2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

천층처분 시설배치에 따른 안전성평가 모델링 영향분석

Repository Layout-dependent Radionuclide Transport Analyses for Near-Surface LILW Disposal

박주완, 박진백, 이은용, 김창락
한국수력원자력㈜ 원자력환경기술원
대전광역시 유성우체국 사서함 149호

요 약

중저준위폐기물 천층처분시설의 최적 배치를 결정하기 위하여 4가지 형태의 처분볼트 배치에 대한 지질-생태계 경계(Geosphere-Biosphere Interface)에서의 핵종농도와 유출율을 비교하였다. 해석에는 구획모델링(compartment modeling)기법을 적용한 SAGE 코드를 사용하였으며, 가상 선원항과 가상부지의 수리지질 조건을 가정하였다. 해석 결과, 전체 처분장 평균화모델에서 지하수 유동방향을 달리한 경우, 지질-생태계 경계에서의 농도가 지하수유동방향에 수직한 처분장 폭에 반비례하므로 처분장 배치시 이를 크게하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 또한 선원항이 상대적으로 큰 폐기물이 처분되는 경우에는 해석결과의 보수성 측면에서 처분볼트 평균화모델이 처분장 평균화모델보다 적합함을 알 수 있었다.

ABSTRACT

In order to find optimum arrangement of vaults in the repository area for lowest flux and concentration at Geosphere-Biosphere Interface, near- and far-fields radionuclide transport modeling were performed for four repository layout options. Assessment was made by SAGE code, which adopts the compartment modeling approach, together with hypothetical source-term inventory and hydrologic parameters of an arbitrary repository site. The results showed that it is desirable to enlarge the dimension of the disposal vaults perpendicular to the aquifer flow, for repository-averaged modeling, because the well concentration is inversely proportional to the disposal vault width. For the disposal of wastes with different source-term, it is preferable to use vault-averaged modeling than to use repository-averaged modeling, for the former provides more conservative results.

1. 서 론

국내 원전에서는 다양한 형태의 중저준위폐기물 고화체와 포장용기가 생성되고 있으며 따라서 중저준위폐기물의 천층 처분시설은 폐기물의 농도, 포장용기의 형태 및 재질, 폐기물의 취급상 요건, 처분시의 적합성 등을 고려하여 적절히 처분볼트내에 분류, 적재하도록 설계되어야 한다. 한편, 이러한 처분볼트의 분류와 더불어 처분장 폐쇄후 안전성에 미치는 인자를 분석하여 처분시설 설계의 최적화를 도모할 필요가 있다. 중저준위 방사성폐기물 처분장의 안전성 평가에서는 처분장 폐쇄후 처분시설내의 방사성핵종이 어떻게 누출되어 인간 생활권에 영향을 미치는 가를 평가하기 위한 첫 단계로서 누출가능한 경로를 선별하기 위한 시나리오 분석이 수행되며, 이 시나리오 분석 결과로부터 도출된 정상누출경로로서 지하수 유동경로를 통한 핵종이동 시나리오(지하수 이동 시나리오)가 이용되고 있다. 천층처분시설에서의 지하수 이동시나리오에서는 처분시설 폐쇄후 처분덮개 등 인공방벽이 기능을 상실하여 공극이나 균열을 통해서 침투한 지하수가 처분볼트내의 폐기물 포장용기를 부식시키고 충전재를 통과하여 침투수에 의해 폐기물 고화체 내의 방사성 핵종이 침출되며, 처분고로부터 누출된 핵종은 지하수 경로를 따라 이류와 분산에 의하여 하부 지층으로 이동하고 부지근처에 굴착된 우물 또는 샘에 도달하여 이를 인근 주민이 음용하는 보수적인 시나리오가 사용되고 있다.

본 논문에서는 이러한 지하수 이동시나리오 평가를 통하여 처분시설내 처분볼트 배치의 최적화를 위한 노력의 일환으로 4가지 형태의 처분볼트 배치 개념을 설정하고 각각에 대한 지질-생태계 경계(Geosphere-Biosphere Interface)에서의 핵종농도(concentration)와 유출율(flux)을 비교, 분석하였다. 해석에는 한국수력원자력㈜ 원자력환경기술원과 한국원자력연구소가 미국 Monitor Scientific사와 국제공동연구를 통해 개발한 SAGE(Safety Assessment Groundwater Evaluation) 코드를 사용하였다[1,2].

