

## 건식저장고 및 Transfer Campaign에 대한 국가 계량관리 검사 접근방법 (Safeguards Approach for the Verification of both Dry Canister and Transfer Campaign)

이재성, 차홍렬, 박완수, 윤여창 (한국원자력연구소)

### 요 약

안전조치 측면에서 관심의 대상이 되어온 중수형 원전의 건식저장고 및 사용후핵연료 이송 검증을 위한 안전조치 접근방법이 국가 계량관리 검사의 이행을 위하여 개발되었다. 이는 IAEA 사찰장비를 활용하지 못하는 우리나라의 현실을 반영하여 자체 개발된 비파괴검증장비가 이용되며, IAEA 안전조치 기준을 만족시킬 것으로 기대된다. 건식저장고에 대한 국가 계량관리 검사기준은 자체 개발된 비파괴검증장비와 봉인에 의존하는 기준이 제안되었으며, 검증활동은 시설운영자의 부담경감을 위하여 IAEA 사찰이 실시되는 기간동안 동시에 실시되도록 되어 있다. Transfer campaign 검증을 위하여 3명의 국가 계량관리 검사관이 검증활동에 참여하게 되며, 이를 통하여 이송작업의 연속성 유지 및 시설운영자의 부담경감 등이 달성됨과 함께 사찰량의 감소가 기대된다. 본 논문은 국가 계량관리 검사의 시작과 함께 현실적인 어려움을 극복하면서, IAEA의 안전조치 기준을 만족하는 안전조치 접근방법을 제시하고 있으며, 안전조치 목적을 보다 적합하게 달성할 것으로 기대된다.

### 1. 서 론

평화적 목적으로 활용되는 핵물질이 핵무기 또는 기타 핵폭발장치로 전용되는 것을 방지할 목적으로 수행되는 체계인 안전조치는 이러한 목적을 달성하기 위한 수단으로써 사찰이라는 행위를 수행하고 있다. 국가 계량관리 검사는 여러 가지 형태로 정의될 수 있으나, 기술적으로 접근하여 볼 때 SSAC (State's System of Accounting for and Control of nuclear material)가 SSAC의 인력, 장비 및 기술을 바탕으로 핵물질의 계량관리 검사를 수행하여 독립적으로 결과를 도출하는 것으로 정의될 수 있다. 이러한 국가 계량관리 검사의 정의는 국제사찰인 IAEA 사찰과는 전혀 다른 개념과 기준 그리고 절차를 사용하여 독자적으로 사찰을 수행하는 것으로 해석되어서는 아니된다.

우리나라가 국가 계량관리 검사를 수행하는 전제에는 우리나라의 모든 원자력 활동에 대한 투명성을 확보하고 국제사회로 부터의 신뢰성을 제고한다는 목표가 포함되어 있다고 할 수 있다. 따라서, 국가 계량관리 검사의 기준과 절차는 적어도 IAEA 안전조치 기준과 사찰절차를 만족시켜야 하는 대 전제가 붙어 있다.

본 논문에서는 275 SQ 이상의 사용후핵연료가 저장되어 있는 건식저장고 및 습식저

장고인 사용후핵연료 저장조에서 건식저장고로의 사용후핵연료 이송작업시 적용될 국가 계량관리 검사 접근방법에 대하여 기술하고자 한다.

