2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

CANDU 형 원자력발전소에 대한 안전조치검사

Safeguards Inspection for CANDU Nuclear Power Plant

나원우, 박승기, 박수진, 박완수
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

천연우라늄을 연료로 사용하는 CANDU 형 원전은 경수로에 비해 많은 사찰량이 요구된다. 이는 CANDU 형 연료의 크기가 상대적으로 작고 노심연료에 대한 직접 검증 불가능 및 건식저장고 운영 때문이다. 월성 1 호기의 핵연료이송공정을 포함한 월성원전 사찰량이 2001 년 국내시설 총사찰량의 절반을 차지하고 있다. IAEA 및 국가검사관은 주요측정지점에 있는 핵물질을 안전조치 검사기준에 의해 검증하고 있다. CANDU 형 원전에 대한 IAEA 안전조치 검사기준은 노심연료와 사용후연료 검증을 위한 격납 및 감시장치와 검증장치 운영을 요구한다. 본 논문은 물자재고검사와 중간검사에서의 검증절차와 검증방법 그리고 시설운영자의 준비 등에 대해 설명하고 개선점을 제안하고 있다.

Abstract

CANDU reactor has been required a lot of PDI for safeguards inspection due to its unique character. It is basically caused by the use of small fuel, unaccessible core fuel during PIV and the operation of dry storage. Currently safeguards efforts for 4 units of Wolsong site requires about a half of PDI given for all facilities in Korea. Safeguards inspection activities of IAEA and national inspector are based on IAEA safeguards criteria. It requires operating C/S to the main diversion paths as well as the special system to verify the discharge of core fuel. This paper shows the inspection procedures and methods for PIV and interim inspection and requirement for operator ' preparation.

1. 서론

1975 년에 핵비확산조약 (NPT) 당사국이 된 우리나라는 IAEA 와 체결한 안전조치 협정에 따라 1976 년부터 안전조치검사를 받기 시작하여 지금에 이르고 있다. 한편 정부는 1995 년에 개정된 원자력법과 원자력법 시행령 그리고 1996 년에 시행된 과학기술처 고시에 따라 국가 특정핵물질 계량관리검사를 수행할 수 있는 법적근거를 마련하였다. 정부는 이를 근거로 1997 년부터 국내 일부 시설에 대한 국가검사를 시작으로 1999 년엔 국내 모든 원자력시설에 대해 확대 실시하고 있다. 특히 우리나라는 1976 년에 고리 1 호기, 1983 년에 월성 1 호기를 가동한 이래로 14 기의 PWR 형 원전과 4 기의 CANDU 형 원전을 동시 보유하고 있으며, 이에 필요한 경수로/중수로 연료 가공공장과 기타 연구시설 등 총 33 개 원자력시설을 보유하고 있는 원자력산업 강국이다[1].

국내의 원자력산업활동에 사용되고 있는 모든 핵물질은 우리나라의 소유지만 국제규제대상 물질이므로 국제협정에 따라 핵물질의 양 및 사용용도 등에 대해 보고해야 하는 의무를 따라야 한다. 정부는 이를 보다 효과적/효율적으로 관리하기 위해여 해당업무를 전문기관인 원자력연구소내의 원자력통제기술센터에 위임하여 원자력산업에 대한 투명성과 신뢰성 확보를 위해 적극적으로 대처하고 있다.

IAEA 는 2001 년 동안 국내의 33 개 시설에 대해 143 회의 안전조치 검사에서 총 427 PDI (Person Day Inspection) 검사활동을 수행하였다. 국가는 IAEA 와 동시검사를 수행하면서 총 543 PDI (검사관 : 165 PDI, 검사원 : 378 PDI) 를 수행하였다[1]. 국가검사를 IAEA 검사와 병행하여 수행함으로써 검사 현장에서의 업무협조가 원만히 이루어질 수 있었고, 특히 IAEA 의 무리한 요구사항 등이 사전에 해결될 수 있었다. 무엇보다 국가검사를 도입하면서 IAEA 안전조치검사 목표 달성률이 이전에 비해 대폭 향상된 것으로 평가되었다. 그러나 CANDU 형 원전에 대한 안전조치 검사는 경수로에 비해 상당히 복잡하고 많은 검사량을 요하기 때문에 아직도 IAEA 및 국가검사기관에 상당한 검사량을 요하는 시설로 작용하고 있다. 본 논문은 CANDU 형 원전에 대한 안전조치 동향과 검사방법 등을 소개하고 있다.

2. CANDU 형 원전에 대한 안전조치 현황

천연우라늄을 연료로 사용하는 CANDU 형 원전은 캐나다에서 시작되어 대한민국, 아르헨티나, 루마니아, 중국 등지에서 운전 또는 건설되고 있으며, 2000 년 기준으로 20 기의 CANDU 형 원전이 IAEA 안전조치 검사를 받았다. 그러나 IAEA 안전조치 검사 대상 시설 총 584 개 가운데 20 기에 불과한 CANDU 형 원전에 대한 IAEA 검사량은 1,386 PDI 로서 총검사량의 10%을 차지하였다[2]. CANDU 600MW 형 원전은 380 채널에 핵연료 4,560 다발을 동시 장전하여 운전하며 매일 2 3 개 채널에서 핵연료 16 24 다발을 교체한다. CANDU 형 원전은 크기가 작은 천연우라늄 연료를 사용하면서 정상운전 중에 핵연료교체가 빈번히 일어나고, 많은 양의 사용후연료를 방출하기 때문에 안전조치 측면에서 핵확산 저항성이 경수로에 비해 상대적으로 낮은 것으로 평가된다.

