Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 1, pp. 35-42, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.1.35

Original article

국내 · 외 방사성폐기물 해상운반 현황 및 침몰사고 시 일반인 선량평가 사례 분석

오가은[1] · 곽민우[1] · 김혁재[1] · 김광표[1,*]
[1]경희대학교 원자력공학과

Analysis of Domestic and Overseas Radioactive Waste Maritime Transportation and Dose Assessment for the Public by Sinking Accident

Ga Eun Oh[1], Min Woo Kwak[1], Hyeok Jae Kim[1], and Kwang Pyo Kim[1,*]
[1]Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deokyoungdae-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea

ABSTRACT Demand for RW transportation is expected to increase due to the continuous generation of RW from nuclear power plants and facilities, decommissioning of plants, and saturation of spent fuel temporary storage facilities. The locational aspect of plants and radiation protection optimization for the public have led to an increasing demand for maritime transportation, necessitating to apprehend the overseas and domestic current status. Given the potential long-term radiological impact on the public in the event of a sinking accident, a pre-transportation exposure assessment is necessary. The objective of this study is to investigate the overseas and domestic RW maritime transportation current status and overseas dose assessment cases for the public in sinking accident. Selected countries, including Japan, UK, Sweden, and Korea, were examined for transport cases, Japan and the U.S were chosen for dose assessment case in sinking accidents. As a result of the maritime transportation case analysis, it was performed between nuclear power plants and reprocessing facilities, from plants to disposal or intermediate storage facilities. HLW and MOX fuel were transported using INF 3 shipments, and all transports were performed low speed of 13 kn or less. As a result of the dose assessment for the public in sinking accident, japan conducted an assessment for the sinking of spent fuel and vitrified HLW, and the U.S conducted for the sinking of spent fuel. Both countries considered external exposure through swimming and working at seashore, and internal exposure through seafood ingestion as exposure pathway. Additionally, Japan considered external exposure through working on board and fishing, and the U.S considered internal exposure through spray inhalation and desalinized water and salt ingestion. Internal exposure through seafood ingestion had the largest dose contribution. The average public exposure dose was 20 years after the sinking, 0.04 mSv yr^{-1} for spent fuel and 5 years after the sinking, 0.03 mSv yr^{-1} for vitrified HLW in Japan. In the U.S, it was 1.81 mSv yr^{-1} 5 years after the sinking of spent fuel. The results of this study will be used as fundamental data for maritime transportation of domestic RW in the future.

Key words: Radioactive waste, Maritime transportation, Sinking accident, Ocean diffusion, Radiation dose assessment

1. 서 론

원자력발전소 및 원자력이용시설의 운영으로 인하여 방사성폐기물이 지속적으로 발생하고 있다. 중저준위방사성폐기물의 경우 2022년까지 200 L 드럼을 기준으로 총 15만 7,976개가 발생하였으며, 고리 1호기와 월성 1호기의 영구정지 등으로 인해 해체 폐기물 역시 대량으로 발생할 예정이다[1]. 사용후핵연료의 경우 현재 원자력발전소 부지 내 임시저장시설에서 관리하고 있으나, 2031년을 시작으로 2066년까지 모든 임시저장시설이 완전히 포화될 것으로 예상된다[2]. 중저준위방사성폐기물 발생량이 누적됨에 따라 처분장으로의 운반 수요가 증가하고 있다. 추후 원자력발전소의 해체 작업이 착수되고 국내 사용후핵연료 중간저장시설 또는 영구처분 시설이 건설될 경우 해체 폐기물 운반과 사용후핵연료의 소외 운반 수요 역시 증가할 것으로 예상된다.

ISSN 1976-2402 **http://www.ksri.kr/**
Copyright© 2024 by Korean Society of Radiation Industry
***Corresponding author:** Kwang Pyo Kim
Tel: +82-31-201-2560, Fax: +82-31-273-3592, E-mail: kpkim@khu.ac.kr
Received 6 March 2024 **Revised** 21 March 2024 **Accepted** 25 March 2024

일본에서는 해안가에 위치한 원전 부지 특성에 맞게 자국내 재처리 시설과 저준위방사성폐기물 처분시설로의 해상운반을 수행하였다[3,4]. 영국은 영국과 일본 사이에 사용혼합산화물(MOX, Mixed oxide) 연료, 유리화된 고준위방사성폐기물을 운반하기 위해 해상운반을 수행하였다[5-7]. 스웨덴 역시 해안가에 위치한 원전 부지 특성에 맞게 중저준위방사성폐기물 최종처분시설과 사용후핵연료 중간저장시설로의 해상운반을 수행하였다[8,9]. 국내에서는 원자력발전소에서 발생한 중저준위방사성폐기물을 운반하기 위해 해상운반을 수행하였다[10]. 프랑스에서는 고준위방사성폐기물이 해양에서 유실된 상황에서의 위험도 분석 연구를 수행한 바 있다[11]. 미국에서는 해양에서 유실된 방사성폐기물의 방사선학적 영향 평가 연구를 다수 수행하였다[12,13]. 일본에서는 방사성폐기물을 자국내에서 운반할 때, 침몰사고로 인하여 방사성핵종이 해양으로 확산되는 상황에 대한 선량평가 연구를 수행하였다[14,15]. 또한, 일본과 유럽 사이에서 유리화된 고준위방사성폐기물과 MOX 연료를 해상으로 운반할 때, 침몰사고로 인하여 방사성핵종이 해양으로 확산되는 상황에서의 선량평가 연구를 수행한 바 있다[16-18].