2. 천층처분 기준시설 및 평가모델 설정

2.1 천층처분 기준시설

천층처분 기준시설은 국내에서 발생되는 중저준위 방사성 폐기물을 위해 건설될 처분시설의 1차 처분규모인 10만 드럼(200 단위드럼 기준)에 대한 처분볼트 배치를 가정하였다. 처분되는 폐기물의 형태는 시멘트 고화체, 파라핀 고화체 등 원전운영폐기물과 RI 폐기물 및 잡고체 등 총 6가지로 분류하고 처분볼트는 콘크리트 용기, 200 리터 드럼, 재포장 드럼의 3가지 형태로 설정하였다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 처분볼트 수량은 총 20개 (200 리터 드럼용: 7개, 재포장 드럼용: 10개, 콘크리트용: 3개)이며, 각 열 10개씩 2열로 배치되도록 설계되었다. 처분볼트 사이의 간격은 침하에 대한 안정성, 폐기물 취급측면, 처분고 유지보수 및 건설 시공측면 등을 고려하여 종간격은 2m로 이격하였으며, 횡간격은 10m로 이격하였다. 처분볼트의 유형분류에 대해서는 콘크리트 용기(처분볼트 유형 I)의 경우 자갈로써 뒷채움 매질을 설정하고, 철제드럼(처분볼트 유형 II와 III)은 모르타르 시멘트로 뒷채움 매질을 설정하였다[3]. 표 1~3에는 본 평가에서 고려한

핵종과 그 재고량, 방벽별 핵종의 분배계수 및 수리지질학적 평가입력자료를 나타내었다.

시설 폐쇄에는 다층복토 개념을 적용하여 40만 드럼 처분 후 폐쇄하는 것으로 가정하였으며, 부지특성으로서 그림 2에서와 같이 저구릉지를 형성한 화강암류 분포지역에 비교적 비압밀(unconsolidated)상태인 풍화암반층과 자연토양으로 구성된 임의부지를 가정하였다. 본 논문에서는 지하수 유동경로를 통한 시나리오 중 가장 보수적인 시나리오로서 처분시설 중심에서 200m 떨어진 곳에 우물이 위치하고 이곳의 물을 인근 주민이 음용하는 경우를 고려하기 위해 이 위치를 지질-생태계 경계(GBI)로 설정하였다. 또한, 처분시설의 인공방벽의 열화를 고려하여 표 4에서와 같이 처분시설 덮개를 통한 침투수량이 시간에 따라 변화하는 것으로 가정하였다.

2.2 평가 모델링

지하수 이동시나리오 평가를 위한 처분볼트 배치 개념은 처분장 평균화 모델링(repository-averaged modeling)과 처분볼트 평균화 모델링(vault-averaged modeling)의 2가지로 나누어 설정하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 처분장 평균화 모델링 대안(모델 A와 B)은 지하수 유동방향에 다른 처분시설 배치의 영향을 보기 위한 것이며, 그림 4의 처분볼트 평균화 모델링(모델 C와 D)은 처분장내를 처분볼트 유형별로 세분화하였을 경우의 영향을 보기 위한 것이다.

본 논문에서 다루는 천층처분시설을 통한 지하수에 의한 핵종이동 평가개념은 그림 5에서 보는 바와 같이 처분장을 근계(Near-Field)와 원계(Far-Field)로 나누고, 근계에서는 강우에 의한 처분시설로의 침투수의 수직유동을, 원계에서는 하부 대수층에서의 수평방향의 지하수 유동을 가정한 것이다. 이러한 단순화된 개념모델에 대한 평가에는 천층처분 시설의 다양한 물리적 방벽을 구획 모델(compartment model)을 사용하여 상호연계된 구획으로서 구현한 시스템레벨의 평가코드인 SAGE를 사용하였다. SAGE는 점진적으로 열화하는 인공방벽 시스템으로부터 하부의 불포화 지역을 거쳐 포화대수층으로의 누출에 초점을 둔 것으로 선원항 평가, 지질계 및 생태계에서의 핵종이동과 방사선적 안전성평가 및 확률론적 평가가 가능한 천층처분 통합안전성평가코드이다. SAGE에 적용된 개념모델은 수학적으로 유한차분법과 동일한 것으로 입증된 구획 모델법을 사용하고 있으며, 구획의 수가 증가하면 구획모델로부터 얻어진 해는 유한차분모델의 해에 근접하게 된다. 구획 모델이 제공하는 기하학의 유연성과 신속한 계산은 민감도분석 뿐만 아니라 대안적인 개념모델과 시설설계의 비교가 용이한 확률론적 평가에 적합한 특징을 가지며, 자료와 미래 상태에 대한 제한된 지식으로부터 발생하는 불확실성을 내재하고 있는 방사성폐기물 처분시설의 안전성평가에 널리 이용되고 있다.

