

Status Analysis for the Confinement Monitoring Technology of PWR Spent Nuclear Fuel Dry Storage System

경수로 사용후핵연료 건식저장시스템의 격납감시 기술현황 분석

Chang-Yeal Baeg* and Chun-Hyung Cho

Korea Radioactive Waste Agency, 168 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

백창열*, 조천형

한국원자력환경공단, 대전광역시 유성구 가정로 168 KT빌딩

(Received September 24, 2015 / Revised November 30, 2015 / Approved December 4, 2015)

Leading national R&D project to design a PWR spent nuclear fuel interim dry storage system that has been under development since mid-2009, which consists of a dual purpose metal cask and concrete storage cask. To ensure the safe operation of dry storage systems in foreign countries, major confinement monitoring techniques currently consist of pressure and temperature measurement. In the case of a dual purpose metal cask, a pressure sensor is installed in the interspace of bolted double lid(primary and secondary lid) in order to measure pressure. A concrete storage cask is a canister based system made of double/redundant welded lid to ensure confinement integrity. For this reason, confinement monitoring method is real time temperature measurement by thermocouple placed in the air flow(air intake and exit) of the concrete structure(over pack and module). The use of various monitoring technologies and operating experiences for the interim dry storage system over the last decades in foreign countries were analyzed. On the basis of the analysis above, development of the confinement monitoring technology that can be used optimally in our system will be available in the near future.

Keywords: PWR spent nuclear fuel, Confinement monitoring, Dual purpose metal cask, Dry storage, Pressure sensor

*Corresponding Author.

Chang-Yeal Baeg, Korea Radioactive Waste Agency, E-mail: baegy@korad.or.kr, Tel: +82-42-601-5341

ORCID

Chang-Yeal Baeg <http://orcid.org/0000-0001-7586-6501>

Chun-Hyung Cho

<http://orcid.org/0000-0001-5258-6646>

국가 주도로 2009년부터 개발중인 경수로 사용후핵연료 건식저장시스템은 금속 검용용기와 콘크리트 저장용기의 두 가지 방식이다. 국외 건식저장시설 운영 시 주요 격납감시 방안으로는 금속 검용용기인 경우 이중 뚜껑 사이에 압력센서를 설치하여 실시간 압력변화를 감시하는 방법이 있고 콘크리트 저장용기의 경우는 캐니스터 기반으로 주요 격납 경계인 뚜껑을 이중으로 용접하는 방식으로 구조물(over pack 또는 module)의 공기 유로인 입구 및 출구에 대한 온도 변화를 감시하는 방법으로 격납을 관리하는 것으로 나타났다. 미국, 독일 등 30 년 이상 안정적으로 저장시설을 관리한 국가의 다양한 적용기술 및 운영사례를 조사/분석하여 우리가 개발중인 저장시스템에 적용할 수 있는 격납감시 방안을 도출하는데 활용할 수 있도록 하였다.

중심단어: 경수로 사용후핵연료, 격납감시, 금속 검용용기, 건식저장, 압력센서

1. 서론

원전의 사용후핵연료 저장용량 포화에 대비하고 원활한 전력생산 및 운영을 위해 2009년 중반부터 국가 주도로 “사용후핵연료 수송/저장 시스템 상용화 기술개발” 과제를 수행하고 있다. 개발중인 사용후핵연료 수송저장 시스템은 국외의 선진 경험과 국내의 사용후핵연료 저장량, 원전의 기반 시설 여건 등을 고려하여 저장효율, 안전성 등에서 장점이 많은 건식으로 저장하는 방식으로 운반과 저장을 겸할 수 있는 금속 검용용기와 저장만을 고려한 콘크리트 저장용기의 두 가지 방식으로 시스템을 개발중에 있다. 미국, 독일, 일본 등은 건식저장 경험이 이미 30 년 이상으로 안정적으로 저장시설을 운영관리하고 있으며 시설관리자는 자국의 법규정에 따라 저장기간 동안 안전성을 보증하여야 한다. 건식저장 시 관리되어야 할 부분은 저장대상 내용물인 사용후핵연료와 이를 저장하는 구조물인 저장용기로 나눌 수 있다. 현재 우리나라는 사용후핵연료 공론화위원회에서 2 년여의 여론 수렴 등 공론화를 통해 국가에 권고보고서를 제출한 상태로 이를 고려하여 정부가 관리계획을 금년 말까지 수립할 예정이다. 우리나라는 아직 사용후핵연료 중간저장을 위한 제규정이 없는 상태로 현재 제정중에 있으므로 개발중인 건식저장 시스템은 미국의 인허가 기준인 U.S. NRC 10CFR72를 적용하고 있다. 개발 중인 금속 검용용기와 콘크리트 저장용기의 안전성을 입증하기 위해 분야별로 안전성해석과 필요한 입증시험을 수행하고 설계승인을 위한 기술자료인 특정기술주제보고서(Topical Report, TR)를 생산 중에 있다. 전체적으로 저장용기와 취급설비를 포함한 저장시스템과 저장시설이

연계된 장기간의 안전관리를 위한 다양한 감시방안(사용후핵연료의 자체 건전성, 주요 구성품의 장기열화, 방사선 감시 등)이 강구되어야 하지만 본 기술현황 분석에서는 금속 및 콘크리트 저장용기에 국한하여 일상운영에 따른 사용후핵연료를 포함한 내용물의 누설을 감시하여 건전성을 보증할 수 있는 격납감시 방안에 국한하였다. 주요 격납감시 방안으로는 금속 검용용기와 저장 전용인 콘크리트 저장용기에 대한 적용기기, 감시기술, 운영현황 등을 조사 및 분석하였다.