해상운반은 선박이 육지와 멀리 떨어져 운항하기 때문에 일반인에 대한 불필요한 피폭을 줄일 수 있고, 한 번에 많은 양의 방사성폐기물을 운반할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점을 고려하였을 때, 향후 국내 해상운반에 대한 수요 역시 증가할 것으로 예상된다. 국내에서는 중저준위방사성폐기물의 해상운반을 2010년부터 수행했으나, 수십년 간 해상운반을 수행하고 그와 관련한 많은 연구를 진행한 국외에 비하면 운반 사례가 적다. 또한, 국내에서 수행 중인 해상운반은 중저준위방사성폐기물에 한정되어 있다. 따라서 증가하는 국내 해상운반 수요에 대비하여 국내 해상운반 현황과 국외 방사성폐기물 해상운반 동향을 파악할 필요가 있다. 방사성폐기물 해상운반 시 침몰사고가 발생하여 선박과 운반물이 속히 회수 · 인양되지 않을 경우, 방사성핵종이 해양으로 확산될 수 있다. 운반물 내부에 존재하는 방사성핵종이 해양으로 확산될 경우, 일반인에게 장기간 방사선학적인 영향을 미칠 개연성이 있다. 이에 따라 운반에 앞서 침몰사고 시 일반인 피폭선량평가를 수행해야하나, 국내의 경우 이와 관련한 평가 사례가 국외에 비해 적다. 따라서 이러한 국내 방사성폐기물 해상운반 침몰사고 발생 시 해양 확산에 의한 일반인 피폭선량평가를 위해 국외 선량평가 사례를 분석할 필요가 있다.

본 연구의 목표는 국내 · 외 방사성폐기물 해상운반 현황 및 국외 침몰사고 시 방사성핵종 해양 확산으로 인한 일반인 선량평가 사례를 조사 · 분석하는 것이다. 이를 위해 방사성폐기물 해상운반 선도국의 해상운반 현황과 침몰사고 시 방사성핵종 해양확산에 의한 일반인 선량평가 사례를 조사하였다. 그리고 각 국가에서 수행되고 있는 해상운반의 주요 특징과 선량평가 시 고려한 피폭경로 및 선량평가 결과를 비교 · 분석하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 국내 · 외 방사성폐기물 해상운반 사례 및 국외 침몰사고 발생 시 일반인 선량평가 사례를 분석하였다. 해상운반 사례 조사 대상 국가로는 현재 방사성폐기물 해상운반을 수행중인 일본, 영국, 스웨덴, 한국을 선정하였다. 침몰사고 발생 시 일반인 선량평가 사례 조사 대상 국가로는 일본, 미국을 선정하였다. 각 국가별 해상운반 현황과 운반 세부사항에 대한 조사는 해당 국가 내 방사성폐기물 해상운반을 담당하는 운반 회사에서 발간한 문헌자료를 기반으로 수행하였으며, 해상운반 침몰사고 시 방사성핵종 해양 확산에 의한 일반인 선량평가 사례와 그 결과 조사는 관련 연구기관에서 발간한 문헌자료를 기반으로 수행하였다.

2.1. 국내 · 외 해상운반 사례 분석

일본은 자국에서 발생한 사용후핵연료 중 일부를 도카이, 로카쇼 재처리 시설로 운반한다. 또한, 처리 · 처분할 저준위방사성폐기물을 로카쇼 저준위방사성폐기물 처분장으로 운반하고 있다. 영국은 일본에서 발생한 대부분의 사용후핵연료를 영국 · 프랑스 재처리 시설로 운반한다. 또한, 일본의 사용후핵연료를 재처리하여 생산한 MOX 연료와 생산하고 남은 유리화된 고준위방사성폐기물을 일본 원자력발전소와 처분장으로 운반한다. 스웨덴에서는 스웨덴 원자력 발전소에서 발생하는 사용후핵연료와 방사성폐기물을 자국내에서 저장 · 처분하기 위해 포스마크와 오스카샴에 위치한 단수명 방사성폐기물 최종 처분장과 사용후핵연료 중간저장시설로 해상운반을 수행하고 있다. 고준위방사성폐기물은 2가지 종류로 폐기가 승인된 사용후핵연료와 사용후핵연료를 재처리한 뒤 남은 폐기물로 구분할 수 있으며 후자의 경우 유리화 등의 처리를 거쳐 처분한다[19]. 본 연구에서는 해상운반 사례 분석 시 해상운반의 목적, 선박 기본 제원, 항해정보과 운반용기 제원에 대하여 분석하였다.

2.2. 국외 침몰사고 시 일반인 선량평가 사례 분석

일본 전력중앙연구소(CRIEPI, Central Research Institute of Electric Power Industry)와 미국 샌디아국립연구소(SNL, Sandia National Laboratory)에서 해상운반 침몰사고 시 방사성핵종 해양 확산에 의한 일반인 피폭선량평가 연구를 수행한 바 있다. Fig. 1에 침몰사고로 인한 일반인 피폭선량평가 순서를 나타내었다. 선량평가는 1) 사고조건 가정, 2) 해양 내 핵종 농도 계산, 3) 피폭경로 선정, 4) 선량평가 순으로 이루어진다. 먼저 사고조건 가정에서는 가상 사고의 발생 위치, 운반물 및 운반용기의 종류, 선원항 설정, 방출 시나리오 등을 가정하여 사고 상황을 설정한다. 다음으로 방출 시나리오와 선원항을 이용하여 해양으로 방출되는 핵종의 양을 계산한다. 핵종이 방출되는 해양의 해류

