

# 1-1805 汚染土壌浄化・再利用と廃棄物高減容化 を目指した亜臨界水処理システムの開発

(JPMEERF20181005)

<研究代表機関>

国立大学法人東京工業大学

<研究分担機関>

三菱マテリアル株式会社

## 全体目標

高度汚染土壌（環境省汚染土壌分類カテゴリーC、D）を対象に、汚染土壌からのCsの高速脱離、処理土壌の再利用、最終廃棄物の高減容化を同時に達成できる連続土壌処理・廃棄物減容システムを開発する。

## 技術的な達成目標

- ①土壌からCsを高速・高効率脱離
- ②処理後に土壌として再利用
- ③Cs安定固定化と廃棄物高減容化

## 数値目標

- ①亜臨界水イオン交換技術で  
99%以上のCsを土壌より回収
- ②最終廃棄物（ガラス固化体）の  
元土壌に対する体積減容率  
1万分の1以下

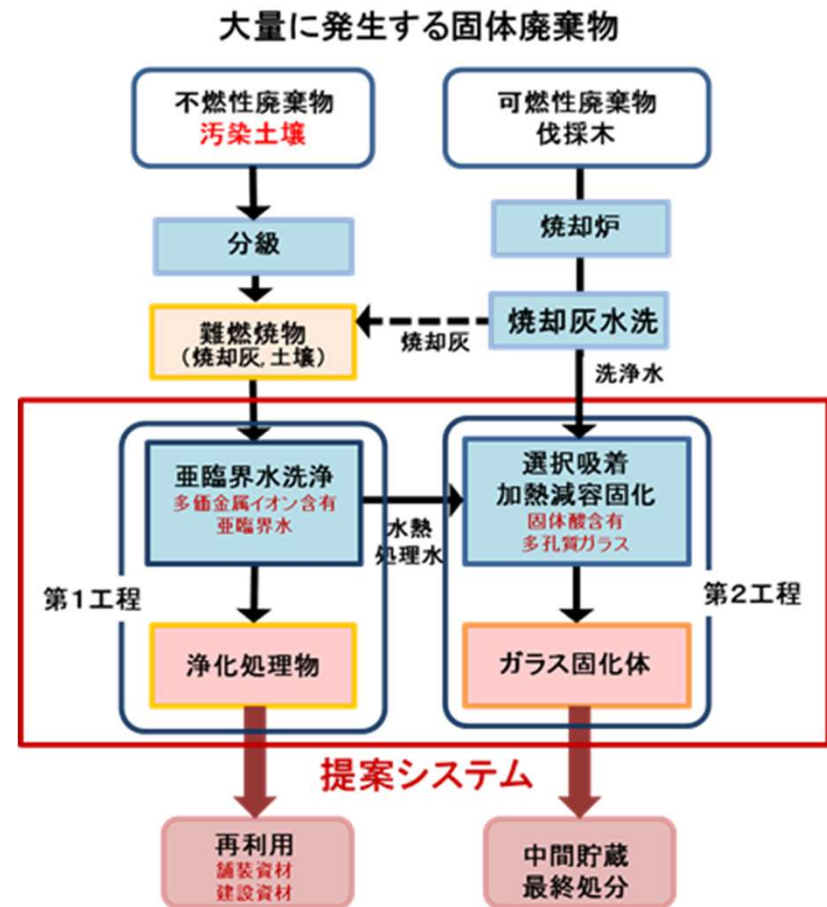


図1 土壌処理・廃棄物減容システム

## サブテーマ1 亜臨界水イオン交換による福島土壤からのCs脱離

①バーミキュライトからのCs脱離に対する亜臨界水イオン交換現象の速度論・平衡論の解析・理論化、②亜臨界水イオン交換プロセスの設計法の確立

## サブテーマ2 カラムを用いた亜臨界水イオン交換プロセスによる連続処理

①カラム法により土壤細粒子からのCsの回収率99%以上の達成、②サブテーマ1で確立した亜臨界水イオン交換理論拡張による連続処理プロセス解析モデル構築、③小型カラム試験装置を用いた亜臨界水イオン交換による福島土壤細粒子(75 μm以下)からのCs脱離挙動測定(実土壤試験)

## サブテーマ3 亜臨界水イオン交換処理装置システムの開発(新規プロセス概念)

①多室平板カラム型連続処理装置を用いた土壤細粒子の処理、②平板カラムの数理モデル化とプロセス設計、③実機装置システム及び実機構成の概念の確立、④多室平板カラム型の実用装置の全体像の構築

## サブテーマ4 土壤から回収したCsの高減容固定化技術

①固体酸含有多孔質ガラスを用いた土壤細粒子処理水からのCsガラス固化の実施、②Csの選択吸着性とガラス固化体作製に伴うCs揮発率や耐水性試験、③実機規模のガラス固化プロセスを想定した物質収支の計算と廃棄物減容率1万分の1以下の達成

## サブテーマ5 汚染土壤の高減容処理処分システムの評価

①亜臨界水イオン交換プロセスと回収Csの高減容固定化プロセスを統合化した土壤処理・廃棄物減容システムに対する装置規模、物質収支、熱収支、放射能収支、二次廃棄物発生量、経済性の評価

# 研究スケジュール（1）

サブテーマ	研究項目	平成30年度				令和元年度				令和2年度			
		1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
1. 亜臨界イオン交換による福島土壤からのCs脱離	①粘土鉱物を用いた回分式亜臨界水処理 ・粘土鉱物の準備 ・回分式亜臨界水処理試験 ・粘土鉱物試料の分析 ・イオン交換現象の理論構築	←→	←→	←→	←→								
	②実汚染土壤を用いた回分式亜臨界水処理 ・実汚染土壤の準備 ・回分式亜臨界水処理試験 ・実汚染土壤試料の分析 ・イオン交換現象の解析				←→	←→	←→	←→	←→	←→			
2. カラムを用いた亜臨界水イオン交換プロセスによる連続処理	①粘土鉱物を用いた小型カラム試験 ・小型カラム試験装置の作製 ・粘土鉱物を用いたカラム試験 ・粘土鉱物試料の分析 ・カラムの動的挙動の解明	←→	←→	←→	←→								
	②実汚染土壤を用いた小型カラム試験 ・実汚染土壤を用いたカラム試験 ・実汚染土壤試料の分析 ・カラムの動的挙動の解明 ・プロセス操作条件の検討					←→	←→	←→	←→	←→	←→		
3. 亜臨界水イオン交換処理システムの開発	①要素試験装置の設計 ・実機装置システムの概念構築 ・要素試験装置の概念構築 ・工学的課題の整理 ・要素試験装置の設計	←→	←→	←→	←→								
	②要素試験装置の製作 ・要素試験装置の製作・調整 ・要素試験装置の設置・試運転					←→	←→	←→	←→				
	③要素試験装置による土壤洗浄試験 ・模擬土壤による土壤洗浄試験 ・平板カラムの数理モデル化 ・実機装置システムの検討									←→	←→	←→	

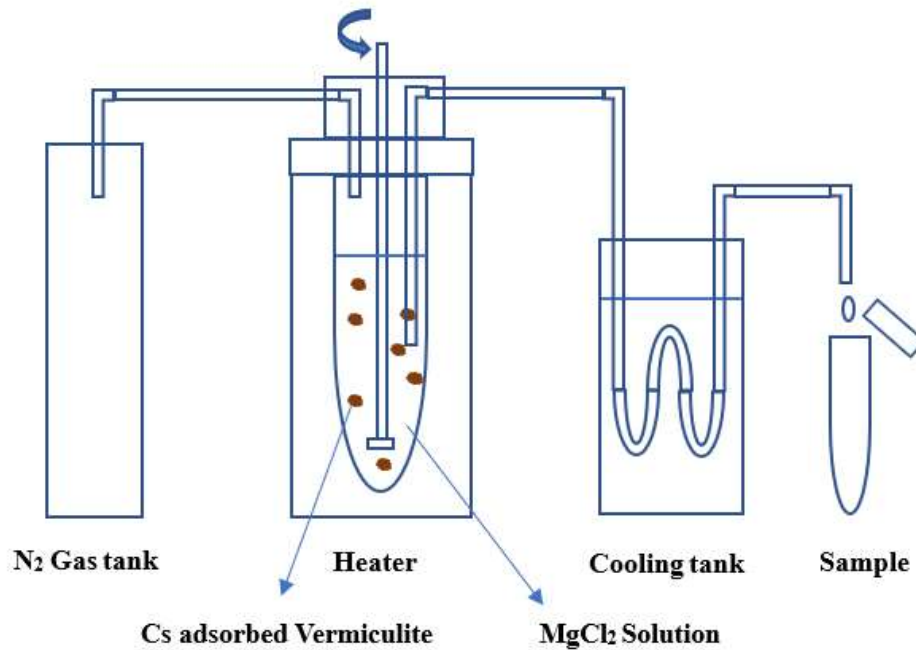
# 研究スケジュール（2）

サブテーマ	研究項目	平成30年度				令和元年度				令和2年度				令和3年度
		1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q
4. 土壌から回収したCsの高減容固定化技術	①機能性多孔質ガラスを用いたCs固定化 ・機能性多孔質ガラスの作製 ・Cs回収試験 ・ガラス固化試験 ・ガラス固化体の分析 ・ガラス固化体の耐水性試験					←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	
	②Cs固定化プロセスの評価 ・物質収支計算 ・プロセス構築・評価							←→				←→	←→	
5. 汚染土壌処理・高減容システムの評価	①実規模システムの検討 ・処理シナリオの設定 ・処理フローの検討 ・物質、エネルギー、放射能収支の算出 ・二次廃棄物発生量の評価									←→	←→	←→	←→	
	②経済性評価 ・実機システム構造の検討 ・コスト試算											←→	←→	
	③総合評価 ・処理済土壌の性状評価 ・Cs廃棄物の減容効果 ・総合評価												←→	←→
KO会合 AD会合	①キックオフ（KO）会合 ②アドバイザーボード（AD）会合	・ KO会合（7/13） ・ 第1回AD会合（12/18）				・ 中間ヒアリング（7/24） ・ 第2回AD会合（12/12）				・ 第3回AD会合（9/29） ・ 第4回AD会合（12/15） ・ 第5回AD会合（3/2）				

