Technical Paper https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2020.18.2(E).305

Method for Evaluating Radionuclide Transport in Biosphere by Calculating Elapsed Transport Time

이동 경과 시간 계산을 이용한 생물권에서의 방사성 핵종 이동 평가 방법

Nak-Youl Ko* and Sung-Hoon Ji
Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

고낙열*, 지성훈
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received March 31, 2020 / Revised July 6, 2020 / Approved August 6, 2020)

For geological disposal of radioactive wastes, a method was proposed to evaluate the radionuclide transport in the biosphere by calculating the elapsed time of nuclide migration. The radionuclides were supposed to be introduced from a natural barrier and reached a large surface water body following a groundwater flow in a shallow subsurface. The biosphere was defined as a shallow subsurface environment that included aquifers on a host rock. Using the proposed method, a calculation algorithm was established, and a computer code that implemented the algorithm was developed. The developed code was verified by comparing the simulation results of the simple cases with the results of the analytical solution and a public program, which has been widely used to evaluate the radiation dose using the radionuclide transport near the surface. A case study was constructed using the previous research for radionuclide transport from the hypothetical geological disposal repository. In the case study, the code calculated the mass discharge rate of radionuclide to a stream in the biosphere. Because the previous research only demonstrated the transport of radionuclides from the hypothetical repository to the host rock, the developed code in the present study could help identify the total transport of radionuclide along the complete pathway.

Keywords: Radionuclide transport simulation, Transport in porous media, Radionuclide transport in biosphere, Time-domain random walk (TDRW) method

*Corresponding Author.
Nak-Youl Ko, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: nyko@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-4929

ORCID
Nak-Youl Ko http://orcid.org/0000-0001-8279-6652 Sung-Hoon Ji http://orcid.org/0000-0002-2506-4049

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

방사성폐기물의 심층처분에서 생물권에서의 방사성 핵종 이동을 핵종의 이동 경과 시간을 계산하여 평가하는 방법이 제안되었다. 방사성 핵종은 자연 방벽에서 유출되어 지하 천부의 지하수 흐름을 따라 대규모 지표수체에 도달한다고 가정하였다. 생물권은 기반암 위에 있는 대수층을 포함하는 천부 지하 환경으로 정의하였다. 제안된 방법을 이용하여, 계산 알고리즘을 수립하였고, 알고리즘을 수행하는 컴퓨터 코드를 작성하였다. 작성된 코드는 간단한 사례에서 계산된 모의 결과를 해석해 계산 결과 및 지표 부근에서의 방사성 핵종 이동에 의한 방사선량 평가에 널리 이용되는 공공 프로그램의 계산 결과와 비교하여 검증하였다. 사례 연구 조건을 가상의 심층처분장에서의 방사성 핵종 이동에 대한 이전 연구를 통해 작성하였다. 작성된 코드는 사례 연구에서 생물권의 하천으로 유출되는 핵종의 이동량을 계산하였다. 이전 연구에서는 가상의 처분장에서 모암까지의 방사성핵종의 이동만을 보여주었기 때문에, 이 코드는 모든 경로를 지나가는 방사성 핵종의 전체적인 이동을 파악하는데 도움이 될 수 있었다.

중심단어: 핵종 이동 모의, 다공성 매질에서의 용질 이동, 생물권 핵종 이동, 시간차원 랜덤 워크 기법

1. 서론

원자력 발전을 통해 발생하는 사용후핵연료 등의 고준위방사성폐기물을 처분하는 방법에 대해서는 여러가지 개념이 도출되었다. 그 중에서 현실적으로 실현 가능한 방법으로 선정되어 여러 나라에서 고려되고 있는 것이 심지층에 장기간에 걸쳐 폐기물을 거치하는 방식이다[1]. 핀란드에서는 이런 심층처분 방식을 기본적인 처분 개념으로 선정하고 처분장 건설을 허가하여 건설을 진행 중이다[2,3]. 다른 나라에서도 심층처분 개념을 적용하여 처분에 대한 실현 가능성을 파악하고 처분에 대한 방사선적 안전성 평가에 이용하고 있다[4,5].

심층처분장에 대한 안전성 평가는 처분되는 방사성 폐기물에 포함된 방사성 핵종의 위험성이 각각의 국가에서 규정하고 있는 안전규제 요건을 만족한다는 것을 보이기 위한 평가기간을 대상으로 이루어진다. 평가기간은 대개 폐기물 내의 방사성 핵종이 자연 방사선 수준으로 감소하는 기간으로 설정된다. 반감기가 매우 긴 일부 핵종들로 인해 평가 기간은 수십 만년을 넘는 매우 긴 기간이 된다[2,4].

지금까지 진행되거나 계획 중인 심층처분 사업에서는 스웨덴의 SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB)에서 개발한 KBS-3 방식을 처분 방식으로 적용하거나 검토하고 있다[2,4]. 이 방식은 처분된 폐기물에서 누출될 수 있는 방사성 핵종의 이동을 제한하기 위해 다중 방벽 시스템을 채용하고 있다. 다중 방벽은 공학적 방벽(engineered barrier)과 천연 방벽(natural barrier)으로 구분된다. 공학적 방벽은 폐기물을 격리하고 폐기물에 존재하는 핵종의 누출을 억제하는 기능을, 천연 방벽은 유출된 방사성 핵종의 이동을 지연시키는 기능을 수행하도록 설계된다. 공학적 방벽은 크게 처분용기(canister), 완충재(buffer), 뒤채움재(backfill)로 구성되고, 천연 방벽은 처분장 부지의 모암(host rock)이 된다.

심층처분에 대한 안전성 평가에서는 누출된 핵종이 공학적 방벽을 거쳐 천연 방벽을 통과하여 인간이 생활하는 지표환경인 생물권(biosphere)에 도달하는 것으로 가정한다[2,4,5]. 생물권은 인간의 생활 공간 및 동식물의 서식 공간을 제공하는 토양과 호수 및 바다 등의 지표환경, 천연 방벽 역할을 하는 암반인 모암의 상부에서 지하수가 유동하는 공간인 대수층 등을 포함한다. 생물권에 속하는 요소들은 방벽의 기능을 갖지는 않는다고 가정되며, 생물권에 도달한 방사성 핵종이 인간 및 자연 환경에 끼치는 방사선적 영향이 평가된다. 방사성 핵종의 위험성이 자연 방사선 수준으로 감소하는 수십만 년 이상의 매우 긴 시간을 고려하기 때문에, 호수나 강 등의 지표수체(surface water body)의 시간에 따른 위치나 규모의 변화도 핵종의 이동을 예상하는데 기본적으로 반영하는 경우도 있다[6,7].

