

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. 20
[技術情報室]

亀裂媒体中の物質の遅延：
最近の研究に関するプロセスと調査の概要
(翻 訳)

1998年8月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

。内使

亀裂媒体中の物質の遅延：
最近の研究に関するプロセスと調査の概要
(翻 訳)



要 旨

本資料は、平成 9 年度 Golder 委託研究で実施した内容の一部を翻訳したものである。これは、天然バリア中の性能評価研究に必要な情報がまとめられているものである。

本資料では、

- ① 亀裂媒体中の物質の遅延プロセス(チャンネルリング、収着、拡散など)についての要約。
- ② 海外の性能評価レポートで取り扱われている天然バリアプロセスとパラメータのコンパイル。
- ③ 最近の海外の性能評価研究、調査研究の動向レポート。

が、取りまとめられている。海外のパラメータ比較(特に、マトリクス拡散に寄与するパラメータ: K_d 、空隙率、拡散係数、拡散深さ等)や、核種の遅延性能を示す F-ratio 等、亀裂性媒体を対象とした核種移行評価に必要な情報が集約されているため、ここに翻訳を試みた次第である。

1998 年 8 月
環境技術開発部
処分システム解析室
山田 直之

目次

1.はじめに	-----	1
1.1 背景	-----	1
1.2 範囲	-----	1
1.3 本書の構成	-----	2
2.プロセスの説明	-----	3
2.1 亀裂媒体中の物質の遅延を支配するプロセスの説明	-----	3
2.1.1 チャンネリング現象	-----	3
2.1.2 亀裂表面の収着	-----	4
2.1.3 マトリクス拡散	-----	6
2.1.4 コロイドの影響	-----	12
2.2 鍵となるパラメータの定量化	-----	13
3.他の性能評価研究における遅延の取り扱い	-----	15
3.1 SKB 91(スウェーデン)	-----	15
3.2 TVO-92(フィンランド)	-----	16
3.3 Kristallin-I(スイス)	-----	17
3.4 SITE-94(スウェーデン)	-----	18
3.5 AGP-Granite(スペイン)	-----	19
3.6 最近の評価で使われている物質遅延パラメータ値の概要	---	20
4.最近の研究の概要	-----	23
4.1 スカンジナビア	-----	23
4.1.1 室内研究	-----	23
4.1.2 フィールド調査	-----	25
4.1.2.1 Äspö Hard Rock Laboratory	-----	25
4.1.2.2 Palmottu ナチュラルアナログ	-----	27
4.1.3 スウェーデンとフィンランドで実施している安全評価	---	28
4.1.3.1 スウェーデン安全評価(SR97)	-----	28
4.1.3.2 フィンランド安全評価(TILA-99)	-----	29
4.2 スイス	-----	29
4.3 北アメリカ	-----	30
4.3.1 AECL(カナダ)	-----	30
4.3.1.1 亀裂ゾーン	-----	31

4.3.1.2 中程度の亀裂岩石	31
4.3.1.3 まばらな亀裂岩石における天然亀裂	32
4.3.1.4 掘削影響領域	32
4.3.2 WIPP	33
4.4 他の関連研究	34
5. 概要と結論	35
5.1 プロセスとパラメータの概要	36
5.2 物質遅延プロセスの定量化における現在の試み	37
5.3 亀裂媒体中の物質移行のモデルの確率的研究	38
5.3.1 FracMan/PAWorks モデル化システム	38
5.3.2 LTG への物質遅延入力パラメータの議論	39
6. 参考文献	43

1. はじめに

1.1 背景

動力炉・核燃料開発事業団(PNC)は、現在、結晶質岩盤内の処分場到高レベル廃棄物を永久に処分する概念を研究している。スウェーデン、フィンランド、スイス、スペイン、カナダを含む多くの国々でもそのような概念で研究が行われている。そのようなシステムで、放射性核種が生物圏に到達する主要な経路は、水で満たされた亀裂を結んだネットワークで構成されている。従って、そのネットワークでの物質移行の性質を理解し、説明することは、これらのシステムの長期間における性能を予測するためにきわめて重要である。そのため過去 20 年間に、亀裂媒体中の汚染物質の移行を支配するプロセスを説明、定量化するために多くの文献が提示されてきた。

PNC は、1992 年に、地層処分の概括的な調査結果を提示した。この概念の安全評価の次段階は、2000 年に提示されると予想される。最近のモデル化研究開発、フィールドと研究室からのデータの有用性により、このきたるべき評価は、1992 年よりも現実的な方法で、亀裂媒体中の物質の移行(と遅延)を扱うことができるようにすべきである。本報告書で示した情報は、結晶質岩盤処分場の性能評価を定量化するための PNC における開発をサポートするものである。

1.2 範囲

本報告書の目的は、亀裂媒体中の物質の遅延について、現在理解していることを要約することと、PNC が近く公表する性能評価において、PNC が最もよくプロセスをまとめられる手順を簡単に説明することである。

亀裂媒体中の物質の移動は、主に地下水の水理特性によって支配されている。亀裂システムにおける地下の水理の特性調査とモデル化は、他の論文で詳細に議論されてきた(e.g., Bear, 1993)。本報告書は、亀裂システム中をソース(湧き出し、例えば深部処分場)からシンク(吸い込み、例えば地表に流出する点または帯水層上面)へ溶存物質が移行するときの遅延を支配する鍵となるプロセス(例えば収着、マトリクス拡散)に注目する。

本報告書の主要な目的は、次の4つである。

1. 亀裂媒体中の物質遅延を支配する鍵となるプロセスの概要を示す。

2. 前述の国々における放射性廃棄物の取り扱い計画が、安全評価においてこれらのプロセスをどのように表現(代表させているか)しているかについて手短かにレビューする。
3. 亀裂媒体中の物質遅延の取り扱いについて、最近行われている研究を要約する。
4. PNC が近く公表する性能評価において、PNC が最もよくプロセスをまとめられる手順を簡単に説明する。

1.3 本書の構成

本書は6章で構成されている。第2章は、亀裂媒体中の物質遅延を支配するプロセスとパラメータの性質の概要説明である。第3章は、従来の亀裂中の物質遅延プロセスを扱う結晶質岩盤の処分場における性能評価研究の概要である。第2章で区別した支配パラメータをいかに定量化するかについても含まれる。第4章は、亀裂媒体中の物質移行パラメータの定量化に関連した調査の概要である。第5章は、性能評価における物質遅延を定量化するための手法についての概要と議論である。参考文献は第6章に示す。

2. プロセスの説明

2.1 亀裂媒体中の物質の遅延効果を支配するプロセスの説明

亀裂媒体中における物質の移行と遅延を支配する鍵となるプロセスとパラメータは、最近の多くのレビュー論文(e.g., Neretnieks, Moreno, Elert)で議論されてきた。プロセスについての有益な論議もまた、結晶質岩中に処分することを考慮した国家計画の安全評価報告書(e.g., Elert, Vieno, Negra, SKI)で示されてきた。この節では、広範囲にわたる文献の説明を行わずに、むしろ、鍵となるプロセスの概念をこれらの文献(とそれ以外)から簡単に示す。

2.1.1 チャンネリング現象

度重なる研究は、とても複雑な亀裂ネットワークにおいて、流れは一様に分布していないことを示している。ネットワークスケールにおいて、一般的に、岩石質量中の亀裂の一部分だけを実際に水が流れていることと、システムの移行経路の大部分は、少ないパスに限定されていることが発見されている。より小さなスケールにおいて、移行経路は、平板亀裂中の不連続なチャンネル(水路)に限定されていることもまた発見されている(e.g., Tsang and Tsang, 1987)。Fig. 1 に図式化されているこれらのチャンネルは、亀裂を移行する経路の抵抗が最小になるように選択する傾向を生じている。このチャンネルリング現象は、相対する亀裂表面の起伏による亀裂開口幅の変化、原位置応力状態による亀裂面の部分的閉口、およびまたは鉱物の沈殿による亀裂面の部分的閉口(Smith and Schwartz, 1993)に起因する。

実際のチャンネルの形状は大変重要であり、細いチューブから平面のすき間までの範囲がありそうなことに注意すべきである。また、チャンネル内では、一部分が他の部分よりも速い流速で流れるような多様性がありそうなことにもまた注意すべきである。移行経路は亀裂中のこれらのチャンネルに限定されているため、亀裂が交差するときチャンネルが出会う比率は多様である。さらに、亀裂ネットワークにおけるチャンネル中の地下水流速には、大きな多様性がありそうである。これらのファクターは、流れに沿った物質の分散(流れ方向の縦、横両方向)を引き起こす。その結果、物質のほとんどが亀裂ネットワークの流速の遅い部分に留まったとしても、処分場を起源とする物質のいく

つかは、幾分速いスピード(“速い移行経路”)で移動する可能性がある。

亀裂ネットワークの複雑な特性は、物質移行の2つの主な考えに影響を与える。

1. 滞留時間(処分場から生物圏に流れ出る)の分布に明らかに影響を与え、これはシステムを移行するにつれて物質が分散する程度を定義する。
2. ネットワーク内のチャンネルの幾何形状は、地下水流と亀裂面の接触表面積の大きさを定義する。接地面積は、収着とマトリクス拡散による物質の遅延の程度を決定する。

これら2つの遅延のメカニズムは以下で議論される。

2.1.2 亀裂表面の収着

処分場から放出される放射性核種は、いろいろな国家計画で考えられている結晶質岩盤において、一般的に予想される状態では陽イオンあるいは中性と思われる。従って、負に帯電した亀裂表面上に収着する(すなわち収着および、またはイオン交換)傾向があると思われる。

線形性、可逆性、瞬間的な収着を仮定すると、収着物質の速度は遅延係数によって減じられる:

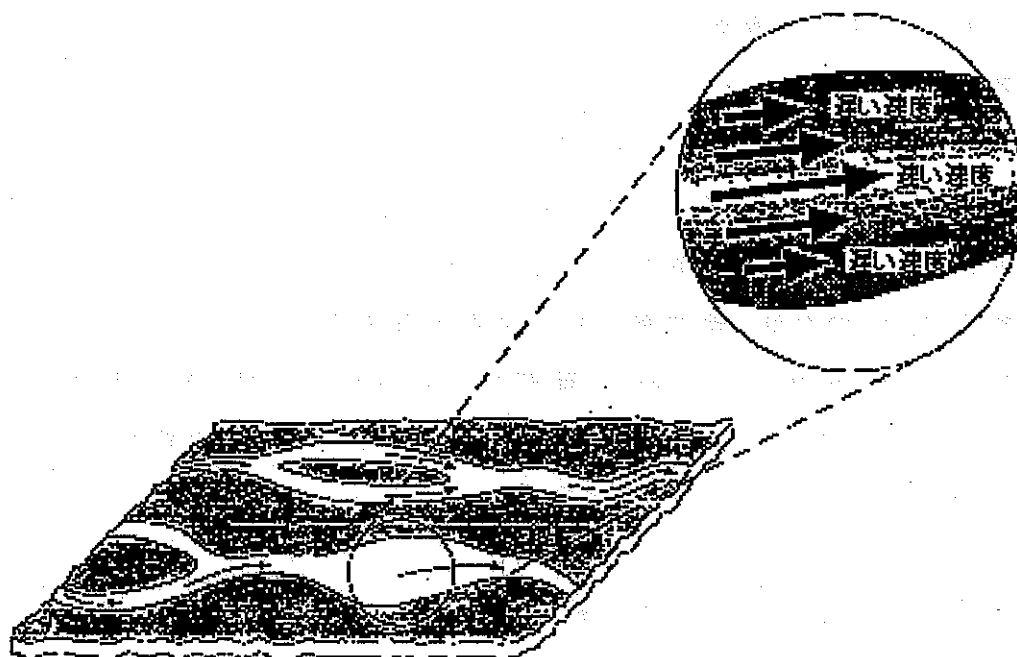
$$R = 1 + a_w K_a \quad (1)$$

ここで、 a_w は亀裂表面積と流水体積の比 (m^2/m^3) であり、flow-wetted area, flow-wetted surface, specific surface area と呼ばれる。 K_a は表面収着係数で、単位は $(g/m^2)/(g/m^3) = m^3/m^2$ である。

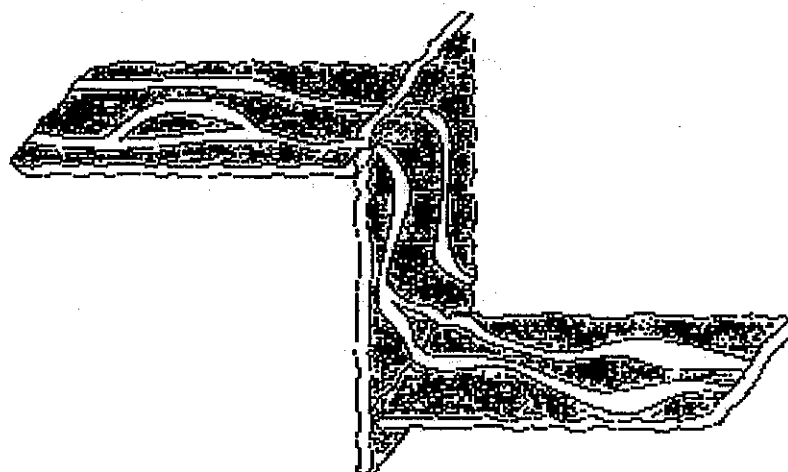
亀裂が開口幅 b の2枚の平行平板で表せると仮定すると、 $a_w = 2/b$ であることに注意する。つまり、開口幅の増加は、flow-wetted area の減少と、表面収着の程度を減少する。