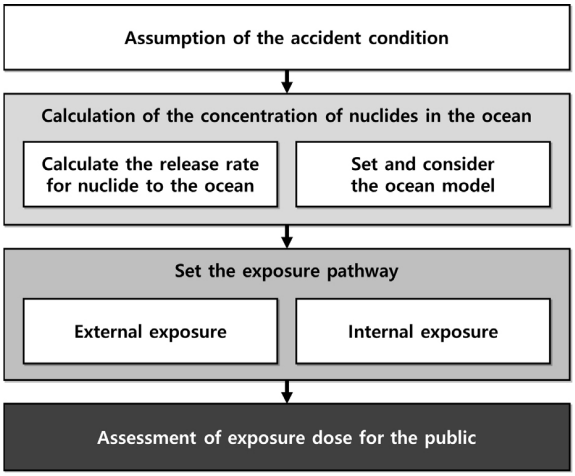

Fig. 1. Dose assessment process by nuclides ocean diffusion by sinking accident

방향과 속도, 침전 등을 고려하여 확산된 핵종의 해양 내 농도를 계산한다. 이후, 일반인 선량평가를 위한 주요 피폭경로를 선정한다. 마지막으로 선정한 피폭경로를 고려하여 침몰사고 시 일반인에 대한 선량평가를 수행한다. 본 연구에서는 선량평가 시 단계별로 설정된 사항과 계산된 결과에 대하여 비교 · 분석하였다.

3. 결 과

3.1. 국내 · 외 방사성폐기물 해상운반 사례 조사

3.1.1. 일본 NFT 사

일본 NFT 사는 일본 전국 원자력발전소에서 도카이, 로카쇼 재처리 시설로의 사용후핵연료 운반, 로카쇼 저준위방사성폐기물 처분 시설로의 저준위방사성폐기물 운반을 수행하였다. NFT 사는 1978년부터 일본 내 방사성폐기물 해상운반을 수행하고 있다[20]. 당사는 사용후핵연료 및 고준위, 중저준위방사성폐기물 운반 선박 2척과 저준위방사성폐기물 운반 선박 1척을 소유하고 있으며, 사용후핵연료 운반 선박은 모두 INF 3등급 선박이다[21,22]. 각 운반 선박에는 최대 12개, 20개의 캐스크와 432개의 IP-2형 운반용기를 적재할 수 있으며, 1회 운반 시 약 2~4일이 소요된다[22-26]. 운반 선박은 평균 11.3 kn로 해상운반을 수행하였다[27]. 사용후핵연료는 HZ형 운반용기 또는 원자로 노형별 NFT형 운반용기에 포장하여 운반하며, 저준위방사성폐기물은 200 L 드럼에 포장 후 IP-2형 운반용기에 적재하여 운반한다[20].

3.1.2. 영국 PNTL 사

영국 PNTL 사에서는 영국, 프랑스 재처리 시설에서 일본의 처분 시설로 유리화된 고준위방사성폐기물, 일본 원자력발전소로 MOX 연료를 해상으로 운반하였다. PNTL 사는 1975년부터 전세계적으로 방사성폐기물 및 MOX 연료 해상운반을 수행하고 있다[28]. 당사는 유리화된 고준위방사성폐기물 운반 선박 1척과 MOX 연료 운반 선박 2척을 소유하고 있으며, 선박은 모두 INF 3등급 선박이다[29-31]. 운반 선박에는 최대 20개의 캐스크를 적재할 수 있다[29,30]. 적재량에 따라 차이가 있으나, 1회 운반 시 MOX 연료는 43~67일, 유리화된 고준위방사성폐기물은 66~81일이 소요된다[32]. 운반 선박은 평균 10.0~11.3 kn의 속도로 운반을 수행하였다[27]. 유리화된 고준위방사성폐기물과 사용후핵연료, MOX 연료는 각 폐기물 특성에 맞는 Orano 사의 운반용기에 적재하여 운반한다[33].

3.1.3. 스웨덴 SKB 사

스웨덴 SKB 사에서는 스웨덴 원자력발전소에서 포스마크에 있는 단수명 방사성폐기물 최종 처분장으로의 중저준위방사성폐기물 운반과 오스카샴에 있는 사용후핵연료 중간저장시설로 사용후핵연료 운반을 수행하였다. SKB 사는 1982년부터 스웨덴 자국 내 방사성폐기물 해상운반을 수행하고 있다[34]. 당사는 방사성폐기물 운반 선박 1척을 소유하고 있으며, 선박은 INF 3등급 선박이다[9,35,36]. 최대 12개의 캐스크를 적재할 수 있으며, 1회 운반 시 약 0.8~2.1일이 소요된다[35,37]. 운반 선박은 평균 9.8 kn로 해상운반을 수행하였다[27]. 사용후핵연료는 Orano 사의 TN-17 Max 캐스크에 포장하여 운반한다[38-40]. 중저준위 폐기물은 200 L 드럼 또는 콘크리트 모듈에 적재한 뒤 ATB 용기에 포장하여 운반한다[41-44]. 극저준위 폐기물은 ISO 컨테이너에 담아 운반한다[41,45].

3.1.4. 한국 원자력환경공단(KORAD)

한국 원자력환경공단에서는 고리, 한빛, 한울 원자력발전소 임시저장시설에서 경주 중저준위방사성폐기물 처분시설로의 중저준위방사성폐기물 운반을 수행하였다. 원자력환경공단은 2010년부터 국내 중저준위방사성폐기물 해상운반을 수행하고 있다. 당사는 중저준위방사성폐기물 운반 선박 1척을 소유하고 있다. 최대 190개의 IP-2형 운반용기를 적재할 수 있으며, 1회 운반 시 0.3~2일이 소요된다[46]. 운반 선박은 평균 8.6 kn로 해상운반을 수행하였다[27]. 중저준위방사성폐기물은 200 L 드럼에 담긴 뒤 IP-2형 운반용기로 포장하여 운반을 수행한다[47].

