



후쿠시마 해양방사능의 우리나라 주변해 영향 관련 주요 이슈 및 향후 과제

2020. 06.



해양수산과학기술진흥원
Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion

이슈리포트

후쿠시마 해양방사능의 우리나라 주변해 영향 관련 주요 이슈 및 향후 과제

2020.06.

주)오셔널 정 경 태 해양환경연구소장

1 | 서론

1.1 후쿠시마 기인 방사능 물질 해양 유출 개요

- ▶ 2011년 3월 11일 초대형 지진해일 내습으로 후쿠시마 원전 외부 전력공급이 전면 끊기면서 원자로 용융, 수소폭발로 이어져 대량의 인공방사능 물질들이 대기와 해양으로 방출되었음
- ▶ 대기로 방출된 방사능 물질들은 전 세계적으로 퍼져나갔지만 대부분은 후쿠시마 원전 주변 육상과 북태평양에 유입됨
 - 후쿠시마 원전사고로 인해 대기 및 해양으로 방출된 방사능 물질의 양에 대해서 관련학자들 간에 큰 논란거리가 됨
 - 여전히 논란의 여지가 있으나, 관측 정보가 축적되면서 대기로 방출되어 북태평양에 침적된 방사능 물질($Cs137$)의 양은 10-15 PBq, 해양으로 직접방출된 양은 3.5-4 PBq 정도인 것으로 의견이 모아지고 있음
- ▶ 육상에 침적된 방사능 물질은 하천수를 통해 해양으로 유입되었으며 현재에도 지속되고 있음
- ▶ 많은 방사능 물질들이 방출되었으나 방출량은 물론 반감기 등을 고려하여 세슘($Cs137$), 스트론튬($Sr90$) 및 트리튬($H3$) 등을 주요 대상으로 연구가 진행됨.
 - 이 들 핵종은 해양순환 및 해양-대기 상호작용을 연구하기 위한 추적자로서 중요하여 후쿠시마 사고 이전에도 존재한 핵종들임
 - ※ $Cs137$, $Sr90$, $H3$ 의 반감기는 각각 30.17년, 28.15년, 12.32년임
 - 후쿠시마 사고 이전의 이들 핵종의 북서태평양 해역에서의 배경농도는 각각 약 1.5-2.0Bq/톤, 1Bq/톤 및 60Bq/톤임¹⁾
- ▶ 후쿠시마 사고 초기 수 십 일 동안에 집중된 대기 및 해양 직접방출 외에 후쿠시마 원자로 건물에 냉각수를 지속적으로 주입하면서 방사능 오염수가 발생하였고 지하수를 통해 해양으로 유입됨
 - 2012-2015년 기간에 해양으로 방출율은 약 3.6 TBq/년 정도로 파악됨
 - 현재는 차수벽 건설과 원전 부지 내 탱크에 오염수를 저장하면서 지하수를 통한 해양직접유출을 제어하고 있음

1) Povinec 등, Fukushima accident: Radioactivity impact on the environment, Elsevier, 2013, p.382

1.2 후쿠시마 기인 방사능 물질의 영향 관련 국내의 주요 이슈

(1) 2011년 초 해양으로 방출된 후쿠시마 기인 방사능 물질의 우리나라 주변해로의 영향 관련

- ▶ 체르노빌 사고 이후 약 25년 만에 대형 방사능 유출 사고가 발생함에 따라 전 세계는 물론 우리나라 국민들의 관심이 고조되었으며 언론에서 다양한 전문가와의 인터뷰를 통해 경쟁적으로 우리나라에의 영향 여부를 집중적으로 보도함
- ▶ 사고 초기 얼마나 많은 방사능 물질이 어떻게 방출되었는가를 모르는 상황에서 관심의 초점은 대기로 방출된 방사능 물질이 주는 영향 보다는 해양으로 방출된 후쿠시마 방사능이 우리나라에 언제 도달하는가를 집중 보도됨
 - 다양한 해양물리 전문가들이 1년 후부터 4-5년, 길게는 10년 이후에 도달한다는 의견을 개진 하면서 혼란이 가중되었음
- ▶ 2012년 Behrens 등은 후쿠시마 방사능 연구 결과의 논문 출판과 함께 방사능 거동 예측 모델링 동영상을 제작하여 독일 GEOMAR가 인터넷에 공개함.²⁾³⁾ 우리나라 주변해로 방사능 물질이 침투해 들어오는 결과를 이 동영상에서 보여주었으며, 이를 확인한 우리나라 국민들은 놀라움을 금치 못하였고 결국은 한동안 우리나라 수산경제가 심각히 위축되는 결과에 일조함

(2) 2018년 경 부터 제기된 후쿠시마 방사능 오염수의 해양방출 시 우리나라 주변해에 대한 영향

- ▶ 지속적으로 생성되는 방사능 오염수를 후쿠시마 원전부지 내 탱크에 저장할 수 있는 능력이 조만간 한계에 이를 것으로 예상되면서 일본 정부는 이의 처리방안을 검토하고 있음
 - 저장탱크에 보관된 방사능 오염수의 해양방출 가능성이 높아지면서 Behrens 등의 동영상이 재 부각되고 있음
- ▶ 최근 우리나라를 방문한 그린피스 전문가가 후쿠시마 방사능 오염수가 해양으로 방출되면 1년 내에 한국 주변에 도달하여 영향을 주게 된다는 발표와 더불어 일본 연구자들의 연구에서도 이러한 결과가 얻어졌다는 보도가 나오면서 또 다시 해양방출 시 얼마 후에 영향을 주느냐가 논쟁의 중심에 서게 됨

2) Behrens, E., Schwarzkopf, F.U., Lubbecke, J.F., Boning, C.W. Model simulations on the long-term dispersal of ¹³⁷Cs released into the Pacific ocean off Fukushima, Environmental Research Letters, 7 034004, 2012.

