

한일 탈핵 연속 웨비나
2026년 10월 27일

후쿠시마 제1핵발전소 오염수 해양 방류 어떻게 바라볼 것인가?

*핵발전소를 용인한다면 후쿠시마 제1원전에서 발생한 것과 같은 대형 사고 발생 가능성이 있다는 사실을 직시해야 합니다.

*노심 용융과 같은 사고가 발생하면 육지와 해역 모두 방사능으로 오염됩니다. 여기서는 주로 후쿠시마 제1핵발전소 사고로 인한 현재 해역의 오염에 대해 발표하겠습니다.

발표자: 아마노 히카루

도카이 제2핵발전소 주변 과학자·기술자 모임
이와키 방사능 시민 측정실 타라치네 베타 랩 고문

오늘 발표 내용:

- * 후쿠시마 제1핵발전소 노심 내 방사능 및 오염수 해양 방출 경위
- * 오염수 발생에 관한 현황
- * 후쿠시마 제1핵발전소 부지 내 배수로에서 배수
- * 후쿠시마 제1핵발전소 부지 내 지하수의 방사능
- * 전용 항만 안으로 얼마나 방사능이 유입되고 있나
- * 후쿠시마 제1핵발전소 ALPS 처리 오염수의 방류
- * 후쿠시마 바다로 방출되는 처리된 오염수가 전 세계로 어떻게 확산되는가
- * 해양 생물의 농축 계수
- * 삼중수소의 개요와 위험성
- * 삼중수소 농도와 생물학적 영향, 규제치 등
- * 삼중수소수에서 붕어 알의 사망률
- * 삼중수소수에서 붕어 치어의 발육 이상률
- * 삼중수소 및 방사성 탄소 등을 바다로 유출할 경우의 리스크
해양 생태계에 미치는 영향
- * 요오드-129, 탄소-14, 스트론튬-90, 세슘-137 등을 바다로 방출할 경우의 리스크
- * 추가: 일본에서 오염수 방류 금지 소송 현황 등
- * 추가: 미국의 수많은 해양 연구소가 오염수 해양 방류에 반대

오염수 해양 방출 경위 1

2011년3월 11일: 동일본대지진 발생, 후쿠시마 제1핵발전소에서 3기의 원자로가 멜트다운

2011년3월: 후쿠시마 제1핵발전소 사고, 노심 냉각 위해 담수 및 해수를 주입, 이들이 오염수가 되어 건물 지하로 유입, 쓰나미로 유입된 해수도 건물 지하에 체류, 원자로 1차 냉각수 포함 건물 지하가 고농도 오염수의 '저수지'화, 바다로도 유출(양수 우물 및 펌프 손상으로 인한 지하수위 상승, 건물 손상으로 유입). 게다가 지하수나 빗물이 원자로 건물 내에서 용융 연료 데브리 접촉하여 오염수 발생.

2011년3월: 연료 데브리 접촉으로 발생한 고농도 오염수가 해양 방출됨. 상세 내용은 불명확.

터빈 건물 내 복수기 대용량 탱크에 고농도 오염수 보관

2011년4월 2일: 고농도 오염수 520톤 바다로 직접 유출 확인, 4월 6일까지 방출.

2011년4월 5일: 저준위 오염수 항만 밖으로 의도적 방출, 4월 10일까지.

(이 기간 동안 영국 세라필드 재처리 공장에서 1975년 1년 동안 방출된 세슘-137 양에 상당하는 양 방출)

2011년3월: 대기 중으로 방출된 방사성 핵종 해수 표면에 침적

2011년4월: 집종 폐기물 처리 건물에 보관 중인 오염수 약 10,000톤 바다로 방출.

국내외 비난 받자, 오염수 탱크 보관 시작

2011년6월: 순환 냉각 시스템 도입, 세슘 흡착 장치(미국 크리온사)

제염 장치(프랑스 아레바사), 고장으로 실질적 가동 거의 없음

담수화 장치(히타치제 2기, 수처리에이스제 2기)

2011년8월: 제2 세슘 흡착 장치(Sally, 도시바 제조) 체류수도 고선량

오염수 해양 방출 경위 2

2013년 3월: 다핵종 제거 장치 (ALPS) 몇 대(도시바 및 히타치 제조) 가동 시작

2013년 4월, 8월: 지하 저수조, 플랜지형 탱크에서 오염수 누출

2014년: 건물 유입 전의 서브드레인, 지하수 드레인의 해양 방출

“관계자의 이해 없이는 ALPS 처리수에 대한 어떠한 처분도 하지 않겠다”

2021년 4월: 일본 정부, ALPS 처리 오염수 해양 방출 결정

2022년 7월: 원자력규제위원회가 도쿄전력의 오염 처리수 해양 방출 계획 승인

2023년 7월: 원자력규제위원회가 도쿄전력에 사용 전 검사 종료증 교부

2023년 8월 ~ 해양 방출 시작, 2023년도에 4회, 2024·2025년도에 각 7회 방출

2026년 4월 ~ 2026년도 총 8회 방출 예정

후쿠시마 제1핵발전소(BWRs)에서 사고 당시 존재했던 방사능 1~3호기 노심에 생성된 방사성 핵종 등에서 추출

표 1: 외부 방출 없다고 가정한 경우 후쿠시마 제1원전 노심 내 핵종 존재량 (사고 발생 시)

원소명	핵종	반감기 (년)	주요 방사선	1호기 노심(kg)	2호기 노심(kg)	3호기 노심(kg)	1~3호기 합계중량(kg)	1~3호기 합계방사능(Bq)
삼중수소	H-3	12.3	β	0	0	0	0.01	$1.10\text{E}+15$
탄소	C-14	5730	β					$6.75\text{E}+11$
코발트	Co-60	5.3	β, γ					$9.42\text{E}+12$
스트론튬	Sr-90	28.8	β	29.2	37.3	35.3	101.8	$5.22\text{E}+17$
테크네튬	Tc-99	21만	β	42.7	52.4	49.5	144.6	$1.31\text{E}+14$
카드뮴	Cd-110	안정		1.61	1.85	1.65	5.11	
텔루륨	Te-128	거의 안정		5.07	6.16	5.81	17.04	
요오드	I-129	1570만	β	9.44	11.4	10.8	31.64	$2.08\text{E}+11$
텔루륨	Te-130	거의 안정		19.8	24.1	22.7	66.6	
세슘	Cs-137	30.2	β, γ	63	79.5	75	217.5	$6.98\text{E}+17$
우라늄	U-235	7억	α	1,110	1,700	1,690	4,500	$3.60\text{E}+11$
우라늄	U-236	2342만	α	242	299	285	826	$1.98\text{E}+12$
우라늄	U-238	44.7억	α	65,300	89,100	89,100	200,000	$3.03\text{E}+12$
넵투늄	Np-237	214만	α	21	24	22	67	$1.82\text{E}+12$
플루토늄	Pu-239	2.4만	α	307	384	452	1,143	$2.65\text{E}+15$

출처: 후쿠시마 제1원자력발전소 연료 조성 평가, 니시하라, 이와모토, 스야마 (원자력기초공학연구부문) JAEA-Data/Code2012-018

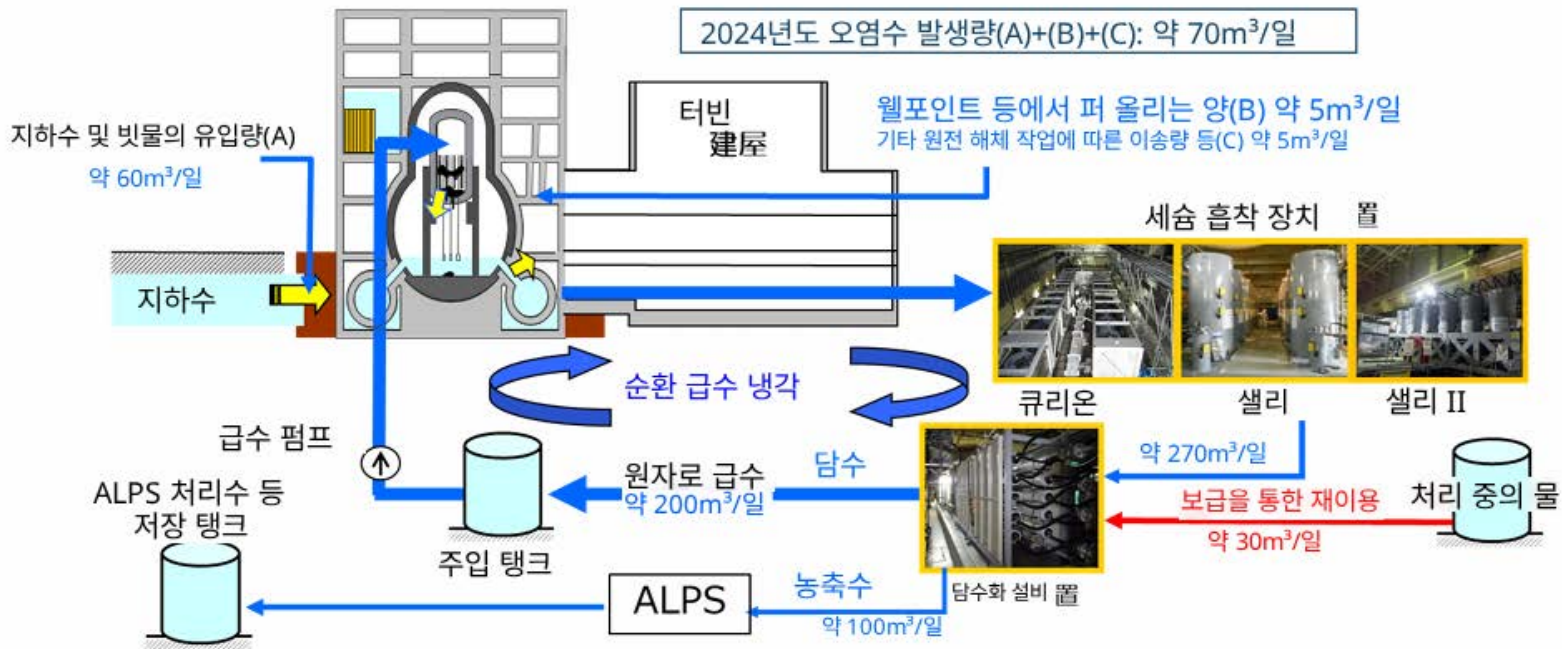
원자로 내에서 생성된 방사성 핵종의 종류는 1,600종 이상
 사고 당시 바다로 방출된 H-3은 $(1\sim5)\times10^{14}$ Bq (ALPS 처리 오염수 연간 방출량의 약 10배)
 Cs-137은 바다로, 대기 침적 경로를 통해 $(15\sim21)\times10^{15}$ Bq, 직접 유출은 $(3\sim6)\times10^{15}$ Bq

오염수 발생 현황

1-3. ② 오염수 발생량

TEPCO

- 2024년도 오염수 발생량은 약 $70\text{m}^3/\text{일}$ 이며, 이 중 건물로 유입되는 양은 약 $60\text{m}^3/\text{일}$, 해발 2.5m의 오염된 지하수(웰포인트)의 양수량은 약 $5\text{m}^3/\text{일}$, 그 외 폐로 작업에 수반하여 발생하는 이송량 등이 약 $5\text{m}^3/\text{일}$ 이다.
- 2028년도까지 오염수 발생량을 $50\sim 70\text{m}^3/\text{일}$ 로 줄이겠다는 목표를 향해 계속해서 대책을 시행해 나갈 것이다.



도표의 수치는 2024년도 말 시점의 값

인용: 원자력규제청 '특정 원자력 시설 감시·평가 검토회' (제120회) 자료 1-1
2026년도 ALPS 처리수 방류 계획(초안)에 대하여 2026년 2월 16일 도쿄전력

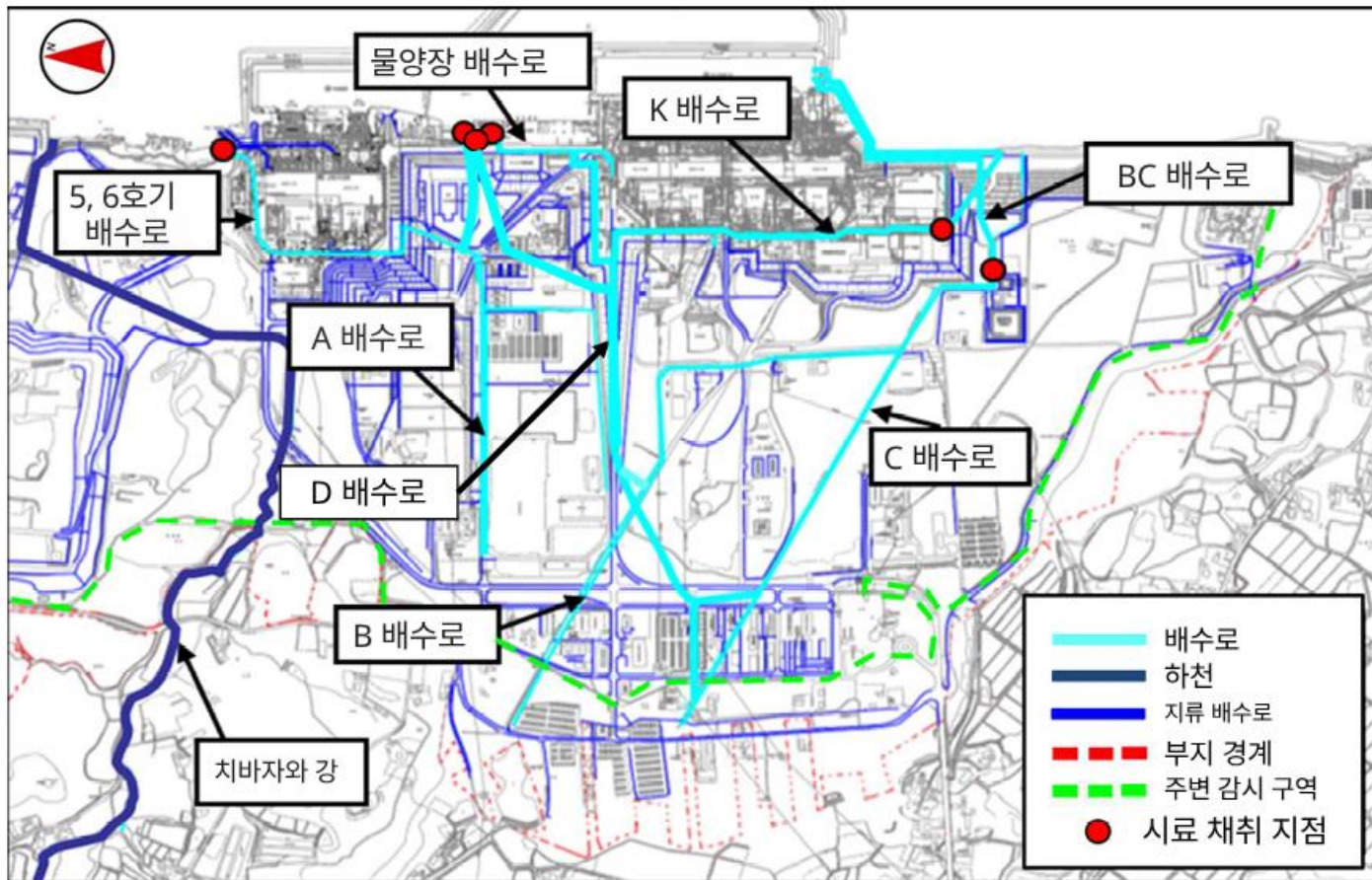
오염수의 발생은 위와 같은 것뿐만이 아니다!!

오염수 해양 유출 현황은 어떠한가?

1. 부지 내 배수로에서 배수
2. 오염된 지하수 유출
3. ALPS 처리 오염수 방류

1. 부지 내 배수로에서 배수

후쿠시마 제1핵발전소 부지 내 배수로의 시료 채취 지점



*BC 배수로의
오염수 저장
탱크군 내
를 흐른다.

*K 배수로는
터빈 건물
원자로 건물
주변을 흐른다

←도쿄전력
홈페이지에서

부지 내 배수로에서 나오는 오염 배수에 관하여

- * 사고 초기(2015년 경까지)에는 빗물을 통해 고농도 오염 물질이 외해(항만밖의 바다)로 유출
- * 도쿄전력은 배수구의 배수 경로를 항만 내부로 변경 (K 배수구 등, 2015년)
- * 대형 배수로(D 배수로) 신설 및 증강
- * 부지 일대를 모르타르나 아스팔트로 덮는페이싱 작업 및 건물 지붕 보수 및 방수 시트 설치를 실시했으나, 여전히 고농도 오염수 방출
- * 통상적으로는 그대로 항만 안으로 방출하며, 농도 상승 경우에는 배수 게이트를 닫아 오염수로 분류해 탱크에 회수, 오염수 처리 라인(Sally나 ALPS 등)에서 처리한 후, ALPS 처리 오염수로 분류하여 해양 방출
- 배수 게이트를 닫는 것은 고농도 경보(3,000벵크레/L)가 발령될 경우
- * 실제로는 폭우 시 수만 톤에서 수십만 톤의 빗물이 부지로 유입되어 고농도 오염수가 되지만, 이를 회수할 방법이 없어 직접 방출된다.

<참고> 지난번 공표[※1]까지의 최고치(구내 배수로)

도쿄전력 홈페이지에서 발췌

단위: Bq/L

	A 배수로	물양장 배수로	K 배수로	BC 배수로	D 배수로
Cs-134(약 2년)	4.6E+01[2014년 6월 12일]	5.6E+01[2014년 6월 12일]	2.8E+02[2014/5/21]	2.2E+01[2014/6/12]	6.3E-01[2024/11/15]
Cs-137(약 30년)	1.3E+02[2014/6/12]	1.6E+02[2014/6/12]	9.1E+02[2015/9/9]	5.7E+01[2014/6/12]	7.9E+01[2025/9/11]
전체 β	2.0E+02[2014/6/12]	1.9E+02[2014/6/12]	1.5E+03[2014/8/26] [2015/9/9]	5.4E+03[2015/2/22]	9.4E+01[2025/9/11]
H-3(약 12년)	3.6E+01[2022/8/17]	3.5E+01[2014/5/7]	8.2E+02[2014/6/18]	2.5E+03[2015/6/18]	1.1E+01[2026/6/10]

· O.OE±O는 O.O×10[±O]임을 의미한다. (예) 3.1E+01은 3.1×10[1]로 31, 3.1E+00은 3.1×10[0]로 3.1, 3.1E-01은 3.1×10[-1]로 0.31이라고 읽는다.