与えられた流束において、もし、 K_a の値が開口幅とは比べものにならないほど大きいならば、実際の物質の移行速度は亀裂中の水の流速(すなわち流れに寄与する空隙率)とは無関係で、主に流束、 K_a 、 a_w によって決定される (Moreno, 1995)。

この単純なモデルがいくつかのシステムに適していると示されても (e.g., Neretnieks, 1982; Abelin, 1985)、多くの亀裂システムにおいて、



A. 亀裂平面内のチャネリング



B. 亀裂ネットワークの移行経路のチャンネル化

Figure.1 チャネリング現象

このモデルは以下のいくつかのファクターにより複雑になる。

- ・開口幅サイズの空間的な多様性(つまり specific surface area)と、移行経路に沿った複雑なネットワーク幾何形状は、実効開口幅の設定を複雑にして(e.g., Selroos and Cvetkovic, 1996)、一様な遅延ファクターの適用を不可能にする(e.g., Wels and Smith, 1994)。
- ・亀裂システムは、化学的に大きな不均質性を示し、そこでは収着特性の空間的な不均質性が存在する(e.g., Vandergraaf and Abry, 1982)。
- ・物質のいくつかは、理想的でない収着反応を示す(e.g., Berkowitz and Zhou, 1996; Wels, 1996)。理想的でない反応には、非線形な収着と収着ヒステリシスのような効果を含む。これは、いくつかの物質特性のために、特にセシウムにおいてしばしば観測される(e.g., Comans and Hockley, 1992)。

遅延のメカニズムにおける不均質性の明白な取り扱い手順については、後の章で議論する。

2.1.3 マトリクス拡散

亀裂表面上への収着に加えて、物質は亀裂から亀裂周辺の岩石マトリクス中の微小亀裂へ拡散することができる(Neretnieks, 1980)。これは物質が岩石内部の微小空隙へ入り込むことを示しており、そこでは、物質は収着とイオン交換が可能になる。その後、物質は岩石から脱着し、拡散して亀裂に戻る(Fig2a)。これは、マトリクス拡散と呼ばれ、物質の遅延効果における重要なプロセスである。マトリクス拡散の証拠は、フィールドと室内研究の両方から得られている(e.g., Alexander, 1990; Birgersson and Neretnieks, 1990; Valkiainen, 1992; Hedermann and Heer, 1996)。

表面上への収着と流れ方向の分散を無視すると、主要なマトリクス拡散の影響は、開口幅が一定な単一亀裂への定常ソースの解析解を考えることによって、模式化することができる(Vieno, 1992; Moreno, 1995)。この単純なシステムでは、亀裂内の距離 L での濃度は次の式で書ける:

$$\frac{c_f}{c_0} = \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{D_e n_p R_p}{t - t_w} \right)^{0.5} \frac{LW}{Q} \right] \quad (2)$$

ここで、 c_f は L での濃度、 c_0 は亀裂入り口での濃度、 D_e は岩石の実効拡散係数、 n_p は岩石マトリクス内の空隙率、 R_p は岩石マトリクスの遅延係数、 t は時間、 t_w は地下水が距離 L に要する時間、 Q は地下水流束(体積/時間)、 W はチャンネル幅である。

この結果を遅延程度の定量化のために、亀裂出口の濃度が入り口の濃度の半分になる時間 (t_{50}) で上式を書き直すと:

$$t_{50} = t_w + \frac{D_e n_p R_p}{(0.48)^2} \left(\frac{LW}{Q} \right)^2 \quad (3)$$

前節で、specific surface area (a_w) は流量(体積)に比例すると定義した。specific surface area はまた、移行経路の岩石の全体積に比例することも定義できる。(3)式が導かれた単純な幾何形状においては、岩石の体積あたりの specific surface area (a_r) は $2Wq/Q$ に等しい。ここで q はダルシー流速である。これを(3)式に代入すると:

$$t_{50} = t_w + \frac{D_e n_p R_p}{(0.48)^2} \left(\frac{La_r}{2q} \right)^2 \quad (4)$$

ここで、もし第2項が第1項(地下水の移行時間)よりも極端に大きいならば、与えられた流速条件下で、物質移行時間は地下水流速(流れに寄与する空隙率)から実質的に独立することに注意しなければならない。

また、specific surface area は、表面収着量を支配するファクター (a_r は a_w に直接的に比例する) と等価であるが、その重要性にも注意しなければならない。specific surface area は地下水が接触できる岩石マトリクスの量を規定する。(4)式に見られるように、たとえマトリクスで収着がなくても(すなわち $R_p=1$)、マトリクス拡散は遅延効果を持つ。比較的大きな空隙によって、マトリクスは溶存物質のための大きな容量を持つことができる(亀裂と比較して)。マトリクス内での収着(大きな R_p) はこの容量を極端に大きくする。

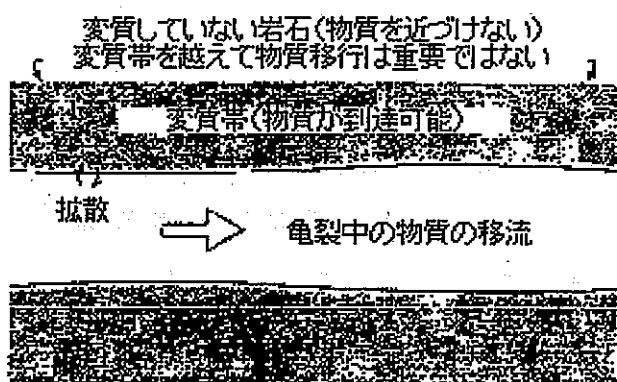
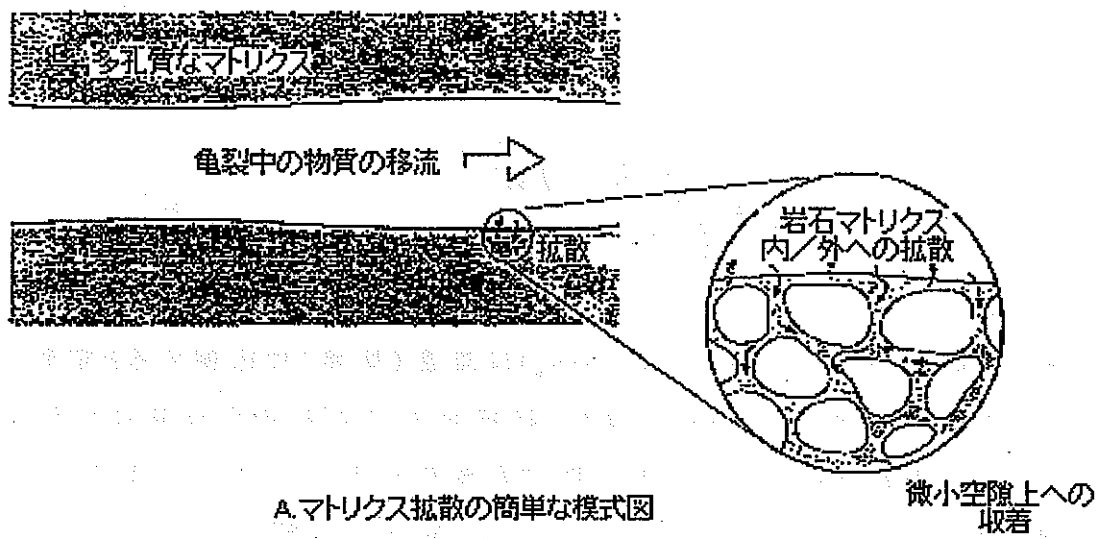


Figure.2 マトリクス拡散

マトリクス拡散による遅延量は、場所または時間で一定でなく、むしろ時間に伴う増加が見られる。これは、物質がマトリクスに浸透することができる深度が時間に伴って増加するためであり、それにより、物質が反応するマトリクスの体積は増加する。

式(2)から(4)は、2つの平行な亀裂から岩盤へ拡散によって浸透する物質が、決して出会うことはないまばらな亀裂で有効である。実際のシステムでは、状況はかなり複雑である。亀裂は、違う亀裂からの拡散物質がお互い影響をおよぼすほどに近接していると思われる。

亀裂の密度が高く、流量が少ないという極端な例では、亀裂とマトリクスの間で濃度の平衡状態が予想され、マトリクス拡散の効果は、収着特性の関数と、マトリクスの空隙率で表すことのできる遅延ファクターによって定量化される(Zuber and Motyka, 1994; Moreno, 1995; Enresa, 1997)。例えば、マトリクス拡散(亀裂とマトリクスの平衡状態と、マトリクス内の水が停滞している状態を仮定した場合)のための遅延係数(R_{md})は以下のように定義できる:

$$R_{md} = \frac{\text{全体質量}}{\text{移動質量}} = \frac{\text{亀裂部に溶存} + \text{マトリクス部に溶存} + \text{マトリクスに収着}}{\text{亀裂部に溶存}} \quad (5)$$

数学的に、次のように書ける:

$$R_{md} = \frac{Vc(n_f + n_m + K_d\rho)}{Vcn_f} \quad (6)$$

ここで V は岩石の体積、 c は平衡状態の濃度、 n_f は亀裂の空隙率、 n_m はマトリクスの空隙率、 K_d はマトリクスでの分配係数、 ρ は岩石のバルク密度である。

マトリクス(R_m)の遅延係数は次のように定義される:

$$R_m = 1 + \frac{K_d\rho}{n_m} \quad (7)$$

マトリクス拡散の実効的な遅延係数は次のように書ける:

$$R_{md} = 1 + \frac{n_m}{n_f} R_m \quad (8)$$

亀裂／マトリクスのシステムが実際に平衡状態であるかどうかは、亀裂での地下水流速、マトリクスの拡散係数・遅延係数、拡散可能なマトリクスの量の関数で決定される(結果として例えば、亀裂間隔などにより)。Damkohler 数(Haggerty and Gorelick, 1995)は、システムが平衡状態であるか決定するために使われる無次元の比であり、4.3.2 節で詳細に議論する。

式(8)は物質と全マトリクスが反応すると仮定しているため、亀裂部を移行する物質に対してマトリクスの遅延効果を最も大きく表していることに注意しなければならない。

たとえ流量が極端に少なくても、拡散している物質と反応可能なマトリクスの量は亀裂間の岩石のすべてを必要としない。いくつかの研究(e.g., Birgersson and Neretnieks, 1990)は物質の浸透深度に制限が認められないことを示しているが、その他の研究(e.g., Heath, 1992)は、多くのシステムで、亀裂充填物およびまたは亀裂に隣接する変質部でマトリクス拡散の範囲が制限されることを示唆している(Fig2b)。

マトリクス拡散の定量化は、実際のシステムの複雑性・不均質性によってより複雑になる。例えば、マトリクスの拡散係数と空隙率は、高い不均質性を持つことが観測されている(e.g., Birgersson and Neretnieks, 1990)。亀裂表面のコーティングの存在もまた、拡散(と収着)のプロセスの不均質性を生じる。さらに、現実的なシステムでは、他の拡散プロセス、停滞した小さい開口幅領域や行き止まりの孔の場所およびまたは亀裂充填物への横方向の拡散が重要になるだろう(Johns and Roberts, 1991; 内田, 1997)。

その結果として、亀裂中の移行プロセスはより現実的には Fig.3 のような模式図になる。事実、流れに隣接する“immobile zone”には多くの種類があり、そこでは物質が多様な量と範囲に拡散可能である。亀裂表面での反応を表す表面収着を非常に薄い immobile zone への拡散として概念的に扱うことは、指摘する価値がある(ゆえに表面収着は他の immobile

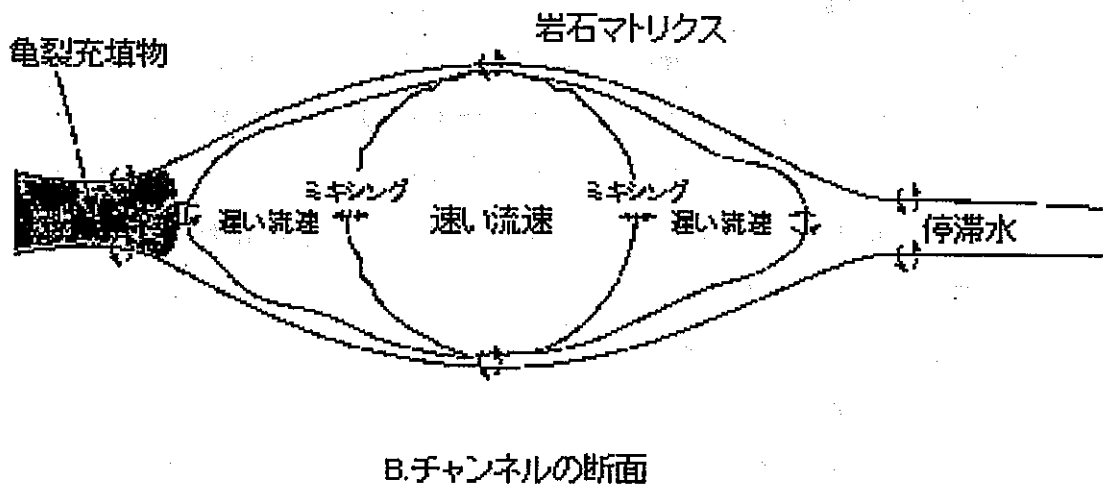
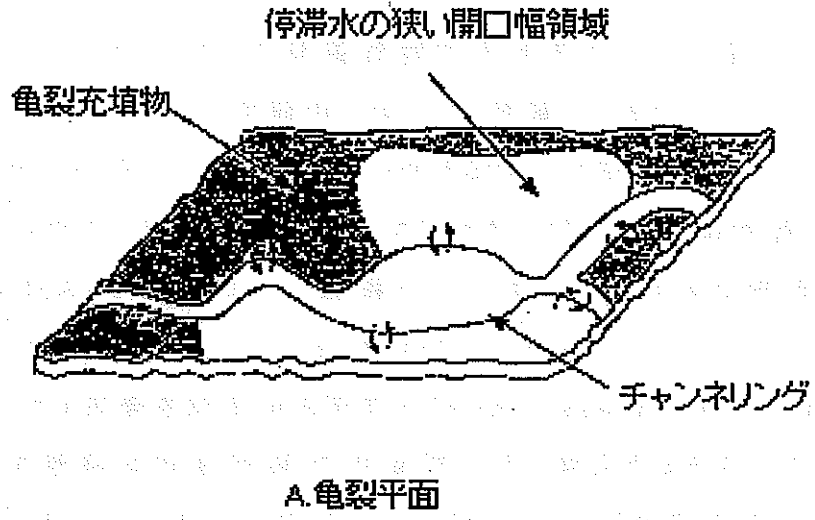


