

Safety Assessment for LILW Near-Surface Disposal Facility Using the IAEA Reference Model and MASCOT Program

Hyun-Joo Kim, Joo-Wan Park and Chang-Lak Kim

Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd., Nuclear Environment Technology Institute

IAEA의 기준모델과 MASCOT 프로그램을 이용한 중저준위 방사성 폐기물 천층처분시설 안전성평가

김현주 · 박주완 · 김창락

한국수력원자력주식회사, 원자력환경기술원

(2002년 1월 4일 접수, 2002년 5월 28일 채택)

Abstract - A reference scenario of vault safety case prepared by the IAEA for the near-surface disposal facility of low-and intermediate-level radioactive wastes is assessed with the MASCOT program. The appropriate conceptual models for the MASCOT implementation is developed. An assessment of groundwater pathway through a drinking well as a geosphere-biosphere interface is performed first, then biosphere pathway is analysed to estimate the radiological consequences of the disposed radionuclides based on compartment modeling approach. The validity of conceptual modeling for the reference scenario is investigated where possible comparing to the results generated by the other assessment. The result of this study shows that the typical conceptual model for groundwater pathway represented by the compartment model can be satisfactorily used for safety assessment of the entire disposal system in a consistent way. It is also shown that safety assessment of a disposal facility considering complex and various pathways would be possible by the MASCOT program.

key words : groundwater pathway, conceptual model, compartment model, MASCOT, safety assessment,

요약 - IAEA가 제시한 중·저준위 방사성 폐기물 천층처분시설 기준 안전성평가 사례에 대해 MASCOT 프로그램을 이용하여 안전성평가를 수행하였다. 이를 위해 기준시나리오에 대한 개념 모델을 개발하였다. 지질계와 생태계의 연결매체인 우물을 통한 지하수 이동경로에 대한 평가를 수행하였고 생태계 모델에서는 구획모델을 적용하여 인간활동을 통한 최종 방사선적 영향을 평가하였으며, 다른 평가 결과와의 비교를 통해 기준시나리오에 대한 개념모델의 적합성을 조사하였다. 본 연구 결과는 구획모델을 이용한 지하수 이동경로에 대한 대표적인 개념모델을 총체적인 처분시스템의 안전성평가에 만족스럽게 이용할 수 있다는 것을 보여주었다. 또한 MASCOT 프로그램을 이용하여 복잡하고 다양한 이동경로를 통한 천층처분시설의 방사선적 안전성평가 가능성을 보였다.

중심어 : 지하수 이동경로, 개념모델, 구획모델, MASCOT, 안전성평가

서 론

기 발생된 폐기물의 최종 관리단계인 처분은

방사성 폐기물을 인간과 자연생태계로부터 영구히 격리시키는데 의의가 있다. 처분 폐기물 중에 함유되어 있는 방사성 핵종이 일정기간 후에 처분

고(disposal vault)로부터 이동하여 인간 생활권에 도달하기까지는 다시 장기간이 걸리므로 그 사이에 감쇠하거나 도중에 다른 물질에 포집 또는 흡착되는 특성을 고려하여 최종적으로 인간이 받는 피폭선량(dose)이나 위험도(risk)를 무시할 수 있는 정도의 값이 되도록 함으로써 처분안전성을 확보할 수 있다. 이러한 부지특성과 다중방벽으로부터 장래 인간의 피폭을 해석하고 추정하는 것을 처분 안전성평가(safety assessment)라 한다. 처분 안전성평가에서는 장기간의 처분시설의 성능을 예측함에 따른 불확실성이 존재하며 불확실성은 크게 모델과 파라미터의 불확실성으로 구분할 수 있다. 이 가운데 모델의 불확실성은 평가에 적용하는 예측모델에 내재하는 지식의 제한성과 관련이 있으므로 다양한 개념모델의 사용에 의한 모델 불확실성의 분석이 필요하다. 본 연구의 목적은 중·저준위 방사성폐기물 처분시설 안전성평가 방법론을 수립하기 위한 일환으로 천층 처분시 기준시나리오로 사용되는 지하수 시나리오에 적용하기 위한 전형적인 개념모델을 개발, 적용하는 데 있다. 본 논문에서는 IAEA에서 제시하는 천층처분 기준 안전성평가 사례에 대해 개발된 개념모델을 적용하였으며, 평가계산에는 한국수력원자력(주) 원자력환경기술원에서 보유하고 있는 MASCOT 프로그램을 사용하였다.

MASCOT은 3차원 지하 매질에서의 방사성핵종 이동을 Laplace 역변환법을 이용하여 유동현상을 1차원으로 모사하여 평가하는 코드로 음용수 시나리오에 주로 이용된다. 본 논문에서는 개념모델의 수학적 표현을 위해 처분시설을 통과하는 지하수 이동을 크게 선원항, 지질계 및 생태계로 구분하여 선원항과 지질계 모델은 MASCOT 내 단순침출 모델과 다공성 지질계 모델을 사용하였으며, 생태계 모델에는 구획모델 접근방법을 적용하여 피폭경로별로 수학적 표현식을 작성하였다.

