

# 후쿠시마 제 1 원전 오염수 위기

TEPCO WATER CRISIS

그린피스 독일사무소 보고서

숀 버니(Shaun Burnie)<sup>1</sup>, 그린피스 독일사무소 수석 원자력 전문가

2019년 1월 22일



사진설명: 후쿠시마 제 1 원전. 2018년 10월 16일

© Christian Åslund / Greenpeace

*“후쿠시마 원전 사고의 문제는, 사고로 나오는 핵폐기물질이 정상가동시의 경우와는 매우 다르다는 점이다. 바닷물, 소금, 진흙, 모래 등이 섞여 있는 상태로, 이 오염수를 처리하는 일은 그 규모와 복잡함 면에서 엄청나다. 또한 원자로 및 격납건물에서 데브리(debris)<sup>2</sup>를 꺼내야 하는 작업도 남아 있다.”*

- 존 라지 박사(Dr. John Large), 컨설팅 엔지니어, 2018년 6월 22일<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Senior Nuclear Specialist, Greenpeace Germany (Tokyo)

<sup>2</sup> \*(감수자 주) 핵연료가 원자로내의 구조재와 함께 녹아 섞여 있는 덩어리로, corium 이라고도 한다.

<sup>3</sup> Briefing note to Shaun Burnie, June 2018.

## 요약 (Executive Summary)

도쿄전력(TEPCO)<sup>4</sup>은 후쿠시마 제 1 원전<sup>5</sup>에서 배출되는 고준위 방사성 오염수를 처리하느라 골머리를 앓고 있다. 그 규모가 엄청난 데다 성질도 특이한 탓이다. 지난 8년간 계속 나오는 오염수로 인해 후쿠시마 제 1 원전은 여러 차례에 걸쳐 위기를 맞이했다. 2018년 12월 13일 기준 제 1 원전(1-4 호기)에 보관된 오염수 양은 111만 톤이다.<sup>6</sup> 이 중 98만 8천 톤이 재처리되어 철제 탱크에 저장되어 있다.<sup>7</sup> 오염수는 일주일마다 2천~4천 톤씩 늘어나고 있다. 이 오염수 위기를 해결하지 않는다면, 이미 현실성을 잃은 도쿄전력의 용융핵 연료 추출계획은 더 이상 추진이 어려워질 수밖에 없다.

50여 년 전에 도쿄전력이 후쿠시마 제 1 원전 부지를 애초의 해발 35미터보다 25미터 낮은 해발 10미터에 건설한 것이 제 1 원전의 운명을 결정했다. 이로 인해 수십 년 동안 원전으로 흘러드는 지하수를 막느라 싸워야 했다. 또 2011년 사고 이후 오염된 지하수가 유입돼 발전소 부지에 쌓이고 있다. 도쿄전력은 지하수를 뽑아낸 우물을 설치함으로써 원자로 건물로 흘러드는 지하수의 양을 줄이려 했지만, 오염수는 날마다 최대 150톤씩 늘어나고 있다.<sup>8</sup> 태풍으로 비가 많이 오면 양은 더 늘어난다. 이에 대응하기 위해 도쿄전력은 2014년부터 원자로 둘레(약 1.5km)에 동토벽(ice wall)을 설치했다.<sup>9</sup> 도쿄전력은 이 방어벽을 6년간 운영해 “건물 내의 오염 지하수를 정화 처리하고 건물 방수작업을 끝낼 시간을 벌면, 2020년에는 제 1 원전 부지 내의 건물들에 물이 유입되는 것을 차단할 수 있다”고 주장했다.<sup>10</sup> 그러나 도쿄전력의 주장은 신뢰를 받지 못하고 있으며, 2020년까지 그런 목표가 달성될 가능성도 낮아 보인다.

도쿄전력이 내놓는 오염수 대책에 관해 그동안 다양한 의문들이 제기되어 왔다. △부지 내에 흘러드는 지하수를 줄이기 위한 노력의 효과 △방사성 물질을 제거하기 위해 물을 처리하는 방식 △처리된 물을 태평양으로 방출하겠다는 계획 등과 같은 의문이다.

도쿄전력은 오염수의 다핵종 제거 설비인 ALPS(Advanced Liquid Processing System, 이하 ALPS)를 활용해 방사성 준위를 낮추려는 시도가 오염 정도를 해양 방출에 적합한 규제치

<sup>4</sup> \*(감수자 주) 지주회사(Holding company)로 되어 있다.

<sup>5</sup> \*(감수자 주) 후쿠시마현에는 사고가 발생한 제 1 원전(6기)와, 약 12km 남쪽에 있는 제 2 원전(4기)이 있다.

<sup>6</sup> TEPCO, “Situation of Storage and Treatment of Accumulated Water including Highly Concentrated Radioactive Materials at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (382th Release)” 10 December 2018, see [https://www7.tepcoco.jp/wp-content/uploads/handouts\\_181210\\_02-e.pdf](https://www7.tepcoco.jp/wp-content/uploads/handouts_181210_02-e.pdf)

<sup>7</sup> Ibid.

<sup>8</sup> Ibid.

<sup>9</sup> TEPCO, “Fukushima Daiichi NPS Prompt Report Construction Of Water-Blocking Ice Wall Starts At Fukushima”, 3 June 2014, see [https://www4.tepcoco.jp/en/press/corp-com/release/2014/1237060\\_5892.html](https://www4.tepcoco.jp/en/press/corp-com/release/2014/1237060_5892.html)

<sup>10</sup> TEPCO, “Questions on the “Land-side Impermeable Wall (Frozen Soil Wall)”, 2014, see [https://www4.tepcoco.jp/en/decommission/planaction/ga\\_ice\\_wall-e.html](https://www4.tepcoco.jp/en/decommission/planaction/ga_ice_wall-e.html)

이하<sup>11</sup>로 떨어뜨리는 데 실패했다는 사실을 원전 사고가 일어난 지 7년 이상 지난 2018년 9월이 되어서야 인정했다. 또, 같은 달 28일 ALPS 처리 후 철제 탱크에 저장한 물 89만 톤 중 약 75만 톤이 해양 배출 허용 규제치보다 높은 방사성 물질을 함유하고 있다고 인정했다.<sup>12</sup> 도쿄전력의 평가에 따르면, 처리수 6만 5천 톤에 포함된 스트론튬 90은 규제치의 100배에 달했다. 일부 탱크에서는 규제치의 2만 배에 이르는 경우도 있었다. 그동안 도쿄전력은 ALPS가 오염수의 방사성을 배출 가능한 수준으로 떨어뜨릴 것이라고 주장해 왔으나, 실제 상황은 전혀 다르다는 사실을 인정했다.<sup>13</sup>

도쿄전력이 사태의 심각성을 인정함에 따라 문제는 더 어려워졌다. 그러나 분명한 것은 1백만 톤에 이르는 오염수의 태평양 방출 계획은 실행할 수 없다는 점이다. 오염수를 관리하는 일본 정부 관계 당국과 국제원자력기구(이하 IAEA)가 지지하고 있는 이 방출계획은 이제 방향을 잃었으며, 오염수 배출을 반대하는 지역의 목소리는 그 어느 때보다 더 힘을 얻고 있다.

본 보고서는 오염수 위기가 어떻게 진행되어 왔는지, 그 처리 기술은 왜 도쿄전력이 주장하는 기준에 이르지 못했는지, 그리고 일본 정부가 제시하는 방사성 삼중수소 제거 기술이 왜 채택되지 않았는지를 분석한다.

본 보고서에 따르면, 도쿄전력은 애초의 주장과는 달리 오염수 처리 기술이 성과를 내지 못한다는 점과 방사성 핵종을 제거하는 데 실패하고 있다는 점을 처음부터 알고 있었다. 실제 오염 수준을 대중에게 공개하면 도쿄전력과 경제산업성(METI)의 목표, 즉 태평양에 오염수를 방출하는 것으로 이 엄청난 문제를 해결하려는 계획에 지장이 생길 것이 분명했다. 다행히도 사태는 그들이 계획한 대로 진행되지는 않았다.

도쿄전력, 원자력규제위원회, 일본 정부는 그들의 전임자들이 과거에 저지른 실수로부터 아무런 교훈도 얻지 못했다. 단기적인 경제 이익에 기반한 결정으로 원자로 3기가 멜트다운(핵연료의 용융)되었고<sup>14</sup>, 일본국토와 태평양 수천 평방킬로미터의 지역이 오염되었으며, 16만 5천 명의 후쿠시마 주민들이 피난하지 않을 수 없었다. 아직도 수만 명이 고향을 잃은 피난민 상태다. 지난 수년간 고준위 방사성 오염수를 처리하는 대안은

---

<sup>11</sup> \*(감수자 주) 일본법의 규제치는 60,000Bq/l 이하이나, 도쿄전력은 사고 전의 원전 가동시에 30,000Bq/l 이하라는 조금 높은 자체 기준을 이용하고 있었다.

<sup>12</sup> Asahi Shimbun, “Editorial: TEPCO bungles it again in dealing with Fukushima tainted water”, 9 October 2018, see <http://www.asahi.com/ajw/articles/AJ201810090025.html>

<sup>13</sup> 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/Treatmentofcontaminatedwater.pdf>

<sup>14</sup> \*(감수자 주) 멜트다운은 일반적인 용어로서 핵추진과들은 “원자로손상”으로 표현한다. 용융 핵연료가 원자로를 뚫고 나온 상태를 멜트쓰루(Melt through), 그리고 격납건물을 뚫고 밖으로 나온 상태를 멜트아웃(Melt out)이라고 한다.

제대로 고려되지 않았으며, 이에 따라 유효한 성과를 낼 수도 있는 방식들이 무시되었고 제대로 개발되지 못했다. 후쿠시마 제 1 원전에서 일어나고 있는 오염수 사태는 2011년 3월에 벌어진 원전 사고와 마찬가지로 전적으로 인간이 초래한 인재다.

일본 정부와 도쿄전력은 후쿠시마 제 1 원전의 오염수 사태를 2020년까지 해결하겠다는 목표를 세워놓았지만, 전혀 신뢰할 수 없는 계획이었다. 모든 오염수를 재정화(처리)하는 데 5~6년 걸릴 것으로 보고 있으나, 그 실효성에 의문이 제기되는 것은 당연하다. 오염수의 양은 앞으로 계속 늘어날 것이기 때문이다. 유일한 효과적 해법은 오염수를 철제 탱크에 중장기적으로 저장해 그사이에 처리 기술의 발전을 꾀하는 것뿐이다.

일본 정부와 도쿄전력은 오염수 관리 방안들을 시급히 재검토해야 한다. 앞으로 내려질 결정에서 가장 중요하게 고려해야 할 것은 이 문제의 최전선에 있는 사람들, 즉 후쿠시마의 태평양 연안 지역사회와 수산물 관련 산업을 보호하는 것이다. 2018년에 겨우 열린 몇 차례의 공개회의를 비롯해 지난 수년간 기회 있을 때마다 이들의 주장이 제기되었다. 2018년 8월, 후쿠시마현 어업협동조합연합회 노자키 테츠 회장은 오염수를 바다에 방출하면 지역 어업에 “치명적인 타격”을 줄 것이라고 강조한 바 있다.<sup>15</sup> 이러한 주장을 무시하는 접근법은 올바른 방식이 아니며, 오염수를 그저 태평양에 방출하려는 계획도 심각한 오류다.

후쿠시마 제 1 원전 사고가 발생한 지 8년이 지난 지금도 위기의 끝은 보이지 않는다. 도쿄전력과 일본 정부는 사태의 심각성과 관련해 대중을 기만하는 일을 멈추어야 하며, 1백만 톤에 이르는 고준위 오염수를 비롯한 핵폐기물을 장기적으로 저장하고 관리할 방안을 찾는 데 최우선을 두어야 한다.

## 서론

도쿄전력은 후쿠시마 제 1 원전 사고로 발생한 고준위 오염수를 처리해야 하는 거대한 문제에 봉착해 있다. 지난 8년 동안 오염수 사태와 관련한 일련의 단계를 거쳐 왔지만, 그동안 부지 내의 방사성 오염수는 지속해서 증가했다.

2018년 12월 13일 기준으로 후쿠시마 제 1 원전(1~4 호기)의 오염수 규모는 111만 톤에 달한다.<sup>16</sup> 그 대부분인 98만 8천 톤은 철제 탱크에 저장된 처리수이며, 지금도 매주 2천~4천 톤씩 증가하고 있다.<sup>17</sup> 이렇게 막대한 양의 물을 처리할 해법이 당장 존재하지 않는 상황에서, 도쿄전력이 이 위기에 어떻게 대처해 왔는지는 부지 내의 현 상황에 직접적인

<sup>15</sup> Kazumasa Sugimura and Chikako Kawahara “Residents blast water-discharge method at Fukushima plant” 31 August 2018, see <http://www.asahi.com/ajw/articles/AJ201808310042.html>

<sup>16</sup> TEPCO, “Situation of Storage and Treatment of Accumulated Water including Highly Concentrated Radioactive Materials at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (382th Release)” 10 December 2018, see [https://www7.tepco.co.jp/wp-content/uploads/handouts\\_181210\\_02-e.pdf](https://www7.tepco.co.jp/wp-content/uploads/handouts_181210_02-e.pdf)

<sup>17</sup> Ibid.

영향을 미친다. 오염수 위기를 해결하지 않는다면, 이미 현실성이 없는 것으로 비판받고 있는 도쿄전력의 대책은 더욱 난관에 부딪힐 수밖에 없다.

## 50년 전 도쿄전력의 결정, 후쿠시마 제1 원전의 운명을 좌우하다

도쿄전력이 50년 전 한 선택이 이 일본 최대 전력 회사의 운명을 결정지었다. 그리고 이 선택으로 인해 도쿄전력은 물론 일본 전체가 피할 수 없는 재앙을 남은 21세기와 미래에까지 감당해야 한다.