SAGE는 근계, 원계 및 생태계로 전체 처분시스템을 나누고 각각에 대한 평가모듈(즉, SAGENF, SAGEFF 및 SAGEBIO)을 갖추고 있다. 각 구획간 핵종의 물질전달은 확산 및 분산과정을 통해 이루어 지며, 이들 각 구획은 폐기물고화체, 인공방벽, 불포화 지하매질, 포화 지하매질, 그리고 생태환경 등으로 분할되어 구성된다. 근계 모델은 급격한 표면누출과 확산 누출을 모델링하거나 또는 특별한 폐기물 고화체에 적합한 용해도 제한(solubility limit)를 고려할 수 있는 기능이 있으며, 천층처분 시설 인공방벽의 열화(특히, 콘크리트 처분볼트와 덮개의 성능)를 고려한 강우 침투율 모사가 가능하다. 또한 다중층으로 구성된 불포화대의 시간에 따른 층별 핵종별 분배

계수의 변화를 해석할 수 있는 기능도 가지고 있다[4]. 원계 모델은 지질계를 일련의 구획으로 간주하되, 다공성 매질(porous medium)과 균열성 매질(fractured rock)을 모두 해석할 수 있으며, 종분산과 횡분산을 고려하는 기능을 갖추어 준 2차원적 해석이 가능하다. 본 논문에서는 SAFENF와 SAGEFF가 사용되었다.

3. 평가 결과 및 분석

3.1 근계 해석결과 비교

그림 6과 표 5는 근계와 원계의 경계에서의 각 핵종의 최대 유출율(peak flux, Bq/yr)과 그 시점(peak time, yr)를 나타낸다. 예상되는 바와 같이 모델간 유출율의 차이는 보이지 않는다. 그림과 표는 핵종을 크게 두 가지 부류로 나눌 수 있음을 나타내고 있다. 한 가지 부류는 수천년 (대략 5,000년) 정도에 최대유출율을 갖는 핵종들이다. 이 핵종들은 낮은 분배계수 값을 가지거나 비교적 짧은 반감기를 갖는 것(H-3, Co-60, Ni-63, I-129, Cs-137)으로서 따라서 최대유출율에 빠르게 도달한다. 다른 한가지 부류는 수천년 이후에 최대유출율이 나타나는 핵종들로서 상대적으로 높은 분배계수와 긴 반감기를 가진 핵종들(C-14, Ni-59, Nb-94, Tc-99, U-235, U-238, Pu-238 및 Pu-239)이다. 최대유출율이 1,000 Bq/yr를 초과하는 것은 10개 핵종(H-3, C-14, Ni-59, Nb-94, Tc-99, I-129, U-235, U-238, Pu-238 및 Pu-239)이며, H-3와 Pu-238을 제외하고는 장반감기와 이동성 핵종들이다. Pu-238의 경우, 최대유출율은 딸핵종(U-234, Ra-226, Pb-210 및 Po-210)의 기여때문이며, 대략 100,000년에 지나야 도달한다.

3.2 처분장 평균화 모델 비교

표 6은 지질-생태계 경계에서의 주요 핵종과 그 딸핵종에 대한 최대 유출율(peak flux, Bq/yr)과 그 시점(peak time, yr)을 나타낸다. 전체 처분장 평균화모델에서 지하수 유동방향을 달리한 경우(model A와 B) 모델간 유출율의 차이는 나지 않으나, 경계에서의 농도는 지하수 유동방향에 수직한 처분장의 폭에 반비례하는 것으로 나타났다. 이는 선원항의 규모에 대한 핵종농도의 영향을 비교한 NRC의 해석에서와 같은 경향을 보여주고 있다[5]. 예상되는 바와 같이 선원의 폭이 넓어짐에 따라 선원의 폭의 증가가 희석을 증가시키는 쪽으로 작용하기 때문인 것으로 판단되며, 이는 각 처분볼트로부터의 오염대(contaminant plume)가 서로 섞이지 않는다는 전제하에서는 타당성이 있는 것으로 보고 있다. 따라서 처분장 배치시 지하수유동방향에 수직한 처분볼트의 폭을 크게 하는 것이 바람직한 것임을 알 수 있다.

