

후쿠시마 오염수 해양 투기 3년 국회 세미나

# 후쿠시마 오염수의 생물 농축과 건강 영향

일시 | 2026. 8. 27.(목) 오후 2시

장소 | 국회의원회관 제6간담회실

1부 강연 사회 | 김영희 변호사

■ SUZUKI YUZURU 도쿄대 명예교수

↳ 후쿠시마의 바다에서 보이기 시작한 것

- 방사성 물질이 물로 흘러들어가면 가장 먼저 영향받는 것은 수생생물

■ 백도명 서울대 명예교수

↳ 후쿠시마 앞바다의 생태계 훼손과 그 의미 모색

2부 토론 좌장 | 최무영 서울대 명예교수

■ 장정욱 마쓰야마대 명예교수

■ 이정운 원자력안전과 미래 대표

■ 김해창 경성대 교수

주최 |

국회의원 박지혜·서왕진·윤종오, 민변 후쿠시마 오염수 해양 투기 저지를 위한 헌법소원 변호단,  
책임과학자연대, 공감연대, 반핵의사회, 탈핵신문, 탈핵법률가모임 해바라기

# 후쿠시마 오염수 해양 투기 3년 국회 세미나 후쿠시마 오염수의 생물 농축과 건강 영향

## CONTENTS

### 축사

|                       |   |
|-----------------------|---|
| 박지혜 더불어민주당 국회의원 ..... | 2 |
| 서왕진 조국혁신당 국회의원.....   | 4 |
| 윤종오 진보당 국회의원.....     | 6 |

### 발제

1. 후쿠시마의 바다에서 보이기 시작한 것..... 8  
- 방사성 물질이 물로 흘러들어가면 가장 먼저 영향받는 것은 수생생물  
스즈키 유즈루(SUZUKI YUZURU, 鈴木 譲) 도쿄대학교 명예교수
2. 후쿠시마 앞바다의 생태계 훼손과 그 의미 모색..... 30  
백도명 서울대학교 명예교수

### 토론

1. 장정욱 마쓰야마대 명예교수..... 47
2. 이정윤 원자력안전과 미래 대표..... 50
3. 김해창 경성대 교수..... 54

## 축 사



**박지혜** 더불어민주당 국회의원

기후위기 특별위원회, 기후에너지환경노동위원회,  
성평등가족위원회

안녕하십니까, 더불어민주당 의정부시갑 박지혜 국회의원입니다.

<후쿠시마 오염수의 생물 영향> 토론회에 참석해 주신 모든 분들을 환영합니다. 뜻깊은 자리를 함께 준비해 주신 서왕진 의원님, 윤종오 의원님을 비롯해 민주사회를 위한 변호사모임 후쿠시마 오염수 헌법소원 변호단, 책임과학자연대, 공감연대, 탈핵신문 관계자 분들에게 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

일본 정부가 후쿠시마 원전의 오염수를 방출하기 시작한 지 벌써 3년이 되었습니다. 그동안 우리 국민들께서는 수산물과 바다의 안전을 두고 적지 않은 불안을 안고 지내오셨습니다. 도쿄전력은 다핵종제거설비(ALPS)를 거치고 해수로 희석하는 방식을 통해 방출 농도가 안전 기준치에 부합한다고 설명하고 있지만, 오염수가 해양 생태계 전반에 미칠 장기적 영향까지 확인되었다고 보기는 어렵습니다. 더욱이 이번 방출은 30년 이상 이어질 예정으로 그만큼 긴 시간을 전제로 한 논의가 필요합니다.

그러나 그동안의 논의는 방사능 농도에만 집중되어 왔습니다. 그 결과 바다 생물과 먹이사슬, 나아가 우리 밥상에 이르기까지 어떤 영향이 나타날 수 있는지에 대해서는 충분한 검토가 이루어지지 못했고, 이를 오랜 기간에 걸쳐 확인할 수 있는 조사 체계도 아직 갖추지 못한 상황입니다.

이제는 단기적인 기준 초과 여부를 확인하는 감시를 넘어, 구조적이고 근본적인 검증 체계로 나아가야 할 때입니다. 방출이 계속되는 기간만큼 이어질 수 있는 독립적인 장기 조사 체계를 갖추고, 그 결과를 투명하게 검증할 수 있도록 해야 합

니다.

오늘 토론회는 오염수가 바다 생물에 미치는 영향을 과학적으로 짚어보고, 우리의 조사와 감시 체계가 무엇을 확인하는 한편 무엇을 놓치고 있는지를 함께 살펴 보기 위해 마련되었습니다. 국내외 전문가께서 함께해 주신 만큼, 오염수 방출로 인해 우리 해양 생태계가 직면하는 위기와 함께 해결 방안에 대한 논의가 이루어 지기를 기대합니다. 여러분이 모아주신 지혜를 바탕으로, 저 역시 국회 차원에서 필요한 제도 개선과 입법이 이뤄질 수 있도록 최선을 다하겠습니다.

다시 한번 귀한 시간을 내어 함께해 주신 모든 분들께 감사드립니다.

2026년 8월 27일  
국회의원 박지혜

## 축 사



**서왕진** 조국혁신당 국회의원  
기후위기 특별위원회, 기후에너지환경노동위원회

안녕하십니까.

조국혁신당 국회의원 서왕진입니다.

오늘 「후쿠시마 오염수의 생물 영향」 강연회에 함께하게 되어 뜻깊게 생각합니다. 특히 귀한 발제를 위해 한국을 찾아주신 스즈키 유즈루 도쿄대 명예교수님께 깊이 감사드리며, 오늘 자리를 마련해주신 관계자 여러분과 참석해주신 모든 분께도 감사드립니다.

후쿠시마 오염수 문제를 둘러싼 논의는 그동안 주로 방류 기준과 해수 중 방사성 물질의 농도가 기준치 이하인지에 집중되어 왔습니다. 물론 이러한 확인은 중요합니다. 그러나 바닷물에서 측정된 농도만으로 해양생태계에 미치는 장기적인 영향까지 충분히 살펴보기에는 한계가 있을 수 있습니다.

바다에서 살아가는 생물에게 장기간 어떤 변화가 나타나는지, 방사성물질이 생물과 먹이사슬을 따라 어떻게 이동하고 축적되는지는 지속적인 조사와 검증이 필요한 문제입니다.

그런 점에서 스즈키 교수님께서 후쿠시마 앞바다에서 직접 물고기를 채집하고 생물의 조직과 생태적 변화를 살펴오신 연구는 오늘 논의에 중요한 의미가 있다고 생각합니다. 삼중수소뿐 아니라 요오드-129 등 다양한 핵종의 문제, 수생생물에서 관찰·보고된 변화, 시민들이 직접 시료를 채취하고 측정해 온 시민과학의 경험까지 폭넓게 살펴볼 수 있기를 기대합니다.

아울러 오늘은 오염수 방류뿐 아니라 후쿠시마 원전의 폐로 과정과 그 과정에서 발생하는 오염 문제도 함께 논의합니다. 방류 기준을 충족했는지만 확인하는 데 그치지 않고, 사고 원전의 현재 상황과 폐로 과정에서 어떤 과제가 남아 있는지까지 장기적인 관점에서 살펴볼 필요가 있습니다.

이를 위해 현재 이뤄지고 있는 해양방사능 모니터링과 더불어 해수뿐 아니라 해양 생물과 생태계 전반에 대한 장기적인 조사도 더욱 폭넓게 이뤄질 필요가 있습니다. 조사 결과를 투명하게 공개하고 국내외 연구자들이 자료를 독립적으로 검증할 수 있는 기반을 확대하는 것 역시 중요하다고 생각합니다.

국회에서도 오늘 논의되는 내용을 바탕으로 후쿠시마 오염수 문제를 장기적인 해양환경과 생태계의 관점에서 지속적으로 살펴보고, 필요한 제도적·정책적 역할을 충실히 해나가겠습니다.

오늘 강연회가 후쿠시마 해양환경은 물론, 우리 바다의 안전과 해양생태계를 어떻게 지켜나갈 것인지 함께 고민하는 뜻깊은 자리가 되기를 바랍니다.

감사합니다.

2026년 8월 27일  
국회의원 서왕진

## 축 사



**윤종오** 진보당 국회의원 (원내대표)  
국토교통위원회, 국회운영위원회

「후쿠시마 오염수의 생물 농축과 건강영향 세미나」 개최를 진심으로 축하드립니다. 뜻깊은 자리를 마련해주신 관계자 여러분과 발제·토론을 맡아주신 전문가 여러분께 깊이 감사드립니다.

후쿠시마 원전 오염수 해양 방류가 시작된 지 시간이 흘렀지만, 국민의 불안은 여전히 해소되지 않았습니다. 일본 정부와 도쿄전력은 기준치 이하 방류를 말하고, IAEA는 방류 설비와 절차를 검증하고 있습니다. 그러나 기준을 지켰다는 설명만으로 바다와 생태계의 장기적 안전이 확인됐다고 말할 수는 없습니다.

해수에서 방사성물질 농도가 낮게 측정됐다는 사실과, 해양생물과 먹이망에 영향이 없다는 결론은 같은 말이 아닙니다. 삼중수소가 생물체 안에서 어떤 형태로 존재하는지, 퇴적물과 저서생물, 어패류와 먹이사슬을 따라 어떻게 이동하는지는 별도로 확인해야 합니다.

또한 후쿠시마 오염수 문제를 삼중수소 하나로만 좁혀 볼 수도 없습니다. ALPS 처리 이후에도 삼중수소는 제거하기 어렵고, 세슘-137, 스트론튬-90, 요오드-129, 탄소-14처럼 각기 다른 반감기와 이동경로를 가진 핵종 문제가 남아 있습니다. 기준치 이하라는 말이 곧 생태계 영향이 없다는 뜻은 아닙니다.

확인되지 않은 위험을 없다고 단정하는 것이 아니라, 끝까지 검증하는 것이 과학이고 국가의 책임입니다. 한국 정부도 일본과 IAEA가 제공하는 자료를 확인하는데 머물러서는 안 됩니다. 해수뿐 아니라 퇴적물, 플랑크톤, 해조류, 저서생물, 어

패류를 포함한 독립적 생태계 조사체계를 구축해야 합니다. 조사 방법과 원자료도 투명하게 공개해 국내외 연구자들이 검증할 수 있도록 해야 합니다.

바다는 특정 국가의 소유물이 아닙니다. 한 번 훼손된 해양생태계는 국경을 넘어 영향을 미치고, 미래세대에게까지 부담을 남깁니다.

진보당은 정부가 국민 불안을 외면하지 않고, 독립적 조사와 투명한 정보 공개, 국제적 책임 요구에 적극 나서도록 국회에서 함께 노력하겠습니다. 오늘 세미나가 정부의 책임 있는 대응을 촉구하는 뜻깊은 계기가 되기를 바랍니다.

함께해주신 모든 분들께 다시 한번 감사드립니다.

2026년 8월 27일  
국회의원 윤종오

## 발 제

후쿠시마의 바다에서 보이기 시작한 것

방사성 물질이 물로 흘러들어가면  
가장 먼저 명향받는 것은 수생생물

스즈키 유즈루 (SUZUKI YUZURU, 鈴木讓)

도쿄대학교 명예교수

# 후쿠시마 바다에서 보이는 것

방사성물질이 물에 흘러들면 가장 먼저 영향을 받는 것은 해양생물

스즈키 유즈루 鈴木 譲

도쿄대학 명예교수·다카기 진자부로 시민과학기금 이사



## 01 ALPS 처리오염수 해양방출

- 1-a. 오염수 확산 시뮬레이션
- 1-b. 삼중수소는 무엇이 문제인가
- 1-c. 요오드129 문제

## 02 시민의 해양조사활동

- 2-a. 삼중수소 모니터링
- 2-b. 바다고기에 대한 방사선 영향 조사

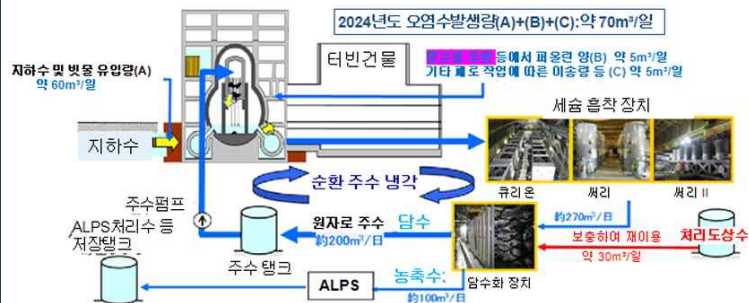
## 03 ALPS 처리오염수 저지 소송

# 1. ALPS 처리오염수 해양방출

## 오염수 발생현황

### 1-3. 오염수 발생량

- 2024년도 오염수 발생량은 약 70m<sup>3</sup>/일, 이 중 건물 내 유입량은 약 60m<sup>3</sup>/일, 해발 2.5m의 오염된 지하수(양수용 우물) 양수량은 약 5m<sup>3</sup>/일, 기타 폐로 작업에 동반하는 발생하는 미송량 등이 약 5m<sup>3</sup>/일.
- 2028년도까지 오염수 발생량을 50~70m<sup>3</sup>/일로 줄이는 목표를 향해, 계속적으로 대책을 추진함



인용: 특정 원자력 시설 감시·평가 검토회 (제120회) 자료 1-1  
2026년도 ALPS 처리수 방출 계획(초안)에 대하여

2026년 2월 16일 도쿄전력



2023년 8월 24일,  
드디어 시작된 방사능 오염수의 해양방출



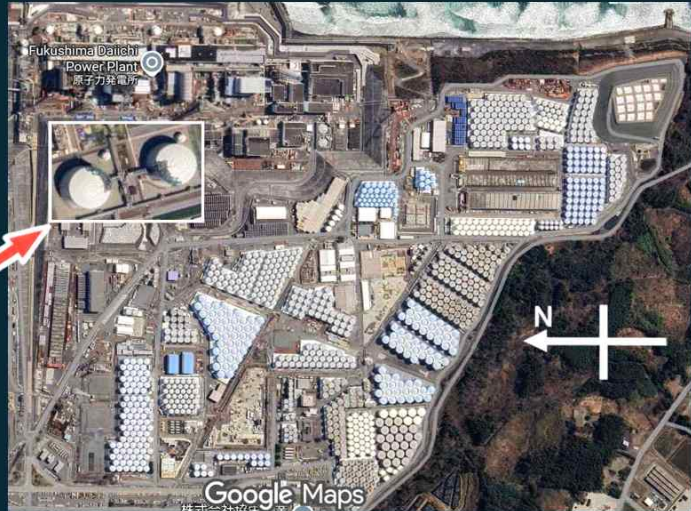
#### ALPS 처리수는 오염수

처리수에 포함된 대량의 삼중 수소수는 화학적으로는 같은 물이므로 제거는 거의 불가능.  
다른 핵종도 남아 있음.

**바다생물에 어떤 영향이 있는가?**

## 처음부터 육상보관을 선택지에서 배제하여 **최악의 선택**을 해버림

소마LNG기지의 대형탱크라면  
6기로 모든 오염수를 수용할 수 있음.  
더구나 폭발 걱정이 없는 물이라면  
조밀한 배치도 가능.

