

## DUPIC 핵연료 보장조치용 중성자측정장치 개발(II)

이영길, 차홍렬, 김호동, 강희영, 홍종숙

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150 번지

### 요약

DUPIC 공정의 핵연료에 대한 핵물질 보장조치(safeguards)를 이행하여 핵투명성(nuclear transparency)을 검증하기 위한 중성자측정장치를 개발하였다. 본 장치를 사용한 보장조치 원리 및 기술적 사항, 장치 설계 개념등에 관해서는 본 논문의 전편<sup>[1]</sup>에서 기술하였고 여기서는 제작된 측정장치에 대한 성능시험 내용을 중심으로 나타내었다. 즉, 일반시설(cold lab.)내에서 실시한 성능시험 결과로부터 장치의 각 부분별 기능이 정상적으로 작동되고 있음을 확인할 수 있었으며 이것은 현재 후속과정으로 핫셀(hot cell)내에서 사용 후핵연료를 이용하여 수행중인 성능시험 결과를 분석하는 기본자료로 활용될 것이다. 본 장치 개발을 통하여 확보한 중성자측정 기술은 앞으로 고준위감마선방출 핵물질을 사용하는 후행핵연료주기 시설에 대한 핵물질 통제 및 계량관리에 필요한 보장조치 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 1. 서론

DUPIC(Direct Use of Spent PWR fuels in CANDU reactors) 공정은 사용후 PWR 핵연료봉을 고준위방사성물질 취급시설인 Hot cell 에서 절단, 해체한 후, 이 핵연료의 연소 상태에 따라 <sup>235</sup>U 또는 감손우라늄을 추가하고 가압중수로(PHWR)형 핵연료인 CANDU 핵연료 제조 요건을 만족하도록 하여 CANDU 핵연료 다발을 생산하는 것이다. DUPIC 공정은 재처리공정과 달리 공정의 전·후를 통하여 사용후핵연료의 성분이 분리되지 않으므로 그 양이 항상 동일하여야 한다. 즉, 핵물질 계량관리 및 보장조치 측면에서 사용후핵연료가 결손 또는 전용되지 않았음을 증명할 수 있어야만 DUPIC 공정이 원활하게 가동될 수 있다. 개발된 DUPIC 공정 보장조치용 중성자측정장치는 고준위의 감마선장에서 중성자측정이 가능하도록 설계, 제작되었다. 본 장치에 대한 성능검사, 시운전 등을 본 공정이 가동되기 이전에 완료하여 국제원자력기구(IAEA)등 대외적 기관의 공인을 받아 DUPIC 공정의 핵물질 계량관리에 적용할 수 있도록 하여야 하는데 본 연구에서는 제작된 장치<sup>[1]</sup>에 대한 성능시험 내용을 중심으로 나타내었다.

## 2. 본론

### 2.1 중성자검출기 제작

현재 일반적인 감마선 백그라운드하에서 사용이 가능한 우물형(well type) 중성자검출기는 개발되어 있고 IAEA 에서도 핵물질 보장조치용으로 널리 사용<sup>[2-4]</sup> 하고 있지만, DUPIC 핵연료 다발과 같이 고준위의 감마선을 방출하는 핵물질에 적용될 수 있는 중성자검출기<sup>[5]</sup> 는 개발되어 있지 않다. 따라서, 본 DUPIC 공정의 핵연료에 대한 핵물질 계량관리에 적합한 중성자검출기를 개발할 필요성이 있어 한국원자력연구소(KAERI) 와 미국 로스알라모스국립연구소(LANL)가 공동 연구로 제작키로 하였으며, 설계는 KAERI 와 LANL 이 공동으로 수행<sup>[6,7]</sup> 하였고 제작은 KAERI 에서 단독으로 하였으며 현재 KAERI 에서 성능시험을 수행하고 있다. 그림1(A) 는 제작된 중성자측정장치(이하, 'DSNC' (DUPIC Safeguards Neutron Counter)라 칭함)에 대한 입체단면도를 나타낸 것이고, 그림 1(B)는 실물 사진이다. DSNC 는 고준위감마선을 갖는 사용후핵연료 및 이것으로 제조된 DUPIC 핵연료의 중성자를 검출하여야 하는 특수성으로 인하여 일반적인 중성자검출기와는 다른 다음과 같은 몇몇 특성을 갖고 있다. 즉, 고준위 감마선을 차폐하기 위하여 내부에 텅스텐 차폐체를 설치하였으며 감마선에 의한 검출신호의 중첩(pile-up)을 최소화하기 위하여 <sup>3</sup>He 튜브 각각에 전치증폭기를 부착하였다. 핫셀내부에 장치가 설치되므로 인하여 작업자가 직접적으로 기능의 정상작동 여부를 확인할 수 없으므로 검출된 신호를 이용하여 기능을 자가진단할 수 있도록 제작하였다.

