A Deterministic Safety Assessment of a Pyro-processed Waste Repository

A-KRS 처분 시스템 결정론적 안전성 평가

Youn-Myoung LEE¹⁾, Jongtae JEONG and Jongwon CHOI

Korea Atomic Energy Research Institute, 989-111 Daedeok-Daero, Yuseong-Gu, Daejeon

이연명¹⁾, 정종태, 최종원

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received August 16, 2012 / Revised September 10, 2012 / Approved September 11, 2012)

Abstract

A GoldSim template program for a safety assessment of a hybrid-typed repository system, called "A-KRS," in which two kinds of pyro-processed radioactive wastes, low-level metal wastes and ceramic high-level wastes that arise from the pyro-processing of PWR nuclear spent fuels are disposed of, has been developed. This program is ready both for a deterministic and probabilistic total system performance assessment which is able to evaluate nuclide release from the repository and farther transport into the geosphere and biosphere under various normal, disruptive natural and manmade events, and scenarios. The A-KRS has been deterministically assessed with 5 various normal and abnormal scenarios associated with nuclide release and transport in and around the repository. Dose exposure rates to the farming exposure group have been evaluated in accordance with all the scenarios and then compared among other.

Key words : A-KRS pyro-processed waste, repository system, deterministic safety assessment, GoldSim

요 약

파이로 처리 방사성 폐기물 처분 시스템 A-KRS에 대한 결정론적, 확률론적 안전성 평가가 가능하도록 골드심 프로그램을 개발하였다. 처분장에서 핵종이 유출되어 다양한 처분 시스템 내 매질을 이동하는 것에 관련된 주요 시나리오를 도출하기 위하여 처분 시스템을 구성하는 각 요소 별로, 그리고 처분 시스템 내 핵종의 이동에 관여하는 FEP을 인지 선별하여 수학적 모델을 개발하고 이를 골드심 템플릿 프로그램으로 개발하였다. 이 프로그램을 이용하여 폐쇄후 방사선적 안전성 평가를 결정론적으로 수행하여 5개의 정상 및 비정상 시나리오를 평가하여 그 결과를 상호 비교하였다.

중심단어 : A-KRS 파이로 처리 폐기물, 처분 시스템, 결정론적 안전성 평가, 골드심

1) Corresponding Author. E-mail : ymlee@kaeri.re.kr

I. 서 론

수년 전까지만 해도 PWR과 CANDU 원자로에서 발생하는 사용후 핵연료가 우리나라의 유일한 고준위 방사성 폐기물은 개념이었다. 사용후 핵연료는 스웨덴의 KBS-3I와 유사한 개념인 “KRS”라는 한국형 방사성 폐기물 처분 개념으로 개발된 지하 500m 정도의 심부 암반층에 건설된 동굴 처분장에 직접 처분하는 방안으로 고려되어왔다.[2] 그러나 이러한 처분 시스템은 사용후 핵연료를 직접 처분하는 대신, 사용후 핵연료를 파이로 처리(pyroprocessing)하여 이에 따라 발생하는 2차 방사성 폐기물을 처분하는, 보다 새로운 A-KRS 개념으로 변경되었다.

직접 처분 대상이었던 사용후 핵연료가 아닌 파이로 처리 폐기물이라는 새로운 선원형을 갖게 되는 이 A-KRS 개념은, 그림 1에 보이는 것처럼 지하 매질 내 깊이가 심도를 갖는 복층 형태로서, 처분되는 방사성 폐기물의 종류에 따라 처분 심도를 달리 하고 있는 것이 특징이다. 이 개념에 따르면 지표로부터 200m 깊이의 천지층에는 중저준위 방사성 폐기물로 볼 수 있는 금속폐기물 (Metal LLW) 을, 그리고 500m 깊이의 심지층에는 고준위 방사성 폐기물로 간주할 수 있는 세라믹 폐기물 (Ceramic HLW) 을 나누어 처분하는 것으로 되어 있다. 200m 깊이에 터널을 굴착하여 터널 내에 처분하는 금속 폐기물은 여전히 장반감기이긴 하지만 붕괴열을 거의 갖지 않는 핵종을 함유한다. 200m의 깊이는 일상이고 장기적인 시간에 비추어 인간의 침입 한계를 고려했을 때 최소한의 격리 심도로 여겨지는 반면, 보다 고방사능을 가지며 붕괴열도 비교적

높은 핵종을 갖는 세라믹 폐기물의 경우는 스웨덴의 KBS-3 개념의 사용후 핵연료의 처분이나 이전 KRS 개념과 사실상 다르지 않은 형태로서, 환원환경을 갖는 500m 깊이의 심지층에 굴착된 처분 터널의 바닥 처분공에 처분되는 개념이다.

이러한 처분 시스템은 우리 나라의 지형적 영향을 고려해 볼 때 그림 2에 모식화한 전형적인 형태를 갖게 될 가능성이 크다. 이러한 처분 시스템 내에서 폐기물에서 유출된 핵종의 정상적인 이동은, 처분장에 지하수가 침투된 후, 용기나 캐니스터가 부식되고 핵종이 유출되면, 처분장 주변 인공방벽으로 이루어지는 처분 시스템 근계 영역(near-field)으로 이동하고, 이후 처분장의 모암 내 천연 방벽으로 이루어지는 원계 영역(far-field)

Fig. 1. Conceptual A-KRS repository.

Fig. 2. A repository concept.

으로 계속하여 이동하는 형태의 시나리오로 생각할 수 있다. 그러면 그림 2에 기술된 바와 같이 모암 내 원계 영역 내에 존재하는 형태로, 단층에서와 같이 지하수의 유동이 급격히, 선택적으로, 그리고 대량적으로 이루어지는 MWCF (major water conducting feature or fault) 지역을 만나게 되어, 이를 지나 지하매질과 생태계의 경계 (geosphere-biosphere interface; GBI)를 통하여 핵종이 생태계로 결국 유출되고, 이후로는 인간 생태 환경에서의 이동과 다양한 피폭 경로를 통하여 인간에게 피폭을 주게 되는 것으로 상정할 수 있게 된다.

이 연구의 목적은 이러한 파이로 처리 방사성 폐기물 처분 시스템 (A-KRS)에 대하여 폐쇄 후 방사선적 안전성 평가를 결정론적으로 수행한 결과를 제시하는 것이다. 이를 위해 핵종이 처분장으로 부터 유출되어 다양한 처분 시스템 내 매질을 이동하는 것에 관련된 5개의 주요 시나리오를 도출하고, 이에 대한 결정론적 평가는 물론 확률론적 평가도 병행에서 수행하고, 결정론적 평가에 관한 내용은 이 논문에서, 그리고 확률론적 평가에 대한 내용은 이 논문과 짝이 되어 이후에 발표될 “A-KRS 처분 시스템 확률론적 안전성 평가 논문”에서 별도로 분리하여 논의하고자 한다.

II. 골드심 모델링

두 개의 처분장을 상이한 형태로 갖는 A-KRS에 대해, 처분 시스템 전체를 구성하는, 폐기물이 처분된 처분장, 인공방벽으로 구성되는 근계영역, 그리고 천연방벽인 원계영역과 GBI를 넘어 생태계에 이르기까지 각 요소 별로, 처분 시스템 내 핵종의 유출과 이동에 관여하는 다양한 특성, 사건, 그리고 과정 (feature, event, and process; FEP)을 인지 선별하고 이를 통하여 핵종이 처분장으로부터 유출되어 인간에게 피폭을 주기까지의 시나리오를 도출하였다. 이러한 시나리오에 따라 처분 시스템을 구성하는 모듈 별로 수학적으로 모델링한 후, 처분 시스템의 안전성을 평가할 수 있는 수 있도록 상용 모사 프로그램 개발을 위한 골드심(GoldSim)[4]을 이용하여, 입력 자료만 준비되면 결정론적, 확률론적 종합안전성평가가 가능하도록 템플릿 (template) 프로그램(코드)으로 개발하였다. 다양한 정상 및 비정상 시나리오를 효율적으로 평가할 수 있는 종합 안전성 도구로서 이용 가능한 이러한 평가 코드는, A-KRS는 물론, 다양한 형태의 처분 시스템에 대해서도 안전성 평가를 수행할 수 있도록 그 체계가 마련되었다.

