

# 緩衝材の流出/侵入特性(Ⅱ)

— 幌延地下水(HDB-6号孔)を用いた緩衝材の侵入特性評価 —

(研究報告)

2005年2月

核燃料サイクル開発機構  
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

電話 : 029-282-1122(代表)  
ファックス : 029-282-7980  
電子メール : jserv@jnc.go.jp

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)  
2005



## 緩衝材の流出/侵入特性(II)

— 幌延地下水(HDB-6号孔)を用いた緩衝材の侵入特性評価 —

(研究報告)

松本 一浩\*\*, 棚井 憲治\*

## 要旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア埋設後においては、緩衝材の物理的安定性に影響を及ぼす事象の一つとして、緩衝材の流出挙動が考えられる。緩衝材の流出挙動は、岩盤亀裂中への侵入現象と、亀裂へ侵入したベントナイトゲルの地下水による浸食現象の二つの現象によるものと考えられており、この現象を実験により定量的に把握する必要がある。

本報では、これまでに得られた侵入現象の降水・海水系地下水条件における挙動の把握を踏まえ、より現実的な地質環境条件下での挙動を把握するために、幌延深地層研究計画の一環として実施されている試験調査で採取された実際の地下水(幌延地下水 HDB-6 号孔)を用いた挙動の把握を行った。また、侵入現象モデルの妥当性の検討および構築に資するため、非破壊検査技術を適用した侵入密度分布の把握を行った。浸食現象に関しては、緩衝材を起源とするベントナイトコロイドの生成量に関して、海水系地下水を模擬し、人工海水ならびに幌延地下水相当のイオン強度(I)に調整した NaCl 溶液を用い、挙動の把握を試みた。

試験により得られた知見は、以下のとおりである。

## 1) 侵入現象

- 幌延地下水を用いて、侵入試験を実施した。その結果、幌延地下水では、ベントナイトの亀裂中への侵入が、蒸留水の結果と比較し、著しく小さくなることが分かった。また、蒸留水・人工海水・幌延地下水の水質をイオン強度で整理し、比例係数を整理した。その結果、ベントナイトの侵入挙動は、イオン強度が小さい水質ほど侵入し、逆にイオン強度が大きくなるほど、侵入が抑制されることが分かった。
- X線CTによって亀裂侵入部における密度分布に関するデータを取得した。その結果、亀裂侵入部における平均的な乾燥密度は、ケイ砂混合体を用いた場合に、おおよそ  $0.3\text{Mg/m}^3$  以下であり、ベントナイト単体の平均乾燥密度よりも小さくなることを概略的に把握した。

## 2) 浸食現象

- 幌延地下水相当( $I=0.2\text{ mol/L}$ )ならびに人工海水相当( $I=0.64\text{ mol/L}$ )の NaCl 溶液を用い、浸食試験を実施した。その結果、平均流速  $8 \times 10^{-6}\text{ m/s}$  で浸食コロイドは認められないことから、本条件下では、緩衝材を起源とするベントナイトコロイドが生成・移行しないことを概略的に把握した。

---

\* 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

\*\* 検査開発株式会社

## Extrusion and erosion of bentonite buffer (II)

—Evaluation of extrusion process of bentonite buffer in Horonobe groundwater(HDB-6)—  
(Research Document)

Kazuhiro Matsumoto<sup>\*\*</sup> , Kenji Tanai<sup>\*</sup>

### Abstract

The extrusion and erosion of bentonite buffer is one of the important issues on physical stability of bentonite buffer in the geological disposal of the high level radiation waste. This report provides the results of the measurement on the extrusion process of bentonite buffer in Horonobe groundwater (HDB-6) and on the applicability of X-ray CT to evaluate the extrusion process of bentonite buffer.

The erosion test was carried out by using NaCl solution to simulate Horonobe underground water and the artificial seawater.

Results are as follows;

#### 1) Extrusion

- The spread of bentonite extrusion into a fracture in Horonobe groundwater (ionic strength:0.2 mol/L) is smaller than that in distilled water. Moreover, when the ion strength increases, the extrusion of the bentonite to the fracture is becomes insignificant.
- Average dry density of sand mixture bentonite into a fracture measured by X-ray CT is approximately smaller than 0.3 Mg/m<sup>3</sup> .

#### 2) Erosion

- In the NaCl solution to simulate Horonobe groundwater (ionic strength:0.2 mol/L) and the artificial seawater (ionic strength:0.64 mol/L), the bentonite colloid is not generated at the flow velocity of  $8 \times 10^{-6}$  m/s.

---

\* Barrier performance group, West isolation research division,  
Waste management and fuel cycle research center

\*\* Inspection Development Corporation

## 目 次

1. はじめに	1
2. 試験方法	2
2.1 試験装置概要および方法	2
2.1.1 静水試験	2
2.1.2 流水試験	3
2.2 試験条件	4
2.2.1 供試体	4
2.2.2 静水試験	4
2.2.3 流水試験	5
3. 試験結果および考察	6
3.1 静水試験	6
3.1.1 侵入距離	7
3.1.2 侵入挙動の整理	9
3.1.3 膨潤応力	11
3.1.4 試験後の試料状態	12
3.1.4.1 試験後供試体の密度状態	12
3.1.4.2 ベントナイトの亀裂侵入に伴う密度低下	12
3.1.5 X線CTを用いた亀裂侵入域における密度分布評価	13
3.2 流水試験	20
3.2.1 浸食コロイドの定量的な評価	20
3.2.1.1 侵入距離および侵入状態	20
3.2.1.2 亀裂内流速	22
3.2.1.3 排水液の分析	24
3.2.2 浸食現象における実験的知見の整理	30
4. おわりに	32
参考文献	33

## 目 次

図 2.1	静水試験装置概略図	2
図 2.2	流水試験装置概略図	3
図 3.1	侵入距離測定位置	8
図 3.2	経過日数と侵入距離の関係 (亀裂幅 1.5mm)	8
図 3.3	経過時間と侵入距離の関係 (亀裂幅 1.5mm)	10
図 3.4	有効粘土密度と比例係数の関係 (亀裂幅 1.5mm)	10
図 3.5	イオン強度と比例係数の関係 (亀裂幅 1.5mm)	11
図 3.6	膨潤応力経時変化 (亀裂幅 1.5mm)	11
図 3.7	X線 CT 測定用 BENTFLOW 型試験容器概略図	15
図 3.8	侵入画像の一例	15
図 3.9	X線 CT 測定位置 (供試体寸法: $\Phi 20 \times H20\text{mm}$ )	16
図 3.10	侵入距離と乾燥密度分布の関係 (供試体寸法: $\Phi 20 \times H20\text{mm}$ )	17
図 3.11	侵入距離と乾燥密度分布の関係 (供試体寸法: $\Phi 30 \times H30\text{mm}$ )	18
図 3.12	経過日数と侵入域における平均乾燥密度の関係	19
図 3.13	侵入距離測定箇所 (実験の一例)	21
図 3.14	試験中の侵入画像	22
図 3.15	浸食現象試験における亀裂内流速の推定	23
図 3.16	元素分析フロー	25
図 3.17	経過時間と pH の関係	29
図 3.18	平均流速と浸食コロイド量の関係	30
図 3.19	侵入ベントナイト先端部における界面形状断面図	31

## 目 次

表 2.1	静水試験条件	4
表 2.2	幌延地下水組成分析結果	5
表 2.3	流水試験条件	5
表 3.1	比例係数(幌延地下水)	10
表 3.2	試験後における孔内供試体密度	12
表 3.3	侵入領域における侵入質量の推定	13
表 3.4	侵入による乾燥密度の低減率	13
表 3.5	侵入密度測定試験条件	15
表 3.6	X線CTによる測定条件	15
表 3.7	侵入距離	21
表 3.8	排水液の分析項目および分析機器	24
表 3.9	コロイド濃度分析測定条件	25
表 3.10	Si, Al, Mg 濃度の測定結果	26
表 3.11	コロイド粒径分布およびゼータ電位測定条件	27
表 3.12	コロイド粒子の平均粒径およびゼータ電位の測定結果	28
表 3.13	pH 測定条件	28
表 3.14	排水液の pH	29
表 3.15	試験手法と結果	30

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分研究では、人工バリア設置後において、緩衝材の物理的安定性に影響を及ぼす事象の一つとして、緩衝材の流出／侵入挙動が考えられている。緩衝材の候補材料であるベントナイトは、吸水により膨潤する性質を有し、この膨潤性によって緩衝材と周辺岩盤との隙間や周辺岩盤亀裂等を充填する自己シール性が期待されている。一方で、岩盤亀裂の開口幅が大きい場合には、この膨潤性によってベントナイトの亀裂への侵入が止らずに緩衝材の密度が低下し、緩衝材自体の諸機能に影響を及ぼすことが懸念される。また、亀裂へ侵入したベントナイトゲルが地下水によって浸食されコロイドを生成することにより、核種の移行を促進してしまうことも考えられる。緩衝材の流出現象は、これら岩盤亀裂中への侵入と、亀裂へ侵入したベントナイトゲルの浸食による二つの現象によるものと考えられ、人工バリア設置後における緩衝材の物理的安定性や核種移行評価を行ううえで、これらの現象を定量的に把握する必要がある。また、緩衝材の流出挙動は、定置後より発生する事象であり、長期にわたり継続する現象である。したがって、本挙動評価においては、時間的スケールに関する評価が必要であり、地層処分システムの安全性を評価するうえで、現象に即したモデルを構築することが必要である。本研究では、緩衝材の流出／侵入挙動の現象理解ならびにモデル構築へ向けた基礎研究とし、降水系・海水系地下水を想定したデータの取得を実施してきた（菅野、松本(1997), 松本、棚井(2003, 2004)）。また、侵入現象のモデル化に関しては、Kanno et al(1999)が提案している固相拡散理論（中野ら(1982)）と粘性流体モデルを組み合わせたモデルを適用し、拡散モデルを用いた評価を試みている（杉野、菅野(1999), 菅野、岩田(2003, 2004)）。

本報では、これまでに取得した侵入現象の降水・海水系地下水条件における挙動の把握を踏まえ、より現実的な地質環境条件下での挙動を把握するために、幌延深地層研究計画の一環として実施されている試錐調査で採取された実際の地下水を用いた挙動の把握を行った。また、現象メカニズムの理解および、侵入現象モデルの適用性の検討に資するために、非破壊検査技術を用いた侵入密度分布に関するデータの取得を実施した。浸食現象に関しては、緩衝材よりベントナイトコロイドが生成する可能性が指摘されており（Avogadro and De Marsily,(1984)）、緩衝材より発生したコロイドが放射性核種を収着する場合に、核種の移行を助長することが懸念されている（Kersting et al., (1999)）。コロイドが核種の移行挙動に及ぼす影響に関しては、久野ら(1999)によって検討されており、コロイド濃度が核種の移行に影響を与える要因の一つであること、また、コロイド濃度が増加することで、核種移行速度の助長も大きくなることが示されている。一方、緩衝材からのコロイドの発生に関しては、Pusch, R.(1983)、黒澤ら(1998)によってコロイドの結合力と地下水流れの掃流力との大小関係による理論的な検討が行われており、黒澤らはコロイドが生成される流速を、 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{m/s}$ 程度と見積っている。しかし、これら理論的な評価を確証するための十分な実験データは得られておらず、緩衝材を起源としたコロイドの生成／移行挙動を定量的に把握する必要がある。ここでは、コロイド影響評価研究に資するために、浸食現象に関する実験的データの整備を進め、浸食影響によるコロイド生成の定量的な把握を試みた。

## 2. 試験方法

### 2.1 試験装置概要および方法

#### 2.1.1 静水試験

侵入現象に関する試験は、図 2.1 に示す装置を用いて行った。

試験装置の構造は、上部および下部の透明アクリル板、亀裂開口幅を制御するための応力補強治具、ピストンなどから構成されている。上部および下部のアクリル板を重ね合わせることで、単一平板模擬亀裂（以下、亀裂という）を設けることができ、亀裂幅はスペーサによって任意に設定（0.5, 1.0, 1.5mm）することが可能である。供試体は、アクリル板の中心部の孔に設置し、供試体の上部には金属焼結フィルターを介して空気孔を設けている。また、供試体の下部には、ピストンを介してロードセル（共和電業社製：LC-2TN）を備え、ベントナイトの亀裂への侵入過程における膨潤応力の経時変化を計測することができる。亀裂内への給水は、上部アクリル板の給水孔より水頭差で供給を行い、亀裂内を満水にする。ベントナイトの亀裂への侵入状態については、試験装置上部のカメラによって侵入形状の記録を行うとともに、専用のアクリル製定規により侵入距離を測定することが可能である。膨潤応力などの測定は、供試体への水の接触直後から開始し、ベントナイトの亀裂への侵入過程における経時的な挙動を観察する。

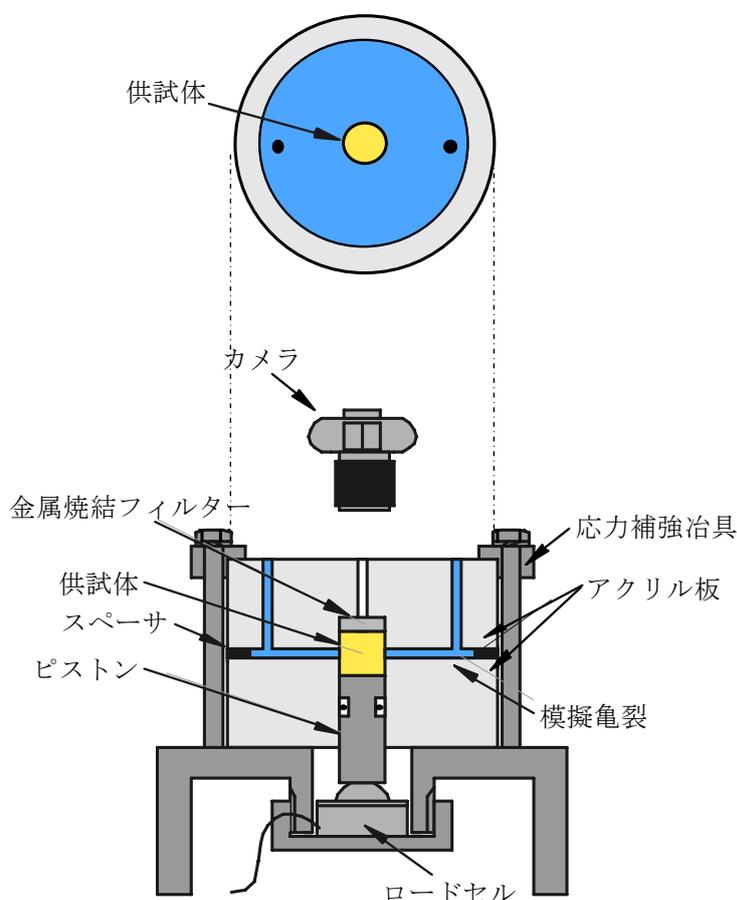


図 2.1 静水試験装置概略図

### 2.1.2 流水試験

浸食現象に関する試験は、図 2.2 に示す装置を用いて行った。基本的な構造は、静水試験装置と同様である。流水試験装置は、アクリル板上部における注水孔の一方より水を供給し、一方より排水させることで亀裂内に二次元的な水の流れ場をつくり、水流が亀裂内侵入ベントナイトに与える影響、すなわちベントナイトの浸食現象を定量的に把握することが可能である。亀裂内への水の供給は、定量ポンプ（エムエス機器社製：ペリスタルティック型ポンプ）を用いた。また、ベントナイトの亀裂への侵入過程における膨潤応力は、静水試験と同様にロードセル（共和電業社製：LC-200KN）を用いて計測を行った。

