

고준위 방사성 폐기물 처분장 기준 생태계에서의 선량 환산 인자 평가

Assessment of Dose Conversion Factors in a Generic Biosphere of a Korea
HLW Repository

황 용수, 박 진백, 강 철형

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

방사성폐기물 처분장에서 유출된 방사성 핵종들은 공학적, 천연 방벽을 거쳐 생태계로 이동한 후 다양한 섭생 경로를 통하여 최종적으로 인간에게 전달된다. 우선 국내 기후 지질 및 생태계 조건들을 고려하여 처분장 폐쇄 후 장기 성능 평가에서 고려할 평가 대상 생태계들을 도출하여 각각에 대해 RES를 개발하였다. 생태계 내의 핵종 이동을 정확하게 묘사하여 처분장 성능 평가에 필요한 선량 환산 인자를 평가하기 위하여 피폭 그룹을 농업, 담수 수산물, 해양 수산물 사용 그룹으로 구분한 후 섭취 경로를 대상으로 섭취, 음용, 호흡, 외부 피폭에 따른 선량 환산 인자를 AMBER 코드를 이용하여 평가하였다. 본 연구에서 도출된 선량 평가 인자들은 처분장 성능 평가에 활용될 예정이다.

Abstract

Radioactive species released from a waste repository migrate through engineered and natural barriers and eventually reach the biosphere. Once entered the biosphere, contaminants transport various exposure pathways and finally reach a human. In this study the full RES matrix explaining the key compartments in the biosphere and their interactions is introduced considering the characteristics of the Korean biosphere. Then the three exposure groups are identified based on the compartments of interest. The full exposure pathways and corresponding mathematical expression for mass transfer coefficients and etc are developed and applied to assess the dose conversion factors of nuclides for a specific exposure group. Dose conversion factors assessed in this study will be used for total system performance assessment of a potential Korean HLW repository.

1. 생태계 평가를 위한 시나리오 및 RES 도출

고준위 방사성 폐기물 처분 성능 평가를 위한 연구에서 최종적으로 처분장 건설, 운영, 폐쇄 후 성능을 정량적으로 평가하기 위해서는 처분 용기에 거치된 후 심부 암반에 매립된 방사성 핵종들이 공학적, 천연 방벽을 통하여 생태계로 유출된 후 이동 과정을 이해하는 것

이 필요하다. 국내 생태계의 특성은 서구 여러 나라와 여러 점에서 다르다. 국내 처분장이 수송 편의성 등을 고려하여 임해에 건설된다면 특히 해양 생태계에서 채집되는 어류 및 해조류들을 통한 핵종 전이 과정에 대한 이해가 필요하다. 생태계에서의 방사성 핵종 이동 평가는 원자력 발전소 건설 및 운영 인허가 과정에서 일부 다루어 졌으나 평가 대상 핵종들이 다르기 때문에 평가 방법론 및 결과들이 매우 다르게 나타나게 된다. 원전 생태계 평가에서는 대기를 통한 이동과 해양에서의 이동을 다룰 때 대상 핵종들의 반감기가 비교적 짧으나 처분장 생태계 평가에서는 평가 대상들의 반감기가 길다. 또한 핵종들의 반감기가 길기 때문에 심부 토양에서 천부 토양으로의 장시간에 걸친 이동 등 원전 생태계에서는 요구되지 않았던 부분에 대한 평가가 필요하다.

본 연구에서는 생태계 평가를 위하여 고준위 방사성 폐기물 성능 평가 시간대(time frame)에서 발생 가능한 생태계와 관련된 시나리오들을 도출하고 이들 시나리오에 대해 자세한 RES(Rock Engineering System)[Hudson 1992] 행렬을 개발하여 생태계 평가를 위한 개념 설정에 활용하였다. 즉 생태계에서 다루어야 할 주요 FEP을 13개로 구분하였는데 이들은 (1) 생태계로 유입되는 선원항, (2) 천부 대수층(near surface aquifer), (3) 천부수(surface water), (4) 퇴적층(sediment), (5) 가변충전층(variably saturated zone), (6) 표토층(surface soil), (7) 대기층, (8) 식물군, (9) 동물군, (10) 연안 해수, (11) 연안 퇴적층, (12) 핵종 이동과 연관된 인간 행동, (13) 인간 피폭 모델이다. 생태계 RES에는 이러한 13 FEP을 LDE(leading diagonal element)로 선정하고 ODE(off diagonal element)에는 각 LDE 간의 상호 반응을 표기하였다. 이와 같이 도출된 RES에서는 생태계로 유입된 선원항이 토양, 동식물 등 다양한 개체를 통하여 최종적으로 인간 피폭 단계로 도달하는 과정을 모사한 것으로 생태계에서의 핵종 이동을 정량적으로 평가하기 위해 활용된다.

