

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H04150

研究課題名(和文) 福島原子炉事故により放出された微粒子の環境移行を探るための化学形態の解明

研究課題名(英文) The elucidation that is in chemistry form to investigate an environmental shift of fine particles emitted by Fukushima nuclear reactor accident

研究代表者

大槻 勤(Ohtsuki, Tsutomu)

京都大学・複合原子力科学研究所・特任教授

研究者番号：50233193

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 38,620,000円

研究成果の概要(和文)：複数の核種を含む放射性エアロゾルの成長・輸送機構の解明により福島第一原発の炉内に残留する放射性微粒子の挙動を推測するため、放射性微粒子の模擬生成実験や人工放射性エアロゾルの発生実験を行った。まず、環境中に放出された放射性微粒子の性状を調べるため、SEM-EDXを用いた分析と模擬微粒子の生成実験を行い、生成される微粒子の加熱温度依存性について検討を行った。また、中性子照射した二酸化ウランを用いて、核分裂生成物を含む人工の放射性溶液エアロゾル粒子の成長・輸送の模擬実験を行った。これらの実験より実際の原発炉内の状況を推測する手がかりを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放射性微粒子の模擬生成実験や人工放射性エアロゾルの発生実験を行った。複数の放射性核種を含む微粒子やエアロゾルの成長・輸送機構の解明により1Fの炉内に残留する放射性微粒子の挙動を推測する手がかりを得た。環境中に放出された放射性微粒子の性状を調べるため、SEM-EDXを用いた分析をもとに模擬微粒子の生成実験を行い、生成される微粒子の加熱温度依存性について検討を行った。また、中性子照射した二酸化ウランを用いて、核分裂生成物を含む人工の放射性溶液エアロゾル粒子の成長・輸送の模擬実験を行った。これらの結果から実炉内の状況を推測し、廃炉に向けた作業等への知見を得た。

研究成果の概要(英文)：We performed the generation experiments of radioactive fine particle and an outbreak experiments of the artificial radioactive aerosol to simulate the behavior of the radioactive fine particle and aerosol in a furnace of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (FDNPS). The elucidation of growth and transport mechanism of the radioactive particles (and aerosol) including plural nuclides in the FDNPS can be further investigated by the facts. Firstly, we performed analysis using SEM-EDX, the generation experiment of quasi fine particles has been performed to check the property of the radioactive fine particles emitted during environment. Then, we considered about the temperature dependence of generated quasi fine particles. Furthermore, we performed a simulation of growth and transportation of the artificial radioactive solution aerosol including fission products using the uranic dioxide which irradiated a neutron. Finally, we got the clue which supposed the situation in the FDNPS.

研究分野：放射化学

キーワード：原発事故 環境放射能 放射性微粒子 放射性エアロゾル 核分裂生成物 廃炉

様式 C - 19 , F - 19 - 1 , Z - 19 ( 共通 )

1 . 研究開始当初の背景

東京電力福島第一原子力発電所の事故 ( 2011 年 3 月 ) により , 福島県沿岸部を中心とする陸域に大規模な放射能汚染が起こった . 環境中に放出された放射性核種の中でも  $^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  は , 最も多く放出された放射性核種であり ,  $^{137}\text{Cs}$  は 30 年 ( ひと世代 ) という比較的長い半減期をもつ . これらの核種は事故より 10 年以上が経過した現在でも環境中に残っており , 空間線量の上昇をもたらしている主要な原因となっている . 事故により放出された放射性核種は , その多くは環境中で比放射能が非常に高い粒子状で放出されたもの ( 放射性微粒子 ) やエアロゾルの形態で輸送され , 乾性沈着もしくは湿性沈着により陸域を汚染した [1,2] . これら放射性核種の放出時の化学形態については不明な点が多くあった . また , 化学形態は経年変化により変性が生じている .

原子炉から放出される核種の初期状態は未だ不明の部分が多く , 観測されるのは環境中に分散され , 陸水生物系に移行された後の状態のみである . これらについて , これまで様々な調査・研究がなされてきたが , 解明された事実は一部にしかすぎない . 放射性核種の現在における環境動態をさらに精査し , かつ物理的・化学的模擬実験を駆使して観測事実を再現し , 当初の物理的・化学形態を推測することで , 特に放出時の化学的状态を特定する . 本提案の遅滞なくやるべき課題として環境中の放射性微粒子の探索及び化学形態の特定やエアロゾルによる核種成長・輸送の解明 , そして炉内事象模擬化学実験を通して , 炉内や環境動態の定量的機構解明や核種移行の未来予測に寄与することが挙げられる . 特に炉内事象の理解には , 放出核種の初期状態や放出機構の情報が必須であり , 環境移行の現状や未来予測に本研究が貢献することに背景がある .

