

DUPIC 핵연료 보장조치용 중성자측정장치 개발

이영길, 차홍렬, 나원우, 홍종숙

한국원자력연구소

요약

DUPIC 공정은 재처리공정과는 달리 공정의 전·후를 통하여 사용후핵연료의 양이 변하지 않기 때문에 시설이 원활히 운전되기 위해서는 사용후핵연료가 결손 또는 전용되지 않았음을 증명할 수 있어야 한다. 따라서, 핵투명성(nuclear transparency)을 보장할 수 있는 DUPIC 핵연료 보장조치용 비파괴측정 장치의 개발이 요구되었으며 ^3He tube, 폴리에틸렌(CH_2)감속재, 텅스텐 차폐체 그리고 PSR(portable shift register) 등으로 구성된 측정 시스템을 제작하였다. 본 장치를 사용하여 사용후핵연료에서 검출되는 중성자중에서, ^{244}Cm 의 자발핵분열중성자 수를 분석할 수 있으며 이를 이용하여 사용후핵연료를 계량관리 할 수 있다. 현재 측정시스템에 대한 성능시험등을 수행하고 있는 중이며 향후 DUPIC 연구용 고준위방사성물질취급시설(hot-cell)에 설치할 예정이다.

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 ^{235}U 또는 감손우라늄을 추가하고 가압중수로(PHWR)형 핵연료인 CANDU 핵연료 조건을 만족하도록 하여 CANDU 핵연료 다발을 생산하는 것이다. 이 공정의 경우, 사용후핵연료의 성분은 분리되지 않으므로 공정의 전·후를 통하여 사용후핵연료의 양은 일정하여야 된다. 즉, 핵물질 계량관리 및 보장조치 측면에서 사용후핵연료의 양은 항상 추적 및 관리되어 핵투명성(nuclear transparency)이 유지되어야만 DUPIC 공정이 원활하게 가동될 수 있다. 개발하고자하는 DUPIC 공정 보장조치용 중성자검출장치는 고준위의 감마선장에서 중성자측정이 가능하도록 설계, 제작되어야 하며 성능검사, 시운전 등을 본 공정이 가동되기 이전에 완료하여 국제원자력기구(IAEA)등 대외적 기관의 공인을 받아 DUPIC 공정의 핵물질 계량관리에 적용할 수 있도록 하여야 한다.

2. 본론

2.1 모니터핵종 결정

약 10 GWD/tU 이상의 연소도로 조사된 사용후핵연료에 남아 있는 여러 종류의

물질중에서 중성자 방출률이 상대적으로 큰 동위원소들로는 ^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu , ^{242}Cm 및 ^{244}Cm 가 있으며 핵연료의 냉각기간(Cooling Time: CT)에 따라 이들의 조성비는 변하게 된다. CT=0 에서 사용후핵연료가 갖는 중성자원은, 낮은 연소도인 BU= ~ 10 GWD/tU 에서는 ^{242}Cm 가 대부분을 차지하고 연소도가 높아질수록 ^{244}Cm 가 차지하는 비중이 증가하고 있으며 BU= ~ 30 GWD/tU 이상에서는 ^{244}Cm 가 차지하는 비중이 ^{242}Cm 의 것보다도 더 크다[1,2]. 그림 1 은 31.5 GWD/tU 연소도의 경우를 예로 나타낸 것이다[3].

한편, 핵연료의 조사이력에 따라 중성자원도 변하게 되는데 그 주된 이유는 반감기가 짧은 ^{242}Cm 가 연소이력에 민감하기 때문이다. 약 3 년의 냉각기간을 거치고 나면 조사이력을 반영하는 ^{242}Cm 는 대부분 붕괴하여 없어지므로 조사이력에는 거의 무관하고 Exposure(또는 연소도)에만 관계되는 동위원소인 ^{244}Cm 에서 방출되는 중성자를 측정할 수 있다[4].

