



高レベル放射性廃棄物の
地層処分研究開発特集

地層処分研究

2. 性能評価研究

2-2 ニアフィールド研究

(4) 人工バリア周辺岩盤中の水理・物質 移行に関する研究

東海事業所 環境技術開発部

資料番号：85-8

Research on Geological Disposal

2. Performance Assessment

2-2 Near-Field Study

(4) Study on Groundwater Flow and Nuclide Migration
within the Near-Field Host Rock

(Waste Technology Development Division, Tokai Works)

人工バリア周辺岩盤中の水理条件は広域水理解析結果をもとに周辺岩盤の水理地質構造から設定される。また物質移行に影響を及ぼす岩盤の物質収着性能は人工バリア周辺岩盤の地質環境条件を模擬した室内試験により分配係数の形で求められる。ここでは人工バリア周辺岩盤内の水理モデルおよび条件設定の考え方、この水理場で核種移行計算を行う際に必要となる分配係数取得に関する試験研究および原位置データに基づいた水理・物質移行モデリングについて述べる。

1. はじめに

ニアフィールドにおいては緩衝材および緩衝材周辺の岩盤が透水性媒体とみなされる。このニアフィールドでの地下水の流れの状況および核種移行メカニズムについて知見を得ることは、ニアフィールドの核種移行解析を行う上で重要である。また、現状のモデルでは、分配係数(Kd)が核種の収着性能を表現するように核種移行モデルに組み込まれて解析が行われており、このモデルを室内試験および原位置試験で検証していくことはモデルの信頼性を得るための重要なプロセスである。

このような観点から、先般公開した高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書—平成3年度—¹⁾(以下、技術報告書)においては、人工バリア周辺岩盤および緩衝材中の水理解析を行い、緩衝材が周辺岩盤の水理特性によらず固有の性能を発揮するか否かを検討した。また、人工バリアから漏出した核種の人工バリア周辺岩盤における移行挙動を評価するためには、周辺岩盤中での収着および拡散についてパラメータを取得する必要がある。技術報告書においては室内実験により取得したパラメータを使用した。

技術報告書においては、岩盤中の不均質性を考慮していないが、実際の岩盤には亀裂間および亀裂内

部の不均質性等があり、これらを原位置データを基にモデル化していくことが今後重要となると考えられる。現在、動燃事業団で開発している三次元亀裂ネットワークモデルを釜石鉱山の花崗閃緑岩に適用した解析例と、スイスGrimselテストサイトの単一で小規模な破碎帯に対して行った破碎帯内部の不均質性を考慮した水理・物質移行解析の結果について述べる。

2. 岩体中の核種移行に関する試験研究

2.1 岩石への核種の収着実験

地層処分研究における天然バリア中での核種の収着挙動に関する研究は重要である。本研究では、性能評価上重要な元素の中で、データ数の増加が必要である、Ni, Zr, Nb, Tc, Sn, Raについて、わが国に比較的広く分布する4種類の代表的な岩石(花崗閃緑岩、凝灰岩、玄武岩、泥岩)への分配係数を測定した。

実験条件を表1に示す。実験は大気下・室温でバッチ法によって実施した。実験に用いた溶液は、岩石—蒸留水浸漬液および岩石—人工海水浸漬液の2種類である。

得られた分配係数を表2に示す。Niの分配係数(Kd)は $1.2 \times 10^{-3} \sim 1.4 \times 10^1 \text{ m}^2/\text{kg}$ で、固相によって

表1 岩石に対する核種の収着実験条件

核種	実験条件			
	$^{52}\text{Ni}, ^{99}\text{Tc}$	$^{90}\text{Zr}, ^{94}\text{Nb}$	^{113}Sn	^{226}Ra
固相	花崗閃緑岩、凝灰岩、玄武岩、正岩	花崗閃緑岩、玄武岩、泥岩	泥岩	
粒径	355 μm 以下			
液相	固相-蒸留水浸漬液、固相-人工海水浸漬液			
固液比	10g/100ml			
雰囲気	大気下			
温度	室温			
濾紙孔径	0.45 μm	分離分子量10000		
実験期間	30日	24日	10日	24日

大きく変化することがわかった。固相別では、分配係数は泥岩・玄武岩>花崗閃緑岩>凝灰岩となり、蒸留水・人工海水浸漬液の違いでは、人工海水の方が蒸留水よりKdが低くなった。

ZrのKdは、 $7.2 \times 10^{-1} \sim 4.0 \times 10^1 \text{ m}^2/\text{kg}$ が得られたが、最大の値を示した花崗閃緑岩-蒸留水浸漬液系の値を除けば、ZrのKdは固相、液相の変化による差は明瞭には確認できなかった。固相のKdは、花崗閃緑岩>泥岩・凝灰岩>玄武岩となった。

NbのKdは、 $3.3 \times 10^{-1} \sim 4.1 \times 10^1 \text{ m}^2/\text{kg}$ が得られた。泥岩、花崗閃緑岩-蒸留水浸漬液系の値を除けば、NbのKdは固相、液相の変化による差は明瞭には確認できなかった。固相別のKdは、花崗閃緑岩・泥岩・玄武岩>凝灰岩となった。

TcのKdは、 $1.4 \times 10^{-4} \sim 5.1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{kg}$ と、今回実験を行った核種のなかでは一番小さい値となった。固相別のKdは、花崗閃緑岩・泥岩>凝灰岩・玄武岩となった。Tcは、本実験条件下での溶液中では、 TcO_4^- で存在していることが予測されるた