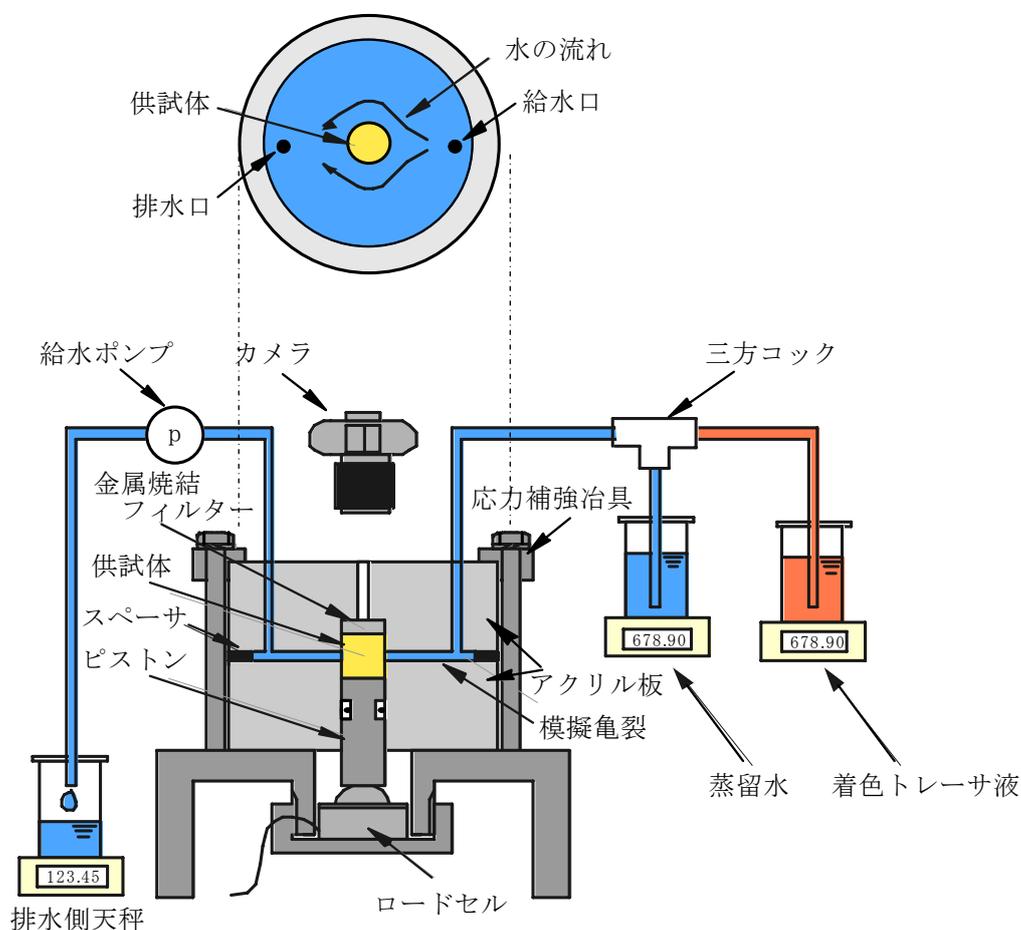


図 2.2 流水試験装置概略図

## 2.2 試験条件

### 2.2.1 供試体

ベントナイト試料には、クニゲル V1（クニミネ工業社製：山形県月布産 Na 型ベントナイト）を用いた。供試体は、ベントナイト（以下、ベントナイト単体という）およびベントナイトにケイ砂を混合した供試体（以下、ケイ砂混合体という）を用いた。また、ケイ砂は、3号ケイ砂と5号ケイ砂を重量比1：1で混合したものを使用した。

供試体寸法は、静水試験で $\phi 50 \times H50$  [mm]、流水試験で $\phi 10 \times H10$  [mm]とし、引張万能試験機（島津製作所製：オートグラフ AG-I）により、圧縮成型治具内において一軸圧縮成型したものをを用いた。

### 2.2.2 静水試験

試験条件を表 2.1 に示す。静水試験では、供試体の仕様（乾燥密度とケイ砂混合率）をパラメータとして模擬亀裂中へのベントナイトの侵入挙動の観察を行った。試験水には、幌延深地層研究計画の一環として実施されている試錐調査によって採取された実際の地下水（以下、幌延地下水という）を用いた。なお、幌延地下水の組成は、表 2.2 に示すとおりである（菊池・棚井(2005)）。

測定は、供試体への水の浸潤直後より膨潤応力および亀裂中への侵入距離の計測を行った。膨潤応力の経時的な変化や試験室温度は、パソコンにより計測し、ベントナイトの亀裂への侵入距離は専用のアクリル板定規を用いて測定した。なお、ベントナイトの侵入形状については、試験装置上部のカメラを用いて観察した。

表 2.1 静水試験条件

試料（ベントナイト）	クニゲル V1	
供試体寸法 [mm]	$\phi 50 \times H50$	
ケイ砂混合率 [%]	30	0
乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]	1.6	1.8
初期含水比 [%]	10	
亀裂幅 [mm]	1.5	
試験温度 [°C]	室温 (20)	
試験水	幌延地下水 HDB-6	

表 2.2 幌延地下水組成分析結果

分析項目	結果	単位	分析項目	結果	単位
pH	7.70 (22.7°C)	—	Al	< 1	mg/l
EC	2010	mS/m	Cl <sup>-</sup>	6400	mg/l
Na <sup>+</sup>	4300	mg/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	< 0.1	mg/l
K <sup>+</sup>	92	mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	< 0.2	mg/l
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	124	mg/l	H <sub>2</sub> S	—	mg/l
Ca <sup>2+</sup>	136	mg/l	S <sup>2-</sup>	< 0.5	mg/l
Mg <sup>2+</sup>	89	mg/l	Pアルカリ度	< 0.5	mmol/l
I <sup>-</sup>	19	mg/l	Mアルカリ度	22.8	mmol/l
Fe <sup>2+</sup>	< 0.2	mg/l	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1600	mg/l
Fe <sup>3+</sup>	0.6	mg/l	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	< 0.5	mg/l
Si	24	mg/l	TOC	23	mg/l
			イオン強度	0.2075	mol/l

### 2.2.3 流水試験

試験条件を表 2.3 に示す。流水試験では、亀裂内における流量をパラメータとし、侵入ベントナイトの形状変形の観察、ならびに排水液中のベントナイトコロイドの濃度分析などを行い、水流の影響によるベントナイトの浸食挙動の把握を行った。ここでは、ベントナイトコロイドの浸食挙動の把握のため、供試体にはケイ砂を混合せずに、ベントナイト単体の供試体を用いた。なお、試験水には、人工海水相当 (I=0.64mol/l) ならびに幌延地下水相当 (I=0.2mol/l) のイオン強度に調整した NaCl 溶液を使用した。

試験は、ベントナイトの亀裂への侵入距離が安定するまでの間、亀裂内を静水状態として放置した後に水流を与え、排水液の採取および侵入形状の観察を行った。ベントナイトの侵入形状は、試験装置上面のカメラにより記録を行った。

表 2.3 流水試験条件

試料 (ベントナイト)	クニゲル V1	
供試体寸法 [mm]	φ 10×H10	
ケイ砂混合率 [%]	0	
乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]	1.6	
初期含水比 [%]	10	
亀裂幅 [mm]	1.0	
流量 [ml/min]	0.009 → 0.074	0.010 → 0.078
試験水	NaCl 溶液 (I=0.2 mol/l)	NaCl 溶液 (I=0.64 mol/l)
試験温度 [°C]	室温 (20)	

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 静水試験

定置後の緩衝材には、地下水や物質の移行経路となり得る天然の岩盤亀裂(割れ目)や、掘削影響により発生すると考えられている岩盤のマイクロクラック等、また、ブロック定置方式の際のハンドリング上における岩盤と緩衝材間との隙間、緩衝材とオーバーパック間との隙間、緩衝材ブロック間における隙間などを膨潤性(自己シール性)により充填し、地下水の流れを抑制する機能が期待されている。一方で、周辺岩盤亀裂が卓越して大きい場合や亀裂頻度が多い場合には、緩衝材の膨潤により、岩盤亀裂中への緩衝材の侵入が止らず、緩衝材自体の質量減少によって緩衝材の密度が低下してしまうことが懸念される。緩衝材の密度の低下は、放射性核種の隔離のために期待される低透水性、核種収着性、コロイド濾過性、化学的緩衝性や、人工バリアとして長期健全性を維持するための応力緩衝性、力学的安定性、熱伝導率性など諸機能に対して影響を及ぼすことが考えられる。したがって、岩盤亀裂中への緩衝材の侵入挙動を定量的に把握し、緩衝材の密度低下が人工バリア性能へ及ぼす影響に関して評価する必要がある。

これまでに、緩衝材の侵入現象に関する実験的な研究は、Pusch, R.(1983)、Boisson, J.Y.(1989)、Kanno, T. and Wakamatsu, H.(1991)らにより報告されている。ここでは、これらの研究事例を参考にし、侵入現象の挙動把握および現象モデルの構築へ向けたデータの整備を行った。

緩衝材の侵入挙動に関する現象把握の観点から、緩衝材密度と侵入距離の関係、また亀裂開口幅と侵入距離の関係やその侵入速さなどの関係を定量的に把握しておく必要がある。また、侵入による緩衝材の諸機能低下の影響を評価する上で、侵入に伴う緩衝材の密度低下量を把握しておく必要があり、これらは緩衝材の流出挙動による人工バリア性能への影響を長期的に評価するために重要なデータである。一方、侵入メカニズムの解明やモデルの構築にあたり、亀裂侵入域におけるベントナイトの密度や侵入によるコア部の局所的な密度の状態を把握しておくことが必要である。とくに、侵入域におけるベントナイトのゲルフロントの状態的な把握は、地下水流れによるベントナイトコロイドの浸食現象にも関連しているため、亀裂中で形成される侵入域の密度分布に関するデータの取得も重要な現象把握の一つである。

本報告では、地質環境条件の一つである地下水組成が及ぼす挙動への影響を把握するために、幌延地下水を用いた侵入挙動試験を行った。また、侵入現象モデルの妥当性の検討および構築に資するために、非破壊検査技術を用いた侵入密度分布に関するデータの取得を試みた。次項より、これらの現象把握に関する個別の知見について述べる。

### 3.1.1 侵入距離

降水条件下での基礎的な特性評価において、ベントナイト供試体の模擬亀裂中に侵入する時間と侵入距離との関係は、既存の研究（Kanno, T. and Wakamatsu, H. (1991)）と同様に時間の平方根に比例して大きくなる傾向を示しており、ベントナイト供試体に接する模擬亀裂への侵入に方向依存性がないという結果が得られている（菅野、松本(1997), 松本、棚井(2003)）。ベントナイトの亀裂中への侵入距離の測定に関しては、試験容器の上面より専用のアクリル製の測定定規によって、4方向(No. 1~No. 4)における侵入距離を目視によって測定した。測定箇所は、図 3.1 に示すとおりであり、供試体の壁面（亀裂との接触面）より、亀裂中へ侵入したベントナイトの先端部までの距離を経時的に測定した。

ベントナイトの亀裂への侵入距離の経時変化を、図 3.2 に示す。図は、幌延地下水を浸潤水として、単一平行平板の模擬亀裂中へのベントナイトの侵入距離を測定したものである。1.6Mg/m<sup>3</sup> ケイ砂混合体および 1.8Mg/m<sup>3</sup> ベントナイト単体における侵入距離は、水の浸潤直後より、非常にゆっくりと侵入が進展していくことが分かる。1.8Mg/m<sup>3</sup> ベントナイト単体における侵入距離が、1.6Mg/m<sup>3</sup> ケイ砂混合体のものよりも大きくなるのは、侵入挙動がベントナイトの膨潤応力に依存しているためであり、有効粘土密度が大きいほど侵入速さ、ならびに侵入距離が大きくなる。

侵入距離の経時変化について、海水系地下水を模擬した人工海水による試験結果（松本、棚井(2004)）と、本結果を時間軸間で比較した場合、人工海水では、ある時間以降には亀裂への侵入が進展しなくなるのに対し、幌延地下水では、亀裂への侵入はゆっくりとした動きでも侵入距離が徐々に進展する傾向がある。亀裂内への侵入が、ベントナイトの膨潤による流動として考えると、侵入の大小は、膨潤力に起因するものと言える。イオン強度をパラメータとした膨潤応力試験結果の一例（菊池、棚井(2005)）からは、イオン強度が大きくなるにしたがい、平衡膨潤応力が低下する傾向が得られている。これらの結果は、あるイオン強度以上になると平衡膨潤応力の顕著な差はみられなくなり、また、ベントナイトの密度にも依存し、ベントナイト密度が小さくなるほど顕著に影響が認められている。これらの知見より、同仕様のベントナイトを用いて人工海水と幌延地下水による侵入距離を比較した場合、イオン強度が大きい人工海水よりも、イオン強度が小さい幌延地下水のほうが膨潤力への影響が小さいことが考えられ、本試験結果の傾向は説明できる。また、侵入亀裂中におけるベントナイトは、自由膨潤状態であるため、低密度となっていることが考えられる。したがって、幌延地下水のイオン強度による膨潤特性への影響を考慮すれば、亀裂中におけるベントナイトは、膨潤応力が低下していることが推察され、孔内供試体からの亀裂中への侵入を抑制していることも考えられる。

