Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 4, pp. 307-325, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.4.307

Original article

사용후핵연료 건식저장시스템 작업절차 및 작업형태 분석

이동규[1] · 이신동[1] · 오가은[1] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Analysis of Spent Fuel Dry Storage System Work Procedures and Work Patterns

Dong Gyu Lee[1], Shin Dong Lee[1], Ga Eun Oh[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 The Second High Level Radioactive Waste Management Basic Plan for Dry Interim Storage and Interim Storage of Spent Nuclear Fuel has been released. The Dual Purpose Canister (DPC) has emerged as a way to avoid repeating the mistakes made by leading countries in spent fuel management by not considering the linkages between management steps. From the worker's point of view, the dose is likely to be influenced by the operating procedures and work patterns of the dry storage facility. It is necessary to conduct a survey on the operating procedures and work patterns of each dry storage method before evaluating the exposure dose. The purpose of this study is to investigate and analyze the work procedures and work patterns of commercially available DPC-based spent fuel dry storage facilities in other countries. For this purpose, the dry storage systems commercialized overseas were first categorized into 1) concrete overpack, 2) vertical storage module, and 3) metal overpack. The HI-STORM 100, NAC-UMS, VSC-24, and Fuel Solutions systems were selected as the subjects of the study for the concrete overpack method. The HI-STORM UMAX system was selected for the vertical storage module method, and the HI-STAR 100 system was selected for the metal overpack method. To analyze the operating procedures and work patterns, the loading and unloading procedures described in the Final Safety Analysis Report (FSAR) for each system were analyzed, as well as the time and personnel required for each task. The results showed that, on average, the loading procedure requires 13.4 more steps and 644.5 more minute than the unloading procedure, although there are detailed differences in operating procedures and work patterns among dry storage systems. The results of this study can be used as a basis for the radiological impact assessment of workers during the operation of spent fuel dry storage facilities.

Key words: Spent nuclear fuel, Dry storage, Work procedures, Work patterns, Final safety analysis report

1. 서 론

국내에서는 제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획을 통해 사용후핵연료를 임시저장 및 중간저장 단계를 거쳐 관리할 계획을 밝힌 바 있다[1]. 사용후핵연료 관리 선도국에서는 관리 단계 간 연계성을 고려하지 않음으로써 관리의 복잡성, 비경제성 등과 같은 시행착오를 겪고 있는 실정이다. 다목적캐니스터(DPC, Dual Purpose Canister)는 운반 및 저장 겸용이 가능하게 설계되어 관리 단계간 연계성이 강조된 설비이며, 사용후핵연료 관리 선도국에서 겪은 시행착오를 답습하지 않기 위한 방안으로 대두되고있다. DPC 기반 건식저장시설은 콘크리트 오버팩 기반 방식, 수직저장모듈 기반 방식, 금속 오버팩 기반 방식을 활용하여 운영될 수 있으며, 건식저장방식별로 작업절차와 작업의 소요시간 및 작업인원과 같은 작업형태의 차이가 존재한다.

미국의 퍼시픽 노스웨스트 국립연구소(PNNL, Pacific Northwest National Laboratory)에서는 사용후핵연료 건식저장시스템인 CASTOR V/21 시스템의 작업절차와 작업형태에 대해 조사를 수행한 바 있다[2]. 미국의 North Anna 원자력발전소는 소내에서 취급하는 사용후핵연료 건식저장시스템인 TN-32 시스템의 작업절차와 작업형태에 대해 조사를 수행한 바 있다[3]. P.F.

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 26 September 2024 **Revised** 26 November 2024 **Accepted** 26 November 2024

Weck 등은 CASTOR V/19, VSC-24, NAC-UMS, HI-STORM 100, NUHOMS 시스템에 대한 작업절차와 작업형태를 조사한 바 있다[4].

국제원자력기구(IAEA, International Atomic Energy Agency)는 사용후핵연료 저장시설에서 수행되는 작업에 대해 ALARA 원칙이 적용되어야 함을 언급한 바 있다[5]. 작업자의 관점에서 사용후핵연료에 의한 피폭선량은 건식저장시설의 작업절차와 작업형태에 영향을 받을 개연성이 있다. 따라서 사용후핵연료 건식저장시설 운영으로 인한 작업자 피폭선량 평가를 위해 작업절차 및 작업형태에 대한 조사를 수행할 필요가 있다. 본 연구에서는 국외에서 상용되는 DPC 기반 사용후핵연료 건식저장시스템별 작업절차와 작업형태에 대해 조사하였다.

본 연구의 목표는 국외 상용 DPC 기반 사용후핵연료 건식저장방식별 작업절차와 작업형태에 대해 조사 및 분석하는 것이다. 이를 위해 국외에서 상용되는 DPC 기반 건식저장방식별 시스템 현황을 조사하였다. 그리고 각 방식별 시스템의 작업절차와 작업형태를 조사 및 분석하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 DPC 기반 사용후핵연료 건식저장시스템의 작업절차 및 작업형태를 조사하였다. 조사대상으로 DPC를 활용하는 1) 콘크리트 오버팩 방식, 2) 수직저장모듈 방식, 3) 금속 오버팩 방식을 선정하였다. 방식별 조사대상 시스템은 Table 1에 제시하였다. 작업절차는 습식저장시설로부터 사용후핵연료를 회수하여 저장구역에 배치하기까지 작업인 Loading 절차와 저장구역의 사용후핵연료를 회수하여 습식저장시설로 반환하기까지 작업인 Unloading 절차를 조사하였다. 작업형태는 Loading 및 Unloading을 위해 수행되는 작업별 작업시간 및 인원을 조사하였다. 미국 원자력규제위원회(NRC, U.S. Nuclear Regulatory Commission)에서는 사용후핵연료 건식저장시스템의 인허가를 위해 Loading 및 Unloading 절차에 대한 상세한 내용을 최종안전성분석보고서(FSAR, Final Safety Analysis Report)에 기술하여 제출할 것을 명시한 바 있다[6]. 이에 따라, 본 연구에서는 앞서 선정한 방식의 시스템별 작업절차와 작업형태에 대해 FSAR를 기반으로 조사하였다.

2.1. 콘크리트 오버팩

콘크리트 오버팩 기반 사용후핵연료 건식저장방식은 사용후핵연료를 저장설비인 수직형 콘크리트 오버팩에 적재하는 방식이다. 콘크리트 오버팩 기반 사용후핵연료 건식저장방식은 DPC, 소내 이송용기, 콘크리트 오버팩을 사용하여 DPC에 사용후핵연료 집합체를 장입하고, 이송용기를 통해 이를 콘크리트 오버팩에 저장하는 단계적 절차로 운영된다. DPC는 사용후핵연료 포장 및 밀봉을 위한 원통형 구조물로 핵분열성 물질을 격납하는 역할을 수행한다. 소내 이송용기는 탄소강 또는 스테인리스강으로 제작된 두꺼운 원통형 구조물로 습식저장시설에서 인출된 사용후핵연료를 콘크리트 오버팩까지 옮기는 동안 사용후핵연료에서 방출되는 방사선을 차폐하는 역할을 수행한다. 콘크리트 오버팩은 콘크리트로 제작된 두꺼운 원통형 구조물로 저장기간 동안 사용후핵연료에서 방출되는 방사선을 차폐하는 역할을 수행한다. 콘크리트 오버팩 기반 건식저장방식은 미국에서 사용되는 건식저장시스템 중 48.6%를 차지하는 등 가장 보편적으로 사용된다[7]. 본 연구에서는 미국 내에서 사용빈도가 가장 높은 HI-STORM 100, NAC-UMS, VSC-24, Fuel Solutions 시스템을 조사대상으로 선정하였다.

2.1.1. HI-STORM 100

Fig. 1에 HI-STORM 100 사용후핵연료 건식저장시스템의 외형 및 단면도를 나타내었다. HI-STORM 100 시스템은 미국 Holtec 사에서 개발한 콘크리트 오버팩 기반 사용후핵연료 건식저장시스템이다. 해당 시스템은 콘크리트 오버팩에 다양한 종류의 사용후핵연료를 DPC를 통해 수용할 수 있도록 설계되었다. HI-STORM 100 오버팩은 저장 전용으로 설계되었기에 HI-TRAC이라는 별도의 소내 이송용기를 필요로 한다. 그러나 견고한 구조적 건전성을 바탕으로 유지보수 작업의 필요성을 줄여 작업자가 사용후핵연료로 인해 피폭되는 방사선량을 최소화하였다는 특징이 있다[8]. 해당 시스템은 미국의 Diablo Canyon, Indian Point 등의 원자력발전소 사용후핵연료 독립저장시설에서 사용된 바 있다[9-10].

