

## 사용후핵연료 물질의 중량계량 관리 방안

홍중숙, 이태훈, 김승현, 신희성, 김호동

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 대덕대로 1045

ishong@kaeri.re.kr

### 1. 서론

안전조치 목적으로 사용후핵연료 물질을 계량하는 데는 두 가지 방법이 있다. 그 첫 번째 방법으로서 핵연료집합체 단위로 계량하거나 또는 핵연료집합체 건전성, 안정성 등을 규명하기 위하여 집합체의 일부 연료봉을 추출하여 파괴 분석하는 것이다. 이 경우 사용후핵연료 내에 포함하고 있는 우라늄 원소 및 우라늄 235, 플루토늄 원소 함량 결정은 대상 물질의 원자로 내에 머무는 기간과 원자로 내에서의 위치 변경 등 핵연료의 연소 이력을 반영하여 컴퓨터 코드로 얻은 결과를 토대로 집합체내 품목 수의 평균값에 의해서 결정되기 때문에 그 핵물질 양에 대한 오차가 클 수밖에 없다. 따라서 연료 집합체 전체를 파괴하여 중량 계량하는 데는 그 방법을 도입할 수가 없다.

사용후핵연료 물질을 계량하는 두 번째 방법은 사용후 핵연료 집합체 전체를 파괴하여 중량계량 하는 것이다. 신핵연료물질일 경우에는 중량, 즉 무게와 농축도만 알면 간단하게 계량할 수 있다. 그러나 사용후핵연료일 경우, 핵연료의 원자로 내에서 연소됨에 따라 핵적 손실, 핵적 생성 그리고 핵분열 생성물들을 포함하고 있다. 또한 핵연료집합체의 연소정도가 원자로의 위치, 길이 방향의 불균등 연소 등으로 인하여 핵연료 집합체마다 핵물질의 분포가 달라지기 때문에 중량으로 직접 계량하기는 불가능하다.

안전조치 관점에서 이러한 문제를 해결하기 위해, 핵시설운영자 측은 핵투명성확보차원에서, 그리고 핵공급국 측은 핵확산방지 차원에서 동물질의 계량에 대한 연구개발이 꾸준히 이어왔다. 특히 우리나라에서는 PWR 사용후핵연료 적체 해소 및 핵폐기물 감소, 에너지 재활용의 목적으로 DUPIC 핵연료 주기 기술개발을 세계에서 처음으로 시도했으며, 공중물질의 유효한 계량관리기술개발을 목적으로 미국 LANL와 KAERI 간의 공동연구를 추진하여, Cm-Ratio에 의한 사용후핵연료 물질내의 우라늄 및 플루토늄 함량계량 방법을 도출해 내었다<sup>1)</sup>.

### 2. 본론

사용후핵연료 물질의 특성(고준위 감마 및 중성자선을 방출하면서 핵분열 생성물을 포함하는 극히 비균질성 상태임)을 고려할 때, 핵물질의 직접 계량은 불가능하다. 그러나 중성자 90% 이상이 TRU

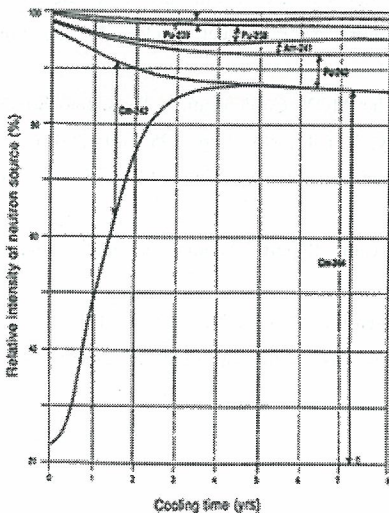


그림 1. 전체 중성자 방출에서 각각의 동위원소의 상대적인 기여

중의 한 원소인 Cm에서 방출되는 그림 1에서 보는 바와 같다. 원자로에서 핵연료가 방출되는 시점에는 Cm-242가 전부이나 시간이 경과함에 따라 자연 붕괴되어 Cm-244로 변하는데 약 6년간의 냉각기간을 지나면 Cm-242는 모두 소멸하고 Cm-244만 존재하면서 일정한 값으로 유지된다. 반면, 반감기가 긴 우라늄과 플루토늄은 거의 일정하게 유지되지만, 세부적으로는 조금씩 변한다. 대의적 관점에서 사용후 핵연료물질로부터 우라늄 및 플루토늄의 함량을 계량해 내는 수단으로 Cm 측정과 Cm Ratio를 이용하는 것이 현재로서는 유일하게 거론되고 있다. 그러나 구체적으로는 사용후핵연료의 특성과 TRU 중 Cm 원소의 거동과의 상호 연관성을 면밀히 검토하는 활동은 지속되어야 한다. Cm ratio의 Cm 원소는 18.1년의 반감기를 가지고 자연붕괴 하기 때문에 사용후 핵연료 물질이 최초로 투입될 시 계량된 핵물질의 양이 시간이 흐를수록 감소하는 경향을 가진다. 따라서 공정 내 핵물질 재고를 일정하게 유지하려면 항상 Cm 측정치를 최초 도입 시간과 측정 시간 차이

