

TRU廃棄物処分システムの安全評価における
核種移行データセット

Radio-nuclide Migration Datasets (RAMDA) for the Safety Assessment
of TRU Waste Repositories in Japan

三原 守弘

Morihiro MIHARA

地層処分研究開発部門

TRU廃棄物処分研究グループ

TRU Waste Disposal Research Group

Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。

本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。

なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4

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

電話029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構内

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 +81-29-282-5901

TRU 廃棄物処分システムの安全評価における核種移行データセット
- RAMDA : Radio-nuclide Migration Datasets -

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
三原 守弘

(2006年2月3日 受理)

核燃料サイクル開発機構及び電気事業連合会は、原子力発電所から発生する使用済み燃料の再処理の過程やウラン及びプルトニウム混合酸化物燃料の加工において発生する超ウラン元素を含む低レベルの放射性廃棄物(以下、「TRU 廃棄物」)の処分の事業化及び制度化に資するために TRU 廃棄物処分技術検討書を公開した。その報告書において、TRU 廃棄物の地層処分システムの安全評価が行われている。安全評価における核種移行解析に用いたパラメータについては、核種移行データセット (RAMDA : Radio-nuclide Migration Datasets) として報告されている。

本報告書は、RAMDA の解説を加えるとともに、酸化性環境条件についてもデータセットして示したものである。RAMDA には、TRU 廃棄物の処分システムを対象に、以下の核種移行パラメータを対象にして記載されている。

- 放射性元素の溶解度
- 放射性元素の人工バリア中の実効拡散係数
- 放射性元素の人工バリア及び天然バリアに対する収着分配係数

Radio-nuclide Migration Datasets(RAMDA) for the Safety Assessment
of TRU Waste Repositories in Japan

Morihiro MIHARA

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

(Received February 3, 2006)

The Federation of Electric Power Companies (FEPC) and the Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) published a technical report on the safety assessment of TRU waste repositories last September in order to promote the establishment of the regulatory framework and an implementation body in Japan. TRU waste is being generated in a reprocessing plant and a fabrication plant of mixed oxide fuel (UO₂ and PuO₂) for the nuclear power plant. It is categorized as low-level radioactive waste in Japan, however it contains long half-life radio-nuclides such as C-14, I-129, Pu-239 and Np-237. In the technical report, the nuclide migration analyses were performed for the safety assessment of TRU waste repository. RAMDA (Radio-nuclide Migration Datasets) was used in these analyses.

In this report, the explanation of RAMDA is described. In addition, the datasets used for the oxidized condition also are reported. The following datasets are shown.

- The solubilities of radio-nuclides
- The effective diffusion coefficients of radio-nuclides
- The distribution coefficients of radio-nuclides on engineered and natural barriers

Keywords: TRU Waste, Radio-nuclide, Migration, Dataset, Solubility, Diffusion Coefficient, Distribution Coefficient

目 次

1. 緒言.....	1
2. 前提条件.....	1
2.1. 地層処分システム概念.....	1
2.2. RAMDA を対象としたパラメータ.....	2
2.3. 想定した核種移行媒体.....	2
2.4. 地下水.....	3
2.5. 元素.....	4
2.6. 処分施設における化学的条件.....	4
3. 溶解度.....	6
3.1. 解析手順.....	6
3.2. 処分施設内の地下水組成の計算結果.....	6
3.3. 溶解度のデータセット.....	7
4. 実効拡散係数.....	13
4.1. 実効拡散係数の定義.....	13
4.2. セメントモルタル.....	13
4.3. 圧縮成型ベントナイト.....	14
5. 収着データセットにおける化学類似性の考え方.....	17
6. セメントモルタルに対する収着分配係数.....	18
6.1. データの選定.....	18
6.2. 収着分配係数のデータセット.....	18
7. 圧縮成型ベントナイトに対する収着分配係数.....	25
7.1. データの選定.....	25
7.2. 見かけの拡散係数の選定と収着分配係数の算出.....	25
7.3. 収着分配係数のデータセット.....	31
8. 地質媒体に対する収着分配係数.....	33
8.1. データの選定.....	33
8.2. 収着分配係数のデータセット.....	33
9. 酸化性条件でのデータセット.....	35
9.1 溶解度.....	35
9.2 実効拡散係数.....	35
9.3 収着分配係数.....	35
10. 結言.....	36
参考文献.....	36
Appendix A セメントペースト硬化体に対する核種の収着分配測定結果.....	39
Appendix B 圧縮成型ベントナイトに対する核種の見かけの拡散係数測定結果.....	45
Appendix C 酸化性条件におけるセメント系材料に対する元素の収着分配係数.....	50

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Presupposition	1
2.1. Concept of disposal system.....	1
2.2. Parameters of RAMDA.....	2
2.3. Nuclide migration mediums.....	2
2.4. Groundwater	3
2.5. Elements	4
2.6. Chemical condition.....	4
3. Solubility	6
3.1. Procedure of solubility calculation.....	6
3.2. Calculated results of groundwater compositions.....	6
3.3. Solubility datasets.....	7
4. Effective diffusion coefficient	13
4.1. Definition of effective diffusion coefficient.....	13
4.2. Cement mortar	13
4.3. Compacted bentonite.....	14
5. Chemical analogue for sorption dataset	17
6. Sorption data of cement mortar	18
6.1. Data selection	18
6.2. Sorption datasets	18
7. Sorption data of compacted bentonite	25
7.1. Data selection	25
7.2. Selected D_a values and sorption data calculated from D_a	25
7.3. Sorption datasets	31
8. Sorption data of rocks	33
8.1. Data selection	33
8.2. Sorption datasets	33
9. Datasets under oxidizing condition	35
9.1 Solubility datasets	35
9.2 Effective diffusion coefficient	35
9.3 Sorption datasets	35
10. Conclusion	36
Reference	36
Appendix A Experimental results of sorption experiments of cement paste.....	39
Appendix B Measurement of D_a values of compacted bentonite	45
Appendix C Sorption data of cementitious materials under oxidizing condition.	50

表 目 次

表 - 1 セメントモルタルの配合(1m ³ あたりの各材料量)	3
表 - 2 地下水の化学組成(mol/dm ³)	3
表 - 3 処分施設における地下水の解析結果(mol/dm ³)	7
表 - 4 降水系地下水における放射性元素の溶解度のデータセットと支配溶存化学種 [*] (mol/dm ³)	8
表 - 5 海水系地下水における放射性元素の溶解度のデータセットと支配溶存化学種 [*] (mol/dm ³)	9
表 - 6 収着分配係数の設定における元素の化学的類似性の考え方	17
表 - 7 収着試験条件のまとめ	18
表 - 8 セメントモルタルに対する収着分配係数のデータセット(m ³ /kg)	19
表 - 9 非定常拡散試験の条件のまとめ	26
表 - 10 選定された見かけの拡散係数のまとめ(m ² /s)	30
表 - 11 計算された収着分配係数(m ³ /kg)	30
表 - 12 圧縮成型ベントナイトに対する収着分配係数のデータセット(m ³ /kg)	31
表 - 13 地質媒体に対する収着分配係数(m ³ /kg)	33
表 - 14 酸化性地下水における放射性元素の溶解度のデータセットと支配溶存化学種 [*] (mol/dm ³)	35
表 - 15 酸化性条件における収着分配係数のデータセット(単位:m ³ /kg)	36

図 目 次

図 - 1 TRU 廃棄物の地層処分システム概念(グループ1 廃棄体対象)	1
図 - 2 処分施設における地下水の pH 変化	4
図 - 3 セメントモルタルの間隙率とトリチウムの実効拡散係数との関係	14
図 - 4 クニゲル V1 の間隙率とトリチウムの実効拡散係数との関係	15
図 - 5 ベントナイトの間隙率とトリチウムの実効拡散係数との関係	16

LIST OF TABLE

Table - 1	Mix proportion of cement mortar	3
Table - 2	Chemical composition of groundwater	3
Table - 3	Calculated results of groundwater in repository	7
Table - 4	Solubility dataset of fresh-type groundwater	8
Table - 5	Solubility dataset of sea-type groundwater	9
Table - 6	Chemical analogue for sorption dataset	17
Table - 7	Sorption experimental conditions	18
Table - 8	Sorption dataset of cement mortar	19
Table - 9	In-diffusion experimental conditions	26
Table - 10	Selected Da	30
Table - 11	Calculated sorption data	30
Table - 12	Sorption dataset of compacted bentonite	31
Table - 13	Sorption dataset of rocks	33
Table - 14	Solubility dataset of oxidizing groundwater	35
Table - 15	Sorption dataset of oxidizing condition	36

LIST OF FIGURE

Figure - 1	Concept of TRU waste disposal system (Group1 waste)	1
Figure - 2	Change of groundwater in repository	4
Figure - 3	Relationship between porosity and diffusion coefficient of HTO in cement mortar	14
Figure - 4	Relationship between porosity and diffusion coefficient of HTO in KunigelV1	15
Figure - 5	Relationship between porosity and diffusion coefficient of HTO in bentonite	16

1. 緒言

核燃料サイクル開発機構及び電気事業連合会は、原子力発電所から発生する使用済み燃料の再処理の過程やウラン及びプルトニウム混合酸化物燃料の加工において発生する超ウラン元素を含む低レベルの放射性廃棄物（以下、「TRU 廃棄物」と言う。）の処分の事業化及び制度化に資するために TRU 廃棄物処分技術検討書（以下、「第 2 次 TRU レポート」と言う。）を公開した¹⁾。その報告書において、TRU 廃棄物の地層処分システムの安全評価が行われている。安全評価における核種移行解析に用いたパラメータについては、核種移行データセット（RAMDA : Radio-nuclide Migration Datasets（以下、「RAMDA」と言う。）として報告されている²⁾。

本報告は、Mihara and Sasaki の報告²⁾に解説を加えるとともに、酸化性環境条件についてもデータセットして示したものである。

2. 前提条件

2.1. 地層処分システム概念

第 2 次 TRU レポートで検討された図 - 1 に示すレファレンスの地層処分概念を基本とする。この処分概念は、第 2 次 TRU レポートで TRU 廃棄物の特徴ごとに分類されたグループ 1（I-129 を多量に含む廃棄物）の処分概念である。主に処分施設を構成するものは、廃棄物を定置するための充填材および構造材、核種の移行遅延やコロイドなどのろ過機能を期待するために設置される緩衝材がある。

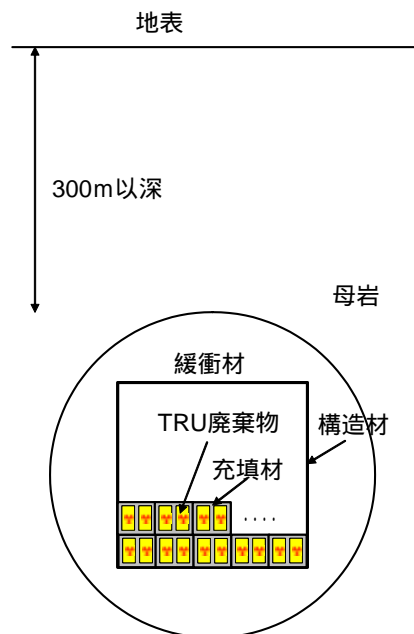


図 - 1 TRU 廃棄物の地層処分システム概念（グループ 1 廃棄体対象）

2.2. RAMDAで対象としたパラメータ

放射性廃棄物処分における核種移行解析モデルは、移行媒体中の核種の濃度勾配による移行(分子拡散)及び地下水の流れによる移行(移流・分散)であり、媒体への核種の収着が考慮されている。この基本モデルを用いて、数々の核種移行解析コードが開発・整備されている³⁾。解析に用いる主な核種に依存するパラメータとして、核種の濃度を決定する溶解度(C^*)、分子拡散を表す実効拡散係数(D_e)及び媒体への核種の収着を表す収着分配係数(K_d)がある。RAMDAにおいては、安全評価における核種移行解析に用いることを念頭においているため、安全側の評価が行えるようなデータ設定^aが行われ、これらのパラメータの記述が行われている。

- 溶解度(C^*)：一般にある物質が他の物質に溶解する限度をいう。ここでは、前者が核種となり、後者が処分施設に用いられる核種の移行媒体の間隙水となる。核種が異なっても同じ元素であれば、溶解度は等しいため、元素毎に値を示す。溶解度の単位は、 mol/dm^3 である。
- 実効拡散係数(D_e)：核種の濃度勾配による媒体中の移行量を表す値であり、単位面積あたり、単位時間あたりの移行量は、濃度勾配と比例関係(フィックの第1法則)であるとして示した比例係数のことである。実効拡散係数も同じ元素であれば、値は等しいと想定されるため、元素毎に値を示す。実効拡散係数の単位は、 m^2/s であり、有効拡散係数とも言われる。
- 収着分配係数(K_d)：核種の媒体の間隙水中の濃度と媒体に収着した核種濃度との比である。前者の単位を mol/m^3 、後者の単位を mol/kg とすると、収着分配係数の単位は m^3/kg となる。分配係数も同じ元素であれば、値は等しいと想定されるため、元素毎に値を設定する。

2.3. 想定した核種移行媒体

既に図-1において示したように処分施設に用いられる材料として、TRU廃棄物を定置するための充填材、核種の移行遅延やコロイドなどのろ過機能を期待するために設置される緩衝材について核種の移行媒体と想定する。レファレンスの処分概念においては、構造材には、鋼材料が検討され、その肉厚は厚くないため、核種の移行媒体とは考えない。さらには、周辺の母岩も核種の移行媒体であり、以下にこれら媒体の詳細について示す。

- 充填材：普通ポルトランドセメントを用いたモルタル(OPC)を想定する。表-1にセメントモルタルの配合を示す。

a：溶解度及び実効拡散係数については計算値や実測値に基づき大きめの値を、収着分配係数については、小さめの値を設定している。このため、これらの設定値は、学術的観点からの値と区別して議論する必要がある。例えば、データが存在しない核種については、溶解度を考慮しない。すなわち可溶性として設定が行われているといった値の設定がされている。

表 - 1 セメントモルタルの配合(1m³あたりの各材料量)

水セメント比(%)	セメント(kg)	水(kg)	砂(kg)
55	483	266	1,449

表-1 に基づけば間隙率は 0.19 で、セメントペーストのモルタルに占める割合は 28wt%^bとなる。

- 緩衝材：Na 型ベントナイト（国産のベントナイト（商品名：クニゲル V1 相当））にケイ砂を 30wt%混合し、乾燥密度 1.6Mg/m³程度に圧縮成型したものであり、間隙率は 0.40 となる。Na 型ベントナイトのスメクタイト含有率は 48wt%とする。この緩衝材の仕様は、高レベル放射性廃棄物処分研究開発第 2 次とりまとめ（以下、「H12 レポート」と言う。）⁴⁾と同じである。
- 母岩：H12 レポートと同様に花崗岩，玄武岩，泥岩・凝灰岩，砂岩の 4 種類を想定する。

2.4. 地下水

降水系高 pH 型地下水(FRHP) pH8.46, pe=-4.76 と海水系高 pH 型地下水(SRHP), pH7.95, pe=-5.14 を想定する。これらの地下水の組成は、H12 レポートに示されたものと同じである。表-2 に各々の地下水の化学組成を示す。

表 - 2 地下水の化学組成 (mol/dm³)

	FRHP	SRHP
pH	8.5	8.0
pe	-4.8	-5.1
Na	3.6E-03	6.2E-01
Ca	1.1E-04	3.3E-04
K	6.2E-05	1.1E-02
Mg	5.0E-05	2.5E-04
Fe	9.7E-10	3.9E-08
Al	3.4E-07	3.2E-09
C	3.5E-03	3.5E-02
S	1.1E-04	3.0E-02
B	2.9E-04	1.7E-03
P	2.9E-06	2.6E-07
F	5.4E-05	1.0E-04
N	2.3E-05	5.2E-03
Cl	1.5E-05	5.9E-01
Si	3.4E-04	3.0E-04
Br	-	5.3E-04
I	-	2.0E-04

b：セメントが完全に水和すると重量が1.2倍になるものと仮定して算出。

2.5. 元素

処分の安全評価に重要な以下に示す元素を対象にしてデータセットを作成した。

C(無機), C(有機), Cl, Co, Ca Ni, Se, Sr, Zr, Nb, Mo, Tc, Pd, Sn, I, Cs, Sm, Pb, Ra, Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm

2.6. 処分施設における化学的条件

核種移行データセットを作成するにあたっては、核種の溶存化学種に大きく影響を及ぼす処分施設の化学的条件を明確にしておく必要がある。図 - 1 で示したように処分施設には、多量のセメントモルタルを用いることを想定しており、モルタルと地下水の反応によって処分施設の化学的条件は決定される。セメントペースト硬化体の浸出試験結果⁵⁾を基に地下水の pH に着目して、その変化を示すと図- 2 ようになる。

