

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H01777

研究課題名(和文) 福島原子炉事故時の放射性核種の放出機構と化学的状態の解明

研究課題名(英文) Elucidation of release mechanism and chemical states of radionuclides from FDNPP accident

研究代表者

篠原 厚 (Astushi, Shinohara)

大阪大学・理学研究科・教授

研究者番号：60183050

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,300,000円

研究成果の概要(和文)：福島原発事故時の ^{137}Cs 等の放射性物質の放出過程と化学的存在状態の実験的研究から、環境動態の解明や汚染の未来予測、さらに炉内事象の理解に貢献することを目的とした。事故後5年目に、多くの大学の連携を得て、帰宅困難地域を中心に100か所の土壌サンプリングを行い、 $^{137}/^{134}\text{Cs}$ と ^{90}Sr の分布測定から環境動態と事故解析に貴重なデータを得た。また、放出後も炉内環境の情報を保持していると考えられる不溶性粒子中の ^{90}Sr やPu同位体の定量に注力し、粒子中に初めてPuの存在を確認し、Cs/Sr/Puの含有量の違いから炉内環境の直接的な情報を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本成果は、原子炉から放出される多様な核種測定から炉内で起こったと推測される種々の反応経路解析にフィードバックすることで、一次放射性核種の化学状態の解明を目指し、より正確な炉内事象解析に繋げようとするもので、学術的に独創的かつ意義あるばかりでなく、廃炉等においても重要な情報となり、社会貢献度も大きい。 ^{90}Sr とPu同位体の実測放射能濃度が ^{137}Cs に比べ、それぞれ4桁や8桁低いことを示したことは一般社会には重要である。さらに、本研究で得られた成果は、環境動態研究、汚染の未来予測、さらには粒子状不溶性生成物の寄与を含めた被曝評価などに貴重な知見を与えるもので、社会的な貢献は大きい。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is experimental studies of the release process and chemical state of radioactive substances such as ^{137}Cs at the Fukushima nuclear accident. It will contribute to the elucidation of environmental dynamics, the future prediction of pollution, and the understanding of status inside the reactor. Five years after the accident, with the cooperation of many universities, we systematically sampled 100 soils, mainly in areas where it was difficult to return home, and obtained valuable distribution data of $^{137}/^{134}\text{Cs}$ and ^{90}Sr for environmental dynamics and accident analysis. In addition, we focused on the quantification of ^{90}Sr and Pu isotopes in insoluble particles, which are thought to retain the information on the environment inside the reactor during the accident, and confirmed the presence of Pu in the particles for the first time. These results not only contribute greatly to the accident elucidation, but also provide valuable knowledge for exposure assessment.

研究分野：放射化学

キーワード：環境放射能 福島第一原子力発電所事故 放射性微粒子 ストロンチウム-90 プルトニウム 放射化学分離

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

2011年3月に起こった、東京電力福島第一原子力発電所の事故により、福島県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 ^{134}Cs と ^{137}Cs は、最も多く放出された放射性核種の一つであり、それぞれ2年と30年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5年が経過した現在(研究開始当時)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。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いが、環境中に最も多く存在する硫酸塩エアロゾルの形態で運搬されていたと考えられる[1]。一方で、放射性Csを含み比放射能が非常に高い粒子状で放出されたものがあることも指摘されている[2]。

一方で、化学的特性はエアロゾルの沈着挙動に影響を及ぼすため、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。社会的な意義からも科学的な観点からも、放射性エアロゾル(放射性核種)の放出時の化学的存在状態を解明することは重要かつ必要なことである。また、今後、被爆評価の際に大きな問題となる可能性のある粒子状不溶性生成物の生成機構は全く未知である。この粒子は事故時の炉内で生成したと考えられており、水に不溶であることから現在も一部は炉内情報を保持した状態のまま環境中で存在していると考えられており、事故時の炉内状況を調べる上で重要なツールとなりうる。

2. 研究の目的

新学術研究領域(放射能環境動態: IsetR)の成果として、粒子状不溶性生成物の発見[2]や、化学状態解明のための方法論の開発(8班の主テーマ)の途上で重要な切り口が見えてきた。これらの成果に基づき、炉内事象と結びついた炉内から炉外への放出過程の解明と、それによる核種の化学的存在状態の特定という新たなゴールを設定した。IsetRはあくまで放出された核種の環境中の挙動に目を向けたものであったが、本研究は、むしろ炉内事象に目を向けることで、実験的に一次放出時の核種の化学的・物理的状态の解明、特に不溶性粒子の生成機構を検討し、事故解明、廃炉、さらには被ばく評価にも貢献しようとするものである。

このため、環境影響的に重要な ^{137}Cs だけではなく、多くの核種の環境中の分布から、それを同時に再現できるような化学形の核種を放出する状況を炉内事象に演繹し、エアロゾルへの移行過程の化学的違いや搬送経路等の検討、不溶性粒子の生成機構解明に向けた模擬粒子生成などを通じ、一次放出核種の化学状態の解明を目指す。また、不溶性粒子の分布やインベントリ一、含有放射性核種($^{134/137}\text{Cs}$ 、 ^{90}Sr 、Pu同位体)の分析から炉内事象の解明に繋げる。さらに、今までに無かった人体への影響の評価に関しても重要な知見を与える。

