

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：13301

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2012～2016

課題番号：24110008

研究課題名（和文）移行に伴う放射性物質の化学形態と微量分析技術の開発

研究課題名（英文）Development of microanalysis technology and chemical form of radioactive materials with migration

研究代表者

山本 政儀（Yamamoto, Masayoshi）

金沢大学・その他部局等・名誉教授

研究者番号：10121295

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 95,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究班(A04-7)は、東京電力福島第一原子力発電所の事故で環境中に放出された放射性核種の拡散・輸送・沈着・移行過程の実態とメカニズム解明、併せて長期的な環境汚染の予測を可能とする学際的で総合的な新しい研究領域の確立に寄与することを目的とした。この目的達成のために、大気、陸域、海洋研究グループと連携しながら（1）微量な放射性核種の定量を可能とする高感度測定法の開発と応用、（2）環境中での放射性核種の移行挙動を支配する素過程を明確にするため、マクロからミクロまでの放射性核種の存在形態の基礎研究とそれを考慮した移行挙動予測モデルの構築、ひいては新しい環境動態学の構築の2つの研究を実施した。

研究成果の概要（英文）：On March 11, 2011, huge amounts of radioactive substances were released from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant of Tokyo Electric Power Company (TEPCO), which was affected by a massive earthquake (magnitude 9.0) that occurred off the Pacific coast of Tohoku and subsequent tsunamis. These events resulted in an unprecedented catastrophic disaster where a massive earthquake disaster and a nuclear radiation accident were combined to synergize the damage. A collaborating science investigation team was organized. Our group (A04-7) engaged in development of the technology to measure trace amount of released radionuclides and elucidate its chemical forms in the transition process by taking full advantage of existing equipment and new advanced micro-measurement technology. These researches have collaborated closely with the proposed researches (diffusion, transport, migration, deposition and so on) of the other teams related to the atmosphere, terrestrial and marine environments.

研究分野：環境放射能 地球環境化学

キーワード：福島第一原発事故 環境放射能汚染 放射性セシウム 放射性ヨウ素 超ウラン元素 極微量放射能測定法の開発 存在状態 移行挙動解明

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日、東北地方太平洋沖でM9.0の巨大地震とその後の大津波で被災した東京電力・福島第一原子力発電所事故により大量の放射性物質が環境に放出され、通常の震災と放射能災害が複合・増幅し合う人類未体験の破局的災害が発生した(東日本大震災)。事故当初から多くの調査・研究等が行われ、事故原子炉の状況や環境に放出された放射性核種の大気・陸域・海洋での汚染や拡散状況、更に住民が受けた被ばく線量などの概要が明らかになってきた。これを受けて、さらに、放出された放射性核種の拡散・沈着・輸送・移行過程を同定し、その実態とメカニズムを解明し、併せて中・長期的な環境汚染の予測を可能とする学際的で総合的な研究が必須となった。そこで、新学術領域研究「福島原発事故により放出された放射性核種の環境動態に関する学際的研究」(代表：筑波大学・恩田裕一教授)を立ち上げ、大気[A01班]、海洋[A02班]、陸域[A03班]、全体の班をサポートする測定技術及び化学形態解明[A04班]の包括的・学際的な研究を組織し、我が国の学術水準の強化と社会貢献を図ることとした。

2. 研究の目的

この中で本研究班(A04-7班)は、「移行に伴う放射性物質の存在形態および測定技術の開発」を主課題に、(1)A04-8班との相補的な連携による存在形態分析と微弱放射能の測定開発を基に、(2)エアロゾル(A01-1班、A01-2班)、海水・沿岸堆積物(A02-3,4班)、土壌・河川水・河川堆積物・懸濁粒子・リター(A03-5班、A03-6班)などの分析支援・共同研究を行いながら、マクロからミクロまでの放射性核種の存在形態を考慮した移行挙動予測モデルの構築、ひいては新しい環境動態学の構築を目的とした。

3. 研究の方法

そのために、主に(1)【研究1】微量な放射性核種の定量を可能とする高感度測定法の開発と応用として、環境に放出されたアクチノイド元素諸核種、ヨウ素-129の精密測定を行った。また、強放射性粒子(nuclear particle)の構成組成、成分などのキャラクタリゼーション研究を試みた。(2)【研究2】様々な核種のマクロからミクロの存在形態解析に基づく移行挙動予測研究として、特に放射性セシウム(及び放射性ヨウ素)について、環境媒体中での化学種の同定、土壌等への吸着・脱着メカニズム、水圏における固液分配の化学モデルを検討した。