* 괄호 안은 각 값의 측정일을 나타낸다.

* ND는 검출 한계치 미만을 나타낸다.

※1 '부지 내 배수로 분석 결과' 및 2020년 9월 1일 이전에 공표된 자료 '후쿠시마 제1핵발전소 부지 내 배수로 분석 결과'에 제시된 수치 중 가장 높은 수치를 기재한다.

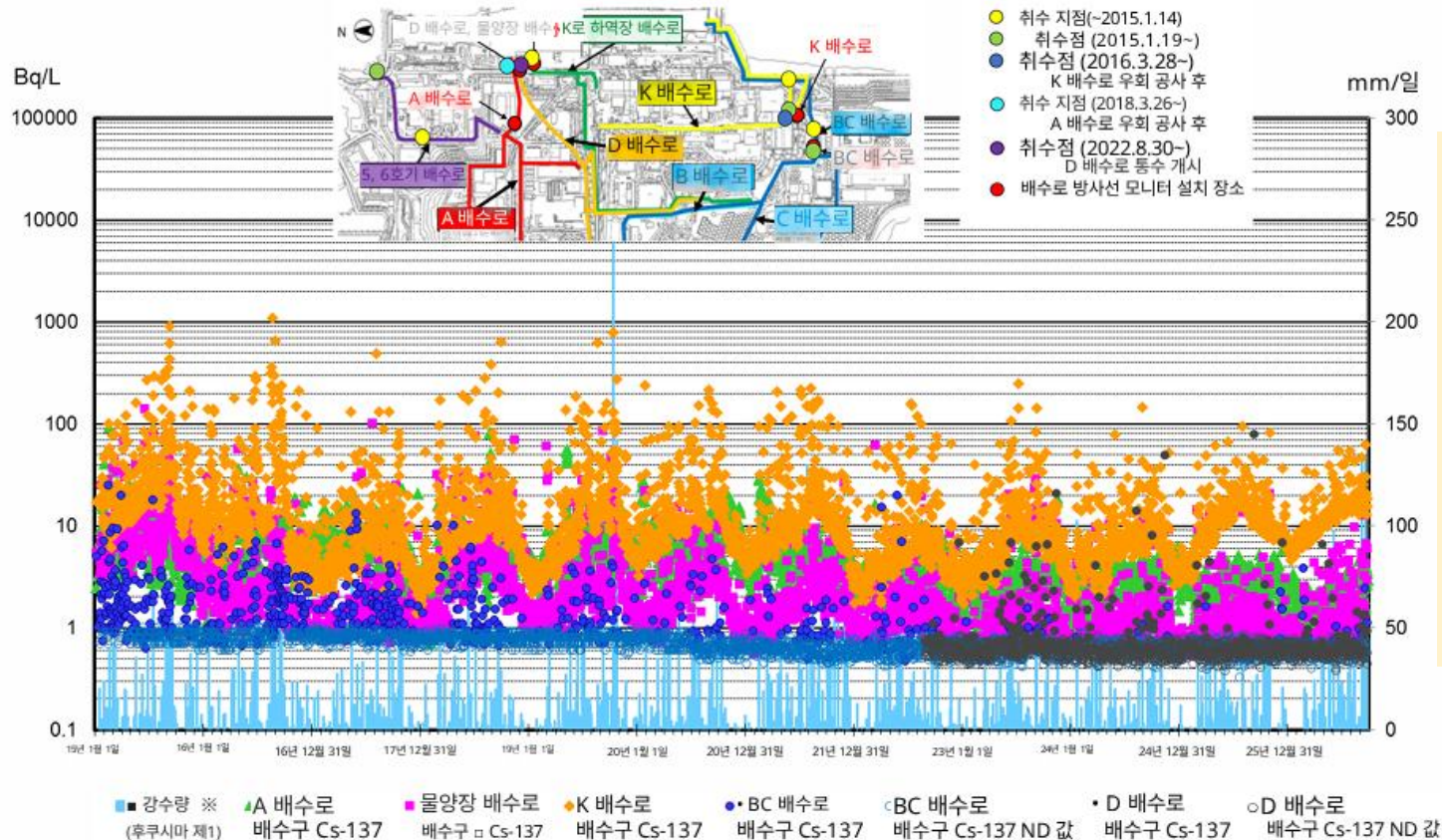
공시된 농도 한도

Cs-134는 60 Bq/L
Cs-137은 90 Bq/L
SR-90은 30 Bq/L
H-3는 60,000 Bq/L

후쿠시마 제1핵발전소 부지 내 배수로 배수 속 Cs-137, 총 베타(Sr-90), H-3 농도 추이

배수로의 배수 농도 추이 (Cs-137)

TEPCO



Cs-137 농도가 높은 것은 K 배수로 배수이며 강우 후 상승.

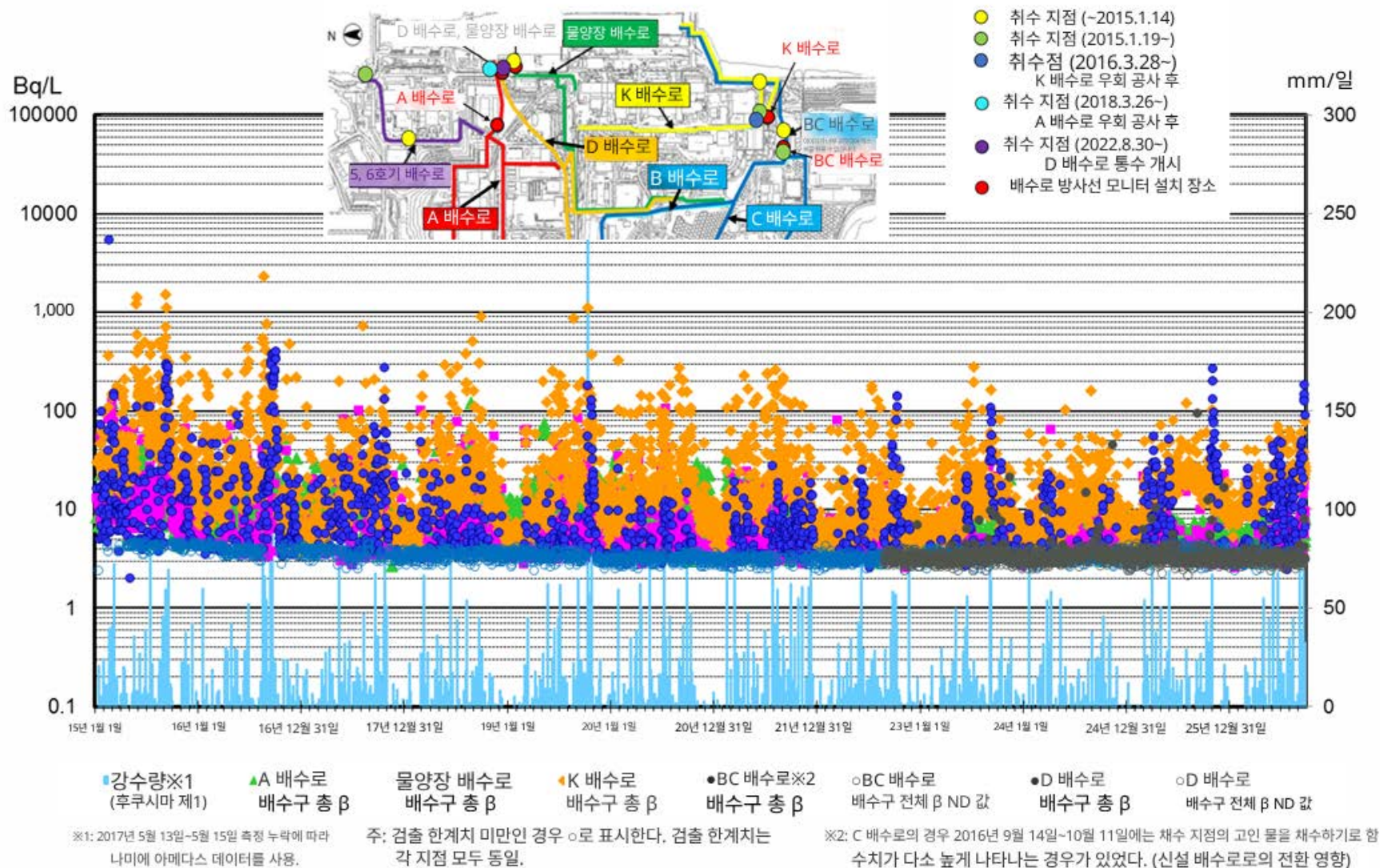
BC 배수로 배수의 경우 그다지 높지 않다.

경제산업성(자원에너지청) 주최

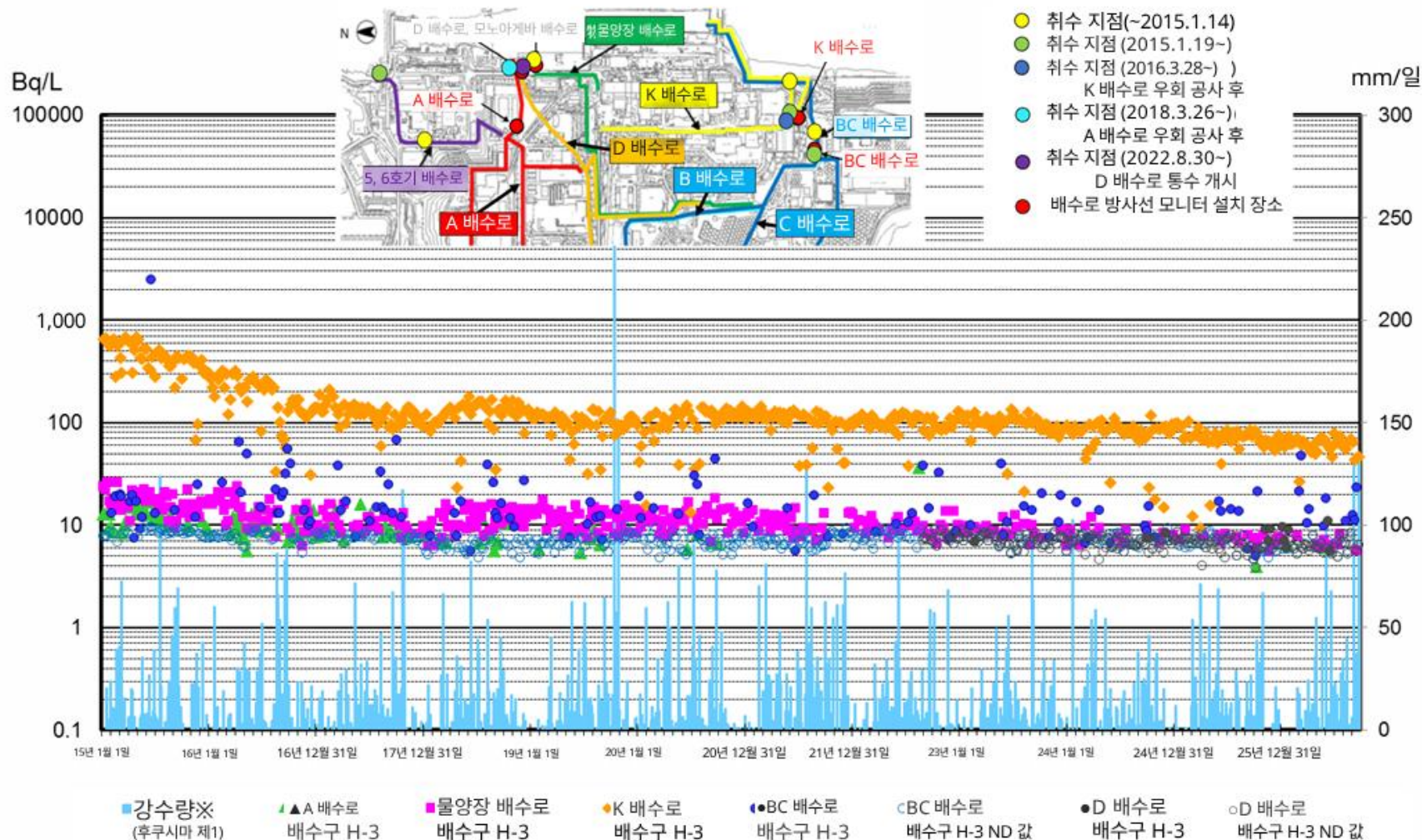
원전 해체·오염수·처리수 대책팀 회의／사무국 회의 자료(제154회) 2026년 10월 1일

※: 2017년 5월 13일~5월 15일 특정 데이터가 누락되어 니아에 애러스의 데이터를 사용함.

주: 검출 한계치 미만인 경우 ○로 표시. 검출 한계치는 각 지점 모두 동일.



배수의 전체 베타선 방사선의 주성분은 Cs-134, 137 및 Sr-90, Y-90이다. K 배수로 및 BC 배수로에서 수치가 높다. BC 배수로의 배수에서는 Cs-134, 137이 적으므로, 대부분 Sr-90(+Y-90)이며, 강우 후 농도가 상승한다.



※: 2017년 5월 13일~5월 15일, 측정 데이터가 누락되어 나미에 야마다스의 데이터틀 사용했다.

참고: 검출 한계치 미만인 경우 ○로 표시한다. 검출 한계치는 모든 지점에서 동일하다.

K 배수로의 배수 중 삼중수소 농도는 2016년부터 H-3가 100 Bq/L이다.
BC 배수로의 삼중수소 농도는 10~100 Bq/L이다.

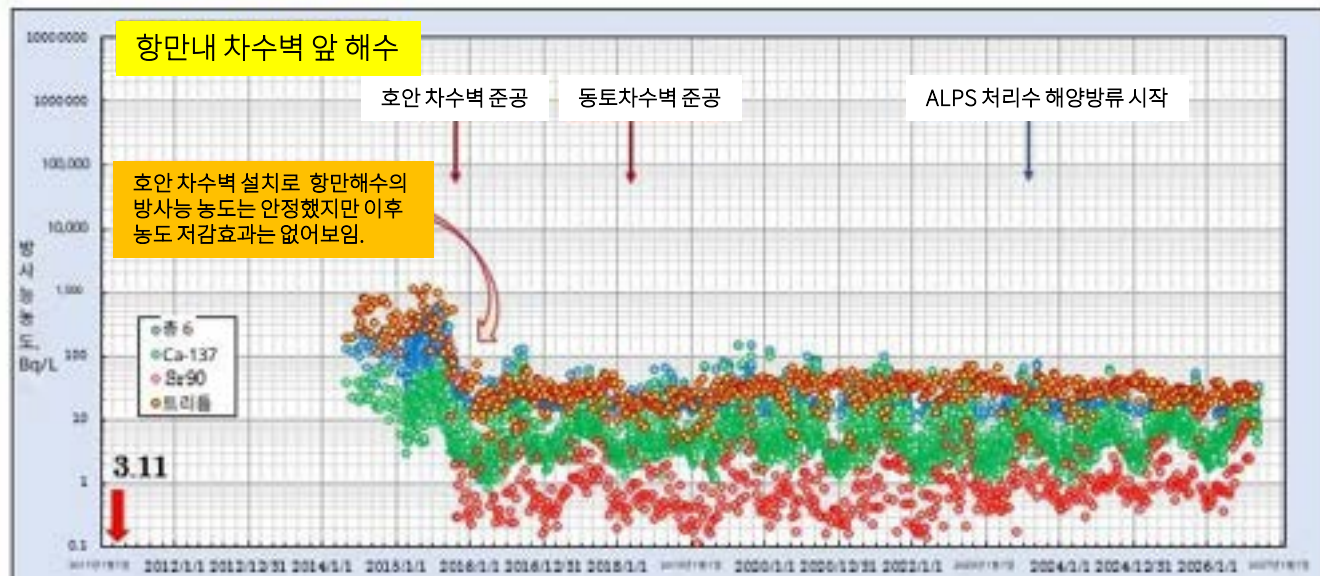
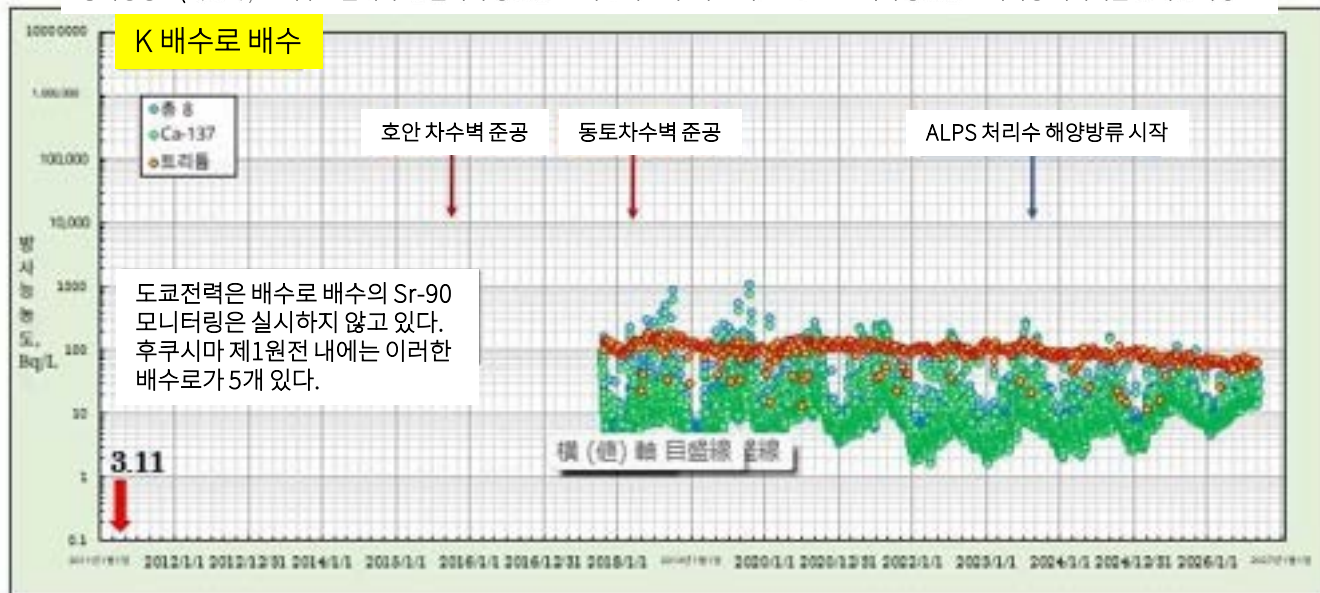
발전소 구내 배수로에서 해양으로 방출되고 있는 H-3, Sr-90, Cs-137 농도

야마자키 히데오 씨의 페이스북
(2026년 9월 10일자) 인용

K 배수로에서
배수 농도는
2016년부터
H-3이 100Bq/L
Cs-137은 10Bq/L
전체 베타선은
(주로 Sr-90)
100Bq/L 전후로
유지되고 있다.