1983 년에 월성 1 호기 가동이후 4 기의 CANDU 600MW 형 원전이 국내에서 운전되

고 있다. 사업자는 방출되는 많은 양의 사용후연료를 효율적으로 관리하기 위한 방안으로 7 년 이상 충분히 냉각된 것을 건식저장고로 이송하여 중간 저장하는 정책을 채택하고 있다. 월성 1 호기는 1992 년 사용후연료 건식저장을 시작으로 매년 5,000 여 다발을 이송하는 공정을 3 개월간 시행하고 있다. CANDU 600MW 형 원전이 3,500 MWD/MTU 정도 연소도로 운전되었을 경우에 사용후연료 1 다발에서 특정핵물질인 플루토늄을 60g 정도 생산할 수 있다고 IAEA 는 평가하고 있다[3]. 그리고 CANDU 사용후연료 120 다발은 폭발 장치로 전용 가능한 핵물질의 유의량 (SQ: Significant Quantity)에 해당되는 풀루토늄 (8 kg)을 포함하는 것으로 보고있다. IAEA 는 사용후연료 60 다발을 담는 건식저장용 용기인 바스켓이 0.3 SQ 이상의 핵물질을 수송할 수 있는 용기로 판단하여 이를 현장 확인하기 위해 핵연료이송공정 전반에 대해 안전조치검사를 하고 있다.

3. CANDU 형 원전에 대한 안전조치 검사방법

풀루토늄을 포함하고 있는 사용후연료를 보유한 원자력발전소에 대한 안전조치 검사는 핵물질 전용을 적시탐지 할 수 있도록 표 2 에 근거해 4 개월 주기의 정기검사를 수행하고 있다. 년간 4 회의 정기검사를 수행하면서 1 회는 1 년의 물질수지기간 (MBP : Material Balance Period)에 대한 물질수지구역 (MBA : Material Balance Area) 내의 핵물질에 대한 물자재고검사 (PIV : Physical Inventory Verification) 이다. 그리고 3 회의 정기검사는 사용후연료 등의 적시탐지를 위한 중간검사 (Interim Inspection) 이다. 월성 1 호기의 물질수지구역은 그림 1 에 명시된 주요측정지점 (KMP : Key Measurement Point) 들로 구성된다. 안전조치 검사는 각 KMP 별로 저장된 핵물질에 대해 물리적 특성에 따라 Stratum 을 분류하여 안전조치기준 (Safeguards Criteria)에 따른 검사를 다음과 같이 수행한다[4]. 안전조치검사에서 검증의 탐지확률은 다음 세가지로 구분된다. 낮은 탐지확률 (Random Low)은 20~50% (특별한 경우엔 10~50% 적용)을 의미하고, 중간 탐지확률 (Random Medium)은 50~90%을 의미하고, 높은 탐지확률 (Random High)은 90% 이상을 의미한다[4,8].

