

ナトリウム型ベントナイトのカルシウム型化に伴う透水係数及び核種の実効拡散係数の変化

三原 守弘

東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部

資料番号：6-7

The Comparison Concerned with Hydraulic Conductivities and Effective Diffusion Coefficients for Nuclides between Na and Ca Bentonite

Morihiro MIHARA

Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

放射性廃棄物の地層処分システムに使用することが想定されているナトリウム型ベントナイトのカルシウム型化に伴う透水係数及び核種の実効拡散係数の変化を調査した。調査においては、ナトリウム型ベントナイトをカルシウム型に処理し、浸出イオン量の88%がカルシウムイオンであることを確認するとともに、乾燥密度をパラメータとして透水係数及びトリチウム、セシウム、ヨウ素の実効拡散係数を取得した。

その結果、乾燥密度が $1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ と高い条件であれば、カルシウム型化ベントナイトの透水係数及び核種の実効拡散係数は、既に報告されているナトリウム型の値と同程度であることが分かった。

We studied changes of hydraulic conductivities and effective diffusion coefficients for nuclides between sodium and calcium bentonite, considering that sodium bentonite changes to calcium bentonite in the geological disposal of radioactive waste.

For the permeability and diffusion experiments, we used calcium bentonite derived from sodium bentonite. Calcium ions comprised 88 % of the leached cations in 1.2×10^3 to $1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ dry density. Results show that the hydraulic conductivities and the effective diffusion coefficients of the calcium bentonite were equivalent to those for the sodium bentonite obtained in the $1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ dry density.

キーワード

放射性廃棄物、地層処分システム、ナトリウム型ベントナイト、カルシウム型化ベントナイト、透水係数、実効拡散係数、トリチウム、セシウム、ヨウ素

Radioactive Waste, Geological Disposal System, Na Bentonite, Ca Bentonite, Hydraulic Conductivity, Effective Diffusion Coefficient, Tritium, Cesium, Iodine

1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分システムにおいては、締め固められたナトリウム型ベントナイトを使用することが検討されている¹⁾。このナトリウム型ベントナイトは、処分施設閉鎖後、地下水や支保工等のセメント系材料及びベントナイト中のカルシウム成分の影響によって、長期的にはカルシウム型になっていくと考えられる。

このベントナイトのカルシウム型化は、処分システムの性能を評価するために重要となる物質移行特性を変化させると考えられる。このため、カルシウム型化したベントナイトの特性を把握する

ことは重要である。

本研究では、締め固められたベントナイト（以下、圧縮ベントナイト）の物質移行特性を表す指標として透水係数と核種の実効拡散係数を選び、カルシウム型化させたベントナイトに対するデータを乾燥密度をパラメータとして取得し、既存のナトリウム型ベントナイトの値と比較した。

2. 物質移行方程式における透水係数と実効拡散係数の役割

圧縮ベントナイトのような媒体中の物質移行は、その間隙水の流れによる移行（移流）と物質

自らが均一になろうとする移行（分散）とに大別される。物質の移行を評価するための移流・分散方程式の一例を以下に示す。

$$\varepsilon R d \frac{\partial C}{\partial t} = (\alpha v + De) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad \dots\dots$$

ここで、C : 間隙水中の物質の濃度 [mol/m³]
 t : 時間 [s]
 ε : 間隙率 [-]
 Rd : 遅延係数 [-]
 α : 分散長 [m]
 v : ダルシー流速 [m/s]
 De : 実効拡散係数 [m²/s]
 x : 評価地点 [m]

である。ダルシーの法則より、媒体の透水係数 (K [m/s]) と動水勾配 (i [-]) : 媒体における水圧の勾配) の関係が $v = Ki$ で表されることから、式は以下のように書き直される。

$$\varepsilon R d \frac{\partial C}{\partial t} = Ki \left(\alpha \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial C}{\partial x} \right) + De \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \dots\dots$$

式より、評価地点の間隙水中の物質の濃度変化（左辺）は、透水係数が関与する項（右辺第一項）及び実効拡散係数が関与する項（右辺第二項）の和によって表されることが分かる。