평가개요

전제조건

안전성평가에서는 IAEA가 주관하는 국제공동연구인 안전성평가 방법론 개선 프로그램의 일환으로써 South Africa의 Vaalputs에 위치한 기준천층처분시설을 대상으로 하여 인간에게 미치는 방사선적 영향을 평가하였다 [1]. 본 연구에서 고려한 기준 처분시설에는 지표면상에 위치한 20개의 콘크리트 처분고에 총 750,000드럼의 폐기물이 처분될 예정이다. MASCOT에서는 시간의 변화에 따른 처분고와 덮개의 열화현상을 고려할 수 없기 때문에 인공방벽을 포함한 처분고는 폐쇄된

Table 1. Near-field, unsaturated zone and saturated zone distribution coefficient(m³/kg)

Element	Near field	Unsaturated zone				Sat. zone
	Degraded Vault	Red sand/calcrete	Brown sand/gritty clay	White kaolinite clay	Weathered granite	Weathered granite
H	0	0	0	0	0	0
C	2.0×10 ⁻¹	5.0×10 ⁻³	5.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	5.0×10 ⁻³	5.0×10 ⁻³
Ni	1.0×10 ⁻²	4.0×10 ⁻¹	4.0×10 ⁻¹	6.0×10 ⁻¹	4.0×10 ⁻¹	4.0×10 ⁻¹
Sr	1.0×10 ⁻³	8.0×10 ⁻³	7.1×10 ⁻³	8.3×10 ⁻³	5.5×10 ⁻³	5.5×10 ⁻³
Tc	0	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁴
I	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³
Cs	2.0×10 ⁻²	5.4×10 ⁻¹	3.4×10 ⁻¹	2.2×10 ⁻¹	2.6×10 ⁻¹	2.6×10 ⁻¹
Pb	5.0×10 ⁻²	3.0×10 ⁻¹	3.0×10 ⁻¹	5.0×10 ⁻¹	3.0×10 ⁻¹	3.0×10 ⁻¹
Po	0	1.5×10 ⁻¹	1.5×10 ⁻¹	3.0×10 ⁰	1.5×10 ⁻¹	1.5×10 ⁻¹
Ra	5.0×10 ⁻²	5.0×10 ⁻¹	5.0×10 ⁻¹	9.0×10 ⁰	5.0×10 ⁻¹	5.0×10 ⁻¹
Ac	2.0×10 ⁻¹	3.4×10 ⁻¹	3.4×10 ⁻¹	7.6×10 ⁰	3.4×10 ⁻¹	3.4×10 ⁻¹
Th	1.0×10 ⁰	3.0×10 ⁰	3.0×10 ⁰	6.0×10 ⁰	3.0×10 ⁰	3.0×10 ⁰
Pa	1.0×10 ⁻¹	3.4×10 ⁻¹	3.4×10 ⁻¹	7.6×10 ⁰	3.4×10 ⁻¹	3.4×10 ⁻¹
U	1.0×10 ⁻¹	2.5×10 ⁻³	6.8×10 ⁻³	1.4×10 ⁻³	3.0×10 ⁻³	3.0×10 ⁻³
Np	1.0×10 ⁻¹	3.4×10 ⁻¹	3.4×10 ⁻¹	7.6×10 ⁰	3.4×10 ⁻¹	3.4×10 ⁻¹
Pu	1.0×10 ⁰	3.4×10 ⁻¹	3.4×10 ⁻¹	7.6×10 ⁰	3.4×10 ⁻¹	3.4×10 ⁻¹
Am	2.0×10 ⁻¹	3.4×10 ⁻¹	3.4×10 ⁻¹	7.6×10 ⁰	3.4×10 ⁻¹	3.4×10 ⁻¹

후 점차 열화되어 500년이 지나면 완전 붕괴되는 것으로 보수적으로 가정하였다. 또한 처분고에서 누출된 방사성핵종이 불포화 상태의 토양층과 그 하부에 위치한 포화매질을 거쳐 오염물질이 이동하고 최종적으로 생태계와의 연결 매체인 우물을 통해 인간에게 전달되는 지하수 이동경로에 대한 평가를 수행하였다. 해석에 필요한 모든 자료는 IAEA에서 제공한 자료를 이용하였으며(Table 1 과 2 참조) 생태계 모델해석에서는 MASCOT 코드 내의 기획모델을 적용하여 인간활동을 통해

피폭 가능한 방사선적 영향을 분석하였다. 이 해석을 통해서 처분시설 폐쇄 후 장기간의 인간에 대한 방사선적 영향 평가가 가능하다.