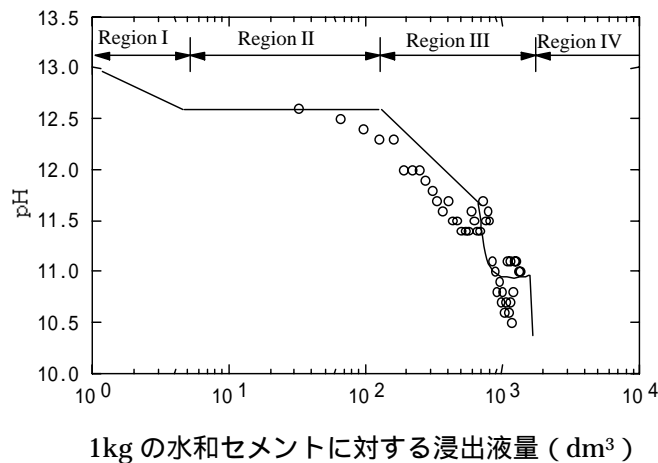


図 - 2 処分施設における地下水の pH 変化
(データについては、三原ら⁵⁾に基づく)

この地下水の pH の変化について、Bradbury and Sarott⁶⁾ は、セメント系材料に対する核種の収着分配係数データセットを整備しており、本検討においてもこの考え方を踏襲するものとする。これらの各々の Region について記載すると以下のようである。

- Region I

pH は、13.3 ~ 12.5 の範囲である。地下水の組成を支配するのは、Na 及び K であり、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が飽和溶解している。主たるセメント水和物の固相は、C-S-H ゲル及び水酸化カルシウムであり、それらの Ca/Si モル比は 2.5 以上である。

- Region II

Region I から Na 及び K が溶出した条件が Region II である。固相の条件は、Region II と同じであり、pH は約 12.5 となる。

- RegionIII
RegionII から $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が溶出した条件が RegionIII である。この時の水酸化カルシウムで
あり, それらの C/S モル比をトバモライトと同じ 0.833 と定義する。pH は 11 ~ 12.5 となる。
- RegionIV
初期の地下水組成と同じである。セメント水和物は全て溶出したものとする。
本章で示した化学条件を考慮にいれつつ, 以下に核種移行データセットについて述べる。

3. 溶解度

放射性核種の溶解度を地球化学平衡計算に基づき設定した。計算には、PHREEQC(version2.2) コード⁷⁾を用いた。活用係数の補正については、Davies 式を用いたが、イオン強度が 0.3mol/dm^3 を超える場合には、 0.3mol/dm^3 での値を使用して解析を行った。解析にあたって使用した熱力学データは、JNC-TDB(version 011213q0) (<http://migrationdb.jnc.go.jp/>)であった。しかしながら、本熱力学データに整備されていない Co, Mo, Ra, Ac 及び Cm については、実験値や化学アナログを考慮して設定した。

3.1. 解析手順

以下に示す手順により、図 - 2 で示した各 Region の地下水組成を決定し、核種溶解度計算を行った。

- RegionI

この領域においては、C-S-H ゲル、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、カルサイト及びエトリンガイトを固相として設定した。JNC-TDB は、これらの水和物を含んでいないため、C-S-H ゲル及び水酸化カルシウムについては、杉山ら⁸⁾が提案するモデルを用いた。この時の C/S モル比を 2.61 とした。カルサイトとエトリンガイトは、Glasser et al.の報告値⁹⁾を用いた。Na 及び K の濃度をセメント系材料の間隙水の抽出試験より 0.1mol/dm^3 と設定した¹⁰⁾。

- RegionII

上述した RegionI から Na 及び K を除いた条件でモデル化を行った。

- RegionIII

RegionII の条件からエトリンガイトを除き、C-S-H ゲル及び $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の Ca/Si モル比をその固溶体モデルの端成分であるトバモライトの値 0.833 として設定した。

- RegionIV

降水系 (FRHP) 及び海水系地下水 (SRHP) にカルサイトを設定した。

3.2. 処分施設内の地下水組成の計算結果

3.1 で述べた条件において、各領域の地下水の組成の計算結果を表-3 に示す。

表 - 3 処分施設における地下水の解析結果(mol/dm³)

	FRHP				SRHP			
	RegionI	RegionII	RegionIII	RegionIV	RegionI	RegionII	RegionIII	RegionIV
pH	13.2	12.5	11.4	8.5	13.1	12.5	11.6	8.0
Na	1.0E-01	3.6E-03	3.6E-03	3.6E-03	7.1E-01	6.1E-01	6.2E-01	6.2E-01
Ca	2.4E-03	2.1E-02	6.8E-04	1.2E-04	4.2E-03	3.9E-02	7.4E-04	4.3E-04
K	1.0E-01	6.2E-05	6.2E-05	6.2E-05	1.1E-01	1.1E-02	1.1E-02	1.1E-02
Mg	5.0E-05	5.0E-05	5.0E-05	5.0E-05	2.5E-04	2.5E-04	2.5E-04	2.5E-04
Fe	9.7E-10	9.7E-10	9.7E-10	9.7E-10	3.9E-08	3.9E-08	3.9E-08	3.9E-08
Al	7.0E-05	2.1E-07	3.4E-07	3.4E-07	1.2E-02	1.2E-02	3.2E-09	3.2E-09
C	7.6E-05	6.8E-06	1.9E-05	3.6E-03	1.3E-04	2.1E-05	1.9E-02	3.5E-02
S	2.2E-04	1.1E-04	1.1E-04	1.1E-04	4.9E-02	4.9E-02	3.0E-02	3.0E-02
B	2.9E-04	2.9E-04	2.9E-04	2.9E-04	1.7E-03	1.7E-03	1.7E-03	1.7E-03
P	2.9E-06	2.9E-06	2.9E-06	2.9E-06	2.6E-07	2.6E-07	2.6E-07	2.6E-07
F	5.4E-05	5.4E-05	5.4E-05	5.4E-05	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-04
N	2.3E-05	2.3E-05	2.3E-05	2.3E-05	5.1E-03	5.1E-03	5.2E-03	5.2E-03
Cl	1.5E-05	1.5E-05	1.5E-05	1.5E-05	5.9E-01	5.9E-01	5.9E-01	5.9E-01
Si	2.1E-03	7.0E-05	1.4E-03	2.8E-05	6.4E-05	1.1E-05	2.2E-03	2.2E-05
Br	-	-	-	-	5.2E-04	5.2E-04	5.3E-04	5.3E-04
I	-	-	-	-	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04

3.3. 溶解度のデータセット

降水系及び海水系地下水における放射性核種（元素）のデータセット及び支配溶存化学種を表-4及び5に示す。計算においては熱力学データが最も整備されている25の条件にて実施した。

これより温度が高い条件においては、溶解度を制限する固相がより結晶質となり、溶解度がより小さくなることが想定されることから、25の評価は、保守側のデータ設定となる。また溶解度を制限する固相については、水酸化物を基本とした。さらに、熱力学データの不確実性を包含するために、計算で得られた値を1あるいは 5×10^n (n: 整数)と大き目の値に丸めて設定した。

表 - 4 降水系地下水における放射性元素の溶解度のデータセットと支配溶存化学種*(mol/dm³)

放射性元素	Region I	Region II	Region III	Region IV
C (無機)	1E-4 CO ₃ ²⁻ , NaCO ₃ ⁻	1E-5 CaCO ₃ , CO ₃ ²⁻	5E-5 CO ₃ ²⁻ , CaCO ₃	5E-3 HCO ₃ ⁻
C (有機)	可溶性	可溶性	可溶性	可溶性
Cl	可溶性 Cl ⁻	可溶性 Cl ⁻	可溶性 Cl ⁻	可溶性 Cl ⁻
Co	5E-4 Co(OH) ₃ ⁻	5E-5 Co(OH) ₃ ⁻	5E-6 Co(OH) ₃ ⁻ , Co(OH) ₂	1E-4 Co ²⁺ , CoCO ₃ (aq)
Ca	5E-3 CaOH ⁺ , Ca ²⁺	5E-2 CaOH ⁺ , Ca ²⁺	1E-3 Ca ²⁺	5E-4 Ca ²⁺
Ni	5E-4 Ni(OH) ₃ ⁻	5E-5 Ni(OH) ₃ ⁻	5E-6 Ni(OH) ₃ ⁻ , Ni(OH) ₂	1E-4 Ni ²⁺ , NiCO ₃ (aq)
Se	5E-6 HSe ⁻	1E-6 HSe ⁻	1E-7 HSe ⁻	5E-9 HSe ⁻
Sr	5E-4 Sr ²⁺ , SrOH ⁺	5E-3 Sr ²⁺ , SrOH ⁺	1E-4 Sr ²⁺	5E-5 Sr ²⁺
Zr	5E-5 Zr(OH) ₅ ⁻	5E-6 Zr(OH) ₅ ⁻	5E-7 Zr(OH) ₅ ⁻	1E-8 Zr(OH) ₄
Nb	5E-2 Nb(OH) ₆ ⁻	1E-2 Nb(OH) ₆ ⁻	1E-3 Nb(OH) ₆ ⁻	1E-6 Nb(OH) ₆ ⁻
Mo	1E-3 MoO ₄ ²⁻	1E-3 MoO ₄ ²⁻	1E-3 MoO ₄ ²⁻	1E-3 MoO ₄ ²⁻ (?)
Tc	1E-6 TcO(OH) ₃ ⁻	5E-7 TcO(OH) ₃ ⁻	5E-8 TcO(OH) ₃ ⁻ , TcO(OH) ₂	5E-9 TcO(OH) ₂
Pd	可溶性	可溶性	可溶性	可溶性
Sn	5E-1 Sn(OH) ₆ ²⁻	1E-1 Sn(OH) ₆ ²⁻	1E-3 Sn(OH) ₆ ²⁻	5E-7 Sn(OH) ₅ ⁻
I	可溶性 I ⁻	可溶性 I ⁻	可溶性 I ⁻	可溶性 I ⁻
Cs	可溶性 Cs ⁺	可溶性 Cs ⁺	可溶性 Cs ⁺	可溶性 Cs ⁺
Sm	1E-10 Sm(OH) ₂ ⁺	5E-10 Sm(OH) ₂ ⁺	5E-9 Sm(OH) ₂ ⁺	5E-9 Sm(CO ₃) ₂ ⁻ , SmCO ₃ ⁺ , Sm(OH) ₂ ⁺
Pb	5E-2 Pb(OH) ₃ ⁻	5E-3 Pb(OH) ₃ ⁻	5E-3 Pb ₃ (OH) ₅ ⁺ , Pb(OH) ₃ ⁺	5E-6 PbCO ₃
Ra	1E-6	1E-6	1E-6	1E-6
Ac	1E-10 Ac(OH) ₂ ⁺	5E-10 Ac(OH) ₂ ⁺	5E-9 Ac(OH) ₂ ⁺	5E-9 Ac(CO ₃) ₂ ⁺ , AcCO ₃ ⁺ , Ac(OH) ₂ ⁺
Th	1E-9 Th(OH) ₄ (aq)	1E-9 Th(OH) ₄ (aq)	1E-9 Th(OH) ₄ , Th(OH) ₃ CO ₃ ⁻	1E-6 Th(OH) ₃ CO ₃ ⁻
Pa	1E-8 PaO(OH) ₃	5E-8 PaO(OH) ₃	5E-8 PaO(OH) ₃	5E-8 PaO(OH) ₃
U	5E-9 U(OH) ₄ (aq)	5E-9 U(OH) ₄ (aq)	5E-9 U(OH) ₄ (aq)	5E-9 U(OH) ₄ , U(OH) ₃ (CO ₃) ²⁻
Np	5E-9 Np(OH) ₄ (aq)	5E-9 Np(OH) ₄ (aq)	5E-9 Np(OH) ₄ (aq)	5E-9 Np(OH) ₄ , Np(OH) ₃ (CO ₃) ²⁻
Pu	1E-10 Pu(OH) ₄ (aq)	1E-10 Pu(OH) ₄ (aq)	1E-10 Pu(OH) ₄ (aq)	5E-9 Pu(CO ₃) ₂ , Pu(OH) ₂ (CO ₃) ₂ ⁻ , PuCO ₃ ³⁺
Am	1E-10 Am(OH) ₂ ⁺	5E-10 Am(OH) ₂ ⁺	5E-9 Am(OH) ₂ ⁺	5E-9 Am(CO ₃) ₂ ⁺ , AmCO ₃ ⁺ , Am(OH) ₂ ⁺
Cm	1E-10 Cm(OH) ₂ ⁺	5E-10 Cm(OH) ₂ ⁺	5E-9 Cm(OH) ₂ ⁺	5E-9 Cm(CO ₃) ₂ ⁺ , CmCO ₃ ⁺ , Cm(OH) ₂ ⁺

*: 溶存支配化学種は 10%以上とした

表 - 5 海水系地下水における放射性元素の溶解度のデータセットと支配溶存化学種*(mol/dm³)

放射性元素	RegionI	RegionII	RegionIII	RegionIV
C (無機)	5E-4 NaCO ₃ , CO ₃ ²⁻	5E-5 CH ₄ , CaCO ₃ , NaCO ₃ ⁻	5E-2 CH ₄	5E-2 CH ₄ , HCO ₃ ⁻
C (有機)	可溶性	可溶性	可溶性	可溶性
Cl	可溶性 Cl ⁻	可溶性 Cl ⁻	可溶性 Cl ⁻	可溶性 Cl ⁻
Co	1E-4 Co(OH) ₃ ⁺	5E-5 Co(OH) ₃ ⁺	5E-6 Co(OH) ₃ ⁺ , Co(OH) ₂	1E-3 Co ²⁺ , CoCO ₃ (aq)
Ca	5E-3 CaOH ⁺ , Ca ²⁺	5E-2 CaOH ⁺ , Ca ²⁺	1E-3 Ca ²⁺	5E-4 Ca ²⁺
Ni	1E-4 Ni(OH) ₃ ⁻	5E-5 Ni(OH) ₃ ⁻	5E-6 Ni(OH) ₃ ⁻ , Ni(OH) ₂	1E-3 Ni ²⁺ , NiCO ₃ (aq)
Se	5E-5 HSe ⁻	5E-5 HSe ⁻	1E-5 HSe ⁻	5E-6 HSe ⁻
Sr	5E-4 Sr ²⁺ , SrOH ⁺	5E-3 Sr ²⁺	1E-4 Sr ²⁺	1E-4 Sr ²⁺
Zr	5E-5 Zr(OH) ₅ ⁻	5E-6 Zr(OH) ₅ ⁻	1E-6 Zr(OH) ₅ ⁻	1E-8 Zr(OH) ₄
Nb	5E-2 Nb(OH) ₆ ⁻	1E-2 Nb(OH) ₆ ⁻	5E-3 Nb(OH) ₆ ⁻	5E-7 Nb(OH) ₆ ⁻
Mo	1E-3 MoO ₄ ²⁻	1E-3 MoO ₄ ²⁻	1E-3 MoO ₄ ²⁻	1E-3 MoO ₄ ²⁻ (?)
Tc	1E-6 TcO(OH) ₃ ⁻	5E-7 TcO(OH) ₃ ⁻	5E-8 TcO(OH) ₃ ⁻ , TcO(OH) ₂	5E-9 TcO(OH) ₂
Pd	可溶性	可溶性	可溶性	可溶性
Sn	5E-1 Sn(OH) ₆ ²⁻	1E-1 Sn(OH) ₆ ²⁻	5E-3 Sn(OH) ₆ ²⁻	1E-7 Sn(OH) ₅ ⁻ , Sn(OH) ₄
I	可溶性 I ⁻	可溶性 I ⁻	可溶性 I ⁻	可溶性 I ⁻
Cs	可溶性 Cs ⁺	可溶性 Cs ⁺	可溶性 Cs ⁺	可溶性 Cs ⁺
Sm	1E-10 Sm(OH) ₂ ⁺	5E-10 Sm(OH) ₂ ⁺	5E-9 Sm(OH) ₂ ⁺	1E-8 Sm(CO ₃) ₂ ⁻ , SmCO ₃ ⁺ , Sm(OH) ₂ ⁺
Pb	5E-2 Pb(OH) ₃ ⁻	1E-2 Pb(OH) ₃ ⁻ , Pb(HS) ₂ , Pb(HS) ₃ ⁻	1E-2 Pb(OH) ₃ ⁻ , Pb(HS) ₂ , Pb(HS) ₃ ⁻	1E-2 Pb(HS) ₂ , Pb(HS) ₃ ⁻
Ra	1E-6	1E-6	1E-6	1E-6
Ac	1E-10 Ac(OH) ₂ ⁺	5E-10 Ac(OH) ₂ ⁺	5E-9 Ac(OH) ₂ ⁺	1E-8 Ac(CO ₃) ₂ ⁻ , AcCO ₃ ⁺ , Ac(OH) ₃
Th	5E-10 Th(OH) ₄ (aq)	1E-9 Th(OH) ₄ (aq)	1E-9 Th(OH) ₄ , Th(OH) ₃ CO ₃ ⁻	5E-6 Th(OH) ₃ CO ₃ ⁻
Pa	1E-8 PaO(OH) ₃	1E-8 PaO(OH) ₃	1E-8 PaO(OH) ₃	1E-8 PaO(OH) ₃
U	5E-9 U(OH) ₄ (aq)	5E-9 U(OH) ₄ (aq)	5E-9 U(OH) ₄ (aq)	1E-8 U(OH) ₃ (CO ₃) ₂ ⁻ , U(OH) ₄
Np	5E-9 Np(OH) ₄ (aq)	5E-9 Np(OH) ₄ (aq)	5E-9 Np(OH) ₄ (aq)	5E-8 Np(OH) ₃ (CO ₃) ₂ ⁻ , Np(OH) ₄
Pu	1E-10 Pu(OH) ₄ (aq)	1E-10 Pu(OH) ₄ (aq)	1E-10 Pu(OH) ₄ (aq)	1E-8 Pu(CO ₃) ₂ ⁻ , PuCO ₃ ⁺ , Pu(CO ₃) ₃
Am	1E-10 Am(OH) ₂ ⁺	5E-10 Am(OH) ₂ ⁺	5E-9 Am(OH) ₂ ⁺	1E-8 Am(CO ₃) ₂ , AmCO ₃ ⁺ , Am(CO ₃) ₃
Cm	1E-10 Cm(OH) ₂ ⁺	5E-10 Cm(OH) ₂ ⁺	5E-9 Cm(OH) ₂ ⁺	1E-8 Cm(CO ₃) ₂ , CmCO ₃ ⁺ , Cm(CO ₃) ₃ ⁺