우리나라에서도 심층처분에 대한 적용 가능성을 파악하기 위해, 가상의 심층처분장에 대해 안전성 평가를 수행하여 핵종의 이동에 의한 방사선적 영향을 평가하였다[8,9]. 해당 연구에서는 폐기물에서 누출된 핵종이 공학적 방벽과 천연 방벽을 통과하여 생물권의 구성요소인 지표 부근의 대수층에

도달하는 이동 경로를 계산하였다. 다만, 바다, 호수, 강과 같이 지하수의 배출 영역(discharge area)이 될 수 있는 규모가 큰 지표수체의 장기간에 따른 변화가 반영되지 못하였다. 이로 인해 지표 부근의 대수층에서 발생하는 지하수 유동 조건의 시간에 따른 변화를 핵종 이동 예측에 반영하기 어렵게 되어서, 천연 방벽을 통과하여 생물권에 유입되는 방사성 핵종의 이동은 상세하게 다루어지지 못했다.

이 연구에서는 심층처분에 대한 안전성 평가에서 누출된 핵종의 이동을 예측할 때, 천연 방벽을 통과하여 생물권인 지표환경에서의 핵종의 이동을 이동 경과 시간을 계산하는 방식으로 평가하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법이 유도되는 방식을 설명하고 그것을 이용하여 핵종의 이동 경과 시간이 계산되는 알고리즘을 제시하였다. 알고리즘을 구현하는 컴퓨터 코드를 작성하여 코드가 출력한 계산 결과를 해석해 및 지표 부근의 핵종 이동에 의한 방사선적 영향을 평가하는데 널리 이용되는 프로그램의 결과와 비교하여 검증하였다. 사례 연구로서 이전 연구에서 다루지 않았던 지표 환경에서의 핵종 이동에 대한 평가 결과를 제시하였다.

2. 연구방법

2.1 다공성 매질에서의 용질 이동 모의 방법

지하수에 용해되어 다공질 매질을 통해 이동하는 용질의 양상을 모의할 때, 특정한 시간에서의 용질의 공간적 분포를 알고 싶을 때에는 Eulerian 방식과 같이 특정 공간을 고정시키고 해당 공간에서의 시간적인 변화를 계산하는 기법을 이용한다. 반면에, 시간에 따른 용질의 변화를 이동 경로를 따라가며 묘사하고 싶을 때에는 Lagrangian 방식과 같이 이동 경로를 지나가며 발생하는 용질의 변화를 직접적으로 계산하는 기법을 이용하게 된다[10]. 예를 들면, 강물을 따라 흐르는 어떤 물체의 움직임을 묘사한다고 할 때, Eulerian 방식은 강둑이나 다리 가운데 같은 고정된 한 지점에서 물체가 특정 위치나 영역을 지나가는 특성(속도 등)을 제시하지만, Lagrangian 방식은 배를 타고 강을 따라 이동하면서 해당 물체의 특성(위치 등)을 제시한다. 이 연구에서는 후자의 방식에 해당하는 TDRW (Time-Domain Random Walk) 방식을 이용하여 다공성 매질에서 핵종의 이동을 평가하였다[11-13].

이 기법의 기초는 이미 소개되어 있으며 관련된 연구도 알려져 있지만, 알려지기 시작할 당시에는 기법 활용을 위한 컴퓨터 활용 환경이 현재에 비해 매우 열악하여 원하는 계산을 수행하기에 어려움이 있었다. 계산을 위해 필요한 계산기기나 컴퓨터 자원이 당시의 기술로는 감당하기 어려웠고, 계산에 걸리는 시간도 매우 길었다. 최근에 컴퓨터 공학이 발달하면서 TDRW 기법에서 요구하는 계산 자원을 갖추기 쉬워지고, 계산 알고리즘도 개선되었으며, 계산 시간도 대폭 감소하게 되어, 활용 효율성이 대폭 증가하였다. 방사성 핵종의 붕괴를 다른 기법들에 비해 쉽게 고려할 수 있고, 용질 이동의 시작 및 도달 위치를 알 경우에 계산이 매우 효율적으로 이루어질 수 있다는 점이 이 기법의 장점이라고 볼 수 있다[10-13].

2.1.1 이류-분산에 의한 용질 입자의 이동 시간 계산

1차원 공간에서의 지하수 내 용질의 이동을 표현하는 일반적인 이류-분산 방정식은 이류와 분산을 통해 일정한 공간을 통과하는 용질의 시간에 따른 농도 변화를 나타낸다. 지하수의 단위 면적당 유량, 유속이 일정 공간 내에서 변하지 않고, 분산도(dispersivity)가 해당 공간 내에서 일정한 경우, 1차원 공간에서 이동하는 용질의 농도는 다음의 식으로 표현된다[14].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v_x \frac{\partial C}{\partial x} + D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{1}$$

이 때, C는 지하수 내 용질의 농도, t는 경과 시간, v_x는 지하수 흐름에 의해 용질이 이동하는 속도를 나타내는 선속도(linear velocity)로 단면적 당 지하수 유량을 공극률로 나눈 값이 되며, D_x ($=\alpha_x v_x$)는 지하수 흐름 방향의 분산계수(dispersion coefficient), α_x는 지하수 흐름 방향의 분산도(longitudinal dispersivity)이다.

이 연구에서 이용하려는 TDRW 방식은 식 (1)이 나타내는 1차원의 이류-분산 방정식을 통해 용질 입자가 일정 거리를 지나가는데 걸리는 시간을 시간 영역(time domain)에서 계산하기 위해, 입자의 임의적인 운동(Brownian motion)을 확률밀도함수를 통해 나타내는 Fokker-Planck 식을 이용한다[11]. Fokker-Planck 식은 이류와 분산을 통해 용질 입자가 이동하여 공간에 분포되어 있는 상태를 일종의 확률변수로

상정하고, 그것이 시간에 따라 변화하는 것을 나타낸 방정식이다. 분산에 의한 입자의 확산 형태가 임의의 이동(random displacement)을 통해 표현되는 Random Walk 방식을 차용하여 확률변수화 하였고, 이류에 의한 이동은 지하수의 유속을 통해 표현하였다. Fokker-Planck 식은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -v_x \frac{\partial f}{\partial x} + D_x \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \tag{2}$$

이 때, f는 용질 각각의 입자가 공간에 존재하는 공간적 분포를 나타내는 확률변수가 된다.