3) Jan Steffen, Fukushima - Wo bleibt das radioaktive Wasser?, GEOMAR, 2012, <https://bit.ly/3ehdG4L>

1.3 본 이슈리포트에서 검토할 주요 내용

- ▶ 후쿠시마 기인 방사능 물질의 우리나라 주변해로의 영향을 포함하고 있는 기존 모델링 연구 결과를 심층 분석하여 문제점을 파악하고 결과가 의미하는 바를 전문가와 일반인에게 정확히 전달함
 - 많은 전문가와 비전문가들이 2011년 후쿠시마 사고 당시 대기와 해양직접방출이 일어난 사실을 모르거나 혼동하고 있어 이를 명확히 정리하고 이 두 가지 방출이 우리나라 주변해에 미친 영향을 정성적으로 제시함
- ▶ 이를 토대로 향후 일본이 후쿠시마 저장탱크 내 방사능 오염수 해양방출 시의 영향을 개략적으로 추정하고 어떠한 대응이 필요한가를 제안함

2

후쿠시마 방사능 오염수 현황 및 처분 방안 검토 개요

2.1

후쿠시마 방사능 오염수 현황

(1) 후쿠시마 방사능 오염수 발생량 및 저장 현황

- ▶ 후쿠시마 사고 초기 수 십 일 동안에 집중된 대기 및 해양 직접방출 외에 후쿠시마 원자로 건물에 냉각수를 지속적으로 주입하면서 방사능 오염수가 발생하였고 지하수를 통해 해양으로 유입됨
 - 사고 약 2년 후에야 이를 인지하고 후쿠시마 부지 내에 저장탱크를 건설하여 발생한 오염수를 저장하기 시작함
- ▶ 당면한 후쿠시마의 문제는 원자로 건물에 냉각수를 지속적으로 주입해야 하는 탓으로 방사능 오염수 발생이 현재에도 지속되고 있고 근본적인 조치 (폐로 조치)가 이루어지기 전까지는 장기간 계속될 수밖에 없다는 점임
 - 2014년 5월 기준으로 방사능 오염수 1일 발생량은 540톤이었으며, 오염수 대책 2018년 평균 1일 발생량은 170톤으로 감소하였음
 - 2019년에는 태풍 및 강우 영향으로 1일 발생량이 약 200톤으로 증가하였음
 - 일본의 중장기 로드맵에서는 2020년 내에 1일 발생량을 150톤, 2025년에 100톤으로 감축하고, 폐로조치는 30-40년 내 완료를 목표로 하고 있음
 - 2020년 1월말 기준으로 저장탱크 총 개수는 1000개, 용량은 약 127만 톤이고 탱크 내 오염수 저장량은 약 118톤임
- ▶ 후쿠시마 부지 내 탱크 증설 여지는 폐로관련 시설 등의 설치를 고려할 때 제한적이어서 2022년 여름 경 저장능력은 포화상태에 이를 것으로 일본 측은 예상하고 있음

(2) 후쿠시마 방사능 오염수에 포함된 핵종 현황

- ▶ 다핵종제거설비(ALPS)을 이용하면 삼중수소를 제외한 오염수 내 62개 핵종의 농도를 고시농도 미만까지 정화할 수 있다고 알려져 있으나 2013년 초기 이용 시 설비의 저성능과 더불어 부지경계에서의 피폭선량 규제기준을 맞추는데 주력하여 현재 저장량의 약 80%가 배출기준을 초과함

〈표 1〉 최대값이 배출기준을 초과하는 핵종들의 양과 일본의 배출기준

구분	Cs134 (세슘)	Cs137 (세슘)	Ru106 (루테튬)	Sr90 (스트로튬)	I129 (아이오다인)	H3 (트리튬)
최대값	68	829	203	433,000	71.3	3,230,000
최소값	0.0925	0.0635	0.811	0.0625	0.363	154,000
평균값	0.699	5.9	6.63	3,700	10.2	567,000
일본 배출기준	60	90	100	30	9	60,000

2.2 일본의 방사능 오염수 처분 계획

(1) 일본에서 검토한 방사능 오염수 처분 방안

- ▶ 일본 다핵종제거설비(ALPS) 소위원회는 원자로 폐로조치 완료 목표를 위해 방사능 오염수 처분을 다각적으로 검토하였으며, 구체적으로 해양방출, 대기방출, 지중주입, 수소방출 및 지하매설 등 5개 안이 검토됨
 - 아울러 대용량 지상, 지중 및 해상 탱크 보관방안, 부지 외부로 오염수를 이송하는 방안도 검토하였으나, 사업 허가 획득 등에 어려움으로 배제됨.
 - 결국 유력한 방안으로 해양방출과 대기방출을 고려하였으나 대체로 해양방출로 굳어가고 있음

(2) 방사능 오염수의 2차 정화 계획

- ▶ 해양방출 추진 시에 삼중수소 외의 핵종 농도는 고시농도 미만으로 2차 정화한 후 방출할 예정
- ▶ 방사능 오염수 처분기간 및 처분개시 시점은 처분 개시시기 및 연간 처분량에 따라 방사능 오염수의 처리기간이 결정됨
 - ※ 참고로 고려된 처분량 22 TBq/년은 후쿠시마 사고 전 배출관리 기준임

〈표 2〉 방출 개시시기 및 연간 배출량에 따른 처분기간

개시시기	처분량	22 TBq/년	50 TBq/년	100TBq/년
	2020		33년 (2052년)	19년 (2038년)
2025		29년 (2053년)	17년 (2041년)	9년 (2033년)
2030		25년 (2054년)	14년 (2043년)	8년 (2037년)
2035		21년 (2055년)	12년 (2046년)	7년 (2041년)