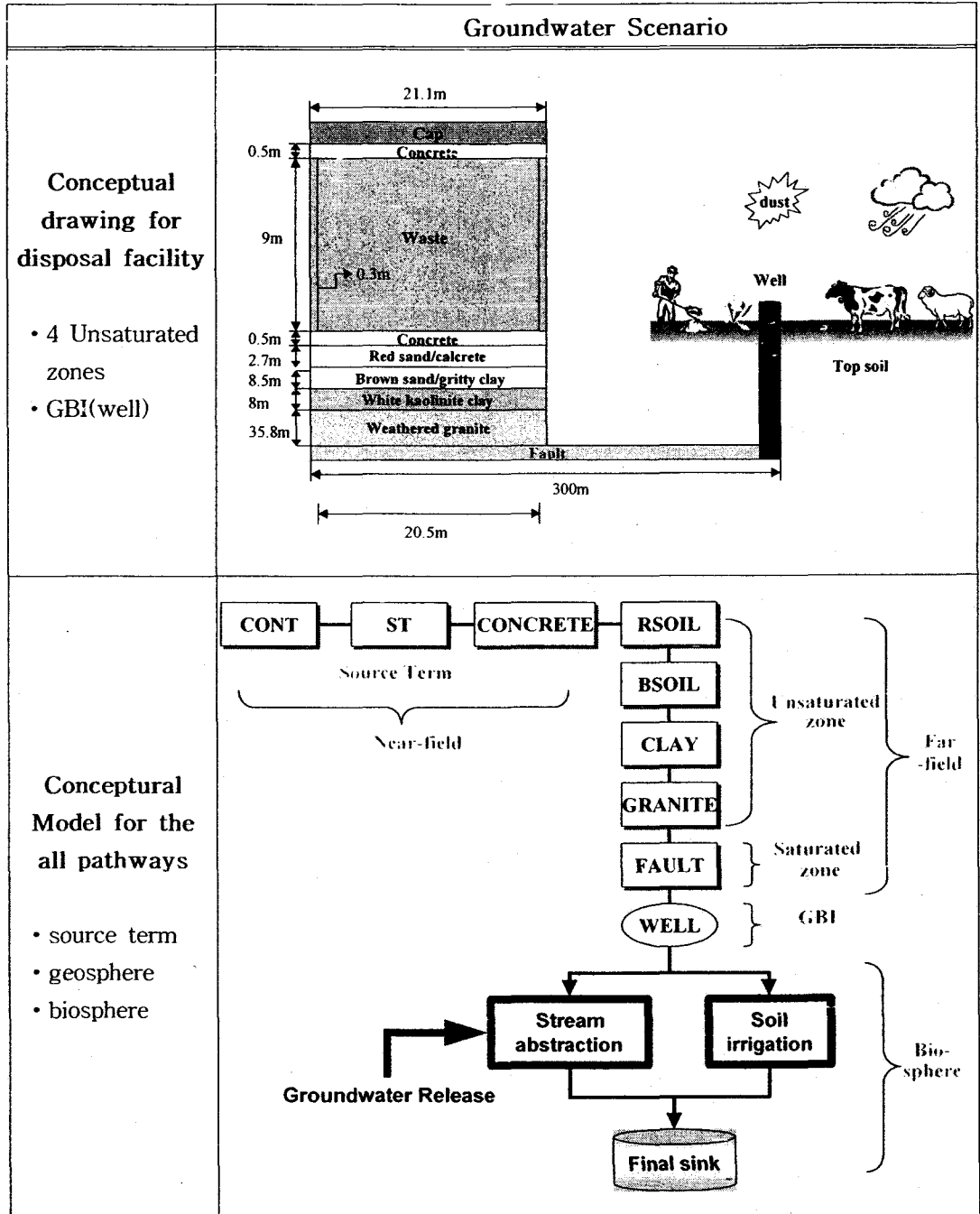
시나리오와 개념모델

평가에 이용된 시나리오로서 IAEA에서 선정된 기준 천층처분시설을 대상으로 한 음용수 시나리오에 대해서는 처분고내 핵종 누출과 이동 및 불포화대에서의 핵종이동 그리고 포화대에서의 핵종이동을 본 연구팀이 DUST-MS와 GWSCREEN

Table 2. Dose coefficients for ingestion, inhalation and external irradiation

Radionuclide	Dose coefficients (adults)			
	Ingestion (Sv.Bq ⁻¹)	Inhalation (Sv.Bq ⁻¹)	External irradiation from soil (Sv.h ⁻¹ .Bq ⁻¹ .m ³)	External irradiation from water (Sv.h ⁻¹ .Bq ⁻¹ .m ³)
¹ H	1.8×10 ⁻¹¹	2.6×10 ⁻¹⁰	0	0
¹⁴ C	5.8×10 ⁻¹⁰	5.8×10 ⁻⁹	2.6×10 ⁻¹⁹	1.6×10 ⁻¹⁸
⁵⁹ Ni	6.3×10 ⁻¹¹	4.4×10 ⁻¹⁰	0	0
⁶³ Ni	1.5×10 ⁻¹⁰	1.3×10 ⁻⁹	0	0
⁹⁰ Sr	3.1×10 ⁻⁸	1.6×10 ⁻⁷	4.7×10 ⁻¹⁶	1.4×10 ⁻¹⁵
⁹⁹ Tc	6.4×10 ⁻¹⁰	1.3×10 ⁻⁸	2.4×10 ⁻¹⁸	1.1×10 ⁻¹⁷
¹²⁹ I	1.1×10 ⁻⁷	3.6×10 ⁻⁸	2.5×10 ⁻¹⁶	3.2×10 ⁻¹⁵
¹³⁷ Cs	1.3×10 ⁻⁸	3.9×10 ⁻⁸	6.6×10 ⁻¹⁴	2.1×10 ⁻¹³
²¹⁰ Pb	6.9×10 ⁻⁷	5.7×10 ⁻⁶	12.×10 ⁻¹⁶	7.0×10 ⁻¹⁶
²¹⁰ Po	1.2×10 ⁻⁶	4.3×10 ⁻⁶	1.0×10 ⁻¹⁸	3.3×10 ⁻¹⁸
²²⁶ Ra	2.8×10 ⁻⁷	9.5×10 ⁻⁶	2.2×10 ⁻¹³	6.9×10 ⁻¹³
²²⁷ Ac	1.2×10 ⁻⁶	5.7×10 ⁻⁴	3.9×10 ⁻¹⁴	1.5×10 ⁻¹³
²²⁹ Th	6.1×10 ⁻⁷	2.6×10 ⁻⁴	3.1×10 ⁻¹⁴	1.2×10 ⁻¹³
²³⁰ Th	2.1×10 ⁻⁷	1.0×10 ⁻⁴	2.3×10 ⁻¹⁷	1.4×10 ⁻¹⁶
²³¹ Pa	7.1×10 ⁻⁷	1.4×10 ⁻⁴	3.7×10 ⁻¹⁵	1.4×10 ⁻¹⁴
²³³ Pa	8.7×10 ⁻¹⁰	3.9×10 ⁻⁹	2.0×10 ⁻¹⁴	7.4×10 ⁻¹⁴
²³³ U	5.1×10 ⁻⁸	9.6×10 ⁻⁶	2.7×10 ⁻¹⁷	1.3×10 ⁻¹⁶
²³⁴ U	4.9×10 ⁻⁸	9.4×10 ⁻⁶	7.7×10 ⁻¹⁸	6.3×10 ⁻¹⁷
²³⁵ U	4.7×10 ⁻⁸	8.5×10 ⁻⁶	1.5×10 ⁻¹⁴	6.2×10 ⁻¹⁴
²³⁸ U	4.8×10 ⁻⁸	8.0×10 ⁻⁶	2.9×10 ⁻¹⁵	1.1×10 ⁻¹⁴
²³⁷ Np	1.1×10 ⁻⁷	5.0×10 ⁻⁵	1.5×10 ⁻¹⁵	8.4×10 ⁻¹⁵
²³⁸ Pu	2.3×10 ⁻⁷	1.1×10 ⁻⁴	2.9×10 ⁻¹⁸	4.1×10 ⁻¹⁷
²³⁹ Pu	2.5×10 ⁻⁷	1.2×10 ⁻⁴	5.7×10 ⁻¹⁸	3.5×10 ⁻¹⁷
²⁴¹ Pu	4.8×10 ⁻⁹	2.3×10 ⁻⁶	3.6×10 ⁻¹⁹	1.8×10 ⁻¹⁸
²⁴¹ Am	2.0×10 ⁻⁷	9.6×10 ⁻⁵	8.4×10 ⁻¹⁶	6.8×10 ⁻¹⁵

Table 3. Simplified representation of the conceptual model for the disposal facility and all pathways.