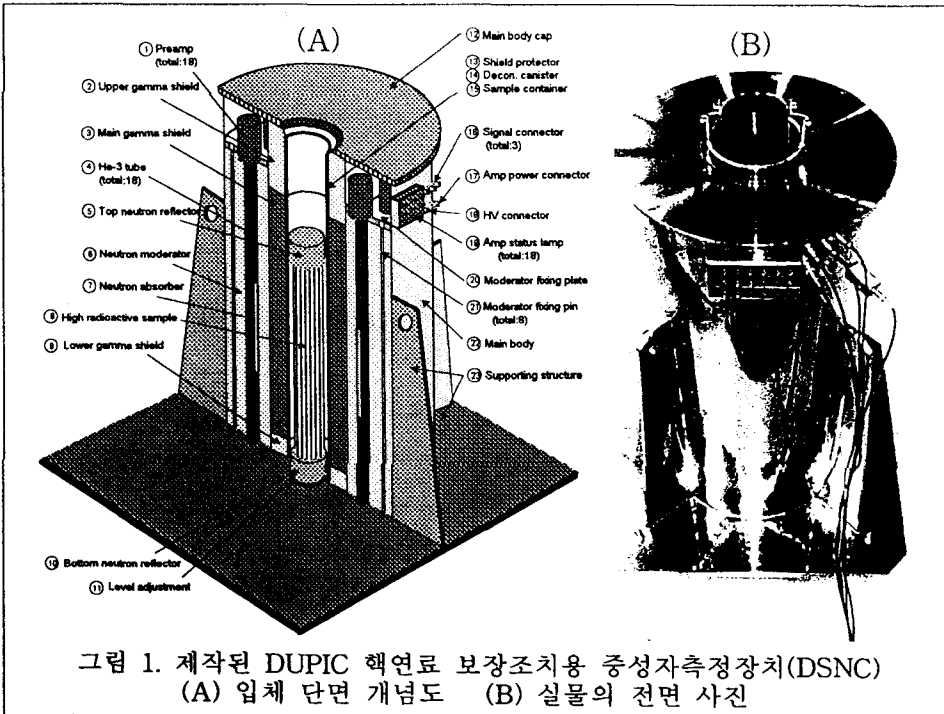


그림 1. 제작된 DUPIC 핵연료 보장조치용 중성자측정장치(DSNC)  
(A) 입체 단면 개념도 (B) 실물의 전면 사진

## 2.2 검출특성 결정

DSNC 의 경우, DUPIC 공정의 생산물인 CANDU형 핵연료다발(bundle)뿐만 아니라 공정 내에 존재하는 재료물질인 사용후핵연료 및 공정내의 잔존물(holdup)에 대한 중성자까지 측정이 가능하여야 한다. 이 경우 DUPIC 핵연료다발이 아닌 다른 측정 대상시료들이 기하학적으로 갖는 중성자분포는 대부분 비균질성을 가지므로 검출기 내부의 측정위치에 따라 검출효율이 차이가 나는 경우 비록 동일한 시료라 할지라도 서로 다른 결과를 갖게 되므로 이러한 영향을 제거하기 위해서는 검출효율을 균일하게 해주어야 한다. 이를 위하여 우선, 검출장치의 상하 양단은 중앙부보다 낮은 검출효율을 갖기 때문에 양단의 검출효율을 증가시켜 주기 위하여 그림 1(A) 에서 보는 바와 같이 그라파이트(graphite)를 사용한 상단중성자반사체와 니켈(nickel)로 된 하단중성자반사체를 부착하였다.  $^{252}\text{Cf}$  중성자선원을 사용하여 그 효과를 실험한 결과 반사체가 없는 경우보다 양단의 검출효율은 약 10 % 증가하였다. 