

## 저준위 방사성폐기물 동굴처분 안전성 평가 대상 시나리오 도출 및 확률론적 지하수 유동 평가 방법론 개발

황 용수, 서 은진, 강 철형  
한국원자력연구소

**요약** : 저준위 방사성폐기물 안전성 평가를 위해서 안전성 평가 대상에 관한 기술이 이해당사자들이 이해하기 명확하고 쉽게 설정되어야 한다. 방사선적 안전성 평가 시나리오란 처분장으로부터 유출된 방사성 물질들이 공학적 방벽과 천연 방벽을 거쳐 생태계로 어떻게 이동하는가에 대한 설명으로 안전성 평가를 위한 일종의 대본과 같은 역할을 한다. 본 논문에서는 핵종 이동 현상을 RES(Rock Engineering System) 방법론에 의거 기술하였다. 국내 처분장의 특성을 고려하여 처분 시설은 연안에 동굴 처분 방식으로 건설된다고 가정하여 생태계를 산정하고, 공학적 및 천연 방벽들이 처분장 설계 시 예상한 기능들을 수행한다고 가정하여, 기준 시나리오를 설정하였다. 또한 다양한 설계 고려 요소들을 고려하여 대안 시나리오들을 도출하고자 하였다. 도출된 시나리오의 주요 항목들을 평가하기 위해서 AMF (Assessment Method Flowchart)를 도출하였다. 주어진 지형 조건에 따라 확률론적 방사선적 안전성 평가를 위해 각 지층 구조별 이동 거리 및 시간을 CONNECTFLOW를 이용해 산정하고, 그 결과들을 Response surface method를 이용해 확률 밀도함수로 도출하여 방사선적 안전성 종합 평가 코드인 MASCOT-K의 입력 자료로 활용되도록 하였다.

### 1. 서론

2008 년 준공 예정인 저준위 방사성폐기물 처분장의 인허가를 위해서는 관련 서류들과 함께 안전성분석보고서와 환경영향평가서의 평가서 작성이 필요하다. 안전성분석보고서 중 가장 중요한 처분장 폐쇄 후 장기 방사선적 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 처분 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

이와 같은 과정을 통해 도출된 안전성 평가 결과는 설계에도 환원되어 사용될 수 있다. 본 논문에서는 상기 8 단계의 저준위 방사성폐기물 동굴 처분 안전성 평가 단계 중 (3)-(5) 및 (7) 위해도 평가 중 방사선적 안전성 평가의 입력 자료인 지하 매질에서의 지하수 유동 평가 단계에 대해 방법론 및 결과물을 제시하고자 한다.

저준위 방사성폐기물 처분 안전성 평가에 있어서 지하수 유동 평가는 처분 동굴, 공학적 방벽, 천연 방벽, 천연 방벽과 생태계 접면(Geosphere Biosphere Interface: GBI)에서의 지하수 이동 거리(path length), 시간(travel time), 유입 속도(Darcy velocity) 등을 2차원 혹은 3차원 유동 평가를 통해 산정해 종합 안전성 평가 코드인 MASCOT-K나 AMBER의 입력 자료로 최종적으로 사용된다.

## 2. FEP 목록 현황

1950년대 말부터 미국과 영국에서 수행된 저준위 방사성폐기물 영구 처분 연구 사업의 결과를 통하여 저준위 방사성 폐기물 처분장에서 발생할 수 있는 FEP 목록은 세계적으로 방대하게 작성되어 있다. 최근 영국 NIREX가 자국 Sellafield 중저준위 처분장 사업의 일환으로 NIREX FEP 목록을 정리하였으며, OECD의 산하기관인 NEA(Nuclear Energy Agency)는 심지층처분 안전성평가용 NEA FEP 목록을 작성하였다.

본 논문에서는 동굴 처분 관련 국내 고유의 FEP 목록을 작성함에 있어 그 출발점을 NEA FEP 목록으로 삼고, 여기에 NIREX 및 스웨덴 FEP 등 해외 각국에서 고려하고 있는 사항들을 추가하였다. FEP 목록 개발에서 중요한 점은 발생 개연성이 조금이라도 있는 사건들이 모두 포함되어야 한다는 것이다. 따라서 향후 인허가를 위해서는 국내외에서 도출된 동굴 처분 관련 FEP들을 망라하는 FEP Encyclopedia를 개발한 후 이들에 대한 국내외 전문가들의 평가를 통해 국내 동굴 처분장에 맞는 FEP들을 선별하고 이들 FEP들의 우선 순위를 도출해야 한다. 아직 국내에서는 저준위 동굴 처분용 FEP Encyclopedia가 정립되지 않았는데, FEP이야 말로 다양한 이해 당사자 계층 및 인허가 기관 및 국내외 peer review group 들과의 안전성에 관한 의견 수렴을 위해 필수적인 것이므로 시급히 이에 대한 정비가 요구된다.

향후 저준위 방사성폐기물 동굴 처분과 관련된 FEP 목록이 완성되면, 이들 FEP 중에서 과연 우리나라 처분장에서 발생할 수 있는 FEP 들인가를 선별해야 한다. 이와 같은 FEP 선별(Screen) 과정에서 적용할 수 있는 원칙들은 아래와 같다.

- (1) 발생 확률
- (2) 사건의 영향력
- (3) 규제 조건
- (4) 부지 특성

대부분의 나라에서 FEP을 선별하는데 있어서 발생 확률 빈도를 하나의 척도로 삼고 있다. 예를 들면 유성이 처분장에 충돌하는 사건의 경우, 사건의 발생으로 인한 피해는 크겠지만, 발생 확률이 매우 낮아 실제 피해 기대치는 낮다. 일반적으로 발생 확률 빈도를 이용한

선별 기준에 관한 명시적인 값은 없으나, 대부분의 경우 연간 발생 확률이 100 만분의 1 이하인 경우 관련 사건을 처분장 안전성 평가에서 고려하지 않아도 무방하다.

FEP 선별에 있어서 또 하나의 중요한 요인은 사건의 영향력이다. 예를 들어 인간이 처분장 주변에 우물을 굴착하여 유출된 방사성 핵종으로 인하여 오염된 지하수를 음용수로 사용할 경우, 이로 인한 영향(Consequence)는 클 것이다. 이와 같은 사건의 경우 발생 확률이 낮더라도 그 영향이 중요하므로 안전성 평가에서 고려되어야 한다.

세 번째로 고려할 사항이 규제 등 법적 요건이다. 예를 들어 방사성폐기물 처분장의 입지 조건 등을 규정한 과학기술부 기술 기준 고시 등에 의하면 처분장은 화산 지역에 위치하지 않는다. 따라서 올바른 위치 선정 과정을 거친 처분장일 경우 안전성 평가에서 화산으로 인한 안전성은 평가하지 않아도 무방하다고 하겠다. 이와 반면에 현행 법규에는 처분장 주변에 활성 단층이 존재하더라도 공학적 방벽의 설치로 인해 안전성을 확보할 수 있다면 해당 부지가 법적으로 적격하다고 규정하고 있으므로, 이와 같은 규제 근거에 의해 활성 단층의 유무 및 이에 따른 공학적 방벽 보강을 통한 안전성을 확보할 경우 제반 안전성 평가를 통해 타당성이 입증되어야 한다.