을 사용하여 평가한 바 있다 [2,3]. 여기서는 영국의 중·저준위 동굴처분 안전성평가 연구에 적용된 바 있는 MASCOT를 이용하여 처분고로부터 누출된 핵종을 단순히 우물을 통한 음용수 섭취

에 국한하지 않고, 처분장 인접지역에 살고 있는 거주자들이 우물을 통해 처분장으로부터 흘러나온 지하수를 이용하여 경작 및 가축사육과 같은 인간활동을 통해 음용수로 섭취, 호흡에 의한 퍼

폭, 오염된 토양에 의한 외부피폭 및 오염된 동물성 식품의 섭취에 따른 피폭 등의 다양한 생태계 활동을 고려하였다. 평가에 대한 천층처분시설 처분고와 불포화대 및 포화대 그리고 방사성핵종의 최종 전달단계인 생태계에 대한 개념도와 개념모델은 Table 3에 제시되어 있다. 또한 우물로부터 유출된 물이 최종 소비자인 인간에게 도달하는 경로에 대한 생태계 개념모델은 Fig. 1에 보다 상세히 제시하였으며 생태계에서의 1차, 2차 수용체와 이동 매체, 이동 매커니즘, 최종적으로 인간 피폭 매커니즘 등을 파악할 수 있다.

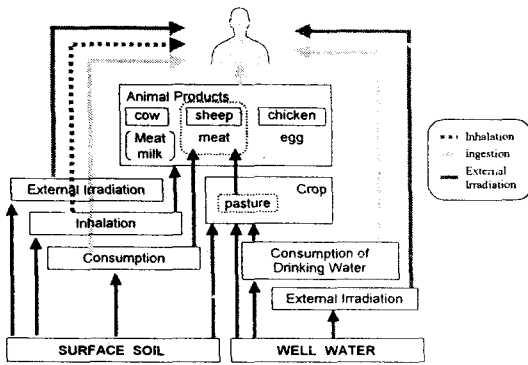


Fig. 1. Conceptual model for the biosphere

수학적 모델링 및 평가

수학적 모델

위와 같은 개념모델로부터 지하수이동경로 시나리오(농장 시나리오)에서 이용되는 접근방법을 알 수 있다.

시나리오에 대한 개념모델을 수학적으로 나타내어 방사성핵종의 영향을 정량적으로 평가하기 위한 방법으로 MASCOT [4]에서는 선원항, 지질계, 생태계로 구분하여 모델링이 가능하다. 먼저 선원항은 침출(leaching)에 의해 유출되므로 여러 선원항 모델 중 단순침출(simple leaching) 모델을 사용하였으며 반응식은 다음과 같다.

$$k_n = \frac{qA}{V(\phi + \beta\rho K_n)} \quad (1)$$

여기서, k_n 은 침출률(y^{-1}), q 는 처분장을 통한 유출량($m^3 y^{-1}$), A 는 처분장 단면적(m^2), V 는 처분장 체적(m^3), ϕ 는 처분장의 공극률, $\beta\rho K_n$ 는 처분장 구성물질에 대한 흡착계수(-)이다.

그 다음 단계로 인공방벽 및 자연방벽(불포화대 및 포화대)에서는 다공성 지질계(porous geosphere) 모델을 적용하였으며 식(2)는 공극을 통해 오염물질이 이류-분산(advection-dispersion)과 같은 물리적·화학적 작용을 함으로써 지하수를 따라 이동한다는 것을 나타내는 식이다.

$$R_n \frac{\partial C_n}{\partial t} = -v \frac{\partial C_n}{\partial x} + \frac{\partial^2 C_n}{\partial x^2} - \lambda_n R_n C_n + \lambda_{n-1} R_{n-1} C_{n-1} \quad (2)$$

$$R = 1 + \frac{\rho Kd(*)}{\theta} \quad (3)$$

여기서, R_n 은 n 핵종에 대한 자연인자(-)이고 v 는 유속($m y^{-1}$), λ_n, λ_{n-1} 은 모핵종으로부터 생성된 n 번째와 $n-1$ 번째 핵종에 대한 붕괴 상수, C_n, C_{n-1} 은 각각 n 번째와 $n-1$ 번째 핵종 농도, D 는 분산계수($m^2 y^{-1}$), t 는 시간, x 는 거리이다. 또한 자연인자 R 은 식 (3)으로 표현되며 여기서 ρ 는 매질의 밀도, θ 는 함수비(water content), Kd 는 분배계수이다.

마지막 단계인 생태계 모델에서는 구획 생태계 모델(compartment biosphere model)을 이용하였으며, MASCOT에서는 다른 연계 프로그램을 통해 산출된 결과값을 입력하는 형태를 취하므로 주요 피폭경로로서 흡입(inhalation), 섭취(ingestion) 및 외부피폭(external exposure)에 대해 다음에 제시한 산출식을 적용하였다.

◎ 흡입에 의한 선량계산:

$$E_{Dust} = C_{Air} O_{Out} Inh_{Sed} DC_{inh} \quad (4)$$

여기서, E_{Dust} 는 부유된 토양의 흡입으로 인한 연간 개인 선량($Sv y^{-1}$), C_{Air} 는 공기 중에 있는 방사성핵종 농도 ($Bq m^{-3}$), O_{Out} 은 오염된 토양에서의 개인 작업기간($h y^{-1}$), Inh_{Sed} 는 호흡에 대한 호흡률($m^3 h^{-1}$), DC_{inh} 는 호흡에 의한 선량환산계수($Sv Bq^{-1}$)를 나타낸다.

