

고준위방사성 폐기물 처분장으로부터 핵종이동 평가  
Performance Assessment for Radionuclides Transport from HLW  
Repository

김성기 · 강철형 · 이연명 · 황용수  
한국원자력연구소  
심지층처분시스템개발  
sgkim1@kaeri.re.kr

초 록

요오드나 세슘 같은 핵종들은 고용해도 핵종들로서 사용후핵연료 내 피복관이나 연료 결정 경계면에 위치하고 있다가 고준위 방사성폐기물 처분후 지하수가 용기를 부식시키고 용기 내부로 침투하면 고용해도를 가지고 유출된 후 공학적, 천연 방벽을 통해 최종적으로 유출되게 된다. 본 연구에서는 한국원자력연구소에서 개발한 MASCOT-K를 이용하여 고용해도 핵종들이 조화 유출과 고용해도 유출할 경우 유출량을 평가 분석해 보았다. 평가 결과 요오드와 같은 고용해도 핵종인 경우 전체 핵종 재고량의 최대 10%만이 고용해도 유출을 하지만 그 영향은 조화 유출에 비해 훨씬 중요한 것으로 판명되었다. 이러한 결과를 바탕으로 현재 국내 고준위 처분 환경에서 보수적인 시나리오로 주목받고 있는 우물 굴착 시나리오를 대상으로 우물까지의 거리 등 입력 자료의 불확실성을 평가해 보았다. 36,000 톤의 사용후핵연료를 처분 대상으로 했을 때 성능 평가 결과는 현재 처분 개념이 안전함을 입증한다.

1. 서 론

방사성 폐기물 영구처분장에 처분된 사용후핵연료가 포장되어 있는 처분용기로부터 누출된 핵종은 공학적 방벽과 굴착으로 인한 교란 지역(EDZ)을 통과한 후 심부 암반을 통하여 인간생태계에 도달한다. 심부 암반에서 핵종의 이동수단이 되는 지하수는 균열암반의 경우 암반의 투수율이 낮아 암반의 균열을 따라 주로 유동하게 되며, 지하수에 용해된 핵종은 지하수와 함께 이동하고 균열표면에 흡착과 탈착을 하면서 이동하게 된다. 본 연구에서는 심부 균열암반에서 핵종이동에 중요한 매개변수인 지하수 유동길이에 따른 선량의 영향을 분석하였다.

2. 수학적 배경

심지층에 위치한 처분장 주변 지하수의 이동은 일반적으로 균열대를 통하여 일어난다. 완충재를 통과한 핵종들은 손상대를 통과한 후 심부암반의 균열을 따라 지하수와 함께 이동할 것이다. 균열대의 주변암반 다공성 매질에서 핵종이동은 이류보다는 확산에 의하여 좌우되며, 균열대에서 주변암반으로의 핵종이동은 확산에 의해 이루어진다[1]. 따라서 지하수 이동과 관련된 지하수 유동속도, 균열간극, 주변암반으로의 확산계수와 균열대에 존재하는 단열 표면의 흡·탈착 그리고 지하수 유동길이는 처분장으로부터의 핵종이동과 관련된 주요 기구이다. 균열성매질의 균열대에서 방사성 핵

종의 이동에 관한 지배 방정식은 (1)과 같이 표시할 수 있다[1].

$$R_n \frac{\partial C_n}{\partial t} = -v \frac{\partial C_n}{\partial x} + D^L \frac{\partial^2 C_n}{\partial x^2} + \frac{D_n^i}{b} \frac{\partial C_n^p}{\partial y} \Big|_{y=l} - R_n \lambda_n C_n + R_{n-1} \lambda_{n-1} C_{n-1} \quad (1)$$

또한 암반에서 핵종이동 방정식을 표시하면 다음과 같다.

$$R_n^p \frac{\partial C_n^p}{\partial t} = D_n^i \frac{\partial^2 C_n^p}{\partial w^2} - R_n^p \lambda_n C_n^p + R_{n-1}^p \lambda_{n-1} C_{n-1}^p \quad (2)$$

여기서  $R_n^p$ 는 주변 다공매질에서의 지연계수이며

$l$  : 균열간극사이의 거리, [m],

$D^L$  : 균열 내에서의 확산계수, [ $m^2/yr$ ],

$v$  : Pore velocity, [ m/yr],

$R_n$  : 핵종의 이동 지연 계수(Retardation Coefficient), [-]

