

結晶質岩中の単一割れ目を対象としたトレーサー試験および解析

EXPERIMENT AND NUMERICAL ANALYSIS OF TRACER MIGRATION THROUGH A SINGLE FRACTURE IN CRYSTALLINE ROCK

田中靖治*・長谷川琢磨**・五十嵐敏文*・宮川公雄***

Yasuharu TANAKA, Takuma HASEGAWA, Toshifumi IGARASHI and Kimio MIYAKAWA

A tracer experiment was performed in the Äspö Hard Rock Laboratory in Sweden to increase the understanding of the processes which govern the retention of radionuclides transported in crystalline rock. The average transmissivity of the target fracture, Feature A, is about $4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$. The distance between the tracer injection hole and the withdrawal one is 4.7 m. Eight tracers with different adsorption characteristics were injected into the fracture. The concentration of HTO and Cs in the withdrawal hole reached the maximum after 6 and 400 hours, respectively. A simulation was performed to evaluate the adsorption behavior of the tracers. By considering the adsorption on the fracture surface and in the rock matrix, the simulated breakthrough curves agreed well with the experimental ones.

1. はじめに

スウェーデン核燃料廃棄物管理会社 (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company、以下 SKB と呼ぶ) では、スウェーデン南東部のバルチック海に面した主に花崗岩から成る Äspö 島に地下実験施設 (Äspö Hard Rock Laboratory) を建設した。そして、高レベル放射性廃棄物深地層処分のための様々な研究活動、技術開発を国際プロジェクトとして実施しており、電力中央研究所も 1991 年よりその Äspö 国際プロジェクトに参加している。Äspö プロジェクトの中で、結晶質岩中での核種の移行および遅延プロセスを解明するために、Tracer Retention Understanding Experiments (TRUE) が実施されている。TRUE は、詳細スケール (5 m 程度) での単一割れ目内での溶質移行を対象とした試験と、ブロック・スケール (10~100 m) での複数の割れ目を通じた溶質移行を対象とした試験とに大別される。詳細スケールの TRUE では既に様々なレイアウトでの試験が実施され、ブロック・スケールの TRUE では現在試験サイトでの特性調査が進められている。

ここでは、詳細スケールでの TRUE について紹介するとともに、当所の開発した岩盤中地下水流動・核種移行解析コードを TRUE に適用した結果について報告する。

2. トレーサー試験¹⁾

試験サイトは、トンネルの入り口からほぼ 2,950m の距離に位置する。試験はトンネル壁面から 12~16m 奥にある割れ目 Feature A を対象として行われた。Feature A を貫通する 5 本のボーリング孔が掘削され (図

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 バックエンドプロジェクト

** 正会員 (財)電力中央研究所 バックエンドプロジェクト

*** 正会員 (財)電力中央研究所 地質部

1)、詳細な地質調査が行われた²⁾。その結果、Feature A は、NW 走向で急傾斜の単一の断層面 (N29W/79E) であり、再活動したマイロナイト構造であると評価された。

各ボーリング孔は4～5個のパッカーにより、内部を区間分けされた。Feature A を含むボーリング区間の容積は1.548～2.285 lであり、ボーリング孔の直径は56 mmである。すべての区間の水圧が自動計測されている。今回紹介するトレーサー試験 STT-1 の前に測定された結果によれば、KA3005A 孔へ向かう動水勾配がみられたが、この勾配の方向はトンネルの方向に一致している。しかし、計算上 Feature A が現れるべきトンネル壁面の位置には水みち構造は一切見られず、Feature A はトンネル壁面においては確認されていない。また、トンネルから掘削されたすべてのボーリング孔に共通してみられる現象であるが、地質構造内の水理水頭には季節的な変動がみられる。

STT-1 試験は Radially Converging Tracer test であり、KXTT3 孔から 0.401 l/min の揚水を行い、トレーサーは KXTT4 にのみ投入された。トレーサー投入孔と揚水孔は 4.68 m 離れている。

トレーサー投入システムの概観を図-2 に示す。操作手順としては、まず、three way valve を閉じた状態でトレーサーの原液を tracer injection tank (E2) に入れ、water storage tank (E1) に蓄えておいた Feature A から採取した地下水を tracer injection tank に注入することにより、トレーサー溶液を作る。tracer injection tank 内の水圧が投入区間の水圧と一致するまで、HPLC pump (C) により water storage tank を注水し加圧する。そして、three way valve を開いてトレーサー溶液をボーリング孔の投入区間に送る。投入区間内のトレーサー濃度を均質に保つために、投入区間を含むシステム内でトレーサー溶液を強制的に循環させる。溶液の循環は circulation pump (A) により制御され、循環速度は flow meter (B) により測定される。STT-1 試験においては、試験開始4時間後に循環システム内の水を Feature A から採取した地下水に置き換える作業が行われた。tracer exchange tubing は長さが 1,200m で、Feature A から採取した地下水で満たされており、作業は水の循環経路を tracer injection tank から tracer exchange tubing に迂回させることにより行われた。また、循環システム内のトレーサー濃度の測定は、原位置において HPGe-detector により循環水の濃度を