일반적으로, 약 20 GWD/tU 이상의 연소도를 갖는 사용후핵연료가 약 3 년 이상 냉각될 경우

- 1) 연료에서 방출되는 중성자의 거의 모두는 ^{244}Cm 에 의한 것이고 이것은 연소이력에 무관한 중성자원이 되기 때문에 ^{244}Cm 는 사용후핵연료를 계량 및 보장 조치 할 수 있는 모니터(monitor) 핵종이 될 수 있다.
- 2) ^{244}Cm 는 자발핵분열(spontaneous fission: SF)에 의한 시간상관적인 중성자(time correlated neutron)를 방출하므로 PSR 을 사용하여 시간독립적인 중성자(time independent neutron) 또는 유도핵분열(induced fission: IF)에 의한 시간상관적인 중성자에 의한 영향을 받지 않은 값을 얻을 수 있다.

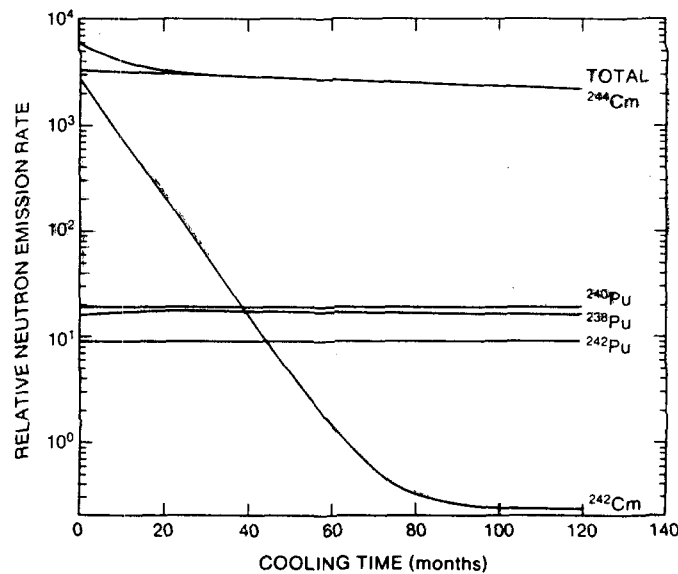


Fig.1 Five Principal Neutron Sources in a PWR Fuel Assembly with an Exposure of 31.1 GWD/tU. (source NUREG/CR-5550, LA-UR-90-732)

즉, DUPIC 공정에 사용된 사용후핵연료의 양을 직접 측정하는 대신에 사용후핵연료 내에 존재하는 ^{244}Cm 모니터 핵종을 이용하여 간접적으로 계량 및 관리할 수 있으므로, DUPIC 공정의 재료로 사용된 PWR 핵연료에서 방출되는 SF 중성자수를 측정하고, 공정의 생산물인 DUPIC 핵연료 다발의 SF 중성자수와 공정에 남아 있는 SF 중성자수를 측정하여 이들 값이 일치하면 사용후핵연료에 대한 핵투명성을 입증할 수 있다.

2.2 자발핵분열중성자 분석 기술

1 개의 DUPIC 핵연료 다발을 제조하는데 필요한 사용후핵연료와 생산된 핵연료 다발에서 방출되는 중성자수를 비교할 경우, 그림 2 의 예에서 보는바와 같이 IF n 의 수와 (α, n) n 의 수가 변하게 되는데 그 이유는 핵연료의 밀도, 물리적 형태, 핵분열성물질의 함량 등이 달라지기 때문이다. 그러나 사용된 사용후핵연료의 양이 동일하기 때문에 SF n 의 수는 변하지 않는다.

