

저준위 방사성폐기물 동굴처분 안전성 평가 방법론 개발

황용수¹⁾ · 강철형¹⁾ · 김성기¹⁾ · 김창락²⁾

Safety Assessment Methods for a Rock Cavern Type Repository

Yongsoo Hwang, Chul-Hyung Kang, S Kim and C-L Kim

초 록. 한국원자력연구소에서는 80년대말부터 1996년까지 저준위 방사성 영구처분 연구사업을 수행한 바 있으며 2000년부터는 국가원자력증강기연구개발사업의 일환으로 한국원자력연구소와 한국수력원자력주식회사가 동굴 처분 관련 안전성 평가 연구를 공동 수행하고 있다. 본 기술 보고에서는 그 동안 개발된 연구 개발 성과들을 중심으로 중저준위 방사성폐기물 처분장 장기 안전성 평가에서 고려되어야 할 요소들과 현재까지 정립된 안전성 평가 방안들에 관하여 정리하였다.

1. 서 론

1978년부터 시작된 원자력발전은 현재 고리, 울진, 월성, 영광 등 4 개의 원자력 발전 단지에서 총 16기의 원자로가 가동 중으로 발전 점유율이 40%를 차지하여 에너지 준 국산화에 기여하고 있다. 이와 같은 원자력 발전의 부산물로서 원전 운영 과정에서 발생하는 저준위 방사성폐기물을 안전하게 영구 격리하기 위한 방법론이 80년대 중반부터 한국원자력연구소(이하 한원연)를 중심으로 개발되었다. 현재 관련 사업 추진은 한국수력원자력발전주식회사(이하 한수원)으로 이관되었으며 관련 기술 개발은 한수원과 한원연이 공동으로 개발하고 있다.

2008년 준공 예정인 저준위 방사성폐기물 처분장 인허가를 위해서는 여러 부수 서류들과 함께 건설 착공을 위한 인허가 문서(CP: Construction Permit) 작성, 방사선적 안전성 평가서인 PSAR(Preliminary Safety Assessment Report) 작성 및 최종 운영허가(OL: Operation License)를 위한 FSAR(Final Safety Assessment Report) 작성이 수행되어야 한다. 이와 같은 안전성 분석 보고서 중 가장 중요한 처분장 장기 방사선적 안전성 평가에서 고려되어야 할 주요 사항들은 아래와 같다.

1) 처분장에 거치될 선원항(inventory) 평가

- 2) 처분 용기에 함유된 핵종들의 유출 및 인간 생태계로의 이동을 기술하는 사건 (FEP: Features, Events, Processes) 목록
- 3) 사건들로 구성된 처분 핵종 이동 시나리오 구성
- 4) 각 시나리오 별 안전성 평가를 위한 방법론 설정
- 5) 공학적/천연 방벽의 불확실성을 고려한 입력 인자 설정
- 6) 확률론적 방법(PSA: Probabilistic safety assessment method)을 이용한 연간 개인 선량(Annual individual dose) 평가

본 기술 보고에서는 상기 단계 별로 두 기관에서 수행한 방법론을 정리하고자 한다.

2. 동굴 처분 안전성 평가 방법

상기 여섯 가지 단계 중 첫 번째 선원항 평가에 관해서는 방사성 폐기물 발생자인 한수원에서 업무를 전담하고 있다. 현재 한수원은 발생 방사성폐기물의 이력을 전산 관리하고 있으며 각 방사성 폐기물 드럼마다 선원항 이력을 표기하고 있다. 외국의 예로 볼 때 이러한 방사성 폐기물 선원항은 향후 영구 처분 전에 이력 검증을 위하여 비파괴 검사(NDT: Non-Destructive Test)와 표본 파괴 검사 단계를 거칠 것으로 판단된다. 따라서 본 기술보고에서는 상기 여섯 단계 중 두 번째인 처분 용기에 함유된 핵종들의 유출 및 인간 생태계로의 이동을 기술하는 사건 목록 관련 연구 현황부터 기술하도록 하겠다.

¹⁾한국원자력연구소 심지층처분시스템
²⁾한국수력원자력발전주식회사
접수일 : 2001년 12월 7일
심사 완료일 : 2002년 1월 24일

2.1 FEP 연구 현황

한원연과 한수원에서는 방사성폐기물 처분장 안전성에 관한 정량적 평가 및 논의의 출발점인 FEP에 관한 상세 분석을 위한 연구를 수행하고 있다. 일반적으로 1950년대 말 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)도 NEA FEP 목록을 작성하였다. 한원연과 한수원에서는 동굴 처분 관련 국내 고유의 FEP 목록을 작성함에 있어 그 출발점을 NEA FEP 목록으로 하고, 여기에 NIREX 및 스웨덴 FEP 등 해외 각국에서 고려하고 있는 사항들을 추가하였다.

