JAEA-Data/Code
2008-035

緩衝材及び岩石中での核種の拡散データベースの整備

Development of Diffusion Database of Buffer Materials and Rocks

栃木 善克　舘 幸男

Yoshikatsu TOCHIGI and Yukio TACHI

地層処分研究開発部門
核種移行研究グループ

Radionuclide Migration Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

February 2009

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

本レポートは独立行政法人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

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

JAEA-Data/Code 2008-035

緩衝材及び岩石中での核種の拡散データベースの整備

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
栃木　善克※，舘　幸男

（2008 年 12 月 19 日 受理）

放射性廃棄物地層処分の性能評価のための基盤情報として，既存の拡散データベースを基礎に，緩衝材及び岩石中での核種の拡散係数データベースの整備を行った。今回のデータベース整備においては，特にデータ評価における推定値の導入，信頼性情報に係る記述の導入に重点を置き，さらにベントナイトのデータを対象に加えるためにデータベースの構成や定義の再構築を行い，対象データ範囲の大幅な拡充を実施した。また，再構築後のデータベース定義に従い，既存の国内岩石を対象としたデータを文献調査によって拡充・更新すると共に，国産ベントナイトを対象とした文献調査を実施し，データを追加した。その結果，総データ数は，実効拡散係数 D_e が約 450 件，見かけの拡散係数 D_a は約 1,350 件となった。また，整備したデータベースの活用例として，乾燥密度や間隙率に対する拡散係数のプロットを例示し，元素・固相・試験環境による影響評価の例を示した。

本データベース改良の結果実現した特徴として，拡散係数と関連するパラメータの相関に関する評価範囲の拡大，特に拡散係数の実測値と推定値の分布傾向を測定時の環境条件などと関連させた比較評価など，が挙げられる。

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

JAEA-Data/Code 2008-035

Development of Diffusion Database of Buffer Materials and Rocks

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 19, 2008）

The diffusion database of nuclides in the buffer material and rock was developed on the basis of the existing diffusion database, as an important basis for the performance assessment of radioactive waste disposal. Update of database includes improvement of database contents, extension of data scope, etc.

The database was updated with especially emphasis on introduction of the estimation approach for related parameters and description concerning reliability of diffusion data. In order to add the data of bentonite, the cotents of database was improved by adding related parameters such as smectite partial density, and the data range was largely expanded. Diffusion data and related information for domestic rocks and bentonites was updated by literature survey in accordance with the definition of improved database. As the result of data addition, total data count of effective diffusion coefficient is about 450 and that of apparent diffusion coefficient is about 1,350. As an example of practical use of the improved database, the example of evaluation for the plot of a diffusion coefficient vs. density or porosity was discussed.

Updated database made it possible to evaluate the correlation of parameters relevant to the diffusion coefficient, especially, comparative evaluation between environmental conditions and distribution tendency both of measured and estimated diffusion coefficient, for parameter-setting for performance assessment.

Keywords: Diffusion Coefficient, Database, Rock, Buffer Material

---

※ Collaborating Engineer

目　　次

1. はじめに 1
1.1 背景及び目的 1
1.2 実施内容 1
2. データベースの構成と拡散パラメータ 2
2.1 データベース構造・定義の拡張・改良 2
2.1.1 データベース更新の概要 2
2.1.2 拡散データベースのデータ構成 3
2.1.3 信頼性情報の整備 5
2.2 拡散係数に係るパラメータの定義および測定手法 6
2.2.1 透過拡散法（Through-Diffusion method) 8
2.2.2 濃度プロファイル法（In-Diffusion method) 9
2.3 パラメータ間の相関・推定評価手法 10
2.3.1 対象パラメータの相関 10
2.3.2 部分スメクタイト密度 11
2.3.3 GF の部分スメクタイト密度依存性と D_e の推定値としての導出 12
2.3.4 試験方法を起点としたパラメータの導出フロー 13
2.4 データベースの定義詳細 14
3. 評価対象データ 19
3.1 調査方法・範囲 19
3.2 調査方針 19
3.3 評価対象 19
4. データベースの利用による拡散係数と関連パラメータの相関評価 33
4.1 ベントナイト 33
4.1.1 1 価の陽イオンの評価例（Cs^+） 33
4.1.2 1 価の陰イオンの評価例（I^-） 39
4.1.3 アクチニドの評価例 41
4.2 岩石 46
4.2.1 全元素の評価例 46
4.2.2 1 価の陽イオンの評価例（Cs^+, K^+, Na^+） 46
4.2.3 1 価の陰イオンの評価例（Cl^-, I^-） 46
4.2.4 ヒストグラムー拡散係数のデータ分布 51
5. まとめ 51
謝辞 51

参考文献 52

Contents

1. Introduction ····· 1
1.1 Backgrounds and objective ····· 1
1.2 Contents ····· 1
2. Structure of database and parameters related to diffusion ····· 2
2.1 Extension and improvement of database configure/definition ····· 2
2.1.1 Summary of database renewal ····· 2
2.1.2 Component of diffusion database ····· 3
2.1.3 Introduction of data reliability information ····· 5
2.2 Parameters related to diffusion coefficient and measurement method ····· 6
2.2.1 Through-Diffusion method ····· 8
2.2.2 In-Diffusion method ····· 9
2.3 Correlation among parameters and estimation methods ····· 10
2.3.1 Parameters ····· 10
2.3.2 Partial smectite density ····· 11
2.3.3 Association between geometric factor and partial smectite density ····· 12
2.3.4 Flow diagram of parameter examining starting from experimental method ····· 13
2.4 Detailed information of database definition ····· 14
3. Data for evaluation ····· 19
3.1 Examination method and scope of survey ····· 19
3.2 Examination policy ····· 19
3.3 Data for evaluation ····· 19
4. Data evaluation using updated database ····· 33
4.1 Bentonite ····· 33
4.1.1 Example of examining monovalent cation (Cs^+) ····· 33
4.1.2 Example of examining monovalent anion (I^-) ····· 39
4.1.3 Example of examing actinides ····· 41
4.2 Rock ····· 46
4.2.1 Example of examining all elements ····· 46
4.2.2 Example of examining monovalent cation (Cs^+, K^+, Na^+) ····· 46
4.2.3 Example of examining monovalent anion (Cl^-, I^-) ····· 46
4.2.4 Histgram-distribution of diffusion coefficient ····· 50
5. Conclusion ····· 51
Acknowledgment ····· 51

References ····· 52

図　目　次

図 2.1　透過拡散試験セルの例 8
図 2.2　濃度プロファイル法試験セルの例 9
図 2.3　GF と部分スメクタイト密度の相関 12
図 2.4　試験方法と導出パラメータの相関 14
図 4.1　乾燥密度に対する Cs^+の実効拡散係数 35
図 4.2　部分スメクタイト密度に対する Cs^+の実効拡散係数 35
図 4.3　乾燥密度に対する Cs^+の実効拡散係数（実測値のみ） 36
図 4.4　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） 36
図 4.5　乾燥密度に対する Cs^+の見かけの拡散係数 37
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 37
図 4.7　乾燥密度に対する Cs^+の収着分配係数 38
図 4.8　乾燥密度に対する I^-の実効拡散係数（実測値のみ） 40
図 4.9　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） 40
図 4.10　乾燥密度に対する U の見かけの拡散係数 43
図 4.11　乾燥密度に対する Np の見かけの拡散係数 43
図 4.12　乾燥密度に対する Pu の見かけの拡散係数 44
図 4.13　乾燥密度に対する Am の見かけの拡散係数 44
図 4.14　乾燥密度に対する U, Np, Pu, Am の見かけの拡散係数 45
図 4.15　乾燥密度に対する Np の収着分配係数 45
図 4.16　間隙率に対する全元素の実効拡散係数 47
図 4.17　間隙率に対する全元素の見かけの拡散係数 47
図 4.18　間隙率に対する Cs,K,Na の実効拡散係数 48
図 4.19　間隙率に対する Cs,K,Na の見かけの拡散係数 48
図 4.20　間隙率に対する Cl, I の実効拡散係数 49
図 4.21　間隙率に対する Cl, I の見かけの拡散係数 49
図 4.22　全岩石の De のデータ分布（LogDe のヒストグラム） 50
図 4.23　全岩石の Da のデータ分布（LogDa のヒストグラム） 50

表　目　次

表 2.1　拡散データベースのデータテーブル 3
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 5
表 2.3　拡散データベース（DDB）定義一覧 15
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（岩石） 20
表 3.2　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（ベントナイト） 25

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評価において，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および人工バリア（緩衝材）の候補材として検討されているベントナイト中の核種の移行遅延を評価する上で，収着・拡散現象が重視されている。収着・拡散に係る収着分配係数や拡散係数といったパラメータを，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性能評価上重要となる。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収着・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ている。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，熱力学的収着モデルの活用とともに，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されてきた。

以上を背景として，岩石とベントナイト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は，データの管理と活用の観点で重要であると考える。データベースとしては，既に，第２次取りまとめ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[1)]がまとめられ，PC 上で動作するデータベースシステムとして作成・公開してきている[2)3)]。

本開発では，データベース定義の内容を見直し，これまで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。

データベースの使用に際しては，格納データの信頼性が重視されることから，可能な限り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，その手法が多様であると共に，得られるパラメータも多様であることから，信頼性評価の重要性は高いが，体系的な評価を実施することは難しいと考えられる。そこで，本開発では，最初にデータベースを利用したデータ評価の幅を広げるためのデータ項目の拡充と共に，データの信頼性評価に係る重要情報（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）を付加することを目的とし，データベースの更新を実施した。

また，データベースで管理するデータは全て拡散試験による実測値であることが望ましいが，一方でサンプルの特性による試験手法の制限などにより，直接測定ができず，特定のパラメータが得られないことがある。本報告書では，直接導出できないパラメータを推定値として導出するための定義を導入し，実測値と共に推定値を管理する方法を導入した。

1.2 実施内容

（１） データベース構造・定義の拡張・改良（２章）

既存のデータベース[3)]を基に，以下に示す構成の見直しとデータの拡充を行った。

- 緩衝材中の核種の拡散に係るデータの拡充
- 信頼性情報を付加するためのデータ定義の更新
- 拡散係数に係る主要パラメータの推定評価手法の導入

（２） 文献調査とデータの追加（3 章）

文献調査を実施し，データベースのデータ拡充を図ると共に，調査データを対象固相や元素などに基づいて整理した。

- 国内産ベントナイト・国内産岩石を対象とした文献調査の実施
- 調査文献と対象とした固相・元素・試験手法一覧の整理

（３） データの活用に関する検討（4 章）

整備を通じて定義更新・データ拡充したデータベースを活用し，拡散係数の評価において代表的なデータ相関について試行的に評価した結果を整理した。

- 評価対象固相であるベントナイト・岩石を対象に，性能評価上重要な元素である Cs^{+}, I^{-} やアクチニド等の拡散係数と，乾燥密度などの関連パラメータの相関を評価
- 拡散係数と関連パラメータの相関を，実測値と計算評価値の区分情報や，酸化還元条件等に基づいて評価。

2. データベースの構成と拡散パラメータ

2.1 データベース構造・定義の拡張・改良

本開発では，既存データベース [3)]を基に，新たにデータフィールドや付加情報を追加して，データの信頼性情報や推定評価に基づくデータ項目の拡張を行うと共に，パラメータ間の相関を考慮した評価が可能な構造への改良を実施した。また，データベース構造の更新に伴い，既存データベースのデータを見直すと共に，新規データの追加を実施した。

2.1.1 データベース更新の概要

データベースの更新にあたっては，主として下記の更新を実施した。

- 既存データベースに含まれる国内岩石を対象としたデータを更新すると共に，国産ベントナイトを対象としたデータを追加
- 拡散係数に係るデータの信頼性情報付加に対応するためのデータ定義の更新
- 拡散係数に係る主要パラメータの推定評価手法の導入（対象：ベントナイト）

データの信頼性情報を導入することを目的として，既存データベースから引き継いだデータフィールドの定義・記入方法を再検討し，データ定義を更新した。拡散係数の評価試験においてデータの信頼性に影響を与える要素としては，例えば Through-Diffusion 法におけるトレーサセル中のトレーサ濃度の経時変化の管理や，トレーサの破過曲線による定常状態到達の判断，拡散係数を求める際に適用する解析モデル選択等が挙げられる。

また，パラメータの推定評価手法として，スメクタイト含有量に拠らず，全てのベントナイト試料へ適用可能なパラメータ推定手法として，HDO や HTO の拡散係数の部分スメクタイト密度

（ベントナイト中の主にスメクタイト含有量に基づいて定義される密度）依存性から導出したパラメータを設定した。これを必要に応じて適用することで推定値を算出し，データベースに登録する作業を実施した。ここで，データベースの運用にあたって従来の実測値と推定値が混在することで評価に影響を与える可能性を考慮し，実測値と推定値を別個に扱うための情報を付記し，データベースシステム上での活用を可能とした。

2.1.2 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シートの構造については，今回の拡張検討に伴って，従来整備してきた拡散データベースに対して，ベ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の推定手法の拡張など，表 2.1 に示すとおりの見直しを行った。収着データベース[4)]と同様に，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。

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	
番号	Record No.	-	管理番号
元素情報	Element	-	元素記号
	Species/Redox	-	化学種
	Species Info	-	化学種の決定方法（推定又は実測のいずれか）
	Ion charge	-	イオン電荷
固相情報(1)	Solid type	-	固相グループ
	Solid	-	岩石，粘土鉱物，鉱物等の固相名称
	Solid information	-	岩石：産地，種類，鉱物組成，前処理の有無など ベントナイト：スメクタイト含有率，ケイ砂混合率など
試験方法	Experimental method	-	試験方法（In diffusion 法, through diffusion 法など）
	Method Info	-	試験方法に係る付加情報
固相情報(2)	Dry Density (g/cm^3)	g/cm^3	乾燥密度
	Porosity	%	間隙率
	Smectite density*	g/cm^3	部分スメクタイト密度（ベントナイトのみ）
	Smectite content*	%	スメクタイト含有率（ベントナイトのみ）
	Sand mixture*	%	ケイ砂混合率（ベントナイトのみ）
	Density/Porosity Info	-	固相に係る付加情報
拡散係数情報	D_e	m^2/s	実効拡散係数
	D_e Info	-	実効拡散係数導出に係る付加情報
	D_a	m^2/s	見かけの拡散係数
	D_a Info	-	見かけの拡散係数導出に係る付加情報
	Rock capacity factor (RCF)	-	収着容量（保持因子）
	RCF info	-	収着容量導出に係る付加情報
	Kd	m^3/kg	収着分配係数
	Kd Info	-	収着分配係数導出に係る付加情報
	D_0	m^2/s	自由水中の拡散係数
	D_0 Info	-	自由水中の拡散係数に係る付加情報
	Formation factor (FF)	-	形状因子
	FF Info	-	形状因子導出に係る付加情報
	Geometric factor (GF)	-	幾何学因子
	GF Info	-	幾何学因子導出に係る付加情報

* 後述する推定値評価のための新設項目

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	
液相情報	Solution	-	試験溶液種類
	Solution Info	-	試験溶液種類や調整に係る付加情報
	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	イオン強度計算のため，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
	pH Info	-	pH 調整等に係る付加情報
試験条件情報	Redox condition	-	雰囲気条件，酸化還元条件
	Redox Info	-	雰囲気条件，酸化還元条件に係る付加情報
	Tracer	-	トレーサ情報
	Tracer Info	-	トレーサ情報に係る付加情報
	Diffusion time	s/hr/d/m/yr	拡散時間
	Time Info	-	拡散時間に係る付加情報
	Temperature	degC	試験系の温度
	Temperaturre Info	-	温度に係る付加情報
文献情報	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
	Publication Year	-	発行年
その他	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

2.1.3 信頼性情報の整備

拡散データベースに含まれるデータの信頼性に係る情報は，前述したように，試験手法や関連パラメータなどデータベース構造が複雑であるため，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[5)]ではなく，まずは，信頼度に係る重要な情報をデータテーブル（表 2.1）の関連項目の付加情報に盛り込むことを検討した。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[6)]なども参考としながら，各項目の付加情報として記載した。

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

DDB 項目	内容	付加情報（Additional Info）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

2.2 拡散係数に係るパラメータの定義および測定手法

ここでは，データベースに格納するパラメータに関して，その定義・導出方法や相互の関連性について記す。記載に当たっては，前述した学会標準化資料の他，既存の文献[1)7)8)]を参考とした。

拡散は，一般的には分子の熱運動の結果，濃度勾配により溶液中の成分が高濃度の相から低濃度の相へ移行する現象をいう。ベントナイトを主成分とする緩衝材は，地下水による飽和・膨潤により均質な微細間隙構造を形成し，低透水性を示すことから，ガラス固化体から溶出した核種の化学種は緩衝材中を拡散で移行すると見なし得る。一方，岩石においては鉱物の粒界や微細な割れ目構造や亀裂中に拡散過程が生じることとなるが，拡散現象を支配する各種条件やそれを表現する特性値はベントナイトと同様に定義される。

拡散現象を表現する拡散係数として，固相への化学種の収着による遅延を含まない「実効拡散係数」と，固相への化学種の収着による遅延を含む「見かけの拡散係数」が定義される。

実効拡散係数は，拡散に関するフィックの第 1 法則に基づいて記述される，定常状態における拡散係数である。この係数は，間隙水中の濃度勾配との積により，単位面積単位時間当たりの溶質の通過量を意味している。実効拡散係数は，Through-Diffusion 法による定常拡散試験（試料中の濃度プロファイルが定常となる条件で，透過する元素のフラックスを測定する方法）によって取得される。

見かけの拡散係数は，拡散に関するフィックの第 2 法則に基づいて記述される，非定常状態における拡散係数である。この係数は，拡散媒体に対する溶質の吸着など，物理化学的遅延現象の影響を含んでいる。見かけの拡散係数は，In-Diffusion 法（試料中の濃度プロファイルの時間変化を調べる方法）に代表される非定常拡散試験により取得される。

実効拡散係数（D_e[m^2/s]）は，式(1)で表される。

$$D_e = FF \cdot D_0 \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで，

FF：形状因子（Formation Factor）[-]

D_0：自由水中の拡散係数[m^2/s]

FF は式(2)で定義される。

$$FF = \varepsilon\, GF \quad \cdots\cdots (2)$$

ここで，

ε ：間隙率[-]

GF：幾何学因子（Geometric Factor）[-]

さらに，GF は式(3)として定義される。

$$GF = \frac{\delta}{\tau^2} \quad \cdots\cdots(3)$$

ここで,

δ ：収れん度（拡散化学種のイオン排除・分子フィルトレーションを示す因子）[-]

τ^2 ：屈曲度（物理的空隙構造を表す因子）[-]

よって D_e は式(4)で示すように，溶液中の化学種ごとに異なる自由水中の拡散係数および固相種類や条件によって変化する間隙率，屈曲度，収れん度などのパラメータによって記述される。

$$D_e = \varepsilon\, GF\, D_0 = \varepsilon \frac{\delta}{\tau^2} D_0 \quad \cdots\cdots(4)$$

見かけの拡散係数（D_a[m^2/s]）は式(5)に示すように，D_e に対して収着による遅延の影響を含む式として記述される。

$$D_a = \frac{D_e}{\varepsilon + \rho K_d} \quad \cdots\cdots(5)$$

ここで,

ρ ：乾燥密度（kg/m^3)

K_d：分配係数（m^3/kg)

また，対応する D_e の実測値が存在，又は適切な D_e の推定が可能であれば，式(6)によって K_d の算出が可能となる。

$$K_d = \frac{1}{\rho}\left(\frac{D_e}{D_a} - \varepsilon\right) \quad \cdots\cdots(6)$$

2.2.1 透過拡散法（Through-Diffusion method)

透過拡散試験に使用される試験セルの例を図 2.1 に示す。同試験の実測値を基に，実効拡散係数（D_e）を導出することが可能である。以下に，D_e の導出方法の詳細を記す。

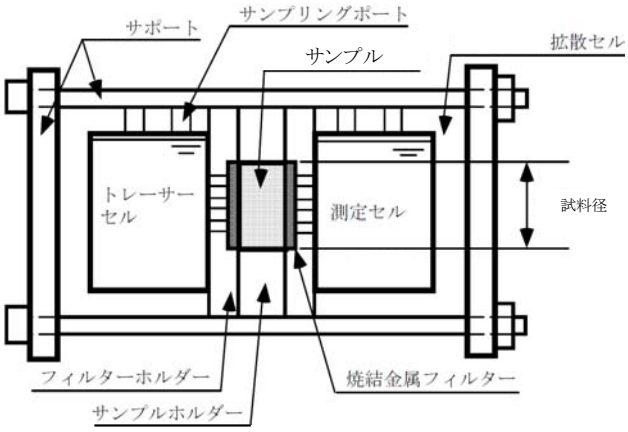

図 2.1　透過拡散試験セルの例

トレーサセルからサンプル内を拡散したトレーサが測定セルに達した以降の濃度の経時変化を測定し，その変化率が一定になった状態（定常状態）から，D_e が求められる。

定常状態では，式(7)が成立し，測定セルのトレーサ濃度は時間に比例して増加する。

$$\frac{Q(t)}{A\,L\,C_0} = \frac{D_e}{L^2}t - \frac{\alpha}{6} \quad \cdots\cdots(7)$$

