사회가 192개 유엔 회원국 인권상황을 유엔 헌장, 세계인권선언, 각종 인권협약, 자발적 공약 등에 비추어 정례 검토하는 활동

[16] United Nations Human Rights Council, "Universal Periodic Review of Japan, Human Rights Council, Decision of Working Group", 26 February to 23 March 2018, see https://www.ohchr.org/en/hrbodies/upr/pages/jpindex.aspx

[17] 세슘 고함량 미립자는 고선량 방사능을 뿜는 밀리미터 수준의 소입자로 2019년 후쿠시마 제1 원전에서 약 200킬로미터 떨어진 곳에서 발견됐다. 세슘 고함량 미립자에 대한 연구에 따르면, "세슘 고함량 미립자는 세슘

경로를 통해 주민들에게 흡입 및 접촉된 피해는 기초 조사 부재로 현재로선 추정조차 불가한 상황이다.

문제는, 최근 세슘 고함량 미립자가 후쿠시마현 인근 태평양 연안 지역의 해양 조사 샘플에서도 발견됐다는 점이다.[18] 도쿄전력이 RIA 초안의 핵심 기준으로 인용한 IAEA 일반안전지침 No. GSG-9 에 따르면, 방류로 인한 방사능 영향을 평가하기 위해 "자연 방사능, 기존 핵무기실험이나 사고 영향으로 인한 방사성 오염 수준을 비롯해 원전 부지 주변 물, 토양, 식물, 곡물 등 다양한 환경적 요소의 방사능 농도를 측정할 것"이 요구되며, "새로운 방사선 오염 경로를 발견한 경우"에는 RIA를 수정할 것[19]을 권고하고 있다.

그러나, 도쿄전력은 RIA에 세슘 고함량 미립자 등 새로운 방사성 피폭 경로에 대한 최신 연구들을 포괄하는 평가를 제시하지 못한다.

후쿠시마 연안과 하구의 방사성 오염

도쿄전력은 RIA에서 지난 10년간 발생한 후쿠시마 현 주변 태평양 연안과 바다로 이어지는 하구에 대한 방사능 오염 평가는 전혀 제시하지 않았다. 후쿠시마 현의 70% 이상을 차지하는 산림은 제염이 불가하여, 고지대의 숲과 호수에 저장된 상당량의 방사성 핵종은 지속적으로 태평양 연안에 유입되고 있다.[20]

따라서, 도쿄전력이 RIA를 통해 방출 지점 인근 10km^{2}에 대한 영향만 고려하여, 오염수 방류가 해양 영향에 미치는 피해가 없다고 규정한 것은 정당화 될 수 없는 명백한 왜곡이다.

앞서 밝힌 바와 같이, 현재 원전 주변과 지역 환경의 방사능 농도를 기초조사 하는 것은 IAEA 지침에 따라 RIA의 기본 전제이나, 그것이 도쿄전력의 편의에 따라 선택적으로 반영된 셈이다.

세슘이나 스트론튬은 상대적으로 무거운 방사성 핵종으로 주로 퇴적층이 모여있는 하류로 이동하는 특성이 있다. 이 영향으로 후쿠시마 현의 하구가 오염된다. 사고 초기 방사성 물질이 전혀 발견되지 않던 강하류 부근에서 방사능 농도가 높게 측정되는 이유이다.

고유활성도가 높고 입자 크기가 작아, 인체 호흡기에 깊이 침투하여 수십 년간 머무를 수 있고, 이로 인해 국지적 피폭 선량이 높게 나타날 수 있다. 거주지역 내 세슘 고함량 미립자는 현재 수목, 콘크리트, 건물 등으로 둘러싸인 지역 등 다양한 환경 속에 존재하고 있다. 따라서 이들 지역의 표면에서 씻겨 내려가게 되면 물질의 이동성이 크게 증가할 수 있다." see https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653519322581?via%3Dihub

[18] Miura, H., Ishimaru, T., Ito, Y. et al. "First isolation and analysis of caesium-bearing microparticles from marine samples in the Pacific coastal area near Fukushima Prefecture." Sci Rep 11, 5664 (2021). https://www.nature.com/articles/s41598-021-85085-w

[19] IAEA, "Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment", General Safety Guide No. GSG-9, General Safety Guide Jointly Sponsored by the International Atomic Energy Agency and United Nations Environment Programme, International Atomic Energy Agency Vienna, 2018, see https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1818_web.pdf

[20] Greenpeace Japan, "Radiation Reloaded: Ecological Impacts of the Fukushima Daiichi Nuclear Accident 5 years later", February 2016, see https://www.greenpeace.org/archive-japan/Global/japan/pdf/GPJ-Fukushima-Radiation-Reloaded-Report.pdf.