4. 研究成果

(1) 微量な放射性核種の定量を可能とする高感度測定法の開発と応用

環境に大量放出された放射性セシウム(^{134,137}Cs)は、測定が容易なこともあり事故直後から今日に至るまで多くのデータが得られてきた。一方、核燃料であるウラン(U)や3号炉に使用されたMOX燃料に含まれるプルトニウム(Pu)、核燃料の燃焼から生成されるアクチノイド諸核種の放出の有無や放出量については、周辺住民を中心とした公衆の最大の憂慮の一つであったにもかかわらず、測定時の煩雑な化学分離操作や特殊な施設・装置の必要性から、事故当初の情報は非常に限られていた。そこで、原発近傍の住民が最も懸念したプルトニウムをはじめとするアクチノイド諸核種の環境放出有無、更にそのレベル、同位体組成を明らかにするために、原発から40-50km範囲の広域約150地点から土壌コア、落葉、道路脇のダスト(黒い物質)を採取し放射性Csと併せてU, Pu, Am, Cm同

核種組成	原子炉コア中のインベントリ ¹⁾			試料中の放射能比		
	1号炉	2号炉	3号炉	試料数	平均値	中央値
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu/ ¹³⁷ Cs	7.86x10 ⁻³	7.54x10 ⁻³	9.96x10 ⁻³	137	(2.34±3.50)x10 ⁻⁷	1.29x10 ⁻⁷
²³⁹ Pu/ ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	3.63x10 ⁻⁴	3.66x10 ⁻⁴	2.84x10 ⁻⁴	12	(5.84±4.43)x10 ⁻⁴	5.12x10 ⁻⁴
²³⁸ Pu/ ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	2.90	2.38	2.30	137	1.73±0.75	1.79
²⁴¹ Pu/ ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	140	146	126	10	90-100**	
²⁴¹ Am/ ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	0.35	0.23	0.23	122	0.56±0.16	0.54
²⁴² Cm ¹⁾ / ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	56.1	46.5	43.3	122	28.1±13.1	26.7
²⁴² Cm ²⁾ / ²⁴³⁺²⁴⁴ Cm	32.5	27.6	20.0	122	28.3±9.9	25
²⁴³⁺²⁴⁴ Cm/ ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	1.72	1.68	2.16	122	1.10±0.61	1.06
Atom ratio ²⁴⁰ Pu/ ²³⁹ Pu	0.34	0.32	0.36	9	0.33±0.02	0.34

¹⁾2011年3月11日の値に補正
²⁾範囲で表示

位体を正確に測定した。これにより、蓄積量、同位体組成、原発からの放出量、非揮発性(refractory)元素(Puなど)と揮発性(volatile)元素(Csなど)の飛散・拡散・降下挙動を比較検討する上で極めて重要なデータを提供した。

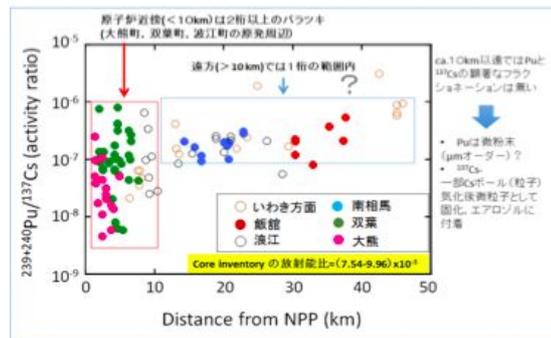


図 原発からの距離と ²³⁹⁺²⁴⁰Pu/¹³⁷Cs 比との関係

さらに、今回原子炉燃料放出との関連で、Key pointの²³⁶Uの測定をオーストリア・ウィーン大学のタンデム加速器質量分析計AMSを

駆使して測定した。海水についても挑戦を試みたが検出限界以下であった。海水中の ^{236}U については、今日 ^{137}Cs に勝る海水循環解明のトレーサーと注視されており、少量迅速分離開発を試みている。これらの開発は、今後の原子炉事故の際の海洋汚染の拡散情報取得や地球化学的プロセス解明の有用なトレーサー利用に繋がる。

