

報告

放射性元素の移行機構の解明と環境浄化
に関する国際共同基礎研究の推進



平成29年（2017年）9月12日

日本学術会議

放射性核種による汚染に係る環境浄化の基礎科学に関する委員会

この報告は、日本学術会議放射性核種による汚染に係る環境浄化の基礎科学に関する委員会の審議結果を取りまとめ公表するものである。

日本学術会議放射性核種による汚染に係る環境浄化の基礎科学に関する委員会

委員長	花木 啓祐	(第三部会員)	東洋大学情報連携学部教授
副委員長	家 泰弘	(連携会員)	日本学術振興会理事
幹事	大貫 敏彦	(特任連携会員)	東京工業大学科学技術創成研究院先導原子力研究所教授
幹事	前川 禎通	(特任連携会員)	日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター長
	南條 正巳	(第二部会員)	東北大学大学院農学研究科教授
	大西 隆	(第三部会員)	豊橋技術科学大学学長、東京大学名誉教授
	今田 高俊	(連携会員)	東京工業大学名誉教授、統計数理研究所客員教授
	甲斐 倫明	(連携会員)	大分県立看護科学大学教授
	巽 和行	(連携会員)	名古屋大学名誉教授、名古屋大学物質科学国際研究センター特任教授
	恩田 裕一	(特任連携会員)	筑波大学生命環境科学研究科教授、アイソトープ環境動態研究センターセンター長
	佐々木隆之	(特任連携会員)	京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻教授
	高橋 嘉夫	(特任連携会員)	東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻教授
	竹下 健二	(特任連携会員)	東京工業大学科学技術創成研究院原子燃料サイクル研究ユニット教授・ユニット長
	中西 友子	(特任連携会員)	東京大学大学院農学生命科学研究科特任教授・東京大学名誉教授

本報告の作成にあたり、以下の職員が事務及び調査を担当した。

事務	石井 康彦	参事官(審議第二担当)(平成29年7月まで)
	糸川 泰一	参事官(審議第二担当)(平成29年7月から)
	松宮 志麻	参事官(審議第二担当)付参事官補佐(平成29年7月まで)
	高橋 和也	参事官(審議第二担当)付参事官補佐(平成29年7月から)
	大橋 睦	参事官(審議第二担当)付専門職付
	大庭 美穂	参事官(審議第二担当)付専門職付
	石尾 航輝	参事官(審議第二担当)付専門職付(平成29年1月から)
調査	漆畑 春彦	上席学術調査員
	堀尾 健太	学術調査員

要 旨

1 背景

地下水、海洋及び地表の放射性元素による汚染は、将来にわたる人類の健康、生活環境及び産業への影響が懸念される重大問題である。放射性元素の汚染による影響から人類を防護するためには、汚染地域から放射性元素の除去等により放射性元素の影響を低減する措置、すなわち環境浄化が必要となる。環境浄化を進めるには放射性元素を除去する方法を開発するだけでなく、汚染地域やその周辺環境における放射性元素の空間的な移行を明らかにすることが必要となる。そのためには、放射性元素の種類や濃度だけでなく、それらの汚染地域における現在の化学状態や将来に渡るその変化に関する知見を得るための研究、すなわち放射性元素の移行機構の解明に向けた基礎研究が不可欠である。

放射性元素の移行機構の解明や浄化手法の確立には、数多くの放射性元素と汚染地域が対象となることから膨大な時間と莫大な費用が必要となるため、一国の努力だけでは完全な解決は望めない。そのため、これまでも国際協力研究が進められてきたが、汚染状況の異なる参加国が自国の問題解決に直接的に関係する基礎研究を優先してきたため、環境浄化問題の組織だった取り組みには至っていない。そこで、環境浄化を達成するための基礎研究課題の抽出と、達成に向けた研究計画の作成を国際協力体制のもとで行い、共通の課題を有する国々の研究者が協力して「放射性元素の移行機構や汚染に係る環境浄化の基礎研究」に取り組むことを可能とする国際共同体の創設が提案されている。放射性元素の移行機構の解明と環境浄化は、放射性元素の係わる現象が複雑で包括的であり、その問題解決のために必要となる研究は個別の分野を対象とするもののみでは不十分で、多分野にまたがる総合科学として研究を進めなければならない。本報告は、以上のような状況のもとで、放射性元素の移行機構や汚染に係る環境浄化の基礎研究に関する国際的な共同体の創設と日本の参画について討議した結果をまとめ、今後の国際共同研究案の具体的検討のための基礎とするものである。

2 放射性元素の移行機構の解明と環境浄化に係わる研究の現状

放射性元素に汚染された土地(以下、「汚染サイト」)やその周辺地域(以下、「汚染地域」)、すなわち核兵器開発施設跡地(例えば、米国ハンフォードの汚染サイト、他)、原子力事故による汚染サイト及び周辺の汚染地域(チェルノブイリ原発事故による汚染地域、福島第一原発の事故による汚染地域)、及び廃止措置を施す原子力施設などでは、汚染物の除染とそれに続く解体及び運搬により放射性元素を取り除く作業が進められてきた。

米国では、1990年以降に処理施設が建設され、地下水を汲み上げて放射性元素を吸着材などで取り除き、処理水を地下水に戻すかタンクに保管するなどの能動的な措置や汚染サイトと河川、湖沼などの間の地中にアクチノイドや核分裂生成核種の吸着材をバリア壁として設置し、地下水を透過させて吸着させるなどの方法が取られてきた。

日本では、福島第一原子力発電所事故に関して、放射性セシウムやヨウ素が広域にわた

って拡散したことを踏まえて広い範囲を迅速に測定できる航空機・自動車や公共交通機関を用いたモニタリング手法が確立された。放射性元素移行の予測においては、放射性セシウムが畑地、河川周辺部などから雨水による浸食により土砂粒子とともに流出し、河川水系を移動・堆積を繰り返しながら、河口に至る挙動を模擬できるようになりつつある。また環境浄化と回復のため、森林の林床を被覆することにより放射性元素の流出拡散を抑制する工法が検討されており、植生基材吹付工法による環境保全が進められている。

一方、放射性元素の移行機構の解明研究としては、米国では汚染サイト土壌や透過バリア中の放射性元素の化学状態を解明する研究が行われており、ウランの鉱物への取り込みや、ウラン及びプルトニウムの鉱物や微生物による濃集機構の研究等が行われている。日本では、放射性元素の移行機構や環境浄化に関する基礎研究が進められている。それらの研究は、アクチノイドならびに核分裂生成核種など多岐にわたる元素を対象としている。土壌中の粘土鉱物、特にアルミノシリケート層状粘土鉱物に特異的に吸着したセシウムの化学状態について、電子顕微鏡によるミクロな分析のほか、計算科学による解明が進んでいる。