2. 적용기준 및 기술요건

2.1 적용기준

본 기술현황분석에서는 국제원자력기구의 사용후핵연료 저장시설의 설계 및 운영 세부지침, 운반/저장 검용용기의 안전사례(초안)와 현재 국내에서 개발중인 수송/저장 시스템 상용화 기술개발에 참조한 미국의 건식저장 시스템 인허가 요건 등을 참조하였으며 주요 적용기준은 다음과 같다.

- IAEA SAFETY STANDARDS SERIES No. SSG-15, Storage of Spent Nuclear Fuel, IAEA, VIENNA, 2012.
- IAEA-TECDOC-DRAFT, Guidance for preparation of a safety case for a dual purpose cask containing spent fuel, July 2013.
- U.S. NRC 10CFR72, Licensing Requirements for the Independent Storage of Spent Nuclear Fuel, High-

Level Radioactive Waste and Reactor Related Greater than Class C Waste, 2012.

- U.S. NRC NUREG-1536, Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems, Revision 1, 2010.

2.2 주요 기술요건

국제원자력기구의 사용후핵연료 저장관련 규제지침인 IAEA SSG-15(사용후핵연료 저장)에서는 방사성폐기물의 저장은 적절한 관리가 이루어 지도록 검사, 감시, 회수 및 보존될 수 있어야 한다고 규정하고 있다[1].

미국의 경우 NRC 10CFR72에서는 사용후핵연료 저장에 따른 격납을 보증하기 위해 저장용기가 금속밀봉을 사용할 경우 적절한 감시 및 검사 계획을 갖추어야 하고 용접으로 격납을 유지하는 경우 직접 감시할 수 없기 때문에 공기 입출구 막힘(air flow blockage)이나 온도 감시를 수행하여야 한다고 규정하고 있다[2].

2.2.1 IAEA-TECDOC-DRAFT(사용후핵연료 운반/저장 겸용용기 안전사례 준비를 위한 지침)[3]

일반적으로 운반/저장 겸용용기(Dual Purpose Cask, DPC)는 이중의 격납경계를 갖도록 설계된다. 이들은 불필요한 열화, 부대 위험, 방사능 노출을 피하기 위하여, 저장 중 검사나 유지보수, 혹은 저장 후 수송을 위해 1차 뚜껑을 열 필요가 없도록 설계되고 관리된다. 또한, 이러한 방식은 저장 기간 중 핫셀(hot cell)과 같은 추가 설비가 반드시 필요하지는 않다. 그러나, DPC가 단일 격납 경계를 갖도록 설계된 경우, 내부 방사성물질의 누설 사고 발생에 대비한 적절한 유지보수 시설이 확보되어야 한다. DPC를 이용한 사용후핵연료 관리에는 원전부지 내/외(on site/off site) 운반뿐 아니라 사용후핵연료의 저장이 포함된다. 많은 국가에서 DPC 자체의 라이선스나 DPC 를 포함하는 저장시설을 위한 라이선스를 보유할 것을 요구하고 있다. 또한, 대부분의 국가들은 운반 DPC에 대한 설계승인(design approval)을 요구하고 있다. DPC는 저장 및 운반 기간 동안 방사성물질의 방출을 예방하기 위한 격납 시스템을 명확하게 정의해야 한다. 저장 기간 중 밀봉 시스템은 사이공간 압력을 감시함으로써 누출 탐지를 할 수 있도록 이중 뚜껑 밀봉 시스템으로 구성되어야 한다. 뚜껑 사이 공간 및 내부 압력을 지속적으로 감시하기

위한 압력 센서를 도입할 수 있고, 시스템이 압력 감시를 위한 사이공간을 제공할 수 있는 밀봉(sealing)을 사용하는 경우, 단일 뚜껑 밀봉 시스템이 이용될 수 있다. DPC를 밀봉하기 위해 다중 용접을 이용하는 경우, 압력 감시는 필요하지 않다. 저장 중 밀봉 시스템을 구성하는 seal에는 내열성, 내부식성, 방사선 저항력이 있어야 하며, 저장 기간 동안 충분한 내구력을 유지해야 한다.

DPC의 격납 기능은 용기 내부가 부압(negative pressure)을 유지하는 경우, 방사성물질의 방출 위험이 경감된다. 한편, 내부가 정압(positive pressure)인 경우, 사용후핵연료 피복의 부식 위험이 DPC 공동으로 흐르는 모든 부식성 가스의 흐름으로 인해 감소될 것이다. DPC의 격납 시스템은 방사성물질의 방출을 막기 위한 다중 방벽을 갖추고 있어야 한다. 만약, 밀봉 및 용접을 활용하는 경우, 격납 기능이 장기 저장기간 동안 유지되어야 한다. 밀봉 시스템의 격납 기능은 연료장전 후 DPC의 누설 방지 성능이 검증될 수 있도록 설계되어야 한다. DPC의 밀봉 시스템은 저장기간 중 격납 기능을 감시할 수 있도록 설계되어야 하며 DPC 내 공기가 설계 원칙의 범주 내에 있다는 점을 압력 측정을 통해 확인해야 한다. 그러나 DPC의 내부 공동이 충분히 건조되고, 불활성 기체로 채워지며, 다중 뚜껑 구조로 밀봉되고 최대권장온도를 초과하지 않았기 때문에 저장 기간 동안 격납 기능이 유지되는 한, 초기 공기가 보존되는 것으로 추정할 수 있다. 특별히 다음 사항이 검증되는 경우, DPC 내 공기가 설계 단계에서 추정한 범주 내에 있다고 판단할 수 있다.