*: 溶存支配化学種は10%以上とした

- C(無機)

無機炭素は、カルサイトによってその溶解度は支配される。支配溶存化学種は、FRHP で CO_3^{2-} 、 NaCO_3^- 及び $\text{CaCO}_3(\text{aq})$ であり、SRHP では、 CH_4 と有機形態となった。SRHP における収着分配係数については、有機炭素を考慮する必要があることに留意しなければならない。
- C(有機)

有機炭素の化学形態は、複雑である。Yamaguchi et al.¹¹⁾ は使用済みの燃料被覆管（ジルカロイ）から溶出した炭素の化学形態の同定を試みた。しかしながら、有機炭素の濃度は低く測定は困難であったが、炭化水素の可能性があると示唆した。溶解度の設定においては、化学形態が不明であることから可溶性と判断した。
- Cl

塩素は、ハロゲン元素の一つである。可溶性と判断した。
- Co

JNC-TDB は、Co のデータが整備されていない。Ni のデータをアナログとして設定した。支配溶存化学種も Ni の計算結果を参考にした。
- Ca

Ca の濃度は、水酸化カルシウム及び C-S-H ゲルによって支配されると仮定した。両地下水において、 CaOH^+ が支配溶存化学種である。
- Ni

Ni の濃度は、 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ によって支配されると仮定した。高アルカリ溶液においては、 $\text{Ni}(\text{OH})_3^-$ が支配的となる。
- Se

FeSe_2 を溶解度制限固相として仮定した。支配溶存化学種は、 HSe^- となる。
- Sr

SrCO_3 を溶解度制限固相として仮定した。支配溶存化学種は、 Sr^{2+} となる。
- Zr

Zr の濃度は、非晶質の ZrO_2 で支配されるものとした。高アルカリになると Zr の濃度は上昇する。高アルカリ領域では、支配溶存化学種は、 $\text{Zr}(\text{OH})_5^-$ である。
- Nb

Nb の濃度は、 Nb_2O_5 により支配されるものとした。高アルカリ性では、 $0.5\text{mol}/\text{dm}^3$ と Nb の濃度は非常に高い。その時の支配溶存化学種は、 $\text{Nb}(\text{OH})_6^-$ である。
- Mo

JNC-TDB では、Mo の熱力学データが整備されていない。Kindness et al.¹²⁾ が実験によって取得した値¹²⁾ を全ての Region に設定した。Kindness et al. は支配溶存化学種として MoO_4^{2-} を報告している。しかしながら、RegionIV における支配溶存化学種は不明である。
- Tc

Tc の濃度は、 $\text{TcO}_2 \cdot 1.6\text{H}_2\text{O}(\text{s})$ によって支配されるものとした。高アルカリ領域では、 $\text{TcO}(\text{OH})_3^-$ が支配溶存化学種となる。

- Pd

PdO(cr)を溶解度制限固相として仮定した。しかしながら、降水系地下水においては、計算が収束しなかった。海水系地下水においては計算が可能であったが、 10^{-26} mol/dm³以下と非常に小さな値であった。現段階の核種移行解析においては、可溶性として扱うこととする。
- Sn

Snの濃度は、SnO₂によって支配されるものとした。高アルカリ領域においては、Sn(OH)₆²⁻が溶存支配化学種である。
- I

Iは可溶性である。
- Cs

Csは、アルカリ土類金属の一つであり可溶性である。
- Sm

Smの濃度は、高アルカリ領域においては、炭酸イオン濃度が低くなるため Sm(OH)₃(am)によって支配されると仮定した。RegionIVについては、SmOHCO₃(s)を仮定した。高アルカリ領域においては、Sm(OH)₂⁺が支配溶存化学種である。
- Pb

高アルカリ領域では、Pb(OH)₂を溶解度制限固相として仮定し、RegionIVではPbCO₃を溶解度制限固相として設定した。降水系地下水においてはPb(OH)₃⁻が支配溶存化学種であるが、海水系地下水になるとPb(HS)₂が支配溶存化学種となる。
- Ra

実測値¹³⁾に基づきRaの溶解度を 10^{-6} mol/dm³と設定した。支配溶存化学種は、Caと同じとした。
- Ac

JNC-TDBには、Acの熱力学データが整備されていない。化学アナログを考慮してSmのデータを設定した。支配溶存化学種もSmの結果を参照した。
- Th

Thの溶解度制限固相としてThO₂(am)を設定した。高アルカリ領域では、Th(OH)₄(aq)が支配溶存化学種であり、pHが低くなるとTh(OH)₃CO₃⁻が支配溶存化学種となる。
- Pa

Paの濃度は、Pa₂O₅によって支配されると仮定した。全てのRegionにおいて、PaO(OH)₃(aq)が支配溶存化学種となる。
- U

UO₂(am)を溶解度制限固相とし、熱力学データとしてU(IV)のみを使用した。全てのRegionにおいて、Thと同様にU(OH)₄(aq)が支配的な溶存化学種である。
- Np

NpO₂·2H₂Oを溶解度制限固相として設定した。高pH領域においてNp(OH)₄(aq)が支配的な溶存化学種であった。SRHPのRegionIVのみ支配溶存化学種はNp(OH)₃(CO₃)₂⁻であった。

- Pu
Pu の溶解度制限固相として $\text{Pu}(\text{OH})_4(\text{am})$ を設定した。高 pH での支配溶存核種は、 $\text{Pu}(\text{OH})_4(\text{aq})$ であった。RegionIV では、両地下水において $\text{Pu}(\text{CO}_3)_2^-$ が支配溶存化学種であった。
- Am
高 pH 領域では、炭酸の濃度が低いため $\text{Am}(\text{OH})_3$ を溶解度制限固相として設定した。pH の低い RegionIV では、 $\text{AmOHCO}_3(\text{s})$ を設定した。高 pH では、 $\text{Am}(\text{OH})_2^+$ が支配溶存化学種であり、低 pH になると $\text{Am}(\text{CO}_3)_2^-$ が支配溶存化学種となる。
- Cm
JNC-TDB では Cm の熱力学データが整備されていない。化学アナログとして Am のデータを用いた。

4. 実効拡散係数

セメント系材料と圧縮成型ベントナイトに対する実効拡散係数について記載する。まず、最初に実効拡散係数の定義について記述する。

4.1. 実効拡散係数の定義

実効拡散係数を以下のように定義した。

$$\begin{aligned} De &= \varepsilon \frac{\delta}{\tau^2} D^* \\ &= \varepsilon G D^* \end{aligned} \quad \text{eq.1}$$

ここで、

：媒体の間隙率 (-)

：収斂度 (-)

：屈曲率 (-)

D^* : 核種の自由水中の拡散係数 (m^2/s)

G : 形状因子 = δ / τ^2

この式は佐藤の報告¹⁴⁾を参照した。実効拡散係数は間隙率の関数として表現できるものと仮定した。実効拡散係数と間隙率との関係を以下に示す。

$$\begin{aligned} De &= D^* \varepsilon^n \\ &= \varepsilon (\varepsilon^{n-1}) D^* \end{aligned} \quad \text{eq.2}$$

ここで

n : 実験によって定まる定数 (-)

この式より $G = \varepsilon^{n-1}$ となる。

4.2. セメントモルタル

安田らは OPC モルタルに対するトリチウムの実効拡散係数を報告した¹⁵⁾。未通水と通水変質させたセメントモルタルについて拡散試験が実施された。通水変質させたモルタルについては、透水試験によって作製したものである。トリチウムの自由水中での 25 における拡散係数を $2.27 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ ¹⁶⁾ として以下のような実験式を得た。この結果を図-3 に示す。

$$\begin{aligned} De &= 2.27 \times 10^{-9} \varepsilon^{3.05} \\ &= \varepsilon \times \varepsilon^{2.05} \times D^* \end{aligned} \quad \text{eq.3}$$

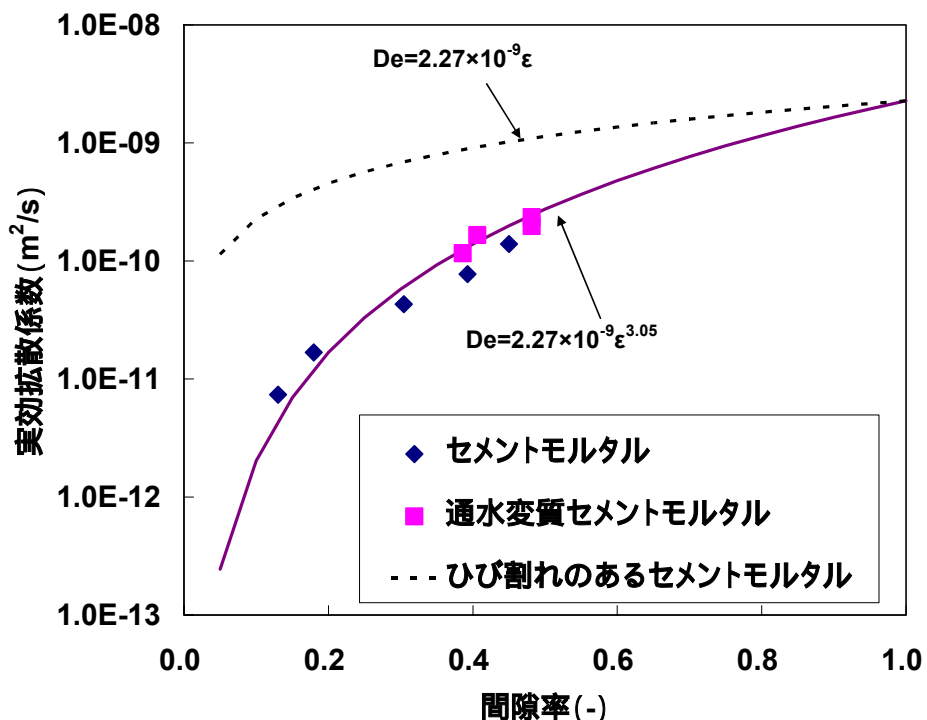


図 - 3 セメントモルタルの間隙率とトリチウムの実効拡散係数との関係

充填材のモルタルの間隙率は 0.19(2.2 参照)であるので、全ての核種に最も保守的な自由水中の核種の拡散係数として $4 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ (60)¹⁶⁾を設定する。その結果、実効拡散係数として $3 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$ を得ることができる。しかしながらこの値は、ひび割れの無いセメントモルタルでの値であり、もしひび割れが生じたことを仮定すると自由水中の拡散係数と間隙率を乗じた値 $8 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ を設定する。設定した実効拡散係数を以下にまとめる。

	ひび割れの無い セメントモルタル	ひび割れのある セメントモルタル
De	$3 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$	$8 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$

4.3. 圧縮成型ベントナイト

Na 型ベントナイトのクニゲル V1 に対して多くの実測値が報告されている¹⁷⁻²¹⁾。これらの実測値に対して以下の式にて実効拡散係数を求めた。実効拡散係数は、ベントナイトの間隙率とスメクタイト含有率に影響されるものとした。

$$\begin{aligned}
 De &= D * \varepsilon^{af_s^b + 1} \\
 &= \varepsilon(\varepsilon^{af_s^b}) D *
 \end{aligned}
 \tag{eq.4}$$

ここで、

fs: ベントナイト中のスメクタイトの含有率(-)

a 及び b : 実験によって求まる定数(-)

フィッティングの結果を図-4 に示す。スメクタイトの含有率の影響については、Kato et al. ²⁰⁾ が報告したベントナイトの混合率を変化させて測定した実効拡散係数にてフィッティングを行った。図-5 にフィッティングの結果を示す。クニゲル V1 のスメクタイト含有率を 0.48 として以下の式を得た。

$$De = 2.27 \times 10^{-9} \varepsilon^{2.22fs^{0.13}+1} \quad \text{eq.5}$$

$$= \varepsilon \times (\varepsilon^{2.22fs^{0.13}}) D^*$$

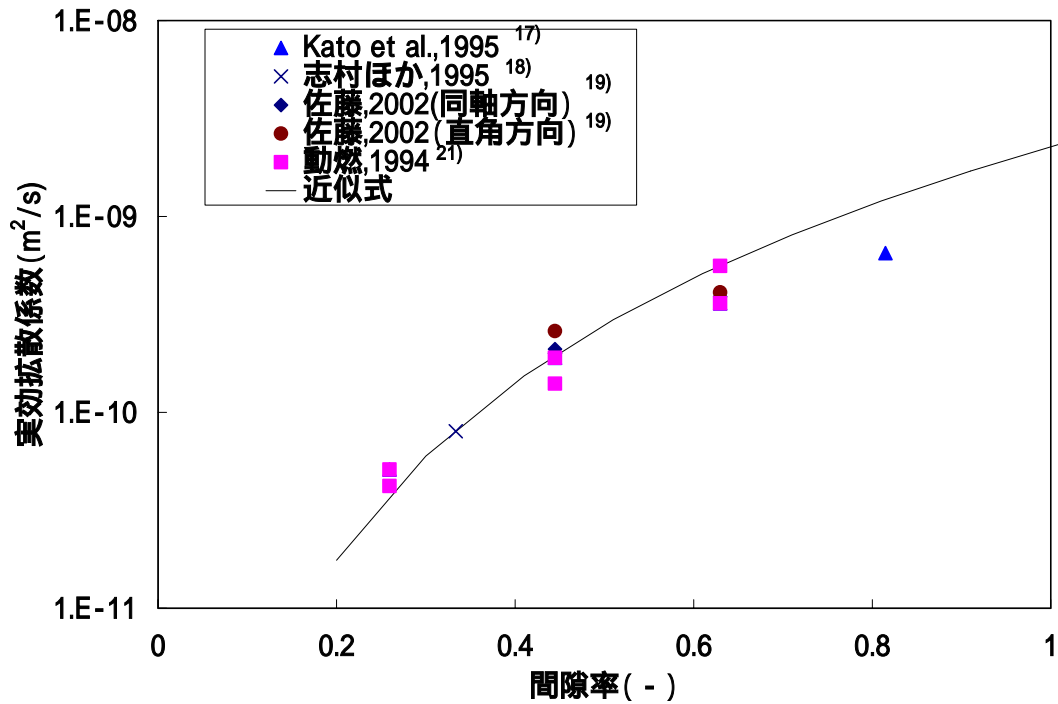


図 - 4 クニゲル V1 の間隙率とトリチウムの実効拡散係数との関係

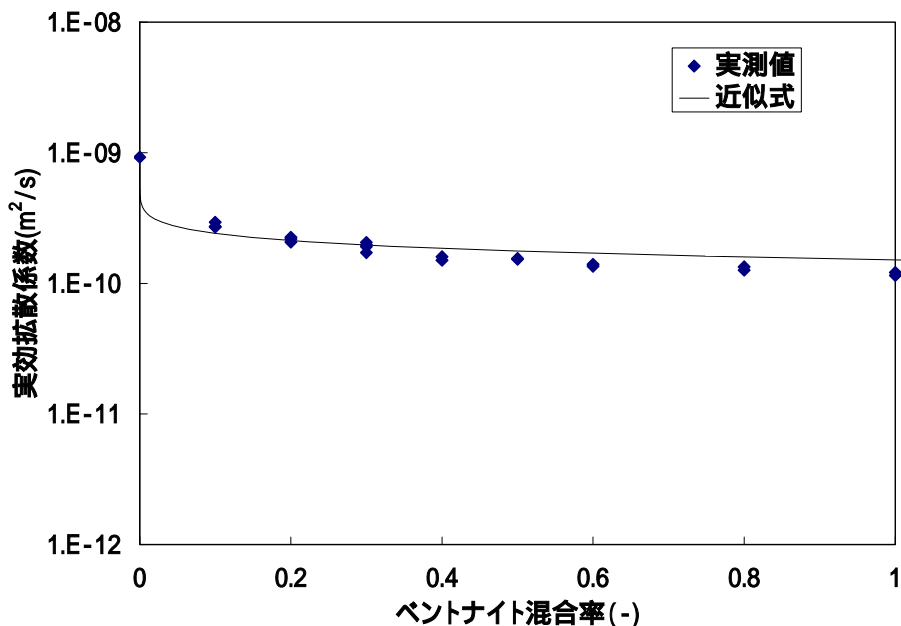


図 - 5 ベントナイトの間隙率とトリチウムの実効拡散係数との関係²⁰⁾

圧縮ベントナイトの実効拡散係数については、典型的な陽イオン及び陰イオンに対しても報告さがされており^{21,22)}、これらの値はトリチウムの実効拡散係数の値と異なる。このため、典型的な陽イオン及び陰イオンに対しても実効拡散係数を設定した。フィッティングには三原ら（1999）の実測値²²⁾を用いた。三原らは、クニゲル V1 をカルシウム型化させたベントナイトに対してトリチウム、セシウム及びヨウ素の実効拡散係数を取得しており、これらの値は処理前のクニゲル V1 と変わらないことを示している²²⁾。セシウム及びヨウ素の実効拡散係数のフィッティングにより得られた式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \text{セシウム} \quad De &= 2.10 \times 10^{-9} \varepsilon^{1.80fs^{0.13}+1} \\ &= \varepsilon \times (\varepsilon^{1.80fs^{0.13}}) D^* \end{aligned} \quad \text{eq.6}$$

$$\begin{aligned} \text{ヨウ素} \quad De &= 2.00 \times 10^{-9} \varepsilon^{4.72fs^{0.13}+1} \\ &= \varepsilon \times (\varepsilon^{4.72fs^{0.13}}) D^* \end{aligned} \quad \text{eq.7}$$

