

個別試験結果と評価詳細

実施代表者の所属機関: 水 ing 株式会社

実証テーマ名: 土壌細粒分等からの常温常圧下での Cs 溶離および溶離した Cs の吸着・濃縮による減容化技術

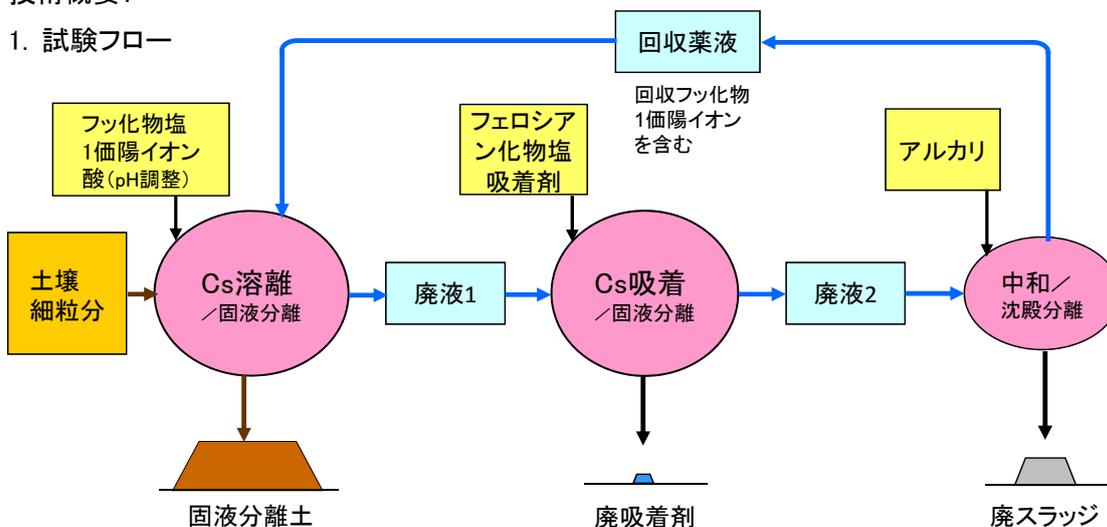
事業の概要: 除染除去土壌の細粒分や砂、汚泥焼却灰等の放射性 Cs 汚染物を常温常圧下にてフッ化物塩を主とした薬液で処理して Cs を溶離させ、放射能濃度を低減するとともに、溶離した Cs を選択性の高い吸着剤で濃縮回収する、高濃度汚染物減容化技術を実証する。

実施内容:

- ①砂画分等への適用性評価、②パイロットスケール装置による土壌細粒分での性能実証、③パイロットスケール装置による土壌細粒分での Cs、フッ化物のマスバランス、安全性評価

技術概要:

1. 試験フロー



2. 試験目標

浄化目標: 高濃度土壌細粒分等は 100,000Bq/kg

以下、低濃度汚染土壌は 3,000Bq/kg 以下

高濃度汚染物減容化率: 99%

処理土のフッ素等: 土壌汚染対策法準拠



固液分離土脱水ケーキ

廃吸着剤ろ集物

3. 期待される効果

高濃度汚染物を 100,000Bq/kg 以下に浄化することにより、遮断型処理場処分コストを削減できる。

低濃度汚染物を 3,000Bq/kg 以下に浄化することにより、再生資材として再利用が期待できる。*

*環境省「東日本大震災からの公共工事における災害廃棄物由来の再生資材の活用について(通知)」H24.5.25

除染効果：パイロットスケール装置による処理試験結果

対象汚染土壌	放射能濃度 (Bq/kg)		処理後フッ素 溶出量 (mg/L) *
	処理前	処理後	
高濃度土壌細粒分 (<0.077mm)	293,000	69,000	19~22
低濃度砂分 (0.077~2mm)	5,100	2,100	0.5~0.7

* 土壌汚染対策法に基づく溶出試験結果

高濃度土壌細粒分は 100,000Bq/kg 未満に、低濃度汚染土壌は 3,000Bq/kg 未満に低減できた。

除去物発生量評価：

<高濃度土壌細粒分処理時の放射能、重量、フッ素バランス>

対象汚染土壌		処理前 (%)		処理後 (%)				
		試験供試 土壌	薬液	処理土	廃吸着 剤	廃スラ ッジ	回収 薬液	洗浄 水
高濃度土壌 細粒分 <0.077mm	放射能	100	0	20	25	4	27	2
	重量	100	—	76	0.9	33	—	—
	フッ素	0	100	2	0	29	66	3

上記処理により 100,000Bq/kg を超える汚染物は廃吸着剤のみとなる。その重量は 0.9%なので約 99%減容された。回収薬液は(減少分のフッ化物塩、酸を補充して)繰り返し使用できることを確認した。同様に低濃度砂分についても、3,000Bq/kg を超える汚染物は廃吸着剤のみとなった。その重量は 1.4%なので約 99%減容された。

作業員被ばく量評価：試験期間中(9/4~11/14)、全作業時間から算出

試験場所	平均空間線量率 (μ Sv/hr)	平均作業時間 (時間/日)	作業員被ばく量 (μ Sv/日)	
			最大	平均
檜葉	0.19	6.4	7.0	1.5
大熊	5.8	5.2	34	16

コスト評価：

トータルコスト 6.0 万円/t

歩掛り(作業人工、作業速度)：土壌細粒分等の処理速度

実証試験：5kg/hr、実装置：10t /hr

コスト評価条件：トータルコスト：100,000Bq/kg 以上の除染除去土壌 50t に対して、分級+提案技術を適用した時の費用(分級・提案技術費用、処理土・廃棄物処分費用等で算出)

除染作業における安全上の注意：作業前/作業環境の放射線量を作業者に周知、注意喚起
作業時/放射線管理者による線量計測の適宜実施、被ばく低減のための作業指導実施、マスク、手袋、保護めがね、袖付エプロン、専用長靴、タイベックスーツ(大熊町作業時)着用

試験場所(住所)：

福島県檜葉町、大熊町

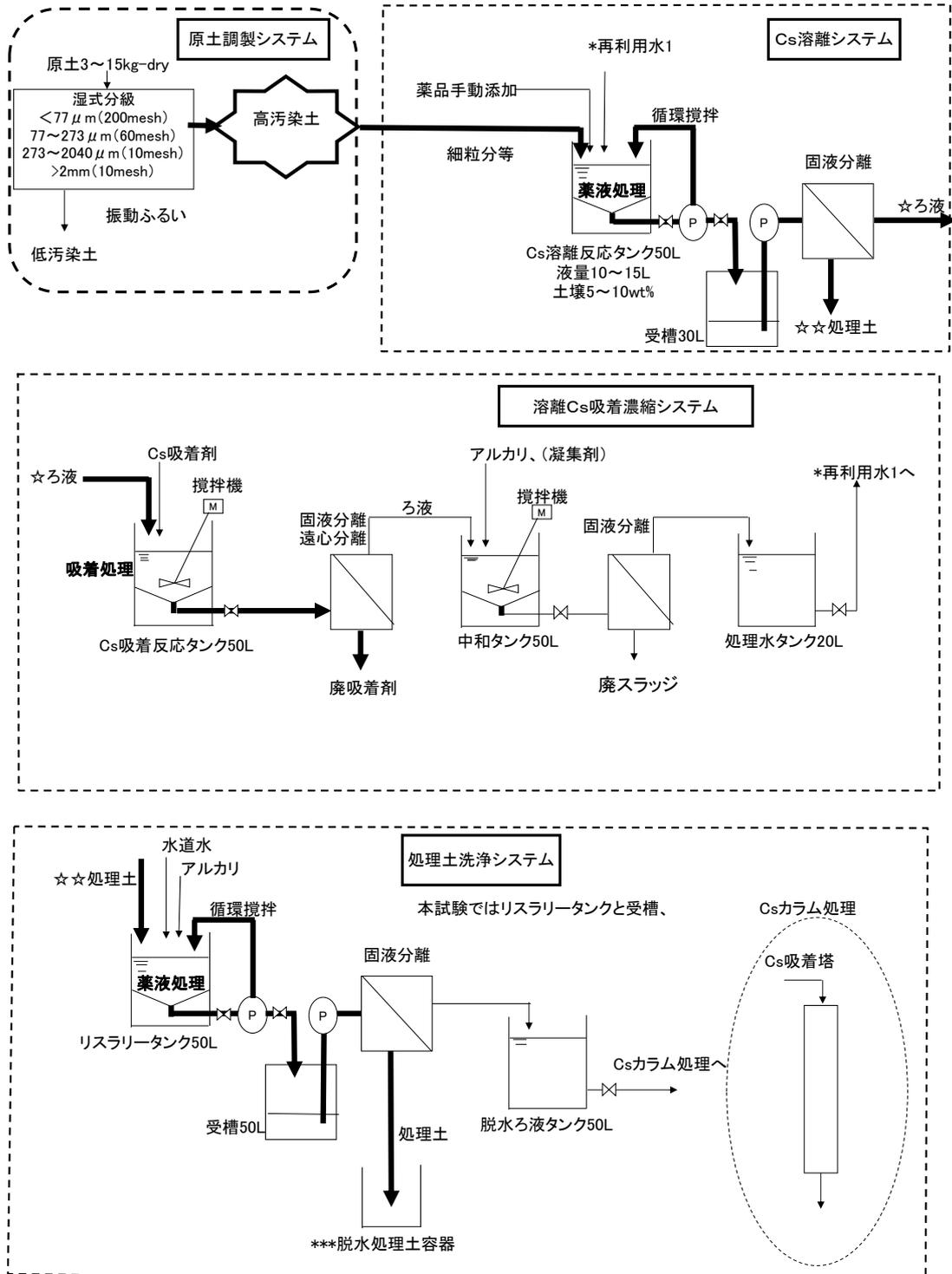
除去物保管場所と保管状況(写真)：

<檜葉> 廃液：除染後産廃、固形物：拝借した除染除去土壌フレコンバッグに返還。<大熊> 現地(荏原工業洗浄敷地内)保管

添付資料

1. 実験装置フロー

試験に用いた実験装置のフロー（詳細）を以下に示す。



実験装置フロー

2. 実験状況

<原土調製>



原土採取状況(左: 檜葉、 右: 大熊)



分級前スラリー化状況(左: 檜葉、 右: 大熊)



分級作業状況(左: 檜葉、 右: 大熊)



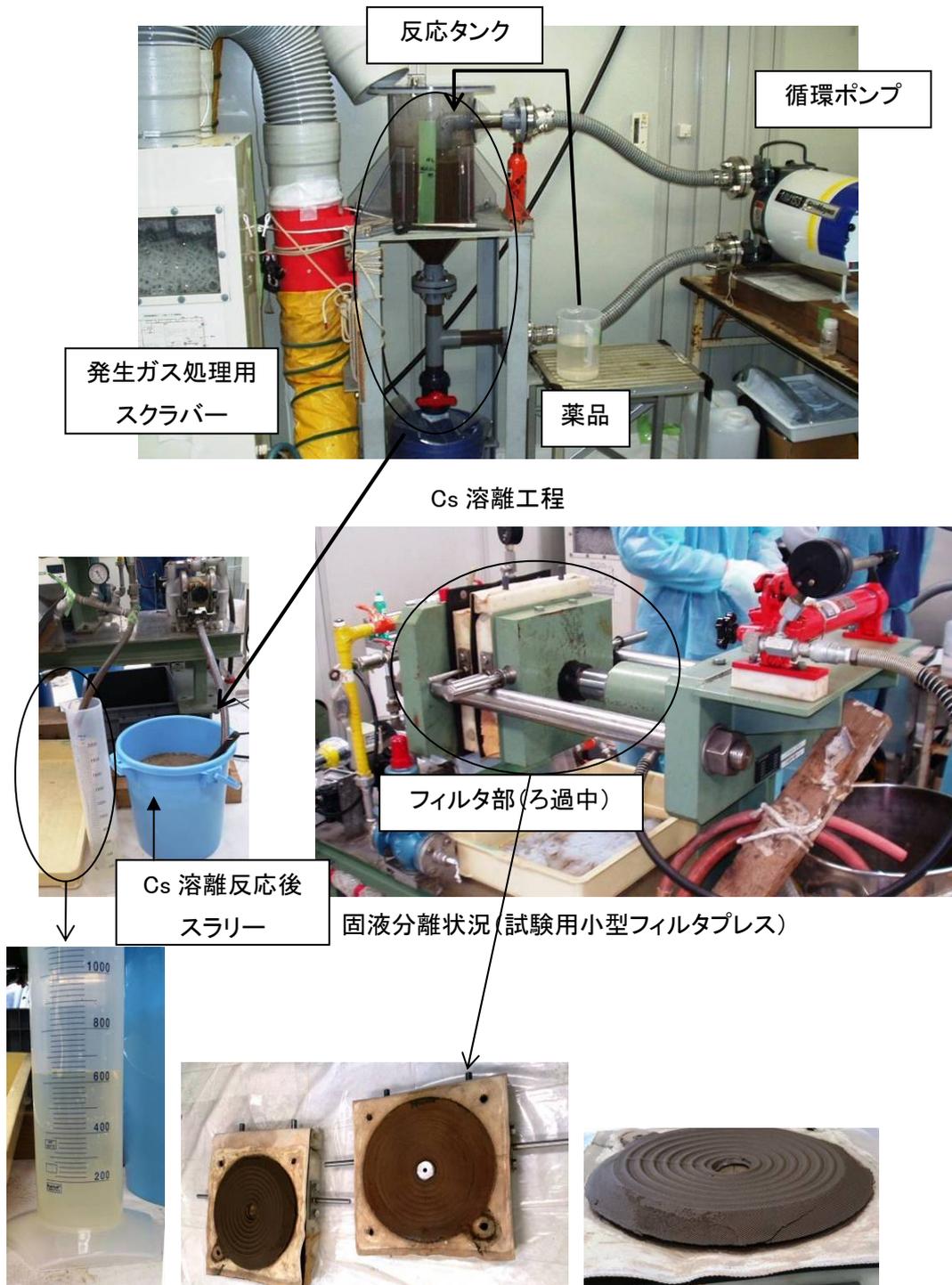
分級後試料を遠心分離して
固液分離し、固形分を回収
して試験供試用土壌を調製



試験供試用土壌

<Cs 溶離システム>

試験供使用土壌を所定の濃度のスラリーとして反応タンクに投入し、薬品を添加して循環攪拌してCs 溶離工程を実施する。

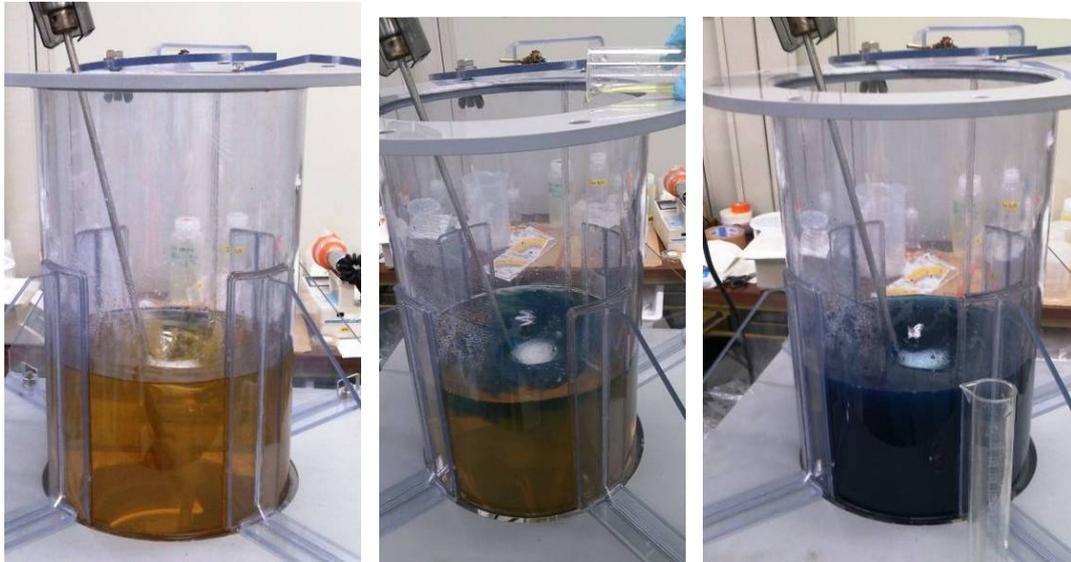


固液分離後 ろ液
固液分離後 土壌
ろ液は Cs 吸着システムに、土壌は処理土洗浄システムに供給される。

<溶離 Cs 吸着システム>

Cs 溶離工程でろ別されたろ液に対して、フェロシアン化 Na 溶液を添加して、紺青を生成し Cs を紺青生成物に固定した。

固液分離をすることで Cs は固形物として濃縮・回収される。ろ液については中和処理を行い循環再利用時に不要な土壌由来の多価金属イオンを除去する。



固液分離後溶液 → フェロシアン化 Na 添加中 → フェロシアン化 Na 添加後



フェロシアン化物ろ過後ろ液中和

固液分離して、ろ液と固形物にろ別する。

ろ液
(アルカリ中和沈殿)

固形物



固形物

中和沈殿物(廃スラッジ)



フェロシアン化物(廃吸着剤)

<処理土洗浄システム>

<Cs 溶離システム>で発生した固液分離土壌を水道水にリスラリーして、再度、試験用小型フィルタプレスを用いて固液分離を行い、処理土を得る。

3. 試験結果（パイロット試験）

3.1. 汚染砂の 3,000Bq/kg 以下への浄化処理試験結果概要

檜葉町で回収された除染土壌の砂画分(粒径 0.077～2 mm、以下檜葉砂と表記)を対象に、パイロット試験を 3 回(回収した薬液を繰り返し使用して)行った結果の放射能除去効果を表 3.1-1 に、物質収支を表 3.1-2 に示す。本処理により、対象土壌の放射能を 3,000Bq/kg 未満に低減できた。

表 3.1-1 檜葉砂のパイロットスケール装置による処理試験結果

対象汚染土壌	放射能濃度(Bq/kg)		不溶化処理後 フッ素含有量 (mg/kg)	不溶化処理後 フッ素溶出量 (mg/L)
	処理前	処理後		
檜葉砂	5,100	1,580～2,420	570	0.5～0.7

表 3.1-2 檜葉砂パイロット試験時の放射能、重量、フッ素バランス

対象汚染土壌		処理前(%)		処理後(%)				
		試験土壌	薬液	処理土	廃吸着剤	廃スラッジ	回収薬液	洗浄水
檜葉砂	放射能	100	0	37	30	5	25	2
	重量	100	—	73	1.4	24	—	—
	フッ素	0	100	2	0	22	64	11

本処理により 3,000Bq/kg を超える汚染物は吸着処理沈殿物のみとなる。その重量は 1.4%なので約 99%減容された。体積換算での減容化率も同じく 99%であった。

不溶化剤を土壌重量に対し 3wt%添加した不溶化処理土のフッ素含有量は 570mg/kg、不溶化処理後のフッ素溶出量 0.5～0.7mg/L であり、処理砂のフッ素残留は土壌汚染対策法基準値(溶出量基準値:0.8mg/L、含有基準値:4000mg/kg)を満足することができていた。したがって路盤材等への再資源化に支障となるものではない。

薬液は(減少分のフッ化物塩、酸を補充して)3 回繰り返し使用することができた。なお、洗浄水中のフッ素は 90%以上を蛍石として回収可能であった(本パイロット試験においては、蛍石回収は行っていない)。

3.2. 汚染シルトの浄化試験結果概要

檜葉町で回収された除染土壌のシルト画分(粒径 0.077 mm未満、以下檜葉シルトと表記)および大熊町で採取した表層土シルト画分(粒径 0.077 mm未満、以下大熊シルトと表記)を対象に、パイロット試験を檜葉シルトで 2 回、大熊シルトで 3 回行った結果の放射能除去効果を表 3.2-1 に、物質収支を表 3.2-2 に示す。

本処理により、大熊町で得られた高濃度シルトの放射能を 100,000Bq/kg 未満に低減

できた。一方、檜葉町で得られた比較的低濃度のシルト画分は放射能除去率が40%にとどまった。

表 3.2-1 汚染シルトのパイロットスケール装置による処理試験結果

対象汚染土壌	放射能濃度 (Bq/kg)		不溶化処理後 フッ素含有量 (mg/kg)	不溶化処理後 フッ素溶出量 (mg/L)
	処理前	処理後		
檜葉シルト (<0.077mm)	11,700	7,000	-	-
大熊シルト (<0.077mm)	293,000	60,000~ 78,000	2,900	19~22

表 3.2-2 大熊シルト処理時の放射能、重量、フッ素バランス

対象汚染土壌		処理前 (%)		処理後 (%)				
		試験 土壌	薬液	処理 土	吸着処理 沈殿物	中和 沈殿物	薬液	洗浄 水
大熊シルト (<0.077mm)	放射能	100	0	20	25	4	27	2
	重量	100	-	76	0.9	33	-	-
	フッ素	0	100	2	0	29	66	3

大熊シルト試験において、処理により 100,000Bq/kg を超える汚染物は吸着処理沈殿物のみとなった。その重量は 0.9%なので約 99%減容された。体積換算での減容化率も同じく 99%であった。

不溶化剤を土壌重量に対し 3wt%添加した不溶化処理土のフッ素含有量は 2900mg/kg、不溶化処理後のフッ素溶出量 19~22mg/L であり、処理土のフッ素残留は土壌汚染対策法基準値(第二溶出量基準値: 24mg/L、含有基準値: 4000mg/kg)を満足することができていた。したがって管理型処分に支障となるものではない。

ただし、上記の檜葉砂、大熊シルトのいずれのサンプルも溶出量はそれぞれの基準値にかなり近い値となっている。本試験においては薬液コストを低減するため不溶化剤の添加量を土壌あたり 3wt%に抑制したが、もう少し多くの不溶化剤を添加すべきかもしれない。不溶化剤のコストは薬品コストの 3%程度にすぎず、不溶化剤の添加量を倍程度に増加させることは全体のコストに大きな影響を与えない。

大熊シルト試験において、薬液は(減少分のフッ化物塩、酸を補充して)3 回繰り返し使用することができた。

4. 廃水処理試験結果

檜葉砂処理土洗浄システムで発生する洗浄廃水を対象に、Cs を除去するためのカラム試験を行った。

アンモニウムイオンを除去し、再利用する。

6. 実機設計とコスト計算

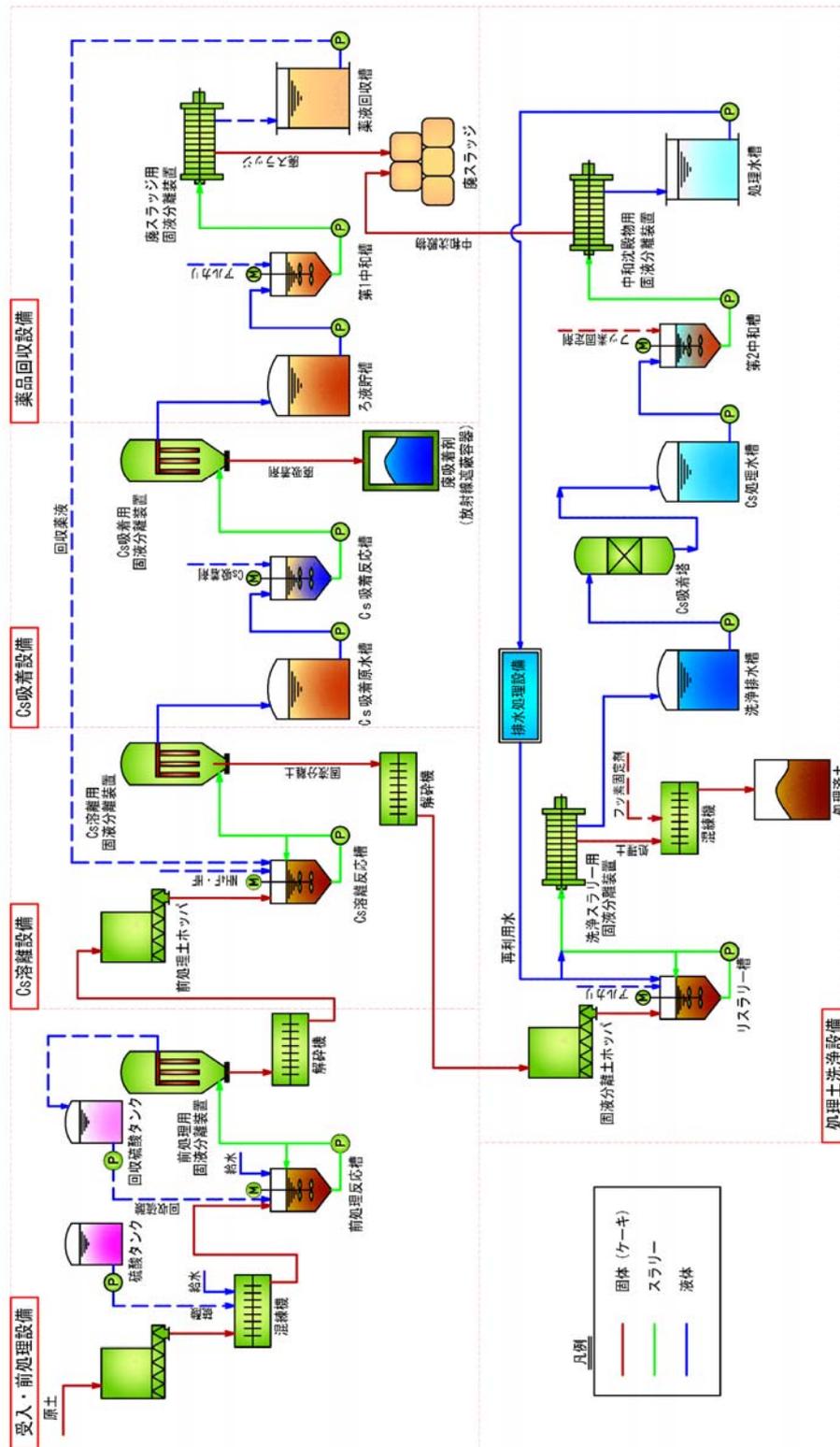


図 6-1 実プラントの概略処理フロー

実プラントを想定した場合の概略の処理フローを図 6-1 に示す。処理対象物はシルト

土壌(脱水ケーキ含水率 30%)とし、処理量を 10t/h×8h/日としている。

本方法は分級処理後の砂または細粒分を処理することを想定しているが、未処理で廃棄処分する場合のコストと比較するためには、洗浄分級処理コスト、本方法による処理コスト、処理土や廃棄物の処分コスト等の全てを加味したコストをトータルコストとして評価する必要がある。

100,000Bq/kg を超過する除染除去土壌 50t(細粒分:100,000Bq/kg 以上 10t、細粒分以外:100,000Bq/kg 未満 40t)を処理すると設定した場合のトータルの処分費用を表 6-1 に示す。

表 6-1 100,000Bq/kg を超過する除染除去土壌 50t の処理費用

処 理	トータルコスト	備考
未処理 (全量、浅地中ピット処分)	5,900 万円	118 万円/t
分級処理 (分級後放射能濃度に応じて処分)	1,330 万円	26.6 万円/t
分級処理 + 提案技術 (分級後、高濃度分に対して提案技術適用)	298 万円	6.0 万円/t

提案技術を利用することで、処理費用が高額になると想定される 100,000Bq/kg 以上の高濃度廃棄物量を 99%程度減容化することができ、これにより、処分コストは未処理の場合に比べて 95%、分級処理のみの場合の 70%程度削減できる。

7. 安全管理

事業実施にあたっては、入場時入所教育により作業場所ルール、緊急時対応を確認し、安全施工に十分配慮するよう注意喚起した上で事業を開始した。

また、実際の作業開始前には、作業場所の線量確認、作業手順の確認、危険予知の実施、使用薬品 MSDS 確認、機器点検等を適宜行った。

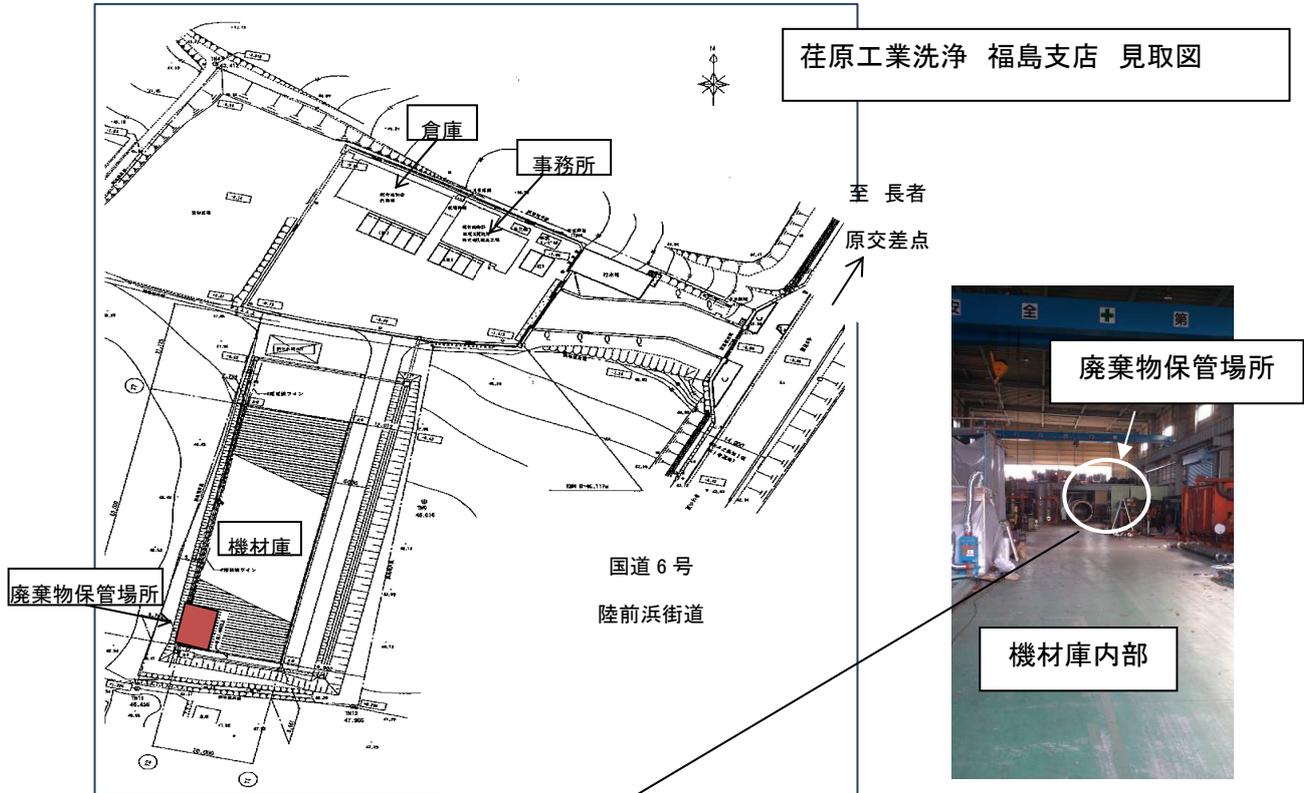
作業実施中は放射線管理者による線量計測の適宜実施、被ばく低減のための作業指導の実施、適切な保護具の着用により、作業の安全性、被ばくの低減を確保した。

さらには日々の安全管理としては放射線管理記録の作成、個人用放射線線量計による個人の被ばく線量確認・記録、安全日誌の作成を実施した。

表 7-1 事業期間中の作業員被ばく状況

試験場所	平均空間線量率 (μ Sv/hr)	平均作業時間 (時間/日)	作業員被ばく量(μ Sv/日)	
			最大	平均
檜葉	0.19	6.4	7.0	1.5
大熊	5.8	5.2	34	16

8. 廃棄物保管状況



保管廃棄物

200L ケミカルドラム: 小分けした固形廃棄物

70L バケツ: 廃スラッジ

20L 白ポリタンク×5: 廃液

保管場所空間線量

保管前: $6.2 \mu\text{Sv/h}$ 、保管後: $6.2 \mu\text{Sv/h}$

産廃処分可能な廃棄物は産廃処分し、

産廃処分不可能な廃棄物は荏原工業洗浄福島支店、機材庫内部の保管庫に保管した。

実施代表者の所属機関：前田建設工業株式会社

実証テーマ名：真空加圧脱水法による除染廃棄物に含まれる放射性物質の固定化・減容化同時処理技術の実証

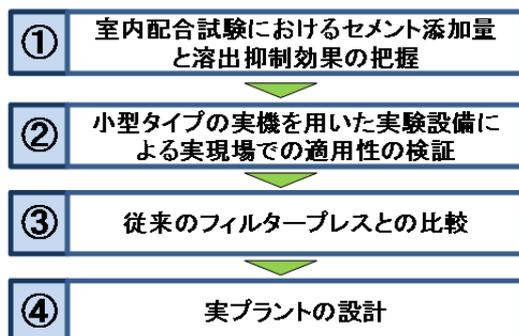
事業の概要：濁水処理で生じる汚泥等の放射性物質を含む高含水土に、セメントによる固形化と脱水による減容化を併用した「真空加圧脱水固化処理工法（SVP 工法）」を適用することで、放射性物質の付着した細粒分の流出抑制（不溶化）と減容化を可能とする技術を実証する。

実施内容：

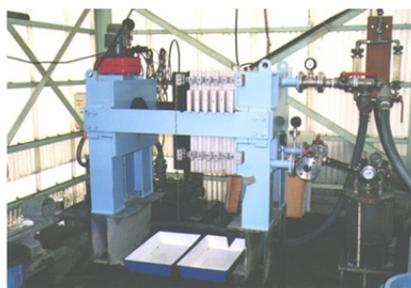
- 1.室内配合試験において、真空加圧脱水固化処理工法を適用した脱水ケーキに対して溶出試験を行い、セメント添加量と放射性物質の溶出防止効果の関係を把握する。
- 2.除染工事の濁水処理設備に、実験設備を設置し、当該技術を適用した脱水ケーキの溶出特性を確認することで実現場における適用性を検証する。
- 3.従来のフィルタープレス(FP と称す)による処理と比較を行い、技術の有効性を確認する。

