

# 콘크리트 방사화방사선원항 정량화를 위한 중성자흡수단면적 보정핵종 도출

조동건\*, 백민훈

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

\*dkcho@kaeri.re.kr

## 1. 서론

대체적으로 방사선원항 평가 코드가 내장하고 있는 구조물의 핵반응단면적은 조사(irradiation)되는 구조물에 대한 핵반응단면적과 다르므로 보다 정확한 방사선원항을 도출하기 위해서는 방사선원항 평가코드에 내장되어 있는 핵반응단면적을 보정하여야 한다[1]. 예를 들어, 중성자의 방사화에 의해  $^{60}\text{Co}$ 이 생성될 때, 코발트 원소는 천연상태에서  $^{59}\text{Co}$ 로 100% 존재하므로 원자로에서 중성자 한 개를 흡수하면 방사성 핵종인  $^{60}\text{Co}$ 으로 변한다. 따라서  $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$  반응은  $^{60}\text{Co}$  생성에 기여하는 중요한 반응이다.  $^{58}\text{Co}$ 이 중성자 한 개를 흡수하면  $^{59}\text{Co}$ 가 생성되므로 만일 타핵종의 방사화로 인해  $^{58}\text{Co}$ 이 생성되면  $^{58}\text{Co}(n, \gamma)^{59}\text{Co}$  반응 또한 간접적으로  $^{60}\text{Co}$ 의 생성에 기여하게 된다. 이런 관점에서 볼 때,  $^{60}\text{Co}$ 보다 중성자 개수가 적은 모든 코발트 동위원소는 중성자를 흡수함으로써  $^{60}\text{Co}$ 의 생성에 기여함을 알 수 있다.  $^{60}\text{Co}$ 은  $^{60}\text{Fe}$ 의 베타붕괴에 의해서도 생성된다. 그런데,  $^{60}\text{Fe}$ 은 천연상태에서는 존재하지 않으며,  $^{59}\text{Fe}$ 의 중성자흡수에 의해 생성되거나  $^{60}\text{Mn}$ 의 베타붕괴에 의해 생성된다.  $^{59}\text{Fe}$  또한 천연상태에서는 존재하지 않으며 천연상태에 존재하는  $^{58}\text{Fe}$ 이 중성자 한 개를 흡수함으로써 생성된다. 따라서 콘크리트 최초 구성성분에 철이 포함되어 있으면,  $^{58}\text{Fe}$ 의 중성자 흡수에 의한  $^{59}\text{Fe}$ 의 생성반응 또한  $^{60}\text{Co}$ 의 생성에 간접적으로 기여하게 된다.

이렇듯, 구조물 내에서의 방사화핵종 생성은 초기 조성으로 함께 장전된 다른 안정핵종의 중성자 흡수반응으로 인한 방사화핵종의 생성 및 이렇게 생성된 방사화핵종의 붕괴와 복잡하게 연관되어 있다. 따라서 관심대상 핵종의 생성에 관여하는 모든 핵종의 중성자흡수단면적은 보정해야 하며 이는 매우 방대한 작업이다.

그런데,  $^{59}\text{Co}$ 의 중성자흡수는 직접적으로  $^{60}\text{Co}$ 을 생성하지만  $^{59}\text{Fe}$ 의 중성자흡수는  $^{60}\text{Fe}$ 을 거쳐  $^{60}\text{Co}$ 을 생성하게 되고,  $^{60}\text{Fe}$ 은 반감기가 크므로  $^{59}\text{Co}$ 의 중성자 흡수와  $^{59}\text{Fe}$ 의 중성자 흡수는  $^{60}\text{Co}$ 의 생성

측면에서 기여도가 다르다. 즉, 관심 방사성핵종을 정확히 정량화하기 위해서는 그 핵종의 생성반응 및 소멸반응에 관여하는 중성자흡수단면적을 보정해야 하는데, 이는 매우 방대한 작업이며, 어떤 핵종이 초기에 함께 장전되었는 지와 기여도에 따라 필수적으로 보정해야 할 핵종의 수가 달라지게 된다.