도쿄전력은 1960년대에 제1 원전을 건설하면서 비용을 줄이기 위한 방식을 선택했다. 발전소 설비를 해수면에 가까운 정도로 낮게 건설한 것이다.<sup>18</sup> 이러한 결정은 오로지 비용 절감의 목적에서 내려진 것이었다. 원자로를 식히기 위해 바닷물을 사용해야 하므로, 해수면 높이의 저지대에 원자로를 설치하면 35미터 상층 지역에 원자로를 설치하고 펌프로 물을 공급하는 것보다 운영 비용이 훨씬 적게 든다.<sup>19</sup> 이 발전소가 위치한 곳의 지질은 층적단구층이어서, 도쿄전력의 결정은 심각한 지하수 문제를 초래하는 것이었으며, 후쿠시마 제1 원전 사고 같은 일이 벌어지면 사태가 연쇄적으로 악화될 수밖에 없었다.<sup>20</sup>

1960년대 말, 원자로 건설을 시작하기 직전에 도쿄전력은 발전소 기단부를 해수면으로부터 35미터 높이로 계획했던 것을 뒤집고 10미터 높이로 변경했다.<sup>21</sup> 게다가 비상 디젤 발전기를 포함하는 터빈 건물 등의 발전소 지하 설비는 그보다 14미터나 더 낮은 곳에 만들었다.<sup>22</sup>

---

<sup>18</sup> \*(감수자 주) 제너럴 일렉트릭(GE)과의 턴키(Turn-key)계약으로 진행된 탓으로, 당시 냉각수인 바닷물을 35미터 높이까지 끌어 올리는 펌프의 비용이 매우 높아 항구건설의 비용을 절감하기 위해 25미터를 깎았다.

<sup>19</sup> Reiji Yoshida And Takahiro Fukada “Fukushima plant site originally was a hill safe from tsunami”, Japan Times, 13 June 2011, see <https://www.japantimes.co.jp/news/2011/07/13/national/fukushima-plant-site-originally-was-a-hill-safe-from-tsunami/#.W95gLXozaAw>

<sup>20</sup> The terrace lies within the Hamadori belt, a stretch of Quaternary deposits limited by the Abukuma Granites to the West, and the Pacific Ocean to the East. The geology comprises a sequence of Cainozoic marine and fluvial sediments directly recharged by rain infiltration, as described in Yamamoto T. The rate of fluvial incision during the Late Quaternary period in the Abukuma Mountains, northeast Japan, deduced from tephrochronology. *Isl. Arc.* 2005;14:199–212. doi: 10.1111/j.1440-1738.2005.00464.x, and cited in International Journal of Environmental Research and Public Health, “Managing Groundwater Radioactive Contamination at the Daiichi Nuclear Plant” Atsunao Marui and Adrian H. Gallardo, 2015 Jul; 12(7): 8498–8503, see <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4515732/>

<sup>21</sup> Opcit. Reiji Yoshida And Takahiro Fukada 13 June 2011.

<sup>22</sup> \*(감수자 주) 토네이드의 영향을 고려한 미국의 (지하)건설방식을 검토없이 받아들인 탓이나, 일본은 지진의 영향을 적게 받는 지하에 무거운 발전기를 설치한다는 사고방식이었다. 결과적으로 쓰나미 대책을 전혀 고려하지 않았다.

후쿠시마 제 1 원전의 원자로들은 이렇게 낮게 설치되었기 때문에, 후쿠시마 원전 사고 이전에도 매일 850 톤의 지하수가 원자로 건물로 흘러들었다.<sup>23</sup>

이러한 방식으로 원자로가 설치된 것은 건설 및 운용비용을 줄이기 위해서였다. 과거에 내려진 그 같은 결정으로 인해 오늘날 재앙과 같은 원자력 위기 사태가 초래됐으며, 회사는 실질적으로 파산 상황에 처했다.<sup>24</sup> 사태를 수습할 처리 비용도 앞으로 수십 년 동안 눈덩이처럼 계속 불어나, 수백억 달러에 이를 것으로 예상된다.<sup>25</sup>

원전을 수십 년간 가동하는 동안, 도쿄전력은 원자로 및 터빈 건물 내에 유입되는 지하수를 퍼내는 우물들을 주변에 설치했었다.<sup>26</sup> 원전 건물 주변의 지하수 수위를 낮추어 흘러드는 지하수를 차단하기 위해서였다. 그러나 2011 년에 쓰나미가 닥쳤을 때, 배수 시설과 펌프는 모두 손상을 입고 작동을 멈췄다.<sup>27</sup>

사고 이후 8 년 가까운 기간 동안, 도쿄전력은 원자로 1~3 호기의 원자로 및 격납용기에 있는 핵연료 등의 데브리(Debris)를 식히기 위해 매일 상당한 물을 원자로로 쏟아부었다. 이렇게 냉각하지 않으면 녹은 핵연료의 온도는 치솟게 되며, 특히 노심용융 뒤 몇 년 동안에 그런 사태가 벌어진다<sup>28</sup>. 이렇게 되면 2 차적인 화학반응 사태로 확산될 수 있다. 데브리를 식히는데 실패하면 그에 따른 화학반응으로 인해 엄청난 수준의 비응축 가스(주로 일산화탄소와 이산화탄소)가 발생하게 된다. 이렇게 발생한 가스로 생긴 압력은 이미 약해진 격납용기에 더 큰 부담을 주게 되고, 결국 통제되지 않은 방사성 물질이 대기로 더욱 많이 방출되는 사태로 이어진다.<sup>29</sup>

---

<sup>23</sup> \*(감수자 주) 1966 년 7 월의 신청서에 따르면, 당시 해안근처까지 표고 20 미터에 지하수면이 있었을 정도로 지하수 유입이 많아, 원전 사고전에도 지하수를 퍼내는 우물(drain) 57 기를 지하 10 미터에 설치하여 매일 약 750 톤의 지하수를 퍼내고 있었다.

<sup>24</sup> Hajime Matsukubo, "Commentary: Why wasn't TEPCO bankrupted?" Citizens Nuclear Information Center, CNIC, 4 June 2018, see <http://www.cnic.jp/english/?p=4128>

<sup>25</sup> Japan Center for Economic Research, "Accident Cleanup Costs May Rise to 50-70 Trillion Yen - It's Time to Examine legal liquidation of TEPCO - Higher Transparency is Needed for the Reasons to Maintaining Nuclear Power", Tatsuo Kobayashi, Principal Economist, Professor Tatsujiro Suzuki, Specially Appointed Fellow (Director of Nagasaki University Research Center for Nuclear Weapons Abolition), Kazumasa Iwata, JCER President, see <http://www.jcer.or.jp/eng/research/policy.html>

<sup>26</sup> \*(감수자 주) 사고 당시 파산상태였지만, 일본정부의 지원으로 법적으로는 파산상황을 모면했는데, 지금도 일본정부가 51%의 주식을 가지고 있다.

<sup>27</sup> \*(감수자 주) 현재 새로 42 기의 우물(Sub-drain)을 설치하여 운용하고 있다.

<sup>28</sup> \*(감수자 주) 핵분열생성물의 붕괴열때문이다.

<sup>29</sup> For an early description of the Fukushima Daiichi accident see, John Large, "Incidents, Developing Situation And Possible Eventual Outcome At The Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plants", 11 April 2011, Greenpeace Germany, see [https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/Large\\_Report\\_R3196-A1\\_10\\_April\\_2011-3\\_0.pdf](https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/Large_Report_R3196-A1_10_April_2011-3_0.pdf)

2011년 원전 사고 이후 원자로를 식히려는 절망적인 시도가 계속되었으며, 그 결과 1~4 호기 원자로 건물 내부에는 7만 톤의 고준위 오염수가 축적되어 있는 상태다. 2018년 12월 기준으로 원자로와 터빈 건물에 남아있는 오염수의 양은 27,780 톤으로 추정된다.<sup>30</sup>

이처럼 막대한 양의 오염수는 냉각을 위해 쏟아부은 물과 자연적으로 흘러든 지하수가 합쳐져 형성된 것이다. 이 물은 테브리와의 접촉으로 방사성을 가진 고준위 오염수로 변한다. 특정한 핵분열생성물 및 활성화 물질(세슘, 코발트, 스트론튬, 안티몬, 삼중수소 등)은 물에 쉽게 녹아 퍼진다.<sup>31</sup>

2011년 5월 15일 당시 도쿄전력은 하루 최대 720톤의 담수를 후쿠시마 제 1 원전의 원자로 3기에 주입하고 있었다.<sup>32</sup> 6월 1일경에는 513톤 정도였다.<sup>33</sup> 용융 핵연료가 냉각됨에 따라 도쿄전력은 원자로 주입 수량을 점차 줄여왔으며, 2018년 12월 13일에는 하루에 225톤 정도가 되었다.<sup>34</sup> 그러나 이와 같은 조치를 하는 동안, 원전 부지 내의 처리수는 2018년 12월 13일 기준으로 210만 톤에 이르렀다.<sup>35</sup>

2018년 12월에도 여전히 냉각수가 1~3호 원자로에 주입되고 있으며, 격납용기로 흘러가게 되는데, 격납용기로부터 물이 새어 나와 원자로 건물의 지하에 있는 Torus room<sup>36</sup>에 축적되고 있다.<sup>37</sup>

원전 안과 주변으로 다량의 지하수가 흘러들어오는 구조이기 때문에, 도쿄전력은 원자로 건물 안에 있는 고준위 오염수가 주변 환경으로 배출되지 않도록 하는 과제를 해결해야 한다. 도쿄전력은 원자로 건물 안에 고인 물의 수위를 통제하는 데 주력하고 있다. 내부에 고인 물의 수위를 건물 주변의 지하수 수위보다 낮게 유지함으로써 지하수가 건물 안으로 흘러들게 하고, 삼투압을 이용해 방사성 물질이 밖으로 흘러나가지 않도록 한다는 것이다.

---

<sup>30</sup> Opcit. TEPCO, 10 December 2018

<sup>31</sup> IRSN, “Aftermath of the Fukushima Daiichi nuclear accident of March 2011 - Situation update in March 2016”, March 2016, see <https://www.irsn.fr/EN/publications/thematic-safety/fukushima/fukushima-2016/Documents/IRSN-Fukushima-in-2016.pdf>

<sup>32</sup> TEPCO, “Plant Status of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant”, 15 May 2011, see [https://www7.tepco.co.jp/wp-content/uploads/hd03-02-04-001-001-09-handouts\\_110515\\_01-e.pdf](https://www7.tepco.co.jp/wp-content/uploads/hd03-02-04-001-001-09-handouts_110515_01-e.pdf)

<sup>33</sup> TEPCO, “Plant Status of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant”, 1 June 2011, see [https://www7.tepco.co.jp/wp-content/uploads/hd03-02-04-001-001-09-handouts\\_110601\\_01-e.pdf](https://www7.tepco.co.jp/wp-content/uploads/hd03-02-04-001-001-09-handouts_110601_01-e.pdf)

<sup>34</sup> Opcit. TEPCO, 10 December 29 2018.

<sup>35</sup> \*(감수자 주) 세슘, 기름성분, 염분을 제거한 오염수의 반 정도를 냉각수로서 재이용하고 있다.

나머지 반은 더 세밀한 정화처리한 후 탱크에 저장하고 있다. Opcit. TEPCO, 10 December 2018.

<sup>36</sup> \*(감수자 주) 비등수형 원자로에만 있는 것으로, 격납용기 밑에 물이 차있는 도너츠형의 압력제어실이 있는 “구역”이다.

<sup>37</sup> Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation, “Technical Strategic Plan 2018 for the Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.” October 2, 2018, see [http://www.dd.ndf.go.jp/en/strategic-plan/book/20181109\\_SP2018eFT.pdf](http://www.dd.ndf.go.jp/en/strategic-plan/book/20181109_SP2018eFT.pdf)

## 지하수 오염의 통제와 감소

후쿠시마 원전의 오염수 사태는 태평양을 방사성으로 오염시키는 직접적인 위협이 되어 왔다. 위협의 정도는 오염원인 방사성 핵종이 지하수에서 확산되는 속도에 기반하여 측정되었다. 방사성 핵종은 각기 다른 정도로 원전 지역의 사암층 지질과 상호작용한다. 사암과 상호작용하지 않는 삼중수소(3H)는 하루에 1 미터의 속도로 지하수를 따라 퍼진다. 스트론튬은 더 느리고(한 달에 1 미터), 세슘은 더욱더 느리다(하루에 몇 센티미터).<sup>38</sup>

도쿄전력은 2013년 4~12월 사이에 원자로와 항만 사이에 ‘동토벽(바다 물막이벽)’을 설치한 바 있다. 이 벽은 길이가 약 780미터에 이르고 땅속 30미터 깊이에 박은 강철 파이프 594개로 구성되어 있다.<sup>39</sup> 이 벽의 용도는 원전 부지에서 바다로 나가는 지하의 대수층에 흐르는 지하수를 통제하려는 것이다. 2014년에 동토벽과 제방 사이의 공간이 메워진 뒤, 2015년 8~10월 사이에 다섯 개의 지하수 우물(Drain)이 벽을 따라 설치되었고, 2015년 10월, 바다로 흘러드는 지하수를 우물로 퍼내어 처리해 바다로 방출하는 계획이 발표된 후, 동토벽은 완전히 닫혔다. 그러나 닫힌 벽 안쪽에 누적되는 지하수 양이 늘어남에 따라 2015년 11월에 동토벽이 휘어지는 현상이 나타났다. 도쿄전력은 벽을 강화하는 조치를 하고, 지하수로 인한 압력을 완화하기 위해 퍼내는 지하수량을 늘렸다.<sup>40</sup>

원전 지대나 원자로 건물로 흘러드는 지하수량을 줄이는 작업은 양수용 우물(Drain)을 건설하는 방식을 중심으로 전개되어 왔으며 동토벽을 설치하는 것도 그 대책 중 하나였다.

### 1. 양수용 우물(Sub-drain)<sup>41</sup>

도쿄전력이 설치한 양수용 우물 시스템은 기본적으로 원자로와 터빈 건물 주변을 따라 설치한 다수의 우물로 구성되어 있다. 이 우물에 고인 물의 양수 작업은 2015년 9월 3일부터 시작되었다.<sup>42</sup> 또 ‘By Pass 시스템’은 산 쪽에서 들어오는 저준위의 지하수를 퍼내기 위해

<sup>38</sup> IRSN, “Fukushima Daiichi nuclear accident - Groundwater under the site Situation in January 2016”, March 2016, see [https://www.irsn.fr/EN/publications/thematic-safety/fukushima/fukushima-2016/Documents/14-IRSN\\_Fukushima-2016\\_Safety-Groundwater\\_201603.pdf](https://www.irsn.fr/EN/publications/thematic-safety/fukushima/fukushima-2016/Documents/14-IRSN_Fukushima-2016_Safety-Groundwater_201603.pdf)

<sup>39</sup> TEPCO, “Sea-side Impermeable Wall”, [https://www7.tepco.co.jp/responsibility/decommissioning/action/w\\_management/sea\\_side-e.html](https://www7.tepco.co.jp/responsibility/decommissioning/action/w_management/sea_side-e.html)

<sup>40</sup> Ibid.