- 원전에서 DPC를 준비하는 동안, 설계 원칙을 만족하는 방식으로 불활성 기체를 채우고 수분을 제거하였다.
- DPC가 원전으로부터 저장시설로 수송을 위한 압력 측정치 검사를 통과 하고, 수송 동안 작용하는 비정상적 외력이 없다.
- DPC의 격납 기능이 저장시설에서의 승인시험에 의해 확인되었다.
- DPC의 격납 기능이 저장기간 동안 상실되지 않았다.

DPC는 안전에 중요한 부품의 온도와 정상 및 비정상 운반조건 그리고 정상 및 비정상 운영 조건에서 건전성을 유지하기 위해 명시된 범주 내에서 사용후핵연료 피복관의 온도를 유지하기 위해 외부 유입 열원과 내용물의 붕괴열을

감소시킬 수 있도록 DPC를 개발해야 한다. 저장기간 중 필요한 경우 DPC에 온도감시 시스템을 설치할 수 있다.

2.2.2 US NRC 10CFR72.44 인허가 조건[2]

인허가 조건의 내용중 ISFSI(Independent Spent Fuel Storage Installation) 또는 MRS(Monitored Retrievable Storage Installation)에 대한 기능상 및 운영상 제한치는 저장된 사용후핵연료나 폐기물 용기의 건전성을 유지하고 작업자를 피폭으로부터 보호하며, 방사성물질이 관리되지 않은 상태로 방출되는 것을 방지하기 위하여 필요한 것으로 사용후핵연료나 폐기물의 취급 및 저장조건에 주어지는 제한치를 말한다. 감시요건으로는 저장중에 있는 사용후핵연료나 고준위 방사성폐기물에 대한 검사 및 감시, 필요계통과 구성품의 건전성 유지를 확인하기 위한 검사, 시험 및 검교정 작업, ISFSI 또는 MRS가 요구되는 기능상 및 운영상 제한치 범위 내에서 운영되고 있는지에 대한 확인과 안전한 저장에 필요한 제한조건의 만족여부에 대한 확인 등의 요건을 만족하여야 한다.

사용후핵연료 건식저장관련 규제지침인 NUREG-1536에서는 사용후핵연료 저장에 따른 격납을 보증하기 위해 저장용기가 금속 밀봉을 사용할 경우 적절한 감시 및 검사 계획을 갖추어야하고, 용접으로 격납을 유지하는 직접 감시할 수 없는 경우 공기 입출구 막힘이나 온도 감시를 수행하여야 한다고 규정하고 있다[4].

3. 국가별 격납감시 시스템 운영현황 및 사례

3.1 미국

3.1.1 격납감시 시스템 운영현황

미국은 상용원전에서 나오는 경수로 사용후핵연료를 대략 1985년부터 30여 년간 1,500개 이상의 건식저장시스템을 이용하여 원전 내에 저장하여 오고 있다(Fig. 1). 미국은 2010년말 기준으로 전체 사용후핵연료 저장용량인 62,500 MTU의 약 1/4 정도를 건식저장시스템에 저장하고 있으며 습식 저장조에 저장중인 냉각기간이 오래된 연료는 최근 새로이 배출되는 연료의 저장 공간을 확보하기 위해 건식저장시설로



Fig. 1. Dry Storage Facility (Decommissioned Connecticut Yankee NPP).

Table 1. Potential Methods of Monitoring Dry Cask Performance during Normal Operation

Parameter/Phenomenon	Monitoring Method/Stage of Development		
	Current Field Practice	For Near-Term Field Deployment	For Longer-Term Development
Canister temperature	Inferred from T/C reading at surface	Thermal imaging using borescope	U/S or fiber optic temperature sensors on canister surface
Change in DCSS cooling	Inspection of cooling vents for debris	Temperature-indicating RFIDs and/or SoS ²⁾ devices in vents	Current methods sufficient
Canister leakage	None ¹⁾	Outlet air monitored for increase in SoS due to helium leakage	ΔT_{BT} using fiber optic temperature sensors on canister to annunciate large leak(vertical only)
Bolted cask leakage	Alarmed on ΔP in space between inner and outer lids	Current methods sufficient	

