

令和 3 年 6 月 19 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03398

研究課題名(和文) 金属イオンを含有した亜臨界水による土壌粘土鉱物からのCs脱離に関する研究

研究課題名(英文) Study on Cs Desorption from Soil Clay Minerals by Subcritical Water containing Metal Ions

研究代表者

竹下 健二 (Takeshita, Kenji)

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：80282870

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：亜臨界水中でのイオン交換現象は、粘土鉱物、特にパーミキュライトに強固に吸着しているCsを高速脱離させるのに大変有効である。しかしながらそのCsイオン交換機構は学術的に十分解明されていない。そこで本研究では亜臨界水イオン交換によるCsの脱離機構を分子動力学計算及び第一原理計算を使って明らかにし、その結果に基づいてCs脱離過程を輸送現象論の適用により数学モデル化した。実土壌処理を想定したイオン交換Cs脱離プロセスの物質収支が計算され、Cs回収性能が評価された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

東京電力福島第一原子力発電所事故後の除染作業により放射性セシウムによる汚染土壌が大量に発生した。そのうち高度に汚染した土壌(65万m³)は何らかの物理化学的処理により廃棄物量を減容し、コンパクトに処分することが求められている。Csは土壌中の粘土鉱物、特にパーミキュライトに選択的に吸着されているが、パーミキュライトからCsを効率的に回収できる方法として亜臨界水イオン交換法がある。本研究は分子動力学計算と第一原理計算を使って亜臨界水中のCsのイオン交換脱離機構を明らかにし、更にCs脱離過程を数学モデル化して効率的なCs脱離条件を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The ion-exchange phenomenon in subcritical water is available to the rapid desorption of radioactive cesium from a clay mineral, vermiculite, in which Cs is adsorbed selectively and strongly. However, the investigation of ion-exchange mechanism is not enough academically. In this study, the ion-exchange mechanism of Cs from vermiculite in subcritical water was made clear by the combination of molecular dynamics calculation and first-principle calculation. Based on the calculation results, the ion-exchange Cs desorption process was modeled mathematically by the application of transport phenomena theory. The mass balance of the Cs desorption process assuming real contaminated soil treatment was calculated and the Cs recovery performance was evaluated.

研究分野：環境化学工学

キーワード：福島第一原子力発電所事故 汚染土壌 粘土鉱物 放射性セシウム 分子動力学 イオン交換 亜臨界水

1. 研究開始当初の背景

福島第一原子力発電所事故後の除染作業により汚染土壌及び草木や汚泥などの大量の廃棄物が発生した。その中でも放射能濃度の高い汚染土壌(約 65 万 m³)は何らかの物理化学的処理を施して減容後処分する予定である。土壌中の放射性物質は大部分セシウム (¹³⁴Cs+¹³⁷Cs)である。Cs は粘土鉱物に選択吸着されることから、土壌分級による粘土鉱物を含む細粒物(一次減容)と細粒物から Cs を脱離・濃縮・固定化(二次減容)ができれば廃棄物を高減容化できる。

この課題を解決するために、これまで環境省除染減容等技術実証事業などで湿式、乾式の各種の処理技術が開発されてきた⁽¹⁻³⁾。湿式法としてアルカリ洗浄による粘土鉱物の溶解(H28 大成建設)、硫酸やアルカリ金属イオンを含む溶液を用いた土壌細粒物洗浄(H27 大阪大学)、土壌細粒物の凝集沈殿技術(H26 日立機械)などが検討されたが、20~60%前後の Cs 除去率であり、再利用へ回す事ができるのは汚染の程度が 20,000Bq/kg 以下のものに限られる。乾式法としては、熔融技術による土壌細粒物の高度減容化処理(H28 クボタ環境サービス)が挙げられるが、熔融飛灰中に Cs を 99%以上濃縮できるものの、土壌細粒物重量の 4 割に相当する大量の揮発促進剤を加えた高温操作が必要であり、再利用可能といっても用途の限られた大量の熔融スラグが残される。以上のように、廃棄物の高減容化と二次廃棄物の発生量低減を同時に満たす汚染土壌処理プロセスは見当たらない。

