

種々のセメント系材料に対する
ヨウ素、セシウムの吸着試験

1997年6月

動力炉・核燃料開発事業団

東 海 事 業 所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所

技術開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technology Management Section Tokai Works Power Reactor and Nuclear
Fuel Development Corporation 4-33, Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation) 1997

公 開 資 料

P N C T N8410 97-258

1 9 9 7 年 6 月

種々のセメント系材料に対するヨウ素、セシウムの吸着試験

報告者 嶺 達也* 三原 守弘**
伊藤 勝** 加藤 大生***

要 旨

放射性廃棄物を地層処分する場合、処分場の構造材や廃棄体間の充填材としての使用が考えられているセメント系材料には処分環境の化学的雰囲気をアルカリ性に保ち、TRU核種の溶解度を下げるという機能のほかに、セメント系材料自体に核種を吸着させて、その移行を遅延させる機能も期待できると考えられる。

本報告書は、種々のセメントペーストについての核種の吸着能を調べるため、処分環境において可溶性の一価の陰イオンとしてヨウ素を、陽イオンとしてセシウムを対象として分配係数を取得した結果をまとめたものである。対象としたセメントペーストは普通ポルトランドセメントペースト(OPCペースト)、中庸熱ポルトランドセメントペースト(MHPペースト)、高炉スラグ90%混合普通ポルトランドセメントペースト(BFSペースト)及びフライアッシュ90%混合普通ポルトランドセメントペースト(PFAペースト)の4種類である。結果は以下のとおりである。

(1)ヨウ素の吸着能が高かったセメント系材料はOPCペースト及びMHPペーストであった。ヨウ素はCaO/SiO₂モル比が高いC-S-Hゲル(ケイ酸カルシウム水和物)、AFt(エトリンガイト)及びAFm(モノサルフェート水和物)に吸着されるとの報告があり、これらのセメント系材料は他の2つよりもC-S-Hゲル中のCaO/SiO₂モル比が高く、AFt及びAFmの含有量が高かった。また、浸漬期間に依らずヨウ素の吸着が期待できるセメント系材料はMHPペーストであった。そして、トレーサ溶液初期濃度が1×10⁻⁵mol/lであれば、MHPペーストに対するヨウ素の分配係数は約100ml/gであった。

(2)一般的に陽イオン交換性を持つと言われるシリカゲルの含有量が比較的多いPFAペーストに対するセシウムの分配係数は浸漬期間に依存せず、平均5ml/gであり、他のセメント系材料と比較すると安定していることが分かった。

* 三井造船株式会社 原子力事業部

** 東海事業所 環境技術開発部地層処分開発室

*** 検査開発株式会社

目 次

1 はじめに	1
2 既存の研究と本研究の方針	2
2.1 分配係数について	2
2.2 吸着試験方法	2
2.3 セメント系材料に対する従来の吸着試験	6
2.4 本研究の方針	6
3 試験概要	16
3.1 セメント系材料の準備	16
3.2 トレーサの選定	17
3.3 試験項目	17
3.4 試験条件	17
3.5 試験手順	17
4 試験結果と考察	26
4.1 フィルタ及び浸漬期間影響試験結果	26
4.2 液固比影響試験結果	27
4.3 種々のセメント系材料に対する吸着試験結果	28
5 まとめ	40
5.1 フィルタ及び浸漬期間影響試験	40
5.2 液固比影響試験	40
5.3 種々のセメント系材料に対する吸着試験	40
6 今後の課題	41
7 謝辞	42
8 参考文献	43
卷末資料-1 「セメント水和物の分析方法」	45
卷末資料-2 「試験データ集」	51

図目次

図2-1 Batch法概念図	9
図2-2 Through-Diffusion法概念図	9
図2-3 In-Diffusion法概念図	9
図2-4 Out-Diffusion法概念図	11
図2-5 Back-to-Back Diffusion法概念図	11
図2-6 Reservoir-Depletion法概念図	11
図2-7 Colum & High Pressure対流法概念図	13
図2-8 コンクリートに対するヨウ素吸着試験での 浸漬期間度数分布	15
図2-9 コンクリートに対するセシウム吸着試験での 浸漬期間度数分布	15
図3-1 セメント系材料の作製	24
図3-2 吸着試験手順	25
図4-1 ろ過フィルタ及び浸漬時間がヨウ素の 分配係数に与える影響	30
図4-2 ろ過フィルタ及び浸漬時間がセシウムの 分配係数に与える影響	30
図4-3 ろ過方法による成分濃度の違い	31
図4-4 液固比がヨウ素及びセシウムの 分配係数に与える影響	33
図4-5 液固比に対する全浸出成分濃度	35
図4-6 種々のセメント系材料に対する ヨウ素の分配係数	37
図4-7 種々のセメント系材料に対する セシウムの分配係数	37
図4-8 浸漬期間に対するヨウ素の分配係数	38
図4-9 浸漬期間に対するセシウムの分配係数	39

表目次

表2-1 吸着実験方法の特徴	8
表3-1 セメント及び混和材の化学組成及び鉱物組成 (wt.%)	19
表3-2 種々のセメント系材料の化学組成、水和物組成、水和物組成 の分析結果 (wt.%) 及び比表面積	20
表3-3 難溶性ヨウ素化合物の溶解度積及び溶解度	21
表3-4 試験条件	22
表3-5 液相成分の分析方法	23

1 はじめに

放射性廃棄物を地層処分する場合、処分場の構造材や廃棄体間の充填材としての使用が考えられているセメント系材料には処分環境の化学的雰囲気をアルカリ性に保ち、TRU核種の溶解度を下げるという機能のほかに、セメント系材料自体に放射性核種（以下、核種と記す）を吸着させて、その移行を遅延させる機能も期待できると考えられる。これまでセメント系材料に対する核種の吸着試験が行われているが、その構成鉱物まで分析し、報告した例はない。

本報告書は種々のセメント系材料に対する核種の吸着能を調べるため、構成鉱物の分析を実施し、さらに、処分環境において可溶性の一価の陰イオンとしてヨウ素を、陽イオンとしてセシウムを対象として分配係数を取得した結果をまとめたものである。対象としたセメント系材料は普通ポルトランドセメントペースト（OPCペースト）、中庸熱ポルトランドセメントペースト（MHPペースト）、高炉スラグ90%混合普通ポルトランドセメントペースト（BFSペースト）及びフライアッシュ90%混合普通ポルトランドセメントペースト（PFAペースト）の4種類である。

2 既存の研究と本研究の方針

これまでセメント系材料に対する核種の吸着データが取得されている。ここではまず、既存の吸着試験方法及びそれらの特徴について述べる。次に既存の吸着試験結果についてどのような問題点があったのかを述べ、本研究の方針を示す。

2.1 分配係数の定義¹⁾

放射性廃棄物の処分システムの安全評価を行う場合、重要な入力データとして分配係数が挙げられる。分配係数とは廃棄物から地下水中に浸出した核種の人工バリア及び天然バリアへの吸着を定量化した値で一般的に以下の式で定義することができる。

$$\text{分配係数 (ml/g)} = \frac{\text{吸着平衡後の単位質量あたりの固相中の元素の量 (mol/g)}}{\text{吸着平衡後の単位容積あたりの液相中の元素の量 (mol/ml)}}$$

2.2 吸着試験方法

実験室規模でセメント系材料に対する核種の吸着データを取得する方法について、Berryら¹⁾は9種類の試験方法についてまとめている。また、それぞれの方法の概念図を図2-1～図2-7に示し、それらの内容を以下に示す。

Batch法・・・図2-1参照

セメント系材料を微粉碎したものに核種を含む溶液を混合し、核種がセメント系材料に吸着したときの溶液濃度を測定する。分配係数は溶液の濃度変化、溶液の体積及び固相の重量から以下の式を用いて計算される。

$$K_D = (C_0 - C_1) / C_1 \cdot V / M$$

K_D : 分配係数 (ml/g)

C_0 : 試験前の溶液中の核種初期濃度 (mol/l)

C_1 : 試験後の溶液中の核種濃度 (mol/l)

V : 液液体積 (ml)

M : 固相重量 (g)

Through-Diffusion法・・・図2-2参照

核種を含むセル（リザーバセル）と含まないセル（測定セル）の間に数mmのセメント系材料のサンプルを設置し、リザーバセルから核種がサンプル中を通過して測定セルに拡散していくときの測定セル中の核種濃度上昇の時間変化を観察する。本法は測定セル内の核種濃度が上昇し、その上昇速度が一定になるまで続けられ

る。この上昇曲線を線形的に近似すると次のようになる。

$$\frac{C_t \cdot V \cdot L}{C_0 \cdot A} = D_i \cdot t - \frac{\alpha \cdot L^2}{6} = D_i \cdot t - \frac{(\phi + \rho \cdot K_D) \cdot L^2}{6}$$

C_0 : リザーバセル内核種濃度 (mole/m^3)

C_t : 時間 t での測定セル内核種濃度 (mole/m^3)

V : 測定セル体積 (m^3)

L : サンプル厚さ (m)

A : サンプル断面積 (m^2)

D_i : 実効拡散係数 (m^2/s)

t : 時間 (s)

α : 吸着容量 (-) , $\alpha = \phi + \rho \cdot K_D$

ϕ : サンプル空隙率 (-)

ρ : サンプルの見かけの密度 (kg/m^3)

K_D : 分配係数 ($\text{m}^3/\text{kg} = \times 10^3 \text{ml/g}$)

左式を縦軸に右式を横軸に取り、その直線の傾きから実効拡散係数を、切片から分配係数を求めることができる。

In-Diffusion法・・・図2-3参照

円柱型のセメント系材料の一断面にできるだけ長い時間、核種を含む一定濃度の溶液を接触させ、溶液が浸透したサンプルの断面を薄く平行に切り取る。そして、その切り取った断片の両面の核種濃度を測定し、その断片の厚さ、つまり浸透深さに対する濃度分布を分析する。この分布は次の式で表すことができ、分配係数は非吸着性核種の実効拡散係数を代入すれば概算することができる。

$$C_x/C_0 = \text{erfc} \left\{ x/2 (D_i \cdot t / \alpha)^{1/2} \right\}$$

C_x : 深さ = x での核種濃度 (mole/m^3)

C_0 : 溶液中の核種初期濃度 (mole/m^3)

$$\text{erfc} : \text{余誤差関数} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\xi^2} d\xi$$

x : 浸透深さ (m)

α : 吸着容量 (-) , $\alpha = \phi + \rho \cdot K_D$

Out-Diffusion法・・・図2-4参照

予め核種を含有させた円柱型のセメント系材料を核種の入っていない溶液に浸漬させ、溶液中に拡散してくる核種の濃度を測定す

る。このときの溶液中の核種濃度は次の式で表すことができる。

$$C_t = (2 \cdot S_0 \cdot A / V) \cdot (D_i \cdot t / \alpha \cdot \pi)^{1/2}$$

S_0 : 初期溶液中の核種量 (mol/m^3)

α : 吸着容量 (-) , $\alpha = \phi + \rho \cdot K_D$

Back-to-Back Diffusion法・・・図2-5参照

核種を含む溶液をセメント系材料で両側から挟み込み、セメント系材料中に拡散していく核種の分布を調査する。

$$S = Q / 2 (\pi \cdot D_i \cdot t / \alpha)^{1/2} \cdot \exp(-x^2 \cdot \alpha / 4 \cdot D_i \cdot t)$$

S : 溶液中の核種量 (mol/m^3)

Q : 試料単位面積あたりの核種量 (mol/m^2)

x : 試料表面から核種が拡散した距離

α : 吸着容量 (-) , $\alpha = \phi + \rho \cdot K_D$

Reservoir-Depletion法・・・図2-6参照

円柱型のセメント系材料をリザーバ中での核種を含む溶液に接触させることにより核種がセメント系材料中に拡散し、そのときの溶液の減少量を測定する。このとき、円柱型のサンプルが長ければ、次の式から溶液中の核種濃度を算出できる。

$$C_t = C_0 \cdot \exp(A^2 \cdot D_i \cdot \alpha \cdot t / V^2)$$

$$\cdot \operatorname{erfc}(A^2 \cdot D_i \cdot \alpha \cdot t / V^2)^{1/2}$$

C_t : 時間 t での溶液中の核種濃度 (mol/m^3)

C_0 : 溶液初期濃度 (mol/m^3)

A : 接触面の面積 (m^2)

V : リザーバ中の溶液体積 (m^3)

α : 吸着容量 (-) , $\alpha = \phi + \rho \cdot K_D$

$$\operatorname{erfc} : \text{余誤差関数} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\xi^2} d\xi$$

Column&High Pressure対流法・・・図2-7参照

ブロック状に成型したセメント系材料の片端（入口）から核種を含むある一定濃度の溶液を循環させ、出口の溶液濃度が入口の溶液濃度に近づいていく様子を観察する。このとき、分配係数は次の式で表される。

$$\rho \cdot K_D = \frac{(C_t = 0.5 C_0 \text{ のときのサンプルを透過する水の体積})}{(\text{ブロック状のサンプル体積})}$$

この方法で分配係数を測定するのに必要な時間は次の式で与えら

れる。

$$t_c = (\rho \cdot K_D \cdot l^2) / K \cdot \Delta p$$

t_c : $C=0.5C_0$ までの対流破過時間 (s)

K : 透水係数 (m/s)

Δp : 水の静水圧 (m)

l : サンプル長さ (m)

Thin-Section法 . . .

この方法はセメント系材料中のそれぞれの鉱物相に吸着した核種の分布を調べるもので、薄くスライスしたセメント系材料を核種を含む溶液に浸漬させ、セメント系材料中の鉱物に吸着した核種の分布をオートラジオグラフィー、核分裂トラック分析、粒子線励起X線分光法、ラザフォード後方錯乱分光法、二次イオン質量分析計などによる表面分析を行うことにより観察する。この方法は鉱物相自体の吸着特性を決定するのに重要であり、吸着挙動のモデル化に役立つ。

Sequential-Extraction法 . . .