Figure.3 亀裂中の拡散プロセス

zone として簡単にモデル化することができる)。複数の immobile zone は specific surface area の意味を複雑にする。ゆえに拡散プロセスのモデル化に関して、多くの specific area (immobile zone の多様なタイプの1つ) が現実には存在する。

最近、移行経路に沿った不均質な物質遅延プロセスを定量化・モデル化する試みが行われている。一般的に、これらの研究は、いくつかのケースにおける複雑なシステムをモデル化するために“実効”単一パラメータを使うこと(例えば、実際の開口幅、ブロックサイズ)は不適當であり、その不均質性ははっきりと表現されなければならない指摘している(e.g., Selroos and Cvetkovic, 1996; Dverstorp, 1998)。Haggerty and Gorelick(1995)は最近、multi-rate mass transfer モデル化手法を発表した。その手法は、不均質なシステムから導かれる質量拡散移行量の多様性を明確に説明した。この手法はその後、New Mexico の WIPP サイトのトレーサー試験をうまく説明するために使用された(Holt, 1997)。この研究は4章で説明する。

2.1.4 コロイドの影響

溶存核種としての移行に加えて、放射性核種はコロイドによって亀裂ネットワークを移行する可能性がある。これは、物質の遅延に影響を与える。つまり、物質はコロイドと結びつき(例えば収着)、その後コロイドとともに移行する。コロイドは単位体積あたり大きな表面積を持ち、このため放射性核種が効果的に収着することができる。

コロイドは、次の2つの理由から、亀裂システムにおける放射性核種の遅延を減少させる可能性がある。

- ①別の方法で強く亀裂表面に収着した物質は、実質的に移動することができる(移動するコロイドに収着することによって)。
- ②コロイドは immobile zone (例えば岩石マトリクスまたは小さい開口幅の領域)から排斥される。そのために、マトリクス拡散の遅延効果は減少する。

物質がコロイドに非可逆的に収着するならば、その影響は特に重要になる。しかしながら、コロイドは亀裂壁と影響しあい、安定して留まらず、およびまたは狭い開口幅領域で濾過される。このすべては物質移行における遅延効果

を減少させる。Smith and Degueldre(1993)はコロイド促進が重大となる条件下で確認した移行現象を詳細に議論した。

移行経路システムの天然での複雑性、構成の幅広い多様性、サイズ分布、実際のシステムにおけるコロイドの収着特性のために、特定のサイトにおけるコロイドの影響を正しく定量化するために粒子の移行実験が必要になる。最近、いくつかの移行実験が、フィールドで実施されている(e.g., Vilks, 1997)。

2.2 鍵となるパラメータの定量化

前の議論に見られるように、実際のシステムの複雑性と不均質性のために、亀裂媒体における物質遅延を支配するプロセスの定量化は、難解である。本質的に、定量化には次のことが必要となる。

- ・ネットワークを通る移行経路の特質と幾何形状
- ・移行経路に沿った immobile zone での拡散性と収着性

物質遅延における移行経路の特性と幾何形状の影響は、specific surface area によって典型的にパラメータ化される。これは a_w (流体体積と area の比)か、あるいは a_r (岩石体積と area の比)のどちらかで定義される。この2つは、近似的に次の式で関係づけられる:

$$a_r = a_w n_f \quad (9)$$

ここで n_f は流れに寄与する空隙率である(n_f は亀裂で停滞することを考慮しないため、この式は近似式である)。一般的に、トンネルとボーリング孔の観測データは a_r の値、亀裂開口幅のデータは a_w の値を与え、前者の方が簡単に得られる。

Specific surface area は、地下水と岩石の接地面積を表す。これは、システムにおける亀裂幾何形状(例えば連結性、開口幅)と流れ場の両方の関数である。主要な遅延のメカニズムはこのパラメータに支配されているために、亀裂システムにおける物質移行を予想することによるパラメータの定量化は重要である。多くの研究がこのパラメータを理解するために行われているが、定量化は大変難しい。Elert(1997)は以前の研究においてこのパラメータを定量化する手法についての優秀なレビューを報告し、また将来の研究に、

空間的な多様性の研究が必要であると提案している。4章で議論されるように、最近、いくつかの計画 (SKI, 1996; Elert, 1997; Andersson, 1998) は”F 数”の定量化に注目している。これは $(a_r L)/q$ で定義される。ここで L は移行経路の長さで、 q はダルシー流速である。この比の重要性は、(4)式で明確にされており、単純な幾何形状における物質移行方程式の解を示している。この値の増加に伴って物質遅延も増加するため、これは”transport resistance”と考えられている (Vieno, 1992)。この比は重要である。なぜなら、互いに独立である不均質な流体を媒体とした a_r と q の平均化は a_r/q 比の平均化とは違った結果を生じるだろう。この比は局所的に測定することはできないが、いくつかのモデル化手法で(例えば亀裂ネットワークモデル)、局所的な値をこの比に割り当てることは可能である (Elert, 1997)。

亀裂媒体での物質の遅延におけるマトリクス拡散と収着の影響を定量化するために、移行経路に沿った immobile zone のための拡散係数と分配係数の定量化もまた必要である。数多くの努力がこれらの収着と拡散特性の定量化に向けられている。Ohlsson and Neretnieks (1995) は、利用可能な拡散データの包括的な文献調査を提示している。収着データに関して、研究室での測定の際には、注意が必要である。なぜなら、使用する K_d 値の特有性に関しては、研究所で破碎した岩石から求めた K_d 値を intact rock に適用することに関して疑問が挙げられている (Valkiai-nen, 1992)。利用できる表面積の違いを見積もることにより研究室で求められた K_d が低下するときは、適用可能であると示されたことから、いくつかの解析は、研究室スケールの K_d に適用できる内容を持っている (e.g., Enresa, 1997)。

4章での議論のように、これらの特性に関する研究は続いている。しかしながら、ほとんどの実際のシステムは、高い不均質性であるということを繰り返して述べることは重要である。そこでは移行経路に沿ったこれらゾーンの特性 (specific surface area、拡散係数、空隙率、収着特性) とともに多重の immobile zone が存在する。いくつかのシステムで、これらの特性から単一の“実効的な”値を取りまとめる近似はできないと思われる (e.g., Dverstorp, 1998)。

結晶質岩における処分場のためにこれまでの性能評価が物質遅延の鍵となるパラメータを定量化した方法は、次の章で要約する。PNC の性能評価における物質遅延パラメータの定量化に関する追加説明は5章で説明される。

3.他の性能評価研究における物質遅延の取り扱い

この章では、結晶質岩中の処分場に関するこれまでの性能評価(PA)で、いかに物質移行(と特に物質遅延)が表現されたかについて簡単に説明する。ここでは、読者にそれらの典型的な量の一般概念を与えるために、いくつかの鍵となるパラメータについての設定値を示している。以下の議論では、考えられたシステムのために与えられた移行経路と地下水流速において、いかに物質移行をシミュレートするかという点に注目している。移行経路と流速は、地圏システムの水理モデルに基づき、典型的に計算される(ここでは議論しない)。

3.1 SKB91(スウェーデン)

Elert(1992)は地圏を伝わる物質移行をいかにシミュレートするかについて、花崗岩中における処分場のためのスウェーデン安全評価、SKB91に記述している(SKB,1992)。

SKB91では、処分場から地表に達する流管の配置が定義され、それぞれ異なる流管ごとに水理モデルを用いたパーティクルトラッキング法による地下水伝播時間が与えられている。移行モデル(FARF31)は、それぞれの流管に沿った地下水移行時間の計算に使用された(Norman and Kjellbert, 1990)。FARF31は、マトリクス拡散、岩石マトリクスへの収着、放射能連鎖崩壊を考慮した1次元移流-分散を仮定する。流れ方向に垂直なマトリクス拡散は、1次元(かつ見かけ上無限)で生じると仮定している。亀裂表面上への収着とコロイドによる影響は組み込まれなかった。

FARF31は流管に沿った一定数値(平均実効パラメータ)を必要とする。従ってSKB91では、マトリクス部の実効拡散係数($3.2E-6m^2/yr$),マトリクス空隙率(0.005),マトリクスの分配係数(K_d)の定数を、研究室とフィールドのデータを基に仮定した。トンネルと坑道とトレーサー試験でのチャンネル幅の観測を基にして、specific surface areaの中央値として岩石 $0.1m^2/m^3$ (水 $1000m^2/m^3$)を仮定している。

SKBは現在安全評価の次の段階を行っている(参照SR97)。最近の計画によれば、それは1999年上期に終了する。この研究の範囲では、物質遅延パラメータ(例えば specific surface area)の評価が特に強調して示されている。

3.2 TVO-92(フィンランド)

Vieno(1992)は地圏を伝わる物質移行をいかにシミュレートするかについて、花崗岩処分場のためのフィンランド安全評価、TVO-92 に記述している。

地圏における移行は、長さ400mの単一移行経路によりモデル化された。この移行経路に沿った地下水流速は、速い速度(さまざまなシナリオのもとで数年)が仮定された。移行経路内では、モデルは、マトリクス拡散、岩石の収着、放射能崩壊を考慮した1次元移流を仮定している。縦方向の分散は無視された。マトリクス拡散は、流れに垂直方向の1次元方向に生じると仮定された。亀裂表面上への収着とコロイドの影響は含まれなかった。

支配方程式の解として、2つの異なるモデルが使用された。1つは、周辺のマトリクスへの無限拡散を伴った亀裂中の移流解析解である。単一の放射性核種(すなわち連鎖崩壊のない)についてのみシミュレートされた。数値モデル(FTRANS)は、連鎖崩壊と不均質なマトリクス特性を説明するために使用された(Rasilinen,1989)。

マトリクス特性は、亀裂に隣接した部分(1cm以内)で異なる値が定義された。これは変質帯を表すと仮定している。さらに、拡散係数と空隙率は、陰イオンの排斥現象の説明(大きく負に帯電した物質は、マトリクス中の微小亀裂から他のところに“排斥”される)により、陰イオンと非陰イオンで異なる値が定義された。実効拡散係数は亀裂の近傍において、陰イオン($3.2E-7m^2/yr$)、非陰イオン($3.2E-6m^2/yr$)であり、亀裂から1cm以上離れるに従って減少する。空隙率は亀裂の近傍において、陰イオン(0.001)、非陰イオン(0.005)であり、亀裂から1cm以上離れた距離において、それぞれ0.0002と0.001に減少する。マトリクスの分配係数(K_d)は、研究室とフィールドのデータを基に仮定されて、スウェーデンと比較して保守的な値が示されている。

地圏を伝播する移行は、チャンネルで生ずると仮定された。チャンネルは、岩石面積あたりの全チャンネル幅(W')と移行経路の全長(L)によって定義される。このとき $2W'$ は岩石体積あたりの specific surface area を表す。 W' の値は、岩石種類(例えば intact、乱されたゾーンなど)により異なって定義され、 $0.02 \sim 1m^{-1}$ の範囲である。

移行経路は、 $W'L/q$ と定義される“total transport resistance”で特

徴付けられた。さまざまな変質した移行経路が評価されて、移行抵抗が最小な経路がリファレンスシナリオのために使用された。10000年/mの値がリファレンスケースで選択され、2000年/mの“短絡移行経路”ケースは感度解析として行われた。“total transport resistance”は2.2節で触れた“F数”と本質的に同じである。

研究の中で、解析は停滞水領域(すなわち追加的な immobile zone)の影響を受けた。しかし、この影響は安全評価において特に考慮されなかった。

3.3 Kristallin-I (スイス)

花崗岩処分場のためのスイス安全評価(Kristallin-I)は、地図を伝播する物質移行をいかにシミュレートするかについて、Nagra(1994)に記述している。

地下の水理は、主要な透水性亀裂(ここでの移行は速い速度と仮定される)に導かれる不連続の小さな透水性亀裂のネットワークに起因すると仮定された。小さな透水性亀裂内のチャンネルは、場所と時間によらず均一な特性を持つ、代表的な単一の平行平板あるいは管水路の移行経路を仮定することでモデル化された。このモデルは、マトリクス拡散、岩石マトリクスの収着、放射能連鎖崩壊を考慮した1次元移流分散を仮定した。マトリクス拡散は、流れ方向に垂直な1次元方向において生ずると仮定された(そして有限と無限両方の拡散は異なるケースとして考慮された)。亀裂表面上への収着は無視されたが、コロイドによる影響は特に考慮された。非線形収着(後述の Freundlich isotherm)がセシウムのためにモデル化されたことには価値がある。支配方程式はコンピュータコード RANCHMD を使って解かれた(Jakob, 1989)。