技術概要：

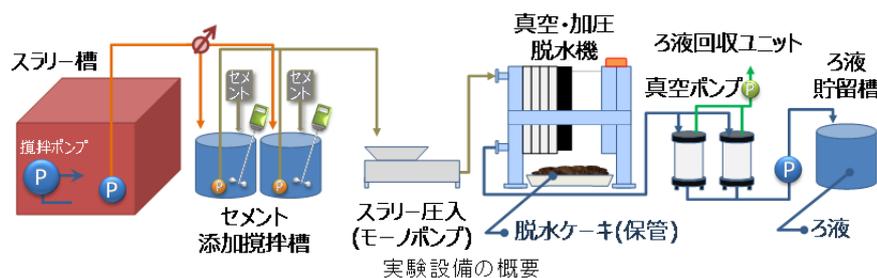
1.試験フロー



試験フロー



真空加圧脱水固化処理機（小型タイプ）
（名称：スーパーバキュームプレス、略称：SVP）



実験設備の概要

2.試験目標

脱水ケーキの溶出試験により、放射性セシウム溶出量が 10Bq/L 以下^{※1} となることを検証する。

※1 食品衛生法における飲料水に係る新基準

3.期待される効果

- ・放射性物質の溶出が防止可能な減容化処理技術の開発により、保管時の安全性が向上。
- ・装置の自動運転により、作業者の被ばく低減が可能。

その他：

効果

真空加圧脱水固化処理工法は、放射能を含む高含水土を、放射性物質の不溶化と減容化を同時に処理することが可能であり、本工法で処理した脱水ケーキは、降雨等に対して特段の養生をしなくても屋外にそのまま保管することができる処理物となることを実証した。以下に特徴を示す。

- ①脱水ケーキに含まれる放射性物質の不溶化が図れる(図1、写真1)
- ②セメント添加による容量の増加が無く、FPと同等の減容化効果を確認(表1)
- ③FPに比較し処理速度が向上(表2)
- ④処理物のハンドリング性が向上(FPでは鋭敏比が高く再泥化しやすい)(図2、写真2)

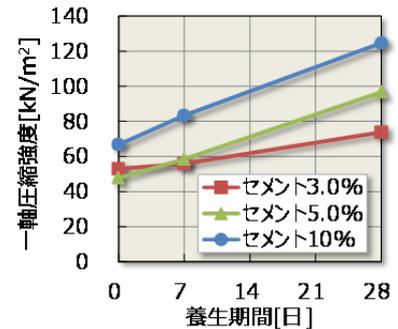
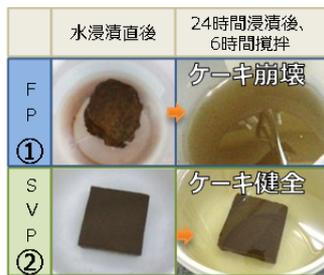
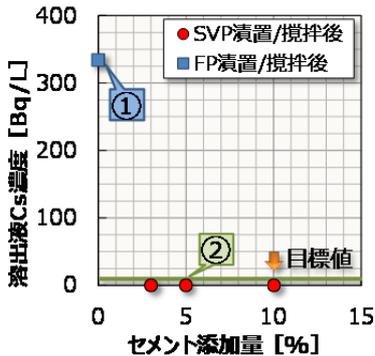


図1 水浸漬後有姿攪拌試験

写真1 脱水ケーキの状態

図2 養生期間と改良強度

表1 脱水ケーキの性状及び減容化率

	FP		SVP	
	0.0	3.0	5.0	10.0
セメント添加量[%]	0.0	3.0	5.0	10.0
含水比[%]	94.1	76.5	72.0	61.3
脱水ケーキ密度[t/m³]	1.3	1.5	1.7	1.8
減容化率[%]	86.0	86.4	85.9	82.1

表2 処理速度比較

	セメント添加量[%]	脱水時間[分]	作業時間[分]	サイクル時間[分]	処理速度比[倍]
	FP	0.0	180	10	190
SVP	3.0	100	10	110	1.7
	5.0	60	10	70	2.7
	10	30	10	40	4.8



写真2 ケーキ

除去物発生量評価：含水比 1,000%、比重 1.06t/m³のスラリー 1 m³を処理する場合、セメント(BB)添加量に応じて、以下に示す脱水ケーキが生じる。

BB 添加量 3.0%:0.140m³、BB 添加量 5.0%:0.141m³、BB 添加量 10%:0.179m³(FP:0.141m³)

作業員被ばく量評価：作業場所平均空間線量率 0.31 μSv/hr (作業時間 8 時間)、作業員最大被ばく線量 3 μSv/日 (作業時間 4.4 時間/日)、作業員平均被曝量 2.1 μSv/日

コスト評価：スラリー1m³当り単価 4,243 円/m³(SVP) 比較技術:4,469 円/m³(FP)	歩掛り： 作業人工：世話役(兼務可) 1 人工+特殊作業員 0.5 人工/日 作業速度：スラリー量 107.5m³/日 (2m³タイプ)
---	--

コスト評価条件：原水 SS3,800mg/L、270m³/hr で濁水処理した際に生じる含水比 1,000%、比重 1.05t/m³のスラリーに対し、セメント添加量 5.0%で減容・固形化処理した場合の 1m³あたりの処理単価とした。なお、処理量は中間貯蔵施設を想定した。

設置・撤去費等の間接費を含まない直工費

除染作業における安全上の注意：線量により異なるが、メガネ、マスク、手袋着用

試験場所 (住所)： 福島県双葉郡楡葉町	除去物保管場所と保管状況：大谷工区内仮置場にて保管
-------------------------	---------------------------

○処理対象となるスラリーについて

試験に供するスラリーは、平成24年度檜葉町除染等工事(発注者：環境省) 大谷工区内に設置した濁水処理設備のスラリー槽より採取した。

本濁水処理設備に送られてきた除染除去物は、主に道路側溝の除染作業により生じたものである。発生状況を写真-1に示す。回収した除染除去物は、バキューム車で回収し、濁水処理設備まで移送している。

当該濁水処理設備では、図-1に示すフローに従って濁水処理を実施しており、処理水は、放流判定基準を満足していることを確認してから放流している。

脱水ケーキについては、トンパックに収納した後、隣接する仮置場にて一時保管をしている。



道路側溝除染作業状況



道路側溝除染作業状況



除染除去物回収状況

写真-1 道路側溝除染作業状況(濁水発生状況)

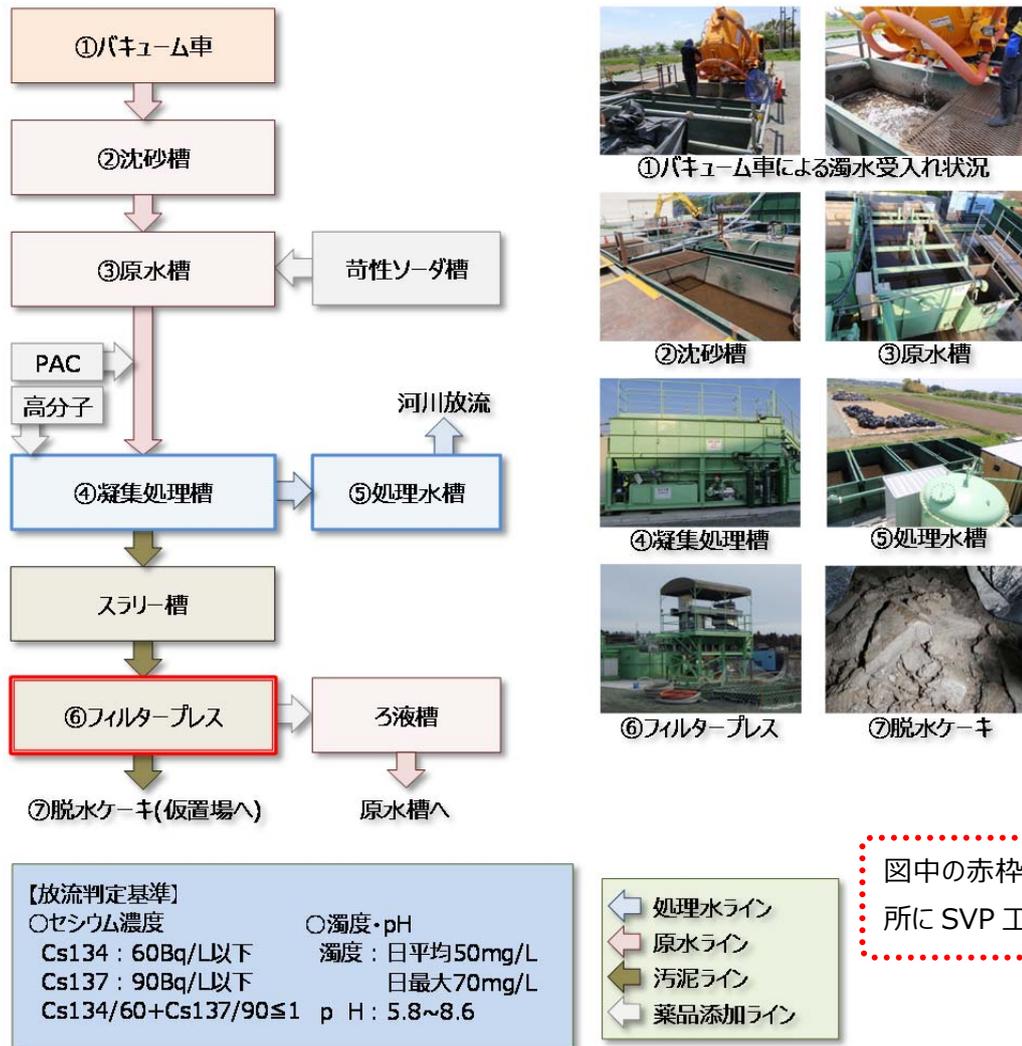


図-1 従来設備による濁水処理フロー

○実験に使用した放射能を含む汚泥(シックナー濃縮スラリー)について

採取状況を写真-2～7に示す。採取したスラリーは、3 m³水槽に保管して使用した。スラリーは、分流式攪拌ポンプ(2.2kw)で攪拌し、水槽内の試料が均一になるよう留意した。



写真-2 スラリー槽



写真-3 スラリー採取状況



写真-4 スラリー採取状況



写真-5 スラリー移送状況

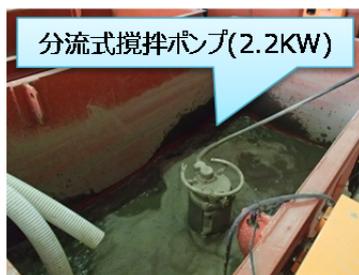


写真-6 分流式攪拌ポンプ



写真-7 スラリー保管状況

試験に使用したスラリーの性状を表-2、図-2に示す。

表-2 スラリーの物性

放射性Cs濃度	19,950 Bq/L
スラリー比重	1.06 t/m ³
含水比	1,000 %
土粒子密度	2.262 t/m ³
強熱減量	22.8 %

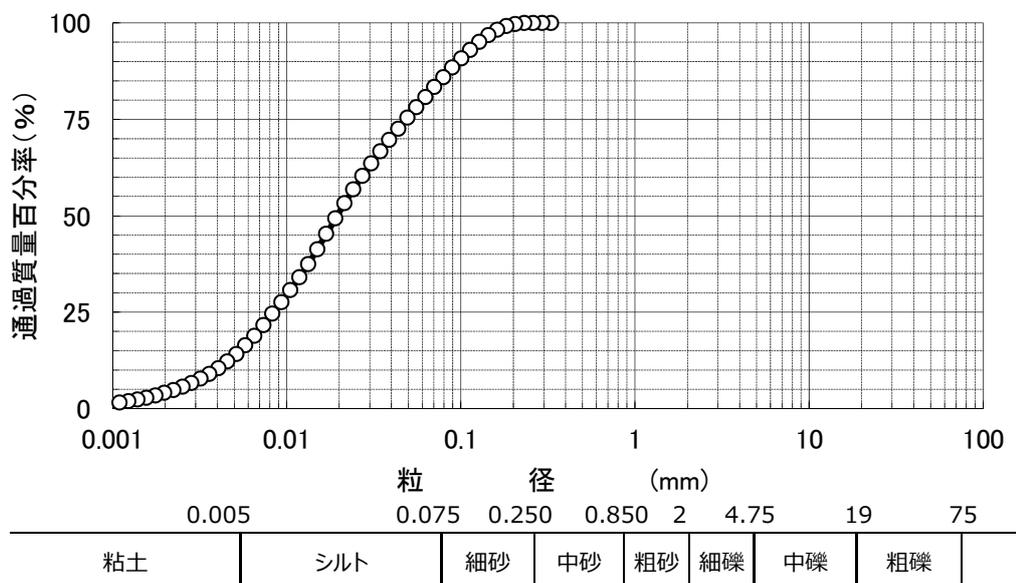


図-2 スラリーの粒度分布

○試験手順

本工法を除染で発生する放射能を含む汚泥に対し適用した際の効果を検証するため、濁水処理設備にて発生したスラリーを図-3 に示す真空加圧脱水機を用いた処理フローに従い脱水処理を行った。効果の検証は、得られた脱水ケーキや、ろ液の各種性状を分析することにより評価した。

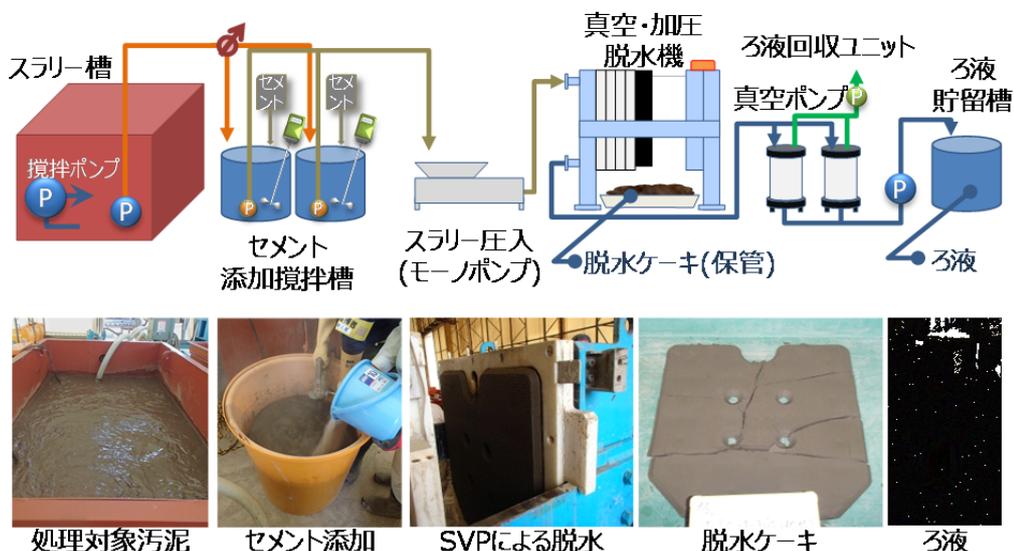


図-3 試験フロー及び状況写真

○脱水ケーキの溶出試験結果について

SVP 工法により放射性 Cs を含むスラリー等を処理した際に発生する脱水ケーキについて、各種溶出試験を行った。表-3 に溶出試験方法と概要を示す。

なお、ここでは、溶出試験の目標値として飲料水の基準値である 10Bq/L を採用した。

表-3 溶出試験の概要一覧

試験名	概要
有姿攪拌試験 (有姿溶出試験) (図-4 参照)	脱水ケーキからの土粒子及びセシウムの溶出特性を把握するため、環境省「廃棄物関係ガイドライン 第五部 放射能濃度等測定方法ガイドライン、平成 25 年 3 月第 2 版」の第 8 章溶出量に記載されている試験方法に基づいた溶出試験を実施(JIS K0058-1 に準拠)。ただし、本試験は、土粒子の流出に対する放射性セシウムの溶出抑制効果を検証するものであるため、ろ過処理をしないで SS を含めた溶出液の放射能濃度を分析対象とした。
長期溶出試験 (図-4 参照)	脱水ケーキからの土粒子及びセシウムの長期的な溶出特性を把握するため、有姿攪拌試験の溶液に、 $[H^+] = 1.54 \text{ meq/l}$ の酸溶液を使用。これは、pH4.0 の酸性雨、年間降水量 2000mm として、この酸性雨に 100 年間曝される酸に相当する酸の量となる。
乾湿繰返後溶出試験 (図-5 参照)	脱水ケーキの風化に対する長期的な安定性を確認するため、材齢 7 日の脱水ケーキを乾燥と湿潤を 5 サイクル(1 サイクル 2 日(乾燥 1 日、水への浸漬 1 日))繰返し行った後に、有姿攪拌および長期溶出試験を実施(JIS 110-2006 に準拠)。
中性化促進後溶出試験 (図-6 参照)	脱水ケーキの中性化に対する長期安定性を確認するため、材齢 7 日の脱水ケーキを温度 20℃、湿度 60%、二酸化炭素濃度 5%の条件で養生し、所定期間後に有姿攪拌および長期溶出試験を実施(JIS A 1153 に準拠)。
水浸漬後溶出試験 (図-7 参照)	脱水ケーキを純水に 24 時間漬置した後、有姿および長期溶出試験を行う。試験実施期間中に水に浸漬したフィルタープレス脱水ケーキが崩壊する状況が観察できたため、その影響を定量的に評価するために実施したものである。

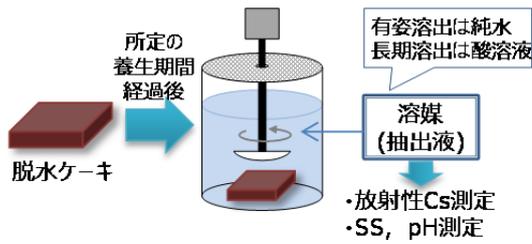


図-4 有姿攪拌・長期溶出試験の概要

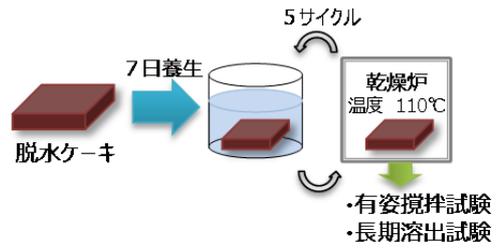


図-5 乾湿繰返後溶出試験の概要

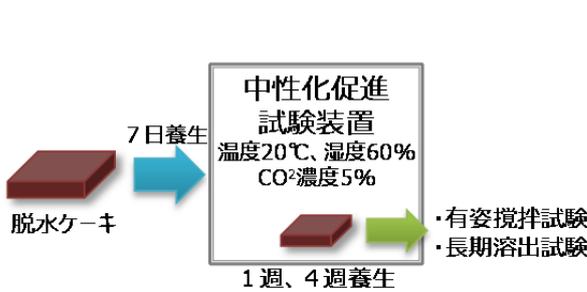


図-6 中性化促進後溶出試験の概要

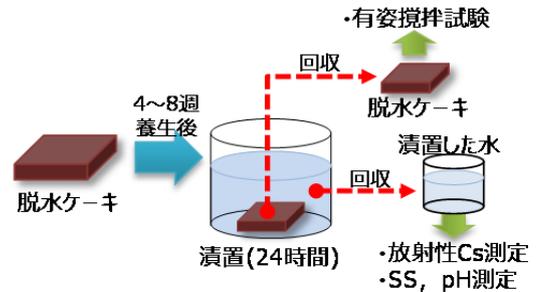


図-7 水浸漬後溶出試験の概要

・有姿溶出、長期溶出試験結果

有姿、長期溶出ともに、SVP 脱水ケーキは全てのケースで目標値を満足しており、材齢を増すことにより溶出量はさらに低減する結果となった (図-8、図-9)。

一方、フィルタープレス脱水ケーキは、材齢が増すと目標値を超過する事例が認められた。

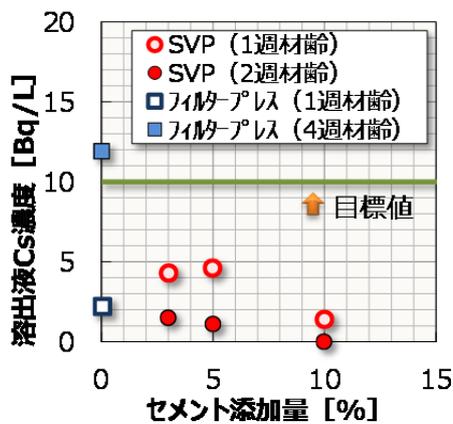


図-8 有姿攪拌試験結果

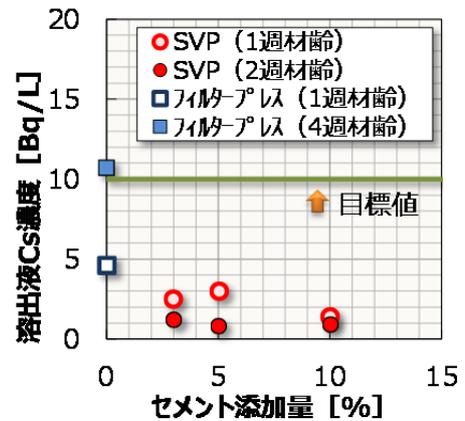


図-9 長期溶出試験結果

・乾湿繰返後溶出試験結果

乾湿繰返後溶出試験の結果を図-10 に示す。当該溶出試験においても、SVP の脱水ケーキから、目標値を超過する溶出液は確認できなかった。

このため、SVP 工法による脱水ケーキは、風化に対する抵抗性が高いことが確認できた。

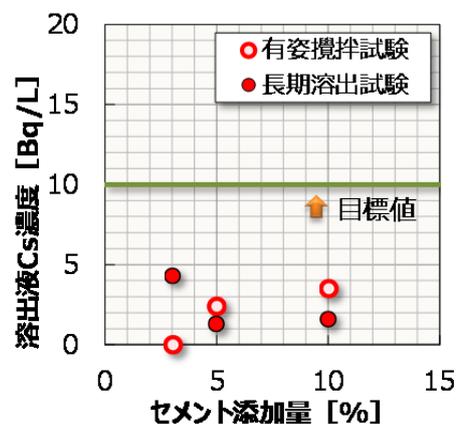


図-10 乾湿繰返後溶出試験結果

・中性化促進後溶出試験結果

中性化促進後の溶出試験結果を図-11、図-12 に示す。これより、9 週間の中性化促進においても、有姿溶出、長期溶出ともに目標値を満足する結果となった。

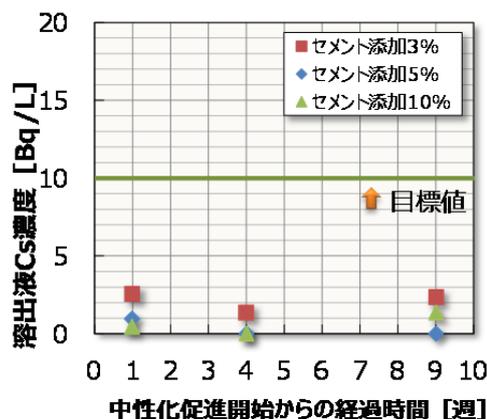


図-11 中性化促進後有姿攪拌試験結果

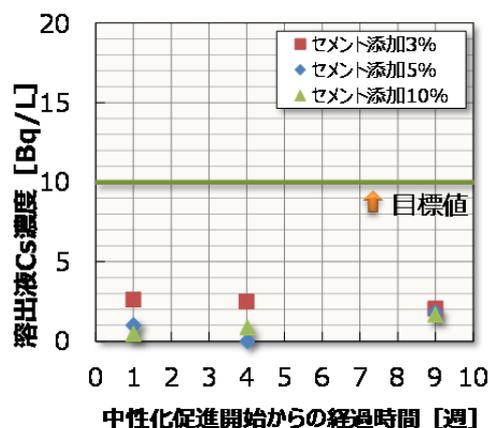


図-12 中性化促進後長期溶出試験結果

・水浸漬後溶出試験結果

トンネル工事等において、脱水ケーキが雨水等に接触すると再泥化することを経験していたことから、FP および SVP の脱水ケーキを長時間水に浸し、各脱水ケーキの水に対する抵抗性を検討した。その浸漬状況を写真-8 に示す。FP は浸漬 13 時間後には吸水し膨張が始まり、18 時間後には崩壊した土粒子がピーカーの底に溜まる結果となった。68 時間後には、ケーキ内部から水に押し出された気泡が残留している様子が観察できる。

一方、SVP の脱水ケーキは長期間水に浸していても、健全な状態を維持していたが、溶出液が茶色に呈色する現象が確認された。これは、脱水ケーキがセメントで固化反応をした結果、有機物の溶出が促進されたことが原因であると推測される。この着色した水の放射性 Cs 濃度を測定した結果、不検出であることを確認している。

Cs 溶出量を定量的に評価するため、水浸漬後の脱水ケーキに対し溶出試験を実施した。結果を図-13 に示す。

これより、FP の脱水ケーキは、24 時間浸漬するだけで溶出液の Cs 濃度は 100Bq/L を超え、さらに攪拌を加えることで 300Bq/L を超える結果となり、水に対する抵抗性が低いことが分かった。

一方、SVP による脱水ケーキ(8 週養生)からは、セメント添加量によらず目標値を満足したことより、十分な溶出防止が図れていることが確認できた。

ここで、各種溶出試験の溶出液の SS と Cs 濃度の関係を図-14 に示す。これより、溶出液の Cs 濃度と SS の間には、相関関係が成立していることが伺え、放射性 Cs の溶出防止には、脱水ケーキからの SS の流出を防止することが有効であると言える。

・溶出試験まとめ

以上より、FP 脱水ケーキは、水と接触することで軟らかくなり、放射性物質が吸着された土粒子が流出しやすくなる結果、溶出液の Cs 濃度が基準を超過する結果となった。

一方、SVP の脱水ケーキは、各種溶出試験の結果から、基準値を全て満足する結果となり、十分な不溶化が行えた。

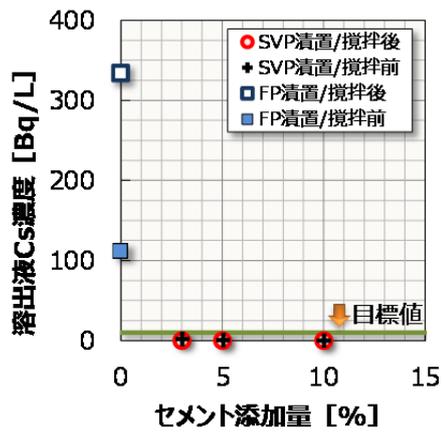


図-13 水浸漬後溶出試験結果

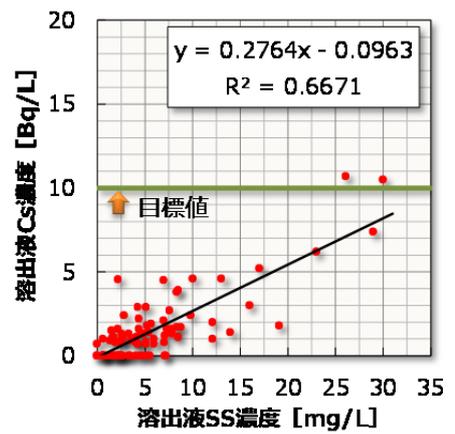


図-14 溶出液の SS と Cs 濃度の関係

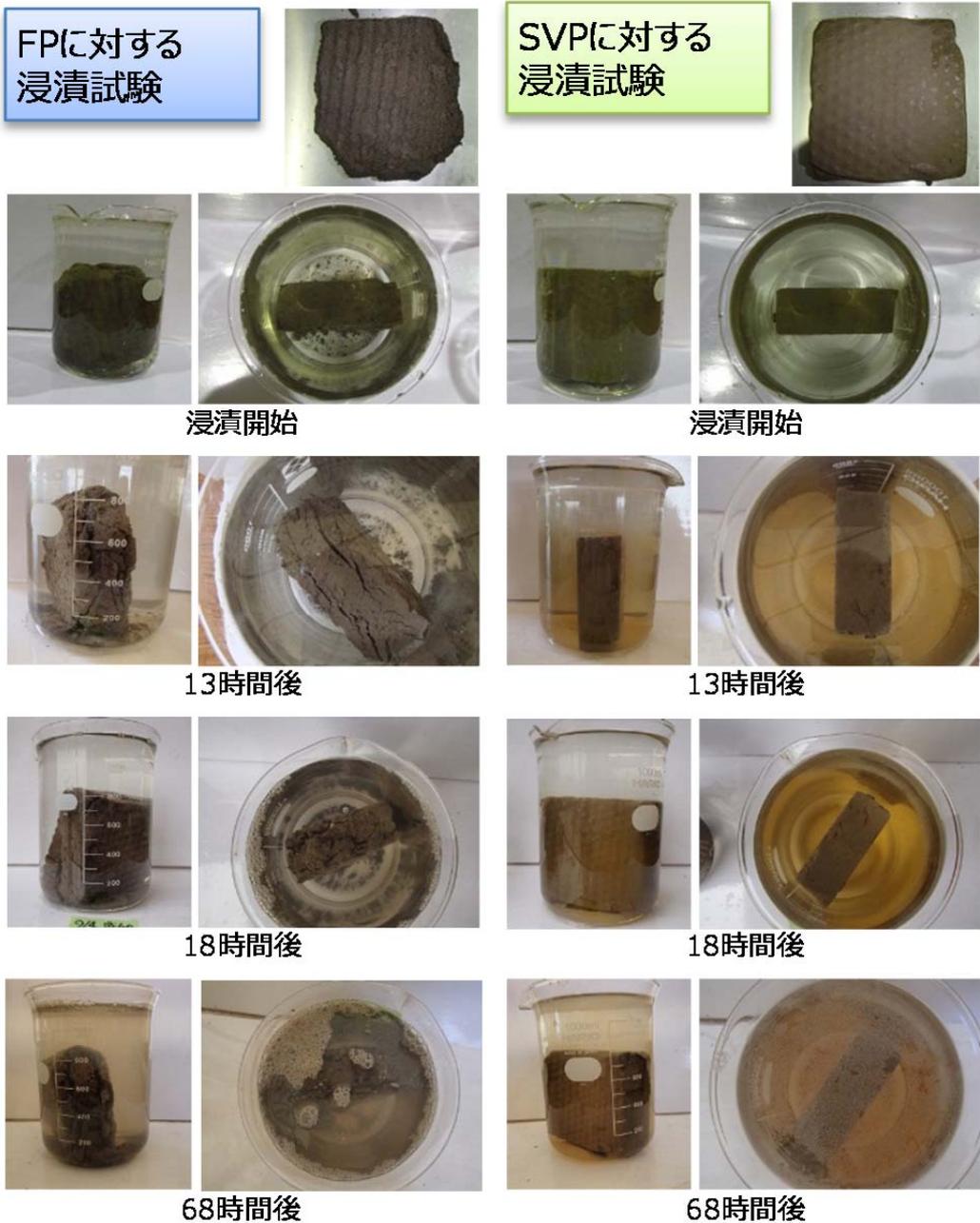


写真-8 水浸漬試験状況

○脱水ケーキの強度特性について

SVP 工法は、スラリーにセメントを加えているため、経時変化と共に脱水ケーキの圧縮強度が上昇した。脱水ケーキの強度特性を図-15 に示す。

これより、以下に示すことが分かった。

- ・セメント添加量を増やすほど、改良強度が増加する
- ・養生期間を確保するほど、改良強度は増加する
- ・セメント添加量が少ない 3.0% のケースにおいても、28 日後には第 4 種改良土相当(70kN/m²)となる

SVP の脱水ケーキは、第 3 種改良土、第 4 種改良土相当の強度になるため、硬すぎず、また、再泥化することのないハンドリング性の高い状態に改良できることが確認できた。

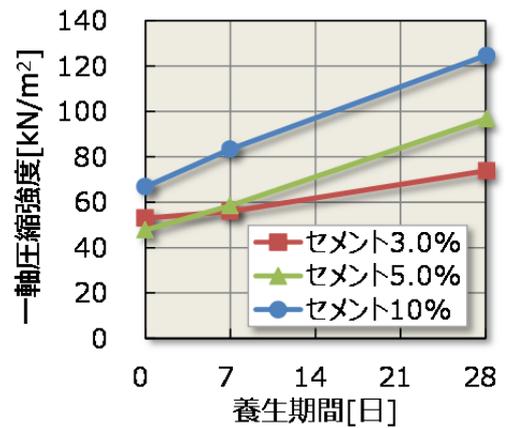


図-15 脱水ケーキの強度特性



写真-9 脱水ケーキ状況

○脱水効率

SVP 工法による脱水時間とセメント添加量の関係を図-16 に示す。

これより、以下に示すことが分かった。

- ・セメント添加量を増やすほど、脱水効率が向上する(脱水時間が短くなる)
- ・セメント添加量と脱水効率の間には、相関関係が存在する

以上より、セメント添加量の調整によって、脱水に必要な時間を調整できることが確認できた。

一方、従来設備のフィルタープレスでは、加圧力 0.5MPa の条件で、3~5 時間の脱水時間を要している(処理対象となるスラリー濃度が低いほど、脱水時間が長期化する)。

SVP 工法とフィルタープレスそれぞれの脱水時間から、開栓等の作業時間を考慮したサイクルタイムを求め、1 日に脱水処理可能な回数を算出した。1 日の稼働時間は、除染作業所であることから 6 時間/日と設定した。結果を表-4 に示す。

これより、以下に示すことが分かった。

- ・セメント添加量 3.0% の条件で SVP にて処理した場合、FP に比較し処理速度は 1.7 倍以上となる
- ・SVP では、セメント添加量を増やすほど、脱水速度が向上する