## 2. 건식저장고에 대한 안전조치 접근방법

### 가. 건식저장고 안전조치 개요

월성 1호기에는 현재 총 60기의 건식저장고가 있으며, 모든 건식저장고에는 사용후핵물질로 가득차 있다. 이에 따라 80기의 건식저장고를 신축하기 위한 건설작업이 시작되어 예정대로 진전되고 있다. 1기의 건식저장고에는 9개의 basket이 적재되어 있고, 1개의 basket에는 60다발의 사용후핵연료 다발이 들어 있다. 60기의 건식저장고에 담겨있는 핵물질을 핵무기로의 전용가능 핵물질인 플루토늄을 기준으로 산정하여 보면 2.2 톤을 상회하고 있다. 이러한 핵물질 양은 60기의 건식저장고를 상정하여 볼 때 275.4 SQ에 해당된다. SQ란 용어는 핵폭발장치 제조관련 공정이 존재할 경우, 한 기의 핵폭발장치를 제조할 수 있음을 배제할 수 없는 핵물질의 근사량으로 정의되며, 안전조치를 적용하기 위해 만든 개념이다. SQ는 한 기의 핵폭발장치 제조에 필요한 특수핵분열성 물질의 근사량으로 정의되는 threshold amount와 혼동되기도 하나 엄격하게 구분하여 사용되어야 한다. 즉, 현실적으로 천연우라늄을 전용하여 핵무기를 제조한다는 것을 상정하기 곤란하며, 핵폭발장치 제조관련 공정이 존재한다는 전제가 우리나라에는 적용되기 곤란함에도 이 개념이 적용되는 것은 안전조치의 특수성을 감안하고 이해하여야 할 것이다. SQ란 개념과 함께 사용되는 중요한 개념으로 적시탐지라는 개념이 있는 바, 적시탐지(timely detection)란 핵폭발장치의 제조에 소요되는 시간을 핵물질의 형태와 구분에 따라 규정한 IAEA 사찰목표달성 평가기준중의 하나이다. SQ와 적시탐지 개념을 도입하여 각 핵물질 형태별로 적용하여 보면 표 1과 같다.

표 1. SQ와 적시탐지

핵물질 구분	핵물질 형태	SQ	적시탐지
DIRECT USE MATERIAL	Pu (분리된 형태)	8 kg Pu	1 개월
	HEU = 20 % 이상	25 kg U-235	1 개월(UNIRR) 3 개월(IRR)
	Pu in Spent Fuel	8 kg Pu	3 개월
	U-233	8 kg U-233	1 개월
INDIRECT USE MATERIAL	LEU = 20 % 미만	75 kg U-235	12 개월
	NU	10 ton NU	12 개월
	DU	20 ton DU	12 개월
	Th	20 ton Th	12 개월

탐지확률이란 개념 역시 안전조치 목적상 만들어진 개념으로서 검증대상 핵물질중 결손되었다는 사실을 탐지할 수 있는 정도를 확률로 나타낸 것이다. 탐지확률은 3가지로

구분되는데, 높은 확률은 90% 이상을 적용하며, 중간 탐지확률은 50%-90%, 낮은 탐지 확률은 20%-50%(특수한 경우에는 10%-50%)를 적용한다.

### 나. 계량관리 검사 기준

건식저장고에 대한 계량관리 검사는 정기검사와 물자재고검사시 적용된다. 안전 조치 적용기준은 검사 유형에 따라 안전조치 강도가 상이하며, 검증될 건식저장고는 무작위 추출방식에 의하여 선정되어야 한다.

3개월 간격으로 수행되는 정기검사시에는 낮은 탐지확률을 적용하여 건식저장고 수를 결정하고 검증될 건식저장고의 선정을 위하여 무작위 추출방식을 활용한다. 각 건식저장고에는 국가 계량관리 목적의 봉인이 설치될 것인 바, 정기검사시 선정된 건식저장고에 대하여 봉인의 건전성을 확인하고 봉인을 평가한다. 이와같은 봉인에 대한 평가 활동 대신에 건식저장고 상단부 용접부위 사진촬영 부분을 Mother-picture와 대조하거나 PMCC (PMCA + CdTe detector)를 활용한 fingerprint를 대조할 수 있다. 건식저장고 상단부의 용접부위와 PMCC를 이용한 fingerprint는 독특한 형태를 가지고 있어 핵물질이 전용되었을 경우 이를 확인할 수 있는 수단이 될 수 있다. 대체 검증방법 역시 총 건식저장고의 20%에 해당되는 건식저장고가 대상이 되며, 검증대상 건식저장고는 무작위 추출방식에 따라 결정된다.