일정한 양의 입자가 이류 및 분산을 통해 이동하는 것을 식 (2)를 통해 계산하기 위해, Fokker-Planck 방정식에 용질에 대한 순간 주입 조건을 초기 및 경계 조건으로 설정하여 풀면, 그 해는 주어진 영역을 통과하는데 경과되는 시간인 τ에 대한 확률밀도함수가 된다[11,15]. 즉, 1차원 공간에서의 용질 이동에서, 용질이 일정한 거리를 이류 및 흐름 방향으로의 분산을 통해 통과하는데 걸리는 시간을 τ라고 하면, 용질이 이동 경로의 입구에서 순간 주입(instantaneous injection)되어 출구로 나오는 용질의 양을 시간에 따라 표준화(normalization)한 이력곡선(breakthrough curve)은 τ에 대한 확률밀도함수가 된다[15]. 이 때, 이 확률밀도함수의 누적분포 $F(\tau)$는 다음과 같이 표현된다[16,17].

$$F(\tau) = \frac{1}{2}\left[\mathrm{erfc}\left(\frac{\sqrt{\eta}}{2}\frac{1-\tau'}{\sqrt{\tau'}}\right)\exp(\eta)\mathrm{erfc}\left(\frac{\sqrt{\eta}}{2}\frac{1+\tau'}{\sqrt{\tau'}}\right)\right] \tag{3}$$

이 때, $\tau' = \tau/\bar{\tau}$, $\bar{\tau}$는 용질이 이류만으로 움직일 때의 이동 경로 통과 시간으로 지하수의 유동 시간과 동일하고, $\eta = L/\alpha$, L은 이동 경로의 길이, α는 이동 방향으로의 분산도를 나타낸다.

식 (3)은 순간적으로 주입된 용질의 이동 경과 시간에 대한 누적 분포를 나타내므로 유입 지점에서 들어온 용질이 관측되는 지점에 도착하는 시간을 계산하는데 이용될 수 있다. 식 (3)이 용질 입자 전체의 이동 경과 시간에 대한 누적 분포를 나타내기 때문에, 특정한 용질 입자의 이동 시간이 주어지면 그 입자가 전체 용질 입자 중에서 얼마만큼 빠르게 이동했는가를 확률과 같이 최대값이 1인 비율로 계산할 수 있다. 즉, 이동 시간이 적게 걸린 순서로 상위 5%에 해당하는 입자의 이동 경과 시간을 $F(\tau) = 0.05$가 되는 τ의 값을 찾는 방정식의 풀이를 통해 알아낼 수 있다.

2.1.2 다공질 매질에서의 흡착에 의한 이동 지연 계산

용질이 다공성 지하 매질을 이동하는 과정에서 매질과 용질 사이의 물리적 또는 화학적 작용에 의해 용질이 매질 표면 또는 매질 공간 안으로 흡착되는 현상이 발생하면, 용질의 이동이 지연되고 그로 인해 이동에 걸리는 시간이 증가하게 된다. 이런 흡착 현상이 시간에 관계없이 순간적으로 평형 상태에 도달한다고 가정하는 평형 흡착(equilibrium sorption) 상태와 선형 등온(linear isotherm) 과정이 가정되는 조건에서는, 흡착에 의한 용질의 지연 계수(retardation factor, R)는 다음과 같이 정의된다[10].

$$R = 1 + \frac{K_d \rho_b}{n} \tag{4}$$

이 때, K_d는 분배계수(distribution coefficient), ρ_b는 주어진 기질의 단위 부피당 고체 입자의 질량(bulk density), n은 공극률이다.

지연 계수는 흡착에 의해 느려진 최종 상태를 반영한 값이므로, 실제로 흡착에 의해 지연되는 영향은 식 (4)의 우변의 두 번째 항에 의해 나타난다. 이를 이용하여 흡착에 의해 지연된 이동 경과 시간 t_{ret}는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_{ret} = \frac{K_d \rho_b}{n}\tau \tag{5}$$

2.2 이동 시간 계산 알고리즘

다공성 지하 매질에서 유동하는 지하수 내의 용질이 이류와 분산, 선형 흡착 과정을 거쳐 이동하는데 걸리는 이동 경과 시간을 TDRW 기법을 이용하여 계산하는 과정은 다음과 같다[18].

1. $R_1 \in [0,1]$인 임의의 수 R_1을 균일 분포(uniform distribution)에서 선택하여 식 (3)에서 $F(\tau) = R_1$을 만족하는 τ를 구한다.
2. 선형 흡착이 발생하는 용질의 경우, 흡착에 의해 지연된 이동 경과 시간 t_{ret}를 식 (5)를 통해 계산한다.
3. 1과 2에서 계산된 경과 시간을 합하여 용질의 총 이동 경과 시간을 계산한다. 즉, 총 이동시간 $t = \tau + t_{ret}$가 된다.

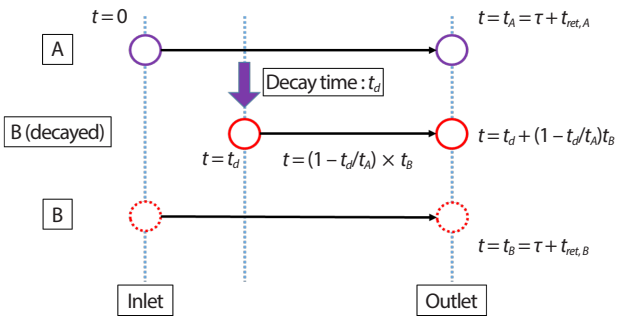


Fig. 1. Schematic illustration of nuclide transport with radioactive decay (modified from [19]).