なお、平成 24 年度檜葉町除染等工事では、1 日当たり 0.5m³ の脱水ケーキが発生していた。また、今回の試験結果では、FP と SVP で減容化率はほぼ同等であった。この条件のもと、SVP で 1 日当たり 0.5m³ の脱水ケーキが生じる場合の SVP の最適仕様を試算した。その結果、セメント添加量 5.0% の場合、0.10m³ のろ室容積の設備で処理できる結果となり、設備規模を FP に比較して約

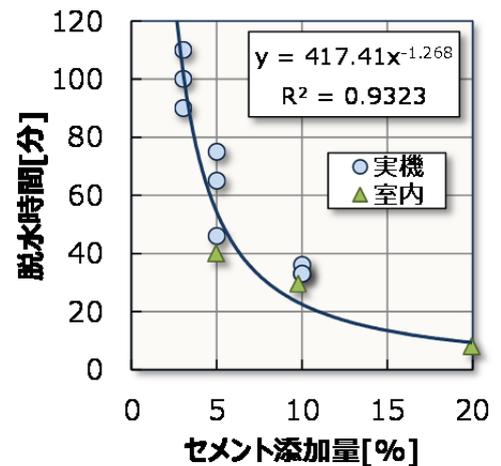


図-16 セメント添加量と脱水時間の関係

1/3 程度に縮減できることが分かった。

表-4 SVPとフィルタープレスの脱水速度の比較

	セメント添加量[%]	脱水時間[分]	作業時間[分]	サイクル時間[分]	処理速度比[倍]	必要脱水機容量 ^{※1} [m ³]
FP	0.0	180	10	190	1.0	0.27
SVP	3.0	100	10	110	1.7	0.18
	5.0	60	10	70	2.7	0.10
	10	30	10	40	4.8	0.06

※1 必要脱水機容量とは、実験結果より求めた必要最低限のろ室容積である

○その他脱水ケーキの性状

SVP で処理した脱水ケーキの性状を表-5 に示す。同時に比較対象となる FP のケーキ性状も併せて示した。

SVP では、セメントを添加しているにもかかわらず、減容化率は FP とほぼ同程度であった。これは、脱水ケーキの含水比が低下し、密度が大きくなったためである。つまり、FP 中の水分がセメントで置き換わっていることを示していると考えられる。

なお、脱水ケーキの比重が高くなった分、放射能濃度は低下する傾向を示した。

表-5 脱水ケーキの性状及び減容化率

	FP	SVP		
セメント添加量[%]	0.0	3.0	5.0	10
含水比[%]	94.1	76.5	72.0	61.3
脱水ケーキ密度[t/m ³]	1.3	1.5	1.7	1.8
減容化率[%]	86.0	86.4	85.9	82.1
放射性Cs濃度[Bq/kg]	188,181	173,467	155,167	114,633

○除去物発生量評価

本技術は、減容化処理のため、除去物は発生しない。よって、ここでは、本技術の適用によって処理物として生じる脱水ケーキの量について示す。含水比 1,000%、比重 1.06t/m³ のスラリー 1 m³ を処理する場合、セメント添加量に応じて、表-6 に示す除去物(脱水ケーキ)が発生する。

なお、SVP と FP は、減容化率は同程度であるため、廃棄物発生量も同程度となる結果となった。

表-6 スラリー 1 m³あたりの除去物発生量

	脱水ケーキ	
	重量[t]	容積[m ³]
FP	0.19	0.14
セメント3.0%	0.21	0.14
セメント5.0%	0.24	0.14
セメント10%	0.32	0.18

○作業中の空間線量率、作業員の被ばく量

作業前、中、後での作業場所の空間線量率の最大、最小値を表-7 に、測定箇所を図-17 に示す。測定結果より、試験作業中は全ての箇所で線量の上昇傾向が確認された。また、作業完了後の測定結果より、装置の洗浄を実施すれば、空間線量率は作業前の状態まで下がることを確認した。

作業中に特に空間線量率が高くなった箇所は、スラリーを投入する開口を有する②打込みポンプと、スラリーが脱水により濃縮される④ろ板（表面線量率）であった。

表-7 空間線量率の計測記録

No.	測定箇所	作業前		作業中		作業後	
		最大	最少	最大	最少	最大	最少
①	スラリー槽	3.00	2.00	-	-	3.00	1.00
S V P	② 打込みポンプ	0.25	0.16	3.00	0.25	0.23	0.15
	③ ポンプ配管	0.30	0.18	0.80	0.20	0.30	0.15
	④ ろ板	0.30	0.12	2.50	0.13	0.22	0.12
	⑤ 圧入る液槽	-	-	0.25	0.12	-	-
	⑥ 真空ろ液槽	0.23	0.15	0.23	0.13	0.30	0.15
雰 囲 気	⑦ 空間/雰囲気 1	0.30	0.15	0.40	0.22	0.30	0.22
	⑧ 空間/雰囲気 2	0.33	0.15	0.38	0.15	0.40	0.12
	⑨ 空間/雰囲気 3	0.23	0.15	0.30	0.13	0.22	0.15

(単位 : $\mu\text{Sv/h}$)

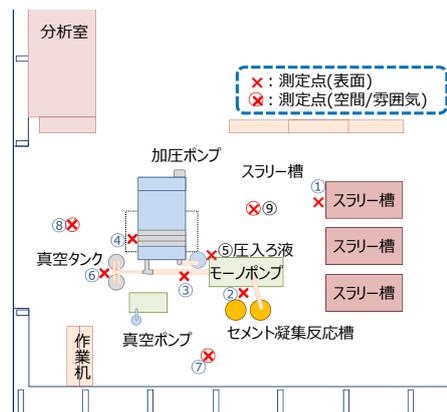


図-17 空間線量率測定地点

次に、本試験の実施に伴う作業員の被ばく量を表-8 に示す。なお、被ばく量はガラスバッジと個人線量計にて測定を行った。各測定値は以下のとおりである。

作業場所の平均空間線量率： 作業場所および周辺の9か所のモニタリングポイントにおける作業前後の空間線量率をNaIサーベイメータにて測定した平均値

バックグラウンド： 試験実施前から実施後の各モニタリングポイントにおける空間線量率の最低値の平均値

実証期間中の作業員の被ばく量： 個人線量計およびガラスバッジの測定結果のうち最大の量

作業員の平均被ばく量： 作業期間における個人線量計の測定値の累計を作業日数で割った値

時間あたりの平均被ばく量： それぞれの作業時間で割った値

表-8 作業員の被ばく量一覧

作業場所平均空間線量率		0.31 $\mu\text{Sv/hr}$
作業時間(日平均)	8 時間	実証機稼働時作業日数
作業未実施場所における当該区域の空間線量率(バックグラウンド)		0.14 $\mu\text{Sv/hr}$
作業員最大被ばく量		3 $\mu\text{Sv/日}$
担当作業:原料(スラリー)投入、セメント添加、脱型および洗浄作業		
作業時間(日平均、全作業(片づけ等の周辺作業含む))	8 時間	担当作業に該当する作業時間(日平均)
		4.4 時間
作業員平均被ばく量(実証機稼働期間の平均)		2.1 $\mu\text{Sv/日}$
全作業(片づけ等の周辺作業含む、時間平均)	0.27 $\mu\text{Sv/h}$	担当作業従事時(時間平均)
		0.48 $\mu\text{Sv/h}$

表-8 より、本試験中の作業員の最大被ばく量は、3 $\mu\text{Sv/日}$ であった。当該実績値は、ろ板付近での計測作業とろ板の開枠・洗浄作業をメインとして作業した際のものである。これより、被ばく量低減の観点から、ろ板付近での長時間作業は控えることが望ましいことを確認した。

ここで、装置付近で空間線量率を測定した結果と、被ばく量の結果から、打込みポンプとろ板付近の作業について、作業員の被ばく量を低減する工夫について検討した。

まず、ポンプについては、スラリー投入口が開口部となっているポンプを密閉型の渦巻きポンプとすることで、空間線量率の上昇が軽微であったポンプ配管と同様の線量率に抑えることが可能と思われる。

次に、ろ板周辺の作業については、FP 工法と異なり、SVP 工法は、表-9 に示す通り、ろ板周辺での作業工程が自動化されている。そのため、SVP 工法では、前述した空間線量率が高くなる場所

表-9 自動化設備の概要

作業工程	SVP	FP	備考
開 枠	○	×	ケーキ剥離性の良い板構造のため、SVP は開枠しただけで脱水ケーキが自動で脱落
ろ板洗浄	○	×	SVP は、バッチ処理毎の洗浄と、一日 1 回のろ布の薬液洗浄を自動化

での作業の省人化が図れ、作業員の被ばく低減に効果がある。

また、表-4 に示したように、SVP 工法では、FP 工法に比べ、脱水時間が短縮でき、作業時間を削減することができるため、作業員の被ばく低減に有効である。さらに、SVP は FP に比較して脱水速度が速く、ろ室容積の小さい設備での処理が可能であるため、脱水処理中にろ室内に滞留している SS 量が少なくなる。これより、空間線量率の上昇を抑えることができ、作業員の被ばくリスクの低減が期待できる。

脱水処理中はパトランプを回すなどの警報システムを加えることにより、SVP 工法では、作業員の被ばくリスクの低減が可能となる。

○コスト

濁水処理量により処理コストが大きく変わるため、中間貯蔵施設で発生する濁水の処理に本技術を適用したと仮定してコストを試算した。試算の条件・結果を図-18 に示す。

なお、濁水処理費用については、試算コストから除外している。



図-18 コスト比較結果

また、FP 工法において脱水ケーキの固形化処理を実施する場合、簡易な混合・攪拌工法を採用したとしても、脱水ケーキ 1 m³ 当たり 2,500 円程度の固形化処理費が追加費用として見込まれる。

現有する SVP の設備仕様は 2.0m³、3.0m³ の 2 タイプであり、除染現場に SVP 工法を適用するには、過大な設備となりコスト増となるため、実証実験での結果を基に、適切な設備規模を検討し、処理コストの縮減を図る予定である。

○まとめ

真空加圧脱水固化処理工法は、放射能を含む高含水土に対し、放射性物質の不溶化と減容化を同時処理することが可能な技術であり、本工法で処理した脱水ケーキは、降雨等に対して特段の養生をしなくても屋外にそのまま保管可能な処理物となることを実証した。以下に特徴を示す。

- ① 放射性物質が付着した細粒分の流出を抑制することで脱水ケーキの不溶化が図れ、保管時の安全性を向上できることが確認できた。
- ② セメント添加による脱水ケーキの容積増加がなく、従来工法と同程度の減容化効果が確認できた。
- ③ 脱水速度が速く作業時間の短縮が図れるため、作業員の被ばくと処理コストの低減に寄与できることが確認できた。
- ④ 脱水ケーキは第 3 種・第 4 種改良土相当に強度改善され、ハンドリング性が向上する(FP 脱水ケーキは鋭敏比が高く再泥化しやすい)。
- ⑤ 試験時の線量測定結果では、ろ板周辺の空間線量が高くなることが確認された。このため、本装置が有する開栓やろ板洗浄の自動機構が作業員の被ばくリスクの低減に有効であることが確認できた。

実施代表者の所属機関：あおみ建設株式会社

実証テーマ名：水底土砂の原位置分級除染工法

事業の概要：放射性物質で汚染された水底土砂上に水中分級ロッドを設置し、ロッド内で汚染土を分級・洗浄して、洗浄後の粗粒分は水底に残し、汚染度の高い細粒分と有機物のみを陸上に回収することで、処分する汚染土量を削減できる技術の効果を確認する。

実施内容：1. キャビテーションジェットと超音波を併用した分級・洗浄能力の効果をモデル実験で確認し、機材の組み合わせや必要能力を決定する。
2. 実規模に近いプロトタイプを製作し、分級・洗浄性能や浮泥の回収率等を確認する。
3. 福島県内のため池で除染を行い、その効果を確認する。

技術概要：[試験フロー]

試験場所：千葉県袖ヶ浦市
試験対象：水槽内の模擬水底(非汚染土)
分級・洗浄性能や浮泥回収率等を確認



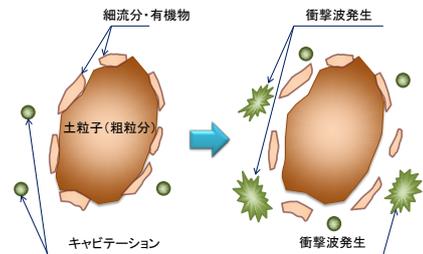
試験場所：福島県内
試験対象：ため池の水底土砂
除染の効果を確認

[試験目標]

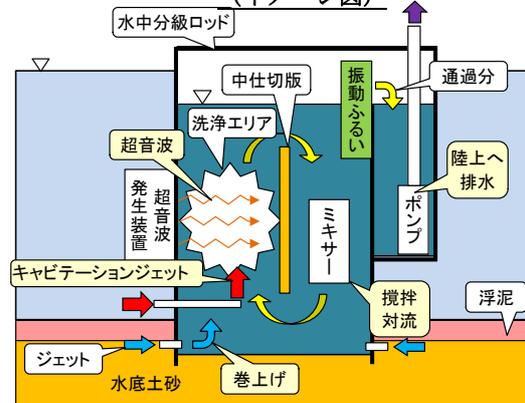
- ・ 処理対象土の細粒分と有機物のみ回収し、水底に存置した粗粒分の除染率は、95%以上であること
- ・ 処理対象土の表層 10cm 程度の薄層で処理できること
- ・ 存置する水底土砂に有機物が残存していないこと
- ・ 実水域で、水深 1m 以下の低水深で施工できること
- ・ 浮泥を確実に回収できること

[期待される効果]

- ・ 薄層(10cm)での浚渫・分級・洗浄の実現
- ・ 存置した粗粒分(砂分)による覆砂効果
- ・ ため池や湖沼など適用範囲の広い工法の実現

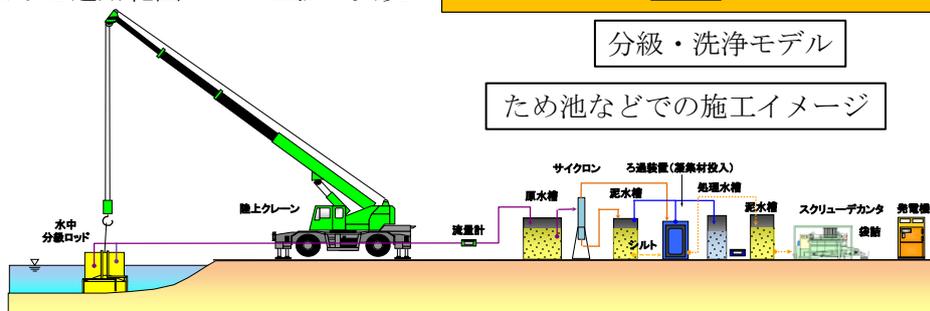


想定されるキャビテーション洗浄原理 (イメージ図)



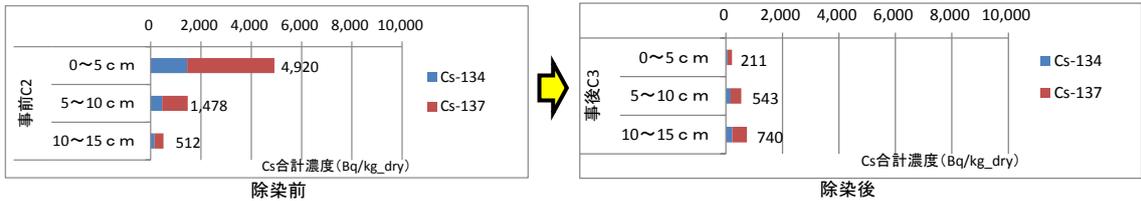
分級・洗浄モデル

ため池などでの施工イメージ

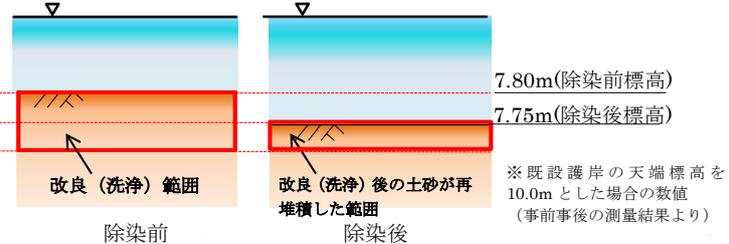


その他：洗浄原理の過程を目視で確認できるモデル実験機と実規模に近いプロトタイプを使用した試験を実施する。

除染効果：薄層 10cm 改良処理実施後、同一地点（事前 C2、事後 C3）での放射性物質濃度の鉛直分布の変化より確認



水底面からの深度(cm)	Cs濃度(Bq/kg_dry)	
	除染前	除染後
0~5	4,920	
5~10	1,478	211
10~15	512	543
15~20	—	740



単位面積(1m²)当たりの試算結果より収支確認

深度	含水比	改良量(m ³)	比重(kg/m ³)	土量(kg_wet)	土量(kg_dry)	Cs濃度(Bq/kg_dry)	Cs量(Bq)	
								改良前
改良前	表層 5cm	150%	0.05	1,337	66.9	26.8	4,920	131,856
	5~10cm	75%	0.05	1,562	78.1	44.6	1,478	65,919
計			0.10		145.0	71.4		197,775
改良後	表層 5cm	233%	0.05	1,233	61.7	18.5	211	3,884

除染率=(改良前Cs量-改良後Cs量)/改良前Cs量=(197,775-3,884)/197,775=0.980 98.0%

減量率=改良後存置土量 / 改良前土量=18.5/71.4=0.259 25.9%

除去物発生量評価：処理数量 23.8m² 改良厚 0.1m 改良土量 2.4m³

除去物発生量 851kg_dry (内、凝集剤 120kg) 1.9m³、回収 Cs 量 4,145,600Bq
 従来の工法(床掘)では全量除去のためには 40cm での施工が必要となるが、本工法では扱い数量は 1/4 となり、砂レキを含む底質であれば原位置分級効果が加味される。
 ※港湾工事共通仕様書(国土交通省港湾局監修) 港湾工事出来形管理基準により、床掘は施工精度±30cm を許容されているため、10cm の全量除去のためには 40cm の施工が必要となる。

作業員被ばく量評価：作業場所平均空間線量率 0.24 μSv/h

作業員最大被ばく量 16 μSv (機材設置運転担当、作業時間 110 時間 (15 日間))

作業員平均被ばく線量 (作業期間中) 7.5 μSv

コスト評価：

- ①30 千円/m² (実地試験使用プロトタイプ)
0.81m²型 (ポット 1.0×1.0m) 陸上からクレーン施工
- ②10 千円/m² (実施を想定する水上施工)
4m²型 (ポット 2.1×2.1m) 組立台船を使用し水上施工

歩掛り (作業人工、作業速度)：

- ①6 人工/日 3.24m²/h
- ②6 人工/日 16.0m²/h

コスト評価条件：①②とも：コストは直接工事費のみ計上。就業 8h (運転 6h)、1 ヶ月以上運転 (稼働日は 20 日/月と想定)。脱水処理後の土砂はフレコン詰後、場内仮置、除染特殊勤務手当は含まず。

除染作業における安全上の注意：綿の手袋、ゴム手袋、ゴム長靴を着用、飛沫対策として眼鏡・ゴーグル着用、濁水処理作業時はマスク装着

試験場所 (住所)：
袖ヶ浦市 (千葉県)
福島県内

除去物保管場所と保管状況 (写真)：
地区指定場所に保管。
(移動が必要な場合採択者で移動)



除去物保管状況

1. 業務の目的

業務名：「水底土砂の原位置分級除染工法」の技術実証

2. 実施内容と成果目標

(1)実施内容

放射性物質に汚染され堆積している水底土砂に対して原位置で細粒分（粘性土等）を分級除去し水底土砂の除染を行う。

(2)成果目標

実規模に近いプロトタイプモデルによる排水処理まで含む一連の処理手順、作業効率の確認を行い、水底土砂の除染に寄与できる技術として確立する。

目標値 浮泥除去率 100%、除染率 95%、薄層(10cm)除去への対応

2.1 予備実証実験結果

予備実証実験（千葉県袖ヶ浦市内）

モデル実験装置での予備実験

目的：使用機器の必要能力の検証、効率的な洗浄方法の確定

水中分級ロッド（プロトタイプ）による予備実験

目的：機材性能および効果、一連の処理手順、作業効率の確認

(1)モデル実験装置での予備実験

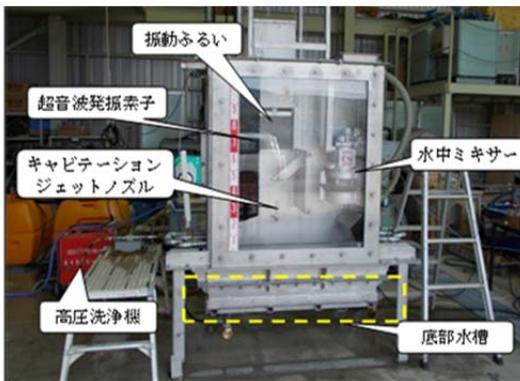


写真-1 モデル実験装置



写真-2 単粒径の材料(ガラスビーズ、
砂)による対流状況確認

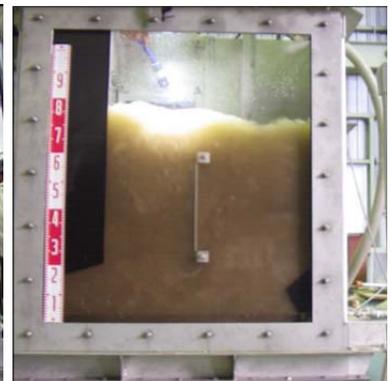


写真-3 模擬底泥を使用した
分級能力確認状況

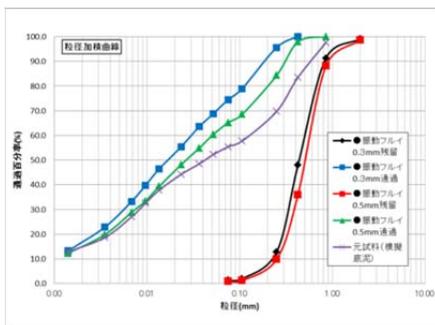


図-1 振動ふるいの分級性能の確認結果

○モデル実験成果（概要）

- ・「超音波」と「キャピテーションジェット（以下 CAV-J）」との併用による洗浄効果を確認し、同時実施を選定した。
- ・単粒径の材料による対流状況の確認結果より、水中ミキサー(洗浄時の攪拌)、水流ジェット(底質の巻上げ)に必要な能力を確認(写真-2)した。
⇒モデル条件下で水中ミキサー出力 80%、水流ジェット 50L/min。
- ・模擬底泥を仕様した分級能力の確認結果より、振動ふるいの分級能力、洗浄に必要な時間を確認(写真-3、図-1)した。
⇒プロトタイプ実験では、振動ふるいは 0.3mm を採用する。
⇒ " " 1 サイクルの洗浄時間は 10 分とする。
- ・モデル実験の結果から、水流ジェットを併用することで薄層での除去対応は可能であることを確認 (写真-2,3) した。

(2)水中分級ロッド(プロトタイプ)による予備実験

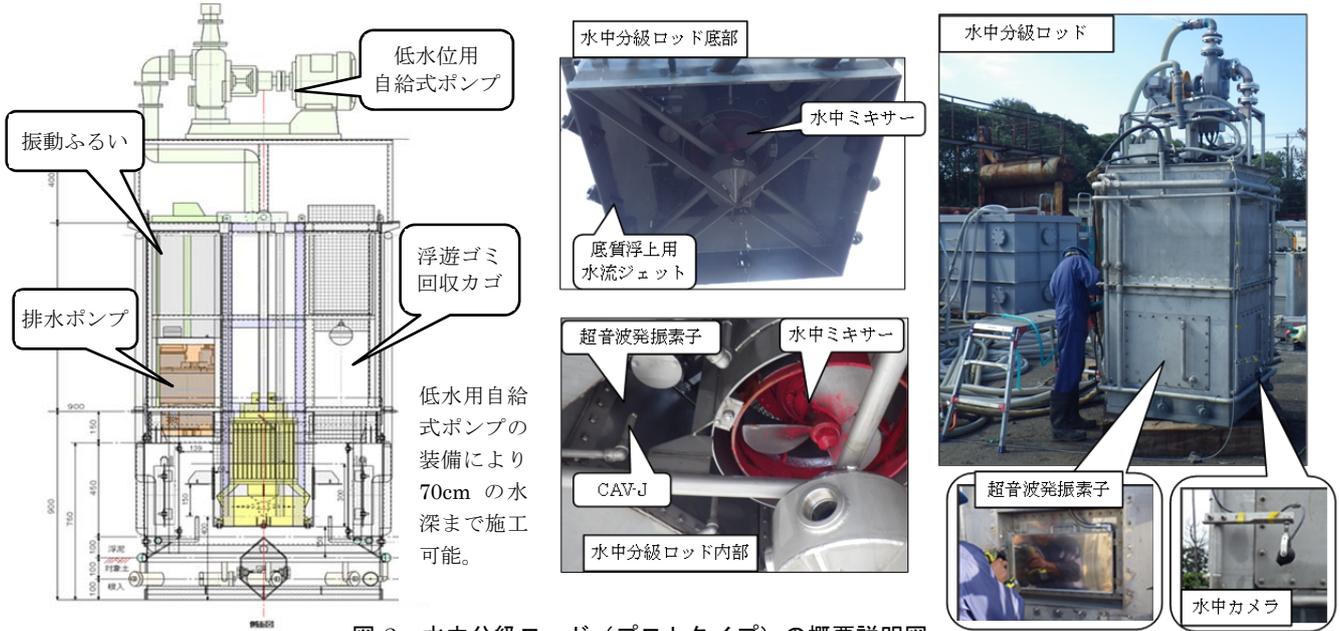


図-2 水中分級ロッド(プロトタイプ)の概要説明図

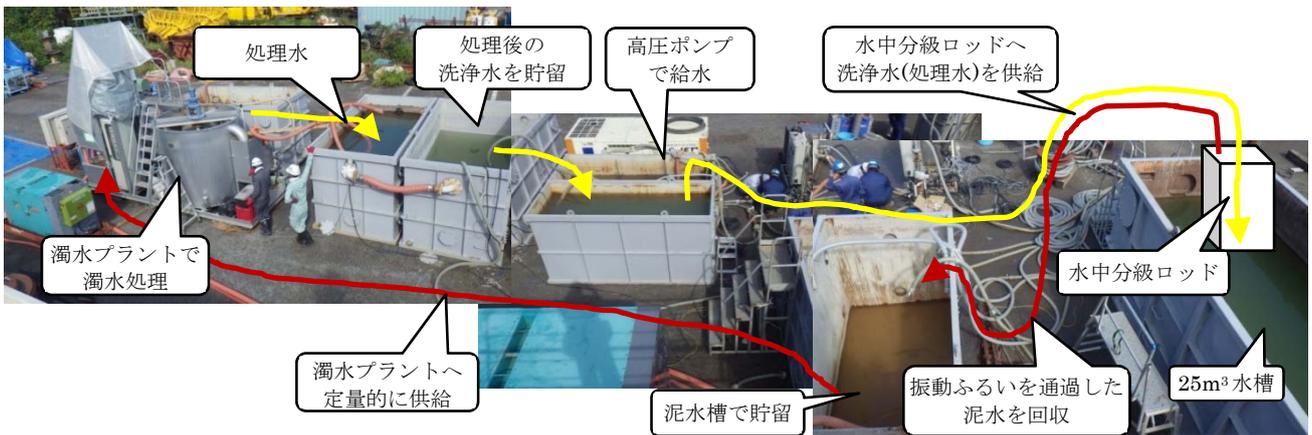


図-3 模擬土による水中分級実験の系統説明図



写真-4 模擬底泥敷設状況

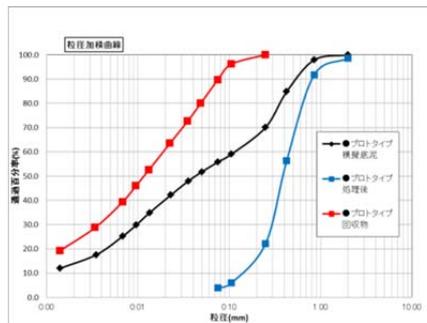


図-4 分級性能の確認結果



写真-5 浮泥回収状況確認
(分級ロッド着底前の状況)



写真-6 原位置分級処理後の
模擬底泥(トライアップ)状況

○プロトタイプ予備実験成果(概要)

- ・鋼製水槽(25m³)内に設置した模擬底泥に対して分級洗浄を連続実施することで、各装置とも連続運転に対して十分な処理能力があることを確認した。
- ・水中分級ロッド内を絶えず排水することにより、分級ロッド内への浮泥の吸い込みが発生し、運転中の濁りの拡散がないことを水中ビデオ(写真-5)により確認した。
- ・プロトタイプ施工時の振動ふるいの分級効果を土質試験結果(図-4)から確認した。
- ・10cmの薄層施工が可能であることを出来形計測結果(写真-6)より確認した。
- ・洗浄・分級後に水底部に良質な砂質土を存置できていることを確認(写真-6)した。

2.2 現地実証試験（福島県内）結果

(1) 施工概要

施工場所は下図に示すとおり（ため池の流入部と流入部から最も近い取水場所の間）。

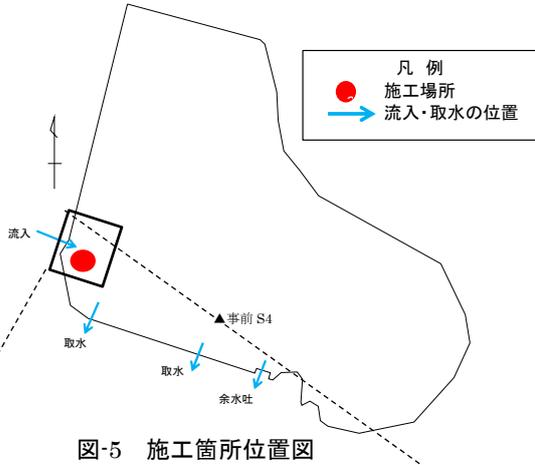


図-5 施工箇所位置図

○施工期間（準備・片付を除く）
 平成 25 年 10 月 14 日（試運転）
 平成 25 年 10 月 15 日（台風養生）
 平成 25 年 10 月 16 日（台風 26 号待機）
 平成 25 年 10 月 17 日～19 日（除染実施）
 ○施工数量
 プロトタイプ（1.0m² 型）を利用して 28 サイクルの洗浄分級を実施した。
 施工位置の誘導誤差等を考慮して、ラップ長を 0.10m として施工した。
 除染面積 23.8m²
 改良層厚 0.1m
 改良土量 2.4m³
 ※施工水深は、出水の影響等により施工期間中に 0.8m～1.2m まで変化した。

(2) 事前調査

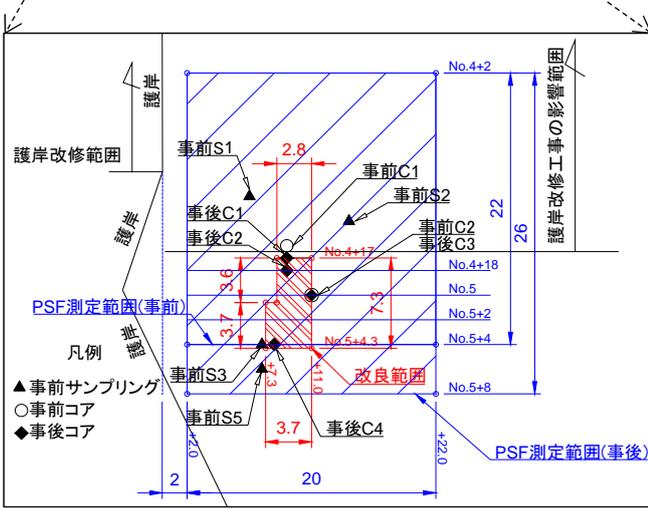


図-6 事前・事後調査位置図

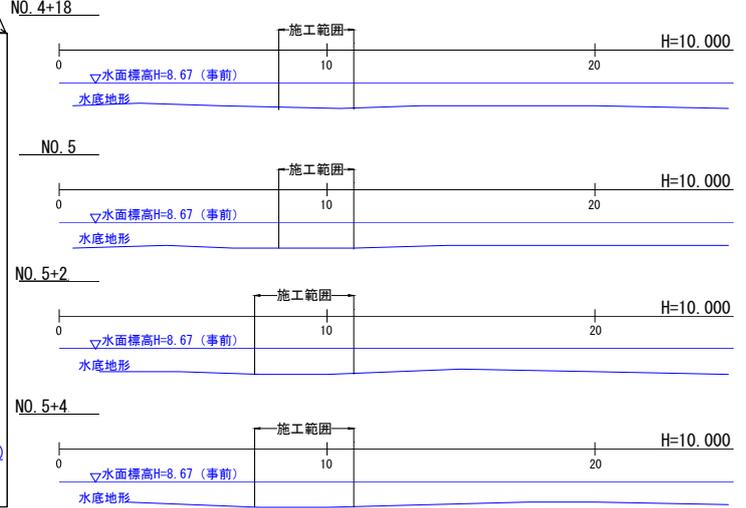


図-7 施工場所周辺断面図（2013/10/10 計測）

1) 土質試験結果

・表層部の 7 地点の平均値は以下のとおり。

土粒子密度 2.52g/cm³、含水比 246%、細粒分含有率 64%、強熱減量 10.2%。

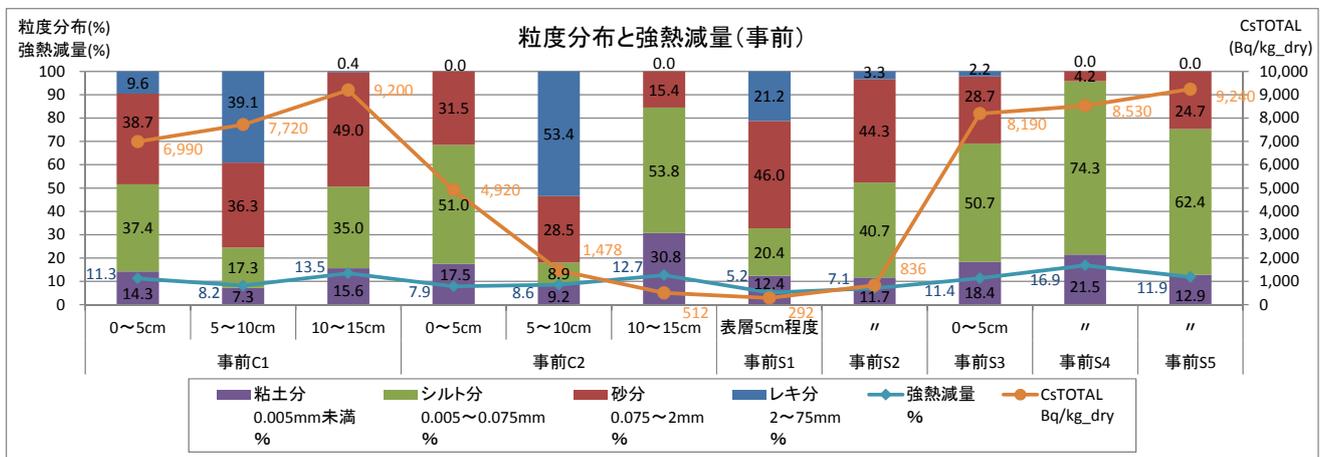


図-8 事前調査土質試験結果一覧

2) 底質の Cs 濃度鉛直方向分布の確認

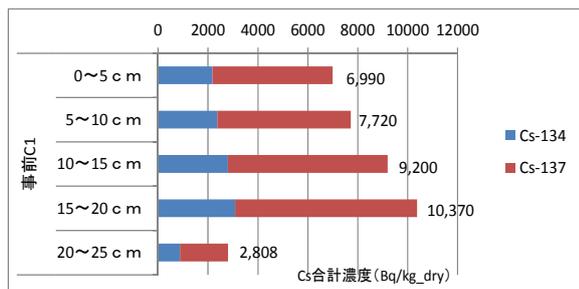


図-9 Cs 濃度の鉛直分布 (事前 C1)

