

農地土壌の放射性物質除去技術（除染技術）について

農林水産省は、農地土壌の放射性物質除去技術（除染技術）の開発の取組について、これまで得られた研究成果をとりまとめ、地目や放射性セシウム濃度に応じた農地土壌除染の技術的な考え方を整理しました。

技術開発の目的

この度の東京電力福島第一原子力発電所の事故に伴い、福島県を中心に広範囲の農地が放射性物質に汚染されました。

我が国の農地が放射性物質に汚染される事態は初めてのことであり、面積が大きく、食料生産の基盤である農地土壌を除染する技術を開発するため、農林水産省は、内閣府総合科学技術会議、文部科学省、経済産業省と連携して、平成23年度科学技術戦略推進費「放射性物質による環境影響への対策基盤の確立」により、農地土壌等における放射性物質除去技術の開発に取り組んでいるところです。

試験の概要

試験研究機関での予備試験を踏まえ、地目（水田、畑）や汚染程度等を考慮した上で、福島県の飯舘村及び川俣町の現地圃場等において、表土の削り取り、水による土壌攪拌・除去、反転耕による汚染土壌の埋め込み、及び高吸収植物による除染等の実証試験を行っています。さらに、除染に伴って生じる汚染土壌や植物体の処理・保管技術についても研究を行っています【別添1】。

これまで得られた知見【別添2】から、農地土壌除染技術の適用の考え方を整理しました【別添3】。

各技術の詳細は、【別添4】のとおりです。

農地土壌除染技術の適用の考え方

- ・すでに耕作が行われている場合が多い、稲の作付制限対象区域設定の際の判断基準としている放射性セシウム濃度 5,000 Bq/kg 以下の農地については、必要に応じて反転耕などにより農作物への移行低減対策、空間線量率低減対策を講じることが適当です。
- ・5,000 ～ 10,000 Bq/kg の農地については、地目や土壌の条件を考慮した上で、水による土壌攪拌・除去、表土削り取り、反転耕を選択して行うことが適当です。
- ・10,000 ～ 25,000 Bq/kg の農地については、表土削り取りを行うことが適当です。10,000 Bq/kg を超えると、深さ 30cm の反転耕による希釈で 5,000 Bq/kg 以下にすることが困難になります。

- ・ 25,000 Bq/kg を超える農地については、固化剤等による土埃飛散防止措置を講じた上で、5cm 以上の厚さで表土の削り取りを行うことが適当です。表土を薄く削ると、廃棄土壌の放射性セシウム濃度が100,000 Bq/kg を超える可能性があります（原子力災害対策本部により、脱水汚泥等について、100,000 Bq/kg を超える場合には、適切に放射線を遮へいできる施設で保管することが望ましいとされています*）。また放射線量が高いため、固化剤による土ほこり飛散防止等、除染作業時の被曝に対する様々な安全対策を講じる必要があります。

*平成 23 年 6 月 16 日付け 原子力災害対策本部通知

今後の研究予定

高吸収植物による生物的除染や各種資材等を用いた作物への吸収抑制技術については、試験を継続し、作物の収穫後に調査結果をとりまとめます。また、廃棄土壌からの放射性セシウム分離・減容技術について引き続き研究を行います。

参画機関

農地土壌の除染技術の開発は、独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）、独立行政法人 農業環境技術研究所（農環研）、独立行政法人 産業技術総合研究所（産総研）、独立行政法人 物質・材料研究機構（物材機構）、独立行政法人 日本原子力研究開発機構（原子力機構）、福島県農業総合センターを中心に、7 独立行政法人、11 大学、6 県の農業試験場、1 財団法人、3 民間企業が協力して実施しています。

<添付資料>

- ・【別添 1】農地土壌除染技術開発の実証試験概要
- ・【別添 2】実証した除染技術の成果の概要
- ・【別添 3】農地土壌除染技術の適用の考え方
- ・【別添 4】各技術についての解説

お問い合わせ先

農林水産技術会議事務局研究開発官（食料戦略）室

担当者：中谷、安東、田村

代表：03-3502-8111（内線 5840）

ダイヤルイン：03-3502-2549

FAX：03-3502-4028

当資料のホームページ掲載 URL

<http://www.maff.go.jp/j/press/>

【別添1】 「ふるさとへの帰還に向けた取組」 — 農地土壤除染技術開発 実証試験概要 —



○その他の地域での実証試験

反転耕(天地返し)

(水田)

本宮市: 面積: 28 a

放射性セシウム濃度:

4,100 Bq/kg



放射性セシウム濃度は、土壌中のセシウム134濃度とセシウム137濃度の合計 (Bq/kg、乾土)

【別添2】実証した除染技術の成果の概要

技術の項目	これまでに得られた結果の概要
表土の削り取り	
1)基本的な削り取り 農業機械等で表土を薄く削り取る手法。	<ul style="list-style-type: none"> ・約4cmの削り取りにより、土壌の放射性セシウム濃度は、10,370 Bq/kg→2,599 Bq/kgに低減(75%減)。 ・圃場地表面の空間線量率は、7.14μSv/hから3.39μSv/hへ低減。 ・廃棄土壌量は、約40m³(40トン)/10a。 ・削り取りまでにかかる作業時間は、55分～70分/10a程度。
2)固化剤を用いた削り取り 土を固める薬剤により土壌表層を固化させて削り取る手法。	<ul style="list-style-type: none"> ・マグネシウム系固化剤を用いた実証試験では、溶液の浸透により地表から2cm程度の表層土壌が7～10日で固化。 ・3.0cmの削り取りで、土壌の放射性セシウム濃度は、9,090 Bq/kg→1,671 Bq/kgに低減(82%減)。 ・圃場地表面の空間線量率は、7.76μSv/hから3.57μSv/hへ低減。 ・廃棄土壌量は30m³/10a。
3)芝・牧草のはぎ取り 農地の牧草や草ごと土を専用の機械で削り取る手法。	<ul style="list-style-type: none"> ・3cmの削り取りで、土壌の放射性セシウム濃度は、13,600 Bq/kg→327 Bq/kg(低減率97%)。 ・草も含む排土量は約40トン/10a。 ・作業時間は、はぎ取りまでで250分/10a。
水による土壌攪拌・除去	
表層土壌を攪拌(浅代かき)し、濁水を排水した後、水と土壌を分離し、土壌のみを排土とする手法。	<ul style="list-style-type: none"> ・土壌の放射性セシウム濃度の低減率は土壌の種類によって異なり、予備試験で約30～70%と推定。 ・飯舘村での実証試験では、15,254 Bq/kg→9,689 Bq/kgに低減(低減率36%)。 ・圃場内の地表面線量は、7.55μSv/h→6.48μSv/hに低減。 ・10a当たりの廃棄土壌量は、1.2～1.5トンと推計。 ・分離した水の放射性セシウムは、検出限界以下。
反転耕	
プラウ耕により、30cm以上の反転耕起を行い、放射性物質を土中深くに埋め込む手法。	<ul style="list-style-type: none"> ・30cmの反転により、表層に局在していた放射性物質は、15-20cmの深さを中心に0-30cmの土中に拡散。 ・圃場地表面の空間線量率は、不耕起:0.66μSv/h、通常のロータリ耕:0.40μSv/hに対してプラウ耕:0.30μSv/h。 ・作業時間は30分/10a。 ・45cmの反転では、表土は25-40cmの土中に移動。 ・60cmの反転では、表土は40-60cmの土中に移動。ただし通常のトラクターでは施工不可。 ※施工前に土壌診断、地下水位等による評価が必要。
高吸収植物による除染	
放射性セシウムの吸収能力が高い植物を栽培し、土壌を除染する手法。	<ul style="list-style-type: none"> ・青刈りのヒマワリの放射性セシウム吸収率は、植物体地上部生重当たり52 Bq/kg。 ・単位面積当たりの吸収量は、作付け時の土壌の放射性セシウムの約1/2000であり、効果は小さい。 ・現時点では、除染に利用可能な高吸収植物の候補が得られていないため、現場への普及の段階に無い。