表2 岩石に対する核種の分配係数

		Kd (m^2/kg)			
		花崗閃緑岩	玄武岩	凝灰岩	泥岩
Ni	蒸留水	1.1×10^0	9.8×10^0	8.1×10^{-2}	1.4×10^1
	人工海水	2.2×10^{-1}	1.2×10^0	1.2×10^{-3}	2.1×10^0
Zr	蒸留水	4.0×10^1	1.2×10^0	4.6×10^0 $\sim 6.8 \times 10^0$	2.5×10^0 $\sim 3.1 \times 10^0$
	人工海水	1.1×10^0	7.2×10^{-1}	1.4×10^0 $\sim 1.5 \times 10^0$	2.4×10^0 $\sim 2.7 \times 10^0$
Nb	蒸留水	4.1×10^1	8.1×10^0	1.7×10^0	2.9×10^1 $\sim 3.1 \times 10^1$
	人工海水	4.8×10^0	5.2×10^0	3.3×10^{-1} $\sim 3.4 \times 10^{-1}$	6.3×10^0 $\sim 6.8 \times 10^0$
Tc	蒸留水	5.1×10^{-2}	1.4×10^{-4}	4.2×10^{-3}	3.2×10^{-2}
	人工海水	3.4×10^{-2}	1.3×10^{-3}	3.8×10^{-3}	5.0×10^{-2}
Sn	蒸留水	$> 4.3 \times 10^{-1}$	$> 2.6 \times 10^{-1}$		$> 5.0 \times 10^{-1}$
	人工海水	$> 7.2 \times 10^{-1}$	$> 6.4 \times 10^{-1}$		$> 5.3 \times 10^{-1}$
Ra	蒸留水				4.9×10^{-1} $\sim 5.7 \times 10^{-1}$
	人工海水				2.8×10^{-2} $\sim 3.1 \times 10^{-2}$

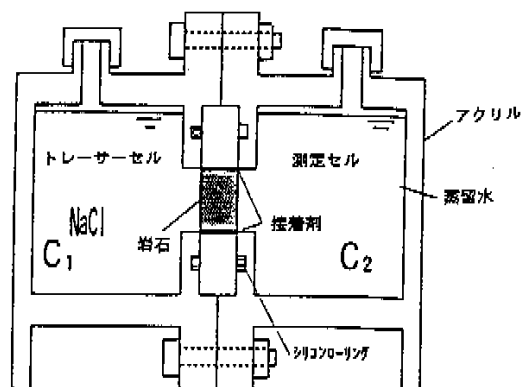


図1 拡散試験に用いた拡散セル

め非収着性と考えられるが、花崗閃緑岩、泥岩には比較的高いKdを示すことがわかった。また、TcのKdは蒸留水・人工海水による差は確認できなかった。

SnのKdは $2.6 \times 10^{-1} \sim 7.2 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{kg}$ で、固相、液相の変化による差は明瞭には確認できなかった。RaのKdは、泥岩に対してのみ行い、蒸留水系で $4.9 \times 10^{-1} \sim 5.7 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{kg}$ 、人工海水系で $2.8 \times 10^{-2} \sim 3.1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{kg}$ となり、人工海水の方が蒸留水より低くなった。

今後は、重要核種について岩石を用いた同様の試験を行い、収着データの蓄積を図る予定である。

2.2 岩石中の拡散に関する試験

(1) 拡散試験

拡散試験はThrough-Diffusion（透過拡散）法で行った。図1に拡散セルを示す。拡散セルは、トレーサセルおよび測定セルより構成され、両セルの真ん中に岩石試料が挟まれている。トレーサセル側にはNaCl（60000ppm- Cl^- , pH=5.5）を、測定セル側には蒸留水（pH=5.5）を注入し試験開始とした。各時間毎に測定セルよりサンプリングし、イオンクロマトグラフにより Cl^- イオンの濃度を測定した。測定セル側の Cl^- 濃度の定常時の経時変化より次式²⁾を用いて実効拡散係数Deおよび間隙因子をもとめた。

$$C_2 = \frac{A\ell C_1}{V} \left(\frac{De t}{\ell^2} - \frac{\alpha}{6} \right) \quad (1)$$

$$De = \frac{\delta}{\tau^2} D^* \quad (2)$$

$$FF = \frac{De}{D^*} \quad (3)$$

ここで、 C_2 ：測定セル側濃度（ppm）

表3 岩石中のCl⁻イオンの拡散試験条件

トレーサ溶液	NaCl (Cl ⁻ : 60000ppm)
岩石試料	花崗閃緑岩、泥岩、玄武岩
初期溶液	蒸留水
pH	5.5 (測定値)
温度	25 (°C)
試験数	n=3

A : 試料断面積 (m²)

ℓ : 試料の厚さ(m)

C₁ : トレーサセル側濃度 (ppm)V : セル容積 (m³)

t : 時間(s)

α : Rock capacity factor

δ : 収れん度 (=1)

τ : 屈曲度

D* : 自由水中の拡散係数
(2.03×10⁻⁹ m²/s)