3

후쿠시마 방사능 물질의 우리나라 주변해로의 영향

3.1

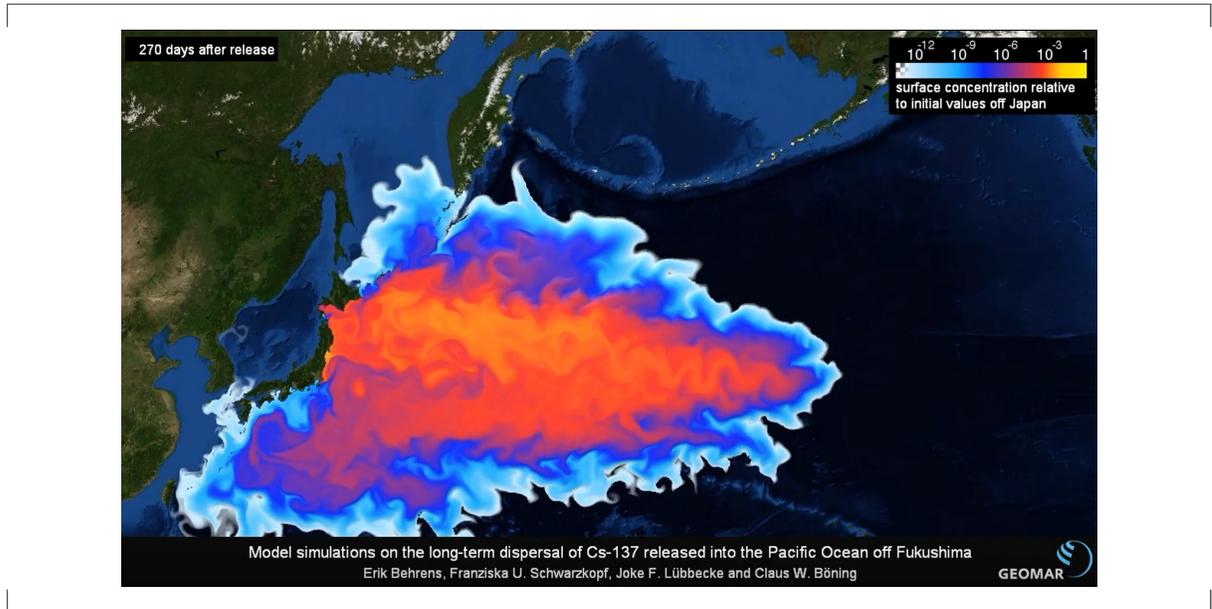
Behrens 등의 2011년 후쿠시마 방사능 물질(Cs137)의 거동 모델 결과 분석

(1) 모델 구성 및 주요 입력자료

- ▶ EU의 3차원 해수순환 모델 NEMO 모델에 방사능 모듈을 추가하여 적용함
 - 0.5도 해상도의 전 지구 모델에 근거하되 북태평양을 0.1도 모델격자로 구성 (더불어 0.25도 및 0.5도 해상도의 영향도 분석)
 - 1998-2007년 기간의 대기 재분석 자료(CORE)를 사용하여 10년 기간 적분
 - 후쿠시마 외해 역 150km × 45km에서 방사능 물질이 순간적으로 혼합되어 유입된다고 가정
 - 총 10 PBq 이 54일간에 걸쳐 해당해역에 유입되는 것으로 고려
 - 후쿠시마 원전에서 해양으로 유입되는 방사능 농도는 10,000 Bq/톤
- ▶ 주목할 사항으로는 해양직접방출과 대기방출을 고려하되 대기방출은 쿠로시오 북쪽의 제한된 해역에서만 있었던 것으로 고려됨
- ▶ 관측치와의 비교를 통한 모델 검증은 실시되지 않았으며, 해수순환 산정에 자료동화와 본격적인 계산 전에 필요한 모델안정화 계산(Spin-up 과정)을 실시하지 않음

(2) Behrens 등의 동영상 결과 분석

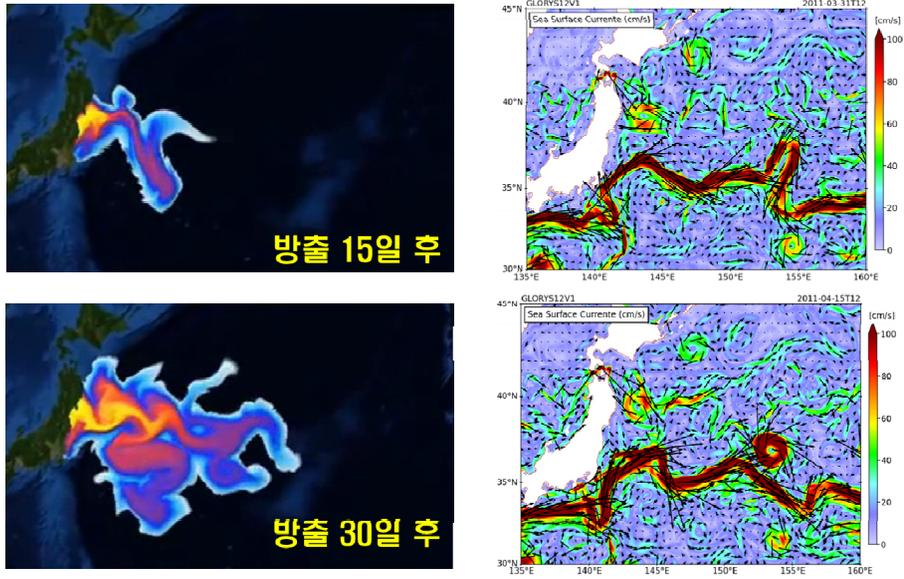
- ▶ 그림 1은 Behrens의 결과(동영상) 중 방출 270일 후의 결과(snapshot)로서 해수표면 방사능 물질이 동해 입구에 진입하고 있음을 보여주고 있음
 - 제시된 결과는 농도 상대값(특정시점의 농도/유입방사능 농도)으로 동해에 진입하는 값은 10^{-12} ~ 10^{-11} 로 제시됨
 - Behrens 등의 논문에 근거할 때 이는 10^{-8} ~ 10^{-7} Bq/톤의 농도 값에 해당됨



〈그림 1〉 Behrens 등의 동영상에서 추출한 방출 270일 후의 모델 결과

- ▶ 의외의 결과로 해류가 동쪽으로 향하는데도 불구하고 동쪽으로는 경도 약 170°W 부근까지만 퍼져나갔고 서쪽으로는 동해에 진입하기 시작했다는 점임
 - 이의 원인을 파악하기 위해 계산 초기의 결과를 해수순환도와 비교, 검토함.
- ▶ 그림 2는 방출 15일 및 30일 후의 Behrens 등의 계산결과와 해당 시점의 재분석된 GLORYS4) 자료의 해류분포임
 - 방출 15일 및 30일 후의 결과를 보면 방사능 물질이 각각 위도 32°N과 30°N 정도까지 이동한 것으로 나타나고 있음
 - 즉, 후쿠시마 남측에 발달해 있는 강한 쿠로시오를 가로질러 쿠로시오 남측으로 15일이 채 지나기 전에 방사능 물질이 이동한 것을 알 수 있음

