

중·저준위 방사성폐기물 처분장 안전성 평가를 위한 시나리오 도출

한지웅, 황용수, 서은진, 이연명, 강철형
jwhan@kaeri.re.kr

요약

본 연구에서는 한국형 중저준위 방사성폐기물 처분시설 안전성 평가를 위한 FEP 목록 도출 방법 및 선별 원칙들을 제시하였으며, 처분장에서의 핵종 이동 시나리오에 대해서는 생태계의 특성 및 공학방벽에 따라 각각의 RES (Rock Engineering System)를 구성하여 각 상황별 핵종이동을 모사할 수 있도록 제안하였다. 또한 각 시나리오별 안전성 평가를 위하여 적용 가능한 해석 코드를 제안하였으며, 종합 성능 평가를 위한 보완점을 지적하였다. 추후 종합 성능 평가 시스템을 통해 최종적으로 도출될 안전성 평가 결과는 한국형 처분장 설계시에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Key Words: 지하수 유동 평가, 방사선적 종합 안전성 평가, 이동 시간, Connectflow

1. 서론

병원, 연구기관, 산업체 등에서 원자력을 이용하는 과정에 발생된 각종 방사성폐기물은 인체나 환경에 영향을 주지 않는 상태가 될 때까지 철저한 관리가 필요하다. 중저준위 방사성 폐기물은 지금까지는 각 원전 부지내의 저장고에서 안전하게 관리하고 있으나, 근년 내에 포화량에 다다를 예정이다. 따라서 이러한 중저준위 방사성 폐기물 처분시설의 건설이 시급한 실정이다.

현재 한국원자력연구소를 비롯한 관련 기관들이 동굴처분방식을 대상으로 한국형 처분 안전성 평가와 관련된 다양한 연구를 활발히 진행하고 있다. 이러한 사전 안전성 평가에서 고려되어야 할 주요 사항들은 아래와 같다.

- (1) 처분 동굴 터널 배치도와 같은 처분 터널 및 주변 공학적 방벽 설계 자료
- (2) 처분 터널에 거치될 18 가지 평가 대상 핵종들에 대한 선원항(inventory)정보
- (3) 처분 용기에 함유된 핵종들의 유출 및 인간 생태계로의 이동을 기술하는 사건 (FEP: Features, Events, Processes) 목록 개발
- (4) 사건들로 구성된 처분장 핵종 이동 시나리오(Scenario) 구성
- (5) 각 시나리오 별 안전성 평가를 위한 방법론 설정
- (6) 공학적/천연 방벽의 불확실성을 고려한 입력 인자 설정
- (7) 연간 개인 선량(Annual individual dose)이나 위험도(Risk) 평가
- (8) 수정 설계 및 수정 설계안에 대한 평가

본 논문에서는 최종 안정성 평가 결과 도출에 앞서, 상기 8 단계의 중저준위 방사성폐기물 동굴 처분 안전성 평가 단계 중 (3)-(5) 단계에 대해 각각 방법론을 제시하고자 한다. 위와 같은 과정을 통해 최종적으로 도출된 안전성 평가 결과는 추후 한국형 처분장 설계 시에도 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

2. FEP 목록 도출

한국원자력연구소에서는 방사성폐기물 동굴 처분장 안전성에 관한 정량적 평가 및 논의의 출발점인 FEP에 관한 상세 분석을 위한 연구를 수행하고 있다. FEP 목록 개발에서 가장 중요한 점은 발생 개연성이 조금이라도 있는 사건들은 모두 포함되어야 한다는 것이다. 1950년대 말부터 미국과 영국에서 저준위 방사성 폐기물에 대한 방대한 FEP목록이 작성되었으며, 최근 OECD의 산하기관인 NEA(Nuclear Energy Agency)에서도 심지층 처분 안전성 평가용 NEA FEP 목록을 작성하였다.

아직까지 국내에서는 중저준위 동굴 처분용 FEP Encyclopedia가 정립되지 않았으나, 현재 한국원자력연구소에서 한국형 FEP 목록을 작성하기 위하여 NEA FEP 목록을 기본으로, 영국 NIREX 및 스웨덴 FEP 목록 등 해외 각국에서 고려하고 있는 사항들을 지속적으로 추가하고 있다. 이러한 FEP 목록은 다양한 이해 당사자(Stakeholder) 계층, 인허가 기관 및 국내외 peer review group 들과의 안전성에 관한 의견 수렴을 위해 필수적인 것이므로 이에 대한 시급한 준비가 요구된다.

