

기준 사용후핵연료의 방사성독성도 및 독성도 저감기간 예비 평가

김인영*, 최희주

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

*iykim@kaeri.re.kr

1. 서론

사용후핵연료는 높은 붕괴열과 방사능을 띠며, 장 반감기 핵종을 다량 포함하고 있다. 이를 안전하게 관리하기 위해 스웨덴, 핀란드 등에서는 심지층에 직접 처분하는 방식을 택하고 있으며, 우리나라도 고준위방사성폐기물 관리 기본계획을 시작으로 심지층 처분장 건설이 본격화될 것으로 예상된다. 일반적으로 심지층 처분장의 안전성은 선량 또는 위험도로 평가된다. 그러나 현시점에서 가정한 핵종이동 시나리오가 매우 먼 미래시점에서도 유효한지에 대한 논란이 있으며, 평가된 유효선량 또는 위험도 또한 매우 큰 불확도를 내포하고 있다는 한계가 있다. 이러한 맹점을 보완하기 위해 심지층 처분을 고려하고 있는 대부분의 나라에서 유효선량 및 위험도 외에 추가적으로 다양한 보조안전지표를 도입하고 있다. 본 연구에서는 그 중 방사성폐기물의 위험도가 얼마나 오래 지속되는가에 대한 지표로 가장 빈번하게 활용되고 있는 섭취시 방사성독성도 및 독성도 저감기간을 예비 평가하고, 향후 보조안전지표로 활용하고자 한다.

2. 본론

2.1 주요 가정 및 해석조건

방사성독성도는 식 [1]과 같이 대상폐기물의 방사능 값을 섭취에 대한 농도제한치로 나눈 값으로 정의되며[1], 대상폐기물을 섭취했을 때 인체에 무해한 수준으로 희석시키는데 필요한 물의 양으로 이해할 수 있다.

$$Toxicity_{ix} = \sum_i \frac{\lambda_i N_i}{C_{ik}} \quad [1]$$

(여기서, C_{ik} 는 매개체 k 에서 방사성 핵종 i 의 농도제한치)

독성도 저감기간은 대상 폐기물의 독성도가 참조값(reference value)과 같아지는 시점으로 일반적으로 참조값은 대상 폐기물을 생산하는데 소요되는 천연우라늄의 독성도 또는 우라늄원광의 독성도 등이 사용된다.

본 논문에서는 초기농축도 4.5wt.%, 방출연소도

55 GWd/MtU의 Plus7 핵연료를 기준 핵연료로 선정하고 이의 방사성독성도 및 독성도 저감기간을 평가하였다. 평가를 위해 ORIGINE-ARP 코드를 사용하였으며, 이 때 ICRP 72의 선량환산 인자를 적용해 평가된 섭취 농도제한치를 적용하였다[2].

2.2 사용후핵연료의 방사성독성도

Fig. 1은 사용후핵연료 1톤에 포함된 모든 핵종의 독성도를 평가한 결과를 나타내고 있다. Fig에서 확인할 수 있듯이 초기 수백년 이내에는 Sr-90 (Y-90), Cs-37 등과 같이 핵분열생성물이 독성도의 대부분을 차지한다. 수백년 이후에서 약 10만 년 이후는 Pu-238, Pu-239, Pu-240, Am-241과 같은 악티나이드 핵종이 독성도의 대부분을 차지하게 된다. 약 10만 년 이후에는 Po-210, Pb-210, Ra-226 등 악티나이드 핵종의 자핵종들이 방사성독성도의 대부분을 차지하게 된다.

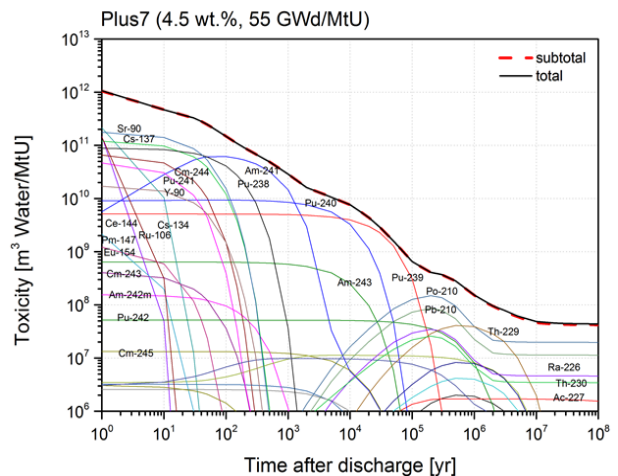


Fig. 1. Radiotoxicity of 1 MtU ref. SNF.

토륨시리즈(4n), 우라늄시리즈(4n+2), 악티늄시리즈(4n+3)은 붕괴체인 중 불활성기체인 라돈을 포함하고 있다. 만약 라돈기체가 모두 UO₂ matrix에서 방출된다고 가정하는 경우 라돈의 자손 핵종들의 영향을 제외할 수 있을 것이다. Fig. 2는 모든 핵종을 포함한 사용후핵연료, 라돈 및 라돈자손, 사용후핵연료에서 라돈 및 라돈자손의 독성도를 제외한 방사성독성도를 나타내고 있다. Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 약 10만 년 이후 라돈 및 라돈자손의 독성도가 전체 독성도에서 매우 큰 부분을 차지하고

있으며, 라돈자손을 제외하는 경우 수십만년 이후 사용후핵연료의 독성도가 매우 크게 감소함을 확인할 수 있다. 그러나 방사성라돈의 짧은 반감기($T_{1/2}$, $Rn-220 = 55.6$ 초, $T_{1/2}$, $Rn-222 = 3.82$ 일, $T_{1/2}$, $Rn-219 = 3.96$ 초[3])를 고려할 때 모든 라돈기체가 사용후핵연료에서 제거될 수 있는가에 대해서는 상세한 검토가 필요할 것으로 보인다.

