



JAEA-Data/Code

2009-029

緩衝材及び岩石中の核種の拡散データベースの整備

—海外の緩衝材データの拡充とその活用法—

Development of Diffusion Database of Buffer Materials and Rocks
-Expansion and Application Method of Foreign Buffer Materials-

栃木 善克 館 幸男

Yoshikatsu TOCHIGI and Yukio TACHI

地層処分研究開発部門
地層処分基盤研究開発ユニット

Geological Isolation Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-
Data/
Code

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

緩衝材及び岩石中での核種の拡散データベースの整備
—海外の緩衝材データの拡充とその活用法—

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門
地層処分基盤研究開発ユニット
柄木 善克※, 館 幸男

(2009年12月18日 受理)

日本原子力研究開発機構（JAEA）では、地層処分の安全評価における核種移行パラメータ設定への活用を目的として、緩衝材（ベントナイト）や岩石中での拡散係数に関するデータを、拡散データベース（Diffusion DataBase; DDB）として整備してきた。第2次取りまとめに際し、最初のデータベースを国内の岩石を対象に整備した後、緩衝材への対象範囲の拡張や最新データの拡充、データベースの構造や機能の改良、Web ブラウザでの利用環境の整備等、様々な観点でデータベースの更新・改良を進めてきた。特に、パラメータ推定、傾向性把握、管理するデータの信頼性に関する情報の入力など、今後のパラメータ設定へのデータベースの有効活用を図るための開発・改良を進めてきた。

本報告において、国内の岩石及び緩衝材中の核種の拡散係数に係るデータを格納・管理している既存のデータベース(JAEA-DDB)に対し、対象範囲を海外産のベントナイトに拡張してデータの追加を行った。データの追加により、総データ数（実測値）は、実効拡散係数 D_e が約 600 件、見かけの拡散係数 D_a は 1,750 件となった。整備したデータベースによる活用例として、乾燥密度や部分スメクタイト密度に対する拡散係数の関係を図示し、元素・固相・試験環境による影響に関して、特に国産・海外産ベントナイトのデータ傾向の比較評価の例を示した。海外産ベントナイトと国産ベントナイトのデータについて、部分スメクタイト密度の概念の適用により同一指標で共通的にデータを表現できることが分かった。

核燃料サイクル工学研究所（駐在）：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

※ 技術開発協力員

Development of Diffusion Database of Buffer Materials and Rocks
- Expansion and Application Method of Foreign Buffer Materials -

Yoshikatsu TOCHIGI[※] and Yukio TACHI

Geological Isolation Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 18, 2009)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has been developing database of diffusion parameters in buffer material (bentonite) and rock, which are key parameters for safety assessment of the geological disposal. The diffusion database (DDB) has been firstly developed as an important basis for the H12 performance assessment (PA) of high-level radioactive waste disposal in Japan. JAEA is continuing to improve and update the DDB in view of expanding the data range and structure of database. In particular, development and updating such as parameter estimation, finding data trend, examining related information concerning reliability have been carried on to apply the database in parameter setting for safety assessment.

The database for utilizing the data related to the diffusion coefficient of nuclides in the domestic buffer material and rock (JAEA-DDB) was expanded with data concerning diffusion coefficient in the foreign buffer materials. As the result of data addition, total data count (measured data) of effective diffusion coefficient is about 600 and that of apparent diffusion coefficient is 1,750. As an example of practical use of the improved database, the example of evaluation for the plot of a diffusion coefficient vs. dry and partial smectite density was discussed. Especially, similarities or differences between domestic and foreign bentonites affected with elements, solid phases and experimental environments are emphasized

As a result of introducing partial smectite density for database update, domestic and foreign bentonites are normalized on same index and compared each other on the same plot of measured data.

Keywords: Diffusion Coefficient, Database, Buffer Material, Bentonite, Geological Disposal

※ Collaborating Engineer

目 次

1. はじめに.....	1
1.1 背景及び目的.....	1
2. データベースの拡充と活用法検討の方針	2
2.1 拡散データベースのデータ構成.....	2
2.2 信頼性情報の取扱い	4
2.3 関連パラメータの導出/推定法.....	5
2.3.1 拡散関連パラメータの関係と導出/推定法	5
2.3.2 緩衝材系データに関する部分スメクタイト密度の導入	6
2.4 データ拡充の方針.....	7
2.5 データ評価と活用のアプローチ.....	7
3. 評価対象データ	8
3.1 調査方法・範囲.....	8
3.2 調査方針.....	8
3.3 調査対象.....	8
3.4 調査結果.....	8
4. データベースの利用による拡散係数評価と活用法	17
4.1 トリチウム水の評価 (HTO)	17
4.2 1 値の陽イオンの評価例 (Cs^+)	20
4.3 1 値の陰イオンの評価例 (I^- , Cl^-)	27
4.4 アクチニドの評価例.....	31
5. まとめ.....	35
謝辞.....	35
参考文献.....	36

Contents

1. Introduction	1
1.1 Background and objective	1
2. Expansion and application policy for Database	2
2.1 Structure of Diffusion Database	2
2.2 Reliability Information	4
2.3 Derivation and estimation of diffusion parameters	5
2.3.1 Relation of diffusion parameters and method of derivation and estimation	5
2.3.2 Introducing partial smectite density concerning buffer materials	6
2.4 Policy of data expansion	7
2.5 Data estimation and application approach	7
3. Data for evaluation	8
3.1 Examination method and scope of survey	8
3.2 Examination policy	8
3.3 Data for evaluation	8
3.4 Evaluation result	8
4. Data evaluation using updated database	17
4.1 Example of examining Tritium (HTO)	17
4.2 Example of examining monovalent cation (Cs^+)	20
4.3 Example of examining monovalent anion (I^- , Cl^-)	27
4.4 Example of examining actinides	31
5. Conclusion	35
Acknowledgment	35
References	36

図 目 次

図 2.1 拡散試験方法と関連パラメータの導出/推定フロー	5
図 2.2 幾何学因子 (GF) と部分スメクタイト密度の相関	6
図 4.1 乾燥密度に対する HTO の実効拡散係数	19
図 4.2 部分スメクタイト密度に対する HTO の実効拡散係数	19
図 4.3 部分スメクタイト密度に対する Cs ⁺ の実効拡散係数 (実測値のみ)	23
図 4.4 乾燥密度に対する Cs ⁺ の見かけの拡散係数	24
図 4.5 部分スメクタイト密度に対する Cs ⁺ の見かけの拡散係数	24
図 4.6 部分スメクタイト密度に対する Cs ⁺ の見かけの拡散係数 (国産ベントナイトのみ)	25
図 4.7 部分スメクタイト密度に対する Cs ⁺ の見かけの拡散係数 (環境条件による絞込済)	25
図 4.8 部分スメクタイト密度に対する Cs ⁺ の収着分配係数 (推定値含む)	26
図 4.9 乾燥密度に対する I ⁻ の実効拡散係数 (実測値のみ)	29
図 4.10 部分スメクタイト密度に対する I ⁻ の実効拡散係数 (実測値のみ)	29
図 4.11 乾燥密度に対する Cl ⁻ の実効拡散係数 (実測値のみ)	30
図 4.12 部分スメクタイト密度に対する Cl ⁻ の実効拡散係数 (実測値のみ)	30
図 4.13 部分スメクタイト密度に対する U の見かけの拡散係数	33
図 4.14 部分スメクタイト密度に対する Np の見かけの拡散係数	33
図 4.15 部分スメクタイト密度に対する Pu の見かけの拡散係数	34
図 4.16 部分スメクタイト密度に対する Am の見かけの拡散係数	34

表 目 次

表 2.1 拡散データベースのデータテーブル	2
表 2.2 信頼性情報を付加したデータベース項目と記載内容の例	4
表 3.1 調査対象とした文献と対象とした固相・元素・試験手法一覧 (海外産ベントナイト)	10

This is a blank page.

1. はじめに

1.1 背景及び目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価において、人工バリア（緩衝材）の候補材として検討されているベントナイト中、および天然バリアとしての性能が期待される岩石マトリクス中の核種の移行遅延を評価する上で、放射性核種を含む化学種の吸着・拡散現象が重視されている。吸着・拡散に係る吸着分配係数や拡散係数等のパラメータを、実測データや現象論的モデル等をベースに、様々な地質環境や地球化学条件、更には時間的・空間的な不確実性等も考慮して、適切に設定することが地層処分安全評価上重要となる。日本原子力研究開発機構（JAEA）では、このような各種パラメータを集約して管理・活用するためのデータベースを構築・整備し、これを活用した実際の地質環境での吸着・拡散パラメータの設定法に関する検討についても進めてきた。このようなパラメータ設定における実測値を集約したデータベースの活用に関しては、従来からその重要性が認識されており、実測データの傾向性等をベースにパラメータ設定を検討する従来アプローチが今後とも一定の重要性をもつことが確認してきた。

以上を背景として、ベントナイトと岩石の両者を対象として記述された既存の文献を調査・整理し、データベースに登録することがデータの管理と活用の観点で重要であると考えている。データベースとしては、既に、第2次取りまとめ¹⁾における岩石中の実効拡散係数設定を目的とした拡散係数のデータベース²⁾をまとめ、これをPC上で動作するデータベースシステムとし、順次改良しつつ公開してきた³⁾⁴⁾。2008年度には、データベースが持つデータ定義・構造を見直し、既存のデータベースを拡張・改良すると共に、収録データ範囲に国産のベントナイトを加えた⁵⁾。

前著⁵⁾では、拡散係数データベースの定義および格納データの拡充・更新の実施に関して、その詳細を記すと共に、改めて拡散係数と関連パラメータに関して、その導出試験の方法やパラメータ間の相関等を明記した。データベースの更新は、特に、データ評価における推定値の導入、推定値と実測値を区別して扱うための手法検討、信頼性情報に係る記述の導入などに重点を置いて実施した。更新後のデータベース定義の詳細をまとめるとともに、同定義に従い、既存の国内岩石を対象としたデータを見直し、ベントナイトを対象としたデータを追加した。

同データベースは、インターネットを通じて公開するWebアプリケーションへ改良したデータベースシステム⁶⁾に登録し、2008年度末から公開を開始した。

本報告では、海外産ベントナイトの拡散係数と関連パラメータを対象として文献調査を実施し、データベースに格納・管理するデータの範囲の拡張に関して記した。拡張したデータベースは、2009年度末から公開予定である。

さらに本報告では、既存データ・拡張したデータの全てを登録したデータベースを使用し、データの活用に関する検討を実施した。検討にあたり、特に2008年度から導入した部分スメクタイト密度による規格化の概念に着目し、既存の国産ベントナイトのデータと拡張した海外産ベントナイトのデータを同一の尺度で比較可能であることを検証した。比較可能であれば、注目した元素の拡散係数と関連データに関して、国産・海外産ベントナイトの両方で得られたデータから幅広くデータを収集し、拡散現象に係るパラメータ設定に活用することが可能になると考えられる。

2. データベースの拡充と活用法検討の方針

2.1 拡散データベースのデータ構成

拡散データベースのデータ構造を表 2.1 に示す。本構造は、前著⁵⁾に記したペントナイトのデータの追加、信頼度に係る情報の付加や拡散係数の関連パラメータを推定値として導出するための拡張などを含む。収着データベース⁶⁾と同様、主要条件を 1 次情報とし、より詳細な補足的情報を 2 次情報 (additional information) として階層的に情報を管理している。

データベースで管理するデータは全て拡散試験で取得した実測値であることが望ましい。しかし、評価対象試料の特性に基づく試験手法の制限などを理由として、直接測定による実測値が得られず、関連する特定のパラメータも得られない場合がある。本報告では、前著⁵⁾に引き続き、直接導出不可能なパラメータを、スメクタイト含有率に基づいて定義する「部分スメクタイト密度」によって推定値として導出し、複数種類の粘土試料のデータを規格化して統一的に扱うための手法を導入した。ここで得た推定値は、実測値と共にデータベースで管理・活用する。

表 2.1 拡散データベースのデータテーブル

分類	項目	単位	詳細	階層
番号	Record No.	-	管理番号	一
元素 情報	Element	-	元素記号	一
	Species/Redox	-	化学種	1 次
	Species Info	-	化学種の決定方法(推定又は実測のいずれか)	2 次
	Ion charge	-	イオン電荷	一
固相 情報 (1)	Solid type	-	固相グループ	一
	Solid	-	岩石、粘土鉱物、鉱物等の固相名称	1 次
	Solid information	-	岩石:産地、種類、鉱物組成、前処理の有無など ペントナイト:スメクタイト含有率、ケイ砂混合率など	2 次
試験 方法	Experimental method	-	試験方法 (In diffusion 法, through diffusion 法など)	1 次
	Method Info	-	試験方法に係る付加情報	2 次
固相 情報 (2)	Dry Density (g/cm ³)	g/cm ³	乾燥密度	1 次
	Porosity	%	間隙率	
	Partial smectite density*	g/cm ³	部分スメクタイト密度(ペントナイトのみ)	
	Smectite content*	%	スメクタイト含有率(ペントナイトのみ)	
	Sand mixture*	%	ケイ砂混合率(ペントナイトのみ)	
	Density/Porosity Info	-	固相に係る付加情報	2 次
拡散 係数 情報	D _e	m ² /s	実効拡散係数	1 次
	D _e Info	-	実効拡散係数導出に係る付加情報	2 次
	D _a	m ² /s	見かけの拡散係数	1 次
	D _a Info	-	見かけの拡散係数導出に係る付加情報	2 次
	Rock capacity factor (RCF)	-	収着容量(保持因子)	1 次
	RCF info	-	収着容量導出に係る付加情報	2 次
	Kd	m ³ /kg	収着分配係数	1 次
	Kd Info	-	収着分配係数導出に係る付加情報	2 次
	D ₀	m ² /s	自由水中の拡散係数	1 次
	D ₀ Info	-	自由水中の拡散係数に係る付加情報	2 次
	Formation factor (FF)	-	形状因子	1 次
	FF Info	-	形状因子導出に係る付加情報	2 次
	Geometric factor (GF)	-	幾何学因子	1 次
	GF Info	-	幾何学因子導出に係る付加情報	2 次

* 後述する推定値評価のための項目

表 2.1 拡散データベースのデータテーブル（続き）

分類	項目	単位	詳細	階層
液相 情報	Solution	-	試験溶液種類	1 次
	Solution Info	-	試験溶液種類や調整に係る付加情報	2 次
	Ionic strength	mol/L	イオン強度	—
	Concentration of K ⁺ (mol/L)	mol/L	K ⁺ の濃度	
	Concentration of Na ⁺ (mol/L)	mol/L	Na ⁺ の濃度	
	Concentration of Ca ²⁺ (mol/L)	mol/L	Ca ²⁺ の濃度	
	Concentration of Cl ⁻ (mol/L)	mol/L	Cl ⁻ の濃度	
	Concentration of CO ₃ ²⁻ (mol/L)	mol/L	CO ₃ ²⁻ と HCO ₃ ⁻ の合計値を記載	
	Concentration of SO ₄ ²⁻ (mol/L)	mol/L	SO ₄ ²⁻ の濃度	
	pH	-	pH 値	1 次
	pH Info	-	pH 調整等に係る付加情報	2 次
試験 条件 情報	Redox condition	-	雰囲気条件、酸化還元条件	1 次
	Redox Info	-	雰囲気条件、酸化還元条件に係る付加情報	2 次
	Tracer	-	トレーサ情報	1 次
	Tracer Info	-	トレーサ情報に係る付加情報	2 次
	Diffusion time	s/hr/d/m/yr	拡散時間	1 次
	Time Info	-	拡散時間に係る付加情報	2 次
	Temperature	degC	試験系の温度	1 次
文献 情報	Temperature Info	-	温度に係る付加情報	2 次
	Reference	-	文献を示す記号的表記	—
	Author	-	著者名	
	Title, Vol., Num. etc.	-	タイトル、巻、号など	
その他	Publication Year	-	発行年	—
	Notes	-	関連する参考文献情報などの補足情報	
	Additional QA information	-	データ品質に係る補足情報	2 次