環境に放出された放射性物質の存在状態の情報を得る為に、今回、上記の で用いた汚染の高い黒い物質について、その試料からの強放射性微粒子の分離法を開発し、マイクロXAFS法等を用いて、粒子のサイズ、組成等を明らかにした。バルク試料とそれから分離した微粒子の研究は、車の両輪であり、事故時の原子炉内情報などの重要な情報を提供す

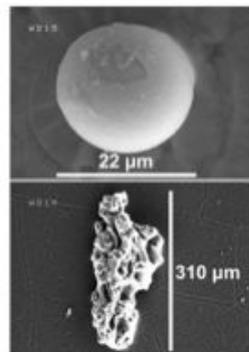


図 黒い物質から分離した Nuclear particles (上: 南相馬市; 下: 双葉町)

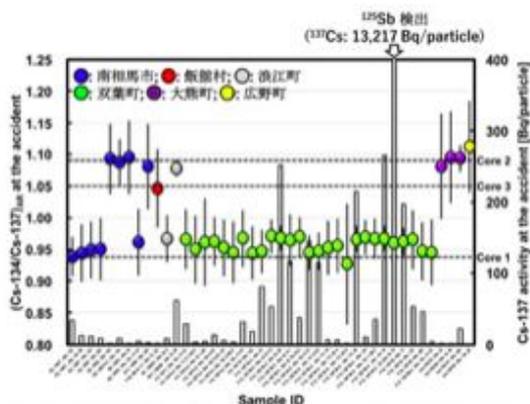
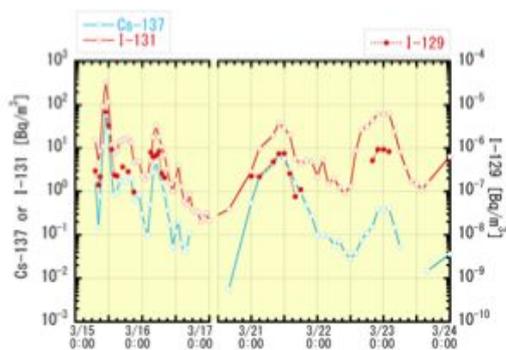


図 黒い物質から分離した Nuclear particles の ^{137}Cs 放射能 (バー) 及び $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比 (プロット)

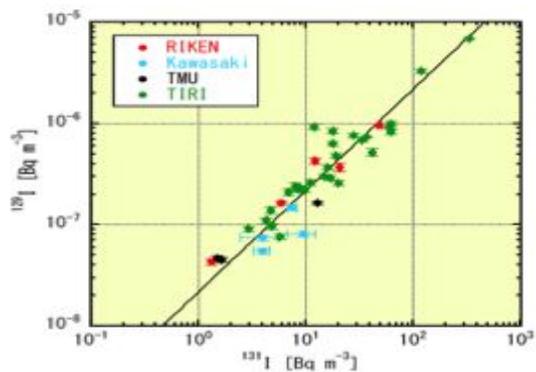
る。

原発事故当時に多量の放射性ヨウ素が環



東京都産業技術センター (TIRI) 駒沢支所で採取された大気浮遊塵試料中の ^{137}Cs 、 ^{129}I 、 ^{131}I 放射能濃度 (Bq/m^3) 変化 (^{137}Cs 、 ^{131}I の値はTIRIの報告値、 ^{129}I の値は本研究による)

境に放出され、吸入による乳幼児や子供への甲状腺がんの懸念が増大した。しかし、一部のデータは存在するが、事故初期からの連続した大気中の放射性ヨウ素の評価は困難であった。そこで、大気環境を常時監視している自動モニターのテープろ紙 (SPM) に着目し、放射性セシウム ^{137}Cs と半減期の長い放射性ヨウ素 ^{129}I の放射能を系統的に測定し、両者の比をもとに事故当時の ^{131}I 濃度の復元を試みた。試料内の $^{129}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 比の均一性、ろ紙の材質と放射性核種の捕集効率、 ^{129}I 濃度と $^{129}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比、ガス状ヨウ素の寄与などの基礎評価を行い、連続SPM試料で事故初期のエアロゾル中の ^{131}I 濃度 (ガス状の ^{131}I については別途評価必要) を概ね復



