

사용후핵연료 특수핵물질 분석을 위한 감마선 분광 분석 연구

엄성호, 박세환, 안성규, 임혜인, 권형문, 신희성, 김호동
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
eom@kaeri.re.kr

1. 서 론

사용후핵연료에 포함된 플루토늄 등 특수핵물질 (SNM; Special Nuclear Material)의 양을 결정하는 일반적 방법은 사용후핵연료에서 발생하는 중성자원인 큐륨(Cm)에서 발생하는 중성자를 측정하고 [1], 사용후핵연료에서 큐륨과 플루토늄의 비가 일정하게 유지되고 있다는 가정에 기반을 두고 있다. 이러한 분석법은 간접적인 방식으로 특수핵물질을 결정하는 방식이다. 특히, 사용후핵연료에서 큐륨과 플루토늄의 비가 일정하게 유지되지 않는다면 이 분석법으로 플루토늄 양을 결정하는 방식은 많은 오차를 포함하게 된다. 특히 파이로 일부 공정에서는 큐륨과 플루토늄의 비가 일정하게 유지되지 않을 수 있으므로, 직접적으로 사용후핵연료에 포함된 플루토늄 양을 결정할 수 있는 새로운 분석법이 필요하게 된다.

본 연구에서는 HPGe 검출기를 이용한 감마선 분광분석을 통하여 사용후핵연료에 포함된 큐륨과 플루토늄을 직접적으로 측정할 수 있는 새로운 분석법 및 이를 이용한 실험 결과 및 앞으로의 진행 방향에 대하여 소개한다.

2. 실험 및 결과

가. 플루토늄, 큐륨 측정을 위한 감마선 분광분석법

감마선 분광분석은 일반적으로 방사성 물질에서 발생하는 감마선 에너지를 HPGe 검출기 등을 이용하여 정밀하게 측정하고 측정된 감마선 에너지에 해당하는 방사성 물질의 종류를 판별하는 분석법이다. 그러나, 감마선 분광 분석법을 직접적으로 이용하여 사용후핵연료에 포함된 플루토늄 양을 결정하고자 할 경우, 플루토늄에서 발생하는 대부분의 감마선 에너지가 1 MeV 이하임에 비하여, 사용후핵연료에서 발생하는 많은 높은 에너지의 감마선이 HPGe 검출기 내에서 1 MeV 이하 에너지 영역에 많은 콤프턴 반응 (Compton Interaction)에 의한 에너지를 잃게되고 이러한 에너지가 백그라운드를 만들게 된다. 따라서, 직접적으로 감마선분광분석을 이용하여 사용후핵연료에 포함된 플루토늄을 측정할 수 없다. 그러나, 플루토늄은 아주 작은 확률 (3.6×10^{-6} %) [2] 로 자발핵분열 (Spontaneous Fission)을 하게 되며 이때 1 MeV 이상 높은 에너지 감마선이 발생하게 되며 이러한 높은 에너지 영역에서는 비교적 콤프턴 백그라운드가 작게 되므로 직접적으로 감마선 분광분석을 이용하여 사용후핵연료의 플루토늄을 측정할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 본 연구에서는 사용후 핵연료에서 발생하는 감마선을 측정하고 이를 플루토늄 자발 붕괴에서 발생하는 감마선 측정 데이터와 비교하여 감마선 분광분석을 적용한 사용후핵연료 플루토늄 직접 측정에 대한 연구를 진행하였다.

나. 사용후핵연료 감마선 측정

한국원자력연구원 조사후실험시설 (PIEF; Post Irradiation Examination Facility) 핫셀에 설치된 감마선 측정 장치를 이용하여 사용후핵연료에서 발생하는 감마선을 측정하였다. 그림 1 은 감마 측정 장치 구조로서 HPGe 검출기가 설치되어 있으며, 시료와 검출기 사이에 시준기(collimator)가 존재하며, 시료와 검출기 사이의 거리는 자유롭게 이동이 가능하도록 되어 있다. 시료 운반체(specimen carrying assembly unit)는 Z축 방향으로 검출기와 시료사이의 거리를 410mm ~ 980mm까지 수직으로 이동시킬 수 있으며, 이동거리는 벽에 설치되어 있는 눈금자로 알 수 있다. 본 연구에서는 감마선 측정 조건을 바꾸면서 사용후핵연료에서 발생하는 감마선을 측정하여 자발핵분열시 발생하는 감마선 측정을 위한 최적의 실험 조건을 도출하였다. 측정에 사용된 사용후핵연료 시료는 3회 연소한 영광 2호기 사용후 핵연료 봉에서 잘라 낸 약 5mm, 7mm, 8mm, 10mm 두께의 시료와 HPGe 검출기 사이에 collimator를 두고 감마선을 측정하였다. 이 때 사용후핵연료시료에서 발생하는 많은 감마선이 검출기 내에서 콤프턴 반응을 일으켜서 전체 측정 에너지 스펙트럼에서 낮은 에너지 영역의 측정치가 높게 나타나는 결과를 보였다. 자발핵분열에서 발생하는 감마선을 측정하기 위한 실험 조건은 a) 자발핵분열이 일어날 확률이 대단히 작기 때문에 짧은 효율적으로 감마선을 측정할 수 있도록 하는 것과 b) 자발핵분열에서 발생하는 높은 에너지 감마선을 측정하는 것을 목표로 하기 때문에 전체 스펙트럼 상에서 1 MeV 이하의 낮은 에너지