4) Fernandez, E., Lellouche, J.M., Product user manual: For the Global Ocean Physical Reanalysis product GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030, CMEMS, 2018, p.15



〈그림 2〉 Behrens 등의 동영상에서 추출한 방출 초기 계산결과와 해당 시점의 해류분포

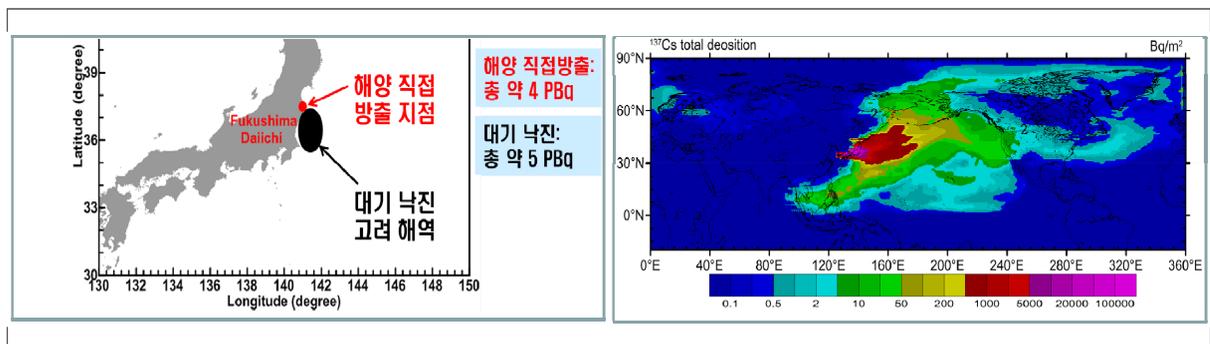
(3) 논문 모델 결과 분석

- ▶ Behrens 등의 논문에서는 동영상과는 달리 상대 값의 하한선으로 0.25×10^{-5} 를 제시함
 - 이는 실제 농도 값으로 환산하면 0.25×10^{-1} Bq/톤에 해당됨
 - 그 결과 우리나라 동해로 진입은 방출 약 5년 후인 것으로 확인
- ▶ 북미 연안에 도달하는 시간으로는 0.1 Bq/톤의 농도를 기준으로 4~5년이 소요된다고 기술함
- ▶ 계산 초기의 해수순환 정보에 따라 방사능 물질의 초기 분포 결과가 상당히 달라질 수 있으나 약 2~3년 후부터의 결과는 크게 변하지 않는다고 기술함
- ▶ 이는 간접적으로 초기 해수순환 분포가 불안정하게 계산되었음을 시사함

3.2 Zhao 등⁵⁾의 2011년 후쿠시마 방사능 물질(Cs137)의 거동 모델 결과 분석

(1) 모델 구성 및 주요 입력자료

- ▶ 3차원 해수순환 모델 POM(Princeton Ocean Model)에 방사능 모듈을 추가하여 적용. 경도 및 위도 방향으로 0.5° 해상도를 갖는 전 지구 모델로 구성함
 - 초기 해류분포를 Levitus 수온, 염분 자료를 사용하여 산정함
 - 해수표면경계조건으로는 월평균 바람 및 열속자료가 사용됨
 - 20년 동안 모델결과 안정화를 위한 계산을 수행하였으며 본격적인 모델 계산기간은 2020년까지 수행함
 - Behrens 등의 경우와 마찬가지로 자료동화 미실시
- ▶ Behrens 등과 유사하게 해양 직접방출과 쿠로시오 북측 후쿠시마 연안역에 국한된 대기낙진을 고려한 경우와 해양 직접방출과 북태평양 전체에 걸친 대기 낙진을 고려한 경우를 고려함
- ▶ 북태평양 낙진은 일본학술회의 주관 모델비교 보고서⁶⁾에 제시된 9개 기관 북태평양 대기확산모델 결과의 평균값을 디지털이징하여 사용함
- ▶ 후쿠시마 원전으로 부터의 해양 직접방출은 두 경우 모두 4 PBq을 고려함



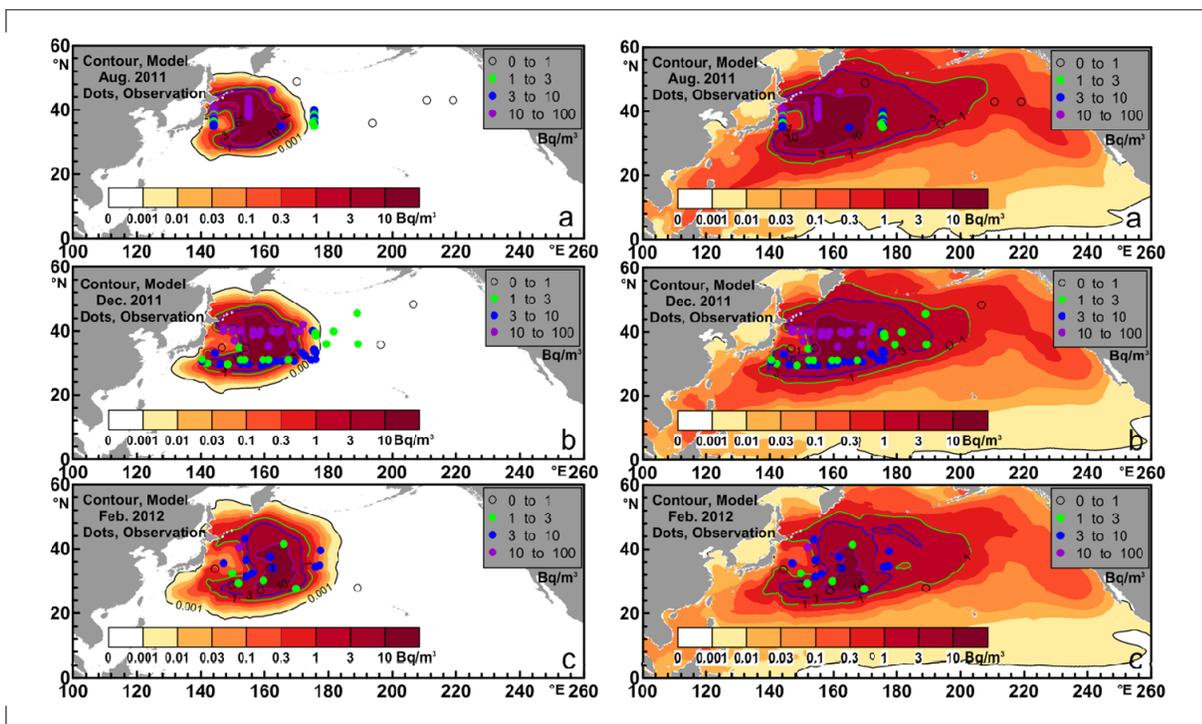
〈그림 3〉 사용된 대기 낙진정보:

