

(案)

提言

放射性核種汚染の環境浄化に関する 国際共同基礎研究の推進



平成29年（2017年）〇月〇日

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

この提言は、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理事・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

本提言の作成にあたり、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)
	松宮 志麻	参事官 (審議第二担当) 付参事官補佐
	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

114

1 作成の背景

[illegible]

2 現状及び問題点

[illegible]

3 提言の内容

(1) ○○○○○

[illegible]

(2) ○○○○○

[illegible]

(3) ○○○○○

[illegible]

目 次

1	背景.....	1
2	放射性核種による汚染に係る環境浄化と基礎科学.....	3
	(1) 環境浄化の現状.....	3
	(2) 我が国における基礎研究事例.....	3
	① 汚染分布の把握.....	3
	② 放射性核種移行の予測.....	4
	③ 浄化手法の開発.....	4
	④ 環境浄化と回復.....	5
3	基礎科学における国際協力の在り方.....	6
	(1) 基礎科学に関する共通課題.....	6
	① 放射性核種の挙動予測.....	6
	② 移行予測モデル.....	6
	③ 環境浄化と回復.....	7
	(2) 国際的な共同研究の意義と提案.....	7
	① 共同研究の意義.....	7
	(3) 今後の取組.....	8
	① 基礎研究の方向性.....	8
	② 人材育成.....	10
4	まとめ.....	10
	<参考文献>.....	12
	<参考資料 1> 審議経過.....	14

1 背景

地下水、海洋及び地表の放射性核種による汚染は、現在及び次世代の人類の健康への影響の懸念から、非常に関心の高い問題である。放射性核種による健康影響を除くためには、汚染地域から放射性核種を除去する、すなわち環境浄化が必要となる。一方、放射性核種による健康影響は汚染地域から放射性核種の漏出及び環境中移行によりもたらされるため、放射性核種の汚染の程度及び汚染地区と移行経路の環境条件により、放射性核種の健康影響の程度は異なる。したがって、環境浄化を行うためには汚染地域や影響を及ぼす環境中における放射性核種の移行や化学状態を明らかにする必要がある。

放射性核種は汚染地域から生態系へ地下水や地表水を介してもたらされるものの、放射性核種の環境中における移行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、一部の放射性核種が数十年以上の時間スケールで森林、土壌、河川や海洋などの異なる媒体中を数百 m から数千 km に渡る広範な空間スケールで媒体中を移行するためである。すなわち、放射性核種が移行過程において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水溶液中及び固相で化学状態を変える可能性があること、さらに移行する地質媒体自体も変化する可能性があるためである。したがって、環境中の放射性核種の移行を予測するためには、放射性核種の濃度だけでなく化学状態に関する長期的な観測及び地質媒体に関する知見が必要となる。一方、環境浄化については広域に汚染した環境を浄化する手法、人間の直接のハンドリングを超えた高濃度の放射性核種による汚染環境の浄化や、浄化により搬出された汚染物の処理、処分などの問題がある。

放射性核種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。放射性核種の複雑な移行機構や浄化手法の確立に要する莫大な費用のため、一国の努力では完全な解決はできない。すなわち、各国の横断的な専門家による対策が必要となる。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一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、放射性核種の環境中における挙動の解明には、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、放射性核種による汚染に係る環境浄化の基礎科学に取り組む国際共同体の創設を提案しており、一機関、一国では負担の大きい放射性核種汚染の浄化という研究対象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目的を達成させることを目標としている。提案者の一人であるフランス、SUBATECH 研究所長の Grambow 博士が 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、設立の準備を進めている。同時に、日本にも共同体への参加を要請している。

放射性核種の移行挙動の解明と環境浄化に係わる基礎科学は、放射性核種の移行挙動の解明と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る。また、本基礎科学は、放射性廃棄物の地層処分における放射性核種の環境挙動との共通点も多い。したがって、本課題別委員会では、以上のよ

うな状況のもとで、放射性汚染環境の浄化への基礎科学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、提言（報告）をまとめた。

2 放射性核種による汚染に係る環境浄化と基礎科学

(1) 環境浄化の現状

放射性核種に汚染したサイト、すなわち核兵器開発施設跡地や、原子力事故による汚染サイト、除染対象の原子力施設（例えば、米国ハンフォードサイト、チェルノブイル事故影響地域、福島事故の影響地域）などでは、これまで除染・解体及び運搬により汚染サイトから放射性核種を取り除いてきた。核開発関連施設などはすでに 70 年以上存在し、米国、欧州及び日本などの国に今後 70 年以上存在すると考えられる。

