

## 천연 및 저농축 우라늄 가공시설에 대한 보장조치 방법

박완수  
한국원자력연구소

### 요 약

천연 및 저농축 우라늄 가공시설은 취급하는 핵물질의 민감도가 고농축 우라늄이나 플루토늄에 비하여 상대적으로 낮기 때문에 원자력발전소, 연구용원자로 등과 같은 시설보다 국제원자력기구의 보장조치 적용 방법이 단순하다고 생각하기 쉽다. 그러나 가공시설은 취급되는 핵물질이 UF<sub>6</sub>, 우라늄 분말, 소결체 등과 같이 계량하기 쉽지 않는 형태로 존재하는 중량시설(bulk handling facility)이기 때문에 오히려 핵연료집합체 만이 존재하는 계수시설(item facility) 보다 더 다양하고 정밀한 계량방법이 적용되고 있다. 이 때문에 국제원자력기구에서는 일반 원자력발전소의 4-5 배에 달하는 사찰량을 가공시설에 투입하고 있으며, 동 시설에 대한 보다 효과적이고 효율적인 사찰방법을 개발하고 있다.

### 1. 개요

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 12 개월이므로 년 1 회 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.

보장조치 측면에서 볼 때 물자재고검증 만을 수행할 경우의 문제점은 비파괴 검사 만을 수행하는 핵연료봉 및 핵연료집합체의 경우 검사의 정확도가 시료 분석에 비하여 상대적으로 낮다는 점이다. 이를 보완하기 위하여 보장조치 기준에서는 최소한 연 4 회 이상 전략지점(가공시설의 경우 Rod Loading Station)에서 핵연료봉에 장입되는 소결체를 채취, 분석토록 하거나 핵연료봉을 Rod Scanner 로 검사토록 하고 있다. 이외의 문제점으로는 물자재고조사 시 검증한 물자재고가의 의미를 갖기 위해서는 물지수지기간 중 발생한 재고변동(반입량, 반출량, 소모량, 폐기물량 등)에 관한 보고가 정확하여야 한다는 점이다. 즉 물지수지기간 중 상기와 같은 재고변동이 있다고 보고하고 실제로는 핵물질을 전용하는 것이 가능하다. 이를 방지하기 위하여 보장조치 기준에서는 재고변동 중 시설 내·외로의 물질이동에 대한 검증(Transfer Verification)을 위하여 무작위 사찰(Random Inspection : 사찰 수행일을 무작위로 지정)을 실시토록 하거나, 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 이용하여 이의 유의성을 검증하고 있다.

이외에 우리나라의 저농축 핵연료 가공시설에 대하여는 구역 보장조치(Zone Approach)가 적용

되고 있다. 일반적으로 보장조치 적용 방법은 단일 시설 또는 단일 물질수지구역(Material Balance Area)에 대한 재고(Inventory) 및 재고변동(Inventory Change) 검증 결과가 국제원자력 기구에서 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. 우리나라에 적용되고 있는 구역 보장조치는 한국원전연료(주)의 경수로핵연료 가공시설과 현재 가동 중인 10기의 경수로에 존재하는 모든 신연료로 구성되는 저농축우라늄 구역과 한국원자력연구소의 중수로형핵연료 가공시설과 월성 1,2호기의 신연료로 구성되는 천연우라늄 구역의 2개 구역이 있다.

## 2. 저농축 핵연료 가공시설에 대한 보장조치 기준

### ① 기록 및 보고의 검사

- 시설에서 유지하는 계량관리 보고서, 운영기록 및 보조문서 간의 정확성 및 일치성을 검증하고, IAEA에 송부한 재고변동보고서, 물질수지보고서, 물자재고목록과 상호 비교.

### ② 물자재고검증

- 매년 1회 시설자의 물자재고조사(PIT : Physical Inventory Taking)에 대한 검증(PIV : Physical Inventory Verification)을 실시, 다음의 활동을 수행함. 물자재고조사 간의 기간은 14개월을 초과하지 못함.
- 감시 및 봉인이 적용되지 않는 물질은 갯수 확인을 수행하고 물질 형태 별로 다음과 같이 검증.