표 1. 핵물질의 형태별 SQ 와 적시탐지

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

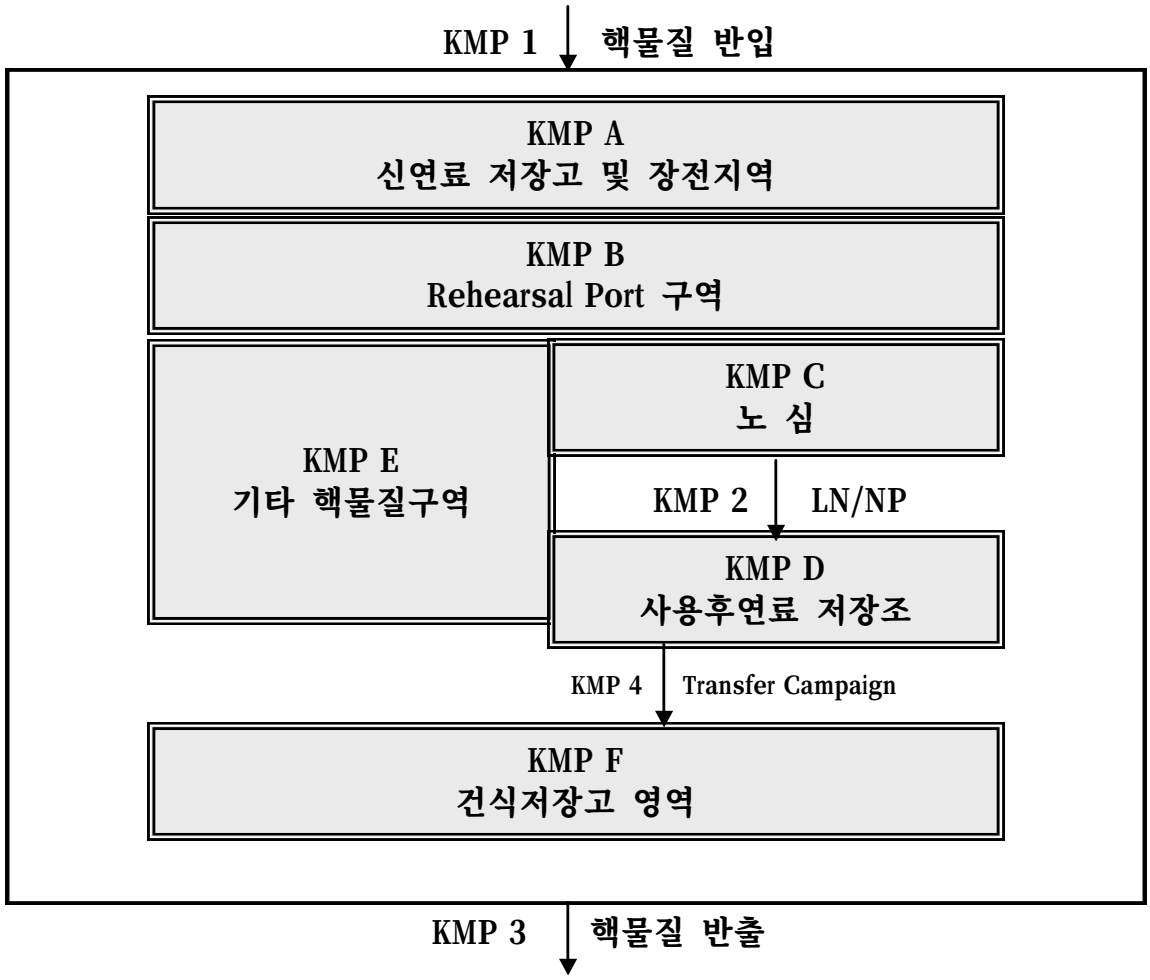

그림 1. CANDU 형 원전의 MBA 내 KMP 구분

3.1 신연료 검증

월성원전에서 신연료가 보관된 지역은 신연료 저장고와 신연료 장전지역이며 KMP A 로 구분 관리되고 있다. 우리나라는 중수로핵연료 가공시설과 월성원전 4 기를 한 구역으로 묶는 구역안전조치검사 (Zone Approach Safeguards Inspection) 기준을 적용받고 있어서 이 기준에 의해 신연료 검사가 이루어지고 있다[4]. 이는 핵연료 가공시설의 물자재고검사기간 동안 가공시설에 보관중인 신연료와 각 발전소에 보관중인 신연료에 대해 재고검사를 동사에 수행하는 것이다. 이를 구역안전조치검사에 의한 동시검사 (Simultaneous Inspection)라 한다. 이는 곧 시설간에 핵물질을 임차하거나 하는 방법으로 핵물질을 전용하는 것을 사전에 차단코자 하는 방안이다. 월성원전은 구역안전조치검사를 수용함으로써 2 회의 중간검사에서는 새로이 반입된 신연료에 대해서만 검사를 수행하고 물자재고검사와 동시검사에서는 KMP A 에 보관중인 신연료 재고에 대해 아래의 안전조치 검사기준에 맞게 검사하고 있다. 다음은 IAEA 의 물자재고검사 기준이다[4].

2.2 신연료는 (a) 혹은 (b) 절차로 검증한다.

(a) 신연료 다발(DNLEU)은 품목계수(Item Counting)하고 대량결손에 대해 중간 탐지확률로 검증한다. 신연료 다발이 밀폐용기에 저장되어 있다면 Annex F 의 6 항에 따라 품목계수 및 검증한다.

ANNEX F : Procedures for Sampling Plans

6. Items in closed containers

6.2 (b) In-direct use material 을 담고 있는 용기를 열수 있을 경우에 낮은 탐지확률로 박스를 선정 개봉하여 품목계수, 일련번호확인 및 검증한다.

이 기준에 의해 검사관은 신연료 검증을 위해 아래 식을 사용하여 검증할 신연료 박스 수량을 결정하여 검증한다[4].

$n_1 = N_1 (1 - b^{(X/M)})$

여기에서,

n_1 *: 검증할 총 표본 수 (검증할 핵연료 다발 수량)*

N_1 *: 모집단수 (검증대상 핵연료 다발 수량)*

b *: Non-Detection Probability (1- Detection Probability)*

X *: 단위 평균 무게 (19.1kg-U /Bundle)*

M *: 1 SQ (Significant Quantity) = 10,000kg*

신연료 검사에서 IAEA 안전조치 검사기준은 낮은 탐지확률의 검증활동을 요구한다. 검사관은 물자재고 및 동시검사에서 시설측이 제공한 장부를 기준으로 신연료의 재고량을 우선 파악하고 검증할 신연료 박스 수량을 결정하여 이를 지정해주고 비파괴 검증할 수 있는 장소로 이격 시키도록 한다. 선정된 박스인지를 확인하고 박스 내에 36 개의 연료다발에 대해 품목계수하고 임의로 몇 개 (2~3 개)의 연료를 선정하여 HM-4 나 HM-5 를 이용한 비파괴 검증 (Method H)을 한다[5]. 일부 신연료는 연료장전지역에 항상 대기하고 있으므로 이에 대해서는 별개의 Stratum 으로 분류하여 추가적인 검증을 한다.

CANDU 형 원전의 신연료 1 SQ 양은 10 톤으로 약 560 다발에 해당되는 것이며, 이의 적시탐지 기간은 12 개월이다. 따라서 월성 원전에서의 신연료에 대한 물자재고검증은 년 1 회이면 된다. 그러나 구역안전조치검사로 인해 월성의 신연료 재고검증에는 동시검사 1 회가 추가되어 실시되고 있다. 구역안전조치로 인해 핵연료가공시설에서는 검사횟수가 줄어드는 효과가 있는 것으로 판단되어 국가에서 이를 수용하고 있다. 동시검사는 정기검사기간에 이루어지므로 나머지 2 회의 중간검사에는 지난 검사이후 새로 반입된 신연료에 대해 검증한다. 월성원전의 경우 신연료 저장고 용량이 한정되고 시설운영 규정상 1 년 분의 신연료 재고량을 항상 보유해야 하기 때문에 1 년에 4 회에 걸친 신연료 반입이 이루어지고 있다. 따라서 4 회의 정기검사에서 항상 신연료 검증이 수행되고 있다.