¹⁾ Welded inner and outer lids assumed to preclude canister leakage

²⁾ SoS : Pitch-catch speed of sound

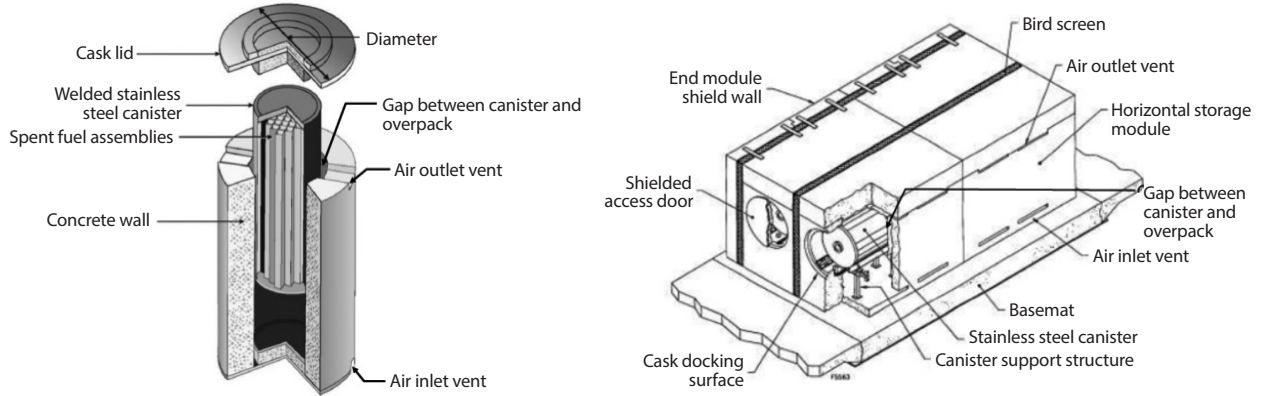


Fig. 2. Schematics of Canister Based Concrete Storage System.

운반/저장하는 추세가 날로 증가하고 있다.

아르곤국립연구소(ANL)에서 2012년 수행한 사용후핵연료 장기 건식저장 역무(NRC Job Code V6060)의 일환으로 “Task 3 : 확장된 현장 및 실시간 감시”가 수행되었다. 기술 개발 상태에 따라 분류된 감시방법으로는 1) 현 상태 기술, 2) 단기간 내에 이루어 질 수 있는 기술, 3) 장기간(4년 이상 소요) 소요되는 기술로 분류하였다. 건식저장시설의 정상운영 중에 수행 가능한 잠정적인 감시방법은 Table 1에 요약하였다[5].

3.1.2 격납감시 시스템 적용사례[6]

미국에서 상용 운전 중인 건식저장시스템은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데 사용후핵연료를 용기에 직접 넣고 뚜껑을 볼트로 체결하는 방식과 사용후핵연료를 캐니스터에 넣고 용접한 후 구조물(over pack 또는 module)에 위치시키는 방식이 있다. 오버팩이나 모듈은 steel lined 또는 강화 콘크리트로 중성자 및 감마 차폐 기능도 제공한다. 대부분 저장시설은 원전내 독립저장시설(ISFSI)로 옥외저장 방식으로 운영하고 있다[6].

콘크리트 저장용기의 경우, 수직과 수평으로 저장하는 방식을 이용하며 저장용기의 특성상 직접 감시하지 않고 공기 입출구의 이물질 막힘 감시와 온도 변화를 실시간으로 상시 측정하여 격납 건전성을 관리한다(Fig. 2).

금속 저장용기는 압력감시 시스템(pressure monitoring system)을 이용하여 1차와 2차 뚜껑 사이에 대한 압력변화를 측정하여 격납을 연속적으로 감시한다(Fig. 3).

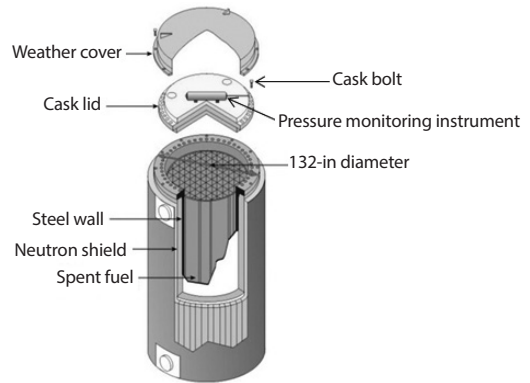


Fig. 3. Schematics of Direct Load Bolted Cask System.

3.2 일본

3.2.1 격납감시 시스템 운영현황

일본은 2011년 3월 후쿠시마 원자력발전소 사고 이후 원자력발전을 중지한 상태이나 총 54기의 원전에서 발생한 사용후핵연료는 각 원전의 소내 임시 저장시설에 저장중에 있다. 현재 사용후핵연료의 재처리정책에 따라 재처리 전까지 집중적으로 저장관리하기 위해 무츠시에 건식저장시설(Mutsu Recyclable Fuel Storage Facility)을 건설 중으로 설계수명 50년의 운반/저장겸용 금속용기를 사용하여 총 5,000톤의 사용후핵연료를 저장할 예정이다.