FEP 목록 개발에서 중요한 점은 FEP 목록은 발생 개연성이 조금이라도 있는 사건들을 모두 포함해야 한다는 것이다. 남은 과제는 개발된 한원연 FEP 목록에 수록된 각 사건 중에서 우리 나라 처분장에서 발생할 수 있는 FEP 들을 선별하는 것이다. 이를 위해 FEP 선별 과정에서 적용할 수 있는 원칙들은 아래와 같다.

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

대부분의 나라에서 FEP를 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 낮게 나타나게 된다. 일반적으로 발생 확률 빈도를 이용한 선별 기준에 관한 명시적인 값은 없으나 대부분의 경우 연간 발생 확률이 100 만분의 1 이하인 경우 관련 사건은 처분장에서 고려되지 않아도 무방하다고 하겠다.

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)은 지대할 것이다. 이와 같은 사건의 경우 발생 확률이 낮다고 현실적으로 판단되더라도 그 영향이 중요하기 때문에 안전성 평가에서 고려되어야 하는 사건으로 선별된다.

세 번째로 고려할 사항이 법적 요건이다. 예를 들어

방사성폐기물 처분장의 입지 조건 등을 규정한 과거처 기술기준 고시 등에 의하면 처분장은 화산 지역에 위치해서는 안된다. 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 그 영향을 무시할 수 있으면 해당 부지가 법적으로 적격하다고 규정하고 있으므로 이와 같은 법률 근거에 의해 활성 단층의 유무 및 이에 따른 공학적 방벽 보강을 통한 안전성 확보 과정은 제반 안전성 평가를 통해 타당성이 입증되어야 하겠다.

처분장 관련 FEP 선별 연구에서 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 여론(Public Perception)이다. 과학적인 입장에서는 이러한 사건들의 발생 빈도와 그 영향이 미미하더라도 일반 대중들에게는 중요하다고 생각되는 사건들에 대해서도 안전성 평가가 수행되어 그 결과에 관해 알기 쉬운 방법으로 관련 일반 대중들에게 전달되는 것은 중요한 일이라고 하겠다. 이와 같은 관점에서 현재 세계적인 안전성 평가의 기본 방향은 과학적인 관점에서의 상세 안전성 평가 업무와 함께 보다 많은 사람들이 쉽게 처분장 관련 안전성을 이해하기 쉽게 하는 방법론 개발 적용이 병행되고 있다고 하겠으며, 이와 관련한 NEA의 safety case에 대한 일련의 논의는 향후 국내 관련 처분 사업의 원활한 수행을 위해서도 중요하다고 판단된다(황용수, 2002a).

한원연과 한수원에서는 위와 같은 선별 기준을 근거로 한원연 FEP 목록에 수록된 사건들을 선별하였다. 특히 동굴 처분과 관련된 FEP 선별을 위해 내부 전문가와 외부 전문가들로 구성된 패널을 구성하여 각 전문가들이 FEP 항목들에 대해 중요도를 0-5 점으로 정량 평가하도록 하였다. 2001년 초에 수행된 전문가 검토를 거쳐 개발된 최종 목록은 FEAS 프로그램(황용수, 2001)에 저장되었다.

2.2 처분 핵종 이동 시나리오

제한된 처분장이 과연 안전한가를 평가하기 위해서

는 모든 관련자들(Stakeholders)이 공감할 수 있는 방사성 핵종 유출, 이동, 섭취 과정을 모사하는 시나리오가 개발되어야 한다. 현재 한원연과 한수원에서는 다양한 핵종 이동 평가 시나리오를 개발하고 있는 바 대표적인 것이 우물 시나리오(황용수, 2002b)로 그 개요는 다음과 같다.

200 리터 드럼이나 콘크리트 박스, 혹은 기타 용기에 포장된 저준위 방사성폐기물은 동굴 처분장 내로 유입되는 지하수와 접촉하게 된다. 지하 50 m 가량 암반에 설치될 동굴 처분장은 건설 과정에서는 지하수면이 왜곡되어 불포화대가 존재하게 되나 처분장 주변의 빈 공간을 매립하고 난 후에는 지하수가 유입되기 시작하여 일정 시간이 경과하게 되면 공극(Pore)이 지하수로 포화된다. 이렇게 포화된 침투 지하수는 탄소강(Carbon steel)으로 만들어진 처분 드럼의 표면을 점부식(Pitting corrosion)을 통하여 관통하고 방사성폐기물 고화물과 접촉한다. 접촉된 방사성폐기물은 지하수와 반응하여 방사성 핵종들이 액상으로 유출된다. 이때 액상으로 용해되는 핵종의 최고 농도는 각 핵종별 최고 용해도(Solubility Limit)일 것이다.

