

## 사용후핵연료 연소도에 따른 주요 핵종의 함량 변화 분석

임혜인, 엄성호\*, 서지선\*, 박세환\*, 신희성\*

UST, 대전 유성구 과학로 113

\*한국원자력연구원, 대전 유성구 대덕대로 1045

[hvein\\_lim@kaeri.re.kr](mailto:hvein_lim@kaeri.re.kr)

### 1. 서론

핵임계 안전성 분석은 핵임계 안전의 보수성을 확보하기 위하여 핵연료가 연소되지 않은 상태, 즉 신핵연료로 가정하여 수행하는 것이 일반적이다.

그러나 연소도에 의한 핵연료의 반응도의 감소를 고려하는 연소도 효과(burnup credit)를 적용한다면 사용후핵연료의 저장 및 수송 용량을 30% 이상 증대 시킬 수 있다. 현재, 한국에서는 발전소 사용후핵연료 저장조에, 미국과 유럽에서는 수송용기 중 일부에 연소도 효과를 적용하고 있으며, 일본에서도 연소도 효과적용과 관련하여 활발한 연구가 진행되고 있다.

Burnup Credit을 효과적으로 활용하기 위해서는 사용후핵연료에 포함된 핵종량을 정확히 파악해야 하는데, 특히 사용후핵연료 집합체의 축방향 연소도 분포를 정확히 측정하는 것이 중요하다. 30GWd/MTU 이상의 연소도에서는 집합체 평균 연소도 값을 기준으로 계산한 핵임계도 값이 축방향 연소도 분포를 고려한 핵임계도 값보다 낮기 때문에 핵임계도 관점에서 보수성을 확보할 수 없기 때문이다(End Effect). 따라서 사용후핵연료 집합체의 축방향 연소도 분포자료가 필수적이다.

지난 추계 방폐학회에서 발표한 '사용후핵연료 축방향연소도 분포의 그룹화에 따른 핵종량 변화 분석' 논문에서는 사용후핵연료봉 축방향 연소도 분포를 그룹화한 후, ORIGEN계산을 통해 얻은 데이터를 분석하였다[1]. 그룹화는 울진 2호기의 K23 집합체를 길이방향으로 3등분한 것을 초기 데이터로 정하여 그 것을 기준으로 연소도가 급격히 변하는 양 끝부분의 간격을 보다 더 세밀하게 설정하였다. 핵임계도 값에 크게 영향을 미치는 U-235와 Pu-239의 핵종량 변화를 관찰하였는데, 그룹화에 따른 최대 핵종량의 차이는 U-235의 경우엔 7.8%, Pu-239의 경우엔 3.5%의 차이를

보였다.

현재, KAERI에서는 사용후핵연료의 정확한 연소도 및 핵종 분포 파악을 위하여 '사용후핵연료 연소도 효과적용을 위한 연소도분포 측정기술 개발 과제'를 수행하고 있다. 과제의 일환으로 수행된 본 연구는 연소도에 따른 핵종량 변화 분석을 목적으로 핵임계도 값에 크게 영향을 미치는 주요 Actinide 원소와 Fission Product의 핵종량 변화 및 Cs-134, Cs-137, Ru-106의 핵종량과 연소도의 관계를 관찰하였다. 또한 이 결과는 그룹화에 따른 연소도 차이의 원인을 심층적으로 분석하기 위해 사용되었다.

### 2. 본론

#### 2.1 원자로 연소코드 계산-ORIGEN

계산에 사용된 울진 2호기의 K23 집합체는 17X17 배열, 4.2wt%의 초기 농축도를 가지고 있으며, 1316일의 연소일과 44.410GWd/MTU의 연소도, 냉각기간 1730일의 연소이력을 포함하고 있다. 이러한 사용후핵연료 집합체의 정보를 바탕으로 ORIGEN 계산을 수행하였다.

#### 2.2 데이터 분석

사용후핵연료 축방향 연소도 분포의 그룹화에 따른 핵종량 변화분석에서 사용한 정보를 이용하여 6.318GWd/tU부터 50.756GWd/tU까지의 연소도에서 핵종량 변화 분석연구를 수행하였다.

본 연구에서는 Actinide 원소인 U-235, U-236, U-238, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242와 Fission Product인 Cm-242, Cm-244, Ru-106, Cs-134, Cs-137, Eu-154를 분석 데이터로 사용하였다.

2.2.1 Actinide와 Fission Product의 핵종량 변화 연소도와 핵종량의 관계를 살펴보면, 예상했던 대로 연소도가 높을수록 핵분열을 일으키는

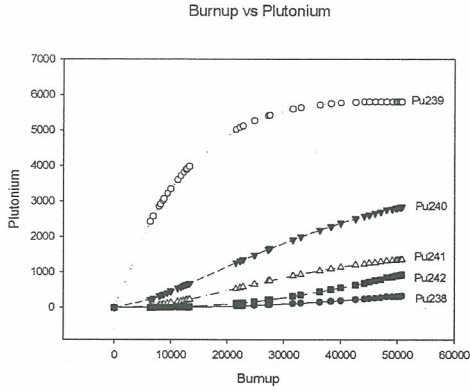


Fig. 1. Plutonium vs Burnup

U-235, 핵연료의 대부분을 차지하는 U-238의 양은 감소하였고, 나머지 핵종들을 모두 증가하였다. 특히 U-236과 Pu-239, Pu-241은 완만한 기울기를 보이며 증가한 반면, Pu-238, Pu-240, Pu-242, Cm-242, Cm-244, Ru-106, Cs-134, Eu-154는 고연소도에 근접할수록 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있었다. 또한, Cs-137은 연소도와 선형적으로 증가함을 볼 수 있었다.