#### (a) 저농축우라늄

- i UF6 Cylinder 는 대량결손, 부분결손 및 미량결손에 대하여 중탐지확률로 검증함. 미량결손 검증은 상대표준편차(RSD)가 0.06 이하인 부분결손 검증 방법으로 대체할 수 있음.
- ii 우라늄 금속, 우라늄 합금, 우라늄 분말, 소결체 및 Scrap 을 포함하는 우라늄 화합물은 대량결손, 부분결손 및 미량결손에 대하여 중탐지확률로 검증함.
- iii 핵연료봉, 핵연료집합체 및 기타 핵연료 품목은 대량결손 및 부분결손에 대하여 중탐지확률로 검증함.
- iv 우라늄을 포함하는 기타 Bulk 물질(예를 들면 폐기물 등)은 대량결손에 대하여 중탐지확률로 검증함.

#### (b) 천연우라늄

- i UF6 Cylinder 는 대량결손에 대해서는 중탐지확률로, 부분결손에 대하여는 저탐지확률로 검증함.
- ii 우라늄 금속, 우라늄 합금, 우라늄 분말, 소결체 및 Scrap 을 포함하는 우라늄 화합물은 대량결손 및 부분결손에 대하여 중탐지확률로 검증함.
- iii 핵연료봉, 핵연료집합체 및 기타 핵연료 품목은 대량결손에 대하여 중탐지확률로 검증함.
- iv 우라늄을 포함하는 기타 Bulk 물질(예를 들면 폐기물 등)은 대량결손에 대하여 중탐지확률로 검증함.

#### (c) 감손우라늄

모든 형태의 감손우라늄은 대량결손에 대하여 중탐지확률로 검증함.

③ 국내 및 국제이전의 검증

- 시설 또는 영역에서 반출입되는 국내 이전 물질은 PIV 시 및 중간사찰 시에 (a) 또는 (b)에 의거 검증함.

(a) 일반사찰은 시설로 반입되는 국내 반입 물질과 시설로부터 반출되는 완성된 제품의 반출을 국내 및 국제이전 검증 규정에 따라 검증할수 있도록 시설의 운영계획에 맞춰 일정을 조정함. 또한 중간사찰은 이와 같은 모든 국내 이전에 대하여 무작위 사찰(Random Inspection)이 적용될수 있도록 계획함. 무작위 사찰이 실시될때까지 국내이전을 검증하기 위한 계획된 중간사찰은 통상 물질수지기간중 다음과 같은 빈도로 수행됨.

- i 저농축우라늄을 취급하는 시설에 대해서는 5 회,
- ii 천연우라늄 또는 감손우라늄을 취급하는 시설에 대해서는 3 회. 그리고 물질수지기간 중 국내 이전에 관련된 핵물질 량의 20% 이상에 대한 검증이 필요함. 필요시 경우에 따라서 DDG-SG 의 결정에 따라 추가적인 사찰이 수행될수 있음.

(b) 구역 보장조치(Zone Approach)가 적용되는 시설에 대해서는 통상 2 회의 중간사찰이 실시되며, 다음의 활동과 수반하여 실시됨. 즉 소결체를 핵연료봉에 장입하는 장소(Rod Loading Station)에서의 소결체 시료 채취 및 분석, 구역에서 반출입되는 핵물질의 검증 및 기타 재고 변동의 검증과 기록 및 보고의 검사. 저농축우라늄 구역에서는 2 회의 중간사찰 시 전회의 사찰 이후 검증할수 있는 새로이 생산된 제품(핵연료집합체 등)에 대해 PIV 시와 동일한 기준에 의거하여 검증함.

- 시설 또는 구역에 반출입되는 국제이전 핵물질은 다음의 경우 국내 및 국제이전 검증 규정에 의거하여 검증함.

- (a) 기타 목적을 위한 사찰 중에 핵물질의 검증이 가능한 경우.
- (b) 예외적으로 DDG-SG 가 필요하다고 판단된 경우.

- 각 사찰에 있어서 전회의 사찰 이후 사찰기간 중에 검증될수 있는 반입 핵물질에 대하여는 PIV 시 적용되는 것과 동일한 기준에 의거하여 검증함. 검증 후 핵물질은 정보의 연속성 유지(Continuity of Knowledge)를 위하여 IAEA 의 봉인을 적용할수 있음.