$D_n^i$  : 균열 주변 암반내 diffusion coefficient, [ $m^2/yr$ ]

$2b$  : 암반의 균열간극(fracture aperture)[m]

초기 및 경계조건은 다음과 같다.

$$C_n(x, 0) = 0, \quad (3)$$

$$C_n^p(x, y, 0) = 0 \quad (4)$$

$$0 < x < \infty \quad 0 < y < l \quad t > 0$$

$$A [d_1 C_n - d_2 \frac{\partial C_n}{\partial x}]_{x=L} = 0, \quad (5)$$

$$C_n^p(x, 0, t) = C_n(x, t), \quad (6)$$

$$\frac{\partial C_n^p}{\partial y} \Big|_{y=l} = 0, \quad (7)$$

여기서 A는 균열의 단면적을 의미하며, L은 심부암반의 외부경계 까지의 거리를 말하며 물리적으로 무한대이나 수치해석상의 편의를 위해 유한거리 L로 가정한다.

### 3. 유출현상 비교평가

조화유출이란 사용후핵연료에 포함되어 있는 핵종들이 사용후핵연료의 대부분을 구성하고 있는 이산화우라늄의 유출물에 비례하여 유출되는 것을 말하며, 대부분의 방사성핵종들은 일반적으로 조화유출에 의해 처분용기에서 이동한다. 즉 이산화우라늄은 심지층 지하수에 의해 용해되는 최고용해도가 낮기 때문에 대부분의 핵종들을 둘러싸고 있는 이산화우라늄이 용해되어야 각각의 핵종들이 유출될 수 있다는 것이며,

각 핵종의 유출률은 이산화 우라늄의 유출률과 각 핵종의 질량과 이산화우라늄의 질량비에 비례한다는 것이다. 이것을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$J_i(a, t) = \frac{M_i(t)}{M_m(t)} J_m(a, t), \quad t \geq 0 \quad (8)$$

$J_i(a, t)$  : 처분용기 표면에서 핵종  $i$  의 유출률

$J_m(a, t)$  : 처분용기 표면에서 이산화우라늄 고화체의 유출률

$M_i(t)$  : 시간  $t$ 에서의 핵종  $i$  의 질량

$M_m(t)$  : 시간  $t$ 에서의 이산화우라늄의 질량

조화유출이 고준위방사성폐기물의 심지층처분에서 유출되는 주요 기구일 것으로 예상되어, 활성핵종에 대하여 지하수 유동거리가 100m일 경우, 조화유출과 Gap에 의해 유출되는 연간개인선량을 스웨덴의 KBS-3에서 사용된 주요 매개변수 값을 이용하여 계산하여 비교한 결과, 활성핵종의 방사성폐기물을 심지층에 처분할 경우, 다음 그림 1에서와 같이 Gap유출이 지배적인 유출기구인 것으로 판명되었다.

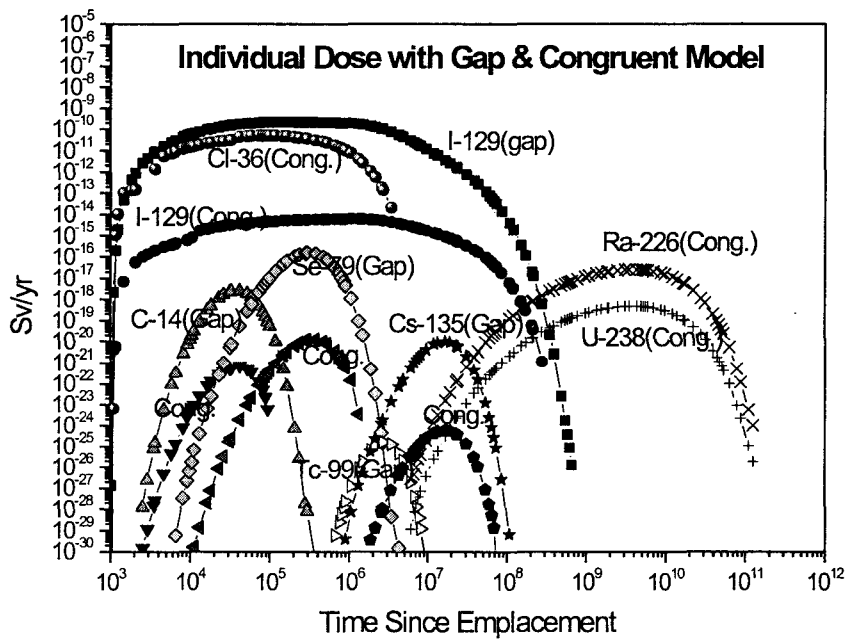


그림 1. 조화유출과 Gap 모델 유출에 의한 연간개인선량

#### 4. 민감도 분석

핵종 이동 관련 민감도 분석을 위해 한국 원자력 연구소에서 개발한 확률론적 방

사성폐기물 처분장 종합 성능 코드인 MASCOT-K 프로그램을 사용하였다[2].