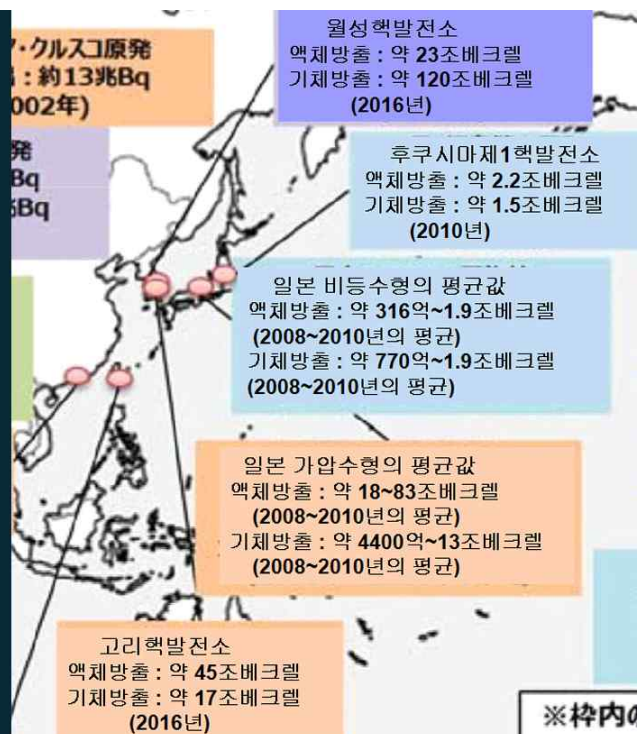


후쿠시마 제1발전소의 약1,000m<sup>2</sup>기 탱크군과, 소마 LNG기지의 230,000m<sup>2</sup> 탱크를 동일 축척으로 표시

## ALPS 처리로는 삼중수소를 제거할 수 없어, 해수로 희석하여 방출

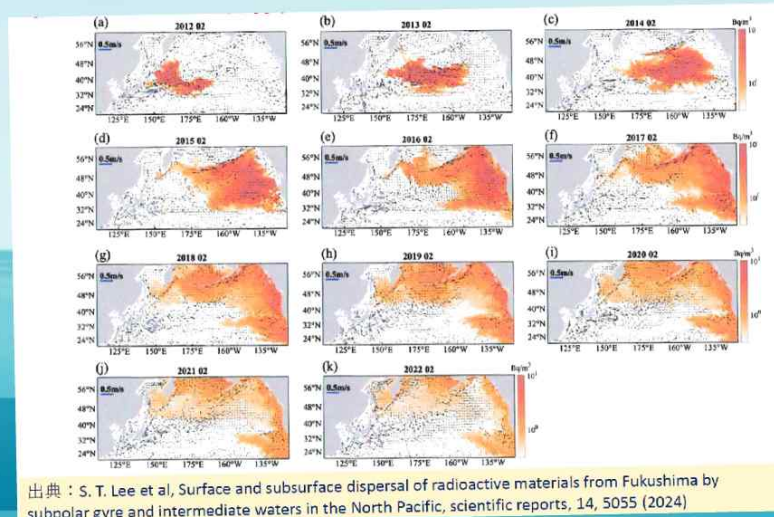
핵발전소 가동으로 삼중수소 등의 방출은 피할 수 없음.  
통상 운전 시 삼중수소 배출은, 가압수형로(PWR)에 비해,  
후쿠시마 발전소의 비등수형로(BWR)는 적음.  
CANDU (HWR : 중수로) 일본에 비해 많이 배출.

해양방출은 비교적 저준위이지만,  
핵발전소 사고로 핵연료에 직접 닿은 물을  
고의로 해양투기하는 것은 후쿠시마가 세계에서 최초임.

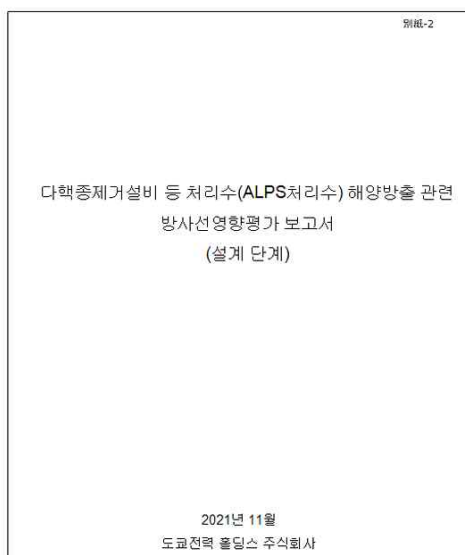


## 1-a. 오염수 확산 시뮬레이션

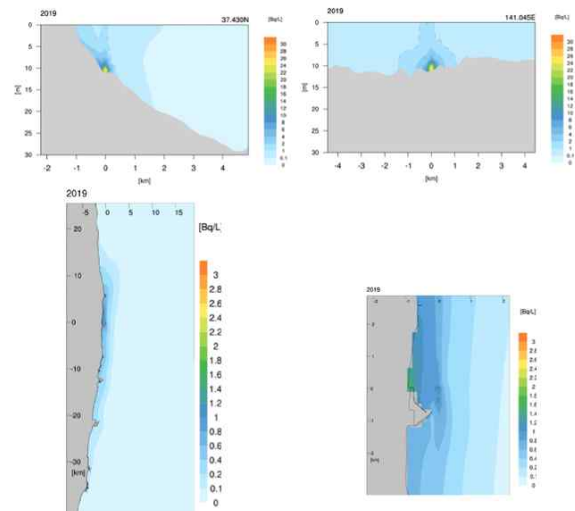
사고 시 후쿠시마 바다에 방출된 방사성 세슘은 어떻게 확산되었나!



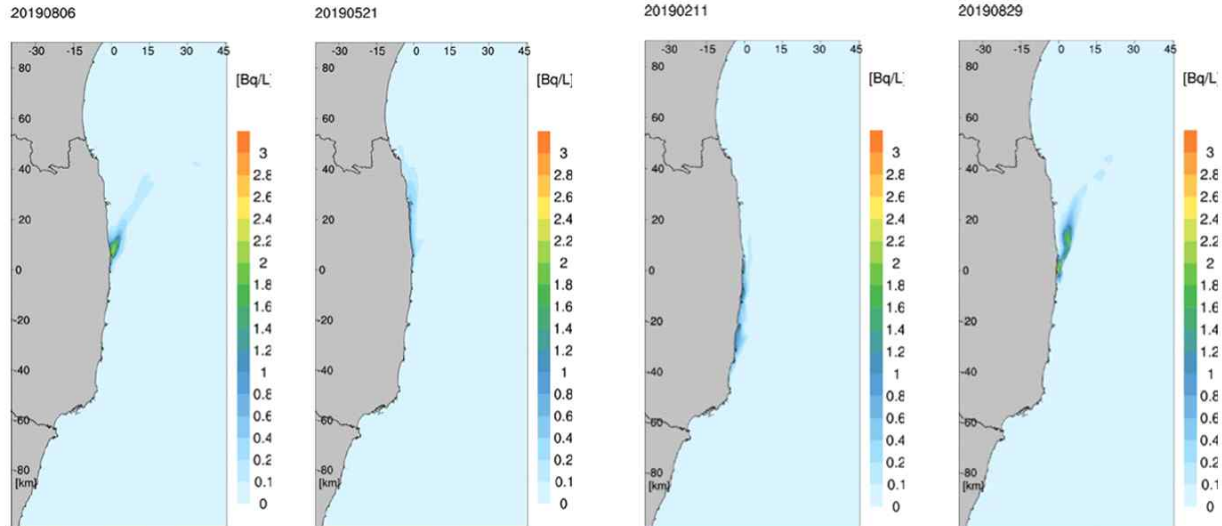
## 도쿄전력에 의한 삼중수소 확산 시뮬레이션



### 평균적인 농도분포

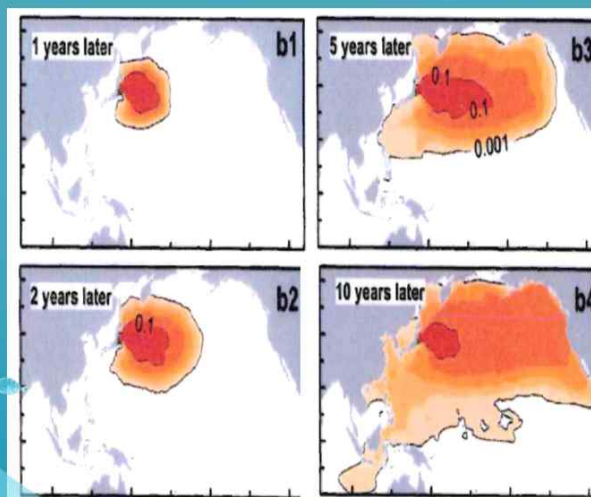


## 특정 방향으로 강하게 확산된 경우를 상정



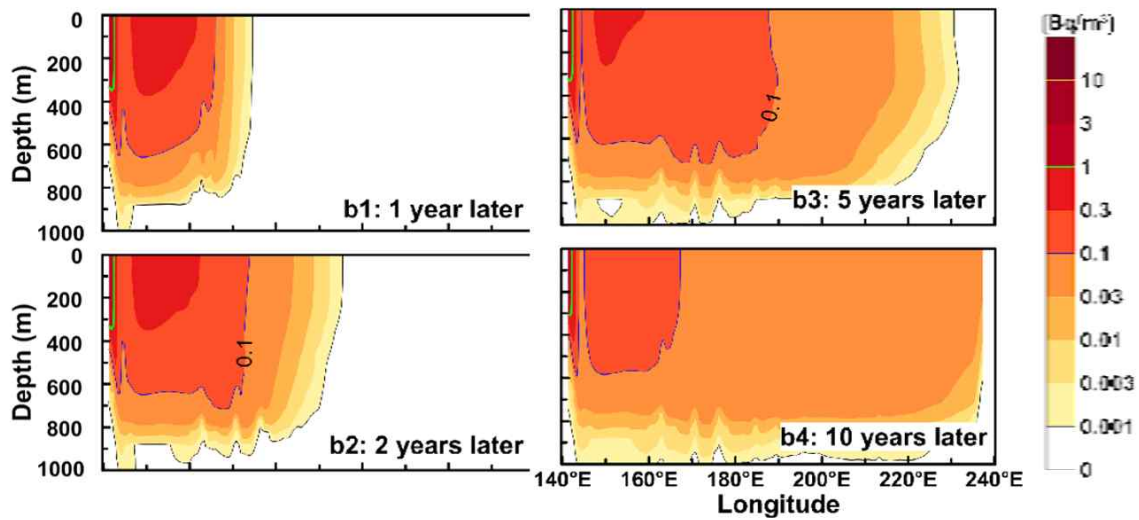
## Zhao et al. 2021에 의한 확산 시뮬레이션

Zhao et al, 2021: Marine Pollution Bulletin 169 (2021) 112515



10년동안 해양방출이 지속된다고 가정한 예지만, 실제로는 30년 이상이나 계속됨.  
해양방출은 30년간 계속하지만, 가장 10년간이라 가정한 경우의 확산 시뮬레이션을 확대 표시.

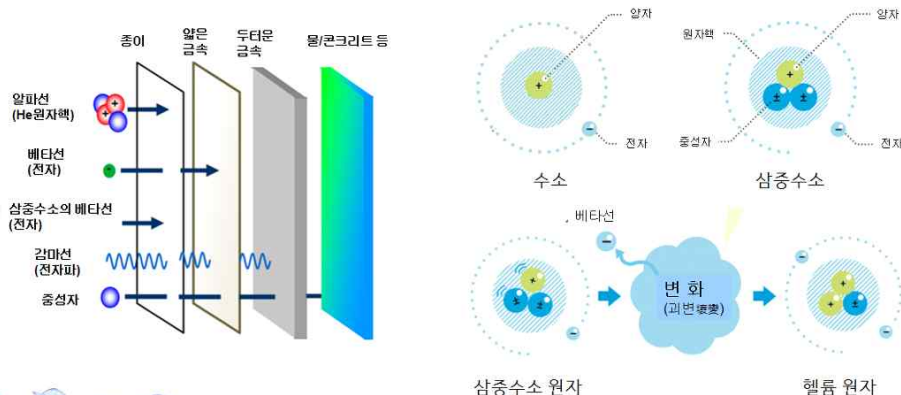
## 북위 37도에서 수직방향의 확산 시뮬레이션 (해양방출의 지속 기간을 10년으로 가정)



### 1-b. 삼중수소는 무엇이 문제인가

β선은 공기 중 몇mm 밖에 나가지 못하므로, 공간 선량률에는 기여하지 않음.  
삼중수소의 β선은 특히 저에너지로 실효선량은 Cs-137의 1/700.

- 투과력이 약하므로, 세포에 최대한으로 작용
- 삼중수소는 체내에 들어가 온갖 조직에서 상해를 일으킬 수 있음 (내부 피폭)



<https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/watertreatment/tritium/>

## 삼중수소 농도와 생물영향, 규제치

| 삼중수소 농도 (Bq/L) | 규제치 등 (Bq/L)            | 생물영향 등 (Bq/L)              |
|----------------|-------------------------|----------------------------|
| 100,000        | 일본의 음용수 규제값 없음          | 인간의 임파구 염색체 이상 (37,000) *1 |
| 10,000         | WHO 음용수 기준 (10,000)     |                            |
| 1,000          | 후쿠시마핵발전소 배수규제값 (1,500)  | 어란에 이상 발생 (500)*2          |
| 100            | 미국 EPA 음용수 기준 (740)     |                            |
| 10             | EU 음용수 기준 (100)         |                            |
| 1              | 미국 Cf주 음용수 기준 (15)      |                            |
| 0.1            | 핵실험 전 강수 중 농도 (0.1~0.6) |                            |

ALPS 처리수는 해양방출 전  
해수로 희석해 삼중수소 농도를 **1,500Bq/L 이하로 함**

환경에 한꺼번에 방출되는 방사성물질 농도를  
극히 낮은 준위로 억제하여,  
국소적인 영향을 회피해 안전성을 높이기 위함,  
이라고 함(국가·도쿄전력)

주: 일본에 음용수 규제값 없음

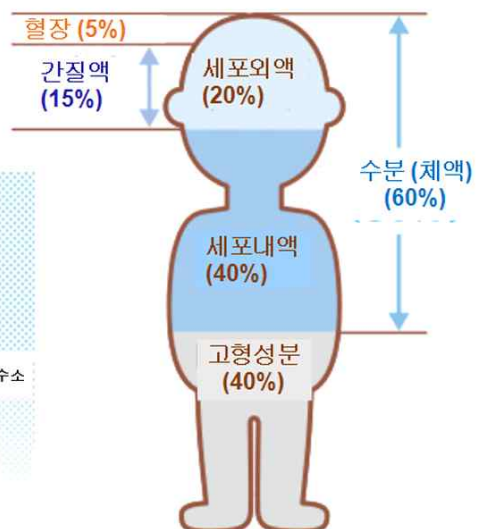
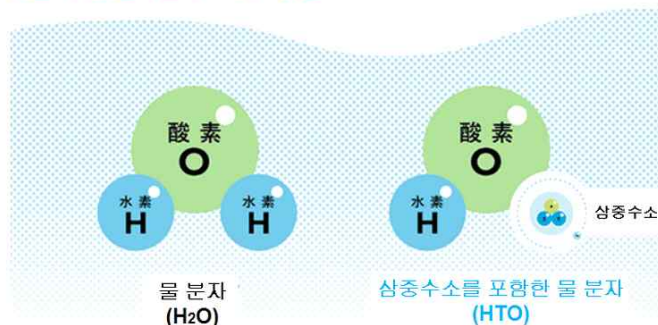
\*1 호리카와 외, 저준위 삼중수소의 유전적 효과, 보건물리 11, 1-11(1976)

\*2 L. Bondareva et al., Environment, 9, 51 (2022)

## 핵발전소에서 방출되는 삼중수소수(자유수형 삼중수소)

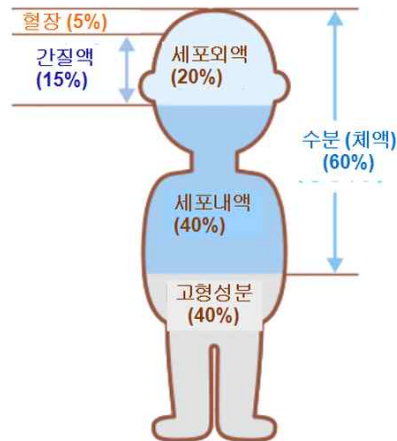
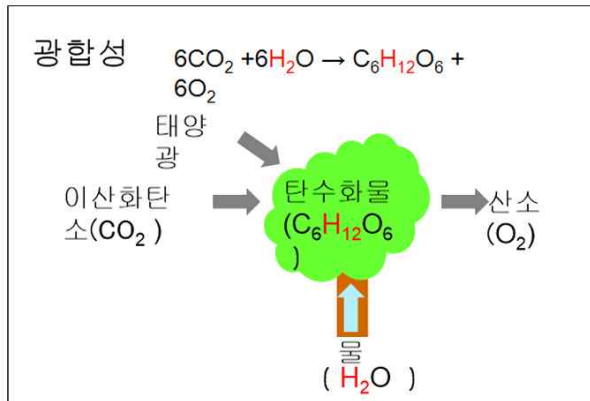
### 몸으로 들어간 자유수형 삼중수소(HTO)

몸의 60%는 수분(체액)으로 되어 있음.  
물을 섭취하여 소변으로 배설하는 과정에서  
비교적 용이하게 외부의 물과 교환하기 때문에,  
삼중수소 농축은 일어나지 않음.  
생물학적 반감기는 약 10일로 짧음.



도쿄전력 처리수 포털사이트에서  
<https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/watertreatment/tritium/>

## 식물은 자유수형 삼중수소(HTO)에서 유기결합형 삼중수소(OBT)를 만들



### 유기결합형 삼중수소(OBT) :

광합성에 의해 생긴 탄수화물이 출발점이 되어, 다양한 유기화합물이 합성되어, 먹이사슬을 통해 동물에도 확산됨.  
 핵발전소에서 배출되는 삼중수소는 생체의 40%를 차지하는 고형성분에 유기결합형 삼중수소에 의한 오염을 초래함.  
 생물학적 반감기는 약 40일로 짧.

