

중수로형 원자력발전소에 대한 보장조치 방법

박찬식, 박완수, 김현태, 이재성, 정미영

한국원자력연구소

요 약

보장조치 대상 원자력 시설에 대한 사찰 목적은 평화적 목적으로 사용되기 위한 시설 및 핵물질이 핵무기 생산 등의 비평화적 목적으로 전용되지 않았음을 확인하는 것이다. 이를 위하여 국제원자력기구에서는 보장조치 기준(IAEA Safeguards Criteria : 1991 - 1995)에 따라 적절한 검증 수단을 사용하여 핵물질의 형태 및 양, 시설의 운전기록 등에 대하여 보고된 내용과 실제 상황과의 일치성을 확인하고, 미신고된 핵활동이 없음을 확인하고 있다. 보장조치 측면에서 보면, 중수형원자로(CANDU)는 핵연료의 크기가 작고 운전중에 핵연료를 교체하는 방식(On Load Reactors)을 채택하고 있기 때문에 시설 내에서의 핵물질 이동이 매우 빈번하며, 사용후핵연료의 양 역시 경수형원자로에 비해 매우 많다. 따라서 중수형원자로에 대한 보장조치 사찰은 경수형원자로에 비해 사찰일수(최대허용사찰량 : 중수형원자로 45 인-일/년, 경수형원자로 15 인-일/년)가 훨씬 많고 보장조치 관련 장비 또한 매우 다양하다. 현재 운전 중인 월성 1호기에 이어 건설 중인 월성 2, 3, 4호기의 운전이 시작 되면 중수형원자로에 대한 국제원자력기구 및 국가사찰 양이 급격히 늘어날 전망이다. 또한 월성 1호기의 경우 사용후핵연료 저장조의 용량 초과로 인한 건식저장고(Dry Canister)로의 이송이 1992년도부터 매년 실시되고 있으며, 이 기간 중에 이송 대상 핵연료의 검증 및 운반 중 전용을 방지하기 위한 추가적인 사찰이 수행됨으로써 많은 인력과 시간이 투입되고 있다. 또한 국제원자력기구에서 추진하고 있는 보장조치 강화 방안의 일환으로 현재 건설 중인 월성 2, 3, 4호기에 대해서는 월성 1호기에는 적용되지 않은 추가적인 보장조치 관련 장비의 설치가 고려되고 있다. 이에 따라 우리나라에서는 중수형원자로에 대한 국제원자력기구의 사찰 기준 및 사찰 내용을 분석, 중수형원자로 보장조치 사찰에 대한 개선점을 도출하고, 후속기에 대해서 보다 효율적이고 효과적인 보장조치 방안을 적용토록 하여야 할 것이다.

1. 개요

중수형원자로는 핵연료의 크기가 소형이며, 천연우라늄을 사용하기 때문에 핵연료 사용량이 많고, 운전중 핵연료 교체 방식(On Load Reactors)이라는 시설의 특징과 때문에 상대적으로 보장조치의 목적인 핵물질 전용의 탐지가 어려운 시설이다. 이 시설에 존재하는 핵물질의 유형(Type)은 천연 우라늄, 감손 우라늄 및 조사된 플루토늄이며, 각 유형에 대한 유의량(Significant Quantity-핵 무기 1개를 제조할수 있는데 필요한 최소 핵물질량)은

10 ton-NU 및 8 kg-Pu 이고, 적기 탐지 기간(1 SQ 이상의 핵물질을 가졌을 경우 핵 폭발 장치를 제조하는데 소요되는 시간을 고려한 기간)은 저농축 및 감손 우라늄은 1년이며 조 사된 플루토늄은 3개월이다. 따라서 이 시설에 대한 적기 탐지 목적을 위한 사찰이 년 4 회 실시 되고 있으며, 이중 1회는 시설 내의 모든 핵물질을 검증하는 물자재고검증(PIV : Physical Inventory Verification)이다. 사찰시 검증 방법은 IAEA로 보고된 보고서와 시설 의 핵물질 재고 장부 및 관련 기록과의 비교 검증, 비파괴 측정 방법을 이용한 핵물질 검 증, 감시 및 봉인 장비에 의한 시설 내 핵물질 이동 검증 등이 사용되고 있으나, 시설의 특성 상 감시 및 봉인 장비에 대한 의존도가 매우 높다.