2.1.2. NAC-UMS

Fig. 2에 NAC-UMS 사용후핵연료 건식저장시스템의 외형 및

Table 1. Spent nuclear fuel commercial storage systems analyzed

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

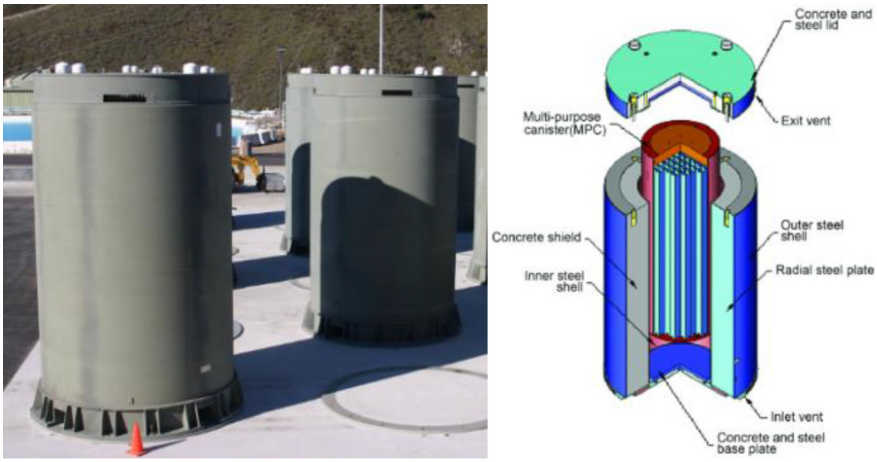

Fig. 1. Exterior and cross-sectional view of the HI-STORM 100 system

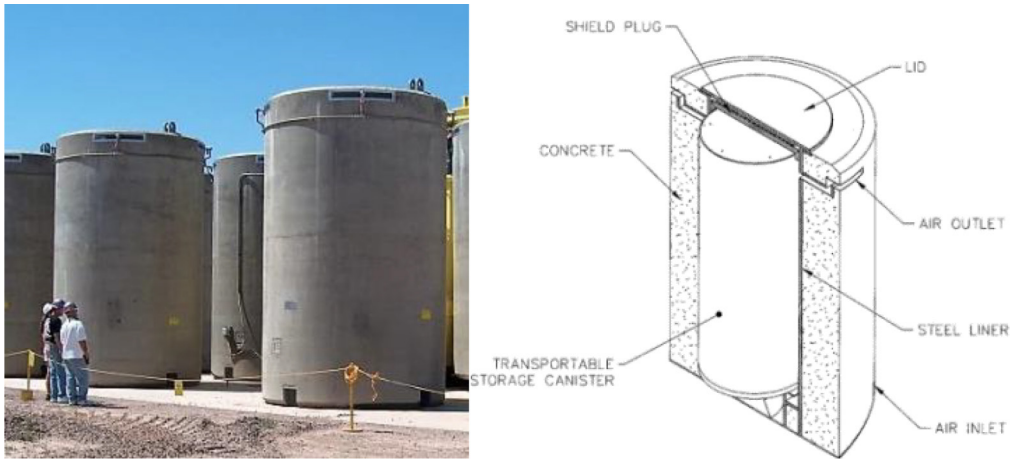

Fig. 2. Exterior and cross-sectional view of the NAC-UMS system

단면도를 나타내었다. NAC-UMS 시스템은 미국 NAC 사에서 개발한 콘크리트 오버팩 기반 사용후핵연료 건식저장시스템이다. NAC-UMS 시스템은 최대 24개의 PWR형 사용후핵연료 또는 56개의 BWR형 사용후핵연료를 관리할 수 있게 설계되었다[11]. 해당 시스템은 미국의 Maine Yankee, Palo Verde 등의 원자력발전소 사용후핵연료 독립저장시설에 사용된 바 있다[12-13].

2.1.3. VSC-24

Fig. 3에 VSC-24 사용후핵연료 건식저장시스템의 외형 및 단면도를 나타내었다. VSC-24 시스템은 미국 Energy Solutions 사에서 개발한 콘크리트 오버팩 기반 사용후핵연료 건식저장시스템이다. VSC-24 시스템은 DPC에 총 24개의 PWR형 사용후핵연료를 장입하여 관리할 수 있게 설계되었다[14]. 해당 시스템은 미국의 Palisades. Point Beach, Arkans as Nuclear One(ANO) 등의 원자력발전소 사용후핵연료 건식저장시설에서 사용된 바 있다[15].

2.1.4. Fuel Solutions

Fig. 4에 Fuel Solutions 사용후핵연료 건식저장시스템의 외형 및 단면도를 나타내었다. Fuel Solutions 시스템은 미국 Energy Solutions 사에서 개발한 콘크리트 오버팩 기반 사용후핵연료 건식저장시스템을 말한다. Fuel Solutions 시스템은 사용후핵연료 최대 적재 시 총 하중 150톤의 W150 콘크리트 오버팩을 사용하며, 소내 이송용기로는 W100 이송용기를 사용한다[16]. 해당 시스템은 Big Rock Point 등의 원자력발전소 사용후핵연료 건식저장시설에서 사용된 바 있다[17].

2.2. 수직저장모듈

수직저장모듈 기반 사용후핵연료 건식저장방식은 사용후핵연료를 수직저장모듈에 장입하여 관리하는 방식이다. 수직저장모듈 기반 사용후핵연료 건식저장방식은 DPC, 소내 이송용기, 콘크리트 수직모듈, 덮개를 사용하여 DPC에 사용후핵연료 집합체를 장입하고, 이송용기를 통해 이를 수직저장모듈에 저장 후 덮개를 덮는 단계적 절차로 운영된다. DPC는 사용후핵연료 포장

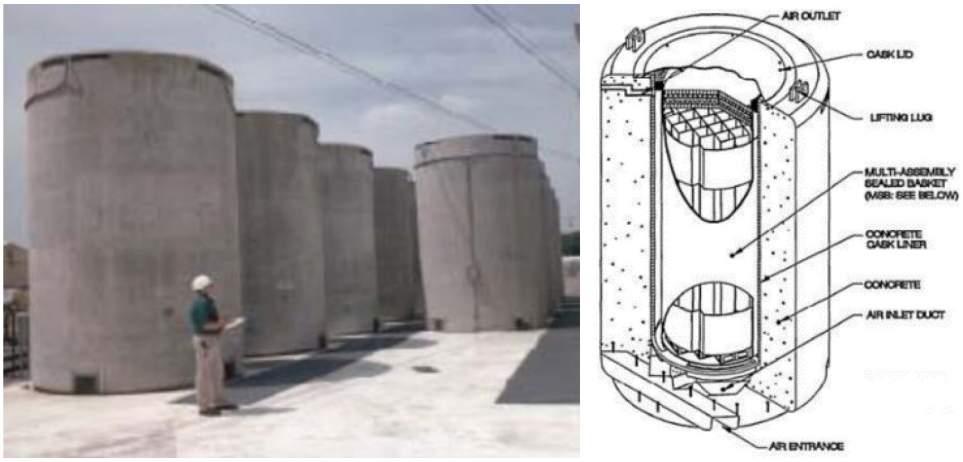

Fig. 3. Exterior and cross-sectional view of the VSC-24 system

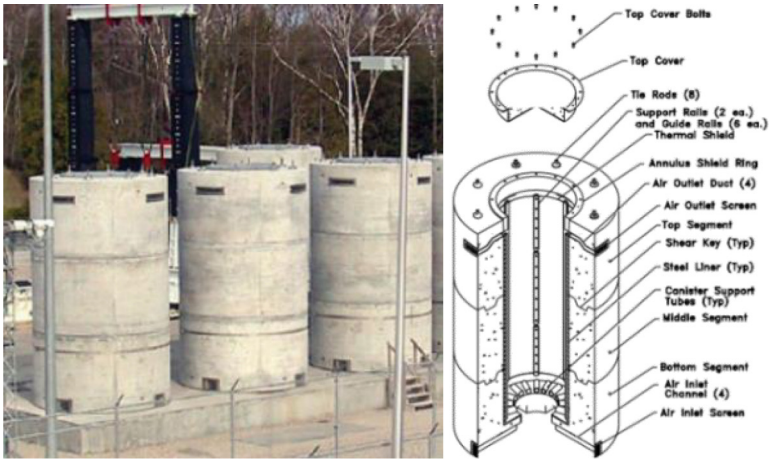

Fig. 4. Exterior and cross-sectional view of the Fuel Solutions system

및 밀봉을 위한 원통형 구조물로 핵분열성 물질을 격납하는 역할을 수행한다. 소내 이송용기는 탄소강 또는 스테인리스강으로 제작된 두꺼운 원통형 구조물로 습식저장시설에서 인출된 사용후핵연료를 콘크리트 수직모듈까지 옮기는 동안 사용후핵연료에서 방출되는 방사선을 차폐하는 역할을 수행한다. 콘크리트 수직모듈은 콘크리트로 건설된 지하구조물로 저장기간 동안 사용후핵연료에서 방출되는 방사선을 차폐하는 역할을 수행한다. 덮개는 콘크리트와 스테인리스강으로 제작된 구조물로 콘크리트 수직모듈의 출입구에 설치되어 사용후핵연료에서 방출되는 방사선을 차폐하는 역할과 수직모듈 내부로 이물질이 유입되는 것을 막는 역할을 수행한다. 대표적인 수직저장모듈 기반 사용후핵연료 건식저장시스템은 HI-STORM UMAX 시스템이 있으며, 본 연구에서는 해당시스템을 조사대상으로 선정하였다.