④ 기타 재고 변동의 검증

- 측정된 폐기, 기타 재고감소(반출, 핵적 손실, 구분 변경 또는 사고 손실은 제외)로 처리되는 핵물질과 잔류폐기물로 처리되는 핵물질은 그러한 미검증된 재고 변동의 합계량에 매 물질수지기간 중 0.5 SQ 미만으로 유지토록 PIV 및 중간사찰시 검증함. 동 검증은 대량결손에 대하여 PIV 시 그 물질에 요구되는 탐지확률로 수행함. 기타 목적을 위한 사찰에서 검증할 수 있는 보장조치의 대상이 되는 핵물질은 PIV 에서 적용된 바와 같은 동일한 기준으로 검증함.

⑤ 기타 주요측정지점에서의 검증

- 소결체에 대한 시료 채취는 미량결손 검증을 위하여 핵연료봉 장입 장소에서 수행함. 동 활동은 저농축우라늄 시설에서는 적어도 연 2 회, 감손우라늄 또는 천연우라늄 시설에 대해서는 적어도 연 1 회 실시함. 핵연료봉 중의 핵물질 용량 측정시 상대표준편차가 0.06 을 초과하지 않는 경우에는 시설의 핵연료봉 주사장치(Rod Scanner)를 이용한 측정으로 소결체의 시료 채취를 대체할수 있음. (단 IAEA 의 표준 핵연료봉을 이용하여 기기에 대한 검교정을 실시하여야 함)

⑥ 물질수지평가

- 선적/인수차(SRD)는 MUF 와 MUF-D 를 평가하는 경우와 물질수지기간 중의 모든 선적/인수

차의 합계가 0.1 SQ를 초과하는 경우에 통계적 유의성에 대하여 평가함.

- 계량관리 오차에 대한 국제적 기준과 시설에서의 측정 오차를 사용하여 MUF의 통계적 유의성과 보장조치 유의성에 대하여 평가함.
- 시설 운영자와 사찰관 간의 통계적 차이치(D)는 미량결손 및/또는 부분결손 검증이 요구되는 Stratum에 대해 산출됨. 종합적인 D-Statistic 또는 필요시 MUF-D에 대한 기여도와 그 불확실성(표준편차)을 평가함.

⑦ 설계정보의 검증

- 설계정보는 시설보완 또는 운영조건의 변경, 보장조치 기술의 개발 또는 현재 적용되고 있는 보장조치에 관계되는 검증절차의 적용에 있어서의 경험의 견지에서 적어도 년 1회 재검사를 함.
- 보장조치에 관계되는 설계정보에 있어서의 수정 또는 변경사항이 있는 경우에는 그 수정 또는 변경사항은 보장조치 절차의 조정애 필요한 근거를 확립하기 위하여 검증하고, 필요한 조정을 수행함.

⑧ 시설자 측정 계통의 검증

- 시설자 측정계통의 품질과 기능에 대하여 매 물질수지기간마다 평가, 결론을 도출함.
- 시설자 측정계통은 일반 사찰시 다음의 활동에 의하여 검증함.
  - (a) 국제원자력기구에서 인정하는 표준분봉을 이용하여 저울의 교정을 수행하거나, 용기 및 기타 계량관리 목적에 사용되는 측정기기의 교정 및 재교정 활동을 관찰.
  - (b) 독립된 표준 또는 복제된 시료를 사용하여 분석장치 및 비파괴측정 장치와 같은 측정계통의 품질 및 기능의 검증.