Table. 1. Regression result

	y0	a*	b	c	R <sup>2</sup>
U-235	41888.6	-1.176	1.20E-5	-4.81E-11	1.0000
U-236	84.2	0.239	-3.37E-6	1.78E-11	0.9998
U-238	957792.8	-0.607	-6.19E-7	-2.80E-11	0.9999
Pu-238	4.40	-0.002	1.73E-7	-2.81E-13	0.9998
Pu-239	198.94	0.402	-9.92E-6	8.27E-11	0.9982
Pu-240	-70.98	0.045	1.12E-6	-1.72E-11	0.9996
Pu-241	-44.95	0.008	1.19E-6	-1.61E-11	0.9992
Pu-242	15.23	-0.006	5.36E-7	-1.19E-12	0.9998
Cm-242	0.0002	-1.3E-7	1.71E-11	-1.56E-16	0.9999
Cm-244	-1.91	0.0007	-5.97E-8	1.59E-12	0.9993
Ru-106	-0.02	4.95E-5	3.25E-9	-1.23E-14	1.0000
Cs-134	0.07	-1.60E-5	1.83E-8	-3.19E-14	0.9999
Cs-137	0.31	0.033	-9.99E-11	-2.26E-14	1.0000
Eu-154	0.21	-8.45E-5	1.90E-8	-1.34E-13	0.9999

\*  $f=y_0+ax+bx^2+cx^3$

2.2.2 핵종비율과 연소도의 관계

핵종비율과 연소도의 관계를 파악하기 위하여 Cs134와 Cs137의 비율, Ru106과 Cs137의 비율 및  $(Cs134/137)^2$ 과  $(Ru106/Cs137)$ 의 비율을 계산하였는데, 세 비율 모두 연소도와 선형적인 그래프로 나타났다[2].

2.2.3 연료봉 그룹화에 따른 핵종량 비교 분석

연료봉을 등분했을 때, 각 등분한 핵종량 차이의

원인을 파악하기 위해 같은 조건에서 그룹화한 후 각 그룹의 핵종을 분석하였다. 평균연소도 20GWd/tU의 등분하지 않은 한 개의 연료봉과 각각 10GWd/tU, 30GWd/tU의 연소도를 가지는 경우를 고려해 보았다. 두 연료봉의 평균연소도는 20GWd/tU로 동일하지만 그 안에 포함되어 있는 핵종량의 차이는 U-235의 경우 3.67%, Pu-239는 9.64%였다. 이는 사용후핵연료에 포함된 핵종의 함량이 선형적으로 증가하지 않기 때문인 것으로 고려된다. 참고문헌 [1]에서 핵종의 함량 차이가 나타난 것 역시 이러한 이유에 기인한 것으로 추정된다.

3. 결론

본 연구는 현재 KAERI에서 수행하고 있는 사용후핵연료 연소도 분포 측정과제에서 사용후핵연료의 연소도의 변화와 핵종량의 관계를 파악하기 위하여 수행되었다. 연소코드인 ORIGEN-S 계산 결과를 바탕으로 사용후핵연료의 연소도를 변화시키며 핵입계도값에 크게 영향을 미치는 주요 Actinide, Fission Product 핵종량을 확인하였다.

그룹화에 따른 U-235, Pu-239의 핵종량 차이가 3.67%, 9.64%로 나타난 이유는 연소도와 핵종량을 나타낸 그래프에서 확인할 수 있었다. 연소도와 선형적인 관계를 보이는 Cs-137의 경우 그룹화에 따른 차이가 0.05%로, 그룹화 경향에 관계없이 거의 일정한 양을 나타낸 것과는 달리, U-235, Pu-239는 고연소도로 갈수록 급격한 기울기 변화를 보이기 때문에 그룹화의 영향이 상대적으로 큰 것으로 생각된다.

앞으로 보다 다양한 핵종분석을 통해 연소도와 핵종 함량의 관계를 파악할 것이며, 사용후핵연료 집합체 감마/중성자 측정 데이터를 본 연구결과와 연계하여 사용후핵연료의 연소도 분포측정 과제에 기여해 나갈 계획이다.

4. 참고문헌

[1] 임혜인 외 5인, "사용후핵연료 축방향 연소도 분포의 그룹화에 따른 핵종량 변화분석", 한국방사성폐기물학회 학술논문요약 (2009).  
 [2] H.S. Shin의 4인, "Non-destructive Burnup Determination of PWR Spent Fuel Using Activity Ratio Cs-134/Cs-137", ISRS (2001).