2 . 研究の目的

原子炉から放出された核種の初期状態 ( 炉内から炉外へ移行時の化学形態 ) は , 未だ不明の部分が多く , 観測されるのは環境中に分散され , 陸水生物系に移行された後の状態に限られている . しかしながら , 環境動態の定量的機構解明や核種移行の未来予測には , 飛散した核種の初期状態の情報が必須である .

本研究では ( 1 ) 環境中の放射性微粒子の化学的 ( 物理的 ) 状態の解明 , ( 2 ) 複数の核種を含む放射性エアロゾルの成長・輸送機構の解明 , ( 3 ) 炉内 ( 近傍 ) の定性的・定量的理解である . さらに , これらにより放出過程モデルを構築し , 放出核種の環境移行の現状理解と未来予測を行うことを目的とする . そのために事象模擬微粒子生成及び模擬エアロゾルに着目して , 行った微粒子の探索とその性状 ( 物理的・化学的形態 ) との関連性を詳しく調べる . 本研究の最終目標は , 実際に放出された微粒子やエアロゾルの状態の模擬的再現という観点から , 炉内で起こった種々の反応経路解析にフィードバックし , 炉内事象解明に寄与することである . 得られた知見は福島廃炉作業や環境回復過程において , これから待ち構えている未知の問題の解決に大きな指標を与える .

3 . 研究の方法

本計画では図 1 に示すように大きく分けて , ( 1 ) 微粒子の探索と化学形態の特定 , ( 2 ) 事象の炉内反応材料の関係や炉内温度をパラメータとした模擬微粒子生成実験 , ( 3 ) 溶液エアロゾルに付着させる FP 核種搬送経路実験を行った . まず , Cs 等を含む微粒子の合成実験を行い , その化学組成や温度依存性等の条件の考察を行い , 1F 近傍の放出粒子と比較した . また , ウラン試料の照射・加熱条件等を変化させ , 令和元年度と異なる化学種も対象とし , 人工エアロゾル発生装置を用いた放出化学種の付着実験を行った . これらのことからサンプリング粒子と模擬粒子の物理的・化学的性質の関連及び溶液エアロゾルに核種搬送実験等から , 実際の , 乾性沈着もしくは湿性沈着の起こったメカニズムを調べた . また , 事故時の炉内の環境の把握及び経年変化による物理的・化学的変性の知見を得た .

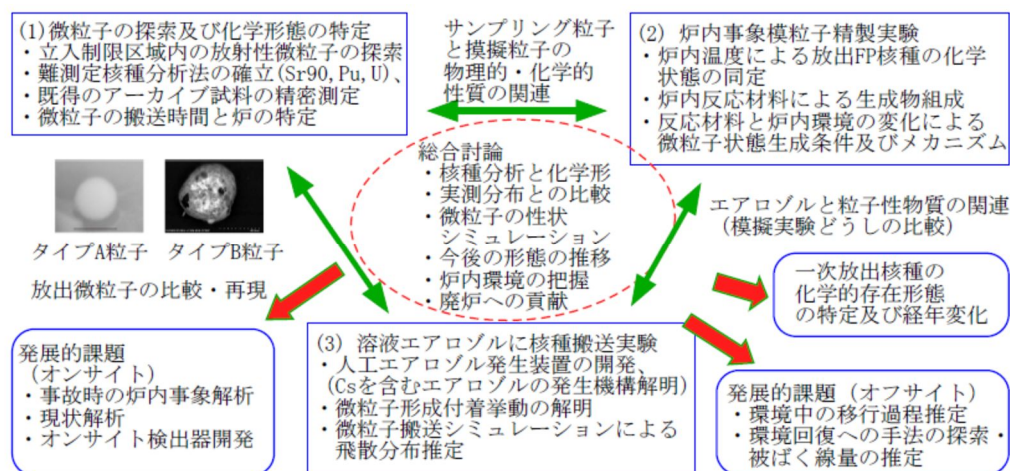


図.1 研究の方法の概要

まず、帰還困難区域を中心とする福島第一原子力発電所近隣において、2011年6月以来となる土壌を実際に採取して分析し、放射性核種の吸脱着過程について調べた。特に現在の放射性セシウムの分布状況や土壌中浸透度を把握し、2011年の段階の調査結果と比較することで放射性セシウムの分布や化学形態の変化についての知見を得た。これら微粒子中には事故時の炉内環境を推測できるものも含まれると考えられる。今後も可能な限り実際のサンプリングを通して物理的・化学的形態の変化の追跡が必要であった。