2. 研究の目的

本研究では汚染土壌からCsを脱離回収する方法として亜臨界水イオン交換法を提案している。亜臨界水イオン交換法は、粘土鉱物に強固に吸着しているCsを効率的に脱離でき、脱離回収したCsをガラスなどに固定化すれば高い廃棄物減容率が得られる。しかしながら、亜臨界水中のイオン交換現象についてその分子レベルでの機構解明が進んでいないのが現状である。

バーミキュライトのような膨潤性のある粘土鉱物はアルミナ層を含むフィロ珪酸塩鉱物であり、層状化合物の構造を持つ。Cs⁺は風化したエッジ部分に最初吸着され、原発事故から10年を経た今日、層間に存在するNa⁺やK⁺などのイオンと交換されながら層間のキャビティー構造に強固に吸着されている。本研究の目的は、亜臨界水中で粘土鉱物に強吸着されたCs⁺がどのように層間を移動し、イオン交換されるのかその交換機構を分子動力学(MD)計算と第一原理計算を用いて明らかにして、亜臨界水イオン交換理論を構築することである。

3. 研究の方法

3. 1 バーミキュライトからのCsイオン交換脱離への分子動力学法の適用

バーミキュライトの基本モデルは、Mathieson らによって報告されている構造^(4,5)を初期モデルとして採用した。この構造の単位格子および結晶学的データを図 1 に示す。固液界面モデルでは、単位格子を a, b, c 軸方向にそれぞれ、16×5×1 倍したスーパーセルを構築し、層間と接するように b 軸方向に水 3250 分子を配置した。このスーパーセルモデルに対して、周期的境界条件下での MD 計算を実施した。

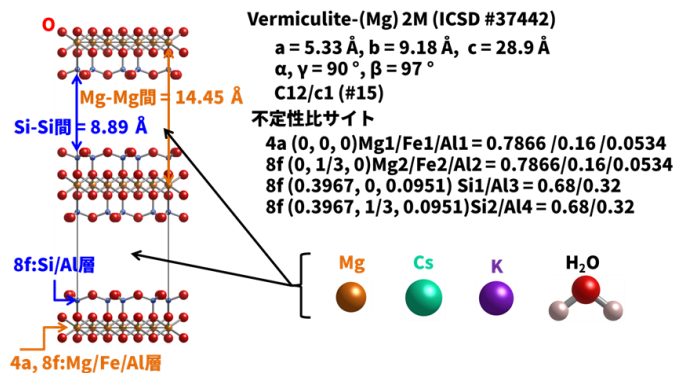


図 1 バーミキュライトの結晶構造と結晶学データ

MD 計算には Forcite を用いた。

力場パラメータとして、粘土鉱物用力場パラメータである clayff⁽⁶⁾を用い、等温定圧アンサンブル(NPT アンサンブル)で 100 ps のタイムスケールでシミュレーションを行った。また、NPT アンサンブルにおける温度および圧力は、常温常圧下モデルとして、27°C, 0.1 MPa、亜臨界水下モデルとして、250°C, 4 MPa とした。さらに、MD シミュレーションにおいて、Cs の平均 2 乗変位 (Mean Square Displacement: MSD)を計算し、拡散係数を算出した。また、水 47 分子(1 g/cm³)のみでの常温常圧下および亜臨界水下での MSD についても算出した。さらに密度汎関数理論(DFT)に基づく第一原理計算により、電子状態および構造特性解析を行った。

3. 2 回分式亜臨界水処理装置によるバーミキュライトからの Cs 脱離の実験検証

Cs を吸着させたバーミキュライト粉末 2 g と 0.1 M MgCl₂ 水溶液 200 mL を回分式亜臨界水処理装置(回分式水熱処理装置)の压力容器内へ入れ、100~250°C以上の亜臨界水条件で Mg²⁺/Cs⁺イオン交換によりバーミキュライトに吸着された Cs⁺を脱離させた。温度(圧力)は、150°C (4 MPa) と 250°C (6 MPa) の 2 条件で Cs 脱離実験を行った。実験開始から 1、2、6、12 時間後に亜臨界水を採取し、フラクシオンコレクターで冷却後に回収した溶液中の Cs 濃度を原子吸光法で定量し、Cs 脱離率を計算した。試験前後のバーミキュライトに対して XRD 測定を行い、バー

