

## 파이로폐기물 처분시스템 흡수선량 평가에 대한 소고

국동학, 조동진, 이민수, 이종열, 최희주  
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045  
 svskook@kaeri.re.kr

### 1. 서론

PWR 사용후핵연료는 파이로공정을 거친 후에 총 5가지의 폐기물의 형태로 생성되고, 그 중에서 고준위폐기물로 분류됨과 동시에 처분되어야 하는 폐기물은 크게 금속폐기물과 세라믹폐기물로 나눌 수 있다. 이 두 가지 폐기물은 각자 고유한 용기 내에 담겨져 심지층 공학적방벽으로 구성된 처분시스템 내에 보관된다. 이 처분용기 수명에 많은 영향을 미치는 메카니즘은 부식이며, 처분용기 외부로 나오는 방사선에 의한 흡수선량으로 인해 공학적방벽인 벤토나이트는 방사화전리되어 다량의 부식인자들을 생성할 가능성이 높기 때문에 이 부분에 대한 평가가 필요하다. 본 연구에서는 이미 수행했던 평가와 다른 평가방법을 통하여 기존의 평가방법을 검증함과 동시에 벤토나이트 외에 처분용기 주변을 감쌀 수 있는 지하수 및 90℃의 수증기에 대한 추가적인 평가를 통하여 파이로폐기물 처분시스템의 흡수선량에 대한 평가를 조금 더 현실화하고자 하였다.

### 2. 본론

파이로폐기물은 총 우라늄과 TRU를 포함하는 금속폐기물, LiCl+KCl과 회토류 및 일부 TRU를 포함하는 세라믹(Monazite)폐기물, 요오드와 테크네슘을 포함하는 Off-gas, 세슘을 포함하는 Off-gas, 그리고 스트론튬과 일부 세슘을 포함하는 LiCl 폐기물 5가지로 구분할 수 있으며, 이 중에서 현재 처분의 대상으로 구분하는 폐기물은 금속폐기물과 세라믹폐기물이다. 이들의 기본적인 특징은 표 1과 같다. 여기서 수치들은 PWR 사용후핵연료 10MtHM을 파이로공정 처리한 후의 값이며, 농축도는 4.5wt%, 연소도는 55 GWd/MtU, 10년 냉각된 사용후핵연료를 기준으로 설정된 값이다. 고준위폐기물 처분에 관하여 앞선 연구를 수행한 스웨덴에서는 폐기물의 방사선에 의해서 공학적방벽이 받는 흡수선량이 방사화전리를 일으킬 수 있는 1 Gy/yr 수준 이하이어야 한다고

정하고 있다[1]. 따라서 향후 모든 평가결과는 이 값을 기준으로 분석하고자 하며, 두 가지 폐기물 중에서 세라믹 폐기물의 경우에 대한 비교 분석을 수행하였다.

Table 1. PWR SF 10MtHM에 대한 폐기물의 특징.

항목	금속	세라믹	
주요 핵종	U, TRU	RE, TRU	
무게 (kg)	3136.4	664.9	
밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	5.70	3.57	
부피 (L)	549.9	186.2	
폐기물 블럭	직경(cm)	30	26
	높이(cm)	10	25
	갯수	77.8	14.1

#### 2.1 기존 평가결과 검증

파이로폐기물은 증성자를 생성할 수 있는 우라늄과 TRU들이 거의 대부분 제거된 상태이기 때문에 증성자에 의한 선량이 감마선보다 훨씬 미미하며, 국동학 등[2]은 세라믹폐기물의 경우 감마선에 의한 벤토나이트의 흡수선량은 MCNPX를 사용하여 0.0115 Gy/hr로 평가하여 현재 제안된 세라믹폐기물 처분시스템이 앞서 언급한 선량기준 이하임을 주장하였으며, 본 연구에서는 MicroShield를 사용하여 위의 내용을 검증하고자 하였다. 서로 다른 프로그램의 비교평가를 위하여 아래와 같은 조건을 맞추었으며, 주로 프로그램 설정의 자유도가 떨어지는 MicroShield에 맞도록 조정하였다.