다음으로 중앙부의 검출효율을 가장자리의 값 정도로 낮추어주기 위하여  $^3\text{He}$  튜브 중앙부 표면의 일부에 중성자흡수체인 Cd판을 길이와 폭을 서로 다르게 부착하여 길이방향 검출효율 분포에 대한 실험을 수행하였다. 최종적으로 얻은 최적의 검출효율분포는 그림 2 와 같으며 전체길이의 평균 검출값에 대하여  $\pm 2\%$  이내의 고른 분

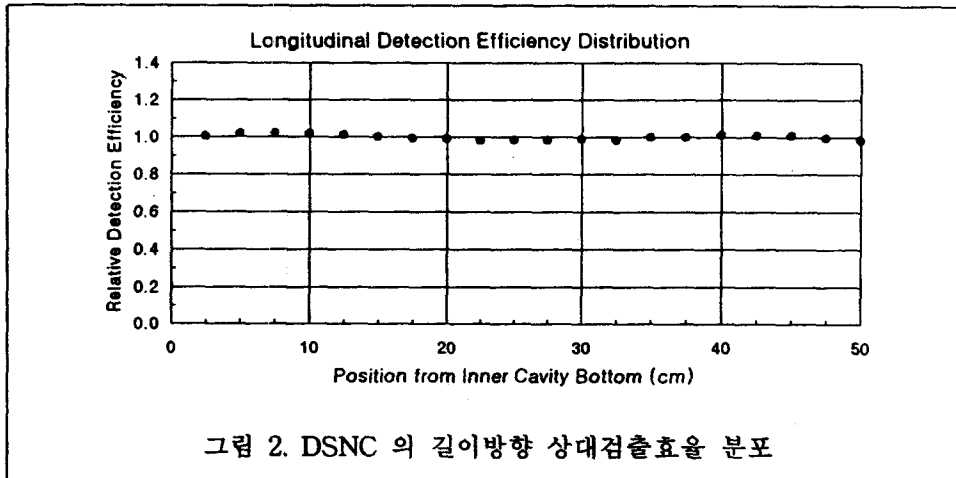


그림 2. DSNC 의 길이방향 상대검출효율 분포

포를 나타내었다.

고준위 중성자시료로 인한 검출기의 불감시간(dead time) 증가 문제를 해결하고, DSNC 가 반경방향으로 갖는 검출효율의 균일성(homogeneity)을 점검함과 아울러 장치의 정상 작동 여부를 진단하기 위하여 검출기의 출력신호를 그림 3 과 같이 3 그룹으로 분리하였다. 즉, 장치의 내부중심을 축으로 하여 동심원으로 배치된 18 개의  $^3\text{He}$  튜브를 매 3 번째 마다 서로 연결하여 전체적으로 기하학적인 대칭을 이루게 하였다.  $^{252}\text{Cf}$  중성자선원을 사용하여 각각의 출력 신호값을 서로 비교하였으며 그림 3 의 표에서 보는 바와 같이 평균값에 대하여  $\pm 0.2\%$  이내에서 잘 일치하였다. 본 실험 결과로부터 그림 1 에 주어진 장치의 감속재와  $^3\text{He}$  튜브의 배치가 전체적으로 대칭을 이루고 있고, 동시에 전치중폭