처분장 관련 FEP 선별에서 고려해야 할 또 하나의 사항이 처분장 부지에 따른 고유한 현상들이다. 예를 들어 처분장이 연안에 위치할 경우 해수와 담수 상호 반응에 의한 지하수 유동 현상이 안전성 평가 시에 고려되어야 하지만 내륙 지방에 처분장이 위치할 경우에는 이와 같은 현상은 고려될 필요가 없다.

이와 같은 네 가지 선별 기준 이외에도 현실적으로 무시할 수 없는 것이 일반 대중들의 안전성에 대한 관념(Public Perception)이다. 과학적 입장에서는 특정 사건들의 발생 빈도와 그 영향이 미미하더라도, 일반 대중들은 중요하다고 생각할 수 있는 사건들이 존재하므로 이들 사건에 대한 안전성 평가가 수행되어 그 결과에 관해 알기 쉬운 방법으로 관련 일반 대중들에게 전달되는 것이 처분장 안전성 관련 이해 증진 측면에서도 중요하다.

이와 같은 관점에서 현재 세계적인 안전성 평가의 기본 방향을 요약해 보면 인허가를 위한 과학적인 관점에서의 상세 안전성 평가 업무와 함께, 보다 많은 사람들이 쉽게 처분장 관련 안전성을 이해하기 쉽게 실제 평가가 수행되어야 한다는 것이다. 이와 관련한 NEA FORUM 프로젝트에서 논의하고 있는 safety case에 대한 사항들은 향후 국내 관련 처분 사업의 원활한 수행을 위해서도 중요하다고 판단된다.

저준위 방사성폐기물 동굴 처분 안전성 평가와 관련된 FEP encyclopedia를 확보하기 위해서는 전문적인 바와 같이 보완 연구 사업을 통해 기존 해외 사례들을 이용한 generic FEP encyclopedia를 갖추어야 하며 향후 부지가 확정되면 확정 부지 특성을 고려한 site specific FEP 들을 추가한 전체 FEP encyclopedia를 완성하고 여기에 포함된 FEP들을 선별하기 위해 본 보고서에서 제시한 네 가지 원칙에 의해 우선 순위를 평가해야 한다.

### 3. 처분 핵종 이동 시나리오

향후 국내에서 공모된 처분 부지에 건설될 저준위 방사성폐기물 처분 동굴 시설 개념이 안전한가를 평가하기 위해서는 모든 이해당사자들(Stakeholders)이 공감할 수 있는 방사성 핵종 유출, 이동, 섭취 과정을 모사하는 시나리오가 개발되고, 이에 대한 투명한 안전성 평

가가 수행되어야 한다. 본 논문에서는 저준위 방사성폐기물 처분 시설이 도서를 포함한 연안 지역에 위치할 것으로 예상하고 처분장 운영 폐쇄 후 일정 기간이 지난 후 핵종들이 자연스럽게 유출될 것을 가정해 과기부 기술 기준에 정의된 공학적, 천연 방벽을 통해 생태계로 유출되는 핵종 이동 평가 시나리오를 개발하고, 생태계의 특성에 따라 기준 시나리오를 우물, 강, 해양으로 나누어 설정하였다.

그림 1-3은 이들 세 생태계를 고려한 처분장에서 고려할 수 있는 다양한 방법들을 행렬의 대각 요소(Diagonal Element)로 설정하고 이들 대각 요소들의 상호 반응을 비대각 요소(Off Diagonal Element)로 도시한 것이다. 그림 1-3에 도시된 기준 시나리오 RES들은 공학적, 천연 방벽이 제 기능을 다하는 경우를 상정한 것이다. 예를 들어 처분 동굴을 벤토나이트와 모래나 암반 분쇄체로 충전할 경우 이들이 설계 시 예측한 대로 투수 계수를 가져 지하수 침투와 유출 핵종의 외부로의 유출을 최대한 억제한다고 가정한다. 그러나 생태계의 차이로 인해 RES 상에 도시된 방법들의 상호 반응들이 달라진다. 예를 들어 해양 생태계를 고려해야 하는 처분장의 경우 해수 침투로 인해 지하수 유동에 변화가 생기게 된다. 즉 밀도가 높은 해수가 담수대를 침투해 지하수 이동 경로를 변화시켜 처분 동굴로부터의 핵종 유출 경로(Pathline)를 변화시킨다. 또한 해수가 벤토나이트 공학적 방벽에 침투하면, 벤토나이트 팽윤이 설계 시 예측대로 일어나지 않게 되며 pH를 변화시켜 핵종들의 최고 유출률을 변화시키게 된다. 따라서 처분 동굴 설계 시에는 이러한 해수 침투로 인한 영향이 최소화 되도록 처분장 위치를 선정해야 한다.

또한 천연 방벽을 구성하는 암반의 투수 계수 및 응력 분포에 따라 처분 동굴의 심도가 달라진다. 이와 같이 해양 생태계를 고려한 기준 시나리오의 경우 RES 대각 요소들의 반응에 따라 다양한 비대각 요소들이 설정된다.

중저준위폐기물					선원항	
유출 제한	용기					
공극수 조성 최고용해도 결정	점부식 발생 결정	벤토나이트/ 암반 혼합재 방벽			확산 흡착	
Eh 결정	부식 물질 이동	재포화	지하수		이류 확산	유입 회석
처분심도		안정성	Pathline 형성	암반	공극물 흡착 매트릭스 확산	
					핵종이동	유출
처분장위치		팽윤 영향	해수 침투			해양 생태계
	5					
	4					
	3					
	2					
	1					

그림 1. 해양 생태계를 고려한 기준 시나리오 RES

중저준위폐기물					선원항	
유출 제한	용기					
공극수 조성 최고용해도 결정	점부식 발생 결정	벤토나이트/ 암반 혼합재 방벽			확산 흡착	
Eh 결정	부식 물질 이동	재포화	지하수		이류 확산	유입 희석
처분심도		안정성	Pathline 형성	암반	공극물 흡착 매트릭스 확 산	
					핵종이동	유출 강 생태계
처분장위치						

그림 2. 강 생태계를 고려한 기준 시나리오 RES

중저준위폐기물					선원항	
유출 제한	용기					
공극수 조성 최고용해도 결정	점부식 발생 결정	벤토나이트/ 암반 혼합재 방벽			확산 흡착	
Eh 결정	부식 물질 이동	재포화	지하수		이류 확산	유입 희석
		안정성	Pathline 형성	암반	공극물 흡착 매트릭스 확 산	
					핵종이동	유출 우물 생태계
처분심도			Water table			

그림 3. 우물 생태계를 고려한 기준 시나리오 RES

그림 1-3에 도시된 기준 시나리오에서는 다음과 같은 사항들을 고려한다. 200 리터 드럼이나 콘크리트 박스, 혹은 기타 용기에 포장된 저준위 방사성폐기물은 동굴 처분장에 처분되었다가 운영 기간이 끝난 후 벤토나이트와 모래 혹은 파쇄 암반 가루의 혼합재로 충전된다. 본 보고서에서는 콘크리트를 충전재로 이용하는 경우를 대안 시나리오의 하나로 별도로 설정했다. 처분장 폐쇄 직후 처분 동굴 주변은 건설 과정에서 지하수 면(Water table)이 왜곡되어 불포화대가 존재하게 되나 처분장 주변의 빈 공간을 매립하고 난 후에는 지하수가 유입되기 시작하여 일정 시간이 경과하게 되면 공극(Pore)이 지하수로 포화된다.