항만내 차수벽 앞
해수 농도는
바다쪽 차수벽 설치
로 수십분의 일
수준으로
낮아졌으며,
2016년부터는
별다른 변동 없음.
H-3는 10~100Bq/L
전체 베타선에는 K-40
의 기여가 포함됨.

후쿠시마 제1원전 부지 내, K 배수로의 배수 및 이에 유입되는 차수벽 앞 해수의 방사능 농도 경과 변화
방사능농도(세로축)는 대수눈금이다. 눈금마다 농도는 10배 변화한다. 이 그래프는 도쿄전력이 공표한 모니터링 데이터를 토대로 작성.



부지 내 배수로에서 배출되는 Sr-90은 고시된 농도 한도를 초과하고 있다

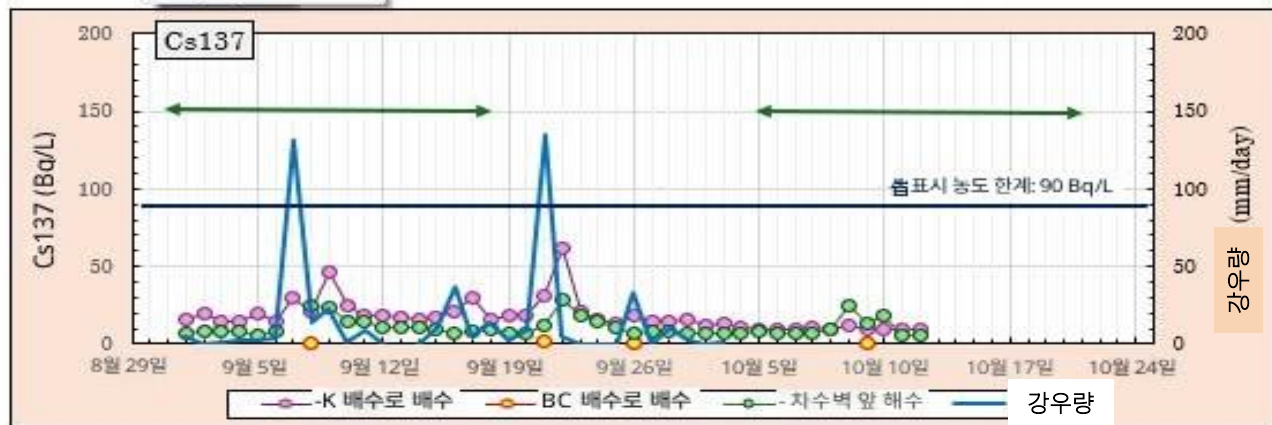
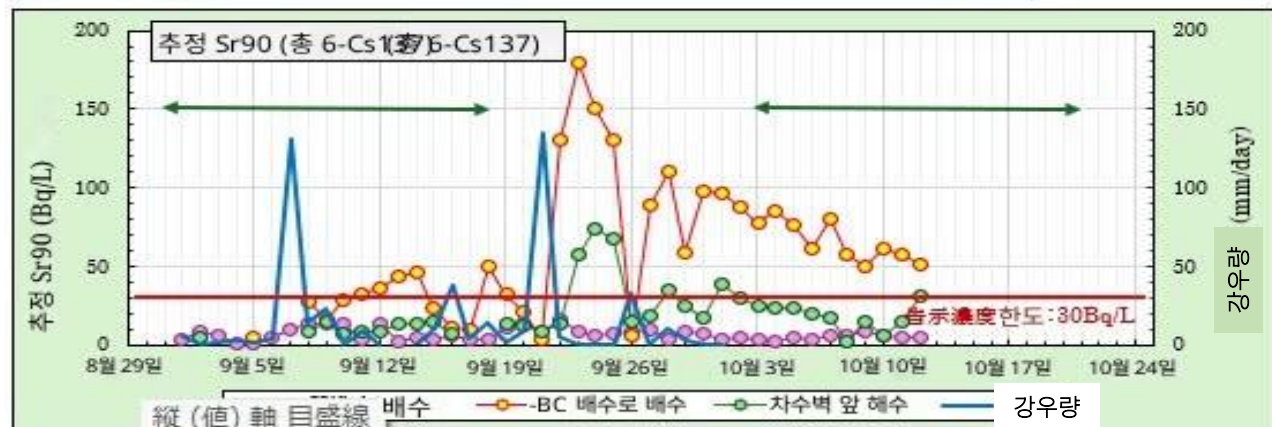
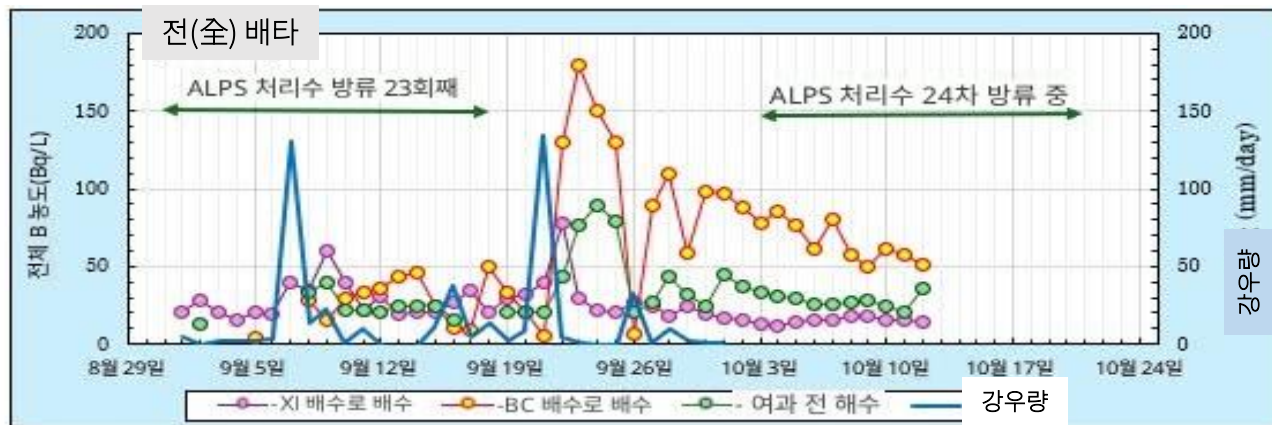
야마자키 히데오 씨의 페이스북
(2026년 9월 10일자) 인용

ALPS 처리 오염수
방출 23, 24회차
(2026년 8월~10월)
기간 중
부지 내 배수로의 배수

BC 배수로에서는 Cs137이
거의 검출되지 않으므로,
전체 베타선은 Sr-90(+Y90)
에 해당한다.

(BC 배수로에는 오염수 저장
탱크군을 통과한다)

9월 23일 Sr-90(+Y-90)은
180Bq/L(규제치 30Bq/L)
로,ALPS 처리 오염수의
동일 시기 수치(0.28 Bq/L)
의 321배 농도로 방출



야마자키 히데오 씨의 계산 결과(2026)에 따르면

BC 및 K 배수에서의 최근 3년간 방사성 핵종 방출량 (Bq/년)					
BC 배수구					
연도	유량 (L/년)	Cs-137	H-3	전 β	추정 Sr-90
2023	1.90E+09	2.20E+08	1.00E+10	2.50E+09	2.30E+09
2024	6.10E+08	1.00E+08	1.80E+09	1.20E+09	1.10E+09
2025	6.30E+08	2.10E+08	1.20E+09	2.10E+09	2.20E+09
K 배수구					
연도	유량 (L/년)	Cs-137	H-3	전 β	추정 Sr-90
2023	4.30E+08	8.70E+09	3.80E+10	1.10E+10	2.30E+09
2024	4.60E+08	6.80E+09	3.50E+10	8.90E+09	2.20E+09
2025	3.30E+08	6.20E+09	2.20E+10	7.80E+09	1.70E+09
* 삼중수소는 주 1회 측정이므로, 주별 방출량에 실측 농도를 곱하여 주별 방출량 산정					
* 기타 핵종은 하루 량으로 계산					
* 추정 Sr-90 값은 방사평형 상태에 있는 Y-90과의 합산					

*부지 내 배수로에서 항만 안으로 배출되는 방사능은 ALPS 처리 오염수 방출량을 훨씬 초과한다



建設用地全景

후쿠시마 제1핵발전소 건설 전의 토지 현황

후쿠시마현 원자력 행정 개요(2010)

I-2. 地下水関連
(福島第一原子力発電所周辺の地形)

【参考】



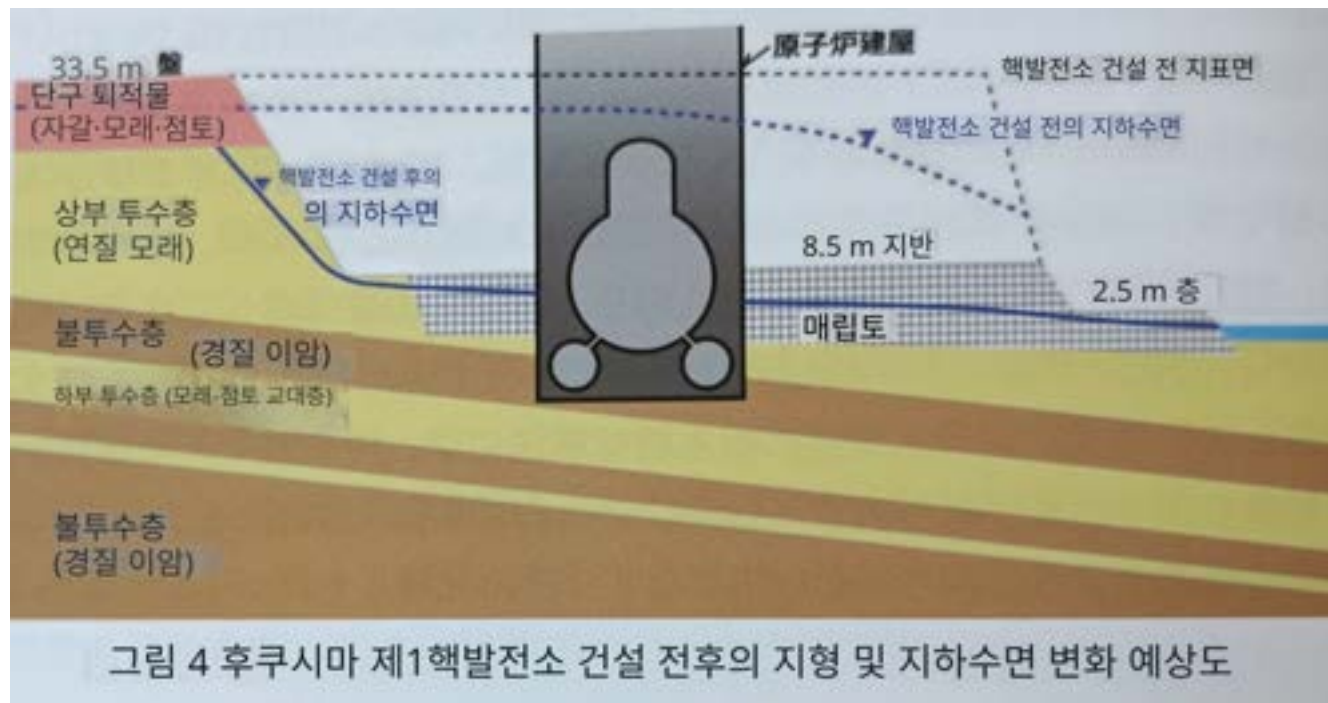
부지 안팎 하천 등

2013년 8월 23일 도쿄전력 발표
「후쿠시마 제1원자력발전소 주변의 지질·지하수 및 분석」

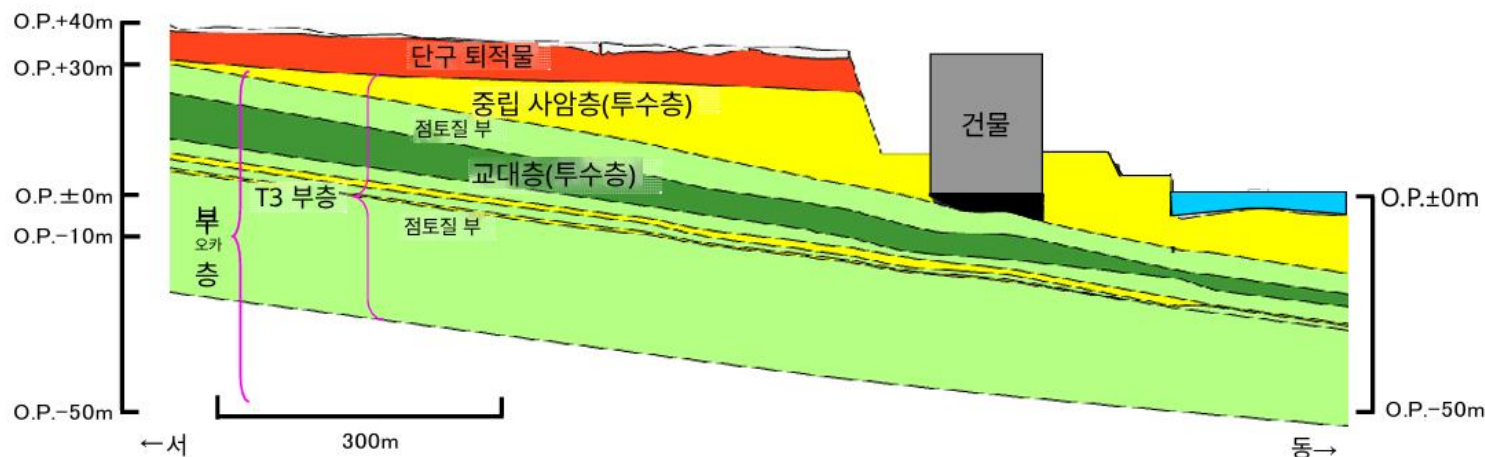
- * 후쿠시마 제1핵발전소는 지하수가 풍부한 대지를 깎아내 건설되었다.
- * 핵발전소 사고 이전에는 700m³ (톤)이 넘는 지하수가 많은 우물 (서브드레인)을 통해 퍼 올려지고 있었다.

지하수 현황: 부지 내 지하 및 지하수의 흐름

지단연소책자16
“후쿠시마
제1핵발전소의
오염수는 왜
계속 늘어나는가”



도쿄전력 2013
후쿠시마
제1핵발전소
주변의 지질·
지하수 및 분석



오염 지하수의 바다 유입에 대하여

- *오염된 지하수는 2015년 10월 해안 측 차수벽이 완공되기 전에는, 하루 약 400톤이 항만 내로 직접 유출되고 있었다.
- *2015년 10월, 호안 따라 총 길이 약 780m에 걸쳐, 깊이 약 30m의 강관을 연속적으로 박아 넣고, 물유리(Water glass) 등으로 접합.
- * 그 결과, 유출량은 하루 10톤에서 수십 톤으로 감소.
- * 막힌 지하수가 넘쳐 지표면으로 스며나오지 않도록, 벽 안쪽에 ‘지하수 펌핑우물’이라 불리는 우물을 다수 설치하여 지하수를 강제로 퍼 올리고 있다.
- * 퍼 올려진 지하수는 전용 정화 설비를 통해 농도를 기준치 이하로 낮춘 뒤, 바다로 방류하고 있다.
- * 터빈 건물 동쪽의 지하수 중 일부는 Cs-137, Sr-90, H-3 농도가 현재도 매우 높다.
- * 배수 규제치가 엄격한 요오드-129 농도는 측정되지 않았거나 공개되지 않았다.
- * 지하수를 통해 바다로 유출되고 있는 방사능의 실체는 아직 밝혀지지 않았다.

바다쪽 차수벽

- * 1~4호기 해안 쪽 지하에 지름 1.1~1.2m, 길이 약 30m의 강관 (철 파이프) 말뚝 약 780개를 틈이 없도록 가로로 한 줄로 박아 놓았음. 총 길이 약 780m에 달하는 철제 벽이다.
- * 파이프 사이의 이음 부분에는 지수재(물유리 등)를 주입.
- * 유출을 방지하기 위해, 바다쪽 차수벽 안쪽에 ‘지하수 드레인’이라 불리는 펌핑 우물을 설치.
- * 지하수 드레인에서 매일 대량의 지하수를 퍼 올려, 육지 쪽의 지하수위를 해수면보다 낮은 상태로 유지하고 있다.
- * 폭우로 지하수위가 급격히 상승하여 양수 펌프 용량을 초과하면 수위가 역전되어, 처리되지 않은 지하수가 항만으로 유출된다.
- * 물리적 틈새나 이음새를 통해 고농도로 오염된 지하수가 유출되며 그 양은 매일 10톤에서 수십 톤으로 평가(도쿄전력)
- * 항만 내로 유출되는 오염수는 상기 오염 지하수뿐만 아니라, 부지 내 배수로에서 나오는 오염된 배수도 포함한다.