민감도 평가에 사용된 주요 입력 자료는 표 1과 같으며 처분 용기에서 용해되는 메카니즘은 Gap 모델과 조화 유출 모델을 적용하였다. Gap 모델에서 핵연료의 Grain boundary나 핵연료봉 내의 공간에 존재하는 핵종의 양은 핵연료내의 핵종 재고량의 10%로 하였다[2]. 계산에 사용된 공극율과 같은 인자 값들은 스웨덴 KBS-3에서 사용한 값을 사용하였다.

표 1. 평가에 사용된 입력 자료

처분용기 수명, yr		1000
지하수 유동속도, m/yr		0.7
균열간극, m		0.0001
공극율	공학적방벽	0.3
	암반	0.002
확산 계수, $m^2/yr$	공학적방벽	0.00126
Buffer Thickness, m		0.38

계산 결과 그림 2에서 보는 바와 같이 균열암반에서 지하수 유동길이가 100m일 경우에 개인에게 미치는 선량은 처분용기의 Gap에 존재하는 활성핵종과 수명이 긴 초우라늄핵종에 의한 두 그룹으로 나타났으며, Gap에 존재하는 핵종은 지하수에 의한 처분용기 부식후 초반부터 10<sup>8</sup>년 직후까지 비교적 많은 핵종이 유출되는 것으로 계산되었다. 또한 그림 3,4,5에서 보면 지하수 유동길이의 변화에 따라 선량의 민감도가 높은 것을 알 수 있다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 처분장 안전성평가에서 고려해야 할 방사성핵종들을 Gap 유출기구와 조화유출기구를 이용하여 비교 평가하였다. 이러한 이유는 Gap의 영향이 클 것으로 예상되었기 때문이다. 평가결과 활성핵종에 있어 Gap의 영향은 개인선량에 많은 영향을 주어 안전성평가에서 Gap을 고려하는 것이 필요한 것으로 판단된다. 또한 현재 불확실성이 높으며 비교적 영향이 크다고 판단되는 지하수 유동 길이를 대상으로 최종 인간에게 미치는 방사선적 선량을 대상으로 민감도 평가를 수행하였는데, 분석 결과 지하수 유동거리 변화가 선량에 비교적 많은 영향을 주었다.

#### 감사의 글

본 논문에 수록된 연구 결과는 과학기술부에서 주관하는 국가 중장기 원자력연구개발 사업의 일환으로 추진되었습니다.

#### 참고문헌

1. J.E. Sinclair외, "Mascot and Mop Programs for Probabilistic Safety Assessment Part B: Mascot Technical Details", AEAT/NSS/R336, 1995.
2. 강철형외, "심지층처분시스템개발-", KAERI/ RR-2013, 1999.