이렇게 공학적 방법을 포화시킨 침투 지하수는 탄소강(Carbon steel)으로 만들어진 처분 드럼의 표면을 점 부식(Pitting corrosion)을 통하여 관통하고, 방사성폐기물 고화체와 접촉한다. 접촉된 방사성폐기물은 지하수와 반응하여 방사성 핵종들이 액상으로 유출된다. 이때 액상으로 용해되는 핵종의 이론적인 최고 농도는 각 핵종 별 최고 용해도(Solubility limit)이다.

만일 방사성폐기물 고화체 자체의 용해도가 낮을 경우에는 고화체 내부에 포함된 각 핵종의 유출률은 고화체 자체의 유출에 지배를 받게 되는데, 이를 조화 유출(Congruent release)라고 한다. 일반적인 경우 저준위 방사성폐기물 처분 용기로부터 핵종의 유출은 최고 용해도 유출이나 조화 유출 현상으로 표시될 수 있다.

유출된 방사성 폐기물은 벤토나이트, 시멘트, 벤토나이트/모래 혼합재 등의 공학적 방벽을 거쳐 유동한다. 이러한 공학적 방벽 내에서는 이류(Advection)에 의한 핵종 이동 현상이 미미하고, 주로 확산(Diffusion)에 의해 핵종들이 이동한다. 벤토나이트의 경우 핵종 이동을 지연 시키는 효과가 크나, 저준위 방사성폐기물에 소량 포함된 I-129 등은 벤토나이트 공학적 방벽에 흡착이 되지 않으므로 상대적으로 빠른 시간에 외부로 유출된다.

공학적 방벽으로 고 알칼리 성분을 갖는 특수 시멘트를 사용할 경우 지하수 내 pH를 변화시켜 일부 TRU 핵종 유출량을 저감하는 효과가 있으나, 고 알칼리 시멘트를 사용할 시 주철 용기를 점 부식시키는 단점도 있다. 따라서 시멘트를 충전재로 사용할 경우, 고 알칼리 시멘트나 저 알칼리 시멘트나를 선택하는데 있어 용기 재질과 안전성에 영향을 미치는 핵종들을 구체적으로 파악해야 한다. 그림 4-5는 이와 같이 콘크리트를 공학적 방벽으로 사용할 경우에 대한 RES 행렬을 도시한 것이다.

중저준위폐기물					선원함	
유출 제한	용기					
공극수 조성 최고용해도 결정 pH 변화	점부식 발생 결정	콘크리트 방벽			확산 흡착	
Eh 결정	부식 물질 이동	재포화	지하수		이류 확산	유입 희석
처분심도		안정성	Pathline 형성	알반	공극물 흡착 매트릭스 확산	
처분장위치		땀문 영향	해수 침투		핵종이동	유출 해양 생태계
	5					
	4					
	3					
	2					
	1					

그림 4. 콘크리트 충전재를 사용한 경우 해양 생태계를 고려한 RES

중저준위폐기물					선원함	
유출제한	용기					
공극수 조성 최고용해도 결정 pH 변화	점부식 발생 결정	콘크리트 방벽			확산 흡착	
Eh 결정	부식 물질 이동	재포화	지하수		이류 확산	유입 희석
처분심도		인정성	Pathline 형성	암반	공극물 흡착 매트릭스 확산	
					핵종이동	유출 강 생태계
처분위치						

그림 5. 콘크리트 충전재를 사용한 경우 강 생태계를 고려한 RES

공학적 방법을 통과해 유출된 핵종들은 국내에서 흔히 존재하는 결정질 암반을 통해 이동한다. 결정질 암반 내에는 미세 단열(Fracture)이 발달해 있는데, 이들 단열들의 연결망(Fracture Network)을 따라 수두가 높은 곳에서 낮은 곳으로 핵종들이 이동하게 된다. 단열을 통하여 이동하는 핵종들은 주변 매질로 확산(Matrix diffusion)을 통해 유입되어 흡착된다. 이렇게 특정 암반층을 이동하던 방사성 핵종들은 그림 4에 도시된 바와 같은 경로를 따라 다른 지질 매질을 통과하여 유동하다가 궁극적으로는 대수대로 유입된다.

대수대로 유입된 지하수는 유동 경로를 따라 우물이나 강으로 유입되어, 지역 주민들이 사용할 음용수를 얻기 위해, 가축 사육용, 농작물 경작용 등의 목적으로 지하수나 강물을 사용할 경우 이에 포함된 방사성 핵종들이 지상으로 유입되어 그림 6에 도시된 다양한 섭생 경로를 통하여 지역 주민에게 전달된다. 또한 지하수가 바다로 연결되는 경우 해양 생태계로 유입되어 생선, 해조류, 갑각류, 조개류 등에 섭취된 후 최종적으로 인간에 의해 섭취되거나 해수에 포함되었다가 해풍에 의해 육지 생태계로 유입된다.

이와 같은 경로를 통해 방사성 핵종을 섭취한 지역 주민이 안전한가를 평가하기 위해서는 주민들에 대한 연간 피폭 선량을 예측하는 일이 중요한 바, 이와 같은 평가를 위해서는 각 시나리오별로 처분장에서부터 최종 지역 주민에게 어떤 식으로 핵종이 전달되는가를 체계적이고 투명하게 기술한 전체 시나리오 및 생태계 부분 시나리오들의 개발이 필요하다.