【別添3】 農地土壌除染技術適用の考え方

当面、5,000 Bq/kg以上の農地をそれ未満に下げること为目标とする(水田:6,300ha、畑:2,000haと推計)

注)●は廃棄土壌が出る手法、○は出ない手法。

土壌の放射性セシウム濃度	畑		水田	
≤ 5,000 Bq/kg	農作物への移行を可能な限り低減する観点、また、空間線量率を下げる観点から、必要に応じて○反転耕、○移行低減栽培技術を適用。			
5,000 Bq/kg ～ 10,000 Bq/kg	地下水位		土壌診断・地下水位	
	低い場合(数値は検討) ●表土削り取り ○反転耕	高い場合(数値は検討) ●表土削り取り	低地土 ●表土削り取り ●水による土壌攪拌・除去 ○反転耕 (耕盤が壊れる)	低地土以外 ●表土削り取り ●水による土壌攪拌・除去 (低地土より効果低) ○反転耕 (耕盤が壊れる) (地下水位が低い場合のみ適用)
10,000 Bq/kg ～ 25,000 Bq/kg	●表土削り取り		●表土削り取り	
25,000 Bq/kg ≤	●表土削り取り 5cm以上の厚さで削りとり。 ただし、高線量下での作業技術の検討が必要。 (例えば土ぼこりの飛散防止のための固化剤の使用)		●表土削り取り 5cm以上の厚さで削り取り。 ただし、高線量下での作業技術の検討が必要。 (例えば土ぼこりの飛散防止のための固化剤の使用)	

廃棄土壌等の処理

廃棄土壌	実証試験において仮置きに放射線遮蔽性、可搬性を有するコンクリート製容器を利用したところ、有効であることが判明。 廃棄土壌から放射性セシウムを分離・除去する技術開発を引き続き実施。
植物残渣	廃棄する植物残渣の減容化のため、焼却による放射性セシウムの動態調査を引き続き実施。高濃度の汚染残渣等の仮置きにコンクリート製容器を利用したところ、有効であることが判明。

注1)実際の除染事業に当たっては、事前に雑草処理を検討する。特に草地などで牧草等のルートマットが生成されている場合には、牧草の剥ぎ取りをまず検討すべきである。

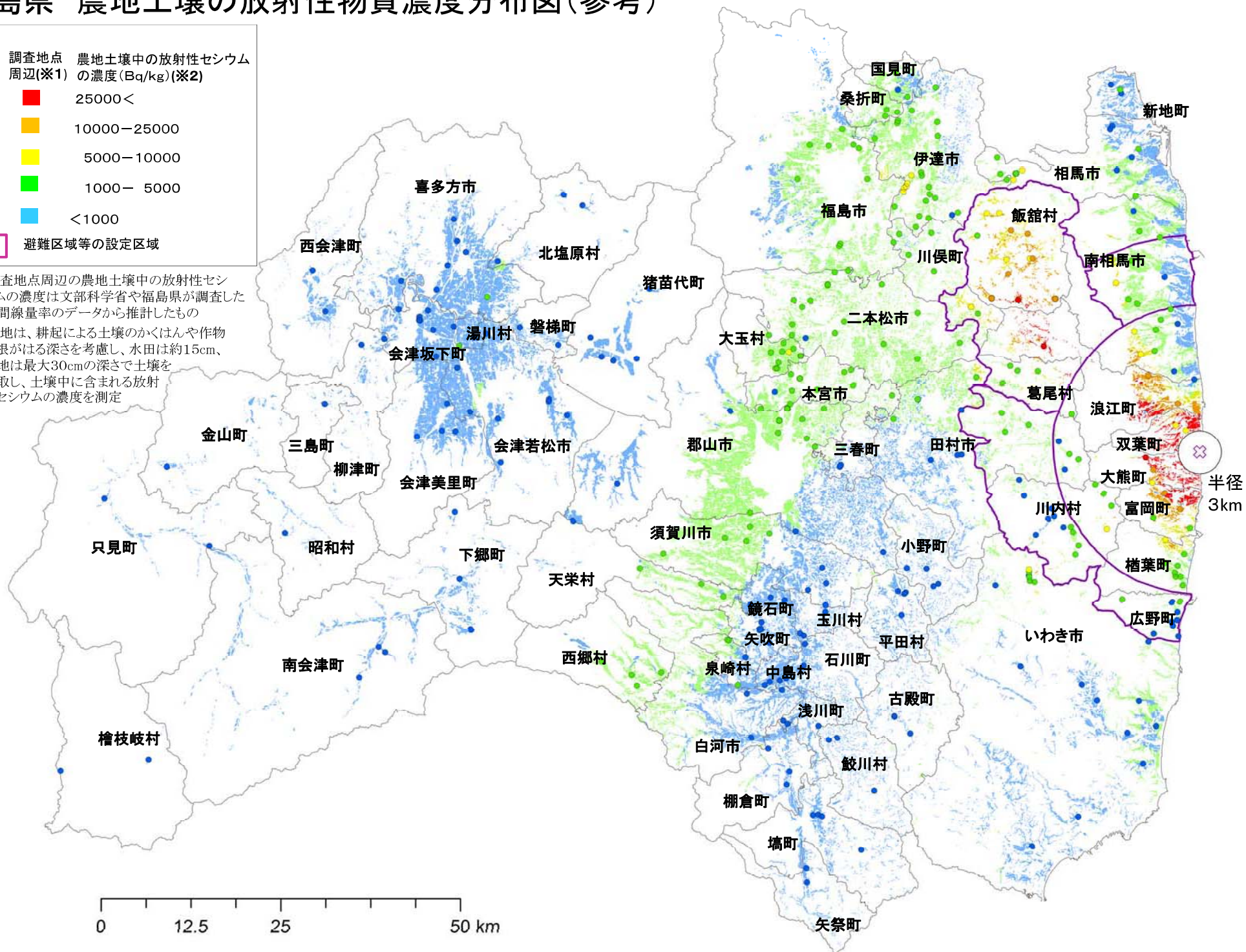
注2)「市町村による除染実施ガイドライン」(8月26日原子力災害対策本部)においては、廃棄土壌等の仮置きについては遮水した上でまとめて地下に置き、覆土する方法が記述されている。