3. 研究の方法

研究では以下の①～③の3課題を設定し、そのために種々の実験や観測等を進めた。①～③の結果を総合し演繹することで、これまで全く解明されていなかった炉からの一次放出核種の放出機構と存在状態(化学的・物理的状态)の解明を試み、さらに、不溶性粒子の結果から炉内事象の解明に繋ぐ考察を行った。②のうち、エアロゾル付着実験は、当初は京大複合研チームと連携して進めることとしていたが、別途科研費による研究プロジェクトが立ち上がったため、私がそちらの分担研者として加わることで、総合的な考察を行える体制とした。そのため、②の一部の成果はここには含めない。

- ① 炉内事象の化学実験シミュレーション(エアロゾル付着時の各核種の化学形、粒子状放出物生成)
- ② 核種搬送メカニズム(人工エアロゾル実験、付着・搬送実験)
- ③ 微量・難測定放出核種の環境分布測定(土壌や不溶性粒子中の ^{90}Sr やPu同位体測定)

このため、本研究では、難測定核種の分析法の開発、粒子や核種飛散の模擬実験、不溶性粒子探査法の開発などを進め、実際の核種の分布や不溶性粒子の探索のために系統的な環境試料サンプリングなどを関係する全国の研究者グループ(大学連合)と協力して行った。

具体的には以下の5種類の研究を行った。それぞれの結果がそれぞれ①～③に関連した成果を与える。現在、研究協力者や炉内事象解明に向けた学術会議WGなどで総合考察を進めている。

- (1) FDNPP近隣の事故後5年後の系統的土壌調査と $^{134/137}\text{Cs}$ の分布測定 →②③
- (2) 揮発性化合物の移行と不溶性粒子生成の模擬実験 →①②
- (3) 土壌中の難測定核種 ^{90}Sr の分布測定(水平分布と垂直分布) →③②
- (4) 土壌中の自動粒子判別法の開発と粒子インベントリ一観測 →③
- (5) タイプの異なる不溶性粒子中のSrおよびPu同位体測定 →③②①

4. 研究成果

ここでは、上記の研究テーマの主な結果(図表)のみを示し、特に、(1)と(5)について概要と成果を簡単に紹介する。

(1) FDNPP 近隣の事故後 5 年後の系統的土壌調査と $^{134}/^{137}\text{Cs}$ の分布測定

事故後の 2011 年 6 月に、日本地球惑星科学連合および日本放射化学会を中心とした有志の研究グループが、文科省のプロジェクトとして、汚染状況の把握のための土壌採取の大規模なフィールド実験を実施した[3]。その後は土壌を採取して汚染状況の詳細を把握する大規模な調査は以降行われていない。事故から 5 年以上が経過し、陸域に沈着した放射性核種（主に放射性セシウム： ^{134}Cs および ^{137}Cs ）は環境中でその分布や化学形を変化させていると考えられる。不溶性の放射性粒子についても、経時変化による風化が起こり、放射性核種の流出が起こるなど、初期とは異なる分布状況に変化していることが予想される。帰還困難区域の除染作業が始まる状況の中で、現在の放射性核種の汚染状況を把握するのはきわめて重要である。そこで本研究では、2016 年 6 月から 9 月にかけて本研究費も利用して、福島県内の帰還困難区域を中心とした土壌採取のフィールド実験を行い、現在の汚染状況の把握、放射性核種の詳細分析と動態分析、放射性粒子の探査などを行った。

(a) サンプルングと汚染状況調査

○試料採取

土壌調査に先立ち、福島県内で帰還困難区域を持つ自治体、飯舘村、浪江町、葛尾村、南相馬市、双葉町、大熊町、富岡町の各自治体との情報交換を行い、調査地点の選定を行った。調査は公共施設を中心として、除染が行われておらず、開けており動物等にあらされていない地点を土壌採取場所として選択した。

試料採取では 3-6 名のチームを編成し、まずは GPS を用いて採取地点の座標を記録した。その後 NaI シンチレーターもしくは電離箱を用いて 1 m および 5 cm の空間線量の測定を行った。次に、各地点で 5 ポイントについて、直径 8.3 cm の筒状の専用採土器をハンマーを用いて地中に打ち込み、表層より 5 cm の土壌を表層 0-2.5 cm と深部 2.5-5.0 cm に分けて採取した。

本研究プロジェクトは、2016 年 6 月から 9 月にかけての 9 日間、18 機関（大学と国研からなる大学連合）のべ 176 名で実施した。試料採取は合計 105 地点で行い、自治体ごとの内訳は飯舘村、浪江町、葛尾村、南相馬市、双葉町、大熊町、富岡町のそれぞれにおいて、20、23、5、5、18、18、16 箇所であった。また放射性核種の移行過程をより詳しく調べるために、29 地点において 30 cm のコア試料の採取も行った。