다공성 지하 매질에서 이동하는 용질이 방사성 핵종일 경우, 방사성 붕괴(decay)가 발생하여 해당 핵종이 안정 동위 원소 또는 또다른 방사성 핵종으로 변환된다. 이동 경로를 지나는 동안에 방사성 붕괴가 발생하면, 이류에 의한 이동에는 영향이 없지만 핵종 변환에 의해 흡착에 의한 이동 시간의 지연은 달라질 수 있다. 이를 반영하여 방사성 핵종 A가 붕괴되어 B로 변할 때의 붕괴 상수(decay constant)를 λ라고 하면, 해당 핵종이 이동 경로를 지나가는데 걸리는 이동 시간은 다음의 과정을 통해 계산된다[19].

1. $R_1 \in [0,1]$인 임의의 수 R_1을 균일 분포에서 선택하여 식 (3)에서 $F(\tau) = R_1$을 만족하는 τ를 구한다.
2. 핵종 A와 B에 대하여 각각의 선형 흡착에 의한 지연된 이동 경과 시간인 $t_{ret,A}$와 $t_{ret,B}$를 식 (5)를 통해 계산한다.
3. 1과 2에서 계산된 경과 시간을 합하여 핵종 A와 B가 주어진 경로를 이동하는데 걸리는 이동 경과 시간을 각각 계산한다. 즉, 핵종 A의 총 이동시간은 $t_A = \tau + t_{ret,A}$, 핵종 B의 총 이동시간은 $t_B = \tau + t_{ret,B}$이 된다.
4. $R_2 \in [0,1]$인 또 다른 임의의 수 R_2를 균일 분포에서 선택하여 방사성 붕괴가 일어나는 시점 t_d를 $t_d = -(\ln R_2)/\lambda$로 설정한다.
5. $t_A < t_d$이면, 핵종 A가 붕괴되지 않고 이동한 것이므로, 핵종의 이동 시간은 t_A로 결정된다.
6. $t_A > t_d$이면, 방사성 붕괴에 의해 핵종 A와 B로 변환되어 이동한 것이므로, 경로에서 각각의 핵종이 이동한 부분을 반영하여 총 이동 시간을 $t_d + (1 - (t_d/t_A))\, t_B$로 계산한다(Fig. 1).

핵종의 유입량을 일정한 개수의 입자로 대응시켜 설정하고, 각각의 입자에 대하여 앞에서 서술한 알고리즘을 적용하면, 일정한 거리만큼 떨어진 지점에 도착하는 핵종 입자의 이동 시간에 대한 누적 분포를 구할 수 있다. 그 결과를 이용하여 일정 거리에서의 시간에 따른 핵종의 이동량을 구할 수 있다. 이런 이유로 계산에 이용되는 입자의 수가 많아질수록 균일 분포에서 임의의 수를 선정하는 과정에서 발생할 수 있는 편향(bias)이 감소되어 지속적인 방사성 붕괴의 모사와 같은 효과를 얻을 수 있고, 계산 결과도 기존에 알려진 방법들과 유사하게 얻을 수 있게 된다.

3. 해석해 및 기존 모델과의 비교

앞에서 제시한 TDRW 기법 및 그 계산 알고리즘을 이용하여 다공성 지하 매질에서 지하수 흐름에 따라 이동하는 용질의 이동 경과 시간을 계산하는 수치모의 코드를 작성하였다. 작성된 코드는 앞에서 설명한 알고리즘을 따라 계산을 수행하여 일정한 구간의 다공성 매질에서 이동하는 핵종의 이동 경과 시간을 계산하는데 이용되었다. 작성된 코드가 의도된 작업을 적절히 수행하는가를 평가 및 검증하기 위해, 모의 영역을 가정하여 계산된 결과를 해석해와 방사성 핵종의 이동에 의한 방사선적 영향을 평가하는데 널리 이용되는 수치모의 프로그램인 RESRAD-OFFSITE [20]가 계산한 결과와 비교하였다.

3.1 해석해와의 비교

작성된 코드가 적절한 계산을 수행하는지를 알아보기 위해 해석해와 비교하였다. 여기에서는 일정한 양의 핵종이 지하 매질에 순간적으로 주입되어 식 (1)의 방정식에 의해 이동하는 조건에 대한 해석해를 이용하였다. 유입되는 지점에서 지하수의 흐름 방향의 단면적 당 유입되는 붕괴상수가 λ인 핵종의 양을 M이라고 하면, 일정 거리 L에서 시간 t가 지났을 때의 농도는 다음과 같은 해석해로 나타난다[16,17].

$$C(x,t) = \frac{M}{\sqrt{4\pi(D_x/R)t}} \exp\left[-\frac{(RL - v_x t)^2}{4RD_x t}\right] \exp(-\lambda t) \qquad (6)$$

해석해와 수치모의를 통해 계산한 결과를 비교하기 위해, 가상의 핵종 이동을 설정하였다. 가상 핵종의 반감기는

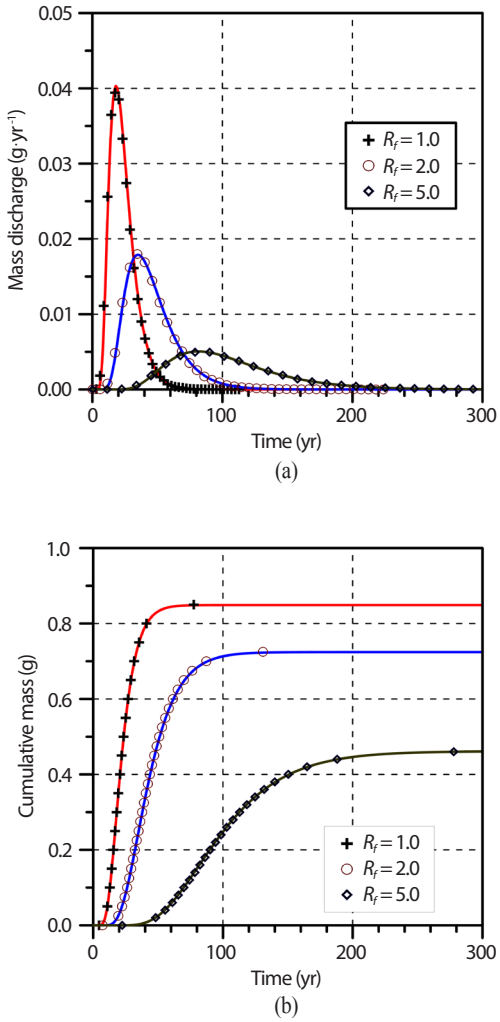


Fig. 2. Comparison of the results simulated by the analytical solution and the developed method according to retardation factor (R_f) (a: breakthrough curve of mass discharge, b: cumulative mass).