일본의 경우 주로 2개 기관이 건식저장용기의 감시시스템 개발을 수행하였으며 금속 저장용기의 실제 모니터링은 동경전력(후쿠시마 다이치 5호기)이 수행하였고 콘크리트

저장용기의 보편적인 시험은 전력중앙연구원(CRIEPI)이 수행하였다. 동경전력의 건식저장시스템은 이중 뚜껑으로 가스켓을 볼트로 체결하며 보론 함유 수지의 중성자 차폐체를 갖는 단조 탄소강으로 구성되어 있다. 각각의 용기는 저장 후레임에 수평으로 저장되며 내부와 외부 뚜껑 사이 공간을 헬륨으로 가압하고 압력변화를 감시한다(Fig. 4). 1995년부터 건식저장을 수행하고 있으며 첫 번째 검사는 저장 후 5년 경과한 2000년에 두 번째 시험은 10년 경과한 2010년에 수행하였다. 수행된 검사로는 Kr-85를 검출하기 위한 가스 샘플링, 가스켓에 대한 육안검사, 일차 뚜껑부 누설시험, 연료 두 다발에 대한 피복판 육안검사 등이다. 건식저장에 따른 검사결과 Kr-85는 검출되지 않았고 일차 뚜껑부 누설시험결과 측정 누설율이 기준치($1 \times 10^{-6} \text{ Pa m}^3/\text{s}$)보다 훨씬 낮게 나타났으며 연료 피복판의 결함도 발견되지 않았다. 유일한 비정상 사례는 가스켓에 남아있던 물에 의해 표면이 하얗게 변색

된 것으로 금속용기가 저장조(pool)에 최소한으로 잠겨있도록 운영절차를 변경하였다. 2011년 쓰나미 발생이전 계획으로 2015년 검사가 예정되어 있었다[5].

3.2.2 격납감시 시스템 적용사례

일본은 원전 내에 금속 저장용기를 이용하여 건식으로 저장하고 있으며 저장용기와 저장건물에 대한 안전성을 확인한다. 금속 저장용기의 경우, 이중 뚜껑 사이 공간에 압력 감지센서를 부착하여 압력변화를 연속적으로 측정하고 용기 표면과 저장시설의 공기 입출구에 대한 실시간 온도 감시를 수행한다. 현재 운영 준비중인 무츠 저장시설은 금속 겸용용기를 이용한 저장시설로 용기와 시설에 대한 감시 시스템은 기존 원전의 소내 건식저장시설에서 운영중인 방식과 유사한 개념이다(Fig. 4 & 5)[7].

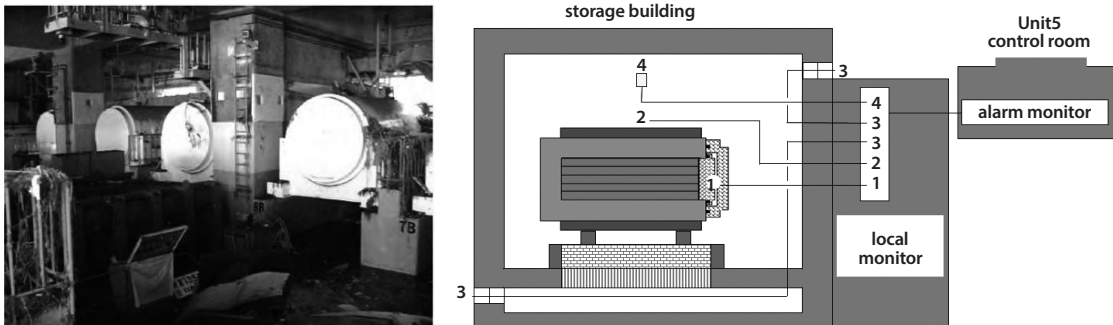


Fig. 4. Schematic of Dry Storage facility & Monitoring System (Fukushima Daiichi NPP).

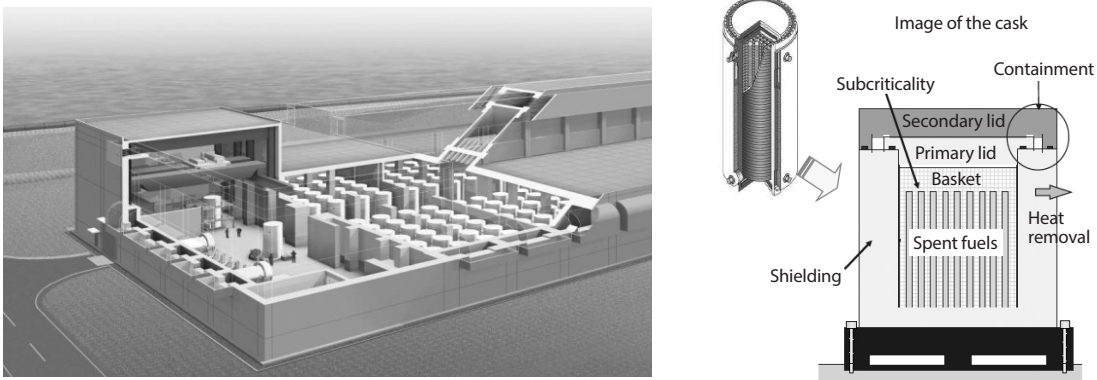


Fig. 5. Schematic of Dry Storage Facility (Mutsu RFS Facility).

3.3 독일

3.3.1 격납감시 시스템 운영현황

현재 운영 중인 19기의 원전에 대하여 2021년까지 점진적으로 폐쇄하는 방침으로 2010년 말 기준으로 총 13,471 톤의 사용핵연료가 발생되었으며, 이중 6,801 톤은 원전 부지 내 및 중앙집중식 중간저장시설에 저장되어 있다.