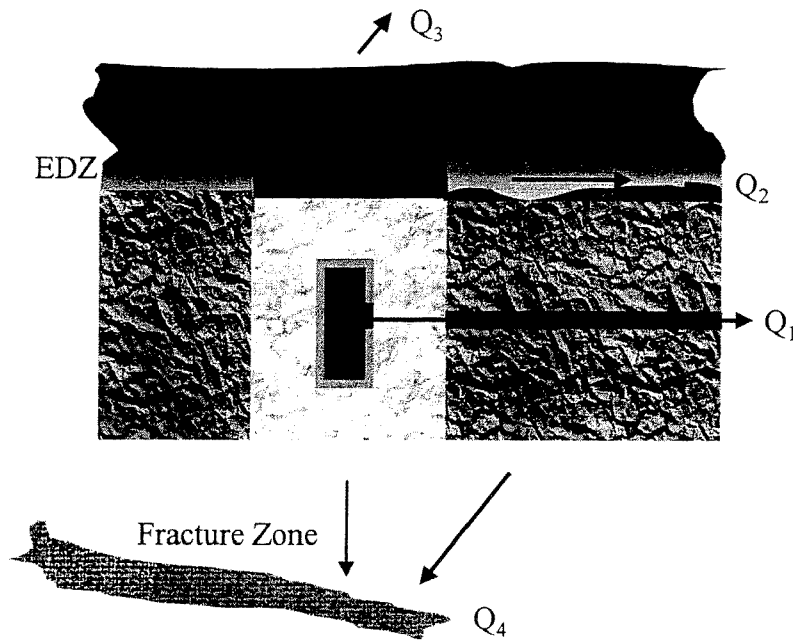


그림 6. 처분장 Near Field에서의 핵종 이동 경로

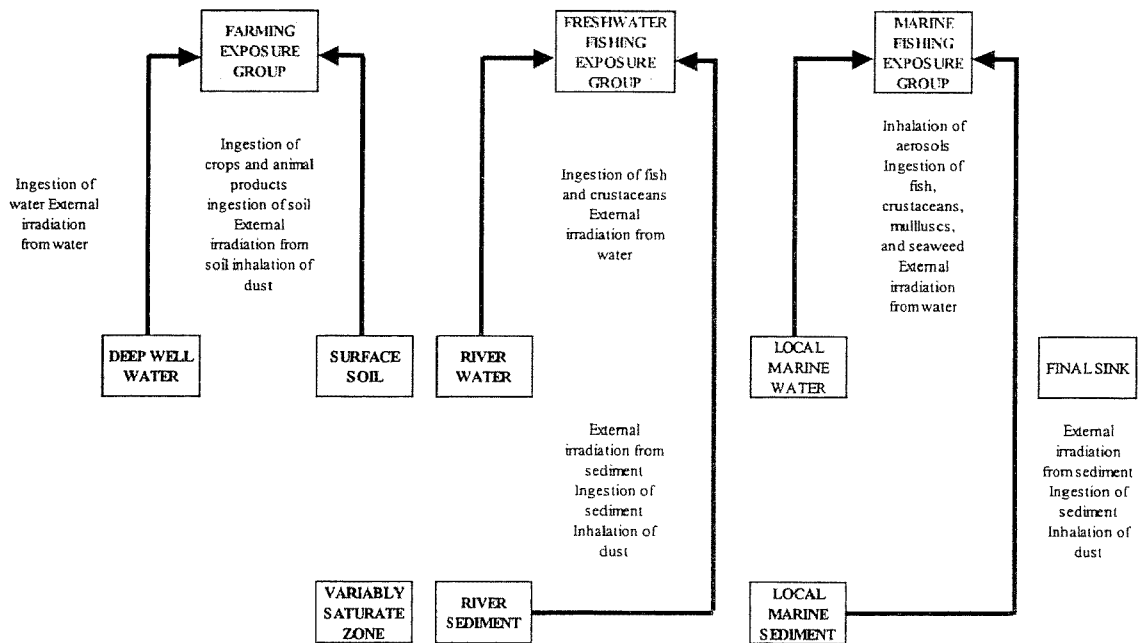


그림 7. 기준 생태계 유출 시나리오 PID



이와 같은 기준 시나리오 및 대안 시나리오 이외에도 보다 다양한 대안 시나리오들이 존재할 수 있다. 이 밖에 외국 사례에서 많이 고려되는 시나리오가 인간 침입 시나리오이다. 인간 침입 시나리오는 개인 혹은 특정 집단이 시행했는가에 따라 영향이 달라진다. 그리고 피해 당사자가 집단이나 개인이나에 따라서도 영향이 다르다. 이와 같은 인간 침입 중에서 가장 영향이 큰 것은 침입자가 처분장을 직접 관통할 수 있게 굴착을 수행하는 것이다.

그러나 상식적으로 처분장을 관통할 수 있게 굴착(Direct intrusion)을 할 수 있는 기술력을 보유한 단체나 개인의 경우 방사성 물질의 존재를 충분히 감지할 수 있을 것이고, 저준위 방사성폐기물 처분장 내에는 핵물질로 전용할 수 있는 플루토늄 등이 존재하지 않으므로 테러 목적으로의 굴착도 배제할 수 있다. 국내에서도 관통 시나리오는 고려하지 않고 처분장 주변에 음용수나 기타 지하수 사용을 위해 우물을 굴착하는 사건에 대해서는 안전성에 미치는 영향을 평가하고 있다.

#### 4. 기준 시나리오 안전성 평가를 위한 방법론

상기와 같이 동굴 처분장 안전성을 평가하기 위한 시나리오가 설정되고 나면 설정된 시나리오를 어떻게 평가할 것인가에 대한 방안이 도출되어야 할 것이다. 먼저 평가를 위한 대상 시나리오에 대한 세부 사항을 보다 자세하게 과학적으로 기술(AC: Assessment context)하는 작업이 필요하고, 이렇게 기술된 세부 사항에 대하여 각 세부 사항 별로 어떤 방법으로 모델링을 개발 적용할 것인가에 대한 작업 흐름도(AMF: Assessment method flow chart)가 개발되어야 한다. AMF에는 단순한 모델링 뿐 아니라, 한 부분 모델에서 다음 부분 모델로의 연결 과정이 명확하게 기술되어야 하고, 개발된 모델링을 실제 안전성 평가에 적용하기 위한 입력 데이터의 준비 상태 등도 기록되어야 한다.

본 논문에서는 해양 유출 시나리오에 대한 자세한 Assessment context와 이에 상응하는 AMF 개발에 대한 한원연의 연구 결과를 소개하고자 한다. 이와 같은 방법론 개발에 있어 현재 저준위 방사성폐기물 영구 처분을 위한 부지가 결정되지 않은 단계에서는 현실적인(Realistic) 모델링 보다는 보수적인(Conservative) 관점에서 제안된 처분 시스템의 안전성이 확고하게 제시될 수 있는 방법을 채택하였다.

##### 4.1 처분장 인근 지역

###### (1) 지하수 재포화

저준위 방사성폐기물 처분장은 처분장 운영 종료 후 빈 공간들을 뒷채움재(Backfilling material)로 충전하더라도 상당 기간 동안 굴착 전과는 달리 주변 암반의 일정 부분이 불포화 상태로 있게 된다. 이후 지하수가 처분장으로 충분히 유입되면 처분장 주변은 굴착 전과 같이 포화 상태로 도달하게 되는 바 이를 재포화(Resaturation)라고 한다. 일반적으로 저준위 방사성폐기물 처분장이 재포화되기까지는 수년에서 수 백년의 기간이 요구되며 재포화 상태에 도달하여야 처분 용기와 지하수의 부식 반응이 촉진된다.

그러나 일반적인 안전성 평가 기간에서는 이러한 재포화 기간을 무시하고 보수적인 관점에서 처분장 폐쇄 후부터 주변 암반과 공학적 방벽이 재포화된다고 가정한다. 본 용역 보고

서에서는 보수적인 관점에서 처분장 폐쇄 시점에서부터 모든 방법들이 재포화된다고 가정하고 별도의 재포화 시간을 산정하지 않는다.

### (2) 용기 수명

일반적으로 탄소강 등으로 만든 처분 용기가 지하에 매립될 경우 초기에는 처분장 건설 운영 과정에서 잔류한 산소에 의해 호기성(Aerobic) 조건이 유지될 것이나 이러한 산소가 유출 혹은 소모되고 난 후에는 혐기성(Anaerobic) 조건이 처분장을 지배하게 될 것이다. 따라서 부식으로 인한 용기 수명을 예측하려면 호기성 조건에서 혐기성 조건으로 전환하는데 소요되는 기간과 혐기성 지하 매립 조건에서 점부식 등 용기 수명을 결정하는 주요 기구(Mechanism)들에 대한 이해가 필수적이다. 현재 관점에서는 용기 내부의 방사성 핵종들은 매립되자마자 지하수와 접촉하여 유출을 시작한다는 보수적인 관점으로 핵종 유출을 평가하고 있다.