レファレンスのベントナイトの仕様は、ベントナイトの混合率 70%である。それゆえ、スメクタイトの含有率は 0.34(=0.7 × 0.48)となる。間隙率を 0.4，自由水中の全核種の拡散係数を 4 × 10⁻⁹m²/s として以下の値を得ることができる。

中性種	3 × 10 ⁻¹⁰ m²/s
典型的陽イオン	4 × 10 ⁻¹⁰ m²/s
典型的陰イオン	4 × 10 ⁻¹¹ m²/s

海水系地下水になるとセシウムやヨウ素の実効拡散は，トリチウムの値に近づくことが報告されているため²²⁾，海水系地下水においては，全ての核種について $3 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ を設定する。

	FRHP			SRHP		
	中性	典型的 陽イオン	典型的 陰イオン	中性	典型的 陽イオン	典型的 陰イオン
De	$3 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$	$4 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$	$4 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$	$3 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$		

5. 収着データセットにおける化学類似性の考え方

核種の収着分配係数のデータは，全て実測値が揃っているわけではない。ここでは，Bradbury and Sarott⁶⁾の報告に基づき設定した化学類似性についてまとめる。化学類似性についてまとめたものを表-6に示す。

表 - 6 収着分配係数の設定における元素の化学的類似性の考え方

グループ	元 素		主たる化学的特性
	還 元	酸化性	
	C(有機)		
ハロゲン	Cl, I		典型的な陰イオン
陰イオン	C(無機), Se, Mo		
		Tc	
陽イオン	Cs Ca, Sr, Ra		典型的な陽イオン
遷移金属元素	II	Co, Ni, Pb, Pd	水酸化物溶存化学種が支配
	IV	Sn, Zr	
	V	Tc Nb	水酸化物溶存化学種が支配
ランタノイド + アクチノイド	III	Sm, Ac, Am, Cm	
	IV	Th Pu, U, Np, Pa	
	V	-	Np, Pa
	VI	-	Pu, U

6. セメントモルタルに対する収着分配係数

6.1. データの選定

収着分配係数については、以下の条件で実施したバッチ法で得られた試験結果に基づき設定した。

- 使用した固相は、普通ポルトランドセメントを用いたセメントペースト硬化体及び透水試験に供しCaを溶出させたセメントペースト硬化体(通水変質セメントペースト硬化体)である。これらの試料を250 μm以下に微粉碎した。
- 試験では、11の元素について蒸留水及び模擬海水を用いた。11の元素は、C(無機・有機)、Cl、Ni、Se、Sr、Nb、Sn、I、Cs、Am 及びThである。
- 収着試験の期間を7日間とした。収着分配係数の算出には、遠心分離、0.45 μmのろ過及び限外ろ過(分画分子量10,000MWC0)で固液分離の結果を用いた。試験繰り返し数は3とした。
- 表-7に試験条件をまとめる。
- 試験結果については、Appendix Aに示す。

表 - 7 収着試験条件のまとめ

記号	ケース	固相	溶液	固液分離方法
RegionI-CEN-F	降水系地下水 + RegionI	セメントペースト硬化体	NaOH・KOH 溶液, pH13.2	遠心分離
RegionI-045-F				0.45 μm フィルター
RegionI-MWC-F				分画分子量 10,000MWC0
RegionII-CEN-F	降水系地下水 + RegionII	セメントペースト硬化体	イオン交換水	遠心分離
RegionII-045-F				0.45 μm フィルター
RegionII-MWC-F				分画分子量 10,000MWC0
RegionIII-CEN-F	降水系地下水 + RegionIII	通水変質セメントペースト硬化体	イオン交換水	遠心分離
RegionIII-045-F				0.45 μm フィルター
RegionIII-MWC-F				分画分子量 10,000MWC0
RegionIII-CEN-S	海水系地下水 + RegionII	セメントペースト硬化体	模擬海水	遠心分離
RegionIII-045-S				0.45 μm フィルター
RegionIII-MWC-S				分画分子量 10,000MWC0

この実測値に基づき以下の手順で収着分配係数を決定した。

- 実験値の中で最も小さいデータを選定し、その値を1あるいは $5 \times 10^{n\text{m}^3/\text{kg}}$ (n:整数)と小さ目の値にまるめた。
- 実測値がない核種については、化学的類似性に基づき設定した。
- RegionIVについては、母岩のデータセットを利用する。

6.2. 収着分配係数のデータセット

収着分配係数のデータセットを表-8に示す。これらのデータは、固液分離法として遠心分離によって決定されたものである。

表 - 8 セメントモルタルに対する収着分配係数のデータセット (m³/kg)

	FRHP			SRHP		
	RegionI	RegionII	RegionIII	RegionI	RegionII	RegionIII
C (無機)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
C (有機)	0.00025	0.00025	0.00025	0	0	0
Cl	0	0	0.000125	0	0	0
Co	0.0125	0.0125	0.00125	0.025	0.025	0.0025
Ca	0.0025	0.00125	0.025	0.0025	0.0025	0.025
Ni	0.0125	0.0125	0.00125	0.025	0.025	0.0025
Se	0.0025	0.025	0.0025	0.000025	0.00025	0.000025
Sr	0.0025	0.00125	0.025	0.0025	0.0025	0.025
Zr	25	2.5	0.25	25	2.5	0.25
Nb	0	0	0.25	0.025	0.025	0.025
Mo	0.0025	0.025	0.0025	0.000025	0.00025	0.000025
Tc	25	2.5	0.25	25	2.5	0.25
Pd	0.0125	0.0125	0.00125	0.025	0.025	0.0025
Sn	25	2.5	0.25	25	2.5	0.25
I	0.00125	0.0025	0	0	0	0
Cs	0.0025	0.0025	0.0125	0.0025	0.0025	0.0125
Sm	0.25	0.25	2.5	2.5	2.5	25
Pb	0.0125	0.0125	0.00125	0.025	0.025	0.0025
Ra	0.0025	0.00125	0.025	0.0025	0.0025	0.025
Ac	0.25	0.25	2.5	2.5	2.5	25
Th	0.25	0.25	2.5	2.5	2.5	25
Pa	0.25	0.25	2.5	2.5	2.5	25
U	0.25	0.25	2.5	2.5	2.5	25
Np	0.25	0.25	2.5	2.5	2.5	25
Pu	0.25	0.25	2.5	2.5	2.5	25
Am	0.25	0.25	2.5	2.5	2.5	25
Cm	0.25	0.25	2.5	2.5	2.5	25

• C(有機)

有機系の C-14 としてホルムアルデヒドの収着試験を実施した。ホルムアルデヒドは、ほとんどセメントペーストに収着せずばらつきが大きい。その範囲は、0~0.01 m³/kg である。RegionIII において、0.01~0.01m³/kg が得られた(図 A-1 参照)。一方、放射化金属から浸出した C-14 を用いた試験では、収着試験において 0.001m³/kg のオーダ及び模擬地下水にて変質させた試料においては、約 0.001m³/kg の収着分配係数が報告されている²³⁾。これらのことから放射化金属から浸出した C-14 の試験結果を優先させ降水系地下水においては、全ての Region で 0.001m³/kg を設定する。海水系地下水では、RegionII におけるホルムアルデヒドの収着分配係数は 0m³/kg である。よって保守的に海水系地下水では、全ての Region で 0m³/kg を設定する。

有機炭素に対して選定された収着分配係数(m³/kg)

	RegionI	RegionII	RegionIII
FRHP	0.001	0.001	0.001
SRHP	0	0	0

これらの値は、セメントペースト硬化体に対する値である。モルタルへの換算係数を 0.25 とし表-8 に与える。

- ハロゲン, Cl, I

Cl 及び I に対して収着試験を実施した。Cl は、セメントペーストに収着しなかった。降水系地下水の RegionIII において僅かばかりの収着が見られた(図 A-2 参照)。しかしながら他の全ての条件では、0 m³/kg であった。海水系地下水においても 全ての Region において、0 m³/kg を設定する。

Cl に対して選定された収着分配係数(m³/kg)

	RegionI	RegionII	RegionIII
FRHP	0	0	0.0005
SRHP	0	0	0

降水系地下水の RegionI 及び II において I の収着分配係数を得ることができた。これらの結果に基づき、以下の表のように収着分配係数を設定する。海水系地下水においては、競合する陰イオンの影響で I は収着しなかった。

I に対して選定された収着分配係数(m³/kg)

	RegionI	RegionII	RegionIII
FRHP	0.005	0.01	0
SRHP	0	0	0

- 陰イオン種

C(無機)

全ての試験条件で、1m³/kg より高い収着分配係数を得ることができた。1m³/kg を全ての条件で設定した。海水系地下水においては、RegionII の条件の試験結果のみであるが、海水の影響が見られなかったため、他の Region への影響はないものとした。設定した値を以下の表にまとめる。

無機炭素に対して選定された収着分配係数(m³/kg)

	RegionI	RegionII	RegionIII
FRHP	1	1	1
SRHP	1	1	1

Se, Mo

Se の収着分配係数を降水系地下水の RegionII において 0.1 ~ 1m³/kg で取得した。RegionI 及

び III については、 $0.001 \sim 0.1 \text{ m}^3/\text{kg}$ の範囲であった。海水系地下水においては、収着分配係数は小さめの値であった。以下の表に設定した値を示す。海水系地下水の Region I 及び III についてはデータが取得されていないが、降水系地下水において、Region I 及び II の値は、Region II の 0.1 であり、海水系地下水において Region II の値を 0.1 倍して Region I 及び III に設定した。

Se に対して選定された収着分配係数 (m^3/kg)

	Region I	Region II	Region III
FRHP	0.01	0.1	0.01
SRHP	0.0001	0.001	0.0001

Mo については、化学アナログとして Se の値を設定する。

- 陽イオン

Cs

Cs の収着分配係数は、Region III において高い値を示した。試験において取得された値は、 $0.01 \sim 0.1 \text{ m}^3/\text{kg}$ である。設定した収着分配係数を以下の表に示す。Region II において海水の影響が見られなかったため、海水系地下水においても同じ値を設定した。

Cs に対して選定された収着分配係数 (m^3/kg)

	Region I	Region II	Region III
FRHP	0.01	0.01	0.05
SRHP	0.01	0.01	0.05

Ca, Sr, Ra

Sr の収着分配係数を取得した。Cs と同様に Region III が、最も高い値を示した。降水系地下水の Region II では、最も小さい値である。設定した値を以下の表にまとめる。Region II の降水系地下水の値が海水系地下水の値よりも低い値を示したことから、保守的に海水系地下水の Region I 及び III の値は、降水系地下水の値をそのまま設定した。

Ca 及び Ra については、化学アナログとして Sr の値を設定した。

Sr に対して選定された収着分配係数 (m^3/kg)

	Region I	Region II	Region III
FRHP	0.01	0.005	0.1
SRHP	0.01	0.01	0.1

- 遷移金属 (+II) Co, Ni, Pb, Pd

Ni の収着分配係数を取得した。降水系地下水において Region I 及び II の値は同程度である。

RegionIII の値は , RegionI 及び II の値より低かった。海水系地下水の RegionII の値は , 海水系の値よりも 2 倍大きい。これらのことを考慮して , 以下の表のように収着分配係数を設定した。海水系地下水の RegionI 及び II については , 降水系の値を 2 倍して設定した。

Ni に対して選定された収着分配係数 (m³/kg)

	RegionI	RegionII	RegionIII
FRHP	0.05	0.05	0.005
SRHP	0.1	0.1	0.01

Co, Pb 及び Pd については , Ni の値を設定した。

- 遷移金属元素 (+IV), Sn, Zr

Sn に対して収着分配係数を取得した。降水系地下水の RegionI に対して 100 ~ 1,000 m³/kg と非常に高い収着分配係数を取得した。RegionII 及び III については , 各々 10 ~ 100 及び 1 ~ 10 m³/kg の範囲であった。海水系地下水の影響は見られなかった。これらのことを考慮して以下の表のように収着分配係数を設定した。

Sn に対して選定された収着分配係数 (m³/kg)

	RegionI	RegionII	RegionIII
FRHP	100	10	1
SRHP	100	10	1

Zr に対して , Sn の値を設定した。

- 遷移金属元素 (+IV), Tc

Tc に対して収着分配係数を取得しなかった。Sn の収着分配係数を設定した。

- 遷移金属元素 (+V), Nb

Nb の収着分配係数は , 固相と液相の分離方法によって大きく依存した。このことは , Nb のセメントペーストの収着にコロイドが影響しているものと考えられる。Nb に対しては , 固液分離方法ごとに 3 つの収着分配係数を設定した。

降水系地下水の RegionI 及び II の遠心分離による分離方法では , 収着分配係数を取得することができなかった。一方 RegionIII においては , 1m³/kg 以上の値を得た。降水系地下水の RegionI 及び II に対して 0m³/kg を , RegionIII に対して 1m³/kg を設定した。海水系地下水の RegionII については , 0.3 ~ 2m³/kg の範囲であった。これらの結果を基に設定した結果を以下の表にまとめる。

Nb に対して選定された収着分配係数 (遠心分離) (m³/kg)

	RegionI	RegionII	RegionIII
FRHP	0	0	1
SRHP	0.1	0.1	0.1

0.45 μm のフィルターによるろ過についても, RegionII において収着分配係数を得ることができなかった。RegionI では, 0.5~2m³/kg の範囲である。海水系地下水においては, 2~5 m³/kg の範囲の値を得ることができた。これらの結果に基づき以下の表のように収着分配係数を設定した。海水系地下水においては, RegionII のデータの値のみであるが, 降水系地下水において RegionII の値が最も小さかったので, RegionII の値を他の Region に設定した。

Nb に対して選定された収着分配係数 (0.45 μm フィルターろ過) (m³/kg)

	RegionI	RegionII	RegionIII
FRHP	0.5	0	1
SRHP	1	1	1

限外ろ過においては, 全ての試験条件において, 0.1~2m³/kg の範囲のデータを得た。RegionII において降水系及び海水系地下水での差が見られなかったため, 海水系地下水においては降水系地下水の設定値を選んだ。

Nb に対して選定された収着分配係数(10,000NMC0 ろ過) (m³/kg)

	RegionI	RegionII	RegionIII
FRHP	0.1	0.1	1
SRHP	0.1	0.1	1

- ランタノイド及びアクチノイド (+III), Sm, Ac, Am, Cm

アクチノイド III 価の Am の収着分配係数を試験により得た。Am はセメントペーストに対する収着性が高い。RegionIII においては, RegionII の値より大きかった。海水系地下水の値は, 降水系地下水の値よりも大きい。これらを考慮して以下の表のように収着分配係数を設定した。

Am に対して選定された収着分配係数(m³/kg)

	RegionI	RegionII	RegionIII
FRHP	1	1	10
SRHP	10	10	100

Sm, Ac 及び Cm についても化学アナログとして Am の値を設定した。

- アクチノイド (+IV), Th, Pu, U, Np, Pa

アクチノイド IV の Th について収着分配係数を取得した。遠心分離と 0.45 μm 及び限外ろ過の固液分離法によって値が異なったため、2 種類の収着分配係数を設定した。

遠心分離においては、降水系地下水の RegionII において 4~7m³/kg の範囲の値が得られた。RegionIII においては、RegionII より約 50~160m³/kg と大きな値であり、この傾向は前述した Am と同じである。海水系地下水の RegionII は、降水系地下水の値よりも大きかった。これらを基に以下の表のように収着分配係数を設定した。海水系地下水の設定については、降水系地下水の設定値を 10 倍した。

Th に対して選定された収着分配係数 (遠心分離) (m³/kg)

	RegionI	RegionII	RegionIII
FRHP	1	1	10
SRHP	10	10	100

降水系地下水の Region II に対して、0.45 μm 及び限外ろ過にて 4~7 m³/kg の範囲の収着分配係数を得た。RegionIII の値は、RegionII よりも大きい。この値は、約 50~160m³/kg の範囲である。海水系地下水の収着分配係数は、降水系の値よりも大きかった。これらを考慮して収着分配係数を以下の表のように設定した。海水系地下水の設定については、降水系地下水の設定値を 2 した。

