

<기술논문>

사용후핵연료 운반용기 및 건식저장 기술 동향

신중철*·양종대*·성운학*·류승우*·박영우†

Technology Trends in Spent Nuclear Fuel Cask and Dry Storage

Jung Cheol Shin*, Jong Dae Yang*, Un Hak Sung*, Sung Woo Ryu* and Yeong Woo Park†

(Received 18 March 2020, Revised 13 April 2020, Accepted 7 May 2020)

ABSTRACT

As the management plan for domestic spent nuclear fuel is delayed, the storage of the operating nuclear power plant is approaching saturation, and the Kori 1 Unit that has reached its end of operation life is preparing for the dismantling plan. The first stage of dismantling is the transfer of spent nuclear fuel stored in storage at plants. The spent fuel management process leads to temporary storage, interim storage, reprocessing and permanent disposal. In this paper, the technical issues to be considered when transporting spent fuel in this process are summarized. The spent fuels are treated as high-level radioactive waste and strictly managed according to international regulations. A series of integrity tests are performed to demonstrate that spent fuel can be safely stored for decades in a dry environment before being transferred to an intermediate storage facility. The safety of spent fuel transport container must be demonstrated under normal transport conditions and virtual accident conditions. IAEA international standards are commonly applied to the design of transport containers, licensing regulations and transport regulations worldwide. In addition, each country operates a physical protection system to reduce and respond to the threat of radioactive terrorism.

Key Words : Spent Nuclear Fuel (사용후핵연료), Spent Fuel Pool Storage(사용후핵연료 수중 저장조), Interim Storage(중간저장), Dry Storage (건식저장), Transportation Cask (운반용기), Physical Protection (물리적방호)

1. 서 론

사용후핵연료란 원자력발전소에 장전되어 핵분열 반응으로 일정기간 에너지를 발생시킨 후 원자로 외부로 방출된 연료를 말한다. 원자로에서 인출된 사용후핵연료에는 핵분열성 물질이 남아 있어 재활용이 가능할 뿐 아니라, 오랜 기간동안 높은 준위의 방사성과 열을 방출하기 때문에 발전소내 사용후핵연료 수중 저장조(Spent Fuel Pool Storage)에서 수십 년 동안 냉각, 보관된다. 발전소를 건설할 때 소내 저장조의 용량은 일반적으로 10~20년을 기

준으로 설계되므로^(1,2), 40~60년이 되는 원자력발전소 운전기간 동안에 발생하는 사용후핵연료를 저장하기 위해서는 조밀랙 교체를 통한 기존의 저장조 확장이나, 저장 여유가 있는 인접 발전소의 저장조로 이동, 보관시킨다.

사용후핵연료의 최종관리방안은 재처리하여 재활용하는 방안과 영구 처분하는 방법이 있다. 재처리는 자원 활용 및 고준위폐기물 저감 측면에서 바람직한 대안이나, 핵확산에 대한 우려와 고속증식로의 실용화 지연 및 우라늄 가격의 안정화에 따른 경제성 문제 등으로 인해 당분간 재처리 수요는 그다지 많지 않을 것으로 전망된다⁽¹⁾.

사용후핵연료의 영구처분은 지하 500~1000m 정도의 깊이에 심층 처분하는 것이 기본이나, 최근에는 심해저처분에 대한 타당성 연구도 진행되고 있

† 책임저자, 충남대학교 공과대학 메카트로닉스공학과
E-mail: ywpark@cnu.ac.kr

TEL: (042)821-6874 FAX: (042)823-4919

* ㈜에네스지

다. 어떤 관리방법을 채택할 것인가는 그 나라의 에너지 정책, 경제성, 환경문제, 국민의 수용태세 등 자국의 제반사항 뿐만 아니라 핵확산 문제와 관련된 정치 외교적 요소 등 국제적 상황까지 고려하여 의사결정을 해야 하는 등 매우 복잡한 측면을 가지고 있다. 현재는 일부 국가만이 사용후핵연료 관리 정책이 결정되었을 뿐, 우리나라는 제3의 방안인 관망정책(Wait & See Policy)을 채택하고 있다⁽²⁾.