그러나 향후 심화 연구를 통하여 부식 기구가 상세히 규명될 경우 부식 시간을 고려한 모델이 실제 평가에 사용될 수 있다.

### (3) 핵종 유출

중저준위 방사성폐기물 처분 용기 내에 존재하는 고체 상태의 방사성 핵종들은 침투 지하수에 용해되어 처분 용기 밖으로 유출된다. 이때 유출은 크게 처분 고화체의 유출에 의해 영향을 받는 조화 유출 방식과 각 핵종 고유의 최고 용해도에 영향을 받는 최고 용해도 유출 두 가지 기구에 의해 발생한다. 현 용역에서는 전술한 바와 같이 고화체 내 잔류하는 기체 상태의 방사성폐기물의 양이 무시할 수 있으며 미량의 기체가 유출된다고 가정하더라도 포화 상태의 지하수에 용해되어 액상으로 이동할 것으로 판단되므로 평가 대상에서 제외하였다. 핵종 유출과 관련된 AMF는 표 1과 같으며 평가를 위해서는 입력 자료로 폐기물 고화체와 공학적 방법에서의 핵종 이동 지연 인자와 물성 조건 및 공극수 조건에서 핵종별 최고 용해도 및 각 핵종별 inventory가 요구된다.

저준위 방사성폐기물의 경우 그 구성물이 대부분 원전 운영에서 사용되던 장갑, 공구, 의복류 등이다. 이들은 화학적으로 글루코스로 구성되어 있는데, 글루코스는 지하수와 반응하여 화학 연결 고리가 끊어지는 반응을 거쳐 최종적으로 메탄(Methane) 등과 같은 부식 기체로 방출된다. 또한 처분 용기나 기타 처분장 건설 과정에서 사용된 철도 궁극적으로 부식하여 수소와 같은 부식 기체를 발생한다. 이러한 부식 기체는 정상적인 경우 공학적, 천연 방벽 내 공극을 통하여 외부로 유출된다고 판단되나 최악의 경우 공학적 방벽에 손상을 줄 수 있다.

이와 같은 경우 공학적 방벽의 공극률(Porosity)이 증가하게 된다. 폐기물 및 공학적 방벽 부식으로 인한 기체 발생량은 SMOGG나 GAMMON 코드를 통해 예측 가능하고 실증 실험을 통해 이를 검증해야 한다. 본 용역에서는 이와 같은 기체 발생으로 인한 영향을 별도로 고려하지 않고, 공극률, 확산 계수, 이류 속도 등 유동 인자들에 대한 민감도 분석에서 고려하도록 하였다.

표 1. 핵종 유출 AMF 요약

항목	코드	입력 자료
조화 유출 현상	MASCOT-K Congruent	핵종 및 고화체 inventory, 고화체의 최고 용해도 등
최고 용해도 유출 현상	MASCOT Solubility Limit이나 Time dependent mass transfer coefficient를 사용한 AMBER	핵종 inventory, 각 핵종 별 최고 용해도
기체 발생	SMOGG	처분장 내 철과 글루코즈 성분의 총량

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

공학적 방벽 내에 유입된 방사성 핵종들은 방벽 내 공극을 타고 확산에 의해 이동하면서 공극 표면에 흡탈착을 반복하면서 이동 속도가 지연(Retardation)된다. 공학적 방벽 내에서 방사성 물질들은 벤토나이트나 시멘트 가루에 흡착되어 유사 콜로이드를 형성할 개연성이 있으나 일반적으로 공학적 방벽의 콜로이드 여과(Filtration) 효과가 뛰어나기 때문에 방사성 핵종이 콜로이드 상태로 이동하는 영향은 평가에서 제외한다. 공학적 방벽에 대한 안전성 평가를 위해서는 최고용해도와 같은 핵종 유출률과 공학적 방벽에서의 핵종 이동 지연 인자와 공극률, 투수 계수 및 확산 계수와 공학적 방벽들의 두께와 넓이 관련 입력 인자들이 필요하다.

표 2. 공학적 방벽의 AMF 요약

항목	코드	입력자료
공극률/ 확산 계수 등 공학적 방벽의 물리적 인자		국내의 벤토나이트 및 시멘트 등에 관한 자료 확보
공학적 방벽의 지연 인자	PHREEQ/ MUGRAM	국내의 database 확보
공학적 방벽 내 핵종 이동	MASCOT Porous Geosphere나 AMBER	

(5) 천연 방벽(Far Field)에서의 핵종 이동

단열 암반으로 유입된 핵종들은 단열 안을 이류(Advection)와 분산(Dispersion)에 의해 유동한다. 또한 농도 차에 의해 주변 다공 매질로 확산 침투 한다. 단열은 일반적으로 완전 개방(Open)되었다고 가정해 방사성 핵종들은 단열 내에서는 흡착할 수 없으며 다만 단열과 주변 다공 암반 경계면에 흡착된다고 가정한다. 한편 단열 주변 다공 암반으로 확산된 핵종들은 다공 암반의 지연 효과가 높아 단열로 이동하는 핵종들에 비해 이동 속도가 떨어지게 된다. 따라서 일정 기간 후 처분 고화체로부터 핵종이 더 이상 유출되지 않을 경우(이런 경우를 Band release라고 한다) 단열 내 같은 위치에서 핵종 농도보다 주변 암반에서의 핵종

농도가 오히려 높기 때문에 주변 다공 암반에서 단열로의 역 확산(Back diffusion)이 발생하게 된다. 그러나 현 단계 평가에는 Band release 현상을 모사하지 않고 처분 고화체로부터 핵종들이 계속해서 공급(이런 경우를 Step release라고 통칭한다)된다고 가정한다.

천연 방벽에서의 핵종 유출률을 예측하기 위해서는 각 암반별 지하수 유동 거리 및 시간과 같은 지하수 유동 평가 결과와, 천연 방벽에서의 핵종 이동 지연 인자 계수와 공극률, 이류 분산 계수 등이 요구된다.

(6) 생태계(Biosphere)

기준 시나리오에 고려하는 생태계는 처분장에서 유출된 방사성 핵종들이 대수대로 유입된 후 대수대로 굴착된 우물로 유입된 후 지상으로 양수되어 음용수로 사용되거나 관개 및 가축 사육 등에 활용될 수 있다. 또한 대수대가 강을 만나 유입된 후 이들 강물 속의 담수 생태계로 핵종들이 전이 될 수 있는데 이 경우 담수 생물을 채취하는 지역 주민들의 생활 양태 자료가 필요하게 된다. 이와 같이 지하수가 강물로 유입되는 경우 방사성 핵종들이 희석되므로 희석률에 대한 정보가 필요하다. 강물을 이용해 농사나 목초지 경작을 위한 관개를 하거나 주민 및 가축들의 음용수로 사용할 수 있으며 기타 정원 가꾸기 등 생활 전반에도 사용되므로 이러한 경로들을 모두 고려한 생태계 평가가 필요하다.