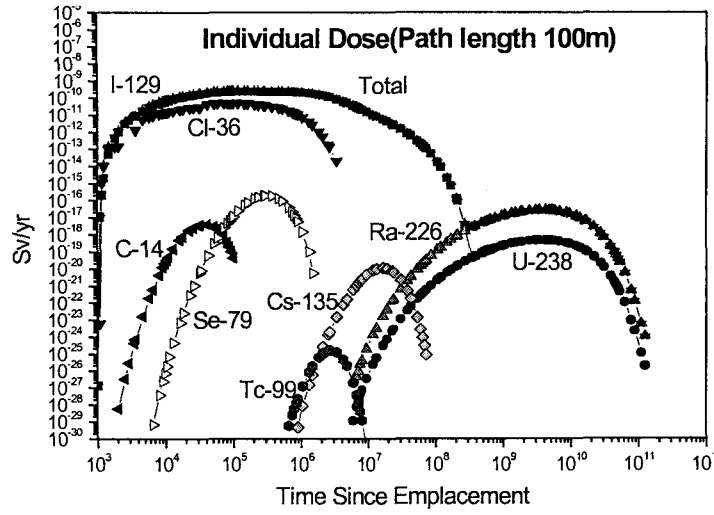


그림 2. 유동길이 100m일 경우의 개인선량

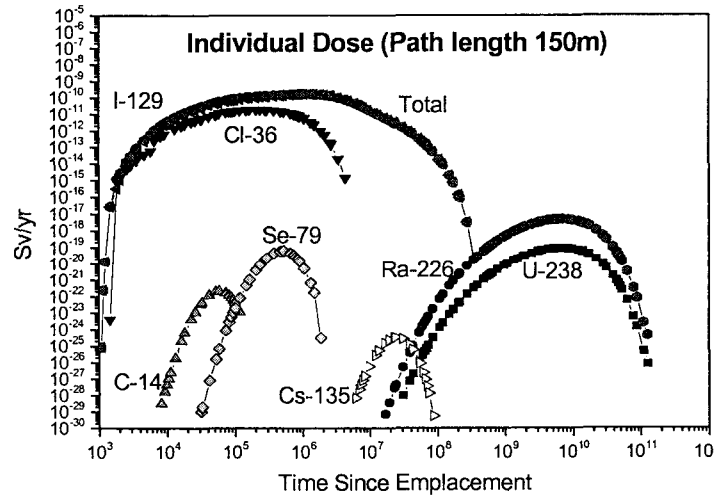


그림 3. 유동길이 150m일 경우의 개인선량

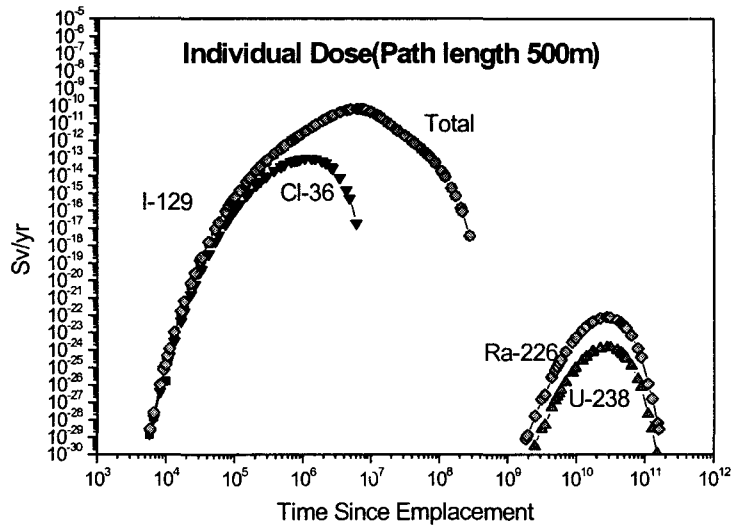


그림 4. 유동길이 500m일 경우의 개인선량

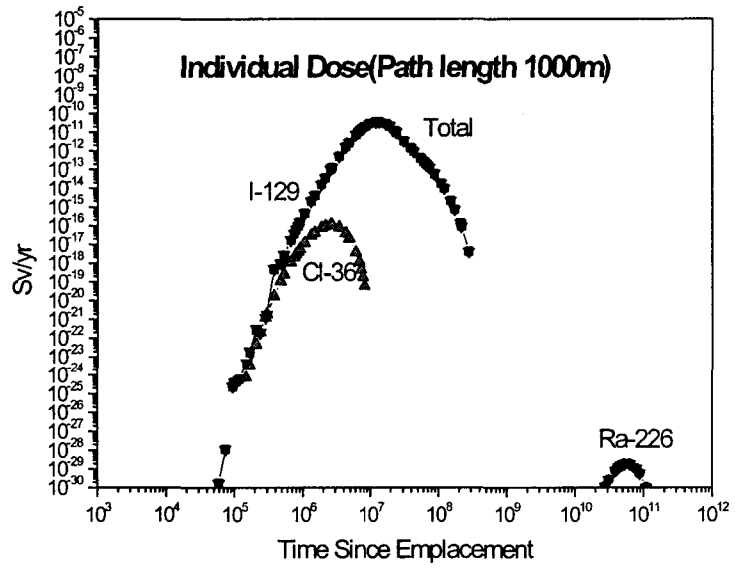


그림 5. 유동길이 1000m일 경우의 개인선량