가. 골드심 개요

GoldSim은 범용 시뮬레이션 패키지로 미국 에너지성이 고

준위폐기물 처분을 위한 야카마운틴 프로젝트를 지원하기 위해 개발된 핵종 이동 모사 프로그램으로, 이를 골드심사가 상용화하여 질량의 유동이 존재하는 시스템을 편리하게 모사할 수 있도록 범용으로 개발한 프로그램 개발 도구이다.

Element라고 불리는 그래픽 객체들을 조합하여 사용함으로써 프로그램을 직관적으로 개발하는 방식의 GoldSim은 다양한 모듈을 용도에 맞게 제공하는데, 그 중 Transport Module은 처분 환경과 같이 복잡한 질량 이동 시스템을 모사할 수 있도록 특화된 것으로, 이 모듈을 통해 핵종이나 오염물의 질량의 흐름과 그 결과로서 인간에게 주는 영향을 평가할 수 있는 템플릿 형태의 프로그램의 개발을 가능하게 해준다.

GoldSim은 아래에 논의될 질량 이동에 관한 상미분 방정식과 편미분 방정식 이렇게 2개의 지배 방정식만으로 매질 내 질량 이동을 기술하도록 하지만, 지하수 유동을 위한 지배 방정식은 따로 존재하지 않아 지하수 유동을 직접적으로 모사할 수는 없게 된다. 여러 element 중에서도 cell, pipe, external pathways, 그리고 network pathways 등 이렇게 4개의 물리적인 element가 “pathway” 형태로서 매질 내 질량의 이동이나 보유를 표현할 수 있도록 미리 제공하여, 사용자는 이들 pathway를 실제 시스템을 적절히 모사하도록 해 주는데, 우선 형태나 매질 내 물질을 정의하고 적절한 조합과 입력 자료를 통하여 상호 연결하고 선원향을 구성함으로써 처분 시스템 내 핵종 이동 및 거동에 관한 수학적 모델을 템플릿으로 구현할 수 있도록 해 준다. 결국 처분 시스템은 이들 pathway의 네트워크로 구성되는 개념이 된다.

GoldSim과 무관하게 독립적으로 개발된 질량 이동이나 유체 유동 등에 관한 다양한 수치 및 해석적 형태의 외부 프로그램 모듈을 GoldSim에 연결할 수 있도록 하는 동적 링크 라이브러리 (dynamic link library; dll)로서 external pathway나 균열 암반과 같이 복잡한 균열 매질의 일차원적 네트워크 모델을 다중 pipe로 접근할 수 있도록 하는 network pathway를 제외하면 실제로 cell과 pipe가 질량 이동을 기술하는 주요한 2개의 물리적 매질로서의 pathway로 볼 수 있다. pipe의 경우는 매질의 입구에서 mass flux를 입력 받아 응답한 mass를 매질 내에서 이동시키거나 또는 보관하며 출력시키게 되어 하나의 이동응답함수 (transfer function)인 operator로 간주된다. 이는 또 하나의 pathway인 Cell의 경우도 마찬가지로, 단독의 cell의 경우 수학적으로는 엄밀히 operator로 볼 수는 없으나 연속된 cell로서는 질량을 플럭스의 형태로 받아 다른 cell이나 pipe 등으로의 이동을 잘 기술할 수 있다..

이류와 분산에 의한 질량의 이동을 기술하는데 적합하도록 마련된 Pipe에서는 핵종 농도에 관한 이류-분산 식

(advection-dispersion equation)을 라플라스 역변환을 통해 해를 구하고, 이를 통해 출구에서의 플럭스 형태로 구현하는 것과 다르게 cell 간의 이동은, 완전 혼합 탱크 (mixing tank)를 갖는 구획 (compartment)간의 질량 전달 모델로 기술된다. 즉 각 cell로서 구현되는 구획은 크기나 부피를 갖지 않는 질점으로 간주되어 이 질점 내, 그리고 각 질점 사이에서의 mass는 시간에 대한 상미분식으로 주어지는 (1)식과 같은 지배 방정식을 따르게 되는데, 수학적으로 유한차분법과 같은 방식으로 해를 제공하여 확산과 이류에 의한 물질 이동을 기술하도록 한다.

$$\frac{dm_i^s}{dt} = -m_i^s \lambda^s + \sum_{p=1}^{N_p} m_{ip} \lambda^p f_p^s S^{p \rightarrow s} \left(\frac{W^s}{W^p} \right) + \sum_{c=1}^{N_l} \phi_{l \rightarrow i}^s + S_i^s \quad (1)$$

여기서

m_i^s = mass of nuclide s in cell i [M]

p = denotes for parent of s

λ^s, λ^p = decay constant for s and parent nuclide, respectively [T^{-1}]

N^p = number of direct parents for s

f_p^s = fraction of parent which decays into s

$S^{p \rightarrow s}$ = stoichiometric ratio of moles of s produced per mole of parent decayed

W^s, W^p = molecular weight of s and parent, respectively [M/mol]

N_l = number of mass flux links from/to cell i

$\phi_{l \rightarrow i}^s$ = influx ratio of s into i through advective and diffusive mass flux link l [M/T]

S_i^s = rate of direct input of s to i from external sources [M/T]

이 때 $\phi_{l \rightarrow i}^s$ 를 통하여 다음에 기술할 pipe 등 다른 pathway와 플럭스를 통해 질량이 연계될 수 있도록 한다.

Pipe의 출구를 떠나는 이류 및 분산에 의한 플럭스는 (1)식과 달리 (2)식과 같이 주어지는데, 이에 대한 해를 위해 pipe 출구에서의 농도와 농도 구배, 그리고 유동률 (flow rate)가 필요하게 되지만, 전술하였듯이 지하수와 같은 유체의 유동에 관한 유동률은 외부 입력값이나 external pathway 모델을 통하여야 한다.

pipe를 떠나는 핵종의 질량 플럭스는 시간과 pipe의 출구에서 용액에 용해된 농도의 함수로서 (2)식과 같이 표시될 수 있다.

$$\phi^s = (1 + c^{ss} K_{ss}^s) \left\{ Qc^s - (D_s + \alpha Q) \frac{\partial c^s}{\partial x} \right\} \Big|_{x=L} \quad (2)$$

여기서

ϕ_s = flux of s leaving the pipe pathway [M/T]

c^{ss} = concentration of the suspended solid in the mobile

zone [M/L³]

Q = volumetric flow rate in the pathway [L³/T]

K_{ss}^s = sorption coefficient between the suspended solid and the fluid for s [L³/M]

D^s = effective diffusivity of s in the mobile zone [L²/T]

α = dispersivity of the pathway [L]

L = length of the pathway [L]

x = distance into the pathway [L]

c^s = dissolved concentration of s in mobile zone of pathway [M/L³] 이 되고,

이 때 이 질량 플럭스를 구하기 위해서 필요한 매질 내에서 이동되는 용액이나 매질 내의 핵종 농도 $c \cdot s$ 는 아래 (3)식의 1차원 이류-분산식을 통해 구해질 수 있다:

$$\frac{\partial c^s}{\partial t} = -\frac{Q}{\theta A R_s} \left\{ (1 + c^{ss} K_{ss}^s) \frac{\partial c^s}{\partial x} - \alpha \left[(1 + c^{ss} K_{ss}^s) + D_s \right] \frac{\partial^2 c^s}{\partial x^2} \right\} + \left\{ -c^s \lambda^s + \sum_{p=1}^{N_p} c^p \lambda^p f_p^s S^{p \rightarrow s} \frac{W^s R^p}{W^p R^s} \right\} - \frac{1}{\theta A R_s} \sum_{im=1}^{NMD} P f_{im} D_{im}^s \frac{\partial c_{im}^s}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (3)$$