◎ 외부 피폭에 의한 선량계산 :

$$E_{ExSoil} = C_{Soil} O_{Out} DC_{Exts} \quad (5)$$

여기서, E_{ExSoil} 은 토양으로부터 외부 피폭에 의한 연간 개인 선량($Sv y^{-1}$), C_{Soil} 은 토양에서의 핵

중 농도(Bq m⁻³), O_{Out}는 오염된 토양에서 개별적 외부 피폭시간(h y⁻¹), DC_{Exis}는 외부 피폭에 의한 선량환산계수(Sv.h⁻¹/Bq.m⁻³)이다.

◎ 음용수 섭취에 대한 선량계산 :

$$E_{Wat} = C_{Wat} \text{Ing}_{Wat} DC_{Ing} \tag{6}$$

$$C_{Wat} = \frac{\text{Amount}_w}{\theta_w V_w R_w}$$

여기서, E_{Wat}는 음용수에 의한 선량(Sv y⁻¹)이며, C_{Wat}는 물에 녹아있는 방사성핵종의 농도(Bq m⁻³), Amount_w는 우물에서 양수한 물에 녹아있는 방사성핵종량(Bq), θ_w는 포화대에서의 유효공극률(-), V_w는 포화대의 체적(m³), R_w은 포화대에서의 지연인자(-)이며 Ing_{wat}는 연간 물 섭취량(m³ y⁻¹), DC_{Ing}는 섭취에 의한 선량환산계수(Sv Bq⁻¹)이다.

◎ 동물 섭취에 대한 선량계산 :

$$E_{Ann} = \chi_{Ann} \text{Ing}_{Ann} DC_{Ing}$$

$$\chi_{Ann} = CF_{Ann} (\chi_{Past} \text{Ing}_{Past} + C_w \text{Ing}_{AW} + \chi_{Wet} \text{Ing}_{ASoil})$$

$$\chi_{Past} = (CF_{Past} + S_{Past}) \chi_{Dry} + \frac{\mu_{Past} d_{irrig} C_w}{Y_{Past} \lambda_{Weather} + N_{Ann} \text{Ing}_{Past} 365} \tag{7}$$

여기서, E_{Ann}는 동물 가공품 소비에 의한 선량(Sv y⁻¹)이며 식(7)의 변수는 다음과 같다. χ_{Ann}는 가공품에 들어있는 핵종 농도(Bq kg⁻¹ fresh weight of product), Ing_{Ann}는 연간 가축 가공품 소비량(kg fresh weight of product y⁻¹), CF_{Ann}는 가축 가공품에 대한 농도인자(d kg⁻¹ fresh weight of product), χ_{past}는 목초에 있는 핵종농도(Bq kg⁻¹ fresh weight of pasture), Ing_{past}는 가축에 의한 목초 섭취량(kg fresh weight of pasture d⁻¹), C_w는 가축용 음용수에 녹아있는 핵종 농도 (Bq m⁻³), Ing_{AW}는 가축에 의한 물 섭취율(m³ d⁻¹), χ_{wet}는 습윤 토양에 들어있는 핵종 농도(Bq kg⁻¹), Ing_{ASoil}는 가축에 의한 토양 섭취율(kg wet weight of soil d⁻¹)을 나타낸다. 또한, CF_{Past}는 목초에 대한 농도인자(Bq kg⁻¹ fresh

weight of pasture per Bq kg⁻¹ dry weight of soil), S_{past}는 목초에 대한 토양오염(kg dry weight soil kg⁻¹ fresh weight of pasture), χ_{Dry}는 건조 토양에서의 핵종 오염(Bq kg⁻¹ dry weight soil), μ_{Past}는 목초용 관개수에 대한 차단율(-), d_{irrig}는 유효 관개수 깊이(m y⁻¹), Y_{Past}는 목초 수확량(kg fresh weight m⁻²), λ_{Weather}는 풍화작용으로 인한 농작물 관개수의 손실률(y⁻¹), N_{Ann}는 가축의 저장밀도(m²)를 나타내며, 365는 d¹를 y¹로 변환하기 위해 이용된 인자이다.

◎ 부주의한 토양 섭취에 대한 선량계산 :

$$E_{Sed} = \chi_{Wet} \text{Ing}_{Sed} DC_{Ing} \tag{8}$$

여기서, E_{Sed}는 토양 섭취로 인한 연간 개인 선량(Sv y⁻¹), χ_{wet}는 토양에서의 방사성핵종 농도(Bq kg⁻¹ wet weight), Ing_{Sed}는 부주의한 토양 섭취율(kg wet weight soil y⁻¹), DC_{Ing}는 섭취에 의한 선량환산계수(Sv Bq⁻¹)이다.

◎ 목욕에 의한 외부피폭 선량계산 :

$$E_{ExWat} = C_w O_{Wat} DC_{Extw} \tag{9}$$

여기서, E_{ExWat}는 목욕물로부터 외부피폭에 의한 연간 개인 선량(Sv y⁻¹), O_{Wat}는 목욕에 소요된 시간(h y⁻¹), DC_{Extw}는 목욕물로 인한 외부 피폭 선량환산계수(Sv.h⁻¹/Bq.m⁻³)를 나타낸다.

