

## 중수형 원전과 경수형 원전의 안전조치 비교 분석 (Comparison of Safeguards Approach between OLR and PWR)

이재성, 박찬식, 박완수, 윤여창 (한국원자력연구소)

### 요 약

중수형 원전과 경수형 원전의 핵연료 교체방식, 핵연료 특성, 원전에 설치된 사찰장비 등의 안전조치 특성 관점에서 비교 분석되었는 바, 이는 중수형과 경수형 원전에 투입되는 사찰량의 차이가 10배 이상 투입되는 근본적인 원인으로 파악되었다. 특히 사찰량의 비교를 위하여 사찰시 수행되는 단위활동별로 소요시간을 측정하여 향후 국가 계량관리 검사 수행시 사찰량을 절감할 수 있는 요소들을 정확히 파악하여 사찰량 절감방안을 도출하는데 기여할 것으로 기대된다. 또한 우리나라가 보유하고 있는 원자력발전소 유형인 중수형과 경수형 원전에 대한 안전조치 측면에서의 특성을 상호 비교함으로써 안전조치 접근방법의 정확한 이해와 국가 계량관리 검사절차서의 개선에 기여할 것으로 기대된다.

### 1. 서 론

우리나라는 현재 10기의 경수형 원전과 2기의 중수형 원전을 상업가동중에 있으며, 4기의 경수형 원전과 2기의 중수형 원전을 건설중에 있는 바, 원자력발전 측면에서 원자력선진국 수준에 도달하였다. 동시에 국제 정치외교의 초점이 되고 있는 핵비확산 측면에서의 핵투명성과 원자력 활동에 대한 신뢰성 제고를 도모하면서 원자력 연구개발 프로그램의 차질없는 추진을 위하여 원자력 안전조치에 대한 관심이 점차 증대되어 왔다.

우리나라 정부는 원자력법의 개정과 관련 법령의 개정을 통하여 국가 계량관리 검사 수행을 위한 법적 체계를 완비함과 함께 과학기술처내에 원자력 안전조치 담당과를 신설하고 국가 계량관리 검사의 실질적 수행을 위한 사찰전문기관인 원자력통제기술센터를 한국원자력연구소 내에 설치하는 제도적 체제도 완비되었다. 그러나 안전조치의 기술능력 제고를 위한 연구개발 및 국가 계량관리 검사 수행을 위한 기술기반은 아직 확고하지 못한 상태이다.

본 논문은 이러한 관점에서 안전조치 활동의 주류를 이루고 있는 원자력발전소에 대한 안전조치 측면에서의 정확한 파악과 안전조치 접근방법을 파악할 목적으로 그 대상 노형인 중수형 원전과 경수형 원전에 대한 안전조치의 특성이 상호 비교되고 분석되었다.

### 2. 중수형 원전과 경수형 원전의 안전조치 비교

#### 가. 핵연료 교체방식 비교

##### 1) 경수형 원전

경수형 원전은 특정하게 예정된 기간동안 핵연료 집합체의 교체활동이 수행되며, 이외의 기간에는 노심의 개방이 발생하지 않는다. 이를 안전조치 측면에서 보면, 노심개방 여부를 확인할 수 있는 수단이 조치되고, 노심이 개방된 시기동안 안전조치 접근방법을 적절하게 취하게 된다면 조사후 또는 사용후핵물질의 전용을 탐지할 수 있다.

경수형 원전에서는 상기와 같은 핵연료 교체와 관련된 노심핵연료의 전용탐지를 위하여 두 전략지점에 봉인을 설치하고 있다. 즉, 장비출입구에 봉인을 설치하고, missile shield 또는 canal gate에 봉인을 설치하고 있다. 이는 어떠한 경우에도 설치된 봉인의 훼손이 없는 경우에는 노심에서 조사된 핵물질의 전용이 발생하지 않았다고 판단할 수 있는 것이다. 또한 노심이 개방되는

