

環境放射能除染学会第22回講演会

「復興再生利用・最終処分に向けた産官学をつなぐ技術ネットワークの構築」

除去土壌等の最終処分に向けた再生利用・ 減容化の取組みへの期待

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

川瀬 啓一



《本日の内容》

1. JAEAについて
2. 事故直後のJAEAでの取組み
 - (1) 環境中に放出された放射性物質について
 - (2) 除染モデル実証事業から得られた知見
 - (3) 事故直後の技術実証について
3. JAEAにおける最近の研究成果
4. 今後の取組みへの期待



原子力機構のビジョン ～目指す将来像～

「ニュークリア×リニューアブル」 で拓く新しい未来

原子力(ニュークリア)と
再生可能(リニューアブル)エネルギーが二元論を乗り越え、
融合することで実現する新しい**持続可能**(サステナブル)な
未来社会を目指します。

++ 2050年 ++
脱炭素社会

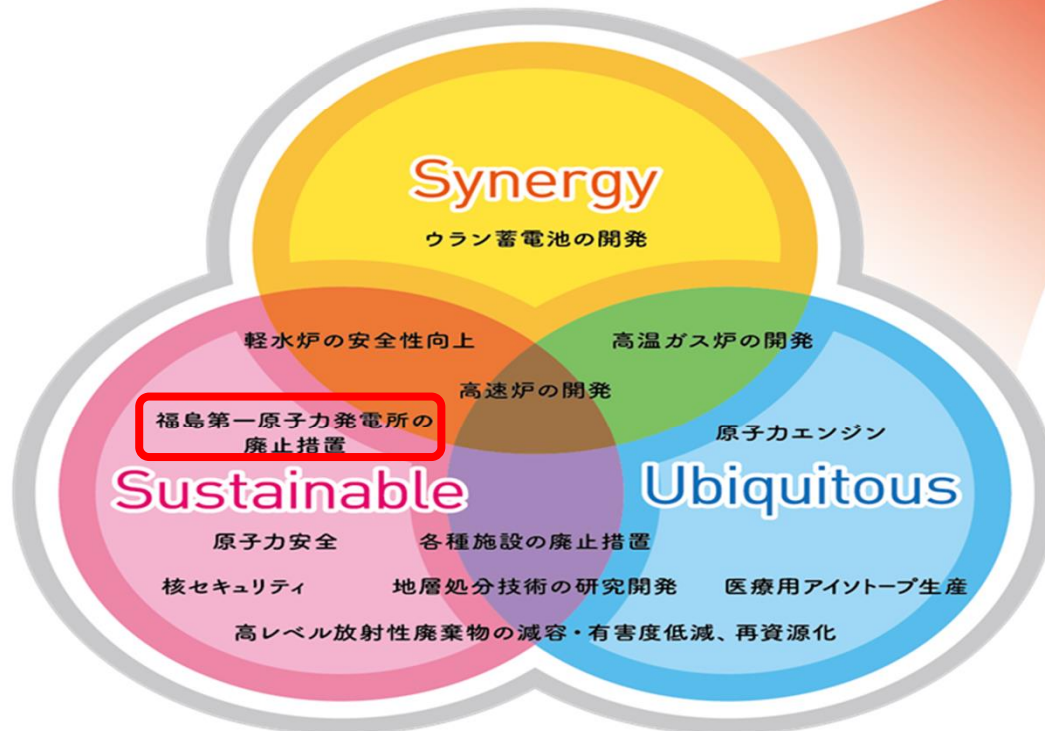


原子力科学技術を
最大限に活用

ニュークリア×リニューアブルの
Synergy
相乗効果のための研究開発

Sustainable
原子力自体を**持続可能**に
するための研究開発

Ubiquitous
原子力利用の**多様化**に
向けた研究開発





福島廃炉安全工学研究所は、福島県をはじめ国内外の皆さまの安全・安心に貢献すべく研究開発を進めています。

【福島復興に向けた重点活動】

福島環境回復に関する研究開発

目的) 特定帰還居住区域解除等への貢献

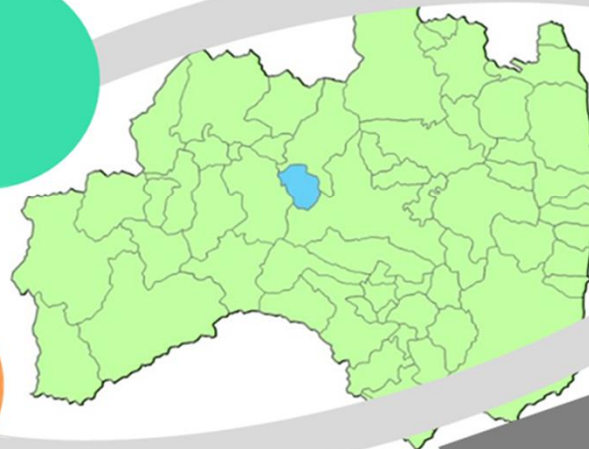
- 環境モニタリング・マッピングに関する技術開発



環境モニタリング



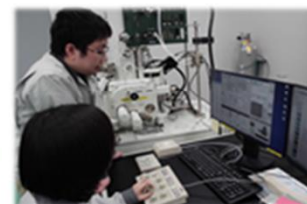
放射性廃棄物の分析



1F廃止措置に関する研究開発

目的) 研究開発成果を現場に実装し、廃止措置の安全・着実な推進に寄与

- 燃料デブリの取扱い
- 放射性廃棄物の処理処分
- 事故進展シナリオ解析
- 遠隔操作技術 等



1F廃止措置に関する研究開発

研究開発基盤の整備・運用

目的) 研究開発推進のための施設、体制整備

- 楢葉遠隔技術開発センターの運用
- CLADS 国際共同研究棟の運用
- 大熊分析・研究センターの運用整備
- 国内外の大学、研究機関、産業界等の人材が交流できるネットワークの形成



