Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 3, pp. 255-266, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.3.255

Industrial article

경수로 사용후핵연료 중간저장시설 개념(안) 수립

강현구[1,*] · 이상환[1] · 신창민[1] · 문태철[1]

[1]한국원자력환경공단

Conceptual Design of Interim Storage Facility for PWR Spent Nuclear Fuel

Hyun-goo Kang[1,*], Chang-min Shin[1], Sang-Hwan Lee[1], and Tae-Chul Moon[1]

[1]Korea Radioactive Waste Agency, 174, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Republic of Korea

ABSTRACT The uranium nuclear fuel used in nuclear power generation needs to be replaced with new fuel after a certain period. In South Korea, the spent nuclear fuel generated during this process is temporarily stored within the nuclear power plant site, and there are ongoing issues with the saturation of storage capacity. To address these problems, the South Korea government has established a plan to manage high-level radioactive waste, including provisions for securing interim storage facilities. An interim storage facility is designed to safely store spent nuclear fuel for certain period before its permanent disposal. This study analyzed leading international cases of interim storage facilities that are technically feasible and can reduce the operating period of temporary storage facilities for spent nuclear fuel within nuclear power plant sites. It also presented the technical concepts required for the operation of interim storage facilities for spent fuel from PWR(Pressurized Water Reactor), reflecting the situation in South Korea.

Key words: Spent Nuclear Fuel, PWR, Interim Storage Facility, Conceptual Design

1. 서 론

원자력발전에 사용되는 우라늄 핵연료는 일정 기간이 지나면 새로운 연료로 교체가 필요하며, 사용후핵연료는 연료의 교체 과정에서 인출된 핵연료를 말한다. 2024년 6월 기준, 26기의 상업용 원자로에서 발생된 사용후핵연료는 경수로 23,181다발, 중수로 513,396다발로, 이들 모두는 원자력발전소의 부지 내 임시로 저장하고 있다[1]. 이를 통상적으로 임시저장이라 명명하고 있으며, 알려진 바와 같이 현재 임시저장시설(원자력발전소 부지 내 습식 또는 건식 방식으로 사용후핵연료를 저장하고 있는 시설을 의미)의 사용후핵연료 저장 포화 문제를 해결하기 위한 많은 노력이 필요한 실정이다[2].

이러한 배경에 따라 정부는 고준위방사성폐기물 관리 기본계획을 통해 사용후핵연료를 포함한 고준위방사성폐기물의 6대 관리원칙(국가 책임하 안전 관리, 국민 건강과 환경에 대한 위해 방지, 투명한 정보공개 및 국민참여와 공감대 확보, 현세대의 관리책임 및 발생자의 관리비용 부담, 필요기술 지속 개발, 의사결정의 가역성과 회수가능성 고려)을 수립하였으며, 기본계획 내 중간저장시설과 지하연구시설, 영구처분시설의 확보 계획을 반영하였다. 계획에는 사용후핵연료 최종 처분을 위한 처분장 부지선정 시기를 기준년도로 설정(Y년)하여 관리시설 부지 확보는 Y+13년, 중간저장시설 확보는 Y+20년, 영구 처분시설 확보는 Y+37년으로 언급하고 있으며, 더하여 관리시설 부지 확보 이후 약 14년 내 지하연구시설(Underground Research Laboratory, URL) 운영에 대한 계획도 포함하고 있다[3].

고준위방사성폐기물 관리 기본계획에서 언급된 중간저장시설은 현재 원자력발전소 부지 내 저장하고 있는 사용후핵연료를 영구적으로 처분하기 전, 이를 일정 기간 동안 원자력발전소 부지 외부에 저장하는 시설을 의미한다. 이는 사용후핵연료의 일반적인 관리절차(Fig. 1)에서 허리를 담당하는 기점으로[4], 현 시점의 국내에서는 운영되고 있지 않는 시설이나 해외 선도국에서는 사용후핵연료를 재처리 또는 처분하기 전까지 저장하는 개념으로 분류하여 원자력발전소와는 별도의 관리시설로 운영 중인 사례가 다수 존재한다. 중간저장시설은 기술적으로 실현이

ISSN 1976-2402 http://www.ksri.kr/

Copyright© 2024 by Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author: Hyun-goo Kang
Tel: +82-42-601-5354, E-mail: kanghyungoo@korad.or.kr

Received 12 September 2024 Revised 24 September 2024 Accepted 25 September 2024

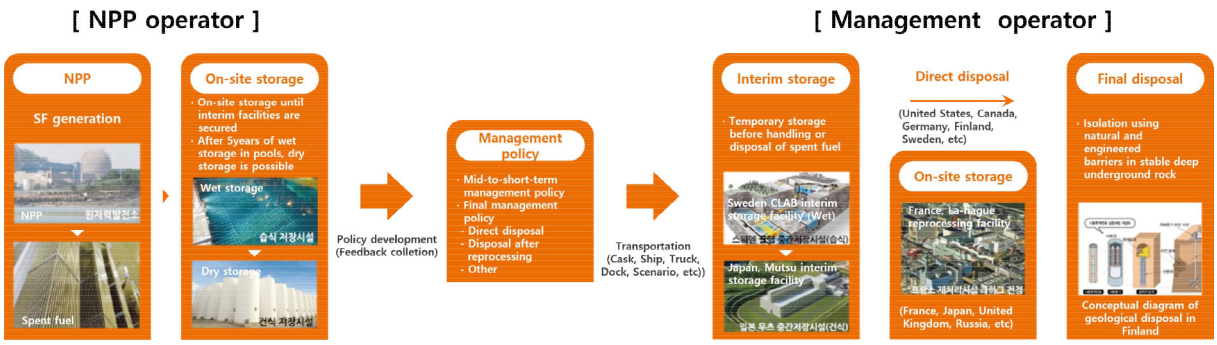


Fig. 1. General management procedure for spent nuclear fuel [4]

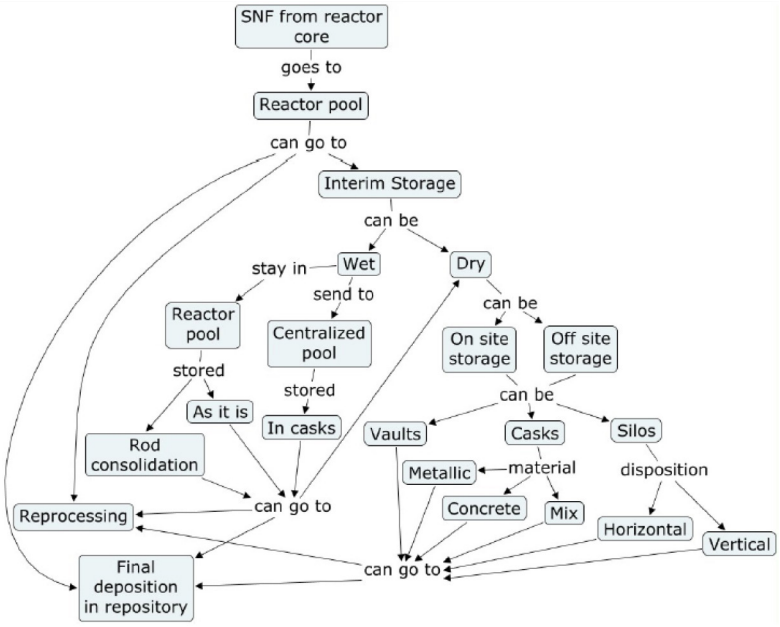


Fig. 2. Concept of spent nuclear fuel classification process [6]

가능하면서 원자력발전소 부지 내 임시저장시설의 운영기간을 단축시킬 수 있다는 측면에서 상대적인 국민 수용성이 높다는 특징을 가지며, 이는 사용후핵연료 관리정책 재검토위원회의 전국의제에서도 다뤄진 바가 있다[5]. 이러한 배경에 따라 본 연구에서는 기술적 측면에서 경수로 사용후핵연료를 대상으로 한 중간저장시설 운영에 필요한 개념을 도출한 결과를 기술하였다.

