

## 수조저장 사용후핵연료집합체 축방향연소도 분포 결정

Determination of Axial Burn-up Distribution of Spent Nuclear Fuel Assembly Stored in Pool

박광준, 이동욱, 박형종, 구대서, 김종훈, 박성원

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

1998년 개발하여 비방사선구역 성능시험을 마친 수중 연소도측정 시스템에 대하여 방사선구역 수조에서 실제 사용후핵연료집합체 A17을 사용하여 성능시험을 수행하였다. 성능시험결과 감마선 검출 기능이 기존의 다른 시설에서 사용되는 검출시스템과 같은 기능을 갖고 있다는 것을 감마선 스펙트럼 획득으로 확인하였으며, 또한 A17 연료집합체 전체 길이에 대한 그로스 감마스캐닝을 수행하여 상대 연소도 분포를 획득하였다. 따라서 새로 개발된 본 시스템이 한국원자력연구소의 조사후시험시설 수조에서 뿐만아니라 원자력발전소 수조에서도 사용후핵연료 관리에 필요한 연소도 결정에 활용될 수 있다는 것을 최종적으로 확인하게 되었다.

### Abstract

The active performance test with the spent nuclear fuel assembly A17 discharged from Kori-1 in 1979 was carried out in the pool of PIEF(Post-Irradiation Examination Facility) for the under-water burnup measuring system, which was manufactured and finished the inactive performance test in 1998. As a result of the test, the gamma-ray detectable function appeared to be good in comparing with the other system being in use now. And relative burnup distribution of the assembly was determined by gross gamma-ray measurement scanning the whole length. Therefore, it was confirmed that the newly developed system is available to the pool of not only PIEF in KAERI but also NPP(Nuclear Power Plant) for the spent nuclear fuel safe management in the near future.

## 1. 서론

현재 국내 에너지자원중 원자력이 차지하는 비율이 거의 30%에 달하고 있으며, 원자력발전량에 비례하여 사용후핵연료가 발생하고 있다. 이러한 사용후핵연료는 고준위방사선으로 인한 차폐문제 뿐만아니라 연소하지 않고 남아있거나 새로 생성된 핵분열성물질 때문에 임계안전성 문제를 고려하여야 한다. 지금까지 핵연료취급시설에서의 임계안전성은 연소하지 않은 신연료(fresh fuel)를 근거로하여 설계 및 안전해석이 이루어져 왔다. 그러나 신연료는 원자로내 연소중 그 조성(composition)이 변화하고, 이에 따라 중성자중배율(반응도)이 저하한다. 그 저하분을 무시하고 필요 이상의 여유도(margin)를 취하는 것은 사용후핵연료의 저장, 수송, 재처리등에 많은 비용을 소비하는 결과를 초래하게 된다. 그러므로 합리적인 사용후핵연료관리는 안전성과 경제성 모두를 만족시키는 방향으로 추진되어야 할 것이다. 이를 위하여 연소도 크레딧(burnup credit) 개념의 도입이 고려되고 있다. 원자력선진국들은 핵연료취급시설에서 이러한 연소도 크레딧 적용을 신중히 검토하고 있으며, 일부 국가에서는 이미 연소도 크레딧을 도입하여 활용하고 있다. 우리도 이러한 원자력 선진국의 추세에 맞춰 사용후핵연료관리에 연소도 크레딧 적용을 위한 준비가 필요한 시점이라고 생각된다. 이를 위한 첫 번째 단계로서 정확한 연소도 결정 기술개발이 요구되며, 이론적인 컴퓨터계산뿐만 아니라 물리적인 측정방법이 동시에 추진되어야 한다. 그러므로 본 연구에서는 1998년 국내 설계/제작 및 비방사선구역 성능시험이 완료된 수중 연소도 측정시스템에 대한 방사선구역 성능시험을 수행하여 물리적인 측정방법의 효용성을 입증하였다.