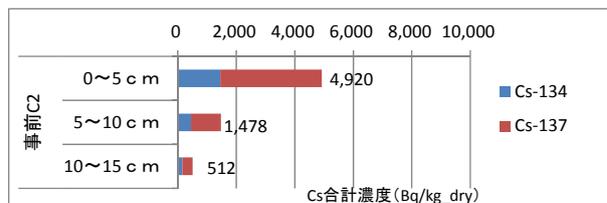


図-10 Cs 濃度の鉛直分布 (事前 C2)

事前 C1 箇所は、護岸改修工事の影響を受けており、表層より 20cm 程度の Cs 濃度が表層部より高くなっている。事前 C2 データでは、表層部の Cs 濃度が高く、表層より 10cm までに全 Cs 量のほとんどが存在する。

3) シンレーションファイバーによる面的な放射線量の確認

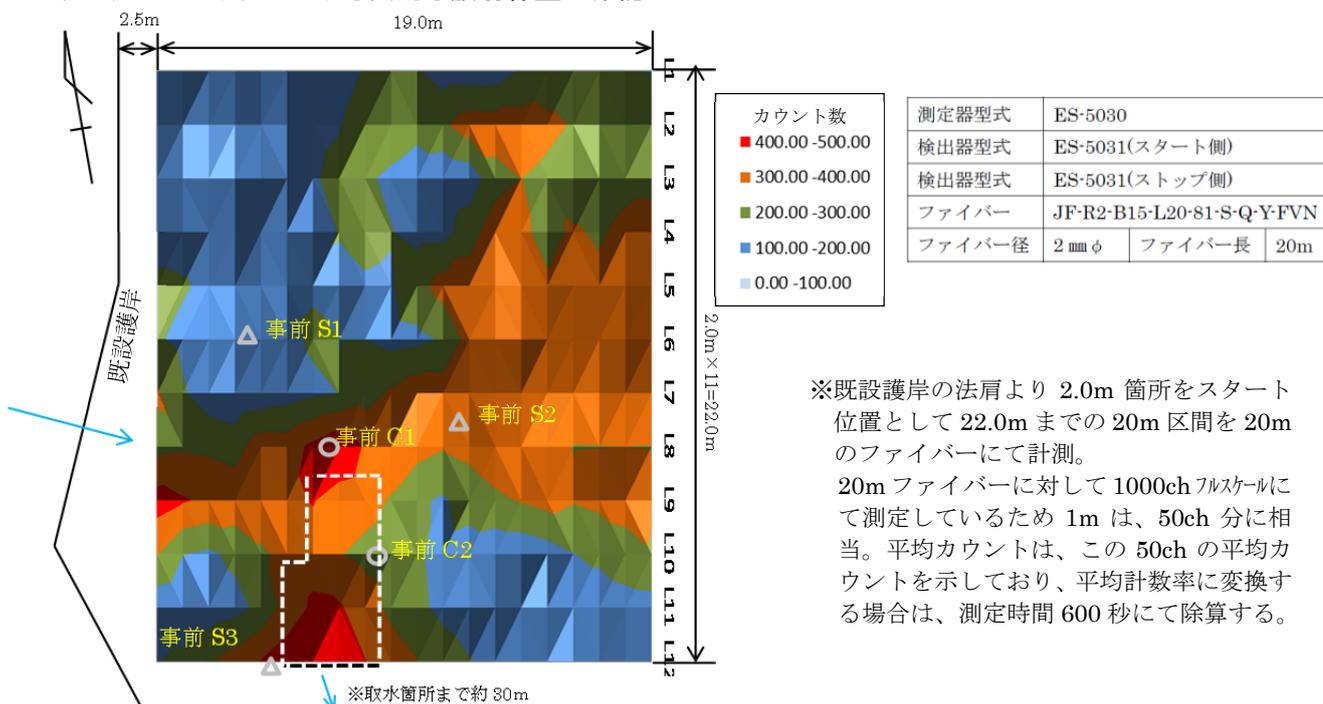


図-11 シンレーションファイバーによる測定結果マッピング図 (除染前)

流入 (排水口) 付近での線量が高く、流入箇所、最も近い取水箇所へ向けて比較的高線量のエリアが存在する。実地試験施工場所は、C1 箇所 (護岸工事の影響箇所) を避け、陸上クレーンでの施工可能な範囲でなるべく高線量の箇所を実施 (図中の破線部分)。工事影響箇所以外については、事前 C2 箇所と同様に表層部に Cs 量が集中していると想定し 10cm の深度での改良を実施することとした。

(3) 現地除染実施結果

1) 実験準備 (試験装置搬入組立)

予備実験で最適化された装置・手順により原位置分級処理システムおよび水処理を含む一連のシステムをため池堤外地に搬入し装置の組立を実施した。

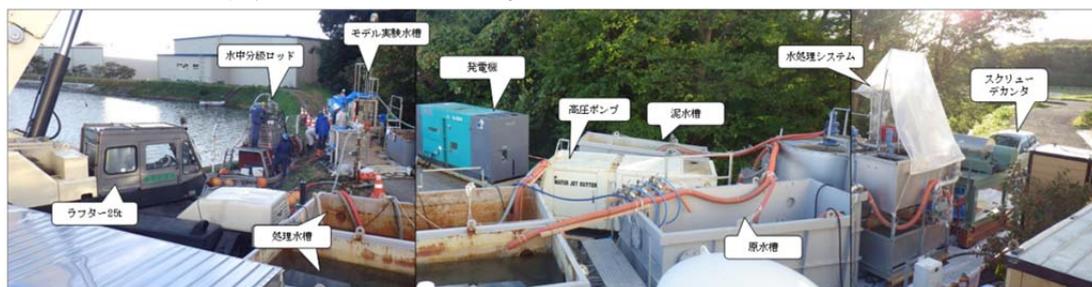


図-12 資機材配置状況

2) 現地除染実験

25t 吊ラフタークレーンを使用して、以下の手順で分級洗浄を実施した。

- ・排水ポンプを起動した状態で分級ロッドを徐々に降下させ、浮泥を回収する。
- ・原位置分級処理装置（水中分級ロッド）を水底面に着底させ、ロッド内の閉鎖された領域で「超音波」と「CAV-J」を組み合わせた洗浄（粗粒分、細粒分の分離、細粒分同士の固着の分散）を10分間実施し、水流を利用した分離により、水底土砂から細粒分のみを分級し回収する。



写真-7 施工状況全景



写真-8 底質分級洗浄状況



写真-9 泥水として回収した細粒分

- ・泥水として回収した細粒分は水処理システムにて凝集沈殿処理を行い、固液分離する。脱水処理にはスクリュードカンタを使用した。



写真-10 濁水処理機運転状況



写真-11 脱水機処理機運転状況



写真-12 保管状況(フレコンバッグ)

- ・回収した（放射性物質を含む）細粒分は、フレコンバッグで一次保管を実施。
- ・処理水は放射性物質の吸着性能を併せ持つ凝集剤を用いて処理を行い、排水基準を満たすことをONサイト測定（遮蔽容器を使用した現場内試験）で確認の上で洗浄水に繰り返し利用するとともに、実地試験終了後には現地排水処理を実施。

※特定廃棄物の処分に伴い生じた排水に係る基準

$$(\text{セシウム } 134 \text{ 濃度 (Bq/L)} / 60) + (\text{セシウム } 137 \text{ 濃度 (Bq/L)} / 90) \leq 1$$

ONサイト測定で確認するとともに、別途サンプルを採取し分析機関によりゲルマニウム半導体検出器型放射能測定装置による確認を実施した結果を以下に示す。

表-1 処理水放射性物質濃度確認結果

(単位: Bq/L)

採取場所(試料名)		CsTOTAL	Cs-134	Cs-137
処理水	10/14施工開始前処理水	ND	ND(<0.68)	ND(<0.94)
	10/14処理水	ND	ND(<0.89)	ND(<0.86)
	10/17処理水	ND	ND(<0.83)	ND(<0.88)
	10/18 AM処理水	ND	ND(<0.80)	ND(<0.75)
	10/18 PM処理水	ND	ND(<0.75)	ND(<0.79)
	10/19 処理水	ND	ND(<0.90)	ND(<0.88)

試験結果（表-1）より処理水からは、放射性物質は検出されなかった。

3) 施工時の濁りの発生の有無の確認

施工時の濁りの発生の有無を、確認した結果を以下に示す。

表-2 施工場所直近の濁度確認結果
測定項目 濁度 (単位:mg/L)

測定日	測定時期	測定位置		
		水面下 10cm	水面下 50cm	水底面上 10cm
2013/10/14(月)	施工前 (14:05)	-	-	20
	施工中 (15:50)	-	-	14
2013/10/17(木)	施工前 (13:12)	8	17	20
	施工中 (14:05)	6	6	6
2013/10/18(金)	施工前 (08:35)	4	4	8
	施工中 (11:30)	6	11	18
	施工中 (15:30)	10	15	20
2013/10/19(土)	施工前 (08:20)	5	3	18
	施工中 (11:30)	6	6	15

施工中は、原位置分級ロッドの直近で計測
測定機器 多項目水質計W-22XD(堀場製作所)



写真-13 施工中濁度測定状況

濁度計測結果(表-2)から、施工前、施工中に変化は見られず、施工場所直近においても、施工に起因する濁りは発生していない。

(※参考 水質汚濁防止法の規程に基づいた環境省令では、排水基準(一律排水基準)は濁度を日平均SS 150mg/L以下としている。)



写真-14 分級ロッド貫入時の状況



写真-15 原位置分級・洗浄中の状況

※写真は水中ビデオ映像から
キャプチャした施工時の状況。
撮影位置は分級ロッド外の
下端部と水底部
写真 14,15 とも 10/17PM 撮影
(濁度 8mg/L)

4) 浮泥の回収除去率の確認

ここでいう、浮泥とは「水底面上を浮遊し、流れ等で容易に移動する有機物を含む泥で、保水能力が非常に高く、比重が小さく、水底に沈降するが圧密し難い状態のもの」とする。事前および事後に採取した底質の鉛直コアの目視結果では試験場所のため池底質にはほとんど存在しない(層厚で2mm程度)。施工に起因する濁りが発生していない結果から、わずかな浮泥層についてはほぼ回収ができていると判断する。

5) 有機物除去効果の確認

超音波とキャビテーションジェットにより土壌より分離された、腐食植物等の有機物は、微細なものは土粒子細粒分とともに泥水として回収し、一定の大きさ以上(100 μ m)のものは浮遊物回収カゴにゴミ等と一緒に回収した。

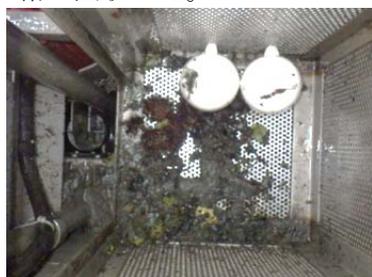


写真-16 回収カゴへの回収状況



写真-17 回収カゴへの回収物の状況(実地試験全量)
(回収物は、ヒシの実が主体だった)

- ・ 事前調査時の表層の強熱減量平均値 10.2%⇒事後調査の平均値 8.4%とやや減少している。

6) 作業効率の確認

プロトタイプモデルによる、排水処理まで含む一連の処理手順、作業効率の結果から実施工時において4施工サイクル/h(=3.24m²/h)は確保可能である。

(4) 事後調査

1) 土質試験結果

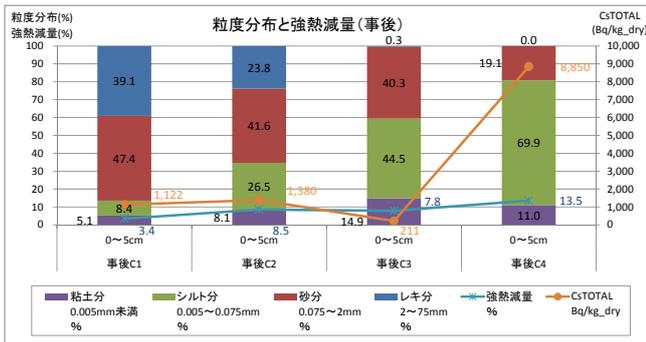


図-13 事後調査土質試験結果

- ・表層部の4地点の平均値は以下のとおり。
土粒子密度 2.55g/cm³、含水比 116%、細粒分含有率 47%、強熱減量 8.4%
- ・事後 C1、C2 の表層は、砂礫分主体で構成されている。
- ・事後 C3 の表層は、シルト分主体ではあるが砂分の含有も多い。
- ・事後 C4 の表層は、細粒分主体で構成されている。

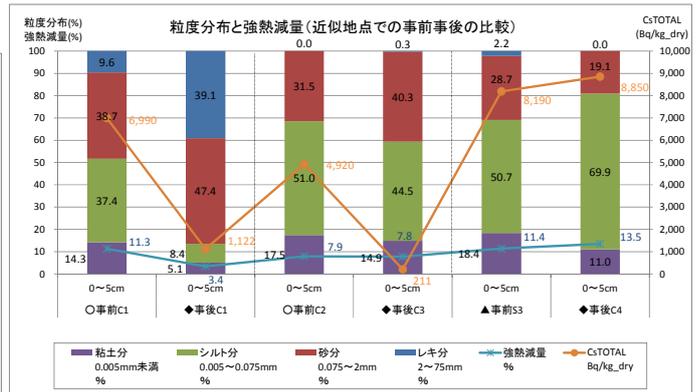


図-14 事前事後土質試験結果比較

(同一地点 (事前 C2, 事後 C3) または、最近傍地点)

2) 底質の Cs 濃度鉛直方向分布の確認

表-3 事後調査放射性物質濃度確認結果 (単位:Bq/kg_dry)

採取場所(試料名)	Cs-TOTAL	Cs-134	Cs-137	
事後C1	0~5cm	1,122	366	756
	5~10cm	64	14	50
	10~15cm	ND	ND(<14)	ND(<14)
	15~20cm	131	37	94
事後C2	0~5cm	1,380	427	953
	5~10cm	368	137	231
	10~15cm	127	40	87
	15~20cm	740	222	518
事後C3	0~5cm	211	53	158
	5~10cm	543	169	374
	10~15cm	740	222	518
	15~20cm	640	194	446
事後C4	0~5cm	8,850	2,690	6,160
	5~10cm	8,620	2,620	6,000
	10~15cm	3,740	1,140	2,600
	15~20cm	640	194	446

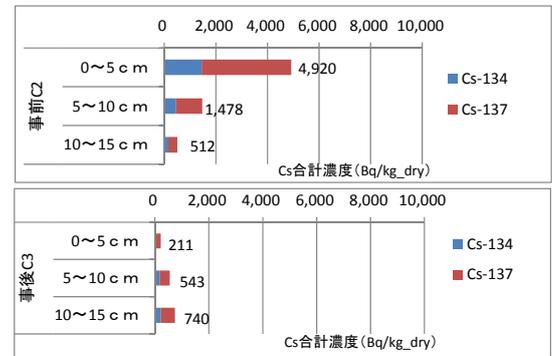


図-15 同一地点(事前 C2-事後 C3) での Cs 濃度変化

事後 C1~C3 は放射性物質量が低減している (図-13~14) が、事後 C4 については、表面汚染密度が高く、15cm 程度の比較的高濃度の土層が存在する (表-3)。

事後の考察として、事後 C4 周辺のような、Cs 濃度の高い細粒分の層が厚く堆積している箇所については、改良深度を下げた対応が必要であった。今後、水底土砂の除染を行う上で、バラつきの大きな底質の平面的な汚染分布の把握とともに、深度方向の汚染分布についても把握する必要がある。

3) シンチレーションファイバーによる面的な放射線量の確認

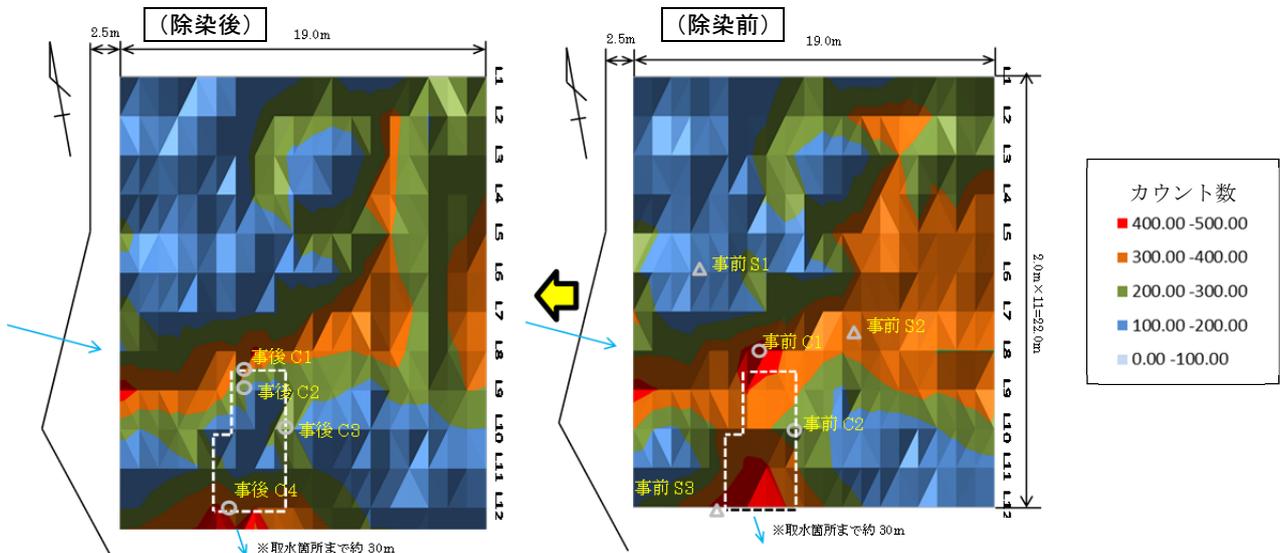


図-16 シンチレーションファイバーによる測定結果マッピング図 (事前事後計測結果比較)

除染後の測定結果から、水底面の放射線量は施工範囲 (白色破線) 内で大きく低下している。

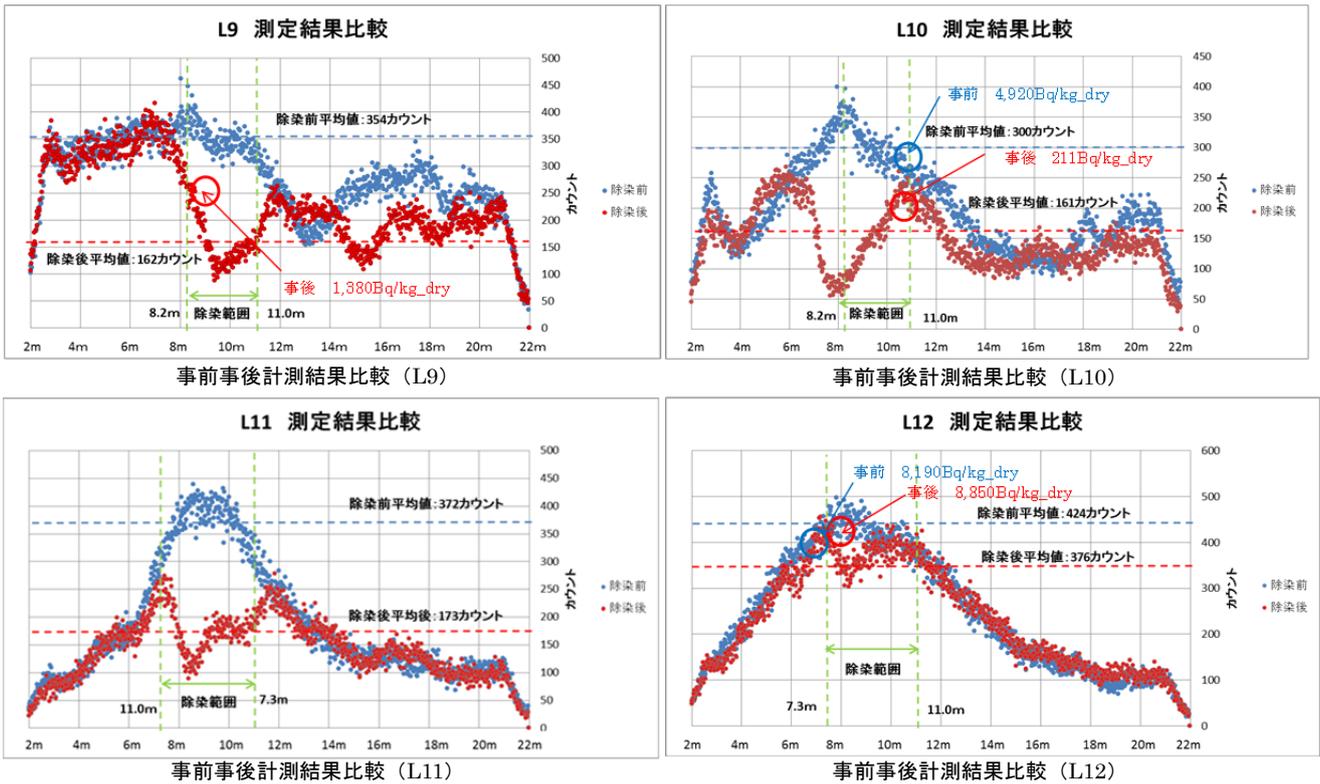


図-17 シンレーションファイバーによる測定結果（事前（青色）・事後（赤色）比較）
 ○はサンプル採取位置、除染実施範囲の除染前後の平均カウント数を表記
 事前事後サンプルとも、最大値・最小値を採取できていない。

L10～L12 では、除染範囲について大きく放射線量が低下しているが、L12 では、低下が少ない。

L12 周辺は「前記 2)」より、改良後の土壤に 15cm 程度の深さまで比較的高濃度の放射性 Cs が存在することがわかっており、10cm の改良深度では当地点では改良深度不足であった。

(4) 改良効果の把握

1) 収支確認方法①

同一地点（事前 C2、事後 C3）での放射性物質濃度の鉛直分布の変化より試算

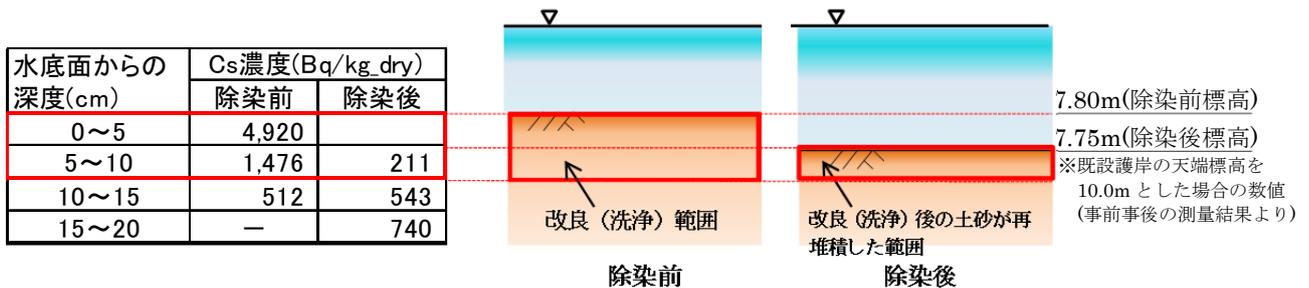


図-18 分級による除染効果の説明

上記の結果から単位面積当たりの除染率等を試算する。

表-4 単位面積 (1m²) 当たりの収支計算結果

単位面積 (1m²) 当たりの試算結果より収支確認

深度	含水比	改良量 (m ³)	比重 (kg/m ³)	土量 (kg_wet)	土量 (kg_dry)	Cs濃度 (Bq/kg_dry)	Cs量 (Bq)
改良前	表層 5cm	150%	0.05	1,337	66.9	4,920	131,856
	5～10cm	75%	0.05	1,562	78.1	1,478	65,919
	計		0.10		145.0	71.4	197,775
改良後	表層 5cm	233%	0.05	1,233	61.7	211	3,884

除染率 = (改良前Cs量 - 改良後Cs量) / 改良前Cs量 = (197,775 - 3,884) / 197,775 = 0.980 98.0%

減量率 = (改良前土量 - 回収した土量 (=改良前土量 - 改良後土量)) / 改良前土量 = (71.4 - (71.4 - 18.5)) / 71.4 = 0.259 25.9%

2) 収支確認方法②(参考値)

PSF による放射線量の面的測定結果を利用し、サンプリングによる放射性物質濃度 (Bq/kg_dry) との相関から、改良対象の全 Cs 量を推計し、回収した Cs 量との比較より収支を確認する。

注) 相関関係は認められるが、サンプル数が少ないため精度の良い直線近似式とは言えず、参考値扱いとする。

表-5 PSF 測定値と放射性物質濃度の比較

採取位置	PSF番号	PSF測定値	PSFカウント数	Bq/kg_dry	
事前	C1	L8	7m	425	6990
	C2	L10	9m	273	4920
	S1	L6	4m	119	292
	S2	L7	12m	353	836
	S3	L12	5m	403	8190
事後	C1	L8,L9	7m	287	1122
	C2	L9	7m	256	1380
	C3	L10	9m	214	211
	C4	L12	6m	421	8850
相関係数				0.793752	

事後C1データのPSF値はL8,L9の平均値

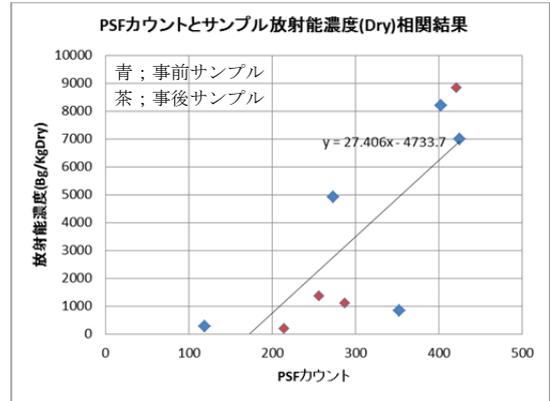


図-19 PSF 測定値と放射性物質濃度の相関関係

表-6 除染前後の PSF 測定値と放射性物質濃度の比較

除染前後における除染エリア平均カウントの変化

測線	除染前	除染後	差
L9	354	162	-192
L10	300	161	-139
L11	372	173	-199
L12	424	376	-48

除染前後における除染エリア平均Cs濃度の変化 (Bq/kg_dry)

測線	除染前	除染後	差
L9	4,968	0	-4,968
L10	3,488	0	-3,488
L11	5,461	8	-5,454
L12	6,886	5,571	-1,315

y = 0 以下の計算結果は 0 として表記。

含水比 $\omega = 246\%$ 、土粒子の密度 $\rho_s = 2.52 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ 、水の密度を $\rho_w = 1.00 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ の場合の土砂の見かけの比重 $\gamma \text{ (g/cm}^3\text{)}$

$$\gamma = (1 + \omega) / (\omega / \rho_w + 1 / \rho_s) = (1 + 2.46) / (2.46 / 1.00 + 1 / 2.52) = 1.211 \text{ (g/cm}^3\text{)} = 1,211 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

以上より、改良範囲の全 Cs 量を算出。

a) 除染前の全 Cs 量の算出

表-7 除染前の総土量および Cs 量の算出結果

PSF測線	平均Cs濃度 (Bq/kg_dry)	改良範囲				土量 (m³)	単位容積質量 (kg_wet/m³)	改良土量 (kg_wet)	改良土量 (kg_dry)	改良範囲Cs量 (Bq)
		幅 (m)	長さ (m)	面積 (m²)	深度 (m)					
L9	4,968	2.0	2.8	5.6	0.1	0.56	1,211	678.2	196.0	973,733
L10	3,488	1.6	2.8	4.5	0.1	0.45	1,211	545.0	157.5	549,376
L11	5,461	2.4	3.7	8.9	0.1	0.89	1,211	1,077.8	311.5	1,701,205
L12	6,886	1.3	3.7	4.8	0.1	0.48	1,211	581.3	168.0	1,156,923
		7.3		23.8		2.38		2,882.3	833.0	4,381,236

b) 除染により回収した Cs 量

泥水として回収した細粒分は、脱水処理を行った上でフレコンバッグに回収した。

表-8 フレコンバッグに回収した物質質量

	回収量 (kg_dry)	Cs濃度 (Bq/kg_dry)	放射性物質質量 (Bq)
1袋目	237	5,810	1,376,970
2袋目	293	5,560	1,628,080
3袋目	321	3,550	1,139,550
計	851	4,871	4,145,600

無機系凝集剤添加量 120kg_dry

回収した土量 851-120=731 (kg_dry)

洗浄後水底に残した土量 833-731=102 (kg_dry)

未回収の Cs 量

$$4,381,236 - 4,145,600 = 235,636 \text{ (Bq)}$$

除染率 = (改良前 Cs 量 - 改良後 Cs 量 (=改良前 Cs 量 - 回収した Cs 量)) / 改良前 Cs 量

$$= (4,381,236 - (4,381,236 - 4,145,600)) / 4,381,236 = 0.946 \text{ (=94.6\%)}$$

減量率 = 改良後存置土量 / 改良前土量

$$= 102 / 833 = 0.122 \text{ (=12.2\%)}$$

2.3 参考（モデル実験設備による分級洗浄効果の把握）

洗浄効果を定量的に把握するため、「予備実証実験（1）モデル実験」で使用した実験設備を実地試験場所へ搬入し、現地水底土砂を採泥し以下の手順でモデル実験を実施した。

- ・ 現地水底土砂を採泥⇒粗粒分の含有が少ないため、分級効果把握のため購入砂添加。
- ・ 均質な試料となるように攪拌混合を実施した上で、4 ケース分に試料分割。
- ・ モデル実験設備に模擬底泥を 0.025m³ 投入し分級洗浄を実施。
- ・ 実験ケース毎に事前サンプルと粗粒分・細粒分の後サンプルの放射性物質濃度、質量、含水比を測定し、乾燥質量当たり換算した物質質量（固型物質量、放射性物質質量）から物質の収支を確認した。

モデル実験実施ケース

- 【Case-1】 水洗浄のみ（超音波・CAV-J なし）
- 【Case-2】 超音波洗浄のみ（CAV-J なし）
- 【Case-3】 CAV-J のみ（超音波なし）
- 【Case-4】 超音波+CAV-J

A 模擬底泥	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
Cs濃度(Bq/kg dry)	5,370	5,430	5,110	5,950
cs量(Bq)	53,593	54,517	51,304	68,723
土量(kg dry)	9.98	10.04	10.04	11.55

モデル実験水槽内で分級

B 細粒分（泥水として回収）	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
Cs濃度(Bq/kg dry)	7,082	7,048	6,869	6,662
cs量(Bq)	56,942	46,307	42,723	58,025
土量(kg dry)	8.04	6.57	6.22	8.71

B' 凝集材添加量(kg)	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
	0.60	0.75	0.75	0.75

※実際の計量は脱水袋毎(1or2)、およびモデル実験水槽に残留したものを個別に計測
本表には便宜的に、全量で記載(Cs濃度はCs量を固形物質量で除算)

C 粗粒分（洗浄後）	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
Cs濃度(Bq/kg dry)	362	249	278	191
cs量(Bq)	1,405	974	1,015	714
土量(kg dry)	3.88	3.91	3.65	3.74

D 処理水（洗浄使用後、濁水処理）	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
Cs濃度(Bq/L)	0	0	0	0
cs量(Bq)	0	0	0	0
処理水量(L)	900	1,200	1,200	1,200