なお、Deを $\varepsilon R d$ で除した値は、見掛けの拡散係数と呼ばれる。

3. ナトリウム型とカルシウム型の物性の違い

ベントナイトは、含まれる交換性陽イオンの種類により、ナトリウム型とカルシウム型に大別される。

ナトリウム型ベントナイトは、膨潤性や粘性に優れており、カルシウム型ベントナイトは、砂との粘結力に優れている。そのため工業的には、前者は土木・ボーリング用に、後者は鋳物用に用いられている。

また、ナトリウム型ベントナイトはカルシウム型ベントナイトより止水性、膨潤性に優れているとされているため、放射性廃棄物の処分においては、ナトリウム型ベントナイトの使用の検討が主になされている¹⁾。

Puschはナトリウム型ベントナイトがカルシウム型に変化すると、密度 $1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ において膨潤圧が0.5MPaから0.4MPaまで減少し、透水係数が2～5倍大きくなることを報告²⁾している。さらにその後の研究によって、Puschらは、低乾燥密度において、カルシウム型ベントナイトの透

水係数は、ナトリウム型ベントナイトより1桁以上大きくなることを報告している³⁾。

また、Westsikらは、圧縮成型したナトリウム型及びカルシウム型の両ベントナイトの透水係数を測定した（含水率5～7wt%のベントナイトを約 $2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ に圧縮成型⁴⁾）。その結果、ナトリウム型ベントナイトの透水係数が 10^{-15} m/s のオーダーで、カルシウム型ベントナイトの透水係数が 10^{-14} m/s のオーダーであること、並びに、密度が高い状態においても両者の透水係数は1桁程度差がある結果を示している。

4. カルシウム型化ベントナイトの調整

4.1 カルシウム型化させたナトリウム型ベントナイト

本研究では、透水係数や核種の実効拡散係数が体系的に取得されている国産のベントナイト、クニゲルV1（クニミネ工業社製、山形県月布地方産）を使用した。表1にその鉱物組成の一例を示す⁵⁾。

4.2 調整方法

粉体状のナトリウム型ベントナイトを用いてカルシウム型化の調整を行った。調整の手順を以下に示す。

イオン交換水 50 dm^3 を攪拌機で攪拌しながら、カルシウム量が調整するベントナイトの陽イオン交換容量の約3倍に相当する塩化カルシウム2水和物 1.5 kg (約 10 mol) を徐々に溶かした。

ベントナイト 13 kg を少量ずつ分散させ、1時間攪拌した後、懸濁液を一昼夜以上静置した。

分離した上澄み液を除去し、残りの懸濁液をブフナーロートでろ過・水洗した。

水洗を 3 dm^3 の蒸留水で3～4回程度繰り返した後に、ろ液を採取し塩化物イオンの存在を調べるため硝酸銀溶液を加えた。ろ液の白濁は

表1 ナトリウム型ベントナイトの鉱物組成の一例⁵⁾

鉱物種	定量結果 (wt%)		定量方法
スメクタイト	46～49		MB, CEC
石英	29～38	(0.5～0.7)	X線, モード
玉髄		(37～38)	X線, モード
斜長石	2.7～5.5		X線, モード
方解石	2.1～2.6		X線, モード, 分析
苦灰石	2.0～2.8		X線, モード, 分析
方沸石	3.0～3.5		X線, モード
黄鉄鉱	0.5～0.7		DTA, モード, 分析

() 石英と玉髄を分けて考えた場合

MB; メチレンブルー吸着量, CEC; 陽イオン交換容量,

X線; X回折法(内部標準法, 標準添加法), モード; モード分析, 分析; 化学分析, DTA; 熱分析発熱量

みられないことから、塩化物イオンが除去されているものと判断した。

ブフナーロー上へのベントナイトケーキをステンレスバットに移し、50℃にて乾燥した。

乾燥したベントナイトケーキを調整前のベントナイトと同程度の粒度になるよう、200メッシュ（直径約74μm）のふるいを90wt%以上が通過するように粉碎した。

4.3 カルシウム型化の確認及び概略的な特性把握

カルシウム型化の程度を調べるためにナトリウム型ベントナイトとカルシウム型に調整したベントナイトの浸出陽イオン量などの分析を行った。また、その概略的な特性を調べるための試験もあわせて行った。