最初に環境中のサンプルについての分析が必要となった。福島第一原子力発電所の事故により放出された放射性セシウムの多くはエアロゾルの形で環境中に拡散したと考えられているが[1]、異なる形態として、水に不溶な微粒子によって放射性セシウムが環境中に拡散したことが知られている[3]。この微粒子はradiocaesium-bearing microparticles (CsMPs)と呼ばれている[4]。CsMPには、形状や含まれる放射性セシウムの同位体比の違いなどにより、Type-A、Type-Bなどと呼ばれる少なくとも2種類以上があることが知られている[5]。Type-A CsMPの典型的な形状は直径0.1～10マイクロメートル程度の球形であり、 $10^{-2}$ ～ $10^2$ ベクレルのCs-137を含み、Cs-134/Cs-137比が約1である。一方、Type-B CsMPは50～400マイクロメートル程度の大きさの不定形であり、 $10^1$ ～ $10^4$ ベクレルのCs-137を含み、Cs-134/Cs-137比が約0.9程度であることが分かった。また、Type AやType Bの分類から外れるようなCsMPも一部報告されている[6]。

まず、環境試料の研究では、福島第一原子力発電所周辺の土壌中に存在する放射性微粒子の性状分析を行い、その元素組成等の化学的性質の調査を行った。複数の核種を含む放射性エアロゾルの成長・輸送機構の解明により炉内に残留する放射性微粒子の挙動を推測するため、タイプB粒子と考えられる土壌の観察・分析実験を行った。環境中に放出された放射性微粒子の性状を調べるため、2016年に福島第一原子力発電所の周辺で採取した土壌試料を用いて実験を行った。タイプB粒子をイメージングプレート(BAS IP MS 2025)を用いて土壌試料の放射能の局在が見られる部分を逐次的に弁別し、放射性粒子を特定した。この放射性粒子の性状を分析するために、Ge半導体検出器を用いた放射能測定、光学顕微鏡およびSEMを用いた外観観察、EDXによる元素分析を行った。これらは次の模擬粒子生成の結果と比較を行った。

福島第一原子力発電所では廃炉作業が予定されているが、燃料デブリの取り出し等に伴って放射性微粒子が新たに発生する可能性がある。例えば、切断工具やレーザー等による燃料デブリの切断過程において放射性微粒子が新たに発生し、原子炉内において飛散することが想定される。このような微粒子の生成過程や性質は、既存の放射性微粒子であるCsMPの生成過程や性質と共通点がある可能性があり、それらの解明に共通の知見を活かすことができると考えられる。また、CsMPが原子炉内で発生したものであるとすれば、その多くが炉内に残存しているはずで、廃炉作業において炉内でCsMPが再飛散することも容易に想像できる。作業員の被ばく低減の観点から、新たな放射性微粒子の発生やCsMPの再飛散は抑制することが好ましく、また飛散した粒子を検出・回収することが求められている。CsMPの生成過程を明らかにし、その特性をさらに解明することは、燃料デブリの切断等に伴う新たな微粒子の発生低減や、再飛散したCsMPの検出・回収手法の確立につながると期待される。

そこで本実験では、CsMPの生成過程についての知見を得るため、 $\text{SiO}_2$ を主とする物質をレーザーによって加熱することでCsMPを模擬する微粒子を生成する実験を行い、生成した微粒子とCsMPとの比較検討を行った。

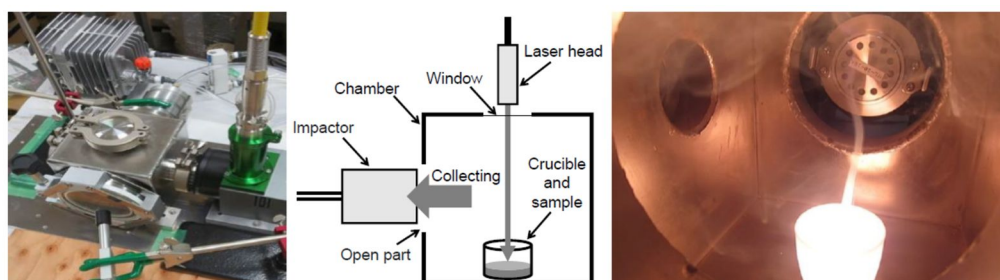


図.2 レーザー実験の概要、フューム発生の様子

まず、これらの試料を、レーザーによる加熱に先立ち、アルミナるつぼに入れ電気炉で加熱することによりガラス状の固体とした。これは、試料をよく混合させることと、レーザーによる加熱の際の試料の飛び散りを防ぐ目的で行った。電気炉(日陶科学 小型電気炉 NHK-170AF)による加熱は、室温から1250℃まで昇温60分、1250℃で180分保持、放冷のパターンで行った。