2. 중수형원자로에 대한 보장조치 적용 방법

월성 1 호기에 대한 물질수지구역(MBA : Material Balance Area, 보장조치 목적상 핵물 질 양이 결정될수 있고 핵물질의 반입 및 반출이 허용되는 한정된 지역, 그림 1 참조)에는 9개의 주요측정지점(KMP : Key Measurement Point, 보장조치 대상 핵물질의 이동 및 재고 량을 결정하기 위해 물질수지구역 내에 설정한 유통 경로 및 핵물질 축적이 가능한 지점) 이 설정되어 있으며, 이는 다시 3개의 유통 주요측정지점(Flow KMP)과 6개의 재고 주요측 정지점(Inventory KMP)으로 구성되어 있다. 이중 신연료 저장고를 제외한 노심 핵연료, 수 중저장조 내 사용후핵연료 및 건식저장고 내 사용후핵연료에 대한 검증은 이들에 대한 물 리적 접근이 용이하지 않기 때문에 갯수 확인, 일련번호 확인, 비파괴 검증 등과 같은 직 접적인 검증 방법보다는 감시 및 봉인 장비에 크게 의존하고 있으며, 따라서 감시 및 봉인 방법이 실패했을 경우 이에 대한 재검증이 매우 어렵고 많은 시간이 소요된다.