以下に測定項目を示す。

膨潤力（容積法）	[mL / 2 g]
pH	[-]
メチレンブルー吸着量	[mmol/100g]
浸出陽イオン量	[meq/100g]
陽イオン交換容量	[meq/100g]
化学組成	[wt%]

～ については日本ベントナイト工業会試験方法に準拠した。

ナトリウム型ベントナイト及びカルシウム型に

表2 ナトリウム型及びカルシウム型に調整したベントナイトの分析結果

項 目		ナトリウム型 ベントナイト	カルシウム型に調整 したベントナイト
膨潤力 [mL/2g]		17	6
pH [-]		10.1	9.4
メチレンブルー吸着 [mmol/100g]		70.0	71.3
浸出陽 イオン量 [meq/100g]	Na ⁺	53.9	5.2
	K ⁺	1.4	1.4
	Ca ²⁺	48.5	102.8
	Mg ²⁺	7.4	7.0
	Total	111.2	116.4
陽イオン交換容量 [meq/100g]		59.9	60.8
化 学 組 成 [wt%]	SiO ₂	70.6	69.4
	TiO ₂	0.18	0.17
	Al ₂ O ₃	13.5	13.2
	Fe ₂ O ₃	0.96	1.00
	FeO	0.58	0.54
	MnO	0.08	0.08
	MgO	2.25	2.24
	CaO	2.17	3.61
	Na ₂ O	2.56	0.88
	K ₂ O	0.33	0.30
	P ₂ O ₅	0.04	0.05
	Ig loss	5.35	7.31
	Total	98.6	98.8
	Total S	0.09	0.06
	SO ₄ ²⁻	0.08	0.02
	CO ₂	2.16	2.23
	Cl ⁻	<0.01	<0.01

調整したベントナイトの分析及び試験結果を表2に示す。カルシウム型に調整したベントナイトの浸出陽イオンの88%がカルシウムイオンであることから、ベントナイトがカルシウム型化していることが分かる。また、調整したベントナイトの膨潤力は約1/3程度となっていた。これは、膨潤性が低下し、粘結力が増加するというカルシウム型ベントナイトの特性と一致している。ベントナイトの化学分析の結果では、カルシウム型化にともないNa₂O及びCaOが変化している。また、ベントナイトの塩化物が定量下限値以下であり、調整時に混入する塩化物が除去されていることを確認した。

以上の分析結果より、ナトリウム型ベントナイトがカルシウム型化されていることが確認された。以下、この調整したベントナイトをカルシウム型化ベントナイトと称することとする。

5. カルシウム型化ベントナイトの透水係数

5.1 透水係数の取得法

透水係数を測定する方法には、定水位透水試験（定圧透水試験やアウトプット法ともいう。）と変水位透水試験とがある。ここでは、既にナトリウム型ベントナイトに対して用いられている定水位透水試験⁶⁾にて透水係数を測定することとする。

試験装置の概念図を図1に示す。この試験は、試験セルに設置した試料の片方から一定の水圧をかけ、もう一方から流出する水量を一定時間毎に測定し、単位時間あたりの試料の透過水量の定常値（ Q_w [m³/s]）を取得するものである。この定常値は、式によって透水係数に換算される。

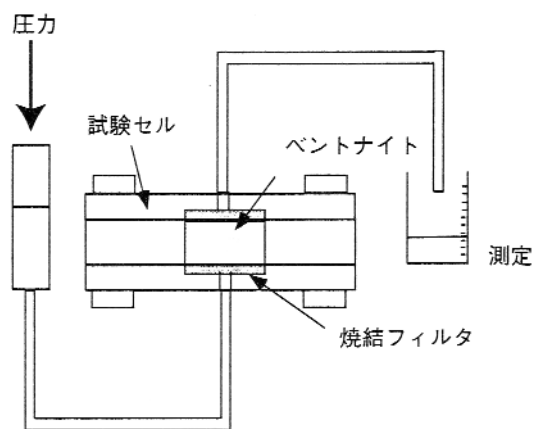


図1 透水試験装置概念図

$$K = \frac{Q_w}{A i} \quad \dots\dots$$

ここで、K : 透水係数 [m/s]
 Q_w : 単位時間当たりの透水量 [m^3/s]
 i : 動水勾配 [-]
 A : 試料断面積 [m^2]