廃炉創造ロボコン

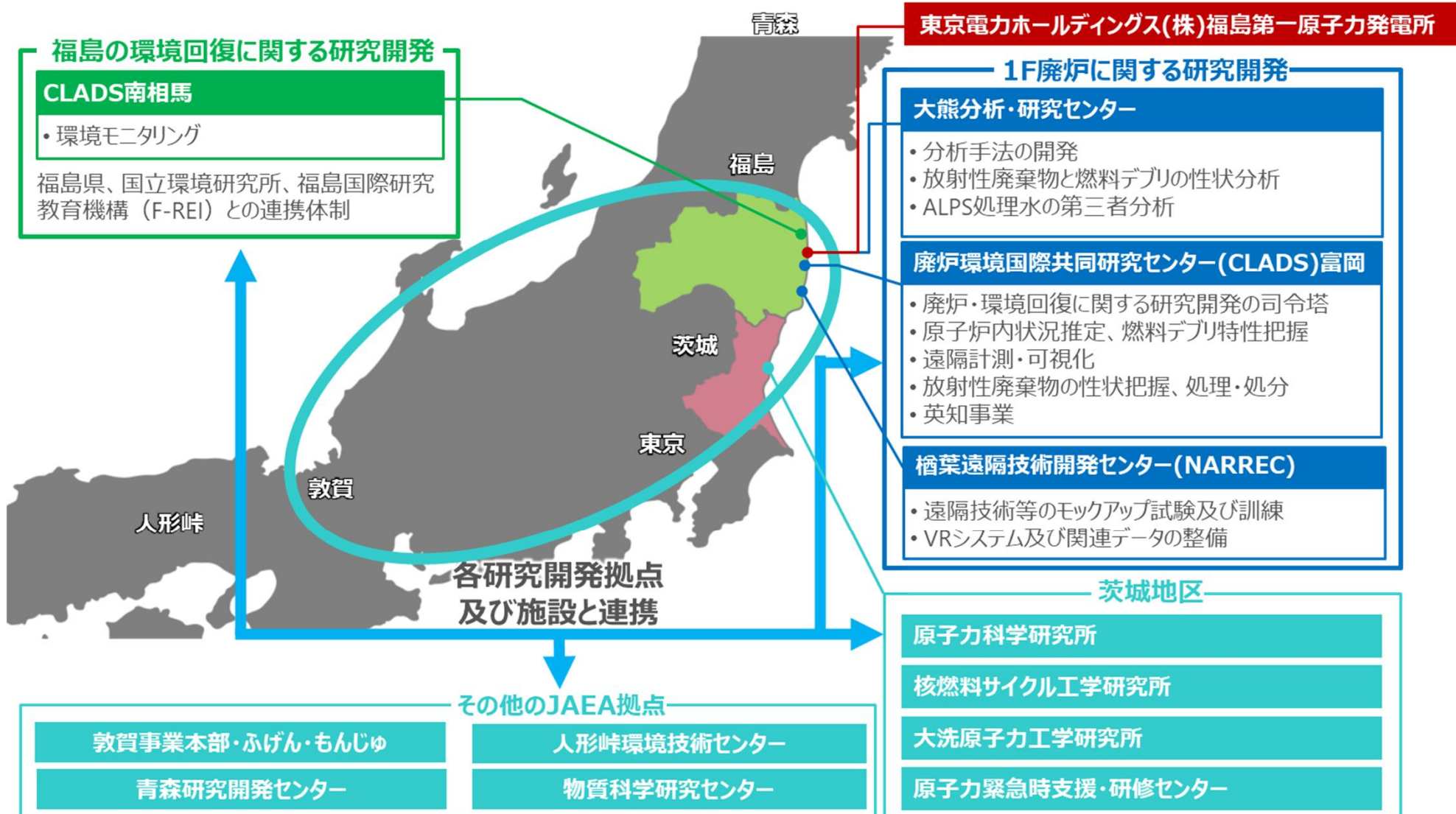


ALPS処理水第三者分析

福島復興への貢献

- 地元の関係機関とのコミュニケーション
- 地元企業との連携
- 人材育成

福島県内の活動拠点に加え、県外のJAEA拠点とも連携し、JAEAを挙げて研究開発に取り組んでいます。



《本日の内容》

1. JAEAについて

2. 事故直後のJAEAでの取組み

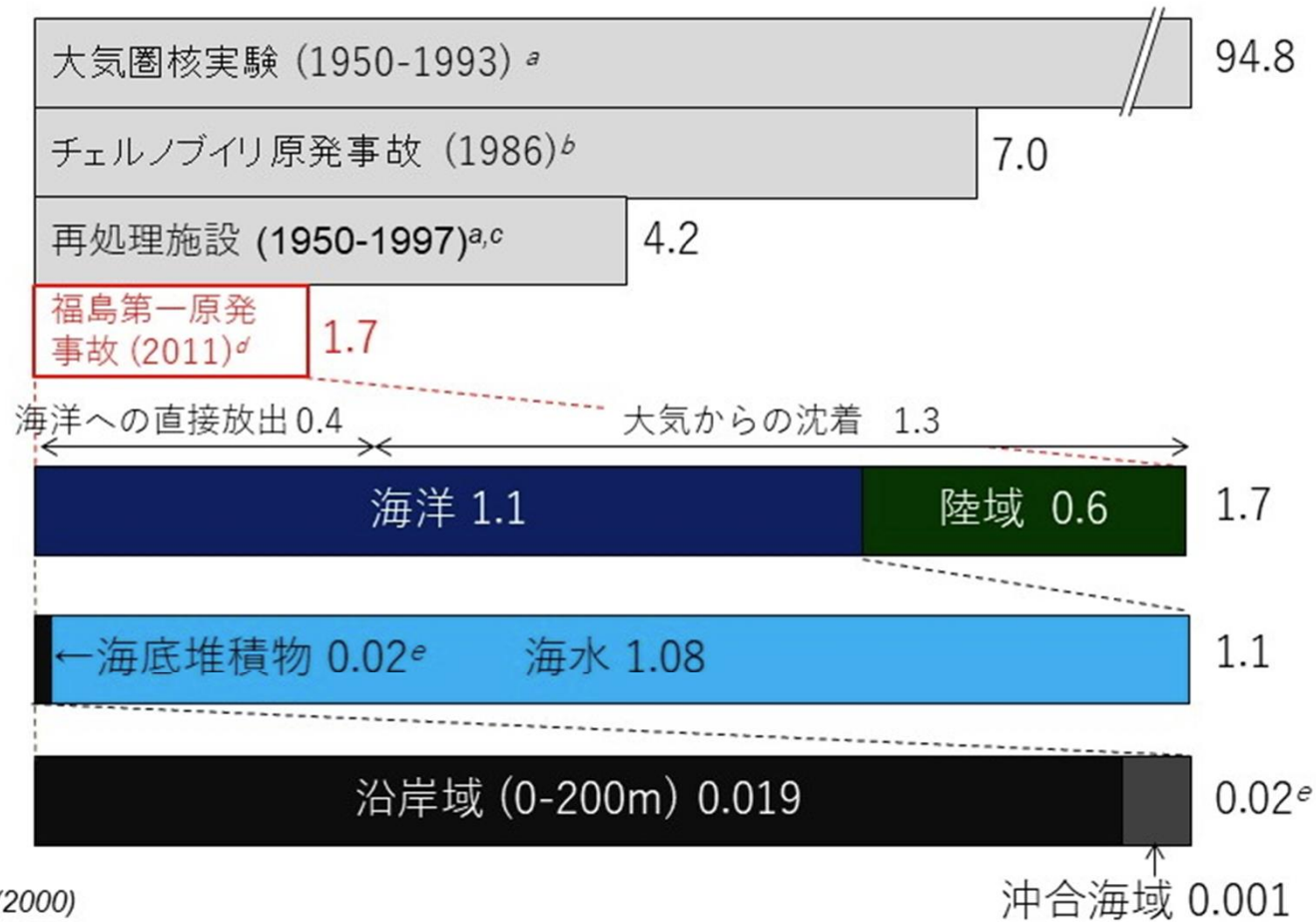
- (1) 環境中に放出された放射性物質について
- (2) 除染モデル実証事業から得られた知見
- (3) 事故直後の技術実証について

3. JAEAにおける最近の研究成果

4. 今後の取組みへの期待



セシウム137の環境への放出量（京ベクレル）



^a UNSCEAR (2000)

^b UNSCEAR (1993)

^c Smith et al. (1993) J. Environ. Radioact. 68, 193-214.