한국원자력연구소에서는 생태계 평가를 위해 우물, 강 등 기본 생태계에 대한 RES를 도출하였으며 이외에도 처분장 장기 성능 평가를 위한 기후 변화를 고려한 생태계에 대한 RES를 도출하였다. 본 연구에서는 이와 같이 도출된 RES 중 가장 기본이 되는 강 생태계에 대한 선량 환산 인자 평가를 정량적으로 수행하였다. 그림 1은 본 연구에서 활용된 RES를 도시한 것이다.

2. 기준 생태계 고찰

생태계 내에서의 방사성 물질 이동을 정량적으로 평가하기 위해서는 대상 생태계 내 각 LDE 들간의 상호 영향을 정확하게 이해하는 것이 필수적이다. 그림 2는 기준 생태계 내 LDE들을 구획 개념으로 표시 한 후 각 구획(compartment) 간의 상호 반응을 도시한 것이다. 이와 같은 작업을 통하여 생태계 내의 물질 이동 주요 경로들이 도출되었다.

이제 남은 과정은 도출된 물질 이동 경로에 따른 인간 피폭 경로를 보다 자세하게 이해하는 것이다. 그림 2에서 도시된 상호 반응을 통하여 주어진 생태계 환경에서는 농업 활동을 통한 피폭, 담수에서의 어류 채취 활동을 통한 피폭 및 해수에서의 해산물 채취 활동을 통한 피폭 등 3가지 그룹으로 인간 피폭 과정이 구분된다. 이와 같은 3 가지 피폭 그룹은 국내 생태계 특성을 고려할 때 가장 대표적인 피폭 그룹이다. 이와 같이 구분된 피폭 그룹들에 대한 방사성 물질 섭취 경로를 도출하면 표 1과 같다. 이와 같이 도출된 방사성 물질 섭취 경로를 그림 2에서 도시된 구획들과 연계하여 도시하면 그림 3과 같다.

표 1. 기준 생태계 시나리오에서 피폭 그룹 별 섭취 경로

Intake pathway (섭취경로)		Farming (농업)	Freshwater fishing (담수 수산물)	Marine fishing (해양수산물)
Ingestion (섭취)	Crops (농작물)	<ul style="list-style-type: none"> Grains (곡류) Rice (쌀) Green vegetables Root vegetables Fruit (과일) 		
	Animal products/Aquatic food-stuffs (농수산물)	<ul style="list-style-type: none"> Beef, Cow liver, Cow milk (소고기, 소간, 우유) Pork (돼지고기) Mutton (양고기) Chicken, chicken liver, chicken eggs (닭고기, 간, 계란) 	<ul style="list-style-type: none"> Freshwater fish (민물고기) Freshwater crustaceans (민물갑각류) 	<ul style="list-style-type: none"> Marine fish (바다고기) Marine crustaceans (바다갑각류) Marine molluscs (바다 연체류) Seaweed (해조류)
	Others (기타)	<ul style="list-style-type: none"> Water Soil 	<ul style="list-style-type: none"> Water Sediment 	<ul style="list-style-type: none"> Sediment
Inhalation (흡입)		Dust	Dust	Dust
External irradiation (외부피폭)		<ul style="list-style-type: none"> Water Soil 	<ul style="list-style-type: none"> Water Sediment 	<ul style="list-style-type: none"> Water Sediment

