

후쿠시마 원전 오염처리수의 처분으로 인한
우리나라 국민의 방사선영향

한 국 원 자 력 학 회

2020. 08.

목 차

요약	1
1. 서론	4
2. 오염처리수의 저장현황	6
3. 오염처리수의 처분방안	10
1) 해양방출	11
2) 수증기방출	12
4. 방사성물질의 인체영향	14
5. 방사선 피폭선량 평가	19
1) 오염처리수의 환경방출	19
가) 해양방출	20
나) 수증기방출	22
2) 예상 피폭선량	26
가) 해양방출	26
나) 수증기방출	27
6. 결론 및 권고	32
붙임 1. 후쿠시마 오염처리수의 해양 이동 및 확산	35
붙임 2. 후쿠시마 원전 인근 해양에서 방사능 측정 현황	37

그림목차

그림 1. 방사능오염수 발생 현황	6
그림 2. 방사능오염수 정화 과정	7
그림 3. 오염처리수의 방사능농도 현황	8
그림 4. 일본 전문가 소위원회에서 검토된 오염처리수의 처분방안 ...	10
그림 5. 오염처리수의 해양방출에 대한 기본 개념도	11
그림 6. 오염처리수의 수증기방출에 대한 기본 개념도	12
그림 7. 자연방사선과 인공방사선에 의한 피폭선량	15
그림 8. 방사선 피폭선량과 인체 위험도	16
그림 9. 수증기방출로 인한 주요 피폭경로	28

표목차

표 1. 오염처리수의 예상 평균농도와 총 방사능	19
표 2. 해양방출로 인해 예상되는 해수와 해산물의 방사능농도	22
표 3. 수증기방출로 인해 예상되는 공기와 지표면농도	25
표 4. 해양방출로 인한 우리나라 국민의 예상 피폭선량	27
표 5. 수증기방출로 인한 우리나라 국민의 예상 피폭선량	31

부록그림목차

부록그림 1. 북태평양에서 표층 해류의 이동 흐름도	35
부록그림 2. 후쿠시마 원전 북쪽 방류 운하로부터 50 m 지점에서 H-3과 Cs-137의 농도 변화	38
부록그림 3. 후쿠시마 원전 주변 연안 표층수 중 Cs-137 농도 변화 ...	39
부록그림 4. 후쿠시마 원전 인근 해역에서 잡은 어류에서 Sr-90과 Cs-137의 농도 변화	41

요 약

본 보고서는 최근 우리나라에서 사회적 관심사로 대두되는 후쿠시마 원전부지에서 관리중인 오염처리수의 처분으로 우리나라 국민에게 미치게 될 방사선영향에 대해 과학적 사실에 근거한 정보를 제공하기 위한 목적으로 작성되었다.

후쿠시마 원전부지 내 저장탱크에 보관중인 오염처리수의 현황 및 예상되는 일본 정부의 처분방안은 다음과 같다.

- 2020년 상반기 기준으로 오염처리수의 약 29% 만이 환경방출기준을 만족하고 있음.
- 오염처리수에 존재하는 삼중수소의 총 방사능은 870 TBq로 추정되며, 평균농도는 730,000 Bq/L임. 이는 일본의 환경방출기준인 60,000 Bq/L을 10배 이상 초과하고 있는 수치임.
- 삼중수소를 제외한 방사성물질은 다핵종제거설비(ALPS)를 사용하여 기준에 부합할 때까지 재정화되고, 삼중수소는 희석시켜 환경으로 방출할 계획임.
- 저장탱크를 보관할 수 있는 공간이 조만간 포화상태에 도달할 것으로 예상됨에 따라 일본 정부에서는 오염처리수의 처분방안으로 해양으로 방출(해양방출)하거나 수증기화를 통해 대기로 방출(수증기방출)하는 방안을 유력하게 검토 중임.

일본 정부에서 유력하게 검토 중인 오염처리수의 해양방출과 수증기방출로 인한 우리나라 국민에게 미칠 방사선영향을 평가하였다. 보수적 평가를 위해 오염처리수를 재정화하지 않고 현재 저장상태 그대로 전량이 1년 동안 해양이나 수증기로 방출한다고 가정하였다. 이로 인해 우리나라 국민이 받을 것으로 예상되는 피폭선량은 해양으로 방출할 경우에는 3.5×10^{-9}

mSv/yr, 수증기로 방출할 경우에는 6.5×10^{-5} mSv/yr로 평가되었다. 이러한 결과는 인공방사선에 의한 일반인의 선량한도인 1 mSv/yr에 비해 매우 낮은 값이다.

100 mSv 이하의 낮은 선량에 대한 건강상의 위험성 연구가 국제적으로 활발하게 진행되고 있지만, 이에 대한 실험적, 임상적 근거는 확인되지 않고 있다. 따라서 예상되는 피폭선량의 결과로 볼 때 후쿠시마 원전부지에 저장된 오염처리수의 처분으로 인한 우리나라 국민의 방사선영향은 우려할 수준이 아니라고 판단된다.

오염처리수의 환경방출에 대해 당사국 뿐 아니라 주변국 국민의 방사선 안전에 대한 우려가 매우 크므로 우리 학회에서는 다음 사항을 권고한다.

- 현재 저장된 오염처리수의 처분은 반드시 법적 요건과 필요시에 국제법을 준수하여야 하며, 이해당사국과 함께 이를 검증할 체계와 절차가 수립되어야 함.
- 환경방출기준에 부합하는 처분방안이라고 하더라도 최신 기술을 이용하여 오염처리수의 방사능농도를 최대한 줄이기 위한 노력이 필요함.
- 오염처리수를 처분하기 전에는 잔류하는 방사능을 신뢰할만한 방법으로 측정하고 분석해야 하며, 그 결과는 국제기구 뿐 아니라 이해당사국에도 수시로 공개해야 함.
- 주기적으로 국제기구 뿐 아니라 이해당사국이 참여하는 소통 채널을 구축하는 것도 국제적 신뢰도를 높일 수 있는 바람직한 방안이 될 것임.
- 오염처리수를 처분하는 동안에는 환경시료의 측정 및 분석, 처리시설의 오작동에 대비한 안전성 등의 강화에 노력을 기울여야 함.

- 후쿠시마 원전부지로부터 근접한 해역에서 채취한 해산물에서 방사능농도가 기준을 초과할 수 있을 가능성에 대비하여 우리나라 정부는 수입 해산물에 대한 검역을 강화하고 원양 어업지역에서 방사능 측정을 주기적으로 실시할 필요가 있음.

1. 서론

■ 2011년 3월 일본의 후쿠시마 원전사고로 다량의 방사성물질이 환경(대기, 해양)으로 방출되었음. 이후 현재까지도 방사능오염수가 지속적으로 발생되고 있음.

- 우리나라는 일본의 최인접국으로 후쿠시마 원전사고 당시 방출된 방사성물질로 인한 국내에 미치는 영향에 대해 국민적 관심이 높았음.
- 사고가 발생한 지 9년이 지난 현재에도 지하수와 빗물이 균열된 원자로 건물의 틈새로 유입되어 방사능오염수가 지속적으로 발생되고 있음.

■ 일본 정부는 방사능오염수를 정화하여 환경으로 방출할 계획을 수립 중임.

- 2022년 여름 즈음에 오염처리수¹⁾를 보관할 부지의 저장 공간이 한계에 이를 것으로 예상됨에 따라 일본 정부는 전문가 소위원회를 구성하여 처분방안을 논의함.
- 전문가 소위원회의 검토 결과로 오염처리수를 해양으로 방출(이하 해양 방출)하거나 수증기화하여 대기로 방출(이하 수증기방출)하는 방안이 유력시되고 있음.

■ 최근 우리나라의 언론 등에서는 오염처리수의 처분으로 인한 방사선의 건강상 위험에 대해 집중적으로 보도하여 국민의 우려가 높아짐.

- 오염처리수의 환경방출에 대해 과학적 사실에 근거하지 않거나 방사선의 건강상 위험에 대한 잘못된 정보가 언론과 소셜미디어(SNS)를 통해 확산되고 있음.
- 과학적 사실에 바탕을 둔 올바른 정보의 제공은 사회적 논란을 최소화 하는데 무엇보다 중요함.

1) 방사능농도를 줄이기 위해 물리·화학적 방법으로 처리된 방사능오염수를 통칭하여 ‘오염처리수’라 표기함.

■ 본 보고서는 전문학술단체인 한국원자력학회에서 후쿠시마 원전 부지에 보관되어 있는 오염처리수의 환경방출이 우리나라 국민에게 미치는 방사선 영향을 과학적 사실에 근거하여 평가함으로써 국민이 올바른 판단을 할 수 있도록 정보를 제공하고자 작성됨.

- 현재 오염처리수는 어떻게 보관되고 있으며, 이를 어떻게 처분할 것으로 예상 되는가 ?
- 오염처리수를 처분한다면 우리나라 국민은 어떻게 방사선영향을 받을 수 있는가 ?
- 그 영향은 어느 정도로 예상되며, 이로 인한 우리나라 국민의 건강상의 위험은 없는가 ?

2. 오염처리수의 저장현황

■ 방사능오염수는 후쿠시마 원전 부지의 지하수와 빗물이 원자로건물의 균열 틈새로 유입되어 발생됨.

- 후쿠시마 원전 부지의 지하수와 빗물이 원자로건물의 균열 틈새로 유입되어 손상된 원자로, 용융된 핵연료와 접촉하여 방사능으로 오염되며, 이를 ‘방사능오염수’라고 함.
- 방사능오염수에는 삼중수소(H-3)를 제외하고 세슘-137(Cs-137), 스트론튬-90(Sr-90) 등 약 62가지의 방사성핵종이 포함되어 있음.
- 후쿠시마 원전 사업자인 동경전력(TEPCO)에서는 지하수를 우회(bypass)시키거나 동토차수벽(frozen-soil wall)²⁾을 설치하여 원자로 건물 내부로 지하수와 빗물의 유입을 줄이고 있음.
- 이 결과로 [그림 1]³⁾에 나타난 바와 같이 이전에 비해 유입량은 많이 줄었지만 하루에도 여전히 170~180 톤의 방사능오염수가 발생되고 있음. 강수량이 많은 시기에는 방사능오염수의 발생도 증가하는 것을 알 수 있음.

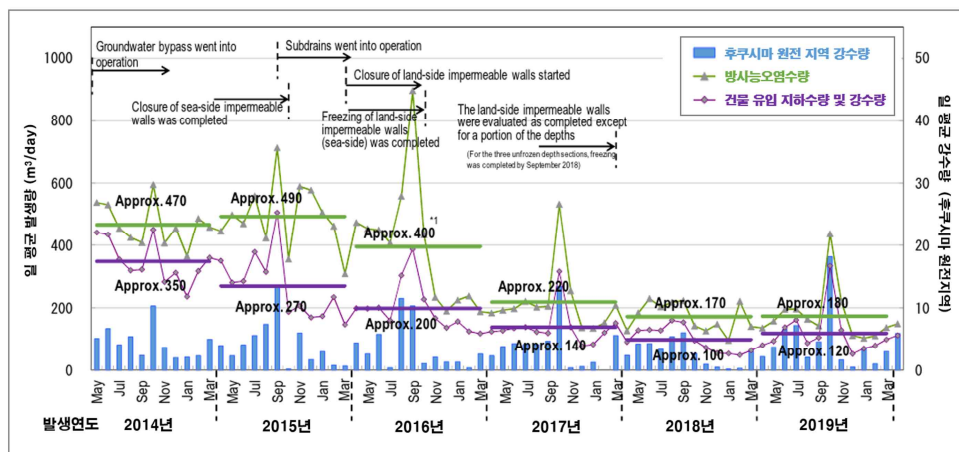


그림 1. 방사능오염수 발생 현황(원본그림수정).

2) 땅을 얼려 만든 얼음벽.