<sup>41</sup> \*(감수자 주) 지하수대책으로 건설된 우물은 3가지로, 산쪽에서 들어오는 저준위 오염수를 퍼내는 1)By-pass drain, 2)원전건물주위의 양수용 우물(Sub drain), 3) 해측 동토벽 근처에 있는 지하수 drain 가 있다. 사용 용도는 모두 지하수를 퍼내는 목적이다.

<sup>42</sup> TEPCO, “Groundwater Pump-up by Subdrain System and Groundwater Drain”, see [https://www7.tepco.co.jp/responsibility/decommissioning/action/w\\_management/subdrain-e.html](https://www7.tepco.co.jp/responsibility/decommissioning/action/w_management/subdrain-e.html); and TEPCO, “Summary of Decommissioning and Contaminated Water Management”, 26 January 2017, see [https://www7.tepco.co.jp/wp-content/uploads/hd03-02-03-001-d170126\\_01-e.pdf](https://www7.tepco.co.jp/wp-content/uploads/hd03-02-03-001-d170126_01-e.pdf)

부지의 언덕 부분의 폭 약 470 미터에 만든 12 기의 양수용 우물로 구성되어 있다.<sup>43</sup> 이러한 우물에서 퍼낸 지하수는 방사성 농도를 낮춘 후에 원전 항만 내로 방출하고 거기에서 태평양으로 흘러나간다.

퍼 올려진 지하수가 처리되고 배출되기 시작한 것은 2015 년 9 월 14 일부터이며, 2018 년 9 월 25 일 현재 모두 60 만 2,904 톤의 물이 이런 과정을 거쳐 배출되었다. 도쿄전력은 “자사와 제 3 자 기관이 수질의 운용 기준 적합성을 확인한 뒤에” 물을 내보낸다고 주장해왔다.<sup>44</sup>

지하 배수로와 양수용 우물의 설치로 인해 원자로 건물로 흘러드는 지하수의 양이 줄어들게 되었다. 도쿄전력은 하루 최대 150 톤의 물이 유입된다고 평가했다.<sup>45</sup>

## 2. 동토벽

*“우리 평가에 따르면 동토벽은 분명히 효과를 보여왔습니다. ...  
이제 물의 수위를 관리할 수 있는 시스템을 갖추게 된 것입니다.”  
- 도쿄전력의 마쓰다 나오히로 원자로폐기 총책임자<sup>46</sup>*

그러나 이 회사가 내놓은 많은 발표가 그렇듯, 그의 언급 역시 후쿠시마 제 1 원전의 실상을 제대로 말하고 있지 않다.

2014 년 6 월 3 일, 원전 부지 전체를 약 1.5 킬로미터의 동토벽으로 둘러싸는 공사가 시작되었다.<sup>47</sup> 공사비로 국비 345 억 엔(2 억 9 천 200 만 달러)이 투입됐으며, 연간 운영비는 10 억 엔(950 만 달러)에 이를 것으로 추산되고 있다.<sup>48</sup> 동토벽은 1,568 개의 파이프를 지하 30 미터에 1 미터간격으로 설치하고, 각 파이프에 투입된 액체 냉매(염화칼슘)가 섭씨 영하 30 도 이하를 유지하도록 한 것이다. 액체 냉매로 파이프 주변의 땅은 급속히 냉각되며, 결빙된 땅이 이어져 결국 땅속에 두께 약 2 미터의 기다란 얼음장벽이 형성되게 된다.

<sup>43</sup> TEPCO, “Groundwater Bypass System”, see

[https://www7.tepco.co.jp/responsibility/decommissioning/action/w\\_management/bypass-e.html](https://www7.tepco.co.jp/responsibility/decommissioning/action/w_management/bypass-e.html)

<sup>44</sup> TEPCO, “Summary of Decommissioning and Contaminated Water Management”, 27 September 2018, see [https://www7.tepco.co.jp/wp-content/uploads/hd03-02-03-001-d180927\\_01-e.pdf](https://www7.tepco.co.jp/wp-content/uploads/hd03-02-03-001-d180927_01-e.pdf)

<sup>45</sup> Ibid.

<sup>46</sup> Aaron Sheldrick and Malcolm Foster, “Tepco's 'ice wall' fails to freeze Fukushima's toxic water buildup”, Reuters, 8 March 2018, see <https://www.reuters.com/article/us-japan-disaster-nuclear-icewall/tepcos-ice-wall-fails-to-freeze-fukushimas-toxic-water-buildup-idUSKCN1GK0SY>

<sup>47</sup> TEPCO, “Fukushima Daiichi NPS Prompt Report Construction Of Water-Blocking Ice Wall Starts At Fukushima”, 3 June 2014, see [https://www4.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2014/1237060\\_5892.html](https://www4.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2014/1237060_5892.html)

<sup>48</sup> Mari Yamguchi, “Experts: Fukushima must do more to reduce radioactive water (Update)” Associated Press, 7 March 2018, see <https://phys.org/news/2018-03-fukushima-ice-wall-partly-radioactive.html>

동토벽의 주 시공사는 카지마건설(鹿島建設)이었다. 이 사업의 목표는 공사가 개시된 2014년 6월 당시 매일 320톤이 발생하는 오염 지하수를 제로로 줄이는 것이었다.<sup>49</sup> 도쿄전력은 오염 지하수의 축적량도 30~50톤 정도로 줄일 것이라고 보고했다.<sup>50</sup> 동토벽 건설 당시 도쿄전력은 이 시설을 6년 동안 가동하면, 그 사이 “원전 건물로부터 오염수를 빼내어 처리할 시간과 건물을 밀폐할 시간을 벌 수 있으므로 2020년까지 제 1 원전의 건물로 흘러드는 물을 모두 차단할 수 있다”고 주장했다.<sup>51</sup>

이와 같은 도쿄전력의 주장은 전혀 신뢰를 받지 못했다. 그 이유는 지하 냉각 파이프들을 원전의 지하설비(배관, 케이블 등)를 피해서 매설해야 하므로, 동토벽에 틈(구멍)이 생길 수밖에 없다는 점 때문이다.

2016년 12월에 원자력규제위원회(NRA)는 동토벽이 “설령 효과가 있더라도 제한적”이라고 평가하며, 지하수 오염 감소 대책으로는 어디까지나 보조적인 역할을 하는 것으로 간주해야 한다고 말했다.<sup>52</sup> 위원회는 도쿄전력이 지하수 문제를 동토벽이 아니라 펌프 방식으로 해결해 나가야 한다고 촉구했다.

동토벽 건설 이후에 발생한 지하수의 수량은 이 벽이 도쿄전력이 주장한 대로 작동되지 않는다는 점을 입증하고 있다. 지하수 양수용 우물, 동토벽 등의 방법을 모두 동원한 결과, 원자로 건물로 흘러드는 지하수가 감소한 것은 사실이다. 2015년 12월~2016년 2월 기간에 유입 지하수 양은 하루 평균 520톤이었지만, 2년이 지난 2017년 12월~2018년 2월 기간에 141톤으로 줄었다.<sup>53</sup>

그러나 태풍철에 집중되는 강우 때문에 발전 시설로 유입되는 지하수는 언제든 늘어날 수 있다. 예컨대 2017년 10월 태풍 란<sup>54</sup>이 상륙했을 때, 지하수 수위는 급속히 상승하였다. 이때의 지하수 유입량은 하루 평균 310톤으로, 지하 배수로, 양수용 우물, 동토벽 등을 설치하기 전에 원자로 지하로 흘러들었던 양인 400톤에 육박했다.<sup>55</sup> 2017년 10월의 마지막 주에 태풍 란은 토호쿠 지역을 강타하였는데, 이때 원자로 건물 지하로 유입된 물은 하루 최고

<sup>49</sup> TEPCO, “Measure of reduction of groundwater inflow into buildings of Units 1 to 4 using Land-side Impermeable Wall (“Ice Wall”) July 3, 2014, see [https://www4.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2014/images/handouts\\_140703\\_04-e.pdf](https://www4.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2014/images/handouts_140703_04-e.pdf)

<sup>50</sup> Ibid and Kazuaki Nagata “Fukushima No. 1’s never-ending battle with radioactive water”, Japan Times, 11 March 2015, see <https://www.japantimes.co.jp/news/2015/03/11/national/fukushima-1s-never-ending-battle-radioactive-water/#.W96hQXozbOQ>

<sup>51</sup> TEPCO, “Questions on the “Land-side Impermeable Wall (Frozen Soil Wall)”, 2014, see [https://www4.tepco.co.jp/en/decommision/planaction/ga\\_ice\\_wall-e.html](https://www4.tepco.co.jp/en/decommision/planaction/ga_ice_wall-e.html)

<sup>52</sup> The Asahi Shimbun “NRA: Ice wall effects ‘limited’ at Fukushima nuclear plant”, 27 December 2016, see <http://www.asahi.com/ajw/articles/AJ201612270056.html>

<sup>53</sup> Opcit. Sheldrick, 8 March 2018.

<sup>54</sup> Kyodo, “Seven dead as Typhoon Lan lashes Japan”, Japan Times, 23 October 2017, see <https://www.japantimes.co.jp/news/2017/10/23/national/powerful-typhoon-lan-lashes-tokyo-snarling-morning-commute-least-two-dead/#.W-ov2HozbOQ>

<sup>55</sup> Asahi Shimbun, “Fukushima ‘ice wall’ linchpin not living up to high hopes” 26 November 2017, see <http://www.asahi.com/ajw/articles/AJ201711260031.html>

880 톤에 이르렀다.<sup>56</sup> 반면, 건조기에 지하수 유입량은 적어졌다. 2018 년 1 월의 유입량은 하루 83 톤에 그쳤다.

태풍과 폭우로 인한 지하수 급증을 제쳐둔다고 하더라도, 동토벽의 건설 이전에 양수용 우물 설치 원자로에의 지하수 유입이 이미 하루 150 톤 정도로 감소한 점을 고려하면, 동토벽의 비효율은 분명해진다. 2018 년 2 월까지 석 달 동안 동토벽은 풀가동되었지만, 유입 지하수의 양은 하루 평균 140 톤이었다. 이는 동토벽 설치 이전과 비교해 단 10 톤 정도 줄어든 것이며, 사실 이 차이가 동토벽에서 비롯된 것인지조차 분명하지 않다.

도쿄전력은 2014 년에 자신들의 기술력으로 지하수 오염을 제로로 만들겠다고 공언했으나, 이 회사의 현재 기술로 볼 때 그런 목표가 달성될 가능성은 별로 없다. 따라서 도쿄전력은 앞으로도 수년간 원전 설비에 오염수가 계속 축적되는 상황에 직면할 수밖에 없다.

### 3. 오염수의 정화 처리

도쿄전력은 원자로 냉각 기능을 유지하고 오염수의 축적을 줄이기 위해 2011 년부터 다양한 물 처리 시스템을 도입했다.

사고가 발생한 직후 몇 주 동안 도쿄전력의 직원들은, 정화 처리(낮은 제염) 후의 오염수를 원자로 노심의 냉각수로 재이용하는 “순환주수 냉각” 시스템을 구성하기 위해 애썼으며, 이를 위해 일본 국내 기술뿐 아니라 미국과 프랑스의 기술까지 활용했다. 순환주수 냉각 시스템은 오염수가 원자로 용기의 구멍, 틈새, 기타 파손 공간으로 흘러나와 원자로 건물, 터빈 건물, 외부 배수로를 채우는 문제에 대처하기 위해 도입된 것이다. 도쿄전력은 2011 년 6 월 17 일에 물 처리 시스템을 본격 가동하기 시작했고, 열흘 뒤에 순환주수 냉각 시스템도 작동을 개시했다.<sup>57</sup>

그러나 두 시스템 모두 차질이 생겼다. 물이 계속 유출되었으며, 새는 부분을 찾아 틈을 메우는 동안 가동은 중단되어야 했다. 순환주수 냉각 시스템의 가동 전에는 인근 저수지에 있던 담수를 끌어와 원자로 노심을 식히는 데 사용했다. 그러나 2011 년 7 월 2 일부터는 순환주수 냉각 시스템만을 이용하고 있다<sup>58</sup>.

<sup>56</sup> Opcit. Sheldrick, March 2018.

<sup>57</sup> Japan Times, “Water treatment, cooling systems finally working”, Kazuaki Nagata, July 8 2011, see <https://www.japantimes.co.jp/news/2011/07/08/national/water-treatment-cooling-systems-finally-working/#.W9fxA3ozbOO>

<sup>58</sup> \*(감수자 주) 고준위 오염수→기름과 물의 분리→Kurion 사의 흡착탑→Sarry→담수화장치를 거친 후, 순환주수냉각 시스템에 약 반이 이용되고, 나머지는 다시 추가적인 정화공정을 거친 후 탱크에 저장되고 있다.

물 처리 시스템을 통해 처리된 오염수는 2011년 7월 첫째 주까지 모두 13,610 톤에 이르렀다. 2012년 1월에 원자로를 식히기 위해 최대 25만 톤의 물이 필요하다는 결과가 나왔다. 게다가 원자로의 “냉온 정지상태”<sup>59</sup>를 유지하기 위해서는 하루 50만 리터꼴로 물을 주입할 필요가 있었다. 프랑스 과리의 원자력 업체인 아레바(Areva)<sup>60</sup>와 미국 캘리포니아주에 있는 쿠리온(Kurion)<sup>61</sup>사가 개발한 정화 처리 시스템을 도입하는 비용은 당시 기준으로 6억 6천만 달러에 이를 것으로 추산되었다.<sup>62</sup>

후쿠시마의 첫 번째 정화 처리 시스템은 프랑스의 원자력 업체 아레바와 캘리포니아에 본사를 둔 핵폐기물 관리업체 쿠리온이 개발한 것이다. 쿠리온의 필터들은 제올라이트(불광석)를 함유하고 있다. 많은 다공성의 광물인 규산염의 제올라이트는 금속 이온과 느슨하게 결합한다. 이 필터는 흡수와 이온 교환을 통해 방사성 핵종인 스트론튬 90, 세슘 134, 세슘 137을 포집하여, 이런 방사성 핵종 물질들의 수중 농도를 최대 1천분의 1까지 줄일 수 있다. 쿠리온 공정을 거친 후 아레바의 공정을 이용하는 두 번째 단계로 이어진다. 오염수는 일련의 탱크로 차례로 이동되면서, 페로시안화 니켈이나 황산바륨과 같은 시약들과 혼합되고 고분자 물질이나 모래와 섞이기도 한다. 물에 용해되었던 방사성 금속들은 침전물 및 콜로이드를 형성하며 방사성 찌꺼기가 되어 분리된다. 물은 염분 및 기름까지 제거한 후 원자로로 다시 들어간다. 도쿄전력은 “두 공정을 거치면, 물속의 세슘 농도를 최대 100만분의 1로 줄일 수 있다”고 발표했다.