大気浮遊粒子中の放射性ヨウ素 (^{129}I 、 ^{131}I) の濃度 (Bq/m^3) の相関

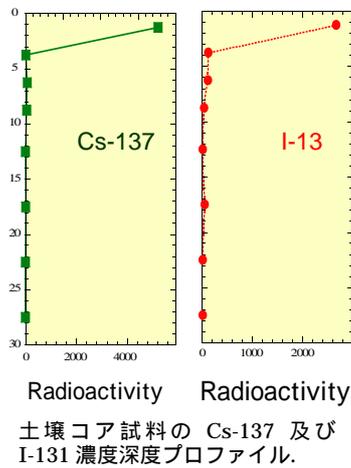
元できることが分かった。

(2) 存在状態(形態)に関する研究

放射性核種の分布と移行挙動を解明する上で常につきまとう問題は、放射性核種の移行を支配する素過程であり、その解明のためには、元素の化学種情報の把握が必須となる。陸域では、放射性核種は大気経路で地表に沈着した後で、浸食等で河川に流入し海洋に運ばれるか、地層中を浸透し地下水に流入し長期間かけて河川・海洋に運ばれる。例えば、水への溶解性の高いストロンチウムでは地下水への移行も考えられるが、セシウムの挙動は層状珪酸塩への親和性が高く土壌表層に強く吸着されるため、浸食による河川への流入の方が主要な移行プロセスになる。このように、放射性核種の挙動把握には環境中の化学種の同定が必須であり、そのためには核種の濃度分析に加えて、化学種に関係する手法の開発と適用が必要がある。そこで、以下の研究をおこなった。

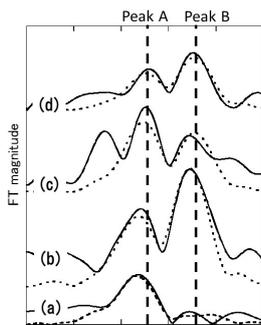
土壌中での深度分布と溶出挙動:

右図に示すように、地表に沈着した放射性セシウムとヨウ素の90%以上が表層5 cm以内に存在し、鉛直方向に移行しにくい化学形態であることが分かった。放射性ヨウ素の方が僅かに下方に浸透していることが分かった。さらに、放射性ヨウ素は土壤中の腐植物質に支配されていることが示唆された。



土壌や堆積物に対して放射光を用いた X 線吸収微細構造法 (X-ray absorption fine structure; XAFS)、X 線マイクロビームを用いた蛍光 X 線法 (XRF) を用いた化学種解明：

福島原発事故でもっとも多量に環境中に放出された ^{137}Cs でも、10000 Bq/kg の場合でそのモル濃度 (重量濃度) は 2.28×10^{-11} mol/kg (3.12 ppt) であり、XAFS 法で検出できるレベル (ppm レベル) ではない。そこで、同じ元素を試料に必要な量添加して XAFS 法を適用した。下図に粘土鉱物と Cs の吸着状態を示すが、Cs は外圏錯体 (peak A) と内圏錯体を作り、粘土層間の結合 (内圏錯体: peak B) が安定であることが分かった。また、環境では放射性 Cs の固相側への吸着が有機物によって阻害されることが示唆された。一方、ヨウ素では XAFS 法・XRF 法のような分光的手法を用いることで、土壌中の有機物に対する共有結合形成による取り込みが重要であることが明らかになった。



土壌、堆積物、粘土鉱物に吸着されたセシウム L_{III} 吸収端 EXAFS (R: 位相シフト)。(a)水和イオン；(b)パーミキュライト；(c)土壌に吸着された Cs；(d)堆積物に吸着された Cs。実線：測定値；破線：カーブフィッティング。

粘度鉱物からの放射性 Cs の脱離挙動：

放射性Csは土壌粒子中において、雲母鉱物、パーミキュライトおよびスメクタイトなど 2:1型層状粘土鉱物に保持されている寄与が

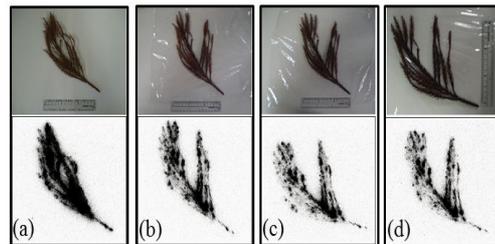
大きい。いわき市における6つのため池から粘土鉱物を抽出し、主要陽イオン (Na^+ , Mg^{2+}) によるセシウムの脱離挙動を検討した。その結果、いずれの試料に関しても、 ^{133}Cs および ^{137}Cs とも、NaによるCsの脱離量はMgによるものよりも大きかった。本結果は交換侵入性からの予測とは異なっており、セシウムの脱離挙動は、交換侵入性のみにより説明できず、粘土粒子の分散・凝集過程がセシウムの脱離挙動に影響を与える可能性が示された。