3) METI, Monthly Progress(Outline of decommissioning and contaminated water management) (May 28, 2020), [meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/mp202005.pdf](https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/mp202005.pdf).

■ 동경전력은 여러 단계의 공정을 거쳐 방사능오염수를 정화하고 있음

- 방사능오염수에서 방사성물질을 제거하기 위한 여러 단계의 공정을 [그림 2]⁴⁾에 보여줌.
- 먼저 흡착탑을 이용하여 방사능오염수에 포함되어 있는 Cs과 Sr을 제거함.
- 제거된 방사능오염수는 역삼투압 장치를 통과하면서 담수와 고농도의 염(鹽) 농축액으로 분리됨. 담수는 손상된 원자로의 냉각수로 재사용되며, 염 농축액은 추가 정화를 위해 저장탱크에 보관됨. 이를 ‘Cs/Sr 오염처리수’라 함.
- Cs/Sr 오염처리수 중의 잔존 방사성물질은 전처리(preprocessing)와 다핵종제거설비(Advanced Liquid Processing System ; ALPS)를 거치면서 대부분 제거됨. 다만 방사능오염수 중의 삼중수소수(HTO)⁵⁾는 물과 특성이 동일하여 분리, 제거되지 못하고 저장탱크에 그대로 남음. 이를 ‘ALPS 오염처리수’라 함.

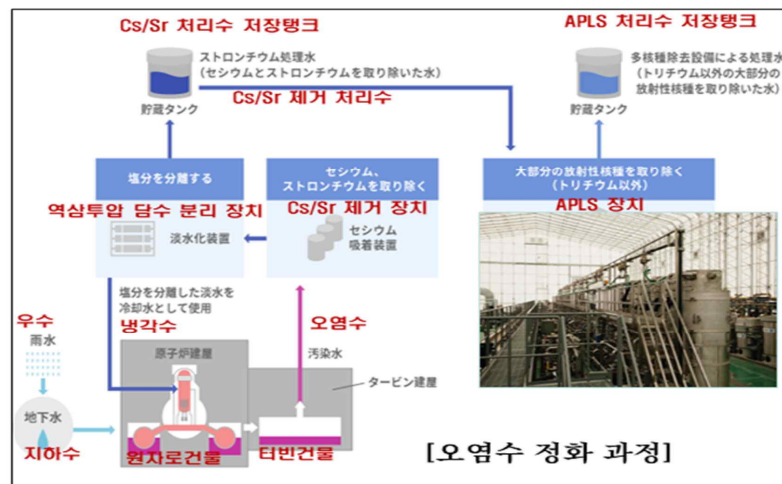


그림 2. 방사능오염수 정화 과정(원본그림수정).

4) TEPCO, Treated water portal site, Tokyo Electric Power Company Holdings, tepcoco.jp/decommission/progress/purification/index-j.html.

5) 일반 물(H_2O)에서 수소(H) 하나 대신에 삼중수소(H_3)가 수소와 산소(O)가 결합되어 있다는 물 분자임. 삼중수소는 H-3, H_3 , 3H 또는 T로 표기할 수 있으며, 본 보고서에서는 독자가 이해하기 쉽도록 혼용하여 사용함.

■ 오염처리수는 현재 후쿠시마 원전부지 내 저장탱크에 보관되고 있음.

- 2020년 3월 기준으로 ‘Sr/Cs 오염처리수’와 ‘ALPS 오염처리수’(이하 오염처리수)는 약 117만 8천 톤이 979개의 저장탱크에 보관되고 있음.
- 2020년 6월 기준으로 오염처리수의 약 29% 만이 액체상 방사성물질의 환경방출기준⁶⁾을 만족하고 있음[그림 3]⁷⁾. 동경전력에서는 삼중수소를 제외한 방사성물질에 대해서는 ALPS를 사용하여 기준에 부합할 때까지 오염처리수를 재정화할 계획임.
- 지속적으로 방사능오염수가 발생되고 있고, 이로 인해 2022년 여름 즈음에는 저장탱크를 보관할 수 있는 공간이 포화상태에 도달할 것으로 예상하고 있음.

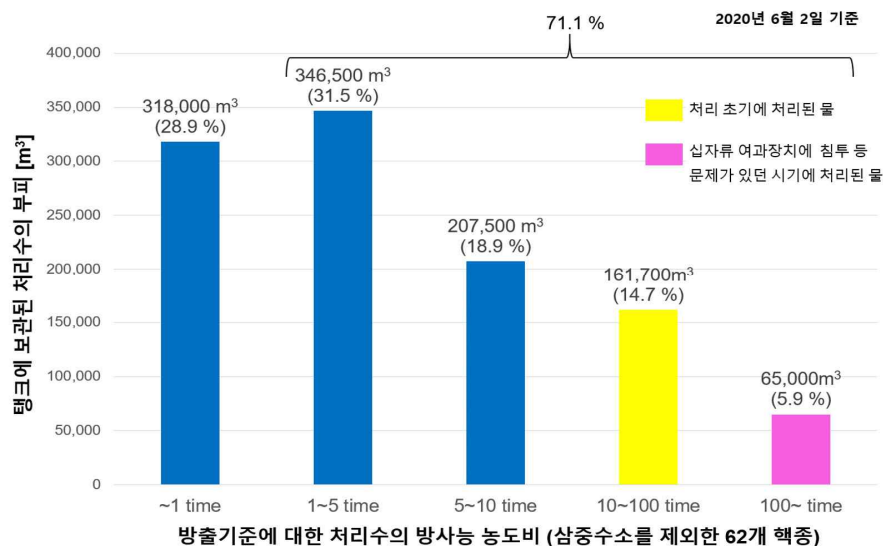


그림 3. 오염처리수의 방사능농도 현황(원본그림수정).

6) 물에 포함된 특정 방사성핵종을 음용수로 섭취하였을 경우 평생 동안(70세) 받게 되는 피폭선량이 일 반인의 연간 선량한도인 1 mSv(밀리시버트)로 부터 유도된 물에서의 방사능농도임. 물에 여러 방사 성핵종이 포함되어 있다면 각 방사성핵종의 방출농도기준에 대한 실제 존재하는 방사능농도의 비를 합산하여 1을 초과하지 않아야 함. 피폭선량의 단위인 mSv는 본 보고서의 4장에서 상세히 설명함.

7) TEPCO, Treated water portal site, Tokyo Electric Power Company Holdings, <http://www4.tepco.co.jp/en/decommission/progress/watertreatment/index-e.html>.

■ 오염처리수에서 삼중수소의 총 방사능은 860 TBq⁸⁾ 정도로 추정하고 있음.

- 삼중수소는 물 분자(H_2O)에서 1개의 수소(H) 대신에 삼중수소(T)가 결합되어 있는 것으로 화학기호로는 HTO로 표기함. 이는 물과 동일한 성질을 가지고 있어 물리적으로나 화학적으로 제거하기가 쉽지 않고 대량으로 제거하기는 아직 기술이 실용화되고 있지 못함.
- 오염처리수에서 삼중수소의 총 방사능은 860 TBq 정도임. 이를 질량으로 환산하면 117만 8천 톤의 오염처리수 중에서 방사능을 띄는 HTO 형태의 물 분자는 16 g 정도임.
- 오염처리수에서 삼중수소의 평균농도는 730,000 Bq/L로 일본의 액체상 방사성물질의 환경방출기준인 60,000 Bq/L을 10배 이상 초과하고 있음. 참고로 우리나라의 삼중수소 환경방출기준은 40,000 Bq/L이며, 국제보건기구(WHO)의 음용수 기준은 10,000 Bq/L임.

8) Bq(베크렐)은 방사성물질에서 방출되는 방사선의 양을 나타내는 단위임. 1 Bq은 1초에 한 개의 원자핵이 붕괴하면서 내는 방사능을 말함(1 TBq(테라베크렐) = 1×10^{12} Bq).

3. 오염처리수의 처분방안

■ 2022년 여름 즈음에 후쿠시마 원전부지에 오염처리수를 저장할 수 있는 공간이 포화상태에 도달할 것으로 예상하며, 일본 정부는 이에 대한 처분 방안을 마련 중임.

- 일본 정부는 오염처리수의 5가지 처분방안(심지층 주입, 해양방출, 수증기방출, 수소방출, 지하매립)에 대해 기술적 적용성, 소요되는 비용, 법적 요건 등을 다각도로 검토함[그림 4]⁹⁾.

APLS 처리수 처분방안					
처분방안	(1) 심지층주입	(2) 해양방출	(3) 수증기방출	(4) 수소방출	(5) 지하매립
개념도					
기술적 타당성	적정한 지층이 존재하지 않으면 처분 지연, 모니터링 방법 없음	기존시설로부터 액체방출과 동일	미국 TMI-2 수증기방출 경험 있음	전처리 및 처분규모 확대를 위한 연구개발 필요	방사성폐기물 전처분과 유사
규제적 타당성	저분 농도와 관련한 새로운 규제 및 기준 설정 필요	타당	타당	타당	새로운 규제 및 기준 설정 필요

그림 4. 일본 전문가 소위원회에서 검토된 오염처리수의 처분방안(원본그림수정).

- 오염처리수의 해양방출과 수증기방출이 현실적인 처분방안으로 검토되었으며, 동경전력에서는 이들 방안에 대한 기본개념을 수립함.
- 어떤 방안이든 오염처리수를 방출하기 전에는 환경방출기준을 만족하도록 하며, 방출 도중에는 환경측정을 강화하고 그 결과를 일반인에 신속하고 투명하게 공개하며, 만일 도중에 이상 징후가 발생되면 방출을 즉

9) METI, The outline of the report of the subcommittee on handling of ALPS treated water, Agency for Natural Resources and Energy, Japan, February 10, 2020, https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20200210_alps_sum.pdf.

시 중지시킨다는 것이 기본개념임.

1) 해양방출

■ 환경방출기준을 초과하는 오염처리수는 재정화되고 대량의 바닷물로 희석시켜 해양으로 방출함.

- 동경전력에서 수립한 오염처리수의 해양방출에 대한 기본 개념도는 [그림 5]¹⁰⁾와 같음.

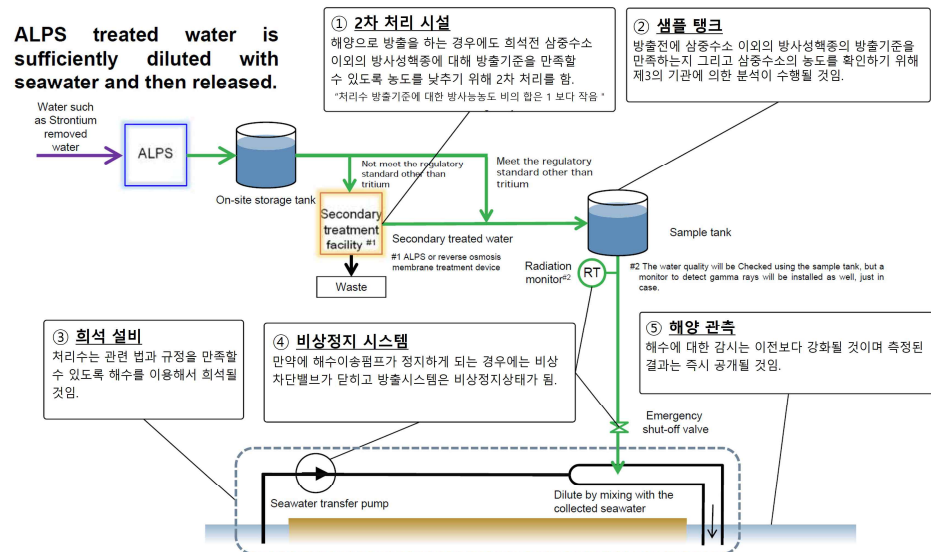


그림 5. 오염처리수의 해양방출에 대한 기본 개념도(원본그림수정).