100년, 이동 거리는 20 m, 지하수의 선속도는 1.0 m·yr^{-1}, 분산도는 2.0 m으로 가정하였다. 또한 흡착에 의한 핵종 이동 지연 현상과 그로 인한 방사성 붕괴가 핵종 이동에 끼치는 영향을 확인하기 위해 지연 계수(R)를 각각 1.0, 2.0, 5.0이 되도록 설정하였다.

앞에서 가정한 조건을 이용하여 작성된 코드로 계산한 결과를 해석해와 비교하면, 시간이 지남에 따라 주어진 거리에 도착하는 용질의 양의 변화(Fig. 2(a)) 및 누적된 용질의 양(Fig. 2(b)) 모두 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 일부에서 작은 차이를 보이기도 하는데 이는 일정한 확률분포에서 선정된 임의의 변수를 이용하여 계산하는 TDRW 기법의 특성에 의한 것으로 생각된다. 이런 조그마한 차이는 계산이 쓰이는 입자의 개수를 늘리면 감소할 것으로 판단된다.

흡착이 고려되지 않은 경우(R=1)에 비하여, 흡착이 고려되는 경우를 보면, 흡착에 의한 핵종 이동 지연 효과가 잘 나타나고 있으며, 해석해와 일치하는 결과를 보인다(Fig. 2(a)). 또한 이동 시간 지연에 의해 이동에 요구되는 경과 시간이 길어지면서 방사성 붕괴가 더 많이 일어나게 되어, 이동되는 핵종의 총량은 감소하는 것으로 나타났다. 이런 효과는 흡착계수가 커질수록 더 크게 나타났다(Fig. 2(b)).

3.2 기존 모델과의 비교

핵종의 이동을 계산하는데 널리 쓰이는 다른 프로그램의 결과와 비교하여 작성된 코드가 의도된 계산을 적절히 수행하는지를 평가하였다. 비교를 위해 사용된 프로그램은 지표 또는 지하 천부에 존재하는 방사성 핵종이 지하수 또는 대기의 바람에 의해 이동하게 될 때, 인간 및 지표면의 다른 환경에 끼치는 방사선적 영향을 평가하는데 자주 사용되는 RESRAD-OFFSITE [20]이다.

RESRAD-OFFSITE는 지표 부근의 방사성 물질이 대기 또는 지하수를 통해 인간의 거주 환경이나 자연 환경으로 이동하는 일이 발생했을 때, 인간 또는 동식물에 대한 피폭 선량을 계산하는 용도로 매우 폭넓게 이용되는 프로그램이다 [20]. 이 프로그램은 미국의 국립연구소 중 하나인 Argonne National Laboratory에서 개발하였고, 미국의 원자력 이용과 관련된 규제 기관인 NRC (Nuclear Regulatory Commission)가 원자력 시설의 해체 및 인허가 종료를 위한 위해성 평가에 사용하도록 승인하였다.

RESRAD-OFFSITE와 작성한 코드 사이의 비교를 간결하게 하기 위해서 모의 영역을 설정하였는데, 여기에 몇 가지 조건을 가정하였다. 핵종이 포함된 폐기물이 지표면 위나 불포화대가 아닌 대수층에만 존재하여 방사성 핵종은 불포화대를 거치지 않고 바로 지하수로 포화된 대수층에서 용해되어 이동하는 것으로 가정하였다. 대수층 하부의 천연 방벽인 모암에서 방사성 핵종이 올라와 대수층을 통해 이동한다는 심층처분 안전성 평가에서의 가정과 유사한 조건을 부여하기 위해 이런 가정이 이루어졌다.

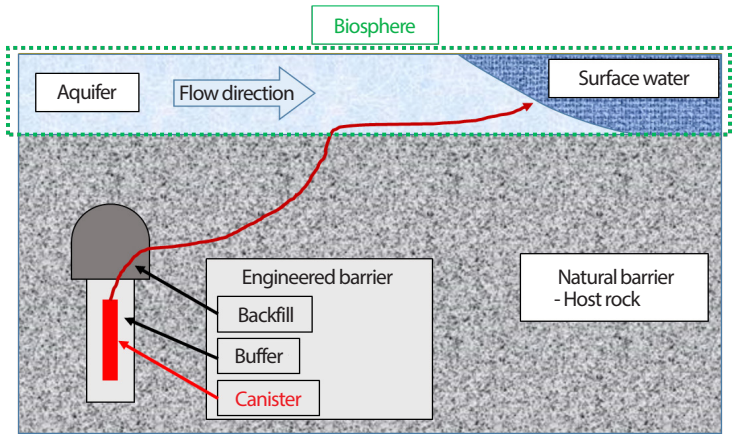


Fig. 3. Concept model for transport of radioactive nuclides from the repository to surface water body (The dotted rectangle represents the area focused on by this study).

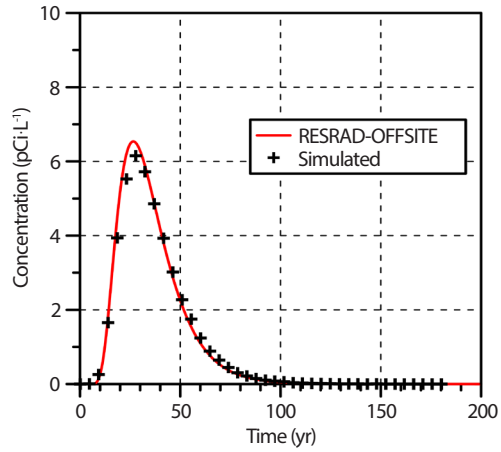
Table 1. Parameters used in numerical simulations for RESRAD-OFFSITE and the developed method

Parameter	Value
Distance to the surface water body	300 m
Hydraulic conductivity	100 $m \cdot yr^{-1}$
Hydraulic gradient	0.02
Porosity	0.2
Linear velocity	10 $m \cdot yr^{-1}$
Dispersivity	30 m
Distribution coefficient of ^{129}I	0.0
Half-life of ^{129}I	1.57×10^7 yr

RESRAD-OFFSITE가 원래 지상 또는 불포화 상태의 지하에 존재하는 방사성 오염 토양 또는 폐기물에 존재하는 방사성 핵종이 바람에 의해 침식되어 대기중으로 이동하거나 불포화대 및 포화대에서의 지하수 흐름에 의해 용해되어 이동하는 것을 계산하는데 사용된 프로그램이다. 그러나 최근에 개선된 RESRAD-OFFSITE (Ver. 3.2 이상)는 방사성 물질이 포화대 내에 존재하여 핵종의 용해 및 이동이 포화대 안에서만 일어나는 조건을 계산할 수 있게 되었다. 이 연구에서는 이런 기능을 이용하여 포화대 내에서만 핵종의 이동이 일어나도록 설정하였다.