ここで，

Q：サンプルを透過した核種量

A：試料断面積[m^2]

L：拡散方向の媒体の厚み[m]

C_0：トレーサセルとの境界におけるサンプル中に核種濃度≒トレーサセル中濃度

α ：収着容量又は Rock Capacity Factor(RCF)(＝ $\varepsilon + \rho K_d$)

ε ：間隙率[-]

ρ ：乾燥密度[kg/m^3]

である。

横軸を t，縦軸を式(7)の左辺としてプロットして傾きを求めることで，D_e を求められる。

また，式(7)による直線の横軸（時間軸）との交点から，収着容量 α（式(8)）が得られ，収着容量から K_d（式(9)）が求められる（Time-lag 法）。

$$\alpha = \frac{6D_e t}{L^2} \quad \cdots\cdots(8)$$

$$\alpha = \varepsilon + \rho K_d \rightarrow K_d = \frac{\alpha - \varepsilon}{\rho} \quad \cdots\cdots(9)$$

さらに，D_a と D_e には式(10)の関係があることから，D_a が求められる。

$$\alpha = \frac{D_e}{D_a} \quad \cdots\cdots (10)$$

2.2.2 濃度プロファイル法（In-Diffusion method)

濃度プロファイル法（In-Diffusion 法）で使用される試験セルの例を図 2.2 に示す。同試験の実測値を基に，見かけの拡散係数（D_a）を導出することが可能である。以下に，D_a の導出方法の詳細を記す。

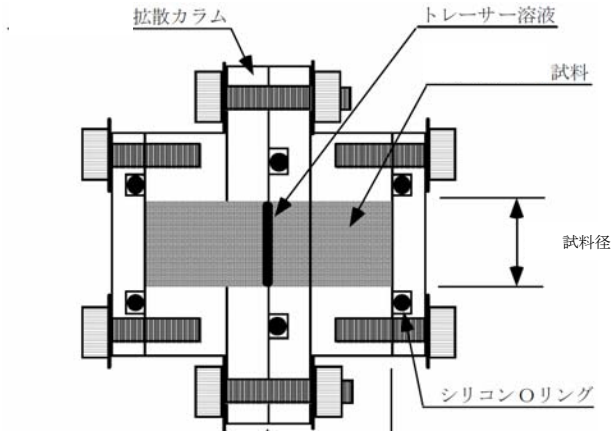

図 2.2　濃度プロファイル法試験セルの例

1 次元の非定常拡散は，フィックの第 2 法則に則して，式(11)で示される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_a \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad \cdots\cdots (11)$$

ここで，

C：トレーサ濃度

t：拡散時間[s]

x：拡散源からの距離[m]

である。

Da が試料内で均一であると仮定すると，式(11)は式(12)と等価である。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \cdots\cdots (12)$$

拡散理論解は，拡散試験を行った初期・境界条件に適合したものを選ぶ必要がある。ここでは，全量拡散モデルと濃度一定モデルによる理論解について記す。

（1） 全量拡散モデル

無限長の試料中を，平面拡散源から有限量のトレーサが拡散していく場合に，拡散がトレーサ濃度に依存しないと仮定すると，式(12)は式(13)として表せる。

$$\frac{C}{M}=\frac{1}{2\sqrt{\pi D_a t}}\exp\left(\frac{-x^2}{4D_a t}\right) \cdots\cdots(13)$$

ここで,

M：トレーサの総量（$M=\int_{-\infty}^{\infty} C\,dx$）

である。

式(13)の両辺の対数を取ると，式(14)となる。

$$\ln C(x,t)=\ln\frac{M}{2\sqrt{\pi D_a t}}-\frac{1}{4D_a t}x^2 \cdots\cdots(14)$$

ある実験時間 t で得た試料内濃度 C の分布を，横軸 x^2，縦軸 lnC としてプロットし，線形近似のフィッティングを行い，求められる傾き a から，式(15)のとおり，見かけの拡散係数が求められる。

$$D_a=-\frac{1}{4ta} \cdots\cdots(15)$$

（２） 境界濃度一定モデル

難溶性化学種を考慮すると，拡散源（塗布面）における液相中の濃度は，溶解度に応じて一定に保持されると考えられる。また，拡散化学種が拡散媒体の両端に達する長時間の試験を行うことは稀であることから，無限媒体・拡散源濃度一定に対する解析解，式(16,17)が適用できる。

$$C(x,t)=C_0 erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}}\right) \cdots\cdots(16)$$

$$erfc(Z)=1-\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^Z \exp(-\eta^2)d\eta \cdots\cdots(17)$$

試験結果のプロットに対して, 最も近似的な解を与える D_a を見かけの拡散係数として採用する。

2.3 パラメータ間の相関・推定評価手法

2.3.1 対象パラメータの相関

2.2 項で示した拡散係数に係る各種パラメータの導出にあたり，パラメータ間の相関を整理する。

式(18)に示すとおり，実効拡散係数 D_e は形状因子 FF と自由水中の拡散係数 D_0 の積で示し得ることから，2.2.1 項で示した Through-Diffusion 法で D_e を求めた場合，さらに D_0 の有無によって，FF の評価可否が分かる。FF が導出されれば, 対象となる試料の間隙率 ε を用いて, 式(19)により，幾何学因子 GF も導出が可能である。

$$D_e=FF\cdot D_0 \cdots\cdots(18)$$

$$FF=\varepsilon\, GF \cdots\cdots(19)$$

式(20,21)から，D_e は式(20)でも記述される。

$$D_e=\varepsilon\, GF\ D_0 \cdots\cdots(20)$$

Through-Diffusion 法でさらに Time-lag 法（2.2.1 項参照）を適用して式(21)から Rock Capacity Factor α を導出する場合を考える。

$$\alpha = \frac{6D_e t}{L^2} \quad \cdots\cdots (21)$$

α は式(22)で表せることから，同式から見かけの拡散係数 D_a の導出が可能である。

$$\alpha = \frac{D_e}{D_a} \quad \cdots\cdots (22)$$

さらに，D_a は式(23)で記述されることから，式(22)を考慮すると，α は式(24)と書ける。

$$D_a = \frac{D_e}{\varepsilon + \rho K_d} \quad \cdots\cdots (23)$$

$$\alpha = \varepsilon + \rho K_d \quad \cdots\cdots (24)$$

上記のとおり, D_e と D_a の両方の評価が可能であれば, 式(25)によって K_d の算出が可能となる。

$$K_d = \frac{1}{\rho}\left(\frac{D_e}{D_a} - \varepsilon\right) \quad \cdots\cdots (25)$$

2.3.2 部分スメクタイト密度

ベントナイトの試験条件においては，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は，ベントナイトのスメクタイト含有率と試料全体の乾燥密度により式(26)のように表せる[9)]。

$$\rho_s = \frac{(1-f_q)f_s}{\dfrac{1}{\rho_{net}} - \dfrac{f_q}{\rho_q} - \sum_m \dfrac{(1-f_q)f_m}{\rho_m}} \quad \cdots\cdots (26)$$

ρ_s：部分スメクタイト密度

ρ_q：石英の密度（2.7 Mg/m^3）

ρ_m：ベントナイト構成鉱物の密度（スメクタイトを除く；2.7 Mg/m^3）

f_s：ベントナイト中のスメクタイト含有率（重量比）

f_q：ケイ砂混合率

f_m：ベントナイト中の鉱物含有率（スメクタイトを除く）

スメクタイトを除くベントナイト構成鉱物の密度を全て石英と同等の 2.7Mg/m^3 と仮定すると，$\rho_q = \rho_m$，$f_m = 1 - f_s$ となることから，式(27)を得る。

$$\rho_s = \frac{(1-f_q)f_s\rho_{net}}{1-\frac{\rho_{net}}{\rho_q}\left(f_q-(1-f_q)(1-f_s)\right)} \quad \cdots\cdots(27)$$

2.3.3 GF の部分スメクタイト密度依存性と D_e の推定値としての導出

ベントナイトを対象として，In-Diffusion 法を用いて D_a（見かけの拡散係数）を導出した場合，別途 D_e（実効拡散係数）を Through-Diffusion 法等で実測して導出することで，GF，FF，α等のパラメータを導出することが可能となる。但し一方で，一般的にベントナイトの拡散係数の評価試験では，In-Diffusion 法を適用し，D_a のみが評価されている場合がほとんどであることから，別途，適切な D_e を評価・導出する方法を検討する。

D_e の評価対象となる国内産のベントナイト試料は，主に Kunigel-V1，Kunipia-F およびこれらとケイ砂の混合系である。これらに対して統一的に適用可能な評価手法を検討するうえでは，2.3.2 項で導出した部分スメクタイト密度を活用し，特定のパラメータを規格化する方法が考えられる。

ここでは，前述した幾何学的因子（GF）に着目して行った検討に関して記す。トリチウム水をトレーサとして，Kunigel-V1，Kunipia-F およ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 GF を求め，横軸を部分スメクタイト密度（式(19)で導出），縦軸を GF としてグラフにプロットし，相関を確認した（図 2.3 参照）。この結果，GF を対数表示とすると，部分スメクタイト密度との対応に直線性が見られたことから，これを直線近似して実験式，式(28)を得た。

$$GF(\rho) = 0.6015 \times e^{-1.3115\rho} \quad （\rho：部分スメクタイト密度） \quad \cdots\cdots(28)$$

評価に際しては，部分スメクタイト密度を算出し，式(28)から GF を求め，式(22)から De を推定値として求められる。さらに，式(24), (21), (27)からそれぞれα, FF, Kd の導出が可能である。

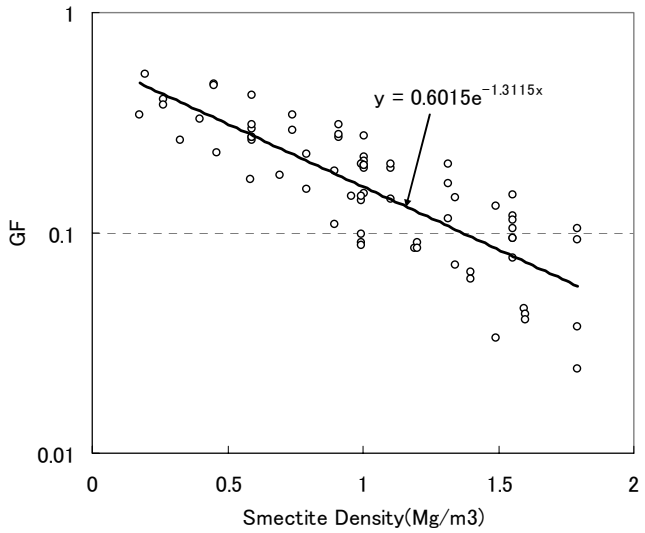

図 2.3　GF と部分スメクタイト密度の相関

2.2 項の式(4)で示したように，D_e の導出にあたって評価する GF は，例えば収れん度が固液界面での相互作用の影響を受けて変化するなど，化学種に応じて変化する可能性がある。しかし上記のとおり，データベースに登録する D_e の推定においては，GF がベントナイト試料のスメクタイト密度から化学種に拠らず一意に定義されると仮定し，これにベントナイト試料の間隙率と，化学種の自由水中の拡散係数を掛け合わせることで評価している

2.3.4 試験方法を起点としたパラメータの導出フロー

前項までに示した拡散係数に係る各種パラメータについて，拡散係数の評価試験方法を起点とした導出フローを図 2.4 に示す。なお，赤色の矢印はベントナイトのみを対象として部分スメクタイト密度を導入し，De 等を推定値として計算する場合の導出フローである。

Through-Diffusion 法を起点にした評価では，実測値が実効拡散係数（D_e）のみである場合と，さらに Time-lag 法等によって Rock Capacity Factor (RCF; α)が求められている場合，の 2 条件で場合分けが生じ，さらに評価対象化学種の自由水中での拡散係数（D_0）の有無によって，FF, GF, Kd 等のパラメータ決定の可否が決まる。

一方で，In-Diffusion 法を起点にした評価では，実測値が見かけの拡散係数（D_a）のみである場合と，さらに Through-Diffusion 法等の併用によって D_e が求められている場合，の 2 条件で場合分けが生じる。前者の評価対象がベントナイトである場合に限り，2.3.2 項で述べた部分スメクタイト密度から求める GF(ρ_{smt})を導入し，さらに D_0 の有無によって D_e，α, FF, Kd 等の導出可否が決まる。ここで導出される値は推定値となる。後者の場合は，Through-Diffusion 法で D_e と α の両方を求めた場合に準じた導出が可能となる。

データベースの管理項目として，通常の実測値に加えて新たに推定値が導入されることから，後述するデータ評価における区別等を目的として，実測値と推定値を区別するための付加情報をデータベースに組込んだ。

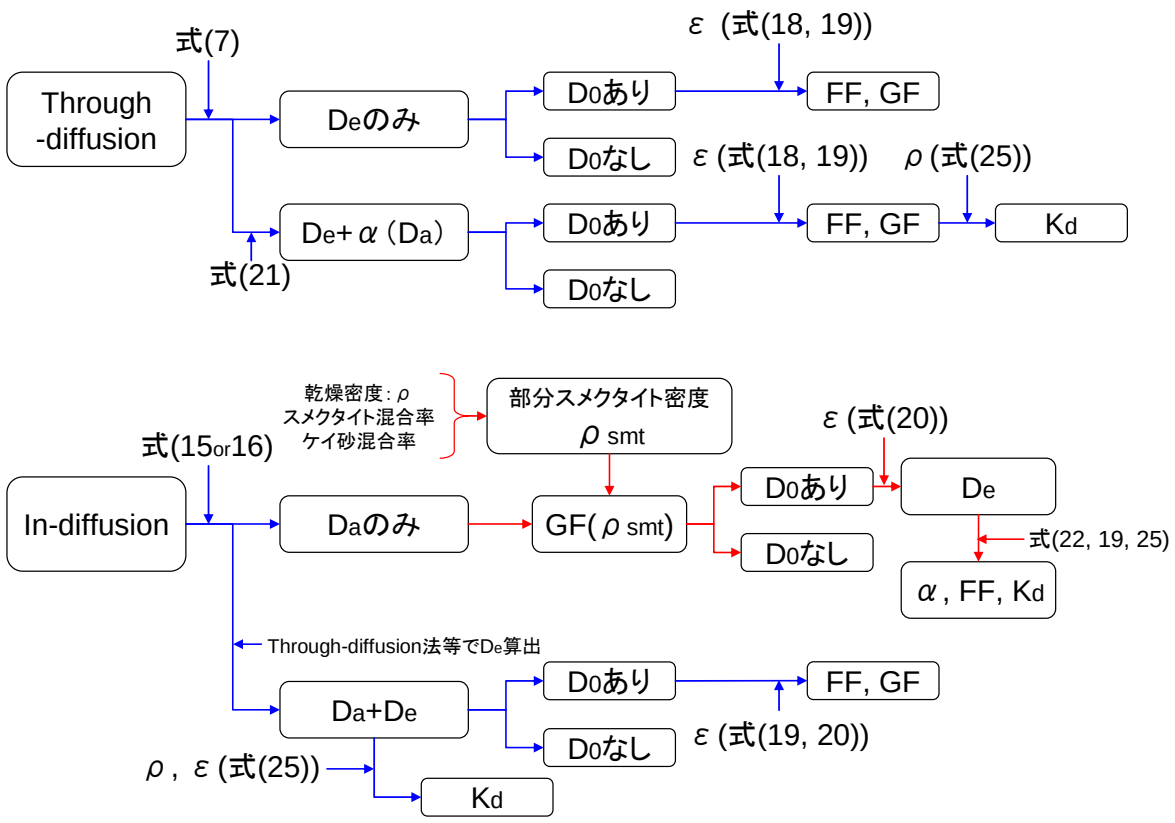

図 2.4　試験方法と導出パラメータの相関

2.4 データベースの定義詳細

前項までに述べたパラメータ群を含むデータベース定義の詳細を表 2.3 に示す。この表には，データベース内に定義された全てのデータ項目を記載し，それぞれに記載にあたってのルールと記載例を併記した。