기간 즉, 계획예방정지 기간중에는 감시카메라의 설치와 동시에 장비출입구와 missile shield(또는 canal gate)에 설치된 봉인이 제거된다. 감시카메라는 장비출입구 방향을 향하고 있으며, 카메라의 수는 통상 3대이다. 감시카메라는 장비출입구가 개방된 기간동안 지속적으로 감시할 수 있도록 되어 있으며, 카메라가 정상적으로 작동되고 있는 시간동안은 장비출입구를 통하여 입출입된 모든 형태의 시설장비, 도구 및 용기가 카메라에 녹화되며, 시설운영자는 장비출입구를 통하여 입출입된 물품의 종류와 정확한 시간 등을 기록유지하여 Post-PIV시 이를 사찰관에게 제시하도록 되어 있다. 노심이 단혀지고 장비출입구 및 missile shield(또는 canal gate)에 봉인이 설치된 후 시설운영자가 사찰관에게 제시한 입출입 문서와 감시테이프의 비교 검토를 통하여 전용 여부를 판단하게 된다. 물론 시설운영자가 제출한 문서에서 사찰관이 시설장비, 도구 및 용기에 대한 크기 및 용도 등에 대한 확인을 요청하는 경우 도면 또는 현장확인 절차가 수행된다.

## 2) 중수형 원전

중수형 원전은 On-Load 방식 즉, 운전중에 핵연료를 교체하는 방식을 채택하고 있으며 매일 2-3채널씩(16-24 다발) 신연료가 노심으로 장전되고 동시에 노심으로 부터 discharge bay로 사용후핵연료가 배출되고 있다. 이를 전용경로 측면에서 상정하여 보면, 미신고 핵물질을 노심에 장전하여 일정기간 조사시킨 후 플루토늄의 조성도를 고려하여 원하는 시간에 discharge bay로 배출한 후 이를 전용하는 경로이다. 안전조치 기준 및 접근방법은 미신고 핵물질의 전용을 탐지하기 위하여 CDM, MUX-CCTV, SFBC 및 Y/N detectors 등을 설치하고 있으나 대상 핵연료 다발의 수효가 많고 특정 채널의 핵연료가 배출되었다는 확인이 어려운 점 등을 고려하여 보면 전용여부를 판단하기가 쉽지 않다.

운전중 핵연료의 교체가 이루어짐에 따라 원자로 운전중에 시설 종사자, 시설장비, 도구 및 용기 등의 입출입이 경수로에 비하여 대단히 많으며, 이에 따라 핵물질의 전용 가능성이 높다. 이러한 빈번한 움직임중에 핵물질의 전용이 이루어지지 않았음을 검증하기 위하여 CDM, SFBC, 다수의 MUX-CCTV가 설치되어 있으며, Y/N detectors도 6곳에 설치되어 있다. 이와 같이 다양한 격납 및 감시장치의 설치에도 불구하고 사찰목표 달성율은 표 1에서 보는 바와 같이 경수형 원전에 비하여 매우 저조한 상태이다. 1993년 부터 1996년 기간동안 사찰목표 달성율은 물론이고 양적 목표 달성율과 적시탐지 목표달성율 등 모든 평가대상 측면에서 중수형 원전에 대한 달성율은 경수형 원전에 비하여 현저하게 차이를 보이고 있다. 특히 경수형 원전의 경우에는 1993년 이후 점차로 사찰목표 달성율이 높아지고 있는 반면, 중수형 원전의 경우에는 반대로 낮아지고 있다는 점이다. 이러한 사찰목표 달성율은 현재 IAEA가 경수형 원전을 대상으로 하여 canal gate 봉인을 설치하고 있는 바, 이러한 격납장치의 설치가 완료된 이후에는 사찰목표 달성율의 격차가 더욱 커질 것으로 예상된다.

### 나. 핵연료 특성 비교

#### 1) 경수형 원전의 핵연료

경수형 핵연료는 중수형 핵연료에 비하여 크기에서 많은 차이를 보이고 있는 바, 이는 핵물질의 전용경로에 영향을 주어 경수형 원전의 전용경로는 중수형 원전에 비하여 단순하며, 안전조치 적용방법 역시 상대적으로 엄격하지 않게 적용되고 있다.