3.2. 국외 방사성핵종 해양확산 선량평가 사례 조사

3.2.1. 일본 CRIEPI

일본 CRIEPI에서는 유럽과 일본 사이의 방사성폐기물 해상운반 중 사용후핵연료 및 유리화된 고준위방사성폐기물이 각각 일본 근처 대륙붕에서 침몰하여 방사성핵종이 해양으로 확산되었을 때의 일반인에 대한 선량평가를 수행하였다[16]. 사용후핵연료는 PWR 사용후핵연료 집합체 7다발이 포장된 HZ-75T 캐스

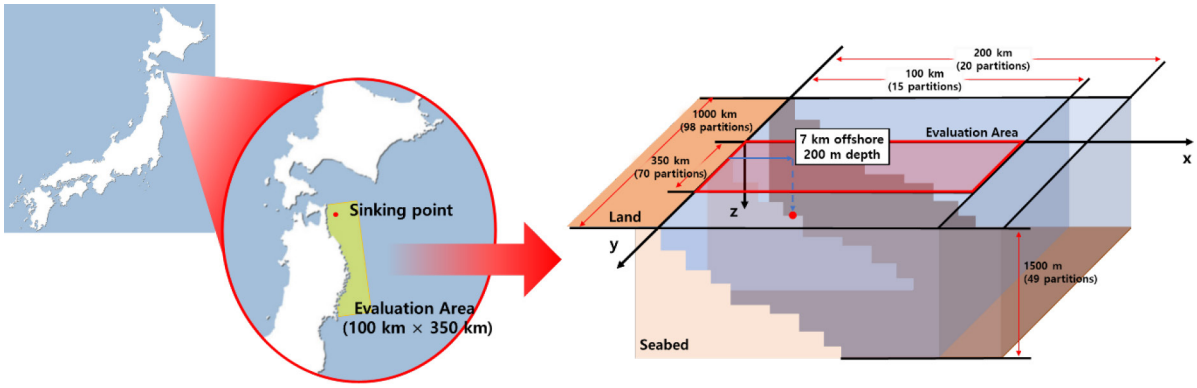

Fig. 2. Ocean grid model of CRIEPI (Japan)

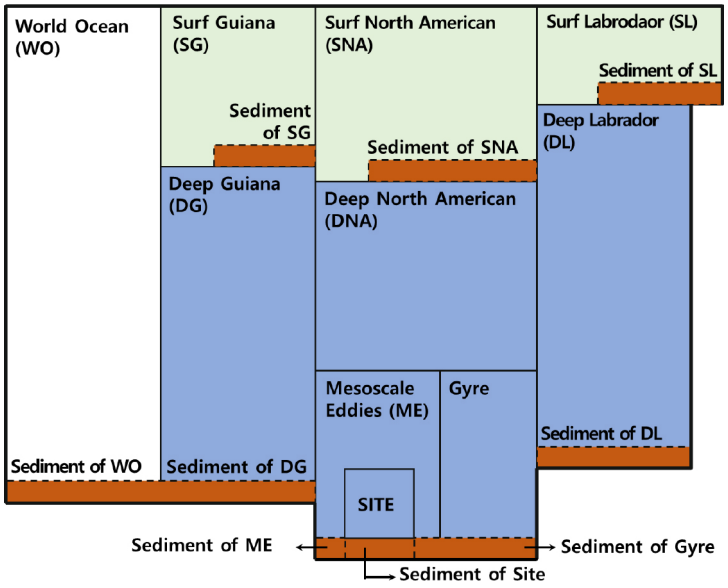

Fig. 3. 19 compartments ocean model of SNL (U.S)

크, 유리화된 고준위방사성폐기물은 400 kg 캐니스터 28개를 담은 TN-28VT 캐스크로 가정하였다. 침몰 위치는 일본 시모키타 반도에서 7 km 떨어진 위치의 수심 200 m 대륙붕으로 설정하였다. 이때 운반하는 사용후핵연료와 유리화된 고준위방사성폐기물의 총 방사능량은 570.5, 714.0 PBq이다. 방사성핵종의 방출율은 실제 상황과 유사하도록 장벽효과를 고려하여 계산하였다. 그 결과 방사성핵종의 방출율이 사용후핵연료의 경우 침몰 후 20년 뒤 최대 2.8×10^{13} Bq yr^{-1}, 유리화된 고준위방사성폐기물의 경우는 침몰 후 5년 뒤 최대 2.3×10^{13} Bq yr^{-1}로 나타났다. 방사성핵종이 확산되는 해양은 수평, 수직 방향으로는 수십 km, 깊이 방향으로는 수십 m 단위의 격자로 나누어 모델링되었으며 그 형태는 Fig. 2와 같다. 피폭경로의 경우, 갑판활동, 수영, 해안활동, 어업에 의한 외부피폭과 해양생물 섭취에 의한 내부피폭을 피폭경로로 고려하였다. 해양생물은 어류, 연체동물, 해조류에 대해 고려하였으며, 해양생물 내 핵종 농도는 각 해양생물종에 대한 핵종별 농축인자를 통해 핵종의 해수와 농도에 대한 생물체 내에서의 농도 비로 고려하였다[16,48]. 계산 결과, 해양생물 섭취에 의한 내부피폭경로의 선량 기여도가 가장 큰 것으로 나타났다. 이때 일반인에 대한 평균 피폭선량은 사용후핵연료의 경우 침몰 후 20년 뒤에 최대 0.04 mSv yr^{-1}, 유리화된 고준위방사성폐기물의 경우 침몰 후 5년 뒤에 최대 0.03 mSv yr^{-1}로 나타났다.