좌) 국지 대기낙진 고려 해역 및 낙진량
 우) 북태평양 해수면 대기 낙진량 분포. 해양 직접방출은 동일하게 고려.

5) Zhang, C., Qiao, F., Wang, G., Xia, C., Jung, K.T.. Distribution of ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs from the Fukushima nuclear accident, Presentation in Technical meeting for China-Korea nuclear safety project held in Jinan, 2016
 6) Science Council of Japan, A review of the model comparison of transportation and deposition of radioactive materials released to the environment as a result of the Tokyo Electric Power Company's Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, 2014, pp103

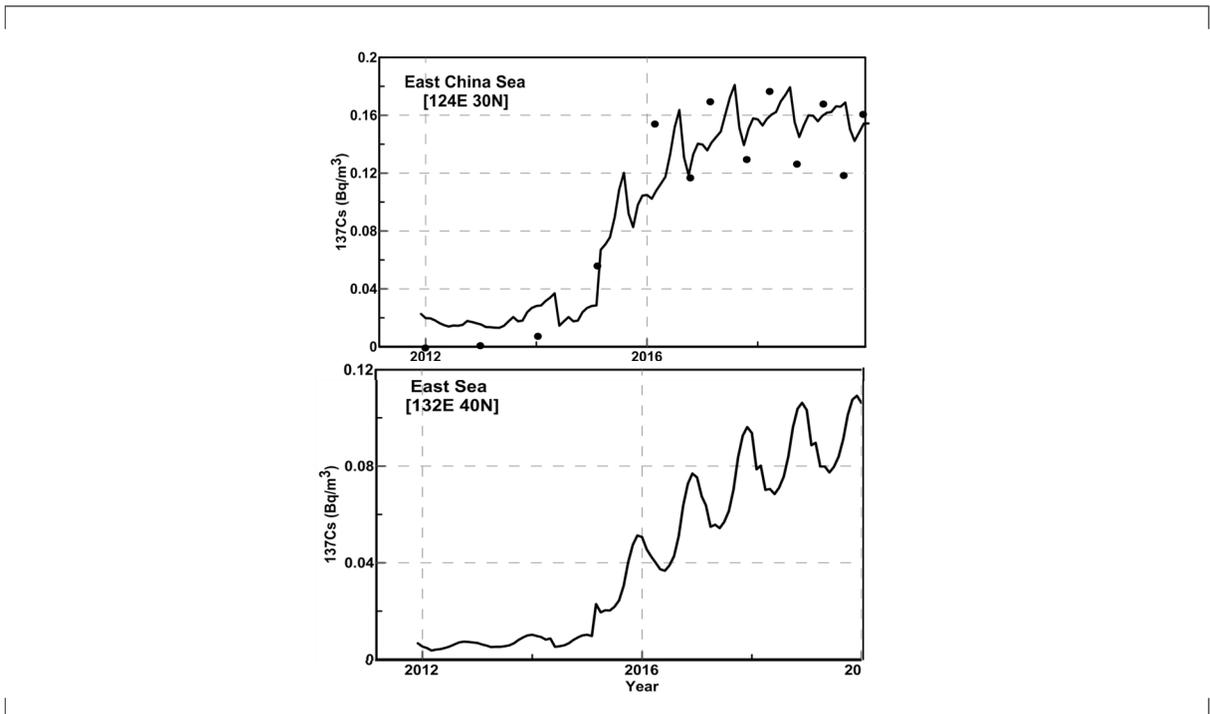
(2) 해양 직접방출과 국지 낙진을 고려한 경우와 해양 직접방출과 북태평양 낙진을 고려하여 계산된 결과 비교

- ▶ 그림 4는 두 모델 적용으로부터 얻어진 방출 약 1년간의 표층 방사능 물질 (Cs137) 농도 분포이다. Behrens 등의 경우와는 다르게 0.001 Bq/톤까지의 농도를 제시하고 있음
- ▶ 해양 직접방출과 국지 대기낙진만을 고려한 결과에서는 2012년 2월에 0.001 Bq/톤의 등농도선이 류큐열도에 못 미치고 있으며, 해양 직접방출과 북태평양 대기낙진을 고려한 결과에서는 후쿠시마로부터 대기로 방출된 방사능 물질이 우리나라 주변해를 포함한 북태평양 전체의 해수표면으로 침적되면서 영향을 주고 있음을 확인할 수 있음
 - 결과가 제시되지 않는 2011년 4월 초부터 북태평양 상 대기낙진의 영향이 북태평양 및 우리나라 주변해에 나타나고 있음



