Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 1, pp. 43-52, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.1.43

Original article

# 건식 저장방식별 사용후핵연료 운반 작업자 피폭시나리오 개발

손건우[1] · 김혁재[1] · 이신동[1] · 곽민우[1] · 김광표[1,*]
[1]경희대학교 원자력공학과

# Development of Spent Nuclear Fuel Transportation Worker Exposure Scenario by Dry Storage Methods

Geon Woo Son[1], Hyeok Jae Kim[1], Shin Dong Lee[1], Min Woo Kwak[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** Currently, there are no interim storage facilities and permanent disposal facilities in Korea, so all spent nuclear fuels are temporarily stored. However, the temporary storage facility is approaching saturation, and as a measure to this, the 2nd Basic Plan for the Management of High-Level Radioactive Waste presented an operation plan for dry interim storage facilities and dry temporary storage facilities on the NPP on-site. The dry storage can be operated in various ways, and to select the optimal dry storage method, the reduction of exposure for workers must be considered. Accordingly, it is necessary to develop a worker exposure scenario according to the dry storage method and evaluate and compare the radiological impact for each method. The purpose of this study is to develop an exposure scenario for workers transporting spent nuclear fuel by dry storage method. To this end, first, the operation procedure of the foreign commercial spent nuclear fuel dry storage system was analyzed based on the Final Safety Analysis Report (FSAR). 1) the concrete overpack-based system, 2) the metal overpack-based system, and 3) the vertical storage module-based system were selected for analysis. Factors were assumed that could affect the type of work (working distance, working hours, number of workers, etc.) during transportation work. Finally, the work type of the processes involved in transporting spent nuclear fuel by dry storage method was set, and an exposure scenario was developed accordingly. The concrete overpack method, the metal overpack method, and the vertical storage module method were classified into a total of 31, 9, and 23 processes, respectively. The work distance, work time, and number of workers for each process were set. The product of working hours and number of workers (Man-hour) was set high in the order of concrete overpack method, vertical storage module method, and metal overpack method, and short-range work (10 cm) was most often applied to the concrete overpack method. The results of this study are expected to be used as basic data for performing radiological comparisons of transport workers by dry storage method of spent nuclear fuel.

**Key words:** Spent nuclear fuel, Dry storage, Spent nuclear fuel transportation, Worker dose assessment, Exposure scenario

## 1. 서 론

사용후핵연료는 원자로에서 일정기간 연소 후 인출된 핵연료를 말하며, 고준위 방사성폐기물에 해당한다[1,2]. 사용후핵연료는 일반적으로 영구처분 전까지 임시저장, 중간저장 단계를 따라 관리된다. 국내에서는 아직 중간저장시설 및 영구처분시설이 부재하여 기존 사용후핵연료는 전량 임시저장되고 있다[3]. 그러나 현재 국내 원전의 사용후핵연료 저장수조 용량은 2031년부터 순차적으로 포화될 전망이며, 중간저장시설의 확보는 상당한 시일이 필요할 것으로 예상되기 때문에 차후 발생할 사용후핵연료 또한 장기간의 임시저장이 필요한 상황이다. 이에 대한 대안으로써, 제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획에서는

**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** 7 March 2024 **Revised** 21 March 2024 **Accepted** 25 March 2024

건식 중간저장시설과 더불어 원전 부지 내 건식 임시저장시설의 운영 계획을 명시하였다. 이러한 사용후핵연료 건식 저장은 다양한 방식으로 수행될 수 있으며, 향후 관련 정책 및 주민 수용성, 안전성 등을 고려하여 결정될 예정이다[4].

미국에서는 사용후핵연료 취급 설비 인허가 시 운영절차, 작업자 및 일반인에 대한 방사선학적 영향 평가를 최종안전성분석보고서(FSAR, Final Safety Analysis Report)에 포함하여 원자력규제위원회(NRC, Nuclear Regulatory Commission)에 제출해야 한다[5]. 또한 NRC에서는 건식 저장조건에서의 사용후핵연료 포장 용기 취급 시 준수해야 할 세부 지침을 제시하고 있다[6]. 이에 따라, 미국 Holtec, EnergySolutions, NAC 등에서는 각 사에서 개발한 사용후핵연료 건식 저장 용기에 대해 운영절차를 수립하고 이에 대한 방사선학적 영향 평가를 수행한 바 있다[7-14]. 그리고 퍼시픽 노스웨스트 국립연구소(PNNL, Pacific Northwest National Laboratory)에서는 Surry 원자력발전소의 CASTOR V/21 취급 작업자에 대해 방사선학적 영향 평가 연구를 수행하였다[15]. P. F. Weck 등은 다양한 건식 저장 설비 운영에 따른 작업자 방사선학적 영향을 종합하였다[16]. 한편 국내에서는 사용후핵연료 건식 저장시스템 개발 및 이의 운영에 따른 차폐 평가 및 방사선학적 영향 평가 연구가 수행되었다[17-19].

미 연방 규제집 10CFR72에서는 사용후핵연료 저장시설 내 작업자에 대해 방사선 방호 ALARA (As Low As Reasonably Achievable)원칙을 준수해야 함을 명시하고 있다[20]. 또한 국내 원자력안전법 제91조, 동법 시행령 제134조에서는 방사선작업종사자의 피폭이 가능한 낮게 유지되어야 함을 명시하고 있다[21,22]. 이에 향후 국내 사용후핵연료 건식 저장방식 선정 시에는 작업자에 대한 방사선학적 영향 또한 고려대상으로 포함해야 한다. 국내 · 외에서 사용후핵연료 건식 저장시설 운영에 따른 방사선학적 영향 평가는 다수 수행되었다. 그리고 국외에서는 건식 저장 설비 인허가 등을 목적으로 작업자에 대한 방사선학적 영향 평가 및 관련 연구 또한 다수 진행된 바 있다. 그러나 각각 특정 건식 저장 설비의 운영에 한정되어 있어, 동일한 저장방식 이거나 유사한 작업인 경우에도 작업환경 등 평가 조건이 서로 상이하게 나타난다. 따라서 작업자의 방사선학적 영향을 평가하고 이를 건식 저장방식 선정에 활용하기 위해서는, 저장 방식별 일반화된 피폭시나리오를 개발하여 적용할 필요가 있다.

