

수중 사용후핵연료 연소도측정장치 개발 Development of Under-Water Burnup Measuring Device for Spent Nuclear Fuel Assembly

박광준, 박형종, 구대서, 민덕기, 노성기
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

수중의 사용후핵연료집합체에서 방출되는 감마선을 측정하여, 그 연료의 연소도, 냉각시간, 초기 U-235 농축도와 같은 연료이력매개변수(fuel history parameters)를 얻을 수 있는 장치를 개발하였다. 이장치를 제작하기 위하여 개념설계, 기본설계 및 상세설계가 수행되었다. 이 장치가 고준위 감마선방출 핵연료와 접하고, 방사성 물질로 오염된 수중에서 작동되기 때문에 검출기 부분의 차폐 및 방수가 우선적으로 개념설계에 반영되었으며, 검출기 차폐부분의 차폐계산, 시준기 크기, 장치취급부분은 기본설계 및 상세설계에서 고려하였다. 이 장치는 앞으로 당소 조사후시험시설 수조 뿐만아니라 원자력발전소 수조에서 평균연소도, 냉각시간 및 초기농축도 측정에 직접 이용될 수 있을 것이다.

Abstract

The under-water burnup measuring device was developed in KAERI. The concept, basic and detail design were carried out for manufacturing the device. Detector shield and watertight were reflected prior to the other considerations, because the device operates in the contaminated water and close to the spent fuel assembly emitting the high level gamma-rays. Shielding calculation of the detector shield, the size of collimators, the shape of fuel collar, length of down tube determined in the step of basic and detail design. This device can be used in the pool of Post-Irradiation Examination Facility(PIEF) in KAERI as well as in the pool of nuclear power plant for determining the average burnup, cooling time and initial enrichment of the PWR spent fuel assembly.

1. 서 론

사용후핵연료에서 방출되는 감마선과 중성자와 같은 방사선을 측정하면, 연소도, 냉각시간, 초기/최종 U-235 농축도와 같은 연료이력매개변수(fuel history parameters)를 결정할 수 있다. 이러한 매개변수 수용치에 높은 신뢰도가 있다는 것은 매우 중요하며, 따라서 매개변수에 대한 원자로 운전기록치를 그대로 사용하는 것보다 직접 측정하여 매개변수를 결정하는 방법이 선호되고 있다. 저장, 수송, 재처리, 처분등과 같은 취급은 사용후핵연료내 방사성 핵종의 량, 열출력 및 핵

분열성 물질의 양에 따라 취급절차와 비용에 영향을 주기 때문에 이러한 매개변수들의 측정값이 요구되는 것이다. 이와 관련하여 사용후핵연료측정시스템에 대한 개발은 유럽, 미국 및 아시아의 여러 기관에서 상당한 진전이 이루어지고 있다. 이러한 시스템들은 일반적으로 연료자체에서 방출하는 감마광자나 중성자에 대한 방사선측정분석과 연료 밖에서 중성자를 조사시켜 측정분석하는 방법에 근거를 두고 있다.

사용후핵연료로부터 감마선과 중성자를 측정하면, 우선 핵물질 보장조치(safeguard)에 필요한 핵분열성 물질 특히 플루토늄함량을 결정하고, 두 번째 공정기준(flowsheet criteria)에 따라 "수용가능(acceptable)" 연료를 보증할 연료이력매개변수를 재처리 공정제어(process control)에 사용하고, 세번째 사용후연료 저장, 운송 및 처분분야에 연소도 크레딧(burnup credit)을 적용하게 된다.

사용후핵연료에 대한 연소도를 알게되면 연소에 기인한 핵분열성 물질(fissile content) 및 반응도(reactivity) 감소(loss)를 알 수 있으며, 이러한 결과로부터 핵안전평가(nuclear safety assessments)시 신용(credit)으로 생기는 경제적 이익(economic benefits)이 있다는 것을 여러 원자력 사용국들은 고려하고 있다.

영국의 BNFL Instruments사는 최근 사용후핵연료집합체에 대한 연소도(burnup) 측정장치를 개발하여 사용후핵연료의 수송, 저장, 재처리, 처분등에 이러한 연소도 크레딧(Burnup Credit)을 적용하고 있다. 미국 NRC도 연소도 크레딧 적용을 검토하고 있으며, 우리도 이에 대비하기 위하여 수중연소도측정장치 설계제작을 추진하고 있다.