福島県 農地土壌の放射性物質濃度分布図(参考)



※1:調査地点周辺の農地土壌中の放射性セシウムの濃度は文部科学省や福島県が調査した空間線量率のデータから推計したもの

※2:農地は、耕起による土壌のかくはんや作物の根がはる深さを考慮し、水田は約15cm、畑地は最大30cmの深さで土壌を採取し、土壌に含まれる放射性セシウムの濃度を測定



【別添 4】各技術についての解説

目 次

1.	農地土壌汚染に関する基礎的知見	P 2
2.	表土削り取り	
2-1)	基本的な表土削り取り	P 3
2-2)	固化剤を用いた表土削り取り	P 5
2-3)	芝・牧草の剥ぎ取り	P 7
3.	水による土壌攪拌・除去	P 9
4.	反転耕	P11
5.	高吸収植物による除染	P13
6.	放射性物質の中間処理・管理技術	
6-1)	コンクリート製容器による放射線減衰試験	P15
6-2)	土壌からの放射性物質の分離技術の開発	P17
6-3)	水溶液からの放射性物質の吸着・除去技術の開発	P19

1. 農地土壌汚染に関する基礎的知見

- 1) 放射性セシウム (^{134}Cs 、 ^{137}Cs の合計) は、耕起していない農地土壌の表面から 2.5 cmの深さに 95%が存在 (図 1)。

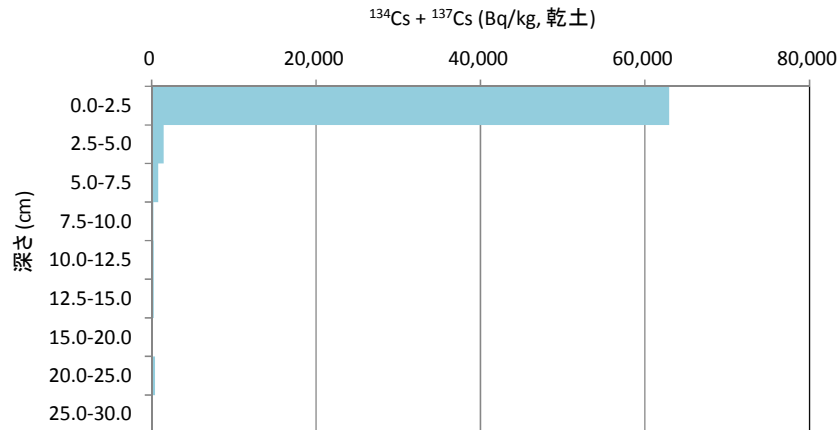


図 1：飯舘村伊丹沢の水田土壌の放射性セシウム濃度

- 2) 放射性セシウムは農地土壌中の粘土粒子等と強く結合しており、容易に水に溶出し
ない (表 1)。一方、ため池や用水等、水の汚染は軽微 (表 2)。

表 1: 福島県の農地土壌からの放射性セシウム ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$) 抽出試験

土の種類	水抽出	酢酸アンモニウム抽出
福島の水田土壌	ND	2.3%
福島の畑土壌	ND	5.3%

注) 検出限界値 (0.4 Bq/L)

表 2: 飯舘村の実証試験水田周辺の水場の放射性セシウム濃度 ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$) 測定

水の種類	放射性物質濃度
水源ため池水	ND
近傍の新田川河川水	ND
観測井地下水	ND
用排水中	ND

注) 検出限界値 (4~7 Bq/L)

- 3) 放射性セシウムは粘土やシルトなど細かい土粒子に多く結合している (表 3)。

表 3: 事前サンプリング土壌表層 (0-2.5 cm、伊丹沢) の粒径別の放射性セシウム濃度の測定結果

試料深さ	国際土壌学会法による 粒径区分		組成割合 (%)	Bq/kg(各 組成)	Bq/試料 全体	Bq 割合 (%)
0-2.5cm	粘土	～2 μm	4.8	174,300	8,400	13
	シルト	20～2 μm	29.6	103,300	30,600	46.4
	細砂	200～20 μm	45.2	48,000	21,700	32.9
	粗砂	2mm～200 μm	20.4	25,900	5,280	8.0

注) 0-2.5cm 表層全体の放射線濃度は、65,923 Bq/kg である。採土は平成 23 年 6 月。

2-1) . 基本的な表土削り取り

1. 概要

農地に降下した放射性物質は、土壌の表層に集中して存在している。従って放射性物質を含む表層の土壌を除去することで、汚染された農地を利用可能な状態に回復できると考えられる。そこで、物理的に農地の表土を除去する技術を開発することを目的として試験を行った。

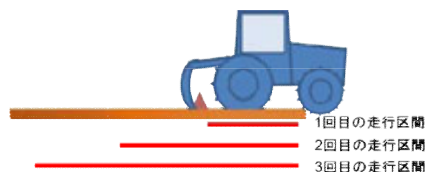
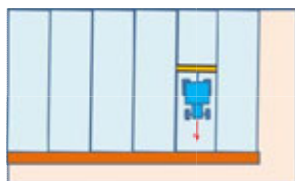
○担当：(独)農研機構中央農業総合研究センター

○実証試験実施場所：福島県相馬郡飯舘村飯樋の水田（8 a）

2. 作業の流れ

砕土→削り取り→土壌の搬出・土のう詰め作業手順で行う。

- 1) 砕土：農業用トラクタにバーチカルハローを取り付け、ほ場表面を浅く（4～5 cm）砕土し、膨軟にする。
- 2) 削り取り：農業用トラクタにリアブレード（排土板）を付け替え、砕いた表土を圃場の短辺方向に5～10m 毎に削り取り、集積する。



- 3) 排土・土のう詰め：農業用トラクタのフロントローダで、集積した表土をダンプトラックに積み込み、ほ場外へ搬出し、バックホー等で土のう袋に詰める。



写真1：砕土



写真2：削り取り・集積



写真3：排土

3. 結果と考察の概要（表1、2参照）

- 1) 水田の表土を約4cm（10aあたり約40m³）削り取ることで、土壌の放射性セシウム濃度は10,370 Bq/kg から2,599 Bq/kg に低下した。除去の前後で土壌表面の空間線量率は7.14 μ Sv/h から3.39 μ Sv/h に低下した。削り取りまでの作業時間は10aあたり55～70分かった。

- 2) 削り取った表層土壌の排出と土のう詰めに最も時間を要した。特に排出土の運搬を効率的に行う工夫が必要である。
- 3) 所要作業時間は、ほ場条件、オペレータの熟練度、排出運搬距離などにより異なる。
- 4) 作業により発生する土ほこりや粉塵による作業者の内部被ばくを防止する措置を講ずる必要がある。
- 5) 放射線量の高い農地では、排土の放射性物質濃度が 10 万 Bq/kg を超えないよう、厚めに削り取ることを検討する必要がある。