3.2.2. 미국 SNL

미국 SNL에서는 MARINRAD 전산코드를 사용하여 사용후핵연료 해상운반 침몰사고 시 일반인에 대한 피폭선량평가를 수행하였다[13]. Labrador 해의 Grand Banks에서 PWR 사용후핵연료 집합체 12다발이 포장된 TN-12 캐스크가 침몰되어 해양에서 핵종이 확산되었다 가정하였다. 이 때 사용후핵연료의 총 방사능량은 128.5 PBq이다. 방사성핵종의 방출 상황은 운반용기

내부에서 해양으로 방사성핵종이 방출되어 핵종의 농도가 1/e로 줄어드는 시간(τ)이 1, 10, 100년인 세가지 조건으로 나누어 가정하였다. 방사성핵종이 확산되는 해양은 총 19개의 구획으로 나누어 Fig. 3과 같이 설정하였으며, 이때 사고 지점은 Top Labrador 구획으로 설정하였다. 피폭경로의 경우, 수영 및 해안활동에 의한 외부피폭, 분무 흡입 및 해양생물, 담수, 염분 섭취에 의한 내부피폭을 피폭경로로 고려하였다. 해양생물은 먹이, 1차 포식자, 2차 포식자로 설정하여 먹이사슬을 구성한 뒤 먹이사슬에 따른 핵종 농축을 고려하였다. 먹이의 경우 어류, 갑각류, 연체동물, 해조류, 플랑크톤을 고려하였다. MARINRAD 계산 결과, 해양생물 섭취에 의한 내부피폭경로의 선량 기여도가 가장 컸다. 일반인에 대한 평균 피폭선량은 Top Labrador 구획에서 τ가 1년이라 가정하였을 때 침몰 후 약 5년 뒤에 최대이며 그 선량은 약 1.81 mSv yr^{-1}로 나타났다. 더불어 일반인 평균 피폭선량은 τ가 10년일 경우에는 최대 1.20 mSv yr^{-1}, τ가 100년일 경우에는 최대 0.07 mSv yr^{-1}로 나타났다.

4. 고 찰

해상운반 사례는 각 국가별 해상운반 목적, 선박 기본 제원, 항해 거리 및 운반 소요 시간과 운반용기 제원에 대해 분석하였다. Table 1에 국가별 해상운반 선박 제원을, Table 2에 운반용기의 제원을 나타내었다. 해상운반이 수행되는 방사성물질 종류는 사용후핵연료, 유리화된 고준위방사성폐기물, MOX 연료, 중저준위방사성폐기물 4가지로 구분되었다. 중저준위방사성폐기물을 제외한 나머지 방사성폐기물은 전용 운반용기에 담아 운반하였다. 중저준위방사성폐기물을 제외한 운반물은 모두 운반 시 INF 3등급을 인증받은 방사성폐기물 전용 운반 선박으로 운반을 수행하였다. INF 2등급 선박이 INF 3등급 선박에 비해 1회 운반 시 경비가 저렴하다. INF 2등급 선박은 운반하는 유리화된 고준위방사성폐기물의 총방사능량 한도가 정해져있어 그 이상을 선적하여 운반할 수 없다. 그러나 INF 3등급 선박은 그 한도가 없어 더 많은 양의 폐기물을 운반할 수 있다. 주기적인 방사성폐기물의 대량 운반이 수행될 예정임을 고려하였을 때 장기적으로는 INF 3등급 선박이 운반 경비를 절감할 수 있기 때문에 모두 INF 3등급 선박으로 해상운반을 수행하는 것으로 판단된다[49].

일본 NFT 사의 경우 평균 운반 속도가 11.3 kn이다. 영국 PNTL 사의 경우 10.0~11.3 kn의 속도로 운반한다. 스웨덴 SKB 사의 경우 9.8 kn로 방사성폐기물을 운반한다. 한국 원자력환경공단의 경우 8.6 kn로 운반을 수행한다. 일반적인 해상운반을 수행하는 선박의 평균 속도와 비교하였을 때 방사성폐기물 운반 선박의 속도가 느린 것을 알 수 있다[50]. 선박의 속도가 증가할 경우, 동일 경로에 대해 운반 중 승무원의 외부피폭 시간이 감소하여 승무원에 대한 피폭선량이 감소한다. 그러나 승무원에 대한 방사성폐기물의 외부피폭선량 감소라는 이익보다 운반 시 연료 소비량과 온실가스 배출량 증가라는 손해가 더 크다[51]. 따라서 선박을 감속하는 대신 운반용기와 선박의 중차폐를 통해 외부피폭선량을 줄이는 방향으로 최적화한 것으로 판단된다.