## サブテーマ1

### 亜臨界水イオン交換による福島土壌からのCs脱離

- ①バーミキュライトからのCs脱離に対する亜臨界水イオン交換現象の速度論・平衡論の解析・理論化
- ②亜臨界水イオン交換プロセスの設計法の確立

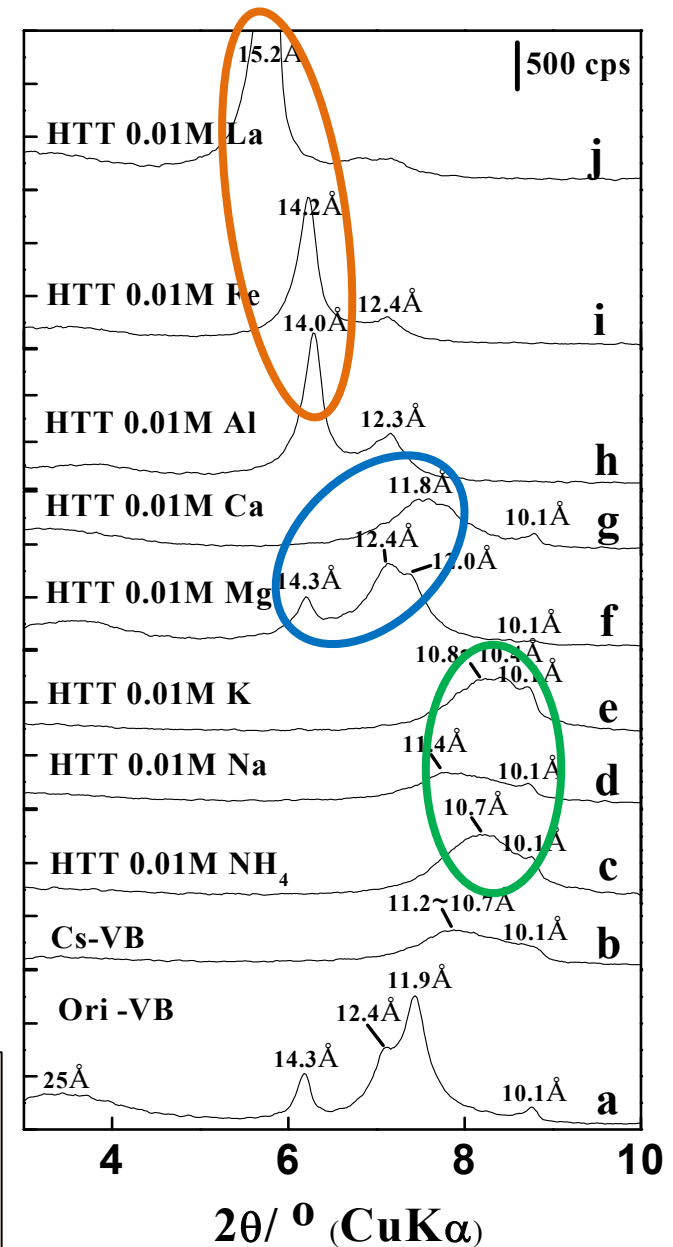
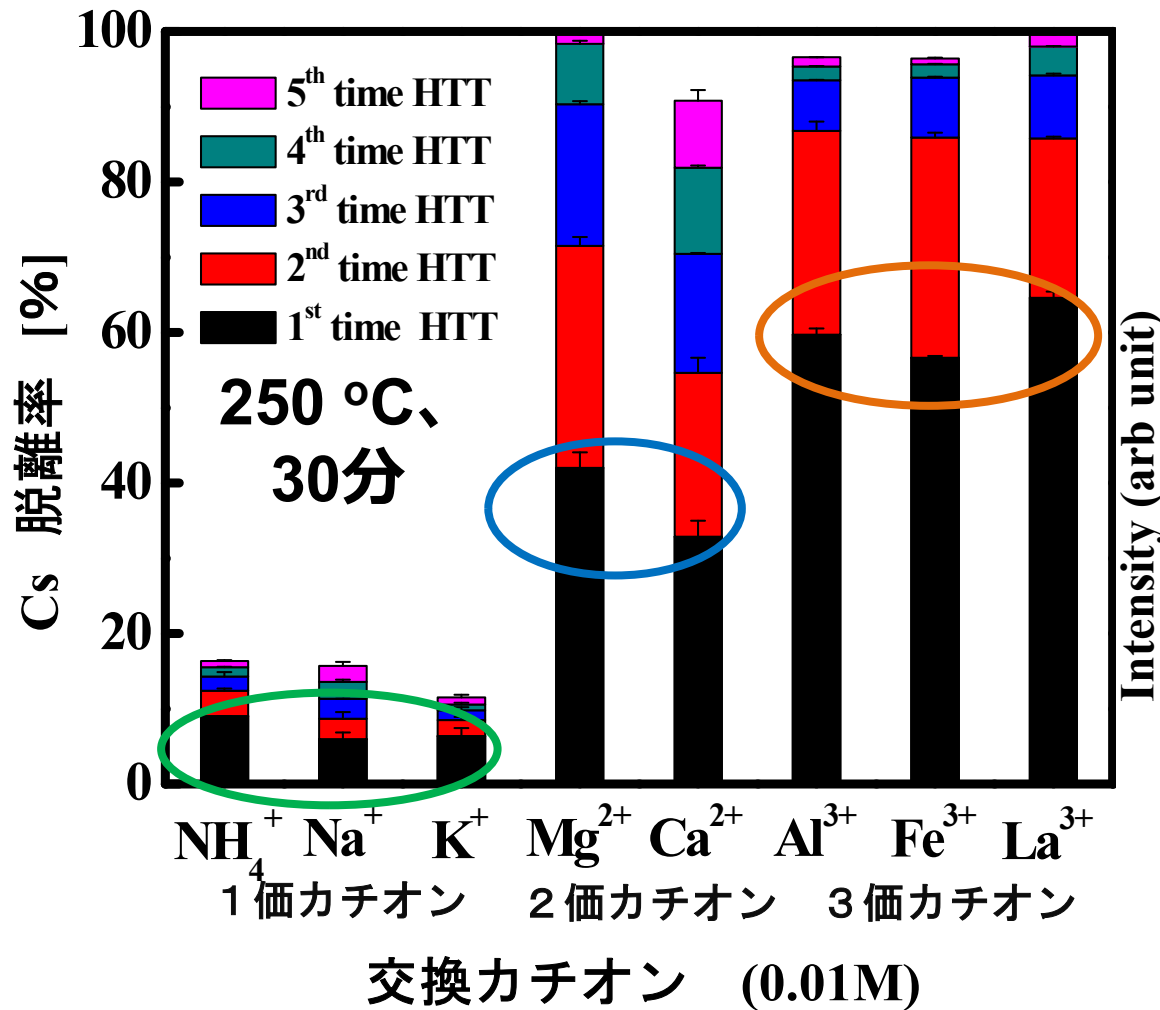


回分試験装置

バーミキュライト物性	
粒子径(um)	100-710
密度(kg/m3)	850~1050
空隙率(-)	0.4
Cs <sup>+</sup> 吸着量 (mg/g)	39.40

実験条件	
温度 (°C)	250
圧力(MPa)	2~6
液量(ml)	200
バーミキュライト量(g)	1.8
初期Mg <sup>2+</sup> 濃度(mol/L)	0.1, 0.05, 0.01

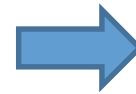
- 異なったMg<sup>2+</sup>濃度の水溶液を用いてVermiculiteに吸着したCsをイオン交換法で脱離させる。脱離速度とイオン交換平衡を測定する。
- 初期Mg<sup>2+</sup> 濃度: 0.1, 0.05, 0.01 mol/L



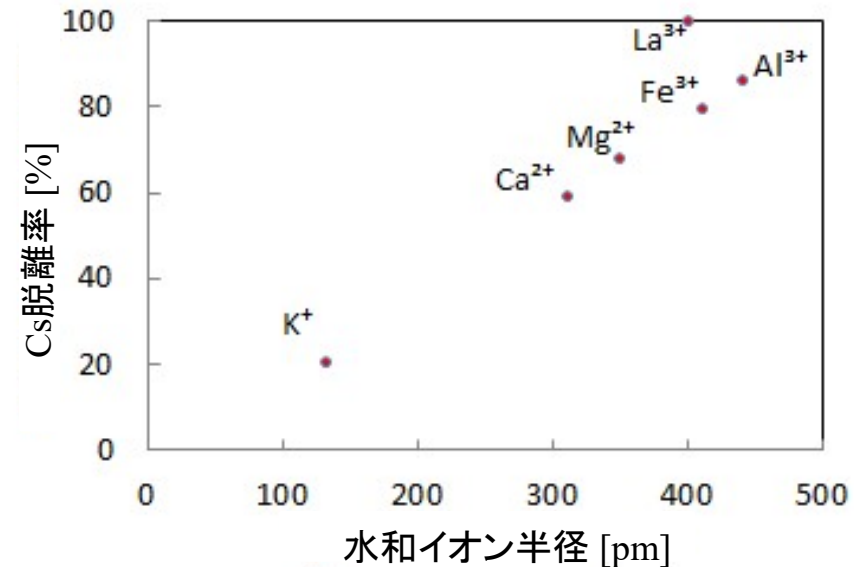
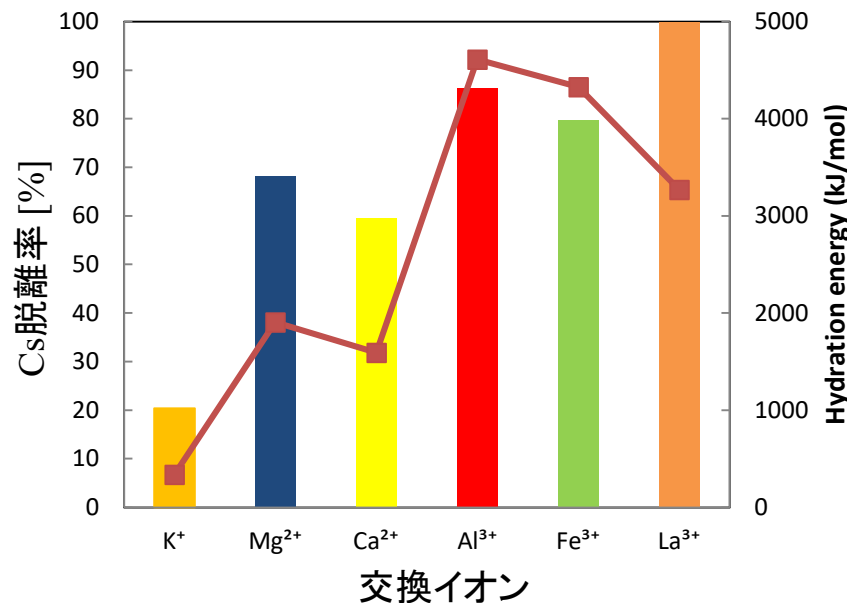
- ✓ 3価カチオンM<sup>3+</sup> (Al<sup>3+</sup>/Fe<sup>3+</sup>/La<sup>3+</sup>)は1、2価のカチオンに比べて高いCs脱離性能を示す。
- ✓ XRDによってイオン交換過程を確認