2. 중간저장시설 개념 및 사례분석

2.1. 중간저장시설의 개념

2.1.1 중간저장시설

서론에서 언급한 바와 같이 중간저장시설은 관리사업자가 발생자로부터 인수한 고준위방폐물을 처분 전까지 원자력발전소 부지 외부에서 저장하는 시설을 의미하며, 기본적으로 격납과 차폐, 열 제거, 핵임계 방지 기능 등이 요구된다. 시설의 운영 방식은 과학적인 안전성과 주민 의사를 종합적으로 고려해야 하며, 용기(금속 또는 콘크리트) 저장 또는 매립형, 지상건물, 터널형 등의 다양한 방식이 채택될 수 있다. 시설의 저장 용량 결정에는 발생량이 고려되어야 하며, 여건 변화에 능동적 대응이 가능하도록 단계적 증설 방안 등이 고려되어야 한다.

Fig. 2에는 중간저장 방식에 대한 사용후핵연료 분류 과정을 나타내었다[6]. 먼저 습식저장 방법은 물을 담은 수조 내에 사용후핵연료를 보관하며 냉각하는 방식으로, 원자력발전소의 사용후핵연료 습식 저장조와 기본적인 개념이 같다(Fig. 3(a)). 수조 내 물에 의해 방사선 차폐와 열의 냉각이 이뤄지며 다년간의 풍부한 운영 경험에 의해 안전성과 효율성이 입증된 저장방식이나, 냉각 및 정화계통 등의 부대 설비가 필요하며 초기 투자비용과 운전 비용이 비교적 높다는 단점이 존재한다. 건식저장 방법은 사용후핵연료를 콘크리트 또는 금속 재질의 구조재 및 차폐체를 이용하여 보관하고 이를 자연 대류에 의해 냉각하는 방식(Fig. 3(b))으로, 추가적인 운영비가 들지 않고 운영 중 폐기물 발생이 거의 없다는 장점이 있다. 하지만 사용후핵연료의 온

(a) Wet storage (SKB) (b) Dry storage (HI-STORM 100) (c) Vault (Fort st. Vrain) (d) Module (NUHOMS System)

Fig. 3. Types and examples of interim storage facility [7]

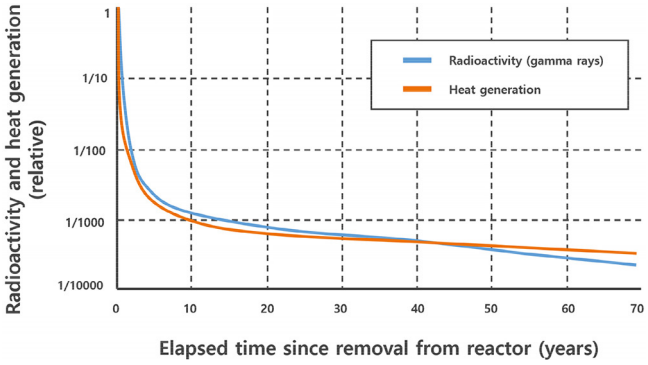


Fig. 4. Trend in decreasing radioactivity and heat generation from spent nuclear fuel [8]

도가 상대적으로 높게 유지되므로 사용후핵연료 건전성 유지에 다소 불리하다는 점과 습식저장 방식 대비 운영 경험이 부족하다는 단점이 존재한다. 더하여 많은 수량의 사용후핵연료를 경제적으로 보관하기 위해 볼트 방식(Fig. 3(c))과 모듈 방식(Fig. 3(d))이 채택될 수 있으나, 고정식 형태로 인해 이동이 어렵다는 단점이 있다[7].

2.1.2 선도국의 경수로 사용후핵연료 중간저장시설 운영 사례

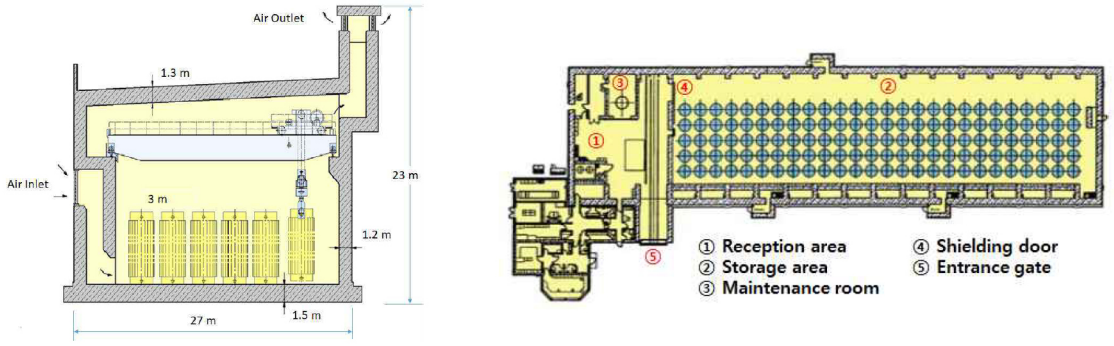
사용후핵연료는 높은 열과 방사선을 방출하기 때문에 습식 또는 건식 저장을 통해 이를 낮추는 과정이 필요하다. 다만, Fig. 4에서와 같이 방출되는 열과 방사선의 감소추세가 10년 내 급격히 줄어드는 특성을 보이므로[8], 수년간의 중간저장시설 운영 방식에는 건식저장 방식을 활용하는 것이 경제적 측면에서 장점을 가진다. 이러한 배경에 따라 본 절에서 분석 대상으로 선정한 선도국 중간저장시설 운영 사례는 경수로 사용후핵연료의 건식저장 방식에 한정하였으며, 대상을 구조물 내부에 저장하는 옥내형 방식과, 외부에 저장하는 방식인 옥외형으로 분리하여 검토하였다(Table 1).

먼저 독일의 경우, 옥내형 중간저장시설로 STEAG와 WTI 저장방식을 채택하고 있다(Fig. 5)[9,10]. 독일 STEAG사에서 설계한 STEAG 방식은 철근 콘크리트 구조물 내부에 용기를 저장하는 방식으로, 외부 충격에도 안전성을 유지할 수 있도록 약 1.2 m 두께를 가지며 자연냉각을 위한 공기유입구가 마련된 것이 특징이다. 독일 WTI사에서 설계한 WTI 방식의 경우 하나의 벽을 기준으로 양쪽으로 분리된 저장공간이 배치되어, 단일 유동 흐름을 갖는 STEAG 방식과 달리 측면 복수개로 배치된 공기 유입구와 지붕 전면에 공기 배출구가 배치된 차이를 갖는다. 다만 911 테러 사건 이후 항공기 충돌에 대한 성능분석 결과에 따라 상대적으로 벽두께가 얇은 WTI 방식에는 보강 방벽이 추가되었다[11].