セメント系材料中の核種の吸着試験において、吸着に寄与しない余分な鉱物を取り除くことにより吸着の原因となる鉱物を識別し、その鉱物中での核種の分布状況を観察する。

表2-1にこれらの手法の特徴をまとめた。表2-1より、本研究での試験方法としては、比較的短時間で実施でき、様々な試料での分配係数の相対的な比較が可能であるBatch法を選定した。ただし、BerryらはBatch法で得られたデータを適用するには以下に示す4点について注意しておく必要があるとしている。

- ・吸着挙動が時間に依存し、試験が長期間に及ぶ場合があるため、Batch法で使用する試験試料は、吸着挙動が平衡に達する時間が短縮されるよう微粉碎されたものが使用されている。（吸着挙動の時間依存性）
 - ・液相中の核種濃度が溶解度以上になった場合、沈殿を生じ、分配係数が大きく見積られる。（初期濃度依存性）
 - ・Batch法では核種がコロイドを形成した場合、液固分離の方法によって分離した液相中の成分濃度が異なってくる。（ろ過方法依存性）
 - ・実際の処分環境の液固比はBatch法での液固比よりかなり小さくなるため、液相中の成分濃度及び吸着サイトの数が異なってくる。（液固比依存性）
- これら4点を考慮しながら、試験を行うこととする。

2.3 セメント系材料に対する従来の吸着試験

OECD/NEAのSorption Database²⁾に記載されているセメント系材料に対するヨウ素、セシウムのBatch法による吸着試験結果について、それぞれの試験の浸漬期間を調査し、度数分布として図2-8及び図2-9に示す。ほとんどの試験の浸漬期間は30日以内であることが分かる。また、本試験で試験対象としたヨウ素及びセシウムは可溶性であるが、その適切なろ過方法や液固比の影響を検討した研究もなされていない。

Atkinsら³⁾はセメント水和物のケイ酸カルシウム水和物（以下、C-S-Hゲルと記す）、エトリンガイト（以下、AFtと記す）及びモノサルフェート水和物（以下、AFmと記す）へのヨウ素の吸着を確認し、その他のセメント水和物であるCa(OH)₂等にヨウ素は吸着しないことを確認しており、Heathら⁴⁾はC-S-Hゲル中のCaO/SiO₂モル比が1以上であれば、その表面電位が正に帶電し、陰イオンが吸着する可能性があることを示している。また、金子ら⁵⁾はアルミナセメントに水酸化カルシウムを添加してセメント水和物であるAFm型化合物の含有量を増加させることにより、従来のセメント系材料に比べ、ヨウ素の分配係数を1桁以上向上させたと報告している。さらに、大木ら⁶⁾はシリカゲルが一般的に陽イオン交換性を持つとしている（「3.1.3セメント系材料の分析」においてセメント水和物としてシリカゲルが観察された）。

このようにセメント水和物によって核種の吸着挙動が異なり、通常使用されるセメントの種類やセメント系材料の作製方法等が異なるとセメント水和物の組成も変化する。セメント水和物の定量分析が困難であるためにセメント系材料の定量分析を実施して、その水和物組成が吸着に与える影響を調査した報告はない。

2.4 本研究の方針

「2.2 吸着試験方法」において、本研究での試験方法としてはBatch法を選定したが、ここでは、batch法の問題点及びセメント系材料に対する従来の吸着試験での問題点を整理し、それらの問題点に対処できるような研究方針を示す。

2.4.1 問題点の整理

batch法の問題点は以下のとおりである。

- ①吸着挙動の時間依存性
- ②初期濃度依存性
- ③ろ過方法依存性
- ④液固比依存性

次にセメント系材料に対する従来の吸着試験での問題点を示す。

- ⑤セメント系材料の種類によってセメント水和物の組成が変化すること。

2.4.2 研究方針

以上の問題点に対処するため、本研究では以下の方針で試験を進めることとした（詳細は「3.3 試験項目」で後述する）。

- ①浸漬期間をパラメータとした試験を実施して、吸着挙動の時間依存性を調査する。
- ②初期濃度をパラメータとした試験を実施し、初期濃度が分配係数に与える影響を検討する。
- ③目開きが異なるろ過フィルタを使用してフィルタが吸着に与える影響を調査する。
- ④液固比をパラメータとした試験を実施し、液固比が分配係数に与える影響を検討する。
- ⑤試験で使用する4種類のセメントペーストの固相分析を実施して、これらセメントペーストのヨウ素、セシウムの吸着能を調査する。

表2-1 吸着実験方法の特徴

吸着試験方法	長所	短所
Batch法	装置が単純で、比較的短時間で実施できる。また温度、pH、Eh、溶液濃度等のパラメータを組み合わせて吸着挙動に関する情報を得ることが可能である。	液固比が小さい条件での分配係数を得ることが困難である。
Through-Diffusion法 In-Diffusion法 Out-Diffusion法	処分環境に近い条件でのデータ取得が可能である。	装置が複雑で、実験時間がかかる。また、温度、pH、Eh、溶液濃度等のパラメータを組み合わせた試験を実施することが
Back-to-Back Diffusion法 Reservoir-Depletion法		め、吸着挙動に関する情報を得ることができない。
Colum&High Pressure対流法	処分環境の圧力を考慮して任意の圧力を設定できる。	
Thin-Section法 Sequential-Extraction法	吸着挙動の補足的技術 (分配係数を得ることができない)	

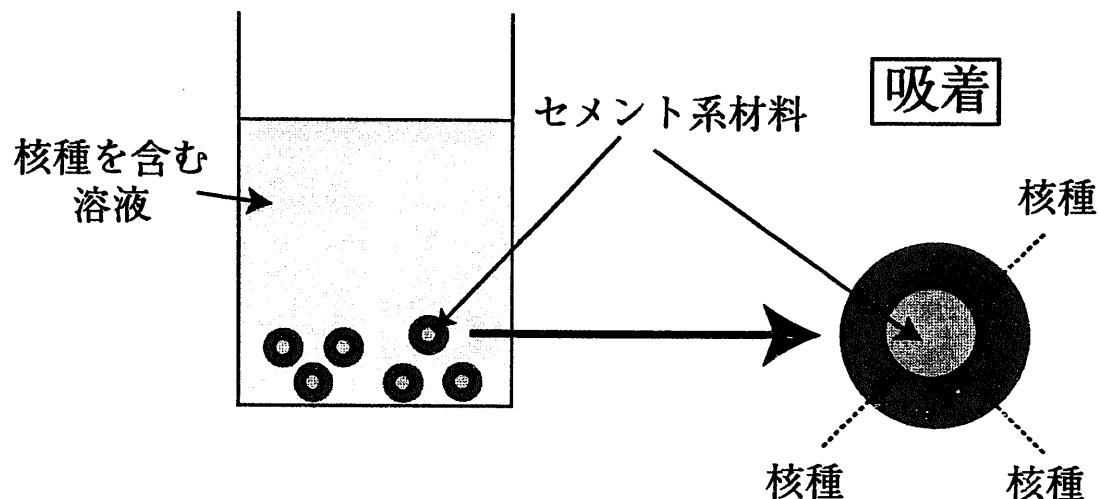


図2-1 Batch法概念図

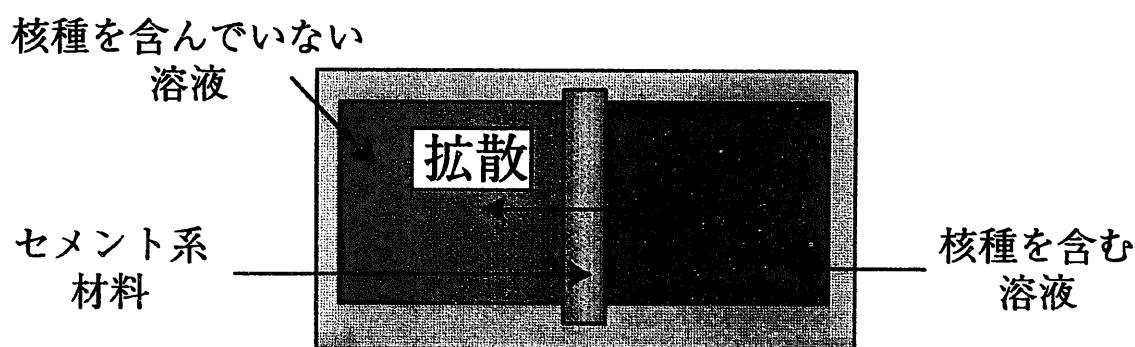


図2-2 Through-Diffusion法概念図

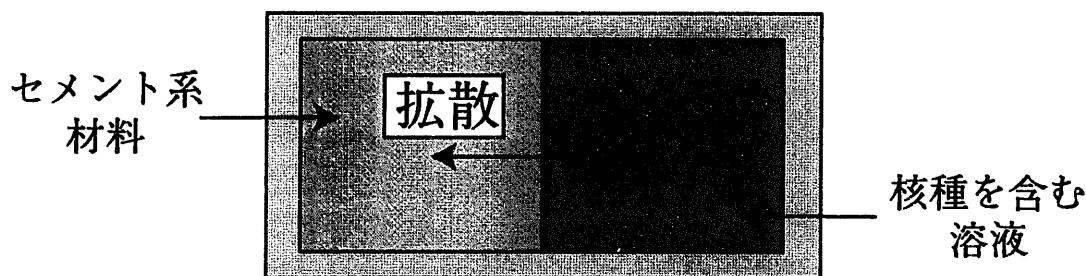


図2-3 In-Diffusion法概念図

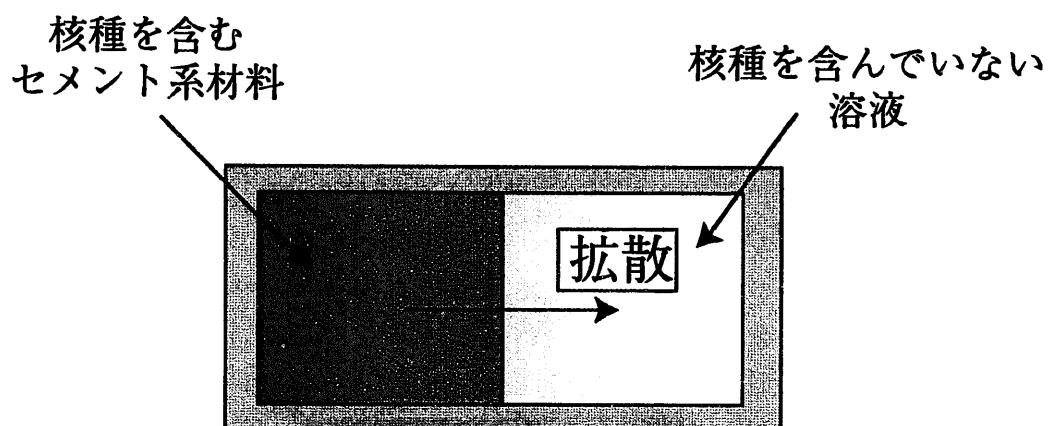


図2-4 Out-Diffusion法概念図

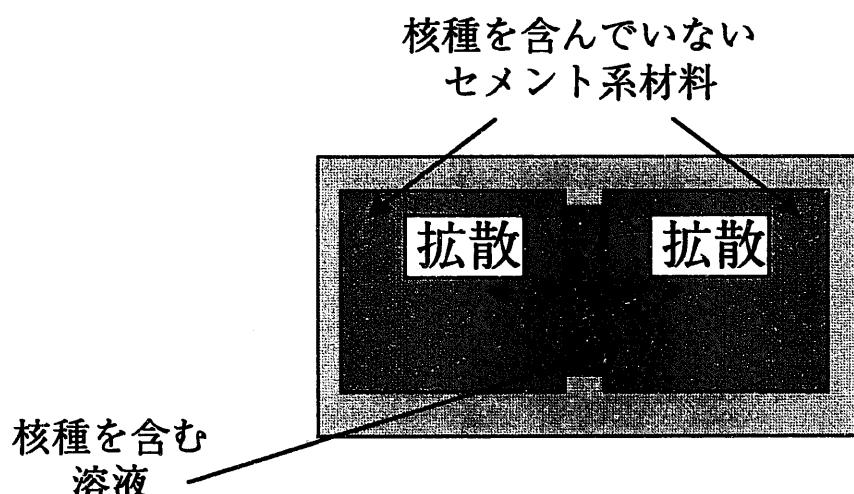


図2-5 Back-to-Back Diffusion法概念図

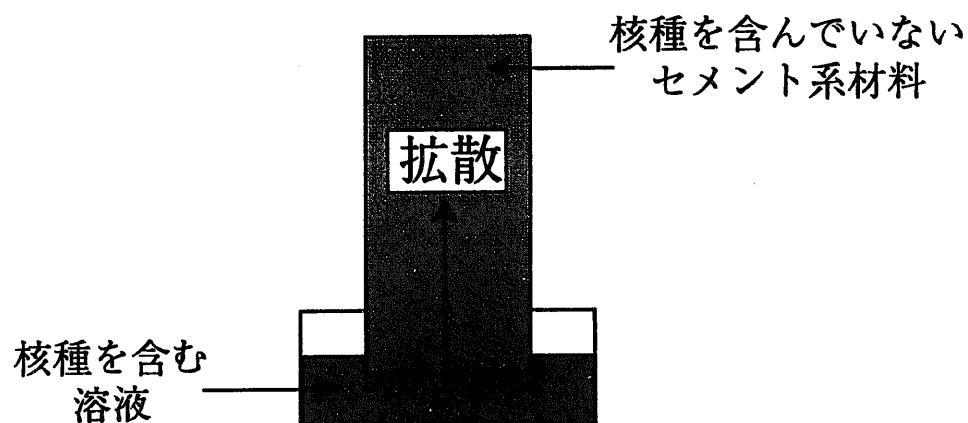


図2-6 Reservoir-Depletion法概念図

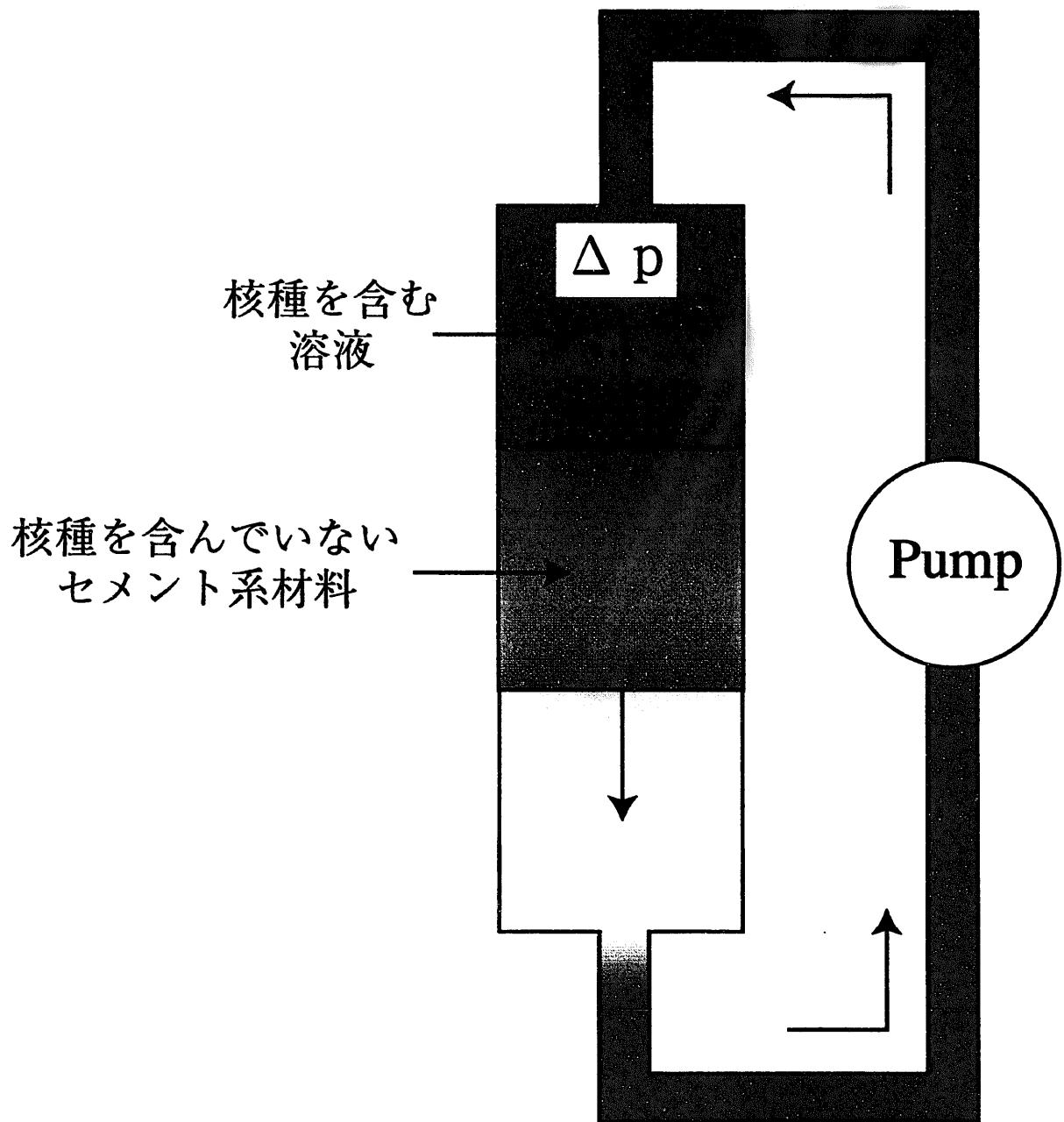


図2-7 Column & High Pressure対流法概念図

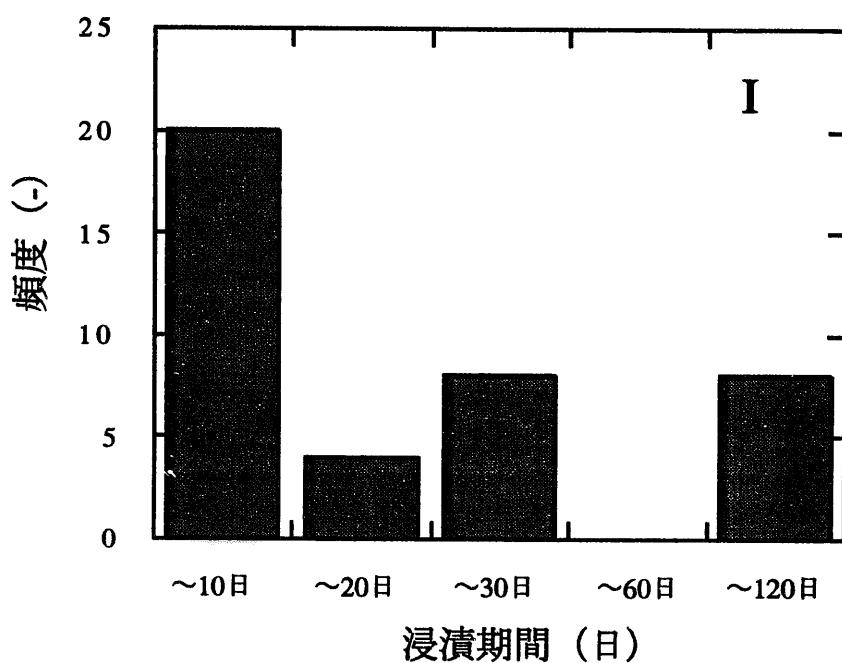


図2-8 コンクリートに対するヨウ素吸着試験での浸漬期間度数分布
(OECD/NEAのSorption Database)

