

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360369

研究課題名(和文) 福島原発事故によりセシウムで汚染した土壌の合理的な処理・処分法

研究課題名(英文) Intelligent treatment and disposal of soils contaminated cesium from accident of nuclear power plant at Fukushima

研究代表者

佐藤 努 (Sato, Tsutomu)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10313636

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、福島第一原子力発電所事故で環境中に放出されたセシウムを固定している粒子を明らかにし、それを基に、土壌の減容化を可能とする分級方法や合理的で安全なセメント固化法について提案することを目的とした。その結果、放射性セシウムを多く吸着している粒子は、複数の鉱物の凝集態、有機物と鉱物の複合体、風化雲母片に大別され、これらは多孔質天然材料である珪藻土、あるいは通常の湿式分級法により分級可能であることが明らかとなった。さらに、固定化されていないセシウムはゼオライトで吸着除去した後に処分することが予想されるが、通常のスラグセメントで浸出性の低い安全な固化体となることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we conducted extraction and identification of particles fixed radioactive cesium from the soils at Fukushima to make proposal of applicable separation method for reduction in volume, and leaching experiments to make proposal safety solidification of cesium adsorbed zeolites. As the results of this study, the particles are categorized in the following three types, 1) coagulation of several mineral particles, 2) mineral-organic matter complex, and 3) weathered mica, and separated from non-contaminated particles by wet screening and using diatomite. These particles will be directly disposed after volume reduction of the contaminated soils because cesium already fixed into structure of the minerals in the particles. However, cesium released from the particles must be collected by adsorbents such as zeolite. We confirmed that the zeolite bearing cesium can be safely disposed after encapsulation by slag cement.

研究分野：環境鉱物学

キーワード：地質汚染修復 セシウム 土壌汚染 環境修復 福島

1. 研究開始当初の背景

東北地方太平洋沖地震により発生した津波被害により、東京電力・福島第一原子力発電所において、炉心および使用済燃料貯蔵プール内の燃料が冷却できなくなった。このことが要因となって燃料が損傷し、大量の放射性物質が外部に放出され周辺に甚大な影響を与えるに至った。放出された主な放射性核種は、 ^{131}I (半減期：約 8 日)、 ^{137}Cs (半減期：30 年)、 ^{134}Cs (半減期：約 2 年)等であるが、 ^{131}I は半減期が短いため(80 日経過する毎に放射線量が 1/1000 に減少していくため)、 ^{131}I は現在ほとんど検出できない(文部科学省の発表による)。したがって、当面の除染・回収作業の対象は ^{137}Cs や ^{134}Cs と考えて差支えない。しかし、当面の除染・回収作業の対象が放射性 Cs に絞られたとしても、今回の放射性核種の放出によって汚染された対象物は、土地、水、建物、道路等多岐にわたる。また、その存在状態も多岐にわたり(溶存態、イオン交換態、懸濁態(不可逆吸着態)等)、除染も一筋縄でいかないことは想像に難くない。しかし、合理的な除染が実施されなければ、住民の帰還も達成できない。

除染が住民帰還の根拠となることは上述のように自明だが、居住地への復帰と生活を可能にするためには国際放射線防護委員会(ICRP)が示した ALARA (As Low As Reasonably Achievable) の概念を適用し、被ばく量が 1-20mSv/年の範囲に収まるようにする必要がある。また、緊急避難区域・計画的避難区域では稲作、畑作、牧畜等で生計を立てている住民が多いため、その解除のためには汚染土壌を 5000 ベクレル/kg 以下にする必要もある。学校のグラウンドのように耕作していない土地の放射性セシウムは表層 5cm 以内に存在しているため(文部科学省の発表による)、その除染は表層土壌をはぎ取ることで実施されようとしているが、耕作地の場合のセシウムの分布はより深い部位にまで達しており、それらを合わせた除染対象となる土壌の量は想像を絶する。したがって、数多くの分野から、除染回収された汚染土壌の合理的な処理・処分法が強く求められている。