○土壌の処理

採取した土壌は重量を測定した後、室温で 1-3 週間風乾した。乾燥した土壌をよく攪拌し、石や植物片等を取り除き、U8 容器に 3 cm の高さに充填した。分析は東北大学、尚絅学院大学、気象研究所、国立環境研究所、筑波大学、京都大学、大阪大学の 7 つの研究機関で分担して実施した。それぞれの試料について、放射能の値からインベントリー (kBq/m^2) を導出した。それぞれの地点での 5 試料のばらつきが非常に大きかったため、中央値をその試料の代表値とした。

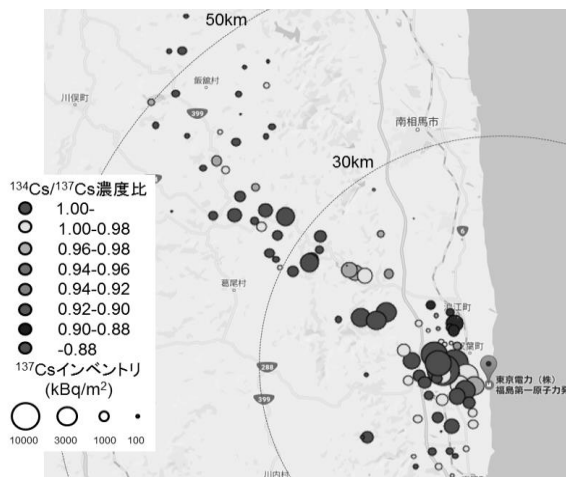


図 1. $^{134}/^{137}\text{Cs}$ のインベントリーマップ

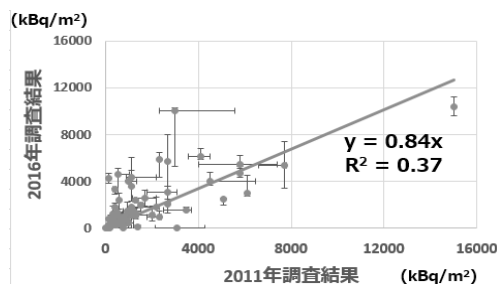


図 2. 2011.3 調査[3]と今回のインベントリーの比較。ほぼ物理的半減期で減少していることを示している。

(b) 結果と考察

本研究により得られた土壌の汚染マップを図 1 に示す。図中で円の大きさが ^{137}Cs のインベントリーを示している。今回の調査で得られた最大のインベントリーは $68400 \text{ kBq}/\text{m}^2$ であり、土壌の濃度として $1180 \text{ kBq}/\text{kg}$ に相当する。表層部の 0.0-2.5 cm と、深部の 2.5-5.0 cm の試料を比較すると、表層部の汚染のほうが高かったが、その比率については試料ごとに大きく異なっていた。福島第一原子力発電所から北西方向にインベントリーの高い地域が広がっており、これは過去に行われた調査の結果とも整合した。放射性セシウムの放射能比、 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比は 0.87-1.02 (2011.3 に補正) であり、これは福島第一原子力発電所事故由来であることを示している。

図 2 に今回の調査結果と、5 年前の調査で比較的近い位置で採取された試料から得られたインベントリーの比較を示す。 ^{137}Cs のインベントリーは 5 年前の調査に比べて 15% 程度減少が見られたが、これは自然壊変のみを考慮した 0.89 倍と近い値であった。このことから、インベントリーが大きく変化するような土壌流出は起こっていないことがわかった。また、ここでは示さなかったが、インベントリーと空間線量の関係から、5 年間で空間線量が 27% 減少していることが分かり、放射性 Cs が $0.34 \text{ cm}/\text{年}$ で下方に移行していることが示唆された。

(2) 揮発性化合物の移行と不溶性粒子生成の模擬実験

研究では、揮発性核分裂生成物を模擬した化合物で飛散実験を行った。また、不溶性粒子の生成過程の解明のため模擬粒子生成実験[4]をさらに発展させた。結果の一例を図3と表1に示すが、Cs, Iについては、本実験のように1000°Cの条件でもCsI等の化学種が生成、揮発することが確認できた。また、U₃O₈共存下でもCsI等の塩で放出されていることが確認された。UO₄のように酸素原子過剰になると、異なる放出挙動へと変化することが分かった。また、模擬粒子生成実験では、含有金属や¹³⁷Csについても再現できる低温過程の存在を提案できた(図4)。



図3. 1000°Cに加熱後の石英管の飛散物分布の写真

表1 Zone2の蛍光X線分析の結果

元素	濃度(mol%)			
	Zone2 上部			Zone2 中部
	サンプル1	サンプル2	サンプル3	
Te	64.5	6.8	6.6	1.2
I	13.4	32.3	30.5	27.5
Cs	7.8	30.0	28.0	24.0
Rb	7.0	13.0	14.0	24.2
Br	4.8	8.7	10.6	18.2
Se	1.6	3.6	4.1	3.7
As	1.0	—	—	—
Sn	—	3.4	4.2	0.6
Sb	—	1.8	1.6	0.6

