

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

1 背景

背景と必要性を述べる。

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。放射性核種の健康への影響は生態系、その中でも飲料水や食物を介してもたらされる。それにもかかわらず、汚染物と環境、食品及び健康との因果関係については未だ解明されていない。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緩慢に移動するためである。環境中の放射性核種の移行を予測するためには、長期的な観測とともに、長期間で広域における挙動を予測する必要がある。日本学術会議の提言「放射能対策の新たな一步を踏み出すために一事実の科学的散策に基づく行動を」においても、長期的な放射性核種の移行などについての定量化を進めることの重要性指摘されている。放射性核種の移行予測や環境修復については、現在は各国がそれぞれの裁量で行っているが、放射性核種は様々な媒体を経て広範囲、長時間にわたり移行するため、一国の努力では完全な解決はできない。

現在、フランス、ドイツ及びアメリカ合衆国の研究者が中心となり、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、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 やフランスの学術会議において趣旨説明を行い、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修復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修復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、物理学、放射化学、地球化学、環境学、地質学、鉱物学、生態学、農学、生物学、医学、社会学などの多分野にまたがる。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、関連分野の専門家により総合的に検討することを目的とする。

2 放射性核種による汚染に係る環境浄化と基礎研究

2.1 環境浄化の現状

汚染の状況についてはあまり言及しない。ただ、汚染にはハンフォードのような人間の生活環境から隔離された場所が汚染しているケースと、チェルノブイリや福島のように人間の生活環境が汚染された場合があることを述べる。ケースの違いにより浄化の考え方も異なることを述べる。

2.1.1 福島（日本）

2.1.2 ロッキーフラッツ（米国）

2.1.3 ハンフォード（米国）

2.1.4 セラフィールド（英国）

2.1.5 チェルノブイリ（ウクライナ）

2.2 我が国における基礎研究事例（JAEA の協力でまとめる）

2.2.1 汚染分布の把握

初期の空間線量測定、土壌採取による表面汚染濃度分布の測定

2.2.2 放射性核種移行の予測

河川を中心とした陸、河川、海洋への移行に関する研究

森林における移行に関する調査と予測

2.2.3 浄化手法の開発

汚染土壌を対象とした放射性セシウムの溶離試験（汚染土壌の減容）。新規の基礎化学が関与しそうなものを対象とする。

2.2.4 環境浄化と回復

線量低減手法と復興後における使用に対する影響

3 基礎科学における国際協力の在り方

3.1 基礎科学に関する共通的課題

3.1.1 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。

ることを予測するためにはどうするか。

福島などの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。

3.1.2 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。放射性核種が、鉍物などの無機的な構成物との相互作用ばかりでなく、微生物との相互作用により化学状態が変化するプロセス・機構については不明な点が多い。

放射性核種の化学状態の変化は、人間や自然が関与する活動によってもたらされる。例えば火災や洪水による固相の特性が変化することが考えられる。さらに、人間を含む動物による放射性核種の直接的な摂取による移動も考えられる。

また、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。

3.1.3 環境浄化と回復

回復に関する課題としては、土壌、特に農地の回復に関する研究の促進が重要である。

浄化対象物中の放射性核種の化学状態の解明は、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、汚染水からの汚染物質の沈殿などによる除去と、除去されたコロイド態挙動、沈殿、凝集などである。これらの基礎的な知見は、コロイド状の物質の移動現象や、石炭スラリーの処理及び微生物活性処理等の懸濁物の処理方法の発展に貢献する。

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。

固化体に係わる基礎科学：ガラス廃棄体は非晶質であることが放射性核種の取り込みと長期安定性に不可欠であるが、最近高分解能の分析により中距離スケールにおいて周期的な構造が現れることが報告されている(Caurant,2009)。廃液とガラス溶融体との混合の化学については未だに不明な点がある。

廃棄体に係わる科学：ガラス、セラミック等の固化体や金属キャニスターの長期安定性、特に、高放射線、温度、腐食や化学反応による劣化に対する安定性に係わる科学は重要である。

浄化手法の開発においては、対象のサイトが人間の生活環境か、人間の生活から隔離された環境かも重要な基準となる。チェルノブイルによるヨーロッパ地域や、福島のような人間の生活環境に比較的近いサイトの浄化は、ハンフォード、サバンナリバーやセラフィールドなどの人間の活動からある程度離れた場所を対象とした場合では異なる。

人間が直接アクセスできない領域の汚染の状況把握も重要な課題である。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。

最近の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。

3.2 国際的な共同研究の意義と提案

3.2.1 共同研究の意義

3.1 に述べた課題の国際的な共同研究による解決の可能性

3.1 で述べたように環境修復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と考える。

国際協力の意義

核種移行モデル：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、処分場の具体的評価が行われている諸外国の方が進ん

でいる感がある。ただ、確度の高い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。日本は、チェルノブイルのような場所での動態予測に貢献できる可能性が高い。したがって、国際協力により相補性が期待できる。

化学状態の解析：様々な核種について各国の研究者が解明を進めている分野である。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、Cs などの核分裂核種やⅢ価アクチノイドの代替としての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、特にアクチノイドの関する計算に関しては諸外国の方が進んでおり、協力を行うことにより進捗が期待できる。

装置に関すること、

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 Pu 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 施設は環境修復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。

研究サイトと参画

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 Cs 及び要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動態研究所では、国内外の研究者が協力して

環境動態及び修復に関する研究を展開している。

3.2.2 共同研究体の提案

グランボウ氏の提案内容の紹介。

3.2.3 研究共同体への参画

討議結果を記載する。

3.3 今後の取組

3.3.1 基礎研究の方向性

若手研究者にとって魅力ある研究できるかが鍵であろう。

汚染物を動かすだけによる浄化ではなく、処分の負担を軽減できるような手法の確立に寄与する基礎科学を進める。例えば、海水を用いる経済的な脱離手法の開発と引き続き行った機構解明研究などは参考にすべき事例であろう (Yin et al. (2016))。ナノスケールの制御により揮発性の核種である Cs や I を閉じ込め可能な材料の開発。この材料はガラス固化の温度においても閉じ込め能が高いことが要求される。

また、分析機器の発達による従来の認識を覆すような提言。例えば、ガラス固化体は非晶質であることが廃液中の核種を安定的に閉じ込めると考えられてきた。一方、電子顕微鏡の発達によりガラス質にも周期構造があることが報告されるなど、非晶質の定義そのものを変える可能性もある。

汚染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、除染の観点からも解明が必須のものである。

タンク廃液物：非平衡条件における化学、化学状態の解明、高放射線下での原子レベルからメートルにまたがる空間スケール及び秒から年にまたがる時間スケールが関与する問題の解決

高塩濃度溶液中の放射性物質の処理に係わる課題、すなわち沈殿形成、パイプなどの目詰まりを解決するためのレオロジー、スラリーの凝集に係わる科学

観測あるいは収集された莫大なデータから適切な情報を抽出して要約、整理する情報処理技術の開発も課題である。さらに、整理した大量のデータを適切に処理して、有用な情報を抽出する技術の開発も必要となる。

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、もしも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、汚染地域の浄化については基礎科学の知見が直接に浄化へ役立つ可能性が

高いことから，社会的にもインパクトの高い成果となる。

3.3.2 人材育成(研究者の人材育成と放射性核種、放射線に関する知識の普及)

放射性核種による汚染の浄化に科学と社会各層の間における知識の双方向コミュニケーションを図れる人材の育成。

実際の汚染サイトにおいて実施する研究への参画

国を超えた交流の実現

放射線及び影響に関する知識の普及

4 結言？