- 오염처리수에는 삼중수소를 제외하고 약 62개 종류의 방사성핵종을 포함하고 있음.
- 환경방출기준을 초과하는 오염처리수는 ALPS를 사용하여 기준이 만족될 때까지 재정화됨.

10) TEPCO, Draft study responding to the subcommittee report on handling ALPS treated water, TEPCO(March 24, 2020), tepcoco.jp/en/decommission/progress/watertreatment/images/200324.pdf.

- ALPS로 제거하기 힘든 삼중수소는 일본의 환경방출기준인 60,000 Bq/L을 초과하지 않도록 대량의 바닷물로 희석됨.

2) 수증기방출

▣ 환경방출기준을 초과하는 오염처리수는 재정화되고, 이를 끓여 수증기화하여 대기로 방출함.

- 동경전력에서 수립한 오염처리수의 수증기방출에 대한 기본 개념도는 [그림 6]¹¹⁾과 같음.

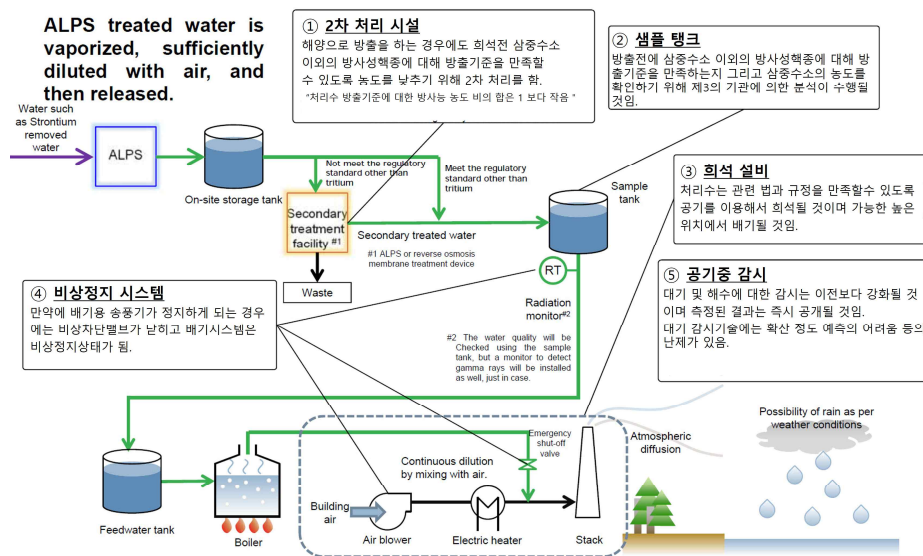


그림 6. 오염처리수의 수증기방출에 대한 기본개념도(원본그림수정).

- 해양방출 처분방법과 마찬가지로 환경방출기준을 초과하는 오염처리수는 ALPS를 사용하여 재정화됨.

11) TEPCO, Draft study responding to the subcommittee report on handling ALPS treated water, TEPCO(March 24, 2020), tepcoco.jp/en/decommission/progress/watertreatment/images/200324.pdf.

- 오염처리수를 보일러로 끓여 수증기화하고, 외부 공기를 붙여 넣어 희석시킨 후 굴뚝을 통해 대기로 방출함. 이 때 삼중수소의 공기 중 농도는 원자력발전소(이하 원전)의 부지경계¹²⁾에서 5,000 Bq/m³¹³⁾을 초과할 수 없음. 참고로 우리나라는 그 기준이 3,000 Bq/m³임.
- 방출 도중에는 환경측정을 강화하고 그 결과를 즉시 일반인에 공개함. 이상 징후가 발생되면 방출을 즉시 중지시킴.
- 현재까지 일본에서는 이 방법을 적용한 경험은 없음. 그러나 액체상 방사성물질을 끓여 수증기화하여 공기로 희석시키는 과정을 제외하고 대기로 방출시키는 과정은 원전의 운영으로 발생된 기체상 방사성물질의 대기로 방출과 동일하므로 기술적으로 어려움은 없을 것으로 판단됨.
- 수증기방출은 1979년에 내륙에 위치한 미국의 TMI-2(스리마일섬 원전 2호기) 원전 사고 후 액체상 방사성물질을 처분할 때 적용한 경험이 있음.

12) 부지경계 내에서 일반인의 거주는 제한됨. 따라서 일반인이 거주할 수 있는 가장 가까운 거리는 부지경계임.

13) 일반인이 1년 동안 공기에 포함된 방사성물질의 흡입으로 평생 동안(70세) 받게 될 피폭선량이 1 mSv/yr(일반인의 선량한도)가 되는 공기 중 농도를 유도한 값임.

4. 방사성물질의 인체영향

▣ 방사선은 에너지이며, 그 에너지가 얼마만큼 인체에 영향을 주는가를 나타내는 지표가 피폭선량임.

- 일반적으로 피폭선량이라 함은 모든 인체 장기의 위험을 정량적으로 나타내는 척도인 유효선량(effective dose)을 말하며, 단위는 mSv¹⁴⁾임 .
- 방사선 에너지는 방사선의 종류(알파선, 베타선, 감마선 등)와 피폭하는 장기(폐, 간, 골수 등)에 따라 위험도가 다름.

▣ 방사선은 자연적으로 존재하는 자연방사선과 인공적으로 만들어지는 인공방사선이 있음.

- 자연방사선은 숨 쉬는 공기, 마시는 물, 먹는 음식은 물론 땅속에도 있고 우주에서 날아오기도 하는 등 지구상 어디에나 있음.
- 전 세계인이 평균적으로 피폭하는 자연방사선은 연간 2.4 mSv¹⁵⁾이고 우리나라는 평균 3 mSv 수준임[그림 7]. 한 나라에서도 지역 간에 지질이나 개인의 식생활 등에 따라 차이가 있음. 우리나라의 경우 지역에 따라 2.4~3.4 mSv로 보고되고 있음.
- 우리나라 국민은 연간 평균 3 mSv의 자연방사선 중에서 지각과 우주선으로부터 1.25 mSv, 식품의 섭취로부터 0.38 mSv, 라돈의 흡입으로부터 1.4 mSv 정도 피폭함.
- 인공방사선은 필요에 따라 인위적으로 만든 방사성물질로부터 발생됨. 인위적으로 만들어진 방사성물질은 질병의 검사와 치료, 비파괴검사 등에 활용됨. 또한 원전에서는 에너지를 얻기 위한 우라늄의 핵분열생성물 등으로부터 인공방사선이 발생됨.

14) 방사선의 인체방호 목적으로 피폭 정도를 나타내기 위해 도입된 단위임(1 mSv = 1/1,000 Sv).

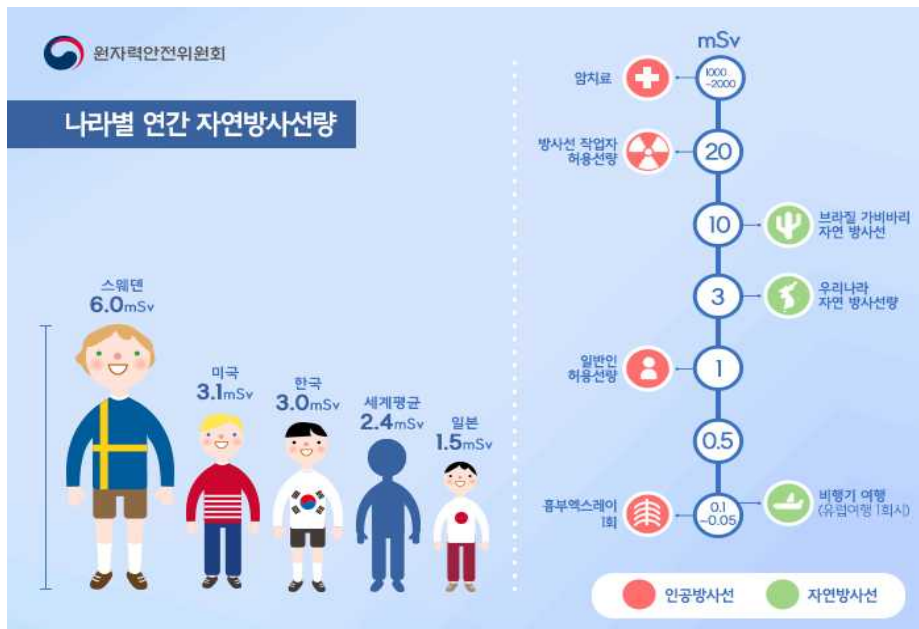


그림 7. 자연방사선과 인공방사선에 의한 피폭선량.

- 방사선은 에너지이기 때문에 측정된 값은 그것이 자연방사선인지 인공방사선인지 구별하지 못함. 또한 몸 안의 세포는 자신에게 방사선 에너지가 전달되었다는 것만 알 뿐이고, 그것이 자연방사선인지 인공방사선인지 알지 못함. 따라서 방사선의 기원에 관계없이 동일한 피폭선량에는 동일한 인체영향을 나타냄.

■ 방사선 관리의 편의를 위해 외부피폭과 내부피폭으로 구분함. 외부피폭이든 내부피폭이든 동일한 피폭선량은 동일한 인체영향을 나타냄.

- 공기와 지표면에 있는 방사성물질, 즉 몸 밖에 존재하는 방사성물질로부터 피폭하는 것을 외부피폭(external exposure)이라 함. 몸 밖에 존재하는 방사성물질이 제거되면 더 이상 피폭을 주지 않음.
- 호흡과 식품섭취 등을 통해 몸 안으로 들어온 방사성물질로부터 피폭하는 것을 내부피폭(internal exposure)이라 함. 방사선방호의 목적으로 내부피폭선량은 몸 안으로 들어온 방사성물질이 평생 동안(70세) 받게 되는 예탁선량(committed dose)으로 나타냄.

- 몸 안의 세포는 자신에게 방사선 에너지가 전달되었다는 것만 알 뿐이고, 어디에서 피폭을 주는지는 알지 못함. 외부피폭과 내부피폭의 구분은 방사선 관리의 편의를 위해 구분한 것일 뿐 동일한 피폭선량은 동일한 인체영향을 나타냄.
- 방사성물질로부터 받게 되는 총 피폭선량은 외부피폭선량과 내부피폭선량을 합산하여 나타냄.

■ 100 mSv 이하의 낮은 선량에서 인체에 대한 유의미한 임상적 영향은 관측되지 않음.

- 미국국립과학원 방사선영향연구회(NAS/BEIR)와 국제방사선방호위원회(ICRP)에서는 100 mSv 이하의 낮은 선량에서 선량과 건강상의 위험도의 상관관계를 나타내기 위해 문턱이 없는 선형비례(Linear Non-Threshold ; LNT) 모델을([그림 8])을 현재까지 방사선방호 관점에서 가장 합리적인 것으로 제시함.

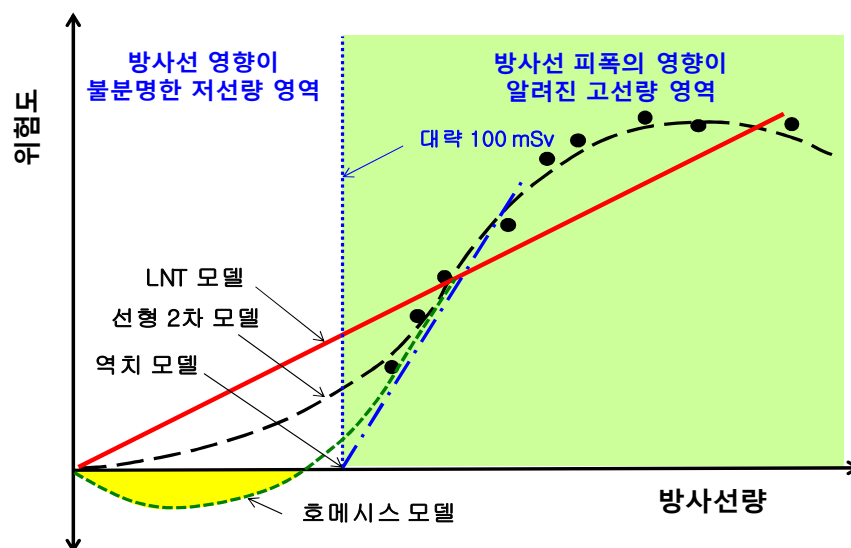


그림 8. 방사선 피폭선량과 인체 위험도.

