

파이로 공정물질의 핵물질 계량을 위한 균질화 필요성

안성규, 신희성, 김호동

한국원자력연구원, 305-353 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

skahn76@kaeri.re.kr

1. 서론

파이로 공정을 통해 사용후핵연료를 다루는 시설에서, 안전조치 목적의 우라늄 및 플루토늄 (^{235}U , Pu) 계량은 필수요소이다. 일반적으로 원자력 시설에서는 파괴분석 및 비파괴분석을 통해 핵물질의 양을 간접적으로 측정, 결정, 관리한다. 현재 파이로공정의 계량 방안으로는 큐륨 자발핵분열 중성자를 측정하여 큐륨의 양을 결정하고, 파괴분석 혹은 비파괴분석을 통해 결정한 플루토늄(혹은 우라늄-235)-큐륨 비율(Cm ratio)을 적용하여 핵물질의 양을 결정하는 방안이[1] 가장 현실적인 방안이다. 습식 재처리공정에서는 모든 핵물질을 용해시킨 후, 연속공정으로 처리하지만, 파이로 공정 개념에서는 배치별 공정을 통해 불연속적으로 처리한다. 사용후핵연료는 길이방향으로 다른 연소도 분포를 보인다. 따라서 길이방향 위치에 따라 동위원소 구성 비율이 달라지며, 이에 따른 배치별 차이가 전체 핵물질 계량의 오차로 작용하게 된다. 본 연구에서는 공정 운전 및 계량관리에 영향을 미치는, 배치별 핵물질 량 차이를 예측해 봄으로서, 공정 전 균질화의 필요성의 근거로 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1 축방향 연소도 분포 차이에 따른 핵물질

사용후핵연료의 연소도는 축방향으로 크게 다르다 (Figure 1). 연소도가 다르면 그 위치에 포함된 물질의 동위원소 양과 비율도 달라진다. 지난 연구결과[2]를 바탕으로 예측해 본 핵물질의 양은, Table 2에서 보듯이 연소도가 30, 40, 50GWd/MTHM 일 경우 포함된 U-235의 경우 2배 이상, Pu은 최대 30%, Cm-244는 최대 10배 이상 차이난다. 결과적으로 U-235/Cm 및 Pu/Cm ratio도 최대 20배 이상 크게 달라진다.

분말화된 핵연료에 포함된 핵물질의 양을 파괴분석방법으로 결정하고자 하는 경우, 미량의 샘플을 채취하여 분석하는데, 위와 같이 위치별 연소

도 차이에 따라 핵물질 조성이 크게 달라질 경우, 그 결과를 전체량에 반영시킬 경우 큰 오차를 야기한다. 공정물질 내 포함되는 전체 핵물질 양이 초기부터 잘못 예측한다면, 이후 공정중, 공정후 산출물에 대한 계량 역시 의미가 없어진다. 따라서 균질화 공정을 통해 각 동위원소의 함량을 전체 핵연료다발(1 캠페인)에 대해서는 동일하게 만들고, 미량의 시료 분석을 통해 핵물질의 초기 입력량을 결정하고, 이후에 활용할 Cm ratio를 정확하게 결정할 필요가 있다.

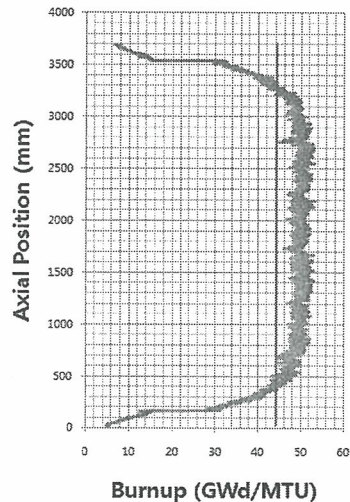


Fig. 1. An example of axial burn-up profile and average burn-up

Table 1. Amount of special nuclear material and Cm ratios as different burn-up estimated by 3rd-order regression (unit: g)

BU(Wd/tHM)	30G	40G	50G
U-235	16110	10970	7076
Pu	8596	10008	11191
Cm-244	8	32	83
U ratio	1943	339	86
Pu ratio	1037	310	136

2.2 불균질 배치별 핵물질 양의 차이

Figure 1과 같은 연소도 분포를 가진 핵연료를 균질화하지 않고 배치로 구분할 경우(10배치/다발) 끝단의 저연소도 물질이 모인 배치와 중간 고연소도 물질이 모인 배치 간에는 큰 차이가 생긴다. Table 2는 50kg 배치일 경우 최소연소도 배치와 최대연소도 배치에 포함된 Pu 양의 차이를 보여준다. 공정 시 각 배치의 전후에 어느 배치를 처리하느냐에 따라 공정물질 내 포함된 Pu 양은 최대 50% 이상 차이날 수 있다.