また，データベースの項目名およびデータは全て英文表記で統一管理することとした。

表 2.3　拡散データベース（DDB）定義一覧

No.		項目名	記載ルール	記載例
1		Record No.	他のレコードと重複しない No.	整数値
2		Solid type	酸性結晶質岩，塩基性結晶質岩，堆積岩（砂質岩類），堆積岩（泥質・凝灰質岩類），緩衝材など	Basaltic rocks, Bentonite (Clay minerals), Cementatious materials, Granitic rocks, Mudstone (Sedimentary rocks), Other Rocks/Minerals, Sandstone, Tuff
3		Element	元素名	Am, Pu, …
4		Species＋Redox	酸化還元環境を反映した化学種	Cl^-, Cs^+, CO_2^{2+}, …
		Info (for Species / Ion Charge)	推定又は実測のいずれかを記述。各々の手法も同様に記述。 記載例：①not reported, ②not reported, but estimated to be monovalent cation, ③estimated by geochemical calculation / pH-Eh diagrams / -----, ④observed by spectroscopic analysis, ------	左記の例や，以下のような具体的記述 The species of U in the porewater has not been described, but it is probably UO22+ judging from the pH of the porewater (pH5.0).
5		Charge	イオン価数	2, -1, …
6	data	Solid	固相の名称（Solid Type より詳細な分類；花崗岩など，緩衝材の場合 Bentonite, Smectite, Bentonite+Sand いずれか）。Kunigel-V1, Kunipia-F, MX-80 などの情報は，Bentonite の次に括弧書きで記載。	岩石名（Besalt, Mudstone, etc.），ベントナイト種類と砂混合の有無（Bentonite(Kunigel-V1, Kunipia-F, Kunigel-V1+sand)）など。砂との混合比は次項の Information に記載
	info	Solid information	岩：産地，種類，鉱物組成，前処理の有無，混合物，粒径，等電点，比表面積（特に岩のバッチーインタクトの議論が目的）など ベントナイト：スメクタイト含有率，ケイ砂混合率の情報が重要。 また，岩石，ベントナイトともに，試料の加工や圧縮成型（水平 or 垂直方向）の方法等も同様に記載。	岩：The rock sample used for the experiment was sampled from Sori, Seta- gun, Gunma-ken, Japan. The granodiorite, one of the candidate host rocks for repository, is major host rock in Japan. ベントナイト: Silica Sand 50wt%, Kunigel-V1 is Na-type bentonite contains about 50wt% of Na-type smectite. More than 99wt% of smectite is Na-type montmorillonite. The vendor of Kunigel-V1 is Kunimine Industries Co., Ltd. And Kunigel-V1 is produced in Tsukinuno mine in Japan.
7	Data	Experimental method	In-Diffusion 法(両側(Back to back)or 片側), Through-Diffusion 法など，実験方法を選択 In-Diffusion, Back-to-back, Out-diffusion, Tracer-depletion, Through-Diffusion などと具体的に記載。	In-Diffusion, through-diffusion など。その他（Conductivity 等）であれば文献から転記
	Info	Method information	拡散係数算出に係る付加情報⇒ここは「拡散試験方法」に関する重要な付加情報を記載（パラメータ算出は各パラメータ部分に記載）。試験体系・サンプルサイズ等 たとえば，①Through-Diffusion の場合，フィルターの有無，フィルター溶液循環の有無，濃度制御の有無と方法，環境条件（pH や Eh）の制御方法，②In-Diffusion の場合，トレーサ塗布，環境条件の制御方法など，	例：In-Diffusion(D 20mm x T 20mm, Type of diffusion column; diffusion column consists of two stainless steel column. Tracer solution was applied on edge face of bentonite. Concentration profile inside the sample was investigated by measurement of concentration of extracted tracer by ICP-AES.), Through-Diffusion（D 20mm x T 1 or 5mm (depends on the rate of diffusion), Type of diffusion cell; with sintered metal filter(2 microM pore) and no circlation. Concentration of tracer in the cell was monitered, and decreasing of concentration was not observed.）
8		Dry Density (g/cm^3)	乾燥密度	文献から転記
9		Porosity (%)	間隙率	ベントナイトの場合，乾燥密度と真密度から算出
10		Smectite density	ベントナイトのみを対象として「部分スメクタイト密度」を入力 乾燥密度(No.8)，スメクタイト含有率(No.11)，ケイ砂混合率(No.12)から計算	佐藤ら[10]，p.105,(44)式等を参照
11		Smectite content (%)	スメクタイト含有率	
12		Sand mixture (%)	ケイ砂混合率	
13	info (8-12)	Information to calculate Density and Porosity	・乾燥密度測定方法（真密度や飽和含水密度などから計算されている場合にはそれらの実測値と計算方法） ・飽和含水密度などのみが与えられている場合にも本フィールドに記載 ・間隙率測定方法（水銀圧入法や水乾燥法など）	The degree of measured value of porosity by water saturated weight measurement was in agreement with a theoretical value (about 1% of error) (a theoretical value is computed from equation of [1 - dry density / 2.7] and true density;2.7 Mg/m3).The true density in the experiment was 2.7661Mg/m3. The porosity which theoretically evaluated was 63.0%. ex. described as table format, described in body text, read from graph plot
14	Data	D_e (m^2/s)	実効拡散係数（推定値及び実測値：実測値は基本的に Through-Diffusion から導出，推定値は式(20)により，間隙率（No.9），スメクタイト密度（No.10）から導出した GF（No.20），D_0（No.18）から求める。	実測値：文献から転記した値，推定値：計算結果の値
	Info	D_e information	実測値の場合：境界条件，溶液の撹拌状況など（⇒ここは，解析評価の条件のみ，試験条件は Experimental Method に記載）。パラメータ導出方法は，破過曲線の直線部からの導出か，非定常部分も含めた解析か，あるいは，濃度プロファイル等も含めた複雑な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）解析の際の境界条件の取り扱い（一定濃度か，濃度変化考慮か，これらの実験との関係／フィルターの補正の有無や方法），などを記載。 推定値の場合：計算で求めた推定値を格納。計算値を載せた場合 not reported と明記。	Through-Diffusion: Derived from the straight slope of break-through curve in steady state. The steady-state is judged based on the break-through curve and the concentration profile of the tracer in the column after the diffusion experiment. The change of concentration in the tracer cell was monitored by liquid scintillation counter, Analytic solution based on constant boundary condition are applied considering correcting a loss of concentration gradient in filter.
15	Data	D_a (m^2/s)	見かけの拡散係数（基本的に実測値のみ。In-Diffusion, Back-to-back, Out-diffusion から導出）。文献に記載があれば転記。	
	Info	D_a information	D_a 導出法に関する情報。 In-Diffusion の場合の解析は境界濃度一定の解，全量拡散のいずれを採用したか。 どのようなプロファイルから導出されたものか（たとえば，表面数点へのフィッティング，２重プロファイル問題など）	In-Diffusion: Solubility limit of Zr is low, so boundary condition is controlled by solubility limit of Zr. Analytical solution of constant concentration at boundary was applied (constant source model). In-Diffusion: Analytical solution in case of instantaneous planner source.(instantaneous planar source model） 未記載で計算値を載せた場合 not reported と明記
16	Data	Rock capacity factor (RCF)	収着容量（保持因子）。実測値又は推定値は式(22)から D_e(No.14)／D_a(No.15)で導出。	実測値：D_e と D_a が共に実測値であれば，文献への RCF 値の明記の有無に拠らず実測値とする。 推定値：D_e が推定値の場合，式(25)から導出される RCF も推定値とする。
	Info	RCF info	パラメータ導出手法を記載（たとえば，Through-Diffusion の破過曲線から Time-lag または非定常フィッティングで導出，トレーサ減衰カーブと内部プロファイルから導出など）	未記載で計算値を載せた場合 not reported と明記
17	Data	Kd（m^3/kg）	拡散現象から求めた Kd のみとし，バッチ試験で得た Kd は対象外とする。実測値又は推定値は式(25)から，ρ (No.8), ε (No.9), D_e(No.14), D_a(No.15)で導出。	実測値：D_e と D_a が共に実測値であれば，文献への Kd 値の明記の有無に拠らず実測値とする。 推定値：D_e が推定値の場合，式(25)から導出される Kd も推定値とする。
	info	Kd information	Kd 導出法に関する情報	未記載の実測値又は計算値を載せた場合 not reported と明記
18		D_0 (m^2/s)	自由水中の拡散係数（①実測値が文献に記載，②文献に引用記載，③別論文で実測データが存在，等）	
		Info	データの取得方法を明記。別論文から引用の場合には，引用先と取得方法を記載	
19		Formation factor (FF)	形状因子：式(18)の関係から，D_e(No.14)／D_0(No.18)で導出。文献に記載があれば転記。	
		Info	導出方法に関する情報	未記載で計算値を載せた場合 not reported と明記
20		Geometric factor (GF)	幾何学因子：式(19)の関係から，FF(No.19)／ε (No.9)で導出。文献に記載があれば転記。	
		Info	導出方法に関する情報	未記載で計算値を載せた場合 not reported と明記

表 2.3 拡散データベース（DDB）定義一覧（続き）

No.		項目名	記載ルール	記載例
21	Solution	Index	試験溶液種類（蒸留水，模擬地下水等で分類; In-Diffusion であれば，含水浸漬液，Through-Diffusion であれば両セルのバックグラウンド溶液組成など）	Distilled water, De-ionized water, Simulated Sea Water, CSW (simulated sea water (Ca(OH)2 was added to set pH12.5), saturated with NaNO3), …
		Detailed information	詳細情報（地下水組成・性状など）を記す。溶液組成に係る情報があれば，ここに記載。	Prepared with distilled water and known quantities of chemical reagents. Their ionic composition was determined by the results of leach tests that varied the ratio of bentonite to distilled water.
		Ionic strength (mol/L)	イオン強度（文献記載値を入力，又は not reported を明記しつつ下記 6 種のイオン濃度のみを考慮したイオン強度を計算して記載）	$I=\frac{1}{2}\sum_i Z_i^2 C_i$ Z:イオン価数，C:濃度
		Concentration of K^+ (mol/L)	K^+の濃度	同上
		Concentration of Na^+ (mol/L)	Na^+の濃度	同上
		Concentration of Ca^{2+} (mol/L)	Ca^{2+}の濃度	同上
		Concentration of Cl^- (mol/L)	Cl^-の濃度	同上
		Concentration of CO_3^{2-} (mol/L)	CO_3^{2-} の濃度（イオン強度計算のため，CO_3^{2-}とHCO_3^-の合計値を記載）	同上
		Concentration of SO_4^{2-} (mol/L)	SO_4^{2-} の濃度	同上
22	pH	Typical value	代表値。濃度範囲の場合，その平均値。	文献から転記，又は計算による平均値
		Info	試験初期と終了時の値を明示していない文献もあるため，数値フィールドにこだわらず，範囲 or 初期＆最終が書いてあればそのまま記載。	about 7.2-7.6, about 9, 9-10, …
23		Redox condition	雰囲気条件（還元又は酸化）	Aerobic, Anaerobic 等
		Info	Eh（vs SHE），雰囲気条件（還元又は酸化），還元剤使用の有無・種類・濃度などを記載	Rock: All the experiments were carried out in a N2-atmophere glove-box, in which the concentration oxygen was kept less than 1ppm. Bentonite: In the pH range of natural waters, SeO42- is predominant under strongly oxidising conditions, while HSe- dominates under reducing conditions. 他に，Ar glove-box, oxygen<0.1ppm，Ar(O2<1ppm, CO2<1ppm)など
24		Tracer	使用したトレーサの種類／濃度／添加量 形式：stable - Cs-137 - Cs-137+stable/carrier，activity/concentration，chemical species->stable&RI + conc.	0.06M(2127ppm) or Cs-137/XXBq/ml or Cs-137+carrier/xxM など Rock: Sr-85(2kBq/ml) Bentonite: Pu-239+Pu-240/3.5kBq/0.05ml
		Info	Stable or Radioactive, RI，キャリアの有無，mol 濃度，液性，分析手法等を記載 In-Diffusion であれば，塗布液濃度，量，その液組成（固相挟み込みであれば，その材料や形状なども） through-diffusion であれば高濃度セルのトレーサ濃度（その変化や濃度維持の方法なども）	Rock: Stable; The rock sample was firstly saturated with a 0.1 M KCl solution and then electrical conductivity was measured. The porewater and tracer are therefore the same. Bentonite: Radioactive; solution of NaCl(36Cl) was added to the cell of high concentration
25		Diffusion time	試料内拡散に供した時間（単位：yr, wk, d, hr, s に統一）	about 8 d, 30d, 12-36d, 16d, 8hr, 4wk, etc.
		Info	・文献中に数値記載されたものを転記，プロットからの読み取りなど，データの採用方針を明記	read from graph plot 等
26		Temperature (degC)	試験系の温度。室温と記載されている場合 25℃とみなす。温度範囲が指定されている場合，上限・下限値の平均値とする。	
		Info	温度を摂氏で記載。文献から試験系の温度に関する詳細を転記する。	room, degree, R.T., probably room，整数値など
27	Literature	Reference	文献を示す記号的表記（1 名，2 名，3 名以上で書き方が異なる。2 回以上出現する場合年号の次に alphabet 追加）	1 名：Sato（1999），Sato(1999a)など，2 名：Sato and Suzuki(2003)など，3 名以上：Sato et al.(1995)など。
		Author	参考文献;著者	Idemitsu, K., Furuya, H., Hara, T., Inagaki, Y.
		Title, Vol., Num. etc.	参考文献;タイトル，巻，号など	Migration of Cesium, Strontium and Cobalt in Water-Saturated Indada Granite, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.29, No.5, pp.454-460, the Atomic Energy Society of Japan
		Publication Year	参考文献;発行年	1992
		Notews	文献間でデータに重複がある場合，Masterになる文献は最新かつ英語記載を基本とする。Master文献の情報は上記 3 フィールドに記載する。日本語版又は古い文献にデータ取得等に関する詳細条件が記載されている場合，ここに情報を記載する。	Also described in Haruo Sato, A study on Nuclide Migration in Buffer Materials and Rocks for Geological Disposal of Radioactive Waste, PNC TN8410 97-202.(in Japanese), Sato(1998))
28		Additional QA information*1	1 から 26 に該当しないものの，データの品質に係る重要情報	

注記：D_e, D_a 等のデータが文献に数値として記載されず，グラフプロットからの読み取り等で得られた場合は，その旨を Info に明記する。

*1 品質評価のための追加情報
・In-Diffusion の場合（(1)プロファイルフィッティングに利用している点数が必要十分か，(2)プロファイルの形状（プロットのばらつき），(3)解析の境界条件の適切性，等の記述）
・Through-Diffusion の場合（(1)実験の境界条件の適切性（濃度勾配が一定とみなせるか又は変化に対応した解析を行なっているか），(2)定常状態の判定が適切性（ブレークスルーカーブ or フラックスカーブの直線性）等の記述）
・解析における境界条件の取り扱いの適切性（フィルターを利用している際にその影響を評価しているか等の記述）

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。

・ ベントナイトの拡散係数に関する文献調査

地層処分性能評価に活用するためのデータセットをまとめた資料の引用文献 [7),8)]の他，Kunigel-V1 や Kunipia-F（国産ベントナイト）を対象に文献情報データベースで得た文献を対象として実施した。

・ 岩石の拡散係数に関する文献調査

2 章で述べたデータベース構造の更新に伴い，既存のデータベース [1)2)3)]の内容を見直すと共に，文献情報データベースによって得た新規文献を対象として実施した。

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，可能な限り英語で記載された原文献に記載されたデータを対象とした。

2 章で述べたとおり，データベースによる管理項目が更新・増加していることから，既存のデータベースに登録済みのデータに対しても，再度参考文献を対象として調査を実施し，必要な修正・追加を実施した。

3.3 評価対象

（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連する情報として，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 と表 3.2 に示す。なお，2.4 項で述べたとおり，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。

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

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（岩石）

Literature; Author	Literature; Title, Vol., Num. etc.	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
Conca, J. L., Wright, J. [11]	Direct Determinations of Unsaturated Flow and Transport, Proceedings of the Twelfth Annual American Geophysical Union Hydrology Days Meeting, Fort Collins, March 1992, pp.103-116	1992	Basaltic Rocks	Basalt	K	Conductivity
			Granitic Rocks	Granite	K	Conductivity
			Mudstone	Mudstone	K	Conductivity
			Tuff	Tuff	K	Conductivity
K. Hatanaka, M. Uchida, M. Shimo, H. Yamamoto and S. Kumamoto [12]	Laboratory experiment on the hydraulic and transport properties of fractured soft sedimentary rocks, free posted papers on proceeding of 33th symposium on rock dynamics (Jan. 2004), Japan Society of Civil Engineers, (41) pp.313-318	2004	Mudstone	Mudstone	I	Through-Diffusion
T. Hirono, S. Nakajima, T. Hayashi and M. Takahashi [13]	Delay Effect on Advection and Diffusion Phenomena by Physicochemical Change of Pore Water in Nanopores, Jour. Japan Soc. Eng. Geol., Vol.45, No.3, pp.118-124, 2004	2004	Basaltic Rocks	Basalt	I	Through-Diffusion
			Other minerals	Chalk	I	Through-Diffusion
				Chart	I	Through-Diffusion
				Cray holding volcanic ash	I	Through-Diffusion
				Marl	I	Through-Diffusion
				Pelagic clay	I	Through-Diffusion
				Porcellanite	I	Through-Diffusion
			Sandstone	Sandstone	I	Through-Diffusion
K. Idemitsu, H. Furuya, K. Murayama and Y. Inagaki[14]	Diffusivity of Uranium(VI) in Water-Saturated Inada Granite, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XV (Sombret, C. G. ed.), Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol.257, pp.625-632, Materials Research Society, Pittsburgh, Pennsylvania	1992	Granitic Rocks	Granite	U	In-Diffusion
K. Idemitsu, H. Furuya, T. Hara and Y. Inagaki[15]	Migration of Cesium, Strontium and Cobalt in Water-Saturated Inada Granite, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.29, No.5, pp.454-460, the Atomic Energy Society of Japan	1992	Granitic Rocks	Granite	Co	In-Diffusion
					Cs	In-Diffusion
					Sr	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（岩石）（続き）

Literature; Author	Literature; Title, Vol., Num. etc.	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
K. Idemitsu, H. Furuya, K. Murayama, H. Asano and Y. Inagaki[16)]	Primary Diffusion Path of Uranium(VI) in Water-Saturated Inada Granite, Proceedings of the International Conference on Nuclear Waste Management and Emvironmental Remediation (Alexandra, D., Baker, R. and Kohout, R. eds.), the American Society of Mechanica	1993	Granitic Rocks	Granite	U	In-Diffusion
T. Ishidera, S. Miyamoto and H. Sato [17)]	The Effect of $NaNO_3$ Concentration on Diffusions of C, Cl and I in Compacted Bentonite and Tuff, JAERI-Conf 2004-011 pp.157-158	2004	Tuff	Tuff	C	Through-Diffusion
					Cl	Through-Diffusion
					H_2O	Through-Diffusion
					I	Through-Diffusion
H. Kita, T. Iwai and S. Nakashima. [18)]	Diffusion Coefficient Measurement of an Ion in Pore Water of Granite and Tuff, Journal of the Japan Society of Engineering Geology, 30-2, pp.26-32	1989	Granitic Rocks	Granite	I	Through-Diffusion
			Tuff	Tuff	I	Through-Diffusion
T. Kosaka, S. Sato, H. Furuya, S. Araya, K. Matsuo[19)]	Diffusion Behavior of Uranium in a Rock Block, 1984 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, G82	1984	Tuff	Tuff	U	In-Diffusion
S. Mukai, H. Kitao and S. Kataoka[20)]	Advection Diffusion Experiment Using I, Se and Cs in Fractured Rocks, 1998 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, M25, p.842	1998	Granitic Rocks	Granite	Cs	Advection diffusion
				Granodiorite	Se	Advection diffusion
K. Nishiyama, S. Nakashima, R. Tada and T. Uchida[21)]	Diffusion of an Ion in Rock Pore Water and Its Relation to Pore Characteristics, Mining Geology, 40 (5), pp.323-336	1990	Granitic Rocks	Granite	I	Through-Diffusion
			Other minerals	Andesite	I	Through-Diffusion
				Schist	I	Through-Diffusion
			Sandstone	Siliceous sedimentary rock	I	Through-Diffusion
			Tuff	Tuff	I	Through-Diffusion
K. Ota and H. Yoshida[22)]	Influence of Microscopic Heterogeneity on Diffusion for Sedimentary Rocks, Proceedings of an NEA/SKI Symposium, Paris, France, 11-14, October, 1994, pp.237-243	1994	Tuff	Tuff	U	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（岩石）（続き）

Literature; Author	Literature; Title, Vol., Num. etc.	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
H. Sato, T. Shibutani and M. Yui[23]	Experimental and Modelling Studies on Diffusion of Cs, Ni and Sm in Granodiorite, Basalt and Mudstone, Journal of Contaminant Hydrology, 26, pp.119-133, Elsevier Science B.V.	1997	Basaltic Rocks	Basalt	Cl	Through-Diffusion
					Cs	Through-Diffusion
					Na	Through-Diffusion
					Ni	Through-Diffusion
			Granitic Rocks	Granodiorite	Cl	Through-Diffusion
					Cs	Through-Diffusion
					Na	Through-Diffusion
					Ni	Through-Diffusion
					Sm	Through-Diffusion
			Mudstone	Mudstone	Cl	Through-Diffusion
					Cs	Through-Diffusion
					Na	Through-Diffusion
					Ni	Through-Diffusion
					Sm	Through-Diffusion
H. Sato[24]	PNC Technical Report "Report of Information Exchange Meeting on the Performance Assessment Research", PNC TN1410 91-079, pp.275 -286, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (1991. 10)	1991	Granitic Rocks	Granite	Tc	Through-Diffusion
			Other minerals	Pelitic schist	Cl	Through-Diffusion
H. Sato[25]	Through-Diffusion Experiments on NaCl through Tuff -Measurement of Tortuosity-, PNC Technical Report, PNC TN8410 96- 111, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (1996. 7)	1996	Tuff	Tuff	Cl	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（岩石）（続き）

Literature; Author	Literature; Title, Vol., Num. etc.	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
H. Sato[26]	Matrix diffusion of simple cations, anions, and neutral species in fractured crystalline rocks, Nuclear technology vol.127 p.199, aug.1999	1999	Granitic Rocks	Altered Granodiorite	Cl	Through-Diffusion
					Cs	Through-Diffusion
					H_2O	Through-Diffusion
					Na	Through-Diffusion
					Se	Through-Diffusion
				Fractured fillings	Cl	Through-Diffusion
					Cs	Through-Diffusion
					H_2O	Through-Diffusion
					Na	Through-Diffusion
					Se	Through-Diffusion
				Granodiorite	Cl	Through-Diffusion
					Cs	Through-Diffusion
					H_2O	Through-Diffusion
					Na	Through-Diffusion
					Se	Through-Diffusion
H. Sato[10]	Study on Solid-Liquid Interfacial Phenomena and Advancement of Migration Model in Diffusion and Migration Processes of Radionuclides in Buffer Materials and Rock Matrixes for Disposal of Radioactive Wastes, JNC TN1400 2004-003	2004	Sandstone	Fine-grained sandstone	Cs	In-Diffusion
M. Shimo, H. Yamamoto and S. Kumamoto[27]	Study on flow and mass transport through fractured soft sedimentary rocks, JNC TJ8400 2003-028	2003	Mudstone	Teriary siliceous mud rock	I	Through-Diffusion
Y. Tachi, T. Shibutani, H. Sato and M. Yui[28]	Sorption and Diffusion Behabior of Selenium in Tuff, Journal of Contaminant Hydrology 35, pp.77-89	1998	Tuff	Tuff	Se	Through-Diffusion
M. Tsukamoto and T. Ohe[29]	Diffusion of Radioactive Cesium into Granitic Core Sample, 1988 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, J45, p.169	1988	Granitic Rocks	Biotitic granite	Cs	In-Diffusion
T. Yamaguchi and S. Nakayama[30]	Effect of Sorption on Diffusivity in Micropores, 1997 Annual Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, L10, p.559	1997	Granitic Rocks	Granite	I	Through-Diffusion
					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（岩石）（続き）