2.2 信頼性情報の取扱い

データベースは、その格納データの信頼性が重視されることから、本来であれば、収着データベースで採用したガイドラインに基づく体系的な評価⁸⁾と同様、一定のガイドラインに基づく信頼性評価手法が設定されることが望ましい。但し、拡散係数を導出するための試験では、その手法と得られるパラメータが多様であることから、体系的な評価を実施することは難しいと考えられる。本書では前著⁵⁾に引き続き、データ評価の幅を広げることを目的として、信頼度に係る重要な情報を記録するデータ項目を拡充したデータベースを採用し、重要情報（試験条件の制御方法、パラメータ導出に適用した解析手法等）を付加しつつ、海外産ベントナイトのデータを拡充した。

信頼度に係る重要な情報は、表 2.1 に示すデータテーブルの関連項目の付加情報に記載している。具体的には、表 2.2 に例示するように、試験方法、パラメータ導出、試験条件等の拡散データ取得の信頼度に係る情報を、収着・拡散係数の測定方法に係る（社）日本原子力学会による学会標準化資料⁹⁾などを参考しながら記載した。

表 2.2 信頼性情報を付加したデータベース項目と記載内容の例

項目	内容	付加情報(Additional Information)への信頼性に係る情報の記載例
試験方法	Through-Diffusion 法 (TD 法) や In-Diffusion 法 (ID 法) 等の試験方法	拡散試験の基本的な方法/体系に関する情報(パラメータ算出は各パラメータ項目に、個々の試験条件制御は条件項目に記載)。TD 法の場合、フィルターの有無、フィルター溶液循環の有無、濃度制御の方法、環境条件(pH や Eh)の制御方法、ID 法の場合、トレーサ塗布法、環境条件の制御方法などを記載
拡散係数と 関連 パラメータ	実効拡散係数(D_e)	破過曲線の直線部からの導出/非定常部分も含めた解析のいずれか、内部濃度プロファイル等も含めた評価を行っているか、定常状態をどのように評価判断しているか(上流側の濃度変化、濃度プロファイル確認など)、解析上の境界条件の取扱い(一定濃度/濃度変化考慮、フィルター補正方法)などを記載
	見かけの拡散係数 (D_a)	境界濃度一定の解/全量溶解の解の選択と適用法(塗布トレーサ濃度や溶解度の考慮、表面付近のプロットや2重プロファイルの考慮)などを記載
	収着容量(α)	破過曲線の Time-lag 法/内部プロファイルからの導出など、導出方法や前提などを記載
試験条件	雰囲気/酸化還元条件	雰囲気制御や酸化還元条件の調整、制御、確認の方法、還元剤の種類や濃度などを記載
	トレーサ	安定元素/放射性元素、キャリアの有無、mol 濃度、液性、分析手法等を記載。ID 法の場合、塗布液の濃度/量/組成、TD 法の場合、高濃度セルのトレーサ濃度や維持の方法などを記載
	拡散時間	拡散試験期間を、TD 法の破過曲線や ID 法の濃度プロファイルとの関係も含めて記載

2.3 関連パラメータの導出/推定法

拡散データベースに含まれる拡散係数及び関連パラメータは、相互に関連性を有するパラメータ群であり、データベースの構築にあたっては、特に、緩衝材系データを中心に、従来から検討されてきたパラメータの導出/推定法¹⁰⁾を適用し、データベース中の関連パラメータの導出/評価を検討している⁵⁾。具体的には、実測データ等に基づき関連パラメータ評価を行い、データベース上に実測値と推定値の判別機能とともに導入したほか、緩衝材系拡散データを統一的に取り扱うための指標として、部分スメクタイト密度の定義を導入した。

2.3.1 拡散関連パラメータの関係と導出/推定法

データベースで対象としている拡散係数は、定常状態での実質的な拡散係数を表す実効拡散係数 (D_e ; Effective diffusion coefficient) と非定常状態での収着遅延の効果を含む見かけの拡散係数 (D_a ; Apparent diffusion coefficient) が主要なパラメータであり、その他、以下の式に示すように、これらの拡散係数は、複数の遅延因子へと分解することができる。

$$D_e = FF \cdot D_0 = \varepsilon \cdot GF \cdot D_0 = \varepsilon \cdot \frac{\delta}{\tau^2} D_0 \quad (1)$$

$$D_a = \frac{D_e}{\alpha} = \frac{D_e}{\varepsilon + \rho K_d} \quad (2)$$

ここで、 D_0 ；自由水中の拡散係数、FF；形状因子(Formation Factor)、 ε ；間隙率、GF；幾何学因子(Geometric Factor)、 δ ；收れん度(constrictivity)、 τ^2 ；屈曲度(tortuosity)、 α ；収着容量(rock capacity factor)、 ρ ；乾燥密度、 K_d ；分配係数である。

これらの関連パラメータの拡散試験法(Through-diffusion /In-diffusion 法)を起点とした導出フローを図 2.1 に示す。岩石と緩衝材のそれぞれについて、実験手法やそこで実測評価されるパラメータの種類に応じて、関連するパラメータが導出されるが、破線内は、今般導入したベントナイト系データに特有なフローであり、次項で述べる部分スメクタイト密度を導入し、 D_e を推定値として導出する場合のフローである。

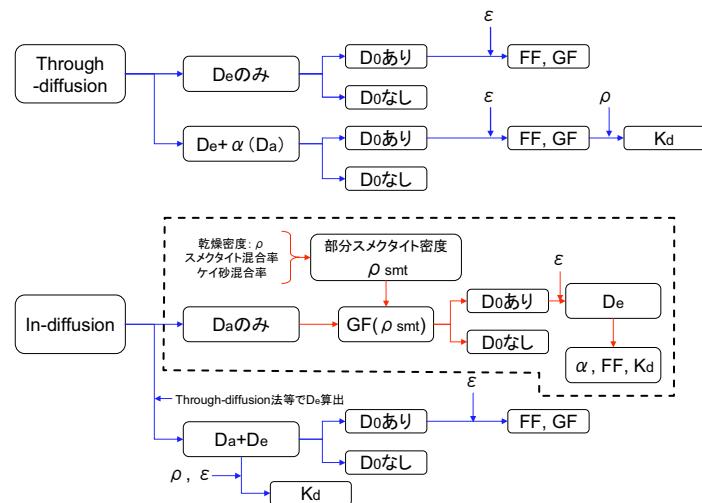


図 2.1 拡散試験方法と関連パラメータの導出/推定フロー

2.3.2 緩衝材系データに関する部分スメクタイト密度の導入

拡散データベースに含まれる緩衝材ベントナイトの拡散データは、ベントナイトの種類、ケイ砂混合率、圧縮密度などの様々な固相条件下でのデータが含まれる。ベントナイト中の拡散挙動が主にその主成分であるスメクタイトに支配されるとの前提のもとに、固相条件の差異を補正する手法が、従来から部分スメクタイト密度として検討されており^{11),12)}、緩衝材系データの導入に伴い、表 2.1 に示したように、この部分スメクタイト密度をデータベースに導入した。これらの条件においては、一般に固相の含有量を示すために乾燥密度を使用する。しかし、ベントナイトの種類によりスメクタイトの含有率が異なるため、試料全体の乾燥密度(ρ_{net})とスメクタイト集合体部分の乾燥密度は異なる。部分スメクタイト密度(ρ_s)は、スメクタイト以外の成分を石英と仮定した場合、試料全体の乾燥密度(ρ_{net})、石英の密度(ρ_q)、ベントナイトのスメクタイト含有率(f_s)、ケイ砂混合率(f_q)により、以下の式で表される。

$$\rho_s = \frac{(1-f_q)f_s\rho_{net}}{1 - \frac{\rho_{net}}{\rho_q}(f_q - (1-f_q)(1-f_s))} \quad (3)$$

さらに、上記図 2.1 のフローにおいて、In-diffusion 法で得られた緩衝材ベントナイトに対する見かけの拡散係数から、関連パラメータを導出するため、幾何学的因子(GF)と部分スメクタイト密度との関係を導出した。トリチウム水をトレーサとして、Kunigel-V1, Kunipia-F 及びこれらに対するケイ砂混合系を対象とした拡散試験から得られた D_a , D_e の実測値と、間隙率や自由水中の拡散係数から幾何学因子 (GF) を求め、図 2.2 に示す関係図より、次式の相関式を導出し、これにより図 2.1 のフローに沿って関連パラメータを導出した。すなわち、幾何学因子が化学種によって変化しないとの前提のもと、データベース中の関連パラメータ導出を行った。

$$GF(\rho) = 0.6015 \times e^{-1.3115\rho} \quad (\rho ; \text{部分スメクタイト密度}) \quad (4)$$

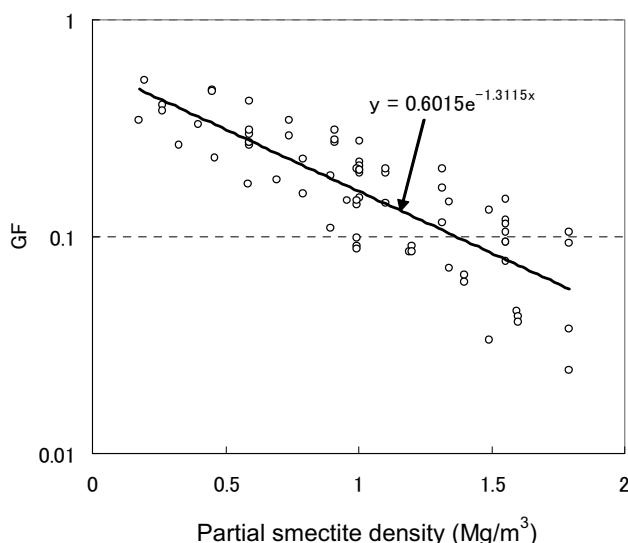


図 2.2 幾何学因子 (GF) と部分スメクタイト密度の相関

2.4 データ拡充の方針

前著⁵⁾で、国産ベントナイトを対象とした主要な核種の拡散係数の評価を実施した。一方で、海外産ベントナイトは国産ベントナイトと比較した場合に、スメクタイトを主要鉱物としている点で共通性を有している。そこで、何らかの共通指標に基づき、統一的に比較評価する方法が期待される。前著⁵⁾において、スメクタイト含有量を指標とした「部分スメクタイト密度」の概念を導入した。さらに、国産のベントナイトである Kunigel-V1 や Kunipia-F、及びそのケイ砂混合物の拡散係数・収着分配係数等を、この部分スメクタイト密度によって規格化し、同一プロット上で比較・評価可能であることを確認した。これと同様の規格化による評価を、国産・海外産ベントナイトの比較にも適用可能と考え、データベースで管理するデータ範囲を海外産ベントナイトのデータに拡張するための文献調査とデータの追加を行った。

海外産ベントナイトのデータを扱う文献調査に当たっては、以下の点を重視して実施した。

- ・ 調査対象の文献選定に際して、MX-80 や Avonlea 等、鉱物組成や性状が既知の材料を扱っていること
- ・ 拡散係数を取得するための実験方法が特殊ではなく一般的な方法であること
- ・ Cs 等地層処分の安全評価上重要な元素を評価対象としていること

2.5 データ評価と活用のアプローチ

新たに追加した海外産ベントナイトのデータを用い、安全評価に適用可能なパラメータ設定への活用も視野に入れた検討を行った。

国産ベントナイトのデータに関しては、既に前著にて Kunigel-V1, Kunipia-F 及びこれらとケイ砂の混合物を対象に、部分スメクタイト密度による規格化で比較評価を実施している。この結果と、部分スメクタイト密度によって同様に規格化した海外産ベントナイトのデータを同一指標上で比較した。これにより、従来よりも幅広いベントナイト固相の拡散に係るデータに基づいた評価・検討が可能になると考えられる。

上記の評価に際し、第 2 次取りまとめ¹⁾で検討された安全評価のレファレンスケース（降水系地下水条件）において、重要元素を対象に設定されたベントナイト中の拡散係数について、相当する条件でのデータを対象に部分スメクタイト密度による規格化を行って比較評価を行い、設定値の妥当性に関する検討を行った。

3. 評価対象データ

3.1 調査方法・範囲

データベースに登録する拡散係数および関連するデータを収集・整理するために、下記の方針で文献調査を実施した。

(1) ベントナイトの拡散係数に関する文献調査

文献調査は、海外産ベントナイトを対象として、2.4 項にて前述したとおり、以下の 3 点を重視して実施した。

- ・ 調査対象の文献選定に際して、MX-80 や Avonlea 等、鉱物組成や性状が既知の材料を扱っていること
- ・ 拡散係数を取得するための実験方法が特殊ではなく一般的な方法であること
- ・ Cs 等地層処分の安全評価上重要な元素を評価対象としていること

3.2 調査方針

文献調査とデータベースへのデータ登録に当たっては、同一の試験から得られ、重複して掲載されていると判断したデータを排し、原文献に記載されたデータを対象とした。

3.3 調査対象

(1) 調査文献および評価項目

データベースに格納されている全てのデータの参考文献と、文献に含まれる拡散係数に関する情報として、固相の情報と評価対象元素および評価試験の方法を併記し、下記に示す 7 項目に分類して表 3.1 に示す。なお、日本語の文献に係る情報（タイトル・著者名等）も全て英文表記で統一した。なお、データベースに含まれる国産ベントナイト・国産岩石の既存データの出典は、前著⁵⁾に記載されている。

著者名 : Author

タイトル・巻・号等 : Title, Vol., Num. etc.

発行年 : Publication Year

固相種類 : Solid Type

固相名 : Solid

評価対象元素 : Element

試験方法 : Experimental Method

3.4 調査結果

調査の結果、以下のデータを確認し、データベース上に追加登録した。

- ・ 文献数 : 33 件（文献総数 : 113 件）

- ・ 評価対象元素 : Am, C, Cl, Cm, Co, Cs, H₂O, I, Na, Np, Pu, Se, Sr, Tc, Th, U (16種類)
(登録総数 : 33種類)
- ・ 追加データ数 (実測値) : 実効拡散係数 150件 (総数 : 600件),
見かけの拡散係数 400件 (総数 : 1750件)

表 3.1 調査対象とした文献と対象とした固相・元素・試験手法一覧(海外産ペントナイト)

Literature; Author	Literature; Title	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
Albinsson, Y. and Engkvist, I. ¹³⁾	Diffusion of Am, Pu, V, Np, Cs, I and Tc in compacted sand-bentonite mixture	1989	Bentonite	Bentonite (MX-80)	Am Cs I Np Pu Tc U	In-diffusion In-diffusion In-diffusion In-diffusion In-diffusion In-diffusion In-diffusion
Albinsson, Y.; Forsyth, R.; Skarnemark, G.; Skalberg, M.; Torstenfelt, B. and Werme, L. ¹⁴⁾	Leaching/migration of V02-fuel in compacted bentonite	1990	Bentonite	Bentonite	Am Co Cs Pu Tc Cm	In-diffusion In-diffusion In-diffusion In-diffusion In-diffusion In-diffusion
Albinsson, Y.; Christiansen-Satmark, B.; Engkvist, I. and Johansson, W. ¹⁵⁾	Transport of actinides and Tc through a bentonite backfill containing small quantities of iron or copper	1991	Bentonite	Bentonite (MX-80)	Np Pu Tc U	In-diffusion In-diffusion In-diffusion In-diffusion
Albinsson, Y.; Andersson, K.; Borjesson, S. and Allard, B. ¹⁶⁾	Diffusion of radionuclides in concrete/bentonite systems.	1996	Bentonite	Bentonite (MX-80)	Cs	In-diffusion