本研究では、放射性セシウムの土壌における存在状態を考慮し、除染回収された汚染土壌の合理的な処理・処分方法を提案することを最終的なゴールとしている。そのため、まず土壌中に存在する物質とセシウムの関係について明らかにする必要がある。土壌中に存在する物質とセシウムの関係については、広島・長崎での原爆や 1950 年代に頻繁に実施

された核実験によりフォールアウトされたセシウムに関する研究が発端となり、チェルノブイリでの事故、そして今回の福島の事故により放出されたセシウムと、それらを研究対象とした研究や論文は枚挙に暇がない(福島に関しては論文という形で公表されたものは未だ少ないが、報道や学会発表により明らかにされている事実は数多い)。特に土壌中に存在する粘土鉱物は、放射性セシウムの挙動を決定する重要な物質であり、粘土鉱物とセシウムの関係を対象とした調査研究や実験研究は数多く存在する。それらで明らかになっていることは、負電荷を有する粘土鉱物にセシウムが固定化され、固定化後はセシウムの移動が制限されるということである。通常、粘土鉱物の陽イオンの吸着はイオン交換型であるが、セシウムは水和数が少なく、粘土鉱物の陽イオン交換サイトにしっかりとまるサイズを有することがその要因であるということも明らかになっていて、すでに多くの粘土鉱物学や土壌鉱物学の教科書に記述されている内容である。しかし、Maes et al. (1985)が示しているように、粘土鉱物の吸着サイトの全てではないけれども、セシウム濃度が低い場合にセシウムに対して非常に高い選択性を示す吸着サイトが存在することも知られている。今回の放射性セシウムの場合、土壌中に存在する他のイオンに対してセシウムイオンの濃度は非常に低いので、上述のような高いセシウム選択性を有するサイトの詳細について理解する必要があるが、未だに明らかにされていない。また、すでに強固に固定化されているセシウムを含む粘土鉱物をどのように合理的に処理・処分するのかに関する知見も十分ではない。

2. 研究の目的

東京電力・福島第一原子力発電所で発生した事故により放出された大量の放射性セシウムは、溶存態やイオン交換態から懸濁態(不可逆吸着態)へと変化し、土壌中の粘土鉱物等と強固に結合した状態で存在している。本研究では、汚染土壌中のセシウム存在形態を踏まえた合理的な処理・処分法を開発し、環境省が作成する除染のための行程表内のアクションに対して基礎的な知見を提供することを目的として、以下のことを実施する。①固定化されたセシウムと粘土鉱物の関係を処理・処分の観点から明らかにする、②汚染土壌から粘土鉱物フラクションを効率よく分離し処分する土壌の減容化を可能とする分級方法を明らかにする、③洗浄した土壌から浸出したセシウムの処分方法について、実施の可能性の高い合理的で安全なセメント固化法について提案する。

3. 研究の方法

本研究は、以下の 3 つのパートに分かれる。

- (1)固定化されたセシウムと粘土鉱物の関係を処理・処分の観点からの解明

(2)汚染土壌から粘土鉱物フラクションを効率よく分離し処分する土壌の減容化を可能とする分級方法の提案

(3)洗浄した土壌から浸出したセシウム の処分方法の提案

以下にそれぞれの研究の方法を述べる

(1)固定化されたセシウムと粘土鉱物の関係

固定化されたセシウムと粘土鉱物の関係は、実際の汚染土壌から放射能によりイメージングプレート (IP) を感光させた微小な土壌粒子を、走査電子顕微鏡 (SEM) 下で確かかつ効率的に特定することにより解明することとして、効率的に特定する手法の開発から試みた。電子顕微鏡用 IP の表面に、レーザーマーカーを用いて直径数十 μm の掘削痕を方眼状に形成し、この方眼位置と放射性粒子による感光を同時に IP で読み取ることで、粒子による感光の位置を座標化した。次に SEM 内においてこの方眼状のレーザー掘削痕をもとに感光位置を探し、そこに存在する土壌粒子を観察・分析した。