여기서

A = diffusive area of the matrix zone per unit length of mobile zone [L]

θ = porosity for s

R^s, R^p = retardation factor for s and parent in the mobile zone, respectively

P = perimeter of the pathway [L]

f_{im} = perimeter fraction occupied by matrix diffusion zone [L]

D_{im}^s = diffusivity of matrix diffusion zone for s [L²/T]

NMD = number of matrix diffusion zone

c_{im}^s = concentration of s in the rock matrix diffusion zone im 이 되고,

Pipe는 cell과 달리 암반 매질 내 매트릭스 확산도 함께 기술할 수 있는데, 이 (3)식과 직각방향으로의 확산 이동에 대한 기술은 아래 (4) 식으로 주어진다:

$$\frac{\partial c_{im}^s}{\partial t} = \left\{ \frac{D_{im}^s}{\theta_{im} R_{im}^s} \frac{\partial^2 c_{im}^s}{\partial z^2} + \frac{D_{im}^s}{\theta_{im} R_{im}^s A_{im}} \frac{\partial A_{im}}{\partial z} \frac{\partial c_{im}^s}{\partial z} \right\} + \left\{ -c_{im}^s \lambda^s + \sum_{p=1}^{N_p} c_{im}^p \lambda^p f_p^s S_{p \rightarrow s} \frac{W^s R_{im}^p}{W^p R_{im}^s} \right\} \quad (4)$$

여기서

D_{im}^s = effective diffusivity of s in the matrix zone [L²/T]

θ_{im} = porosity of the matrix zone

R_{im}^s, D_{im}^p = retardation factor in the matrix zone for s and

parent, respectively

A_{im} = diffusive area of the matrix zone per unit length of mobile zone [L]

한편 (3)식에 대한 경계조건은 (5)식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} c^s &= 0 \text{ as } x \rightarrow \infty; \\ (1 + c^{ss}K_{ss}^s)Q - [D_s + \alpha(1 + c^{ss}K_{ss}^s)Q] \frac{\partial c^s}{\partial x} \Big|_{x=0} &= -\delta(t)M_0^s + \phi_b^s + \phi_e^s \end{aligned} \quad (5)$$

여기서

$\delta(t)$ = Dirac delta function [T^{-1}]

M_0^s = initial mass of s applied to the pathway [M]

ϕ_b^s = boundary flux of s [M/T]

ϕ_e^s = flux of s from external pathways [M/T]

이 되고, 매트릭스 지역에 대한 (4)식에 대한 경계조건은 아래 (6)식으로 기술된다:

$$\begin{aligned} c_{im}^s &= c^{ss} \text{ at } z = 0; \\ \frac{\partial c_{im}^s}{\partial z} &= 0 \text{ at } z = T_{im} \end{aligned} \quad (6)$$

이 때 T_{im} = thickness of the diffusion zone [L]이다.

GoldSim은 위 (3)식 에서 (6)식에 대해 Laplace transforms 을 이용하여 농도에 대한 해를 구해 주는데, (2)식을 통하여 Pipe 출구에서의 질량에 대한 플럭스를 구할 수 있게 되고, (2)식을 통하여 (1)식 내의 질량에 대한 ϕ_{i-i}^s 항을 통하여 Cell 과 Pipe간, 다시 external과 network을 포괄하는 pathway사 이에서 질량 전달을 위한 플럭스의 연계가 가능해진다.

(1)식의 지배방정식에서 보이는 대로 cell에서는 당장 그 부 피가 필요하지 않으며, 이는 질점 내외로 이류나 확산을 통해 들어 오거나 나가는 질량만을 모사하는 것을 의미하듯이 각 pathway 내에서는 주 관점은 질량뿐이며 pathway 사이 이동 하는 순간만 질량의 플럭스를 통해 연결되며, 일단 pathway 입력으로 들어 오면 연계해준 플럭스는 더 이상 무의미하게 된다. 다만 이러한 플럭스에 의해 pathway 사이에서의 질량 의 이동 속도가 결정되고 정의되게 된다.

GoldSim은 각각의 pathway 내 각 이동 물질에 대해 각각 의 질량의 양, pathway 매질 내 따로 정의해 준 부피에 따라 각각의 질량의 농도, 그리고 pathway들 사이에서의 플럭스를 시간의 함수로서 벡터값으로 계산해 준다. mass flux의 입출 력은 cell과 동일하나 pipe의 경우는 (3)과 (4)식에서처럼 농 도에 관한 지배 방정식으로 기술되는 만큼 질점인 Cell과 달 리 파이프의 dimension이 처음부터 요구된다. 그리고 플럭스 를 산출하기 위하여 파이프출구에서의 농도와 flow rate, 그

리고 파이프의 길이, 즉 핵종의 이동거리에서의 농도 구배가 필요하게 되어 이를 산출해준다. 한편 pathway 사이에서만 플럭스가 보존되고 각각의 독립된 pathway 내의 질량만 기술 되고 있는 이유로 각각의 pathway 내의 유동률은 다른 매질, 즉 다른 pathway에 대해 보존된 필요는 없게 된다.

나. 골드심 모델링

① 금속 폐기물 선원항 및 근계 영역 세부 모델링

선원항으로 구성되는 처분 용기로부터 핵종이 유출되는 경우 유출 모델은 다양하게 고려할 수 있게 된다. 이 연구를 통해서는 1) 폐기물 조직 물질의 질량의 유출에 비례하여 핵 종의 유출되는 상태를 가정하는 조화 (congruent) 유출, 2) 질량 대신 시간의 흐름에 따라 동적으로 변화하는 폐기물 표면적에 비례하여 핵종이 유출되는 것으로 가정하는 표면 적 비례 유출, 그리고 3) congruent 유출이 연간 항상 일정 하게 일어난다고 상정한 연간 단순 유출률 등 3가지 경우로 모델링하였고, 처분장 내에서는 각 핵종별로 용해도 제한치 를 부과할 수 있도록 하였다.

금속 폐기물을 처분하는 터널은 200m 깊이의 암반 내 건 설되는데, 터널을 구성하는 매질은 그림 3에서 보는 대로 polymer concrete, Ca-bentonite block buffer, crushed rock와 bentonite backfill 혼합물 등으로 복합적이다. PWR 사용후 핵연료 20,000tU 기준으로 파이프 처리한 금속 폐기 물을 터널 1개당 1,235개씩의 MWDPs (Metal Waste Disposal Packages)에 담아 터널 2개에 모두 처분하는 것으 로 하여 모델링을 수행하였다.

터널 내에 처분되는 다수의 MWDP는 이에 상응하는 한 개의 폐기물로 간주하여 그림 4에서와 같이 GoldSim 모듈 에서 WasteCell로 구현하였다.

Fig. 3. Disposal concept for metal wastes.

Fig. 4. Source term and near-field modeling for metal wastes.

폴리머 콘크리트로 이루어진 MWDP는 핵종의 이동에 대하여 방벽의 기능이나 매질의 기능을 따로 갖지는 않는 단순한 용기로 보았고, 처분 용기 (그림에서 Can)도 100년이 경과하면 핵종의 차단 기능을 완전히 상실하는 것으로 가정하였다. 이는 설계 개념상 금속 폐기물의 경우, 폐기물을 담고 있는 스테인리스 용기는, 일정한 기간이 지난 후 파손 시점을 갖도록 용기에 대해 credits를 부여 하고 있지만, 이는 일종의 차단막 같은 일시적 방벽일 뿐, 핵종의 이동을 고려하는 중간 매질로는 고려하고 있지 않기 때문이다.