이런 관점 하에 본 논문에서는 가압경수로 원전의 생물학적 차폐체로 설치된 콘크리트를 대상으로 방사화핵종 정량화 측면에서 중성자흡수반응단면적을 보정해야 할 핵종을 도출하였다.

## 2. 콘크리트 방사화 특성

### 2.1 콘크리트 조성

계산에 고려된 콘크리트 조성은 무게분율 기준으로 H(0.60%), C(17.50%), O(41.00%), Mg(3.30%), Al(1.10%), Si(3.50%), K(0.10%), Ca(32.10%), Fe(0.80%), Co(2.55E-04%), Eu(2.94E-05%) 이다.

### 2.2 방사화 특성

ORIGEN-2 코드를 이용하여 콘크리트가 중성자에 의해 방사화 되었을 경우 냉각시간에 따른 방사능 세기 변화 특성을 평가하였다. 울진 3호기 콘크리트 생물학적 차폐체에서의 중성자속과 유사한 값인  $1.0\text{E}10 \text{ n/cm}^2\text{-sec}$ 을 적용하였으며 40 년 동안 지속적으로 조사됨을 가정하였다.

Fig. 1은 방사화된 콘크리트 총 방사능량을 기준으로 주요 핵종이 차지하는 비율을 나타내는데, 원자로 영구정지시부터 약 1 년까지는 전체 방사능의 2-40% 정도만을 차지하지만, 약 5 년 이후부터는 7개 핵종이 전체 방사능량의 100% 정도를 차지함을 볼 수 있다. 이는 원전 해체의 주 관심이 되는 시점인 5~10 년 이전에 단반감기 핵종이 대부분 붕괴하여 소진됨을 의미한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이, 10 년 시점에서는  $^{152}\text{Eu}$ 가 약 50%,  $^{55}\text{Fe}$ 가 약 15%,  $^{60}\text{Co}$ 이 8%,  $^{154}\text{Eu}$ 가 4% 정도를 차지함을 볼 수 있다.

앞서 제시된 핵종 중 우리나라 중저준위폐기물 방사능농도 제한치와 연관된 핵종은  $^{14}\text{C}$ 와  $^{60}\text{Co}$  뿐이

며, 이 또한 제한치를 크게 하회하므로 개략적인 계산결과 만을 보더라도 중저준위폐기물처분장에 수용될 수 없는 콘크리트 폐기물은 없을 것으로 판단된다. 따라서 결국 주 관심사는 중저준위폐기물 처분장에 처분하지 않고 자체처분 할 수 있는 콘크리트 양을 정확히 정량화하는 것이며, 이러한 측면에서 관심핵종은  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$  뿐이다.

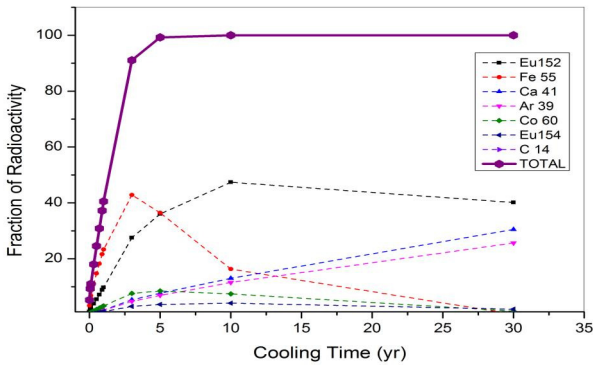


Fig. 1. Ratio of Radioactivity for Major Nuclides.