⑨ 재고가 1 SQ 미만 또는 사찰목표의 부분적 달성

- : 재고가 1 SQ 미만 및 1 SQ 이상의 경우 사찰목표의 부분적 달성의 평가를 위하여 사용
- 어떤 유형의 물질 재고가 1 SQ 보다도 적은 경우는 그 물질유형에 대하여 요구되는 다음의 활동을 수행함. 재고가 1 SQ 보다 큰 물질유형의 재고가 있는 시설에 대한 사찰목표는 모든 물질 유형들에 대하여 수행된 지침서 다음의 활동과 물질수지평가(⑥ 참조)가 수행되었을 경우 부분적으로 달성되었다고 평가함.
  - 상기 항에 있어서 PIV는 다음과 같이 수정되어 수행됨.
    - (a) 감시/봉인 하에 있지 않은 저농축우라늄은 갯수확인을 수행하고, 다음 검증을 수행함.
      - i UF6 Cylinder는 대량결손 및 부분결손에 대하여 저탐지확률로 검증함.
      - ii 우라늄 금속, 우라늄 합금, 우라늄 분말, 소결체 및 Scrap을 포함하는 우라늄 화합물은 대량결손 및 부분결손에 대하여 저탐지확률로 검증함.
      - iii 핵연료봉, 핵연료집합체 및 기타 핵연료 품목은 대량결손에 대하여 저탐지확률로 검증함.
      - iv 우라늄을 포함하는 기타 Bulk 물질(예를 들면 폐기물 등)은 대량결손에 대하여 저탐지확률로 검증함.
    - (b) 감시/봉인 하에 있지 않은 천연우라늄은 갯수확인을 수행하고, 그리고 다음의 검증을 수행함.
      - i UF6 Cylinder는 대량결손에 대해서는 저탐지확률로 검증함.
      - ii 우라늄 금속, 우라늄 합금, 우라늄 분말, 소결체 및 Scrap을 포함하는 우라늄 화합물은 대량결손에 대하여 저탐지확률로 검증함.
      - iii 핵연료봉, 핵연료집합체 및 기타 핵연료 품목은 대량결손에 대하여 저탐지확률로 검증함.
      - iv 우라늄을 포함하는 기타 Bulk 물질(예를 들면 폐기물 등)은 대량결손에 대하여 저

탐지확률로 검증함.

(c) 감시/봉인 하에 있지 않은 감손우라늄은 갯수확인을 수행하고 대량결손에 대하여 저탐지확률로 검증함.

(d) 감시/봉인 하에 있고, 그 결과가 만족스러울 때는 재측정을 수행하지 않음.

(e) PIV 시 미검증된 각 물질 유형의 양을 0.6 SQ 로 변경함.

### 3. 국내 가공시설에 대한 보장조치 적용 방법

#### (1) 중수로핵연료가공시설

중수로핵연료가공시설(시설코드 KOE-)은 천연우라늄을 사용하여 중수형원자로(월성 원자력발전소)의 핵연료(Fuel Bundle)를 생산하는 가공시설로써 연간 100톤의 천연우라늄을 가공할수 있는 시설을 보유하고 있다. 동 시설은 년 1회의 물자재고검증(PIV)을 포함, 연간 3-4 회의 일반사찰을 받고 있으며, 그 내용은 IAEA 에 보고된 보고서와 시설의 장부 및 기록을 비교 검증, 각 주요 측정지점(Key Measurement Point, KMP)별 핵물질에 대한 검증(갯수 확인, 번호확인, 중량검사, 비파괴검사 및 시료채취 분석)으로 이루어지고 있다. 핵연료 가공시설 내에는 UF6 Cylinder, 우라늄 분말, 용액, Sludge, Pellet, Rod, Bundle 등의 핵물질이 존재하며, 사찰시 각각의 핵물질 형태에 따라 보조기기와 NaI Detector(PMCN) 등을 이용한 비파괴 검사(Non-Destructive Assay, NDA)와 파괴 분석(Destructive Assay, DA)을 위한 시료를 채취함으로써 검증이 가능하다. 시료채취가 불가능한 UF6 cylinder, 핵연료봉, 핵연료집합체는 각각 PMCG (PMCA + Ge Detector), PMCN (PMCA + NaI Detector) 및 HM-4 등을 이용하여 비파괴검사 만으로 검증한다.

중수로가공시설은 월성 1호기의 신연료저장고와 더불어 Natural Uranium Zone 을 형성, NU Zone Approach 를 적용토록 되어 있어 중수로가공시설 PIV 시 월성 1호기의 신연료도 동시에 검증하는 Simultaneous PIV 가 아울러 실시되고 있다.

