

**Review for  
“Study on Model for Bentonite Buffer Intrusion (II)”,  
by T. Kanno and Y. Iwata,  
JNC TJ8400 2003-083, February 2004**

JNC TJ8400 2003-083 「緩衝材侵入現象モデルの検討(II)」  
(2004年2月) に対するレビュー

A Review Report  
Submitted  
to  
Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd

By

Joonhong Ahn  
Department of Nuclear Engineering  
University of California, Berkeley

January 2005

The author invites comments and would appreciate  
Being notified of any errors in the report.

Joonhong Ahn  
Department of Nuclear Engineering  
University of California, Berkeley  
Berkeley, CA 94720-1730  
USA

[ahn@nuc.berkeley.edu](mailto:ahn@nuc.berkeley.edu)

## 目次

1. はじめに .....	1
2. レビューの対象となった報告書の概要 .....	1
2.1. 平成 14 年度 JNC TJ8400 2003-026 「緩衝材侵入現象モデルの検討」 .....	1
2.2. 平成 15 年度 JNC TJ8400 2003-083 「緩衝材侵入現象モデルの検討 (II)」 .....	3
3. レビューの要点と結果.....	5
3.1. 本研究の意義.....	5
3.2. 本研究に対して指摘される潜在的問題点 .....	6
3.3. 今後必要な研究 .....	8
4. 結語.....	8



## 1. はじめに

石川島播磨重工業株式会社（以下、IHI）は、核燃料サイクル開発機構（以下、JNC）からの業務委託を受け、高レベル放射性廃棄物地層処分における緩衝材の岩盤亀裂への侵入現象のモデル化を検討し、頭記の報告書 JNC TJ8400 2003-083「緩衝材侵入現象モデルの検討（II）」（以下、報告書）をまとめた。IHI が JNC から委託した業務の中に、「専門家とのレビュー」が含まれており、カリフォルニア大学バークレー校原子力工学科（以下、UCBNE）は、IHI の求めにより報告書のレビューを行った。本文書は、そのレビュー結果を要約したものである。

## 2. レビューの対象となった報告書の概要

従来、緩衝材の岩盤亀裂内における挙動に関しては、ベントナイトに対して、性能評価上の基本物性値である膨潤圧、粘性係数、透水係数などが、評価の際必要とされる低密度領域において測定されておらず、推定値に基づく評価しか行われてこなかった。

IHI は平成 14 年度 JNC より業務委託により、この状況を改善すべく、亀裂中の緩衝材密度分布の測定値に基づくモデルの再検討を行い、JNC TJ8400 2003-026「緩衝材侵入現象モデルの検討」を 2003 年 2 月 JNC に提出した。

今回、UCBNE がレビューする報告書はその翌年度（平成 15 年度）に IHI によって継続され得られた成果を取りまとめたものであるが、深く関連しているため、平成 14 年度の報告書 JNC TJ8400 2003-026 に記載された成果とともに以下に概要を示す。

### 2.1. 平成 14 年度 JNC TJ8400 2003-026「緩衝材侵入現象モデルの検討」

○ベントナイト粘性係数を用いたモデル化：

人工バリア領域からのベントナイトの流出を解析する場合、液性限界程度の低い密度から幅広い密度領域を取り扱うことが必要となる。特に低密度領域では、ベントナイトは粘弾性体と捉えるのが妥当で、その場合、ベントナイトの粘性係数を知る必要がある。14 年度 IHI は粘性係数測定法に関する理論的整理を行い、JNC が実際に測定したベントナイト粘性係数の値と処分場で想定される条件とを比較し、JNC が粘性係数を測定した角速度の値よりもさらに 4 桁程度低い領域まで必要であることを示した。

○膨潤圧、透水係数の評価式の再検討：

小峰らの既往の研究結果を元にこれらの値を決定した。

○固相拡散係数の定式化：

初期ベントナイトが存在するコアの部分での固相拡散係数（亀裂開口幅に依存しない）、並行平板亀裂中の固相拡散係数（亀裂開口幅に依存する）、円管亀裂中の固相拡散係数（亀裂開口半径に依存する）を定式化した。平板亀裂、円管亀裂に対しては、膨潤するベントナイトと亀裂壁面での粘性抵抗を考慮し定式化された。