Table 3에 일본과 미국의 방사성핵종 해양확산에 의한 일반인 선량평가 연구를 비교하여 나타내었다. 일본과 미국 모두 공통적으로 수영, 해안활동에 의한 외부피폭과 해양생물 섭취에 의한 내부피폭을 피폭경로로 고려하였다. 다만, 일본의 경우, 갑판활동과 어업에 의한 외부피폭을, 미국의 경우에는 분무 흡입 및 담수, 염분 섭취에 의한 내부피폭을 추가적으로 고려하였다는 차이가 있다. 사용후핵연료는 일본의 경우 침몰 후 20년 뒤에 0.04 mSv yr^{-1}, 미국의 경우 침몰 후 5년 뒤에 1.81 mSv yr^{-1}가 일반인 최대 피폭선량으로 나타났다. 이 때 두 연구 모두 선량에 큰 기여를 한 피폭경로는 해양생물 섭취에 의한 내부피폭으로 나타났다. 두 연구에서 일반인 최대 피폭선량이 나타나는 시기와 그 선량값이 다른 이유는 해양 구획 모델링 차이로 인한 것으로 판단된다. 일본의 경우 사고 지점과 평가 지점이 다른 구획에 존재하지만, 미국의 경우 사고 지점과 평가 지점이 같은 구획에 존재한다. 따라서 시간에 따른 구획 간 핵종의 이동이 일본보다 적게 고려되었기에 해수 내 핵종의 농도가 상대적으로 높게 평

Table 1. Specification of radioactive waste transportation shipment

	Shipment	Content	INF code	Length (m)	Width (m)	Deadweight (ton)
NFT co. (Japan)	Rokueimaru	SF, HLW, LILW	3	100	16	2810
	Kaieimaru	SF, HLW, LILW	3	100	16.5	2795
	Seieimaru	LLW	-	100	16.5	3018
PNTL co. (UK)	Pacific Heron	MOX fuel	3	104	17	4916
	Pacific Egret	MOX fuel	3	104	17	4408
	Pacific Grebe	HLW	3	104	17	4902
SKB co. (Sweden)	M/S Sigrid	SF, LILW	3	100	19	1600
KORAD (Korea)	HJ Cheongjoengnuri	LILW	-	79	16	1365

LLW: Low level radioactive waste, LILW: Low and Intermediate level radioactive waste
HLW: High level radioactive waste, SF: Spent fuel

Table 2. Specification of radioactive waste transportation package

	Package	Content	Package mass (t)	Packaging mass (t)	Length (m)	Diameter (m)
NFT co. (Japan)	NFT-38B	BWR SF assemblies	119	103	6.4	2.6
	NFT-32B		106	92	6.4	2.4
	NFT-22B		97	88	6.3	2.6
	NFT-12B		73	68	6.4	2.3
	NFT-14P	PWR SF assemblies	115	101	6.3	2.6
	NFT-10P		83	75	6.2	2.6
	HZ-75T	PWR or BWR SF assemblies	82	74	5.9	2.3
	IP-2	LLW 200 L drums	9	1	Height (m): 1.1	Length (m): 3.2 Width (m): 1.6
PNTL co. (UK)	TN 28 VT	HLW	112	95	6.6	2.5
	TN 12/2	MOX fuels	110	101	6.2	2.5
SKB co. (Sweden)	TN 17Max	PWR or BWR SF assemblies	82	75	6.8	2.15
	ATB 12K	LILW concrete modules	120	69	Height (m): 4.1	Length (m): 7.2 Width (m): 3.3
	ATB 3T		120	58	Height (m): 4.4	Length (m): 7.2 Width (m): 3.7
	ATB 1T		113	62	Height (m): 2.9	Length (m): 4.2 Width (m): 2.3
	ISO 1D	LLW	10	1	Height (m): 2.6	Length (m): 3.0 Width (m): 2.4
	ISO 1CC		31	2	Height (m): 2.6	Length (m): 6.1 Width (m): 2.4
KORAD (Korea)	IP-2	LILW 200 L or 320 L drums	6.5	3.1	Height (m): 1.2	Length (m): 3.4 Width (m): 1.6

가되어 피폭선량 값이 높게 계산된 것으로 판단된다. 그 예로 같은 조건일 때, 인접한 Top North American 구획에서 일반인 최대 피폭선량은 침몰 후 20년 뒤에 0.03 mSv yr^{-1}이다. 핵종의 이동에 따른 해수 농도 희석과 구획을 이동하는 데 소요되는 시간으로 인해 Top Labrador 구획에 비해 최대 피폭선량이 나타나는 시기가 지연되며 그 값이 급감하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

국내 방사성폐기물의 지속적인 증가와 원자력발전소 해체에 따른 해체 폐기물 발생, 원자력발전소 임시저장시설의 포화로 인하여 방사성폐기물 소외운반 수요의 증가가 예상된다. 국내 지형적 특성과 운반 시 일반인에 대한 방호 최적화 등을 근거로 하였을 때, 방사성폐기물이 해상으로 운반될 개연성이 있다. 다만, 국내는 국외에 비해 해상운반에 대한 경험이 적고, 그 경험이 중저준위방사성폐기물에 한정되어 있다. 또한, 해상운반에 앞서 수행되어야하는 침몰사고 시 일반인 선량평가 연구 사례가 국외에 비해 적다. 따라서 본 연구에서는 국내 · 외 방사성폐기물 해상운반 사례와 국외 해상운반 침몰사고 시 방사성핵종 해양확산에 따른 일반인 선량평가 사례에 대해 분석하였다.