表 3.1 調査対象とした文献と対象とした固相・元素・試験手法一覧（海外産ベントナイト）（続き）

Literature; Author	Literature; Title	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
Cho, W.J.; Oscarson, D.W.; Gray, M.N. and Cheung, S.C.H. ¹⁷⁾	Influence of diffusant concentration on diffusion coefficients in clay.	1993	Bentonite	Bentonite (Avonlea)	Cs	Through-diffusion
Cho, W.J.; Oscarson, D.W. and Hahn, P.S. ¹⁸⁾	The measurement of apparent diffusion coefficients in compacted clays: an assessment of methods	1993	Bentonite	Bentonite (Avonlea)	Cs	In-diffusion
Choi, J.W.; Oscarson, D.W. ¹⁹⁾	Diffusive transport through compacted Na- and Ca-bentonite	1996	Bentonite	Bentonite (Korea) Na-type	HTO	Through-diffusion
Eriksen, T.E. and Jacobsson, A. ²⁰⁾	Ion diffusion in compacted Na and Ca bentonites	1981	Bentonite	Bentonite (MX-80 Na-type)	Cs	In-diffusion method and through diffusion method
				Bentonite (MX-80 Ca-type)	Cs	In-diffusion method and through diffusion method

表 3.1 調査対象とした文献と対象とした固相・元素・試験手法一覧（海外産ベントナイト）（続き）

Literature; Author	Literature; Title	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
Eriksen, T.E. and Jansson, M. ²¹⁾	Diffusion of I ⁻ , Cs ⁺ and Sr ²⁺ in compacted bentonite - Anion exclusion and surface diffusion	1996	Bentonite	Bentonite (MX-80)	Cs	In-diffusion method and through diffusion method
Eriksen, T.E.; Jansson, M. and Molera, M. ²²⁾	Sorption effects on cation diffusion in compacted bentonite	1999	Bentonite	Bentonite (MX-80)	Co	Through-diffusion
Garcia-Gutierrez, M.; Missana, T.; Mingarro, M.; Samper, J.; Dai, Z. and Molinero, J. ²³⁾	Solute transport properties of compacted Ca-bentonite used in FEBEX project	2001	Bentonite	Bentonite (Ca-type FEBEX)	Cs	Through-diffusion
Garcia-Gutierrez, M.; Cormenzana, J.L.; Missana, T. and Mingarro, M. ²⁴⁾	Diffusion coefficients and accessible porosity for HTO and ³⁶ Cl in compacted FEBEX bentonite	2004	Bentonite	Bentonite (FEBEX)	Cl	In-diffusion
Glaus, M.A.; Baeyens, B.; Bradbury, M.H.; Jakob, A.; Van Loon, L.R. and Yaroshchuk, A. ²⁵⁾	Diffusion of ²² Na and ⁸⁵ Sr in montmorillonite: Evidence of interlayer diffusion being the dominant pathway at high compaction	2007	Bentonite	Bentonite (montmorillonite)	Na	Through-diffusion
Kim, H.T., Suk, T.W. and Parks, S.H. ²⁶⁾	Diffusivities for ions through compacted Na-bentonite with varying dry bulk density	1993	Bentonite	Bentonite (MX-80)	Sr	Through-diffusion

表 3.1 調査対象とした文献と対象とした固相・元素・試験手法一覧（海外産ペントナイト）（続き）

Literature; Author	Literature; Title	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
Lee, J.O.; Cho, W.J.; Hahn, P.S. and Lee, K.J. ²⁷⁾	Effect of dry density on ^{90}Sr diffusion in a compacted Ca-bentonite for a backfill of radioactive waste repository	1996	Bentonite (Korea) Ca-type	Bentonite (Korea) Ca-type	Sr	Through-diffusion
Melkior, T.; Mourzagh, D.; Yahiaoui, S.; Thobey, D.; Alberto, J.C.; Brouard, C. and Michau, N. ²⁸⁾	Diffusion of an alkaline fluid through clayey barriers and its effect on the diffusion properties of some chemical species	2004	Bentonite (MX-80)	Bentonite (MX-80)	Cs	Through-diffusion
Melkior, T.; Gaucher, E.C.; Brouard, C.; Yahiaoui, S.; Thobey, D.; Clinard, C.; Ferrage, E.; Guyonnet, D.; Tournassat, C. and Coelho, D. ²⁹⁾	Na^+ and HTO diffusion in compacted bentonite: Effect of surface chemistry and related texture	2009	Bentonite	Bentonite (MX-80; Na-type)	HTO	Through-diffusion
				Bentonite (MX-80; Ca-type)	HTO	Through-diffusion
				Bentonite (MX-80; Cs-type)	Na	Through-diffusion
				Bentonite (MX-80; equilibrated with artificial pore water)	HTO	Through-diffusion
				Na	Through-diffusion	

表 3.1 調査対象とした文献と対象とした固相・元素・試験手法一覧（海外産ベントナイト）（続き）

Literature; Author	Literature; Title	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
Molera, M. and Eriksen, T. ³⁰⁾	Diffusion of $^{22}\text{Na}^+$, $^{85}\text{Sr}^{2+}$, $^{134}\text{Cs}^+$ and $^{57}\text{Co}^{2+}$ in bentonite clay compacted to different densities: experiments and modeling	2002	Bentonite	Bentonite (MX-80)	Co	Through-diffusion
Molera, M.; Eriksen, T. and Jansson, M. ³¹⁾	Anion diffusion pathways in bentonite clay compacted to different dry densities	2003	Bentonite	Bentonite (MX-80)	Ci	Through-diffusion
Muurinen, A.; Rantanen, J. and Penttila-Hiltunen, P. ³²⁾	Diffusion mechanisms of strontium, cesium and cobalt in compacted sodium bentonite	1985	Bentonite	Bentonite (details unknown; supposing as MX-80)	Co	Non-steady state
Muurinen, A.; Penttila-Hiltunen, P. and Rantanen, J. ³³⁾	Diffusion mechanisms of strontium and cesium in compacted sodium bentonite	1987	Bentonite	Bentonite (details unknown; supposing as MX-80)	Cs	Non-steady state
					Sr	Through-diffusion

表 3.1 調査対象とした文献と対象とした固相・元素・試験手法一覧（海外産ベンツナイト）（続き）

Literature; Author	Literature; Title	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
Muurinen, A.; Penttila-Hiltunen, P. and Uusheimo, K. ³⁴⁾	Diffusion of chloride and uranium in compacted sodium bentonite	1989	Bentonite (MX-80)	Cl	Through-diffusion	
Oscarson, D.W. and Hume, H.B. ³⁵⁾	Diffusion of ¹⁴ C in Dense Saturated Bentonite Under Steady-State Conditions	1994	Bentonite (Avonlea)	U	Through-diffusion	
Oscarson, D.W.; Hume, H.B.; Sawatsky, N.G. and Cheung, S.C.H. ³⁶⁾	Diffusion of Iodide in Compacted Bentonite	1992	Bentonite (Avonlea)	I	In-diffusion	
Robin, M.J.L., Gillham, R.W. and Oscarson, D.W. ³⁷⁾	Diffusion of strontium and chloride in compacted clay-based materials	1987	Bentonite (Avonlea+ Silica sand(1:1))		Through-diffusion	
Sawatsky, N.G. and Oscarson, D.W. ³⁸⁾	Diffusion of Technetium in Dense Bentonite under Oxidizing and Reducing Conditions	1991	Bentonite (Avonlea)	Cl	In-diffusion	
Sawatsky, N.G. and Oscarson, D.W. ³⁹⁾	Diffusion of Technetium in Dense Bentonite	1991	Bentonite (Avonlea)	Tc	In-diffusion	
Sharma, H.D. and Oscarson, D.W. ⁴⁰⁾	Diffusion of plutonium (IV) in dense bentonite-based materials.	1989	Bentonite (Avonlea+ Sand)	Pu	In-diffusion	

表 3.1 調査対象とした文献と対象とした固相・元素・試験手法一覧（海外産ベンツナイト）（続き）

Literature; Author	Literature; Title	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
Staunton, S.; Clay, P.G. and Rees, L.C. ⁴¹⁾	Diffusion of Neptunium(V) in Clays	1990	Bentonite	Momtroll ilomite (Na-type)	Np	In-diffusion
				Momtroll ilomite (Ca-type)	Np	In-diffusion
				Kaolinite (Na-type)	Np	In-diffusion
				Kaolinite (Ca-type)	Np	In-diffusion
				Illite (Na-type)	Np	In-diffusion
				Illite (Ca-type)	Np	In-diffusion
Torstenfelt, B. ⁴²⁾	Migration of the fission products strontium, technetium, iodine and cesium in clay	1986	Bentonite	Bentonite (MX-80)	Cs	In-diffusion
Torstenfelt, B. and Allard, B. ⁴³⁾	Migration of fission products and actinides in compacted bentonite	1986	Bentonite	Bentonite (MX-80)	Am	In-diffusion
Torstenfelt, B.; Allard, B.; Andersson, K.; Kipatsi, H.; Eliasson, L.; Olofsson, U. and Persson, H. ⁴⁴⁾	Radionuclide diffusion and mobilities in compacted bentonite	1983	Bentonite	Bentonite (MX-80)	Th	In-diffusion
Van Loon, L.R.; Glaus, M.A. and Muller, W. ⁴⁵⁾	Anion exclusion effects in compacted bentonites: Towards a better understanding of anion diffusion	2007	Bentonite	Bentonite (Volclay KWK; similar to MX-80)	Cl	Through-diffusion

4. データベースの利用による拡散係数評価と活用法

本章では、データベースのデータを活用した評価の実施例を示す。データベースに格納されているデータは、評価対象の元素・固相等の条件で抽出・分類して扱うことが可能である。ここではベントナイトを対象固相として、地層処分の安全評価等において重要な元素ごとに実施した評価結果を示す。

評価は、電気的に中性で収着等の影響が小さいトリチウム水、地層処分の安全評価上の重要核種として評価実績があり、かつ単一のイオン電荷を有する Cs^+ や I^- , Cl^- を対象とした評価の他、アクチニドを対象とした評価を実施した。アクチニドは、試験時の雰囲気・酸化還元条件等によって、複数の原子価を取り得ることから、試験条件に基づくデータ分類に関して評価した。

ベントナイトのデータには、従来からの国産ベントナイトのデータと、新たに拡充した海外産ベントナイトのデータが存在することから、主として国産ベントナイトのデータ傾向と海外産ベントナイトのデータ傾向を比較・検討した。この検討にあたっては、2章で述べた「部分スメクタイト密度によるデータの規格化」の適用性を重視した。

4.1 トリチウム水の評価 (HTO)

(1) 実効拡散係数

国産・海外産ベントナイトを評価対象固相として、トリチウム水の実効拡散係数を評価した。評価に当たっては、実験で実測された実効拡散係数に加えて、 $K_d=0$ として見かけの拡散係数と間隙率から導出した実効拡散係数のデータを採用した。実効拡散係数は、乾燥密度と部分スメクタイト密度のそれぞれに対してプロットし、対応関係を評価した。

乾燥密度に対する実効拡散係数 (De) (図 4.1 参照) は、乾燥密度の増加に対応して減じる傾向を示す一方、比較的離散的な分布を示すことが分かる。

これに対し、部分スメクタイト密度に対する実効拡散係数 (図 4.2 参照) は、乾燥密度に対する傾向と同様密度の増加に対応して減じる傾向を示すとともに、乾燥密度に対するデータ分布と比較して狭い範囲にデータが分布していることが分かる。

データのプロットを見ると、部分スメクタイト密度との対応において、一部異なる傾向を示すデータ群が存在することが分かる。この傾向の原因を確認するために、データベースに格納されているデータの信頼性に関する情報を活用して影響の原因を確認した。データベースの格納情報のみで明らかにならない原因については、実験条件等詳細を記載した元文献を参照して確認を行った。

その結果、(a)高アルカリのセメント平衡水の使用、(b)特に広範囲なケイ砂混合(10-90%)による密度変動、(c)ベントナイト試料の圧密方向と拡散係数の特異性(異方性)、(d)粗大粒径の試料の使用、などの影響を受けて、異なるデータ分布・傾向を示していることが分かった。HTO のデータ評価に当たっては、これらの特異的な条件下で取得したデータはあらかじめ除外した。

特異条件を除外して抽出したデータ群に対し、最小二乗法を適用して直線近似を行うとともに、同直線をデータの分布する範囲の上限・下限を考慮して平行移動することで、分布範囲の特徴を示し得る (図 4.2 参照) ことが分かる。

また、この実効拡散係数から幾何学因子(GF; Geometric Factor)を導出してスメクタイト密度に対してプロットし、最小二乗法を適用して直線近似を行ったところ、 $GF(x)=0.61e^{-1.32x}$ (x ; スメクタイト密度) の関係が得られた。これは、前述した国産ベントナイトのデータから得た図 2.2に基づく式(4)とほぼ同等であることから、国産・海外産ベントナイトの推定値導出には、基本式(4)をそのまま適用する。

図 4.1 及び図 4.2において、青及び緑色のプロットは国産ベントナイト、赤色のプロットは海外産ベントナイトのデータを示す。国産ベントナイトのデータと、海外産ベントナイトのデータは基本的に同一の傾向を示すことが、図 4.1 及び図 4.2 から分かる。特に、部分スメクタイト密度で規格化した図 4.2 で傾向の近似性が顕著であることから、部分スメクタイト密度による規格化により、異なる種類のベントナイトの拡散係数を同一の指標で同時に評価し得ることを示唆していると考えられる。

第 2 次取りまとめでは、トリチウム水の実効拡散係数は Cs, Se を除く元素の実効拡散係数として設定された。図 4.2 にはこの条件（但し、乾燥密度は第 2 次とりまとめで設定された条件に基づき、部分スメクタイト密度に換算）を図示し、一連のデータ群の分布範囲と比較している。同図から、HTO の実効拡散係数の分布は、国産・海外産を問わず、そのほとんどがレファレンスケースで設定した値と同等又は低い値を示すなどの整合性を持つことが分かる。これは、レファレンスケースの設定値が広範な緩衝材に対して概ね妥当であることを改めて示す結果であると考えられる。