3.3 처분볼트 평균화 모델 비교

처분볼트 평균화 모델의 경우(model C와 D)에서는 지하수 유동방향에 수직하게 처분볼트들을 배치한 모델 C의 경우가 지하수 유동방향에 평행하게 배치한 모델 D의 경우에 비해 유출율 값이 높게 나타내고 있으며 (표 6), 표 7에서 알 수 있듯이 지질-생태계 경계에서의 농도는 낮은 값을 보이고 있다. 처분장 평균화 모델에 비해 처분볼트 평균화 모델의 경우가 지하수유동방향에 따른 농도증가

비율이 비교적 높게 나타나고 있는데, 그 이유는 전체 처분장 평균화 모델에서는 처분볼트와 볼트사이의 비오염구역이 평균화 과정에 포함되기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 동일부지에 동일한 유형의 다수의 처분볼트를 고려하는 시나리오에 대한 평균화 과정에서는 처분시설 전체 체적을 농도 평균화를 위한 적절한 체적으로 사용할 수 있으나, 본 논문에서와 같이 동일부지내에 여러가지 다른 유형의 처분볼트가 존재하는 경우는 해석결과의 보수성 측면에서 처분볼트단위의 처분볼트평균화 모델링을 사용하여야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 중저준위폐기물 천층처분시설의 최적 배치를 결정하기 위하여 4가지 형태의 처분볼트 배치에 대한 지질-생태계 경계(Geosphere-Biosphere Interface)에서의 핵종농도와 유출율을 비교하였다. 해석에는 구획모델링(compartment modeling) 기법을 적용한 SAGE 코드를 사용하였으며, 가상 선원항과 가상부지의 수리지질 조건을 가정하였다. 해석 결과, 전체 처분장 평균화모델에서 지하수 유동방향을 달리한 경우, 지질-생태계 경계에서의 농도가 지하수유동방향에 수직한 처분장 폭에 반비례하므로 처분장 배치시 이를 크게 하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 또한 선원항이 상대적으로 큰 폐기물이 처분되는 경우에는 해석결과의 보수성 측면에서 처분볼트 평균화모델이 처분장 평균화모델보다 적합함을 알 수 있었다.

본 연구에서의 평가결과는 구획모델링 개념을 적용한 전체 처분시스템 레벨의 예비평가 성격을 가진 것으로서 추후 처분시스템을 구성하는 요소별 세부 평가코드를 사용한 비교분석이 필요하며, 각 처분볼트내에 적치되는 폐기물 종류별 불균질성(heterogeneity)까지를 고려한 세부 평가 등 처분시설의 최적배치를 위한 심층분석이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 국가지정연구실사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] Zhou, W., M.W. Kozak, J.W. Park, C.L. Kim, and C.H. Kang, "Development of SAGE: A Computer Code for Safety Assessment Analyses for Korean Low-Level Radioactive Waste Disposal," The 17th KAIF/KNS Annual Conference, April 17 – 19, 2002, Seoul, Korea.

[2] Park, J.W., C.L. Kim, and E.Y. Lee, Y.M. Lee, C.H. Kang, W. Zhou, M.W. Kozak, "Development of a Computer Code for Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Safety Assessment," The First Asian and Oceanic Congress for Radiation Protection (AOCRP-1), Oct. 20 – 24. 2002. Seoul, Korea.

[3] 최규섭, 황태원, 김헌, 이찬구, "국내 중저준위 방사성폐기물 천층처분시설 개념설계," 한국원

자력학회, 2002춘계학술발표회.
[4] Park, J.B., J.W. Park, E.Y. Lee, and C.L. Kim, “Experiences from the Source-Term Analysis of Low and Intermediate Level Radioactive Disposal Facility,” Waste Management ’03 Conference, February 23 – 27, 2003, Tucson, Arizona, USA.
[5] Kozak, M.W., M.S.Y. Chu, P.A. Mattingly, J.D. Johnson, and J.T. McCord, “Backgroud Information for the Development of a Low-Level Waste Performance Assessment Methodology: Computer Code Implementation and Assessment,” NUREC/CR-5453-Vol.5, 1990.

