2000 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

사용후핵연료의 비파괴적 연소도 결정

Nondestructive Burnup Determination of Spent Nuclear Fuels

박광준, 조일제, 김종훈, 엄성호, 박성원

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

고리1호기 사용후핵연료집합체 G23 및 C15에서 선택한 연료봉 및 시편에 대한 연소도를 비파괴적 방법으로 결정하고, 발전소공표값 및 화학분석값과 비교·평가하였다. 그 결과 G23연료봉의 경우, 평균연소도는 발전소공표값을 기준으로 할 때 약 5 % 오차범위 이내에서 일치하였으며, C15 시편의 경우, 연소도가 상대적으로 높은 위치에서 화학분석값을 기준으로 하여 약 4 %, 연소도가 낮은 위치에서 약 7 %의 오차가 발생하였다.

Abstract

Burnup of the fuel rod and specimens taken from spent nuclear fuel assemblies G23 and C15 discharged from Kori-1 in 1986 and 1982, respectively, was non-destructively determined. And then they were compared with the declared burnup of NPP(nuclear power plant) and destructive chemical burnup. As a result of the comparison, the measured average burnup has a good agreement with the declared burnup within 5 % error in the G23-G2 rod. And there is approximately 4 % difference between the measured and chemically determined burnup at the relatively higher burnup region of the C15-E11 rod, but it appeared to be poor agreement at the lower burnup region in the vicinity of rod ends.

1. 서론

핵연료는 원자로내에서 연소하면서 초기 신연료의 성분이 다양하게 변한다. 우선 핵분열로 인하여 핵분열성 원소의 조성비가 줄어드는 반면, 초기에는 전혀 존재하지 않는 새로운 핵분열 생성물 및 다른 종류의 핵분열성 원소가 생성된다. 이러한 변화는 연소된 연료가 원자로로부터 배출된 후, 저장, 수송, 재활용, 처분 등의 사용후핵연료 관리공정에서 임계안전성, 방사선피폭 등에 큰 영향을 미치게 된다. 이 중에서 임계안전성은 대형사고와 직결되므로 사전에 정확한 안전성 평가가 이루어져야 한다. 사용후핵연료의 임계안전성평가는 우선 반응도 평가가 선행되어야하며, 이러한 것은 잔존하는 핵분열성 물질의 수 또는 연소도와 관련된다. 따라서 사용후핵연료의 안전한 관리는 연소도를 정확히 결정함으로서 가능해진다. 본 연구에서는 사용후핵연료로부터 방출되는 감마선스펙트럼을 분석하여 연소도 모니터핵종비를 구하고, 그 값을 SCALE4.4 코드로 계산된 연소도-핵종비 관계곡선에 대입하여 연소도를 결정하였다. 이렇게 비파괴적으로 결정된 연소도는 파괴적인 화학분석 연소도 및 발전소 공표값과 비교·평가되었다.

2. 실험

(1) 측정시스템

사용후핵연료로부터 방출되는 감마선 검출은 전/후치 시준기, 고순도 Ge 검출기와 전자장비를 사용하여 수행하였다. 전자장비는 개인용 컴퓨터(PC)에 고전압공급장치 및 다중채널분석기(MCA)가 카드식으로 내장되어 있으며, 기존의 장비보다 훨씬 크기가 작고 경량이기 때문에 장비이동시 편리하게 되어있다.

(2) 연료봉 측정

사용후핵연료 G23-G2 연료봉에 대한 감마선 검출은 그림1과 같은 조사후시험시설 비파괴 시험 핫셀에서 수행되었다.

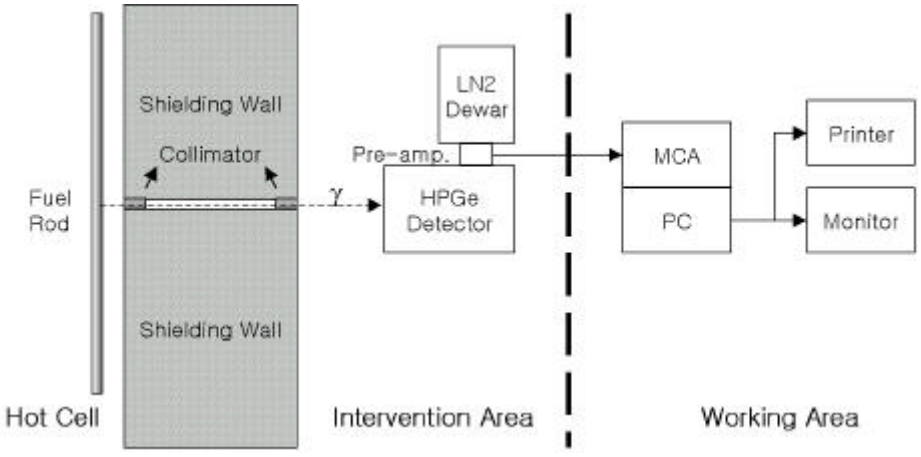

그림1. 사용후핵연료봉 감마선검출 시스템의 개요도.