である。

5.2 試験条件

以下に試験条件について述べる。

ベントナイト試料

4. で調製したカルシウム型化ベントナイトを試験に供した。

試料の乾燥密度及び試料の大きさ

既に報告されているナトリウム型ベントナイト(クニゲルV1)の試験結果⁶⁾を参考にして、乾燥密度を $1.2 \sim 1.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ の範囲とした。試料の大きさについては水を透過させる断面を直径50及び40mmの円形とし、試料の厚さをそれぞれ5及び20mmとした。

使用した溶液

蒸留水または、イオン交換水とした。

動水勾配

既存の報告例⁵⁾を参考に、ダルシーの法則が成立することを確認しながら動水勾配が3,000～20,000の範囲で試験を実施した。

温度

室温で実施した。

以上の条件を表3にまとめる。

5.3 試験結果及び考察

図2に既に報告されているナトリウム型ベントナイトの透水係数⁶⁾と本試験で得られたカルシウム型化ベントナイトの乾燥密度依存性を示す。

カルシウム型化ベントナイトの透水係数はナトリウム型ベントナイトと同様に、乾燥密度が大きくなるにともない小さくなっており、乾燥密度が

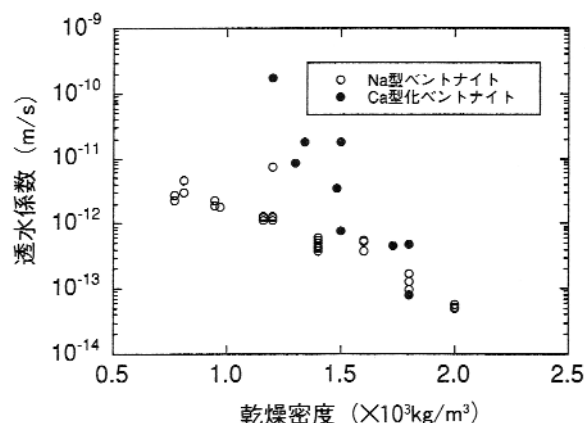


図2 圧縮ベントナイトの透水係数の乾燥密度依存性

$1.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ では、 10^{-13}m/s 程度である。この値は、同乾燥密度のナトリウム型ベントナイトの透水係数と同程度である。しかし、乾燥密度が小さい領域では、カルシウム型化ベントナイトの透水係数の増大の程度は、ナトリウム型のそれを上まわり、乾燥密度 $1.2 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ では、約1桁以上大きくなっていることが分かる。これは、低飽和密度において、カルシウム型ベントナイトの透水係数が、ナトリウム型ベントナイトより1桁以上大きくなることを示しているPuschらの報告³⁾と同様な傾向であった。

また、図2よりカルシウム型化ベントナイトの透水係数は、ナトリウム型ベントナイトの透水係数に比べて乾燥密度の変化による影響が大きいことが分かる。

6. カルシウム型化ベントナイトの核種の実効拡散係数

6.1 実効拡散係数の取得法

実効拡散係数の取得方法には、大きく分けて濃度プロファイル(In-diffusion)法と透過拡散(Through-diffusion)法とがある。前者の方法は、見掛けの拡散係数($= D_e / \varepsilon R_d$)を取得する方法であり、用いる核種がベントナイトに対して非収着性(すなわち、 $R_d = 1$)であれば、得られる見掛けの拡散係数と間隙率を用いて実効拡散係数を算出することができる。収着性の核種の場合は、得られる見掛けの拡散係数から実効拡散係数を求めるために、別途未知量である遅延係数を推定する必要がある。ここでは、収着性の核種についても実効拡散係数を取得するため、直接実効拡散係数が取得できる透過拡散法を用いることとする。そこで、Katoらがナトリウム型ベントナイトに対して行った試験方法⁷⁾を用いることとし、本試験