사용후핵연료관리는 안전성과 경제성을 고려하지 않을 수 없다. 발전소 수조로부터의 사용후핵연료의 이동은 이 연료가 고방사능 물질이기 때문에 방사선 차폐가 완벽한 수송용기를 사용하여야 한다. 한 개의 수송용기에 많은 량의 연료를 담을 수 있다면, 운반횟수를 줄일수 있으므로 소량을 담아 운반할때보다 운반비용이 적게 든다. 그러나 수송용기에 담을 수 있는 사용후핵연료의 수는 책임계를 고려하여야 하기 때문에 제한을 받게 된다. 따라서 이러한 책임계를 고려하면서 최대한 담을 수 있는 방법이 있다면 안전성과 경제성 모두를 만족시킬 수 있을 것이다. 또한 연소도 크레딧은 발전소 저장수조내 사용후핵연료 저장랙(storage rack)의 간격조정에도 적용되어 저장밀도를 높일 수 있을 것이다.

2. 장치

가. 개념설계 요건

1) 감마선 검출기(gamma-ray detector), 전치증폭기(preamplifier), 액체질소용기(liquid nitrogen dewar), 시준기(collimators)등과 같은 주요구성품들이 수조물에 오염되지 않도록 구조물의 방수를 철저히 하여야 한다.

2) 시준기 슬릿 slit)을 통하여 들어오는 감마선 이외의 모든 감마선은 검출기 보호 및 감마선 스펙트럼 일그러짐 현상을 방지하기 위해서 차폐되어야 한다.

3) 수조(pool) 내에서 사용되는 모든 재료는 부식(corrosion)을 방지하고 제염을 용이하게하기 위해서 구조재로서 매끄럽게 표면처리된 불수강을 사용하여야 한다.

4) 수조내에서의 시험장치 취급이 용이하여야 한다.

나. 기본설계

기본설계는 개념설계에서 고려한 사항들을 근거로하여 수중연소도측정장치 주요 구성품인 검출기차폐체(detector shield), 시준집합체(collimation assembly), 다운튜브(down tube) 등에 대하여 수행되었다.

1) 검출기차폐체

사용후핵연료로부터 방출되는 방사선 (주로 감마선 및 중성자) 량이 어느 정도인지를 예상하고, 이 값을 근거로 하여 수중연소도측정장치중 그림1과 같은 검출기 주변의 구조물이 방사