次いで、これらのガラス化した試料に対してレーザー照射(ファイバー型波長1080nm出力300W)による加熱を行った。ガラス化した試料の入ったるつぼをチャンバー内に置き、そこに上面からレーザーを照射し、加熱されて発生した微粒子を含むフュームをインパクトによって吸引して捕集した。実験セットアップの概略とフュームによる模擬微粒子が生成する様子を図.2に示す。フュームを捕集したインパクトのフィルターの一部を切り出し、SEM/EDS(Phenom ProX, Thermo Fisher Scientific)による観察及び元素分析を行った。

二酸化ケイ素( $\text{SiO}_2$ )を主とする原料を大強度の赤外線レーザーにより加熱することで、CsMPを模擬する微粒子の生成を試みた。本実験では放射性Cs等の放射性物質は使用せず、すべて非放

放射性の原料を用いた。原料としては、先行研究における Type A 粒子の分析結果[7]をもとにその組成を再現した混合試料、玄武岩のみの試料、珪藻土と人工海水の混合試料の3種を用いた(以下、それぞれ「混合試料」、「玄武岩試料」、「珪藻土試料」と呼ぶ)。混合試料は、Type A 粒子の分析結果[7]等をベースとして SiO<sub>2</sub> 59.7%、Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 10.6%、ZnO 9.8%、NaCl 8.7%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 6.9%、SnO<sub>2</sub> 3.0%、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 0.8%、Rb<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 0.7% (重量%) の割合で混合したもので、玄武岩試料は産業技術総合研究所の地球化学標準物質 JB-1b、珪藻土試料は珪藻土と人工海水を乾燥重量で 1:1 の割合で混合したものである。JB-1b 以外の試薬は、富士フィルム和光純薬から入手したものをを用いた。

放射性エアロゾルの発生では、まず、「溶液エアロゾルに付着させる核分裂生成物」(FP) の発生源として自発核分裂核種である Cf-252 線源を用いた実験を行った。溶液エアロゾルの原料には、陽イオンと陰イオンの影響を系統的に調べるために、濃度調製したハロゲン化物(NaCl、NaBr、NaI、KCl) 等の水溶液を用い、溶液エアロゾルを発生させた。濃度変化による付着率の変化を調べるため異なる溶液を実験に用いた。3種類の濃度のアトマイザーを用いて発生させたエアロゾルは静電分級器(DMA) による分級を行った。これにより単位体積あたりのエアロゾル粒子の表面積の総和(全表面積)を変化させ、チャンパー内でFP と混合させた。チャンパー内で Cf-252 から放出されるFP が溶液エアロゾル粒子に付着し、放射性エアロゾルが生成する。生成した放射性エアロゾルはポリカーボネート製フィルターを用いて 30 分間捕集し、Ge 半導体検出器を用いて線スペクトルを 1 時間測定した。また、Cf-252 線源の直上にグリスを塗布したセルロースろ紙を設置し、Cf-252 線源から放出されるすべてのFP を 30 分間捕集し、同様の測定を行った。それぞれの線スペクトロメトリにより得られた、FP のひとつである Tc-104 (T<sub>1/2</sub> = 18.3 min, 独立核分裂収率 約 0.1%) の計数率の比をもとに、Tc-104 が溶液エアロゾルに付着した割合を付着率として算出した。DMA と粒子計測器(CPC)から成る粒径分析器(SMPS)を用いてエアロゾルの粒径分布を測定した。実験ではエアロゾル粒子への付着挙動を測定するFP 核種の種類を増やすため、半減期の短いFP を対象として発生実験を行った。特に燃料デブリ中に長期間において存在し続けるCs 及び Sr 同位体に着目し、Cs-138 (半減期: 約 32 分) 及び Sr-92 (半減期: 約 2.6 時間) の付着率を得るために、原子炉によるウラン試料に対する中性子照射を行った。FP エアロゾル粒子の原料とする溶液の種類については、ハロゲン化エアロゾル粒子との挙動と比較することを目的として、(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液を用いて比較した。短寿命FP を対象とした実験では 5 分の照射の後、3 時間静置し、管状炉内で 1000 °C に加熱して 60 分加熱することで照射したウラン試料中からFP を放出させた。一方で、0.01 M の NaCl、NaBr、NaI の 3 種のハロゲン化ナトリウム、及び 0.01M の (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液を原料とし、アトマイザーを用いて溶液状エアロゾルを生成させ、FP とともにステンレス製のチャンパー内に導入した。チャンパー内で両者を混合することで、溶液状エアロゾル粒子の表面にFP を付着させた。生成した放射性エアロゾルはポリカーボネート製フィルターを用いて捕集し、Ge 半導体検出器を用いて線スペクトロメトリを行い、溶液で生成したエアロゾル粒子に対するFP 核種の付着率を得た。

