

ラプラス変換有限要素法を用いた割れ目ネットワーク中の核種移行解析モデルの開発

井尻裕二¹・澤田淳²・坂本和彦³・William S. DERSHOWITZ⁴・
内田雅大⁵・石黒勝彦⁶・梅木博之⁷

¹正会員 工修 大成建設株式会社 エンジニアリング本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

²核燃料サイクル開発機構 東海事業所 (〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33)

³検査開発株式会社 東海事業所 (〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33)

⁴Ph.D Golder Associates Inc. (4104 148th Avenue NE, Redmond, Seattle, Washington 98052, USA)

⁵理修 核燃料サイクル開発機構 東海事業所 (〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33)

⁶工博 核燃料サイクル開発機構 東海事業所 (〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33)

⁷工博 核燃料サイクル開発機構 (現在 原子力発電環境整備機構 技術部)

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、天然バリアとしての地下深部の岩盤が有する核種移行遅延機能を評価することが重要な課題の一つとなっている。著者らは、亀裂性岩盤を割れ目ネットワークモデルによりモデル化し、ラプラス変換有限要素法を用いて効率的に不均質岩盤中の核種移行解析を行う手法を開発した。ブロックスケールの花崗岩を対象とした核種移行解析を実施した結果、亀裂性岩盤の不均質性が解析結果に反映されたより現実的な核種移行解析ができることが確認された。さらに、処分場全体を対象としたサイトスケールの核種移行評価を実施した結果、岩盤中の小さな割れ目が構成するネットワーク構造よりも断層などの大きな割れ目構造が核種移行解析結果に及ぼす影響が大きいことがわかった。

Key Words : radionuclide migration, fracture network model, Laplace transform Galerkin method, block scale, site scale

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムにおいては、地下深部の安定な地質環境に埋設された廃棄体中の放射性核種が数千年以上の長期間にわたって人工バリアから浸出し、岩盤中の地下水の流れに沿って人間環境に放出されることを想定した地下水シナリオを中心に安全評価を行うことが重要と考えられている。この地下水シナリオにおいては、ガラス固化体、オーバーパックおよび緩衝材からなる人工バリアの核種閉じ込め性能に加えて、天然バリアとしての地下深部の岩盤が有する核種移行遅延機能を評価することが重要な課題の一つである。すなわち、亀裂性岩盤においては割れ目を流れる核種が岩石基質中に拡散し鉱物粒子表面に吸着して遅延される効果を、多孔質岩盤においては鉱物粒子間隙中を流れる核種が鉱物粒子表面に吸着されて遅延される効

果を評価する必要がある。

天然バリア中の核種移行評価においては、数万年以上の長期にわたる岩盤中の核種移行計算に不均質モデルを用いると計算時間が膨大となるため、これまでは、不均質岩盤中の移行経路ごとに均質な1次元モデルを適用し、岩盤の核種移行遅延機能を過大評価しないように保守側のデータを設定する手法が主流であった^{1), 2)}。しかし、統計的なばらつきを有する岩盤の透水性に最も保守側のデータを用いた場合には過度に保守的な評価となったり、平均値や最頻値を用いた場合には核種移行への影響が大きい透水性の高い経路の影響を解析結果に反映できないため必ずしも保守的な評価とならない可能性があるため、不均質岩盤への均質モデルの適用には注意が必要である³⁾。そこで、岩盤の有する不均質性を反映できるより実際の現象に即した計算効率の高いモデルを開発し、岩盤の有する不均質性が核種移行に及

ばす影響を評価し、天然バリア中の核種移行評価の信頼性をより高めていく必要がある。

本論では、亀裂性岩盤を割れ目ネットワークモデルを変換したチャンネルネットワークモデルによりモデル化し、長期計算に対する計算効率の高いラプラス変換有限要素法を用いることによって、岩盤の不均質性を反映した3次元割れ目ネットワーク構造中の長期の核種移行計算を効率的に行うことができる核種移行解析モデルを提案する。また、典型的な亀裂性岩盤である花崗岩を対象とした高レベル放射性廃棄物地層処分における天然バリア中の核種移行解析を実施し、核種移行解析モデルの適用性について検討を行うとともに、核種移行解析結果から得られた知見に基づいて、今後の天然バリアの安全評価における課題について述べる。

2. 割れ目ネットワーク中の核種移行解析モデル

(1) 概念モデルと解析フロー

花崗岩に代表されるような亀裂性岩盤中を流れる核種は、図-1 に示すような割れ目が互いに連結したネットワーク構造内を個々の割れ目の中の不均質性に起因したチャネリング現象に伴う機械的分散と地下水中での分子拡散による分散を伴いながら、地下水の流れに沿って移流により下流側に運ばれる。割れ目内を流れる地下水中の核種の一部は、図-2 に示すように割れ目表面から岩石基質の間隙中へ拡散（以下、マトリクス拡散という）して岩石基質中における岩石鉱物表面への収着により遅延されることが Neretnieks⁴⁾により提唱され、その後、室内試験^{5), 6)}やナチュララアナログ研究^{7), 8)}などによって確認されている。

解析にあたっては、まず、原位置データに基づいて割れ目の方向、形状、大きさ、頻度、中心点の空間位置、透水量係数、開口幅などの割れ目の幾何学的特性および水理特性を設定し、その割れ目特性にしたがって FracMan コード⁹⁾を用いて解析領域内に割れ目を発生させて不均質な3次元割れ目ネットワークモデルを構築する。

割れ目内の地下水は、図-3 に示すように割れ目内のチャンネル状に連結した開口部を選択的に流れていることが確認されており^{10), 11)}、割れ目ネットワークモデルをチャンネルネットワークモデルに変換して解析モデルを作成している例も多い^{12), 13)}。そこで、図-4 に示すように構築した割れ目ネットワークモデルの各割れ目面上にある全ての割れ目交

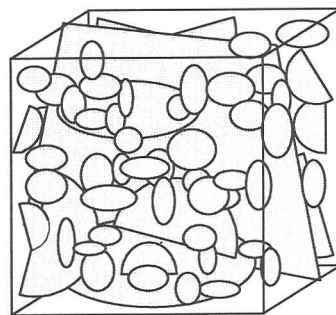


図-1 亀裂性岩盤中の割れ目ネットワーク概念図

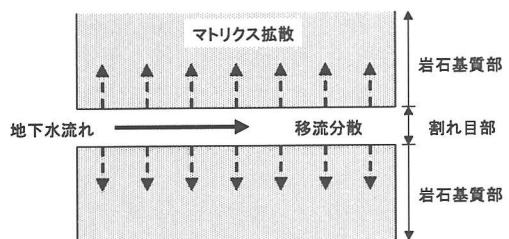


図-2 割れ目中の核種移行概念図

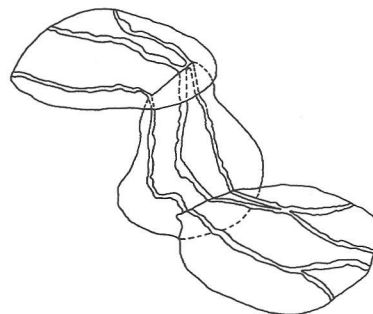


図-3 割れ目内の地下水移行経路模式図¹⁰⁾

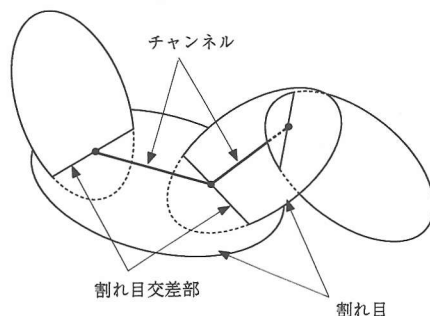


図-4 割れ目からチャンネルへの変換模式図

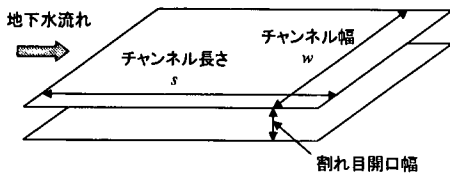


図-5 チャンネル模式図

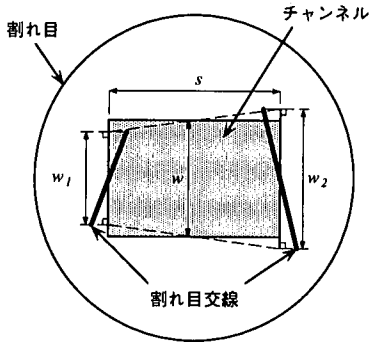


図-6 チャンネル幅の設定模式図

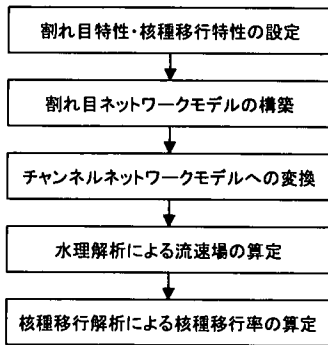


図-7 核種移行解析フロー

線の中点間を矩形形状の平行平板チャンネル（図-5参照）で結び、割れ目ネットワークモデルをチャンネルネットワークモデルに変換する。ここで、チャンネルの長さ s は割れ目交線の中点間の距離で、チャンネルの幅 w はチャンネルネットワークモデル全体の透水係数が割れ目ネットワークモデル全体の透水係数と等しくなるように次式にしたがい割れ目交線の長さに応じて設定する。

$$w = f_w \times \frac{w_1 + w_2}{2} \quad (1)$$

ここに、 w はチャンネル幅[m]、 f_w は水理解析によ

り求められたチャンネルネットワークモデルの透水係数がもとの割れ目ネットワークモデルの透水係数と等しくなるように設定した係数[-]、 w_1 、 w_2 はチャンネルと直交する方向への割れ目交線の投影長さ[m]（図-6参照）を表す。