○安らのモデルとの関係：

UCBNE において開発されたベントナイト膨潤モデルとの理論的比較を行い、それが亀裂壁面との摩擦が無視できる自由膨潤状態に対する固相拡散モデルと等価であることを示した。

○数値解析：

円管亀裂において行われた膨潤ベントナイトの密度分布測定結果に対して、同等の体系にお

ける数値解析が行われ、測定値との比較が行われた。結果の一例を下図に示す。

コア部、円管亀裂部の双方において、顕著な相違が観察され、固相拡散係数の評価とモデルの両面からの再検討が必要であるとの結論となった。

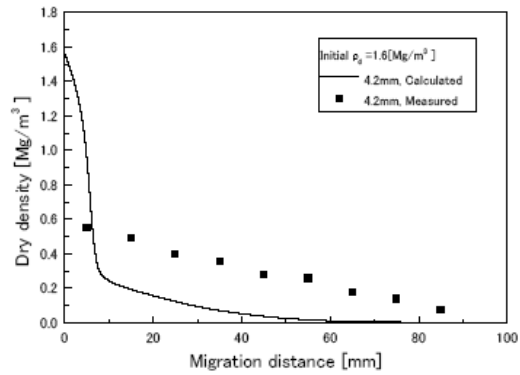


図 3.2-4 乾燥密度分布解析結果（初期乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$ 、孔径  $4.2\text{mm}$ ）

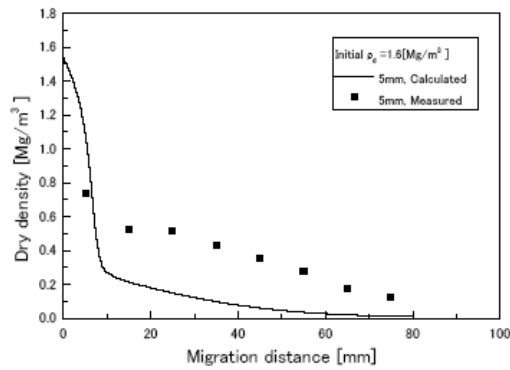


図 3.2-5 乾燥密度分布解析結果（初期乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$ 、孔径  $5\text{mm}$ ）

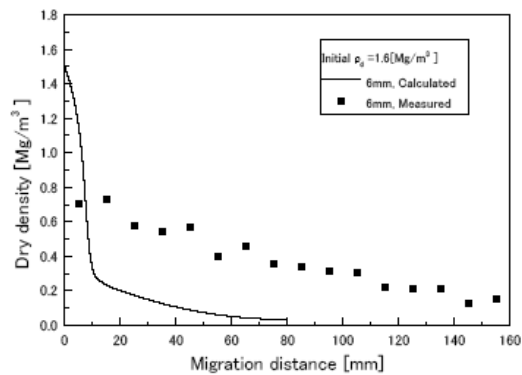


図 3.2-6 乾燥密度分布解析結果（初期乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$ 、孔径  $6\text{mm}$ ）

## 2.2. 平成 15 年度 JNC TJ8400 2003-083 「緩衝材侵入現象モデルの検討 (II)」

○粘性係数の再設定：

平成 14 年度において粘性係数と含水比のプロットからフィッティングで求めた経験式を再検討し、粘性係数がより小さく評価されるよう修正した。以下にその違いを示す。図中、中央にある中央の線が再評価で決定された線である。

