ITER 중준위금속폐기물에 대한 감마스캐닝 시스템 개념설계

지영용, 홍권표, 오완호, 이한재, 강문자, 나병찬*
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
*ITER, Rute de Vinon CS 90 046, 13067 St. Paul lez Durance Cedex, France
yyji@kaeri.re.kr

1. 서론

ITER(international thermonuclear experimental reactor)에서 발생되는 중준위금속폐기물(Type B)은 인접한 HCB(hot cell building)로 이송되어, 절단, 바스켓 포장, 삼중수소 제거 등의 처리과정을 거친 후에 감마스캐닝을 이용한 핵종평가를 수행하며, 최종적으로 핫셀 내 임시저장 구역에 저장된다. 이 중준위금속폐기물은 방사능 농도가 매우 높아 사람이 접근할 수 없으며, 따라서 핫셀 내 모든 폐기물 처리 공정은 외부 인접한 건물에서 원격조작(remote handling, RH)으로 이루어진다. 이를 위해 폐기물 및 장비 등의 수송을 위한 trolley와 상부의 크레인이 설치되며, 각종 RH 장비 등의 조작을 위해서 고가(overhead)의 power manipulator 등이 도입될 것이다 [1].

폐기물 절단과정을 거쳐 약 2.7 m^3 크기의 철재 바스켓에 담긴 금속폐기물은 삼중수소가 제거된 후에 감마스캐닝을 위한 특성평가실에 도착한다. 이 감마스캐닝 시스템은 매우 높은 방사선 장에 노출되므로 고 선량에 적합한 검출기와 이의 원활한 작동을 유지하기 위한 검출기 주변의 콜리메이터 및 납차폐 등의 검출시스템을 갖추어야 한다. 또한 이 평가실로는 사람이 접근할 수 없기 때문에 해당 검출시스템은 액체질소 등에 의한 냉각이 필요치 않아야 하며, 잘 알려진 검출기로써 유지보수 측면에서 유리한 시스템이 구축되어야 한다.

일반적인 감마스캐닝 시스템은 폐기물의 측정을 위한 고순도 반도체검출기로 구성된 검출시스템, 폐기물 전 영역을 스캐닝하기 위한 수직방향 구동장치, 폐기물 내의 핵종 비균질 분포에 의한 오차를 줄이기 위한 폐기물 회전 장치 그리고 폐기물의 밀도보정을 위한 외부의 감마선원 개폐장치 등으로 구성된다. 본 연구에서는 ITER에서 발생되는 중준위금속폐기물의 방사선적 특성을 평가하였으며, 그로부터 감마스캐닝을 위한 검출기 선정 및 차폐설계 그리고 각종 RH 장비에 대한 개념 설계를 수행하였다.

2. 본론

2.1 ITER 폐기물의 방사선적 특성

일반적으로 ITER 토카막(핵융합용 플라즈마 발생장치)내 주요 컴포넌트들은 핵융합에서 발생되는 중성자에 의해 방사화되며, 방사능 준위 및 반감기 등을 고려하여 주로 Type B 폐기물로 분류된다. 토카막 내 컴포넌트들의 주요 재질(material compositions) 및 방사화로 인한 주요 감마핵종들은 Table 1과 같다. 방사화로 생성되는 여러 감마핵종들은 시간이 지남에 따라 그들 고유의 반감기에 따라 붕괴하므로, 반감기가 짧은 핵종들은 제외하였다.

Table 1. Material compositions and dominant gamma nuclides in the Type B radwaste.

Major component	Material composition	Dominant gamma nuclide
Divertor cassette	W layer, Cu layer, SS316	^{51}Cr (320 keV) ^{54}Mn (835 keV) ^{55}Fe (126 keV) ^{57}Co (137 keV) ^{58}Co (811 keV) ^{59}Fe (1099 keV) ^{60}Co (1333 keV) ^{185}W (125 keV)
Blanket module	Be layer, CuCrZr layer, SS316	
Port plugs	SS316	

철재 바스켓에 포장된 금속폐기물의 원활한 RH를 위하여 철재 바스켓의 성능기준(performance criteria)을 최대 적재량 7 톤으로 한정하고 있다. 그리고 Type B 폐기물의 비방사능이 약 10^{13} Bq/kg이므로[2] 철재 바스켓 내 최대 적재된 금속폐기물의 총 방사능은 약 2 MCi가 된다.