表3 透水試験条件

項目	試験条件
ベントナイト試料	4. で調整したカルシウム型化ベントナイト
乾燥密度	$1.2 \sim 1.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
大きさ	直径50×5mm, 直径40×20mm
試験溶液	蒸留水またはイオン交換水
動水勾配	3,000～20,000
温度	室温

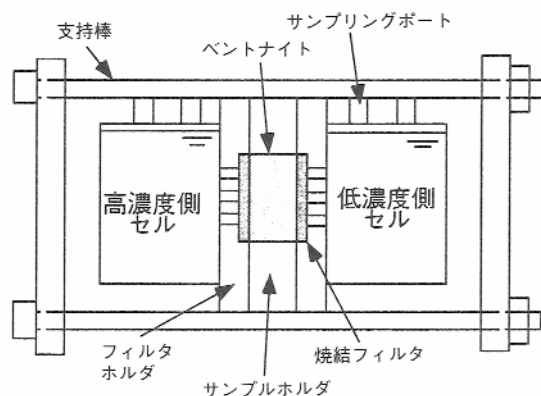


図3 拡散試験装置概念図

で用いた試験装置の概念図を図3に示す。試料が流出しないように2枚の焼結フィルタ(厚さ1 mm)で試料を挟んで両側に溶液セルを設ける。試料を十分溶液で飽和させた後、一方のセルには測定対象とする核種を添加する(このセルを「高濃度側セル」といい、この濃度を C_0 [mol/m³]とする)。核種は拡散現象によって他方のセルへと移行する(このセルを「低濃度側セル」という)。低濃度側セルの核種の濃度(C [mol/m³])を測定することにより単位時間あたりの核種の低濃度側セルへの流入量を算出する。時間が経つと単位時間あたりの核種の流入量は一定となる。一定となった値(Q_t [mol/s])と、 C_0 、 C の条件から導出される次式を用いることによって実効拡散係数が求められる。

$$De = \frac{Q_t L}{A C_0} \quad \dots\dots$$

ここで、 De : 実効拡散係数 [m²/s]
 Q_t : 単位時間当たりの核種の流入量 [mol/s]
 L : 試料厚さ(焼結フィルタの厚さ含む) [m]
 A : 試料断面積 [m²]
 C_0 : 高濃度側の核種濃度 [mol/m³]

である。求めた値は、2枚の焼結フィルタの影響を含んでいるため、試験終了後のフィルタに対しても同様に核種の実効拡散係数を取得する。求められた実効拡散係数より、次式を用いてベントナイトのみの実効拡散係数を算出する。

$$De_b = \frac{L_b}{\frac{L_f}{De} - \frac{2 \times L_f}{De_f}} \quad \dots\dots$$

ここで、 De_b : ベントナイト中での核種の実効拡散係数 [m²/s]

De_f : フィルタ中での実効拡散係数 [m²/s]

L_b : ベントナイト部のみの厚さ [m]

L_f : フィルタ1枚の厚さ [m]

である。

6.2 試験条件

以下に試験条件について述べる。

使用した核種と濃度

本試験で使用した核種については、ベントナイトの間隙水での化学形態を考慮して以下のものを選定した。

1) トリチウム (H - 3)

本核種は、中性付近では電荷を帯びておらず、ベントナイトにほとんど吸着しないため、他の核種と比較して試験期間を短くできる特徴を有している。核種の濃度は約 5×10^4 cpm/cm³ となるように調整し、両セルからサンプリングを行い濃度を測定した。

2) セシウム (Cs - 137、CsClの化学形態)

セシウムは、溶液中では正の一価(Cs^+)であり、雰囲気の影響によって化学形態は変化しない。ベントナイトに収着する特徴を有しており、ナトリウム型ベントナイトに対する分配係数は0.1m³/kgオーダである⁸⁾。本拡散試験では、高濃度側槽の核種濃度を一定に保つ必要があるため、あらかじめベントナイトへの収着による濃度減少を考慮して、非放射性のCsを添加し、Cs - 137の濃度減少を押さえた。非放射性のCsの濃度を 10^{-3} mol/dm³とした。Cs - 137の濃度は、約 10^5 cpm/cm³となるように調製した。