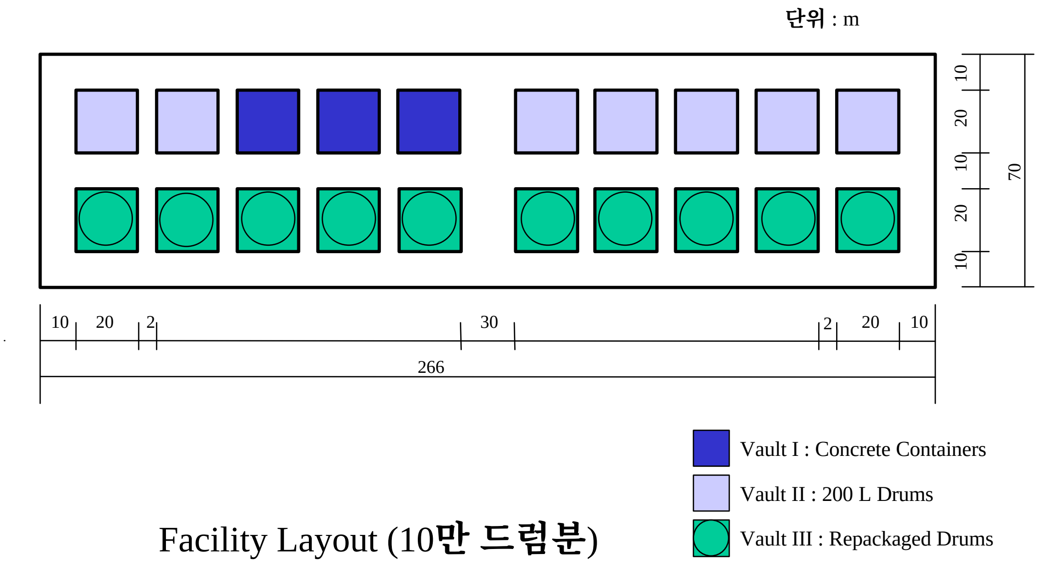


그림 1. 가상 처분장의 기준 처분시설 배치 개념

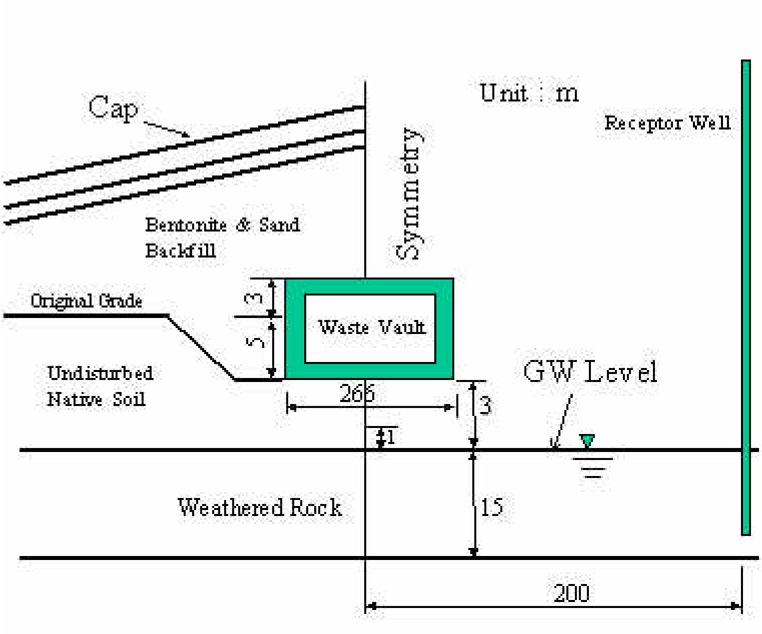
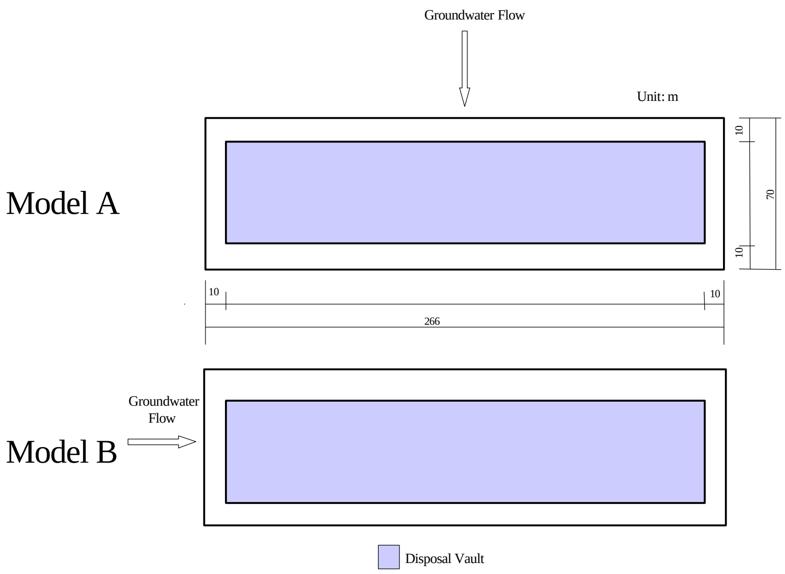
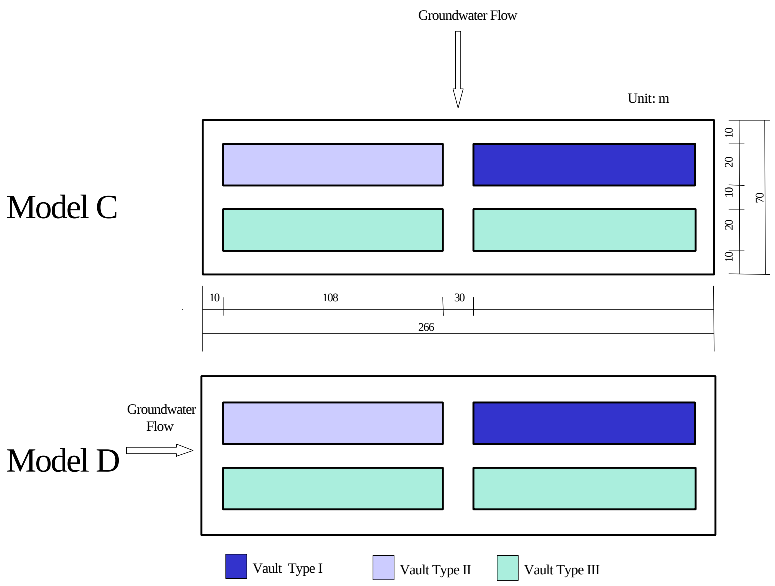