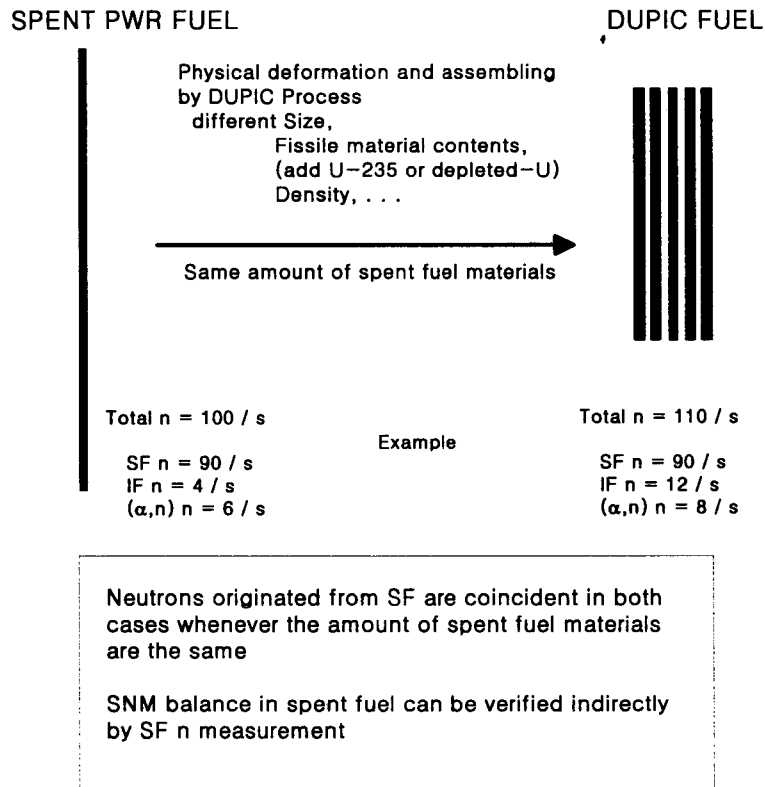


Fig.2 Strategy of DUPIC Fuel Safeguards

그림 3 은 사용후핵연료에서 방출되는 3 종류의 중성자 중에서 SF n 만을 분리해 내는 원리를 나타낸 것으로, PSR 의 SR(shift register) 라는 기능을 이용하면 발생된 여러 중성자들 중에서 시간적으로 서로 상관된 SF n 과 IF n 을 시간적으로 서로 독립인 (α, n) n 으로 부터 분리해 낼 수 있다. 만약에 측정시료에서 IF n 이 생기지 않거나 그 수가 SF n 의 수와 비교해서 거의 무시할 수 있는 경우에는 SR 만으로도 충분히 전체 중성자중에서 SF n 의 수를 측정할 수 있다. 한편, IF n 에 의한 영향이 큰 경우에는 PSR 의 MC(multiplicity counter) 기능을 이용하여 SF n 을 IF n 으로 분리해 낼 수 있으며, MC 를 사용하여 SF 발생수율 구하기 위해서는 Singles, Doubles 및 Triples 로 불리는 이론식과 실험값을 사용한다[5~10].