直接測定する方法と、採取した水を実験室で分析する方法の二通りの方法で行われた。採水は循環システムから少量の水を連続的に fractional collector に採取する形で行われた。なお、トレーサー原液は最初に tracer injection tank に注入されるだけで、試験途中での補充はない。したがって、投入区

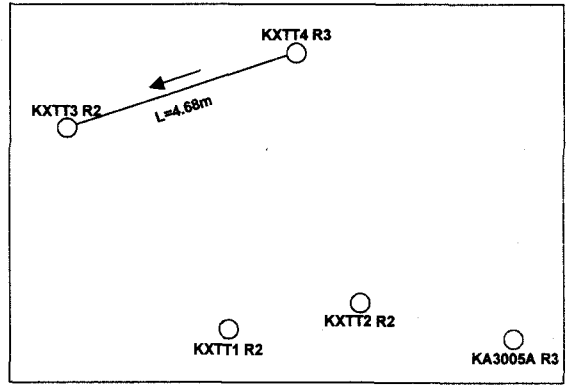


図-1 Feature A 面内でのボーリング孔の配置

を直接測定する方法と、採取した水を実験室で分析する方法の二通りの方法で行われた。採水は循環システムから少量の水を連続的に fractional collector に採取する形で行われた。なお、トレーサー原液は最初に tracer injection tank に注入されるだけで、試験途中での補充はない。したがって、投入区

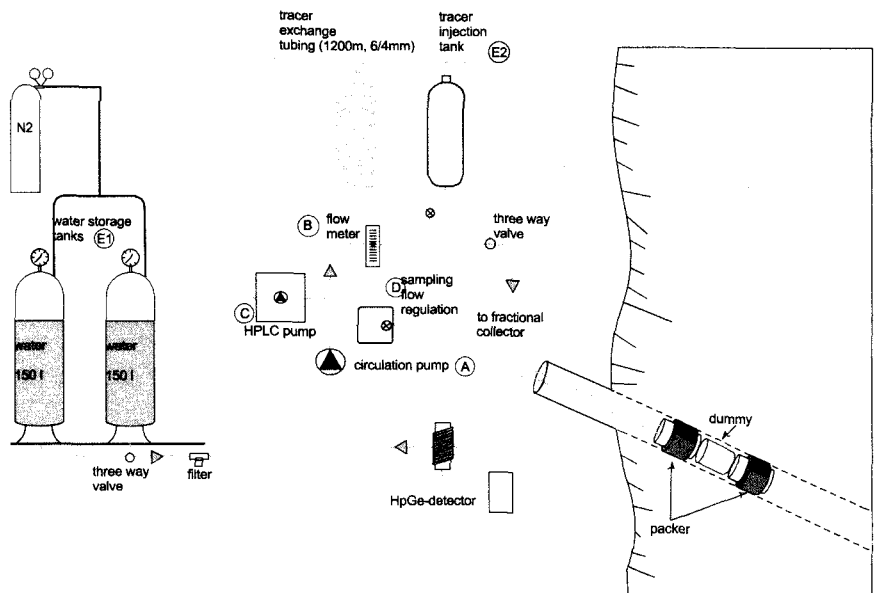


図-2 トレーサー投入装置の概観

間を横切る Feature A 内の地下水流による希釈効果のため、投入区間内のトレーサー濃度は時間の経過とともに減衰していく。

STT-1 試験では 8 種類のトレーサーの混合物が投入された。吸着性トレーサーとして、 ^{22}Na 、 ^{47}Ca 、 ^{86}Rb 、 ^{85}Sr 、 ^{133}Ba 、 ^{137}Cs が使用された。これらのトレーサーは、Feature A 内の化学条件を変化させないように、低濃度で投入することが要求された。一方、非吸着性トレーサーとしては、Uranine と HTO が使用された。投入孔における破過曲線を図-3 に示す。ただし、トレーサー濃度は最大濃度で正規化されている。