그림 2. 임의 처분장의 기준 처분시설 단면 설계개념



Assessment Modeling Options A & B (Single Repository Analysis)

그림 3. 처분장 평균화 모델



Assessment Modeling Options C & D (Multiple Vaults Analysis)

그림 4. 처분볼트 평균화 모델

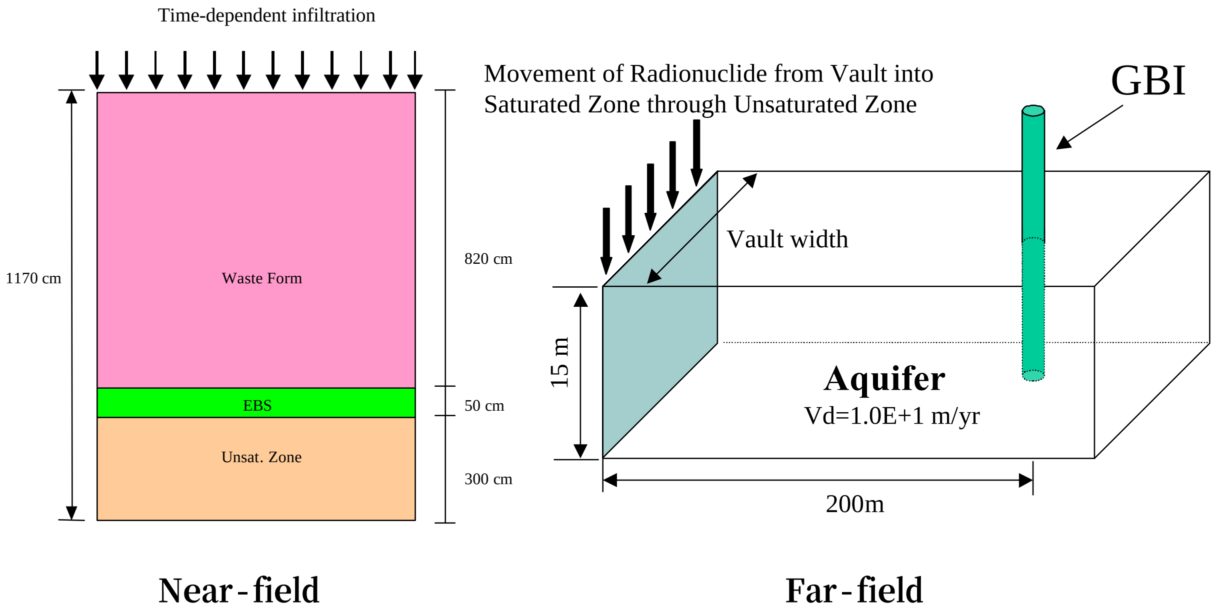


그림 5. 천층처분시설을 통한 지하수 이동평가 개념

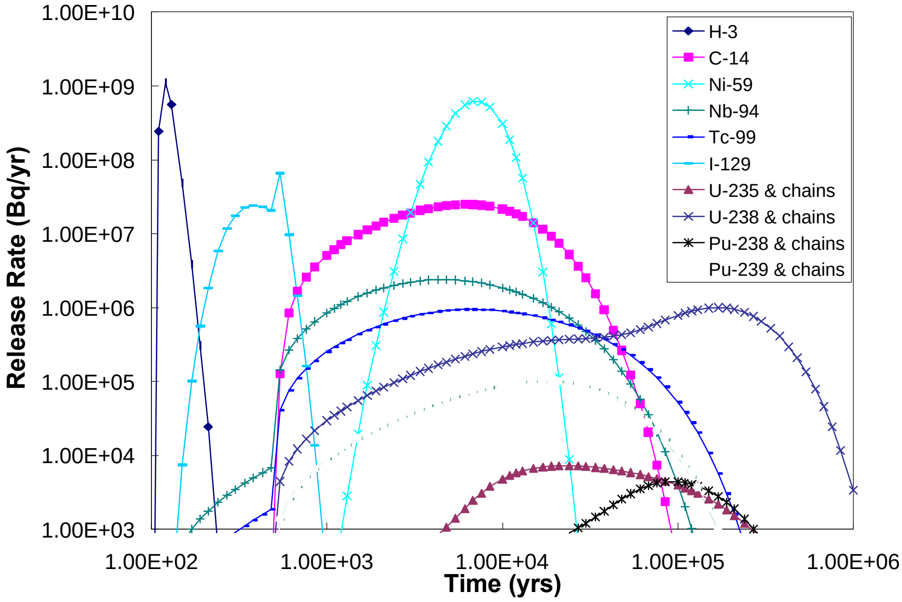


그림 6. 근계-원계 경계에서의 주요 핵종의 누출율

표 1. 고려대상 방사성 핵종 및 재고량

Nuclides	Inventory(Bq)			
	Vault I Total	Vault II Total	Vault III	Total Repository
H-3	2.97E+11	9.20E+12	1.72E+13	2.67E+13
C-14	2.67E+11	1.66E+12	1.49E+13	1.68E+13
Co-60	1.82E+13	1.09E+14	4.63E+13	1.73E+14
Ni-59	3.36E+11	1.21E+12	2.09E+12	3.64E+12
Ni-63	1.29E+13	5.25E+13	2.97E+13	9.51E+13
Sr-90	1.22E+11	1.16E+12	1.05E+11	1.39E+12
Nb-94	1.81E+10	7.28E+10	9.18E+09	1.00E+11
Tc-99	5.42E+09	2.65E+10	8.74E+09	4.07E+10
I-129	6.12E+08	3.94E+09	7.99E+09	1.25E+10
Cs-137	6.70E+12	5.24E+13	1.86E+12	6.09E+13