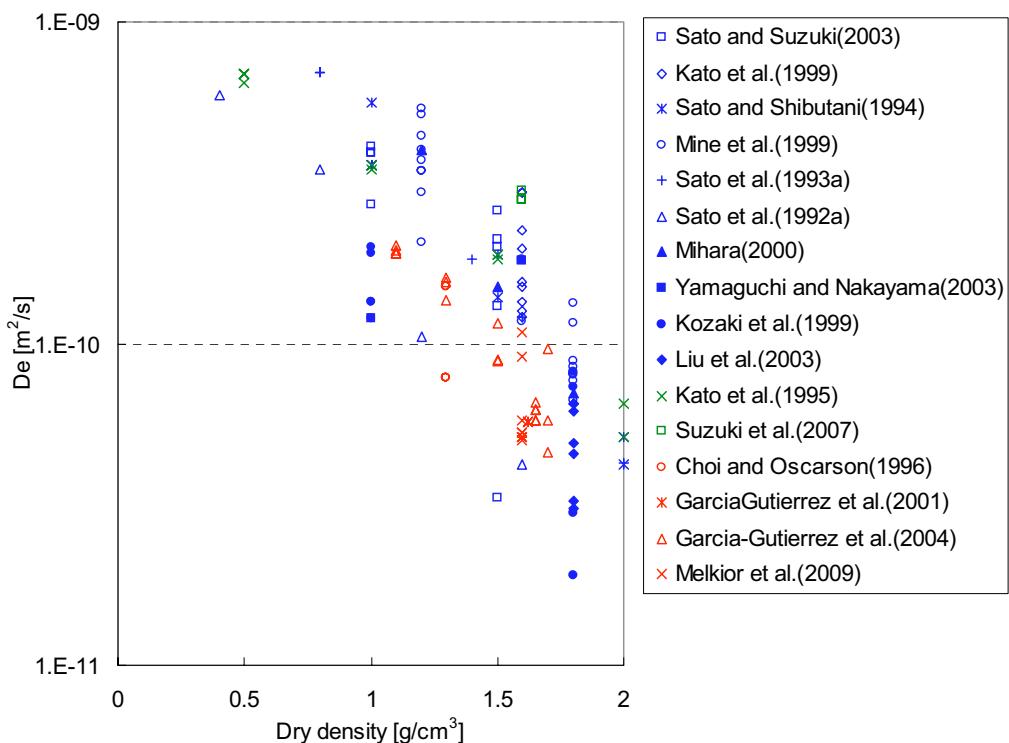


図 4.1 乾燥密度に対する HTO の実効拡散係数

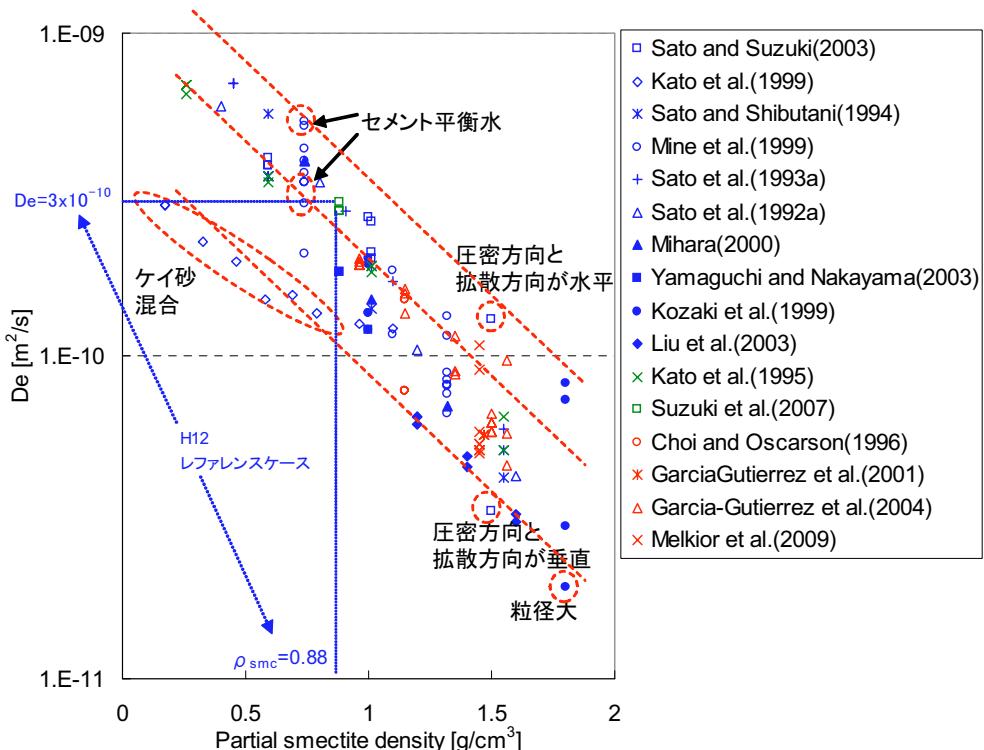


図 4.2 部分スメクタイト密度に対する HTO の実効拡散係数

4.2 1価の陽イオンの評価例 (Cs^+)

(1) 実効拡散係数（実測値のみ）

部分スメクタイト密度に対する実測の実効拡散係数 (De) の分布を図 4.3 に示す。固相は国産、海外産ベントナイトを対象としている。国産ベントナイトのデータは青色、海外産を赤色でプロットしている。

部分スメクタイト密度に対し、実効拡散係数の実測値のみを示した図 4.3 では、部分スメクタイト密度の増加に対応して、拡散係数は減じる傾向を示すことが分かる。さらに、特殊条件（変質ベントナイト等）を除外すると、国産ベントナイトのデータは、後述する Kozaki ら⁴⁶⁾のデータを除き、比較的狭い範囲（平行な 3 本の破線内）に分布することが分かる。

一方、海外産ベントナイトのデータを見ると、上記の範囲には分布せず、同密度に対して複数の拡散係数値が縦方向に分布していることが分かる。これらのデータを、赤色・破線の楕円でデータの記載された文献毎に区別した。これは海外産ベントナイトを対象とした Cs の実効拡散係数の実測値の評価が、種々の模擬地下水・塩濃度・評価手法で実施されていることに加え、Through-Diffusion (TD) 法から得られる試験データを基にした拡散係数の導出法に、下記に示すような特殊な手法が適用されていることもその一因と考えられる。

Muurinen ら³³⁾、Eriksen ら²¹⁾のデータは、高塩濃度の試験溶液を採用しているが、比較的高い値に分布していることが分かる。これは、TD 法が一般に低濃度側のトレーサ濃度の時間変化を基に実効拡散係数を導出するのに対し、Muurinen らの評価は TD 法で使用したベントナイト試料の濃度プロファイルと、両端に位置するフィルター内部の濃度変化の補正を基に実施しており、通常の手法に比べて特殊な手法を採用していることがその理由であると推測される。Eriksen らも、トレーサ濃度の時間変化の他に、ベントナイト中のトレーサ濃度プロファイルとフィルター中の濃度勾配の影響を考慮しつつ、両者を同時に考慮することを目的として、ANADIFF と称する有限差分法によるシミュレーションコードで見かけの拡散係数と収着分配係数の両方の実測値を評価している。実効拡散係数は、見かけの拡散係数と収着分配係数から実測値として導出できるが、こちらも見かけの拡散係数と収着分配係数の導出の手法が通常の手法に比べて特殊であることを反映して、実効拡散係数が比較的高い値を示していると推測される。一方で、両者のデータについて、文献毎にグループ化して塩濃度の影響を見ると、高塩濃度の試験溶液での評価値は低い実効拡散係数を示しており、データの大小の傾向は保たれていることが分かる。この傾向は、一般に陽イオンの実効拡散係数の評価値が試験溶液の塩濃度の上昇に伴って低下する傾向があることと整合する。

また、Cho ら¹⁷⁾のデータを見ると、同密度で低塩濃度環境において評価した国産ベントナイトのデータと比較して、低い値に分布していることが分かる。縦方向のデータ分布は、低トレーサ濃度では低い値、高トレーサ濃度では高い値に対応している。一方で、国産のベントナイトを対象とした Kozaki らのデータでは、試験溶液として蒸留水を使用しているにも拘わらず、低い実効拡散係数を示していることが分かる。これは 1mM という高いトレーサ濃度を適用したことが理由の 1 つであると推測される。

さらに、国産ベントナイトのデータに注目すると、Yamaguchi and Nakayama⁴⁷⁾のデータでは高塩濃度条件を採用しており、Suzuki ら⁴⁸⁾のデータでは 60°C の高温条件に加えて高塩濃度条件を

採用しているにも拘わらず、降水系地下水条件による評価結果に近い値を示していることが分かる。

以上から、データベースから抽出した Cs の実効拡散係数の評価に関しては、現時点では統一的な指標に基づく評価は困難であり、これらのデータについては上述のとおり TD 法から得られる値が試験条件に対して高い感度を有し、特に海外産ベントナイトにおいて試験方法・導出方法の両面に多様性があることなどに留意して取り扱う必要があると考えられる。

また、第 2 次取りまとめのレファレンスケースとして、Sato and Shibutani⁴⁹⁾の実測データに基づいて設定された実効拡散係数を青色の破線で図示するが、上述の通りデータの相互比較は困難であり、今後共通した条件・導出法で求める実効拡散係数の実測値データの拡充が必要であると考えられる。

(2) 見かけの拡散係数

ベントナイトを対象とした拡散試験では、主に In-Diffusion 法が適用されることから、見かけの拡散係数が実測値として得られる。この他にも、前述した Through-Diffusion 法における Time-lag 法の適用によっても、見かけの拡散係数が実測値として得られるなど、ベントナイトを対象としたデータにおいては、見かけの拡散係数はそのほとんどが実測値と見なし得る。図 4.4 と図 4.5 に、それぞれ乾燥密度と部分スメクタイト密度に対する見かけの拡散係数を示す。両者とも比較的離散的な分布を示していることから、一見して相違は明確で無いが、部分スメクタイト密度に対するプロット（図 4.5）では、国産・海外産ベントナイトサンプルの有するスメクタイト含有率に応じてプロットの位置が水平方向に移動している。2.3.2 項の式(3)として前述した部分スメクタイト密度の定義から、スメクタイト含有率が高いほどプロットの移動は小さく（例えば Kunipia-F ではほぼ移動無し）、ケイ砂混合系やスメクタイト以外の鉱物を含む試料では、スメクタイト含有率に対応したプロット移動が見られることが分かる。

また、部分スメクタイト密度に対する見かけの拡散係数の国産ベントナイトのデータに対して明示したプロットを図 4.6 に示す。データ分布は、基本的に密度の増加に伴って低下する傾向を示している。分布傾向を見ると、赤色の破線で示す範囲に入るデータの他に、この範囲に入らないデータ分布も見られる。範囲外に分布するデータは、試験溶液に海水系やセメント平衡のアルカリ溶液、温度変化による影響を反映した結果得られたデータである。

これらの試験条件に基づくデータ分類により抽出した国産ベントナイトのデータ（青色）に、追加する形で海外産ベントナイトの評価データ（赤色）をプロットした（図 4.7 参照）。同図から、部分スメクタイト密度に対する見かけの拡散係数の分布に関して、以下の特徴が見られる。

- ・ 低密度側では、国産・海外産ベントナイトのデータ分布は整合的である
- ・ 高密度側の海外産ベントナイトのデータでは、共通して一般的な試験手法・導出法を採用している場合でも、低い分布又は高い分布に分化する傾向を示す
- ・ 高密度側にある国産ベントナイトのデータは少数であるが、同文献内のデータの低密度側からの連続性を考慮した場合、共通した特性として高密度側でのデータ低下が確認できる
- ・ 高密度側の分布を見ると、イオン強度の増加に伴って見かけの拡散係数の増加が見られる場

合と、イオン強度が増加しても変動が小さい場合の両方が見られる。

以上から、データベースから抽出した Cs の見かけの拡散係数の評価にあたっては、特殊な条件・手法による評価値の区分によって、ある程度信頼性の高いデータ分布を取得することが可能であると考えられるが、高い部分スメクタイト密度領域で得られたデータに関しては、試験溶液のイオン強度・模擬地下水組成等を反映した分布の相違を示す可能性があることを考慮しながら評価する必要があると考えられる。

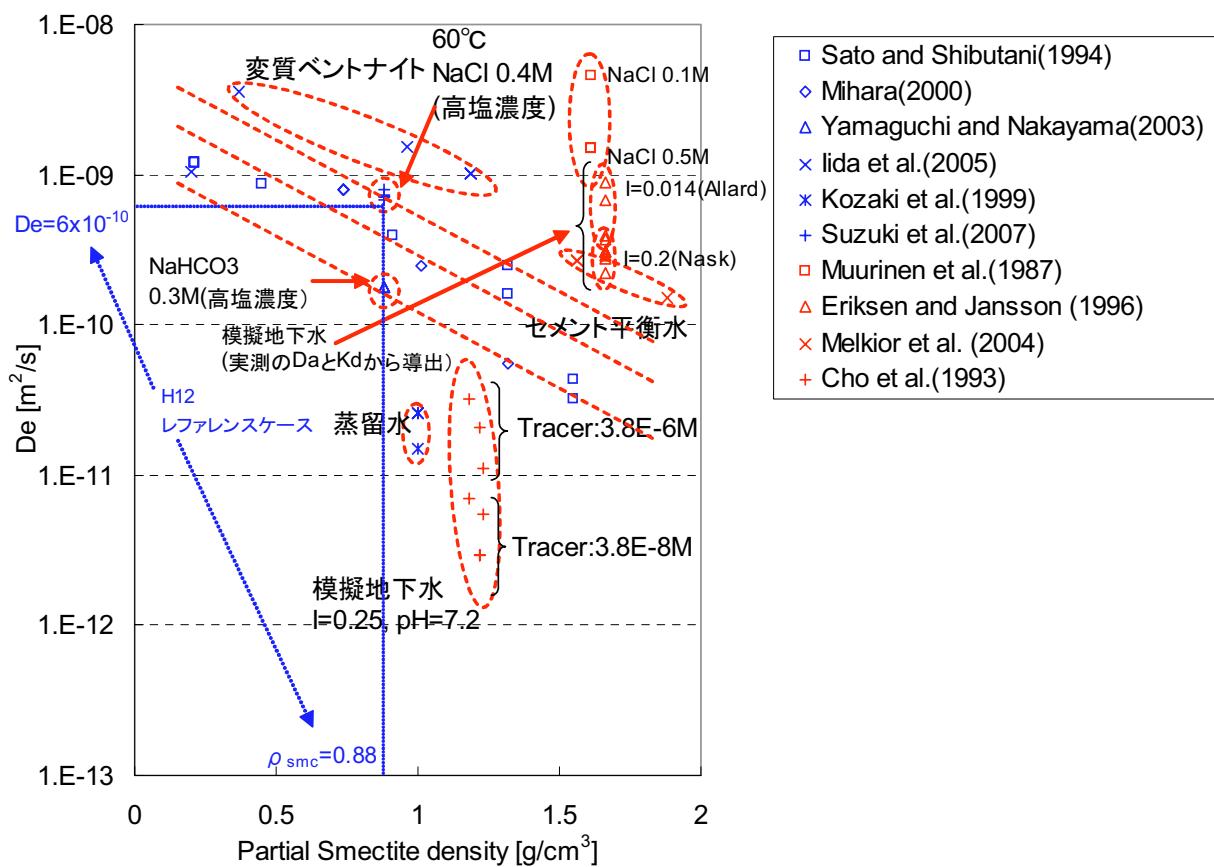
また、見かけの拡散係数のデータ分布は、第 2 次取りまとめのレファレンスケースで検討された見かけの拡散係数（収着分配係数の設定を目的として実測値から導出された値）と設定密度近傍で比較すると、そのほとんどが設定値よりも小さい範囲に分布している。このことから、「レファレンスケースで収着分配係数の設定のために検討された Cs の見かけの拡散係数設定値⁵⁰⁾」は概ね妥当であることが確認された。