하구는 강한 해류의 영향을 받지 않기 때문에, 조개류와 일부 해양 생물의 주요 거점지이다. 세슘을 함유한 입자 일부가 부유 형태로 강둑을 따라 퇴적되기도 하지만[21], 광물 결합된 방사성 세슘의 상당 부분이 해안 하구로 유입되며[22], 이는 "해양 생물상에 쉽게 축적"[23]된다.

지하수 오염 방지 실패

도쿄전력은 유입 및 오염되는 지하수의 양을 2020년 말 연평균 150m3/t, 2025년까지 100m3/t로 감소하는 목표가 있다. 이 목표가 달성된다는 전제 하에도, 2030년까지 약 45만톤의 추가 오염수가 발생할 것으로 예측된다. (총 456,250m^3)

다시 말해, 현재 저장되어 있는 약 128만톤의 오염수 이외에 약 50만톤의 오염수가 ALPS 처리를 거쳐야 하는 것이다. 그 결과 역시 장담할 수 없다.

지하수 유입과 폐로 과정에 따른 오염수의 양적 증가는 결국 원전 부지 내 오염수 추가 저장 시설을 설치해야 함을 의미한다. 도쿄전력 RIA는 이러한 현실에 대한 합리적인 분석이나 인정 없이, 2차 처리는 무조건 성공하는 것을 전제로 해양 방류에만 초점을 맞추고 있다. 저장 기간이 늘어나면 삼중수소를 비롯한 일부 방사성 물질은 반감기를 거치며 더 안전한 수준이 될 수 있음에도 불구하고 해양 방류만을 고집하는 과학, 기술적 정당성 역시 확인되지 않는다.

ALPS의 최종 성능이 불확실하고, 향후 폐로 과정에서 더해질 세슘, 스트론튬, 플루토늄 등 고독성의 방사성 핵종이 오염수에 포함될 것을 고려하면, 오염수로 인한 환경 및 인체 위험을 최소화할 수 있는 유일한 방법은 추가적인 저장 공간을 확보하고, 동기간 최적의 기술을 통해 정화 처리를 계속하는 것이다.

삼중수소와 유기결합삼중수소(**Organically-Bound Tritium**)

도쿄전력 RIA는 유기결합삼중수소(OBT)의 위험성을 전혀 언급하지 않고 있다. 삼중수소(H-3)의 반감기는 12.3년이다.[24] 삼중수소는 단당류, 아미노산 등 유기 화합물과 결합할 수 있다.[25] 삼중수소가 생물체에 유입되면, 체내 조직의 수소 분자로 치환되며

---

[21] Kakehi, S., et al. "Radioactive cesium dynamics derived from hydrographic observations in the Abukuma River Estuary, Japan." (2016). Journal of Environmental Radioactivity. Vol. 153: 1–9. see http://www.science direct.com/science/article/pii/S0265931X15301600.

[22] Iwasaki, T., et al. "Computational modeling of Cs-137 contaminant transfer associated with sediment transport in Abukuma River." (2014). Journal of Environmental Radioactivity. Vol.139: 416–426, see http://www.sciencedirect.com/ science/article/pii/ S0265931X14001520.

[23] Ibid.

[24] Fairlie (2014).

[25] McCubbin, D., Leonard, K.S., Bailey, T.A., Williams, J., Tossell, P., 2001. Incorporation of organic tritiagirum (3H) by marine organisms and sediment in the Severn Estuary/Bristol Channel (UK). Mar. Pollut. Bull. 42, 852–863.

유기결합삼중수소가 된다.[26] 고농도의 삼중수소나 유기결합삼중수소에의 노출이 장기화되면 암 또는 유전자 결함이 발생할 수 있다는 증거가 담긴 연구들도 있다.[27]

핵발전소에서 누출된 삼중수소는 거의 전부가 삼중수소수 형태, 즉 방사능 물 형태로 존재한다.[28] 핵발전소에서의 삼중수소 방출 이후 수중 생물의 삼중수소 분포와 농도를 연구한 사례는 극히 일부다. 유기 물질에 결합한 삼중수소에 대한 데이터는 더욱 적다. 유의미한 연구는 뉴욕 허드슨 강의 퇴적물 샘플을 채취한 결과였는데, 퇴적층의 유기결합삼중수소 농도가 시간의 변화에 따라 계속 증가했기 때문이다.[29] 이는 장기적인 삼중수소 배출이 해양에 축적됐을 때의 영향을 시사한다.