- 100 mSv 이하의 낮은 선량에서 방사선이 건강에 어떤 해로운 영향이 있는지, 아니면 이로운 영향이 있는지는 현재까지 밝혀지지 않고 있음.

앞으로도 이에 대한 많은 연구는 계속 필요함.

- ICRP는 인공방사선에 의한 일반인의 연간 선량한도를 1 mSv로 정하고 있음. 이는 방사선의 인체영향이 나타나는 선량에 근거하여 일반인이 안전하다고 판단되는 수준의 충분한 여유를 두어 정한 값임. 따라서 연간 선량한도인 1 mSv를 초과하면 위험하고 초과하지 않으면 안전하다는 경계선을 의미하는 것은 아님.

■ 오염처리수 내의 주요 핵종인 삼중수소는 공기나 물 등에 널리 분포되어 있음

- 삼중수소는 수소의 동위원소¹⁶⁾로, 우주선이 지구 안으로 들어오다가 지구 상층부에서 공기를 구성하는 원소인 질소와 충돌하면서 자연적으로 연간 7×10^{16} Bq 정도 생성됨. 또한 원전의 운영과 과거 핵실험 등으로 생성되어 지구상에 존재함.
- 이로 인해 자연에서 삼중수소는 7×10^{19} Bq 정도로 대기의 수증기, 빗물, 지하수, 해수, 수돗물, 식물체, 우리 몸 등 다양하게 존재함. 후쿠시마 원전부지에 저장되어 있는 8.7×10^{14} Bq(870 TBq)의 삼중수소는 전 세계 자연에서 존재하는 삼중수소의 0.0012% 정도임.
- 삼중수소는 순수 베타에너지를 방출하는 수소의 방사성동위원소로 평균 에너지는 약 6 keV 정도임. 이로 인해 공기 중에서는 6 mm 정도 밖에 이동하지 못함. 이와 같이 피부 각질층조차도 통과하지 못하는 삼중수소의 약한 에너지로 인해 외부피폭으로는 인체에 영향을 주지 않음. 참고로 건강검진에 활용되는 엑스선은 수십에서 수백 keV이며, 감마선은 수천 keV의 에너지를 가짐.
- HTO 형태의 삼중수소가 환경으로 방출되어 농작물 등의 생체로 유입되면 광합성작용으로 탄수화물, 지방, 단백질, 핵산 등의 유기물질과 결합하여 OBT(Organically Bounded Tritium ; 유기결합삼중수소) 형태의 삼중수소가 생성됨.

16) 원자번호는 같으나 질량수가 다른 원자. 수소의 동위원소는 수소(H), 중수소(D), 삼중수소(T)가 있으며, 이 중에서 삼중수소가 방사성을 띄는 원소임.

- HTO 형태와 OBT 형태의 삼중수소가 우리 몸에 유입되어 인체에 피폭을 주게 됨. 삼중수소의 물리적반감기¹⁷⁾는 12.3년임. 삼중수소는 물과 마찬가지로 몸 속에서 쉽게 배출됨. 우리 몸 속에서 HTO와 OBT 형태를 갖는 삼중수소의 생물학적반감기¹⁸⁾는 각각 10일와 37일 정도임.
- 일반적으로 해수와 음용수와 같은 물에서 삼중수소의 농도는 0.1~1.0 Bq/L 정도임.
- 국제보건기구(WHO)에서는 삼중수소의 음용수에 대한 기준으로 10,000 Bq/L로 정하고 있으며, 우리나라와 일본은 이에 대한 기준을 별도로 정하고 있지 않음.

17) 주어진 물체 안에 있는 방사성핵종의 방사능은 시간이 지남에 따라 자연적으로 계속 감소함. 방사능이 처음의 절반으로 줄어든 때까지 걸리는 시간을 말하며, 일반적으로 '반감기'라고도 함.

18) 몸 속으로 들어 온 방사성물질의 일부는 신진대사로 몸 밖으로 배출되어 몸 속의 방사능이 절반으로 줄어드는데 걸리는 시간을 말함.

5. 방사선 피폭선량 평가

1) 오염처리수의 환경방출

▣ 오염처리수의 환경방출에 따른 우리나라 국민의 방사선영향을 평가하기 위해서는 우선적으로 오염처리수에 포함되어 있는 방사능에 대한 정보를 파악해야 함.

- 2019년 12월 말 기준으로 152개 저장탱크의 그룹별 방사능농도 자료¹⁹⁾로부터 평가에 필요한 정보를 산정하였음[표 1].
- 오염처리수의 총 방사능은 평균농도와 저장중인 오염처리수의 부피를 곱하여 산정하였음.

표 1. 오염처리수의 예상 평균농도와 총 방사능.

방사성 핵종	반감기	평균 농도(Bq/L)	총 방사능(Bq)
H-3	12.3년	$7.30 \times 10^{5\text{\$}}$	8.60×10^{14}
C-14	5,730년	54	6.36×10^{10}
Tc-99	2.13×10^5 년	4.4	5.18×10^9
Co-60	5.27년	2.03	2.39×10^9
Sb-125	2.77년	7.68	9.05×10^9
Sr-90	29.12년	4.07×10^3	4.79×10^{12}
Ru-106	368.2일	5.63	6.63×10^9
I-129	1.57×10^7 년	9.42	1.11×10^{10}
Cs-134	2.06년	0.842	9.92×10^8
Cs-137	30.17년	7.23	8.52×10^9

^{\\$} 삼중수소(H-3)의 평균 농도는 동경전력에서 제공한 값임.

19) TEPCO, More detail at the radioactive concentrations of each storage tank area, Treated Water Portal Site, Tokyo Electric Power Company Holdings,
http://www4.tepco.co.jp/en/decommission/progress/watertreatment/images/tankarea_en.pdf.

▣ 보수적 평가를 위해 현재 저장된 오염처리수를 재정화하지 않고 전량을 1년에 걸쳐 해양 혹은 대기로 방출한다고 가정함.

- 앞서 언급한 바와 같이 환경방출기준을 초과하는 오염처리수는 ALPS를 사용하여 재정화되고, 이를 희석하여 해양 또는 대기로 방출함.
- 그러나 오염처리수를 환경으로 방출하기 전에 어느 수준까지 방사능 농도를 줄일 것인지, 그리고 언제까지 처분할 것인지 등에 대한 세부계획은 아직 수립되지 않음.
- 보수적 평가를 위해 현재 저장된 오염처리수를 재정화하지 않고 현재 저장된 상태 그대로 해양 혹은 대기로 방출한다고 가정함.
- 또한 저장된 오염처리수를 완전히 처분하는 데는 수 년간의 시간이 걸리지만 1년 동안의 단기간에 전량 처분한다고 가정함.

가) 해양방출

▣ 유엔방사선과학위원회(UNSCEAR)에서는 오염처리수의 해양방출로 인한 해수의 방사능 농도를 평가할 수 있는 모델을 제시함.

- 해양으로 방출된 오염처리수는 매우 복잡한 이동 및 확산 과정을 거침. 후쿠시마에서 방출될 오염처리수는 북태평양에서 표층 해류의 대순환계를 따라 이동하거나 쿠로시오 확장류의 끝부분에서 남쪽으로 갈라져 나와 북태평양 서측으로 이동하여 우리나라 해역에 도달할 수 있음. 이에 대한 상세 설명은 [부록 1]에 수록함.
- 해양 이동 및 확산 모델은 매우 다양하게 존재하며, UNSCEAR에서 제시한 구획모델(compartment model)²⁰⁾로부터 후쿠시마 오염처리수의 해양방출로 인한 표층 해수(이하 해수)의 방사능 농도를 평가할 수 있음.

20) 환경매질(해양 등)을 균질한 특성을 갖는 여러 구획(compartment)으로 나누고, 구획 간에 방사성물질의 이동으로부터 각 구획에서 농도를 평가하는 모델임.

- 국제원자력기구(IAEA)에서는 해수에서의 방사성물질로 인한 생태계 (어류, 갑각류 등)의 농도를 평가하는데 필요한 농축인자²¹⁾ 등 다양한 자료를 제공하고 있음.

■ UNSCEAR에서 제시한 모델과 IAEA에서 제공한 자료를 사용하여 해양 생태계에서 방사능농도를 평가함.

- 후쿠시마 원전부지로부터 10 km까지를 근해(近海), 1,000 km까지를 원해(遠海)로 구획함.
- 구획모델을 사용하여 오염처리수의 해양방출로 인한 해수와 해산물에서 예상되는 방사능농도를 평가함[표 2].
- 근해와 원해의 삼중수소 농도는 각각 43 Bq/L, 8.1×10^{-4} Bq/L로 평가됨. 삼중수소는 물과 같이 농축되지 않으므로 어류에서 그 농도는 각각 43 Bq/kg, 8.1×10^{-4} Bq/kg로 평가됨.
- 전 세계의 해수에서 삼중수소의 평균농도는 0.05 Bq/L 정도임. 오염처리수의 해양방출로 해수에서 삼중수소의 농도는 기존에 존재하는 것보다 근해에서는 약 860배가 높으나 원해에서는 1/60 수준으로 평가됨. 참고로 2013~2018년까지 우리나라 해역의 해수에서 삼중수소 농도는 0.1~0.5 Bq/L을 나타냄.
- 국제보건기구(WHO)와 유엔식량농업기구(FAO)가 공동으로 운영하는 국제식품규격위원회(CODEX)에서 삼중수소에 대한 식품의 섭취 기준으로 유아식품은 1,000 Bq/kg, 그 외에는 10,000 Bq/kg을 정하고 있음. 따라서 오염처리수의 해양방출로 인한 어류의 방사능농도는 섭취 기준에 비해 무시할 수준일 것으로 예상됨.
- 후쿠시마 원전 사고 이후 후쿠시마 원전부지 인근 해역에서 측정된 주요 방사성핵종에 대한 해수에서 농도 변화, 최근 해산물에서 농

21) 해수에 대한 해산물에서의 방사능농도의 비를 나타내며, 단위는 Bq/kg per Bq/L임. 본 보고서에서 식품의 중량은 수분을 포함하는 '생중량(fresh weight)'으로 나타냄.

도, 식품의 농도기준 등의 상세 설명은 [부록 2]에 수록함.

표 2. 해양방출로 인해 예상되는 해수와 해산물의 방사능농도.