いくつかの異なる幾何形状が考慮された。その違いは、水路のタイプ(管状または板状)、マトリクス拡散の範囲(無限または有限)、亀裂のタイプ(チャンネル次元を定義する)である。リファレンスケースの計算は、亀裂に隣接する5cmの変質岩帯に制限された拡散を伴う板状幾何形状を仮定した。マトリクス拡散を生じる変質岩ゾーンの特徴は、マトリクス空隙率0.05、実効拡散係数 $5E-5m^2/yr$ で一定と仮定された。岩石体積あたりの flow-wetted area は $4E-3m^{-1}$ であった。“realistic-conservative”である K_d 値は、マトリクス内の収着を定量化するために利用できる測定値に基づいて

開発された。

Nagra は最近、移行経路における不均質性をよりよく表現する能力のある新しいコンピュータコード PICNIC を開発した(Schneider, 1996)。

3.4 SITE-94(スウェーデン)

SITE-94 は SKI(スウェーデン原子力検査局)によって実施された深部処分場のための性能評価研究であり、1996 年下期に完成した。これは SKI (1996)でドキュメント化された。

サイトスケールの水理学は、さまざまなタイプの 3D モデル(不連続亀裂モデル、確率的な連続体モデル、不連続亀裂ネットワークモデル)を使ってモデル化された。その後、放射性核種移行は CRYSTAL(Worgan and Robinson, 1995)を使って計算された。CRYSTAL は 1D モデルであるために、3D 水理モデルの結果は、2, 3の物質移行パラメータの項で解釈(要約)されなければならない。例えば、CRYSTAL のための実効流速と縦方向の分散係数は、1D 移行方程式を 3D の結果にフィッティングさせることによって評価される。

CRYSTAL において、1次元移流拡散は、マトリクス拡散、岩石マトリクス内での収着、放射能連鎖崩壊を考慮してシミュレートされた。マトリクス拡散は、流れに垂直な1次元方向で生じると仮定された。浸透深度は 5cm と仮定された(さまざまな値があり、25cm の値も使われた)。亀裂表面の収着とコロイドの影響は無視された。

α_r のいくつかの独立した評価は、一部で研究されたが(0.0014~140m⁻¹の範囲)、一般的に specific surface area は、ダルシー流速から独立して使われない。そのかわりに、“F 比”(2.2 節で議論された“F 数”と同じ)が評価された。F 比は 7E2~6E6yr/m の範囲である。マトリクス空隙率は 0.001 と仮定された。マトリクスの実効拡散係数は近似的に 1E-6m²/yr と仮定された。

3.5 AGP-Granite(スペイン)

地圏を伝播する物質移行方法の詳細は、花崗岩処分場におけるスペインの安全評価、AGP- Granite でシミュレートされ、Enresa(1997)に記述された。

スペインの安全評価は、確率論的な評価である。地圏においてランダムにシミュレートされた亀裂ネットワークを伝わる移行経路と地下水流速は、不連続亀裂モデリングパッケージ(FracMan/MAFIC)を使って計算された。そのシステムでのそれぞれランダムな realization において、処分場からの主要な移行経路が抽出される(PAWorks を使って)。それぞれ主要な移行経路は、経路の長さと地下水流速によって特性が決められる。

システムでのそれぞれランダムな realization において、それぞれの主要な移行経路は、全体システム性能評価コード RIP(Golder, 1997)の1次元水路としてシミュレートされた。移行、縦方向分散、放射能崩壊、内部成長物は明確に表現された。表面上への収着は無視された。マトリクス拡散は、それぞれの経路に同等の遅延ファクターを定義した近似的な方法で表現された。2.1.3 節で示したように、亀裂とマトリクスが平衡状態であるかどうかは、数学的な手法を適用できる。たとえそれらが平衡状態でなくても、マトリクス拡散の影響を近似的な遅延ファクターで定義することは可能であるが、慎重に適用されなければならないことは明白であり、そのような状況下でのマトリクス拡散の遅延効果は現実的に一定ではないことに注意が必要である。

遅い地下水流速(1m/yr のオーダー)とマトリクスへの浅い浸透距離(0.05m)のために、亀裂とマトリクスが平衡状態と見なせると仮定することができ、実効遅延係数は(8)式のように定義される。この式は次の2つの方法で改良される。1つめは、流れに寄与する空隙率(n_f)は、開口幅と浸透厚さの2倍の比で表せる:

$$R_{md} = 1 + \frac{2n_m T}{b} R_m \quad (10)$$

ここで T は浸透厚さ、 b は亀裂開口幅、 n_m はマトリクス空隙率、 R_m はマトリクスの遅延係数である。

2つめは、コロイドの影響は、一定濃度で存在して、亀裂表面あるいはマトリクス近傍と反応しないで、そこでの収着は線形で可逆性であると仮定することによって組み込まれた。これらの仮定のもとで、コロイドの影響は実効遅延係数で次のように示される:

$$R_{md} = 1 + \frac{2n_m T}{b(1 + c_c Kd_c)} R_m \quad (11)$$

ここで c_c はコロイドの濃度、 Kd_c はコロイドの平衡分配係数である。鍵となる入力パラメータは、確率分布と関連しないで定義され、 n_m は 0.005~0.05、 b は 0.005~0.1mm の範囲とされた。上述のように、浸透厚さは 0.05m と仮定された。分配係数は、これまでに議論されたスイス、スウェーデン、フィンランドの安全評価から引用された。

3.6 最近の評価で使われている物質遅延パラメータ値の概要

この節は、これまでの性能評価で使われた鍵となる物質遅延パラメータ値の範囲を簡単にまとめる。まもなく公表される PNC の性能評価におけるこれらの値の適用性は、5章で議論する。

Table1 は、これまでの性能評価において使用された specific surface area の評価範囲をまとめたものである。この表のほとんどの部分は、Elert(1997)から直接得られる。

Table1

最近の性能評価における Specific Surface Area の評価のまとめ

研究(年度)	方法/コメント	岩石体積あたりの Specific surface area(ar) m ² /m ³	流水体積あたりの Specific surface area(aw) m ² /m ³
SKB-91(1992)	トレーサー試験	0.2-20	1000
	チャンネル幅の測定	0.005-0.4	
	安全評価で使用	0.1(0.1-0.5)	
TVO-92(1992)	intact rockでの評価	0.04-0.08	
	乱された岩石での評価	0.5-2	
	亀裂ゾーンでの評価	1.2-2	
Kristallin-I (1994)	透水性亀裂の評価	0.0024-0.17	10000
SITE-94(1996)	単純時測計算	0.0014-140	3100
	不連続亀裂モデル	0.01-0.1	
	不連続亀裂ネットワークモデル	0.1-10	
	サイトスケール構造の測定	0.12	
	ウラン含有量とラドン濃度	0.31-3.1	
	統計的な連続体モデルのための安全評価で使用	0.01-1	
AGP-Granite(1997)	開口幅と浸透深度の定義を基礎	20	20000-400000

上記で議論された拡散と空隙率データを Table2 にまとめる。

Table2

最近の性能評価におけるマトリクス拡散と空隙率の概算のまとめ
(リファレンスケースで使用された値)

研究(年度)	マトリクスへの浸透深度 m	実効拡散係数 m^2/yr	マトリクス孔隙率	コメント
SKB-91(1992)	無限	3.20E-06		
TVO-92(1992)	無限、しかし 0.01mまで特性変化	変質帯: 3.2E-7(陰イオン) 3.2E-6(非陰イオン) intact rock: 3.2E-8(陰イオン) 3.2E-7(非陰イオン)	変質帯: 0.001(陰イオン) 0.005(非陰イオン) intact rock: 0.0002(陰イオン) 0.001(非陰イオン)	特性は変質帯(深度0.01m)と intact rockに分けて定義されている
Kristallin- I (1994)	0.05	5E-5	0.05	変質岩ゾーンと示される
SITE-94(1996)	0.05	1E-6	0.001	
AGP-Granite(1997)	0.05	項目なし	0.005-0.05	安定したサイトにおいて 拡散性の値は使用されない

安全評価のために使用された分配係数の評価は大変幅広い。Enresa (1997)は、SKB-91, TVO-92, SKI-90 (SITE-94の前任), Kristallin- I において使用された収着データの要約と、いくつかの鍵となる元素の K_d の最小(保守的)値と最大値を定義した。最小値はいくつかの研究によって使用された最も低い(保守的な)値を示していて、一方、最大値はいくつかの研究によって使用された最も高い(現実的な)値を示していることに注意すべきである。これらを Table3 に示す。

Table3

最近の性能評価において使用された分配係数のまとめ

元素	最小Kd(m ³ /kg) [保守的]	最大Kd(m ³ /kg) [現実的]
C	0	0.05
Cl	0	0.0001
Ni	0.01	0.5
Se	0.0005	0.01
Sr	0.001	0.05
Zr	0.1	4
Nb	0.1	2
Tc	0	2
Pd	0.001	0.5
Sn	0.001	0.5
I	0	0.001
Cs	0.005	0.5
Pb	0.05	1
Ra	0.005	0.5
Ac	0.5	5
Th	0.01	5
Pa	0.01	2
U	0.01	5
Np	0.05	5
Pu	0.5	5
Am	0.05	5
Cm	0.5	5

4. 最近の研究の概要

この章では、亀裂を有する結晶質岩における物質遅延の取り扱いについて最近進行中の研究の概要を説明する。いくつかの優れたレビュー論文が利用可能で、それらは 1995 年までをカバーしている。Ohlsson and Neretnieks(1995)は拡散データ(岩石の拡散係数と空隙率)を概説し、また物質遅延プロセスを理解することに向けたナチュラルアナログ研究を議論した。マトリクス拡散を研究するためにナチュラルアナログを利用することは、Miller(1994)によってもまた詳細に議論された。トレーサー試験のレビューは Andersson(1995)によって議論され、より最近の OECD(1997)の国際会議(GEOTRAP)において、放射性核種移行を予想するためのフィールドトレーサー試験の実施手順が提案された。

本書ですでに議論された初期の研究についてはここでは説明しない。むしろ、この章では世界中で行われている最近の主要な研究を要約する。研究報告の批評(その多くがまだ完成していない)に注目せずに、それよりも、この章では現在進行している研究の目的とその状況の要約を行い、特に適用可能であれば、重要な結果を強調する。

研究の多くは国際的な協力と関連している。この章は、研究の大多数が実施された場所に従って構成される。

- ・スカンジナビア(スウェーデンとフィンランド)
- ・スイス
- ・北アメリカ

4.1 スカンジナビア

最近の研究の大多数は、スカンジナビアで実施されている。スウェーデンとフィンランドの両方で結晶質岩における処分場の可能性を活発に研究している。スウェーデンとフィンランドにおいて現在進行中あるいは最近完成した研究がたくさんあるため、以下では研究室での研究、フィールドでの研究、性能評価に分割して議論する。

4.1.1 室内研究

1995 年以前の室内研究は、Ohlsson and Neretnieks(1995)によって要約された。Table4 は、スウェーデンとフィンランドにおける結晶質岩を伝

播する移行に関連した最近または進行中の主要な研究室スケールの実験を要約する。

進行中の重要な実験は、結晶質岩サンプルにおける多くの元素と水の化学性によるバッチ式の吸着実験である(e.g., Cui and Erikssen, 1996)。これら実験の主要な目的は、性能評価計算で直接使われる吸着データベースの特質を次第に増加することである。類似の実験はフィンランドで現在進行中である。

Table 4

結晶質岩での物質移行に関連したスウェーデンとフィンランドにおける
主要な進行中の研究室スケールの実験

研究機関	実験の説明	参照
Department of Nuclear Chemistry Royal Institute of Technology, Stockholm	花崗岩におけるいろいろな元素 (Te, Sr, Co, Csを含む)の一連の吸着実験	Continuously reported (e.g., Cui and Erikssen, 1996)
Laboratory of Radiochemistry, University of Helsinki, Finland	フィンランドのbedrockにおける吸着特性(Kd値)の測定のための一連の実験 Na, Np, Sr, Zr, Nb, Pa, Puの低・高イオンカ水 およびCs, Np, U, Pu, Pa, Ra(破壊岩石) 実効・見かけ拡散率の決定のための拡散セルと掘削コアを用いたHTO, Na, Cl, Npの拡散	On going, will be published in YJT series (Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies)
Department of Nuclear Chemistry Chalmers Institute of Technology, Göteborg	Aspo閃緑岩と細粒花崗岩におけるHTO, Sr ²⁺ , Na ⁺ , Ca ⁺ 拡散の研究	Continuously reported (e.g., Johansson et al., 1997)
University of Jyväskylä and VTT	岩石試料の空隙率と浸透率の測定のためのヘリウムガス流れとガス拡散法 ヘリウムの結果は、水飽和試料の典型的に重い分子により評価される 試験スケールは約10cmである 研究室・原位試験装置ともに開発されている	Hartikainen et al. (1995; 1996)
Laboratory of Radiochemistry, University of Helsinki and University of Jyväskylä	水銀浸入porosimetryとガス吸着を用いた新鮮・変質結晶質岩の空隙構造の特性調査	Siitari-Kauppi(1997)
Institute of Earth Science, Uppsala University	マトリクス拡散と吸着における不均質性の影響の研究 さまざまなボーリングコアの移行実験の結果とともにバッチ試験で決定された物理・化学的性質の統計パターンと比較 Csを用いた、Aspo島中粒花崗岩試料の人工・天然亀裂のin-diffusion, through-diffusion, 研究室移行試験	Work in progress, first report Worman and Xu (1996)
Laboratory of Radiochemistry, University of Helsinki, Finland and VTT of Finland	研究室スケールの亀裂流れ・移行試験 20×30×10cmの天然亀裂(花崗岩)における流れ・移行試験 非吸着・吸着トレーサーを使ったトレーサー試験 試験は確率的モデル化と決定論的モデル化で評価された	Hiltta et al., (1997a, 1997b)