3.2 노심연료 검증

원자로의 380 개 채널에 연료 4,560 다발을 장전하여 운전하는 CANDU 600MW 형 월성원전은 경수로와 달리 계획예방정지 기간에도 노심이 열리지 않아 노심연료를 직접 검증할 방안이 없다. 특히 OLR (On Load Reactor)로 분류된 CANDU 형 원전은 핵연료 교체가 수시로 일어나므로 검사기간에 KMP 간 핵물질 이동 등을 직접 검증할 수 없다. IAEA 는 이를 효율적/효과적으로 검증하기 위해 그림 2 의 감시/검증장치를 설치하여 운영하고 있다. 이 장치는 물질수지구역내의 주요측정지점을 감시하는 MUX 혹은 DMOS 와 원자로건물 내에서 사용후연료가 방출될 수 있는 경로의 주요지점에 설치된 CDM (Core Discharge Monitor), SFBC (Spent Fuel Bundle Counter) 그리고 Y/N Monitor 로 구성된 VIFM (VXI Integrated Fuel Monitor) 등이다[4].

그림 2 에 나타난 바와 같이 CDM 은 누워 있는 형태의 노심 좌우(A-side, C-side)에 각각 설치되어 핵연료의 장전/방출 과정을 기록하고 있다. CDM Assembly 에는 1 개의 감시용 카메라가 부착되어 있어 핵연료교환기 이동 등을 항상 감시하고 있다. CDM 은 감마선을 측정할 수 있는 Ion Chamber 와 중성자를 측정할 수 있는 Fission Chamber 로 구성되어 핵연료교환기에 실려 들어오고 나가는 물질의 성질을 파악하도록 되었다. 핵연료 교환을 한번 하게 되면 A-side 의 핵연료교환기에 신연료 8 다발을 담고 와서 밀어 넣으면서 반대의 C-side 에서 사용후연료 8 다발을 받아 방출하는 절차로 작업이 이루어진다. 이때, 사용후연료가 방출된다면 Ion Chamber 와 Fission Chamber 에 문턱 값 이상의 감마선 및 중성자 세기가 측정된다. 그러나 사용후연료가 아닌 조사된 물질이 방출하게 되면 감마선 세기만 감지되고 중성자는 전혀 측정되지 않는다. 검사관은 이 장치의 측정결과를 검토하여 시설운영자가 제공한 자료와 상호 비교하여 미신고 핵 활동 존재유무를 검증하고 있다.

원자로에서 방출된 사용후연료는 Discharge Port 를 통해 한 다발씩 Discharge Bay 로 방출된다. 이때 Discharge Port 통로에 설치된 SFBC 가 방출 순간 이를 감지하고 연료의 중성자 세기를 측정하여 기록한다. 검사관은 이 기록을 검토하여 검사기간 내에 A-side 와 C-side 에서 방출된 각각의 사용후연료 수량을 정확히 파악하고 있다. 그리고 Yes/No Monitor 는 신고되지 않은 핵물질이 원자로 건물에서 빠져 나가는 것을 감지하기 위해 전용이 의심되는 경로에 설치되어 방사선 세기를 항상 감시하고 있다. IAEA 검사관은 검사기간에 시설자의 신고 값을 확인하기 위하여 위에 열거된 모든 검증장치의 검증결과를 분석하여 일치성 여부를 확인하게 된다.

검사관은 물자재고검사기간에 기준날짜 (PIT : Physical Inventory Taking)를 지정해 주면 시설운영자가 검사기간 내에 방출된 연료에 대한 자료(Refueling History)를 검사관에게 제출한다. 검사관은 제공받은 시설의 신고 값을 검증하기 위해 위에 열거된 검증장치의 결과를 아래의 IAEA 안전조치검사기준에 의해 검사활동을 수행한다[4].

2.3 노심연료는 직접검증이 곤란한 경우에 (a) 혹은 (b) 절차로 검증한다.

(a) 연료방출을 확인할 수 있는 감시장치, 검증장치(SFBC)가 저장수조로 방출된 연료들에 대해 확인하고 미신고 방출이 없었음을 확인한다.

(b) 조사된 핵연료의 방출에 대한 기록(CDM)과 검증(SFBC) 결과는 시설측의 신고된 핵연료방출을 확인한다.

이 기준은 물자재고 검사기간에는 지난번 검사기간 이후 기간의 자료를 확인하여야 하고 3 회의 중간검사에서도 이를 활용하여 노심연료를 검증한다.