放射性物質質量収支の確認	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
処理量-回収量=A-(B+C+D)	-4,754	7,236	7,566	9,984
誤差 (A-(B+C+D))/A	-0.09	0.13	0.15	0.15

土量収支の確認	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
処理量-回収量=A-((B-B')+C)	-1.34	0.31	0.92	-0.15
誤差 (A-(B-B')+C)/A	-0.13	0.03	0.09	-0.01

※誤差の要因は、主としてサンプルのバラつき(含水比、Cs濃度)による。

放射性物質濃度低減率 =1-C/A (Bq/kg dry)	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
	93.3%	95.4%	94.6%	96.8%

減量率 =(A-B)/A (kg dry)	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
	19.4%	34.6%	38.0%	24.6%

除染率 =(A-C)/A (Bq)	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
	97.4%	98.2%	98.0%	99.0%

図-20 モデル実験結果集計

①除染効果等の確認結果

・Case-1（水洗浄のみ）

最も効果が低いが、本モデル実験装置による循環洗浄にも一定の効果（濃度低減率 93%）は確認できた。

・Case-2（超音波のみ）

Case-1 の濃度低減率 93%に対して、Case-2 の濃度低減率は 95%となり、超音波による追加効果が確認できた。

・Case-3（CAV-Jのみ）

Case-1 の濃度低減率 93%に対して、Case-3 の濃度低減率は 95%となり、CAV-Jによる追加効果が確認できた。

・Case-4（超音波+CAV-J）

Case-1 の濃度低減率 93%に対して、Case-4 の濃度低減率 97%となり、最も追加効果が高いことが確認できた。

・まとめ

超音波と CAV-J を併用する Case-4 の効果が最も高く、プロトタイプモデルの仕様が妥当であることを確認した。

Case-2 (95.4%)、Case-3 (94.6%) の濃度低減率の差については有意なものではないと判断する。

②マスバランスの確認結果

土量収支としては、Case-2 および Case-4 の誤差が小さく、Case-1、Case-3 の誤差が大きい。放射性物質質量収支としては Case-1 のみ回収量が多く、その他の Case では回収量が少ない。誤差は Case-1 が+9%、その他の Case が-15%となった。

誤差の発生要因として、サンプルの細粒分のバラつきが大きいことがあげられる。細粒分は、泥水として鋼製水槽に回収したものを水中ポンプで濁水処理機へ送泥し、凝集沈殿処理を行った後に脱水袋（1～2袋）に回収している。サンプルは脱水袋毎に個別になるべく均質なものとなるように採取したが、処理手順より初期に粒径の小さなもの、後期に粒径の大きなものの含有が多くなることが避けられず、細粒分のサンプル自体の Cs 濃度のバラつきが大きくなる事を避けられなかった。

粗粒分については、洗浄工程（攪拌）により均質なサンプルとなっており、誤差の少ないデータ採取が可能であるため、濃度低減率および除染率の算出結果の信頼度が高い。

実施代表者の所属機関: 福島小松フォークリフト株式会社

実証テーマ名: 緑地除染における省力化【緑地・土壌向け破砕吸引システム】

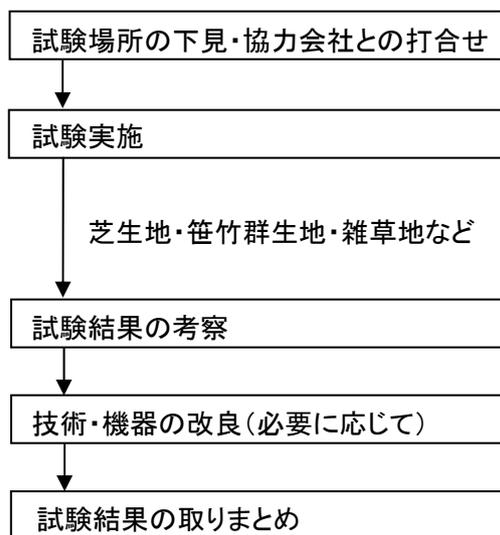
事業の概要: 公園や住宅地、里山(住居等近隣の林縁から 20メートル)における除染のための芝生地や笹竹群生地の深刈り作業について、機器を使用した効果的・効率的な作業が可能であることを実証する。

実施内容:

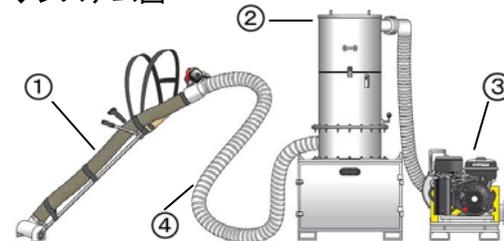
- ◆緑地除染における省力化【緑地・土壌向け破砕吸引システム】に関する技術を開発
- ◆当技術を使用した際の従来作業との各種効率、効果の測定と比較
 - ・作業効率(作業時間・作業人数)の測定と比較
 - ・除去物量の測定と比較
 - ・表面汚染密度の低減効果の測定と比較

技術概要:

◆試験フロー



◆システム図



【緑地・土壌向け破砕吸引システム】

システムは①バキュームトップと呼ばれる吸引先端部、②回収物を収納するフィルター付集塵ボックス、③吸引の原動力となるエンジン式ブロワーの3つの機器から構成されています。④ホースは25～50メートルまで汎用可能。バキュームトップの先端で土壌表面の芝や雑草を破砕し、強力な吸引で集塵ボックスに集めることができます。

◆試験目標

- ・作業効率の向上(従来の手作業に対し作業時間、作業人数の低減)
- ・手作業と同等の地表面線量率低減効果

◆期待される効果

- ・作業効率の向上に伴い、作業面積が拡大される。
- ・芝や笹などの地下茎を粉砕しながら回収することで、除去物容量が低減される。

その他:

- ・フレキシブルコンテナバッグへの回収仕様の検討
- ・芝や笹などの有機物と土壌を分けて回収する仕様の検討

除染効果	①線量低減効果比較、②作業時間比較							
①【地上 1cm の土壤掘削作業前後空間線量率比較(測定ポイント 5 箇所平均)】(単位: μ Sv/h)								
対象地	芝生地				笹竹群生地			
作業手法	機器作業		手作業		機器作業		手作業	
測定時期	作業前	作業後	作業前	作業後	作業前	作業後	作業前	作業後
コリメータ無	0.73	0.25	0.62	0.26	1.24	0.54	1.47	0.55
コリメータ有	0.26	0.07	0.22	0.08	0.38	0.12	0.44	0.13
◆以上の結果から、機器作業も手作業も同等の低減効果があることがわかる。								
②【土壤掘削から袋詰めまでの作業時間比較(16 m ²)】(作業効率:手作業を 1 とした場合)								
	作業手法	作業時間	人数	1人工作業に換算した場合	作業効率			
芝生地	手作業	1 時間 21 分 0 秒	3 人	4 時間 3 分 0 秒	1			
	機器作業	1 時間 24 分 3 秒	2 人	2 時間 48 分 6 秒	1.45 倍			
笹竹地	手作業	2 時間 50 分 48 秒	3 人	8 時間 32 分 24 秒	1			
	機器作業	1 時間 43 分 24 秒	2 人	3 時間 26 分 48 秒	2.48 倍			
◆以上の結果から、手作業より人数が少なく済み、作業効率が上がることがわかる。								
除去物発生量評価	表土深さ方向の放射能濃度分布の結果から、掘削深さの目標値を 3cm と設定し掘削作業を行った。							
【芝生地土壤掘削作業時(16 m ²)の実績】(掘削深さ測定ポイント 5 箇所平均)								
作業手法	除去物体積	平均掘削深さ	除去物重量	0.1 m ² 当り重量				
手作業	0.771 m ³	3.14cm	528.0kg	68.5kg				
機器作業	0.596 m ³	3.56cm	484.5kg	81.3kg				
◆手作業による均一な掘削は難しいが、機器ではほぼ均一に削れるため土壤除去量が少ない。								
◆機器先端で破碎しながら収集するため、手作業に比べ除去物の容量を減容できる。								
作業員被ばく量評価	福島県郡山市、南相馬市にて実証試験を 16 日間実施した。							
◆作業場所平均空間線量率(地上 100cm)0.45 μ Sv/hr、最大作業時間 112.5 時間								
◆作業員最大被ばく量 49 μ Sv(作業担当箇所:掘削、測定作業 作業時間:112.5 時間)								
◆作業員平均被ばく量 19 μ Sv(平均作業時間:43 時間)								
コスト評価				歩掛り(作業人工、作業速度)				
1,365 円/m ² (芝生地)、2,208 円/m ² (笹竹群生地)				8~19 m ² /hr(対象および掘削深さによる)				
コスト評価条件	緑地状況(自生植物量、堆積物量、含水率等)、掘削深さ、作業面積、機器レンタル期間等により変動する。今回は面積 1000 m ² 、掘削深さ 30mm、分別作業時で計算した。							
除染作業における安全上の注意								
◆マスク、ゴーグル、長靴、ヘルメットまたは帽子、ゴム手袋着用 ◆機器取扱い注意								
試験場所(住所)	除去物保管場所と保管状況							
福島県郡山市	郡山市五百淵公園(埋設)と南相馬市民家(地上)にて保管。保管状況は添付資料参照。尚、仮置き場が設置された段階で移動する。							
福島県南相馬市								



(1) 線量低減効果

① 自生植物および堆積物の除去による線量低減効果

土壌掘削をせずとも、自生植物や落葉などの堆積物を除去しただけで除染効果が得られるか、人が出入りする芝生地と、原発事故後に人がほとんど出入りせず、ほぼ手付かずの笹竹群生地で検証した。(作業面積: 16 m²)

【自生植物および堆積物の除去前後の空間線量率、表面汚染度比較(測定ポイント平均値)】

測定方法		地上 100cm 空間線量率(μSv/h)		地上 1cm 空間線量率(μSv/h)		地上 1cm 表面汚染密度(cpm)	
		無し	有り	無し	有り	無し	有り
コリメータ		無し	有り	無し	有り	無し	有り
芝生地	作業前	0.65	0.70	0.25	0.25	329	183
	作業後	0.65	0.68	0.24	0.24	363	197
	低減率	0.0%	2.9%	4.0%	4.0%	-10.3%	-7.7%
笹竹群生地	作業前	1.09	1.38	0.44	0.44	692	348
	作業後	1.04	1.36	0.41	0.41	732	422
	低減率	4.6%	1.4%	6.8%	6.8%	-5.8%	-21.3%

◆結果:空間線量率はほとんど下がらず、表面汚染密度は上昇する結果となった。

原発事故後に人の出入りがある芝生地も、ほぼ手付かざる笹群生地も、地表に残る自生植物や堆積物の除去だけでは、除染効果が低いことが確認された。そのため、土壌の掘削作業を実施し除去することが必要である。



刈払い

収集

【芝生地作業】



刈払い

収集

【笹竹群生地作業】

② 土壌掘削のための掘削深さ選定

除去物排出量削減のためにも、その汚染状況に合った掘削深さを選定する必要があるため、土壌掘削前にスクレーパープレートによる削土をおこない土壌内放射能濃度測定を実施した。



【スクレーパープレートによる土壌掘削作業例】

【試験エリアにおける土壌内放射能濃度分布】 ※比率は0～5cmまでの全体を100%とした場合

地層深さ		0～1cm	1～2cm	2～3cm	3～4cm	4～5cm
芝生地	放射能濃度(Bq/kg)	6190	12833	5483	1937	722
	比率(%)	22.8	47.2	20.2	7.1	2.7
笹竹群生地	放射能濃度(Bq/kg)	65050	15600	3695	1575	839
	比率(%)	75.0	18.0	4.3	1.8	0.9

◆結果：芝生地は日当たりもよく、表土近くが砂地で浸透しやすい状況であったため、1～2cmでの放射能濃度が最も高かった。笹竹群生地は雑木林の中にあり、日当たりが悪く粘土質で水捌けも悪いため、地下へ浸透しにくい地層であり、0～1cmの放射能濃度が最も高かった。

今回の試験地では、表土深さ方向に30mm掘削することで90%以上のセシウムを除去できることが確認された。



【芝生地作業面参考】



【笹竹群生地作業面参考】

③ 土壌掘削作業による線量低減効果

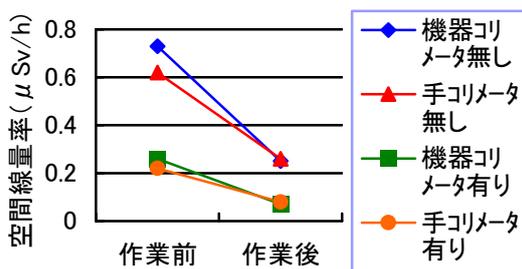
放射能濃度分布データを基に土壌掘削深さを 30mm に設定し、機器作業および手作業による土壌掘削作業を実施した。それぞれの試験地での線量低減効果を比較する。(作業面積: 16 m²)

【芝生地における土壌掘削作業前後の空間線量率、表面汚染度比較(測定ポイント平均値)】

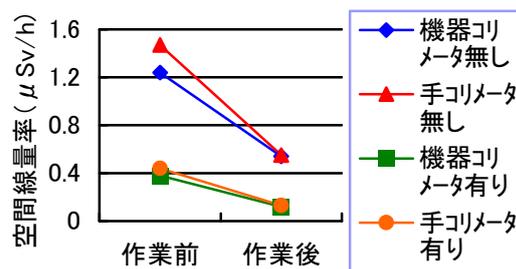
測定方法		地上 100cm 空間 線量率(μSv/h)	地上 1cm 空間 線量率(μSv/h)		地上 1cm 表面 汚染密度(cpm)	
コリメータ		無し	無し	有り	無し	有り
機器作業	作業前	0.69	0.73	0.26	398	214
	作業後	0.47	0.25	0.07	163	99
	低減率	31.9%	65.8%	73.1%	59.0%	53.7%
手作業	作業前	0.61	0.62	0.22	328	180
	作業後	0.42	0.26	0.08	196	108
	低減率	31.1%	58.1%	63.6%	40.2%	40.0%

【笹竹群生地における土壌掘削作業前後の空間線量率、表面汚染度比較(測定ポイント平均値)】

測定方法		地上 100cm 空間 線量率(μSv/h)	地上 1cm 空間 線量率(μSv/h)		地上 1cm 表面 汚染密度(cpm)	
コリメータ		無し	無し	有り	無し	有り
機器作業	作業前	0.98	1.24	0.38	676	385
	作業後	0.78	0.54	0.12	320	177
	低減率	20.4%	56.5%	68.4%	52.7%	54.0%
手作業	作業前	1.10	1.47	0.44	787	459
	作業後	0.75	0.55	0.13	318	171
	低減率	31.8%	62.6%	70.5%	59.6%	62.7%



【芝生地地上1cm空間線量率】



【笹竹群生地地上1cm空間線量率】

◆結果: 作業前線量率に差があっても、作業後の線量率にはほぼ差が無くなることが確認された。
機器作業と手作業の違いによる除染効果にほとんど差が無いことが確認された。

■考察: 作業手段によって除染効果が変わるのではなく、作業箇所の汚染状況や地質等の状況を検討したうえで、どこまで掘削すれば除染効果が得られるか判断することが重要。

(2) 作業効率

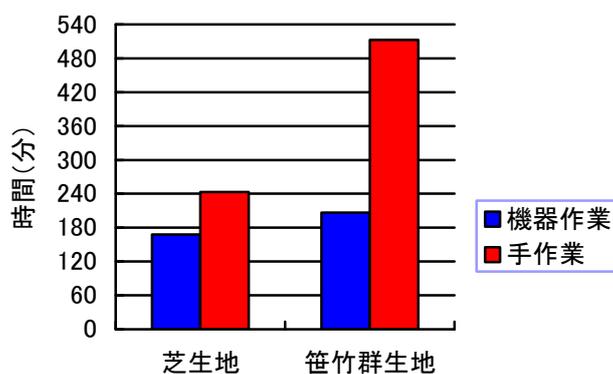
① 土壌掘削作業時間

機器作業では土壌掘削と同時に回収、袋詰め作業が行われることから、機器作業と手作業それぞれの土壌掘削作業および袋詰め作業の合計時間を比較した。機器作業では、集塵ボックス内の袋交換時間も含めて測定する。

【土壌掘削および袋詰め作業時間(作業面積:16 m²)】

試験地	芝生地		笹竹群生地	
	機器作業	手作業	機器作業	手作業
作業時間	1時間 24分 3秒	1時間 21分 0秒	1時間 43分 24秒	2時間 50分 48秒
人数	2名	3名	2名	3名
一人換算	2時間 48分 6秒	4時間 3分 0秒	3時間 26分 48秒	8時間 32分 24秒

※一人換算とは、作業を一人工で実施したと換算した場合の値(計算式:作業時間×人数)



【一人換算作業時間比較】

◆結果:機器を使用することで、手作業よりも少ない人数で同じ面積を作業できることが確認された。作業人数に差があるので一人換算で比較した場合、芝生地では1時間15分ほど、笹群生地では5時間15分ほど機器作業の方が早かった。

また、試験地の状態(地下茎の有無、土質、含水率等)の違いにより、同じ面積を施工しても作業時間に差が出ることが確認された。特に手作業の差が大きい。



掘削前



掘削作業



掘削作業近景



作業後

【芝生地機器作業】



【芝生地手作業】



【笹竹群生地機器作業】



【笹竹群生地手作業】

②自生植物および堆積物回収作業時間

笹竹群生地における刈払い作業後の自生植物(笹竹、雑草等)および落葉等の堆積物を除去する際、機器作業と手作業の時間を比較した。機器作業では破碎しながら収集するため減容効果もあるが、手作業での減容作業には別途破碎機等が必要なため、袋詰め収集までの作業とした。

【笹竹群生地における自生植物および堆積物回収作業時間】

作業手段	機器作業	手作業
作業時間	17分 32秒	21分 31秒
人数	2名	2名

◆結果: 機器作業では自生植物と堆積物を分けることなく、同時に破碎・吸引・減容することができるため、作業時間が短く回収体積も小さくなることが確認された。手作業で回収した除去物を減容しようとする、別途工程が必要となり効率が悪くなる。



③回収容器容量の差による機器作業時間

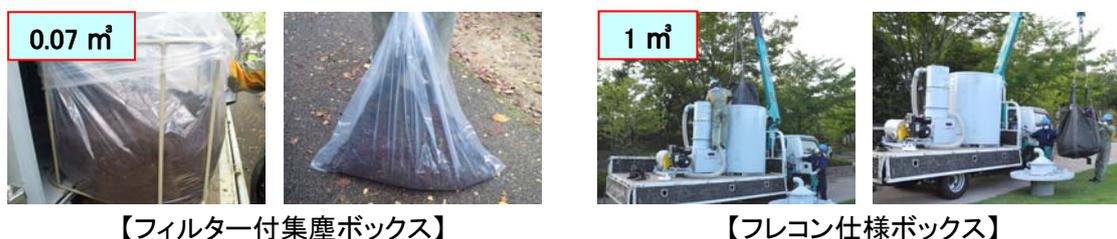
土壤掘削機器作業において、除去物回収時の容器容量の差による作業時間の差を比較した。

【機器による芝生地土壤回収および袋詰め作業時間(作業面積:16 m²×2)】

回収容器	フィルター付集塵ボックス(0.07 m ³)	フレコン仕様ボックス(1 m ³)
袋交換回数	8回	1回
袋交換に要した時間	18分6秒	5分39秒

※フィルター付集塵ボックスは手作業、フレコン仕様ボックスはクレーン作業にて交換

◆結果:回収容器容量が大きいほど作業時間が早いことが確認された。除去量(作業面積)が増えるほどこの差は大きくなる。



■考察:機器を使うことで手作業よりも少ない人員と短い時間で同じ面積の作業が可能で、更に、容量の大きいフレコン仕様ボックスに回収することで、作業時間の短縮が可能である。また、機器作業は破碎・減容も同時に行うため、回収物の減容作業が必要な場合は更なる時間短縮が可能である。

今回の試験地は、芝生地、笹竹群生地ともに地下茎が存在しており、特に笹竹群生地の地下茎は発達しているため、手作業での掘削は困難を極めた。緑地の状況(自生植物、土質、地下茎など)により、手作業では作業時間に大きな差がある場合も、機器作業ではその差が小さく、作業時間も計算しやすいと思われる。

今回の試験は16 m²という面積だったが、1日中作業をした場合、手作業では疲労が蓄積され、効率は更に悪くなるとと思われる。様々な自生植物が混在する自然条件下では、機器作業の方が安定した作業効率が見られる。

(3) 除去物発生量

① 除去土壌発生量

芝生地と笹竹群生地において、機器作業、手作業それぞれどれくらいの除去物量が発生したか、重量と体積量を測定した。(作業面積: 16 m²)

【回収土壌の重量および体積】

試験地	芝生地		笹竹群生地	
	機器作業	手作業	機器作業	手作業
総重量	484.5kg	528.0kg	310.0kg	742.5kg
総体積量	0.596 m ³	0.771 m ³	0.448 m ³	0.950 m ³
1 m ² 当りの体積	0.037 m ³	0.048 m ³	0.028 m ³	0.059 m ³

◆結果: 深さ30mm ちょうどに掘削した場合の計算上の体積量は0.48 m³となるが、全体的に多い傾向となった。特に手作業の除去体積量が多くなることがわかった。

② 土壌掘削深さ測定

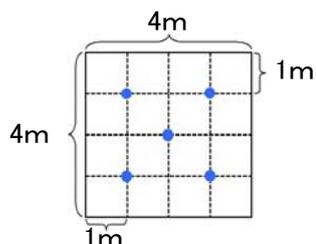
機器作業と手作業での除去土壌の体積量に差があることから、それぞれの試験地で測定した土壌掘削深さを比較してみる。(測定ポイント5箇所)

【土壌掘削深さ(単位:mm)】

測定ポイント		1	2	3	4	5	平均値	最大差
芝生地	機器作業	28	35	47	35	33	35.6	19
	手作業	41	37	22	29	28	31.4	19
笹竹群生地	機器作業	22	22	19	30	23	23.2	11
	手作業	8	44	70	30	57	41.8	62

◆結果: 土壌内放射能濃度分布から掘削深さ 30mm を目安に作業したが、機器作業、手作業ともに掘削深さにばらつきがあった。

芝生地では測定ポイントごとの最大差が両作業とも19mm だったが、笹竹群生地では機器作業の最大差が11mm であったのに対し、手作業の最大差が62mm であった。



【測定ポイントイメージ】



【測定イメージ】

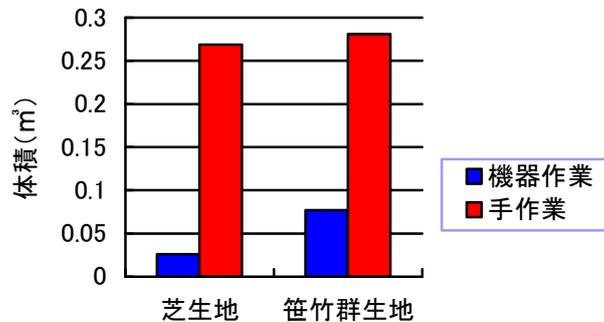
③除去土壌量実績と理論値比較

土壌掘削作業時の除去土壌量実績と、平均掘削深さから求められる除去土壌理論値とを比較してみる。この差が大きいほど、作業地の掘削に凹凸が大きいことが考えられる。

【除去土壌量実績と平均掘削深さから求められる理論値】

試験地	芝生地		笹竹群生地	
	機器作業	手作業	機器作業	手作業
作業手段				
平均掘削深さ	35.6mm	31.4mm	23.2mm	41.8mm
実測体積(m ³)	0.596	0.771	0.448	0.950
理論値の体積(m ³)	0.570	0.502	0.371	0.669
実測体積から見た理論値との差(m ³)	+0.026	+0.269	+0.077	+0.281

※理論値計算式：試験エリア面積 16 m² × 平均掘削深さ(m)



◆結果：機器作業に比べ手作業の差が大きいことが確認された。実績体積から見た理論値との差を比べると、手作業では芝生地で0.269 m³、笹竹群生地で0.281 m³多く掘削除去していたこととなる。手作業による土壌掘削作業では、均一的な掘削が難しく凹凸が大きいことが確認された。

■考察：芝生地では、手作業に比べ機器作業の平均掘削深さが深いにもかかわらず、除去体積量は手作業の方が多いため、手作業では測定値以上に凹凸が大きかったと考えられる。笹竹群生地において手作業の掘削最大差が62mmもあったことを見ても、手作業による掘削は緑地状況(地下茎、土質等)から受ける影響が大きいため、凹凸が大きいため除去物量も増える傾向にある。

機器を使用した場合、平均掘削深さから計算される理論値との差を見ても、手作業に比べ均一的な掘削作業が可能であり、除去物量の計算もしやすいと思われる。更に、地下茎などが混在した場合は破碎による減容効果も見込める。

仮置き場への余分な除去物搬入量削減のためにも、機器を使用することが望ましい。

(4)コスト

ここまでの結果と以下条件にて、笹竹群生地作業時のコストをシミュレーションしてみる。

【条件】	・1日あたり作業時間:6時間40分	・自生植物および堆積物は減容し土壌と分別する
	・土壌掘削深さ:30mm	・自生植物および堆積物回収量:0.07 m ³ /10 m ²
	・土壌回収量:0.3 m ³ /10 m ²	・刈払い作業時間:2分30秒/10 m ²
	・機器作業員3名(交代員追加)	・手作業員:5名(減容作業員と交代員追加)

以上条件と結果を組み合わせると、作業面積は機器作業 50 m²/日、手作業 35 m²/日となる。

【笹竹群生地 1000 m²機器作業時のコストシミュレーション】

種別	詳細	単位	数量	単価	金額
機器レンタル経費	破碎・吸引システム	日	20	25,000	500,000
車両レンタル経費	軽トラック	日	20	6,000	120,000
労務費	作業員	人	60	18,000	1,188,000
消耗品費	破碎ブレードセット	式	4	15,000	60,000
消耗品費	一次フィルター	個	1	50,000	50,000
消耗品費	破碎部吸引ホース	個	1	20,000	20,000
消耗品費	標準回収袋	式	11	15,000	165,000
雑費	ガソリン代等	%	5		105,000
合 計					2,208,000

【笹竹群生地 1000 m²手作業時のコストシミュレーション】

種別	詳細	単位	数量	単価	金額
機器レンタル経費	破碎減容機	日	29	10,000	290,000
車両レンタル経費	軽トラック	日	29	6,000	174,000
労務費	作業員	人	145	18,000	2,610,000
消耗品費	標準回収袋	式	11	15,000	165,000
雑費	ガソリン代等	%	3		97,000
合 計					3,336,000

※レンタル品は、レンタル期間やレンタル会社により変動する。消耗品は価格変動の場合あり。

◆結果

	合計コスト	1 m ² 当りコスト	コスト比率
機器作業	2,208,000 円	2,208 円	1
手作業	3,336,000 円	3,336 円	1.5

◆考察: 機器作業は同じペースで作業できるが、手作業は腰を曲げた状態での作業が続くため、作業面積が増えるほど疲労の蓄積により効率が落ちると思われる。原発事故以降荒れ放題になっている土地などでは、これ以上に作業時間もコストもかかると思われる。芝生地機器作業シミュレーションでは作業面積 85 m²/日、1 m²当りコストが 1,365 円となる。

(5) 効果的な機器作業方法

今回の結果を踏まえ、理想的と思われる落葉および草木と土壌を分別回収する作業方法を示す。

- i) 木の枝、倒木などはあらかじめ取り除く
- ii) 丈が高い(20cm以上)の自生植物や、笹竹など丈夫な植物がある場合は刈払いをする。
- iii) 刈り払った植物および残った自生植物と落葉などの堆積物を回収する。
- iv) 土壌回収作業をする。

以下、線量低減目標まで土壌回収作業を繰り返す。



i) 枝等の除去

ii) 刈払い

iii) 笹と落葉のみ回収

iv) 土のみ回収

【笹竹群生地における分別回収の工程イメージ】



分別回収した芝

分別回収した土

同時回収した芝と土

【芝生地にて回収した除去物】

【まとめ】

- 機器作業でも手作業でも、空間線量率及び表面汚染密度が同等程度まで下がることを確認した。作業箇所の汚染状況や地質等の状況を検討したうえで、どこまで掘削すれば除染効果が得られるか判断することが重要。
- どの試験対象地においても、手作業に比べ機器作業の方が早く作業できることを確認した。更に、容量の大きいフレコン仕様ボックスに回収することで、作業時間の短縮が可能である。また、機器作業は破碎・減容も同時に行うため、回収物の減容作業が必要な場合は更なる時間短縮が可能である。
緑地の状況(自生植物、土質、地下茎など)により、手作業では作業時間に大きな差がある場合も、機器作業ではその差が小さく作業時間も計算しやすい。
- 手作業による均一な掘削は難しいが、機器作業ではほぼ均一に掘削できるため、除去土壌量が少なくなることを確認した。手作業による掘削は緑地状況(地下茎、土質等)から受ける影響が大きいため、凹凸が大きくムラが出やすいため除去物量も増える傾向にあるが、機器を使用した場合、手作業に比べ均一的な掘削作業が可能であり、除去物量の計算もしやすく、仮置き場への余分な除去物搬入量を削減できる。
- 機器作業では、自生植物や堆積物、地下茎を粉碎しながら回収するため、除去物容量を減容できる事を確認した。手作業で回収した除去物を減容しようとすると、別途工程が必要となる。

実施代表者の所属機関：株式会社大林組

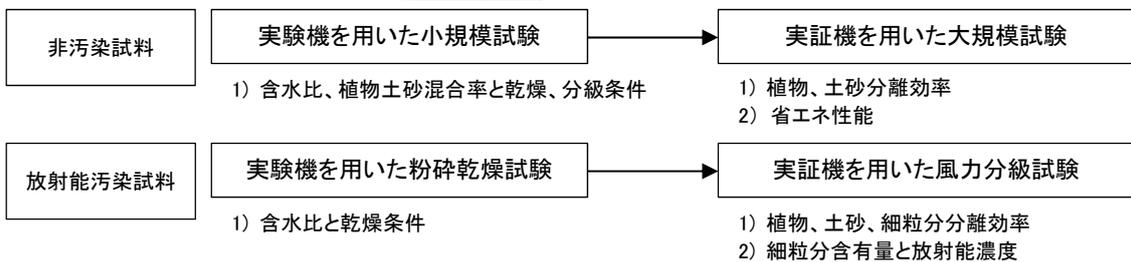
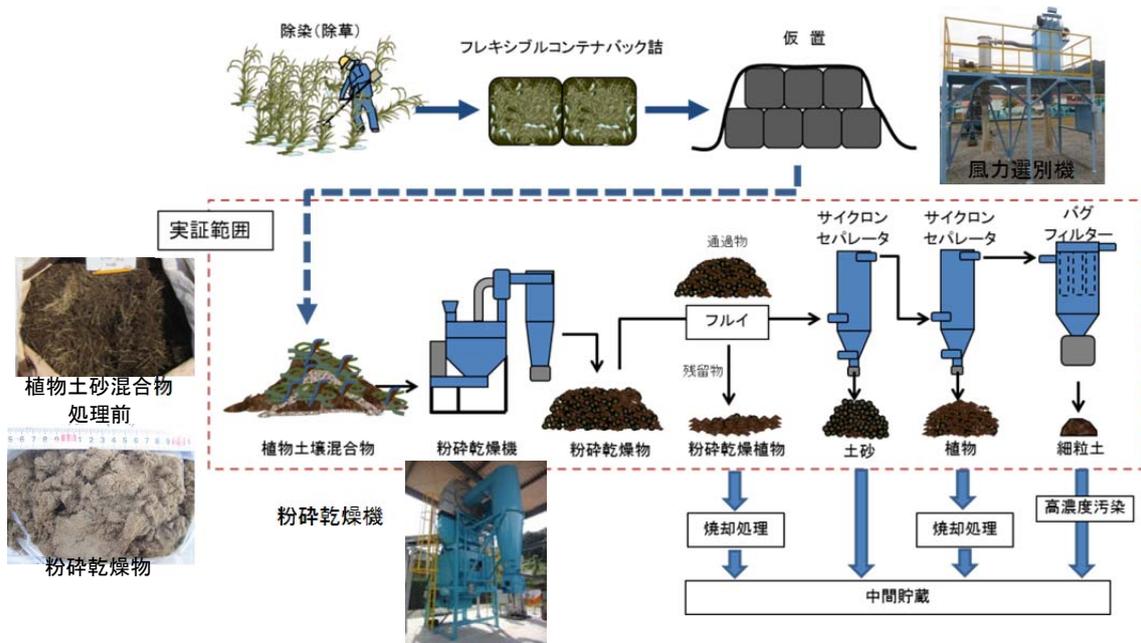
実証テーマ名：植物及び土砂混合物乾燥分級技術の実証

事業の概要：除染された植物には多くの土砂が混入したまま仮置され腐敗し、含水比も高い物がある。この分級困難物である植物土砂混合物を粉碎乾燥し、土砂を分級除去することで、焼却処理量の減量化、焼却する植物の放射能濃度の低減効果を実証する。

実施内容：実験機器を用いた小規模試験によって、様々な含水比や植物土砂混合条件で、乾燥状況、分級状況を検証し、大規模実証機器で、植物土砂混合物の乾燥分級による土砂の除去効率を実証する。また、放射能汚染された植物土砂混合物を用いて、分級された植物の放射能濃度低減効果を把握する。

1.試験フロー

含水比が高い腐食した植物土砂混合物を粉碎乾燥装置で、粉碎、乾燥し、次に風力分級機で焼却処理対象物である植物から土砂を分離し、焼却処理量を減量化する。



2.試験目標

- 実展開モデル構築のため、以下を把握する。
- (1) 本乾燥・分級システムを実際の中間処理施設へ展開する際に必要な設計データを取得する。
 - (2) 植物等可燃物の焼却処理量の減量化効果を定量的に把握する。