## 2. 실험

### (1) 측정시스템

새로 개발된 수중 연소도 측정 시스템은 수조내의 사용후핵연료집합체로부터 방출되는 감마선을 검출하고, 그 감마선 스펙트럼의 특정 피이크 분석치에 컴퓨터 계산에 의한 연소도와 특정 핵분열 생성물과의 관계식을 서로 상관시켜 연소도를 결정하는 시스템이다. 이 시스템은 그림1과 같이 수조내에 잠기는 감마선 검출부분과 수조 작업구역에 설치되는 전자장비로 구성된다. 전자장비는 고전압공급장치(high voltage supply), 다중채널 분석기(multichannel analyser: MCA), 스펙트럼 피이크 분석 소프트웨어 등 감마선 스펙트럼 획득/분석 및 자체 개발한 연소도 결정 매개변수 시각화 소프트웨어 등으로 구성되

어 있다. 그러므로 모든 연소도 결정 관련 매개변수와 분석결과를 시험 현장에서 컴퓨터 모니터를 통하여 확인할 수 있다.

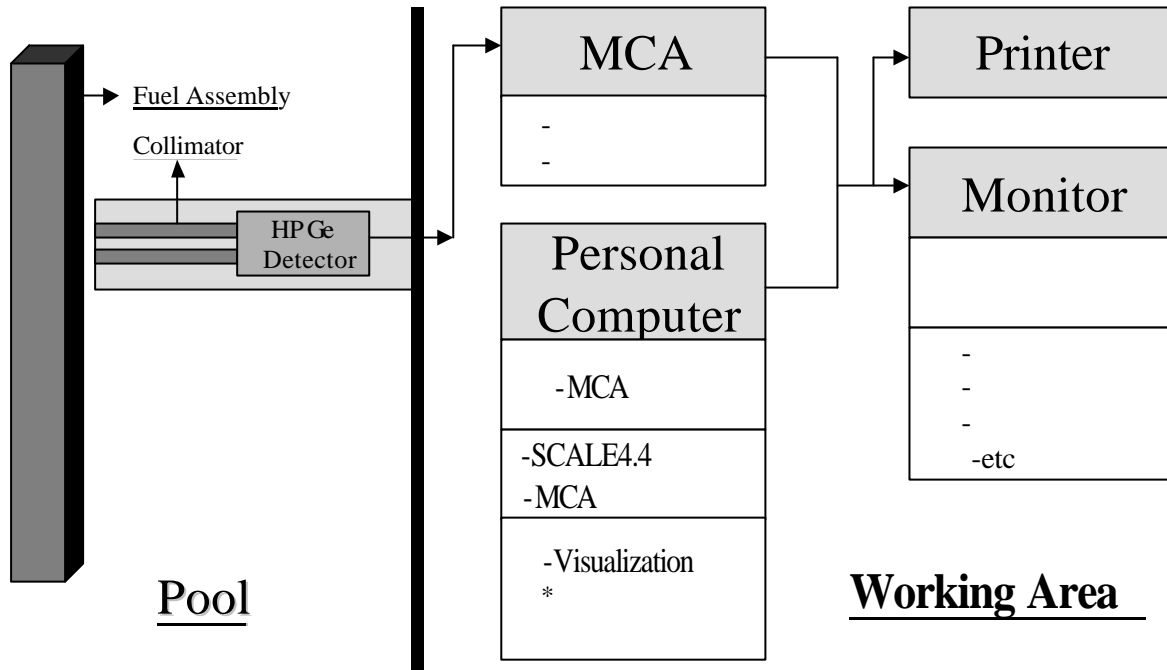


그림1. 사용후핵연료 집합체 수증 연소도 결정 시스템 개요도

(2) 방사선구역 성능시험(active performance test)

수증 연소도 측정장치는 비방사선구역에서 검출기차폐체/시준기집합체와 다운튜브 등 두 부분으로 해체되어 조사후시험시설(Post-Irradiation Examination Facility: PIEF)로 이동시켜 청정구역에서 재조립한후 방사선구역 하역수조(unloading pool)에 설치하였다. 수조에 설치하기 전에 비방사선구역 성능시험(inactive performance test)에서 수행한 HP Ge 검출기차폐부분 납차폐 견전성 시험, 시준기 정렬 시험, 누설시험 중, 측정장치의 방사선구역 운반으로 인한 해체/재조립으로 누설시험만이 다시 수행되었으며, 나머지 두가지 항목은 해체의 필요성이 없기 때문에 생략되었다. 방사선구역 성능시험에서 필요한 시험 항목은 수조내에서 사용후핵연료집합체로부터 방출되는 감마광자를 HP Ge 검출시스템이 정상적으로 검출해내는지를 확인하는 것이다. 이를 위하여 감마선 검출대상 사용후핵연료집합체로는 표1과 같은 1978년 고리1호기에 최초로 장진되었던 A17 집합체(14x14

PWR fuel)를 선택하였다.