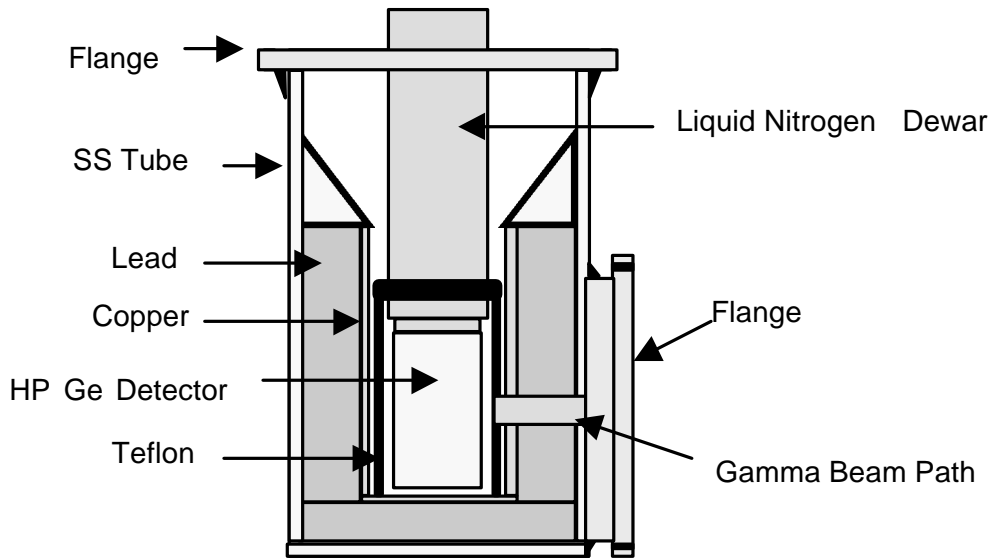


Fig. 1. Schematic Description of Detector Shield Assembly

선 차폐능을 어느정도 가지고 있는지를 계산하였다. 이를 위하여 그림2와 같은 모델을 가정하여 ORIGEN-2와 XSDRMPM 코드로 차폐계산이 수행되었으며, 그 결과는 표1과 같다. 이 계산결과로부터 선진국에서 선량을 기준으로 설정한 $10 \mu\text{Sv}$ 이하의 납차폐두께를 결정하게 되었다. 차폐능계산결과는 HP Ge 검출기의 손상을 미리 예방하고, 자연방사능을 낮게 유지하여 정확한 정량 분석을 하는데 기여할 수 있다.

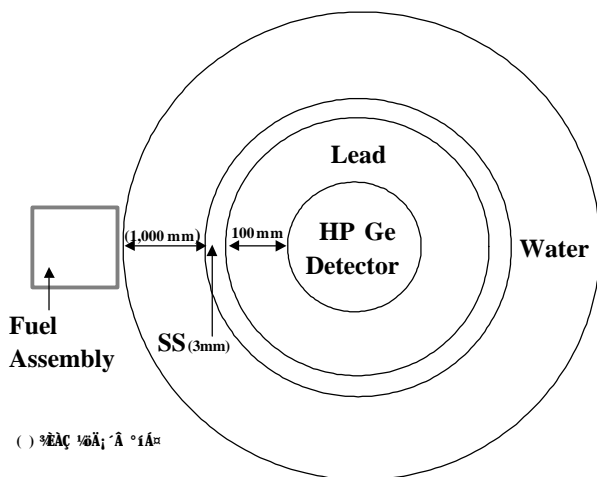


Fig.2 Geometrical Model of Radiation Shielding Calculation for HP Ge Detector Protection from Spent Fuel Assembly.

() 3000 1000 100 3000

Table 1. Results of Radiation Shielding Calculations for HP Ge Detector with Lead Shileding

Thickness of Lead	Dose Rate, mR/h	
	Neutron	Gamma Ray
0 cm	1.36533×10^{-4}	$1.64170 \times 10^{+3}$
1 cm	1.29678×10^{-4}	$3.56879 \times 10^{+2}$
2 cm	1.22584×10^{-4}	$1.51569 \times 10^{+2}$
3 cm	1.15690×10^{-4}	$7.16965 \times 10^{+1}$
4 cm	1.09157×10^{-4}	$3.59929 \times 10^{+1}$
5 cm	1.03019×10^{-4}	$1.87803 \times 10^{+1}$
6 cm	9.72680×10^{-5}	$1.00722 \times 10^{+1}$
7 cm	9.18885×10^{-5}	5.51364
8 cm	8.68566×10^{-5}	3.06601
9 cm	8.21501×10^{-5}	1.72584
10 cm	7.74750×10^{-5}	0.98089

2) 시준집합체

시준집합체내에는 그림3과 같이 전치시준기(primary collimator)와 후치시준기(secondary collimator) 두 개만을 장착하는 배열을 택하였다. 이러한 것은 세 개의 시준기를 사용하는 것이 보통이나 장치의 복잡성과 시준정렬상의 어려움을 피하고 교체시 간편성을 유지하기 위한 배려이다. 높은 시준효과를 얻기위한 방법은 여러개의 시준기를 사용하는 방법과 시준기 개수를 줄이면서 그 길이를 늘이는 방법이 있을 수 있다. 시준기는 감마선이 방출되는 핵연료집합체내 특정 위