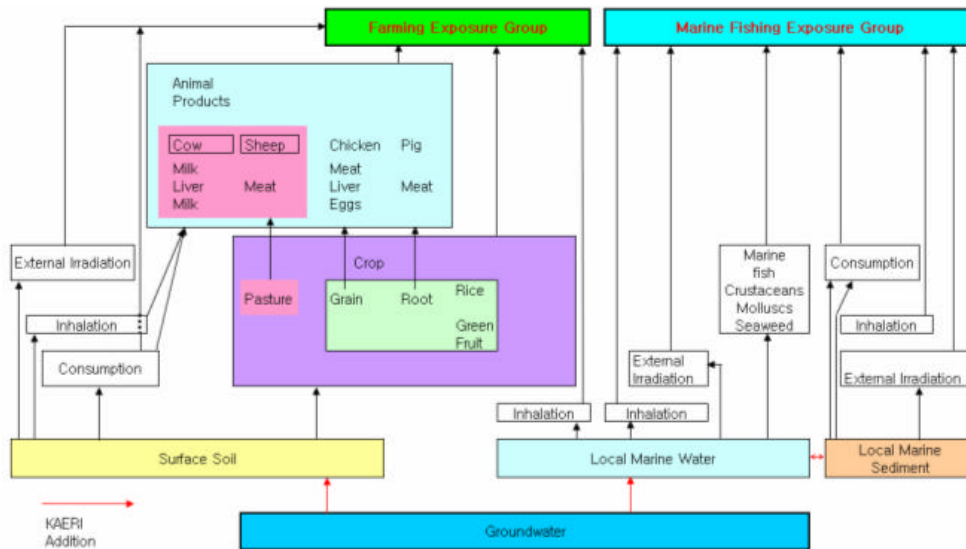


그림 3. 생태계 내 피폭 경로 도시도

기준 생태계의 핵종 이동을 설명한 수학적 모델은 그림 4에 도시된 바와 같이 구획간의 물질 수지 식에 따라 이루어지며 피폭경로에 대한 수식들은 한 구획 또는 구획 내 대상에 대한 핵종 농도에 대하여 관련 구획과 핵종 농도 평형에 있다고 가정하여 작성한다.

수학적 모델링은 AMBER 4.4[EnvirosQuantisci 2002] 프로그램을 이용하여 수행되었는데, AMBER 프로그램은 영국, 스페인 그리고 미국에서 사용되며 국제 공동연구 BIOMOVs II [SKI, 1996] 및 ISAM[IAEA, 2001]에서 다른 생태계 평가 코드들을 이용하여 검증되었다.

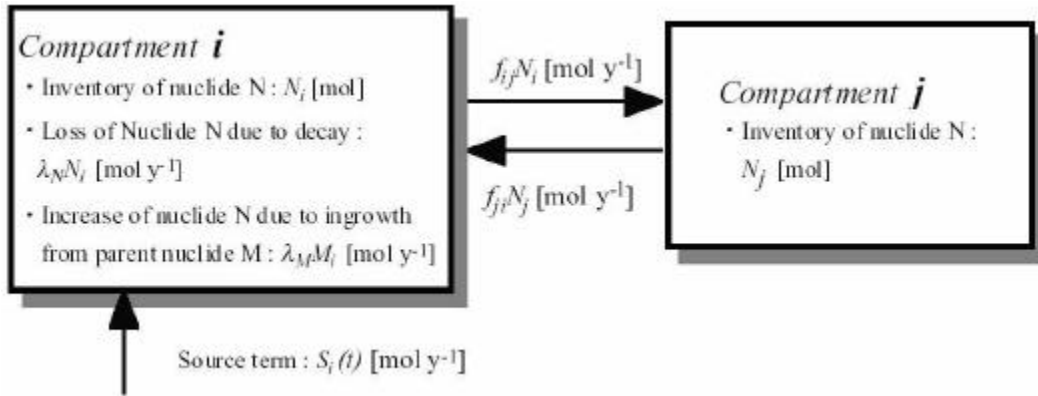


그림 4. 구획사이에 물질 수지를 이용한 수학적 모델의 방법

구획 i 에 존재하는 방사성핵종 N [mol] (N_i)에 대한 보존방정식은 아래와 같다.