3.期待される効果

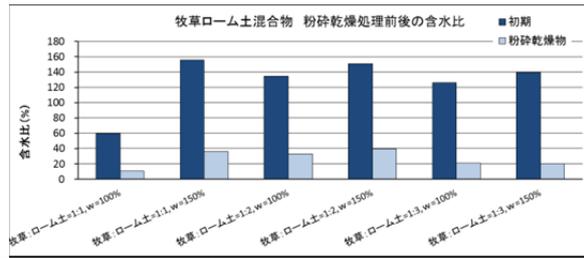
- (1) 植物から、水分と土砂除去で減量化することによる焼却処理量の削減
- (2) 土砂・粉碎乾燥物と細粒土の分別による放射能汚染物質処理の最適化

その他：

除染効果：

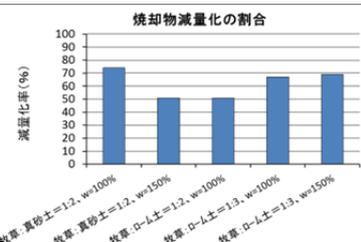
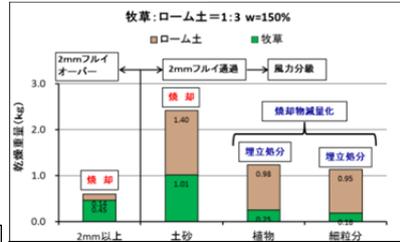
乾燥効果

牧草ローム土混合物のケースについて初期の含水比は、概ね 120~160%であったが、粉碎乾燥の省エネを基本とした粉碎乾燥処理により 20~40%に低下した。



焼却物減量化効果

風力分級により牧草と土砂を分別し直接埋立処分できる土砂を全体の 13~45%確保できるため、焼却物が減量化される。焼却物減量化は、脱水も含め 50~70%強であった。



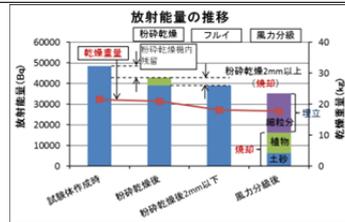
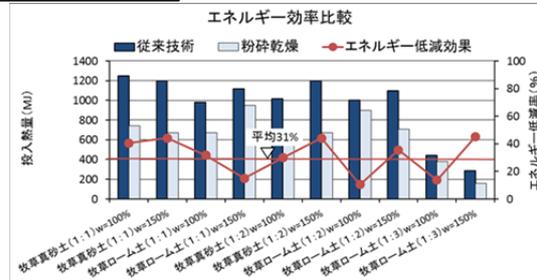
乾物当たりの牧草混入量が 20%以下の物は、有機物の多い黒色土と同等の有機物量であり、土砂として直接処分すると考えた。

※便宜上、風力分級機による飛散しやすさで、一番飛散しにくい物を“土砂”、次に飛散しにくい物を“植物”、一番飛散しやすい物を“細粒分”とした。

※牧草の初期混入率は 1/3 以下(乾物当たり)である必要があった。

粉碎・乾燥の省エネ性評価

粉碎・乾燥は従来、大量のエネルギーを必要とした。従来の粉碎(ハマクラッシャー)・乾燥技術(回転式熱風乾燥機)との省エネ性を比較した。植物を粉碎しながら、乾燥させることで、50~60℃での乾燥を可能とし、排熱ロスを低下させ、従来技術と比較して約 30%エネルギー低減効果があると算出した。



焼却対象物の放射エネルギー低減

放射能濃度の推移を示すが、土砂細粒分と植物(土砂含む)を分別することにより、焼却対象物の放射エネルギーを 50%以上低減できたことを確認した。

除去物発生量評価：植物土砂混合物(含水比 100~150%) 1t 当たり、水分として 400kg~500kg/t、粉じんとして 13kg (粉碎乾燥機からミストとともに排出し、水処理施設へ移行)。

作業員被ばく量評価：作業場所平均空間線量率 0.11 μSv/hr、作業時間 7 時間

作業員最大被ばく量 8.1 μSv (粉碎乾燥、風力分級試験、作業時間：7 時間×8 日間)

コスト評価：

31,000 円/t、
7,800 円/m³ (比重 0.25)

歩掛り(作業人工、作業速度)：

0.09 人工/t (植物土砂混合物投入、粉碎乾燥機、回転バー交換、粉碎乾燥物搬出)

コスト評価条件：植物土砂混合物：草本と粘性土混合物、含水比 100%、植物混入率(35%(乾物比)以下)、処理量(粉碎乾燥機処理量(0.4t/h)-12 台設置：約 5t/h、5 年間処理)、粉碎乾燥機の回転バーの交換：1 セット/約 20t

除染作業における安全上の注意：マスク、手袋を使用し、汚染粉じんの吸引を防止した。

試験場所(住所)：

広島県府中市
福島県檜葉町

除去物保管場所と保管状況：福島県檜葉町で使用した雑草、汚染土は、提供元の仮置場へ返却した。

1. 乾燥分級試験について

1.1 試験の目的

腐敗して分離が困難な植物土砂混合物を分離するには、乾燥し、粉碎して、植物に付着している土砂を引きはがす必要がある。これが、第1工程である。次に、引きはがした植物と土砂を分離する必要がある。これが、第2工程である。

植物に付着した土砂を引きはがす第1工程(粉碎乾燥工程)では、①含水比、②植物土砂混合比率、③土質の違いによる乾燥しやすさ、粉碎物の性状の調査を行った。

引きはがした植物と土砂を分離する第2工程(フルイ、風力分級工程)では、①分離精度、②分離と粒度分布の関係の調査を行った。

模擬試料を用いた小規模試験では、幅広い条件(含水比、植物土砂混合比率)で試験を行い、大規模試験では、条件を絞り込み、大規模で、乾燥効果(乾燥程度と省エネ性)、植物と土砂の分離精度、分離と粒度分布との関係、さらに、植物と土砂の分離による焼却物の減量効果の評価を行った。

さらに、放射能汚染土砂を用いた試験では、土砂の方が、植物より高濃度に汚染されているため、土砂を分離した焼却物(主として植物)の放射能濃度の低減効果の評価を行った。

1.2 乾燥分級処理方法

今回の試験では、粉碎乾燥方式と、フルイと風力分級方式を用いた。

(1) 粉碎乾燥方式

粉碎乾燥方式の概念図を図1に示すが、高速で回転するブレードで細かく粉碎し、そこに50~60°Cの温風をあてることで、水分を蒸気ではなく、ミストとして回収し、蒸発潜熱によるロスを低減することで、省エネで乾燥する方式である。

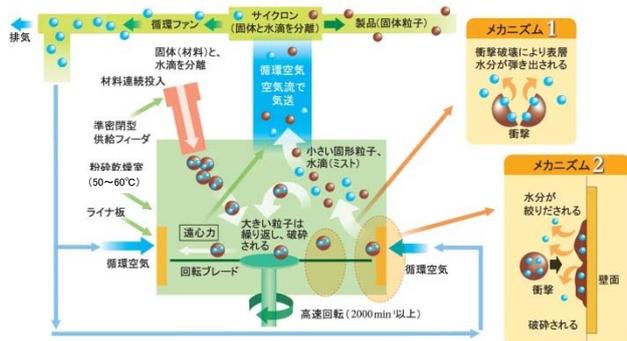


図1 粉碎乾燥方法の概念

(2) フルイ、風力分級方式

フルイと風力分級方式とは、粉碎乾燥物を、2mm 目のフルイで通し、フルイ残留物は植物が多いため、焼却対象物として取り扱い、フルイを通過した物を、さらに風力分級機によって、粉碎物の大きさや比重によって植物と土砂を分離した。土砂を分離することで、植物の焼却量を減量化する方式である。

なお、風力分級機のセパレーターを図2に示すが、下からも空気を送風できるジェットサイクロンセパレーターを用いた。2次空気エリアはジェットゾーンと呼び、植物に付着した細粒分を、ジェット気流で剥離させることができ、細粒分の除去性能を高めたサイクロンセパレーターである。

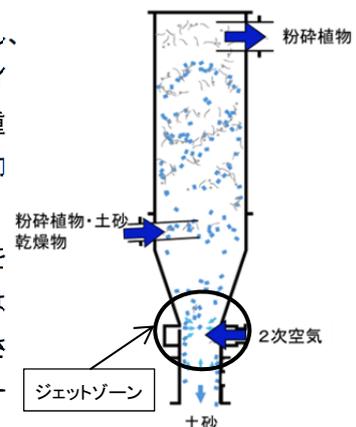


図2 ジェットサイクロンセパレーター

2. 模擬試料を用いた乾燥分級試験

2.1 小型試験機を用いた小規模乾燥分級試験

(1) 試験方法

小型粉碎乾燥機による植物土砂混合物の乾燥効果、粉碎効果の調査を行った。植物と土砂を混合し、3~4週間養生(腐敗)して試験体とした。小型粉碎乾燥機に、10kg-wet/時の速度で投入し粉碎乾燥した。粉碎乾燥物は、2mmのフルイ目で分離し、2mm以上は植物含有量が多いため、焼却対象物として考えた。2mmのフルイ目を通過した物は、小型風力分級機によって、さらに植物、土砂の分級(2回)を行った。

植物として牧草(イタリアライグラス)、土砂として、真砂土、関東ローム土を用いた。

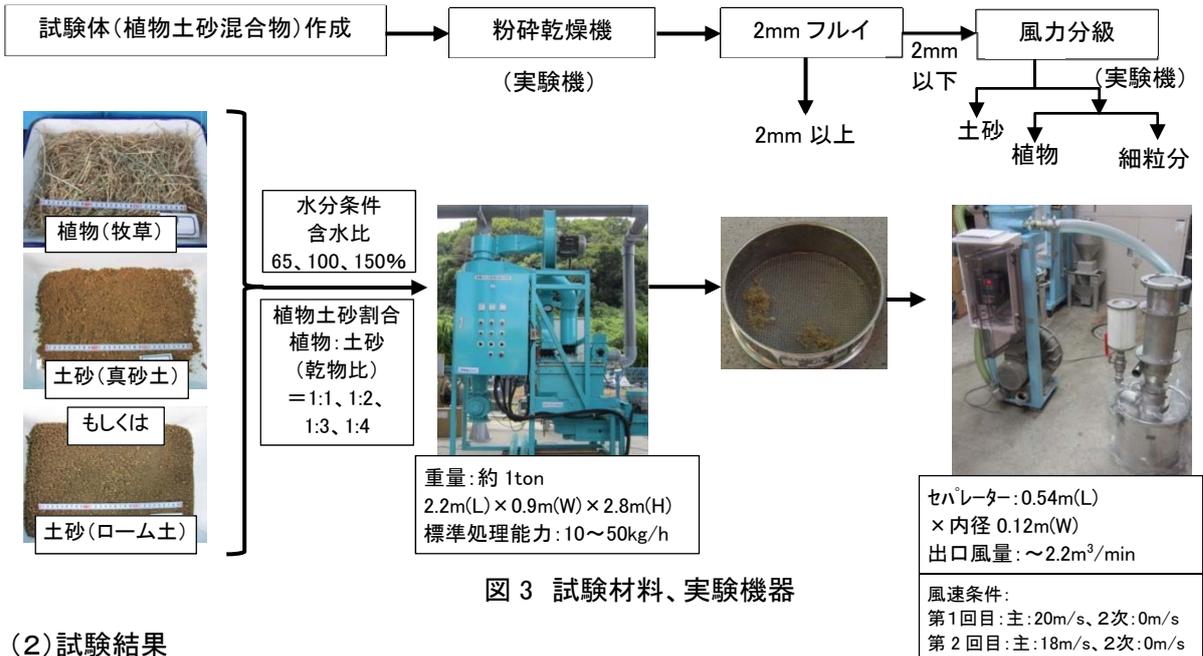


図3 試験材料、実験機器

(2) 試験結果

1) 粉碎乾燥試験結果

① 粉碎効果(粉碎物の粒度分布)

小型粉碎乾燥機により、牧草は、40~100mm程度の長さから0.075mm~4.75mmに粉碎された。一方、土砂は、真砂土の粒径が4.75mm以下、ローム土の粒径が0.25mm以下であったが、粉碎処理後いずれも0.075mm以下(シルト・粘土)となった。

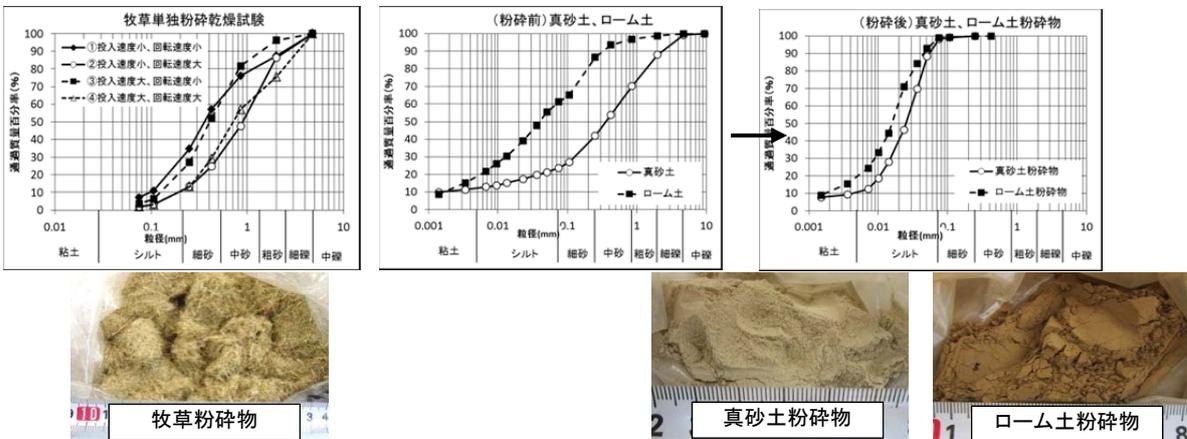


図4 粉碎物の粒度分布及び粉碎物の状況

② 乾燥効果

牧草ローム土混合物は、初期の含水比が高く、牧草の割合が多いと、粉碎乾燥物の含水比が高くなる傾向を示したが、平均して含水比は約 20%、最大で 30%であった。一方、牧草真砂土混合物は、混合割合、初期含水比にかかわらず、粉碎乾燥物の含水比が 20%以下であった。

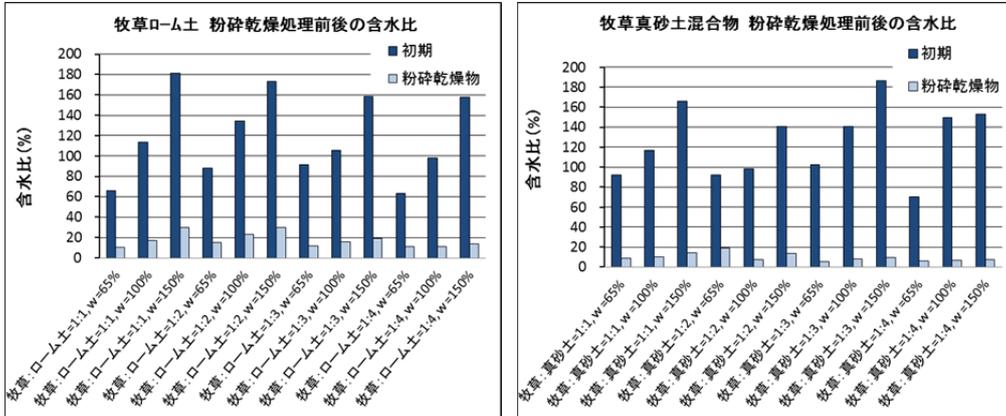


図 5 粉碎乾燥前後の含水比

※粉碎乾燥時間:6分/kg

2) フレイ、風力分級結果(一部抜粋)

初期含水比 100%、牧草土砂混合比率が乾物比 1:1~1:3 である試験体の、2mm のフレイ目によるフレイと、風力分級の結果を示す。牧草ローム土混合物では、混合比率 1:1、1:2 の植物として分級した部分の牧草の割合が大きい。粒度分布をみると、植物として分級した部分のシルト・粘土分が、他の分級物と比べ少なくなっている。植物からシルト・粘土分を分離できていると考えられた。

黒色土等の有機物の多い土には、炭素量が 20%程度含まれている場合があるため、埋立処分する物の牧草の割合を約 20%許容すると考えれば、牧草:土砂(混合比率:1:2、1:3)を乾燥分級して、牧草の割合が少ない区分は、埋立処分できると考えられる。

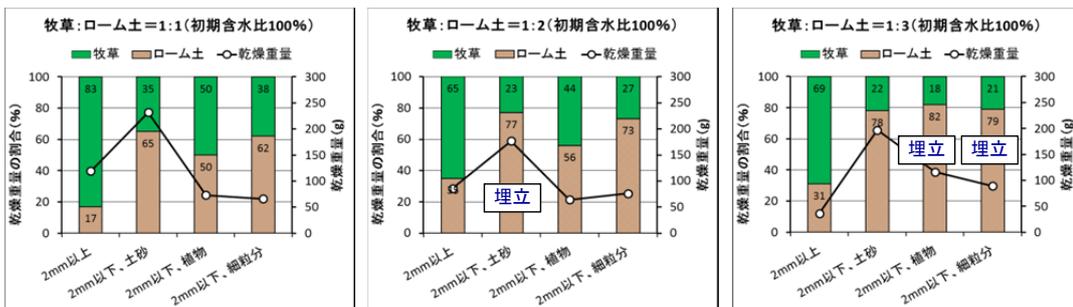


図 6 フレイ、風力分級結果

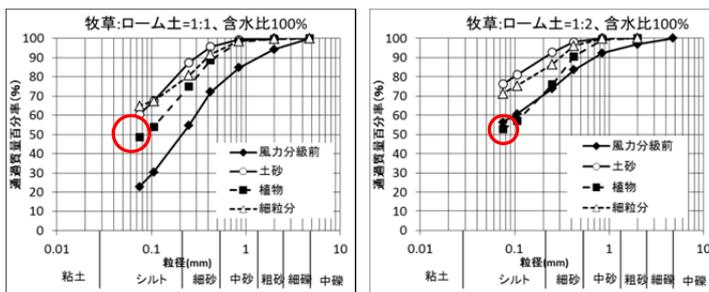


図 7 風力分級物の粒度分布結果

※便宜上、風力分級機による飛散しやすさで、一番飛散しにくい物を“土砂”、次に飛散しにくい物を“植物”、一番飛散しやすい物を“細粒分”とした。

*1: 久間ら、「新土壌学」、p39、1984年、朝倉書店

3) 焼却物減量化効果

焼却物減量化効果では、土砂として分別、埋立て処分されるものの植物の許容できる割合が 20%程度(乾物重量比)と考えた。乾燥による脱水と土砂の減量化も含め、50~90%弱の減量化効果があった。なお、土砂の減量化には、植物土砂混合物の初期の植物:土砂の比は 1:2(乾燥重量比)以下である必要があった。

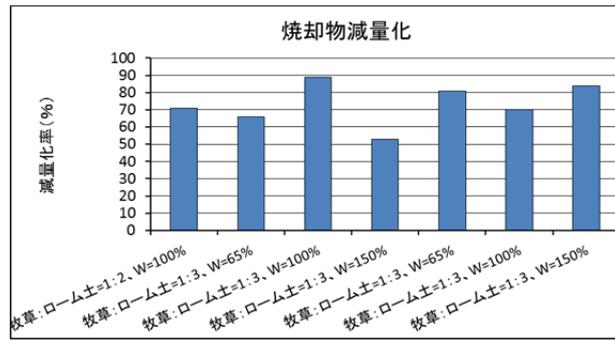


図 8 焼却物減量化の割合

2.2 実証機を用いた大規模乾燥分級試験

(1) 試験方法

現地で作成した植物土砂混合物(150~450kg)を粉碎乾燥機(実証機)に投入し、乾燥状況、粉碎状況、消費電力状況の調査を行った。粉碎乾燥物は、2mmのフルイ目を通して後、風力分級実証機により植物、土砂の分級を2回行った。植物として牧草(イタリアライグラス)、土砂として、真砂土、ローム土を用いた。

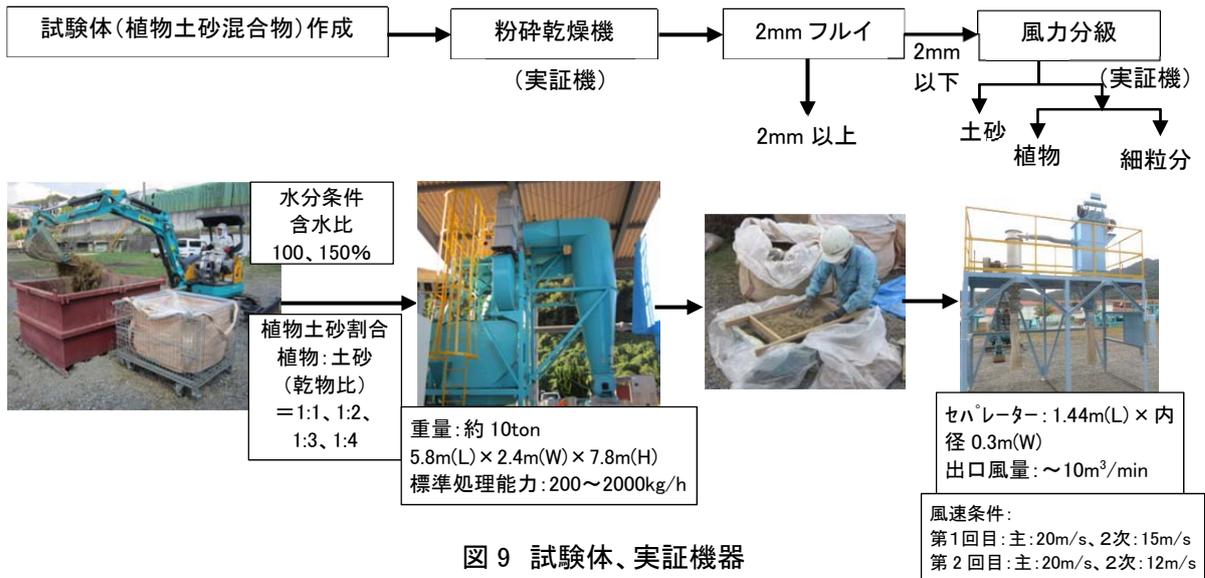


図 9 試験体、実証機器

(2) 試験結果

1) 粉碎乾燥試験結果

① 粉碎乾燥機運転状況

表-1 に粉碎乾燥機への投入及び排出状況を示すが、牧草:粘性土の混合比率 1:4の試験体は、乾燥機内部にかなり残留してしまった。粘性土の混合比率が高くなってしまうと、機内への付着効果が強く、乾燥しにくいことが分かった。

表 1 粉碎乾燥処理状況

番号	試験体作成仕様			粉碎乾燥時間(時)	乾燥機投入重量(kg)	粉碎後排出重量(kg)	乾燥機内残留物重量(kg)
	混合物	混合比率(乾物比)	設定含水比(%)				
1	牧草:真砂土	1:1	100	2	450	239	1
2	牧草:真砂土	1:1	150	2	450	191	1
3	牧草:ローム土	1:1	100	2.3	450	245	0
4	牧草:ローム土	1:1	150	2	448	196	53
5	牧草:真砂土	1:2	100	2	450	210	17
6	牧草:真砂土	1:2	150	3	450	221	50
7	牧草:ローム土	1:2	100	3	426	180	20
8	牧草:ローム土	1:2	150	2	450	153	85
9	牧草:真砂土	1:3	100	0.83	200	71	32
10	牧草:真砂土	1:3	150	0.6	200	58	60
11	牧草:ローム土	1:3	100	1.2	184	83	11
12	牧草:ローム土	1:3	150	0.5	125	66	10
13	牧草:ローム土	1:4	100	0.6	172	31	60
14	牧草:ローム土	1:4	150	0.33	149	13	69

② 乾燥効果

粉碎乾燥前と粉碎乾燥後の含水比の結果を以下に示す。牧草ローム土混合物は、ローム土の細粒分が多いため、牧草真砂土混合物と比較して乾燥しづらく、粉碎乾燥物の含水比が 30~40%を示す傾向であった。乾燥時間を多少長くする必要があった。

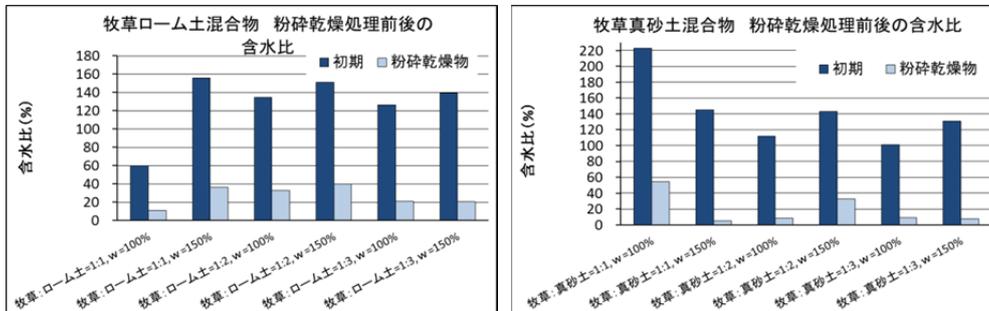
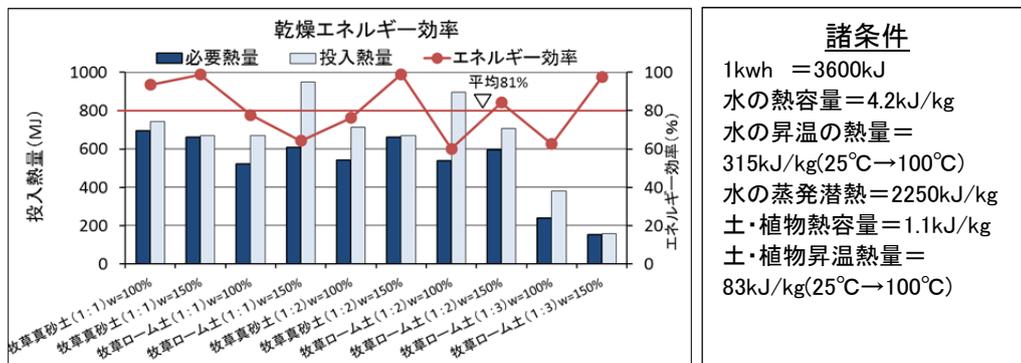


図 10 粉碎乾燥処理前後物の含水比

③ 粉碎乾燥エネルギー効率

投入速度は、約 220kg/時間であった。性能的には倍近い投入速度が可能であったが、試料が腐敗して固まっており、定量供給をするために、投入速度を遅くする必要があった。

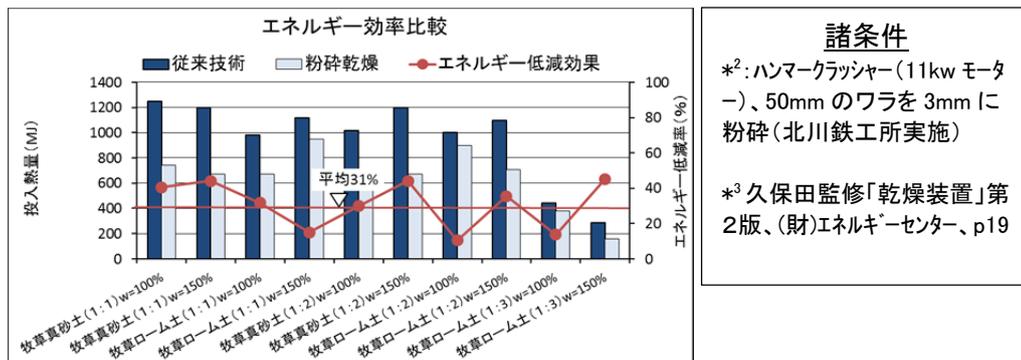
乾燥エネルギー効率とは、水分蒸発に必要な熱エネルギー量(100℃までの昇温と、蒸発潜熱)を、粉碎乾燥に係る消費電力量を熱エネルギー量に換算して除算したものである(必要熱エネルギー÷投入熱エネルギー)。従来技術との比較として、粉碎(ワラのハンマークラッシャーによる粉碎試験*2からのエネルギー投入量:約 110kwh/t)+乾燥機(回転式熱風乾燥の熱効率 65%;文献値*3)と比較を行った結果を図 11 に示す。従来技術に比べ平均して約 30%のエネルギー低減効果が見られた。



諸条件

1kwh = 3600kJ
 水の熱容量 = 4.2kJ/kg
 水の昇温の熱量 = 315kJ/kg(25℃→100℃)
 水の蒸発潜熱 = 2250kJ/kg
 土・植物熱容量 = 1.1kJ/kg
 土・植物昇温熱量 = 83kJ/kg(25℃→100℃)

図 11 乾燥エネルギー効率



諸条件

*2: ハンマークラッシャー(11kw モーター)、50mm のワラを 3mm に粉碎(北川鉄工所実施)
 *3 久保田監修「乾燥装置」第 2 版、(財)エネルギーセンター、p19

図 12 従来技術とのエネルギー効率比較

2) フルイ、風力分級結果(一部、抜粋)

牧草ローム土混合物の粉碎乾燥物のフルイ、風力分級結果を以下に示す。実験機による小規模試験と異なり、最初に、サイクロンセパレーターから落下して回収される物は、牧草の割合が多かった。これは、ローム土のほとんどは粉碎されてシルト・粘土分となっており、シルト・粘土分の方が、粒径の大きな植物粉碎物よりも飛散しやすかったとためと考えられる。牧草真砂土混合物も同様の結果であった。

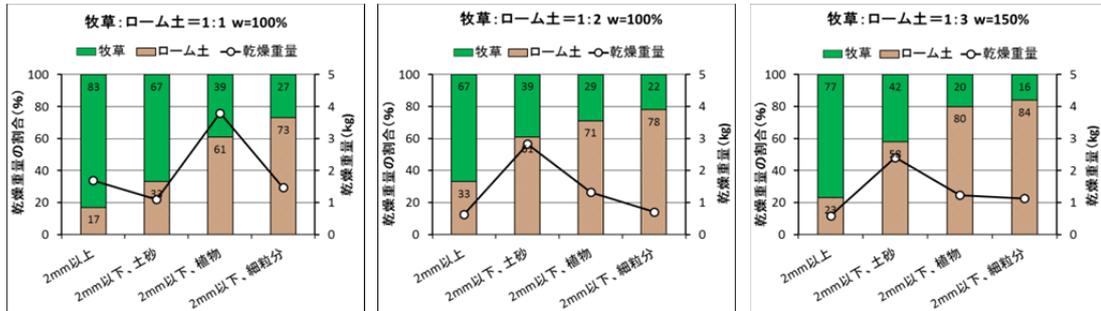


図 13 フルイ 風力分級結果

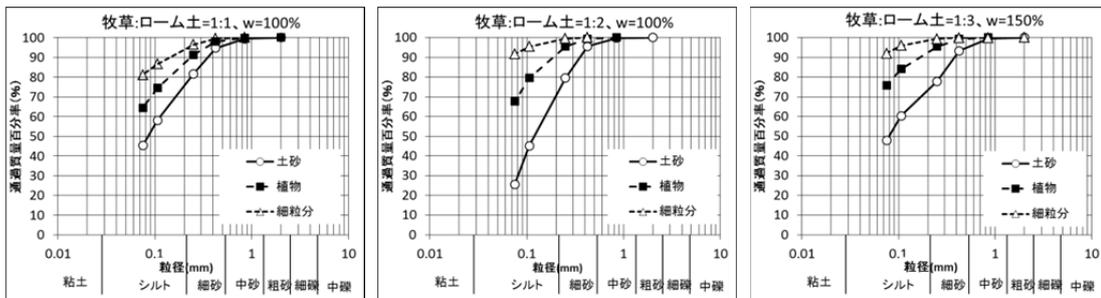


図 14 風力分級物の粒度分布

3) 焼却物減量化効果

焼却物減量化効果では、土砂として分別、埋立てされるものの植物の許容できる割合を、20%程度(乾物重量比)と考えた。風力分級により牧草と土砂を分別し直接埋立処分できる土砂を全体の 13~45%確保できるため、乾燥による減量化も含め、焼却処理対象物の 50~70%強の減量化効果があった。

なお、植物土砂混合物の初期の牧草と土砂の割合が1:1の場合、牧草の割合が最少でも 27%であり、目標の 20%以下とすることができなかった。初期の牧草と土砂の割合は1:2以下とする必要があった。

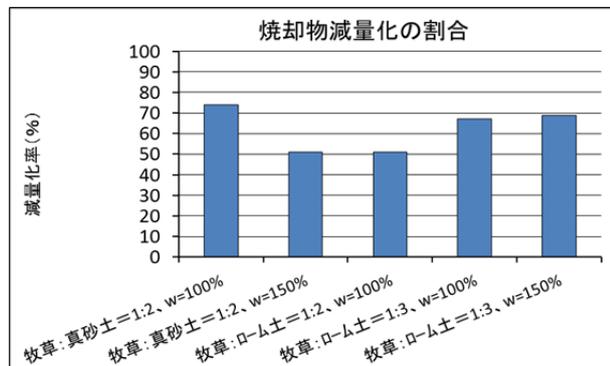


図 15 焼却物減量化の割合

3.汚染試料を用いた乾燥分級試験

(1)試験方法

福島県楡葉町で採取した放射能汚染がほとんどされていない雑草と、放射能汚染された細砂主体の土砂を混合し、試験体を作成した。これを、乾燥分級し、雑草と土砂を分離することで、焼却対象の雑草が多い試料中の放射能濃度が低下するか調査を行った。