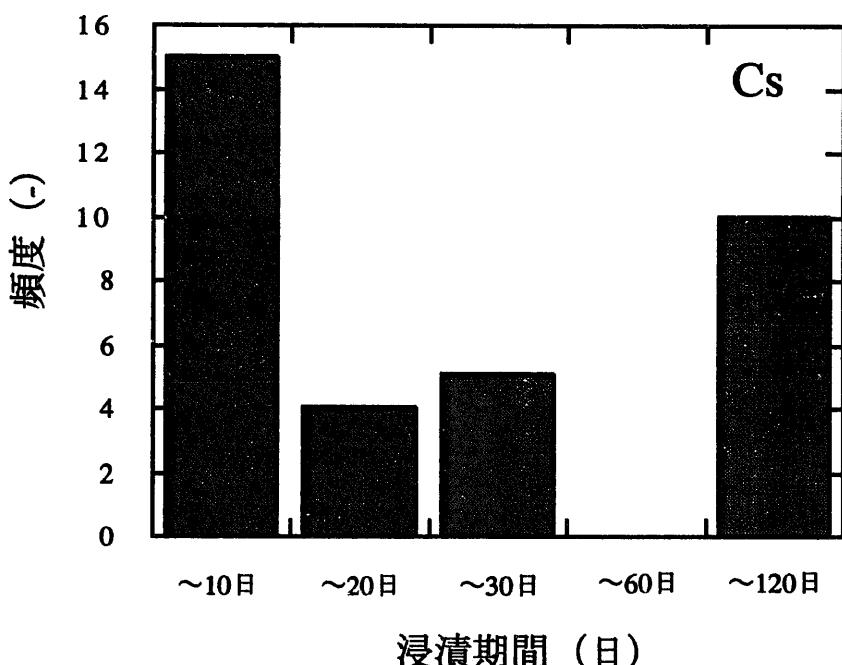


図2-9 コンクリートに対するセシウム吸着試験での浸漬期間度数分布
(OECD/NEAのSorption Database)

3 試験概要

3.1 セメント系材料の準備

3.1.1 セメントの選択

本試験では土木・建築の分野で最も使用実績のあるセメントとして普通ポルトランドセメント（OPC）、混和材として高炉スラグ（BFS）及びフライアッシュ（PFA）を使用した。また、普通ポルトランドセメントの水和物の組成の違いから吸着に対する影響を調査するため、中庸熱ポルトランドセメント（MHP）を使用した。

3.1.2 セメント系材料の作製

セメント系材料は通常、セメント、水、骨材（岩石）から成る。ここでは、骨材の吸着への影響を除くためにセメントと水から成るセメントペーストとした。試験に使用するセメント系材料はそれぞれ粉碎した普通ポルトランドセメントペースト（以下、OPCペーストと記す）、高炉スラグ90%混合普通ポルトランドセメントペースト（以下、BFSペーストと記す）、フライアッシュ90%混合普通ポルトランドセメントペースト（以下、PFAペーストと記す）及び中庸熱ポルトランドセメントペースト（以下、MHPペーストと記す）の4種類とした。図3-1にセメント系材料の作製フローを示す。

セメント及び混和材は市販品である普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント及び高炉スラグ、フライアッシュを準備した。表3-1にセメント及び混和材の化学組成及び鉱物組成を示す。混練水は蒸留水である。

まず、BFSペースト及びPFAペーストを作製するために普通ポルトランドセメントに90wt.%となるように高炉スラグ及びフライアッシュを混合した。

次に上記のように準備した普通ポルトランドセメント、高炉スラグ90%混合普通ポルトランドセメント、フライアッシュ90%混合普通ポルトランドセメント及び中庸熱ポルトランドセメントにそれぞれ水セメント比が40%となるように蒸留水を加えて練り混ぜた後、20℃で28日間水中養生した。

養生後、硬化した各セメントペーストを比表面積が同等となるようにジョークラッシャ、クロスピーターミル及びポットミルを用いて粉碎し、これらをセメント系材料とした。

3.1.3 セメント系材料の分析

本研究では、鈴木ら⁷⁾ の方法でC-S-Hゲル及びAFtを、内川ら⁸⁾ の方法でAFmを、そして、船戸ら⁹⁾ の方法でシリカゲルを定量分析したが、これらは規格化されておらず、正確に定量できる方法ではないため、水和物の組成の絶対量を求めたとは言えない。しかしながら、種々のセメント系材料のセメント水和物の分析方法を上記の方法で統一することにより、水和物組成の相対的な比較は可能であると思われる。

卷末資料-1に鈴木ら、内川ら及び船戸らによるセメント水和物の分析方法を示す。種々のセメント系材料の化学組成、水和物組成の分析結果及び比表面積を表3-2に示す。比表面積はレーザー回折法で測定した。

3.2 トレーサの選定

ヨウ素は大気雰囲気で難溶性の固相をつくるが、今回使用するセメントペースト中にはヨウ素と難溶性の固相を生じさせるAgやHgといった元素が存在しないため、大気雰囲気での試験が可能である。表3-3に難溶性ヨウ素化合物の溶解度積及び溶解度を示す¹⁰⁾。セシウムもまた、雰囲気に鋭敏ではないため、大気雰囲気での試験が可能である。また、両者とも地下水中で一価の陰イオンまたは一価の陽イオンとして存在し、地下水に対して易溶性である。

3.3 試験項目

試験項目は「2.4本研究の方針」を考慮して以下に示す3通りとした。

試験1. フィルタ及び浸漬期間影響試験（OPCペーストを使用して、ろ過フィルタ及び浸漬期間が分配係数に与える影響を調査する）

試験2. 液固比影響試験（OPCペーストを使用して、液固比が分配係数に与える影響を調査する）

試験3. 種々のセメント系材料に対する吸着試験（BFSペースト、PFAペースト及びMHPペーストを使用して、分配係数を取得し、各ペーストのセメント水和物が吸着に与える影響を調査する）

3.4 試験条件

全ての試験は装置が単純で短期間でデータの得られるバッチ法とした。

表3-4に試験条件を示す。

3.5 試験手順

図3-2に示すフローにしたがって試験を実施した。

(1) トレーサ溶液の調製

ヨウ化セシウムを蒸留水に溶解させ、所定濃度となるように調製した。なお、実際の処分場での地下水におけるヨウ素及びセシウムの濃度が不明であるためトレーサ溶液をパラメータとした試験を実施した。

(2)試験試料の作製及びブランク溶液の準備

サンプル瓶に所定の液固比となるようにトレーサ溶液とセメント系材料を混入した。このとき、トレーザのサンプル瓶への吸着の影響を考慮するため、セメント系材料を混入しないブランク溶液も準備した。

(3)浸漬

室温・常圧の大気雰囲気で試験試料を所定期間浸漬させた。

(4)サンプリング

所定期間浸漬させた試験試料の液相及びブランク溶液を所定のフィルタでろ過した。

(5)液相分析

試験試料の液相中のトレーザ（ヨウ素及びセシウム）濃度、セメント系材料からの浸出成分のNa、Mg、Al、Si、K、Ca、Fe、Cl、 SO_4^{2-} 、全炭酸濃度及びブランク溶液中のトレーザ（ヨウ素及びセシウム）濃度を分析した。それぞれの成分の分析方法を表3-5に示す。

(6)結果解析

試験試料の液相中のトレーザ濃度及びブランク溶液中のトレーザ濃度より式3-1¹⁾を用いて分配係数 K_D を算出した。

$$K_D = (C_0 - C_1) / C_1 \cdot V / M \quad (3-1)$$

K_D : 分配係数 (ml/g)

C_0 : ブランク溶液中のトレーザ濃度 (mol/l)

C_1 : 試験後の液相トレーザ濃度 (mol/l)

V : 溶液体積 (ml)

M : 固相重量 (g)

表3-1 セメント及び混和材の化学組成及び鉱物組成 (wt.%)

	セメント		混和材	
	OPC	MHP	BFS	PFA
化学組成	SiO ₂	21.5	22.9	31.6
	Al ₂ O ₃	5.3	3.9	13.8
	Fe ₂ O ₃	3.1	4.2	0.2
	CaO	64.4	63	42
	MgO	0.8	1.5	6.4
	Na ₂ O	0.36	0.15	0.17
	K ₂ O	0.28	0.44	0.32
	SO ₃	2.1	2	2
	TiO ₂	0.23	0.24	0.61
	MnO	0.16	0.2	0.23
	P ₂ O ₅	0.11	0.18	0.05
	Cl	0.006	0.003	1.4
	FeO	0.6	1.4	0.2
全炭素	全炭素	*1	*1	*1
	全S	0.9	0.81	1.87
	ig.loss *4	1	1.5	1.5
	insol *5	0.1	0.2	89.7 *3
	C ₃ S	49	44	
含有鉱物種組成	C ₂ S	25	32	
	C ₃ A	9	3	*2
	C ₄ AF	9	13	
	f·CaO	0.9	0.2	
	Ca(OH) ₂	1.7	0.3	
	CaCO ₃	*1	*1	同定
	CaSO ₄ ·2H ₂ O	0.2	0.7	同定
	CaSO ₄ ·1/2H ₂ O	3.7	1.5	
	石英			*2
	ムライト			23
ヘマタイト				18
		*2	*2	1
	メリライト			*2
	SiO ₂ (am)			37

*1 : 定量下限値以下

*2 : 存在せず

*3 : SiO₂が多いため、正確に分析できない。

*4 : 強熱減量・・・セメント中に含まれる水分と炭酸ガスの合量

*5 : 不溶残分・・・未反応の粘土質原料

表3-2 種々のセメント系材料の化学組成、水和物組成の
分析結果 (wt.%) 及び比表面積

	OPCペースト	BFSペースト	PFAペースト	MHPペースト
化学組成	SiO ₂	16	25.7	56.8
	Al ₂ O ₃	3.8	10.4	18.4
	Fe ₂ O ₃	2.4	0.5	3.6
	CaO	47.8	37	7.5
	MgO	0.7	4.5	0.7
	Na ₂ O	0.24	0.17	0.46
	K ₂ O	0.14	0.25	0.91
	SO ₃	1.6	1.7	0.4
	TiO ₂	0.15	0.48	0.84
	MnO	0.12	0.18	0.03
	P ₂ O ₅	0.09	0.03	0.21
	Cl	0.0092	0.54	0.024
	FeO	0.1	0.3	0.3
全炭素	全炭素	N.D	N.D	2.43
	全S	0.64	1.34	0.17
ig.loss *2	ig.loss *2	26.6	18.1	9.7
	insol *3	0.1	0.2	72.3 *1
水和物組成	Ca(OH) ₂	18.7	N.D	N.D
	CaCO ₃	N.D	N.D	N.D
	AFm	0.8	N.D	N.D
	AFt	5.4	D.L	D.L
	C-S-H	59.1	D.L	D.L
	(CaO/SiO ₂ モル比)	(2.2)	(-)	(-)
	シリカゲル	0.3	0.2	1.8
C ₂ S,CaSO ₄ · 2H ₂ O,CaCO ₃ , メリライト				
同定された未水和鉱物種	C ₂ S	C ₂ S		C ₂ S
比表面積 (cm ² /g) *4	4470	4370	4870	4350

N.D: 定量を試みたが、定量できなかったもの

D.L: 最初から定量下限値以下であることが分かっていたので同定のみ実施したもの

*1: SiO₂が多いため、正確に分析できない。

*2: 強熱減量・・・セメント中に含まれる水分と炭酸ガスの含量

*3: 不溶残分・・・未反応の粘土質原料

*4: レーザー回折法で測定

表3-3 難溶性ヨウ素化合物の溶解度積及び溶解度

	溶解度積	I濃度 (mol/l)
AgI	8.3×10^{-17}	9.1×10^{-9}
BiI ₃	8.1×10^{-19}	3.9×10^{-5}
CuI	1.1×10^{-12}	1.0×10^{-6}
Hg ₂ I ₂	9.5×10^{-29}	9.7×10^{-15}
HgI ₂	1.1×10^{-12}	1.3×10^{-4}
PbI ₂	7.1×10^{-9}	2.4×10^{-3}
PdI ₂	2.5×10^{-23}	3.7×10^{-8}
TlI	6.5×10^{-8}	2.5×10^{-4}

表3-4 試験条件

試験方法	試験1	試験2 バッチ法	試験3
使用セメント系材料	OPCペースト	OPCペースト	BFSペースト PFAペースト MHPペースト
雰囲気	常温、常圧の大気雰囲気		
トレーサ溶液初期濃度 (mol/l)	1×10^{-2}	1×10^{-5} 1×10^{-3}	1×10^{-4} 1×10^{-2}
液固比 (ml/g)	50/1	50/50 50/1	50/5 100/1 50/1
浸漬期間	30、60、90日	30日	30、60、90日
ろ過フィルタ	0.45 μm 10,000MWCO		0.45 μm
繰り返し数	3回*		2回

*: 60、90日は繰り返し数1回

表3-5 液相成分の分析方法

対象元素	分析方法	定量下限値 (mol/l)
I		1.57×10^{-6}
Al		7.41×10^{-6}
Mg	ICP-AES：誘導結合プラズマ原子分光分析	4.17×10^{-6}
Si		7.14×10^{-6}
Ca		5.00×10^{-6}
Fe		5.36×10^{-6}
Cs		1.50×10^{-7}
Na	AAS：原子吸光分析	4.35×10^{-6}
K		7.69×10^{-6}
塩化物イオン	IC：イオンクロマト分析	5.56×10^{-6}
硫酸イオン		4.17×10^{-6}
全炭酸	TOC：全有機炭素分析	3.33×10^{-4}