이 폐기물로부터의 선량률을 MCNP 코드를 이용하여 계산하였으며, Table 1의 주요 감마핵종들이 서로 같은 방사능 비율로 금속폐기물 내 균일하게 분포되어 있을 때를 가정하였다. 계산결과 최대 적재된 바스켓으로부터의 표면선량률은 약 300 Sv/h이며, 바스켓으로부터 3 m 떨어진 지점

에서의 선량률은 약 15 Sv/h로 평가되었다. 여기서 3 m 지점에는 검출기와 바스켓간의 측정환경 등을 고려하여 검출기가 위치할 예정이다. 그리고 위 측정값은 폐기물 내 존재하는 모든 핵들을 감마핵종으로 가정했기 때문에, 보수적인 평가에 해당한다.

2.2 CZT 검출기

ITER 폐기물의 방사선적 특성에서 보듯이, 매우 높은 방사선장에서 검출기가 운영되며 사람이 접근할 수 없는 핫셀에 위치하고 있으므로 검출기의 스펙트럼 구현 및 유지보수적인 측면을 고려하여 CZT(CdZnTe) 검출기를 중준위금속폐기물의 감마스캐닝을 위한 최적의 검출기로 선정하였다. CZT 검출기의 특성은 Table 2와 같다.

Table 2. The properties of a CZT detector.

Resolution	4.64 eV of W value → Spectroscopy
Band gap	1.57 eV → No cooling required
Small volume	several m^3
Dose capability	~ 200 mSv/h (depending on a volume)

2.3 콜리메이터 및 납차폐

검출기가 위치할 지점에서의 선량률이 15 Sv/h이므로, 이를 0.2 Sv/h 미만으로 낮추기 위해서는 검출기 주변으로 콜리메이터와 납차폐 등이 필요하다. 이들의 적절한 크기 및 구조를 MCNP 코드를 이용하여 계산하였으며, MCNP 모델링 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 여기서 납차폐의 크기는 고정하였고, 철재 콜리메이터의 길이(L)와 내부 반경(R)을 변화시키면서 검출기 위치에서의 선량률을 평가하였다.

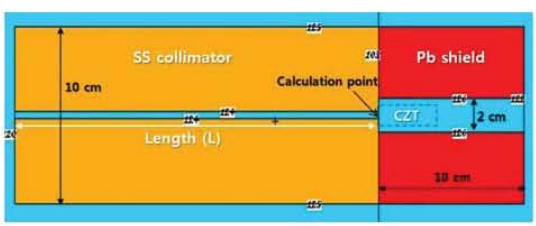

Fig. 1. MCNP modeling of the collimator and shield for determination of their dimension.

콜리메이터 크기에 따른 검출기 지점에서의 선량률 변화를 Fig. 2에 나타냈다. 검출기 지점에서의 선량률을 0.2 Sv/h로 낮추기 위해서, 콜리메이터 내부 반경(R)이 2 ~ 5 mm일 때, 필요한 콜리메이터 길이(L)는 약 15 ~ 27 cm로 계산되었다.

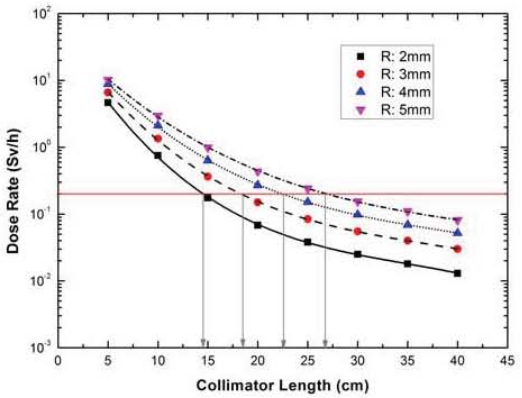

Fig. 2. Calculation result on dose rate at detector position depending on the collimator dimension.

3. 결론

ITER 중준위금속폐기물의 감마스캐닝 시스템을 구성하기 위하여 필요한 장비 및 특성을 평가하였다. 먼저 금속폐기물의 방사선적 특성을 조사하였으며, 철재 바스켓 내에 최대 적재된 금속폐기물의 총방사능은 약 2 MCi로 평가되었다. 이로부터의 표면선량률 및 거리별 선량률을 MCNP 코드를 이용하여 계산하였으며, 검출기가 위치할 지점에서의 선량률은 약 15 Sv/h로 계산되었다.

따라서 매우 높은 방사선장에서 스펙트럼 구현이 가능한 검출시스템을 구성하기 위하여 CZT 검출기를 선정하였으며, 이 검출기의 성능 구현을 만족하도록 콜리메이터와 납차폐의 크기 등을 계산하였다.

4. 참고문헌

[1] K. P. Hong et al., "Preliminary study on remote handling feasibility of ITER Type B radwaste treatment and storage equipment and its cost assessment", 2010

[2] B. C. Na, "Current status and critical review of the ITER operational radioactive waste amount", ITER_D_2NHK7C, 2009