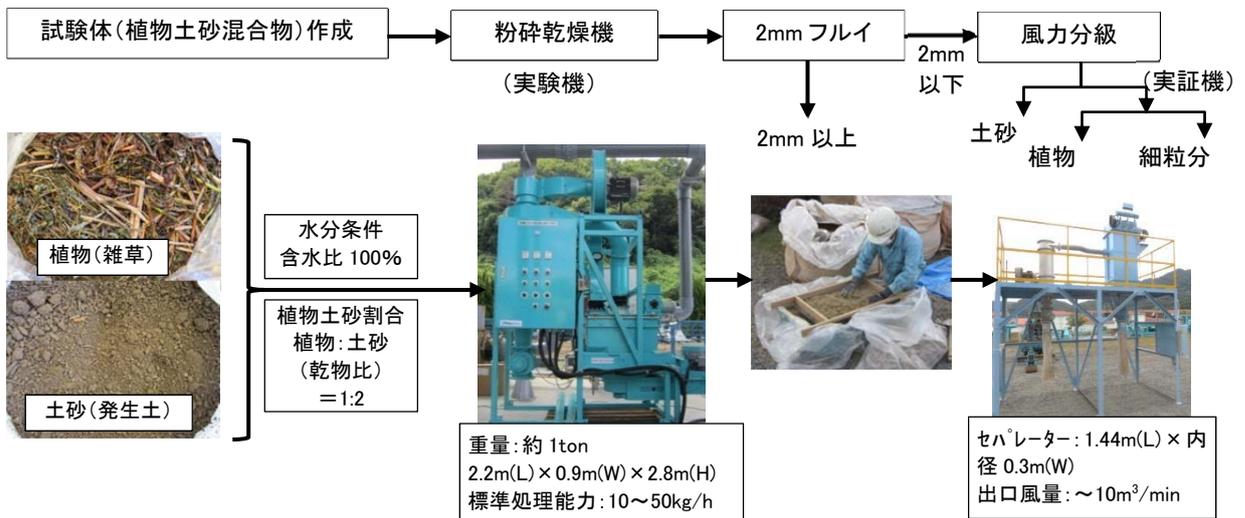
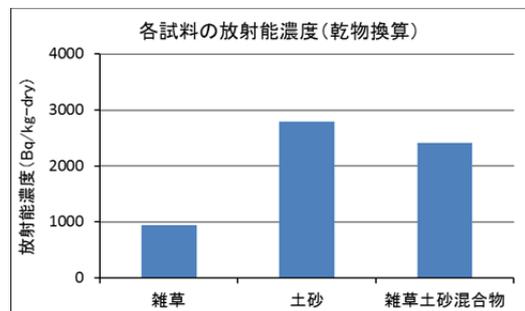


図 16 試験体、試験機器

(2)試験結果

雑草、土砂、雑草土砂混合物それぞれの乾物当たりの放射能濃度を示すが、雑草は放射能濃度が低く、土砂は乾物当たりで、2800Bq/kg の濃度を示した。

なお、放射能濃度の分析は、湿潤試料を用いたが、土壌水分中には放射性セシウムは含まれていないため、乾物試料に放射性セシウムがすべて含まれていると考え、乾物当たりの放射能濃度を示す。



① フルイ目による分離物の放射能濃度の結果

雑草土砂混合物を粉碎乾燥して、2mm のフルイ目で 2mm 以上と 2mm 以下に分離した。2mm のフルイ目による分離物は、土砂の割合が多い 2mm 以下の方が、放射能濃度が高い結果であった。

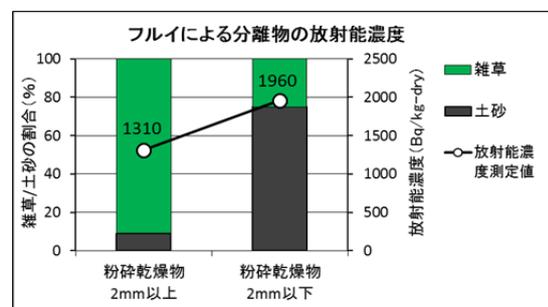


図 18 フルイによる分離物(2mm 以上、2mm 以下)の放射能濃度と雑草/土砂の割合

② 風力分級物の放射能濃度の結果

2mm のフルイ目を通過した物を風力分級機により、さらに分級した。それぞれの分級物の放射能濃度と、雑草、土砂の割合との関係を調査した。粒径 0.075mm 以下(シルト・粘土分)の割合が多い物が、放射能濃度が高い結果となった。

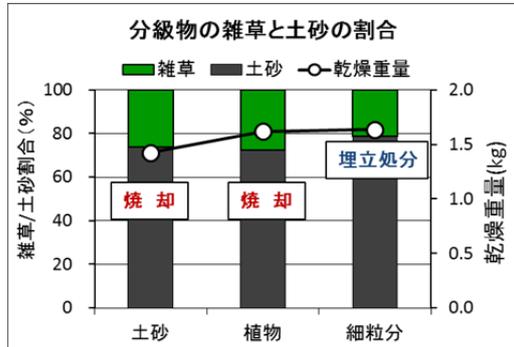


図 19 風量分級物の乾燥重量と雑草/土砂の割合

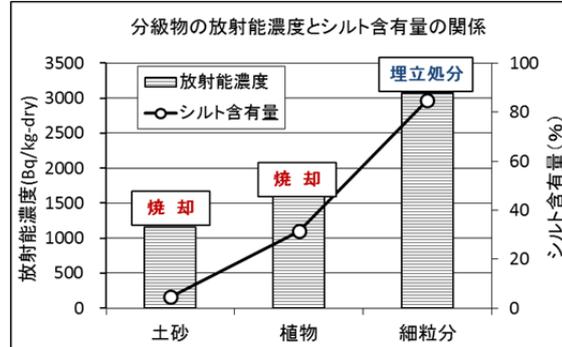


図 20 風力分級物の放射能濃度と粒径 0.075mm 以下(シルト・粘土分)含有量の関係

③ 放射エネルギーの推移

放射エネルギーの推移を図 21 に示す。粉碎乾燥の際に、放射エネルギーが低下している。この原因は、粉碎乾燥機内に細粒分が残留してしまったことが原因として考えられる。この放射エネルギーの推移から、土砂細粒分と植物(土砂含む)を分別することにより、焼却対象物の放射エネルギーを 50% 以上低減できた。

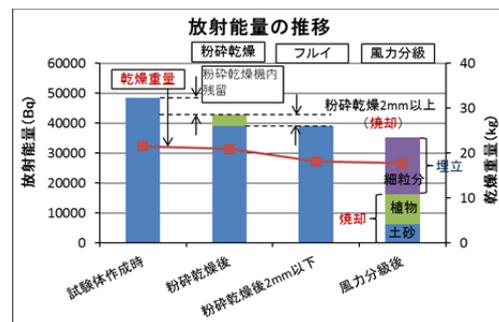


図 21 放射エネルギーの推移

4. 試験結果のまとめ

(1) 第1工程(植物から土を引きはがす工程: 粉碎、乾燥工程)

- 腐敗を想定した含水比が 120~160% 程度の植物土砂混合物を、粉碎乾燥により植物から土砂を分離し、含水比 20~40% 程度にまで低下できることを確認した。
- 粉碎により、ローム土、真砂土とも、0.075mm 以下(シルト・粘土)まで細粒化された。植物(牧草)は、0.1mm 以上であり、粒度の大きさに差が見られた。この粒度の違いにより、風力分級が可能であることが分かった。
- 本試験で用いた粉碎乾燥機は、粉碎・乾燥に関して従来技術より平均約 30% のエネルギー低減効果があることを確認した。

(2) 第2工程(引きはがした土と植物を分離する工程)

- 植物と土砂を分離させたものは、フルイと風力分級により焼却対象物(植物+一部土砂)と細粒分との分別が可能となる。分別により焼却処理量を 50~70% 減量化することが可能となり、また、埋立処分を前提とする土砂中の植物含有量(乾物当たり)は 20% 以下となった。

(3) 放射エネルギー低減効果

- 植物に混入する土砂細粒分(粘土・シルト分)の量を減らすことにより、焼却対象物の放射能濃度を低減できることを確認した。

5.実展開モデル

(1) 設定条件に関して

実展開モデルは、仮置き場から運搬され、破袋機で破袋された中で、植物の含有量(乾物当たり)が、20～35%のものを乾燥分級処理するものとする。乾燥分級処理で発生する排水は、破袋機に付帯する水処理設備で処理するものと考え、ランニングコストのみを見込むものとする。植物土砂混合物は含水比 100%とし、粉碎乾燥処理量は1台当たり 0.4t/h(2m³、比重 0.25)とし、乾燥後の含水比は 20%とする。粉碎乾燥機は 12 台設置し、約 5t/h(20m³/h、比重 0.25)を 24 時間/日(メンテ含)処理するものとする。なお、風力分級処理は1回とした。処理期間は 5 年間とした。

(2) 実展開システムフロー

実展開システムフローを図 22 に示す。

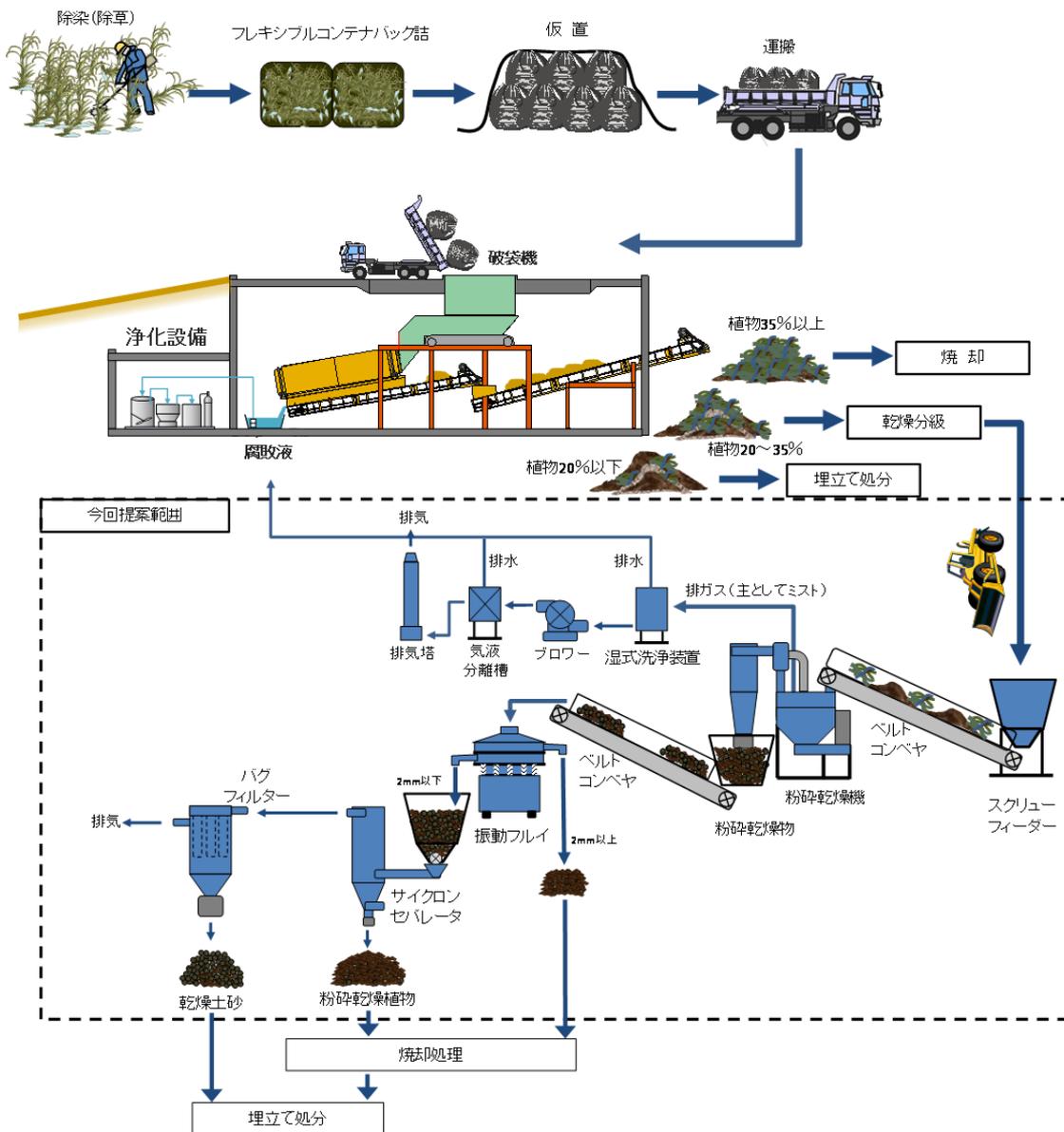


図 22 実展開システムフロー

(3)コスト評価

1) 条件

- ・粉砕乾燥処理量: 回転バーの交換1回/日、電気は東北電力より購入
- ・フルイは振動フルイ: 目詰まり防止用のタッピングボールを投入した3次元振動フルイ機
- ・処理期間は5年間、処理量 162,000t、648,000m³(比重 0.25)



写真2 振動フルイ機

2) コスト評価

表2 コスト評価(単位:千円)

項目	仕様	コスト	備考
粉砕乾燥処理	12台、回転バー: 1セット/2日交換	4,270,000	水処理含む
振動フルイ処理	6台(3次元振動、タッピングボール付)	160,000	
風力分級処理	3台(実証機の10倍の処理能力)	290,000	
労務	10人工/日、植物土砂混合物の投入搬出、粉砕乾燥メンテナンス	350,000	
合計	比重 0.25	5,150,000	31,000円/t 7,800円/m ³

6.除去物(粉じん)発生量

粉砕乾燥でミストを除去する際に、ミストに、土砂や雑草の粉じんが、わずかに混入する。粉じん量を、粉砕乾燥実験機で測定した。なお、ミストに混入する粉じんは水処理設備で処理回収される。

表3 粉砕乾燥機からの粉じんの排出

	項目	測定値	備考
粉砕乾燥機から排出口からの粉じん飛散量 ^{※1}	粉じん排出量①(mg-dry/分)	340	
	粉じん排出量②(mg-dry/分)	28	
	粉じん排出量③(mg-dry/分)	12	
	平均粉じん排出量(mg-dry/分)	130	
粉砕乾燥機の投入量	平均投入量(mg-dry/分)	100,000	湿潤試料:0.17kg/分 含水比:120%
粉砕乾燥機からの排出率	平均粉じん排出量/平均投入量(%)	1.3	

※1: 排出口は2個あるので、排出量は2倍になる。



写真3 排出される粉じん量

実施代表者の所属機関：千葉大学

実証テーマ名：無人ヘリによる超低高度計測による空間線量率マップの作成と
ハイパースペクトル技術による植生・土地被覆現況図の作成

事業の概要：低高度自律航行可能な無人ヘリにより簡便・安全に、森林斜面上を含めた 1m 高度の空間線量率分布を地図化し、ハイパースペクトル（超高精度分光計測）による土地被覆・植生現況図と重ね合わせて除染および放射能管理計画の策定に寄与する。

実施内容：

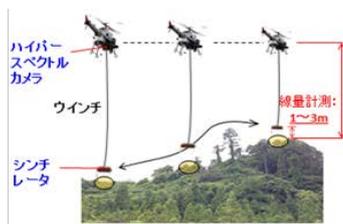
- (1) 無人ヘリによる詳細放射能汚染マップ作成に関する技術開発
- (2) ハイパースペクトル技術による植生・土地被覆図の作成技術開発
- (3) 山木屋地区復興 GIS(地理情報システム) の構築

技術概要：

1. 試験フロー



ミニサーベイヤーによる空間線量率自動計測



YAMAHAラジコンヘリ+ウインチシステムによる山地斜面上空のハイパースペクトルおよび空間線量率自動計測



空間線量率計測結果(山木屋小学校における検証実験の例)



ハイパースペクトルによる植生・土地被覆図

2. 試験目標

- (1) 無人ヘリによる簡便、低コストの空間線量率測定
- (2) ハイパースペクトル画像による植生・土地被覆現況図の作成
- (3) 地理情報システムによる空間情報管理

3. 期待される効果

- (1)山村における生業の基本単位である里山流域ごとの空間線量率マップの作成
- (2)植生・土地被覆、地形情報と空間線量率を重ね合わせて放射能管理案策定が可能な地理情報システムの構築

その他：千葉大学は福島県伊達郡川俣町山木屋地区において、地域と交流しながら、順応的管理の考え方により、総合大学としての特色を活かした支援活動を行っている。本事業で実証された技術を包括的な枠組みの中で活かすことができ、復興への具体的施策を提示する基礎情報を提供することができる。

<p>1. 除染計画に対する効果</p> <ul style="list-style-type: none"> ・作業員被ばく量はオペレーション場所の空間線量率に依存するが、最小限に留めることができた。 ・人が容易に立ち入ることができない領域においても空間線量率を計測できた。 ・したがって、山村における暮らしの領域、ここでは里山流域を単位とした放射能対策立案に役立てることができる。 	
<p>2. 地図化の効率</p> <ul style="list-style-type: none"> ・低コストの無人航空機および小型有人航空機によりオルソ画像作成、地表面被覆の地図化、空間線量率の地図化が可能となり、放射能対策立案のための基礎資料を得ることができた。 	
<p>3. コスト評価</p> <p>(1) 有人ヘリ 通常コスト：¥2,082/ha ※今回の計測においては、航空会社との連携のもと、特別に低コストで実施した。 今回コスト：¥663/ha</p> <p>(2) YAMAHA/RMAX 航空計測：¥7,483/ha</p> <p>(3) ミニサーベイヤー 航空計測（山木屋地区全域）：¥4,000/ha</p> <p>(4) 地理情報システム(GIS) GIS システム一式は大学設備を利用した。</p>	<p>4. 歩掛り（作業人工、作業速度）</p> <p>(1) 有人ヘリ：1,973ha/日 (2) YAMAHA/RMAX：50ha/日 (3) ミニサーベイヤー：5ha/日</p> <p>5. コスト評価条件</p> <p>①現場管理者等の人件費を含めず、実作業員のみ計上。 ②作業員宿泊費・交通費・間接費等を含む。</p>
<p>6. 作業における安全上の注意</p> <ul style="list-style-type: none"> ・無人ヘリ（ミニサーベイヤー、RMAX）の離着陸の際は、ヘリ周辺に人やものがない状態を確保して操作を行い、天候状態が悪く、フライトに適さない期間を避けて、計測を実施した。 ・飛行の安全を確保するため、必ずフライト前に機体本体の姿勢制御機構、バックアップオペレータのプロポの電池残量、制御スイッチの設定等に間違いがないかについて確認した。 ・自律飛行時においても、飛行状況に異変が生じた際には、即座にオペレーターによるマニュアル操作に切り替えて事故を防ぐためのバックアップ体制を備えた。 ・有人ヘリの安全管理については、航測会社の規定に則り、計測を行った。 	
<p>7. 試験場所（住所）：福島県伊達郡川俣町山木屋地区</p>	

1. 背景

東京電力第一原発事故による放射性物質の環境への放出からほぼ3年が経過し、避難している住民の暮らしを立て直さなければならない段階に入った。文部科学省が行った航空機モニタリング成果は広域の放射能汚染状況を把握し、原子力災害の初期段階における避難区域の設定には大きく役立った。しかし、復旧・復興段階では暮らしとの関わりを持つ範囲、すなわち山林の里山流域まで含めた様々な土地被覆や住居の構造も考慮したモニタリングに基づく放射能対策を講じる必要がある。

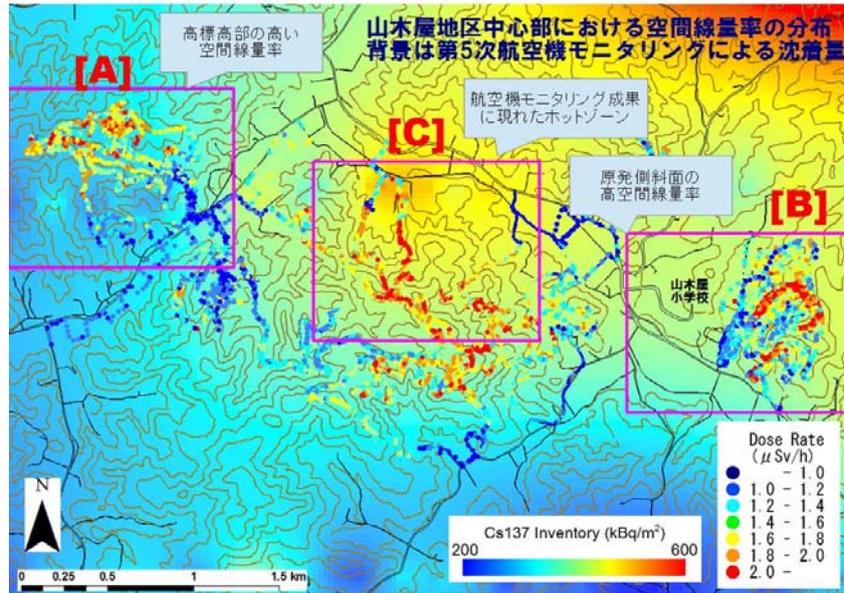


図 1.1 2012 年度に実施した歩行サーベイによる山木屋地区北部の山林域における空間線量率の分布。背景は第 5 次航空機モニタリングによる沈着量。空間線量率補正の基準日は 2012 年 6 月 28 日（近藤原図）

2012 年に予察的に行った山林の調査では空間線量率は植生、土地被覆、地形に対応して不連続に変化することが明らかとなっている（千葉大学による調査）。また、空間線量率の測定が密に行われている低地よりも、山林の高標高域の空間線量率が地域によっては高いことも予察的に明らかになっている。さらに、放射性物質の移行により空間線量率の空間分布は不均質性を増していると考えられる。よって、人が近づけない、あるいは立ち入りが危険な領域にも対応できる新たな空間線量率測定方法の開発が必要となった。

そのため、下記の 4 点の調査項目を設定した。

- (1) 空間線量率計測システムの開発
- (2) 無人ヘリによる簡便、低コストの空間線量率測定
 - ① エンジンヘリ YAMAHA/RMAX による高機能・高精度モニタリングシステムの実証
 - ② ミニサーバイヤー（電動マルチコプター）による低コスト・効率化モニタリングシステムの実証
- (3) ビデオ映像・ハイパースペクトル画像による植生・土地被覆現況図の作成

(4) 地理情報システムによる空間情報管理

詳細な空間線量率調査の結果は地域の特徴に応じた除染・放射能対策の立案に活用されなければならない。そこで、単なる空間線量率測定のための一要素技術だけでなく、測定結果から対策を立案するため情報も含めたトータルなシステムとして「無人ヘリによる超低高度計測による空間線量率マップの作成とハイパースペクトル技術による植生・土地被覆現況図の作成」を提案し、そのフィージビリティを確認した。

2. 空間線量率計測システムの開発

空間線量率計測システムは、GPS 連動型空間線量率自動記録システム Hot Spot Finder（製造：S W R株式会社、販売：ポニー工業株式会社）を基に、本検証事業用に軽量化を主目的として改良を行った。

機器構成を以下に示す。



- ①制御用パソコン：Panasonic 社 タフブック CF-U1
- ②放射線検出モジュール：浜松ホトニクス社 C12137-01
- ③GPS：SiRF 社 BU-353S4 SiRFstarIV
- ④Web カメラ：ロジクール社 HD Webcam C615

図 2.1 UAV 搭載用に改良された Hot Spot Finder

放射線検出モジュールは最大 2 台の同時使用が可能であり、測定データ（空間線量率、緯度、経度）は 1 秒ごとに制御用パソコンに保存される。本機器を UAV（無人飛行体）に搭載し、空間線量率の遠隔測定を行った。

3. 無人ヘリによる簡便、低コストの空間線量率測定

3.1 エンジンラジコンヘリコプターYAMAHA/RMAX（以後小型無人ヘリ）による高機能・高精度モニタリングシステムの実証

ここでは空間線量率計測システムを小型無人ヘリに搭載したウィンチシステムに設置することで、以下のような場合の空間線量を計測するシステムを開発した。

- A) 従来、近接して面的に取得することが困難だった樹冠や屋根上の線量計測。
- B) 線量計を縦方向に一定間隔で設置し、複数高度で計測することにより線源からの空間線量減衰の理論値を検証するためのデータ取得。
- C) 上記 B)によって、計測位置の線量に対する周囲からの線量の影響評価を行うためのデータ

取得。

3.1.1 小型無人ヘリの計測システム

2. で説明した空間線量率計測システムを 3mの距離でワイヤーに固定し、小型無人ヘリに搭載した遠隔操作可能なウィンチによって計測対象との距離を調節する。空間線量率計測システムの放射線検出モジュール（浜松ホトニクス社 C12137-01）は 2 台を 1 台の PC でコントロールされるが、これら 2 台を 3mの固定距離だけ離し、同時に 2 高度でのデータ取得を可能とした。



図 3.1 ウィンチを装着した RMAX



図 3.2 吊り下げ器具



図 3.3 離陸の様子



図 3.4 ウィンチによるケーブル繰り出し

本機の操縦は専門のオペレーターに依頼し、天候が飛行に不適な場合は飛行中止する等、安全対策には万全の配慮を行っている。特に今回はケーブル懸垂を行ったため、安定な天候下における飛行を運用の条件として設定した。

3.1.2 計測結果

(1) 高度による空間線量率の変化

山木屋小学校校庭において除染残土にシンチレーターを接近させている状況を図 3.5 に示す。

また、高度による空間線量率の変化を図 3.6 に示す



図 3.5 山木屋小学校校庭の残土上に RMAX からシンチレータを接近させている状況

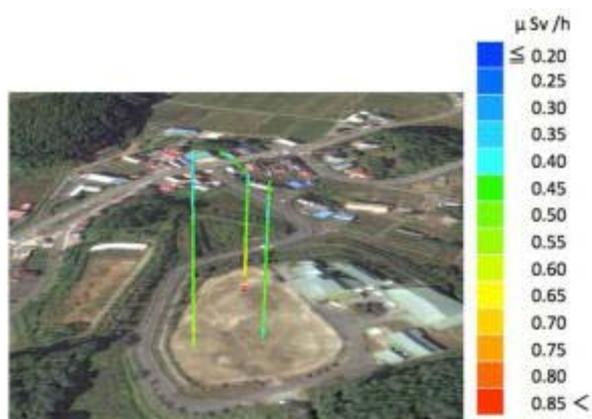


図 3.6 山木屋小学校校庭における高度別空間線量率

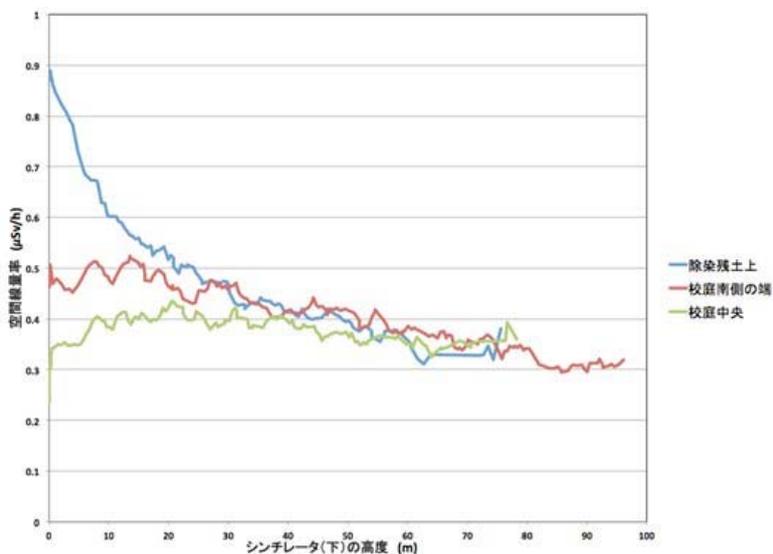


図 3.7 山木屋小学校校庭の 3 カ所の高度による空間線量率の変化

図 3.7 に図 3.6 の 3 カ所の高度別空間線量率を示す。除染残土上の比較的大きな線量は高度が上がるにつれ急激に減衰するが、除染された校庭と同レベルの値を示すのは 70m もの高さに達してからであることが分かる (50 m あたりからは、除染済みの校庭と同レベルになるが、その値は地上よりは高い)。一方、除染されて空間線量率が低くなっているはずの校庭南側地上では校庭中央部に比べるとやや高い値を示している。また、校庭中央部では地上 5m から空間線量率がわずかに上昇傾向を示すことがわかる。この傾向は校庭南側の端でも認められる。これは周囲に除染されていない土地が存在する場合、5m 程度の高度からはそれらの空間線量率の影響をうけることを示唆している。RMAX では地点ごとの空間線量率の高度方向の変化 (~150m) を計測できることを実証したが、高度方向の変化が単純な指数関係で表現できないことも明らかにした。

(2) その他の計測モード

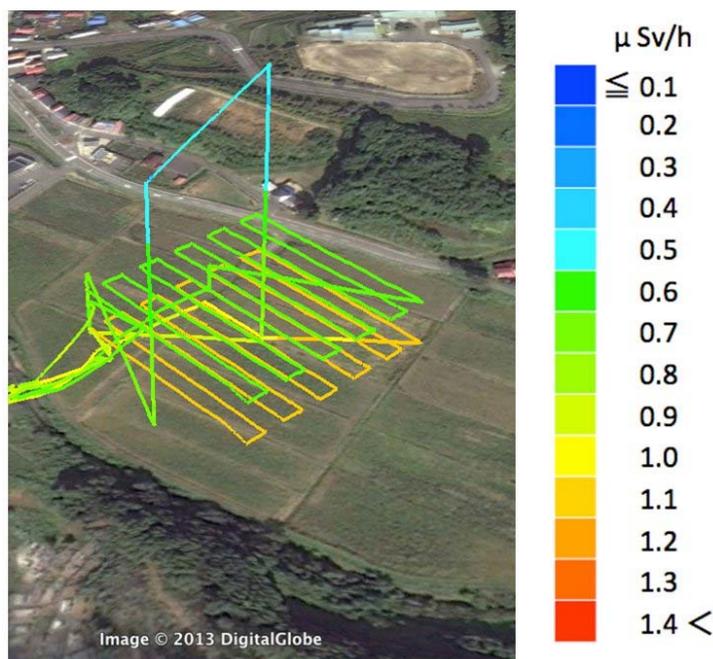


図 3.8 除染前水田における空間線量率の三次元分布

図 3.8 に高度を変えて計測し、空間線量率の三次元分布を計測した例を示す。オレンジ色のモザイクは地上約 50cm、緑色のモザイクは地上との距離 30m における計測値である。ここでは山腹斜面の影響は認められなかった。このように低高度における複雑な飛行経路の設定も可能であることを検証した。

その他、ホバリングによる民家の屋根における計測、トランセクト計測、あるいは樹冠上の飛行など多様なモードの飛行による空間線量率の計測が可能であることを実証することができた。

3.2 電動マルチコプター（ミニサーベイヤー）による低コスト・効率化

モニタリングシステムの実証

本実証事業においては、千葉大学が開発した電動型マルチロータヘリコプタ「ミニサーベイヤー」を用いて空間線量率計測を実施した。ミニサーベイヤーは重量 3kg 程度、大きさ 110mm（プロペラ径を含む）の小型ラジコンヘリコプタである。実証実験の結果、電動型マルチロータ小型ヘリの特徴である飛行時のオペレータの恐怖感低減、騒音低減と静穏、メンテナンス容易、搬送が容易、高効率な計測、超低空での計測、トータルな低コスト化実現などが実証された。今後はモニタリング結果を計測中に同時にリアルタイムでマッピングする機能などを装着することで、一層高効率な放射線量モニタリングを実施できる。

電動型マルチロータ小型ヘリコプタの運用方法としては大きく分けて 3 種類ある。①完全マニュアルモード（ラジコンヘリと同様にすべてオペレータが送信機等を用いて操縦するモード）、②姿勢制御アシスト型マニュアルモード（姿勢安定化制御は自動制御で行われており、それ以外はマニュアルで操縦するモード）、③ウェイポイント飛行モードあるいは自律モード（無線で地

上の基地局 PC 等から転送された複数のウェイポイントに沿って飛行するモード)。③は一般には自律制御モードとも呼ばれるが、基地局から飛行ルートの指令を受けて飛行する観点からオペレータの負担が最も少ないテレオペレーション技術でもある。放射線計測の実際のことを考慮すると②か③が望ましい。ミニサーバイヤーは②、③いずれも実装済みであり、低コストであることが利点であり、人が容易に近づけない場所の放射線計測に欠かせない飛行体である。



図 3.9 計測器を搭載して飛行中のミニサーバイヤー

ミニサーバイヤーMS-06L に空間線量率測定システムを搭載した外観 (左) および山木屋小学校校庭を飛行中の MS-06L を図 3.9 に示す。

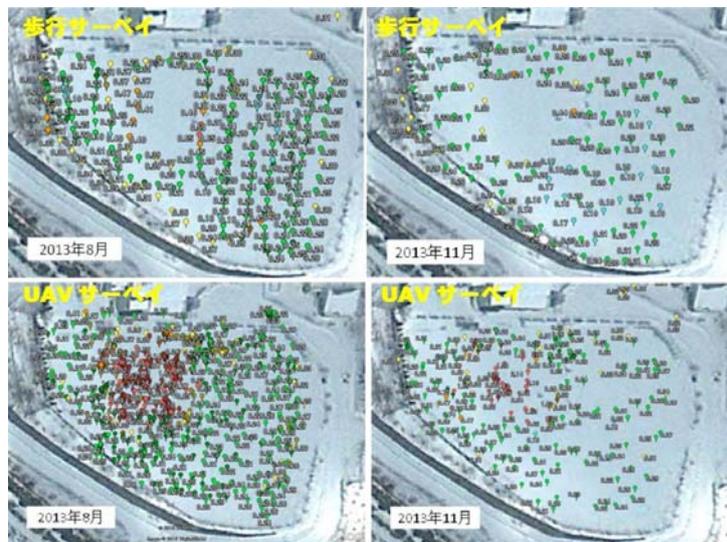


図 3.10 山木屋小学校校庭における空間線量率分布測定結果

山木屋小学校における 8 月と 11 月の測定結果を比較した結果を図 3.10 に示す。立ち入りができない除染残土上 (実験における象徴としての立ち入り困難地域) の空間線量率も UAV では計測できた。UAV のセッティングから計測終了までは数 10 分で可能であり、迅速な測定が可能である。なお、飛行しながら一定間隔で空間線量率を計測するため、同一の地点を計測できるわけではないが、分布から歩行サーベイと UAV サーベイの結果は良く一致していることがわかる。