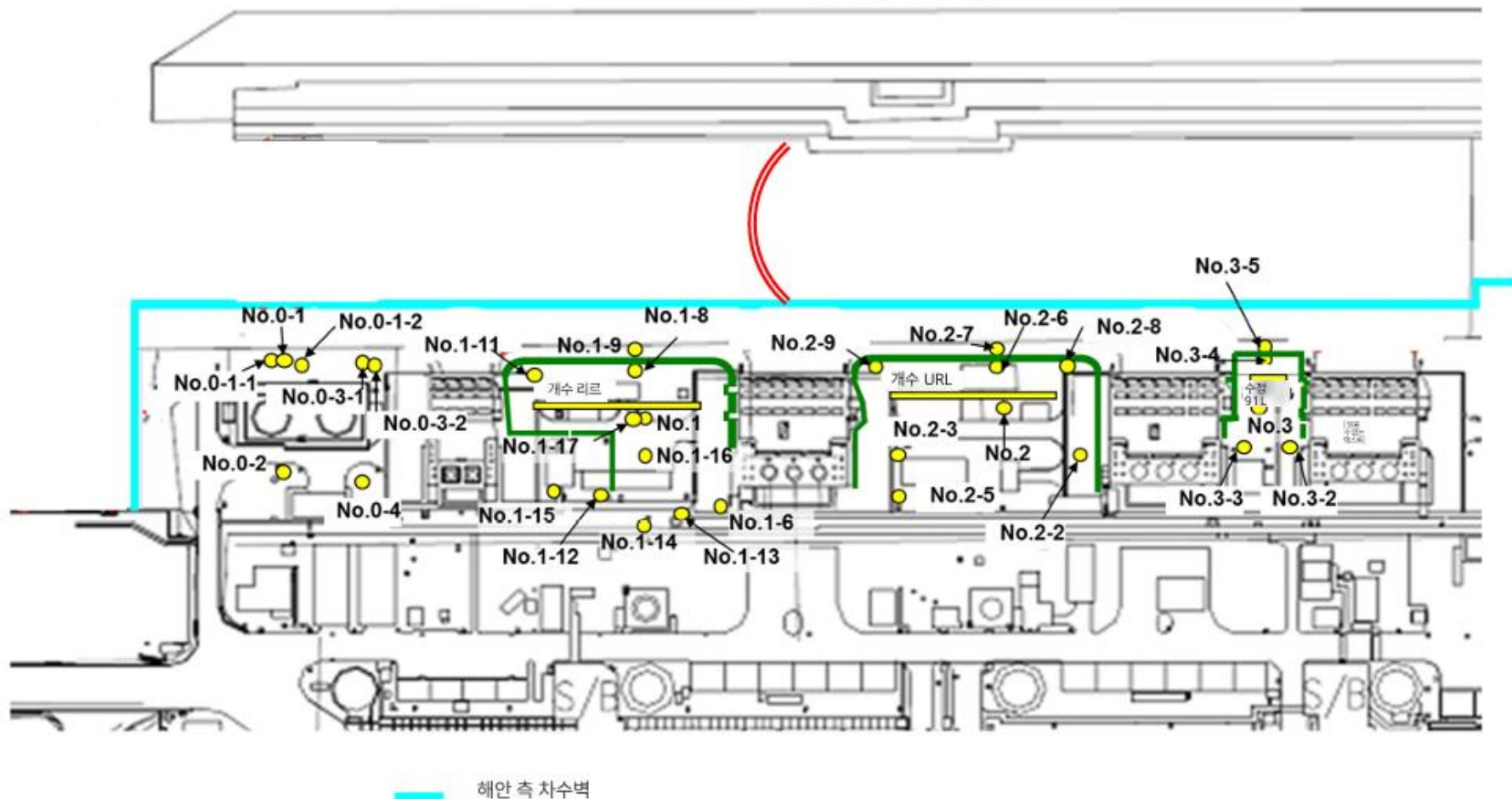
오염 지하수의 바다 유입에 대하여

후쿠시마 제1핵발전소

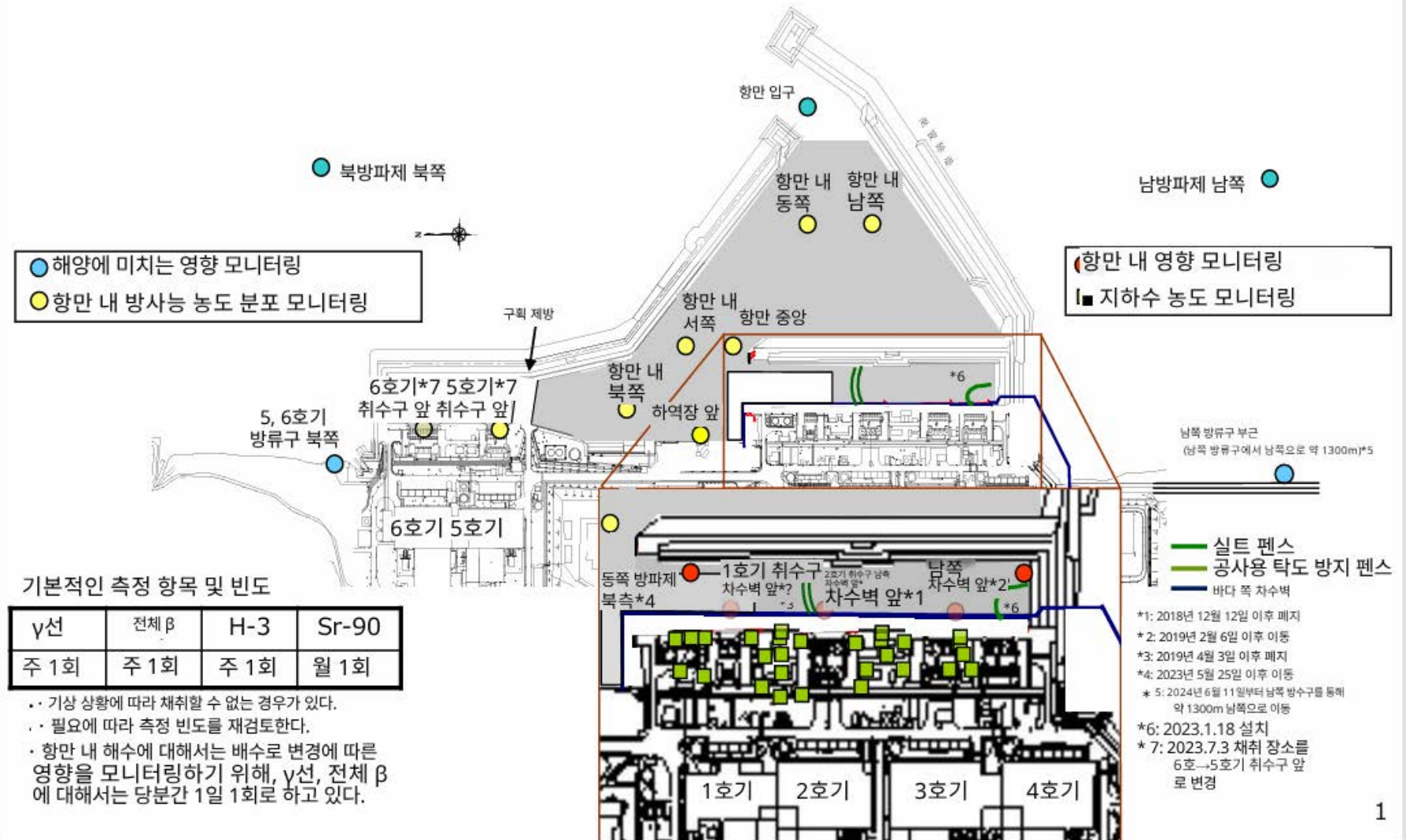
호안 지하수 시료 채취 지점

● 호안 지하수 시료 채취 지점

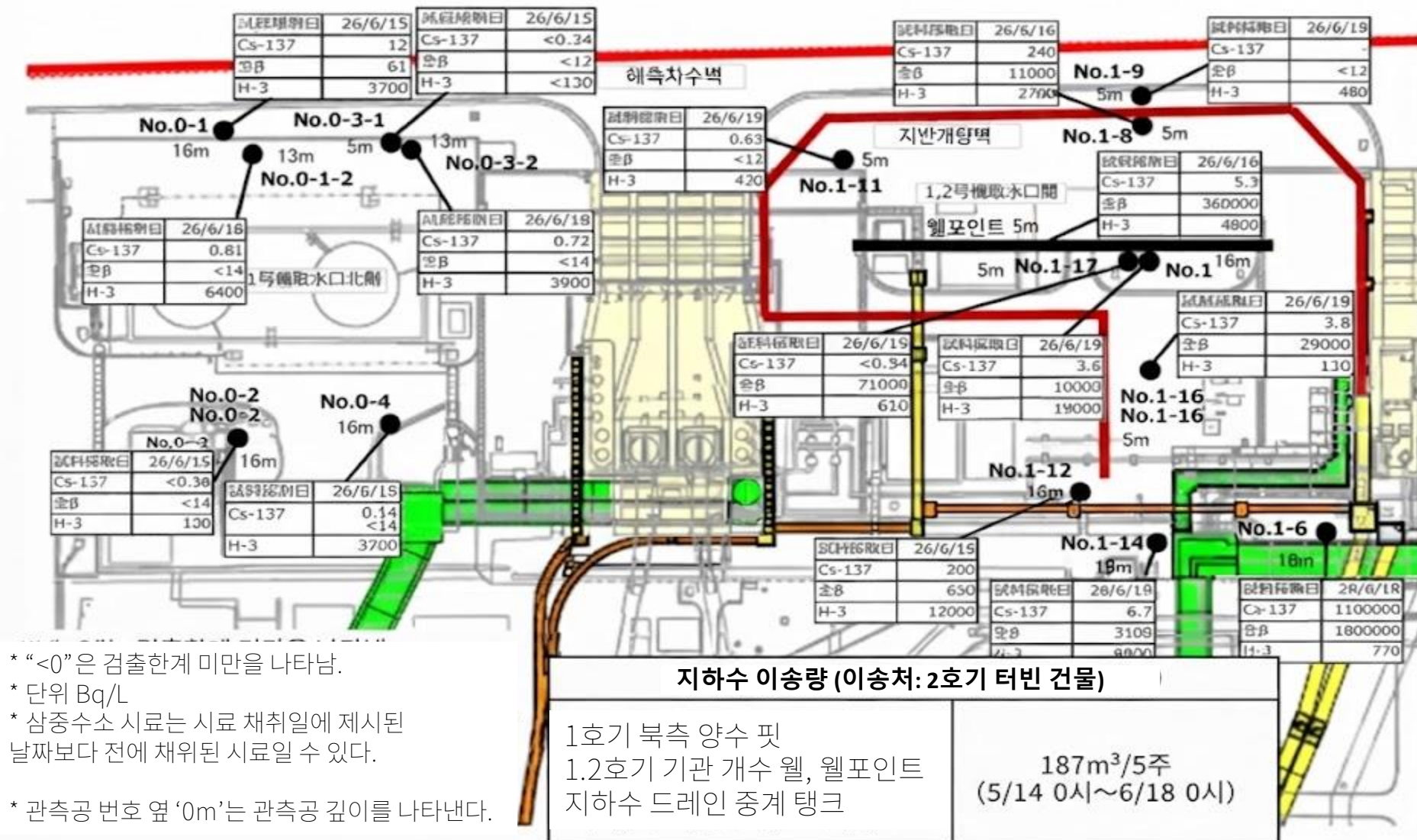
東波除堤



후쿠시마 제1핵발전소 터빈 건물 동쪽의 지하수 채취 지점과 항만 내외 모니터링 지점



1호기 취수구 북측, 1.2호기 취수구 사이



* “<0”은 검출한계 미만을 나타냄.

* 단위 Bq/L

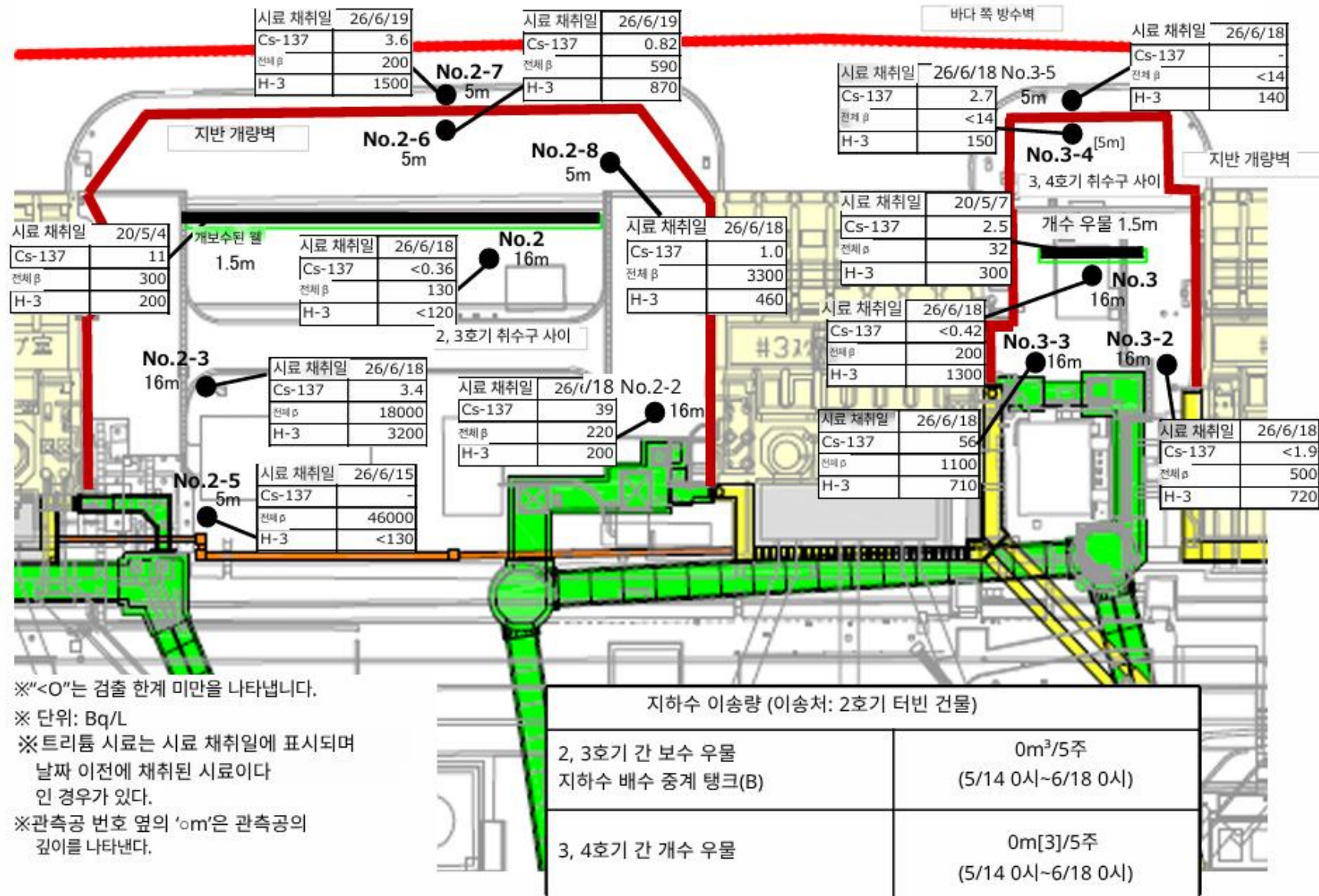
* 삼중수소 시료는 시료 채취일에 제시된 날짜보다 전에 채워진 시료일 수 있다.

* 관측공 번호 옆 ‘0m’는 관측공 깊이를 나타낸다.

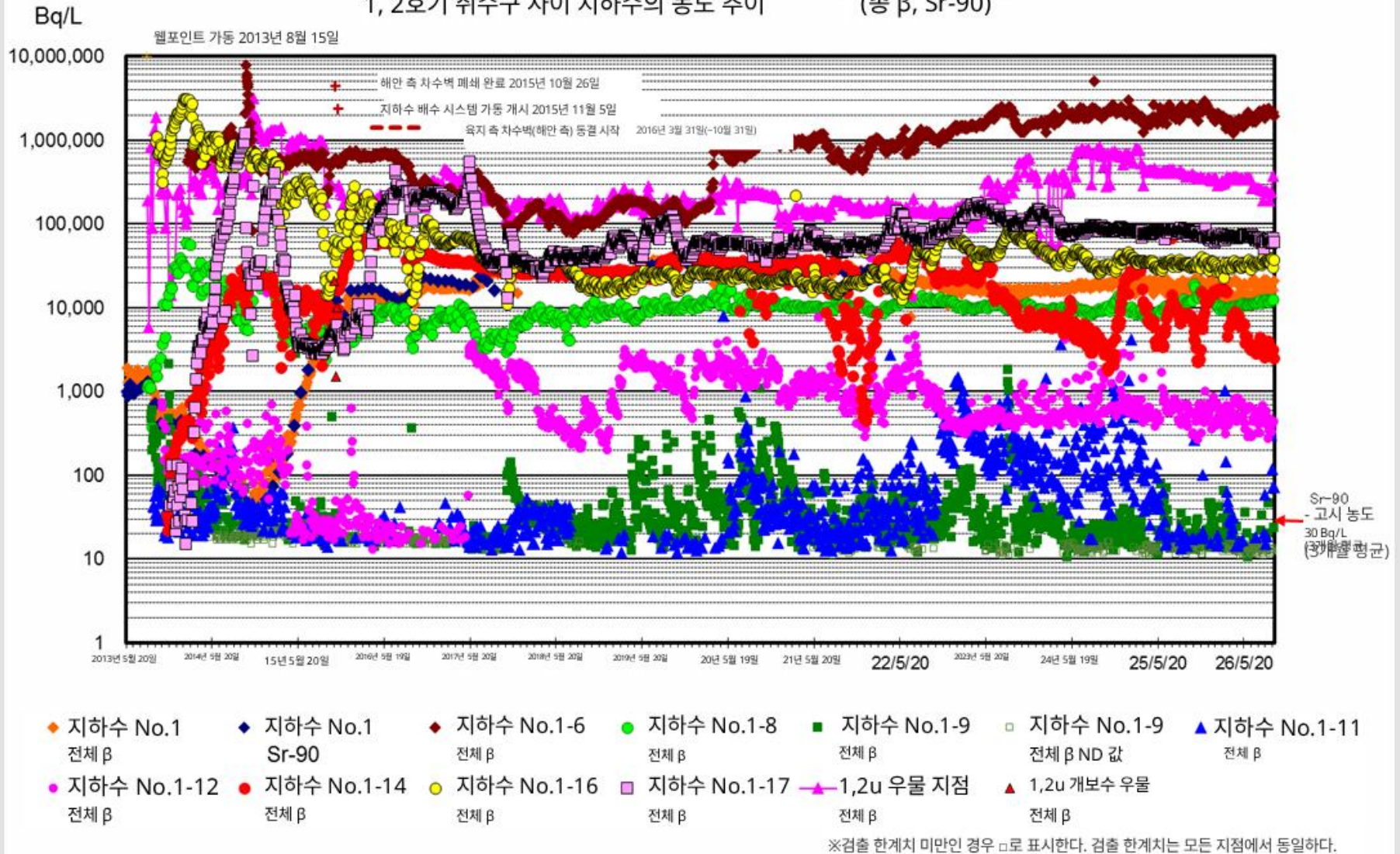
No.0-3-2, No.1, No.1-6에 대해서는 변동 조사중

2026년 7월 2일 도쿄전력 ‘터빈 건물 동쪽의 지하수 및 해수 내 방사성 물질 농도 현황’

<2,3号機取水口間、3,4号機取水口間>



1, 2호기 취수구 사이 지하수의 농도 차이 (총 β, Sr-90)