2.2.1. HI-STORM UMAX

Fig. 5에 HI-STORM UMAX 사용후핵연료 건식저장시스템의 외형 및 단면도를 나타내었다. HI-STORM UMAX 시스템은 미국 Holtec 사에서 개발한 매립형 지하저장시스템으로 PWR형 사용후핵연료 37다발 혹은 BWR형 사용후핵연료 89다발을 수용할 수 있게 설계되었다. Holtec 사에서는 고연소도의 사용후핵연료 또한 저장 가능하도록 설계하였기에 타 오버팩 시스템과의 호환이 용이하다는 특징이 있다[18]. 해당 시스템은 미국의 San Onofre, Callaway 원자력발전소 사용후핵연료 건식저장시설에서 사용된 바 있다[19-20].

2.3. 금속 오버팩

금속 오버팩 기반 사용후핵연료 건식저장방식은 사용후핵연료를 저장설비인 금속 오버팩에 적재하는 방식이다. 금속 오버팩 기반 사용후핵연료 건식저장시스템은 DPC, 금속 오버팩을 사용하여 DPC를 금속 오버팩에 적재하고, DPC에 사용후핵연료 집합체를 장입하여 저장하는 단계적 절차로 운영된다. DPC는 사용후핵연료 포장 및 밀봉을 위한 원통형 구조물로 핵분열성 물질을 격납하는 역할을 수행한다. 금속 오버팩은 중성자 차폐체 및 탄소강으로 제작된 원통형 구조물로 사용후핵연료에서

Fig. 5. Exterior and cross-sectional view of the HI-STORM UMAX system

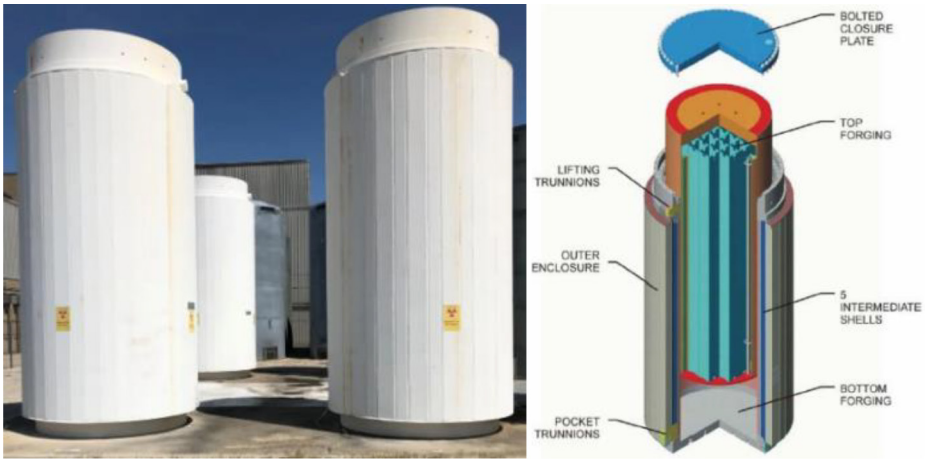

Fig. 6. Exterior and cross-sectional view of the HI-STAR 100 system

방출되는 방사선을 차폐하는 역할을 수행한다. 대표적인 금속 오버팩 기반 사용후핵연료 건식저장시스템은 HI-STAR 100 시스템이 있으며, 본 연구에서는 해당 시스템을 조사대상으로 선정하였다.

2.3.1. HI-STAR 100

Fig. 6에 HI-STAR 100 사용후핵연료 건식저장시스템의 외형 및 단면도를 나타내었다. HI-STAR 100 시스템은 미국 Holtec 사에서 개발한 금속 오버팩 기반의 사용후핵연료 건식저장시스템으로 앞서 설명한 타 건식저장방식과는 다르게 운반 및 저장을 겸용할 수 있다는 특징이 있다. DPC 종류에 따라 PWR형 사용후핵연료의 경우 24 혹은 32다발을 BWR형 사용후핵연료의 경우 68다발을 수용할 수 있게 설계되었다[21]. 해당 시스템은 미국의 Hatch 원자력발전소와 독일의 Dresden 원자력발전소 사용후핵연료 건식저장시설에서 사용된 바 있다[22-23].

3. 결 과

Table 2에 본 연구에서 조사 대상으로 선정한 사용후핵연료 건식저장시스템별 작업절차 수와 작업형태를 나타내었다. 작업절차 수의 경우 Loading 및 Unloading 시 요구되는 작업절차의 수를 구분하여 나타내었다. 작업형태의 경우 Loading 및 Unloading 시 수행되는 작업절차별 요구되는 작업시간 및 작업인원을 합산하여 나타내었다.

3.1. 콘크리트 오버팩 방식 작업절차 및 작업형태 조사

3.1.1. HI-STORM 100

Table 3에 HI-STORM 100 시스템의 Loading을 위한 작업 절차·형태를 제시하였다. HI-STORM 100 시스템의 Loading은 99가지의 작업으로 이루어지며, 크게 1) DPC내 사용후핵연료 장입 작업, 2) DPC 밀폐 작업, 3) 저장준비 작업, 4) 저장구역에 HI-STORM 100 오버팩 배치 작업으로 분류되는 것으로 나타났다. DPC내 사용후핵연료 장입 작업은 사용후핵연료를 DPC에 장입한 후 육안 검사를 수행하는 작업이며, 총 2단계의 세부작업이 1,088분 동안 4명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. DPC 밀폐 작업은 습식저장시설 내에 위치한 DPC를 인양하여 배수 및 불활성기체 충진을 통해 저장에 적합한 형태로 만든 후 DPC를 밀폐하는 일련의 작업이며, 총 59단계의 세부작업이 973분 동안 69명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. 저장준비 작업은 소내 이송용기에 덮개를 설치하여 소내 이송에 적합한 형태로 만드는 작업이며, 총 12단계의 세부작업이 101분

Table 2. Work Patterns by Systems

System Names	Number of Procedures		Work time (min)		No. of Worker (man)	
	Loading	Unloading	Loading	Unloading	Loading	Unloading
HI-STORM 100	99	55	2510	1555.5	128	70
NAC-UMS	12	12	1998	1998	22	22
VSC-24	29	29	1680	1680	36	36
Fuel Solutions	15	12	1875	1155	45	33
HI-STORM UMAX	24	24	1385	1385	15	15
HI-STAR 100	50	17	2658	1110	91	26

Table 3. HI-STORM 100 system loading procedure

No.	Process	Work time (min)	No. of Worker (man)
	DPC Fuel Loading		
1	Load pre-selected fuel assemblies into dpc	1020	2
2	Perform post-loading visual verification of assembly identification	68	2
	DPC Closure		
3	Install dpc lid and attach lift yoke	45	2
4	Rasie HI-TRAC to surface of spent fuel pool	20	2
5	Survey DPC Lid for hot particles	3	1
6	Verify DPC Lid is seated	0.5	1
7	Install Lid retention system bolts	6	2
8	Remove HI-TRAC from spent fuel pool	8.5	1
9	Decontaminate HI-TRAC bottom	10	1
10	Take smears of HI-TRAC exterior surfaces	5	1
11	Disconnect annulus overpressure system	0.5	1
12	Set HI-TRAC in cask preparation area	10	1
13	Remove neutron shield jacket fill plug	2	1
14	Install neutron shield jacket fill plug	2	1
15	Disconnect lid retention system	6	2
16	Measure dose rates at DPC lid	3	1
17	Decontaminate and Survey HI-TRAC	103	1
18	Install temporary shield	16	2
19	Fill temporary shield ring	25	1
20	Attach drain line to HI-TRAC drain port	0.5	1
21	Install RVOAs	2	1
22	Attach water pump to drain port	2	1
23	Disconnect water pump	5	1
24	Decontaminate DPC lid top surface and shell area above inflatable annulus seal	6	1
25	Remove Inflatable annulus seal	3	1
26	Survey DPC lid top surfaces and accessible areas of top three inches of DPC shell	1	1
27	Install annulus shield	2	1
28	Center lid in DPC shell	20	3
29	Install DPC shims	12	2