FF : Formation Factor

表3に試験条件を示す。

(2) 空隙率測定試験

蒸留水による水中飽和法により測定した。岩石試料をデシケータ中に蒸留水とともに入れ、吸引ポンプにて約30Torrの減圧下で含水させた。定期的に岩石を取り出し、表面水を拭き取って重量を測定し、重量に変化がなくなるまでこの作業を繰り返した。飽和になった岩石を水中に沈め、水位の差より岩石の体積を測定した。その後、110℃の恒温槽中で重量が一定になるまで乾燥させた。岩石の空隙率ε%は次の式³⁾にでもとめた。

$$\varepsilon = \frac{M_1 - M_2}{\rho_w V} \times 100 \quad (4)$$

ここで、M₁ : 含水飽和時の岩石重量 (g)M₂ : 乾燥時の岩石重量 (g)V : 岩石体積 (cm³)ρ_w : 水の密度 (=1.0g/cm³)

表4に試験結果をまとめて示す。花崗岩>泥岩>

表4 岩石中のCl⁻イオンの拡散試験および空隙率測定結果

岩石	De (m ² /s)	FF	τ	ε (%) 平均
花崗閃緑岩	4.5×10 ⁻¹³	2.2×10 ⁻⁴	6.7	0.99
	7.1×10 ⁻¹³	3.5×10 ⁻⁴	5.3	//
	5.1×10 ⁻¹³	2.5×10 ⁻⁴	6.3	//
泥 岩	3.2×10 ⁻¹⁴	1.6×10 ⁻⁵	21.5	0.74
	9.6×10 ⁻¹⁵	4.7×10 ⁻⁶	12.5	//
玄 武 岩	1.2×10 ⁻¹⁴	6.1×10 ⁻⁶	64.8	2.56
	5.7×10 ⁻¹⁵	2.8×10 ⁻⁶	95.6	//
	7.1×10 ⁻¹⁵	3.5×10 ⁻⁶	85.5	//

玄武岩の順でDe、FFが小さくなり、玄武岩が最もイオンを通しにくいことがわかった。また、空隙率の測定結果とFFとの関係は必ずしも正比例関係ではなく、岩石の拡散経路の違いによるものと考えられる。

今後は、イオン種と実効拡散係数との関係について岩種毎に明らかにするとともに、拡散メカニズムとして空隙率および空隙幅とイオンの相互作用について検討し、拡散の過程でおこる遅延メカニズムを明らかにして行く予定である。

3. ニアフィールド水理解析

(1) 解析の考え方

緩衝材中の流速を評価し、緩衝材中の物質移行が移流支配か拡散支配かを調べるために、ガラス固化体およびオーバーバックを不透水性媒体として、また、緩衝材および周辺岩盤を透水性媒体として取り扱い、これらより構成される人工バリアおよびその周辺領域(ニアフィールド)での再冠水後の定常状態における水理解析を実施した。この解析にあたっては2次元水理解析コード「FEMWATER」(Yeh and Ward,1980)⁴⁾を使用した。透水性媒体中の地下水流速(断面平均流速)は、ダルシー則が成り立つ条件下では、媒体自身のもつ透水係数と媒体に作用する動水勾配の積により決定される。そこで本解析では、人工バリアおよびその周辺領域の地下水流動を規定するパラメータとして、透水係数と動水勾配の2つを選んだ。

なお、これらの解析の結果を基に、緩衝材中における物質移動のメカニズムについて検討を行った。

(2) 地下水流動の支配方程式

地下水および媒体が非圧縮性であることおよび媒体の透水性に関する等方性を仮定すると、地下水の湧き出しあるいは吸い込みがない場合、地下水流動の支配方程式は定常状態において次式で示されるラプラスの方程式に帰着する。

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

$$\Phi = K \cdot H \quad (6)$$

ここで、x : x方向(水平方向)の座標 [L]

z : z方向(鉛直方向)の座標 [L]

Φ : 速度ポテンシャル [L²T⁻¹]K : 等方性媒体の透水係数 [LT⁻¹]

H : 全水頭 [L]

本解析では、緩衝材および岩盤の2つの領域から構成される人工バリア近傍の地下水流動を、(5)式をもとに全水頭分布および流速分布を計算し、人工バ

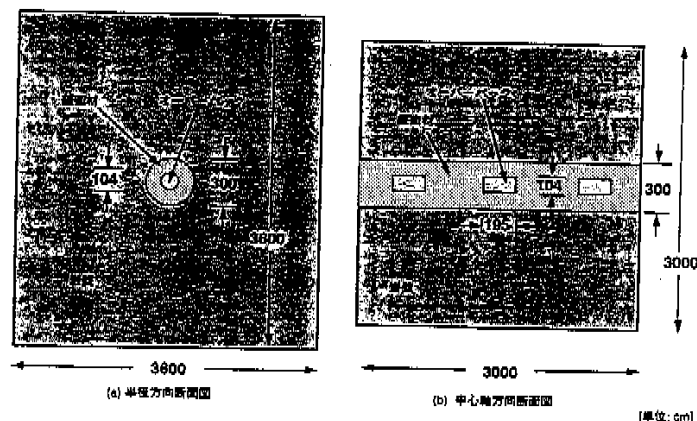


図2 横置きガラス固化体解析領域

リア近傍の地下水流動状態の概略的把握を行った。さらに、得られた流速分布から流れ関数分布を計算し、地下水流動の経路の変化および緩衝材中を流れる地下水流量の評価を行った。

(3) 解析

1) 解析対象

解析対象として、図2に示すようなガラス固化体を横置きとする場合（半径方向断面、中心軸方向断面の2ケース）を考えた。オーバーバックの半径および緩衝材の半径方向厚さは以下のとおりである。

オーバーバックの半径：52 [cm]

緩衝材の厚さ：98 [cm]