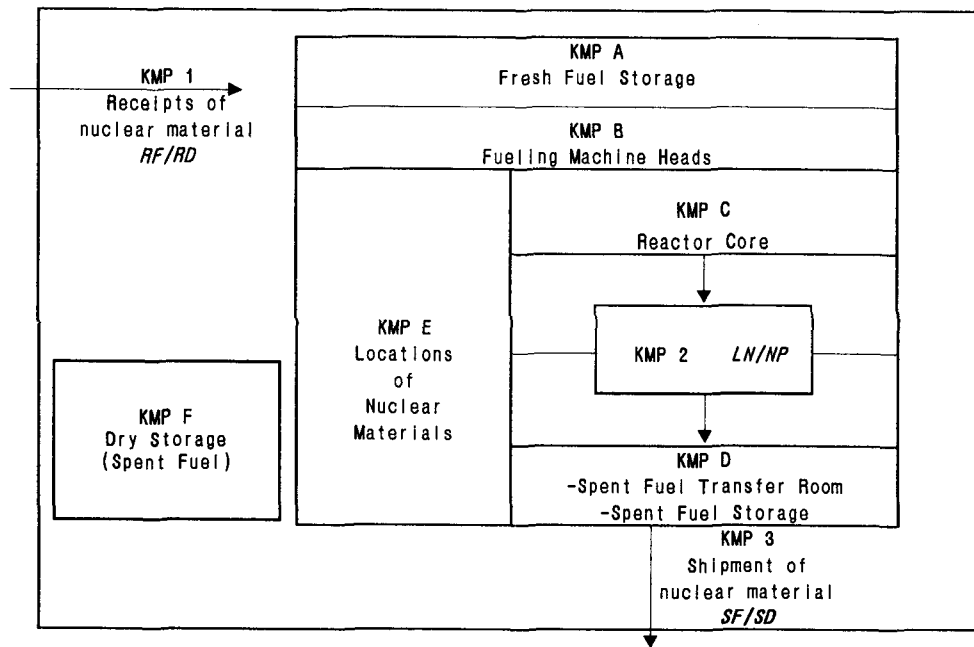


그림 1. 월성 1호기에 대한 물질수지구역 및 주요측정지점

신연료에 대한 검증으로는 갯수 확인, 일련번호 확인 및 비파괴측정(HM-4를 사용한 방사선 측정)이 수행되고, 노심 내에서 사용후핵연료 저장조로 이동되는 사용후핵연료를 검증하기 위하여는 이송 통로에 Bundle Counter를 설치하여 사용후핵연료의 수량을 파악하고 있으며 또한 사용후 핵연료의 불법 반출을 차단하기 위하여 불법 반출이 가능한 통로에 TLD 를 이용한 Yes/No Monitor를 설치하고 있다. 건식저장고로 이송되는 사용후핵연료의 검증을 위해서는 비파괴측정 장비인 HSGM(High Sensitivity Gamma Monitor)을 사용하고 일련번호 확인을 위하여 수중망원경을 이용하고 있다. 건식저장고 내의 사용후핵연료에 대한 검증 방법은 2중 봉인(Dual C/S System : COBRA 및 Metal Seal)을 설치하여 사용후핵연료의 불법 인출을 막고 있으며, 주기적으로 PMCC(PMCA+CdTe Detector)를 사용하여 사용후핵연료에 대한 비파괴측정을 수행하고 있다. 월성 1호기에 적용되고 있는 감시 장비로는 MUX-CCTV 시스템이 사용되고 있다. 이 시스템은 최대 15개의 감시 카메라를 연결, 사용할 수 있으나 현재는 13개의 카메라 만이 작동되고 있다. 보장조치용 감시 카메라는 각 주요 측정지점에 설치되어 플루토늄을 포함하는 노심 핵연료 및 사용후핵연료의 이동 감시에 주로 사용되어지며 미보고된 핵연료의 이동 및 보장조치용 장비의 고의적인 훼손 등을 감시하기 위한 목적으로 사용된다.

3. 중수형원자로에 대한 보장조치 사찰 내용

3.1 일반 사항

중수형원자로의 물질수지구역은 감손 우라늄, 저 농축 우라늄 및 조사된 플루토늄이 존재하고 있다. 따라서 이시설에 대한 적기 탐지를 위한 탐지 기간은 3개월이며 년 3 회의 중간 사찰(Interim Inspection)과 1 회의 물자재고검증(Physical Inventory Verification)이 이루어지고 있다. 주요 사찰 내용은 1) IAEA에 보고된 핵물질과 시설의 장부 내역과의 비교 검증, 2) 신핵연료의 수량, 일련번호 확인 및 비파괴 측정, 3) 감시 테이프의 판독 및 봉인 교체 를 통한 사용후핵연료의 검증, 4) Bundle Counter 기록지의 내용을 통한 노심에서의 사용후핵연료 저장조의 핵연료 이송 현황 검증, 5) YES/NO Monitor의 교체를 통한 사용후핵연료의 불법 이송 검증, 6) 감시 테이프의 판독을 통하여 핵연료의 이송으로 오인되는 작업 등에 대한 검증을 하고 있다. (그림 2 참조) 이외에 사용후핵연료의 건식저장고 이송에 대한 검증이 1992년 이후 계속적으로 이루어지고 있으며 이 기간 중에 이루어지는 주요 내용은 이송 대상 핵연료의 1) 수량 확인 및 수중카메라를 이용한 일련번호 확인, 2) HSGM(High Sensitivity Gamma Monitor)을 이용한 비파괴 측정, 3) 사용후핵연료 적재 차량 수행에 의한 불법 이송 감시, 4) 건식 저장고에 대한 이중 봉인(Metal 및 COBRA Seal 설치), 5) PMCC(PMCA + CdTe Detector)를 이용한 비파괴 측정 등이 이루어지고 있다.

3.2 천연 우라늄 구역에 대한 구역 보장 조치

동일한 범주의 핵물질을 취급하는 여러개의 시설을 하나의 가상적인 구역으로 설정하여 보장조치를 적용하는 것이 구역 보장조치(Zone Approach) 개념이다. 구역 보장조치에 관한 일반적인 기준은 IAEA 보장조치 기준 Annex I에 기술되어 있다. 구역 보장조치의 목적은 구역 내부의 시설간 차용을 방지하면서 구역 내부의 시설간의 재고 변동 검증을 줄이기 위한 것으로 현재 우리나라는 한국원자력연구소의 중수로 핵연료가공시설(CFFP)과 월성 1호기의 신핵연료 저장고를 천연우라늄 구역(Natural Uranium Zone)으로 설정하고 있다. 이 구역에서의 핵물질에는 CFFP에 있는 천연 우라늄(UO₂ Powder, UO₂ Pellet, Rod 및 Bundle)과 월성1호기의 미조사된 신연료가 포함된다. 따라서 중수로핵연료 가공시설에서 제조한

핵연료 다발을 중수로에 선적(shipment)할 때와 같이 동일 구역 내의 핵물질 이동은 검증하지 않으며, 중수로의 신핵연료 저장고로부터 노심으로 핵연료 장전시에는 구역 외의 이동으로 간주된다.