방사성 핵종은 균일한 수리특성을 가진 대수층을 따라 이동하여 호수나 바다와 같이 부피가 매우 큰 지표수체에 도달하여 모두 유출되는 것으로 설정하였다. 즉, 천연 방벽을 통과하여 대수층 하부로 유입된 방사성 핵종은 포화대를 거쳐 지표수체로 유출되는 것으로 가정하였다. 이는 심층처분장에서 유출되어 공학적 방벽과 천연 방벽을 이동해 온 방사성 핵종이 생물권에 해당하는 대수층으로 유입되는 조건을 반영하면서, 작성된 코드와의 비교를 위해 대수층에서의 이동을 단순하게 나타낸 것이다(Fig. 3).

작성된 코드를 이용하여 대수층에 유입된 핵종이 지표수체에 도달하기까지의 이동 경과 시간을 계산하여, RESRAD-OFFSITE에서 계산된 지표수체에서의 핵종의 농도 변화와 비교하였다. 계산에 쓰인 핵종은 ^{129}I로 하였다. 해당 핵종의 반감기는 1.57×10^7년이며, 분배계수는 0으로 하여 흡착이 없는 것으로 가정하였다[21]. RESRAD-OFFSITE 및 수치모의에 이용된 다른 주요 변수는 Table 1에 정리하였다.



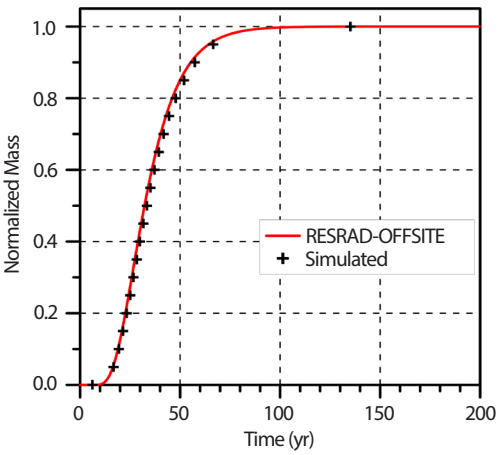


Fig. 4. Comparison of the results simulated by the RESRAD-OFFSITE and the developed method (a: breakthrough curve of concentration, b: cumulative normalized mass).

Fig. 4에 계산된 결과를 비교하였다. Fig. 4(a)의 농도는 RESRAD-OFFSITE에서 나타내는 방식대로 하여 시간에 따라 유입되는 핵종의 양을 지표수체의 전체 부피로 나눈 값을, Fig. 4(b)의 누적량은 지표수체에 유입된 핵종의 양을 총량이 1로 되도록 표준화하여 제시하였다.

Table 1에서 제시한 조건을 이용하여 수치모의한 결과와 RESRAD-OFFSITE 계산 결과를 비교하면, 시간이 지남에 따라 주어진 거리에 도착하는 용질의 양의 변화(Fig. 4(a)) 및 누적된 용질의 양(Fig. 4(b)) 모두 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 앞의 해석해의 경우와 비슷하게, 작은 차이가 나타나는

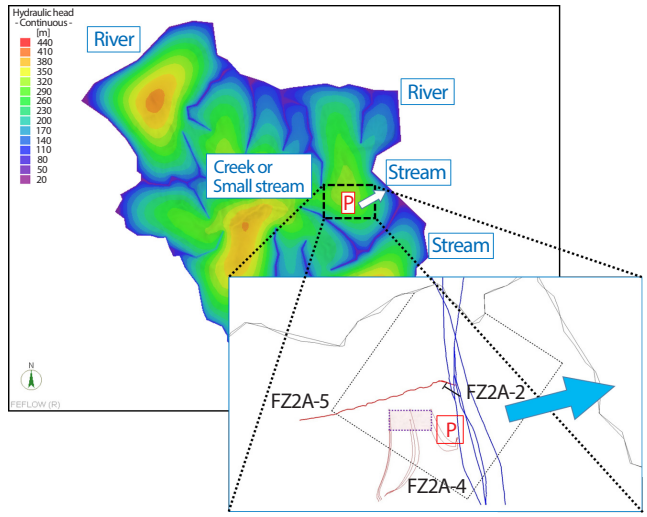


Fig. 5. Schematic description for the position where the radionuclide appears (P) and the transport direction represented by arrows in the aquifer (not to scale, modified from [13]).

것은 TDRW 기법의 특성에 의한 것으로 생각된다. 계산에 이용된 핵종(^{129}I)의 반감기가 1.57×10^{7}년으로 계산에 이용된 이동 거리를 핵종이 이동하는데 걸리는 시간에 비해 매우 길기 때문에, 방사성 붕괴로 인한 핵종 감소의 효과는 거의 나타나지 않았다.

4. 현장 조건에 적용

실제 현장 조건에서의 적용성 검토를 위해 작성한 코드를 이용하여 천부 지하수 환경에서의 핵종 이동 양상을 평가하였다.

4.1 현장 조건

이전 연구[12,13]에서는 TDRW 기법을 이용하여, 가상의 처분장에서 공학적 방벽을 거쳐 공학적 방벽의 마지막 부분이 되는 지하 천부의 대수층으로 이동하는 방사성 핵종의 이동 경로를 계산하여 도시하였다. 이 연구에서는 작성된 코드를 활용하여 대수층까지 이동한 방사성 핵종이 생물권에 해당하는 천부 지하 환경을 거쳐 지표수체인 하천에 이르는 이동 양상을 모의하였다.

