
후쿠시마 처리수 방류: 어떻게 볼 것인가?

대한방사선방어학회의 입장

2023. 07. 31



대한방사선방어학회

The Korean Association for Radiation Protection

후쿠시마 처리수 방류: 어떻게 볼 것인가?

대한방사선방어학회의 입장

요지

후쿠시마 처리수를 태평양으로 방류하려는 일본의 계획에 대해 많은 논란과 우려가 있습니다. 과학적 평가는 방류로 인해 후일 우리 국민이 피폭할 방사선량은 거의 없는 수준임에도, 방사선에 대한 불안감으로 사회적 혼란이 나타나고 있습니다. 이에 방사선 안전 전문 학술단체인 대한방사선방어학회의 입장을 다음과 같이 밝힙니다.

1. 후쿠시마에서 1년에 태평양으로 내보내려는 삼중수소의 양은 매년 한반도에 내리는 빗물에 포함된 삼중수소가 우리 바다로 흘러드는 양보다 훨씬 적어 광역 해양 환경방사능에 영향을 미칠 수준이 전혀 아닙니다.
2. 후쿠시마 처리수 방류를 개시해도 5년이나 10년 후 우리 국민이 수산물을 섭취해 1년 동안 받을 방사선량은 국민여러분이 지금 1초 동안 땅에서 나온 감마선을 피폭하는 선량보다 적습니다.
3. 후쿠시마 처리수에 세슘-137, 탄소-14 등 몇몇 다른 방사성핵종도 들어있지만 방사능 농도가 매우 낮아 전체 위해도 기여는 무시할 정도로 적어 우려할 일이 아닙니다.
4. 이와 같은 과학적 사실은 무시되고, 허위 사실에 의한 방사선에 대한 불안 심리가 사회 혼란을 초래하고 있음에 유감을 표명합니다.

보충 설명

일러두기

대한방사선방어학회(KARP)

대한방사선방어학회는 1976년에 설립되어 현재 2600여 명의 회원(물리학, 화학, 생물학, 방사선학, 원자력공학, 기계공학, 환경과학, 생태학, 보건학, 의학, 사회학 등 다양한 전공자)이 활동하는 방사선 안전에 관한 국내 최고 전문 학술단체입니다. 대한방사선방어학회는 국제방사선방호학회연합(IRPA)에 우리나라를 대표하는 회원단체입니다.

단위와 수치 표현

자료를 평이하게 작성하려 노력했지만, 불가피하게 일반인이 익숙하지 않은 용어와 단위, 표현이 다음과 같이 사용됩니다. L(리터), kg(킬로그램), km(킬로미터), m³(입방미터) 등 보편적 단위는 그대로 사용합니다.

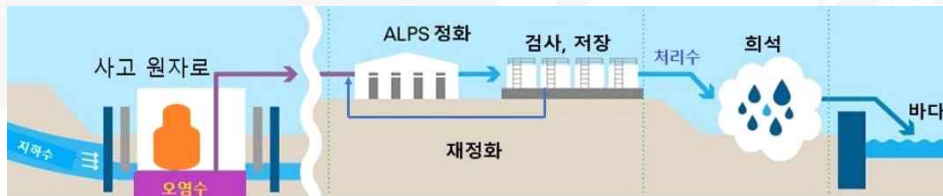
- 방사능 단위: Bq(베크렐), 주어진 물체 안에서 핵변환(붕괴)이 매초 하나 일어나는 양.
- 핵종(동위원소): 원자핵을 이루는 성분이나 에너지 상태가 다른 원자의 종류. 수소-1, 수소-3(삼중수소), 세슘-137, 세슘-134, 스트론튬-90 등은 각각 하나의 핵종임.
- 방사성핵종(방사성동위원소): 원자가 불안정하여 스스로 핵변환을 일으키며 방사선을 내는 성질이 있는 핵종. 삼중수소, 세슘-137, 요오드(아이오딘)-129 등은 방사성핵종임.
- 반감기: 방사성핵종이 붕괴해 방사능이 절반이 될 때까지 걸리는 시간. 방사성핵종마다 반감기는 고유한데 삼중수소는 12.3년, 세슘-137은 30년임.
- 방사선량 단위: 종합적 위해 지표인 유효선량 단위로 mSv(밀리시버트)를 주로 사용함. μSv (마이크로시버트)는 mSv의 1/1000.
- 수치의 지수 표현: 매우 큰 수와 매우 작은 수의 일반적 수치 표현은 0이 너무 많아 혼동될 수 있어 종종 10의 지수형으로 표현함. 예: $10^{12} = 1000000000000 = 1\text{조}$; $10^{16} = 1\text{경}$; $10^{20} = 1\text{해}$; $3.7 \times 10^6 = 3700000$; $10^{-4} = 0.0001 = 1/10000$; $2.3 \times 10^{-6} = 0.0000023$ 등과 같음.

■ 후쿠시마 오염수와 처리수란 무엇인가?

2011년 동일본 대지진으로 일본 동해안 후쿠시마 제1발전소(운영자: 도쿄전력)의 원자로 3기에서 핵연료가 녹는 중대사고가 발생했습니다. 이로 인해 핵연료 안에 갇혀있던 매우 많은 방사성핵종이 대기나 바다로 방출되었습니다. 사고가 진정된 후에도 파손된 원자로나 발전소 시설(원자로나 하부 시설물은 아직 물속에 잠겨있음)에 남아있는 방사성핵종 일부가 손상된 틈을 통해 계속 지하수로 들어가고 있습니다. 지하수를 통해 발전소 앞바다로 흘러드는 방사성핵종을 줄이기 위해 도쿄전력은 차수벽(지하수가 흘러나가거나 역으로 해수가 침

투해 들어오는 것을 막는 방벽)을 설치하고 오염된 지하수(오염수)를 퍼내 알프스라는 정화설비(ALPS, 여러 종류 방사성핵종을 거르는 물처리 시스템)로 정화하고 있습니다. 현재까지 퍼낸 오염수와 정화를 완료한 물 모두를 1천 개를 넘는 대형 물탱크(하나의 용량 1백만 L 규모)들에 저장해 오고 있습니다. ‘처리수’란 방사성핵종의 농도가 일본 환경배출기준을 만족(단, 삼중수소는 예외)하도록 정화한 물을 말합니다(이유는 아래 참조).* 지금도 매일 수십만 L 발생하는 오염수를 감당하기 위해 도쿄전력은 처리수를 삼중수소까지 배출기준을 만족하도록 바닷물로 수백 배 희석하여 태평양으로 방류하려는 것입니다.

* 알프스로 정화했다고 하나 방사능 오염이 남아있는 물인데 ‘오염수’로 부르지 않고 일본의 표현을 따라 ‘처리수’로 부르는 것부터 일본 편들기라는 견해도 있습니다. 그러나 우리나라 하수종말처리장에서도 들어오는 더러운 물은 ‘하수’나 ‘오수’로, 정화 후 강으로 내보내는 물은 ‘방류수’ 또는 ‘처리수’라고 부릅니다. 방류수는 방류를 전제로 해 마땅치 않으므로 처리수로 적습니다. 일본의 입장을 옹호하려는 것이 아니라 의미를 분명히 해 설명을 쉽게 하려는 것입니다. 알프스로 정화했더라도 배출기준을 초과하는 물(삼중수소 제외)은 여전히 오염수로 분류합니다.



후쿠시마 오염수 처리 개요(그림: 도쿄전력). 사고 원자로에서 오염된 지하수(오염수)를 퍼내 알프스계통으로 배출기준에 적합할 때까지 정화한 물(처리수)을 재검사 후 바닷물로 희석해 해안선에서 1 km 떨어진 배출구를 통해 저층 방류함.

■ 현재 저장하고 있는 오염수와 처리수 총량은 얼마나 되나?

2023년 6월말 기준으로 오염수와 처리수 총량은 약 134만 톤(13억 4천만 L)입니다. 그중 약 30%는 정화를 완료한 처리수이며 나머지 70%는 정화해야 할 오염수입니다. 현재 오염수와 처리수에 함유된 삼중수소의 총 방사능은 약 780조 Bq입니다. 오염수 발생과 처리는 계속되고 있으므로 저장된 오염수나 처리수의 총량은 변동되는데, 다음의 도쿄전력 한국어 홈페이지 ‘알프스 처리수 등의 현황’에서 갱신된 값을 확인할 수 있습니다.

<https://www.tepco.co.jp/ko/decommission/progress/watertreatment/index-kr.html>

■ 처리수에는 어떤 방사능이 얼마나 들어있나?