방사성핵종	해수 (Bq/L)		해산물			
			어류 (Bq/kg)		갑각류 (Bq/kg)	연체류 (Bq/kg)
	근해 ¹⁾	원해 ¹⁾	근해	원해	근해	근해
H-3	4.3×10^1	8.1×10^{-4}	4.3×10^1	8.1×10^{-4}	4.3×10^1	4.3×10^1
C-14	3.2×10^{-3}	6.4×10^{-8}	6.4×10^1	1.3×10^{-3}	6.4×10^1	6.4×10^1
Tc-99	2.6×10^{-4}	5.2×10^{-9}	2.1×10^{-2}	4.1×10^{-7}	2.6×10^{-1}	1.3×10^{-1}
Co-60	1.2×10^{-4}	2.0×10^{-9}	8.3×10^{-2}	1.4×10^{-6}	8.3×10^{-1}	2.4
Sb-125	4.5×10^{-4}	7.1×10^{-9}	2.7×10^{-1}	4.3×10^{-6}	1.3×10^{-1}	1.3×10^{-1}
Sr-90	2.4×10^{-1}	4.7×10^{-6}	7.2×10^{-1}	1.4×10^{-5}	1.2	2.4
Y-90 ²⁾	2.4×10^{-1}	4.7×10^{-6}	4.8	9.4×10^{-5}	2.4×10^2	2.4×10^2
Ru-106	3.2×10^{-4}	3.8×10^{-9}	6.4×10^{-4}	7.6×10^{-9}	3.2×10^{-2}	1.6×10^1
Rh-106 ²⁾	3.2×10^{-4}	3.8×10^{-9}	NA ⁴⁾	NA	NA	NA
I-129	5.5×10^{-4}	1.1×10^{-8}	5.0×10^{-3}	1.0×10^{-7}	1.7×10^{-3}	5.5×10^{-3}
Cs-134	4.9×10^{-5}	7.3×10^{-10}	4.9×10^{-3}	7.3×10^{-8}	2.4×10^{-3}	2.9×10^{-3}
Cs-137	4.2×10^{-4}	8.3×10^{-9}	4.2×10^{-2}	8.3×10^{-7}	2.1×10^{-2}	2.5×10^{-2}
Ba-137m ³⁾	4.0×10^{-4}	7.9×10^{-9}	4.0×10^{-3}	7.9×10^{-8}	2.8×10^{-4}	4.0×10^{-3}

¹⁾ 근해는 후쿠시마 원전부지로부터 10km, 원해는 1,000km로 정의함.

²⁾ Y-90(반감기 : 64시간)과 Ru-106(반감기 : 30초)은 각각 Sr-90과 Ru-106의 자핵종으로 모핵종과 자핵종은 방사평형을 이뤄 방사능은 동일하다고 가정함. 어떤 방사성핵종이 방사능붕괴를 하여 다른 새로운 방사성핵종이 생성되었을 때 초기 방사성핵종을 모핵종, 생성된 방사성핵종을 자핵종이라 함.

³⁾ Ba-137m(반감기 : 2.6분)은 Cs-137의 자핵종이며, 생성율(yield)은 94.6%임.

⁴⁾ NA는 무시할 수준을 나타냄.

나) 수증기방출

■ 오염처리수를 수증기화하여 굴뚝을 통해 대기로 방출된 방사성물질은 바람을 타고 이동하면서 확산 또는 희석됨.

- 대기에서 이동에 따른 방사성물질의 확산 또는 희석(이하 확산) 정도는 대기확산모델(atmospheric dispersion model)을 사용하여 평가될 수 있음.
- 후쿠시마 원전과 우리나라 내륙까지는 약 1,000 km 떨어져 있음 (후쿠시마 원전과 부산까지의 직선거리는 약 1,090 km임). 미국 Oak Ridge 국립연구소(ORNL)에서 개발한 RETADD-II 코드는 장거리 확산평가에 적합한 모델을 제공하고 있음.

▣ 대기에서 확산되는 정도를 평가하기 위해 후쿠시마 원전 인근의 이와키시(磐城市)에서 측정된 기상자료²²⁾를 분석함.

- 이와키시의 풍향은 북서풍(NW)이 연중 약 30%로 가장 많음. 북서풍은 일본의 내륙에서 북태평양으로 바람이 불어 나가는 방향임.
- 수증기화된 오염처리수가 우리나라에 영향을 줄 수 있는 풍향은 동풍(E) 계열임. 동풍 계열 중에서 한 특정방향으로 바람이 불 확률은 연중 10%에도 채 미치지 못함.
- 연간 평균풍속은 2.5 m/sec이며, 대기안정도²³⁾는 중립상태(D)의 발생확률이 가장 많음.

▣ ORNL에서 개발한 RETADD-II 코드에 적용된 모델을 사용하여 평가한 우리나라 내륙에서 연간평균 대기확산인자(atmospheric dispersion factor)²⁴⁾는 4.93×10^{-11} sec/m³임.

- RETADD-II 코드에 적용된 장거리 대기확산모델은 기본적으로 직선레적 가우시안 플룸모델(straight-line Gaussian plume model)²⁵⁾

22) 원자력발전소 주변 환경방사능 측정결과 보고서, 평성30년도.

23) 공기가 혼합되는 정도를 나타내는 지표이며, Pasquill(파스킬) 분류체계에 따라 A(매우 불안정)부터 G(매우 안정)까지 7개 등급으로 나뉨.

24) 방사성물질이 1 Bq/sec로 1년 동안 일정하게 대기로 방출될 때 공기 중의 농도(Bq/m³)를 나타냄. 방사성핵종을 구분하지 않고 확산되는 정도를 일반화한 것으로 단위는 sec/m³임. 대기희석인자(atmospheric dilution factor)라고도 불리움.

25) 방사성물질은 대기에서 지그재그로 움직이지 않고 한 지점에서 측정된 풍향과 풍속에 따라 직선으로 이동하며, 수평방향과 수직방향의 농도는 정규분포(normal distribution)를 가진다고 가정하는 모델임. 일반적으로 십 수 km까지의 짧은 거리까지 방사성물질 확산의 예측에 널리 사용되는 모델임.

에 근거함. 이 모델은 근거리에 보다 적합하지만 모델의 변수 등을 장거리에 적용 가능하도록 개선되었음.

- 풍속이 크면 클수록 방사성물질은 대기에서 확산이 더 잘 이루어지므로 공기 중 농도는 더욱 낮아짐.
- 보수적 평가를 위해 연중 30%의 시간동안 후쿠시마 원전부지에서 우리나라의 내륙으로 2 m/sec의 일정한 풍속으로 바람이 불어온다고 가정함.
- 후쿠시마 원전에서 방출된 방사성물질이 직선으로 이동한다고 하더라도 우리나라 내륙에 도달하기까지는 약 140시간(5.8일)이 걸림. 보수적 평가를 위해 방사성물질의 이동 중에는 방사능붕괴나 해수면으로의 침적이 일어나지 않아 공기 중 농도의 손실은 없다고 가정함.
- 대기확산모델을 사용하여 평가한 우리나라 내륙에서의 예상되는 공기 중 방사능농도는 [표 3]과 같음.

■ 공기 중으로 이동하여 우리나라 내륙 상공에 도달한 방사성물질의 일부는 지표면으로 침적되어 토양이나 농작물에 영향을 주게 됨. 이를 평가하기 위한 연간평균 침적인자(deposition factor)²⁶⁾의 값은 $9.86 \times 10^{-14} \text{ 1/m}^2\text{임}$.

- 연간평균 침적인자는 방사성물질의 대기확산인자와 침적속도(deposition velocity, m/sec)²⁷⁾ 등으로 평가될 수 있음.
- 입자상 핵종의 침적속도는 $2 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$ 정도이며, H-3과 C-14은 거의 침적되지 않음.
- 우리나라 내륙에서 예상되는 지표면 방사능농도는 [표 3]과 같음.

26) 공기 중 방사능농도부터 지표면의 방사능농도를 정량화하기 위한 것으로 단위는 $1/\text{m}^2\text{임}$.

27) 공기와 지표면의 방사능농도의 상관관계를 나타내는 것으로 단위는 m/sec 임.

표 3. 수증기방출로 인해 우리나라 내륙에서 예상되는 공기와 지표면 농도.

방사성핵종	공기 중 농도(Bq/m ³)	지표면 농도(Bq/m ²)
H-3	1.35×10^{-3}	NA ³⁾
C-14	9.96×10^{-8}	NA
Tc-99	8.09×10^{-9}	2.55×10^{-4}
Co-60	3.74×10^{-9}	1.14×10^{-4}
Sb-125	1.41×10^{-8}	4.19×10^{-4}
Sr-90	7.49×10^{-6}	2.35×10^{-1}
Y-90 ¹⁾	7.49×10^{-6}	4.98×10^{-3}
Ru-106	1.04×10^{-8}	2.76×10^{-4}
Rh-106 ¹⁾	1.04×10^{-8}	8.96×10^{-10}
I-129	1.74×10^{-8}	5.47×10^{-4}
Cs-134	1.55×10^{-9}	4.51×10^{-5}
Cs-137	1.33×10^{-8}	4.17×10^{-4}
Ba-137m ²⁾	1.26×10^{-8}	5.56×10^{-9}

¹⁾ Y-90(반감기 : 64시간)과 Ru-106(반감기 : 30초)은 각각 Sr-90과 Ru-106의 자핵종으로 모핵종과 자핵종은 단시간 내 방사평형을 이뤄 방사능은 동일하다고 가정함.

²⁾ Ba-137m(반감기 : 2.6분)은 Cs-137의 자핵종이며, 모핵종으로부터 생성율(yield)은 94.6%임.

³⁾ NA는 무시할 수준을 나타냄.

- 식품의 농도는 연간평균 침적인자를 사용하여 미국 원자력규제 위원회(NRC)의 규제지침 1.109에 제시된 평형모델(equilibrium model)²⁸⁾로 평가될 수 있음.
- H-3과 C-14은 공기 중에서 혼합이 잘 이루어지고 지표면에 거의 침적되지 않음. 또한 자연계에서 생성되어 널리 분포되어 있음. 이들 방사성핵종으로 인한 식품의 농도는 NRC의 규제지침 1.109에 제시된 비방사능모델(specific activity model)²⁹⁾로 평가될 수 있음.

28) 방사성물질이 일정하게 대기로 방출되어 공기, 토양, 농작물 등에서 방사능은 일정하다고 가정한 모델임. 이 모델은 원자력시설의 운영 중에 발생된 기체상 방사성물질의 관리를 위해 적용되고 있음.

29) 공기와 식물체에서 안정 동위원소와 방사선 동위원소는 일정한 비율로 존재한다고 가정하는 모델임. H-3와 C-14과 같이 자연에서도 널리 존재하며, 대기에서 혼합이 잘 이루어지는 방사성물질로 인한 농작물의 농도를 예측하는데 유용한 모델임. 이 모델은 원자력시설의 운영 중에 발생된 기체상 방사성물질의 관리를 위해 적용되고 있음.

2) 예상 피폭선량

가) 해양방출

■ 오염처리수의 해양방출로 후쿠시마 원전부지로부터 원해에서의 어업활동으로 잡은 어류를 섭취하였을 때 우리나라 국민에게 건강상 영향을 줄 가능성이 있음.

- 후쿠시마 원전부지 근해에서 잡은 해산물은 많은 부분이 우리나라 정부의 수입 금지조치에 따라 국내로 반입되지 않음.
- 우리나라 국민은 북태평양지역의 원양어업으로 잡은 어류를 섭취함으로써 오염처리수의 해양방출로 인한 건강상의 영향을 받을 수 있음.

■ 원양어업으로 잡은 어류의 섭취로 인한 피폭선량은 다음 기본 식으로 평가될 수 있음.

$$\text{섭취 피폭선량(mSv/yr)} = \text{해수농도(Bq/L)} \times \text{농축인자(Bq/kg per Bq/L)} \times \text{총 섭취량(kg/yr)} \times \text{원양어업 공급분율} \times \text{섭취 선량계수(mSv/Bq)}$$

- 보수적으로 원양어업으로 잡은 어류는 전량 후쿠시마 원전부지로부터 원해에서 잡은 것을 우리나라 국민이 소비한다고 가정함.
- 우리나라 국민의 평균 어류섭취량은 23 kg/yr이며, 이 중에서 원양어업으로 잡아 소비되는 어류는 13% 정도를 차지함.
- 선량계수(dose coefficient)³⁰⁾는 ICRP의 1990년 권고에 따른 조직가중치를 고려한 값을 적용함.

30) 환경매질(공기 또는 지표면) 또는 우리 몸 속으로 들어온 방사능으로부터 피폭선량을 평가하기 위한 값임. 공기와 지표면으로부터 받는 외부피폭 선량계수의 단위는 각각 mSv/hr per Bq/m³, mSv/hr per Bq/m²임. 호흡과 식품섭취로 인한 내부피폭 선량계수의 단위는 mSv/Bq임.