浄化への関心が高まるきっかけの一つは、1980 年代における米国ハンフォードサイトの高レベル廃液タンクからの放射性核種の漏出による地下水汚染である。米国政府は米国内の核開発地域などを調査し 107 カ所の汚染サイトについて浄化が必要と考え、91 カ所について浄化を完了した。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させる予定である²⁾。

一方、ハンフォード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浄化は不可能と考え、汚染地下水の環境への漏出を防ぐため、1990 年代に地下水の浄化対策として処理施設を建設して、地下水をくみ上げて放射性核種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、ポンプアップなどの施設を運転することが不可避なため、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、実行されている。汚染サイトと河川、湖沼などの環境境界との間に、放射性核種の吸着材を設置し、地下水を透過させて反応させるバリア壁を設置する方法である。吸着材の設置方法として、吸着材料を地下水付近に設けたトレンチに直接導入する方法、及び試薬などを注入し地下水付近で沈殿物を形成する注入型を用いる方法がある。オークリッジサイトで採用されたゼオライトなどの直接導入による Sr や Cs の除去や、サバンナリバー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。ハンフォードでは、Sr 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る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る土壌の直接ガラス化処理、植林によるトリチウムの吸い上げと蒸散を期待したファイトレメデーション方法がある。オークリッジサイトでは、凍土壁を用いた地下水汚染拡大防止策も講じられ 1997 年から 2004 年まで稼働した。

(2) 我が国における基礎研究事例

① 汚染分布の把握

福島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によるモニタリングシステムが確立された³⁾。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 程度であり詳細な分布の測定は難しい。一方、無人ヘリコプターによるモニタリングでは、低高度での詳細分布の測定が可能であるものの測定可能な範囲は数 km までである。有人、無人ヘリコプターでカバーする領域を埋める中間範囲を遠隔で

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 UAV（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。

② 放射性核種移行の予測

福島などにおいては、地下水を介した放射性セシウムの移行についてはこれまで観測されていない。放射性セシウムが土壤中の粘土鉱物、特にアルミノシリケート層状粘土鉱物に強く吸着するため、地表面近くの土壌層に留まっているためである。一方、放射性セシウムは森林等から雨水による土壌浸食により土砂粒子とともに流出し、河川水系を移動・堆積し、河口に至ることが明らかになっている。こ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。森林等から河川水系への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を確かめている。例えば、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を評価した上で、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、調査結果と概ね一致する結果が得られている⁴⁾。

また、層状粘土鉱物へのセシウムの特異的な吸着による化学状態の変化については、第一原理計算や電子顕微鏡による分析から明らかになりつつある⁵⁾。

③ 浄化手法の開発

福島においての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溶離は、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 試薬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⁶⁾。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の開発である。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⁷⁾。XRD 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面間隔が変化することも確認している。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⁸⁾。

ストロンチウムの浄化については、福島サイトから海水中に漏出した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むことから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。そこで、海水中に生息する微生物を活用する方法である。実際の海水から尿素分解菌を探索し炭酸カルシウムを形成させることによりストロンチウムを共沈させるものである。

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⁹⁾。

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いる。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、雨水による土壌の浸食が抑えられるためである。一方、森林における林業従事者等の外部被ばく、林産物への放射性セシウムの取り込みや沢水への放射性セシウムの混入が懸念されている。

落葉等の除去は有効と考えられているものの、広範囲の落葉等の除去は、雨水による土壌の浸食を妨げる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ととなる。このことから、林床を被覆することにより線量低減を図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、被覆する資材の厚さを 5cm 厚、10cm 厚として試験を行い、最も効果がみられた植生基材吹付工 10cm 厚で 20 ～30%程度の線量低減効果が得られた³⁾。

ため池は放射性セシウムが吸着した土壌が底部に留まっている。このため、大雨などにより底土が下流に流出する恐れがある。この対策としては、底土を除去する方法と放射性セシウムの拡散を抑制する方法がある。底土の除去では、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ことが行われている。