#### 4. 研究成果

フュームを捕集したフィルターのSEMによる観察結果を図.3に示す。図.3(a),(b),(c)は、それぞれ混合試料、玄武岩試料、珪藻土試料のフュームを捕集したフィルターから発見された微粒子のSEM像である。SEM像中の繊維状の物体は、用いたフィルターの石英繊維である。図に示すように、3つの試料ともに、直径0.1~数マイクロメートル程度の球形の微粒子が生成した(以下、「模擬微粒子」と呼ぶ)。Type A CsMP の典型的な形状は直径0.1~10マイクロメートル程度の球形であり、Type A CsMP と類似した形状の模擬微粒子が生成したといえる。図.3のようなフュームが立ち上る様子から、この模擬微粒子は試料がレーザーによる加熱で気化し、それが凝縮することによって生成したと考えられる。

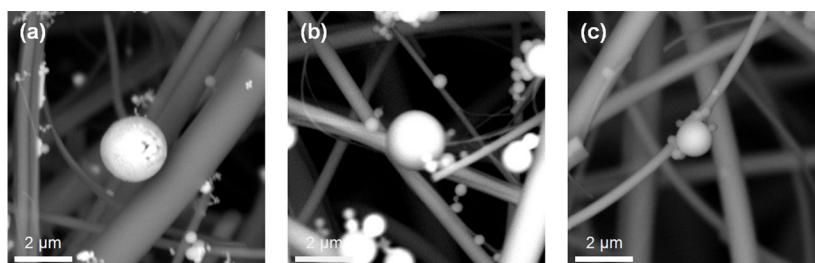


図.3 発生する微粒子は、(a)混合サンプル、(b)玄武岩サンプル(c)珪藻土試料。

模擬微粒子のEDSによる元素分析結果を表.1に示す。混合試料は5個、玄武岩試料は4個、珪藻土試料は6個の模擬微粒子について、含まれる元素を定性的に分析した。また、レーザーを照射する前の、ガラス化した試料そのもの(以下、「バルク」と呼ぶ)についても分析した。これらについて、検出された元素を○、検出されなかった元素を×、複数分析した粒子のうち一部で検出された元素を△で示す。比較として、Type BおよびType AのCsMPの分析結果を文献から示す[8]。CsMPの結果については、主要な検出元素を○、微量が検出された元素をTr.と示す。混合試料については、混合した試薬に含まれる元素がRbを除いてそのまま検出された。Rbについては、試料中に混合した量が非常に少なかったこと、また揮発性の高い元素であることから、電気炉による加熱の過程で失われた可能性がある。混合試料におけるバルクと模擬微粒子との

比較については、模擬微粒子の検出元素にばらつきがあったものの、おおむね同じ元素が検出される結果となった。玄武岩試料については、混合試料には含まれない Mg, Al, Ca, Ti が検出された一方、Type A や Type B の CsMP に含まれている Zn, Rb, Sn, Cs は検出されなかった。珪藻土試料については、玄武岩試料とほぼ同じ結果となり、人工海水中に豊富に含まれる Cl が追加で検出された点のみが異なった。玄武岩試料及び珪藻土試料の結果は、仮に玄武岩や珪藻土・海水混合物が CsMP の原料であるならば、Zn や Sn などを含む追加の原料が混合している必要があることを示している。玄武岩試料及び珪藻土試料のバルクと模擬微粒子との比較については、バルクでは検出された Al, Ca, Ti が模擬微粒子では検出されなかった。これらは揮発性の低い元素であり、レーザー加熱によるバルクからの気化が起こりづらく、模擬微粒子中に含まれなかったと考えられる。ここで、玄武岩試料及び珪藻土試料のバルクと模擬微粒子における Al, Ca, Ti の検出の有無が、Type B CsMP と Type A CsMP におけるそれらの存在の違いと類似していることは注