Table 3. HI-STORM 100 system loading procedure (continued)

No.	Process	Work time (min)	No. of Worker (man)
30	Position AWS baseplate shield on DPC lid	20	2
31	Install automated welding system robot	8	2
32	Perform NDE on lid weld	230	1
33	Attach drain line to vent port	1	1
34	Visually examine DPC lid-to-shell weld for leakage of water	10	1
35	Disconnect water fill line and drain line	2	1
36	Repeat liquid penetrant examination on DPC lid final pass	45	1
37	Attach gas supply to vent port	1	1
38	Attach drain line to drain port	1	1
39	Attach drain line to vent port	1	1
40	Attach water fill line to drain port	1	1
41	Disconnect water fill drain lines from DPC	2	1
42	Attach helium supply to vent port	1	1
43	Attach drain line to drain port	1	1
44	Disconnect gas supply line from DPC	1	1
45	Disconnect drain line from DPC	1	1
46	Attach moisture removal system to vent and drain port RVOAs	2	1
47	Disconnect moisture removal system from DPC	2	1
48	Close drain port RVOA cap and remove drain port RVOA	1.5	1
49	Attach helium backfill system to vent port	1	1
50	Disconnect HBS from DPC	1	1
51	Close vent port RVOA and disconnect vent port RVOA	1.5	1
52	Wipe inside area of vent and drain port recess	2	1
53	Place cover plate over vent port recess	1	1
54	Perform NDE on vent and drain cover plate weld	100	1
55	Flush cavity with helium and install set screws	2	1
56	Plug weld over set screws	8	1
57	Install msld over vent port cover plate	2	1
58	Install msld over drain port cover plate	2	1
59	Install and align closure ring	5	1
60	Perform NDE on closure ring welds	185	1
61	Rig AWS to crane	12	1
	Preparation for Storage		
62	Remove annulus shield	1	1
63	Attach drain line to HI-TRAC	1	1
64	Position HI-TRAC top lid	10	2
65	Torque top lid bolts	12	1
66	Install DPC lift cleats and DPC sling	25	2
67	Remove Temporary shield ring drain plugs	1	1
68	Remove temporary shield ring segements	4	1
69	Attach DPC slings to lift yoke	4	2

Table 3. HI-STORM 100 system loading procedure (continued)

No.	Process	Work time (min)	No. of Worker (man)
70	Position HI-TRAC above transfer step	15	1
71	Remove bottom lid bolts	6	1
72	Install transfer lid bolts	18	1
73	Disconnect DPC slings	4	2
	Placement of HI-STORM into Storage		
74	Position HI-TRAC on transport device	20	2
75	Transport HI-TRAC to outside transfer location	90	3
76	Attach outside lifting device lift links	2	2
77	Mate overpacks	10	2
78	Attach DPC slings to DPC lift cleats	10	2
79	Remove transfer lid door locking pins and open doors	4	2
80	Install trim plates	4	2
81	Disconnect slings from DPC lifting device	10	2
82	Remove DPC lift cleats and DPC slings	10	1
83	Install hole plugs in empty DPC bolt holes	2	1
84	Remove HI-STORM vent duct shield inserts	2	1
85	Remove allignment device	4	1
86	Install HI-STORM lid and Install lid STUDS/NUTS	25	2
87	Install HI-STORM exit vent gamma shield cross plates	4	1
88	Install temperature elements	20	1
89	Install exit vent screens	20	1
90	Remove HI-STORM lid lifting device	2	1
91	Install hole plugs in empty holes	2	1
92	Perform shielding effectiveness testing	16	2
93	Secure HI-STORM to transport device	10	2
94	Transfer HI-STORM to its designated storage location	40	1
95	Insert HI-STORM lifting jacks	4	1
96	Remove air pad	5	2
97	Remove HI-STORM lifting jacks	4	1
98	Install inlet vent screens/cross plates	20	1
99	Perform air temperature rise test	8	1
90	Remove HI-STORM lid lifting device	2	1
91	Install hole plugs in empty holes	2	1
92	Perform shielding effectiveness testing	16	2
93	Secure HI-STORM to transport device	10	2
94	Transfer HI-STORM to its designated storage location	40	1
95	Insert HI-STORM lifting jacks	4	1
96	Remove air pad	5	2
97	Remove HI-STORM lifting jacks	4	1
98	Install inlet vent screens/cross plates	20	1
99	Perform air temperature rise test	8	1

동안 16명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. 저장구역에 HI-STORM 100 오버팩 배치 작업은 HI-STORM 100 오버팩 내에 DPC 장입 후 HI-STORM 100 오버팩을 지정된 저장구역으로 운반하는 작업이며, 총 26단계의 세부작업이 348분 동안 39명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다[8].

Table 4에 HI-STORM 100 시스템의 Unloading을 위한 작업 절차·형태를 제시하였다. HI-STORM 100 시스템의 Unloading은 55가지의 작업으로 이루어지며, 크게 1) 저장구역으로부터 HI-STORM 100 오버팩 회수 작업, 2) 사용후핵연료 하역준비 작업, 3) 사용후핵연료 하역 작업으로 분류되는 것으로 나타났다. 저장구역으로부터 HI-STORM 100 오버팩 회수 작업은 저장구역에서 저장중인 사용후핵연료를 소내 이송용기를 활용하여 캐니스터 교환구역으로 운반하는 일련의 작업이며, 총 23단계의 세부작업이 287분 동안 31명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. 사용후핵연료 하역 준비 작업은 DPC내에 저장중인 사용후핵연료를 습식저장시설에 반환하기에 적합한 형태로 만드는 작업이며, 총 31단계의 세부작업이 248.5분 동안 37명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. 사용후핵연료 하역 작업은 DPC 내에 저장된 사용후핵연료 집합체를 습식저장시설에 반환하는 작업으로 1가지의 작업이 1,020분 동안 2명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다[8].

3.1.2. NAC-UMS

Table 5에 NAC-UMS 시스템의 Loading을 위한 작업 절차·형태를 제시하였다. NAC-UMS 시스템 Loading은 12가지의 작업으로 이루어지며, 크게 1) DPC 장입 및 밀폐 작업, 2) 콘크리트 오버팩에 적재 작업, 3) 콘크리트 오버팩 운반 및 배치 작업으로 분류되는 것으로 나타났다. DPC 장입 및 밀폐작업은 습식저장시설 내에 위치한 사용후핵연료를 DPC 내에 장입한 후 인양하여 저장에 적합한 형태로 만드는 작업이며, 총 10단계의 세부작업이 1,782분 동안 16명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. 콘크리트 오버팩에 장입 작업은 DPC를 소내 이송용기를 활용하여 콘크리트 오버팩이 위치한 장소까지 운반하여 콘크리트 오버팩으로 DPC를 장입시키는 작업이며, 총 1가지의 작업이 168분 동안 4명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. 콘크리트 오버팩 운반 및 배치 작업은 DPC가 장입된 콘크리트 오버팩을 지정된 저장위치까지 운반하는 작업이며, 1가지의 작업이 48분 동안 2명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다[11].

NAC-UMS 시스템의 FSAR에서는 Unloading 절차는 Loading 절차의 역순으로 진행한다고 기술되어 있다. 따라서 NAC-UMS 시스템의 Unloading 절차와 형태를 제시하는 별도의 표는 첨부하지 않았다[11].

3.1.3. VSC-24

Table 6에 VSC-24 시스템의 Loading을 위한 작업 절차·형태를 제시하였다. VSC-24 시스템 Loading은 29가지의 작업으로 이루어지며, 크게 1) 사전 준비 작업, 2) 사용후핵연료 장입 작업, 3) DPC 밀폐 작업, 4) 콘크리트 오버팩으로 DPC 교환 작업, 5) 콘크리트 오버팩 배치 작업으로 분류되는 것으로 나타났다. 사전 준비 작업은 사용후핵연료 적재를 수행하기 전 세척 및 오염 제거 후 붕산수를 주입하는 작업이며, 1가지의 작업이 120분 동안 5명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. 사용후핵연료 장입 작업은 습식저장시설 내에 위치한 사용후핵연료를 DPC에 포장하는 작업이며, 총 4단계의 작업이 330분 동안 7명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. DPC 밀폐 작업은 사용후핵연료가 포장된 DPC를 장기저장에 적합한 형태로 만드는 작업이며, 총 10단계의 작업이 870분 동안 7명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. 콘크리트 오버팩으로 DPC 교환 작업은 이송용기에 장입되어있는 DPC를 콘크리트 오버팩으로 옮기는 작업이며, 총 8단계의 작업이 150분 동안 12명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. 콘크리트 오버팩 배치 작업은 DPC가 장입된 콘크리트 오버팩을 지정된 저장위치에 배치하는 작업이며, 총 6단계의 작업이 210분 동안 5명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다[14].