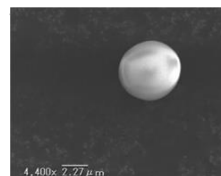
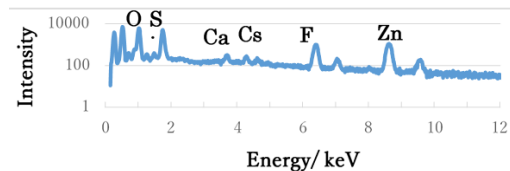


図4. 生成された模擬粒子の一例。左はSEM像、上はEDXのスペクトル。

(3) 土壌中の難測定核種⁹⁰Srの分布測定(水平分布と垂直分布)

放射能濃度の高い土壌について⁹⁰Sr分析を、方法論の開発と合わせて行った。結果として図5に示すように、原発から北方向、北西方向、西方向、南方向の4つのグループに分類できることが分かった。⁹⁰Sr/¹³⁷Csの違いがそれぞれの原発からの放出イベントの違いに対応していると考え、4つのグループにはそれぞれ別の由来となったプルームが存在していると考えられる。まとめると、分析調査から⁹⁰Sr/¹³⁷Csは福島原発から北方向と南方向で高く、西方向で低いことが分かった。各プルームの時系列と⁹⁰Sr/¹³⁷Cs比の詳細な解析は、炉内環境の解析につながる貴重な情報である。また全地点で⁹⁰Srが¹³⁷Csと比べより深部へ移行していることが分かった。

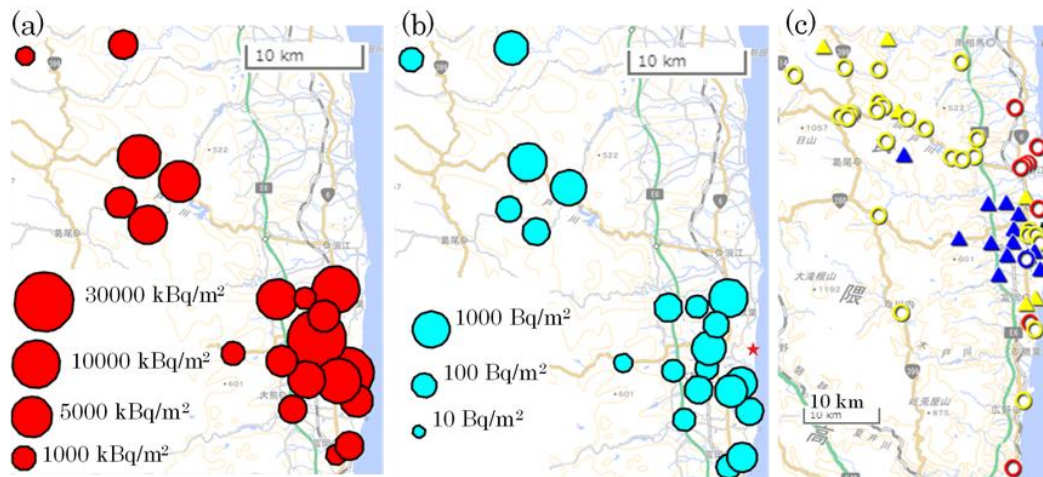


図5. 各測定点における(a)¹³⁷Csと(b)⁹⁰Srのインベントリー、および(c)⁹⁰Sr/¹³⁷Cs比。(c)における▲は本測定値、○は文献値を示す。⁹⁰Sr/¹³⁷Cs比の値に従い、次の通り分類した。赤:>10⁻³、黄:~10⁻⁴、青:~10⁻⁵。

(4) 土壌中の自動粒子判別法の開発と粒子インベントリー観測

不溶性粒子のインベントリーと特性の詳細分析は、生成過程の解明のみならず事故解析や被ばく評価などに大いに関係するが、未だその全貌は明らかになっていない。その障害は試料中の粒子識別と単離法、大量試料を対象とした探査法である。ここでは、土壌中から粒子をオートラジオグラフィックを使って自動認識する独自のシステムを開発(図6はイメージング写真)し、まずは10試料について粒子インベントリーを調べた。インベントリー測定の結果を図7に示す。この方法により粒子放出の全貌が明らかになると期待される。

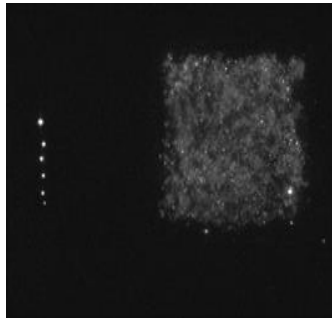


図 6. 土壌試料のイメージング画像。左側の 6 点は標準試料を、右側の四角の領域は土壌試料を示している。画像のデジタルデータから独自の粒子判別ソフトウェアを開発し、自動化を実現した。