表 1：土壌中放射性セシウムの値（単位 Bq/kg、表層 15cm）

	削り取り前	削り取り後	排土	低減率(%)
水田	10,370	2,599	44,253	75

表 2：作業別所要時間（10a 当たり）

作業の種類	所要時間	作業者数	必要機械
砕土	15～20 分	1	トラクタ、バーチカルハロー
削り取り	40～50 分	1	トラクタ、リアブレード
集積・排土	70～85 分	2（トラクタ 1、ダンプトラック 1）	トラクタ、フロントローダ
袋詰め	15～20 分	2（バックホー1、補助者 1）	バックホー、大型土のう、土のうスタンド

※ほ場に雑草がある場合に行う除草作業は含まない。

4. 今後の計画・課題

- 1) 水田圃場に作付けした稲の放射性セシウム含量等の調査。

2-2) . 固化剤を用いた表土削り取り

1. 概要

酸化マグネシウムを主材料とする固化剤やポリイオンをほ場表面に吹き付け、土壌表面を固化した後に、表層土壌の削り取りを行う。表層土壌の固化により、放射性セシウムが多く含まれる表層を効率的に削り取り、汚染土壌を効率的に除去する技術を開発することを目的とする。

○担当：(独) 農研機構農村工学研究所 ((独) 日本原子力研究開発機構)

○実証試験実施場所：福島県相馬郡飯舘村伊丹沢地区現地ほ場 (10a)

2. 作業の流れ (マグネシウム系固化剤の場合)

- 1) マグネシウム系固化剤を水と混合した溶液をほ場に吹き付ける。
- 2) 固化剤が浸透し、表層土壌が十分に固化 (晴天時 7~10 日) したことを確認したのち、表層土壌の削り取りを行う。
削り取りは、油圧ショベルのアームを押し付けながらスイングすることにより行う。これにより、削り取りの厚さを一定に制御できる。アームに取り付けるバケット部を改良することで、バキュームカーによる排土の収集が可能となり、汚染土壌の取りこぼしをなくすることができる。
- 3) バキュームカーで収集した排土をフレコンバッグに移し替え、決められた場所に仮置きする。



写真 1：固化剤吹き付け作業



写真 2：固化剤吹き付け後のほ場

3. 結果と考察の概要 (表 1 参照)

- 1) 土壌の放射性セシウムの濃度は、表層土を削り取るにより、9,090 Bq/kg から 1,671 Bq/kg へ低減した。ほ場内の表面線量率は、7.76 μ Sv/h から 3.57 μ Sv/h へ低減した。
- 2) 10a 当たりの排土量は約 30m³ であり、推定された削り取りの厚さは約 3.0cm であった。
- 3) 油圧ショベルのバケットの改良によって、これまで削り取り・収集・搬出の 3 工程

で行っていた作業を1工程で行うことが可能である。

- 4) 表層土壌を固化することで、土壌の飛散を抑えることが期待できる。
- 5) 固化剤を散布することで表層土壌が白くマーキングされるため、削り残しや取りこぼしを目視により確認できた。
- 6) 稲の刈り株や不陸のある田面でも適用が可能。
- 7) 降雨後では場表面が濡れている場合は、固化剤混合溶液が所定の深度に浸透しない可能性があるため、ほ場が乾燥した後に吹き付けることが望ましい。
- 8) 固化剤混合溶液を吹き付ける際には、ほ場内の雑草を事前に処理する必要がある。
- 9) ポリイオンや分子性ポリマーでも同様の効果が期待できる（飯舘村で予備試験を実施、日本原子力研究開発機構）。



写真3：表層土の削り取り



写真4：改良したバケット部

表1：結果の概要

	放射性セシウム濃度 (Bq/kg、乾土)	低減率 (%)	地表面線量 (μ Sv/h)
削り取り前	9,090	—	7.76
削り取り後	1,671	82	3.57

4. 今後の計画・課題

- 1) 削り取った表層土壌をより効率よく吸引するため、バケット部の改良を検討。
- 2) 削り取った表層土壌の吸引以外の効率的な収集方法についても検討



写真5：ポリイオンにより固化した土壌

2-3) . 芝・牧草の剥ぎ取り

1. 概要

芝の剥ぎ取り機であるターフスライサーを用いて、芝地や草地の草と表土とを同時に切り取ることにより、除草と除染の同時作業による効率的な汚染土壌の削り取りを行うことを目的とする。

○担当：福島県農業総合センター

○実証試験実施場所：1) 畜産研究所沼尻分場：ターフスライサーによる芝地の切り取りとフロントローダによる回収試験

2) 福島県相馬郡飯舘村飯樋の水田転換牧草地：ターフスライサーによる牧草地の切り取りとフロントローダによる回収試験

2. 作業の流れ

1) ターフスライサーにより芝や草を切り取る。

2) フロントローダで剥ぎ取り、搬出する。



スガノ農機製ターフスライサーを用いる。



土壌を 3cm (奥) もしくは 5cm (手前) に剥ぎ取る。

草丈の低い芝地等



フロントローダーを用い、すくい上げによる搬出する。

草丈の高い牧草等



フロントローダーを用い、引き剥ぎによる搬出する。

3. 結果と考察の概要 (表 1 参照)

1) ターフスライサーによるルートマットの切り取りは 3cm 及び 5cm の厚さで可能であり、ともに切り取り速度 0.15 km/h であった。

2) 放射性セシウム濃度は切り取り厚 3cm で 97% 減、5cm で 99% 減であり、どちらの剥ぎ取り厚でも大幅に減少した。

3) ターフスライサーによる切り取り及びフロントローダによる剥ぎ取り及び運搬時に

において、草丈 50cm 程度の牧草のルートマットでも表層土壌の落ちこぼれを防止できることを確認できた。

- 4) 表土を 3 cm の厚さで切り取るとすると、10 a 当たりの大まかな作業時間は、切り取り時間は 135 分、剥ぎ取り時間は 113 分、また、牧草を含む剥ぎ取った土の重量は 41.6 t であった。
- 5) 飯舘村の現地圃場のように水田からの転換地では、フロントローダによる剥ぎ取りについて、すくい上げでは想定より深く土を剥ぎ取ってしまうため、引き剥ぎで作業を行った。
- 6) ルートマットの発達した草地では作業がし易いが、そうでない草地では作業がし難い。

表 1：飯舘現地の土壌中の放射性セシウムの値（単位：Bq/kg）

試料の内容 (剥ぎ取り設定深度)	乾土 ^{134}Cs	乾土 ^{137}Cs	乾土 Cs 合計	低減率 (%)
剥ぎ取り前 (5 点の混合)	6,394	5,485	13,630	—
5 cm	80	97	177	98.5
3 cm	147	180	327	97.2

注) 土壌のサンプルについては 15cm の深さである。

4. 今後の計画・課題

- 1) ターフスライサーとフロントローダを用いる体系について、傾斜地や凹凸のある土地で効率的に実施できるか検討が必要である。
- 2) ルートマットがない草種が優占する群落での適用性の検討が必要である。
- 3) より小型のソーダクターと吸引器を組み合わせた方法についても検討中（農研機構中央農業総合研究センター）。