#### 4. ALPS(다핵종 제거설비)<sup>63</sup>

후쿠시마 제 1 원전에 축적된 오염수를 처리하기 위해 다양한 설비가 채택되었는데, 삼중수소를 제외한 62종의 방사성핵종을 제거하는 ALPS도 그중 하나다. 2013년 9월에 가동되기 시작한 이래 업그레이드를 거듭하여 고성능 ALPS가 2014년 말부터 가동되고 있다.<sup>64</sup>

도쿄전력은 2011년 6월에 ALPS 공사를 시작하여 2012년 10월에 완공했다. 2013년 3월에 시운전이 시작되었으며 2014년에 본격적으로 가동되었다. IAEA에 따르면, 현재의 시스템은 하루에 오염수 약 750톤을 처리할 수 있도록 고안되었다. 처리 용량이 똑같은 두

<sup>59</sup> \*(감수자 주) 원자로내의 물 온도를 섭씨 100도미만으로 하는 냉각을 지속하여 방사성물질도 나오지 않는 상태를 유지하는 것을 가리킨다.

<sup>60</sup> \*(감수자 주) 현재는 Framatome 사로 개편되었다.

<sup>61</sup> \*(감수자 주) 이 회사의 제품은 쓰리마일드 원전 사고의 오염수 처리에 이용된 적이 있다.

<sup>62</sup> “Absorption of Radionuclides from the Fukushima Nuclear Accident by a Novel Algal Strain.” PLOS ONE 9(4): e95903, see <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095903>

<sup>63</sup> \*(감수자 주) 미국회사의 설계를 바탕으로 일본 도시바사가 제조하였다.

<sup>64</sup> TEPCO, “Multi-nuclide Removal Equipment (“ALPS”) (Existing/ Improved/ High-performance)”, see [http://www.tepco.co.jp/en/decommission/planaction/images/141021\\_01.pdf](http://www.tepco.co.jp/en/decommission/planaction/images/141021_01.pdf)

번째 ALPS 시스템이 2014년 9월에 설치되었다.<sup>65</sup> 그해 10월에는 개량된 ALPS가 하루 500톤의 처리 능력으로 가동되기 시작했다. IAEA의 국제 동향 보고서는 “부지 내에서 지속적으로 발생하는 오염수를 관리하는 데 ALPS가 중요한 역할을 수행하는 만큼,” 성능을 개선하고 처리 용량을 늘리면서 계속 활용할 것을 권고했다.<sup>66</sup>

2015년 5월 27일, 저수탱크의 바닥에 남아있는 물을 제외한 모든 고준위 오염수(역삼투압 농축 염수, 스트론튬 함유)의 처리가 완료되었다. 2015년에 ALPS는 하루 약 1,260톤의 물을 처리하고 있었다. 하루 1,960톤을 처리하겠다는 2014년 발표에 미치지 못하는 실적이다. 도쿄전력은 “설비를 리모델링하고 가동 과정을 개선하여 효율을 높임으로써” 처리 용량을 늘리겠다는 계획을 세웠다.<sup>67</sup>

후쿠시마 제1원전 사고와 관련해 긍정적인 소식을 짜내야 한다는 압박감 때문에 도쿄전력, 그리고 ALPS의 가동 초기부터 함께 해온 IAEA는 이 기술을 적극 홍보했으며 유해한 방사성 핵종들의 제거가 성공적이었다고 홍보했다. 2015년의 IAEA 보고서는 다음과 같이 밝혔다.

“오염된 바닷물과 세슘 제거 과정을 거친 배출수를 이용한 시험 가동의 결과, 62가지의 방사성 핵종이 제거될 수 있으며 해양 방출 규제 기준을 충족하는 수준을 달성할 수 있다는 결론이 나왔다.”<sup>68</sup>

그러나 물속의 방사성 핵종의 농도를 감소시켜 방출 가능한 정도로 낮추는 도쿄전력의 물 처리 기술의 효율성은 가동 초기부터 의문의 대상이 되어왔다.<sup>69</sup> 아래에 설명하겠지만, 도쿄전력과 일본 정부는 오염수의 처리가 그들이 공언한 것처럼 작동되지 않는다는 사실을 이미 잘 알고 있었다. 2013년 9월 원자력비상대책본부는 오염수의 증가를 통제하는 데 필요한 대책에 “다핵종 제거설비(ALPS)의 오작동을 개선하여 물의 정화 처리를 촉진하는 것”이 포함된다고 명시했다.<sup>70</sup>

---

<sup>65</sup> 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>

<sup>66</sup> Ibid.

<sup>67</sup> TEPCO, “Update on the completion of contaminated water treatment” January 23, 2015 Tokyo Electric Power Company, see [https://www7.tepco.co.jp/wp-content/uploads/hd03-02-03-002-001-handouts\\_150123\\_02-e.pdf](https://www7.tepco.co.jp/wp-content/uploads/hd03-02-03-002-001-handouts_150123_02-e.pdf)

<sup>68</sup> Opcit. IAEA, 9 – 17 February 2015.

<sup>69</sup> See comments of Ming Zhang in June 2011 in Nature, “Fukushima deep in hot water”, Geoff Brumfiel and David Cyranoski, 7 June 2011, <https://www.nature.com/news/2011/110607/full/474135a.html>, WM2014 Conference, March 2 – 6, 2014, Phoenix, Arizona, USA Lessons Learned from the Fukushima Daiichi Nuclear Accident – A Discussion from a Neutral Point of View – 14384 Ming Zhang, Geological Survey of Japan, AIST

<sup>70</sup> Opcit. Nuclear Emergency Response Headquarters, 3 September 2013.

2015 년에 도쿄전력의 브리핑에서 스트론튬 제거 과정을 거친 물도 다시 정화 처리해야 한다는 사실이 밝혀졌다.<sup>71</sup> 브리핑은 “스트론튬이 제거된 물을 ALPS 시설을 통해 다시 처리함으로써 리스크를 더 줄일 것이다”라고 했고, 또 “과거 ALPS 가 제대로 작동되지 않았던 때의 처리수 역시 다시 ALPS 처리될 것이다”라고 밝힌 것이다. 결론은 “물을 배출하기 전 마지막 확인 조치로서, 이미 정화된 물에도 추가적인 정화 처리가 고려될 수 있다”는 것이었다.

도쿄전력에 따르면, 세습 흡착장치인 쿠리온(KURION)과 2 차적 세습 흡착장치인 사리(SARRY)<sup>72</sup>를 통해 스트론튬이 처리된 물은 2018 년 9 월 기준으로 약 48 만 2 천 톤에 이른다.<sup>73</sup>

## 후쿠시마 오염수 처리의 실패

후쿠시마 제 1 원전의 방사성 오염수 규모는 전례 없는 것이다. 도쿄전력이 오염수 처리 기술이 제대로 작동하고 있다는 자신의 주장을 수정하는 데는 7 년 이상이 걸렸다.

2018 년 9 월 28 일 도쿄전력은, ALPS 로 처리해 탱크에 저장한 물 89 만 톤 중에서 약 75 만 톤이 바다에 방출하기에 적합한 안전 규제치보다 높은 방사성 물질을 함유하고 있다고 인정했다.<sup>74</sup> 도쿄전력에 따르면, 이미 처리된 물 중에서 6 만 5 천 톤은 스트론튬 90 함유량이 안전 기준의 100 배 이상이었다. 어떤 탱크에서는 안전 기준의 2 만 배에 달하는 처리수가 나오기도 했다.

도쿄전력이 제염 계수(오염 제거율, DF)를 사실 그대로 투명하게 공개하지 않는다는 의심이 최근 몇 년간 끊임없이 제기되었는데, 위와 같은 결과는 이러한 의심이 옳았다는 것을 입증하는 것이다. 제염 계수란 이 원전에서 채택한 방사성 핵종의 제거 방식이 얼마나 효과적인지를 보여주는 지표다.<sup>75</sup>

---

<sup>71</sup> TEPCO, “Regarding contaminated water purification” March 16 2015, Tokyo Electric Power Company, see [https://www7.tepco.co.jp/wp-content/uploads/hd03-02-03-002-001-handouts\\_150316\\_02-e.pdf](https://www7.tepco.co.jp/wp-content/uploads/hd03-02-03-002-001-handouts_150316_02-e.pdf)

<sup>72</sup> \*(감수자 주) SARRY(Simplified Active Water Retrieve and Recovery System, 단순형 오염수처리시스템) 은 Back-up 시설로서, 미국설계로 일본의 토시바, IHI 가 제조하였다.

<sup>73</sup> Opcit. TEPCO, 27 September 2018.

<sup>74</sup> Asahi Shimbun, “EDITORIAL: TEPCO bungles it again in dealing with Fukushima tainted water”, 9 October 2018, see <http://www.asahi.com/ajw/articles/AJ201810090025.html>

<sup>75</sup> 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/>

2018년 6월에 컨설팅 엔지니어인 존 라지는 그린피스 일본사무소를 위해, 도쿄전력이 대중에 공개한 데이터를 분석한 바 있다. 도쿄전력은 2011년 사고 때부터 엄청난 양의 데이터를 쏟아내고 있지만, 그런 정보가 정확한 것인지를 제 3자가 검증하기는 불가능에 가깝다. 데이터를 분석한 라지가 내린 결론은, 도쿄전력이 내놓은 정보의 정확성에 대해 중대한 의문이 제기된다는 것이다. 여기에는 도쿄전력이 2016년에 발표한, 전년도와 거의 차이도 없는 데이터 보고서도 포함된다. 이 2016년 보고서는 세슘 137을 처리하여 오염 수준을 리터당 30 베크렐(30Bq/l)로 떨어뜨렸으며 “해양에 방출 가능한 제한선을 정확하게 만족시켰다”라고 쓰고 있다.<sup>76</sup>

도쿄전력은 ALPS를 포함한 정화 처리 방식을 적용하더라도 제염 계수는 매우 다양하게 나올 수 있다는 사실을 알면서도, 현실을 무시하고 자신들에게 유리한 수치가 나왔을 때를 기준으로 해 데이터를 작성, 공개한 것이다.

왜 이런 일이 벌어졌는지, 최소 5년 동안 알고 있던 사실을 7년이나 지나서야 뒤늦게 인정했는지에 대해 많은 의문이 제기되고 있다.

일본 정부는 오염수 정화 처리 기술 실패를 지난 몇 년 동안 솔직하게 보고하지 않은 이유에 대해 지금껏 제대로 설명하지 못했다. 또한 처리수를 태평양에 흘려보내서는 안 된다는 문제 제기에 대해서 아직 어떤 응답도 없다.

더 시급한 질문은 왜 오염 처리가 도쿄전력이 주장한 효과를 내지 못했는지, 또 그러한 사태가 의미하는 바는 무엇인지에 대한 것이다.

## 제염 계수

도쿄전력은 큐리온과 사리의 처리 설비를 도입한 이후인 2013년, 오염수에 함유된 세슘 137 성분은 2만 Bq/g 이라고 보고했다. 당시 도쿄전력의 보고에 따르면, ALPS에 설정된 제염 계수는 60만이며 이는 오염수의 방사성 준위를 방출 기준보다 낮은 정도로 감소하는 것이라고 되어 있다.<sup>77</sup> 그러나 다른 단체가 작성한 문건에서는 ALPS가 훨씬 높은 제염 계수를 갖는 것으로 나왔는데, 그 범위는 세슘의 830만에서부터 스트론튬의 165만까지에 이르렀다. 이는 해당 물질이 초미세량이어서 검출이 불가능한 정도에 해당한다.<sup>78</sup>

<sup>76</sup> John Large, “Preliminary analysis of TEPCO processed water data sheets”, June 21st 2018, Large&Associates, London for Shaun Burnie, Greenpeace Germany.

<sup>77</sup> 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/Treatmentofcontaminatedwater.pdf>

<sup>78</sup> Fortum, “Highly selective ion exchange materials: CsTreat, SrTreat and CoTreat”, Jussi-Matti MäkiProduct Manager, NURES, BORES, see <https://www.fortum.com/products-and-services/power-plant-services/nuclear-services/nuclear-waste-management/nures/highly>

ALPS 는 삼중수소를 제외한 62 가지의 방사성 핵종을 제거하는 것이 목표다. 여기에는 방사성 오염수에 가장 많이 존재하는 5 가지의 방사성 핵종인 세슘 137(Cs-137), 스트론튬 90(Sr-90), 코발트 60(Co-60), 탄소 14(C-14), 요오드 129(I-129)가 포함된다. 이들의 반감기는 스트론튬 90 의 29 년에서부터 요오드 129 의 1 천 570 만 년에 이르기까지 매우 다양하다. ALPS 는 이온 교환을 통해 대전(전기를 가진)된 원자나 입자를 제거한다.<sup>79</sup> 이온 교환은 여러 산업 분야에서 널리 쓰이는 검증된 기술이다. 원자력 산업에서는 재처리 공장이나 원자로에서 물의 방사성 수준을 감소시키는 데 활용하기 위해 개발되어 왔다.