放射性 Cs に汚染された土壌試料は、2013 年秋に福島県飯館村と浪江町の境の峠付近の広葉樹の葉を中心としたリター (litter) に含まれる土壌粒子を用いた。リターをオープンで乾燥後、ふるい振とう機によって分級した 20-75 μm の粒子を使用した。この土壌粒子をエタノールに分散し、マイクロピペットでレーザーマーク方眼をつけた IP 上に数滴落とし、38 日間静置して IP を感光させた。

(2)土壌の減容化を可能とする分級方法の提案

まずは、現在までに汚染土壌の分級法などで実施されている湿式分級法が、福島の汚染土壌に適応可能か否かについて調査した。試料は飯館村内、主に同役場周辺の農地等より採取し、飯館村役場の協力の下、試験作業は飯館村役場敷地内の屋内駐車場で実施した。また、試料の測定は環境中の放射線の影響を避けて測定時のバックグラウンドを抑えるため飯館村役場建屋内で行った。

放射性セシウムを含む表層土壌について、減容化を目的とした土壌分級洗浄試験を行った。試験には、バルクとして高い放射性セシウムが検出された畝土、および水田、畑、グラウンドの各表層土壌を供した。調査では草地表土において最も放射性セシウム濃度が高かったが、草の根に絡んだ土壌という局所的な試料であり、また試験に供するだけの試料量を確保できなかったことから除外した。

土壌分級洗浄試験は次のとおり行った。土い振とう機 (FRITSCH 製 A・3) を用いて水で洗浄しながら湿式分級を行った

洗浄水は放射性セシウムが不検出であった。

飯館村役場の水道水を使用し、使用量は供試土壌生重量の約 7 倍であった。粒度画分は、

ふるいの目から、 $<0.075\text{ mm}$, $0.075\sim0.125\text{ mm}$, $0.125\sim0.25\text{ mm}$, $0.25\sim0.5\text{ mm}$, $0.5\sim2\text{ mm}$, $2\sim4.75\text{ mm}$, $>4.75\text{ mm}$ の 7 段階とした。 $<0.075\text{ mm}$ については濁水として回収し、懸濁成分を除く目的で植物浸出水を濾過したものと同一 3 mm のバグフィルターに通した (図 1)。

除染には、薬剤、電力、人力等を使うアクティブな除染と、それらを極力必要としないメンテナンスフリーに近いパッシブな除染があり、現在はオールジャパンで前者の検討を行っている。里山や森林の場合は、間伐により木草類に付着している放射性セシウムの除染は可能であるが、それ以外の除染は現実的に難しい。したがって、降雨や雪解け水等によって下流に移動するリター中の溶存態・交換態セシウムや粘土鉱物に固定されている懸濁態セシウムを捕獲する吸着材を泥水の流路等に設置するだけのパッシブな除染が必要と考える。また、このパッシブな除染は、すでに懸濁態として流れる程度に細粒化され分級されているものになっているので、効率的な減容化と考えられる。そこで、放射性セシウムの存在形態に応じたパッシブ除染に適する材料として珪藻土を詳細に検討し、実際に福島県の森林地帯に珪藻土を設置してその効果を検討した。

実汚染現場において放射性セシウムの捕獲特性を調べるために、以下のように用意したバッグを福島県の森林地帯の数か所に設置し (図 2)、回収後の放射性セシウム量を測定した。はじめに 2cm 以下に篩った焼成珪藻土を 5kg 秤量し、市販の洗濯ネットに入れた後農業用のメッシュ袋に詰めて泥水の流路に設置した (写真 3)。比較のため、同じ粒度のゼオライト岩や採石も同一個所に設置した。試料は 4 カ月間現場に設置した後、110 $^{\circ}\text{C}$ のオープンで試料を乾燥させ、乾燥状態における放射性セシウム濃度を測定した。