^d Kobayashi et al. (2013) J. Nucl. Sci. Technol. 50, 255-264

^e Ootosaka and Kato (2014) Environ. Sci.: Proc. Impacts 16, 945-1156

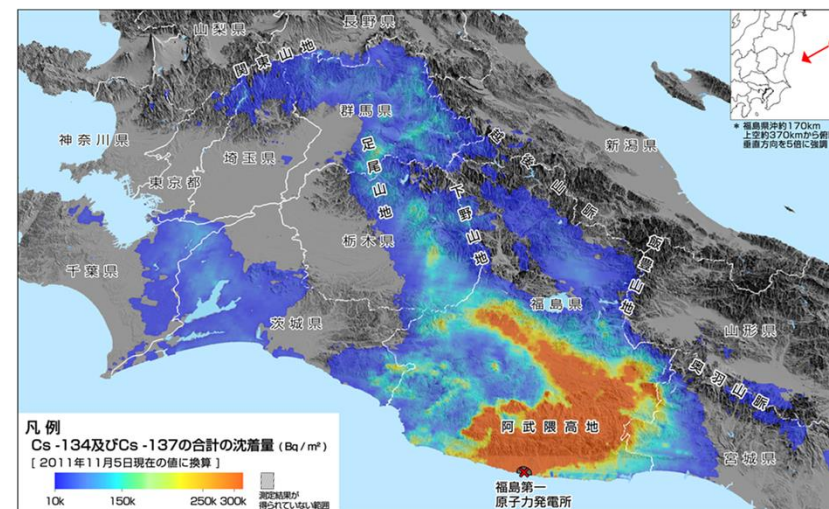
※) 京ベクレル=10¹⁶Bq

○環境へのセシウム137 (Cs-137) 放出量 (推定値)
 (放射エネルギー) $1.7 \times 10^{16} \text{ Bq}$ (Cs-134はCs-137と同程度)
 $\rightarrow 5.3 \times 10^3 \text{ g}$ 程度 (計算上)

○陸域に沈着したCs-137
 (放射エネルギー) $0.6 \times 10^{16} \text{ Bq}$
 \rightarrow 約 $1.9 \times 10^3 \text{ g}$ 程度 (計算上)

○土壌 (1 kg) 中に含まれるCs-137
 (重量: 概算値)

- 1000 Bq/kg の場合 $\rightarrow 3.1 \times 10^{-10} \text{ g}$
- 8000 Bq/kg の場合 $\rightarrow 2.5 \times 10^{-9} \text{ g}$



○セシウムの比放射能
 セシウム137 : $3.21 \times 10^{12} \text{ Bq/g}$
 (セシウム134 : $4.79 \times 10^{13} \text{ Bq/g}$)
 ○セシウムの比重: 1.9 g/cm^3

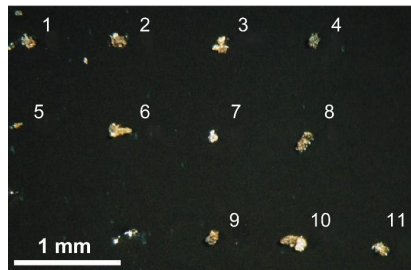
【参考】金鉱石の場合

- 数 g / t で採算が合う品位 (世界平均) (10^{-3} g オーダー)
- 菱刈鉱山の品位: 約 $20 \sim 40 \text{ g/t}$ ($2 \sim 4 \times 10^{-2} \text{ g}$)

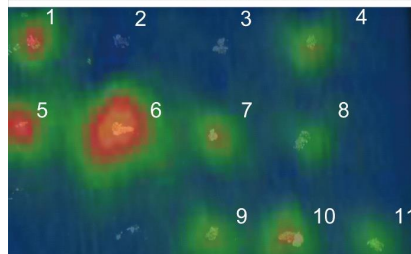
(Web情報を参考に整理)

福島放射能汚染における土壌中の放射性微粒子の特定と微粒子中の放射能分布の解明

東京大学大学院理学系研究科、物質・材料研究機構、
国際農林水産業研究センター、JAEAの共同研究成果



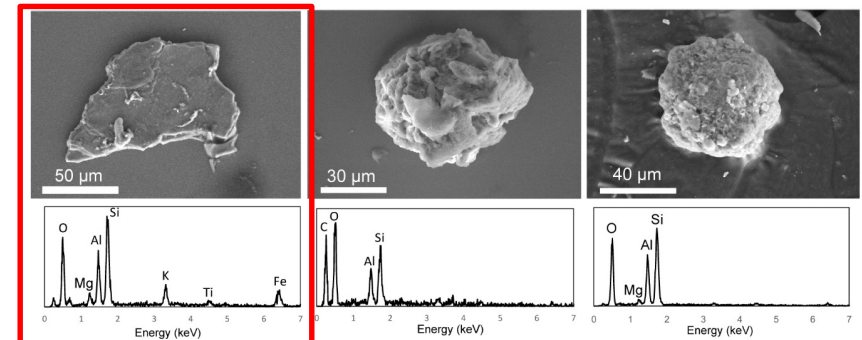
図：福島県の放射能汚染土壌からマイクロマニピュレータによって採取された放射性微粒子（上）