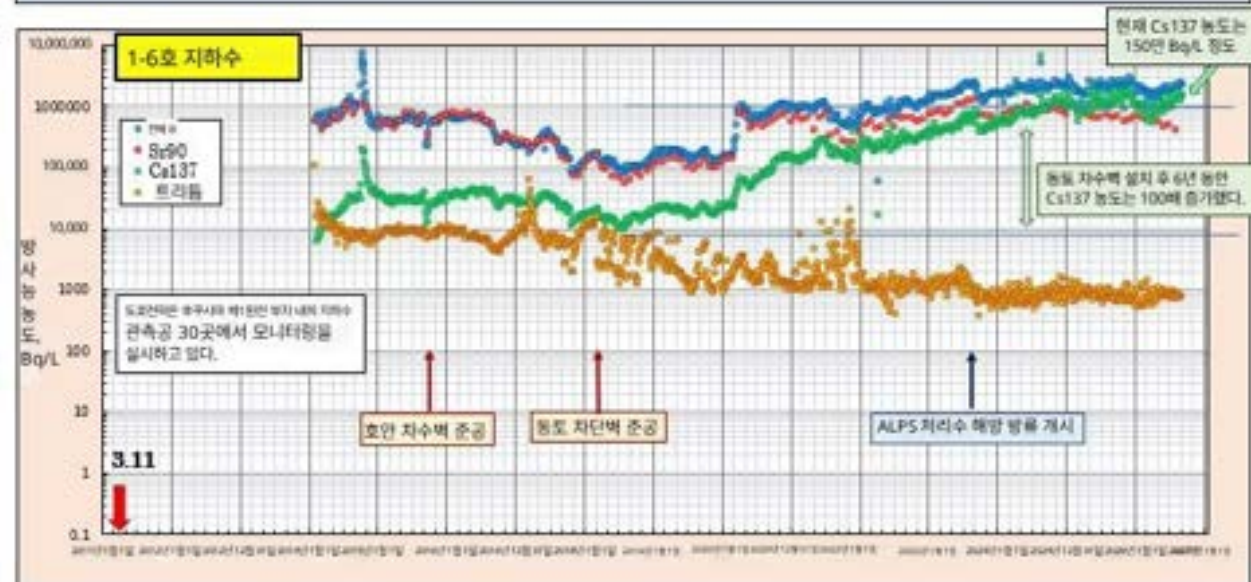
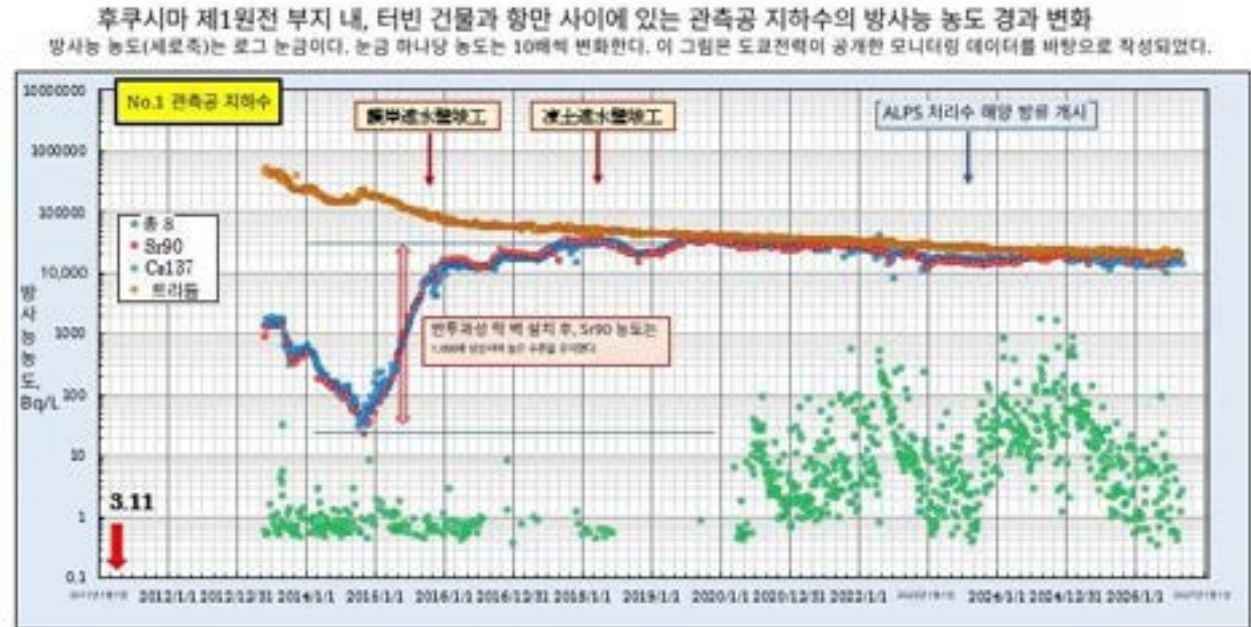


No.1, No.1-6에 대해, 변동 조사 실시 중.

제1원전 터빈 건물과 항만 사이 지하수의 H-3, Sr-90, Cs-137 농도 경년 변화 (야마자키 히데오 씨 페이스북 2026년 9월 10일 게시물에서 인용)

No.1 지하수에서
Cs-137 농도는
1~1000 Bq/L
전체 베타선(Sr-90)
은 현재도
10,000 Bq/L를 초과
H-3 농도는
10,000~100,000 Bq/L

No.1-6 지하수에서는
Cs-137 농도와
전체 베타선(Sr-90)은
100,000~
1,000,000 Bq/L
H-3 농도는 현재도
1,000 Bq/L 전후



최근 몇 가지 실측 지하수 중 농도

터빈 건물 동쪽 지하수 농도(Bq/L) 측정치					
지하수 우물번호	지하수 깊이	시료 채취일	Cs-137	全 β (Cs-137+Sr-90+Y-90)	H-3
No.0-1	16	2026/6/15	12	61	3700
No.0-1-2	13	2026/6/18	0.81	14以下	6400
No.1-6	16	2026/6/19	1100000	1800000	770
No.1	16	2026/6/19	3.6	10000	19000
No.1-17	5	2026/6/19	0.54 이하	71000	610
No.2-3	16	2026/6/18	3.4	18000	3200
No.2-5	5	2026/6/15	검출한계 이하	46000	130 이하
No.2-8	5	2026/6/18	1	3300	460
No.3-3	16	2026/6/18	56	1100	710

*Sr-90의 실측값은 없으나, 거의 전체 베타값에서 Cs-137과 이트륨(Y)-90 값을 뺀 값일 것이다.

*유로와 깊이가 다른 지하수가 여러 개 흐르고 있는 것으로 보인다.

*지하수 유로와 깊이 차이로 인해 측정값에 큰 차이가 나타난다.

*지하수의 Cs-137은 토양과 접촉하면 점토 광물 등에 흡착된다.

*측정값은 없으나, I-129나 C-14 등의 방사성 핵종은 당연히 포함되어 있다.

*이러한 지하수 일부는 항만 내로 유입되고 있지만, 일부는 항만 밖으로 유출되고 있다.

*해안 쪽 차수벽 설치로 인해 직접적인 유출은 없는 것으로 보이지만, 지하수는 지속적으로 유입되고 있으므로 서서히 해양으로 유출되고 있는 것으로 보인다.

*바다 쪽 차수벽을 넘어 항만 내부로 유출되는 지하수의 양은 현재 약 10~수십 톤/일(도쿄전력)

*2015년 해안 측 차단벽이 설치되기 전에는 하루 400톤의 오염된 지하수가 항만 내로 유출되었다.

전용 항만 내부로 어느 정도의 방사능이 유입되고 있는지

＊항만 내로 유입되는 배수로의 배수량과 지하수 유입량을 평가 (마츠클보 2023)
항만 내 방사능을 바탕으로 추론 (항만내로 유입되는 배수로의 배수와 지하수를 평가)

1. 항만 내 해수 중 Cs-137의 총량을 추산. 측정 농도에 항만 내 해수량을 곱함.
2. 외해와 항만 간의 해수 교환율을 추산.

기존 연구의 교환율 0.44/일 (Kanda et al., 2013; Machida et al., 2023)

3. 항만 내로 유출되고 있는 Cs-137의 양을 계산을 통해 구함.

(항만 내에서는 방사성 물질을 포함한 새로운 배수나, 방사성 물질을 포함한 잔류 해수와, 외해에서 유입된 새로운 바닷물이 서로 섞여, 다음 날에는 그중에서 다시 44%의 바닷물이 외해로 유출되는 이러한 반복 과정을 통해 해수의 교환율은 항만의 형태와 구조, 조수의 밀물과 썰물(조석), 바람 및 해류 등에 따라 결정되는 값)

평가 결과는 전용항(항만)으로의 방출량 추정치로, 2023년 5월 경우 세슘 137이 70억~96억 베크렐, 삼중수소는 430억~530억 베크렐, 전체 베타가 2,500억~2,900억 베크렐로 나타났다. 전체 베타 방사선의 대부분은 스트론튬 90이다. 이를 연간 방출량으로 환산하면, 세슘 137은 840억~1,152억 베크렐, 삼중수소는 5,160억~6,360억 베크렐, 전체 베타(대부분 스트론튬 90)는 30,000억~34,800억(3.0조~3.5조) 베크렐이다.

주로 스트론튬 90으로 추정되는 다량의 방사능이 항만 내로 유입되고 있다.

2023년도 같은 시기에 1km 앞바다로 방출된 ALPS 처리 오염수는, 세슘 137이 1,400만 베크렐, 삼중수소는 4.5조 베크렐, 전체 베타선에 기여하는 스트론튬 90이 590만 베크렐이었으므로, 세슘 137은 ALPS 처리 오염수 방출량의 2,400배에서 10,500배, 스트론튬 90은 ALPS 처리 오염수 방출량의 51만배에서 90만배가 전용항(항만)으로 유출되었다.

구내 배수 및 지하수를 통한 해양 유출 요약

- * 부지 내 배수로에서 배출되는 물은 H-3, Cs-137, 전체 베타선의 측정을 실시하고 있으나, Sr-90이나 I-129, C-14도 측정해야 한다. 이를 포함하면 고시 농도 한도를 초과할 가능성이 있다.
- * 전체 베타 값으로 Sr-90을 추산하고 있으나, BC 배수로의 배수에서는 Sr-90이 고시 농도(30Bq/L)를 초과하여 방출되고 있다.
- * 배수로에서는 강우로 극히 고농도의 Sr-90이 항만 및 해양으로 현재도 유출되고 있다. ALPS 처리 오염수의 수백 배에 달한다.
- * 부지 내 배수로에서 배출되는 물은 현재도 법률상 고시 농도 한도를 초과하고 있다. 더욱 엄격하게 관리해야 한다.
- * 지하수에서의 유출은 그 유출 경로, 총량 및 농도 등을 포함하여, 실태는 아직 밝혀지지 않았다.
- * 현재도 상당한 양의 방사능이 항만 내로 유출되고 있다.
- * 지하수가 부지 내로 유입되지 않도록 대책을 마련해야 한다.
- * 규제치가 엄격하고 생체 영향이 큰 요오드-129나 탄소-14도 측정해야 하며, 측정값이 있다면 이를 공개해야 한다.

참고: 항만 내에서 채취된 어류의 최근 방사능 오염 현황(Cs-137 기준)

장어(1,700 Bq/kg, 2022년도), 우럭(18,000 Bq/kg, 2023년도),
쥐노래미(810 Bq/kg, 2026년도), 우럭(980 Bq/kg, 2026년도)

ALPS처리 오염수의 해양 방출

(ALPS 처리 오염수에서의 방사성 핵종 방출 실적)

후쿠시마 바다에 해양 방출된 ALPS 처리 오염수의 방사능 총량 (2023~2025년도)					
핵종 (기호)	핵종 (명칭)	반감기	2023년도 (베크렐)	2024년도 (베크렐)	2025년도 (베크렐)
H-3	삼중수소	12.3년	4.5조	13조	16조
C-14	탄소14	5,700년	4.3억	6.4억	17.4억
Co-60	코발트60	5.27년	980만	1,800만	1,920만
Sr-90	스트론튬90	28.8년	590만	4,000만	6,210만
Tc-99	테크네튬99	21만 년	3,200만	4,600만	5,140만
Sb-125	안티몬125	2.76년	220만	880만	950만
Te-125m	텔루륨125m	57.4일	80만	330만	350만
I-129	요오드129	1,570만 년	6,400만	3,800만	2,440만
Cs-137	세슘137	30.2년	1,400만	1,100만	1,280만

참고 자료: ALPS 처리수 해양 방출 현황에 대하여 2024년 5월 30일 TEPCO
특정 원자력 시설 감시·평가 검토회 자료 4-1 (제113회, 2024년 7월 16일)
ALPS 처리수 해양 방출 현황에 대하여 2025년 5월 29일 TEPCO
ALPS 처리수 해양 방출 현황에 대하여 2026년 5월 28일 TEPCO

*삼중수소, C-14, Sr-90, Tc-99의 총 방출량은 많으며, 연도별로 증가하고 있다.
*I-129, Cs-137의 총 방출량은 높은 수준을 유지하고 있다.

후쿠시마 핵발전소 오염수의 위험성, 현황은 어떠한가 ALPS 처리 오염수란 어떤 것일까요?

ALPS 처리 오염수의 원래 물은 -----

- * 사고가 발생한 원자로 건물로 유입되는 지하수 및 빗물
- * 연료 데브리(debris)와 접촉하여 핵반응으로 생성된 다양한 방사성 물질 등을 포함하고 있음. 연료 데브리에는 사고로 용해된 다양한 금속을 포함하고 있음. 방사성 물질인 코발트-60(Co-60) 등을 포함함. 용융된 연료 피복관 재료인 지르코늄, 주석 등도 포함되어 있음. 사고로 용해된 콘크리트 성분 등을 포함하고 있음. 원자로 내에서 핵분열로 생성된 안정 텔루륨 등의 독성 물질도 포함.
- * 유입된 지하수에 포함된 부식산 등의 유기물
- * 저장 탱크 내에서 발생한 황산 환원균 등도 포함되어 있음.
- * 방사성 탄소를 포함한 방사성 유기물이 포함되어 있을 가능성. 후르보산이나 후민산 등 고분자 유기산에 흡수된 방사성 탄소는 ALPS에서도 제거하기 어렵다.
- * 강력한 자체 방사선에 연료데브리가 취성화되어, 현재 용출되지 않은 방사성 핵종이나 독성 물질이 향후 용출될 가능성이 있음.

후쿠시마 제1핵발전소: 다핵종 제거 설비 'ALPS'란?

(계속 늘어나는 오염수 대책으로 도입, 부지 경계의 선량 제한 대책도 포함)

철 공침, 탄산염 침전 전처리 장치 + 각종 흡착 장치 (ALPS, 2013.-)

전처리 장치의 철 공침 설비를 제외한 컬럼 증강 (증설 ALPS, 2014.9-)

전처리 공정 없음, 필터와 흡착제 컬럼 만 (고성능 ALPS, 2014-)

운영 방침으로 가동률을 높여 운영하기 위해서는 흡착재 교체로 인한 정지 기간을 단축해야 한다.

흡착재 교체로 인한 정지 기간은 짧은 경우 1탑당 2일 정도(처리량 환산 시 500m^3). 긴 경우(흡착재가 고착되기 쉬운 경우) 14일 정도 (처리량 환산 시 $3,500\text{m}^3$)가 소요되므로,

흡착재 교체로 인한 처리량 감소의 영향이 큰 경우에는,

고시 농도 한도를 크게 초과하지 않는 범위 내에서 교체 시기를 조정

(「다핵종 제거 설비 등 처리수의 성상에 관하여」 TEPCO 2018년 10월)