チャンネルネットワークモデル上で水理解析を実施して各チャンネル内の流速を算定した後に、割れ目内の縦方向分散長、マトリクス拡散に寄与する割れ目全体に対する開口部の面積比率（割れ目開口部面積比率）、マトリクス拡散の限界深さ（マトリクス拡散深さ）、割れ目内から岩石基質中への実効拡散係数、岩石基質内での収着による遅延に寄与する岩石基質の有効間隙率・乾燥密度および核種の分配係数などの核種移行特性を設定し、水理解析により算定した流速を用いて核種移行解析を実施して評価地点における核種フラックス（核種移行率）を算定する。

以上に記した核種移行解析フローを図-7に示す。

(2) 数学モデル

a) 水理モデル

チャンネルネットワーク中の地下水定常流れの支配方程式は、以下のように表される。

$$\frac{\partial}{\partial \ell} T(\ell) \frac{\partial h}{\partial \ell} = 0 \quad (2)$$

ここに、 $T(\ell)$ はチャンネルの透水量係数[m²/s]、 h は全水頭[m]、 ℓ はチャンネルネットワーク中の位置座標[m]を表す。

水頭固定境界および不透水境界での境界条件は、それぞれ以下のように表される。

$$h = h^0 \quad (3)$$

$$T \frac{\partial h}{\partial \ell} = 0 \quad (4)$$

ここに、 h^0 は固定水頭[m]を表す。

支配方程式(2)をガラーキョ有限要素法により離散化してチャンネルネットワークモデル内のポテンシャル場を求め、各チャンネル内での流速を算定する。

b) 核種移行モデル

チャンネルネットワーク中の放射性核種の崩壊連鎖を考慮した割れ目および岩石基質中の非定常核種移行支配方程式は、それぞれ以下のように表される。

$$A(\ell) \left[R_n(\ell) \frac{\partial C_n}{\partial t} + q(\ell) \frac{\partial C_n}{\partial \ell} - \frac{\partial}{\partial \ell} D_L(\ell) \frac{\partial C_n}{\partial \ell} + R_n(\ell) \lambda_n C_n - R_{n-1}(\ell) \lambda_{n-1} C_{n-1} \right] + W(\ell) F D_e \frac{\partial C_n^m}{\partial \omega} \Big|_{\omega=0} = 0 \quad (5)$$

$$R_n^m \frac{\partial C_n^m}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial \omega} D^m \frac{\partial C_n^m}{\partial \omega} + R_n^m \lambda_n C_n^m - R_{n-1}^m \lambda_{n-1} C_{n-1}^m = 0 \quad (6)$$

ここに、上添え字 m は岩石基質、下添え字 n は核種を表し、 $n-1$ は連鎖の親核種を表す。また、 $A(\ell)$ はチャンネルの断面積[m²] (= $w(\ell) \times b(\ell)$)、 $q(\ell)$ は水理解析により得られたチャンネル内の地下水流速[m/s]、 $D_L(\ell)$ は縦方向分散係数[m²/s] (= $\alpha_L q(\ell) + D_o$)、 α_L は縦方向分散長[m]、 D_o は自由水中の拡散係数[m²/s]、 λ_n は崩壊定数[1/s]、 $w(\ell)$ はチャンネル幅[m]、 F は割れ目開口部面積比率[-]、 D_e は実効拡散係数[m²/s] (= $\theta^m D^m$)、 θ^m は岩石基質部の有効間隙率[-]、 D^m は岩石基質間隙中の拡散係数[m²/s]、 C_n 、 C_n^m はそれぞれ割れ目および岩石基質中の核種 n の濃度[mol/m³]、 ω は割れ目面に法線方向の距離[m] ($0 \leq \omega \leq d$)、 d はマトリクス拡散深さ[m]、 t は時間[s]を表す。また、 $R_n(\ell)$ および R_n^m はそれぞれ割れ目表面および岩石基質中での収着による遅延係数で瞬時・線形・可逆な収着を仮定して以下のように表される。

$$R_n(\ell) = 1 + \frac{K a_n}{b(\ell)} \quad (7)$$

$$R_n^m = 1 + \frac{\rho^m K d_n}{\theta^m} \quad (8)$$

ここに、 $K a_n$ は割れ目表面への分配係数[m]、 $b(\ell)$ は割れ目開口幅の 1/2[m]、 ρ^m は岩石基質の乾燥密度[kg/m³]、 $K d_n$ は岩石鉱物への分配係数[m³/kg]を表す。ただし、マトリクス拡散による岩石基質中での鉱物粒子表面への収着を考慮する場合には、割れ目表面への収着は考慮しないこととし、以下では $R_n(\ell) = 1$ とする。

割れ目および岩石基質中の初期条件($t=0$)は、それぞれ以下のように表される。

$$C_n = f_n(\ell) \quad (9)$$

$$C_n^m = f_n^m(\omega) \quad (10)$$

ここに、 $f_n(\ell)$ および $f_n^m(\omega)$ はそれぞれ割れ目および岩石基質中の初期濃度[mol/m³]を表す。

各チャンネルにおける核種移行率で規定された境界条件は、次式で与えられる。

$$A(\ell) \left[q(\ell) C_n - D_L(\ell) \frac{\partial C_n}{\partial \ell} \right] = g_n^o(\ell, t) \quad (11)$$

ここに、 $g_n^o(\ell, t)$ は規定された核種移行率[mol/s]を表す。また、下流側のある断面を通過する各チャンネルにおける核種移行率は、以下のように表される。

$$A(\ell) \left[q(\ell) C_n - D_L(\ell) \frac{\partial C_n}{\partial \ell} \right] = g_n^b(\ell, t) \quad (12)$$

ここに、 $g_n^b(\ell, t)$ は断面 B を通過する核種移行率[mol/s]を表す。さらに、割れ目表面($\omega=0$)およびマトリクス拡散深さ($\omega=d$)における境界条件は、それぞれ以下のように表される。

$$C_n^m(\ell, \omega, t) = C_n(\ell, t) \quad (\omega=0) \quad (13)$$

$$\frac{\partial C_n^m}{\partial \omega} \Big|_{\omega=d} = 0 \quad (\omega=d) \quad (14)$$

安全評価においては、数万年以上の長期間にわたる核種移行計算が必要となるため、数値解法には計算効率の高いラプラス変換を用いた有限要素法¹⁴⁾を適用した。すなわち、ラプラス変換を用いて支配方程式(5)中の時間微分項を消去するとともにマトリクス拡散項を簡単な式に変換し、ラプラス空間上で有限要素法により各節点の濃度を計算した後、逆ラプラス変換により各節点濃度の時間履歴を算定する。ラプラス変換を用いることにより、時間ステップが不要となるため、効率的な時間領域の計算が可能となる。さらに、クーラン数による制約がなくなることから、流速の大きな移流支配の割れ目と流速の小さな拡散支配の岩石基質中の核種移行を同時に解く場合に離散化が粗くても比較的精度の良い解を得ることが可能となる¹⁴⁾。

時間領域の核種濃度 $C_n(\ell, t)$ のラプラス変換は、 L をラプラス変換演算子として複素数 p をパラメータとする関数で表される。

$$L[C_n] = \bar{C}_n(\ell, p) = \int_0^{\infty} C_n(\ell, t) e^{-pt} dt \quad (15)$$

$$L \left[\frac{dC_n}{dt} \right] = p \bar{C}_n - C_n \Big|_{t=0} \quad (16)$$

したがって、支配方程式(5)は、ラプラス変換によ

り時間微分項が消去された次式に変換される。

$$\int_{\Omega} \mathbf{L}(\hat{\bar{C}}_n) w_i d\Omega = 0 \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (25)$$

$$\begin{aligned} & \left[A(\ell)R_n(\ell)(p + \lambda_n) + \bar{g} - \sum_{k=1}^{n-1} G_{n,k}^m \right] \bar{C}_n \\ & + A(\ell) \left[q(\ell) \frac{\partial \bar{C}_n}{\partial \ell} - \frac{\partial}{\partial \ell} D_L(\ell) \frac{\partial \bar{C}_n}{\partial \ell} - R_{n-1}(\ell) \lambda_{n-1} \bar{C}_{n-1} \right] \\ & - A(\ell)R_n(\ell)C_n|_{t=0} = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