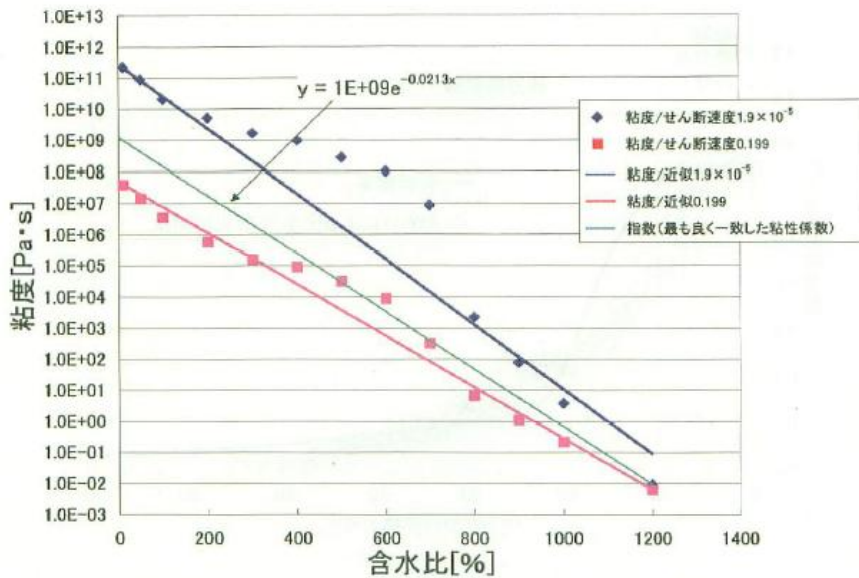


図 2.2-1 粘性係数の設定

○円管亀裂に対する数値計算：

前頁の 3 つのケースと同じ条件で、新たな粘性係数評価式を用いて行った計算結果を示す。固相拡散係数が過大評価され、実測値と比べて、ベントナイトの膨潤が速いという結果が見られる。

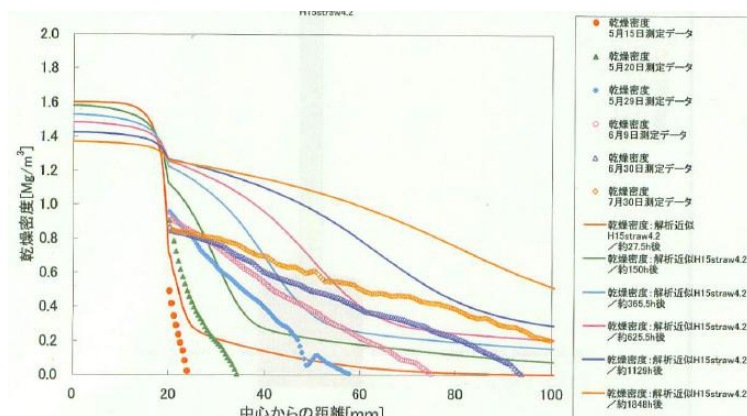


図 2.4-12 乾燥密度分布解析結果 (初期乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>、孔径 4.2mm)

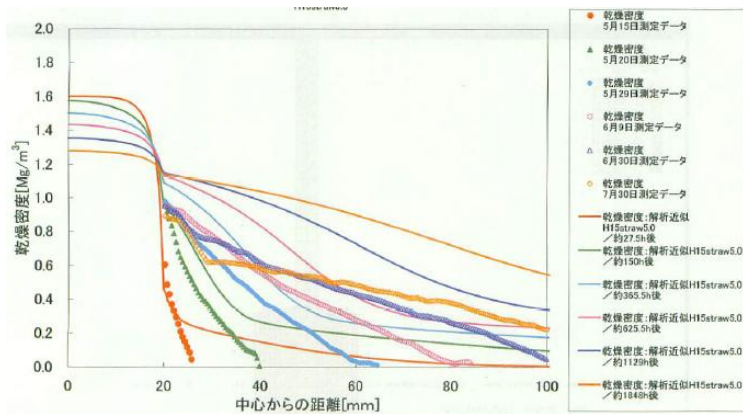


図 2.4-13 乾燥密度分布解析結果（初期乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>、孔径 5mm）