일본의 경우 2000년 6월, 원자력발전소 부지 외 시설에 사용후핵연료를 저장할 수 있도록 관련 법령이 개정됨에 따라 리사이클연료 비축센터 사업을 통해 아오모리현 무츠시에 중간저장시설 확보를 추진하였으며, 2024년 9월을 시작으로 50년간의 중간저장이 시작되었다. 옥내형 방식의 무츠 중간저장시설은 철근 콘크리트 구조물(일부는 철골 구조가 적용)로 용기 배열 방식과 냉각을 위한 유동 흐름이 길이방향으로 대칭을 이룬다는 점에서

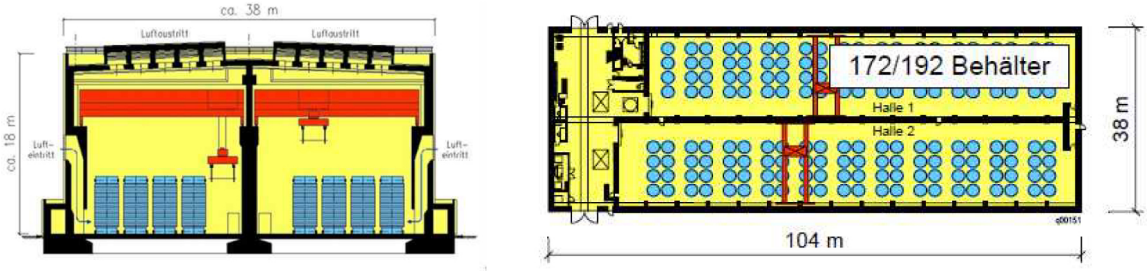
Table 1. Current states of dry interim storage facility in foreign countries

Location type	Country	Name (Storage type)	Characteristic
In-door	Germany	STEAG	▪ 1-way air flow
		WTI	▪ Reinforced outer wall
	Japan	MUTSU	▪ Temporary storage area exists
	Czech	Dukovany	▪ Additional shielding wall exists
Out-door	USA	PFSF	▪ Large capacity storage
		WCS CISF	▪ Vertical storage module
		HI-STORE CIS	▪ Underground disposition



Cross-sectional view　　Plan view

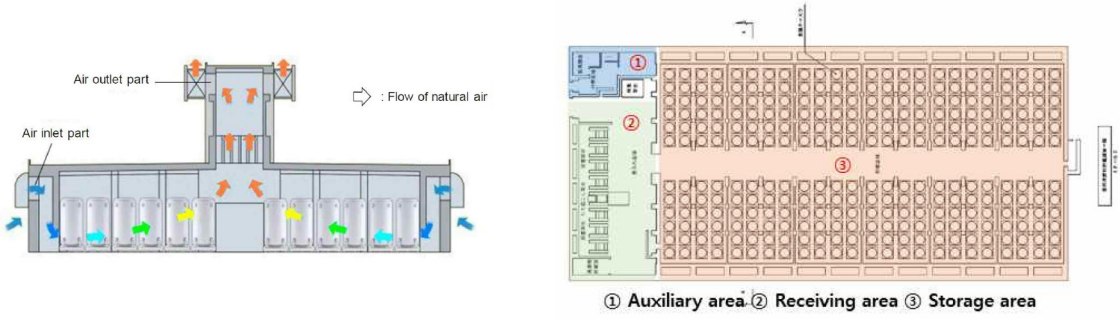
(a) STEAG concept



Cross-sectional view　　Plan view

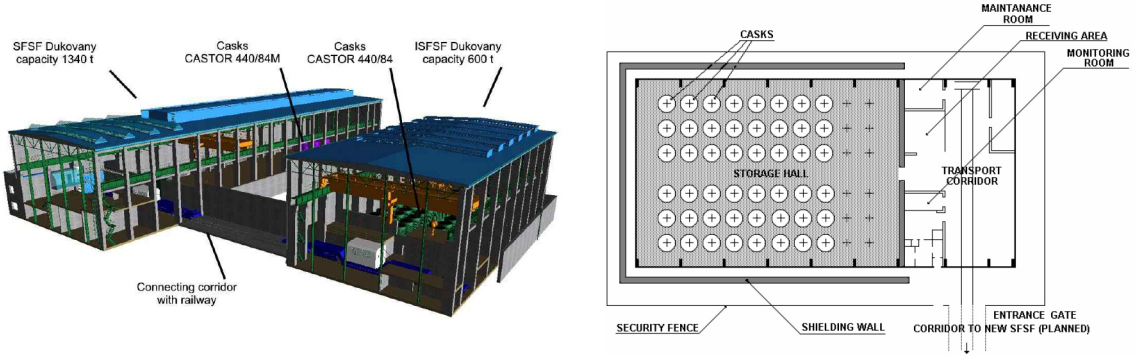
(b) WTI concept

Fig. 5. Dry storage facility concept information in Germany [9,10]



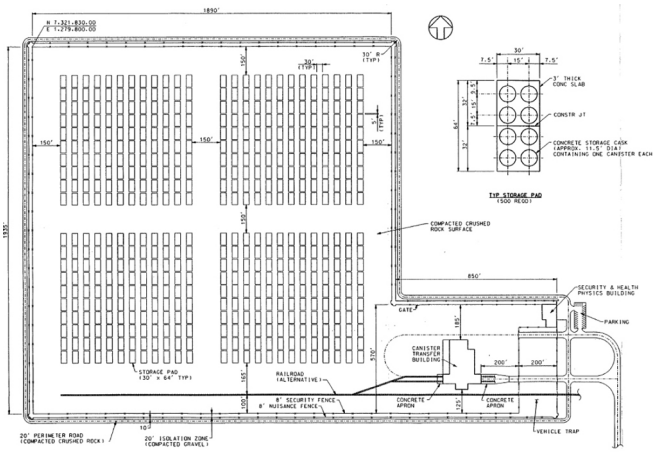
Cross-sectional view　　Plan view

Fig. 6. Dry storage facility concept information of MUTSU (Japan) [12,13]

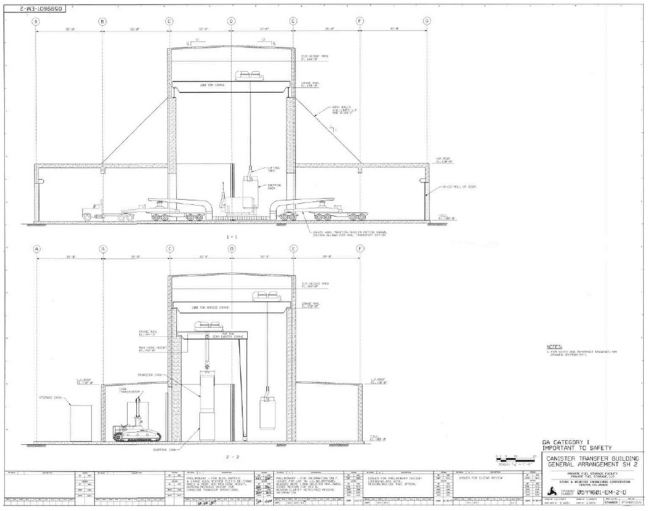


Cross-sectional view　　Plan view

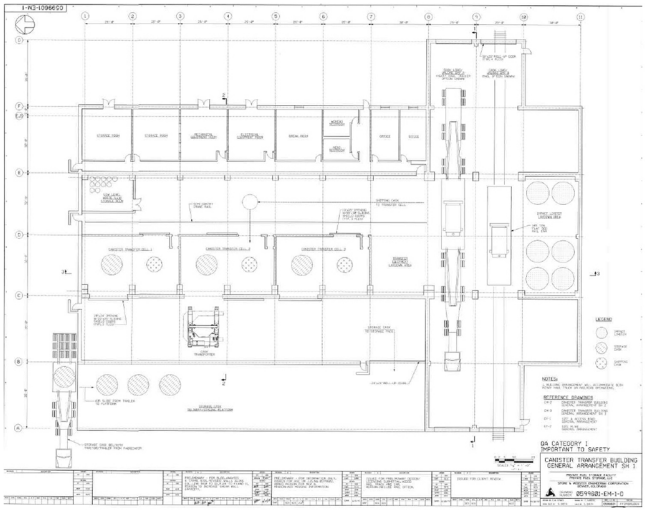
Fig. 7. Dry storage facility concept information of Dukovany (Czech) [14]