ここに、

$$\bar{g} = w(\ell)F\theta^m D^m \beta_n \tanh(\beta_n d) \quad (18)$$

$$\beta_n = \sqrt{\frac{R_n^m(p + \lambda_n)}{D^m}} \quad (19)$$

$$G_{n,k}^m = -w(\ell)F\theta^m D^m \times \left[\sum_{j=k}^n \frac{\prod_{i=k}^{n-1} (\lambda_i R_i^m)}{\prod_{\substack{i=k \\ i \neq j}}^n [R_i^m(p + \lambda_i) - R_j^m(p + \lambda_j)]} \cdot \beta_j \tanh(\beta_j d) \right] \quad (20)$$

また、境界条件式(11)および(12)は、以下のように書き直される。

$$A(\ell) \left[q(\ell) \bar{C}_n - D_L(\ell) \frac{\partial \bar{C}_n}{\partial \ell} \right] = \bar{g}_n^0(\ell, p) \quad (21)$$

$$A(\ell) \left[q(\ell) \bar{C}_n - D_L(\ell) \frac{\partial \bar{C}_n}{\partial \ell} \right] = \bar{g}_n^B(\ell, p) \quad (22)$$

ガラーキン有限要素法によりラプラス空間上の支配方程式(17)を解く。空間を離散化し、近似解 $\hat{\bar{C}}_n$ を以下のように設定する。

$$\bar{C}_n \approx \hat{\bar{C}}_n = \sum_{j=1}^M \bar{C}_{n,j}(p) w_j(\ell) \quad (23)$$

ここに、 $w_j(\ell)$ は基底関数、 M は節点数、 $\bar{C}_{n,j}(p)$ は節点 j におけるラプラス空間上の濃度を表す。偏微分演算子を \mathbf{L} として \bar{C}_n に対して式(17)は、

$$\mathbf{L}(\bar{C}_n) = 0 \quad (24)$$

と表される。ガラーキン法では重み関数に基底関数を用いて領域 Ω の近似解に関して次式を得る。

グリーンの定理を用いて次式を得る。

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^M \bar{C}_{n,j} \left\{ \sum_{\epsilon} \int_{\Omega^{\epsilon}} \left[\left(A(\ell)R_n(\ell)(p + \lambda_n) + \bar{g} - \sum_{k=1}^{n-1} G_{n,k}^m \right) w_i w_j \right. \right. \\ & \left. \left. + A(\ell) \left(q(\ell) \frac{\partial w_j}{\partial \ell} w_i + D_L \frac{\partial w_i}{\partial \ell} \frac{\partial w_j}{\partial \ell} \right) \right] d\ell \right\} \\ & - \sum_{j=1}^M \bar{C}_{n-1,j} \left\{ \sum_{\epsilon} A(\ell)R_{n-1}(\ell) \lambda_{n-1} \int_{\Omega^{\epsilon}} w_i w_j d\ell \right\} \\ & - \sum_{j=1}^M \sum_{\epsilon} A(\ell) \int_{\Gamma^{\epsilon}} D_L \frac{\partial \hat{\bar{C}}_{n,j}}{\partial n} w_i d\Gamma \\ & = \sum_{j=1}^M C_n|_{t=0} \sum_{\epsilon} A(\ell)R_n(\ell) \int_{\Omega^{\epsilon}} w_i w_j d\ell \quad i = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (26)$$

ここに、 Γ は領域 Ω の境界を表し、式(26)は以下のように表される。

$$\begin{aligned} & \left([E] + \left(A(\ell)R_n(\ell)(p + \lambda_n) + \bar{g}_n - \sum_{k=1}^{n-1} G_{n,k}^m \right) [M] \right) \{ \bar{C}_n \} \\ & - (A(\ell)R_{n-1}(\ell) \lambda_{n-1}) [M] \{ \bar{C}_{n-1} \} \\ & = (A(\ell)R_n(\ell)) [M] \{ \bar{C}_n \}_{t=0} + \{ \bar{B} \} \end{aligned} \quad (27)$$

ここに、 $[E]$ は移流分散行列、 $[M]$ は質量行列、 $\{ \bar{C}_n \}$ はラプラス空間上の節点濃度を表す未知ベクトル、 $\{ \bar{C}_n \}_{t=0}$ は初期条件を表す既知ベクトル、 $\{ \bar{B} \}$ はラプラス空間上の境界条件を表す既知ベクトルで、 $\{ \bar{C}_{n-1} \}$ は親核種からの崩壊がある場合は最上位の親核種から順に計算を行い娘核種への崩壊量を算定する。この非対称の複素数行列を解いて、ラプラス空間上の節点濃度を計算する。

有限要素法により求められたラプラス空間上の各節点の濃度から逆ラプラス変換により時間 t における各節点の濃度を計算する。

$$\hat{C}_n(\ell, t) = \sum_{j=1}^M L^{-1}[\bar{C}_{n,j}(p_k)] w_j(\ell) = \sum_{j=1}^M C_{n,j}(t) w_j(\ell) \quad (28)$$

逆ラプラス変換の数値解法として de Hoog et al.¹⁵⁾の方法を用い、異なる $p_k (= p_0 + k\pi i/T; k=0, 1, \dots, 2K)$ に対して式(27)を解く。

$$C_{n,j}(t) = \frac{1}{T} \exp(p_0 t) \left\{ \frac{1}{2} \bar{C}_{n,j}(p_0) + \sum_{k=1}^{2K} \operatorname{Re} \left[\bar{C}_{n,j} \left(p_0 + \frac{k\pi i}{T} \right) \exp \left(\frac{k\pi i t}{T} \right) \right] \right\} + E \quad (29)$$

ここに、 $2T$ はフーリエ級数の区間 $[0, 2T]$ 、 Re はラプラス空間上の節点濃度の実数部、 $i=(-1)^{1/2}$ を表し、 E は誤差 $[\text{mol}/\text{m}^3]$ で 10^{-4} から 10^{-6} の値を用いると解の精度が高くなることが知られている。また、収束のため通常 $K=5$ を用い、パラメータ p_0 は次式により与えられる。

$$p_0 = \mu - \ln(E)/2T \quad (30)$$

ここに、 t_{\max} を最大計算時間として経験的に $\mu=0$ 、 $T=0.8t_{\max}$ が用いられる。

本研究で開発したラプラス変換有限要素法を用いた核種移行解析モデルは、1次元均質場を対象としたマトリクス拡散と核種崩壊連鎖を考慮した移流分散理論解¹⁶⁾および不均質場を対象とした既存の核種移行解析コード¹⁷⁾との比較により、解の妥当性を確認している¹⁸⁾。

3. 地層処分システムへの核種移行解析モデルの適用性に関する検討

3章では、高レベル放射性廃棄物地層処分における天然バリア中の核種移行解析を実施し、核種移行解析モデルの適用性について検討する。

解析で対象とする岩種は、典型的な亀裂性岩盤としてこれまでに数多くの割れ目調査により割れ目特性に関するデータが豊富なのに加えて、諸外国の安全評価研究の対象岩種の一つとして核種移行特性に関するデータも豊富な花崗岩とする。

(1) 天然バリア中の核種移行評価概念およびフロー
花崗岩における処分場は、地下1,000mに位置し、処分場内のガラス固化体の総本数を40,000本とすると処分坑道の総延長は100km以上で、処分場の大きさは数キロメートル四方になると試算されている¹⁹⁾ (図-8参照)。このような地下深部の数キロメートル四方におよぶ広大な処分場から人間環境に至るまでの核種移行経路は、非常に複雑で地形地質構造などのサイト固有の条件や処分場のレイアウトに依存し、処分場領域内の岩盤中の割れ目をモデル化して核種移行解析を行うには膨大な計算容量が必要とな