3 放射性元素汚染の環境浄化に係わる基礎研究における国際協力の在り方

放射性元素汚染の環境浄化に係わる基礎研究における国際的に共通な課題として、

- 1) 放射性元素の移行予測では、地表水・海水・地下水中に溶解した放射性元素と固相すなわち岩石、土壌、海底砂、微生物などの媒体との相互作用の解明
- 2) 移行モデルでは、移行媒体の空間的な複雑性と時間的な物理的特性変化のモデル化
- 3) 環境浄化と回復では、土壌、特に農地の浄化と回復方法の確立、がある。

このような課題を解決するためには、環境浄化を達成するための基礎研究課題の抽出と計画の立案を行い、アクチノイドなどの取扱いに制限のある元素を最先端機器などにより分析できる研究拠点において、各国の研究機関及び研究者が自国の利益を超えた協力により放射性元素汚染の環境浄化に係わる基礎研究を推進するための国際共同体の体制が必須である。こうした国際協力によって、例えば、セシウムなどの核分裂生成物やアクチノイドについて室内における熱力学的解析などの基礎的な知見を有する日本の研究者が、放射性元素による汚染サイトの試料を取り扱うことのできる分析装置と機器が整備されている米国や欧州などと共同で研究を進めることにより、移行機構の解明に大きく貢献するばかりでなく新規の浄化手法を開発することが期待できる。これらの知見は、福島における環境浄化だけでなく、福島第一原子力発電所の廃炉の促進に貢献する可能性も高い。国外の研究者にとっても、福島における移行や浄化に関連した研究に参加できることは重要である。国内外の汚染サイトなどにおける研究拠点では様々な分野の研究者が一堂に会して、意見交換を行いながら共同で研究を進める貴重な機会をもたらす。このような機会は、各国の若い研究者の研究意欲への刺激になり、各人の研究課題を俯瞰することを可能にする。

環境浄化に係わる基礎研究に関して国際共同体を設立し、各国の研究機関及び研究者が協力して研究を進めることは、環境汚染問題を解決するだけでなく、新規の研究を生み出す可能性を秘めるとともに、研究者、特に若い研究者の育成を促進させると期待できる。

目 次

1	背景	1
2	放射性元素の移行機構の解明と環境浄化に係わる研究の現状	3
(1)	諸外国における研究の現状	3
(2)	我が国における研究の現状	4
①	汚染分布の把握	4
②	放射性元素移行の予測	5
③	浄化手法の開発	5
④	環境浄化と回復	6
3	放射性元素汚染の環境浄化に係わる基礎研究における国際協力の在り方	7
(1)	放射性元素汚染の環境浄化に係わる基礎研究に関する共通課題	7
①	放射性元素の移行予測	7
②	移行予測モデル	8
③	環境浄化と回復	8
(2)	国際的な共同研究の意義と提案	8
①	共同研究の意義	8
(3)	今後の取組	10
①	基礎研究の方向性	10
②	人材育成	12
4	まとめ	14
	<参考文献>	15
	<参考資料> 審議経過	18

1 背景

地下水、海洋及び地表の放射性元素による汚染は、将来にわたる人類の健康、生活環境及び産業への影響の懸念から、非常に関心の高い問題である。放射性元素の汚染による影響から人類を防護するためには、汚染地域からの放射性元素の除去などによる影響の低減措置、すなわち環境浄化が必要となる。一方、放射性元素による影響は、汚染地域からのそれらの漏出及び環境中での移行によりもたらされるため、汚染地域の把握と並んで環境中における放射性元素の移行機構を明らかにすることが環境浄化のために必要である。

放射性元素は、汚染地域から他の地域へ地下水や地表水を介してもたらされるものの、環境中におけるその移行機構については未だ十分には解明されていない。その原因としては、森林、土壌、河川や海洋などの異なる媒体中を数十年以上の時間スケール及び数百 m から数千 km に渡る広範な空間スケールで移行する際、水中の懸濁物や有機物との反応及び固相との相互作用により放射性元素が水溶液中及び固相で化学状態を変える可能性があるためである。環境中の放射性元素の移行を予測するためには、放射性元素の種類及び濃度だけでなくそれらの化学状態に関する長期的な観測及び移行媒体に関する知見が必要となる。このことは、放射性元素の移行機構を理解するためには、それらの汚染地域における放射性元素の現在の化学状態や将来に渡る化学状態の変化に関する化学的、物理的、生物学的及び地質学的な知見を得るための研究、すなわち移行に関する基礎研究が重要となることを示している。さらに環境浄化については、移行に関する基礎的な知見に加えて、広域に汚染した環境を浄化する手法、及び浄化により搬出された汚染物の減容などの処理、処分などの問題が重要である。

放射性元素の移行予測や環境浄化については、これまで汚染環境を抱える国がそれぞれの裁量で行ってきた。数多くの放射性元素と汚染地域が対象となり、それぞれの固有の条件が影響を与えることから、放射性元素の複雑な移行機構や浄化手法の確立には膨大な時間と莫大な費用を要し、一国の努力だけでは完全な解決はできない。また、移行機構が複雑でその対応が多岐にわたるため、各国の横断的な専門家による対策が必要であり、有効である。そのため、これまで多くの国際協力研究が進められてきたが、汚染状況の異なる参加国が自国の課題解決を優先させた基礎研究により貢献してきたため、環境浄化問題の解決には至らなかった。日本国内においても、日本学術会議の提言「復興に向けた長期的な放射能対策のために—学術専門家を交えた省庁横断的な放射能対策の必要性—」（2014年9月19日）[1]の中で、放射性元素の環境中における移行の解明には、様々な分野の学術専門家が参画する長期的で府省横断的な放射能調査・研究体制の必要性が示されている。

2017年4月現在、フランス科学アカデミーやドイツヘルムホルツ協会及び米国パシフィックノースウェスト国立研究所等の支援を受けて、放射性元素の移行機構や汚染に係る環境浄化に関して基礎研究に取り組む国際共同体の創設が提案されている。一機関、一国では負担の大きい放射性元素汚染の浄化という研究対象に対して、環境浄化を達成するための基礎研究課題の抽出と、達成に向けた研究計画の作成を国際的に共同して行い、共通の課題を有する国々の研究者が協力して「放射性元素の移行機構や汚染に係る環境浄化の基礎研究」を推進し、全体として目的を達成させることが目標である。提案者の一人である