해상운반 사례는 각 국가별 해상운반 목적, 선박 기본 제원, 항해 정보와 운반용기 재원에 대해 분석한 결과, 해상운반은 원자력발전소과 재처리시설, 원자력발전소와 처분시설 또는 중간저장시설간 방사성폐기물을 운반하기 위해 수행되었다. 중저준위방사성폐기물을 제외한 운반물은 모두 INF 3등급 선박으로 운반하였다. 운반 선박의 평균 속도는 일본 NFT 사 11.3 kn, 영국 PNTL 사 10.0~11.3 kn, 스웨덴 SKB 사 9.8 kn, 한국 원자력환경공단 8.6 kn로 모두 13 kn 이하의 저속으로 수행되었다. 사용후핵연료의 경우, 일본은 HZ형 운반용기와 노형별로 제작된 NFT형 운반용기, 스웨덴은 TN-12Max에 포장하여 운반을 수행하였다. 영국의 고준위방사성폐기물은 TN 28VT, MOX 연료는 TN 12/2에 포장되어 운반되었다. 중저준위방사성폐기물의 경우 한국과 일본은 200 L 드럼에 담은 뒤 IP-2형 운반용기에 포장하여 운반하였으며, 스웨덴은 ATB형 운반용기에 200 L 드럼 또는

Table 3. Summary and comparison of Japanese and the U.S studies

		Japan	The U.S
Accident location		200 m deep continental shelf 7 km from Shimokita Peninsula	Grand Banks in the Labrador Ocean
Radioactive Waste Type		PWR Spent Fuel, Vitrified HLW	PWR Spent Fuel
Activity (Bq)		SF: 5.71×10^{17} HLW: 7.14×10^{17}	1.29×10^{17}
Ocean Grid model		3D Ocean grid divided by distance (70×20×49 partitions)	2D Ocean grid divided by current (19 partitions)
Release rate (Bq/yr)		SF: after 20 yr, 2.8×10^{13} HLW: after 5 yr, 2.3×10^{13}	Con. 1: Average 4.3×10^{16} for τ = 1 yr Con. 2: Average 4.3×10^{15} for τ = 10 yr Con. 3: Average 4.3×10^{14} for τ = 100 yr
Exposure pathway	External exposure	Working at Seashore, Swimming, Working on Board, Fishing	Working at Seashore, Swimming
	Internal exposure	Ingestion of Seafood	Ingestion of Seafood, Ingestion of Desalinized Water, Ingestion of Sea Salt, Inhalation of Spray
Highest dose		SF: after 20 yr, 0.04 mSv/yr HLW: after 5 yr, 0.03 mSv/yr	After 5 yr, 1.81 mSv/yr

콘크리트 모듈에 담아 포장하여 운반을 수행하였다.

방사성핵종 해양확산에 따른 일반인 선량평가 사례 분석 결과 일본과 미국 모두 공통적으로 수영, 해안활동에 의한 외부피폭과 해양생물 섭취에 의한 내부피폭을 피폭경로로 고려하였다. 일본의 경우, 갑판활동과 어업에 의한 외부피폭을, 미국의 경우에는 분무 흡입 및 담수, 염분 섭취에 의한 내부피폭을 추가적으로 고려하였다. 선량평가 결과 두 사례 모두 해양생물 섭취에 의한 내부피폭의 선량 기여도가 가장 큰 것으로 나타났다. 일본은 사용후핵연료의 경우 침몰 후 20년 뒤에 0.04 mSv yr^{-1}, 유리화된 고준위방사성폐기물의 경우 침몰 후 5년 뒤에 0.03 mSv yr^{-1}로 일반인 최대 피폭선량이 나타났으며, 미국의 경우, 침몰 후 5년 뒤에 1.8 mSv yr^{-1}로 일반인 최대 피폭선량이 나타났다.

본 연구의 결과는 방사성폐기물 해상운반 현황과 가상 침몰사고로 인한 방사성핵종 해양확산 선량평가 방법을 파악하는 데에 활용될 수 있을 것이다. 그리고 향후 국내 방사성폐기물 해상운반 시 기반자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 원자력안전위원회의 제원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다 (RS-2021-KN059910).

참고문헌

1. WACID. Radioactive Waste Management Situation. https://nsic.nssc.go.kr/rad/radiationWaste.do#page
2. MOTIE. 2021. 2nd High Level Radioactive Waste Management Basic Plan
3. Nuclear Assurance Corporation. 1983. Nuclear Fuel Reprocessing and Mixed Oxide Fabrication Services. NAC C-8344
4. Nambu K, Nakama K. 1998. Domestic Transport for Nuclear Fuel Cycle in Japan. PATRAM'98
6. PNTL. 2016. Sea Shipments of Radioactive Waste from Europe to Japan
7. PNTL. 2016. MOX Fuel Shipments from Europe to Japan
8. Wikstroem M. 1998. Swedish Spent Fuel Management; Systems and Facilities. IAEA. IAEA-SM-352/17
9. SKB. 2018. SKB's mission is to take care of the Swedish radioactive waste
10. MOTIE. 2011. 2011 Nuclear Power Generation White Paper.
11. Baillif L, Beutier D, Raffestin D and Lepicard S. 1998. The Case of a Loss of VHLW Cargo at Sea: Towards a Risk Analysis Perspective. PATRAM'98.
12. Klett RD. 1985. Subseabed Disposal Project Annual Report: Systems October 1984 through September 1985. Sandia National Laboratories. SAND86-0244.
13. Sprung JL, Bespalko SJ and Kanipe FL. 1998. Data and Methods for the Assessment of the Risks Associated with the Maritime Transport of Radioactive Materials: Results of the SeaRAM Program Studies. Sadia National Laboratories. SAND-98-1171/1
14. Nagano I, Harada T, Hanate M. 1992. Experiences on Domestic Transportation of Spent Nuclear Fuels in Japan. PATRAM'92
15. Nagakura T, Maki Y and Tanaka N. 1978. Safety Evaluation on Transport of Fuel at Sea and Test Program on Full Scale Cask in Japan. PATRAM'78.
16. Tsumune D, Saegusa T, Suzuki H, Watabe N, Asano H, Maruyama K and Kinehara Y. 2000. Dose Assessment for the Public Due to Packages Shipping Radioactive Materials Hypothetically Sunk on a Continental Shelf. *International Journal of RAMTRANS* **11**(4): 317-328. https://doi.org/10.1179/rmt.2000.11.4.317
17. Watabe N, Knhno Y, Tsumune D, Saegusa T and Ohnuma H. 1996.