향후 저준위 방사성폐기물 동굴 처분과 관련된 FEP 목록이 완성되면, 이들 중에서 과연 우리나라 처분장에서 발생할 수 있는 FEP 들에 대한 선별(Screen)을 해야 한다. 이와 같은 FEP 선별 과정에서 적용할 수 있는 원칙들은 발생 확률, 사건의 영향력, 규제 조건, 부지 특성 등이 있다.

이 네가지 선별 기준 이외에도 일반 대중들의 안전성에 대한 관념(Public Perception)이 있다. 비록 과학적 발생 확률 및 영향이 미미하더라도, 일반 대중들 입장에서 중요하다고 생각될 수 있는 사건들을 대상으로 안전성 평가가 수행되어야 하는 것이 바람직하다.

중저준위 방사성폐기물 동굴 처분 안전성 평가와 관련된 FEP encyclopedia를 확보하기 위해서는 전술한 바와 같이 보완 연구 사업을 통해 기존 해외 사례들을 이용한 generic FEP encyclopedia를 갖추어야 하며 향후 부지가 확정되면 부지 특성을 고려한 site specific FEP 들을 추가한 전체 FEP encyclopedia를 완성해야 한다.

3. 중·저준위 처분장 핵종 이동 시나리오

한국형 중저준위 방사성폐기물 처분 동굴 시설 개념이 안전한가를 평가하기 위해서는 이해당사자들이 공감할 수 있는 방사성 핵종 유출, 이동, 섭취 과정을 모사하는 시나리오가 개발되고, 이에 대한 안전성 평가가 수행되어야 한다.

본 논문에서는 연안에 위치한 중저준위 방사성폐기물 처분 시설을 대상으로 처분장 운영 폐쇄 후 일정 기간 후에 핵종들이 자연스럽게 유출될 것을 가정해 과기부 기술 기준에 정의된 공학적, 천연 방벽을 통해 생태계로 유출되는 핵종 이동 평가 시나리오를 개발하였다. 생태계의 특성에 따라 우물, 강, 해양으로 나누어 RES (Rock Engineering System)를 구성하였다.

그림 1은 공학적, 천연 방벽이 기능을 다하는 경우 강 생태계를 대상으로 처분장에서 고려할 수 있는 다양한 방벽들을 행렬의 대각 요소로 설정하고 이들 대각 요소들의 상호 반응을 비대각 요소로 설정하여 도시한 것이다. 그림을 비교하면 생태계의 차이로 인해 RES 상에 도시된 방벽들의 상호반응들도 달라지는 것을 알 수 있다. 공학적 방벽을 포화시킨 침투 지하수는 처분 드림의 표면을 점 부식(Pitting corrosion)을 통하여 관통하고, 방사성폐기물 고화체와 접촉한다. 일반적인 경우 중저준위 방사성폐기물 처분 용기로부터의 핵종 유출은 이론적인 최고 용해도 유출 혹은 고화체 자체의 유출에 지배를 받는 조화 유출 현상으로 표시될 수 있다. 유출된 방사성 폐기물은 벤토나이트, 시멘트, 벤토나이트/모래 혼합재 등의 공학적 방벽 내에서 주로 확산(Diffusion)에 의해 이동한다.

중지준위폐기물					선원함	
유출제한	용기					
공극수 조성 최고용해도 결정	결부식 발생 결정	벤토나이트/ 암반 혼합재 발벽			확산 흡착	
Eh 결정	부식 물질 이동	재포화	지하수		이류 확산	유입 회색
저분장도		안전성	Pathline 형성	암반	공극률 흡착 매트릭스 확산	
					핵종이동	유출 강 생태계
저분장위계						

그림 1. 강 생태계를 고려한 기준 시나리오 RES

공학적 방벽을 통과해 유출된 핵종들은 국내에서 흔히 존재하는 결정질 암반내의 단열 (Fracture) 및 단열 연결망(Fracture Network)을 통해 이동하며, 주변 매질로 확산(Matrix diffusion)을 통해 유입되고 흡착된다. 대수대로 유입된 지하수는 유동 경로를 따라 우물이나 강, 혹은 바다로 유입되어, 지역 주민에게 전달된다.

4. 기준 시나리오 안전성 평가를 위한 방법론

시나리오가 설정되고 나면 설정된 시나리오에 대한 평가 방안이 도출되어야 한다. 먼저 평가를 위한 대상 시나리오에 대한 세부 사항을 보다 자세하게 과학적으로 기술(AC: Assessment Context)하고, 세부 사항에 대하여 어떤 방법으로 모델링을 개발 적용할 것인가에 대한 작업 흐름도(AMF: Assessment Method Flow chart)가 개발되어야 한다.

가. 처분장 인근 지역

(1) 지하수 재포화

본 연구에서는 보수적인 관점에서 처분장 폐쇄 시점으로부터 모든 방벽들이 재포화된다고 가정하고 별도의 재포화 시간을 산정하지 않는다.