フランス、SUBATECH 研究所長の Grambow 博士が国際科学会議 (ICSU) やフランスの科学アカデミーにおいて趣旨説明を行い、基本的な考え方について委員の賛同を得るなど、設立の準備が進んでいる。同時に、同氏は日本にも共同体への参加を要請している。

放射性元素の移行機構の解明と環境浄化に係わる基礎研究は、放射性元素に係わる現象が複雑で包括的であるため、その問題解決のために必要となる研究も、個別の分野に留まらず、多分野にまたがる総合的なものでなければならない。また、本基礎研究は、放射性廃棄物の地層処分における放射性元素の環境動態研究との共通点も多い。本報告は、以上のような状況のもとで、放射性元素の移行機構の解明や汚染に係る環境浄化の基礎研究に関する国際的な共同体の創設と日本の参画について、その可能性と効果を討議し、その結果をまとめたものである。

2 放射性元素の移行機構の解明と環境浄化に係わる研究の現状

(1) 諸外国における研究の現状

放射性元素に汚染された施設やその周辺地域、すなわち核兵器開発施設跡地（例えば、米国ハンフォードの汚染サイト、サバンナリバーの汚染サイト）、原子力事故による汚染サイト及び周辺の汚染地域（チェルノブイリ事故による汚染地域）、及び廃止措置を施す原子力施設などでは、放射性元素の種類や汚染の程度により環境浄化の手法は異なるものの、除染・解体及び運搬により放射性元素を取り除く作業が進められてきた。さらに、環境への影響を予測するため、移行機構の解明研究も行われている。以下、諸外国の中で積極的に環境浄化を行っている米国について経緯と現状を述べる。

米国において浄化への関心が高まったきっかけの一つは、1980年代における米国ハンフォードの核開発サイト内の高レベル廃液タンクからの放射性元素の漏出による地下水汚染である。タンク内の廃液にはセシウム、ストロンチウムのような核分裂生成核種の他にウラン、ネプツニウム及びプルトニウムなどのアクチノイドが含まれており、環境へ漏出した。米国政府は米国内のハンフォードの汚染サイトを含ま核開発サイトなどを調査し107カ所の汚染サイトについて浄化が必要と考え、91カ所について浄化作業を実施した。この間、約15兆ドルを投じてきた。今後、2065年までに23兆ドルを投入して浄化を完了する予定である[2]。

浄化の例として、ハンフォードの汚染サイトでは廃液タンク内の廃液等の化学的特性が不明なことから直接的な浄化は不可能と考え、地下水を介したアクチノイドや核分裂生成核種の環境への漏出を防ぐため、1990年代に処理施設を建設して、地下水をくみ上げて放射性元素を吸着材などで取り除き、処理水を地下水に戻すあるいはタンクに保管する能動的な措置を施してきた。しかしながら、この方法ではポンプアップなどの施設を長期にわたって運転することが不可避で、そのために継続的に資金が必要なことから他の手法に切り替えられている。

2000年代になると、受動的な処理手法が開発され、実行された。汚染サイトと河川、湖沼などとの間に、アクチノイドや核分裂生成元素の吸着材を設置し、地下水を透過させて吸着させることによってバリア壁として機能させる方法である。吸着材の設置方法として、吸着材料を地下水帯水層付近に設けたトレンチに直接導入する方法、薬品などを注入し地下水付近で沈殿物を形成する方法がある。例としては、米国オークリッジの汚染サイトで採用されたゼオライトなどの直接導入によるストロンチウムやセシウムの除去や、米国サバンナリバーの汚染サイトで採用された銀添着材料によるヨウ素の除去などがある。ハンフォードの汚染サイトでは、ストロンチウムを対象としてアパタイトを地下水付近で沈殿させることによってバリア壁を形成する方法が用いられている。

その他、電流を流すことにより汚染土壌を直接ガラス化して処理する方法、植林によるトリチウムの吸い上げを期待した植物浄化（ファイトレメディエーション¹）手法がある。オークリッジの汚染サイトでは、凍土壁を用いた地下水汚染拡大防止策も講じられ、

¹ 汚染サイトの浄化手法の一つ。汚染サイトに植物を植えることにより、土壌中の汚染物質を植物に移行させて、土壌中の汚染物質濃度の低下を図る。植物を回収することにより、汚染サイト外で処理することが可能となる。

1997年から2004年まで稼働した。

このような浄化処理を行う一方で、放射性元素の移行機構の解明研究が、アクチノイド及び核分裂生成核種を対象として米国や欧州及びアジア諸国で行われている。米国においては、上述した環境浄化についての研究としてサイト土壌や透過バリア中の放射性元素の化学状態を解明する研究が行われており、ウランの鉱物への取り込み[3]や、微生物によるウラン及びプルトニウムの濃集機構の解明研究[4][5]等が行われている。欧州においては、チェルノブイリ起源の放射性セシウムや放射性ストロンチウムの移行機構を解明する研究[6]が進められている。さらに、アクチノイドについても溶解度に関する研究[7]、鉱物への吸着[8]、岩盤層における移行機構の解明研究[9]や、微生物による化学状態変化[10]に関する研究が進められている。

(2) 我が国における研究の現状

我が国の環境浄化についての研究・開発は、主に福島第一原子力発電所事故（以下、福島原発事故）に関連して行われており、放射性元素の移行機構の解明研究は大学、公的な研究所や企業の研究所において進められている[11][12]。それらの研究では、アクチノイドから核分裂生成核種等の多岐にわたる元素を対象としている。ここでは、環境浄化及び放射性元素の移行機構の解明について、福島原発事故に係わる研究事例を紹介する。

① 汚染分布の把握

福島の事故では放射性セシウムやヨウ素が広域にわたって拡散した。このため、広い範囲を迅速に測定できる航空機・自動車や公共交通機関を用いたモニタリングシステムが確立された[13]。有人ヘリコプターによるモニタリングは、広域の分布を測定することが可能であるが、飛行高度が300m程度であり地表付近の詳細な分布測定は難しい。一方、無人ヘリコプターによるモニタリングでは、より低高度での詳細分布測定が可能であるものの、測定可能な範囲は数kmまでであり広域のモニタリングは困難である。有人、無人ヘリコプターでカバーする領域の中間範囲を遠隔でモニタリングできる小型無人航空機の開発が進められている。マイクロ無人航空機(ドローン)は市街地や森林内部などのさらに狭い領域を対象とした調査に有効であると考えられており、飛行の安全確保を第一に開発が進められている。