3.3 시설내 사용후핵연료 이송 검증

동일 물질수지구역 내의 건식 저장고에 이송되는 핵연료에 대한 검증은 보장조치 기준 (Safeguards Criteria) Annex D.1.b에 따라 검증이 이루어지고 있다. 수중에 보관 중인 사용후핵연료가 건식 저장고에 일단 이송이 되면 향후 검증을 위해서는 핵연료에 대한 접근이 어려운 상황이므로 사전에 필요한 검증을 수행하고 적재가 완료된 저장고에 대해서는 이중 감시 체제 (Dual C/S System) 하에 두게 된다. 월성 1호기에 적용되는 이중 감시 체제는 각각 독립적으로 설치된 봉인 (COBRA Seal 과 Metal Seal) 이 적용 되고 있으며, 저장고 내부의 핵연료를 PMCC (PMCA + CdTe Detector) 를 사용하여 검증하고 있다. 1992년 부터 실시되고 있는 사용후핵연료 이송 작업은 앞으로 매년 실시될 예정이며 이에 대한 작업량의 축소와 보다 효율적인 검증을 위해 새로운 절차서의 적용에 대해 협의를 진행 중에 있으며, 현재의 절차서에 명시된 몇몇 사항에 대해서는 향후 변경이 되어야 할 것이다. 예를 들어 사용후핵연료 집합체 (Fuel Bundle) 의 일련번호를 수중 망원경을 통하여 확인 하는 것 등인데 노심 내에서 배출되는 핵연료 집합체는 Bundle Counter에 의해 수량 및 이동 방향이 검증 되었고 검증된 핵연료는 감시 장비에 의해 연속적으로 감시되고 있기 때문에 핵연