만일 방사성폐기물 고화체 자체의 용해도가 낮을 경우에는 이 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 혼합체 등의 공학적 방벽을 거쳐 유동한다. 이러한 공학적 방벽들은 이류(Advection)에 의한 이동 현상이 미미하고 확산(Diffusion)에 의해 핵종들이 이동하는 특징을 보여 준다. 벤토나이트의 경우 핵종 이동을 지연 시키는 효과가 크고, 특수 시멘트를 사용할 경우 지하수 내 pH를 변화시켜 핵종 유출량을 저감하는 효과를 가져다 준다.

공학적 방벽을 통과해 유출된 핵종들은 국내 지질 구조에서 흔히 접하게 되는 결정질 암반을 통해 이동한다. 결정질 암반 내에는 미세 단열(Fracture)이 발달해 있는 바 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 유입되기도 한다. 이렇게 특정 암반 층을 이동하던 방사성 핵종들은 Fig. 1에 도시된 바와 같은 경로를 따라 다른 지질 매질층을 통과하여 유동하다가 궁극적으로는 대수대로 유입된다. 우

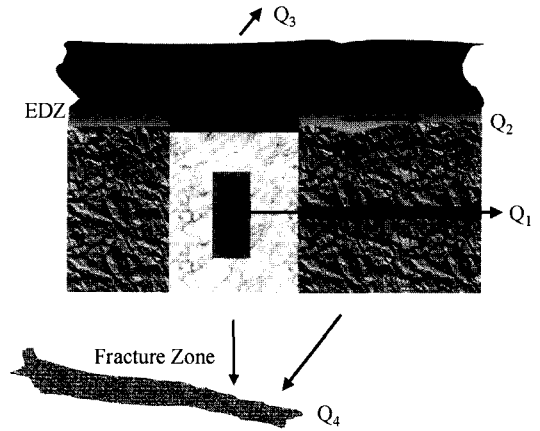


Fig. 1. 처분장 Near Field에서의 핵종 이동 경로.
 주) Q1 : 파손된 용기로부터 핵종이 유출되는 최단 경로로 공학적 방벽을 거쳐 단열이 발달한 단열 암반으로 유출되는 경로
 Q2 : 파손된 용기로부터 상부로 transverse 확산을 거쳐 터널 바닥 면을 따라 발달한 EDZ(Excavation Disturbed Zone)을 타고 핵종이 유출되는 경로
 Q3 : 파손된 용기로부터 상부로 transverse 확산으로 공학적 방벽과 충전된 터널 상부로 핵종이 유출되는 경로
 Q4 : 파손된 용기로부터 공학적 방벽 하부로 transverse 확산을 거쳐 외부 암반으로 핵종이 유출되는 경로

물 시나리오란 대수대에 지역 주민들이 사용할 음용수를 얻기 위해, 혹은 가축 사육용, 농작물 경작용 등의 목적으로 지하수에 포함된 방사성 핵종들이 지상으로 유입되어 Fig. 2에 도시된 다양한 섭생 경로를 통하여 지역 주민에게 전달된다는 것이다. 방사성 핵종을 섭취한 지역 주민이 안전인가를 평가하기 위해서는 주민들에 대한 년간 피폭 선량을 예측하는 일이 중요한 바, 이와 같은 평가를 위해서는 우물 시나리오와 같이 처분장에서부터 최종 지역 주민에게 어떤 식으로 핵종이 전달되는가를 체계적이고 투명하게 기술한 시나리오 개발이 필요하다.

한원연과 한수원이 고려하고 있는 또 다른 시나리오의 하나가 자연 유출 시나리오이다. 우물 시나리오와 유사하게 공학적, 천연 방벽을 거쳐 유출되던 방사성 핵종들이 지하수 유동 경로를 따라 강물로 유입되거나, 샘 등으로 지상으로 용출되거나 해양으로 유입된다. 이와 같은 경로를 따라 유출된 핵종들은 복잡한 경로를 거쳐 최종적으로 주민들에게 섭취된다.