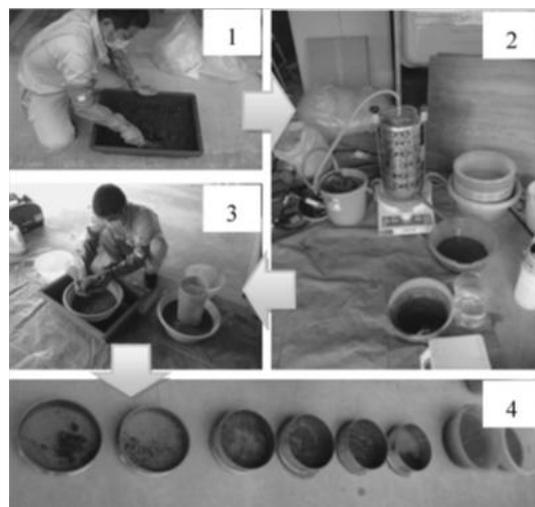


図 1 汚染土壌の湿式分級と洗浄方法



図2 珪藻土の溪流への設置状況

(3) 洗浄した土壌から浸出したセシウムの特徴的な処分の提案

上述のように湿式分級・洗浄により土壌から浸出した放射性セシウムはゼオライト等の吸着材で回収・処分する必要がある。そこで、セシウムを濃集させたゼオライトを普通ポルトランドセメントや混合セメントなどに異なる配合率で混ぜ合わせて固化し、固化後の性状などについて検討するための実験を行った。

4. 研究成果

(1) 固定化されたセシウムと粘土鉱物の関係

最も強く感光した位置10点程度をSEM-EDSにより観察・分析するため、事務用裁断機でIPの感光位置の近傍を5mm角に切断し(このサイズにしたのは最終的にTEM試料を作製するためのFIB装置に入る最大試料サイズを考慮したため)、両面導電性テープでSEM試料台に固定した後、Pt-Pdを蒸着した。

図3は、観察した2つの粒子によるIPの感光状態で、0.3・0.4mm程度の大きさで黒く写っている。その中心位置をもとに粒子を探し、観察・分析した結果を図4に示す。また同様にもう一つの粒子(線状のレーザー掘削痕の中にあった)の結果を図5に示す。今回観察した2つの土壌粒子にはX線組成分析によりO, Al, Si, Feが主要元素として検出され、また高分解能SEM観察による粒子表面の鱗状の形態から、放射性Csを多く吸着している粘土鉱物はFe含有Al系スメクタイトであると考えた。

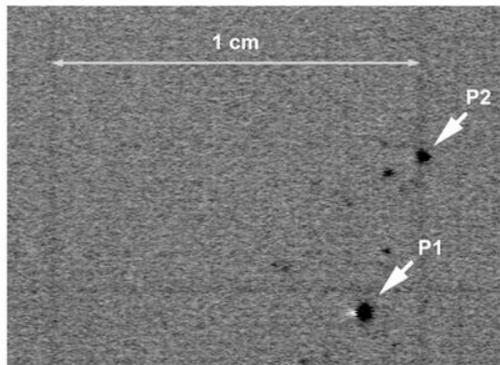


図3 IPの読み取り結果の拡大図。

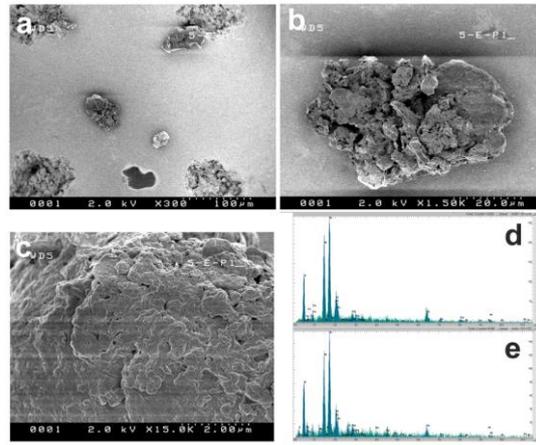


図4 IPを感光させた土壌粒子(P1)のSEM-EDSによる分析結果。(a)SEMの低倍像。白い矢印の粒子がP1。尚この粒子もSEM観察中に図の下部中央の黒い部分から帯電により動いた。四方の4つの穴はレーザー掘削痕。(b)P1の拡大像。(c)(b)における粒子の右上部をさらに拡大したもの。表面に鱗状のテクスチャーが見える。(d)(c)の部分からのEDSスペクトル。(e)P1粒子全体からのEDSスペクトル。どちらもPt, Pd以外にはO, Al, Si, Feが検出された。