연간 1회 수행되는 물자재고검사시에는 낮은 탐지확률로 봉인의 건전성 및 봉인 확인/교체 활동을 수행하고 건식저장고 상단부 용접부위를 Mother-picture와 낮은 탐지 확률로 대조한다. 검증대상 건식저장고는 무작위 추출방식에 따라 결정되며, 용접부위 사진 대조 대신 PMCC를 이용한 낮은 탐지확률로 fingerprint를 구한 후 Mother-fingerprint와 대조하는 활동으로 대체될 수 있다.

건식저장고 구역에 대한 핵물질의 검증시 불일치 또는 이상상황이 발생한 경우 transfer campaign시 PMCC를 활용한 fingerprint 및 촬영한 용접부위 사진을 실제 fingerprint 및 용접부위 모양과 상호 비교하는 활동이 수행된다.

## 3. Transfer Campaign시 안전조치 접근방법

핵물질에 대한 접근이 어려운 구역, 즉 습식저장고인 사용후핵연료 저장조로부터 건식저장고 지역으로 이동하는 transfer campaign시에는 이송전에 수량확인, 일련번호 확인 및 random high의 탐지확률로 비파괴검증(gross and partial defects)을 수행하며, 검증활동은 basket 적재, 건조 및 용접, 건식저장고에서의 검증, 이송작업의 마무리 단계 등으로 크게 구분된다. transfer campaign시 국가 계량관리 검사와 IAEA 사찰은 대부분 같은 절차와 방법에 의하여 수행된다. 그러나 양자간에는 검사결과의 독립성 유지를 위하여 차이점이 있는 바, 이러한 차이를 살펴보면 다음과 같다.

① 국가 계량관리 검사는 3명의 검사관 및 검사원이 검증활동에 참여하며, IAEA 사찰은 1명의 사찰관에 의해 수행된다. 국가검사관은 사용후핵연료 저장구역, 건식저장고 구역 및 이송시 동반한다. 따라서 IAEA 사찰과는 달리 복잡한 봉인절차를 생략할 수 있다. 반면 IAEA 사찰은 1명의 사찰관이 수행하는 관계로 많은 봉인의 설치 및 제거활동이 수행되어야 하며, 사용후핵연료 저장조 구역에 감시장비인 이동용 MIVS를 설치하여 해당지역에 입회하지 못하는 시간동안의 공백을 보완한다.

② 각 건식저장고에 설치되는 봉인은 국가사찰의 경우 metal 봉인 1개이며, IAEA 사찰의 경우에는 metal 봉인 2개와 COBRA 봉인 1개가 설치된다.

③ 사용후핵연료 저장조에서 basket 적재시 무작위로 추출된 사용후핵연료 다발의 일련번호 및 비파괴검증시 국가사찰과 IAEA 사찰은 각기 별도의 다른 장비를 사용하여 검증활동을 수행한다.

④ 검증활동이 정상적으로 수행될 경우 국가사찰관의 인수인계를 위한 중복 일수는 2일이나 IAEA 사찰관의 중복일수는 4일간 이다.

transfer campaign시 검증을 위한 작업공정과 검증활동은 다음과 같이 수행된다.

#### 가. basket 적재

a) tray를 물속에 있는 이송용 작업대로 이동한다. tray를 다시 경사작업대로 이동하여 tray를 수직방향으로 기울여 그 일련번호를 확인하고 기록한다.

b) 수평방향의 핵연료를 수직방향으로 전환하여 들어올릴 수 있도록 준비한다. 시설운영자가 빈 basket을 사용후핵연료 저장조로 가져 왔을 때 일련번호를 확인한 연후에 수중작업대로 이동한다.

c) 한 basket에는 60개의 핵연료 다발이 수직으로 세워져 적재된다. 시설운영자가 basket에 핵연료 다발을 적재하는 동안 무작위로 핵연료 다발을 선택하여, 시설운영자가 제공한 itemized list를 참조하여, 일련번호를 확인하고 비파괴검증(gross defect)을 수행한다. 국가사찰관은 무작위로 선택된 사용후핵연료 다발을 내방사선 카메라를 사용하여 일련번호를 확인하고, IAEA 사찰관은 시설에 설치된 망원경을 통하여 일련번호를 확인한다.

d) basket에 핵연료가 완전히 적재되면 시설운영자는 뚜껑을 덮어 건조 및 용접을 위해 작업지역으로 이동된다. 이때 basket에 60개의 핵연료 다발이 채워졌는지 확인을 하고 기록을 유지한다. 검사관의 입회없이 basket에 뚜껑이 덮여져서는 아니된다. 한 basket에 핵연료가 채워지는 시간은 평균 2시간에서 2시간 30분 정도가 소요되고 있다.