VSC-24 시스템의 FSAR에는 Unloading 절차에 대해 기술하였으나, 작업형태에 대해 기술하지 않은 것으로 나타났다. 따라서 VSC-24 시스템의 Unloading 절차와 형태를 제시하는 별도의 표는 첨부하지 않았다[14].

3.1.4. Fuel Solutions

Table 7에 Fuel Solutions 시스템의 Loading을 위한 작업 절차·형태를 제시하였다. Fuel Solutions 시스템 Loading은 15가지의 작업으로 이루어지며, 크게 1) 사용후핵연료 장입 준비 작업, 2) 캐니스터 장입 작업, 3) DPC 소내 이송 작업, 4) 저장구역으로 이송 작업으로 분류되는 것으로 나타났다. 사용후핵연료 적재 준비 작업은 사용후핵연료 운반 및 저장을 수행할 소내 이송용기와 콘크리트 오버팩을 지정된 위치에 배치하는 작업이며, 총 1가지의 작업이 480분 동안 4명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. 캐니스터 장입 작업은 DPC와 소내이송용기를 습식저장시설 내에 위치시킨 후 사용후핵연료를 DPC에 장입하는 작업이며, 총 9단계의 작업이 1,215분 동안 29명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. DPC 소내 이송 작업은 사용후핵연료가 장입된 DPC를 콘크리트 오버팩이 위치한 장소까지 운반하여 콘크리트 오버팩 내로 장입하는 작업이며, 총 4단계의 작업이 120분 동안 10명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. 저장구역으로 이송 작업은 DPC가 장입된 콘크리트 오버팩

Table 4. HI-STORM 100 system unloading procedure

No.	Process	Work time (min)	No. of Worker (man)
	HI-STORM Recovery from Storage		
1	Remove inlet vent screens	20	1
2	Insert HI-STORM lifting jacks	4	1
3	Insert air pad	5	2
4	Remove HI-STORM lifting jacks	4	1
5	Transfer HI-STORM to DPC transfer location	40	1
6	Remove HI-STORM lid STUDS/NUTS	10	1
7	Remove HI-STORM lid lifting hole plugs and install lid lifting sling	2	1
8	Remove gamma shield cross plates	4	1
9	Remove temperature elements	8	1
10	Remove HI-STORM lid	2	1
11	Install HI-STORM vent duct shield inserts	2	1
12	Install alignment device	4	1
13	Remove DPC lift cleat hole plugs	2	1
14	Install DPC lift cleat and DPC slings	2	1
15	Align HI-TRAC over HI-STORM and mate overpacks	10	2
16	Pull DPC slings through top lid hole	10	2
17	Install trim plates	4	2
18	Attach DPC sling to lifting device	10	1
19	Close HI-TRAC doors and install door locking pins	4	2
20	Disconnect slings from DPC lift cleats	10	2
21	Downend HI-TRAC on transport frame	20	2
22	Transport HI-TRAC to fuel building	90	1
23	Upend HI-TRAC	20	2
	Preparation for Unloading		
24	Move HI-TRAC to transfer slide	20	2
25	Attach DPC slings	4	2
26	Remove transfer lid bolts	6	1
27	Install pool lid bolts	18	1
28	Disconnect DPC slings and lift cleats	10	1
29	Place HI-TRAC in preparation area	15	1
30	Remove top lid bolts	6	1
31	Remove HI-TRAC top lid	2	1
32	Attach water fill line to HI-TRAC drain port	0.5	1
33	Install bolt plugs or waterproof tape from HI-TRAC top bolt holes	9	1
34	Core drill closure ring and vent and drain port cover plates	40	2
35	Remove closure ring section and vent and drain port cover plates	1	1
36	Attach RVOAs	2	1
37	Attach a sample bottle to vent port RVOA	0.5	1
38	Gather a gas sample from DPC	0.5	1
39	Close vent port cap and disconnect sample bottle	1	1

Table 4. HI-STORM 100 system unloading procedure (continued)

No.	Process	Work time (min)	No. of Worker (man)
40	Attach Re-flood system to RVOAs	2	1
41	Disconnect Re-flood lines to vent and drain port RVOAs	1	1
42	Vaccum top surface of DPC and HI-TRAC	10	1
43	Remove annulus shield	1	1
44	Manually install inflatable seal	10	2
45	Open neutron shield jacket drain valve	2	1
46	Close neutron shield jacket drain valve	2	1
47	Remove DPC lid lifting hole plugs	2	1
48	Attach lid retention system	12	1
49	Attach annulus overpressure system	0.5	1
50	Position HI-TRAC over cask loading area	10	1
51	Lower HI-TRAC into spent fuel pool	8.5	1
52	Remove lid retention bolts	12	1
53	Place HI-TRAC on floor	20	2
54	Remove DPC lid	20	2
47	Remove DPC lid lifting hole plugs	2	1
48	Attach lid retention system	12	1
49	Attach annulus overpressure system	0.5	1
50	Position HI-TRAC over cask loading area	10	1
51	Lower HI-TRAC into spent fuel pool	8.5	1
52	Remove lid retention bolts	12	1
53	Place HI-TRAC on floor	20	2
54	Remove DPC lid	20	2
	MPC Unloading		
55	Remove spent fuel assemblies from DPC	1020	2

을 지정된 저장구역으로 이송하여 위치시키는 작업으로 1가지 작업이 60분 동안 2명의 작업자 의해 수행되는 것으로 나타났다[16].

Table 8에 Fuel Solutions 시스템의 Unloading을 위한 작업 절차·형태를 제시하였다. Fuel Solutions Unloading은 12가지의 작업으로 이루어지며, 크게 1) DPC 회수 작업, 2) 사용후핵연료 하역 작업으로 분류되는 것으로 나타났다. 캐니스터 회수 작업은 콘크리트 오버팩에 저장중인 DPC를 소내 이송용기를 활용하여 사용후핵연료 습식저장시설까지 이송하는 작업이며, 총 5단계의 작업이 255분 동안 13명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. 사용후핵연료 하역 작업은 DPC 내에 위치한 사용후핵연료를 습식저장시설에 반환하는 일련의 작업이며, 총 7단계의 작업이 480분 동안 20명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다[16].

3.2. 수직저장모듈 방식 작업절차 및 작업형태 조사

3.2.1. HI-STORM UMAX

Table 9에 HI-STORM UMAX 시스템의 Loading을 위한 작업절차·형태를 제시하였다. HI-STORM UMAX 시스템 Loading은 24가지의 작업으로 이루어지며, 크게 1) DPC 장입 및 밀폐 작업, 2) DPC 이송 작업, 3) 수직저장모듈에 DPC 장입 작업으로 분류되는 것으로 나타났다. DPC 장입 및 밀폐 작업과 DPC 이송 작업은 HI-STORM UMAX FSAR에 별도로 기술되지 않은 것으로 나타났다. 다만, 해당 작업의 경우 HI-STORM FW 시스템과 절차 및 형태를 동일하게 수행한다라고 기술되어 있다[18]. 따라서 HI-STORM FW 시스템의 DPC 장입 및 밀폐 작업의 절차 및 형태를 조사하였다. DPC 장입 및 밀폐 작업은 DPC에 사용후핵연료 장입 후 DPC 덮개를 DPC에 용접하여

Table 5. NAC-UMS system loading procedure

No.	Process	Work time (min)	No. of Worker (man)
	Loading and Sealing DPC		
1	Load canister	594	2
2	Move to decon area/prep for weld	36	2
3	Setup shield lid weld	30	2
4	Welding operation (Automated)	18	1
5	Weld inspections	450	1
6	Drain/Vacuum Dry/Backfill and leak test	24	2
7	Weld and inspect port covers	132	2
8	Setup structural lid weld	18	2
9	Welding operation (Automated)	18	1
10	Weld inspections	462	1
	Loading a Concrete Overpack		
11	Transfer to vertical concrete cask	168	4
	Transporting and placing concrete overpacks		
12	Position on ISFSI pad	48	2

DPC를 장기저장에 적합한 형태로 만드는 작업이며, 총 3단계의 작업이 1,015분 동안 8명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. DPC 이송 작업의 경우 소내 이송용기에 DPC를 장입하여 수직저장모듈까지 이송하는 작업이며, 총 3단계의 작업이 370분 동안 7명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다[24]. 수직저장모듈에 DPC 장입 작업의 절차는 제시되어 있으나, 작업의 형태는 제시되지 않은 것으로 나타났다. 따라서 해당 작업의 절차만 기술하였다. 수직저장모듈에 DPC 장입 작업은 수직저장모듈의 덮개를 제거하는 작업부터 시작하여 DPC를 수직저장모듈에 장입하고 덮개로 수직저장모듈의 입구를 폐쇄하는 일련의 작업이며, 총 18단계의 작업으로 이루어지는 것으로 나타났다[18].