## 도쿄전력이 행한 해양생물 사육시험



해수로 희석한 ALPS처리수(삼중수소 1500Bq/L 정도)에서 광어를 사육하여 축적이 없었다고 주장.  
 먹이에 유기결합형 삼중수소가 포함되어 있지 않으므로 당연한 얘기, 해양환경 실태를 반영하고 있지 않은  
 사육한 광어에서 처리수가 건강에 미치는 영향 조사를 신청했으나 받아들이주지 않음

## 삼중수소 위험은 없는가? : 일본에서 가장 많이 삼중수소를 배출하는 겐카이 핵발전소

2호기 : 폐로  
1호기 : 폐로

4호기 : 가동  
3호기 : 가동



## 겐카이발전소 주변에서는 핵발전소 가동 이후 백혈병 사망이 증가하고 있음

겐카이핵전 가동 전후 겐카이핵전과의 거리별  
및 각 지자체별 백혈병 사망자 대 10만명

| 지자체명  | 겐카이핵전에서<br>각 시장 市町<br>청사까지 거리(km) | 백혈병 사망자/ 10만명                     |                                   |
|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|       |                                   | 1969년 ~<br>1974년 평균<br>전국 평균 3.5명 | 1997년 ~<br>2011년 평균<br>전국 평균 5.7명 |
| 겐카이정  | 6.0                               | 9.0                               | 28.3                              |
| 가라초시  | 14.2                              | 5.4                               | 12.3                              |
| 마츠우라시 | 22.8                              | 4.3                               | 15.9                              |
| 이마리시  | 28.2                              | 3.6                               | 10.5                              |
| 이키시   | 29.4                              | 3.9                               | 26.2                              |
| 히라도시  | 31.0                              | 4.0                               | 21.2                              |
| 아리타정  | 34.0                              | 2.9                               | 9.5                               |
| 사자정   | 35.4                              | 3.1                               | 10.4                              |
| 다쿠시   | 35.8                              | 3.8                               | 9.0                               |
| 사세보시  | 39.1                              | 3.9                               | 11.8                              |
| 다케오시  | 39.6                              | 2.8                               | 9.4                               |

10만명 대 백혈병 사망 출현 이키시

| 5년 단위         | 인 원   |
|---------------|-------|
| 1969년 ~ 1974년 | 3. 9  |
| 1975년 ~ 1979년 | 6. 8  |
| 1980년 ~ 1984년 | 8. 4  |
| 1985년 ~ 1989년 | 19. 1 |
| 1990년 ~ 1994년 | 21. 0 |
| 1995년 ~ 1999년 | 27. 3 |
| 2000년 ~ 2004년 | 22. 5 |
| 2005년 ~ 2009년 | 28. 9 |
| 2010년 ~ 2013년 | 26. 2 |

[참고자료]  
겐카이핵전 1호기 가동 1975년  
2호기 1981년  
3호기 1994년  
4호기 1997년

세계 각지의 삼중수소  
배출시설 주위에서  
건강피해가 속출

뭔가 이상하지만  
검증이 불충분

※ 표는 이키신보 2019년 3월 1일호에서

이 데이터에는 이론(異論)도 있지만, **삼중수소에 관한 역학적 재검토 필요성 시사**

## 삼중수소 위험성은 여러가지가 지적되어 있음

### Makhijani, A. (2023)

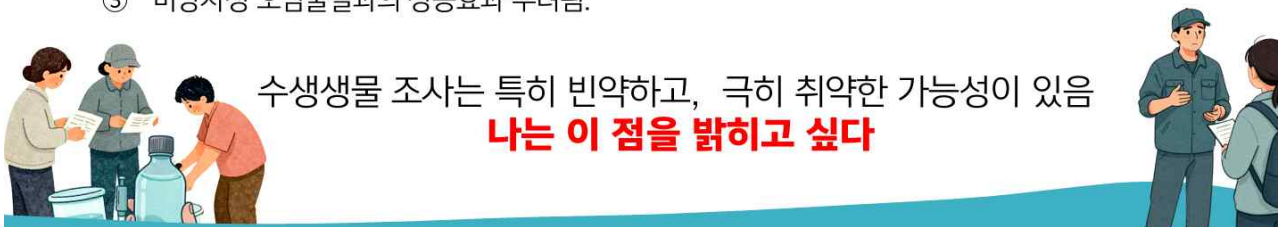
삼중수소의  $\beta$ 선 내부피폭에 의한 장애의 영향은 극히 광범위하게 미칠 가능성이 있음.

- ① 미토콘드리아 DNA는  $\beta$ 선에서 생긴 활성산소에 의한 손상을 입기 쉽고, 유전적인 건강피해로
- ② 태아(胎芽)나 태아(胎兒)에 대한 기형발생 리스크의 관점을 재검토할 필요 있음.
- ③ 비방사성 오염물질과의 상승효과 우려됨.

### Makhijani, A. (2023)

삼중수소의  $\beta$ 선 내부피폭에 의한 장애의 영향은 극히 광범위하게 미칠 가능성이 있음.

- ① 미토콘드리아 DNA는  $\beta$ 선에서 생긴 활성산소에 의한 손상을 입기 쉽고, 유전적인 건강피해로
- ② 태아(胎芽)나 태아(胎兒)에 대한 기형발생 리스크의 관점을 재검토할 필요 있음.
- ③ 비방사성 오염물질과의 상승효과 우려됨.

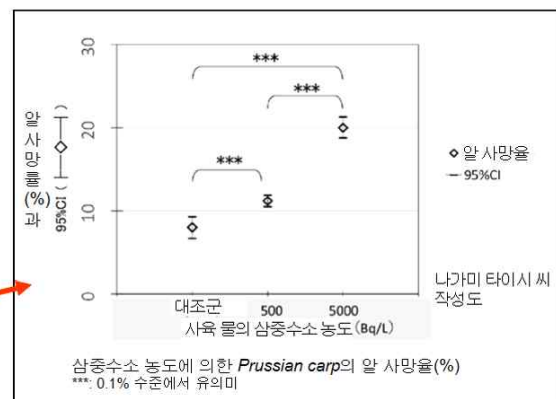


## 삼중수소의 수생생물에 대한 영향 연구, 비교적 저선량으로 실험한 사례

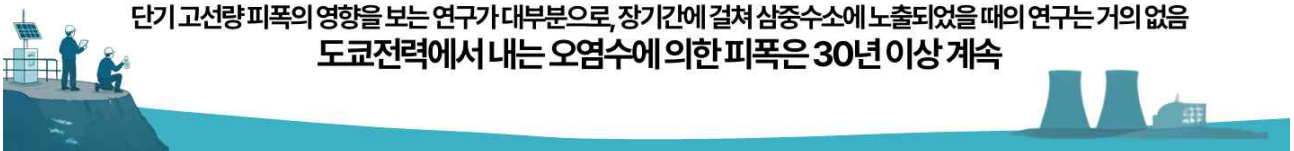
거북손エボシガイ 370 Bq/L 32日  
탈피(脱皮) 주기 변화 (Abbott and Mix, 1979)

물벼룩ミジンコ 50 Bq/L 5세대 성장률 저하.  
생식능력과 자손 생존율 저하. 배아형성 중의 이상 증가.  
핵소체(核小体)의 수와 직경의 증가.  
(Gudkov and Kipnis, 1996)

기베리오붕어ギベリオフナ 500Bq/L 알의 사망률 증가  
(Bondareva et al, 2022)



단기 고선량 피폭의 영향을 보는 연구가 대부분으로, 장기간에 걸쳐 삼중수소에 노출되었을 때의 연구는 거의 없음  
도쿄전력에서 내는 오염수에 의한 피폭은 30년 이상 계속



## 1-c. 요오드129 문제

후쿠시마제1발전소 처리오염수의 핵종 방출 실적

| 핵종명     | 반감기         | 고시농도한도<br>( Bq/L ) | 연도별 방출 총량(Bq ) |       |       |
|---------|-------------|--------------------|----------------|-------|-------|
|         |             |                    | 2023           | 2024  | 2025  |
| H-3     | 12.3y       | 60000              | 4.5조           | 13조   | 16조   |
| C-14    | 5700y       | 2000               | 4.3억           | 6.4억  | 17.4억 |
| C0-60   | 5.27y       | 200                | 980만           | 1800만 | 1920만 |
| Sr90    | 28.8y       | 30                 | 590만           | 4000만 | 6210만 |
| Tc-99   | 210,000y    | 1000               | 3200만          | 4600만 | 5130만 |
| Sb-125  | 2.76y       | 800                | 220만           | 880만  | 950만  |
| Te-125m | 57.4d       | 900                | 80만            | 330만  | 350만  |
| I-129   | 15,700,000y | 9                  | 6400만          | 3800만 | 2440만 |
| Cs-137  | 30.2y       | 90                 | 1400만          | 1100만 | 3450만 |

「고시(告示) 농도한도」 매일 2 리터를 계속 마신 경우,  
선량률이 1년 당 1 mSv에 달하는 농도로써 방사성물질 마다 지정되어 있음

## 삼중수소 이외 핵종의 고시농도비 총합, 요오드129(I-129) 농도,고시농도비,고시농도 총합에 차지하는 요오드129의 기여율

| 회차   | 일자       | 총합    | 농도<br>Bq/L | I-129의<br>고시농도비 | 기여율    |
|------|----------|-------|------------|-----------------|--------|
| 제1회  | 20230622 | 0.28  | 2.0        | 0.22            | 78.6%  |
| 제2회  | 20230921 | 0.26  | 1.8        | 0.2             | 80%    |
| 제3회  | 20231019 | 0.25  | 1.9        | 0.21            | 84%    |
| 제4회  | 20240226 | 0.34  | 2.5        | 0.28            | 82.4%  |
| 제5회  | 20240417 | 0.31  | 2.3        | 0.25            | 80.6%  |
| 제6회  | 20240515 | 0.17  | 1.0        | 0.11            | 67.7%  |
| 제7회  | 20240626 | 0.18  | 0.78       | 0.087           | 48.3%  |
| 제8회  | 20240805 | 0.12  | 0.29       | 0.032           | 26.7%  |
| 제9회  | 20240924 | 0.078 | 0.24       | 0.026           | 33.3%  |
| 제10회 | 20241015 | 0.083 | 0.11       | 0.012           | 14.46% |

요오드129의 고시농도한도는 9 Bq/L로 엄격히 제한.  
고시농도한도에 가까운 요오드129가 방류되고 있음.  
해조류, 갑상선이라는 특정부위에 축적되므로, 동향 파악이 중요.  
(이하, 다음 슬라이드에 계속)

삼중수소 이외 핵종의 고시농도비 총합,  
요오드129(I-129) 농도,고시농도비,고시농도 총합에 차지하는  
**요오드129의 기여율**

| 회차   | 일자       | 총합    | 농도<br>Bq/L | I-129의<br>고시농도비 | 기여율    |
|------|----------|-------|------------|-----------------|--------|
| 제11회 | 20250306 | 0.076 | 0.13       | 0.014           | 18.42% |
| 제12회 | 20250408 | 0.083 | 0.1        | 0.012           | 14.4%  |
| 제13회 | 20250710 | 0.11  | 0.34       | 0.038           | 34.5%  |
| 제14회 | 20250805 | 0.12  | 0.23       | 0.025           | 20.8%  |
| 제15회 | 20250909 | 0.12  | 0.50       | 0.055           | 45.8%  |
| 제16회 | 20251028 | 0.14  | 0.37       | 0.041           | 29.3%  |
| 제17회 | 20251202 | 0.19  | 0.17       | 0.019           | 10.0%  |
| 제18회 | 20260306 | 0.24  | 1.4        | 0.15            | 62.5%  |

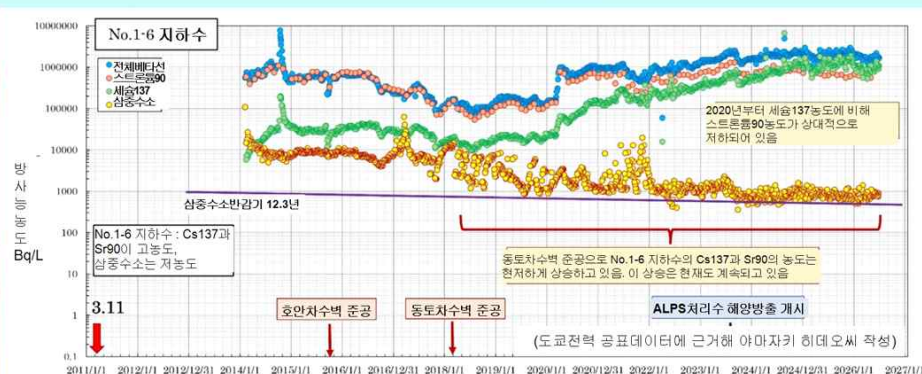
고시농도 60,000Bq/L의 삼중수소는  
1,500Bq/L까지 희석하지 않으면 고시농도비 총합이 1을 넘어버림  
국가와 도쿄전력은 삼중수소 문제를 자주 거론하지만,  
요오드 등 다른 핵종을 숨기고 싶은 것은 아닌가

향후 예정

| 회차   | 기간       | 총합 (Bq/L)   |
|------|----------|-------------|
| 제19회 | 4월       | 0.51 ~ 0.86 |
| 제20회 | 5 ~ 6월   | 0.51 ~ 0.86 |
| 제21회 | 6 ~ 7월   | 0.51 ~ 0.86 |
| 제22회 | 7 ~ 8월   | 0.60 ~ 0.84 |
| 제23회 | 8 ~ 9월   | 0.32 ~ 0.84 |
| 제24회 | 9 ~ 10월  | 0.32 ~ 0.84 |
| 제25회 | 10 ~ 11월 | 0.35 ~ 0.40 |
| 제26회 | 2 ~ 3월   | 0.35 ~ 0.50 |

향후의 핵종은 미발표. 요오드129 농도는 불명확  
7월 말 도쿄전력 기자회견에서  
요오드129 농도가 4.7Bq/L이었다고 발표.  
이것만으로 고시농도비 0.5를 초과함

## ALPS 처리수 이외에도 빗물과 지하수에 유래하는 방사성물질의 해양방출 있음



핵발전소 부지 안에는 지하수나 빗물의 배수경로가 있어,  
ALPS로 처리되는 일 없이 항만으로 흘러들고 있음.  
예를들면 No.1-6 지하수의 Sr-90, Cs-137 농도는 고시농도를 수 만 배나 넘고 있음.  
이 현황을 무시하고 ALPS 처리수 방출이 행해지고 있음

# 시민의 해양 조사 활동



**채다, 본다, 지킨다**  
마음을 이어, 내일을 살아가기 위해

이와키 방사능시민측정실 2011년3월11일 후쿠시마제1핵발전소 사고로  
피폭피해에서 아이들과 지역 사람들의 건강과 생활을 지키기 위해, 지역주민에 의해 설립되었습니다.  
보이지 않고 • 냄새 없고 • 느낌 없는 방사능에 의한 환경오염과 장기적으로 맞서서,  
지금부터 앞날이 먼 미래를 내다본 활동을 하고 있습니다.

## 2-a. 삼중수소 모니터링

### 베타선 측정 랩



이와키방사능시민측정실 '다라치네'는 시민단체 중 유일한 베타선 측정시설을 갖춘  
베타선은 삼중수소 뿐 아니라, 스트론튬과 세슘도 내는데 그것들을 구별할 수 없음.  
측정에는 핵종 별로 분리정제가 필요. 삼중수소는 물의 형태로 회수.

### 자유수형 삼중수소 (HTO)

시료에서 증발한 수분을  
냉각해 회수함

### 유기결합형 삼중수소 (OBT)

건조시킨 시료를 연소시켜  
연기에서 물을 회수함.

## 액체 신치레이션 카운터로 측정

## 액체 신치레이션 카운터로 측정



베타선을 받으면 발광하는 액체에  
얼은 물을 더해, 검출기에 세팅함.  
일정시간의 발광수에서  
시료의 물에 포함된  
삼중수소양을 산정할 수 있음.