#### 나. 건조 및 용접

a) 핵연료 다발로 채워진 basket은 용접 작업지역으로 이동되는데 이때 검사관은 동일 basket이 용접 작업지역으로 이동되는 것을 눈으로 확인하고 기록을 유지한다. 이송용 flask가 용접용 작업지역으로 이동된다.

b) basket이 이송용 flask 안으로 이동되는 동안 건조작업이 수행되며, 용접위치에 놓여졌을 때 용접 작업지역내에 설치되어 있는 시설 소유의 CCTV를 통하여 basket의 일련번호를 확인한다. 이후 시설운영자는 용접작업을 시작한다.

c) 용접이 종료된 이송용 flask는 준비되어 있는 트럭에 적재되면 건식저장고 지역으로의 이송을 위한 준비가 완료된 상태이다.

d-1) 국가사찰 수행을 위하여 국가사찰관은 최소한 2명의 검사관이 검사에 참여하여 1명은 트럭이 건식저장고로 이송될 때 동행하며, 1명은 용접작업구역, 이송장구 및 이송통로 등을 계속 관찰한다.

d-2) 반면, IAEA 사찰기준은 건식저장고로의 이송준비가 완료된 상태에서 IAEA 사찰관은 VACOSS 봉인을 flask grapple chain에 설치한다. IAEA 사찰관은 또한 용접지역 grapple chain에도 VACOSS 봉인을 설치한다. VACOSS 봉인은 사찰관에 의해서만 제거될 수 있다. 건식저장고에서의 검증작업을 끝내고 사용후핵연료 저장고로

돌아와서 수행되는 검증활동을 기술하면 다음과 같다.

이동용 MIVS가 사용후핵연료 저장조에 설치되는데, 용접작업구역, 이송장구 및 이송통로가 감시구역내에 포함되도록 한다. 이는 IAEA 사찰관 1인에 의해 사용후핵연료 이송작업이 수행되기 때문에 IAEA 사찰관이 건식저장고 지역으로 이송용 트럭을 타고 검증작업을 수행하기 위하여 없는 시간동안 기록이 유지토록 하기 위함이다. 일주일에 한 번 MIVS 테이프는 기술적인 측면과 보장조치 차원에서 검토된다. MIVS의 설치에 따라 IAEA 사찰관이 부재중에도 시설운영자는 사용후핵연료를 basket에 적재하는 작업을 계속하되 사찰관이 없는 시간동안 적재된 basket에 담긴 사용후핵연료 다발중에서 무작위로 2다발을 선택하여 일련번호를 확인하고, HSGM으로 비파괴검증(gross defect)을 수행한다.

#### 다. 건식저장고에서의 검증

a) 시설운영자는 빈 저장고를 선택하여 저장고 뚜껑을 제거하고 영구 plug를 임시 plug으로 교체한다. 국가사찰관은 저장고가 비어 있는 것과 건전성을 확인하고, 저장고에서 계속 채류한다.

b) 시설운영자는 이송용 flask를 건식저장고에 설치되어 있는 크레인을 이용하여 트럭으로 부터 저장고 상단부에 올려 놓는다. 국가 계량관리 검사기준의 경우 항상 검사관 1명이 건식저장고에 채류하므로 별도의 봉인설치가 필요없다.

c) 이송용 flask로 부터 basket이 적하되기 시작할 때 flask 무게측정기를 통하여 무게를 확인한다. 무게는 4,500 파운드 정도이다. basket이 저장고에 적하가 완료되면 검사관은 다시 한 번 flask 무게측정기의 눈금을 확인한다.

d) 저장고가 9개의 basket으로 가득 차게 되면 시설운영자는 임시 플러그를 영구 플러그로 교체하게 된다. 영구 플러그에 대한 용접이 완료되면 검사관은 임시로 설치된 봉인을 제거하고 시설운영자는 저장고 뚜껑을 저장고 상단으로 이동하게 된다. 검사관은 이때 2개의 metal 봉인을 저장고 뚜껑의 튜브를 통하도록 설치한다. 검사관은 봉인의 wire가 저장고 뚜껑의 튜브를 통하여 설치되었는지 확인하여야 한다.