Literature; Author	Literature; Title, Vol., Num. etc.	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
T. Yamaguchi, T. Sakamoto and M. Senoo[31]	Consideration on Effective Diffusivity of Strontium in Granite, Journal of Nuclear Science and Technology, 30 (8), pp.796-803, the Atomic Energy Society of Japan (August 1993)	1993	Granitic Rocks	Granite	Ba	Through-Diffusion
					Be	Through-Diffusion
					Co	Through-Diffusion
					Mg	Through-Diffusion
					Ni	Through-Diffusion
					Sr	Through-Diffusion
T. Yamaguchi, Y. Sakamoto, S. Nakayama and Vandergraaf, T.T[32]	Effective Diffusivity of the Uranyl Ion in a Granite from Inada, Ibaraki, Japan, Journal of Contaminant Hydrology, 26, pp.109-117, Elsevier Science B. V.	1997	Granitic Rocks	Biotitic granite	U	Through-Diffusion
				Granite	Np	Through-Diffusion
					Sr	Through-Diffusion
					Uranine	Through-Diffusion
T. Yamaguchi, S. Nakayama and M. Saito[33]	Np and Pu Diffusion Experiments in Granite under Antoxic Conditions, 1998 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, M17, p.834	1998	Granitic Rocks	Granite	Np	Through-Diffusion
T. Yamaguchi and S. Nakayama[34]	Present Status of the Study on Radionuclide Diffusion in Barrier Materials, JAERI-Conf 2002-004, pp.325-332	2002	Granitic Rocks	Granite	Ba	Through-Diffusion
					Cs	Through-Diffusion
					H_2O	Through-Diffusion
					I	Through-Diffusion
					Np	Through-Diffusion
					Pu	Through-Diffusion

表 3.2　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（ベントナイト）

Literature; Author	Literature; Title, Vol., Num. etc.	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
A. Cui, Z. Fan, J. Zhang, C. Gu, M. Mukai, T. Maeda, J. Matsumoto, T. Tanaka and H. Ogawa[35)]	Diffusion coefficient test of ^{237}Np in bentonite backfill materials, JAERI-CONF-2002-004 pp.621-626	2002	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Np	In-Diffusion
H. Furuya[36)]	Progress reports of the Oarai Branch IMR Tohoku University Journal code:X0416A ISSN:0912-8808 Vol.15th; pp.6-10	1999	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Pu	In-Diffusion
				Bentonite(Kunipia-F)	Pu	In-Diffusion
K. Idemitsu, H. Furuya and Y. Inagaki[37)]	Diffusion of corrosion products of iron in compacted bentonite, Mat, Res, Soc, Symp. Proc. Vol.294, pp.467-474	1993	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Fe	In-Diffusion
K. Idemitsu, H. Furuya and Y. Inagaki[38)]	Diffusion of Uranium in Compacted Bentonite in the Presence of Carbon Steel, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.333, pp.939-946	1994	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	U	In-Diffusion
K. Idemitsu, Y. Tachi, H. Furuya, Y. Inagaki and T. Arima. [39)]	Diffusion of Uranium in Compacted Bentonites in the Reducing Condition with Corrosion Products of Iron, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.412, pp.683-690	1996	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	U	In-Diffusion
				Bentonite(Kunipia-F)	U	In-Diffusion
K. Idemitsu, Y. Tachi, H. Furuya, Y. Inagaki and T. Arima. [40)]	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	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Cs	In-Diffusion
					Sr	In-Diffusion
				Bentonite(Kunipia-F)	Cs	In-Diffusion
					Sr	In-Diffusion
K. Idemitsu, X. Xia, T. Ichishima, H. Furuya, Y. Inagaki and T. Arima[41)]	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	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Pu	In-Diffusion
				Bentonite(Kunipia-F)	Pu	In-Diffusion
Y. Iida, H. Taki, T. Yamaguchi, T. Tanaka, K. Negishi and S. Nakayama[42)]	Data Acquisition on Migration of Radionuclides under Deep Geological Environments, JAERI-Conf 2005-007, pp.230-235	2005	Bentonite	Bentonite(Altered)	Cs	Through-Diffusion
					I	Through-Diffusion
				Bentonite(Altered+Sand)	Cs	Through-Diffusion
					I	Through-Diffusion
T. Ishidera, S. Miyamoto and H. Sato[43)]	The Effect of Silica Sand Content and NaNO3 on Diffusion of CO32-, Cl- and I-in Compacted Bentonite , JNC Technical Review No.25 pp.85-93	2004	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	C	Through-Diffusion
				Bentonite(Kunipia-F)	C	Through-Diffusion

表 3.2 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（ベントナイト）（続き）

Literature; Author	Literature; Title, Vol., Num. etc.	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
T. Ishidera, S. Miyamoto and H. Sato[44]	The Effect of Silica Sand Content on Diffusion of CO_3^{2-}, Cl^- and I^- ions in Compacted Bentonite, JAERI-Conf 2005-007, pp.264-269	2005	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	C	Through-Diffusion
					Cl	Through-Diffusion
					I	Through-Diffusion
T. Ishidera, S. Miyamoto and H. Sato[45]	Effect of Sodium Nitrate on the Diffusion of Cl- and I- in Compacted Bentonite, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 45, No. 7, pp. 610–616	2008	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Cl	Through-Diffusion
					I	Through-Diffusion
				Bentonite(Kunipia-F)	Cl	Through-Diffusion
					I	Through-Diffusion
H. Kato, M. Muroi, N. Yamada, H. Ishida and H. Sato[46]	Estimation of Effective Diffusivity in Compacted Bentonite, Mat, Res, Soc, Symp. Proc. Vol. 353. pp.277-284	1995	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	H_2O	In-Diffusion
						Through-Diffusion
H. Kato, T. Nakazawa, S. Ueta and T. Yato[47]	Measurements of effective diffusivities of tritiated water in sand-mixed bentonite, ASME 1999	1999	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	H_2O	Through-Diffusion
				Bentonite(Kunigel-V1+silica sand)	H_2O	Through-Diffusion
H. Kato, T. Nakazawa, S. Ueta and M. Shibata[48]	Apparent Diffusion Coefficients of Uranium, Neptunium and Technetium in Compacted Bentonite under Reducing Conditions, JNC TN8400 99-069	1999	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Np	In-Diffusion
					Tc	In-Diffusion
					U	In-Diffusion
H. Kato, T. Nakazawa, S. Ueta, M. Muroi, I. Yasutomi, H. Fujihara. [49]	Effective diffusivities of iodine, chlorine and carbon in bentonie buffer material., MRSXXII Vol.556, pp.687-694	1999	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	C	Through-Diffusion
					Cl	Through-Diffusion
					I	Through-Diffusion
Naofumi Kozai, Koichi Inada, Tamotsu Kozaki, Seichi Sato, Hiroshi Ohashi and Tsunetaka Banba[50]	Apparent diffusion coefficients and chemical species of neptunium(V) in compacted Na-montmorillonite, Journal of Contaminant Hydrology,47, pp.149-158	2001	Bentonite	Bentonite(Kunipia-F)	Np	In-Diffusion
Tamotsu KOZAKI, Hiroki SATO, Atsushi FUJISHIMA, Seichi SATO and Hiroshi OHASHI[51]	Activation Energy for Diffusion of Cesium in Compacted Sodium Montmorillonite, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 33, No. 6, pp. 522-524	1996	Bentonite	Bentonite(Kunipia-F)	Cs	In-Diffusion
T. Kozaki, H.Sato, A.Fujishima, N.Saito, S.Sato and H.Ohashi. [52]	Effect of Dry Density on Activation Energy for Diffusion of Strontium in Compacted Sodium Montmorillonite, Mat.Res. Soc. Symp. Proc. Vol465, pp.893-900	1997	Bentonite	Bentonite(Kunipia-F)	Sr	In-Diffusion

表 3.2 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（ベントナイト）（続き）

Literature; Author	Literature; Title, Vol., Num. etc.	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
T. Kozaki, Y. Sato, M. Nakajima, H. Kato, S. Sato and H. Ohashi[53]	Effect of particle size on the diffusion behavior of some radionuclides in compacted bentonite, Journal of Nuclear Materials 270, pp.265-272	1999	Bentonite	Bentonite(Kunipia-F; Na type)	Cl	In-Diffusion
					Cs	In-Diffusion
						Through-Diffusion
					H_2O	In-Diffusion
						Through-Diffusion
T. Kozaki, Hiroki Sato, S. Sato and H. Ohashi [54]	Diffusion mechanism of cesium ions in compacted montmorillonite, Engineering Geology, 54, pp.223-230	1999	Bentonite	Bentonite(Ca type Kunipia-F)	Cs	In-Diffusion
				Bentonite(Kunipia-F)	Cs	In-Diffusion
				Bentonite(Na/Ca type Kunipia-F)	Cs	In-Diffusion
T. Kozaki, K. Inada, S. Sato and H. Ohashi[55]	Diffusion mechanism of chloride ions in sodium montmorillonite, Journal of Contaminant Hydrology 47, pp.159–170	2001	Bentonite	Bentonite(Kunipia-F)	Cl	In-Diffusion
T. Kozaki, Y. Adachi, K. Inada, S. Sato and H. Ohashi[56]	Diffusion Behavior of Ca^{2+} Ions in Compacted Na-Montmorillonite, Materials Research Society Symposium Proceedings Volume 663, pp.629-635	2001	Bentonite	Bentonite(Kunipia-F)	Ca	In-Diffusion
T. Kozaki and S. Sato[57]	Effects of repository environment on diffusion behavior of radionuclides in buffer materials)、JNC TJ 8400 2003-075(in Japanese)	2003	Bentonite	Bentonite(Kunipia-F)	Cl	In-Diffusion
T. Kozaki, A. Fujishima , N. Saito, S. Sato and H. Ohashi[58]	Effects of dry density and exchangeable cations on the diffusion process of sodium ions in compacted montmorilloniteEngineering Geology 81, pp.246-254	2005	Bentonite	Bentonite(Ca type Kunipia-F)	Na	In-Diffusion
				Bentonite(Kunipia-F)	Na	In-Diffusion
				Bentonite(Na/Ca type Kunipia-F)	Na	In-Diffusion
T. Kozaki, J. Liu and S. Sato[59]	Diffusion mechanism of sodium ions in compacted montmorillonite under different NaCl concentration, Physics and Chemistry of the Earth 33, pp.957-961	2008	Bentonite	Bentonite(Kunipia-F)	Na	In-Diffusion
Y. Kuroda, K. Idemitsu, H. Furuya, Y. Inagaki and T. Arima[60]	Diffusion of Technetium in Compacted Bentonites in the Reducing Condition with Corrosion Products of Iron, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 465, pp.909-916	1997	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Tc	In-Diffusion
				Bentonite(Kunipia-F)	Tc	In-Diffusion
J. Liu, H. Yamada, T. Kozaki, S. Sato and H. Ohashi[61]	Effect of silica sand on activation energy for diffusion of sodium ions in montmorillonite and silica sand mixture, Journal of Contaminant Hydrology 61, pp.85-93	2003	Bentonite	Bentonite(Kunipia-F)	H_2O	In-Diffusion
					Na	In-Diffusion

表 3.2 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（ベントナイト）（続き）

Literature; Author	Literature; Title, Vol., Num. etc.	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
J. Liu, T. Kozaki, Y. Horiuchi and S. Sato[62]	Microstructure of montmorillonite/silica sand mixture and its effects on the diffusion of strontium ions, Applied Clay Science 23, pp.89–95	2003	Bentonite	Bentonite(Kunipia-F)	Sr	In-Diffusion
M. Mihara[63]	The comparison concerned with hydraulic conductivities and effective diffusion coefficients for nuclides between Na and Ca bentonite, JNC Technical Review No.6 2000.3 pp.61-68 (ISSN 1344-4239)	2000	Bentonite	Bentonite(Ca type)	Cs	Through-Diffusion
					H_2O	Through-Diffusion
					I	Through-Diffusion
T. Mine, M. Mihara and Hiroshige Sato[64]	Distribution coefficients of radio-elements on compacted bentonite under cementitious conditions, JNC TN8430 99-012	1999	Bentonite	Bentonite(Ca type)	Am	In-Diffusion
					Cs	In-Diffusion
					H_2O	In-Diffusion
					Nb	In-Diffusion
					Ni	In-Diffusion
					Np	In-Diffusion
					Sn	In-Diffusion
					Sr	In-Diffusion
					U	In-Diffusion
					Zr	In-Diffusion
				Bentonite(Kunigel-V1)	Am	In-Diffusion
					Cs	In-Diffusion
					H_2O	In-Diffusion
					Nb	In-Diffusion
					Ni	In-Diffusion
					Np	In-Diffusion
					Sn	In-Diffusion
					Sr	In-Diffusion
					U	In-Diffusion
					Zr	In-Diffusion

表 3.2 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（ベントナイト）（続き）

Literature; Author	Literature; Title, Vol., Num. etc.	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
C. Oda, T. Ikeda and M. Shibata[65]	Experimental Studies for Sorption behavior of Tin on Bentonite and Rocks, and Diffusion behavior of Tin in Compacted Bentonite, JNC TN8400 99-073	1999	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Sn	In-Diffusion
H. Sato and T. Shibutani[66]	Study on Adsorption and Diffusion Mechanism of Nuclides in Buffer Material and Geosphere, PNC Technical Review No.91 1994.9 pp.71-89	1994	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Am	In-Diffusion
					Cs	In-Diffusion
						Through-Diffusion
					H_2O	Through-Diffusion
					Np	In-Diffusion
						Through-Diffusion
					Tc	In-Diffusion
						Through-Diffusion
					U	Through-Diffusion
H. Sato and S. Suzuki[67]	Fundamental study on the effect of an orientation of clay particles on diffusion pathway in compacted bentonite, Applied Clay Science 23, pp.51-60	2003	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	H_2O	Through-Diffusion
				Bentonite(Kunipia-F)	H_2O	Through-Diffusion
H. Sato, T. Ashida, Y. Kohara, M. Yui and N. Sasaki[68]	Effect of Dry Density on Diffusion of Some Radionuclides in Compacted Sodium Bentonite, Journal of Nuclear Science and Technology, 29[9], pp.873-882	1992	Bentonite	Bentonite(Kunipia-F)	Am	In-Diffusion
					Cs	In-Diffusion
					H_2O	In-Diffusion
					I	In-Diffusion
					Np	In-Diffusion
					Sr	In-Diffusion
					Tc	In-Diffusion
H. Sato, T. Ashida, Y. Kohara and M. Yui. [69]	Study on Retardation Mechanism of H-3, Tc-99, Cs-137, Np-237 and Am-241 in Compacted Sodium Bentonite, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 294, pp.403-408	1993	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Am	In-Diffusion
					Cs	In-Diffusion
					H_2O	In-Diffusion
					Np	In-Diffusion
					Tc	In-Diffusion

表 3.2 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（ベントナイト）（続き）

Literature; Author	Literature; Title, Vol., Num. etc.	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
H. Sato, M. Yui and H. Yoshikawa[70]	Diffusion Behaviour for Se and Zr in Sodium Bentonite, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 353, 269-276	1995	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Se	In-Diffusion
					Zr	In-Diffusion
H. Sato and M. Yui[71]	Diffusion of Ni in Compacted Sodium Bentonite, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 34, No.3 pp.334-336	1997	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Ni	In-Diffusion
H. Sato and S. Miyamoto[72]	A study on Diffusion and Migration of Lead in Compacted Bentonite, JNC TN8400 2001-018	2001	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Pb	In-Diffusion
H. Sato and S. Miyamoto[73]	The effects of silica sand content and temperatures on diffusion of selenium in compacted bentonite under reducing conditions, JAERI-Conf 2002-004, pp.675-682	2002	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Se	In-Diffusion
H. Sato[74]	Diffusion behaviour of Se(II) and Sm(III) in Compacted Sodium Bentonite, Radiochim. Acta Vol.82, pp.173-178	1998	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Se	In-Diffusion
					Sm	In-Diffusion
H. Sato[75]	A study on Nuclide Migration in Buffer Materials and Rocks for Geological Disposal of Radioactive Waste, PNC TN8410 97-202	1998	Bentonite	Bentonite(Kunipia-F)	Pu	In-Diffusion
H. Sato[76]	Measurements of Apparent Diffusion Coefficients (Da) for Cs(I), Ni(II) and Se(IV) in Bentonite with Silica Sand, JNC TN8400 99-060	1999	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Cs	In-Diffusion
					Ni	In-Diffusion
					Se	In-Diffusion
H. Sato[77]	Acquisitions of effective diffusion coefficients (D_e) for Ni(II), Am(III), Sm(III) and Se(IV) in Bentonite by Through-Diffusion Method, JNC-TN-8400-99-062	1998	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Am	Through-Diffusion
					Ni	Through-Diffusion
					Se	Through-Diffusion
					Sm	Through-Diffusion
H. Sato[78]	Effects of the orientation of smectite particles and ionic strength on diffusion and activation enthalpies of I- and Cs+ ions in compacted Smectite, Applied Clay Science 29, pp.267-281	2005	Bentonite	Bentonite(Kunipia-F)	Cs	In-Diffusion
					I	In-Diffusion
S. Suzuki, H. Sato and Y. Tachi[79]	A Technical Problem in the Through-Diffusion Experiments for Compacted Bentonite, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol.40, No.9, pp.698-701	2003	Bentonite	Bentonite(Kunipia-F)	Sr	Through-Diffusion

表 3.2 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（ベントナイト）（続き）

Literature; Author	Literature; Title, Vol., Num. etc.	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
S. Suzuki, H. Sato, T. Ishidera and N. Fujii[80]	Study on anisotropy of effective diffusion coefficient and activation energy for deutrated water in compacted sodium bentonite, Journal of Contaminant Hydrology 68 (2004) pp.23-37	2004	Bentonite	Bentonite(Kunipia-F)	H_2O	Through-Diffusion
S. Suzuki, M. Haginuma and K. Suzuki[81]	Study of Sorption and Diffusion of 137Cs in compacted Bentonite Saturated with Saline Water at 60 C,Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 44, No. 1, pp.81-89	2007	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)+ Sand(Silica Sand)	Cs	In-Diffusion
						Reservoir-depletion
						Through-Diffusion
					H_2O	Through-Diffusion
S. Suzuki[82]	Study on nuclide diffusion process in engineered barrier, research briefing report of doctoral research fellow, pp.64-74	2001	Bentonite	Bentonite(Purified Kunipia-F)	H_2O	Through-Diffusion
					I	Through-Diffusion
Y. Tachi, T. Shibutani, H. Sato and M. Yui[83]	Comparison of Actinides Solubilities in Compacted Bentonites between Diffusion Measurements and Thermodynamic Model, PNC TN8410 97-233	1997	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Am	In-Diffusion
					Np	In-Diffusion
					U	In-Diffusion
				Bentonite(Kunipia-F)	Pu	In-Diffusion
Y. Tachi, Y. Kohara, N. Uchidate and T. Shibutani[84]	Diffusion Behavior of Pu and Am in Compacted Bentonite, JNC Technical Report, JNC TN8400 99-089	1999	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Am	In-Diffusion
					Pu	In-Diffusion
Y. Tachi, T. Shibutani, H. Sato and M. Shibata[85]	Sorption and Diffusion Behavior of Palladium in Bentonite, Granodiorite and Tuff. JNC TN8400 99-088	1999	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Pd	In-Diffusion
Y. Tachi, T. Shibutani, H. Sato and M. Yui[86]	Experimental and modeling studies on sorption and diffusion of Radium in bentonite., Journal of contaminant hydrology 47, pp.171-186	2001	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Ra	In-Diffusion
M. Takazawa, K. Negishi, Y. Sakamoto, M. Akai, T. Yamaguchi, Y. Iida, T. Tanaka and S. Nakayama[87]	Experimental and modeling study to predict long-term alteration of bentonite buffer materials with alkaline Groundwater, JAERI-Conf 2005-007 pp.236-241	2005	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	OH-	Through-Diffusion

表 3.2 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（ベントナイト）（続き）

Literature; Author	Literature; Title, Vol., Num. etc.	Year	Solid Type	Solid	Element	Method
M. Tsukamoto, T. Ohe and T. Fujita[88]	Diffusion of Neptumnium(V) in Loosely Compacted Sodium Bentonite, Radiochimica Acta, 66/67, pp.397-403	1994	Bentonite	Bentonite(Kunigel-V1)	Np	In-Diffusion
T. Yamaguchi and S. Nakayama.[89]	Data Acquisition for Predicting Radionuclide Migration under Deep Geological Environments, JAERI-Conf 2003-018 pp.115-116	2003	Bentonite	Bentonite(Na type)	Cs	Through-Diffusion
					H_2O	Through-Diffusion
					I	Through-Diffusion
					Np	Through-Diffusion
T. Yamaguchi, N. Minase, Y. Iida, T. Tadao and S. Nakayama[90]	Evaluation of uncertainty associated with parameters for long-term safety assessments of geological disposal, JAERI-Conf 2005-007	2005	Bentonite	Bentonite(+Sand)	Cs	Through-Diffusion