これらの結果より、幌延地下水においては、人工海水と同様に降水系地下水（蒸留水）よりも、亀裂への侵入が小さくなることが分かった。

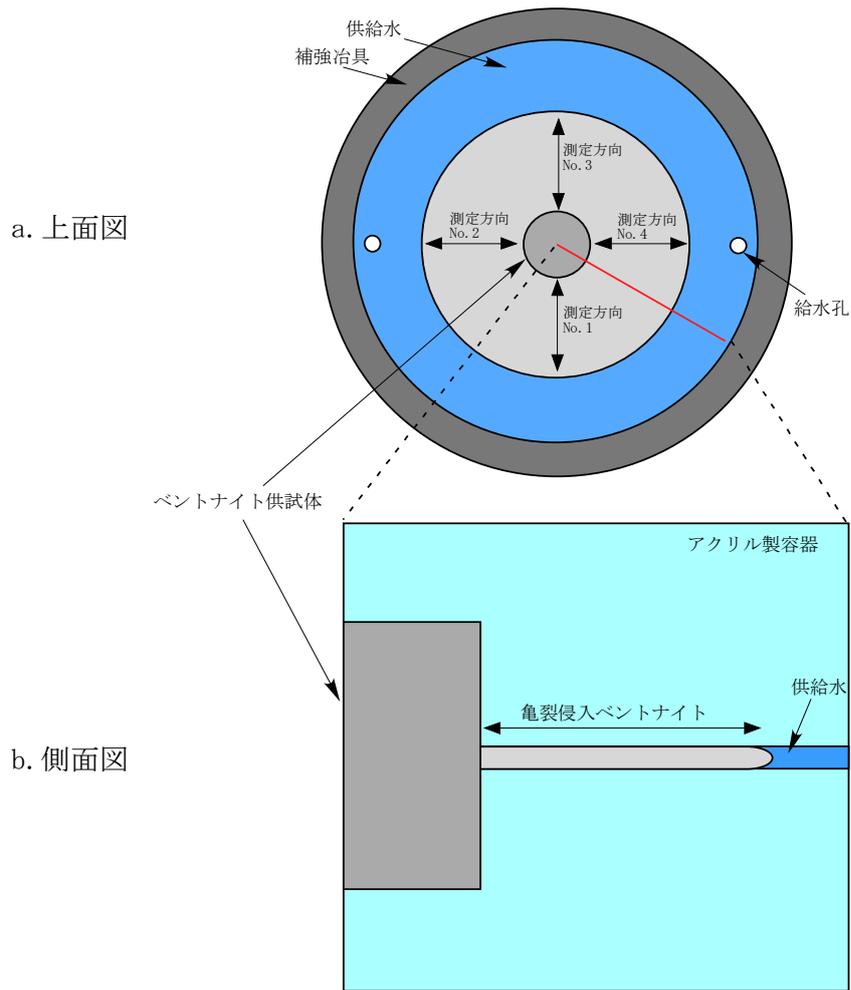


図 3.1 侵入距離測定位置

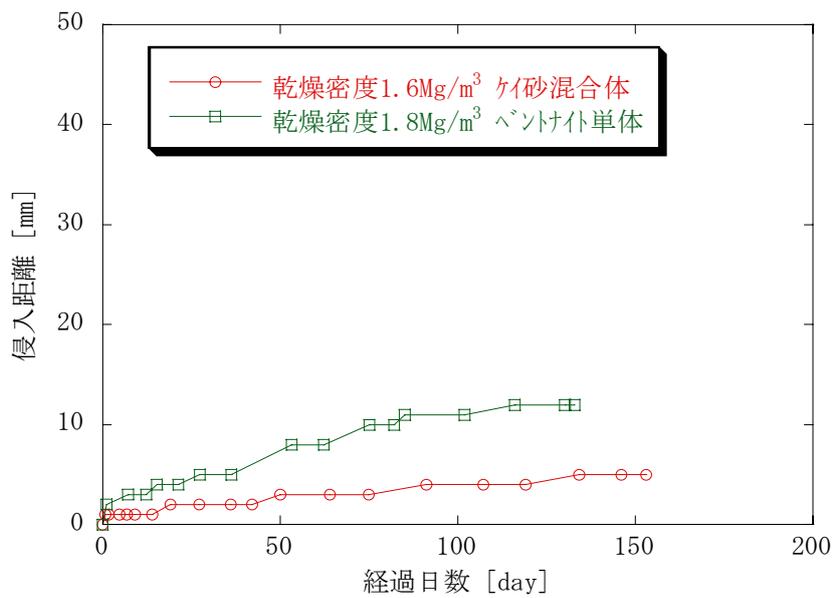


図 3.2 経過日数と侵入距離の関係（亀裂幅 1.5mm）

### 3.1.2 侵入挙動の整理

ベントナイトの亀裂への侵入は、これまでの試験結果より時間の平方根に比例し、(3.1) 式で表すことができる。ここで、 $y$  は侵入距離[mm]、 $t$  は時間[hr]、 $A$  は亀裂幅  $d$  [mm] とベントナイト含有比  $Bc$  [-] に依存する比例係数[mm/hr<sup>1/2</sup>]である。

$$y = A(d, Bc)\sqrt{t} \quad (3.1)$$

測定した侵入距離は、これまでの実験結果より侵入形状に方向依存性が認められないことから、ここではベントナイトの侵入形状を同心円状として取扱い、測定した4方向の侵入距離を平均化して整理した。

試験結果を、経過時間 $\sqrt{t}$  [hr<sup>1/2</sup>]と侵入距離  $y$  [mm] の関係で表し、図 3.3 に示す。また、得られた比例係数  $A$  を表 3.1 に示す。図は、蒸留水における同仕様の結果を合わせて示している。亀裂への侵入距離は、幌延地下水が蒸留水のものよりも小さく、比例係数で比較した場合に、1.6Mg/m<sup>3</sup> ケイ砂混合体で 1/4 程度、1.8Mg/m<sup>3</sup> ベントナイト単体で 1/6 程度となった。

ベントナイト含有量の増加に伴い比例係数が大きくなるというこれまでの試験結果より、侵入現象は膨潤性に大きく起因するものと考えられる。したがって、膨潤性を有するベントナイトのみの乾燥密度、すなわち有効粘土密度  $\rho_b$  [Mg/m<sup>3</sup>] を用いて比例係数を整理し、図 3.4 に示す。

有効粘土密度は、(3.2) 式のように定義される。ここで、 $\rho_d$  はベントナイト供試体の乾燥密度[Mg/m<sup>3</sup>]、 $R_s$  はケイ砂混合率[%]、 $\rho_s$  はケイ砂の土粒子密度[Mg/m<sup>3</sup>]である。

$$\rho_b = \frac{\rho_d(100 - R_s)}{100 - \rho_d \frac{R_s}{\rho_s}} \quad (3.2)$$

図は、既存の試験結果である降水系地下水条件(蒸留水)および海水系地下水条件(人工海水)を合わせて表している。図から分かるように、幌延地下水における比例係数は、降水・海水系地下水条件の間に位置しており、水質による挙動への影響程度を把握することができた。これらの結果より、幌延地下水を用いた場合のベントナイトの亀裂への侵入は、蒸留水のものとは比べ、顕著に小さくなり、どちらかと言えば、人工海水の挙動に近い傾向を示した。

次に、これまでに実施した降水系・海水系・幌延地下水のそれぞれの試験水をイオン強度という一指標を用いて整理し、比例係数との関係を図 3.5 に示す。ここで、 $I=0\text{mol}/1$  が降水系、 $I=0.2\text{mol}/1$  が幌延地下水、 $I=0.64\text{mol}/1$  が海水系を表している。図より、 $I$  が  $0\text{mol}/1$  から  $0.2\text{mol}/1$  になることで、比例係数が顕著に小さくなるのに対し、 $0.2\text{mol}/1$  から  $0.64\text{mol}/1$  に至る間には、大きい変化がないことが分かる。これらの傾向から、ベントナイトの侵入挙動は、イオン強度が小さい水質ほど侵入し、逆にイオン強度が大きくなるほど、侵入が抑制されることが分かった。

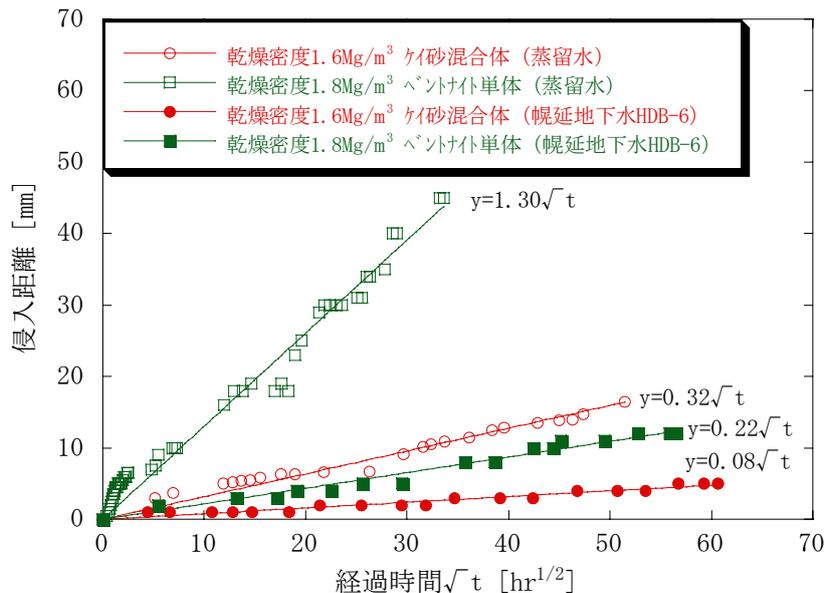


図 3.3 経過時間と侵入距離の関係（亀裂幅 1.5mm）

表 3.1 比例係数（幌延地下水）

供試体仕様	亀裂幅 $d$ [mm]	比例係数 $A$ [mm/hr <sup>1/2</sup> ]
乾燥密度 1.6Mg/m <sup>3</sup> ケイ砂混合体	1.5	0.08
乾燥密度 1.8Mg/m <sup>3</sup> ベントナイト単体	1.5	0.22

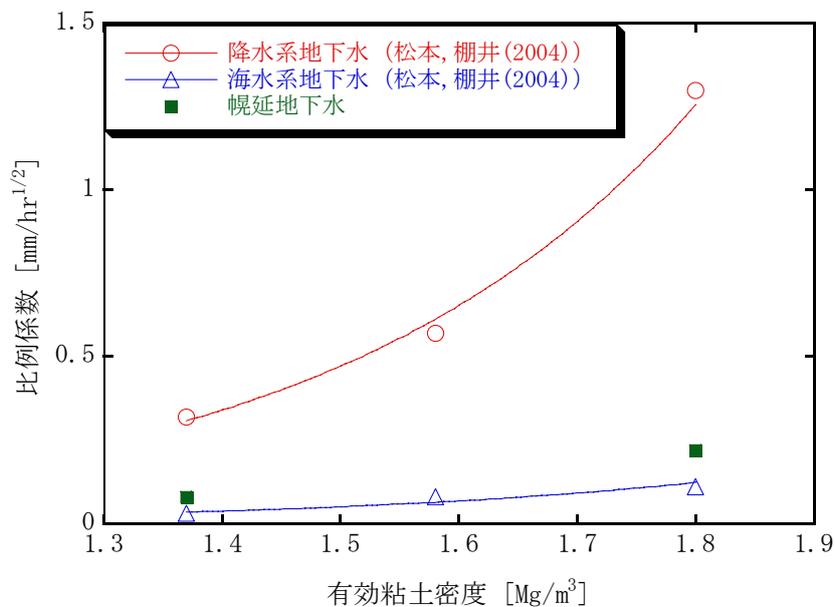


図 3.4 有効粘土密度と比例係数の関係（亀裂幅 1.5mm）

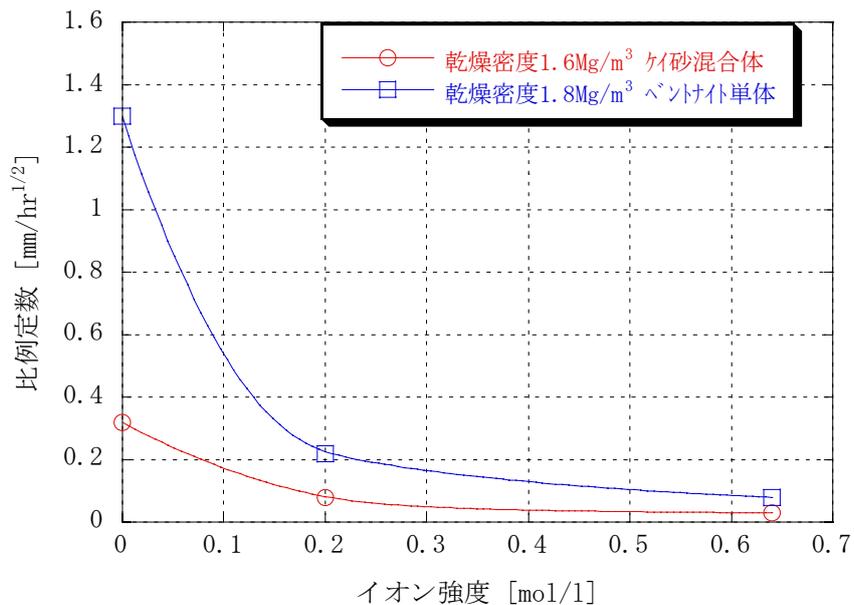


図 3.5 イオン強度と比例係数の関係（亀裂幅 1.5mm）

### 3.1.3 膨潤応力

本試験では、緩衝材の侵入に伴う密度低下による孔内供試体の応力状態を把握するために、供試体の下部よりピストンロッドを介し、ロードセルによって試験中の膨潤応力の測定を行った。測定は、供試体の周方向に設けた模擬亀裂より、供試体へ浸潤水が接触した直後に開始した。膨潤応力の経時変化を図 3.6 に示す。図より、膨潤応力は、有効粘土密度が大きいものほど、大きい応力状態を保っていることが分かる。また、試験開始 50 日後以降、供試体の仕様によらず、膨潤応力は平衡な膨潤応力となった。