また、線量率測定器を車両に搭載して空間線量率を測定すると同時に、全地球無線測位システムにより位置及び時間情報を自動的に記録するシステムが京都大学を中心に開発された。同システムは福島県内を走行する路線バス等に搭載され、走行サーベイにより得られるデータはインターネット経由で共有され、地図上に可視化されるなどの自動化が図られている。これによって、地域住民や自治体に対し居住地域における線量情報をタイムリーに提供することが可能になると共に、放射性物質の移行モデルの精緻化に必要なデータの提供、除染活動の見える化及びホットスポットの発見支援に貢献することが期待されている[14]。

② 放射性元素移行の予測

福島事故の影響地域の地表に降下した放射性セシウムは、ごく一部が地下水中で検出されたが[15]、ほとんどの部分が地表近くに留まっている。しかし最近の研究によれば、畑地、河川周辺部等から雨水浸食により放射性セシウムはが土砂粒子とともに流出し、河川水系を移動・堆積を繰り返しながら、河口に至ることが明らかになっており、粒子態の放射性セシウムの挙動はシミュレーションできるようになりつつある。さらに、周辺土壌から河川水系への粒子態放射性セシウムの移動に伴う濃度分布の変化等、得られた計算結果を調査結果と比較することにより、シミュレーションの適用性が確かめられている。例えば、福島県内を流れる請戸川の大柿ダム湖の入り口における平水時及び高水時の河川水中の放射性セシウム濃度に基づき、高水時における出口での放射性セシウム吸着土壌粒子の流出挙動を予測した結果、調査結果と概ね一致することが報告されている[16]。

土壌中の粘土鉱物、特にアルミノシリケート層状粘土鉱物²へ放射性セシウムは特異的に吸着し、土壌間隙水中に溶出し難くなっている。この化学状態については、電子顕微鏡によるミクロな分析のほか、計算科学により解明が進んでいる[17][18]。

③ 浄化手法の開発

福島における浄化手法の開発としては、環境中に降下した放射性セシウムを対象としたものと、福島第一原子力発電所敷地から漏出した放射性セシウムや放射性ストロンチウムの浄化を目的とした開発がある。汚染土壌を対象とした放射性セシウムの分離は、放射性セシウムを強く吸着する層状粘土鉱物の一つであるバーミキュライトを対象としている。

乾式処理法として低圧・無水反応による加熱処理法が開発された。セシウムを吸着したバーミキュライトと NaCl-CaCl₂ を混合した試料を低圧条件で加熱したところ、700℃でバーミキュライトに吸着したほとんどのセシウムが脱離した[19]。湿式法としては、2価陽イオンである Mg イオンによりバーミキュライトに吸着したセシウムの脱離法が開発された。250℃の熱水処理によりほぼ 100%のセシウムがバーミキュライトから脱離した[20]。X線回折パターンから Mg イオンによるセシウムの脱離により層の間隔が変化することも確認されている。本方法の応用として、海水を用いることによるセシウムの脱離が検討され、経済的な脱離手法が提案されている[21]。

ストロンチウムの浄化については、海水からのストロンチウムの回収法が開発されている。海水は様々な陽イオンを含みイオン強度が高いため、ゼオライトなどの吸着材ではストロンチウムを有効に回収できない。海水中に生息する尿素分解菌を用いるバイオテクノロジー手法により、炭酸カルシウムの形成過程でストロンチウムを共沈

² シリカの四面体シート及びアルミナの八面体シートを基本としてそれぞれのシートが層状に重なる構造となる粘土鉱物。シリカシートとアルミナシートが1層ずつ重なる1：1構造、シリカシートがアルミナシートの両側から挟む構造をした2：1構造を取る粘土鉱物がある。放射性セシウムを特異的に吸着するのは、2：1構造の粘土鉱物で、バーミキュライト、スメクタイトなどがある。

させる技術の開発が提案されている。幾つかの候補菌を探索し、ストロンチウムを1/10以下の濃度に減少させることに成功している[22]。

④ 環境浄化と回復

環境浄化の観点から未解決な対象としては、森林、河川・ため池等がある。森林における放射性セシウムは、森林内に留まり外に漏出する割合は小さいことが分かってきた[14]。森林では、樹根が土中に張り巡らされ、落葉等が覆っていることから、雨水による土壌の流出が抑えられるためである。つまり、放射線量の低減のための落葉等の除去は有効と考えられるものの、広範囲にわたる除去は、雨水による土壌流出を抑制する落葉等の機能を損なうこととなり、放射性セシウムの流出率の大幅な増加が懸念される。このことから、例えば林床を被覆することにより放射性物質の流出拡散を抑制する工法が検討されている。林床を被覆する工法として、植生マット工、植生基材吹付工、木材チップ散布工について線量低減効果が調べられている[13]。

ため池では放射性セシウムを吸着した土壌が底部に堆積しており、大雨などにより底土がため池の下流に流出する恐れがある。この対策として、放射性セシウム濃度が高い細粒土を分別回収して粗粒部分をため池に戻す方法や、放射性セシウムの拡散を抑制する方法が検討されている。

3 放射性元素汚染の環境浄化に係わる基礎研究における国際協力の在り方

(1) 放射性元素汚染の環境浄化に係わる基礎研究に関する共通課題

放射性元素の移行機構や汚染に係る環境浄化の基礎研究の国際的に共通な課題を、放射性元素の移行予測、移行モデル、環境浄化と回復に分けて述べる。

① 放射性元素の移行予測

放射性元素の移行を予測するためには、地表水・海水・地下水中に溶解した放射性元素と固相すなわち岩石、土壌、海底砂、微生物などの媒体との相互作用を解明する必要がある。相互作用により、放射性元素の化学状態が変化するためである。長期的な予測を可能とするためには時間、空間スケールでの化学状態変化を明らかにする必要がある。これまで多くの研究者が放射性元素と鉱物などの無機質な構成物との相互作用について研究してきた。例えば、鉄を含む鉱物との相互作用による6価ウランの4価ウランへの還元などのようなアクチノイドの酸化数の変化について多くの研究がなされている。また、地下水中の有機物懸濁物質であるフミン酸やフルボ酸等と放射性元素の相互作用、及び地表水・海水中の粒子態放射性元素の挙動については、多くの研究がなされてきたが、未だ完全には解明されていない。さらに近年、地下環境や海水環境においても地表と同程度の微生物が生息することが明らかになり、放射性元素と地下環境や海水環境中の鉄還元菌、硫酸還元菌、マンガン酸化菌などの微生物との相互作用について研究が進められている。これら微生物はウランなどのアクチノイドの酸化状態を変化させることが知られている。また、糸状菌はその子実体中に放射性セシウムを濃集することが知られている。しかしながら、酸化還元を含むアクチノイドやセシウムと微生物との相互作用による化学状態の変化プロセス・機構については不明な点が多い。