평가

처분고는 시설이 폐쇄된 후 100년이 지난 후 용기가 열화되기 시작하여 500년이 되면 완전히 파괴되는 것으로 설정하였으나, MASCOT 모델링에서는 시간의 경과에 따른 인공방벽 파손의 영향평가가 이루어지지 않기 때문에 500년에 완전 파괴된다는 가정 하에 평가를 수행하였다. 500년이 경과한 후 완전 붕괴된다고 보고 그 때 외부로부터 처분고내로 유입되는 침투율은 0.018 m y⁻¹으로 가정하였다. 따라서 안전성평가시 인공방벽의 분배계수는 열화된 이후의 값을 적용하였다. 처분시설은 지표면상에 위치한 20개의 콘크리트 처분고로 구성되어 있으며 처분시설내에 처분된 총 면적은 35,700 m²이다. 폐기물은 200ℓ 드럼에 처분되고 그라우트된 폐기물의 부피는 150,000 m³이며, 처분시설에는 전체 750,000 드럼(각 처분고 당 37,500 드럼)이 처분된다. 각 처분고의 높이와 넓이 및 길이는 각각 9 m, 20.5 m, 83 m

이며 처분고 하나 당 4×17×69개의 드럼이 적재된다(Fig. 2 참조).

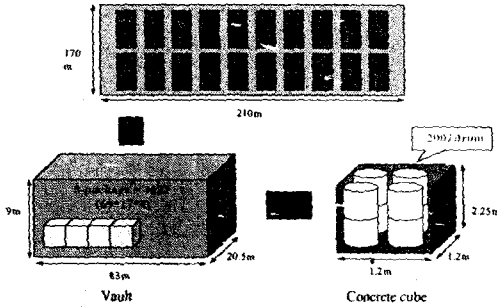


Fig. 2. The spatial layout of the disposal site

Table 4. Radionuclides, inventory at closure, and decay chains considered.

Parent	Inventory (Bq)	Daughters
² H	1 × 10 ¹⁵	
¹⁴ C	1 × 10 ¹³	
³⁸ Ni	2 × 10 ¹⁰	
⁶³ Ni	1 × 10 ¹⁵	
⁹⁰ Sr	1 × 10 ¹⁴	
⁹⁹ Tc	3 × 10 ¹⁰	
¹²⁹ I	6 × 10 ⁹	
¹³⁷ Cs	8 × 10 ¹⁵	
²³⁴ U	5 × 10 ¹⁰	²³⁰ Th → ²²⁶ Ra → ²¹⁰ Pb → ²¹⁰ Po
²³⁸ U	5 × 10 ¹⁰	²³⁴ U → ²³⁰ Th → ²²⁶ Ra → ²¹⁰ Pb → ²¹⁰ Po
²³⁸ Pu	2 × 10 ¹⁰	²³⁴ U → ²³⁰ Th → ²²⁶ Ra → ²¹⁰ Pb → ²¹⁰ Po
²³⁹ Pu	3 × 10 ¹⁰	²³⁵ U → ²³¹ Pa → ²²⁷ Ac
²⁴¹ Pu	6 × 10 ¹¹	²⁴¹ Am → ²³⁷ Np → ²³³ Pa → ²²⁹ Th
²⁴¹ Am	2 × 10 ¹⁰	²³⁷ Np → ²³³ Pa → ²²⁹ Th

분석에 이용된 방사성 모핵종은 14종이고 방사성 붕괴사슬과 딸핵종의 생성을 고려하였으며, 핵종별 초기 재고량(inventory)은 Table 4에 제시된 바와 같다. 인공방벽으로부터 유출된 핵종은 red sand, brown sand, white kaolinite clay 및 granite의 4부분의 다른 물성을 가진 55 m 두께의 불포화대를 지나 수리경사가 0.1인 300 m 길이의 포화대를 지난다고 가정하였다. 포화대에서의 지하수 유동은 균열을 통한 흐름이며 핵종은 균열 벽면에 흡착되는 것으로 가정된다. 포화대에

서의 일련의 균열은 하나의 유동관(streamtube)으로 표현된다. 이 유동관을 통한 지하수량은 2160 m³ y⁻¹이다. 부지특성 자료에 따르면 우물로 유입되는 지하수 총량은 8300 m³ y⁻¹이다. 그러므로 나머지 6140 m³ y⁻¹은 오염되지 않은 지하수량이며, 인간이 음용수로 이용하는 물 소비량은 연간 0.8 m³ y⁻¹이다. 음용수 이외에 거주지역에서 가축사육으로부터 얻어진 육류와 유제품 섭취 및 부주의한 토양섭취 그리고 흡입을 통한 간접피폭 및 목욕을 통한 외부피폭 등을 고려하여 선량평가를 하였다.

결과 및 고찰

Fig. 3은 처분고로부터 불포화대로의 핵종 유출률(flux)을 보여준다. 폐쇄 후 500년에 처분고가 붕괴되어 핵종의 침출이 시작되는데 유동성이 큰 핵종(예를 들면, ³H, ⁹⁰Sr)이 침출율이 크고 이동 속도가 빠르므로 대략 1,000년 이내에 모두 유출되는 것을 알 수 있다.

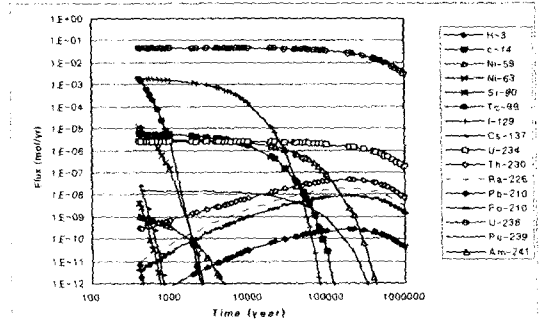


Fig. 3. Flux of radionuclides from the repository to the unsaturated zone as a function of time

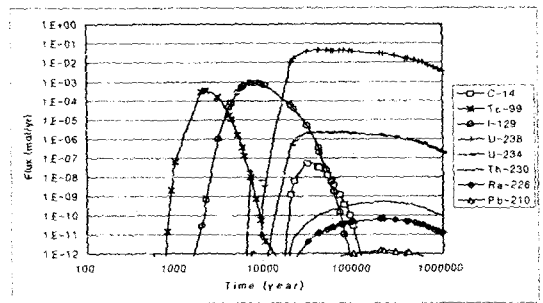


Fig. 4. The flux of radionuclides from unsaturated zone to saturated zone as a function of time.