#### 라. 이송작업의 마무리 검증

a) 건식저장고의 콘크리트 벽 내부에는 두 개의 재검증튜브가 존재하며, 이 튜브를 통하여 비파괴검증이 수행된다. 비파괴검증은 PMCC를 이용하여 수행되는 바, 한 저장고에 9개의 basket이 들어 있으므로 9개의 고유한 감마선 특성을 지닌 그래프를 확인할 수 있으며, 3번 반복하여 녹화하고 이를 테이프에 보관한다. 이와 같이 고유한 감마선 특성 그래프는 fingerprint라고 명명되며, 건식저장고에 대한 검증이 필요할 경우 대조하여 동일함을 확인하는데 중요한 정보가 된다. 또한 fingerprint의 보완으로서 무작위로 선정된 위치에서 Cs-137의 스펙트럼을 녹화하여 보관한다.

b) 추가적 조치로서 9개의 basket이 건식저장고에 완전히 적하되고 용접이 종료된 후 용접부위를 사진으로 촬영하여 보관한다.

c) 상기 기술된 절차에 따라 하루의 작업이 종료되면 사찰관은 이송용 flask, 용접작업 구역의 grapple, 사용후핵연료 다발을 들어 올리는데 이용되는 크레인 등에 봉인을 설치한다. 국가사찰은 metal 봉인을 설치하고, IAEA 사찰의 경우에는 VACOSS 봉인을 설치한다. VACOSS봉인에 문제가 발생한 경우에는 이동용 MIVS 테이프를 즉시 검토하여야 하며, 문제를 해결하고 기록을 유지한다.

d) 작업일정상 용접되지 않은 건식저장고에는 봉인이 설치되어야 한다. 국가사찰은 metal 봉인을 설치하고, IAEA 사찰의 경우에는 VACOSS 봉인을 설치한다.

e) 익일 사찰관은 용접작업 구역의 grapple, 이송용 flask, 사용후핵연료 다발을 들어 올리는데 이용되는 크레인에 설치되었던 봉인의 건전성을 확인하고 제거하는 것을 먼저 수행한다.

f) 지금까지 기술된 절차에 따라 정상적으로 검증활동이 수행되면, 사찰관과 사찰관의 인수인계를 위한 중복 일수는 2일간으로 한다. IAEA의 경우에는 중복 일수를 4일로 하고 있다.

#### 4. 결 론

건식저장고에 대한 국가 계량관리 검사기준은 자체 개발된 비파괴검증장비와 봉인에 의존하는 기준이 제안되었으며, 이에 대한 검증활동은 시설운영자의 부담경감을 위하여 IAEA 사찰이 실시되는 기간동안 동시에 실시되도록 되어 있다. 본 논문에서 제시된 안전조치 접근방법은 IAEA 안전조치 기준도 만족할 것으로 기대된다. 사용후핵연료 저장조로부터 건식저장고로의 사용후핵연료 이송과 관련한 국가 계량관리 검사 적용은 3명의 국가 계량관리 검사관의 검증활동 수행이라는 접근방법이 제시되고 있으며, 이를 통하여 이송작업의 연속성 유지 및 시설운영자의 부담경감 등이 달성됨과 함께 사찰량의 감소가 기대된다.

#### 참고문헌

- [1] IAEA Safeguards Criteria 1991-1995, IAEA, 1994. 4.15
- [2] Proposed Safeguards Approach for Wolsong-2, 1996. 11.
- [3] Verification of Spent Fuel Bundle Transfer from Spent Fuel Bay to Dry Storage at Wolsong-1, IAEA, 1996. 2.