이 밖에 외국 사례에서 많이 고려되는 시나리오의 하나가 인간 침입 시나리오이다. 인간 침입 시나리오는 Table 1에 도시된 바와 같이 개인 혹은 특정 집단이 시행했는가에 따라 영향이 달라진다. 그리고 피해 당사자

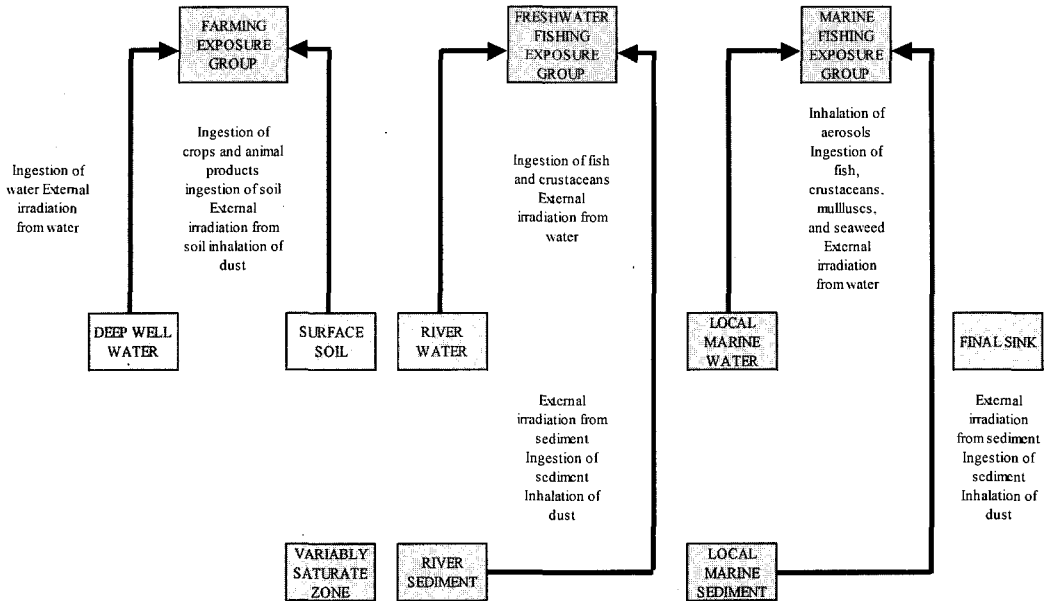


Fig. 2. 우물 생태계 유출 시나리오 PID(Process Influence Diagram).

Table 1. 우물 시나리오로 인한 사건들의 영향 범위.

	Off-site Individual	Off-site Community	Intruder Individual	Intruder Community
Physical Disruption	None	None	Major	Major
Hydrology Disruption	Minor	Minor	Major	Major
Thermal Disruption	Minor	Minor	Minor	Major
Chemistry Disruption	Minor	Minor	Minor	Major

가 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. 따라서 현재의 인허가 상에서는 이러한 직접적인 관통 시나리오는 고려하지 않고 있으며, 미국, 영국, 스웨덴 등 외국에서도 이와 같은 시나리오는 고려 대상에서 제외하고 있다. 국내에서도 관통 시나리오는 고려하지 않고 처분장 주변에 음용수나 기타 지하수 사용을 위해 우물을

굴착하는 사건에 대해서는 안전성에 미치는 영향을 평가하고 있다.

2.3 시나리오 별 안전성 평가를 위한 방법론

상기와 같이 처분장 안전성을 평가하기 위한 시나리오가 설정되면 이 시나리오를 어떻게 평가할 것인가에 대한 방안이 설정되어야 할 것이다. 우선 평가를 위한 평가 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 Clearing House를 통해 연결되어야 하고, 개발된 모델링을 실제 안전성 평가에 적용하기 위한 입력 데이터의 준비 상태 등도 기록된다. 본 기술 보고에서는 우물 시나리오에 대한 자세한 Assessment context와 이에 상응하는 AMF 개발에 대한 한원연과 한수원의 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.

(1) Near Field

1) 지하수 재포화 AC & AMF

AC: 저준위 방사성폐기물 처분장은 처분장 운영 종료 후 빈 공간들을 뒷채움재(Backfilling material)로 충전하더라도 상당 기간 동안 굴착 전과는 달리 주변 압반의 일정 부분이 불포화 상태로 있게 된다. 그 후 지하수가 처분장으로 충분히 유입되면 처분장 주변은 굴착 전과 같아 포화 상태로 도달하게 되는 바 이를 재포화(Resaturation)라고 한다. 일반적으로 저준위 방사성폐기물 처분장이 재포화되기까지에는 수년에서 수백년의 기간이 요구되며 재포화 상태에 도달하여야 비로소 완전한 처분 용기와 지하수의 부식 반응이 원활하게 촉진된다. 그러나 일반적인 안전성 평가 기간에서는 이러한 재포화 기간을 무시하고 보수적인 관점에서 처분장 폐쇄 후부터 주변 압반과 공학적 방벽이 재포화된다고 가정한다.