ミキュライトの層状構造の層間距離を測定した⁽⁷⁾。

4. 研究成果

4. 1 分子動力学法によるパーミキュライトからの Cs イオン交換脱離の評価

MD 計算の妥当性を調べるために、4a, 8f サイトの Mg/Al 比を変え、さらに層間に種々の原子・分子を入れた 29 種のモデルについて網羅的計算を行った。3.1 項で記載した 2 種の力場パラメータおよび 3 種のアンサンブルを検討した結果、実際の系を最もよく再現することができる条件は、clayff 力場パラメータを用いた NPT アンサンブルであることが分かった。

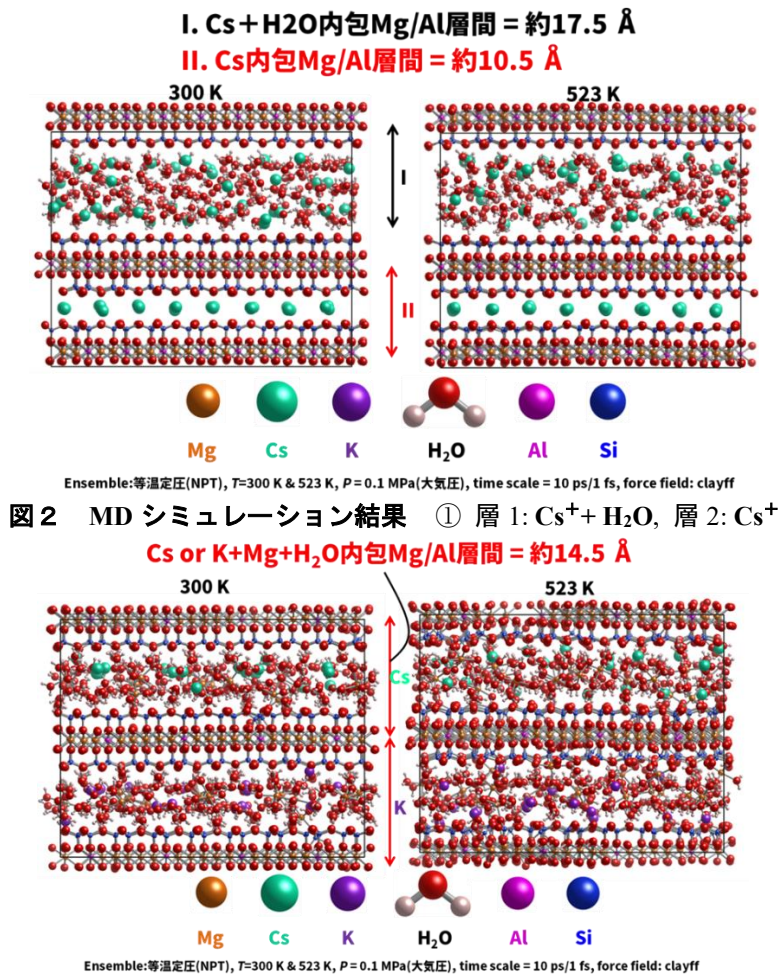


図3 MD シミュレーション結果 ②層 1: Cs⁺+ Mg²⁺+ H₂O, 層 2: K⁺+ Mg²⁺+ H₂O

次に、clayff 力場パラメータ、NPT アンサンブルを用いて、層間に内包する原子・分子を変えて MD シミュレーションを行った。Cs⁺、K⁺、Mg²⁺、H₂O を種々のパターンでパーミキュライト層間に入れ込んだモデルに対してタイムスケール 10 ps、タイムステップ 1 fs で計算した。これらのタイムスケールで、十分に等温定圧下に収束していることを確認している。亜臨界水イオン交換の効果を調べるために 27°C (室温条件) と 250°C (亜臨界水条件) の温度条件で計算を行った。