放射性元素の化学状態の解明には、状態分析手法の適用が不可欠である。環境中の放射性元素の濃度は非常に低いため、レーザー光を用いた分光分析や、放射光を用いる分析法など、希薄濃度元素を分析する手法の開発が進められてきた。これらの手法は、アクチノイドをはじめとする種々の放射性元素のみならず、安定元素の環境中移行解析にも応用されており、環境科学研究の発展に寄与している。特に実際の環境試料中の放射性元素の化学状態分析では、岩石や海底土が様々な元素を含む鉱物や金属酸化物中に不均質に存在する放射性元素を分析するため、他の元素の妨害を受けにくい多様な解析が必要になってくる。すなわち、放射光を用いる分析法やレーザー分光などと、微細な領域を分析できる電子顕微鏡や加速器で生成される中性子線による分析、可視化技術及び計算科学を組み合わせる必要がある。

放射性元素を直接取り扱う研究施設については、放射線防護や核物質防護のために、安定元素の取り扱い施設とは異なる仕様が必要である。そのため、先端的な分析機器を備え、試料中の放射性元素の分析を一つの施設内で完結できる施設の充実も必要である。

② 移行予測モデル

放射性元素の移行の問題として、空間的及び時間的な課題がある。空間的な課題としては、様々な性質の異なる層を介した移行を予測するモデルが必要となる。それらの層は空間的に一様ではなく、複数の層が存在している。それぞれの層における移行モデルの開発は可能であるが、層の境界面において不整合層が形成されている場合に適切な移行予測を行えるモデルの開発が重要となる。

時間的な問題としては、時間の経過により移行経路の土壌などの媒体の物理的特性が変化することが挙げられる。例えば、人間の地下環境利用に伴う土壌の掘削などが引き起こす土壌の攪乱などで媒体の性質が変化することを予測する方法は確立されていない。

福島の河川などの表層水や海水中の放射性元素移行では、土壌粒子に付着した移行、すなわち粒子態物質の移動を予測するモデルの開発、及び河川の河口と海水域を繋ぐ汽水域における移行予測を行う方法の確立が課題である。

③ 環境浄化と回復

環境浄化と回復に関する課題としては、土壌、特に農地の浄化と回復に関する研究の促進が重要である。現在は、農地の表層土壌の除去が主な方法であるが、農耕土壌の醸成には時間を要することから、復興後における農地利用を見据えた浄化法の確立が課題である。

浄化対象物中の放射性元素の化学状態の解明も重要である。化学状態の解明は、汚染した土壌あるいは水の処理システム開発の基礎になる。例えば、放射性元素が粒子状の場合には、汚染水からの汚染物質の沈殿などによる除去が可能である。さらに、陽イオン態や陰イオン態であれば、吸着による除去が可能である。

また、人間が直接アクセスできない領域の汚染の状況把握も環境浄化には重要な課題である。例えば、原子炉周辺の汚染状況の計測を非接触あるいは遠隔操作により測定できる技術の開発も必要である。

回収した汚染物の処理法についても課題がある。ガラスやセメント固化体に替わる新規固化体の作製のための基礎研究も重要である。特に、移動性の高いトリチウム、セシウム、ストロンチウムやテクネチウム、ヨウ素及び炭素-14 を長期間閉じ込めることが可能な固化体の開発は重要課題である。一方、固化体の長期的な劣化機構は未だ完全には解明されていない。さらに、放射線影響によるガスの発生機構、有機態放射性元素の化学状態変化についての知見も不足している。

(2) 国際的な共同研究の意義と提案

① 共同研究の意義

3 (1) で述べたように環境浄化に関する基礎研究では、多くの課題が残されている。これらをすべて一国の研究が解決するのは困難である。このような問題を解決することを目的として、これまでも国際協力がなされてきた。これまでの国際協力では、汚

染状況の異なる参加国が自国の問題解決に直接的に関係する基礎研究を優先してきたため、環境浄化問題の組織だった解決には至らなかった。そこで、環境浄化を達成するための基礎研究課題の抽出と、達成に向けた研究計画の作成を国際協力体制のもとで行い、共通の課題を有する国々の研究者が自国の利益を超えて協力して「放射性元素の移行機構や汚染に係る環境浄化の基礎研究」に取り組むことを可能とする国際共同体の設立が必須である。国際共同体のもと、課題を解決するために各国の研究機関及び研究者に適切な研究テーマを割り振り、アクチノイドなどの取扱いに制限のある元素を最先端機器などにより分析できる研究拠点において、各国の研究機関及び研究者と協力して放射性元素汚染の環境浄化に係わる基礎研究を推進する体制とすることが肝要である。このような体制で参加機関及び研究者が進める国際協力研究には以下のような意義がある。

放射性元素の移行予測について、特に放射性元素の化学状態に関しては、各国の研究者が様々な核種について解明を進めている。ただ、化学状態を解析する対象核種については各国で大きな違いがある。日本では、セシウムなどの核分裂生成物やアクチノイドについて多くの知見を有する。一方、米国ではアクチノイド等の放射性元素を取り扱える分析装置、機器があるため、ウラン及び超ウラン元素に関する知見が豊富である。欧州でもウラン及び超ウラン元素の化学状態の解析を行っている。このことは、後述するアクチノイドの化学状態の解明のための装置、機器を米国や欧州で使用できる可能性があり、国内の研究者にとっては研究の幅が広がる。化学状態解析には、量子化学計算を用いることも有効である。量子化学計算の分野では、特にアクチノイドに関する計算は米国やドイツの方が進んでおり、協力を行うことによりアクチノイドの化学的性質の理解の進捗が期待できる。

核種移行モデルについては、河川水などを介する地表水移行については、福島における解析により多くの知見を得ていることから国内の研究者に強みがある。さらに、セシウムの粒子態移行についても多くの知見を得ている。一方、深地層から表層に至る核種の移行に関しては、性能評価あるいは安全評価を目指したモデルに関しては世界的に同等のレベルであると考えられる。放射性元素の移行予測は地層の複雑性に依存することから、亀裂がほとんどない岩盤を対象とするヨーロッパで開発されているモデルを、亀裂が存在する日本の岩盤に直接適用することは難しい。その中でも比較的地質環境の類似した岩盤層が対象となる場合、国際的なモデルの正当性評価のための、元素移行試験を共同で行うことは意義がある。

日本には大型放射光施設があり、X線吸収端微細構造分析³やX線回折などの分析が可能である。しかしながら、ウランなどのアクチノイドについては核燃料が取扱える許認可施設が必要であるため、使用の制限が大きい。特にプルトニウムに関しては測定が可能な放射光施設はない。そのため、大型放射光施設である SPring-8 や大強度陽子加速器施設 (JPARC) ではアクチノイドを取り扱える施設の建設・充実を目指して