정련공정과 같이 염속에 포함된 Pu/U 비율을 모니터링하면서 운전하는 경우, 어떤 배치를 처리하느냐에 따라 운전 시간 등의 조건이 크게 달라진다. 이는 공정자체에 큰 부담으로 작용할 수 있다. 입력 물질을 균질화 할 경우 1개의 캠페인 내에서는 공정차이가 거의 없어지게 되며, 다른 핵연료다발(다른 캠페인)일 경우에도 그 차이를 최소화할 수 있다.

Table 2. Pu amounts and their difference in the batch of maximum burn-up and batch of minimum burn-up in one spent fuel assembly

구분	Pu	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242
최소	7.1E+03	9.0E+01	4.6E+03	1.5E+03	6.7E+02	2.7E+02
최대	1.1E+04	3.0E+02	5.8E+03	2.8E+03	1.3E+03	8.9E+02
차이 (증가)	56%	230%	26%	89%	97%	224%
차이 (감소)	-36%	-70%	-21%	-47%	-49%	-69%

2.3 불균질 재순환 핵물질에 의한 차이

전체 파이로 공정을 운전함에 있어서, TRU 내 Pu의 경우 약 0.18%, U원소 내 U-255의 경우 약 6.18%가 정련, 환원공정 및 스크랩과 염의 재순환에 의해 서로 다른 배치 간, 그리고 서로 다른 캠페인(다른 어셈블리) 간 재순환 된다. 불균질 배치를 처리할 경우, 각 배치의 평균 연소도와 각기 다른 Cm ratio를 적용하더라도, 재순환되는 물질의 Cm ratio는 다르며 이들이 섞일 경우 핵물질 계량에 오차를 유발하게 된다. Table 3에서 보듯이 그 차이는 Pu의 경우 약 1.6%, 재순환이 많이 되는 U-235의 경우 12% 이상으로 나타났다.

이로 인한 동일 핵연료 다발에 대한 각 배치별 오차를 최소화하기 위해서는, 전처리 공정에서 균질화 작업이 필수적이다. 균질화 작업은 다른 핵연료 다발 간의 영향을 줄이는데도 도움을 줄 수 있다.

Table 3. Error for Pu and U-235 resulted by using Cm ratio for recycled materials

BU 변화	Pu 오차	U-235 오차
30 -> 40	-0.11%	-8.58%
40 -> 50	-0.09%	-9.00%
30 -> 50	-0.12%	-12.75%
50 -> 40	0.26%	-3.54%
40 -> 30	0.49%	-3.52%
50 -> 30	1.55%	-1.00%

3. 결론

본 연구에서는, 사용후핵연료의 축방향 연소도 분포가 다르다는 점이, 파이로 공정의 각 배치별 차이로 이어질 경우, 핵물질 포함량의 차이를 예측하였다. 이러한 핵물질 양의 차이는 핵물질 계량의 오차를 유발함은 물론 안정적이고 일정한 공정운전을 방해하는 요소로 작용할 수 있음을 살펴보았다. 현재 파이로 공정에 제안할 수 있는 계량방안을 효과적으로 적용하기 위해서는, 사용후핵연료의 전처리 과정에서 균질화시키는 것이 필수적이라 결론내릴 수 있다. 불균질한 물질이 공정에 어떠한 악영향을 미치지, 안정적인 공정운전을 위해 필요한 균질도는 얼마인지 더욱 세심한 연구가 필요하겠다.

4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었다.

5. 참고문헌

- [1] P.M. Rinard, H.O. Menlove, "Application of Curium Measurements for Safeguarding at Large-Scale Reprocessing Plants" 19th ESARDA Symposium-Montpellier, May 1997.
- [2] 임혜인 외, "사용후핵연료 연소도에 따른 주요 핵종의 함량 변화 분석", 한국방사성폐기물학회 춘계학술발표대회, 2010.