4. データベースの利用による拡散係数と関連パラメータの相関評価

本章では，前章までに定義したデータベースに実際に格納されたデータを活用してデータ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，評価対象固相で分類して扱えることから，ここではベントナイトと岩石に分けて実施した評価結果を示す。

4.1 ベントナイト

ベントナイトでは，地層処分の性能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^-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，複数のアクチニドのデータ比較も行った。

4.1.1 1価の陽イオンの評価例（Cs^+）

（1） 実効拡散係数（全データ）

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，それぞれ図 4.1 と図 4.2 に示す。

両図に共通する傾向として，密度の上昇に伴って実効拡散係数が減じる傾向のあることが分かる。図 4.1 と図 4.2 で比較すると，前者よりも後者のほうが，比較的 x 軸方向で圧縮したように狭い範囲に分布することが分かる。これは，後者が複数種類あるベントナイト試料（Kunigel-V1,Kunipia-F,又はこれらとのケイ砂混合）中に共通して含まれるスメクタイトの含有量に着目して規格化した取扱が可能であることを示すものである。例えば図 4.1 と図 4.2 に示す Iida ら [42]のデータでは，乾燥密度は一定でケイ砂混合の割合を変えていることを反映し，部分スメクタイト密度に対する実効拡散係数の分布は，他のデータと同様に右下がりの傾向を示すことが分かる。

図 4.1 と図 4.2 には，一部サンプルの密度上昇に伴って拡散係数が減少する傾向とは異なるデータ分布が見られるが，これは同図に示したとおり，高アルカリの試験溶液を使用し，比較的短時間で測定している場合や，小粒径のベントナイトを対象とした試験の結果から得られたデータである。これは，データベースに格納された付加情報を参照することで確認することが可能である。

（2） 実効拡散係数（実測値のみ）

（1）項で示した実効拡散係数のデータは，Through-Diffusion 法を適用した拡散試験から実測値として得たデータの他，前述した推定方法で得た推定値のデータを含んでいる。データベースには実測値と推定値を区別するための情報も保管されていることから，これを活用して実測値だけのデータを抽出可能である。本項で示すデータ（図 4.3，図 4.4）では，この特徴を活用して，乾燥密度と部分スメクタイト密度に対して実効拡散係数の実測値のみをプロットしている。

ここでも，サンプルの密度上昇に伴って拡散係数が減少する傾向とは異なるデータ分布が見られるが，その原因は（1）項で記したものと同様である。

（３） 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，主に前述した 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 法と Time-lag 法の併用によっても，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 4.5 と図 4.6 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。

基本的なデータ分布は，密度の増加に伴って低下する一定の傾向を示すことが分かる。一方で，他にも複数の分布が見られるが，これは，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。

（４） 収着分配係数

前述の式(25)で求めた収着分配係数のデータを図 4.7 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が，実際にはベントナイトを対象とした評価は In-Diffusion 法のみ，というケースがほとんどであることから，見かけの拡散係数だけが実測値として評価され，実効拡散係数を推定値として評価する必要が生じる。実効拡散係数の推定値を使って導出した収着分配係数は，同様に推定値として扱う必要がある。

データの分布傾向を見ると，拡散係数と同様，ほとんどのデータが密度の増加に伴って低下する一定の傾向を示していることが分かるが，一部この傾向を示さない一連のデータが存在する。Kd は D_a や D_e から導出されることから，前項で示したような特殊な条件で求めた Da は収着分配係数のデータ分布にも影響する。Kd と Da の関係式（式(25)）から分かるように，Da の分布とは同一密度における大小の関係が逆転してはいるものの，試験溶液にアルカリや塩水を導入した場合や温度変化の影響評価を目的として得たデータは，一定のデータ傾向を示さないことが分かる。

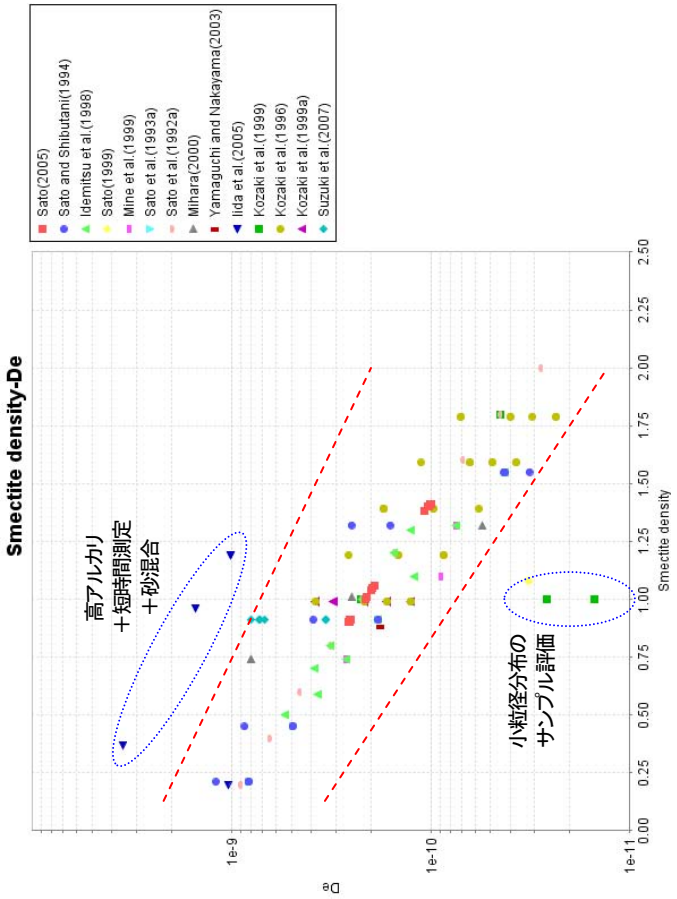

図 4.2　部分スメクタイト密度に対する Cs^{+} の実効拡散係数

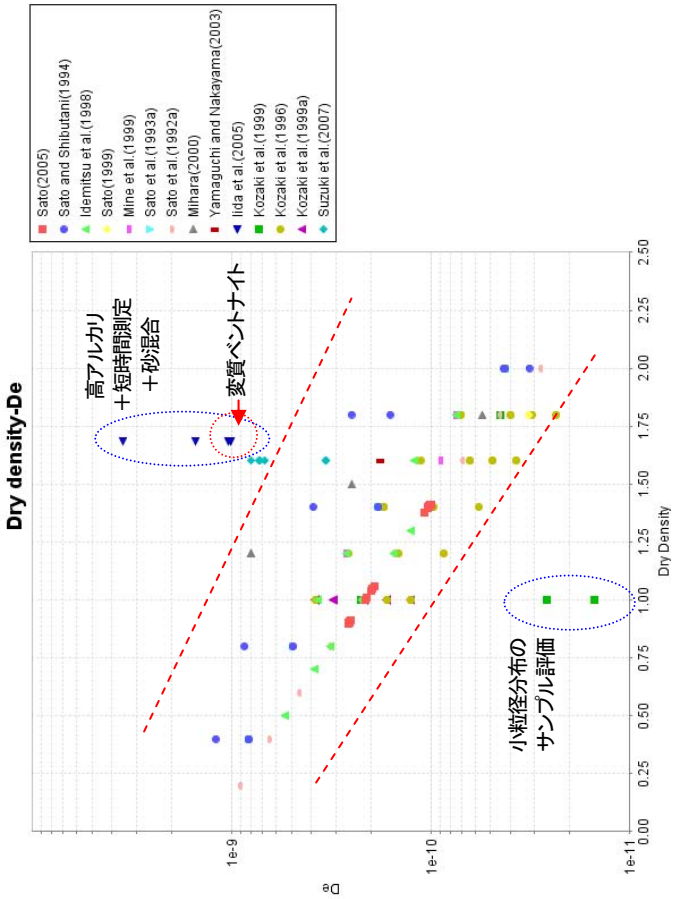

図 4.1　乾燥密度に対する Cs^{+} の実効拡散係数

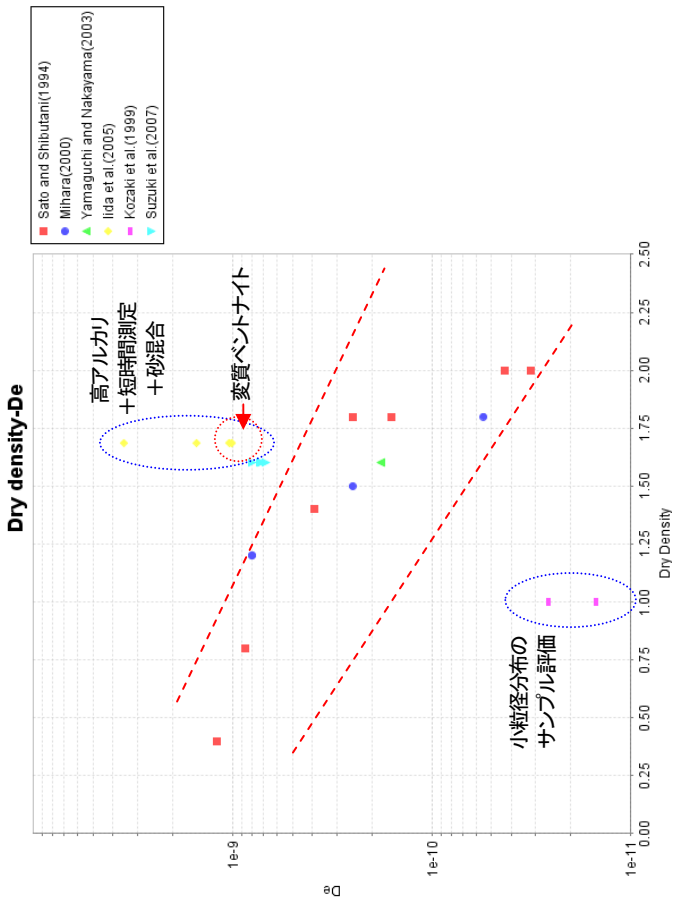

図 4.3　乾燥密度に対する Cs^+ の実効拡散係数（実測値のみ）

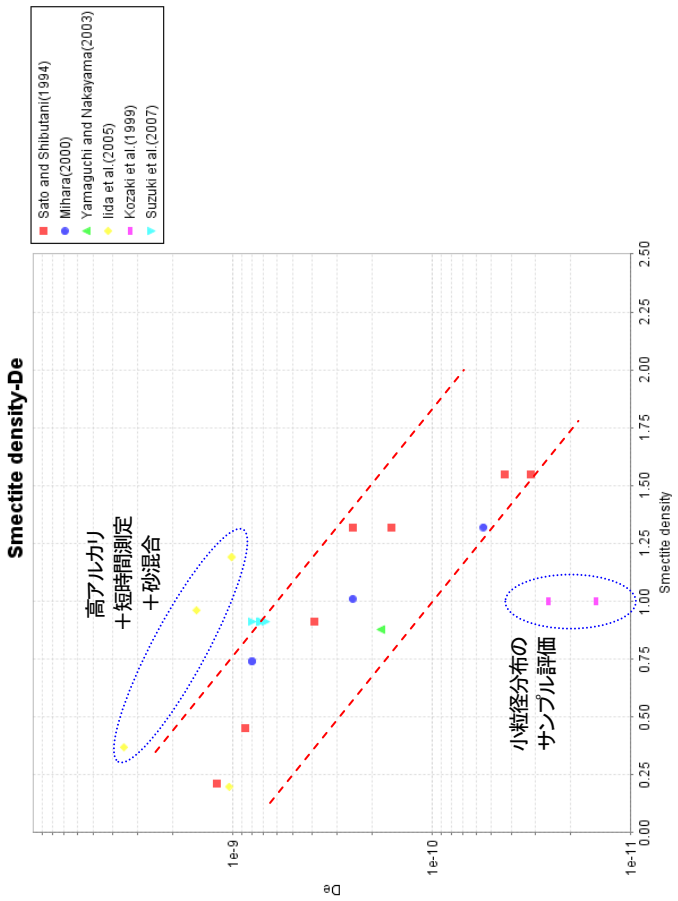

図 4.4　部分スメクタイト密度に対する Cs^+ の実効拡散係数（実測値のみ）

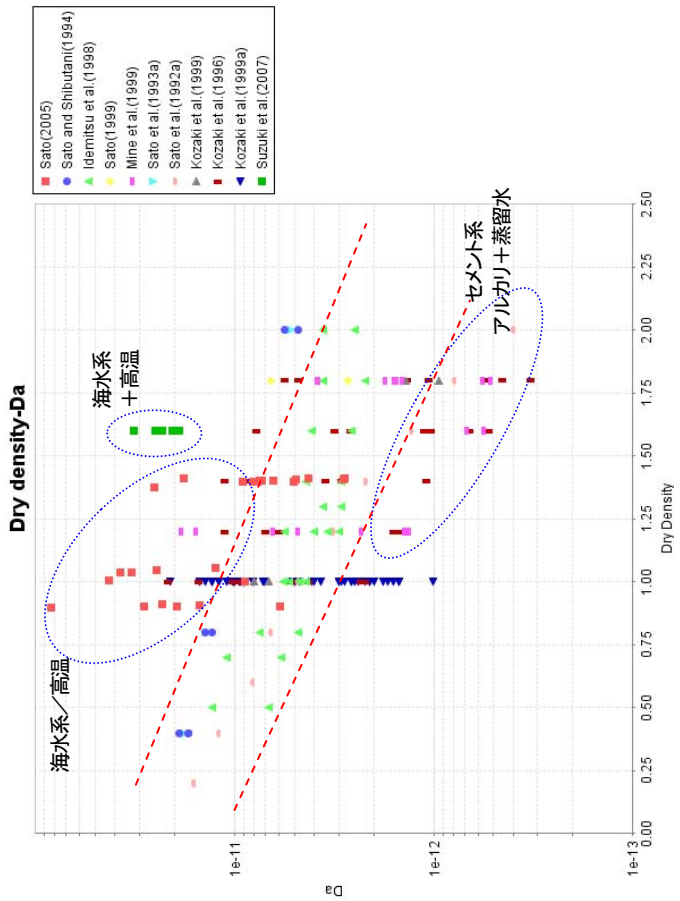

図 4.5　乾燥密度に対する Cs^+ の見かけの拡散係数

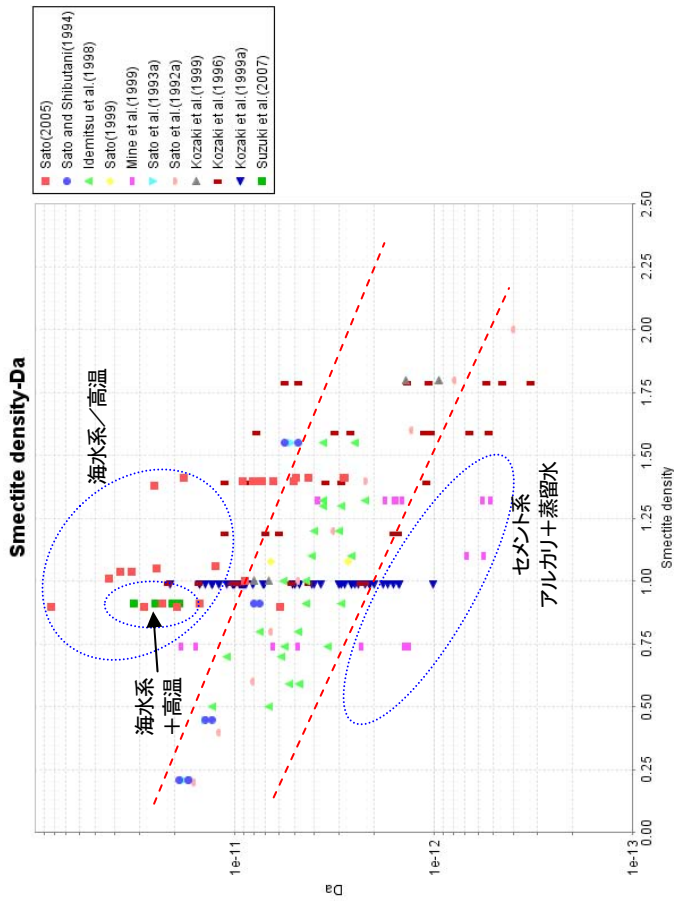

図 4.6　部分スメクタイト密度に対する Cs^+ の見かけの拡散係数

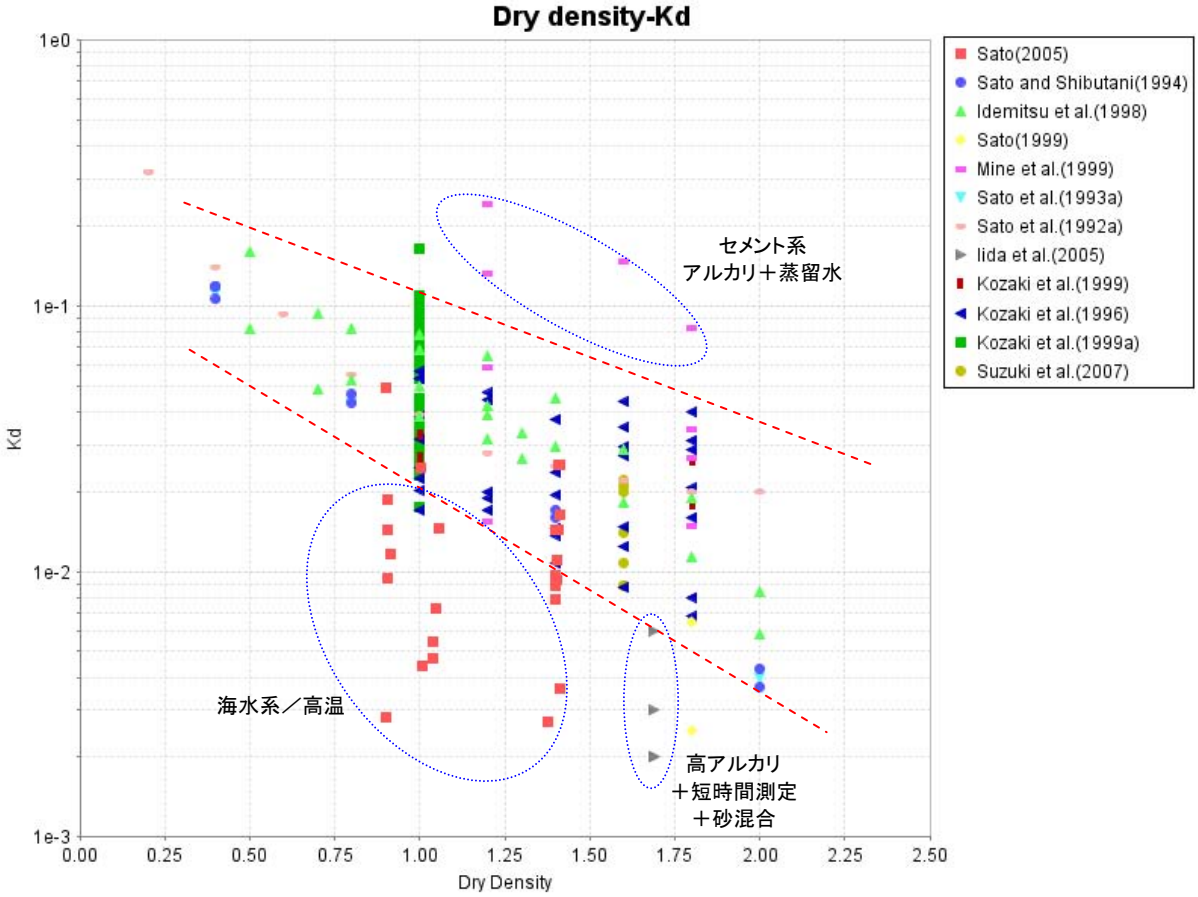

図 4.7　乾燥密度に対する Cs^{+}の収着分配係数

4.1.2　1 価の陰イオンの評価例（I^-）

データベースに含まれる，前述の乾燥密度およびスメクタイト密度と実効拡散係数の関係を，それぞれ図 4.8 と図 4.9 に示す。また，同図では実測値のみを対象とした。

両図を比較すると，部分スメクタイト密度による規格化の特徴が明らかとなる。図 4.8 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している様子のみが分かるが，図 4.9 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（Kunigel-V1,Kunipia-F, さらにこれらへのケイ砂混合比による相違）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。