#### (2) 한국원전연료주식회사

한국원전연료주식회사(시설코드 KOR-)는 저농축 UO2 를 사용하여 경수형원자로 핵연료를 생산하는 가공시설로써 연간 생산능력은 200톤이다. 동 시설은 UF6 변환 공정을 포함하고 있어 시설 내에 UF6 Cylinder, U powder, Scrap/Sludge, Pellet, 핵연료봉, 핵연료집합체 등의 다양한 핵물질이 존재한다.

동 시설은 년 1회의 물자재고검증(PIV)을 포함, 연간 3회의 일반사찰을 받고 있으며, 그 내용은 한국원자력연구소의 중수로핵연료 가공시설과 흡사하게 IAEA 에 보고된 보고서와 시설의 장부 및 기록을 비교 검증하며, 각 KMP 별 핵물질에 대한 검증(갯수 확인, 번호확인, 중량검사, 비파괴검사 및 시료채취 분석)으로 이루어지고 있다. 동 시설에 존재하는 서로 다른 형태의 핵물질의 검증은, 각각의 핵물질 형태에 따라 보조기기와 NaI Detector(PMCN) 등을 이용한 비파괴 검사와 파괴 분석용 시료를 채취함으로써 검증이 가능하다. 시료채취가 불가능한 UF6 Cylinder, 핵연료봉, 핵연료집합체는 각각 PMCG (PMCA + Ge Detector), PMCN (PMCA + NaI Detector), HM-4 및 Neutron Collar(UNCL) 등을 이용하여 비파괴검사 만으로 검증한다.

한국원전연료주식회사는 국내 모든 경수로의 신연료저장고와 더불어 Low Enriched Uranium Zone 을 형성, LEU Zone Approach 를 적용토록 되어 있어 한국원전연료주식회사에 대한 PIV 시 국내의 모든 경수로(고리 1-4 호기, 영광 1-3 호기, 울진 1-2 호기) 중 신연료가 있는 시설의 신연료도 동시에 검증하는 Simultaneous PIV 가 아울러 실시되고 있다.

### (3) 보장조치 목표 달성 결과

한국원자력연구소 내의 중수로핵연료 가공시설과 한국원전연료(주)의 경수로핵연료 가공시설에 대한 보장조치 목표 달성 여부를 보면 1992년 구역 보장조치 적용 첫해에만 이에 대한 경험 부족으로 보장조치 목표를 부분적으로 달성하였고 그 이후에는 별 문제없이 보장조치 목표를 달성하였다. 이들 시설에 대한 사찰 방법이 감시장비가 없다는 잇점을 제외하고는 오히려 시설내 여러가지 형태의 물질 때문에 다른 시설에 비하여 복잡하다는 것을 고려하여 보면 시설에서 보장조치의 준수에 상당한 노력을 하였음을 알수 있다.

향후 이들 시설에서도 큰 문제점이 없을 것으로 예상되나, 앞으로 한국원자력연구소의 중수로 핵연료 가공사업이 한국원전연료(주)로 이전되고, 경수로핵연료 가공시설의 증설될 것에 대비하고 IAEA에서 고려하고 있는 저농축핵연료 가공시설에 대한 새로운 보장조치 적용방법(IFSS, Random Inspection, Near Real Time Accountancy, Batch Follow-up System 등)을 고려하여야 할 것이다. 또한 현재 적용되고 있는 구역 보장조치(Zone Approach)에 대한 심도 있는 검토가 수행되어야 할 것이다.

### 참고문헌

1. IAEA, "Safeguards Criteria 1991-1995", 4th Updates, 1994.4.
2. 한국원자력연구소, "국가보장조치 기술개발", KAERI/MR-291/96, 1996.12
3. 한국원자력연구소, "국가보장조치 기술개발", KAERI/MR-274/95, 1995.12
4. 한국원자력연구소, "국가 사찰제도 확립 및 IAEA 사찰지원", KAERI/MR-280/95, 1995.12
5. 한국원자력연구소, "국내 보장조치 체제 현황 및 개선 방안에 관한 연구", KAERI/RR-1568/94, 1995.3