기의 문턱값설정(threshold setting) 및 신호선 연결이 전체적으로 동일하게 되어 있음을 확인할 수 있었다. 따라서, 측정대상 시료의 중성자세기에 따라 입력신호선의 수를 적절히 조합하여 사용하는 것이 가능하다는 것이 입증되었다. 한편, 본 검출장치에서  $^{252}\text{Cf}$  중성자 에너지 스펙트럼을 갖는 선원의 검출기 내 소멸시간(die-away time)을 측정한 결과  $52.6 \pm 0.3 \mu\text{sec}$  이었다.

### 2.3 사용후핵연료 표준선원 제작

$^{252}\text{Cf}$  표준선원을 사용한 Cold lab. 실험을 통하여 검출기의 검출효율특성 등 전반적인 특성을 규명하였으며, 이를 바탕으로 실제 사용후핵연료를 사용한 DSNC의 성능시험을 수행하기 위하여 다음과 같은 표준선원을 제작하였다. 그림 4는 표준선원 제작에 사용된 14x14 PWR 사용후핵연료봉 1개의 전체길이에 대하여 감마스캐닝한 결과를 나타낸 것이다.

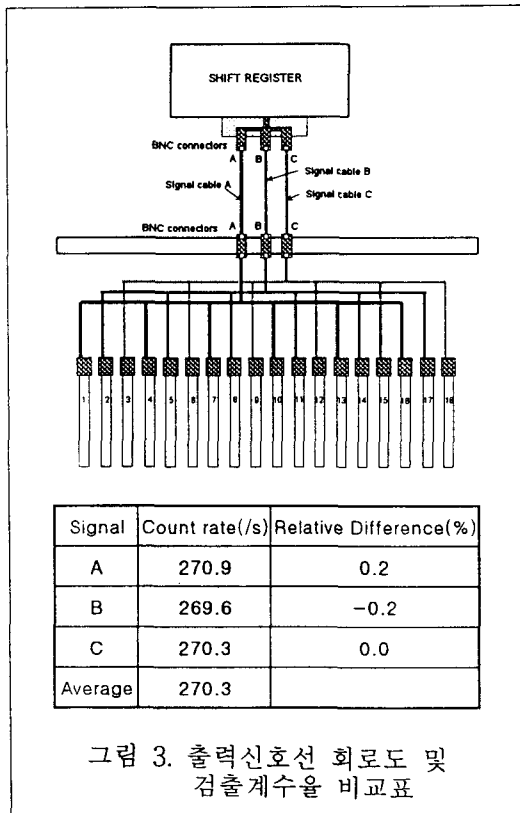


그림 3. 출력신호선 회로도 및 검출계수를 비교표

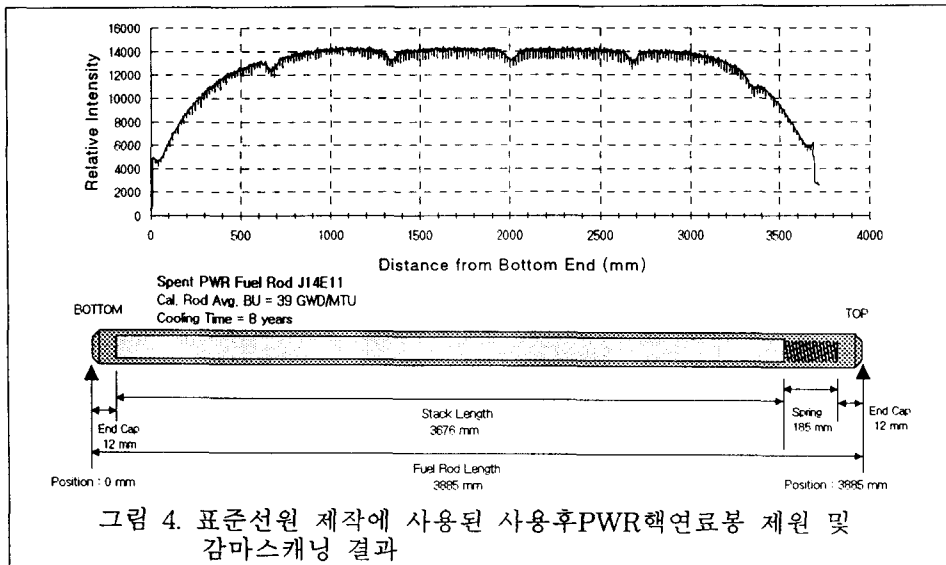


그림 4. 표준선원 제작에 사용된 사용후PWR핵연료봉 제원 및 감마스캐닝 결과