3. 水による土壌攪拌・除去

1. 概要

水田において表層土壌を攪拌（浅代かき）した後、細かい土粒子が浮遊している濁水をポンプにより強制排水し、沈砂地において固液分離を行い、分離した土壌のみを廃棄土とした。セシウム含量の高い土壌表層の細粒子を排出し、廃棄土を減容化するとともに除染を行うことを目的とする。

○担当：（独）農研機構農村工学研究所（（独）農業環境技術研究所）

○実証試験実施場所：福島県相馬郡飯舘村現地ほ場（4. 2a）

2. 作業の流れ

- 1) パーチカルハローで表層約 2cm を攪拌する。
- 2) 水田に水を入れて、浅代かきを実施する。
- 2) 濁水をポンプにより沈砂地に強制排出する。その際、塩ビ管を使用し、人力でポンプ側への濁水の押し出しを実施する。
- 3) 凝集剤を投入し、沈砂地において固液分離を行う。
- 4) 上澄み液は放射性セシウム濃度を確認後、排出する。分離した土壌は乾燥した後にフレコンバッグに移し替え、決められた場所に仮置きする。



写真 1：土壌攪拌（浅代かき）



写真 2：沈砂地への濁水の排出

3. 結果と考察の概要

- 1) 土壌表面攪拌機による小規模の予備試験では、土壌の放射性セシウム濃度の低減率は、土壌によって異なり、29～71%であり、粘土含量が少ない土壌では高い効果が期待できない場合があることがわかった。
- 2) 土壌の放射性セシウムの濃度は、土壌攪拌（浅代かき）及び濁水の強制排水を行うことにより、15,254 Bq/kg から 9,689 Bq/kg へ低減した。圃場地表面の空間線量率は、7.55 μ Sv/h から 6.48 μ Sv/h へ低減した。
- 3) 予備試験から 10a 当たりの排土量は 1.2～1.5t と推計され、表層土壌を 5cm はぎ取

った場合と比較して、排土量は1／10以下となる見込み。

- 4) 沈砂地において固液分離した後の上澄み液の放射性セシウム濃度は、検出限界（4～8 Bq/L）以下であったため、環境中への排出が可能。
- 5) 放射性物質が水に溶出した場合は、プルシアンブルー不織布をフィルターとした水路（産業技術総合研究所）や天然鉱物等による吸着が可能。
- 6) 土壌攪拌を実施する前に、ほ場内の雑草を事前に処理する必要がある。



写真3：沈砂地における固液分離



写真4：固液分離後の上澄み液
（放射性セシウム濃度は検出限界以下）

表1：土壌表面攪拌による実証試験結果の概要

	放射性セシウム濃度 (Bq/kg、乾土)	低減率 (%)	地表面線量率 (μ Sv/h)
試験実施前	15,254	—	7.55
試験実施後	9,689	36	6.48

4. 今後の計画・課題

- 1) 濁水状態を維持し、除染効率を上げることを目的に、土壌表面攪拌機を用いた実証試験を9月中に実施予定（農業環境技術研究所）。

4. 反転耕

1. 概要

プラウ耕により、放射性セシウムで汚染された表層土を土壌下層に反転することにより、土表面の空間線量率を低下させるとともに、作物への移行吸収量を低下させることを目的とする。反転耕では、表土除去の場合問題となる廃棄物としての排土が発生しない利点があり、施工コストも小さいことが期待される。今回は、反転深度の異なるプラウ（耕深 30, 45, 60cm）を試験。

○担当：（独）農研機構中央農業総合研究センター

○実証試験実施場所：福島県本宮市水田(28a)

2. 作業の流れ

①吸着材（バーミキュライト等）の表面散布→②プラウ耕→③踏圧・砕土・均平化→④施肥→⑤移植



図 1：ジョイント付きプラウ（耕深 30cm、トラクタ牽引）：本宮市、5 月 9 日実施

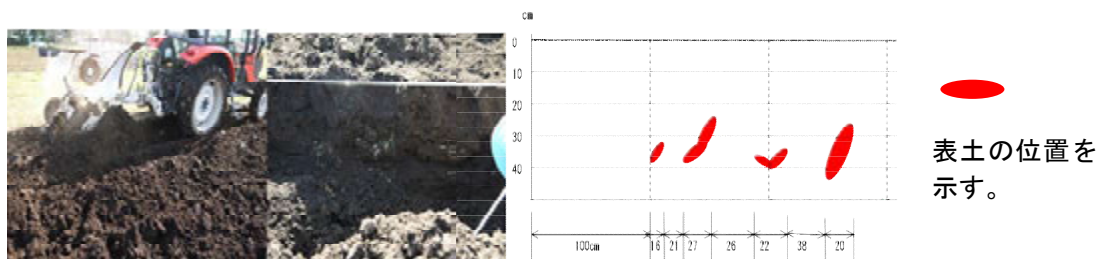


図 2：改良型二段耕プラウ（耕深 45cm、トラクタ牽引）：中央研ほ場、8 月 29 日実施

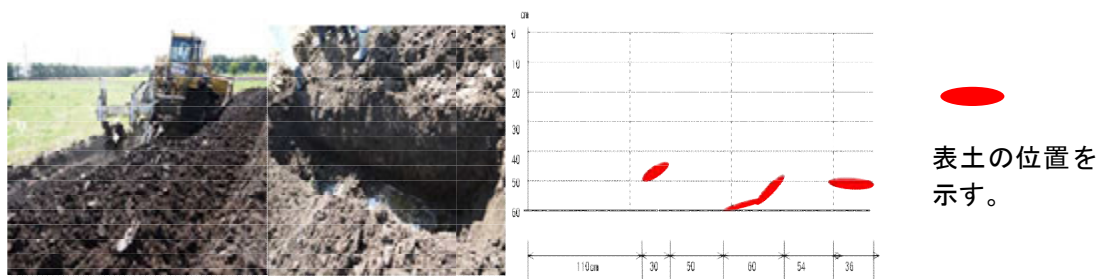


図 3：二段耕プラウ（耕深 60cm、D6 ブルドーザー牽引）：中央研ほ場、8 月 29 日実施

3. 結果と考察の概要

- 1) 本宮市における反転プラウ（30cm）では、放射性セシウムは深さ 15cm～20cm の層に入り、最表層では明らかに濃度は低下した（図 1）。
- 2) ほ場の表面線量率は、不耕起：0.66 $\mu\text{Sv/h}$ 、ロータリー耕：0.40 $\mu\text{Sv/h}$ 、プラウ耕：0.30 $\mu\text{Sv/h}$ であった。
- 3) プラウ耕の作業時間は 0.5 時間/10a。反転耕後、無代かき田植えを実施し、現在、順調に生育中。
- 4) 耕深 45cm の反転耕では、表土は 25–40cm の土中、耕深 60cm 反転耕では表土は 40–60cm の土中に移動。
- 5) 放射性物質を除去する方法ではないので、高度に汚染された農地に適用することはリスクが大きく、比較的軽度の汚染土壌向き。
- 6) 事前に、簡易ボーリングによる地下水位調査と土壌の放射性セシウム溶出試験を実施し、地下水汚染リスク評価が必要。
- 7) 反転深度が深いほど地表面の空間線量率の低下効果等は高いが、耕盤を壊す恐れがあるので、水田には 30cm タイプが適する。また、減水深の大きな水田では、丁寧に代かきをするなどの漏水対策が必要。
- 8) 下層土が痩せた土壌の場合、反転耕により痩せた下層土で作物を栽培することになるので、堆肥や土壌改良資材の施用による地力向上対策が必要。