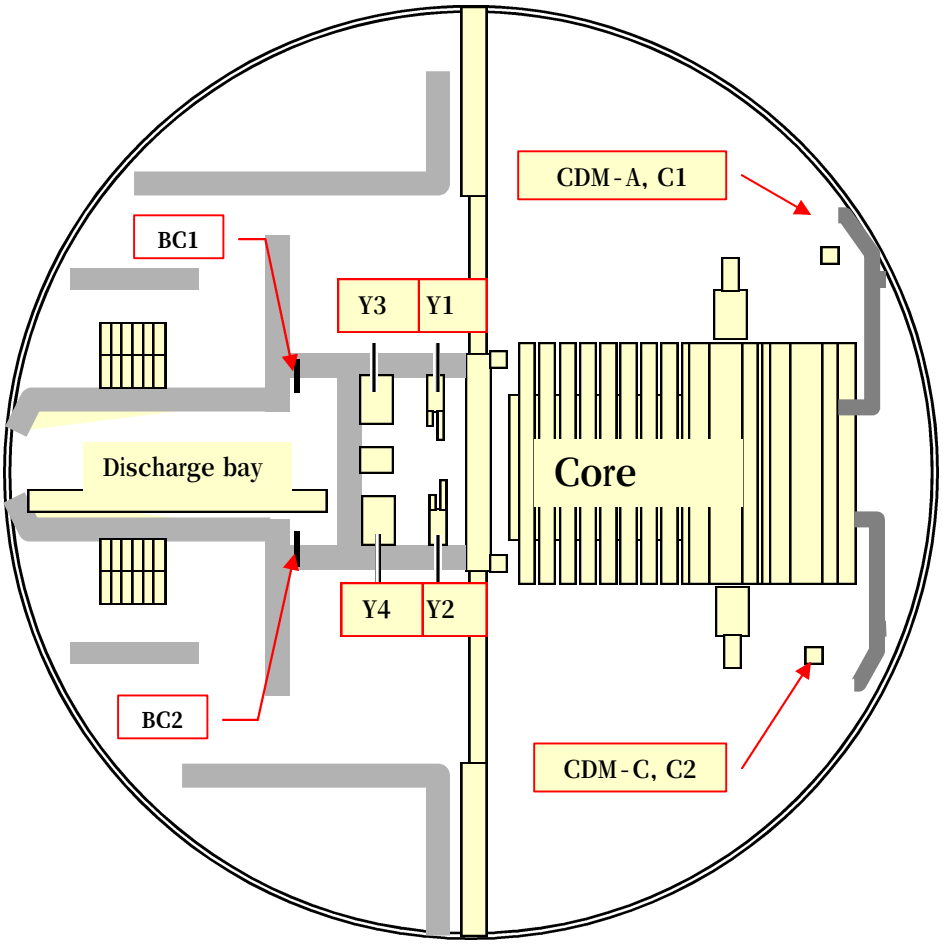

그림 2. 노심연료 감시 및 노심연료 방출 검증 IAEA 장치

3.3 습식 저장고의 사용후연료 검증

월성원전은 방출된 연료를 Reception Bay 에서 육안 검사하여 손상이 없을 경우에 24 다발을 선반(Tray)에 담고 사용후연료 저장조로 이동하여 보관한다. 그리고 손상된 연료는 특수용기에 담아 밀봉하여 손상연료보관지역에 격리시켜 보관하고 있다. IAEA 는 주요측정지점에서 일어나는 이런 일련의 작업활동을 감시하기 위해 단일 격납/감시 체계(MUX or DMOS)를 설치하여 모든 작업과정을 감시하고 있다. 따라서 시설운영자는 원자로건물 및 핵연료건물내의 감시구역 내에서 시설운영에 필요한 작업을 하게 될 경

우, 이와 관련된 모든 작업내용과 날자 및 작업시간 등에 대한 자료 (Declaration for Surveillance)를 작성하여 검사관에게 제공해야 한다. 검사관은 시설운영자가 제공한 자료를 근거로 검사기간 동안 기록된 감시기록을 검토하여 미신고 작업활동 유무를 먼저 확인하여 안전조치검사기준에 의해 검사활동 방법과 강도 등을 결정한다. 습식저장고의 사용후연료에 대한 IAEA 의 물자재고 검사기준은 다음과 같다[4].

2.4 사용후연료는 C/S 하에 유지되고 (a) ~ (c) 의 적절한 항에 따라 검증한다.

(b) 단일 C/S 하에 있는 사용후연료에 대하여 감시기록을 평가하고 품목계수 한다. 만일 사용후연료가 지난 물자재고검사 이후 다음의 경우에 해당할 경우는 대량결손에 대해 중간 탐지확률로 검증한다.

(i) 반출된 사용후연료 용기의 내용물이 품목별로 계산되지 않은 경우

(ii) CDM, SFBC 고장으로 시설운영자의 기록을 확인할 수 없는 경우

(iii) 0.3 Q 이상의 사용후연료를 이송할 수 있는 용기가 감시구역 밖으로 나갔는데 용기내 내용물이 확인되지 않은 경우.

검사관은 이 기준에 의해 물자재고검사기간에 사용후연료를 검증하고 있다. 위에 언급된 3 가지 문제가 발견되지 않을 경우, 검사관은 사용후연료에 대해 품목계수를 아래 식에서 구해진 것에 대해 수행한다. 특히 월성은 사용후연료 선반이 수직으로 16~19 층으로 쌓여 있기 때문에 10%의 낮은 탐지확률로 품목계수를 할 수 있도록 하고 있다[4,9].