HI-STORM UMAX 시스템과 HI-STORM FW 시스템에는 Unloading은 Loading 절차의 역순으로 이루어진다고 기술되어 있으며, 자세한 작업의 절차와 형태를 기술하지 않은 것으로 나타났다. 따라서 HI-STORM UMAX 시스템의 Unloading 절차와 형태를 제시하는 별도의 표는 첨부하지 않았다[18].

3.3. 금속 오버팩 방식 작업절차 및 작업형태 조사

3.3.1. HI-STAR 100

Table 10에 HI-STAR 100 시스템의 Loading을 위한 작업 절차·형태를 제시하였다. HI-STAR 100 시스템의 Loading은 50가지의 작업으로 이루어지며, 크게 1) 준비 작업, 2) 사용후핵연료 장입 작업, 3) 저장준비 작업, 4) 저장구역에 HI-STAR 배치 작업으로 분류되는 것으로 나타났다. 준비 작업은 금속 오버팩을 사용후핵연료 장입에 적합한 상태로 만드는 작업이며, 총 7단계의 작업이 990분 동안 17명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. 사용후핵연료 장입 작업은 HI-STAR 오버팩을 습식저장시설 내에 배치하여 사용후핵연료를 장입시키는 작업이며, 총 6단계의 작업이 876분 동안 15명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. 저장준비 작업은 사용후핵연료가 장입된 HI-STAR 오버팩을 장기저장에 적합한 형태로 만드는 작업이며, 총 34단계의 작업이 690분 동안 54명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. 저장구역에 HI-STAR 배치작업은 지정된 저장 위치에 HI-STAR 오버팩을 배치하는 작업으로 총 3단계의 작업이 102분 동안 5명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다[21].

Table 11에 HI-STAR 100 시스템의 Unloading을 위한 작업 절차·형태를 제시하였다. HI-STAR 시스템의 Unloading은 17가지의 작업으로 이루어지며, 크게 1) 저장구역으로부터 HI-STAR 회수 작업, 2) 사용후핵연료 하역 준비 작업, 3) 사용후핵연료 하역 작업으로 분류되는 것으로 나타났다. 저장구역으로부터 HI-STAR 회수 작업은 저장 중인 HI-STAR 오버팩을 하역 준비구역까지 소내 이송하는 작업이며, 총 3단계의 작업이 102분 동안 5명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. 사용후핵연료 하역 준비 작업은 회수한 HI-STAR 오버팩을 사용후핵연료 하역에 적합한 상태로 만드는 작업이며, 총 11단계의 작업이 282분 동안 14명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. 사용후핵연료 하역 작업은 습식저장시설에 HI-STAR 오버

Table 6. VSC-24 system loading procedure

No.	Process	Work time (min)	No. of Worker (man)
	Preparation for Loading		
1	Preparation of concrete Cask, MSB and transfer cask	120	5
	Fuel Loading		
2	Lift and place the transfer cask (containing the MSB) into the fuel pool	30	7
3	Load 24 fuel assemblies	240	
4	Lift the MSB shielding lid and place it on the MSB in the pool	30	
5	Lift the transfer cask out of the pool	30	
	MSB Closure		
6	Drain sufficient quantity of water from the MSB to provide for welding	15	7
7	Weld shield lid to the shell. Dye penetrant check the weld	240	
8	Pressurize the MSB with water to 22 psia and visually inspect the weld	15	
9	Perform a leak test of the MSB	60	
10	Place the structural lid in the MSB and seal weld it to the shell and shield lid[a)]	300	
11	Decontaminate the exterior of the transfer cask[a)]	240	
12	Attach the VDS to the top of the MSB and pump the remainder of its liquid contents into the fuel pool[a)]	480	
13	Using the VDS, backfill the MSB with helium a)	60	
14	Remove the gas line and seal weld the two valve covers on the structural lid	45	
15	Place and bolt the transfer cask cover	15	
	MSB Transfer to the Concrete Cask		
16	Lift the transfer cask and place it on the concrete cask	30	12
17	Secure and check the placement of the transfer cask on the concrete cask	15	
18	Install the MTC doors hydraulic system[b)]	30	
19	Install and check the MSB lifting devices. Hook and lift the MSB[b)]	30	
20	Open the shield doors on the transfer cask	15	
21	Lower the MSB from the transfer cask into the concrete cask	15	
22	Remove the transfer cask from the concrete cask and place the shielding ring	30	
23	Install the VCC cover plate	15	
	VSC Storage		
24	Check radiation levels along the concrete cask surface	15	5
25	Swipe the concrete cask exterior for contamination	60	
26	Using the trailer, move the concrete cask to the storage pad	60	
27	Insert the hydraulic roller skid under the concrete cask	15	
28	Using the skid towing truck, tow the skid and concrete cask off the trailer and to its storage location	30	
29	Lower the hydraulic pads and remove the skid from the concrete cask and return truck, trailer and skid to storage	30	

[a)]What can be done simultaneously during ‘MSB Closure’
[b)]What can be done simultaneously during ‘MSB Transfer to the Concrete Cask’

팩으로부터 사용후핵연료를 하역하는 작업이며, 총 3단계의 작업이 726분 동안 7명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다[21].

4. 고 찰

Fig. 7와 8에 본 연구에서 조사한 시스템별 Loading 및 Un-

Table 7. Fuel Solutions system loading procedure

No.	Process	Work time (min)	No. of Worker (man)
	Preparation for Fuel Loading		
1	Prepare/Stage transfer cask and canister	480	4
	Load Canister		
2	Stage canister and transfer cask	240	6
3	Insert canister into transfer cask	120	4
4	Place canister and transfer cask into pool	60	6
5	Load fuel into canister	480	2
6	Remove loaded cask/canister from fuel pool	60	6
7	Decontaminate cask exterior	120	2
8	Install canister inner closure plate	60	1
9	Drain and backfill canister with helium	15	1
10	Install canister outer closure plate	60	1
	Vertical Canister Transfer		
11	Preparation for vertical canister transfer	-	-
12	Prepare transfer cask and canister	60	2
13	Move transfer cask to the storage cask	30	4
14	Insert canister into storage cask	30	4
	Move to ISFSI		
15	Tow storage cask to ISFSI	60	2

Table 8. Fuel Solutions system unloading procedure

No.	Process	Work time (min)	No. of Worker (man)
	Retrieve Canister		
1	Transport storage cask to cask receiving bay	60	2
2	Prepare transfer cask	60	2
3	Prepare storage cask and canister	60	4
4	Dock transfer/storage cask and retrieve canister	60	4
5	Move canister and transfer cask to decontamination area	15	1
	Vertical Canister Transfer		
6	Prepare canister for vent and fill	60	2
7	Vent and fill canister with water	60	2
8	Remove the canister inner and outer closure plates	120	2
9	Place transfer cask and canister into fuel pool	60	6
10	Remove fuel from canister	480	2
11	Remove empty canister from fuel pool	60	4
12	Ready empty canister	60	2

loading에 필요한 작업 절차 수와 작업시간을 요약 제시하였다. 건식저장시스템의 Loading 작업은 Unloading 작업에 비해 평균적으로 13.4단계의 작업과 644.5분의 작업시간을 추가로 요구하는 것으로 나타났다. 이는 소내 이송용기 또는 오버팩 외부제염 작업, 용접부 건전성을 점검하는 액체침투탐상검사, 불활성기체 누설 여부 검점 작업이 Loading 작업 중에는 수행되나, Unloading 작업 중에는 수행되지 않기 때문으로 판단된다.