다라치네 소유의 3대 액체 신치레이션 카운터

## 발전소 앞바다 감시활동 개시



## 핵발전소근방 해수중 자유수형 삼중수소(HTO) 농도 측정결과 (Bq/L)

| Date                                                                           | A surface | A deep    | B surface | B deep    | C surface | C deep    | D surface | D deep    |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2022.05.10.                                                                    | ND<0.11   | ND<0.11   | ND<0.11   | ND<0.12   | ND<0.11   | ND<0.11   | ND<0.11   | ND<0.12   |
| 2022.08.24.                                                                    | ND<0.04   | ND<0.04   | ND<0.04   | ND<0.04   | ND<0.04   | ND<0.05   | ND<0.05   | ND<0.05   |
| 2022.11.09.                                                                    | ND<0.04   | ND<0.05   | ND<0.05   | ND<0.04   | ND<0.04   | ND<0.04   | ND<0.04   | ND<0.04   |
| 2023.05.31.                                                                    | ND<0.04   | ND<0.05   | 0.05±0.04 | 0.05±0.04 | ND<0.04   | ND<0.05   | ND<0.04   | ND<0.05   |
| 2023.08.02.                                                                    | ND<0.04   | ND<0.04   | ND<0.04   | ND<0.04   | 0.08±0.04 | 0.07±0.04 | 0.07±0.04 | 0.06±0.04 |
| On August 24, 2023, the FDNPP began ocean the discharge of ALPS treated water. |           |           |           |           |           |           |           |           |
| 2024.03.05.                                                                    | 0.14±0.05 | 0.09±0.04 | ND<0.04   | ND<0.04   | 0.09±0.04 | 0.13±0.05 | 0.65±0.06 | 0.73±0.06 |
| 2024.07.02.                                                                    | 0.28±0.05 | 0.44±0.05 | 1.16±0.05 | 0.31±0.05 | 0.22±0.05 | 0.08±0.04 | 0.30±0.05 | 0.14±0.05 |
| 2024.11.20.                                                                    | 0.16±0.05 | 0.14±0.04 | 0.13±0.04 | 0.15±0.04 | 0.11±0.04 | 0.25±0.05 | 0.15±0.04 | 0.11±0.04 |
| 2025.03.10.                                                                    | 0.12±0.04 | 0.16±0.05 | 0.17±0.05 | 0.13±0.04 | 0.12±0.04 | 0.11±0.04 | 0.14±0.05 | 0.13±0.04 |
| 2025.07.01.                                                                    | 0.23±0.05 | 0.17±0.05 | 0.68±0.06 | 0.33±0.05 | 0.36±0.05 | 0.69±0.06 | 0.23±0.05 | 0.37±0.05 |
| 2025.11.12.                                                                    | 0.43±0.06 | 0.43±0.06 | 0.24±0.05 | 0.20±0.05 | 0.31±0.06 | 0.26±0.06 | 0.16±0.04 | 0.22±0.05 |
| 2026.04.09.                                                                    | 0.44±0.05 | 0.16±0.04 | 0.51±0.05 | 0.26±0.04 | 0.37±0.05 | 0.22±0.04 | 5.69±0.12 | 1.64±0.07 |

해양방출 중 조사 실시

오염수 해양방출 개시부터 삼중수소는 빈번하게 검출되고 있음

## (참고) 핵발전소근방 해수중 방사성 세슘137 농도 측정결과 (Bq/L)

| Date                                                                           | A surface    | A deep       | B surface    | B deep       | C surface    | C deep       | D surface    | D deep       |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 2022.05.10.                                                                    | 0.003±0.0005 | 0.004±0.0005 | 0.003±0.0005 | 0.003±0.0005 | 0.004±0.0005 | 0.003±0.0005 | 0.006±0.0005 | 0.003±0.0005 |
| 2022.08.24.                                                                    | 0.004±0.0005 | 0.004±0.0005 | 0.003±0.0005 | 0.003±0.0005 | 0.002±0.0005 | 0.002±0.0005 | 0.003±0.0005 | 0.003±0.0005 |
| 2022.11.09.                                                                    | 0.004±0.0005 | 0.004±0.0005 | 0.003±0.0005 | 0.003±0.0005 | 0.002±0.0005 | 0.003±0.0005 | 0.005±0.0005 | 0.003±0.0005 |
| 2023.05.31.                                                                    | 0.003±0.0005 | 0.003±0.0005 | 0.004±0.0005 | 0.005±0.0005 | 0.004±0.0006 | 0.003±0.0005 | 0.004±0.0005 | 0.003±0.0006 |
| 2023.08.02.                                                                    | 0.002±0.0005 | 0.005±0.0006 | 0.003±0.0005 | 0.003±0.0006 | 0.003±0.0005 | 0.003±0.0005 | 0.003±0.0005 | 0.004±0.0006 |
| On August 24, 2023, the FDNPP began ocean the discharge of ALPS treated water. |              |              |              |              |              |              |              |              |
| 2024.03.05.                                                                    | 0.004±0.0005 | 0.005±0.0005 | 0.004±0.0005 | 0.004±0.0005 | 0.003±0.0005 | 0.004±0.0005 | 0.024±0.0008 | 0.020±0.0007 |
| 2024.07.02.                                                                    | 0.003±0.0005 | 0.005±0.0005 | 0.004±0.0005 | 0.006±0.0005 | 0.003±0.0005 | 0.003±0.0004 | 0.003±0.0004 | 0.003±0.0005 |
| 2024.11.20.                                                                    | 0.003±0.0004 | 0.003±0.0005 | 0.002±0.0005 | 0.004±0.0005 | 0.001±0.0005 | 0.004±0.0005 | 0.005±0.0005 | 0.004±0.0005 |
| 2025.03.10.                                                                    | 0.003±0.0009 | 0.004±0.001  | 0.010±0.001  | 0.003±0.0009 | 0.003±0.001  | 0.002±0.0009 | 0.002±0.001  | 0.003±0.001  |
| 2025.07.01.                                                                    | 0.018±0.001  | 0.002±0.001  | 0.010±0.001  | ND<0.002     | 0.004±0.001  | ND<0.002     | ND<0.002     | ND<0.002     |
| 2025.11.12.                                                                    | 0.005±0.001  | 0.002±0.001  | ND<0.002     | 0.003±0.001  | ND<0.002     | ND<0.002     | ND<0.002     | 0.006±0.001  |
| 2026.04.09.                                                                    | ND<0.002     | ND<0.002     | ND<0.002     | ND<0.002     | 0.003±0.001  | ND<0.002     | 0.001±0.001  | 0.004±0.001  |

해양방출 중 조사 실시

오염수 해양방출에 동반한 세슘137 증가는 인정받지 못함

## 2-b. 해산어에 대한 방사선영향조사

발전소 앞바다 방사능 오염지역에 사는 물고기 건강상태 조사



물고기는 낚시로 채집



바로 채혈



랩에서 해부



조직을 얇게 잘라 현미경표본 제작



다양한 조직을 현미경으로 관찰하여 이상 유무를 찾음



## 발전소 앞바다에서 채집한 볼락류에서 **이상 발견.**

미발표라 화질을 낮췄습니다.



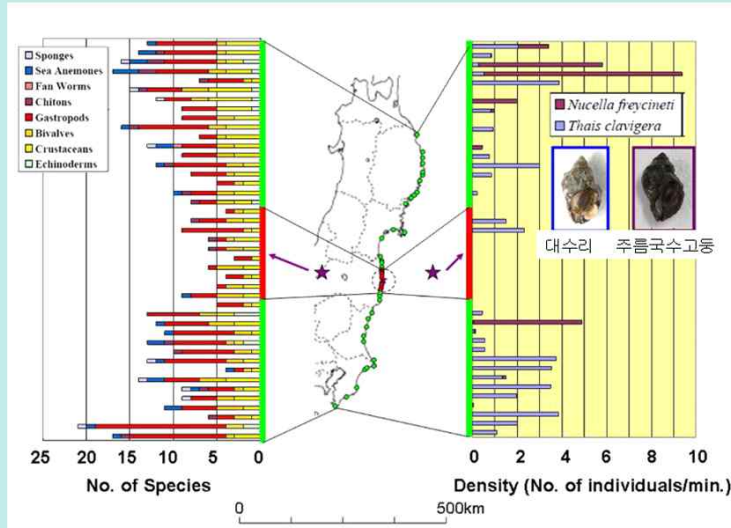
**이소(異所)성 연골 :**

본래 존재하지 않은 연골이 신장과 비장에서 발견됨.

악성, 양성의 종양은 아니지만, 돌연변이에 의한 것으로 생각됨.

100 μm

## 물고기 이외 바다생물 경우 사고 후 해안동물 격감



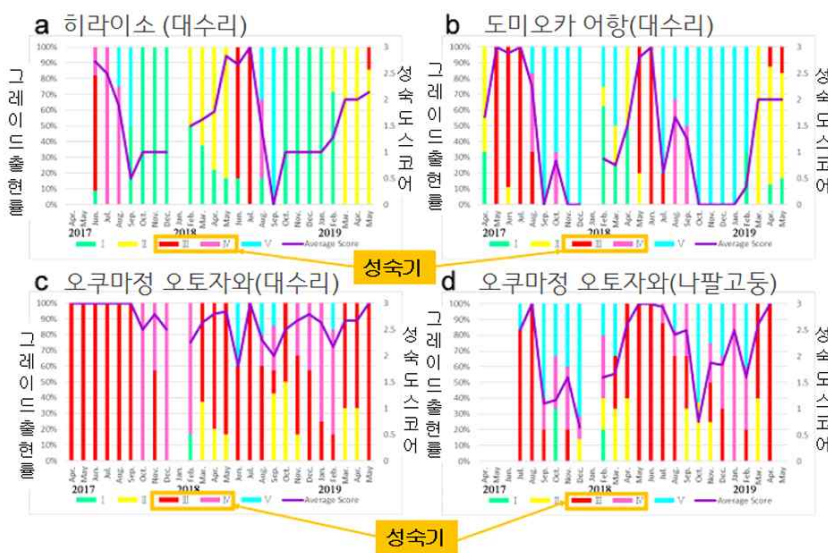
2012년 조사결과.  
후쿠시마발전소 근방에서 생물상(相)의 빈곤화,  
특히 대수리류(고둥)의 감소가 현저.  
쓰나미만으로는 설명이 안되어  
방사선 영향이 의심됨

2016년에는 간신히 회복했다고 들었음.

호리구치 토시히로 씨(국립환경연구소)  
Horiguchi et al. (2016):  
Sci. Rep., DOI: 10.1038/srep20416

## 2016년 이후 부활한 대수리에 나타난 이상

## 2016년 이후 부활한 대수리에 나타난 이상



Horiguchi et al. (2021) Sci. Rep. 11:560  
doi.org/10.1038/s41598-020-80686-3



## 후쿠시마제1핵발전소 남측 약1km 지점의 고동에 연중 성숙 현상

~오쿠마정 오토자와의 대수리가 거의 연속해서 성(性)성숙~



피해가 어느 범위에 미치고 있는가 등  
그 실태는 해명되어 있지 않음



**이런 상황에도 불구하고  
새로운 오염물질 배출이 강행되어 버림**

## 해양조사 정리

오염수에 포함된 삼중수소 노출로 인한  
수생생물에 미치는 영향에 대해서 거의 알고 있지 않음.  
해양방출 이전에, 사고를 일으킨 핵발전소에서 유래한  
오염물질에 의한 생물영향의 일단이 계속 밝혀지고 있음.  
따라서 오염수 방출이 가해진 시점의 복합영향도 고려해야 함.

해양방출 위험성이 증명되었다고는 말하기 어려운데 사실이지만, 안전하다고 할 근거도 없음.

**「증거가 없는 것은, 없는 것의 증거가 아니다」**

티모시 무소 박사에 의한 삼중수소의 생물영향 강연@한국

**해양생물 영향 조사는 앞으로도 계속하겠습니다 !**

### 3. ALPS 처리오염수 저지 소송

2023년 9월 8일, 원고 151명에 의해 ALPS 처리오염수 저지소송이 제기됨



## 청구 취지

피고 국(원자력규제위원회)에 대해, 도쿄전력에 대한 인가를 취소하라  
**피고 도쿄전력은 ALPS처리된 오염수를 해양에 방출해서는 안 된다.**

원고인 어업자는 어업행사권과 어업에 미치는 인격권 침해를 주장  
일반시민들은 생업을 핵으로 하는 생존권,  
오염되지 않은 환경에서 평온하게 생활할 권리를 주장

「관계자 이해 없이, 어떠한 처분도 행하지 않는다」는 약속에 반하고 있음.  
해양환경 오염을 방지하기 위해 온갖 노력을 하지 않으면 안 된다.

그러나 해양방출이 사람에 유해하다는 것을구체적으로 입증하기는 곤란  
상대가 생각지 못한 시점에서 비판해가는 것이 중요

나는 수산동식물에 유해 물질 배출이라는 시점에서 소송에 기여하고 싶음



# 수산동식물에 대해 유해 물질 배출을 규제하는 법령

## 유엔해양법 조약 제194조

해양동식물에 유해한 물질의 유기 또는  
누설 기타 수산동식물에 유해한 수질 오염에 관한 제한 또는 금지  
어떤 나라라도, 모든 발생원에서 해양환경오염을 방지하여,  
경감 및 규제하기 위해, 이용할 수 있는 실행가능한 최선의 수단을 이용하여,..  
이 조약에 적합한 모든 필요 조치를 취할 것이며, 또 이점에 관해 정책을 조화시키도록 노력한다.

## 해양기본법 제18조 해양환경 보전 등

국가는, ..생육환경 보전 및 개선 등에 의한 해양생물의 다양성 확보,  
해양에 유입되는 물에 의한 오염 부하 저감, 해양에 폐기물 배출 방지,  
..그밖의 해양환경 보전을 꾀하기 위해 필요한 조치를 강구하기로 한다.

## 수산자원보호법 제4조

「수산동식물에 유해 물질 유기 또는 누설 기타 수산동식물에  
유해한 수질 오염에 관한 제한 또는 금지」가 규정되어, **벌칙(징역형)도 있음**.  
유해물질 흘려보내기 현상항에 방사능오염을 더 가하는 것이므로 범죄성은 명확.



바다에 사는 모든 생명에 마음을 담아 — 서마리아나 석양



경청에 감사드립니다. 한국 여러분과 연대를 기대합니다.

**발 제**

**후쿠시마 앞바다의 생태계 훼손과  
그 의미 모색**

**백도명**  
**서울대학교 명예교수**

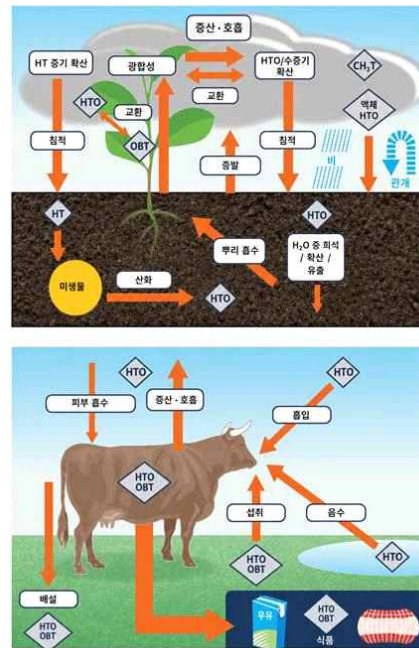
# 후쿠시마 삼중수소 아직은 농도가 높아지지 않았는가? 그렇다면 위험성도 없는가?