▣ 원양어업으로 잡은 어류의 섭취로 인한 피폭선량은 3.5×10^{-9} mSv/yr로 평가됨.

- 원양어업으로 잡은 어류의 섭취로 우리나라 국민이 받을 수 있는 연간 피폭선량의 상세결과를 [표 4]에 제시함.

표 4. 해양방출로 인한 우리나라 국민의 예상 피폭선량.

방사성핵종	피폭선량 (mSv/yr)	핵종	피폭선량 (mSv/yr)
H-3	4.4×10^{-11}	Ru-106 ¹⁾	1.6×10^{-13}
C-14	2.2×10^{-9}	Rh-106	NA
Tc-99	7.9×10^{-13}	I-129	3.3×10^{-11}
Co-60	1.4×10^{-11}	Cs-134	4.1×10^{-12}
Sb-125	1.4×10^{-11}	Cs-137	3.2×10^{-11}
Sr-90	1.2×10^{-9}	Ba-137m ²⁾	NA
Y-90 ¹⁾	NA ³⁾		
합계			3.5×10^{-9}

¹⁾ Y-90(반감기 : 64시간)과 Ru-106(반감기 : 30초)은 각각 Sr-90과 Ru-106의 자핵종으로 모핵종과 자핵종은 단기간 내에 방사평형을 이뤄 방사능은 동일하다고 가정함.

²⁾ Ba-137m(반감기 : 2.6분)은 Cs-137의 자핵종이며, 모핵종으로부터 생성율(yield)은 94.6%임.

³⁾ NA는 무시 가능한 수준을 나타냄.

- 방사성물질의 추가 처리가 없다면, 오염처리수 내 방사성핵종 중에서 C-14와 Sr-90이 총 피폭선량에 상대적으로 많은 기여를 하는 것으로 평가됨.

나) 수증기방출

▣ 오염처리수를 수증기화하여 대기로 방출하였을 경우 우리나라 국민은 다음 경로를 통해 피폭할 수 있음[그림 9].

- ① 공기로부터 베타선과 감마선에 의한 외부피폭
- ② 공기의 흡입으로 인한 내부피폭
- ③ 침적된 지표면으로부터 베타선과 감마선에 의한 외부피폭
- ④ 식품의 섭취로 인한 내부피폭

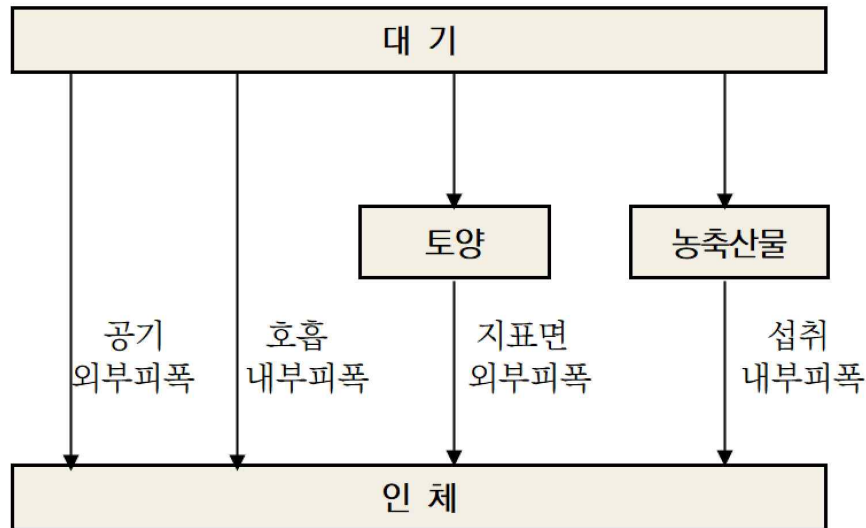


그림 9. 수증기방출로 인한 주요 피폭경로.

▣ 공기 중 방사성물질로부터 받을 수 있는 외부피폭선량은 1.52×10^{-10} mSv/yr로 평가됨.

- 우리나라 국민이 공기 중 방사성물질로부터 베타선과 감마선에 의한 외부피폭선량은 다음 기본 식으로 평가될 수 있음.

$$\text{공기 외부피폭선량(mSv/yr)} = \text{공기농도(Bq/m}^3\text{)} \times [\text{실외거주시간분율} + (\text{실내거주시간분율} \times \text{가옥차폐인자})] \times \text{공기 외부피폭 선량계수(mSv/yr per Bq/m}^3\text{)}$$

- 우리나라 국민은 하루 중에서 16시간은 실외, 8시간은 실내에서 활동한다고 가정함.

- 가옥의 차폐인자³¹⁾는 보수적으로 차폐효과가 적은 경량목조건물에 적용되는 0.4를 적용함. 실제 우리나라는 대부분 콘크리트 건물로 경량목조건물에 비해 차폐효과가 우수한 편임.

■ 지표면에 침적된 방사성물질로부터 받을 수 있는 외부피폭선량은 2.75×10^{-8} mSv/yr로 평가됨.

- 지표면에 침적된 방사성물질로부터 베타선이나 감마선에 의한 외부 피폭선량은 다음 기본 식으로부터 평가될 수 있음.

$$\text{지표면 외부피폭선량(mSv/yr)} = \text{지표면농도 (Bq/m}^2\text{)} \times [\text{실외 거주시간분율} + (\text{실내거주시간분율} \times \text{가옥 차폐인자})] \times \text{지표면 외부피폭 선량계수(mSv/yr per Bq/m}^2\text{)}$$

- 우리나라 국민의 실내외 생활습성, 가옥차폐인자 등은 공기로부터 받는 외부피폭선량에서 기술한 가정과 동일함.

■ 공기의 흡입으로 인한 내부피폭선량은 1.87×10^{-6} mSv/yr로 평가됨.

- 공기의 흡입으로 인한 내부피폭선량은 다음과 같은 기본 식으로 평가될 수 있음.

$$\text{호흡 내부피폭선량(mSv/yr)} = \text{공기농도(Bq/m}^3\text{)} \times \text{호흡률 (m}^3\text{/yr)} \times \text{호흡 선량계수(mSv/Bq)}$$

- 우리나라 성인의 평균 호흡률은 8,100 m³/yr 정도임.
- 공기 중의 HTO 형태의 삼중수소는 물과 같은 성질을 가지므로 피부의 흡수를 통해 우리 몸으로 유입될 수 있음. 이를 고려하기 위

31) 방사선은 가옥과 같은 구조물을 통과하면서 방사능이 줄어드는데 이를 차폐라 함. 차폐인자는 가옥의 외부에 대한 내부에서 선량률의 비로 정의함.

해 피부의 흡수를 통한 피폭선량은 호흡에 의한 피폭선량의 50%로 가정함.

■ 식품섭취에 의한 내부피폭선량은 6.34×10^{-5} mSv/yr로 평가됨.

- 식품을 섭취함으로써 받게 되는 내부피폭선량은 다음 기본 식으로부터 평가될 수 있음.

$$\text{식품 내부피폭선량(mSv/yr)} = \text{식품농도(Bq/kg)} \times \text{식품섭취율(kg/yr)} \times \text{섭취 선량계수(mSv/Bq)}$$

- 보수적 평가를 위해 섭취하는 식품 전량이 후쿠시마 원전부지에서 가장 가까운 우리나라 내륙에서 생산되어 그 지역민이 섭취한다고 가정함.
- 2017년 우리나라 성인의 평균 섭취율은 곡류 105 kg/yr, 채소류 121 kg/yr, 우유 38 kg/yr, 육류 53 kg/yr 정도임.

■ 모든 경로를 통해 우리나라 국민이 받게 되는 총 피폭선량은 6.53×10^{-5} mSv/yr로 평가됨.

- 오염처리수의 수증기방출로 우리나라 국민이 모든 경로로부터 받게 되는 총 피폭선량은 각 경로로부터 피폭할 수 있는 선량의 합임.

$$\text{총 피폭선량(mSv/yr)} = \text{공기 외부피폭선량(mSv/yr)} + \text{지표면 외부피폭선량(mSv/yr)} + \text{흡입 내부피폭선량(mSv/yr)} + \text{섭취 내부피폭선량(mSv/yr)}$$

- 총 피폭선량에 대한 상세결과를 [표 5]에 제시함.
- 총 피폭선량에 대한 기여도는 섭취에 의한 피폭이 97.1%, 호흡에

의한 피폭이 2.85%, 지표면에 의한 피폭이 0.042%, 공기에 의한 피폭이 0.00023%를 차지함.

- 총 피폭선량 중에서 Sr-90의 기여가 97.4%로 가장 높고, H-3는 1.4% 정도를 차지함.

표 5. 수증기방출로 인한 우리나라 국민의 예상 피폭선량(mSv/yr).

방사성핵종	피폭경로				합계
	섭취	호흡	지표면	공기	
H-3	6.10×10^{-7}	3.00×10^{-7}	NA ³⁾	NA	9.10×10^{-7}
C-14	1.29×10^{-8}	4.57×10^{-12}	NA	4.90×10^{-15}	1.29×10^{-8}
Tc-99	1.53×10^{-9}	2.62×10^{-10}	3.08×10^{-13}	4.25×10^{-15}	1.79×10^{-9}
Co-60	3.41×10^{-9}	3.03×10^{-10}	4.98×10^{-9}	8.45×10^{-12}	8.69×10^{-9}
Sb-125	4.07×10^{-9}	5.50×10^{-10}	3.31×10^{-9}	4.98×10^{-12}	7.93×10^{-9}
Sr-90	6.21×10^{-5}	1.46×10^{-6}	7.28×10^{-9}	1.38×10^{-11}	6.36×10^{-5}
Y-90 ¹⁾	4.52×10^{-8}	9.10×10^{-8}	1.05×10^{-8}	1.14×10^{-10}	1.47×10^{-7}
Ru-106	1.67×10^{-8}	2.35×10^{-9}	NA	NA	1.90×10^{-8}
Rh-106	NA ³⁾	NA	5.65×10^{-15}	2.07×10^{-12}	2.07×10^{-12}
I-129	5.62×10^{-7}	1.35×10^{-8}	2.01×10^{-10}	9.12×10^{-14}	5.76×10^{-7}
Cs-134	8.11×10^{-9}	8.30×10^{-11}	1.26×10^{-9}	2.04×10^{-12}	9.45×10^{-9}
Cs-137	5.17×10^{-8}	4.96×10^{-10}	2.41×10^{-11}	2.31×10^{-14}	5.22×10^{-8}
Ba-137m ²⁾	NA	NA	6.14×10^{-14}	6.42×10^{-12}	6.48×10^{-12}
합계	6.34×10^{-5}	1.87×10^{-6}	2.75×10^{-8}	1.52×10^{-10}	6.53×10^{-5}

¹⁾ Y-90(반감기 : 64시간)과 Ru-106(반감기 : 30초)은 각각 Sr-90과 Ru-106의 자핵종으로 모핵종과 자핵종은 단기간 내에 방사평형을 이뤄 방사능은 동일하다고 가정함.

²⁾ Ba-137m(반감기 : 2.6분)은 Cs-137의 자핵종이며, 모핵종으로부터 생성율(yield)은 94.6%임.

³⁾ NA는 무시 가능한 수준을 나타냄.

6. 결론 및 권고

■ 후쿠시마 방사선 안전 문제는 아직도 현재 진행형임. 이러한 방사선 위험성에 직면하거나 또는 그 위험성을 판단하고자 할 때에 우리가 알아야 할 기본적인 지식은 다음과 같음.

