

## 사용후핵연료로부터 방출되는 방사선의 효과적인 차폐를 위한 차폐물질의 두께 계산

양계환, 박창계, 나상호, 강권호, 이정원  
한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045  
[yjh98@kaeri.re.kr](mailto:yjh98@kaeri.re.kr)

### 1. 서론

현재 사용후핵연료를 고속로에서 재사용하기 위해 개발되고 있는 파이로프로세스의 전해정련공정을 통해 금속 우라늄, 초우라늄원소(TRU), 희토류 원소(Rare Earth), 핵분열생성물(Fission product) 등이 분리되어 산출된다[1]. 이들 각각은 중성자와 감마선을 방출하는 방사성물질이므로 각 핵종에서 방출하는 중성자와 감마선 선량에 대한 정확한 계산이 이루어져 선량기준치 미만을 보증할 수 있을 때 파이로프로세스의 안전한 공정수행이 가능할 것이다. 그렇지 못할 경우 적절한 차폐물질을 사용하여 중성자와 감마선을 선량기준치 미만으로 차폐시켜야 한다. 본 논문에서는 사용후핵연료에 대한 핵종별 방사능 평가를 SCALE5 코드를 이용하여 수행한 뒤 MCNP 코드를 통해 각 핵종별 방사선 차폐물질의 두께를 계산하였다.

### 2. 계산방법 및 결과 고찰

먼저 SCALE5 코드[2]를 이용하여 핵연료를 모의연소 후 냉각시킨 사용후핵연료에 대한 방사능평가를 수행하였다. 핵연료는 1톤 우라늄을 기준으로 농축도 4.5 wt%, 연소도 55GWD/tU으로 연소한 뒤 10년간 냉각시켰으며, 피복관의 조성 및 무게는 고리원자력발전소 1호기의 핵연료집합체를 기준으로 사용하였다. 계산을 통해 구한 각 핵종별 질량을 구한 뒤 핵종에 따른 방사선량을 평가하기 위해 MCNP 코드[3]를 이용하여 중성자선량률과 감마선량률을 각각 계산하였다. 계산을 위하여 각 핵종별 질량에 해당하는 구형 물질을 가정하였고, 보수적인 차폐계산을 위해 구 바깥은 10 cm 두께의 물로 둘러싸여 있는 것을 가정하였다. 또한 중성자 차폐물질로는 밀도가 0.872 g/cc인 폴리에틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)을, 감마선 차폐물질로는 밀도가 11.34 g/cc인 납(Pb)을 사용하였다. 이와 같은 조건을 이용하여 방사선 선량기준치인 2 mSv/hr 미만을 만족하는 차폐물질의 두께를 결정하고자 하였으며, 선량기준치 단위로 변화시키고자 MCNP 계산시 ICRP에서 발간한 단위 전환 인자를 포함시켰다[4]. 표 1은 계산결과 나타난 핵종별 차폐물질의 두께와 그에 따른 중성자선량률을 나타낸 것이다. 우라늄은 중성자와 감마선을 동시에 방출하는 핵분열성 원소로서 두 가지 종류의 차폐물질을 사용해야 하나 선량률 계산결과로부터 알 수 있듯이 차폐물질이 전혀 없어도 중성자와 감마선량률은 선량기준치에 훨씬 못 미치는 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 다시 말해 사용후핵연료 1톤에서 회수되는 우라늄 취급시 별도의 차폐설비가 필요치 않음을 의미한다. TRU의 경우 중성자선량률 계산이 되지 않았으며 이는 사용후핵연료 1톤에서 포함된 TRU의 질량이 임계치를 넘어서 계산시 중성자 분열이 기하급수적으로 늘어나기 때문인 것으로 판단된다. 세슘, 스트론튬, 테크네슘, 피복관의 경우 안전한 차폐를 위해 필요한 차폐물질의 두께는 각각 17 cm, 15 cm, 0, 10 cm로 분석되었다.