(3) 그로스 감마선 측정(gross gamma-ray measurement)

수증 연소도 측정시스템의 방사선구역 성능시험결과 정상적인 감마선 검출 기능이 있다는 것이 확인된 후, A17 집합체 전체 길이에 대하여 5cm 간격으로 하단으로부터 감마선 스펙트럼을 획득하였다. 감마선 검출시 A17 연료집합체는 측정장치의 연료깃(fuel collar)에 완전히 접촉시켰으며, 이때 HP Ge 검출기와외 거리는 130 cm, 측정시간은 40 초로 하였다.

표1. 사용후핵연료집합체 A17의 특성 및 이력

형태	초기농축도 w/o	연소원 자료	연소주기/ 노심위치	배출연소도 MED/MTU	배출년월일	KAERI 수송년월
14x14 PWR	2.122	고리1호기	1/J16	17,071	1979.10.27	1987.6

\* 발전소 공표자료

### 3. 결과 및 고찰

(1) 방사능구역 성능시험

사용후핵연료집합체 A17을 사용한 수증 연소도 측정 시스템 감마선 검출 성능시험결과 그림2와 같은 감마선 스펙트럼을 획득하였다. 이러한 스펙트럼은 기존의 핫셀이나 수조벽에 고정설치된 감마선 검출시스템에서 얻어지는 스펙트럼과 같은 양상으로서 새로 개발된 이동식 검출시스템의 감마선 검출 기능이 정상임을 확인시켜 주는 것이다. 그림2의 스펙트럼에서 피크 수가 적은 것은 이 연료가 원자로에서 배출된지 거의 20년이 다 되어 반감기가 짧은 대부분의 핵분열 생성물이 붕괴되었기 때문이다.

(2) 그로스 감마선 측정

A17 사용후핵연료집합체 전체 길이에 대한 그로스 감마스캐닝 결과 상대적인 연소도 분포는 그림3과 같이 나타났다. 모든 핵분열 생성물에서 방출되는 감마광자를 검출하는 방식이 그로스 감마선 측정이나 냉각시간(cooling time)이 길어 실제 총 계수는 Cs-137에 의한 기여가 크다. 이 상대 연소도 분포에서 여러 개의 아래쪽으로 향한 피크 부분은 집합체의 그리드(grid) 부분을 나타내며, 하단 부분에 에지효과(edge effect)가