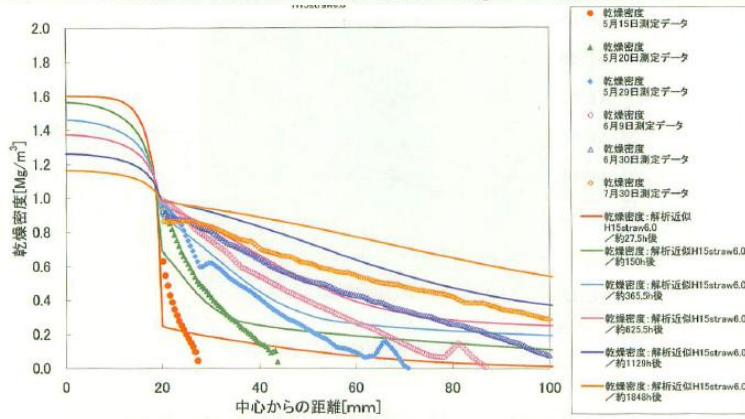


図 2.4-14 乾燥密度分布解析結果（初期乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>、孔径 6mm）

○平板亀裂に対する数値結果：

円管亀裂よりも良い一致を示しているが、コアの部分での値の差異、亀裂部での密度プロファイルの形状の差異（解析結果は上に凸、実測は下に凸）が見られる。

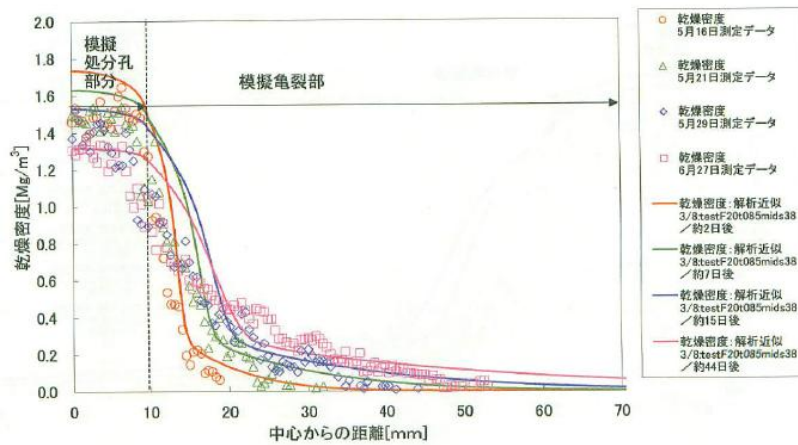


図 2.3-10 乾燥密度分布解析結果（き裂幅 0.85 mm）



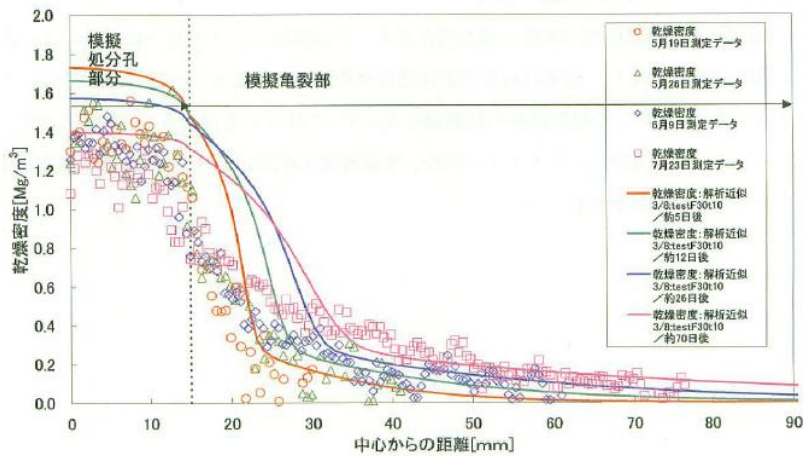


図 2.3-11 乾燥密度分布解析結果 (き裂幅 1.0 mm)