Table 2. Parameters used in numerical simulations for application to the field condition [8,21]

Parameter	Value
Distance to the adjacent river	3,000 m
Hydraulic conductivity	10 $m \cdot yr^{-1}$
Hydraulic gradient	0.02
Porosity	0.2
Linear velocity	1.0 $m \cdot yr^{-1}$
Dispersivity	300 m
Distribution coefficient of ^{129}I	0.0
Half-life of ^{129}I	1.57×10^7 yr

Fig. 5에는 천연 방벽을 거쳐 지하 천부 환경의 대수층에 도달하는 지점과 이 지점에서 대수층을 따라 부근의 하천으로 이동하는 방향을 표시하였다. 핵종이 도달하는 지점에 위치한 지표수체는 핵종 도달 지점에서는 비교적 작은 하천이지만, 이후에 보다 규모가 큰 강으로 합류하는 지류이다. Fig. 5에 나타낸 방향으로의 이동 거리 및 대수층의 특성은 Table 2에 정리하여 제시하였다. 계산에 이용된 핵종은 ^{129}I이다.

4.2 핵종 이동 평가 결과

실제 현장 조건의 자료를 이용하여 지표 부근의 대수층에 도달한 방사성 핵종이 지표수체로 이동하는 양상을 계산하였다(Fig. 6). 계산 결과는 일반적인 용질 이동 양상과 유사하게 나타났다. 이 모의에서는 흡착이 없는 것으로 가정하였기 때문에 누적 이동량이 50%를 넘어서는 시점이 핵종의 이동 거리를 이동 속도로 나눈 3,000년경으로 나타났으며, 그 3배 정도인 9,000년 안에 총 누출량의 95% 이상이 지표수체로 유출되었다.

모의 결과는 방사성 핵종이 천연 방벽과 생물권이 접하는 지점에 도달하는 시기와 생물권에서 환경에 직접적으로 영향을 줄 수 있는 시기에 시간적 차이가 발생 할 수 있으며, 그로 인해 지표 환경에서 나타나는 방사성 핵종의 최대 시간당 이동량 또는 농도가 변할 수 있어 최종적으로 평가되는 선량에도 영향을 끼칠 가능성이 있음을 보여주었다.

이런 방법은 천연 방벽을 통과한 방사성 핵종이 방사선적 영향을 받을 수 있는 수용체 각각으로 이동하는 양상을 매우 단순하게 표현한 이전 연구에 비해, 생물권에서의 핵종 이동에 대한 보다 현실적인 평가를 가능하게 해 줄 수 있다. 또한 지표 환경의 장기 변화로 인해 생물권에서의 지하수 유동 환경이 변화하면, 그에 따라 변화하는 핵종의 이동 양상을 예측하는 것에도 적용될 수 있을 것이다.

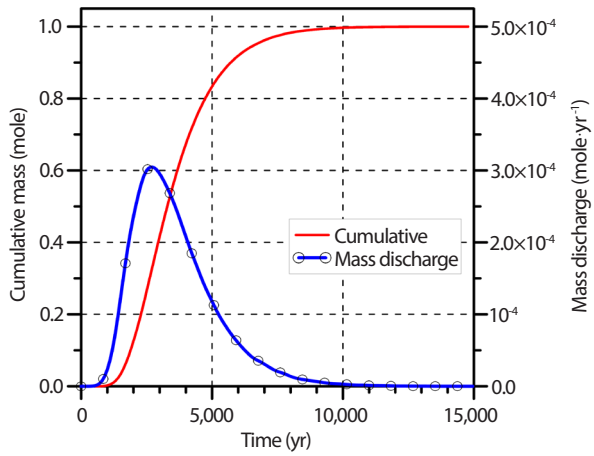


Fig. 6. Results of the numerical simulation with near-surface field conditions.

5. 요약 및 결론

심층처분의 안전성 평가에서 핵종의 이동을 모의할 때, 천연 방벽을 통과하여 생물권에서 이동하는 핵종의 양상을

계산하는 방법으로 핵종의 이동 경과 시간을 이용하는 방법을 제안하였다. 생물권에서의 핵종 이동 경과 시간은 다공성 매질에서 방사성 핵종의 이동 시간을 계산하는 기법인 TDRW 방법을 이용하였다. TDRW 방법과 그것을 이용해 작성된 알고리즘을 구현하는 컴퓨터 코드를 작성하여, 코드의 계산 결과를 해석해 및 방사성 핵종의 이동에 의한 피폭 선량 평가에 널리 이용되고 있는 기존의 프로그램인 RESRAD-OFFSITE의 모의 결과와 비교하였다. 비교 결과는 해석해 및 RESRAD-OFFSITE의 결과와 거의 일치하였다. 이렇게 검증 과정을 거친 코드를 이용하여, 심층처분장에서 누출되어 천연 방벽을 거쳐 생물권에 속하는 지표의 대수층에 도달한 방사성 핵종이 대수층에서 근처의 지표수체로 이동하는 양상을 계산하였다.

가상의 처분장을 대상으로 이루어진 국내 연구에서는 처분시스템에 대한 성능 평가 및 안전성 평가의 입력 자료로 활용하기 위해, 핵종의 이동 경로 및 이동에 소요되는 시간을 계산하였다. 다만, 이동 경로의 끝을 천연 방벽과 생물권에 속하는 대수층이 만나는 지점으로 설정하였기 때문에, 생물권에서의 핵종 이동은 고려되지 못했다. 이 연구에서 제안된 방법을 이용하면 생물권에서의 핵종 이동을 계산할 수 있게 되므로, 방사성 핵종이 처분용기에서 누출되어 지표환경으로 배출되는 지점에 도달하는 모든 경로를 고려할 수 있게 된다. 최대 농도가 나타나는 시점도 천연 방벽과 같은 심부 암반을 통과해 나오는 시점이 아니라, 생물권을 이동하여 핵종이 최종적으로 도달하는 위치에서의 시점으로 계산할 수 있게 된다. 최종적으로 도달하는 위치에 있는 호수나 바다와 같은 지표수체에서의 핵종 농도를 직접적으로 계산하게 된다면, 해당 지표수에 노출되거나 지표수의 음용 또는 지표수체에 서식하는 동식물의 섭취 등에 의한 피폭의 정도를 선량변환계수를 이용하여 직접적으로 계산할 수 있다. 즉, 처분용기에서 누출되는 방사성 핵종에 의한 피폭선량을 직접적으로 제시할 수 있는 것이다. 생물권의 이동을 반영하기 때문에, 그렇지 않은 경우에 발생할 수 있는 불확실성도 줄일 수 있고, 불확실성의 정도도 정량적으로 평가할 수 있다.