2) 境界条件

水理解析では通常、全水頭あるいは流量を解析領域の境界に設定して解析を行う。しかしながら、地表面下1,000m付近では全水頭あるいは流量がわかっている場合は少なく、むしろ動水勾配や地下水流速というような相対的な値が予測されているにすぎない。そこで本解析では、地下深部の水理特性の代表値として動水勾配を選び、この動水勾配を基に境界における全水頭値を導出することとした。動水勾配の設定に際しては、日本の代表的地形をモデル化して実施された広域地下水流動解析を参考にし、地表面下1,000m付近で生じる水平方向と鉛直方向の動水勾配として平均的な値 $(i_x, i_z) = (0.05, 0.01)$ を選んだ。また、ここでの検討の上限として、広域地下水流動解析での極限的に求められた動水勾配として $(i_x, i_z) = (0.6, 0.01)$ の場合も実施した。これらの x および z 方向の動水勾配の組み合わせをもとにして、図2に示している解析対象における左右および上下の境界で、これらの動水勾配が生じる固定水頭をそれぞれ算出し、これらを境界条件とした。

(4) 解析ケースおよび水理パラメータ

解析ケースおよび水理パラメータを表5に示す。

緩衝材の透水係数には乾燥密度 1.8g/cm^3 のときの代表値 $1.0 \times 10^{-11}\text{cm/s}$ を採用した⁵⁾。また、岩盤の透水係数に関しては、種々の地質環境を想定し、 $10^{-4} \sim 10^{-8}\text{cm/s}$ の範囲^{6,7)}にあることから、 10^{-4} 、 10^{-6} 、 10^{-8}cm/s の3つを設定した。

(5) 解析結果

表5に示した各ケースの解析結果について比較すると、同一の動水勾配の組み合わせを用いた解析においては、岩盤の透水係数が大きくなるにしたがって地下水の流速は速くなるが、全水頭分布および流動の形状にはほとんど変化がなかった。この理由として、岩盤に比べて緩衝材の透水係数は非常に小さく、緩衝材の存在が岩盤中の地下水流動に及ぼす影響については無視することができるためと考えられる。

(6) 緩衝材中の物質移動メカニズムに関する検討

上記解析で得られたニアフィールド内の地下水流動の場合において、緩衝材中の物質移動が、移流支配もしくは拡散支配によるものかの判断の検討を行った。この結果は、人工バリア中の核種移行に対するモデル化に対して基礎情報を与えるものである。こ

表5 解析ケースおよび水理パラメータ

ケース	動水勾配 [-] (i_x, i_z)	空隙率 [-]		透水係数 [cm/s]	
		緩衝材	岩盤	緩衝材	岩盤
case 1	(0.05, 0.01)	0.3	0.01	10^{-11}	10^{-4}
case 2				10^{-11}	10^{-6}
case 3				10^{-11}	10^{-8}
case 4	(0.6, 0.01)	0.3	0.01	10^{-11}	10^{-4}
case 5				10^{-11}	10^{-6}
case 6				10^{-11}	10^{-8}

表6 ベクレ数の計算に用いた緩衝材中および岩盤中の実効拡散係数

	実効拡散係数 [cm ² /s]
緩 衝 材	10 ⁻⁶
岩 盤	10 ⁻⁷

こでの検討においては、判断を行うための指標として次式で示されるペクレ数(Pe)を用いた。

$$Pe = \frac{v \cdot L}{De} \quad (7)$$

ここで、 v : 地下水流速 [L³T⁻¹]

L : 代表長さ [L]

De : 実効拡散係数 [L²T⁻¹]

このペクレ数(Pe)は、(7)に示されるように、移流効果と拡散効果の比で示される無次元数である。移流効果が卓越するとペクレ数は大きくなり、また、拡散効果が卓越するとペクレ数は小さくなる。こでの代表長さ L については、オーバーバックの直径として104cmを用いた。また、緩衝材中および岩盤の実効拡散係数については実測データを基に表6に示す値を用いた。

図3は半径方向断面モデルを使用した場合の緩衝

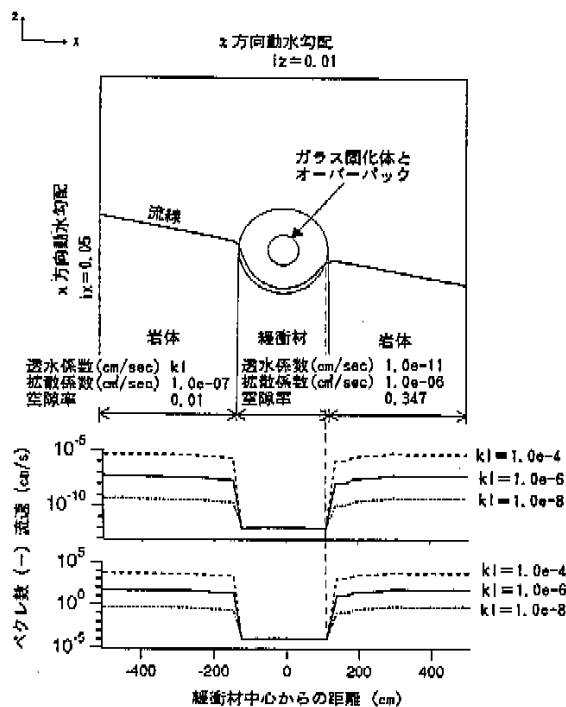


図3 ペクレ数の場所的変化(固化体半径方向断面モデル) - (i_x, i_z) = (0.05, 0.01)