Table 9. HI-STORM UMAX system loading procedure

No.	Process	Work time (min)	No. of Worker (man)
	Loading and sealing DPC		
1	Fuel loading and removal of the transfer cask and DPC from the spent fuel pool	800	3
2	DPC preparation for closure	30	3
3	DPC closure	185	2
	DPC Transfer Operation		
4	DPC preparation for storage	170	2
5	DPC closure ring installation	80	2
6	DPC transfer	120	3
	Loading a DPC into HI-STORM UMAX		
7	Remove the flue extensions to access the lid lifting features	-	-
8	Remove the UMAX lid from the VVM to be loaded	-	-
9	Install the mating device on the VVM to be loaded	-	-
10	Align the HI-TRAC to the mating device using the vertical cask transporter	-	-
11	Mate the HI-TRAC to the VVM	-	-
12	Attach the DPC rigging to the vertical cask transporter	-	-
13	Raise the DPC slightly	-	-
14	Remove the HI-TRAC bottom lid bolts	-	-
15	Open the mating device	-	-
16	Lower the DPC into the VVM	-	-
17	Disconnect the rigging from the vertical cask transporter and lower it onto the DPC lid	-	-
18	Reconnect the HI-TRAC to the vertical cask transporter	-	-
19	Close the mating device	-	-
20	Reinstall the HI-TRAC bottom lid	-	-
21	Remove the vertical cask transporter from the mating device	-	-
22	Remove the DPC lid rigging from the DPC lid	-	-
23	Remove the mating device from the VVM	-	-
24	Reinstall the VVM lid flue extensions	-	-

4.1. 콘크리트 오버팩 방식 작업절차 및 작업형태 분석

본 연구에서 조사대상으로 선정한 시스템 4종의 세부적인 작업절차는 상이하였다. 그러나 Loading 시에는 DPC에 사용후핵연료 장입 작업, 소내 이송용기를 활용한 콘크리트 오버팩으로 이송 작업, DPC 교환작업, 저장된 위치에 콘크리트 오버팩 배치 작업을 공통적으로 수행하며 Unloading 시에는 콘크리트 오버팩 회수 작업, 습식저장조 내에 DPC 배치 작업, 사용후핵연료 반환 작업을 공통적으로 수행하는 것으로 나타났다.

HI-STORM 100 시스템은 콘크리트 오버팩 기반 사용후핵연료 건식저장방식 중 가장 긴 Loading 시간을 필요로 하는 시스템으로 나타났다. 이는 HI-STORM 시스템의 DPC에 장입되는 사용후핵연료봉이 가장 많음에 따라 사용후핵연료 장입 작업이 가장 길게 수행된다는 점과 HI-STORM 시스템에서 작업자 차폐 및 작업의 편의를 위해 사용되는 설비가 가장 많은 점이 주요한 원인으로 판단된다. 또한 VSC-24 시스템은 콘크리트 오버팩 기반 사용후핵연료 건식저장시스템 중 평균적으로 가장 많은 수의 작업자를 필요로 하는 시스템으로 나타났다. 이는 타 시스템의 경우 용접 또는 제염 작업과 같이 직접적으로 사용후핵연료 근처에서 작업을 수행하는 작업자만을 고려하였으나, VSC-24의 경우 보건물리학자 및 현장 감독자와 같이 직접적으로 작업을 수행하지 않는 인원까지 고려하였기 때문으로 판단된다.

4.2. 수직저장모듈 방식 작업절차 및 작업형태 분석

수직저장모듈 기반 사용후핵연료 건식저장방식의 작업절차는 Loading 시 DPC 장입 및 밀폐 작업, DPC 이송 작업, 수직저장모듈에 DPC 장입 작업으로 구성되며 Unloading의 경우

Table 10. HI-STAR 100 system loading procedure

No.	Process	Work time (min)	No. of Worker (man)
	Preparation for Fuel Loading		
1	Remove HI-STAR closure plate	60	2
2	Install empty DPC	120	3
3	Install upper fuel spacers	240	3
4	Install lower fuel spacers	240	3
5	Fill DPC and annulus	240	2
6	Install annulus seal	18	1
7	Place HI-STAR in spent fuel pool	72	3
	Fuel Loading		
8	Load fuel assemblies into DPC	678	3
9	Perform assembly identification verification	90	3
10	Install drain line to DPC lid	48	3
11	Align DPC lid and lift yoke to drain line	12	2
12	Install DPC lid	24	2
13	Remove HI-STAR from spent fuel pool	24	2
	Preparation for Storage		
14	Decontaminate HI-STAR bottom	12	2
15	Set HI-STAR in cask perparation area	30	2
16	Measure dose rates at DPC lid	12	1
17	Decontaminate HI-STAR and lift yoke	42	3
18	Install temporary shield ring	18	2
19	Remove inflatable annulus seal	6	1
20	Lower annulus water level slightly	12	1
21	Smear DPC lid top surfaces	12	1
22	Install annulus shield	6	1
23	Lower DPC water level	30	2
24	Weld DPC lid & perform NDE	72	2
25	Perform vol exam of DPC weld	18	2
26	Raise DPC water level	6	2
27	Perform hydro test on DPC	18	2
28	Perform leakage testing	30	2
29	Drain DPC	42	1
30	Measure volume of water drained	6	1
31	Vacuum dry DPC	18	1
32	Perform DPC dryness verification test	6	2
33	Backfill DPC	12	2
34	Weld vent and drain port cover plates	12	1
35	Perform a liquid penetrant examination	18	2
36	Perform leakage test on cover plates	12	2
37	Weld DPC closure ring	24	1
38	Perform NDE on closure ring welds	18	2

Table 10. HI-STAR 100 system loading procedure (continued)

No.	Process	Work time (min)	No. of Worker (man)
39	Drain annulus	12	1
40	Perform surveys on HI-STAR	12	1
41	Remove annulus shield	6	1
42	Install HI-STAR closure plate	90	3
43	Vacuum dry HI-STAR annulus	12	1
44	Backfill HI-STAR annulus	12	1
45	Leak test HI-STAR annulus	30	2
46	Remove temporary shield ring	12	2
47	Perform final surveys on HI-STAR	12	1
	Placing HI-STAR in a Storage Zone		
48	Place HI-STAR in storage	78	2
49	Install HI-STAR pocket trunnion plugs	12	1
50	Install bottom shield ring	12	2

Table 11. HI-STAR 100 system unloading procedure

No.	Process	Work time (min)	No. of Worker (man)
	Retrieving HI-STAR from Storage Zone		
1	Remove bottom shield ring	12	2
2	Remove HI-STAR pocket trunnion plugs	12	1
3	Recover HI-STAR from storage	78	2
	Preparing to unload fuel		
4	Place HI-STAR in designated preparation area	36	2
5	Sample annulus gas	18	2
6	Remove HI-STAR closure plate	60	2
7	Fill annulus	12	1
8	Install annulus shield	6	1
9	Remove DPC closure ring	24	1
10	Remove vent port coverplate weld and sample DPC gas	24	1
11	Perform DPC cool-down	12	1
12	Fill DPC cavity with water	42	1
13	Remove DPC lid to shell weld	42	1
14	Install inflatable seal	6	1
	Preparation for Storage		
15	Place HI-STAR in spent fuel pool	24	2
16	Remove DPC lid	24	2
17	Remove spent fuel assemblies from DPC	678	3

Loading의 역순으로 수행되는 것으로 나타났다. 수직저장모듈에 DPC 장입 작업을 제외한 작업절차의 경우 콘크리트 오버팩 기반 사용후핵연료 건식저장방식과 유사한 작업으로 구성되는 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 조사대상으로 선정한 HI-STORM UMAX 시스템이 HI-STORM FW 콘크리트 오버팩 시스템을 기반으로 설계되었기 때문으로 판단된다.