図 2、3 には 2 種のモデル構造 (① 層 1: Cs⁺+ H₂O, 層 2: Cs⁺, ② 層 1: Cs⁺+ Mg²⁺+ H₂O, 層 2: K⁺+ Mg²⁺+ H₂O) におけるパーミキュライト層間構造の変化を示す。Cs⁺のみが層間に取り込まれた場合、パーミキュライトの層間距離は、約 11 Å 程度に収縮し、Cs⁺と H₂O がともに取り込まれた場合は、その層間距離は約 17.5 Å 程度に拡張する結果となった。一方で、Mg²⁺ および H₂O と Cs⁺、K⁺がともに層間に取り込まれた場合は、パーミキュライトの層間長が約 14.5 Å 程度になることが分かった。これらの結果は、次節に示す同条件におけるパーミキュライトの XRD 分析結果とよく一致している。Cs⁺が単独でパーミキュライトの層間に取り込まれた場合、その層間距離が 25%程度収縮することから、Cs⁺は高選択的に層間に吸着、固定化される。一旦 Cs⁺がパーミキュライト層間に入ってしまうと、10 ps 以内の短時間で層間の収縮が完了してしまう。これらの挙動は、27°Cのみならず 250°Cでも観測されることから、一旦、パーミキュライトの層間収縮により吸着・固定化された Cs⁺は容易には脱離しない。Cs⁺をパーミキュライト層間から脱離するには水を含む他のイオンによる交換反応が必要である。Cs⁺がイオン交換されるにはパーミキュライト層間を十分に拡張することができる大きさのイオン、つまりは、水和した金属イオンが必要になるものと思われる。水和した Mg²⁺によりパーミキュライト層間は 14.5 Å 程度まで膨潤し、広がった層間から Cs⁺が水相中を拡散することによりイオン交換の可能性があること

が分かった。水相中では Cs⁺は H₂O との結合を形成しないが、Mg²⁺は H₂O と 6 配位単座結合を有しており、Cs⁺に比べて大きい Mg(H₂O)₆²⁺錯体が層間を広げ、イオン交換が迅速に起こる。

次いで固液両相における Cs⁺の挙動を解析する。常温常圧および亜臨界水条件における Cs のバーミキュライト層間および固液界面での挙動を解析するために、4 つのモデル

モデル 1. 層 1: Cs⁺, 層 2: Cs⁺

モデル 2. 層 1: Cs⁺, 層 2: Mg(H₂O)₆²⁺錯体

モデル 3. 層 1: Cs⁺, 層 2: Mg²⁺+ H₂O

モデル 4. 層 1: Cs⁺+ Mg²⁺+ H₂O, 層 2: Cs⁺+ Mg²⁺+ H₂O

を想定し、MD 計算を行った。図 4 には 100 ps 後のバーミキュライト構造を示す。ここで、モデル 1~3 は常温常圧下 (27°C, 0.1 MPa)、モデル 4 は亜臨界水下 (250°C, 4 MPa) を想定している。常温常圧下を想定したモデル 1~3 において、Cs⁺を取り込んだ層は、10.5~11.5 Å 程度まで収縮し、Cs⁺は安定に固定化されている。この結果は、次節の同条件におけるバーミキュライトの XRD 分析結果と一致している (但し、全層に Cs が吸着したモデル 1 では、時間経過とともに、層 1 および 2 が順次開閉を繰り返していた)。固液界面に注目すると、モデル 1~3 では、いずれも Cs を含む層は界面付近が閉じている。界面近傍での Cs⁺と水分子の出入りは活発には起こらず、Cs⁺が層間内に安定的に固定化されたまま残存すると考えられる。

一方で、亜臨界水下を想定したモデル 4 では、層間の Mg²⁺イオン、水分子さらにはそれらが結合した Mg(H₂O)₆²⁺錯体が、層間を押し広げることで Cs⁺は層内をランダムウォークによって拡散できることが示唆された。固液界面に注目すると、その層間は、界面影響のない層間と同程度まで広がっており、イオンの水中への拡散を容易にしている。また、層間に Mg(H₂O)₆²⁺錯体が存在している場合、界面でのバーミキュライトの層構造の乱れが大きかった。この効果により、界面近傍で吸着している Cs⁺は、固定化されなくなり、Cs⁺自身のランダムウォークと水の拡散を推進力として液相への拡散が起こるものと考えられる。

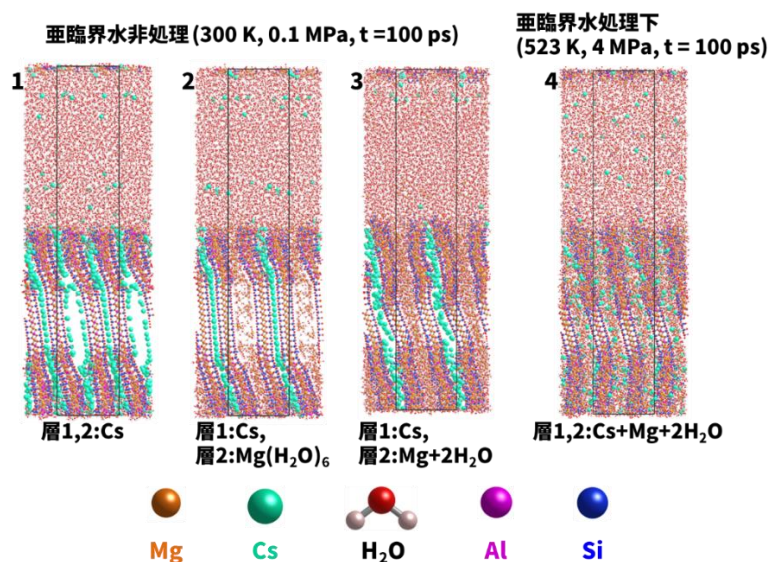


図 4 モデル 1~4 の MD 計算結果 (100 ps 後の固液界面構造)

次に、モデル 1~4 について、Cs⁺の MSD を計算し、拡散係数を算出することで、固液界面での原子・分子移動挙動を解析した。常温常圧下モデル 1~3 と亜臨界水下モデル 4 とを比較すると、亜臨界水中の方が 5~10 倍程度拡散係数が大きくなり、層間に固定化している Cs⁺がランダムウォークにより拡散しやすくなることが分かった。また、常温常圧下のモデル 1~3 を比較すると、層間に水分子が存在されることで Cs⁺の拡散係数は 2 倍程度大きくなった。Cs⁺のランダムウォークによる拡散に水分子の拡散が大きく影響していると考えられる。

4.2 回分式亜臨界水処理装置によるバーミキュライトからの Cs 脱離

1 価から 3 価の各種交換イオン (K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Al³⁺, Fe³⁺, La³⁺) を各 10mM 含む亜臨界水 (200 mL) に 33.6mg-Cs/g の Cs⁺を吸着させたバーミキュライト (2g) を入れて温度 250°C、8 時間 Cs⁺をイオン交換脱離した。結果を図 5 に示す。1 価の陽イオンでは高い脱離率を得ることができないが、イオンの価数の増加に従って Cs 脱離率が増加し、多価イオンを交換イオンとすることで高い脱離率が得られた。これらの結果から、図 6 には交換イオンの水和半径と Cs 脱離率の関係を示す。交換イオンの水和イオン半径と Cs 脱離率の間には直線関係があり、水和数の数に増加に従って Cs 脱離率が向上した。このことは、水和しやすい多価金属イオンがバーミキュライトの層間を開くことで Cs が脱離され易くなることを示唆しており、この結果は MD 計算結果とよく一致した。XRD を用いてバーミキュライト構造を解析した結果、バーミキュライトの層間距

離は交換イオンに K^+ を用いた場合、 10.1\AA 、 Mg^{2+} の場合、 14.2\AA 、 La^{3+} の場合 15.2\AA であった。常温常圧 (27°C 、 0.1MPa) で Cs^+ をバーミキュライトの層間に吸着させた場合の MD 計算では、バーミキュライト層間距離は 11\AA と評価され、 Cs^+ を飽和吸着させたバーミキュライトの XRD 分析結果 ($10.7\sim 11.2\text{\AA}$) とよく一致した。更に第一原理計算によりバーミキュライトの電荷密度分布を計算すると、 Cs^+ は層内にある 12 個の酸素に固定化され、 $Cs-O$ 間距離はイオン半径の和に等しかった。バーミキュライトの層間距離は 10.9\AA と評価され、実験結果及び MD 計算結果とほぼ一致した。層間は Cs 吸着で閉じた構造となり水分子の侵入は見られなかった。

次いで、回分型亜臨界水処理装置を用いてバーミキュライトからの Cs^+ のイオン交換脱離率の時間変化を測定し、 Cs 吸着量 q_A の時間変化を表した物質移動速度式

$$\frac{dq_A}{dt} = k_S a (q_A^* - q_A) \quad (1)$$

を解いて計算結果と実験結果を一致させ、物質移動容量係数 $k_S a$ を決定した。ここで q_A^* は液相の Cs 濃度に平衡な Cs 吸着量を表す。 $k_S a$ は 2 価イオン (Mg^{2+} : $8.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) に比べて 3 価イオン (Al^{3+} : $1.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 La^{3+} : $2.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) の方が大きく、交換イオンの価数が大きいほどイオン交換速度が速いことを分かる。 Cs^+ は層状化合物であるバーミキュライトの層間に強く吸着されているが、XRD 分析によると Cs^+ を飽和吸着したバーミキュライトの層間距離は 10.7\AA であったが、2 価イオン (Mg^{2+}) でイオン交換すると層間距離は 14.3\AA 、3 価イオン (La^{3+}) で交換すると 15.2\AA に増加しており、多価イオンは水和水を伴って層間に入り込むためにバーミキュライトの層間が広げられ、その結果イオン交換速度が増加すると考えられ、こうしたバーミキュライトの構造変化は MD 計算でもよく再現できた。

最後に Cs^+ を飽和吸着させたバーミキュライトを充填したカラムに Mg^{2+} を含む溶離液を流して亜臨界水条件 (250°C) で Cs^+ 脱離試験を実施した。その結果、カラムで吸着 Cs 全量を脱離回収できた。またイオン交換過程を物質移動係数 $k_S a$ を使った輸送理論でモデル化することで、カラムの Cs^+ の脱離挙動を再現できた。これらの結果を用いてプロセス評価を行った。放射能濃度 62000 Bq/kg の汚染土壌 1 万 m^3 に対して 99% の Cs 脱離回収を仮定した。亜臨界水イオン交換によって浄化土壌 (1 万 m^3) の放射能濃度は 620 Bq/kg となり、環境省の定めた指定廃棄物の指定基準 8000 Bq/kg 以下になり、浄化土壌は再利用が可能になる。この処理によって放射性 Cs を含む溶離水が発生するが、令和元年度環境省「除染土壌等の減容等技術実証事業」で検討されたガラス固化技術を使えば、ガラス固化体 (最終廃棄物) の発生量は 737 kg (0.322 m^3)、ガラス固化体の放射能濃度は 1 GBq/kg となり、大幅な廃棄物減容化と Cs 安定固定化が同時に可能になる。

参考文献

1. 公益財団法人原子力安全技術センター 平成 26 年度除染技術選定・評価等業務 報告書 <https://www.nustec.or.jp/etc/pdf/josen-honbun.pdf>
2. 公益財団法人原子力安全技術センター 平成 27 年度除染・減容等技術実証事業 概要書 https://www.nustec.or.jp/etc/pdf/josen-furoku1_H27jigyogaiyousho.pdf
3. 中間貯蔵・環境安全事業株式会社 平成 28 年度除染土壌等の減容等技術実証事業報告書 <https://www.jesconet.co.jp/interim/information/PDF/h28-rep.pdf>
4. A. M. Mathieson and G. F. Walker, Amer. Mineral. 39, 231 (1954).
5. A. M. Mathieson, Amer. Mineral. 43, 216 (1958).
6. T. Cygan, Jian-Jie Liang, and Andrey G. Kalinichev, J. Phys. Chem. B 108, 1255 (2004).
7. X. Yin, X. Wang, H. Wu, T. Ohnuki, K. Takeshita, J. Hazard. Mater. 326, 47 (2017).

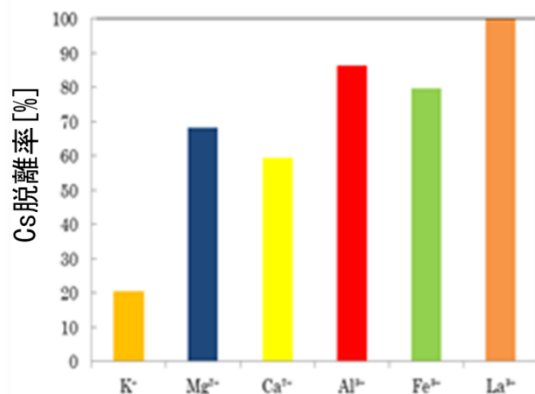


図5 各種交換イオンに対するバーミキュライトからのCs脱離

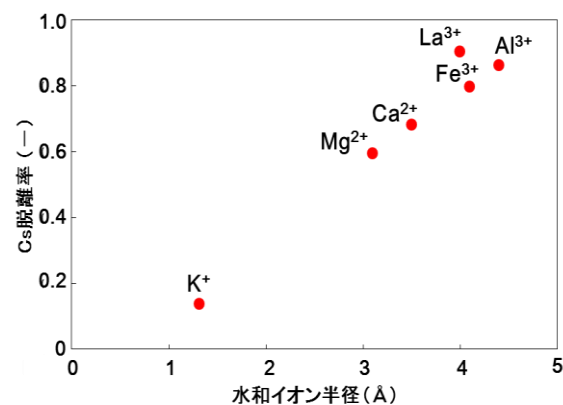


図6 水和イオン半径と脱離率との関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Xiangbiao Yin, Lijuan Zhang, Chenrui Meng, Yusuke Inaba, Xinpeng Wang, Ayako Nitta, Yoshikazu Koma, Kenji Takeshita	4. 巻 387
2. 論文標題 Selective removal of radiocesium from micaceous clay for post-accident soil decontamination by temperature-controlled Mg-leaching in a column	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Hazardous Materials	6. 最初と最後の頁 Article 121677
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jhazmat.2019.121677	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Xiangbiao Yin, Lijuan Zhang, Miki Harigai, Xinpeng Wang, Shunyan Ning, Masahiko Nakase, Yoshikazu Koma, Yusuke Inaba, Kenji Takeshita	4. 巻 177
2. 論文標題 Hydrothermal-treatment desorption of cesium from clay minerals: The roles of organic acids and implications for soil decontamination	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Water Research	6. 最初と最後の頁 115804
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.watres.2020.115804	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tatsuya Fukuda, Ryo Takahashi, Takuhi Hara, Koji Ohara, Kazuo Kato, Daiju Matsumura, Yusuke Inaba, Masahiko Nakase, Kenji Takeshita	4. 巻 58
2. 論文標題 Mechanistic study on the removal of Cs from contaminated soil by rapid ion exchange in subcritical water	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 399-404
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00223131.2020.1830866	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 3件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Kenji Takeshita, Yin Xiangbiao
2. 発表標題 Recovery of Radioactive Cesium from Clay Minerals in Soil contaminated by Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident
3. 学会等名 International Conference on Materials Research and Nanotechnology (基調講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹下健二, 殷 祥標, 稲葉優介, 針貝美樹, 渡邊真太, 尾上順
2. 発表標題 汚染土壌浄化・再利用と廃棄物高減容化を目指した亜臨界水処理システムの開発 1. 亜臨界水イオン交換によるCs脱離速度と平衡
3. 学会等名 第8回環境放射能除染研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹下健二, 殷 祥標, 稲葉優介, 針貝美樹
2. 発表標題 汚染土壌浄化・再利用と廃棄物高減容化を目指した亜臨界水処理システムの開発 2. カラム法による汚染土壌の連続処理
3. 学会等名 第8回環境放射能除染研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 殷 祥標, 駒 義和, 稲葉優介, 竹下健二
2. 発表標題 Removal of Radioactive Cesium from Fukushima Contaminated Soil by Hot-pressing Water Extraction in a Column
3. 学会等名 日本原子力学会2019年秋の大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹下健二, 稲葉優介, 殷 祥標, 駒 義和
2. 発表標題 亜臨界水イオン交換法によるパーミキュライトからのCs+脱離
3. 学会等名 日本原子力学会2019年秋の大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 L.Zhang, M.Harigai, Y.Inaba, M.Nakase, K.Takeshita
2. 発表標題 Removal of Cs from Clay Minerals by Hydrothermal Treatment Using Organic Acids
3. 学会等名 the 5th China Japan Academic Symposium on Nuclear Fuel Cycle (ASNFC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹下健二, 殷祥標, 張麗娟, 原卓飛, 針貝美樹, 稲葉優介
2. 発表標題 福島汚染土壌からの放射性Cs回収及び固定化におけるX線分析の利用
3. 学会等名 第55回X線分析討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋亮, 福田達弥, Yin Xiangbiao, 針貝美樹, 稲葉優介, 竹下健二
2. 発表標題 亜臨界水条件におけるカチオン高速イオン交換を用いたバーミキュライトからのCs回収に関する研究
3. 学会等名 第33回日本吸着学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹下健二, 殷祥標, 渡邊真太
2. 発表標題 放射性Csで汚染された土壌の浄化のための亜臨界水イオン交換プロセスの開発
3. 学会等名 第38回溶媒抽出討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹下健二, 稲葉優介, 内海和夫, Yin Xiangbiao, 堀内伸剛, 近沢孝弘
2. 発表標題 金属イオン含有垂臨界水による土壌分級物からのCsの高速イオン交換回収
3. 学会等名 第7回環境放射能除染研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 張 麗娟, 針貝美樹, 稲葉優介, 竹下健二, 石山達也, 坪根 剛
2. 発表標題 有機酸を用いた水熱処理法による粘土鉱物からのCs除去
3. 学会等名 第7回環境放射能除染研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹下健二, Yin Xiangbiao, 稲葉優介
2. 発表標題 福島第一原発事故で発生した汚染土壌からの放射性セシウムの回収
3. 学会等名 化学工学会第50回秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Takeshita, Xiangbiao Yin and Yusuke Inaba
2. 発表標題 Recovery of Radioactive Cesium from Clay Minerals in Soil Contaminated by Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident
3. 学会等名 20th Symposium on Separation Science and Technology for Energy Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹下健二, Yin Xiangbiao, 稲葉優介
2. 発表標題 亜臨界水中の高速イオン交換による汚染土壌からの放射性Cs回収
3. 学会等名 第37回溶媒抽出討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福田達弥, 高橋 亮, 殷 祥標, 稲葉優介, 針貝美樹, 中瀬正彦, 竹下健二
2. 発表標題 亜臨界水環境における汚染土壌からのCs脱離反応速度解析
3. 学会等名 日本原子力学会 2019年春の年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Takeshita
2. 発表標題 Recovery of Radioactive Cesium from Soil contaminated by Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident
3. 学会等名 5th Tokyo Tech - Uppsala University Joint Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹下 健二
2. 発表標題 金属イオン含有亜臨界水による土壌分級物からのCsの高速イオン交換回収と高減容固定化
3. 学会等名 環境放射能除染学会第15回講演会(招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

竹下研究室ホームページ http://www.lane.iir.titech.ac.jp/~takeshita/ 竹下研究室 http://www.lane.iir.titech.ac.jp/~takeshita/
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	尾上 順 (Onoe Jun) (50241245)	名古屋大学・工学研究科・教授 (13901)	
研究分担者	中瀬 正彦 (Nakase Masahiko) (70744332)	東京工業大学・科学技術創成研究院・助教 (12608)	
研究分担者	渡邊 真太 (Watanabe Shinta) (30554828)	東京工業大学・科学技術創成研究院・研究員 (12608)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------