

우리나라에 적용되는 저농축우라늄 구역 보장조치

박완수
한국원자력연구소

요 약

국제원자력기구에서는 현재 적용되고 있는 보장조치(Safeguards) 방법을 보다 효과적이고 효율적으로 적용하기 위하여 1993년부터 'Programme 93+2'라는 사업을 수행하고 있다. 이중 하나의 과제로 수행되고 있는 구역 보장조치는 기존의 보장조치 개념이 하나의 시설을 대상(Facility-Oriented Safeguards)으로 개발된 것과는 달리 동일한 범주의 핵물질을 취급하는 여러개의 시설을 하나의 가상적인 구역(Fuel Cycle-Oriented Safeguards)으로 설정하여 보장조치를 적용하는 개념으로, 보다 강화된 사찰 활동에 의하여 보장조치 신뢰도를 향상시키면서 사찰 횟수 및 사찰량은 절감되고 있다. 우리나라는 한국원자력연구소의 중수로핵연료 가공시설과 월성 1호기를 천연우라늄 구역(Natural Uranium Zone)으로, 한국원전연료(주)의 경수로핵연료 가공시설과 국내의 모든 경수로를 저농축우라늄 구역(Low Enriched Uranium Zone)으로 설정하여 성공적으로 구역 보장조치를 적용하고 있다. 그러나 이러한 구역 보장조치의 적용에는 원자력산업 체제의 단순화와 같은 제약조건이 따른다. 앞으로 우리나라에서는 현재 적용되고 있는 구역 보장조치 방법이 보다 효율적으로 운영되고 시설 운영에 대한 방해를 최소화시키는 방안을 고려하여야 하며 이에 는 가공시설에서의 생산 및 수송 일정을 발전소 운영 및 사찰 일정과 적절히 조화시키는 방법, 가공시설에서 검증된 핵연료에 대하여 적절한 감시 및 봉인 장비를 적용하는 방법, 현재의 구역 이외의 시설 또는 핵물질에 새로운 구역을 설정, 적용하는 방안 등을 고려할 수 있다.

1. 개요

보장조치란 평화적 이용 목적의 핵물질이 핵폭발장치로 전용되는 것을 방지하기 위한 검증체제를 의미한다. 일반적으로 보장조치 적용 방법은 단일 시설 또는 단일 물질수지구역(Material Balance Area)에 대한 재고(Inventory) 및 재고변동(Inventory Change) 검증 결과가 국제원자력기구에서 정한 '보장조치 기준(Safeguards Criteria 1991-1995)'을 만족하도록 개발되어 왔다. 이러한 보장조치 방법을 적용한다면 물질수지구역 간의 핵물질 이동이 빈번할 경우 재고변동을 검증하기 위하여는 상당량의 사찰자원(Inspection Resources)을 필요로 한다. 이 경우 동일한 범주의 핵물질을 취급하는 다수의 물질수지구역을 하나의 가상적인 초물질수지구역(super MBA, 앞으로 구역-Zone-으로 지칭)으로 간주한다면 동 구역 내부에 있는 물질수지구역 간의 핵물질 이동에 대한 검증을 최소한으로 줄일수 있다.

이러한 구역 개념을 바탕으로 구역에 대한 보장조치 적용 방법을 개발한 것을 '구역 보장조치(Zone Approach)'라고 지칭하며 현재 세계적으로는 우리나라에 2개 구역(저농축우라늄 구역 및 천연우라늄 구역), 그리고 캐나다에 2개 구역(플루토늄 구역 및 천연우라늄 구역)이 설정되어 각각 구역 보장조치를 적용하고 있다. 각각의 구역에 적용되는 구역 보장조치 방법은 개별적으로 국제원자력기구 보장조치 사무차장의 승인을 받도록 되어 있으며, 동일한 범주의 핵물질을 취급

하는 구역이라도 구역을 구성하는 시설의 종류에 따라 보장조치 적용 방법은 조금씩 차이가 있다.