一方の重要な実験は、岩石マトリクスの空隙率と拡散係数を評価する(e.g., Johansson, 1997)。研究の方向性の1つは、陰イオンの排斥効果である。そこでは、小さいイオン力では、水は実効拡散係数を減少する。拡散係数と空隙率の測定の新しく開発された手法は、ヘリウムガス拡散を使用することである(Hartikainen, 1995; 1996)。これは実験時間を減少させるが、必要性を実験結果のスケールに取り入れた。この手法は、さらに研究所内で掘削コアに適用され、原位置ボーリング孔での拡散係数の測定にもまた適用された。

他の研究は岩石マトリクスの空隙率と拡散係数に対する変質と風化の効果に集中している。例えば、Siitari-Kauppi(1997)は、水銀が浸透した空隙とガス吸着を、新鮮な結晶質岩と変質した結晶質岩の空隙構造の特性調査に適用した。おもしろいことに、彼らは、風化と変質は彼らのサンプルで空隙率を増加させることを発見するとともに、拡散係数は現実的には減少し、空隙開口形状に依存することを示した。

実験の一方のグループは、小さい岩石サンプルでの天然と人工の亀裂における研究室スケールトレーサー試験に関連している(e.g., Hölttä, 1997a; 1997b)。これらの種類の試験は、試験結果と解析結果あるいは数値移行モデルを比較することを試みた。これら試験は、収着と岩石マトリクス拡散の“伝統的な”研究室での特性調査とたいてい結びついている。例えば、Wörman and Xu(1996)は、一連の実験から決定された物理・化学パラメータの統計的なパターンと、マトリクス拡散と収着における不均質性の効果を調査するための研究室トレーサー試験の結果を比較した。

4.1.2 フィールド調査

スカンジナビアの結晶質岩における移行実験に関連したほとんどすべてのフィールドでは現在、スウェーデンの Äspö Hard Rock Laboratory あるいはフィンランドの Palmottu natural analogue 両方の framework で実施されている。以下では分けて議論する。

4.1.2.1 Äspö Hard Rock Laboratory

Äspö Hard Rock Laboratory の地下部は、らせん状に深度 450m まで降りるトンネルで構成されている(SKB, 1997)。いくつかの異なる実験が

Äspö で行われ、そのいくつかは SKB によって直接運営される。その他は国際協力の framework に含まれる。

Mazurek(1996)は、Äspö トンネルの透水性亀裂の詳細な地質的特性調査を行った。しかしながら、マトリクス空隙率の測定は別にして、物質移行に相当する水理学的、化学的パラメータ値の誘導は、考慮されなかった。それにも関わらず、この特性調査は、マトリクス拡散と、流れと亀裂の停滞部のやりとりを表現するための現実的な幾何形状を生じさせるような、有用なデータを提供している。

Äspö 研究の一部で、特別なボアホールプローブ(CHEMLAB)は、原位置の特性を測定する遅延実験とは違う目的のために設計された。これはまもなく SKB レポートで公表される。この遅延実験は、プローブ中に組み込まれるが、水を地下水からプローブの位置に運ぶことで、地下水を化学的にコントロールすることをとても簡単に行っている。プローブはベントナイト中で ^{131}I と ^{57}Co の拡散の試験に使用されるが、さらにサイト調査の道具として実際に使用する前に、プローブの開発は必要となる。

現在 Äspö で行われているトレーサー試験は、TRUE(トレーサー遅延理解実験)と呼ばれる計画の一部である。TRUE の範囲の概要は Olsson and Winberg(1997)によって説明された。10 年計画(2003 年に完成)では、徐々に複雑さを増していく一連のトレーサー試験が実施される。

TRUE の第一段階(TRUE-1)は、小さいスケール(10m 以下のスケールでの単一亀裂)でのトレーサー移行を理解することを目的とされた。最初の結果は、Winberg(1996)と Andersson(1997)によって報告された。この試験は、放射状収束とダイポールの流れ幾何形状において、収着を伴わないトレーサー(HTO:トリチウムトレーサー)と選択した弱い収着トレーサー(Na, Ca, Sr)と中程度の収着トレーサー(Rb, Ba, Cs)を用いて行われた。レジ注入と、それに続く注入部亀裂の開削もまた計画された。TRUE-1 サイトの試料を用いたバジ式の収着と拡散の実験が、研究室スケールの移行パラメータを決定するために行われた。トレーサー試験の結果は、国際的な専門家のチームによってまもなく評価・報告される。この試験は、マトリクス拡散と収着の証拠を示す(Selroos and Cvetkovic, 1998)。他の結論はまだ公的に利用されていない。

TRUE の次の段階は、TRUE-Blockscale 実験と呼ばれる(winberg,

1997)。これは、100m スケールで実施される水理とトレーサーの試験に関するもので、このようにして亀裂ネットワークに関わっている。これら実験の目的の1つは、この大きいスケールの亀裂ネットワーク(単一亀裂の反対)を媒体とした、移行モデルの予測能力の試験である。トンネルより下に位置するサイトの深部が選ばれ、さまざまな調査ボーリング孔が掘削されている。水理モデル構造(すなわち亀裂ネットワーク)は、物理検層からの解釈、掘削中に測定された圧力回復応答、詳細な流量検層(自然流量)を基に開発される。このモデルの開発は Olsson(1997)によって議論されている。水理干渉試験とトレーサー試験は現在も計画されている。

4.1.2.2 Palmottu ナチュラルアナログ

Palmottu ナチュラルアナログ計画は 1988 年に開始された。そして、EC の補助研究として 1996 年まで続いた。このサイトは、フィンランドの Palmottu 湖近くの結晶質岩盤地域に位置していて、ウラン鉱床が地表から 300m 以深に伸びている。地質、水理、地下水化学は、フィンランドとスウェーデンの処分候補地のサイトに似通っていると想定される。この計画にはいくつかの特別な目的がある。その1つは、放射性核種移行におけるさまざまな遅延メカニズムの役割の研究とモデル化である(Gustafsson, 1997)。

Palmottu でのマトリクス拡散の研究は、天然放射性核種が透水した亀裂周辺の岩石マトリクス内での、濃度プロファイルに注目している。さまざまな分析が、亀裂面と岩石下方間の放射性核種移行の証拠を見つけるために測定されていて、これらの研究に基づいて拡散はその濃度プロファイルを形成する重要な役割を行っていることを定性的に結論づけた(Suksi, 1995)。しかしながら、さらなる研究は、マトリクス拡散だけで観測からの分析を説明することはできないと指摘している(Rasilainen, 1995)。最近の研究では、モデル化と測定結果の分析を調和させることが始められてきている(Suksi and Rasilainen, 1997)。他のサイトや、その岩石サンプルを用いた室内分析の結果もまた、報告されている。JYT(1997)は、フィンランドで実施された他の研究を要約した。

Gustafsson(1997)は、1997 年夏に実施が計画された Palmottu での亀裂ゾーンにおける大きいスケールの揚水・トレーサー試験を組み合わせた試験を記述している。これは、中心に位置するボーリング孔で揚水を行い(流

れ場の集中を生じる)、一方揚水を行った孔の周囲 100m 以内のいくつかのボーリング孔でトレーサーを注入することである。

4.1.3 スウェーデンとフィンランドで実施している安全評価

スウェーデンとフィンランド両国は、後数年で完成する安全評価の次段階を現在研究しているために、亀裂内で物質遅延を取り扱っているこれら研究の方向性を手短かに議論することは有益である。

4.1.3.1 スウェーデン安全評価 (SR97)

3.1 節で触れたように、SKB は現在安全評価の次段階を行っており (SR97 と呼ばれる)、それは 1999 年前期に完成すると計画されている。この研究で特に強調していることは、物質遅延パラメータ (specific surface area など) の推定を示すことである。特に、亀裂岩体の強い不均質な流れ場における移行とマトリクス拡散を正確に表すための理論的な評価は、現在進行中であり、SR97 論文の一部に含まれるだろう。

いろいろな移行経路に沿った移行とマトリクス拡散の予備モデルの評価では (Andersson, 1998)、“F 数”の重要性を証明する。“F 数”は $(a_r L)/q$ で定義される。ここで a_r は岩石体積あたりの flow wetted area、 L は移行経路の長さ、 q はダルシー流速である。いろいろな研究による F 数 (“F 比”または “transport resistance” と呼ばれる) の評価は、Elert (1997) によって比較された。それぞれ異なる流速・幾何形状のたくさんの小さいセグメントで構成された移行経路の F 数は、全セグメントの F 数の合計とほぼ等しい。

SR97 における F 数を評価するための標準的な方法は、岩石体積あたりの flow wetted surface の平均を評価し、確率的な連続モデルから計算されたダルシー流速の分布によってこれを割ることである。SR97 サイトでの a_r の評価に利用できる特別な情報は、トレーサー試験、地質学的特性調査、水理の測定から構成される。

移行経路のそれぞれの亀裂セグメントにおける F 数は、不連続ネットワークのシミュレーションから直接得られる可能性があり、“平均” flow wetted area を評価する必要性を軽減させる。

4.1.3.2 フィンランド安全評価(TILA-99)

フィンランド安全評価の次段階は、TILA-99 と呼ばれていて、1999 年に完成すると予想されている(Vieno and Nordman,1999)。

TILA-99 で使われているファーフィールドの移行モデルは、単一1次元移行経路に沿った移行を評価する。遅延は、比 $W'L/q$ によって本質的に支配される。ここで W' は岩石交差部の単位面積あたりのチャンネル全体幅、 L は移行距離、 q は岩石内のダルシー流速である。 $W'L/q$ は transport resistance と呼ばれ、前述の F 数と同じ性質を持つ(なぜなら $a_r=2W'$ である)。

TVO-92(Vieno,1992)のようなこれまでの安全評価では、 q の評価は水理解析を基にしていて、一方 W' の評価は、透水性亀裂の頻度から得られる。特定の岩石タイプ(例えば intact rock、破碎帯、異なる亀裂ゾーン)において、流れは平行亀裂の数で等しく分割されることが、単純に仮定されていた。TILA-99 において、より現実的なモデルが使われて、移行パラメータは不連続ネットワークモデルに基づいて得られる(Poteri and Laitinen, 1997; Koskinen, 1998)。 $W'L/q$ を決定するときに特証されるべき鍵となる問題は、亀裂平面内で水理の多様性(チャンネルリング)の影響である。亀裂面積の小さい部分は、水理の大きい部分を説明するだろう。亀裂平面内における透水量係数の不均質性のさまざまな仮定により亀裂平面内の流れ場を解くことによって、Koskinen(1998)は亀裂交差部間で $W'L/q$ を最小にする経路を評価した。それぞれの移行のポテンシャルを持つ経路に沿った亀裂セグメントからの寄与を合計することによって、彼らは全体の $W'L/q$ の評価を得た。

4.2 スイス

過去 10 年間、スイスでの亀裂媒体中の物質移行プロセスに関する実験研究は、主に、スイスアルプスの Grimsel 試験サイト(GTS)における Nagra/PNC のフィールドトレーサー移行(MI)試験が中心であった。この研究は 1985 年に始まり、1996 年に終了した。移行試験は、亀裂のせん断ゾーンの孔井での定常状態のダイポール流れ場を利用したを定義した。実験のスケール(孔井間の距離)は 2~5m である。この計画の中で、広範囲の野外調査は、水理学的、化学的、移行のモデル化のような室内研究から

の補助計画によって補われた。PNCはこの研究に重大に関わっているので、ここでは議論を行わない。モデル化された移行実験の方法は、Hedermann and Heer(1996)によって説明された。Alexander(1997)は、この計画の鍵となる成果を要約した。

新しい実験は Grimsel で現在進行中であり、それは MI の継続と見ることが出来る。放射性核種遅延計画 (RRP) は、亀裂を伝播する物質が亀裂中を移行するにつれて遅延を生じるメカニズムと、遅延パラメータの室内測定をいかに実際のシステムに適用するかについての調査を特に目的としている (Alexander, 1996)。RRP には、MI で使用された同じ透水性のせん断ゾーンに遅延効果の大きい放射性核種を注入して、どのくらい遠くまでさまざまな放射性核種が移行しているかを評価するために、全実験領域を物理的に掘削することが含まれる。原位置の遅延に関するデータの取得に加えて、せん断ゾーンの完全な 3D の物理的記載が行われ、それは概念モデルの開発に使用される。RRP はまた、実際にマトリクス拡散に利用できるマトリクス深度の研究も行っている。

4.3 北アメリカ

北アメリカでの過去数年における亀裂システム内の放射性核種移行に関連した研究のほとんどは、Yucca Mountain の U.S. HLRW 処分候補地の裏付けとして行われてきた。この処分候補地は不飽和亀裂凝灰岩中にあるため、この研究のほとんどが飽和・結晶質システムの解析のために直接適用できない。

しかしながら、北アメリカにおける他の2つの計画には、直接適用できる。1つは Manitoba での地下調査研究所 (URL)、もう1つは New Mexico での廃棄物隔離予備実験施設 (WIPP) である。これらを以下で分けて議論する。

4.3.1 AECL(カナダ)

多くの地下水トレーサー試験が、カナダ、Manitoba にある AECL の地下調査研究所 (URL) の天然亀裂領域と掘削影響領域において現在行われている。Frost(1997)は、これらの実験の概要を説明した。

実験は、サイトから上方 500m 以内で確認された3つの異なる岩石の領

域に注目している。

- ・亀裂ゾーン(断層)、非常にたくさん亀裂がある。
- ・中程度の亀裂岩石(MFR)、数が少なくまばらだが、相互に連結した亀裂(節理)を含む岩石。
- ・まばらな亀裂岩石、微小割れ目とまばらに分布した、あまり連結しない亀裂を含む岩石。

