

파이로프로세스 공정생성물 U/TRU 잉곳의 방사선 방벽

안성규, Yos Banagaman Sitompul, 김영수, 신희성, 김호동
 한국원자력연구원, 305-353 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
 skahn76@kaeri.re.kr

1. 서론

핵연료 주기기술을 포함한 새로운 원자력 시스템 또는 핵연료주기에 대한 분석에서 고려되는 주요한 분야 중 하나는 핵확산저항성이다. 이러한 핵확산저항성의 중요도에 대한 인식은 높아지고 평가방법론에 대한 개발 노력도 다년간 진행되어 오고 있다. 하지만 아직도 합치된 의견은 없으며, 필요에 따라 평가 지표를 수정하고 다른 방법을 적용하고 있다. 이들 평가 인자들 중 가장 공통적이며 기본이 되는 방사선 방벽에 대해서도, 현재 파이로 공정이 개발 중에 있고 최종 생성물의 조성, 크기, 형태가 달라질 수 있으므로 평가 방법에 따라 결과가 달라질 수 있다. 본 연구에서는 파이로 최종 생성물에 대한 방사선 방벽 예측과 타 연구와의 비교를 통해 이러한 차이점들을 살펴보고 향후 어떤 분야에 집중해야 하는지 고민해 본다.

2. 본론

2.1 방사선방벽에 의한 핵확산 저항성

다양한 핵확산저항성을 평가하는 방법론에서 제시하고 있는 여러 가지 주요 인자(지표)들 중 공통적으로 고려해야 하는 기본적인 인자가 대상 핵물질의 방사선 방벽이다. 고선량의 방사선을 방출하는 물질을 전용하려는 시도가 있을 때, 피폭의 위협으로 인한 취급의 어려움을 전용을 방해하는 특성으로 평가하는 것이다. 전용을 위한 접근과 취급이 어려워지며, 전용을 위한 작업 시간에 제약을 받고, 방사선 모니터링 장치에 탐지되거나, 이를 피하기 위해 필요한 차폐용기의 반출입이 격납감시 수단에 의해 제약을 받을 수 있기 때문이다.

일반적으로 대상 물질에 대한 1미터 거리에서의 선량값으로 전용에 대한 저항성을 평가한다. INPRO PR 평가 방법론^[1]이나 DOE의 방사선 방벽 기준에서는 1Sv/hr 이상일 경우 방사선 방벽으로서 강건한 것으로 보고 있으며, 150mSv/hr 이하일 경우 취약한 것으로 보고 있다.

본 연구에서는 파이로 공정의 최종 주요 생성

물인 U/TRU 잉곳에 대한 방출 선량을 예측해 보고, 타 연구와 비교하여 핵확산저항성 관점에서의 방사선 방벽 특성을 비교하였다.

2.2 ORIGEN 및 MCNPX 예측 결과

최종 U/TRU 잉곳 내 동위원소 구성비에 대한 방사선 방출율을 예측하고 (ORIGEN 계산), 6kg 잉곳 형태로 주조한 경우의 중성자 증배 및 감마선 감쇠 효과를 고려하여(MCNPX 계산), 1m 거리에서의 선량을 예측하였다. 초기농축도 4.5w/o, 연소도 55GWd/MTU, 10년 냉각된 사용후핵연료에 대해서 KAERI의 파이로공정 개발을 위해 예측된 핵물질 흐름정보를 입력자료로 활용했다. 물질수지표의 U/TRU-ingot 성분 중에는 감마선 고방출 핵종인 ⁹⁰Y이 포함되어 있지만, 이는 초기 사용후핵연료물질 성분비에 대한 화학적인 반응 예측에서는 포함될 수 있으나, 실제로는 반감기가 매우 짧고(2.67일) 모핵종 ⁹⁰Sr이 이전 공정에서 제거되고 난 후이므로 선량계산에서는 제외하였다.

표 1에서 나타나는 바와 같이, 중성자의 경우 ²⁴⁴Cm의 기여가 대부분이며, 감마선의 경우 ¹⁵⁴Eu, ¹⁵⁴Eu의 방출 비율이 다른 핵종에 비해 월등히 높다. 중성자의 증배와 중성자와 감마선의 자체감쇄 영향을 고려한 선량을 평가하기 위해서, 6kg의 U/TRU 잉곳에 대한 선량을 MCNPX 코드로 계산하였다. 표 2에서 보이듯이 선량환산 인자에 따라 약간의 차이가 있지만, 1미터 거리에서 감마선량율이 약 290mSv/hr으로 예측되었다. 대부분 중성자에 의한 선량은 미미하고, 감마선에 의한 기여가 대부분이다.