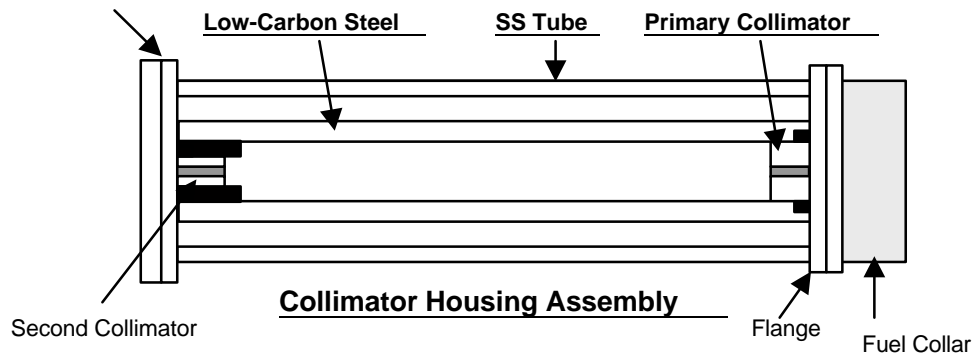


Fig.3. Schematic Arrangement of 1st and 2nd Collimator in the Housing Assembly.

치에서의 정확한 부피를 정의하고, 적절한 계수율을 조정하기 위하여 사용된다. 이것은 감마/엑스 선을 차단하여야 하므로 밀도가 높을수록 효과적이거나 가공성, 구조물 무게 및 경제성을 고려하여야 한다. 따라서 시준슬릿부분은 텅스텐으로하고 나머지 부분은 다른 합금으로 제작하도록 하였다. 전치시준기 슬릿크기는 핵연료집합체 대각선길이를 수용할 수 있도록 하였으며, 후치시준기는 고순도 Ge 검출기 직경을 고려하여 결정하였다.

3) 연료 깃(collar)

이 부분은 핵연료집합체와 직접 접촉하고, 전치시준기쪽에 연결되는 역할을 한다. 핵연료집합체 스캐닝(scanning)시 마찰력을 최소화하기 위하여 접촉부분에 윤활작용을 하는 재료의 사용이 요구된다. 이를 위하여 연료접촉부분은 폴리에틸렌 박판을 부착하도록 하였다. 시준기 슬릿 위치에 해당하는 연료깃 부분은 감마선 흡수를 줄이기 위하여 얇게하되 약 10 m 깊이 수압에 충분히 견딜수 있는 두께를 갖는 재료를 사용 하여야 한다. 그래서 이 부분은 석영판 또는 알미늄합금판을 고려하였다.

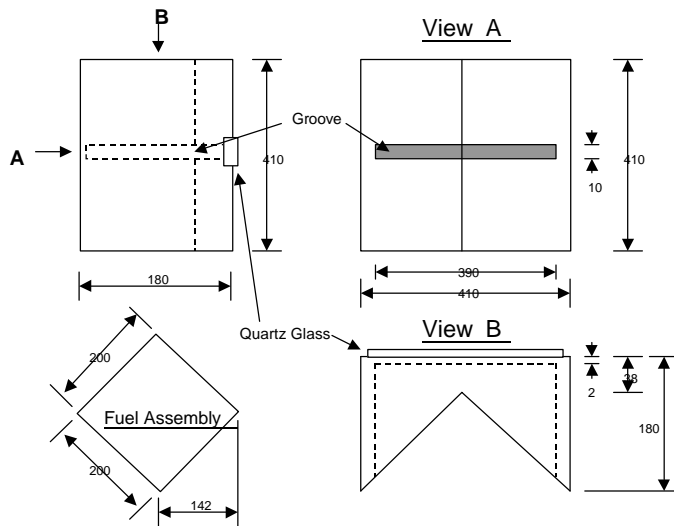


Fig.4. Schematic Drawing of Fuel Collar and Fuel Assembly.

4) 다운튜브

다운튜브는 수중연소도측정장치내에 고순도 Ge 검출기, 액체질소냉각용기/공급라인, 전원공급/신호처리 케이블 등이 수조의 물과 접촉하지 않게 격리하는 역할을 할 뿐만아니라 이러한 구성품들을 수조작업구역에서 인입/배출할 수 있도록 한다. 또한 이튜브는 측정장치의 이동시 운반을 편리하게 하기 위하여 5개부분으로 분리될 수 있도록 하였으며, 물에 잠기지 않는 맨 윗부분 상부에는 걸이개 까치발(hanger bracket)을 부착하여 그림5와 같이 1번 수조벽에 이미 존재하는 걸이개에 걸 수 있도록 설계하였다. 또한 다운튜브 최상부에는 수중연소도측정장치를 수조에 설치하거나 이동하기 위해서 크레인 훅(crane hook)에 걸 수 있는 고리(lifting shackle)가 부착된다. 이 고리는 다운튜브 안으로 고순도 Ge 검출기, 전원/신호 케이블 등과 같은 연소도측정 구성품이 인입/배출될 때 전혀 지장을 초래하지 않도록 좌우방향으로 자유롭게 움직일 수 있게 하였다.