본 연구의 목표는 건식 저장방식별 사용후핵연료 운반에 따른 작업자의 피폭시나리오를 개발하는 것이다. 이를 위하여, 먼저 국외 상용 사용후핵연료 건식 저장시스템의 운영절차를 분석하였다. 그리고 운반 작업 시 작업형태(작업거리, 작업시간, 작업인원 수 등)에 영향을 줄 수 있는 요인들에 대하여 가정사항을 설정하였다. 최종적으로 건식 저장방식별 사용후핵연료 운반 시 수반되는 작업들의 작업형태를 설정하였으며, 이에 따른 피폭시나리오를 도출하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 국외 상용 건식 저장시스템 운영절차 분석

본 연구단계에서는 건식 저장시설 사용후핵연료 운반 작업자 피폭시나리오 개발에 앞서 국외 상용 건식 저장시스템의 운영절차를 분석하였다. 분석 대상으로는 운반 및 저장 겸용 캐니스터(DPC, Dual Purpose Canister) 기반 저장방식을 선정하였다. DPC는 금속 재질의 사용후핵연료 포장용 캐니스터로, 이를 통해 운반 및 저장 작업 시 사용후핵연료의 외부 노출 없이 작업을 수행할 수 있어, 관리단계 간 안전성 및 작업 효율성 확보에 용이하다. 이러한 장점으로 국외에서는 DPC 기반의 건식 저장방식이 다수 활용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 DPC 기반 1) 콘크리트 오버팩 방식, 2) 금속 오버팩 방식, 3) 수직 저장 모듈 방식 상용 저장시스템의 운영절차를 분석하였다.

콘크리트 오버팩 방식은 사용후핵연료가 포장된 DPC를 콘크리트 재질의 용기(Cask)에 적재하여 수직으로 저장하는 방식이다. 그리고 금속 오버팩 방식은 DPC를 금속 재질의 용기에 적재하여 수직으로 저장하는 방식이다. 저장 모듈 방식의 경우 콘크리트 모듈 내 공동에 DPC를 저장하는 방식에 해당하며, DPC 저장 방향에 따라 수평 방식과 수직 방식으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 최근 국내 수직 저장 모듈 개발 연구사례를 고려하여, 해당 방식을 운영절차 분석 대상으로 선정하였다[23].

Table 1에 본 연구에서 분석한 국외 상용 건식 저장시스템을 요약하여 나타내었다. 미국은 세계적으로 가장 많은 사용후핵연료 건식 저장 경험을 보유하고 있으며, 건식 저장 인허가를 위해서는 NRC에 운영절차 등이 포함된 FSAR를 제출해야 한다. 따라서 상기 3가지 방식에 대하여, 상용 건식 저장시스템 FSAR에 제시되어 있는 운영절차를 분석하였다. 저장방식별 상용시스템 선정 시에는 미국 내 건식 저장 현황을 고려하였다[16]. 콘크리트 오버팩 방식의 경우, HI-STORM 100, NAC-UMS, VSC-24, FuelSolutions의 운영절차를 분석하였다. 그리고 금속 오버팩 및 수직 저장 모듈 방식의 경우, 각각 HI-STAR 100, HI-STORM UMAX의 운영절차를 분석하였다[7-14].

### 2.2. 사용후핵연료 운반 작업 시 가정사항 설정

본 연구단계에서는 사용후핵연료 운반에 따른 작업에 대해 가정사항을 설정하였다. 동일한 사용후핵연료 저장방식에 해당하더라도, 상용 건식 저장시스템별 FSAR에서 제시하는 작업분류 및 작업형태는 다양하게 나타난다. 그리고 각각의 FSAR에서는 관련 요건이 충족되는 한, 운영자의 재량에 따라 운영절차, 설비 등의 변경이 가능함을 명시하고 있다. 즉, 상기 언급한 요인 외에도 시설 및 관련 설비 운영 형태 등에 의해, 작업거리, 작업시간, 작업인원 수와 같은 작업형태는 상이하게 나타날 수 있다. 따라서 사용후핵연료 건식 저장방식별 일반화된 피폭시나리오

**Table 1.** Summary of foreign commercial dry storage systems

| Management Method | Management System | Manufacturer |
|---|---|---|
| Metal Overpack | HI-STAR 100 | Holtec |
| Concrete Overpack | HI-STORM 100 | Holtec |
| | NAC-UMS | NAC |
| | VSC-24 | EnergySolutions |
| | FuelSolutions | EnergySolutions |
| Vertical Module | HI-STORM UMAX | Holtec |

개발에 앞서, 이를 위한 가정사항 설정이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 크게 1) 작업구역, 2) 시설 내 사용후핵연료 이송 수단, 3) 취급 보조설비, 4) 작업거리에 대한 가정사항을 설정하였다. 상기 네 항목은 사용후핵연료 운반 작업 시 작업절차에 영향을 미칠 수 있다. 특히 작업거리의 경우 작업자에 대한 방사선학적 영향을 결정하는 주요 요인에 해당한다. 이에 사용후핵연료 건식 저장방식별 작업절차에 따라 상기 네 항목에 대한 가정사항을 설정하였다. 이를 위해 상용 건식 저장시스템별 FSAR에서 제시하고 있는 운영절차를 활용하였으며, 이때 작업자 방사선학적 영향 평가 및 비교의 용이성 등을 고려대상으로 포함하였다.