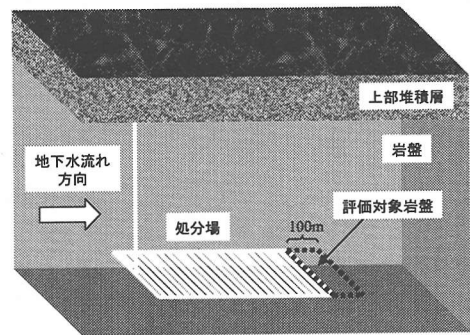


図-8 地層処分場概念図

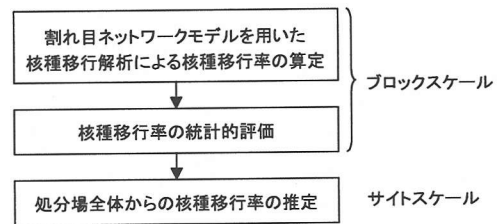


図-9 天然バリア中の核種移行評価フロー

る。

本論では、不均質岩盤の有する一般的な核種移行特性を評価するために、サイト周辺の地質構造や処分場のレイアウトを考慮する必要のない処分場下流側の岩盤100mのみを対象として核種移行評価を実施する。

解析にあたっては、まず図-2のフローにしたがい既往の文献や原位置調査および室内試験結果に基づいて岩盤中の割れ目の幾何学的特性、水理特性および核種移行特性を設定し、ブロックスケール領域を対象に割れ目ネットワークモデルを構築して核種移行解析を実施する。次に、ブロックスケールにおける複数の割れ目ネットワークモデルのリアライゼーションから得られた結果を統計的に評価して数キロメートル四方の処分場全体を対象としたサイトスケールにおける核種移行評価を実施する。天然バリア中の核種移行評価フローを図-9に示す。

(2) ブロックスケール解析

a) 解析領域

ブロックスケールの解析では、領域中央に処分坑道を配し処分坑道の上下流側ともに岩盤100m分をモデル化の対象とした一辺200mの立方体領域をモデル化領域とする。割れ目ネットワークモデルの作

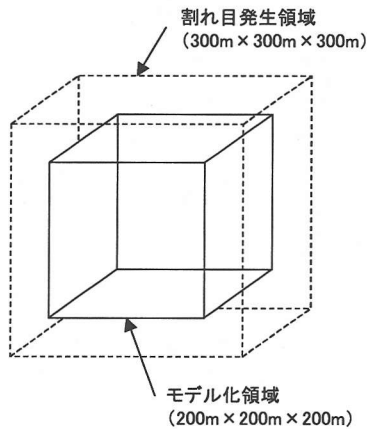


図-10 割れ目発生領域とモデル化領域

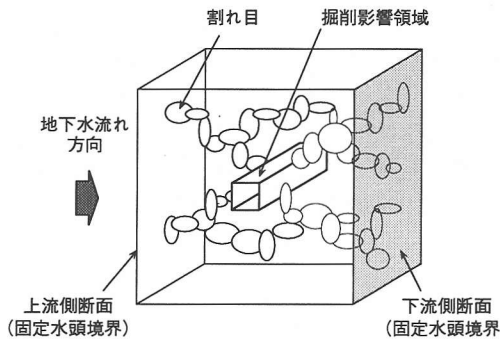


図-11 ブロックスケールのモデル概念図

成にあたっては、一辺 200m の領域内のみ割れ目を発生させた場合は領域外にも発生させた場合よりも割れ目頻度が小さくなり割れ目の連結性も悪くなることから²⁰⁾、図-10 に示すように一辺 300m の立方体領域内に割れ目の中心座標が入るようにモンテカルロシミュレーションによって割れ目を発生させた後、領域中央の一辺 200m の立方体領域を切り出して割れ目ネットワークモデルを作成する。

割れ目ネットワークモデル中央には、処分坑道掘削に伴い坑道周辺に発生する掘削影響領域を平行平板モデルによりモデル化し、図-11 に示すように一辺 3.2m の矩形に配置する。平行平板モデルの透水係数は、後述するように掘削影響領域の幅と透水係数から算定する。掘削影響領域の内側は低透水性の緩衝材として解析では不透水領域とする。

b) 解析条件

水理解析に関しては、図-11 に示すように処分坑道に直交する方向の動水勾配が 0.01 となるように上下流断面に固定水頭を与え、その他の側方境界は

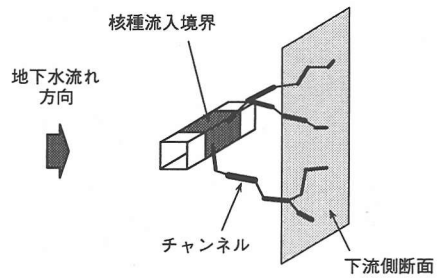


図-12 核種流入境界

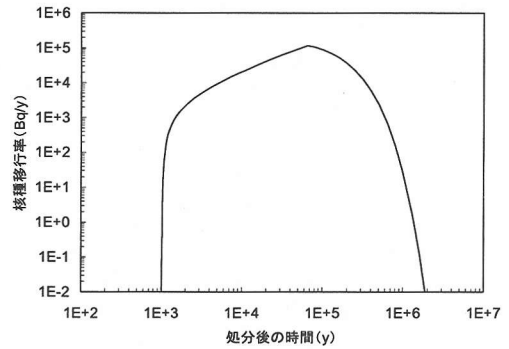


図-13 ガラス固化体1本あたりの人工バリアからの核種移行率³⁾

不透水境界として、チャンネルネットワークモデル内の水頭場から流速を算定する。

核種移行解析に関しては、チャンネルネットワークモデル中の初期濃度を 0 とし、地下水流れ方向の側方境界の影響がなるべく小さくなるように図-12 に示すように掘削影響領域の中央 100m 区間に区間内に埋設されるガラス固化体本数分の人工バリアからの核種移行率を与え、処分坑道から 100m 下流側の断面を通過する核種移行率を算定した。100m 区間内に埋設されるガラス固化体の本数は固化体ピッチを 3.13m¹⁹⁾として計 32 本とし、この区間に接続する各移行経路には各移行経路の流量に比例して 32 本分の核種移行率を配分した。ガラス固化体 1 本あたりの人工バリアからの核種移行率³⁾を図-13 に示す。ただし、核種移行率の単位は mol/s を Bq/y に換算して示した。

c) 入力データ

割れ目の幾何学的特性

花崗岩中の割れ目の幾何学的特性である割れ目の方向分布、形状、半径分布、頻度分布、空間分布に関しては、既往の文献や釜石鉱山における原位置調査結果に基づいて設定された井尻ほか²¹⁾の値(表-

1 参照)を採用する。ただし、割れ目半径のべき乗分布に関しては、べき乗数 3.0~4.0 のうち大きな割れ目の頻度が大きく、割れ目ネットワークモデルの透水性が高く割れ目ネットワークモデル内の地下水移行時間が小さいべき乗数 3.0²¹⁾を採用した。割れ目の最小半径に関しては、最小半径が小さくなるほど割れ目ネットワークモデル内に発生される割れ目の数は膨大となり、それに伴い解析要素数も飛躍的に大きくなるため計算効率が非常に低下する。そこで、割れ目の最小半径をパラメータとして感度解析を実施した結果、割れ目ネットワークモデルの透水性にあまり影響を及ぼさないような連結性の低い小さな割れ目はモデル化しないこととし、割れ目の最小半径は 7m とした²¹⁾。割れ目の最大半径は、割れ目発生領域の一辺と同じ 300 m とした。

割れ目の透水量係数分布

わが国における既往の透水係数測定値は、釜石鉱山を含めてトンネルやダムなどの山地で測定された値²²⁾であるのに対し、花崗岩における処分場は図-14 に示すように地下 1,000m の岩盤を対象としており、このような地下深部における岩盤の透水係数を測定した例は非常に少ない。一方、諸外国の地下研究施設では、地下深部における透水係数が測定され、透水係数は深度とともに減少することが確認されている^{2), 23)~25)}。

そこで、本論では釜石鉱山のボーリング孔内(標高 550m, 土被り 260m)で測定された透水係数と開口割れ目本数から求められた割れ目の透水量係数の対数正規分布(対数平均-8.99m²/s, 対数標準偏差 1.07m²/s)²¹⁾を深度依存性に基づいて 1 桁低減した図-15 に示す対数正規分布(対数平均-9.99m²/s, 対数標準偏差 1.07m²/s)を用いることとした。

割れ目の開口幅分布

透水試験により求められる割れ目の水理学的開口幅は、平行平板内の一様流れに割れ目表面の凹凸の影響を考慮した修正三乗則^{26)~29)}を用いて割れ目の透水量係数から求めることができる。しかし、前述したように割れ目内の地下水はチャンネル状に連結した開口部を選択的に流れているために(図-3 参照)、核種移行解析に必要な割れ目内の実流速の算定に一様流を仮定した水理学的開口幅を用いると実流速を過小評価することが指摘されている³⁰⁾。