4.3.1.1 亀裂ゾーン

亀裂ゾーンは、サイトにおける大きいスケールの地下水の移行を支配する。非常にたくさん亀裂のある岩石の物質移行特性を決定するためと、試験結果をより大きいスケールに外挿する方法を開発するために、一連のトレーサー試験は URL において主要な低角度の亀裂帯で行われた。16 のトレーサー試験が現在までに 17~700m のスケールで行われている(Davison, 1997)。一般的に、これらの試験は、これらゾーンの物質移行特性の空間的な多様性はすべてのスケールにおいて大変複雑であると指摘している。試験の主要な目的の1つは、小さいスケールの実験から決定された情報を、処分場の性能評価に関係する大きいスケールの移行特性の開発に拡張できるかどうかを決定することであった。しかしながら、この研究は、そのような拡張は不可能であることと、トレーサー試験は、サイトスケールモデルで要求される物質移行の特性を決定するために、これらタイプの亀裂ゾーンでのファーストフィールドの移行試験を実施する必要があると指摘した。

これらの試験の一部として、フィールドスケールのコロイド移行研究もまた実施されたことに注意が必要である(Vilks, 1997)。コロイド状のシリカは、開口亀裂を通過して 17m の距離を移行した。コロイドの移行は、研究で使用された流速をこえて、保守的に表れた(これには自然流量よりも高いオーダーが必要となる)。おもしろいことに、トレーサー試験後のボーリング孔内のパーセントと回収率データは、コロイドは保守的にふるまうものの、溶存非吸着トレーサーとは違う移行経路をたどることを示している。

4.3.1.2 中程度の亀裂岩石

2つめの一連のトレーサー試験は、URL の中程度の亀裂岩石領域において現在実施されている。この実験の目的のために、中程度の亀裂岩石とは、

亀裂が比較的均一な分布で互いに交差して、1m あたり 1~5 本の亀裂頻度(線測線)をもつ少なくとも体積 $100,000\text{m}^3$ の岩石質量の領域であると定義された。これら試験の主要な目的は、等価な多孔質媒体のモデル化手法がこれら領域のシミュレートに使用することができるかどうかを決定することである。

MFR 実験の一部で、 $50 \times 50 \times 50\text{m}$ のブロックが設定され、非吸着性トレーサーを使ったダイポール間隔 12m のトレーサー試験が終了した(Kozak, 1998)。AECL は現在、1つの孔井で注入して、3つの孔井で回収する大きな体積のトレーサー試験の準備を行っている。この試験は 1998 年 3 月に実施され、コロイドトレーサーだけでなく、非吸着性トレーサーも使用されるだろう。遅くとも 1998 年後期には、吸着性トレーサー試験が実施されるだろう(おそらく Li およびまたは Rb を用いて)。モデル予測による、これらトレーサー試験を開始する前に作成されるだろう。

4.3.1.3 まばらな亀裂岩石における天然亀裂

移行実験は、日本原研(JAERI)と共同で、原位置状況下から掘削した天然亀裂を有するブロック(およそ体積 1m^3)を用いた非吸着性・吸着性放射性核種の移行研究として計画されている(Vandergraaf, 1996)。

2つのブロックが掘削され、注入・排水ポートが取り付けられている。最初の移行実験は、非吸着性トレーサーを使って完了した。これらの実験は、吸着性トレーサーとコロイドを使って継続される。トレーサー試験が完了したとき、ブロックは亀裂で分割されて表面は分析される。

4.3.1.4 掘削影響領域

天然亀裂を見ることに加えて、トレーサー試験は最近、URL の試験トンネルの掘削影響領域(EDZ)において、これらの領域の物質移行特性に関する情報を得るために行われてきている(Frost and Everitt, 1996)。このトレーサー試験は、等価な多孔質媒体を使ってうまくモデル化され、EDZ はトンネル内の重要な移行経路になり得ると断定された。さらにこのタイプの試験は、上述の MFR 実験の一部として実施されることが計画された。

4.3.2 WIPP

廃棄物隔離予備試験計画(WIPP)は、New Mexico 南東における超ウラン元素(TRU)廃棄物のための処分候補地である。この処分場はそれ自身、岩塩鉱床の中に位置している。処分場レベルより上方の亀裂質ドロマイト層(Rustler 累層の Culebra Dolomite 部層)は、システムの性能に重要な意味合いを持つ可能性があり、従って、集中的に研究されている。

Culebra 部層でのトレーサー試験とモデル化研究(Meigs, 1997; Holt, 1997)は、亀裂性結晶質岩の物質移行の理解へ直接応用された。特に、トレーサー試験は、たとえ不均質な浸透場を考えたとしても、“標準的な”二重空隙率モデルではトレーサー試験を適切に説明できないことが発見された。“標準的な”二重空隙率モデルは、均質プロセスとして拡散を扱う。そこでの拡散量は移行経路に沿って一定である(すなわち拡散空隙率、拡散面積、マトリクス浸透深度などが一定である)。しかしながらこの試験は、multi-rate モデルに関わっているときに説明できる。multi-rate モデル(Haggerty and Gorelick, 1995)は、ブロックサイズの不均質性(表面積と拡散深度)を明確に示すことによって、不均質な拡散プロセスを概念化する。multi-rate モデルは、溶質が反応可能となる immobile zone の分布(1つ以上の)が存在することを仮定している。似通った手法が最近、Simbierowicz and Olin(1997)によって開発されたことに注意することは興味深い。

Haggerty and Gorelick(1995)と Holt(1997)は Damkohler 数を指摘した。Damkohler 数は移流の移行時間と定常拡散で規格化された無次元比であり、multi-rate モデルにおいて表されるいくつかの特別な immobile zone のふるまいを決定するために使うことができる。immobile zone n の Damkohler 数(DI_n)は次のように定義される。

$$DI_n = \alpha_n (\beta_n^* + 1) \frac{LR}{v} \quad (12)$$

ここで

β_n^* は immobile zone n の無次元容量係数で、immobile zone n の溶質質量と移流空隙率の溶質質量の比で表される。

L は移流移行長さ

R は移流空隙中の遅延係数

v は地下水流速

α_n は first-order mass transfer 係数 (単位は時間の逆数) で、

$$\alpha_n = B_n \frac{D_{e,n}}{R_n d^2} \quad (13)$$

ここで

B_n は幾何形状係数

$D_{e,n}$ は immobile zone n の実効拡散係数

R_n は immobile zone n の遅延係数

d は immobile zone n の中心から端までの距離

一般的に、もし Damkohler 数がすべての immobile zone n で 10^{-2} 以下であれば、そのとき immobile zone n への拡散は、遅すぎて物質移行に重要な作用をおよぼさない。これらの状況下では、破過曲線は単一空隙のようなふるまいを示すだろう。Damkohler 数が 100 以上では、拡散は移流に比べて素早く行われ、亀裂/マトリクスシステムは平衡状態と考えられる ((8)式が適用できる)。これらの状況下では、破過曲線は再び単一空隙のようなふるまいを示すだろう。Damkohler 数が $10^{-2} \sim 100$ の間では、拡散の時間スケールは、移流の時間スケールとほぼ等しく、破過曲線は多重空隙のようなふるまいを示すだろう。Damkohler 数は、特別に大きいスケールのトレーサー試験 (非常に多い流量を必要とする) が immobile zone の影響を受けるかどうかを表すことができることに注意が必要である。これはより現実的な水理条件下で重要である。

4.4 他の関連研究

前節で、亀裂中の物質遅延プロセスに関連した主要な進行中の研究について議論したが、最近のすべての完了した調査 (と進行中の研究) を示していない。例えば、スペインの El Berrocal 計画は、花崗岩環境の天然状態下での放射性核種移行を研究するための国際的な協力であった。ナチュラルアナログ研究 (e.g., Heath, 1992) に加えて、トレーサー試験もまたこのサイトで実施された (e.g., Guimera, 1997)。この計画の研究は 1995 年に

終了し、最終的な報告は1996年にされた(Enresa,1996)。

亀裂システムの物質遅延についての別の重要な研究は、日本の釜石鉱山で現在実施されている研究である(内田、1997)。しかしながら、これは PNC の計画であるため、この研究をここで議論する必要はない。

5. 概要と結論

この章では、本報告書で与えられた情報から、概要といくつかの結論を表す。5.1 節では最初に、キープロセスと亀裂媒体中の物質遅延を支配するパラメータを要約する。これらプロセスをモデル化する根本的な難しさと試みは、5.2 節で示される。5.3 節は、これらの試みの手順と亀裂システムでの物質の移行と遅延の手法を簡単に説明する。

5.1 プロセスとパラメータの要約

亀裂媒体中の物質遅延は、2つの主要なプロセスに支配されている：亀裂中を流れる水に近接する“immobile zone”への拡散：物質の接触に伴う固相表面上への収着。典型的に考えられた immobile zone は、亀裂のまわりの岩石マトリクスである。つまり、亀裂から岩石マトリクス結晶間の微小割れ目システムへの物質拡散である。これはマトリクス拡散と呼ばれる。マトリクス拡散による遅延の量は、場所あるいは時間によらず一定しないで、むしろ、時間とともに増加が見られる。これは、溶質がマトリクスに浸透可能な深度は時間とともに増加するために、溶質と反応可能なマトリクスの体積は増加する。しかしながら、いくつかのシステムで、マトリクスに物質が浸透する深度は、亀裂充填物およびまたは亀裂に直接接する変質岩の領域によって制限されることに注意すべきである。

物質移行に関するほとんどの研究はマトリクス拡散に注目しているが、与えられた亀裂ネットワークの範囲内で、流動水に接するさらなる種類の immobile zone (例えば空隙の端、停滞した狭い開口領域、亀裂充填物) が存在しそうである。ここでは物質がいろいろな量や範囲を拡散(移流)可能である。事実、亀裂表面は、亀裂表面の相互作用(すなわち表面上への収着)を、異なる immobile zone の相互作用のように簡単にモデル化できるような、ある種類の immobile zone のように図化される。これらの付加的な拡散プロセスは、物質移行の特別な遅延効果を持つことができる。immobile zone は、物質が溶存する(移流に寄与する空隙率に比べて)ための大きな容量を持つため、もし物質が immobile zone 内で固相と相互作用(収着)するならば、この容量は非常に増大する可能性がある。

亀裂媒体中の物質移行を支配するプロセスの定量化は、難しい。それは特に、次の項目の定量化に起因している。

- ・亀裂ネットワークを伝播する移行経路の性質・幾何形状
- ・移行経路に沿った immobile zone の拡散と収着の特性

物質遅延における移行経路の性質と幾何形状の影響は典型的に、岩石あるいは流動水の単位体積あたりのマトリクス拡散あるいは収着が可能な亀裂表面積である specific surface area によってパラメータ化される。これはシステムの亀裂幾何形状(例えば連結性、開口幅)と流れ場両方の関数である。specific surface area の意味は、多重 immobile zone を考慮する場合、拡散プロセスのモデル化とともに、多重 specific area (immobile zone のさまざまな種類の1つ)が実際には存在するために複雑になる。

主要な遅延メカニズムは、このパラメータに支配されているために、亀裂システムにおける物質移行の予想を行うためのパラメータの定量化は重要である。多くの努力がこのパラメータを理解するために行われているが、不運にも、定量化は非常に難しい。さまざまな計画が最近、 $(a_r L)/q$ と定義される”F 数“の定量化に注目している。ここで a_r は specific surface area (岩石体積と関連した)、 L は移行経路の長さ、 q はダルシー流速である。物質遅延の程度はこの値の増加に伴って増加するため、この比は、”transport resistance“のように考えることができる。

亀裂媒体中の物質遅延におけるマトリクス拡散と収着の影響を定量化するために、移行経路に沿った immobile zone の拡散係数と分配係数を定量化することがまた必要になる。研究所とフィールドの両方でこれらの性質を定量化するためのたくさんの研究が行われ、継続されている。しかしながらほとんどの実際のシステムでは、移行経路に沿ったさまざまなこれらゾーンの性質(specific surface area、拡散係数、空隙率、分配係数)とともに、多重のタイプの immobile zone が存在することから、不均質性が高いと指摘することは重要である。

5.2 物質遅延プロセスの定量化における現在の試み

一般に、亀裂媒体中の物質遅延を支配する基本プロセスはよく理解されている。つまり、一般的なフィールドトレーサー試験における最近の経験は、実験結果を説明するための新しいプロセスの必要性を生じていない。しかしながら、亀裂システム中の物質移行の正確で長期的な予想が現在可能であ

ることを意味していない。プロセスの基礎を理解不足のために難しいのではなく、むしろ、大きいスケールの亀裂ネットワークシステムにおける実際的な複雑さが与えられたとき、プロセスを支配するパラメータを保守的に定量化することが難しいためである。

この難しさは、本質的に2つの関連した問題から生じる：

- ・本質的に、長期間の性能評価に適用するには、フィールドと研究所での実験の時間・距離のスケールは典型的に非常に小さい。
- ・実際のシステムは、地下の水理システムと、移行経路に沿った物質遅延を支配する特性の両方に関連して不均質性が高い。この不均質性の適切な特性調査と表現（特に長距離の移行）は難しい。

これらの難しさのために、小さいスケールからより大きいスケールまで、試験の結果を推定すること（すなわち、鍵となるパラメータを得ること）は、不適當であるだろう。いくつかのシステムで、局所的なスケールの不均質性（例えば非常に多様な性質を伴った多重 immobile zone）のために、平均“実効”値を使って鍵となるプロセスを表現することは、適當ではないだろう。さらに、たとえそれらのシステムが、平均化または簡単な法則によって小さいスケールの不均質性を扱うことができたとしても、大きいスケールの不均質性を表すにはより洗練された手法が必要となる。重要な問題は、システムを通して“速い経路”（例えば速い地下水流速と小さい specific surface area を伴う移行経路）を適切に表現でき、高度に不均質なシステムにおいて“実効”パラメータを不適切に定義することを通して“速い経路”を取り除くことはできないということを実証することである。