폴리머 콘크리트 내의 처분 용기를 빠져 나온 핵종은 완충재와 뒷채움재를 차례로 지나 핵종의 매질 내에서 농도 구배에 의존하는 확산을 통하여 처분장 밖, 즉, 근계, 원계 영역으로 이동하는 것으로 모델링 하였다.

근계 영역으로 표현되는 터널 내에서의 핵종의 이동은, 그림 4에서 보이는 대로 다양한 경로를 통하는 것으로 GoldSim을 통하여 모사되었는데, 터널 위쪽 (Crown_Path)을 한 출구로, 터널 옆과 터널 바닥쪽 (BaseSide_Path)을 또 다른 한 출구로 모델링 하였다. 이러한 근계 영역 매질 내의 이동은 이류적 이동을 야기할 만한 지하수의 유동이 존재하지 않는다고 보아 확산에 의해서만 이루어지는 것으로 간주하였다. 이러한 확산적 이동은 그림에서 보이는 PathUp, PathLateral, PathDown 등을 통해 다중 Cell 간 핵종 이동으로 모사하였다. 이는 전술하였듯이 수학적으로 미분방정식을 수치적으로 유한 차분 하는 방법과 동일하다.

② 세라믹 폐기물 선원항 및 근계 영역 세부 모델링

200m 깊이의 금속 폐기물과 달리 세라믹 폐기물은 암반

층 지하 500m 깊이에 건설되는 처분 터널 바닥내 처분공 (deposition hole)에 처분된다.

처분장의 매질은 그림 5에서 보는 대로 ceramic Blocks, Ca-bentonite block buffer, 그리고 crushed rock과 bentonite의 혼합물로 이루어지는 backfill 등으로 구성된다.

금속폐기물의 경우와 달리 그림 5에서 보는 것처럼 보다 복잡한 형태의 세라믹폐기물의 경우, 터널 매질 내, 즉 처분 시스템 근계 영역에서의 핵종 이동 모델링은 금속 폐기물의 경우와 매우 다르게 이루어졌다. 그림 6에서 보는 대로 처분 캐니스터 주변의 상부 (plug) 및 측면 완충재를 2차원 다중 Cell로 나누고 이들 Cell 간의 핵종의 이동은 확산에 의해 일어나는 것으로 하였다. 다만 처분공 윗 쪽의 터널 부분 뒷채움재는 수치모델링 상 충분하다고 판단되어 단일 Cell로만 모사하였다. 마찬가지로 터널과 처분공 인접 암반 내 굴착에 따른 간섭 지대 (EDZ)에 대해서도 1차원 Cell로서 모사하였다. 그러나 EDZ 내 Cell간의 핵종 이동 메커니즘은 확산뿐 아니라 지하수의 유동도 존재한다고 보아 이에 따른 핵종의 이류에 의한 이동도 함께 고려하였다.

처분공 부분과 처분공과 연계된 터널 바닥 부분, 이렇게 두 지점이 주변 모암의 지하수의 유동 지역을 만나는 것으로 간주하고, 이 부분을 통하여 근계영역으로부터 모암의 균열 암반 매질 내로 핵종 전달이 이루어지는 것으로 하였다.

또한 세라믹 폐기물 처분장의 경우는 금속 폐기물 처분장의 경우와 다르게 각 처분공은 다양한 지하수의 유동 패턴과 관계한다고 가정하였다. 처분공은 세 가지의 유동 패턴을 갖는 지하수 환경에 처한다고 보아, 처분장 상부로부터 지하수가 처분 터널로 유입되는 경우 (outflow), 처분장 하부에서의 지하수의 수두가 보다 높아 위 방향으로 유입되는 경우 (inflow), 그리고 지하수 유입이 전혀 일어나지 않는 경우 (no flow)에 처분공이 위치하는 시나리오를 적용하였다. 이는 처분장 내 처분된 폐기물 모두가 유동하는 지하수나 혹은 일정하게 유동하는 지하수와 접촉하고 있지는 않다

Fig. 5. Disposal concept for ceramic wastes.

는 가정에 따른 것이다.

처분장 내 완충재와 뒷채움재를 확산을 통해 이동한 핵종은 인접한 EDZ로 전달된다. 이 때 지하수 유동 패턴에 따라 EDZ 내의 핵종의 이동은 상호 차이를 가지게 되는데, outflow의 경우는 처분공의 상부, 즉 터널 바닥 부분 균열과 접촉된 부분을 통하여 모암 내 균열을 따라 유동하는 지하수와 함께 원계 영역으로 이동하지만, inflow의 경우는 outflow와 다르게 처분공 주변 EDZ 뿐 아니라 터널 주변 EDZ 내에서도 확산과 함께 이류에 의해서도 핵종의 이동이 이루어진다. 한편 No flow의 경우는 지하수의 유동이 있지 않은 위치에 처분공이 존재하는 만큼 EDZ에서의 이류적 이동은 고려하지 않고 확산만 일어나는 것으로 모델링 하였다.

이 연구에서는 정상적인 시나리오의 경우, 90%의 세라믹 폐기물이 no flow 유동 패턴에 관계하여 오직 10%의 폐기물 만이 유동하는 지하수에 노출되는 것으로 간주하였다. 또 10%의 폐기물 중 50%의 폐기물이 inflow 유동 패턴에, 그리고 나머지가 outflow 유동 패턴에 관계하는 것으로 가정하였는데, 이는 지하수의 유동 지역을 피하는 일반적인 처분장 부지 조건에 비추어 충분히 타당한 가정으로 볼 수

있다.

금속 폐기물의 경우와 마찬가지로 세라믹 폐기물의 경우도, PWR 사용후 핵연료 20,000tU를 기준으로 했을 때, 터널 당 32개의 처분공을 갖고 각 처분공 당 2개의 오버팩(overpack)을 처분하는 것으로 되고 이 때 필요한 총 16개의 터널에 대하여 모델링을 수행하였다.

③ 원계 영역 세부 모델링

처분장 근계 영역을 빠져 나온 핵종은 천연 방벽으로 이루어진 원계 영역 내 균열 암반 매질 내에서 지하수의 유동을 따라 그 이동을 계속하게 된다. 균열 암반에 형성된 균열 네트워크는 지하수 유동량에 상응하는 단일 균열 평판을 갖는 매질로 GoldSim에서 fracture의 특성을 갖는 pipe로 묘사하게 된다.

금속 폐기물과 세라믹 폐기물 처분장에서 각각 유출된 핵종은 그림 7에서 보이는 대로 상호 교류 없이 독립된 매질인 Fracture_200m의 pipe와 Fracture_500m의 pipe를 따라 이동해 나가다, 그림 8에 기술된 역시 각각의 MWCF를 만나 생태계로 이동해 나가게 된다. 이는 주로 수평적으로 유동하는 지하수의 유동 패턴을 가정하여 두 처분장에 상응하는

Fig. 6. Source term and near-field modeling for ceramic wastes.

Fig. 7. Nuclide transport modeling in the far-field.

Fig. 8. Nuclide transport modeling in the MWCF.

각각의 독립된 원계 영역 내에서만 핵종의 이동이 이루어지는 것으로 보았기 때문이다.

사고로 우물이 처분장 가까이 굴착되는 경우는 금속 폐기물 처분장에만 해당된다고 보았는데, 이는 일상적인 우물의 깊이를 고려해 볼 때 500m 깊이의 세라믹 폐기물 처분장에 영향을 줄 수 있다고는 보기 어렵기 때문이다. 즉 사고에 의한 인간 침입으로서 우물 시나리오가 적용되면 금속 폐기물 내의 모든 핵종은 원계 영역 내 균열 암반으로 이동하지 않고 대신 그림 7의 Fracture_Metal2Well의 pipe 경로를 따라 사고 우물로 이동해 나가게 된다. 이 시나리오는 음용수와 관개를 위해 굴착된 우물로 모든 핵종이 유입되어 농축 피폭 집단에 영향을 주는 것으로 간주하였다.