- 방사선은 어느 곳에도 있음. 우리가 숨을 쉬는 공기에도 있고, 매일 마시는 물과 먹는 음식물에도 있으며, 땅 속에도 있고, 지구 밖 우주에서도 지구 안으로 날아 들어오고 있음.
- 우리나라 사람은 어른이든 아이이든 자연에 있는 방사선에 의해 일 년에 평균적으로 3 mSv 정도를 받으며 살고 있음.
- 방사선은 자연적으로 존재하는 것도 있고 인공적으로 만들어 지는 것도 있음. 자연방사선이든 인공방사선이든 우리 몸에 미칠 수 있는 해로운 영향의 정도는 우리 몸이 받는 총 피폭선량의 크기에 비례함.
- 100 mSv 이하의 피폭에서 인체 건강에 해로운 영향이 나타난다는 임상적 근거는 아직 없으며, 이러한 낮은 선량에서 인체영향에 대한 연구는 계속 진행 중임.

■ 해양방출이든 대기방출이든 모두 우리나라 국민의 방사선에 의한 피폭영향은 미미한 수준으로 평가됨.

- 우리나라 국민이 받을 것으로 예상되는 피폭선량은 오염처리수를 해양으로 방출하는 경우에는 3.5×10^{-9} mSv/yr, 수증기로 방출하는 경우에는 6.5×10^{-5} mSv/yr로 평가됨. 이는 인공방사선에 의한 일반인의 선량한도 1 mSv/yr에 비해 매우 낮은 값임.
- 이러한 결과는 오염처리수를 재정화하지 않고 현재 저장상태 그대로 1년 동안 전량을 처분한다는 보수적인 가정 하에 평가한 것임. 실제적으로는 환경방출기준을 초과하지 않도록 오염처리수를 재정화하여 방출할 것으로 예상되므로 우리나라 국민이 받을 수 있는 피폭선량은 이보다 더 낮을 것임.

- 또한 본 결과는 저장된 오염처리수를 1년 동안 단기간에 전량을 처분한다는 가정 하에 평가한 것으로, 전량을 처분하는데 기간이 길어지면 연간 피폭선량은 이에 반비례하여 더욱 낮아짐.
- 따라서 오염처리수의 환경방출로 인한 우리나라 국민의 방사선영향은 거의 없을 것으로 판단함.

■ 예상되는 방사선영향은 미미한 수준임에도 불구하고 우리나라 국민의 우려를 고려하여 다음 사항을 권고함.

- 현재 저장된 오염처리수의 처분은 반드시 법적 요건과 필요시에 국제법을 준수하여야 하며, 이해당사국과 함께 이를 검증할 체계와 절차가 수립되어야 함.
- 환경방출기준에 부합하는 처분방안이라고 하더라도 최신 기술을 이용하여 방사능농도를 최대한 줄이기 위한 노력이 필요함.
- 오염처리수를 방출하기 전에는 잔류하는 방사능을 신뢰할 만한 방법으로 측정하고 분석해야 하며, 그 결과는 국제기구 뿐 아니라 이해당사국에도 수시로 공개해야 함.
- 주기적으로 국제기구 뿐 아니라 이해당사국이 참여하는 소통 채널을 구축하는 것도 국제적 신뢰도를 높일 수 있는 바람직한 방안이 될 것임.
- 오염처리수를 처분하는 동안에는 환경시료의 측정 및 분석, 처리시설의 오작동에 대비한 안전성 등의 강화에 노력을 기울여야 함.
- 후쿠시마 원전부지로부터 근접한 해역에서 채취한 해산물에서 방사능농도가 기준을 초과할 수 있을 가능성에 대비하여 우리나라 정부는 수입 해산물에 대한 검역을 강화하고, 원양 어업지역에서 방사능 측정을 주기적으로 실시할 필요가 있음.

■ 한국원자력학회는 본 보고서를 객관적 사실과 과학적인 지식을 토대로

작성하였으며, 본 보고서가 정부, 언론, 국민이 후쿠시마 오염처리수의 처분에 따른 방사선안전을 객관적으로 판단하고 대응하는데 도움이 되기를 희망함.

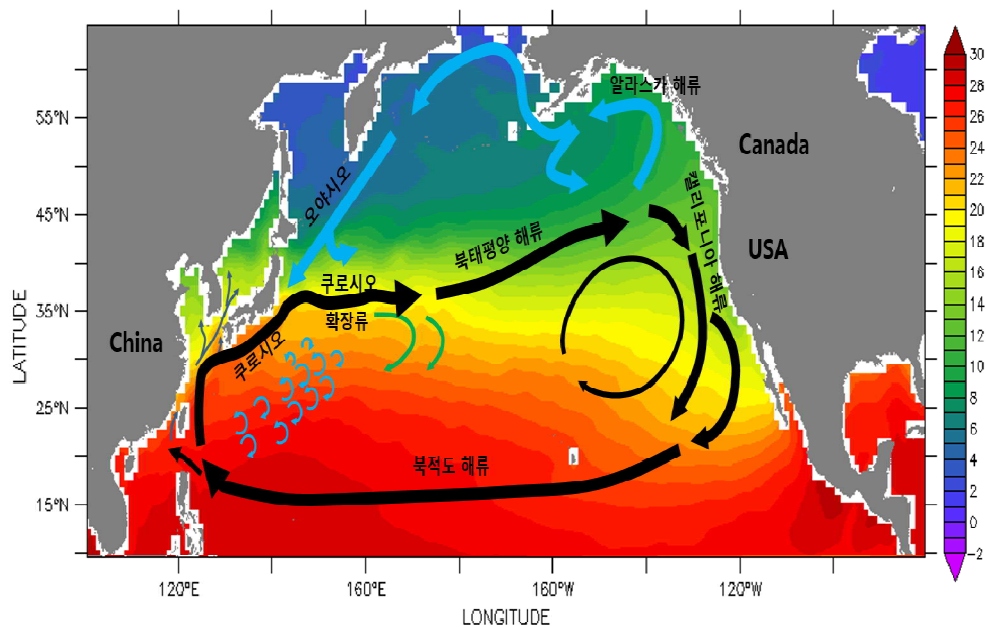
- 최근 국내의 일부 언론에서는 방사능에 대한 과학적 사실보다는 위험에 대한 자극적 보도로 인해 소셜미디어(SNS) 등을 통해 유언비어와 함께 잘못된 정보가 급속히 확산되고 있음
- 언론은 과학적 사실에 근거한 올바른 정보를 국민에게 제공할 책임이 있음.
- 정부는 일본의 오염처리수의 처분으로 우리 국민의 우려가 큰 만큼 사실에 근거하여 올바른 정책과 대응책을 수립하여야 함.
- 국민은 정보의 홍수 속에서 옳고 그름을 판별할 수 있는 보다 성숙한 시민 의식이 요구됨.

부록 1

후쿠시마 오염처리수의 해양 이동 및 확산

▣ 오염처리수가 해양으로 방출되면 해류의 흐름을 타고 이동하면서 난류에 의해 확산 또는 희석됨.

- [부록그림 1]은 태평양에서 표층 해류의 이동 흐름을 간략히 나타낸 것으로 크게 2개의 대순환계로 구성됨. 하나는 쿠로시오 해류 → 쿠로시오 확장류 → 북태평양 해류 → 알래스카 해류 → 오야시오 해류로 이어지는 대순환계이고, 다른 하나는 쿠로시오 해류 → 쿠로시오 확장류 → 북태평양 해류 → 캘리포니아 해류 → 북적도 해류로 이어지는 대순환계임.
- 북태평양에 존재하는 해류의 이동 및 확산현상은 매우 복잡하고 다양함. 상기에 설명한 대순환계 이외에도 쿠로시오 확장류를 따라 다수의 중규모 와류현상이 존재하여 확장류 일부가 아열대 수괴(Subtropical Mode Water ; STMW)에 해류가 합류된다고 알려져 있음.



부록그림 1. 북태평양에서 표층 해류의 이동 흐름도.

■ 해양으로 방출된 오염처리수가 이동하면서 확산되어 우리나라 해역에 미치는 영향은 매우 적을 것으로 판단됨.

- 해양으로 방출된 오염처리수의 쿠로시오 해류 → 쿠로시오 확장류 → 북태평양 해류 → 캘리포니아 해류 → 북적도 해류로의 이동은 우리나라 해역에 영향을 줄 수 있음.
- 이러한 경로로 오염처리수가 이동하여 우리나라 해역에 도달하는 데는 10 ~ 20년 정도의 장시간이 소요됨. 이 이동 과정에서 오염처리수는 많이 희석되어 우리나라 해역에서의 영향은 거의 없을 것으로 판단함.
- 쿠로시오 확장류의 끝부분에서 남측으로 갈라져 나와 아열대 수괴에 합류하는 해류를 타고 북태평양 서측으로 이동하게 되는 오염처리수가 우리나라 해역에 도달하기까지는 대순환계 이동경로에 비해 상대적으로 짧은 시간이 걸릴 수 있음.
- 독일 GEOMAR 연구그룹의 수치모델링을 통한 연구결과에 근거할 때 H-3를 포함하는 오염처리수를 10년에 걸쳐 일정하게 방출하는 경우 5년 후 우리나라 동해 남측 입구에 진입하는 H-3의 농도는 $\sim 10^{-8}$ Bq/L 수준일 것으로 예측됨. 이 후 농도 상승이 있을 것이나 그 농도는 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ Bq/L 수준일 것으로 예상함.
- 향후 보다 정밀한 모델링을 통해 이에 대한 검증이 필요하지만 상기 결과로부터 오염처리수의 해양방출로 인한 우리나라 동해에의 유의미한 영향은 없을 것으로 판단됨.

부록 2

후쿠시마 원전 인근 해양에서 방사능 측정 현황

▣ 후쿠시마 원전의 인근 해양에서 H-3의 측정농도는 현재 심각한 수준은 아님.

- 후쿠시마 원전사고 이후 원전의 북쪽 방출 운하로부터 50 m 지점에서 표층 해수에서 Cs-137과 달리 H-3의 농도는 완만한 감소를 나타냄[부록그림 2³²⁾].
- H-3 방사능농도는 최대 10 Bq/L를 나타냈으며, 이는 사고 이전 북태평양 표층해수 중 H-3의 평균 농도 0.05~0.06 Bq/L보다 약 170배 높은 농도임.
- 2020년 4월~6월까지 후쿠시마 원전의 반경 2 km 이내 표층 해수에서 H-3의 농도는 최대 1.1 Bq/L의 농도를 나타냄. 반경 40~100 km 부근에서는 0.047~0.067 Bq/L의 농도를 나타냄³³⁾.
- 이러한 결과로부터 현재 후쿠시마 원전의 인근 해양에서 H-3의 농도는 심각한 수준은 아닐 것으로 판단함.

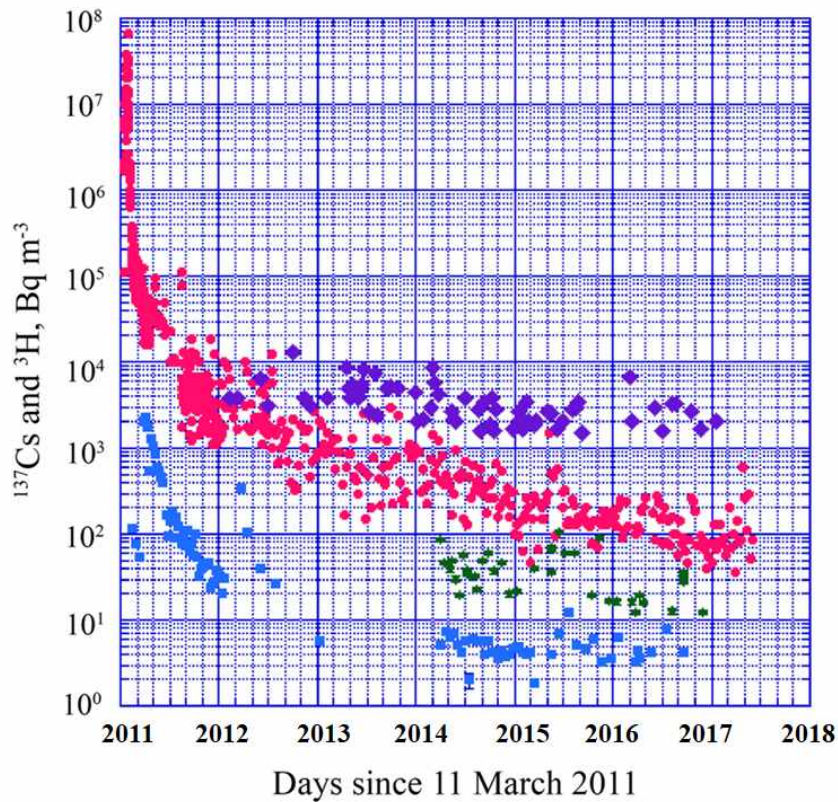
▣ 후쿠시마 원전부지 인근에서 표층 해수에서 Cs-137의 농도는 사고 이전과 유사 수준임.