### 2.3. 건식 저장방식별 운반 작업자 피폭시나리오 도출

Fig. 1에 본 연구에서 피폭시나리오 개발 범위 대상으로 설정한 사용후핵연료 운반 작업을 요약하여 나타내었다. 건식 저장 중인 사용후핵연료가 차 단계 관리시설로 인도되는 과정 중 발생하는 운반 작업은 크게 시설 내부 및 외부 운반 작업으로 구분할 수 있다. 시설 내 운반의 경우 저장방식에 따라 차이가 발생할 수 있으나, 시설 외 운반의 경우 국내 교통환경 여건상 모든 저장방식에서 유사하게 수행될 개연성이 높다. 본 연구는 건식 저장방식별 작업자 방사선학적 영향 비교를 위한 피폭시나리오 개발이 목적이므로, 시설 외 운반 작업의 경우 피폭시나리오 개발 범위에서 제외하였다. 또한 국내에서도 저장조 공간 확보를 위한 사용후핵연료 호기 간 이동 및 이에 따른 작업자 방사선 안전관리 경험이 존재함에 따라, 저장조에서 수행되는 작업 또한 고려대상에서 제외하였다[24].

최종적으로 본 연구에서는 1) 건식 저장 중인 사용후핵연료 회수, 2) 시설 외 운반 준비 작업자에 대한 피폭시나리오를 개발하였다. 이를 위해 상용 건식 저장시스템 FSAR를 기반으로 작업절차를 구분하고, 각 작업에 대해 작업거리, 작업시간, 작업인원 수 등의 작업형태를 설정하였다. 운반 작업 시, 작업 중 발생할 수 있는 불확실성으로 인해 작업 형태는 변동될 가능성이 있음에 따라, 본 연구에서는 각 저장방식별 FSAR에서 제시하는 작업절차 및 이에 따른 작업형태를 활용하였다. 작업시간, 작업인원 수의 경우 FSAR를 참고하여 값을 설정하였다. 작업거리의 경우 대부분의 FSAR에서 제시하고 있지 않거나 대략적으로만 제시하고 있음에 따라, 앞서 설정하였던 가정사항을 기반으로 설정하였다. 그리고 건식 저장방식별 방사선학적 영향 비교를 위하여, 서로 다른 저장방식에 해당하더라도 동일한 작업에 해당하는 경우 작업형태 또한 동일하게 적용하였다.

## 3. 결 과

### 3.1. 국외 상용 건식 저장시스템 운영절차

#### 3.1.1. 콘크리트 오버팩 방식

Fig. 2에 콘크리트 오버팩 기반 건식 저장방식의 운영절차를 요약하여 나타내었다. HI-STORM 100, NAC-UMS, VSC-24, FuelSolutions 각각의 세부적인 운영절차는 일부 상이하였으나, 전반적인 과정은 유사한 것으로 나타났다. 각각의 시스템에서 콘크리트 오버팩, 시설 외부 운반용기(Transportation cask), 시설 내 이송용기(Transfer cask)가 모두 동일하게 활용된다. 콘크리트 오버팩은 DPC의 시설 내 저장용기이며, 운반용기는 DPC의 시설 외부 운반에 활용된다. 이송용기는 시설 내에서의 DPC 운반과 더불어 콘크리트 오버팩으로의 DPC 이동 시 활용된다. 운영절차는 크게 1) 저장조 내 DPC가 장전된 이송용기 하강 및 사용후핵연료 적재, 2) 이송용기 인양, 3) DPC 용접, 4) 이송용기-콘크리트 오버팩 간 DPC 이동, 5) 시설 내 저장구역으로 콘

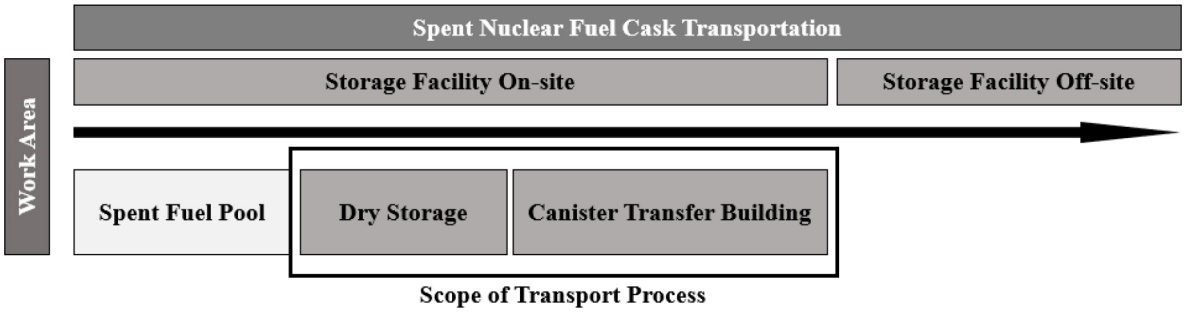


**Fig. 1.** Dose assessment subject spent nuclear fuel transport process scope

**Fig. 2.** Operation procedure of concrete overpack-based dry storage method

**Fig. 3.** Operation procedure of metal overpack-based dry storage method

크리트 오버팩 이동, 6) 콘크리트 오버팩 배치 순으로, 모든 시스템에서 동일하게 적용된다. 그리고 시설 외 운반을 위해서는 운반용기로의 DPC 이동이 필요하며, 용기 상단 및 하단에 충격완충체를 부착하여 반출한다.