Th に対して選定された収着分配係数 (0.45 μm フィルター及び 10,000NMCO ろ過) (m³/kg)

	RegionI	RegionII	RegionIII
FRHP	50	50	100
SRHP	100	100	100

同じアクチノイド IV の Pu, U, Np 及び Pa についても Th の値を設定した。

7. 圧縮成型ベントナイトに対する収着分配係数

7.1. データの選定

圧縮成型ベントナイトの間隙構造は微細であり、間隙水の化学的特性は自由水と異なることが指摘されており、バッチ法で取得した収着分配係数をそのまま核種移行評価に用いることは適切ではない⁴⁾。このことから、非定常の拡散試験によって得られた見かけの拡散係数をまず選定し、その後、以下の式によって収着分配係数 (Kd) を設定する。

$$Kd = \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)\rho} \left(\frac{Dp}{Da} - 1 \right) \quad \text{eq.8}$$

ここで、

: 圧縮成型ベントナイトの間隙率 (-)

: ベントナイトの真密度 (m³/kg)

Dp: 核種の間隙水での拡散係数 (m²/s) (=GD*, eq.1 参照)

Da: 核種の見かけの拡散係数 (m²/s)

7.2. 見かけの拡散係数の選定と収着分配係数の算出

嶺らは、セメント系材料の影響を受けた条件で、圧縮成型ベントナイトに対する種々の見かけの拡散係数を報告している²⁴⁾。この報告に基づき見かけの拡散係数を選定した。嶺らの非定常試験の条件を以下にまとめる。

- 試験に使用したベントナイトは、Na型ベントナイトのクニゲルV1、クニゲルV1をCa型に処理したベントナイト (Ca-クニゲルV1)、クニゲルV1とアナルサイムとの混合物 (アナルサイムは、アルカリ条件でベントナイトが変質した際に生成させる典型的な鉱物の一つであり、80wt%混合) である。
- ベントナイト及び混合物の乾燥密度は1.2~1.8Mg/m³であり、試験繰り返し数2として非定常の拡散試験が実施された。
- 試験では、9種類の元素が用いられ、試験溶液として蒸留水(DW)、セメント系材料の模擬浸出液(CW)、模擬海水を用いたセメント系材料の模擬浸出液(CSW)及びCSWにNaNO₃を混合した溶液(CSNW)である。9種類の元素は、HTO, Cs, Sr, Zr, Nb, Ni, Sn, Am 及びNpである。
- 表-9に嶺らが報告した試験条件をまとめる。
- 取得された見かけの拡散係数をAppendix Bに示す。

表 - 9 非定常拡散試験の条件のまとめ

記号	ケース	固相	溶液
DW	降水系地下水+ベントナイト	Ca-クニゲル V1	イオン交換水
CW	アルカリ溶液+ベントナイト	Ca-クニゲル V1	Ca(OH) ₂ 飽和溶液, pH=12.5
CSW	アルカリ性海水溶液+ベントナイト	クニゲル V1	模擬海水の Ca(OH) ₂ 飽和溶液, pH=12.5
CSNW	NaNO ₃ アルカリ性海水溶液+ベントナイト	クニゲル V1	模擬海水の Ca(OH) ₂ 飽和溶液 6mol/dm ³ NaNO ₃ 添加したもの pH=12.5
CW-Ana	アルカリ性溶液+変質ベントナイト	Ca-クニゲル V1 とアナルサイムの混合物	Ca(OH) ₂ 飽和溶液, pH=12.5

• HTO (トリチウム)

トリチウムは、ベントナイトに対して非吸着性である。嶺らは、DW、CW、CSW 及び CW-Ana の条件(表-9 参照)において、見かけの拡散係数を報告した。報告値の中で最も大きな見かけの拡散係数を各々の条件において選定した(図 B-1 及び下記の表参照)。海水系地下水における変質ベントナイトの値については、降水系地下水の値の傾向性を参照して設定した。

トリチウムに対して選定された見かけの係数(m²/s)

固相	ベントナイト		変質ベントナイト
	DW(pH<11)	CW(11<pH)	CW(11<pH)
FRHP	7 × 10 ⁻¹⁰	8 × 10 ⁻¹⁰	6 × 10 ⁻¹⁰
SRHP	9 × 10 ⁻¹⁰	1 × 10 ⁻⁹	8 × 10 ⁻¹⁰

• Cs

Cs について、非常に明瞭な拡散プロファイルが取得されたことが報告されている(嶺ほか, 1999)。取得された見かけの拡散係数の最大値と最小値を Appendix B の図 B-2 に示す。DW 及び CW における見かけの拡散係数の最大値は、ほとんど同じである。降水系地下水の DW 及び CW において 2 × 10⁻¹²m²/s を設定した。変質したベントナイトについては、ベントナイトとアナルサイムの混合物での値を選定した。海水系地下水については、CSW の条件で取得した値を設定した。

変質ベントナイトについては、降水系地下水における未変質ベントナイトの値を 3 倍として設定した。設定した結果を以下の表に示す。

Cs に対して選定された見かけの係数(m²/s)

固相	ベントナイト		変質ベントナイト
	DW(pH<11)	CW(11<pH)	CW(11<pH)
FRHP	2 × 10 ⁻¹²	2 × 10 ⁻¹²	7 × 10 ⁻¹³
SRHP	6 × 10 ⁻¹²	6 × 10 ⁻¹²	2 × 10 ⁻¹²

• Sr

Sr についても非常に明瞭な拡散プロファイルが取得されたことが報告されている(嶺ほか,1999)。取得された見かけの拡散係数の最大値と最小値を Appendix B の図 B-3 に示す。降水系地下水の DW 及び CW において 5 × 10⁻¹¹m²/s を設定した。変質ベントナイトについては、アナルサイムとベントナイトの混合物の最大値 7 × 10⁻¹²m²/s を選定した。海水系地下水の CW においては、7 × 10⁻¹²m²/s を設定した。DW 及び変質ベントナイトについては、CW における海水系の値が降水系の値よりも小さいことを考慮して値を設定した。

Sr に対して選定された見かけの係数(m²/s)

固相	ベントナイト		変質ベントナイト
	DW(pH<11)	CW(11<pH)	CW(11<pH)
FRHP	5 × 10 ⁻¹¹	5 × 10 ⁻¹¹	7 × 10 ⁻¹²
SRHP	7 × 10 ⁻¹¹	7 × 10 ⁻¹¹	1 × 10 ⁻¹¹

• Zr

嶺らは、CSW 及び CSNW 以外のほとんどの試験条件でベントナイトに元々含有されている Zr の影響によって見かけの拡散係数を取得できなかったとしている。一方、佐藤は、蒸留水の条件にて 10⁻¹⁴ ~ 10⁻¹³m²/s (1998)の見かけの拡散係数をクニゲル V1 の試験で報告¹⁴⁾している。この報告値は、嶺らが報告した CSW 及び CSNW での値と調和的である。降水系及び海水系地下水の DW 及び CW の条件において、10⁻¹⁴ m²/s を設定した。変質ベントナイトに対して値を設定することができなかった。

Zr に対して選定された見かけの係数(m²/s)

固相	ベントナイト		変質ベントナイト
	DW(pH<11)	CW(11<pH)	CW(11<pH)
FRHP	1 × 10 ⁻¹³	1 × 10 ⁻¹³	-
SRHP	1 × 10 ⁻¹³	1 × 10 ⁻¹³	-

• Nb

Nb についても、バックグラウンドの影響により濃度プロファイルより見かけの拡散係数を算出することが困難であった試験があったことが報告されている²⁴⁾。得られたデータの数は少ないが、

CSW を除いてその範囲は、約 $10^{-13} \sim 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ であった。この試験条件に基づき、 1×10^{-13} 及び $6 \times 10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$ を各々降水系地下水の DW 及び CW に設定した。変質ベントナイトについては、取得された値の最大値を選定した。CSW の値は、DW 及び CW での値より小さかったため、降水系での設定値を海水系地下水において設定した。

Nb に対して選定された見かけの係数 (m^2/s)

固相	ベントナイト		変質ベントナイト
	DW (pH<11)	CW (11<pH)	CW (11<pH)
FRHP	1×10^{-13}	6×10^{-13}	4×10^{-13}
SRHP	1×10^{-13}	6×10^{-13}	4×10^{-13}

- Ni

DW, CW 及び変質ベントナイトに対して実測値の最大値を選定した。CW 及び CSW での試験より降水系地下水の値を 4.5 倍して海水系地下水での値を設定した。

Ni に対して選定された見かけの係数 (m^2/s)

固相	ベントナイト		変質ベントナイト
	DW (pH<11)	CW (11<pH)	CW (11<pH)
FRHP	8×10^{-13}	2×10^{-12}	2×10^{-13}
SRHP	4×10^{-12}	9×10^{-12}	9×10^{-13}

- Sn

Sn については、ほとんどの試験条件で見かけの拡散係数を取得することが困難であった²⁴⁾。ただ、CSW 及び CSNW の低い成型密度に対するベントナイトの見かけの拡散が報告されている。これらの結果は、B-6 に示される。一方、小田らは、降水系地下水の条件において、 $1.5 \times 10^{-15} \sim 9.9 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{s}$ の範囲の値を報告している²⁵⁾。これらの情報から、最も大きな値である $10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$ を降水系地下水に設定した。海水系地下水については、実測値は降水系地下水の値よりも小さかったので、降水系地下水の値を保守的に海水系地下水に設定した。変質ベントナイトについては、適切なデータがなかったため値を設定することができなかった。

Sn に対して選定された見かけの係数 (m^2/s)

固相	ベントナイト		変質ベントナイト
	DW (pH<11)	CW (11<pH)	CW (11<pH)
FRHP	1×10^{-13}	1×10^{-13}	-
SRHP	1×10^{-13}	1×10^{-13}	-

- Am

乾燥密度 1.8Mg/m³ においては、良い拡散プロファイルを得ることができなかったことが報告されている²⁴⁾。図 B-6 に試験結果を示す。これらのデータにおいて最大値を降水系地下水に設定した。海水系地下水については、見かけの拡散係数は、CW と CSW の比較により CSW の値が小さかったため、降水系での値を設定した。変質ベントナイトに対しては、 $4 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ を選定した。

Am に対して選定された見かけの係数(m²/s)

固相	ベントナイト		変質ベントナイト
	DW(pH<11)	CW(11<pH)	CW(11<pH)
FRHP	7×10^{-14}	7×10^{-14}	4×10^{-15}
SRHP	7×10^{-14}	7×10^{-14}	4×10^{-15}

- Np

図 B-7 に Np の見かけの拡散係数を示す。海水系地下水に相当する試験条件での値は、降水系の値よりも 1 桁小さい値である。DW における見かけの拡散係数は、大気雰囲気中でクニゲル V1 に対して測定した値¹⁴⁾と同オーダーである。また、還元条件でクニゲル V1 に対して測定された Da は、 $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーであり、CSW 及び CSNW の Da と調和的である。このことから、図 B-7 で示した DW の Da は十分な還元条件が達成されていない可能性がある。これらことから、CSW 及び CSNW の最大値を設定した。変質ベントナイトについては、設定することができなかった。

Np に対して選定された見かけの係数(m²/s)

固相	ベントナイト		変質ベントナイト
	DW(pH<11)	CW(11<pH)	CW(11<pH)
FRHP	3×10^{-14}	3×10^{-14}	-
SRHP	3×10^{-14}	3×10^{-14}	-

上述した 9 つの元素の見かけの拡散係数を表-10 にまとめる。eq.8 に基づき収着分配係数の算出を行った。Dp の設定については、それぞれの条件において設定された非収着性の HTO の値を用いた。間隙率については、0.4 を設定し、算出された値を 1 あるいは $5 \times 10^n \text{ m}^3/\text{kg}$ (n: 整数) と大きめの値に設定した。設定した結果を表-11 にまとめる。

表 - 10 選定された見かけの拡散係数のまとめ(m²/s)

地下水	FRHP			SRHP		
	ベントナイト		変質ベント ナイト	ベントナイト		変質ベント トナイト
pH	DW(pH<11)	CW(11<pH)	CW(11<pH)	DW(pH<11)	CW(11<pH)	CW(11<pH)
HTO	7.E-10	8.E-10	6.E-10	9.E-10	1.E-09	8.E-10
Ni	8.E-13	2.E-12	2.E-13	4.E-12	9.E-12	9.E-13
Sr	5.E-11	5.E-11	7.E-12	7.E-11	7.E-11	1.E-11
Zr	1.E-13	1.E-13	-	1.E-13	1.E-13	-
Nb	1.E-13	6.E-13	4.E-13	1.E-13	6.E-13	4.E-13
Sn	1.E-13	1.E-13	-	1.E-13	1.E-13	-
Cs	2.E-12	2.E-12	7.E-13	6.E-12	6.E-12	2.E-12
Np	3.E-14	3.E-14	-	3.E-14	3.E-14	-
Am	7.E-14	7.E-14	4.E-15	7.E-14	7.E-14	4.E-15

表 - 11 計算された収着分配係数(m³/kg)

地下水	FRHP			SRHP		
	ベントナイト		変質ベント ナイト	ベントナイト		変質ベント ナイト
pH	DW(pH<11)	CW(11<pH)	CW(11<pH)	DW(pH<11)	CW(11<pH)	CW(11<pH)
HTO	0	0	0	0	0	0
Ni	0.1	0.05	0.5	0.05	0.01	0.1
Sr	0.001	0.001	0.01	0.001	0.001	0.01
Zr	1	1	-	1	1	-
Nb	1	0.1	0.1	1	0.1	0.1
Sn	1	1	-	1	1	-
Cs	0.05	0.05	0.1	0.01	0.01	0.05
Np	5	5	-	5	5	-
Am	1	1	10	1	1	10

7.3. 収着分配係数のデータセット

表-11 で設定された収着分配係数に基づき核種移行評価に必要な元素に対するデータセットを表-12のようにまとめる。

表 - 12 圧縮成型ベントナイトに対する収着分配係数のデータセット(m³/kg)

	FRHP			SRHP			化学類似性
	ベントナイト		変質ベントナイト	ベントナイト		変質ベントナイト	
	<pH11	pH11<	pH11<	<pH11	pH11<	pH11<	
C (無機)	0	0	0	0	0	0	
C (有機)	0	0	0	0	0	0	陰イオン
Cl	0	0	0	0	0	0	陰イオン
Co	0.1	0.05	0.5	0.05	0.01	0.1	Ni
Ca	0.001	0.001	0.01	0.001	0.001	0.01	Sr
Ni	0.1	0.05	0.5	0.05	0.01	0.1	
Se	0	0	0	0	0	0	陰イオン
Sr	0.001	0.001	0.01	0.001	0.001	0.01	
Zr	1	1	1	1	1	1	
Nb	1	0.1	0.1	1	0.1	0.1	
Mo	0	0	0	0	0	0	陰イオン
Tc	1	1	1	1	1	1	Sn
Pd	0.1	0.05	0.5	0.05	0.01	0.1	Ni
Sn	1	1	1	1	1	1	
I	0	0	0	0	0	0	陰イオン
Cs	0.05	0.05	0.1	0.01	0.01	0.05	
Sm	1	1	10	1	1	10	Am
Pb	0.1	0.05	0.5	0.05	0.01	0.1	Ni
Ra	0.001	0.001	0.01	0.001	0.001	0.01	Sr
Ac	1	1	10	1	1	10	Am
Th	5	5	5	5	5	5	Np
Pa	5	5	5	5	5	5	Np
U	5	5	5	5	5	5	Np
Np	5	5	5	5	5	5	
Pu	5	5	5	5	5	5	Np
Am	1	1	10	1	1	10	
Cm	1	1	10	1	1	10	Am

- C(有機)
有機炭素に対するデータないため、保守的に 0m³/kg を設定した。
- ハロゲン, Cl, I
ベントナイトに収着しないとして、保守的に 0m³/kg を設定した。
- 陰イオン種
C(無機)
ベントナイトに収着しないとして、保守的に 0m³/kg を設定した。

Se, Mo

ベントナイトに収着しないとして、保守的に $0\text{m}^3/\text{kg}$ を設定した。

- 陽イオン

Cs

表-12 で求められた値をそのまま設定した。

Ca, Sr, Ra

表-12 において Sr の収着分配係数が設定されており、化学アナログを考慮して、この値を Ca 及び Ra に設定した。

- 遷移金属元素(+II), Co, Ni, Pb, Pd

表-12 において Ni の収着分配係数が設定されており、化学アナログを考慮して、この値を Co, Pb 及び Pd に設定した。

- 遷移金属元素(+IV) Sn, Zr

Sn 及び Zr の収着分配係数を表-11 に示したが、変質ベントナイトについては値が設定されていない。他の元素については、変質ベントナイトに対する値が未変質ベントナイトに対する値より大きいことから、未変質ベントナイトの値を保守的に変質ベントナイトの値に設定した。