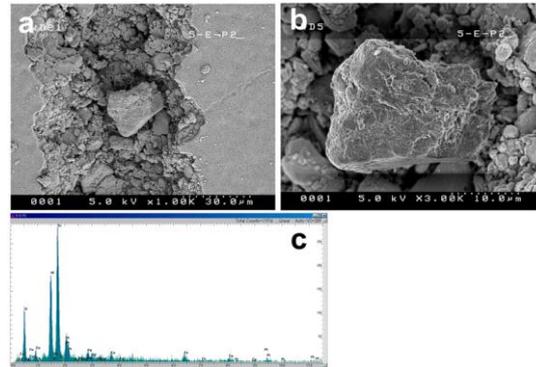


図5 IPを感光させたもう一つの土壌粒子(P2)のSEM-EDSによる分析結果。(a)SEMの低倍像。白い矢印の粒子がP2。レーザーマーカーによる直線状の掘削痕の中に存在する。(b)P2の拡大像。やはり表面に鱗状のテクスチャーが見える。(b)の中央からのEDSスペクトル。Pt, Pd以外にはO, Al, Si, Ca, Feが検出された。

(2) 土壌の減容化を可能とする分級方法の提案

各土壌に含まれる放射性セシウムの63~85・は0.075mm以下の粒度画分に存在していた。しかし、粗い粒度画分にも分布したことから、各土壌の5000 Bq/kg以下で回収可能な粒度画分と重量割合は、水田で2mm以上の12.2%、畑で0.25mm以上の29.5%、グラウンドでは0%であった。また、汚染程度の高い細粒分を分級で取り除いた後には土壌の物理性等を回復させるために等量程度の健全土を混ぜる、あるいは原地盤と攪拌することが考えられる。その場合、除去された

細粒分と等量の健全土が補填され、希釈効果が加わる。希釈を加味して 5000 Bq/kg を下回る条件では、水田、畑は 0.075 mm 以下、グラウンドは 0.25 mm 以下が除去対象となり、それぞれ回収率は 39%、44%、75% となると考えられる。土壌分級洗浄法により減容化の効率を高めるには、①水田や畑のような細粒分の多い土壌では、簡便なメッシュによる篩いで分離可能な 0.075 mm 以下の土壌粒子に対して、サイクロンなどの精度の高い分級洗浄機器を用いてさらに分級すること、②最終的に排出される高濃度の汚泥については費用対効果に応じて化学処理等の追加処理を行うことが必要である。また、砂質のグラウンドでは粗い粒度を含むすべての粒度画分で放射性セシウム濃度が 8000 Bq/kg を超過した。これは、放射性セシウムが粗い土壌粒子の表面への吸着または放射性セシウムを吸着した粘土鉱物等の付着により残留している可能性を示している。高い粗い粒度画分については、減容化の観点から追加処理ではなく土壌分級洗浄の工程で処理される必要がある。この場合、篩いやその前処理等を工夫して粗い粒子画分の放射性セシウム濃度を下げることが必要である。

実汚染現場において放射性セシウムの捕獲特性を調べるために、以下のように用意したバッグを福島県の森林地帯の数か所に設置し、回収後の放射性セシウム量を測定した。はじめに 2cm 以下に篩った焼成珪藻土を 5kg 秤量し、市販の洗濯ネットに入れた後農業用のメッシュ袋に詰めて泥水の流路に設置した (図 2)。比較のため、同じ粒度のゼオライト岩や採石も同一個所に設置した。試料は 4 か月間現場に設置した後、110°C のオーブンで試料を乾燥させ、乾燥状態における放射性セシウム濃度を測定した。その結果、実汚染現場の主要な土壌鉱物であるカオリナイトやバーミキュライトという鉱物粒子がトラップされていることが明らかとなり、5000Bq/kg 程度のセシウムが捕集されていた。比較のため設置した採石が 70Bq/kg であったので、焼成珪藻土の性能の高さが容易に理解できる。焼成珪藻土により回収された細粒粘土粒子は、篩作業や洗浄により容易に分離回収することが可能であり、洗浄後の焼成珪藻土は再利用可能であることが分かった。回収した焼成珪藻土の走査電子顕微鏡写真と回収した細粒粘土粒子の X 線回折プロファイルより、本珪藻土により回収された細粒粘土粒子は、初期の珪藻土には含まれていないバーミキュライトとカオリナイトであった。現状のデータからは、バーミキュライトかカオリナイトが放射性 Cs の運搬媒体であることが分かる。