³ 元素の X 線吸収端近傍における振動を解析することにより、化学状態を分析する手法。

いるものの、十分とは言えない。一方、海外においては米国やフランスの放射光施設では密封性の担保などの制限はあるもののプルトニウムの分析が可能である。さらに、ハンフォードに設置されている環境分子科学研究施設は環境浄化を含む環境科学や生物科学に関わる分子レベルでの分析装置を米国エネルギー省の予算で整備している。各国の強みが活かされる国際的な共同体に参画することにより、各研究者はこのような装置を使った研究を継続的に行え、国内における研究と並行して進められることが、国際協力の利点である。

国内の研究者にとっては、環境中において放射性セシウム及びヨウ素などの核分裂生成核種の取り扱いが可能でも、実環境試料に対してアクチノイドを直接分析することはほとんど不可能である。一方、外国、特に米国においてはアクチノイドに汚染したサイトが存在する。日本の研究者がこのような汚染サイトにおいてアクチノイドなどの放射性元素の移行や浄化を直接研究することが可能となれば、放射性元素の環境動態、浄化や廃炉に関する研究に進展が期待され、大きな利点となる。

国外の研究者にとっても、福島における移行や浄化に関連した研究に参加できることは、実際の環境汚染データを解析できる観点から重要である。さらに、海外からの研究者の参画は福島における復興を加速する可能性が高い。例えば、福島大学に設立された環境放射能研究所や日本原子力研究機構の廃炉国際共同研究センターでは、国内外の研究者が協力して環境動態、浄化や廃炉に関する研究を展開している。これらの研究を包括的に進める共同体を組織することにより更なる進展が期待できる。放射性元素の環境中移行の解明研究分野では、日本の研究者はアジアの諸国の中ではトップレベルである。この事実は、日本が共同体においてアジア諸国の研究機関の中心となって基礎研究を進めることにより当該分野の進展に貢献できる。また、国際協力による福島における研究開発促進を目指した「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」として、日仏、日英及び日米協力研究事業が現在展開されている。このような国際協力を進める研究所、研究センター及びプログラムを発展させることによる共同体への参画の可能性もある。

(3) 今後の取組

① 基礎研究の方向性

放射性元素の化学状態に関する基礎研究は、長期間における放射核種の移行の予測において重要なばかりでなく、除染、すなわち分離や回収の観点からも解明が必須のものである。化学状態変化は、固液界面、液液界面、液気界面などの界面における反応により生じる。したがって、放射性元素の界面における配位化学、官能基との結合のような化学的特性、及び質量、価数、誘電性や磁性応答のような物理的特性が対象となる。界面の反応場は 10nm 程度の領域であり、溶液中の反応場である 100 μ m と比べると遙かに小さい。放射性元素の化学状態変化を明らかにするためには、分子レベルでの反応を理解する必要がある。現在は、多くの研究が液相に溶解した放射性元素の固相への吸着挙動を捉えることを目指している。一方、長期的な移行機構を解明す

る上では、固相の溶解・沈殿・結晶化とそれに伴う放射性元素の化学状態変化を明らかにする必要がある。溶解・沈殿・結晶化のプロセスは非常に遅い反応であることから、平衡論だけでなく速度論的な取り組みが必要となる。

分離や回収のための新規材料の開発においては、効率的な分離・回収を原子レベルで制御する構想に基づく設計を行うべきである。例えば、金属有機構造体などは、金属と有機リガンドが相互作用することで、活性炭やゼオライトなどをはるかに超える比表面積を持つ多孔質の配位ネットワーク構造を持ち、3次元マイクロポーラス材であることから、特定の放射性元素を効率よく回収することが可能となる。

ガラスやセメント固化体に替わる新規固化体の作製のための基礎研究も重要である。固化体において、ナノレベルの構造の特性から特異的に揮発性の核種、セシウム-137 やテクネチウム-99 も取り込み、長期的に安定な固化体の開発も可能であろう。上述したようにナノ技術の適用による新規の吸着・分離材料の開発、特に分子構造中に選択的な取り込み機能を有する高度選択性物質の開発が求められている。連続処理に替わる一度の操作で複数の放射性物質を分離・除去可能な物質の開発も可能である。

移行予測モデルに関しては、空間的な不均質性を克服する必要がある。現在のモデルでは地球化学的、生物学的及び水理学的知見を反映させることが可能であるが、放射性元素の移行の予測を完全には行えていない。その原因としては、複数の不均質媒体の中を放射性元素が移行していることを反映できないことにある。媒体の不均質性は、地下水流に影響を及ぼすだけでなく、鉱物組成の不均質性や微生物の生態系とその活性にも影響を与える。そのため、界面における反応をモデルにより予測することは依然として困難であり、このような不均質性の克服を目指すことが肝要である。そのためには、不均質性の影響を観測などにより明らかにすることや、移行経路や不均質層のモデル化に取り組む必要がある。このようなモデル化には、放射性元素の移行に関するより多くの情報が必要であるため、国内における情報に国外で入手する情報を加えること、すなわち国際協力が重要となる。

放射性元素の移行においては、地下水中で移行性が高いコロイドの挙動に関する研究も重要である。米国やロシアにおいて、放射性元素が汚染源から非常に速い速度で環境中に移行することが報告されている[24][25]。これまでの研究では、移行性の高いコロイドとして、環境の観察によりプルトニウム含有コロイドの発見[24][25]、地下水の分析によるコロイド性元素の同定[26]、地下水中腐植物質と放射性元素の相互作用に関する研究が行われてきた。しかしながら、コロイドの移動挙動については、地下水流速とほぼ同じ速度で移行する部分があることを示す程度で、化学的な追求は非常に少ない。分子レベルでの理解とモデル構築が重要である。特に、コロイド-コロイド相互作用に関する研究は分光学的な特性評価と計算化学によるモデル化が欠かせない。最近、DLVO 理論⁴による予測とは異なり高塩濃度溶液中でのコロイドが凝集せずに安定に存在することが報告された[27][28]。現象を理解しモデルを構築するた

⁴ 粒子間に働く相互作用は、粒子間の電氣的反発力と van der Waals 引力の和によって表される、という理論である。

めには、分子レベルでの現象理解が欠かせない。

さらに、このような現象は、新たな研究領域を開拓するものである。これまでの環境浄化や廃棄物処分に係わる研究は、問題解決型であった。すなわち、環境浄化などの問題に対して既存技術を適用することが主であった。しかしながら、コロイド態放射性元素の移行の発見に始まる、移行性の高い放射性元素の化学状態に関する研究から、コロイド相互作用について新しい現象が見つかりしている。このように、環境浄化や移行機構に関する基礎研究は、新たな分野を開拓する可能性を秘めている。分子レベルでの理解を深めるための分析装置の進歩も大きく、放射光施設などの大型施設を用いた分析により、分子レベルでのより深い理解が可能となった今、環境浄化に係わる基礎研究を進めることは、新たな研究領域を生み出す可能性が高い。