- 후쿠시마 원전사고 이후 원전의 북쪽 방출 운하로부터 50 m 지점에서 표층 해수에서 사고 이후 Cs-137의 농도는 급격한 감소를 나타냄[부록그림 2³⁴⁾].

32) M. Aoyama, Long-term behavior of ¹³⁷Cs and ³H activities from TEPCO Fukushima NPP1 accident in the coastal region off Fukushima, Japan Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2018, <https://doi.org/10.1007/s10967-018-5815-3>).

33) Japan Atomic Energy Agency, Database for Radioactive Substance Monitoring Data : 해양 생태계의 방사성물질 거동조사 사업보고서, 2020.

34) M. Aoyama, Long-term behavior of ¹³⁷Cs and ³H activities from TEPCO Fukushima NPP1 accident in the coastal region off Fukushima, Japan Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2018, <https://doi.org/10.1007/s10967-018-5815-3>).

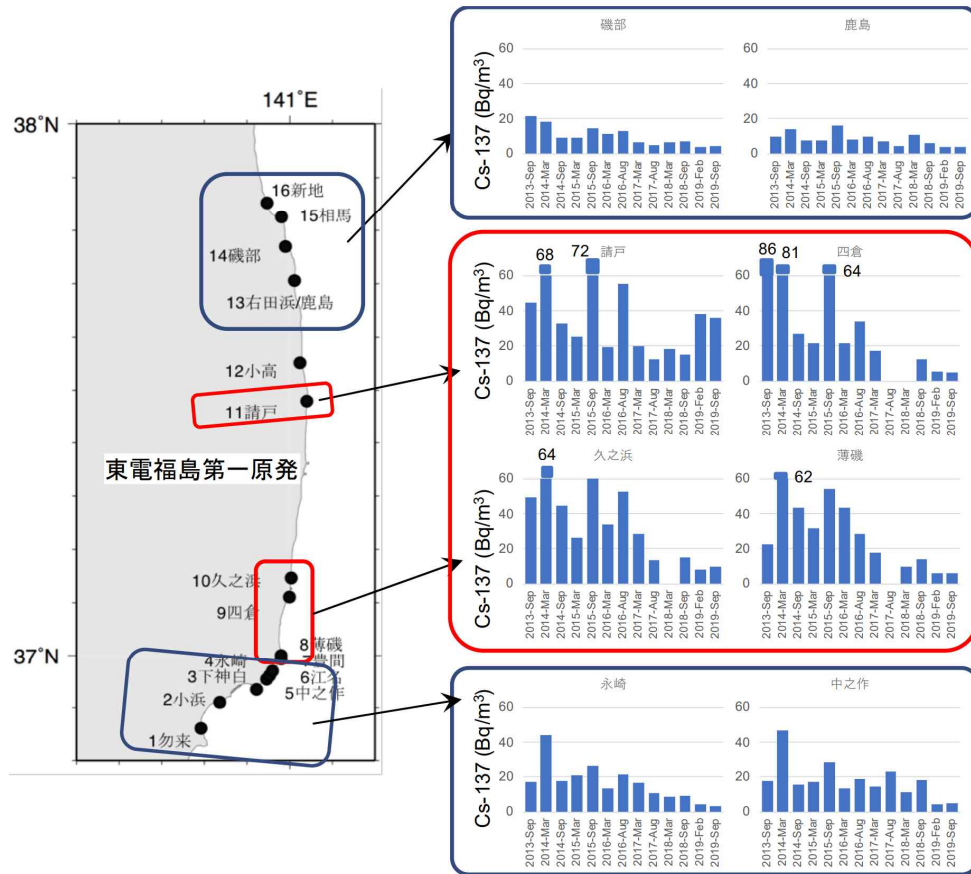


부록그림 2. 후쿠시마 원전 북쪽 방류 운하로부터 50 m 지점에서
H-3(보라색)과 Cs-137(빨강색)의 농도 변화.

- 2020년 4월~6월까지 후쿠시마 원전부지로부터 반경 2 km 이내 표층 해수에서 Cs-137은 0.10~0.21 Bq/L의 농도범위를 나타냄. 같은 기간동안 40~100 km에서는 0.0016~0.0022 Bq/L의 농도범위를 나타냄³⁵⁾. 이 농도는 후쿠시마 원전사고 이전 농도(0.0015 Bq/L)와 거의 유사한 수준임.
- [부록그림 3³⁶⁾]은 후쿠시마 원전 인근에서 측정한 표층 해수의 연도별 방사능농도를 보여줌.
- 2020년 4월~6월까지 후쿠시마 원전부지로부터 반경 2 km 이내 표층 해수에서 Sr-90은 0.0020~0.0041 Bq/L의 농도 범위를 나타냄.

35) Japan Atomic Energy Agency, Database for Radioactive Substance Monitoring Data : 해양 생태계의 방사성물질 거동조사 사업보고서, 2020.

36) Japan Atomic Energy Agency, Database for Radioactive Substance Monitoring Data : 해양 생태계의 방사성물질 거동조사 사업보고서, 2020.



부록그림 3. 후쿠시마 원전의 주변 연안 표층수 중 Cs-137 농도 변화($1 \text{ Bq/m}^3 = 0.001 \text{ Bq/L}$).

- 같은 기간동안 40~100 km 부근에서는 $0.00066 \sim 0.00097 \text{ Bq/L}$ 의 농도 범위를 나타냄. 이 농도는 후쿠시마 원전사고 이전 농도(검출하한치 : 0.001 Bq/L)와 거의 유사한 수준임.

▣ 후쿠시마 원전부지로부터 인근 해역에서 잡은 어류의 방사능농도는 대부분 기준치 이하로 측정됨.

- 국제식품규격위원회(CODEX)에서 제시하는 기준은 H-3의 경우 유아식품에 대해서는 $1,000 \text{ Bq/kg}$, 그 외 식품에 대해서는 $10,000 \text{ Bq/kg}$ 임. Sr-90과 Cs-137은 모든 식품에 대해 각각 100 Bq/kg , $1,000 \text{ Bq/kg}$ 임.
- 국제원자력기구(IAEA)에서 제시한 결과에 따르면 어류에서 H-3은 거의 농

측되지 않음. [부록그림 2]에서 나타낸 바와 같이 원전 인근 해수 중 H-3의 농도(1~10 Bq/L)를 고려하면 어류에서 H-3의 농도도 이와 유사한(1~10 Bq/kg) 농도 수준일 것으로 예상됨. 이는 CODEX의 기준에 훨씬 못 미치는 수준임.

- 원전사고 이후 원전을 포함한 후쿠시마현 주변을 중심으로 2011년부터 2020년 3월까지 잡은 어류에서 Sr-90의 농도는 대부분 검출하한치를 나타냄[부록그림 4³⁷⁾]. 2011년 이후 일부 시료에서 유의한 농도수준인 1~60 Bq/kg가 검출되었으나, CODEX의 기준인 100 Bq/kg에는 못 미치는 수준임.
- 원전사고 이후 원전을 포함한 후쿠시마현 주변을 중심으로 2011년부터 2020년 3월까지 채집한 어류 중 Cs-137의 농도는 사고 초기에는 CODEX의 기준인 1,000 Bq/kg를 초과하였음. 그러나 이후 시간에 따라 급격하게 감소하여 2014년 이후부터는 CODEX의 기준보다 낮은 농도를 나타냄[부록그림 4].
- 2018년 이후 측정 결과를 보면 대부분의 어류에서 1 Bq/kg 이하의 농도를 나타냄.

37) Japan Atomic Energy Agency, Database for Radioactive Substance Monitoring Data : 해양 생태계의 방사성물질 거동조사 사업보고서, 2020.

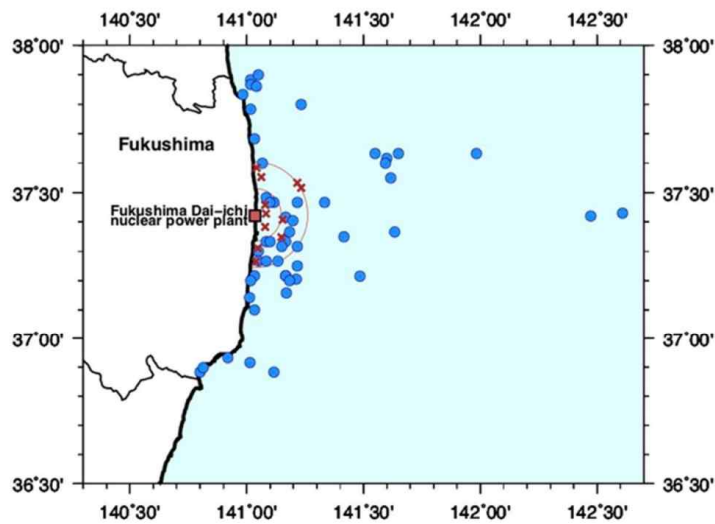
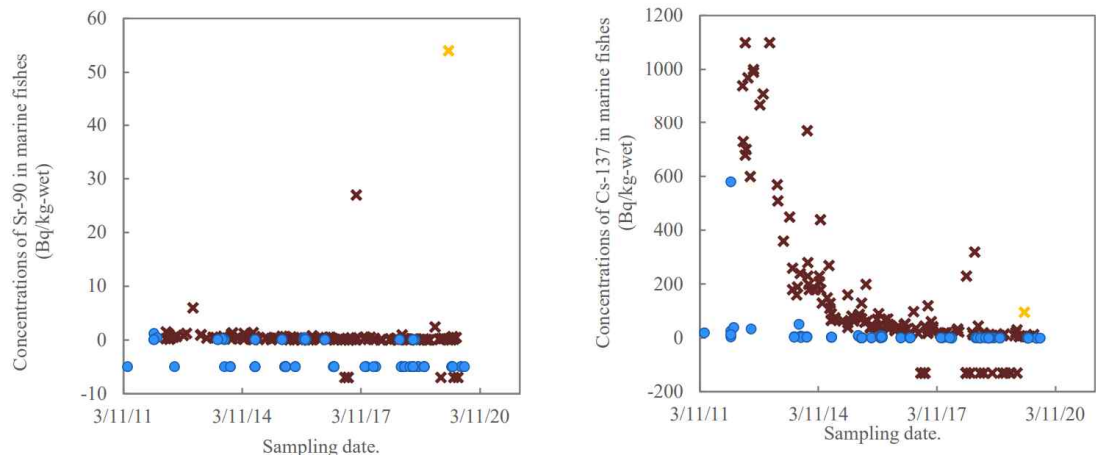


図 1. 福島県沖における魚類試料の採取位置。青丸(●)は水産機構(2011~2020)、茶バツ(×)は東京電力(2012~2019)の公表データを示す。赤の正方形は東電福島第一原発、赤の内円は東電福島第一原発から 10 km 圏、赤の外円は 20 km 圏を示す。



부록그림 4. 후쿠시마 원전 인근 해역에서 잡은 어류에서 Sr-90과 Cs-137의 농도변화.