④ 생태계 세부 모델링

생태계는 두 가지로 경우로 나누어 모델링하였다. 정상 시나리오에 의해 피폭을 받을 수 있는 자연 발생적 취락 내 피폭 집단이 피폭을 받는 경우와, 그리고 전술하였듯 처분장 근처에서 사고로서 발생할 수 있는 인간 침입에 따른 우물 굴착 시나리오를 고려하였다. 이러한 우물 굴착은 사실상 처분장을 직접 침입할 수 있는 시나리오라는 점에서 그 발생 확률은 낮을 수 있지만 굴착된 우물을 통해 음용수의 섭취와 농경을 위한 관개가 이루어지는 경우 해당 피폭 집단에 대한 피폭은 심각할 것으로 예상될 수 있다. 이 경우의

피폭 집단은 정상 시나리오에서 다른 농축, 민물어업, 그리고 해양어업 피폭집단의 경우와 다르게 농축 어업 집단만을 고려하였다.

그림 9와 10에 정상적인 우물이 존재하는 경우의 생태계 내 핵종 이동 구획 모델과 여기서 구해진 농도를 통해 다양한 섭생 경로에 따른 피폭 모델을, 그리고 그림 11에는 우물 침입 시나리오의 경우에 대한 생태계 핵종이동 및 섭생 경로에 따른 피폭 모델을 골드십으로 구현한 모듈을 각각 보았다.

구획 모듈은 생태계를 다양한 구획으로 나누어 이들 구획 간의 핵종 이동을 기술하는 것으로, 처분장을 유출한 핵종이 근계 및 원계 영역 내 지하매질에서 이동해 나와 강의 하저와 바다의 해저 이렇게 두 군데로 가정된 지하매질-생태계 경계인 GBI를 통해 유입되면 이 모듈을 통하여 각 구획 내 핵종의 농도가 계산된다. 그러면 이 농도에 따라 생태계의 다양한 피폭 경로를 따라 이 핵종이 확산해 나가 최종적으로 각 피폭집단에게 피폭을 주게 된다.

III. A-KRS 핵종 유출 시나리오

처분 시스템 내의 핵종의 유출 및 이동은 매질 내의 다양한 경로를 통하여 핵종의 농도구배에 따라 확산적으로, 그리고

Fig. 9. Compartment modeling in the biosphere (Normal case).

Fig. 10. Exposure pathway modeling in the biosphere (Normal case).

Fig. 11. Compartment and exposure pathway modeling in the biosphere (abnormal well drilling case).

이와 동시에 지하수의 정상적인 유동에 따라 이루어져 생태 환경으로 이르는 것으로, 이를 정상 유출 시나리오로서 기준 시나리오로 간주하였다. 그러나 이와 병행하여 처분 시스템 내에서는 핵종의 비정상적인 유출도 가능하게 된다. 이러한 비정상적인 유출에 관여하는 FEP을 분석 선별하여 대체 시나리오(alternative scenario)로 도출하였다.

처분장이 폐쇄된 이후 처분장에 근접하여 이루어지는 인간의 침입에 따른 우물 침입 시나리오와 함께, 처분 시스템 원

계 영역에서 자연 재해로서 지진이 발생하는 경우에 따른 시나리오도 도출하였다. 이러한 지진 시나리오에 의해 MWCF 내에서 지하수 유동량이 갑작스럽게 증가할 수 있다고 보았으며, 천연 방벽으로서의 처분 시스템 내 모암의 방벽 기능이 상실되거나 MWCF가 새로이 형성되어 근계영역에서 유출된 핵종이 바로 MWCF로 유입되는 것으로 가정하였다. 이러한 지진 시나리오에 의해 이 두 현상이 복합적으로 동시에 발생하는 시나리오도 따로 고려하였다. 또 처분 시스템 내 각 폐

기물 용기가 핵종 유출을 억제하도록 주어진 신뢰시간(credit time)을 유지하지 못하고 처분장이 폐쇄된 이후 즉시 상실하는 시나리오도 평가 해 보았다.

가. 정상 시나리오

기본적으로 모든 평가에 대하여 금속 폐기물의 처분을 위한 용기의 신뢰시간은 300년으로, 그리고 심지층 처분을 위한 세라믹 폐기물 용기 수명은 1,000년으로 가정하였다.

정상 시나리오에 대하여 200m 천층 및 500m 심층 처분에 따라 인공방벽으로부터 원계영역으로 유출되는 각 핵종별 핵종 유출률 (Bq/yr)을 그림 12에 보였다. 계산에 사용된 핵종의 재고량은 표 1에 보였다. 그 외 계산에 사용된 다양한 물성 및 지화학 입력 자료 값도 표 2와 3에 도표로 기술하였다. 이러한 입력자료는 대부분 문헌 등을 통하여 적절하게

Table 1. Nuclide inventory.

Nuclide	Metal Waste Inventory(mol/can)	Ceramic Waste Inventory (mole/can)	D_ext [Sv h1/Bq m-3]	D_ing [Sv Bq-1]	D_inh [Sv Bq-1]
Ac_227	0	9.73839E-15	0	1.10E-06	2.20E-04
Am_241	6.97E-01	0.54842514	1.10E-15	2.00E-07	4.20E-05
Am_243	1.31E-01	0.104706802	2.90E-15	2.00E-07	4.10E-05
C-14	9.29E+01	0	1.60E-20	5.80E-10	5.80E-10
Cl_36	1.66E-03	0	0	9.30E-10	7.30E-09
Cm_245	3.14E-03	0.002418193	3.20E-15	2.10E-07	4.20E-05
Cm_246	4.33E-04	0.000346542	0.00E+00	2.10E-07	4.20E-05
Cs_135	6.58E-01	0.95080564	2.60E-19	2.00E-09	9.90E-10
Cs_137	5.78E-01	0.845011773	5.60E-14	1.30E-08	9.70E-09
I_129	2.13E-01	0	1.10E-16	1.10E-07	9.60E-08
Nb_94	2.74E+02	0	1.60E-13	1.70E-09	1.50E-09
Ni_59	4.75E+03	0	0	6.30E-11	1.30E-10
Ni_63	5.51E+02	0	0	1.50E-10	4.80E-10
Np_237	3.81E-01	0.296420131	1.30E-15	1.10E-07	1.50E-05
Pa_231	3.84E-07	4.59383E-11	3.70E-15	7.10E-07	1.40E-04
Pd_107	1.99E+04	1.67172E-16	0	3.70E-11	8.50E-11
Pu_238	1.29E-01	0.101271068	1.30E-17	2.30E-07	4.60E-05
Pu_239	2.64E+00	2.061828726	6.60E-18	2.50E-07	5.00E-05
Pu_240	1.28E+00	1.015988054	0	2.50E-07	5.00E-05
Pu_241	1.03E-01	0.080783661	0	0	0
Pu_242	4.19E-01	0.337008372	0	2.40E-07	4.80E-05
Ra_226	0	2.84865E-10	6.00E-16	2.80E-07	3.50E-06
Ra_228	0	0	0	0	0
Rn_222	0	0	0	0	1.77E-10
Se_79	0	0	3.60E-10	2.40E-09	2.50E-09
Sm_151	1.05E-02	5.452535555	4.60E-18	9.80E-11	4.00E-09
Sn_126	2.48E+03	0	3.00E-15	5.40E-09	2.80E-08
Sr_90	3.51E-01	24.00197242	0	2.80E-08	3.60E-08
Tc_99	2.10E+01	4.24056E-06	0	6.40E-10	4.00E-09
Th_229	0	2.93245E-10	2.00E-15	4.90E-07	1.10E-04
Th_230	3.75E-05	2.41406E-06	3.50E-17	2.10E-07	4.30E-05
Th_232	0	2.50535E-09	1.50E-17	2.30E-07	4.50E-05
U_233	1.44783E-05	3.72783E-06	5.70E-17	5.10E-08	3.60E-06
U_234	0.436735008	0.038540594	3.10E-17	4.90E-08	3.50E-06
U_235	13.22854349	0.002364337	1.10E-14	4.70E-08	3.10E-06
U_236	12.02246827	0.00443401	0	4.70E-08	3.20E-06
U_238	1692.68363	2.48933E-05	0	4.50E-08	2.90E-06
Zr_93	119176.8376	0.219053567	0	1.10E-09	1.00E-08

Table 2a. Physical input data (1).