중간저장시설은 건물 내에 금속용기를 저장하는 방식이 대부분으로 STEAG 방식과 WTI 방식으로 구분되며 STEAG 시설은 저장구역을 2개로 구분하여 중앙의 환기구를 통해 자연냉각하는 방식이고 WTI 시설은 단일 저장구역으로 1대의 천장 크레인으로 운영되며 측면의 환기구를 통해 자연냉각방식으로 운영된다. GNS에서 운영 중인 Ahaus와 Gorleben 저장시설은 건식으로 설계수명 40 년으로 각각 1992 년과 1995년부터 사용후핵연료와 재처리 폐기물을 저장 및 관리하고 있다[8]. 저장시설은 길이 200 m, 폭 40 m, 높이 22 m로 시설은 차량 인수구역, 용기 유지 및 검사구역 및 저장 구역으로 구성된다(Fig. 6).

주요 구성품중 한가지는 폭이 33.7 m인 140/10 톤 용량의 브리지 크레인으로 뚜껑이나 충격완충체를 취급할 수 있는 보조 크레인도 구비하고 있다.

방사성물질을 저장 및 운반하기 위한 용기는 CASTOR형으로 GNS에서 개발하여 운영 중인 대표적인 금속용기로 저장 대상 연료종류, 저장용량 등에 따라 다양하게 구분되며 이중 뚜껑 구조로 누설을 감시할 수 있다.

3.3.2 격납감시 시스템 적용사례

이중 뚜껑을 갖는 금속 저장용기를 이용하여 사용후핵연료를 저장하며 1차와 2차 뚜껑 사이에 압력 스위치(pressure

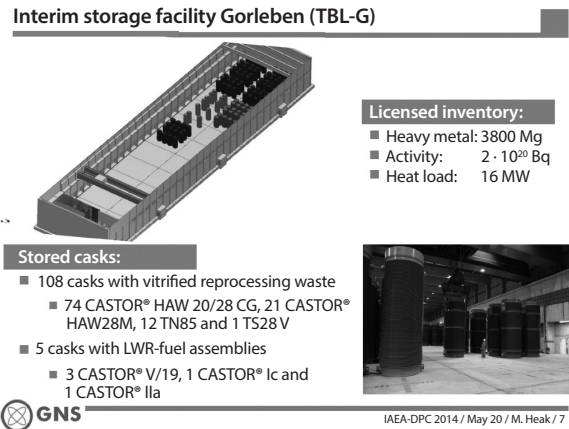


Fig. 6. Interim Storage Facility(Gorleben TBL-G).

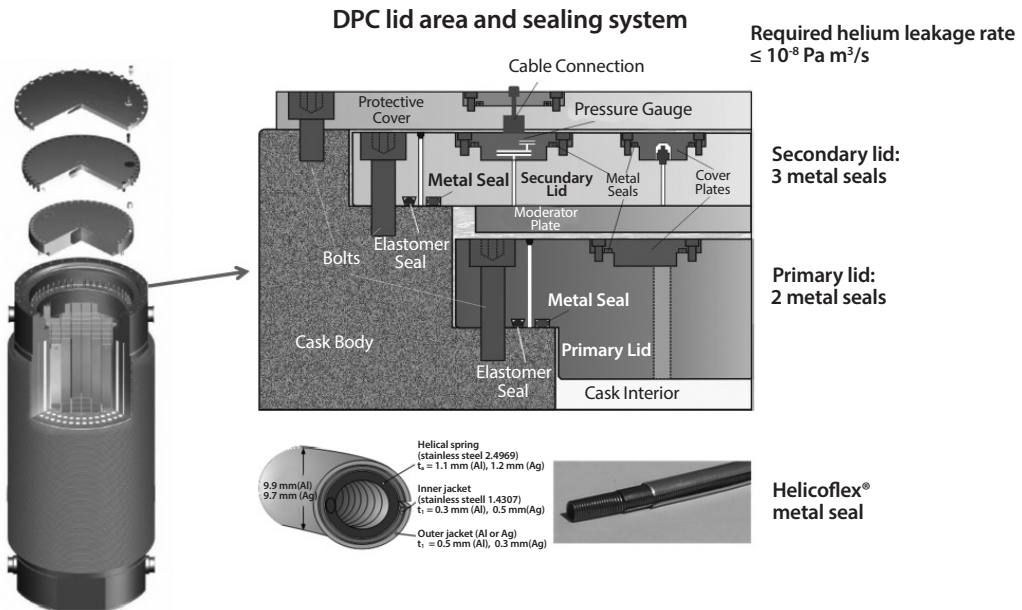


Fig. 7. Schematic of Bolted Lid System(with metal seals).