경수형 원전의 원자로심 내외로 연결되어 있는 통로는 장비출입구, personnel hatch, 비상통로 및 사용후핵연료저장조에 연결된 통로 등이다. 이중 장비출입구에는 격납 및 감시장치가 설치되어 있으며, 사용후핵연료저장조에 연결된 통로는 사용후핵연료저장조에 감시장비가 설치되어 있어 전용탐지가 가능한 영역에 속한다. 그러나 집합체의 크기와 차폐용기를 고려하여 전용경로에서 제외된 personnel hatch와 비상통로는 중수형 원전의 경우와 비교하여 보면 많은 차이를 보이고 있다. 특히 personnel hatch에 대해서는 후술하는 바와 같이 전용경로 가정시 안전조치상 문제점이 있으나, 집합체를 해체 또는 분리하지 않은 상태에서 차폐용기에 담겨 전용을 위하여 이송할 수 없다는 가정하에 어떠한 격납 및 감시장비가 설치되어 있지 않고 있다.

## 2) 중수형 원전의 핵연료

원자로심은 380개의 채널로 구성되어 있으며, 각각의 채널에는 12다발의 핵연료가 장전되어 있다. 따라서 운전중 원자로심에 장전된 핵연료 다발 수는 총 4,560 다발이며, 하루에 교체되는 핵연료 양은 16-24 다발이다. 중수형 핵연료의 전용기준 측면에서 살펴보면, 신연료 560 다발, 사용후핵연료 120 다발이 1 SQ를 형성한다. 또한 신연료는 핵물질이 Indirect-use로 구분되어 적시탐지 기간은 1년이며, 사용후핵연료는 Direct-use핵물질로 구분되어 적시탐지 기간은 3개월이다. 따라서 적시탐지 목표를 달성하기 위하여 중간사찰은 매 3개월 마다 수행된다.

중수형 핵연료는 원자로 설계와 핵연료 특성상 원자로 운전중 교체가 가능하고 핵연료가 소형인 까닭에 안전조치 기준이 경수형 원전과 상이하며, 원자로와 연결된 모든 통로와 공간에 대하여 전용탐지를 위한 격납 및 감시장치가 설치되어 있다. 또한 중수형 사용후핵연료는 경수형 사용후핵연료에 비하여 단위당 플루토늄 생성율이 높아 안전조치의 적용이 엄격하게 다루어지고 있다. IAEA 안전조치 기준에는 원자로심에서 빠져 나오는 0.3 SQ 이상을 담을 수 있는 용기 및 핵연료장전기에 대하여 IAEA 사찰관의 입회와 수행되어야 함이 기술되어 있다.

사용후핵연료 저장조에는 총 45,600 다발의 사용후핵연료가 보관될 수 있는 용량을 갖고 있다. 이는 약 340-350 SQ에 해당되는 양일 뿐만 아니라 사용후핵연료가 소형인 만큼 다수의 감시카메라 및 모니터 등이 이를 상시 감시하고 있다.

### 다. 사찰장비 설치 비교

경수형 및 중수형 원전에 장착된 사찰용 감시장비를 주요측정지점별로 구분하여 살펴보면, 신연료 저장고에 대한 감시, 원자로심에 장전된 핵연료를 감시하기 위한 사찰장비, 사용후핵연료 저장지역에 보관되어 있는 사용후핵연료를 감시하기 위한 사찰장비 및 중수형 원전에만 적용되는 건식저장고에 보관되고 있는 사용후핵연료를 감시하기 위한 사찰장비 등이다.

중수형 원전과 경수형 원전의 전형적인 사찰장비 설치도는 그림 1과 2에서와 같이 중수형 원전에는 다양하고 복잡한 감시장비가 설치되어 있는 반면 경수형 원전에는 봉인과 사용후핵연료 저장조에 감시장비 1대만이 설치되어 있다. 특히 경수형 원전의 경우에는 일단 핵연료 집합체가 노심에 장전되면 계획예방정지를 위한 노심개방이 있기 전까지는 노심의 개방이 없기 때문에 장비출입구와 노심 개폐여부를 확인하기 위한 봉인만 설치되면 된다. 따라서 여타 감시장비가 설치되지 않고 격납상태를 감시하기 위한 감시활동만 수행된다. 반면 중수형 원전에는 다양한 전용 경로가 존재하고 이를 감시하기 위한 사찰장비 역시 이중 삼중으로 설치되어 있다. 전용탐지를 위하여 설치된 사찰장비는 MUX-CCTV, CDM, Y/N detectors, SFBC 등이다.