우선 연료봉 전체 길이에 대한 그로스감마스캐닝(gross gamma scanning) 시험을 수행하여 축방향 상대연소도분포를 그림2와 같이 획득하였다. 이 상대 연소도분포로부터 평균 계수율 지점을 다음과 같은 식을 사용하여 계산하였으며, 이러한 지점은 평균연소도 결정에 사용하게 된다.

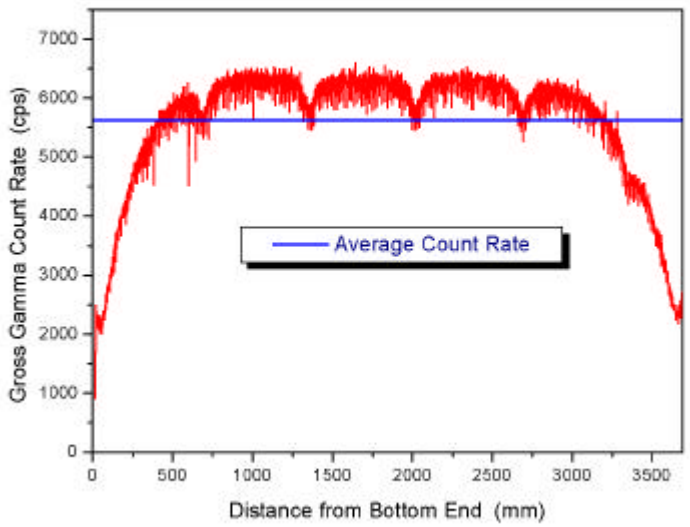

그림2. G23-G2 핵연료봉 축방향 상대 연소도 분포.

$$\text{평균계수율} = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i}{n} \quad , \quad (C_i : \text{측정위치별 계수율}, \ n : \text{측정위치의 수})$$

또한 감마선스펙트럼은 그림2의 축방향 상대연소도분포에서 아래쪽 방향으로 피이크를 형성한 그리드 부분을 제외한 11개 지점에서 획득하였다. 이때 감마선 검출 시간은 3,600초로 하였는데, 이것은 측정시점 기준으로 G23 연료의 냉각시간이 12.8년이 경과하여 반감기가 비교적 짧은 연소도 모니터핵종의 충분한 검출을 고려하였기 때문이다.

(3) 시편측정

사용후핵연료집합체 C15의 E11연료봉에서 화학분석용 시편 바로 옆에서 절단한 시편에 대한 감마선 검출 시험은 그림3과 같은 검출시스템에서 수행되었다. 감마선 검출시 1차 및 2차 시준기는 시편 전체에서 방출하는 감마선을 수집하기 위해서 모두 제거하였는데, 이는 화학분석 방법에서 시편 전체를 용해시켜 얻는 연소도와 대등한 비교를 하기 위한 것이다. 감마선 검출 시간은 반감기가 짧은 연소도 모니터핵종을 검출하기 위하여 10,800초(3시간)으로 하였으며, 시준기 제거에 따른 계수율 증가를 조절하기 위하여 시편 상부에 납 차폐체를 올려 놓았다.