#### 3.1.2. 금속 오버팩 방식

Fig. 3에 금속 오버팩 기반 건식 저장방식의 운영절차를 요약하여 나타내었다. 금속 오버팩 방식 건식 저장시스템에 해당하는 HI-STAR 100의 경우, 타 저장 방식에 비해 비교적 단순한 절차로 운영되는 것으로 나타났다. 금속 오버팩의 경우 타 저장방식과 다르게 저장조 내 직접 하강 및 시설 내 운반이 가능하여, 오버팩 및 용기 간 DPC 이동을 위한 이송용기가 필요하지 않다. 또한 시설 외 운반이 가능하여 운반용기로의 DPC 이동이 필요하지 않다. 금속 오버팩 방식의 운영절차는 크게 1) 저장조 내 DPC가 장전된 금속 오버팩 하강 및 사용후핵연료 적재, 2) 금속 오버팩 인양, 3) DPC 용접, 4) 시설 내 저장구역으로 금속 오버팩 이동, 5) 금속 오버팩 배치 순으로 구분된다. 그리고 시설 외 운반을 위해서는 오버팩의 상단 및 하단에 충격완충체를 부착하여 반출한다.

#### 3.1.3. 수직 저장 모듈 방식

Fig. 4에 수직 저장 모듈 기반 건식 저장방식의 운영절차를 요

**Fig. 4.** Operation procedure of vertical storage module-based dry storage method

약하여 나타내었다. 수직 저장 모듈 방식 건식 저장시스템에 해당하는 HI-STORM UMAX의 경우, 콘크리트 오버팩 방식과 상당 부분 유사한 절차로 운영되는 것으로 나타났다. 또한 콘크리트 오버팩 방식과 동일하게, 오버팩 및 용기 간 DPC 이동을 위한 이송용기 및 시설 외부 운반용기가 활용된다. 운영절차는 크게 1) 저장조 내 DPC가 장전된 이송용기 하강 및 사용후핵연료 적재, 2) 이송용기 인양, 3) DPC 용접, 4) 시설 내 저장구역으로의 이송용기 이동, 5) 이송용기-모듈 간 DPC 이동 순으로 구분된다. 그리고 시설 외 운반 시에는 콘크리트 오버팩 방식과 동일하게 운반용기로의 DPC 이동이 필요하며, 충격완충체를 부착하여 반출한다.

## 3.2. 사용후핵연료 운반 작업 시 가정사항

### 3.2.1. 작업구역

사용후핵연료 운반을 위한 작업구역은 크게 인수취급건물과 저장구역 2가지로 구분하였다. 인수취급건물은 인수 구역(Receiving area)과 캐니스터 취급구역으로 세분하였다. 인수 구역에서는 시설 내로 들어오는 운반차량으로부터의 사용후핵연료 인수 작업, 운반차량으로의 사용후핵연료 적재 등의 반출 작업이 수행되며, 캐니스터 취급구역에서는 오버팩 및 용기 간 DPC를 이동하는 작업이 수행되는 것으로 가정하였다. 그리고 저장구역의 경우, 사용후핵연료의 배치 또는 회수를 위한 작업이 수행되는 것으로 가정하였다.

### 3.2.2. 시설 내 이송 수단

시설 내 사용후핵연료 이송 수단은 건식 저장방식 간 작업자 방사선학적 영향 비교의 용이성을 위해 모두 동일하게 수직이송기(VCT, Vertical Cask Transporter) 형태의 이송 수단을 사용하는 것으로 가정하였다. 수직이송기는 오버팩을 수직 방향으로 적재하여 운반하는 설비로, 최근 많은 건식 저장시설에서 활용되고 있으며 작업절차가 가장 간단한 이송설비에 해당한다. 수직이송기는 사용후핵연료 용기 또는 오버팩 운반 또는 캐니스터 교환 작업 시 추가적인 크레인 설비가 필요하지 않을 뿐 아니라, 운전석이 마련되어 있어 상대적으로 자유로운 제어가 가능하다. 이를 고려하여, 3가지 방식 공통적으로 시설 내 용기 또는 오버팩 이송을 위한 설비는 수직이송기로 설정하였다.

### 3.2.3. 취급 보조설비

사용후핵연료 건식 저장 시에는 작업의 편의 또는 작업자 보호 등을 위해 다양한 보조설비들이 활용된다. 이에 대한 예시로, 사용후핵연료 취급 시 작업자 피폭방사선량을 저감시키기 위한 감마 차폐격자 등이 있다. 앞서 분석한 FSAR에 따르면, 동일한 저장 방식의 시스템에서도 보조설비의 사용유무 차이로 인해 작업절차가 일부 상이하게 나타났다. 그리고 특정 보조설비의 경우 저장시설 운영자 재량에 따라 작업 과정에서 배제할 수 있음을 명시하였다. 따라서 본 연구에서는 건식 저장방식별로 단일한 운반 작업자 피폭시나리오를 개발하기 위해, 시스템별 고려대상 취급 보조설비를 선정하였다. 이때 콘크리트 오버팩 방식은 2종 이상의 시스템에서 활용되고 있는 보조설비를 선정하였다.