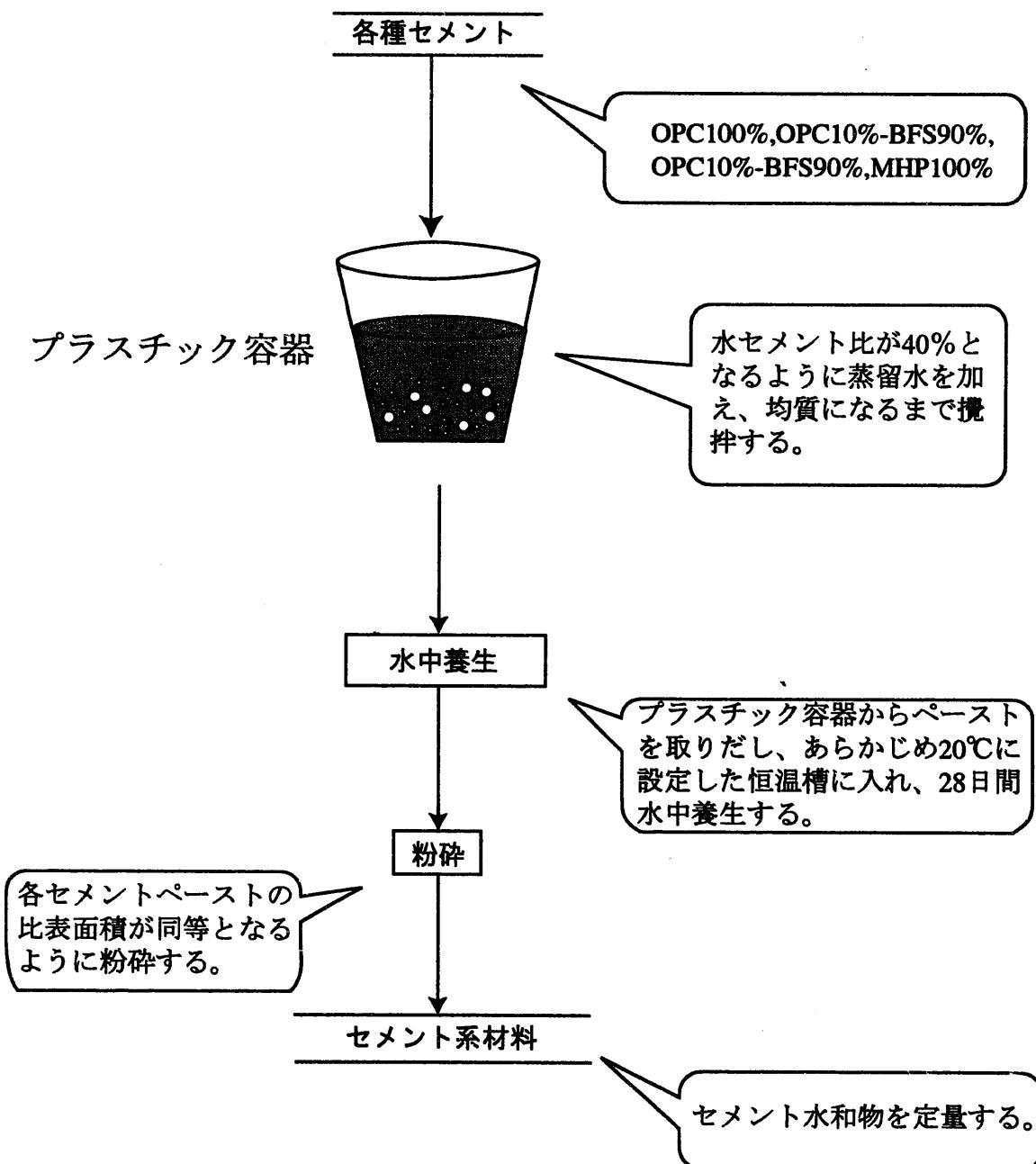


図3-1 セメント系材料の作製

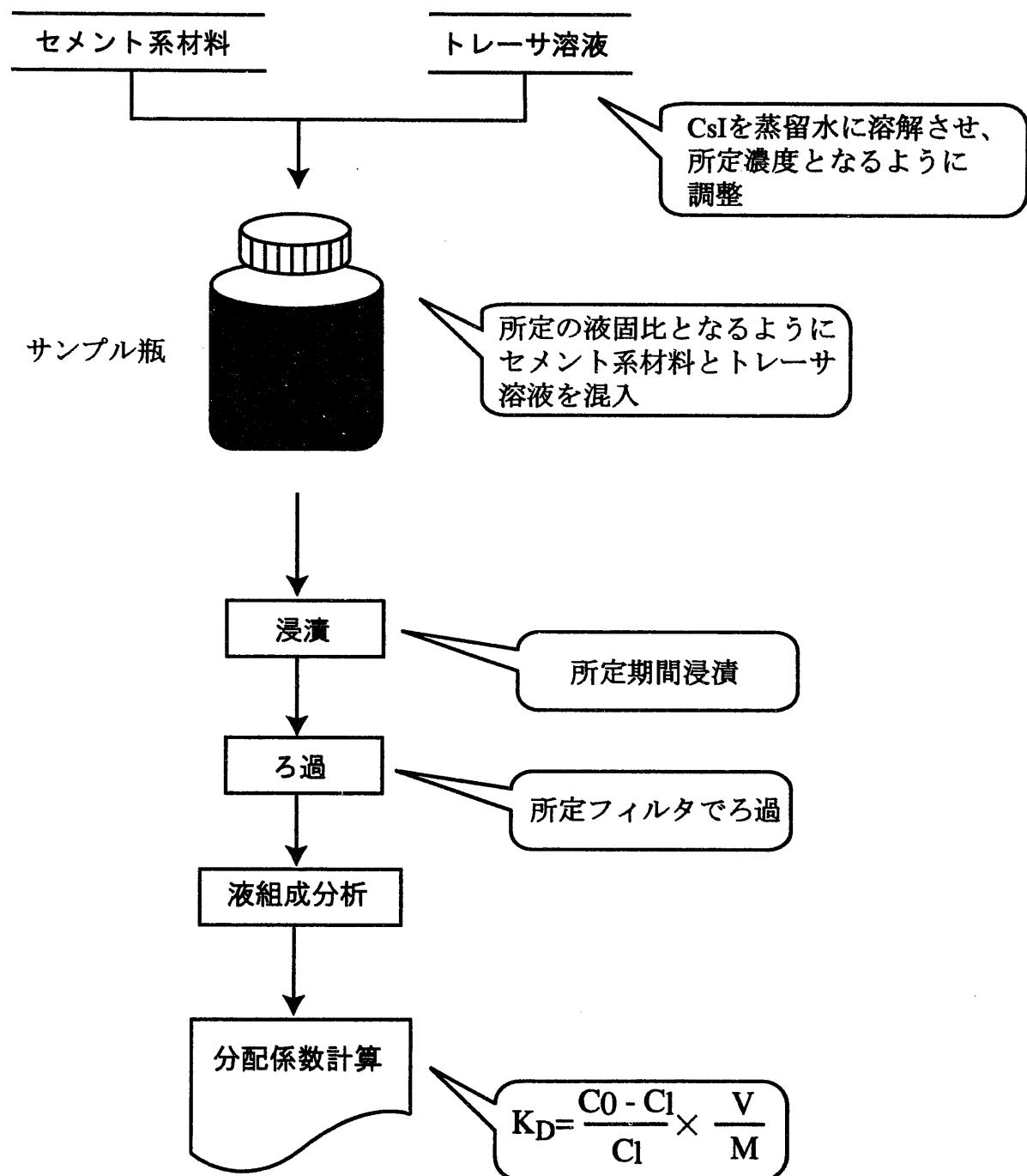


図3-2 吸着試験手順

4 試験結果と考察

4.1 フィルタ及び浸漬期間影響試験結果

OPCペーストを使用して、 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ フィルタ（以下、 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ と記す）と分画分子量10,000の限外ろ過フィルタ（以下、10,000MWCOと記す）がヨウ素及びセシウムの分配係数に与える影響、浸漬期間が分配係数に与える影響を調査した。ただし、この試験でのヨウ素及びセシウムのトレーサ溶液初期濃度を $1\times 10^{-2}\text{ mol/l}$ に調製し、液固比を $50/1\text{ ml/g}$ とした。さらに、浸漬期間を30日、60日、90日とした。試験繰り返し数は3回とした（浸漬期間60日、90日は1回）。ヨウ素の試験結果を図4-1、セシウムの試験結果を図4-2に示す。

4.1.1 ろ過方法が分配係数に与える影響

図4-1、図4-2より、 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ を使用したときの分配係数と10,000MWCOの分配係数はヨウ素、セシウムいずれの場合もそれほど有為な差はないことが分かった。繰り返し数2でコンクリートに対するヨウ素の吸着試験を行ったBakerらの報告¹¹⁾によれば、トレーサ溶液初期濃度 $2\times 10^{-4}\text{ M}$ のときの $0.45\text{ }\mu\text{m}$ フィルタろ過後と限外ろ過（30,000MWCO）後のヨウ素の分配係数を比較すると、 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ のろ過後の方が大きな値を示したが、その差は誤差範囲内であるとしている。本試験における限外ろ過後の分配係数の違いも分析誤差が主な要因であると考えられる。限外ろ過フィルタへの吸着も考えられるが、いずれにしても分配係数のオーダーが変わるものとの影響はないと判断できる。

図4-3に $0.45\text{ }\mu\text{m}$ と10,000MWCOのフィルタでろ過した後の液相中の成分濃度の違いを示すが、 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 及び10,000MWCOのいずれのフィルタを使用しても、フィルタが浸出成分濃度に与える影響はほとんどないことが分かった。

また、ヨウ素及びセシウムは可溶性化学種であり、沈殿を生成しにくいことからも要因が分析誤差である可能性が高いと考えられる。

4.1.2 浸漬期間が分配係数に与える影響

図4-1より、時間経過とともにヨウ素の分配係数は $1\times 10^0\sim 1\times 10^1\text{ ml/g}$ の範囲内であり、オーダーは変わらないものの増加していく傾向にある。これは、セメントペースト中の未水和セメントの水和反応が進行しており、ヨウ素を吸着するとされているセメント水和物のモノサルフェート水和物が増加することによる影響³⁾が考えられる。

図4-2より、セシウムの分配係数は時間の経過に係わらず $1\times 10^0\text{ ml/g}$ で

ほぼ一定であり、吸着平衡に達しているものと考えられる。

4.2 液固比影響試験結果

トレーサ溶液初期濃度及び液固比をパラメータとし、OPCペーストを使用して、ヨウ素及びセシウムの分配係数を取得し、液固比が分配係数に与える影響を調査した。ただし、この試験でのヨウ素及びセシウムのトレーサ溶液初期濃度を 1×10^{-5} ～ 1×10^{-2} mol/lに調製し、液固比を50/50ml/g、50/5ml/g、50/1ml/g、100/1ml/gとした。さらに、浸漬期間を30日とし、ろ過には $0.45 \mu\text{m}$ フィルタを使用した。試験繰り返し数は2回とした。液固比に対するヨウ素及びセシウムの分配係数を図4-4に示す。

4.2.1 液固比がヨウ素及びセシウムの分配係数に与える影響

図4-4より、ヨウ素の分配係数は液固比に依らず一定で、トレーサ溶液初期濃度 1×10^{-5} mol/lのときが最も大きく、平均約29ml/gとなることが分かった。ただし、液固比が50/50ml/g及び50/5ml/g（図4-4では液固比1ml/g、10ml/g）のときの吸着試験後の液相中のヨウ素濃度測定値はいずれも 2.36×10^{-6} mol/lで定量下限値（ 1.57×10^{-6} mol/l）と同等の値であった。したがって、図4-4の液固比1ml/g、10ml/gでのトレーサ溶液初期濃度 1×10^{-5} mol/lの分配係数のプロット（◇）は 10^0 ～ 10^1 ml/gオーダーにあるが、実際には（□）より大きな値になると予想される。

これに対してセシウムの分配係数は液固比が小さくなるにつれ、 1×10^0 ～ 1×10^{-3} ml/gと小さくなり、OPCペーストにはほとんど吸着しないことが分かった。

図4-5に液固比に対するセメント系材料からの浸出成分濃度の関係を示す。液固比が小さいほど（処分環境の液固比に近づくほど）、浸漬液中の全浸出成分濃度が大きくなっている（共存イオンが多くなる）。このことから、ヨウ素のOPCペーストに対する分配係数は共存イオンの影響を受け難く、逆にセシウムの分配係数は共存イオンの影響を受けやすいものと考えられる。

A. Atkinsonら¹²⁾はセメントペーストに対するプルトニウムの吸着試験を液固比をパラメータ（40/1、400/1ml/g）として実施し、分配係数が液固比の影響を受けずに 1×10^4 ml/g程度となることを確認しているが、N.J.Pilkingtonら¹³⁾は、セメントペーストに対するニッケルの吸着試験を液固比をパラメータ（30/1～100/1ml/g）として実施し、液固比が処分環境の液固比に近づくにつれ、分配係数が小さくなる（1600～340ml/g）ことを確認している。但し、A. Atkinsonら及びN.J. Pilkingtonらは吸着機

構までは言及しておらず、どの元素の分配係数が液固比の影響を受けて変化するかについては明らかにしていないため、吸着機構と液固比の影響を受ける元素の分配係数との関連については依然として不明である。

4.3 種々のセメント系材料に対する吸着試験結果

トレーサ溶液初期濃度及び浸漬期間をパラメータとし、BFSペースト、PFAペースト及びMHPペーストを使用して、ヨウ素及びセシウムの分配係数を取得し、各ペーストのセメント水和物が吸着に与える影響を調査した。ただし、この試験でのヨウ素及びセシウムのトレーサ溶液初期濃度を 1×10^{-5} ～ $1 \times 10^{-2} \text{ mol/l}$ に調製し、液固比を $50/1\text{ml/g}$ とした。さらに、浸漬期間を30日、60日、90日とし、ろ過には $0.45 \mu\text{m}$ フィルタを使用した。試験繰り返し数は2回とした。種々のセメント系材料に対するヨウ素及びセシウムの分配係数を図4-6及び図4-7に、浸漬期間に対するヨウ素及びセシウムの分配係数を図4-8及び図4-9に示す。なお、「4.1 フィルタ及び浸漬期間影響試験」、「4.2 液固比影響試験」での液固比が $50/1\text{ml/g}$ のときのOPCペーストの結果も合わせて示す。

4.3.1 種々のセメント系材料に対するヨウ素の吸着挙動

表3-2で種々のセメント系材料の水和物組成を見ると、OPCペースト及びMHPペーストのC-S-Hゲル中の CaO/SiO_2 モル比がそれぞれ2.2、2.1と高くなっている。また、AFt及びAFmの含有量も多く、OPCペースト中のAFt及びAFmの含有量はそれぞれ5.4wt.%及び0.8wt.%、MHPペースト中ではAFmの含有量は定量下限値以下となつたが、AFtは7.4%であった。また、図4-6よりヨウ素の分配係数が比較的大きいセメント系材料はOPCペースト及びMHPペーストであった。これらのセメント系材料に対する分配係数はトレーサ溶液初期濃度が $1 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$ であれば、それぞれ 38ml/g 、 113ml/g であり、ヨウ素の吸着が期待できるセメント系材料はMHPペーストとなることが分かった。したがって、セメント系材料の水和物のうちヨウ素の吸着に有効な吸着サイトはC-S-Hゲル、AFt及びAFmであり、「2.3 セメント系材料に対する従来の吸着試験」での調査結果と一致している。また、これらの水和物の含有量が多いセメント系材料ほどヨウ素を吸着する可能性が高くなると言える。しかしながら、これらの水和物にヨウ素が吸着する機構については不明な点が多いため、検討を要する。

次に図4-8より、いずれのセメント系材料の場合でも浸漬期間に対するヨウ素の分配係数はオーダーが変わるほど変化しないことが分かった。

これらのセメント系材料のうち、特に分配係数が高く、安定しているものはMHPペーストであり、浸漬期間を考慮しない場合、トレーサ溶液初期濃度が 1×10^{-5} mol/lのときの分配係数の平均値は約84ml/gとなることが分かった。

4.3.2 種々のセメント系材料に対するセシウムの吸着挙動

図4-9からPFAペーストに対するセシウムの分配係数は浸漬期間に依らず、平均5ml/gであり、他のセメント系材料と比較すると安定していることが分かった。また、表3-2においてPFAペースト中のシリカゲルの含有量が最も多くなっていることを考慮すると、「2.3セメント系材料に対する従来の吸着試験で陽イオンに有効な吸着サイトはシリカゲルであると示唆した調査結果は妥当であると言える。

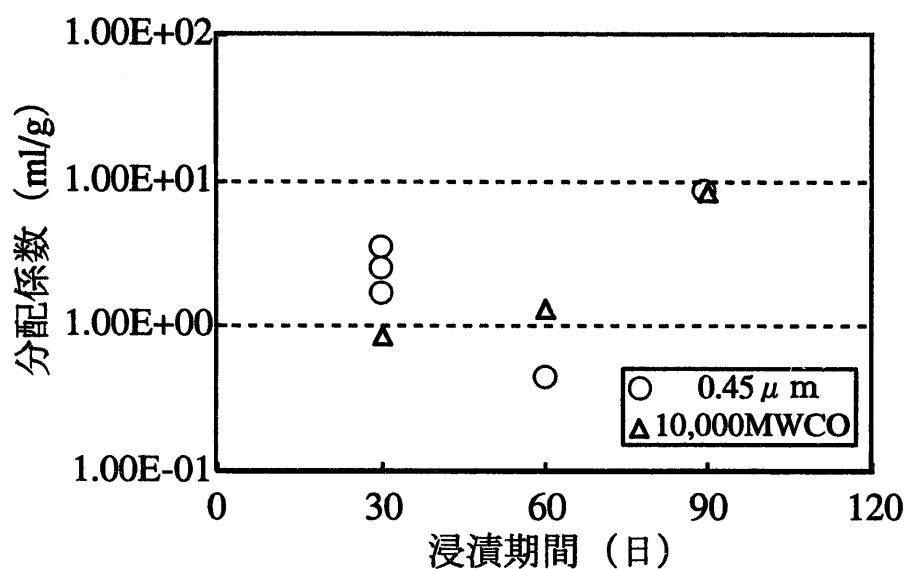


図4-1 ろ過フィルタ及び浸漬期間がヨウ素の分配係数に与える影響
(ヨウ素初期濃度 $1 \times 10^{-2}\text{ mol/l}$ 、液固比 $50/1\text{ ml/g}$)