$$\frac{dN_i}{dt} = \left[\sum_{j \neq i} f_{ji} N_j + \lambda_M M_i + S_i(t) \right] - \left[\sum_{j \neq i} f_{ij} N_i + \lambda_N N_i \right] \quad (1)$$

여기서,

- N_i : 구획 i 에 존재하는 방사성핵종 N 의 양 [mol],
- N_j : 구획 j 에 존재하는 방사성핵종 N 의 양 [mol],
- M_i : 핵종 N 의 모핵종으로 구획 i 에 존재하는 핵종 M 의 양 [mol],
- $S(t)$: 구획 i 로 유입되는 핵종 N 의 선원항 유입율 [mol/y],
- λ_M : 핵종 M 의 붕괴상수 [1/y],
- λ_N : 핵종 N 의 붕괴상수 [1/y],
- f_{ji} : 구획 j 에서 구획 i 로 이동하는 핵종 N 의 전달계수 [1/y],
- f_{ij} : 구획 i 에서 구획 j 로 이동하는 핵종 N 의 전달계수 [1/y],

피폭선량의 계산을 위한 피폭경로는 세 개의 경우로 나뉘어진다. 즉, 섭취(ingestion)에 의한 내부피폭 (internal exposure), 흡입 (inhalation)에 의한 내부피폭 그리고 외부피폭 (external exposure)으로 나뉘어진다. 각각의 피폭경로를 통한 연간 개인피폭선량은 각 구획의 핵종에 따라 아래의 식들을 이용하여 구한다.

- 섭취 (ingestion)에 의한 내부피폭: D_{ing} [Sv/y]

$$D_{ing} = DCF_{ing} \cdot ING \cdot C_{ing} \quad (2)$$

여기서

- DCF_{ing} : 섭취에 대한 선량환산인자 (Dose Conversion Factor) [Sv/Bq],
- ING : 음식 등 연간 개인이 섭취한 양 [Kg/y],
- C_{ing} : 개인이 섭취한 음식 등에 존재하는 핵종의 농도 [Bq/kg 또는 Bq/m³],

- 흡입 (inhalation)에 의한 내부피폭: D_{inh} [Sv/y]

$$D_{inh} = DCF_{inh} \cdot BR_{comp} \cdot O_{comp} \cdot C_{inh} \quad (3)$$

여기서

- DCF_{inh} : 섭취 (inhalation)에 대한 선량환산인자 [Sv/Bq],
- BR_{comp} : 섭취율 [m^3/h],
- O_{comp} : 점유율 (occupancy) [h/y]
- C_{inh} : 개인이 흡입한 공기 등에 존재하는 핵종의 농도 [Bq/kg 또는 Bq/m^3],

- 외부피폭 (external dose): D_{ext} [Sv/y]

$$D_{ext} = DCF_{ext} \cdot O_{comp} \cdot C_{ext} \quad (4)$$

여기서

- DCF_{ext} : 외부피폭에 대한 선량환산인자 [(Sv/h)/(Bq/ m^3)],
- O_{ext} : 점유율 [h/y],
- C_{ext} : 외부방사선을 방출하는 물 또는 흙에 존재하는 핵종농도 [Bq/m^3].

4. 입력 인자 도출 및 AMBER를 이용한 평가

구획 모델링 평가를 위한 주요 입력 인자들은 국내 관련 보고서[보건복지부, 1999] 및 H12 보고서[JNC, 1999] 등 해외 문헌 조사를 통하여 수집되었다. 표 2는 수집된 입력 자료들의 일부를 정리한 것이다. 표 2에 도시된 입력 자료와 AMBER를 이용하여 선량 환산 인자 평가가 수행되었다. 그림 5는 AMBER 프로그램 상에서 고려한 구획들을 도시한 것이다. 그림 5에서 도시된 바와 같이 각 구획 간의 핵종 이동은 핵종 전이 계수(mass transfer coefficient)로 구현되는데 이를 위한 상세 수식들이 개발 입력되었다. 그림 6은 지표 토양층 구획 내의 핵종량을 각 핵종 별로 도시한 것이다.