$n_1 = N_1 (1 - b^{(X/M)})$

여기에서,

n_1 : *검증할 총 표본 수 (검증할 Stacked Bundle 의 Column 수)*

N_1 : *모집단수 (검증대상 Stacked Bundle 의 Column 수)*

b : *Non-Detection Probability (1- Detection Probability)*

M : *1 SQ (Significant Quantity) = 120 다발*

X : *단위당 사용후연료 다발 (19 층인 경우에 19 다발,*

위식에서 80 개의 Stack 이 쌓여 있는 경우에 검증할 표본 수는 31.7 로서 32 개의 Column 에 대해 저장된 사용후연료 다발 수량을 품목계수 하라는 것을 의미한다. 이런 검사기준을 만족시키기 위해 IAEA 및 국가검사관은 자체 개발한 SCAI-2 (Spent CANDU Fuel Identifier-2)[6] 혹은 SCAV (Spent CANDU Fuel Verifier)[7]를 이용하여 물자재고검사를 동시 수행하고 있다. 또한, 물자재고검사 외 3 회의 중간검사를 하고 있는데 이때의 IAEA 검사기준은 다음과 같다[4].

9.4 사용후연료는 C/S 하에 유지되고 (a) ~ (d) 의 적절한 항에 따라 검증한다.

(b) 단일 C/S 하에 있는 사용후연료에 대하여 감시기록을 평가한다. 만일 사용후연료가 지난 물자재고검사 이후 다음의 경우에 해당할 경우엔 대량결손에

대해 낮은 탐지확률로 품목계수하고 검증한다.

(i) 반출된 사용후연료 용기의 내용물이 품목별로 계산되지 않은 경우

(ii) 0.3SQ 이상의 사용후연료를 이송할 수 있는 용기가 감시구역 밖으로 나갔는데 용기내 내용물이 확인되지 않은 경우

(iii) CDM, SFBC 의 고장으로 시설운영자의 기록을 확인할 수 없는 경우

(iv) 지난 감시기간의 감시기록이 "Inconclusive" 한 것으로 평가될 경우.

3.4 건식 저장고의 사용후연료 검증

월성원전 1 호기의 사용후연료 습식 저장고는 45,600 다발 (약 340~350 SQ)을 저장할 수 있는 용량이다. 따라서 수조의 저장공간을 확보하기 위해 월성 1 호기는 7 년 이상 충분히 냉각된 사용후연료를 건식저장고로 이송하는 공정을 1992 년부터 매년 시행하고 있다. IAEA 는 월성 1 호기의 사용후연료 저장고에 저장된 핵물질을 Difficult To Access 한 물질로 분류하여 검사활동을 수행하고 있다. 건식저장고의 사용후연료에 대한 IAEA 의 물자재고 검사는 다음 기준에 의해 수행한다[4].

2.4 사용후연료는 C/S 하에 유지되고 (a) ~ (c) 의 적절한 항에 따라 검증한다.

(a) 이중 C/S 하에 있는 사용후연료에 대하여 두 가지 봉인을 낮은 탐지확률로 검증한다.

ANNEX D : Special Criteria for Difficult to Access Fuel Items

1. 아래의 조건을 만족하는 경우 Difficult to Access 한 것으로 확정된 핵연료 품목에 대해 적용된 C/S 평가가 물자재고 및 적시탐지 평가 결과를 도출하는 역할을 한다.

(a) DDG-SG 는 시설 설계정보에 의해 핵연료 품목이 Difficult to Access 하다고 승인한다.

(b) 핵물질은 Difficult to Access 가 되기 이전에 대량결손에 대해 높은 탐지확률로 품목계수, 일련번호 확인 및 비파괴 검증 등에 의해 검증된 후에 이중봉인이 적용되어야 한다.

(c) 이중 C/S 의 결과가 "Acceptable C/S" 를 만족할 수 있는 조건이어야 한다.

IAEA 는 이 기준을 만족시키기 위해 핵연료이송공정이 마무리되면 Cobra 봉인과 Metal 봉인을 설치하여 이중봉인 하에 두고 있다. 검사관은 물자재고검사 기간동안 다음식에 의해 검증대상 캐니스터 수를 정하여 Cobra 봉인의 건정성 확인 및 Metal 봉인을 교체한다.

$$n_1 = N_1 (1 - b^{(X/M)})$$

여기에서,

n_1 *: 검증할 총 표본 수 (검증할 캐니스터 수)*

N_1 : 모집단수 (검증대상 캐니스터 수)
b : Non-Detection Probability (1- Detection Probability)
M : 1SQ (Significant Quantity) = 120 다발
X : 단위당 사용후연료 다발 (540 다발)

위식에서 단위당 사용후연료 다발 수량 (540 다발)이 1 SQ (120 다발)보다 많기 때문에 이식은 성립되지 않는다. 이런 경우에 검사관은 낮은 탐지확률 (20%)로 캐니스터에 대한 봉인 건전성 확인 및 봉인교체작업 등의 물자재고검사를 수행한다. 그리고 3 회의 중간검사에 대한 검사기준은 다음과 같다.

9.4 사용후연료는 C/S 하에 유지되고 (a) ~ (c) 의 적절한 항에 따라 검증한다.
(a) 이중 C/S 하에 있는 사용후연료에 대해 적어도 한가지 봉인에 대해 낮은 탐지확률로 검증한다.

IAEA 는 이 기준에 의해 중간검사기간에 이중 봉인 가운데 한가지 봉인에 대해 낮은 탐지확률 (20%)로 봉인을 검증한다.