### 라. 사찰량 상호 비교

#### 1) 경수형 원전에 대한 사찰량

경수형 원전에 대한 사찰은 연간 1회 수행되는 물자재고검증 사찰과 매분기 수행되는 중간사찰, 신연료가 입고되고 노심에 장전되기 전에 수행되는 신연료 검증사찰 및 구역안전조치 적용에 따른 동시사찰(신연료가 없는 경우 사찰은 수행되지 않음) 등 연간 총 6회의 IAEA 사찰이 안전조치 기준에 명시된 사찰횟수이다. 경수형 원전에 대한 사찰활동이 하루에 종료된다는 사실을 고려하면 연간 소요되는 사찰량이 6 PDI만 소요되어야 한다.

그러나 실제로는 물자재고검증 사찰이 원자로 운전이 정지되고 노심이 개방된 상태에서 노심 핵연료에 대한 검증활동이 수행되는 관계로 시설의 계획예방정지 활동이 종료되기 전에 수행되어야 한다. 이와 같은 물자재고검증 사찰이 수행되기 전에 시설의 계획예방정지를 위하여 장비출입구에 설치된 봉인의 제거와 함께 감시장비의 설치를 위한 사찰이 수행된다. 또한 물자재고검증후 시설의 계획예방정지 활동이 종료된 후 통상 물자재고검증 사찰이 수행된 1주일 후에 장부검증, 감시장비의 제거 및 장비출입구에 봉인설치활동과 함께 사용후핵연료에 대한 수량확인과 비파괴검증을 위한 사찰이 수행된다.