- 遷移金属元素(+IV) Tc

Sn の値を化学アナログとして設定した。

- 遷移金属元素+V Nb

表-12 で求められた値をそのまま設定した。

- ランタノイド及びアクチノイド(+III) Sm, Ac, Am, Cm

表-12 において Am の収着分配係数が設定されており、化学アナログを考慮して、この値を Sm, Ac 及び Cm に設定した。

- アクチノイド(+IV) Th, Pu, U, Np, Pa

表-12 において Np の収着分配係数が設定されており、化学アナログを考慮して、この値を Th, Pu, U 及び Pa に設定した。変質ベントナイトについては、他の元素については、その値が未変質ベントナイトに対する値より大きいことから、未変質ベントナイトの値を保守的に変質ベントナイトの値に設定した。

8. 地質媒体に対する収着分配係数

8.1. データの選定

地質媒体に対する収着分配係数の設定については、渋谷ら²⁶⁾がH-12レポートのために作成したデータ設定を用いた。しかしながら、渋谷らが報告していないCi, Ch, Ca, Cl, Co, Sr, Mo及びIについては、化学アナログや実験データを参照して設定した。

8.2. 収着分配係数のデータセット

設定した収着分配係数のデータセットを表-13に示す。

表 - 13 地質媒体に対する収着分配係数(m³/kg)

	FRHP				SRHP				化学的類似性
	花崗岩	玄武岩	泥岩・凝灰岩	砂岩	花崗岩	玄武岩	泥岩・凝灰岩	砂岩	
C (無機)	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0	0	0	0	Cl
C (有機)	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0	0	0	0	
Cl	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0	0	0	0	陰イオン
Ca	0.5	0.5	0.5	0.5	0.05	0.05	0.05	0.05	Ra
Co	0.01	0.1	0.1	0.01	0.001	0.001	0.001	0.001	Ni
Sr	0.5	0.5	0.5	0.5	0.05	0.05	0.05	0.05	Ra
Se	0.01	0.01	0.01	0.001	0.01	0.01	0.01	0.001	
Ni	0.01	0.1	0.1	0.01	0.001	0.001	0.001	0.001	
Zr	0.1	1	1	0.1	0.1	0.5	1	0.1	
Mo	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0	0	0	0	Cl
Nb	0.1	1	1	0.1	0.1	0.5	1	0.1	
Tc	1	1	1	1	1	1	1	1	
I	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0	0	0	0	Cl
Pd	0.1	1	1	0.1	0.1	1	1	0.1	
Sn	1	5	5	1	1	5	5	1	
Cs	0.05	0.1	0.1	0.05	0.005	0.01	0.01	0.005	
Sm	5	5	5	5	5	5	5	5	
Pb	0.1	1	1	0.1	0.1	1	1	0.1	
Ra	0.5	0.5	0.5	0.5	0.05	0.05	0.05	0.05	
Ac	5	5	5	5	5	5	5	5	
Th	1	1	1	1	1	1	1	1	
Pa	1	1	1	1	1	1	1	1	
U	1	1	1	1	1	1	1	1	
Np	1	1	1	1	1	1	1	1	
Pu	1	1	1	1	1	1	1	1	
Am	5	5	5	5	5	5	5	5	
Cm	5	5	5	5	5	5	5	5	

● C(有機物)

放射化金属から浸出したC-14を用いた堆積岩に対する収着試験において0.0001m³/kgのオーダの収着分配係数が報告されている²³⁾。NaNO₃も共存させた条件でも試験を行っており、この場合は0.0001m³/kg以下の値である。このことから、有機C-14は、わずかに地質媒体に収着するものと仮定し、降水系地下水に対して収着分配係数0.0001m³/kgを設定する。収着に競合するイオンが

存在するような海水系地下水の場合は， $0\text{m}^3/\text{kg}$ とする。

- ハロゲン，Cl，I

Sato et al. は，定常拡散試験において Cl の収着分配係数を報告した²⁷⁾。その値は，約 $0.0001\text{m}^3/\text{kg}$ である。陰イオンはの地質媒体への収着性は低い。降水系地下水においては，この値を設定し，海水系地下水については，収着に競合するイオンが存在するため $0\text{m}^3/\text{kg}$ を設定した。

- 陰イオン化学種

C(無機炭素)

Cl の値を設定した。

Se, Mo

Cl の値を設定した。

- 陽イオン

Ca, Sr

Ra の値を Ca 及び Sr に設定した。

- 遷移金属元素(+II)，Co

Ni の値を Co に設定した。

9. 酸化性条件でのデータセット

対象とした放射性元素に対して、酸化性条件で化学形態の変化する元素は Se, Tc, Np, Pa, Pu 及び U がある。これらの元素は、酸化性条件によって核種移行データが変化する可能性がある。降水系の地下水 (FRHP) が酸化性地下水になることを想定してこれらの元素に対して収着分配係数を設定する。

9.1 溶解度

溶解度の設定方法は、3章で示したように地球化学平衡計算に基づき上述した。計算にあたっては、FRHP を大気平衡とした地下水を求め、セメント系材料の影響を受けた地下水を3章で示した手順にて各 Region におけるセメント水和物を仮定し地下水組成を求めた。H12 レポートの評価において Se 及び Tc については可溶性と設定されていることから、本データ設定においても可溶性として設定するとともに同様な支配溶存化学種を仮定した。他の元素については、同様な溶解度制限固相を仮定し計算を行なった。溶解度の設定結果を表 14 に示す。

表 - 14 酸化性地下水における放射性元素の溶解度のデータセットと支配溶存化学種* (mol/dm³)

放射性元素	Region I	Region II	Region III	Region IV
Se	可溶性 SeO ₄ ²⁻	可溶性 SeO ₄ ²⁻	可溶性 SeO ₄ ²⁻	可溶性 SeO ₄ ²⁻
Tc	可溶性 TcO ₄ ⁻	可溶性 TcO ₄ ⁻	可溶性 TcO ₄ ⁻	可溶性 TcO ₄ ⁻
Pa	1E-8 PaO(OH) ₃	5E-8 PaO(OH) ₃	5E-8 PaO(OH) ₃	5E-8 PaO(OH) ₃
U	5E-1 UO ₂ (OH) ₃ ⁻ , UO ₂ (OH) ₄ ²⁻	5E-2 UO ₂ (OH) ₃ ⁻	1E-3 UO ₂ (OH) ₃ ⁻	5E-4 UO ₂ (CO ₃) ₃ ⁴⁻ , UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻
Np	5E-5 NpO ₂ (OH) ₂ ⁻	5E-5 NpO ₂ (OH) ₂ ⁻	5E-5 NpO ₂ CO ₃ ⁻ , NpO ₂ (OH) ₂ ⁻	5E-4 NpO ₂ CO ₃ ⁻ , NpO ₂ ⁺
Pu	5E-6 PuO ₂ (OH) ₃ ⁻	5E-7 PuO ₂ (OH) ₃ ⁻ , Pu(OH) ₂	5E-7 PuO ₂ (OH) ₂ , Pu(OH) ₂ ⁻	5E-5 PuO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻

*: 溶存支配化学種は 10%以上とした

9.2 実効拡散係数

実効拡散係数については、4章で示したように元素の支配的な溶存化学種を考慮して実効拡散係数を設定する。

セメントモルタルに対しては、全元素について同じ値を設定しているため、酸化性地下水においても実効拡散係数は変わらない。圧縮成型ベントナイトについては、溶存化学種が中性種、典型的陽イオン及び陰イオンについて実効拡散係数を設定している。このため、溶解度の設定で示したように Tc, Np 及び U に対して典型的陰イオンの実効拡散係数を設定する。

9.3 収着分配係数

圧縮成型ベントナイト及び岩石 (花崗岩) については、H12 レポートと同様な値を設定するものとする。セメントモルタルについては、加藤らがまとめたセメント系材料に対する核種の収着

データベース²⁸⁾より、酸化性条件でのセメントペーストに対する実測値を参照して、4章で述べた手順にて収着分配係数の設定を行なった。設定の詳細を Appendix C に示す。設定した酸化性条件における酸化性条件における収着分配係数のデータセットを表-15 に示す。

表 - 15 酸化性条件における収着分配係数のデータセット (単位:m³/kg)

	セメントモルタル	圧縮成型ベントナイト	岩石 (花崗岩)
Se	0.0125	0	0
Tc	0.000025	0	0
Pa	0.25	1	0.005
U	0.025	0.005	0.005
Np	0.25	0.005	0.005
Pu	0.025	10	0.05

10. 結言

本報告書については、第2次 TRU レポートで用いられた RAMDA についてデータの設定方法及びデータの選定について解説を加えた。データの設定については、化学アナログなどの仮定を設けており、今後もデータが取得されていない核種や条件については、データの取得・整備を行っていく必要がある。特に高アルカリ条件においては、中性から弱アルカリ性の条件と比較して核種の溶解度データが少ないためデータの取得が必要である。そして、本データセットは、今後も新しい試験結果や知見が得られる毎に見直しを行うべきものである。今後、海外の放射性廃棄物処分の安全評価におけるデータセットなどとの比較により RAMDA の健頑性が高まるものと考えられる。

参考文献

- 1) 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構: "TRU 廃棄物処分技術検討書 - 第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ -", JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005)
- 2) Mihara, M. and Sasaki, R: "Radio-nuclides Migration Datasets (RAMDA) on cement, bentonite and rock for the performance assessment of TRU repository in Japan", JNC TN8400 2005-027 (2005)
- 3) 例えば, 三原守弘, 大井貴夫: "パラメータの時間的变化を考慮した考慮した核種移行解析コード (TIGER) の開発", サイクル機構技報, No.22, pp.27-38 (2004)
- 4) 核燃料サイクル開発機構: "わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ - 分冊3 地層処分システムの安全性", JNC TN1400 99-023 (1999)
- 5) 三原守弘, 入矢桂史郎, 根山敦, 伊藤勝: "シリカフェーム混合したセメントペーストの浸出試験とモデル化", 放射性廃棄物研究, Vo.3, No.2, pp.71-79 (1997)
- 6) Bradbury, H. and Sarott, F: " Sorption databases for the cementitious near-field of L/ILW

- repository for performance assessment ”, PSI Bericht Nr. 95-06(1995)
- 7) Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J.: ”User's guide to PHREEQC (version 2)--A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations”, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259 (1999)
- 8) 杉山大輔, 藤田智成, 中西潔: ”RU 廃棄物処分環境におけるセメント系材料の化学的変質評価 (その1) - カルシウムシリケート水和物の熱力学的溶解沈殿モデルの提案 - ” 電力中央研究所報告, T01007 (2001)
- 9) Glasser, F. P., Tyrer, M., Quillin, K., Ross, D., Pedersen, J., Goldthorpe, K., Bennett, D. and Atkins, M.: ”The Chemistry of Blended Cements and Backfills Intended for Use in Radioactive Waste Disposal ”, R&D Technical Report P98(1998)
- 10) 日本コンクリート工学協会: ”耐久性診断研究委員会 報告書 ” (1989)
- 11) Yamaguchi, T., Tanuma, S., Yasutomi, I., Nakayama, T., Tanabe, H., Katsurai, K., Kawamura, W., Maeda, K., Kitao, H. and Saigusa, M.: ”A STUDY ON CHEMICAL FORMS AND MIGRATION BEHAVIOR OF RADIONUCLIDES IN HULL WASTES ”, Radioactive Waste Management and Environmental Remediation ASME 1999(1999)
- 12) Kindness, A., Lachowski, E., Minocha, K. and Glasser, P.: ”Immobilisation and fixation molybdenum(VI) by Portland cement ”, Waste Management, Vol.14, No.2, pp.97-102(1994)
- 13) Thomason, H.P. and Williams, S.J.: ”Near-Field Solubility Studies, UK Nirex Ltd Report ”, NSS/R128 (1992)
- 14) 佐藤治夫: ”放射性廃棄物地層処分における緩衝材および岩体中の核種移行に関する研究 ” PNC TN8410 97-202(1998)
- 15) 安田和弘, 横関康裕, 河田陽介, 古澤勇二: ”カルシウム溶出に伴うコンクリートの物理性能及び物質移行性能の変化に関する検討 ”, セメント・コンクリート論文集, No.56, pp.492-498 (2003)
- 16) 佐藤治夫, 芦田敬, 小原幸利, 油井三和, 梅木博之, 石黒勝彦: ”ベントナイト及び岩石中の核種の実効拡散係数 ”, PNC TN 8410 92-164(1992)
- 17) Kato, H., Muroi, M., Yamada, N., Ishida, H. and Sato, H.: ”Estimation of effective diffusivity in compacted bentonite ”, MRS Symp, Vol.353, pp.277-284(1995)
- 18) 志村聡, 村瀬拓也, 赤坂秀成, 加藤耕一, 加藤博康, 齊藤茂幸: ”海外ベントナイトの緩衝材適用性調査検討 (2) - 実効及び見かけの拡散係数の評価 ” 日本原子学会「1995 春の年会」, p.456 (1995)
- 19) 佐藤治夫: ”圧縮ベントナイト中の拡散移行経路の異方性に関する基礎的研究 ” サイクル機構技報, No.16, pp.125-136(2002)
- 20) Kato, H., Nakazawa, T., Ueta, U. and Yato, T.: ”Measurements of Effective Diffusivities of Tritiated Water in Sand-mixed Bentonite ”, Radioactive Waste Management and Environmental Remediation ASME (1999)
- 21) 動力炉・核燃料開発事業団: ”地層処分研究開発の現状 (平成5年度) ”, PNC TN1410 94-094, p116(1994)

- 22) 三原守弘, 伊藤勝, 加藤博康, 上田真三: "カルシウム型ベントナイトのトリチウム, セシウム, ヨウ素及び炭素の実効拡散係数の取得", JNC TN8430 99-011(1999)
- 23) 三倉通孝, 立山伸治, 加藤博康, 金子昌章, 村瀬拓也, 塚本政樹, 稲継成文: "TRU 廃棄物処分における硝酸塩の影響(4) - セメント系材料及び岩の分配係数への影響 - ", 日本原子力学会「2004年秋の大会」, p.678(2004)
- 24) 嶺達也, 三原守弘, 加藤大生: "セメント系材料の影響を受けた条件での圧縮成型ベントナイトに対する核種の分配係数", JNC TN8430 99-012(1999)
- 25) 小田治恵, 池田孝夫, 柴田雅博 "Sn(IV)のベントナイト・岩石への収着実験およびベントナイト中の拡散実験", JNC TN8400 99-073(1999)
- 26) 渋谷朝紀, 陶山忠宏, 柴田雅博: "核種のベントナイトおよび岩石に対する核種の分配係数" JNC TN8410 99-051(1999)
- 27) Sato, H. Shibutani, T. Tachi, Y. Ota. K.Amano, K. and Yui, M.: "Diffusion behaviour of nuclides considering pathways fractured crystalline rock" PNC Technical Report, PNC TN 84710 97-127(1997)
- 28) 加藤大生, 嶺達也, 三原守弘, 大井貴夫, 本田明: "セメント系材料に対する核種の収着データベースの整備", JNC TN8400 2001-029(2002)

Appendix A セメントペースト硬化体に対する核種の収着分配測定結果

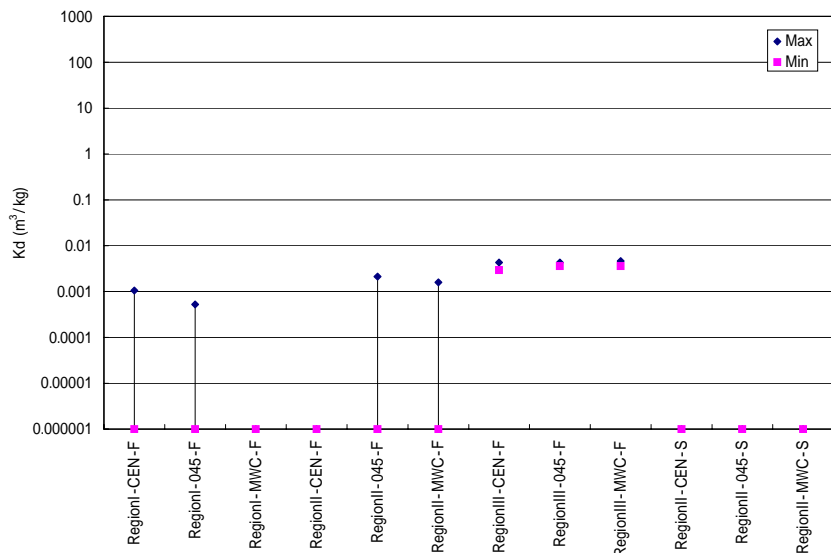


図 A-1 有機炭素のセメントペースト硬化体に対する収着分配係数
(0.000001 m³/kg は 0m³/kg を示す)

