

기준 파이로 시설 미계량물질(MUF) 측정 불확도 모델

한보영, 박세환, 송대용, 신희성, 안성규, 이태훈, 김호동  
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 대덕대로 1045  
 byhan@kaeri.re.kr

1. 서론

본 연구는 기준 파이로 시설의 안전조치를 이행하기 위한 핵물질 계량 측정 시스템을 이용하여 핵물질 계량 측정 시 발생하는 측정불확도로부터 파이로 공정 물질 수지 구역 안에서 발생하는 미계량물질의 불확도 모델을 제시한다. 기준 파이로 시설은 공학규모의 10tHM 사용후핵연료를 처리할 수 있는 시설으로써 개념연구를 통해 선정된 물질수지구역(MBA)와 주요측정지점(KMP)에 대한 정보를 사용한다 [1]. 주요 파이로 공정을 포함하고 있는 MBA-2 구역을 하나의 자동화된 공정처럼 생각하고 MBA-2안에서 계량관리는 공정흐름에 방해하지 않기 위해 최소화하는 모델을 설명한다. Fig. 1은 계량관리관점에서 핵물질흐름도를 간략히 표시하였다.

2. 본론

2.1 기준파이로 시설 안전조치 계량 방안

Fig.1에서 주요 파이로공정 셀 안에서 발생하는 미계량물질의 양은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$MUF_i = x_{in} - (x_U + x_{TRU} + x_W) + d_i \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $MUF_i$ 는 미계량물질로 파이로공정 안에서 발생하는 총 hold-up과 process loss를 포함하고,  $x_{in}$ 은 총 반입 핵물질 양,  $x_U$ 는 총 반출되는 U ingot의 핵물질 양,  $x_{TRU}$ 는 총 반출되는 U/TRU의 핵물질 양, 그리고  $x_W$ 는 총 반출되는 폐기물에 포함된 핵물질 양을 말하며  $y_i$ 는 셀 안에서 재고 측정(inventory taking)때 측정된 양을 말한다. 각 측정값은 그 측정 방법에 따라 측정오차를 가지며 MUF값은 각 측정오차들로부터 전과된 통계적인 불확도를 가진다. 이를 미계량물질의 불확도라 부르고  $\sigma_{MUF}$ 로 표기할 것이다. 측정 불확도는 독립적인 두 종류의 오차로 분류되는데 그 특징에 따라 랜덤오차(random error)와 계통오차(systematic error)로 나눈다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 계량관리 모델은 MBA-2 안에는 처리되지 못하고 순환되는 미량의 핵물질을 측정하는

KMP가 존재하고 MBA-1에 Input Accountancy Tank안에 균질화 공정 후 SF 분말을 저장하는 곳으로 input 양을 측정하는 inventory가 있다. MBA-1과 MBA-2 사이 경로에는 격납/감시 시스템을 설치하여 이동간의 전용을 감시하고 동일한 물질 이동을 증명하므로 SRD (Shipper and Receiver Difference)가 발생하지 않는 것으로 간주한다. 또한 MBA-2로부터 반출되는 U과 U/TRU ingot 그리고 폐기물 역시 두 MBA 이동간에 SRD가 존재하지 않고 MBA-3에서 반출되는 물질은 형태에 따라 3개의 KMP에서 계량 측정된다.

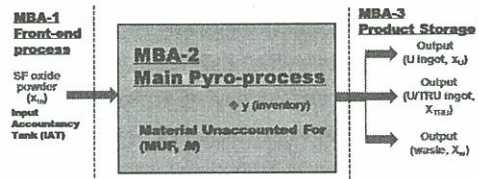


Fig. 1. Schematic of the simplest safeguards accountancy model

2.2 핵물질 계량관리를 위한 측정 오차 분석

2.2.1 균질한 SF 분말에 대한 Pu 측정 (IAT/MBA-1) 측정 대상의 SF 분말은 측정을 위해 n개의 균등한 item으로 나누고 r개 샘플을 수집하여 피동형 중성자 검출기와 감마검출기를 이용한 비파괴검사를 수행한다. 식 (2)에서처럼 저울을 통한 총 SF 무게(W)와 비파괴검사를 통한 Pu 성분비(P)를 곱하여 해당 총 Pu 무게를 측정한다. 식 (3)은 측정에서 발생하는 오차와 샘플링으로부터 예상되는 Pu 측정에 대한 불확도를 보여준다.

$$x_{in} = W \times P \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_{x_{in}}^2 = (x_{in})^2 \left[ \left( \frac{\delta_c^2}{n} + \frac{1}{r} (\delta_c^2 + \delta_f^2 + \delta_s^2) \right) + \left( \frac{\delta_w^2}{n} \left( 1 + \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n-1} \rho_{ij} \right) + \delta_c^2 + \delta_f^2 + \delta_s^2 \right) \right] \dots\dots\dots (3)$$

2.2.2 U ingot에서 Pu 측정 (전수검사) 측정 대상인 U ingot안에 포함된 Pu 양을 측정하

기 위해 총 U ingot을 m개의 균등한 item으로 나누고 파이로공정 셀을 나오는 모든 item을 피동형 중성자 검출기를 이용하여 Cm-244의 양(C)을 측정하고 균질화 분말에서 구한 Pu/Cm 비율(f)을 이용한다.