(a) General arrangement [15]

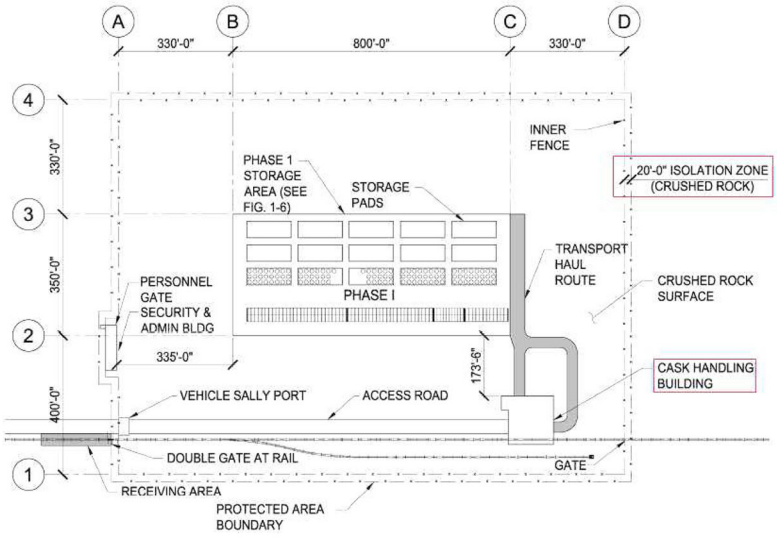


(b) Cross-sectional view of canister transfer building [16]

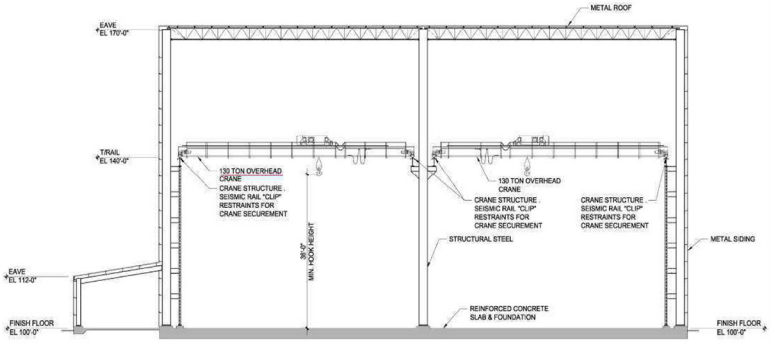


(c) Plan view of canister transfer building [17]

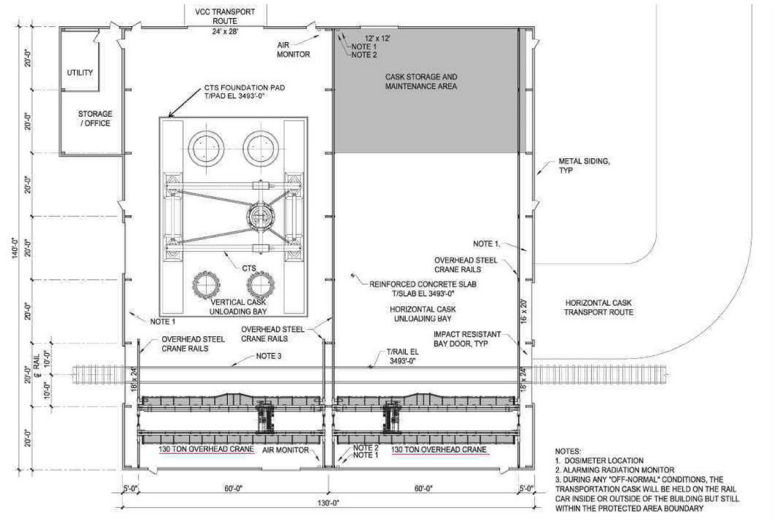
Fig. 8. Dry storage facility information of PFSF (USA)



(a) General arrangement



(b) Cross-sectional view of cask handling buliding

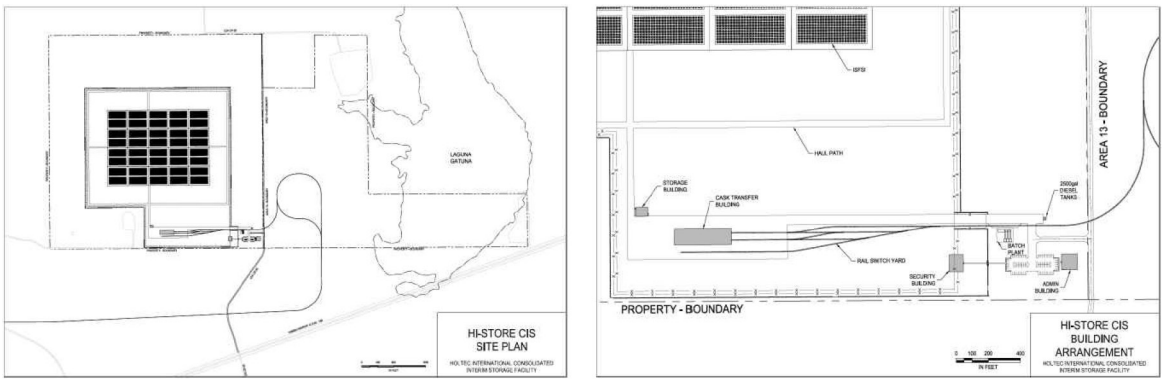


(c) Plan view of cask handling buliding

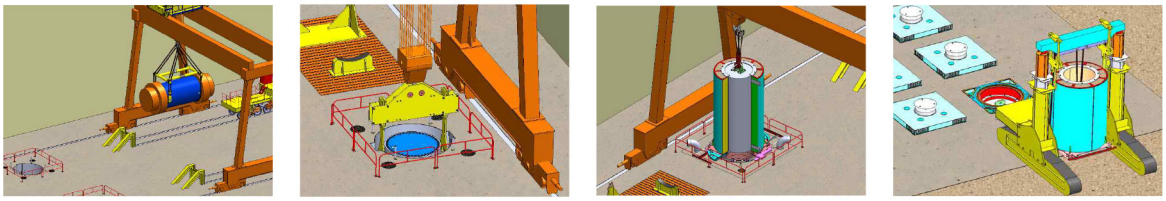
Fig. 9. Dry storage facility information of CISF (USA) [18]

WTI 방식과 유사하나, 이들 공간을 구획하는 별도의 벽체는 존재하지 않는다(Fig. 6). 상대적으로 큰 내부공간으로 인하여 크레인이 아닌 에어파레트(Air Pallet) 장비를 이용하여 용기를 이동시키며, 이에 따라 층고를 낮출 수 있는 장점이 있다[12,13].

Fig. 7에 나타낸 체코의 Dukovany ISFSF (Interim Spent Fuel Storage Facility)는 Dukovany 발전소 내 위치한 건식저장 시설



(a) General arrangement



[Unloading] [Cask handling] [Canister moving] [Installed]

(c) Cask handling process

Fig. 10. Dry storage facility concept information of CIS (USA) [19]

로, 철근콘크리트 구조에 철골 지붕으로 결합된 구조시스템 내부에 용기를 저장하는 방식이며 건물 외부에 별도의 벽(Fence)이 존재하는 특징을 가진다[14].