Table 2에 본 연구에서 고려한 사용후핵연료 건식 저장방식별 보조설비를 요약하여 나타내었다. 콘크리트 오버팩 시스템의 경우, 공기 유입구 및 출구 스크린, 온도 감시 장비, 감마 차폐격자, 상부 및 하부 유로 차폐체, 보조 차폐체, 정렬장치를 활용하는 것으로 가정하였다. 금속 오버팩 방식의 경우, 캐니스터 교환 작업을 수행하지 않아 별도의 보조설비를 사용하지 않는 것으로

**Table 2.** Assumed auxiliary equipment by spent nuclear fuel management methods

| Management Method | Auxiliary Equipment |
|---|---|
| Concrete Overpack | Air inlet vent screen |
| | Air outlet vent screen |
| | Temperature element |
| | Gamma shield cross plate |
| | Vent duct shield |
| | Shield ring |
| | Alignment device |
| Vertical Module | Shield ring |
| | Alignment device |
| Metal Overpack | - |

가정하였다. 그리고 수직저장모듈 방식의 경우 저장 오버팩을 사용하지 않으므로, 보조 차폐체와 정렬 장치만 사용하는 것으로 가정하였다.

#### 3.2.4. 작업거리

앞서 분석한 상용 운반·저장시스템의 FSAR에서는 대부분 작업별 작업거리를 제시하고 있지 않으며, 이를 제시하고 있는 FSAR에서도 대략적인 작업거리만 명시할 뿐 구체적인 작업별 작업거리를 나타내고 있지 않았다. 하지만 NRC에서는 작업자의 직무피폭량을 평가하기 위해 활동 반경을 고려하여 용기로부터 10 cm, 1 m에서의 방사선량률을 측정할 것을 권고한 바 있다[6]. 따라서 본 연구에서는 작업자 방사선학적 영향 평가의 단순화 및 합리적 보수성을 고려하여, 10 cm, 1 m, 2 m의 작업거리를 가정하였다. 그리고 앞서 분석한 운영절차를 기반으로 작업별 거리의 경향성을 반영하여 작업거리를 설정하였다.

작업자가 볼트를 조이거나 인양 설비를 장착하는 등의 작업은 작업자가 근거리에서 수행하는 작업으로, HI-STORM 100 FSAR에서는 이와 같은 작업에 대해 작업자의 팔이 닿는 거리에서 작업을 수행한다고 기술하고 있다. 이러한 작업의 경우, 직관적이고 보수적인 평가를 위해 용기 표면선량률 기준에 해당하는 10 cm의 거리에서 수행되는 것으로 가정하였다. 길이가 긴 도구를 사용하거나 육안검사를 수행하는 것과 같이 작업자의 접촉이 불필요한 작업의 경우, 1 m의 거리에서 수행되는 것으로 가정하였다. 그리고 수직이송기를 이용한 운반 등 작업 상황상 1 m보다 먼 거리에서 수행될 것으로 예상되는 작업의 경우, 2 m의 작업거리를 가정하였다.

### 3.3. 건식 저장방식별 운반 작업자 피폭시나리오

#### 3.3.1. 콘크리트 오버팩 방식

Table 3에 콘크리트 오버팩 방식 저장시설의 사용후핵연료 운반 작업자 피폭시나리오를 나타내었다. 회수 작업 및 시설 외부 운반 준비 작업은 각각 4단계, 27단계의 작업으로 구분하였다. 회수 작업자는 먼저 저장 구역에서 콘크리트 오버팩의 하부유로 스크린 및 차폐격자를 제거한다. 보조설비를 제거한 후, 오버팩을 수직이송기에 연결하여 캐니스터 교환구역으로 운반한다. 회수 작업을 완료한 작업자는 인수취급건물에서 시설 외부 운반 준비 작업을 수행한다. 해당 작업에서는 먼저 오버팩 내부의 DPC를 이송용기로 교환하는 작업이 수행된다. DPC가 장입된 이송용기는 다른 캐니스터 교환구역으로 옮겨지고, DPC는 다시 운반용기로 교환된다. 최종적으로 DPC는 운반용기에 포장되며, 덮개로 밀봉된 후 외부 운반을 위한 차량에 적재된다.

콘크리트 오버팩 방식 저장시설에서의 사용후핵연료 운반 작업 중, 회수작업에서 총 72분의 작업시간이 소요되며, 시설 외부 운반 준비 작업에서는 총 293분이 소요되는 것으로 설정하였다. 시설 외부 운반 준비 작업 중 4가지의 작업은 원격으로 수행되며 해당 작업의 경우 작업자의 방사선 피폭이 예상되지 않아 작업형태 설정에서 배제하였다.

#### 3.3.2. 금속 오버팩 방식

Table 4에 금속 오버팩 방식 저장시설의 사용후핵연료 운반 작업자 피폭시나리오를 나타내었다. 회수 작업 및 시설 외부 운반 준비 작업은 각각 3단계, 6단계의 작업으로 구분하였다. 작업자는 저장 구역의 금속 오버팩을 수직이송기를 활용해 인수취급건물로 이송한다. 인수취급건물에 도달한 금속 오버팩은 곧바로 운반차량에 적재되어 시설 외부 운반을 준비한다. 금속 오버팩 방식 저장시설에서의 회수 작업에서는 총 100분이 소요되며, 시설 외부 운반 준비 작업에서는 총 98분이 소요되는 것으로 설정하였다.