採水システムを図-4 に示す。採水システムにおいては投入システムと同様に circulation pump によりシステム内の水を循環させるだけでなく、flow regulation unit によりボーリング孔から一定流量の水を汲み出す。sampling は、投入システムと同様に連続的な sampling と、時間に関して離散的な sampling の 2 通りの方法で行われた。残りの水を degassing tank で脱気した後、fluorometer にて染料トレーサーの濃度を測定し、さらに酸化還元電位、電気伝導度の測定を行う。STT-1 試験では、sampling はいずれの sampling 方法のものも最初の 2 時間は 10 分間隔で行われた。その後徐々にサンプリング間隔を広げ、2 ヶ月後には 1 日 1 回とした。

試験の手順は、以下の通りである。① KXTT3 孔からの揚水を開始、②33 日後に KXTT4 孔からのトレーサーの投入を開始、③トレーサー投入開始から 4 時間後に循環システム内の水を Feature A から採取した地下水に置換する作業を開始、④72 分後に置換作業の終了、⑤トレーサー投入開始から 79 日後に sampling の終了。

試験の結果、揚水孔 KXTT3 において、図-7 に示すトレーサー濃度の破過曲線が得られた。ただし、この破過曲線は放射壊変に対する補正が施してある。すなわち、放射性トレーサーであっても、放射壊変を生じないものとしてのフラックスが示されている。揚水孔での濃度がピークに達するのに要する時間は、非吸着性トレーサー HTO で 6 時間、最も吸着性の強い Cs で 400 時間程度であった。