사용후핵연료의 최종관리방안이 지연됨에 따라, 가동 원전의 저장조는 포화상태로 접근하고 여기에 수명을 다한 원전은 해체계획을 준비 중인데 사용후핵연료 처분이 제일 큰 문제로 대두되고 있다. 발전소내 저장조에서 임시 보관중인 연료를 재처리나 영구처분하기 전에 중간단계로 어느 한곳에 모아 저장하는 방안을 대부분 국가에서 채택하고 있는데 이를 중간저장이라고 한다.

우리나라의 경우도 영구처분 전에 사용후핵연료를 50년 이상 중간저장 하는 것이 기본정책이다. 사용후핵연료 중간저장기술은 습식저장기술과 건식저장기술로 구분되며, '80년대 중반까지는 실증경험이 풍부한 습식저장이 주로 채택되었으나, '90년대에 들어서면서 용량확장과 장기관리 측면에서 유리한 건식저장방식을 채택하기 시작하여 독일, 헝가리, 체코, 미국, 영국 등 현재 많은 나라에서 건식저장시설을 운영하고 있다⁽³⁾.

이상과 같이 사용후핵연료 관리프로세스는 Fig. 1과 같이 발전소내 저장조에서 임시저장, 중간저장, 재처리 또는 영구처분으로 이어지는데⁽²⁾, 본 논문에서는 이러한 과정에서 필연적으로 발생하는 사용후핵연료 운반시 고려해야 되는 기술사항들 즉, 운반용기의 요건, 사용후핵연료의 취급특성, 운반규정 및 물리적방호 등에 관하여 정리하였다.



Fig. 1 Nuclear Spent Fuel Management Process

2. 사용후핵연료 특성

2.1 사용후핵연료의 방사능

경수로 핵연료는 원자력발전소에 약 5년간 사용되며, 사용전과 사용 후의 외형상 차이는 거의 발생하지 않지만, 중성자 조사로 인한 핵연료 구성품의 취성화로 구조적 건전성은 취약하게 된다. 신핵연료는 방출되는 열이 없고, 방사선량이 매우 낮아 사람이 접근할 수 있으나, 사용후핵연료는 물질의 구성이 변화되어 강한 방사선과 높은 열을 방출한다. 원자로에서 인출된 사용후핵연료의 U^{235} 농축우라늄에 의한 붕괴열의 양은 시간이 경과함에 따라 감소되면서, 방사능이 천연우라늄 수준으로 떨어지는데까지 약30만년이 걸리며, 재처리를 위해 플루토늄과 마이너액티나이드(Minor actinide)를 제거할 경우는 약 300년이 소요된다^(1,2).

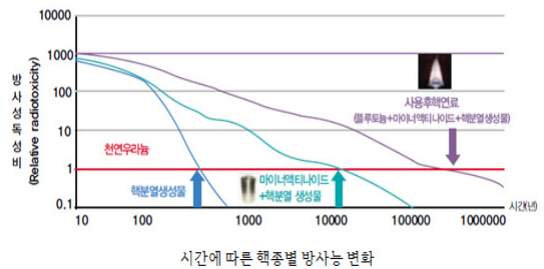


Fig. 2 Radioactivity Nuclide Changes over Time

2.2 사용후핵연료 건전성

고온 고압의 원자로에서 인출된 사용후핵연료는 수십 년 동안 습식저장 후에 중간저장 시설로 이동되어, 또 수십 년 동안 건식저장된다. 이렇게 오랜 기간 동안에도 사용후핵연료가 손상없이 보관될수 있다는 보증을 위하여, 중간저장시설로 이동전에 사용후핵연료의 건전성에 대한 검사가 요구된다. 사용후핵연료 건전성 검사에 가장 핵심이 되는 특성은 후프응력(Hoop Stress)과 열화에 따른 피복관의 응력부식균열(Stress Corrosion Crack, SCC), 상단 고정체의 체결력 및 연료봉의 누설확인 등이다^(4,5).

2.2.1 피복관 열화손상

핵연료봉은 원자로에서 연소 중 핵분열 생성물의 방출로 인해 내부압력이 생성되어 건식저장동안 핵연료 피복관에 후프응력을 가하게되고, 이 응력이

가해지는 동안 피복관이 열화되면서 크리프파괴 (Creep Rupture)에 의한 손상으로 나타날 수 있다. 크리프파괴의 유발 인자로서는 피복관의 부식 정도와 수소방향성 (Hydride Reorientation)검사가 요구된다⁽⁶⁾. 산화는 핵연료 피복관의 열전도도를 나쁘게 하는 반면, 수산화는 취화를 일으킨다. 핵연료 연소 주기 말에 산화막 두께는 100 μm , 및 수소함량 제한치는 500~600 ppm으로 제한된다. 산화막의 두께가 100 μm 정도가 되면 산화막이 깨질 가능성이 급격히 증가하고 수화물의 성장에 영향을 주어 산화를 더욱 촉진하게 된다^(6,7).