(3) 洗浄した土壌から浸出したセシウムの処分方法の提案

普通ポルトランドセメント、鉄鋼スラグなどを使用した混合セメント等の様々なセメ

ントに非放射性セシウムを吸着させたゼオライトを入れて純水や海水などで寝室実験を行った結果、純水よりも海水の方がセシウムの浸出率が高かったが、高炉水砕スラグを混合させた混合セメントにおいては、セシウムの浸出率は十分低いものであることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

① Matsunaga, T., Nakanishi, T., Atarashi-Andoh, M., Takeuchi, E., Tsuduki, K., Nishimura, S., Koarashi, J., Otosaka, S., Sato, T., Nagao, S., A passive collection system for whole size fractions in river suspended solids, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 査読有、303 巻、2015、1291-1295

DOI: 10.1007/s10967-014-3491-5

② 佐藤 努、無機汚染物質の除去・隔離のための層状化合物、*Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan*, 査読有、368 巻、2014、42-48

③ Mukai, H., Hatta, T., Kitazawa, H., Yamada, H., Yaita, T., Kogure, T., Speciation of radioactive soil particles in the Fukushima contaminated area by IP autoradiography, *Environmental Science & Technology*, 査読有、48 巻、2014、13053-13059

DOI: 10.1021/es502849e

④ Tamura, K., Kogure, T., Watanabe, Y., Nagai, C., Yamada, H., Uptake of cesium and strontium ions by artificially altered phlogopite, *Environmental Science & Technology*, 査読有、48 巻、2014、5808-5815

DOI: 10.1021/es4052654

⑤ Okumura, T., Tamura, K., Fujii, E., Yamada, H., Kogure, T., Direct observation of cesium at the interlayer region in phlogopite mica, *Microscopy*, 査読有、63 巻、2014、65-72

DOI: 10.1093/jmicro/dft045

⑥ Kogure, T., K. Mori, V.A Drits, Y. Takai, Structure of prismatic halloysite, *American Mineralogist*, 査読有、98 巻、2013、1008-1016

DOI: 10.2138/am.2013.4385

⑦ 佐藤努、無機汚染物質の除去・隔離のための層状化合物、*Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan*, 査読有、368 巻、2014、42-48

⑧ Matsunaga, T., Koarashi, J., Atarashi-Andoh, M., Nagao, S., Sato, T., Nagai, H., Comparison of the vertical distributions of Fukushima nuclear accident radiocesium in soil before and after the first rainy season, with

physicochemical and mineralogical interpretations、Science of the Total Environment、査読有、447 巻、2013、301-314
DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.12.087

⑨伊藤健一、宮原英隆、氏家亨、武島俊達、横山信吾、中田弘太郎、永野哲志、佐藤努、八田珠郎、山田裕久、湿式分級洗浄および天然鉱物等による農地土壌等に含まれる放射性セシウム除去方法の実践的検討、日本原子力学会和文論文誌、査読有、Vol. 11, No. 4, 2012、25-271.

DOI:10.3327/taesj.J12.010

⑩佐藤努、福島第一原発事故で発生した廃棄物の処理・処分に内在する課題、セラミックス、査読有、47 巻、2012、859-863.