- MicroShield의 선원항 부분 균질화
- 각 차폐층에 대한 재질특성분포 반영
- 방사선 에너지 그룹수 조절 (18 그룹)
- 선량단위 통일 (MeV/cm<sup>2</sup>/sec)

MCNPX 계산의 상대오차는 3%이내의 값을 나타내었으며, 표 2에 비교결과를 표기하였다. Case ①은 MicroShield의 결과를, Case ②는

MicroShield 조건으로 맞춘 MCNPX 결과를, Case ③은 국동학 등[2]의 원본 계산조건을 그대로 적용한 경우를 나타낸다.

Table 2. 선량계산 결과 비교.

Case	① MicroShield	② MCNPX	③ MCNPX
Energy Group	18 Group (0~11MeV)	18 Group (0~11MeV)	44 Group (0.01~20MeV)
Photon Intensity (photons/sec)	2.833E+14	2.833E+14	2.114E+14
Tally (MeV/cm <sup>2</sup> /sec)	7.772E+05	9.210E+05	8.15E+05

표 2에서 보는 바와 같이 Case ②의 경우가 조금 더 높게 나타났으며, 이는 선원항 균질화 과정에서 기인한 차이와 MicroShield는 선량을 특정 포인트에서 나타내는 반면, MCNPX 계산은 측정의 정확도를 높이기 위해 같은 거리에 있는 얇은 원통형 tally volume을 사용하였기에 발생한 차이 때문인 것으로 판단된다. Case ③의 경우에는 ORIGEN-ARP 5.0에서 자동으로 생성하는 Gamma-44 Group Energy에서 0.01 MeV 이하 영역의 광자들을 고려하지 않았기 때문에 총 광자선량에 차이가 있으며, 그 차이로 말미암아 최종 선량평가의 값은 Case ①과 거의 유사하게 나타났다. 따라서, 국동학 등[2]의 기존 계산에 대한 검증계산이 합리적인 수준이내에서 수행된 것으로 판단할 수 있다.

### 2.2 심지층 지하수에 대한 흡수선량평가

공학적 방벽(벤토나이트)과 용기 표면 사이에 존재하는 공간에 지하수가 가득 차 있을 때, 심지층 지하수에 대한 흡수선량을 평가하여 표 3에 나타내었다.

### 2.3 90℃ 수증기에 대한 흡수선량평가

처분공 내에서는 방사성폐기물의 발열에 의해 처분용기 표면온도가 최대 90℃까지 상승할 수 있으며, 이때에는 수증기 형태의 분위기가 형성될 것으로 예상된다. 90℃ 수증기 분위기의 밀도는 3.81E-4 g/cc, 핵종은 H: 8.4%, N: 18.3%, O: 73.3%로 산출되었으며 이에 대한 흡수선량을 평가하여 표 3에 나타내었다.

Table 3. 대상 물질별 흡수선량 비교.

대상 물질	흡수선량 (Gy/hr)	상대 비율 (%)
벤토나이트	1.1476E-02	100.00
지하수	4.3102E-03	37.56
90℃ 수증기	4.3274E-03	37.71

모든 MCNPX 결과는 3% 이내의 상대 오차를 보였으며, 세 가지 경우 모두 서두에 언급한 1 Gy/hr의 기준을 훨씬 밑도는 결과를 나타내었다. 수증기의 경우 지하수에 비해서 질소가 존재하였지만, 전체적인 흡수선량 계산에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 벤토나이트의 흡수선량이 높은 것은 물에 비해 상대적으로 선량을 흡수할 수 있는 기타 핵종들이 많기 때문인 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 구체적으로 어느 핵종에 주로 에너지가 흡수되는 지를 추가적으로 연구할 예정이다.

### 3. 결론

파이로폐기물을 처분할 경우 처분용기 주변의 물질(지하수, 수증기, 벤토나이트)이 받게 되는 흡수선량을 MCNPX를 사용하여 평가하였으며, 일부의 경우에는 MicroShield로 검증하였다. 평가결과 세가지 물질 모두 기존의 선진국에서 제시한 기준을 만족하였으며, 비교검증 결과도 양호한 것으로 나타나 향후 추가적인 연구에 신뢰성을 확보하였다.

### 4. 참고문헌

- [1] SKB TR-99-06, Deep repository for spent nuclear fuel, 1999.
- [2] 국동학, "Pyroprocess waste disposal system design and dose calculation", 한국원자력학회지, 발간예정 (승인번호 11-06).