放射性核種の種類の観点から見ると、米国や欧州においては、放射性セシウム以外の核分裂生成核種やウラン、プルトニウムなどが対象であり、福島的环境汚染は主に放射性セシウムによるものである。しかし、将来、福島第一原子力発電所の廃炉事業を行う際には、燃料デブリに含まれるウラン、プルトニウムの環境中における移行機構の知見が必要となることから、これらの研究成果は、その基礎として重要となるであろう。

② 人材育成

環境浄化に係わる基礎研究に関して国際的な共同研究をすすめることは、人材育成においても大きな貢献をする。これまで、アクチノイドなどの環境中の挙動を解明する研究は、地層処分の安全評価に関連して行われてきた。この場合、地下水シナリオという仮想世界における反応に関する研究であった。そのため、得られた知見に関しても、放射性元素の漏出がほとんど起こらないという前提で開始されていることから、インパクトも小さかった。一方、環境浄化については、基礎研究の知見が現実に存在する汚染地域の浄化に直接に役立つ可能性が高いことから、社会的にもインパクトの高い成果となる。このような研究開発に博士研究員や博士課程の学生などの若い研究者が関与することは、彼らの成果が直接的に環境浄化に貢献することを実感できるために、大きな成長を促す可能性が高い。さらに、彼らが環境浄化の新手法を開発することにより、新たな知的財産を生み出すことになり、国際共同研究の中にあっても、知的財産の確保が重要となってくる。

さらに、アクチノイドなどの取扱いに制限のある元素を研究するためには、拠点間の移動も制限が大きいことから、アクチノイドなどを最先端機器などにより分析できる、国内外において幾つかの拠点の形成が不可欠となる。拠点においては、環境条件などを揃える必要があることから同じ時期に試料採取を行うため、アクチノイドの研究者は勿論のこと、様々な分野の研究者が一堂に会して、議論を行いながら共同で研究を進める貴重な機会をもたらす。このような機会は、若い研究者の研究意欲への刺激になるばかりでなく、各人の研究課題に関して俯瞰することを可能にする。この結果、研究者は、研究に対して多角的な視点から考えることができ、アクチノイドに関

する研究の幅広い分野への展開が期待できる。

このように、国際的な共同基礎研究を進めることにより、研究者、特に若い研究者の育成を促進させることが期待できる。

4 まとめ

放射性元素の移行機構の解明と環境浄化に係わる基礎研究は、福島や諸外国における放射性元素による汚染が問題となる地域の環境浄化・回復に貢献するために進めることが基本である。しかしながら、放射性元素の移行機構及び環境浄化に係わる現象が複雑で包括的であり、問題解決のために必要となる研究は一分野ではなく多分野にまたがり負担も大きい。したがって、一機関、一国では負担の大きい放射性元素汚染の浄化を達成するために、各国が持つ強みを生かしつつ、移行や浄化に係わる基礎研究の研究をそれぞれに割り振り、共通の課題を有する国々の研究者が協力して、全体として重要かつ普遍的な研究成果を得ることは有効な方法である。

各国の協力による効果の例としては、セシウムなどの核分裂生成物質やアクチノイド及びランタノイドについて多くの知見を有する日本の研究者が、アクチノイドの分析装置、機器が整備されている米国、欧州などで研究を進めることにより研究の幅を広げられることが期待できる。これらの知見は、福島における環境浄化だけでなく、福島第一原子力発電所の廃炉の促進に貢献する可能性も高い。さらに、これまで問題解決型であった移行や浄化に係わる基礎研究が、コロイド態放射性元素の移行に関する研究からコロイドの相互作用に係わる新しい現象の発見に繋がっている。また、化学状態の分子レベルでの理解を深めるための分析装置の進歩も大きく、放射光施設などの大型施設を用いた分析により、放射性元素のみならず安定元素の化学状態について分子レベルでのより深い理解が可能となった今、環境浄化に係わる基礎研究を進めることは、新たな研究領域を生み出す可能性が高い。また、アクチノイドなどの取扱いに制限のある元素を研究するためには、幾つかの拠点の形成が不可欠であり、様々な分野の研究者が共同で議論をすることが人材育成につながる。

今後は、本報告において必要性を示した国際共同研究を実現し、持続的に運営するための国際的な枠組み、規模、参加国、資金調達の方法などを、具体化に向けて検討していく必要がある。

<参考文献>

- [1] 日本学術会議 東日本大震災対策委員会 放射能対策分科会、提言「復興に向けた長期的な放射能対策のために—学術専門家を交えた省庁横断的な放射能対策の必要性—」、2014年9月19日。
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-t140919.pdf>
- [2] Regalbuto, M. C., 2016, “Cooperation & collaboration”, 1st International Forum on Decommissioning of Fukushima Daiichi NPP, April 10, 2016,
http://ndf-forum.com/1st/common/data/pdf/presentation/en/1-2_Regalbuto.pdf
- [3] Ma, R., Zheng, C., Liu, C., Greskowiak, J., Prommer, H., Zachara, J.M., 2014, “Assessment of controlling processes for field-scale uranium reactive transport under highly transient flow conditions.” *Water Resources Research* 50, 1006-1024.
- [4] Marshall, M. J., Beliaev, A. S., Dohnalkova, A., Kennedy, D.W., Shi, L., Wang, Z., Boyanov, M. I., Lai, B., Kemner, K.M., Mclean, J.S., Reed, S.B., Culley, D.E., Bailey, V.L., Simonson, C.J., Saffarini, D., Romine, M.F., Zachara, J.M., Fredrickson, J.K., 2006, “c-Type cytochrome-dependent formation of U(IV) nanoparticles by *Shewanella oneidensis*.” *PloS Biology*, 4, 1324-1333.
- [5] Francis, A. J., Dodge, C. J., Ohnuki, T., 2007, “Microbial transformations of plutonium” *J. Nucl. Radiochem. Sci.*, 8, 121-126.
- [6] Pourcelot, L., Louvat, D., Gauthier-Lafaye, F., Stille, P., 2003, “Formation of radioactivity enriched soils in mountain areas” *J. Environ. Radioact.*, 68, 215-233.
- [7] Hummel, W., Anderegg, G., Puigdomenech, I., Rao, L., Tochiyama, O., 2005, “Chemical thermodynamics of compounds, complexes of U, Np, Pu, Am, Tc, Se, Ni and Zr with selected, organic ligands” *Chemical Thermodynamics Series*, NEA, 9.
<https://www.oecd-nea.org/dbtdb/pubs/vol9-organic-ligands.pdf>
- [8] Geckeis, H., Lützenkirchen, J., Polly, R., Rabung, T., Schmidt, M., 2013, “Mineral-water interface reactions of actinides” *Chem. Rev.* 113, 1016-1062.
- [9] Nagra; BGR; GSF: 1985, “Grimsel Test Site. Overview and test programs” *Nagra Technical Report NTB 85-46*. Nagra, Baden.
- [10] Kimber, R.L., Boothman, C., Purdie, P., Livens, F.R., Lloyd, J.R. 2012, “Biogeochemical behaviour of plutonium during anoxic biostimulation of contaminated sediments” *Mineralogical Magazine*, 76, 567-578.
- [11] Nakanishi, T. M., Tanoi, K. ed. 2013, “Agricultural implications of Fukushima nuclear accident” Springer.
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-4-431-54328-2/page/1>
- [12] Nakanishi, T. M., Tanoi, K. ed. 2016, “Agricultural implications of Fukushima