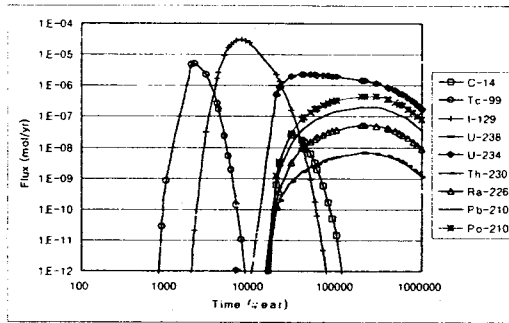


Fig. 5. The flux of radionuclides in the well water as a function of time

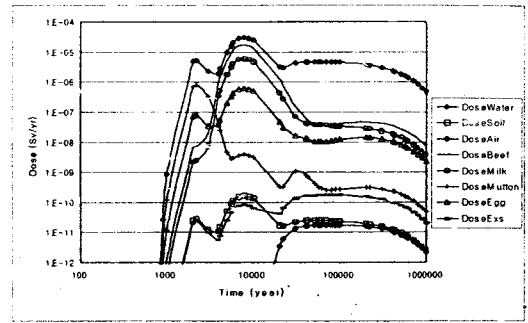


Fig. 7. The individual dose of biosphere as a function of time

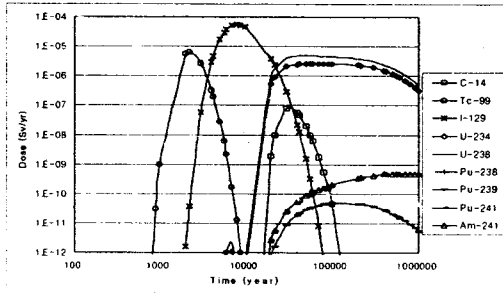


Fig. 6. The annual individual effective dose to the critical group for each radionuclide over all exposure pathways

Fig. 4는 불포화대로부터 포화대로의 유출률을 보여준다. 불포화대와 포화대를 통과하면서 핵종마다 고유한 특성에 따라 지연되고 붕괴되며 ^{14}C , ^{129}I , ^{99}Tc , ^{234}U 및 ^{238}U 과 같은 장수명의 유동성이 큰 핵종이 유출률을 주도한다. 또한 우라늄 동위원소의 딸핵종들도 보이거나 모핵종에 비해 낮은 농도치를 나타낸다. Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 상기한 농일 핵종들이 우물물에서 높은 농도치를 보여 준다. 그리고 ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po 와 같은 우라늄 동위원소의 딸핵종은 보다 낮은 농도치를 나타내며 ^{234}U 곡선은 ^{238}U 곡선과 중첩된다. Fig. 6은 주요 핵종들이 모든 피폭 경로를 통해

Table 5. Comparison of the results of MASCOT and AMBER for timing and magnitude of peak doses for each radionuclide disposed.

Radio-nuclide	MASCOT			AMBER		
	Peak Time (year)	Peak drinking water ingestion dose(Sv/yr)	Peak Total Dose(Sv/yr)	Peak Time (year)	Peak drinking water ingestion Dose(Sv/yr)	Peak Total Dose(Sv/yr)
H-3	560	9.24×10^{-19}	1.93×10^{-18}	500	6.1×10^{-19}	5×10^{-18}
C-14	30,000	2.54×10^{-8}	7.97×10^{-8}	30,000	2.1×10^{-8}	7.7×10^{-7}
Ni-59	1,000,000	1.06×10^{-16}	1.48×10^{-16}	1,000,000	8.5×10^{-17}	2.9×10^{-16}
Ni-63	-	-	-	-	-	-
Sr-90	-	-	-	-	-	-
Tc-99	2,200	5.36×10^{-6}	6.23×10^{-6}	2,500	1.2×10^{-6}	3.3×10^{-6}
I-129	8,000	3.13×10^{-5}	5.47×10^{-5}	8,000	1.5×10^{-5}	2.7×10^{-5}
Cs-137	-	-	-	-	-	-
U-234	50,000	2.49×10^{-6}	2.53×10^{-6}	50,000	2.3×10^{-6}	2.9×10^{-6}
U-238	50,000	4.71×10^{-6}	4.78×10^{-6}	50,000	2.4×10^{-6}	3.1×10^{-6}
Pu-238	50,000	2.49×10^{-6}	2.53×10^{-6}	50,000	3.0×10^{-10}	4.1×10^{-10}
Pu-239	100,000	4.73×10^{-11}	4.79×10^{-11}	90,000	3.8×10^{-11}	5.7×10^{-11}
Pu-241	600,000	4.83×10^{-10}	4.89×10^{-10}	200,000	8.3×10^{-11}	1.2×10^{-10}
Am-241	600,000	4.83×10^{-10}	4.89×10^{-10}	200,000	8.3×10^{-11}	1.2×10^{-10}
TOTAL	80,000	3.13×10^{-5}	5.47×10^{-5}	80,000	1.5×10^{-5}	2.7×10^{-5}