2.2.2 상단고정체 체결력 약화

지지격자에 의해 고정된 핵연료봉은 상단고정체와 슬리브 또는 스크류로 체결되어 있는데, 원자로 내 고온 고압 고방사선환경에서 입계응력부식균열 (Intergranular Stress Corrosion Cracking, IGSCC)로 인해 취약해 질 수 있다. IGSCC현상이 심하면 사용후핵연료를 중간저장하기 위해 크레인으로 집합체를 들어 올릴 때 상단고정체가 연료 집합체에서 분리되어 사용후핵연료가 파손되는 사고를 유발시킬 수 있다. 수중에 있는 사용후핵연료 상단고정체 체결부위의 IGSCC현상을 검사하는 것은 어려운 일이므로 Fig. 3과 같이 집합체의 안내판이나 계측관의 위치에 체결 봉(Tie Rod)을 설치하는 방안이 미국 원전에서 활용되고 있다⁽⁸⁾.

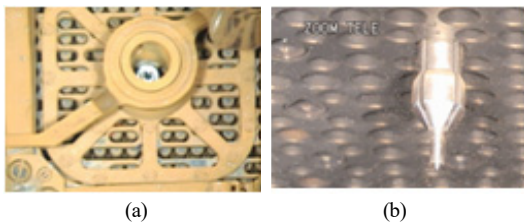


Fig. 3 Fuel Assembly Tie Rod (a) Top Nozzle, (b) Bottom Nozzle

2.3 사용후핵연료집합체 손상검사

사용후핵연료집합체에서 핵분열성물질이 누출되면 건식저장용기에 담지 못하거나, 특별히 설계된 용기에 보관하게 되어 있다. 따라서 건식저장 용기로 이동전에 사용후핵연료집합체는 전량 핵분열성 가스 누출 유무검사를 하는데 여기에 사용되는 장비가 진공흡입장치(Vacuum Sipping Unit)이다. 이 장비는

하나 이상의 누출 연료봉이 포함 된 사용후핵연료집합체를 식별한다. 검사방법은 검사대상 집합체를 챔버에 넣고, 챔버를 밀봉한 후에, 챔버 상부에 공간이 발생하도록 물을 일부 제거한다. 챔버 내에 공기 공간이 생성되면, 진공 펌프를 사용하여 공간 내 공기를 빼기시킴이다. 결과적으로 챔버 내는 압력 감소가 되고, 파손된 연료봉이 있다면 연료봉 내부의 핵분열 가스가 방출되어 공간으로 배출하도록 유도한 후, 이를 포집하여 정량적으로 분석한다. Fig.4는 PWR용과 CANDU용 진공흡입장치이다^(9,10,11).

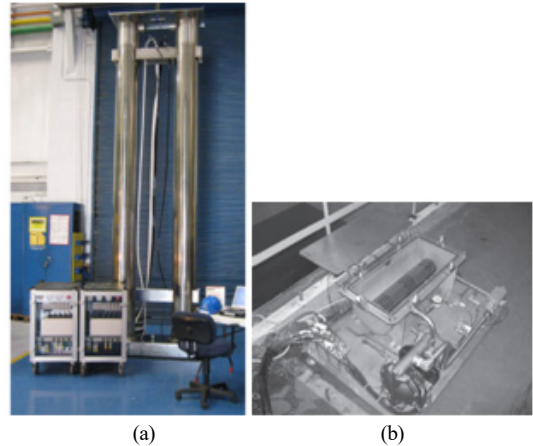


Fig. 4 Vacuum Sipping Units for (a) PWR Fuel (b) CANDU Fuel

3. 사용후핵연료 운반용기 및 건식저장

사용후핵연료 운반용기는 원자로 격납용기와 동일한 개념으로 정상운반조건에서 살수, 취급높이 낮아, 적층 및 관통 등의 시험요건을 만족해야 하며, 또한 기상사고 조건에서도 법적인도인 방사능 누설과 방사선량을 만족한다는 안전성을 입증하여야 한다⁽¹²⁾.