표 3. 천연 방벽의 AMF

항목	코드	입력자료
이류 분산 계수 및 주변 암반의 공극률, 확산 인자 등 천연 방벽의 물리적 인자		국내외 암반 물성 자료 확보
천연 방벽의 지연 인자	PHREEQ/ MUGRAM	국내외 database 확보
천연 방벽 내 핵종 이동	MASCOT Fractured Geosphere 혹은 Porous Geosphere	

지하수가 바다로 연결되는 경우 해양 생태계로 유입되어 생선, 해조류, 갑각류, 조개류 등에 섭취된 후 최종적으로 인간에 의해 섭취되거나 해수에 포함되었다가 해풍에 의해 육지 생태계로 유입된다. 이와 같은 해양 생태계 내에서의 방사성 핵종 이동을 평가하기 위해서는 지하수로부터 해양으로 유입될 때 희석률(Dilution rate) 자료가 필요하다.

일반적으로 우물 시나리오에 대한 선량 환산 인자(DCF: Dose conversion factor)가 가장 보수적으로 알려져 있으나, 실제의 경우 우물물을 음용수 뿐 아니라 경작, 가축 재배 등으로 추가적으로 사용하는 경우에 대한 DCF 값이 더 높아 질 수 있다. 향후 부지가 도출될 경우에는 그림 7에 도시된 바와 같은 생태계 내 핵종 이동 경로를 구획 모델(Compartment Model)로 모사하여 특정 부지 내 자세한 방사성 핵종 이동 경로를 고려한 선량 평가(EDF: Ecosystem specific dose conversion factor)를 산정할 예정이다.

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 요구된

다. 1999년 출간된 일본 H-12 보고서는 생태계 평가를 위한 입력 자료 도출을 위해서 뿐 아니라 생태계 구획 모델링을 위한 template를 제공해 주는 유용한 자료이다.

## 5. 처분 동굴 지하수 유동 평가

저준위 처분 터널은 처분 방사성폐기물의 방사선 준위에 따라 저준위 방사성폐기물(LLW)와 법령에는 정의되지 않았지만 비교적 준위가 높은 중준위 방사성폐기물(ILW) 동굴로 대별된다. 이러한 동굴들은 처분장 폐쇄 시 공학적 방벽으로 충전되거나 혹은 빈 공간으로 남겨지게 된다. 이러한 처분 동굴 내 지하수 유동을 평가하기 위해서는 주변 암반과 투수 계수가 상이한 처분 동굴을 수치적 계산 시 오차없이 평가하는 것이다. 처분 동굴의 투수 계수는 주변 암반보다 높거나 낮기 때문에 수치 해석 시 오류가 발생하기 쉽다.

이러한 문제를 해결하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 처분 동굴은 투수 계수에 따라 처분 동굴 FEM 그리드를 적절히 세분화하는 것이다. 이러한 접근법은 NAMMU 계산을 통해 직접적으로 처분 동굴로부터의 지하수 유동과 관련된 지하수 이동 거리(path length), 시간(travel time), 유입 속도(Darcy velocity) 정보를 산정할 수 있는 장점이 있으나 처분 동굴의 투수 계수나 공극률 변화 등을 평가하기 위해서는 각 평가 case 별로 FEM 그리드를 새로 세분화해야 하는 단점이 있다.

이와 대비되는 평가 방안은 Flow Enhancement Factor(FEF)를 이용하는 방법이다. 이 방법에서는 처분 동굴을 주변 암반과 같은 투수 계수와 공극률을 가지는 충전 매질로 가정하고 이러한 조건에서 지하수 이동 거리(path length), 시간(travel time), 유입 속도(Darcy velocity)를 평가한다. 이러한 평가 결과는 실제 처분 동굴의 물성을 정확히 반영하지 못하는 것이므로 처분 동굴의 물성 특성을 고려한 FEF를 산정해, 지하수 이동 거리(path length), 시간(travel time), 유입 속도(Darcy velocity) 값을 보정해 MASCOT-K 평가 시 입력 자료로 사용하는 것이다. 처분 터널은 실제로는 3차원 건설물이므로 FEF는 x,y,z 방향에 따라 다르게 산정되므로 보수적인 평가를 위해 이중 가장 큰 FEF 값을 MASCOT-K 평가 시에 사용하면 된다.

FEF 계산을 위해 처분장에 n개의 처분 터널이 있다고 가정하고 전체 처분장의 면적을 가로  $W_m$  (가로 길이는 각각  $x_m$  가로 길이를 가지는 m개의 저준위 처분 터널과  $x_l$  가로 길이를 가지는 l개의 처분 터널과  $W = (n \times x_m + m \times x_l)$  길이를 가지는 충전재 층, 세로  $L_m$ 로 정의하자. 처분장 터널은 처분 대상 방사성폐기물 적치 방법에 따라 다른 터널 높이를 가질 수 있다. 이들 터널 높이를  $h_1, h_2, \dots, h_n$ 이라 하고 이들 중 최저 터널 높이를  $h_k$ 라 가정한다.

이와 같은 정보를 이용해 먼저 기하상수(geometric factor)를 아래와 같이 산정할 수 있다. 이를 위해 직사각형 형태의 처분 심도에서의 처분장을 ellipsoid 형태로 전환한다. 이 경우 장축의 길이 (major axis length)는  $m_j$ 이다. 이때 단축의 길이(minor axis length)는  $h_k$ 를 사용한다. 장축과 단축의 길이를 이용하면 ellipsoid의 집밀도(eccentricity)를 산정할 수 있고 이를 통해 FEF를 아래 공식으로부터 산정할 수 있다.

$$F_j = \frac{K_j^e}{(K_j^e - K^0)n_j + K^0}, \quad j = x, y, z$$

여기서  $K^0$ 는 처분장 주변 암반의 투수 계수이고,  $K_j^e$ 는 아래에서 정의할 유효 투수 계수이다. 이제 남은 문제는 각  $x, y, z$  방향 별 유효 투수 계수(effective permeability)를 구하는 것이다. 처분 터널에서의 지하수 유동은 처분 터널과 평행한 방향( $x$  방향으로 정의), 처분 터널과 수직인 방향( $y$  방향으로 정의), 처분 심도의 처분장과 수직인 방향( $z$  방향으로 정의)으로 발생하므로 각 방향 별로 유효 투수 계수를 산정해야 한다.

## 5.1 확률론적 평가를 위한 방안

지하수 유동을 확률론적 평가를 위한 방안으로는 크게 Monte Carlo 평가법, Response Surface Method(RSM), Maximum Likelihood Method(MLM)의 일환인 Adjoint Method 등이 있다. Monte Carlo 방법은 확률론적 평가에서 가장 널리 사용되는 방법이나 지하수 유동 평가에서는 잘 사용되지 않는다. 다양한 지질층이 존재할 경우 각 지질층에 대한 투수 계수와 공극률 등을 확률 밀도로 표시하고 각 확률 밀도 함수로부터 샘플링을 반복해 확률론적 평가를 할 경우 해수 침투 계산을 위해 요구되는 비선형 방정식에 대한 오차반복법 적용과 더불어 평가 시간을 증가시킨다. 특히 하나의 지질층을 추가할 때마다 이로 인한 새로운 평가 case가 기하 급수적으로 증가하게 되므로 이를 적용하는데 현실적인 무리가 있다.