nuclear accident. The first three years” Springer.

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-4-431-55828-6>

- [13] 宮原要、飯島和毅、斎藤公明、2015, “放射性物質による事故由来汚染物の対策技術の現状 3. 福島第一原子力発電所事故後の環境回復への取り組みと環境回復技術” 地盤工学会誌、63、 62-69.
- [14] Tanigaki, M., Okumura, R., Takamiya, K., Sato, N., Yoshino, H., Yoshinaga, H., Kobayashi, Y., Uehara, A., Yamana, H., 2015, “Development of KURAMA-II and its operation in Fukushima” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 781, 57-64.
- [15] Iwagami, S., Tsujimura, M., Onda, Y., Nishino, M., Konuma, R., Abe, Y., Hada, M., Pun, I., Sakaguchi, A., Kondo, H., Yamamoto, M., Miyata, Y., Igarashi, Y., 2017, “Temporal changes in dissolved ^{137}Cs concentrations in groundwater and stream water in Fukushima after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident” J. Environ. Radioact., 166, 458-465.
- [16] Kurikami, H., Kitamura, A., Yokuda, S., Onishi, Y., 2014, “Sediment and ^{137}Cs behaviors in the Ogaki dam reservoir during a heavy rainfall event” J. Environ. Radioact., 137, 10-17.
- [17] 奥村 雅彦、中村 博樹、町田 昌彦、2014, “粘土鉱物へのセシウム吸着機構解明(2) 第一原理計算による原子・分子レベルの吸着挙動解析”, アトモス : 日本原子力学会誌、56、 372-377.
- [18] Mukai, H., Motai. S., Yaita, T., Kogure, T., 2016, “Identification of the actual cesium-adsorbing materials in the contaminated Fukushima soil” Appl. Clay Sci., 121-122, 188-193.
- [19] Shimoyama, I., Hirao, N., Baba, Y., Izumi, T., Okamoto, Y., Yaita, T., Suzuki, S., 2014, “Low-pressure sublimation method for cesium decontamination of clay minerals” Clay science 18, 71-77.
- [20] Yin, X., Takahashi, H., Inaba, Y., Takeshita, K., 2016, “Desorption of cesium ions from vermiculite with sea water by hydrothermal process” Chemistry letters, 45, 256-258.
- [21] Yin, X., Wang, X., Wu, H., Ohnuki, T., Takeshita, K., 2017, “Enhanced desorption of cesium from collapsed interlayer regions in vermiculite by hydrothermal treatment with divalent cations” J. Hazardous Materials, 326, 47-53.
- [22] Ohnuki, T., Kozai, N., Sakamoto, F., Saito, T., Yu, Q., Yamashita, M., Horiike, T., Utsunomiya, S., 2016, “Removal of radioactive strontium from sea water by biogenic calcium carbonates” Goldschmidt conference Abstract, 2352. <https://goldschmidt.info/2016/uploads/abstracts/finalPDFs/2352.pdf>
- [23] Iwagami, S., Onda, Y., Tsujimura, M., Abe, Y., 2017, “Contribution of

- radioactive ^{137}Cs discharge by suspended sediment, coarse organic matter, and dissolved fraction from a headwater catchment in Fukushima after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident” *J. Environ. Radioact.*, 166, 466 -474.
- [24] Kersting, A. B., Efur, D.W., Finnegan, D.L., Rokop, D.J., Smith, D.K., Thompson, J.L., 1999, “Migration of plutonium in ground water at the Nevada test site.” *Nature*, 397, 56-59.
- [25] Novikov, A.P., Kalmykov, S.N., Utsunomiya, S., Ewing, R.C., Horreard, F., Merkulov, A., Clark, S.B., Tkachev, V.V., Myasoedov. B.F., 2006, “Colloid transport of plutonium in the far-field of the Mayak production association, Russia” *Science* 314, 638-641.
- [26] Kozai, N., Ohnuki, T., Iwatsuki, T., 2013, “Characterization of saline groundwater at Horonobe, Hokkaido, Japan by SEC-UV-ICP-MS: Speciation of uranium and iodine” *Water Research*, 47, 1570-1584.
- [27] Huang A.Y., Berg. J.C., 2006, “High-salt stabilization of laponite clay particles” *J. Colloid and Interface Science*, 296, 159-164.
- [28] Manciu, M., Ruckenstein, E., 2004, “The polarization model for hydration/double layer interactions: The role of the electrolyte ions” *Advances in Colloid and Interface Science*, 112, 109-128.

＜参考資料＞審議経過

平成 28 年

- 11 月 17 日 放射性核種による汚染に係る環境浄化の基礎科学に関する委員会(第 1 回)
設置趣旨の確認、役員を選出、国際的な動向、今後の議論の進め方について

平成 29 年

- 1 月 19 日 放射性核種による汚染に係る環境浄化の基礎科学に関する委員会(第 2 回)
研究課題について、今後の議論の進め方について
- 3 月 3 日 放射性核種による汚染に係る環境浄化の基礎科学に関する委員会(第 3 回)
意思の表出について
- 5 月 8 日 放射性核種による汚染に係る環境浄化の基礎科学に関する委員会(第 4 回)
意思の表出について承認
- 8 月 17 日 日本学術会議幹事会(第 250 回)
報告「放射性元素の移行機構の解明と環境浄化に関する国際共同基礎研究の推進」について承認