원자력 선진국들은 사용후핵연료 운반용기의 대형화를 추진하여 최근 경수로 사용후핵연료 32 다발 용량까지 개발하여 상용화하고 있으며, 운반과 저장 용기를 겸용화하고 있다. 국내의 사용후핵연료 운반용기는 Table 1과 같이 조사후시험용 사용후핵연료를 운반하기 위해 1985년부터 개발하기 시작하였다. 원자력연구원에서는 PWR 사용후핵연료 1다발 및 4다발을 운반할 수 있는 KSC-1 및 KSC-4 운반용기를 개발하였고, 한수원(주)에서는 12다발 및 18다발의 사용후핵연료를 운반할 수 있는 KN-12 및 KN-18 운

반용기를 개발하여 소내 운반에 사용하고 있다. 한국 원자력환경공단에서는 건식 중간저장에 대비하여 21 다발의 사용후핵연료를 운반할 수 있는 KORAD-21 운반저장겸용용기를 개발하여 인허가 신청을 완료한 상태이다. 또한, CANDU 사용후핵연료 120다발을 운반할 수 있는 HI-STAR63 운반용기를 한수원(주)에서 개발하여 월성원전 소내 운반에 활용하고 있다. Fig. 5는 KN-12와 KORAD-21 캐스크이다^(1,2).

Table 1 Status of Spent Fuel Container Development in Korea

모델명	기관명	운반 용량 (다발)	최대 연소도 (MWd/MTU)	최대 농축도 (wt%)	날각 기간 (년)	최대 용기열 (kW)	중량 (t)	용기 방식	비고
KSC-1	한원연 (KAER)	1 PWR	45,000	3.5	1	7.2	28.0	운반 전용	원전-연 구용 수송
KSC-4	한원연 (KAER)	4 PWR	38,000	3.2	3	7.0	37.0	운반 전용	고리 소내 운반
KN-12	한수원 (KHNP)	12 PWR	50,000	5.0	7	12.6	75.0	운반 전용	WH 연료 소내 운반
KN-18	한수원 (KHNP)	14 PWR	55,000/7년 60,000/9년	5.0	7/9	19.1	104.4	운반 전용	CE연료 소내 운반
KORAD-21	공단 (KORAD)	21 PWR	45,000	4.5	10	16.7	120.5	운반 전용	WH/CE 연료 소내외 운반
HI-STAR63	한수원 (KHNP)	63 CANDU	7,800	0.7111	6	0.0063 (다발당)	21.5	운반 전용	CANDU 소내 운반

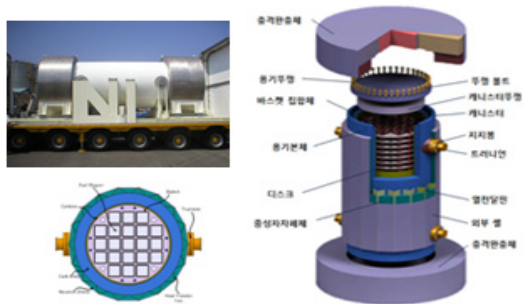


Fig. 5 KN-12 and KORAD-21 Cask

사용후핵연료 운반용기의 일반적인 형상은 원통형이며, 반경방향으로 사용후핵연료를 적재하는 바스켓, 내부 쉘, 감마 차폐층, 중간 쉘, 증성자 차폐층 및 외부 쉘이 있고, 상부에 뚜껑과 상하부에 충격완충체로 구성되어 있다. 2017년 두산중공업이 개발한 DOOSAN -DSS21은 캐니스터(TSC21), 운반용기(TC21), 이송용기(TFR21), 금속저장용기(MSO21)로 구성되어 사용후핵연료를 운반 및 저장할 수 있도록 구현했다. 사용후핵연료가 장전된 캐니스터는 운반용기를 이용해 핵연료 건물로부터 원전 내 건식저장시설로 이동한다. 건식저장시설에서는 캐니스터를 운반용기에서 꺼내 이송용기를 사용하여 저장용기로 옮겨 담는다. 이송용기는 외부 충격으로부터

사용후핵연료를 보호하고 작업자의 피폭을 최소화 캐니스터를 안전하게 운반용기로부터 저장용기로 이송하기 위해 고안된 장치이다. Fig. 6은 DOOSAN -DSS21 운반용기 시스템이다.