#### 3.3.3. 수직 저장 모듈 방식

Table 5에 수직 저장 모듈 방식 저장시설의 사용후핵연료 운반 작업자 피폭시나리오를 나타내었다. 회수 작업 및 시설 외부 운반 준비 작업은 각각 8단계, 15단계의 작업으로 구분하였다. 작업자는 먼저 DPC가 저장된 모듈 공동 상단의 덮개를 제거한다. DPC가 노출되면, 수직이송기를 활용해 DPC를 이송용기에 포장하여 인수취급건물로 이송한다. 이후 인수취급건물에서 수행되는 시설 외부 운반 준비 작업은 콘크리트 오버팩 방식과 동

**Table 3.** Concrete overpack-based system transportation worker exposure scenario

| No. | Process | Work time (min) | Distance (cm) | No. of Workers (man) |
|---|---|---|---|---|
| | **Retrieval Process[d]** | | | |
| 1 | Remove inlet vent screen and cross plate | 12 | 10 | 2 |
| 2 | Connect concrete overpack to VCT[a] | 10 | 10 | 1 |
| 3 | Transport concrete overpack to CTB[b] | 40 | 200 | 1 |
| 4 | Disconnect concrete overpack to VCT[a] | 10 | 10 | 1 |
| | **Preparation Process for Facility Off-site Transportation[e]** | | | |
| 1 | Connect sling to concrete overpack lid and remove bolts | 12 | 10 | 1 |
| 2 | Remove outlet vent screen, cross plate, temperature element | 22 | 10 | 2 |
| 3 | Remove concrete overpack top lid | 2 | 100 | 1 |
| 4 | Insert vent duct shield and alignment device | 25 | 10 | 2 |
| 5 | Attach lifting adapter to DPC | 10 | 10 | 2 |
| 6 | Align concrete overpack and transfer cask | 10 | 100 | 2 |
| 7 | Remove transfer cask bottom lid | 4 | 100 | 2 |
| 8 | Connect lifting bar to DPC lifting adapter | | -[c] | |
| 9 | Transfer DPC to transfer cask from concrete overpack | 5 | 100 | 2 |
| 10 | Close transfer cask bottom lid | 4 | 100 | 2 |
| 11 | Disconnect lifting bar to DPC lifting adapter | | -[c] | |
| 12 | Transport transfer cask to CTB[b] | 5 | 200 | 1 |
| 13 | Align transfer cask and transportation cask | 10 | 100 | 2 |
| 14 | Connect lifting bar to DPC lifting adapter | | -[c] | |
| 15 | Remove transfer cask bottom lid | 4 | 100 | 2 |
| 16 | Transfer DPC to transportation cask from transfer cask | 5 | 100 | 2 |
| 17 | Disconnect lifting bar to DPC lifting adapter | | -[c] | |
| 18 | Remove lifting adapter from DPC | 10 | 10 | 2 |
| 19 | Remove alignment device | 25 | 10 | 2 |
| 20 | Install shield ring | 2 | 10 | 1 |
| 21 | Close transportation cask top lid | 40 | 10 | 2 |
| 22 | Move transportation cask to vehicle tie-down | 40 | 200 | 2 |
| 23 | Cask dose rate and contamination survey | 16 | 10 | 2 |
| 24 | Attach impact limiter | 16 | 10 | 2 |
| 25 | Install personnel barrier | 10 | 10 | 2 |
| 26 | Vehicle surface dose rate and contamination survey | 8 | 10 | 2 |
| 27 | Vehicle dose rate and contamination survey | 8 | 200 | 2 |

[a]Vertical Cask Transporter
[b]Canister Transfer Building
[c]Remote Control
[d]Working Area: Storage Area
[e]Working Area: CTB

일한 절차를 따라 수행한다. 수직 저장 모듈 방식의 운반 작업 중 회수 작업에서 총 148분의 작업시간이 소요되며, 시설 외부 운반 준비 작업은 총 194분이 소요되는 것으로 설정하였다. 수직 저장 모듈 방식에서는 2가지의 작업이 원격으로 수행되며 해당 작업의 경우 작업자의 방사선 피폭이 예상되지 않아 작업형태 설정에서 배제하였다.

**Table 4.** Metal overpack-based system transportation worker exposure scenario

| No. | Process | Work time (min) | Distance (cm) | No. of Workers (man) |
|---|---|---|---|---|
| | **Retrieval Process[c]** | | | |
| 1 | Connect metal overpack to VCT[a] | 30 | 200 | 2 |
| 2 | Transport metal overpack to CTB[b] | 40 | 200 | 1 |
| 3 | Disconnect metal overpack to VCT[a] | 30 | 200 | 2 |
| | **Preparation Process for Facility Off-site Transportation[d]** | | | |
| 1 | Move transportation cask to vehicle tie-down | 40 | 200 | 2 |
| 2 | Cask dose rate and contamination survey | 16 | 10 | 2 |
| 3 | Attach impact limiter | 16 | 10 | 2 |
| 4 | Install personnel barrier | 10 | 10 | 2 |
| 5 | Vehicle surface dose rate and contamination survey | 8 | 10 | 2 |
| 6 | Vehicle dose rate and contamination survey | 8 | 200 | 2 |

[a]Vertical Cask Transporter
[b]Canister Transfer Building
[c]Working Area: Storage Area
[d]Working Area: CTB

## 4. 고 찰

Table 6에 사용후핵연료 건식 저장방식에 따른 회수 작업자 피폭시나리오의 주요 특징을 요약하여 나타내었다. 회수 작업의 경우, 수직 저장 모듈 방식(8단계), 콘크리트 오버팩 방식(4단계), 금속 오버팩 방식(3단계) 순으로 많은 수의 작업을 적용하였다. 특히, 수직 저장 모듈 방식의 회수 작업에 따른 총 Man-hour는 4.02로, 작업자 집단선량 평가 시 3가지 방식 중 가장 긴 피폭시간이 적용된다. 금속 오버팩 방식에서의 회수 작업에 따른 총 Man-hour는 2.67로 콘크리트 오버팩 방식보다 약 1.9배 높다. 그러나, 금속 오버팩 방식의 경우 모든 작업에 2 m 거리를 적용하였음에 따라 향후 콘크리트 오버팩 및 금속 오버팩 방식에 따른 작업자 방사선학적 영향 평가 시에는 금속 오버팩 방식에서 더 낮게 평가될 개연성이 있을 것으로 판단된다.