Fig. 8에는 미국의 PFSF (Private Fuel Storage Facility) 저장시설의 정보를 나타내었다. 이 시설은 옥외 콘크리트 저장 패드에 콘크리트 저장용기를 저장하는 방식의 중간저장시설로, 약 4,000개의 용기를 저장할 수 있는 시설이다. 용기의 반입에는 철도 시설을 이용하며, 캐니스터 이송건물(Canister transfer building)에서 운반용기로 반입된 캐니스터를 저장용기로 이동시킨다[15,16,17]. Fig. 9에는 미국의 CISF (Consolidated interim storage facility) 저장시설의 정보를 나타내었다. 이 시설은 PFSF와 유사하게 용기 반입에 철도 시설과 캐스크 취급 건물(Cask handling building)을 이용하는점, 콘크리트 저장 패드를 이용한 옥외형 저장방식을 사용하는 점 등이 PFSF 시설과 유사하나, 수용 용량이 상대적으로 낮은 것과 수평 저장 모듈이 별도로 존재하는 차이점이 존재한다[18]. Fig. 10에는 미국의 HI-STORE CIS 저장시설의 정보를 나타내었다. 앞선 시설들과 유사한 특징(철도 시설로의 용기 반입, 옥외형 저장방식 등)이 존재하나, 사용후핵연료가 장전된 캐니스터를 지하에 매립하는 방식을 채택하고 있는 차이점이 존재한다[19].

2.1.3. 사례 분석을 통한 시사점 도출

앞서 언급한 선도국의 중간저장시설 운영 사례를 통하여 국내 실정에 적합한 중간저장시설 필요 기능을 도출한 결과는 다음과 같다. 첫째, 모든 중간저장시설에는 중간저장 직전에 반입된 용기를 임시로 보관할 수 있는 구역이 필요하다. 독일과 체코의 경우, 옥내형 중간저장시설이 원자력발전소 부지 내 위치하여, 발전소 내 순차적 용기반입이 가능하므로 별도의 임시보관구역이 마련되어 있지 않으나, 일본의 경우 이와 반대로 임시저장 공간이 마련되어 있다. 또한 미국의 경우 용기 반입을 위한 철도 시설이 존재하여 용기 반입물량 통제가 용이한 점이 존재한다. 국내의 경우 중간저장시설의 위치와 운반 수량이 계획되어 있지 않으며, 지리적 여건상 중간저장시설이 내륙보다 해안가 근처에 위치할 가능성을 고려, 해상운반을 통해 반입되는 용기 반입 수량 조건을 보수적으로 고려할 필요가 있다.

둘째, 중간저장시설 수용 용량 결정에 국내 실정이 반영되어야 한다. 국내 사용후핵연료 중간저장시설의 저장용량 추정치(약 47,000여 다발)을 고려하였을 때[20], 약 1,300여개의 용기(용기당 37다발 장전 기준)를 저장할 수 있는 시설이 필요하다. 이것이 상대적으로 많은 용량임을 고려하였을 때 옥내형 중간저장시설은 대공간이 필요하며, 열의 냉각을 위한 공기의 유동은 WTI 또는 MUTSU와 같이 복수의 유입구를 고려할 필요가 있다.

셋째, 대부분의 저장시설 외벽 두께가 약 1 m 이상 수준으로, 항공기 충돌과 같은 외부 위협에 대응하기 위한 내력설계 또는 보강설계가 반영되었다. 따라서 옥내형 저장시설의 외벽은 극한하중에 대한 충분한 내력을 보유할 필요가 있다. 지진과 같은 자연재해를 대비하기 위한 내진설계 또한 필요하나, 이는 구조시스템, 특정 지역의 지진동에 대한 응답 특성, 지하 기초 설계, 항

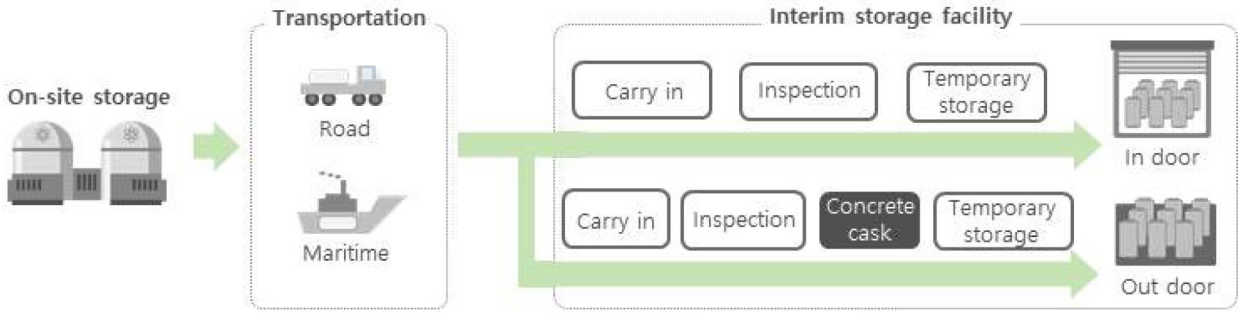


Fig. 11. Concept of interim storage operating procedures

공기충돌 등의 대비를 위한 극한하중 내력설계 등의 조건에 따라 구조물의 성능이 결정되므로, 이를 고려하기 위한 상세설계 내용은 본 연구의 검토범위에서 제외하였다.

넷째, 시스템 설계 시 특정 부품이나 기능이 실패하더라도 다른 부품이 역할을 대신하여 전체적인 안전을 유지하도록 하는 단일고장 사고방지(Single failure proof) 고려가 필요하다[21]. PFSF에는 갠트리 크레인과 3개의 캐니스터 이송구역이 존재하며, CIS 시설에는 저장 방식에 따른 수직과 수평 시스템이 반영되어 있다. 반입 물량과 소요되는 일정, 작업의 효율성이 고려된 운영 방식일 것으로 사료되나, 복수개의 작업공간, 보조설비 등이 반영된 사례를 통해 차질 없는 운영을 위한 단일고장 사고방지 조건이 고려되었음을 직·간접적적으로 추정해볼 수 있다.

마지막 다섯째, 저장시설 부지는 사용후핵연료의 운반과 시설 운영에 지장이 없을 정도의 충분한 면적이 필요하며, 시설의 주위에는 방사선 조사 규제를 만족할 수 있는 공간적 여유가 필요하다. 이상 도출된 다섯 가지 시사점을 후 절에서 기술한 중간저장시설 개념(안) 수립 과정에 모두 반영하였다.

3. 중간저장시설 개념(안) 도출 결과

3.1. 중간저장시설의 개념(안) 도출

3.1.1. 중간저장시설 구역 및 주요설비 분류

본 절에서는 국내 실정에 적합한 중간저장시설 운영 시 필요한 공간과 구성 설비 내용을 기술하였다. 첫 번째 시사점으로 도출된 임시보관 구역의 필요성을 반영하고 시설의 최종 단계는 옥내형과 옥외형 시설로 분리하여 검토하였다. 영구처분시설과 중간저장시설이 동일부지 내 설치되는 국내 정책적 환경을 고려하여, 사용후핵연료 운반 방법에 대한 상세한 조건은 반영하지 않았다. 각 저장 형태는 대부분의 작업 공간과 절차가 유사하게 적용되지만, 옥외형의 경우 캐니스터를 콘크리트 저장 용기로 이동해야 하는 절차 고려가 필요하다(Fig. 11). 이를 고려한 옥내형 작업공간의 분류, 작업내용 및 주요 설비를 Table 2에 나타내었으며, 옥외형 내용을 Table 3에 나타내었다.