表. 1 模擬微粒子の EDS による元素分析結果

		O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Zn	Rb	Sn	Cs
Mixture sample	Bulk	○	○	×	×	○	○	○	×	×	○	○	×	○	○
	Micro-particle	○	○	×	×	○	×	△	×	×	△	○	×	○	△
Basalt sample	Bulk	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×	×	×	×
	Micro-particle	○	○	○	×	○	×	○	×	×	○	×	×	×	×
Diatomaceous earth sample	Bulk	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	Micro-particle	○	○	○	×	○	○	△	×	×	○	×	×	×	×
Type B-CsMP [6,7]		○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	Tr.	Tr.	Tr.
Type A-CsMP [21,29]		○	○	Tr.	Tr.	○	○	○	Tr.	×	○	○	○	○	○

目に値する。元素の揮発性の指標として、太陽系元素存在度に等しい混合比を持った 10 Pa の高温のガスが冷却される際に、各元素の 50% が凝縮する温度を考慮する [9]。複数の元素が混合した試料である玄武岩等における各元素の揮発性の指標となり、Type B CsMP で検出された元素のうち Type A CsMP で検出されなかったか微量のみが検出された Mg, Al, Ca, Ti は揮発性が最も低いグループであり、逆に Type B CsMP で微量のみが検出された元素のうち Type A CsMP で検出された Rb, Sn, Cs は揮発性が最も高いグループである。このことは、仮に Type A と Type B の CsMP の主たる原料が同一であったとしても、元素の揮発性の違いによる生成過程における気化の有無を考えることで、それらの含有元素の違いの一部を説明できた。

放射性エアロゾルの発生実験では FP のひとつである Tc-104 ( $T_{1/2} = 18.3 \text{ min}$ , 独立核分裂収率 約 0.1%) の計数率の比をもとに付着率として算出した。DMA と粒子計測器 (CPC) から成る気移動度粒径分析器 (SMPS) を用いて溶液エアロゾルの粒径分布の測定結果が得られた。また結果として Cs-138, I-134, 135, Te-134, Sn-128 に対する付着率が得られた。溶液エアロゾル粒子への付着率を比較すると、Cs-138, I-134, 135, Te-134 については同程度の付着率であったが  $^{128}\text{Sn}$  ではこれらの FP と比較して約 1/1000 の低い付着率となった。一方で、溶液エアロゾル粒子の溶質の違いによる付着率の差異は最大でも 10 倍程度であった。FP の溶液状エアロゾル粒子への付着過程においては、溶液状エアロゾルの溶質よりも FP の化学的性質の差異の方が、より大きな影響を与えたと考えられた。

おわりに

本研究で放出核種の化学形態についての検討が進み、環境動態の解明と汚染の未来予測に貢献した。特に炉内事象解明に繋がる模擬放射性微粒子やエアロゾルによる実験的知見を与えた。今後の課題として次の様なことに役立つ結果を得た。発展的課題 1：オフサイトとして、環境中の移行過程推定及び環境回復への手法の探索・被ばく線量の推定および環境中の一次放出核種の化学的存在形態の特定及び経年変化を追跡。発展的課題 2：オンサイトでは事故時の炉内事象の現状解析やオンサイト検出器開発。