표 2. 생태계 평가를 위해 사용된 입력 자료 (in part)

Human Parameters Database			H12	H12/1
1	Area of the Compartment (m^2)	A_comp		
	Coastal marine sediment	Coastal_Sed	2.00E+00	2.00E+00
	Fresh sediment	Fresh_Sed	1.00E+04	1.00E+04
	Coastal marine water	Coastal_Water	1.00E+00	1.00E+00
	Fresh water	Fresh_Water	1.00E+04	1.00E+04
	Vertical zone	VertZone	1.00E+04	1.00E+04
	Surface soil	Surface_Soil	1.00E+04	1.00E+04
2	Respiratory rate in the area (m^3/h)	Rr_area	1.00E+11	1.00E+11
3	Respiratory rate of animal (m^3/h)	Rr_Annimal		
	Chicken		1.00E+00	1.00E+00
	Pig		4.00E+01	4.00E+01
	Sheep		1.00E+01	1.00E+01
	Cow		6.40E+01	6.40E+01
	Others		0.00E+00	0.00E+00
4	Human breathing rate (m^3/h)	Rr_Human		
	Indoor breathing group in Total sediments		1.00E+00	1.00E+00
	Indoor breathing group in Total water		1.00E+00	1.00E+00
	For fishing group in Total sediments		0.00E+00	0.00E+00
	For fishing group in Total water		0.00E+00	0.00E+00
	For fishing group in Fresh sediments		1.00E+00	1.00E+00
	For fishing group in Fresh water		1.00E+00	1.00E+00
	Foraging group in Soil		4.00E+01	4.00E+01
	Foraging group in Surface soil		1.00E+00	1.00E+00
5	Respiratory rate in the area (m^3/h)	Rr_Area	1.00E+00	1.00E+00
6	Diffusion rate by advection (m^2/h)	D_Adv		
	In total sediment		1.00E+00	1.00E+00
	Others		0.00E+00	0.00E+00
10	Depth of dispersion (m)	D_Deep		
	Others		7.00E+01	7.00E+01
	Coal		1.00E+01	1.00E+01
	Clay		1.00E+01	1.00E+01
	Pyrite		0.00E+00	0.00E+00
	Uran		1.00E+00	1.00E+00
	Spentine		1.00E+01	1.00E+01
	Sootings		1.00E+01	1.00E+01
11	Emission rate (m/y)	E_Rate	1.00E+04	1.00E+04