Table 2. Area classification and tasks of in-door storage facility

Area	Main tasks	Equipment list
Receiving area	▪ Check relevant documents ▪ Cleaning ▪ Removing parts(such as shock absorbers) and unloading	▪ Cranes ▪ Lifting and tethering devices ▪ Measurement equipment (Contamination)
Inspection area	▪ Place the cask in the workspace ▪ Visual inspection and inspection of surface temperature, radiation dose, and surface contamination	▪ Cranes ▪ Lifting devices ▪ Measurement equipment (Surface contamination, Temperature) ▪ Decontamination equipment
Temporary storage area	▪ Place the cask in the storage area ▪ Installing attachments to move cask to a storage area	▪ Cranes ▪ Lifting devices
Storage area	▪ Place the cask in the specified location ▪ Inspection of surface temperature, radiation dose, and surface contamination	▪ Cranes ▪ Lifting devices ▪ Measurement equipment (Surface contamination, Temperature, Radiation dose) ▪ Decontamination equipment

Table 3. Area classification and tasks of out-door storage facility

Area	Main tasks	Equipment list
Receiving area	▪ Check relevant documents ▪ Cleaning ▪ Removing parts(such as shock absorbers) and unloading	▪ Cranes ▪ Lifting and tethering devices ▪ Contamination measurement equipment
Inspection area	▪ Place the cask in the workspace ▪ Visual inspection and inspection of surface temperature, radiation dose, and surface contamination	▪ Cranes ▪ Lifting devices ▪ Measurement equipment (Surface contamination, Temperature) ▪ Decontamination equipment
Temporary storage area	▪ Place the cask in the storage area ▪ Installing attachments to move cask to a storage area	▪ Cranes ▪ Lifting devices
Canister transfer area	▪ Remove the lid and install the lifting adapter ▪ Placing casks for canister movement ▪ Moving casnister ▪ Removing and storing auxiliary equipment and assembling the cask lid	▪ Crane and Transporter ▪ Lifting devices and adapter ▪ Secondary shields ▪ Lower lid opener ▪ Measurement equipment (Surface contamination, Temperature, Radiation dose)
Storage area	▪ Place the cask in the specified location ▪ Inspection of surface temperature, radiation dose, and surface contamination	▪ Transporter

Table 4. Estimation of storage facility capacity considering the generation of spent fuel from PWR

Condition	In-door type	Out-door typer
Maximum store capacity (Spent fuel bundle)	(About) 47,000	
Spent fuel loading capacity (per storage cask)	37	
Quantity of cask required (Number of cask)	(About) 1,300	
Arrangement of cask	(6×22)×2=264 (2-stage array)	3×8=24 (per storage pad)
Required quantity	5 storage building (132×5=1,320cask)	54 storage pad (24×54=1,296cask)

3.1.2. 사용후핵연료 중간저장시설 규모 설정

본 절에서는 두 번째 시사점인, 시설 용량을 고려한 중간저장시설 필요 규모 산정 결과를 기술하였다. 원자력발전소 내 임시저장 중인 사용후핵연료의 운반과 중간저장시설로의 반입 과정에서 발생할 수 있는 정체를 고려하여 3.1.1절에서와 같이 옥내형 저장시설 및 옥외형 취급시설에 임시저장 공간을 마련하였으며, 경수로 사용후핵연료 중간저장시설의 부지와 운영 규모 산정에 보수적 추정이 가능하도록 각 저장시설이 갖는 최대 규모를 도출하였다(Table 4).

국내 실정을 고려한 중간저장시설 추정 용량을 고려할 경우, 약 1,300개의 용기를 수용할 수 있는 용량이 필요하다. 옥내형과 옥외형 저장시설 경우를 독립적으로 고려한 결과, 옥내형의 경우 264개의 용기를 저장할 수 있는 저장건물 5동(저장용량 1,320개), 옥외형의 경우 24개의 용기를 보관할 수 있는 패드 54개(저장용량 1,296개)를 개념적으로 도출하였다. 옥내형 저장시설 건물과 옥외형 저장패드 개수는 각각이 가지는 용량에 따라 변동될 수 있으며, 옥내·옥외형 혼합 방식을 고려할 경우, 각 저장방식을 구성하는 저장건물과 저장패드의 수량 또는 용기의 보관 배열은 달라질 수 있다.

3.1.3. 사용후핵연료 중간저장시설 운영 절차(안) 설정

Fig. 12와 13에는 3.1.1절과 3.1.2절에서 도출된 내용을 바탕으로 한 시설의 운영 개념과 절차(안)을 나타내었다. 옥내형 저장시설은 세 번째 시사점인 극한하중 저항 내력 필요성을 고려하여 해외 사례와 유사한 수준의 구조체(1.5 m 수준의 벽 두께)를 반영하였으며, 네 번째 시사점인 단일고장 사고방지를 고려, 저장공간과 크레인을 복수개로 반영하였다. 주요 공간은 총 5가지로, 주 저장공간, 임시저장공간, 손상핵연료 저장공간, 주요 이동동선, 기타작업공간을 고려하였다. 이러한 사항을 반영한 옥내형 저장시설 운영 절차를 살펴보면, 최초 운반용기를 반입, 부수기재 탈거 등의 저장 전 작업을 수행하고 주 저장공간 또는 임시 저장공간으로 용기를 이동시키는 절차와, 반입 또는 저장 과정에서 문제가 발견된 손상연료를 별도의 구역으로 보관하는 절차, 이후 재포장시설로의 반출을 위한 작업 절차로 분류할 수 있다. 더하여 손상핵연료 저장에 대해, 옥내형 저장시설은 환경변수 통제력이 높은 실내에 보관한다는 장점이 있으나 저장 용량이 제한적인 단점이 존재한다(Fig. 12(b)). 이러한 부분은 상세설계 과정에서 손상핵연료 발생량 고려를 위한 합리적 추정이 필요할 것으로 사료된다.