そこで、解析には、釜石鉱山の単一割れ目内で実施した原位置トレーサ試験³¹⁾により求められた次式の経験則で表される物質移行開口幅を用いることとした。

表-1 割れ目特性データ

パラメータ	設定値
方向分布	直交 2 組の鉛直割れ目群 Fisher 分布 (Fisher 係数 10)
形状	6 角形
半径分布	べき乗分布 (べき乗数 3.0) 最大半径 300m, 最小半径 7m
頻度分布	3 次元密度 0.8m ² /m ³
空間分布	Poisson 分布 (Baecher モデル)
透水量係数分布	対数正規分布 (対数平均-9.99m ² /s, 対数標準偏差 1.07m ² /s)
開口幅分布	2(透水量係数) ^{1/2}

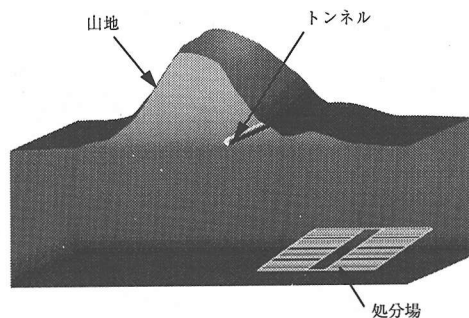


図-14 透水係数評価深度概念図

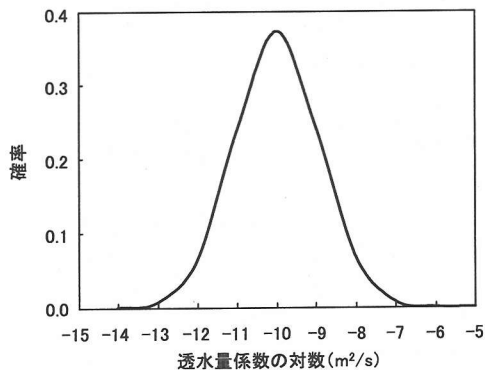


図-15 透水量係数分布

$$b(\ell) = \sqrt{T(\ell)} \quad (29)$$

掘削影響領域の透水量係数

既往の測定結果によると花崗岩における機械掘削に伴う掘削影響領域の幅は約 0.5m, 透水係数は掘削前の母岩の透水係数の約 10 倍と考えられる^{3), 18)}。

表-2 核種移行特性データ

パラメータ	記号	設定値
縦方向分散長	D_L	2.0m
割れ目開口部面積比率	F	0.5
マトリクス拡散深さ	d	0.1m
岩石基質の有効間隙率	θ^m	0.02
岩石基質の乾燥密度	ρ^m	2,640kg/m ³
実効拡散係数	$\theta^m D^m$	$3.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$
分配係数 (Cs-135)	Kd	0.05

そこで、掘削影響領域の幅を 0.5m とし、後述する割れ目ネットワークモデルのリアライゼーション 50 個の透水係数平均値に基づいて母岩の透水係数を 10^{-10}m/s とし、掘削影響領域をモデル化した平行平板モデルの透水量係数は $5.0 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ ($=0.5\text{m} \times 10^{-10} \text{m/s} \times 10$) と設定した。

割れ目内の縦方向分散長

割れ目内を流れる核種は、割れ目内のチャンネル状の不均質な流れに起因した機械的分散と分子拡散により分散され、単一割れ目内の縦方向分散長は Neretnieks et al.³²⁾の実施した花崗岩試料を用いた室内トレーサ試験結果によると移行距離の約 1/10 倍と求められている。

表-1 の割れ目の幾何学的特性にしたがって構築したチャンネルネットワークモデル内のチャンネル長は、最頻値約 5.0m を中心に数メートルから数十メートルの範囲に分布する。そこで、縦方向分散長を 0.5m~2.0m の範囲で感度解析した結果、縦方向分散長は解析結果にほとんど影響を及ぼさないことを確認した¹⁸⁾。したがって、解析では計算効率が良いように縦方向分散長は一律 2.0m とした。

割れ目開口部の面積比率

地下水中の核種は、割れ目開口部を流れ、その一部は岩石基質中へと拡散する。割れ目全体に対する割れ目開口部の面積比率は、Pyrak-Nolte et al.³³⁾の割れ目への低融点金属注入試験結果によると割れ目面への垂直応力が 3~85Mpa の範囲で 58%~92% に分布し、垂直応力の増加とともに減少することが確認されている。一方、これまでに割れ目開口部の面積比率の不均質性に関する知見は得られていないことから、解析では、全ての割れ目に対して一律 50% と保守的に設定した。

マトリクス拡散深さ

新鮮な花崗岩の岩石基質中においても連続した間隙が存在し、深さ方向に制限なくマトリクス拡散することが確認されている^{34)~36)}。既往のナチュラルアナログ研究によると、割れ目周辺の岩石基質は割れ目形成過程で生じるマイクロクラックや熱水変質などの影響を受けて間隙が大きくなり連結性も高くなっていることからマトリクス拡散しやすいことが知られており^{8), 37), 38)}、その深さは 0.01m~0.1m の範囲に分布している^{7), 8), 38)~42)}。解析では、保守的にマトリクス拡散深さに制限を設けることとし、マトリクス拡散深さに関しても不均質性に関する知見がないことから全ての割れ目に対して 0.1m と設定した。

岩石基質部の有効間隙率・乾燥密度・実効拡散係数
マトリクス拡散に寄与する岩石基質部の有効間隙

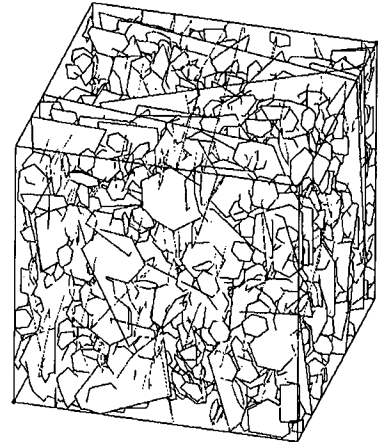


図-16 割れ目ネットワークモデル鳥瞰図

率・乾燥密度・実効拡散係数の設定にあたっては、保守的に新鮮な花崗岩の値を用いることとし、既往の文献調査結果⁴³⁾に基づいて有効間隙率は 2% とし、乾燥密度は有効間隙率との相関式⁴⁴⁾、

$$\rho^m = 2,700 \times (1 - \theta^m) \quad (30)$$

に基づいて $2,640 \text{kg/m}^3$ とする。また、割れ目内から岩石基質中への核種の実効拡散係数は保守的に $3.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ とする³⁾。

分配係数

対象核種は、岩石鉱物への収着能力が小さい核分裂生成物セシウム 135 (Cs-135) とし、Cs-135 の花崗岩に対する分配係数は保守的に 0.05 とする⁴⁵⁾。

割れ目ネットワークモデルの構築に用いた割れ目特性データを表-1 に、核種移行計算に用いた核種移行特性を表-2 に示し、表-1 にしたがって発生させた割れ目ネットワークモデルの鳥瞰図を図-16 に示す。図中には発生させた全割れ目のうち 25% の割れ目のみ表示している。

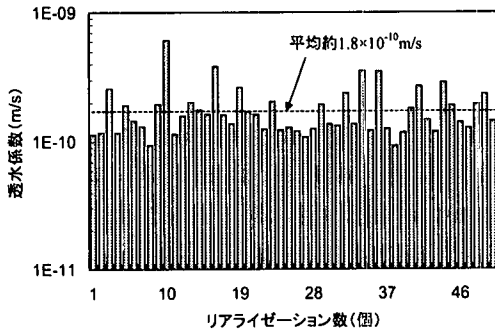


図-17 チャンネルネットワークモデルの透水性係数の分布

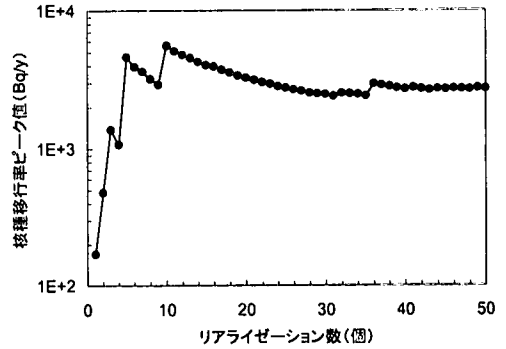


図-19 リアライゼーション数と核種移行率ピーク値の平均の関係

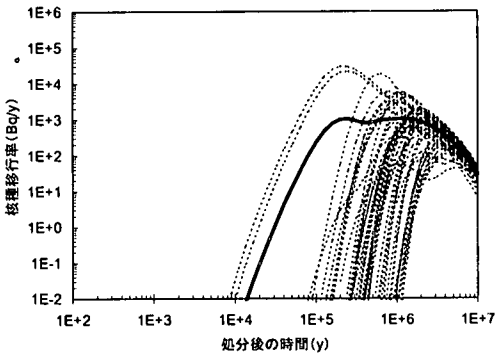


図-18 リアライゼーション 50 個の核種移行率解析結果 (点線) とその平均 (太線)