### 3. 결론

사용후핵연료의 핵종별 차폐물질의 두께를 계산하기 위해 SCALE5 코드를 이용하여 핵연료 연소를 모사하고, MCNP 코드를 통해 핵종별 선량률을 계산하였다. 우라늄과 TRU는 핵분열성 원소이기 때문에 중성자와 감마선 차폐물질이 동시에 필요한데, 계산을 통해 우라늄의 경우 중성자 차폐물질은 전혀 필요치 않을 정도로 사용후핵연료 1톤에서 발생하는 선량이 낮다는 것을 알 수 있었다. 반면에 TRU는 사용후핵연료 1톤에 포함된 양이 임계질량을 넘기 때문에 그 양을 분산시키지 않고 모아둘 경우 핵분열 연쇄반응으로 인해 높은 발열량과 방사능 수치를 나타내게 될 것임을 추정할 수 있다. 세슘과 스트론튬은 고방사성물질이어서 안전한 차폐를 위해서 15 cm 이상의 납이 필요하다는 것을 보였고, 테크네슘은 방사성 물질이지만 사용후핵연료에 함유된 양이 그리 많지 않아서 별도의 차폐가 필요하지 않다는 것을 보였다. 피복관은 원래 방사성 물질이 아니지만 핵연료 연소과정에서 방사화되었기 때문에 안전한 취급을 위해서는 10 cm 두께의 납이 차폐를 위해 요구됨을 알 수 있었다. 향후 피복관에 침투된 TRU의 양

을 계산하여 침투된 TRU로 인해 필요한 차폐물질의 두께를 결정하는 연구도 실제 사용후핵연료를 안전하게 취급하는데 많은 도움이 될 것으로 예상된다.

표 1. 핵종별 차폐물질의 두께에 따른 선량률

U (22.6 cm)	중성자선량률 (mSv/hr)	32.6 cm (H <sub>2</sub> O)	33 cm (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	34 cm (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	35 cm (Pb)	36 cm (Pb)	37 cm (Pb)
		±1.95E-06	±1.95E-06	±1.95E-06	±1.95E-06	±1.95E-06	±1.95E-06
TRU (5.3 cm) (keff=1.02)	중성자선량률 (mSv/hr)	15.3 cm (H <sub>2</sub> O)	16 cm (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	18 cm (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	20 cm (Pb)	22 cm (Pb)	24 cm (Pb)
		-	-	2.82E-02 ±2.47E-05	1.25E-03 ±2.32E-05	6.22E-05 ±1.34E-05	4.86E-06 ±8.18E-06
Cs (8 cm)	감마선량률 (mSv/hr)	20 cm(Pb)	30 cm (Pb)	32 cm (Pb)	34 cm (Pb)	36 cm (Pb)	38 cm (Pb)
		5.71E+05 ±1.71E+02	4.66E+01 ±8.11E-01	1.14E+01 ±3.18E-01	3.05E+00 ±1.23E-01	8.28E-01 ±4.59E-02	2.36E-01 ±1.71E-02
Sr (4.8 cm)	감마선량률 (mSv/hr)	23 cm (Pb)	26 cm (Pb)	29 cm (Pb)	32 cm (Pb)	35 cm (Pb)	40 cm (Pb)
		1.84E+02 ±5.34E-01	2.50E+01 ±1.28E-01	3.69E+00 ±3.17E-02	5.65E-01 ±7.97E-03	8.98E-02 ±2.05E-03	4.09E-03 ±2.40E-04
Tc (3 cm)	감마선량률 (mSv/hr)	13.2 cm (Pb)	13.4 cm (Pb)	13.6 cm(Pb)	13.8 cm(Pb)	14 cm (Pb)	14.2 cm (Pb)
		1.24E-02 ±2.84E-05	7.43E-03 ±1.93E-05	4.90E-03 ±1.42E-05	3.33E-03 ±9.99E-06	2.30E-03 ±7.37E-06	1.58E-03 ±5.21E-06
Cladding (Zr-4) (21 cm)	감마선량률 (mSv/hr)	26cm(Pb)	27 cm (Pb)	28 cm (Pb)	29cm (Pb)	30 cm (Pb)	31 cm (Pb)
		6.18E+01 ±1.71E-02	2.98E+01 ±1.95E-02	1.47E+01 ±2.21E-02	7.30E+00 ±2.44E-02	3.66E+00 ±2.66E-02	1.84E+00 ±2.87E-02

References

[1] J.J. Laidler, J.E. Battles, W.E. Miller, J.P. Ackerman, and E.L. Carls, "Development of Pyroprocessing Technology", Progress in Nuclear Energy, 31, 1/2, pp. 131-140, 1997.  
 [2] I.G. Gauld, O.W. Hermann, R.M. Westfall, ORIGEN-S: SCALE System Module to Calculate Fuel Depletion, Actinide Transmutation, Fission Product Buildup and Decay, and Associated Radiation Source Terms, ORNL/TM-2005/39, 2005.  
 [3] MCNPX User's Manual, version 2.5.0, LA-CP-05-0369, Denise B. Pelowitz, April 2005.  
 [4] ICRP Publication 74: Conversion Coefficients for Use In Radiological Protection Against External Radiation, 74, 1995.