森林におけるCsの化学状態

福島県の70%は森林などの植生に覆われており、森林への沈着及び樹木等の植物への放射性セシウムの取り込みは重要な移行過程である。ここでは、化学状態の解明に重点を置いた。

(i) リーチング実験による樹葉からの放射性セシウムの溶出挙動：樹葉試料を純水、洗剤、アセトンを用いて順に超音波洗浄器内にてリーチング処理を行い、処理前後にそれぞれ光学写真像及びオートラジオグラフ像を撮影した。オートラジオグラフ像が示す通り、洗剤やアセトンによるリーチング処理を行った後でも、スギの樹葉にはおよそ半分の放射性Csが残っており、放射性Csが葉の組織の中に吸収されていることが示された。

(ii) EXAFS法を用いた樹木へのセシウムの吸着構造：樹木中に取り込まれたセシウムの化学形態を明らかにするために、安定セ



スギ樹葉の写真 (上段) 及びオートラジオグラフ像 (下段)。(a)未処理試料、(b)純水処理後、(c)洗剤処理後、(d)アセトン処理後。スケールは 15 cm の定規。

シウムを添加した樹木試料のセシウム L_{III} 吸収端EXAFS測定を実施した。その結果、すべての部位が水和イオン及びセルロース吸着試料と同様のスペクトルを示し、Csが樹木の各部位に対して外圏錯体として静電的に吸着していることが示唆された。

(3) 水圏中のセシウムの移行挙動：素過程解析と化学モデル

ここでは、主に土壌等の浸食によって河川に流入した放射性セシウムが海洋に移行する過程で受ける主に物理化学的な素過程やそれに与える様々な因子の解析、それらに基づく

主に放射性Csの水圏での固液分配（吸脱着脱着）に関わるモデル化を行った。また本新学術領域で大きな発見となった放射性Csを高濃度を含む強放射性Cs粒子の影響や、チェルノブイリ地域と福島地域の河川中の固液分配の違いについての考察も行った。

河川中の強放射性Cs粒子の寄与：

福島県の口太川上流、口太川下流、阿武隈川（伏黒付近）で2014年から2016年までに採取した計13回分の河川懸濁粒子ろ過フィルター（3-63 μm）を用い、湿式法により強放射性Cs微粒子を分離した。これらに基づき、フィルター上の全放射性Csに占める強放射性Cs粒子の放射濃比を分析した。その結果、2014年5月の口太下流のフィルターの場合、見かけ上の K_d 値（L/g）は約1650であったが、フィルター上には2つで計3.5 BqのCs-137をもつ強放射性粒子があり、これはフィルター全体のCs-137のうち、約30%を占めていた。よって、真の K_d 値は約1150となり、微粒子によって K_d 値が高く算出されることがわかった。また、2015年11月の口太下流のフィルターでも同様に強放射性粒子が見つかり、全体の約46%の放射性Csがこの微粒子に含まれていることが判明した。

放射性Csの河川固液分配と吸着・溶出：

事故初期から6年間の河川水中の放射性Csの存在形態の変動と、それを支配する要因を検討するために、福島県内の河川水系（口太川、阿武隈川、宇田川、新田川、岩沢川、夏井川、鮫川）などを主に調査した。一部、利根川を対象にした調査も行った。また、河川水の懸濁粒子中の吸脱着特性を把握するため、採取した懸濁粒子の抽出実験とともに、放射性Csを吸着させた後に脱離実験を行い、存在形態の基礎データも取得した。その結果、福島地域及び群馬県の利根川上流において、河川の放射性Cs流出に及ぼす降雨の重要性が改めて示された。特に、降雨時に河床土が再懸濁するとともに河川流域に沈着した放射性Csが吸着した懸濁粒子の供給が上流から下流に向けて増加することが示唆された。また、河川の流域環境により、懸濁態と溶存態の放射性Csの流出性が大きく異なることも明確になった。