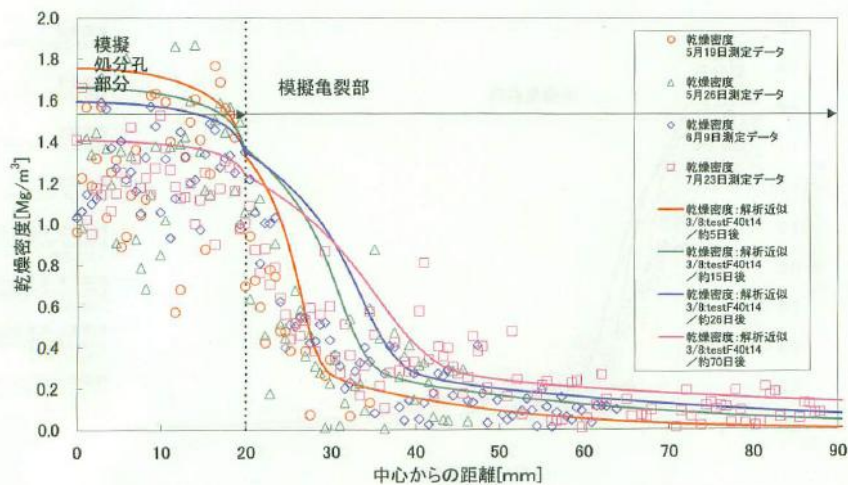


図 2.3-12 乾燥密度分布解析結果 (き裂幅 1.4 mm)

### 3. レビューの要点と結果

#### 3.1. 本研究の意義

##### ○理論面での成果

ベントナイトの膨潤のモデル化に対しては、膨潤を、(1) ベントナイト粒子の拡散と捉えてモデル化する菅野らの方法と、(2) 負圧による水の流入、あるいはボイドの拡散と捉えてモデル化した安らの方法がある。今回、菅野らはこれらのモデルが自由膨潤の場合同等であることを示した。この理論的研究成果により、お互いのモデルの数学的検証が行われたことになる。また、同時に両モデルで用いられているパラメータの間の関係が示されたことにより、数値計算上のベンチマークも可能となった。

##### ○データ面での成果

固相拡散係数の評価には、(1) 膨潤圧、透水係数と (2) ベントナイトの粘性係数を、幅広い固相率の範囲にわたり求めておく必要がある。本研究以前には、これら 2 つの量は非常に限

られた固相率の範囲における測定しかなく、得られた評価結果は第0近位の域を出ないものであった。本研究により特に困難であった粘性係数に対して、いまだ不完全とはいえ、性能評価上必要とされる固相率の範囲において、ある程度の定量的、実験的根拠の伴った評価値が得られた意義は大きい。

#### ○モデル面での成果

従来、主たる着目点が亀裂中のベントナイトの侵入距離であったため、実験的研究においてもベントナイト固相率の空間分布を測定した例は無く、より詳細なモデル、信頼性の高いモデルを構築しようとしても実験的裏づけの無い空論のそしりを免れなかった。今回の研究は、実際に測定された固相率の空間的分布とその時間的变化をモデルにより再現を試みた最初の例であり、画期的である。

#### ○性能評価への貢献

従来の経験式に依存したモデルでは適用可能な範囲が限られており、人工バリアとその周辺環境の長期にわたる経時変化に適応できない可能性がある。そのため、性能評価モデルは、より根本的な物理・化学的原理・理論に基づく **Mechanistic** なものであることが望ましい。

ベントナイトの亀裂への膨潤は複雑な現象であるが、これまでのモデルは非常に限定的な情報に基づく過度に簡略化されたものであった。実験的にベントナイト固相率の空間的・時間的变化を測定したことにより、**Mechanistic** なモデルを構築するために利用できる情報の量は飛躍的に増えた。今回のモデル開発は、実験結果と一致させるような事後の **Tuning** を排除しほぼ独立した推論に基づくものである。モデル化には多くの仮定が依然として含まれているため、今回のモデルでは実測値とそれほど良好な一致が見られているとはいえないが、仮定に基づく部分があることや実験そのものの精度を考えるとむしろ当然のことである。今後双方の開発を通じてより良い一致（よりよい物理現象の理解）に向けて努力する方向が示された意義は大きい。

