

기준 파이로 시설의 계량추정시스템 방안과 미계량 물질 측정 불확도

한보영, 송대용, 신희성, 안성규, 김호동

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 대덕대로 1045

byhan@kaeri.re.kr

1. 서론

사용후핵연료를 이용한 미래 핵연료 주기 시설인 파이로 시설(Pyroprocessing facility)은 한국을 비롯한 세계의 많은 나라들이 관심을 가지고 연구하고 있다. 그 중 파이로 시설에 대한 가장 큰 이슈중 하나는 시설의 안전조치성(Safeguardability) 평가에 대한 접근방안이다. 현재 연구시설이외에 가동되고 있는 파이로 프로세스 시설이 존재하지 않기 때문에 안전조치에 대한 IAEA 뿐만 아니라 국제적인 경험이 부족한 상태이다. 한국원자력연구원은 기준 파이로 시설의 안전조치 접근방안 확립하기 위하여 다양한 연구가 진행 중이다[1]. 본 논문은 사용후핵연료와 파이로 프로세스 공정 중 이동하는 주요 핵물질(Pu)의 계량을 위한 가능한 측정방안과 측정시스템이 가질 수 있는 오차를 분석하여 미계량물질(Material Unaccounted For, MUF)의 불확도(Uncertainty)를 계산할 수 있는 방법을 제시한다.

2. 분석내용 및 결과

2.1 기준파이로시설의 가능한 계량추정시스템

한국원자력연구원에서 기준파이로시설의 안전조치 접근방안을 개발하기 위해 주요 파이로 프로세스 공정들과 공정 중 물질수지를 정확하게 확립할 수 있는 물질수지구역(Material Balance Areas, MBA), 그리고 물질수지구역내 각 단위 공정에서 핵물질 흐름 또는 재고를 결정하기 위한 핵물질 측정 가능한 위치로서 주요측정지점(Key Measurement Point, KMP)을 분석하는 개념적인 설계가 연구 진행 되고 있다. Fig. 1.에서는 기준파이로시설의 주요 공정들과 물질수지구역, 그리고 주요측정지점을 보여주고 있다. 현재의 개념설계안을 토대로 사용후핵연료를 사용하는 파이로 공정에서 주요 대상 핵물질(Pu)의 계량관리를 위한 중요 고려대상은 공급된 사용후핵연료 집합체안의 핵물질을 균질하게 분포시키는 것과 주요 대상 핵물질 성분비를 정확하게 측정

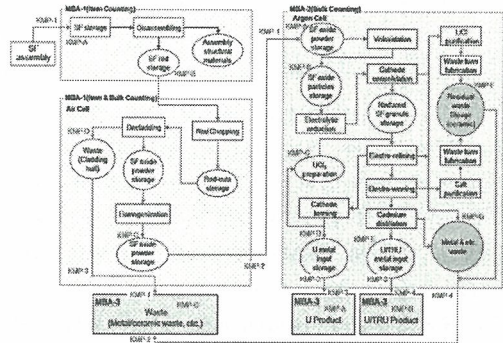


Fig. 1. MBA/KMP for Reference Pyro-processing Facility(REFP)

하는 것, 그리고 파이로 공정 처리 후 생산된 우라늄과 우라늄/TRU를 정확하게 계량하는 것이다. 또한 핵물질 포함량이 극미하지만 계량관리가 필요한 Hull, 염 폐기물, 금속 폐기물에 대한 계량추정도 필요하다. 이러한 고려사항을 반영하여 시설 운영자가 사용가능한 계량추정시스템 방안으로 현재 가능한 비파괴분석(Non-Destructive Assay, NDA) 기술을 적용하여 계량 시스템을 구성하고 그에 따른 불확도 예측 및 안전조치성 평가를 수행하는 것이다. 파이로 공정 핵물질흐름순서에 따라 공급된 사용후핵연료 집합체의 정량추정은 집합체의 총질량추정과 이후 공정인 사용후핵연료 균질화 분말로부터 측정된 주요 핵물질(Pu)의 성분비를 사용하여 결정된다. 다음은 파이로 공정전 사용후핵연료를 균질화시키고 나온 분말을 대상으로 감마분광을 통한 연소도(Burn-up)추정과 ORIGEN 모사로 주요 핵물질의 양을 결정하여 주요 핵물질(Pu)과 큐륨(Cm)의 비율(Pu/Cm)을 얻어진 양들로부터 계산한다. 이 Cm의 비율은 대부분의 주요측정지점(KMP)에서 NDA장비를 통한 Cm양을 직접 측정하고 식 (1)과 같이 주요 핵물질(Pu)양을 결정하는 데 사용된다.

$$Pu = \left(\frac{Pu}{Cm} \right)_{\text{균질화}} \times Cm_{KMP} \dots\dots\dots (1)$$