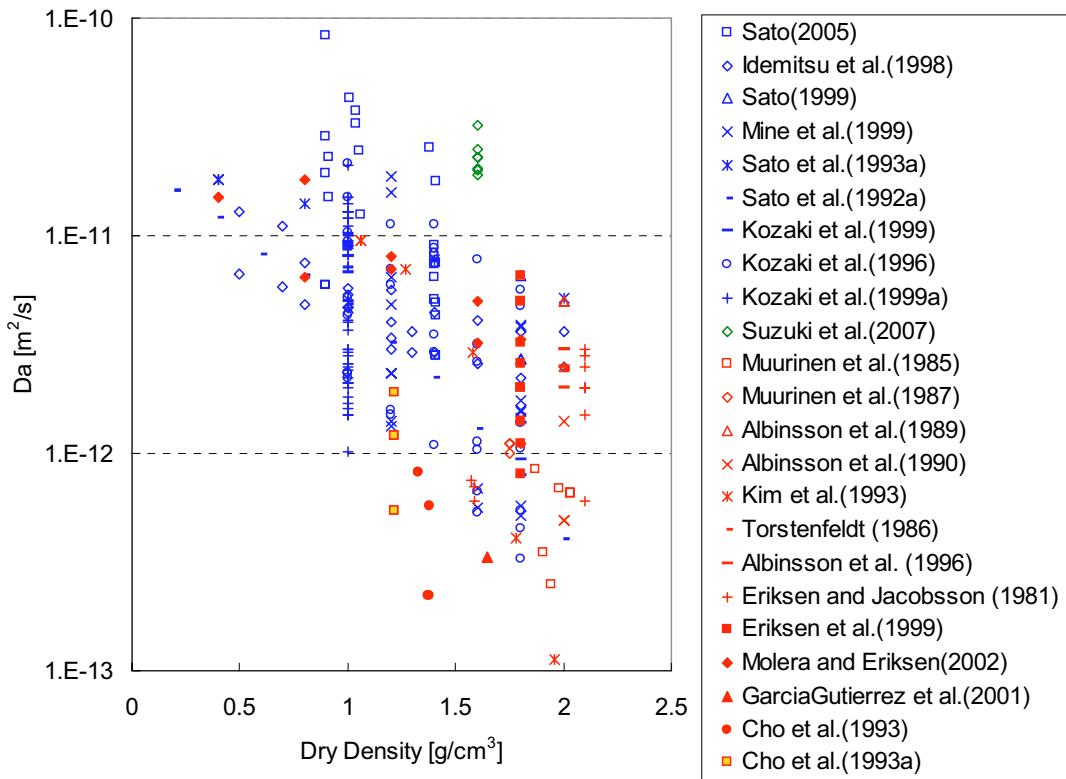
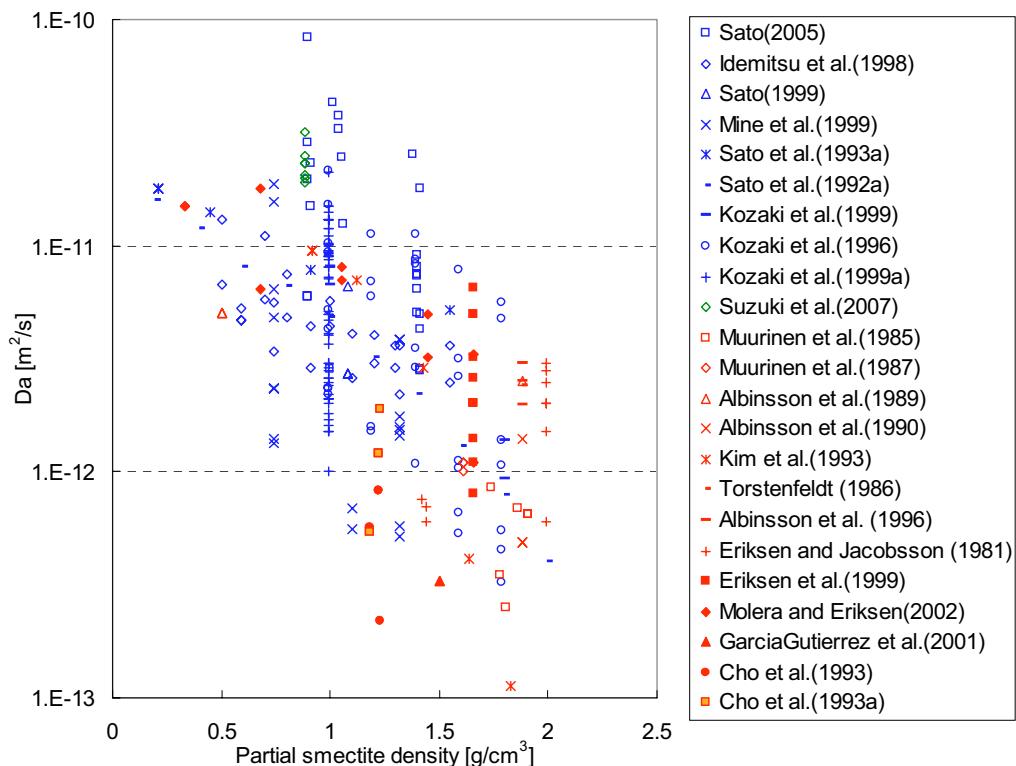
(3) 収着分配係数

拡散係数の評価データから導出した収着分配係数のデータを図 4.8 に示す。ベントナイトを対象とした収着分配係数を実測値として評価するためには、In-Diffusion 法と Through-Diffusion 法の併用等により、実効拡散係数と見かけの拡散係数の両方を実測値として取得する必要がある。しかし、実際にはベントナイトを対象とした評価は In-Diffusion 法によって見かけの拡散係数だけが実測値として評価されるケースがほとんどであることから、ここでは実効拡散係数の推定値を使って導出した収着分配係数を含めて同図にプロットした。

収着分配係数のデータ分布を見ると、拡散係数と同様、ほとんどのデータが密度の増加に伴つて低下する一定の傾向を示していることが分かる一方、一部この傾向を示さない一連のデータが存在することも分かる。収着分配係数の導出に見かけの拡散係数を適用する場合、見かけの拡散係数のデータ分布が、収着分配係数のデータ分布にも影響する。図 4.7 に示す見かけの拡散係数の分布と、図 4.8 に示す収着分配係数の分布からも、同一密度における大小の関係が逆転していることが分かる。見かけの拡散係数は比較的ばらつきが少なく、かつ大部分の収着分配係数のデータが見かけの拡散係数から導出した値であることから、収着分配係数も 1 衍程度の狭い範囲に分布していることが分かる。

また、収着分配係数のデータ分布は、第 2 次取りまとめのレファレンスケースで設定された密度近傍において、収着分配係数よりも大きい範囲にあることが分かる。この結果は、レファレンスケースで設定された Cs の収着分配係数の保守性を支持していると考えられる。

図 4.3 部分スメクタイト密度に対する Cs^+ の実効拡散係数（実測値のみ）

図 4.4 乾燥密度に対する Cs⁺の見かけの拡散係数図 4.5 部分スメクタイト密度に対する Cs⁺の見かけの拡散係数

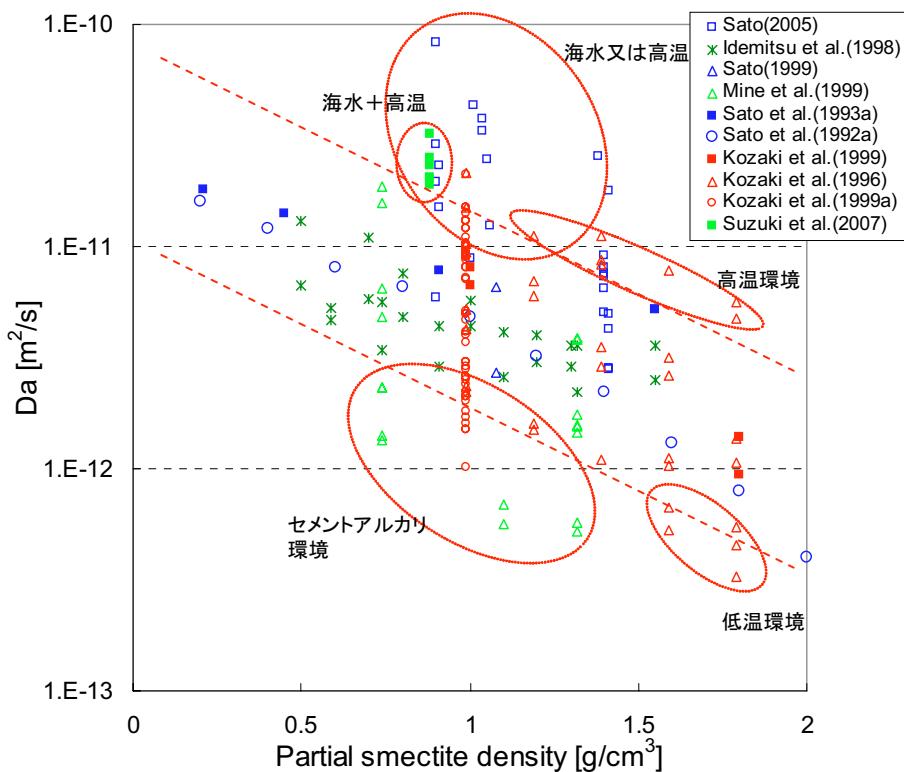


図 4.6 部分スメクタイト密度に対する Cs^+ の見かけの拡散係数（国産ベントナイトのみ）

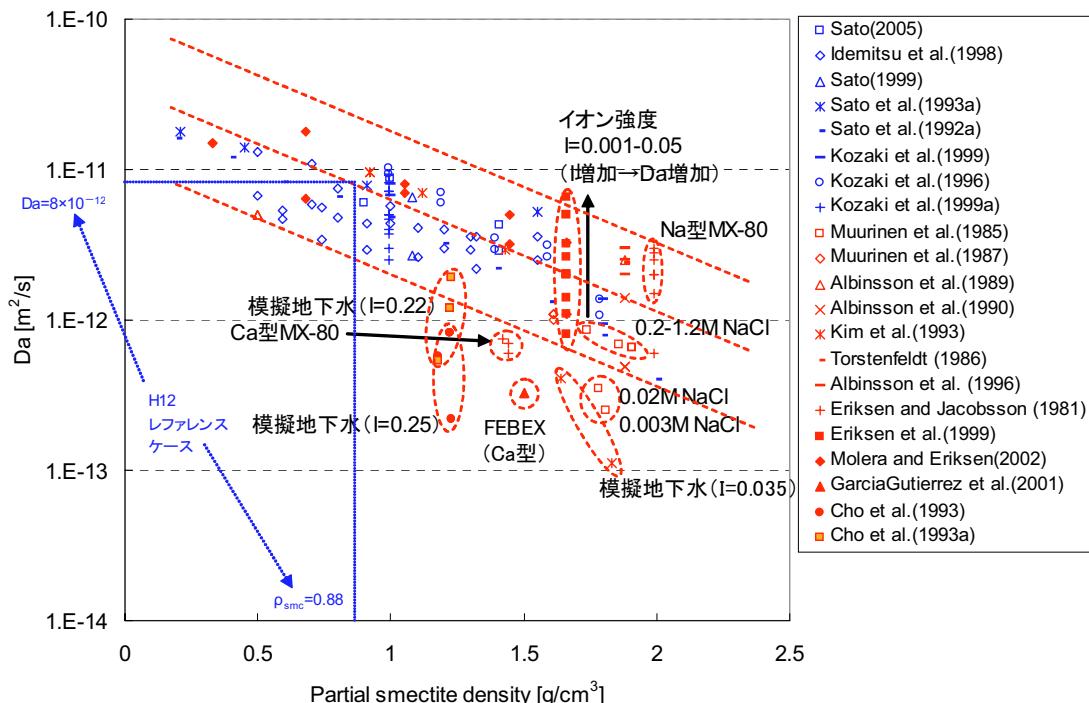
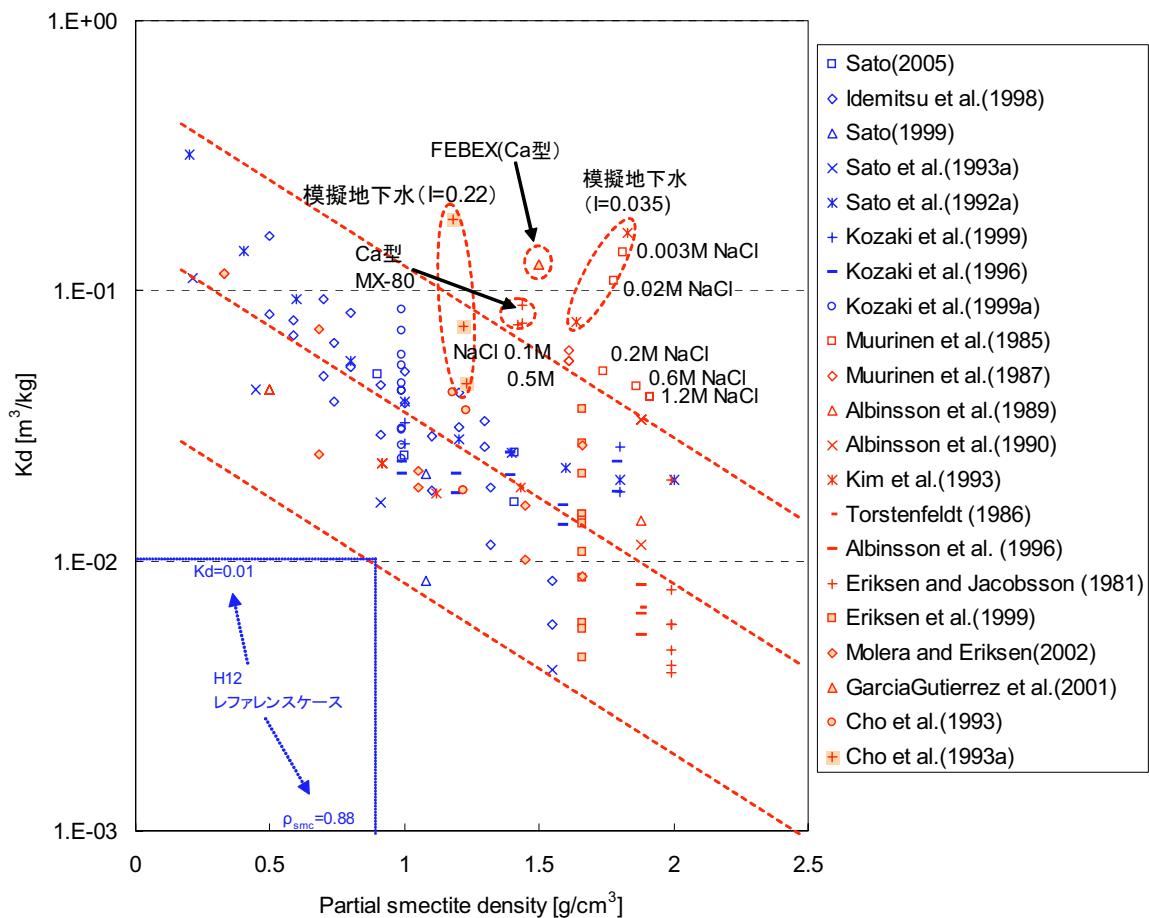


図 4.7 部分スメクタイト密度に対する Cs^+ の見かけの拡散係数（環境条件による絞込済）

(国産ベントナイトのデータ；降水系地下水のみ（低塩濃度・蒸留水）、Ca型又は変質ベントナイト等の特異条件を除外済)

図 4.8 部分スメクタイト密度に対する Cs^+ の収着分配係数（推定値含む）

4.3 1 値の陰イオンの評価例 (I^- , Cl^-)

ここでは、1 値の陰イオンの評価例として、 I^- と Cl^- を対象とした評価を行う。データベースに含まれる、前述の乾燥密度および部分スメクタイト密度と実効拡散係数の関係をそれぞれ I^- について図 4.9 と図 4.10 に、 Cl^- について、図 4.11 と図 4.12 に示す。データは全て実測値のみを対象とし、推定値は含まない。青色が国産、赤色が海外産ベントナイトのデータを示す。

乾燥密度と部分スメクタイト密度に対する実効拡散係数の分布を比較すると、部分スメクタイト密度による規格化の特徴が明確となる。図 4.9 や図 4.11 では 1 つの乾燥密度に対して複数の実効拡散係数が分布する傾向が見られる一方、図 4.10 や図 4.12 では、部分スメクタイト密度による規格化によって、ベントナイト試料の種類を問わず、1 つの尺度で統一的に実効拡散係数の傾向を把握できることが分かる。

また、 Cs の評価で確認した場合と同様、図 4.10 や図 4.12 に赤色・破線の楕円で示すように、一定の範囲に分布しないデータも存在していることが分かる。これらについても、 Cs で検討した場合と同様、試験溶液の液性（高塩濃度、高 pH 等）、ベントナイト特性の変化（Ca 型化、変質等）等を反映しており、降水系地下水模擬溶液（純水系又は低塩濃度等）を使用したデータの分布傾向とは区別して扱うことが可能となる。

さらに、陰イオンで共通する事象として、高密度側で顕著になると考えられる陰イオン排除の影響が挙げられる。低密度側では国産・海外産ベントナイトのデータは整合的であるが、高密度側に分布するデータは主として海外産ベントナイトのデータであることから、高密度側のデータ傾向の議論は海外産ベントナイトのデータに基づいて行う。

以下では、さらに I^- と Cl^- 各々に特徴的な事項に関して記載する。

(1) I^-

図 4.10 に、部分スメクタイト密度に対する I^- の実効拡散係数のデータを示す。特異的な試験条件として、高 pH・変質ベントナイト・コンクリート平衡水・スメクタイト含有量の低い固相等を適用した評価等があれば、図中に明記している。特異条件を除いた国産ベントナイトのデータ分布を基に、最小二乗法で近似直線を求め、記載するとともに、これを平行移動して上限・下限値を示した。

海外産ベントナイトのデータは赤色でプロットしている。データは高密度になるに従って低い値を示すことが分かる。これは主として高密度側において影響がより顕著となる陰イオン排除の影響を反映していると考えられる。この傾向は、特に Oscarson ら³⁶⁾のデータにおいて、低密度側から高密度側にかけて連続性を見出すことができる。一方、Kato ら⁵¹⁾のデータが示す密度に対応した一連の分布を見ると、密度の上昇に伴って減少する傾向は認められるものの、その減少傾向は Oscarson らの傾向と比較すると小さいことが分かる。これは、データの評価がケイ砂混合系で実施されたことにより、密度の増加に伴って陰イオン排除の寄与が相対的に低下したことが原因であると考えられる。