### 3.2. 本研究に対して指摘される潜在的問題点

実測値と計算値の間に顕著な差異が観察されることについて、データとモデルの2つの視点から考える。

データのうち最も重要なのは、固相拡散係数を決定する透水係数、膨潤圧、ベントナイト粘性係数である。このうち、透水係数と膨潤圧は、小峰らの研究に基づき、評価式を決定し数値計算に用いている。ベントナイト粘性係数は **JNC** の測定値を極低角速度領域に外挿して得られた値である。

これらの再評価によって、固相拡散係数は、固相率との関係が大きく変更された。たとえば、亀裂部での拡散係数は下図に示すように、上に凸の関数から下に凸の関数に変更された。この変更が及ぼす効果は大きい。低密度領域では従前よりも2桁以上大きく見積もられている。一方高密度側では最大2桁程度小さく見積もられている。これら再評価された拡散係数で数値計算をすると、速く膨潤する低密度の領域が亀裂内の膨潤の先端に現れる一方、コアに近い部分の拡散は遅くなることが予想される。実際、数値結果においてはそのような結果が観察されている。

再評価前のパラメータの値そのものも確たる根拠に乏しい推定値であるので、どちらが正しいという結論を出すべきではない。現在観察される実測値と計算値の違いを小さくするひとつの方法は拡散係数の密度依存性をより正しく求めることである、という指摘ができる。

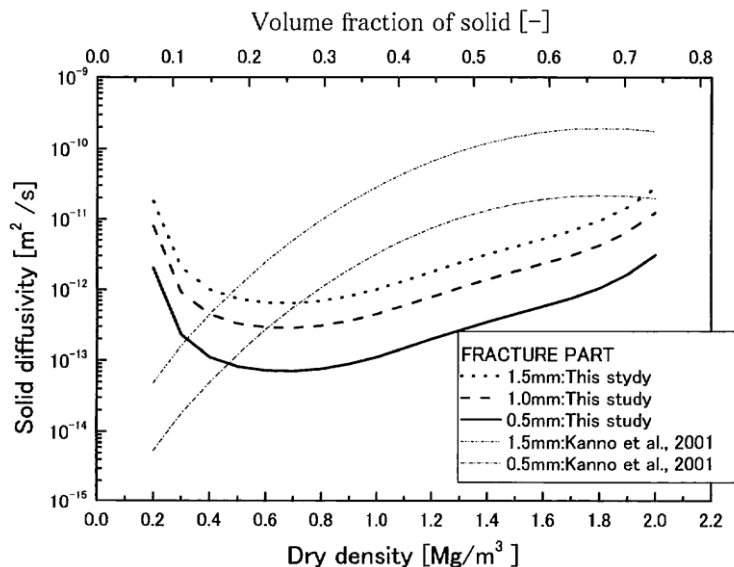


図 1.2-9 き裂部固相拡散係数の設定値

モデルの観点から実測値と計算値に差異が生じた理由を考えると、次の点が指摘できる。

まず、拡散モデルに拠っている限り、拡散開始直後から理論上は無限遠点にまでベントナイト粒子が到達することになる。そして、ある距離から先は液性限界を下回る密度になっているはずで、そこではモデルそのものが成立しない。便宜的には、液性限界点を膨潤の先端とみなして膨潤の速度を観察することになるが、厳密に考えると現在のモデルそのものが内包する矛盾である。

これに対し、安らのモデルは水（あるいはボイド）の動きを追跡しているため、膨潤の先端を明確に定義できるという点で矛盾が少ない。ただし、亀裂開口幅などの影響を考慮したモデルでないため、比較は自由膨潤の場合だけに限定される。今回の研究で求められた各種パラメータの密度依存性をボイド比依存性に読み替えて比較計算をしてみることが望まれる。

モデルに関する 2 点目は、対称性を利用した計算による誤差である。下図に示すように、コア部の拡散係数の値は再評価により、特に密度の低い部分において大きくなった。これは、コア部における拡散が深く内部に浸透することを意味する。コア部におけるベントナイト分布はすでに深部まで影響を受けている可能性がある。また、このことは、並行平板の場合に比較的一致を見るが円管の場合の一致が悪いということの一因であると推察される。