3. 결론

사용후핵연료집합체 수중연소도측정장치는 검출기차폐체, 시준집합체, 핵연료깃, 다운튜브, 고정체 등으로 나누어 개념/기본설계를 수행하였다. 이 장치가 방사성 물질로 오염된 수조에서 사용되고 또한 고도의 정밀성을 요하므로 장치설계시 누수방지, 검출기차폐, 제염용이성 및 시준정렬 정확성을 설계요건으로 정하였다. 검출기차폐체의 차폐납 두께는 35 GWd/tU 의 연소도를 갖는 사용후핵연료집합체를 가정하여 고순도 Ge 검출기 안착위치에서의 선량이 $10\mu\text{Sv}$ 이하가 되게 10 cm 로 결정하였다. 시준집합체는 이 측정장치가 사용될 수조의 크기를 고려하여 전/후치시준기간의 거리를 1 m 로 하였다. 시준집합체 전치시준기쪽에 부착되는 핵연료 깃은 14x14

PWR 핵연료집합체 대각선 길이를 기준으로 그 슬릿 폭을 정하였으며, 시준집합체방수를 위하여 감마선흡수가 적은 석영판이나 알루미늄판 사용을 고려하였다. 다운튜브는 취급 및 운반상의 편의를 위하여 5개 부분으로 분리되도록 하였으며, 맨 윗부분은 이 장치의 설치 및 해체시 행거와 천장크레인 사용이 가능하도록 행거 브라켓과 리프팅샤클을 부착하도록 설계하였다.

이 시험장치는 당소 조사후시험시설 1번 수조에서 사용후핵연료집합체에 대한 시험을 수행하게 되며, 필요시 원자력발전소 수조에서 평균연소도, 냉각시간, 초기농축도등의 결정에 활용될 수도 있다.

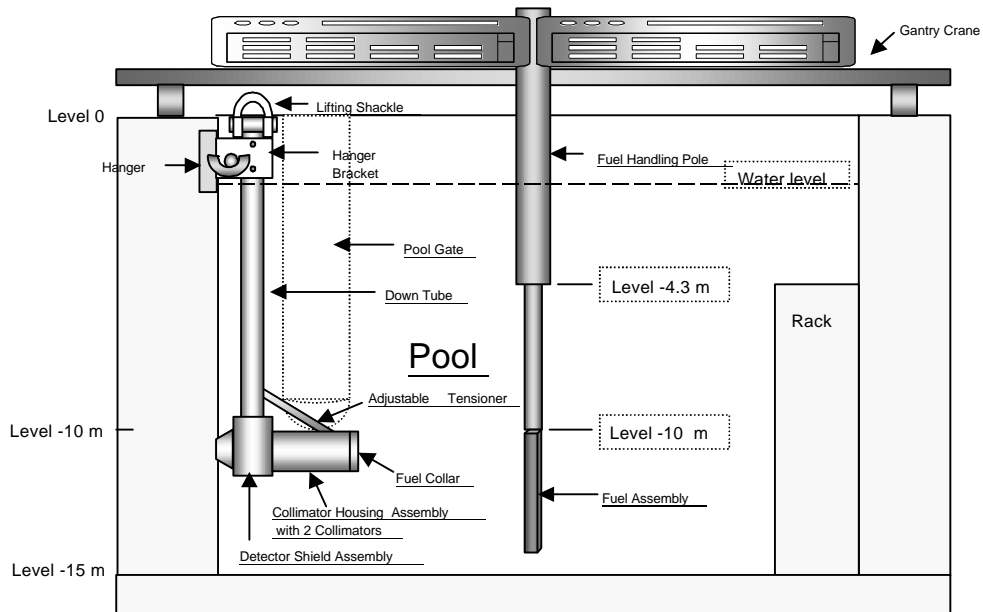


Fig.5. Schematic Description of Fuel Assembly and Burnup Measuring Device in Pool.