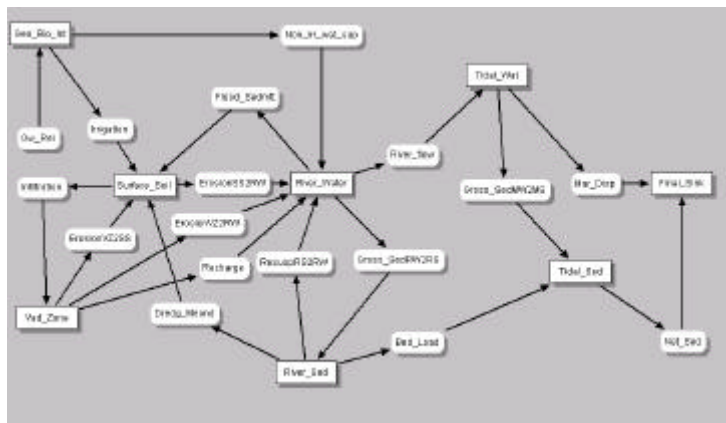


그림 5. 기준 생태계 평가를 위한 구획 및 핵종 전이 계수 설정 개념도

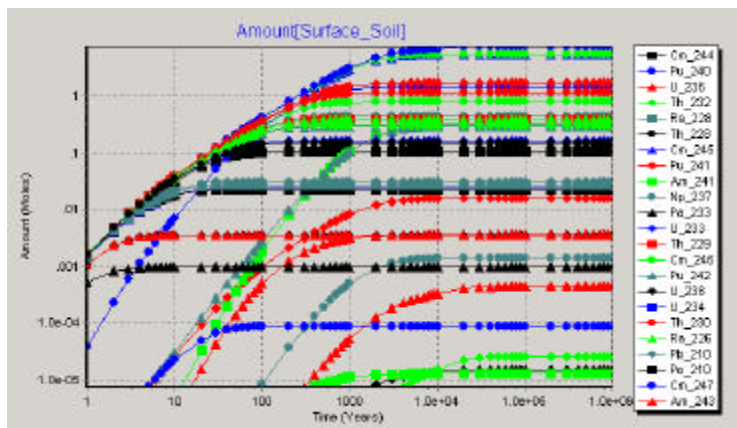


그림 6. 토양층 내에 축적된 핵종 량

그림 7은 농업에 종사하는 피폭 그룹을 대상으로 연간 단위 베크럴의 방사선원이 생태계로 유입될 경우 모든 피폭 경로를 고려한 선량 환산인자이다.

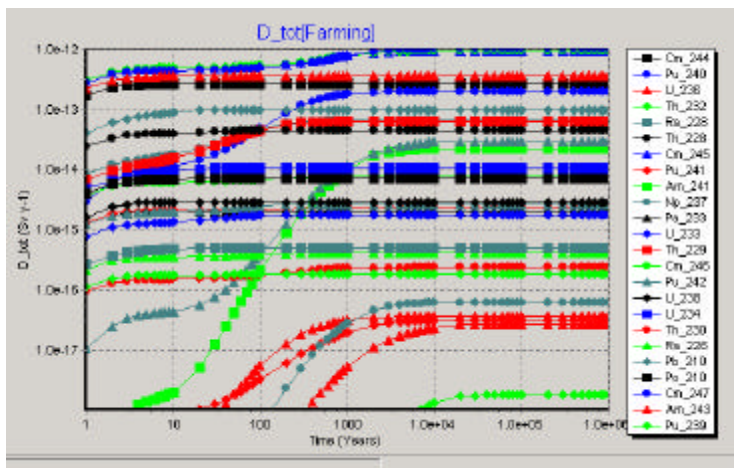


그림 7. 농업 종사자 그룹에 대한 선량 환산 인자

이와 같은 방법으로 기준 생태계에 대한 각 피폭 그룹별 특정 핵종들에 대한 선량 환산 인자가 도출되었고 음용수 섭취 등 개별 주요 활동이 선량 증가에 미치는 영향 등이 평가되었다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 고준위 방사성 폐기물 처분장 성능 평가를 위한 기준 생태계에 대한 개념을 정립하고 관련 상호 반응 및 피폭 경로를 도출하였다. 도출된 경로를 구획 개념을 도입하여 표시 한 후 각 구획간의 물질 이동에 관해 수학적인 개념 모델을 개발하였다.

섭취/호흡/외부 피폭과 같은 섭취 경로에 대해 처분장 주변 생태계에 거주하는 주민들을 농업 종사자, 담해수 어업 활동 종사자로 구분한 다음 각 피폭 그룹에 대해 선량 환산 인자를 평가하였다. 금번 연구를 통해 산출된 선량 환산인자들은 향후 처분 종합 성능 평가 연구에 활용될 예정이다. 후속 연구를 통하여 국내 생태계에 대한 상세 입력 자료들을 도출하고 다양한 생태계에 대한 선량 환산 인자들을 평가할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 국가 중장기 원자력 연구 개발 사업의 일환으로 추진되었습니다.

참고 문헌

1. 보건복지부 1999, "1998년도 국민건강·영양조사 결과보고서 - 계절별 영양조사", 한국보건산업진흥원, 보건복지부
2. Hudson, J. 1992, "Rock Engineering Systems: Theory and Practice", Ellis Horwood, Chichester.
3. IAEA, 2001, "Safety Assessment Methodologies for Near Surface Radioactive Waste Disposal Facilities: Example Safety Assessment Exercise", Version 0.1, 6 November 2001.
4. JNC 1999, "H12 Project to Establish Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Project Overview Report", Japan.
5. EnvirosQuantisci 2002, "AMBER 4.4 Getting Started", United Kingdom
6. SKI, 1996, "Biosphere Modelling for Dose Assessments of Radioactive Waste Repositories", BIOMOVs II Technical Report No.12, Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm, Sweden.