사례 연구로 제시된 핵종 이동 평가 절차 및 결과는 지표 부근의 환경 변화가 거의 없는 처분장 폐쇄 후의 초기 기간에, 예기치 않은 사건(event)으로 인해 발생한 방사성 핵종의 누출로 인한 영향을 평가하는데 그대로 적용할 수 있을 것으로 생각된다. 또는 처분장 부지의 지표 변화가 장기간에 걸쳐 크게 일어나지 않는 환경일 경우에도 생태계에서 이동하는 방사성 핵종의 시간에 따른 양적 변화를 직접적으로 평가하는데 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 만약 시간에 따라 변화하는 지표환경에 대한 정보가 주어진다면, 이 연구에서 제시한 방법을 통해 핵종의 이동을 계산하여 변화하는 환경에 의한 핵종 이동 양상의 변화를 예측할 수 있을 것이다.

심층처분에서의 안전성 평가에서 방사성 핵종의 이동에 의해 발생하는 호흡, 노출, 섭취에 의한 피폭을 가정할 때, 천연 방벽에서 흘러나와 생물계에 유입되는 핵종의 이동 및 그로 인한 피폭 선량을 보다 직접적으로 평가하기 위해서는, 생물계에서의 핵종 이동도 함께 평가되어야 할 것이다. 지표 부근의 환경에 대한 장기적인 변화를 예측할 수 있는 시스템이 갖추어져 활용될 수 있다면, 그 결과를 핵종이 이동하는 영역에 대한 입력 자료로 활용하여, 생물계로 유입된 방사성 핵종의 이동 양상의 변화도 평가되어야 할 것이다. 그러한 절차에 이 연구에서 제시된 핵종 이동 경과 시간 평가 방법이 방사선적 영향의 최종 수용체에 대한 피폭 선량 또는 방사성 핵종의 이동량을 계산하는데 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 기대한다.

Acknowledgement

이 논문은 한국연구재단의 원자력연구개발사업의 지원을 받았음을 밝힌다(NRF-2017M2A8A5014858).

REFERENCES

[1] H.J. Choi, J.Y. Lee, and J. Choi, “Development of Geological Disposal Systems for Spent Fuels and High-level Radioactive Wastes in Korea”, Nucl. Eng. Technol., 45(1), 29-40 (2013).

[2] Posiva, Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto – Synthesis 2012, Posiva Report, POSIVA 2012-12 (2012).

[3] Posiva, Annual report 2018, Posiva Oy (2019).

[4] Svensk Kärnbränslehantering AB, Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark

- Main report of the SR-Site project, SKB Technical Report, SKB TR-11-01 (2011).

[5] Radioactive Waste Management, Geological disposal – Overview of the generic disposal system safety case, Nuclear Decommissioning Authority (NDA) Report, NDA Report No. DSSC/101/01 (2016).

[6] Posiva, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Terrain and Ecosystems Development Modelling in the Biosphere Assessment BSA-2012, Posiva Report, POSIVA 2012-29 (2013).

[7] Svensk Kärnbränslehantering AB, Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Site, SKB Technical Report, SKB TR-10-49 (2010).

[8] Korea Atomic Energy Research Institute, Geological disposal of pyroprocessed waste from PWR spent nuclear fuel in Korea, KAERI Technical Report, KAERI/TR-4525/2011 (2011).

[9] Korea Atomic Energy Research Institute, A safety case of the conceptual disposal system for pyro-processing high-level waste based on the KURT Site (AKRS-16): Safety case synthesis report, KAERI Technical Report, KAERI/TR-6726/2016 (2016).

[10] C. Zheng and G.D. Bennett, Applied Contaminant Transport Modeling, 2nd ed., 621, John Wiley and Sons, Inc., New York (2002).

[11] O. Banton, F. Delay, and G. Pore, "A New Time Domain Random Walk Method for Solute Transport in 1-D Heterogeneous Media", Ground Water, 35(6), 1008-1013 (1997).

[12] Y. Hwang, N.Y. Ko, J.W. Choi, and S.S. Jo, "Radionuclides transport from the hypothetical disposal facility in the KURT field condition on the time domain", J. Korean Radioact. Waste Soc., 10(4), 295-303 (2012).

[13] N.Y. Ko, J. Jeong, K.S. Kim, and Y. Hwang, "Travel times of radionuclides released from hypothetical multiple source positions in the KURT site", J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol., 11(4), 281-291 (2013).

[14] R.A. Freeze and J.A. Cherry, Groundwater, Prentice-Hall, Inc., New Jersey (1979).

[15] S. Painter, V. Cvetkovic, J. Mancillas, and O. Pensado, "Time-Domain Particle Tracking Methods for Simulating Transport with Retention and First-Order Transformation", Water Resour. Res., 44(1), W01406, doi:10.1029/2007WR005944 (2008).

[16] A. Kreft and A. Zuber, "On the Physical Meaning of the Dispersion Equation and Its Solution for Different Initial and Boundary Conditions", Chem. Eng. Sci., 33(11), 1471-1480 (1978).

[17] J.P. Sauty, "An analysis of hydrodispersive transfer in aquifers", Water Resour. Res., 16(1), 145-158 (1980).

[18] S.L. Painter, V. Cvetkovic, and O. Pensado, "Time-Domain Random Walk Algorithm for Simulating Radionuclide Transport in Fractured Porous Rock", Nucl. Technol., 163(1), 129-136 (2008).

[19] R. Yamashita and H. Kimura, "Particle Tracking Technique for Nuclide Decay Chain Transport in Fractured Porous Media", J. Nucl. Sci. Technol., 27(11), 1041-1049 (1990).

[20] E.K. Gnanapragasam and C. Yu, User's Guide for RESRAD-OFFSITE, United States Nuclear Regulatory Commission (U.S. NRC), NUREG/CR-7189 (2014).

[21] M.L. Rockhold, C.M.R. Yonkofski, J.L. Downs, V.L. Freedman, S.R. Waichler, and M.J. Truex, Draft Technical Impracticability Evaluation for Iodine-129 in Groundwater at Hanford: 200-UP-1 Operable Unit, Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-28057 (2018).