백도명  
책임과학자연대  
서울대학교 명예교수

## 환경 중 삼중수소

- 발생원 및 환경매체에서의 삼중수소
  - 삼중수소수(HTO) – 주변 해수·호수의 삼중수소수
  - 삼중수소화 화학물질 – 퇴적물에 침전
- 생물체 내 삼중수소
  - 조직 자유수 삼중수소(TFWT)
  - 유기결합형 삼중수소(OBT) – 교환성(E) + 비교환성(NE)
    - E: 산소·황·질소에 결합한 수소 / NE: 탄소에 결합한 수소
  - TFWT/HTO – 이동
  - OBT/TFWT – 대사 + 먹이사슬

농업 환경에서의  
삼중수소 이동 경로  
모식도  
출처: IRSN, 2010



## 삼중수소와 생물증폭 (Arjun Makhijani, 2022)

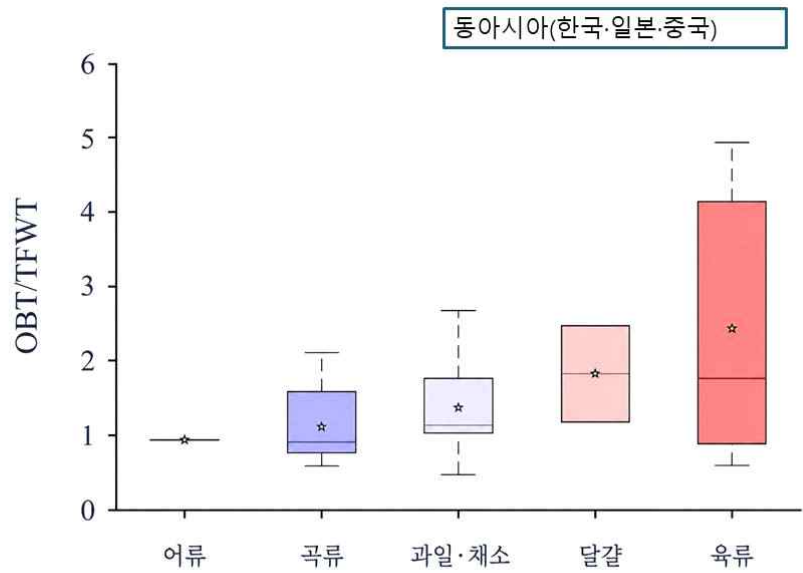
- 식물플랑크톤은 삼중수소를 생물농축한다. 두 종류의 식물플랑크톤을 삼중수소에 노출한 뒤 홍합의 먹이로 공급한 결과, 두 식물플랑크톤 모두 조직 내 HTO를 OBT로 전환했으나 그 정도에는 차이가 있었다. 또한 이 식물플랑크톤을 홍합에 먹인 결과, 홍합 내 삼중수소 농도는 섭취량에 비례해 선형적으로 증가했다.<sup>1</sup>
- Kim, Baglan, Davis는 식물과 과일의 OBT 농도가 삼중수소에 대한 총("시간 적분") 노출을 반영한다고 지적한다.<sup>4,5</sup> 즉 식물은 삼중수소를 계속 흡수하면서 조직 내 삼중수소가 축적된다. 비평형 상태를 초래하는 우발적 방출은 상당한 생물축적을 일으킬 수 있다. 웨일스에서는 바이오의약품의 우발적 방출로 이러한 사례가 발생했으며, 당시 "홍합과 저서성 어류의 OBT 농도는 물의 HTO 농도보다 1,000배 높았다"고 보고되었다.<sup>2</sup>

A Makhijani. Exploring Tritium Dangers: Health and Ecosystem Risks of Internally Incorporated Radionuclides. 2022. ISBN: 978-1-62429-447-1

## 식품별 OBT/TFWT 농도비

Feng, B., Zhuo, WH. Levels and behavior of environmental tritium in East Asia. *NUCL SCI TECH* 33, 86 (2022).  
<https://doi.org/10.1007/s41365-022-01073-3>

전체 OBT/TFWT 비 중  
66%가 1보다 큼



## TFWT와 OBT(교환성 E / 비교환성 NE)

### HTO에서 TFWT로

- TFWT/HTO

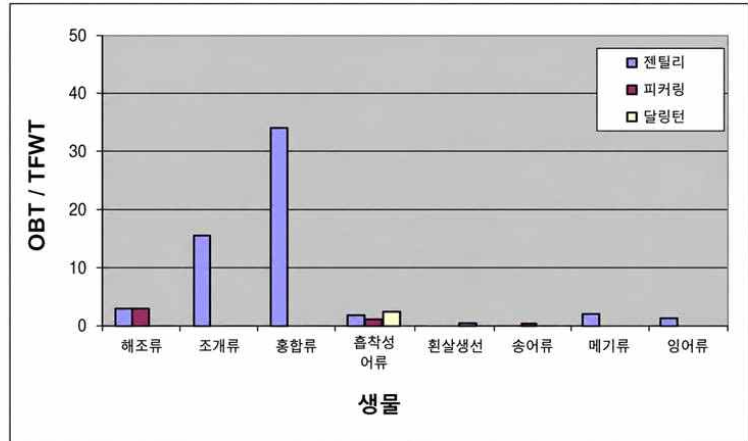
### HTO/TFWT에서 OBT로

- 발생원
  - 삼중수소수
  - 삼중수소화 화학물질
- 퇴적물·유동
- 먹이사슬

젠틸리-2(Gentilly-2)  
원자력발전소에서  
채집한 수생생물의  
TFWT 및 OBT  
생물농축계수. 물의  
HTO 농도와 생물체 내  
TFWT·OBT 방사능  
농도를 기준으로  
각각의 농축계수를  
산정함.

S.B. Kim, M. Bredlaw, H. Rousselle, M. Stuart, Distribution of organically bound tritium (OBT) activity concentrations in aquatic biota from eastern Canada, Journal of Environmental Radioactivity, Volumes 208-209, 2019,

캐나다



## 연구 논문 | Original Research Article

Frontiers in Marine Science | 2024년 10월 17일

섹션 | 해양 오염

Volume 11 - 2024 | <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1398933>

# 중국 저장성 수산물의 OBT/TFWT 데이터셋 구축



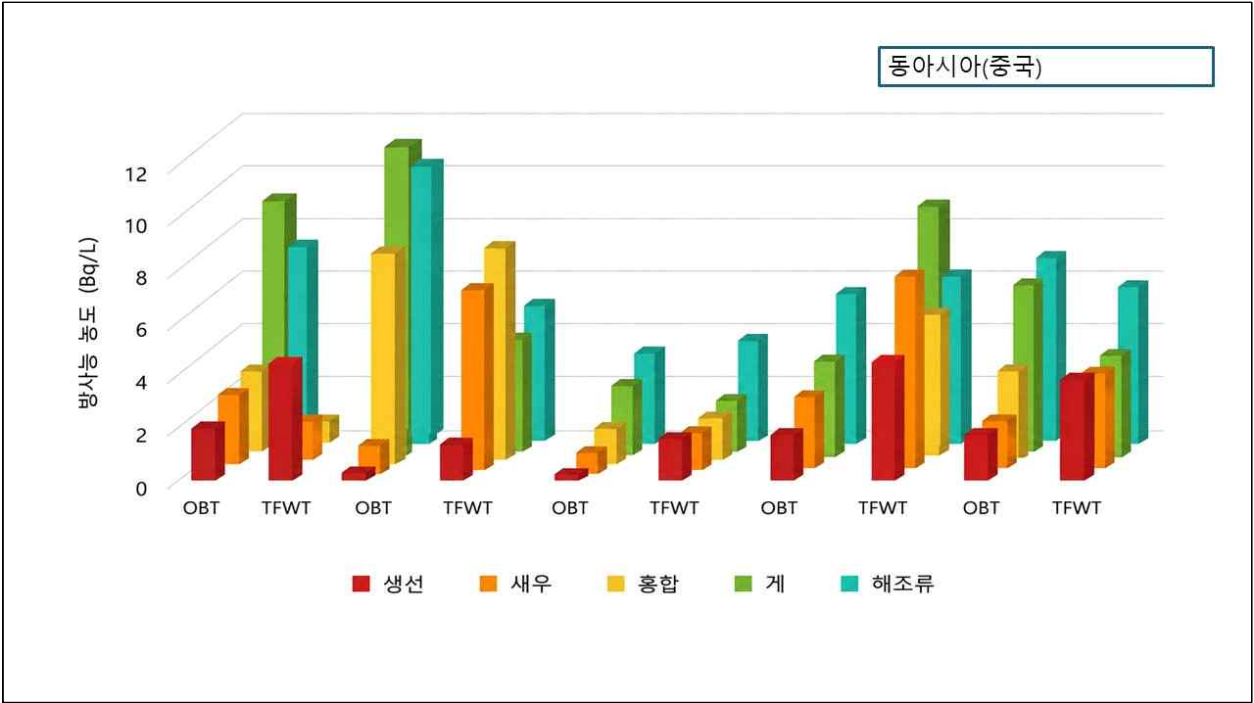
Xinyu Gong <sup>1,2†</sup>



Wengzhe Huang <sup>3†</sup>



Yiyao Cao <sup>1†</sup>



국립환경연구원소 뉴스 Vol.39 No.5

특집 : 방사능오염의 해양적 흐름과 평가에의 구축을 목표로

【연구 노트】

지진·원전 사고 이후 후쿠시마현 연안의 어패류 군집 변화

코다마 케이타

**발제자명·지진·원전 사고 이후 후쿠시마현 연안의 어패류 군집 변화**

**주요내용 요약-**

후쿠시마에 발생한 지진과 원전 사고로 인해 후쿠시마현 연안에서 어패류 군집이 크게 변화했다. 지진 발생 후 10년이 지난 후에도 어패류 군집은 여전히 변화하고 있다. 지진 발생 후 10년이 지난 후에도 어패류 군집은 여전히 변화하고 있다. 지진 발생 후 10년이 지난 후에도 어패류 군집은 여전히 변화하고 있다.

지진 발생 후 10년이 지난 후에도 어패류 군집은 여전히 변화하고 있다. 지진 발생 후 10년이 지난 후에도 어패류 군집은 여전히 변화하고 있다. 지진 발생 후 10년이 지난 후에도 어패류 군집은 여전히 변화하고 있다.

지진 발생 후 10년이 지난 후에도 어패류 군집은 여전히 변화하고 있다. 지진 발생 후 10년이 지난 후에도 어패류 군집은 여전히 변화하고 있다. 지진 발생 후 10년이 지난 후에도 어패류 군집은 여전히 변화하고 있다.

동아시아(일본), 후쿠시마

현재 이 이미지를 표시할 수 없습니다.

그림 1 후쿠시마 제1원자력발전소

일본 '국립환경연구소뉴스', 2021년 2월

일본 환경성 국립환경연구소 코다마 케이타 주간연구원

'지진 재해·원전 사고 후 후쿠시마현 연안의 어패류 군집 변화' 보고서

보고서에 따르면 원전 사고 이후  
어업활동이 극히 위축된 상태임에도  
어패류는 줄었다. 특히 갑각류와 성게,  
불가사리 등의 극피류가 많이  
감소했다. 코다마 연구원은 “어획  
압력이 낮음에도 어패류가 증가하지  
않은 것은 어업 이외에 어패류 증가를  
방해하는 요인이 존재함을  
시사한다”고 설명했다.

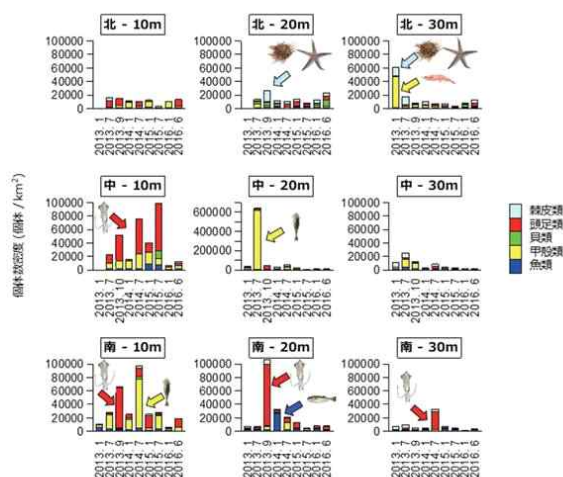


図4 定点・調査回別の巨体数密度の時系列変化



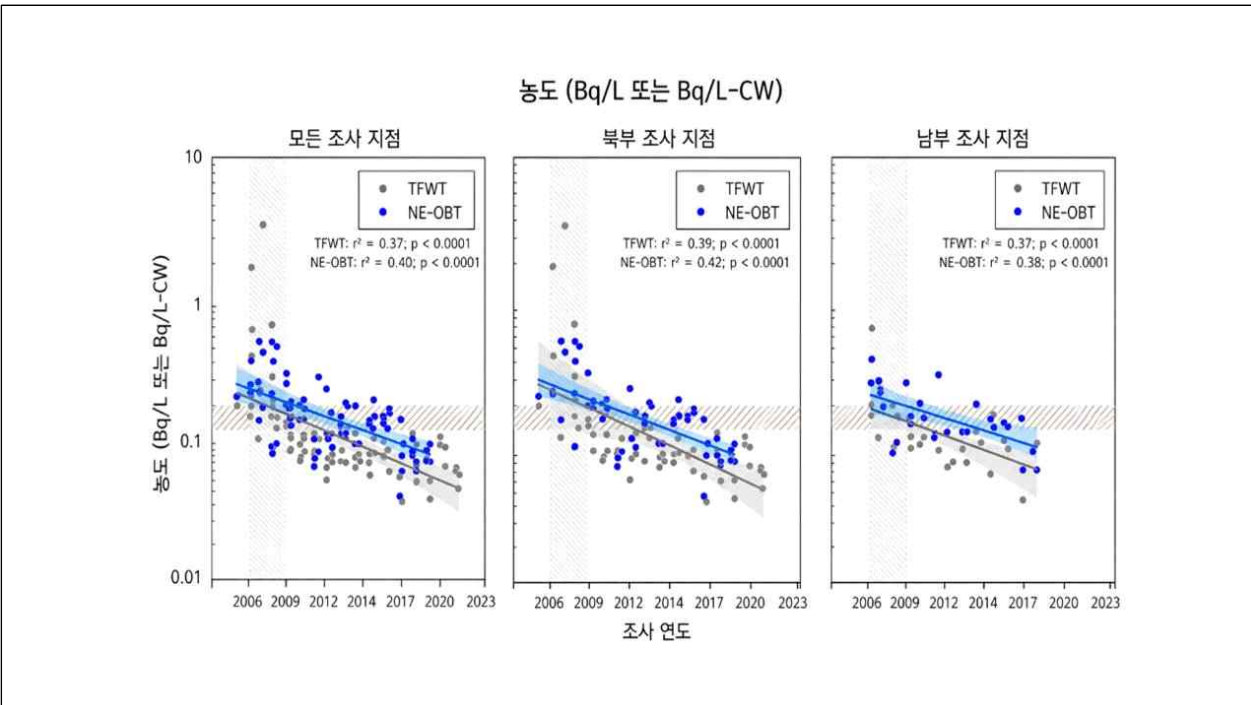
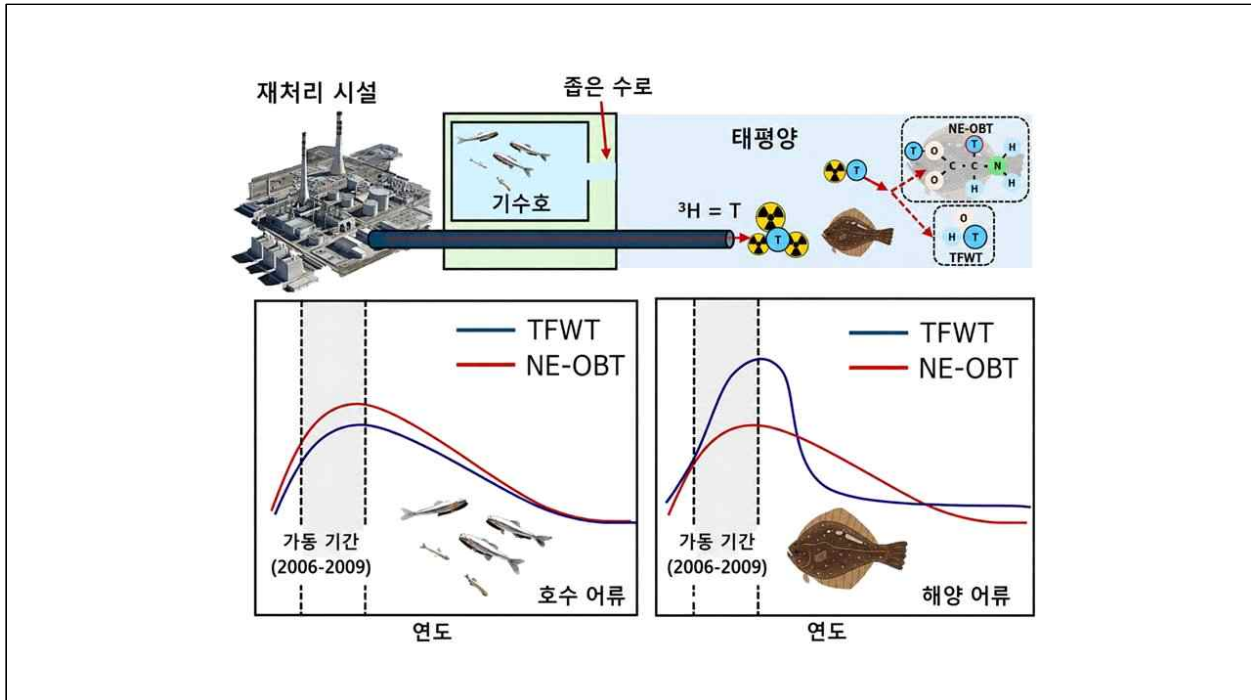
## 총환경과학

제947권, 2024년 10월 15일, 174404



# 일본 제1원전 연료 재처리 시설의 가동 전후 연안 어류의 조직 비함유수소 삼중수소와 유기결합 삼중수소 농도: 후쿠시마 해안 근처 어류에서의 분석 결과

Naofumi Akata <sup>a, b, 1</sup> ✉, Donovan Anderson <sup>b, 1</sup>, Hideki Kakiuchi <sup>a, 1</sup>,  
Ryohei Yamada <sup>b</sup>, Hidenao Hasegawa <sup>a</sup>, Shinji Ueda <sup>a</sup>



# 롯데재처리공장 연구

## 주요 결과

- 해양:
  - HTO
  - TFWT 3.59 Bq/L, NE-OBT 0.56 Bq/L (최대)
  - 반감기(T1/2): TFWT 3.4년, NE-OBT 6.85년
- 호수:
  - TFWT 0.78 Bq/L, NE-OBT 1.2 Bq/L
  - 반감기(T1/2): 둘 다 1년

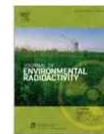
## 해석 및 시사점

- NE-OBT가 TFWT보다 높음
- 해양과 호수의 차이는 HTO 농도만으로 설명되지 않음
- 3년 이내 평형 도달의 근거가 없음
- 환경에서 소실되는 데 장기간이 걸림
- 생태학적 요인을 고려하지 않음