Table 7에 사용후핵연료 건식 저장 방식에 따른 시설 외 운반 준비 작업자 피폭시나리오의 주요 특징을 요약하여 나타내었다. 시설 외 운반 준비 작업의 경우, 콘크리트 오버팩 방식(27단계), 수직 저장 모듈 방식(15단계), 금속 오버팩 방식(6단계) 순으로 많은 수의 작업을 적용하였다. 특히, 콘크리트 오버팩 방식의 회수 작업에 따른 총 Man-hour는 9.42로, 작업자 집단선량 평가 시 3가지 방식 중 가장 긴 피폭시간이 적용된다. 수직 저장 모듈 방식에서의 시설 외 운반 준비 작업에 따른 총 Man-hour는 6.43으로 금속 오버팩 방식보다 약 1.96배 높으며, 근접 거리(10 cm)에서 수행되는 작업의 비율이 높다. 이에 따라 향후 수직 저장 모듈 및 금속 오버팩 방식에 대한 작업자 방사선학적 영향 평가 시에는 수직 저장 모듈 방식에서 더 높게 평가될 개연성이 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 국외 상용 건식 저장시스템 FSAR를 기반으로 운반 작업에 따른 피폭시나리오를 도출하였으며, 국내의 경우 건식 저장시설 운영 경험이 전무함에 따라 일부 가정사항을 적용하였다. 국내에서는 다양한 방면에서 건식 저장방식 및 운영 설비 선정을 위한 검토가 수행되고 있으며, 이에 대한 구체화 수준에 따라 고려해야 하는 작업절차 등은 일부 변동될 수 있다. 따라서, 국내 사용후핵연료 건식 저장 시 운반 작업자에 대한 방사선학적 영향을 보다 합리적으로 평가하기 위해서는, 향후 건식 저장방식 및 운영 설비 결정에 따른 작업절차를 피폭시나리오에 반영할 필요가 있다.

## 5. 결 론

국내 제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획에서는 건식 중간저장시설 및 원전 부지 내 건식 임시저장시설 운영 계획을 명시하였다. 사용후핵연료 건식 저장은 다양한 방식으로 수행될 수 있으며, 향후 관련 정책 및 주민 수용성, 안전성 등을 고려하여 결정될 수 있다. 원자력안전법에서는 방사선작업종사자의 피폭이 가능한 낮게 유지되어야 함을 명시하고 있으며, 이에 향후 건식 저장방식 선정 시에는 작업자에 대한 방사선학적 영향 또한 고려대상으로 포함해야 할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 건식 저장방식별 운반 작업자의 방사선학적 영향 평가 및 비교를 위한 피폭시나리오를 개발하였다.

건식 저장방식에 따른 운반 작업자 피폭시나리오는 회수 작업 및 시설 외부 운반 준비 작업으로 구분하여 개발하였다. 피폭시나리오 개발 대상 건식 저장방식은 DPC 기반의 1) 콘크리트 오버팩 방식, 2) 금속 오버팩 방식, 3) 수직 저장 모듈 방식을 선정

**Table 5.** Vertical module-based system transportation worker exposure scenario

| No. | Process | Work time (min) | Distance (cm) | No. of Workers (man) |
|---|---|---|---|---|
| | **Retrieval Process[d]** | | | |
| 1 | Remove CEC[a] lid | 60 | 100 | 2 |
| 2 | Attach lifting adapter to DPC | 10 | 10 | 2 |
| 3 | Align transfer cask to CEC[a] | 10 | 100 | 2 |
| 4 | Remove transfer cask bottom lid | 4 | 100 | 2 |
| 5 | Connect lifting bar to DPC lifting adapter | 15 | 100 | 1 |
| 6 | Transfer DPC to transfer cask from CEC[a] | 5 | 100 | 2 |
| 7 | Close transfer cask bottom lid | 4 | 100 | 2 |
| 8 | Transport transfer cask to CTB[b] | 40 | 200 | 1 |
| | **Preparation Process for Facility Off-site Transportation[e]** | | | |
| 1 | Align transfer cask and transportation cask | 10 | 100 | 2 |
| 2 | Connect lifting bar to DPC lifting adapter | | -[c] | |
| 3 | Remove transfer cask bottom lid | 4 | 100 | 2 |
| 4 | Transfer DPC to transportation cask from transfer cask | 5 | 100 | 2 |
| 5 | Disconnect lifting bar to DPC lifting adapter | | -[c] | |
| 6 | Remove lifting adapter from DPC | 10 | 10 | 2 |
| 7 | Remove alignment device | 25 | 10 | 2 |
| 8 | Install shield ring | 2 | 10 | 1 |
| 9 | Close transportation top lid | 40 | 10 | 2 |
| 10 | Move transportation cask to vehicle tie-down | 40 | 200 | 2 |
| 11 | Cask dose rate and contamination survey | 16 | 10 | 2 |
| 12 | Attach impact limiter | 16 | 10 | 2 |
| 13 | Install personnel barrier | 10 | 10 | 2 |
| 14 | Vehicle surface dose rate and contamination survey | 8 | 10 | 2 |
| 15 | Vehicle dose rate and contamination survey | 8 | 200 | 2 |

[a]Cavity Enclosure Container
[b]Canister Transfer Building
[c]Remote Control
[d]Working Area: Storage Area
[e]Working Area: CTB

**Table 6.** Analysis of worker exposure scenarios in spent nuclear fuel retrieval process

| Management Method | Process | Man-hour[a] (hr) | Number of process by distance (cm)[b] | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 10 | 100 | 200 |
| Concrete Overpack | 4 | 1.40 | 3 | - | 1 |
| Metal Overpack | 3 | 2.67 | - | - | 3 |
| Vertical Module | 8 | 4.02 | 1 | 6 | 1 |