〈그림 4〉 해양 직접방출과 국지 대기낙진만을 고려한 결과와 해양 직접방출과 북태평양 대기낙진을 고려한 결과의 비교

- ▶ 그림 5는 해양 직접방출과 북태평양 대기낙진을 고려한 적용에서 계산된 동중국해 및 동해 두 지점에서의 표층 방사능 농도의 시간변화임
 - 참고로 동중국해의 결과는 해양 직접방출과 국지 대기낙진만을 고려하여 계산한 결과를 검정색 원으로 표시함
 - 동중국해와 동해 모두에서 2012년~2015년 초 기간에 0.02 Bq/톤 이하의 방사능 농도가 나타나다가 2015년 중반부터 점차 상승하는 패턴을 확인
 - 동중국해에서는 2016년 경 0.1 Bq/톤, 2017년~2018년 경 평균 0.15 Bq/톤에 이르고 동해에서는 2016년 경 0.05 Bq/톤, 2019년~2020년경에 평균 약 0.1 Bq/톤 정도에 이르는 것으로 나타남
- ▶ 이는 2015년 초까지의 영향은 대기 낙진에 의한 것이고, 그 이후는 해양 직접 방출된 방사능 물질이 동중국해 및 동해로 유입되면서 나타나는 현상으로 해석할 수 있음



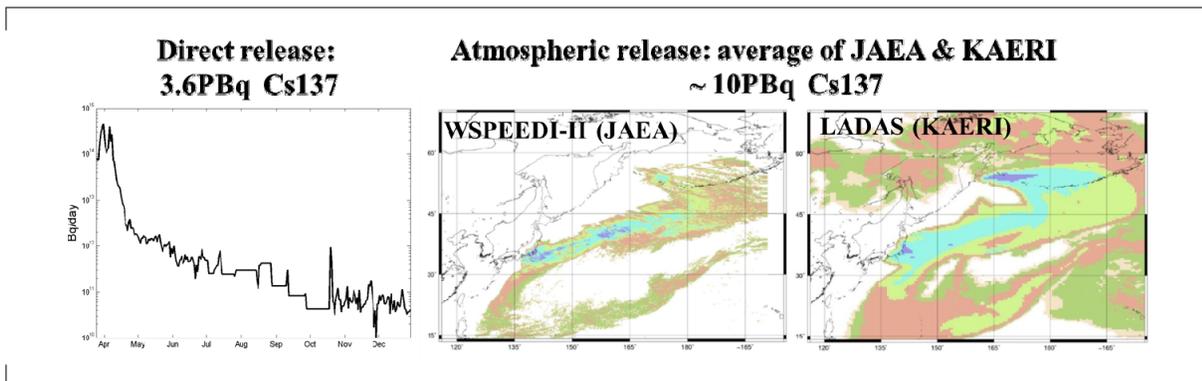
〈그림 5〉 해양 직접방출과 북태평양 대기낙진을 고려한 적용에서 계산된 동중국해 및 동해 두 지점에서의 표층 방사능 농도의 시간변화

3.3

한국해양과학기술원(기)의 2011년 후쿠시마 방사능 물질(Cs137)모델링 종합분석 결과

(1) 모델 구성 및 주요 입력자료

- ▶ 3차원 입자추적기법에 근거하여 계산함
- ▶ 모델 영역은 117°E~160°W, 15°N~65°N를 포함한다. 해수순환장은 일본 측 참가자인 일본 원자력청 (JAEA) 고바야시 박사가 제공한 월평균 자료로서 경위도 1/10° 해상도, 연직으로 54층의 정보로 구성됨
- ▶ 3.6 PBq의 해양직접 유입과 약 10 PBq의 대기 유출을 방사능 오염원으로 정의하였다. 대기 낙진은 일본원자력청의 WSEEDI-II 모델과 한국원자력연구원(KAERI)의 LADAS 모델 결과 평균값이 사용됨(그림 6 참조).
- ▶ 모델 계산에는 충분한 정확도를 확보하기 위하여 총 약 3억 개의 입자가 사용되었으며, 계산기간은 방출 후 2년간임

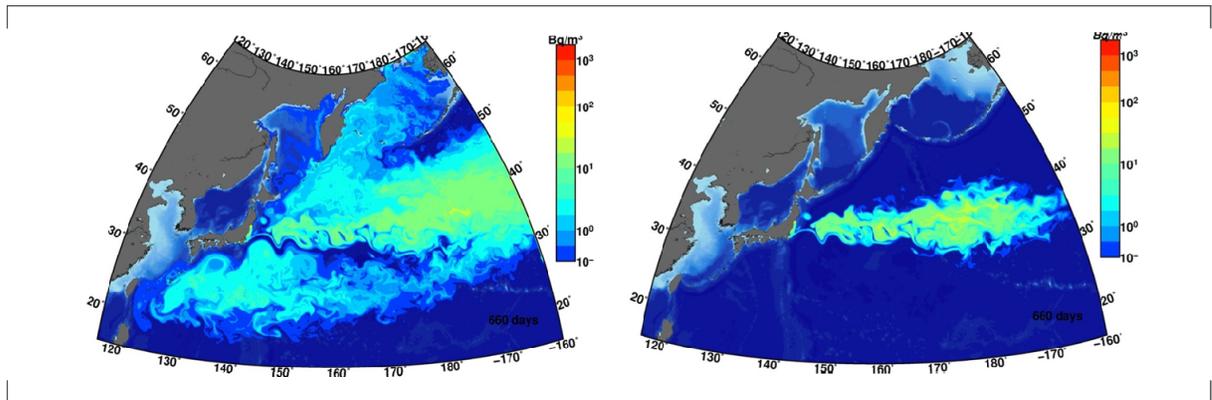


〈그림 6〉 계산에 사용된 해양 직접 유입 시간변화와 대기 낙진의 공간 분포

7) 한국해양과학기술원, 해양방사능 유출사고 대응 지원체계 구축 및 해양방사능 오염현황 조사, 2018, pp120. 여기에서 다루어 지는 모델 결과는 IAEA 주관 MODARIA Phase II 프로그램에 참여하여 우크라이나 IMMSP 전문가와 공동 수행한 성과임

(2) 모델 계산 결과

- ▶ 그림 7은 대기 낙진과 해양 직접방출을 각각 고려하여 계산된 결과로써 방출 2년 후의 표층농도 분포를 보여주고 있다. 농도는 0.1 Bq/톤까지만 제시됨.