3) ヨウ素 (I - 125、NaIの化学形態)

ヨウ素は、溶液中では負の一価(I^-)である。溶液の酸化還元電位が高い場合には、同じ負のイオンであるヨウ素酸の化学形態(IO_3^-)も取り得る⁹⁾。負のイオンは、ベントナイトにほとんど収着しない。I - 125の濃度をCs - 137と同様、約 10^5 cpm/cm³となるように調製した。

いずれの核種についても、試験中は高濃度側セルの核種濃度の測定を行い、核種濃度を確認した。

ベントナイト試料

4) で調整したカルシウム型化ベントナイトを試験に供した。

ベントナイトの乾燥密度及び試料の大きさ

既に報告されているナトリウム型ベントナイト(クニゲルV1)の試験結果^{7), 10), 11)}を参考にして、透水試験と同様に乾燥密度を $1.2 \sim 1.8 \times 10^3$ kg/m³の範囲とした。

表4 拡散試験条件

項 目	試験条件
核 種	H-3, Cs-137, I-125
核種濃度	$10^4 \sim 10^5 \text{cpm/cm}^{-3}$
ベントナイト試料	4. で調整したカルシウム型化ベントナイト
乾燥密度	$1.2 \sim 1.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
大きさ	直径20×3及び20mm
試験溶液	pH約9.4の水酸化カルシウム溶液
雰囲気	大気条件
温 度	室温

試料の大きさは直径20mm、高さ20mm（H-3のみ）及び3mm（Cs-137、I-125）の円筒形とした。

試験液性

試料を挟む両側のセルの溶液には、カルシウム型化ベントナイトの間隙水を模擬した溶液を用いた。表2に示される結果より浸出陽イオンのほとんどがカルシウムイオンであるため、pH約9.4の水酸化カルシウム水溶液とした。

雰囲気

本試験で用いた核種の化学形態は雰囲気にあまり影響を受けないため大気条件とした。

温度

室温で実施した。

以上の試験条件をまとめた結果を表4に示す。

6.2 試験結果及び考察

トリチウム（H-3）の実効拡散係数

図4に本試験で得られたカルシウム型化ベントナイト及び既に報告されているナトリウム型ベントナイトの実効拡散係数^{7), 10), 11)}の乾燥密度依存性を示す。

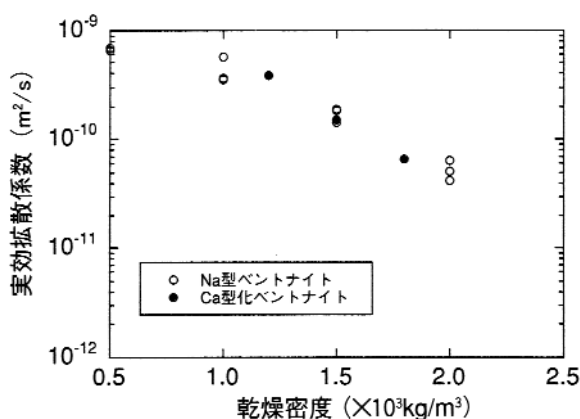


図4 圧縮ベントナイトのH-3の実効拡散係数の乾燥密度依存性

カルシウム型化ベントナイトのトリチウムの実効拡散係数は、乾燥密度が大きくなるにともない小さくなっている。乾燥密度が $1.2 \sim 1.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ の範囲では、実効拡散係数は、 $10^{-11} \sim 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ のオーダーである。

この図から分かるようにこの乾燥密度の範囲では、ナトリウム型の実効拡散係数とほぼ同じ値を示している。

セシウム（Cs-137）の実効拡散係数の乾燥密度依存性

図5に本試験で得られたカルシウム型化ベントナイト及び既に報告されているナトリウム型ベントナイトの実効拡散係数¹¹⁾の乾燥密度依存性を示す。

カルシウム型化ベントナイトのセシウムの実効拡散係数についても、トリチウムと同様に乾燥密度が大きくなるにともない小さくなっており、乾燥密度 $1.2 \sim 1.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ の範囲では、 $10^{-11} \sim 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ のオーダーである。