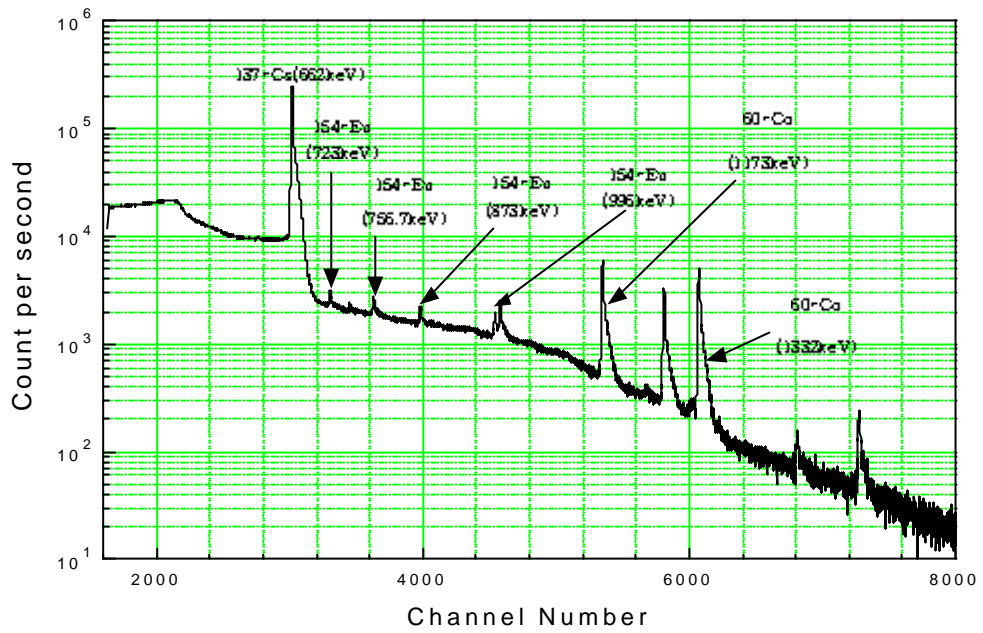


그림 2 사용후핵연료 집합체 A17의 감마선 스펙트럼

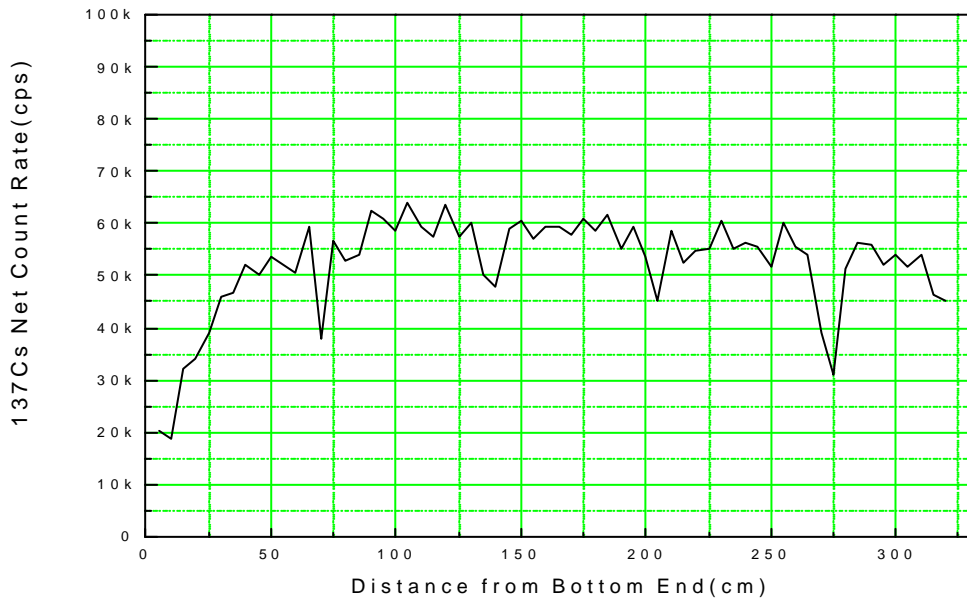


그림 3. 사용후핵연료 집합체 A17의 축방향 연소도 분포

나타난 것도 볼 수 있다. 14x14 PWR 연료집합체는 총 7개의 그리드가 있지만 이 그림에서는 5개만을 보여주는데, 이것은 A17 집합체가 이전에 연료봉 시험을 위하여 상부노즐(top nozzle)을 잘라내어 바스켓(basket) 속에 담겨 있어 스캐닝시 불축 튀어나온 바스켓 뚜껑의 플랜지(flange) 부분이 측정장치의 연료킷에 걸리기 때문에 연료집합체 상부 약 50 cm 부분은 스캐닝이 불가능하였다. 그리드 2개는 그 부분에 놓여 있다.

#### 4 결론

1998년 제작하여 비방사선구역 성능시험을 마친 수증 연소도 측정 시스템에 대하여 방사선구역 수조에서 실제 사용후핵연료집합체 A17을 사용하여 성능시험을 수행하였다. 성능시험결과 감마선 검출 기능이 기존의 다른 시설에서 사용되는 검출시스템과 같은 기능을 갖고 있다는 것을 감마선 스펙트럼 획득으로 확인하였으며, 또한 A17 연료집합체 전체 길이에 대한 그로스 감마스캐닝을 수행하여 상대 연소도 분포를 획득하였다. 따라서 새로 개발된 본 시스템이 앞으로 한국원자력연구소(KAERI)의 조사후시험시설(PIEP) 수조에서 뿐만아니라 원자력발전소 수조에서도 사용후핵연료의 안전한 관리를 위한 연소도 결정에 활용될 수 있다는 것을 최종적으로 확인하였다.

•본 연구가 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.