이온 교환 시스템은 수지나 폴리머(응집제로 이용)를 매개체로 사용한다. 유기 수지 물질로 만들어진 이런 불용성 매개체를 미세한 구슬 형태(반지름 0.25~0.5 밀리미터)로 가공하여 적용한다. 구슬은 대개 다공성이어서 큰 표면적을 가지게 된다. 목표로 한 이온의 포집은 다른 이온의 방출과 동시에 이루어지며, 따라서 이온 교환이라는 이름이 붙었다. 핀란드 기업인 포르툼(Fortum)사는 ALPS 에 쓰이는 산화티타늄 미세 구슬 이온 수지의 주요 공급자이다. 뉴레스(Nures)라는 이름으로 독점적으로 판매되는 이 이온 교환 수지는 스트론튬, 세슘, 코발트 등을 제거할 수 있는 물질을 함유하고 있다.<sup>80</sup> 전처리 설비에서는 두 단계의 침전 과정이 진행되며<sup>81</sup>, 전처리 후 14 개의 이온 교환용 용기와 흡착탑 역할을 하는 두 개의 이온 교환용 탑으로 이루어져 있다. 이온 교환 물질의 양은 각 시설에서 총 1 톤에 이른다.<sup>82</sup> 이 시스템은 세 개(A, B, C)의 공정 라인으로 이루어지는데 각 공정은 시간당 250 톤의 물을 처리할 수 있고 원전 탱크에 저장된 오염수의 방사성 준위를 낮추기 위해 사용된다.<sup>83</sup>

도쿄전력이 인용하고 있는 포르툼사의 서술에 따르면, 큐리온과 사리로 세슘 제거를 하기 전의 오염수에 함유된 세슘 성분은 500 만 Bq/ml 이었으며, 세슘 제거 시스템을 통과하면 역삼투압 제거율 기준으로 약 3 천 Bq/ml 로 떨어졌다. 스트론튬 90(반감기 약 29 년)은 1 만 6 천 Bq/ml, 스트론튬 89(반감기 약 51 일)는 1 만 1 천 Bq/ml 였다. ALPS 가 첫 가동을 시작한 것은 2013 년 3 월 30 일이며, 도쿄전력에 따르면 그해 10 월 29 일까지 총

---

<sup>79</sup> For a simple explanation of ion exchange see, “The Basics of Ion Exchange and Water Chemistry-Part I”, C.F. “Chubb” Michaud CWS-VI, available at <http://www.wcponline.com/2007/02/26/basics-ion-exchange-water-chemistry-part/>

<sup>80</sup> Fortum, “Fortum to supply more ion exchange materials for purification of radioactive liquids in Fukushima, Japan”, 22 September 2015, see <http://globenewswire.com/news-release/2015/09/22/769907/0/en/Fortum-to-supply-more-ion-exchange-materials-for-purification-of-radioactive-liquids-in-Fukushima-Japan.html>

<sup>81</sup> \*(감수자 주) 철공침처리와 탄산염침전의 2 가지이다.

<sup>82</sup> Fortum Power and Heat, “Cesium and Strontium Removal with Highly Selective Ion Exchange Media in Fukushima and Cesium Removal with Less Selective Media”, Esko Tusa Fortum Power and Heat, Finland, WM2014 Conference, 2-6 March, 2014, Phoenix, Arizona, U.S, see <http://archive.wmsym.org/2014/papers/14018.pdf>

<sup>83</sup> Ibid.

25,888 톤의 물이 방사성 물질의 불검출 수준으로 처리되었다고 한다.<sup>84</sup> 이 7 개월 기간에 방사성 물질을 흡착한 이온 교환 기저부(층)가 교환된 적은 없다.<sup>85</sup>

## ALPS의 초기 결과

도쿄전력이 2014년에 펴낸 ALPS에 관한 최초의 성능 보고서는 바람직해보이는 성과로 가득차 있다. 처리수에서 추출한 방사성 핵종의 물질 표본조사에 따르면 “코발트 60, 루테튬 106, 안티몬 125, 텔루륨 125m, 요오드 129 등은 상대적으로 높은 수준으로 검출되었으나” 스트론튬 90은 “오염수의 함량보다 1억~10억분의 1로 줄어들었다”고 되어 있다.<sup>86</sup> 방출 허용 기준을 적용하면 스트론튬 90, 코발트 60, 세슘 137은 모두 기준치 이하이며 요오드 129만이 기준치를 초과하는 것으로 나왔다고 보고했다.

이 초기 표본조사 보고서 이후로는 ALPS의 가동 결과를 설명하는 공개 자료가 거의 나오지 않았다. 도쿄에 있는 원자력자료정보실(CNIC)이 수집한 2017년의 공식 자료는 방사성 핵종 스트론튬 90과 요오드 129의 농도가 배출 기준치보다 각각 4.7배와 6.8배 높다고 보고했다.<sup>87</sup> 코발트 60은 기준치의 50분의 1 수준이었다.

단위: 베크렐/리터

|                    | 총 β | 삼중수소      | 스트론튬 90 | 요오드 129 | 루테튬 106 | 안티몬 125 | 코발트 60 | 테크네튬 99 | 니켈 63 |
|--------------------|-----|-----------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|-------|
| ALPS 처리수 내의 최대 잔류량 | 454 | 1,593,000 | 141     | 62      | 93      | 5       | 4      | 59      | 3     |
| 폐수의 배출 기준 농도       | —   | 600,000   | 30      | 9       | 100     | 800     | 200    | 1,000   | 6,000 |

<sup>84</sup> TEPCO, “Situation of Storage and Treatment of Accumulated Water including Highly Concentrated Radioactive Materials at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (123rd Release), 30 October, 2013 Tokyo Electric Power Company, see [https://www4.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu13\\_e/images/131030e0201.pdf](https://www4.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu13_e/images/131030e0201.pdf)

<sup>85</sup> Opcit. Fortum March 2014.

<sup>86</sup> TEPCO, “Status of Contaminated Water Treatment and Tritium at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station” Noboru Ishizawa Project Planning Department Fukushima Daiichi Decontamination and Decommissioning Engineering Company Tokyo Electric Power Company, Inc., 2014, see [https://fukushima.jaea.go.jp/english/outline/pdf1410/4a-1\\_Ishizawa.pdf](https://fukushima.jaea.go.jp/english/outline/pdf1410/4a-1_Ishizawa.pdf)

<sup>87</sup> Nobuko Tanimura, “The Fukushima Daiichi Nuclear Accident: Current State of Contaminated Water Treatment Issues and Citizens’ Reactions”, Citizens Nuclear Information Center (CNIC), October 2018, see <http://www.cnic.jp/english/?p=4219>

이 2017년 자료에 나온 최대 농도는 도쿄전력이 2018년 공개한 자료의 수치와 차이가 난다. 예컨대 도쿄전력은 2018년 자료에서 스트론튬 90의 최대 농도가 방출 허용 기준의 2만 배라고 서술했고, 왜 이런 차이가 발생했는지에 대한 설명은 없었다.

## ALPS의 실패 - 잠재적 요인들

ALPS의 제염 계수를 떨어뜨리고, 이에 따라 도쿄전력이 방사성 핵종을 방출 허용 기준으로 낮추는 데 실패하게 만든 여러 요인이 있다. 2019년 1월 현재까지 도쿄전력은 이 기술이 제대로 기능하지 않는 데 대한 기술적 분석 결과를 내놓은 적이 없다. 아래에서 우리는 이러한 사태를 초래한 잠재적 요인을 제시한다.<sup>88</sup> 하지만 도쿄전력이 모든 자료를 공개하지 않는 한, 사태에 대한 종합적 이해는 불가능할 것이다.

### 1. 물의 화학적 특성

원래 물의 화학적 특성은 이온 교환 효율이 최적이지 아니며, 그 효율을 떨어뜨릴 수 있다. 다른 모든 화학 공정과 마찬가지로 ALPS는 물의 pH(수소이온 농도) 수준에 영향을 받는다. 포르투삼에 따르면 이온 교환용 미세 구슬은 광범위한 pH 상황에서 작동하지만, 최적 조건은 따로 있다. 코발트 처리는 pH 4~8에서 모두 가능하지만 최적 범위는 pH 5~7 수준이며, 스트론튬 처리는 pH 7 이상이면 되지만 최적 범위는 pH 10 이상이다. 세슘 처리는 pH 1~13의 광범위한 영역에서 가능하다. 만일 도쿄전력이 ALPS를 가동하면서 물의 pH 수준을 긴밀하게 모니터링하지 않았다면 스트론튬이나 코발트 처리 능력에 영향을 미쳤을 것이며, 이에 따라 제염 계수가 크게 떨어졌을 것이다. 정화되는 오염수는 그 성분이 일정하지 않으며, 방사성 핵종 및 다른 함유물들의 농도는 때에 따라 매우 큰 편차를 보인다. 물의 화학적 특성을 긴밀하게 모니터링해야 하는 이유다.

### 2. 유입물 및 필터 교환

ALPS에 유입되는 물의 양은 이온 교환 과정의 효율에 영향을 미친다. 간단한 공정에서는 문제될 게 없지만, 방사성 물질로 오염된 많은 양의 물을 대규모 공정에서 처리할 때는 주요한 난관이 된다. 스트론튬 90과 같은 고준위 방사성 핵종을 제거하는 처리 기술이 실패하는 이유는, 단순히 처리량만을 늘리려 하는 의도 때문일 수 있다. IAEA는 당장은 큰 문제가 없더라도 현재 처리되는 물의 양은 다른 기술이 감당하도록 설계된 처리 능력을 넘어선다고 지난 2015년 지적한 바 있다. “스트론튬을 비롯한 방사성 물질을 최대한 신속하게 제거함으로써 막대한 고준위 방사성 오염수가 축적되는 리스크를 줄이려는 도쿄전력의

<sup>88</sup> TEPCO, “Status of Contaminated Water Treatment and Tritium at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station” Noboru Ishizawa Project Planning Department Fukushima Daiichi Decontamination and Decommissioning Engineering Company Tokyo Electric Power Company, Inc., 2014, see [https://fukushima.jaea.go.jp/english/outline/pdf1410/4a-1\\_Ishizawa.pdf](https://fukushima.jaea.go.jp/english/outline/pdf1410/4a-1_Ishizawa.pdf)

노력은 치하할 만하지만, IAEA 팀은 처리 전의 오염수량을 줄이는 노력을 함께 기울이는 것도 중요하다고 믿는다.”<sup>89</sup>

2015년 IAEA 팀은 개선된 ALPS에 상정된 최대의 처리 능력은 하루 2천 톤이지만, 실제 가동시의 처리 능력은 하루 1천 2백 톤에 지나지 않는다고 밝힌 바 있다. IAEA 보고서는 다음과 같이 서술했다. “IAEA는 이러한 차이가 급수 처리 장치의 복잡성, 그리고 산업 현장에서 처음 채택된 신개발 선택적 흡착제의 사용과 관련이 있을 수 있다고 지적했다. 예컨대 처음 설치된 ALPS의 두 시스템은 급수 필터를 자주 청소하거나 교환하도록 되어 있으며, 이에 따라 자주 가동을 중단해야 하는 일이 벌어진다.”<sup>90</sup> 또, “다른 예로서 고성능 ALPS에서 스트론튬 흡착제의 수명이 애초 설정보다 짧다는 점”을 강조했다. 이런 시스템에서 가동 조건을 적절히 조정해 가면서 목표 성과를 달성하려면 예상보다 많은 시간이 걸리는 것이 당연하다.”<sup>91</sup> 그러나 IAEA는 오염수의 정화 처리가 계획대로 진행되고 있으며, 여기에는 처리수의 방사성 농도가 방출 기준 이하로 떨어지는 것을 포함한다고 서술했다.

ALPS를 처음 시험할 때, 흡착제와 급수 필터를 작동 20일마다 한 번씩 교환한다면 방사성 핵종의 농도를 방출 기준 이하로 떨어뜨릴 수 있음이 확인되었다. 그러나 잦은 교환은 빈번한 가동 중단을 초래하고 결국 처리할 수 있는 오염수의 양이 감소되게 된다. 2018년 원자력자료정보실(CNIC)의 타니무라 노부코가 보고한 대로, 제염 계수가 저하되더라도 ALPS를 계속 가동했고 결국 처리 효율이 떨어지는 결과로 이어졌다.<sup>92</sup> 오염수가 급속히 늘어났고 그 결과 후쿠시마 제 1 원전 주변에 방사선 수치가 증가했기 때문이다.

도쿄전력이 오염수 처리량을 늘리고 이온 교환 물질의 교환 주기를 연장하는 결정을 내린 것은 IAEA가 처리 과정을 가속화하라고 권고한 것과도 관련이 있다. 이렇게 처리를 가속화하면 스트론튬 90 등의 방사성 핵종의 제거에 실패하게 된다. 5년이 지난 이제서야 도쿄전력은 이런 사실을 인정하고 있다. IAEA는 지난 몇 년 동안 처리수를 태평양으로 내보내는 계획을 지지해 왔는데, 한편 역설적이게도 도쿄전력에게 처리율을 높이라고 요청하기도 했다. 결국 도쿄전력이 오염물질로 범벅된 필터를 필요보다 더 늦게 교환하도록 유도한 IAEA는 불완전 처리된 오염수가 태평양으로 방출되도록 후원자 역할을 한 셈이다.

### 3. 염분

---

<sup>89</sup> 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>

<sup>90</sup> Ibid.

<sup>91</sup> Ibid.

<sup>92</sup> Nobuko Tanimura, The Fukushima Daiichi Nuclear Accident: Current State of Contaminated Water Treatment Issues and Citizens’ Reactions, CNIC, October 2, 2018, see <http://www.cnic.jp/english/?p=4219>

수중 염분은 코발트보다 스트론튬 흡착에 더 큰 영향을 미친다는 사실이 잘 알려져 있다.<sup>93</sup> ALPS의 성과가 좋지 않은 것은 바닷물에 존재하는 경합 이온의 농도 때문이기도 하다. 오염수 처리 초기부터 일본의 전문가들은 정화 처리 과정에 대해 의구심을 나타냈다. 수중 염분 때문이었다. 도쿄공업대학의 물 처리 전문가인 다케시타 겐지는 2011년에, 제올라이트 여과 시스템은 1979년 부분적 노심용융 사태가 벌어진 스리마일 섬의 원자로에서는 제 역할을 했는데, 이 때 원자로에 공급된 물은 담수였다고 지적했다. “그러나 이번 사태에서는 물에 다량의 염분이 함유되어 있다. … 소금 속의 나트륨 이온과 세슘 이온의 화학적 유사성 때문에 제올라이트 추출 공정은 예상보다 훨씬 비효율적일 가능성이 있다.”<sup>94</sup>

이상의 요인들뿐만 아니라, 수온의 변동, 혼탁도 증가(물이 혼탁해지면 이온 교환 장치의 정상 작동을 방해한다), 기타 다른 요인들이 ALPS의 낮은 성과에 기여했을 가능성이 높다. 도쿄전력은 ALPS의 제염 계수로 60만을 설정했지만, 위에 제시한 요인들 때문에 이온 교환 작용의 효율이 매우 불안정했음이 분명하다. ALPS의 주요 공급자 중 하나인 포르투사는 자신들의 기술이 매우 폭넓은 범위의 제염 계수를 나타낸다고 분명히 말한 바 있다(아래 표 참고).