4. 사용후핵연료 운반규정 및 물리적방호

4.1 사용후핵연료 운반규정

방사성물질의 안전운송은 전 세계적으로 공통으로 적용하고 있는 IAEA Safety Standard인 Regulations for the Safe Transportation of Radioactive Materials, TS-R-1기준에 따라 운영된다. 여기에서는 운반용기의 설계, 제작, 유지, 이송, 운반수단 등 방사성물질의 운반을 위한 운전 및 조건 등이 제공된다. 미국의 운반규정 10 CFR Part 71, Packing and Transportation of Radioactive Material도 IAEA 규정과 유사하며, US NRC NUREC -153는 운반규정에서 제시하는 사고조건 이외에 도로나 철도에서 발생한 대형사고 결과를 분석하고, 이를 데이터베이스화하여 사용후핵연료 운반용기의 안전성 평가 사례를 소개한다. 국내 방사성물질운반은 Fig. 7과 같이 운반물의 종류에 기반하여 국내 관련법에 따라 운반용기 설계, 제작 및 운영 규정을 준수하여야 한다⁽¹³⁻¹⁵⁾.

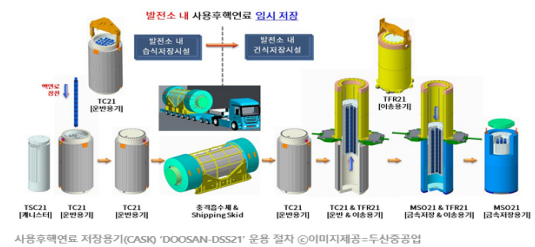


Fig. 6 Spent Fuel Cask System, DOOSAN-DSS21

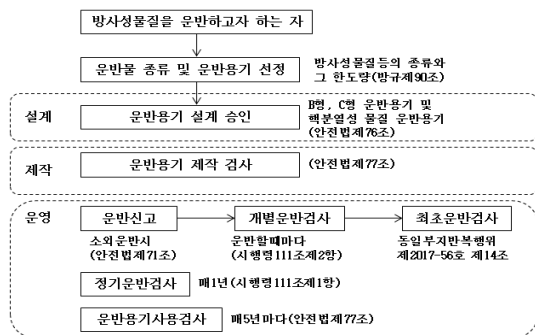


Fig. 7 Regulations for the Transportation of Spent Nuclear Fuel

국내 원자력안전법에서는 방사성물질 운반의 안전성을 확보하기 위해 준수하여야 할 요건을 규정하고, 운반물의 안전수준이 방사성내용물의 잠재적 위험성과 상응하도록 기본을 두고 운반물 형태를 다음과 같이 6가지 종류로 구분한다.

1) L형 운반물(Excepted Package)은 포장되는 방사성 물질의 양이 충분히 작아서 최소한의 요건이 적용되는 운반물을 말한다. 다른 운반물의 설계 및 취급에 관한 요건 중에서 최소한의 요건만이 적용된다. 외부표면 방사선량률은 시간당 5마이크로시버트를 초과하지 않아야 한다.

2) IP형 운반물(Industrial Package)은 저준위비방사성물질(LSA; Low Specific Activity Material) 또는 표면오염물체(SCO; Surface Contaminated Object)를 운반하는데 사용된다. IP형 운반물은 L형 운반물의 설계요건에 덧붙여서 작은 재해를 포함하는 정상운반요건을 만족시켜야만 한다. IP형 운반물은 방사능 제한치를 바탕으로 방사성내용물의 위험과 관련하여 3등급이 나누어진다.

- IP-1형: L형 운반물에 부여되는 요건이외에 온도와 압력요구조건을 만족시켜야 한다.
- IP-2형: 자유낙하와 적층시험조건을 만족하여야 한다.
- IP-3형: 부가적으로 물분사시험과 관통시험조건 요건을 만족시켜야 한다.

3) A형 운반물(Type A Package)은 방사성물질이 비교적 작은 양을 수송하기 위한 운반용기를 포함하는 운반물이다. 이 운반물은 정상운송조건하에서 자유낙하시험(9m), 관통시험(1.7m), 물 분사시험, 적층시험을 거쳐 안전성이 유지되도록 설계된다. 운반하는 방사성물질이 액체상태인 경우에는 액체상태의 방사성내용물 체적의 2배를 흡수할 수 있는 충분한 흡수재를 갖추어야되며, 1차 내부격납에서 누설이 발생하면 2차 외부격납 안에서 액체 내용물을 확실히 유지할 수 있어야 한다.