Parameter	Value	Unit
Source		
Number of Canister, PWR/Ceramic HLW	1	[-]
Number of canister, CANDU	1	[-]
Buffer		
Thickness	0.36	[m]
Gap volume		[m³]
Cross sectional area		[m²]
Porosity	0.41	[-]
Diffusion coefficient	0.000378	[m²/yr]
Density	1600	[kg/m³]
Waste form radius	0.51	[m]
Matrix solubility		
Backfill		
Diffusion coefficient	3.15E-03	[m²/yr]
Deep Fractured Rock Mass (@500m)		
Flow velocity	0.0013	[m/yr]
Dispersion coefficient	56.4	[m²/yr]
Fracture aperture	0.0001	[m]
Fracture Spacing (Deep)	5	m
Retardation in fracture	1.0	[-]
Matrix diffusion distance	5.00E-01	[m]
Length	419	[m]
Matrix porosity	0.002	[-]
Density	2650	[kg/m³]
Diffusion coefficient	1.00E-06	[m²/yr]
Mass gradient	5	%
Hydraulic conductivity of the rock mass at 500m	1.00E-10	m/s
Intermediate Fractured Rock Mass (@200m)		
Flow velocity		[m/yr]
Dispersion coefficient	One tenth of the	[m²/yr]
Fracture aperture	4.00E-05	[m]
Fracture Spacing (Intermediate)	5	M
Retardation in fracture	1.0	[-]
Matrix diffusion distance	2.00E-02	[m]
Length in Intermediate Shallow Rock	533	[m]
Matrix porosity	0.002	[-]
Density	2650	[kg/m³]
Diffusion coefficient		[m²/yr]
Hydraulic conductivity of the rock mass at 200m	1.00E-08	m/s

취해진 값이거나 가정된 값으로 향후 정확한 부지 조사 등을 통하여 보다 신뢰도 있는 값이 제공될 것으로 기대된다.

그림 12에서 보면 처분시스템 근계 영역 내 복잡한 핵종 이동 경로에 따라 각각의 핵종의 파과 곡선도 복잡한 모습으로 나타나는 것을 알 수 있다. 현저한 특징으로서 액티나이드 핵종의 경우는 모든 매질에서 지연효과가 있음에도 상당히 오랜 기간 동안 피크 값을 유지 하고 있는 것을 알 수 있지만, 세라믹폐기물에 보다 많이 들어 있는 Sr-90과 같은 핵종은 짧은 반감기와 상대적으로 낮거나 없는 매질 내 지연효과 등으로 파과 곡선이 그리 길게는 유지되지 못하는 것을 알 수 있다.

또 그림 13에는 정상 시나리오에 의하여 이러한 핵종의 근계영역에서 원계 영역으로 유출되어 이후 천연 방벽을 이 동해 나간 이후 생태계의 영향을 반영한 결과로서 농축 피

Table 2b. Physical input data (2).

Parameter (con'd)	Value	Unit
Shallow Fractured rock Mass (@ well depth for well scenario)		
Flow velocity		[m/yr]
Dispersion coefficient	One tenth of the	[m ² /yr]
Fracture aperture	0,025	[m]
Fracture Spacing (Intermediate)	5	m
Retardation in fracture	1	[-]
Matrix diffusion distance	0,002	[m]
Length to Well (Length in well-deep shallow rock mass)	150	[m]
Matrix porosity	0,002	[-]
Density	2650	[Kg/m ³]
Diffusion coefficient		[m ² /yr]
Hydraulic conductivity of the rock mass at well depth	2,00E-08	m/s
MWCF (@500m)		
Flow velocity	20	[m/yr]
Dispersion coefficient	One tenth of the	[m ² /yr]
Fracture aperture	0,001	[m]
Fracture Spacing		m
Retardation in fracture	1	[-]
Matrix diffusion distance	1	[m]
Length	468	[m]
Matrix porosity	0,002	[-]
Density	2650	[kg/m ³]
Diffusion coefficient		[m ² /yr]
Hydraulic conductivity	2,00E-08	m/s
MWCF fracture width (물흐르는 넓이) 200m-500m-depth 동일	5,00E+02	m
MWCF (@200m)		
Folw velocity	13,8	[m/yr]
Dispersion coefficient		[m ² /yr]
Fracture aperture	0,01	[m]
Fracture Spacing		m
Retardation in fracture	1	[-]
Matrix diffusion distance	1	[m]
Length	320	[m]
Matrix porosity		[-]
Density		[kg/m ³]
Diffusion coefficient		[m ² /yr]
Hydraulic conductivity	2,00E-08	m/s
GW		
Pure diffusion coefficient	0,032	[m ² /yr]
Plume Width at the Biosphere in MWCF	2400	m
MWCF		
Length	468	[m]
Travel time	430	[yr]
Dispersion coefficient	9,69	[m ² /yr]
Porosity	0,02	[-]

폭 집단에 대한 피폭 선량률 (mSv/yr)을 보였다.

나. 비정상적 우물 굴착 시나리오

인간에 의한 처분 시스템 내로 침입하는 이 시나리오는 다양한 형태로 상정될 수 있겠지만, 이 연구를 통해서는 핵종의 정상적인 이동 경로상에 우물이 비정상적으로 굴착되는 것으로 한정하여 표현된다. 자연적으로, 생태계의 피폭 집단이 취락을 이루어 정상적으로 이용하게 되는 경우에 상정 가능한 정상적인 우물과는 달리 이 시나리오에서는, 설사 처분장을 관통하는 일은 없더라도 금속 폐기물이 처분되

Table 3. Distribution coefficient (Kd) and solubility limit (Cs).