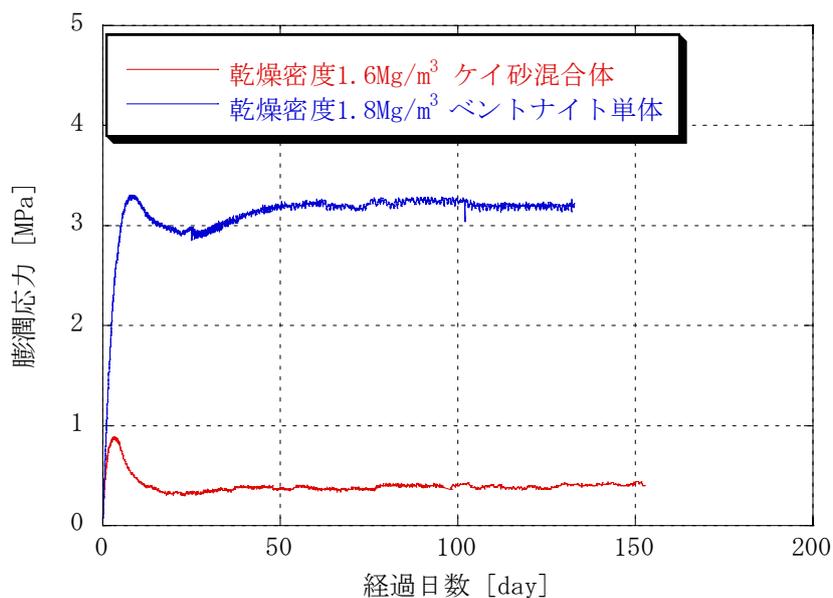


図 3.6 膨潤応力経時変化（亀裂幅 1.5mm）

### 3.1.4 試験後の試料状態

#### 3.1.4.1 試験後供試体の密度状態

試験後における孔内供試体の残留乾燥密度の測定を行った。結果を表 3.2 に示す。試験後における孔内供試体の乾燥密度は、乾燥密度  $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$  ケイ砂混合体で初期乾燥密度となっており、亀裂への侵入に伴う密度低下がない結果となった。一方、乾燥密度  $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$  ベントナイト単体では、若干の密度低下が生じた。3.1.1 項の侵入距離の測定結果からは、両者ともに亀裂中へのベントナイトの侵入が認められている。すなわち、孔内供試体における質量は、若干減少していることが考えられる。これらを考慮すると、乾燥密度  $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$  ケイ砂混合体においては、初期の乾燥密度が、所定の密度よりも若干大きめに製作されていた可能性が考えられる。いずれにせよ、幌延地下水による亀裂へのベントナイトの侵入による密度低下への影響が小さいことが、この結果より予想される。

表 3.2 試験後における孔内供試体密度

供試体仕様	亀裂幅 [mm]	試験後の乾燥密度 [ $\text{Mg}/\text{m}^3$ ]	含水比 [%]	飽和度 [%]
乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ ケイ砂混合体	1.5	1.605	27.57	110.56
乾燥密度 $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$ ベントナイト単体	1.5	1.772	23.17	119.69

#### 3.1.4.2 ベントナイトの亀裂侵入に伴う密度低下

試験後の試料の密度状態の結果からは、ベントナイトの亀裂侵入に伴う孔内供試体の顕著な密度低下が認められなかった。一方で、侵入距離の計測では、亀裂中への侵入が観察されていることから、孔内供試体において若干なりの質量変化が生じていることが考えられる。亀裂侵入域における密度分布評価の知見からは、亀裂侵入域における平均的な乾燥密度が  $0.4\text{Mg}/\text{m}^3$  程度であり、保守的に見積もって  $0.5\text{Mg}/\text{m}^3$  としている（松本、棚井(2003, 2004)）。これらの知見により、亀裂侵入域の密度を保守的に  $0.5\text{Mg}/\text{m}^3$  と仮定して侵入に伴う乾燥密度の低下率を推定した。侵入領域の体積は、侵入距離の測定結果をもとに侵入形状を円と仮定し、ベントナイト侵入領域の表面積と亀裂幅から求めた。また、試験に用いた供試体の初期乾燥密度は、試験後の乾燥密度と侵入域の密度の推定値より導出を行った。表 3.3 に侵入域の密度を仮定した場合の侵入質量の算出結果をまとめる。次に、得られた侵入質量の推定値より、初期乾燥密度を見積り、試験後の乾燥密度の結果をもとに、侵入に伴う供試体の密度低減率を求めた。これらの推定された侵入に伴う供試体の密度低減率を表 3.4 に示す。表より、有効粘土密度が大きいほど、密度の低下も大きくなっているものの、その低下率は 1% 程度であることから、幌延地下水による侵入挙動は、極めて小さく侵入による緩衝材の密度低下への影響は小さいことが考えられる。

表 3.3 侵入領域における侵入質量の推定

供試体仕様	亀裂幅 [mm]	侵入領域の体積 [cm <sup>3</sup> ]	侵入領域の乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]	侵入質量 [g]
乾燥密度 1.6Mg/m <sup>3</sup> ケイ砂混合体	1.5	1.296	0.5 (仮定値)	0.648
乾燥密度 1.8Mg/m <sup>3</sup> ベントナイト単体	1.5	3.506	0.5 (仮定値)	1.753

表 3.4 侵入による乾燥密度の低減率

供試体仕様	亀裂幅 [mm]	初期乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]	試験後の乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]	乾燥密度の低減率 [%]
乾燥密度 1.6Mg/m <sup>3</sup> ケイ砂混合体	1.5	1.612 (推定値)	1.605	0.43
乾燥密度 1.8Mg/m <sup>3</sup> ベントナイト単体	1.5	1.790 (推定値)	1.772	1.01

### 3.1.5 X線 CT を用いた亀裂侵入域における密度分布評価

緩衝材の侵入現象に関しては、単一平板模擬亀裂への基本的なベントナイトの侵入現象に関するデータを蓄積している。一方で侵入現象に関するモデル化に関しては、ベントナイトの侵入メカニズムを検討し、亀裂中へのベントナイトの移動を粘性流体による拡散移動と仮定し、拡散モデルを用いたモデル化を試みている（杉野、菅野(1999)、菅野、岩田(2003)）。

これまでに、侵入現象試験において主に取得されているデータとしては、亀裂開口部への時間と侵入距離との関係であり、侵入部におけるベントナイトゲルの密度分布等に関しては、データが整備されていない。したがって、モデルに関する十分な妥当性および適用性の検討が実施できておらず、今後、亀裂侵入領域におけるベントナイトの密度分布の把握ならびに、その密度におけるベントナイトゲルの粘性係数などのデータを取得し、モデルの適用性評価を行う必要がある。ここでは上述した課題のうち、亀裂中のベントナイト密度に関する概略的な把握を試みた。

緩衝材流出挙動試験設備（BENTFLOW）において、単一平板亀裂内にあるベントナイト侵入領域における密度測定に関しては、上下の亚克力板を分離する際に侵入域におけるベントナイトの状態が乱されてしまうため、サンプリングによる密度の測定は装置の構造上不可能である。そのため、ここでは、医療用 X 線 CT 装置（東芝製：Asteion VI）を用い、BENTFLOW 試験と同様な構造の試験容器により、非破壊検査技術を適用した侵入ベントナイトの密度分布の測定を行った。本装置を適用した侵入密度の測定に関しては、ベントナイト単体の試料を用いて一部データを取得しており、亀裂侵入ベントナイトの密度分布についての概略的な傾向が得られている（松本、棚井(2004)）。第 2 次取りまとめにおいては、人工バリア緩衝材の仕様として、ベントナイトにケイ砂を配合した仕様（レファレンスケース）が考えられており、侵入現象のモデル化研究においても、ケイ砂混合系の緩衝材仕様に関する密度分布等のデータが必要不可欠になる。したがって、ケイ砂混合系のベントナイト試料を用い、侵入密度の測定を実施した。

本評価に用いた X 線 CT 装置は、X 線が物体を透過した際、X 線吸収係数による物体の空間分布が求められるものであり、医療分野において (3.3) 式で定義されている。ここで、 $\mu_t$  : 物体の吸収係数、 $\mu_w$  : 水の吸収係数、 $K$  : 比例定数である。本装置は、水の CT 値を 0、空気を-1000

と定義しており、X線吸収係数はCT値という数値に換算され、物体の空間分布が画像処理される。

$$CT = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} K \quad (3.3)$$

測定によって得られる空間画像を構成しているCT値は、医療分野における定義上の数値であるため、ベントナイトへの直接的な適用による密度評価は行えない。したがって、ベントナイト密度とCT値との相関関係より、密度の導出を行う必要がある。本測定試料は、ケイ砂混合試料であるため、ベントナイトに対するケイ砂の配合割合、また、試料中のケイ砂の配合分布のバラツキなどによってケイ砂混合試料とCT値との相関関係データの取得が難しいものとなっており、現状では十分にデータが整備されていない。ケイ砂混合試料の場合には、ベントナイトの流動に伴って一部のケイ砂も亀裂中に侵入してくることが考えられるが、基本的にはベントナイト自体が流動するという概念により、本評価では亀裂中に侵入した物質の大半がベントナイトであると仮定し、棚井、他(2003), Tanai and Yamamoto(2003)らにより取得されているベントナイト単体試料における湿潤密度とCT値との相関関係式(3.4式)を適用した評価を行った。

$$\rho_t = \frac{(CT + 1465.7)}{1495.6} \quad (3.4)$$

地層処分研究における緩衝材の密度に係わる種々の研究では、乾燥密度による評価が主になっている。湿潤密度は、含有水分質量を土の単位体積重量に含めた密度であるため、絶対量としてベントナイト量を見積る場合に、含水比等を把握しておく必要がある。しかしながら、ベントナイトの含水比を把握するためには、サンプリング等による解体が必要であるため、経時的な侵入挙動による密度分布を測定している本試験では、試験中におけるベントナイト含水比の把握は行えない。したがって、ここでは、侵入ベントナイトが飽和しているものと仮定し、飽和状態にある湿潤密度と乾燥密度の相関関係(3.5式)より、湿潤密度から乾燥密度への導出を行い、侵入ベントナイトの密度分布の把握を行った。

$$\rho_d = -1.5891 + 1.5887 \rho_t \quad (3.5)$$

試験容器概略図を図3.7に示す。試験は、従来のBENTFLOW試験方法と同様に、容器中央にある供試体の周方向に単一平板亀裂を設け、亀裂中へ水を供給して亀裂中への侵入ベントナイトの観察およびX線CTによる測定を行った。試験条件を表3.5に、X線CTによる測定条件を表3.6に示す。X線CTによる測定は、亀裂侵入距離の測定を行い、その経時変化の進展状況により適時実施した。参考として、試験中における亀裂侵入写真の一例を図3.8に示す。図より、ベントナイトの侵入形状は、供試体寸法 $\phi 20 \times H20\text{mm}$ 、 $\phi 30 \times H30\text{mm}$ ともに、同心円状にはならず、ベントナイトの侵入域において、所々に非充填域ができています。このような傾向は、ベントナイト単体の試料では認められておらず、ケイ砂を含む本試料が、ベントナイトの亀裂への流動に伴いケイ砂を運び、その過程において、ベントナイトの流動力が減少し、運ばれていたケイ砂が亀裂中に留まったことで、ベントナイトがそれを避けるように流動してできたものと推察される。

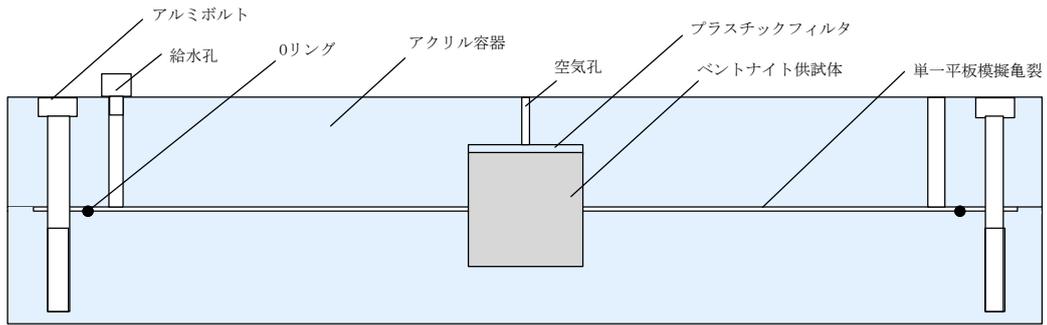


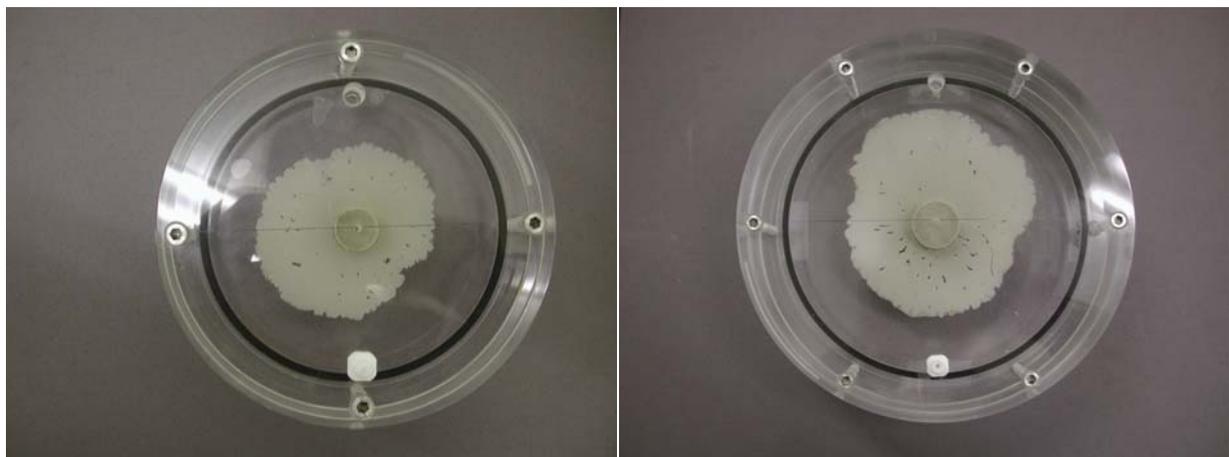
図 3.7 X線 CT 測定用 BENTFLOW 型試験容器概略図

表 3.5 侵入密度試験条件

試料 (ベントナイト)	クニゲル V1	
	供試体寸法 [mm]	φ 20×H20
ケイ砂混合率 [%]	30	
乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]	1.6	
初期含水比 [%]	7	
亀裂幅 [mm]	0.6	0.9
試験温度 [°C]	室温 (20)	
試験水	蒸留水	