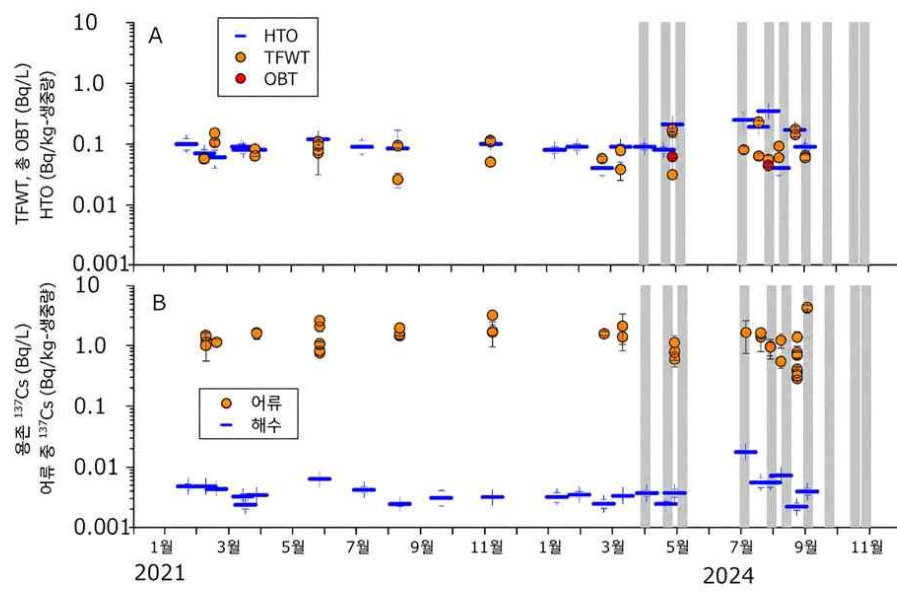
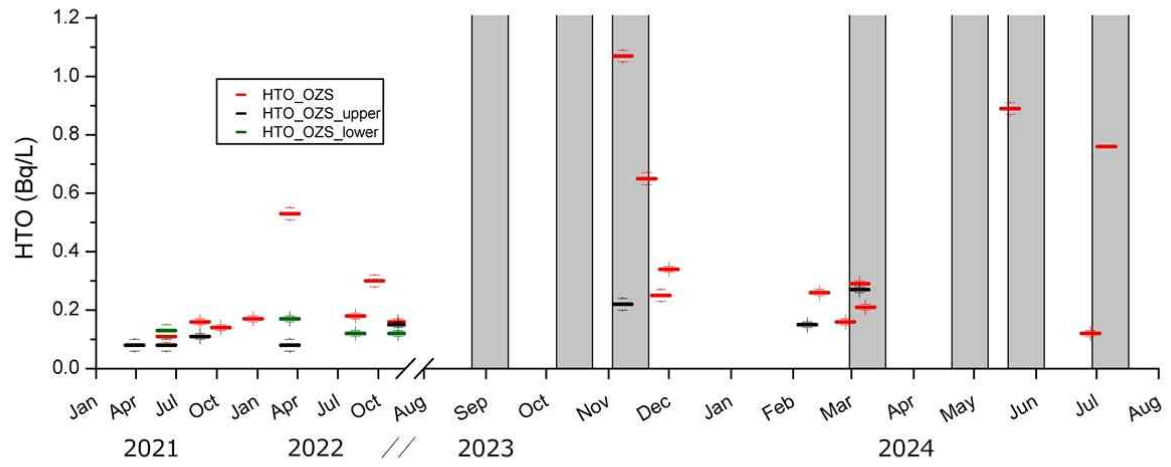
환경방사능 저널

제289권, 2025년 10월, 107760



## 2021년부터 2024년까지 후쿠시마 제1원전 주변의 해양 어류와 그 서식 해수에서의 삼중수소와 $^{137}\text{Cs}$ 농도

Hyoe Takata<sup>a</sup>, , Toshihiro Wada<sup>a</sup>, Hikaru Miura<sup>b</sup>, Yoshifumi Wakiyama<sup>a</sup>, Takuya Niida<sup>c,d</sup>, Keiri Imai<sup>e</sup>, Atsushi Ooki<sup>e</sup>



고급 액체 처리 시스템을 통해 처리된 물의 방출 사례. 세슘의 경우 서식수이다. 삼중수소의 경우, CR은 조직-자유-수 삼중수소(TFWT)와 OBT의 합계이다

| 삼중수소      |       |            |      | 삼중수소의 CR |
|-----------|-------|------------|------|----------|
| TFWT      | 총 OBT | TFWT + OBT | 서식수  |          |
| Bq/kg-생중량 |       |            | Bq/L |          |
| 0.17      | 0.061 | 0.23       | 0.23 | 1.0      |
| 0.056     | 0.045 | 0.10       | 0.35 | 0.3      |

## 후쿠시마 원전 오염수 방류

### 주요 결과

- HTO 최대 1 Bq/L
- TFWT  $\approx$  HTO
- OBT + TFWT < HTO

### 해석 및 시사점

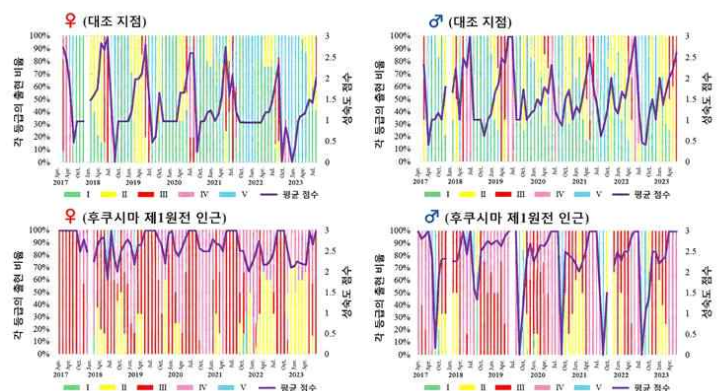
- 검출한계를 초과한 측정치는 2건뿐
- OBT < TFWT
- 아직 초기 단계
  - 관측은 1~2년에 불과함 → 방류는 30년 이상
- 먹이사슬 내 영양단계를 고려하지 않음

- 왜 그런가? 문제는 무엇인가? 다음에는 무엇을 해야 하는가?
- 모델과 시나리오에 따라 결론이 달라짐
- OBT 형성이 차단·교란된 것인가, 아니면 OBT가 형성되지 않은 것인가?

#### 대수리, 후쿠시마, 2017~

그림 2. 히라이소와 오토자와 대수리 (고둥)의 발달 단계 및 평균 성숙도 점수(2017년 4월~2023년 6월)  
 (a) 히라이소 암컷(후쿠시마 제1원전 남쪽 약 120 km) (b) 히라이소 수컷(약 120 km 남쪽) (c) 오토자와 암컷(약 1 km 남쪽) (d) 오토자와 수컷(약 1 km 남쪽). 색 세로막대: 발달 단계(출현율, 왼쪽 축); 보라색 선: 성숙도 점수(오른쪽 축)

**Continuing reproductive abnormalities observed in a rock-shell population near the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Japan** T. Horiguchi, K. Kodama, H. Kintsu, K. Kawamura and Y. Ohta  
 Environmental Monitoring and Contaminants Research 2025 Vol. 5  
 Pages 157-169 DOI: 10.5985/emcr.20250011



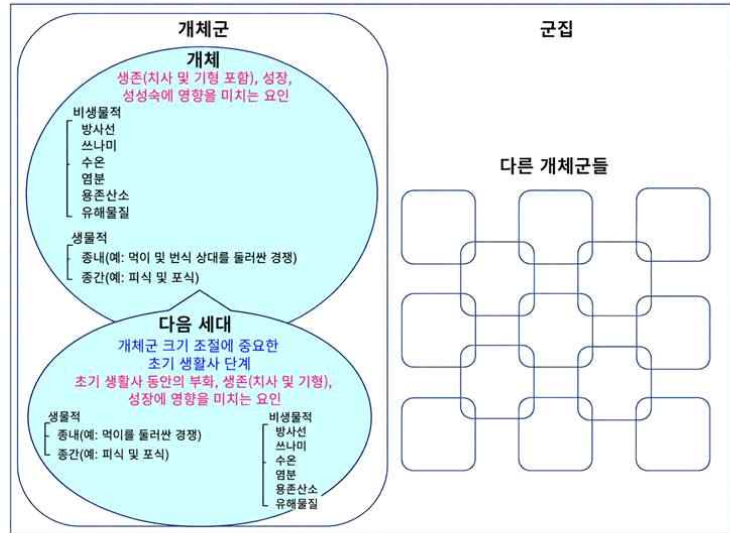
- 2012년 도호쿠 지진·쓰나미와 그에 따른 후쿠시마 제1원자력발전소(FDNPP) 사고 이후 대수리(고둥)(*Reishia clavigera*; 복족류)가 관찰되지 않았다는 사실이 원전 인근 히로노에서 후타바 해변까지 약 30 km 구간에서 확인되었다. 그러나 2016년 7월 이 지역에서 대수리가 다시 관찰되었다. 2017년 4월부터 2023년 6월까지 연구진은 ... 생식주기와 성적 성숙을 조직학적으로 평가하기 위해 생식수를 조사했다. FDNPP 남쪽 약 1 km의 오토자와에서 채집한 개체는 채집 기간 내내 생식 이상인 연속적 성적 성숙(CSM)을 보였다. 반면 히라이소 개체는 여름에만 성적으로 성숙했다. 오토자와 개체에서 관찰된 CSM은 FDNPP 인근의 환경요인에 의해 유발된 지역 특이적 표현형일 가능성이 있다. 실제로 CSM은 FDNPP 남쪽 3 km 이내 지점에서만 관찰되었으며, 오토자와 개체의 이보다 훨씬 남쪽 3 km의 쿠이리노 개체보다 더 흔했다. 이는 FDNPP에서 유래한 미생물 요인이 해당 지역의 대수리 생리를 변화시켜 CSM을 비가역적 증후군으로 유발했을 가능성을 시사한다.

## 일본 NIES 10년간 모니터링

- 2012-2024년 NIES 어업 활동과 독립적으로 수행한 트롤 조사 시계열
- NIES 프로젝트 요약자료
- 2024년 학술대회 발표 목록
- 2024년 학술대회 발표 제목: 「동일본대지진 이후 일본 후쿠시마현 연안 대형저서생물 군집의 10년 모니터링」
- 2024 회계연도 NIES 종합보고
- NIES 연차보고서 2025

그림 1. 개체군 내 각 개체와 후속 세대의 생존(치사·기형 포함), 성장, 성적 성숙에 영향을 미치는 생물적·비생물적 요인

Horiguchi, T., Kodama, K. What Caused Declines in Intertidal Invertebrate Populations around Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant after the 2011 Great East Japan Earthquake, Tsunami, and Nuclear Disaster? *Toxics*. 2022; 10(5):214. <https://doi.org/10.3390/toxics10050214>



- 많은 저층성 어류와 저서성 무척추동물은 예를 들어 가자미류, 쥐노래미류, 게류, 새우류, 성게류, 불가사리류 등이 지난 10년 동안 감소했으며, 전반적인 회복을 보이지 않았다.
- 반면 일부 분류군은 증가했고, 특히 판새류(상어·가오리), 복어류, 갑오징어류에서 증가 경향이 나타났으며, 이는 생태계 전체의 단순 붕괴라기보다 먹이망 구조 재편을 시사한다.
- 이 변화는 어획 압력이 크게 감소한 상황에서도 나타났으므로, 어업만으로는 충분히 설명하기 어렵다.
- NIES는 현재 수온 상승, 먹이생물 감소, 번식·모집(recruitment) 실패를 주요 후보 기작으로 보고 있으나, 원인은 아직 규명되지 않았다.
- 개체수, 체급 구성, 먹이생물 군집이 변했기 때문에, 하나의 고정된 먹이망 모델이 2012–2024년 전체 기간을 동일하게 잘 설명하기는 어렵다.

## 삼중수소와 생식 (Arjun Makhijani, 2022)

- 삼중수소는 태반을 쉽게 통과한다. 산모가 임신 전 또는 임신 후에 삼중수소를 섭취했는지와 관계없이, 태아의 삼중수소 농도/산모의 농도 비는 1보다 크며 약 1.6배이다.
- 모든 다세포 생물의 에너지 시스템의 핵심은 세포질에 위치한 미토콘드리아이다. 삼중수소는 세포질의 물을 이온화하여 미토콘드리아 DNA를 심각하게 교란할 수 있는 과정을 촉발하고, 결과적으로 음식물을 신체 모든 기능에 사용되는 ATP 형태의 에너지로 전환하는 시스템에 영향을 줄 수 있다.
- 삼중수소는 난자가 태내에서 형성되는 시기와 임신 중 난자가 성숙하는 시기에 영향을 줌으로써 미래 세대에 영향을 미칠 수 있다. 또한 정자와 정모세포에 편입되는 경로를 통해서도 영향을 줄 수 있다.

- 정확한 평가를 위해서는 상대생물학적효과(RBE) 계수를 평가 대상인 생물학적 손상의 유형에 맞게 설정해야 한다. 그러나 규제 실무에서는 거의 그렇게 하지 않으며, 과학 문헌에서도 대체로 마찬가지다. 이는 주로 평가 대상 위험을 명시적 또는 암묵적으로 암 위험으로 전제하기 때문이다. ... 그러나 세포 사멸만이 유의미한 평가 종말점(endpoint)은 아니다.
- ... 실험자료에 따르면 자매염색분체 교환 빈도 증가에 대한 상대생물학적효과 계수는 수천 수준으로, 외부 방사선의 경우보다 적어도 100배 이상 높다. 이는 손상 역치가 10 mrem(0.1 mSv) 미만일 수 있음을 시사한다.

## 상대생물학적효과(RBE)

- 유기결합형 삼중수소의 중요성을 보여주는 구체적 사례가 삼중수소화 타이미딘(tritiated thymidine)이다. 이는 DNA에 편입될 수 있는 유기화합물이다. 실험에 따르면 삼중수소화 타이미딘은 삼중수소 농도를 기준으로 할 때, 배반포 단계까지의 배아에 손상을 유발하는 효율이 HTO[삼중수소수]보다 "1,000배 이상" 높았다.<sup>3</sup>

- Kadhim 등의 실험은 비클론성 유전적 이상처럼 내부피폭에 특이적인 영향이 존재할 수 있음을 보여준다. 이러한 이상은 외부 방사선을 조사했을 때는 관찰되지 않았다.<sup>4</sup>
- 이러한 현상은 일부 평가 종말점에서 내부피폭과 외부피폭 사이에 질적 차이가 있음을 시사한다. 이러한 종말점에는 상대생물학적효과(RBE)라는 개념을 적용할 수 없다. 내부 방사선은 외부 방사선에서는 나타나지 않을 수 있는 일부 유전적 영향을 유발하는 것으로 보인다.

## 생물증폭 평가를 위한 적절한 연구 설계

- 먹이사슬 경로
  - HTO → 식물플랑크톤 → 동물플랑크톤 → 소형 먹이 어류 → 포식자
- 저서 경로
  - HTO → 유기쇄설물(detritus) 내 OBT → 퇴적물/생물막 → 다모류/갑각류 → 가자미/볼락류
- 시간 설계
  - 배경농도, 방류 사건, 생물학적 반응 주기
- 공간 설계
  - 거리와 수심
- 분석 품질보증
  - Bq/kg(습중량), Bq/L(연소수)
- 동시 시료 채취
  - 생물체 + 동일 장소·수심·날짜의 물 시료 + 먹이/환경 시료

1. Benedict C. Jaeschke and Clare Bradshaw, Bioaccumulation of tritiated water in phytoplankton and trophic transfer of organically bound tritium to the blue mussel, *Mytilus edulis*, Journal of Environmental Radioactivity, 2013.
2. S. B. Kim, N. Baglan, and P. A. Davis, Current understanding of organically bound tritium (OBT) in the environment, Chalk River Laboratories, Canada, 2013.
3. International Commission on Radiological Protection. Biological Effects after Prenatal Irradiation (Embryo and Fetus). ICRP Publication 90. page 14, Annals of the ICRP, 33(1-2) 2003.
4. M. A. Kadhim, D. A. Macdonald, D. T. Goodhead, S. A. Lorimore, S. J. Marsden & E. G. Wright, "Transmission of chromosomal instability after plutonium  $\alpha$ -particle irradiation," Nature, Vol. 355, 20 February 1992.