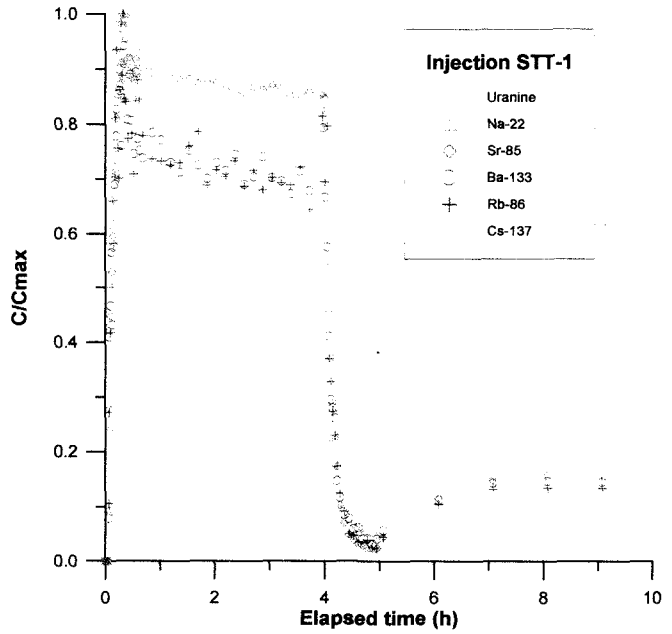


図-3 投入孔におけるトレーサー破過曲線

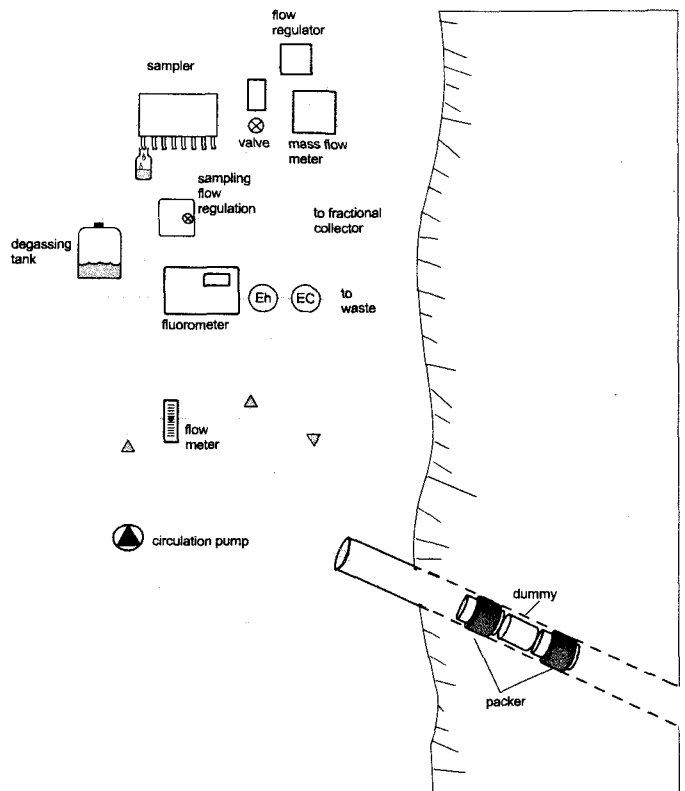


図-4 採水装置の概観

3. 解析方法

計算には有限要素法による地下水流動解析コード FEGM³⁾および核種地中移行解析コード FERM⁴⁾を使用した。

解析においては、Feature A を一辺の長さが 30m の正方形の平行平板で表現するとともに、厚さ 10cm の母岩を考慮した。解析に使用した有限要素 mesh を図-5 に示す。図では厚さ方向の要素分割を見やすくするために、Feature A に平行な方向と直交する方向とで倍率を変えて表示している。母岩部は、厚さ方向には 0.5、1.5、7、31、60mm の長さで 5 分割した。なお、比較のために、Feature A のみを考慮したモデルによる解析も行った。

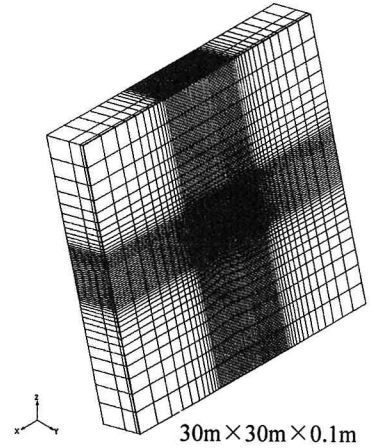


図-5 解析モデル

境界条件は、水理学的には、Feature A を含む直方体の岩盤ブロックにおいて、Feature A と直交する面では水位固定、平行な面では不透水とした。溶質移行については、すべての周囲境界を横切るフラックスはゼロとした。

Feature A および周辺母岩内での溶質移行に関する支配方程式を以下に示す。ただし、STT-1 試験では放射性核種濃度は放射崩壊が生じない場合の濃度として補正されているため、今回の解析では放射崩壊は考慮しない。

$$b \left(1 + \frac{2K_a}{b} \right) \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial V_i C}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - M - \Gamma_m = 0 \quad (\text{Feature A}) \cdots (1)$$

$$n \left(1 + \frac{1}{n} \rho_d K_d \right) \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial V_i C}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(n D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - m + \Gamma_m = 0 \quad (\text{周辺母岩}) \cdots (2)$$

ここで、 b は Feature A の開口幅、 K_a は Feature A の表面吸着係数、 C は溶質の濃度、 V_i はダルシー流速の x_i 方向成分、 M および m は溶質の湧き出しあるいは吸い込み、 Γ_m は岩盤から Feature A への溶質フラックス、 n は岩盤の間隙率、 ρ_d は岩盤の乾燥密度、 K_d は岩盤の吸着係数である。また、 D_{ij} は分散係数テンソルの ij 成分であり、次式で表される。

$$n D_{ij} = \alpha_T |V| \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_i V_j}{|V|} + D_e \delta_{ij} \cdots (3)$$

ここで、 α_L は縦分散長、 α_T は横分散長、 V はダルシー流速ベクトル、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ、 D_e は岩盤内拡散係数である。

4. 解析結果

まず、Feature A 内の透水量係数分布の推定を行った。その際、各ボーリング孔位置での Feature A の透水量係数を未知パラメーターとして、以下の手順により Feature A 内の透水量係数分布を推定することとした。①各ボーリング孔位置での Feature A の透水量係数に適当な値を設定する、②①で設定した値の平均値と標準偏差を求める、③kriging により Feature A 内の透水量係数分布を推定する、④過去 11 回のトレーサー試験時の揚水・注水孔における水位変化を計算する。水位変化の計算値が実測値に十分近ければ作業を終了し、実測値とあまり一致していなければ各ボーリング孔位置での透水量係数を変更して上記の手順を繰り返す。ただし、透水量係数は対数正規分布にしたがうものとし、バリオグラムには指数関数型モデルを用い、相関距離は 1m とした。上記の手順の実施により得られた Feature A 内の透水量係数分布を図-6 に示す。

次に、水理学的境界条件を設定するために、5本のボーリング孔での水位の観測値を基に自然状態での全水頭分布の推定を行った。未知パラメーターは、基準点での全水頭、平均動水勾配、平均動水勾配の方向である。推定結果として、平均動水勾配の向きはほぼ KXTT3 孔から KXTT1 孔へ向かう方向、平均動水勾配の値は 0.124 が

得られた。この結果を基に、Feature A と直交する周辺境界面上に線形に固定水位を与えた。

トレーサー投入孔における溶質の投入条件としては、投入孔の破過曲線から投入孔を横切る地下水流量を推定し、その地下水流量と投入孔の溶質濃度との積を投入フラックスとして与えた。