放射性セシウムへの吸着平衡モデルの適用とRIPを支配する因子の解析：河川等における固液分配（吸脱着反応）は、セシウムの場合には主に雲母・粘土鉱物などの層状珪酸塩が担っている。この反応を層状珪酸塩へのイオン交換反応でモデル化することで、共存する溶存イオンを考慮した放射性セシウムの固液分配を予測することが可能になる。ここでは、この吸着反応を3つの吸着サイトを

考慮したイオン交換反応である Generalized Adsorption Model (GAM) によりモデル化した。またモデル化の結果、Frayed Edge Site が天然での放射性Csの主要な結合サイトであることが分かったので、

Frayed Edge Site により記述した RIP を用い、吸着の程度を支配する因子も調べた。固相粒子が持つ因子として、主に RIP、 K_d 、CEC、OM、XRD、M/Q 比などの測定を行った。各パラメータの RIP への寄与は、 $\log\{RIP/(mmol/kg)\} = 0.87 \log(CEC_{norm}) - 0.36 \log(OM_{norm}) + 0.06 \log\{(Ill/Qtz)_{norm}\} + 0.42 \log(SA_{norm})$ で表せることが分かった。

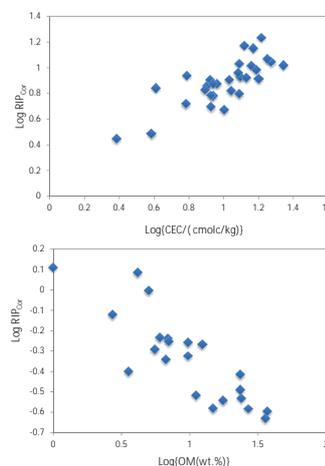


図3.他の項の寄与を除いたRIP値 (logRIP_{or}) に対して各パラメータの相関を調べた例。

河川固液分配と吸着・脱着：福島第一原子力発電所の事故の影響を受けていない河川懸濁粒子を対象として、¹³⁷Cs トレーサーを用いて粒度分布依存性と温度依存性の吸着実験を行った。温度が上昇するにつれ放射性Csが脱離した。吸着挙動について固液分配係数 K_d を用いて評価したところ、温度が25度から5度になると K_d が2倍増加することが分かった。また、吸着反応のエンタルピー変化を求めた結果、イライトに対する吸着エンタルピーとほぼ同じ値をとり、同鉱物を仮定して考案された3サイトモデルの妥当性を示す結果を与えた。

口太川とプリピャチ川（チェルノブイリ）の溶存セシウムの割合の比較：

1986年のチェルノブイリ原発事故の際に、原発の側を流れるプリピャチ川中の放射性セシウムは70%以上が溶存態であり福島と正反対の傾向を示した。プリピャチ川中の懸濁粒子は、層状ケイ酸塩である無機の微

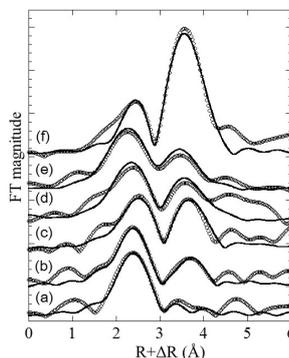


図4. 河川懸濁粒子などに吸着されたセシウムのセシウムL吸収端EXAFSの動径構造関数 (AR: 位相シフト)。 (a): 水和Csイオン; (f): パーモキュライトに吸着されたCs; (b): (c): プリピャチ川中の懸濁粒子に吸着されたCs (b: 有機物除去前; c: 有機物除去後); (d): (e): 口太川中の懸濁粒子に吸着されたCs (d: 有機物除去前; e: 有機物除去後); ○: 測定値; 実線: カーブフィッティング。

懸濁粒子は、層状ケイ酸塩である無機の微

細粒子を腐植物質という有機物が覆っている形態を示し、それが放射性 Cs の吸着挙動に影響を与えていると解釈できた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 94 件)