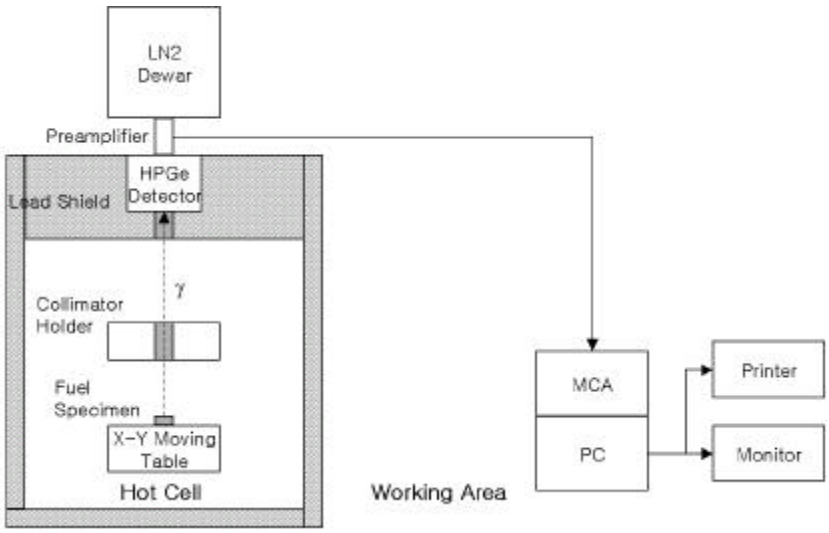

그림3. 사용후핵연료시편에 대한 감마선 검출시스템의 개요도.

3. 결과 및 고찰

연료봉 및 시편의 연소도는 감마선 분광분석으로 얻은 모니터 핵종의 비와 SCALE4.4 코드계산에 의해 얻은 모니터핵종의 비를 상관시켜 결정하였다. 즉, 코드계산에 의해서 연소도-모니터핵종비와의 관계식을 구하고, 그런 다음 감마선 분광분석에서 얻은 모니터 핵종비 값을 그 관계식에 대입하여 연소도를 구하는 방법을 사용하였다.

(1) G23-G2 연료봉의 연소도 결정

G2 연료봉의 11개 지점에서 얻은 감마선 스펙트럼의 피이크 분석결과 연소도 모니터 핵종 EU-154와 Cs-137 사이의 비가 결정되었으며, 앞에서 언급한 연소도-모니터핵종비의 관계식에 Eu-154/Cs-137비 값을 대입하여 표1과 같은 연소도를 결정하였다. 연소도 모니터

표1. G23-G2 연료봉의 11개 위치에서의 연소도 결정 값 및 발전소 공표값

연료특성	고리 1호기 G23 (4,5,6,7주기 연소), 냉각 시간: 13년										
시료위치(mm)	160	182	460	483	1,039	1,618	2,360	2,376	3,154	3,481	3,546
감마선 분광분석에 의한 Eu154/Cs137 비	0.0065	0.0066	0.0078	0.0081	0.0081	0.0086	0.0082	0.0081	0.0077	0.0067	0.0057
비파괴 측정연소도 (MWd/tU)	28,900	29,530	37,260	40,410	40,150	45,540	41,100	40,810	36,950	30,230	24,580
발전소 공표 연소도 (MWd/tU)	35,500										
화학분석 연소도 (MWd/tU)	추후 비교예정 (DUPIC 연료 분말화 공정이 끝난 후 화학적 방법으로 연소도 측정 예정)										

핵종으로서 Eu-154를 선택한 이유는 G23 연료의 냉각기간이 13년이 경과하여 반감기가 비교적 짧은 Cs-134의 강도가 낮았기 때문이다. 이 표에서 보는 바와 같이 그로스 감마스캐닝 결과로부터 얻은 평균 계수율 근방인 460 mm 및 3,154 mm 위치에서 연소도는 각각 37,260 및 36,950 MWd/tU 로 1 % 미만의 오차범위 내에서 일치하는 것을 알 수 있으며, 또한 G23 연료의 발전소 공표값인 평균 연소도 35,500 MWd/tU 와 5 % 오차 내에서 일치하는 것으로 나타났다. 그림4는 표1의 연료 축방향 위치에 따른 11개 지점에서의 연소도를 그래프상에 도시한 것이며, 이 11개 지점에서의 연소도 값을 4차함수로 곡선점철하여 연소도분포를 나타내었다. 이 곡선내의 면적을 계산하고 이에 상응하는 면적을 갖는 사각형의 높이를 결정하여 평균연소도 지점을 구한 후, 그 지점에서의 연소도를 결정하였다. 그 값은 37,500 MWd/tU 로 G23 연료의 측정에 의한 평균연소도이다. 이 측정값과 발전소공표값 35,500 MWd/tU 사이의 차이가 5.6 %로 계산되었다. 5 % 이상 차이가 나는 것은 평균연소도 지점 결정시 불과 11개의 자료점을 사용하여 정확한 곡선점철이 이루어지지 않았기 때문이라고 생각된다. 그러므로 연료봉 축방향 연소도 측정지점 수를 증가시키거나 그렇지 못할 경우 그로스감마스캐닝에 의한 평균연소도 지점을 결정하여 사용하는 것이 오차를 줄일 수 있는 방법일 것이다. 그러나 연소도 측정지점 수를 늘린다는 것은 연료의 냉각시간이 긴 경우 반감기가 짧은 모니터핵종을 검출해내기 위해 측정시간을 늘려야 하는 단점이 수반된다.