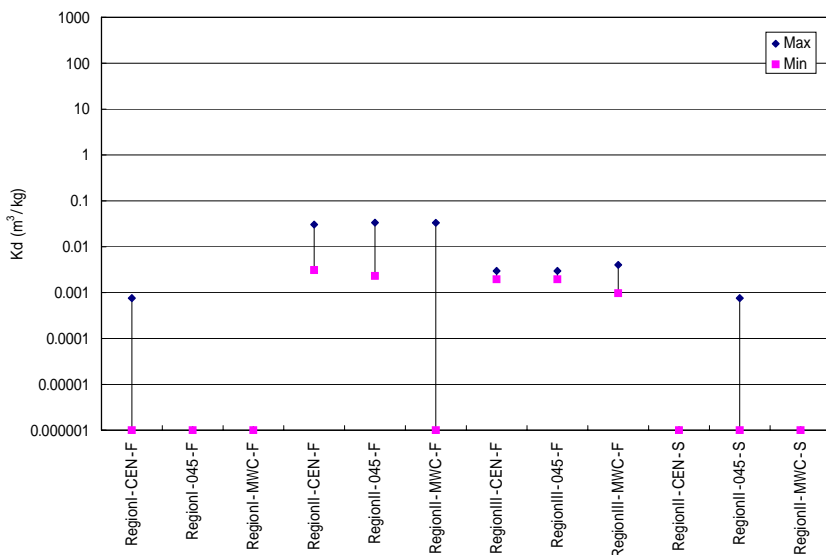


図 A-2 Cl のセメントペースト硬化体に対する収着分配係数
(0.000001 m³/kg は 0m³/kg を示す)

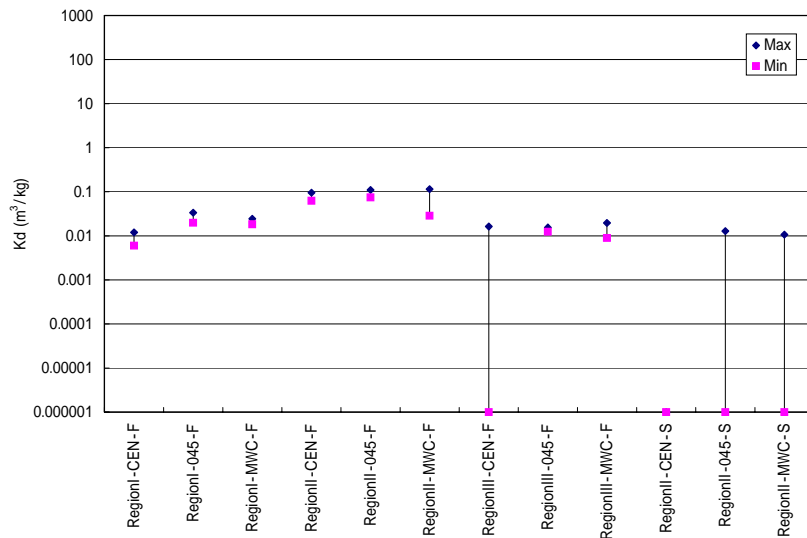


図 A-3 I のセメントペースト硬化体に対する収着分配係数
(0.000001 m³/kg は 0m³/kg を示す)

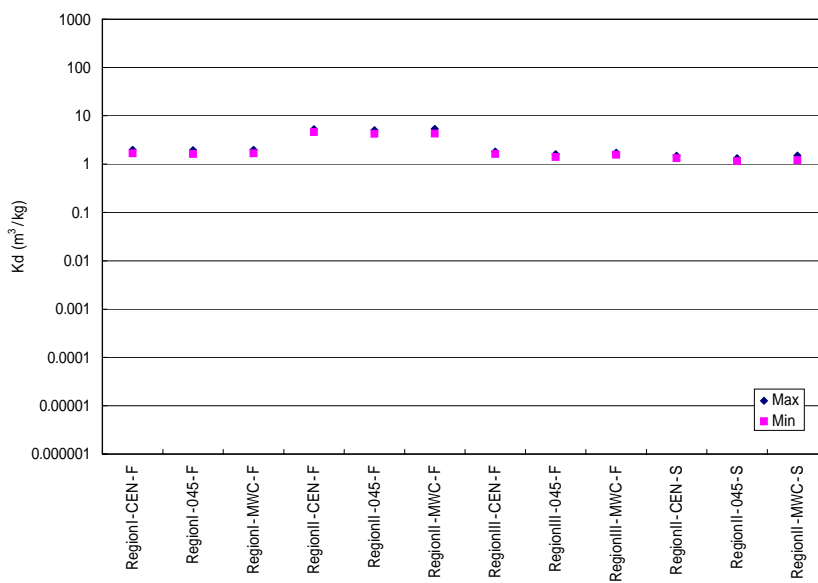


図 A-4 無機炭素のセメントペースト硬化体に対する収着分配係数
(0.000001 m³/kg は 0m³/kg を示す)