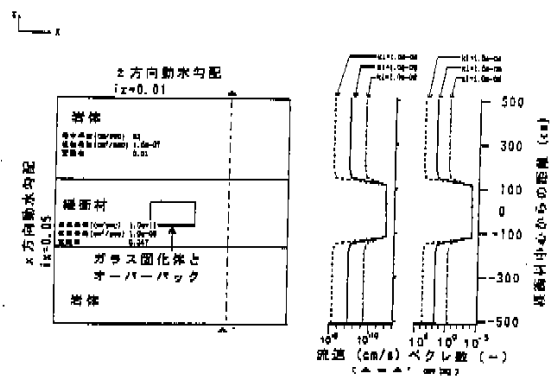


図4 ペクレ数の場所的変化(固化体中心軸方向断面モデル) - (i_x, i_z) = (0.05, 0.01)

材中を通過する流れに沿って流速およびペクレ数を算出したものの一例を、図4は中心軸方向断面モデルを使用した場合の図中に示しているA-A'断面に沿って流速およびペクレ数を算出したものの一例を示す。また、それぞれの図中の k_1 は岩盤の透水係数を示している。これらの図より、緩衝材中のペクレ数は $10^{-3} \sim 10^{-4}$ と1よりも十分小さく、また、岩盤中のペクレ数に比べても非常に小さいことがわかる。このことから、緩衝材中に存在する核種は拡散支配によって周辺岩盤へ向かって移行するものと考えられる。

今後、緩衝材中への地下水の再冠水、緩衝材の地下水への流出、岩盤の不均質性、地下水の密度変化等、ニアフィールドの流れの場に影響を与える因子を抽出、整理し、モデル化および解析に反映させる予定である。

4. 周辺岩盤中の水理・物質移行モデルの開発

亀裂状媒体においては、人工バリアから漏出した核種は、処分ピット周辺の亀裂中を選択的に移行する。ニアフィールド周辺岩盤は、ファーフIELDに比べ核種の濃度が相対的に高く、またこでの遅延効果が期待されるため、個々の亀裂をモデル化可能な亀裂ネットワークモデルを用い、詳細なモデル化を行い評価する必要がある。

また、単一の亀裂および破碎帯中の流れは、チャンネルと呼ばれる選択的移行経路で起こることが知られている。チャンネルは、核種移行のプロセスである移流、分散、マトリクス拡散、吸着のいずれとも密接に関係するため、原位置試験データを用いてモデル化手法を検討する必要がある。

このような観点に立ち、動燃事業団においては、OECD/NEA国際ストリバ・プロジェクトにおいて

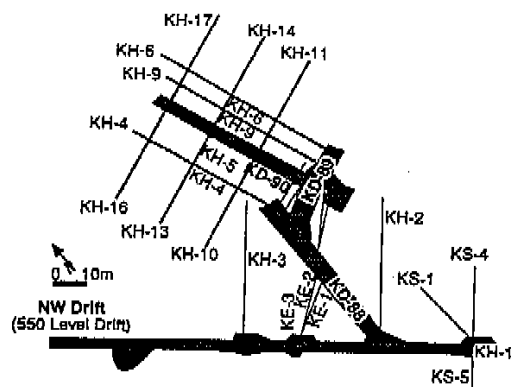


図5 KD-90坑道周辺のボーリング

実用化された亀裂ネットワークモデル「FracMan/MAFIC」の開発を行うとともに、スイス放射性廃棄物処分会国組合(Nagra)が行っているGrimselテストサイトでの水理・物質移行試験に参加し、モデル化を行っている。

4.1 亀裂ネットワークモデルFracManによる湧水量予測解析

亀裂ネットワークモデルFracManの特徴は、原位置データからモデル入力データを作成するデータ解析コード群が自動化しており、解析者は収束状況を判断すれば良いことである。これは、同時に解析の再現性を保証することになる。

ストリバ・プロジェクトにおいては、SCV(Site Characterization and Validation)坑道周辺の一辺が200mの立方体領域の岩盤がモデル化された。ストリバ・プロジェクトと同じモデル化手法で釜石における原位置試験で得られた亀裂や間隙水圧等のデータを用いてKD-90坑道への湧水量の予測解析を行った⁸⁾。

モデル化の目的は、①FracManがわが国の亀裂状媒体に適用可能であることの確認、および②FracManの改良点の抽出、である。

モデル化のステップとしては、

- ① 外側境界条件の設定
- ② 亀裂モデルの選定
- ③ 亀裂半径の解析
- ④ 亀裂の方向の解析
- ⑤ 透水性亀裂の頻度と亀裂の透水量係数の設定
- ⑥ シミュレーション

の6つの段階を踏んで実施した。以下に、各ステップでの検討内容と結果について述べる。

- ① 外側境界条件の設定

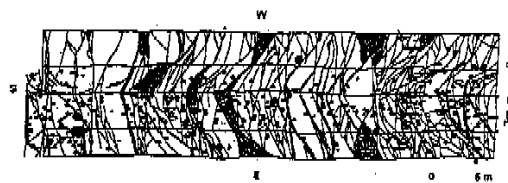


図6 KD-90坑道の亀裂トレース図

KD-90坑道周辺には、図5に示すように24孔のボーリング孔が掘削されており、そのうちKH-1～18においては間隙水圧のモニタリングが行われている。KD-88坑道掘削以前のデータから検討した結果、同一レベルのNW坑道から垂直下方に掘削した500mボーリング、KH-1、が最も自然な状態の圧力の指標となると考えた。KH-1のデータが静水圧分布をとり、KD-90坑道レベルでの間隙水圧は、水頭で約30mであることから、モデル外側境界での圧力を、次式で与えることとした。