さらに、国産ベントナイトのデータにも高密度側のデータが低いものが存在するが、これらはコンクリート平衡水や高 pH の試験溶液を採用した結果であることから、陰イオン排除の影響とは区別して検討する必要があると考えられる。

これらのデータ分布を、第2次取りまとめのレファレンスケースで設定された実効拡散係数のうち、最も低い値である陰イオンの HSe⁻の設定値と比較すると、全てのデータが設定値よりも小さい範囲に分布している。HSe⁻の設定値が、複数の陰イオンの実効拡散係数の実測値のうち、保守的に最も大きなI⁻の値から決められたことを考慮すると、この結果はレファレンスケースで設定された陰イオンの実効拡散係数が十分に大きく、高い保守性を有していることを示していると考えられる。

(2) Cl⁻

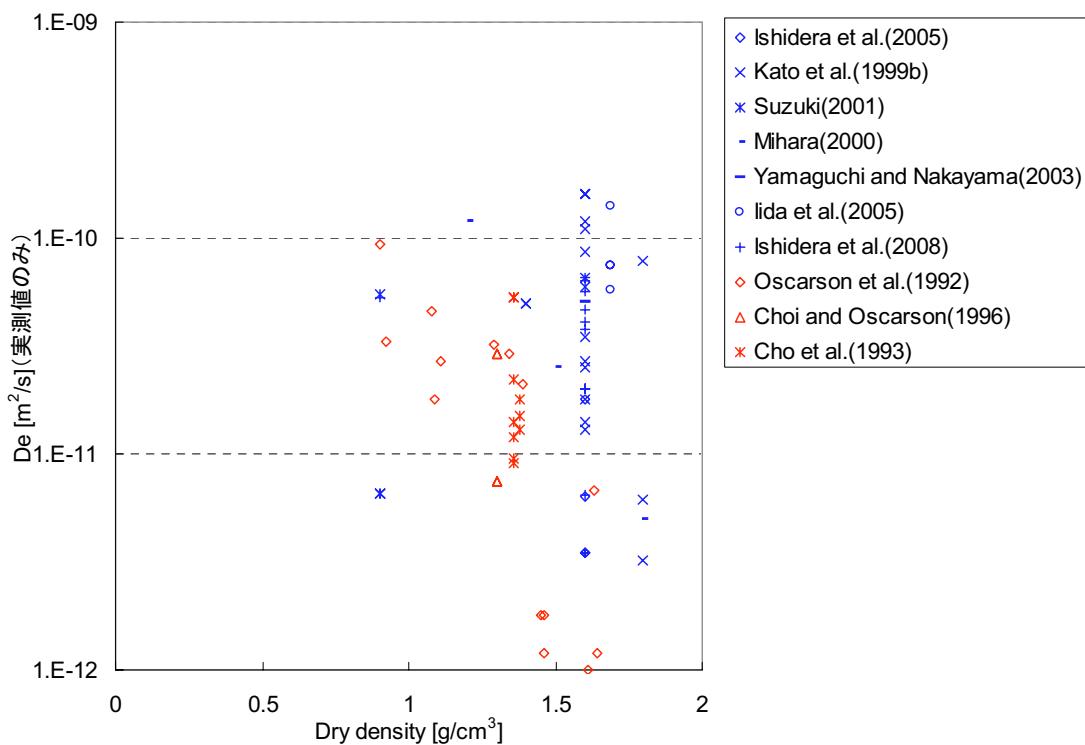
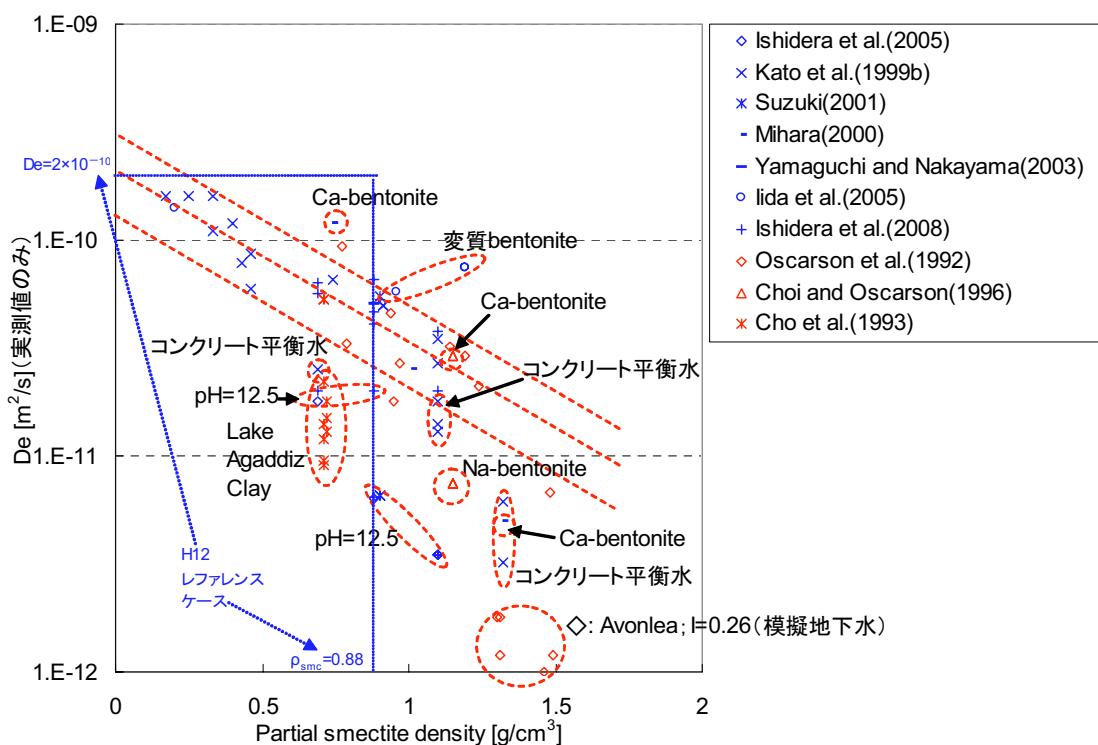
図4.12に示すCl⁻の実効拡散係数のデータ分布では、I⁻の評価と同様、特異条件を除いた国産ベントナイトのデータ分布を基に、最小二乗法で近似直線を求め、記載するとともに、これを平行移動して上限・下限値を示した。さらに、赤色でプロットした海外産ベントナイトのデータは、I⁻の評価と同様、高密度になるに従い、低い値を示している。この傾向も、I⁻の評価と同様、高密度側において影響がより顕著となる陰イオン排除の影響を反映していると考えられる。

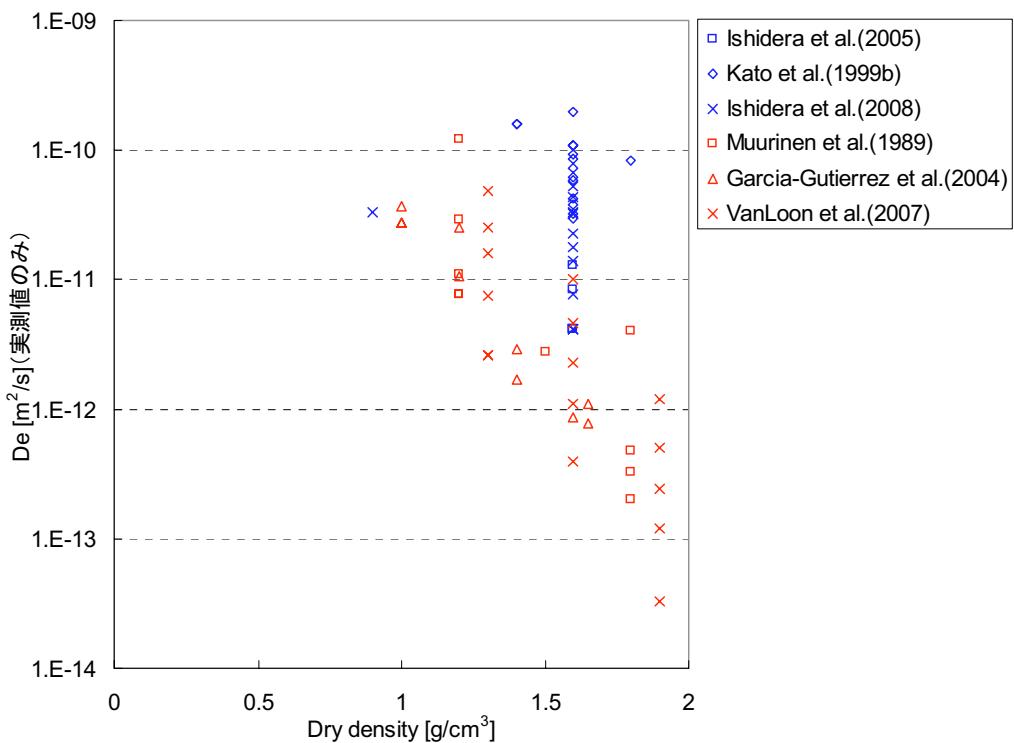
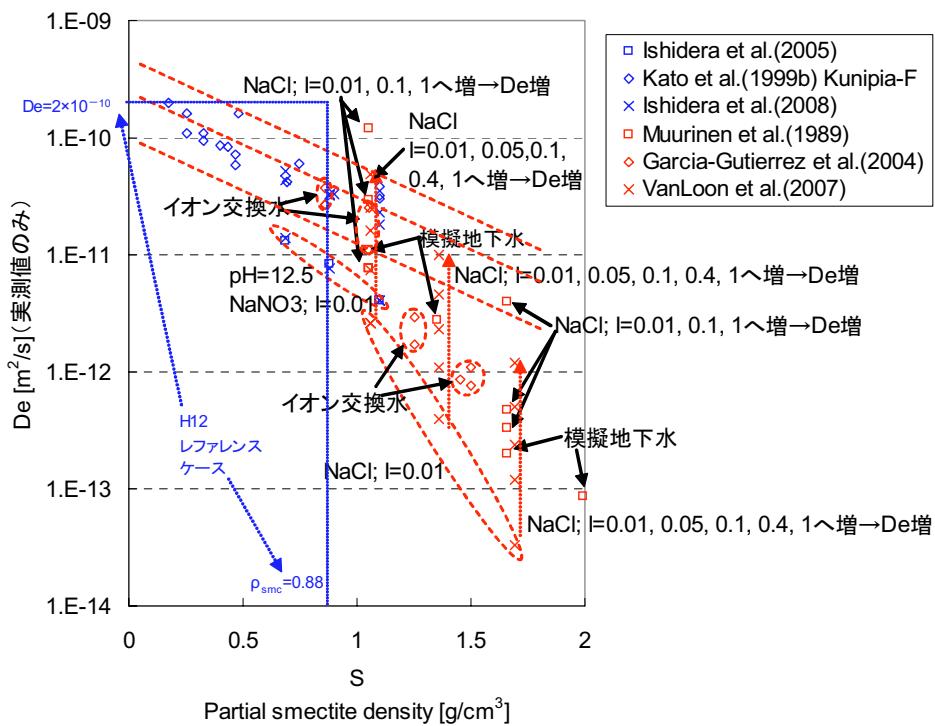
この傾向は、特にVan Loonら⁴⁵⁾のデータにおいて、I⁻の評価と同様、低密度側から高密度側にかけて連続性を見出すことができる。一方、Katoら⁵¹⁾のデータが示す密度に対応した一連の分布を見ると、密度の上昇に伴って減少する傾向は認められるものの、その減少傾向はVan Loonらの傾向と比較すると小さいことが分かる。これもI⁻の評価と同様、データの評価がケイ砂混合系で実施されたことにより、密度の増加に伴って陰イオン排除の寄与が相対的に低下したことが原因であると考えられる。

さらにCl⁻の場合、同密度に対する塩濃度の変化による影響が評価されている。Muurinenら³⁴⁾、Van Loonらのデータを見ると、図中に示すとおり、低塩濃度条件では陰イオン排除の影響を強く受けて低い値を示し、塩濃度が上昇するにつれて陰イオン排除の影響が低下し、高い値を示していると考えられる。この傾向は、陽イオンの実効拡散係数評価で見られた傾向とは逆転している。

上述した高密度側で見られるDeの減少傾向と同一密度における塩濃度上昇に伴うDeの増加は、共に陰イオン排除の影響がDeに与える影響を正しく反映しているとすると、実測値を得るための試験手法や導出手順等の信頼性が高く、データの信頼性も同様に高いことを反映していると考えられる。

I⁻の評価と同様、全データが、第2次取りまとめのレファレンスケースで設定されたHSe⁻の実効拡散係数（保守的に最も大きなI⁻の値から導出）よりも小さい範囲に分布しており、レファレンスケースで設定された陰イオンの実効拡散係数が十分に大きく、高い保守性を有していることを示していると考えられる。

図 4.9 乾燥密度に対する I^- の実効拡散係数（実測値のみ）図 4.10 部分スメクタイト密度に対する I^- の実効拡散係数（実測値のみ）

図 4.11 乾燥密度に対する Cl^- の実効拡散係数（実測値のみ）図 4.12 部分スメクタイト密度に対する Cl^- の実効拡散係数（実測値のみ）

4.4 アクチニドの評価例

アクチニド元素のうち、主要な評価対象である U, Np, Pu, Am を対象とした拡散係数のデータ分布の評価例を示す。特に実測値として評価される見かけの拡散係数を評価の対象とした。アクチニドを対象とした評価では、国産ベントナイトのデータを青色、海外産ベントナイトのデータを赤色として区別した。

(1) U

部分スメクタイト密度に対する U の見かけの拡散係数を図 4.13 に示す。部分スメクタイト密度による規格化は、国産・海外産ベントナイトを同一の指標上で比較することを目的としている。同図では、見かけの拡散係数が試験系の酸化還元環境に応じて異なる分布を示すことが分かる。U(VI)が支配的に存在する酸化的な環境で測定した拡散係数は、高い値の領域に分布しており、一方、U(IV)が支配的に存在する還元的な環境で測定した拡散係数は、低い値の領域に分布している。

還元環境に置かれた U(IV)の収着分配係数は、酸化環境の U(VI)の収着分配係数と比較して非常に高いことが知られている。このことから、U や Np の見かけの拡散係数は、酸化還元環境に応じた収着の影響に強く支配されていると考えられる。

また、両方の領域にまたがって Mine らのデータが分布しているが、これは拡散試験で使用された試験溶液に海水系や、セメント平衡水を模擬したアルカリ溶液、またはこれらの混合系が採用されたことによるものである。

さらに、海外産ベントナイトではデータ数が少ないため、多様な試験条件で取得したデータ間の比較は不可であるが、少なくとも通常の大気雰囲気（酸化環境）のデータは、国産ベントナイトの大気雰囲気におけるデータ分布と一致し、同傾向を示すことが確認できる。

特徴的なデータとして、Albinsson ら¹³⁾が実施した、還元用の粉体をベントナイトに混合した試験で得たデータを図中の破線の楕円で明示した。Albinsson らは還元用の粉体として、還元性の異なる Cu, FeO, Fe を使ってその効果を比較しており、定性的な評価として、酸化条件から Cu, FeO, Fe の順番で、順次還元条件に至るデータが得られたと考えられる。還元性の定量的制御の観点では、粉体の混合による還元性の実現に関して信頼性の評価が必要と考えられる。

(2) Np

部分スメクタイト密度に対する Np の見かけの拡散係数を図 4.14 に示す。同図においても、U と同様、試験系の酸化還元環境に応じて、見かけの拡散係数が異なる分布を示すことが分かる。Np(V)が支配的に存在する酸化的な環境で測定した拡散係数は、高い値の領域に分布しており、一方、Np(IV)が支配的に存在する還元的な環境で測定した拡散係数は、低い値の領域に分布している。

U の場合と同様、還元環境に置かれた Np (IV) の収着分配係数は、酸化環境の Np(V)の収着分配係数と比較して非常に高いことが知られている。このことから、U と同様、Np の見かけの拡散係数は、酸化還元環境に応じた収着の影響に強く支配されていると考えられる。