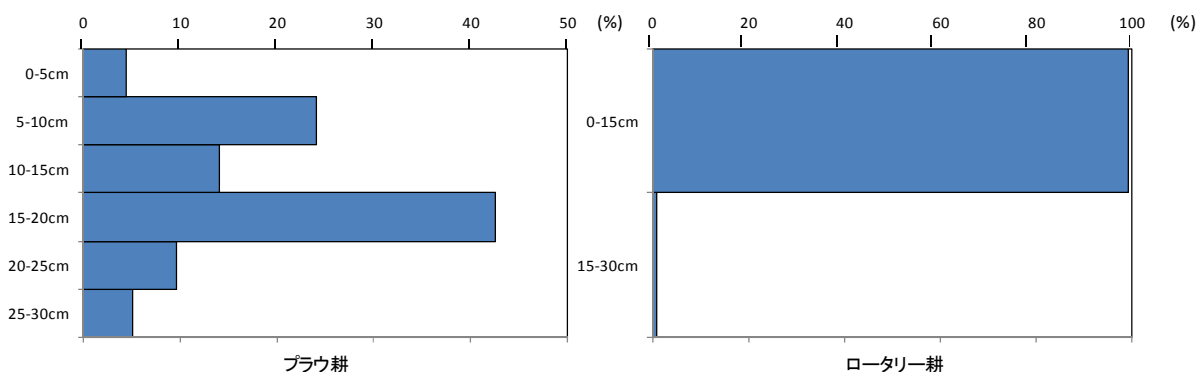


図 1：本宮市における反転プラウ（30cm）耕後の放射性セシウムの深度分布

4. 今後の計画・課題

- 1) 事前の地下水汚染リスク評価法を早急に確立。
- 2) 本宮市の現地実証水田で生育中の水稻の収穫物調査等を実施。

5. 高吸収植物による除染

1. 概要

放射性セシウムを吸収する能力が高いと考えられている植物により土壌から吸収させて回収する技術（ファイトレメディエーション技術）について有効性を確認・実証することを目的とする。試験研究機関の圃場および被災地の現地圃場で栽培し、放射性物質の吸収量を推定するとともに、残渣の焼却試験を行う。

○担当：（独）農研機構東北農業研究センター、福島県農業総合センター、（独）日本原子力研究開発機構

○実証試験実施場所：

- 1) 福島県相馬郡飯舘村二枚橋現地圃場（15a）：土壌の放射性セシウム濃度：7,715 Bq/kg、ヒマワリ（キク科）、アマランサス（ヒユ科）（5/28 播種）
- 2) 福島県伊達郡川俣町山木屋地区現地圃場（1a×2）：土壌の放射性セシウム濃度：5,690 Bq/kg ケナフ（アオイ科）、キノア（アカザ科）、アマランサス（ヒユ科）（6/29 播種）

2. 作業の流れ

飯舘村二枚橋地区現地圃場（褐色森林土）および福島県農業総合センター（灰色台地土）では、ヒマワリ、アマランサスを栽培し、放射性セシウムの吸収量を把握する。

川俣町山木屋地区現地圃場では、ケナフ、キノア、アマランサスを栽培し、放射性セシウムの吸収量を把握する。

東北農業研究センター福島拠点（黒ボク土）では、ヒマワリ2品種、アマランサス4品種・系統、キノア1品種、ケナフ1品種に加え、ソルガム1品種、キビ1品種、栽培ビエ1品種（以上イネ科）を栽培し、放射性セシウムの吸収量を比較する。

表1. ヒマワリ栽培の試験設計および開花日

試験地点	土壌	作期の気温 ^{注)}	播種日	開花日
飯舘村現地	褐色森林土	20.0℃	5月27日	8月5日
福島拠点	黒ボク土	23.0℃	5月25、27日	7月29日、7月31日
福島農総セ	灰色台地土	22.2℃	5月17日	7月20日

注：6月～8月の平均気温の平年値

3. 結果と考察の概要（暫定値）

- 1) 飯舘村現地圃場のヒマワリについて、開花時（8月5日）の放射性セシウム濃度は硫安＋無カリ区において茎葉で52 Bq/kg、根で148 Bq/kgであった（表2）。この場合の、土壌（7,715 Bq/kg）から茎葉への移行率は0.00674であった。

- 2) 飯舘村現地圃場の土壌の放射性セシウムは、平方メートル当たり、1,067,820 Bq と計算される。一方、ヒマワリの収量（新鮮重）が約 10 kg/m²、放射性セシウム濃度が 52 Bq/kg とすると、平方メートルあたり 520 Bq がヒマワリに吸収された計算になり、平方メートル当たりの土壌に含まれる放射性セシウム（1,067,820 Bq）の約 2,000 分の 1 にあたる。このことから、ヒマワリによる除染効果は小さいと考えられる。
- 3) 今回のヒマワリの値は開花時の値である。今後、開花 30 日後まで経時的に採取したサンプルの結果を総合的に評価する必要がある。

表 2. ヒマワリの開花時の放射性セシウム濃度（飯舘村二枚橋圃場）

部位	区	¹³⁴ Cs Bq/kg, DW	¹³⁷ Cs Bq/kg, DW	Cs 合計 Bq/kg, DW	水分率	Cs 合計 Bq/kg, FW
茎葉	硫安＋無カリ	280	340	620	0.91	52
	硝安＋塩化カリ	140	185	325	0.91	31

それぞれ 2 箇所の平均

4. 今後の計画・課題

試験している全ての植物の結果が出てないので、確定的ではないが、ヒマワリについては、吸収率が低く除染に極めて長い時間がかかるため、実用的ではない。

ヒマワリについては、開花期から開花後 30 日にかけて経時的に収穫し、放射性セシウム濃度を測定する。現地栽培ヒマワリの一部については、放射性物質を飛散させずに減容化するための焼却試験を実施する。さらに一部のヒマワリについては、種子を完熟させ、油への放射性セシウムの移行を調査する。

その他の各種作物については、生育ステージを見極めつつ生産量と放射性セシウム濃度を順次測定する。



写真 1：焼却試験装置

6. 放射性物質の中間処理・管理技術

6-1) . コンクリート製容器による放射線減衰試験

1. 概要

6月13日～15日に飯舘村で実施した表土削り取り試験によって生じた排土（放射性セシウム濃度：約5万Bq/kg）を詰めたフレコンバッグを、試作したコンクリート製容器に封入し、放射線遮蔽効果を確認することを目的とする。

○担当：（独）農研機構農村工学研究所、他

○実証試験実施場所：福島県相馬郡飯舘村飯樋、他

2. 作業の流れ

使用したコンクリート製容器の外寸は1.5m×1.5m×1.5m、壁厚は15cm、内容積は1.6m³。使用した材料は、普通コンクリートと重量コンクリートであり、それぞれ重量は普通コンクリート製が4.2t、重量コンクリート製が6.0tである。