4) B형 운반물(Type B Package)은 더 많은 양의 방사성물질을 운반하기 위한 B형 운반용기로 구성된 운반물이다. 운반물 기준을 충족하여 한 국가에서 승인한 운반물이 다른 국가에서도 사용될 수 있는 B(U)형과, 부분적으로 미흡함이 있어 운반물이 통과하게 되는 모든 국가의 승인이 필요한 B(M)형으로 구분된다. 이 운반물은 가혹한 사고의 영향을 견딜 수 있어야 한다. 이러한 능력을 입증하기 위한, 충격, 관통,

화재, 침수 같은 가상사고조건하에서의 시험이 요구된다. 부가적으로 각각의 운반물의 설계는 국가 관계당국에 의하여 승인을 받아야 한다. B형 운반물은 산업에서의 방사선촬영, 사용후핵연료, 핵폐기물 등 방사능이 높은 방사성물질을 운반하는데 사용된다. B형 운반물은 A형 운반물의 요건 및 B형 운반물에 적용되는 추가적인 요건을 만족하여야 한다. 이 운반물의 운반용기는 각 국가의 관계당국으로부터 설계승인을 받아야 하는데, 통과하는 국가의 일광조건과 섭씨 40도부터 섭씨 38도까지의 주변온도의 환경에서 건전성 유지가 보장되어야 한다.

5) C형 운반물(Type C Package)은 매우 많은 양의 방사성물질을 항공수송하기 위한 좀 더 강화된 성능요건을 적용한 운반물이다. B형 운반물이 항공운반의 방사성물질등과 그 방사능 한도량을 초과할 경우, C형 운반물은 물질 그 자체가 분산성에 대하여 충분한 방어요건을 제공하지 않을 때 운반물에 추가적으로 필요한 사항을 부여함으로써 확산되는 오염의 위험을 최소화하기 위하여 분류되었다. 주요 시험요건은 324 km/h(90 m/s) 속도의 낙하시험과 60분간의 화재시험이다. 이 운반물의 운반용기는 각 국가의 관계당국으로부터 설계승인을 받아야 한다.

6) 핵분열성물질 운반물(Package Containing Fissile Material)은 방사성내용물이 핵분열성물질인 것을 말한다. 핵분열성물질을 포함한 운반물은 방사성물질 등의 운반기준과 더불어 핵임계방지를 위한 기준, 평가 및 관리가 추가되어야 한다. 특히, 육분화우라늄은 원자력발전소의 핵연료생산의 공정에서 사용되며 보통압력 56 °C에서 증발한다. 방사선에 대한 위험성은 비교적 작으나 독성이 크고 부식성이 있으므로 운반 시에 특별한 고려가 필요하다. 운반용기는 일정 수준의 압력에 견디는 특수 압력용기로 구성되며 최대 내부압력과 특정 낙하시험 및 열시험에 견딜 수 있도록 제작된다. 이 운반물의 운반용기는 각 국가의 관계당국으로부터 설계승인을 받아야 한다.

Table 2 Test Requirements for Transportation Container under Normal Operating Conditions

구분	L형	IP-1	IP-2	IP-3	A형	B형	C형
낙하시험			●	●	●	●	●
적층시험			●	●	●	●	●
살수시험				●	●	●	●
관통시험				●	●	●	●

4.2 물리적 방호

원자력이용이 다양한 분야로 확대됨에 따라 핵물질 및 원자력시설의 사고와 더불어 방사성물질을 이용한 방사능테러 등의 위협 요인이 날로 증가하고 있다. 2001년 9월 11일 미국의 세계무역센터(World Trade Center) 테러사태 이후, 방사성물질을 이용한 테러가 현실적으로 가능하다는 인식이 확산되면서 국가 안보차원에서 주요 현안으로 대두되었으며, 각 국가는 방사능테러 위협의 감소와 이에 대응을 위한 방호체계의 수립에 많은 노력을 기울이고 있다. 방사선 사고나 방사능테러는 방사선장해를 일으킬 뿐만 아니라, 방사능에 대한 공포심으로 인해 심각한 사회적 혼란을 유발할 수 있으므로 이를 사전에 예방하고 이에 대응할 수 있는 방호체계 구축을 갖추어야 한다.