An Environmental Impact Assessment for Sea Transport of High Level Radioactive Waste. *International Journal of RAMTRANS* **7**(2-3): 117-127. https://doi.org/10.1179/rmt.1996.7.2-3.117
18. Tsumune D, Saegusa T, Suzuki H, Maruyama K, Ito C and Watabe N. 2000. Estimated Radiation Dose from a Mox Fuel Shipping Package that is Hypothetically Submerged in the Sea, *International Journal of RAMTRANS* **11**(3): 239-253. https://doi.org/10.1179/rmt.2000.11.3.239
19. IAEA. 2003. Predisposal Management of High Level Radioactive Waste. Safety Guide No. WS-G-2.6
20. Makoto H, Kenji T. 2006. Safety Measures for Marine Transportation of Nuclear Fuel and Its Performance. *Safety Engineering* **45**(6):386-389.
21. Hideki T, Koichi N. 2019. Ship Building Plan for Radioactive Material Transport in NFT. PATRAM2019.
22. Kim YM, Kim CL. 2021. Application of Logistic Simulation for Transport of SFs from Kori Site to an Assumed Interim Storage Facility. *JNFCW* **19**(1):61-74. https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2021.19.1.61
23. Chuden. 2022. Transportation of low-level radioactive waste
24. Tanaka K, Yoshida K and Sanui T. 1992. Transport System for Low Level Radioactive Wastes in Japan. PATRAM'92
25. KEPCO. Press, For transportation of spent fuel. https://www.kepco.co.jp/site_search/?ie=u&temp=ja&kw=%E4%BD%BF%E7%94%A8%E6%B8%88%E7%87%83%E6%96%99%E8%BC%B8%E9%80%81%E3%81%AB%E3%81%A4%E3%81%84%E3%81%A6&sa=%EA%B2%80%EC%83%89&cat%5B%5D=pr
26. KYUDEN. Press, For completed transportation of spent fuel. https://search.kyuden.co.jp/?kw=%E4%BD%BF%E7%94%A8%E6%B8%88%E7%87%83%E6%96%99%E8%BC%B8%E9%80%81%E5%AE%8C%E4%BA%86%E3%81%AB%E3%81%A4%E3%81%84%E3%81%A6&btn=%EA%B2%80%EC%83%89&ie=u&cpn=10&ord=p&tss=120x90&temp=new&cate%5B%5D=all&pdf=on
27. VesselFinder. Vessels. https://www.vesselfinder.com/vessels/
28. PNTL. 2015. 40 Years of PNTL
29. PNTL. 2014. Pacific Grebe
30. PNTL. 2012. Pacific Heron and Pacific Egret
31. Dylan H. 2016. Safe and secure packaging and transport of uranium materials. Uranium for Nuclear Power: 405-414. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100307-7.00015-6
32. PNTL. Shipment Notices. https://www.pntl.co.uk/category/shipment-notices/
33. AREVA. 2011. Overview of Used Fuel Transport Casks
34. SKB. 1997. SKB Annual Report 1996. SKB TR 96-25.
35. SKB, 2016, Transport ship M/S Sigrid
36. Vattenfall. 2013. Information on Forsmark - Safety, Energy and Technology.
37. SKB. 2014. Environmental Impact Assessment, Development and Continued Operation of SFR
38. Rickard L, Sofia N, Fredrik W. 2018. Transport of Irradiated Nuclear Fuel between Reactor Sites for Turther Use.
39. SKB. 2019. RD&D Programme 2019. Programme for Research, Development and Demonstration of Methods for the Management and Disposal of Nuclear Waste. TR-19-24.
40. Orano. 2022. Status of Safety in Nuclear Facilities, General Inspectorate Annucal Report.
41. Gustafsson B, Dybeck P, Pettersson S. 1989. Development, Implementation, and Experiences of the Swedish Spent Fuel and Waste Sea Transportation System. PATRAM'89
42. SKB. 2014. Acceptance criteria for waste, SFR extension project
43. Tobias H. 2017. Radioactive Waste Transport Container ATB 12K and applicable vehicles. European Spallation Source. ESS-0149584.
44. Holtec. 2019. Safety Analysis Report on The HI-STAR 1T Non-Fuel Waste Transport System
45. ISO. 2020. Series 1 freight containers - Classification, dimensions and ratings. ISO-668:2020.
46. KORAD. 2016. Healing Center for Next Generation.
47. Kim SI. 2018. Radioactive Waste Management. Joint IAEA-KINS Regional Network Meeting on Basic Professional Training Course for Nuclear Safety.
48. The Nuclear Safety Committee. 2001. The Assessment of Radiation Exposure to Public at the Light Water Reactor Power Station in Safety Examination.
49. KAERI. 2008. Development of a Computer Program (CASK) for the Analysis of Logistics and Transportation Cost of the Spent Fuels. KAERI/TR-3579/2008.
50. Tran NK, Lam JSL. 2022. Effects of container ship speed on CO_2 emission, cargo lead time and supply chain costs. *Research in Transportation Business & Management* **43**. https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100723
51. Harilaos NP. 2023. Ship Speed vs Power or Fuel Consumption: Are laws of physics still valid? Regression Analysis Pitfalls and Misguided Policy Implications. *Cleaner Logistics and Supply Chain* **7**. https://doi.org/10.1016/j.clscn.2023.100111