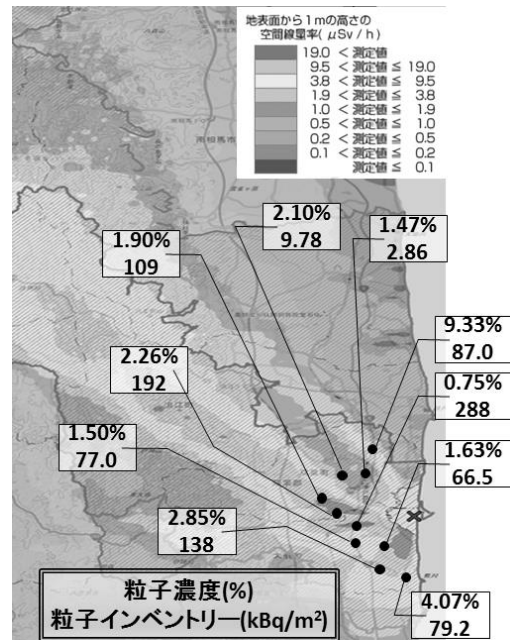


図 7. 本研究で分析した不溶性粒子の濃度とインベントリーのマップ

(5) タイプの異なる不溶性粒子中の Sr および Pu 同位体測定

不溶性粒子は、様々なタイプが存在していることから、事故を起こした複数の原子炉でそれぞれ生成したと考えられる[6]。不溶性粒子に含まれる微量の原子炉燃料由来の放射性同位元素を調べることで、その生成過程について理解することができると期待される。核燃料内に存在する元素の中で Sr や Pu は、Cs よりも揮発性の低い元素のため、Sr/Cs 比もしくは Pu/Cs 比を明らかにすることができれば、不溶性粒子生成時の温度条件に大きな制約を与えることができる。これまで不溶性粒子の ⁹⁰Sr や Pu 同位体分析は試みられていたが、その量が極めて少なく検出には成功していなかった。本研究では、不溶性粒子中に含まれる Sr や Pu の検出定量を行い、Pu について初めて検出に成功した[7]。

不溶性粒子はアルカリ溶融し、Sr の分析[8]を行った後、同じ試料 Pu の分析を行うために、Sr-Rad disk を通過したフラクションについて分析を行う化学手順を考案した。なお、Sr-Rad disk を通過させても Pu のロスがないことは Pu トレーサーを用いることで確認した。Pu の分析のために、沈殿法により不純物を取り除いた後、TEVA、U-TEVA、DGA の 3 種類の分離用樹脂を用いて Pu フラクションを濃縮した。測定は QST 放医研との共同研究として、SG-ICP-MS によって行った。結果を ⁹⁰Sr と合わせて表 2 に示す。この結果から、個々の炉の温度や酸化還元雰囲気についての議論が可能となった[7]。

表 2 本研究で分析した不溶性粒子の ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, ²⁴¹Pu の定量値

Radioactive particle	DP1	DP2	DP3	SP	
Activity [Bq]	¹³⁴ Cs	214 ± 2	794 ± 4	679 ± 4	230 ± 1
	¹³⁷ Cs	234 ± 1	887 ± 4	736 ± 4	224 ± 1
	⁹⁰ Sr	0.171 ± 0.010	0.589 ± 0.034	Not measured*	0.0455 ± 0.0040
	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	(1.70 ± 0.20) × 10 ⁻⁵	(3.48 ± 0.45) × 10 ⁻⁵	(7.06 ± 0.57) × 10 ⁻⁵	<4.44 × 10 ⁻⁶
	²⁴¹ Pu	<1.97 × 10 ⁻³	(4.10 ± 0.68) × 10 ⁻³	(8.10 ± 1.27) × 10 ⁻³	<2.23 × 10 ⁻³
Atom ratio	²⁴⁰ Pu/ ²³⁹ Pu	0.330 ± 0.077	0.415 ± 0.069	0.373 ± 0.045	—
	²⁴¹ Pu/ ²³⁹ Pu	—	0.178 ± 0.016	0.162 ± 0.028	—
Radioactivity ratio	¹³⁴ Cs/ ¹³⁷ Cs	0.915 ± 0.009	0.895 ± 0.005	0.922 ± 0.006	1.03 ± 0.01
	⁹⁰ Sr/ ¹³⁷ Cs	(7.31 ± 0.43) × 10 ⁻⁴	(6.64 ± 0.39) × 10 ⁻⁴	—	(2.03 ± 0.18) × 10 ⁻⁴
	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu/ ¹³⁷ Cs	(7.26 ± 0.86) × 10 ⁻⁸	(3.92 ± 0.51) × 10 ⁻⁸	(9.58 ± 0.78) × 10 ⁻⁸	<1.98 × 10 ⁻⁸

5. おわりに

以上のように、本研究で一次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。特に不溶性粒子の詳細な分析により、炉内事象解明と新たな放射性微粒子による被ばく評価に貴重な実験的知見を与えた。