Nuclide	Buffer [m ³ /kg]	Rock [m ³ /kg]	Surface Soil [m ³ /kg]	Vadose[m ³ /kg]	River Sediment [m ³ /kg]	Marine Sediment [m ³ /kg]	MaCs (Reducing) [mol/me]
Ac	5,00E+00	1,00E+01	4,50E-01	4,50E-01	1,00E+02	2,00E+03	1,00E-04
Am	5,00E+00	1,00E+01	2,00E+00	8,00E+00	1,00E+02	2,00E+03	1,00E-04
C	0	1,00E-03	0	0	0	0	1,00E+00
Cl	0	0	0	0	0	0	7,00E+03
Cm	5,00E+00	1,00E+01	4,00E+00	4,00E+00	1,00E+02	2,00E+03	1,00E-04
Cs	6,60E-01	5,20E-02	2,70E-01	2,70E-01	2,00E+00	3,00E+00	4000
I	7,40E-03	0	0	0	0	0	4000
Nb	1,00E+00	1,00E+00	1,60E-01	1,60E-01	1,00E+01	1,00E+01	0,0001
Ni	7,00E-01	1,20E-01	0	0	0	0	5,00E-04
Np	3,00E+00	1,70E-01	4,10E-03	4,10E-03	5,00E-01	2,00E+00	2,00E-05
Pa	3,00E-01	1,00E+00	5,40E-01	5,40E-01	5,00E+03	5,00E+03	5,00E-05
Pd	1,00E-02	1,00E-01	5,50E-03	5,50E-03	2,00E+00	5,00E+01	1,00E-05
Pu	3,00E+00	4,00E-03	5,40E-01	5,40E-01	1,00E+02	2,00E+03	5,00E-06
Ra	1,00E-02	1,30E+00	4,90E-01	4,90E-01	1,00E+00	5,00E+00	1,00E-03
Rn	0	0	0	0	0	0	-1,00E+00
Se	3,00E-03	8,30E-04	0	0	0	0	0,0001
Sm	1,00E+00	1,00E+00	2,40E-01	2,40E-01	1,00E+02	2,00E+03	0,0001
Sn	3,00E+00	2,00E-02	1,30E-01	1,30E-01	1,00E+01	1,00E+01	5,00E-04
Sr	1,20E-02	1,00E-02	0	0	0	0	1,00E+01
Tc	1,00E-01	1,00E+00	1,40E-04	1,40E-04	1,00E-01	1,00E-01	1,00E-05
Th	3,00E+00	5,00E+00	3,00E+00	3,00E+00	5,00E+03	5,00E+03	5,00E-05
U	1,70E-01	4,30E-02	3,30E-02	3,30E-02	5,00E-02	5,00E-01	1,00E-05
Zr	2,00E+00	2,00E-01	6,00E-01	6,00E-01	1,00E+01	1,00E+01	1,00E-05

는 200m 깊이의 천지층 터널에 가능한 한 근접하여 비정상적으로 인간의 침입 형태로 우물이 굴착되는 경우만을 의미한다. 다만 이 때 이러한 우물이 굴착되면 모든 핵종이 우물로 빠져 나간다고 가정하고 있는데, 이러한 가정은 굴착된 우물에서 처분장을 지나며 오염된 지하수를 전량 취수한다는 가정이어서 지나치게 보수적인 결과를 초래할 수도 있다. 다른 모델링 예[5]에서와 같이 이러한 보수성을 없애고 실제 우물의 굴착에 따른 영향으로 일부 핵종만이 우물로 향하고 나머지는 여전히 정상시나리오를 따라 일반 생태계로 이동하게 되는 경우가 신뢰도 측면에서 보다 바람직할 수도 있다.

이러한 시나리오의 결과로서 우물 침입 시나리오에 대하여 천층 처분장과 심층 처분장에서 인공방벽을 통하여 유출되는 각 핵종별 핵종 유출률(Bq/yr)을 그림 14에 보였다.

그림 15와 16에는 우물 침입 시나리오에서 농축 피폭 집단에 대한 피폭 선량률 (mSv/yr)을 보였다. 이 중 그림 15는, 그림 16의 일반 생태계의 경우와 달리, 우물 침입 시나리오에서의 국지 농축 피폭 집단, 즉 처분시스템 내 터널에 근접한 곳으로서 150m 거리만이 이격되어 굴착된 우물로부터 국지 농축 피폭 집단이 받는 피폭 선량률 (mSv/yr)을 나타낸다. 150m의 거리는 금속 폐기물 처분장에 아주 근접한 우물 굴착으로 볼 수 있다. 그림 15에는 우물 침입 시나리오에서 처분장 인근이 아닌 정상 취락 집단으로서의 농축 피폭 집단에 대한 피폭 선량률 (mSv/yr)을 따로 보였다. 이 피

키 키 삼 나 키 오 세

일 때, 그림 17에서 $M/D > 1.0 \text{ km}^{-1}$ 를 만족하는 특정한 지진이 발생하는 경우, 이에 의해 MWCF내에서 지하수 유동량 Q 는 $Q \times 10.0$ 배로 증가하며, 동시에 MWCF 내 핵종 이동 거리 d 는 $d \times 0.9$ 배로 감소하는 것으로 보았다.

또 $M > 7.0$ 의 지진에 대해서는 처분장 근계 영역 내에서 유출된 핵종이 바로 MWCF로 진입하는 것으로 보아 더 이상 원계 영역 내 모암의 천연 방벽 기능을 유지하지 못하는 것

Fig.17. Stochastic variation of M/D as time flows.

Fig.18. Variation of groundwater flow rate and travel distance in the MWCF as time flows.

으로 가정하였다. 유동량과 MWCF 내 핵종 이동 거리의 변화를 구현한 예를 그림 18에 각각 보였다.

지진 발생 사건은 가능한 한 단순하게 모델링하여, 처분장 주변에서의 지진의 발생은 진도에 무관하게 지수분포 (exponential distribution) 적 시간 간격으로, 1만년에 한번, 즉 평균 10^{-4} 1/yr 의 빈도로 비균질하게 발생한다고 보아 프와송분포 (Poisson distribution) 를 따른다고 가정하였다. 이는 개별 지진의 발생이 상호 독립적이고 동시에 다발적으로 일어나지는 않으며 어느 정도의 발생 간격은 유지한 채 추계적 (stochastic) 과정을 따르며 발생한다는 가정에 따른 것이다.

지진 시나리오를 GoldSim으로 구현한 모듈을 그림 19에 보였다. 이는 그림 17에 보인 시계열의 형태를 제공하여 지진이 발생하는 경우 MWCF 내 균열이 보다 발달하게 되어 단층과 같은 매질 내를 흐르는 지하수 유동량과 이동거리가 변화하고, 강력한 지진이 발생하는 경우 처분장 주변의 모암이 완전히 손상되어 더 이상의 방벽으로서의 기능을 상실한 채 처분장에서 누출된 핵종이 곧바로 MWCF로 연결되도록 해 준다.

지진의 발생 자체는 전술한 대로 프와송 분포를 따르나 이 때 발생하는 지진의 진도는 최소 5.5, 그리고 최고 8의 진도를 갖는 로그 균등 분포 (log-uniform distribution)를 따르는 것으로 가정을 하였다. 또한 진앙까지의 거리의 분포는 0 km에서 25 km 사이의 거리 사이에서 최빈값 5 km를 갖는 삼각분포 (triangular distribution)를 따르는 것으로 가정을 하였다.

진앙까지의 거리와 무관하게 진도가 7이 넘어 지진에 의한 모암 상실하는 시나리오의 경우, 원계영역 내 MWCF내에서의 지하수 유동량은 증가하지 않고 천지층 및 심지층 모암 내 균열 매질이 상실됨에 따라 인공방벽에서 유출된

Fig.19. Earthquake modeling.

핵종은 모암을 거치지 않고 직접 MWCF로 이동하게 되는 시나리오로 된다. 반면 진도가 7이 넘으며 동시에 M/D값이 0.1 km-1보다 큰 지진의 경우에는 MWCF에서의 물리적 변화와 동시에 복합적으로도 발생하는 시나리오의 경우 보다 더 심각한 시나리오로 간주된다.

지하수 유동량 증가 시나리오에 대하여 원계 영역 모암 내 MWCF를 유동하는 지하수 유동률이, 천층 및 심층내 MWCF에서 모두 10배로 증가한 경우에 대하여 인공방벽으로부터 유출되는 각 핵종별 핵종 유출률 (Bq/yr)을 그림 20에 보였고, 그림 21에는 지하수 유동량 증가 시나리오에 의한 농축 피폭 집단에 대한 피폭 선량률 (mSv/yr)을 보였다.

그림에서 보면 우물 시나리오와 다르게 정상 시나리오에 비해 선량률이 그렇게 달라지지는 않는 것을 알 수 있는데,

Fig.20. Nuclide release rate (Bq/yr) from the man-made barrier (Increase of groundwater flow rate in the MWCF).