(2) 용기 수명

현재는 용기 내부의 방사성 핵종들은 매립되자마자 지하수와 접촉하여 유출을 시작한다는 보수적인 관점으로 핵종 유출을 평가한다.

(3) 핵종 유출

본 연구에서는 고화체 내 잔류하는 기체 상태의 방사성폐기물의 양이 무시할 수 있으며 미량의 기체가 유출된다고 가정하더라도 지하수에 용해되어 액상으로 이동할 것으로 판단되므로 평가 대상에서 제외하였다.

본 연구에서는 기체 발생으로 인한 공학적 방벽의 손상은 별도로 고려하지 않고 공극률, 확산 계수, 이류 속도 등 유동 인자들에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

(4) 공학적 방벽(Engineered barrier)에서의 핵종 이동

공학적 방벽에 대한 안전성 평가를 위해서는 최고용해도와 같은 핵종 유출률과 핵종 지연 인자와 공극률, 투수 계수 및 확산 계수와 공학적 방벽들의 두께, 넓이 관련 입력 인자들이 필요하다.

(5) 천연 방벽(Far Field)에서의 핵종 이동

현 단계 평가에는 처분 고화체로부터 핵종이 더 이상 유출되지 않는 경우를 의미하는 현상을 모사하지 않고 처분 고화체로부터 핵종들이 계속해서 공급된다고 가정한다. 천연 방벽에서의 핵종 유출률을 예측하기 위해서는 각 암반별 지하수 유동 거리 및 시간과 같은 지하수 유동 평가 결과

와, 천연 방벽에서의 핵종 이동 지연 인자 계수와 공급률, 이류 분산 계수 등이 요구된다.

(6) 생태계(Biosphere)

기준 시나리오에 고려하는 생태계는 처분장에서 유출된 방사성 핵종들이 대수대로 유입되어 우물을 통해 지상의 음용수로 사용되거나 관개 및 가축 사육 등에 활용되는 경우이다. 그 외에도 강물 혹은 해양 생태계 경로 등 다양한 경로를 모두 고려한 생태계 평가가 필요하다.

이러한 생태계 영향 평가를 위해서는 천연 방벽에서의 핵종 유출 경로, 한국인의 섭생 특성, 해안 등 생태계 구획 별 이동 인자(mass transfer coefficients) 등 다양한 입력 자료가 요구된다.

나. 확률론적 평가 방법론을 이용한 선량 및 불확실성 민감도 평가

안전성 평가를 위해서는 평가 대상인 시나리오와 각 시나리오별 평가를 위한 코드, 코드의 입력 자료로 활용되는 데이터들이 요구된다. 현재 채택하고 있는 중저준위 방사성폐기물 동굴처분의 안전성 평가 방법론은 라플라스 영역에서의 해를 구하는 반해석적(Semi-analytic) 기법에 의존하는 방법에 기초를 두고 있으며, MASCOT를 일부 핵종 유출 현상을 평가할 수 있도록 개량한 MASCOT-K를 개발해 사용할 예정이다.

장단기 기후 변화나 자연 재해와 같은 외부 사건(External FEP)들도 인한 영향 평가가 요구되는 경우에는 지질 구조 등의 천이적인 변화를 반영하는 TDPSA(Time Dependent Probabilistic Safety Assessment) 코드 개념인 MDPSA 코드를 확장 개발해 적용할 예정이다.

안전성 평가를 위한 입력 자료들을 관리하기 위한 방안으로 고준위 방사성폐기물 처분 연구를 통해 개발된 PAID(Performance Assessment Input Database)라는 데이터 관리 프로그램과 입력 자료의 품질 보증을 위해 web을 기반으로 하는 품질 보증 체계와 시나리오 개발 프로그램인 FEAS(FEP to Assessment through Scenario)들을 통합하고 여기에 문서화 기능까지 보강한 Cyber RnD Platform 프로그램을 개발하고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 한국형 중저준위 방사성폐기물 동굴 처분 안전성 평가와 관련하여 FEP 목록 및 시나리오 도출과 관련된 구체적인 방법들을 제시하였다. 또한 시나리오별로 안전성 평가를 위해 필요한 구체적인 방법을 제시하였다. 개발된 모델링을 실제 안전성 평가에 적용하기 위한 입력 데이터의 취득 방안 및 적용 가능 수치해석 코드를 제안하였으며, 종합 성능 평가를 위한 보완점을 지적하였다. 추후 이들 과정에 기초하여 최종적으로 도출될 안전성 평가 결과는 한국형 처분장 설계 시에도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 국가원자력중장기연구사업 및 (주)한국전력기술이 주관하는 연구 프로젝트를 통해 수행되었습니다.