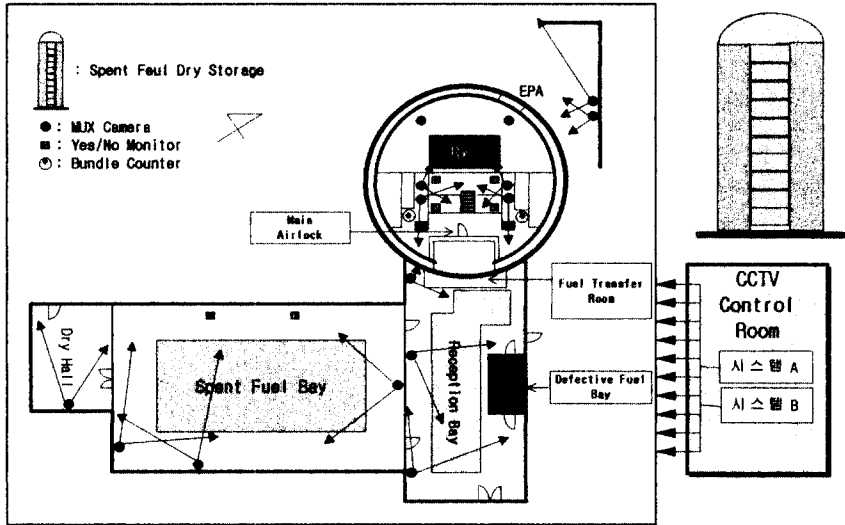


그림 1. 중수형 원전에 설치된 격납 및 감시장비

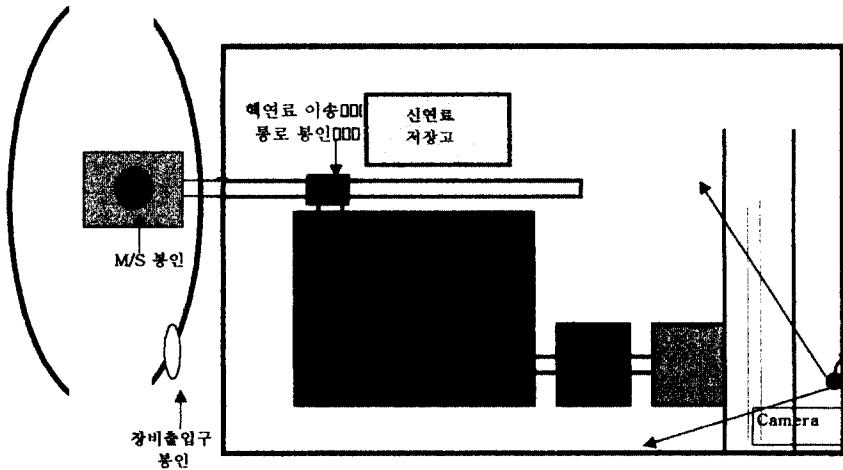


그림 2. 경수형 원전에 설치된 격납 및 감시장비

또한 계획예방정지 기간중 장비출입구를 감시하는 감시장비의 감시영역이 장애물에 의해 가려지는 경우 감시장비 카메라의 위치 조정을 위하여 사찰관이 투입되는 사례가 발생하고 있고, 노심핵연료 취급 등에서 발생하는 시설 자체의 문제로 IAEA에 통보후 사찰관이 투입되는 경우가 발생하고 있으며, 감시장비의 upgrade 또는 결합이 있는 모듈의 교체를 위한 사찰이 수행되는 등 실제로는 안전초치 기준에 언급된 경우보다 더 많은 사찰량이 투입되고 있다.

IAEA에서는 이러한 사항들을 감안하여, 연간 최대 사찰 허용치를 설정하고 있으며, 경수형 원전의 경우 15 PDI로 하고 있다. 1991년 부터 1996년 기간동안 경수형 원전에 실제로 투입된 사찰량이 최대 사찰 허용치를 초과한 경우는 발생하지 않았다.

경수형 원전의 경우 중간사찰시 모든 KMP에 있는 핵물질의 검증에 소요되는 시간은 정상적인 경우 통상 4시간 정도이다. 물자재고사찰시에는 원자로심에 장전된 핵연료에 대한 수량확인 및 일련번호 확인활동이 2-3시간에 걸쳐 추가로 소요된다. 따라서 모든 사찰이 1명의 사찰관에

의하여 하루내에 수행되므로 1 PDI만이 투입되고 있다. 경수형 원전에 대한 사찰시 소요되는 시간 및 검증내역은 표 1과 같다.

표 1. 경수형 원전의 사찰시 검증내역 및 검증 소요시간

사찰구분	사찰관	검 증 활 동	소요시간
신연료검증 사찰	1 인	신연료 검증 - 수량확인, 일련번호 확인 및 비파괴검증	1
중간사찰		장부검증	2
물자재고사찰		장비출입구 봉인확인 및 교체	0.3
		MIVS 서비스	0.5
		방사선 관리구역 출입 및 이동	1
		시설운영자와 회의 및 의견교환	0.2
물자재고사찰	노심 핵연료 검증 - 수량확인 및 일련번호 확인	2-3	

표 2. 중수형 원전의 일반사찰시 검증내역 및 검증 소요시간

사찰관(A, B)	검 증 활 동	소요시간
A	장부검증	3
B	MUX-CCTV downloading, 검토 및 시설운영자와 면담	24
A	건식저장고 검증 - 봉인 건전성 확인, 고유번호 점검 및 봉인 교체	4
A	신연료 검증 - 수량확인, 일련번호 확인 및 비파괴검증	3
A	SFBC, Y/N monitors 서비스(핵연료 장전지역) - 건전성 확인, print-out 제거 - TLD 교체	4
A	확장건물 봉인 교체 및 Y/N monitors 서비스 - 봉인 건전성 확인, 고유번호 점검 및 봉인 교체 - TLD 교체	1
A	결합 핵연료 검증 - 수량확인, 비파괴 검증	5
A+B	사용후핵연료 검증 - 수량확인 (Method K)	16
A+B	검증활동 준비	12
A+B	방사선 관리구역 출입 및 이동	4
A+B	시설운영자와 회의 및 의견교환	8
A+B	기타 검증 및 확인 활동	4
합 계		88

## 2) 중수형 원전에 대한 사찰량

1992년 이후 중수형 원전 1기에 투입된 사찰량은 모든 경수형 원전에 투입된 사찰량을 훨씬 상회하고 있다. 일반사찰에 투입되는 연간 최대 사찰량은 45 PDI로 설정되어 있으며, 통상이 사찰량의 범위내에서 실제 소요 사찰량이 투입되고 있다. 그러나 transfer campaign으로 불리워지고 있는 기타 전략지점에 대한 사찰은 습식저장고인 사용후핵연료 저장지역에서 건식저장고로의 사용후핵연료 이송시에 검증을 위한 활동을 말한다.