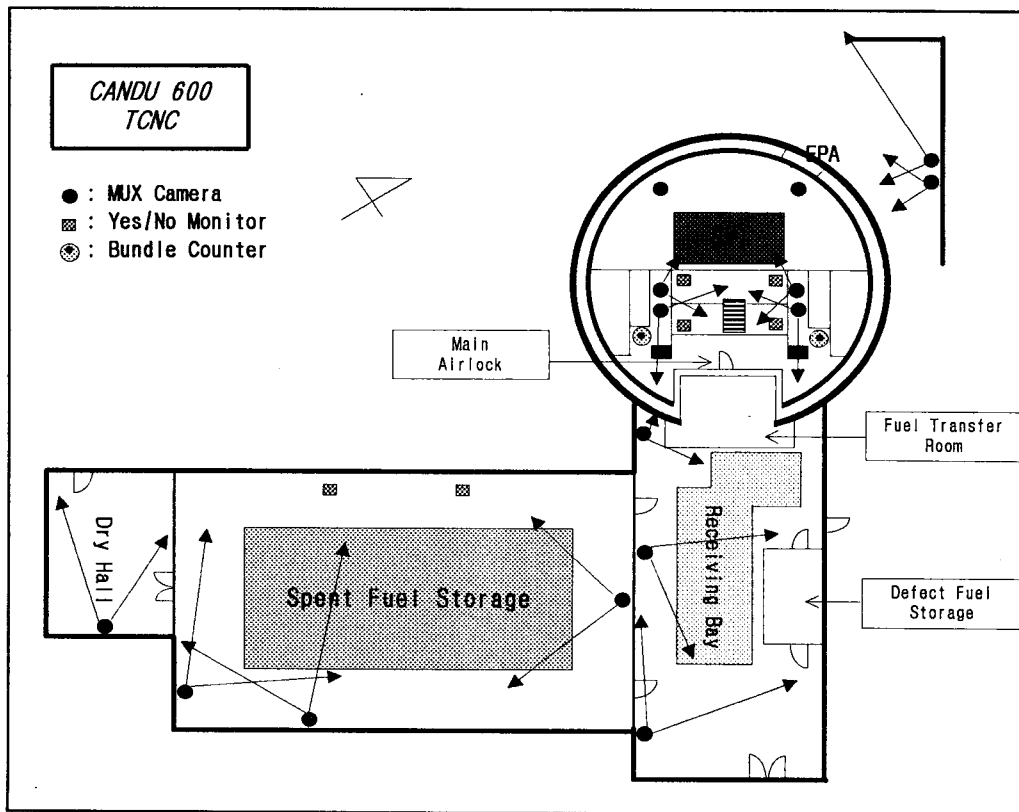


그림 2. 월성 1호기에 대한 보장조치 장비 설치도

료 이송 시 검증이 불필요 하다고 판단되며 또한 부식의 영향 등에 의해 현실적으로 검증이 불가능한 경우도 없지 않다. 이와 같이 핵연료의 상태 등에 따라 검증의 방법이 적절하지 못하거나 변경의 필요성이 있는 부분에 대해서는 관련 기관간 협의를 통해 보완 되어야 할 것이다.

4. 추가적인 보장 조치

4.1 Core Discharge Monitor (CDM) 설치

Bundle Counter는 노심에서 배출된 사용후핵연료의 감마선을 측정함으로써 시간에 따른 핵연료의 이동 방향, 수량 등을 파악 하여 비정상적인 핵연료의 이동을 발견하여 전용을 탐지하는 장비인 반면에 CDM은 노심 내 핵연료의 감마선 및 중성자를 측정하여 노심 내에서의 핵연료의 위치 및 수량을 실시간(Real Time)으로 검증하고자 하는데 목적이 있다. 이 시스템은 1980년대 후반에 캐나다의 AECL에서 제1 세대 CDM을 개발하여 자국의 Darlington 1, 2호기에 최초로 설치하여 운영하고 있고 그후 제 2 세대 CDM 을 동일 시설 3, 4호기에 설치하였다. 월성 1 호기에는 현재 CDM 이 설치되어 있지 않으나 2호기에는 CDM의 설치를 위해 협의 중에 있다. 이와 같은 추가적인 보장조치 장비를 설치하기 위해서는 우선 보장조치의 신뢰성을 향상 시킬 수 있다는 긍정적인 측면과 장비의 기능이 상실됨으로써 발생하는 보장조치 목표 달성의 실패 등이 동시에 고려되어야 할 것이다.

4.2 Ultrasonic Seal 설치

월성 1 호기의 경우 사용후핵연료 저장조에 설치된 감시 장비의 실패로 이들에 대한 재검증을 위해서는 매우 많은 노력이 필요하다. 이런 경우를 대비하여 사용후핵연료 저장택에 Ultra Sonic Seal 을 설치하면, 감시 장비가 비록 실패하더라도 저장 중인 사용후핵연료에 대한 재검증을 최소화 할 수 있다.

5. 사찰 결과에 대한 분석

중수형원자로는 보장조치 적용 방법이 경수형에 비해 매우 복잡하여 연간 사찰량도 경수형에 비해 약 4 배 가량 많다. 한편 시설의 특성상 감시 및 봉인에 대한 의존이 높기 때문에 이들에 대한 보장조치 적용이 실패할 경우 사용후핵연료의 재검증 등에 따른 많은 인력이 필요로 한다. 실제로 월성 1 호기의 경우 사찰 목표 미달성의 주요 원인은 감시 장비의 실패(조명 상실 및 전원 공급 중단 등)에서 비롯된 재검증의 지연이며, 미검증된 용기의 이동 등도 여기에 포함된다. 따라서 검증의 신뢰도를 향상 시킬수 있다는 측면에서 추가적인 보장조치 장비(CDM 등)를 설치하면 하나의 장비가 실패했을경우 다른 장비로써 사찰 결과를 만족 시킬 수 있을 것이다. 한편 핵연료 다발을 적재할수 있는 크기의 용기의 출입(감시 지역에서 비감시 지역으로 출입)에 대해서도 검증을 하여야 하나 실제로 모든 경우에 검증을 하기란 현실적으로 어려움이 있다. 따라서 미 검증된 용기의 이동에 대해서는 사전 통지 및 사후 이에 대한 충분한 설명을 통하여 전용의 의심을 해소 하여야 할 것이다.