### 3. 중성자흡수단면적 보정핵종 도출

중성자 조사로 인한  $^{60}\text{Co}$ 의 생성·소멸 측면에서 신뢰도 높은 정량화를 위해서는 초기조성으로 장전되는  $^{59}\text{Co}$ 의 중성자흡수단면적과 중성자에 의한 소멸을 나타내는  $^{60}\text{Co}$ 의 중성자흡수단면적은 보정되어야 한다. 또한, 앞서 2.1절에 기술된 바와 같이, 콘크리트는 철(Fe)을 포함하고 있으므로  $^{59}\text{Fe}$ 의 생성에 기여하는 Fe 동위원소, 즉  $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{58}\text{Fe}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ 의 중성자흡수단면적은 엄밀히 말해 모두 보정되어야 한다. 그런데, 앞서도 언급했듯이  $^{60}\text{Co}$ 의 생성에 대한 기여도는 모두 다르므로  $^{60}\text{Co}$  생성측면에서 중성자흡수반응의 각 핵종별 중요도를 평가하였다.

Table 1에는 최초 장전된 1톤의 콘크리트 내에 함유되어 있는  $^{59}\text{Co}$  및 Fe의 동위원소가 40년 동안 조사되었을 때, 각 안정동위원소로부터 생성된  $^{60}\text{Co}$ 의 방사능 세기를 나타낸다. Table에는 냉각기간 5년 및 10년 시점에서의 값이 기재되어 있으며, Table에서 보는 바와 같이,  $^{60}\text{Co}$ 은 거의 대부분  $^{59}\text{Co}$ 의 중성자 흡수에 의해 생성되며, Fe의 안정동위원소에 의한 생성은 무시할 만 한 것으로 나타났다.

유로피움(Eu)의 경우에는 인접한 원소가 함께 장전되지 않으므로 유로피움을 구성하고 있는 동위원소로 인한  $^{152}\text{Eu}$  및  $^{154}\text{Eu}$ 의 생성 및 소멸에 관여하는 중성자 흡수단면적만 보정하면 된다.

Table 1. Radioactivity of  $^{60}\text{Co}$  Induced from Each Nuclide

안정 동위원소	콘크리트 1톤당 초기장전량 (g)	$^{60}\text{Co}$ 의 방사능세기 (Bq)	
		5년시점	10년시점
Co-59	$2.55 \times 10^0$	$6.50 \times 10^2$	$3.37 \times 10^2$
Fe-54	$4.68 \times 10^2$	$0.00 \times 10^0$	$0.00 \times 10^0$
Fe-56	$7.34 \times 10^3$	$3.05 \times 10^{-12}$	$1.58 \times 10^{-12}$
Fe-57	$1.70 \times 10^2$	$7.03 \times 10^{-8}$	$3.64 \times 10^{-8}$
Fe-58	$2.26 \times 10^1$	$7.45 \times 10^{-3}$	$3.86 \times 10^{-3}$

결국,  $^{60}\text{Co}$ 의 정량화 측면에서 공학적 소모시간을 줄이면서도 생성 및 소멸반응을 타당하게 고려하기 위해서는  $^{59}\text{Co}$  및  $^{60}\text{Co}$ 의 중성자흡수단면적만 보정되면 되며,  $^{152}\text{Eu}$  및  $^{154}\text{Eu}$ 의 정량화 측면에서는  $^{151}\text{Eu}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{153}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ 의 중성자흡수단면적만 보정하면 타당할 것으로 판단된다.

### 4. 결론

표준형 원전에 설치되어 있는 콘크리트 생물학적 차폐체를 대상으로 방사화 계산시 중성자흡수단면적을 보정해야할 핵종을 선정하였다. 평가결과, 방사능측면에서 관심 핵종은  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ 로 나타났다. 공학적 측면에서 중성자흡수단면적을 보정해야할 핵종은  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{151}\text{Eu}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{153}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ 로 나타났다.

### 5. 감사의 글

이 논문은 2016년도(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(원자력연구개발사업, No. 2012M2A8A5025589).

### 6. 참고문헌

[1] D. K. Cho, et. al., "Verification of Source Term Estimation Method against Measured Data for Decommissioning Waste from a CANDU Reactor," Journal of Nuclear Science and Technology, **48**, No.7, p. 1087-1093 (2011).