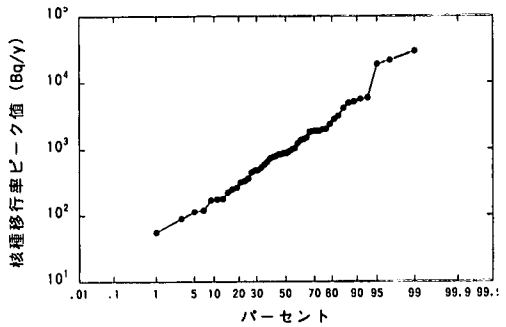


図-20 対数正規確率紙上の核種移行率ピーク値

d) 解析結果

割れ目ネットワークモデルのリアライゼーションを 50 個発生し、それぞれに対してチャンネルネットワークモデルを構築して水理解析と核種移行解析を実施した。

水理解析により求められた 50 個のチャンネルネットワークモデルの透水性係数の分布を図-17 に示す。図に示すようにチャンネルネットワークモデルの透水性係数のほとんどは、 10^{-10} m/s オーダーに分布し、50 個のリアライゼーションの平均は約 1.8×10^{-10} m/s と求められた。

核種移行解析により求められた 50 個のチャンネルネットワークモデルにおける解析領域の下流側断面を通過するガラス固化体 1 本あたりの核種移行率を図-18 中に点線で示す。リアライゼーションごとに得られた核種移行率は大きく異なり、そのピーク値は約 2 桁にわたって分布している。この核種移行率のピーク値は、図-19 に示すようにリアライゼーション数が増加するとともにその平均が一定値に漸近し、図-20 に示すように対数正規確率紙上ではほぼ

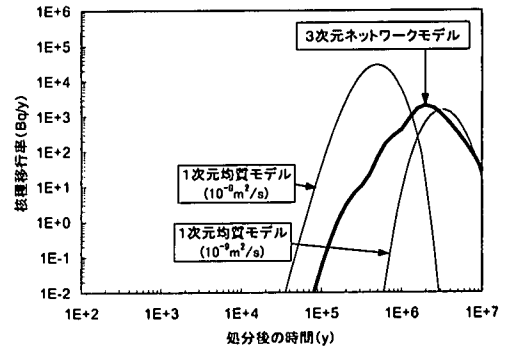


図-21 リアライゼーション 1 個から求められたガラス固化体 1 本あたりの核種移行率

直線上に分布することから、対数正規分布にしたがうことがわかる。したがって、各リアライゼーションから得られる核種移行率のピーク値だけでなく核種移行率の経時変化もある統計量にしたがうと考えられる。

図-18 に示す 50 個のリアライゼーションの中のある 1 個のリアライゼーションにより得られた核種移行率を図-21 中に太線 (3 次元ネットワークモデ

ル)で示す。

ここで、岩盤が有する不均質性が核種移行解析結果に及ぼす影響を評価するために、処分坑道から下流側断面まで1本の均質な割れ目内を核種が移行する場合の解析を実施した。この1次元均質場における解析に用いる移行距離は100mとし、割れ目の透水量係数は $10^{-9}m^2/s$ と $10^{-8}m^2/s$ とした。また、透水量係数および透水量係数と相関のある開口幅以外の核種移行特性は、表-2に示す値を用いた。1次元均質モデルから求められたガラス固化体1本あたりの核種移行率を図-21中に細線(1次元均質モデル)で示す。

図-21に示すように不均質な3次元チャンネルネットワークモデルにより得られた核種移行率は、1次元均質モデルにより得られた核種移行率よりもピークに至るまでの立ち上がりやピーク後の減衰に要する時間が長く、透水量係数の異なる複数の1次元均質モデルにより得られた核種移行率を重ね合わせたような形状を呈する。これは、人工バリアから放出された核種は、ブロックスケール領域を対象としたチャンネルネットワークモデル内の流速や経路長の異なる様々な経路を移行して下流側断面に到達しているためである。割れ目ネットワークモデルを用いた核種移行解析モデルにより、岩盤の不均質性が核種移行解析結果に反映できることが確認された。

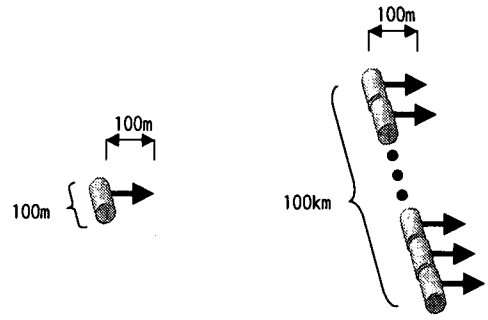
任意のある割れ目ネットワークモデルのリアライゼーションにおける割れ目数は約8,000で、変換後のチャンネルネットワークモデル内の節点数は約23,000、要素数は84,000であった。また、核種移行計算に要したCPU時間は、逆ラプラス変換による計算時間数を20として約13分(COMPAQ Alpha Server 4100, 600MHz, 880MFlops)で、比較的短時間に複雑な3次元ネットワーク中の核種移行計算ができることが確認された。

(3) サイトスケール問題への拡張

a) 評価手法

処分坑道100m区間を対象としたブロックスケール領域における核種移行解析結果に基づいて、サイトスケールの処分場全体からの核種移行率を算定する方法について述べる。

処分場全体からの核種移行率の算定にあたっては、処分場領域内の各処分坑道から下流側100mまでの岩盤による核種移行遅延効果のみを考慮することとする。この場合、処分場全体からの核種移行率は、図-22に示すように処分場内の処分坑道総延長分だけ処分坑道100m区間を対象としたブロックスケールのリアライゼーションから求められた核種移行率



(a) ブロックスケール (b) サイトスケール

図-22 ブロックスケールとサイトスケールの評価概念図

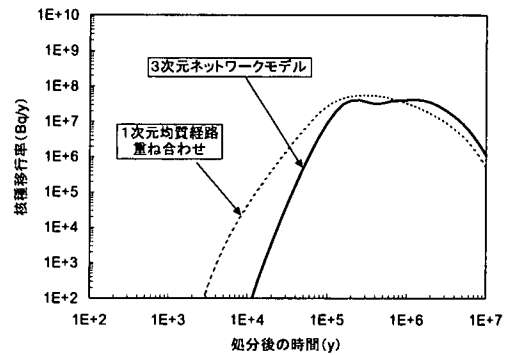


図-23 処分場全体からの核種移行率算定結果

を重ね合わせることによって概算される。すなわち、前述したように処分場内の処分坑道の総延長は100km以上になることから、処分場全体からの核種移行率は、1,000個以上のブロックスケールのリアライゼーションから求められた核種移行率の総和となる。ここで、前節に述べたようにリアライゼーションにより得られた核種移行率はある統計量にしたがうと考えられることからエルゴード性を仮定して、処分場全体からの核種移行率は、リアライゼーション50個から求められたガラス固化体1本あたりの核種移行率の平均値(図-18中の太線)を処分場内の総ガラス固化体本数40,000本に比例換算して求めることができる。

b) 評価結果

処分場全体からの核種移行率算定結果を図-23中に実線(3次元ネットワークモデル)で示す。処分場全体からの核種移行率は、図-21に示すブロックスケールごとの核種移行率よりもさらに分散効果が

大きくなり、処分後約 25 万年と約 130 万年に 2 度ピーク値を持つことがわかる。

(4) 支配的な移行経路の同定

処分場全体からの核種移行率算定結果に及ぼす割れ目ネットワーク構造の影響を把握するために、ネットワーク構造を有しない仮想岩盤での解析を実施し、処分場全体からの核種移行率算定結果と比較検討を行った。

比較解析は、図-24 に示すように処分坑道から下流側 100m まで複数の均質な単一割れ目内を核種が移行する場合を想定した。各割れ目の透水量係数には、図-25 に示すように表-1 で設定した透水量係数分布を短冊状に 48 分割した各区間の中央値を用い、移行距離は 100m、割れ目開口幅および核種移行特性はそれぞれ表-1 および表-2 で設定した値を用いた。各割れ目の境界条件としてガラス固化体 1 本分の人工バリアからの核種移行率を与え、各割れ目ごとに均質な 1 次元モデルにより核種移行解析を実施した。処分場全体からの核種移行率 Q [Bq/y] は、各割れ目ごとに得られた核種移行率 Q_i [Bq/y] ($i=1,2, \dots, 48$) に各区間の分布確率 p_i (図-25 参照) と総ガラス固化体本数 40,000 を乗じて算定した。

$$Q = \sum_{i=1}^{48} 40,000 \times p_i \times Q_i \quad (31)$$

式(31)により算定された処分場全体からの核種移行率を図-23 中に点線 (1 次元均質経路重ね合わせ) で示す。図-23 より 3 次元ネットワークモデルにより得られた処分場全体からの核種移行率は、この 1 次元モデルの重ね合わせにより得られた核種移行率と同じような傾向を示す。これは、割れ目半径のべき乗分布のべき乗数が 3.0 の場合は、割れ目ネットワークモデル中に解析領域を横断するような大きな割れ目の頻度が高く、これらの大きな割れ目が支配的な移行経路になっていること²¹⁾が原因と考えられる。実際のトンネルの現場においても、断層や断層破砕帯などの大きな割れ目構造から多量の湧水が見られることが多く、核種移行上も岩盤中の大きな割れ目構造の把握が重要であることが確認された。