2. 일반적인 보장조치 적용 방법

국제원자력기구의 보장조치 방법은 1 SQ(Significant Quantity - 유의량 : 핵폭발장치 1개를 제조하는데 필요한 핵물질량-, 1 SQ = 8 kg Pu = 25 kg U-235 for HEU = 75 kg U-235 for DU, NU, LEU)의 핵물질이 핵폭발장치로 전용되었을 경우 이를 적기탐지 기간(Detection Time : 특정 핵물질을 가졌을 경우 핵폭발장치를 제조하는데 소요되는 시간을 고려한 기간, 미조사된 플루토늄 및 고농축 우라늄 = 1개월, 조사된 플루토늄 및 고농축 우라늄(사용후핵연료 등) = 3개월, 저농축 우라늄 등 = 12개월) 내에 탐지하는 것을 목표로 개발되었다. 보장조치 대상 시설에 대하여 이러한 보장조치 목표가 달성(Goal Attainment) 되었는가를 평가하기 위하여는 보장조치 기준이 이용된다. 보장조치 기준은 각 시설 형태(경수로, 중수로, 기타 발전로, 연구용원자로, 가공시설, MOX 가공시설, 재처리 시설, 농축 시설, 저장 시설, 기타 시설, 시설외 지점 등 11개 시설 형태와 중수 생산 시설 및 국가 전체에 대한 기준 등 13개 장으로 구성됨) 별로 양적 목표(Quantity Goal)와 시간적 목표(Timeliness Goal)를 만족시키기 위하여 검증(사찰)시 수행되어야 할 내용을 기술한 것이다. 양적인 목표란 사찰시 시설 내에 있는 핵물질을 검증, 전용이 없음을 확인하기 위한 것으로 통상 1년에 한번 수행되는 물자재고검증 (Physical Inventory Verification)를 중심으로 한 재고 검증, 시설로 반입/반출되는 핵물질을 검증하는 재고변동 검증(Inventory Change Verification), 그리고 전략지점 검증(Strategic Point Verification) 등의 방법으로 달성된다. 시간적 목표란 핵물질을 전용하더라도 이를 핵무기 제조에 이용되기 전에 탐지하기 위한 것으로 적기탐지를 위해서 미조사된 플루토늄 및 고농축 우라늄은 1개월, 조사된 플루토늄 및 고농축 우라늄(사용후핵연료 등)은 3개월, 저농축 우라늄 등은 12개월마다 사찰을 받아야 한다.

2.1 저농축핵연료 가공시설에 대한 보장조치 방법

저농축핵연료 가공시설에 대한 국제원자력기구의 보장조치 목표는 물질수지기간(Material Balance Period, 통상 1년) 중 유의량(75 kg U-235)의 핵물질 전용을 탐지하는 것이다. 동 시설에서 취급하는 저농축우라늄은 적기탐지 기간이 12개월이므로 년 1회 실시되는 물자재고검증 시 집중적으로 재고검증을 실시한다. 물자재고검증 내용은 국제원자력기구에 보고된 보고서와 시설의 장부 및 기록을 비교 검증하며, 각 주요측정지점(Key Measurement Point) 별로 핵물질에 대한 검증(갯수 확인, 일련번호 확인, 중량검사, 비파괴 검사 및 시료 분석)으로 이루어지고 있다. 일반적으로 시료의 채취가 가능한 용액, 분말, 소결체 등의 물질은 NaI Detector (PMCN)와 보조기기 등을 이용한 비파괴 검사와 파괴 분석용 시료를 채취함으로써 검증을 수행한다. 시료채취가 불가능한 UF6 Cylinder, 핵연료봉, 핵연료집합체는 각각 Ge Detector (PMCG), NaI Detector (PMCN), HM-4 및 Neutron Collar (UNCL) 등을 이용하여 비파괴검사만으로 검증한다.