AMF: 고려 안함

2) 용기 수명 AC & AMF

AC: 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.

AMF: 고려 안함

Clearing House:

① 출력 : 향후 연구 진전에 따른 용기 부식 결과가 핵종 유출 모델에 입력될 수 있음

3) 핵종 유출

AC : 저준위 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 단계 연구에서는 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.

AMF: 핵종 유출과 관련된 AMF는 Table 2와 같다.

Clearing House:

① 입력 : 공학적 방벽에서의 핵종 이동 지연 인자와 물성 조건 및 공극수 조건에서 핵종별 최고 용해도 및 각 핵종별 inventory

② 출력 : 공학적 방벽으로의 유출률

4) 공학적 방벽에서의 핵종 이동

AC : 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. 저준위 방사성폐기물의 경우 그 구성물이 대부분 원전 운영에서 사용되던 장갑, 공구, 의복류 등이다.

이들은 화학적으로 글루코스라는 물질로 구성되어 있는데, 글루코스류는 지하수와 반응하여 화학 연결 고리가 끊어지는 반응을 거쳐 최종적으로 메탄(Methane) 등과 같은 부식 기체로 방출된다. 또한 처분 용기나 기타 처분장 건설 과정에서 사용된 철재류도 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. 이 경우 공학적 방벽의 공극률(Porosity)이 증가하게 된다. 한원연에서는 이러한 손상으로 인한 영향 평가를 독립적으로 다루지 않고 공극률, 확산 계수, 이류 속도 등 유동 인자들에 대한 민감도 분석에서 고려하도록 하였다.

Table 2. 핵종 유출 AMF 요약.

항 목	코 드	입력 자료
조화 유출 현상	MASCOT-K Congruent	핵종 및 고화체 inventory, 고화체의 최고 용해도 등
최고 용해도 유출 현상	MASCOT Solubility Limit	핵종 inventory, 각 핵종 별 최고 용해도

Table 3. 공학적 방벽의 AMF 요약.

항 목	코 드	입력자료
공극률/ 확산 계수 등 공학적 방벽의 물리적 인자		국내외 벤토나이트 및 시멘트 등에 관한 자료 확보
공학적 방벽의 지연 인자	PHREEQ/ MUGRAM	국내외 database 확보
공학적 방벽 내 핵종 이동	MASCOT-K Porous Geosphere	

Table 4. 천연 방벽의 AMF.

항 목	코 드	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-K Fractured Geosphere	

AMF: 공학적 방벽과 연관된 AMF는 Table 3과 같다.

Clearing House:

- ① 입력 : 핵종 유출률과 공학적 방벽에서의 핵종 이동 지연 인자와 물성 조건
- ② 출력 : 천연 방벽으로의 유출률

(2) 천연 방벽(Far Field)

AC : 단열 암반으로 유입된 핵종들은 단열 내를 이류(Advection)와 분산(Dispersion)에 의해 이동한다. 또한 주변 다공 매질로 농도 차에 의한 확산 침투를 한다. 단열은 일반적으로 완전 개방(Open)되었으며 따라서 방사성 핵종들은 단열 내에서는 흡착할 수 없으며 다만 단열과 주변 다공 암반 경계면에 흡착된다. 한편 단열 주변 다공 암반으로 확산된 핵종들은 다공 암반의 지연 효과가 높아 단열로 이동하는 핵종들에 비해 이동 속도가 떨어지게 된다. 따라서 향후 처분 고화체로부터 핵종이 더 이상 유출되지 않을 경우(이런 경우를 Band release라고 통칭한다) 오히려 단열 내 같은 위치에서 핵종 농도가 오히려 높기 때문에 일정 기간 후에는 주변 다공 암반에서 단열로의 역 확산(Back diffusion)이 발생하게 된다. 그러나 한원연의 현 평가 방안에는 보수적인 관점에서 Band release 현상을 모사하지 않고 계속해서 처분 고화체로부터 핵종들이 공급(이런 경우를 Step release라고 통칭한다)된다고 가정한다.

AMF: 천연 방벽과 연관된 AMF는 Table 4와 같다.