포르투이 생산하는 이온 교환 물질의 제염 계수<sup>95</sup>

| 방사성 물질 | 세슘 처리                      | 코발트 처리   | 스트론튬 처리                       |
|--------|----------------------------|----------|-------------------------------|
| 제염 계수  | 1,000~10,000 (최고 기록은 8 백만) | 10~2,000 | 200~2,000 (최고 기록은 1억 6천 500만) |

도쿄전력은 ALPS의 제염 계수가 매우 광범위하다는 점을 분명히 알고 있었다. 그럼에도 삼중수소는 제외한 채, 규제 기준 이하로 나오는 방사성 핵종의 제염 계수만을 일관된 수치인 것처럼 보고해 왔다. 따라서 도쿄전력의 후쿠시마 제 1 원전 오염수 처리 보고서는 무언가 크게 잘못되어 왔다고 볼 수 있다.

## 방출 및 폐기를 위한 대안의 모색 실패

“실행 가능한 유일한 방법이다.”

- 원자력규제위원회 후케타 도요시 위원장, 오염수의 태평양 방출에 대해<sup>96</sup>

<sup>93</sup> Handley-Sidhu, S. et al. “Influence of pH, competing ions, and salinity on the sorption of strontium and cobalt onto biogenic hydroxyapatite. Sci. Rep. 6, 23361; doi: 10.1038/srep23361 (2016), see <https://www.nature.com/articles/srep23361>

<sup>94</sup> Nature, “Fukushima deep in hot water: Rising levels of radioactive liquid hamper clean-up effort”, 7 June 2011, see <https://www.nature.com/news/2011/110607/full/474135a.html>

<sup>95</sup> Fortum, “Highly selective ion exchange materials: CsTreat, SrTreat and CoTreat”, Jussi-Matti MäkiProduct Manager, NURES, BORES, see <https://www.fortum.com/products-and-services/power-plant-services/nuclear-services/nuclear-waste-management/nures/highly>

2018년 10월에 도쿄전력이 오염수를 처리하여 방사성 핵종의 농도를 배출 기준 이하로 떨어뜨리는 데 실패하였음을 인정하기 전까지는 오염수를 태평양으로 방출하는 방식이 적극적으로 추진되었다. 최근 몇년동안 도쿄전력과 일본 정부의 오염수 문제 해법은 폐기 방식에 초점이 맞추어져 왔으며, 특히 태평양에 방출하는 방식을 선호했다. 2013~16년 기간에 삼중수소수 대책위원회는 이와 같은 방출 폐기 방식에 대한 기술적 평가를 실시했다. 여기에서는 다섯 가지 방식이 제시되었다.<sup>97</sup>

- 1) 지층 주입<sup>98</sup> - 전 처리, 후 회석, 후 분리 모두 불필요
- 2) 해양 방출 - 후 회석, 후 분리
- 3) 수증기 배출<sup>99</sup> - 전 처리, 사후 회석, 사후 분리 모두 불필요
- 4) 수소 배출<sup>100</sup> - 전 처리 및 후 분리 불필요
- 5) 지하 매설<sup>101</sup> - 전 처리 불필요

이 방식들 중에서 가장 선호된 것은 태평양으로 직접 방출하는 것이었다. 대책위원회는 “바다로 방출하는 방식을 완료하는 데에는 약 34억 엔(3천만 달러)의 비용과 7년 4개월의 시간이 소요된다.<sup>102</sup> 다섯 가지 방식 중에서 가장 저렴하고 신속한 방식이다”라고 결론내렸다.<sup>103</sup>

그러나 대책위원회는 이 같은 방식 이외에 또다른 대안적 방출/처분 방식을 검토에 포함하여 설명하지 않았다. 이런 대안에 대해 도쿄전력과 일본 정부 기관인 대책위원회는 분명히 인지하고 있었으나 배제해버린 것이다. 물을 처리하여 삼중수소를 분리하는 방식과 같은 대안들은 2011년 사고 이후 첫 해에 검토된 바 있다.

일본 경제산업성 산하 국제폐로연구개발기구(IRID)의 지휘를 받는 오염수처리대책위원회(이하 위원회)는 2013년에, 국내외 업계로부터 방사성 삼중수소를 제거하는 방식과 관련한 제안들을 받았다고 밝혔다.<sup>104</sup> 위원회의 보고서는 “삼중수소 분리 기술과 관련한 많은 제안이 있지만, 과거의 지식과 경험으로 볼 때 가장 유망한 시스템인 복합

<sup>96</sup> Asahi Shimbun, “Residents blast water-discharge method at Fukushima plant”, 31 August 2018, see <http://www.asahi.com/ajw/articles/AJ201808310042.html>

<sup>97</sup> METI, “Tritiated Water Task Force Report”, June 2016 Tritiated Water Task Force” June 2016, see [http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20160915\\_01a.pdf](http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20160915_01a.pdf); and CNIC, “The Fukushima Daiichi Nuclear Accident: Current State of Contaminated Water Treatment Issues and Citizens’ Reactions”, 2 October 2018, see <http://www.cnic.jp/english/?p=4219>

<sup>98</sup> \*(감수자 주) 지하 2500미터 이하의 지층에 주입

<sup>99</sup> \*(감수자 주) 증발처리후 삼중수소를 포함한 수증기 배출

<sup>100</sup> \*(감수자 주) 삼중수소후를 전기분해한 후 수소로 환원하여 대기로 배출

<sup>101</sup> \*(감수자 주) 삼중수소수를 시멘트와 혼합하여 콘크리트로 한 후 매설

<sup>102</sup> \*(감수자 주) 5가지의 방식은 2016년 6월에 발표된 것으로, 대상 처리수량은 80만톤이었다.

<sup>103</sup> Ibid.

<sup>104</sup> Committee on Countermeasures for Contaminated Water Treatment “Technology Information Form 2”, see [http://irid.or.jp/cw/public/group/form2\\_301-350.pdf](http://irid.or.jp/cw/public/group/form2_301-350.pdf)

전기분해 촉매 교환(CECE) 과정을 획기적으로 개선할 혁신적인 제안은 없다”라고 썼다.<sup>105</sup> 위원회는 2016년 4월 19일 최종 결정을 내렸다. 후쿠시마 제 1 원전에 적용할 삼중수소 제거 기술은 어느 것도 채택하지 않겠다는 것이었다.<sup>106</sup>

이와 같은 결정에 영향을 미친 주요한 원인은 재정적 측면, 그리고 제 1 원전에 있는 다량의 물을 처리할 수 있는 기술 발전의 잠재성이었던 것으로 보인다. IRID는 제안들을 검토한 뒤 “많은 제안이 제출되었지만 당장 후쿠시마 제 1 원전에 적용할 수 있는 것은 없었다”라고 평가했으며, “삼중수소는 이론적으로는 분리될 수 있지만, 산업 규모의 실천적인 기술은 존재하지 않는다. 따라서 규제하에 주변 환경에 방출하는 것이 저준위 삼중수소 오염수를 처리하는 최선의 방법이다”라고 천명했다.<sup>107</sup>

그러나 후쿠시마 제 1 원전이 맞닥뜨린 삼중수소수 문제를 해결할 기술은 존재하지 않는다는 결론은 2014~16년에 위원회에 증거를 제출한 몇몇 사업자들의 주장과 배치된다.

삼중수소 제거 기술로 제출된 것 중 하나는 이미 물 처리 기술을 제공하고 있는 미국 회사 쿠리온이 제출한 것이다. 쿠리온은 위원회에 제출한 제안서에서 자사의 기술을 확장해오염수의 삼중수소 농도를 현저히 줄일 수 있다고 주장했다. 2015년에 쿠리온의 기술부서는 “쿠리온의 시스템은 물 80 만톤에서 삼중수소를 제거해 1 톤의 방사성 물질만 남도록 처리할 수 있다”라고 설명했다.<sup>108</sup> 삼중수소 제거에 필요한 시간은 5~8년, 비용은 시설 설립에 10억 달러, 가동에 연간 수억 달러가 소요될 것으로 추정했다. 쿠리온은 자사의 기술을 후쿠시마 제 1 원전에 적용할 수 있음을 보이기 위해 미국 텍사스 휴스턴에 시험용 시설을 건립하기도 했다.

쿠리온에 따르면, 이 회사의 규격화된 탈삼중수소 시스템(MDSTM)은 제염 계수 1,000으로서, 삼중수소 제거에 필요한 기준을 만족시키며, “하루 수십~수백 톤의 물을 저비용 방식으로 처리할 수 있다”라고 주장했다.<sup>109</sup> 이 처리 기술은 모든 삼중수소를 제거하지는 않지만(제안서는 처리수의 삼중수소 수치가 방출 기준인 6만 Bq/l 보다 훨씬

---

<sup>105</sup> Ibid.

<sup>106</sup> METI, “Committee on Countermeasures for Contaminated Water Treatment”, 19<sup>th</sup> April 2016, 14<sup>th</sup> meeting, see [http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/tritium\\_tusk/pdf/160419\\_07.pdf](http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/tritium_tusk/pdf/160419_07.pdf) (in Japanese)

<sup>107</sup> 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>

<sup>108</sup> 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>

<sup>109</sup> Kurion, “Kurion Modular Detritiation System (MDSTM)”, Committee on Countermeasures for Contaminated Water Treatment 2014.

낮다고 주장한다), 삼중수소수의 양을 대폭 줄이며, “걸러진 삼중수소는 안정화를 위해 매우 작은 부피로 응축하여(콘크리트화) 저준위 폐기물로 처분하게 된다.”<sup>110</sup>

또다른 서너 개의 회사 역시 삼중수소수를 처리하는 방식<sup>111</sup>을 위원회에 제안했다. 미국 에너지부(DOE)도 그 중 하나다. DOE는 오랫동안 원자력 프로그램을 운영해온 역사때문에, 삼중수소를 다루어 온 풍부한 경험이 있다. 물론 그 모든 것이 긍정적인 것만은 아니었다. 미국은 핵 폐기물 문제 때문에 핵물질 제조 거점을 중심으로 수많은 과제를 안고 있고, 여기에는 삼중수소 문제도 포함된다. 그런 경험 때문에 DOE는 삼중수소 폐기물을 어떻게 처리할 것인지에 대해 지구상의 어떤 나라보다 많은 연구를 해왔다. DOE 산하 퍼시픽노스웨스트 국립연구소(PNNL)가 2015년에 일본 정부에 제안한 기술은 저농도(10-3-10 $\mu$ Ci/g) 삼중수소수의 분리에 산화그래핀 판막(GOx)을 이용하는 방식이다.<sup>112</sup> PNNL는 이 기술로 최초의 삼중수소의 평균 60%가 제거되며, 제거율이 99%까지 올라갈 수도 있다고 평가했다.

일본 정부 기관들이 삼중수소 제거를 위한 옵션을 충분히 고려하지 않은 이유가 무엇인지 제대로 설명한 자료는 거의 없다.

## 삼중수소 제거 비용

*“어떤 사람들은 삼중수소 제거 비용이 비싸다고 말하겠지만, 무엇과 비교해서 그렇다는 것인가? 이 물을 그냥 흘려보내야 한다는 사람이 있다면, 그와 마주앉아 비용 문제를 놓고 토론하고 싶다. 어떻게 흘려보낼 것인가? 그 영향은 무엇이 될 것인가? 그로 인해 피해를 보는 사람들에게 어떤 식으로 보상할 것인가?” - 쿠리온의 기술 책임자 개턴 보눔<sup>113</sup>*

PNNL이 제안한 기술을 채택할 때 드는 비용은 물론 상당하다. 리터당 60~180 달러 정도 된다.<sup>114</sup> 여기에는 매년의 가동비용과 10년 동안의 시설의 자본비용이 포함된다. 위원회로부터 가장 긍정적인 평가를 받은 기술인 CECE의 경우 제 비용은 리터당 2~20 달러 수준이다.

---

<sup>110</sup> Ibid.

<sup>111</sup> IRID “Summary of major responses to the RFI (classified into items and categories) [Topic 2 Treatment of contaminated water”, 2014, see [http://irid.or.jp/cw/wp-content/uploads/2013/11/RFI\\_Result1118\\_1\\_21.pdf](http://irid.or.jp/cw/wp-content/uploads/2013/11/RFI_Result1118_1_21.pdf)

<sup>112</sup> 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 CampaignGJ Sevigny, RK Motkuri, DW Gotthold, LS Fifield Pacific Northwest National Laboratory AP Frost, W Bratton Kurion June 2015 FCRD- MRWFD-2015-000773 PNNL-24411, see [https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical\\_reports/PNNL-24411.pdf](https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-24411.pdf)

<sup>113</sup> Opcit. Los Angeles Times, March 2015.

<sup>114</sup> Ibid.

두 기술로 후쿠시마 제 1 원전의 오염수 1 백만 톤을 처리한다면, CECE 의 경우 20~200 억 달러가 소요되고 DOE 가 개발한 산화그래핀 기술의 경우는 500~1 천 8 백억 달러가 소요된다.

그러나 잊지말아야 할 현실이 있다. 후쿠시마 제 1 원전 사고로 인해 투입해야 할 비용이 앞으로 수년에 걸쳐 몇 조 달러가 될 것이라는 점이다. 2017 년 기준으로 이 사고의 처리 비용은 7 조 333 억 엔(642 억 1 천만 달러)에 이르고 있다.<sup>115</sup> 2016 년 12 월에 일본 정부는 전체 비용을 21 조 5 천억 엔(1 천 930 억 달러)으로 추산했다. 그러나 이것은 심각하게 과소평가된 추산으로 평가된다. 2017 년에 일본경제연구소(JIER)는 원자로 폐기, 오염제거, 배상금 지급 등을 포함한 처리 비용이 총 50 조~70 조 엔(4 천 490 억~6 천 200 억 달러)<sup>116</sup>에 이를 것으로 평가하며, 이마저도 매우 불확실한 것이라고 단서를 달았다. 만일 이러한 예상이 실제로 현실화된다면 후쿠시마 제 1 원전 사고는 역사상 가장 비싼 산업 재해가 될 것이며, 일본 국민과 에너지 산업의 미래에 더욱 막대한 영향을 미치게 될 것이다.

물론 어떤 오염수 처리 기술도 개발자들이 주장하는 대로 작동할 것이라는 보장은 없다. 도쿄전력의 사례에서 이미 보았듯, 의심을 가지는 것이 당연하다. 원자력 산업의 역사는 실효성이 뒷받침되지 않는 기술적 주장으로 얼룩져 있다.