〈그림 7〉 대기 낙진과 해양 직접방출을 각각 고려하여 계산된 결과

- ▶ 먼저 대기 침적 기인한 방사능 물질의 분포를 보면, 공역에 걸쳐 퍼져 있음을 알 수 있음
 - 그리고 쿠로시오 북측 북태평양에 분포하는 방사능 물질의 양이 쿠로시오 남측에 분포하는 양보다 훨씬 더 많지만 쿠로시오 남측에도 상당량이 분포하고 있음을 알 수 있음
 - 대부분의 방사능 물질은 쿠로시오와 쿠로시오 확장류 북측에서 경도 160°W를 가로질러 동측으로 확장하고 있으며 그 남측에는 북태평양 서측 류큐열도 부근까지 퍼져나가고 있음
 - 흥미롭게도 쿠로시오 북측의 방사능 물질은 태평양 동측으로 퍼져 나가다가 약 경도 170°W 부근에서 방사능 물질 일부가 잠시 남측으로 이동하다 서측으로 방향을 바꾸고 있음
- ▶ 해양 직접방출 기인한 방사능 물질의 분포를 보면, 대기 낙진의 경우와는 완전히 다르게 쿠로시오와 쿠로시오 확장류를 타고 좁은 폭을 갖는 형태로 동측으로 경도 160°W 부근에서까지 확장되고 있음

4 | 결론 및 제언

4.1 결론

(1) 2011년 후쿠시마 방사능 유출에 따른 우리나라 주변해에의 영향 모델링 결과

- ▶ Behrens 등의 논문에 따르면, 농도 0.25×10^{-1} Bq/톤의 방사능 물질이 우리나라 동해에 진입하는 시간은 약 5년 후이며 0.1 Bq/톤의 농도를 기준으로 할 때는 이보다 상당 시간 지난 후로 요약할 수 있음
 - Behrens 등의 동영상에서 시사하는 후쿠시마 방사능 물질의 270일 후 동해 진입은 모델 안정화 계산 미실시에 따른 초기 해수순환의 불안정성, 그리고 유의하지 않은 농도 값(즉, 관측 하한치보다 훨씬 낮은 값)의 부주의한 제시에 따른 왜곡된 정보임.
- ▶ Zhao 등의 결과는 우리나라 주변해에 대한 영향은 2015년 초까지는 거의 대기 낙진에 의한 것이고 그 이후는 해양 직접방출의 영향이 점차 지배적으로 나타나는 것을 시사함.
- ▶ 한국해양과학기술원의 결과는 방사능 물질의 2년 내 동해 진입은 해양 직접방출에 기인한 것이 아니라 대기 낙진에 기인한 것임을 뒷받침함.

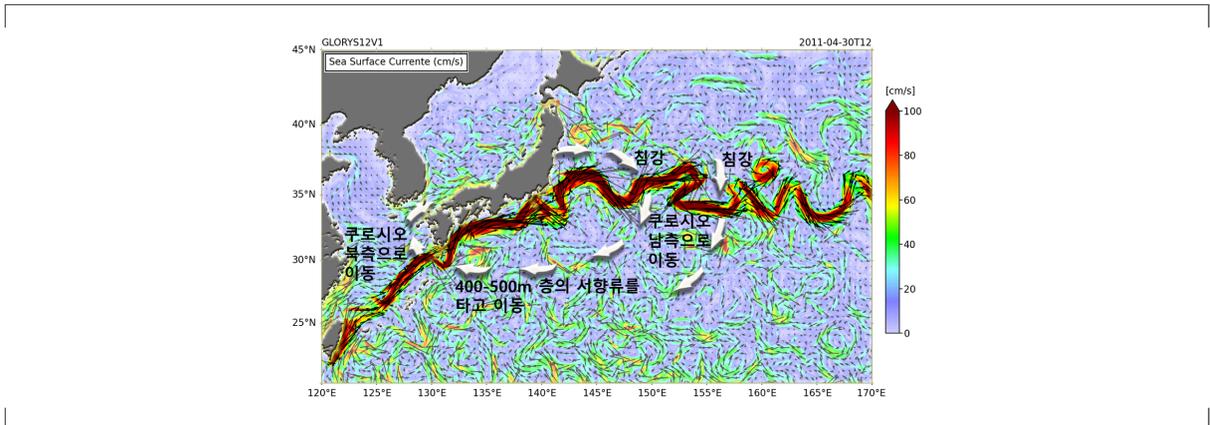
(2) 관측 자료에 기반한 2011년 후쿠시마 방사능의 우리나라 주변해에의 영향

- ▶ Aoyama 등⁸⁾은 2015/2016년 기간에 수집된 일본 열도 연근해의 관측 자료를 분석하여 소량의 후쿠시마 방사능 물질이 동해로 이미 진입했다고 보고.
 - 동일 연구팀인 Inomata 등⁹⁾의 학회 발표에서 2012년부터 동해로 후쿠시마 방사능 물질이 진입하기 시작했다고 언급.

8) Aoyama, M., Hamajimab, Y., Inomata, Y., Oka, E. Recirculation of FNPP1-derived radiocaesium observed in winter 2015/ 2016 in coastal regions of Japan, Applied Radiation and Isotopes, 126, 83-87. 2017

9) Inomata, Y., Aoyama, M., Hamajimab, Y., Oka, E., Yamada, M. Rapid transportation of FNPP1-derived radiocaesium suggesting new pathway of subtropical mode water from the western North Pacific to the Sea of Japan, Geophysical Research Abstracts, 20, EGU2018-5866, EGU General Assembly, 2018

- Aoyama 등 및 Inomate 등은 예상보다 빠르게 소량의 후쿠시마 방사능 물질이 동해에 진입한 이유로 새로운 경로를 통한 이동을 제시함. 즉, 대부분의 방사능 물질은 쿠로시오와 쿠로시오 확장류를 타고 북태평양 동측으로 향하나 일부 방사능 오염수가 쿠로시오 북측에서 겨울철 침강하여 쿠로시오 하부로 남하하여 북태평양 중층수에 합류하고 이후 서진하여 규슈를 돌아 동해로 진입하는 경로임 (그림 8 참조).