ナトリウム型と比較すると、乾燥密度 $1.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 程度では、セシウムの実効拡散係数は、ナトリウム型より小さくなっているが、乾燥密度 $1.2 \sim 1.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ の範囲でみると、ほぼ同程度の値である。

ヨウ素（I-125）の実効拡散係数の乾燥密度依存性

図6に本試験で得られたカルシウム型化ベントナイトの実効拡散係数の乾燥密度依存性を示す。また、透過拡散試験法においては、ナトリウム型ベントナイトに対するヨウ素の実効拡散係数が取得されていないため、間隙水中で同じ化学形態と推定される $\text{Tc} (\text{TcO}_4^-)$ を示す¹¹⁾。

カルシウム型化ベントナイトのヨウ素の実効拡

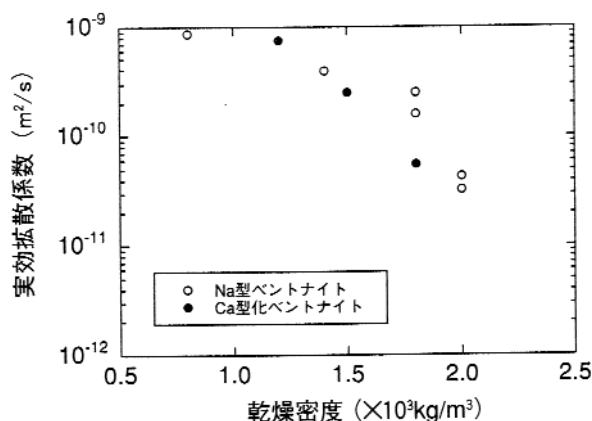


図5 圧縮ベントナイトのCs-137の実効拡散係数の乾燥密度依存性

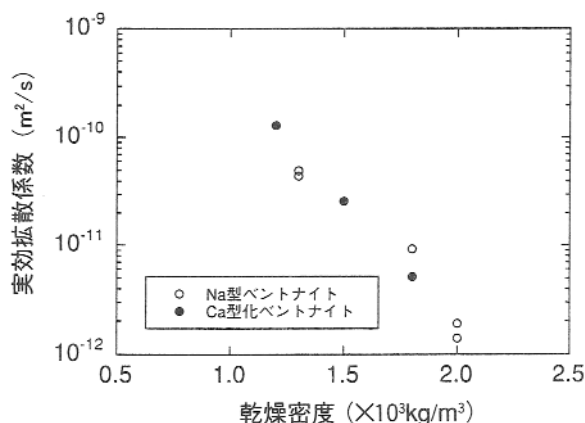


図6 圧縮ベントナイトの I-125の実効拡散係数の乾燥密度依存性

(Na型ベントナイトについては、Tc-99の値)

散係数は、乾燥密度が大きくなるにともない小さくなっており、 $10^{-12} \sim 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ のオーダーである。

この結果は、ナトリウム型ベントナイトに対するTcの値と同程度の値である。

～の結果を基にカルシウム型化ベントナイトのみの実効拡散係数を図7にまとめる。核種ごとに比較すると、乾燥密度 $1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ では、セシウムとトリチウムの実効拡散係数はほぼ同程度であるがそれ以外の乾燥密度での実効拡散係数の大きさは、セシウム トリチウム>ヨウ素の順となっていた。これら核種の水溶液中での自己拡散係数は、 $2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 程度^{(10), (12)}であるが、実効拡散係数での比較ではヨウ素の実効拡散係数がトリチウムやセシウムの値より1桁程度小さくなっている。特に乾燥密度が大きくなるとその差は顕著となる。一般に、ベントナイト等の珪酸塩鉱物の表面は、負に帯電しているといわれており、こ