라는 내용이 있어, 완전히 제거하지 못하더라도 방류한다는 뜻

ALPS에 대한 자세한 내용은 다음 등을 참조할 것

『중대 사고 시 발생하는 오염수의 처리』, 전기중앙연구소 히지카타 타카토시, 2017년

http://www.aesj.or.jp/~recycle/nfctxt/nfctxt_9-2.pdf

TMI 노심 용융 사고 후 오염수 처리에 대한 설명이 있음

후쿠시마 제1핵발전소 오염수 처리 체계도

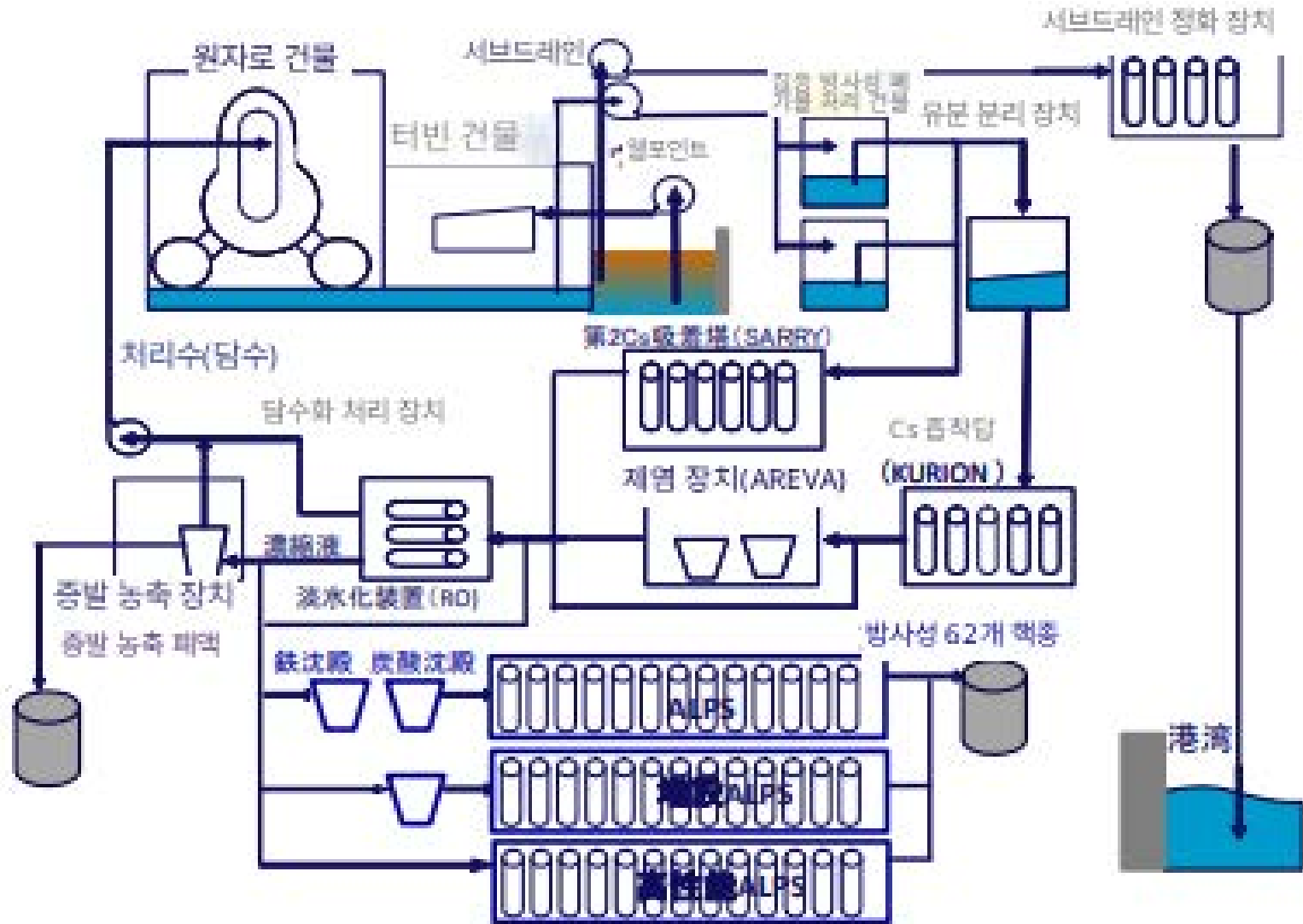
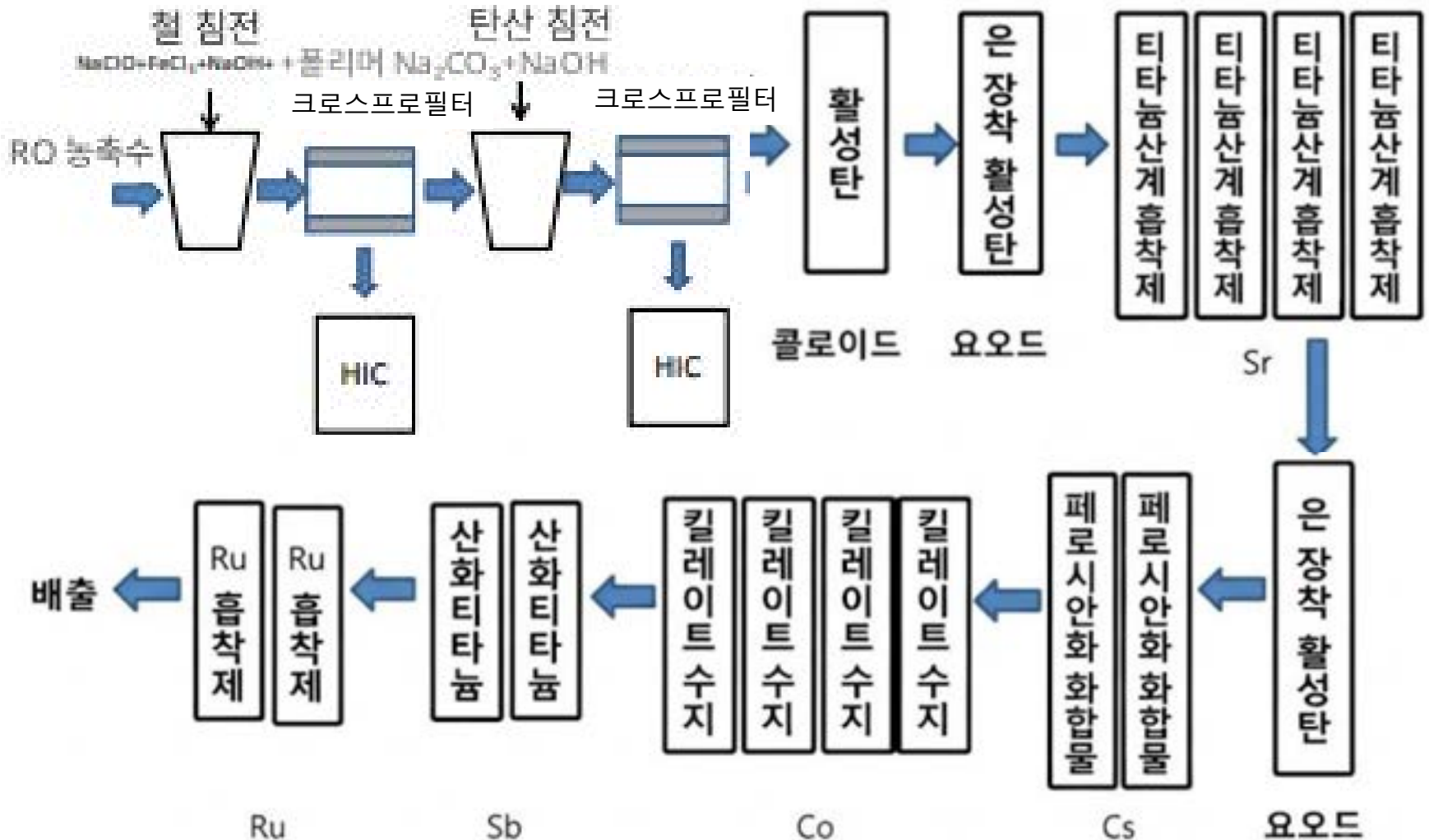


그림 3 1F 오염수 처리 시스템도

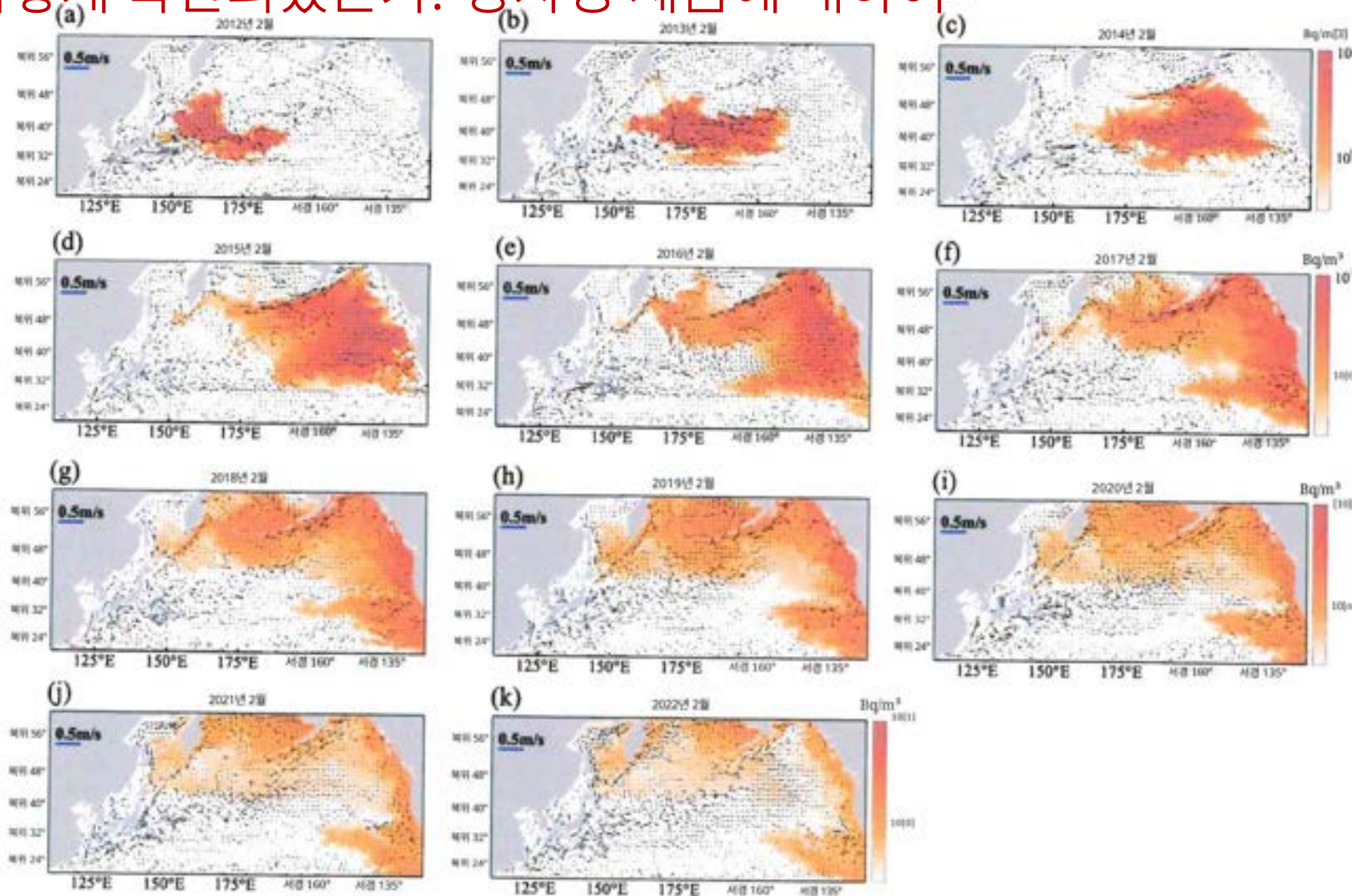
중대 사고 시 발생하는 오염수 처리, 전기중앙연구소 히지카타 타카토시 2017

ALPS 처리 흐름도



제7도 ALPS의 처리 흐름도 ²⁶⁾

해양 확산: 사고 당시 후쿠시마 해역으로 방출된 오염수는 어떻게 확산되었는가: 방사성 세슘에 대하여



출처: S. T. Lee 외, 북태평양의 아극권 회오리와 중간층 해수를 통한 후쿠시마 방사성 물질의 표층 및 심층 확산, Scientific Reports, 14, 5055 (2024)

후쿠시마 해역으로 방출되는 처리 오염수는 어떻게 확산되는가 : 최근 연구 논문을 통해

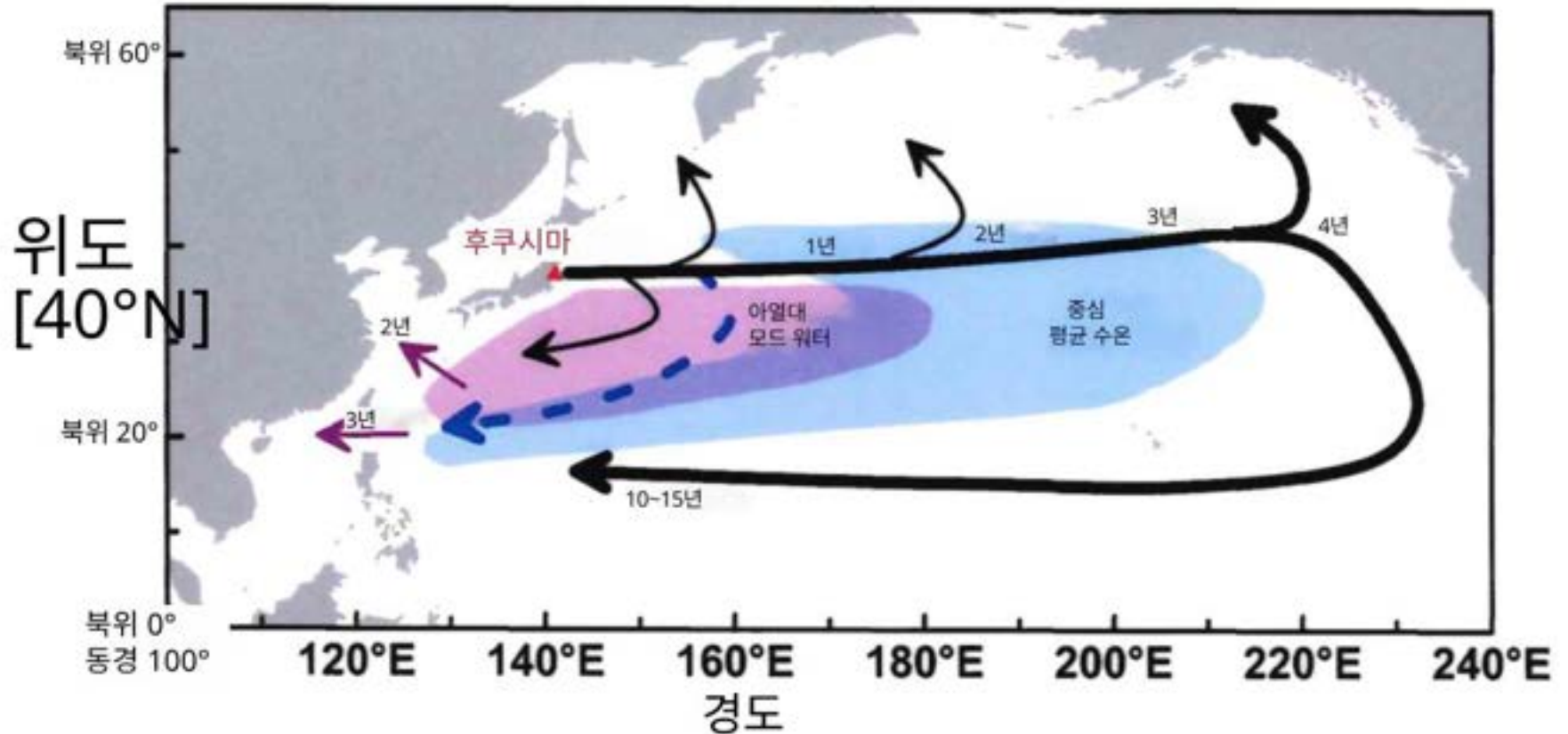


그림: 주로 삼중수소를 포함하는 처리된 오염수의 확산 양상

출처: Chang Zhao 외, 후쿠시마 제1 원자력 발전소의 방사성 오염수에서 유래한 삼중수소의 이동 및 확산, v169, pp112515 (2021).

해양 생물의 농축 계수

농축 계수: 특정 수생 생물의 체내 물질 농도와 해수 중 농도의 비율,
생체 농도와 환경 매체 농도가 평형 상태에 있을 때의 계수

표 4-1 해산 생물의 원소 농축 계수

원 소	종 류						
	식물 플랑크톤	동물 플랑크톤	조류	갑각류	연체동물 (두족류 제외)	두족류	어류
세슘	20	40	50	50	60	9	100
요오드	800	3,000	10,000	3	10	-	9
스트론튬	1	2	10	5	10	2	3
플루토늄	200,000	4,000	4,000	200	3,000	50	100
삼중수소	1	1	1	1	1	-	1

データは, IAEA (2004) より引用. -는 데이터 없음.

출처: 쿠로쿠라 히사시 편: 수권의 방사능 오염(2015) 4장 수산물 내 방사능 측정 85페이지
원본 데이터는 IAEA Technical Reports Series No.422. (2004)이지만,
삼중수소에 대해서는 기본값(초기값)으로 기재되어 있어 실제 측정값을 인용한 것은 아니다.

아마노의 코멘트: 후쿠시마 제1핵발전소 ALPS 처리 오염수 해양 방출은, 2023년, 2024년, 2025년 연도에 스트론튬 90은 590만, 4,000만, 6,210만 베크렐, 요오드 129는 6,400만, 3,800만, 2,440만 베크렐, 세슘 137은 1,400만, 1,100만, 1,280만 베크렐 등이 후쿠시마 앞바다로 방출되었다.

삼중수소 개요 1

*수소의 방사성 동위원소 (H-3; T로도 표기)

*베타선 방출 핵종(반감기 12.3년: 18.6 keV)

*자연계에서도 미량으로 생성·존재한다.

*물 분자나 수소 가스와 혼재한다.

*물의 삼중수소(HTO)는 생물체 내 구석구석까지 퍼져

태아로도 이동, 생물학적 반감기는 약 10일 정도.

*유기물의 수소 원자와 치환되어 유기 결합형(OBT)이 된다.

*신진대사나 세포 재생 과정에서도 유기적으로 결합한다.

*식물의 광합성을 통해서도 유기 결합형이 된다.

*OBT의 생물학적 반감기는 약 40일~500일 정도이다.

*DNA를 구성하는 수소와도 치환되며, 이 경우

베타선을 방출하며 붕괴되어 헬륨(He)이 되고 DNA 사슬을 절단한다.

*세포 내로 흡수되어 모든 에너지를 세포 내로 방출하며, 유해한 활성산소를 발생시키고, 생체의 에너지 생성 원천인 미토콘드리아 등에 손상 입힘.

삼중수소 개요 2-물리·화학

아르준 마키자니 저
『삼중수소 위험성을
탐구하다』
료쿠후 출판 2024년 간행
(27, 28쪽)에서

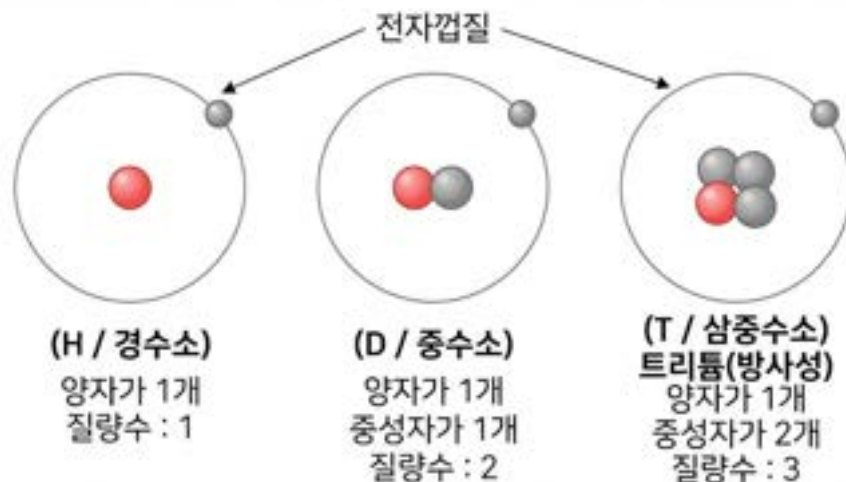


그림 II-1: 수소의 3가지 동위원소 개념도. 일반 수소는 H-1이며 단순히 H로 표기하고, 중수소는 H-2로 D로 표기하며, 삼중수소는 H-3, T로 표기한다. 삼중수소만이 방사성(반감기 12.3년)이며, 베타선을 방출하여 He-3가 된다.

*삼중수소의 붕괴 과정에서 중성자1개가 양성자로 변환되며, 이때 베타선을 방출한다.

*생물체 내부로 흡수되면 모든 방사선 에너지를 세포 내부로 방출.

*삼중수소 베타선의 평균 에너지는 5,700 전자볼트(eV)

(생물 분자의 일반적인 화학 결합은 수eV)이므로, 삼중수소 원자 하나에서 방출되는 베타선 한 개가 수천 건의 이온화를 일으킴.