U-235	4.49E+06	3.61E+07	1.50E+08	1.91E+08
U-238	1.32E+10	3.40E+10	3.43E+08	4.75E+10
Pu-238	2.75E+09	3.89E+10	8.62E+10	1.28E+11
Pu-239	5.23E+09	4.08E+10	1.29E+10	5.89E+10
Total	3.89E+13	2.27E+14	1.12E+14	3.78E+14
Nuclides	**Daughters**			
U-235	Pa-231 → Ac-227			
U-238	U-234 → Th-230 → Ra-226 → Pb-210 → Po-210			
Pu-238	U-234 → Th-230 → Ra-226 → Pb-210 → Po-210			
Pu-239	U-235 → Pa-231 → Ac-227			

표 2. 처분 방벽별 방사성핵종의 분배계수

unit: m^3/kg

Nuclides	Concrete barrier	Waste vault	Soil	Aquifer
H	0	0	0	0
C	2.50E+00	2.50E+00	5.00E-03	1.00E-02
Co	2.00E-02	2.00E-02	1.50E-02	1.00E+00
Ni	2.00E-02	2.00E-02	4.00E-01	1.00E+00
Sr	2.50E-03	2.50E-03	1.50E-02	2.00E-02
Nb	5.00E-01	5.00E-01	0	1.00E+00
Tc	6.00E-01	5.00E-01	1.00E-04	1.00E+02
I	6.00E-04	6.00E-04	1.00E-03	5.00E-03
Cs	2.50E-04	2.50E-04	3.00E-01	1.00E-01
U	2.00E+00	2.00E+00	0	1.00E+02
Pu	4.00E+01	4.00E+00	0	5.00E+00