위의 스캐닝 자료를 근거로 하여 핵연료봉의 연료부위를 10 cm 단위로 절단하여 모두 36 개의 시료를 제작하였다. DSNC는 비파괴시험 핫셀 내에서 사용되기 때문에 선원으로 부터의 오염을 방지하고 아울러 소결체의 이탈 등을 방지하지 위하여 그림 5 와 같은 용기를 제작하여 내부에 절단시료를 삽입한 후 밀봉하여 표면을 제염하였다. 용기 자체에 의한 중성자흡수를 최소화하기 위하여 모든 재질은 Zircaloy-4 를 사용하였으며 피복관은 CANDU 핵연료봉의 것을 사용하였다.

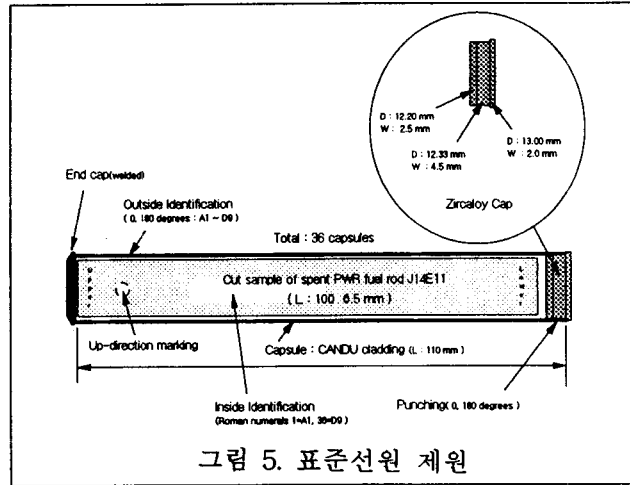


그림 5. 표준선원 제원

#### 2.4 핫셀시험

표준선원 제작, 시험, 자료분석등 일련의 핫셀시험 과정에 대한 흐름은 그림 6 과 같다. 제작된 사용후핵연료 표준선원을 사용하여 DSNC 에 대한 성능시험을 핫셀내에서 현재 수행하고 있는 중이며, 측정값은 흐름도의 좌측에 있는 코드해석에 의한 결과 및 우측의 화학분석에 의한 것등과 함께 향후 분석을 수행할 예정이다. 화학분석의 경우, 본 사용후핵연료 표준선원 제작을 위한 PWR 핵연료봉 절단 과정에서 연소도가 서로 다른 위치에서 12 개의 분석용 시료를 취하였으며 각각의 시료가 갖는 연소도, U, Pu 및