$$x_U = C \times f \dots\dots\dots (4)$$

$$\sigma_{x_U}^2 = (x_U)^2 \left[ \frac{1}{C^2} \sum_{i=1}^m c_i^2 \delta_w^2 + \delta_{f_r}^2 + \delta_{f_s}^2 + \frac{\delta_{\mu}^2}{C^2} \left( \sum_{i=1}^m c_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{m-1} c_i c_j \pi_{ij} \right) \right]$$

2.2.3 U/TRU ingot에서 Pu 측정 (전수검사)  
 측정 대상인 U/TRU ingot의 경우 하나의 item이 전체 sample을 대표한다. 파이로공정 셀을 나오는 U/TRU ingot을 피동형 중성자 검출기를 이용하여 Cm-244의 양을 측정하고 U ingot에서와 마찬가지로 Pu/Cm 비율이 공정 중 변하지 특성을 적용한다.

$$\sigma_{x_{mv}}^2 = (x_{TRU})^2 \left[ (\delta_{\xi}^2) + (\delta_{\gamma}^2 + \delta_{f_r}^2 + \delta_{f_s}^2) \right] \dots\dots\dots (5)$$

2.2.4 폐기물에서 Pu 측정 (전수검사)  
 폐기물의 경우 포함된 핵물질 양이 극미하기 때문에 계량관리 필요성이 적지만 여기서는 측정을 가정하고 하나의 item이 전체 sample을 대표하여 전수검사를 한다. U/TRU ingot에서와 같이 파이로공정 셀을 나오는 폐기물을 중성자 검출기를 이용하여 Cm-244의 양을 측정한다.

$$\sigma_{x_w}^2 = (x_w)^2 \left[ (\delta_{\theta}^2) + (\delta_{\gamma}^2 + \delta_{f_r}^2 + \delta_{f_s}^2) \right] \dots\dots\dots (6)$$

2.2.5 파이로 공정 셀 안 inventory에서 Pu 측정 (전수검사)  
 파이로 공정에서 순환되는 핵물질의 계량관리는 하나의 item이 전체 sample을 대표하는 전수검사를 가정으로 한다. 현재 적용되는 방법은 피동형 중성자 검출기를 이용하여 Cm-244의 양을 측정하며, 측정대상물질이 염과 함께 혼재되어 있는 핵물질이기 때문에 구체적인 방법은 폐기물에서의 측정방법과 동일할 것으로 예상된다.

$$\sigma_{y_i}^2 = (y_i)^2 \left[ (\delta_{r_i}^2) + (\delta_v^2 + \delta_{f_r}^2 + \delta_{f_s}^2) \right] \dots\dots\dots (7)$$

2.3 미계량물질(MUF) 측정 불확도 모델  
 각 주요측정지점에서 측정값과 측정오차들을 예측하였고 이 측정값들의 대수적 합산을 통해 한 물질수지주기에서 미계량물질(MUF)을 결정하는 계산모델을 제시한다. 본 연구를 위해 개념 설계

된 파이로시설은 공정 가동 중에 하나의 캠페인 단위로 구분이 가능하며 캠페인 간의 독립성이 유지되는 것으로 가정하고 있다[2]. 한 캠페인 주기로 물질계량 관리가 이루어지며, 예측되는 미계량물질의 불확도는 식 (8)과 같다

$$\sigma_{MUF_i}^2 = \sigma_{x_{in}}^2 + \sigma_U^2 + \sigma_{TRU}^2 + \sigma_W^2 + \sigma_{y_{i-1}-y_i}^2 \dots\dots (8)$$

총 물질 수지 기간(연간 처리량 기준)에서 미계량물질(MUF) 결정은 연간 총 q개의 캠페인(campaign)이 처리되고 현재 캠페인 ending inventory의 값은 다음 캠페인에 beginning inventory 값으로 사용되기 때문에 발생하는 correlation effect를 고려하여야 한다. 이를 위해 총 미계량물질 계산식 (9)를 얻을 수 있다.

$$MUF = MUF_1 + MUF_2 + \dots + MUF_q \dots\dots\dots (9)$$

$$= \sum_{i=1}^q [x_{in} - (x_U + x_{TRU} + x_W)]_i + y_0 - y_q$$

Table 1. MUF 불확도 계산식에서 사용된 첨자들

첨자	내 용
$\delta$	상대적 랜덤, 계통 오차
$s$	샘플링 오차 변수
$c$	Cm-244 측정오차 변수
$f$	Pu/Cm-244 측정오차 변수
$\rho_{ij}$	SF 분말의 무게 측정 시 상관관계 계수
$\pi_{ij}$	NDA 분석 측정 시 상관관계 계수

3. 결론

본 연구를 통해서 기준파이로시설의 측정방법에서 발생할 수 있는 미계량물질 양과 불확도를 예측할 수 있는 모델을 제시하였다. 예측된 미계량물질 불확도는 기준파이로시설의 계량관리측면에서 안전조치성과 시설의 총 연간 처리량, 그리고 사찰활동의 주기를 결정하는 중요한 요소로 작용할 것이다.

4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었다.

5. 참고문헌

[1] 한국방사성폐기물학회, 2010년 춘계학술발표회 논문요약집, pp.209-210, 2010.  
 [2] 김호동 외 7명, "기준파이로시설에 대한 핵물질 계량관리 시스템 설정", KAERI/TR-4294, 2011.