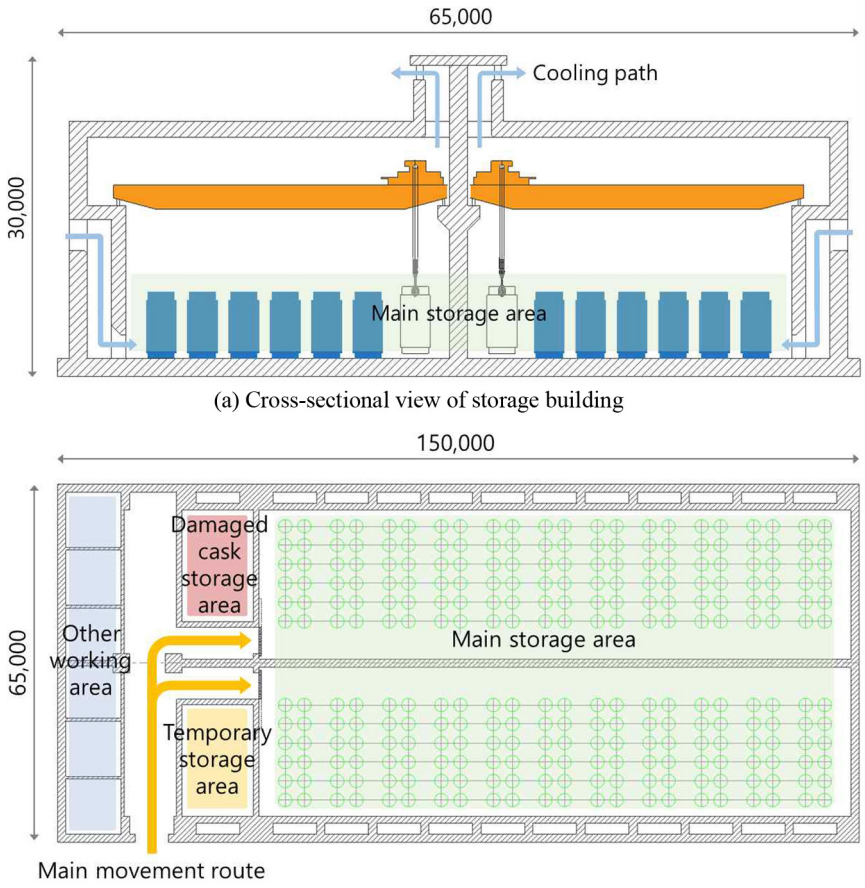
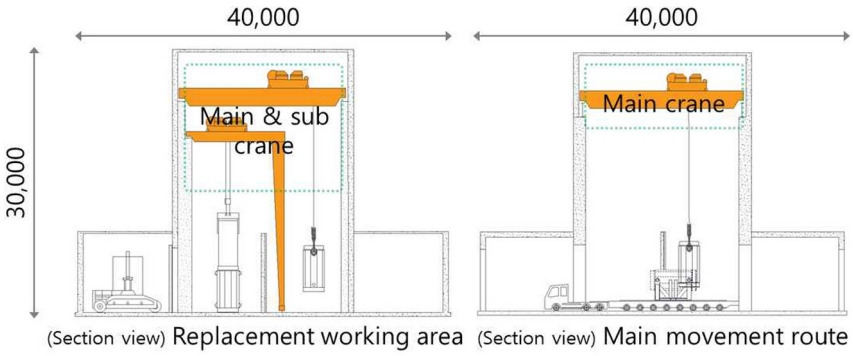


Fig. 12. Result of establishing the operational concept for in-door storage facility

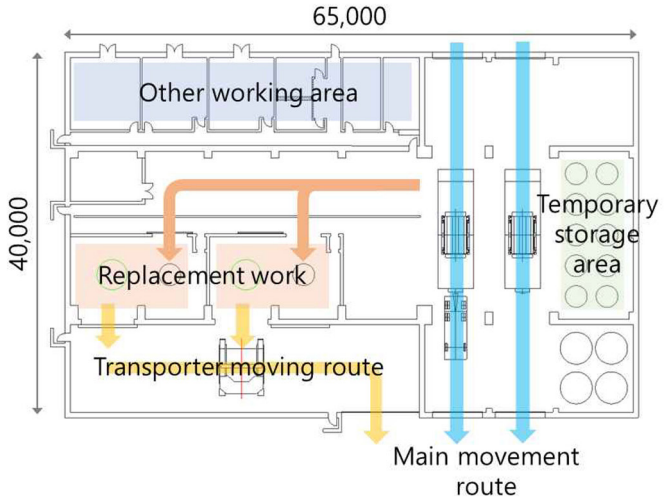
옥외형 취급건물에는 캐니스터를 저장용기로 옮기는 일련의 작업 공정에 필요한 공간과 크레인 설비를 단일고장 사고방지를 고려하여 복수개로 반영하였다. 주요 공간은 총 5가지로, 임시저장공간, 주 이동동선, 캐니스터 교체작업 공간, 트랜스포터 이동동선, 기타작업공간을 고려하였다. 따라서 옥외형 취급건물의 운영 절차를 살펴보면, 최초 용기를 반입한 후 부수기재를 탈거하고 캐니스터를 옮겨담기 위한 작업공간으로 운반용기를 이동시킨다. 이후 이송용기를 통해 캐니스터를 저장용기로 이동시키고, 이를 트랜스포터가 건물 외부에 위치한 저장 패드로 이동시키는 절차로 분류할 수 있다. 옥외형의 경우 용기 취급건물 내 임시 저장공간을 구획하였으나(Fig. 13(b)), 손상핵연료는 옥외 콘크리트 저장패드에 저장하는 방식을 고려하였다(Fig. 15). 옥내형과 달리 환경변수 통제력은 낮으나 손상핵연료 저장 용량과 위치 설정에 자유도가 높은 장점을 가진다. 이러한 부분 또한 상세설계 과정에서 충분한 검토가 필요하므로, 본 연구에서는 옥외형 시설에서 손상핵연료를 저장하는 방식에 대한 부분만 고려하였다.

3.1.4. 사용후핵연료 중간저장시설 배치(안) 도출

앞서 고려한 시설 구성, 저장규모 및 운영절차를 고려하여 옥내형 및 옥외형 저장시설의 일반배치도를 Fig. 14와 15에 나타내었다. 먼저 옥내형 중간저장시설의 경우, 저장건물 간격은 차량 이동에 필요한 동선과 회전반경 등을 고려하여 30 m 수준으로 반영하였고, 관리구역에서 제한구역 경계까지의 거리는 100 m로 적용하였다[22]. 옥외형 중간저장시설의 경우, 콘크리트 저장패드 간격은 선도국 사례 등을 반영하여 가로 및 세로 각 6 m로 적용하였으며, 관리구역에서 제한구역 경계까지의 거리는 230 m로 적용하였다[23]. 더하여 물리적 방벽 마련을 위한 관리구역과 제한구역 각각의 울타리 간격은 모두 6 m로 반영하였다[24]. 다섯 번째 시사점인 공간적 면적확보의 필요성을 반영하여 최종적으로 산정한 옥내형 제한구역 전체 면적 규모는 약 285,000 m^2 (570 m × 500 m) 수준으로, 옥외형 제한구역의 전체 면적 규모는 약646,100 m^2 (910 m × 710 m) 수준으로 도출되었다. 본 내용은 앞서 도출한 다섯 가지의 시사점과 국내 실정을 복합적으로 고려한 중간저장시설의 개념(안)이다. 사례분석을



(a) Cross-sectional view of storage building



(b) Plan view of storage building

Fig. 13. Result of establishing the operational concept for out-door management building

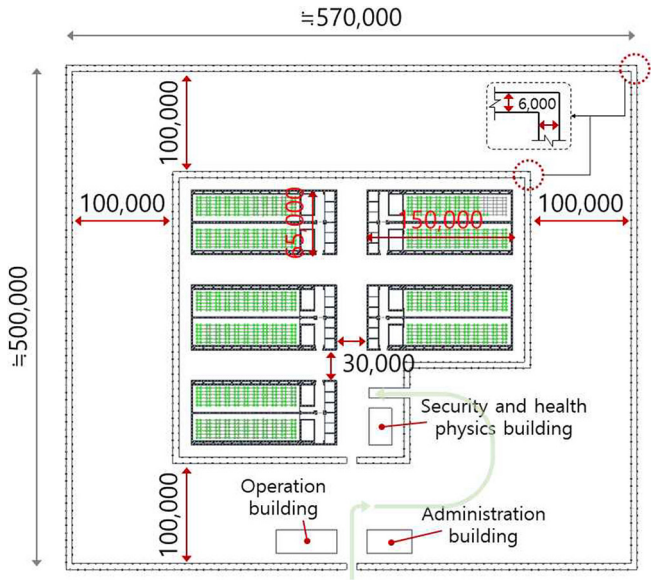


Fig. 14. General arrangement of the in-door interim storage facility

통한 시사점을 모두 반영하여 중간저장시설의 기능적 요구사항을 충족하는 개념(안)과 시설 규모가 도출되었으나, 시설 운영에 필요한 상세 설비의 운영조건과 수용용량 등을 보수적으로 반영한 한계가 존재한다. 저장건물의 배치와 운영을 위한 동선 등 경수로 사용후핵연료 중간저장시설의 개념은 다양한 변동성이 존재하므로, 추후 효율적인 시설 운영 방안 마련을 위한 후속 검토가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 원자력발전에서 발생되는 사용후핵연료의 안전한 관리를 위해 필요한 저장시설에 대한 개념설계 방안을 기술하였다. 먼저 선도국의 사례 분석을 통해 시설 내 용기 임시보관 장소의 필요성, 국내 실정을 반영한 수용 용량의 고려, 저장시설의 충분한 내력 보유의 필요성, 단일고장 사고방지 기능 필요성, 충분한 공간적 고려의 필요성을 주요 시사점으로 도출하