表 3.6 X線 CT による測定条件

スキャン方式	コンベンショナル
管電流 [mA]	200
管電圧 [kV]	135
スキャン幅 [mm]	1
スキャンスピード[sec]	1



供試体寸法 : φ 20×H20mm

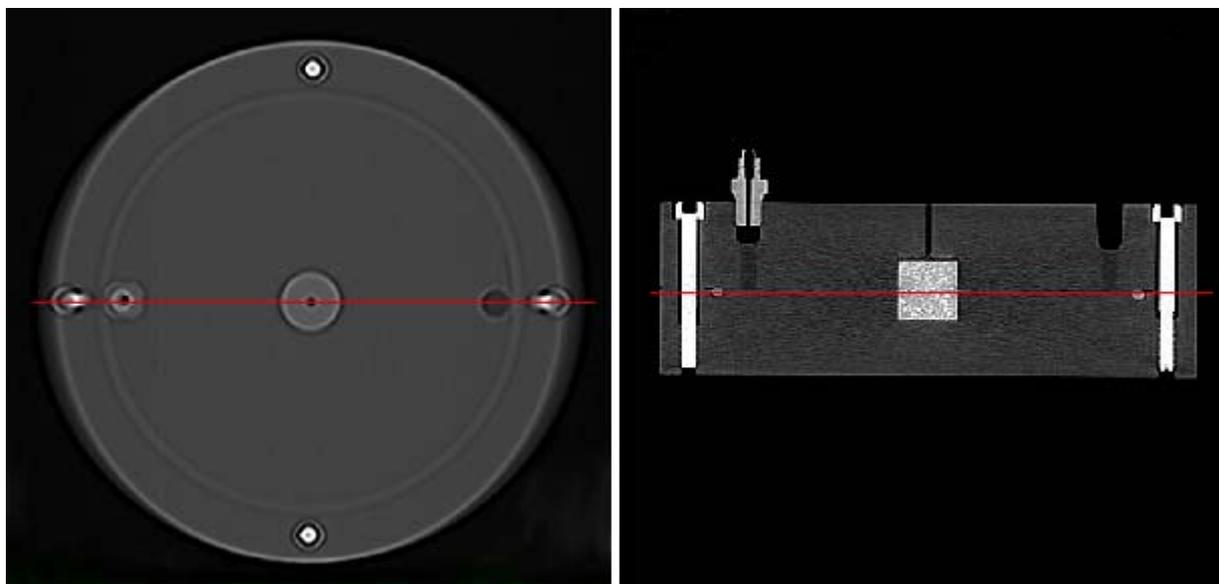
供試体寸法 : φ 30×H30mm

図 3.8 侵入画像の一例

X線 CT によるスキャナ画像および断面画像を図 3.9 に示す。図の左に示しているスキャナ画像上の赤ラインは、X線 CT の測定位置を示している。また、図の右は、測定した断面画像を示しており、赤ラインの位置（単一平板模擬亀裂面）で密度分布の評価を行った。

X線 CT によって測定評価を行った亀裂中における侵入ベントナイトの乾燥密度分布図を図 3.10～3.11 に示す。図は、経過時間ごとの乾燥密度分布を示している。図中の 2 本の破線部は、供試体の部位を示しており、横軸の距離 0 は供試体の中心位置である。したがって、破線部が供試体と亀裂との境界を表している。図の分布傾向から分かるように、亀裂中におけるベントナイトゲルは、供試体から亀裂侵入部の先端位置にかけて、非線形的な密度分布が形成されていること、また、亀裂中におけるベントナイトの乾燥密度は、おおよそ  $0.5\text{Mg}/\text{m}^3$  以下の密度になっていることが分かる。

分布図からは、供試体寸法  $\phi 20 \times H20\text{mm}$  よりも供試体寸法が大きい  $\phi 30 \times H30\text{mm}$  において、密度分布にバラツキがみられる。本試験では、供試体寸法によって試験容器であるアクリル板の肉厚が異なっており、供試体寸法が大きくなれば、試験容器の肉厚も厚いものとなる。X線の物質を透過する度合いは、物質の種類、厚さおよび密度によって変化する。したがって、密度分布データのバラツキは、X線の透過エネルギーの減弱による測定の感度、すなわち測定精度への影響が表れているものと推察される。



容器スキャナ画像

測定断面画像

図 3.9 X線 CT 測定位置(供試体寸法： $\phi 20 \times H20\text{mm}$ )

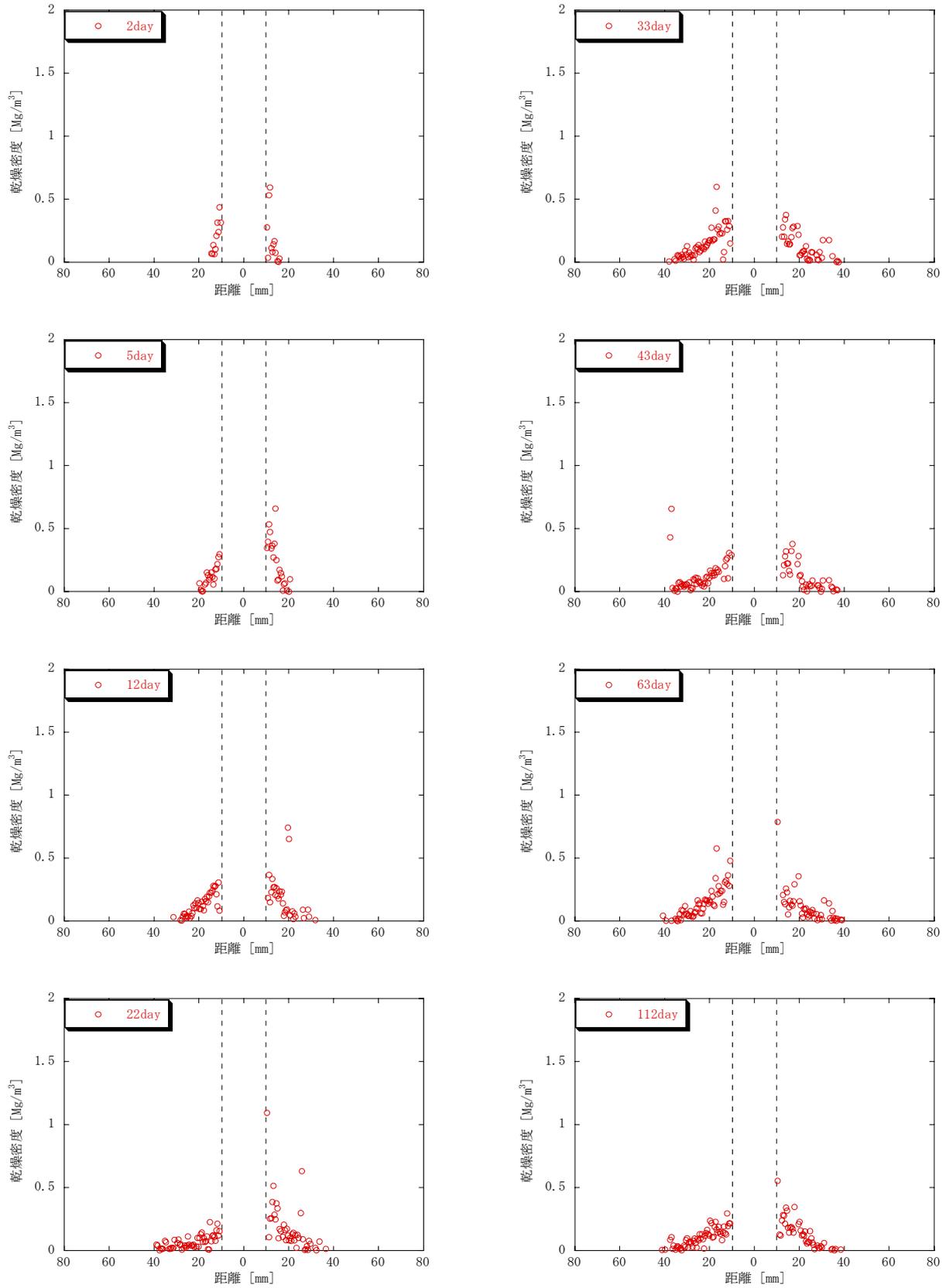


図 3.10 侵入距離と乾燥密度分布の関係 (供試体仕様:  $\phi 20 \times H20\text{mm}$ )

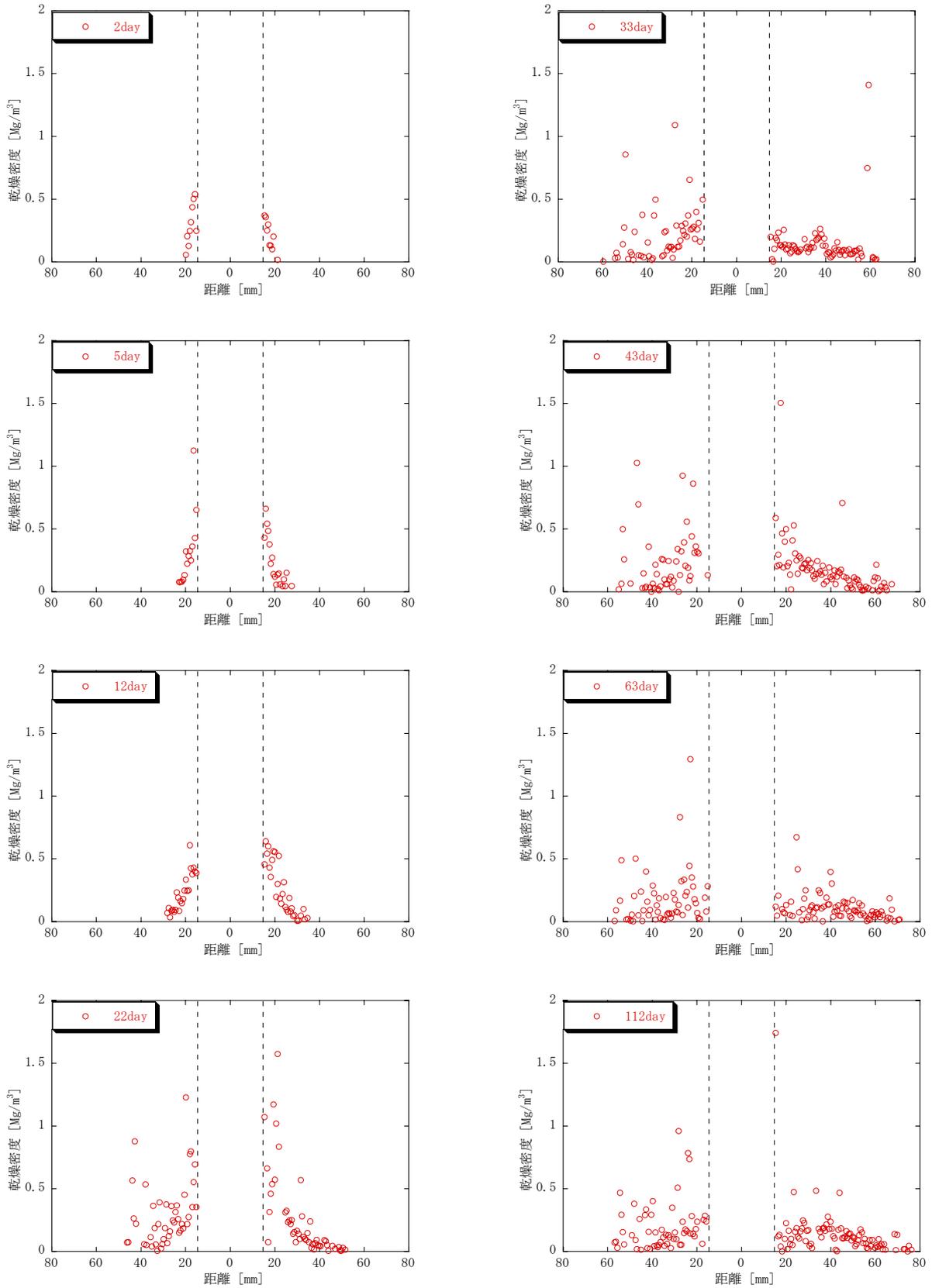


図 3.11 侵入距離と乾燥密度分布の関係 (供試体仕様：φ 30×H30mm)

次に侵入域の乾燥密度について整理する。侵入域における密度については、ベントナイト単体を用いたデータが取得されており、侵入域における平均的な密度は、おおよそ  $0.4\text{Mg}/\text{m}^3$  前後の密度状態であることから、保守的に見積もって侵入域における平均的な乾燥密度を  $0.5\text{Mg}/\text{m}^3$  程度であるとしている（松本、棚井(2004)）。本試験においても同様に、侵入域の平均的な乾燥密度を経過時間毎に整理し、図 3.12 に示す。図は、横軸に試験日数（経過日数）、縦軸に X 線 CT の評価結果より求めた侵入域の平均乾燥密度を表わしている。図より、供試体寸法  $\phi 20 \times \text{H}20\text{mm}$ 、 $\phi 30 \times \text{H}30\text{mm}$  とともに、侵入初期の密度より時間の経過に伴って  $0.1\text{Mg}/\text{m}^3$  程度の密度低下が認められる。 $\phi 20 \times \text{H}20\text{mm}$  では約  $0.2\text{Mg}/\text{m}^3 \rightarrow 0.1\text{Mg}/\text{m}^3$ 、 $\phi 30 \times \text{H}30\text{mm}$  では約  $0.3\text{Mg}/\text{m}^3 \rightarrow 0.2\text{Mg}/\text{m}^3$  と両者ともに極めて低密度状態となった。これらの結果より、ケイ砂混合体を用いた場合の侵入域における平均乾燥密度は、おおよそ  $0.3\text{Mg}/\text{m}^3$  以下であり、また、ケイ砂混合体の場合には、既存のベントナイト単体の侵入域の平均乾燥密度の結果よりも小さくなることを概略的に把握した。