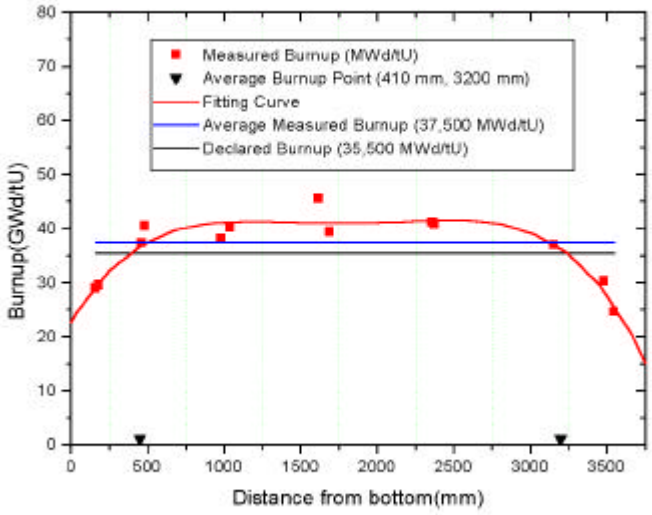

그림4. G23-G2 연료봉의 11개 위치에서의 연소도 분포.

(2) C15-E11 연료봉 시편의 연소도 결정

E11 연료봉의 축방향 3개의 지점에서 얻은 감마선 스펙트럼 피이크 분석은 Eu-154 및 Cs-137의 두 개 핵종에 대하여 이루어졌다. 이 연료의 냉각시간은 시편의 측정시점에서 18

년 경과하였기 때문에 반감기가 짧은 연소도 모니터핵종은 감마선 스펙트럼상에 나타나지 않았다. 이러한 시편에 대한 연소도는 앞에서 언급한 연료봉의 연소도 결정 과정과 똑 같은 순서로 이루어졌으며, 표2와 같은 결과로 나타났다. 표에서 보는 바와 같이 평균계수율 지점보다 높은 1,650 mm 위치에서 본 연구에서 측정한 연소도는 36,563 MWd/tU이고, 화학분석에 의한 연소도는 35,265 MWd/tU 으로 화학분석결과를 기준으로 하였을 때 3.7 % 오차가 발생하였으며, 평균계수율 보다 낮은 43 mm 위치에서는 각각 15,119 및 14,146 MWd/tU으로 6.9 %의 오차가 발생하였다. 이러한 결과는 비교적 연소도가 높은 구역에서 오차가 작아진다는 것을 의미한다. 또한 평균계수율 근방인 3,050 mm에서의 측정연소도값은 35,223 MWd/tU 으로서 발전소공표값 32,000 MWd/tU 과 2.7 % 오차범위 내에서 일하는 것으로 나타났다. 본 측정연소도값은 평균연소도 지점이 아니기 때문에 공표값과 절대비교가 될 수 없지만 3,050 mm 지점이 평균계수율 보다 높은 위치에 존재하기 때문에 오히려 과대평가되므로 정확한 평균계수율 지점에서 연소도가 결정되었다면 오차가 더 줄었을 것이다.

표2. C15-E11 시편의 측정연소도, 화학분석연소도 및 발전소공표 연소도

연료봉	시료위치 (mm)	화학분석 연소도 (MWd/tU)	본 연구에서 측정한 연소도 (MWd/tU)	발전소 공표 연소도 (MWd/tU)
C15-E11	43(a)	14,146	15,119	32,000
	1,650(b)	35,265	36,563	
	3,050(c)	35,223	32,874	

4. 결론

사용후핵연료봉 및 시편에 대한 연소도를 비파괴적인 감마선분광분석법과 컴퓨터코드계산 방법을 상관시켜 결정하고 화학분석 연소도 및 발전소공표 연소도와 비교평가하였다. 본 연구에서 결정한 고리1호기 G23-G2 연료봉의 연소도는 발전소공표값을 기준으로 하였을 때 약 5 % 정도의 오차범위 내에서 일치하는 것으로 나타났다. 또한 C15-E11 연료봉 시편의 경우 평균연소도 위치 보다 높은 지점에서 화학분석연소도와 3.7 % 오차가 발생하였으며, 평균연소도 보다 낮은 지점에서는 6.9 %로 오차가 크게 나타났다. 그러나 본 측정연소도는 발전소공표 연소도와 약 3 % 오차범위 내에서 일치하였다.

*본 연구가 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.