잉곳의 크기가 달라질 경우, 중성자 증배(중성자의 선량 기여분은 미미하지만) 및 감마선의 차폐 감속 효과의 변화로 인해 외부 선량은 질량에 비례하지 않는다. TRU 질량이 커질 경우(예: 117%), 중성자 감속은 크지 않고 증배가 일어나서 중성자 선량 증가는 질량 증가분보다 크고(예: 121%), 감마선은 차폐에 의해 질량 증가분에 못 미친다(예: 111%). 하지만 일정 질량 범위에서 이

러한 비선형 효과는 10-20% 정도이다.

Table 1. Major neutron and gamma-ray emitters and their ratio.

증성자 방출핵종	증성자 방출비율	감마선 방출핵종	감마선 방출비율
Cm-244	97%	Eu-154	42
Cm-246	1%	Eu-155	42
Pu-238	1%	Am-241	9.5
기타	1%	기타	6.5
합계	100%	합계	100%

Table 2. Estimated dose rate from 6kg-U/TRU ingot.

Dose(Sv/hr)@1m for 6kg-ingot ball			
선량환산	Gamma	Neutron	Total
ICRP21	2.51E-01	3.94E-03	2.55E-01
ANSI/ANS	2.87E-01	4.03E-03	2.91E-01

2.3 지난 연구

TRU에 대해서 감마 및 증성자 선량을 예측한 가거 연구^[2]에서는, 53MWd/kg 연소도, 4.4w/o 초기농축도, 20년 냉각한 사용후핵연료에 대한 성분비를 바탕으로 하였다. 핵종은 ORIGEN 2.1, self-shielding 계산은 MCNP4C2를 이용했으며, 선량환산인자는 ANSI/ANS 값을 사용했다. 1kg TRU 금속구(metal ball, 밀도 19.86 g/cc)에 대한 감마/증성자 선량 결과는 약 0.5mSv/hr이다. 이는 방사선 방벽으로서는 무의미할 만큼 낮은 수치이다. 이 때 선량계산에 포함한 핵종들은 Np, Pu, Am, Cm 동위원소들이다. 주요 감마선원인 ¹⁵⁴Eu, ¹⁴⁴Pr (from ¹⁴⁴Ce)가 오랜 냉각 및 파이로 공정에 의해 TRU-ingot에 포함되지 않기 때문에 상기 결과와 같은 저선량이 예상되고, 따라서 자체보호(self-protection) 기준 미달로 핵확산저항성 이득이 없다는 것이 주요 결론이다.

또 다른 연구^[3]에서는, 50MWd/MTHM, 4.3w/o 초기농축도 사용후핵연료 기준, TRU에 대한 감마 및 증성자 선량이, 15kg-ingot (8.3kg-Pu)에 대해 1미터 거리에서 1Sv/hr 이다. 이때는 Eu를 포함한 다른 핵분열생성물을 포함한 결과이다. 또한 다른 핵연료주기와의 동등한 비교를 위해, 하나의 사용후핵연료 다발을 처리하여 생성된 한 개의 잉곳에 대한 선량을 추정된 결과이다.

3. 비교 및 결론

서로 다른 핵주기 기술과의 비교를 위해, 얼마의 질량과 크기에 대한 선량 방벽을 기준으로 해야 할지 명확하지 않으며, 이에 대한 고민이 필요

하다. 하지만 임계를 고려할 때 U/TRU 잉곳 크기가 가질 수 있는 범위는 크지 않으므로, 그 영향은 크게 중요하지 않을 것이다.

KAERI 물질수지에 따르면 ¹⁵⁴Eu가 일부 포함되어 있으며 (6kg-U/TRU ingot 기준 약 2g), 그에 따른 선량 증가분을 고려했을 때 예측된 선량은 약 290mSv/hr 이다. 지난 타 연구에서는 ¹⁵⁴Eu이 강한 감마선 방출핵종이며 선량에 대한 영향이 크지만, 파이로공정 특성상 최종 TRU 생성물에는 Eu가 포함되지 않는다는 점을 언급하고 있다. 본 연구에서 U/TRU ingot의 전체 선량에 증성자 영향은 2% 미만으로 미미했으며, Eu를 포함하지 않은 타 연구에서는 감마선량과 증성자 선량과 비슷하게 낮았다. 따라서, U/TRU 생성물의 방사선량을 고려할 때 증성자의 기여는 무시할만 하며, 감마선 선량의 주요 기여핵종인 Eu의 포함여부의 검증이 향후 공정 개발 실험 및 검증 시 반드시 수행되어야 한다.

4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었다.

5. 참고문헌

- [1] IAEA, TECDOC-1575 Rev. 1, Nov. 2008.
- [2] Jungmin Kang and Frank von Hippel, "Limited Proliferation-Resistance Benefits from Recycling Unseparated Transuranics and Lanthanides from Light-Water Reactor Spent Fuel," *Acience and Global Security*, 13:169-181, 2005.
- [3] 고원일 외, 핵연료주기시스템의 핵확산저항성 분석, KAERI/TR-3928/2009.