물리적 방호(Physical Protection)란 핵물질 및 원자력시설에 대한 국내외 위협을 사전에 방지하고, 위협이 발생한 경우 불법행위를 저지하는 한편, 사고가 발생한 경우에는 이를 최소화하는 일체의 조치를 말한다. 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)에서는 테러의 유형에서 원자력시설에 대한 공격이나 방사성물질을 이용한 방사능폭탄(Dirty Bomb)을 가정하고, ‘핵물질 및 원자력시설의 물리적 방호’에 관한 안전지침과 ‘핵물질의 물리적 방호에 관한 국제협약’을 개정하였다. 우리나라의 방호체계는 2003년 5월 제정된 ‘원자력시설 등의 방호 및 방사능 방재대책법’에 따라 구축되어 이행되고 있으며, 이 법은 국제원자력기구의 안전지침서인 ‘핵물질 및 원자력시설의 물리적 방호’와 ‘핵물질의 물리적 방호에 관한 국제협약’의 내용을 반영하여 제정되었다. 물리적방호의 국제기준이 되는 IAEA INFCIR/225에 따르면 핵물질은 Table 2와 같이 형태별로 3종으로 분류되며, 물리적 방호 수칙은 다음과 같다^(16,17).

제1종 : 1종에 속하는 물질은 불법적 사용을 방지하기 위해 고도의 신뢰성 있는 체제로 보호해야 한다. 고도로 보호된 구역에 저장하고 사용한다. 즉, 2종과 같은 구역에 저장하되 신분이 확인된 자에 한하여 접근을 허락하고, 경비당국과 통신연락을 취할 수 있는 경비원이 감시해야 한다. 핵물질의 무단 반출, 접근, 기습을 예방 탐지하기 위한 목적으로 특별한 조치가 취해져야 한다. 수송은 2종, 3종과 같

은 예방조치는 물론 호송에 의한 감시와 경비당국과의 통신 연락 하에 이루어져야 한다.

제2종 : 접근이 제한된 보호구역내에 저장하거나 사용할 경우, 즉, 경비나 전자장비의 상시 감시와 적절한 통제하의 제한된 출입구를 가진 방벽으로 쌓인 구역이나, 이와 동일한 보호구역 내에 있는 것으로 한다. 수송은 발송자, 인수자, 운반자간의 사전 약정 및 수입국과 수출국 각각의 규제와 사법 권한에 있는 실체간의 사전 합의를 포함하는 예비조치를 마련해야 하고, 국제적인 수송 시에는 수송책임의 인계에 관한 절차, 장소, 시간을 명시해야 한다.

제3종 : 접근이 제한된 구역에 저장 및 사용되며, 수송은 발송자, 인수자, 운반자 사이의 약정과 수입국과 수출국 각각의 규정과 사법권의 대상이 되는 실체간의 사전합의를 포함하는 예비조치를 마련해야 하고, 국제적인 수송 시에는 수송책임의 인계와 관련하여 절차, 장소, 시간을 명시해야 한다.

Table 3 Categorization of Nuclear Material

물질	형태	제 1 종	제 2 종	제 3 종
1. 플루토늄	미 조사	2Kg 이상	500g을 초과하고 2Kg 미만	500g 이하
2. 우라늄-235	미 조사 우라늄235의 농축도가 20%이상의 우라늄 우라늄235의 농축도가 10%이상 20%미만인 우라늄 우라늄235의 농축도가 천연우라늄을 초과하고 10%미만인 우라늄	5Kg 이상	1Kg을 초과하고 5Kg 미만 10Kg 이상	1Kg이하 10Kg미만 10Kg 이상
3. 우라늄-233	미조사	2Kg 이상	500Kg을 초과하는 2Kg 미만	500g이하
4. 조사후연료			감손 또는 천연우라늄, 토륨 또는 저농축연료 (핵분열성분 10%미만)	

5. 결 론

국내 사용후핵연료의 관리방안이 지연됨에 따라, 가동 원전의 저장조는 포화상태로 접근하고 있고, 여기에 고리1호기와 같이 수명을 다한 원전은 해체 계획을 준비 중이다. 원전해체의 첫 단계는 사용후핵연료의 이동이다. 사용후핵연료 관리프로세스는 임시저장, 중간저장 그리고 재처리 또는 영구처분으로 이어진다. 본 논문에서는 이 과정에서 사용후핵연료 운반시 고려해야 되는 기술사항들에 대하여 정리하였다.