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] 「福島県および近隣の 2200 箇所から採取された土壌試料の核種分析結果 (H23.6.14 換算)」日本原子力研究開発機構 (<http://emdb.jaea.go.jp/emdb/portals/b211/>) 2016.5.13.確認

[4] N. Fujita et al., Proceedings of the 17th Workshop on Environmental Radioactivity, March8-10 (2016).
 [5] 福島県「平成 28 年度原子力発電所周辺環境放射能測定結果報告書」(2016); Sahoo, S. K. et al. Sci. Rep. **6**, 23925 (2016).; Steinhäuser, G. et al. PLoS One **8**, e57760 (2013).
 [6] Y. Satou et al., Geochem. J. **52**, 0514 (2018).
 [7] J. Igarashi et al., Sci. Rep., **9**, 11807 (2019).
 [8] Z. Zhang, et al., Environ. Sci. Technol. **52**, 9917 (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Igarashi Junya, Zheng Jian, Zhang Zijian, Ninomiya Kazuhiko, Satou Yukihiko, Fukuda Miho, Ni Youyi, Aono Tatsuo, Shinohara Atsushi	4. 巻 9
2. 論文標題 First determination of Pu isotopes (239Pu, 240Pu and 241Pu) in radioactive particles derived from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 11807
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1038/s41598-019-48210-4	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 梶原知啓、二宮和彦、篠原厚、山口喜朗	4. 巻 2
2. 論文標題 福島原発周辺における土壌中放射性ストロンチウム濃度の分布測定	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 20th Workshop on Environmental Radioactivity	6. 最初と最後の頁 44-48
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 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 五十嵐 淳哉、張 子見、二宮 和彦、篠原 厚、佐藤 志彦、箕輪 はるか、吉川 英樹	4. 巻 2
2. 論文標題 福島県大熊町及び双葉町にて採取した放射性セシウムを含む不溶性粒子の分類	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第20回環境放射能研究会Proceedings	6. 最初と最後の頁 54-59
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 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 Zhang Zijian, Ninomiya Kazuhiko, Yamaguchi Yoshiaki, Kita Kazuyuki, Tsuruta Haruo, Igarashi Yasuhito, Shinohara Atsushi	4. 巻 52
2. 論文標題 Atmospheric Activity Concentration of 90Sr and 137Cs after the Fukushima Daiichi Nuclear Accident	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Environmental Science & Technology	6. 最初と最後の頁 9917 ~ 9925
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.est.8b01697	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 Igarashi Yasuhito, Kita Kazuyuki, Maki Teruya, Kinase Takeshi, Hayashi Naho, Hosaka Kentaro, Adachi Kouji, Kajino Mizuo, Ishizuka Masahide, Sekiyama Tsuyoshi Thomas, Zaizen Yuji, Takenaka Chisato, Ninomiya Kazuhiko, Okochi Hiroshi, Sorimachi Atsuyuki	4. 巻 9
2. 論文標題 Fungal spore involvement in the resuspension of radiocaesium in summer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1954
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-37698-x	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 二宮和彦、北和之、篠原厚、河津賢澄、箕輪はるか、藤田将史、大槻勤、高宮幸一、木野康志、小荒井一真、齊藤敬、佐藤志彦、末木啓介、竹内幸生、土井妙子、千村和彦、他	4. 巻 2018-7
2. 論文標題 福島第一原子力発電所近隣における土壌調査2016～放射性セシウムの深度分布～	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 KEK Proceedings	6. 最初と最後の頁 41-44
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 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 Kinase Takeshi, Kita Kazuyuki, Igarashi Yasuhito, Adachi Kouji, Ninomiya Kazuhiko, Shinohara Atsushi, Okochi Hiroshi, Ogata Hiroko, Ishizuka Masahide, Toyoda Sakae, Yamada Keita, Yoshida Naohiro, Zaizen Yuji, Mikami Masao, Demizu Hiroyuki, Onda Yuichi	4. 巻 5
2. 論文標題 The seasonal variations of atmospheric ^{134,137} Cs activity and possible host particles for their resuspension in the contaminated areas of Tsushima and Yamakiya, Fukushima, Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1186/s40645-018-0171-z	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 Ishizuka Masahide, Mikami Masao, Tanaka Taichu Y., Igarashi Yasuhito, Kita Kazuyuki, Yamada Yutaka, Yoshida Naohiro, Toyoda Sakae, Satou Yukihiko, Kinase Takeshi, Ninomiya Kazuhiko, Shinohara Atsushi	4. 巻 166