- 亜臨界水イオン交換条件
- バーミキュライト : 2 g
  - 溶離液 :  $KCl$ ,  $MgCl_2$ ,  $CaCl_2$ ,  $AlCl_3$ ,  $FeCl_3$ ,  $LaCl_3$  (10 mM) 200 mL
  - 操作時間 : 8 h
  - Cs 吸着量: 33.6 mg/g-dry
  - Measurement : AAS

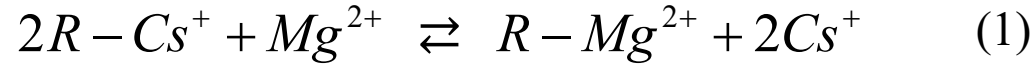


水和イオンの水和エネルギーと水はイオン半径に対するCs脱離率の関係を調べる。



- ✓ 亜臨界水カチオン交換によってVermiculiteからCsを脱離できる。
- ✓ Csの脱離率は交換カチオンの水和イオン半径に比例する。

イオン交換体固定基のCs<sup>+</sup>と水溶液中のMg<sup>2+</sup>との交換反応は



イオン交換過程の平衡関係は選択係数 $K_S$ により記述できる。選択係数 $K_S$ は

$$K_S = \frac{q_{AEq} C_{BEq}^2}{C_{AEq} q_{BEq}^2} \quad (2)$$

$C_{AEq}$ ,  $C_{BEq}$ : 平衡時における水溶液中のMg<sup>2+</sup>濃度[mol-Mg/m<sup>3</sup>-aq]とCs<sup>+</sup>濃度[mol-Cs/m<sup>3</sup>-aq]

$q_{AEq}$ ,  $q_{BEq}$ : バーミキュライト中に吸着されているMg<sup>2+</sup>濃度[mol-Mg/m<sup>3</sup>-verm]とCs<sup>+</sup>濃度[mol-Mg/m<sup>3</sup>-verm]

イオン交換体中のイオン移動過程(拡散過程)が律速であると仮定すると、イオン交換速度は

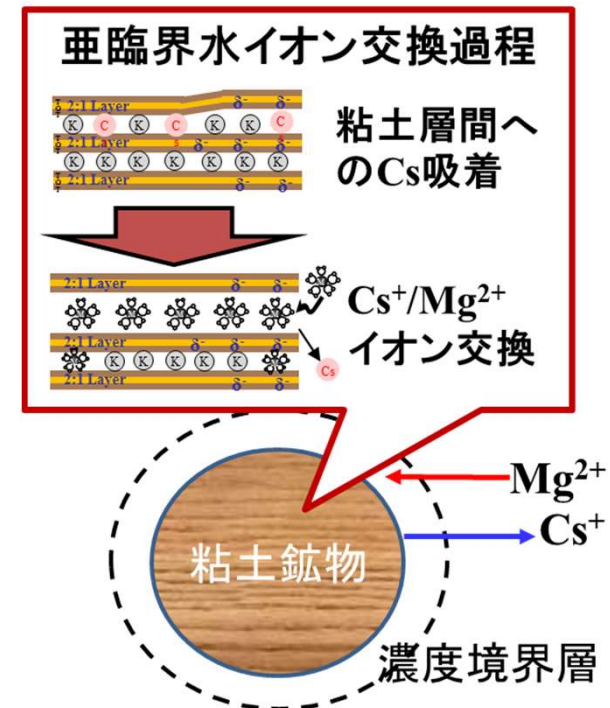
$$\frac{\partial q_{Mg}}{\partial t} = k_s a (q_{Mg}^* - q_{Mg}) \quad (3)$$

$\bar{q}$ : イオン交換体中の平均交換量

$q^*$ : 溶液中のMg濃度 $C_{Mg}$ と平衡な交換容量

$k_s a$ : イオン交換体側の総括物質移動係数[1/s]

$a$ : 比表面積[m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>]



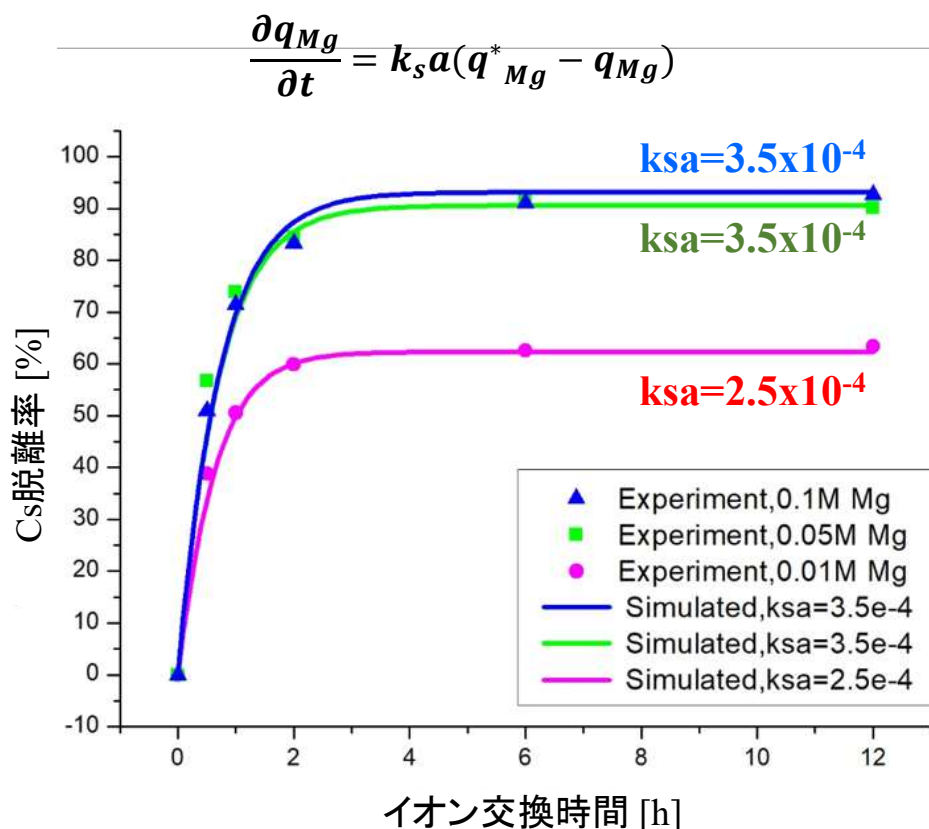
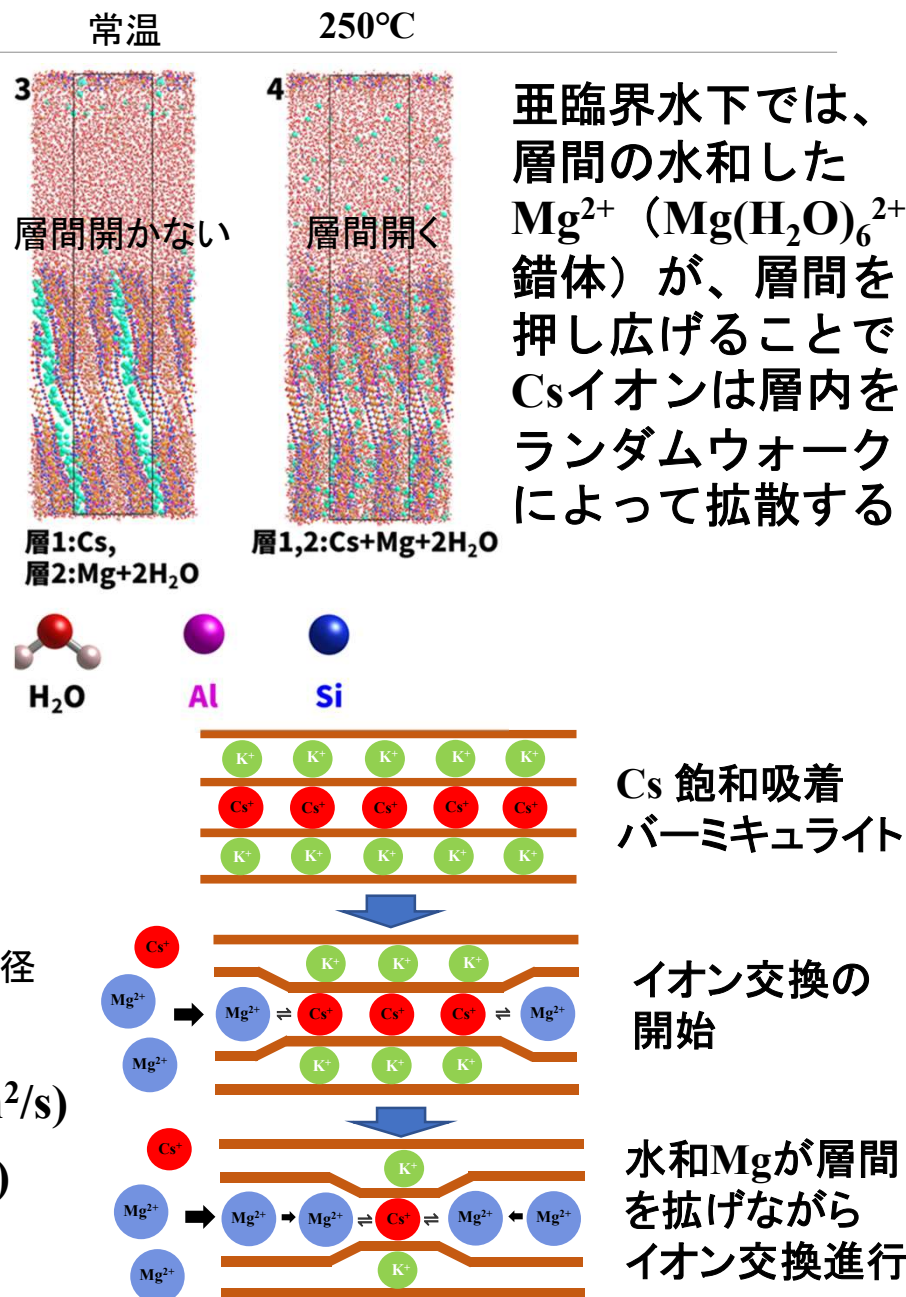


Fig.15 Kinetic analysis of Cs/Mg ion-exchange in vermiculite

$$k_s a = \frac{15 D_e}{R_p^2} \quad R_p: \text{バーミキュライトの粒子径}$$

➡ 有効拡散係数:  $D_e = 1.875 \times 10^{-12} \text{ (m}^2/\text{s)}$   
 通常の液相拡散:  $10^{-10} \sim 10^{-11} \text{ (m}^2/\text{s)}$