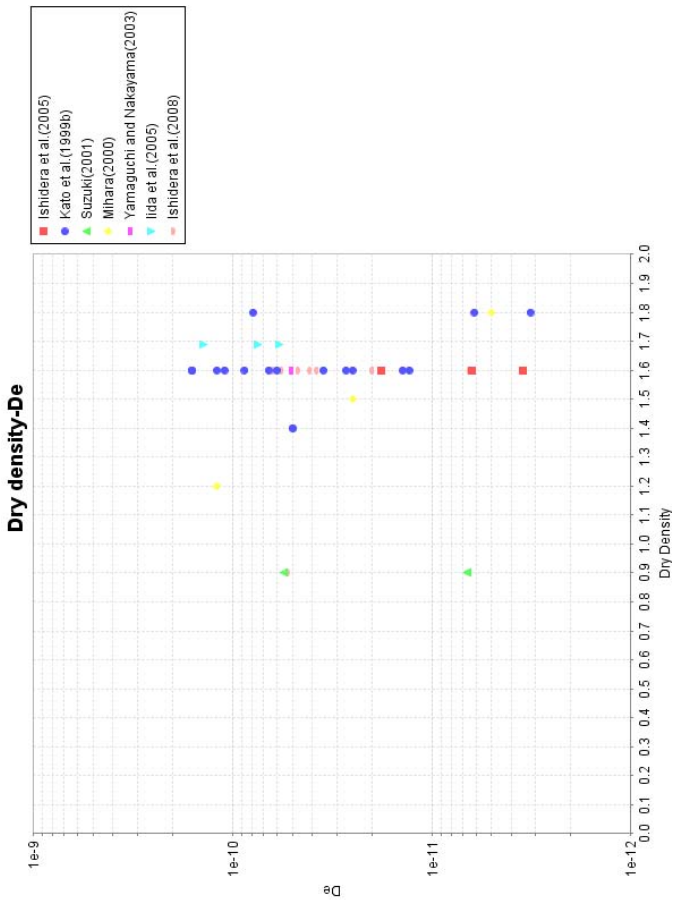

図 4.8　乾燥密度に対するI^-の実効拡散係数（実測値のみ）

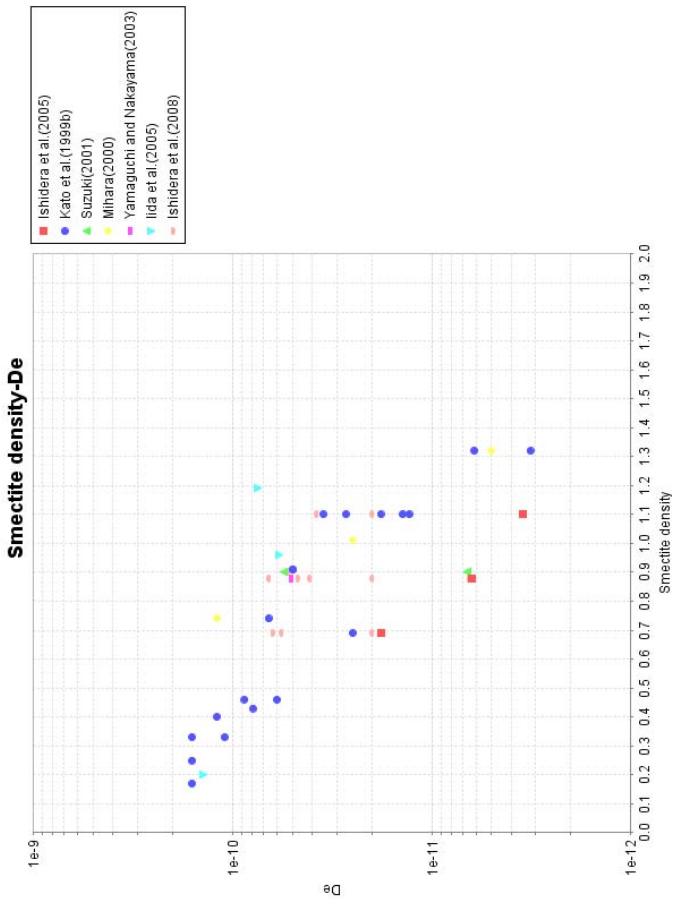

図 4.9　部分スメクタイト密度に対するI^-の実効拡散係数（実測値のみ）

4.1.3 アクチニドの評価例

ここでは，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。また，ベントナイトを対象とした場合，特に実測値として評価される見かけの拡散係数を評価例の対象とした。

（１） U

乾燥密度に対する U の見かけの拡散係数を図 4.10 に示す。同図では，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。

上方には酸化的な環境で測定した拡散係数が分布しており，U は U(VI)の原子価を有し，かつ比較的高い拡散係数を持つ化学形を取る傾向のあることが分かる。下方には還元的な環境で測定した拡散係数が分布しており，U は U(IV)の原子価を有して比較的低い拡散係数を持つ傾向のあることが分かる。また，両方の領域にまたがって Mine ら [64]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。

（２） Np

乾燥密度に対する Np の見かけの拡散係数を図 4.11 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。

プロットの上方には, U と同様, 酸化的な環境で測定した拡散係数が分布しており, Np は Np(V)の原子価を有し，かつ比較的高い拡散係数を持つ化学形を取る傾向のあることが分かる。下方には還元的な環境で測定した拡散係数が分布しており，Np は Np(IV)の原子価を有して比較的低い拡散係数を持つ傾向のあることが分かる。

ここでも両方の領域にまたがって Mine ら [64]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。

（３） Pu

乾燥密度に対する Pu の見かけの拡散係数を図 4.12 に示す。

酸化性環境中の試験で得られたデータは，乾燥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 [41]のデータのみである。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。

（４） Am

乾燥密度に対する Am の見かけの拡散係数を図 4.13 に示す。

Am は酸化還元環境に拠らず 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が，同図では縦方向に分布するデータが見られる。同一連のデータについて，データベースに格納されている付加情報を確認したところ，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を確認できた。

（５） アクチニド間の比較

図 4.14 に，（１）から（４）に示した全データを重ねてプロットした結果を示す。同図は，特にアクチニド元素と酸化還元環境を考慮したうえで，元素間で類似性の評価の可能性を示唆している。例としては，アクチニド全体として見ると，V/VI 価の D_a に対して，III/IV 価の D_a はかなり低い値を示すことが分かる。また，Np と U の酸化還元環境条件の違いによる拡散係数の分布の類似性や，大気下で取得された Am と Pu の類似性などが挙げられる。

これらの結果から，アクチニドの拡散係数に対する化学アナログの取扱に関して，定性的ではあるが，その適用可能性が示唆された。

（６） 収着分配係数（Kd）の実測・推定値の比較（Np）

ベントナイト試料の乾燥密度に対する収着分配係数の分布を図 4.15 に示す。収着分配係数は，前述の式(25)から求めた。図 4.15 は 4.1.1 項で述べた場合と同様，推定値として取り扱う収着分配係数を含め，データベースで管理する全ての収着分配係数のプロットである。

図 4.15 を見ると，還元環境で得られた K_d は，低い D_a 値を反映して高い値を示す一方，これ以外の酸化環境で得られた Np(V)の示すデータは，10^{-2} から 10^{0} に分布していることが分かる。