#### 参考文献

- [1] N. Kaneyasu et al., Environ. Sci. Technol., **46**, 5720-5726 (2012).
- [2] K. Adachi, et al., Sci. Rep. **3**, doi:10.1038/srep02554 (2013).
- [3] Z. Zhang et al., Environmental Science & Technology **52**, 9917 (2018).
- [4] H. Miura et al., Geochemical Journal **52**, 145 (2018).
- [5] T. Ono et al., BUNSEKI KAGAKU **66**, 251 (2017).
- [6] H. Miura et al., Scientific Reports **11**, 5664 (2021).
- [7] T. Okumura et al., Scientific Reports **10**, 1352 (2020).
- [8] Kogure et al., Microscopy **65**, 451 (2016).
- [9] K. Lodders, The Astrophysical Journal **591**, 1220 (2003).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 G. Yoshida, K. Nishikawa, H. Nakamura, H. Yashima, S. Sekimoto, T. Miura, K. Masumoto, A. Toyoda, H. Matsumura	4. 巻 325
2. 論文標題 Investigation of variations in cobalt and europium concentrations in concrete to prepare for accelerator decommissioning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	6. 最初と最後の頁 801-806
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10967-020-07212-7	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 F. Futagami, M. Soliman, K. Takamiya, S. Sekimoto, Y. Oki, T. Kubota, M. Konno, S. Mizuno, T. Ohtsuki	4. 巻 223-224
2. 論文標題 Isolation, characterization and source analysis of radiocaesium micro-particles in soil sample collected from vicinity of Fukushima Dai-ichi nuclear power plant	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	6. 最初と最後の頁 106388
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jenvrad.2020.106388	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 M. Soliman, N. Mohamed, K. Takamiya, S. Sekimoto, M. Inagaki, Y. Oki, T. Ohtsuki	4. 巻 324
2. 論文標題 Estimation of <sup>47</sup> Sc and <sup>177</sup> Lu production rates from their natural targets in Kyoto University Research Reactor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	6. 最初と最後の頁 1099-1107
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10967-020-07156-y	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 K. Okada, A. Fushimi, S. Sekimoto, T. Ohtsuki	4. 巻 57
2. 論文標題 Basic consideration of a nuclear power monitoring system using neutron-induced prompt gamma rays	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 514-522
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00223131.2019.1699187	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 M. Inagaki, S. Sekimoto, T. Tadokoro, Y. Ueno, Y. Kani, T. Ohtsuki	4. 巻 324
2. 論文標題 Production of 99Mo/99mTc by photonuclear reaction using a natMo03 target	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	6. 最初と最後の頁 681-686
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10967-020-07086-9	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 Y. Kasamatsu, K. Toyomura, H. Haba, T. Yokokita, Y. Shigekawa, A. Kino, Y. Yasuda, Y. Komori, J. Kanaya, M. Huang, M. Murakami, H. Kikunaga, E. Watanabe, T. Yoshimura, K. Morita, T. Mitsugashira, K. Takamiya, T. Ohtsuki, A. Shinohara	4. 巻 13
2. 論文標題 Co-precipitation behaviour of single atoms of rutherfordium in basic solutions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Chemistry	6. 最初と最後の頁 226-230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41557-020-00634-6	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 N. Kinoshita, T. Noto, K. Kosako, M. Asada, K. Torii, A. Tada, T. Ohtsuk, S. Sekimoto	4. 巻 131
2. 論文標題 Uncertainty derived from elemental analysis and its effect on the separation of radioactive waste into low-level radioactive waste and wastefor clearance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress in Nuclear Energy	6. 最初と最後の頁 103597
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pnucene.2020.103597	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 J. Jang, H. Kikunaga, S. Sekimoto, M. Inagaki, T. Kawakami, T. Ohtsuki, S. Kashiwagi, K. Takahashi, K. Tsukada, K. Tatenuma, M. Uesaka	4. 巻 987
2. 論文標題 Design and testing of a W-Mo03 target system for electron linac production of 99Mo/99mTc	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A	6. 最初と最後の頁 16815