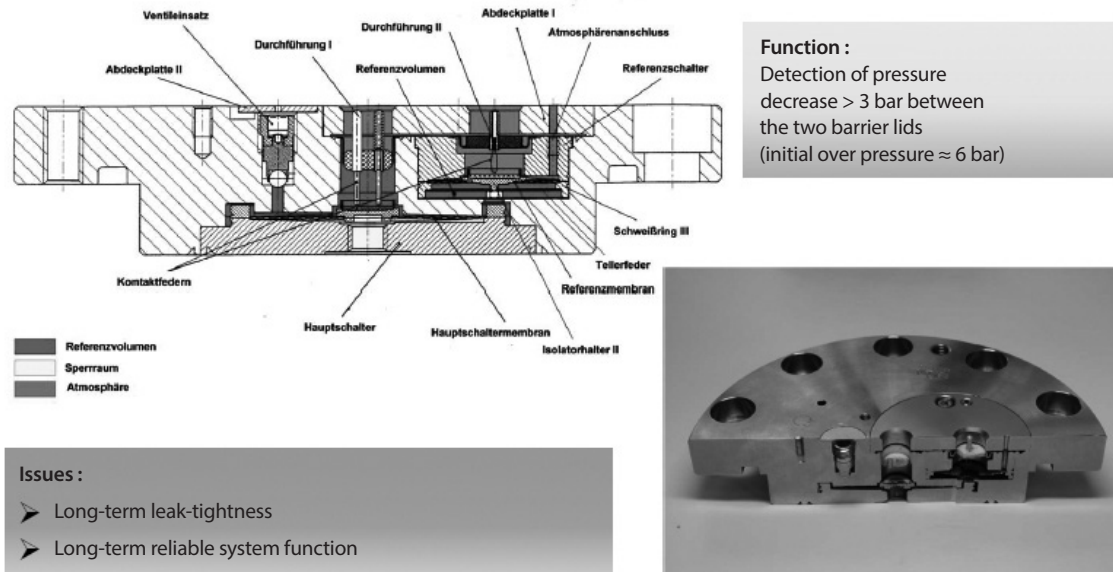


Fig. 8. Schematic of Pressure Switch (place in the secondary lid).

switch)를 설치하여 상시 압력변화를 측정하여 격납 건전성을 감시한다(Fig. 7 & 8)[9].

3.4 체코

3.4.1 격납감시 시스템 운영현황[10]

체코는 사용후핵연료를 발전소내 중간저장시설에 저장하고 이르면 2065년부터 최종처분을 위해 국가에서 인도하는 계획으로 현재 운영중인 듀코바니(Dukovany) 원전내의 중간저장시설은 금속 견용용기로 설계수명 40 년인 CASTOR-440/84를 이용하여 용기당 러시아형 VVER-440 사용후핵연료 84다발을 저장할 수 있다(Fig. 9 & 10). 중간저장 시설 운영중 가장 중요한 업무는 저장용기에 대한 격납과 표면온도 측정/감시, 저장시설 내부 및 인접주변에 대한 방사선 감시이다.

3.4.2 격납감시 시스템 적용사례

압력감시를 위해 CASTOR-440/84 용기의 1차 뚜껑과 2차 뚜껑 사이에 대한 압력변화를 측정하여 연속으로 누설을 감시하며 뚜껑 사이 공간에는 헬륨을 충전한다. 압력변화를 관찰하여 하한치 이하로 떨어질 경우 누설 발생인지 확인하도록 원전의 근무자에게 신호를 보내도록 되어있다. 표면

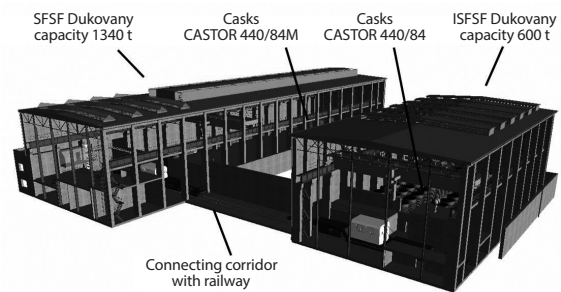


Fig. 9. Dukovany ISFSF with New Building of Dukovany II(left).

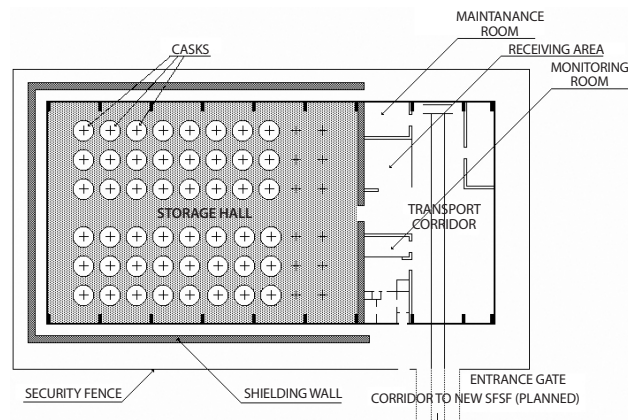


Fig. 10. Arrangement of ISFSF Dukovany I.

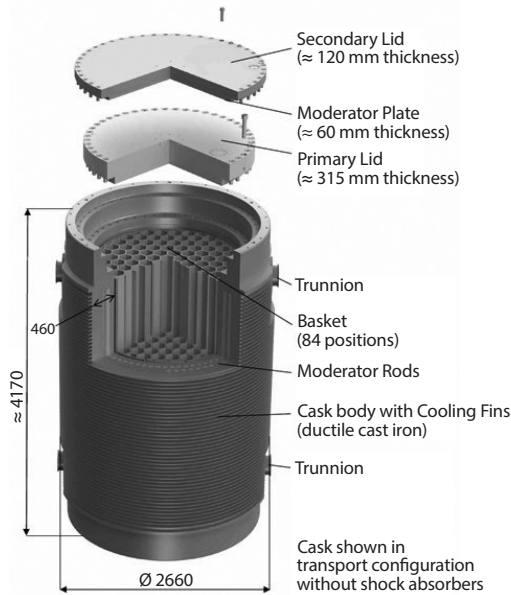


Fig. 11. Dual Purpose Metal Cask, CASTOR for VVER 440.

