

파이로 처리 방사성폐기물 처분장 원계영역 내 핵종 이동거리 영향

이연명, 정종태

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

ymlee@kaeri.re.kr

1. 서론

사용후 핵연료는 최근까지 우리나라에서 발생할 수 있는 유일한 형태의 고준위 방사성폐기물로 분류되어 심층 암반 내에 직접 처분하는 방안이 검토되어 왔다. 최근 이를 파이로 처리(pyro-process)하는 건식재처리 방안이 모색되고 있는데, 우리나라 자원을 재활용하고 TRU를 줄이며 고방열 핵종을 분리시켜 고준위 폐기물의 처분량을 줄일 수 있는 장점 때문이다. 파이로 처리를 통하여 발생하는 주요한 폐기물인 형태로는, 사용후 핵연료의 피복관을 탈피할 때 생성되는 금속 폐기물과 LiCl-KCl 공용용융을 산화침전법으로 수집하고 걸러서 모나자이트(Monazite) 세라믹으로 고화한 세라믹폐기물이 있다. 금속폐기물은 소량이긴 해도 우라늄과 TRU, 그리고 핵분열생성물이 포함되며 비록 열 발생률은 낮아도 TRU같은 장반감기 핵종이 포함된다. 모나자이트 고화체 내의 주 핵종은 희토류지만 기타 장반감기 핵종도 포함되어 있다. 이러한 폐기물을 처분하기 위한 처분시스템은 복합폐기물 처분에 적합하도록 설계가 수행하고 있는데, 200m 심도에는 금속폐기물을, 그리고 500m 심도에는 세라믹 고준위 폐기물을 처분하는 것으로 A-KRS (Advanced Korea Repository System)로 부르고 있다. 최근 A-KRS에서 유출되는 핵종 거동에 관련된 FEP을 인지한 후 이로부터 각 방벽별 핵종유출 시나리오를 도출하고 이를 정량적으로 평가함으로써 처분안전성 및 처분장의 성능을 평가하기 위한 연구가 수행되어 지고 있다. 우리나라의 환경에 비추어 그림 1과 같은 처분 시스템 개념이 전형적으로 상정될 수 있는데, 이러한 처분 시스템에서의 장기적인 핵종 유출에 관련된 정상 및 사고시나리오에 대한 평가는 처분 시스템에 대한 안전성 및 성능 평가 측면에서는 물론 설계에 대한 피드백을 위해서도 매우 중요하다. 이러한 평가를 위한 도구로서 상용 모사 프로그램인 GoldSim[1]을 이용하여 최근 템플릿(template) 형태의 전산 프로그램으로 개발 하고 있다.[2-3]

Conceptual Modeling Scheme for GoldSim TSPA Model (associated with Various Waste Policy, N/F, F/E, & Biosphere Models w/Natural a/o Manmade Disruptive FEPs/Scenarios)

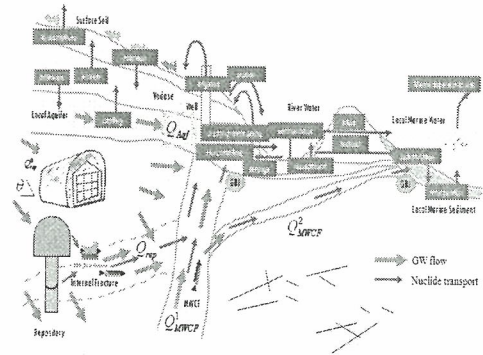


Fig. 1. 처분 시스템 개념.

불확실성은 낮추며 보수성은 가능한 한 줄이면서 신뢰도를 향상시키는 것을 목표로 개발되고 있는 이러한 템플릿은, 좌표계 상으로는 무차원이지만, 근계 및 원계 영역 내 지하 및 생태계를 포괄하는 처분 시스템 내 핵종의 이동을 보다 실제적으로 모사하는 프로그램이다. 처분 시스템 각 방벽으로 부터의 복잡한 핵종의 유출과 다양한 매질 내의 이동, 궁극적으로 인간 환경 내에서의 피폭 선량에 관한 다양하고도 복잡한 시나리오의 형태에 구애받지 않고 보다 정확하게 정량적으로 평가할 수 있는 점이 가장 큰 특색이다. 방사성폐기물에서 지하수와와의 접촉을 통해 유출된 핵종은 정상적인 지하수의 유동을 따라 이동하는 것이 가장 보편적이겠지만, 실제로 처분 환경 내에는 비정상적인 핵종의 유출과 근계 및 원계 영역 내 이동을 야기하는 다양한 시나리오가, 때로는 복합적으로도 존재할 수 있다. 이러한 시나리오는 처분시스템 내 핵종의 유출 및 거동에 관련된 여러 Feature, Event, 그리고 Process(FEPs)를 인지하여 그 발생확률과 FEP의 결과로서 나타나는 정량적 평가 결과의 심각한 정도 등을 고려하여 선별한 후 인지, 도출하게 된다. 한편 이 연구에서 다루게 되는, 처분 시스템의 원계영역(far-field)은 핵종의 유출을 최종적으로 억제하는 천연방벽으로

서 매우 중요한데, 이는 균열을 갖는 암반 매질로 기술 된다. 지하수는 이러한 암반 매질을 유동하며 핵종을 이류와 분산을 통하여 이동시키게 되고, 유동이 보다 집중될 수 있는 주요지하수유동경로(MWCF)를 갖는 구역에서는 보다 빠른 지하수 유동을 따라 핵종의 이동도 빠르게 진행될 수 있다. 이 연구를 통해서 이러한 MWCF의 존재를 가상하여 이 구역 내에서의 핵종의 이동이 MWCF내의 이동 거리에 따라 주요 핵종별로 어느 정도 민감한지 그 영향을 검토해 보았다.