*물의 이온화 에너지는 12.6 eV이므로, 삼중수소 베타선은 평균적으로

물 분자 약 450개를 이온화하며, 최대(18.6 keV)에서는 1,470개 이상을 이온화한다.

삼중수소 개요 3 - 위험에 대한 상세 내용

1. 기형 유발성 영향

임신 제1·삼분활기 동안의 임신 실패, 중추신경계 손상, 장기 기형, 비암성 영향, 다양한 출생 후 건강 영향의 가능성

2. 미토콘드리아에 미치는 영향

mtDNA(모계 유전)의 돌연변이(어머니로부터 여러 세대에 걸쳐 해를 끼칠 가능성 있음): 미토콘드리아는 ATP를 생산하여 생체의 에너지를 생성하며 파킨슨병, 알츠하이머병, 심근증 등을 발병시킬 가능성이 있음

3. 상승 효과의 가능성

내부 피폭과 비방사성 오염 물질이 생물학적 영향에 미치는 시너지 효과의 가능성
(1~3은 마키자니 저 『삼중수소 위험성을 탐구하다』, 료쿠후 출판, 2024년 간행 참조)

4. 세포 수준의 영향

세포 내 피폭으로 세포질 내 과잉 활성산소종(ROS)이 생성되어 다양한 장애 유발 가능성

5. DNA 손상

핵 DNA, 미토콘드리아 DNA를 구성하는 수소와 치환되어 DNA를 파괴함

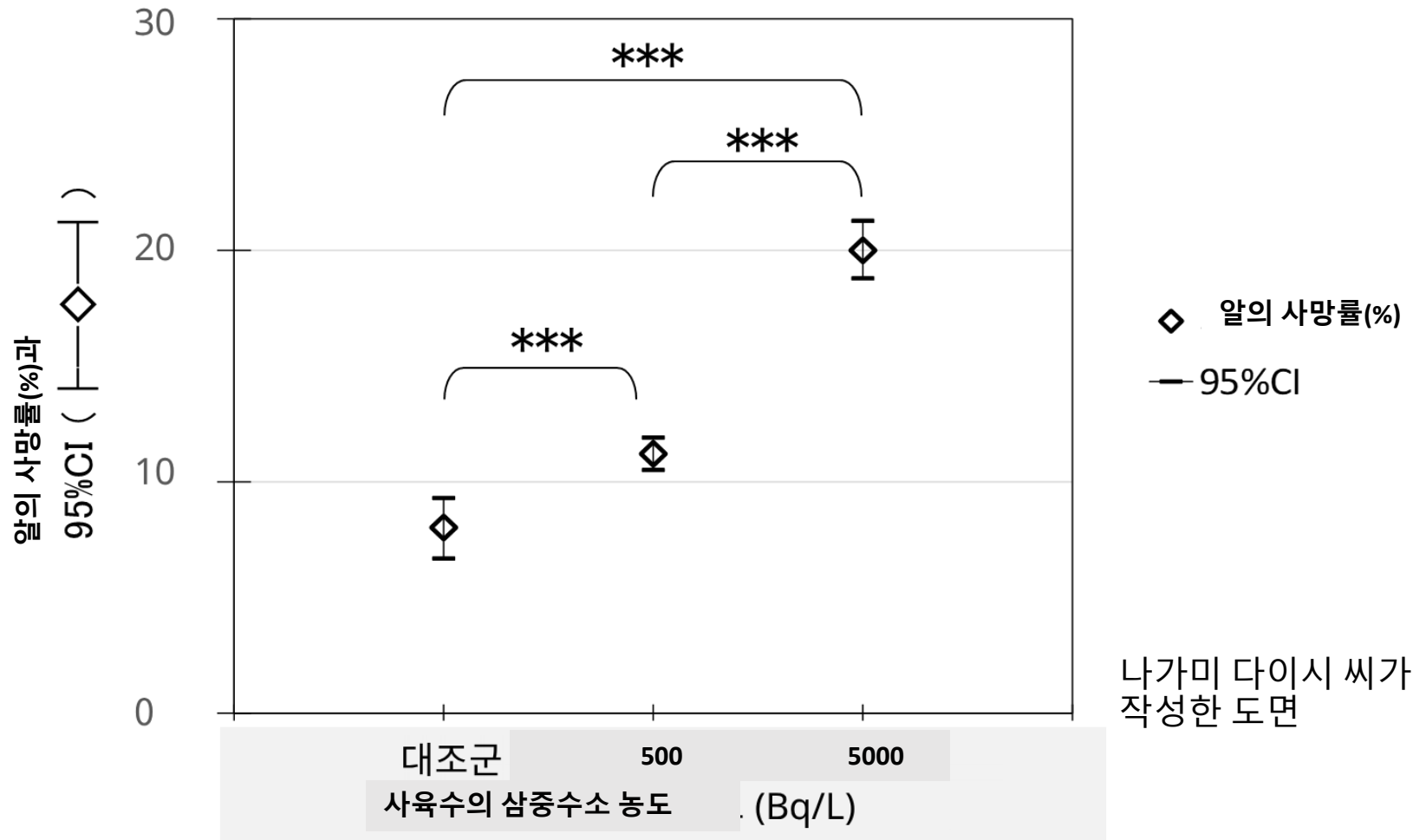
6. 생태계에 미치는 영향

환경으로 방출된 방사성 핵종이 생태계를 변화시킴

삼중수소 농도와 생물학적 영향 및 규제 값 등

트리튬 농도(Bq/L)	규제치 등 (Bq/L)	생물학적 영향 등 (Bq/L)
100,000		
	일본의 방류 규제치(60,000)	인간의 림프구 염색체 이상(37,000) * ¹
10,000	WHO 음용수 기준(10,000)	
	후쿠시마 제1핵발전소 방류수 규제치(1,500)	
1,000		
	미국 EPA의 음용수 기준(740)	어란에 이상 발생(500)* ²
100	EU의 음용수 기준(100)	
	미국 Cf주의 음용수 기준(15)	
10		
1		
	핵실험 전 강수 중 농도(0.1~0.6)	
0.1		
주:	일본에는 음용수 규제치가 없음	
* ¹ 호리·나카이, 저농도 트리튬의 유전적 영향, 보건물리 11, 1~11(1976)		
* ² L. Bondareva 외, Environment, 9, 51 (2022)		

삼중수소 함유 물에서 붕어 알의 사망률



| 그림 : 삼중수소 농도에 따른 *Prussian carp* 알의 사망률(%)
*** : 0.1% 수준으로 유의

삼중수소 용액에서 자라난 붕어 치어의 발육 이상률

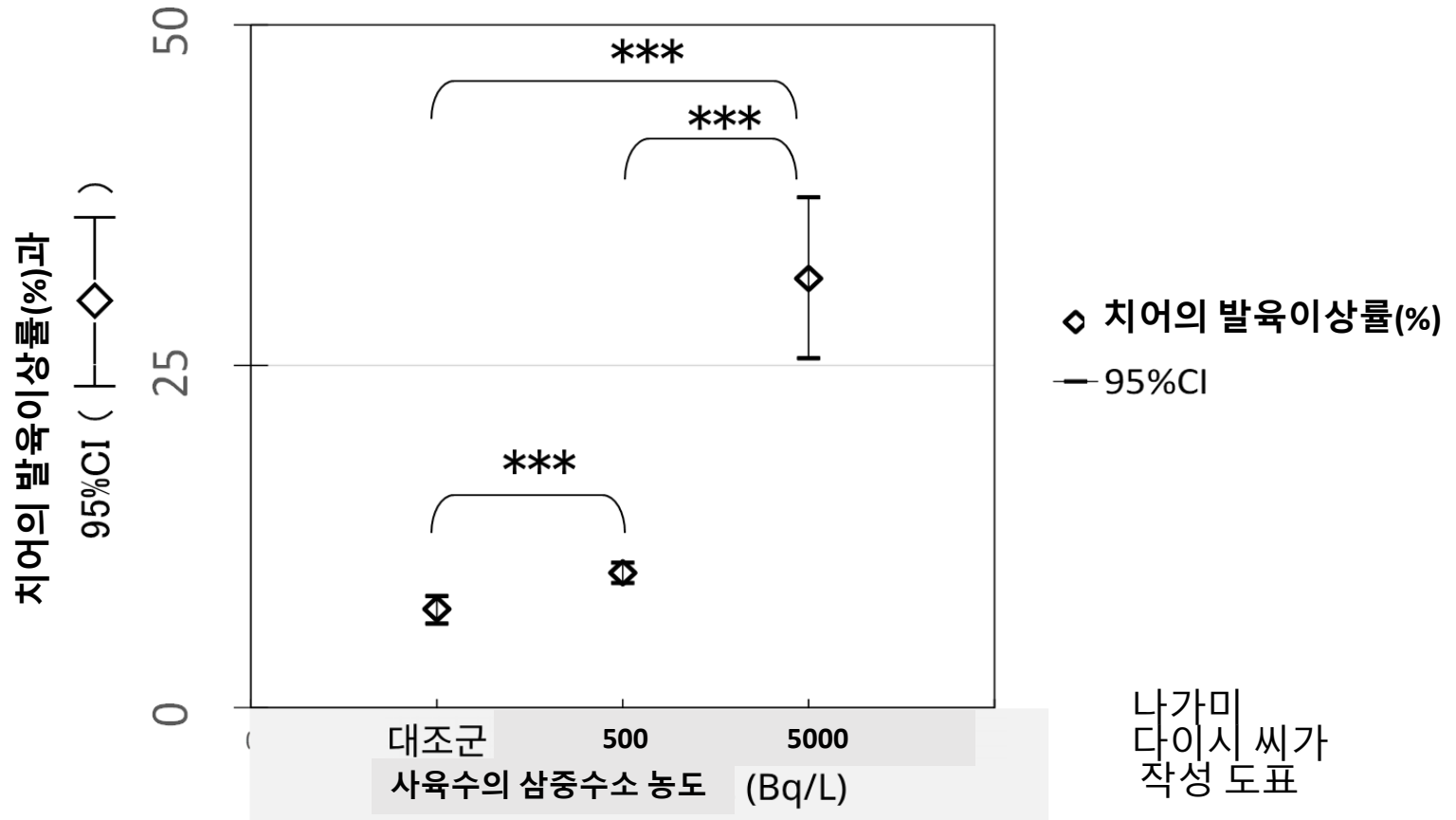


그림 : 삼중수소 농도에 따른 *Prussian carp* 의 치어 발육 이상율(%)
*** : 0.1% 수준으로 유의

문헌: Lidia Bondareva, et al., Environments, 9, 51 (2022)

아마노의 코멘트: 이 실험들에서는 붕어의 먹이에 대한 세부 사항이 불분명하므로 해수 속 삼중수소 농도만으로는 판단할 수 없다.

삼중수소와 방사성 탄소를 해수로 보내는 리스크 - 해양 생태계 영향

미생물의 다양성, 대사 과정, 영양 순환 유전자의 풍부성에 악영향(2023년 논문)

미생물 군집 구조를 재편하는 삼중수소 및 탄소-14 오염,
대사 네트워크 및 해수 환경의 원소 순환
Jin-long Lai 외, Environ. Sci. Technol. 2023, 57, 5305-5316

실험 방법:

- * 실제 해수와 해저 토양을 사용하여 삼중수소와 방사성 탄소를 투입한 후, 60일이 경과한 시점의 해양 미생물 군집에 미치는 장기적 영향을 분석
 - 삼중수소 농도는 3.7×10^3 Bq/L (T1), 3.7×10^4 Bq/L (T2)
 - 방사성 탄소 농도는 3.7×10^3 Bq/L (C1), 3.7×10^4 Bq/L (C2)
- (참고로 후쿠시마 제1원전 처리 오염수의 방류수 내 삼중수소 농도는 1×10^3 Bq/L)
- * 퇴적물의 대사, 미생물 군집 구조, 대사 기능의 변화를 분석
- * 해양 환경에서 퇴적물의 영양 순환에 관여하는 효소를 조사한

결과:

- * 해수 중 미생물 군집 구조 및 존재량과 밀접한 관련이 있는 무기인, 황,
아질산염, 질산태 질소의 해수 중 농도가 감소하고, 해수 세균 군집 구조가 대폭 변화
- * 퇴적물의 대사산물 조성(지질, 유기산, 유도체 등)이 현저하게 변화했다.
(아마노 주: 퇴적물에 포함된 생물 유래 유기물은 미생물에 의해 분해되어 더 단순한 물질로 변환된다. 퇴적물에는 다양한 생물이 서식하며, 유기물을 섭취하고 대사함으로써 에너지를 얻거나 신체를 구성하는 물질을 합성한다)
- * H3 및 C14 노출로 인해 퇴적물의 미생물 구성이 대폭 변화하고, 유기인 대사가 저해됨
- * 질소 순환에 관여하는 효소의 발현을 변화시켜, 촉매 활성화와 질소 대사에 영향을 미침
- * 해수와 퇴적물 내 미생물 군집 구조가 변화하여, 퇴적물의 대사 주기가 변화
- * C14 노출은 퇴적물의 탄수화물 대사를 조절하고, H3 노출은 항생제 내성 유전자에 영향을 미침

ALPS 처리 오염수에는 요오드-129도 포함되어 있다

요오드-129(반감기 1,570만 년)의 농도 및 규제 값 등

*요오드-129 방출 규제치(고시 농도): 9 Bq/L

농도 규제만 있으며, 총량 규제는 없음(참고로 삼중수소는 60,000 Bq/L)

*실제 방출 농도: 2.5 Bq/L (2023년도 제4회, 2024년 2월)

2.3 Bq/L (2024년도 제1회, 2024년 4월)

1.4 Bq/L (2025년도 제7회, 2026년 3월)

*방출 핵종 중 삼중수소에 이어 고시 농도 대비 비율이 높은 핵종

실제 방출 총량: 2023년도 6,400만 Bq (방출량: 31,145 m³)

2024년도 3,800만 Bq (방출량: 54,999 m³)

2025년도 2,440만 Bq (방출량: 54,977 m³)

방출 평균 농도는 2023년도 2.05 Bq/L

2024년도 0.69 Bq/L

2025년도 0.44 Bq/L

*생물 내 농축이 크며, 플랑크톤에 흡수되어 확산됨

농축 계수는 식물성 플랑크톤에서 800배, 동물성 플랑크톤에서 3,000배, 조류는 10,000배이며, 식용으로 이용된다

*체내로 흡수되었을 때의 내부 피폭 선량이 크다

ICRP 선량 환산 계수(Sv/Bq) 요오드-129: 2.2E-07(1세 영아)

(실효선량, 음식 섭취) 요오드 131: 1.8E-07(1세 영아)

ALPS 처리 오염수에는 방사성 탄소 14도 포함되어 있다

탄소 14(반감기 5730년)의 농도 및 규제 값 등

- *탄소14 방출 규제치(고시 농도): 2,000 Bq/L
농도 규제만 있으며, 총량 규제는 없음 (참고로 트리튬은 60,000 Bq/L)

*방출 핵종 중 삼중수소에 이어 방출 농도가 높음

실제 방출 총량:	2023년도	4.3억 Bq (방출량: 31,145 m ³)
	2024년도	6.4억 Bq (방출량: 54,999 m ³)
	2025년도	17.4억 Bq (방출량: 54,977 m ³)
방출 평균 농도는	2023년도	13.8 Bq/L
	2024년도	11.6 Bq/L
	2025년도	31.6 Bq/L

*생물 내 농축이 크며, 플랑크톤에 흡수되어 확산됨

농축 계수는 식물성 플랑크톤에서 9,000배, 동물성 플랑크톤에서 20,000배, 조류에서는 10,000배로 농축되며, 조류는 식용으로 이용된다

*체내로 흡수되었을 때의 내부 피폭 선량이 크다

ICRP 선량 환산 계수(Sv/Bq) 탄소-14: 5.8×10^{-10} (성인)
 1.6×10^{-9} (1세 영아)

(실효선량, 음식 섭취)

ALPS 처리 오염수에는 방사성 Sr-90도 포함되어 있다

Sr-90(반감기 28.8년)의 농도 및 규제 값 등

*Sr-90 방출 규제치(고시 농도): 30 Bq/L

농도 규제만 있으며, 총량 규제는 없음 (참고로 삼중수소는 60,000 Bq/L)

*방출 핵종 중 삼중수소, C-14에 이어 방출 농도가 높음(2025년도)

실제 방출 총량: 2023년도 590만 Bq (방출량: 31,145 m³)

2024년도 4,000만 Bq (방출량: 54,999 m³)

2025년도 6,210만 Bq (방출량: 54,977 m³)

방출 평균 농도는 2023년도 0.19 Bq/L

2024년도 0.73 Bq/L

2025년도 1.13 Bq/L

*생물체 내 농축이 크며, 대부분이 뼈에 침착된다.

농축 계수는 식물성 플랑크톤에서 1배, 동물성 플랑크톤에서 2배,
조류에서는 10배로 농축되며, 조류는 식용으로 사용된다.

*뼈 내부에 있는 골수가 피폭되어 백혈병 발병 위험이 높아진다.

또한 뼈나 골막의 세포가 손상을 입어 골종양(골육종 등)의 원인이 된다

*체내로 흡수되었을 때의 내부 피폭 선량이 크다

ICRP 선량 환산 계수(Sv/Bq) Sr-90: 2.8×10^{-8} (성인)

7.3×10^{-8} (1세 영아)

(실효선량, 음식 섭취)

ALPS처리 오염수에는 세슘 137도 포함되어 있다

Cs-137(반감기 30.2년)의 농도 및 규제값 등

*Cs-137 방출 규제치(고시 농도): 90 Bq/L

농도 규제만 있으며, 총량 규제는 없음 (참고로 삼중수소는 60,000 Bq/L)

*H-3, C-14, Sr-90, Tc-99에 이어 방출 농도가 높음(2025년도)

실제 방출 총량: 2023년도	1,400만 Bq (방출량: 31,145 m ³)
2024년도	1,100만 Bq (방출량: 54,999 m ³)
2025년도	3,450만 Bq (방출량: 54,977 m ³)

방출 평균 농도는 2023년도	0.45 Bq/L
2024년도	0.20 Bq/L
2025년도	0.63 Bq/L

*생물체 내 농축이 크며, 근육이나 연조직 등에 침착된다.

농축 계수는 식물성 플랑크톤에서 20배, 동물성 플랑크톤에서 40배, 조류는 50배, 어류는 100배로 농축되며, 조류나 어류는 식용으로 사용되므로

*세포나 세포의 DNA 등이 피폭되어 암이나 백혈병의 위험이 높아진다.