これは例えば、F 数の項によって物質移行を説明するなど（specific surface area よりむしろ）の結果の1つであり、これは互いに独立した不均質な移行経路での a_r と q の平均化は、 a_r/q 比の平均化とは違う結果を生じるだろう。いくつかのシステムで、移行経路に沿った多様性をはっきりと示すことが必要となるであろう（例えば、亀裂ネットワークモデルでのセグメントの F 数に局所的な値を与えることによって）。

比較的大きなスケール（すなわちネットワークスケール）のトレーサー試験の多くは、これら問題点に向けるために現在行われている。しかしながら、現実的でない（大きい）流量がこの試験で使われているために、鍵となる遅延を考慮した情報が得られない（すなわち試験の Damkohler 数がとても小さい）。

さらに、鍵となるパラメータのサイト固有の特性(例えば specific surface area)は、あるサイトから他のサイトへの結果の変換を難しくするようにみえる。

これらの難しさは、複雑な亀裂システムの性能評価における確率的な不連続亀裂ネットワークモデル化手法の使用を支持する傾向がある。この手法は、上記で議論された難しさと試みに取り組むことに適している。なぜなら、亀裂ネットワークを伝播する水理と物質遅延特性の多様性を明確に示すことが可能なため、システムを移行する“速い経路”が存在する可能性を十分保守的に証明できる。Golderが推薦する手法は、以下に手短かに説明される。

5.3 亀裂媒体中の物質移行モデルの確率的手法

PNCはGolder Associatesによって開発されたFracManソフトウェアシステムを使って、亀裂システムを解析するための確率的モデル化手法を長期間使用している。この手法は現在、亀裂媒体中の物質遅延プロセスのより現実的なモデルに拡張されている。次の5.3.1節は、亀裂ネットワークを伝播する物質移行のモデル化における、確率的な亀裂ネットワークを発生するFracManを使った確率的手法の手短な概要と、このネットワークにおける水理と物質移行の解析を行うためのPAWorks(Golder,1998)を示す。5.3.2節では、物質遅延のモデル化するPAWorksによって必要とされる入力パラメータについて明確に議論する。

5.3.1 FracMan/PAWorksモデル化システム

PAWorksはGolder(1998)で詳細に説明された。FracMan/PAWorksシステムの鍵となる外観は以下のように要約される。

FracMan/PAWorksモデル化システムは次の要素で構成される。

- ・FracMan:3次元亀裂パターンの確率的シミュレーション
- ・PAWorks:不連続亀裂ネットワークにおける移行経路の解析。PAWorksは4つの副構成要素からなる。

⇒Genpipe/Edpipe: FracManをパイプネットワーク(連結亀裂トレース)に変換する。ユーザーに要素のリファイン、境界条件の修正、材料特性の調整を許可する。

⇒MAFIC:有限要素水理解

⇒PAW: MAFIC 水理解を読み込み、パイプネットワーク幾何形状、ユーザー一定義のソース(湧き出し)とシンク(吸い込み)間の経路を抽出する。

⇒LTG:PAW で発生したパイプネットワークにおける物質移行式のラプラス変換ガラーキン解

PAW によって抽出された移行経路は、パイプセグメントのネットワークで構成されている。物質移行に関連して、それぞれのパイプセグメントは次のように定義される。

- ・開口幅
- ・長さ
- ・地下水流速
- ・交差部(水理)面積
- ・反応表面積(マトリクス拡散のため)

反応表面積(SA_r)は次のように計算される。

$$SA_r = 2 \left(a_c + b_c \frac{C}{T} \right) L \quad (14)$$

ここで C はパイプ伝導率、 T はパイプ透水量係数、 L はセグメント長さ、 a_c と b_c はチャンネリング効果を評価するための流れ幅(C/T)の調整に使われるユーザー一定義ファクターである。LTG は、移流・分散・表面収着・複合 immobile zone(マトリクスと停滞水)への拡散を評価することより、パイプネットワークを伝播する物質移行をシミュレートする。反応表面積はマトリクス拡散の領域を支配する。質量はまた、亀裂の流れのない部分(単位パイプ長さあたりの拡散面積は、開口幅の2倍と等しい)において停滞水 immobile zone に拡散が可能である。

PAW によって示された入力に加えて、LTG は以下の情報を必要とする。

- ・それぞれの immobile zone の空隙率・曲折率・密度・最大厚さ
- ・それぞれの元素の水中での拡散係数
- ・それぞれの immobile zone における、それぞれの元素の分配係数

5.3.2 LTG への物質遅延入力パラメータの議論

上記の議論で、PAWorks は、物質が移行できる連結亀裂ネットワークを

表すパイプネットワークを作り出した。このネットワークは亀裂パターンの確率的な発生 (FracMan によって作り出される) を基にしているために、反応表面積だけでなく、ネットワークの移流物質移行特性の不均質性質 (速度、流れ面積) も明白に示されて、LTG に入力される。

LTG は、3章と4章で議論したように、“specific surface area”への拡散に利用できる immobile zone の表面積をグローバルな値としてパラメータ化しないことに注目するべきである。これは、水理システムの幾何形状は、パイプネットワークの性質によって明白に示されるためである。つまり、拡散に利用できる表面積は、パイプネットワークのそれぞれのセグメントを PAW によって直接計算される。式 (14) に見られるように、この“反応表面積”は2つのユーザー定義“チャンネルングファクター”(a_c と b_c) を含んでいる。“チャンネルングファクター”は、流れが不均質で亀裂内でチャンネルを生じる事実を説明するために使われる。つまり実効反応幅は、実際の流れ幅 (C/T) とは少し異なるだろう。典型的には実効的な反応幅は流れ幅より小さいと予測される。しかしながらこれらの状況は、実効幅が流れ幅より大きいときもまた適用されるだろう (例えばパイプセグメントが、水理的な亀裂の多重性を伴う亀裂ゾーンを表すとき)。

チャンネルングファクターの定量化は難しいと思われる。しかしながら、さまざまの進行中の研究が4章に示されていて、亀裂表面は、トレーサー試験が局所的なスケールのこのいくつかのパラメータ幅を決定した後に直接解析される。

LTG への入力に必要で残っているものは、他のモデル化手法へも必要なものと同じである。

- ・空隙率と拡散係数。前節で議論されたように、多くの空隙率と拡散係数データが文献として存在する。Ohlsson and Neretnieks(1995)は、1995年までに行われた調査から利用可能なデータを示した。Table2(3.6節)はこれまでの性能評価で使用された値の要約である。LTGでは、実効拡散係数は、水中での拡散係数、曲折率、空隙率の合計として計算される。
- ・分配係数。データのほとんどはまた、多様な岩石タイプについての分配係数が存在する。Table3(3.6節)は、これまでの性能評価で使用された値の要約である。しかしながら、研究室の測定に利用するには注意しなければならない。なぜなら研究所で破碎した岩石を用いて求めた K_d 値を intact

rock へ適用する際にいくつかの疑問があることに注意が必要である (Valkiainen, 1992)。そのような値を使用するとき、例えば、利用できる表面積の違いを見積もって研究室で求められる K_d が低下されるときは、適用できると思われる (Enresa, 1997)。

- immobile zone の最大厚さ。この入力は、拡散が immobile zone に浸透可能な深度を反映している (例えばマトリクス)。たとえいくつかの研究が物質浸透深度に制限が現れないと示しても (e.g., Birgersson and Neretnieks, 1990)、他の研究 (e.g., Heath, 1992) は、多くのシステムにおいて、マトリクス拡散は、亀裂充填物およびまたは亀裂近傍の変質岩において空間的な制限領域を生じると指摘している。Table 2 に見られるように、これまでの性能評価のほとんどは岩石内部数 cm に拡散を制限している。

6. 参考文献

Abelin, H., Neretnieks, I., Tunbrant, S. and Moreno, L., 1985, *Final Report of the Migration in a Single Fracture-Experimental Results and Evaluation*, Report IR 85-03, Stripa Project, Stockholm, 1985.

Alexander, W., McKinley, I., MacKenzie, A. and Scott, R., 1990, *Verification of Matrix Diffusion In Granite by Means of Natural Decay Series Disequilibria*, Materials Research Society Symposium Proceedings, Volume 176, Scientific Basis for Nuclear Waste Management, XIII, Boston, November 1989.

Alexander, W., Frieg, B., Ota, K. and Bossart, P., 1996, *The RRP Project: Investigation of Radionuclide Retardation In the Host Rock*, Nagra Bulletin, No.27, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Wettingen, Switzerland, June 1996.

Alexander, W., McKinley, I., Frick, U. and Ota, K., 1997, *The Grimsel Field Tracer Migration Experiment - What Have We Achieved After a Decade of Intensive Work?*, Field Tracer Experiments: Role In the Prediction of Radionuclide Migration, OECD Proceedings of an NEA/EC GEOTRAP Workshop, Cologne, Germany, August 1996, Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-Operation and Development.

Andersson, P., 1995, *Compilation of Tracer Tests In Fractured Rock*, SKB Progress Report 25-95-05, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, January, 1995.

Andersson, P., Nordqvist, R. and Jönsson, S., 1997, *TRUE 1st Stage Tracer Test Program. Experimental Data and Preliminary Evaluation of the TRUE-1 Dipole Tracer Tests DP1-DP4*, Progress Report HRL-97-13, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm.

Andersson, J., Elert, M., Hermansson, L., Moreno, J., Gylling, B., and Selroos, J. -O., 1998, *Derivation and Treatment of the Flow Wetted Surface and Other Geosphere Parameters in the Models FARF31 and COMP23 for Use in Safety Assessment*, in preparation, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm.

Bear, J., Tsang, C., and de Marsily, G., (eds.), 1993, Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock, Academic Press.

Berkowitz, B. and Zhou, J., 1996, *Reactive Solute Transport in a Single Fracture*, Water Resour. Res., 32, pp.901-913.

Birgersson, L. and Neretnieks, I., 1990, *Diffusion in the Matrix of Granitic Rock: Field Test in the Stripa Mine*, Water Resour. Res., 11, pp.2833-2842.

Comans, R. and Hockley, D., 1992, *Kinetics of Cesium Sorption on Illite*, Geochim. Cosmochim. Acta, Vol.53, No.3, pp.1157-1164.

Cui, D. and Eriksen, T., 1996, *On the Sorption of Co and Cs on Stripa Granite Fracture-Filling Material*, submitted for publication, Radiochim. Acta, 1996.

Davison, C., 1997, *Using Tracer Tests to Assess the Large Scale Solute Transport Properties of Fracture Zones in Granite*, presented at the Geological Society of America's 1997 Annual Meeting in Salt Lake City(GSA97).

Dverstorp, B., Mendes, B., Pereira, A., and Sundstrom, B., 1998, *Data Reduction for Radionuclide Transport Codes Used in Performance Assessments: An Example of Simplification Errors*, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm, unpublished manuscript.

Elert, M., 1997, *Retention Mechanisms and the Flow Wetted Surface -*

Implications for Safety Analysis, SKB Technical Report 97-01, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, February, 1997.

Elert, M., Neretnieks, I., Kjellbert, N., and Strom, A., 1992, *Description Of The Transport Mechanisms And Pathways In The Far Field Of A KBS-3 Type Repository*, SKB Technical Report 92-09, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, April 1992.

Enresa, 1996, *El Berrocal Project: Characterization and Validation of Natural Radionuclide Migration Processes Under Real Conditions on the Fissured Granitic Environment*, Empresa Nacional Residuos Radioactivos, S.A., European Commission Contract No.F12W/CT91/0080, four volumes.

Enresa, 1997, *Almacenamiento Geológico Profundo: Evaluación del Comportamiento y de la Seguridad de un Almacenamiento Profundo en Granito*, Empresa Nacional Residuos Radioactivos, S.A., March 1997 (in Spanish).

Frost, L. and Everitt, R., 1996, *Excavation Damage Zone Tracer Experiment in the floor of the Room 415 Test Tunnel*, AECL-11311, COG-95-171, Atomic Energy of Canada Limited.

Frost, L., Davison, C., Vandergraaf, T., Scheier, N., and Kozak, E., 1997, *Field Tracer Transport Experiments at the Site of Canada's Underground Research Laboratory, Field Tracer Experiments: Role in the Prediction of Radionuclide Migration*, OECD Proceedings of an NEA/EC GEOTRAP Workshop, Cologne, Germany, August 1996, Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-Operation and Development.

Golder Associates, 1997, *RIP: An Integrated Probabilistic Simulator for Environmental Systems, Theory Manual and User's Guide*, August 1997.

Golder Associates, 1998, PAWorks: *Pathways Analysis and Solute Transport, User Documentation*, Version 1.5, March 1998.

Guimerà, J., García-Gutiérrez, M., Yllera, A., Carrera, J., Hernández-Benítez, A. and Saaltink, M., 1997, *Design, Performance and Interpretation of Tracer Tests at El Berrocal Site (Spain)*, Field Tracer Experiments: Role in the Prediction of Radionuclide Migration, OECD Proceedings of an NEA/EC GEOTRAP Workshop, Cologne, Germany, August 1996, Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-Operation and Development.

Gustafsson, E., Nordqvist, R., Korkealaakso, J. and Galarza, G., 1997, *Designing a large Scale Combined Pumping and Tracer Test in a Fracture Zone at Palmottu, Finland*, Field Tracer Experiments: Role in the Prediction of Radionuclide Migration, OECD Proceedings of an NEA/EC GEOTRAP Workshop, Cologne, Germany, August 1996, Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-Operation and Development.