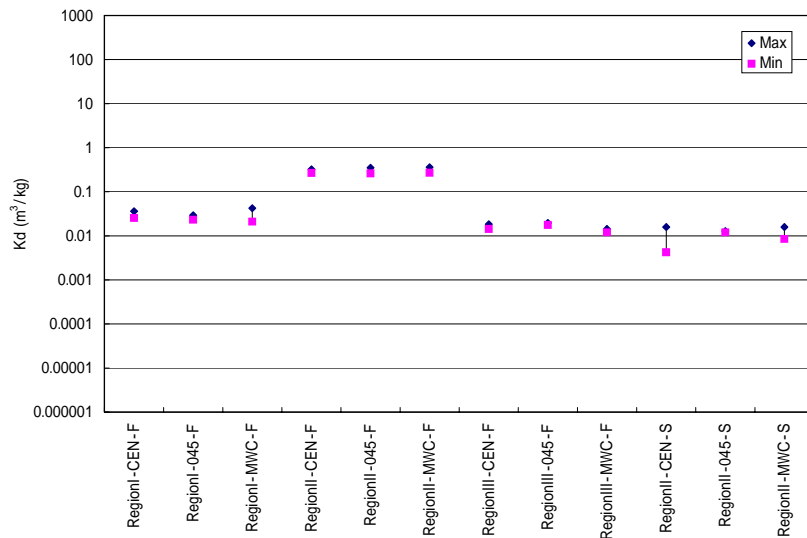


図 A-5 Se のセメントペースト硬化体に対する収着分配係数

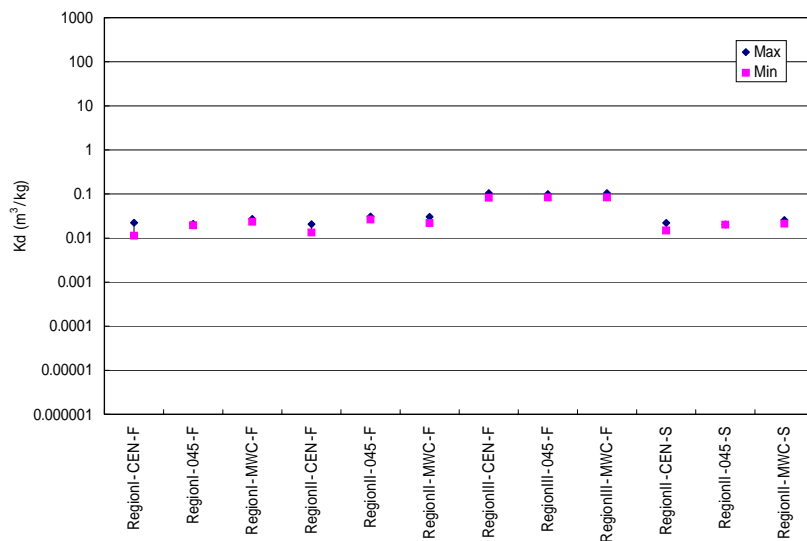


図 A-6 Cs のセメントペースト硬化体に対する収着分配係数

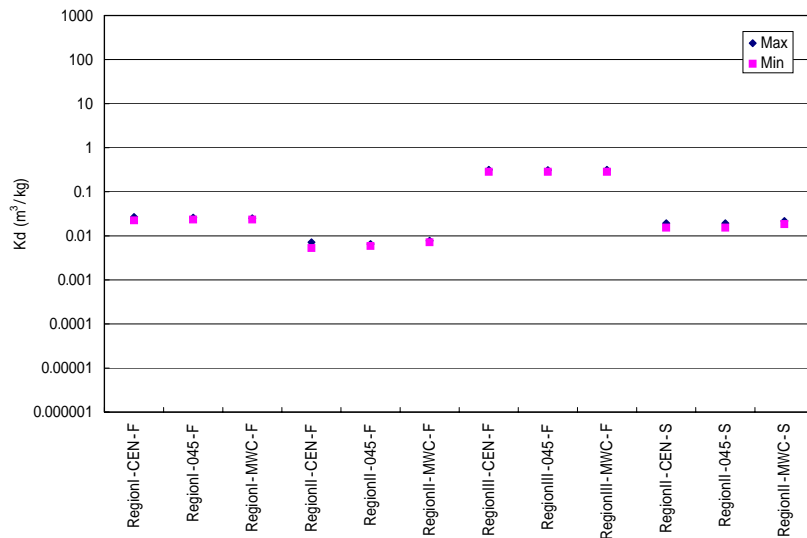


図 A-7 Sr のセメントペースト硬化体に対する収着分配係数

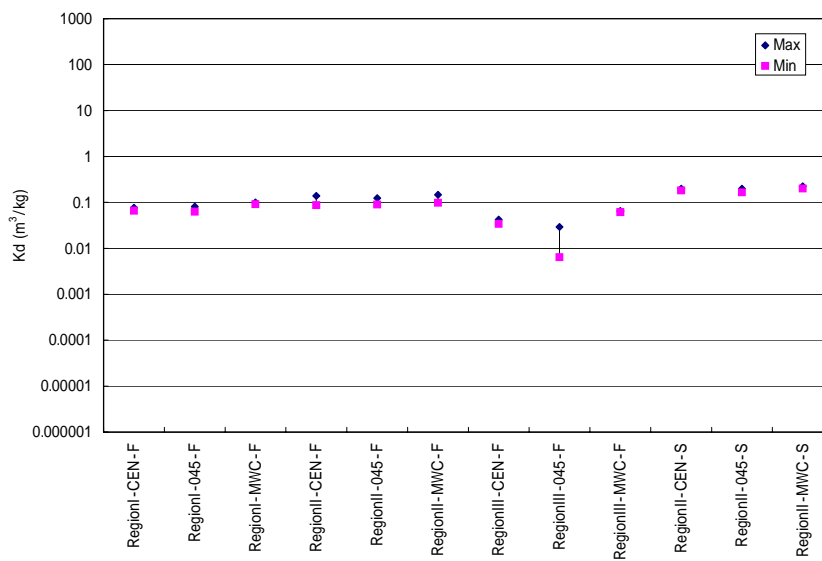


図 A-8 Ni のセメントペースト硬化体に対する収着分配係数

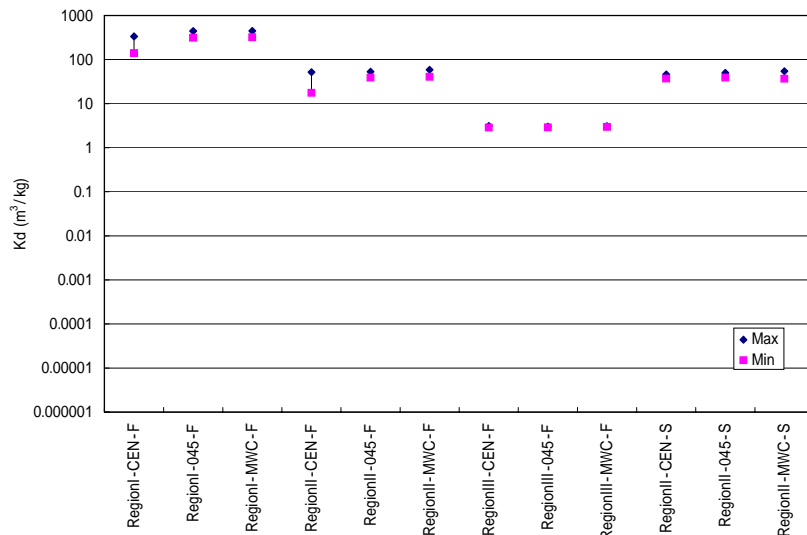


図 A-9 Sn のセメントペースト硬化体に対する収着分配係数

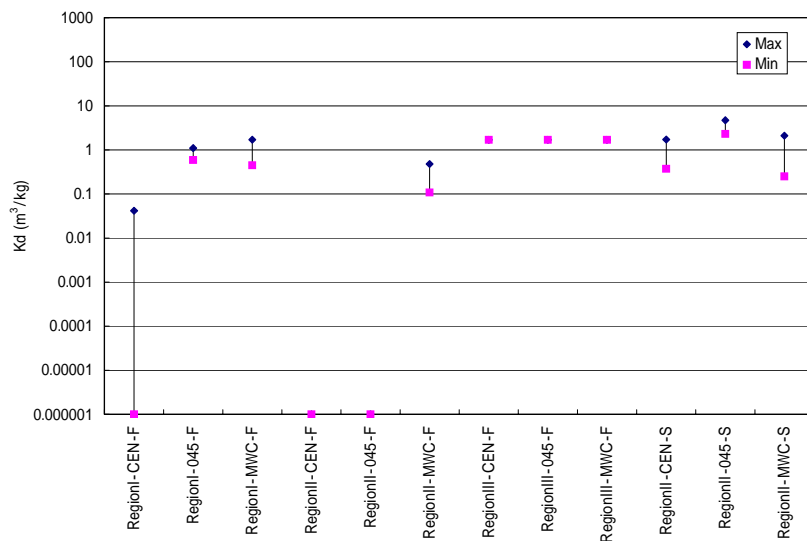


図 A-10 Nb のセメントペースト硬化体に対する収着分配係数

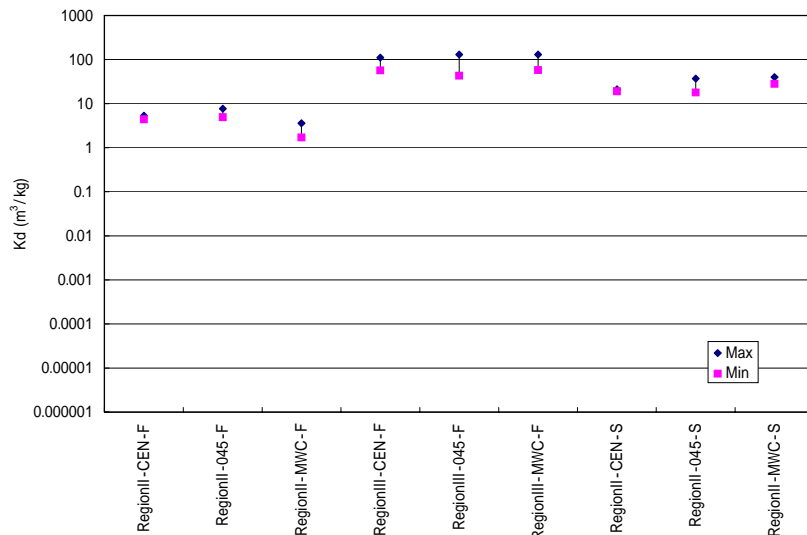


図 A-11 Am のセメントペースト硬化体に対する収着分配係数

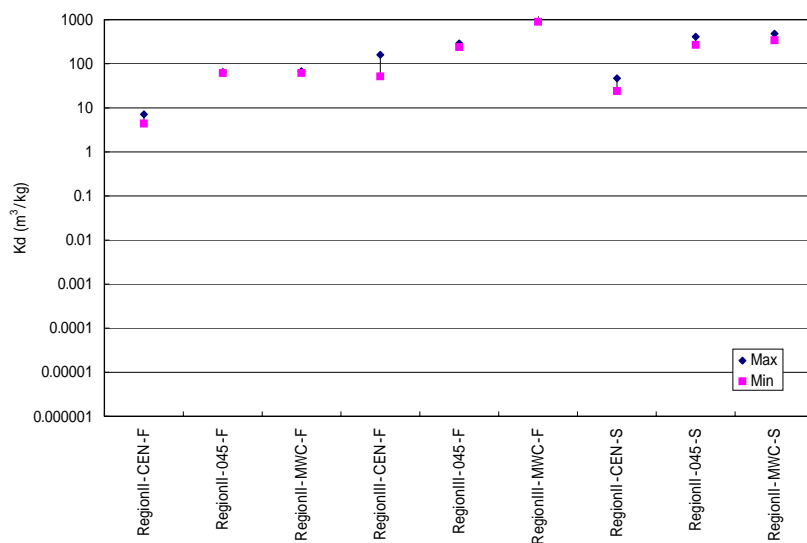


図 A-12 Th のセメントペースト硬化体に対する収着分配係数

Appendix B 圧縮成型ベントナイトに対する核種の見かけの拡散係数測定結果

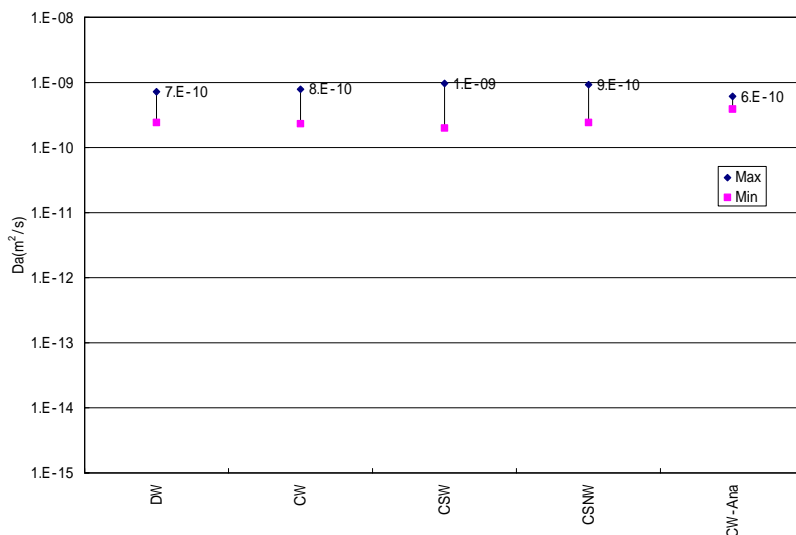


図 B-1 HTO の圧縮成型ベントナイト中の見かけの拡散係数

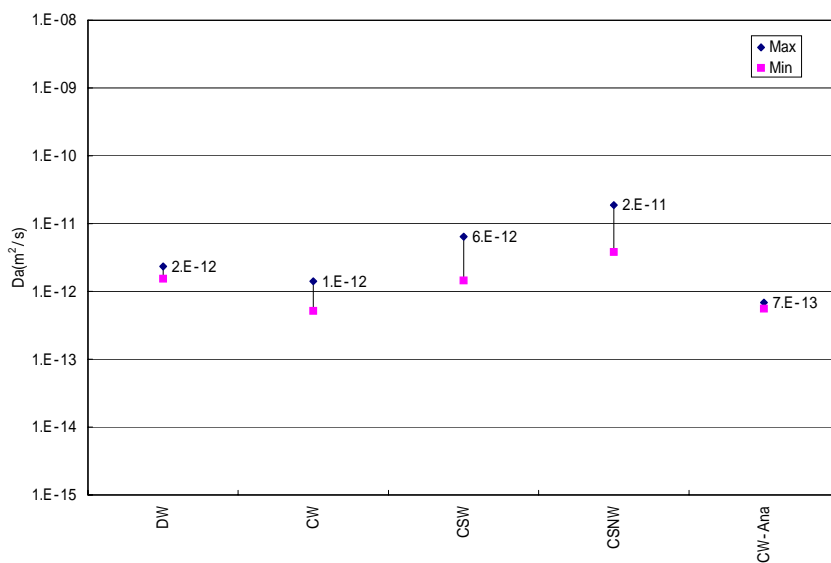


図 B-2 Cs の圧縮成型ベントナイト中の見かけの拡散係数

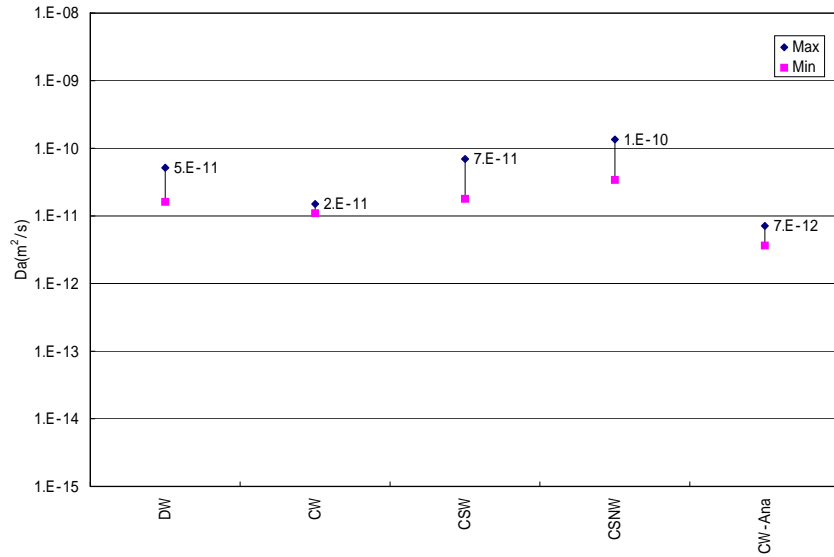


図 B-3 Sr の圧縮成型ベントナイト中の見かけの拡散係数

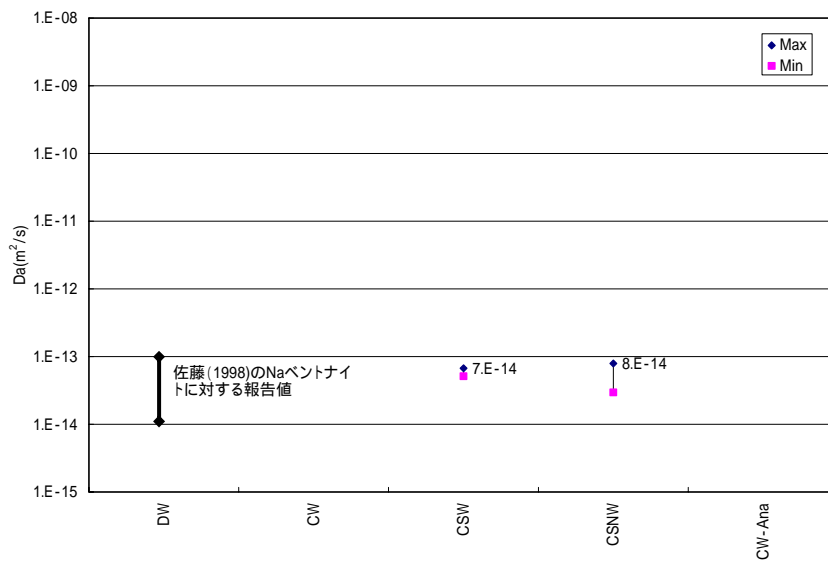


図 B-4 Zr の圧縮成型ベントナイト中の見かけの拡散係数

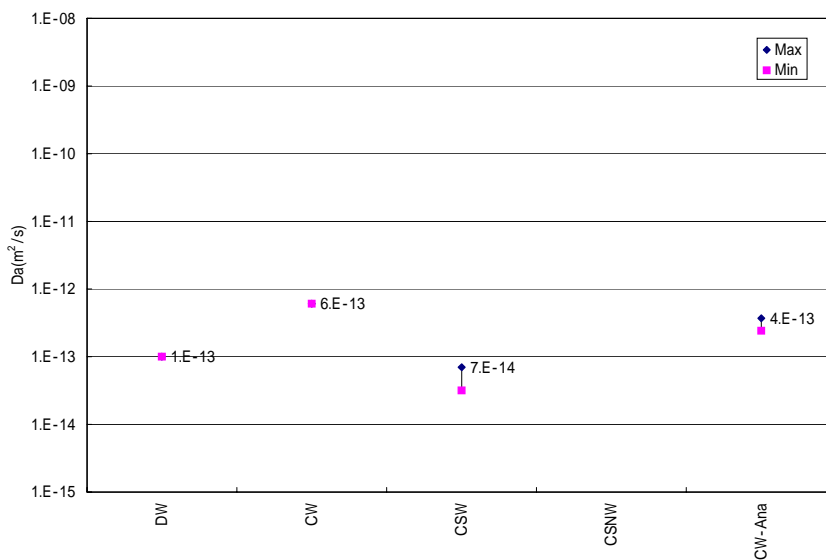


図 B-5 Nb の圧縮成型ベントナイト中の見かけの拡散係数

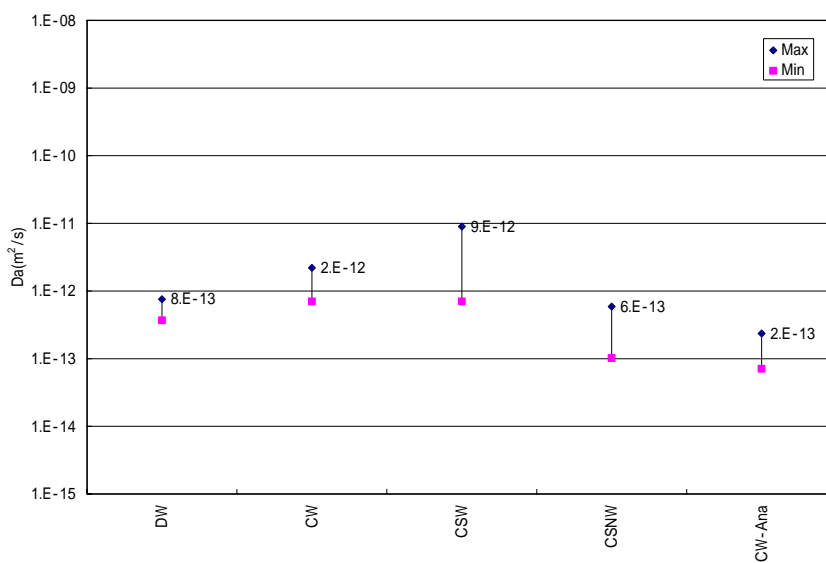


図 B-6 Ni の圧縮成型ベントナイト中の見かけの拡散係数

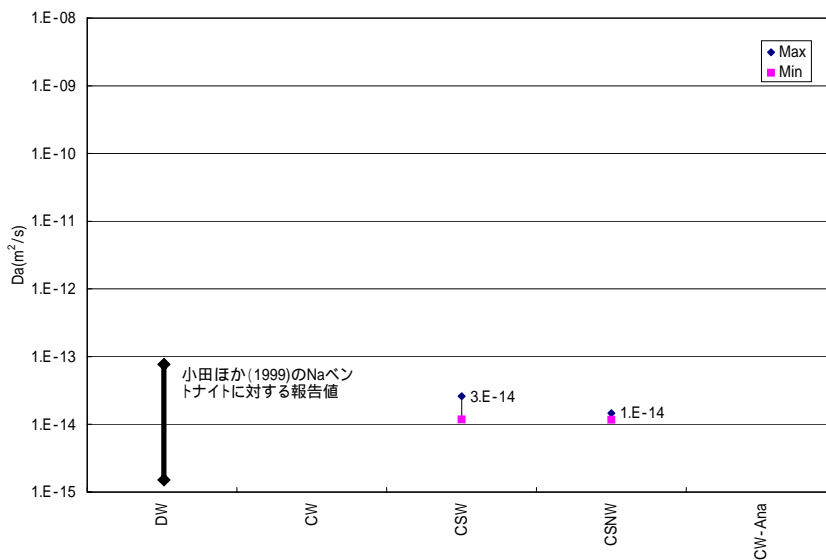


図 B-7 Sn の圧縮成型ベントナイト中の見かけの拡散係数

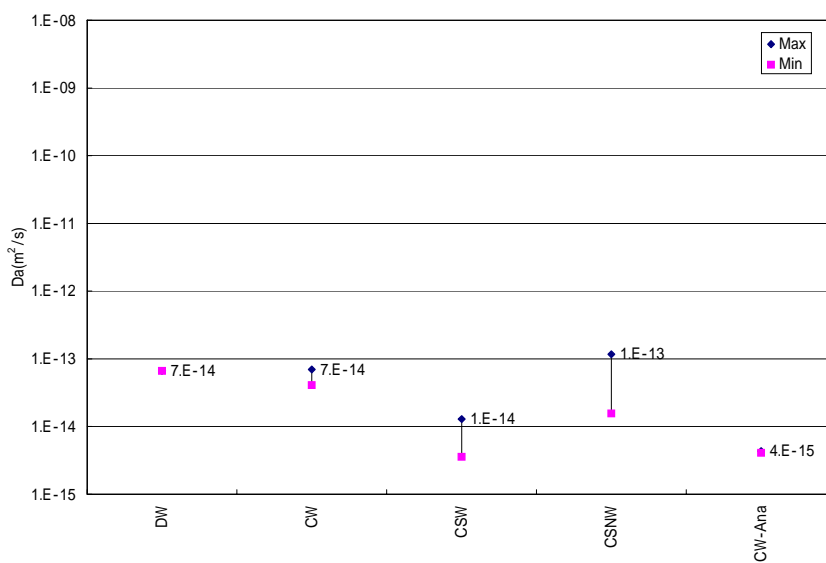


図 B-8 Am の圧縮成型ベントナイト中の見かけの拡散係数

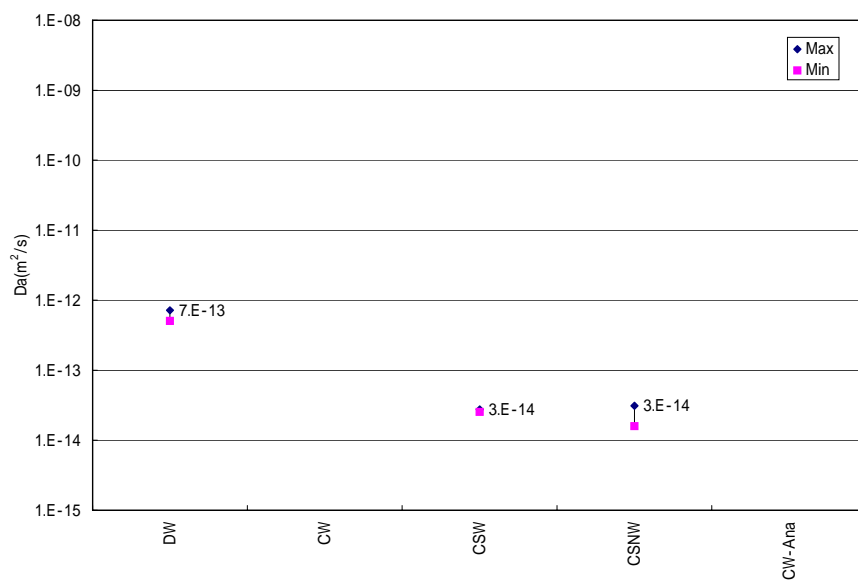


図 B-9 Np の圧縮成型ベントナイト中の見かけの拡散係数

Appendix C 酸化性条件におけるセメント系材料に対する元素の収着分配係数

C1. はじめに

酸化還元反応によって化学形態の変化する元素 (Se, Tc, Pa, Np, Pu 及び U) の酸化性条件におけるセメントモルタルに対する収着分配係数を設定の詳細を示す。

C2. 設定方法

セメント系材料の Se については、加藤ら¹⁾の実測値に基づき $0.05\text{m}^3/\text{kg}$ と設定した。また、Tc について加藤らがまとめたセメント系材料に対する核種の収着データベース¹⁾から、酸化性条件でのセメントペーストに対する実測値を参照して $0.0001\text{m}^3/\text{kg}$ とした。Np, Pu 及び U については、Allard et al. の実測値²⁾の分布から設定した。Allard et al. が得た各原子価の核種のセメント系材料に対する収着分配係数の分布を図-C1 に示す。Pa については、化学アナログとして、Np の値を設定した。設定した値を表-C1 に示す。これらの値は、セメントペーストを対象としているため、セメントモルタルの値として 0.25 を乗じて設定した。

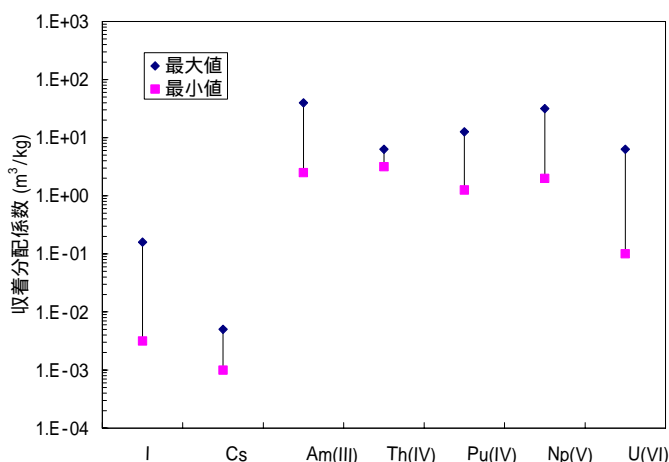


図-C1 各原子価の核種のセメント系材料に対する収着分配係数 (Allard et al., 1984 のデータ²⁾に基づく)

表-C1 酸化性条件におけるセメント系材料に対する元素の収着分配係数の設定結果 (単位: m^3/kg)

	セメントペースト	セメントモルタル
Se	0.05	0.0125
Tc	0.0001	0.000025
U	0.1	0.025
Pu	0.1	0.025
Np, Pa	1	0.25

参考文献

- 1) 加藤大生, 嶺達也, 三原守弘, 大井貴夫, 本田明: "セメント系材料に対する核種の収着データベースの整備", JNC TN8400 2001-029(2002)
- 2) Allard, B., Eliasson, L. and Andersson, K.: "SORPTION OF Cs, I AND ACTINIDES IN CONCRETE SYSTEM", SKB 84-15(1984)

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
物質の量	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	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (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
(物質の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

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	ゼツタ	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3. 固有の名称とその独自の記号で表される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 ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ¹ ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ⁻¹ ・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 ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光度 (放射能)	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。
- (b) 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“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含む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	
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻¹	
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²	
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg ⁻¹ ・s ⁻²	
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹	
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²	
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻³	
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム	J/K	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹	
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹	
熱伝導率	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²	
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹	
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²	
体積電荷	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹	
電気変位	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ¹ ・A	
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ¹ ・A	
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²	
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²	
モルエントロピー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹	
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・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 ・s ¹ ・A	
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³	
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ⁻¹ ・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 ⁻¹ ・s ⁻³ =kg ⁻¹ ・s ⁻³	

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バイン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
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=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ¹¹ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	Torr	1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m