오염수를 알프스계통으로 정화해도 방사성핵종을 완전히 걸러내지는 못합니다. 세슘-137이나 코발트-60, 스트론튬-90, 요오드(아이오딘)-129와 같은 입자성 방사성핵종은 농도를 1/100 이하로 줄여 잔류농도가 1 Bq/L 수준으로서 배출 기준의 10% 내외입니다. 그러나 삼중수소와 탄소-14는 거의 거르지 못하는데, 탄소-14는 본래 농도가 수~수십 Bq/L로 낮아 배출기준 미만이지만, 삼중수소는 L 당 백만 Bq 안팎으로서 배출기준(6만 Bq/L)을 크게 초과합니다. 그래서 처리수를 바닷물로 수백 배 희석하여 삼중수소 농도를 배출기준의 1/40 이하로 낮춰 방류한다는 것이 도쿄전력의 계획입니다.

처리수 모두를 단기간에 방류하는 것이 아니라, 연간 삼중수소 방류량이 사고 이전에 후쿠시마 제1원전을 정상 운영할 때 바다로 내보내던 삼중수소의 제한

표. 방류 대상 처리수의 핵종별 방사능 수준(예)^a(자료: 도쿄전력). 방사능이 압도적인 삼중수소 외에 몇몇 핵종이 있지만 방사능이 적어 전체 위해도에 차지하는 비율은 수% 수준임.

핵종	배출 기준 (Bq/L)	방류 대상 처리수 방사능 농도(Bq/L)		
		저장탱크 번호		
		B남구역 A7	G1구역 A1	G1구역 B1
Cs-137	90	<0.126 ^b	0.186	<0.116
Cs-134	60	<0.137	<0.148	<0.149
Co-60	200	0.327	0.260	0.245
Sb-125	800	<0.394	<0.390	<0.418
Ru-106	100	<0.133	<0.112	<0.115
Sr-90	30	<0.450	<0.451	<0.468
I-129	9	0.686	0.121	0.201
H-3	60000	402000	304000	498000
C-14	2000	6.57	3.06	12.8
Tc-99	1000	<0.719	<0.393	<0.797
삼중수소 제외 배출기준 분율 ^c 합		0.11	0.05	0.06
삼중수소 배출기준 분율		6.70	5.07	8.30
기타핵종의 상대위해도 기여		0.016	0.010	0.006

- 예에서 보듯이 정화 완료한 처리수도 오염수 인출 위치와 시기에 따라 초기 오염도가 달라 정화 완료 후 값도 차이가 있지만 삼중수소를 제외한 기타핵종 농도는 배출기준보다 크게 낮음.
- <0.126처럼 표시한 값은 분석의 최저검출방사능 값인 0.126 Bq/L보다 낮아 구체적 값은 알 수 없음을 의미함.
- 배출기준 분율이란 처리수의 특정 핵종(예: 세슘-137)의 농도(Bq/L)를 그 핵종의 배출기준(세슘-137의 경우 90 Bq/L)로 나눈 값임. 분율이 1보다 크면 배출기준을 초과한다는 의미임. 분율합이란 방사능이 검출된 기타핵종 전체의 분율을 더한 값임.

치인 연간 22조 Bq을 넘지 않도록 나누어 방류합니다. 그러면 기존 저장된 양과 향후 발생할 오염수 양을 감안하면 방류는 30년 이상 걸릴 것으로 예상합니다.

■ 오염수 정화 목표에서 삼중수소의 방사능 기준은 왜 예외로 하는가? 정화 계통이 삼중수소 농도를 왜 낮추지 못하는가?

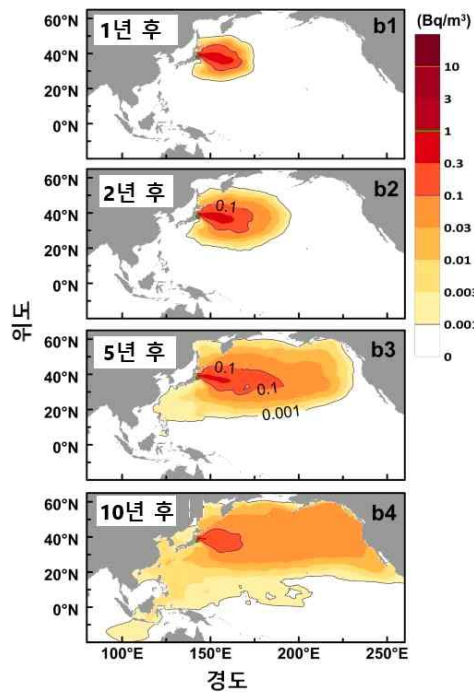
수소와 산소가 결합해 물이 되듯이, 삼중수소도 환경에 노출되면 산소와 결합해 ‘삼중수소물’이 됩니다. 삼중수소물은 방사능을 띠고 무게만 10% 정도 더 무거울 뿐 ‘물’입니다. 세슘이나 스트론튬 같은 입자 방사성핵종은 필터나 이온교환수지를 이용해 걸러서 농도를 쉽게 낮출 수 있는데 반해, 물에 섞여 있는 삼중수소물은 물에서 물을 거르는 것이어서 어렵습니다. 농도가 낮을 때는* 현실적 정화기술이 없습니다. 그래서 운영 중인 원자력시설에서도 삼중수소 방사능은 예외적으로 희석해 배출기준을 맞추는 것을 인정합니다.

* 후쿠시마 오염수의 삼중수소 농도는 kg 당 1백만 Bq로 높다고 하지만 이를 물질 농도로 환산하면 0.018 ppb(물 분자 1000억 개에 삼중수소물 분자 1.8개 수준)으로 이미 초고순도에 해당함.

■ 그렇게 희석해 방류하면 우리나라 바닷물이나 수산물이 영향을 받지 않는가?

아무런 영향 없습니다. 방류할 때 삼중수소의 농도는 최대 1500 Bq/L이지만 방류 지점에서 수 km 흘러가면서 태평양 바닷물에 계속 희석되면 바닷물의 평균적인 농도 수준으로 낮아집니다. 우리나라 해역에 도달하는 5년 정도 기간에 계속 희석되면 평균 농도의 10만 분의 1 수준이 될 것으로 국내외 연구자가 예상합니다. 10년 뒤에는 최고 10배 정도 증가해 1만 분의 1이 되더라도 현실적으로 변동을 검출할 방법이 없는 전혀 의미 없는 수준입니다.

한편, 후쿠시마에 저장하고 있는 삼중수소 총량은 약 780조 Bq인데 이를 연간 22조 Bq 미만으로 나눠 방류합니다. 한반도 면적은 22만 km^2 ($2.2 \times 10^{11} \text{ m}^2$)인데 연간 평균 강수량을 1000 mm (=1 m)로 줄여 잡아도 1년에 한반도에 내리는 강수량은 0.22조 m^3 (=220조 L)가 됩니다. 빗물 삼중수소 농도가 1 Bq/L이면 1년에 한반도에 내려 우리 바다로 흘러드는 삼중수소 방사능이 220조 Bq이 되어 후쿠시마에서 매년 방류하는 방사능의 10배나 됩니다. 이런데도 지금까지



후쿠시마 처리수 방류영향 시뮬레이션 예(중국 연구). 5년 후 우리나라 해역에 큰 영향을 미치는 것처럼 보이지만 그 농도(열은 황색)를 보면 0.001 Bq/m^3 로서 우리 남해안 해수의 현재 삼중수소 농도(100 Bq/m^3 이상)의 10만 분의 1에 불과함. 10년 뒤에 한 단위 높아져 0.01 Bq/m^3 에 이르더라도 전혀 관측할 수 없는 변화로서 현실적으로 무의미한 값임(자료: C. Zhao 등, 2021. Marine Pollution Bulletin, 169). 그림의 가로축 경도가 모두 '동경' 값으로 표현되어 있지만 180도를 넘는 값은 '서경 = $360 - \text{동경}$ '으로 환산할 수 있음(예: 동경 200도 = 서경 160도).

지 생선이나 천일염의 방사능을 걱정하지 않고 살아왔습니다. 후쿠시마 처리수 방류가 우리 국민의 건강을 해치고 우리 국토를 오염시킨다는 주장은 아무런 과학적 근거가 없습니다.

■ 바닷물이나 빗물의 기존 삼중수소 방사능과 비교해 안전하다고 말하는데 처리수 방류 영향을 우리 국민의 방사선량으로 평가하면 얼마나 되나?

후쿠시마에서 방류한 처리수의 영향을 일본, 우리나라, 중국 등의 연구자가 평가한 결과 우리나라 해역에서 농도는 기존 해수농도 0.2 Bq/L 의 $1/10000$ 수준($2 \times 10^{-5} \text{ Bq/L}$)으로 나타납니다. 삼중수소물의 경우 해수의 농도와 거기서 사는 어패류/해조류의 농도는 거의 같은 수준으로 평가되므로 어패류의 삼중수소 농도 증가는 $2 \times 10^{-5} \text{ Bq/kg}$ (물 1 L는 약 1 kg) 정도입니다. 우리 국민의 개인 생선 소비량은 연간 평균 60 kg인데 많이 먹는 사람은 2배인 120 kg을 섭취하는 것으로 하면, 생선을 통해 섭취하는 삼중수소 방사능은 $2 \times 10^{-5} \times 120 = 2.4 \times 10^{-3} \text{ Bq/년}$ 이 됩니다. 삼중수소 섭취로 인한 방사선량 환산계수 $1.9 \times 10^{-8} \text{ mSv/Bq}$ (국제방사선방호위원회(ICRP)가 제공하는 표준값)을 곱하면 선량은 $4.6 \times 10^{-11} \text{ mSv/년}$ 으로 산출됩니다. 삼중수소가 환경에 노출되면 일부는 선량 기여가 더 큰 유기결합 삼중수소로 변환되지만 그 증가폭은 20% 미만입니다. 이를 고려하면 선량은 $6 \times 10^{-11} \text{ mSv/년}$ 정도가 됩니다. 생선 외에 패류와 해조류 섭취까지 합해 3배로 하면 연간 $2 \times 10^{-10} \text{ mSv}$ 정도입니다. 애초

에 우리 해역 농도 추정치에 10배 쯤 불확실성이 있다고 가정하면 연간 2×10^{-9} mSv로 됩니다.

화강암이 많은 우리나라에서 토양에서 나오는 감마 방사선으로 인한 선량률은 대개 시간 당 0.00012 mSv(= 3.3×10^{-8} mSv/초)입니다.* 즉, 후쿠시마 처리수 방류 시작 후 10년쯤 뒤에 따른 우리 국민의 누군가 받을 연간 피폭선량은 지금 땅에서 자연적으로 나오는 감마선을 눈 깜박할 동안(0.1초) 받는 양 정도입니다. 위험과는 거리가 먼 의미 없는 피폭입니다.

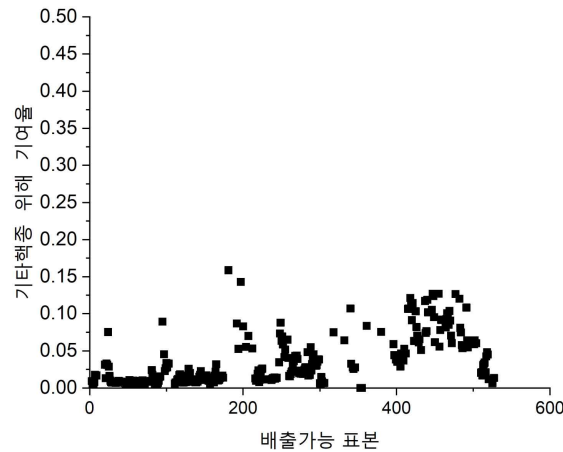
* 한국원자력안전기술원이 제공하는 국가 방사선감시망 운영 결과를 제공하는 전화기 앱 eRad@now2를 설치하면 관심 장소에서 선량률 정보를 실시간으로 확인할 수 있습니다. 인터넷으로는 다음의 국가환경방사선자동감시망에 접속하면 같은 정보를 볼 수 있습니다.
<https://iernet.kins.re.kr/>.



국가환경방사선감시망에 나타나는 2023년7월10일 21:15 서울지역 감시소의 실시간 선량률. 선량률이 0.10~0.15 μSv/hour 또는 평균 약 1.2×10^{-4} μSv/hour로 나타남.

■ 처리수에는 삼중수소뿐만 아니라 완전히 거르지 못한 고위험도 핵종들도 남아있다는데?

사고 원전에서 나온 오염수에는 삼중수소 외에 다양한 방사성핵종(기타핵종)이 들어있습니다. 같은 양에 노출되었을 때 이들 기타핵종의 위해도(위험도)는 삼중수소보다 수백~수천 배 높은 것도 사실입니다. 그래서 정확하지 않은 오염수나 정화가 불충분한 오염수에서는 기타핵종의 위해도가 80% 이상을 차지하기도 합니다. 그러나 기타핵종의 배출기준을 만족하도록 정화한 처리수는 기타핵종의 위해도 기여가 20% 미만으로 감소합니다. 앞서 설명했듯이 방류한 삼중수소의

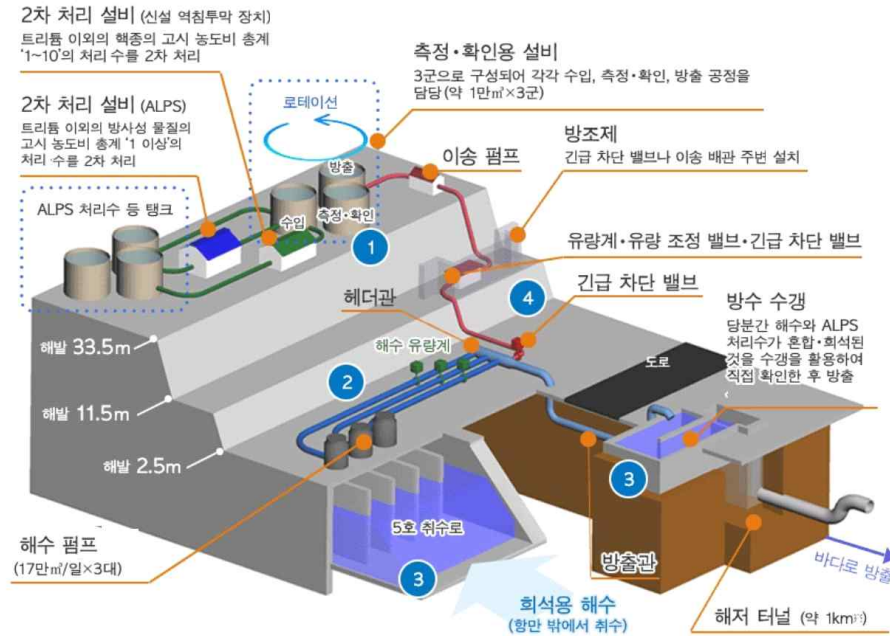


배출기준 미만인 처리수에서 삼중수소 이외 핵종의 위해도 기여율(2023년 3월 도쿄전력 자료를 바탕으로 산출한 값). 기타 핵종 위해 기여가 20% 미만으로서 삼중수소 위해도의 1/4 미만임을 의미함. 즉, 삼중수소가 충분히 안전하면 기타핵종까지 합쳐도 안전함.

영향이 빗물 삼중수소 영향에 비해 문제되지 않기 때문에(또는 눈 깜빡할 사이 땅에서 오는 방사선량 수준이기 때문에) 이보다 더 적은 기타핵종의 위해도는 더욱 문제되지 않습니다. 삼중수소와 기타핵종의 영향을 합쳐도 마찬가지입니다.

■ 알프스라는 정화계통으로 처리해서 안전하다는데 알프스가 고장나면 어찌 되나?

모든 기계는 고장이 날 수 있습니다. 그렇기 때문에 처음부터 고장이 날 것을 전제로 고장이 나더라도 사고로 이어지지 않도록 설계하고 운용하도록 되어 있습니다. 특히 원자력발전소나 폐수처리장 같이 사고가 주변에 큰 영향을 주는 기계일수록 엄격하게 설계, 관리됩니다. 알프스 역시 여러 기기와 부품이 종합된 수처리 공정이므로 불시에 고장이 날 수도 있습니다. 그러나 일본이 발표한 관리계획에 따르면 알프스를 거쳤다고 바로 방류하지 않기 때문에 고장 나더라도 오염수가 방류되는 일은 없습니다. 정화한 물도 일단 저장하고 방사능 농도를 확인합니다. 삼중수소를 제외한 기타핵종이 종합적으로 배출기준 미만(즉, 각 핵종의 배출기준에 대한 농도 분율의 합이 1 미만)이 아니면 재정화 대상이 됩니다. 최종으로 배출하고자 하는 처리수는 일정량(한 번에 1만 톤)씩 배출후보 탱크로 보내고 거기서 뒤섞어 농도를 고른 다음 시료를 채취하여 방



후쿠시마 처리수 방류계통 개요(그림: 도쿄전력). 삼중수소 아닌 기타핵종 농도가 배출기준을 만족하는 처리수를 배출대기 탱크(측정·확인용 설비)로 보내 교반하고 다시 시료를 채취해 분석하여 기타핵종이 배출기준 미만임을 재확인한 후 방출탱크로 보내 해수로 희석해 해저 방류구를 통해 방류함. (1) 배출관리 탱크군(K-4). 3개 군이 수입, 측정/확인, 방류를 순차로 담당. (2) 희석용 해수관, (3) 취수 및 방류 시설, (4) 계통 작동 오류를 대비한 차단밸브.

사능을 다시 분석하여 배출기준 미만임을 확인한 다음이라야 배출 탱크로 보내고 필요한 만큼의 해수로 희석해 방류합니다. 알프스계통 고장으로 정확한 물이 배출기준을 만족하지 못하면 고장 수리 후 다시 처리하게 됩니다. 즉, 알프스계통 고장이 있더라도 시간만 지체될 뿐 최종 배출수의 방사능 농도는 항상 기준 이하로 관리됩니다. 이러한 일본의 관리계획이 적절히 수행되는지 국제기구와 함께 확인하면 됩니다.

■ 처리수가 안전하면 일본이 공업용수나 농업용수로 쓰면 되지 왜 바다로 버리나?

얼핏 일리 있는 말 같지만 그렇지 않습니다. 처리수를 삼중수소 배출기준에 맞추려면 수백 배 희석이 필요합니다. 지금 계획은 바다로 방류할 물이니 바닷물로 희석할 수 있습니다. 그러나 농업용수나 공업용수로 공급하려면 민물을 그만큼 끌어와 처리수와 혼합한 다음 되돌려 보내야 합니다. 1회 배출량 1만 톤을 희석하려면 400만 톤이라는 막대한 민물을 끌어 와야 합니다. 더 중요한 것은 공업용수든 농업용수든 사용하고 나면 모두 강으로 나가게 되고 결국 모

두 바다로 갑니다. 다소 시간은 지연되지만 삼중수소 반감기가 12년이나 되므로 그동안 방사능은 거의 줄어들지도 않습니다. 머잖아 바다로 갈 것을 막대한 비용을 들여 돌려보내는 방안은 합리적이지 않습니다.



■ 일본이 처리수를 보다 안전하게 관리하는 여러 방안을 검토했다지만 결국 손쉬운 해양방류를 선택한 것은 비용을 절감하기 위한 것 아닌가? 일본의 비용절감을 위해 세계 여러 나라, 특히 태평양 연안국이 아무 반대급부 없이 방사선 영향을 받아야 하는 것은 부당한 것 아닌가?

도쿄전력이 오래전부터 처리수 정보 홈페이지에 삼중수소 처리에 대한 혁신적 아이디어를 공모해 왔습니다. 합당한 대안이 있었다면 방류를 계획하지 않았을 것입니다.

환경에 미치는 위험 또는 영향이 ‘상당한’ 수준이라면 더 많은 고민이 필요함은 당연하고, 검토할 대안의 폭도 넓어질 것입니다. 그러나 반대급부가 없는 외국이더라도 땅에서 오는 감마선을 0.1초 피폭하는 정도의 작은 방사선피폭을 더 줄이기 위해 일본에 막대한 자원을 투입하라는 요구는 정당성을 찾기 어렵습니다.

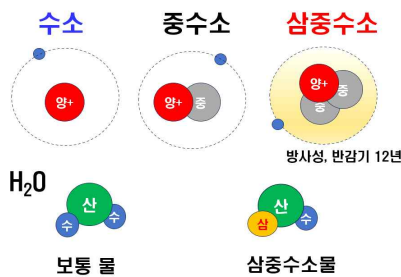
전형적 원전 1기가 정상 운영 중 해양에 배출하는 방사능은 10조 Bq 정도로 평가됩니다. 우리나라는 매년 250조 Bq을 방출하는 셈이므로 3년치면 후쿠시마에 저장하고 있는 삼중수소 총량과 맞먹습니다. 중국은 우리보다 2배 많은 원전을 운영해 황해와 남중국해에 삼중수소를 내보내고 있습니다. 우리 국민이 받는 방사선량 관점에서는 이쪽이 후쿠시마 처리수보다 더 현실적 문제이지만, 국가가 원전 인허가 과정에서 환경영향 평가결과를 살펴 현행 관리체계가 최선임을 인정한 셈이기에 삼중수소 배출에 대해 추가 조치를 요구하지는 않습니다.

니다. 자국에 이득이 없다고 외국의 합리적인 배출을 문제로 삼는다면, 일본은 우리나라나 중국 원전의 삼중수소 배출도 문제 삼을 수 있습니다.

추가 의문

■ 삼중수소란 무엇인가?

수소는 가장 단순한 원소로 보통 하나의 양성자로 된 원자핵과 주변의 궤도 전자 하나로 구성됩니다. 삼중수소는 인공적 또는 자연적 핵반응으로 발생하는 수소의 일종인데 원자핵에 중성자 둘이 추가된 수소입니다. 삼중수소는 핵에 중성자가 과잉이어서 불안정하고 그래서 스스로 붕괴하면서 베타 방사선을 방출하고 안정적인 헬륨원자로 변환됩니다. 삼중수소의 방사능이 절반으로 감소하는 반감기는 12.3년으로 꽤 깁니다.



수소와 삼중수소. 삼중수소는 핵에 양성자(양) 외에 중성자(중) 둘이 더 있어 무겁고 불안정한 수소여서 방사선을 내며 붕괴함. 산소(산) 원자에 수소(수) 원자 둘이 결합한 것이 보통의 물이며, 그 수소 하나를 삼중수소(삼)가 대체한 물이 삼중수소물임.

■ 주변에 이미 삼중수소가 꽤 많이 존재한다는 말이 사실인가? 얼마나 많이 있는가?

지구 생태권에 지금 존재하는 삼중수소의 원천은 크게 셋입니다.

첫째는 우주에서 지구로 들어온 우주방사선이 대기권에서 공기와 핵반응을 일으켜 삼중수소를 만듭니다. 매년 6경 Bq 정도가 생성됩니다.

둘째는 운영하는 원자력시설(동위원소 시설 포함)에서 생성되어 정상운전 또는 사고로 환경으로 방출된 삼중수소입니다. 정상 운영 중인 원자로에서도 상당한 삼중수소가 지속적으로 배출되는데 전형적인 값은 90만 kW 기준 가압경수로(PWR)는 연간 액체 10조 Bq, 기체 0.3조 Bq 정도를 배출합니다. 월성 2,3,4 호기처럼 중수(수소 원자핵에 중성자가 하나 추가된 중수소로 구성된 물)를 냉각재로 사용하는 원자로는 삼중수소 생성량이 훨씬 많아 연간 액체와 기체를 100조 Bq 수준으로 배출합니다. 원전 외에도 군사용 삼중수소 야간장비나 비

상구 표지 등에 사용하는 삼중수소 양도 많아 사용 과정에서 밀봉이 손상되면 삼중수소가 방출됩니다. 이런 과정으로 연간 총 4경 Bq이 배출되는 것으로 평가됩니다. 원전 수의 증가나 삼중수소를 연료로 사용할 핵융합로가 실



지구의 삼중수소 근원과 재고량. 현재로서 가장 큰 기여는 1960년 전후에 빈번히 수행된 대기권 핵실험 잔류 삼중수소임. 야광용 삼중수소는 쇠퇴해 우주방사선 생성과 원자력산업이 다음 위치에 있음. 2023년 현재 지구에 약 800경 Bq이 존재하는 것으로 평가함. 그 결과 강수물에는 1~2 Bq/L의 삼중수소가 내포되어 강물이나 지구에 사는 모든 생물종의 체액에도 비슷한 삼중수소 농도를 보임. 1 EBq = 10^{18} Bq = 100경 Bq.

용화되면 배출량은 더 증가할 것입니다.

셋째는 과거(주로 1950년대부터 1964년까지) 빈번히 수행한 대기권 핵실험으로 핵폭발에서 생성된 삼중수소 또는 증강탄이나 수소폭탄 연료로 사용한 삼중수소 중 소진되지 않은 양이 대기로 방출된 것입니다. 무려 2해 Bq이 60여년 전에 방출된 것으로 평가합니다. 지금은 5 반감기 이상 지났기에 잔류량은 500경 Bq 정도로 추정합니다. 그래서 2023년 현재 지구 생태계의 총 삼중수소 재고량은 800경 Bq 정도로 봅니다.

이 결과 지금 내리는 빗물은 1~2 Bq/L 안팎의 삼중수소를 함유합니다. 그래서 강물, 지하수, 바닷물 모두 0.1~2 Bq/L의 삼중수소가 들어있어 우리가 마시는 물은 물론, 취식하는 모든 식품에는 삼중수소가 들어있습니다. 결과적으로 우리 체액(혈액, 소변 등)도 1~2 Bq/L을 나타냅니다.

■ 후쿠시마 오염수나 처리수의 삼중수소 방사능이 왜 그렇게 많은가?

언제 어느 위치에서 인출한 오염수인지에 따라 차이는 있으나 리터(L) 당 수십만~수백만 Bq로 나타납니다. 사고 당시 환경으로 나간 양은 더 많지만 이후

10여 년간 지하수로 수집된 삼중수소가 800조 Bq이니 연간 80조 Bq이 발생한 셈입니다. 본래 운영 중인 원자로 핵연료에는 많은 삼중수소가 들어있는데(전형적인 100만 kW 원전에서 연간 발생하는 삼중수소 방사능은 520조 Bq에 이릅니다) 대부분 핵연료 안에 갇혀있어 연간 환경 배출량은 10조 Bq 수준인데, 후쿠시마 원전은 사고로 핵연료가 손상되어 배출량이 많아진 것입니다.

■ 삼중수소의 위험도가 낮다고 하지만 그 오염식품을 섭취하는 내부피폭의 경우에는 오히려 다른 핵종보다 더 위험하다는 학자도 있어 불안하다.

삼중수소가 내는 약한 베타 방사선은 투과력이 미약해 우리 피부의 각질도 뚫지 못합니다. 그래서 삼중수소는 본래 체내로 들어가는 내부피폭만 고려하면 됩니다. 방사성핵종 섭취로 인한 내부피폭에서 삼중수소는 가장 위해도가 낮은 쪽입니다. 삼중수소가 내는 베타 방사선의 에너지가 매우 낮기 때문입니다. 같은 1억 Bq을 먹었을 때 그 사람의 생애 방사선량이 세슘-137은 1400 mSv, 스트론튬-90은 2400 mSv인데 삼중수소는 1.9 mSv에 불과합니다.

참고: 몇몇 관심 핵종의 성인 내부피폭 선량계수 예시^a(자료: 국제방사선방호위원회)

핵종	선량계수 ^b (mSv/Bq)		핵종	선량계수 ^b (mSv/Bq)	
	흡입	취식		흡입	취식
삼중수소물 ^c	2.0×10^{-8}	1.9×10^{-8}	스트론튬-90	3.2×10^{-5}	2.4×10^{-5}
유기결합 삼중수소 ^c	3.5×10^{-8}	5.1×10^{-8}	테크네튬-99	1.1×10^{-6}	2.7×10^{-7}
탄소-14	6.7×10^{-6}	1.6×10^{-7}	요오드-131	1.2×10^{-5}	1.6×10^{-5}
칼륨-40	1.3×10^{-4}	3.2×10^{-6}	세슘-137	5.1×10^{-5}	1.4×10^{-5}
코발트-60	3.1×10^{-5}	3.2×10^{-6}	우라늄-238 ^d	1.2×10^{-2}	3.1×10^{-5}

- 성인 종사자의 생애선량(예탁유효선량)으로 국제방사선방호위원회(ICRP)가 새로 제시한 값임. 일반인은 아동도 포함하는데 내부피폭 선량계수는 연령군에 따라서도 상당히 달라짐. 아직 ICRP의 새 값이 제공되지 않았고 여기 보이기에는 너무 복잡해 성인 종사자에 해당하는 수치만 표기함.
- 내부피폭 선량계수는 흡입하거나 먹은 방사능 Bq 당 생애선량 값임. 구체적 선량계수는 물질의 화학형에 따라 다른데 여기서는 보수적으로 높은 값만 표기함.
- 삼중수소는 표에 보인 다른 핵종에 비해 선량계수가 현저히 낮음을 볼 수 있음.
- 우라늄은 내부피폭 위해도가 큰 알파입자를 방출하기 때문에 선량계수가 현저히 높음

삼중수소의 방사선이 다른 방사선에 비해 위해도가 더 크다고 말하는 것은 같은 양의 방사선 에너지가 인체 조직에 흡수된 때 생물학적 작용력(방사선가중치)이 현재 적용하는 값보다 2배 정도 클 수 있다는 말로 보입니다. 이를 알지만, 실제 현장에서 전문가들이 그 작용력 차이를 별도로 평가하지 않는 이유는 삼중수소 피폭은 다른 방사선피폭(예: 감마선이나 X선)에 비해 미미하여 2배로

적용해도 의미가 없기 때문입니다. 일반 환경에도 삼중수소가 상당히 존재하는데 다른 방사선피폭(지각이 내는 감마선, 공기 중 라돈, 식품 중 다른 방사성 핵종[칼륨-40, 우라늄, 토륨 등]으로 인한 피폭)이 1일 때 삼중수소 피폭은 0.00001 수준이므로 그 생물학적 작용력을 2배로 하더라도 0.00002로 의미 없는 수준입니다. 후쿠시마 처리수 방류로 인해 태평양 연안국 국민이 받을 수 있는 방사선량도 이 수준을 넘지 않습니다.

■ 영국 엘리슨 교수가 방한하여 후쿠시마 처리수 10 리터도 마실 용의가 있다고 말했는데, 한국원자력연구원장은 처리수의 방사능이 기준을 넘으므로 마셔서는 안 된다고 말했다. 어느 쪽이 옳은가?

사람의 방사선피폭 관리에서 중요한 관점은 내가 결정해 내가 피폭하느냐(자율 피폭), 아니면 남이 결정해 내가 피폭하느냐(타율피폭)입니다. 엘리슨 교수는 후쿠시마 처리수의 삼중수소 농도가 L 당 수십만 Bq 정도임을 알면서 만약 자신의 시음 행위가 방사선을 불필요하게 두려워해 경제사회적 피해가 발생하는 일을 예방하는 데 도움이 된다면 자신의 결정으로 처리수 10 L 정도는 마실 수 있다는 것입니다. 이러한 판단에는 10 L를 마셔도 그 방사선피폭이 0.1 밀리시버트(mSv) 정도여서 자신이 런던에서 인천을 왕복하는 동안 비행기 안에서 받는 우주방사선 피폭량 정도일 뿐이라는 사실이 뒷받침합니다. 자신의 위험을 자신이 판단하는 이러한 자율피폭에는 법정 선량한도나 제한이 적용되지 않습니다. 흡연이나 음주가 상당한 위험을 수반하지만 각자가 선택한 위험이므로 정부는 위험 정보를 제공해 개인의 판단을 도울 뿐 법으로 금지하지 않습니다.

이렇게 보면 한국원자력연구원장이 방사능 농도가 음용수 기준을 넘는 물은 마시면 안 된다고 말한 것은 약간 표현이 잘못되었습니다. 음용수 방사능 기준이란 타율피폭에 적용되는 것입니다. 그러니까 생수를 제조하는 사업자나 수도 물을 공급하는 시장은 그 물에 방사능이 있다면 불특정인에게 피폭을 유발하는 타율피폭이므로 음용수 기준을 지켜야 합니다.

■ 처리수를 방류하기 전에 시료를 분석하여 방사성핵종의 농도를 재확인한다지만 1천만 L에서 채취한 몇 L 시료가 전체를 대표할 수 있는가? 시료의 대표성에 의문이 제기될 것임에도 왜 한 번에 1천만 L나 되는 많은 양을 방류하는가?

어느 분야든 농도기준에 적합한가를 판단할 때 시료의 대표성은 중요합니다. 물질이 균질할수록, 대상물의 양이 적을수록 한 시료의 대표성이 향상됩니다. 대상물 양을 1천만 L라는 대량으로 설정하는 이유는 스트론튬과 같은 일부 핵종은 분석에 1주일 이상 걸리므로 매주 수백만 L 새로 발생하는 지하수를 소화하기 위해서는 한 번(가령 1주)에 그에 상당한 양을 처분해야 합니다. 대표성 관점에서 유리한 점은 삼중수소물도 물이고 농도도 낮을 뿐 아니라 배출후 보 탱크에서 교반되므로 균질성이 높습니다. 기타 방사성핵종은 교반이 불충분하면 부분별 농도 편차가 날 수 있지만 본래 배출기준 미만 수준인 처리수를 삼중수소 농도를 낮추기 위해 수백 배 희석하므로 농도의 절댓값이 적어 편차가 중요한 의미를 갖지 않게 됩니다. 기준이 1000 Bq일 때 시료의 방사능이 500 Bq이고 불확실성이 200%라면 실제 값이 1500 Bq도 될 수 있어 중요하지만, 1/100로 희석되어 시료 방사능이 5 Bq이면 200% 불확도를 고려해도 15 Bq 수준이니 기준보다 크게 낮습니다.

■ 방류할 때 삼중수소 농도를 배출기준의 1/40인 1500 Bq/L 미만으로 크게 낮추는 이유가 삼중수소 위험도의 불확실성 때문인가?

아닙니다. 삼중수소 위험도는 방호목적에 필요한 수준까지는 충분히 파악하고 있습니다. 기준치의 1/40 수준까지 방류수를 희석하는 이유는 1년에 배출하는 방사능 양을 정상 운영중인 원전에서 인가된 값(즉, 후쿠시마 제1원전이 사고 나기 전에 적용하던 연간 배출량 제한인 삼중수소 22조 Bq) 미만으로 하려는 목적 때문입니다. 정상운영 때 기준을 사고 후에도 적용해야 하는 것은 아니지만, 방류에 대한 지역 주민의 이해를 높이려는 조치로 볼 수 있습니다.

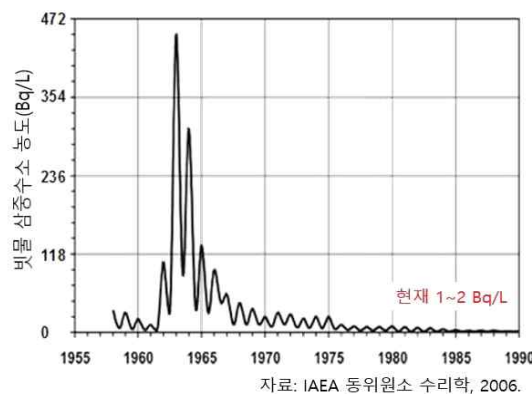
■ 삼중수소 기준이 나라나 국제기구마다 크게 다르다. 이는 위험을 잘 모르거나 과학적 합의가 부족해서 그런 것 아니냐?

보도되는 기준이 국가나 국제기구에 따라 큰 차이가 있어 혼란을 주는 것은 사실입니다. 두 가지 이유가 있습니다. 첫째는 음용수 기준과 배출기준을 혼동하는 것입니다. 배출기준은 시설에서 환경으로 내보내는 배수구에서 농도기준인데 배수구 물을 사람이 직접 음용하는 것이 아니고 환경으로 나가 강이나 호수에서 희석된 후 음용수원으로 들어가므로 그 과정에서 희석이나 방사능 붕괴 효과가 있습니다. 그래서 배출기준은 직접 마실 음용수 기준보다 높을 수 있습니다. 둘째로, 음용수 기준도 다른 경우를 보는데, 이는 음용으로 인한 피

폭선량이나 그 결과적 위험을 달리 보아서가 아니라 기준을 정하는 논거 차이가 주된 이유입니다. 어떤 나라는 일반인에 대한 연간 선량한도 1 mSv를 근거로 하는 데 비해, 어떤 나라는 보수적 접근으로 선량한도의 일부(0.1 또는 0.3 mSv)를 근거로 합니다. 또 어떤 나라는 현행 최선기술의 성능을 근거로 합니다. 즉, 정책적 판단이 서로 다르기 때문입니다.

■ 삼중수소 섭취가 사람 건강이나 환경에 미치는 영향을 밝힌 연구가 거의 없는데 왜 삼중수소 위험이 낮다고 하나?

삼중수소 피폭으로 인한 영향 연구는 상당히 많습니다. 유엔 방사선영향과학위원회(UNSCEAR) 2016년 간행물은 많은 연구 결과를 요약하고 있습니다. 다만, 연구 결과가 삼중수소 피폭과 건강 영향 사이 상관성을 드러낸 경우가 거의 없는데 이는 삼중수소 피폭이 미친 영향이 없거나 너무 작아서 관찰할 수 있는 수준에 이르지 못한 때문입니다. 가령 삼중수소 1000 Bq/L인 물을 평생 먹으면 피폭선량은 1 mSv 정도인데, 우리가 기타 자연방사선으로부터 평생 받는 방사선량은 평균이 400 mSv 정도이고 사람에 따라 상당한 편차(적어도 ± 200 mSv)가 있습니다. 그러니 1 mSv 추가는 편차보다도 크게 작아 그로 인한 건강 변화를 관찰하는 것은 본질적으로 불가능합니다. 1960년대에는 당시 수많은 지상 핵실험 탓으로 빗물의 삼중수소 농도가 지금보다 100배 이상 높았지만 그런 환경에 노출된 인류의 보건의 악화된 증거를 찾을 수는 없습니다.



북반구 빗물의 삼중수소 농도 추이. 핵실험이 빈번하던 1960년대에는 지금보다 빗물의 삼중수소가 수백 배 높았음. 이 때문에 1964년 대기권 핵실험을 금지하는 부분핵금지조약이 체결됨.

■ 방사선이 유전적 영향을 미칠 수 있음은 인정하면서, 피폭자의 몇 세대 후에 어떤 영향이 있을지 증거가 부족한 상태에서 위험 크기를 속단하는 것

은 위험한 것 아니냐?

세대 기간이 짧은 동물(예: 초파리나 쥐)에 대해서는 피폭 후 2세대 이후까지 유전영향을 실제로 연구했습니다. 그러나 세대 기간이 긴 사람에 대한 연구로는 지난 세기까지는 일본 원폭생존자 집단이 유일한 것인데, 그 결과는 피폭받지 않은 대조집단에 비해 중요 유전결함의 증가를 발견할 수 없었습니다. 그렇지만 방호 목적으로는 동물실험 결과와 유전학 원리를 적용해 추산한 유전결함 위험을 포함하여 방호기준을 설정하고 있습니다. 현재의 판단은 피폭자 후손의 심각한 유전결함 위험은 피폭자 본인의 암 위험에 비해 사소하다고 봅니다.

돌연변이 유전자의 회복력이나 정상 유전자와 교배 과정에서 희석 효과 등으로 피폭자의 먼 후손에서 유전질환이 발생할 위험은 첫 두 세대에서 위험에 비해 무시할 수준일 것으로 평가하고 있습니다. 유전자 돌연변이가 계속 나쁜 방향으로 작용해 심각한 유전체 변화에 이를 수 있다면, 인류 탄생 이래 세대마다 수백 mSv를 끊임없이 방사선을 받아 왔으므로 지금쯤은 만화에서나 보는 괴물 같은 개체가 수도룩해야 할 것이지만 그렇지 않습니다.

■ 후쿠시마 사고 후 12년이 지났으므로 저장한 물의 삼중수소 방사능은 스스로 약 절반으로 줄었을 것이다. 12년 정도만 더 보관하면 방사능이 또 절반이 되어 방류하더라도 환경영향이 반감될 터인데 왜 지금 방류하려는가? 결국 비용을 줄이려 지구환경을 오염시키는 것 아닌가?

12년 더 보관하면 방류할 삼중수소 방사능이 반감될 것은 맞습니다. 그러나 지금 계획대로 방류하더라도 환경영향이나 인류 피폭에 미치는 수준은 사소한데 12년을 더 기다려 영향을 반으로 줄이는 것이 낫다고 말하기는 어렵습니다. 또한 반대하거나 우려하는 기반이 방류 방사능이 절반이나 두 배냐 문제가 아니므로 12년을 기다려 방류를 계획해도 반대 목소리는 여전할 것으로 예상됩니다.

■ 방사선방호의 제1원칙이 '행위의 정당화'이고 정당화는 행위로 인한 이득이 관련된 부담(비용)을 상회해 순이익이 있어야 한다는 것인데 후쿠시마 처리수 방류는 어떻게 정당화되나?

정상 가동 원전이라면 원전 건설허가 단계에서 원전이 창출하는 가치가 원전

의 건설, 운영, 폐로 및 폐기물 처분까지 전 단계에 걸친 사람과 환경의 피폭 또는 다른 부정적 영향의 부담을 상회한다는 판단을 따릅니다.

반면, 후쿠시마 원전처럼 예상하지 않은 중대사고가 일단 발생하여 방사능의 환경 방출이 통제되기 어려운 상황이 되면 이미 계획피폭상황이 아니며, 의도하지 않은 방사선피폭이 진행되는 ‘기존피폭상황’이 됩니다. 기존피폭상황에서 피폭을 감축하기 위한 활동은 감축할 방사선피폭(사람 및 환경)의 가치가 활동에 필요한 비용을 충분히 상회할 때 정당화됩니다. 일본은 방류가 이런 관점에서 정당하다고 보는 것입니다.

■ 바닷물로 희석해 배출기준의 1/40 이하로 방류한다지만 결국은 모두 바다로 나가는 것 아니냐?

원론적으로 모든 양이 바다로 가는 것 맞습니다. 다만, 높은 농도 처리수를 그대로 배출하면 해양 방사능이 유의하게 증가하는 해역의 범위가 넓어집니다. 무엇보다 배출기준이 있으므로 이를 준수하는 것이 합당합니다. 또한, 이렇게 희석해 방류하려면 기존 저장량과 계속 발생할 처리수를 모두 방류하는 데는 20년 이상 걸릴 것이므로 그동안 삼중수소 방사능이 상당히 감소하는(시간계획에 따르지만 약 50%) 효과는 기대할 수 있습니다.

■ 방류하면 해류를 따라 북태평양을 돌아오는 데 몇 년이 걸린다지만 복잡한 해류 이동을 어떻게 장담할 수 있나?

물론 해류의 모든 거동을 완전히는 알 수 없습니다. 그러나 지금껏 관찰된 결과는 일본 동해안의 해류의 주류는 동쪽으로 흘러 미국 서안에서 남북으로 나뉩니다. 북쪽으로는 캐나다 해역을 거쳐 알류산 열도를 따른 오야시오 해류로



방류된 후쿠시마 처리수의 이동 개요도. 주된 흐름은 북태평양 해류로 북미 서해안에 이른 다음 나뉘어 일부는 캐나다 서안을 돌아 알류산열도를 따라 흐르는 오야시오 해류로 일본해역으로 돌아옴. 남쪽 지류는 캘리포니아, 멕시코 서안으로 내려가 북적도 해류로 필리핀 해역에 이른 다음 쿠로시오 해류로 일본 남쪽 또는 대한해협을 통해 동해에 이름. 이 과정에서 일부는 본류에서 갈라져 다른 경로를 거침.(그림: 연합뉴스)

일본으로 돌아 내려옵니다. 남쪽 해류는 멕시코 서해안을 따라 내려가 적도 부근에서 돌아 북적도해류로 필리핀 해역에 이른 다음 쿠로시오해류로 일본 남쪽을 통하거나 대한해협을 통해 동해를 지납니다. 이 주류의 순환은 3~5년에 걸치는 것으로 보고됩니다. 이 과정에서 많은 물에 희석되어 방사능 농도는 계속 낮아집니다. 그러나 작은 흐름으로서 국지적으로 갈라지는 해류는 짧은 경로를 통할 수도 있으므로 더 빨리 우리나라 남해에 도달하는 부분도 있을 수 있습니다. 즉, 가장 빠른 도달 시기를 정확히 예측할 수는 없습니다.

그런데 우리나라 해역의 해수나 수산물 방사능 농도에 미치는 영향은 방류된 방사능이 도달하는 데 걸리는 시간은 그다지 중요하지 않습니다. 왜냐면 후쿠시마 처리수의 삼중수소 방사능 총량이 태평양 물에 본래 존재하는 삼중수소나 매년 내리는 빗물의 삼중수소 양에 비해 미미하기 때문입니다. 간단한 예로 우리나라 동해(면적 약 100만 km^2)에 연간 강수량이 1000 mm(1 m)라면 연간 총 강수량은 $10^{12} \text{ m}^3 (=10^{15} \text{ L})$ 인데 빗물 삼중수소 농도가 1 Bq/L이면 총 삼중수소 방사능은 $10^{15} \text{ Bq} (=1000 \text{ 조 Bq})$ 이 되어 후쿠시마에 저장되어 있는 총 삼중수소 방사능과 비슷합니다. 다시 말하면 후쿠시마 처리수 방류는 1년에 동해에 내리는 빗물의 삼중수소 방사능에 해당하는 양을 20년 이상에 나눠서 훨씬 넓은 태평양으로 내보내는 것과 같습니다. 이것이 위험하다면 동해바다는 옛날부터 위험천만인 바다가 돼 있어야 합니다. 전혀 아니죠. 그러니까 후쿠시

마 처리수의 삼중수소 방류가 위험하다는 주장은 처음부터 잘못된 것입니다. 본래 양이 적어 안전한 것이니 그것이 우리 바다에 들어오는 데 2년이든 5년이든 시기와는 관계없이 안전합니다.

■ 물의 방사능 농도가 낮아도 어패류가 계속 섭취하면 누적되어 농도가 높아진다는데?

수생 생물은 물속의 원소들을 섭취해 체내에 저장하므로 원소의 성질에 따라 단위 질량 당 방사능이 물보다 크게 높아지기도 합니다. 물 농도에 대한 어패류 농도 비를 ‘농도인자’라 부르는데 수용성 물질은 낮고 불용성 물질은 큰 값을 보입니다. 예를 들어 바닷물에 대한 어류의 농축인자는 수용성인 Cs-137은 100, 불용성인 Co-60은 700을 권고합니다. 즉, Cs의 경우 수중 방사능농도가 1 Bq/L이면 생선의 방사능농도는 100 Bq/kg으로 예상하여 피폭을 평가합니다. 농도인자 권고 값은 피폭평가에 사용하도록 보수적으로 채택한 값입니다. 그러나 후쿠시마 처리수에서 주된 방사능인 삼중수소는 생체에서 교환이 빠른 물질이어서 물이든 유기결합형(OBT)든 농축인자는 모두 1을 권고하고 있습니다. 보통의 성인이 하루 물 3L를 먹으면(마시는 물, 음식 포함) 같은 양이 매일 배출되어야 합니다.

■ 영국에서 바닷물 삼중수소 농도는 5~50 Bq/L(kg 당 농도도 비슷)인데 어패류 농도는 수천~수만 Bq/kg인 경우가 있었다니 이는 삼중수소도 농축되는 증거 아닌가?

넙치와 홍합의 농도인자 값이 수천에 이른다고 보고한 연구가 있으나,* 이는 다른 여러 연구 결과나 물의 대사 본성과 합치하지 않습니다. 후속 연구는 인근 핵의약품 공장에서 유기결합 삼중수소를 배출했는데, 해수 유기결합 삼중수소는 흐름으로 지나가 버렸더라도 이를 섭취한 해양생물은 자리를 지켜 체내에 잔류하는 농도(유기결합 삼중수소는 수년까지 잔류)와 시차가 있어 이로 인한 오판일 것으로 평가했습니다.** 추가 연구가 필요하지만 삼중수소의 수생동물 농축인자는 1과 큰 차이는 없을 것으로 추정되며† 매우 낮은 농도에서 수배 정도 농도인자는 중요한 의미를 갖지 않습니다.

* G.J. Hunt 등, 2010. Enhancement of tritium concentration on uptake by marine biota: experience from UK coastal waters, J. Radiological Protection, 30(1), 73-83.

** IRSN, 2010. Radionuclide Fact Sheet: Tritium and the Environment.

† Fievet B. 등, 2021. concentration factors and biological half-lives for the dynamic modeling of radionuclide transfers to marine biota in the English Channel,

Science of the Environment, 791.

■ 삼중수소물이 환경으로 나가면 일부는 위해도가 훨씬 큰 유기결합 삼중수소로 변환되어 위험을 증가시키지 않는가?

삼중수소 물이나 가스는 환경의 여러 유기물과 수소를 교환하거나 생화학 반응의 결과로 다양한 유기결합 삼중수소를 만들 수 있습니다. 유기결합 삼중수소는 삼중수소 물보다 생물체 내에 머무르는 시간이 훨씬 길어 더 많은 방사선피폭(2~3배 수준)을 초래합니다. 그러나 유기결합 삼중수소로 변환되는 비율이 낮아 종합적 피폭 기여는 삼중수소 총 피폭의 20% 미만으로 평가되므로 위험을 크게 높이는 것은 아닙니다.

■ 사고 원전 운영자인 도쿄전력 또는 당사국인 일본이 제공하는 자료를 어떻게 믿을 수 있나?

후쿠시마 원전의 방사선 안전관리는 일본 규제당국뿐만 아니라 언론, 시민단체가 주목하는 대상이며, 나아가 국제적 주요 관심사여서 허위로 보고할 가능성은 낮습니다. 또, 이런 우려 때문에 처리수를 최종 배출하기 전 확인 분석은 도쿄전력 스스로 수행하지 않고, 규제기관이 인정하는 제3기관에 위임할 계획입니다. 나아가 국제원자력기구(IAEA)도 당분간 후쿠시마 현장에 사무소를 두고 방류 업무를 확인할 계획입니다.

처리수를 유류 비축시설처럼 더 큰 저장소에 저장하거나 콘크리트로 만들어 매몰하는 방법 등 대안이 있다는데 왜 해양 방류를 추진하는가?

몇몇만 알려졌지만 여러 제안자가 다양한 대안을 낸 것으로 압니다. 이처럼 중요한 정책 방향을 결정할 때는 당연히 여러 방안을 비교 평가하여 최선의 방안을 채택합니다. 초대형 저수탱크의 건설이나 콘크리트화가 공학적으로 가능함은 분명합니다. 어떤 방안이 '최선'인가 판단에는 여러 인자가 작용하는데, 문제는 현재 처리수 방사능이 방류보다 심각하게 큰 비용을 감내해야 할 정도인가 하는 판단입니다. 만약 처리수의 삼중수소 방사능이 지금보다 1만 배 이상 더 높아 방류하면 태평양 물의 삼중수소 농도를 수십% 높일 것이라면 분명히 더 강력한 대책을 모색했을 것입니다. 그러나 현 수준 처리수의 방사능은 방류하더라도 수 km 이내 근해에만 유의한 방사능 변화만 예상되는 상황에서

더 강력한 방안이 설득력을 얻기가 쉽지 않았을 것입니다. 근해의 방사능 증가는 일본의 문제이지 우리나라나 국제적인 문제는 아닙니다.

다른 예를 보겠습니다. 원전이든 석탄 발전소든 대형 발전소는 막대한 폐열을 배출해야 합니다. 내륙 발전소는 거대한 냉각탑을 통해 대기로 열을 배출하는데 방대한 수증기를 내뿜어 주변 지역 햇빛을 가리는 폐단도 있습니다. 그래서 많은 발전소는 해변에 세워 바닷물을 냉각수로 사용합니다. 바다의 열용량이 커도 발전소가 내보내는 열이 많아 배수구에서 어느 정도 거리까지는 소위 ‘온 배수 영향’ 또는 ‘열 오염’ 문제도 종종 제기됩니다. 원론적으로는 냉각수 양을 크게 더 늘이고 더 멀리 내보내면 온도차를 충분히 낮출 수 있지만 그런 노력은 어느 정도까지만 이루어집니다. 후쿠시마 처리수 방류도 같은 맥락입니다.



내륙 발전소가 폐열을 내보내는 대형 냉각탑. 강물의 열 오염을 예방하지만 수증기가 주변 지역 햇빛을 가리는 폐단이 있음.

■ 방사선방호의 제1원칙은 정당화이며, 유해물질 환경배출은 최선으로 줄여야 한다는 것이 기본원칙이자 윤리이다. 일본의 후쿠시마 처리수 배출계획이 이 원칙을 존중하는 것인가?

후쿠시마 오염수는 그냥 두었다면 지하수를 통해 후쿠시마 앞바다로 계속 들어갔을 것입니다. 그 경우에도 가까운 거리에서만 유의한 피폭이 있을 것이어서, 필요하다면 일정 기간 근해 조업 제한 등 다른 조치를 취하더라도 일반인 선량제한치는 만족할 수도 있었을 것입니다. 그래서 단순한 정당화 원칙에만 견준다면 지하수를 인출하여 정화하는 방호조치의 가치가 그 노력의 비용을 상회하지 못할 가능성도 있습니다. 그러나 유해물질 환경배출 관리에는 ‘최선 기술(best available technology; BAT)’을 적용한다는 윤리적 원칙에 따라 바

다로 유입되는 방사능을 최소화하기 위해 차수벽을 설치하고 지하수를 퍼내 정화하는 과정을 거치는 것입니다. 즉, 현재 후쿠시마 오염수를 다루는 일은 단순한 ‘정당화’ 차원을 넘어 환경윤리를 고려한 활동으로 이해됩니다.

■ 처리수 방류에 대해 일본 국민조차 반대가 상당하지 않나?

이러한 일에는 어디나 반대 목소리도 있게 마련입니다. 특히 생업과 관련된 일본 동해안 지역 주민이 많이 우려하는 것은 당연합니다. 국가를 막론하고 이런 일은 정부의 문제 없다는 설명보다는 불안하다는 목소리가 먼저 와닿기 때문입니다. 그러나 지금도 일본 여론은 찬성이 반대의 2배 이상입니다.

무엇보다 일본은 방류 정책이 과학적으로나 법률적으로 나아가 환경윤리적으로 합당하다고 판단한다는 것입니다. 일본이 국내외적 이해를 높일 목적으로 초청한 IAEA 평가가 긍정적인 만큼, 머지않아 방류를 개시할 것입니다. 일본 내 반대 목소리나 주변국의 우려 표명이 방류계획을 바꿀 수 있을 것으로 기대하기는 어렵습니다. 그렇다면 결국 우리만 방사선 피해 실체도 없는 소모적인 논쟁에 휘말렸고, 그래서 애매한 수산업계만 피해를 떠안을 지경이 되고 있습니다. 냉정을 되찾아야 합니다.

■ IAEA가 일본의 방류계획이 합당하다고 평가했다지만 원자력 진흥을 목적으로 하는 IAEA 평가를 믿을 수 있는가?

IAEA가 원자력의 평화적 이용기술을 파급할 목적으로 창립된 것은 맞지만, 현재 IAEA 주된 임무는 핵확산 억제와 원자력/방사선 안전 규범 공급입니다. 핵확산 억제를 위해서는 국가의 핵물질 재고를 감독(사찰)하고 은밀한 핵활동을 찾기 위한 탐지망도 운영합니다. 원자력/방사선 안전을 위해서는 국제 규범과 기준을 정하고 국제협약을 통해 회원국의 준수를 요구합니다. 나아가 회원국의 원자력/방사선 안전관리가 적절히 이루어지는가에 대해 평가와 자문도 제공합니다. 후쿠시마 오염수 처리와 처리수 방류에 대한 평가단을 운영한 것도 이런 활동의 일환입니다. 이런 평가단은 대개 IAEA 직원이 아니라 여러 나라에서 초빙한 전문가로 구성되므로 개인인 전문가의 의사에 반하는 결론을 IAEA 집행부나 사무국이 독단적으로 내기는 어렵습니다.

■ 1993년 러시아 해군이 핵잠수함에서 발생한 방사성 폐기물을 동해에 버릴 때 일본이 반대에 중단시켰다. 이제 일본 스스로 방사성 오염수를 태평양으

로 내보내겠다는 것은 모순 아닌가?

1993년 러시아 해군의 방사성 폐기물 투기와 후쿠시마 처리수 방류는 중요한 차이가 있습니다. 러시아의 투기는 어떤 방사성핵종을 얼마나 많이 내버리는지도 알리지 않은 채 진행된 것이므로 영향권 국가는 물론 국제사회가 반대할 정당성이 있습니다. 이에 반해 후쿠시마 처리수 방류는 왜, 얼마나 많은 방사능을, 어떻게 방류하겠다는 것인지 투명하게 밝혀 추진하겠다고 하고 있습니다.

■ 후쿠시마 처리수 방류를 인정하면 현재 우리나라가 수산물 수입을 제한하고 있는 8개현(후쿠시마현 포함) 수산물도 머지않아 수입되는 것 아닌가?

후쿠시마 처리수 방류와 현재 우리나라가 수입을 제한하고 있는 8개현 수산물의 제한 해제는 별개 문제입니다. 특정지역 수산물 수입 제한은 2011년에 처리수 방사능의 수천 배나 되는 방사능이 방출된 결과 수산물의 유익한 방사능 오염이 확인됨에 따라 취한 조치이므로 그 영향이 해소되었다는 확증이 없으면 계속 제한할 수 있습니다. 처리수 방류는 현재의 잔류 영향에 방사능을 추가하는 활동이므로 역으로 수입제한을 연장할 빌미는 될 수 있을지언정 일본이 수입제한 해제를 요청할 이유는 되지 않습니다.

■ 후쿠시마를 포함한 8개현 수산물 수입제한이 부당하다고 일본이 제소한 데 대해 세계무역기구(WTO)는 국제기준보다 낮은 농도라도 국가 상황에 따라 수입을 제한하는 것은 당사국의 권한으로 판정했다. 그렇다면 처리수 방류 영향이 미미하더라도 각국이 반대할 권리는 있지 않나?

국제기준보다 방사능이 낮더라도 국민 우려 등 여러 상황을 고려하여 더 낮은 기준을 적용하여 수입을 제한하는 것은 국가의 권한으로 본 것이 WTO의 판단입니다. 이는 수입국의 주권적 행동입니다. 이에 비해 처리수 방류가 국제규범이나 윤리규범을 침해하지 않는다면 방류하는 것은 일본의 주권적 행동입니다. 우리 국민이나 시민단체, 나아가 국가가 반대하는 것은 자유지만 힘이 작용하는 권리이기는 어렵습니다. 이를 권리로 인정하면 어느 국가든 다른 나라를 콕 찍어 온실기체 배출을 중지하라고 요구할 수 있게 될 것입니다.

■ 방사선방어학회는 방사선 위험으로부터 사람과 환경을 보호하는 일을 목적

으로 한다면, 방사선피폭이 낮지만 위험이 0은 아닌데 왜 후쿠시마 처리수 방류가 문제없다고 하는가?

어디나 존재하는 다양한 위험을 무조건적으로 0이 되도록 감축할 수는 없습니다. 한 종류 위험을 무리하게 감축하면 다른 위험이 커질 수도 있습니다. 그래서 위험감축은 ‘합리적’이어야 합니다. 방사선방호의 기본원칙의 하나도 ‘방사선을 피폭하는 사람 수나 피폭의 크기를 경제사회적 인자를 고려하여 합리적으로 최소화하는 방호최적화’를 지향합니다. 이런 입장은 일본이든 우리나라든 IAEA든 어디나 같기에 평가 결과도 비슷하기 마련입니다. 외국의 일이라고 합당한 근거 없이 반대한다면 결국 국내의 비슷한 사안에 부메랑이 됩니다. 우리 학회는 과학을 기반으로 윤리적이고 합리적인 입장을 견지함으로써 정치적, 감정적 흐름에 휩쓸리지 않도록 노력합니다.

그럼에도 후쿠시마 처리수 방류를 두고 이념적 대립으로까지 치닫고 있는 실정이기에 방사선방호분야 국내 최고의 학술단체인 방사선방어학회가 입장을 정리하여 알리는 것입니다. 이는 국제방사선방호학회연합(IRPA)의 윤리준칙 제 10항 “가능하고 적절하다면, 회원은 방사선이나 방사선방호에 관한 다른 사람의 오도성, 선정적, 부당한 말을 시정해야 한다.”는 규범에 부합하는 활동입니다.



대한방사선방어학회

The Korean Association for Radiation Protection