2. 論文標題 Use of a size-resolved 1-D resuspension scheme to evaluate resuspended radioactive material associated with mineral dust particles from the ground surface	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Radioactivity	6. 最初と最後の頁 436 ~ 448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.12.023	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 二宮和彦 (他54名)	4. 巻 2017-6
2. 論文標題 福島第一原子力発電所近隣における事故5年後の土壌調査	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the 18th Workshop on Environmental Radioactivity	6. 最初と最後の頁 31-34
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 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 鈴木杏菜、張子見、二宮和彦、山口喜朗、高橋純子、恩田裕一、篠原厚	4. 巻 2017-6
2. 論文標題 福島県川俣町で採取した土壌中の90Srの深度分布および移動度の決定	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the 18th Workshop on Environmental Radioactivity	6. 最初と最後の頁 46-49
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 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 篠原厚	4. 巻 2017-6
2. 論文標題 福島原発事故における一次放出核種の化学形態の解明を目指した環境動態研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the 18th Workshop on Environmental Radioactivity	6. 最初と最後の頁 26-30
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 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 Takashi Yoshimura, Masayuki Nakaguchi, Keisuke Morimoto	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Synthesis, Structures, and Proton Self-Exchange Reaction of μ_3 Oxido/Hydroxido Bridged Trinuclear Uranyl(VI) Complexes with Tridentate Schiff-Base Ligands	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Inorg. Chem., in ASAP	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI 10.1021/acs.inorgchem.6b03175	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 Zhang, Z., Ninomiya, K., Takahashi, N., Saito, T., Kita, K., Yamaguchi, Y., Shinohara, A.	4. 巻 16
2. 論文標題 Rapid isolation method for radioactive strontium using Empore™ Strontium Rad Disk	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences	6. 最初と最後の頁 15-21
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 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 藤田将史、二宮和彦、張子見、篠原厚、吉村崇	4. 巻 2016-8
2. 論文標題 福島原発由来の不溶性粒子の生成模擬実験	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of the 17th Workshop on Environmental Radioactivity	6. 最初と最後の頁 153-157
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 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27件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 二宮和彦
2. 発表標題 福島第一原子力発電所近隣における事故5年後の土壤中放射性物質の深度分布 Depth profile of radioactivity in soil from near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant at five years after the accident
3. 学会等名 日本地球惑星連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 五十嵐淳哉、張子見、二宮和彦、篠原厚
2. 発表標題 福島県大熊町で見つかった放射性セシウムを含む不溶性粒子の性質
3. 学会等名 日本地球惑星連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 二宮和彦、北和之、篠原厚、河津賢澄、箕輪はるか、藤田将史、大槻勤、高宮幸一、木野康志、小荒井一真、齊藤敬、佐藤志彦、末木啓介、竹内幸生、土井妙子、千村和彦、他
2. 発表標題 福島第一原子力発電所近隣における2016年採取土壌の放射性セシウムの深度分布
3. 学会等名 2018日本放射化学会年会・第62回放射化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 五十嵐淳哉、張子見、二宮和彦、篠原厚、末木啓介、佐藤志彦
2. 発表標題 福島県大熊町で発見された放射性Csを含む不溶性粒子の破壊分析による微量元素定量
3. 学会等名 2018日本放射化学会年会・第62回放射化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 二宮和彦
2. 発表標題 福島事故に由来する放射性セシウムを濃集した不溶性粒子の性質
3. 学会等名 日本放射線影響学会 第61回大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 五十嵐淳哉、張子見、二宮和彦、篠原厚、佐藤志彦、箕輪はるか、吉川英樹
2. 発表標題 福島県大熊町及び双葉町にて採取した放射性セシウムを含む不溶性粒子の分類
3. 学会等名 第20回環境放射能研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梶原知啓、二宮和彦、篠原厚、山口喜朗
2. 発表標題 福島原発周辺における土壤中放射性ストロンチウム濃度の分布測定
3. 学会等名 第20回環境放射能研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二宮 和彦
2. 発表標題 「福島第一原子力発電所近隣における土壤中放射性物質の調査2016」で採取したコア試料の分析
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. 発表年 2018年