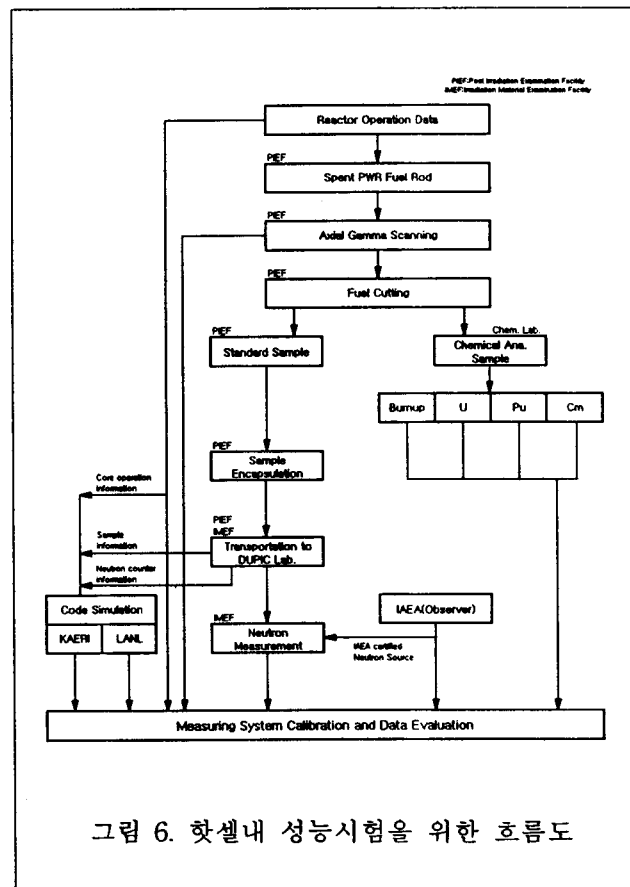


그림 6. 핫셀내 성능시험을 위한 흐름도

Cm 값을 구한 후 본 DSNC 로 구한 결과를 교정하는데 사용하고, 동시에 비파괴적으로 측정된 Cm 값과 다른인자(예로써, 연소도)들간의 상관관계를 규명하는데 사용할 계획이다. 이러한 과정을 통하여 성능시험을 마친 후 본 장치는 IAEA에 의해 인증된 중성자표준선원 등을 사용하여 최종적인 공인을 획득한 후 DUPIC 공정의 핵물질 계량관리를 위한 보장조치 장비로 사용될 예정이다.

### 3. 결론

DUPIC 공정의 핵연료에 대한 핵투명성을 검증하기 위하여 개발된 중성자측정장치에 대한 Cold lab. 성능시험의 결과로부터 장치의 각 부분별 기능이 정상적으로 작동되고 있음을 확인할 수 있었으며 이것은 현재 후속과정으로 수행중인 사용후핵연료를 사용한 Hot experiment 결과를 분석하는 기본자료로 활용될 것이다. 본 장치 개발을 통하여 확보한 중성자측정 기술은 앞으로 고준위감마선방출 핵물질을 사용하는 후행핵연료주기 시설에 대한 핵물질 통제 및 계량관리에 필요한 보장조치기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

- [1] 이영길 외, "DUPIC 핵연료 보장조치용 중성자측정장치 개발," '96 추계학술발표회 논문집 (1996), p.769-774, 한국원자력학회.
- [2] D. Reilly et al., "Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials," NUREG/CR-5550, US Nuclear Regulatory Commission, LA-UR-90-732 (1991), LANL.
- [3] H.O. Menlove et al., "Calibration and Performance Testing of the IAEA Aquila Active Well Coincidence Counter (Unit 1)," LA-13073-MS (1996), LANL.
- [4] J.K. Sprinkle, Jr. et al., "An Evaluation of the INVS Model IV Neutron Counter," LA-12496-MS (1993), LANL.
- [5] P.M. Rinard and H.O. Menlove, "Application of Curium Measurements for Safeguarding at Reprocessing Plants," LA-13134-MS (1996), LANL.
- [6] H.O. Menlove et al., "The Design of the DUPIC Spent Fuel Bundle Counter," LANL NIS-5 Report (1996), LANL.
- [7] 이영길 "중성자검출법에 의한 핵물질 보장조치 기술," KAERI/OT-295/96 (1996), 한국원자력연구소.

#### <감사의 글>

본 장치의 성능시험이 원활히 이루어질 수 있도록 협조하여 주신 한국원자력연구소 조사후시험시설(PIEF), 조사재시험시설(IMEF), 화학특성시험시설 관계자 여러분께 감사드립니다.