1) 吊り金具をもちい、安定した水平面にコンクリート製容器を設置

2) 飯舘村で実施した表層土剥離試験によって生じた排土を詰めたフレコンバッグを防水シートに包んだ後、コンクリート製容器に封入。

3) 蓋とのジョイント部にフチゴムを使用し、雨水の浸入と内部からの漏洩を防止。



写真1：コンクリート製容器の設置



写真2：フレコンバッグ挿入後の状況

3. 結果と考察の概要

- 1) 土壌を封入したコンクリート製容器表面の線量率は、フレコンバッグ表面と比較して 90.1～94.3%減衰しており、コンクリート製容器による放射線の遮蔽効果が確認された（表 1）。
- 2) コンクリート製容器の設置場所が水平であることや、総重量に耐えうる基礎地盤の処置が必要。
- 3) クレーンによる吊り上げの際に、吊り下げケーブルが本体に接触しないように治具を使用すること、また、使用クレーンの旋回やアウトリガーの延長スペースの確保が必要。

表 1：土壌を封入したフレコンバッグ及びコンクリート製容器の表面線量率

測定位置	対象	表面からの距離	線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	低減率 (%)
上部	フレコンバッグ	1cm	3.31	—
		15cm	2.92	11.8
	普通コンクリート	1cm	0.28	91.5
	重量コンクリート	1cm	0.19	94.3
下部	フレコンバッグ	1cm	3.85	—
		15cm	3.31	14.0
	普通コンクリート	1cm	0.38	90.1
	重量コンクリート	1cm	0.22	94.3

注 1：測定に際しては、サーベイメーターの受感部を鉛の円筒で覆い、バックグラウンドの影響を排除。

注 2：空の状態におけるコンクリート製容器の表面線量率

普通コンクリート：0.33 $\mu\text{Sv/h}$ 、重量コンクリート：0.20 $\mu\text{Sv/h}$

4. 今後の計画・課題

- 1) コンクリート製容器のハンドリング性を向上させるため、軽量化の可能性について検討や、封入する汚染土壌の濃度によって、コンクリート製容器の性状を検討する必要がある。
- 2) 現地圃場実証試験で発生した放射性物質を含む土壌の処理（仮置き場への搬出等）を確実に実施する必要がある。

6-2) . 土壌からの放射性物質の分離技術の開発

1. 概要

抽出したセシウムをプルシアンブルーナノ粒子吸着材で回収することで、放射性廃棄物の総量を減らすことを目的とし、土壌中のセシウムを低濃度の酸水溶液中に抽出する技術を開発した。

○担当：(独) 産業技術総合研究所

2. 作業の流れ

計画的避難区域に指定されている福島県飯舘村の畑から採取した非汚染土壌（下層土、褐色森林土、非放射性セシウムを 2.3 ± 0.3 ppm 含む）を使用した。

- 1) 土壌を低濃度の酸水溶液で洗浄して、セシウムイオンを酸水溶液中に脱離させる。
- 2) 酸水溶液に抽出されたセシウムイオンは、セシウム吸着材であるプルシアンブルーナノ粒子で回収する。酸水溶液は低濃度であるため土壌洗浄に再利用できる（図1左）。
- 3) さらに、この2つの工程を接続することで連続処理も可能となる（図1右）。

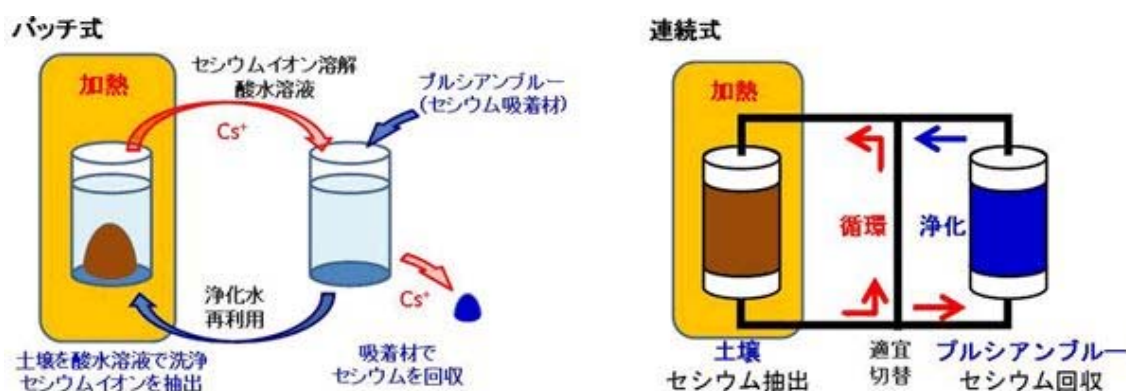


図1：土壌からの放射性セシウム抽出－回収システムの模式図

3. 結果と考察の概要

- 1) 0.5 mol/L の希硝酸を使用した際のセシウムイオン抽出量は、固液比（土壌に対する希硝酸の量）を増加させると、セシウムイオンの抽出率が向上する（図2）。
- 2) 放射性セシウムが非放射性セシウムと同様の化学的挙動であれば、この処理により、処理温度を 200℃に上げることで、ほぼ 100%のセシウムイオンの抽出が可能である（図3）。
- 3) 土壌から抽出したセシウムイオンはプルシアンブルーナノ粒子でほぼ 100%を回収できた。今回の実験で使用したプルシアンブルーナノ粒子の量はセシウムイオンを抽出したもとの土壌量の 1/150 であった。
- 4) セシウムイオン回収後の酸水溶液は、酸濃度の調整のみで繰り返し利用できる。

- 5) 非放射性セシウムを対象としているため、実用化には放射性セシウムを用いた挙動の確認が必要である。
- 6) 酸水溶液を利用するため、抽出を行う機器は腐食に強い必要がある。
- 7) 溶液を 200℃まで加熱するには加圧が必要である。

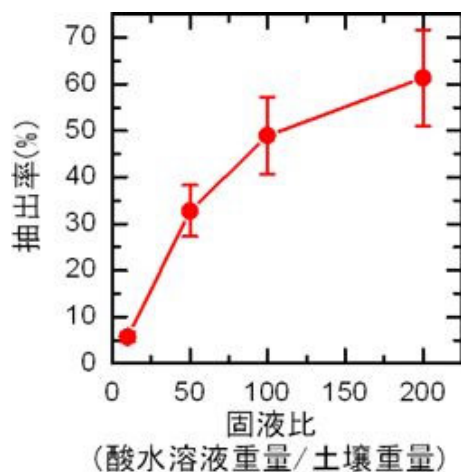


図 2 : 固液比によるセシウム抽出率の変化
土壌と 0.5 mol/L の希硝酸を混合し、
95 °C、45 分静置した際のセシウムイオン
抽出率

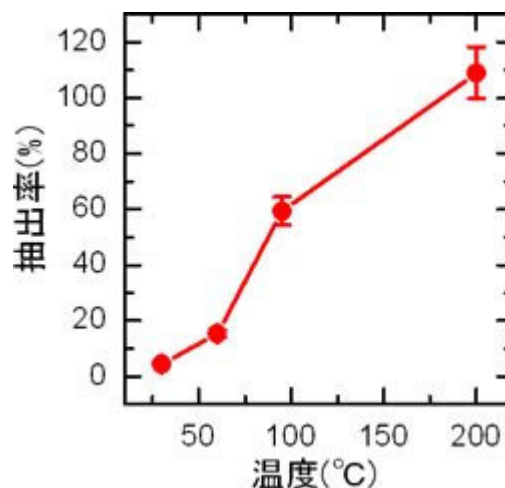


図 3 : 温度によるセシウム抽出率の変化
抽出温度を変化した際のセシウムイオン抽
出率 (0.5mol/L の硝酸、固液比 200)
*抽出率が 100%を超えているのは、土壌中の
セシウムイオン量のばらつきに起因する。