물자재고검증만을 수행할 경우의 문제점은 비파괴 검사만을 수행하는 핵연료봉 및 핵연료집합체의 경우 검사의 정확도가 시료 분석에 비하여 상대적으로 낮다는 점이다. 이를 보완하기 위하여 보장조치 기준에서는 최소한 연 4회 이상 전략지점(가공시설의 경우 Rod Loading Station)에서 핵연료봉에 장입되는 소결체를 채취, 분석토록 하거나 핵연료봉을 Rod Scanner로 검사토록 하고 있다. 이외의 문제점으로는 물자재고조사 시 검증한 물자재고가 의미를 갖기 위해서는 물지수지기간 중 발생한 재고변동(반입량, 반출량, 소모량, 폐기물량 등) 보고가 정확하여야 한다는 점이다. 즉 물지수지기간 중 상기와 같은 재고변동이 있다고 보고하고 실제로는 핵물질을 전용하

는 것이 가능하다. 따라서 보장조치 기준에서는 재고변동 중 시설 내·외로의 물질이동에 대한 검증(Transfer Verification)을 위하여 무작위 사찰(Random Inspection : 사찰 수행일을 무작위로 지정)을 실시토록 하고 이의 실시가 불가능할 경우 물자재고조사 이외에 5번의 계획된 중간 사찰(Interim Inspection)을 수행토록 하고 있으며, 시설 내부에서 발생하는 유보 폐기물(Retained Waste, TW), 손실(Measured Discard, LD) 등에 대해서는 이의 발생량을 연간 0.5 SQ (LD+TW) 및 월 0.01 eff-kg (LD) 미만으로 제한하고 있다. 이외에 가공시설에 대한 보장조치 중 중요한 요소는 선적/인수 차이(Shipper/Receiver Difference, SRD)와 미계량물질(Material Unaccounted For, MUF)에 대한 검증으로 통계적인 방법을 이용하고 있다.

2.2 경수로에 대한 보장조치 방법

경수로에 대한 국제원자력기구의 보장조치 목표는 물질수지기간(Material Balance Period, 통상 1년) 중 유의량(75 kg U-235 및 8 kg Pu)의 핵물질 전용을 탐지하는 것이다. 동 시설에 존재하는 조사 플루토늄(Irradiated Pu)은 적기탐지 기간이 3 개월이므로 통상 연 1회 실시되는 물자재고조사를 포함하여 연간 4번의 사찰이 실시되나, 연료 교체작업이 있을 경우 작업에 필요한 장비의 원자로 건물내 이송 때문에 작업 전후에 봉인의 제거, 재설치 및 동 기간중의 임시 감시 장비 설치를 위한 사찰판의 출입이 추가된다.

경수로에 대한 보장조치 방법은 주로 봉인 및 감시(Containment and Surveillance) 방법에 의 존하고 있어 다른 종류의 시설에 비해 비교적 간단한 형태의 사찰이 이루어지고 있다. 사찰시 수행되는 활동은 국제원자력기구에 보고된 보고서와 시설의 장부 및 운영기록 간의 비교 검증, 노심핵연료 및 사용후핵연료의 이동 감시를 위한 감시장비의 점검과 녹화 테이프의 수거 및 교체, 신연료, 노심연료, 사용후연료의 검증(갯수 확인, 일련번호 확인 또는 비파괴검사 : HM-4 및 ICVD 이용), 원자로 건물의 장비 출입구에 설치된 봉인의 교체 등이다. 이외에 경수로에 대한 보장조치 방법 중 중요한 것은 미신고 플루토늄 생산 탐지로 역시 감시 및 봉인 방법을 이용하고 있다.

2.3 핵물질 차용에 대한 보장조치 방법

핵물질 검증시 다른 시설로부터 동일한 핵물질을 차용(Borrowing)하여 그 시설에서의 핵물질 전용을 은폐하는 것을 방지하기 위하여 보장조치 기준에서는 조사 플루토늄이 존재하는 경수로에 대해서는 1년에 한번 한 경수로에서 사찰이 수행될 경우 다른 경수를 무작위로 선택하여 동시 사찰(Simultaneous Inspection)을 수행하며, 저농축핵연료 가공시설에 대해서는 물자재고조사 시 동일한 핵물질을 보유하고 있는 모든 시설(다른 저농축핵연료 가공시설 및 경수로에 있는 신연료)에 대하여 동시 사찰을 수행한다.

3. 저농축우라늄 구역에 대한 보장조치 방법 및 비교

3.1 저농축우라늄 구역에 대한 구역 보장조치 방법

구역 보장조치에 관한 일반적인 기준은 보장조치 기준 Annex I에 기술되어 있으며 이중 중요한 사항은 다음과 같다.