[a]Number of worker × work time
[b]No remote process

하였다. 콘크리트 오버팩 방식의 회수 작업, 시설 외부 운반 준비 작업은 각각 4, 27단계의 작업으로 세분하였다. 그리고 각각 총 72, 293분의 작업시간을 적용하였다. 금속 오버팩 방식의 회수 작업, 시설 외부 운반 준비 작업은 각각 3, 6단계의 작업으로 세분하였다. 그리고 각각 총 100, 98분의 작업시간을 적용하였다. 수직 저장 모듈 방식의 회수 작업, 시설 외부 운반 준비 작업

**Table 7.** Analysis of worker exposure scenarios in preparation process for facility off-site transportation

| Management Method | Process | Man-hour (hr) | Number of process by distance (cm) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 10 | 100 | 200 | Remote |
| Concrete Overpack | 27 | 9.42 | 12 | 8 | 3 | 4 |
| Metal Overpack | 6 | 3.27 | 4 | - | 2 | - |
| Vertical Module | 15 | 6.43 | 8 | 3 | 2 | 2 |

은 각각 8, 15단계의 작업으로 세분하였다. 그리고 각각 총 148, 194분의 작업시간을 적용하였다.

본 연구에서는 국외 상용 건식 저장시스템의 FSAR, 가정사항 등을 기반으로 운반 작업자의 피폭시나리오를 개발하였다. 건식 저장방식 및 운영 설비 결정에 따라 작업절차는 해당 피폭시나리오와 일부 상이할 수 있으며, 최종적인 방사선학적 영향 평가 시에는 방사선원항 특성 및 건식 저장 방식별 차폐기능 또한 평가 결과의 주요 요인으로 작용한다. 따라서 국내 건식 저장에 따른 운반 작업자의 방사선학적 영향을 보다 합리적으로 평가하기 위해서는, 향후 국내의 관련 동향을 적절히 반영해야 할 것으로 시사된다. 본 연구 결과는 사용후핵연료 건식 저장방식별 운반 작업자의 피폭방사선량 비교를 수행하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 한국에너지기술평가원에서 주관하는 에너지 기술개발사업의 일환으로 수행된 연구입니다(No. 2021171020001B).

## References

1. NEA. 2020. Storage of Radioactive Waste and Spent Fuel.
2. KORAD. 2016. Story about Spent Nuclear Fuel 70.
3. KHNP. Spent Nuclear Fuel Management Process. https://npp.khnp.co.kr/index.khnp?menuCd=DOM_000000103004001000
4. MOTIE. 2021. Korean 2nd Basic Plan for the Management of HLW.
5. Code of Federal Regulations, Part 73-Physical Protection of Plants and Materials; 10 CFR 72.
6. NRC. 2010. Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at a General License Facility-Final Report. NUREG-1536.
7. Holtec International. 2020. Final Safety Analysis Report on the HI-STAR 100 MPC Storage System.
8. Holtec International. 2012. Final Safety Analysis Report on the HI-STORM FW Cask System.
9. Holtec International. 2016. Final Safety Analysis Report on the HI-STORM UMAX Canister Storage System.
10. Holtec International. 2016. Final Safety Analysis Report on the HI-STORM 100 Cask System.
11. Holtec International. 2017. Safety Analysis Report on the HI-STORE CIS.
12. BNG Fuel Solutions. 2005. Final Safety Analysis Report for the VSC-24 Ventilated Storage Cask System.
13. EnerySolutions. 2007. Fuel Solutions Storage System Final Safety Analysis Report.
14. NAC International. 2016. Final Safety Analysis Report for the UMS Universal Storage System.
15. PNNL. 1992. Time and Dose Assessment of Barge Shipment and At-Reactor Handling of a CASTOR V/21 Spent Fuel Storage Cask.
16. Philippe FW. 2013. Worker Exposure for At-Reactor Management of Spent Nuclear Fuel. *Radiation Protection Dosimetry* **156**(3):386-393. https://doi.org/10.1093/rpd/nct083
17. Kim TM, Baeg CY, Cha GY, Lee WG, Kim SY. 2012. Preliminary Assessment of Radiation Impact from Dry Storage Facilities for PWR Spent Fuel. *Journal of Radiation Protection* **37**(4):197-201. https://doi.org/10.14407/jrp.2012.37.4.197
18. Kim TM, Dho HS, Cho CH, Ko JH. 2017. Preliminary Shielding Analysis of the Concrete Cask for Spent Nuclear Fuel Under Dry Storage Conditions. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology* **15**(4):391-402. https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2017.15.4.391
19. Dho HS, Kim TM, Cho, CH. 2015. Shielding Analysis for the Design of Temporary Shield for Spent Nuclear Fuel Metal Storage Cask. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology* **13**(2):351-352. https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2016.14.4.411
20. Code of Federal Regulations, Part 104-Physical Protection of Plants and Materials; 10 CFR 72.
21. NSSC. 2024. Nuclear Safety Act Article 91.
22. NSSC. 2023. Enforcement Decree of the Nuclear Safety Act Article 134.
23. Kim TH, Kim KY, Lee DH, Na TH, Chung SH, Kim YD. 2022. Conceptual Design, Development, and Preliminary Safety Evaluation of a PWR Dry Storage Module for Spent Nuclear Fuel. *Applied Sciences* **12**(9):4587. https://doi.org/10.3390/app12094587
24. Chung SH, Baeg CY, Choi BI, Yang KH, Lee DK. 2006. On-site Transport and Storage of Spent Nuclear Fuel at Kori NPP by KN-12 Transport Cask. *Journal of the Korean Radioactive Waste Society* **4**(1):51-58.