各粒子から発せられる放射線をイメージングプレートと呼ばれる放射線記録媒体によって記録したもの（下）



赤や緑が強い放射線を示し、**放射能を持つ微粒子とそうでないものが判別**できる。



図：放射性微粒子の電子顕微鏡像（上）とそこから放出されえるX線が示し微粒子の化学組成（下）

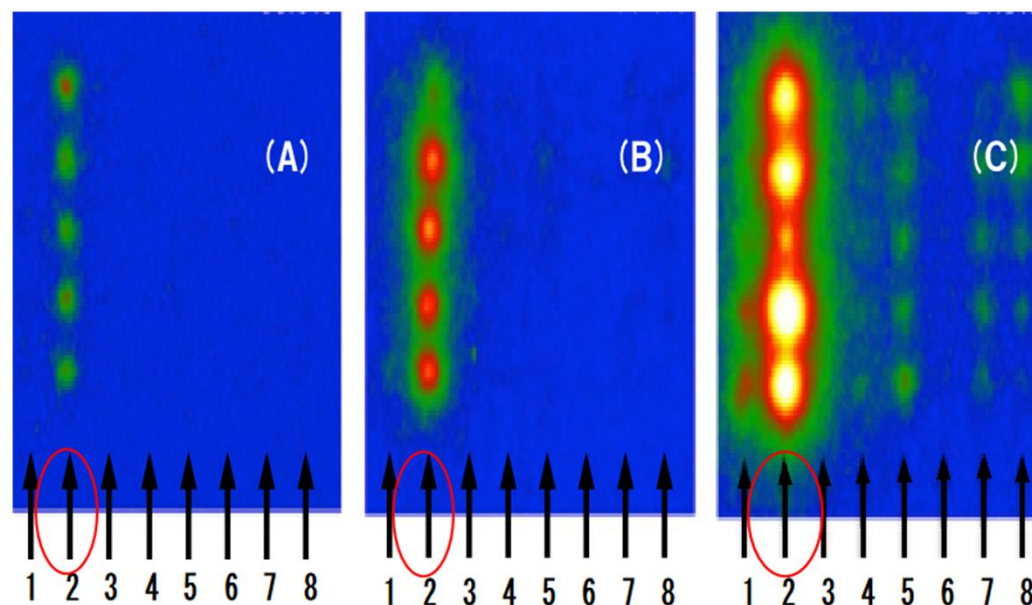
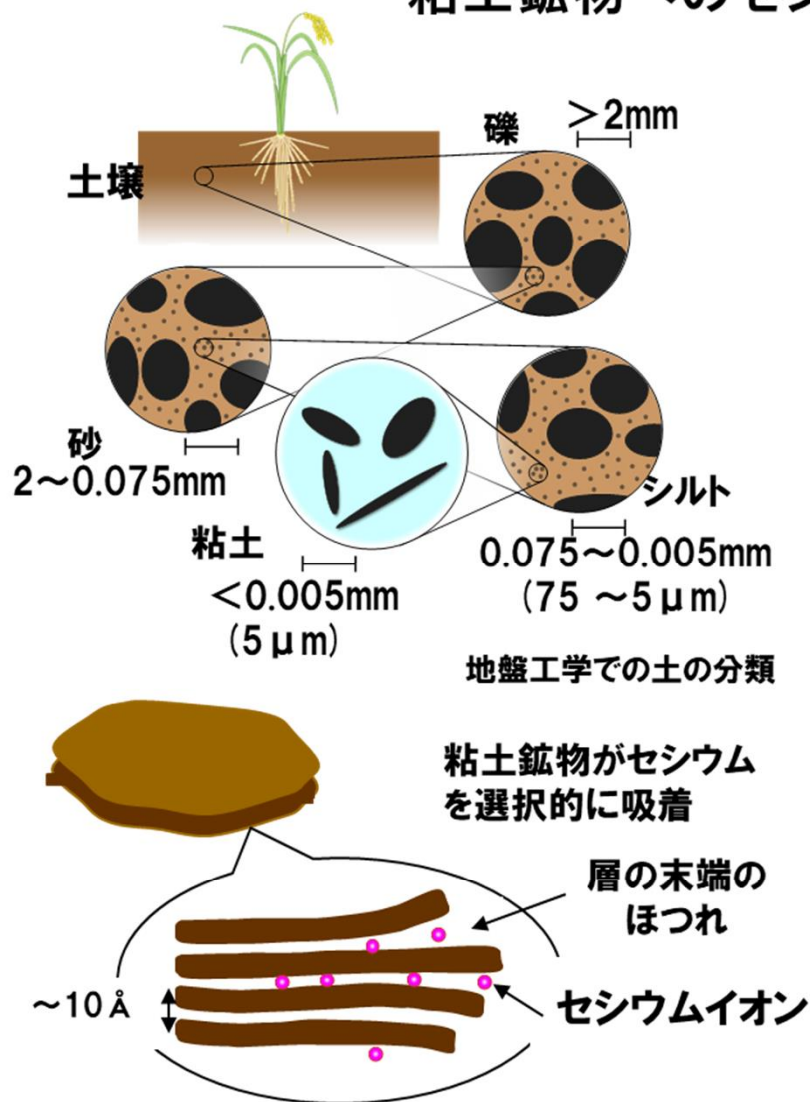


放射性セシウムは**風化黒雲母**と呼ばれる鉱物粒子に多く固定されている。また鉱物中に均一に分布している。

これらの成果により、今後の長期的な放射性物質の拡散・移動等の動態予測、科学的な処理による土壌中の放射性セシウムの除去方法の開発、除染作業によって膨大に発生しつつある汚染物質の有効な減容化や貯蔵方法の提案などに大きく貢献することが期待される。

粘土鉱物へのセシウムの吸着特性

セシウム水溶液*中で土壤に含まれる鉱物**を共存させた吸着実験(イメージングプレートで感光した状態); Mukai 他 (2015)

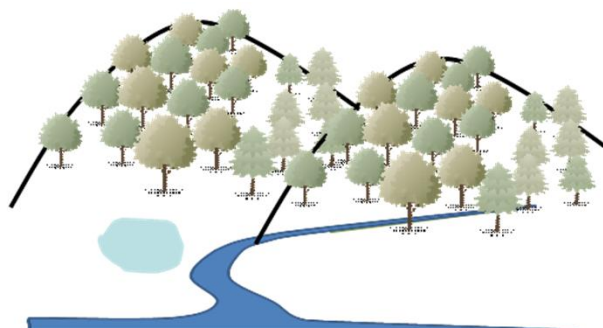


* 吸着実験に使用した溶液中の初期放射性セシウム量:
(A) 0.185Bq, (B) 1.85Bq, (C) 18.5Bq

** 1:黒雲母, 2:風化黒雲母, 3:カオリナイト, 4:ハロサイト,
5:イライト, 6:モンモリロナイト, 7:アロフェン, 8:イモゴライト

土壤中のセシウムは、粘土鉱物、特に**風化雲母類粘土鉱物**に主に吸着している

① 除染技術のメリットとデメリット



森林・河川・ため池



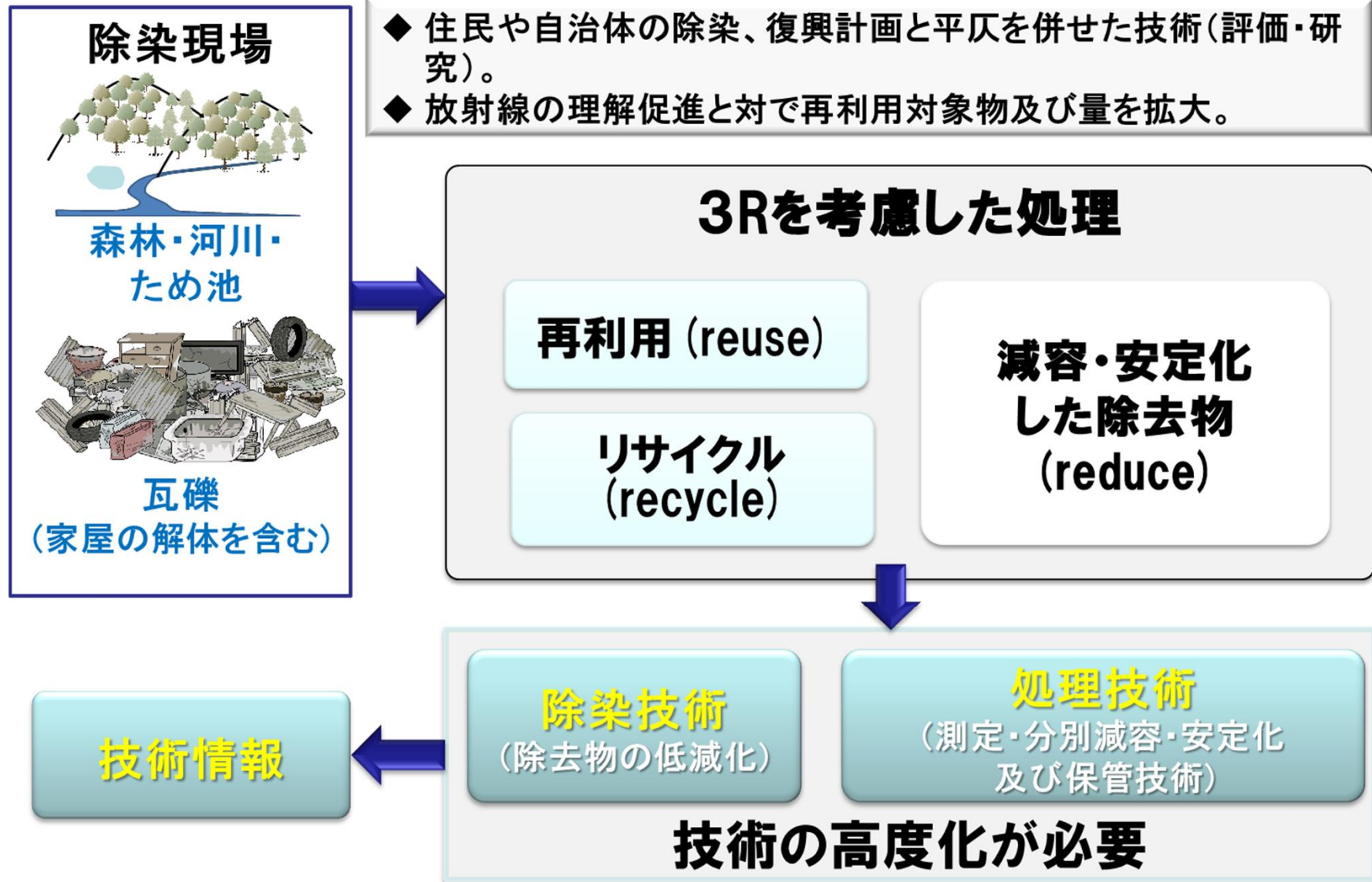
瓦礫

森林	伐採	効果高	廃棄物多・自然破壊
	枝打ち	効果高	廃棄物多
	リター層除去	効果高	廃棄物多、表面保護要
河川・ため池	浚渫	放射能除去	廃棄物多
	覆砂	移行抑制	放射能除去しない
瓦礫	摩砕	廃棄物少	効果低
	ドライブラスト	効果高	処理量少 (1バッチ数時間)

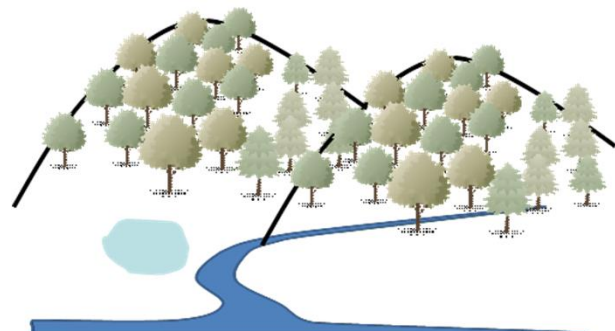
除染時の考慮点と課題

- 森林除染については、発生量・処理量が多くなることから廃棄物量低減や減容化技術との対での考慮が必須。森林からの再汚染不安への対処が必要。
- また、土壌（農地）、瓦礫については、再利用等を考慮した除染技術、処理技術が必要。

②除染技術の高度化に向けた課題



③廃棄物処理のニーズと課題



森林・河川・ため池



瓦礫

場所	種類	処理法/用途	課題
森林	木材	伐採	被ばく多い
	資材	2次産業	廃材の再利用
	その他	新産業(バイオマスエネルギー)	コスト・焼却理解
河川・ため池	底泥	分級	再利用基準なし
	水	凝集沈殿	繰り返し実施?
瓦礫	可燃物	焼却	理解得難い・灰の扱い
	不燃物・難燃物	埋設	処分場

除染廃棄物処理時の考慮点と課題

- ・ **焼却**については**周辺住民の理解**が必要。その理解が進めば、減容安定化処理は前進。但し、焼却灰は放射能のレベルに応じた処理が必要。
- ・ **バイオマス化**によって森林除染が進められる可能性高い。但し、再利用までの付帯設備類が必要であるため中・長期的処置必要か。

土壌の除染・減容化

4

- ✓ 水溶したセシウムは、粘土の構造の間に取り込まれ、極めて強く「固定」される。
- ✓ 土壌粒径が小さいほどセシウムを良く吸着。



土壌の分級、研磨、洗浄、加熱を軸とした除染技術の提案

No.	事業者	特徴	分級	研磨	洗浄	加熱
1	太平洋セメント	回転炉により昇華しセシウム分離	—	—	—	○
2	ロート製薬	特殊ポンプと篩機による小型分級システム	○	—	○	—
3	竹中工務店	ボールミル・ドラムウォッシャ	○	○	○	—
4	熊谷組	摩砕洗浄機	○	○	—	—
5	日立プラントテクノロジー	分級後、700℃で加熱	○	—	—	○
6	鴻池組	摩砕洗浄機、キャビテーション洗浄	○	○	○	—
7	佐藤工業	高圧ジェット水流、マイクロバブル洗浄・分離	○	○	○	—
8	東芝	シュウ酸によるCs溶離	—	—	○	—

No.1は加熱、No.2～7は分級、No.8は酸溶解

土壌の除染・減容化の成果と課題

12

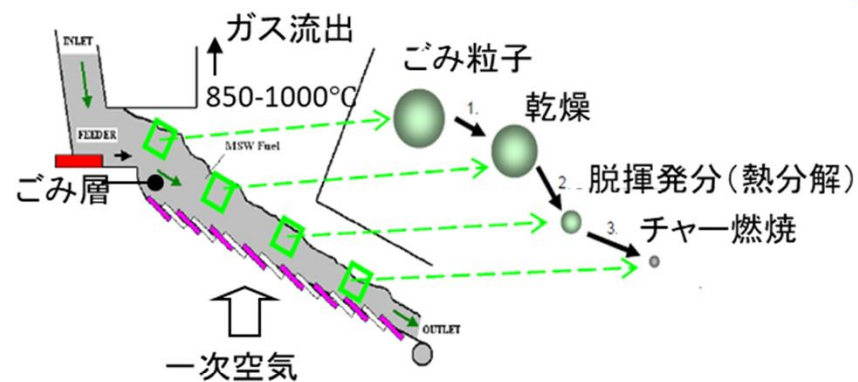
成果

- 回転加熱による昇華、酸による除染は90%以上の除染効果。回転加熱は、下水汚泥にも応用可能
- 減容化には、締固め等が必要。
除染目標1,000または8,000Bq/kgの場合、
除染効果約80%では5,000または40,000Bq/kgまでの原土が適用範囲。
- 細粒分を除去するため、いずれの技術も農地へは適用が難しい。

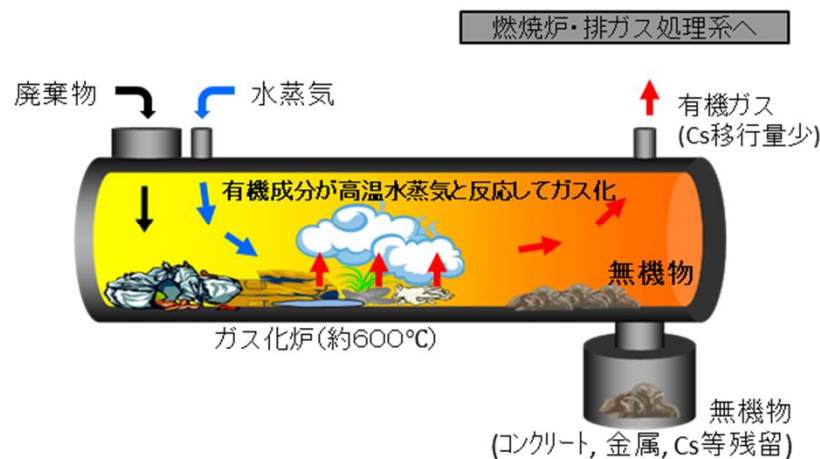
課題

- コスト低減が課題
- 農地除染技術の開発が必要
- 減容技術適用場所の最適化

- スケールアップに向けた焼却時の放射性Cs挙動評価
 - ・ 燃焼シミュレーションにより、一般焼却炉における灰の生成過程、セシウムの凝集過程を解析
- 高線量向け減容処理技術の開発
 - ・ 廃棄物の分別負担が少なく、コンパクトな排ガス処理系を有する減容技術の開発



焼却時のCs凝集過程の解析



減容処理技術の開発

JAEAが担当した技術実証事業（H23～26）の結果の整理

平成23-26年度除染技術実証事業（内閣府、環境省）、平成26年度除去土壌等の最終処分に向けた減容化等に関する技術調査業務報告書（環境省）等からの整理

技術区分	除染率※1 【%】<件数>	濃縮率※2 【倍】<件数>	処理コスト※3 【万円/t】<件数>	メリット	デメリット
分級処理	10～98 (平均75) <32>	1.3～34 (平均6.7) <13>	0.4～3 (平均1.2) <19>	重金属除去で実績あり。実用化段階の技術が多い。大量かつ比較的安価に処理が可能。	除染率が化学処理や熱処理よりも低い。粘土分の割合が高い土壌は濃縮物量が多くなるため効果的な分級が難しい。
化学処理	52～96 <5>	—	6～10 <2>	砂質土に適用できるほか、粘性土にも効果が期待される。	セシウムの吸着剤が必要。浄化物中に残留する溶媒等の処理や排水処理が必要。土壌の性状や組成が変化するため、再生利用先の用途開拓が必要。
熱処理	94～99.8 <3>	10～20 <3>	21 <1>	粘性土や砂質土などの性状に係わらず適用でき、除染率も高い。	相当量の反応促進剤が必要。浄化物もその分増加。処理コスト高。排気処理等が必要。

※1 除染率（%）＝（1－浄化物の放射能濃度÷処理対象物の放射能濃度）×100

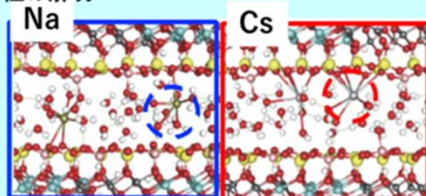
※2 濃縮率（倍）＝分離濃縮物の放射能濃度÷処理対象物の放射能濃度、除染率及び濃縮率は各試験に用いた試料の放射能濃度及び性状等が異なるため参考値

※3 処理コストは、排水処理等付帯設備の範囲やコスト評価項目（設備費、運転費、資材費、労務費等）が異なるため参考値

JAEAにおける主なCs吸脱着機構解明基礎研究

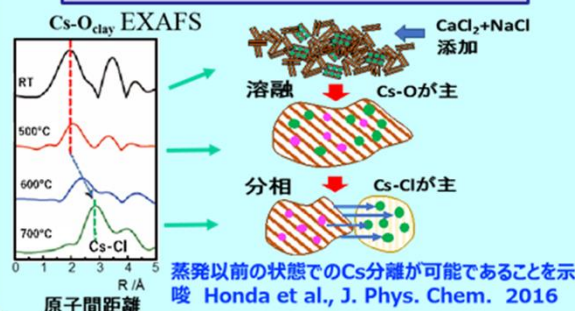
粘土鉱物へのCs吸脱着機構解明

分子動力学シミュレーションによる黒雲母とアルカリ金属の吸着特性の解明

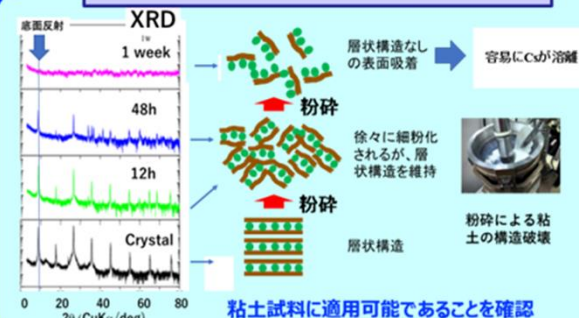


風化の進行でCsの粘土への吸着特性が、他のアルカリ金属イオンより高くなることを解明 Ikeda, J. Chem. Phys. 2016

低温熱処理機構解明



Cs分離促進法の開発



《本日の内容》

1. JAEAについて

2. 事故直後のJAEAでの取組み

- (1) 環境中に放出された放射性物質について
- (2) 除染モデル実証事業から得られた知見
- (3) 事故直後の技術実証について

3. JAEAにおける最近の研究成果

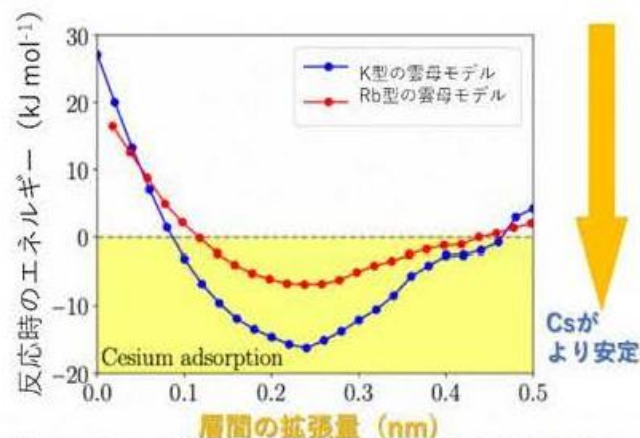
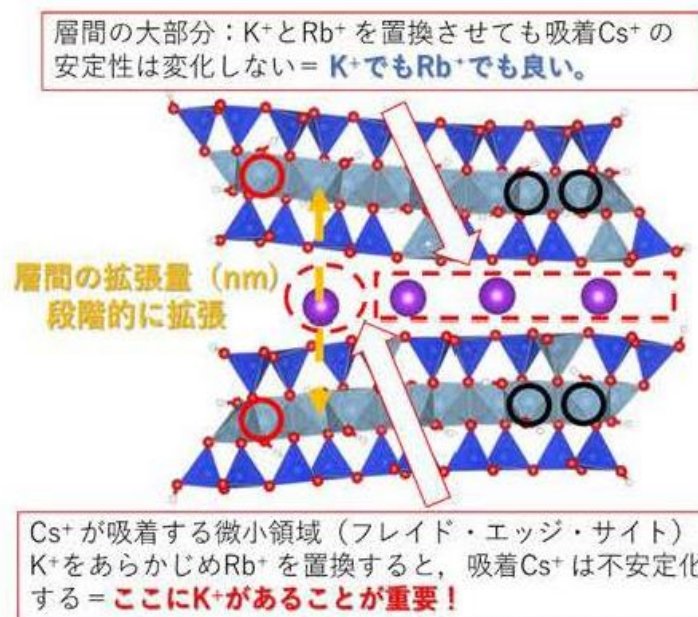
4. 今後の取組みへの期待



① 壊れかけの雲母がセシウムを捕まえる仕組みを解明

令和6年7月31日プレス発表

- 土壌中の鉱物が放射性セシウムを不働化する仕組みを明らかにしました。
- これまで、雲母鉱物の層状構造の層間に放射性セシウムを強く吸着する微小領域が存在することは知られていましたが、そのメカニズムは未解明でした。
- 今回、この微小領域を構成する元素の一部をサイズの大きな別の元素に置換させた際の吸着反応の変化から、セシウム最安定化のメカニズムをの詳細を明らかにしました。
- 本研究の成果は、天然鉱物が吸着能力を発現させる機構を原子レベルで解明したものであり、放射性セシウムを封じ込める機能性物質の開発などへの応用が期待されます。
(プレス発表文より)



【共同研究先】
京都府立大学

値が大きいくほどシート間が拡張した状態を意味する。
約0.22 nmの拡張状態でCs⁺は最安定状態になる。

② セシウムはどのように土に吸着するのか？

- 高度なシミュレーションと実験が解き明かす名のスケールの世界 -

令和7年2月6日プレス発表

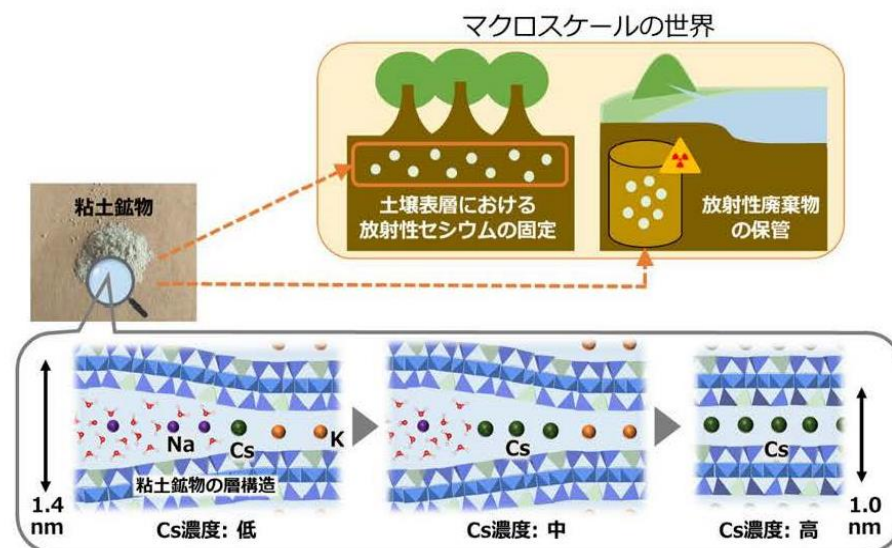
○原子力発電所の事故から放出された放射性セシウム（Cs）は土壌表層に固定されています。これは土壌表層に含まれる粘土鉱物にCsが強く吸着したことが原因と考えられています。

○しかし粘土鉱物へのCsの吸着反応は複雑なため、未解明な点が多く残されています。本研究では、高精度な実験とスーパーコンピュータによるシミュレーションを駆使することで、「Csが粘土鉱物にどのように吸着するか？」を1ナノスケール（1メートルの1億分の1）のスケールでとらえることに成功しました。

○さらに、Csはその吸着状態において、イオン結合による比較的弱い結合状態であるにも関わらず、粘土鉱物に挟まれたナノスケールの構造の影響で強く吸着することを明らかにしました。

○今回の発見により、Csの地球環境での動態をより正確に予測できるようになります。さらに、Csや粘土鉱物がかかわる放射性廃棄物の処理をより安全に進めるために役立つと期待されます。

（プレス発表文より）



ナノスケールの世界
粘土鉱物によるセシウムの吸着（セシウム濃度によって吸着場所が異なる）

本研究では、非放射性のセシウムを使用して実験を行っています。

【共同研究先】

公益財団法人高輝度光科学研究センター

国立大学法人 東京大学 大学院理学系研究科

国立大学法人 東京大学 アイソトープ総合センター

③ 土壌中の放射性セシウムを「塩」×「真空」でスピード除去 － 新発見の「高速イオン交換」現象 －

令和7年7月11日プレス発表

- 放射性セシウムで汚染された土壌の除染は、除去土壌の処理における課題の一つです。
- 熱処理は有望な土壌除染法の一つですが、従来の方法では添加剤を用いても1000℃以上の高温が必要で、800℃程度の中温域では除染率が大きく低下します。
- 本研究では、汚染土壌に塩化ナトリウムを添加し、真空中で800℃の熱処理を行うことで、同一温度条件の従来型熱処理と比べて約6倍高い、90%以上の除染率を達成しました。この要因は、真空環境が粘土鉱物の層間距離を拡張し、「真空中での高速イオン交換」という新しい現象を誘起したことによるものです。
- また、従来型の高温熱処理と比べ、エネルギーコストを大幅に抑制できるため、より現実的で効率的な土壌除染が可能となります。これにより、原子力災害で生じた汚染土壌の効率的な処理に向けて、新たな技術的選択肢を提供します。

(プレス発表文より)

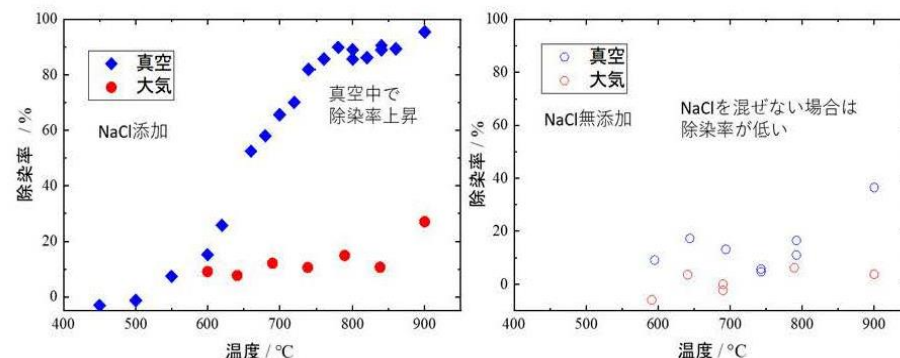
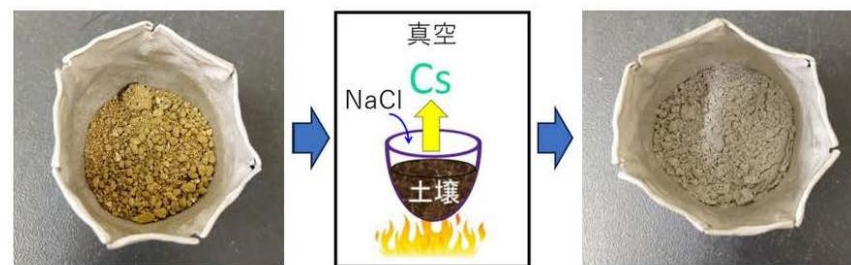
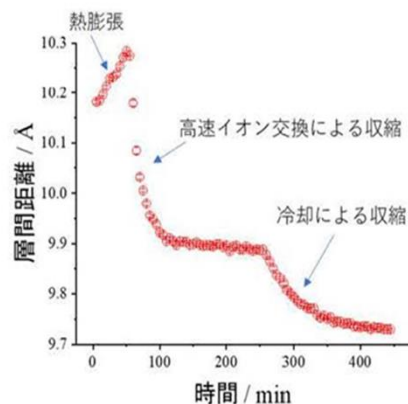


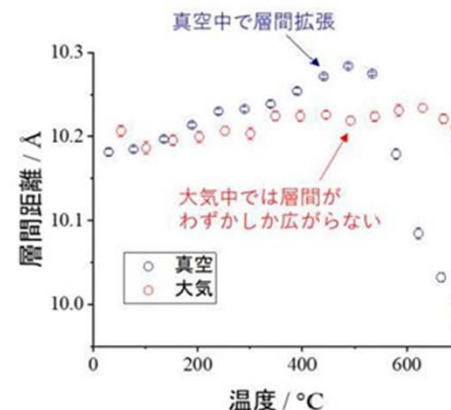
図1 汚染土壌(福島県内で採取)に2時間の熱処理を行った際の除染率の変化

③ 土壌中の放射性セシウムを「塩」×「真空」でスピード除去 － 新発見の「高速イオン交換」現象 －



開始から 70 分で 700℃まで温度を上げ、その後 180 分間は温度を保持。開始 250 分から冷却した。開始 50 分(約 500℃)を境に、温度が上昇しても急激な層間収縮が生じた

図2 塩化ナトリウムを添加した真空熱処理での粘土鉱物の層間距離の変化



真空熱処理(青丸)では急激な収縮が始まる前に層間距離が大きく広がるが、大気熱処理(赤丸)では層間がわずかに広がらない

図3 700℃まで昇温した際の粘土鉱物の層間距離変化

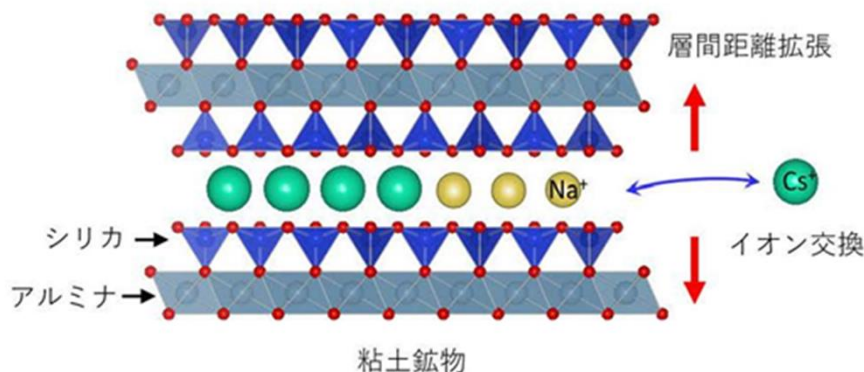


図4 真空熱処理におけるイオン交換の模式図

粘土鉱物の層間距離は真空中で大きく拡張、層間のセシウムイオン(緑球)とナトリウムイオン(黄球)との交換が進行しやすくなる

《本日の内容》

1. JAEAについて
2. 事故直後のJAEAでの取り組み
 - (1) 環境中に放出された放射性物質について
 - (2) 除染モデル実証事業から得られた知見
 - (3) 事故直後の技術実証について
3. JAEAにおける最近の研究成果
4. 今後の取り組みへの期待



私見ですが…

○積極的な情報公開などを通じて公開性・透明性を確保することは重要（HLWの最終処分と同じ状況にならないためにも）

- ・再生復興材の利用の先行事例を増やし、漠然とした不安を払拭
- ・再生利用地や最終処分場の維持管理には、地域の方々の参加も

○技術的なオプションを充実させるために技術開発の継続は必要

- ・基礎研究と現場における課題を共有し、より効率的・効果的に処理の行える技術の整備
- ・課題解決には産学官の連携が重要（研究機関はアイデアを、産業界は実用化に必要なノウハウの提供、国は制度整備での連携）

○継続的に取組むための人材の確保



立場や専門分野を離れ、自由に意見交換できる場（ネットワーク）を確保し、英知を結集した取組みに期待

誰もが安心して安全に暮らせる福島のために…



ご静聴、ありがとうございました。