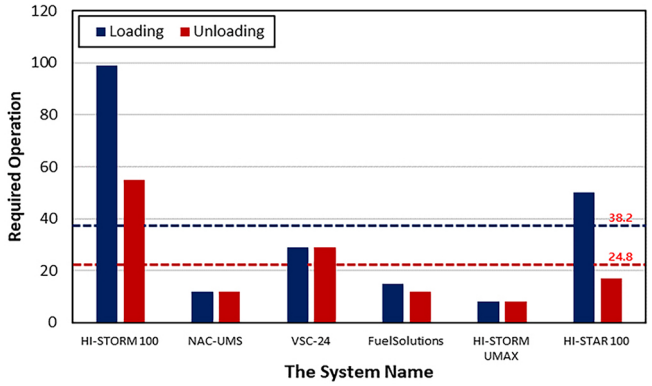

Fig. 7. Number of operations required for loading and unloading per system

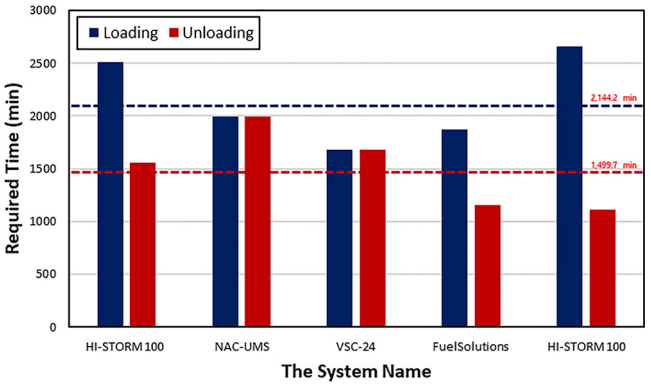

Fig. 8. Time required for loading and unloading by system

HI-STORM UMAX 시스템의 경우 가장 적은 Loading 및 Unloading 절차를 가지는 것으로 나타났다. 이는 오버팩 기반이 아닌 수직저장모듈이라는 지하구조물 기반 사용후핵연료 저장방식의 특성상 별도의 오버팩 준비를 위한 일련의 작업이 수행될 필요가 없기 때문으로 판단된다.

4.3. 금속 오버팩 방식 작업절차 분석

금속오버팩 기반 사용후핵연료 건식저장방식의 작업절차는 Loading 시 사용후핵연료 장입 준비작업, 사용후핵연료 적재 작업, 저장준비 작업, 저장구역에 금속 오버팩 배치 작업으로 구성되며, Unloading 시 금속오버팩 회수 작업, 사용후핵연료 하역 준비 작업, 사용후핵연료 하역 작업으로 구성되는 것으로 나타났다. 동일한 오버팩 기반 건식저장시스템임에 따라 콘크리트 오버팩 기반 건식저장방식과 유사한 작업절차를 보였으나, 소내 이송용기를 사용하지 않는 금속 오버팩의 특성상 DPC 교환작업이 수행되지 않는다는 세부적인 차이점이 존재하였다.

HI-STAR 100 시스템은 가장 긴 Loading 시간과 가장 짧은 Unloading 시간을 필요로하는 시스템인 것으로 나타났다. 가장 긴 Loading 시간을 가지는 이유는 타 시스템과 달리 DPC내에 사용후핵연료 구조물 지지 및 무게중심 유지를 목적으로 하는 상단부 및 하단부 연료 스페이서 장착 작업이 수행되기 때문으로 판단된다. Unloading 시간이 가장 짧은 이유는 금속 오버팩의 특성상 소내 이송용기가 사용되지 않아 소내 이송용기와 금속 오버팩 간 DPC 교환을 위한 일련의 작업이 수행되지 않기 때문으로 판단된다.

5. 결　　론

국내에서는 제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획에 따라 사용후핵연료를 임시저장 및 중간저장 단계를 거쳐 관리할 계획이다. 사용후핵연료 관리 선도국에서 관리 단계 간 연계성을 고려하지 않음으로서 겪은 시행착오를 답습하지 않기 위한 방안으로 DPC 기반 건식저장시설이 대두되고 있다. 사용후핵연료 건식저장시설의 운영 시 방사선작업종사자의 피폭선량은 ALARA 원칙에 의거하여 가능한 낮게 유지되어야 하며, 작업자 피폭선량은 건식저장시설의 작업절차 및 작업형태에 영향을 받을 개연성이 있다. 따라서 본 연구에서는 국외 상용 DPC 기반 사용후핵연료 건식저장시스템별 작업절차와 작업형태에 대해 조사 및 분석하였다.

건식저장시스템별 작업절차 및 작업형태는 시스템별 작업절차를 구성하는 작업의 수와 각 작업을 위한 작업시간 및 인원에 대해 분석하였다. HI-STORM 100 시스템의 Loading 절차는 99단계의 작업이 2,510분 동안 128명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났으며, Unloading 절차는 55단계의 작업이 1,555.5분 동안 70명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. NAC-UMS 시스템의 Loading 절차는 12단계의 작업이 1,998분 동안 22명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났으며, Unloading 절차는 Loading 절차의 역순으로 수행되는 것으로 나타났다. VSC-24 시스템의 Loading 절차는 29단계의 작업이 1,680분 동안 36명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났으며, Unloading 절차는 Loading 절차의 역순으로 수행되는 것으로 나타났다. Fuel Solutions 시스템의 Loading 절차는 15단계의 작업이 1,875분 동안 45명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났으며, Unloading 절차는 12단계의 작업이 1,155분 동안 33명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다. HI-STORM UMAX 시스템의 Loading 절차는 24단계의 작업으로 이루어지며, Unloading 절차는 Loading의 역순으로 수행되는 것으로 나타났다. HI-STAR 100 시스템의 Loading 절차는 50단계의 작업이 2,658분 동안 91명의 작업자에 의해 수행되며, Unloading 절차는 17단계의 작업이 1,110분 동안 26명의 작업자에 의해 수행되는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 국외에서 상용되는 사용후핵연료 건식저장시스템의 FSAR를 기반으로 작업절차를 조사하였다. 일부 최종안전성분석보고서에는 작업자의 피폭선량을 합리적으로 낮게 유

지할 수 있다면, 일부 작업 및 운영설비의 사용을 수행하지 않아도 무방하다고 기술되어 있다. 추후 운영될 건식저장시설의 작업절차는 운영방침 및 운영설비의 결정 등에 따라 본 연구의 결과와 일치하지 않을 개연성이 존재한다. 본 연구의 결과는 국내 사용후핵연료 건식저장시설의 건설에 앞서 운영방식 선정을 위한 사전조사라는 것에 의의가 있다. 따라서 본 연구결과와 예상되는 국내 사용후핵연료 건식저장시설의 운영방침을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 사용후핵연료 건식저장시스템별 운영 시 작업자의 방사선학적 영향평가를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

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

참고문헌

1. MOTIE. 2021. 2nd High Level Radioactive Waste Management Basic Plan.
2. PNNL. 1992. Time and Dose Assessment of Barge Shipment and At-Reactor Handling of a CASTOR V/21 Spent Fuel Storage Cask.
3. North Anna Power Station. 2016. North Anna Power Station Units 1 & 2 Independent Spent Fuel Storage Installation (ISFSI) Safety Analysis Report.
4. 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.
5. IAEA. 1994. Safety Series No.116, Design of Spent Fuel Storage Fuel Storage Facilities.
6. NRC. 1989. Regulatory Guide 3.61, Standard Format and Content for a Topical Safety Analysis Report for a Spent Fuel Dry Storage Cask.
7. KAERI. 2010. The state of the art of the Independent Spent Fuel Storage Installation in the USA.
8. Holtec International. 2016. Final Safety Analysis Report on the HI-STORM 100 Cask System.
9. Holtec International. 2011. Three Dimensional Thermal-Hydraulic Analyses for Diablo Canyon Site-Specific HI-STORM System Design.
10. Dave Lochbaum. 2023. Indian Point Dry Cask Loadings and NRC's ISFSI Oversight.
11. NAC International. 2016. Final Safety Analysis Report for the UMS Universal Storage System.
12. Maine Yankee Atomic Power Company. 2019. Maine Yankee Independent Spent Fuel Storage Installation.
13. Arizona Public Service Company. 2024. Palo Verde Nuclear Generating Station Units 1, 2 and 3 and Independent Spent Fuel Storage Installation.
14. BNG Fuel Solutions. 2005. Final Safety Analysis Report for the VSC-24 Ventilated Storage Cask System.
15. EnergySolutions. 2012. VSC-24 Ventilated Storage Cask Certificate of Compliance Renewal Application.
16. EnerySolutions. 2007. Fuel Solutions Storage System Final Safety Analysis Report.
17. Entergy Nuclear Operations. 2021. ISFSI Decommissioning Funding Plans.
18. Holtec International. 2016. Final Safety Analysis Report on the HI-STORM UMAX Canister Storage System.
19. Southern California Edison. 2020. San Onofre Nuclear Generation Station Units 1,2 and 3 And Independent Spent Fuel Storage Facility.
20. Ameren Missouri. 2018. Independent Spent Fuel Storage Installation Registration of Dry Spent Fuel Storage Canister HGMPC0036.
21. Holtec International. 2020. Final Safety Analysis Report on the HI-STAR 100 MPC Storage System.
22. IAEA. 2001. Analysis and design of dry cask storage pads for plant hatch ISFSI.
23. KAERI. 2003. Present Status for Dry Storage of Spent Nuclear Fuel.
24. Holtec International. 2012. Final Safety Analysis Report on the HI-STORM FW Cask System.