Clearing House:

- ① 입력 : 공학적 방벽에서의 핵종 유출률, 지하수 이동 평가 결과, 천연 방벽에서의 핵종 이동 지연 인자 계수
- ② 출력 : 생태계로의 유출률

(3) 생태계(Biosphere)

AC: 우물 시나리오에 고려하는 생태계는 처분장에서 유출된 방사성 핵종들이 대수대를 통과하면서 굴착된 우물로 유입된 후 지상으로 펌핑되어 최종 생태계로 유출된다. 이때 유출되는 우물물의량은 지역 주민의 지하수 사용 패턴, 펌프의 용량 등에 따라 다르다. 만일 주요 음용수가 지하수에서 나온다고 가정하면 아래와 같은 공식에 의해 음용수 섭취로 인한 연간 개인 선량을 산출할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \cdot \text{연간 개인 선량 [Sv/yr]} \\ & = \text{우물로 유입되는 단위 지하수 부피당 방사능의} \\ & \quad \text{세기 [Bq/m}^3\text{]} \times \text{연간 개인 지하수 소비량 [m}^3\text{/yr]} \\ & \quad \times \text{우물 시나리오에 대한 선량 환산 인자 [Sv/Bq]} \end{aligned}$$

국제 방사성 방호기구(ICRP)나 해의 기관에서는 우물 시나리오에 대한 선량 환산 인자를 계산하여 발표하고 있다. 이와 같은 우물 시나리오는 대체적으로 보수적인 연간 개인 선량을 도출하는 것으로 알려져 있다. 그러나 우물물을 음용수 뿐 아니라 경작, 가축 재배 등으로 추가적으로 사용하는 경우에는 예측 선량 값이 더 높아질 수도 있다. 현재 한원연의 연구에서는 구체적인 부지가 확정되지 않았기 때문에 특정 부지 내 자세한 방사성 핵종 이동 경로를 고려한 선량 평가(EDF: Ecosystem specific dose conversion factor)를 산출하는 방식보다는 우물물을 음용함으로써 생기는 영향만을 평가하고 있다. 향후 부지가 도출될 경우에는 Fig. 2에 도시된 바와 같은 생태계 내 핵종 이동 경로를 구획 모델(Compartment)로 모사하여 EDF를 산정할 예정이다.

AMF: 생태계 AMF는 Table 5에 요약되어 있다.

Clearing House:

Table 5. 생태계 관련 AMF.

항목	코드	입력자료
구획 모델간 전이 인자 도출		해외 자료 확보, 국내 자료는 향후 부지 선정 후 조사 예정
선량 환산 인자 산정	AMBER/ PRISM	

- ① 입력 : 천연 방벽에서의 핵종 유출률, 한국인의 섭식 특성, 해안 등 생태계 구획 별 이동 인자(mass transfer coefficients)
- ② 출력 : 연간 선량

2.4 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 한원연과 한수원이 채택하고 있는 동굴 방식의 저준위 방사성폐기물 안전성 평가 방법론은 공학적, 천연 방벽들에 존재하는 입력 자료의 불확실이 미치는 영향을 평가하고 설계 변경 효과 등을 비교적 간단하게 평가해 볼 수 있는 방안으로 결정론적 방법이나 복잡한 다차원 수치 해석적 방법을 지양하고, 1차원 확률론적 평가가 효율적으로 가능한 리플라스 영역에서의 해를 구하는 반해석적(Semi-analytic) 기법에 의존하는 방법이다. 이와 같은 관점에서 영국 Sellafield 처분장 후보 부지 안전성 평가 연구와 스코틀랜드 둔레이 인허가 절차에서 적용된 MASCOT (Sinclair J, 1994)를 종합 안전성 평가(Overall Safety Assessment) 기본 도구로 사용하고 있으며, 한원연에서는 이 코드에서 미비한 일부 핵종 유출 현상을 평가할 수 있게 하기 위해 이를 개량한 MASCOT-K(강철형, 1999)를 개발 적용하고 있다.

MASCOT-K와 같은 전체 안전성 평가 코드는 모든 평가를 코드 내에서 수행하는 방식보다는 일부 자료들을 타 코드와 연계하는 방법을 채택하고 있다. 즉 선원항은 실측 자료나 Origen-2(Croff I. G)와 같은 코드를 적용한 평가 결과를, 처분장 주변 지하수 유동 현상은 Connectflow(Hartley L J, 1996)와 같은 전문 지하수 유동 평가 코드에서, 흡착 계수와 최고 용해도와 같은 자료들은 실측 자료들이나 MUGREM(한필수, 1999)과 같은 코드를 적용한 평가 결과를, 생태계 영향 또한 PRISM(Hofman D, 1999)이나 AMBER(Enviros QuantiSci, 1998)와 같은 평가 결과를 활용한다. Fig. 3은 한원연에서 적용하는 종합 안전성 평가 코드 체계를 도시한 것이다.