Table 1. The uncertainty of four analytic methods to measure Pu concentration

| 측정 방법 | Cm 측정 오차 | | Pu/Cm 측정 오차 | | Pu 성분비 오차 | |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|--|--|--|
| | 랜덤 | 계통 | 랜덤 | 계통 | 랜덤 | 계통 |
| 1) SF 대상 : Pu 성분비 상수 사용 | - | - | - | - | - | $\sqrt{\delta_{Re_2}^2 + \delta_{Se_2}^2 + \delta_{Rf_2}^2 + \delta_{Sf_2}^2}$ |
| 2) Cm양+Pu/Cm비 모두 측정 | δ_{Re_2} | δ_{Se_2} | δ_{Rf_2} | δ_{Sf_2} | $\sqrt{\delta_{Re_2}^2 + \delta_{Rf_2}^2}$ | $\sqrt{\delta_{Se_2}^2 + \delta_{Sf_2}^2}$ |
| 3) 핵물질 대상 : Cm양 측정 + Pu/Cm 상수 사용 | δ_{Re_3} | δ_{Se_3} | - | $\sqrt{\delta_{Rf_2}^2 + \delta_{Sf_2}^2}$ | δ_{Re_3} | $\sqrt{\delta_{Se_3}^2 + \delta_{Rf_2}^2 + \delta_{Sf_2}^2}$ |
| 4) 폐기물 대상 : Cm양 측정 + Pu/Cm 상수 사용 | δ_{Re_4} | δ_{Se_4} | - | $\sqrt{\delta_{Rf_2}^2 + \delta_{Sf_2}^2}$ | δ_{Re_4} | $\sqrt{\delta_{Se_4}^2 + \delta_{Rf_2}^2 + \delta_{Sf_2}^2}$ |

여기에서 Cm의 비율은 파이로 공정 안에서 핵물질이 이동하는 동안 변하지 않는다는 가정을 하고 있다. 이와 같이 제시된 측정방안은 핵물질의 계량관리를 위해 표 1에서 기준파이로시설에 적용될 수 있는 네 개의 계량측정방법으로 분류하고 NDA 장비를 통한 Cm 측정오차와 Cm 비율 측정오차를 결정하고 오차전파(error propagation) 방법을 통해 해당하는 분석방법에 따른 Pu 성분비 측정오차를 결정하게 된다. 이 분석 측정오차는 핵물질 계량관리에서 미계량물질을 통계적으로 평가하기 위해 불확도 계산에 사용된다.

2.2 미계량물질 측정과 불확도 계산

정량적인 의미로 미계량물질은 시설의 핵물질 input, output을 측정함과 동시에 실제 재고 측정을 실행함에 따라 한 기간의 물질수지를 계산하여 장부재고와 실재고의 차이를 말한다. 또한 측정된 미계량물질은 그 불확도의 범위에서 미계량물질이 있는지 없는지를 통계검정에 따라 평가하게 된다. 따라서 측정된 미계량물질에 대한 통계검정의 신뢰성은 미계량물질의 불확도값에 의존하며, 이 불확도값의 결정은 측정장비의 오차, 측정순서, 조작 및 물질수지등에 따른 오차전파의 정확한 처리와 개개의 측정에 따른 측정오차의 신뢰성이 중요한 요소가 된다. 미계량물질의 불확도를 구하기 위해 물질수지기간중에 대상 핵물질의 벌크측정, 샘플링 및 분석측정을 통계적 랜덤 오차(random error)와 계통오차(systematic error)로 상세히 추적하고 그 프로세스에서 발생한 오차의 전파를 고려하여, 각 핵물질형태별(stratum) 주요 대상 핵물질의 측정 오차분산을 구하고 그 총계를 계산하는 것이다[2, 3]. 기준파이로시설의 계량 측정을 위한 방안은 표 1에서 설명된 네 가지 분석측정방법들 가운데 핵물질형태별 한 가지

방법을 사용하게 되고 미계량물질의 불확도 계산은 IAEA 오차전파 모델을 기본으로 하여 사용된 분석측정방법의 해당오차를 적용하게 된다. 따라서 계량관리를 위해 사용된 모든 장비들의 오차와 분석을 위한 샘플링방법 오차들이 결정된다면 기준파이로시설에서 처리되는 사용후핵연료 처리양에 따른 미계량물질 측정과 그 불확도는 통계적으로 평가가 가능하게 될 것이다.

3. 결론

이 연구주제는 기준파이로시설에서 사용되어 질 수 있는 다양한 방안 가운데 현재 가능한 계량측정 시스템 방안을 제시하고 제시된 방안을 바탕으로 미계량물질의 측정 불확도 결정식 제시하였다. 그러나 추후 계량시스템에 대한 방안은 최종 계량관리 시스템을 도출할 수 있도록 계속적으로 연구 보완 될 것이다.

4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었다.

5. 참고문헌

- [1] 신뢰성 의. 기준파이로시설 설정을 위한 파이로 시설 개념설계 현황 분석, KAERI/TR-3985/2009
- [2] IAEA Safeguards Technical Manual, IAEA-TECDOC-261, (1982).
- [3] Jaech, J. L., "Statistical Methods in Nuclear Material Control", TID-26298, U.S. Gov't Printing Office, Chpt. 6, (1973)