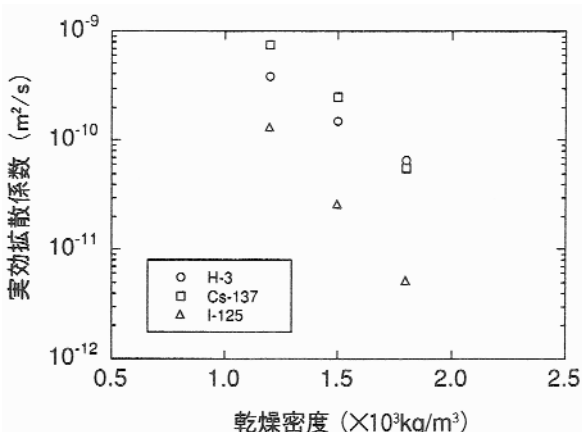


図7 圧縮Ca型化ベントナイトの核種の実効拡散係数の乾燥密度依存性

の影響によって陰イオンとして存在するヨウ素が反発され、実効拡散係数が他の核種よりも小さくなっていると推定される。このことは、ナトリウム型ベントナイトについても同様である。

また、ナトリウム型ベントナイトとの比較から、透水係数は低乾燥密度において1桁程度の差がみられたが、実効拡散係数はどの核種においてもナトリウム型と同程度の値であった。

7. おわりに

本研究においては、浸出陽イオン量の88%がカルシウムイオンであることを確認したカルシウム型化ベントナイトに対して透水係数及び実効拡散係数を取得した。これらの値と調整前のナトリウム型ベントナイトに対して報告されている値とを比較した結果、以下のことが分かった。

カルシウム型化ベントナイトの透水係数は、乾燥密度が $1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ の場合は、ナトリウム型と同程度の値であるが、乾燥密度が $1.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 程度となると、一桁以上大きくなる。

カルシウム型化ベントナイトの実効拡散係数については、どの核種についてもナトリウム型と同程度の値であった。実効拡散係数の大きさを核種毎で比較すると、セシウム トリチウム>ヨウ素となり、ヨウ素の実効拡散係数はセシウム、トリチウムより一桁程度小さく乾燥密度 $1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ で $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーであった。

以上の結果より、乾燥密度が $1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ と高い条件であれば、カルシウム型化ベントナイトの透水係数、実効拡散係数はともにナトリウム型と同程度であると考えられる。

8. 謝辞

本研究を実施するにあたって御協力頂いたクニミネ工業(株)、三菱マテリアル(株)及び鹿島建設(株)の関係各位に感謝する次第である。

参考文献

- 1) 例えば、動燃事業団：“高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 - 平成3年度 -”，動燃事業団技術資料，PNC TN 1410 92-081 (1982)。
- 2) R.Pusch：“Chemical Interaction of Clay Buffer Materials and Concrete”，SFR ARBETSRAPPORT，SFR 82-01 (1982)。
- 3) R.Pusch, O.Karlund, et al.：“GMM-A general microstructural model for qualitative and quantitative studies of smectite clay”，SKB TECHNICAL REPORT，90-43 (1990)。
- 4) J.H.Westsik, L.A.Bray et al.：“Permeability, Swelling, and Radionuclide-Retardation Properties of Candidate Backfill Materials”，PNL-SA-9645，DE82 005921 (1981)。
- 5) 伊藤雅和，岡本真由美 他：“ベントナイトの鉱物組成分析”，

- 動燃事業団技術資料, PNC TN8430 93-003 (1983).
- 6) 鈴木英明, 柴田雅博 他: 緩衝材の特性試験 (I), 動燃事業団技術資料, PNC TN9410 92-057 (1982).
- 7) H.Kato, M.Muroi et al.: "Estimation of Effective Difusivity in Compacted Bentonite", MRS Symp, Proc. Vol.353 (1995).
- 8) 渋谷朝紀, 吉川英樹 他: "ペントナイト及び岩石中での核種の分配係数", 動燃事業団技術資料, PNC TN8410 92-163 (1992).
- 9) 例えば, D.G.Brookins: "Eh-pH Diagrams for Geochemistry", Springer-Verlag (1988).
- 10) 佐藤治夫, 芦田 敬 他: "ペントナイト及び岩石中での核種の実効拡散係数", 動燃事業団技術資料, PNC TN8410 92-163 (1992).
- 11) 動燃事業団: "地層処分研究開発の現状 (平成5年度)", 動燃事業団技術資料, PNC TN8410 92-164 (1994).
- 12) 日本化学会編: "改訂3版 化学便覧 基礎編", 丸善株式会社 (1984).