## サブテーマ2

# カラムを用いた亜臨界水イオン交換プロセス による連続処理

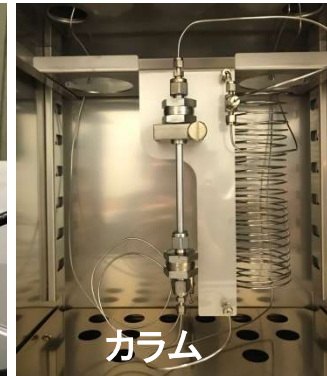
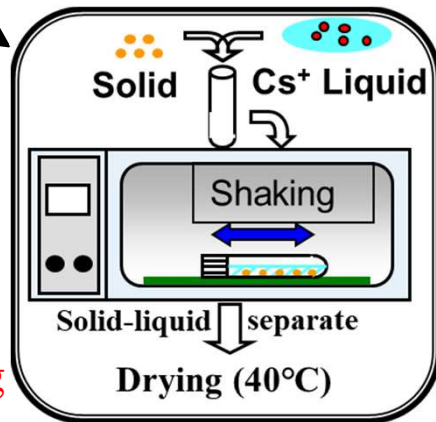
- ①カラム法により土壌細粒物からのCsの回収率99%以上の達成
- ②サブテーマ1で確立した亜臨界水イオン交換理論拡張による連続処理プロセス解析モデル構築
- ③小型カラム試験装置を用いた亜臨界水イオン交換による福島土壌細粒物(75  $\mu\text{m}$ 以下)からのCs脱離挙動測定(実土壌試験)

Vermiculitized biotite

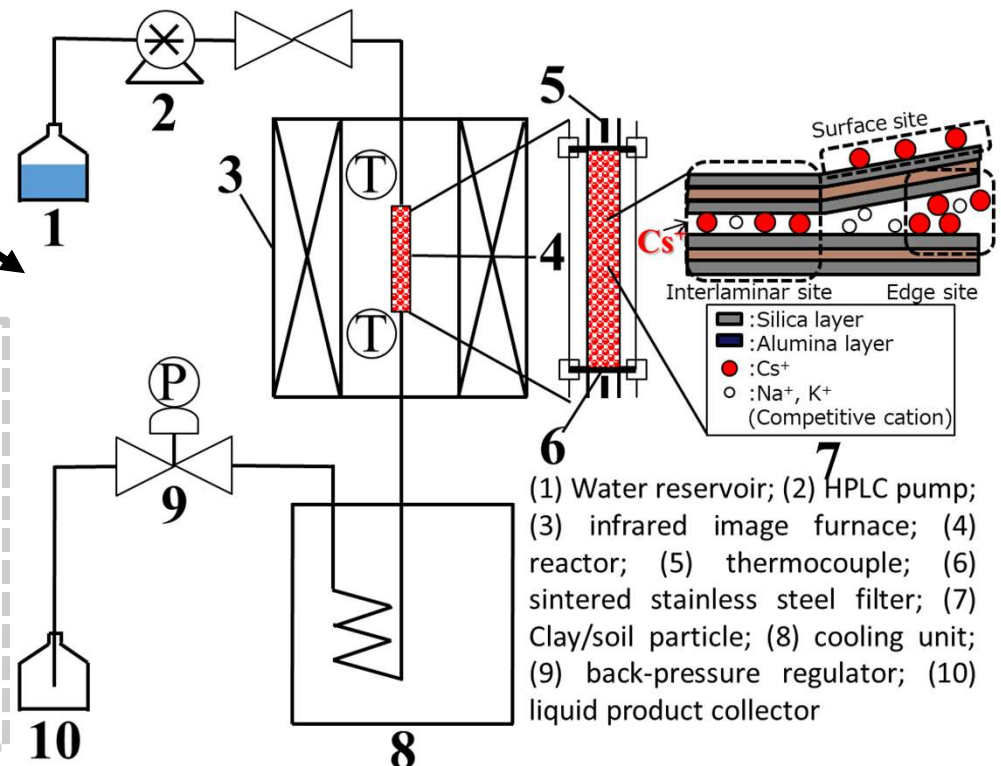


粒子径: 100–800 $\mu$ m

Cs 濃度: 1000ppm  
 固液比: 0.1g/10ml  
 温度: 25 $^{\circ}$ C  
 吸着時間: 3か月  
 乾燥: 40 $^{\circ}$ C, 3d  
 Cs吸着量: 41.93mg/g



カラムサイズ: 内径4.6mm x 長さ 27mm  
 Cs-VB 充填量: 0.5g  
 溶離剤中Mg<sup>2+</sup>濃度: 0, 0.01, 0.05, 0.1M  
 温度: 25 $^{\circ}$ C, 150 $^{\circ}$ C, 200 $^{\circ}$ C, 250 $^{\circ}$ C  
 圧力: 0.1, 1.0, 2.0, 4.0MPa  
 流量: 0.5mL/min  
 流出液の分画量: 10mL



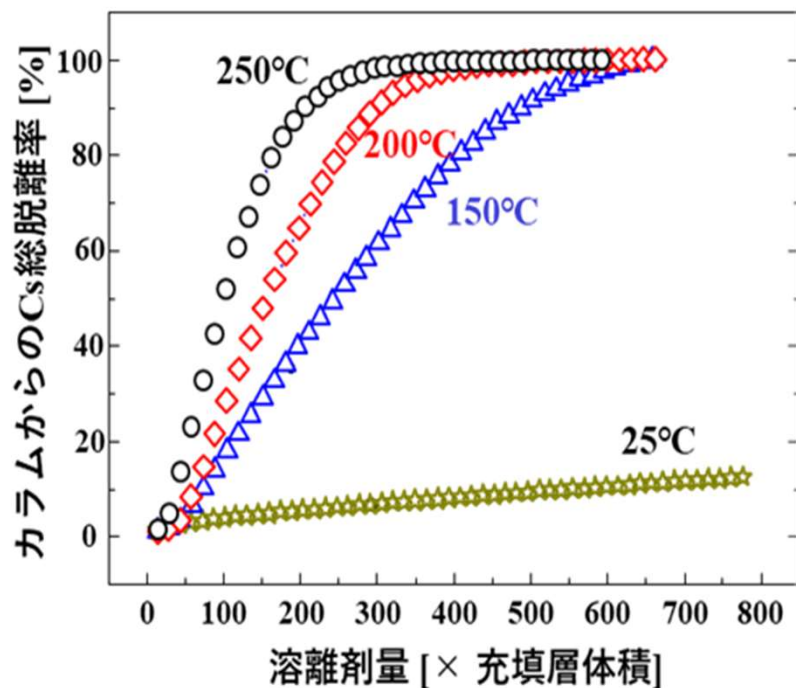


図4 カラムのCs脱離挙動に対する温度の影響  
(溶離剤中のMg<sup>2+</sup>濃度 0.01M、流速0.5mL/min)

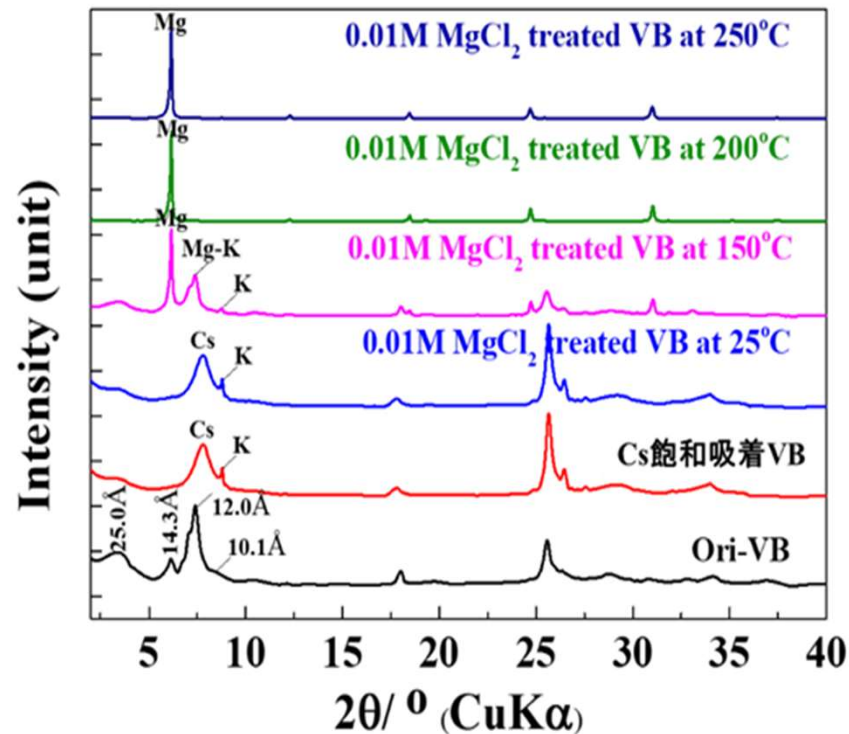


図5 カラム試験使用前後のバーミキュライトのXRD分析

- 150°C以上の亜臨界水条件では交換イオンとしてMg<sup>2+</sup>を含む溶離剤をカラムに流してCsの完全脱離 (Cs回収率100%) を達成できた。
- カラム試験前後のバーミキュライトのXRD分析より、Cs吸着に同定されるピークがカラム試験後には消失しており、Mg吸着に同定されるピークのみとなり、Cs完全脱離 (Cs回収率100%) を裏付けている。

1. カラム物質収支:

$$\varepsilon \frac{\partial C_{Mg}}{\partial t} + u \frac{\partial C_{Mg}}{\partial z} + (1 - \varepsilon) \rho_a \frac{\partial q_{Mg}}{\partial t} = D_z \frac{\partial^2 C_{Mg}}{\partial z^2} \rightarrow D_z \frac{\partial^2 C_{Mg}}{\partial z^2} = 0$$

2. バーミキュライトのMg<sup>2+</sup>/Cs<sup>+</sup>イオン交換 (サブテーマ 1) :

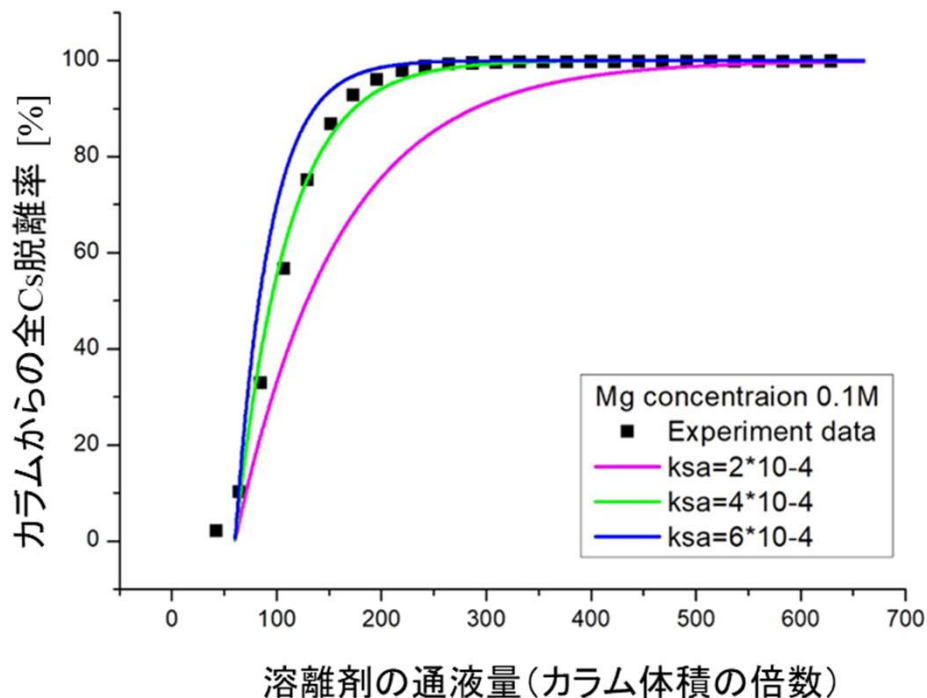
$$\frac{\partial q_{Mg}}{\partial t} = k_s a (q_{Mg}^* - q_{Mg})$$

3. 電荷バランス:

$$2(C_{Mg0} - C_{Mg}^*) = C_{Cs}^*$$

4. 吸着サイトバランス:

$$q_{Cs0} - q_{Cs}^* = 2q_{Mg}^* \quad K' = \frac{q_{Mg} \cdot C_{Cs}^2}{C_{Mg} \cdot q_{Cs}^2}$$



カラム試験から得られたk<sub>s</sub>a

Flow rate (ml/min)	Mg concentration (mol/L)	k <sub>s</sub> a
0.5	0.1M Mg	4.0*10 <sup>-4</sup>
0.5	0.01M Mg	1.5*10 <sup>-4</sup>
0.2	0.1M Mg	4.0*10 <sup>-4</sup>

回分カラム試験から得られたk<sub>s</sub>a

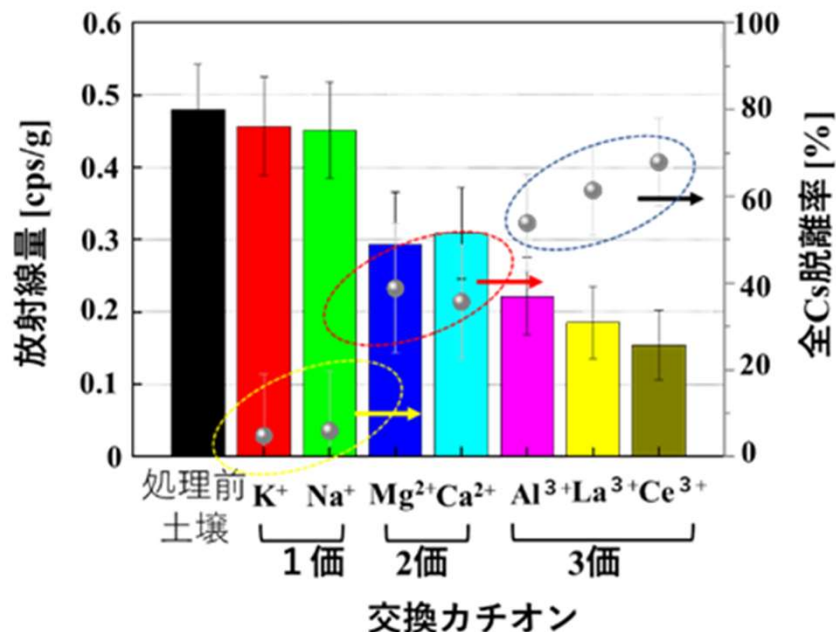
Mg concentration	K <sub>s</sub> a (1/s)
0.1M Mg	3.5*10 <sup>-4</sup>
0.05M Mg	3.5*10 <sup>-4</sup>
0.01M Mg	2.5*10 <sup>-4</sup>

## 試験1

各種交換カチオン（ $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Al^{3+}$ 、 $La^{3+}$ 、 $Ce^{3+}$ ）0.1Mを含む溶離剤（50mL）を150 $^{\circ}C$ 、4MPaの亜臨界水条件で流し、放射性Cs脱離試験を実施



2価以上の交換イオンを用いることで放射性Csは脱離され、交換イオンの価数が大きいほど放射性Csの脱離率は向上した。

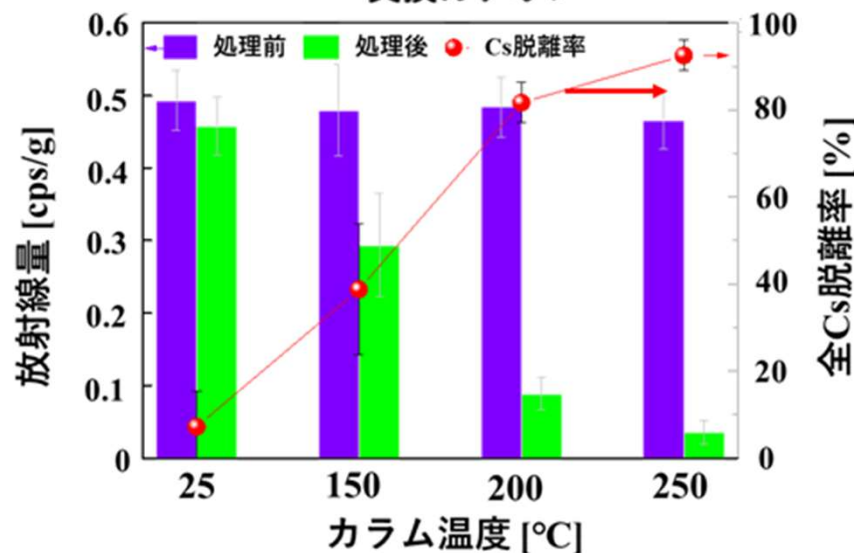


## 試験2

カラム温度を25 $^{\circ}C$ ~250 $^{\circ}C$ に変化させて（カラム圧力は4MPa一定）、0.1M  $MgCl_2$ を含む溶離剤（50mL）を0.25mL/minで流し、Cs脱離



カラム温度が高いほど放射性Cs脱離率は増加し、150 $^{\circ}C$ で40%、200 $^{\circ}C$ で82%、250 $^{\circ}C$ では95%以上のCsを脱離できた



250 $^{\circ}C$ 、4MPaの亜臨界水条件下で十分な溶離剤を流せば、Cs全量回収可能

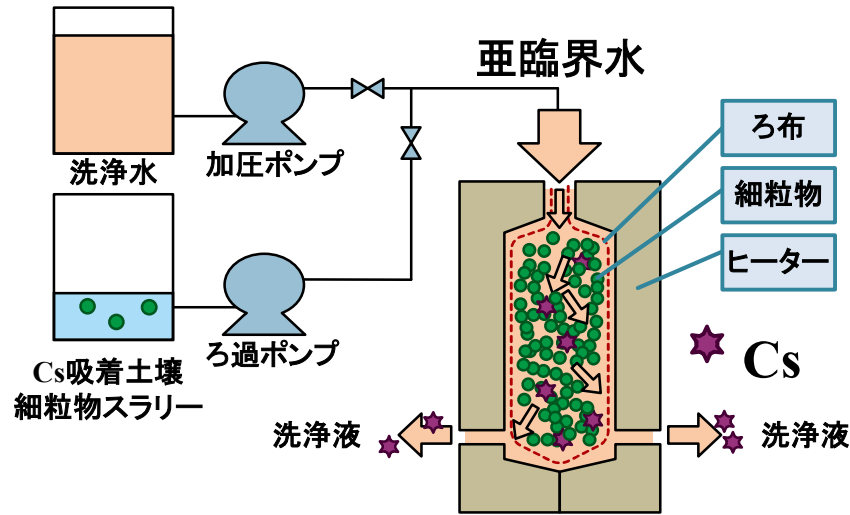


## サブテーマ3

### 亜臨界水イオン交換処理システムの開発

- ①多室平板カラム型連続処理装置を用いた土壌細粒物の処理
- ②平板カラムの数理モデル化とプロセス設計
- ③実機装置システム及び実機構成の概念の確立
- ④多室平板カラム型の実用装置の全体像の構築

## 平板カラムによるCs回収の原理: フィルタープレスのケーキ洗浄機能

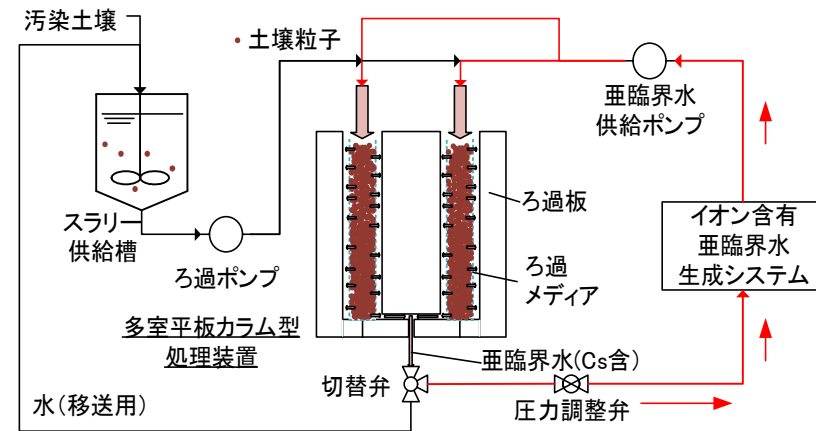


- スラリーで土壌分級細粒物を濾過メディアとして投入
- 交換イオン入った洗浄液を濾過メディアに加熱・加圧投入する。
- 土壌細粒子中のCsを亜臨界水イオン交換によって洗浄液に回収する

高压フィルタープレス: 伊藤忠建機Webサイトより



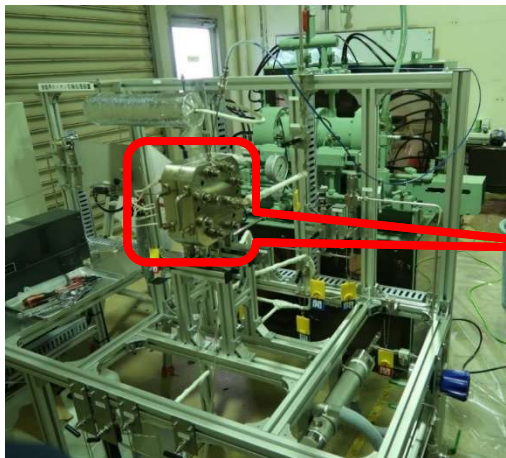
フィルタープレスは多数の平板カラムが並んだ構造



多室平板カラム型連続処理装置

実証が必要な要素は亜臨界水通液によるCs脱離のみ

## 120ccスケールの平板カラムによるCs脱離試験を実施



円盤形状ケーキ



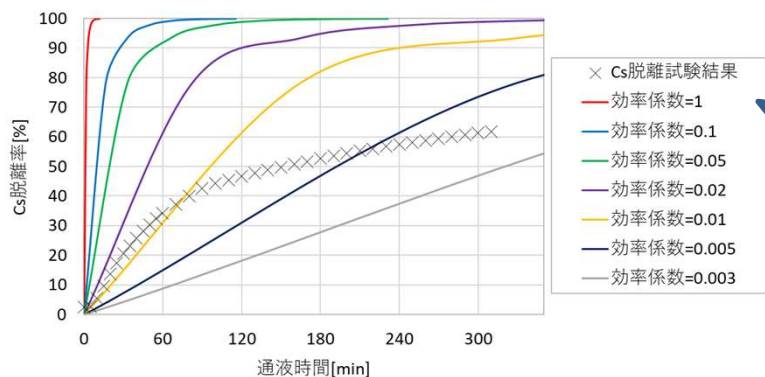
亜臨界水通液後の  
ケーキの健全性を確認

### 試験条件および結果一覧

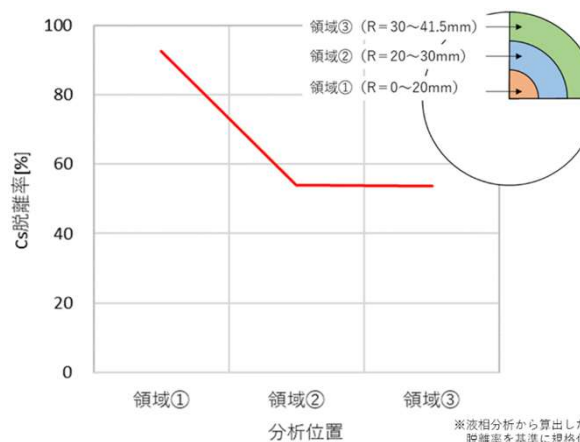
Run No.	スラリー 打ち込み圧力	ケーキの圧密 の程度	Cs脱離率
1	2 MPa	強	27%
2	1 MPa	強	35%
3	1 MPa	弱	63%

圧密の程度を弱くすることで亜臨界水の流動が改善し、Cs脱離の脱離効率が向上する

### 数理モデル化を実施 (サブテーマ1,2から得られた数式を利用)



脱離効率低下  
は円周方向端部に流れる溶離液量が少ないことが原因



溶離液供給口付近は脱離良好  
円周方向端部は溶離液流量が少ないため脱離不足

端部への通液が課題  
⇒通液方法改善・ろ過助剤の利用等により解決可能と判断

No	課題	内容	要素試験装置による確認事項	スケールアップに向けて（実機設計）
①	積層型圧力容器の成立の確認	圧力容器（第1種圧力容器）及び高圧ガス保安法（特定設備）の適用について、規制当局との調整を行う。	高圧ガス保安法が適用されることを規制当局に確認済	設置予定先の規制当局との相談・調整のうえ、設計を進める必要有 円形のろ室、2重のシール構造の採用により高圧ガスの要件を満足する方向で検討する
②	ろ板材質の選定	亜臨界水によるろ板金属の腐食、シール材劣化が懸念される	ろ板腐食状況：顕著な腐食はなし。適切な腐食しろの設定で対応可能。腐食及びヒートサイクル、高圧による負荷によりろ板の歪みが生じる シール材の適用性：FKMは使用不可。FFKMは使用可能。	シール材は交換必要 ろ板に歪みが生じることを前提にろ室やシール構造を設計する必要有
③	ろ材の選定	高温高圧環境下に耐えるろ材を選定する。	300meshサイズのSUS製金網を使用可能。 ただし、スラリーの性状を確認する必要有 シール面の工夫が必要	SUS製の金属メッシュ(綾置織)を採用する。 ろ板に歪みが生じることを前提にろ室の構造に合わせた金属メッシュの製作が必要 ろ過助剤の適用（Cs除去への影響要確認） 運転温度が低い場合は耐熱性のろ布を選定する

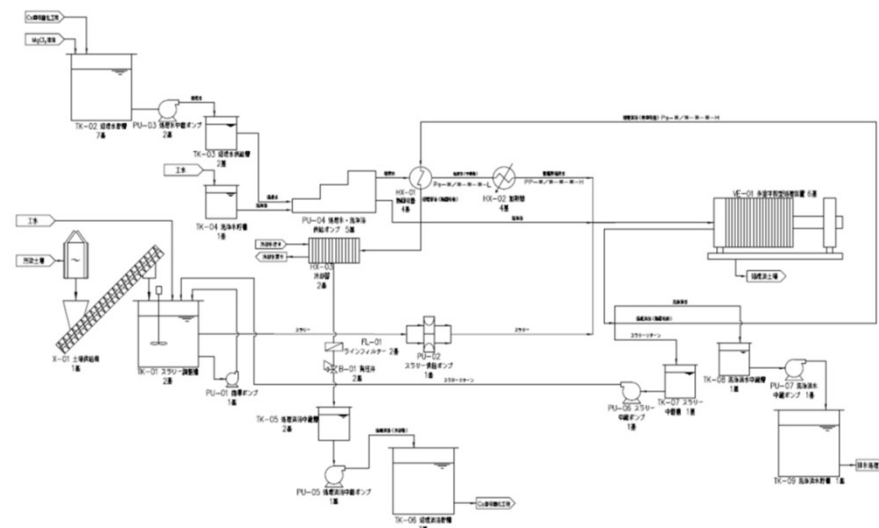
No	課題	内容	要素試験装置による確認事項	スケールアップに向けて（実機設計）
④	土壌ケーキ層形成方法の適性化	亜臨界水の通液を適切にできるように、土壌ケーキ層形成方法を（ろ過圧力等）を確立する。	ろ過ケーキ形成後の高圧水通液時の差圧は、ろ過圧力とほぼ同等となることを確認。 高圧水通液において致命的なショートパスが発生ししないことを確認。 亜臨界水通液において、差圧が低下することを確認 ケーキの圧密が進行するとケーキ内の通液は不均等になることを確認	高圧フィルタープレスの標準設計圧力を考慮して、以下の設計要件とする。 設計圧力：6MPa ろ過時圧力：1MPa 亜臨界水通液時圧力 入口圧力：5MPa 出口圧力を4MPa
⑤	平板カラムの温度維持	亜臨界水通液により、土壌ケーキ層を所定の温度に昇温・維持する。	亜臨界水(流量1/10 Bed Volume、予備ヒータ及び断熱材有)により、1.5hrで250℃に昇温できることを確認。	亜臨界水の通液による昇温・温度維持を基本とする。実機では空気による断熱を想定する。
⑥	平板カラムによるCs回収	平板カラムによる土壌からのCs回収を確認する。	平板カラムへの亜臨界水通液によるCs脱離が可能であることを確認。 ケーキ内における溶離液の流動の改善により効率のよい脱離が可能となることを確認。	ケーキ洗浄機能の応用やろ過助剤の使用等によりさらにケーキ内の流動を改善する。
⑦	除染液の回収	亜臨界状態を維持して除染液を平板カラムから回収する。	ケーキ状態やフィルターのシール性が適切でない場合、後段に微粒子が流出する場合有	後段への微粒子の漏洩に備え、フィルターを適切に配置する。 スラリー通液を前提とした配管設計を行う
⑧	熱回収	加熱・冷却サイクルの効率化を図る	装置を単純化し、試験項目から除外	熱回収機を設置 熱回収機の高温側出口温度：120℃程度を目安(伝熱面積を考慮)

- 工学的課題を考慮した設計により実機スケール装置が実現可能



ろ室合計容量1m<sup>3</sup>の試験機  
(りんかい日産建設)

最大6m<sup>3</sup>/バッチスケールの高圧フィルタープレス装置がすでに存在  
既存装置をベースに改造で対応可能

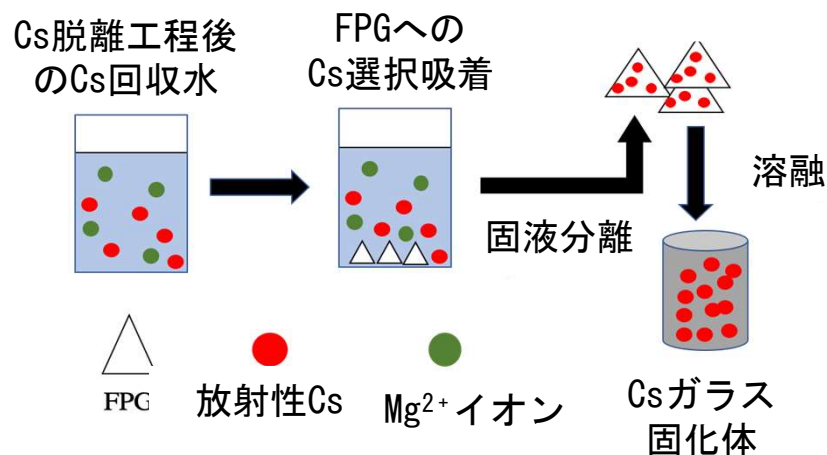


多室平板処理装置を用いた  
プロセスフローを構築

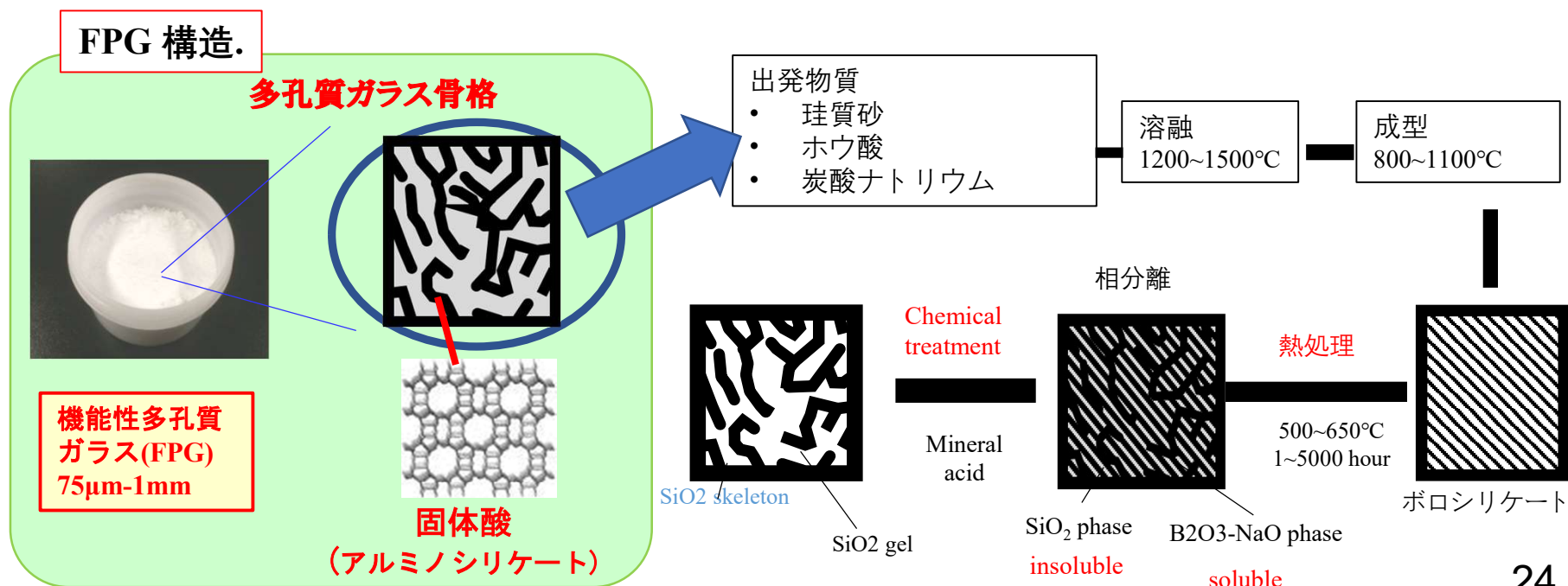
## サブテーマ4

### 汚染土壌処理・高減容システムの評価

- ① 固体酸含有多孔質ガラスを用いた土壌細粒物処理水からのCsガラス固化の実施
- ② Cs選択吸着性とガラス固化体作製に伴うCs揮発率・耐水性試験
- ③ 実機規模のガラス固化プロセスを想定した物質収支の計算と廃棄物減容率1万分の1以下の達成

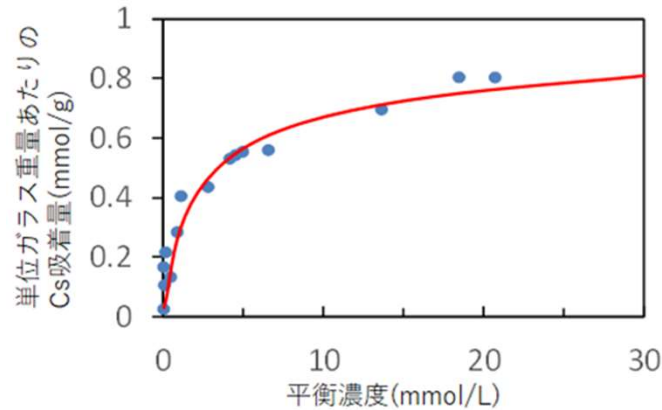


サンプル名	窒素吸着法			XRF 組成分析		
	比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	細孔径 (nm)	細孔体積 (cm <sup>3</sup> /g)	Na (%)	Al (%)	Si (%)
FPG	166	1.9	0.09	1.7	3.3	95

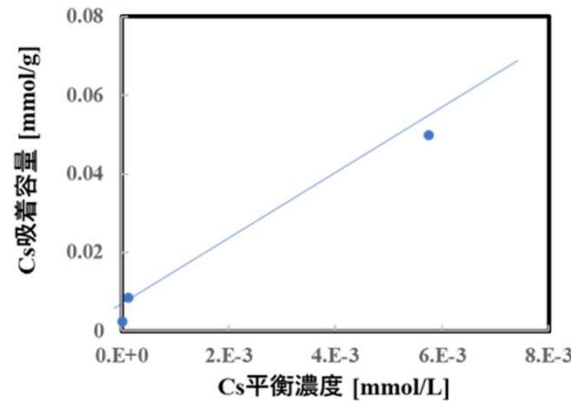




## Cs吸着等温線



Cs高濃度域 (Langmuir型)

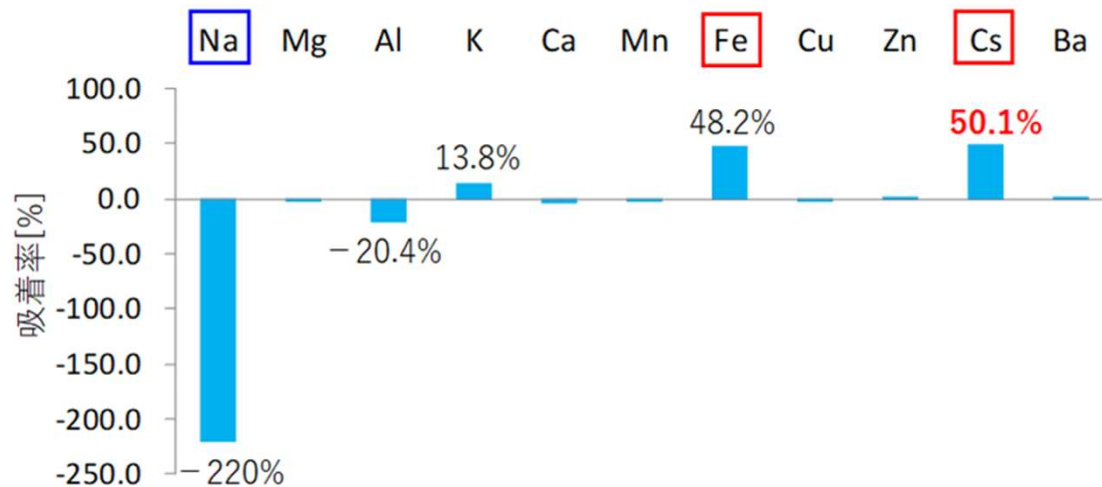


Cs低濃度域 (Henry型)

## 実土壌処理システム

	土壌C細粒物	土壌D
Cs脱離工程のCs回収液	$7.5 \times 10^{-3}$ mmol/L	$2.9 \times 10^{-3}$ mmol/L
FPGへのCs吸着量	0.066 mmol/g (8.8 mg/g)	0.026 mmol/g (3.4 mg/g)

## Cs選択吸着 (11成分試験)



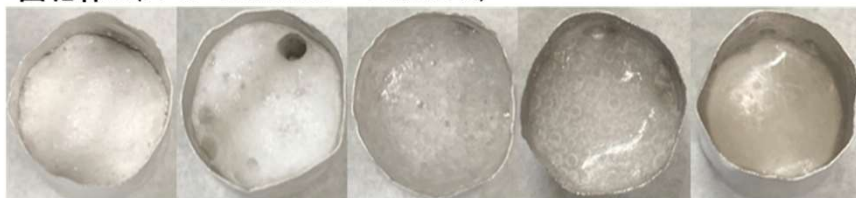
金属イオン濃度 : 2mmol/L、溶液量 : 10mL、液固比 : 100 (10mL/0.1g-glass)、温度 : 室温、振とう時間 : 6時間

- 11元素 (Cs、Na、Mg、Al、K、Ca、Mn、Fe、Cu、Zn、Ba) を含む多成分模擬処理液に対するFPGの吸着選択性を調べた。
- CsおよびFeの吸着率は、約50%であり、これらの元素を選択的吸着していることが分かった。

固化体A (FPG +10wt% Cs)



固化体B (FPG +10wt% Cs + 10wt% Na)



800°C    900°C    1000°C    1100°C    1200°C

800°C～1200°Cで作成したガラス固化体

- Cs10w%を吸着させたガラス固化体を作製した。Na添加なしのガラス固化体がCs保持率が高く、水への浸出率が低い。
- 加熱温度が1200°CまではCsの揮発は起こらず、安定的にCsを固定化できた。
- Na添加なしのガラス固化体の水へのCs浸出率は低く（高耐水性）、高レベル放射性廃棄物用ガラス固化体と同等のCs保持性能を示した。

## ガラス固化体のCs保持率と水へのCs規格化浸出率

加熱温度[°C]	ガラス固化体(A) (Na添加無し)				ガラス固化体(B) (10wt%Na添加)			
	Csの担持量 (XRF)	比表面積 [m <sup>2</sup> /g]	36d規格化浸 出量[g/m <sup>3</sup> ]	平均浸出速度 [g/cm <sup>2</sup> d]	Csの担持量 (XRF)	比表面積 [m <sup>2</sup> /g]	36d規格化浸 出量[g/m <sup>3</sup> ]	平均浸出速 度 [g/cm <sup>2</sup> d]
800	100	0.22	0.076	2.11E-07	90	0.12	0.918	2.55E-06
900	98	0.3	0.09	2.50E-07	80	0.17	0.687	1.91E-06
1000	99	0.28	0.161	4.47E-07	84	0.19	0.337	9.36E-07
1100	100	0.32	0.212	5.89E-07	77	0.19	0.371	1.03E-06
1200	99	0.38	0.118	3.28E-07	68	0.41	0.058	1.61E-07

対象土壌名称	土壌C分級物	土壌D
物量	109.7万ton	17.7万ton
想定する放射能濃度 [Bq/kg]	30,000 Bq/kg	62,000 Bq/kg
Cs脱離率設定値	80%	90%
処理水のMg濃度	1 M	
処理水温度	200°C	230°C
処理水通液速度	0.1 BV/min	0.1 BV/min
液量	399 ton/d	567 ton/d
濃縮倍率	2倍	2倍
濃縮後処理液中Cs濃度	$7.5 \times 10^{-3}$ mmol/L	$2.9 \times 10^{-3}$ mmol/L
FPGによるCs吸着量	8.8 mgCs/g	3.4 mgCs/g
体積減容率	最小1/2000	最小1/1500

- サブテーマ3の平板型カラム試験で1Mという高い交換イオン ( $Mg^{2+}$ ) 濃度を用いたために  $MgCl_2$  の溶解度の制限からCs回収液の蒸発濃縮が十分できないために廃棄物減容率は2000分の1に止まった。
- 下図のカラム試験結果及びX線回折分析結果から  $Mg^{2+}$  濃度は0.1M程度でも十分であり、実プロセスでは10倍以上のCs回収液の蒸発濃縮ができる。
- **目標の廃棄物減容率10000分の1は十分に達成可能**

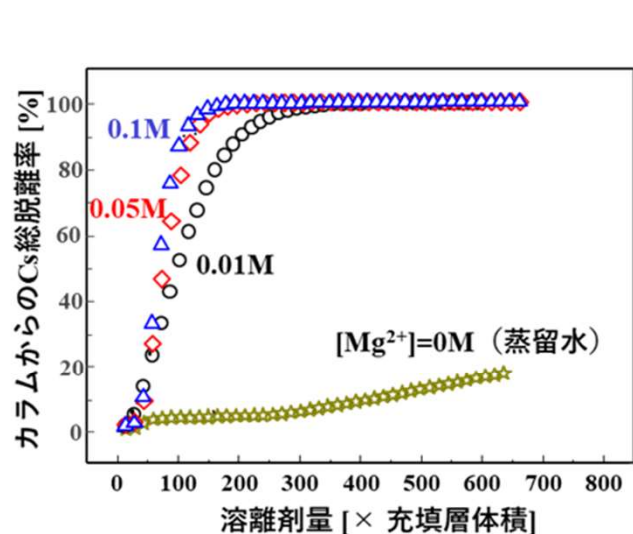
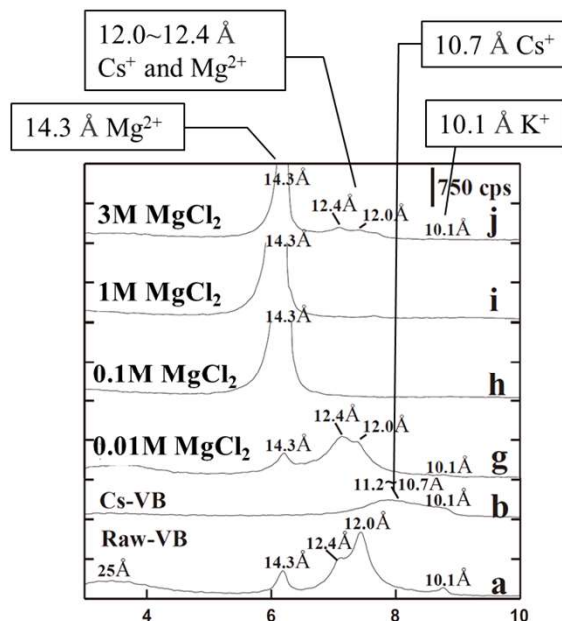
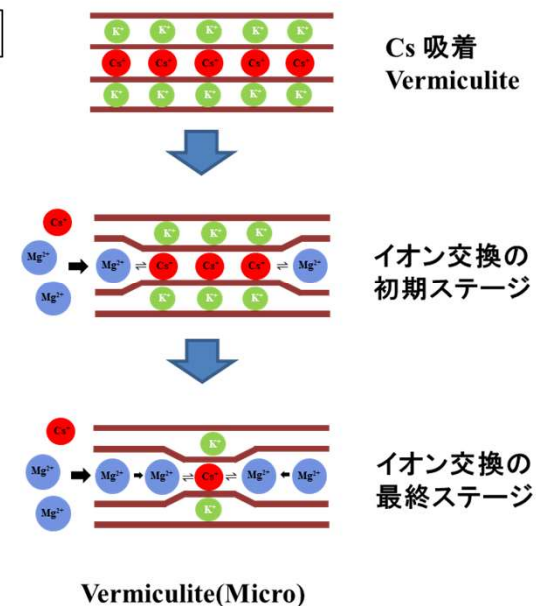


図14 サブテーマ2におけるカラムのCs脱離挙動に対する交換イオン( $Mg^{2+}$ )濃度の影響 (温度 250°C、溶離剤流速0.5mL/min)



X線回折パターン (a) raw VB, (b) Cs-VB, (g) 0.01M 処理, (h) 0.1M 処理, (i) 1M 処理, (j) 3M 処理

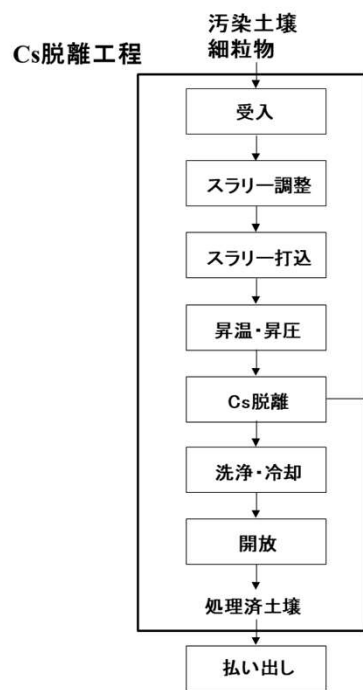


## サブテーマ5

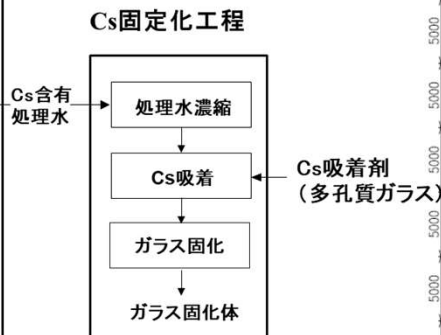
### 汚染土壌処理・高減容システムの評価

①亜臨界水イオン交換プロセスと回収Csの高減容固定化プロセスを統合化した土壌処理・廃棄物減容システムに対する装置規模、物質収支、熱収支、放射能収支、二次廃棄物発生量、経済性の評価

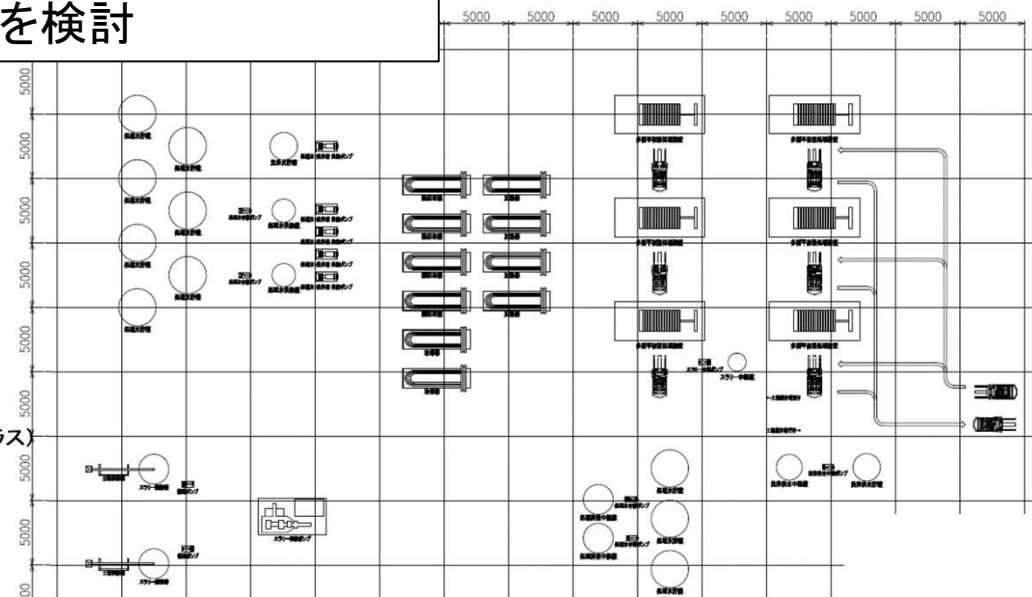
対象土壌名称	土壌C分級物	土壌D
説明	土壌Cの分級処理/高度分級して得られる濃縮物	土壌Dの異物除去後の土壌
密度	1.7 g/cm <sup>3</sup>	1.7 g/cm <sup>3</sup>
物量	109.7万ton	17.7万ton
想定する放射能濃度 [Bq/kg]	30,000 Bq/kg	62,000 Bq/kg
Cs脱離後の放射能濃度設定値 [Bq/kg]	8,000 Bq/kg以下	



処理フローを実現する物質収支、機器構成、配置図を検討

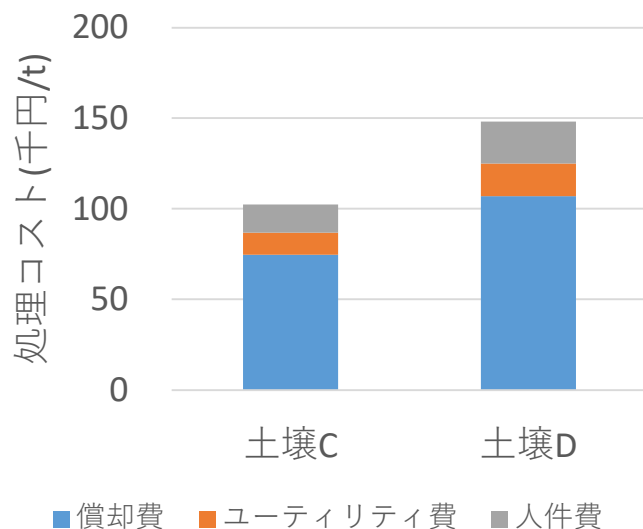


Cs脱離工程配置図



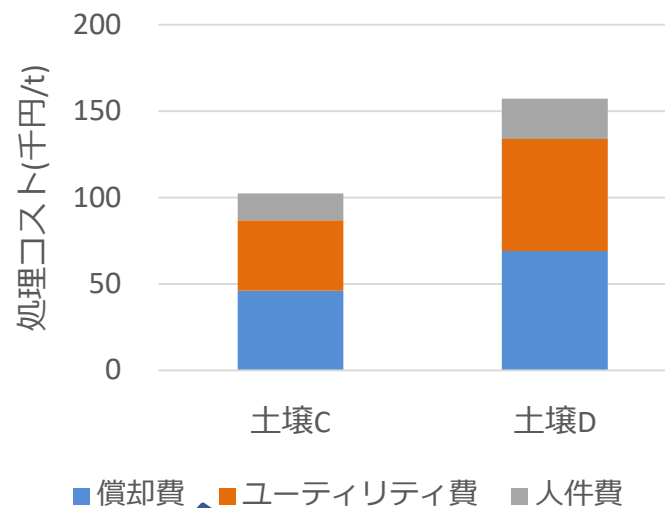
検討結果に基づいて処理コスト(償却費,UTL費,人件費)を算出

Cs脱離工程の処理コスト



償却費が大半⇒処理速度向上、  
装置大規模化により低減

Cs固定化工程の処理コスト



償却費と濃縮に係るユーティリティ費が大半

対象	減容率	Cs脱離工程 処理コスト (千円/t)	Cs固定化工程 処理コスト (千円/t)	合計処理コスト (千円/t)
土壌C分級物	1/1000～ 1/2000程度	102	102	204
土壌D	1/1000～ 1/1500程度	148	157	305

他の除去土壌高度処理方法に対して一定の競争力のある処理コスト