$$H=30-z$$

ここに、H：全水頭 (m)

z：NW坑道 (標高550m) を基準とした高さ

② 亀裂モデルの選定

KD-90坑道における亀裂のトレース図 (図6)を、FracManの亀裂構造解析モジュール、HeterFracで解析した。亀裂中心分布モデルとして、Baecherモデル、BARTモデル、フラクタル・モデル、Nearest Neighborモデルを χ^2 検定した。その結果、フラクタル・モデルが、 χ^2 値は最も良好であったが、場所毎にフラクタル次元が異なること、またKD-90坑道周辺では、亀裂同志が著しく分岐、合流しており、この状況を最も忠実に表現可能であるモデルとしてBARTモデルを採用した。

③ 亀裂半径の解析

亀裂半径の解析は、通常亀裂のトレース長を解析して行うが、KD-90坑道の場合多くの亀裂は坑道全断面より大きいため、以下の手法で検討を行った。

・KD-90坑道の1枚から3枚の壁面を亀裂が切る確率を、亀裂半径の平均値と標準偏差をパラメータにして、それぞれシミュレートする。なお、この場合、現場で観察された、亀裂の交差部でのterminationの確率50%をBARTモデル表現した。

・KD-90坑道の実際の亀裂が、実際に1、2、

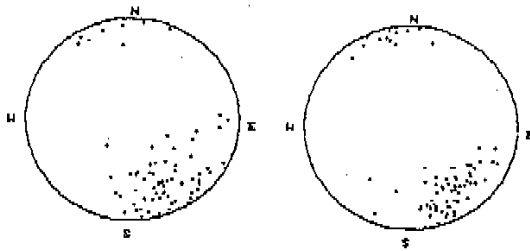


図7 亀裂方向の実測値(左)とBootstrap法で発生させた亀裂の方向(右)(シュミットネット、下半球投影)

3枚の壁をそれぞれ切る確率と比較し、亀裂半径を推定する。

その結果、亀裂半径は平均値が7m、標準偏差が1.25mと推定された。

④ 亀裂の方向の解析

亀裂の方向については、KH-4～9の各ボーリング孔におけるポアホールTV観察により湧水亀裂が同定されているので、そのデータを使用した。

亀裂の方向分布の密度関数の設定に際しては、亀裂セットの区分を行うことなく、モデル化を行う際に、実測された亀裂の方向データから直接サンプリングし、未測定のものによる分散を考慮して亀裂の方向を決定するBootstrap法を使用した。

亀裂方向の実測値とBootstrap法で発生させた亀裂方向とを、図7に示す。

⑤ 透水性亀裂の頻度と亀裂の透水量係数の設定

透水性亀裂の頻度と亀裂の透水量係数は、FracManのOXFILETモジュールを用いて解析される。解析には、KH-2、KH-3、KH-5、KE-1で実施された38個の透水試験データを使用した。

解析の結果、1m区間に含まれる透水性亀裂の頻度は、1.01、透水量係数は対数正規分布で、平均値 $4.05 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 、標準偏差 $2.82 \times 10^{-6} \text{ m}$ を得た。

⑥ シミュレーション

解析に当たっては、今回新たに開発したconditioning(条件付き亀裂発生)機能を用いた。

conditioning機能は、ボーリング孔または坑道で観測された亀裂の位置、方向、トレース長(坑道の場合)を再現するように亀裂を発生す

る機能であり、従来の統計的性質のみを再現する亀裂発生方法に比べ、モデルの現実性を増すことができるとともに、個々のポイントでの実測値との比較が可能となり、モデルがどの程度不均質性を予測しているかが判断可能となる点で優れている。

本機能を用い、以下の2つの項目の予測解析を行った。

- ・KD-90坑道周辺のボーリング孔での亀裂データを用いてKD-90坑道の亀裂パターンがどれだけ予測できるか。

- ・KD-90坑道への湧水量は、坑道を5区間に分け別個に測定されているが、この区間毎の湧水量がどれだけ予測できるか。

モデル化に際しては、一辺200mの立方体領域のすべての透水性亀裂をモデル化することは、現状のFracManでは不可能である。実際には、高い精度で予測が必要な領域は詳細な精度でモデル化し、そうでないところは概略的なモデル化を行うことが現実的である。具体的には、KD-90坑道周辺の直径24mの領域は細かな亀裂までモデル化し、その周辺の通常岩盤については、規模の大きな亀裂のみをモデル化した。直径24mの領域については、KH-4、5、6、7の4本のボーリング孔で観測された透水性亀裂に対してconditioningを行った。また、周辺岩盤中の亀裂の発生に際しては、KD-90坑道を横切る大きな亀裂の発生を防止するため、conditioning機能を用いてKD-90坑道を切らないように亀裂を発生させた。

このようにして作成した、KD-90坑道周辺の一辺が200mの立方体領域の亀裂モデルを図8に示す。

個々の亀裂モデルは、各パラメータの密度関数からのサンプリングを合成した結果得られたもの(realization)であり、其の湧水量は、数10個以上のrealizationから得られた値を統計処理して評価する必要がある。

したがって、今回は25個のrealizationについてシミュレーションを行った。

⑦ 結果と今後の課題

KD-90坑道における湧水亀裂のパターンについては、図9に示すように、坑道北側の約10mの区間がよく一致していることが分かる。

また、湧水量については、図10に示すように、総湧水量が実測値1.4ℓ/分であるのに対して解析値は1.1ℓ/分とよく一致したほか、区間毎の湧水量についても実測値と解析値は傾