결정집단(critical group)에 미치는 연간유효선량을 보여준다. 선량은 장수명 유동성 핵종과 이들 핵종의 딸핵종에 큰 영향을 받는다. ^{99}Tc 의 농도치는 매우 높은 값을 보이지만 전체 유효선량에 미치는 ^{99}Tc 의 영향은 그 만큼 높지 않다. 이는 선량환산계수(dose conversion coefficient)가 ^{129}I 나 ^{210}Po 에 비해서 상대적으로 크지 않은 이유에 기인한다. 그리고 인공방벽이나 자연방벽의 영향으로 단수명 유동성 핵종의 영향은 무시할 수 있는 정도이다. 당연한 결과이긴 하지만 Fig. 7에 제시된 것처럼 섭취에 의한 영향 특히 음용수에 의한 영향이 다른 경로를 통한 피폭보다 더 위대한 것으로 나타났다. Table 5에는 모든 핵종에 대한 최고 농도치와 음용수 섭취에 대한 선량값을 비롯하여 최대값일 때의 시간을 함께 표시하였다. 또한 이를 구획모델을 사용하는 대표적인 방사성폐기물 처분 안전성평가 프로그램인 AMBER [5]의 결과와 비교하여 정리하였다. 해석 결과로부터 음용수에 대한 전체 유효선량은 AMBER 결과와 비교해보았을 때 대략 2배정도 높게 평가되었으나 방사성폐기물 처분시설의 일반적인 기준치 이하임을 알 수 있다. 차이가 나는 것은 시간변화에 따른 처분고 및 덮개외 열화를 고려하는 방식 때문인 것으로 판단된다. AMBER에서는 폐쇄 후 100년이 지난 후부터 500년까지 강우 침투율을 $1.8 \times 10^3 \text{ m/y}$ 에서 $1.8 \times 10^2 \text{ m/y}$ 로 선형적으로 변하는 것으로 가정하였고, IAEA 자료로부터 인공방벽의 분배계수도 열화되기 이전과 이후의 값을 폐쇄직후와 폐쇄 후 1,000년 사이에서 선형적으로 변화하는 것으로 가정하였다. 반면 MASCOT에서는 열화가 일어나는 시기를 폐쇄 후 500년으로 가정하고 이때의 침투율을 $1.8 \times 10^2 \text{ m/y}$ 로 가정하였으며 분배계수도 열화된 이후의 값을 적용하였다. 그래프에서 알 수 있듯이 1,000,000년 동안 세 번의 최대치가 나타난다. 그 최대 유효선량값에 대한 상세한 결과가 Table 5에 제시되어 있다. 2,200년에 첫 번째 발생하는 최대 선량값($6.23 \times 10^6 \text{ Sv y}^{-1}$)은 ^{99}Tc 에 의한 것이며, 처분고 전체의 안전성에 영향을 미치는 핵종은 약 8,000년에 발생하는 최대 선량값이 $5.47 \times 10^5 \text{ Sv y}^{-1}$ 인 ^{129}I 의 영향이다. 그 후 마지막 최대 유효선량값을 보이는 핵종은 우라늄계열로 이들 핵종은 딸핵종의 영향을 고려하여 ^{234}U 과 ^{238}U 이 각각 $2.53 \times 10^6 \text{ Sv y}^{-1}$, $4.78 \times 10^6 \text{ Sv y}^{-1}$ 으로 평가되었다. 결국 모든 피폭경로에서 가장 중요한 요인은 음용수에 의한 영향이 가장 큰 것으로 분석되었으며, 고려한 피폭경로와 핵종에 대

한 최종 선량평가 결과 최대 선량값은 $5.47 \times 10^5 \text{ Sv y}^{-1}$ 로 ICRP 81 [6]에서 제시한 $3 \times 10^4 \text{ Sv y}^{-1}$ 의 권고치 이하임을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 구획모델을 이용한 지하수 유동경로에 대한 대표적인 개념모델이 총체적인 처분시스템의 안전성평가에 만족스럽게 이용될 수 있음을 알 수 있다.

결론

기준 천층처분시설 안전성평가 자료를 바탕으로 처분고로부터 지하수유동경로에 따라 유출된 핵종이 인간에게 미치는 방사선적 영향을 MASCOT을 사용하여 평가하고 AMBER의 결과와 비교 분석하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 구획모델을 이용하여 개발된 기준 지하수 시나리오에 대한 대표적인 개념모델은 총체적인 처분시스템의 안전성평가에 만족스럽게 이용될 수 있다고 판단된다.
2. 모든 피폭경로를 고려한 최대 선량값을 MASCOT과 AMBER에 대해 비교해보면 각각 $5.47 \times 10^5 \text{ Sv y}^{-1}$ 와 $2.7 \times 10^5 \text{ Sv y}^{-1}$ 로 분석되었다. 이는 시간변화에 따른 인공방벽의 열화현상 고려시 각 코드계산에서 침투율과 분배계수를 다르게 적용하였기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 중저준위 폐기물 천층처분시설에 대한 안전성평가 시 불확실성을 줄이기 위해서는 이에 대한 보완이 필요하다.
3. MASCOT은 주로 포화대를 통한 지하수이동으로부터 음용수 섭취에 대한 단순한 평가를 하는데 이용되어 왔으며, 또한 생태계 분석 시에는 외부 코드로부터 계산된 결과를 입력자료로 사용하였다. 그러나 본 연구에서는 MASCOT 코드에 생태계모델에 필요한 수학적 모델과 입력자료를 작성하여 계산함으로써 MASCOT 코드만으로도 좀더 복잡하고 다양한 이동경로를 통한 처분장의 방사선적 안전성평가가 가능함을 보였다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부가 주관하는 국가 중장기 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. IAEA, "Vault Safety Case Data for the

- Liquid Release Calculations for the Design Scenario”, ISAM Vault Safety Group, Vienna, December(2000).
2. C. L. Kim, J. W. Park, K. Chang, and E. Y. Lee, “Analysis Results on Vault Safety Case - Groundwater Pathway”, IAEA ISAM Vault Safety Case Group - 5th Meeting, Brussel, Belgium, April(2001).
 3. J. W. Park, K. M. Chang, and C. L. Kim, “A Case Study on the Safety Assessment for Groundwater Pathway in a Near-Surface Radioactive Waste Disposal Facility”, Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Seoul, Korea, October(2001).
 4. J. E. Sinclair, P. C. Robinson, N. S. Cooper, K. J. Worgan and K. A. Cliffe, “MASCOT and MOP Programs for Probabilistic Safety Assessment”, PART B, NSS/R336, AEA-D&R-0476, pp.2~29(1994).
 5. R. H. Little, “Implementation of the Vault Safety Case Liquid Release Scenario in AMBER”, IAEA ISAM Vault Safety Case Group - 5th Meeting, Brussel, Belgium (2001).
 6. ICRP, “Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste”, International Commission on Radiological Protection Publication 81, Pergamon Press, Oxford(1998).