*체내로 흡수되었을 때의 내부 피폭 선량이 크다.

ICRP 선량 환산 계수(Sv/Bq)	Sr-90: 1.3×10^{-8} (성인)
(신효선량, 식품 섭취)	1.2×10^{-8} (1세 영아)

참고: 항만 내에서 채취된 어류의 최근 방사능 오염 (Cs-137에 관하여)
장어(1,700 Bq/kg, 2022년도), 우럭(18,000 Bq/kg, 2023년도),
쥐노래미(810 Bq/kg, 2026년도), 우럭(980 Bq/kg, 2026년도)

항만 유출 방사능과 1km 해역에 방출되고 있는 ALPS 처리 오염수 내 방사능과 비교 예시

후쿠시마 해역으로 유출·방출되고 있는 방사능 2023년도

	전용 항만 내로의 유출	BC 및 K 배출되는	배수로에서	알프스 처리 오염수 전용 항만/배수로에서
Cs-137	840억~1,152억	89.2억	1,400만	6,000~8,200
Sr-90 추정치	1,4,500억~1,6,800억	46억	590만	25만~28만
트리튬	0.5~0.6조	480억	4.5조	0.11~0.13
비고	2023년 5월 측정값을 바탕으로 유출량 추정 (마츠쿠보 2023)	2023년 4월~2024년 3월까지 1년간의 합계 (야마지)	4회 방출량의 합계 방 지점은 연안에서 1km	

*항만 내로 유입되는 방사능에는 부지 내 배수로에서 배출되는 배수 속의 방사능과, 항만 내로 유입되는 지하수 속의 방사능이 포함된다.

*Sr-90 수치는 전체 베타선 수치로 추정한 값($Sr-90 + Y-90 = \text{전체 } \beta - Cs-137$)

*평가는 2023년도 기준이지만, 평가의 근거가 되는 항만 내 해수 중 방사능이 연도별로 큰 변화가 없으므로, 현재에도 적용 가능하다고 판단된다.

*항만 내 해수는 다양한 방법으로 차단하여 외해와의 교환이 줄어들도록 하고 있으나, 항만 내 해수의 교환율에는 과거 실측 문헌값인 0.44/일을 적용했음.

2026년도에 배수로에서 바다로 방출된 H-3, Sr-90, Cs-137

ALPS 처리 오염수 방류와 비교 (야마자키 히데오 씨 페이스북 2026.9.18)

ALPS 처리수를 해양으로 방류할 때, 후쿠시마 제1핵발전소 부지 내에서 얼마나 많은 방사성 핵종이 해양으로 유출되고 있는가? 도쿄전력이 공표한 모니터링 데이터를 바탕으로 한 추정

a) 희석 전 원수의 수치, b) 오염된 지하수의 해양 유출량은 불명이며, 각 시추공당 일일 1m³로 가정. c) ALPS 처리수를 제외한 나머지 8개 핵종의 농도 차이와 Cs-137의 농도 차를 Sr-90 농도로 가정. d) ALPS 처리수는 29개 핵종의 공표값 그 외는 Sr90과 Cs137 두 핵종의 합산값. e) 요오드-129 농도는 ALPS 처리수 원수 외에는 공표되지 않았다.				방출량		방류 기간 중 해양으로의 유출량			공지 농도비 합계[d]		요오드-129[e]	
				방출량		트리튬	Sr90[c]	Cs137				
				m[3]	MBq (1MBq = 백만 베크렐)			각	합계	MBq	고시 농도비	
ALPS 처리수 해양 방류 통산 20회째 2026년 6월 1일~6월 20일	제어원 방출	ALPS 처리수[a]	7927	1,300,000	3.6	3.7	0.45	1.18	28	0.38		
	미처리 방류	배수로(K+A+참고+BC+D)	165512	4,948	505	496	0.73					
	동태 불명의 누수[b]	No.1-6 관측공 지하수	20	17	14531	22933	37000					
		No.1 관측공 지하수	20	413	287	0.2	478					
ALPS 처리수 해양 방류 통산 21회 2026년 7월 6일~7월 24일	제어원 방출	ALPS 처리수[a]	7894	1300000	3.9	3.7	0.48	1.30	29	0.41		
	미처리 방류	배수로(K+A+참고+BC+D)	94694	934	218	256	0.82					
	동태 불명의 누수[b]	No.1-6 관측공 지하수	19	16	14226	21375	37500					
		No.1 관측공 지하수	19	380	342	0.01	600					
ALPS 처리수 해양 방류 총 22회차 2026년 7월 30일~8월 17일	제어원 방출	ALPS 처리수[a]	7888	1300000	6.4	4.2	0.61	1.50	37	0.52		
	미처리 방류	배수로(K+A+참고+BC+D)	171590	920	414	679	0.89					
	동태 불명의 누수[b]	No.1-6 관측공 지하수	19	15	13066	27867	39200					
		No.1 관측공 지하수	19	372	357	0.04	627					

긴키대 전 교수 야마자키 히데오의 추산에 따르면:

<https://www.facebook.com/photo?fbid=3846509738820374&set=a.753368408134538>

*표 속의 Sr-90 수치는 ALPS 처리 오염수를 제외한 경우 Sr-90과 Y-90의 합계치.

*2026년도에도 배수로 배출수는 Cs-137과 Sr-90 모두 ALPS 처리 오염수를 크게 초과하며,

Cs-137과 Sr-90 농도 합계가 배수 농도 규제치(고시 농도비 합계)를 초과하고 있다.

*도쿄전력은 고시 농도 한도가 엄격한 요오드-129 농도를 측정하지 않았거나, 공표하지 않았다.

*지하수를 통해 막대한 양의 Cs-137과 Sr-90이 항만 내로 유입되고 있다.

BC 및 K 배수로의 최근 3개 연도 방사성 핵종 방출량(Bq/년)					
ALPS 처리 오염수 방출량(Bq/년)과의 비교					
BC 배수로					
연도	유량(L/년)	Cs-137	H-3	전체 β	추정 Sr-90
2023	1.90E+09	2.20E+08	1.00E+10	2.50E+09	1.20E+09
2024	6.10E+08	1.00E+08	1.80E+09	1.20E+09	5.50E+08
2025	6.30E+08	2.10E+08	1.20E+09	2.10E+09	9.50E+08
K 배수로					
연도	유량(L/년)	Cs-137	H-3	전체 β	추정 Sr-90
2023	4.30E+08	8.70E+09	3.80E+10	1.10E+10	1.20E+09
2024	4.60E+08	6.80E+09	3.50E+10	8.90E+09	1.10E+09
2025	3.30E+08	6.20E+09	2.20E+10	7.80E+09	8.50E+08
알프스 처리 오염수					
연도	유량(L/년)	Cs-137	H-3	전체 β	Sr-90
2023	3.11E+07	1.40E+07	4.50E+12		5.90E+06
2024	5.50E+07	1.10E+07	1.30E+13		4.00E+07
2025	5.50E+07	1.28E+07	1.60E+13		6.21E+07

*배수로부터의 방출량은 야마자키 히데오 씨(2026) 계산 결과

*ALPS 처리 오염수 방출량과 비교했을 때, 배수로 배출을 통한 방사능 방출량 중
Cs-137은 BC 배수에서 10배 이상, K 배수에서 500배 이상,
Sr-90은 BC 배수에서 약 30배, K 배수에서 약 50배 더 많다.

정리

- * 원자로 노심 용융 사고 같은 대형 사고 발생하면 육지와 바다가 방사능으로 심각하게 오염된다.
- * 부지 내 배수 및 지하수 고도로 오염되며, 오염수 해양 방류 장기간 지속된다.
- * 부지 내 배수나 지하수 속 방사성 핵종은 방출 규제치를 초과하고 있다.
- * ALPS 처리 오염수의 후쿠시마 앞바다 해양 방류에서는 삼중수소 외에도 반감기가 긴 다양한 방사성 핵종이 방출되고 있다.
- * 해수로 희석하지 않으면 삼중수소 등은 방출 규제치 이하로 낮출 수 없어 방출할 수 없다.
- * 삼중수소 방출 총량은 ALPS 처리 오염수만으로도 2023년도는 약 5조, 2024년도는 약 13조, 2025년도는 약 16조 베크렐(연간 22조 베크렐을 초과하여 방출하지 않고, 순차적으로 고농도의 ALPS 처리 오염수를 방출할 예정이라고 함)
- * 생물체 내로 섭취되는 삼중수소 등의 위험성은 정당하게 평가되지 않고 있다.
- * 후쿠시마 앞 바다로 방출되는 처리 오염수는 전 세계를 돌며 동해로도 유입된다.
- * 방사성 요오드-129는 ALPS 처리 오염수에서 방출 규제치에 가까운 양으로 방출된다. 부지 내 배수나 지하수를 통한 유출까지 포함하면 규제치를 초과할 가능성이 있다.
- * 방출되는 방사성 요오드-129나 탄소-14 등은 해수 속의 식물성 플랑크톤, 동물성 플랑크톤, 해조류 등에 농축되어 전 세계 바다를 순환한다.
- * 방사성 요오드-129가 포함된 해조류 등을 음식으로 섭취하면 요오드-129가 갑상선 등에 축적되어 내부 피폭을 일으킨다.
- * 방사성 탄소(C-14)는 자연적으로도 존재하지만, 오염수나 배수, 지하수에 고농도로 포함되어 있어, 해양 생물체에 농축되어 해양 생태계에 악영향을 미친다.
- * 생물에게 미치는 영향이 큰 스트론튬 90도 상당한 양이 방출되고 있다.
- * 핵발전소는 후쿠시마에서 발생한 것과 같은 대형 사고의 가능성이 있으며, 또한 운전에 따라 발생하는 방사성 폐기물 처리·처분 문제가 있어 용인할 수 없다.

21. 시민들의 몇 가지 질문과 답변

- ① 왜 일본정부와 도쿄전력은 처리수를 바다로 방류하려 하는가
어쨌든 빨리 후쿠시마 사고를 수습하고 싶다.
로카쇼 재처리 공장의 가동에 지장이 없도록 하고 싶다.
- ② 바다로 장기간 방류할 경우 오염 문제는 어떤 것인가
삼중수소뿐만 아니라 다양한 방사성 핵종 등이 방출되어,
해산물에 농축되어 검출된다. 오염이 축적된다. 생태계 보전 필요.
- ③ 안전성이 정말로 보장되는가?
안전성은 보장되지 않는다. 오염이 발견되었을 때는,
정부와 도쿄전력은 보상금으로 해결하려 한다.
- ④ 현재 어업 종사자나 후쿠시마 현민의 인식은 어떠한가?
전일본어업연합회와 후쿠시마현어업연합회는
“해양 방류는 절대 반대”인데---.
후쿠시마 현민 과반수가 반대한다.
- ⑤ 반대 운동의 향후 전망은
해양 방류에 관해서는 어민들의 반대 의지가 중요하지만,
한편으로는 시민들이 얼마나 지지해 줄 수 있는지,
시민들이 이 문제를 자신의 문제로 여기고
얼마나 관여할 수 있는지도 중요하다.
일본에서 어업 중요성, 해양 오염을 방지할 의무와 권리의 문제.

추가:

일본의 ALPS 처리 오염수 방출 금지 소송

- *ALPS 처리 오염수 방출 중지를 요구하며 363명이 원고로 소송 제기
- *국가를 상대로 한 행정소송(도쿄전력의 실시계획 변경 인가 무효 및 취소)
- *도쿄전력을 상대로 한 민사 소송
(도쿄전력이 국가로부터 인가받은 ALPS 처리 오염수의 해양 투기 저지)
- *지금까지 8차례의 구두 변론이 있었으며, 제9회는 2027년 1월 21일로 예정되어 있음
- *정부는 원고 적격이 없다고 주장하며, 문전박대하려 하고 있다

후쿠시마 제1핵발전소 폐로 현황

- *매일 5천 명 미만이 폐로 작업에 종사
- *잔해 제거
- *오염수 대책, 지하수 양수,
- *연 7~8회 정도의 ALPS 처리 오염수 해양 방류 및 감시
- *ALPS 설비 가동으로 인해 발생하는 방사성 폐기물 보관
- *연료 데브리 회수, 연료 수조에서의 연료 인출

사고로 대피한 사람: 약 16만 4,865명 (2012년 5월 후쿠시마현 공식 집계)

현재 2만 2,625명 (2026년 5월 후쿠시마현 공식 집계)

단, 상기 수치에는 “대피 지시가 해제되어 통계에서 제외되었으나,
‘실제로는 돌아오지 않은 사람’이나 ‘피난지에서 주택을 재건하여 귀환을 포기한 사람’
‘국가나 지자체의 지시에 따르지 않은 자발적 피난민’은 포함되어 있지 않다.

고향으로 돌아가지 못한 실질적인 미귀환자는 지금도 4만 명 이상

‘원자력비상사태 선언’은 2026년 10월 현재도 발령 중이며, 해제 기미는 보이지 않는다

미국의 수많은 해양 연구소가 후쿠시마 제1핵발전소 오염수 해양 방출에 반대

전미 100여 개의 저명한 해양 연구 기관으로 구성된 전미해양연구소협회(NAML: National Association of Marine Laboratories)가 2022년 12월, 2023년에 시작될 예정인 후쿠시마 제1핵발전소 오염수 해양 방류에 반대하는 성명을 발표했음.

NAML은 미국 대학의 해양연구소와 우즈홀 해양연구소 등 세계를 대표하는 해양연구기관의 연합체입니다. 미국 환경보호청(EPA)의 한 부서도 참여하고 있습니다. 우즈홀 해양연구소는 처녀 항해 중 빙산에 충돌해 침몰한 대형 유람선 타이타닉호의 해저 조사 등으로도 유명합니다.

이 반대 성명에서는 일본 정부와 도쿄전력의 안전 주장을 뒷받침할 적절하고 정확한 과학적 데이터가 부족하다고 밝히고 있으며, 그 개요는 다음과 같습니다.

“태평양은 우리 행성인 지구의 최대 물 저장고이며, 전 세계 어업의 70%가 이루어지고, 생태학적·경제적·문화적 가치를 지닌 최대 규모의 유기물 바이오매스(생물량)를 포함하고 있습니다. 전 세계 모든 해양 생태계의 건전성이 기후 변화, 자원의 과잉 이용, 유해 물질에 의한 오염 등 다양한 유해 요인에 의해 훼손되고 있습니다.

후쿠시마 제1핵발전소에서 오염수를 해양으로 방류하는 것은 해양 생태계의 건전성과 해양 생태계에 의존하는 생물 및 생활에 대해 우려해야 할, 국경을 초월한 다세대 간 문제입니다. 우리는 각 오염수 탱크 내의 방사성 핵종과, 방사성 핵종을 제거하는 데 사용되는 ALPS(고순도 액체 처리 시스템)에 관한 결정적인 데이터의 부재, 그리고 ‘희석이 오염의 해결책’이라는 오염수 해양 방류에 대해 우려하고 있습니다.

‘희석하면 된다’는 이론적 근거는 방사성 핵종의 해저 축적이나, 유기 결합 및 생물 농축과 같은 생물학적 과정을 무시하고 있습니다. 오염수에 포함된 방사성 핵종의 대부분은 반감기가 수십 년에서 수백 년에 달하며, 이매패류, 굴, 게, 랍스터, 새우, 생선 등의 해산물을 섭취하는 사람들에게 암 발병 위험을 높이는 DNA 손상이나 세포 스트레스 등 유해한 영향을 미칩니다. 게다가 오염수에 포함된 60종이 넘는 다양한 방사성 핵종—그중 일부는 생물의 특정 세포나 선 조직, 장기 및 신진대사 경로와 친화성을 띠고 있습니다—을 거의 완벽하게 제거할 수 있다는 ALPS 시스템의 유효성은, 결정적인 데이터 부족으로 인해 심각한 우려를 낳고 있습니다.

도쿄전력과 일본 정부가 지금까지 제공한 데이터는 불충분하며, 어떤 경우에는 부정확합니다. 측정 시료 채취 계획, 통계 처리, 시료 분석 및 다양한 가정에 미비한 점이 있어, 이는 결과적으로 오염수 처리에 관한 더 나은 대안에 대한 철저한 평가를 저해하고 있습니다. 방사성 폐기물의 안전한 포장, 보관 및 처분을 지향하는 충분한 접근 방식이 적절하게 개발되어 오지 않았습니다. 오염수의 해양 방류에 대한 대안들이 상세하고 과학적으로 엄격한 기준으로 검증되어야 합니다.

전미해양연구소협회(NAML)는 일본 정부와 국제원자력기구(IAEA)의 과학자들에게 태평양 제도 포럼 전문가 회의에서 권고된 대안들을 보다 충분하고 적절하게 검토할 것을 요구합니다. 공공 정책 결정과 규정, 그리고 행동은 환경 및 인류 건강에 관한 과학적 이해의 적절한 향상에 발맞추어 이를 활용해야 합니다.

NAML 회원들은 통일된 견해로서, 방사능에 오염된 물이나 기타 오염 물질을 해양에 투기하는 것을 우려하고 있습니다. 왜냐하면 그러한 행위는 우리 행성인 지구의 장기적인 건전성과 지속 가능성을 훼손하기 때문입니다.

우리는 일본 정부에 태평양으로의 방사능 오염수 방류를 중단할 것을 강력히 권고합니다. 또한, 더 넓은 과학계와 협력하여 해양 생물과 인류의 건강, 그리고 생태적·경제적·문화적으로 가치 있는 해양 자원에 의존하는 사회를 보호할 수 있는 다른 접근 방식을 모색할 것을 권고합니다.

2022년 12월 12일, NAML 이사회」

ALPS처리 오염수의 해양 방류는 즉시 중단해야 한다



← 2016년 후쿠시마 제1원자력
발전소
다라치네 해양 조사 중 촬영

2022년 4월 →
다라치네 해양 조사
때 촬영



2022년 4월
이와키 방사능 시민 측정실
← 다라치네의 해양 조사

경청해 주셔서 감사합니다

어머니 같은 바다, 생명의 고향을 방사능 오염에서
지켜야 합니다 (레이첼 카슨)

감사의 말씀: 관련 논문 등의 입수에 관하여
이마나카 테츠지 씨, 다카가키 요타로 씨, 사키야마 히사코씨,
데이터 분석 등에 관한 논의에서는
야마자키 히데오 씨, 스즈키 유즈루 씨, 유아사 이치로 씨,
카타야마 토모후미 씨, 마츠클보 하지메 씨, 나가미 다이시
씨께서 많은 도움을 주셨습니다!
이번 세미나 개최를 위해 힘써 주신 모든 분께
감사드립니다.