6. 중수형원자로의 보장조치 개선점

앞에서 언급한 바와 같이 중수형원자로에 대한 보장조치 적용은 감시와 격납 및 봉인에

많이 의존하기 때문에 이들에 대한 유지 관리가 매우 중요하다. 중수형원자로에 대한 보장 조치 목표를 달성하기 위해서는 첫째, 감시 카메라 감시 지역에 대한 조명의 확보 및 전원 공급이 무엇보다 중요한데 실제로 보장조치 목표 미달성의 대부분이 여기에 기인하고 있다. 둘째, 봉인에 대한 건전성 유지를 위해 봉인 설치 지점에 인식을 할수 있는 표시 등을 부착하여 부주의에 의한 훼손을 방지하여야 한다. 셋째, 계획 예방 정비 기간 및 불시 정비 기간 중에 이동되는 각종 용기에 대한 사전 및 사후 정보를 충분히 확보하여 오해에 의한 불만족도를 감소 시켜야 한다. 넷째, 월성 1호기의 경우 1회 사찰에 소요되는 사찰량이 12 PDI (Person-Days of Inspection) 정도가 소요되고 있으나 대부분의 시간이 감시 테이프의 판독에 소요되고 있다. 따라서 현재 사용되고 있는 테이프 판독기를 새로운 모델로 교체하여 사찰 소요 일수를 줄여야 할것이다. 보장조치에 적용되는 장비들의 유지에 필요한 시설내 관련부서는 매우 복잡적이며 관련 부서간의 유기적인 협조 체제가 이루어질때 보장 조치 목표 달성이 가능할 것으로 생각 되어진다.

7. 결론

앞에서 설명한 바와 같이 중수형원자로에 대한 보장조치 방법은 경수형원자로에 비해 복잡하고 검증 장비 또한 다양하다. 더우기 추가적인 보장조치 장비가 후행 호기부터 적용될 예정이기 때문에 현재 건설 중인 시설이 완공되면 이들 시설에 대한 보장조치 사찰 및 보고에 관련된 업무량이 급격히 늘어날 것이다. 그러나 중수형원자로에 적용되는 검증기기는 그 종류가 다양한 반면 상호간 보완적인 기능을 수행토록 되어 있어 시설의 사찰 목표 달성에 도움이 될 것이다.

건식 저장고에 이송되는 사용후핵연료에 대한 검증 방법 중 수중 망원경을 이용한 일련 번호 확인은 현실적으로 어려운 작업인 반면, 보장조치 측면에서 유효성을 향상시킨다고 판단되지 않으므로 향후 협의에 의해 생략하여야 할 것이다. 또한 건식저장고내의 사용후 핵연료에 대한 비파괴측정이 PMCC (PMCA + CdTe detector)를 사용하여 이루어 지고 있으나, 이 시설이 이중 봉인 시스템이 적용되고 있는 점을 감안할때 이 방법의 사용은 이송 초기의 감마선 형태 자료 확보 및 이중 봉인 방법이 실패할 경우와 같은 특수한 경우에 한하여 제한적으로 사용되어야 할 것으로 판단된다. 따라서 현재 협의 중에 있는 새로운 이송 절차에는 상기 내용이 충분히 반영 되어야 할 것이다.

시설 차원에서는 보장조치 감시 카메라 및 기타 기기에 대한 전원 공급 및 조명 유지, 봉인 장비 등에 대한 건전성 유지를 위한 자원을 지속적으로 수행하여 후행 호기를 포함한 모든 중수형원자로에 대한 보장조치 목표 달성도를 향상시켜야 할 것이다.

참고문헌

1. IAEA, "Safeguards Criteria 1991 - 1995", 1990.
2. IAEA, "The CANDU Course", 1993.
3. IAEA, "Facility Attachment for Wolsong Unit 1", 1992.
4. IAEA, "Procedure for verification of spent fuel bundle transfer from the spent fuel bay to dry storage at Wolsong-1 NPP", 1994.
5. D.Bot, "Modular Core Discharge Monitor/CDM MARK II", Bot Engineering Ltd., 1993.
6. 한국원자력연구소, "국내보장조치 체제 현황 및 개선 방안에 관한 연구", KAERI/RR-1568/94, 1994