1. 発表者名 Annna Suzuki
2. 発表標題 Determination of migration rate of 90Sr in soil in Kawamata Town, Fukushima Prefecture by measuring depth profile of 90Sr concentration
3. 学会等名 6th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry (APSORC17) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 北和之(他54名)
2. 発表標題 Investigation of soil radionuclide near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant 5-year after the accident by JpGU-JNRS team
3. 学会等名 JpGU2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鈴木杏菜
2. 発表標題 福島県川俣町で採取した土壌とリター層の90Sr濃度の経年変化
3. 学会等名 環境放射能研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 二宮和彦（他54名）
2. 発表標題 福島第一原子力発電所近隣における土壌中放射性物質の調査2016～放射性セシウムの深度分布
3. 学会等名 環境放射能研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 五十嵐淳哉
2. 発表標題 福島県大熊町で採取した土壌から発見された放射性セシウムを含む不溶性粒子の形状とその性質
3. 学会等名 環境放射能研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 張子見
2. 発表標題 イメージングプレート（IP）画像解析による放射能汚染土壌中の高放射能粒子の自動分析法の開発
3. 学会等名 環境放射能研究会
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Z. ZHANG, K. NINOMIYA, Y. YAMAGUCHI, T. SAITO, K. KITA, H. TSURUTA, Y. IGARASHI, A. SHINOHARA
2 . 発表標題 Daily changes of $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ activity ratio in the atmosphere after the FDNPP accident
3 . 学会等名 GOLDSCHMIDT (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 K. Ninomiya, Z. Zhang, N. Fujita, S. Kakitani, Y. Yamaguchi, K. Kita, A. Watanabe, H. Tsuruta and A. Shinohara
2 . 発表標題 Seasonal variation of radioactive cesium concentrations in the atmosphere after the FDNPP accident
3 . 学会等名 GOLDSCHMIDT (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 Z. ZHANG, K. NINOMIYA, Y. YAMAGUCHI, T. SAITO, K. KITA, H. TSURUTA, Y. IGARASHI, A. SHINOHARA
2 . 発表標題 Atmospheric $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ activity ratio in eastern Japan after the FDNPP accident
3 . 学会等名 The 2016 International Conference on Nuclear and Radiochemistry (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 Z. ZHANG, K. NINOMIYA, A. SHINOHARA
2 . 発表標題 Development of aerosol generation system for simulating dry deposition process of radioactive nuclides released from the Fukushima accident
3 . 学会等名 The 2016 International Conference on Nuclear and Radiochemistry (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1. 発表者名 Nobufumi Fujita, Kazuhiko Ninomiya, Zijian Zhang, Shunsuke Kakitani, Takashi Yoshimura, Yoshiaki Yamaguchi, Kazuyuki Kita, Haruo Tsuruta, Akira Watanabe, Hitoshi Yamamoto, Atsushi Shinohara
2. 発表標題 Seasonal Variation and Chemical Property of Radioactive Cesium Released by the FDNPP Acciden
3. 学会等名 The 2016 International Conference on Nuclear and Radiochemistry (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 張 子見、二宮和彦、吉村 崇、古川 純、篠原 厚
2. 発表標題 原子力事故により放出される放射性物質の森林植生への沈着・溶離挙動の研究
3. 学会等名 第60回放射化学討論会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 藤田将史、二宮和彦、吉村崇、篠原厚
2. 発表標題 福島原発事故に由来する放射性セシウムを含む不溶性粒子の生成模擬実験
3. 学会等名 第60回放射化学討論会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 鈴木杏菜、張子見、二宮 和彦、山口 喜朗、高橋 純子、恩田裕一、篠原厚
2. 発表標題 福島県川俣町で採取した土壌中のSr-90の深度分布
3. 学会等名 第60回放射化学討論会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 鈴木杏菜、張子見、二宮 和彦、山口 喜朗、高橋 純子、恩田裕一、篠原厚
2. 発表標題 福島県川俣町で採取した土壌中のSr-90の深度分布及び移動度の決定
3. 学会等名 第18回「環境放射能」研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤田将史、二宮和彦、張子見、篠原厚、吉村崇
2. 発表標題 福島原発事故由来の放射性Csを含む微粒子の生成模擬実験とその性質
3. 学会等名 第18回「環境放射能」研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 二宮和彦、他55名
2. 発表標題 福島第一原子力発電所近隣における事故5年後の土壌調査
3. 学会等名 第18回「環境放射能」研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 稲井優希、二宮和彦、他54名
2. 発表標題 福島第一原子力発電所近隣における事故5年後の土壌放射能測定
3. 学会等名 第18回「環境放射能」研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 篠原 厚、齊藤 敬、上杉 正樹、小島 貞男、村松 久和、沖 雄一、大槻 勤、横山 明彦、大浦 泰嗣、吉村 崇、二宮 和彦、中西 孝、高橋 成人、菊永 英寿、末木 啓介、大塚 孝治、岡田住子、高宮 幸一、佐藤志彦、小池 裕也、斎藤 裕子、山口 喜朗、高橋賢臣、市原 千博
2. 発表標題 福島原発事故における1次放出核種の化学形態の解明を目指した環境動態研究
3. 学会等名 第18回「環境放射能」研究会
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	吉村 崇 (YOSHIMURA TAKASHI) (90323336)	大阪大学・放射線科学基盤機構附属ラジオアイソトープ総合センター・教授 (14401)	実験(1)(2)、および化学分離の検討を担当
研究分担者	二宮 和彦 (NINOMIYA KAZUHIKO) (90512905)	大阪大学・理学研究科・助教 (14401)	実験全般、(1)の調整を担当
研究協力者	大槻 勤 (OHTSUKI TSUTOMU) (50233193)	京都大学・複合原子力科学研究所・教授 (14301)	課題の連携、人工エアロゾル実験
研究協力者	横山 明彦 (YOKOYAMA AKIHIKO) (80230655)	金沢大学・物質化学系・教授 (13301)	難測定核種の化学分離法開発で情報交換
研究協力者	片岡 勲 (KATAOKA ISAO) (80093219)	福井工業大学・工学部・教授 (33401)	炉内事象、炉内シミュレーションについての情報提供

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	張 子見 (ZHANG ZI JIAN)	大阪大学・大学院理学研究科・特任研究員 (14401)	実験の支援
研究協力者	五十嵐 淳哉 (IGARASHI JUNYA)	大阪大学・大学院理学研究科・博士課程学生 (14401)	(4)の実験の実施