4. 사용후연료 이송공정 검증

월성원전 1 호기는 1992 년부터 사용후연료 이송공정을 매년 실시하고 있으며 IAEA 및 국가 검사관은 이송공정 기간에 현장에 상주하며 검증활동을 수행하고 있다. 월성 2 호기 역시 2004 년에는 사용후연료를 건식저장하면서 매년 일정한 수조공간을 확보해야 한다. 이 공정은 3, 4 호기에서도 연차적으로 진행될 것이다. 그러므로 월성 전 호기에서 핵연료 이송공정을 해야 하는 2006 년 경에는 이를 검증하기 위한 검사량이 매년 300 PDI 정도일 것으로 예상된다. 그림 3 은 월성 1 호기의 핵연료 이송공정을 보여주고 있다. 이송공정에 대한 검사활동은 다음의 절차에 의해 진행된다[3]. 특히 사용후연료는 Difficult To Access 한 영역인 건식저장고로 이송되어지기 때문에 이송 전에 사용후연료의 품목계수, 일련번호확인, 그리고 대량/부분결손(Gross and Partial Defects)에 대한 높은 탐지확률 (90%)의 비파괴 검증을 다음과 같이 수행한다.

4.1 사전 준비활동

IAEA 및 국가 검사관은 이송작업이 시작되기 전 Rehearsal 기간에 습식 저장고의 작업구역 내에 임시 감시장비 (ALIS), 원자력통제기술센터가 독자 개발한 SCAI (Spent CANDU Fuel Identifier), 그리고 HSGM (High Sensitivity Gamma Monitor)을 설치하여 테스트 한다. 검사관은 서비스 구역의 Shutter Door 에 부착했던 봉인을 제거하고 바스켓 수송용기인 Flask 내부를 확인하고 Rehearsal 작업에 참여한다. 그리고 Rehearsal 작업이 끝나면 바스켓에 핵연료를 장전하는 Fuel Lifting Tool, 바스켓을 용접구역으로 끌어올리는 Grapple, 그리고 Flask 에 봉인을 하여 COK (Continuity Of Knowledge)를 유지한다.