	モデル化した 亀裂の半径
KD-90坑道周辺	5 ~ 25 m
周辺岩盤	30 ~ 50 m

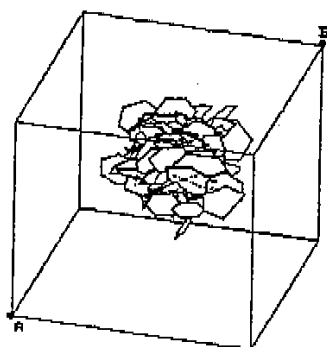


図8a 亀裂モデル
(KD-90坑道周辺の亀裂の鳥瞰図)

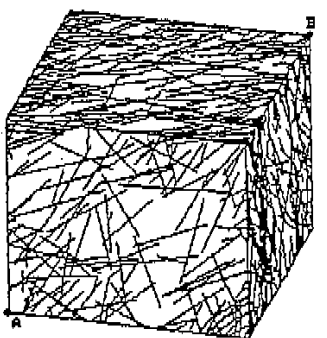


図8b 亀裂モデル
(外側境界に現れた亀裂のトレース図)

向がよく合っていることがわかる。

このように、今回conditioning機能を有する亀裂ネットワークモデルをわが国の亀裂状岩盤に適用した結果、適用性について確認することができた。

一方、データについては解析の信頼性と精度をさらに向上させるために、

- ・ファースフィールドの間隙水圧データが少なく、外側境界条件の精度を向上させる必要がある。
- ・坑道周辺のゆるみ領域での透水係数の変化を今後測定する必要がある。
- ・透水性亀裂の支配要因を理解し、透水性亀裂とそうでない亀裂を識別可能とするデータを収集する必要がある。

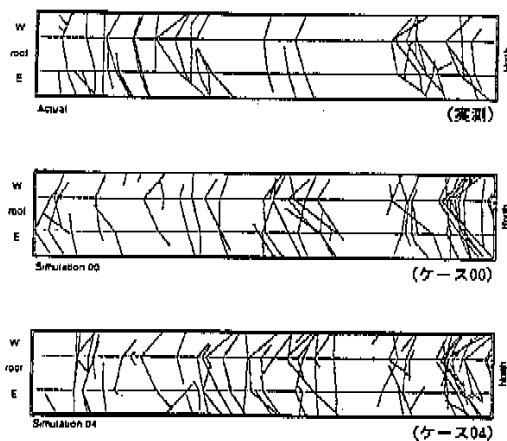


図9 KD-90坑道の透水性亀裂(実測)とシミュレーションの比較

また、FracManについては、

- ・conditioning機能をさらに充実させ、パッカー区間の透水量係数を再現するよう、個々の亀裂への透水量係数の設定を行う予定である。
- ・亀裂の方向と亀裂半径等各パラメータは、独立に密度関数よりサンプリングされているが、実際にはある方向の亀裂は亀裂半径が小さい等、パラメータ間のリンクが存在するため、その相関性を考慮するため、実際の亀裂データファイルから複数のパラメータを同時にサンプリングするmulti-bootstrap法を開発する。

といった改良点が抽出された。

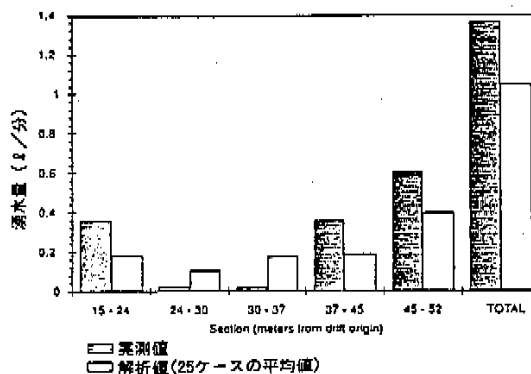


図10 KD-90坑道への湧水量の実測値とシミュレーションの比較

4.2 スイスGrimselテストサイトでのトレーサ試験の解析

結晶質岩盤に見られる亀裂には、通常充填物が含まれており、このような場での物質移動を扱う場合には、亀裂中の支配的な流れによる物質移行と充填物へのマトリクス拡散から構成されるモデルが考えられる。本研究では、このような考え方にに基づき、亀裂中の支配的な流れの空間的不均質性に留意して物質移行のモデルを開発した。また、モデルの適用性をスイスGrimselテストサイトにおける亀裂での水理・核種移行試験から得られたデータにより検討した⁹⁾。

開発したモデルは、ポテンシャル理論に基づいて流速分布を計算する、[1] 水理モデル、とその流速分布から移流分散、マトリクス拡散を考慮して亀裂空隙内および充填物中の濃度分布を計算する、[2] 物質移動モデル、から構成されている。

[1]、[2] の計算手順は次のとおりである。

[1] 水理モデル：解析領域が空間的に不均質の場合、試験データ等から得られる帯水層幅の空間分布にしたがって複数領域に分割する。個々の領域内では帯水層幅は一定と考える。この透水量係数が分割領域毎に異なる全解析領域を解析し、流線と流速分布を求める。これらの流線、流速分布に対してその位置座標が各分割領域と一致する部分を各領域毎の流線、流速とする。流速は各領域内で一定と考える。隣接する領域境界では領域毎の流線が接続する