4. まとめと今後の課題

岩盤中の割れ目の不均質性を考慮した 3 次元割れ目ネットワークモデルを用いたより現実的な亀裂性

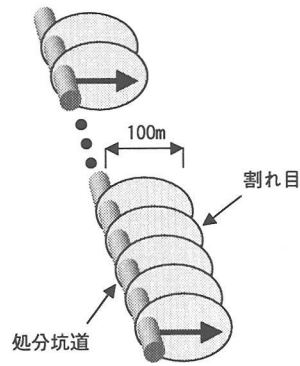


図-24 単一割れ目からなる仮想岩盤概念図

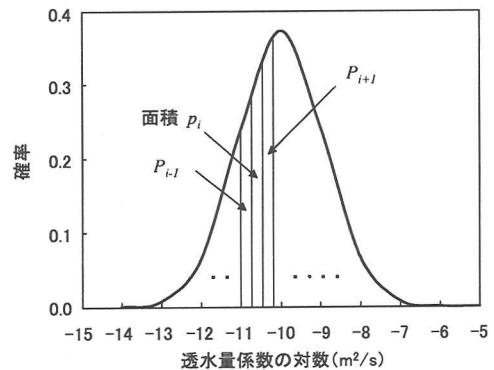


図-25 透水量係数分布の分割区間模式図

岩盤内の核種移行解析手法を開発し、花崗岩を対象として一辺200mのブロックスケール領域内での核種移行解析を実施した結果、岩盤内の不均質性が解析結果に反映された核種移行評価が可能となった。また、割れ目ネットワークモデルをチャンネルネットワークモデルに変換し、ラプラス変換有限要素法を用いることによって、不均質な割れ目ネットワーク中の長期の核種移行計算を10分程度の比較的短時間で効率的に解くことが可能となった。さらに、ブロックスケール領域における50個のチャンネルネットワークモデルの解析結果からエルゴード性を仮定してサイトスケールの処分場全体からの核種移行率を推定した結果、岩盤中の断層などの大きな割れ目構造は、小さな割れ目で構成されるネットワーク構造よりも解析結果に及ぼす影響が大きく核種移行解析上重要であることが示された。

したがって、今後の課題として、断層などの大きな構造の幾何学的特性および水理・核種移行特性を評価していくことが重要となる。実際、処分サイト

におけるサイト特性調査で同定される割れ目構造は、地質構造特性や探査手法の解像度などによって異なるものの、数百メートル以上の比較的大きな構造と考えられる⁴⁶⁾ことから、大きな割れ目構造を中心に処分場の安全性を評価することは合理的と考えられる。

断層や破碎帯などの大きな割れ目構造の核種移行評価を実施するにあたっては、割れ目構造が有する複雑さと大きさの観点から、それぞれ複雑な割れ目構造のモデル化と大規模なスケールでの核種移行特性の評価という2つの課題が考えられる。

前者の具体的な課題としては、断層内の破碎帯角礫部と断層粘土部のモデル化手法の開発が挙げられる。一般に、断層は中央部の断層粘土部とその周辺の角礫部から構成されていることが多く、スイスのグリムゼル地下研究施設におけるトレーサ試験結果によると角礫部内を移行するトレーサは断層粘土部への拡散と収着により遅延されることが確認されている⁴⁷⁾。特に、わが国の地下深部の岩盤においては熱水変質により断層粘土や充填鉱物が形成されている場合が多いことから、小島⁴⁸⁾が指摘しているように断層粘土や割れ目充填鉱物が核種移行に及ぼす影響を評価することは非常に重要である。

後者の具体的な課題としては、割れ目構造内における核種移行特性のスケール依存性の評価手法の確立が挙げられる。従来、数百メートル以上に及ぶ大規模な割れ目構造内の水理特性や物質移行特性は、ボーリング孔内やボーリング孔間における局所的なスケールで測定されたデータに基づいて統計的に推定したり⁴⁷⁾、最も保守的なデータに基づいて設定するのが一般的であった。Davison et al.⁴⁹⁾は、カナダ URL サイトで大規模破碎帯を対象に大規模なスケールで長期透水・トレーサ試験を実施し、巨視的なスケールでの水理・物質移行特性を推定する手法の確立が必要であることを指摘している。

以上より、今後は、深地層の研究所などにおいて断層などの大きな割れ目構造を対象に調査試験を実施して、断層破碎帯部や断層粘土部のモデル化手法を開発するとともに、核種移行特性のスケール依存性の評価手法を確立していく予定である。

謝辞：解析コードの開発にあたっては、Waterloo大学のSudicky教授、Golder Associates Inc.のMiller博士、Doe博士、Shuttle博士の御協力を頂きました。ここに、深甚の謝意を表します。また、データの提供に御協力いただいた核燃料サイクル開発機構東海事業所の佐藤治夫氏、澁谷朝紀氏、谷口航氏、同東濃地

科学センターの太田久仁雄氏、佐藤稔紀氏にも感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Nagra : Kristallin-I, Safety Assessment Report, *Nagra Technical Report* NTB 93-22, 1994.
- 2) SKB : SKB 91 - Final Disposal of Spent Nuclear Fuel; Importance of the Bedrock for Safety, *SKB Technical Report* 92-20, 1992.
- 3) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術的信頼性、一 地層処分研究開発第2次取りまとめ一 分冊 3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, 1999.
- 4) Neretnieks, I.: Diffusion in the rock matrix: An important factor in radionuclide retardation?, *J. of Geophysical Research*, Vol.85, No.B8, pp.4379-4397, 1980.
- 5) Lever, D.A. and Bradbury, M.H.: Rock-matrix diffusion and its implications for radionuclide migration, *Mineralogical Magazine*, Vol.49, pp.245-254, 1985.
- 6) Cliffe, K.A., Gilling, D., Jefferies, N.L. and Lincham, T.R.: An experimental study of flow and transport in fractured slate, *J. of Contaminant Hydrology*, Vol.13, pp.73-90, 1993.
- 7) Alexander, W.R., Scott, R.D., MacKenzie, A.B. and McKinley, I.G.: A natural analogue study of radionuclide migration in a water conducting fracture in crystalline rock, *Radiochimica Acta*, 44/45, pp.283-289, 1988.
- 8) Ota, K., Amano, K. and Ando, T.: Brief overview of in situ contaminant retardation in fractured crystalline rock at the Kamaishi in situ test site, *Proceedings of an International Workshop for the Kamaishi in situ Experiments*, Kamaishi, Japan, 24-25 August 1998, pp.67-76, JNC Technical Report, JNC TN7400 99-007, 1999.
- 9) Dershowitz, W., Lee, G., Geier, J., Foxford, T., LaPointe, P. and Thomas, A.: FracMan interactive discrete feature data analysis, geometric modeling and exploration simulation, User documentation, version 2.6, Golder Associates Inc., Seattle, Washington, 1998.
- 10) Tsang, C.F.: Tracer transport in fracture systems, *Flow and Contaminant transport in Fractured Rock*, edited by Bear, J., Tsang, C.F. and de Marsily, G., Academic Press, Inc., pp.237-266, 1993.
- 11) 水戸義忠, 菊地宏吉, 鶴田修, 本多眞: 実岩盤の節理流れに関する実験と考察(その2), 第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.176-180, 1990.
- 12) Cacas, M.C., Ledoux, E., de Marsily, G., Tillie, B., Barbreau, A., Durand, E., Feuga, B. and Peudeccerf, P.:

- Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: Calibration and validation 1. The flow model, *Water Resources Research*, Vol.26, No.3, pp.479-489, 1990.
- 13) 渡辺邦夫, 田中達也, 内田雅大, 岩崎浩: 地質構造を基礎としたフラクチャーネットワークモデルの開発(その2) - 釜石鉱山 KD-90 坑道・トレーサー試験の解析 -, 応用地質, 第35巻第4号, pp.2-12, 1994.
- 14) Sudicky, E.A.: The Laplace transform Galerkin technique for efficient time-continuous solution of solute transport in double-porosity media, *Geoderma*, 46, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp.209-232, 1990.
- 15) de Hoog, F.R., Knight, J. and Stokes, A.: An improved method for numerical inversion of Laplace transform, *SIAM J. Sci. Stat. Comput.*, 3(3), pp.357-366, 1982.
- 16) Hodgkinson, D.P. and Maul, P.: One-dimensional modeling of radionuclide migration through permeable and fractured rock for arbitrary length decay chains using numerical inversion of Laplace transforms, *Harwell Laboratory of United Kingdom Atomic Energy Authority report*, 1985.
- 17) Barten, W.: PICNIC-1 test cases: Fracture case, *Paul Scherrer Institute*, 1996.
- 18) 澤田淳, 井尻裕二, 坂本和彦, 亘真吾: 亀裂性岩盤を対象とした天然バリア中の核種移行解析, 核燃料サイクル開発機構研究報告, JNC TN8400 99-093, 1999.
- 19) 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性, 一 地層処分研究開発第2次取りまとめ一分冊 2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999.
- 20) Bour, O. and Davy, P.: On the connectivity of three-dimensional fault networks, *Water Resources Research*, Vol.34, No.10, pp.2611-2622, 1998.
- 21) 井尻裕二, 澤田淳, 坂本和彦, 内田雅大, 石黒勝彦, 梅木博之, 大西有三: 割れ目ネットワークモデルの水理特性に及ぼす割れ目スケール効果の影響に関する研究, 土木学会論文集, No. 694/III-57, pp.179-194, 2001.
- 22) 梅田浩司, 柳澤孝一, 米田茂夫: 日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成, 地下水学会誌, 第37巻第1号, pp.69-77, 1995.
- 23) Neretnieks, I.: Solute transport in fractured rock - Applications to radionuclide waste repositories, in *Flow and contaminant transport in fractured rock*, Academic Press Inc., pp.39-128, 1993.
- 24) Poteri, A. and Laitinen, M.: Site-to-canister scale flow and transport in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara sites, Helsinki, *POSIVA* 99-15, 1999.
- 25) Löfman, J.: Site scale groundwater flow in Hästholmen, *POSIVA* 99-12, 1999.
- 26) Witherspoon, P.A., Wang, J.S.Y., Iwai, K. and Gale, J.E.: Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, *Water Resources Research*, Vol.16, No.6, pp.1016-1024, 1980.
- 27) Sundaram, P.N., Watkins, D.J. and Ralph, W.E.: Laboratory investigations of coupled stress-deformation-hydraulic flow in a natural rock fracture, *28th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, pp.585-592, 1987.
- 28) 多田浩幸, 木下直人, 若林成樹: 岩石割れ目の透水係数と応力の関係を用いた空洞周辺岩盤の透水特性変化の予測手法, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.139-144, 1994.
- 29) 内田雅大, 野田兼司, 丸山誠, 須藤賢: 亀裂性媒体水理試験装置による単一亀裂岩体の透水・トレーサー試験, 第26回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.156-160, 1995.
- 30) Tsang, Y.W.: Usage of "equivalent apertures" for rock fractures as derived from hydraulic and tracer tests, *Water Resources Research*, Vol.28, No.5, pp.1451-1455, 1992.
- 31) 動力炉・核燃料開発事業団: 地層処分研究開発の現状(平成5年度), PNC TN1410 94-094, 1994.
- 32) Neretnieks, I.: Tracer movement in a single fissure in granitic rock: Some experimental results and their interpretation, *Water Resources Research*, Vol.18, No.4, pp.849-856, 1982.
- 33) Pyrak-Nolte, L.J., Myer, L.R., Cook, N.G.W. and Witherspoon, P.A.: Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock, *Proceedings of the Sixth International Congress on Rock Mechanics*, edited by Herget & Vongpaisal, Rotterdam, Balkema, pp.225-233, 1987.
- 34) 北尾秀夫, 向井悟, 片岡伸一: 亀裂性岩石中のヨウ素を用いた移流・拡散試験, 日本原子力学会「1997年秋の大会」予稿集, p.692, 1997.
- 35) 向井悟, 北尾秀夫, 片岡伸一: 亀裂性岩石中の I, Se, 及び Cs を用いた移流・拡散試験, 日本原子力学会「1998年秋の大会」予稿集, 第III分冊, p.842, 1998.
- 36) Olin, M. and Valkiainen, M.: Concentration profiles of anions in granite bedrock caused by postglacial land uplift and matrix diffusion, *IVO Technical Report*, 90-1, 1990.
- 37) Bossart, P. and Mazurek, M.: Grimsel Test Site: Structural geology and water flow-paths in the migration shear-zone, *Nagra Technical Report NTB 91-12*, Nagra, Wettingen, Switzerland, 1991.
- 38) Heath, M.J., Montoto, M., Rodriguez Rey, A., Ruiz de Argandoña, V.G. and Menendez, B.: Rock matrix diffusion as a mechanism of radionuclide retardation: A natural analogue study of El Berrocal granite, Spain, *Radiochimica*

- Acta*, 58/59, pp.379-384, 1992.
- 39) Smellie, J.A.T., MacKenzie, A.B. and Scott, R.D.: An analogue validation study of natural radionuclide migration in crystalline rocks using uranium-series disequilibrium studies, *Chemical Geology*, 55, pp.233-254, 1986.
- 40) Alexander, W.R., McKinley, I.G., MacKenzie, A.B. and Scott, R.D.: Verification of matrix diffusion by means of natural decay series disequilibria in a profile across a water-conducting fracture in granitic rock, *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XIII*, pp.567-576, 1990.
- 41) Blomqvist, R., Jaakkola, T., Niini, H. and Ahonen, L.: The Palmottu analogue project: Progress Report 1990, Geological Survey of Finland, *Nuclear Waste Disposal Project Report*, YST-73, 1991.
- 42) Ohlsson, Y. and Neretnieks, I.: Literature survey of matrix diffusion theory and of experiments and data including natural analogues, *SKB Technical Report 95-12*, 1995.
- 43) 佐藤稔紀, 石丸恒存, 杉原弘造, 清水和彦: 文献調査による我が国の岩石の物理的特性に関するデータの収集, PNC TN7410 92-018, 1992.
- 44) 谷口航, 長谷川宏, 岩佐健吾, 佐藤稔紀: 地層処分場設計のための地質環境基本特性, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-053, 1999.
- 45) 澁谷朝紀, 陶山忠宏, 柴田雅博: 性能評価で用いる岩石に対する核種の分配係数, 核燃料サイクル開発機構研究報告, JNC TN8410 99-051, 1999.
- 46) Ijiri, Y., Sawada, A., Sakamoto, K., Yoshida, H., Uchida, M., Ishiguro, K., Umeki, H. and Webb, E.K.: Future prospects for site characterization and underground experiments related to transport based on the H12 performance assessment, *Confidence in Models of Radionuclide Transport for Site-specific Performance Assessment*, The forth GEOTRAP Workshop, OECD/NEA, Carlsbad, NM, 1999 (*in press*).
- 47) Umeki, H., Hatanaka, K., Alexander, W.R., McKinley, I.G. and Frick, U.: The Nagra/PNC Grimsel test site radionuclide migration experiment: Rigorous field testing of transport models, *Proc. of Materials Research Society*, Vol.353, pp.427-434, 1995.
- 48) 小島圭二: 北欧の花崗岩・日本の花崗岩-地下空洞に関する特徴-, 応用地質, 23巻2号, pp.45-49, 1982.
- 49) Davison, C.C., Kozak, E.T., Frost, L.H., Everitt, R.A., Brown, A., Gascoyne, M. and Scheier, N.W.: Characterizing and modeling the radionuclide transport properties of fracture zones in plutonic rocks of the Canadian shield, *Water-conducting Features in Radionuclide Migration*, The third GEOTRAP Workshop, OECD/NEA, Barcelona, Spain, pp. 97-114, 1998.

(2000.11.17 受付)

AN APPROACH FOR SOLVING RADIONUCLIDE MIGRATION IN FRACTURED MEDIA USING LAPLACE TRANSFORM GALERKIN METHOD

Yuji IJIRI, Atsushi SAWADA, Kazuhiko SAKAMOTO, William S. DERSHOWITZ, Masahiro UCHIDA, Katsuhiko ISHIGURO and Hiroyuki UMEKI

This paper describes an approach for solving radionuclide migration in fractured media. In this approach, a three-dimensional heterogeneous channel network system is constructed using a stochastic discrete fracture network (DFN) simulator. The Laplace transform Galerkin finite element method was adopted to solve radionuclide migration in a complex network system for a long period of time effectively. Preliminary radionuclide migration analysis was performed for fifty realization of a block-scale DFN model. The total radionuclide release from all packages in the repository was estimated from the statistics of the results of fifty realizations under the hypothesis of ergodicity. From the result, it was found that large water-conducting features have significant impacts on the radionuclide release from the repository, and thus are important for the performance assessment of geosphere.