일반사찰시 사찰활동에 투입되는 사찰량을 검증활동별로 세분하여 수 차례의 사찰시 소요된 시간을 평균값으로 산정하여 보면 표 2와 같다. 사찰기간중 핵연료장전기에 대한 인출이 있는 경우 상당시간이 투입되어야 하며, 사찰관이 입회하지 못한 기간중에 감시영역으로 출입한 도구, 용기 및 flask 등에 대한 확인 활동도 수행된다. 물자재고검증을 위한 사찰시에는 사용후핵연료 저장조에 보관되고 있는 사용후핵연료에 대한 수량확인 활동이 수행되는 바, 검증활동 준비를 포함하여 총 소요시간은 2명의 사찰관이 2일 이상 투입되거나 검증시간만을 고려할 때 약 16시간이 소요되고 있다. 그러나 1995년 및 1996년 사찰시 사찰장비에 부착되어 있는 전구의 파손, 보조도구의 문제발생 등으로 인하여 검증활동의 효율성이 낮고 효과성에 대한 의구심이 남아 있는 상태이다. 중간사찰과 물자재고사찰은 실제로 소요시간이 차이가 있어야 하나, 물자재고사찰시에만 수행되는 검증활동들이 중간사찰시에는 수행되지 않음에도 불구하고 중간사찰에 소요되는 사찰량은 물자재고사찰에 소요되고 있는 사찰량과 거의 같은 10-12 PDI 정도가 투입되고 있다.

중수형 원전에 투입되는 사찰량은 일반사찰시 검증활동에 소요되는 사찰량 보다는 transfer campaign에 소요되는 사찰량에 의해 그 크기가 결정된다 할 수 있다. 중수형 원전인 월성 1호기의 transfer campaign은 1992년 부터 시작되었으며, 매년 사용후핵연료가 건식저장고로 이송되고 있다. 이송되는 사용후핵연료의 양은 매년 다르며, 1992년 부터 1995년 까지는 transfer campaign 동안 2명의 IAEA사찰관이 상주하면서 검증활동을 수행하였으나, 1996년 부터는 사용후핵연료 이송시 IAEA 검증절차 개선을 통하여 1명의 사찰관이 검증활동을 수행하고 있다.

1996년도에 IAEA 사찰관들에 의하여 수행된 안전조치 대상 중수형 원전과 경수형 원전에 대한 사찰횟수, 사찰량 및 직접경비는 표 3과 같다. 사찰횟수 측면에서는 두 노형간 많은 차이를 보이고 있으나 투입 사찰량 및 경비 측면에서는 큰 차이를 보이지 않고 있는 바, 이는 중수형 원전의 안전조치 특성이 경수형 원전과 많이 다르고 다양한 사찰장비가 설치되어 있으며 안전조치 접근방법이 복잡하기 때문이다.

표 3. IAEA 사찰량 및 경비 비교(1996년 기준)

시설유형	시설수	사찰유형	사찰횟수	직접경비(천불)	사찰량(PDIs)	총비용 대비
LWR	162	PIV	158	1,595	438	2%
		IIV	839	5,615	1,422	6%
OLR	18	PIV	17	1,500	364	2%
		IIV	74	5,200	1,214	6%

### 3. 결 론

중수형 원전과 경수형 원전에 적용되고 있는 안전조치는 핵연료 교체방식과 핵연료의 특성 차이에 의하여 핵물질의 전용을 방지하기 위한 사찰장비 설치에 영향을 주고 있다. 또한 사찰활동에 투입되는 사찰량 역시 다양하고 복잡한 사찰장비가 설치되고 전용가능 핵물질의 생성이 상대적으로 높은 중수형 원전에 경수형 원전의 10배 이상이 투입되고 있다. 중수형 원전과 경수형 원전에 적용되고 있는 안전조치를 상호 비교를 통하여 그 차이점을 정확히 파악함으로써 향후 국가 계량관리 검사 수행시 안전조치 접근방법의 개선에 기여할 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- [1] IAEA Safeguards Criteria 1991-1995, IAEA, 1994. 4.15
- [2] Nuclear Power Plant Characteristics, A Training Manual for the International Atomic Energy Agency Inspectorate, IAEA, 1985.
- [3] The Safeguards Implementation Report for 1996, GOV/2917, IAEA, 1997. 5.