캐나다 핵발전소 인근의 해양 생물상 내 삼중수소 농도에 대한 연구에 따르면, 해조류, 홍합, 어류는 유기결합삼중수소(OBT) 농도비가 모두 달랐다. 홍합은 조류, 어류와 비교해 농도비가 가장 높았다.[30] 이처럼 생물종별로 방사성 핵종에 대한 반응과 유입 수준이 각기 다르다. 또한, 과거에 유출된 삼중수소가 생물 체내의 유기결합삼중수소 농도 증가에 지속적 영향을 끼칠 수 있다는 결과도 확인되었다.

바다홍합에 대한 저선량 삼중수소 피폭 영향 연구[31]에 따르면, 유기결합삼중수소는 쌍각류 조개의 혈액 세포에 유전적 손상을 야기할 수 있는 것으로 확인되었다. 또한, 해당 연구는 홍합의 내장, 아가미, 외투막 등의 순으로 방사능 양이 많았다고 밝혔다.[32] 조직 내 대사와 장기에 직접적인 영향을 준다는 의미다. 또 다른 연구에선, 삼중수소가 유입되는 구역의 어류 및 기타 수중 생물의 방사성 농도가 모델 시뮬레이션의 예측치 보다 높은 경우가 많다는 점도 지적했다.[33]

---

[26] Kim, S.B., Bredlaw, M.,Rousselle H., Stuart, M. Distribution of organically bound tritium (OBT) activity concentrations in aquatic biota from eastern Canada. 208-209 Journal of Environmental Radioactivity. At https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.105997.

[27] Kim (2019). Citing I. Fairlie A hypothesis to explain childhood cancers near nuclear power plants. J. Environ. Radioact., 133 (2014), pp. 10-17.

[28] Svetlik, I., Fejgl, M., Malátová, I., Tomaskova, L., 2014. Enhanced activities of organically bound tritium in biota samples. Appl. Radiat. Isot. 93, 82–86.

[29] Kim (2019) citing Cohen, L.K., Kneip, T.J., 1973. Environmental tritium studies at a PWR (pressurized water reactor) power plant. In: Tritium. Messenger Graphics Publ, pp. 623–639.

[30] Kim (2019).

[31] Jha, A.N., Dogra, Y., Turner, A., Millward, G.E., 2005. Impact of low doses of tritium on the marine mussel, Mytilus edulis: genotoxic effects and tissue-specific bioconcentration. Mutat. Res. 586, 47–57.

[32] Awadesh N. Jha et al. “Impact of low doses of tritium on the marine mussel, Mytilus edulis: genotoxic effects and tissue-specific bioconcentration.” 2005. DOI: 10.1016/j.mrgentox.2005.05.008.

[33] Kim (2019), citing Williams, J.L., Russ, R.M., McCubbin, D., Knowles, J.F., 2001. An overview of tritium behaviour in the Severn Estuary (UK). J. Radiol. Prot. 21, 337–344 and Yankovich, T.L., Kim, S.B., Baumgärtner, F., Galeriu, D., Melintescu, A., Miyamoto, K.,

도쿄전력의 RIA는 선량계수 등 환경 내 삼중수소의 거동에 대한 과학적 불확실성 수준을 반영하지 못하고 있다. 예를 들어, 2011년 IAEA의 삼중수소 실무반 MODARIA (방사선 영향 평가를 위한 모델링 및 데이터)은 수중 생태계의 삼중수소 거동 모델에 대한 데이터가 불충분하며, 중량 100g 이상의 어류에서 유기결합삼중수소(OBT)의 동적 특성에 대한 실험 결과가 없다고 밝혔다(Melintescu et al.,2011). 그러나 선행 연구들을 통해, 삼중수소수와 유기결합삼중수소 모두가 어류를 포함한 해양 생물의 세포 조직에 축적되는 것은 확인했다고 밝히고 있다.