さらに、揚水孔での非吸着性トレーサー Uranine の破過曲線を基に、Feature A の開口幅と分散長の推定を行った。今回の解析では Feature A を平行平板で表現しているため開口幅は一定であり、分散長も Feature A 内で一定とした。また、縦分散長と横分散長の比は、10:1 とした。その結果、Feature A の開口幅 0.58 mm、縦分散長 1.92 m の組み合わせが、実測された破過曲線に最も一致した計算結果を与えることがわかった。

最後に、Uranine 以外のトレーサーに対する移行解析を行った。その際、各トレーサーの Feature A 表面および母岩への吸着係数は未知パラメーターとし、母岩内での有効拡散係数には室内試験により得られた値を使用した。計算結果を図-7に示すが、実測値を概ね良好に再現することができた。

比較のために、Feature A のみをモデル化した2次元解析も実施したが、特に吸着性の

強いトレーサーについては再現することができず、今回の移行時間程度の解析においても母岩の影響を考慮することが重要であると言える。ただし、図-7の計算結果を導くのに使用した Feature A 表面への吸着係数は、Rb、Cs、Ba については室内のバッチ試験の値に比較的近いが、その他の核種については室内試験結果の5~8倍の値となった。また、計算に使用した母岩への吸着係数は、すべての核種について室内試験結果の10倍程度の値であった。したがって、吸着係数を室内試験によりいかに正確に推定するかということも今後の重要な課題である。

5. 参考文献

- 1) SKB : Äspö Hard Rock Laboratory. Annual Report 1998, SKB Technical Report 99-10, 1999.
- 2) Winberg A : Descriptive structural-hydraulic models on block and detailed scales of the TRUE-1 site, SKB International Cooperation Report 94-08, 1996.
- 3) 河西基, 田中靖治, 五十嵐敏文 : 高レベル放射性廃棄物地層処分の天然バリア性能評価手法の開発 (その1) - 割れ目系岩盤中の地下水流動解析手法 -, 電中研研究報告 U93054, 1994
- 4) 河西基, 五十嵐敏文, 田中靖治 : 高レベル放射性廃棄物地層処分の天然バリア性能評価手法の開発 (その2) - 割れ目系岩盤中の熱および核種の移行解析手法 -, 電中研研究報告 U94053, 1995

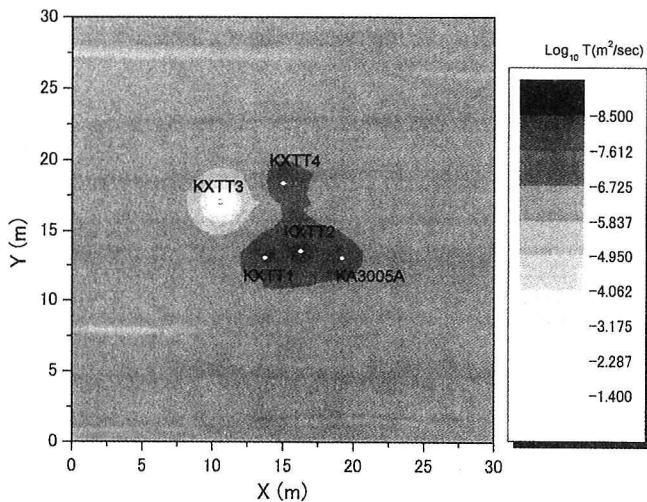


図-6 Feature A 内の透水量係数分布の推定結果

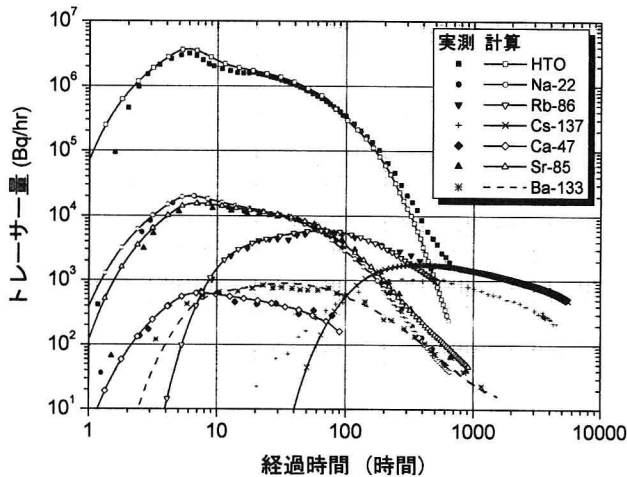


図-7 揚水孔におけるトレーサー破過曲線