원자로에서 인출된 사용후핵연료는 강한 방사선과 높은 열을 방출하므로 고준위방사성폐기물로 취

급되며 국제 규정에 따라 엄격히 관리된다. 사용후 핵연료를 중간저장시설로 이동하기 전에 건식환경에서 수십 년 동안 안전하게 보관될 수 있다는 것을 입증하기 위해 일련의 건전성 검사가 수행된다. 후프응력과 열화에 따른 피복관의 응력부식균열, 상단고정체의 체결력 및 연료봉의 누설확인 등이 주요 검사항목이다.

사용후핵연료 운반용기는 원자로 격납 용기와 동일한 개념으로 설계되며, 정상운반조건 및 가상사고 조건에서도 안전성을 입증하여야 한다. 운반용기 설계, 인허가 규정과 운반규정은 전 세계적으로 IAEA 국제 기준을 공통으로 적용하고 있다. 이와 함께 각 국가는 방사능테러 위협의 감소와 이의 대응을 위한 물리적 방호체계를 운영하고 있다.

참고문헌

- (1) Nuclear Policy Center of Seoul National University, <https://atomic.snu.ac.kr/index.php>
- (2) Waste Comprehensive Information Database, WACID, <http://wacid.kins.re.kr>
- (3) Korea Radioactive Waste Agency, www.korad.or.kr
- (4) United States Nuclear Waste Technical Review Board, 2010, "Evaluation of the Technical Basis for Extended Dry Storage and Transportation of Used Nuclear Fuel,"
- (5) NSSC, 2018, "Final Report on Development of Safety Verification Technology for Dry Storage of Spent Nuclear Fuel," Korea Nuclear Safety and Security Commission, *R&D / 1505032-0517-SB110*
- (6) KAERI, 2010, "Development of Integrity Evaluation Technology for the Long-term Spent Fuel Dry Storage System," Korea Atomic Energy Research Institute, *KAERI/RR-3157-2009*
- (7) KAERI, 2005, "Study on the Standard Establishment for the Integrity Assessment of Nuclear Fuel Cladding," Korea Atomic Energy Research Institute, *KAERI/CM-890/2005*
- (8) Nuclear Services Leaflet, 2009, "Instrument Tube Tie Rod," Westinghouse Electric Company, *NS-FS-0097*
- (9) Nuclear Services Leaflet, 2009, "Vacuum Canister Sipping Services," Westinghouse Electric Company, *NS-FS-0052*
- (10) Lee, J. H., Kim, Y.C., and Song T. H., 2012, "Development of CANDU Spent Fuel Bundle Inspection System and Technology," *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*, Vol.11, No.1, pp.31-39. doi: <https://doi.org/10.7733/jkrws.2013.11.1.31>
- (11) Song, T.Y., 2014, "A Study on the Work Management Method Considering Risks in Nuclear Power Plants," *Trans. of the KPVP*, Vol. 10, No. 1, pp. 37-43
- (12) Cho, S.W., Pyun, Y.S., Mohr, N., Tatman, J., Broussard, J., Collim, J., Yi, W.G., Oh, E.J., Jang, D.H., Koo, G.H., Hwang, S.S., Choi, S.W. and Hong, H.U., 2019, "Development of New Code Case "Mitigation of PWSCC and CISCC in ASME Code Section III Components by the Advanced Surface Stress Improvement Technology," *Trans. of the KPVP*, Vol. 15, No. 1, pp. 28-32. doi: <http://dx.doi.org/10.20466/KPVP.2019.15.1.028>
- (13) IAEA, 2009, "Safety Standard Regulations for the Safe Transportation of Radioactive Materials," International Atomic Energy Agency, Vienna, *TS-R-1*
- (14) U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2004, "Packing and Transportation of Radioactive Material," *10 CFR Part 71*
- (15) U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2010, "Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at a General License Facility," *NUREC-1536*
- (16) IAEA, 2011, "Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities," International Atomic Energy Agency, Vienna, *INFCIRC/225/Revision 5*
- (17) KINAC, 2015, "Physical Protection Training Material," Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control