만큼 수정 보완해야 한다(그림 2, 참조). Cm Ratio이 계량관리에 걸림돌이 되는 또 하나의 변수는 핵연료 물질이 원자로에서 연소된 정도에 따라 Cm Ratio이 지수 함수적으로 변한다는 사실이다. 연소도가 낮을수록 ratio도 크게 변하나, 연소도가 클수록 적게 변한다(그림 3, 참조). 그러므로 Cm 양의 변화에 영향을 주는 특성 3가지, 즉 냉각기간에 따른 변화, 연소도에 따른 변화, 자연 붕괴에 따른 변화가 결과적으로 핵물질 계량 관리에 영향을 미치게 된다. 따라서 사용후핵연료 물질을 중량계량을 해야 하는 공정에서는 batch 별 공정 작업과 더불어 고유 Cm ratio를 동반해서 운영해야 한다. 그러나 batch 작업 과정에서 파생하는 scrap과 폐기물 등을 batch 물질에 비해 그 양이 상대적으로 적기 때문에 공정 내 제 3의 통합된 고유 batch를 "IAEA code 10" 절차<sup>2)</sup>에 따라 지정하여 저장하고, 용기의 용량이 차면 각각의 batch의 고유 Cm ratio의 평균값으로 핵물질을 계량한다. 공정 내 투입되는 핵물질의 재고 및 물질 수지를 일관성 있게 관리하기 위해서는 공정 내 모든 핵물질을 IAEA에서 권고하는 측정 불확실도<sup>3)</sup>에 근접하는 측정 체계를 수립해야 하는데, 현재 개발 완료된 중성자 동시 측정 시스템은 측정 효율 23%에 오차 범위가 1.5% 정도이다. 공정에 초기 투입되는 사용후핵연료 집합체는 핵적 생성과 핵적 손실을 주로 계산하는 전산 코드에서 얻어지는 우라늄 및 플루토늄 양의 정보를 수반하는데, 플루토늄에 대한 계산오차는  $\pm 5\%$ 이고, Cm에 대해서는 약  $\pm 10\%$  이기 때문에 이 계량 정보를 공정 측정 시스템을 거치게 되면 필연적으로 '인도/인수 차이'가 나타나게 되며, 이 부분을 반드시 해결하여 공정 재고를 확립시키는 것이 중요하다. 공정 계량관리의 유효성은 공정 재고 조사 결과에서 얻어지는 미계량물질의 양과 공정 측정 시스템의 오차 합성에서 얻어지는 오차 한계 값을 상호 비교하여 공정 미계량물질의 양이 오차한계 값보다 작으면 정상가동으로 판명되고, 클 경우 그 원인을 규명하여 보완 조치를 취하지 않으면 안 된다. 그 주원인으로는 측정 장비의 불안정성 및 지나치게 많은 양의 공정 물질이 공정 내 누적에 의해서 유발되는 측정 누락, 물질 도난 혹은 의도적 전용 등을 들 수 있다. 여기서 인위적으로 미계량 물질 축소에 기여할 수 있는 부분은 공정물질 및 폐기물을 정확히 계량하고, 공정 누적물 소재를 파악하여 미계량물질의 양을 감소시키려는 노력이다.

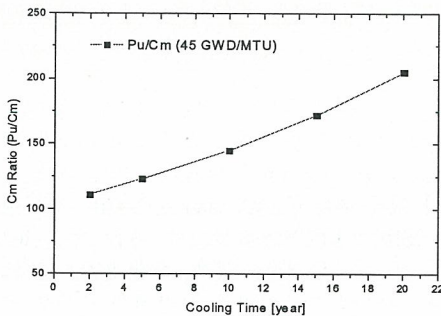


그림 2. Cm Ratio vs. Cooling Time

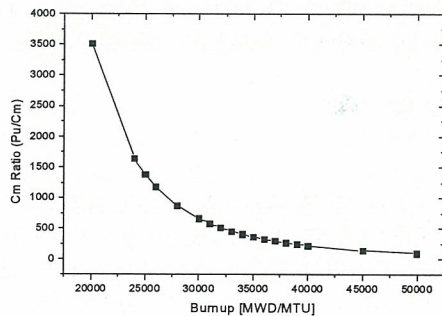


그림 3. Cm Ratio of Pu vs. Burnup

### 3. 결 론

핵물질 계량에 관계되는 측정 시스템은 측정 대상 물질의 구성 요소, 물리적 형태 등을 고려하여 구체적으로 교정된 측정 시스템을 구축하여 정밀도를 향상시킴으로써 미계량물질의 감소에 기여하도록 해야 한다.

### 4. 참고문헌

- 1) LA-12432-MS, safegard
- 2) 한·IAEA 협정, 보조 약정, code 10
- 3) KAERI/GR-265/2007 IAEA 안전조치 용어집, 6.33