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164815	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 Ohtsuki Tsutomu, Manjanath Aaditya, Ohno Kaoru, Inagaki Makoto, Sekimoto Shun, Kawazoe Yoshiyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Creation of Mo/Tc@C60 and Au@C60 and molecular-dynamics simulations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 19666 ~ 19672
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0ra10196f	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 Kasamatsu Yoshitaka, Nagase Masahiro, Ninomiya Hidemi, Watanabe Eisuke, Shigekawa Yudai, Kondo Narumi, Takamiya Koichi, Ohtsuki Tsutomu, Shiohara Naoya, Shinohara Atsushi	4. 巻 179
2. 論文標題 Coprecipitation with samarium hydroxide using multitracer produced through neutron-induced fission of <sup>235</sup> U toward chemical study of heavy elements	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Radiation and Isotopes	6. 最初と最後の頁 110006 ~ 110006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apradiso.2021.110006	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 M. Sato, H. Akai, Y. Saito, T. Takase, H. Kikunaga, N. Sekiya, T. Ohtsuki, K. Yamaguchia	4. 巻 196
2. 論文標題 Use of different surface covering materials to enhance removal of radiocaesium in plants and upper soil from orchards in Fukushima prefecture	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Radioactivity	6. 最初と最後の頁 204-211
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jenvrad.2017.03.022	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14件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 稲垣誠、佐藤諒、関本俊、高宮幸一、沖雄一、大槻勤
2. 発表標題 福島原発事故により放出された放射性微粒子の模擬生成実験
3. 学会等名 第21回「環境放射能」研究会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 西尾 勝久、牧井 宏之、廣瀬 健太郎、Riccardo Orlandi、小川 達彦、大槻 勤、関本 俊、高宮 幸一、河野 俊彦
2. 発表標題 235U(nth, f)における高エネルギー即発ガンマ線スペクトルの測定
3. 学会等名 日本原子力学会 2020年春の年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田所 孝広、上野 雄一郎、可児 祐子、渡辺 敬仁、佐々木 貴裕、島田 真生子、菊永 英寿、柏木 茂、大槻 勤、関本 俊
2. 発表標題 電子線形加速器を利用したAc-225製造量の実験的検討 (1)天然バリウムを用いた予備試験
3. 学会等名 日本原子力学会 2020年春の年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上野 雄一郎、田所 孝広、可児 祐子、渡辺 敬仁、佐々木 貴裕、島田 真生子、菊永 英寿、柏木 茂、大槻 勤、関本 俊
2. 発表標題 電子線形加速器を利用したAc-225製造量の実験的検討 (2)Ra-226を用いたAc-225の製造基礎試験内容の検討
3. 学会等名 日本原子力学会 2020年春の年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Inagaki, R. Sato, S. Sekimoto, K. Takamiya, Y. Oki, T. Ohtsuki
2. 発表標題 Generation and analysis of the radioactive particles emitted from the Fukushima nuclear accident
3. 学会等名 Goldschmidt2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 稲垣誠、佐藤諒、関本俊、高宮幸一、沖雄一、大槻勤
2. 発表標題 福島原発事故に由来する放射性微粒子の分析および模擬生成実験
3. 学会等名 日本放射化学会第64回討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹内 佑、高宮 幸一、稲垣 誠、関本 俊、沖 雄一、大槻 勤
2. 発表標題 放射性エアロゾル模擬生成実験における対象核種の拡張
3. 学会等名 日本放射化学会第64回討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 稲垣誠、佐藤諒、関本俊、高宮幸一、沖雄一、大槻勤
2. 発表標題 不溶性放射性微粒子の模擬生成実験
3. 学会等名 「福島原発事故で放出された放射性物質の多面的分析」専門研究会(4)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 稲垣誠、佐藤諒、関本俊、高宮幸一、沖雄一、大槻勤
2. 発表標題 福島第一原子力発電所事故に由来する不溶性放射性微粒子の模擬生成実験
3. 学会等名 第22回「環境放射能」研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 稲垣誠、関本俊、高宮幸一、沖雄一、大槻勤
2. 発表標題 福島原発事故に由来する不溶性微粒子のレーザー加熱法による模擬生成実験
3. 学会等名 日本放射化学会第64回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 稲垣誠、関本俊、高宮幸一、沖雄一、大槻勤
2. 発表標題 福島原発事故に由来する不溶性放射性微粒子の模擬生成実験
3. 学会等名 第23回「環境放射能」研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 沖 雄一、高宮幸一、関本 俊、大槻 勤、長田直之
2. 発表標題 ワイヤスクリーンを用いた微小エアロゾル粒子の簡便粒径測定
3. 学会等名 第 2 0 回環境放射能研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤守、桑名篤、南春菜、渡辺善仁、高田大輔、大野剛、菊永英寿、大槻勤
2. 発表標題 幼果期と収穫期における果実および葉中Cs137 濃度の経時的推移
3. 学会等名 第 2 0 回環境放射能研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹内裕弥、高宮幸一、関本俊、沖雄一、大槻勤
2. 発表標題 照射ウランを用いた放射性エアロゾル生成模擬実験のための装置開発
3. 学会等名 第20回環境放射能研究会
4. 発表年 2019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	関本 俊  (Sekimoto Shun)  (10420407)	京都大学・複合原子力科学研究所・助教   (14301)	
研究分担者	沖 雄一  (Oki Yuichi)  (40204094)	京都大学・複合原子力科学研究所・准教授   (14301)	
研究分担者	高宮 幸一  (Takamiya Koichi)  (70324712)	京都大学・複合原子力科学研究所・准教授   (14301)	
研究分担者	篠原 厚  (Shinohara Atsushi)  (60183050)	大阪大学・理学研究科・教授   (14401)	
研究分担者	末木 啓介  (Sueki Keisuke)  (90187609)	筑波大学・数理物質系・教授   (12102)	

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
---------	---------