4. 今後の計画・課題

- 1) 処理温度、酸濃度などの最適化や、土壌量に対するプルシアンブルー使用量をさらに低減させるなど、技術改良を進める。
- 2) 処理後の土壌への酸による粘土鉱物への影響などの特性調査を行う。

6-3) 水溶液からの放射性物質の吸着・除去技術の開発

1. 概要

水溶液に溶解しているセシウムを吸着する素材として、天然鉱物等の無機材料を比較するとともに、化学合成や成型技術によりセシウムに選択性が高い捕集材を開発することを目的とする。

○担当：(独)物質・材料研究機構、(独)日本原子力研究開発機構、(独)産業技術総合研究所

2. 研究手法

- 1) セシウムの選択的吸着機能が知られる天然鉱石（ゼオライト、スメクタイト、バーミキュライト、鉄系鉱物、炭化物、層状複水酸化物）について、セシウムの吸着特性についての基礎的データを収集する。
- 2) 従来よりセシウムを吸着することが知られているプルシアンブルーを用いて、利用場面に応じた各種形態の吸着資材を開発する。
- 3) 選択性が高い捕集材として、セシウムを特異的に吸着するグラフト重合体、クラウンエーテルやタンパク質を用いて、セシウムの回収性能評価と、捕集材の量産化について検討するとともに、フィールド試験を行う。

3. 結果と考察の概要

- 1) 天然鉱物として約 100 種類、放射性セシウム濃度を 6 段階に設定した試験を行い、反応後の平衡濃度、セシウム吸着量、分配係数等を明らかにした（図 1）。得られた結果は(独)物質・材料研究機構のマテリアルデータベースサイト（MatNavi）に公表予定（図 2）。

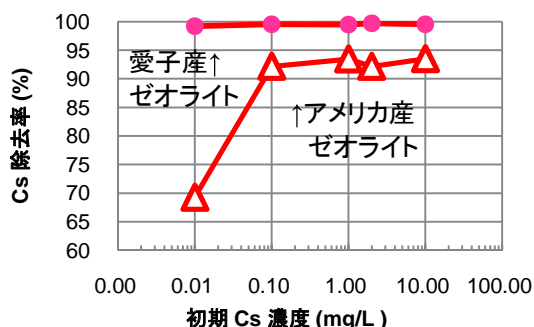


図 1：セシウム吸着試験例



図 2：マテリアルデータベースサイト
(<http://mits.nims.go.jp/index.html>)

- 2) セシウムを吸着するプルシアンブルーを用いて各種吸着資材を開発（図 3）。農研機構で実施中の水による土壌攪拌除染用に、排水から放射性セシウムを取り除くための除染フィルターを開発、提供した（図 4）。1.5L/秒の処理速度での通水が可能であることを示した。

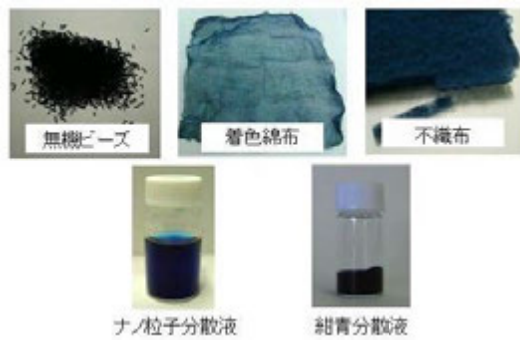


図3：各種プルシアンブルー吸着資材

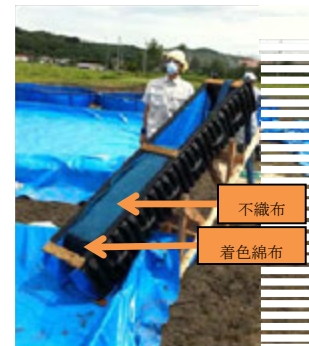


図4：除染フィルターによる実証試験

- 3) グラフト重合による捕集材では、捕集材体積の約 3,000 倍量の汚染水を処理可能であり、量産化によって 1 万円/m² での製造が可能となった。飯舘村のため水を対象とした試験ではフィルターろ過と組み合わせることで約 40 Bq/L のセシウム濃度を検出限界以下まで低減できた（図 5）。
- 4) セシウム選択的クラウンエーテルを新たに設計・開発し、セシウムの除去率はほぼ 100%であることとともに、極少量の 0.1N 硝酸溶液により吸着剤から除去後のセシウムを 100%回収でき、繰り返し利用が可能であることを示した（図 6）。製造コストは 1.5 万円/kg である。

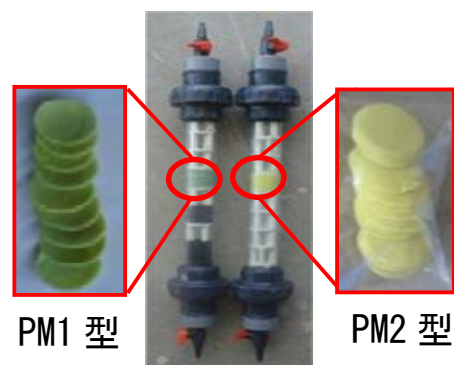


図5：量産型グラフト重合捕集材（左）とセシウム除去フィルター装置（右）

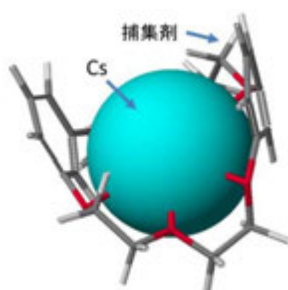


図6：クラウンエーテル捕集材によるセシウム吸着構造（左）とセシウム除去処理装置（中：プレフィルター、右：トルネード吸着塔）

- 5) 土壌から放射性セシウムを分離した溶液をはじめ、様々な除染場面で生じる汚染水溶液の処理に活用が期待される。
- 6) 天然鉱物は製造元等により諸性質が異なることがあり、利用前には検討が必要である。

4. 今後の計画・課題

- 1) タンパク質捕集材は、人工的な改変によりセシウムの吸着を確認したが、大量合成には至っておらず、合成系について検討する。