후쿠시마 제 1 원전 오염수의 엄청난 규모의 문제와 이 위기를 앞으로도 오랫동안 관리해야 한다는 사실을 잊지 않아야 한다. 후쿠시마 원전 사고로 발생한 문제는 도쿄전력이 주장하는 30~40 년이 아니라 그보다 수십 년 더 긴 기간, 심지어 다음 세기에 이르기까지 지속될 가능성이 매우 높다. 이러한 점을 고려하면, 처리 방식을 선택하는 데 있어 가장 우선시해야 할 것은 원전 인근 지역의 위험을 줄이고 다른 지역의 환경 및 인간의 건강에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 모든 합리적인 기술 대안을 제대로 평가하는 것이다. 그러나, 일본 정부와 도쿄전력은 그러한 방향으로 결정해 오지 않았다. 그저 값싸고 빠른 방식인 오염수의 태평양 방출만을 효율적인 대책으로 고려했다.

---

<sup>115</sup> TEPCO, “FY2017 Financial Results (April 1, 2017 – March 31, 2018) Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.” 26 April 2018, see [http://www.tepco.co.jp/en/corpinfo/ir/tool/presen/pdf/180426\\_1-e.pdf](http://www.tepco.co.jp/en/corpinfo/ir/tool/presen/pdf/180426_1-e.pdf)

<sup>116</sup> Japan Center for Economic Research, “Accident Cleanup Costs May Rise to 50-70 Trillion Yen - It’s Time to Examine legal liquidation of TEPCO - Higher Transparency is Needed for the Reasons to Maintaining Nuclear Power”, Tatsuo Kobayashi, Principal Economist, Professor Tatsujiro Suzuki, Specially Appointed Fellow (Director of Nagasaki University Research Center for Nuclear Weapons Abolition), Kazumasa Iwata, J CER President, see <http://www.jcer.or.jp/eng/research/policy.html>



사진설명: 후쿠시마 제 1 원전. 고준위 오염수를 담은 물탱크 1 천 개의 일부가 1 호기의 서쪽으로 보인다. 2018 년 10 월 16 일, © Christian Åslund / Greenpeace

## 물탱크의 장기 저장

**“기술 정보를 요청함에 있어, 삼중수소수 처리 방식에 대해 포괄적인 평가가 수행되어야 한다는 많은 의견과 제안이 있다.”**

-- 국제폐로연구개발기구(IRID), 2014 년<sup>117</sup>

IRID 는 2014 년에 위와 같은 권고를 내놓았지만, 삼중수소 관리 방식에 대해서는 어떠한 포괄적 평가도 이루어지지 않았다. 그러나 일본 정부 기관과 도쿄전력이 직면한 현실은, 삼중수소수를 그냥 원전에 보관하는 것이 앞으로 수십 년에 걸쳐 환경적으로 바람직하고 실행 가능한 유일한 옵션이라는 점이다. 삼중수소수를 태평양에 방출할 때 야기될 문제, 그리고 최근 밝혀진 대로 ALPS 를 비롯한 정화 처리 기술이 제대로 작동하지 않았다는 점을 고려하면, 철제 탱크를 이용해 오염수를 저장 보관하고 그동안 더 효과적인 처리 기술을 모색하는 것이 환경적으로 합리화할 수 있는 유일한 선택이다. 다시 말해, 중기간에 걸쳐 활용할 수 있는 충분한 저장 공간을 확보하는 일에 우선순위가 두어져야 한다는 것이다.

2018 년 11 월 IAEA 는 "현재의 부지 시설 계획은 ALPS 처리수를 저장할 137 만톤의 탱크를 건설하기로 되어 있는데, 이 용량은 앞으로 3~4 년 안에 다 채워질 것으로 예상된다"라고 전망했다.<sup>118</sup> 추가적인 저장 공간이 확보되어야 하는 것이다.

<sup>117</sup> Opcit. IRID 2014.

2014 년에 IRID 는 저장을 통한 해결 방식을 고려하면서 다음과 같이 지적했다. “먼저 해결해야 할 안전 문제가 있다. 농축 삼중수소수를 분리 뒤 장기간에 걸쳐 안정적으로 보관하려면, 삼중수소의 붕괴에 따른 방사선 분해 및 헬륨 가스의 영향에 관한 대책을 마련해야 한다.”<sup>119</sup>

삼중수소를 장기 보관할 때의 문제점은 부인할 수 없다. 시간이 지남에 따라 발생할 수 있는 금속의 화학적 반응만이 문제가 아니다. 미국 에너지부에 따르면 “삼중수소수 형태의 삼중수소는 그 부식성 때문에 장기간 보관하기 어려울 수 있다. 삼중수소 산화물은 물을 방사선 분해하고 그로부터 자유기(OH-)를 생성하는데, 삼중수소의 부식성은 여기에서 비롯되는 것으로 추정된다. 주변 분자에 영향을 미치는 베타 붕괴에서 나오는 추가 에너지도 자유기 생성에 관련이 있다.”<sup>120</sup>

중요한 점은 저장용 탱크를 건설할 때 어떤 금속을 쓰는가 하는 점이다. 후쿠시마 제 1 원전의 저장 탱크는 2011 년 이래 여러 차례 문제를 발생시켜 왔다.<sup>121</sup> 기존의 볼트 나사식의 조립형 탱크는 적합하지 않은 것으로 입증되었다. 오염수 누출이 발생하였기 때문이다.<sup>122</sup> 도쿄전력은 이 탱크들의 수명이 5 년이라고 확인했다.<sup>123</sup> 2014 년에 미쓰비시중공업(MHI)은 볼트 나사식의 조립형 탱크를 교체하기 위해 탄소강제의 용접형 탱크를 공급하기 시작했다.<sup>124</sup>

볼트 나사식의 조립형 탱크의 교체는 꼭 필요한 일이지만, 새로운 용접형 탱크의 수명이 얼마나 될지는 아직 불확실하다. 일본 당국은 탄소강이 삼중수소수 보관에 적합하지 않다는

---

<sup>118</sup> Preliminary Summary 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 (Fourth Mission) Tokyo And Fukushima Daiichi Nps, Japan, 5-13 November 2018, see <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/11/missionreport-131118.pdf>

<sup>119</sup> Opcit. IRID 2014.

<sup>120</sup> DOE, “DOE Handbook Tritium Handling And Safe Storage”, DOE-HDBK-1129-2008 December 2008 U.S. Department of Energy AREA SAFT Washington, D.C. 20585, see <https://www.standards.doe.gov/standards-documents/1100/1129-bhdbk-2008/@images/file>. The DOE notes that “:In a severe case, storage of tritiated water recovered from tritium removal systems in liquid form at concentrations as low as a few curies per milliliter has corroded through the weld area of stainless steel vessels after only a few days of exposure.”

<sup>121</sup> Yoko Kubota, Yuka Obayashi, "Wrecked Fukushima storage tank leaking highly radioactive water", Reuters, 20 August 2013, see <https://www.reuters.com/article/us-japan-fukushima-leak/wrecked-fukushima-storage-tank-leaking-highly-radioactive-water-idUSBRE97J02920130820>; BBC, "Japan's Fukushima nuclear plant leaks radioactive water", 20 February 2014, see <https://www.bbc.co.uk/news/world-asia-26254140>; Mari Yamiguchi, "Fukushima Nuclear Disaster: Water Tanks Flawed, Workers Say", Associated Press, 8 November 2013, see <https://weather.com/science/environment/news/fukushima-nuclear-plant-water-tanks-flawed-20131108>

<sup>122</sup> CNIC, “The Severe Contaminated Water Situation at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station”, September/October 2013, see [http://www.cnic.jp/english/newsletter/nit156/nit156articles/01\\_leak2.html](http://www.cnic.jp/english/newsletter/nit156/nit156articles/01_leak2.html)

<sup>123</sup> TEPCO, “Fukushima Daiichi NPS Prompt Report 2014 Fukushima Daiichi NPS Prompt Report (Jul 24, 2014): Soundness of storage tanks secured at Fukushima Daiichi NPS”, July 2013, see [http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2014/1239559\\_5892.html](http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2014/1239559_5892.html)

<sup>124</sup> MHI, “MHI Starts Shipments of Factory-made Tanks for Storing Contaminated Water at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station”, 4 October 2014, News Letter No,1790, see <https://www.mhi.com/news/story/1404101790.html>

점을 잘 알고 있다. 미국 에너지부는 2008 년에 “일반 탄소강이나 합금강은 삼중수소 관련 설비에 사용되어서는 안 된다. 이 강철들은 강도가 높고 일반적으로 체심입방격자 결정 구조로 이루어져 있는데, 이 때문에 연성이 부족하고 수소로 인한 파손에 매우 취약하다”라고 서술했다.<sup>125</sup>

후쿠시마 제 1 원전 사태를 당장 해결할 수 있는 묘안은 없으며, 조만간 그런 묘안이 등장할 가능성도 별로 없다. 따라서 정책의 우선순위는 오염수의 장기적 관리(저장)와 방사성 핵종 제거라는 두 축에 두어져야 한다.<sup>126</sup>

IRID 는 2014 년에, 고준위 오염수를 앞으로 상당 기간 저장해야 할 가능성이 크다는 점을 분명히 했다. 따라서 “관련 당사자들은 국제적인 지식과 경험을 공유하면서 삼중수소수 처리 방식에 대한 포괄적 평가를 즉시 시작해야 한다”고 강조했다. “포괄적 평가에서 고려해야 할 점은 삼중수소 분리의 효율성이나 삼중수소수의 장기 저장 기술의 여부뿐만 아니라, 언제 발생할지 모르는 자연재해 같은 리스크도 포함되어야 하고, 현재의 상태를 유지해야 한다는 점 등도 빠져서는 안 된다.”

2014 년 이래 도쿄전력이나 후쿠시마 제 1 원전을 관리 감독하는 정부기관들이 협력하여 고준위 오염수를 장기 저장하는 방안을 모색하기 시작했다는 증거는 없다. 저장 방식보다는 오염수를 방출하는 방식이 논의를 지배했을 뿐이다. 환경 보호나 태평양 연안 지역사회 복리에 대한 고려가 아니라 비용을 최대한 줄이려는 데서 나온 접근 방식이었다.

도쿄전력은 자신의 처리 기술이 스스로 공언한 것만큼 효과적으로 작동하지 않았으며 그 결과 방사성 준위가 규제치 아래로 내려가지 않았음을 인정했다. 따라서 처리수를 태평양으로 방출하려던 계획은 지연될 수밖에 없다. 앞으로 몇 년 동안 도쿄전력은 ALPS 를 비롯한 자신의 처리 방식을 통해 방사성 준위를 스스로 언급한 수준만큼 줄일 수 있음을 입증해야 한다. 한편 도쿄전력과 경제산업성 산하 기관들은 삼중수소 제거를 위한 다양한 방식을 고려하는 데는 무관심으로 일관해 왔다. 결과적으로 지금의 오염수 위기는 전적으로 예상되었던 것이며, 그럼에도 환경에 가장 덜 해를 끼치는 방식, 즉 장기 저장을 준비하는 진지한 노력은 기울여지지 않았다.

2017 년에 원자력시민위원회(CCNE) 등의 전문가들이 내놓은 다음과 같은 대안을 제시했다. 이들은 “국가 석유 비축기지에서도 사용하는 것과 같은 10 만 톤짜리 대형 탱크가 10 개 설치되어야 하며, 삼중수소수를 123 년 동안 저장하자는 것이다. 반감기의 10 배의 저장기간으로 방사성이 1,024 분의 1 수준으로 낮아진다”라고 주장했다.<sup>127</sup> 앞으로는 오염수가 폐기물로 저장되는 방식이 가장 선호되는 해결책이 될 것이다. CCNE 의 제안은

<sup>125</sup> Opcit. DOE 2008.

<sup>126</sup> Opcit. IRID 2014.

<sup>127</sup> Nuclear Power Committee Council Special Report 1 "Post-retirement after quarantine storage for over 100 years" November 11, 2017, p.7 see <http://www.ccnejapan.com/?p=7900>

기술적, 경제적으로 모두 실행가능한 것이며, 입증된 공학 기술을 사용하고, 나아가 “제안된 모든 방식 중에 가장 안정적이고 안전한 해법”이다.<sup>128</sup>

## 유엔 국제해사기구와 후쿠시마 오염수 위기

2011년 사고 이래 일본 정부는 유엔 국제해사기구(IMO)에 대해 “△현재의 해양 관찰 활동을 유지 및 강화할 것 △방사성 물질의 확산이 미치는 영향을 조사하고 판단할 것 △그 결과를 공개하기 위해 모든 노력을 기울일 것 △해양으로의 방출을 최소화할 수 있는 방식을 연구할 것” 등을 약속했다.<sup>129</sup> 고준위 오염수 1백만 톤을 바다에 방출하는 방식을 선호하는 태도는 일본이 해양 환경을 보호하겠다고 국제 사회에 내놓은 다짐에 부합하지 않는다.

2011년 8월 한국 정부는 후쿠시마 제1원전 사고가 다른 대규모 해양 오염 사고와 마찬가지로, 오염물의 해양 투기를 규제하는 런던협약 및 런던의정서<sup>130</sup>에 저촉되는 사고임을 분명히 했다.<sup>131</sup> 또한 협약 체결국은 사고가 발생한 국가의 해양 환경을 보호하기 위해, 사고 상황을 통제하는 데 원조할 의무가 있다. 이것은 런던협약 런던의정서의 제3조(3.4)가 규정한 일반 의무이며 국제 관습법이기도 하다.

후쿠시마 제1원전의 오염수 위기는 2018년 11월에 열린 런던협약 체결국 회의와 런던의정서의 체결국 회의에서 논의되었다. 이 회의에 참여한 그린피스는 일본 정부가 △현재의 해양 관찰 활동을 유지 및 강화할 것 △방사성 물질의 확산이 미치는 영향을 조사하고 판단할 것 △그 결과를 공개하기 위해 모든 노력을 기울일 것 △해양방출을 최소화할 수 있는 방식을 연구할 것 등의 약속을 맺은 바 있음을 환기시켰다. 그린피스는 최근에 일본에서 나온 보도, 즉 오염수 처리 시스템이 실패한 것으로 드러나자 해양방출을 허용하는 방안이 검토되고 있다는 소식을 거론한 뒤, 일본 정부의 오염수 방출 결정은 국내 및 국제적 범위의 해양 환경보호에 심각한 우려를 불러일으킬 것이라고 강조했다.<sup>132</sup>

<sup>128</sup> Ibid.

<sup>129</sup> Scientific Group Of The London Convention – 34th Meeting; And Scientific Group Of The London Protocol – 5th Meeting 11 – 15 April 2011 Agenda Item 15, Report Of The Thirty-Fourth Meeting Of The Scientific Group Of The London Convention And The Fifth Meeting Of The Scientific Group Of The London Protocol.