- ① 구역 보장조치의 목적은 구역 내부의 차용을 방지하면서 구역 내부의 시설간의 재고 변동 검증을 줄이기 위한 것으로 각 경우마다 보장조치 사무차장의 승인을 받아야 한다.
- ② 동시 물자재고조사(Simultaneous Physical Inventory Verification, SIM-PIVs)와 필요시 적기탐지를 위한 동시 중간 사찰(Simultaneous Interim Inventory Verification, SIM-IIVs)은 구역 내의 모든 시설에 대하여 사찰일이 중첩되어야 한다. 그렇지 않을 경우 검증시 동일 물질이 되풀이되어 검증되지 않음을 보증하기 위한 감시 및 봉인 장비가 적용되어야 한다.
- ③ SIM-PIV 시 구역 내에 검증되지 않은 이동이 없어야 하며, 직접전용물질(Direct-use Material)에 대해서는 SIM-IIV 시에도 검증되지 않은 이동이 없어야 한다.
- ④ 구역 내부 또는 외부로 이동되는 핵물질의 검증은 구역을 하나의 물질수지구역으로 취급하여 동일 형태의 시설에 요구되는 방법으로 검증하거나, 개개의 구역 보장조치에 달리 규정된 바에 의하여 검증한다.
- ⑤ 구역 외부의 시설로부터 핵물질의 차용이 없음을 확인하는 방법은 상기 2.3에 따른다.
- ⑥ 물질수지평가(Material Balance Evaluation)는 구역 내의 시설에 대해 각각 수행한다.
- ⑦ 구역 보장조치에 규정되어 있지 않은 내용은 보장조치 기준에 규정된 바에 따른다.
- ⑧ 구역 물자재고조사(Zone PIV) 시 구역 내의 모든 시설에 대하여 동일한 장부종료일(Book Ending Date)을 사용하여야 하며, Zone IIV 시에도 가능할 경우 동일한 장부종료일을 사용한다.

우리나라에 적용되고 있는 저농축우라늄 구역은 그림 1.에서 보듯 한국원전연료(주)의 경수로 핵연료 가공시설과 현재 가동 중인 10기의 경수로에 존재하는 모든 신연료로 구성된다. 우리나라에 적용되는 구역 보장조치 방법은 위의 일반적인 기준 외에 사찰 빈도 및 방법 등에 대하여 상세히 규정되어 있다. 이 중 중요한 사항은 다음과 같다.

- ① 가공시설에 대한 중간 사찰은 물질수지기간 중 2회 실시한다.
- ② 동시 물자재고조사 수행시 가공시설은 사찰기준에 규정된 대로 실시하며, 경수로 신연료에 대한 검증은 갯수확인, 일련번호 확인 및 대량결손 검증(Gross Defect Test)을 위한 비파괴 검사를 수행한다(I+A+B). (참고 : 동 조항은 제 4차 한-IAEA 보장조치 검토회의 때 '경수로에 존재하는 신연료가 경수로에 반입된 후 이미 대량결손 검증을 수행하였고, 현재 사용후핵연료 저장조 내에 저장되어 있을 경우에는 갯수확인, 일련번호 확인만을 수행'하도록 합의하였음.)
- ③ 중간 사찰시 가공시설에서는 Rod Loading Station에서 핵연료봉에 장입되는 소결체를 채취, 시료 분석을 수행하고 전번 사찰일 이후 새로이 반입된 핵물질 및 새로이 생산된 핵연료집합체에 대해서만 물자재고조사 시와 같은 강도로 검증하며, 경수로에서는 반입되는 모든 신연료에 대해 사용후핵연료 저장조에 저장되기 전에 갯수확인, 일련번호 확인 및 대량결손 검증(Gross Defect Test)을 위한 비파괴 검사를 수행한다(I+A+B).

3.2 일반적인 보장조치 방법을 적용할 경우와의 비교

현재 저농축우라늄 구역 보장조치가 적용되고 있는 경수로핵연료 가공시설과 10개 경수로 신연료에 일반적인 보장조치를 적용할 경우 예상되는 차이점은 다음과 같다.

- ① 가공시설에 대한 중간 사찰이 물질수지기간 중 2회에서 5회로 증가하며, Rod Loading

Station에서의 소결체 채취가 2회에서 4회로 증가한다.