온도감시는 CASTOR-440/84 용기에 별도의 열전대를 설치하여 감시한다(Fig. 11).

4. 결론

사용후핵연료 건식저장 시스템은 크게 금속 검용용기와 콘크리트 저장용기를 사용하며 저장방식에 따라 옥내와 옥외 저장시설로 구분할 수 있다. 독일이나 일본의 경우 옥내에 금속 검용용기를 사용하고 미국은 주로 옥외에 콘크리트 저장용기를 많이 사용한다. 국외에서 운영중인 건식저장 시스템의 격납감시 방법을 조사/분석한 결과 금속 검용용기인 경우 압력센서를 설치하여 실시간 압력변화를 감시하는 방법이 있고 콘크리트 저장용기의 경우는 공기 입구 및 출구에 대한 온도변화를 감시하는 방법으로 대체로 압력과 온도를 실시간 연속으로 측정하여 격납을 관리하는 것으로 나타났다. 압력감시 장치로는 헬륨누설검출기(He leak detector), 압력센서 등이 사용되고 온도감시 장치로는 주로 열전대가 사용되며 간헐적인 측정에는 직독식 온도계를 사용하기도 한다. 좀더 효율적이고 안정적인 온도감시를 위해 RFID(Radio Frequency Identification), 열화상(thermal imaging) 등 기술을 활용한 다양한 실용화 연구도 수행 중에 있

다. 현재 우리나라에서 개발중인 경수로 사용후핵연료 건식저장시스템은 금속 검용용기와 콘크리트 저장용기 방식으로 국외의 경우와 비교하여 저장대상 내용물인 사용후핵연료의 종류/수량, 저장공간에 사용된 불활성 기체의 종류/압력 및 유지방법 등은 국가별로 차이는 있으나, 격납경계를 구성하는 부분과 연계된 계측장치 설치 공간/위치 등의 형상 및 환경 특성은 매우 유사하다. 고려중인 감시기술은 압력과 온도변화를 계측하는 특성상 사용후핵연료 저장공간 자체의 내부 기체, 압력 등의 환경이 직접적으로 계측신호 등 운영조건에 영향을 미치지 않는으나, 건식저장시스템의 설계수명 동안 계측장치가 기능을 유지할 수 있도록 내열성, 내부식성, 내방사선성 등을 고려하여 선정하여야 할 것이다. 국외에서 사용중인 검증된 격납감시 기술을 선택하여 적용하는데 큰 문제점은 없으며 향후 사용후핵연료 중간저장시설 부지선정, 저장방식 결정 등 국내 여건을 반영하여 최적의 감시방안을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)가 주관하는 산업기술혁신사업의 방폐물관리기술개발과제(2014171020173A)의 일환으로 수행되었음.

REFERENCES

- [1] International Atomic Energy Agency, Storage of Spent Nuclear Fuel, IAEA SAFETY STANDARDS SERIES No. SSG-15, IAEA (2012).
- [2] United States Nuclear Regulatory Commission, Licensing Requirements for the Independent Storage of Spent Nuclear Fuel, High-Level Radioactive Waste and Reactor Related Greater than Class C Waste, U.S. NRC 10CFR72 (2012).
- [3] International Atomic Energy Agency, Guidance for preparation of a safety case for a dual purpose cask containing spent fuel, 43-49, IAEA-TECDOC-DRAFT, IAEA (2013).

- [4] United States Nuclear Regulatory Commission, Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems, Revision 1, U.S. NRC NUREG-1536 (2010).
- [5] J.D. Lambert, S. Bakhtiari, I. Bodnar, C. Kot, and J. Pence, NRC Job Code V6060: Extended In-Situ and Real Time Monitoring Task 3: Long-Term Dry Cask Storage of Spent Nuclear Fuel, v-vii, 17-18, Argonne National Laboratory (2012).
- [6] United States Nuclear Regulatory Commission , “Available methods for functional monitoring of dry cask storage systems”, 1-1~1-5, U.S. NRC Contract NRC–HQ–12–C–02–0089, (2014).
- [7] T. Ishikawa, “Current Status of Interim Storage Facility for Spent Fuels in Japan”, Cask Procurement Group, Engineering Department, Recyclable Fuel Storage Company, IAEA workshop for DPC, 8 (2014).
- [8] L. Oelschläger, W. Graf, and M. Heck, “GNS Experience on the Long-Term Storage at Dry Interim Storage Facilities Especially in Ahaus and Gorleben(GNS, Germany)”, OECD/NEA International workshop, 383-395, May 21-23, 2013, Munich.
- [9] H. Völzke, “Dry Spent Fuel Storage in Dual Purpose Casks(Aging Management Issues)”, INMM Spent Fuel Management Seminar XXVIII, 13-14, January 14-16, 2013, Arlington, VA.
- [10] S. Kuba, “Operational Experience of Castor 440/84 Casks in Dukovany NPP”, CEZ plc Nuclear Power Division, Prague, Czech Republic, PATRAM, Berlin, Germany (2004).