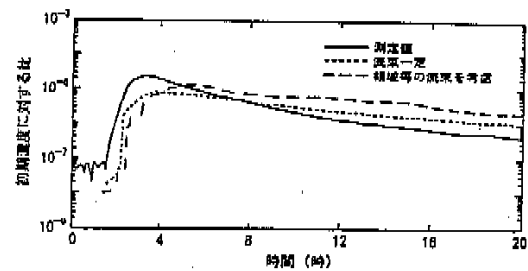


図12 濃度分布計算結果

ものとして全領域にわたる流線を形成する。流線間の流量は、領域によらず一定としている。以上により不均一場での流線とそれに沿った流速分布が求められる。

[2] 物質移動モデル：[1]で求めた流線を一本の流管とし、流速分布により流管径が変化するとして領域毎の流速を基に移流分散とマトリクス拡散を考慮した解析的モデルにより濃度分布を計算する。この計算を流線に沿って領域毎に順次行うことにより、全領域での濃度分布が求められる。このモデルによる核種移行解析の流れを図11に示す。

Grimselでのクロスホールによる核種移行試験データを用いて図11に沿った解析を行いモデルの適用性を検討した。揚水孔におけるトレーサの破過曲線の推定結果の一例（流線に沿った流速分布を一つの領域の値で代表させた場合と領域毎の流速を考慮した場合）を測定結果とともに図12に示す。この例では、流速分布による差異が小さく流速が一点で代表できる試験条件であると考えられる。また、両者とも測定値に対して立ち上がり部分での時間遅れはあるが再現性は良い。時間遅れの原因としては、亀裂中の支配的な流れの分布よりも流線分布の広がりが大きく実際より流路が長く評価されていることが考えられる。

<解析条件>

亀裂帯透水量係数： $1.5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$

注入孔—揚水孔距離：4.91m

ウラン溶液注入流量：9.51ml/m

揚水量：150ml/m

流管直径： $1.49 \times 10^{-4} \text{ m}$ （流速一定）

分子拡散係数： $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

流線本数：10本

流線長さ：4.40～4.45m

平均流速： $1.3 \times 10^{-4} \sim 9.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

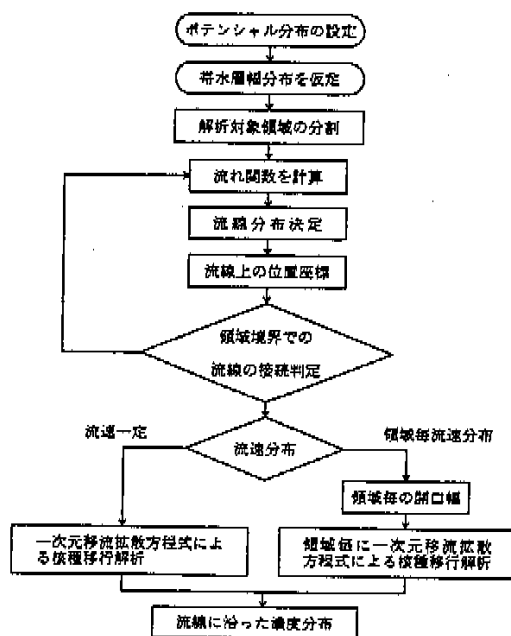


図11 解析の流れ

本解析では、透水係数の異なる領域毎にポテンシャル理論を適用し、各領域の物質収支を考慮して連結し、マトリクス拡散を有する移流分散モデルにより解を求めた。解析から得られた破過曲線は、観測値と比較して、ピーク部およびテール部が十分に一致しなかった。これらの原因として、ポテンシャル理論をベースとした本解析方法の限界、不均質場の決定手法および移流分散モデルの限界等が考えられる。今後、これらの原因について詳細に検討し、単一亀裂を有する岩盤内の物質移行解析に反映させる。

(東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室
 澁谷朝紀、佐藤治夫、内田雅大、
 細中耕一郎、仲島邦彦)

参考文献

- 1) 動燃事業所、高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書、PNC TN 1410 92-081, (1992)。
- 2) K. Skagius and I. Neretnieks, Diffusion in Crystalline Rocks of Some Sorbing and Nonsorbing Species, in Scientific Basis for Nuclear Waste Management V, edited by W. Lutze (Mater. Res. Soc. Symp. 11, Boston, pp.509-518, (1982)。
- 3) 佐藤治夫、油井三和、日本原子力学会、1992秋の大会、F15。
- 4) Yeh, G.T., Ward, D.S., FEMWATER: A FINITE ELEMENT MODEL OF WATER FLOW THROUGH SATURATED-UNSATURATED MEDIA, ORNL-5567, (1980)。
- 5) 鈴木、他、「破断材の特性試験 (I)」、動燃事業所技術資料、PNC TN 8410 92-057, (1992)。
- 6) 堀田和寛、他、「花崗岩盤における巨視的透水係数の評価」、第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp26-30, (1992)。
- 7) 青山、他、「深部岩盤の透水性評価手法とその適用性」、地下空間利用シンポジウム1989, pp149-154, 土木学会, (1989)。
- 8) Uchida, M., T. Doe, W. Derahowitz and P. Wallmann (In press), "Simulation of Fracture Flow of the Kamataki Validation Drift", 1993 International High-Level Radioactive Waste Management Conference, (1993)。
- 9) 古屋俊輔、堀田和寛、細中耕一郎、梅本博之、亀裂状媒体における物質移動モデルの開発、日本原子力学会1992年秋の大会予稿集、P327, (1992)。