以上、ベントナイトの亀裂侵入域における密度状態に関して整理したが、本結果は、限られたケースでの試験結果の一知見にすぎないことに留意しておく必要がある。特に、ケイ砂混合体においては、その配合率や供試体密度、また、亀裂開口幅によっても挙動への影響が考えられる。今後、供試体の初期密度依存性、亀裂開口幅依存性などのデータを取得し、妥当性を評価するとともに、X 線 CT の測定値から乾燥密度への換算方法に関しても、確立していく必要がある。

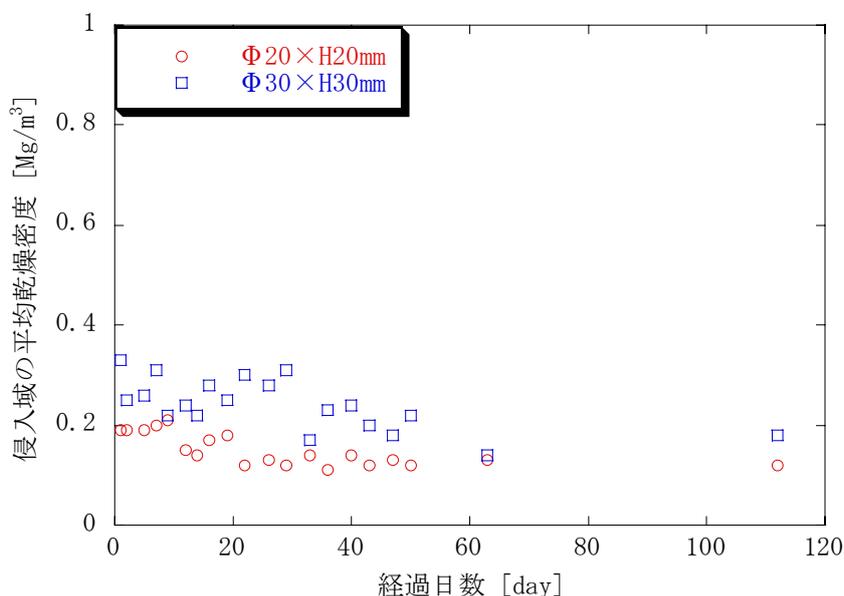


図 3.12 経過日数と侵入域における平均乾燥密度の関係

### 3.2 流水試験

人工バリアと母岩に期待される安全機能へ影響を与える可能性がある現象の一つとして、コロイド生成／移行が考えられている。コロイドの生成に関しては、緩衝材表面からベントナイトコロイド(以下、コロイドという)が生成される可能性が指摘されているものの(A, Avogadro and G, DE Marsily.(1984))、緩衝材を起源としたコロイドの発生量に関しては、十分に検討されていない。核種移行評価においては、地下水中におけるコロイド濃度および核種のコロイドへの分配係数が評価上とくに重要なパラメータとなるとしている(Baek, I. and Pitt, Jr. W.W(1996), 久野、他(1999))。このことから、緩衝材を起源とするコロイドの生成や移行について定量的に把握する必要がある。

緩衝材の浸食現象に関しては、地下水流れによって移行するベントナイトコロイドの移行量に関して、模擬実験を行い、流速と浸食量との関係把握を試みている(松本、棚井(2003, 2004))。本報告では、地質環境条件の一つである地下水組成が及ぼす挙動への影響を把握するために、コロイドの生成に関する、海水系地下水条件を想定した挙動把握の一つの手法として、人工海水相当ならびに幌延地下水相当にイオン強度を調整した NaCl 溶液を用い、浸食により生成されるコロイドを定量的に把握するための浸食挙動試験を実施した。

#### 3.2.1 浸食コロイドの定量的な評価

ここでは、浸食現象を直接的に把握するために、排水液を採取し、流速に伴う浸食コロイドの定量的な把握を行うための試験を試みた。試験は、試験容器の孔内に圧縮ベントナイトを置き、単一平板模擬亀裂を設定して、水を亀裂中に供給する。ベントナイトは、水の浸潤直後より亀裂中へ侵入するため、試験開始から亀裂内へ水の流れ場を与えた場合には、ベントナイトの亀裂への侵入、また、これによる亀裂内流速の変化などが複合的に作用してしまうために、浸食コロイドの定量化が難しくなる。したがって、ベントナイトの亀裂中への侵入が安定するまでの間、試験容器内は静水状態として時間を置き、ベントナイトの亀裂侵入に伴う流路断面の減少による亀裂内流速の変化を防ぐ実験手法とした。ベントナイトの亀裂への侵入が安定(侵入距離の定位置化)した後、液送ポンプにより一定流量で制御した供給水を亀裂内へ送水し、侵入ベントナイトに対して二次元的な流れ場を与え、流速に伴うベントナイトの形状変形の観察および排水液をバッチ的に採取した。試験条件は、2.2.3項、表2.2を参照のこと。

##### 3.2.1.1 侵入距離および侵入状態

亀裂中におけるベントナイトの侵入距離は、亀裂へのベントナイトの侵入距離がほぼ安定されたことを確認した後、水を送水する前に専用の定規を用いて測定を行った。測定箇所は、図3.13に示すA~H方向の8方向とし、試験装置上方よりカメラによって侵入形状を観察した。

測定した侵入距離は、試験開始より約7日後に安定した。侵入距離を表3.7に示す。侵入距離は、イオン強度によらず、それぞれ5mm程度となり、イオン強度の違いによる両者の差は認めら

れなかった。また、ベントナイトの侵入状態を比較した試験中の画像を図 3.14 に示す。図より、イオン強度が異なる両者で、明らかに侵入ベントナイトの状態に違いが生じていることが分かる。I=0.2mol/l に関しては、これまでに実施した試験の観察状態と同様な侵入形態を示しているのに対して、I=0.64mol/l では、侵入ベントナイト域において空隙のような状態が形成された。一般に、コロイド懸濁液においては、水溶液中に分散している場合には、安定な状態、逆に凝集している場合を不安定な状態という。この分散と凝集の状態を支配する力は、コロイド粒子間に作用する静電的な反発力とファンデルワールス力であり、両者の兼合いによって挙動が決まるものとされている。本研究における緩衝材起源のコロイド生成による移行という観点からは、コロイドの安定性という言葉に置換えれば、コロイドが不安定な状態、すなわち凝集状態を示した方が、コロイド移行の遅延効果があるものと考えられる。

電荷をもつコロイド粒子を含む水溶液の塩濃度が小さい場合は、凝集することはない。しかし、塩濃度が高くなると粒子が凝集し始める（足立・岩田, 2003）。これらを考慮すれば、NaCl 濃度の高い図 3.14、(b)に示す侵入ベントナイトの状態は、コロイドが不安定でいる状態となっていることが推察される。

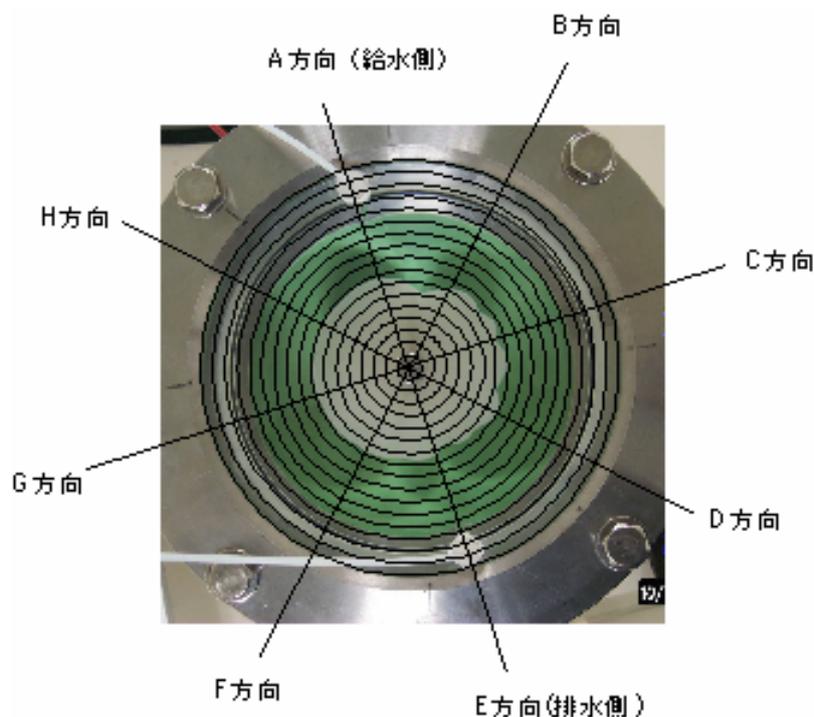
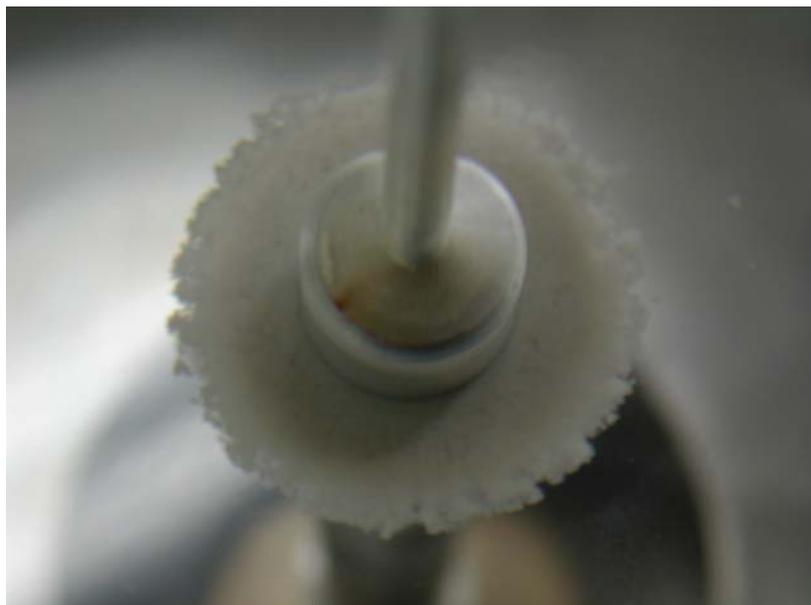


図 3.13 侵入距離測定箇所（実験の一例）

表 3.7 侵入距離

試験条件	侵入距離 [mm]								
	A方向	B方向	C方向	D方向	E方向	F方向	G方向	H方向	平均
NaCl-0.2	5	5	5	5	5	5	5	5	5
NaCl-0.64	5	5	5	5	5	5	5	5	5



(a) NaCl 溶液,  $I=0.2$



(b) NaCl 溶液,  $I=0.64$

図 3.14 試験中の侵入画像

### 3.2.1.2 亀裂内流速

ベントナイトの浸食現象を評価する上で亀裂内の流速、特に侵入ゲルフロント近傍における流速を把握することは、流速と浸食量との関係を定量的に評価するために必要不可欠である。これまでに、着色トレーサ液を用いた可視化による流速測定を試みや、可視化による結果を一知見とし、物質移動解析コードを適用するなどの手法によって、侵入ベントナイトのゲルフロント近傍の実際の流速を再現する推定法の検討を実施している（菅野、松本(1997)，松本、棚井(2003)）。しかしながら、着色トレーサを用いた可視化では、ベントナイトの特性への影響、物質移動解析

コードでは、妥当性の確認が行われておらず、両者ともに評価に関する妥当性の検討が課題となっている。そのため、本実験においては、流量と流路断面積より亀裂内流速を推定し、保守的に亀裂内平均流速を用いることとした（図 3.15）。

流量に関しては、実流量を用い、また、流路断面積は、ベントナイトの亀裂中への侵入も考慮し、亀裂開口幅 0.1cm と断面距離 17cm から推定した。ベントナイトの侵入距離 0.5cm、および供試体の直径 1cm を用いて算出した流路断面積は、 $1.5\text{cm}^2$  となり、流量と流路断面積より求まる平均流速は、それぞれ  $1 \times 10^{-6}\text{m/s}$  および  $8 \times 10^{-6}\text{m/s}$  と見積もられる。ベントナイトの浸食に直接的に影響を与える水の流れは、侵入ベントナイトの先端部であるベントナイトゲル相と液相との境界部であることが考えられる。したがって、流速と浸食現象との関係を把握するためには、侵入ベントナイトの先端部近傍（以下、ベントナイト近傍という）における流速を把握する必要がある。トレーサ液を用いた可視化流速評価での亀裂内流速の把握による知見では、ベントナイト近傍における流速が平均流速の約 3 倍程度という知見が得られている。したがって、本実験において適用している平均流速は、直接的に浸食に作用している流速よりも小さく、保守的な評価となっている。ポリスチレンラテックスコロイドを用いて人工模擬亀裂媒体中でのコロイドの移行挙動試験を行った久野ら(2002)は、試験結果よりコロイド移行への流速の影響について、流速が大きいほど亀裂表面へのコロイドの付着がしにくくなる、あるいはいったん付着したコロイドが脱離しやすくなるといった考察を行っている。これらの知見からも、コロイドの移行挙動への流速の影響が示唆されており、直接的に浸食に影響を与える実流速を明確に把握することが、今後の課題である。

流路断面積 = (流路直径 - (供試体直径 + 侵入距離)) × 亀裂幅

流速 = 実流量 / 流路断面積

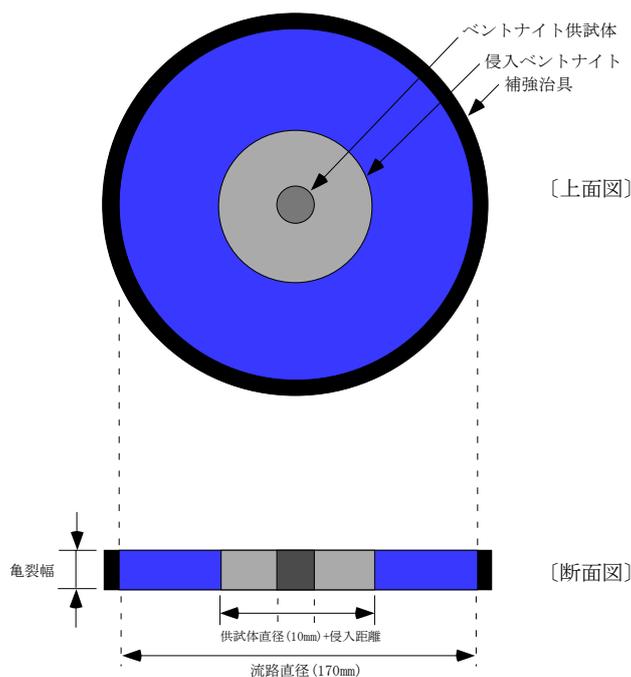


図 3.15 浸食現象試験における亀裂内流速の推定

### 3.2.1.3 排水液の分析

亀裂中の侵入ベントナイトに対して流水場を設けてサンプリングを行った排水液は、一定流量の流速場において約 110～115ml 程度バッチ的に採取し、浸食現象によって生成すると考えられるベントナイトコロイドの濃度を推定するために、主要元素濃度や特性（粒径分布、ゼータ電位）について測定を行った。表 3.8 に、これらの分析項目および分析装置をまとめる。