Fig.21. Exposure rate (mSv/yr) to the farming exposure group (Increase of groundwater flow rate in the MWCF).

이는 피크 선량률에 기여하는 핵종들의 비교적 긴 반감기나 그다지 두드러지지 않는 지연효과 때문으로, 가령 반감기가 23만년으로 상당히 긴 Sn-126의 경우, 10만년에서 그 피크치를 가지고 나타나는 것을 알 수 있지만 지진에 대한 영향은 그다지 받고 있지 않는 것을 알 수 있다.

라. 복합적 지진 시나리오의 평가

MWCF 내 지하수 유동량의 증가와 함께 천연 방벽의 상실 시나리오가 동시에 발생하는 시나리오로서 지진에 의해 원계 영역 모암 내 MWCF를 유동하는 지하수 유동률이 10배로 증가하고, 동시에 모암 내 균열 암반 매질이 상실 되어 근계 영역이 원계 영역 모암 내 MWCF에 직접 연결되는 경우에 대하

여 인공방벽으로부터 각 핵종별 핵종 유출률 (Bq/yr)을 그림 22에 보였다.

그림 23에는 이러한 시나리오에 의해 농축 피폭 집단이 받는 피폭 선량률 (mSv/yr)을 나타내었다.

이 시나리오는 지진에 의해 모암 내 균열 암반 매질이 상실됨으로써 처분장 인공 방벽이 MWCF로 직접 연결되는 형태의 심각한 시나리오로 볼 수 있다.

MWCF 내에서의 유량률의 변화는 없이 근계 영역이 원계 영역 모암 내 MWCF에 직접 연결되는 경우에 대하여 인공방벽으로부터 유출되는 각 핵종별 핵종 유출률 (Bq/yr)을 그림 24에 보였다.

Fig.24. Nuclide release rate (Bq/yr) from the man-made barrier (Loss of the fractured rock medium).

Fig.25. Exposure rate (mS/yr) to the farming exposure group (Loss of the fractured rock medium).

그림 25에는 이러한 지진에 의한 모암 상실 시나리오에 의해서 농축 피폭 집단이 받는 피폭 선량률 (mSv/yr)을 보였다.

마. 방벽 신뢰 상실 시나리오

폐기물을 담고 있는 스테인리스 용기의 핵종 유출 차단 기능이 처분이 시행된 직후 처분장이 폐쇄되면서 바로 그 기능을 잃는 것으로 보는 시나리오이다. 이 시나리오에 따르면 천지층 터널의 금속 폐기물의 처분 용기에 대한 credit time이 정상 시나리오에서 고려한 300년을 유지하지 못하고 처분장 폐쇄 직후 방벽 기능을 순간적으로 상실하게 된다.

마찬가지로 심지충 처분을 위한 세라믹 폐기물의 처분을

Fig.26. Nuclide release rate (Bq/yr) from the man-made barrier (Loss of barrier credit).

Fig.27. Exposure rate (mS/yr) to the farming exposure group (Loss of barrier credit).

위한 캐니스터의 수명도 1,000년이 아닌 0년으로 되어 처분장 폐쇄와 함께 차단 기능을 상실하는 것으로 보는 사고 시나리오로 된다.

이러한 경우에 대하여 인공방벽에서 각 핵종별 핵종 유출률 (Bq/yr)을 그림 26에 보였다.

그림 27에는 방벽 신뢰 상실 시나리오에서 농축 피폭 집단에 대한 피폭 선량률 (mSv/yr)을 따로 보였다.

그림에서 보여지는 대로 이러한 시나리오는 전체적인 파괴 곡선을 credit시간만큼 앞으로 당긴 정도의 결과로만 나타나는 것을 알 수 있는데, 이 역시 주요 기여 핵종의 매질 내 낮은 흡착계수와 비교적 긴 반감기때문이다.

Fig.28. Comparison of exposure rates to the farming exposure group for all the scenarios considered.

Table 4. Exposure rates to the farming exposure group for all the scenarios considered.

	Scenario	Description	Peak exposure rate, mSv/y	Peak time, y
SC1	Normal	Normal groundwater flow	0,35079	92,000
SC2	Abnormal well drilling Near metal waste repository (regional farming exposure group)	Well drilling, 150m apart from the metal waste repository (human intrusion case)	4,0171	580,000
SC2a	Abnormal well drilling near metal waste repository (normal farming exposure group)	Normal biosphere exposure in case of SC2	0,31359	92,000
SC3	Flow increase due to earthquake	10 times higher groundwater flow due to earthquake	0,35295	92,000
SC4	Loss of fractured rock due to Earthquake	Direct flow from barrier to MWCF	0,62963	250,000
SC4a	Flow increase and loss of fractured rock due to earthquake	Sc3 + Sc4	0,73937	260,000
SC5	Loss of container barrier credit	Loss of container barriers immediately after closure	0,35273	91,000

그림 28에 앞서 논의된 모든 시나리오에 대해서, 농축 피폭 집단에 대한 피폭 선량률 (mSv/yr)을 비교하여 도시하였다. 또 표 4에는 이 때 가질 수 있는 최대 피폭 선량률, 최대 피폭 선량이 도달하는 시간과 함께 나타내었다. 이들 결과에서 알 수 있듯이 우물 굴착 시나리오가 가장 높은 선량률을 줄 수 있는 반면 정상 시나리오의 경우는 기대하는 대로 가장 낮은 선량률을 주는 것으로 나타나고 있는 것을 알 수 있었다. 그렇지만 인간 침입으로서 우물 굴착 시나리오를 제외하고는 모든 시나리오에 대하여 한 order 차이의 결과를 주지는 못하는 것을 알 수 있었다.

IV. 결 론

5개의 핵종 유출 및 이동에 관한 주요 시나리오를 도출하고 이에 대한 결정론적 평가는 물론 확률론적 평가도 병행에서 수행하고, 결정론적 평가에 관한 내용은 이 논문에서, 그리고 확률론적 평가에 대한 내용은 이 논문과 짝이 되는 “A-KRS 처분 시스템 확률론적 안전성 평가 논문”에서 별도로 분리하여 논의하였다.

파이로 처분 시스템의 폐쇄 후 성능 및 안전성을 평가할 수 있도록 골드심 프로그램으로 구현된 안전성 평가 프로그램을 개발하고 이렇게 개발된 프로그램을 이용하여 처분 시스템 내 핵종 유출 및 이동에 관련된 주요 시나리오를 부지 특성적 입력 자료와 함께 결정론적으로 평가 하였다.

이 연구를 통하여 고려된 5개 모든 시나리오에 대해서 농축 피폭 집단에 대한 피폭 선량률이 가질 수 있는 최대 피폭 선량률은, 우물 굴착 시나리오가 가장 높은 선량률을 줄 수 있는 반면 정상 시나리오의 경우는 기대하는 대로 가장 낮은 선량률을 주는 것으로 나타났다. 그러나 우물 시나리오를 제외하고 나머지 시나리오에 대해서는 그 결과의 차이가 두드러지지 않는 것으로 나타나고 있는 것을 알 수 있었다.

References

- [1] Final Storage of Spent Nuclear Fuel-KBS-3, Summary, SKBF/KBS, 1983.
- [2] Youn-Myoung Lee et al., "A GoldSim model for the safety assessment of an HLW repository," Progress in Nuclear Energy 51, 746-759, 2009.
- [3] A Probabilistic Safety Assessment of a Pyro-

processed Waste Repository, to be published in Journal of the Korean Radioactive Waste Society.

- [4] GoldSim Contaminant Transport Module, User's Guide, Version 5, GoldSim Technology Group, Seattle, USA, 2006.
- [5] Youn-Myoung Lee et al., "Evaluation of nuclide release scenarios for a hypothetical LILW repository," Progress in Nuclear Energy 53, 760-774, 2011.