- ② 가공시설에 대한 물자재고조사 시 신연료를 보유하고 있는 모든 경수로에 대한 동시 물자재고조사 수행이 필요 없으나, 대신 상기 2.3에 규정된 바와 같이 핵물질 차용을 방지하기 위하여 몇기의 경수로를 무작위로 선택, 동시사찰을 수행하므로 큰 차이가 없다.
- ③ 경수로에 반입되는 모든 신연료에 대해 사용후핵연료 저장조에 저장되기 전에 갯수확인, 일련번호 확인 및 대량결손 검증을 위한 비파괴 검사를 수행(I+A+B)하는 대신 갯수확인, 일련번호 확인 또는 대량결손 검증을 위한 비파괴 검사를 수행(I+A or B)한다. 이 차이 점은 경수로에서 반입된 신연료를 건식 저장고 용량 초과 또는 시설 운영의 편의 등 여러 이유로 사용후핵연료 저장조로 이송하려고 할때 나타난다. 즉 구역 보장조치 하에서는 모든 신연료가 비파괴 검사(보통 IM-4 이용)를 받아야 하기 때문에 이송을 위하여 국제원자력기구 사찰관을 파견토록 요청하여야 하기 때문에 경수로에 대한 사찰량이 상황에 따라 다소 증가할 가능성이 있다.
- ④ 구역 보장조치에 적용시 모든 신연료는 어떤 방법으로라도 비파괴 검사를 받아야 하나, 일반적인 보장조치 방법을 적용할 경우 가공시설에서 검증되지 않고 반출된 신연료는 일련번호 확인만 수행되기 때문에 보장조치 방법이 약화된다.

4. 결론

앞에서 비교한 바와 같이 구역 보장조치를 적용할 경우의 장점은 보장조치 방법이 강화되면서도 사찰빈도 및 사찰량을 감소시킨다는 점이다. 국제원자력기구의 자료에 따르면 우리나라에 저농축 및 천연우라늄 구역을 설정, 구역 보장조치를 적용함으로써 매년 약 26 PDI(Person-Days of Inspection)의 사찰량을 절감한다고 되어 있다. 이는 동 구역에 매년 투입되는 사찰량이 약 200 PDI 정도이므로 구역 보장조치를 적용함으로써 10% 이상의 사찰량을 절감한 것이다.

그러나 이러한 구역 보장조치가 모든 경우에 적용될 수는 없다. 구역 보장조치의 어려움 중 하나는 동시 물자재고조사이다. 우리나라의 경우 구역 내의 시설이 비교적 적고, 단일 기관에서 운영하고 있기 때문에 문제가 없으나, 구역 내에 수개의 가공시설과 수십개의 원자력발전소가 있고 운영하는 기관이 여러 기관일 경우 동일한 시점에 동시 물자재고조사를 한다는 것은 모든 가공시설을 동시에 정지하여야 하기 때문에 불가능하다. 이러한 제약조건 때문에 세계적으로 구역 보장조치를 적용하고 있는 국가는 아직 우리나라와 캐나다 밖에는 없다.

향후 우리나라에서는 현재 적용되고 있는 구역 보장조치 방법이 보다 효율적으로 운영되고 시설 운영에 대한 방해로 최소화시키는 방안을 고려하여야 한다. 현재 가능한 방안으로서는 가공시설에서의 생산 및 수송 일정을 발전소 운영 및 사찰 일정과 적절히 조화시키는 방법, 가공시설에서 검증된 핵연료에 대하여 적절한 감시 및 봉인 장비를 적용하는 방법 등을 단기적으로 고려할 수 있으며, 장기적으로는 현재의 구역 이외의 시설 또는 핵물질에 새로운 구역을 설정, 적용하는 방안을고려할 수 있다.

참고문헌

“IAEA Safeguards Criteria 1991-1995”, 4th Updates, 1994. 4.

- 2. IAEA, “Strengthening the Effectiveness and Improving the Efficiency of the Safeguards System”, GOV/2784, 1995. 2.