表 3.8 排水液の分析項目および分析機器

分析項目	分析装置	仕様	備考
コロイド濃度分析	ICP-AES (SPS-1700VRS)	高周波電源部：周波数 27.12MHz 最高出力：1.8kW 主分光器(B)：ツェルニターナ ホログラフィック平面 回折格子(3600 本/mm), 波長範囲 160 ～500nm 副分光器(A)：ツェルニターナ ホログラフィック平面 回折格子(1800 本/mm), 波長範囲 190 ～800nm	セイコーインスツルメンツ 社製
元素分析	イオンクロマトグラフ (IC7000)	試料注入量：50 $\mu$ L 溶離液(流量)：4mM Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (1mL/min) 除去液(流量)：15mM H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1mL/min) 恒温槽温度：40℃ 検出器：電気伝導度検出器	YOKOGAWA ANALYTICAL SYSTEM 社製 DIONEX 社製
粒径分布測定 (動的光散乱法)	ゼータサイザー ナノ ZS	粒径範囲：0.6～6000nm	マルバース社製
ゼータ電位測定 (レーザードップラー+M3-PALS 法)		測定範囲：-150～150mV	
pH 測定 (ガラス電極法)	pH 計 (F-21)	電極：9610-10D pH 範囲：0～14.00	堀場製作所社製

#### (1) 浸食コロイド濃度

ベントナイトコロイドの濃度分析は、試験により採取した排水液を限外ろ過し、この限外ろ過前後の溶液について、ベントナイトの主要構成元素である Si, Al, Mg の濃度を ICP-AES により測定し、ろ別されたコロイド成分の定量を行った。元素分析の測定に際しての限外ろ過および前処理は、フロー図 3.16 に示すとおりである。表 3.9 に測定条件を示す。

各バッチにおける排水液について、限外ろ過を実施する前後で Si, Al, Mg の濃度を ICP-AES により測定した結果を表 3.10 に示す。限外ろ過を行うことによりコロイドは除去される。したがって、限外ろ過前後における両者の差がコロイド状態として存在していた各元素の濃度となる。測定の結果、各元素濃度に顕著な差が認められず、Si, Mg においては、ほとんど限外ろ過前後での濃度差が認められず、Al においては検出下限以下となった。これら元素分析の結果より、NaCl 溶液によって実施した本試験においては、コロイドが認められず、測定した元素は、溶解または、イオン交換反応などによってイオンとして液中に生成しているものと考察される。

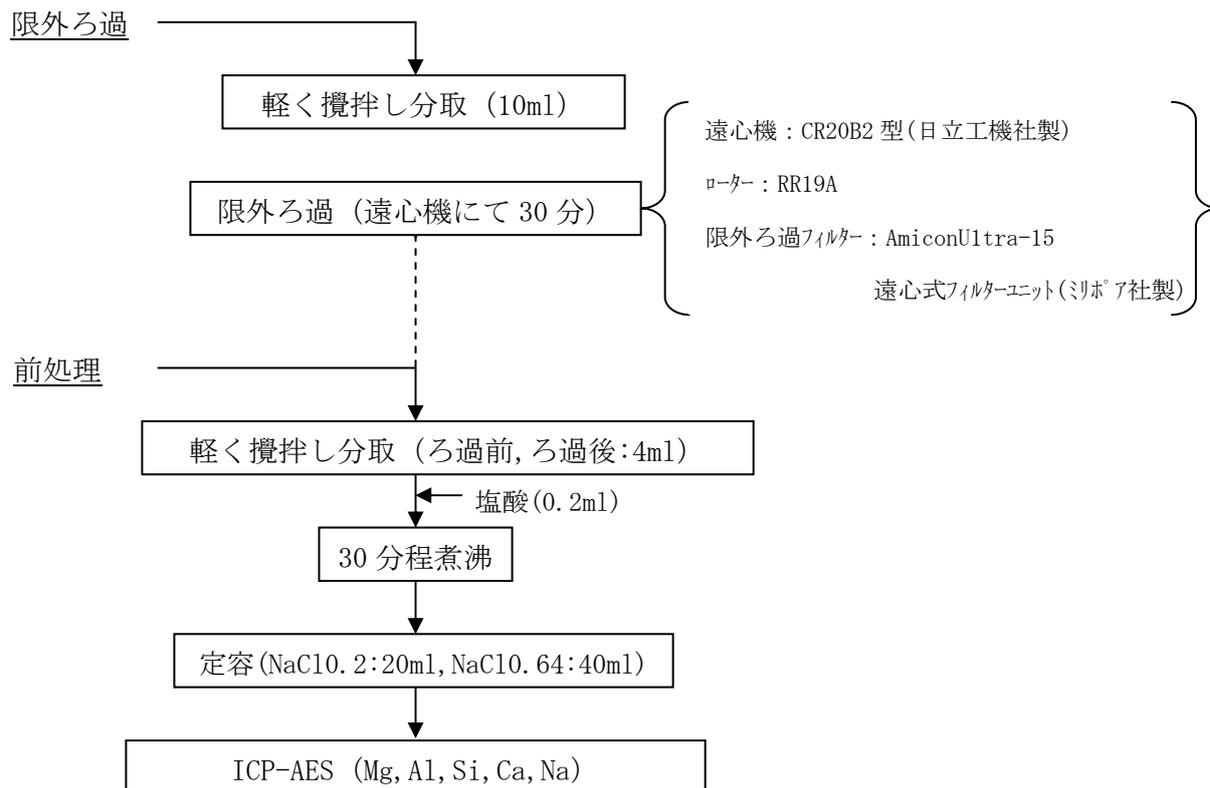


図 3.16 元素分析フロー

表 3.9 コロイド濃度分析測定条件

	ICP-AES
測光高さ	12.0 mm
分光器	B
出力	1.30 kW
キャリアガス	0.2 kgf/cm <sup>2</sup>
ネブライザー	—
プラズマガス	16L/min
サンプルリング温度	—
補助ガス	0.5/min
測定波長	Mg:285.213nm, Al:396.152nm, Si:251.611nm Ca:393.366nm, Na:588.995nm
測定質量数	—
設定温度	23°C
測定環境	クリーンルーム クラス 1000

表 3.10 Si, Al, Mg 濃度の測定結果

(a)NaCl 溶液, I=0.2mol/l

経過時間 [day]	流量 [ml/min]	平均流速 [m/s]	Si		Al		Mg	
			ろ過前 [ppm]	ろ過後 [ppm]	ろ過前 [ppm]	ろ過後 [ppm]	ろ過前 [ppm]	ろ過後 [ppm]
10	0.009	1.00E-6	1.5	1.4	<0.3	<0.3	0.49	0.49
31	0.009	1.00E-6	0.85	0.84	<0.3	<0.3	0.16	0.16
55	0.009	1.00E-6	0.6	0.6	<0.3	<0.3	0.12	0.12
76	0.009	1.00E-6	0.2	0.2	<0.3	<0.3	0.10	0.09
89	0.074	8.22E-6	0.1	0.1	<0.3	<0.3	0.03	0.03
91	0.074	8.22E-6	<0.1	<0.1	<0.3	<0.3	0.03	0.04
93	0.074	8.22E-6	<0.1	<0.1	<0.3	<0.3	0.03	0.03
95	0.074	8.22E-6	<0.1	<0.1	<0.3	<0.3	0.03	0.04

(b)NaCl 溶液, I=0.64mol/l

経過時間 [day]	流量 [ml/min]	平均流速 [m/s]	Si		Al		Mg	
			ろ過前 [ppm]	ろ過後 [ppm]	ろ過前 [ppm]	ろ過後 [ppm]	ろ過前 [ppm]	ろ過後 [ppm]
12	0.010	1.11E-6	1.9	1.9	<0.5	<0.5	2.0	2.0
34	0.010	1.11E-6	1.3	1.3	<0.5	<0.5	0.21	0.21
57	0.010	1.11E-6	1.4	1.3	<0.5	<0.5	0.19	0.19
79	0.010	1.11E-6	1.2	1.2	<0.5	<0.5	0.16	0.16
122	0.078	8.67E-6	1.2	1.2	<0.5	<0.5	0.07	0.06
124	0.078	8.67E-6	0.9	1.0	<0.5	<0.5	0.06	0.06
126	0.078	8.67E-6	1.0	0.9	<0.5	<0.5	0.06	0.06
128	0.078	8.67E-6	1.1	1.1	<0.5	<0.5	0.06	0.06

## (2) 浸食コロイドの粒径とゼータ電位

バッチごとに排水液の粒径分布およびゼータ電位の測定を行った。測定条件を表 3.11 に、コロイドの平均粒径およびゼータ電位の測定結果をバッチごとに表 3.12 示す。測定より得られた溶液中の平均粒径は、I=0.2mol/l および I=0.64mol/l で、平均流速が  $1 \times 10^{-6}$  m/s のとき、 $1 \mu\text{m}$  以上となった。また、流速を  $8 \times 10^{-6}$  m/s に増加させた後には、I=0.2mol/l および I=0.64mol/l で粒径が若干小さくなる傾向が得られた。一般に、コロイドとは直径が 10nm から 1000nm ( $1 \mu\text{m}$ ) の微粒子をいう。平均粒径は、各バッチのほとんどの測定において  $1 \mu\text{m}$  以上の径であり、コロイドとしての大きさとは言いがたい。本測定で得られた粒子が溶液中に存在しているとした場合、限外ろ過によって除去される。元素濃度分析の結果からは、限外ろ過前後の各元素濃度に差が認められていないことから、元素濃度が変化しない程度の粒子しか存在しなかったことが考えられる。しかしながら、本試験では、これ以上の検討はしておらず、元素濃度に顕著な差が認められ

ないほどの粒子の存在に関しては、コロイドが生成・移行に関して評価できない。したがって、検出された粒子径の大きさがコロイドと言えない程度に大きいこと、また、元素濃度分析において差が認められていないこと、さらには、測定において散乱光強度が十分でないことなどからデータの信頼性が低いものとし、本検討では、浸食現象としては取扱わないこととした。

次に、ゼータ電位の結果について考察を行う。ゼータ電位は、分散された粒子の分散安定性の指標として用いられているものであり、微粒子の場合、ゼータ電位の絶対値が増加すれば、粒子間の反発力が強くなり粒子の分散安定性は高くなる。一方、ゼータ電位がゼロに近くなると、粒子は凝集しやすくなる。蒸留水を用いた浸食試験結果からは、ゼータ電位がおおよそ $-35\sim-30\text{mV}$ であり、コロイドが水溶液中に安定であると推定している（松本、棚井(2004)）。一方、本測定によるゼータ電位は、 $-5\text{mV}$ 前後であることから、コロイドの安定性でいえば、蒸留水と比較して不安定な状態であるものと推察される。

表 3.11 コロイド粒径分布およびゼータ電位測定条件

	粒径分布測定	ゼータ電位測定
セル	クォーツスクエアセル	ディスプレイサブルキャピラリーセル
分散媒屈折率	1.33	1.33
分散媒粘度	0.8872 (mPa・s)	0.8872 (mPa・s)
分散媒誘電率	79	79
測定時間	20sec. × 15times	Auto
Attenuator	Auto	Auto
測定セルポジション	Auto	Auto
設定温度	25°C	25°C

表 3.12 コロイド粒子の平均粒径およびゼータ電位の測定結果

(a)NaCl 溶液, I=0.2mol/l

経過時間 [day]	実流量 [ml/min]	平均流速 [m/s]	平均粒径 [nm]	ゼータ電位 [mV]
10	0.009	1.00E-6	1697	-5.5
31	0.009	1.00E-6	1615	-5.7
55	0.009	1.00E-6	2276	-4.9
76	0.009	1.00E-6	1595	-4.0
89	0.074	8.22E-6	1038	-5.6
91	0.074	8.22E-6	308.5	-2.9
93	0.074	8.22E-6	762.3	-2.0
95	0.074	8.22E-6	1095	-3.8

(b)NaCl 溶液, I=0.64mol/l

経過時間 [day]	実流量 [ml/min]	平均流速 [m/s]	平均粒径 [nm]	ゼータ電位 [mV]
12	0.010	1.11E-6	1409	-5.9
34	0.010	1.11E-6	1298	-6.4
57	0.010	1.11E-6	2725	-5.9
79	0.010	1.11E-6	1511	-10.9
122	0.078	8.67E-6	1555	-3.1
124	0.078	8.67E-6	918.2	-4.3
126	0.078	8.67E-6	755.7	-7.2
128	0.078	8.67E-6	756.4	-2.4

## (3) 排水液の pH

排水液の各バッチにおける、pH の測定を行った。測定条件を表 3.13 に、結果を表 3.14 に示す。また、経過時間と pH の変化を図 3.17 に示す。排水液の pH は、流水開始から約 10 日後において初期の弱酸性から中性を示し、その後、時間の経過と共に低下する傾向がみられ、I=0.2mol/l では 5.4 程度、I=0.64mol/l では 6.2 程度で定常となった。

表 3.13 pH 測定条件

電極	9610-10D (硝子電極)	
校正ポイント	4.01	フタル酸塩 (関東化学製)
	6.86	中性リン酸塩 (関東化学製)
	9.18	ほう酸塩 (関東化学製)
設定温度	23°C	

表 3.14 排水液の pH

(a) NaCl 溶液, I=0.2mol/l

経過時間 [day]	実流量 [ml/min]	平均流速 [m/s]	pH
10	0.009	1.00E-6	6.8
31	0.009	1.00E-6	6.2
55	0.009	1.00E-6	5.9
76	0.009	1.00E-6	5.8
89	0.074	8.22E-6	5.4
91	0.074	8.22E-6	5.4
93	0.074	8.22E-6	5.4
95	0.074	8.22E-6	5.4