並行平板亀裂の場合、コア部の密度は測定の場合、計算値よりも小さい傾向が見られる。コア部はベントナイトの固相の量が多いため測定も正確あるはずなので、この部分の差異を詳細に検討する必要がある。たとえば、コアの初期の乾燥密度は  $1.6 \text{Mg/m}^3$  であるので、膨潤が進展するにつれ、コア部の乾燥密度はこの値よりも小さくなると思われるが、計算結果は 5 日後のケースで 1.7 を超える値になっている。この部分の説明が必要である。

モデルに関する 3 点目は、コア部のベントナイトの初期状態に関してである。実験において用意されたベントナイトが水分で飽和していない場合、ベントナイトに水が取り込まれるもうひとつのメカニズムは毛管圧である。実験条件を再検討し、それにあったモデル化を検討する必要がある。

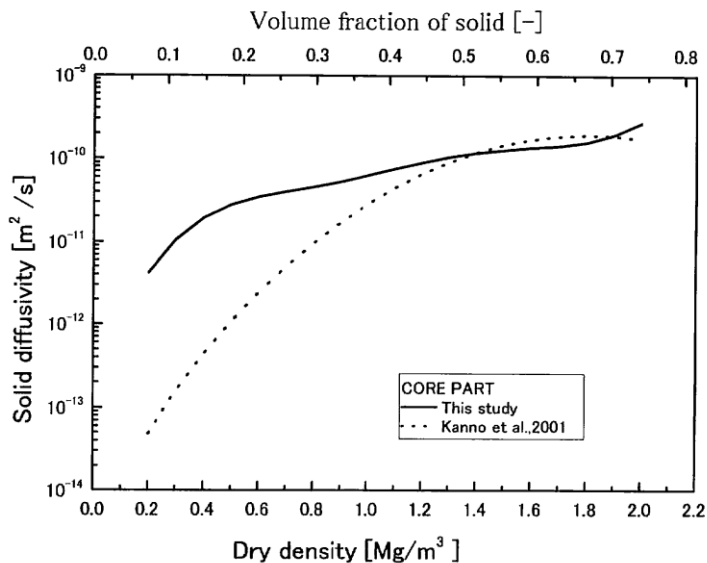


図 1.2-8 コア部固相拡散係数の設定値

### 3.3. 今後必要な研究

上記のレビューから、次のような研究が今後行われることが望ましい。

○ベンチマーク計算：

安らのモデルとの同等性が確認されたので、同じデータセットを用いて比較計算を行う。

○パラメータ測定の精度向上と測定密度領域の拡大、ベントナイト密度の空間時間分布測定の精度向上、エラーバーの確定：

各種の測定の精度を向上させる。また、測定に伴う誤差評価を確立し、シミュレーション計算との差異が有意なものかどうか判定する。

○モデルの改良：

- モデルの次元数、初期不飽和状態を考慮したモデルの高度化を行う。
- 現在確実に測定できるパラメータの範囲内でベントナイト膨潤実験を行い、対応する計算との比較を行う。
- モデルと実測の比較のケース設定を堅固にするためにパラメータの数の少ない自由膨潤状態での実験を行う。
- 次元の影響と初期不飽和の影響を排除するため、実験の体系を単純化する。(実験体系を現モデルに合わせる。)

## 4. 結語

ベントナイトは人工バリアの要であり、長期の挙動をメカニズムのレベルで理解することは処分システム全体の信頼性向上にとって重要な進歩につながる。今回の研究は、ベントナイト密度の空間的時期的変化の直接測定という画期的な実験結果を元に行った最初のモデル化研究

であり、重要である。

本レビューにおいていくつか将来への課題が指摘されたが、これらは膨潤のメカニズムをよりよく理解するためにモデル開発側で行える（行うべき）ことであり、これと呼応して測定が行われることが望ましい。

以上