<sup>130</sup> \*(감수자 주) 런던의정서는 런던협약의 구체적인 내용을 보장하지 위해 도입된 제도적 장치이나, 런던협약과 런던의정서의 체결국수에는 차이가 있다. 이 2가지는 폐기물의 해양투기를 금지하는 것을 목적으로 하고 있으나, 후쿠시마 제1원전 사고 및 정상가동 원전의 온배수같이 육지로부터의 방사성 오염수의 방출을 금지하고 있지는 않다. 단, 선적으로 수송한 폐기물의 해양투기는 금지되어 있다.

<sup>131</sup> Thirty-Third Consultative Meeting Of Contracting Parties To The London Convention & Sixth Meeting Of Contracting Parties To The London Protocol 17 – 21 October 2011 Agenda item 9 LC 33/9/2 25 August 2011 Matters Related To The Management Of Radioactive Wastes Practical International Assistance after Large Scale Industrial Accidents affecting Marine Areas Beyond National Jurisdiction Submitted by the Republic of Korea.

<sup>132</sup> Fortieth Consultative Meeting Of Contracting Parties To The London Convention & Thirteenth Meeting Of Contracting Parties To The London Protocol 5-9 November 2018 Agenda item 16 Consideration And Adoption Of The Report Draft report of the Fortieth Consultative Meeting and the Thirteenth Meeting of Contracting Parties.

또 그린피스는 러시아가 1990 년대에 액체 방사성 폐기물의 해양투기를 중지한 계기가<sup>133</sup> 일본을 포함한 국제사회의 원조 덕분이었음을 환기하고, 지금 후쿠시마 재난으로 쏟아져나오는 액체 방사성 폐기물 문제와 관련해 러시아 때와 같은 국제적 원조가 제대로 요청 및 제공되고 있는지 의문을 제기했다.<sup>134</sup>

일본 대표단은 IMO 참석자들에게 다음과 같이 대답했다. “후쿠시마 제 1 원전에 저장된 폐수를 최종적으로 어떻게 처리할지에 대해서는 여전히 검토중이고 아직 아무런 결정이 내려진 바 없으며, 지역 주민과 전문가들의 의견을 청취하고 있다. 또 어떠한 최종 방식을 선택하든, 일본은 삼중수소를 비롯한 처리수의 방사성 준위가 규제 기준치보다 낮도록 할 것이다.”<sup>135</sup>

또 도쿄전력이 오염수를 방출하기 앞서 안전을 위해 다시 한번 ALPS 처리를 할 것이며, 이것은 “물의 방사성 준위가 방출 기준 이하가 되도록 보장하기 위해서이다”라고 설명했다.

136

한국 대표단은 방사성 오염수의 해양방출이라는 이슈가 “주변국들의 주요한 관심사이며, 일본과 새로운 상황 및 정보를 공유하는 것을 환영한다”고 말했다.

후쿠시마 제 1 원전의 오염수 위기는 앞으로 수년 간 효과적인 해결책을 찾기 어려운 상황이며, 따라서 IMO 를 비롯한 국제 포럼에서 회원국과 NGO 들이 지속적으로 문제를 제기할 수밖에 없다.

## 결론

*“나는 삼중수소를 쉽게 제거할 수 있는 기술이 존재한다고 믿지 않는다.  
오염수의 양은 세계적 차원으로 볼 때 특별히 놀랄만한 정도는 아니다.  
오염수가 일단 안전 기준을 만족시키면 우리는 방출하지 않을 수 없다.”  
- 원자력규제위원회(NRA) 다나카 슌이치 위원장<sup>137</sup>*

<sup>133</sup> \*(감수자 주) 러시아(구 소련)은 1959 년부터 방사성 폐기물을 해양투기해 왔는데, 특히 1993 년 4 월 동해에 버린 사실이 대대적으로 알려 져, 일본을 중심으로 러시아의 핵잠수함의 폐로에 관한 처리비용의 지원을 실시했다.

<sup>134</sup> Ibid.

<sup>135</sup> Ibid.

<sup>136</sup> Ibid.

<sup>137</sup> “IAEA recommends discharging Fukushima radioactive water to the sea,” December 5, 2013, see <http://ajw.asahi.com/article/0311disaster/fukushima/AJ201312050043>.

후쿠시마의 오염수가 언제 안전 기준을 만족시킬지를 구체적으로 밝힌 시간표는 없다. 이것은 방사성의 본질적 성격 때문이다. 또 일본 정부가 오염수를 처리하는 방식을 선택하면서 국제 사회가 인정하는 환경친화적인 방식을 추구했다는 증거도 없다. 예컨대 1976년에 영국에서 제창된 최상실용환경선택(Best Practicable Environmental Option, BPEO)은 “토지, 대기, 수면에 걸쳐 환경 보호와 보존을 강조하는 체계적인 자문과 의사결정 과정을 거쳐 얻어진 결과로 정의된다. BPEO 절차는 단기 및 장기에 걸쳐 환경친화적이며 가장 무해하고 비용을 절감할 수 있는 방식을 찾아낸다.”<sup>138</sup> 이러한 접근방식에서 등장한 개념은 ‘최적가용기술(Best Available Techniques, BAT)’이다. 이것을 원자력 산업에 적용하면, 다른 대안적 관리 기술이 존재할 경우 방사성 폐기물을 환경에 배출하는 일은 허용될 수 없다. 후쿠시마 제 1 원전에도 이와 같은 접근방식이 적용되어야 한다.

후쿠시마 제 1 원전의 오염수 위기는 50여 년 전에 발전소 부지를 낮게 설정한 결정, 원전 지역에 지진과 쓰나미의 리스크가 있다는 증거를 놓고도 그에 적절히 대처하지 않은 점, 그리고 후쿠시마 원전 사고와 그 대책들이 복합되어 빚어진 결과다. 이렇게 엄청난 규모와 범위의 재난에 직면하면 어떤 정부나 기업이라도 이에 효과적으로 대처하기가 힘들 것이다. 그러나 도쿄전력과 일본 정부는 이 위기를 더욱 악화시키기 위해 모의해온 것처럼 보인다. 도쿄전력의 정화 처리 기술이 과거 그들 스스로 일본 국민에게 공언한 것만큼 효과적이지 않았다는 사실이 드러났고, 이는 오랫동안 계속되어 온 왜곡과 은폐의 가장 최근 사례일 뿐이기 때문이다.<sup>139</sup>

수천 명의 후쿠시마 주민들과 그들을 대변하는 헌신적인 변호사들의 의지 덕분에, 도쿄전력의 전 임원 세 명이 업무상 과실로 인해 원전 사고가 발생했고 많은 사상자를 초래한 혐의로 도쿄지방법원에서 기소되었다.<sup>140</sup> 이것은 매우 엄중한 일이다. 도쿄전력이 원자력 재앙을 막기 위해 적절하게 행동하지 않은 혐의와 관련해, 법원에 제출된 증거는 이 회사가 2002년 정부가 임명한 전문가들의 지진 평가를 무시했음을 보여준다. 당시 전문가들은 일본 동북지역 해안에서 진도 8의 지진이 일어날 가능성이 20%라고 경고했다.<sup>141</sup> 또한 도쿄전력이

---

<sup>138</sup> NFLA, “Proposed Changes to Sellafield’s Environmental Permits, NFLA, Radioactive Waste Policy Briefing Number 74: UK Government consultation on the future regulation of nuclear sites as they reach their ‘end’ states”, Nuclear Free Local Authorities, December 2018, see [http://www.nuclearpolicy.info/wp/wp-content/uploads/2019/01/Rad\\_Waste\\_Brfg\\_74\\_Sellafield\\_discharges.pdf](http://www.nuclearpolicy.info/wp/wp-content/uploads/2019/01/Rad_Waste_Brfg_74_Sellafield_discharges.pdf)

<sup>139</sup> 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/files/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/>

<sup>140</sup> Jiji, “Court told ex-Tepco Execs were informed barriers could prevent tsunami flooding at Fukushima plant”, 28 March 2018, see <https://www.japantimes.co.jp/news/2018/02/28/national/court-told-ex-tepco-execs-informed-barriers-prevent-tsunami-flooding-fukushima-plant/#.W-wDgnozaAw>

<sup>141</sup> Ei Okada and Masanori Makita, “Whether tsunami predictable, damage avoidable focus of TEPCO nuclear disaster trial”, 15 October 2018, Mainichi, see <https://mainichi.jp/english/articles/20181015/p2a/00m/0na/028000c>

2008 년에 펴낸 기술 평가서에는 최대 15.7 미터의 쓰나미가 후쿠시마 제 1 원전을 강타할 수 있다고 평가하였고, 이에 따라 더 높은 방파제가 필수적이라고 서술했다.<sup>142</sup>

도쿄전력의 경영진이 2002~2008 년 기간에 위험 요소들을 확인하였으면서도 이에 제대로 대처하지 않은 것은 주로 경제적 이유 때문이었다. 역시 도쿄전력이 소유한 가시와자키 카리와 원전이 2007 년 “니가타 주에쓰오키 지진<sup>143</sup>”으로 7 기의 원자로 모두를 가동 중지하면서 손실이 발생한 상황에서 이 원전의 안전대책비용에 더해, 후쿠시마원전의 방파제 높이를 증설하고 그 공사기간 동안 원자로를 임시로 가동 중단하는 등의 비용을 감당하기 어렵다는 것이 도쿄전력 경영진의 결정 근거였고<sup>144</sup>, 이는 일본 규제당국도 확인한 사실이다. 이러한 사고방식은 오늘날에도 여전히 존재한다. 도쿄전력은 환경 보호나 인간의 건강 리스크보다 경제적 고려가 우선이라는 믿음을 갖고 있는 것처럼 보인다.

본 분석에서 입증하고자 했던 바와 같이, 도쿄전력은 오염수 처리 기술이 주장하는 성과를 내지 못한다는 것과 방사성 핵종의 제거 역시 공언한 대로 되지 않는다는 것을 가동 초기부터 알고 있었다. 실제의 오염 수준을 공개했다라면, 엄청난 오염수 위기를 태평양 방출로 해결하려 했던 도쿄전력과 경제산업성의 명백한 목표는 좌절되었을 것이다.

도쿄전력, 원자력규제위원회, 일본 정부는 그들의 전임자들이 과거에 저지른 실수로부터 아무런 교훈도 배우지 못했다. 단기적인 경제적 이익을 우선한 결정때문에 원자로 3 기가 붕괴되었고 일본과 태평양 수천 제곱킬로미터의 지역이 오염되었으며 16 만 5 천 명의 후쿠시마 주민들이 피난했고, 그들 중 수만 명이 여전히 고향을 잃은 이재민 상태다. 지난 수년 간 고준위 오염수를 처리하는 대체적인 방식은 충분히 고려되지 않았으며, 이에 따라 유효한 성과를 낼 수도 있는 방식들이 무시되었고 제대로 논의되지 못했다.

일본 정부와 도쿄전력은 후쿠시마 제 1 원전의 오염수 사태를 2020 년까지 해결하겠다는 목표를 세웠다. 그러나 이는 전혀 신뢰할 수 없는 계획이다. 모든 오염수를 재처리하는 데 5~6 년이면 된다고 하였는데, 그 실효성에 의문이 제기되는 것은 당연한 일이다. 오염수의 양은 앞으로 계속 늘어날 것이다. 유일한 효과적 해법은 오염수를 탱크에 중장기적으로 저장하고 그 사이에 처리 기술의 발전을 도모하는 것뿐이다.

---

<sup>142</sup> The Diplomat, “TEPCO Prosecution: A Sign That Japan’s Nuclear Industry Is in Free Fall”, 4 March 2016, see <https://thediplomat.com/2016/03/tepcoprosecution-a-sign-that-japans-nuclear-industry-is-in-free-fall/>

<sup>143</sup> Greenpeace Japan, “TEPCO’S Atomic Illusion”, Shaun Burnie, 23 June 2017, see [http://m.greenpeace.org/japan/Global/japan/pdf/TEPCO\\_briefing\\_20170623.pdf](http://m.greenpeace.org/japan/Global/japan/pdf/TEPCO_briefing_20170623.pdf)

<sup>144</sup> Opcit. Ei Okada and Masanori Makita, 15 October 2018. In an affidavit submitted to the court on 5<sup>th</sup> September 2018, a TEPCO official responsible for tsunami countermeasures at the time explained that “Our business environment was deteriorating because of the Niigata Chuetsu offshore earthquake of 2007 that halted the Kashiwazaki-Kariha nuclear power station, and we wanted to prevent the Fukushima No. 1 plant from stopping by all means. The statement said that the former management once decided to introduce measures to protect against possible tsunami damage but decided to postpone them after finding out that they were more costly than expected, implying that managerial decisions were behind the delay.”

일본 정부와 도쿄전력은 오염수를 관리하기 위한 방안들을 시급히 재검토해야 한다. 앞으로 내려질 결정에서 가장 중요하게 고려해야 할 것은 최전선에 있는 사람들, 즉 후쿠시마의 태평양 연안 지역사회와 이들이 종사하는 어업을 보호하는 것이다. 지역주민들의 주장은 2018 년에 겨우 열린 몇 차례의 공청회를 비롯하여 지난 수년 간 기회 있을 때마다 제기되어 왔다. 후쿠시마현 어업협동조합연합회 노자키 테츠 회장은 2018 년 8 월, 오염수를 바다에 배출하면 이 지역 어업에 “치명적인 타격”을 줄 것이라고 강조한 바 있다.<sup>145</sup>

이러한 주장을 무시하는 것은 옳바르지 않으며, 오염수를 그저 태평양에 흘려보내는 결정 역시 위중한 문제다. 후쿠시마 원전 사고가 발생한 지 8 년이 지난 지금도 위기의 끝은 보이지 않는다. 도쿄전력과 일본 정부는 사태의 심각성과 관련해 대중을 기만하는 일을 멈추어야 하며, 1 백만 톤 넘는 고준위 오염수를 비롯한 방사성 폐기물을 장기적으로 저장하고 관리할 방안을 찾는 데 최우선을 두어야 한다.

---

▲번역: 허광준 & 그린피스 서울사무소

▲감수: 장정욱, 마쓰야마 대학 경제학부 교수 | 원자력 정책 전문가

---

<sup>145</sup> Kazumasa Sugimura and Chikako Kawahara “Residents blast water-discharge method at Fukushima plant” Asahi Shimbun, 31 August 2018, see <http://www.asahi.com/ajw/articles/AJ201808310042.html>