MASCOT-K는 다차원적인 방사성 핵종 유출을 Fig. 4에 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 개발한 B2R(강철형, 1999)과 B3R(황용수 2002c)과 같은 다차원 핵종 이동 코드들을 활용하거나 지하수 유동 평가를 위한 Connectflow를 핵종 이동 평가용으로 개량하여 그 영향을 평가할 예정이며 현행 기준에는 명기되어 있으나 기후 변화나 자연 재해와 같은 외부 사건(External FEP)들로 인한 영향 평가가 요구되는 경우에는 지질 구조 등의 천이적인 변화를 반영하는 TDPSA(Time dependent probabilistic safety assessment) 코드를 개발 적용할 예정이다. 이밖에 규제 기관

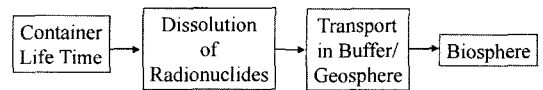


Fig. 4. MASCOT-K 내 부분 모델 연결 개념.

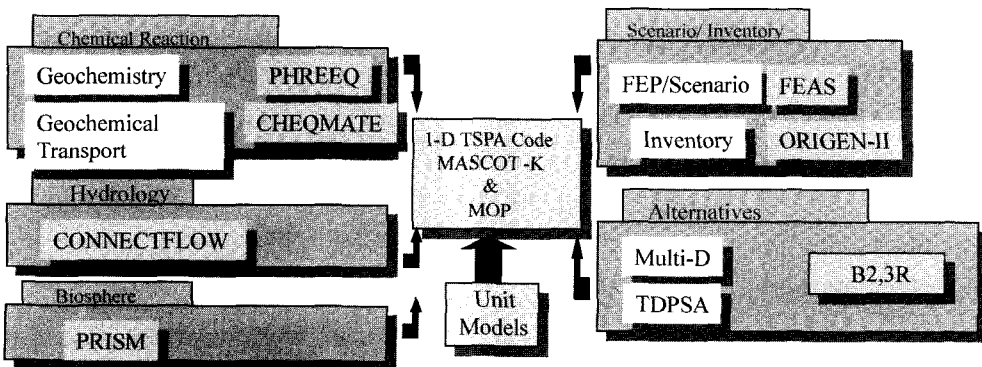


Fig. 3. 저준위 방사성폐기물 처분장 안전성 평가 코드 체계(한원연).

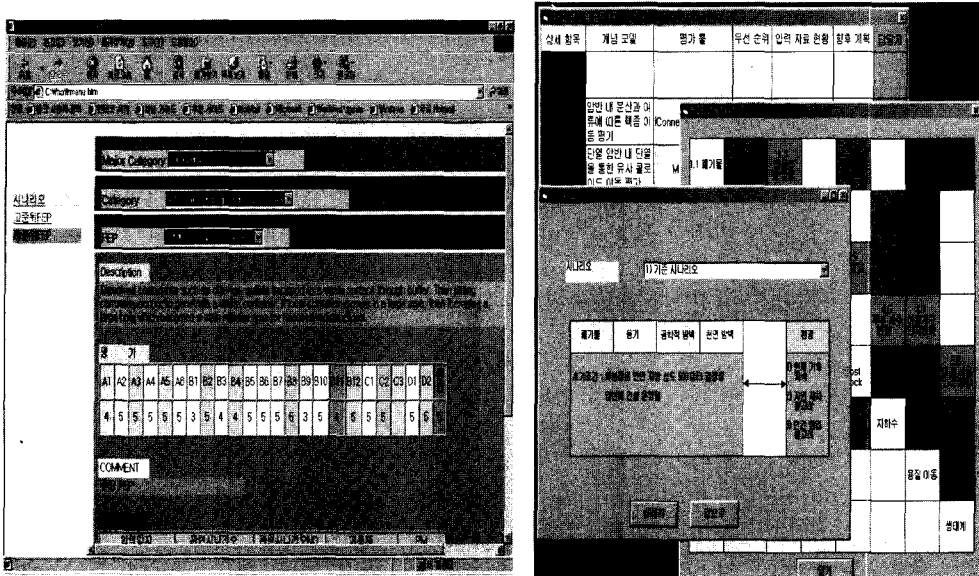


Fig. 5. FEAS 단면도.