〈그림 8〉 새로이 제기된 후쿠시마 기인 방사능 물질의 이동 경로

- 발표초록만을 근거로 판단하기는 어려우나 Inomate 등의 2012년 동해 진입은 새 경로를 통한 진입이 아니라 대기 낙진에 기인한 것으로 추정됨. 이 새로운 경로는 가능하나 여전히 수 년 정도가 요구되는 느린 현상으로 사료됨.
- 재분석된 GLORYS 자료에서 관련 해수순환이 명확히 확인되지 않고 있어 Aoyama 등이 언급한 바와 같이 향후 이 경로에 대해 집중적인 연구가 필요할 것으로 사료됨

(3) 일본 방사능 오염수 방출 시의 영향

- ▶ 구체적인 방출 시나리오는 아직 결정되지 않은 상태이나 나름의 가정을 통해 유추할 수 있음.
- ▶ 만일 저장된 방사능 오염수 약 1 PBq를 Behrens 등의 경우와 같이 54일 만에 방출한다고 가정하면,
 - 후쿠시마 원전에서 해양으로 유입되는 방사능 오염수 농도는 약 1,000 Bq/톤. 약 5년 후 동해에 진입하는 방사능 오염수의 농도는 0.25×10^{-2} Bq/톤으로 예상 (트리튬은 반감기가 Cs137에 비해 짧으므로 이 보다 낮게 됨).
 - 실제로 방사능 오염수 방출은 약 10년 이상에 걸쳐 낮은 농도로 방출할 것으로 예상되므로 우리나라 동해에 진입하는 방사능 오염수의 농도는 아주 개략적으로 10^{-5} Bq/톤 또는 그 이하가 될 것으로 추정. 즉, 사실상 우리나라 주변해에의 유의미한 영향은 없다고 추정됨. 추후 시나리오 확정시 정밀 모델링을 통해 확인 필요.

4.2 제언

- ▶ 후쿠시마 방사능 오염수의 영향이 예상되는 북태평양과 우리나라로 이동하는 경로에서의 지속적인 방사능 물질 모니터링 필요
 - 방사능 오염수에 포함된 트리튬은 이미 2011년 사고 이후 방출되어 왔고 이미 북태평양에 확산되고 있는 상황. 늦은 감이 있지만 지금이라고 적극적으로 모니터링을 추진하여 일본의 방사능 오염수 계획방출 이전 상황을 최대한 파악하는 것이 중요.
- ▶ 북태평양 해양방사능 거동 및 생물영향 모델 개발/고도화 필요
 - 고해상도 북태평양 해양순환 모델에 근거한 해양방사능 거동 모델 개발 시급
 - 모니터링 결과를 방사능 거동 모델의 검증 자료로 활용하여 모델링 신뢰성 제고 및 정부 대응에 대한 국민적 신뢰 확보
 - 해양생물로의 방사능 물질 축적 예측을 위한 해양생물 영향 모델 개발/고도화 필요
- ▶ 방사능 사고 대응 역량 강화 및 체계 구축 필요
 - 상상하기도 싫지만 2011년 후쿠시마 사고 규모의 방사능 유출 사고가 발생한다면 우리는 어떻게 대응할 수 있을 가를 진지하게 고민해 볼 필요가 있음.
 - 구체적으로 어떻게 해양방사능 연구 인력을 양성하고 유지해나갈 것인가, 관련부처 및 연구기관, 연구자 간의 협력체계를 어떻게 강화/체계화 할 것인가 에 대한 검토가 시급함.

참고문헌

- [1] Povinec, P.P., Hirose, K., Aoyama, M., Fukushima accident: Radioactivity impact on the environment, Elsevier, pp382, 2013.
- [2] 다핵종제거설비 등 처리수의 취급에 관한 소위원회, 다핵종제거설비 등 처리수의 취급에 관한 소위원회 보고서, pp45, 2월, 2020.
- [3] Behrens, E., Schwarzkopf, F.U., Lubbecke, J.F., Boning, C.W. Model simulations on the long-term dispersal of ^{137}Cs released into the Pacific ocean off Fukushima, Environmental Research Letters, 7 034004, 2012b.
- [4] Jan Steffen, Fukushima – Wo bleibt das radioaktive Wasser?, GEOMAR, 2012, <https://bit.ly/3ehdG4L>
- [5] 한국해양과학기술원, 해양방사능 유출사고 대응 지원체계 구축 및 해양방사능 오염현황 조사, BSPE99615-11788-4, pp120, 2018.
- [6] Zhang, C., Qiao, F., Wang, G., Xia, C., Jung, K.T.. Distribution of ^{137}Cs and ^{134}Cs from the Fukushima nuclear accident, Presentation in Technical meeting for China-Korea nuclear safety project held in Jinan, May 23, 2016.
- [7] Science Council of Japan. A review of the model comparison of transportation and deposition of radioactive materials released to the environment as a result of the Tokyo Electric Power Company's Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, Report, pp103, April 2, 2014.
- [8] Aoyama, M., Hamajimab, Y., Inomata, Y., Oka, E. Recirculation of FNPP1-derived radiocaesium observed in winter 2015/ 2016 in coastal regions of Japan, Applied Radiation and Isotopes, 126, 83-87. 2017.
- [9] Inomata, Y., Aoyama, M., Hamajimab, Y., Oka, E., Yamada, M. Rapid transportation of FNPP1-derived radiocaesium suggesting new pathway of subtropical mode water from the western North Pacific to the Sea of Japan, Geophysical Research Abstracts, 20, EGU2018-5866, EGU General Assembly, 2018.

본 이슈리포트는 해양수산 관련 이슈의 기술 동향에 대하여 전문가가 작성한 보고서이며,
해양수산과학기술진흥원의 공식견해가 아님을 알려드립니다.

후쿠시마 해양방사능의 우리나라 주변해 영향 관련 주요 이슈 및 향후 과제

발 간 일 2020년 6월 30일

발 간 처 해양수산과학기술진흥원

주 소 (06775) 서울특별시 서초구 마방로 60 8, 9, 10층(양재동, 동원에프앤비빌딩)

전 화 02-3460-4000

홈페이지 www.kimst.re.kr



후쿠시마 해양방사능의 우리나라 주변해 영향 관련 주요 이슈 및 향후 과제



해양수산과학기술진흥원
Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion