

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H02437

研究課題名(和文) 福島汚染土壌の減容化と再利用に向けたセシウムフリー鉱化法の開発

研究課題名(英文) Development of cesium-free mineralization for volume reduction and reuse of radioactive contaminated soil in Fukushima

研究代表者

下山 巖 (Shimoyama, Iwao)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究主幹

研究者番号：10425572

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,100,000円

研究成果の概要(和文)：福島汚染土壌と風化黒雲母に対し、塩化物、硝酸塩、フッ化物を添加した場合の熱処理における各試薬の除染効果を調べた。CaCl₂とMgCl₂は粘土鉱物の相変態誘起によるCs除去が主な作用であったが、NaClとKClは真空中でのイオン交換促進によるCs除去が主な作用であることを見出した。この作用の違いがClと粘土鉱物との相互作用の違いに起因することを明らかにした。塩化物ではCaCl₂添加により750℃で除染率98%に達したのに対し、硝酸塩ではCa(NO₃)₂添加により600℃で除染率95%が得られた。さらにフッ化物ではKHF₂添加により300℃で除染率93%が得られ、大幅な処理温度低減化を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

福島原発事故後の未解決課題の一つは、除染により発生した大量の除去土壌の処理と再生利用である。熱処理は土壌に対する効率的な除染法として知られているが、1000～1300℃の高温処理を要するためコスト面での課題があった。これに対し、処理温度の大幅な低減化を可能にするセシウムフリー鉱化法(CFM)を開発した。土壌の物理的溶解を用いる従来の熱処理に対し、CFMは土壌を化学的にCsを含まない鉱物に変換することで低温域の除染効率を向上させる手法であり、硝酸塩との反応により600℃で95%の除染率を達成した。これにより、除染困難であった粘土質土壌の効率的な除染が可能になる点に社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：Decontamination effects of chloride, nitrate, and fluoride additives on heat treatment were investigated for Fukushima contaminate-soil and weathered biotite. While CaCl₂ and MgCl₂ induced Cs removal from clay minerals through phase transformation at high temperatures, NaCl and KCl induced Cs removal through ion exchange in clay minerals under vacuum. These different actions were explained based on the difference in the interaction between Cl and clay minerals. In the case of CaCl₂ addition, the decontamination ratio of the contaminated soil reached to 98% at 750 °C. In the case of Ca(NO₃)₂ addition, the decontamination ratio reached to 95% at 600 °C. In the case of KHF₂ addition, the decontamination ratio reached to 93% at 300 °C in Ar atmosphere. These results indicate that cesium-free mineralization is effective to improve decontamination efficiency of radioactive contaminated soil at lower temperatures compared with conventional heat treatments.

研究分野：材料科学

キーワード：汚染土壌 セシウム 熱処理 除染

1. 研究開始当初の背景

福島第一原子力発電所の事故により引き起こされた様々な未解決問題の一つに放射性汚染土壌の管理問題がある。環境中に拡散した主要な放射性核種のうち半減期約 30 年の ^{137}Cs は広範囲の土壌中の粘土鉱物に固定され、都市部を中心とした表土剥ぎ取りによる除染により 2200 万 m^3 を超える除去土壌が発生した。その多くは仮置き場に放置されており、その管理方法については未だに議論が続いている。大まかな方針としては仮置き場から中間貯蔵施設に移送し、30 年間保管した後にさらに最終処分場に移送することが決まっているが、中間貯蔵施設での保管コストだけでも 1 兆円を超える試算が予想されている[1]。さらに最終処分では、福島県外とされている処分場を選定する際の輾転や廃棄物の輸送といった社会的負担が容易に推測されるため、汚染土壌の大幅な減容化が望まれている。

福島だけでなく、チェルノブイリ、ハンフォードサイト及びサバンナリバーサイトなど過去の例において、土壌中の粘土鉱物による放射性 Cs の固定により土壌除染は難しいことが知られている。2:1 型粘土鉱物のシロキサンドイトリゴナルキャビティのサイズとイオン半径の大きな Cs^+ はサイズが似ているため固定されやすく、他の陽イオンよりも高い選択性を持つ[5-6]。また、福島県東部に面した地域では顕著な Cs 吸着特性を持つ風化黒雲母がひろく見られるためさらに除染を困難にしている。汚染土壌に対しては、水溶液を用いたイオン交換、ファイトレメディエーション、分級、磁気分離、動電的分離等様々な修復方法が開発されており、これらの手法は土壌性状をある程度保ったまま除染できるという利点を持っている。しかし WB のように Cs を強固に収着する粘土鉱物を多く含む粘土質土壌の場合はこれらの手法では除染率が低下するため、より強力な手段が必要になる。

熱処理はこのような粘土質土壌への適用が期待されている手法の一つであり、粘土鉱物を融解し Cs を塩化物として昇華させるという基本的な考え方に基づいている。Spalding は汚染土壌に石灰石と NaCl を添加して 1000°C 以上の加熱処理を数回行うと、放射能が 99% 以上減衰したことを報告した[2]。また、1F 原発事故後、日本でも幾つかの企業が同様の手法の開発に取り組んでおり、1000~1400°C で 99% 以上の Cs 除去が可能であることが報告されている[3-5]。これらの熱処理は土壌性状を問わず高い除染率が得られるため特に汚染レベルの高い汚染土壌への適用が想定されているが、現状では 1000~1400°C の高温処理を要するため他の手法と比較した場合、高コストとなることが欠点となっており、処理温度の低減化が最重要課題の一つとなっている。

2. 研究の目的

この状況に対し我々はより低温域での熱処理の効率化のためセシウムフリー鉱化法 (CFM) を提案した[6, 7]。この方法は従来のような粘土鉱物の物理的融解ではなく、添加剤との化学反応により粘土鉱物を異なる鉱物に変換することで Cs を除去するという発想に基づいている。反応生成物は試薬の種類、量、温度及び加熱中の雰囲気等様々な因子に影響を受けることが予想されるが、これらの因子と生成物の種類、そして除染効果との関連について調べた研究は我々の知る限りない。従来熱処理でも様々な添加剤が用いられているが、現状では個々の薬剤の作用に関する系統的な研究が不足しており、経験則に頼っている状況にある。従ってこれらの因子と除染効率との相関関係についての知見を蓄積することは CFM のみならず熱処理による土壌除染法の改善においても重要である。

そこで本研究では 1) 塩化物、2) 硝酸塩、3) フッ化物を添加剤として用いた場合の 대기、Ar 雰囲気及び真空中での熱処理による土壌除染を試みた。これらの添加剤を用いた場合の処理温度と生成物との相関関係を明らかにすることで、従来熱処理よりも低温での土壌除染を実現する CFM 法を開発し、最終的に粘土鉱物から 500°C 以下で 99% 以上の Cs 除去を実現する手法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 土壌及び模擬土壌

本研究では非放射性 Cs を収着させた模擬土壌と福島の放射性汚染土壌を対象とした除染試験を行った。模擬土壌としては福島県小野町で産出した WB を用い、非放射性 Cs を飽和量まで収着させた。放射性汚染土壌は福島県富岡町の帰還困難区域において 2016 年 7 月に採取した。Ge 半導体検出器で評価した土壌中の ^{137}Cs 及び ^{134}Cs の放射能濃度はそれぞれ 8.2 kBq/kg と 1.8 Bq/kg であった。X 線回折 (XRD) による分析により、この土壌中にはパーミキュライト化した WB を含む真砂土であることを確認した。

(2) 熱処理

熱処理は環状電気炉の石英管内において行った。添加剤を加えた土壌もしくは模擬土壌を Pt のつばに入れ、大気もしくは真空中で 2 時間の熱処理を行った。模擬土壌 (WB) の乾燥試料 100mg に対し試薬を添加し純水を数 ml 混ぜて十分分散させた後に 90°C で加熱し乾燥させた。汚染土壌に対しては乾燥試料 4g に同重量の試薬を添加し、純水を加えて十分分散させた後に真空中で乾

燥させた。大気加熱では流量 100ml/分の大気フローを行い、真空加熱ではロータリーポンプとターボ分子ポンプで約 20Pa に排気した。添加剤を加えた試料の場合は水洗浄により熱処理後の残留試薬を除去し、乾燥後に分析を行った。

(3) 分析

放射能分析には NaI 半導体検出器を用いた。約 4 g の土壌試料に対して熱処理前、熱処理後及び水洗浄後の ^{137}Cs と ^{134}Cs の γ 線スペクトルを測定し、試料重量あたりの計数率のピーク面積を求めた。熱処理と水洗浄後の試料のピーク面積との比率により除染率を評価した。組成分析には XRF を用いた。XRD による構造解析では Cu K α 線を線源に用いた。放射光による X 線吸収分光実験は高エネルギー加速器研究機構 KEK-PF の BL27A ビームラインにおいて行った。測定は全電子収量法 (TEY) により行った。

4. 研究成果

(1) 塩化物の添加効果

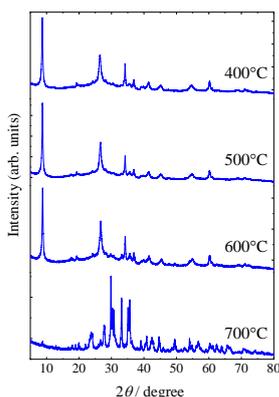


図 1. CaCl₂ 添加 WB の熱処理後の XRD パターン

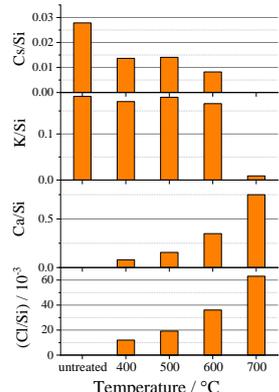


図 2. CaCl₂ 添加 WB の熱処理後の組成比変化

塩化物試薬 NaCl、KCl、MgCl₂、CaCl₂ のうち CaCl₂ は処理あたりの効果が最も高かった。図 1 に WB に CaCl₂ を 5mmol 添加して真空中で加熱した場合の XRD パターンを示す。400°C では WB に由来するピーク成分しか観測されず 600°C まで結晶構造は保持されたが、700°C では augite と wadalite への相変態が生じた。これらの試料の Cs、K、Ca、Cl と Si との組成比の温度変化を図 2 に示す。Cs/Si 比は高温になるにつれ減少し、700°C では検出限界以下まで低下した。またそれと共に K/Si 比も大幅に低下した。一方、Ca/Si と Cl/Si 比は温度と共に増加し、相変態が生じた 700°C で大きく増加した。これらの結果は WB と CaCl₂ との反応により 700°C で augite と wadalite への相変態が生じ、その結果 Cs と K が除去されたことを示している [8]。

augite は一般式 M₂M₁T₂O₆ で表される輝石の一種であり酸素 4 配位の T サイトと酸素 6 配位の M₁ サイトと酸素 8 配位の M₂ サイトを持つ。最も大きい M₂ サイトは Fe²⁺、Na⁺、Ca²⁺ といった +1 価もしくは +2 価のイオンが入り、K⁺ や Cs⁺ は M₂ サイトに対して大きすぎるため、augite 形成と共に排除される。wadalite もサイズの大きいアルカリ金属イオンが占めることができない結晶構造により K や Cs は除去されることになる。これが CFM の基本原理であり、CaCl₂ は粘土鉱物に対しこのような相変態を誘起することで Cs を除去できることがわかった。これを踏まえて汚染土壌に対する CaCl₂ の効果を検証した。図 3 に除染率の温度依存性を示す。除染率は大気・真空どちらの条件でも 700°C 付近で 80% 以上まで増加し、大気加熱 750°C で 98% に達した。このとき土壌中の粘土鉱物は完全に分解し、相変態を介した除染が実土壌に対しても有効であった [9]。

MgCl₂ 添加の場合は真空条件で除染率が向上し、650°C 付近では真空下で CaCl₂ よりも高い効果が得られた [10]。MgCl₂ は 600°C 以下で塩中の残留水分と反応して安定な MgO が形成されるため一部の試薬は粘土鉱物に作用しない。しかし真空中では脱水反応が促進されることで MgO への反応が阻害され、除染率が向上したと考えられる。真空下の 700°C 以上の熱処理により粘土鉱物の分解と forsterite への相変態が観測され、MgCl₂ はも粘土鉱物の相変態を誘起することで Cs を除去することが示された。Ar 雰囲気では真空中と同程度の除染率が得られた。

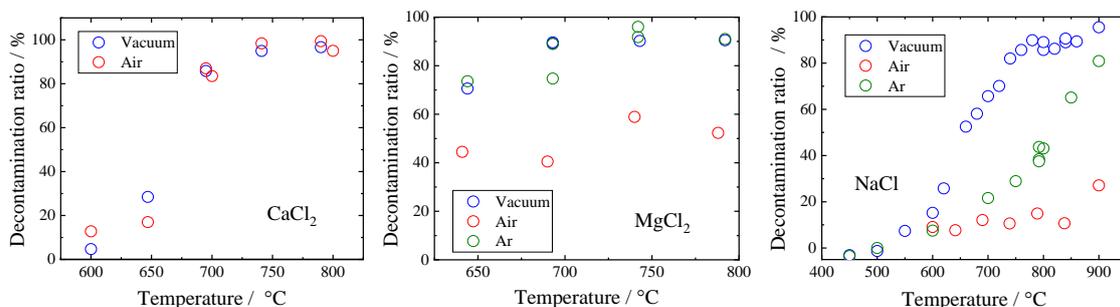


図 3. CaCl₂ (左)、MgCl₂ (中)、NaCl (右) を添加した場合の汚染土壌の除染率の温度依存性

NaCl 添加の場合も真空中で除染率が向上した。真空下の除染率は 800°C で約 90% に達したのに対し、大気中では 840°C で除染率 11% であった [10]。Ar 雰囲気では 700°C 以上で除染率が向上

し大気条件よりは高い値を示したが、800°C付近ではその効果は限定的であった。これは真空の効果は単なる還元雰囲気によるものではないことを示している。

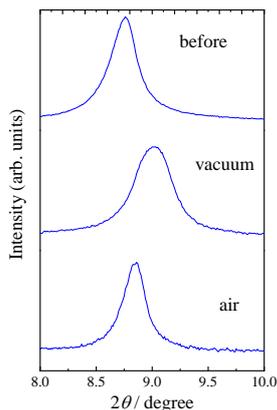


図 4. NaCl 添加 WB の 800°C の熱処理前後の底面反射ピーク比較

興味深いことに、NaCl は大気中と真空中で異なる作用を示した。NaCl を添加した WB を真空中で 800°C、2 時間の熱処理を行った場合、熱処理前後で粘土鉱物の結晶構造が保たれていたのに対し、大気中で 800°C、2 時間の熱処理を行った試料では nepheline や hematite への相変態の進行が確認された。さらに XRD パターンに観測された WB の底面反射ピークは真空熱処理後に高角側へ大きくシフトしたのに対し、大気中でほとんどシフトしなかった (図 4)。これらの結果は真空中では Na によるイオン交換が促進されたのに対し、大気中ではイオン交換が抑制され、粘土鉱物の相変態が引き起こされたことを示している。KCl も NaCl と似た作用を示し、大気で 790°C で約 35% の除染率が真空中で約 82% に向上した。また真空中ではイオン交換による Cs 除去過程が支配的であった。これらの結果から同じ塩化物試薬でも CaCl₂ と MgCl₂ は粘土鉱物の相変態を介して Cs を除去するのに対し、NaCl と KCl は真空中でのイオン交換により Cs を除去するという異なる作用を持つことを明らかにした [10]。このため NaCl と KCl については土壤中の粘土鉱物がある程度保持したまま除染が可能である点にも価値が見いだせる。

(2) 塩化物試薬の Cl が粘土鉱物に及ぼす影響

塩化物試薬により粘土鉱物に及ぼす作用が異なる原因はよくわかっていない。図 2 に示すように Ca と Cl は相変態開始前から WB 中に取り込まれており、これが 700°C での相変態を誘起したことが推察されるが、その一方で Ca(OH)₂ や CaCO₃ 添加の場合は 700°C でほとんど WB の相変態が進行せず、CaCl₂ に比べると低い除染率に止まった。このことは粘土鉱物の相変態に Cl が重要な役割を担っていることを示唆している。そこで Cl の効果を吸収端近傍 X 線吸収微細構造 (NEXAFS) 分光法により調べた。

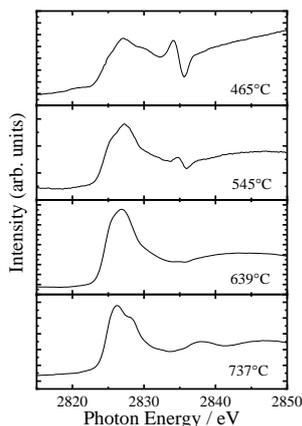


図 5. CaCl₂ 添加 WB の熱処理後の Cl K 端 NEXAFS スペクトル

CaCl₂ 1 mmol を添加した WB を真空中で熱処理した試料の Cl K 端 NEXAFS スペクトルを図 5 に示す。光学素子の汚染に起因する 2835eV 付近の微細構造以外に幾つかの微細構造が観測された。737°C では -1 価の Cl が支配的になると考えられるため 2827eV 付近のピークは -1 価の Cl に帰属されることが推察される。一方、相変態が進行する前の 465°C では 2825eV 付近と 2830eV 付近のショルダー成分の相対強度が増大した。一方、NaCl を添加した WB を真空中で熱処理した試料の NEXAFS スペクトルには明瞭なショルダー成分が観測されず、2827eV 付近のピークのみが強く観測された。これらの結果は上記のショルダー成分に帰属される Cl が WB の相変態に関わっていることを示唆している。

これらの Cl の電子状態を解釈するため、Cl を含む幾つかのシリカモデルクラスターの電子状態を DV-X α 分子軌道計算により調べた。その結果 2825eV のショルダー成分は 0-Cl 結合を形成する +1 価の Cl、2827eV 付近の強い成分は -1 価の Cl に起因し、2830eV 付近のショルダー成分は複数の酸素と結合した高価数の Cl により説明することができることを明らかにした [11]。

Si-Cl 結合と 0-Cl 結合の構造安定性を比較するため、リング型シリカクラスターに対して Si-Cl もしくは 0-Cl 結合を 0 から 3 まで増やした場合のクラスターの凝集エネルギー E_{coh} を以下のよう求めた。

$$E_{\text{coh}} = E_{\text{total}} - \sum_i E_{i,\text{total}}^{\text{isolated}}, \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで E_{total} は PM5 法を用いた最適化により得られた全エネルギーであり、 $E_{i,\text{total}}^{\text{isolated}}$ はクラスターを構成する孤立原子の全エネルギーで i は異なる構成原子に対応する。得られた E_{coh} をクラスターの全原子数で割って得られた $E_{\text{coh}}/\text{atom}$ は Cl を含まない場合が最も低い値をとり、塩素/シリカ四面体比と共に増加した。これは Cl と結合することでシリカクラスターが不安定になることを示している。また、Si-Cl 結合に比べ 0-Cl 結合の方が常に大きい $E_{\text{coh}}/\text{atom}$ 値をとり、より不安定な構造であることが示された。

これらの結果により Cl は粘土鉱物の酸素と結合することで系を不安定化し、相変態を促進する役割を持っていることがわかった。NaCl の場合は高価数の Cl がほとんど形成されなかったため、Cl のこの作用は Ca との共働効果によるものであることを示唆しているが、この共働効果が Ca と Na で異なる原因については今後の課題の一つである。

(3) 硝酸塩試薬の添加効果

硝酸塩試薬の添加効果を調べた。用いた 4 種類の試薬 NaNO₃、KNO₃、Mg(NO₃)₂·6H₂O、Ca(NO₃)₂·

4H₂Oのうち、最も高い効果が得られたCa(NO₃)₂・4H₂Oの結果について示す。

図6にCa(NO₃)₂・4H₂Oを5mmol添加したWBの熱処理後のCs除去率を示す。この試薬は真空中よりも大気中で高い効果を示し、461℃でXRFによる検出限界以下までCs組成比が減少した。しかし450℃ではCs除去率は62%まで低下した[12]。大気加熱処理後の試料は450℃と461℃で

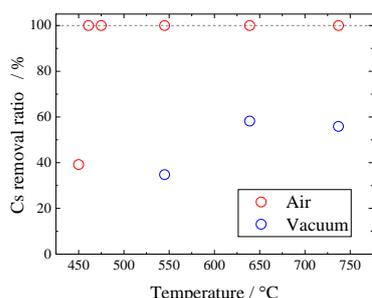


図6. Ca(NO₃)₂・4H₂O添加WBのCs除去率

大きな構造変化を示し、450℃ではWBの結晶構造が保たれており相変態がほとんど生じていないのに対し、461℃ではWBの分解と相変態が進行した。

これを踏まえて実汚染土壌に対するCa(NO₃)₂・4H₂Oの効果を検証した。汚染土壌に対して重量比10/1のCa(NO₃)₂・4H₂Oを添加し、大気中で600℃6時間の熱処理を行った試料では除染率95%に達した。この試薬に関しては添加量依存性に関する検討が十分ではないが、WBに対する熱処理ではWB100mgに対する添加量を5mmolから1mmolに減少した際にCs除去率は大幅に低下し、650℃での効果は同じ添加量のCaCl₂を下回った。このことから、塩化物よりも添加量が増加する点が硝酸塩試薬の問題点と言える。

(4) フッ化物試薬の添加効果

フッ化物は高融点の安定な物質が多く、例えばCaF₂(融点1418℃)の場合700℃ではほとんど除染効果を示さなかった。しかし、KF(融点860℃)は真空中である程度作用し、汚染土壌に対する除染試験では重量比1/1のKF添加で743℃の真空熱処理を行い、除染率84%であった。KF添加時は600℃以上で相変態が進行し、750℃では主な生成物としてmegakalsilite(KAlSiO₄)が形成された。KFは塩化物試薬と比べて処理温度の顕著な低減化を生じなかったため、より低温での反応性向上を期待してKHF₂の添加効果を調べた。KHF₂はKFとは異なり真空中での除染効果の向上はみられなかったが、Ar雰囲気中で除染率が向上した。KHF₂を重量比1/1添加した汚染土壌に対し600℃の大気加熱を行った場合、除染率は約46%であったが、Ar雰囲気中で300℃の熱処理を行った場合は除染率93%が得られた。従ってKHF₂は処理温度低減化の面では最も有効な試薬と言えるが、熱処理及びその後の水洗浄処理において環境負荷の大きいフッ酸が発生することが大きな問題点である。

<引用文献>

- [1] 原子力災害対策本部 (2013) 原子力災害からの福島復興の加速に向けて (案), 平成25年12月20日配付資料, 2013, p.12; <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/genshiryoku/dai33/siryoku2-2.pdf>.
- [2] Spalding, B. P. (1994) *Environ. Sci. Technol.* **28** (6), 1116–1123.
- [3] 本間健一, 高野博幸, 三浦啓一, 佐々木忠志, 木村 武, 万福祐造 (2014) *粘土科学* **52**, 71–73.
- [4] 釜田陽介, 阿部清一, 川本克也, 由井和子, 倉持英敏, 大迫正浩 (2015) *環境放射能除染学会誌* **3**(2), 49–64.
- [5] 竹田尚弘, 小倉正浩, 藤原 大, 倉持英敏, 大迫正浩 (2016) *環境放射能除染学会誌* **4**(4), 303–312.
- [6] Honda M., Shimoyama I., Kogure T., Baba Y., Okamoto Y., Suzuki S. and Yaita T. (2017) *ACS omega* **2**, 8678–81.
- [7] 下山巖, 本田充紀, 小暮敏博, 馬場祐治, 平尾法恵, 岡本芳浩, 矢板毅, 鈴木伸一 (2017) *PF NEWS* **35**, 17–22.
- [8] 下山 巖, 本田充紀, 小暮敏博 (2016) 第5回環境放射能除染研究発表会要旨集 p.13.
- [9] 下山 巖, 本田充紀, 小暮敏博, 馬場祐治, 矢板毅, 岡本芳浩 (2017) 第6回環境放射能除染研究発表会要旨集 p. 3.
- [10] 下山 巖, 小暮敏博, 奥村大河, 馬場祐治 (2018) 第7回環境放射能除染研究発表会要旨集 p. 9.
- [11] Shimoyama I., and Baba Y., (2019) Migration 2019 abstract PD-11.
- [12] 下山 巖, 小暮敏博, 奥村大河, 馬場祐治 (2019) 第8回環境放射能除染研究発表会要旨集 p. 42.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Honda Mitsunori, Shimoyama Iwao, Kogure Toshihiro, Baba Yuji, Suzuki Shinichi, Yaita Tsuyoshi	4. 巻 2
2. 論文標題 Proposed Cesium-free Mineralization Method for Soil Decontamination: Demonstration of Cesium Removal from Weathered Biotite	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 8678 ~ 8681
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.7b01304	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yoshigoe Akitaka, Shiwaku Hideaki, Kobayashi Toru, Shimoyama Iwao, Matsumura Daiju, Tsuji Takuya, Nishihata Yasuo, Kogure Toshihiro, Ohkochi Takuo, Yasui Akira, Yaita Tsuyoshi	4. 巻 112
2. 論文標題 Nanoscale spatial analysis of clay minerals containing cesium by synchrotron radiation photoemission electron microscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 021603 ~ 021603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5005799	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 下山巖、本田充紀、小暮敏博、馬場祐治、平尾法恵、岡本芳浩、矢板毅、鈴木伸一	4. 巻 35
2. 論文標題 福島汚染土壌の除染と再利用のためのセシウムフリー鉱化法の開発	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Photon Factory News	6. 最初と最後の頁 17-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Shimoyama Iwao, Baba Yuji, Hirao Norie	4. 巻 405
2. 論文標題 Micro-orientation control of silicon polymer thin films on graphite surfaces modified by heteroatom doping	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Surface Science	6. 最初と最後の頁 255 ~ 266
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apsusc.2017.01.297	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 Mitsunori Honda, Yoshihiro Okamoto, Iwao Shimoyama, Hideaki Shiwaku, Shinichi Suzuki and Tsuyoshi Yaita	4. 巻 2
2. 論文標題 Mechanism of Cs Removal from Fukushima Weathered Biotite by Heat Treatment with a NaCl - CaCl ₂ Mixed Salt	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ACS OMEGA	6. 最初と最後の頁 721-727
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.6b00372	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 下山巖、馬場祐治
2. 発表標題 粘土鉱物の相変態誘起を介したCs除去に関するアルカリ塩化物の反応促進効果
3. 学会等名 第33回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Iwao Shimoyama, Yuji Baba
2. 発表標題 Importance of halogen for soil decontamination using cesium-free mineralization; A Role of chlorine on phase transformation of weathered biotite
3. 学会等名 17th International Conference on the Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Migration 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Iwao Shimoyama
2. 発表標題 Soil decontamination by cesium-free mineralization with CaCl ₂ ; Effect of chlorine on phase transformation of a clay mineral
3. 学会等名 7th International Conference on DV-Xa Method (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 下山巖
2. 発表標題 セシウムフリー鉱化法を用いた土壌除染における硝酸塩添加剤の効果
3. 学会等名 環境放射能除染学会第8回研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉田剛、下山巖
2. 発表標題 セシウムフリー鉱化法によるCs汚染鉱物の光触媒材料への変換と環境浄化への再生利用
3. 学会等名 環境放射能除染学会第8回研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 下山巖、小暮敬博、奥村大河、馬場祐治
2. 発表標題 セシウムフリー鉱化法を用いた土壌除染における塩化物反応剤と低圧環境の相乗効果
3. 学会等名 環境放射能除染学会第7回研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 下山巖、小暮敬博、奥村大河、馬場祐治
2. 発表標題 アルカリ塩化物を用いたセシウムフリー鉱化法による土壌除染：反応剤のカチオン価数に依存したCs除去過程
3. 学会等名 日本原子力学会2018年秋の大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 下山巖、小暮敏博、奥村大河、馬場祐治
2. 発表標題 低圧環境下での塩化物添加熱処理による土壌除染
3. 学会等名 2018年度日本地球化学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 下山巖、馬場祐治
2. 発表標題 アルカリ塩と粘土鉱物との反応における塩素の役割
3. 学会等名 第50回溶融塩科学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 下山巖、本田充紀、小暮敏博、馬場祐治、矢板毅、岡本芳浩
2. 発表標題 セシウムフリー鉱化法を用いた汚染土壌の除染における塩化物の添加効果
3. 学会等名 第6回環境放射能除染学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 下山巖、本田充紀、小暮敏博、馬場祐治、矢板毅、岡本芳浩
2. 発表標題 セシウムフリー鉱化法を用いた土壌除染におけるCaCl ₂ 及びKCl添加物の効果
3. 学会等名 2017年原子力学会秋の大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 下山巖、本田充紀、小暮敏博、奥村大河、馬場祐治、岡本芳浩
2. 発表標題 セシウムフリー鉱化法を用いた実土壌除染における塩化物の添加効果
3. 学会等名 第61回粘土科学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 本田充紀、岡本芳浩、下山巖、塩飽秀啓、鈴木伸一、矢板毅
2. 発表標題 その場観察高温XAFS測定による反応促進剤を用いた熱処理による福島楓花黒雲母からのCs除去過程の解明
3. 学会等名 第30回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小暮敏博、下山巖、本田充紀、馬場祐治、矢板毅、鈴木伸一
2. 発表標題 セシウムフリー鉱化法による汚染土壌からの放射能除去
3. 学会等名 日本地球化学会第64回年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 下山巖、小暮敏博、奥村大河、馬場祐治、本田充紀、岡本芳浩
2. 発表標題 アルカリ塩化物を用いたCsフリー鉱化法による放射性汚染土壌の除染試験
3. 学会等名 第49回溶融塩化学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 馬場祐治、下山巖
2. 発表標題 表面電離によるCsCl及びCs吸着土壌からのイオン脱離
3. 学会等名 第37回表面科学学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 下山巖、本田充紀、小暮敏博
2. 発表標題 汚染土壌の減容化と再利用を目指したCsフリー鉱化法の提案
3. 学会等名 第5回環境放射能除染研究発表会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 下山巖、本田充紀、小暮敏博、平尾法恵、馬場祐治、岡本芳浩、矢板毅、鈴木伸一
2. 発表標題 福島における汚染土壌の除染と再利用を目指したセシウムフリー鉱化法,1; 非放射性Csを飽和吸着した福島風化黒雲母のセシウムフリー鉱化反応
3. 学会等名 日本原子力学会2016年秋の大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 本田充紀、岡本芳浩、下山巖、塩飽秀啓、鈴木伸一、矢板毅
2. 発表標題 福島における汚染土壌の除染と再利用を目指したセシウムフリー鉱化法,2; その場観察EXAFS分析を用いた混合塩(NaCl-CaCl ₂)添加および加熱処理によるCs吸着風化黒雲母からのCs除去過程の解明
3. 学会等名 日本原子力学会2016年秋の大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 下山巖、本田充紀、小暮敏博、馬場祐治、岡本芳浩、千葉慎哲、矢板毅、鈴木伸一
2. 発表標題 汚染土壌の減容化と再利用を目指したセシウムフリー鉱化法の開発
3. 学会等名 第60回粘土科学討論会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 下山巖、本田充紀、小暮敏博、岡本芳浩、馬場祐治、平尾法恵、塩飽秀啓、矢板毅、鈴木伸一
2. 発表標題 Csフリー鉱化法による汚染土壌減容化と再利用
3. 学会等名 PF研究会「福島環境回復を目指した放射光研究の現状と今後の課題」
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 奥村雅彦、中村博樹、町田昌彦、下山巖
2. 発表標題 Density functional theory study of cesium adsorption to micaceous clay minerals
3. 学会等名 3rd Asian Clay Conference 2016 (ACC 2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 下山巖、本田充紀、小暮敏博、馬場祐治、岡本芳浩、千葉慎哲、矢板毅、鈴木伸一
2. 発表標題 セシウムフリー鉱化法による福島風化黒雲母からのCs除去と低圧環境の影響
3. 学会等名 第30回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 本田充紀、岡本芳浩、下山巖、塩飽秀啓、鈴木伸一、矢板毅
2. 発表標題 その場観察高温 XAFS 測定による反応促進剤を用いた熱処理による福島風化黒雲母からの Cs 除去過程の解明
3. 学会等名 第30回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	奥村 雅彦 (OKUMURA Masahiko) (20386600)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究主幹 (82110)	
研究分担者	小暮 敏博 (KOGURE Toshihiro) (50282728)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授 (12601)	
研究分担者	町田 昌彦 (MACHIDA Masahiko) (60360434)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究主席 (82110)	
研究分担者	馬場 祐治 (BABA Yuji) (90360403)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・囑託 (82110)	
研究分担者	本田 充紀 (HONDA Mitsunori) (10435597)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 物質科学研究センター・研究副主幹 (82110)	削除：2018年6月21日

6. 研究組織（つづき）

	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	岡本 芳浩 (OKAMOTO Yoshihiro) (70370369)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 物質科学研究センター・研究主幹 (82110)	削除：2018年6月21日

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