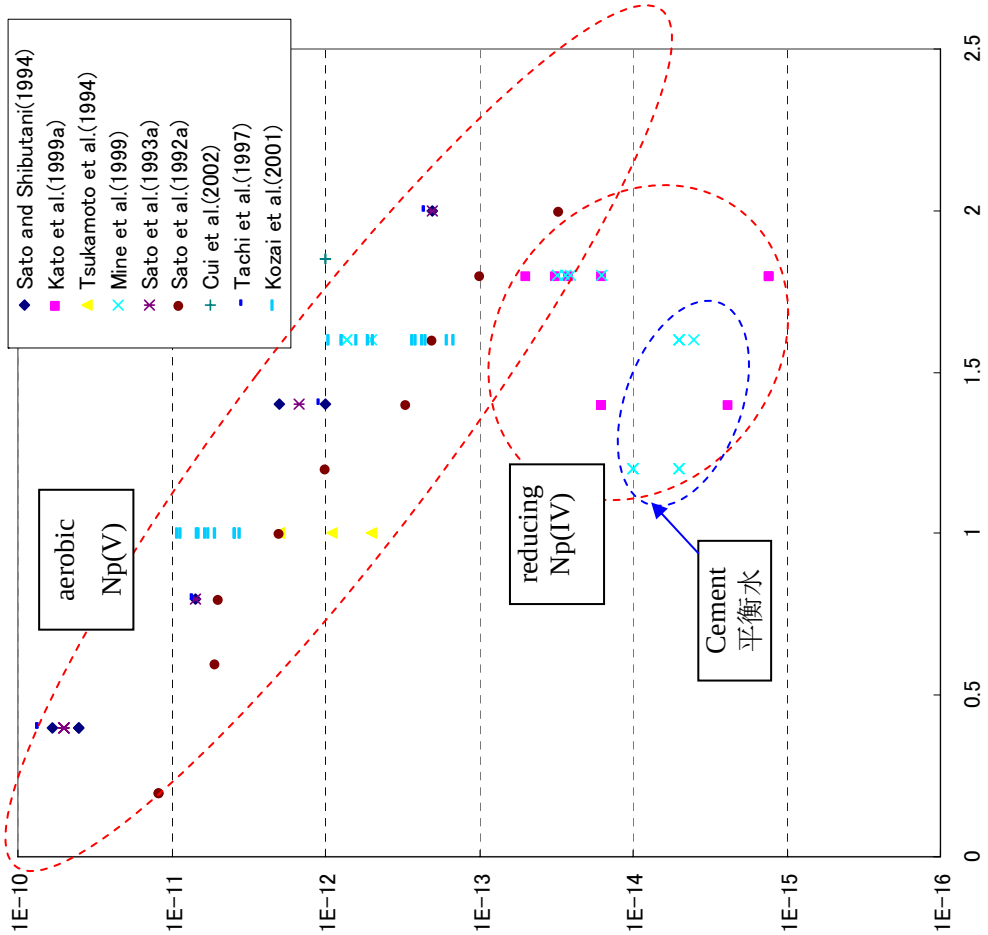

図 4.11 乾燥密度に対する Np の見かけの拡散係数

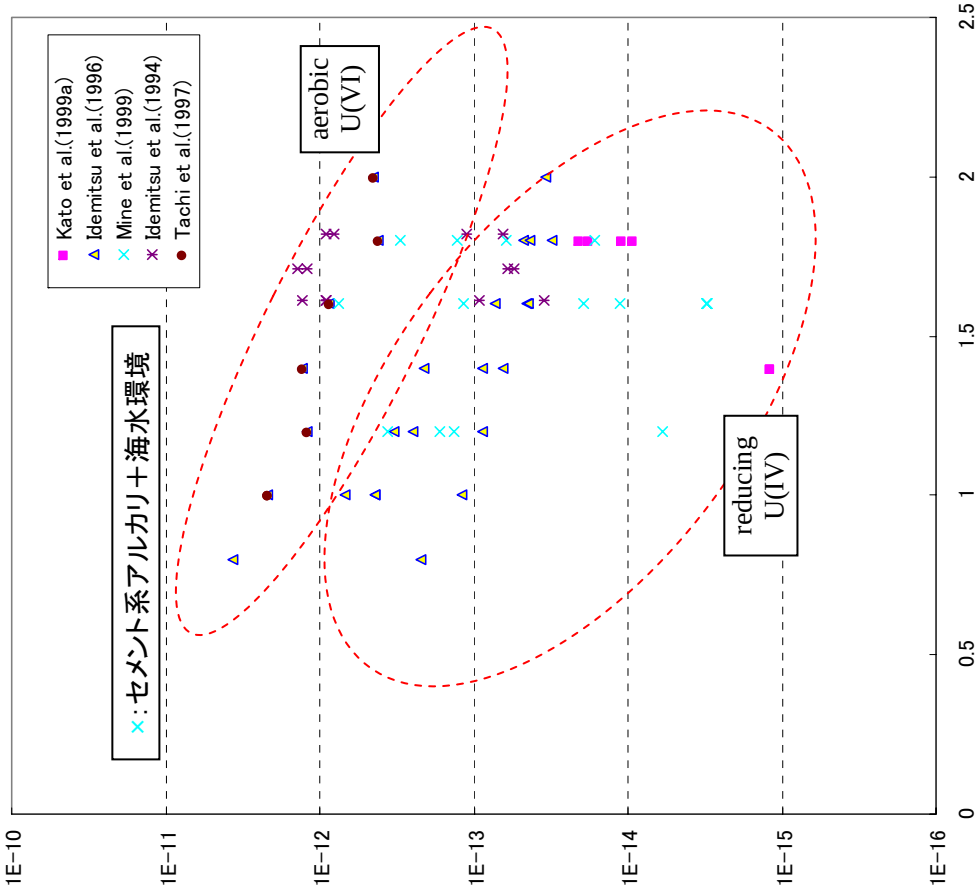

図 4.10 乾燥密度に対する U の見かけの拡散係数

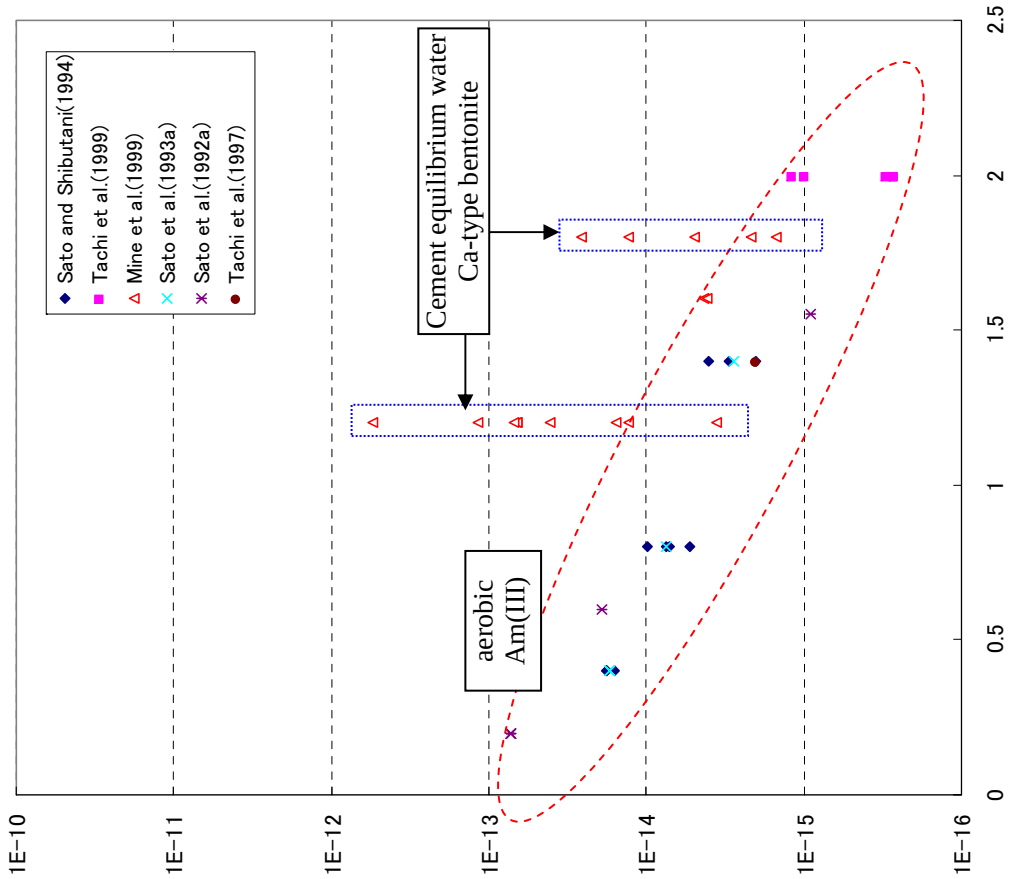

図 4.13 乾燥密度に対する Am の見かけの拡散係数

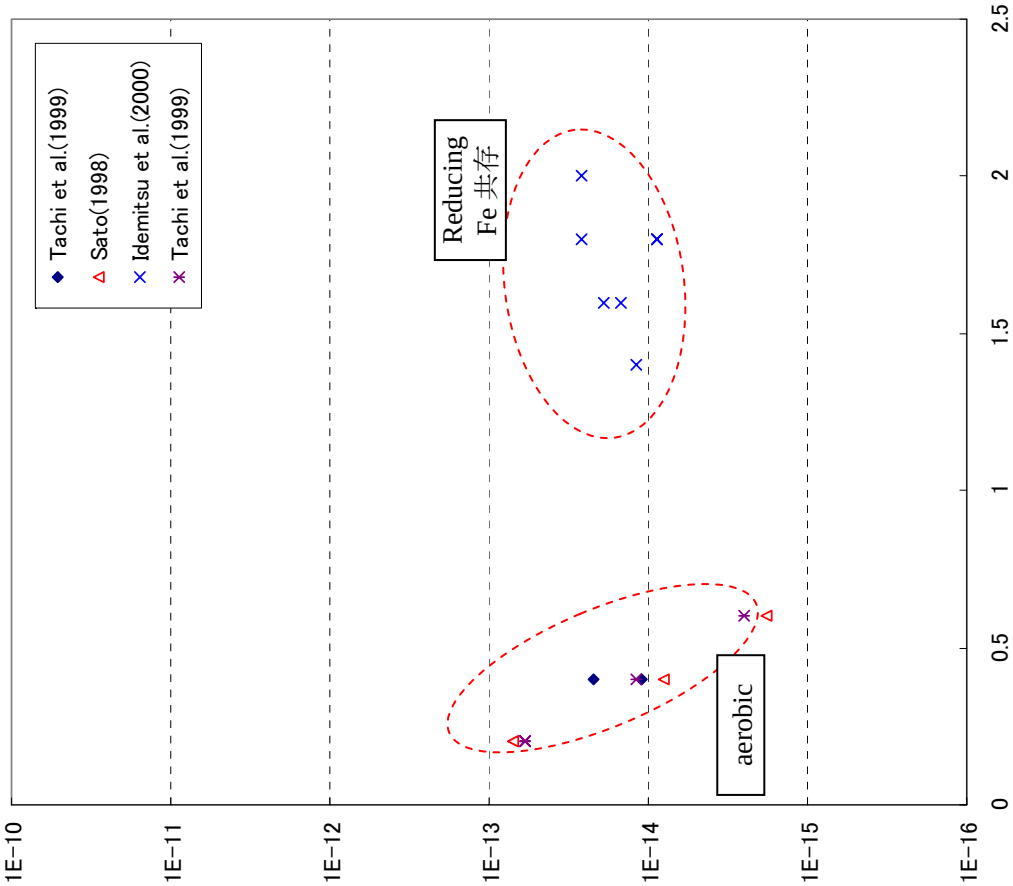

図 4.12 乾燥密度に対する Pu の見かけの拡散係数

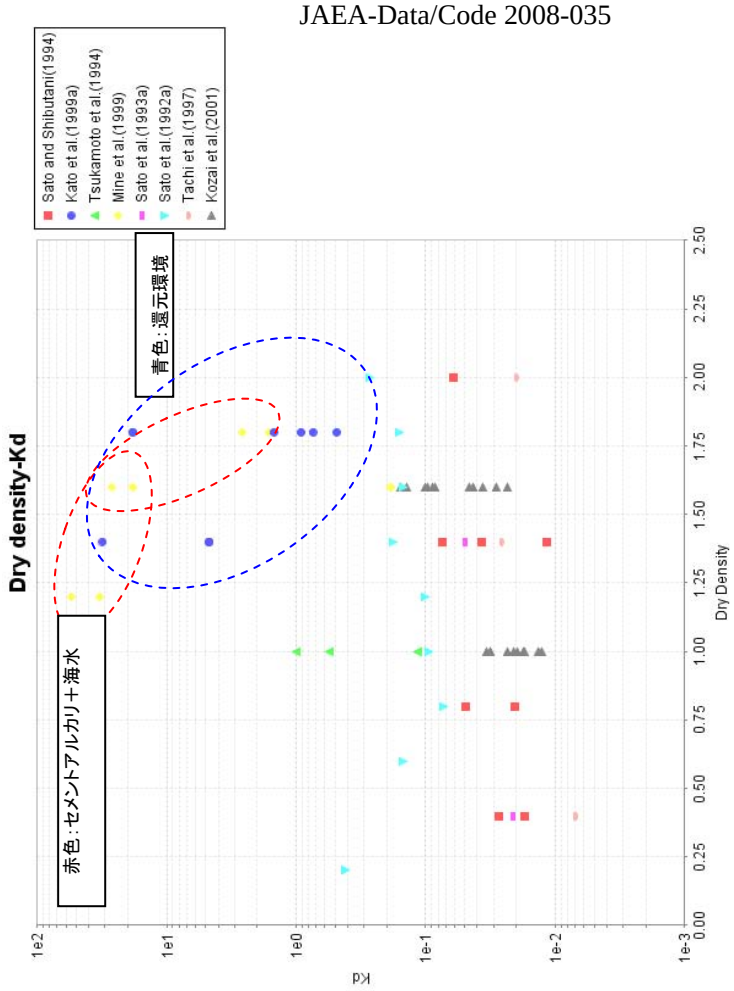

図 4.15　乾燥密度に対する Np の収着分配係数

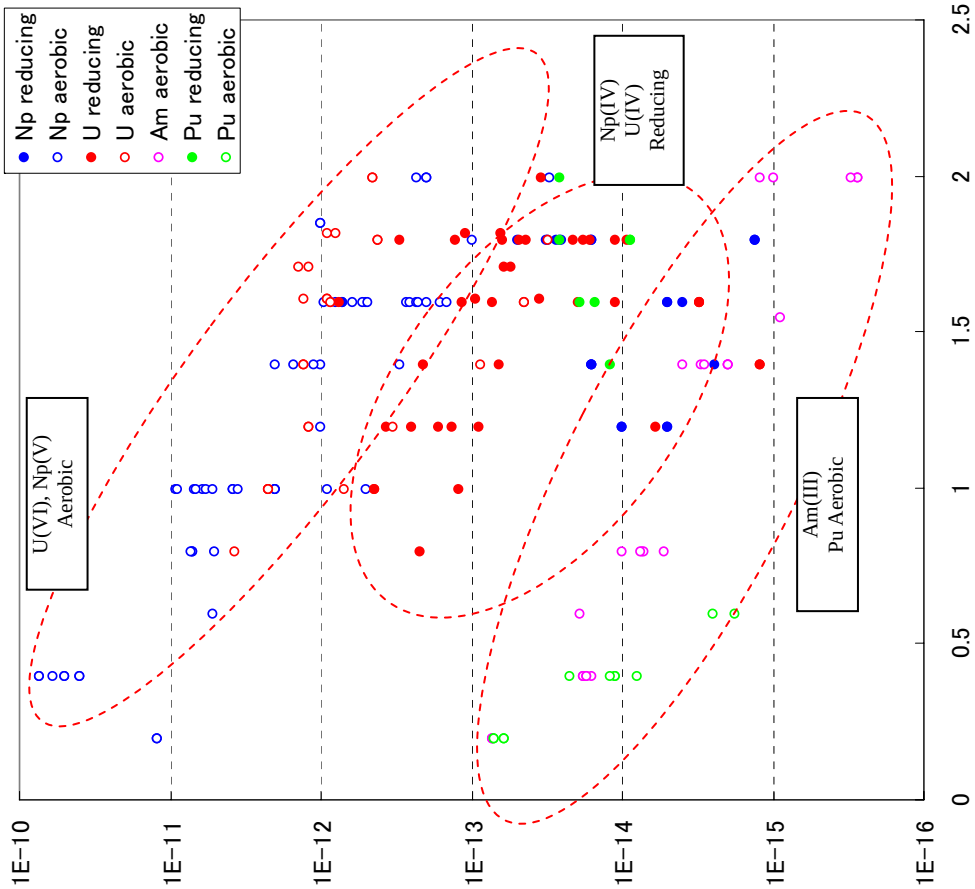

図 4.14　乾燥密度に対する U, Np, Pu, Am の見かけの拡散係数

4.2 岩石

岩石では，全元素を対象とした評価の他，1 価の陽イオン，1 価の陰イオンを対象とした評価を実施した。評価は岩石試料の間隙率に対する実効拡散係数と見かけの拡散係数の分布を対象として行った。ベントナイトを対象として評価した拡散係数では，D_e や Kd が推定値として評価される場合もあり，実測値との比較評価を重視したが，岩石を対象とした評価では，D_e も D_a も実測を基に評価されていることが特徴として挙げられる。

4.2.1 全元素の評価例

データベースに含まれる岩石を対象として評価した全元素の拡散係数を，岩石試料の間隙率に対してプロットした。実効拡散係数のプロットを図 4.16，見かけの拡散係数のプロットを図 4.17 に示す。両図に共通する傾向として，間隙率の上昇に伴って拡散係数が増加する傾向のあることが分かる。逆に低下する傾向を示すデータとして，間隙中に充填した粘土鉱物を含む系であるなどの例外はあるが，概ね一定の傾向を示すことが分かる。

両図を比較すると，実効拡散係数のプロットのほうが，見かけの拡散係数よりも狭い範囲に分布していることが分かる。これは，見かけの拡散係数が，拡散過程で化学種が固相中で受ける収着遅延（分配係数）による影響を反映した結果と考えられる。

4.2.2 1 価の陽イオンの評価例（Cs^+, K^+, Na^+）

岩石を対象として評価した主要な 1 価の陽イオンの拡散係数を，岩石試料の間隙率と対応するプロットとした。実効拡散係数のプロットを図 4.18，見かけの拡散係数のプロットを図 4.19 に示す。

実効拡散係数には間隙率の上昇に伴って増加する傾向があるのに対し，見かけの拡散係数はその傾向を持ちつつも，分布に広がりを見せていることが分かる。これは，全元素のプロットの場合と同様，見かけの拡散係数が，拡散過程で化学種が固相中で受ける収着遅延（分配係数）による影響を反映した結果と考えられる。

4.2.3 1 価の陰イオンの評価例（Cl^-, I^-）

岩石を対象として評価した主要な 1 価の陰イオンの拡散係数を，岩石試料の間隙率と対応するプロットとした。実効拡散係数のプロットを図 4.20，見かけの拡散係数のプロットを図 4.21 に示す。

1 価の陽イオンでのプロットと異なり，両者には類似性があり，共に間隙率の上昇に伴って増加する傾向があることが分かる。これは，1 価の陰イオンに対する遅延影響が非常に小さく，実効拡散係数と見かけの拡散係数間の相違も小さくなることを反映していると考えられる。

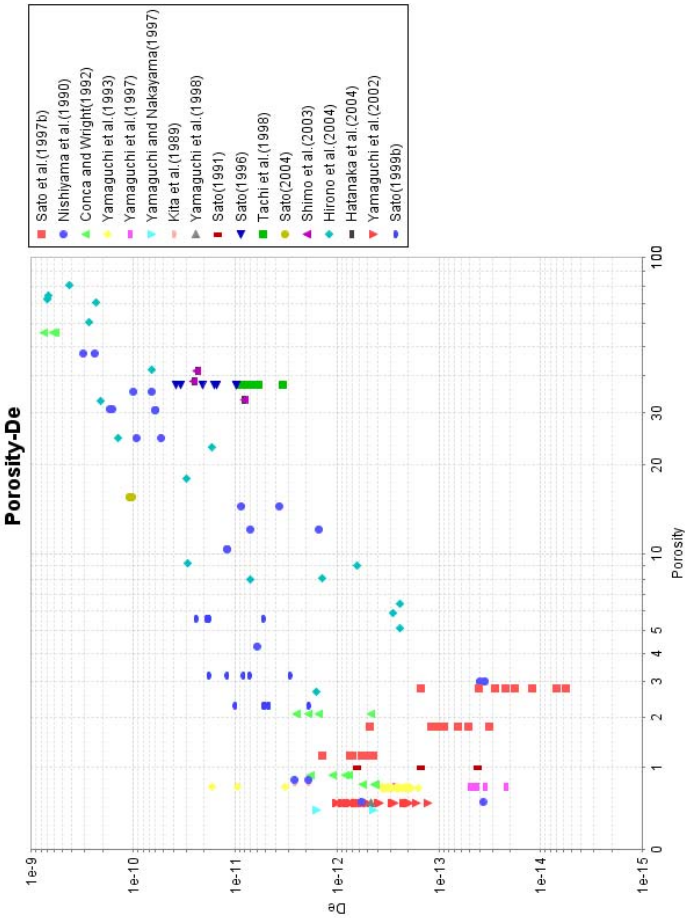

図 4.16　間隙率に対する全元素の実効拡散係数

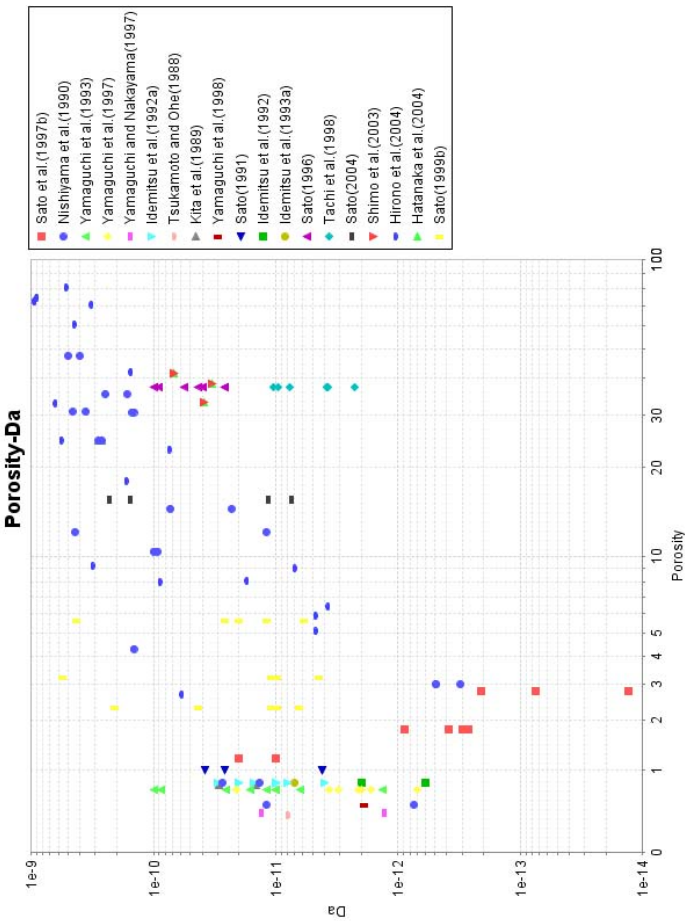

図 4.17　間隙率に対する全元素の見かけの拡散係数

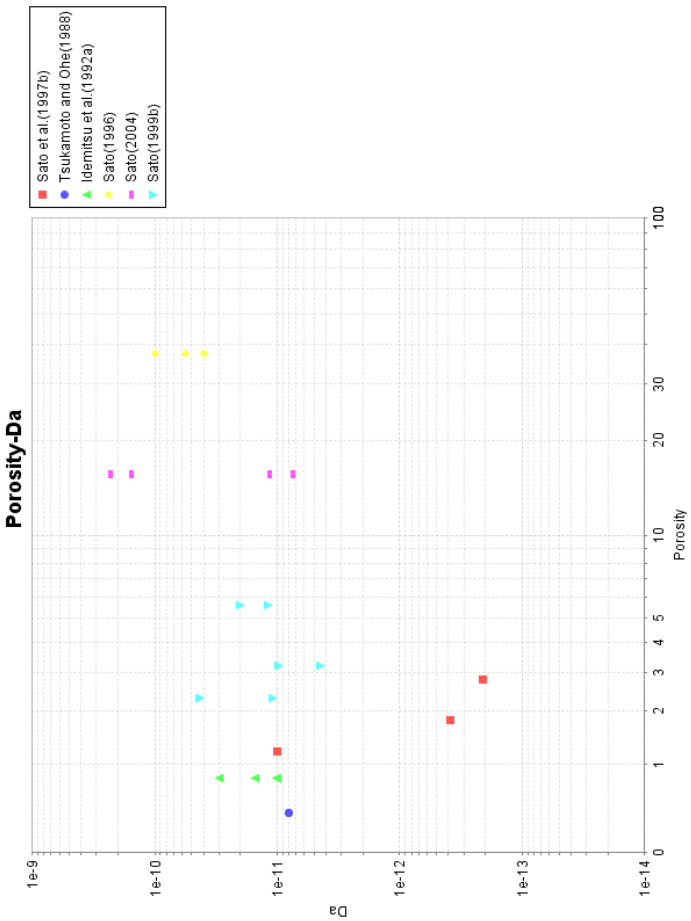

図 4.19　間隙率に対する Cs,K,Na の見かけの拡散係数

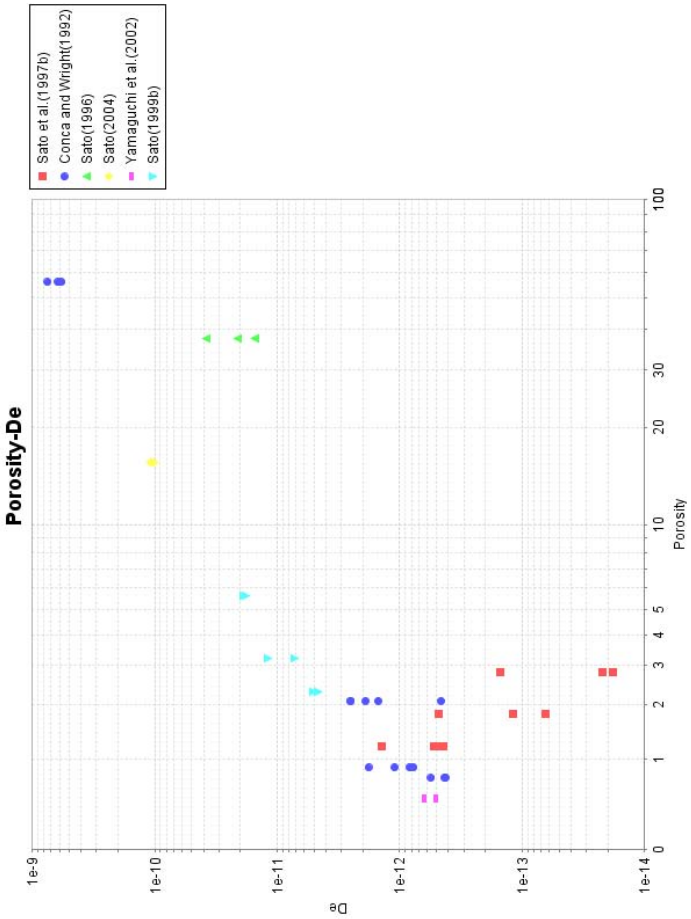

図 4.18　間隙率に対する Cs,K,Na の実効拡散係数

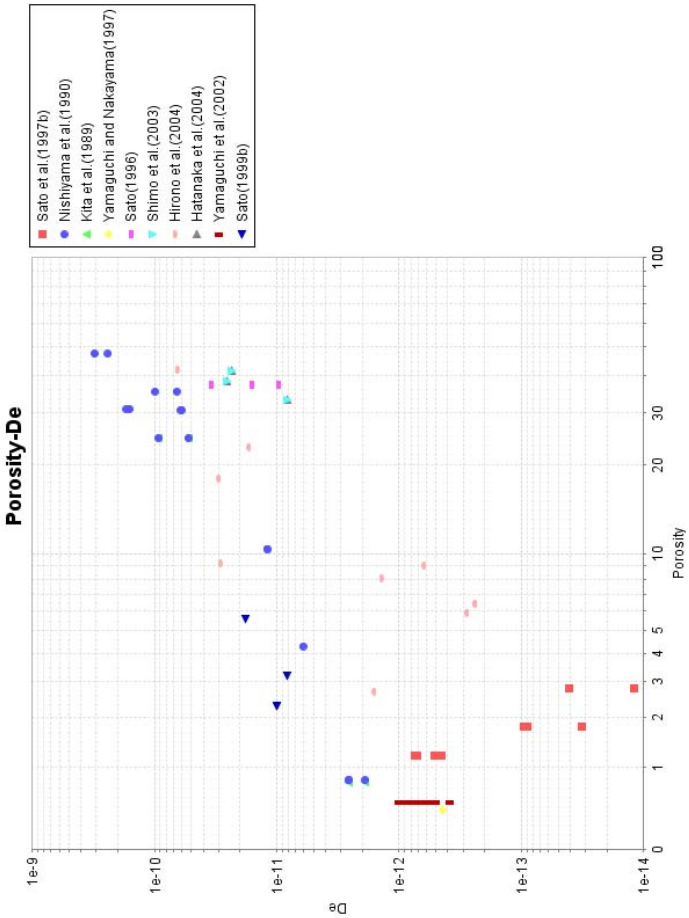

図 4.20　間隙率に対する Cl, I の実効拡散係数

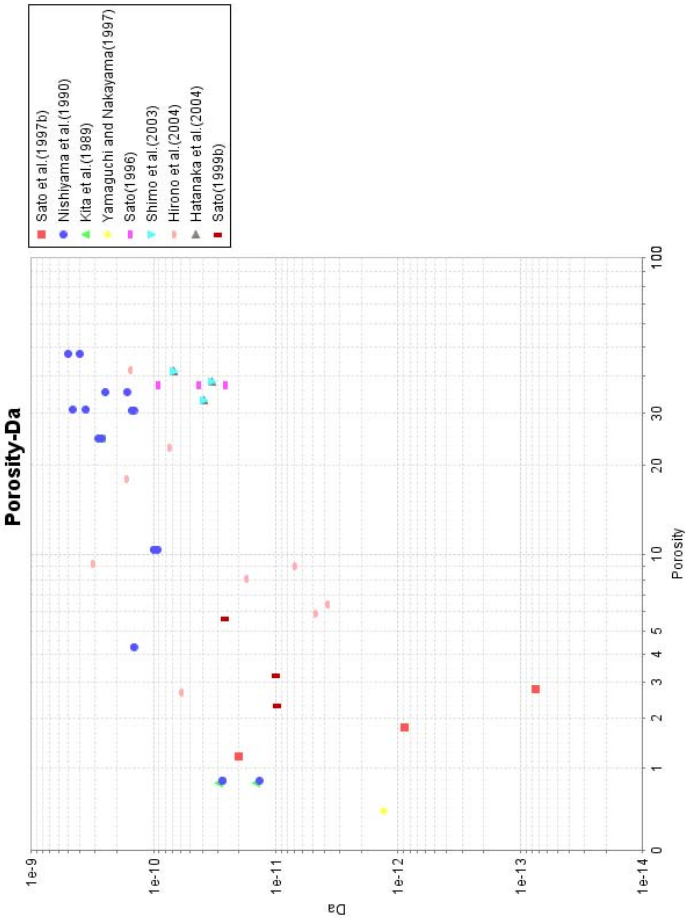

図 4.21　間隙率に対する Cl, I の見かけの拡散係数

4.2.4 ヒストグラムー拡散係数のデータ分布

図 4.22 と図 4.23 に，岩石を対象として評価した全データの D_e と D_a のヒストグラムを示す。ベントナイトを対象とした評価と同様，D_a は，化学種の拡散遅延 K_d の影響もあって広く分布しているが，D_e は比較的狭い範囲に分布していることが分かる。

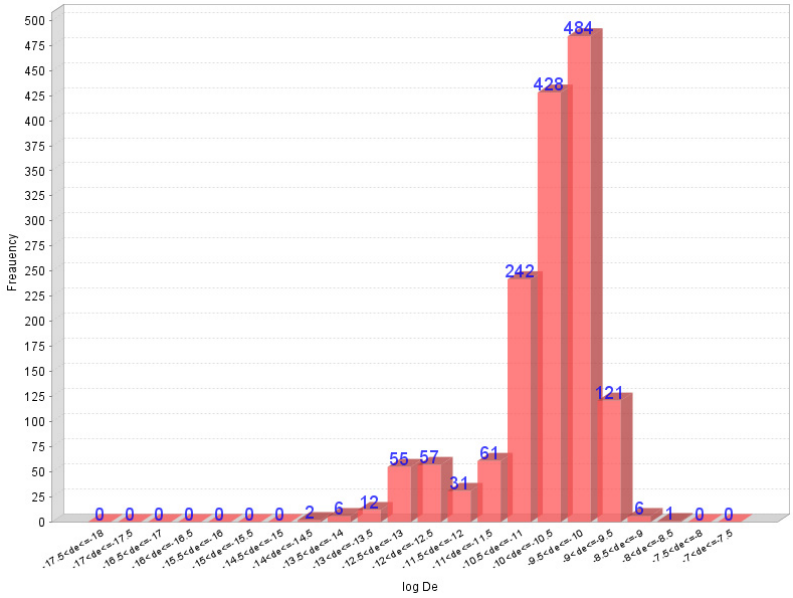

図 4.22　全岩石の De のデータ分布（LogDe のヒストグラム）

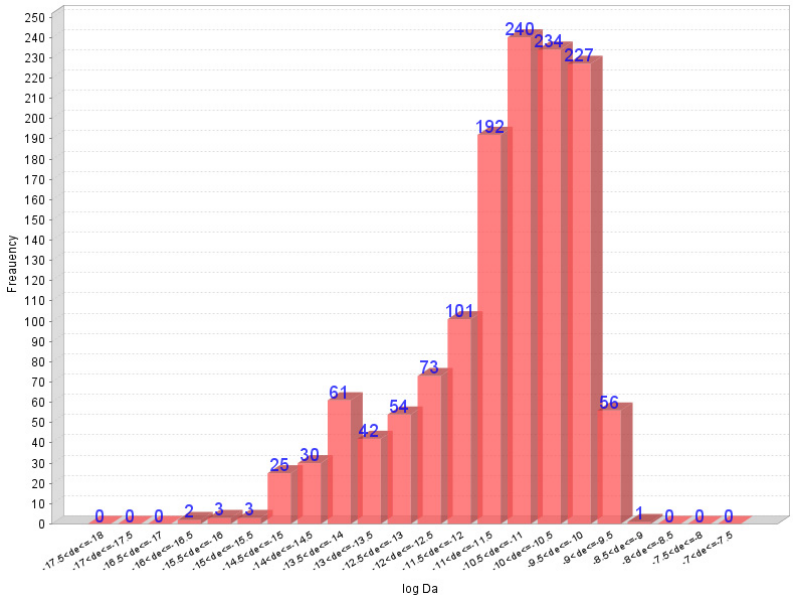

図 4.23　全岩石の Da のデータ分布（LogDa のヒストグラム）

5. まとめ

拡散係数データベースの定義および格納データの更新にあたり，その詳細を記すと共に，改めて拡散係数とその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などについて記した。

データベースの更新に当たっては，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更新し，ベントナイトを対象としたデータを追加した。

評価対象の固相であるベントナイトと岩石に分け，データベースに追加したデータを活用した評価例として,乾燥密度や間隙率に対する拡散係数のプロットを対象とした評価結果を例示した。

このデータベースを活用して，今後実際の地質環境を対象として拡散パラメータの設定がより効果的に行うことが可能となると考える。

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。また，格納データも，現在の国内産のベントナイト・岩石に限らず，必要に応じて海外産のベントナイトや岩石へと対象範囲を拡大していくことを検討している。

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，諸岡幸一氏，上田真三氏による協力をいただきました。また，データの信頼性情報に係る議論に関して，BMG Engineering Ltd.の Michael Ochs 氏の協力をいただきました。データベース整備・本報告書の記載に係る議論に関して，地層処分研究開発部門の油井三和ユニット長，笹本広サブグループリーダ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] H. Sato, Diffusivity Database (DDB) for Major Rocks: Database for the Second Progress Report, JNC-TN8400 99-065 (1999)

[2] 栃木他, 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)

[3] 栃木他, 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)

[4] 澁谷朝紀, 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収着データベース", JNC TN8410 99-050 (1999).

