

CZT 검출기를 이용한 사용후핵연료 집합체 연소도 측정

서희, 오종명, 신희성, 박준식, 박세환, 김호동, 권인찬, 김도식
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 대덕대로 989번길 111
 hseo@kaeri.re.kr

1. 서론

사용후핵연료의 적절한 관리 및 처리, 처분을 위해서는 사용후핵연료 내에 존재하는 핵종들의 양을 정확히 결정하는 것이 필수적이다. 이를 위해서는 기본적으로 사용후핵연료의 특성을 정확히 평가하는 것이 필요하며, 특히 집합체 연소도를 높은 정확도로 결정하는 것은 매우 중요하다. 사용후핵연료의 질량비 구성은 약 93%의 우라늄을 비롯하여 1.4%의 초우라늄원소(Pu, Am, Cm 등) 및 5.7% 정도의 핵분열생성물(I, Cs, Sr 등)이 있다(상기 비율은 초기 농축도, 연소도, 냉각기간에 따라 변함). 연소도 결정을 위해서는 사용후핵연료 내에 존재하는 Cs의 방사능 비를 측정하는 방법이 제안된 바 있다[1]. 이에 본 연구에서는 상온 반도체 검출기인 CZT 검출기를 이용하여 사용후핵연료에서 발생하는 감마선의 에너지 스펙트럼을 측정하고 이를 기반으로 연소도를 결정하였다.

2. 본론

2.1 CZT 검출기 성능평가

본 연구에서는 감마선 에너지 스펙트럼을 획득하기 위해 co-planar grid (CPG) 타입의 CZT 검출기(eV-CPG™, Endicott Interconnect Technologies, Inc., USA)를 사용하였으며, 검출영역은 10×10×10 mm³의 체적을 가지고 있다. CZT 검출기는 상온 반도체 검출기로서 에너지 분해능이 우수하며, 별도의 냉각장치가 필요하지 않다는 장점이 있어서 간소한 시스템을 구성하기에 유리하다.

CZT 검출기의 성능평가를 위해 교정선원을 사용하여 에너지 교정을 수행하였으며, 선원 에너지에 따른 에너지 분해능을 평가하였다. 그림 1에서는 Co-60, Cs-137, Na-22 교정선원(~1 μCi)을 사용하여 획득한 에너지 스펙트럼을 보여주고 있다. 각각의 피크에 대한 가우시안 피팅을 통해 획득한 에너지 분해능은 1.11%(@ 1332 keV)에서 1.98%(@ 511 keV) FWHM의 결과를 보였다.

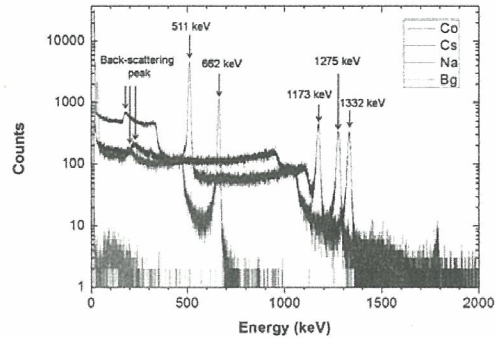


Fig. 1. Energy spectrum for calibration gamma sources of Co-60, Cs-137, and Na-22 as well as background(Bg) spectrum.

2.2 사용후핵연료 집합체 감마선 측정

본 연구에서는 한국원자력연구원 조사후시험시설의 저장조에 있는 K23 사용후핵연료 집합체에 대해서 연소도를 결정하였다. K23 집합체는 웨스팅하우스 17×17 타입의 집합체로서 울진 2호기에서 3주기 동안 연소되었으며, 연소기간은 1313일이다. 냉각기간은 4012일이며, UO₂ 핵연료 초기 농축도는 4.2wt%이다. 그림 2에서는 K23 집합체에 대한 연소도 측정 실험 장면을 보여주고 있다. 측정높이는 집합체의 하단으로부터 2580 mm 지점이며, 측정거리는 집합체의 앞 표면으로부터 측정장치까지 600 mm 거리를 두었다.



Fig. 2. Experimental setup.

그림 3은 K23 집합체에 대하여 획득한 감마선 에너지 스펙트럼을 보여주고 있다. 측정시간은 600 초(live)로 하였다. 감마선 측정 실험을 통해 연소도 측정의 주요 핵종인 ^{137}Cs (662 keV), ^{134}Cs (796 keV), ^{154}Eu (1274 keV)의 감마선 피크를 선명하게 확인할 수 있었다. 단, ^{134}Cs 에서는 802 keV 감마선이 함께 방출되지만, CZT 검출기의 에너지 분해능에 가려 796 keV 피크와 구분할 수 없었다. 이에 이후의 모든 분석과정에서 ^{134}Cs 의 감마선 방출율(yield, Y)을 가중치로 적용함으로써 796 keV 감마선(Y=85.46%)과 802 keV 감마선(Y=8.69%)의 영향을 함께 고려하여 주었다.

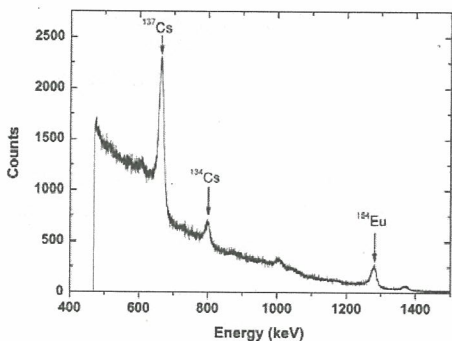


Fig. 3. Measured energy spectrum for K23 spent fuel assembly.

2.3 사용후핵연료 집합체 연소도 결정

연소도를 결정하기 위해서 Cs 방사능 비를 측정 한 후 연소도 계산 코드(ORIGEN-ARP 5.1[2])를 사용하여 연소도에 따른 방사능 비를 구하였다. 또한, 집합체의 외부에서 감마선을 측정하였으므로 선원 에너지에 따른 측정효율을 보정하여 주었다. 이를 위해 (1) 선원의 자기 차폐 효과, (2) 물 거리에 따른 감쇠율, (3) 차폐체의 투과율, (4) 검출기의 고유효율을 각 선원 에너지에 대하여 Geant4 몬테칼로 전산모사[3]를 통해 계산하였다.

지금까지 계산된 모든 인자를 종합적으로 고려하여 획득한 Cs 방사능 비는 0.0848이었다. 이를 ORIGEN-ARP 코드를 통해 획득한 연소도에 따른 방사능 비의 상관관계 식에 대입하여 연소도를 결정하여 79,402 MWD/MTU를 얻을 수 있었다. 이는 화학분석에 기반하여 결정된 측정 높이에서의 집합체 평균 연소도(63,266 MWD/MTU)와 비교할 때 25.5%의 오차가 있는 것으로 확인되었다.

그러나 연소도 코드에서 사용하는 반응단면적 데이터 라이브러리에 오차가 있으므로 이를 추가적으로 보정해 주어야 한다. 즉, 연소도 코드를 통해 계산된 핵종의 양은 실제 측정된 핵종의 양과 상당한 차이가 있다[4]. 이에 평균 코드 편차 값을 적용하여 최종적으로 연소도(69,622 MWD/MTU)를 획득하였고, 이는 화학분석에 의한 연소도 값에서 10.0%의 오차가 있었다.

3. 결론

본 연구에서는 상온 반도체 검출기인 CZT를 사용하여 사용후핵연료 집합체의 외부에서 감마선을 측정함으로써 연소도를 결정하였다. 정확한 연소도 결정을 위해 Geant4 몬테칼로 전산모사 및 연소도 코드 편차를 고려하여 보정하여 주었다. 이를 통해 연소도를 측정 오차 범위 내에서 결정할 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 본 연구를 통해 확인한 바와 같이 핵종 양 계산에 있어서 연소도 코드에 오차가 상당하므로 이에 대한 심도있는 연구가 필요할 것으로 판단되며, 이와 함께 측정장치의 최적화 연구가 필요하다고 판단된다.

4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

5. 참고문헌

- [1] R. Berndt, P. Mortreau, "Spent-fuel characterization with small CZT detectors," Nucl. Instrum. Methods A 564, pp.290-264, 2006.
- [2] I. C. Gauld *et al.*, "ORIGEN-ARP: Automatic rapid processing for spent fuel depletion, decay, and source term analysis," ORNL/NUREG/CSD-2/V1/R7, Vol. 1, 2004.
- [3] S. Agostinelli *et al.*, "GEANT4-a simulation toolkit," Nucl. Instrum. Methods A 506, pp.250-303, 2003.
- [4] I. C. Gauld *et al.*, "Uncertainties in predicted isotopic compositions for high burnup PWR spent nuclear fuel," ORNL/TM-2010/41, 2011.