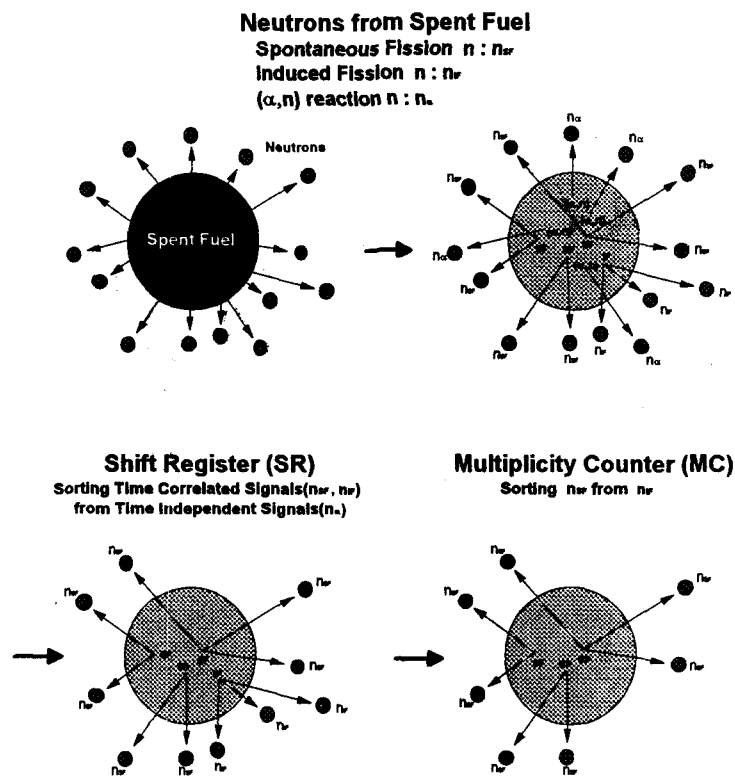


Fig.3 Neutron Sorting by Using Coincidence Circuit

2.3 중성자검출기 설계 및 제작

현재 일반적인 감마선 백그라운드하에서 사용이 가능한 중성자검출기는 상품화되어 있고 IAEA 에서도 핵물질 보장조치용으로 널리 사용하고 있지만, DUPIC 핵연료 다발과 같이 아주 높은 감마선장하에서 사용이 가능한 중성자검출기는 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 KAERI와 LANL이 공동으로 수행하였고 제작은 KAERI에서 단독으로 하였으며 제작 후 성능 시험 및 분석등은 공동으로 수행할 계획이다[11,12].

본 중성자검출기는 고준위감마선을 갖는 사용후핵연료 및 이것으로 제조된 DUPIC 핵연료의 중성자를 검출하여야 하는 특수성으로 인하여 일반적인 중성자검출기와는 다른 설계 특성을 갖고 있다. MCNP code를 이용하여, 검출기가 설치될 핫셀내부의 공간, 기능, 검출효율 등을 고려하여 설계하였으며 그림 4는 이것을 도식적으로 나타낸 것이다. 그림 5는 장치의 전체 시스템을 나타낸 것으로 현재 중성자 표준선원을 사용하여 성능시험 등을 수행하고 있는 중이며 향후 사용후핵연료를 사용한 실험을 수행할 계획이다. 이 과정에서 본 중성자검출기의 길이방향 검출효율분포, 고유검출효율 등의 특성을 결정할 예정이다.

3. 결론

중성자검출법에 의한 보장조치 기술은 특정핵물질(SNM: special nuclear material)인 우라늄, 플루토늄 또는 이들을 포함하고 있는 사용후핵연료나 방사성폐기물 등에 대한 계량관리를 비파괴적으로 수행할 수 있는 기술이며 핵물질 통제 및 계량관리에 필요한 핵심기술이다. 따라서, 개발된 본 중성자검출장치를 통하여 DUPIC 공정의 핵연료에 대한 핵투명성을 검증할 수 있는 기술을 확보하였으며 나아가 이것은 고준위 감마선방출 핵물질을 사용하는 후행핵연료주기 시설에 대한 보장조치 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