## 토 론 1

### 후쿠시마원전사고의 폐로는 가능한 가?

일본 마쓰야마(松山)대학 명예교수 장정욱

#### A. 현황

후쿠시마제일원전(F1)의 사고수습은 일본정부와 도쿄전력 등의 원자력 추진파들의 희망과는 달리, 건물내부의 높은 방사능 때문에 1~4 호기의 데브리(Debris)의 위치·성분·무게 및 원자로 하부의 피해상황조차 이렇다 할 성과가 없는 상태가 이어지고 있다. 한편, 2023년 8월부터 발전소 부지내의 방사성 오염수의 저장탱크의 저감을 목적으로, 방사성 농도를 일부 낮춘 핵종들과 제거 불가능한 삼중수소(H3) 및 탄소(C14)를 해수로 희석한 상태로 약 1km밖의 수심 약 12m의 배수구에서 방출하고 있다. 8월 현재 24회의 해양방출(매회당, 약 7,800m<sup>3</sup>)을 실시했다. 핵연료에 접촉한 방사성 오염수를 의도적으로 대량 방출하는 행위가 해양 생태계 파괴 및 먹이사슬을 통한 건강피해 가능성을 있는 만큼, 주변지역 주민은 물론 주변국가들도 방출저지를 심각하게 대응하고 있는 실정이다.

#### B. 오염수의 생성과 폐로계획

방사성 오염수의 처분방법으로서 육지의 거대 저장탱크의 이용이 안정성과 경제성에서도 효율적이었지만, 일본정부와 관련지자체는 단기적이고 외형적인 해결만을 내세워, 지역주민(어업조합)과의 동의하에 방출이라는 약정조차 무시한 채 일방적인 해양방출을 강행하고 있는 상태이다. 2026년 8월 현재, 24회의 방출효과로서 부지내의 저장량이 약 7% 저감되었다고는 하지만, 데브리의 완전 추출 또는 원자로건물 주변에 지하의 철근콘크리트벽을 건설하여 지하수의 유입을 완전 차단하지 않는 한, 방사성 오염수의 생성에 따른 해양방출도 피할 수가 없다.

예를 들면, 약 800톤로 추측하는 1~4 호기의 데브리 추출에 대비하여 막대한 비용을 투입한 조사에서 겨우 0.7g과 0.2g의 채집 결과를 보였다. 또한 데브리의 본격적인 추출방식도 미확정의 상태로 지지부진한 상황이다(冠水工法 or 船殻工法). 차후 사용후 핵연료·데브리의 제거 및 발전소 내부의 안전성 확보만을 우선하여도, 일본정부와 도쿄전력이 사고 직후에 수립한 최장 2051년(약 25년의 여유)까

지의 폐로계획은 실현가능성을 전혀 기대할 수 없는 실정에도 불구하고 유지되고 있다. 현행법에 사고 원전의 폐로기준이 없는 점을 악용하여, 데브리를 부분적으로 남긴 상태에서 폐로완결을 주장할 가능성조차 부인할 수 없는 상황이다.

### C. PWR과 BWR의 차이-삼중수소 발생량

스즈끼(명예)교수의 발표 슬라이드 7은, 가압수형 원자로(PWR)과 비등수형 원자로(BWR)에서 나오는 삼중수소의 발생량에서, 후자가 절대적으로 적다는 지적이 있다. 이는 원자로의 시스템의 상이(相異)에서 생기는 것으로, 전자가 통상의 출력조정에 붕소(B10)를 주입하는 탓으로 원자로내에서 중성자 흡수로 삼중수소(H3)가 대량 생성된다.

그러나, 후자는 출력조정에 재순환기의 주수량의 조절을 이용하는 만큼, 삼체핵분열 및 냉각수 속의 중수소(0.0115%)가 중성자를 흡수하여 삼중수소가 발생한다, 후쿠시마의 사고원전의 경우, 핵분열의 약 0.2% 발생하는 삼체핵분열에 의한 삼중수소가 대부분을 차지한다. 그런데 이 과정의 삼중수소는 PWR에서도 발생하며, 게다가 PWR에서는 붕소의 산성화로 전열세관이 부식되는 위험성을 방지하기 위해 수산화리튬을 주입한다, 이 리튬은 리튬은 Li7(92%)+Li6(8%)인데 후자의 Li6가 중성자를 흡수하여 삼중수소(H3)가 생성된다.

덧붙이면, 토타이 재처리공장(2007년 폐지), 그리고 룩카쇼 재처리공장의 가동시에는 천문학적인 삼중수소가 배출된다. 삼중수소의 해양방출에 관한 관리목표치는 연간 1경 8000조Bq에서 2018년에 9700조Bq로 변경되었다. 재처리공장의 완공연기에 따른 사용후핵연료 속의 삼중수소 괴변(반감기)을 고려한 저감조치이지만, 후쿠시마제일원전의 연간 최대배출량인 22조Bq의 약 400배이상이다. 한편, 토타이 재처리공장의 가동시에 배출된 삼중수소량의 배출량은 알려지고 있지 않지만, 25년간의 가동기간 동안 사용후핵연료를 약 1,140톤 처리한 실적을 기준으로, 연간 800톤 처리를 가정한 룩카쇼재처리공장의 1경 8000조Bq에서 배출량을 추측할 수는 있을 것이다, 또한 재처리공장의 경우, 강한 방사능의 클립톤(Kr85)과 탄소(C14)로 대량 배출된다.

### D. 저선량의 내부피폭은 안전한 가?

삼중수소는 통상운전의 온배수에서도 나오며(총 7핵종), 삼중수소가 붕괴로 헬륨(He3)이 될 때의 베타(β)선의 평균에너지는 5700eV (전자볼트)로 다른 방사성 핵종에 비해서 상대적으로 약하며, 또 물속(즉 체내)의 '飛거리(飛程)'도 10μm(머리카락이 보통 50~100μm)로 짧다. 하지만 삼중수소수의 생물학적 반감기(10일)과는

달리 유기결합형 삼중수소(OBT2)는 200~500일로서, 체내에 흡인되면 즉 '10 $\mu$ m의 좁은 범위가 집중적인 피폭'을 받으므로 낮은 에너지라도 강력한 영향을 미치게 된다.

즉, 인체의 세포분자의 결합에너지(화학결합)가 수 eV인 만큼, 약 1,000배의 강력한 에너지로 세포를 쉽게 절단하게 된다. 세포내의 유기체는 거의 이온결합 및 공유결합에 의해 결합되어 있다. 이온결합의 에너지는 3eV, 공유결합의 에너지는 7eV이다. 예를 들면, 확률적 영향이 발생하는 DNA 손상의 경우, 직경 수 $\mu$ m인 세포핵 속에 삼중수소가 들어 와 있을 때이다. 세포크기가 약 6~25 $\mu$ m이므로, 삼중수소의 비거리는 거의 세포 하나 속에 들어간다. 즉 국소적으로 집중적인 피폭이 발생 베타붕괴로, 결합에 기여하던 삼중수소가 헬륨3으로 되면서 결합이 끊어지는 결과가 된다. 따라서 삼중수소의 인체 영향이 여전히 불명확한 점이 많은 만큼, 100mSv 안전신화는 주장되어서는 안 된다. ICRP조차 “현 과학수준으로 안전하다는 명백한 근거가 없다고 했을 뿐이다.

또한 ICRP는 동일선량이면 외부피폭과 내부피폭의 영향은 같다는 궤변을 펼치고 있다. 내부피폭의 실효선량은 받은 방사선 물질의 양(Bq)에 실효선량계수를 곱하여 구한다. 실효선량계수(mSv/Bq)는 방사선원소와 방사선의 종류, 피폭자의 연령, 장기 등을 포함한 방사선물질의 섭취형태, 체내의 거동에 근거하여 추정된 수치이다. ICRP는 체내의 각 조직에 관해서 등가선량을 구하여, 이것을 몸 전체 또는 장기전체의 피폭으로 나누어 영향을 왜소화하고 있다. 게다가, 모델에서 평균하여 추정하므로 신뢰성에 의문이 붙는다. 알파선 및 베타선은 비거리가 짧아 국소적인 피폭을 가져 오는데도, 몸 조직의 평균으로 구한 Sv는 피해의 영향을 현저하게 과소평가한 것이 된다.

## E. 기타의 질문

1. 후쿠시마제일의 해안에서 반경 20km밖의 해양에서 채집조사인가?  
→슬라이드 34의 주변지역의 イボニシ類의 조사가 가능했는가?
2. 고시농도비의 결정-핵종의 선택과 제외의 조건에 대해서
  - (1)측정·평가대상 핵종과 측정·평가대상[외] 핵종의 차이는 무엇인가?
  - (2)특히 세슘137의 기여도가 요오드129의 다음으로 알고 있는데, 증가경향이 보이지 않는 이유는 Kurion, Surry 등의 제거효율가 좋은 탓 인가?  
→유입되는 지하수맥이 변화로 인한, 미확인의 해저 배출구의 존재여부?
3. 슬라이드22의 고시농도한도에서, "매일 2리터"는 단일 핵종의 사례로서, 다수의 핵종의 음용을 고려하면 부적절한 문구가 되지 않는 가?

## 토 론 2

### 후쿠시마 오염수, 생태계에 미치는 영향이 중요하다 바닷물만 측정해서는 생태계의 안전을 알 수 없다 － 수즈키·백도명 교수 발제 의미

이정운 대표  
원자력안전과미래

후쿠시마 원전 오염수 방류를 둘러싼 논의는 지금까지 주로 “방류 기준을 지켰는가”, “해수 중 삼중수소 농도가 기준치보다 낮은가”에 집중돼 왔다. 일본 정부와 도쿄전력은 ALPS 처리와 해수 희석을 거쳐 기준치 이하로 방류하고 있다고 설명하고, 국제원자력기구(IAEA)는 방류계획과 설비 운영이 국제안전기준에 부합하는지를 검증하고 있다.

이러한 확인은 필요하다. 그러나 그것만으로 바다와 생태계의 장기적 안전까지 확인됐다고 말할 수는 없다. 수즈키 교수와 백도명 교수의 발제는 바로 이 지점에서 같이 서로 다른 방향에서 보여준다. 수즈키 교수는 후쿠시마 사고 이후 생태계에서 무엇이 관찰되고 있는지를 제시했고, 백도명 교수는 현재의 오염수 평가와 감시체계가 그러한 생태계 변화를 충분히 포착할 수 있는지를 묻고 있다.

두 발제문을 관통하는 핵심 질문은 분명하다.  
해수에서 측정한 낮은 방사성물질 농도가 곧 생태계에 아무런 영향이 없다는 것을 의미하는가.

후쿠시마의 영향은 사고 직후로 끝나지 않았다  
수즈키 교수의 발제가 갖는 가장 중요한 의미는 후쿠시마 사고의 생태계 영향을 사고 직후의 일시적 고농도 오염으로만 보아서는 안 된다는 점이다. 방사성물질은 토양과 하천, 산림과 연안으로 이동하고, 그 과정에서 생물종과 서식환경에 따라 서로 다른 영향을 나타낼 수 있다.

수즈키 교수는 후쿠시마 제1원전 앞바다에서 채집한 불락류의 신장과 비장에서 비정상적인 ‘이소성 연골’이 발견됐고, 원전 인근 연안에서는 생물종 감소와 대수리류의 장기간 소멸, 이후 거의 연중 성숙하는 이상 현상이 관찰됐다고 소개했다. 아직 방사선과의 인과관계가 확정된 것은 아니지만, 사고 15년이 지난 지금도 원전 유래 오염물질이 해양생물에 영향을 미칠 가능성을 보여준다. 이는 기존 생태계 영향조차 충분히 규명되지 않은 상태에서 오염수 방류의 복합영향이 추가되고 있음을 의미한다.

물론 이들 현상을 모두 방사선의 영향이라고 단정해서는 안 된다. 사고 이후의 식지 변화, 인간 활동의 감소, 기후와 먹이 조건 등 여러 요인이 함께 작용할 수 있기 때문이다. 연구마다 조사방법과 인과관계의 해석을 둘러싼 논쟁도 존재한다. 그러나 불확실성이 있다는 이유로 관찰된 현상 자체를 무시할 수는 없는 것이다.

과학적으로 올바른 태도는 영향이 확정됐다고 성급하게 선언하는 것도, 반대로 인과관계가 완전히 밝혀지지 않았으니 문제가 없다고 결론 내리는 것도 아니다. 장기간에 걸쳐 오염지역과 대조지역을 비교하고, 개체·개체군·생태계 수준의 변화를 지속적으로 관찰해야 한다.

수즈키 교수의 발제는 결국 다음과 같은 경고로 읽어야 한다.

후쿠시마 생태계의 변화는 사람의 연간 피폭선량만으로 설명할 수 없다. 영향이 없다고 결론 내리기 전에 장기적인 현장조사와 생태학적 검증이 선행되어야 한다.

삼중수소는 농도만으로 충분히 설명되지 않는다

백도명 교수의 발제는 이러한 문제를 오염수 방류와 삼중수소 평가체계로 연결한다. 삼중수소는 대부분 물과 같은 형태의 삼중수소수로 존재하며, 일반적으로 생물체 안에 장기간 축적되지 않고 비교적 빠르게 배출되는 것으로 설명된다. 현재의 방류 안전성 평가도 이러한 특성을 중요한 전제로 삼고 있다.

백도명 교수는 삼중수소가 해수의 HTO에서 생물체의 TFWT를 거쳐 유기결합삼중수소(OBT)로 전환되고 먹이사슬을 따라 이동할 수 있는데도, 후쿠시마 조사는 검출한계 이상 자료가 두 건에 불과하고 방류 후 1~2년의 초기 측정에 머물러 있다고 지적했다. 특히 NIES 조사에서 어업 감소에도 가자미·게·새우·성게·불가사리 등

이 장기간 감소하고 먹이망 재편 가능성이 나타났지만 원인은 아직 규명되지 않았다. 따라서 현재의 낮은 해수 농도만으로 30년 이상 계속될 방류의 생물축적과 생식·세대 간 영향을 안전하다고 판단할 수 없으며, 먹이사슬과 저서생태계를 포함한 장기 조사가 필요하다는 것이 핵심이다.

따라서 해수의 삼중수소 농도만 측정해서는 생물체 내부에서 일어나는 전환과 잔류를 충분히 파악하기 어렵다. 해수 농도가 낮더라도 해조류, 플랑크톤, 저서생물과 어패류 등에서 삼중수소가 어떤 형태로 존재하며 먹이망을 따라 어떻게 이동하는지는 별도로 확인해야 한다.

백 교수 발제를 통해 “삼중수소가 반드시 심각한 피해를 일으킨다”는 단정이 아니다. 오히려 현재의 자료와 감시방식만으로는 생태계 내 삼중수소의 장기적 거동과 영향을 충분히 판단하기 어렵다는 과학적 문제 제기인 것이다. 이것은 막연한 공포의 주장이 아니라, 측정하지 않은 것을 안전하다고 단정해서는 안 된다는 기본적인 검증의 원칙이다.

#### 방류 관리와 생태계 안전성 검증은 다르다

수즈키 교수는 생태계에서 무엇을 관찰해야 하는지를 보여주었고, 백도명 교수는 현재의 감시체계가 왜 그러한 변화를 충분히 포착하지 못할 수 있는지를 설명했다.

현재 일본 정부와 IAEA의 검증은 방류설비가 계획대로 작동하는지, 방류 전 핵종 농도가 기준을 충족하는지, 예상 피폭선량이 국제기준보다 낮은지를 확인하는 데 의미가 있다. 한국 정부가 수행하는 해양방사능 조사와 시료 분석도 비정상적인 방출이나 광범위한 농도 상승을 확인하는 데 필요하다.

하지만 이러한 활동은 기본적으로 ‘방류 관리의 적정성’을 확인하는 감시다. 장기간에 걸친 ‘생태계 영향’을 검증하는 조사와는 목적과 범위가 다르다.

방류구 인근이나 원거리 해역에서 해수 중 삼중수소 농도가 낮게 측정됐다는 사실은 중요한 정보다. 하지만 그것만으로 퇴적물과 해양생물, 먹이망에서 일어나는 변화를 모두 설명할 수는 없다. 더욱이 평균 농도 중심의 감시는 특정 해역이나 특정 생물종, 성장단계와 계절에 따라 나타날 수 있는 국지적·생태학적 변화를 놓칠 가능성이 있다.

따라서 지금까지의 조사결과를 근거로 “현재까지 해수에서 유의미한 농도 상승이 확인되지 않았다”고 말할 수는 있어도, 이를 곧바로 “장기적인 생태계 영향이 없다”는 결론으로 확대해서는 안 된다. 전자는 측정자료에 근거한 판단이지만, 후자는 아직 충분히 조사되지 않은 영역까지 포함한 선언이기 때문이다.

### 이제는 방류 감시를 넘어 생태계 조사를 시작해야 한다

한국 정부는 일본과 IAEA가 제공하는 방류자료를 확인하는 데 머물지 말고 독립적인 장기 생태계 조사체계를 구축해야 한다. 해수뿐 아니라 퇴적물, 플랑크톤, 해조류, 저서생물, 어패류를 조사하고, 삼중수소수와 유기결합삼중수소를 구분해 측정할 필요가 있다. 생물종·조직·성장단계·계절별 차이와 먹이망을 통한 이동도 장기간 추적해야 한다.