(b) NaCl 溶液, I=0.64mol/l

経過時間 [day]	実流量 [ml/min]	平均流速 [m/s]	pH
12	0.010	1.11E-6	7.2
34	0.010	1.11E-6	7.0
57	0.010	1.11E-6	6.6
79	0.010	1.11E-6	6.3
122	0.078	8.67E-6	6.3
124	0.078	8.67E-6	6.1
126	0.078	8.67E-6	6.2
128	0.078	8.67E-6	6.2

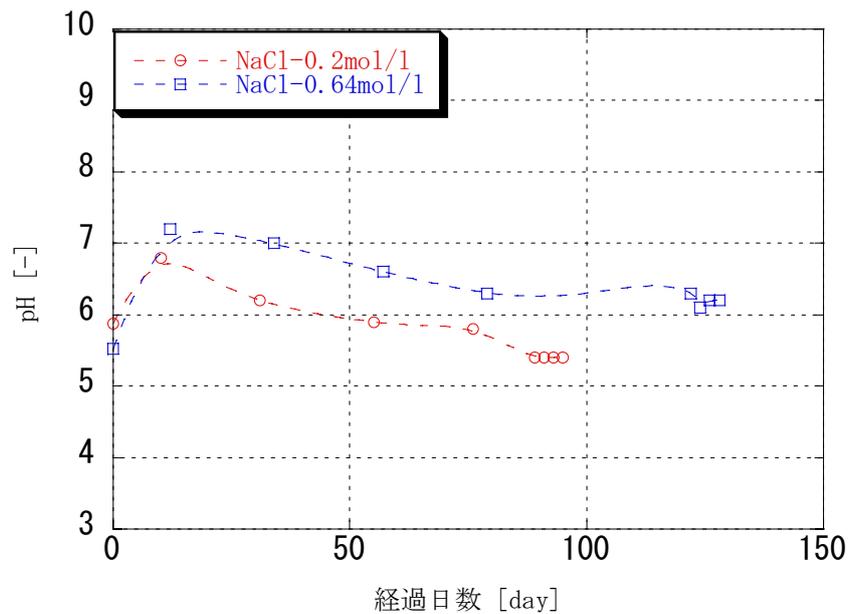


図 3.17 経過時間と pH の関係

### 3.2.2 浸食現象における実験的知見の整理

ここでは、降水系地下水条件(蒸留水)および海水系地下水条件(NaCl 溶液)において実施した浸食現象に関する実験的知見を整理する。

試験手法の概略と結果を整理し、表 3.15 に示す。また、これらの結果を図 3.18 にまとめる。

表 3.15 試験手法と結果

試験	試験水	試験概略	結果
TEST CASE-1	蒸留水	亀裂侵入ベントナイトの形状変形より、臨界流速を概略的に推定	臨界流速： $2 \times 10^{-5}$ m/s と評価
TEST CASE-2	蒸留水	亀裂内流速を多段階で増加させ、液中の元素濃度分析より、浸食コロイド濃度を推定	TEST CASE-1 で評価した臨界流速よりも小さい流れ場での浸食コロイドの生成可能性を示唆
TEST CASE-3	蒸留水	亀裂内流速を一定とし、液中の元素濃度分析より、浸食コロイド濃度を推定	コロイド生成には、時間的な依存性があるとともに、 $2 \times 10^{-6}$ m/s の流れ場における浸食コロイド量を把握
TEST CASE-4	NaCl	亀裂内流速を一定とし、液中の元素濃度分析より、浸食コロイド濃度を推定	$8 \times 10^{-6}$ m/s の流れ場においても、浸食コロイドが生成しないことを把握

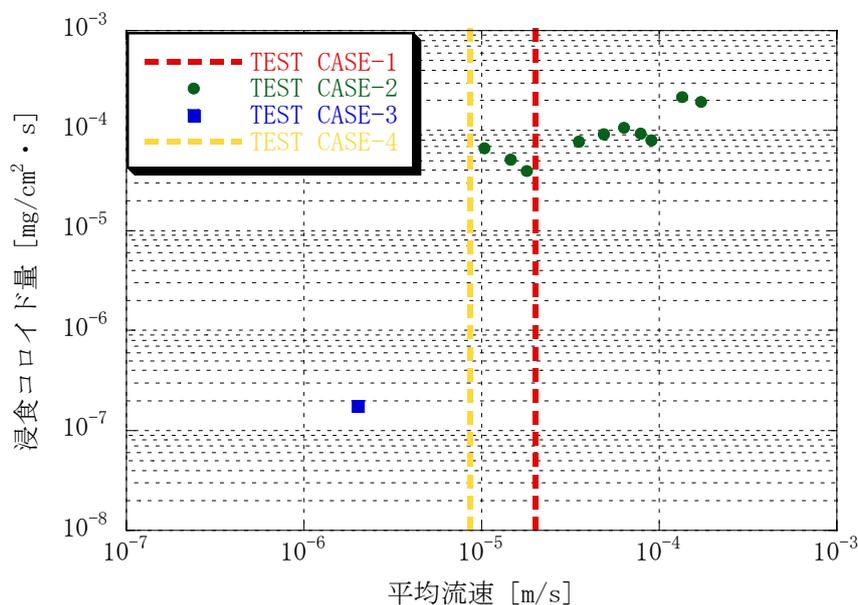


図 3.18 平均流速と浸食コロイド量の関係

図は、横軸に流速、縦軸を浸食コロイド量として、各 TEST CASE の結果をまとめたものである。ここで浸食コロイド量は、浸食現象が発生する場を、流れ場と侵入ベントナイト先端部の界面であるものとし、ベントナイトの侵入距離と亀裂幅から浸食影響を受けると考えられる界面の表面

積を概算した。なお、侵入先端部の形状は、図 3.19 の a もしくは b のような形態が考えられるが、ここでは c と仮定し、単位時間、単位面積当たりに浸食されるコロイド質量として整理を行った。

図中の TEST CASE-1 は、第 2 次取りまとめで評価した臨界流速値を示している。TEST CASE-3 では、一定流速条件の試験において、経時的に浸食コロイド濃度が減少していく傾向がみられ、浸食現象に時間的な依存性があることが確認された。したがって、TEST CASE-3 では、コロイド濃度が安定した域のデータをプロットした。TEST CASE-2 は、TEST CASE-3 で得られた傾向を考慮しておらず、亀裂内流速を段階的に増加させた試験であるため、各流速条件下でのコロイド濃度は、プロットしている値よりも小さくなることが考えられる。TEST CASE-4 では、 $10^{-6}\text{m/s}$  オーダーでコロイドの生成が認められなかった。

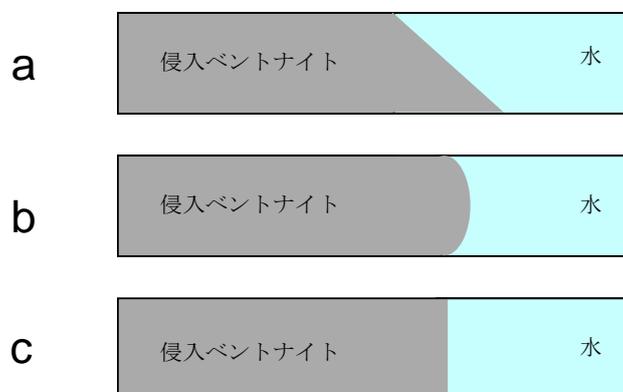


図 3.19 侵入ベントナイト先端部における界面形状断面図

以上より、降水系地下水条件では、平均流速  $2 \times 10^{-6}\text{m/s}$  (TEST CASE-3) の条件下において、コロイドの生成が認められ、これにより、第 2 次取りまとめにおける臨界流速値  $2 \times 10^{-5}\text{m/s}$  (TEST CASE-1) よりも一桁小さい流れ場において緩衝材を起源とするコロイドが生成しうることが確認された。したがって、降水系地下水条件では、浸食が発生する臨界流速は、 $2 \times 10^{-6}\text{m/s}$  よりも小さい流れ場にあるものと推察される。

また、 $0.2\text{mol/l}$  および  $0.64\text{mol/l}$  の両者の NaCl 溶液を用いた試験結果より、 $10^{-6}\text{m/s}$  (TEST CASE-4) オーダーでコロイドの生成が認められなかった。したがって、本試験における海水系地下水条件では、浸食が発生する臨界流速は、 $8 \times 10^{-6}\text{m/s}$  よりも大きい流れ場にあるものと推察される。

これら両者の知見より、浸食現象は、海水系地下水よりも降水系地下水環境において、注意すべき事象であることを概略的に把握した。

#### 4. おわりに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリアの長期健全性を評価するために、緩衝材の流出挙動に関するデータの取得を行った。

緩衝材の侵入現象に関しては、地下水環境条件の一つである地下水化学の観点より、幌延地下水を用いたデータの取得を行い、挙動への影響把握を行った。また、侵入現象モデルの妥当性ならびに適用性の検討に資するために、ケイ砂混合材料を用いた侵入密度分布に関するデータの取得を試みた。これらの結果より、以下の知見が得られた。

- ・ 幌延地下水を用い、亀裂中へのベントナイトの時間と侵入距離に関するデータの取得を行った結果、その侵入距離は降水系地下水(蒸留水)と比較し、著しく小さくなるという知見を得た。また、蒸留水・人工海水・幌延地下水の水質をイオン強度で整理し、それぞれの比例係数を整理した結果、ベントナイトの侵入挙動は、イオン強度が小さい水質ほど侵入し、逆にイオン強度が大きくなるほど、侵入が抑制されることが分かった。
- ・ ベントナイトにケイ砂混合した材料を用い、亀裂侵入部における密度分布に関するデータを取得した結果、ケイ砂混合体を用いた場合の侵入域における平均乾燥密度は、おおよそ  $0.3\text{Mg/m}^3$  以下であり、ベントナイト単体の平均乾燥密度よりも小さくなることを概略的に把握した。

緩衝材の浸食現象に関しては、流速と緩衝材を起源とするベントナイトコロイドの浸食量の関係を定量的に把握するための試験を実施した。これらの結果より、以下の知見が得られた。

- ・ 幌延地下水ならびに人工海水相当のイオン強度に調整した NaCl 溶液を用いて流速と浸食コロイド濃度に関する浸食実験を行った結果、 $I=0.2\text{mol/l}$  ならびに  $I=0.64\text{mol/l}$  では、平均流速  $8 \times 10^{-6}\text{m/s}$  で浸食コロイドは認められなかった。このことから、本条件下では、緩衝材を起源とするベントナイトコロイドが生成・移行しないことを概略的に把握した。

これらの結果は、緩衝材の流出現象を把握する上での基礎データである。したがって、本来複雑である岩盤亀裂内への緩衝材の侵入現象および地下水による浸食現象をより詳細に把握していくためには、処分環境を考慮した上でのデータの取得が必要不可欠である。とくに、地下水組成、温度環境、緩衝材に加わる外圧などによる流出特性への影響を今後把握していく必要がある。

緩衝材の侵入現象に関しては、廃棄体定置後より進行する挙動であり、人工バリアの長期健全性を評価する上で長期予測モデルを構築し、性能評価研究に反映していく必要がある。また、浸食現象に関しては、流速と浸食量の定量的な把握や臨界流速に係わるデータの整備を進め、モデルとの比較や核種移行評価研究へ反映する必要がある。

## 参考文献

- 足立泰久、岩田進午：土のコロイド現象 ー土・水環境の物理化学と工学的基礎ー、学会出版センター(2003)
- A, Avogadro and G, DE Marsily : “The Role of Colloids in Nuclear Disposal” , Scientific Basis for Nuclear Waste Management VII. p. 495-505 (1984)
- Baek, I. and Pitt, Jr. W.W : “Colloid-facilitated Radionuclide Transport in Fractured Porous Rock” , Waste Manage, Vol.16,No.4,pp.313-325 (1996)
- Boisson, J.Y. : “Study on the erosion possibilities by flowing ground waters on bentonite plugs expanded from borehole into fractures” , Proc. NEA/CEC Workshop - Sealing of Radioactive waste repositories (1989)
- Kanno, T. and Wakamatsu, H : “Experimentol Study on Bentonite Gel Migration flom a Deposition Hole” , Proc. 3rd Int. Conf. Nuclear Fuel Reprocessing and Waste Management (RECOD '91), Sendai (1991)
- Kanno, T., et al : “Evaluation of extrusion and erosion of bentonite buffer.” Proc. 7th Int. Conf. on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation (ICEM'99). Nagoya. (1999)
- 菅野毅、松本一浩 : “ベントナイト緩衝材の流出特性の評価(I)” PNC TN8410 97-313 (1997)
- 菅野毅、岩田裕美子 : “緩衝材侵入現象モデルの検討” JNC TJ8400 2003-026 (2003)
- 菅野毅、岩田裕美子 : “緩衝材侵入現象モデルの検討(II)” JNC TJ8400 2003-083 (2004)
- 杉野弘幸、菅野毅 : “拡散モデルを用いた緩衝材の流出挙動の解析的予測” JNC TN8400 99-040 (1999)
- Kersting, A. B., et al : “Migration of Plutonium in Groundwater at the Nevada Test Site, Nature, Vol.397. 7 January ,pp.56-59. (1999)
- 菊池広人、棚井憲治 : “幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験” : JNC TN8430 2004-005(2005)
- 久野義夫、他 : “亀裂岩石中におけるコロイドに助長された核種移行の評価” JNC TN8400 99-022 (1999)

久野義夫、他：“亀裂岩石中でのコロイドおよび溶質の移行研究” JNC TY8400 2001-007 (2002)

黒澤進、他：“ベントナイトコロイドの特性に基づくベントナイトの侵食に関する検討”、日本原子力学会「1998年春の年会」要旨集、p. 598. (1998)

松本一浩、棚井憲治：“ベントナイト緩衝材の流出特性の評価 (II)” JNC TN8400 2003-006 (2003)

松本一浩、棚井憲治：“緩衝材の流出／侵入特性” JNC TN8400 2003-035 (2004)

中野政詩、他：“不飽和粘土の浸潤と膨潤”、農業土木学会論文集、No. 100, pp. 8-16 (1982)

Pusch, R : “Stability of Bentonite Gels in Crystalline Rock - Physical Aspects” , KBS TR 83-04 (1983)

棚井憲治、他：“X線CT法の適用性に関する検討” JNC TN8430 2003-001 (2003)

Tanai, K. and Yamamoto, M : “Experimental and Modeling Studies on Gas Migration in KunigelV1 Bentonite” JNC TN8400 2003-024 (2003)