〔学会発表〕(計 13 件)

① 向井 広樹、小暮 敏博他、福島汚染土壌におけるセシウム吸着個所の探索、53 回粘土科学討論会(招待講演)、2014 年 9 月 26 日、福島 A・O・Z (福島県福島市)

② 倉又 千咲、小暮 敏博他、福島県花崗岩黒雲母の風化状態、第 53 回粘土科学討論会、2014 年 9 月 26 日、福島 A・O・Z (福島県福島市)

③ 小暮 敏博、放射性 Cs を吸着している粘土鉱物は何かー電子顕微鏡による探索ー、第 53 回粘土科学討論会(招待講演)、2014 年 9 月 25 日、福島 A・O・Z (福島県福島市)

④ 菊池 亮佑、小暮 敏博他、福島風化黒雲母への Cs 吸着実験、日本鉱物科学会 2014 年年会、2014 年 9 月 18 日、熊本大学(熊本県熊本市)

⑤ 小暮 敏博、IP オートラジオグラフィと電子顕微鏡による土壌中放射性粒子の特定と分析、日本土壌肥料化学会 2014 年度東京大会(招待講演)、2014 年 9 月 11 日、東京農工大学(東京都府中市)

⑥ 小暮 敏博、福島土壌の放射能汚染ー放射性核種はどこにいるのかー、日本顕微鏡学会第 70 回記念学術講演会(招待講演)、2014 年 5 月 11 日、幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

⑦ 菊池 亮佑、小暮敏博他、福島風化黒雲母への Cs 吸着実験ーHRTEM 及び HAADF-STEM による層間 Cs の可視化ー、日本顕微鏡学会第 70 回記念学術講演会、2014 年 5 月 11 日、幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

⑧ Kogure.T.、Finding and analyses of soil particles adsorbing radioactive cesium in Fukushima、Caesium Workshop: Fukushima recovery - understanding, modeling and managing radiocaesium decontamination(招待講演)、2013 年 9 月 30 日、コラッセ福島(福島県福島市)

⑨ Sato.T.、Problematics and role of clay mineralogists in treatment and disposal of the radioactive waste

produced by accident at Fukushima Daiichi NPP、International Clay Science、2013 年 7 月 10 日、リオデジャネイロ(ブラジル)

⑩ Sato.T.、Let's use metastable geomaterials in environmental protection: An intelligent geotechnonology learnt from natural processes、Goldschmidt Conference 2013(招待講演)、2013 年 6 月 27 日、フィレンツェ(イタリア)

⑪ 小暮 敏博、福島飯館村のリターに付着した放射性土壌粒子の鉱物特定、第 2 回環境放射能除染研究発表会、2013 年 6 月 5 ~7 日、タワーホール船堀(東京都江戸川区)

⑫ 佐藤 努、福島第一原子力発電所の事故で発生した放射性廃棄物の処理・処分に内在する課題、日本地球惑星連合 2013 年大会(招待講演)、2013 年 5 月 24 日、幕張メッセ(千葉県千葉市)

⑬ Syafina Binti Mohd Ghazi, Takato Nishita, Hajime Hasegawa, Isamu Matsubara, Tetsuro Yoneda, Tsubasa Otake, Tsutomu Sato、Uptake and disposal of radioactive cesium by natural inorganic materials around Fukushima Daiichi nuclear power plant、The 2nd Asian Clay Conference、2012 年 9 月 8 日、ソウル市(韓国)

〔図書〕(計 2 件)

① 小暮 敏博、日本結晶学会、地球表層物質と結晶学、日本の結晶学 (II)ーその輝かしい発展ー、2014 年、2

② 山田 裕久、横山 信吾、渡辺 雄二郎、中田 弘太郎、田村 堅志、佐藤努、八田 珠郎、技術情報協会、放射性物質の吸着・除染および耐放射線技術における材料・施工・測定の新技術、2014 年、638

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 努 (SATO, Tsutomu)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 10313636

(2) 研究分担者

小暮 敏博 (KOGURE, Toshihiro)
東京大学・理学研究科・准教授
研究者番号: 50282728

(3) 名和 豊春 (NAWA, Toyoharu)

北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 30292056