무엇보다 방류 이전의 기초자료와 방류 이후의 자료를 같은 방법으로 추적해야 한다. 단기적인 기준 초과 여부가 아니라 수년, 수십 년에 걸친 변화 추세를 확인해야 하기 때문이다. 조사 설계와 시료 채취, 분석방법, 검출한계, 원자료도 투명하게 공개해 국내외 연구자들이 독립적으로 검토할 수 있게 해야 한다.

후쿠시마 오염수 문제에서 과학의 역할은 기준치 이하라는 설명을 반복하는 데 있지 않다. 현재의 측정으로 무엇을 확인했고, 무엇이 아직 확인하지 못했는지를 정직하게 구분하는 데 있다. 불확실성은 안전을 선언하기 위한 빈칸이 아니라, 추가 조사와 예방적 관리가 필요한 이유다.

수즈키 교수와 백도명 교수의 발제가 던진 메시지는 분명하다.

방류가 기준에 맞게 이뤄지는지를 감시하는 것과, 바다와 생태계가 장기적으로 안전한지를 확인하는 것은 서로 다른 과학적 과제다. 지금까지의 감시는 전자에 집중돼 있다. 이제는 후자를 시작해야 한다.

바닷물의 농도만 측정해서는 생태계의 안전을 알 수 없다. 기준치 이하라는 말이 검증의 끝이 아니라, 장기적인 생태계 조사의 출발점이 돼야 한다. □

## 토 론 3

### 후쿠시마 바다가 우리에게 묻는 것

- 스즈키 유즈루 교수 「후쿠시마 바다에서 보이는 것」 발표에 대한 토론문

김해창 교수  
경성대학교 환경공학과

스즈키 유즈루 교수의 이번 발표에서 가장 큰 의미는 후쿠시마 핵오염수 문제를 추상적인 찬반 논쟁이나 ‘기준치 이하인가 아닌가’라는 숫자의 논쟁에서 끌어내어, 후쿠시마 앞바다에서 실제로 살아가는 생명체에 무슨 일이 일어나고 있는가라는 질문으로 되돌려놓았다는 데 있다고 생각한다.

발표는 ALPS 처리오염수의 확산과 삼중수소, 요오드-129의 문제에서 출발해 시민에 의한 삼중수소 모니터링과 해산어(바다고기) 방사선 영향조사, 그리고 ALPS 처리오염수 방출금지소송으로 이어진다. 이 발표에서 특히 주목할 점과 관련 질문, 그리고 우리 정부 및 시민사회에 대한 제언을 하고자 한다.

#### 1. ‘얼마나 희석되는가’에서 ‘생물에게 무슨 일이 일어나는가’로

첫째, 이번 연구는 실제 후쿠시마 앞바다의 수생생물을 대상으로 한다는 점에서 중요하다. 오염수 논쟁은 지금까지 주로 방출되는 방사성물질의 농도, 총량, 해류에 따른 확산과 희석을 중심으로 이루어졌다. 그러나 해양환경에서 중요한 것은 물속의 순간적인 농도만이 아니다. 저농도 물질에 장기간 노출된 생물에게 어떤 변화가 일어나는지, 먹이사슬을 통해 어떤 영향을 줄 수 있는지, 여러 오염물질이 함께 작용할 때 어떤 복합효과가 발생하는지를 살펴야 한다.

스즈키 교수 연구진은 원전 앞바다에서 물고기를 직접 채집하고 즉시 채혈한 뒤 실험실에서 해부하고 조직표본을 만들어 현미경으로 이상 유무를 조사하고 있다. 바로 여기에 이 연구의 중요한 의미가 있다. ‘바닷물이 기준치 이하인가’라는 질문을 ‘그 바다에서 살아가는 생명은 건강한가’라는 질문으로 전환한 것이다.

#### 2. 왜 삼중수소만 이야기하는가 -요오드-129와 다른 핵종을 함께 보아야 한다

둘째, 후쿠시마 오염수 문제를 사실상 ‘삼중수소 문제’로 축소해온 기존 논의를 넘어서야 할 필요가 있다. ALPS가 삼중수소를 제거하지 못한다는 사실은 잘 알려져 있다.

그러나 처리오염수에는 삼중수소만 존재하는 것이 아니다. 스즈키 교수 발표자료에는 탄소-14, 코발트-60, 스트론튬-90, 테크네튬-99, 안티몬-125, 세슘-137, 그리고 요오드-129 등 여러 핵종이 방출되고 있는 것으로 제시돼 있다.

그중 특히 눈여겨볼 것이 요오드-129이다. I-129의 반감기는 약 1,570만 년이며 발표자료가 제시하는 고시농도한도는 9Bq/L로, 삼중수소의 6만Bq/L보다 훨씬 엄격하다. 또한 요오드는 해조류 등에 축적될 수 있고 생체에서는 갑상선과 관련된 원소라는 점에서 장기적인 추적이 중요하다. 실제 일부 방출 회차에서는 I-129가 삼중수소 이외 핵종의 고시농도비 총합에서 상당한 비중을 차지했다.

따라서 일본 정부와 도쿄전력에 물어야 할 질문은 단순히 “삼중수소 농도가 기준치 이하인가?”가 아니다. “방출되는 모든 핵종이 무엇이며 각각 얼마인가, 그 총량과 장기적인 생태영향은 무엇인가, 그리고 그것을 누가 독립적으로 검증하고 있는가?”라고 물어야 한다. 이 점은 앞으로 한국 정부와 시민사회가 대응할 때 매우 중요한 문제라고 생각한다.

### 3. 이와키방사능시민측정실이 보여주는 시민과학

셋째, 개인적으로 이번 발표에서 가장 인상적인 부분 가운데 하나는 이와키방사능 시민측정실 ‘다라치네’의 활동이다. 2011년 사고 이후 지역 주민들이 아이들과 지역사회 건강과 생활을 지키기 위해 설립한 이 단체는 단순한 반대운동단체가 아니다. 발표에 따르면 삼중수소와 스트론튬 등을 측정할 수 있는 실험실을 갖추고 원전 앞바다에서 직접 해양조사를 실시하고 있다.

특히 베타선 측정시설을 갖추고 핵종별 분리·정제를 거쳐 삼중수소를 측정한다. 삼중수소수(HTO)는 시료의 수분을 증발시켜 회수하고, 유기결합형 삼중수소(OBT)는 건조시킨 시료를 연소한 뒤 수분을 회수해 분석한다. 이것은 중요한 시민과학의 사례다.

정부와 사업자가 “안전하다”고 발표할 때 시민이 이를 믿느냐 믿지 않느냐에 머물지 않고, 시민이 직접 시료를 채취하고 측정하고 데이터를 축적하며 전문가와 함께 검증하는 구조를 만들고 있기 때문이다. 한국에서도 후쿠시마 문제에 대한 시민사회의 대응이 집회와 성명 발표를 넘어 독립적인 시민해양방사능 모니터링으로 발전할 필요가 있다.

### 4. 수생생물의 이상 현상은 무엇을 말해주는가 - 스즈키 교수께 드리는 질문

이번 발표에서 특히 흥미로우면서도 동시에 좀 더 확인하고 싶은 부분이 있다. 발표에서는 후쿠시마 제1원전 남쪽 약 1km 지역의 대수리에서, 일반적으로 7~8월이 산란기임에도 원전 인근 개체들이 거의 연중 성숙하는 현상이 관찰됐다고 소개한

다. 연구진은 유생이 2~3개월 동안 바다를 떠돌기 때문에 이곳의 개체가 어디에서 태어났는지는 알 수 없지만, 원전 인근에 도착하면 이상이 나타나는 것으로 보인다'고 설명한다. 이에 따라 '원전 유래의 어떤 오염이 계속되고 있는 것이 의심된다'고 제시한다.

또한 발표자료에는 “방사성물질 축적이 보이지 않는 점으로 보아 사고 후 15년이 지난 지금도 뭔가의 유해물질이 핵발전소에서 흘러가고 있다”고 표현돼 있다. 저는 이 대목이 매우 중요하면서도 동시에 과학적으로는 조금 더 엄밀한 설명이 필요하다고 생각한다.

방사성물질의 유의미한 축적이 확인되지 않는다는 사실과 생물의 생식 이상이 관찰된다는 사실만으로, 현재 원전에서 어떤 특정 유해물질이 계속 흘러나오고 있다고 바로 결론내리기는 어렵기 때문이다.

가능한 원인은 여러 가지일 수 있다. 사고 당시 배출된 오염물질의 잔류 영향일 수도 있고, 현재 계속되는 특정 오염원의 영향일 수도 있다. 방사성물질 이외의 화학물질이나 수온, 먹이, 서식환경 변화 등 다른 스트레스 요인이 개입했을 가능성도 있다. 여러 요인의 복합효과일 수도 있다.

따라서 이 연구가 현재 보여주는 가장 중요한 사실은 '원전에서 유해물질이 계속 유출되고 있음이 입증됐다'는 것이라기보다, '원전 인근 생물에서 통상적이지 않은 현상이 나타나고 있으며 그 원인이 아직 충분히 규명되지 않았으므로 독립적인 장기조사가 필요하다'는 것이라고 생각한다.

이와 관련해 스즈키 교수께 다음과 같이 질문드리고 싶다.

첫째, 대수리의 연중 성숙 현상과 원전 유래 오염 사이의 상관성은 매우 흥미롭지만, 현재까지 특정 원인물질은 확인되지 않은 것으로 이해해도 되는가?

둘째, 수온이나 먹이, 서식환경 변화, 방사성물질 이외의 화학적 오염물질 등 다른 가능성은 어느 정도 검토됐는가?

셋째, '원전 유래의 어떤 오염이 계속되고 있다'는 가설을 검증하기 위해 앞으로 어떤 물질과 어떤 생물학적 지표를 중점적으로 조사할 계획인가?

이 질문은 연구의 의미를 약화시키기 위한 것이 아니다. 오히려 이런 불확실성을 보다 정밀하게 밝혀내는 것이 이번 시민해양조사의 다음 단계가 될 수 있다고 생각한다. 스즈키 교수 자신도 발표 말미에 “해양방출의 위험성이 증명되었다고는 말하기 어렵지만, 안전하다고 할 근거도 없다”는 점을 강조하고 있다. 바로 이 태도가 중요하다. '위험하다는 증거가 충분하지 않다'와 '안전하다는 것이 입증됐다'는 전혀 같은 말이 아니다.

## 5. 인간에게 위험한가를 넘어 '해양생물에 해를 끼칠 권리가 있는가'

다섯째, 이번 발표에서 매우 주목할 부분은 ALPS 처리오염수 방출금지소송의 논리를 인간의 방사선 피폭 문제에서 해양생태계 보호 문제로 확장하고 있다는 점이다. 2023년 9월 제기된 소송은 일본 원자력규제위원회의 도쿄전력 인가 취소와 도쿄전력의 해양방출 금지를 요구하고 있다. 어업자들은 어업권과 인격권 침해, 일반 시민들은 생존권과 오염되지 않은 환경에서 평온하게 생활할 권리를 주장한다. 그런데 사람에게 어느 정도의 건강피해가 발생하는지를 법정에서 구체적으로 입증하는 것은 쉽지 않다.

그래서 스즈키 교수는 다른 각도에서 문제를 제기한다. “수산동식물에 유해한 물질을 바다에 배출해도 되는가?” 발표는 유엔해양법협약 제194조가 모든 발생원에서 해양환경의 오염을 방지·경감·규제하기 위한 필요한 조치를 취하도록 규정하고 있다는 점을 제시한다. 또한 일본의 수산자원보호법과 해양기본법에도 수산동식물에 유해한 물질의 유출을 제한하고 해양환경을 보전해야 한다는 취지의 규정이 있음을 소개한다.

저는 이 접근이 매우 중요하다고 생각한다. 후쿠시마 오염수 문제를 “한국 사람이 수산물을 먹어도 안전한가”라는 인간 중심의 소비자 안전 문제에만 가두어서는 안 된다. 바다는 인간만의 것이 아니다. 인간에게 당장 확인되는 피해가 없더라도 해양생물과 생태계에 장기간 위해를 줄 가능성이 있다면 국가와 기업에는 그것을 예방해야 할 책임이 있다. 이는 국제환경법상의 예방적 접근과 사전주의적 사고의 문제이며, 세대 간 정의의 문제이기도 하다.

## 6. 한국 정부는 무엇을 해야 하는가

이번 발표를 한국의 입장에서 받아들인다면 정부의 대응도 보다 적극적이어야 한다.

첫째, 일본 정부와 도쿄전력에 삼중수소뿐 아니라 방출 대상 모든 핵종의 회차별 농도와 총방출량을 지속적으로 공개할 것을 요구해야 한다. 특히 I-129, C-14, Sr-90, Cs-137 등 장수명 또는 생물학적으로 중요한 핵종의 공개가 필요하다.

둘째, 일본 측 자료를 받아 평가하는 수준을 넘어 독립적인 시료채취와 교차분석 체계를 요구할 필요가 있다. 일본 정부·도쿄전력뿐 아니라 한국과 일본의 독립 연구자와 시민사회가 동일 시료를 분석할 수 있어야 한다.

셋째, 바닷물 농도 측정에서 한 걸음 더 나아가 해조류·패류·저서생물·어류에 대한 장기 생물모니터링을 해야 한다. HTO뿐 아니라 OBT와 I-129, Sr-90 등 핵종별 축적과 생식·발생·조직 변화도 살펴볼 필요가 있다.

넷째, 한국 정부는 유엔해양법협약을 비롯한 국제해양환경법의 관점에서 일본의 방출행위를 지속적으로 검토해야 한다. 질문은 ‘한국 국민에게 당장 건강피해가 발생

하는가’에 그쳐서는 안 된다. “장기간 계획적으로 이루어지는 방출이 해양환경의 오염을 방지·경감해야 할 국가의 의무와 양립하는가?”라는 질문으로까지 나아가야 한다.

## 7. 한국 시민사회도 ‘반대하는 시민’에서 ‘측정하는 시민’으로

시민사회에도 중요한 과제가 있다. 후쿠시마 오염수 문제는 단기간에 끝날 문제가 아니다. 따라서 일회적인 집회나 정치적 쟁점화만으로 대응하기 어렵다.

일본의 다라치네와 같은 시민과학 모델을 참고해 한국에서도 환경단체·어민·대학·연구자·지방정부가 함께 참여하는 ‘한일 시민해양방사능 공동모니터링 네트워크’를 만들어볼 필요가 있다.

부산·울산·제주·동해안 등에서 정기적으로 해수와 해조류, 패류, 어류를 채취하고 동일한 프로토콜로 데이터를 축적하는 것이다. 일본 시민측정소 및 독립 연구자들과 시료를 교환하고 교차검증한다면 정부기관 조사와는 또 다른 사회적 신뢰를 만들 수 있다. 궁극적으로 필요한 것은 일본을 비난하기 위한 데이터가 아니라 바다에서 실제로 무슨 일이 일어나고 있는지를 확인하기 위한 독립적인 데이터다.

## 맺으며 - ‘증거가 없다’는 말의 두 얼굴

스즈키 교수의 발표에 등장하는 한 문장이 오래 남는다. “증거가 없는 것은, 없는 것의 증거가 아니다(티모시 무소 박사).” 후쿠시마 오염수 문제에서 이 문장은 매우 중요하다.

우리는 과학적으로 확인되지 않은 위험을 이미 입증된 사실처럼 과장해서는 안 된다. 그러나 아직 충분히 확인되지 않았다는 이유만으로 위험이 존재하지 않는다고 단정해서도 안 된다. 특히 장기간 저농도 방사성물질에 노출되는 수생생물의 영향에 대해서는 연구 자체가 충분하지 않다는 것이 이번 발표의 중요한 지적이다.

그렇다면 우리가 취해야 할 태도는 분명하다. 모르기 때문에 방출해도 되는 것이 아니라, 충분히 모르기 때문에 더 조사하고 더 공개하고 더 신중해야 한다. 후쿠시마 바다는 거대한 실험실이 되어서는 안 된다. 스즈키 교수와 이와키 시민들이 바다로 나가 물고기를 잡고, 피를 뽑고, 조직을 살피고, 방사성물질을 직접 측정하는 이유도 결국 여기에 있을 것이다.

한국 정부와 시민사회가 해야 할 일 역시 단순한 찬반을 넘어선다. 측정하고, 기록하고, 공개하고, 검증하고, 일본 시민들과 연대하면서 앞으로 수십 년 동안 바다를 지켜보는 것. 후쿠시마 오염수 문제에 대한 진정한 국제연대는 바로 여기서 시작되어야 한다.