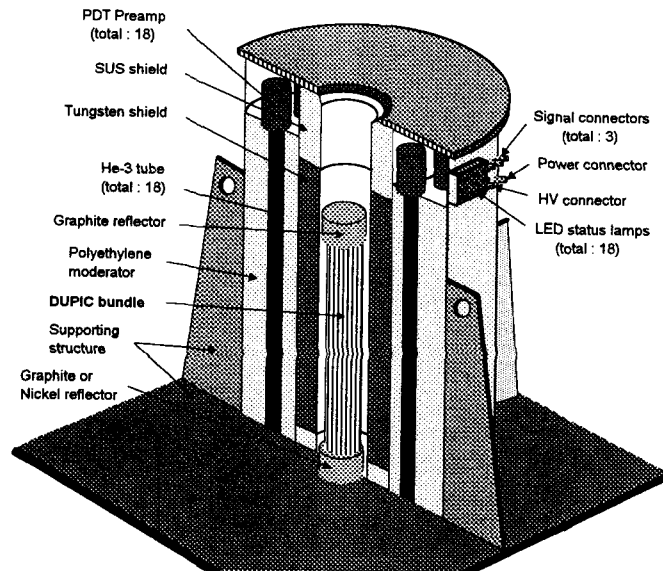


Fig.4 Schematic Drawing of Neutron Counter

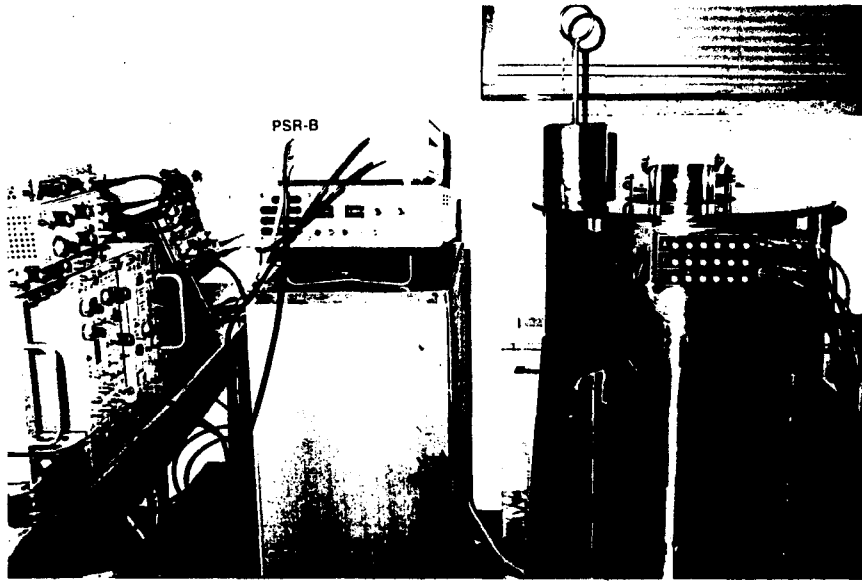


Fig.5 Layout of Manufactured Neutron Counter

참 고 문 헌

- [1] J.R. Phillips et al., "Neutron Measurement Techniques for the Nondestructive Analysis of Irradiated Fuel Assemblies," LA-9002-MS (1981), LANL.
- [2] G.E. Bosler et al., "Production of Actinide Isotopes in Simulated PWR Fuel and Their Influence on Inherent Neutron Emission," LA-9343 (1982), LANL.
- [3] D. Reilly et al., "Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials," NUREG/CR-5550, US Nuclear Regulatory Commission, LA-UR-90-732(1991), LANL.
- [4] P.M. Rinard and H.O. Menlove, "Application of Curium Measurements for Safeguarding at Reprocessing Plants," LA-13134-MS (1996), LANL.
- [5] N. Ensslin et al., "Assay Variance as a Figure of Merit for Neutron Multiplicity Counters," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A290 p.197-207 (1990) North-Holland, Amsterdam.
- [6] J.A. Mason et al., "Neutron Multiplicity Drum Monitor," Proc. of the 36th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management (1995) p.1141-1146.
- [7] B. Pedersen et al., "Neutron Multiple Correlation Analysis Method Applied to the Assay of Radioactive Waste," Proc. of the 13th ESARDA Symposium on Safeguards and Nuclear Material Management (1991) p.467-472.
- [8] N. Dytlewski et al., "Measurement Variances in Thermal Neutron Coincidence Counting," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A327 p.469-479 (1993) North-Holland, Amsterdam.
- [9] D.M. Cifarelli and W. Hage, "Models for a Three-Parameter Analysis of Neutron Signal Correlation Measurements for Fissile Material Assay," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A251 p.550-563 (1986) North-Holland, Amsterdam.
- [10] N. Dytlewski, "Dead-Time Corrections for Multiplicity Counters," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A305 p.492-494 (1991)
- [11] H.O. Menlove et al., "The Design of the DUPIC Spent Fuel Bundle Counter," LANL NIS-5 Report(1996).
- [12] 이영길 "중성자검출법에 의한 핵물질 보장조치 기술," KAERI/OT-295/96 (1996), 한국 원자력연구소.