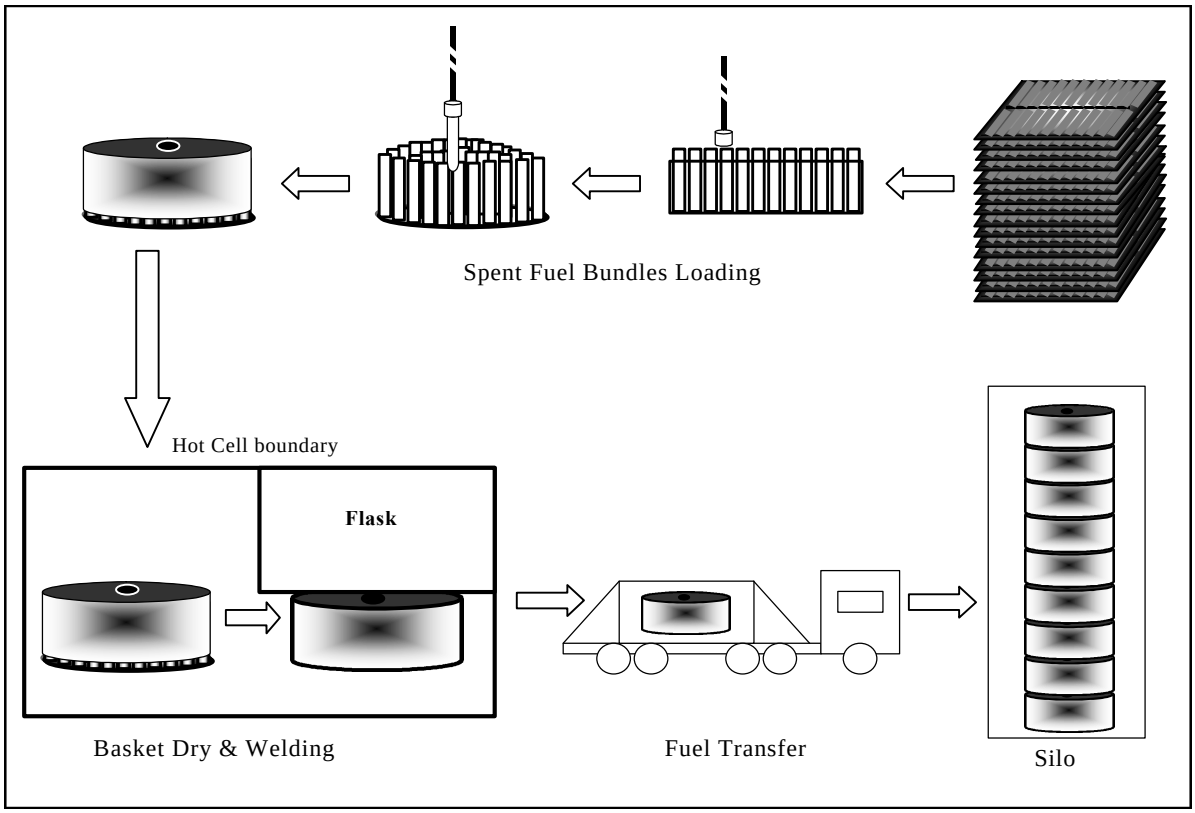

그림 3. 월성의 사용후연료 이송공정

4.2 핵연료 Loading 작업에 대한 검증

작업자가 빈 바스켓을 작업구역 안으로 내려 놓기 전에 검사관은 바스켓 일련번호를 확인한다. 작업자는 이송대상 핵연료 선반을 작업구역으로 이동하여 사용후연료 60 다발을 바스켓에 장전한다. 이때 검사관은 60 개의 연료에 대해 임의로 2 개 연료를 선정하여 일련번호 확인 및 비파괴 검증하여 이상이 없을 시에 작업자가 바스켓 뚜껑을 닫을 수 있도록 한다. 검사관은 뚜껑이 닫힌 바스켓이 건조/용접구역으로 제대로 들어갔는지를 확인한다. 만일, 현장을 떠날 시에는 사용후연료 저장조 밖으로 핵연료가 담긴 바스켓이 반출되지 않도록 하기 위해 바스켓을 용접구역으로 들어 올리는 Grapple 에 봉인을 하고 떠난다. 그리고 작업현장에 돌아와서는 설치된 봉인의 건전성을 확인하여 핵물질 전용이 없었다는 것을 확인하고 다음 공정이 진행되도록 한다.

4.3 바스켓 Dry & Welding 작업에 대한 검증

60 개의 사용후연료 다발이 장전된 바스켓이 검사관에 의해 검증되고 Dry & Welding 용 Hot-cell 로 이동되어 완전 건조된 후에 바스켓의 상/하단이 원격용접 되어 밀봉된다. 검사관은 용접과정에서 바스켓 상단에 새겨진 바스켓 일련번호를 최종 확인한

다. 만일 용접된 바스켓이 건식저장고로 즉시 이송되지 않을 경우 검사관은 Dry & Welding 용 Hot-cell 상단에 놓여 있는 Flask 에 봉인을 하여 COK 를 유지한다.

4.4 바스켓 이송 작업에 대한 검증

작업자는 용접된 바스켓을 담은 차폐 수송용기 (Flask)를 트레일러에 적재하여 건식저장고로 이동해 해당 캐니스터에 저장한다. 검사관은 핵연료 이송경로를 직접 추적하고 캐니스터에 저장되는 전 과정을 현장 확인한다. 작업자는 빈 캐니스터에 바스켓을 저장하고 상단에 임시 End Plug 로 닫는다. 이때 검사관은 이 End Plug 에 임시 봉인을 부착하여 핵물질 전용이 없었다는 것을 확인하고 있다. 이런 이송절차에 의해 9 개 바스켓이 캐니스터에 모두 장전되면 작업자는 영구 End Plug 로 닫고 Cover 를 씌운다. 이때 검사관은 이중봉인을 설치하여 저장된 사용후연료를 Difficult To Access 한 것으로 관리하기 시작하게 된다. 이런 과정에 의해 이송공정이 마무리되면 검사관은 새로이 이송된 캐니스터에 대한 방사능 Finger Print 를 확보한다. 이는 건식저장고에 대한 재검증이 필요할 경우에 결과를 대조하여 동일한지 여부를 확인함으로써 핵물질 전용이 없었다는 것을 확인하는 중요한 정보가 된다.

5. 결론

CANDU 형 원전에 대한 IAEA 및 국가 안전조치 검사는 위에 언급한 안전조치 기준에 의해 진행되고 있다. 다만, 국가검사는 IAEA 안전조치기준에 언급한 노심연료 방출 감시장치, 사용후연료 감시장치 등이 설치되어 있지 않아 독립적인 안전조치 검사결과를 내리기가 어렵다. 따라서 국가검사를 수행하고 있는 원자력통제기술센터는 상기 검사활동이 원만히 수행될 수 있도록 하기 위해 사용후연료 및 핵연료이송공정을 위한 검증장치 개발 및 검증활동을 수행하고, IAEA 활동을 기술적으로 지원하는 역할을 병행하고 있다. 특히 CANDU 형 원전은 복잡한 시설구조와 핵연료 이송공정 등으로 인해 IAEA 및 국가 검사량의 절반 가량이 월성원전에 투입되고 있는 실정이다. 향후, 월성 2, 3, 4 호기가 핵연료이송공정을 새로이 시행해야 하므로 이로 인한 업무부담이 클 것으로 판단되어 이를 해소할 수 있는 방안 등을 다각도로 모색해야 한다. 앞으로 원자력통제기술센터는 이와 관련된 활동에 적극적으로 참여하여 국가의 특정 핵물질 관리의 투명성과 신뢰성을 높이는데 기여해야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 최영명 외 “원자력통제기술센터 2001 년도 운영보고서”, KAERI/MR-376/2001
2. IAEA, “The Safeguards Implementation Report for 2000”, (2000)
3. IAEA, "Verification of Spent Fuel Bundle Transfer from Spent Fuel Bay to Dry Storage at Wolsung-1" (1996)
4. IAEA, "Safeguards Criteria " (2000)
5. IAEA, “HM-5 Arribute Verification og Uranium or Plutonium with fieldSPEC”, SG-CP-99, Revision 1, 2001.
6. 나원우, "월성 사용후연료 저장조에서 수중카메라를 이용한 사용후연료다발 검사",

2000 춘계 한국원자력학회 학술발표 논문집
7. Won Woo Na, "New Approach for Safeguards Verification of Spent Fuel Bundles by the Underwater Camera System", INMM Annual Meeting, (2001).
8. 이재성외, “CANDU 형 원자력발전소에 대한 사찰기술 선진화”, KAERI/RR - 1918/98
9. IAEA, "The CANDU Course (Session 10 : Verification of Irradiated CANDU Fuel Bundles (Method K)" (1993)