ここでも両方の領域にまたがって Mine らのデータが分布しているが、これも U の評価結果と同様、拡散試験で使用された試験溶液に海水系や、セメント平衡水を模擬したアルカリ溶液、ま

たはこれらの混合系が採用されたことによるものである。

さらに、海外産ベントナイトでも U でのケースと同様、データ数が少ないため、多様な試験条件で取得したデータ間の比較は不可であるが、少なくとも通常の大気雰囲気（酸化環境）のデータは、国産ベントナイトの大気雰囲気におけるデータ分布と一致し、同傾向を示すことが確認できた。Np のケースでも、Albinsson ら¹⁵⁾は還元用の粉体をベントナイトに混合した試験を実施していることから、そのデータを図中の破線の楕円で明示した。U のケースと同様、定性的な評価として、酸化条件から Cu, FeO, Fe の順で、順次還元条件に至るデータが得られたことが分かる。Staunton らのデータを見ると、酸化条件の試験溶液にフミン酸や EDTA を導入した結果、収着分配係数の増大に伴うと考えられる拡散係数の低下が見られることが分かる。

(3) Pu

部分スメクタイト密度に対する Pu の見かけの拡散係数を図 4.15 に示す。

国産ベントナイトのデータのみに注目すると、Sato ら⁵²⁾や Tachi ら⁵³⁾のデータから酸化性環境中の試験で得られたデータには密度の上昇に伴う拡散係数の減少が見られる。一方で、還元環境中で得られたデータは Idemitsu ら⁵⁴⁾のデータのみであり、これらのデータは、炭素鋼共存による還元性環境で得られたものである。

海外産ベントナイトのデータとしては、酸化条件下で 4 値に揃えた Pu を使用したデータ、及び Albinsson らによる酸化・還元条件下でのデータがある。プロットの分布から分かるように、広範な密度において 10^{-15} から $10^{-13} [\text{m}^2/\text{s}]$ の範囲にあることを示唆する結果であるが、密度や酸化還元環境の変動に応じた見かけの拡散係数の傾向性の評価のためには、酸化還元条件を制御した信頼性の高いデータ取得が必要である。

(4) Am

部分スメクタイト密度に対する Am の見かけの拡散係数を図 4.16 に示す。

Am は酸化還元環境に拘らず Am(III)の原子価を有することから、一定の分布を示すと考えられる。しかし、同図には同密度に対して縦方向に分布するデータが見られる。この一連のデータについて試験条件等を確認したところ、これらは試験溶液が高アルカリのセメント平衡水であり、かつ Ca 型のベントナイトを使用していることが確認できた。

海外産ベントナイトのデータは、部分スメクタイト密度 0.5 g/cm^3 でのデータがケイ砂を 90wt% 含む試料によるデータであることを除き、降水系地下水を模擬した一般的な条件で取得されており、密度 $1.8 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$ の領域において 1~2 桁程度の範囲に分布していることが分かる。しかし、密度 $1.8 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$ で得られた Albinsson らや Torstenfelt らのデータは、測定に 1 年以上の長時間をかけているにも拘わらず、評価に使用可能な濃度プロファイルの点数が少ない、又は濃度ピークが鋭くフィッティングが困難などの理由から、図 4.16 にプロットした値もしくはそれ未満であることが示されるなど、比較的大きな誤差を含むデータであることが文献から確認された。

以上から、アクチニドでは全般的かつ特に III 値や IV 値で収着性が高く、測定に長時間を要することなどから、精度の高いトレーサ濃度プロファイル取得が難しいこと等も、データのばらつ

きに影響していると考えられる。そのため、アクチニドの拡散係数評価のためには、実験手法の改良等も含めて今後信頼性の高いデータの取得が必要になると考えられる。

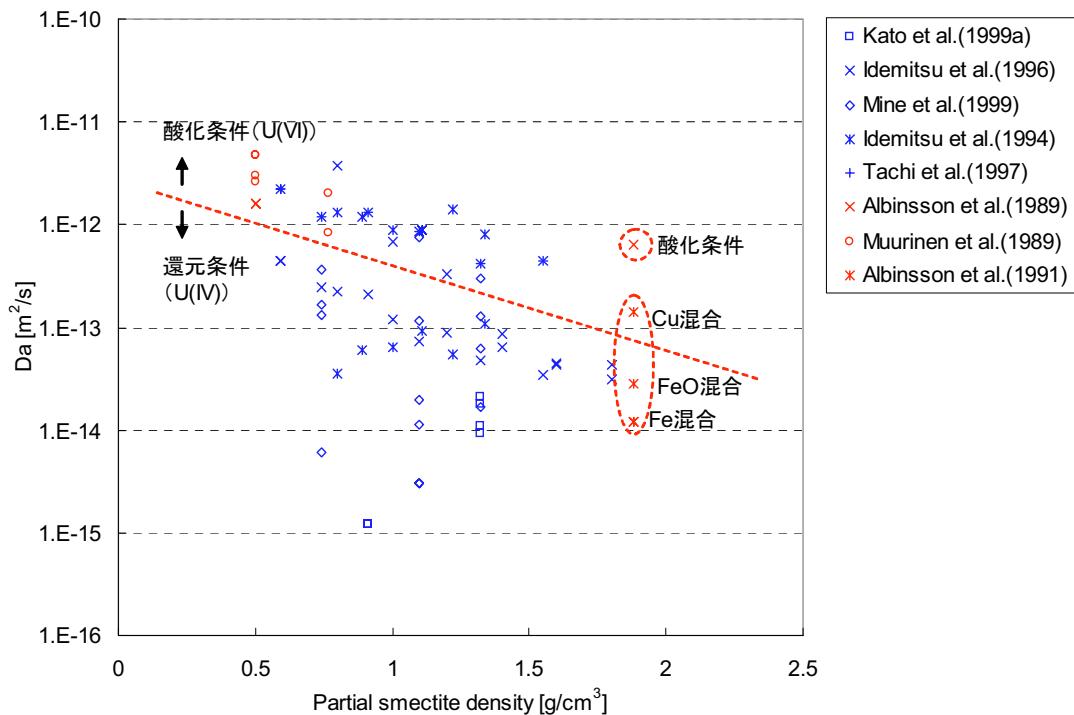


図 4.13 部分スメクタイト密度に対する U の見かけの拡散係数

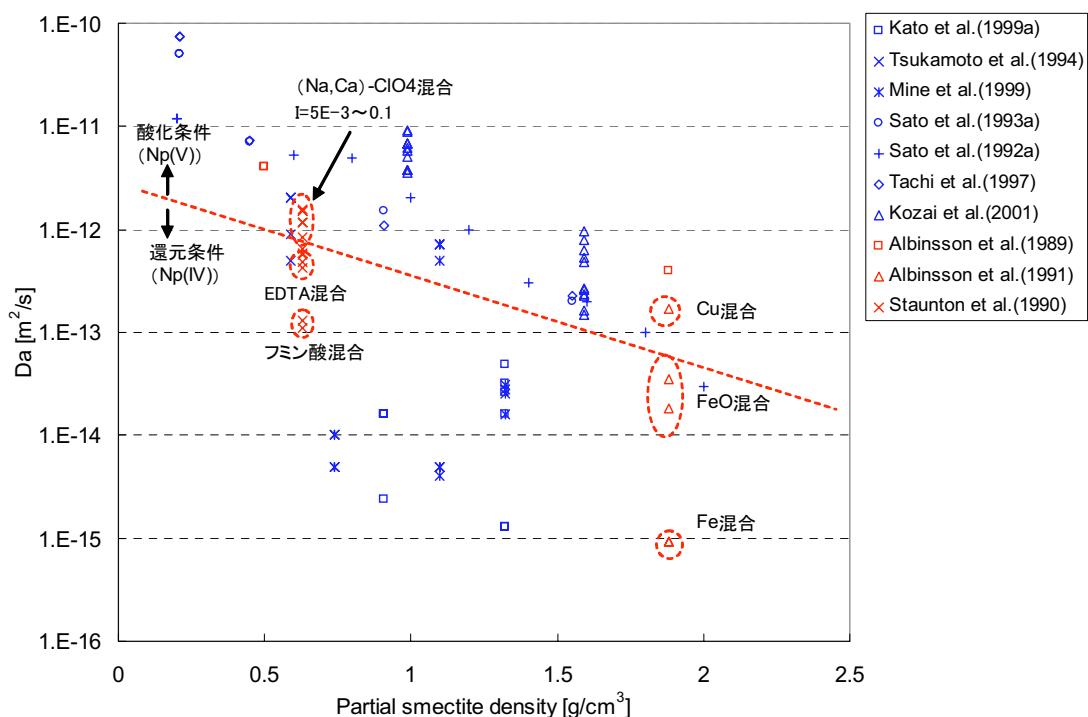


図 4.14 部分スメクタイト密度に対する Np の見かけの拡散係数

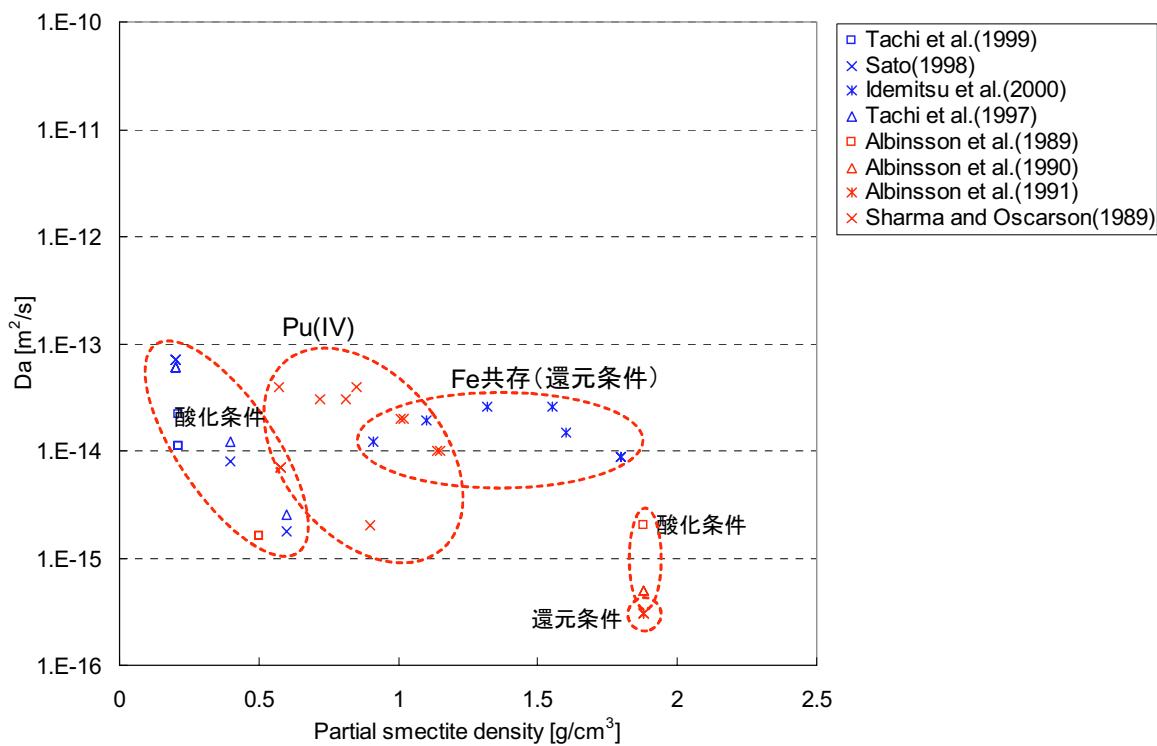


図 4.15 部分スメクタイト密度に対する Pu の見かけの拡散係数

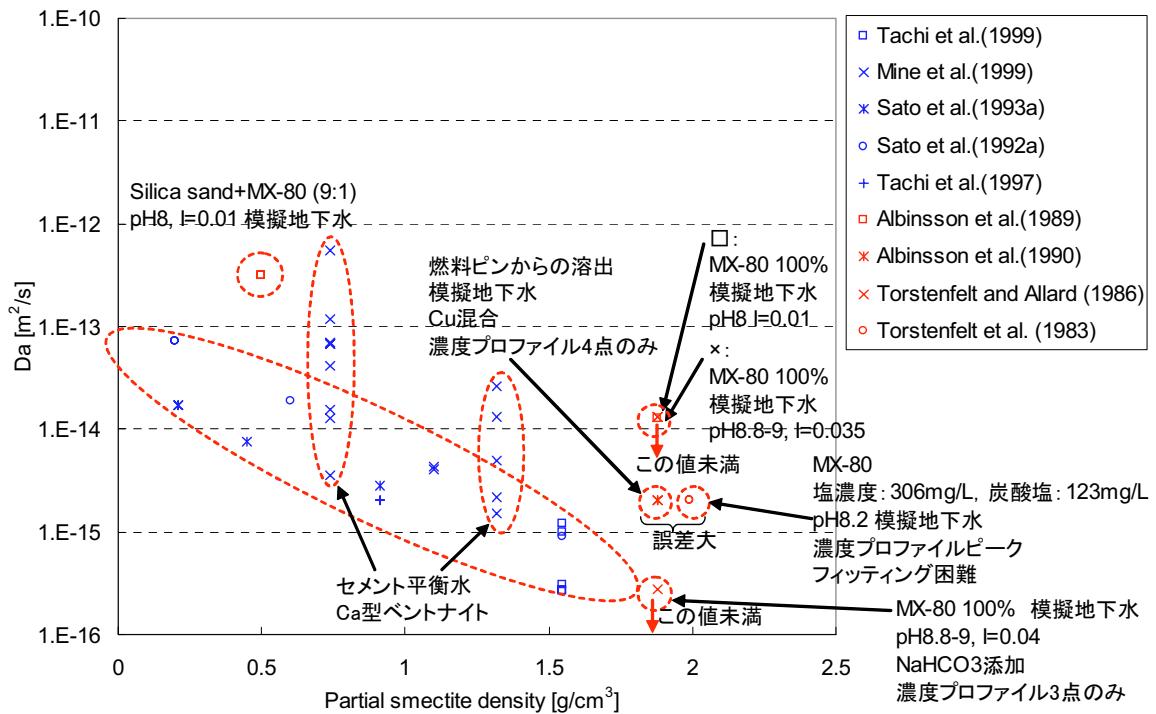


図 4.16 部分スメクタイト密度に対する Am の見かけの拡散係数

5. まとめ

国産のベントナイト・岩石の拡散係数と関連データを管理する既存の拡散係数データベースに対し、海外産ベントナイトに関して新たに文献調査を実施してデータを拡充した。拡充した海外産ベントナイトのデータを、既存の国産ベントナイトのデータと比較し、その評価例を示した。評価例の提示に際し、海外産ベントナイトは国産ベントナイトと比較した場合に、スメクタイトを主要鉱物としている点で共通性を有していることから、「部分スメクタイト密度」の概念を導入して、拡散係数や拡散の評価から得られる収着分配係数等を規格化し、同一プロット上で比較・評価可能であることを確認した。さらに、安全評価上の重要元素に対して第2次取りまとめ検討・設定された拡散係数に係るパラメータとの比較・評価を実施した結果、データ分布が設定値の妥当性を概ね支持することが確認された。

一方で、今回実施したデータ評価・分析を通じて、拡散試験や評価に関する信頼性に関して考察を行った。この結果、実効拡散係数では特に高密度側で試験手法（TD法）と値の導出手法に起因すると考えられる値の変動が確認されたことから、データの取得条件・試験手法の詳細手順等、信頼性に係る情報を考慮した評価が必要であると考えられる。見かけの拡散係数では、導出に必要な試験手法（ID法）によって比較的データを得やすいことを反映して、データは全体として低密度側で比較的狭い値分布を示す一方、海外産ベントナイトと国産ベントナイトの一部のデータは高い密度領域で低い値を示す等の特徴を示していることから、見かけの拡散係数においても、特に高密度側のデータの評価では、試験条件や導出手法等、データの信頼性に係る情報を考慮した評価が重要であると考えられる。また、アクチニド等のデータ取得・評価が困難なデータに関しては、データの信頼性向上に必要な試験手法の改善等を考慮しながらデータの拡充を進めると共に、データの信頼性評価に関して十分な検討が必要であると考えられる。