[5] 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).

[6] （社）日本原子力学会, 収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)

[7] H. Sato, Data Setting for Effective Diffusion Coefficients (De) of Nuclides in the Buffer for Reference Case in Performce Assessment of the Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste (I) – A Dataset of De Values for Fresh-Reducing-High pH Groundwater (FRHP), PNC-TN8410 98-097 (1998)

[8] 柴田 雅博他, 地層処分研究開発第 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)

[9] 鈴木 覚, 人工バリアにおける核種拡散過程に関する研究, JNC TN8400 2002-006, p.165 (2002)

[10] H. Sato, Study on Solid-Liquid Interfacial Phenomena and Advancement of Migration Model in Diffusion and Migration Processes of Radionuclides in Buffer Materials and Rock Matrixes for Disposal of Radioactive Wastes, JNC TN1400 2004-003 (2004)

[11] Conca, J. L. and Wright, J., Direct Determinations of Unsaturated Flow and Transport, Proceedings of the Twelfth Annual American Geophysical Union Hydrology Days Meeting, Fort Collins, March 1992, pp.103-116 (1992)

[12] K. Hatanaka, M. Uchida, M. Shimo, H. Yamamoto and S. Kumamoto, Laboratory experiment on the hydraulic and transport properties of fractured soft sedimentary rocks, free posted papers on proceeding of 33th symposium on rock dynamics (Jan. 2004), Japan Society of Civil Engineers, (41) pp.313-318 (2004)

[13] T. Hirono, S. Nakajima, T. Hayashi and M. Takahashi, Delay Effect on Advection and Diffusion Phenomena by Physicochemical Change of Pore Water in Nanopores, Jour. Japan Soc. Eng. Geol., Vol.45, No.3, pp.118-124 (2004)

[14] K. Idemitsu, H. Furuya, K. Murayama and Y. Inagaki, Diffusivity of Uranium(VI) in Water-Saturated Inada Granite, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XV (Sombret, C. G. ed.), Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol.257, pp.625-632, Materials Research Society, Pittsburgh, Pennsylvania (1992)

[15] K. Idemitsu, H. Furuya, T. Hara and Y. Inagaki, Migration of Cesium, Strontium and Cobalt in Water-Saturated Inada Granite, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.29, No.5, pp.454-460, the Atomic Energy Society of Japan (1992)

[16] K. Idemitsu, H. Furuya, K. Murayama, H. Asano and Y. Inagaki, Primary Diffusion Path of Uranium(VI)

in Water-Saturated Inada Granite, Proceedings of the International Conference on Nuclear Waste Management and Emvironmental Remediation (Alexandra, D., Baker, R. and Kohout, R. eds.), the American Society of Mechanica (1993)

[17] T. Ishidera, S. Miyamoto and H. Sato, The Effect of $NaNO_3$ Concentration on Diffusions of C, Cl and I in Compacted Bentonite and Tuff, JAERI-Conf 2004-011 pp.157-158 (2004)

[18] H. Kita, T. Iwai and S. Nakashima, Diffusion Coefficient Measurement of an Ion in Pore Water of Granite and Tuff, Journal of the Japan Society of Engineering Geology, 30-2, pp.26-32 (1989)

[19] T. Kosaka, S. Sato, H. Furuya, S. Araya and K. Matsuo, Diffusion Behavior of Uranium in a Rock Block, 1984 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, G82 (1984)

[20] S. Mukai, H. Kitao and S. Kataoka, Advection Diffusion Experiment Using I, Se and Cs in Fractured Rocks, 1998 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, M25, p.842 (1998)

[21] K. Nishiyama, S. Nakashima, R. Tada and T. Uchida, Diffusion of an Ion in Rock Pore Water and Its Relation to Pore Characteristics, Mining Geology, 40 (5), pp.323-336 (1990)

[22] K. Ota and H. Yoshida, Influence of Microscopic Heterogeneity on Diffusion for Sedimentary Rocks, Proceedings of an NEA/SKI Symposium, Paris, France, 11-14, October, 1994, pp.237-243 (1994)

[23] H. Sato, T. Shibutani and M. Yui, Experimental and Modelling Studies on Diffusion of Cs, Ni and Sm in Granodiorite, Basalt and Mudstone, Journal of Contaminant Hydrology, 26, pp.119-133, Elsevier Science B.V. (1997)

[24] H. Sato, PNC Technical Report "Report of Information Exchange Meeting on the Performance Assessment Research", PNC TN1410 91-079, pp.275 -286, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (1991)

[25] H. Sato, Through-Diffusion Experiments on NaCl through Tuff -Measurement of Tortuosity-, PNC Technical Report, PNC TN8410 96-111, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (1996)

[26] H. Sato, Matrix diffusion of simple cations, anions, and neutral species in fractured crystalline rocks, Nuclear technology vol.127 p.199 (1999)

[27] M. Shimo, H. Yamamoto and S. Kumamoto, Study on flow and mass transport through fractured soft sedimentary rocks, JNC TJ8400 2003-028 (2003)

[28] Y. Tachi, T. Shibutani, H. Sato and M. Yui, Sorption and Diffusion Behabior of Selenium in Tuff, Journal of Contaminant Hydrology 35, pp.77-89 (1998)

[29] M. Tsukamoto and T. Ohe, Diffusion of Radioactive Cesium into Granitic Core Sample, 1988 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, J45, p.169 (1988)

[30] T. Yamaguchi and S. Nakayama, Effect of Sorption on Diffusivity in Micropores, 1997 Annual Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, L10, p.559 (1997)

[31] T. Yamaguchi, T. Sakamoto and M. Senoo, Consideration on Effective Diffusivity of Strontium in Granite, Journal of Nuclear Science and Technology, 30 (8), pp.796-803, the Atomic Energy Society of Japan (1993)

[32] T. Yamaguchi, Y. Sakamoto, S. Nakayama and Vandergraaf, T.T, Effective Diffusivity of the Uranyl Ion in a Granite from Inada, Ibaraki, Japan, Journal of Contaminant Hydrology, 26, pp.109-117, Elsevier Science B. V. (1997)

[33] T. Yamaguchi, S. Nakayama and M. Saito, Np and Pu Diffusion Experiments in Granite under Antoxic Conditions, 1998 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, M17, p.834 (1998)

[34] T. Yamaguchi and S. Nakayama, Present Status of the Study on Radionuclide Diffusion in Barrier

Materials, JAERI-Conf 2002-004, pp.325-332 (2002)

[35] A. Cui, Z. Fan, J. Zhang, C. Gu, M. Mukai, T. Maeda, J. Matsumoto, T. Tanaka and H. Ogawa, Diffusion coefficient test of ^{237}Np in bentonite backfill materials, JAERI-Conf 2002-004 pp.621-626 (2002)

[36] H. Furuya, Progress reports of the Oarai Branch IMR, Tohoku University Journal code:X0416A ISSN:0912-8808 Vol.15th; pp.6-10 (1999)

[37] K. Idemitsu, H. Furuya and Y. Inagaki, Diffusion of corrosion products of iron in compacted bentonite, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.294. pp.467-474 (1993)

[38] K. Idemitsu, H. Furuya and Y. Inagaki, Diffusion of Uranium in Compacted Bentonite in the Presence of Carbon Steel, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.333, pp.939-946 (1994)

[39] K. Idemitsu, Y. Tachi, H. Furuya, Y. Inagaki and T. Arima, Diffusion of Uranium in Compacted Bentonites in the Reducing Condition with Corrosion Products of Iron, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.412, pp.683-690 (1996)

[40] K. Idemitsu, Y. Tachi, H. Furuya, Y. Inagaki and T. Arima, 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)

[41] K. Idemitsu, X. Xia, T. Ichishima, H. Furuya, Y. Inagaki and T. Arima, 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)

[42] Y. Iida, H. Taki, T. Yamaguchi, T. Tanaka, K. Negishi and S. Nakayama, Data Acquisition on Migration of Radionuclides under Deep Geological Environments, JAERI-Conf 2005-007, pp.230-235 (2005)

[43] T. Ishidera, S. Miyamoto and H. Sato, The Effect of Silica Sand Content and NaNO3 on Diffusion of CO32-, Cl- and I-in Compacted Bentonite , JNC Technical Review No.25 pp.85-93 (2004)

[44] T. Ishidera, S. Miyamoto and H. Sato, The Effect of Silica Sand Content on Diffusion of CO_3^{2-}, Cl^- and I^- ions in Compacted Bentonite, JAERI-Conf 2005-007, pp.264-269 (2005)

[45] T. Ishidera, S. Miyamoto and H. Sato, Effect of Sodium Nitrate on the Diffusion of Cl^- and I^- in Compacted Bentonite, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 45, No. 7, pp. 610–616 (2008)

[46] H. Kato, M. Muroi, N. Yamada, H. Ishida and H. Sato, Estimation of Effective Diffusivity in Compacted Bentonite, Mat, Res, Soc, Symp. Proc. Vol. 353. pp.277-284 (1995)

[47] H. Kato, T. Nakazawa, S. Ueta and T. Yato, Measurements of effective diffusivities of tritiated water in sand-mixed bentonite, ASME 1999 (1999)

[48] H. Kato, T. Nakazawa, S. Ueta and M. Shibata, Apparent Diffusion Coefficients of Uranium, Neptunium and Technetium in Compacted Bentonite under Reducing Conditions, JNC TN8400 99-069 (1999)

[49] H. Kato, T. Nakazawa, S. Ueta, M. Muroi, I. Yasutomi, H. Fujihara, Effective diffusivities of iodine, chlorine and carbon in bentonie buffer material., MRSXXII Vol.556, pp.687-694 (1999)

[50] N. Kozai, K. Inada, T. Kozaki, S. Sato, H. Ohashi and T. Banba, Apparent diffusion coefficients and chemical species of neptunium(V) in compacted Na-montmorillonite, Journal of Contaminant Hydrology, 47, pp.149-158 (2001)

[51] T. Kozaki, Hiroki Sato, A. Fujishima, S. Sato and H. Ohashi, Activation Energy for Diffusion of Cesium in Compacted Sodium Montmorillonite, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 33, No. 6, pp. 522-524 (1996)

[52] T. Kozaki, H.Sato, A.Fujishima, N.Saito, S.Sato and H.Ohashi, Effect of Dry Density on Activation Energy for Diffusion of Strontium in Compacted Sodium Montmorillonite, Mat.Res. Soc. Symp. Proc. Vol465, pp.893-900 (1997)

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

[54] T. Kozaki, Hiroki Sato, S. Sato and H. Ohashi, Diffusion mechanism of cesium ions in compacted montmorillonite, Engineering Geology, 54, pp.223-230 (1999)

[55] T. Kozaki, K. Inada, S. Sato and H. Ohashi, Diffusion mechanism of chloride ions in sodium montmorillonite, Journal of Contaminant Hydrology 47, pp.159–170 (2001)

[56] T. Kozaki, Y. Adachi, K. Inada, S. Sato and H. Ohashi, Diffusion Behavior of Ca^{2+} Ions in Compacted Na-Montmorillonite, Materials Research Society Symposium Proceedings Volume 663, pp. 629-635 (2001)

[57] T. Kozaki and S. Sato, Effects of repository environment on diffusion behavior of radionuclides in buffer materials), JNC TJ 8400 2003-075(in japanese) (2003)

[58] T. Kozaki, A. Fujishima , N. Saito, S. Sato and H. Ohashi, Effects of dry density and exchangeable cations on the diffusion process of sodium ions in compacted montmorilloniteEngineering Geology 81, pp. 246-254 (2005)

[59] T. Kozaki, J. Liu and S. Sato, Diffusion mechanism of sodium ions in compacted montmorillonite under different NaCl concentration, Physics and Chemistry of the Earth 33 pp. 957–961 (2008)

[60] Y. Kuroda, K. Idemitsu, H. Furuya, Y. Inagaki and T. Arima, Diffusion of Technetium in Compacted Bentonites in the Reducing Condition with Corrosion Products of Iron, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 465, pp.909-916 (1997)

[61] J. Liu, H. Yamada, T. Kozaki, S. Sato and H. Ohashi, Effect of silica sand on activation energy for diffusion of sodium ions in montmorillonite and silica sand mixture, Journal of Contaminant Hydrology 61, pp.85-93 (2003)

[62] J. Liu, T. Kozaki, Y. Horiuchi and S. Sato, Microstructure of montmorillonite/silica sand mixture and its effects on the diffusion of strontium ions, Applied Clay Science 23, pp. 89-95 (2003)

[63] M. Mihara, The comparison concerned with hydraulic conductivities and effective diffusion coefficients for nuclides between Na and Ca bentonite, JNC Technical Review No.6 2000.3 pp.61-68 (ISSN 1344-4239) (2000)

[64] T. Mine, M. Mihara and Hiroshige Sato, Distribution coefficients of radio-elements on compacted bentonite under cementitious conditions, JNC TN8430 99-012 (1999) (in Japanese)

[65] C. Oda, T. Ikeda and M. Shibata, Experimental Studies for Sorption behavior of Tin on Bentonite and Rocks, and Diffusion behavior of Tin in Compacted Bentonite, JNC TN8400 99-073 (1999)

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

[67] H. Sato and S. Suzuki, Fundamental study on the effect of an orientation of clay particles on diffusion pathway in compacted bentonite, Applied Clay Science 23, pp.51-60 (2003)

[68] H. Sato, T. Ashida, Y. Kohara, M. Yui and N. Sasaki, Effect of Dry Density on Diffusion of Some Radionuclides in Compacted Sodium Bentonite, Journal of Nuclear Science and Technology, 29[9], pp.873-882 (1992)

[69] H. Sato, T. Ashida, Y. Kohara and M. Yui, Study on Retardation Mechanism of H-3, Tc-99, Cs-137,

Np-237 and Am-241 in Compacted Sodium Bentonite, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 294, pp.403-408 (1993)

[70] H. Sato, M. Yui and H. Yoshikawa, Diffusion Behaviour for Se and Zr in Sodium Bentonite, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 353, pp.269-276 (1995)

[71] H. Sato and M. Yui, Diffusion of Ni in Compacted Sodium Bentonite, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 34, No.3 pp.334-336 (1997)

[72] H. Sato and S. Miyamoto, A study on Diffusion and Migration of Lead in Compacted Bentonite, JNC TN8400 2001-018 (2001)

[73] H. Sato and S. Miyamoto, The effects of silica sand content and temperatures on diffusion of selenium in compacted bentonite under reducing conditions, JAERI-Conf 2002-004, pp.675-682 (2002)

[74] H. Sato, Diffusion behaviour of Se(II) and Sm(III) in Compacted Sodium Bentonite, Radiochim. Acta Vol.82, pp.173-178 (1998)

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

[76] H. Sato, Measurements of Apparent Diffusion Coefficients (D_a) for Cs(I), Ni(II) and Se(IV) in Bentonite with Silica Sand, JNC TN8400 99-060 (1999)

[77] H. Sato, Acquisitions of effective diffusion coefficients (D_e) for Ni(II), Am(III), Sm(III) and Se(IV) in Bentonite by Through-Diffusion Method, JNC TN8400 99-062 (1998)

[78] H. Sato, Effects of the orientation of smectite particles and ionic strength on diffusion and activation enthalpies of I^- and Cs^+ ions in compacted Smectite, Applied Clay Science 29, pp.267-281 (2005)

[79] S. Suzuki, H. Sato and Y. Tachi, A Technical Problem in the Through-Diffusion Experiments for Compacted Bentonite, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol.40, No.9, pp.698-701 (2003)

[80] S. Suzuki, H. Sato, T. Ishidera and N. Fujii, Study on anisotropy of effective diffusion coefficient and activation energy for deutrated water in compacted sodium bentonite, Journal of Contaminant Hydrology 68, pp.23-37 (2004)

[81] S. Suzuki, M. Haginuma and K. Suzuki, Study of Sorption and Diffusion of ^{137}Cs in compacted Bentonite Saturated with Saline Water at ^{60}C, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 44, No. 1, pp.81-89 (2007)

[82] S. Suzuki, Study on nuclide diffusion process in engineered barrier, research briefing report of doctoral research fellow, pp.64-74 (2001)

[83] Y. Tachi, T. Shibutani, H. Sato and M. Yui, Comparison of Actinides Solubilities in Compacted Bentonites between Diffusion Measurements and Thermodynamic Model, PNC TN8410 97-233 (1997)

[84] Y. Tachi, Y. Kohara, N. Uchidate and T. Shibutani, Diffusion Behavior of Pu and Am in Compacted Bentonite, JNC Technical Report, JNC TN8400 99-089 (1999)

[85] Y. Tachi, T. Shibutani, H. Sato and M. Shibata, Sorption and Diffusion Behavior of Palladium in Bentonite, Granodiorite and Tuff. JNC TN8400 99-088 (1999)

[86] Y. Tachi, T. Shibutani, H. Sato and M. Yui, Experimental and modeling studies on sorption and diffusion of Radium in bentonite., Journal of contaminant hydrology 47, pp.171-186 (2001)

[87] M. Takazawa, K. Negishi, Y. Sakamoto, M. Akai, T. Yamaguchi, Y. Iida, T. Tanaka and S. Nakayama, Experimental and modeling study to predict long-term alteration of bentonite buffer materials with alkaline

Groundwater, JAERI-Conf 2005-007, pp.236-241 (2005)

[88] M. Tsukamoto, T. Ohe and T. Fujita, Diffusion of Neptumnium(V) in Loosely Compacted Sodium Bentonite, Radiochimica Acta, 66/67, pp.397-403 (1994)

[89] T. Yamaguchi and S. Nakayama, Data Acquisition for Predicting Radionuclide Migration under Deep Geological Environments, JAERI-Conf 2003-018, pp.115-116 (2003)

[90] T. Yamaguchi, N. Minase, Y. Iida, T. Tadao and S. Nakayama, Evaluation of uncertainty associated with parameters for long-term safety assessments of geological disposal, JAERI-Conf 2005-007 (2005)

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

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

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，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	キログラム毎立法メートル	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。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

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		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	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
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	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
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]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	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ヒーレントではない。
(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及びsrが用いられるが、習慣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)測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。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎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	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎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	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ sA$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	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	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

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}	ゼプト	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	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L，l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
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、SI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	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

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
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
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
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	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	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}\ J$
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St=1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb=1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal=1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G=1Mx\ cm^{-2}=10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(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
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
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=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	$1\ \mu=1\mu m=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています