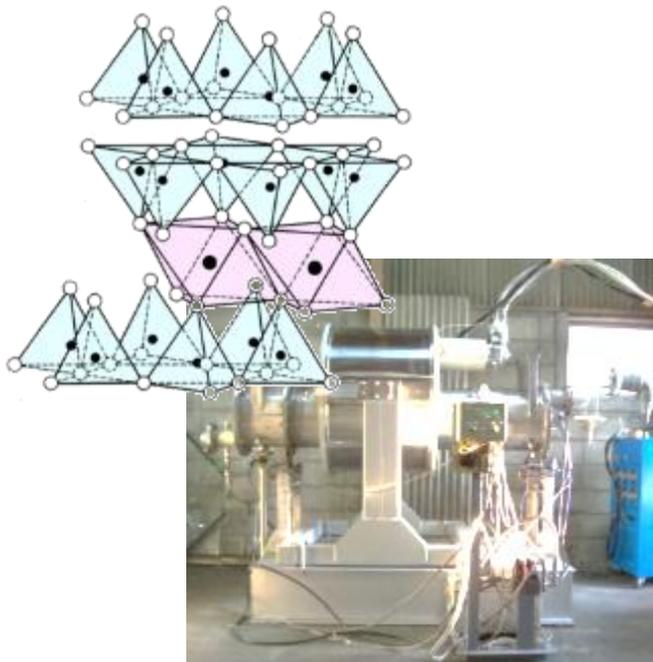


環境研究総合推進費 5Z-1301

「セシウムの動態解析に基づく除染シナリオの構築と磁気力制御型除染法の開発」

研究実施期間:平成25年度～平成26年度

累積予算額:87,234千円



大阪大学

◎秋山 庸子, 三島史人, 西嶋 茂宏
(大学院工学研究科)

誉田 義英(産業科学研究所)

矢坂 裕太(環境安全研究管理センター)

福島大学 理工学群共生システム理工学類

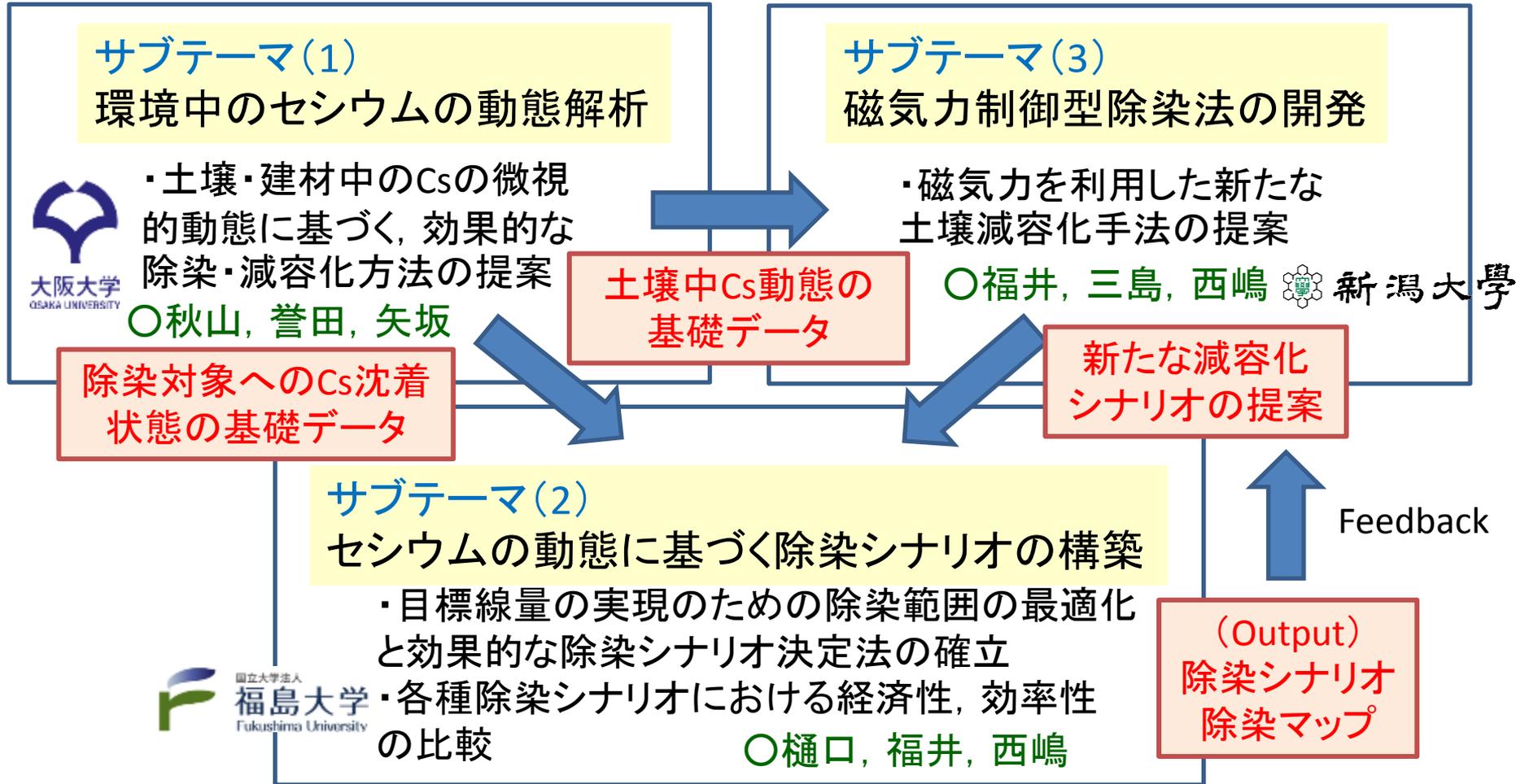
○樋口 良之

新潟大学 大学院自然科学研究科

○福井 聡

全体目標と研究体制

【研究開発目的】 生活圏の除染対象におけるCsの微視的な動態解析, およびそれに基づく動態制御に基づき, 各除染場所について, 最小限の労力, 予算, 期間で必要なレベルまで除染・減容化・保管を行うための除染シナリオを提案する。

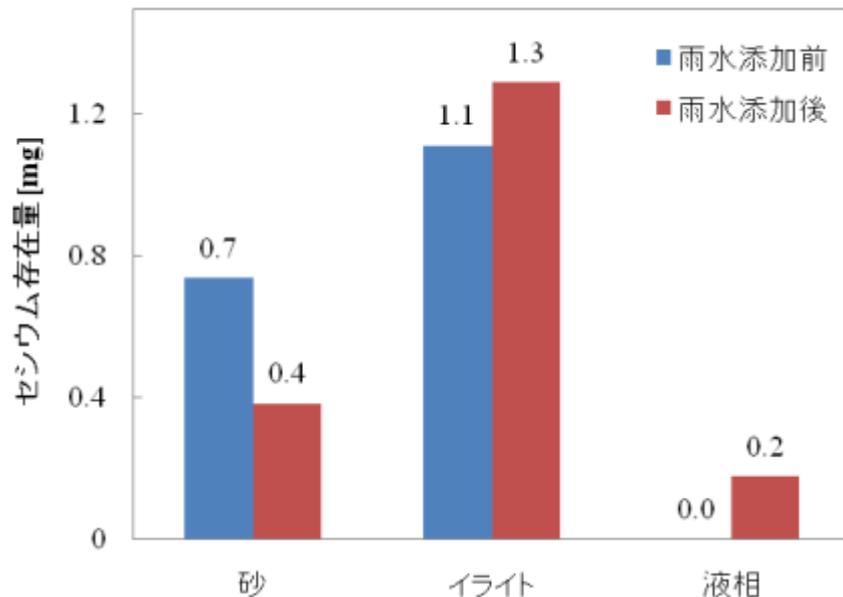


●サブテーマ(1)

環境中のセシウムの動態解析

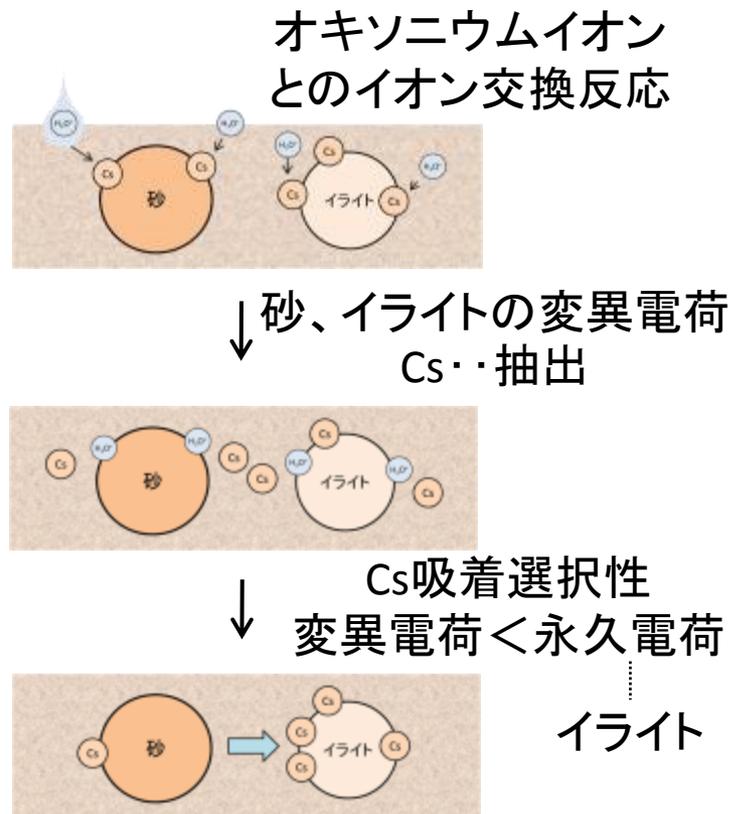
大阪大学 ○秋山 庸子
誉田 義英
矢坂 裕太

事故後の雨水によるCs移行のモデル実験



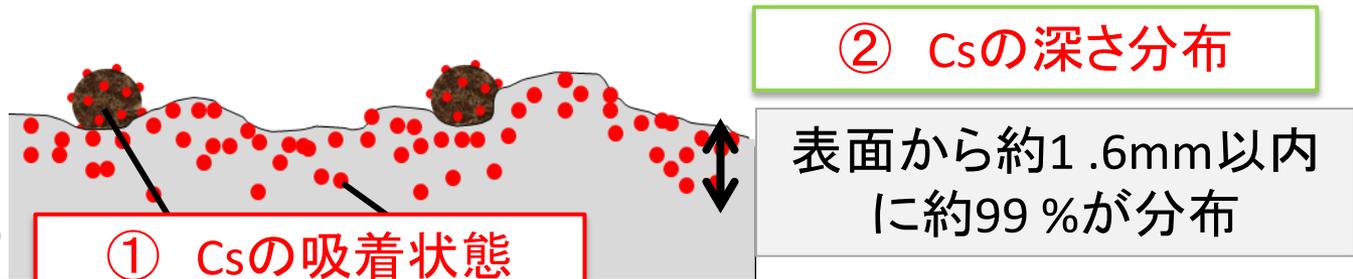
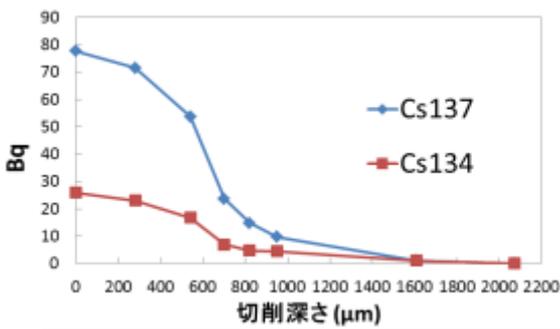
雨水を模擬したpH=5.6の蒸留水
⇒セシウムは砂からイライトに移行

実際の汚染土壌のセシウム量・・・100億分の1
⇒イライト(永久電荷へ) + 液相への抽出量 減

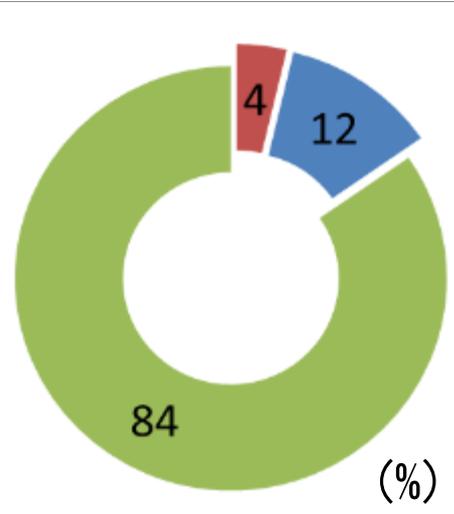


各成分に吸着されたCsは、雨水により経時的にCs吸着量・吸着選択性の大きな粘土鉱物に移行していく傾向
⇒経時的な移行は土壌分級や磁気分離による減容化に有利

建材の汚染状態の調査(福島県内で実施)



① Csの吸着状態



■ 粒子態 4%

→ 容易に洗浄除去可能

■ イオン交換態
→ 薬剤によって溶出可能

■ 固定態

③ Cs 吸着機構

イオン態

96%

各建材におけるCs吸着動態の検討

	セシウムの空間分布 (CsI)		セシウムの吸着機構	
			直接的吸着 (NaI)	間接的吸着 (GM)
セメント系材料	垂直方向	表面から約1.6 mm以内に約99 %が分布	<ul style="list-style-type: none"> ・イオン交換態 (表面電荷等) : 約15 % ・固定態 (セメント水和物の層間) : 約85 % 	<p>粘土や有機物を介して吸着したCsが存在</p> <p>→ 表面汚染への寄与は低い (ほとんどがイオンとして直接的に吸着)</p>
	水平方向	細孔部分に吸着量大		
木材	垂直方向	表面から約4 mm以内に約97 %が分布	<ul style="list-style-type: none"> ・固定態 (セルロース等が持つ水酸基, カルボキシル基 + 分子構造による捕捉) : 約100 % 	
	水平方向	繊維方向の拡散性大 → 拡散の異方性		
粘土瓦	垂直方向	表層約200 μmに約30 % (約70%は全体に拡散)	<ul style="list-style-type: none"> ・表面に吸着 : 約3~4 % ・ほとんどが固定態 (粘土層が強固に吸着) 	
	水平方向	均一な汚染ではなくホットスポットが存在		
トタン材	垂直方向	腐食度合に依存 (表面から約100 μm以内に約91 %が分布)	<p><サビ部分への吸着></p> <ul style="list-style-type: none"> ・イオン交換態 (表面電荷等) : 約15 % ・固定態 (サビの多孔質構造内部) : 約85 % 	
	水平方向	腐食部分 (サビ) へ吸着		

●サブテーマ(3)

磁気力制御型除染法の開発

新潟大学 ○福井 聡
大阪大学 三島 史人
西嶋 茂宏

モデル土壌の磁気分離

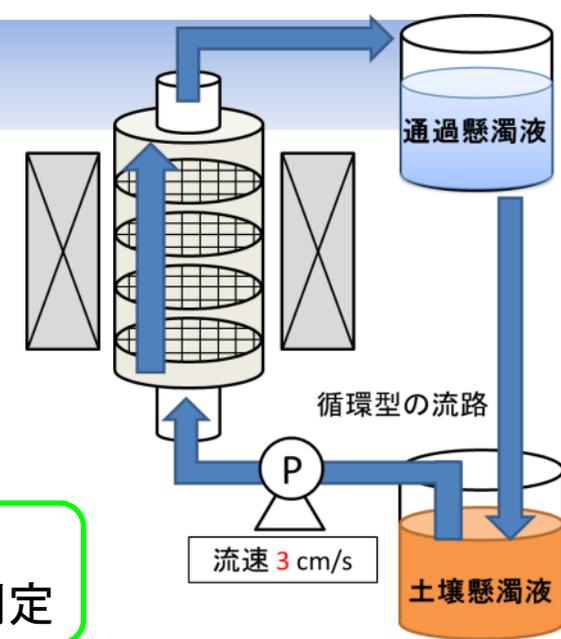
土壌懸濁液



バーミキュライト5.0 g + カオリナイト5.0 g
+ 蒸留水1.5 L

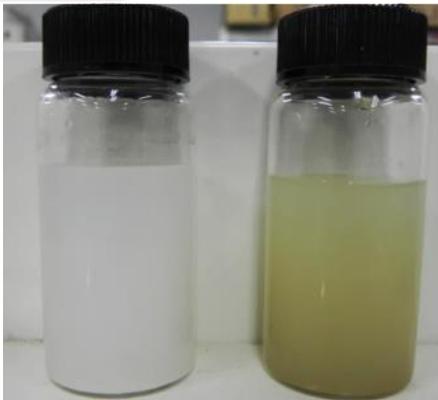
超電導ソレノイド磁石
7Tを印加

磁気フィルター
SUS430
(線径400 μm , メッシュ数20)
外径36 mm, 30枚



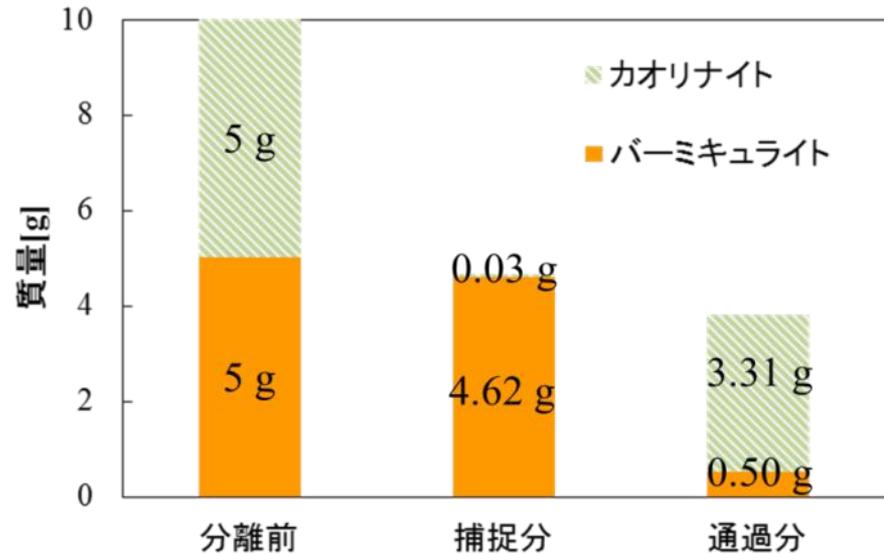
- ◆ 捕捉粒子と通過粒子の質量
- ◆ 吸光度測定による粘土鉱物割合の測定

実験結果



通過液

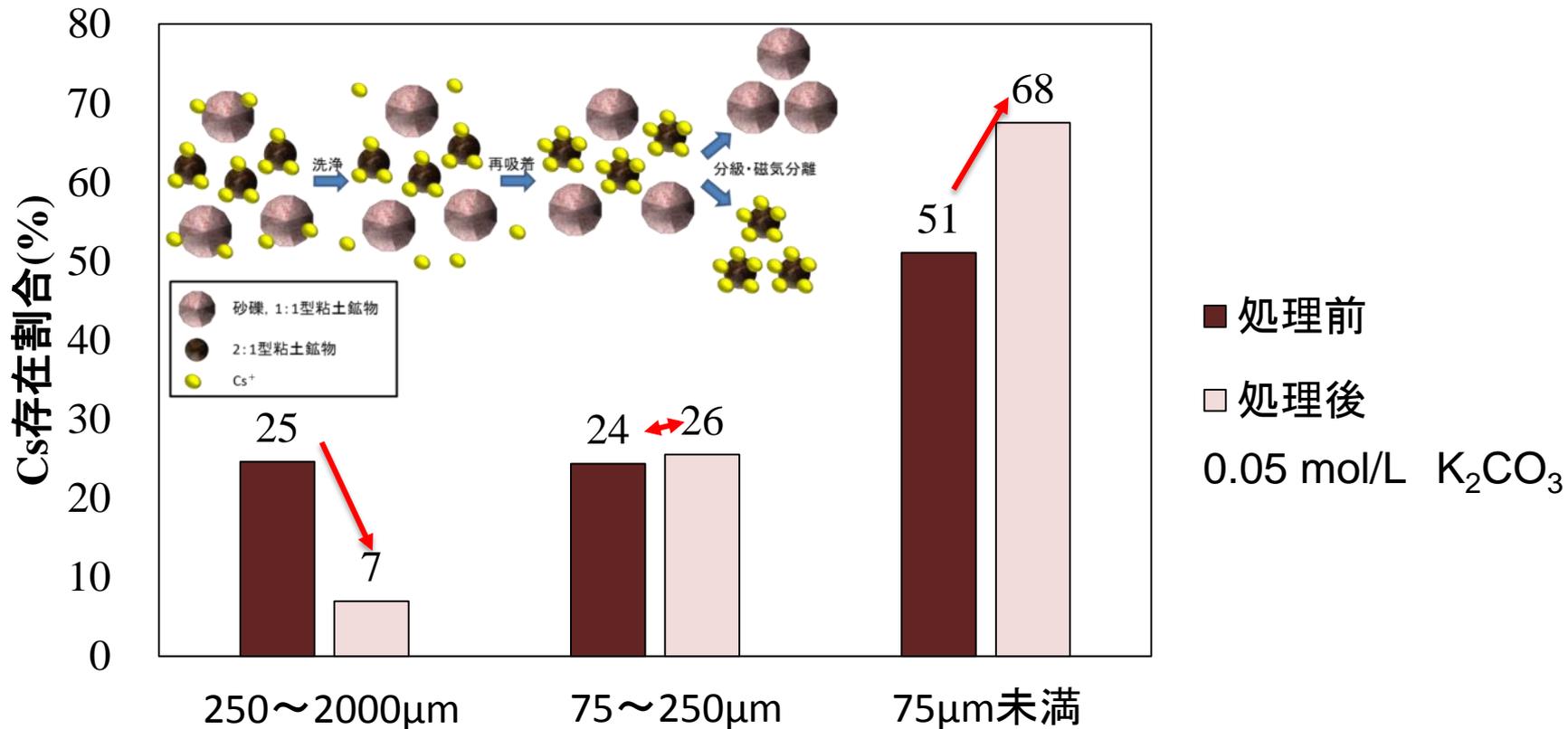
捕捉液



フィルターに捕捉されたバーミキュライトは投入量の92%

磁気力を用いたバーミキュライトの選択的分離に成功

実汚染土壌を用いたCsの移行実験

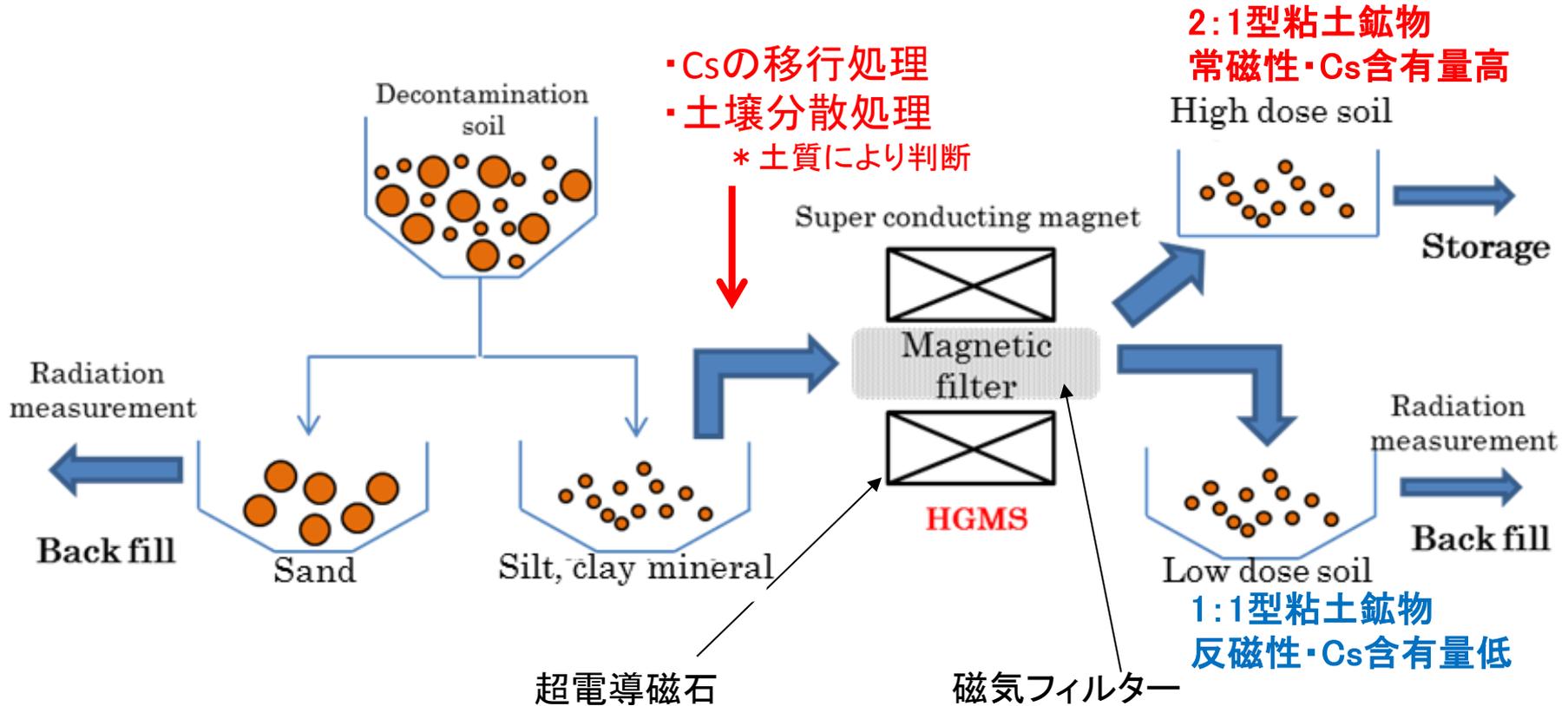


250~2000μmの土壌から約70%のCsが脱離され、75μm未満の土壌に移行

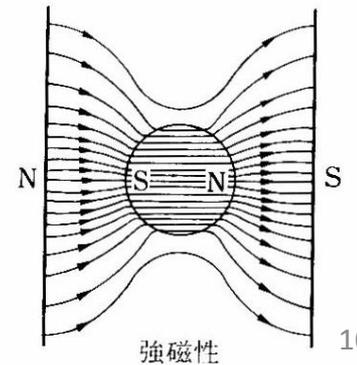


Cs移行処理により砂礫の線量低減と粘土鉱物へのCs移行が可能

超電導磁石を用いた除染の可能性



セシウム動態に基づく移行処理を施すことで、自然界中でCsを強く吸着する物質を吸着剤として利用した、より効果的な汚染土壌の減容化の可能性が示された。



●サブテーマ(2)

セシウムの動態に基づく除染シナリオの構築

福島大学 ○樋口 良之
新潟大学 福井 聡
大阪大学 西嶋 茂宏

(2)-1 除染範囲の最適決定手法の検討

本研究では、除染作業による線量率の低減効果を評価するフリーウェアCDE (Calculation system for Decontamination Effect, JAEA)を利用して、更に感度解析的手法を導入することにより、対象区域の空間線量率を目標値以下にできる周辺区域の最小の除染範囲を計算する手法を提案している
本報告は、福島県伊達市で行われた実証実験のデータを用いて、実証実験、CDE、本最適化ツールの3データの比較を行ったものである

①準備

対象地域の航空地図とそれに対応する汚染密度のモニタリングデータを入手する。CDEを利用して地図データ上に土地区分を表すメッシュを作り、各メッシュに対する汚染源 (Cs134とCs137)の密度分布図を作成する。空間線量率のデータの場合は汚染密度に換算する。

②空間線量率の算出

同時にCDEを利用して、線量計算のベースとなる、ある5m×5mの地表に存在する単位放射能による1m上空の5m×5mのメッシュ上に与える空間線量率を距離の関数として求めておく。CDEでは、これを応答行列と呼ぶ。応答行列により空間線量率を目標値以下に低減したい対象区域(例えば、居住地など。以下、「対象区域」という)の空間線量率を算出する。

③最大汚染セルの探索

対象区域の中で空間線量率が最大のセルに対して最も大きな影響を与えている周辺区域(例えば、耕作地など。以下、「周辺区域」という)の最大汚染セルを探索する。

④最大汚染セルの除染

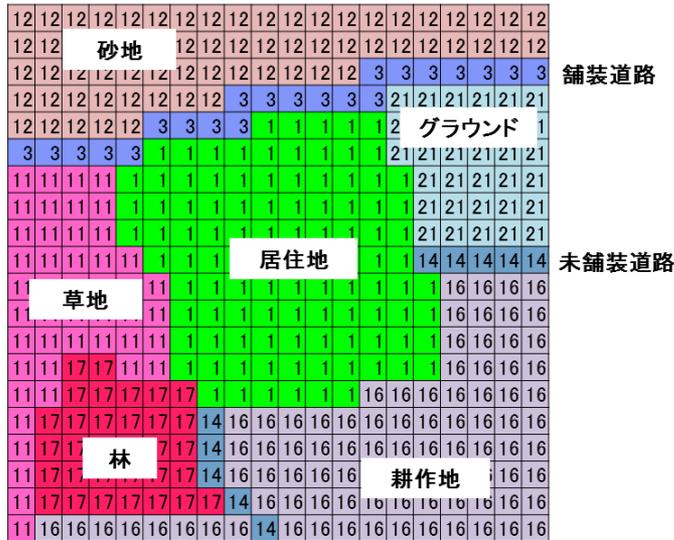
周辺区域で最も影響の大きい1個のセルの除染を行う。除染する毎に、対象区域の空間線量率を再計算する。

⑤除染の継続

対象区域の空間線量率が目標値を下回るまで、③及び④を繰り返す。

(2)-1 除染範囲の最適決定手法の検討

(20×20セルの区分図)



土地区分-汚染密度-除染係数表の作成

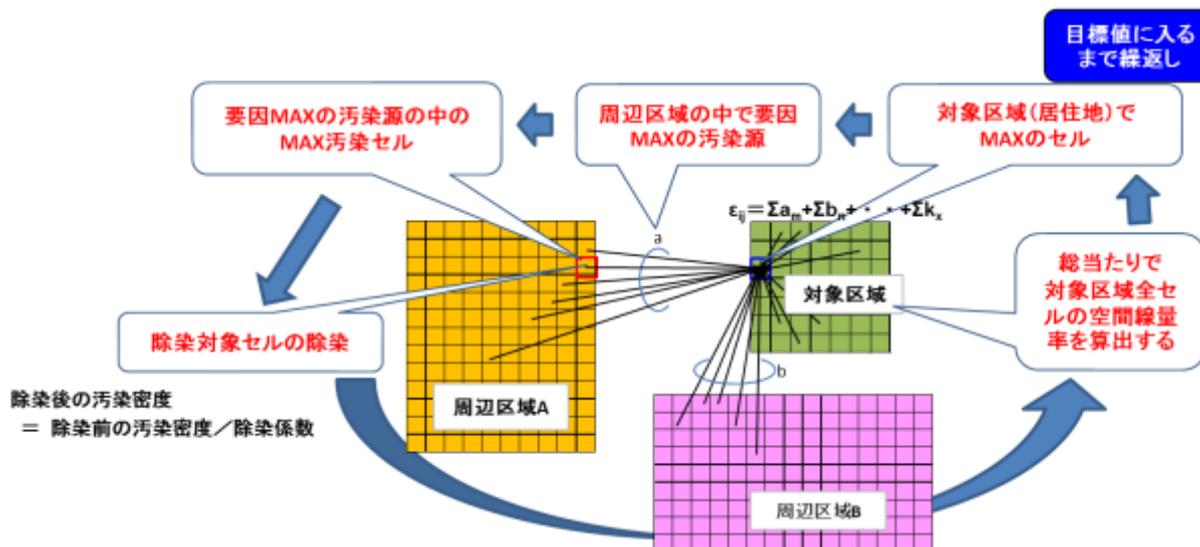
居住地の空間線量率の目標値 0.7 μSv/h

土地区分	土地ID	汚染密度 Bq/cm ²	除染係数	除染ID	除染方法
居住地	1	10	1.0	0	無処置
舗装道路	3	10	1.5	1	高压洗浄
草地	11	70	5.0	2	草剥取り
砂地	12	20	3.0	3	反転耕
未舗装道	14	20	5.0	4	砂利除去
耕作地	16	40	4.0	6	天地返し
林	17	150	10.0	7	堆積物除去+枝打ち
グラウンド*	21	20	4.0	8	天地返し

プログラムの実行

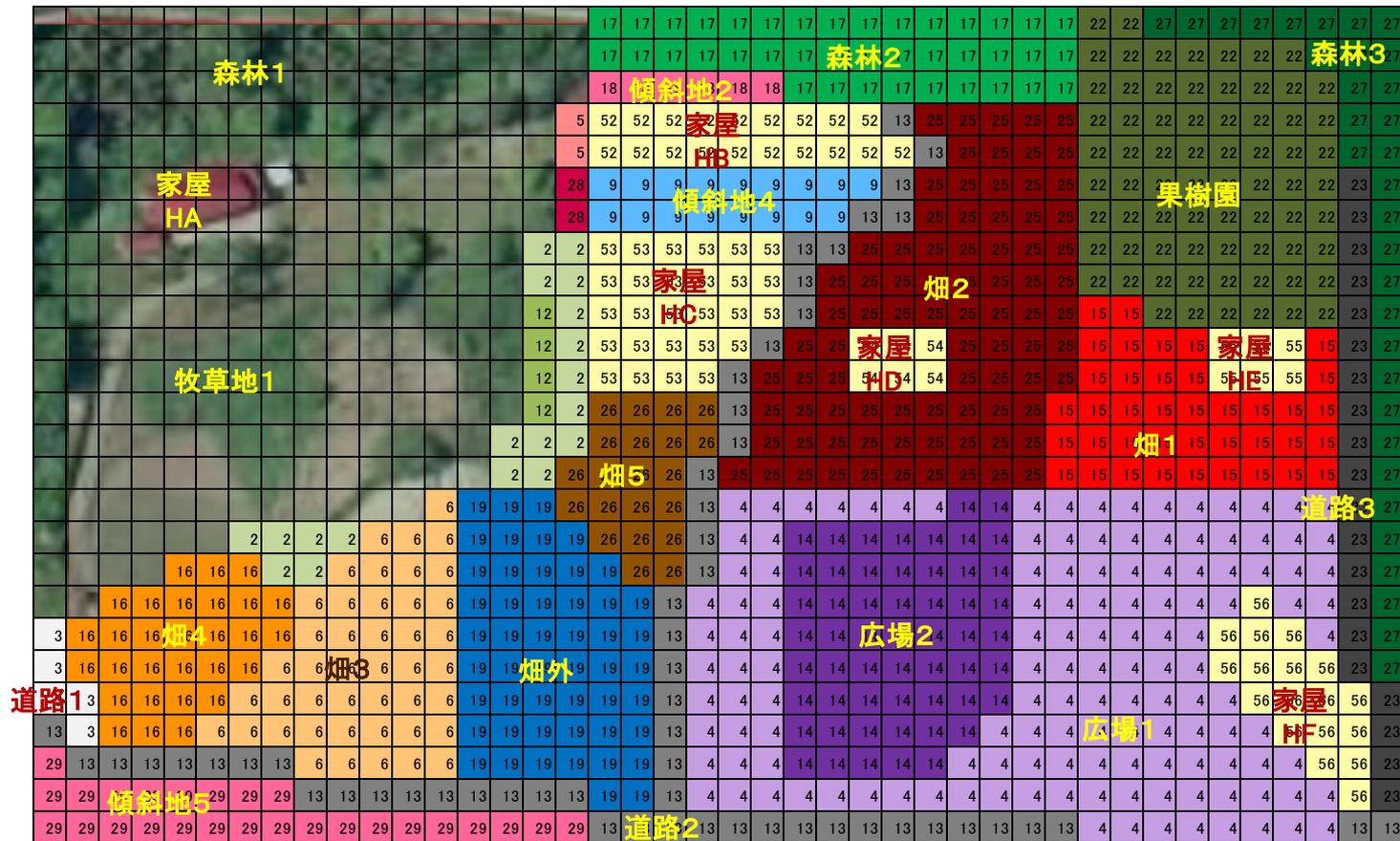
対象区域の全セルの中で最も線量の大きいセルを求める

周辺区域の中で、最大線量セルに最も寄与の大きい汚染源を求める



Case Study : 伊達市の実証実験

分布図 (5m×5mセル 1092個)



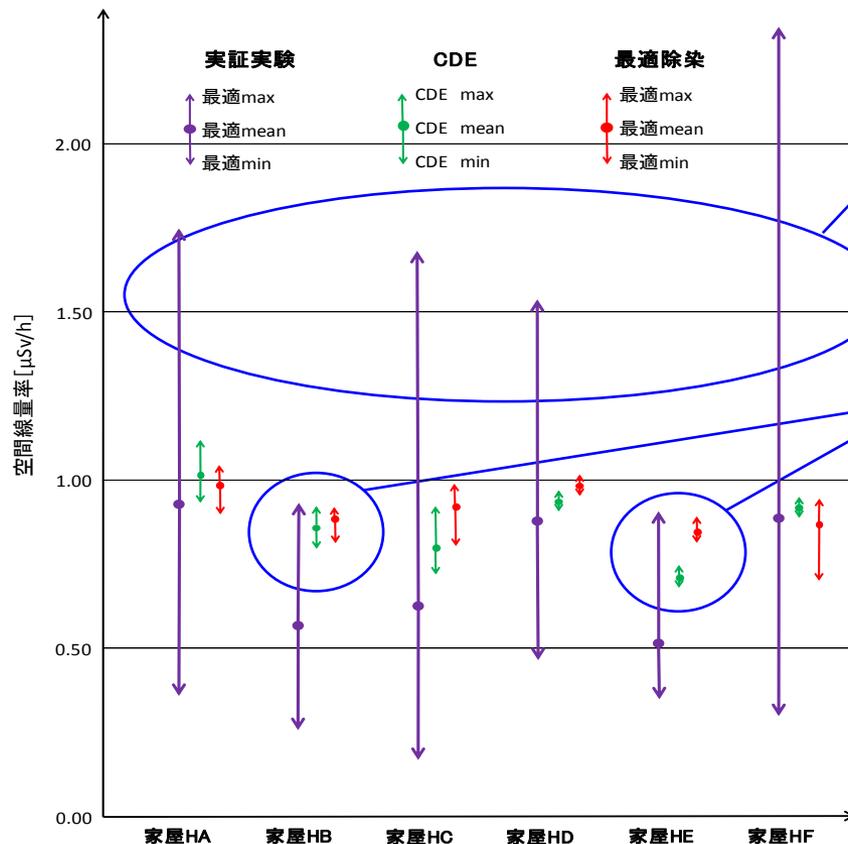
土地区分	土地ID
家屋HA	1
家屋HB	52
家屋HC	53
家屋HD	54
家屋HE	55
家屋HF	56
果樹園	22
畑1	15
畑2	25
畑3	6
畑4	16
畑5	26
畑6	5
畑外	19
牧草地1	2
牧草地2	12
広場1	4
広場2	14
森林1	7
森林2	17
森林3	27
傾斜地1	8
傾斜地2	18
傾斜地3	28
傾斜地4	9
傾斜地5	29
道路1	3
道路2	13
道路3	23

Case Study : 伊達市の実証実験

家屋毎の3データの比較

(実証実験データ/CDEデータ/最適化ツールデータ)

伊達市実証実験/CDE/最適化プログラム
除染後の3データのバラツキ比較



ホットスポットの影響が大きいいため、実証実験データは、最適化ツールデータよりも飛び抜けた値となっている

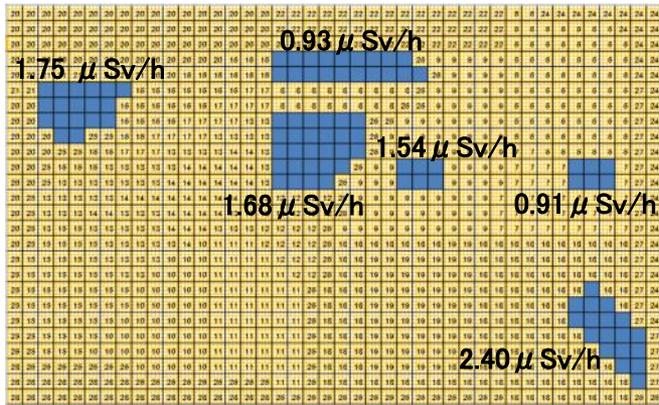
ホットスポットの影響がないため、最適化ツールデータが、実証実験データのMAX以内に入った理想的な事例
これより低い値が存在することは、効率的除染の対象となる範囲が存在することを表している

Case Study : 伊達市の実証実験

除染目標値と除染効率

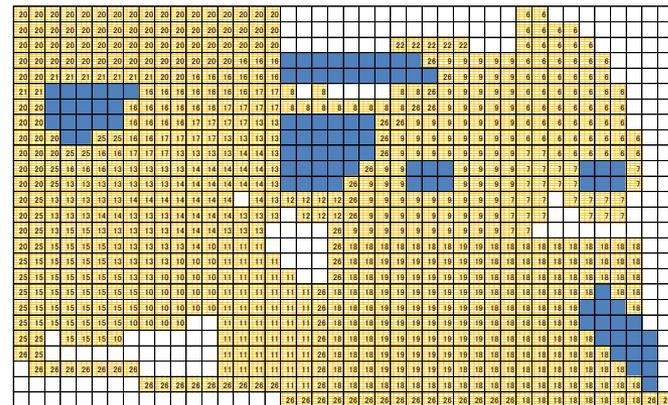
$$\text{除染率} = (\text{除染セル数} / \text{総汚染セル数}) \times 100$$

実証実験結果(最大値) $0.91 \sim 2.4 \mu\text{Sv/h}$



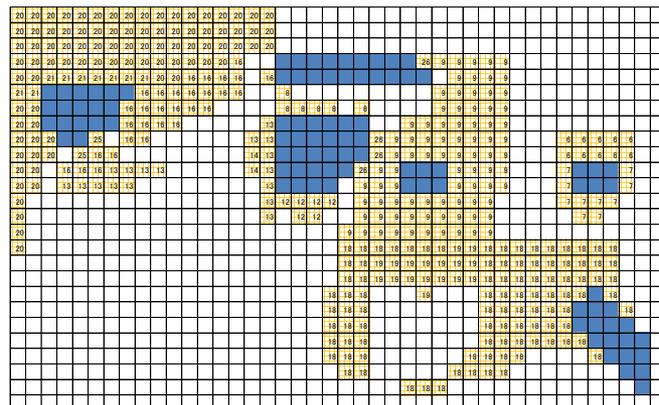
除染率
100%

最適化目標値 $1.0 \mu\text{Sv/h}$ 以下



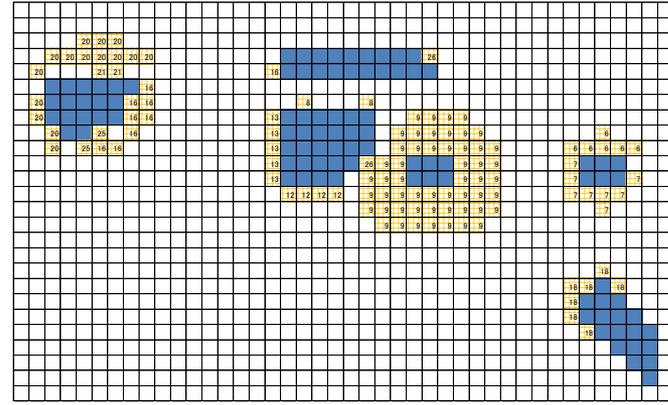
除染率
81%

最適化目標値 $1.1 \mu\text{Sv/h}$ 以下



除染率
38%

最適化目標値 $1.2 \mu\text{Sv/h}$ 以下



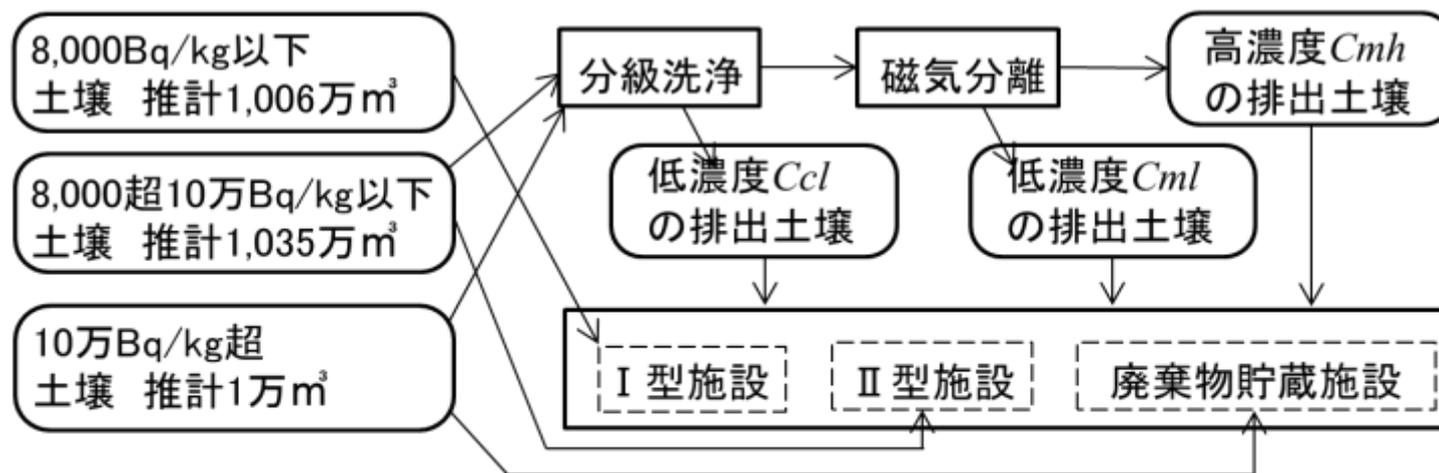
除染率
12%

(2)-2 除染の経済性・効率性のシミュレーション

放射性セシウムに汚染された土壌に対して、現状の除染方法(除去物をそのまま保管した場合)と、減容処理を行った場合の、除染・輸送・保管に係る時間とコストを試算する手順を示し、状況に応じて適切なシナリオ選定を支援できる方法確立した。

シナリオの例 ・現場での天地返し

- ・現場での表土剥ぎ > 仮置き場 > 中間貯蔵施設
- ・現場での表土剥ぎ > 仮置き場での減容処理 > 中間貯蔵施設
- ・現場での表土剥ぎ > 仮置き場 > 中間貯蔵施設での減容処理



- ・少量の高濃度の土壌を厳密に管理する。
- ・廃棄物貯蔵施設とII型施設の保管量をより小さくする。

$C_{ml} \leq 10\text{万Bq/kg}$
or $8,000\text{Bq/kg}$

(2)-2 除染の経済性・効率性のシミュレーション

$$C_{ml} = C_s \frac{R_{crh} R_{mrl}}{R_{csh} R_{msl}}$$

ここで、 C_s : 減容対象土壌の放射能濃度

実験結果による解析

重量分離比	分級洗浄	磁気分離
高濃度	0.2	0.2
低濃度	0.8	0.8

放射能分離比	分級洗浄	磁気分離
高濃度	0.8	0.6
低濃度	0.2	0.4

重量分離比	分級洗浄	磁気分離
高濃度	R_{csh}	R_{msh}
低濃度	R_{csl}	R_{msl}

放射能分離比	分級洗浄	磁気分離
高濃度	R_{crh}	R_{mrh}
低濃度	R_{crl}	R_{mrl}

対象土壌 1トン	分級洗浄		磁気分離			
	排出物		高濃度排出物		低濃度排出物	
	濃度 [Bq/kg]	土壌量 [t]	濃度 [Bq/kg]	土壌量 [t]	濃度 [Bq/kg]	土壌量 [t]
4,000	0.80	1,000	0.04	48,000	0.16	8,000
6,000	0.80	1,500	0.04	72,000	0.16	12,000
8,000	0.80	2,000	0.04	96,000	0.16	16,000
8,333	0.80	2,083	0.04	100,000	0.16	16,667
9,000	0.80	2,250	0.04	108,000	0.16	18,000
10,000	0.80	2,500	0.04	120,000	0.16	20,000
32,000	0.80	8,000	0.04	384,000	0.16	64,000
40,000	0.80	10,000	0.04	480,000	0.16	80,000
50,000	0.80	12,500	0.04	600,000	0.16	100,000
60,000	0.80	15,000	0.04	720,000	0.16	120,000
80,000	0.80	20,000	0.04	960,000	0.16	160,000
100,000	0.80	25,000	0.04	1,200,000	0.16	200,000
400,000	0.80	100,000	0.04	4,800,000	0.16	800,000

$C_{ml} \leq 10$ 万Bq/kgとなる

C_s は5万Bq/kg以下。

$C_{ml} \leq 8,000$ Bq/kgとなる

C_s は4,000Bq/kg以下。

8,000Bq/kg以下の土壌15,525,000[t]は、I型施設で貯蔵。

8,000超10万Bq/kg以下の土壌15,525,000[t]の処理方法

- ・全量15,525,000[t]をII型施設で貯蔵

分級洗浄

- ・I型施設:2,295,000[t] 14.8%, II型施設:13,230,000 [t] 85.2%
- ・I型 : II型 : 廃棄物貯蔵施設 = 20.9 : 77.6 : 1.5

分級洗浄+磁気分離

- ・I型 : II型 : 廃棄物貯蔵施設 = 20.9 : 78.8 : 0.3

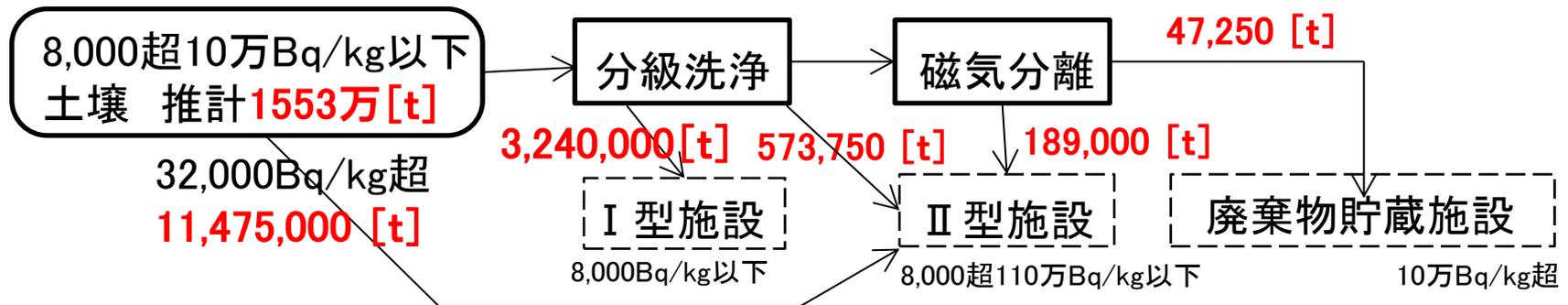
10万Bq/kg超の土壌15,000[t]の処理方法

- ・全量15,000[t]を廃棄物貯蔵施設で貯蔵

分級洗浄

- ・II型施設:9,000[t] 60.0%, 廃棄物貯蔵施設:6,000 [t] 40.0%

事例解析 8,000超10万Bq/kg以下の土壌15,525,000[t]の処理(本来はII型施設に搬入)シナリオ・・・分級洗浄+磁気分離(I型 : II型 : 廃棄物貯蔵施設 = 20.9 : 78.8 : 0.3)



I型、II型、廃棄物貯蔵施設の貯蔵単価と当該減容処理単価を比較することで、どの放射能濃度の土壌に減容処理を実施するのが適切か判断できる。 = シナリオの選定

本研究の科学的意義

◆サブテーマ(1)環境中のセシウムの動態解析

- ・ 土壌中のセシウムは事故後の降雨により2:1型粘土鉱物の永久電荷に移行することが実験的に確認された。
- ・ 建材中のセシウムは、どの種類でも粒子態での付着は少なくイオン態がほとんどであることが明らかになった。
また浸透深さや吸着強さは建材の種類により大きく異なった。

◆サブテーマ(2)セシウムの動態に基づく除染シナリオの構築

- ・ 除染範囲を最適化するための手法を確立し、実証実験のデータを用いてその妥当性を検証した。
- ・ 3つの放射能濃度の区分のそれぞれの土壌量に基づき、減容化処理の有無、減容化の手法に応じてコストを試算する手法を確立した。

◆サブテーマ(3)磁気力制御型除染法の開発

- ・ 土壌中のセシウムの2:1型粘土鉱物の移行を促進するカリウム溶液での前処理が分離率向上に効果的であることが示された。

本研究の環境政策への貢献

◆サブテーマ(1)環境中のセシウムの動態解析

- ・事故後の時間経過によるCsの移行(2:1型粘土鉱物への固定化)は**土壌分級や磁気分離による汚染土壌の減容化に有利**である。
- ・建材のうち金属やコンクリートは浸透深さが比較的浅く、**切削や錆除去処理**が有効である一方、木材や粘土瓦など内部まで浸透して除染不可能なものがあることが分かった。

◆サブテーマ(2)セシウムの動態に基づく除染シナリオの構築

- ・周辺区域からの放射線を加味して、対象区域を目的線量まで下げするための**最適な周囲の除染範囲を策定できる手法**を確立した。
- ・汚染土壌の状況に応じて減容化処理の有無、その手法や実施場所等、**適切なシナリオ選定を支援できる方法**を確立した。

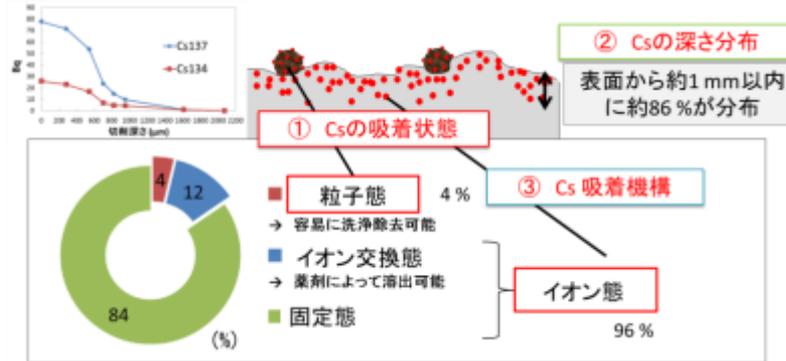
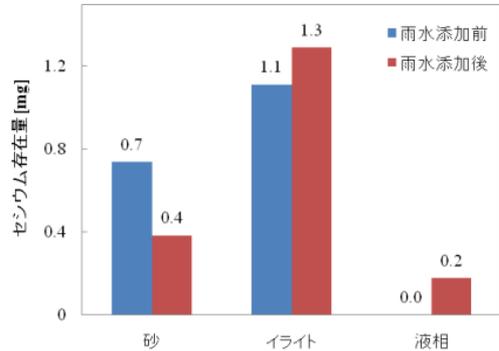
◆サブテーマ(3)磁気力制御型除染法の開発

- ・**7Tの超電導磁石で96%のバーミキュライト**が分離可能であることが確認された。
- ・前処理として**移行処理を行うこと**によるさらなる線量低減が見込まれた。

5Z-1301「セシウムの動態解析に基づく除染シナリオの構築と 磁気力制御型除染法の開発」

◆サブテーマ(1)

環境中のセシウムの動態解析



◆サブテーマ(3)

磁気力制御型除染法の開発



◆サブテーマ(2)

セシウムの動態に基づく除染シナリオの構築

実証実験結果(最大値) 0.91~2.4 $\mu\text{Sv/h}$