以上から、必要なデータを拡充しつつデータベースを活用することで、今後広範な環境を対象とした拡散パラメータの設定を、効果的に実施することが可能になると考えられる。

今後の運用や評価方針の検討の過程において、必要に応じてさらにデータベースの構造や定義等の改良を行い、活用範囲の広い有用なデータベースへと発展させることが必要であると考える。

謝辞

本報告書の作成にあたり、文献調査の作業において、三菱マテリアル株式会社の加藤博康氏、関岡靖司氏による協力を頂きました。また、文献調査及びデータの信頼性情報に係る議論について、BMG Engineering Ltd.の Michael Ochs 氏の協力を頂きました。データベース整備・本報告書の記載に係る議論について、地層処分研究開発部門の油井三和副部門長に協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- ¹ 核燃料サイクル研究開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ”，JNC TN1400 99-(020～024) (1999).
- ² H. Sato : “Diffusivity Database (DDB) for Major Rocks: Database for the Second Progress Report”, JNC TN8400 99-065 (1999).
- ³ 栄木善克, 笹本広, 柴田雅博, 佐藤治夫, 油井三和：“主要岩石中の核種の拡散係数データベースシステム; 2006年版/仕様・CD-ROM”, JAEA-Data/Code 2006-008 (2006).
- ⁴ 栄木善克, 柴田雅博, 佐藤治夫, 北村暁：“主要岩石及び緩衝材中の核種の拡散係数データベースシステム; 2007年公開版/仕様” JAEA-Data/Code 2007-010 (2007).
- ⁵ 栄木善克, 館幸男：“緩衝材及び岩石中での核種の拡散データベースの整備” JAEA-Data/Code 2008-035 (2009).
- ⁶ 館幸男, 栄木善克, 陶山忠宏, 斎藤好彦, Michael Ochs, 油井三和：“地層処分安全評価のための核種の取着・拡散データベースシステムの開発”, JAEA-Data/Code 2008-034 (2009).
- ⁷ 濵谷朝紀, 柴田雅博, 陶山忠宏：“核種のベントナイトおよび岩石に対する取着データベース”, 核燃料サイクル開発機構技術資料, JNC TN8410 99-050 (1999).
- ⁸ Ochs, M.; Saito, Y.; Kitamura, A.; Shibata, M.; Sasamoto, H. and Yui, M. : “Evaluating and Categorizing the Reliability of Distribution Coefficient Values in the Sorption Database”, Japan Atomic Energy Agency Technical Report, JAEA-Technology 2007-011 (2007).
- ⁹ (社) 日本原子力学会：“取着分配係数の測定方法—浅地中処分のバリア材を対象としたバッチ法の基本手順及び深地層処分のバリア材を対象とした測定の基本手順— 標準委員会 技術レポート”, AESJ-SC-TR001:2006 (2006).
- ¹⁰ 油井三和, 佐々木康雄, 濵谷朝紀, 佐藤治夫：“ベントナイト一水反応及びベントナイト中の核種移行挙動”, 放射性廃棄物研究, Vol.1, No.1 (1994).
- ¹¹ Idemitsu, K.; Tachi, Y.; Furuya, H.; Inagaki, Y. and Arima, T. : “Diffusion of Cs and Sr in Compacted Bentonites under reducing conditions and in the Presence of Corrosion Products of Iron”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.506, pp.351-358 (1998).
- ¹² 鈴木 覚：“人工バリアにおける核種拡散過程に関する研究”, 核燃料サイクル開発機構技術資料, JNC TN8400 2002-006 (2002).
- ¹³ Albinsson, Y. and Engkvist, I. : “Diffusion of Am, Pu, V, Np, Cs, I and Tc in compacted sand-bentonite mixture”, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, SKB TR 89-22 (1989).
- ¹⁴ Albinsson, Y.; Forsyth, R.; Skarnemark, G.; Skalberg, M.; Torstenfelt, B. and Werme, L. : “Leaching/migration of V02-fuel in compacted bentonite”, Materials Research Society Symp. Proc., Vol. 176, Pittsburgh, Pennsylvania, pp. 559-565 (1990).
- ¹⁵ Albinsson, Y.; Christiansen-Satmark, B.; Engkvist, I. and Johansson, W. : “Transport of actinides and Tc through a bentonite backfill containing small quantities of iron or copper”, Radiochimica Acta 52/53, pp. 283-286. Part 1 (1991).
- ¹⁶ Albinsson, Y.; Andersson, K.; Borjesson, S. and Allard, B. : “Diffusion of radionuclides in concrete/bentonite systems”, Journal of Contaminant Hydrology 21, pp. 189-200 (1996).

- ¹⁷ Cho, W.J.; Oscarson, D.W.; Gray, M.N. and Cheung, S.C.H. : "Influence of diffusant concentration on diffusion coefficients in clay", *Radiochim. Acta* 60, pp. 159–163 (1993).
- ¹⁸ Cho, W.J.; Oscarson, D.W. and Hahn, P.S. : "The measurement of apparent diffusion coefficients in compacted clays: an assessment of methods", *Applied Clay Science* 8, pp. 283-294 (1993).
- ¹⁹ Choi, J.W. and Oscarson, D.W. : "Diffusive transport through compacted Na- and Ca-bentonite", *Journal of Contaminant Hydrology* 22, pp. 189-202 (1996).
- ²⁰ Eriksen, T.E. and Jacobsson, A. : "Ion diffusion in compacted Na and Ca bentonites", KBS Technical Report 81-12, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm (1981).
- ²¹ Eriksen, T.E. and Jansson M. : "Diffusion of Γ , Cs^+ and Sr^{2+} in compacted bentonite - Anion exclusion and surface diffusion", SKB Technical Report 96-16, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm (1996).
- ²² Eriksen, T.E.; Jansson, M. and Molera, M. : "Sorption effects on cation diffusion in compacted bentonite", *Engineering Geology* 54, pp. 231-236 (1999).
- ²³ Garcia-Gutierrez, M.; Missana, T.; Mingarro, M.; Samper, J.; Dai, Z. and Molinero, J. : "Solute transport properties of compacted Ca-bentonite used in FEBEX project", *Journal of Contaminant Hydrology* 47, pp. 127-137 (2001).
- ²⁴ Garcia-Gutierrez, M.; Cormenzana, J.L.; Missana, T. and Mingarro, M. : "Diffusion coefficients and accessible porosity for HTO and ^{36}Cl in compacted FEBEX bentonite", *Applied Clay Science* 26, pp. 65–73 (2004).
- ²⁵ Glaus, M.A.; Baeyens, B.; Bradbury, M.H.; Jakob, A.; Van Loon, L.R. and Yaroshchuk, A. : "Diffusion of ^{22}Na and ^{85}Sr in montmorillonite: Evidence of interlayer diffusion being the dominant pathway at high compaction", *Environmental Science & Technology* 41, pp. 478-485 (2007).
- ²⁶ Kim, H.T.; Suk, T.W. and Parks, S.H. : "Diffusivities for ions through compacted Na-bentonite with varying dry bulk density", *Waste Management* 13, pp. 303-308 (1993).
- ²⁷ Lee, J.O.; Cho, W.J.; Hahn, P.S. and Lee, K.J. : "Effect of dry density on ^{90}Sr diffusion in a compacted Ca-bentonite for a backfill of radioactive waste repository", *Annals of Nuclear Energy* 23(9), pp. 727-738 (1996).
- ²⁸ Melkior, T.; Mourzag, D.; Yahiaoui, S.; Thoby, D.; Alberto, J.C.; Brouard, C. and Michau, N. : "Diffusion of an alkaline fluid through clayey barriers and its effect on the diffusion properties of some chemical species", *Applied Clay Science* 26, pp. 99-107 (2004).
- ²⁹ Melkior, T.; Gaucher, E.C.; Brouard, C.; Yahiaoui, S.; Thoby, D.; Clinard, C.; Ferrage, E.; Guyonnet, D.; Tournassat, C. and Coelho, D. : " Na^+ and HTO diffusion in compacted bentonite: Effect of surface chemistry and related texture", *Journal of Hydrology* 370, pp. 9-20 (2009).
- ³⁰ Molera, M. and Eriksen, T. : "Diffusion of $^{22}Na^+$, $^{85}Sr^{2+}$, $^{134}Cs^+$ and $^{57}Co^{2+}$ in bentonite clay compacted to different densities: experiments and modeling", *Radiochimica Acta* 90(9-11), pp. 753-760 (2002).
- ³¹ Molera, M.; Eriksen, T. and Jansson, M. : "Anion diffusion pathways in bentonite clay compacted to different dry densities", *Applied Clay Science* 23, pp. 69-76 (2003).
- ³² Muurinen, A.; Rantanen, J. and Penttila-Hiltunen, P. : "Diffusion mechanisms of strontium, caesium and cobalt in compacted sodium bentonite", *Material Research Society Symposium Proceeding* 50, pp. 617-624 (1985).
- ³³ Muurinen, A.; Penttila-Hiltunen, P. and Rantanen, J. : "Diffusion mechanisms of strontium and cesium in

compacted sodium bentonite”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management X, Symp. Proc. vol. 84, Materials Research Society, Pittsburgh, Pennsylvania, pp. 803-812 (1987).

³⁴ Muurinen, A.; Penttila-Hiltunen, P. and Uusheimo, K. : “Diffusion of chloride and uranium in compacted sodium bentonite”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XII, Symp. Proc. vol. 127, Materials Research Society, Pittsburgh, Pennsylvania, pp. 743-748 (1989).

³⁵ Oscarson, D.W. and Hume, H.B. : “Diffusion of C-14 in dense saturated bentonite under steady-state conditions”, Transport in Porous Media 14, pp. 73-84 (1994).

³⁶ Oscarson, D.W.; Hume, H.B.; Sawatsky, N.G. and Cheung, S.C.H. : “Diffusion of Iodide in Compacted Bentonite”, Soil Science Society of America Journal 56(5), pp. 1400-1406 (1992).

³⁷ Robin, M.J.L.; Gillham, R.W. and Oscarson, D.W. : “Diffusion of strontium and chloride in compacted clay-based materials”, Soil Science Society of America Journal 51, pp. 1102-1108 (1987).

³⁸ Sawatsky, N.G. and Oscarson, D.W. : “Diffusion of technetium in dense bentonite under oxidizing and reducing conditions”, Soil Science Society of America Journal 55, pp. 1261-1267 (1991).

³⁹ Sawatsky, N.G. and Oscarson, D.W. : “Diffusion of technetium in dense bentonite”, water, air, and soil pollution 57-58, pp. 449-456 (1991).

⁴⁰ Sharma, H.D. and Oscarson, D.W. : “Diffusion of plutonium (IV) in dense bentonite-based materials”, Material Research Society Symposium Proceedings 127, pp. 735-741 (1989).

⁴¹ Staunton, S.; Clay, P.G. and Rees, L.V.C. : “Diffusion of Neptunium (V) in Clays”, Radiochimica Acta 49, pp. 147-153 (1990).

⁴² Torstenfelt, B. : “Migration of the fission products strontium, technetium, iodine and cesium in clay”, Radiochimica Acta 39, pp. 105-112 (1986).

⁴³ Torstenfelt, B. and Allard, B. : “Migration of fission products and actinides in compacted bentonite”, SKB TR-86-14, Stockholm, Sweden (1986).

⁴⁴ Torstenfelt, B., Allard, B., Andersson, K., Kipatsi, H., Eliasson, L., Olofsson, U. and Persson,H. : “Radionuclide diffusion and mobilities in compacted bentonite”, SKB Technical Report TR 83-34, Stockholm, Sweden (1983).

⁴⁵ Van Loon, L.R.; Glaus, M.A. and Muller, W. : “Anion exclusion effects in compacted bentonites: Towards a better understanding of anion diffusion”, Applied Geochemistry 22, pp.2536-2552 (2007).

⁴⁶ Kozaki, T.; Sato, Y.; Nakajima, M.; Kato, H.; Sato, S. and Ohashi, H. : “Effect of particle size on the diffusion behavior of some radionuclides in compacted bentonite”, Journal of Nuclear Materials 270, pp. 265-272 (1999).

⁴⁷ Yamaguchi, T. and Nakayama, S. : “Data Acquisition for Predicting Radionuclide Migration under Deep Geological Environments”, JAERI-Conf 2003-018, pp.115-116 (2003).

⁴⁸ Suzuki, S.; Haginuma, M. and Suzuki, K. : “Study of Sorption and Diffusion of ¹³⁷Cs in compacted Bentonite Saturated with Saline Water at 60degC”, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 44, No. 1, pp.81-89 (2007).

⁴⁹ Sato, H. and Shibutani, T. : “Study on Adsorption and Diffusion Mechanism of Nuclides in Buffer Material and Geosphere”, PNC Technical Review No.91, pp.71-89 (1994).

⁵⁰ 柴田雅博, 佐藤治夫, 小田治惠, 油井三和 : “地層処分研究第2次取りまとめにおける緩衝材への放射性元素の分配係数の設定”, JNC TN8400 99-072 (1999).

⁵¹ Kato, H.; Nakazawa, T.; Ueta, S.; Muroi, M.; Yasutomi, I. and Fujihara, H. : “Effective diffusivities of iodine, chlorine and carbon in bentonite buffer material”, MRSXXII Vol.556, pp.687-694 (1999).

⁵² Sato, H. : “A study on Nuclide Migration in Buffer Materials and Rocks for Geological Disposal of Radioactive Waste”, PNC TN8410 97-202 (1998).

⁵³ Tachi, Y.; Kohara, Y.; Uchidate, N. and Shibutani, T. : “Diffusion Behavior of Pu and Am in Compacted Bentonite”, JNC Technical Report, JNC TN8400 99-089 (1999).

⁵⁴ Idemitsu, K.; Xia, X.; Ichishima, T.; Furuya, H.; Inagaki, Y. and Arima, T. : “Diffusion of Plutonium in Compacted Bentonites in the Reducing Condition with Corrosion Products of Iron”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 608, pp.261-266 (2000).

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度、質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) 、濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	$1^{(b)}$	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	$1^{(b)}$	m^2/m^2
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	1	s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}kg\ s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N\ m$	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率、工率、放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷、電気量	クーロン	C		$s\ A$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}A^{-1}$
静電容量	ファラード	F	C/V	$m^{-2}kg^{-1}s^4A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}A^2$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}kg^{-1}s^3A^2$
磁束密度	テスラ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}A^{-1}$
光セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}A^2$
照度	ルーメン	lm	$cd\ sr^{(e)}$	cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	lx	lm/m^2	$m^{-2}cd$
吸収線量、比エネルギー分与、カーマ	グレイ	Bq		s^{-1}
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量	シーベルト ^(g)	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
		kat		$s^{-1} mol$

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコピーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号 rad および sr が用いられるが、慣習として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。

(c) 調光学ではステラジアンという名称と記号 sr を単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で "radioactivity" と記される。

(g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) については CIPM勧告 2 (CI-2002) を参照。

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートンメートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	$m^{-1}s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m ²	$kg\ s^{-3}$
熱容量、エントロピー	ジュール每ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}K^{-1}$
比熱容量、比エントロピー	ジュール每キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}K^{-1}$
比エネルギー	ジュール每キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	$m^{-1}kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$kg\ s^{-3}A^{-1}$
電荷密度	クーロン每立方メートル	C/m ³	$m^3\ sA$
表面電荷密度	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^2\ sA$
電束密度、電気変位	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^2\ sA$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^3\ kg^{-1}s^4A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}A^2$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー、モル熱容量	ジュール每モル每ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1}sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^2\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² sr)	$m^2\ m^2\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール每立方メートル	kat/m ³	$m^{-3}s^{-1}mol$

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L	1L=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =2×10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネバ	Np	SI 単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

(c) 3 元系の CGS 単位系と SI では直接比較できないため、等号「≡」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	fm	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1868J ((15°C)カロリー), 4.1868J ((IT)カロリー) 4.184J ((熱化学)カロリー)
ミクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