3. IAEA, "Strengthening the Effectiveness and Improving the Efficiency of the Safeguards System(Programme 93+2), Technical Background Documentation", 1995. 2.
4. IAEA, "Strengthening the Effectiveness and Improving the Efficiency of the Safeguards System - Proposals for a Strengthened and More Efficient Safeguards System", GOV/2807 1995. 5.
5. IAEA, "Strengthening the Effectiveness and Improving the Efficiency of the Safeguards System - Report by the Director General to the General Conference", GC(39)/17, 1995. 8

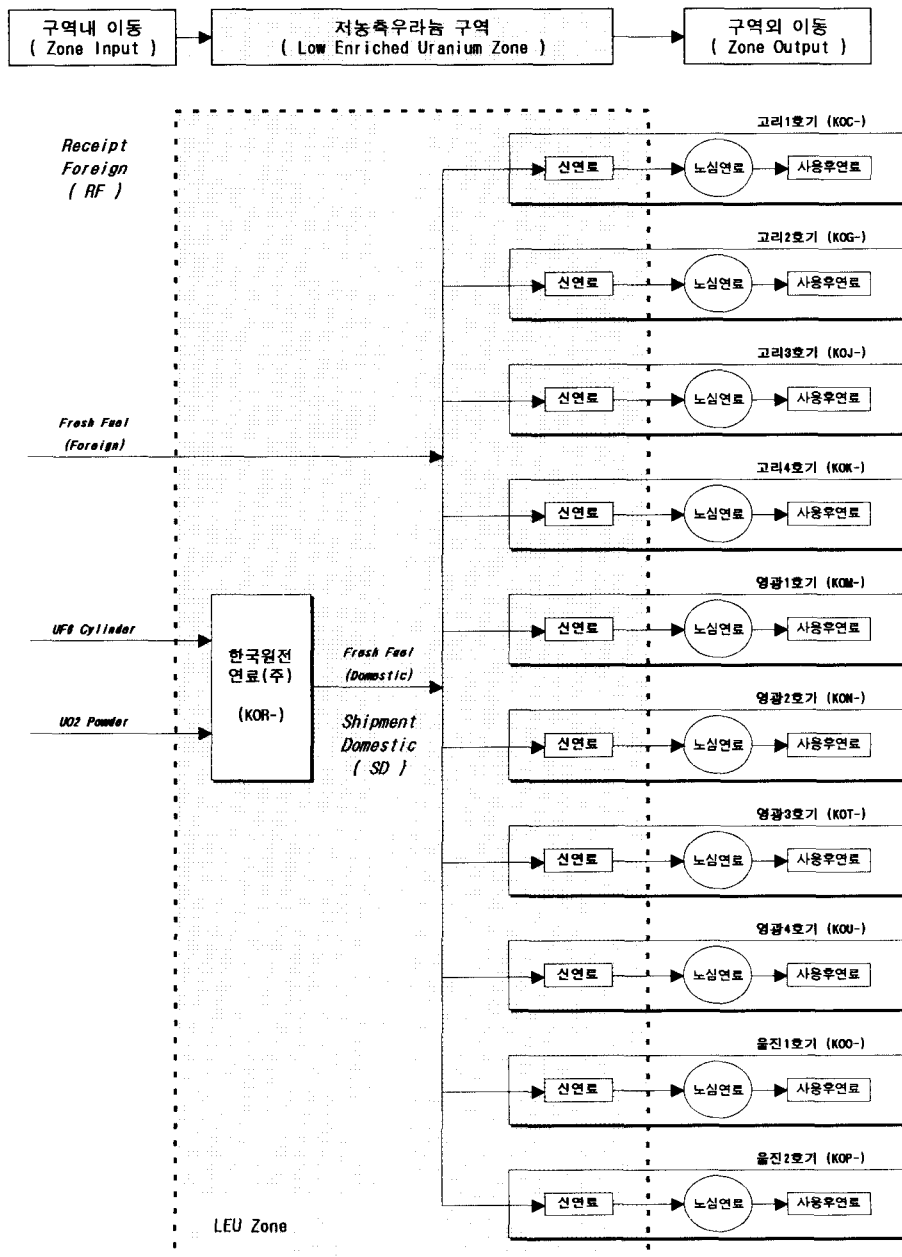


그림 1. 저농축우라늄 구역에서의 핵물질 이동 (Nuclear Material Flow in the LEU Zone)