3 基礎科学における国際協力の在り方

(1) 基礎科学に関する共通課題

放射性核種汚染の環境浄化に係わる基礎科学の国際的に共通な課題を、放射性核種の移行予測、移行モデル、環境浄化と回復に分けて述べる。

① 放射性核種の挙動予測

放射性核種の移行を予測するためには、核種と固相すなわち岩石、土壌、微生物などの媒体との相互作用に関する課題がある。相互作用により、放射性核種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核種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。特に、鉄を含む鉱物との相互作用によるアクチノイドの価数の変化について多くの研究がなされてきた。さらに、地下水中に存在する有機物や無機質な懸濁物質との相互作用についても多くの研究がなされてきた。懸濁物質としては、地下水中の有機体の懸濁物質であるフミン酸やフルボ酸等との相互作用については、未だ完全には解明されていない。さらに、地下数百 m 以深においても地表と同程度の微生物が生息する事実が判明して以降、アクチノイドなどと微生物との相互作用について研究がなされてきた。微生物の中でも、鉄還元菌や硫酸還元菌、マンガン酸化菌はアクチノイドの価数を変化させ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。最近、微生物と岩石が共存する系におけるアクチノイドの挙動について検討されはじめてきた。

放射性核種の化学状態の解明には、取り扱い可能な研究施設の充実、特に先端技術による分析機器を用いることが可能な施設の充実も必要である。放射光、中性子線などの加速器分析、最先端電子顕微鏡、放射化学施設、可視化装置、コンピュータ施設などである。特に、不均一な系における放射性物質の化学状態分析には、多様な解析が必要になってくる。すなわち、電子顕微鏡、放射光、レーザー分光などである。特に、マイクロ領域の分析が重要である。したがって、このような分析設備を整備することも重要な課題である。

② 移行予測モデル

放射性核種の移行の問題として、時間的及び空間的な課題がある。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。移行する媒体は一様ではなく、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、すなわち不整合層での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媒体の物理的特性が変化する。例えば、人間の活動範囲や状況により、擾乱などによる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。

福島河川などの表層水により移行する核種の移行では、土壌粒子に付着した核種の移動の予測が必要となり、粒子性物質の移動を予測するモデルの開発ばかりでなく、予測手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核種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、放射性核種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科学も重要である。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について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、有機体放射性核種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科学では、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と考える。国際協力は以下のような意義がある。

放射性核種の挙動予測については、特に放射性核種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核種やⅢ価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。一方、米国ではアクチノイドの分析装置、機器があるため、ウラン及び TRU に関する知見が豊富である。欧州でもウラン及び TRU 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、機器の使用の可能性があり、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の強みである。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じレベルであると考えられる。放射性核種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。

日本では大型放射光があり、X 線吸収端分析や XRD 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使用の制限が大きい。特に Pu に関しては測定が可能な放射光施設はない。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 EMSL 施設は環境浄化を含む環境科学や生物科学に関わる分析装置を DOE の予算で揃えている。このような装置を使った研究を進めることも国際協力の利点である。

国内の研究者にとっては、環境中の放射性核種、特にアクチノイドに直接接触することは放射性セシウム及びヨウ素を除き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環境が存在する。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核種の挙動や浄化を直接研究することが可能となる点は大きな利点である。

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意義がある。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では、国内外の研究者が協力して環境動態及び浄化に関する研究を展開している。

(3) 今後の取組

① 基礎研究の方向性

放射性核種の化学状態に関する基礎科学は、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、放射性核種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、バルクのレベルである 100 μ m と比べると遙かに小さい。放射性核種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核種の固相への吸着挙動を捉えることを目指している。一方、長期的な移行挙動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核種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と考えられる。

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・回収の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遙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、特定の放射性核種を効率よく回収することが可能と考えられる。

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科学も重要である。固化体においてナノレベルの構造から特異的に揮発性の核種、 ^{137}Cs や ^{99}Tc 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、特に分子構造中選択的な取り込み機能を有する高度選択制御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考えられる。

移行予測モデルに関しては、空間的な不均質性の克服を目指す必要がある。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。しかしながら、放射性核種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、空間的な不均質性と複数の不均質層の中を放射性核種が移行していることを反映できないことにある。空間的な不均質性は、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やその活性にも影響を与える。その結果、界面における反応をモデルによる予測では再現できない結果となる。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、引き続いて移行経路や不均質層のモデル化に取り組む必要がある。観測には、国内よりも米国のサイトの方が遙かに多くの情報を入手することが可能であり、国際協力が重要となる。

放射性核種の移行においては、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、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^{10,11)}。これまでの研究では、移行性の高いコロイドの存在を環境の観察により Pu 含有コロイドの発見^{10,11)}、地下水の分析によるコロイド性元素の同定¹²⁾、地下水中腐植物質と放射性核種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、コロイドー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^{13,14)}。現象を理解しモデルを構築するためには、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、コロイド態放射性核種の移行の発見に始まる、移行性の高い放射性核種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っている。環境浄化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科学を進めることは、新たな研究領域を生み出す可能性が高い。