탄소-14

오염수 희석 처리에도 불구하고, 탄소-14는 해양 방류시 전량 환경으로 방출된다. 탄소-14의 반감기는 5,730년이며, 세계 인구의 집단 방사능 피폭 선량의 주요 원인이다.[34] [35] 탄소-14가 체내 대사에 유입되는 방식은 인체를 구성하는 탄소와 동일하다. 또한, 탄소-14는 먹이사슬을 통해 생물종에 쉽게 농축될 수 있다. 연구에 따르면, 탄소-14의 어류 및 연체동물의 농축계수는 5,000, 토양 퇴적물은 2,000으로 삼중수소 보다 월등히 높은 수준이다.[36] 프랑스 IRSN 연구에 따르면, 탄소-14는 세포와 DNA 손상을 일으켜 세포사 또는 유전 가능 돌연변이를 유발할 수 있다.[37] 도쿄전력은 이러한 탄소-14의 치명적인 위험성에 대해 전혀 평가하지 않았다.

스트론튬-90

스트론튬-90은 가장 유해한 방사성 핵종 중 하나다. 스트론튬의 화학적 거동은 칼슘과 유사하며, 유기체, 특히 뼈에 축적될 수 있다.[38] 후쿠시마 사고 이후, 일본 동부 해안에서

Saito, M., Siclet, F., Davis, P., 2011. Measured and modelled tritium concentrations in freshwater Barnes mussels (Elliptio complanata) exposed to an abrupt increase in ambient tritium levels. J. Environ. Radioact. 102, 26–34..

[34] 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., Faïd, 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. At http://www.wise-paris.org/index.html?/english/stoa_en.html&/english/frame/menu.html&/english/frame/band.html.

[35] Buesseler 2020.

[36] 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.

[37] "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.

[38] See M. Fukuoto, ed. Low-Dose Radiation Effects on Animals and Ecosystems Long-Term Study on the Fukushima Nuclear Accident. 2020.

발견된 방사능 스트론튬 농도를 분석한 결과, 사고 이전보다 최대 100배까지 증가한 것으로 밝혀졌다. 지형상, 쿠로시오 해류 북부 지역이 저위도 지역으로 이동하는 방사능 물질을 막는 방벽 역할을 하고 있어 스트론튬 농도가 가장 높게 발견된다.[39] 원전 사고 이후, 한반도 인근 해역에서도 스트론튬이 발견된 사실이 보고됐다.[40] 그러나 도쿄전력의 방사선 영향평가는 오염수 방류 이후 해양 생태계의 스트론튬 농도 증가의 위험성에 대해서는 함구하고 있다.

후쿠시마 현의 고지대 산림 및 호수의 대규모 방사성 세슘량은 현재도, 그리고 앞으로도 방사성 세슘이 태평양으로 유입되는 지속적, 장기적 원인이 될 것이다. 육상 및 담수계 내의 이러한 지속적이고 다량으로 저장된 방사능은 당분간 지역사회 및 비인간 생물상 모두에 상당한 위협이 된다.

도쿄전력의 RIA 초안은 일본 국민 및 아시아 태평양 지역의 국제사회에 대해, 2011년 재난의 방사선 상황과 영향, 지속적인 여파 등을 설명하기에는 전적으로 부족하다. 도쿄전력의 후쿠시마 오염수 방류 계획은 이러한 폭넓은 컨텍스트에서 고려되어야 한다. (끝)

---

[39] Casacuberta, N; Masqué, P; Garcia-Orellana, J; Garcia-Tenorio, R; Buesseler, K.O.. 90Sr and 89Sr in seawater off Japan as a consequence of the Fukushima Dai-ichi nuclear accident. 2013. Biogeosciences; Katlenburg-Lindau Vol. 10, Iss. 6, (2013): 3649.

[40] Kim C-K, Byun J-I, Chae J-S, Choi H-Y, Choi S-W, et al. (2012) Radiological impact in Korea following the Fukushima nuclear accident. J Environ Radioact 111: 70–82. See Steinhauser G, Schauer V, Shozugawa K (2013) Concentration of Strontium-90 at Selected Hot Spots in Japan. PLoS ONE 8(3): e57760. doi:10.1371/journal.pone.0057760. At https://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0057760&type=printable. See also Tazoe, H., Yamagata, T., Tsujita, K., Nagai, H., Obata, H., Tsumune, D., Yamada, M. (2019). Observation of dispersion in the japanese coastal area of released 90Sr, 134Cs and 137Cs from the Fukushima Daiichi nuclear power plant to the sea in 2013. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(21) doi:http://dx.doi.org.ezproxy.otago.ac.nz/10.3390/ijerph16214094.