Hadermann, J. and Heer, W., 1996, *The Grimsel (Switzerland) Migration Experiment: Integrating Field Experiments, Laboratory Investigations and Modeling*, J. Cont. Hydrol., 21(1996), pp.87-100.

Haggerty, R. and Gorelick, S., 1995, *Multiple-Rate Mass Transfer for Modeling Diffusion and Surface Reactions in Media with Pore-Scale Heterogeneity*, Water Resour. Res., 31, pp.2383-2400.

Hartikainen, K., Hautojärvi, A., Pietarila, H., and Timonen, J., 1995, *Diffusion Measurements on Crystalline Rock Matrix*, Materials Research Society Symposium Proceedings, Volume 353, Scientific Basis for Nuclear Waste Management, XVIII, Kyoto, Japan, October 1994.

Hartikainen J., Hartikainen, K., Hautojärvi, A., Kuoppamäki, K., and Timonen, J., 1996, *Helium Gas Methods for Rock Characterization and Matrix*

Diffusion, Posiva Oy, Posiva-96-22, Helsinki, Finland.

Heath, M., Montoto, M., Rodrigues Rey, A., Ruiz de Argadona, V., and Menendez, B., 1992, *Rock Matrix Diffusion as a Mechanism of Radionuclide Retardation: A Natural Analogue Study of El Berrocal Granite, Spain*, Radiochimica-Acta, V58-59(pt.2), pp.379-384.

Hpltt, R., 1997, *Conceptual Model for Transport Processes in the Culebra Dolomite Member, Rustler Formation*, Sandia National Laboratories Report SAND97-0194, August 1997.

Hölttä P., Hakanen M., Hautojärvi, A., and Poteri, A., 1997a, *Fracture Flow and Transport Experiments in Laboratory Scale: Testing Experimental and Modeling Techniques Using a Small Block*, Posiva Oy, Report POSIVA-97-02, Helsinki, Finland.

Hölttä P., Siitari-Kauppi, M., Hakanen M., Huitti, T., Hautojärvi, A., and Lindberg, A., 1997b, *Radionuclide Transport and Retardation in Rock Fracture and Crushed Rock Column Experiments*, J. Cont. Hydrol., 26(1997), pp.135-145.

Johansson H., Byegård J., Skarnemark G and Skålmark M., 1997, *Matrix Diffusion in Some Alkali- and Alkaline Earth-Metals in Granitic Rock*, Materials Research Society Symposium Proceedings, Volume 465, Scientific Basis for Nuclear Waste Management, XX, Boston, December 1996.

Johns, R. and Roberts, P., 1991, *A Solute Transport Model for Channelized Flow in a Fracture*, Water Resour. Res., 27, pp.1797-1808.

Jakob, A., Hadermann, J. and Roesel, F., 1989, *Radionuclide Chain Transport with Matrix Diffusion and Non-Linear Sorption*, PSI Report 54, Nagra Technical Report NTB 90-13, Wetingen, Switzerland.

JYT, 1997, *Publicly Administrated Nuclear Waste Management Research Program 1994-1996. Final Report*, Report22/1997, Ministry of Trade and Industry, Finland.

Koskinen, L., Poteri, A., Kattilakoski, E., and Laitinen, M., 1998, *Flow and Transport Modeling at the Romuvaara Site*, Draft Report to Posiva Oy, Helsinki, Finland.

Kozak, E., 1998, *Personal communication to R.Kossik*, January 29, 1998.

Mazurek, M., Bossart, P., and Eliasson, T., 1996, *Classification and Characterization of Water-Conducting Feature at Äspö: Results of Investigations on the Outcrop Scale*, Äspö Hard Rock Laboratory International Cooperation Report ICR97-01, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm.

Meigs, L., Beauheim, R., McCord, J., Tsang, Y., and Haggerty, R., 1997, *Design, Modeling, and Current Interpretations of the H-19 and H-11 Tracer Tests at the WIPP Site*, Field Tracer Experiments: Role in the Prediction of Radionuclide Migration, OECD Proceedings of an NEA/EC GEOTRAP Workshop, Cologne, Germany, August 1996, Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-Operation and Development.

Miller, W., Alexander, R., Chapman, N, McKinley, I., and Smellie, J., 1994, Natural Analogue Studies in the Geological Disposal of Radioactive Wastes, Studies in Environmental Science 57, Elsevier Science, Amsterdam.

Moreno, L., Gylling, B. and Neretnieks, I., 1995, *Solute Transport in Fractured Media - The Important Mechanisms for Performance Assessment*, SKB Technical Report 95-11, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, June 1995.

Nagra, 1994, *Kristallin-I Safety Assessment Report*, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Wetingen, Switzerland, July 1994.

Neretnieks, I., 1980, *Diffusion in the Rock Matrix: An Important Factor in Radionuclide Retardation?*, J.Geophys.Res., Vol185, No B8, pp.4379-4397.

Neretnieks, I., Eriksen, T. and Tahtinen, P., 1982, *Tracer Movement in a Single Fissure in Granitic Rock: Some Experimental Results and their Interpretation*, Water Resour.Res., 18, pp.849-858.

Neretnieks, I., 1995, *Nuclear Waste Repositories in Crystalline Rock - An Overview of Flow and Nuclide Transport Mechanisms*, Materials Research Society Symposium Proceedings, Volume 353, Scientific Basis for Nuclear Waste Management, XVIII, Kyoto, Japan, October 1994.

Norman, S. and Kjellbert, N., 1990, *FAR31 - A Far Field Radionuclide Migration Code for Use with the PROPER Package*, SKB Technical Report 90-01, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm.

OECD, 1997, Field Tracer Experiments: Role in the Prediction of Radionuclide Migration, OECD Proceedings of an NEA/EC GEOTRAP Workshop, Cologne, Germany, August 1996, Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-Operation and Development.

Ohlsson, Y. and Neretnieks, I., 1995, *Literature Survey of Matrix Diffusion Theory and of Experiments and Data Including Natural Analogues*, SKB Technical Report 95-12, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, August, 1995.

Olsson, O. (ed) et al., 1997, *TRUE Block Scale Project. Update of the Structural Model Characterization Data from KA2563A, KA3510 and KA2511A*, Progress Report HRL-97-21, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.,

Stockholm.

Olsson, O. and Winberg, A., 1997, *The Äspö TRUE Experiments, Field Tracer Experiments: Role in the Prediction of Radionuclide Migration*, OECD Proceedings of an NEA/EC GEOTRAP Workshop, Cologne, Germany, August 1996, Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-Operation and Development.

PNC, 1992, *Research and Development on Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste, First Progress Report*, PNC TN1410 93-059, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, Tokyo.

Poteri, A. and Laitinen, M., 1997, *Fracture Network Model of the Groundwater Flow in the Romuvaara Site*, Posiva Oy, Report POSIVA-96-26, Helsinki, Finland.

Rasilainen, K., 1989, *Installation and Testing of the Migration Model FTRANS*, Work Report 89-24, TVO/Safety and Technology, Helsinki (in Finnish).

Rasilainen, K., Suksi, J., Hakanen, M. and Olin, M., 1995, *Sorption Aspects for In Situ Matrix Diffusion Modeling at Palmottu Natural Analogue Site SW Finland*, Materials Research Society Symposium Proceedings, Volume 353, Scientific Basis for Nuclear Waste Management, XVIII, Kyoto, Japan, October 1994.

Schneider, J., Zuidema, P., Smith, P., Gribi, P., and Niemeyer, M., 1996, *Recent Developments in the Safety Assessment of a Repository for High-Level Radioactive Waste in the Crystalline Basement of Northern Switzerland*, Proceedings of the International Conference on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, September 16-19, 1996, Winnipeg, Canada, Canadian Nuclear Society.

Selroos, J. and Cvetkovic, V., 1996, *On the Characterization of Retention Mechanisms in Rock Fractures*, SKB Technical Report 96-20, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, December 1996.

Selroos, J. and Cvetkovic, V., 1998, *Scoping Calculations of Tests with Sorbing Tracers at the TRUE-1 Site*, in preparation, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm.

Siitari-Kauppi M., Lindberg A., Hellmuth K.-H., Timonen J., Hartikainen J., and Hartikainen K., 1997, *The Effect of Microscale Pore Structure in Matrix Diffusion - a Site-Specific Study on Tonalite*, J. Cont. Hydrol., 26(1997), pp.147-58

Simbierowicz, P. and Olin, M., 1997, *Investigation of the Influence of Heterogeneous Porosity on Matrix Diffusion: A Novel Approach Using Adaptive Tree-Multigrid Technique and Real Porosity Data*, Materials Research Society Symposium Proceedings, Volume 465, Scientific Basis for Nuclear Waste Management, XX, Boston, December 1996.

SKB, 1992, SKB 91: *Final Disposal of Spent Nuclear Fuel, Importance of the Bedrock for Safety*, SKB Technical Report 92-20, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, May 1992.

SKB, 1997, *Äspö Hard Rock Laboratory: Annual Report 1996*, SKB Technical Report 97-08, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm.

SKI, 1996, SKI SITE-94: *Deep Repository Performance Assessment Project*, SKI Report 96:36, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm.

Smith, L. and Schwartz, F., 1993, *Solute Transport Through Fracture Networks*, in Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock, Bear, J., Tsang, C., and de Marsily, G., (eds.), Academic Press.

Smith, P. and Degueudre, C., 1993, *Colloid-Facilitated Transport of Radionuclides Through Fractured Media*, J. Cont. Hydrol., 13(1993), pp.143-166.

Suksi, J., Saarinen, L., Ruseeniemi, T., Rasilainen, K. and Siitari-Kauppi, M., 1995, *U Series Concentration Distributions Around Rock Fracture - Qualitative Indication of Matrix Diffusion*, Materials Research Society Symposium Proceedings, Volume 353, Scientific Basis for Nuclear Waste Management, XVIII, Kyoto, Japan, October 1994.

Suksi, J. and Rasilainen, K., 1997, *Reconciliation of Experimental and Modeling Concepts in a Natural Analogue of Radionuclide Migration*, Materials Research Society Symposium Proceedings, Volume 465, Scientific Basis for Nuclear Waste Management, XX, Boston, December 1996.

Tsang, Y and Tsang, C., 1987, *Channel Model of Flow Through Fractured Media*, Water Resour. Res., 23, pp.467-479.

Uchida, M., Umeki, H. and Yoshida, H., 1997, *A Tracer Experiment at the Kamaishi Mine as Part of an Integrated Approach to Geosphere Transport Modeling*, Field Tracer Experiments: Role in the Prediction of Radionuclide Migration, OECD Proceedings of an NEA/EC GEOTRAP Workshop, Cologne, Germany, August 1996, Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-Operation and Development.

Valkiainen, M., 1992, *Diffusion in the Rock Matrix - A Review of Laboratory Tests and Field Studies*, Report YJT-92-04, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Helsinki.

Vandergraaf, T., and Abry D., 1982, *Radionuclide Sorption on Drill Core Material from the Canadian Shield*, Nucl. Technol., 57, pp.399-412.

Vandergraaf, T., Drew, D., Kumata, M. and Nakayama, S., 1996, *Design, Construction and Operation of an Underground Facility to Study the Migration of Radioisotopes in Natural Fractures Under In Situ Conditions*, Extended Abstracts of the 4th International Conference on Nuclear and Radiochemistry (F. David and J. Krupka, eds.), St. Malo, France, September 1996.

Vieno, T., Hautajavi, A., Koskinen, L. and Nordman, H., 1992, *TVO-92 Safety Analysis of Spent Fuel Disposal*, Report YTJ-92-33E, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Helsinki.

Vieno, T. and Nordman, H., 1999, *Safety Assessment of Spent fuel Disposal in Hastholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara*. TILA-99, Posiva Oy, to be published in 1999, Helsinki, Finland.

Vilks, P., Frost, L., and Bachinski, D., 1997, *Field-Scale Colloid Migration Experiments in a Granite Fracture*, J. Cont. Hydrol., 26(1997), pp.203-214.

Wels, C. and Smith, L., 1994, *Retardation of Sorbing in Fractured Media*, Water Resour. Res., 30, pp.2574-2563.

Wels, C., Smith, L. and Vandergraaf, T., 1996, *Influence of Surface Area on Transport of Sorbing Solutes in Fractures: An Experimental Analysis*, Water Resour. Res., 32, pp.1943-1954.

Winberg, A.(ed.) et al., 1996, *Descriptive Structural-Hydraulic Models on Block and Detailed Scales of the TRUE-1 Site. First TRUE Stage - Tracer Retention Understanding Experiments*. Äspö Hard Rock Laboratory Internatinal Cooperation Report ICR 96-04, Swedish Nuclear Fuel and Waste Manegement Co., Stockholm.

Winberg, A., 1997, *Tracer Retention Understanding Experiments(TRUE). Test Plan for the TRUE Block Scale Experiment*, Hard Rock Laboratory

International Cooperation Report ICR 97-02, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm.

Worgan, K. and Robinson, P., 1995, *The CRYSTAL Geosphere Transport Model: Technical Documentation, Version 2.1*, SKI Report 95:55, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm.

Worman, A. and Xu, S., 1996, *Simulation of Radionuclide Migration in Crystalline Rock Under Influence of Matrix Diffusion and Sorption Kinetics: Code Development and Pre-Assessment of Migration Experiment*, SKI Report 96:22, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm.

Zuber, A. and Motyka, J., 1994, *Matrix Porosity as the Most Important Parameter of Fissured Rocks for Solute Transport as Large Scale*, J.Cont.Hydrol., 158(1994), pp.19-46.