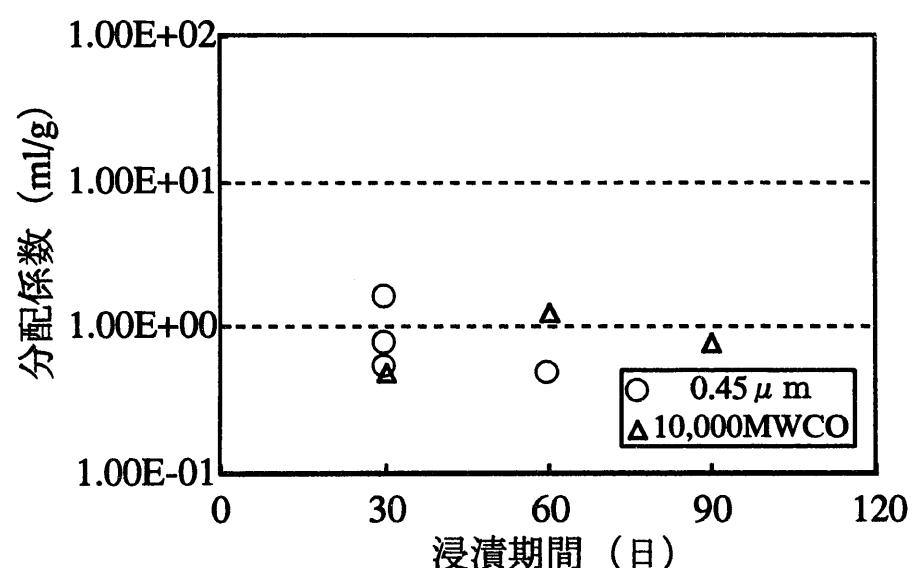


図4-2 ろ過フィルタ及び浸漬期間がセシウムの分配係数に与える影響
(セシウム初期濃度 $1 \times 10^{-2}\text{ mol/l}$ 、液固比 $50/1\text{ ml/g}$)

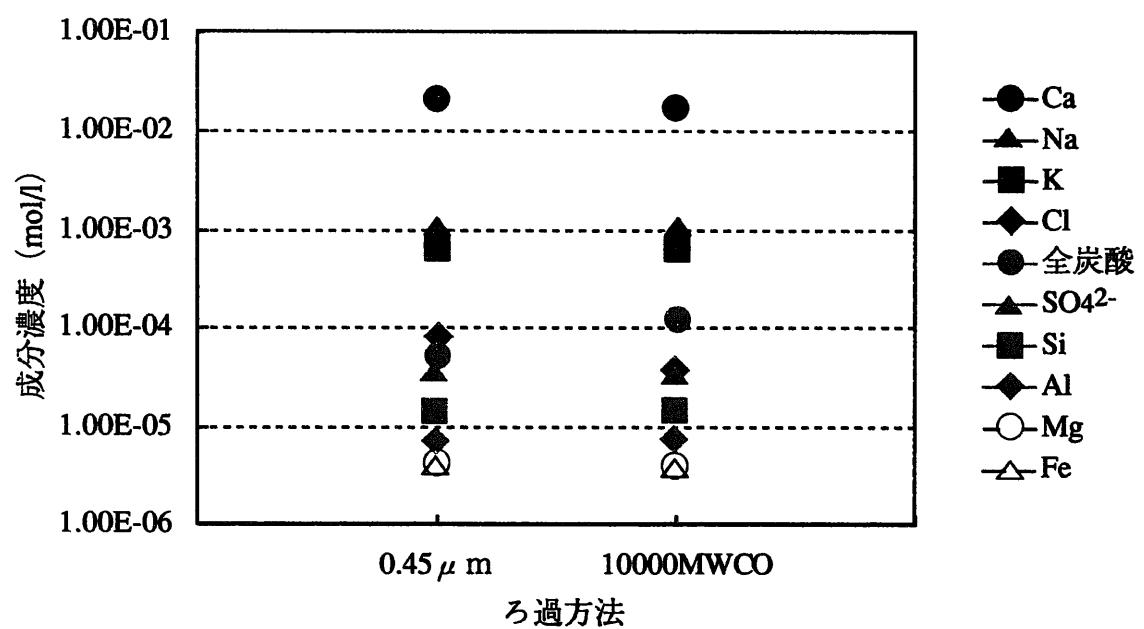


図4-3 ろ過方法による成分濃度の違い

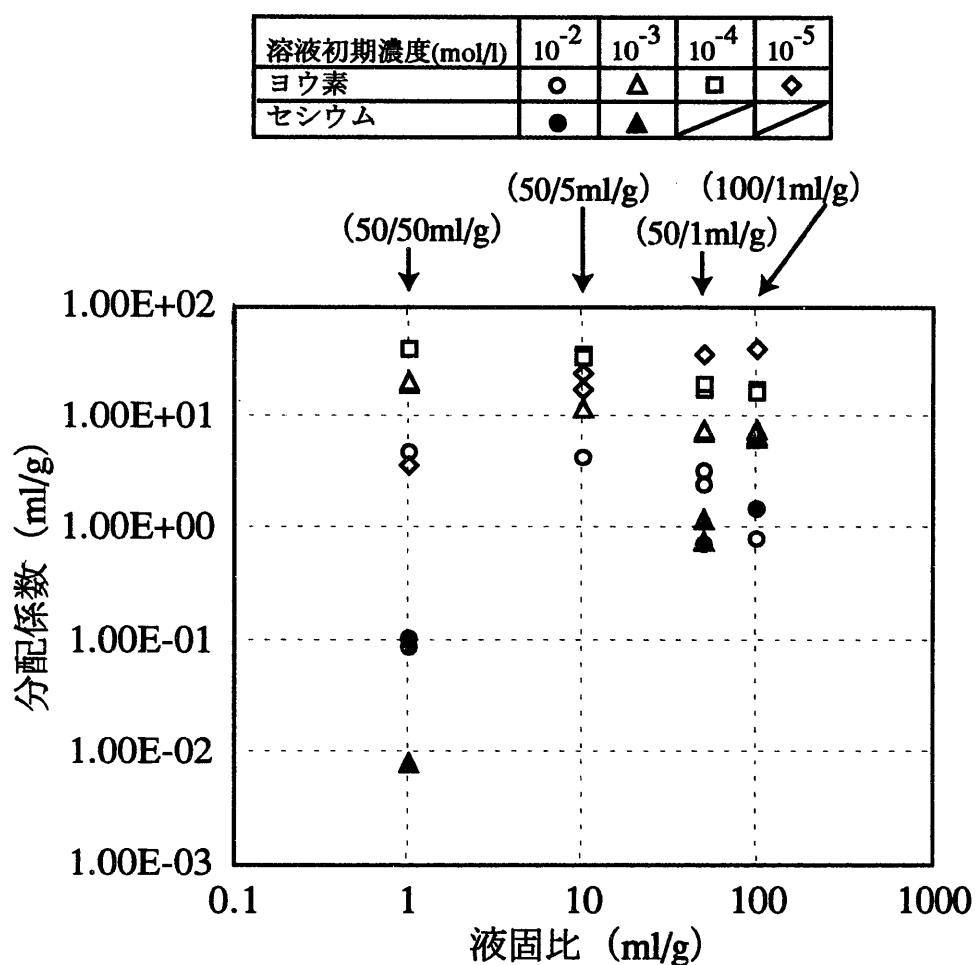


図4-4 液固比がヨウ素及びセシウムの分配係数に与える影響

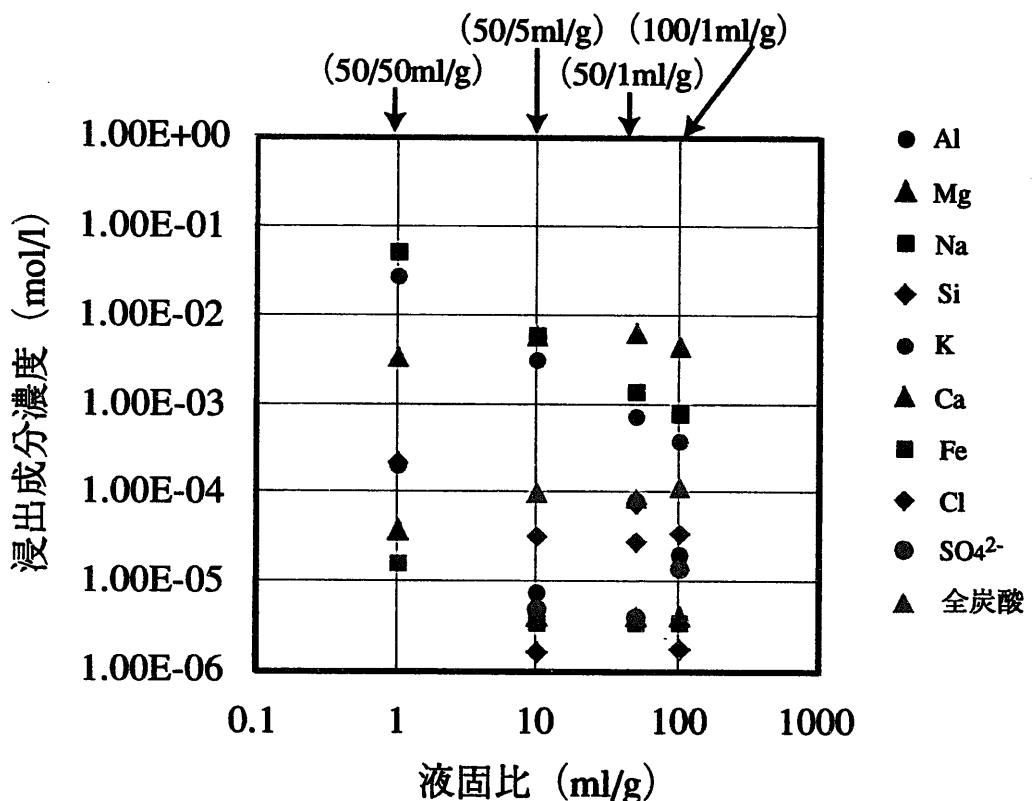


図4-5 液固比に対する全浸出成分濃度

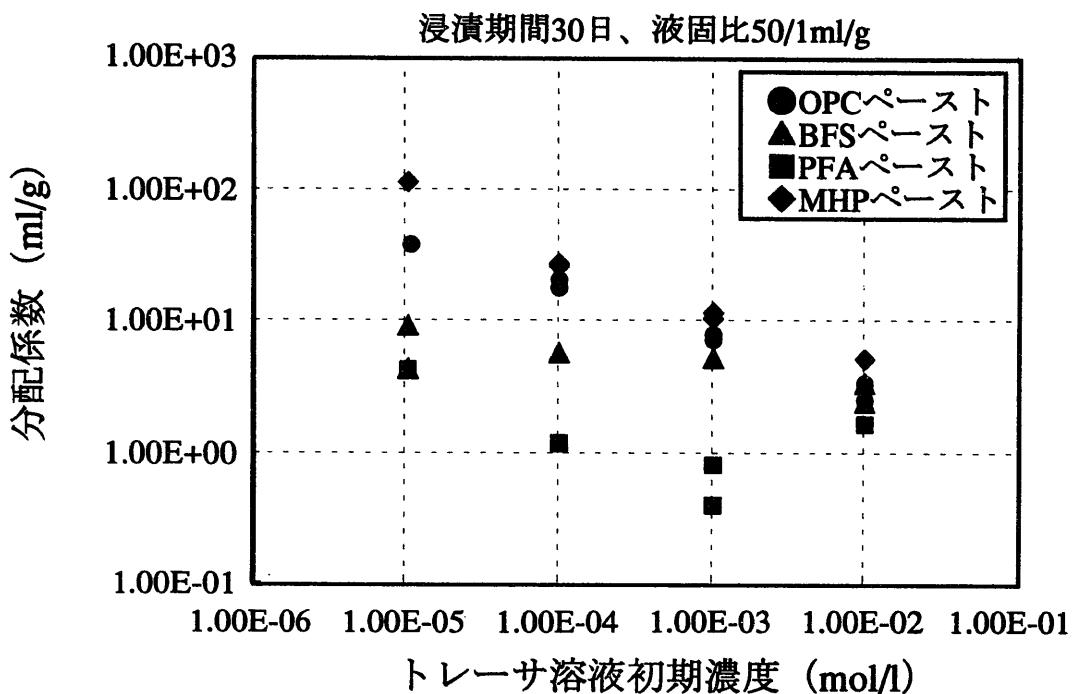


図4-6 種々のセメント系材料に対するヨウ素の分配係数

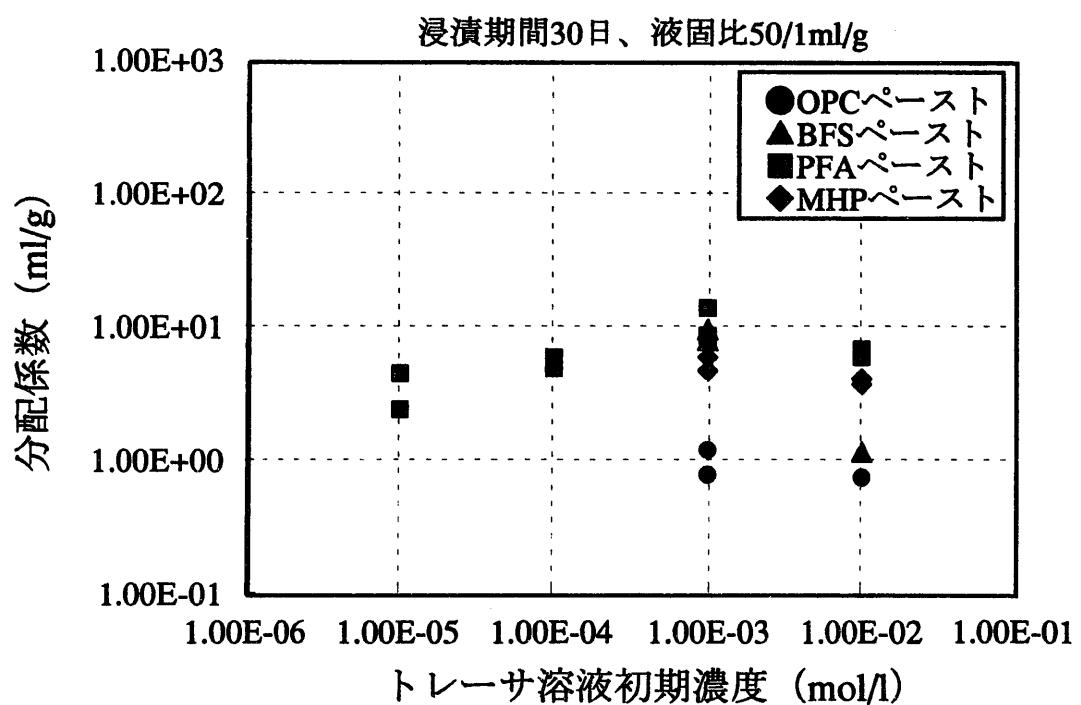


図4-7 種々のセメント系材料に対するセシウムの分配係数

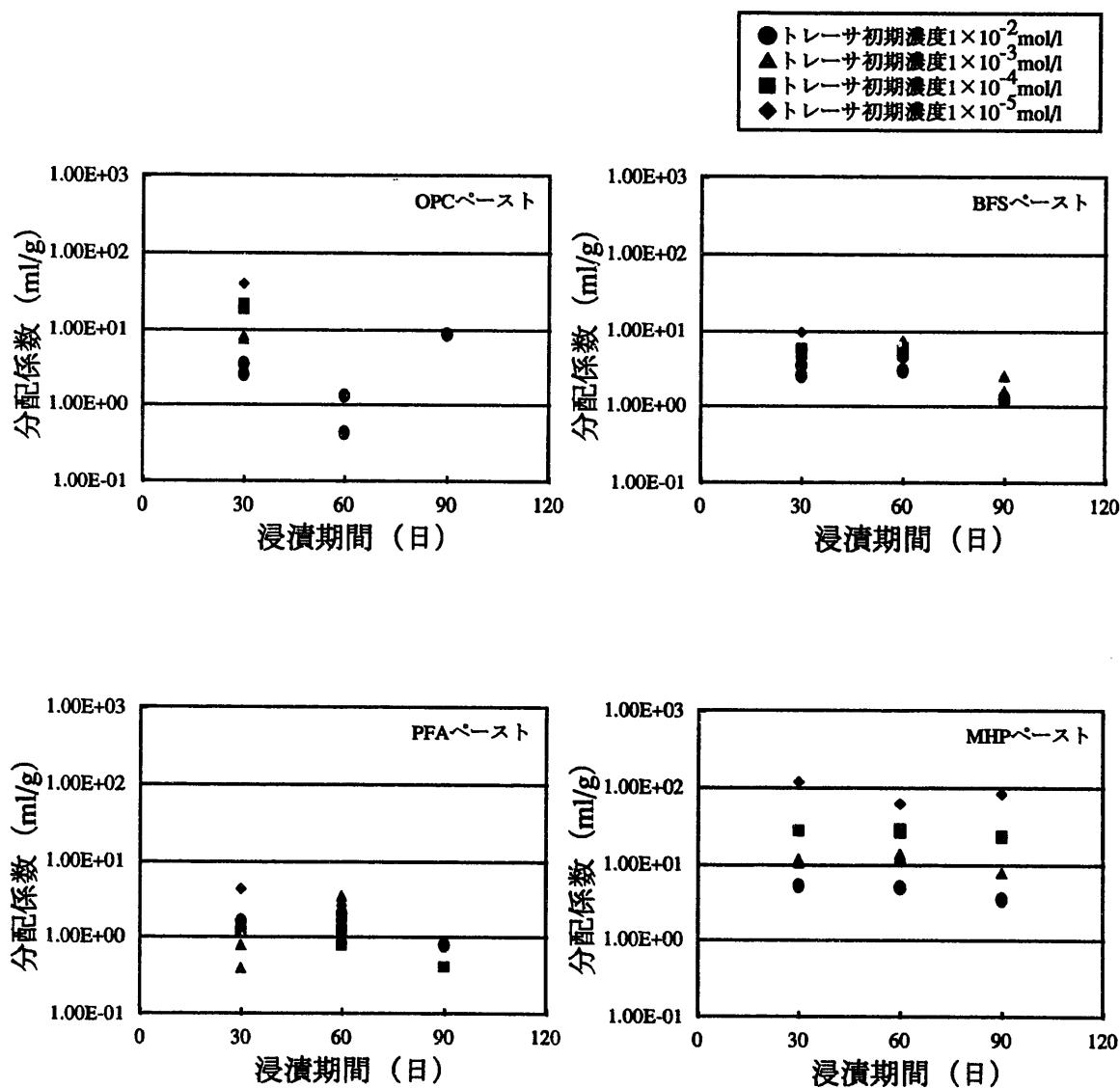


図4-8 浸漬期間に対するヨウ素の分配係数

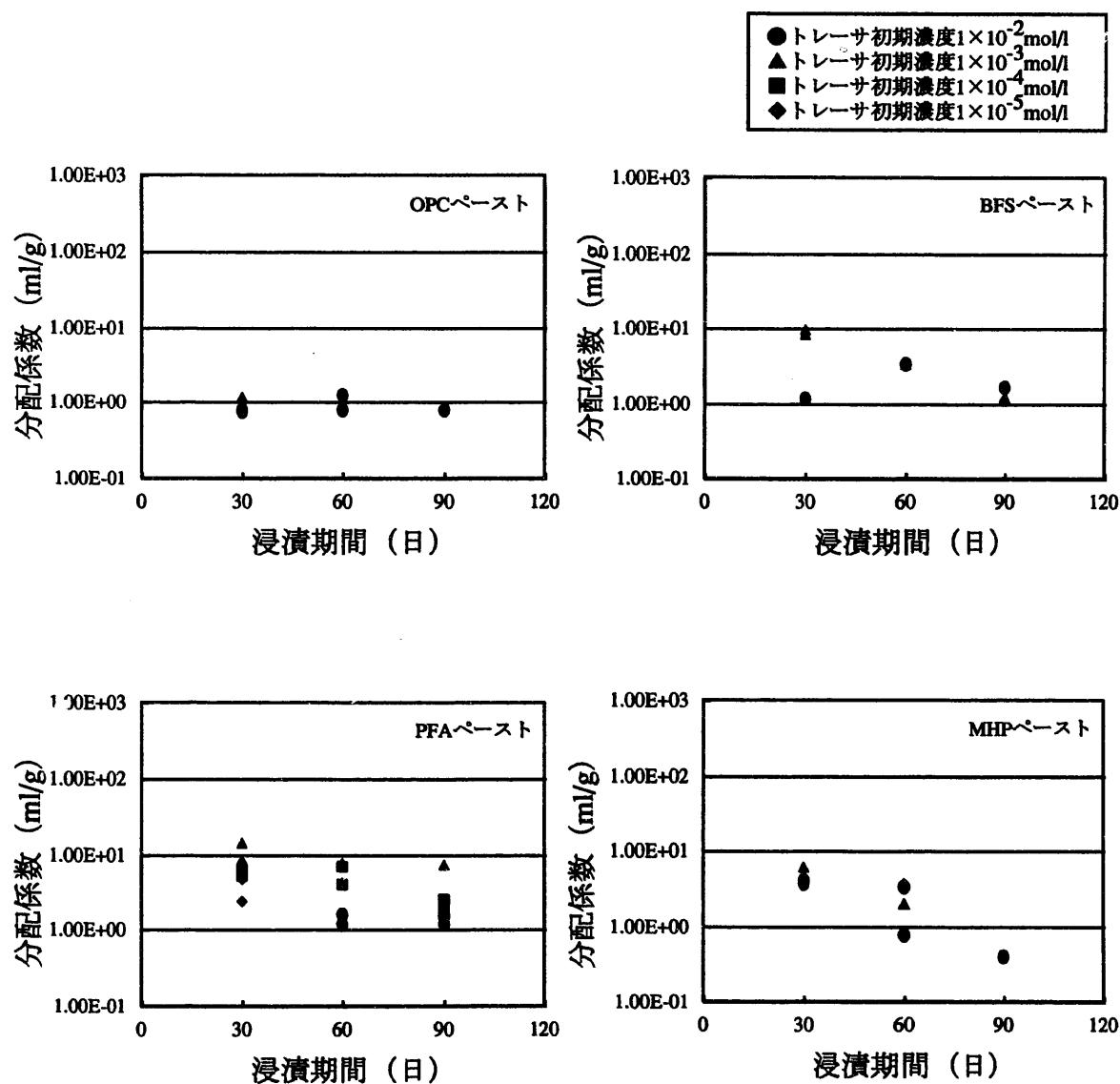


図4-9 浸漬期間に対するセシウムの分配係数

5 まとめ

以下に本報告書の結果をまとめる。

5.1 フィルタ及び浸漬期間影響試験

- ・ヨウ素及びセシウムは可溶性化学種であり、沈殿を生成しにくく、OPCペーストでの吸着試験において、 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ のろ過フィルタを使用したときの分配係数と分画分子量10,000の限外ろ過フィルタを使用したときの分配係数を比べるとヨウ素、セシウムいずれの場合もそれほど有為な差はないことが分かった。
- ・時間経過とともにヨウ素のOPCペーストに対する分配係数は $1\times 10^0\sim 1\times 10^1\text{ml/g}$ の範囲内であり、オーダーは変わらないものの増加していく傾向にあることが分かった。
- ・セシウムのOPCペーストに対する分配係数は時間経過に係わらず $1\times 10^0\text{ml/g}$ で一定となることが分かった。

5.2 液固比影響試験

- ・ヨウ素のOPCペーストに対する分配係数は液固比に依らず一定で、トレーサ溶液初期濃度 $1\times 10^{-5}\text{mol/l}$ のときが最も大きく、平均約 29ml/g となることが分かった。
- ・セシウムのOPCペーストに対する分配係数は液固比が小さくなるにつれ、 $1\times 10^0\sim 1\times 10^{-3}\text{ml/g}$ と小さくなり、OPCペーストにはほとんど吸着しないことが分かった。

5.3 種々のセメント系材料に対する吸着試験

- ・セメント系材料のうち、C-S-Hゲル中の CaO/SiO_2 モル比が高く、AFt及びAFmの含有量が多いものはOPCペースト及びMHPペーストであり、浸漬期間に依らずヨウ素の吸着が期待できるセメント系材料はMHPペーストとなることが分かった。そして、トレーサ溶液初期濃度が $1\times 10^{-5}\text{mol/l}$ であれば、MHPペーストに対するヨウ素の分配係数は 113ml/g となる。
- ・一般的に陽イオン交換性を持つと言われるシリカゲルの含有量が比較的多いPFAペーストに対するセシウムの分配係数は浸漬期間に依存せず、平均 5ml/g であり、他のセメント系材料と比較すると安定していることが分かった。

6 今後の課題

以下のことが課題として挙げられる。

- ・塩化物イオンやナトリウムイオンが多く共存する海水系模擬地下水を使用してヨウ素及びセシウムの吸着試験を実施し、共存イオンがヨウ素及びセシウムの分配係数に与える影響を調査する。
- ・セメント系材料は処分場で地下水と接触することにより長期的にはその成分が地下水中に浸出する。成分浸出によって水和物組成が変化するため、セメント系材料に対する核種の吸着挙動が変化する可能性があるため、セメント系材料の浸出過程を考慮したヨウ素及びセシウムの吸着試験を実施する。
- ・セメント系材料中の水和物であるC-S-Hゲル、AFt及びAFmに対するヨウ素及びセシウムの吸着機構を調査するため、それらの水和物を合成し、ヨウ素及びセシウムの吸着試験を実施する。

7 謝辞

本試験を実施するにあたり、株式会社オーテック殿にはセメントペーストの作製並びに分析をお願いした。また、動燃東海アクチニドプロセス分析室には液相の分析をお願いした。以上の方々に、深く感謝致します。

8 参考文献

- 1)Berry,J.A.(1992):A review of radionuclides under the near- and far-field conditions of an underground radioactive waste repository., DOE REPORT No:DOE/HMIP/RR/92/061 Part I.
- 2)Ruegger,B.(1989):NEA'SSORPTION DATA BASE.
- 3)Atkins,M.,Glasser,F.P.(1992):Application of portland cement-based materials to radioactive waste immobilization.,Waste Management,vol.12.
- 4)Heath,T.G.,Ilett,D.J.,Tweed,C.J.(1996):Thermodynamic modelling of the sorption of radioelements onto cementitious materials.,Mat.Res.Soc.Symp.Proc,vol.412.
- 5)金子昌章、豊原尚実、和田幹雄(1995):セメントによる放射性ヨウ素の固定化,日本原子力学会「1995秋の大会」要旨集.
- 6)大木道則(1989):化学大辞典.
- 7)鈴木一孝、西川直宏、山出善章、谷口幾哉(1990):コンクリートの耐久性評価を目的とした水和組織の分析手法に関する研究、コンクリート工学論文集、第1巻第2号.
- 8)内川浩、宇智田俊一郎、三原康央(1980):TG-DSCによるセメント水和硬化体中の水和物の定量方法、セ技年報、34.
- 9)船戸己知雄、橋本匡史、倉持章一(1991):セメント水和物の炭酸化によって生成するシリカゲルの定量方法、セメント・コンクリート論文集 No.45.
- 10)Burger,L.L.,Burns,R.E.(1979):Technical requirements for the control of 129-I in a nuclear fuels reprocessing plants,PNL-3186.
- 11)Baker,S.,McCrohon,R.,Oliver,P.,Pilkington,N.J.(1994):The sorption of niobium,tin,iodine and chlorine onto Nirex reference vault backfill.,Mat.Res.Soc.Symp.Proc,vol.333.
- 12)Atkinson,A.,Ewart,F.T.,Pugh,S.Y.R.,Rees,J.H.,Sharland,S.M.,Tasker,P.W.,Wilkins,J.D.(1988):Experimental and modelling studies of the near-field chemistry for Nirex repository concept.NSS/R104
- 13)Pilkington,N.J.,Stone,N.S.(1990):The solubility and sorption of nickel and niobium under high pH condition.,NSS/R186.

セメント水和物 (AFm、AFt、C-S-H、シリカゲル) の分析方法

・AFm（モナルフェート）の定量法

参考文献 内川他 TG-DSCによるセメント水和硬化体中の水和物の定量
セメント技術年報 34 58-62 (1980)

対象水和物 AFm（モナルフェート） $(3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot12\text{H}_2\text{O})$

手順 ① 装置 走査熱量計 (DSC,Differential Scanning Calorimetry)

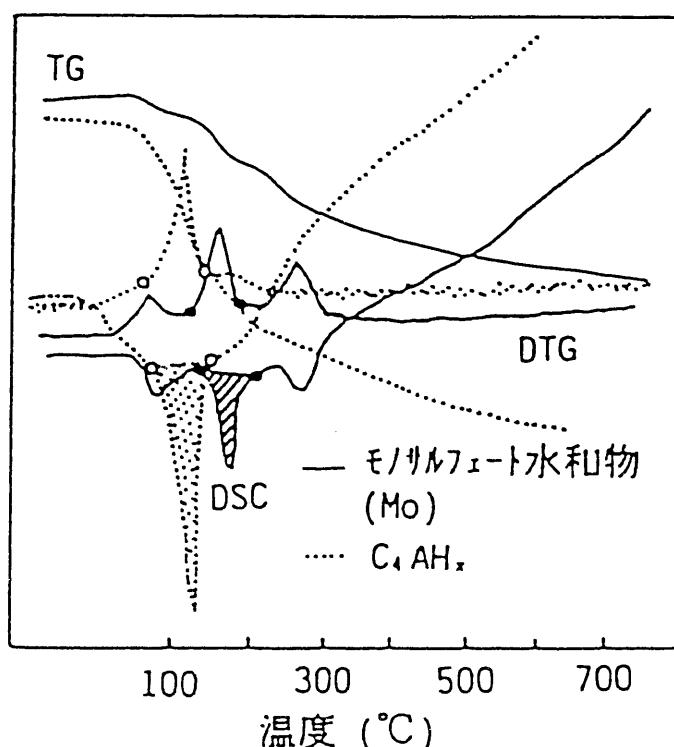
② 方法

1) 試料調製

測定試料は、充分に乾燥行つたものを用いる。

2) 測定及び定量

AFmのDSC曲線を下図に示す。AFmは3段階に脱水するが、120-200°Cに現れる第二ピークの吸熱量が一番大きく62cal/gである。そのため、測定試料の定量にはこのピークの吸熱量を測定して行う。



・ AFt (エトリンガイト) 及び C-S-H (カルシウムシリケート水和物) の定量法

参考文献 鈴木 一考他 コンクリートの耐久性評価を目的とした水和組織の分析方法に関する研究。
コンクリート工学論文集 34 58-62 (1990)

対象水和物 AFt (エトリンガイト ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$)) 及び
C-S-H (カルシウムシリケート水和物)

手順 分析試料の各試料の水和生成物の生成量の定量方法のフローシートを右図に示す。C-S-Hの定量は現在確立されていないため、化学分析値から $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 , ケイ酸ゲル, アルミゲル, AFm(モノサルフェート), AFtの水和物の定量値を差し引いたものをC-S-Hとして定量を行う。以下にAFtの定量方法について記載する。

(AFt (エトリンガイト))

① 試薬

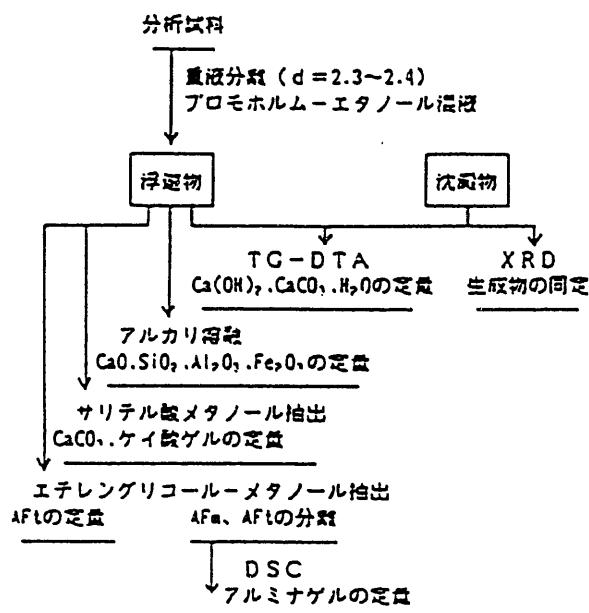
- ・ 1 : 3 エチレングリコール-メタノール混液
エチレングリコールとメタノールを 3 : 1 の質量比で混合する。

② 方法

1) 分析試料の作成

攪拌 試料約0.1gに対し、1 : 3 エチレングリコール-メタノール混液100mlを加えて約2時間攪拌する。

ろ過 溶解液をガラスフィルター (G 4) でろ過する。(メンブランフィルターで吸引ろ過でも可)



2) Al_2O_3 の定量

ろ過後の分析試料をJIS R 5202の Al_2O_3 の分析方法に従い Al_2O_3 の定量を行う。(鈴木他の参考文献では、原子吸光法により定量を行つてゐる。)

3) AFt量の計算

2) の操作で定量を行つた Al_2O_3 は、AFtの Al_2O_3 であることからAFt(理論化学式 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$: 分子量1255.16) を用いて計算を行う。

2) で定量した Al_2O_3 (分子量101.96) 量をx (%) とすれば

$$\text{AFt } (\%) = \frac{x \times 1255.16}{101.96}$$

・シリカゲルの定量法

参考文献 船戸 巳知雄他 セメント水和物の炭酸化によって生成する
シリカゲルの定量方法
セメント・コンクリート論文集 45 252-257 (1991)

対象水和物 シリカゲル

手順 ① 装置 ICP発光分光装置

② 試薬

- ・サリチル酸
 - ・メタノール (99.0%v/v)
 - ・塩酸 (1+4)
- 水と濃塩酸 (12N) を1:4の質量比で混合する。
- ・0.2N水酸化カリウム溶液

③ 方法

サリチル酸 試料0.5~1.0gをテフロン製遠沈管(50ml)に量り、サリチル
メタノール 酸6.0g、メタノール40ml、ろ紙パルプ0.1gおよび回転子を
処理 加え蓋をしてマグネチックスターラーで1時間攪拌して可溶分を溶かす。
蓋を外し回転子を取り除き遠心分離(3000rpm,10分)を行う。
上澄液を廃棄しメタノール20~30mlを加えよく混合してから同様に遠心分離を行い、上澄液が紅に着色しなくなるまで繰り返す。

塩酸 上澄液を廃棄した後、塩酸10mlを加え可溶分を溶かしてから
処理 水30mlを加える。蓋をして60℃の乾燥器に15分間入れさらに可溶分を溶かす。
遠心分離(3000rpm,10分)を行い上澄液のみをろ紙(6種
11.0cm)を用いてろ過する。シリカゲルを含む残分に水20ml
を加えよく混合して遠心分離を行い、上澄液はろ過する。この操作をさらに2回繰り返す。ろ液は温水で8回洗浄する。
ろ液洗液は全量フラスコ200mlに受ける。

水酸化
カリウム
処理 残分に0.2N水酸化カリウム溶液40mlを全量ピペットで加え、
蓋をして60℃の乾燥器に入れ1時間温めてシリカゲルを溶か
す。先のろ液を用いて新たな全量フラスコ200mlにろ過し、
残分をろ過し、残分をろ紙上に移し温水で8~10回洗浄する。
全量フラスコ200mlのろ液洗液に塩酸(1+1)10mlを加え室
温まで冷却した後、水で定容としよく混ぜて試料溶液とす
る。

シリカ
の測定 ICP発光分光装置を用いて以下の条件でシリカを測定する。
RFパワー：1KW 測定波長：251.611nm

試験データ集

フィルタ及び浸漬期間影響試験データ（1／1）

液固比影響試験データ（3／3）

種々のセメント系材料に対する吸着試験データ（3／3）

フィルタ及び浸漬期間影響試験データ

ヨウ素 0.45 μ m												60日	90日	
浸漬期間	30日													
	C0 (mol/l)	9.76E-05	9.76E-04	9.92E-03	1.10E-05	1.01E-04	1.01E-04	9.92E-04	9.92E-04	9.92E-03	9.92E-03	9.45E-03	9.45E-03	
	Cl (mol/l)	7.24E-05	8.50E-04	9.61E-03	6.30E-06	7.40E-05	7.17E-05	8.66E-04	8.58E-04	9.45E-03	9.29E-03	9.37E-03	8.11E-03	
	C0-Cl (mol/l)	2.52E-05	1.26E-04	3.10E-04	4.70E-06	2.70E-05	2.93E-05	1.26E-04	1.34E-04	4.70E-04	6.30E-04	8.00E-05	1.34E-03	
	KD (ml/g)	1.74E+01	7.41E+00	1.61E+00	3.73E+01	1.82E+01	2.04E+01	7.27E+00	7.81E+00	2.49E+00	3.39E+00	4.27E-01	8.26E+00	
ヨウ素 10000MWCO														
浸漬期間	30日			60日			90日			60日				
	C0 (mol/l)	9.45E-03	9.45E-03	9.45E-03										
	Cl (mol/l)	9.29E-03	9.21E-03	8.11E-03										
	C0-Cl (mol/l)	1.60E-04	2.40E-04	1.34E-03										
	KD (ml/g)	8.61E-01	1.30E+00	8.26E+00										

セシウム 0.45 μ m												60日	
浸漬期間	30日						60日						
	C0 (mol/l)	1.01E-02	1.03E-03	9.55E-03	1.02E-02	9.77E-04	9.77E-04	9.55E-03					
	Cl (mol/l)	1.00E-02	9.62E-04	9.25E-03	1.01E-02	9.62E-04	9.55E-04	9.40E-03					
	C0-Cl (mol/l)	1.00E-04	6.80E-05	3.00E-04	1.00E-04	1.50E-05	2.20E-05	1.50E-04					
	KD (ml/g)	5.00E-01	3.53E+00	1.62E+00	4.95E-01	7.80E-01	1.15E+00	7.98E-01					
セシウム 10000MWCO													
浸漬期間	30日			60日			90日			60日			
	C0 (mol/l)	1.03E-03	9.55E-03	9.55E-03									
	Cl (mol/l)	1.02E-03	9.36E-03	9.40E-03									
	C0-Cl (mol/l)	1.00E-05	2.30E-04	1.50E-04									
	KD (ml/g)	4.90E-01	1.23E+00	7.98E-01									

ろ過方法の違いによる成分濃度	
0.45 μ m 10000MWCO	
Ca	2.10E-02
Na	1.02E-03
K	6.77E-04
Cl	7.43E-05
全炭酸	4.92E-05
SO ₄ ²⁻	3.57E-05
Si	1.43E-05
Al	7.41E-06
Mg	4.17E-06
Fe	3.57E-06
	3.57E-05

液固比影響試験データ (1 / 3)

液固比50/l	トレーザ溶液濃度1E-2(mol/l)	トレーザ溶液濃度1E-3(mol/l)	トレーザ溶液濃度1E-4(mol/l)	トレーザ溶液濃度1E-5(mol/l)	浸出成分平均
プランク濃度l(mol/l)	9.92E-03	9.92E-04	1.01E-04	1.10E-05	
プランク濃度Cs(mol/l)	1.02E-02	9.77E-04	1.00E-04	9.92E-06	
pH	12.69	12.71	12.69	12.69	
I	9.45E-03	9.29E-03	8.66E-04	8.58E-04	
Cs	1.01E-02	1.02E-02	9.62E-04	9.55E-04	
Al	8.15E-05	7.41E-05	8.52E-05	8.15E-05	
Mg	4.17E-06	4.17E-06	4.17E-06	4.17E-06	
Na	1.47E-03	1.48E-03	1.31E-03	1.33E-03	
Si	7.14E-05	7.29E-05	7.82E-05	7.67E-05	
K	8.13E-04	8.21E-04	6.95E-04	7.21E-04	
Ca	6.66E-03	6.47E-03	6.36E-03	6.33E-03	
Fe	3.57E-06	3.57E-06	3.57E-06	3.57E-06	
塩化物イオン	7.43E-05	7.43E-05	1.71E-05	2.29E-05	
硫酸イオン	4.17E-06	4.17E-06	4.17E-06	4.17E-06	
全炭酸	1.15E-04	9.84E-05	9.84E-05	4.92E-05	
					9.02E-05

液固比1/l	トレーザ溶液濃度1E-2(mol/l)	トレーザ溶液濃度1E-3(mol/l)	トレーザ溶液濃度1E-4(mol/l)	トレーザ溶液濃度1E-5(mol/l)	浸出成分平均
プランク濃度l(mol/l)	9.92E-03	9.92E-04	1.01E-04	1.10E-05	
プランク濃度Cs(mol/l)	1.02E-02	9.77E-04	1.00E-04	9.92E-06	
pH	13.05	12.11	13.04	13.05	
I	1.72E-03	1.70E-03	4.88E-05	4.57E-05	
Cs	9.40E-03	9.25E-03	9.70E-04	9.70E-04	
Al	2.00E-04	1.74E-04	1.63E-04	1.78E-04	
Mg	3.75E-05	3.75E-05	3.75E-05	3.75E-05	
Na	5.35E-02	5.30E-02	5.17E-02	5.22E-02	
Si	2.05E-04	1.65E-04	1.64E-04	1.74E-04	
K	2.85E-02	2.79E-02	2.79E-02	2.90E-02	
Ca	2.76E-03	2.60E-03	2.69E-03	2.68E-03	
Fe	1.61E-05	1.61E-05	1.61E-05	1.61E-05	
塩化物イオン	分析不能	分析不能	分析不能	分析不能	
硫酸イオン	分析不能	分析不能	分析不能	分析不能	
全炭酸	分析不能	分析不能	分析不能	分析不能	
					データ無し

液固比影響試験データ (2 / 3)

液固比10/l	トレーザ溶液濃度1E-2(mol/l)	トレーザ溶液濃度1E-3(mol/l)	トレーザ溶液濃度1E-4(mol/l)	トレーザ溶液濃度1E-5(mol/l)	浸出成分平均
プランク濃度I(mol/l)	9.92E-03	9.92E-04	1.01E-04	1.10E-05	
プランク濃度Cs(mol/l)	1.02E-02	9.77E-04	1.00E-04	9.92E-06	
pH	12.78	12.91	12.78	12.86	
I	6.87E-03	6.86E-03	4.50E-04	4.47E-04	
Cs	1.04E-02	1.03E-02	1.00E-03	1.15E-04	
Al	7.41E-06	7.41E-06	7.41E-06	7.41E-06	
Mg	4.17E-06	4.17E-06	4.17E-06	4.17E-06	
Na	6.13E-03	6.13E-03	5.87E-03	5.87E-03	
Si	1.50E-06	1.50E-06	1.50E-06	1.50E-06	
K	3.36E-03	3.31E-03	3.18E-03	3.23E-03	
Ca	6.04E-03	5.77E-03	5.90E-03	5.97E-03	
Fe	3.57E-06	3.57E-06	3.57E-06	3.57E-06	
塩化物イオン	6.86E-05	8.57E-05	1.43E-05	2.57E-05	
硫酸イオン	5.21E-06	4.17E-06	5.21E-06	5.21E-06	
全炭酸	9.84E-05	9.84E-05	9.84E-05	9.84E-05	
					1.00E-04

液固比100/l	トレーザ溶液濃度1E-2(mol/l)	トレーザ溶液濃度1E-3(mol/l)	トレーザ溶液濃度1E-4(mol/l)	トレーザ溶液濃度1E-5(mol/l)	浸出成分平均
プランク濃度I(mol/l)	9.92E-03	9.92E-04	1.01E-04	1.10E-05	
プランク濃度Cs(mol/l)	1.02E-02	9.77E-04	1.00E-04	9.92E-06	
pH	12.74	12.74	12.73	12.7	
I	9.84E-03	9.92E-03	9.21E-04	9.29E-04	
Cs	1.01E-02	1.02E-02	1.20E-03	9.17E-04	
Al	2.22E-05	1.85E-05	2.22E-05	2.22E-05	
Mg	4.17E-06	4.17E-06	4.17E-06	4.17E-06	
Na	8.52E-04	8.57E-04	7.52E-04	7.57E-04	
Si	1.50E-06	3.76E-06	1.50E-06	1.50E-06	
K	4.23E-04	4.13E-04	3.82E-04	3.62E-04	
Ca	4.66E-03	4.79E-03	4.44E-03	4.28E-03	
Fe	3.57E-06	3.57E-06	3.57E-06	3.57E-06	
塩化物イオン	8.57E-05	8.86E-05	2.57E-05	1.43E-05	
硫酸イオン	1.56E-05	1.25E-05	1.56E-05	1.46E-05	
全炭酸	1.15E-04	1.48E-04	1.15E-04	9.84E-05	
					1.17E-04

液固比影響試験データ (3 / 3)

液固比50/1		トレーザ溶液濃度1E-2(mol/l)		トレーザ溶液濃度1E-3(mol/l)		トレーザ溶液濃度1E-4(mol/l)-サ溶液濃度1E-5(mol/l)			
I	C0(mol/l)	9.92E-03	9.92E-03	9.92E-04	9.92E-04	1.01E-04	1.01E-04	1.10E-05	1.10E-05
	Cl(mol/l)	9.45E-03	9.29E-03	8.66E-04	8.58E-04	7.40E-05	7.17E-05	6.30E-06	6.30E-06
	C0-Cl(mol/l)	4.72E-04	6.30E-04	1.26E-04	1.34E-04	2.68E-05	2.91E-05	4.72E-06	4.72E-06
	KD(mol/g)	2.50E+00	3.39E+00	7.27E+00	7.80E+00	1.81E+01	2.03E+01	3.75E+01	3.75E+01
Cs	C0(mol/l)	1.02E-02	1.02E-02	9.77E-04	9.77E-04	1.00E-04	1.00E-04	9.92E-06	9.92E-06
	Cl(mol/l)	1.01E-02	1.02E-02	9.62E-04	9.55E-04	1.12E-04	1.18E-04	1.26E-05	1.25E-05
	C0-Cl(mol/l)	1.50E-04	0.00E+00	1.50E-05	2.26E-05	データ無し	データ無し	データ無し	データ無し
	KD(mol/g)	7.46E-01	0.00E+00	7.81E-01	1.18E+00	データ無し	データ無し	データ無し	データ無し
液固比1/1		トレーザ溶液濃度1E-2(mol/l)		トレーザ溶液濃度1E-3(mol/l)		トレーザ溶液濃度1E-4(mol/l)-サ溶液濃度1E-5(mol/l)			
I	C0(mol/l)	9.92E-03	9.92E-03	9.92E-04	9.92E-04	1.01E-04	1.01E-04	1.10E-05	データ無し
	Cl(mol/l)	1.72E-03	1.70E-03	4.88E-05	4.57E-05	2.36E-06	2.36E-06	2.36E-06	データ無し
	C0-Cl(mol/l)	8.20E-03	8.22E-03	9.43E-04	9.46E-04	9.84E-05	9.84E-05	8.66E-06	データ無し
	KD(mol/g)	4.78E+00	4.83E+00	1.93E+01	2.07E+01	4.17E+01	4.17E+01	3.67E+00	データ無し
Cs	C0(mol/l)	1.02E-02	1.02E-02	9.77E-04	9.77E-04	1.00E-04	1.00E-04	9.92E-06	データ無し
	Cl(mol/l)	9.40E-03	9.25E-03	9.70E-04	9.70E-04	1.09E-04	1.09E-04	1.48E-05	データ無し
	C0-Cl(mol/l)	8.27E-04	9.77E-04	7.52E-06	7.52E-06	データ無し	データ無し	データ無し	データ無し
	KD(mol/g)	8.80E-02	1.06E-01	7.75E-03	7.75E-03	データ無し	データ無し	データ無し	データ無し
液固比10/1		トレーザ溶液濃度1E-2(mol/l)		トレーザ溶液濃度1E-3(mol/l)		トレーザ溶液濃度1E-4(mol/l)-サ溶液濃度1E-5(mol/l)			
I	C0(mol/l)	9.92E-03	9.92E-03	9.92E-04	9.92E-04	1.01E-04	1.01E-04	1.10E-05	1.10E-05
	Cl(mol/l)	6.87E-03	6.86E-03	4.50E-04	4.47E-04	2.13E-05	2.28E-05	3.94E-06	3.15E-06
	C0-Cl(mol/l)	3.05E-03	3.06E-03	5.42E-04	5.45E-04	7.95E-05	7.80E-05	7.09E-06	7.87E-06
	KD(mol/g)	4.43E+00	4.47E+00	1.20E+01	1.22E+01	3.74E+01	3.41E+01	1.80E+01	2.50E+01
Cs	C0(mol/l)	1.02E-02	1.02E-02	9.77E-04	9.77E-04	1.00E-04	1.00E-04	9.92E-06	9.92E-06
	Cl(mol/l)	1.04E-02	1.03E-02	1.00E-03	1.18E-03	1.15E-04	1.14E-04	1.34E-05	1.31E-05
	C0-Cl(mol/l)	データ無し	データ無し	データ無し	データ無し	データ無し	データ無し	データ無し	データ無し
	KD(mol/g)	データ無し	データ無し	データ無し	データ無し	データ無し	データ無し	データ無し	データ無し
液固比100/1		トレーザ溶液濃度1E-2(mol/l)		トレーザ溶液濃度1E-3(mol/l)		トレーザ溶液濃度1E-4(mol/l)-サ溶液濃度1E-5(mol/l)			
I	C0(mol/l)	9.92E-03	9.92E-03	9.92E-04	9.92E-04	1.01E-04	1.01E-04	1.10E-05	1.10E-05
	Cl(mol/l)	9.84E-03	9.92E-03	9.21E-04	9.29E-04	8.58E-05	8.66E-05	7.87E-06	7.87E-06
	C0-Cl(mol/l)	7.87E-05	0.00E+00	7.09E-05	6.30E-05	1.50E-05	1.42E-05	3.15E-06	3.15E-06
	KD(mol/g)	8.00E-01	0.00E+00	7.69E+00	6.78E+00	1.74E+01	1.64E+01	4.00E+01	4.00E+01
Cs	C0(mol/l)	1.02E-02	1.02E-02	9.77E-04	9.77E-04	1.00E-04	1.00E-04	9.92E-06	9.92E-06
	Cl(mol/l)	1.01E-02	1.02E-02	1.20E-03	9.17E-04	1.05E-04	1.06E-04	1.21E-05	1.39E-05
	C0-Cl(mol/l)	1.50E-04	0.00E+00	データ無し	6.02E-05	データ無し	データ無し	データ無し	データ無し
	KD(mol/g)	1.49E+00	0.00E+00	データ無し	6.56E+00	データ無し	データ無し	データ無し	データ無し

種々のセメント系材料に対する吸着試験データ（浸漬期間30日）（1／3）

OPCベースト		トレーサ溶液濃度1E-2(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-3(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-4(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-5(mol/l)	
I	C0(mol/l)	9.92E-03	9.92E-03	9.92E-04	9.92E-04	1.01E-04	1.01E-04	1.10E-05	1.10E-05
	Cl(mol/l)	9.45E-03	9.29E-03	8.66E-04	8.58E-04	7.40E-05	7.17E-05	6.30E-06	6.30E-06
	C0-Cl(mol/l)	4.72E-04	6.30E-04	1.26E-04	1.34E-04	2.68E-05	2.91E-05	4.72E-06	4.72E-06
	KD(ml/g)	2.50E+00	3.39E+00	7.27E+00	7.80E+00	1.81E+01	2.03E+01	3.75E+01	3.75E+01
Cs	C0(mol/l)	1.02E-02	1.02E-02	9.77E-04	9.77E-04	1.00E-04	1.00E-04	9.92E-06	9.92E-06
	Cl(mol/l)	1.01E-02	1.02E-02	9.62E-04	9.55E-04	1.12E-04	1.18E-04	1.26E-05	1.25E-05
	C0-Cl(mol/l)	1.50E-04	0.00E+00	1.50E-05	2.26E-05				
	KD(ml/g)	7.46E-01	0.00E+00	7.81E-01	1.18E+00				
BFSベースト		トレーサ溶液濃度1E-2(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-3(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-4(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-5(mol/l)	
I	C0(mol/l)	1.01E-02	1.01E-02	1.01E-03	1.01E-03	1.01E-04	1.01E-04	1.02E-05	1.02E-05
	Cl(mol/l)	9.45E-03	9.61E-03	9.13E-04	9.13E-04	9.06E-05	9.06E-05	8.66E-06	9.45E-06
	C0-Cl(mol/l)	6.30E-04	4.72E-04	9.45E-05	9.45E-05	1.02E-05	1.02E-05	1.57E-06	7.87E-07
	KD(ml/g)	3.33E+00	2.46E+00	5.17E+00	5.17E+00	5.65E+00	5.65E+00	9.09E+00	4.17E+00
Cs	C0(mol/l)	9.92E-03	9.92E-03	9.77E-04	9.77E-04	1.00E-04	1.00E-04	9.85E-06	9.85E-06
	Cl(mol/l)	9.70E-03	9.70E-03	8.20E-04	8.42E-04	1.05E-04	1.05E-04	1.22E-05	1.20E-05
	C0-Cl(mol/l)	2.26E-04	2.26E-04	1.58E-04	1.35E-04				
	KD(ml/g)	1.16E+00	1.16E+00	9.63E+00	8.04E+00				
PFAベースト		トレーサ溶液濃度1E-2(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-3(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-4(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-5(mol/l)	
I	C0(mol/l)	1.01E-02	1.01E-02	1.01E-03	1.01E-03	1.01E-04	1.01E-04	1.02E-05	1.02E-05
	Cl(mol/l)	9.76E-03	1.01E-02	9.92E-04	1.00E-03	9.84E-05	1.02E-04	9.45E-06	1.02E-05
	C0-Cl(mol/l)	3.15E-04	0.00E+00	1.57E-05	7.87E-06	2.36E-06		7.87E-07	0.00E+00
	KD(ml/g)	1.61E+00	0.00E+00	7.94E-01	3.94E-01	1.20E+00		4.17E+00	0.00E+00
Cs	C0(mol/l)	9.92E-03	9.92E-03	9.77E-04	9.77E-04	1.00E-04	1.00E-04	9.85E-06	9.85E-06
	Cl(mol/l)	8.72E-03	8.87E-03	8.35E-04	7.67E-04	8.95E-05	9.10E-05	9.02E-06	9.40E-06
	C0-Cl(mol/l)	1.20E-03	1.05E-03	1.43E-04	2.11E-04	1.05E-05	9.02E-06	8.27E-07	4.51E-07
	KD(ml/g)	6.90E+00	5.93E+00	8.56E+00	1.37E+01	5.88E+00	4.96E+00	4.58E+00	2.40E+00
MHPベースト		トレーサ溶液濃度1E-2(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-3(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-4(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-5(mol/l)	
I	C0(mol/l)	1.01E-02	1.01E-02	1.01E-03	1.01E-03	1.01E-04	1.01E-04	1.02E-05	1.02E-05
	Cl(mol/l)	9.13E-03	9.13E-03	8.35E-04	8.19E-04	6.54E-05	6.61E-05	3.15E-06	3.15E-06
	C0-Cl(mol/l)	9.45E-04	9.45E-04	1.73E-04	1.89E-04	3.54E-05	3.46E-05	7.09E-06	7.09E-06
	KD(ml/g)	5.17E+00	5.17E+00	1.04E+01	1.15E+01	2.71E+01	2.62E+01	1.13E+02	1.13E+02
Cs	C0(mol/l)	9.92E-03	9.92E-03	9.77E-04	9.77E-04	1.00E-04	1.00E-04	9.85E-06	9.85E-06
	Cl(mol/l)	9.17E-03	9.25E-03	8.95E-04	8.72E-04	1.09E-04	1.08E-04	1.22E-05	1.22E-05
	C0-Cl(mol/l)	7.52E-04	6.77E-04	8.27E-05	1.05E-04				
	KD(ml/g)	4.10E+00	3.66E+00	4.62E+00	6.03E+00				

種々のセメント系材料に対する吸着試験データ（浸漬期間60日）（2／3）

OPCベースト	トレーサ溶液濃度1E-2(mol/l)	
I	C0(mol/l)	9.45E-03
	Cl(mol/l)	9.37E-03
	C0-Cl(mol/l)	8.00E-05
	KD(ml/g)	4.27E-01
Cs	C0(mol/l)	9.55E-03
	Cl(mol/l)	9.40E-03
	C0-Cl(mol/l)	1.50E-04
	KD(ml/g)	7.98E-01

BFSベースト	トレーサ溶液濃度1E-2(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-3(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-4(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-5(mol/l)	
I	C0(mol/l)	9.92E-03	9.92E-03	1.00E-03	1.00E-03	9.92E-05	9.92E-05	1.02E-05
	Cl(mol/l)	9.37E-03	9.37E-03	8.74E-04	8.74E-04	8.90E-05	9.06E-05	9.45E-06
	C0-Cl(mol/l)	5.51E-04	5.51E-04	1.26E-04	1.26E-04	1.02E-05	8.66E-06	7.87E-07
	KD(ml/g)	2.94E+00	2.94E+00	7.21E+00	7.21E+00	5.75E+00	4.78E+00	4.17E+00
Cs	C0(mol/l)	9.85E-03	9.85E-03	9.85E-04	9.85E-04	1.02E-04	1.02E-04	9.10E-06
	Cl(mol/l)	9.25E-03	9.25E-03	9.25E-04	9.25E-04	1.06E-04	1.05E-04	1.19E-05
	C0-Cl(mol/l)	6.02E-04	6.02E-04	6.02E-05	6.02E-05			
	KD(ml/g)	3.25E+00	3.25E+00	3.25E+00	3.25E+00			

PFAベースト	トレーサ溶液濃度1E-2(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-3(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-4(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-5(mol/l)	
I	C0(mol/l)	9.92E-03	9.92E-03	1.00E-03	1.00E-03	9.92E-05	9.92E-05	1.02E-05
	Cl(mol/l)	9.53E-03	9.61E-03	9.45E-04	9.37E-04	9.76E-05	9.69E-05	1.02E-05
	C0-Cl(mol/l)	3.94E-04	3.15E-04	5.51E-05	6.30E-05	1.57E-06	2.36E-06	0.00E+00
	KD(ml/g)	2.07E+00	1.64E+00	2.92E+00	3.36E+00	8.06E-01	1.22E+00	0.00E+00
Cs	C0(mol/l)	9.85E-03	9.85E-03	9.85E-04	9.85E-04	1.02E-04	1.02E-04	9.10E-06
	Cl(mol/l)	9.62E-03	9.55E-03	8.57E-04	9.10E-04	9.40E-05	8.95E-05	9.47E-06
	C0-Cl(mol/l)	2.26E-04	3.01E-04	1.28E-04	7.52E-05	7.52E-06	1.20E-05	
	KD(ml/g)	1.17E+00	1.57E+00	7.46E+00	4.13E+00	4.00E+00	6.72E+00	

MHPベースト	トレーサ溶液濃度1E-2(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-3(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-4(mol/l)		トレーサ溶液濃度1E-5(mol/l)	
I	C0(mol/l)	9.92E-03	9.92E-03	1.00E-03	1.00E-03	9.92E-05	9.92E-05	1.02E-05
	Cl(mol/l)	9.06E-03	9.06E-03	7.95E-04	8.11E-04	6.54E-05	6.38E-05	4.72E-06
	C0-Cl(mol/l)	8.66E-04	8.66E-04	2.05E-04	1.89E-04	3.39E-05	3.54E-05	5.51E-06
	KD(ml/g)	4.78E+00	4.78E+00	1.29E+01	1.17E+01	2.59E+01	2.78E+01	5.83E+01
Cs	C0(mol/l)	9.85E-03	9.85E-03	9.85E-04	9.85E-04	1.02E-04	1.02E-04	9.10E-06
	Cl(mol/l)	9.70E-03	9.25E-03	9.17E-04	9.47E-04	1.09E-04	1.09E-04	1.25E-05
	C0-Cl(mol/l)	1.50E-04	6.02E-04	6.77E-05	3.76E-05			
	KD(ml/g)	7.75E-01	3.25E+00	3.69E+00	1.98E+00			

種々のセメント系材料に対する吸着試験データ（浸漬期間90日）（3／3）

OPCベースト	トレーサ溶液濃度1E-2(mol/l)	
I	C0(mol/l)	9.45E-03
	Cl(mol/l)	8.11E-03
	C0-Cl(mol/l)	1.34E-03
	KD(ml/g)	8.26E+00
Cs	C0(mol/l)	9.55E-03
	Cl(mol/l)	9.77E-03
	C0-Cl(mol/l)	1.50E-04
	KD(ml/g)	7.98E-01

BFSベースト		トレーサ溶液濃度1E-2(mol/l)	トレーサ溶液濃度1E-3(mol/l)	トレーサ溶液濃度1E-4(mol/l)	トレーサ溶液濃度1E-5(mol/l)
I	C0(mol/l)	1.00E-02	1.00E-02	9.92E-05	9.92E-05
	Cl(mol/l)	9.76E-03	9.76E-03	9.69E-05	9.69E-05
	C0-Cl(mol/l)	2.36E-04	2.36E-04	2.36E-06	2.36E-06
	KD(ml/g)	1.21E+00	1.21E+00	1.22E+00	1.22E+00
Cs	C0(mol/l)	9.77E-03	9.77E-03	9.55E-05	9.55E-05
	Cl(mol/l)	9.47E-03	9.77E-03	9.40E-04	1.06E-04
	C0-Cl(mol/l)	3.01E-04	0.00E+00	2.26E-05	0.00E+00
	KD(ml/g)	1.59E+00	0.00E+00	1.20E+00	0.00E+00

PFAベースト		トレーサ溶液濃度1E-2(mol/l)	トレーサ溶液濃度1E-3(mol/l)	トレーサ溶液濃度1E-4(mol/l)	トレーザ溶液濃度1E-5(mol/l)
I	C0(mol/l)	1.00E-02	1.00E-02	9.92E-05	9.92E-05
	Cl(mol/l)	9.84E-03	9.84E-03	9.92E-05	9.84E-05
	C0-Cl(mol/l)	1.57E-04	1.57E-04	0.00E+00	0.00E+00
	KD(ml/g)	8.00E-01	8.00E-01	0.00E+00	0.00E+00
Cs	C0(mol/l)	9.77E-03	9.77E-03	9.55E-05	9.55E-05
	Cl(mol/l)	9.40E-03	9.55E-03	8.42E-04	9.25E-05
	C0-Cl(mol/l)	3.76E-04	2.26E-04	1.20E-04	3.01E-06
	KD(ml/g)	2.00E+00	1.18E+00	7.14E+00	1.63E+00

MHPベースト		トレーザ溶液濃度1E-2(mol/l)	トレーザ溶液濃度1E-3(mol/l)	トレーザ溶液濃度1E-4(mol/l)	トレーザ溶液濃度1E-5(mol/l)
I	C0(mol/l)	1.00E-02	1.00E-02	9.92E-05	9.92E-05
	Cl(mol/l)	9.37E-03	9.37E-03	8.66E-04	6.93E-05
	C0-Cl(mol/l)	6.30E-04	6.30E-04	1.34E-04	2.99E-05
	KD(ml/g)	3.36E+00	3.36E+00	7.73E+00	2.16E+01
Cs	C0(mol/l)	9.77E-03	9.77E-03	9.62E-04	9.55E-05
	Cl(mol/l)	9.77E-03	9.70E-03	9.70E-04	1.07E-04
	C0-Cl(mol/l)	0.00E+00	7.52E-05	0.00E+00	0.00E+00
	KD(ml/g)	0.00E+00	3.88E-01	0.00E+00	0.00E+00