그러나 Monte Carlo 방법론은 이미 효용성이 정립된 방법이므로 향후 컴퓨터의 성능이 더욱 향상되면 지하수 유동에 대한 확률론적 평가 주 방법론으로 사용될 것으로 기대된다. 실제 한원연에서 개발 중인 다차원 확률론적 처분 안전성 종합 평가 코드인 MDPSA에서는 내부적으로 Monte Carlo 방법론을 이용한 확률론적 지하수 평가를 위한 코드를 개발하고 있다.

MLM는 평가 시간이 적게 걸린다는 장점이 있으나 수학적 접근 방법이 perturbation 이론에 근간을 두고 있으므로 어떤 특정 투수 계수 값을 중심으로 약간의 미세 변화에 따른 전체 지하수 유동으로의 영향을 평가하는데 적합한 경우로 실제 적용에 있어서는 상세 지질 조사 결과 투수 계수 값이 잘 알려진 경우에 적용하기 적합하고 반면에 일반적인(generic) 평가나 예비 안전성 평가(PSA)에는 적합하지 않다.

RSM는 지하수 이동 거리(path length), 시간(travel time), 유입 속도(Darcy velocity) 평가가 종료된 이후에도 이를 이용해 별도의 민감도 평가를 수행하고 이를 통해 표준 편차(standard deviation)과 지하수 유동 시간의 variant를 구해야 하는 번거로움은 있으나 평가 대상 case가 Monte Carlo 방법론을 적용할 때와 비교하면 상당히 줄일 수 있으므로 실제 평가에 많이 적용하고 있다.

지하 매질에 관한 부지 정보가 미미할 경우 적용할 수 있는 확률 분포는 삼각분포 확률 밀도함수(triangular probability density function)와 보정 삼각분포 확률밀도함수(truncated probability density function)이다. 삼각분포는 최저값, 최빈값과 최고값으로 구성되므로 이를 각각  $a, b, c$ 로 표시하면 확률밀도함수는  $T(a, b, c)$ 로 나타낼 수 있다. 또한 지하수 유동 시간 variant는 아래 식으로부터 구할 수 있다.

$$D_i = \frac{\log(t_+) - \log(t_b)}{\Delta}$$

여기서  $t_+$ 는  $i$ 인자(예를 들어 투수 계수) 값을 한 order 증가할 경우 대상 지질층을 통과하는데 소요되는 이동 시간이고,  $t_b$ 는 기준(base) 투수 계수 값을 사용한 경우 대상 지질층을 통과하는데 소요되는 이동 시간이며,  $\Delta$ 은 1이다. 이와 같은 variant 산정은 공극률에 대해서도 수행해야 한다.

일반적으로 수리 평가 시에는 상세 지질층들을 그룹화해서 단순화 한 다음 지하수 이동 거리(path length), 시간(travel time), 유입 속도(Darcy velocity) 평가를 수행해야 하나, 이를 이용해 MASCOT-K를 이용한 방사선적 안전성 평가를 수행할 경우에는 비슷한 특성을 가지는 지질층 그룹들을 더욱 단순화한 형태로 재 그룹화하게 된다. 따라서 방사선적 안전성 평가에서 고려하는 천연 방벽 매질은 주요 유동 경로별로 몇 개의 leg로 표시된다. 이때 각 leg는 단순화되어 재 그룹화된 지질층을 의미한다. 따라서 각 leg는 몇 개의 지질층으로 구성되게 되므로 이동 시간을 확률 밀도 함수로 표시하는 것이 상당히 복잡하게 된다. 예를 들어 각 leg에 3개의 지층이 존재할 경우, 각 지층의 투수 계수 변화에 따른 이동 시간 variant 3개와, 각 지층의 공극률 변화에 따른 이동 시간 variant 등 도합 6개의 variant가 존재하게 된다.

일반적으로 leg A에  $p$ 개의 지층이 존재할 경우 leg A에서의 지하수 이동 시간에 대한 확률론적 분포 밀도 함수는 아래와 같이 표시된다.

$$\text{Time} = \text{BTime} \times 10^{**} \left( \sum_{i=1}^p P_{k_i} \times D_{k_i} \text{Time} + P_{\epsilon_i} \times D_{\epsilon_i} \text{Time} \right)$$

여기서 BTime은 기준 데이터를 사용했을 때 Leg A에서의 지하수 이동 시간,  $P_{k_i}$ 는  $i$  암반에서의 투수 계수에 대한 확률 밀도 함수,  $P_{\epsilon_i}$ 는  $i$  암반에서의 공극률에 대한 확률 밀도 함수,  $D_{k_i} \text{Time}$ 는  $i$  암반에서 투수 계수 1 order 변화에 따른 지하수 유동 시간 variant,  $D_{\epsilon_i} \text{Time}$ 는  $i$  암반에서 공극률 1 order 변화에 따른 지하수 유동 시간 variant이다.

## 5.2 경계 조건

평가 대상 지역은 왼쪽에 육지가 오른쪽에 바다가 존재하므로 해수 존재를 고려한 경계 조건들을 설정해야 한다. 모델링 대상 지역 선정 시 왼쪽 경계 조건은 높은 산의 존재로 인해 불투수 경계 조건이 유효하며, 육지 상부 지역에서는 지하수위에 따라 경계 조건이 설정되어야 하며, 바다에서는 염수를 고려한 경계 조건이 오른쪽에서는 지형 특성을 고려해 불투수 경계 조건이, 하부는 불투수층의 존재를 고려해 불투수 조건이 설정되어야 한다.

### (1) 육지 상부 경계 조건

육지 상부 조건은 지하수위 분포 라인을 따라 설정된다. 지하수위 아래에 위치한 암반은 잔류 지하수(residual pressure)를 받으므로 아래와 같은 식으로부터 구할 수 있다.

$$P^R = \rho_f g z$$

여기서  $\rho_f$ 는 담수의 밀도이고,  
 $g$ 는 중력 가속도  
 $z$ 는 해수면으로부터의 표고차이다.

(2) 바다 지역 상부 경계 조건

바다 지역에서의 경계 조건은 2 가지이다. 하나는 해안의 지표 지질에서의 상부 경계 조건이고 다른 하나는 우측 경계 조건이다. 먼저 해안의 지표 지질에서의 상부 경계 조건에 대해 알아보자. 기준점으로부터 상부에 위치한 해수의 깊이로 인한 잔류 수압(residual pressure)은 아래와 같이 표시된다.

$$P^R = (\rho_f - \rho_s) \cdot g z$$

여기서  $\rho_s$ 는 해수의 밀도이다.