표 3. 처분 방벽별 수리지질학적 특성

Material \ Parameters		Dimension (m)	Effective Diffusion Coef.(m^2/s)	Porosity (-)	Saturation (-)	a_L (m)	a_T (m)	Bulk Density (kg/m^3)
Waste Zone	Type I	8.2	7.9E-12	0.3	0.5	-	-	2,000
	Type II&III	8.2	1.7E-12	0.12	0.5	-	-	2,500
Concrete Barrier		0.5	1.6E-12	0.12	0.5	-	-	2,500
Soil(Unsat. zone)		3.0	5.1E-14	0.3	0.7	-	-	1,800
Aquifer(Sat. zone)		15.0	5.5E-19	0.25	1.0	20	2	2,500

표 4. 처분시설 덮개를 통한 침투수량의 시간적 변화

Time(yr)	Infiltration Rate(m/yr)
0 to 100 (intact)	3.5E-4
100 to 500 (gradual degradation of cover)	3.5E-2
> 500 (fully degraded cover)	3.5E-1

표 5. 근계-원계 경계에서의 주요 핵종의 최대유출율과 그 시점

Radionuclides	SAGE	
	Peak Time (yr)	Peak Flux (Bq/yr)
^{3}H	120	1.1E+9
^{14}C	6,100	2.5E+7
^{59}Ni	6,800	6.2E+8
^{94}Nb	4,800	2.4E+6
^{99}Tc	6,800	9.5E+5
^{129}I	540	6.6E+7
^{234}U & daughters	24,000	7.3E+3
^{238}U & daughters	170,000	1.0E+6
^{238}Pu & daughters	100,000	4.4E+3
^{239}Pu & daughters	17,000	1.0E+5

표 6. 각 모델별 지질-생태계 경계에서의 주요 핵종의 최대유출율과 그 시점

Radionuclides	Peak Time (yr)	Peak Flux (Bq/yr)			
		Model A	Model B	Model C	Model D
^{3}H	130	6.2E+8	6.2E+8	6.1E+8	6.1E+8
^{14}C	6100	2.5E+7	2.5E+7	2.5E+7	2.5E+7
^{59}Ni	41,000	6.1E+8	6.1E+8	6.1E+8	5.1E+8
^{94}Nb	41,000	2.7E+5	2.8E+5	2.5E+5	1.9E+5
^{129}I	740	3.0E+7	3.0E+7	3.1E+7	2.9E+7
^{234}U & daughters	1,000,000	6.3E+3	6.3E+3	6.7E+3	5.4E+3
^{238}U & daughters	1,000,000	7.0E+6	7.1E+6	6.5E+6	2.6E+6
^{238}Pu & daughters	250,000	3.6E+3	3.6E+3	3.7E+3	2.6E+3
^{239}Pu & daughters	140,000	5.7E+2	5.8E+2	5.0E+2	4.2E+2

표 7. 각 모델별 지질-생태계 경계에서의 주요 핵종의 농도와 그 시점

Radionuclides	Peak Time (yr)	Peak Concentration (Bq/m^{3})			
		Model A	Model B	Model C	Model D
^{3}H	200	7.48E-1	2.65E+0	1.13E+0	5.06E+0
^{14}C	6500	1.03E+2	3.64E+2	1.11E+2	6.22E+2
^{59}Ni	50,000	2.06E+2	7.33E+2	2.91E+2	1.17E+3
^{94}Nb	50,000	1.02E+0	3.66E+0	1.93E+0	4.78E+0
^{129}I	800	1.32E+2	4.70E+2	1.77E+2	7.95E+2
^{234}U & daughters	1,000,000	2.61E-2	9.27E-2	3.02E-2	1.64E-1
^{238}U & daughters	1,000,000	2.84E+1	1.01E+2	5.46E+1	1.48E+2
^{238}Pu & daughters	250,000	8.45E-3	3.01E-2	1.11E-2	4.96E-2
^{239}Pu & daughters	140,000	1.43E-3	5.16E-3	1.90E-3	9.40E-3