감마선 측정 빈도를 최대한 낮추고, 1 MeV 이상 높은 감마선 측정 빈도를 최대한 높이는 방향으로 실험 조건을 구하였다. 이러한 실험 조건을 만족하기 위하여 검출기와 사용후핵연료시료 사이의 거리를 최대한 가까이 두도록 하였으며, 전체 스펙트럼 상에서 낮은 에너지 측정 영역의 비중을 낮추고 높은 에너지 측정 영역의 비중을 높이기 위하여 납차폐체를 두었다. 즉 일정한 두께의 납 차폐체를 둘 경우 낮은 에너지의 감마선이 높은 에너지의 감마선에 비하여 차폐체 투과시 보다 감쇠가 많이 된다는 사실을 이용하였다. 또한 차폐체에 산란하여 검출기에 입사되는 낮은 에너지 감마선을 최소화하기 위하여 차폐체 구조를 설계하였다. 차폐체 설계시 EGSnrc 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하였다. 그림 2 는 차폐체 설치 후 측정된 감마선 스펙트럼이다. 측정된 감마선 스펙트럼에서 플루토늄 및 큐륨에서 자발핵분열에서 발생하는 감마선을 구분하기 위하여 LANL (Los Alamos National Laboratory)에서 측정된 자발핵분열 측정 스펙트럼과 비교하였다 [3].

3. 결 론

사용후핵연료에 포함된 플루토늄의 양을 직접적으로 측정할 수 있는 분석법 개발은 핵물질 안전 조치를 위하여 필요한 기술이다. 특히 큐륨과 플루토늄의 비가 일정하지 않을 수 있는 파이로 공정에서는 그 중요성이 큰 기술이다. 본 논문에서는 감마선 분광분석을 이용하여 사용후핵연료에 포함된 플루토늄을 직접 측정할 수 있는 측정법에 대한 연구를 수행하였다. 플루토늄 자발붕괴시 발생하는 높은 에너지 감마선 측정을 위한 최적의 측정 구조를 도출하기 위하여 다양한 차폐체를 이용하였다. 플루토늄 자발붕괴감마선 스펙트럼과 본 연구에서 측정된 스펙트럼을 비교하여 가능성 있는 감마선 peak에 대하여 분석을 진행하였다. 측정 감마선 에너지 범위 변화, 측정 시료 수 등을 변화시키면서 직접적 감마선 분광 분석법을 통한 사용후핵연료 플루토늄 측정 조건을 도출할 계획이다.

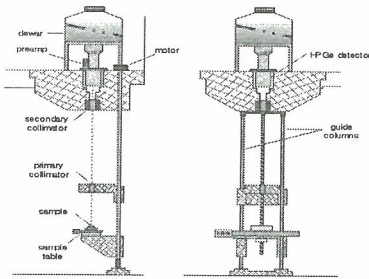


그림 1. 감마 측정장치의 구조

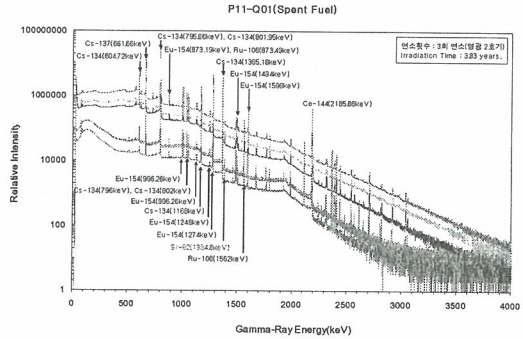


그림 2. 차폐체 설치 후 측정된 감마선 스펙트럼

참고문헌

1. Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials, NUREG/CR-5550.
2. <http://www.nndc.bnl.gov>.
3. Personal contact to D.V. Vo at Los Alamos National Laboratory.