등에서 부지 특성 등을 고려한 특정 사항에 대한 심화 평가를 원할 경우 사업 당사자인 한수원에서는 새로운 모델 개발을 계획하고 있다.

안전성 평가를 위한 입력 자료들을 관리하기 위한 방안으로 한원연과 한수원에서는 고준위 방사성폐기물 처분 연구를 통해 개발된 PAID(Performance assessment input database)라는 데이터 관리 프로그램과 입력 자료의 품질 보증을 위한 web을 기반으로 하는 품질 보증 체계를 개발하였고 현재 이들을 개량하여 저준위 방사성폐기물 처분 성능 평가 입력 자료 데이터 베이스인 PAID-LLW을 개발하고 있으며 향후에는 저준위 방사성폐기물 처분 연구사업에 적합한 품질 보증 체계를 개발할 예정이다.

한원연과 한수원에서는 MASCOT-K, PAID-LLW와 Fig. 5에 도시된 FEAS를 연계한 동굴 처분용 성능 평가 체계를 이용하여 향후 가장 부지에 대한 종합 안전성 평가를 수행할 예정이다.

3. 결 론

한원연과 한수원에서는 중저준위 방사성폐기물을 동굴 처분하는 경우 그 방사선적 안전성을 평가하기 위한 체계를 지난 10 여 년간의 연구를 통하여 구축하였다. 향후에는 입력 자료의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 품질 보증 체제 개발과 다양한 이익 집단의 다양한 안전성

평가 자료 결과물 요구에 대비하기 위한 방안 개발 등을 수행할 예정이며 이와 병행하여 모의 처분 부지를 선정하여 종합 안전성 평가를 수행할 예정이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부가 주관하는 국가중장기원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 강철형 등, 1999, 심지층처분시스템개발, KAERI/RR-2013/99.
2. 한필수 등, 1999, 지하핵종거동규명연구, KAERI/RR-2007/99.
3. 황용수 등, 2001, FEAS Interactive Communication Tool to Understand Performance Assessment Approaches on Permanent HLW Disposal, 대한환경공학회추계학술발표회, 2001년 11월 3일 포항공과대학교.
4. 황용수 등, 2002a, Performance Assessment Code Verification and Validation Project, Final Report, Joint Project between KAERI and U.K. Quintessa, to be published in February of.
5. 황용수 등, 2002b, Influence of EDZ on Safety of a Potential HLW Repository, Accepted for Publication in Annals of Nuclear Energy.
6. 황용수 등, 2002c, Progress of R&D on Total System Performance Assessment of a Potential High Level Radioactive Waste Repository in Korea, submitted to

Progress in Nuclear Energy.

- 7. Croff, I G, 1980, A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code, ORNL/TM-7175.
- 8. Hartley L J, 1996, CONNECTFLOW User Guide, AEAT.

- 9. Hofman D and Nordliner S, 1999, PRISM, Windows, User's Guide, ES-99/13, Studsvik EcoSafe.
- 10. Sinclair J et al., 1994, MASCOT and MOP Programs for Probabilistic Safety Assessment, Part A Overview, NSS/R336 AEAT.

황 용 수



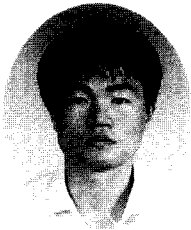
1983년 서울대학교 공과대학 원자핵공학과 공학사
 1986년 캘리포니아대학교 대학원 원자핵공학과 공학석사
 1992년 캘리포니아대학교 대학원 원자핵공학과 공학박사
 Tel : 042-868-2034
 E-mail : yshwang@kaeri.re.kr
 현재 한국원자력연구소 책임연구원

강 철 형



1976년 서울대학교 공과대학 원자핵공학과 공학사
 1983년 워싱턴 대학교 대학원 원자핵공학과 공학석사
 1989년 캘리포니아 대학교 대학원 원자핵공학과 공학박사
 Tel : 042-868-8914
 E-mail : chkang@kaeri.re.kr
 현재 한국원자력연구소 책임연구원

김 성 기



1983년 전북대학교 전산학과 공학사
 2002년 충남대학교 대학원 경영학과 석사
 현재 한국원자력연구소 책임연구원

김 창 락



1982년 서울대학교 원자핵공학과 학사
 1983년 미국 버클리대학교 핵공학과 석사
 1987년 미국 버클리대학교 핵공학과 박사
 Tel : 042-870-0373
 E-mail : clkim@khnp.co.kr
 현재 한국수력원자력(주) 원자력환경기술원 처분연구그룹장