- 1) Yamasaki, S., Imoto, J., Furuk, G., Ochiai, A., Ohnuki, T., Suekia, K., Nanbad, K., Ewing, R. C., Utsunomiya, S. (2016) Radioactive Cs in the estuary sediments near Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Science of the Total Environment (査読有), 551-552, 155-162.
- 2) Fukushi K., Fukiage T. (2015) Prediction of Intrinsic Cesium Desorption from Na-Smectite in Mixed Cation Solutions, *Environ Sci Technol* (査読有), 49(17), 10398-10405. [Doi:10.1021/acs.est.5b01884](https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01884)
- 3) Sakaguchi, A., Tanaka, K., Iwatani, H., Chiga, H., Fan, Q., and Onda, Y., Takahashi, Y. (2015) Size distribution studies of ¹³⁷Cs in river water in the Abukuma riverine system following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, *J Environ Radioactivity*, (査読有), 139, 379-389. [Doi:10.1016/j.jenvrad.2014.05.011](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.05.011)
- 4) Tanaka, K., Iwatani, H., Sakaguchi, A., Takahashi, Y., and Fan, Q. (2015) Size-dependent distribution of radiocesium in riverbed sediments and its relevance to the migration of radiocesium in river systems after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, *J Environ Radioactivity*, (査読有), 139, 390-397.
- 5) Yamamoto, M., Sakaguchi, A., Ochiai, S., Takada, T., Hamataka, K., Murakami, T., Nagao, S. (2014) Isotopic Pu, Am and Cm signatures in environmental samples contaminated by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, *J. Environ. Radioactivity* (査読有), 132, 31-46. [Doi:10.1016/j.jenvrad.2014.01.013](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.01.013)

[学会発表] (計 126 件)

- 1) Fukushi, K., Asahi, K., Sakai, H., Fukiage, T., Inhibitive effects of clay particle organization on Cs desorption: Prediction of intrinsic Cs desorption from the Na-Smectite in cation solutions, Goldschmidt 2016, Pacific Yokohama, Yokohama, Japan, 2016/6/26/
- 2) 田中万也, 高橋嘉夫, 樹皮からの放射性セシウムの吸収とその化学形態, 2016年日本地球化学会年会, 横浜国立大学, 神奈川, 2015/9/17.
- 3) Takahashi, Y., Yoshida, N, Migration of radionuclides in land-surface in Fukushima: Mechanisms of secondary transport, European Winter Conference of Plasma Spectrometry, Sacramento, USA, 2014/6/10.
- 4) Yamamoto, M., Overview of the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident, with amounts and nuclear compositions of the released radionuclides, 5th Pacific Symposium on Radiochemistry, Kanazawa, Ishikawa, Japan, 2013/9/22-9/27.
- 5) 長尾誠也, 金森正樹, 桐島陽, 落合伸哉, 山本政儀, 阿武隈川における放射性セシウムの移行に及ぼす降雨の影響評価, 日本地球惑星科学連合 2013 年対会, 幕張メッセ, 千葉, 2013/6/31.

[図書]: 特に無し。

{産業財産権}: 特に無し。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 政儀 (YAMAMOTO Masayoshi)
金沢大学・名誉教授
研究者番号: 10121295

(2) 研究分担者

坂口 綾 (SAKAGUCHI Aya)
筑波大学・数理物質系・准教授
研究者番号: 00526254

海老原 充 (EBIHARA Mitsuru)
首都大学・理工学研究科・教授
研究者番号: 10152000

高橋 嘉夫 (TAKAHASHI Yoshio)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号: 10134396

(H25年度より研究分担者)

長尾 誠也 (NAGAO Seiya)
金沢大学・環日本海域環境研究センター・教授
研究者番号: 00526254

田中 万也 (TANAKA Kazuya)
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先端基礎研究センター・特任講師
研究者番号: 00526254

福士 圭介 (FUKUSHI Keisuke)
金沢大学・環日本海域環境研究センター・准教授
研究者番号: 90444207
(H28年度より研究分担者)

山崎 信哉 (YAMAZAKI Shinya)
筑波大学・数理物質系・准教授
研究者番号: 70610301
(H28年度より研究分担者)

(3) 連携研究員

静岡 清 (SHIZUMA Kiyoshi)
広島大学・名誉教授
研究者番号: 10127657

遠藤 暁 (ENDO Satoru)
広島大学・工学研究科・教授
研究者番号: 90243609

松崎 浩之 (MATSUZAKI Hiroyuki)
東京大学・総合研究博物館・教授
研究者番号: 60313194