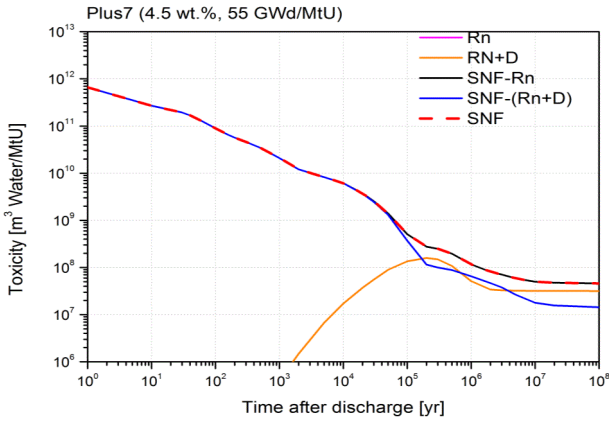


Fig. 2. Impact of Rn & Rn Progeny on Radiotoxicity of SNF.

2.3 참조값으로서 천연우라늄의 독성도

Table 1은 라돈 및 라돈자손 포함 유무에 따른 천연우라늄 1톤의 방사성독성도를 나타내고 있다. 라돈 및 라돈자손의 포함을 포함하는 경우 제외하는 경우에 비해 방사성독성도가 약 4배 정도 높아짐을 확인할 수 있다. 사용후핵연료 1톤 제조시 약 8.8톤의 천연우라늄이 소요되는 것으로 확인되므로 [4], 참조값은 천연우라늄 1톤의 독성도의 8.8배를 적용할 수 있을 것으로 보인다.

Table 1. Impact of Rn & Rn Progeny on Radiotoxicity of Nat.U

라돈 및 라돈자손	방사성독성도 [m^3 water/MtU]
포함	4.56×10^7
불포함	1.09×10^7

2.4 독성도 저감기간

Fig. 3은 사용후핵연료와 천연우라늄 모두 라돈 및 라돈자손의 영향을 포함하는 경우 시간에 따른 방사성독성도를 나타내고 있다. Fig. 3의 푸른 실선은 핵연료 제조시 발생하는 감손우라늄의 독성도를 나타내며, 감손우라늄을 포함하는 경우 사용후핵연료의 독성도는 천연우라늄 수준과 유사한 수준으로 감소하나 그 이하로는 감소하지 않는다. 그러나 우리나라의 경우 감손우라늄이 발생하지 않으므로 사용후핵연료 자체의 독성도인 붉은 실선과 비교하면 약 20만 년 후 독성도가 천연우라늄 수준으로 감소함을 확인할 수 있다. 동일한 방식으로

평가하는 경우 라돈 및 라돈자손을 제외하는 경우 독성도 저감기간은 약 200만 년으로 평가되었다. 라돈자손의 포함여부는 각국마다 적용기준이 상이하나 핀란드, 스위스 등의 사례를 살펴볼 때 포함시키는 것이 합리적으로 판단된다[5].

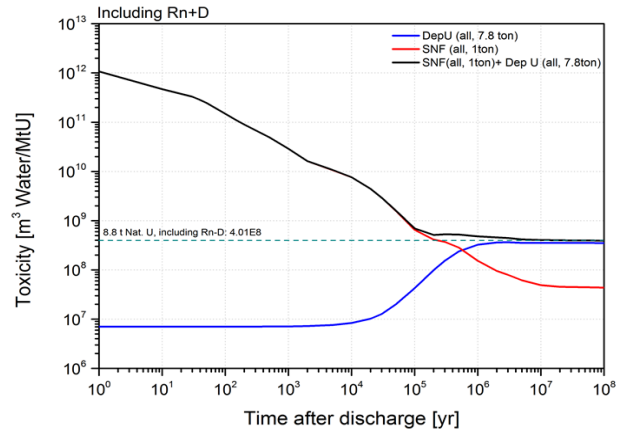


Fig. 3. Crossover time of Radiotoxicity.

3. 결론

본 논문에서는 라돈 및 라돈자손의 영향을 고려해 기준 사용후핵연료의 방사성독성도, 참조값으로서 천연우라늄의 방사성독성도를 평가하고 독성도 저감기간을 평가하였다. 라돈자손을 포함하는 경우 독성도 저감기간은 약 20만 년으로 평가되었으며, 라돈자손을 제외하는 경우 독성도 저감기간은 약 200만 년으로 평가되었으나, 라돈자손을 포함하는 것이 보다 합리적인 것으로 사료된다. 현재 평가된 독성도 저감기간은 사용후핵연료가 얼마나 장기적으로 위험한가에 대한 지표가 되며, 이를 처분용기의 수명과 비교함으로써 심지층 처분장의 안전성에 대한 보조지표로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 참고문헌

- [1] Manson Benedict, T. H. Pigford, and H. W. Levi, Nuclear Chemical Engineering, McGraw-Hill, p.979, 1981.
- [2] ORNL, Scale: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design, ORNL/TM-2005/39, p.M6.2.3, 2011.
- [3] <http://atom.kaeri.re.kr>, Table of Nuclide.
- [4] 고원일 외, DUPIC 핵연료주기의 환경친화성 분석, KAERI/TR-1889/2001, p. 16, 2001.
- [5] POSIVA, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto-Complementary Considerations 2012, POSIVA 2012-11, 2012.