2. 본론 및 토의

정상 시나리오에서는 처분장에서 유출된 핵종이 처분 시스템을 빠져 나와 지하수의 유동을 따라 지표수를 통해 원계영역을 통하여 이동하여 이후 생태계에서 전이해 나가는 경우를 고려해 평가를 수행하게 된다. 원계영역은 대체로 균열을 갖는 비균질 암반 매질로 기술되지만 이 연구에서는 단일한 균열을 갖는 매질과 지하수의 유동을 집중시킬 수 있는 MWCF가 함께 존재한다고 가정하였다. 이러한 MWCF에서는 지하수의 유동 속도에 관계하는 지하수 유동량이나 밀도나 공극률, 균열의 특성에 관련된 암반의 물성, 그리고 핵종별 흡착계수와 같은 지화학적 특성이 원계영역의 방벽기능상 모두 중요할 수 있지만 A-KRS 설계 측면상 MWCF내에서의 핵종 이동 거리, 즉 MWCF의 길이가 매우 중요할 수 있다. 따라서 이 연구를 통하여 특정 주요 핵종을 선별하여 MWCF내의 핵종 이동 거리의 변화를 그림 2와 같이 확률론적으로 고려하여 보았다. 두 처분 심도에 처분된 폐기물 내 주요 핵종을 200m 급속폐기물에서는 Nb-94 ($T_{0.5}=20,300$ 년)와 Sn-126 ($T_{0.5}=10^4$ 년)을 선별하고, 500m 세라믹 폐기물에서는 Tc-99 ($T_{0.5}=213,000$ 년)와 Cs-135 ($T_{0.5}=2.3 \times 10^6$ 년)를 선별하여, MWCF의 출구, 즉 생태계와의 접점 이 전에서의 핵종의 누출률, 즉 플럭스에 대해 그 피크치에 대한 변화를 그림 3과 같이 나타내 MWCF의 거리에 따른 영향을 검토 해 보았다. MWCF의 길이는 200m 심도에 대해서는, 320m×Uniform[1,100], 500m 심도에서는 468m×Uniform[1,100]으로 가정하여 각각 200개의 샘플링을 통해 몬테칼로 방식으로 계산을 수행하였다. 이 때 200m 심도의 폐기물은 처분후 100년, 500m 심도의 폐기물은 1000년후에 유출이 시작되는 것으로 가정하였다. 그림 3에서 보는 대로 반감기가 상대적으로 짧으며 200m 심도에 처분되는 Nb-94의 경우는 흡착계수를 $1.0\text{m}^3/\text{kg}$ 를 갖는데, MWCF의 길이에 따른 방사능 유출률에 대한 피크치에

대하여 어느 정도는 민감도를 보이는 반면, 반감기가 길고 흡착계수도 $5 \times 10^{-2}\text{m}^3/\text{kg}$ 로 낮은 Cs-135의 경우는 거의 그 민감도를 보이지 않는 것을 알 수 있었다. 그 외 두 핵종의 경우는, Tc-99는 긴 반감기 때문에, Sn-126의 경우는 낮은 흡착계수 때문에 그다지 두드러지는 결과를 보여주지는 않는 것으로 나타났다.

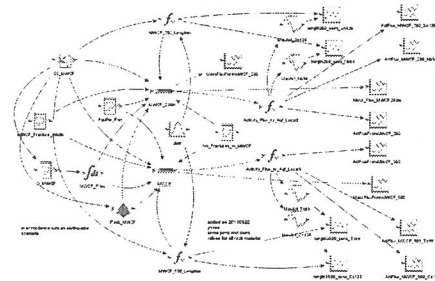


Fig. 2. 원계 영역에서 MWCF내 핵종 이동 거리의 확률론적 고려.

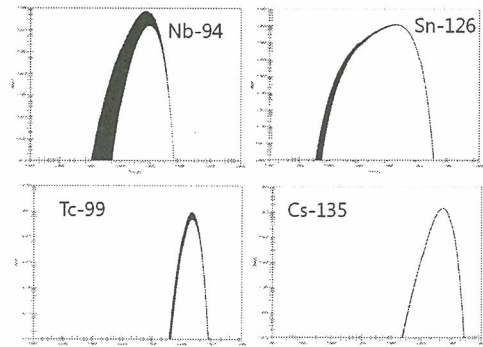


Fig. 3. 각 핵종에 대한 MWCF에서의 방사능 유출률 (균등분포, 샘플링 개수=200).

3. 참고문헌

- [1] GoldSim Contaminant Transport Module, User's Guide, Version 4, GoldSim Technology Group, 2006.
- [2] Youn-Myoung Lee et al., "A GoldSim model for the safety assessment of an HLW repository," Progress in Nuclear Energy, 51, 746-759, (2009).
- [3] Youn-Myoung Lee et al., "Evaluation of Nuclide Release Scenarios for a Hypothetical LILW Repository," Progress in Nuclear Energy, 53, 760-774, (2011).