따라서 모델링 상에  $(\rho_f - \rho_s) \cdot g = -25.8 \times 9.814 = -2.53 \times 10^2$ 이며 해수면에서의 잔류 수압은  $z=0$ 이므로 0이다. 지하수 유동 모델링에서 필요한 또 다른 경계 조건은 염수 농도에 관한 것이다. 해안 상부 지질 경계 면에서의  $C$ 는 염수의 농도이므로 아래 식으로부터  $C=0.1517$ 이다.

$$\frac{1}{\rho_f} = \frac{C}{\rho_s} + \frac{(1-C)}{\rho_f}$$

여기서  $\rho_f$ 는 25도 상온에서 담수의 밀도로  $997.0 \text{ kg/m}^3$ 이고,  
 $\rho_s$ 는 25도 상온에서 염수의 밀도로  $1195.8 \text{ kg/m}^3$ 이고,  
 $\rho_f$ 은 25도 상온에서 해수의 밀도로  $1022.8 \text{ kg/m}^3$  이다.

## 6. 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 한원연이 채택하고 있는 저준위 방사성폐기물 동굴처분의 안전성 평가 방법론은 공학적, 천연 방벽들에 존재하는 입력 자료의 불확실이 미치는 영향을 평가하고 설계 변경 효과 등을 비교적 간단하게 평가해 볼 수 있는 방안으로, 1차원 확률론적 접근법이다. 이는 효율적으로 가능한 라플라스 영역에서의 해를 구하는 반해석적(Semi-analytic) 기법에 의존하는 방법으로, 이러한 수학적 접근론에 바탕을 둔 코드가 영국 Sellafield 처분장 후보 부지 안전성 평가 연구와 스코틀랜드 둔레이 인허가 절차에서 적용된 MASCOT이다. 한원연에서는 이 코드에서 미비한 일부 핵종 유출 현상을 평가할 수 있게 하기 위해 개량한 MASCOT-K를 개발해 사용하고 있다.



표 4. 생태계 관련 AMF

항목	코드	입력자료
구획 모델간 전이 인자 도출		해외 자료 확보 국내 자료는 향후 부지 선정 후 조사 예정
DCF 평가	AMBER/ PRIZM	

MASCOT-K는 모든 평가를 코드 내에서 수행하지 않고, 특정 자료들을 실측치나 타 코드에서 산정한 다음 수입(Importing)하는 방법을 채택하고 있다. 즉 선원항은 실측 자료를, 처분장 주변 지하수 유동 현상은 Connectflow나 Modflow와 같은 전문 지하수 유동 평가 코드에서, 흡착 계수와 최고 용해도와 같은 자료들은 실측 자료들이나 PHREEQ와 같은 코드를 적용한 평가 결과를, 생태계 영향 또한 PRISM이나 AMBER와 같은 평가 결과를 활용한다. 그림 9는 저준위 방사성 폐기물 동굴처분 안전성평가에 적용하는 종합 안전성 평가 코드 체계를 도시한 것이다.

MASCOT-K는 다차원적인 방사성 핵종 유출을 그림 8에 나타난 바와 같이 다양한 부분 모델(Sub-model)들을 연결하여 1차원으로 모사한 후 평가를 수행하는 코드로 만일 향후 규제 기관이나 처분 사업 수행 기관에서 다차원 핵종 이동에 따른 상세 평가 요청이 있을 경우 자체 개발 중인 MDPSA 코드와 같은 다차원 핵종 이동 코드들을 활용하거나, 지하수 유동 평가를 위한 Connectflow를 핵종 이동 평가용으로 개량하여 그 영향을 평가할 예정이다.

또한 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 한원연에서는 고준위 방사성 폐기물 처분 연구를 통해 개발된 PAID(Performance Assessment Input Database)라는 데이터 관리 프로그램과 입력 자료의 품질 보증을 위해 web을 기반으로 하는 품질 보증 체계를 개발하였고 현재 이들과 시나리오 개발 프로그램인 FEAS(FEP to Assessment through Scenario)들을 통합하고 여기에 문서화 기능까지 보강한 Cyber RnD Platform 프로그램을 개발하고 있다.

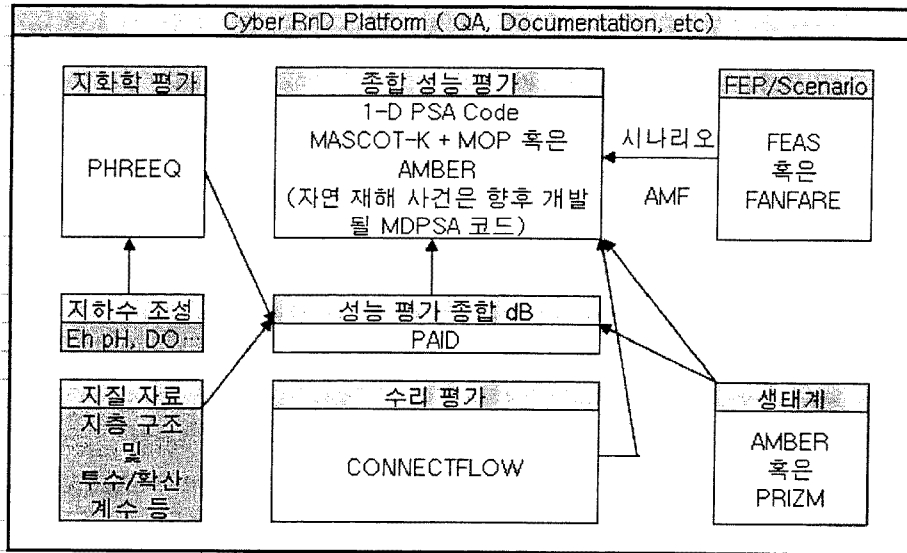


그림 8. 저준위 방사성폐기물 처분장 안전성 평가 코드 체계

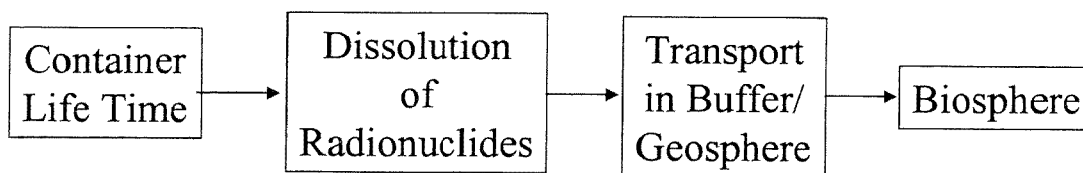


그림 9. MASCOT-K 내 부분 모델 연결 개념

## 7. 결론

본 논문에서는 저준위 방사성폐기물 동굴 처분 관련 FEP들을 조합하여 기준 시나리오들과 주요 대안 시나리오들을 RES 행렬로부터 도출하였다. 이렇게 도출된 기준 및 일부 대안 시나리오들에 대한 안전성 평가 방안을 정립하기 위해 보다 자세한 AC를 정립하고 각 세부 사안들에 대한 평가 방법론인 AMF를 도출하였다. 향후 용역에서는 이와 같이 도출된 AC와 AMF에 대한 정량적인 평가를 수행할 예정이다.

향후 인허가를 위한 본격적인 안전성 평가와 이해 당사자 설득을 위한 safety case 프로젝트에서는 보다 완벽한 FEP encyclopedia가 개발되어야 하며, 현재 한원연이 개발하고 있는 MDPSA 코드를 조기에 개발 완료하여 자연 재해나 기후 변화가 처분장 안전성에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 체계를 구축해야 하겠다. 또한 안전성 평가 입력 자료 확보를 위한 구체적인 방안 수립이 요구된다.