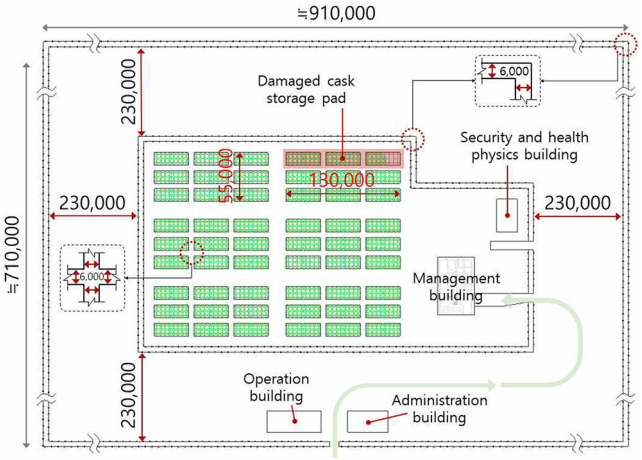


Fig. 15. General arrangement of the out-door interim storage facility

였으며, 도출한 시사점과 국내 실정을 고려하여 경수로 사용후핵연료 중간저장시설이 갖추어야하는 총 수용 용량과 면적 등을 도출하였다. 이를 반영하여 국내 실정에 적합한 시설 운영의 개념과 필요 규모를 산출하여, 옥내형 및 옥외형 두 가지 방식의 저장시설 일반배치도와 각 저장시설의 개념(안)을 제시하였다.

앞 절에서 기술된 바와 같이 본 연구에서는 경수로 사용후핵연료 중간저장시설의 부지와 운영 규모 산정에 보수적 추정이 가능하도록 각 저장시설이 갖는 최대 규모를 도출하였다. 따라서 본 연구에서 도출된 중간저장시설의 개념설계 방안은 사용후핵연료 발생량 변동성 및 국내 정책적 여건 변화에 따라 다양한 형태로 변경될 수 있는 가능성이 존재한다. 또한 중간저장시설은 사용후핵연료를 안전하게 보관하고 관리하기 위한 시설로 격납과 차폐, 열제거, 핵임계 방지 등의 공학적 방벽 기능을 충실하게 갖춰야 함과 동시에 이를 통한 대국민적 수용성의 고려를 복합적으로 고려해야 한다. 따라서 국가적 차원에서의 중간저장시설 사업 추진 과정에서 본 연구에서 도출한 과정과 내용을 고려한 추가적인 분석을 수행하여, 더욱 합리적 형태의 중간저장시설 개념(안) 도출을 위한 노력이 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부 에너지기술평가원 기술개발과제 (No. 2021171020001B, iris 과제번호 RS-2021-KP002665)의 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Nuclear Power Plant Operation Information (http://npp.khnp.co.kr), Public Data Portal (http://www.data.go.kr)
2. Jeong SH, 2022, Issues and Future Tasks of Public Discussion on Spent Nuclear Fuel Management, Vol 1978, Issues and Perspectives, National Assembly Research Service, 1-4pp
3. Ministry of Trade Industry and Energy, 2021, 2nd Basic Plan for High-Level Radioactive Waste Management
4. Korea Radioactive Waste Agency, 2021, Cheongjeong Nuri, Vol 100, KORAD Webzine, 32-34pp
5. Spent Nuclear Fuel Management Policy Review Committee, Details on Agenda 1-2 Related to Interim Storage Facility (http://hlwpolicy.go.kr)
6. Romanato LS, Rzyski BM, 2006, Advantages on Dry Interim Storage for Spent Nuclear Fuel, Primer Congreso Americano del IRPA 2006/First American IRPA Congress 2006, 1-7pp
7. Korea Atomic Energy Research Institute, 2009, Analysis on Storage of Spent Nuclear Fuel, KAERI/TR-3784/2009
8. Korea Radioactive Waste Agency, 2016, Story of Spent Nuclear Fuel 70, 18-19pp
9. Bruno T, 2003, Realization of the German Concept for Interim Storage of Spent Nuclear Fuel-Current Situation and Prospects, WM'03 Conference, 1-12pp
10. Graf W, 2010, Management of Spent Fuel from the Perspective of the German Industry, IAEA International Conference on Management of Spent Fuel form Nuclear Power Reactors, 1-22pp
11. Lee SH, 2019, Safety Assessment of Aircraft Crash Accident Into Spent Nuclear Fuel Dry Storage Facility – A Review With Focus on Structural Evaluation. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology* **17**(2):263-278. http://doi.org/10.7733/jnfcwt.2019.17.2.263
12. Korea Atomic Energy Research Institute, 2010, The state of the art of the Recycle Fuel Storage Facility in Japan, KAERI/AR-857/2010
13. Takahashi M, 2015, Design and Construction Work Experience of Interim Storage Facility for Spent Fuel, IAEA International Conference on Management of Spent Fuel from Nuclear Power, 1-15pp
14. Stanislav K, 2004, Operational Experience of Castor 440/84 Casks in Dukovany NPP, 14th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, 22-28pp
15. U.S.Nuclear Regulatory Commission, 1997, Private Fuel Storage Facility Safety Analysis Report, Docket No. 72-22, 1.7-5pp
16. U.S.Nuclear Regulatory Commission, 1997, Private Fuel Storage Facility, Drawing 0599601-EM-1-D
17. U.S.Nuclear Regulatory Commission, 1997, Private Fuel Storage Facility, Drawing 0599601-EM-2-D
18. U.S.Nuclear Regulatory Commission, 2018, WCS Consolidated Interim Storage Facility System Safety Analysis Report, Docket No. 72-1050
19. U.S.Nuclear Regulatory Commission, 2019, The HI-STORE CIS Facility Licensing Report
20. Lee SH, Shin CM, Kim MS, Jung HR, Cho CH, 2023, Analysis of Spent Nuclear Fuel Generation·Transport and Disposal, Proceeding of Korean Society of Radiation Industry, 254pp
21. U.S.Nuclear Regulatory Commission, 1998, Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities, 10 CFR Part 50
22. U.S.Nuclear Regulatory Commission, 2001, Licensing Requirements for the Independent Storage of Spent Nuclear Fuel, High-Level Radioactive Waste, and Reactor-Related Greater than Class C Waste, 10 CFR Part 72
23. Korea Radioactive Waste Agency , 2016, Concrete Storage Cask Topical Report
24. American Nuclear Society, 2000, Design Criteria for an Independent Spent Fuel Storage Installation, ANSI/ANS-57.9