② 人材育成

環境浄化に係わる基礎科学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十分貢献する。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、もしも放射性核種が漏出したら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科学の知見が、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、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避となる。拠点においては、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する機会がある。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が可能となる。この結果、研究に対して多角的な視点から考えることができる。その結果、アクチノイドに関する研究の広がりが期待できる。

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可能性が高い。

4 まとめ

放射性核種の移行挙動の解明と環境浄化に係わる基礎科学は、放射性核種の移行挙動の解明と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る。したがって、一機関、一国では負担の大きい放射性核種汚染の浄化を達成するためには、移行や浄化に係わる基礎科学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目的を達成させることは有効な方法である。

各国の協力による効果としては、セシウムなどの核分裂核種やⅢ価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が広がることが期待できる。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、コロイド態放射性核種の移行の発見に始まる移行性の高い放射性核種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るなど、新たな研究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科学を進めることは、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避となるため、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する機会がある。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が可能となる。したがって、環境浄化に係わる基礎科学に関して国際的な共同研究をすすめることは、環境汚染の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可能性が高い。

以上のことから、本課題に関する国際共同研究を実施することは、わが国にとっても、また世界にとっても意義があり、推進すべきである。

＜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
- 2) M.C. Regalbuto, “Cooperation & Collaboration”, 1st International Forum on Decommissioning of Fukushima Daiichi NPP”, April 10, 2016.
- 3) 宮原要、飯島和毅、斎藤公明、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(2015).
- 4) H. Kurikami, A. Kitamura, S. Yokuda, Y. Onishi, Sediment and ^{137}Cs behaviors in the Ogaki Dam Reservoir during a heavy rainfall event, J. Environ. Radioact., 137, pp.10-17(2014)
- 5) 奥村 雅彦, 中村 博樹, 町田 昌彦、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、2014 p.372-377. Mukai, H., S. Motai., T. Yaita, and T. Kogure (2016), Identification of the actual cesium-adsorbing materials in the contaminated Fukushima soil, Appl. Clay Sci., 121-122, 188-193.
- 6) I. Shimoyama, N. Hirao, Y. Baba, T. Izumi, Y. Okamoto, T. Yaita, S. Suzuki, Low-pressure sublimation method for cesium decontamination of clay minerals, Clay science 18(3), 71-77, (2014).
- 7) X. Yin, h. Takahashi, Y. Inaba, K. Takeshita, Desorption of cesium ions from vermiculite with sea water by hydrothermal process, Chemistry letters, 45, 256-258(2016).
- 8) X. Yin, X. Wang, H. Wu, T. Ohnuki, K. Takeshita, Enhanced desorption of cesium from collapsed interlayer regions in vermiculite by hydrothermal treatment with divalent cations, J. Hazardous Materials, 326, (2017) 47-53.
- 9) T. Ohnuki, N. Kozai, F. Sakamoto, T. Saito, Q. Yu, M. Yamashita, T. Horiike, S. Utsunomiya, Removal of radioactive strontium from sea water by biogenic calcium carbonates, Goldschmidt conference Abstract, 2352 (2016).

- 10) A. B. Kersting, DW Efur, DL Finnegan, DJ Rokop, DK Smith, and JL Thompson. 1999. "Migration of Plutonium in Ground Water at the Nevada Test Site." *Nature* 397(6714): 56–59. DOI: 10.1038/16231.
- 11) A. P. Novikov, SN Kalmykov, S Utsunomiya, RC Ewing, F Horreard, A Merkulov, SB Clark, VV Tkachev, and BF Myasoedov. 2006. "Colloid Transport of Plutonium in the Far-Field of the Mayak Production Association, Russia." *Science* 314(5799): 638–641. DOI: 10.1126/science.1131307.
- 12) N. Kozai, T. Ohnuki, T. Iwatsuki, Characterization of saline groundwater at Horonobe, Hokkaido, Japan by SEC-UV-ICP-MS: Speciation of uranium and iodine, *Water Research*, 47, (2013) 1570-1584.
- 13) A. Y. Huang AY and JC Berg. 2006. "High-Salt Stabilization of Laponite Clay Particles." *Journal of Colloid and Interface Science* 296(1): 159–164. DOI: 10.1016/j.jcis.2005.08.068
- 14) M. Manciu, E Ruckenstein. 2004. "The Polarization Model for Hydration/Double Layer Interactions: The Role of the Electrolyte Ions." *Advances in Colloid and Interface Science* 112(1–3): 109–128. DOI: 10.1016/j.cis.2004.09.001.

＜参考資料 1＞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）