図 3.11 民家の屋根上の空間線量率計測および測定中の写真の撮影

民家の屋根上の空間線量率の測定と写真撮影を試みた結果を図 3.11 に示す。人がアクセスしないため、安全かつ短時間で測定ができ、ホットスポットの発見や除染・放射能対策を立案するための基礎情報を提供できることを検証した。



図 3.12 自律飛行（プログラミング飛行）による空間線量率計測の実証実験結果

自律飛行（プログラミング飛行）による空間線量率計測の実証を行った結果を図 3.12 に示す。広開地では自動制御により空間線量率のモニタリングを効率よく実施できることが検証できた。一度プログラムができれば一定時間間隔で繰り返し、空間線量率分布を効率的に計測することができるシステムは今後の避難区域の復興に不可欠なシステムとなると考えられる。

なお、ミニサーベイヤーは専門家でなくとも操縦できる。低コストであるため、システムを複数セット用意できれば、広範な放射能汚染地域の複数箇所で同時に空間線量率分布の計測が可能となる。そのため復興期における放射能モニタリングシステムとしての活用が期待できる。

4. ビデオ映像、ハイパースペクトル画像による植生・土地被覆現況図の作成

原子力災害により避難が継続されている地域の地表面被覆は人の手が加わらなくなったことにより急速に変化している。今後の除染・放射能対策立案のためには土地被覆状況の現状を簡便に地図化するシステムの利用が不可欠である。そのため、飛行体（UAV を含む）にビデオカメラ、ハイパースペクトルカメラを掲載し、対策の基盤情報として使える地図情報の作成を目的に撮影手法の確立を試みた。

4.1 ビデオ画像からオルソ画像の作成

鉛直下方を撮影したビデオ画像からオルソ空中写真を作製する手法を確立した。

- i) ビデオ画像から一定時間間隔で静止画像をキャプチャー
- ii) オルソモザイク画像作成 (Agisoft/Photoscan を使用)



図 4.1 一回のヘリコプターのフライトによるビデオ画像から作成した山木屋地区中心部(中央が山木屋小学校)のオルソ空中写真(左)と山木屋比曾坂入口交差点付近の拡大画像

作成したオルソ空中写真は現時点による地表面被覆を表し、原発事故後に変化した植生現況を知ることができる。図 4.1 右の(a)~(c)は(a)Geospace オルソ空中写真、(b)同じ範囲のオルソ空中写真、(c)拡大画像、の比較である。(c)は 10cm 空間分解能で作製しており、精緻な画像が得られていることがわかる。これらの画像を除染、放射能対策立案の基図として利用できる。

4.2 ハイパースペクトル画像による植生・土地被覆現況図の作成

放射能汚染地域における山林や建物密集地における今後の除染および放射能対策では土地の属性の情報が必要である。そこで、土地被覆ごとに可視~近赤外領域の連続スペクトルが得られるハイパースペクトル画像の UAV および有人ヘリによる低コスト、簡便な撮影を試みた。ここではハイパースペクトル(超多波長)画像による土地被覆分類の可能性を検証した。



図 4.2 ハイパースペクトル計測による異なる地表面のスペクトル(左)、フォールカラー画像(中)および分類結果(右)

図 4.2(左)によると異なる土地被覆や屋根の素材ごとに可視~近赤外域のスペクトルが異なることがわかる。この違いを用いて分類処理を行った画像が図 4.2(右)であるが、同じ屋根でも材質に

より発色が異なっていることがわかる。実際の適用に際しては地上調査(グランドトゥルスデータ)を取得して、各分類項目の種類を特定する必要がある。

5. 地理情報システムによる空間情報管理

本事業で得られた観測情報、空間情報は位置の属性を持つ地理情報である。そこで、地理情報システム (GIS) の上で表示させ、その他の地理情報を重ね合わせて表示することにより、低地の田畑、居住域だけでなく、里山流域を含めた範囲の放射能対策への利用、および除染履歴管理への利用等を想定している。

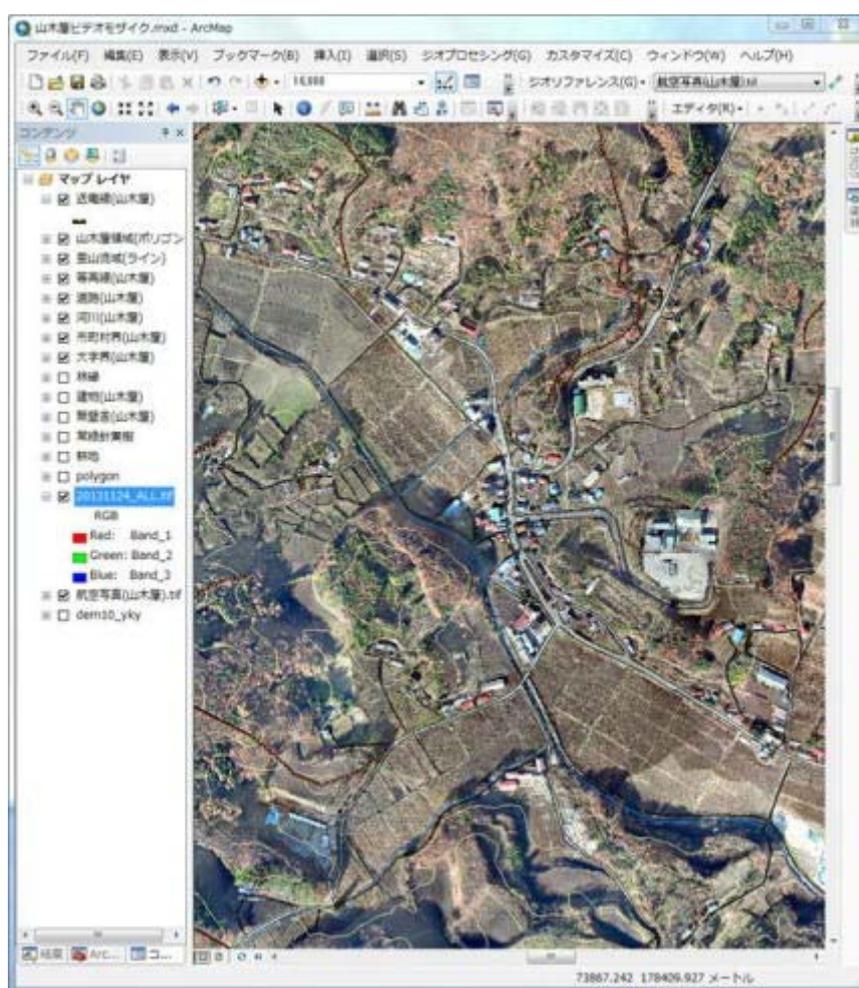


図 5.1 ArcGIS10.2 による山木屋地理情報システムの基本画面

地理情報システム ArcGIS10.1 で表示した山木屋地理情報システムの基本画面を図 5.1 に示す。背景は当実証事業で作成したオルソ空中写真であり、土地被覆の現状を判読できる。河川、行政区等の地理情報を重ねて表示した上に、観測情報を含む地理情報、例えば、除染履歴、空間線量率、放射能濃度 (沈着量) 等のデータも重ねて表示することにより、土地に関する属性を管理できる。セシウム 137 の半減期が約 30 年であり、今後長期間にわたって土地管理を継続させなければならない状況で、地理情報システムは土地資源管理の機能を提供するものである。

5. まとめと提案

低地域の田畑と居住地だけでなく山林を含む多様な領域において UAV を用いて低コスト、効率的に空間線量率を計測するシステムの開発と実証を行った。また、測定結果は地表面の状態の地図化結果と合わせて表示し、解釈されるべきであるため、ハイパースペクトルおよび可視ビデオの空撮システムおよび地理情報システムと同時に使用するトータルなシステムのあり方を検証した。

今後住民の帰還が進むと考えられる避難区域（避難指示解除準備区域）では暮らしのリスクを低減させるための対策が施されなければならない。その方法については除染、封じ込め、隔離等の手段が考えられるが、具体的な対策手法の提案は本報告書の範囲を超える。本提案では地域ごとに固有の対策を立案するための基本情報を統合するプラットフォームとしての地理情報システムの構築の事例を示した。

本実験の主題である放射能モニタリングについて実証した技術の適用を下記のように提案する。

- ・大技術（国や大企業が適用可能な高コストな技術）だけでなく、中・小技術（地域あるいは個人で適用可能な技術）の利用を計るべきである。
- ・電動マルチコプター（ミニサーバイヤー）は高機能化、低価格化が急速に進んでおり、放射能モニタリングの低コスト、効率的な計測システムとなり得る。
- ・電動マルチコプターで計測が困難な場所については大型ラジコンヘリあるいは有人ヘリによるシステムを併用すべきである。
- ・特に、大型ラジコンヘリはペイロードが大きいいため、地形計測、ハイパースペクトル画像の撮影も実施することができた。単一のシステムによる広域計測にこだわらずに、地域の重要度に合わせて柔軟にシステムを選択することが重要である。
- ・その計測範囲は個人あるいは集落における暮らしと関わる範囲、すなわち里山流域を単位とすると良い。これが山村における暮らしの安心を生み出すことになる。
- ・暮らしと関わらない流域は地理情報システムで区分した上で、封じ込め、隔離、あるいはモニタリングに留めても良い。

地域の復興は地域の生業、産業の創成にかかっていると断言しても過言ではない。今回提案する電動マルチコプター（ミニサーバイヤー）は個人や地域の小企業でも活用が可能であり、放射能モニタリングだけでなく、多分野への適用（例えば、農薬散布、IT 農業など）も可能である。波及効果として地域における産業の育成にも貢献でき、新の意味での復興に寄与できる技術であると考えられる。

実施代表者の所属機関：株式会社東芝

実証テーマ名：容器単位での放射能濃度の簡易測定技術の検証

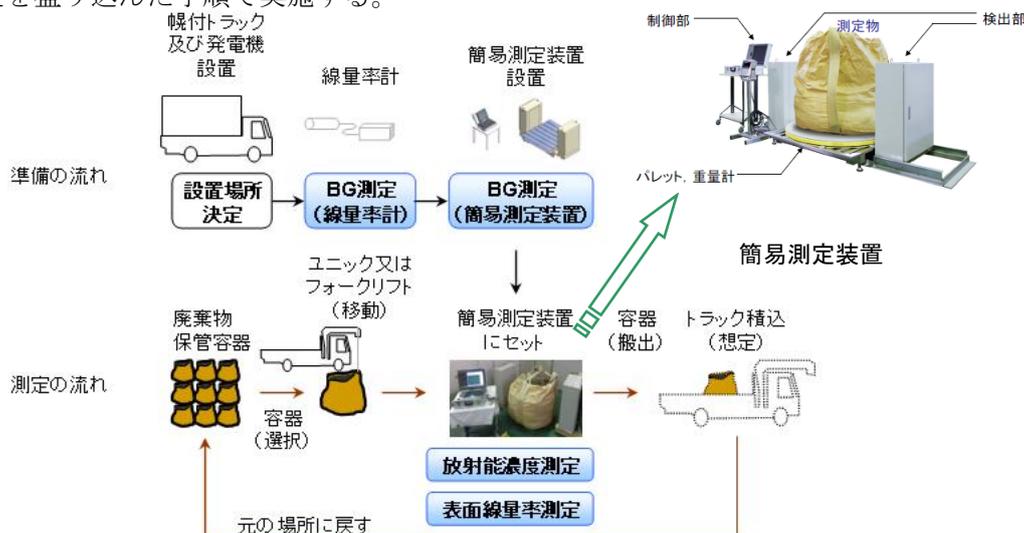
事業の概要：容器単位で放射能濃度を現場測定できる簡易測定装置を用いて、自治体で保管されている除染廃棄物（土壌・灰等）の測定を行い、測定方式及び測定結果の有効性を検証し、実用性、経済性を確認する。

実施内容：簡易測定装置にて、土壌、灰類を一時保管しているフレキシブルコンテナバック（以下「容器」という）を測定、容器形状も合わせてデータを採取し、放射能濃度分布の不均一性や容器形状の変形に対しての測定手法の有効性、及び誤差を評価する。測定時間及び検出下限値を確認し、実証試験を通じて作業手順（作業負荷）としての実用性及び作業効率（時間及びコスト）としての経済性があることを検証する。また、線量率計にて表面線量を測定し、「事故由来廃棄物等処分業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン」に基づく簡易計算法との比較を行う。

技術概要：

1. 試験フロー

一時保管場所の近傍に簡易測定装置を設置し、土壌等の入った容器を自治体より借用して、一時保管場所から容器を移動する工程を模擬、その工程内に簡易測定装置による測定を盛り込んだ手順で実施する。



2. 試験目標

- 放射能濃度の測定手法、及び誤差の評価

3. 期待される効果

(1) 作業効率の向上

- 検体を測定パレットに載せ、簡単操作で測定可能
- 放射能濃度レベルによる効率的な仕分け、管理

(2) 作業者の被ばく低減

- 測定時に検体との距離を確保可能

除染効果：

測定項目として「放射能濃度測定」「表面線量率測定」「容器形状測定」を行い（測定結果は補足資料を参照）、測定結果に対して、工場での試験・解析結果を基に評価した。

(1) 不均一性評価

飛灰は変動誤差が小さいが主灰、土壌においては変動誤差10%以上が多く見られる。（表1）

表1. 放射能の変動係数と大きな検体の割合

種類	測定検体数	変動係数 (2σ / 平均値)	変動係数が10%以上の検体数
主灰	9	7.2~28.2%	8
飛灰	12	1.1~8.4%	0
土壌	20	4.6~44.0%	8

(2) 容器形状評価

容器形状の変形に対する誤差への影響は事前評価を行っており、形状の測定結果は想定範囲内となり、変形による付加誤差はシミュレーション結果（約±8%）を適用できる。

表2. 誤差評価

種類	測定方式		最大誤差
	測定回数	補正	
主灰	1回	なし	33%
	1回	あり	27%
	2回	あり	22%
飛灰	1回	なし	19%
	1回	あり	47%
土壌	1回	あり	31%
	2回	あり	24%

(3) 総合誤差評価

不均一、変形を含めた測定誤差は、補正を行うことで±35%以下となり、不均一性の大きい2検体を除けば±30%に収まる。また、2回測定を行うことで今回測定した全ての検体で±30%以下となる。（表2）

(4) ガイドライン放射濃度簡易計算法との比較

線量率計を用いて表面線量率から放射能濃度を求める簡易計算法の値は、簡易測定装置の結果より約2~5倍大きい。これは表面線量率の最大値を用いるため大きく安全側となる。（図1）

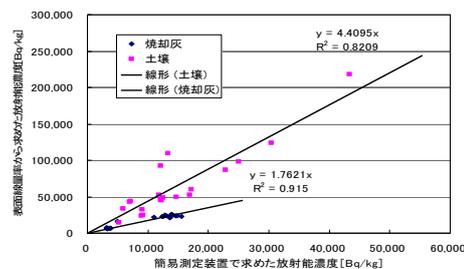


図1. 簡易計算法との比較（焼却灰）

(5) 測定時間と検出下限

BG線量率が0.25 μSv/h以下の時、測定時間1分で検出下限は1000Bq/kg(Cs-137)以下となる。

除去物発生量評価：本実証試験では除去物の発生はなし。

作業員被ばく量評価：

- ・総被ばく線量：100 μSv
- ・作業員最大被ばく線量：6 μSv/人日、平均被ばく線量：3.1 μSv/人日
- ・作業場所平均空間線量率：0.24 μSv/h、作業工数：32人日

コスト評価：

- ・発電機レンタル代：2.4千円/1週間
- ・発電機燃料代：8.3千円/1週間

歩掛り（作業人工、作業速度）：

- ・測定作業：搬出入作業の内数
- ・付帯作業：4人工

コスト評価条件：

- ・測定作業自体は、搬出入作業の工程内で吸収できるので0人工とし、装置の設置、暖気運転、初期のBG測定として2人×2日
- ・付帯設備としては、発電機レンタルとし、ランニングコストは発電機の燃料代

除染作業における安全上の注意：管理区域内ではヘルメット、マスク、手袋を着用

試験場所（住所）：

福島県郡山市、福島市

除去物保管場所と保管状況（写真）：

検体（土壌、焼却灰）は、測定後に提供元へ返却した。

1. 事業の概要

1.1 目的

フレキシブルコンテナ容器（以下、フレコン又は容器）単位で放射能濃度を簡易定量・現場測定できる放射能レベルスクリーニング装置（以下スクリーニング装置又は簡易測定装置）を用いて、自治体で一時保管されている除染廃棄物（土壌・焼却灰等）の測定を行い、測定方式及び測定結果の有効性を検証し、実用性、経済性を確認する。

1.2 実施内容

スクリーニング装置は、NaI シンチレーション検出器、測定モジュールなどを収納した検出部と、検出部からの信号を処理・演算し測定結果を表示する制御部及び測定対象物を載せて重量測定を行うパレットと重量計から構成される。重量測定値及び検出器からの信号を波高分析処理して、予めモンテカルロシミュレーション計算で求めた放射能換算係数より、指定核種（Cs-134, Cs-137）の放射能濃度を演算処理する。工場試験において、容器内に点線源を空間配置した模擬容積検体を用いて、シミュレーション方式・測定結果の妥当性（±20%以内で一致）を確認している。

本実証事業において、自治体で一時保管している土壌、焼却灰容器内部の放射能濃度は必ずしも均一ではないと想定されるため、測定データを採取・評価することで、不均一性や形状変形した容器に対する本装置の測定手法の有効性及び誤差（目標：±30%）を確認・評価し、実用性・経済性検討のため、測定時間及び検出限界値についても確認・評価する。また、線量率計にて表面線量率を測定し、「事故由来廃棄物等処分業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン」に基づく簡易計算法との比較を行う。更に、測定試験を通じて実用性を考察し、適用例を検討するとともにコスト評価を実施する。

2. 試験の内容

2.1 試験フロー

一時保管場所の近傍に本装置を設置し、土壌・焼却灰等の入った容器を自治体より借用して、一時保管場所から容器を移動する工程を模擬、その工程内に本装置による測定を盛り込んだ手順で実施する。

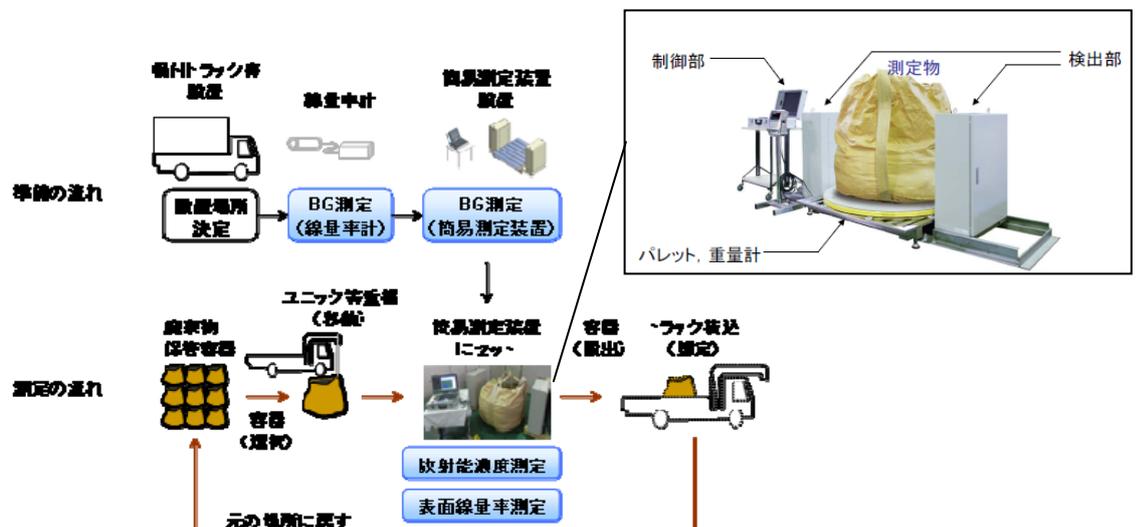


図 2.1 試験フロー

2.2 測定項目

測定項目を以下に示す。

(1) 放射能濃度測定

本装置により放射能濃度を測定する。本装置に容器を載せて 0° 位置を決定後、 0° ～ 150° まで 30° ピッチ（計6点）で測定を行う。検出器1(Det1)にて $0\sim 150^{\circ}$ 方向の測定を行い、検出器2(Det2)にて $180\sim 330^{\circ}$ 方向の測定を行う。

(2) 表面線量率測定

線量率計（サーベイメータ）にて、容器の表面線量率を測定する。上面、底面は各5点ずつ（計10点）測定し、側面は $0\sim 330^{\circ}$ まで 30° ピッチで、側面の上部、中部、下部を測定する（ $12\times 3=36$ 点）。

(3) 容器形状測定

フレコン容器の形状を測定する。容器高さ及び重量を測定する。側面寸法は $0\sim 330^{\circ}$ まで 30° ピッチで、側面の上部、中部、下部の検出器との距離を測定する（ $12\times 3=36$ 点）。参考のため、容器の胴囲を上部、中部、下部の3ヶ所測定する。

2.3 測定試験〔焼却灰〕

焼却灰については、郡山市殿のご協力のもとに、郡山市内クリーンセンターにて、焼却炉から排出される“主灰”と排ガス処理設備で捕集され、薬品処理された“処理飛灰”（以下飛灰）の2種類を測定した。この焼却灰は、焼却施設で容器に入れられ、ユニック等の重機を用いて、搬出され、郡山市内の仮置場にて一時保管されている。今回、この搬出工程内での測定を想定し、焼却施設からトラックへの積込みの途中での測定を模擬して実施した。

測定場所：郡山市内クリーンセンター

測定期間：2013年9月9日～13日

測定検体：21検体（主灰／9検体、
処理飛灰／12検体）



2.4 測定試験〔土壌〕

土壌については、福島市殿のご協力のもとに、福島市内仮置場にて、今回は生活圈森林等からの土壌を測定した。この土壌は、容器に詰められ、ユニック車等に積込まれ福島市内仮置場に搬入され、仮置場内のバックホーやクレーン等の重機で、所定の位置に積上げられ、一時保管されている。今回、この搬入工程内での測定を想定し、ユニック等から容器を仮置場へ降ろし、仮置場内のバックホーやクレーン等の重機で、所定の位置に積上げられる作業の途中での測定を模擬して実施した。

測定場所：福島市内仮置場

測定期間：2013年10月21日～25日

測定検体：20検体（充填率100%／16検体、
充填率66%／2検体、充填率33%／2検体）



3. 試験結果と評価

3.1 放射能換算係数

(1) モンテカルロ計算コードによる評価

本装置の測定値から放射能濃度(Cs-134, Cs-137)へ換算する放射能換算係数は、測定体系を3次元で模擬し、モンテカルロシミュレーション計算で求める方式を採用している。この放射能換算係数の計算条件は表 3.1-1 による。

表 3.1-1 放射能換算係数の計算条件

項目	内容
計算コード	三次元連続エネルギーモンテカルロコード MCNP5
計算体系	3次元体系
γ線発生数	10000000 以上
測定対象物	φ 110cm×110cm フレコン容器
充填率	100%、66%、33% (最大高さ：110cm)
密度	0.6～1.6 g/cm ³
元素組成	土壌 (含水率 0%)
γ線源	Cs-134, Cs-137 (均一容積線源)

(2) 放射能換算係数の試験検証

放射能換算係数の妥当性は、フレコン容器内の各位置に標準点線源を空間配置し、その各位置での検出器の応答を測定し、その測定値に各点線源で割り当てた容積で重み付けして、フレコン全体で平均化することで均一模擬容積線源とみなし、均一容積線源でのモンテカルロシミュレーション計算結果と比較した。放射能換算係数を実験的に求めて検証した結果を表 3.1-2 に示す。誤差は-13%であり、±20%以内で一致することを確認した。

表 3.1-2 均一容積線源での放射能換算係数

項目	感度 [cps/Bq]	放射能換算係数 [(Bq/kg)/cps]	放射能換算係 数の比率*1	放射能換 算係数評 価の誤差
均一容積線源に対する 放射能換算係数 (計算値)	8.78×10^{-5}	19.2 ± 1.0	—	—
点線源での均一模擬容積線源に対 する放射能換算係数 (測定値)	1.04×10^{-4}	16.8 ± 2.7	0.87	-13%

*1：放射能換算係数の計算値に対する測定値との比率

3.2 試験結果

3.2.1 焼却灰測定結果

(1) 放射能濃度測定

容器内での放射能濃度の偏在を評価するために、容器を 30° 間隔で回転させ、測定方向の異なる 6 回の測定を行った。図 3.2-1 に測定方向の異なる 6 回の測定結果とその標準偏差 (2σ) 及び郡山市殿で実施されたサンプリング(主灰 2 検体、飛灰 1 検体)での Ge 検出器による核種分析結果をフレコン単位で示す。本装置によるフレコン容器内の放射能濃度 (Cs-134+Cs-137)は、主灰で 3,100～4,900Bq/kg、飛灰で 11,000～15,400Bq/kg であった。測定方向による変動係数(2σ / 平均値)は、主灰で 7.2～28.2%で、飛灰で 1.1～8.6%であった。

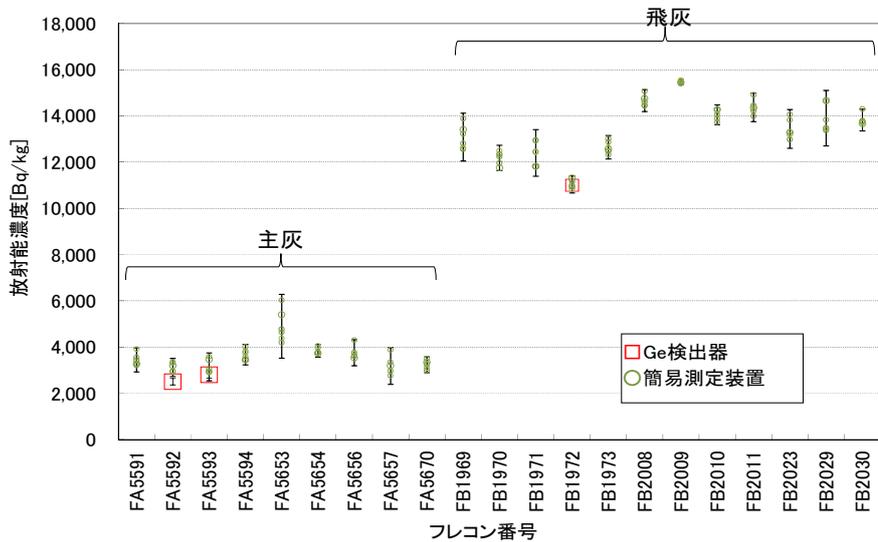


図 3.2-1 放射能濃度測定結果（焼却灰）

なお、サンプリング分析した3検体について、Ge分析結果に対して、本装置の測定結果の平均値は0～+25%以内で一致した。その比較結果を表3.2-1に示す。

表 3.2-1 Ge分析結果と簡易測定装置との比較

種類	フレコン番号	Ge分析結果	簡易測定装置	Ge分析結果に対する簡易測定装置結果の割合[%]
		放射能濃度 [Bq/kg]	放射能濃度 [Bq/kg]	
主灰	FA5592	2,500	3,116	125%
主灰	FA5593	2,800	3,143	112%
飛灰	FBI972	11,000	11,037	100%

(2) 表面線量率測定

30°ピッチで線量率計にて測定したフレコン容器の表面線量率の平均値及び標準偏差(2σ)及び最大値と最小値を図3.2-2に示す。なお、表面線量率は主灰でばらつきの大きな検体があり、変動係数(2σ/平均)は主灰で24~83%、飛灰で17~29%であった。

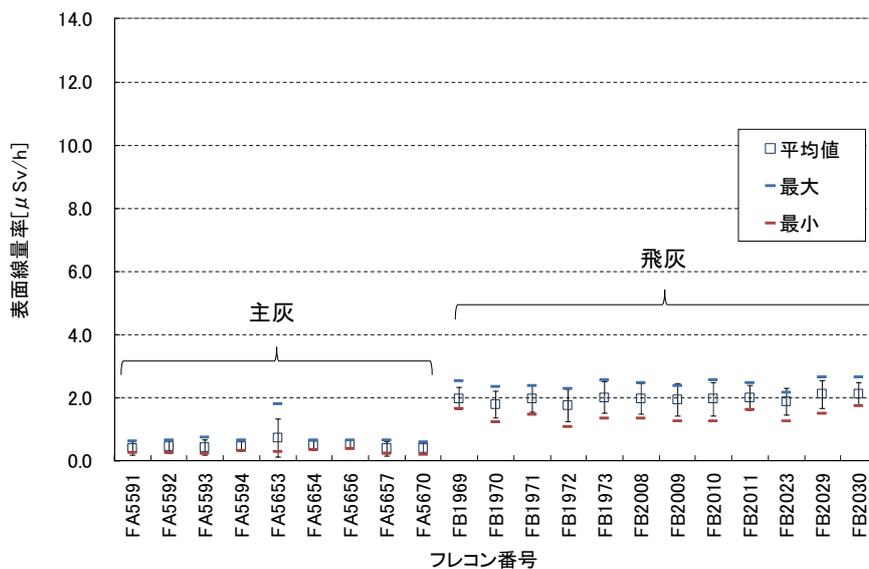


図 3.2-2 表面線量率測定結果（焼却灰）

(3) 容器形状測定

フレコン容器 21 検体の形状測定結果をまとめたものを表 3.2-2 に示す。フレコン容器の直径 $\phi 110\text{cm}$ のときの検出器～フレコン容器間の距離をゼロとした場合の凹凸寸法は、 $-12.5\sim 9.9\text{cm}$ であった。また、直径の平均値は $\phi 110\text{cm}$ 対し約 2cm 大きく、標準偏差(σ)は $\pm 1.6\text{cm}$ であった。

表 3.2-2 形状測定結果 (焼却灰)

項目		上部 (75cm)	中部 (50cm)	下部 (25cm)	フレコン全体
凸 凹	平均[cm]	-1.2	0.3	0.6	-0.1
	標準偏差 σ [cm]	3.7	2.8	2.3	3.1
	凹最大値[cm]	-12.5	-7.8	-6.0	-12.5
	凸最大値[cm]	9.9	9.5	8.3	9.9
直 径	平均[cm]	110.4	112.6	112.8	111.9
	標準偏差 σ [cm]	1.9	0.6	0.6	1.6
	最大値[cm]	112.7	113.4	113.7	112.7
	最小値[cm]	105.4	111.5	111.5	111.5

3.2.2 土壌測定結果

(1) 放射能濃度測定

容器内での放射能濃度の偏在を評価するために、容器を 30° 間隔で回転させ、測定方向の異なる 6 回の測定を行った。図 3.2-3 に測定方向の異なる 6 回の測定結果とその標準偏差 (2σ) をフレコン単位で示す。放射能濃度は、 $5,000\sim 44,000\text{Bq/kg}$ で、測定方向による変動係数 (2σ / 平均値) は、 $5\sim 45\%$ であった。全測定 20 検体のうち 12 検体が 10% 未満で、2 検体が $10\sim 15\%$ で、6 検体が $20\sim 45\%$ であった。

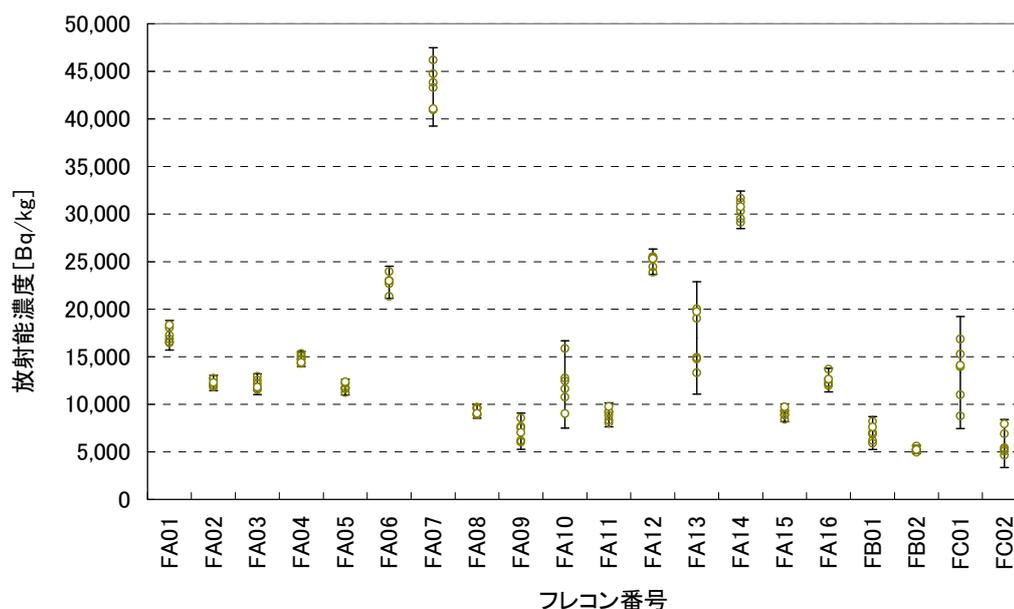


図 3.2-3 放射能濃度測定結果 (土壌)

(2) 表面線量率測定

30° ピッチで線量率計にて測定したフレコン容器の表面線量率の平均値及び標準偏差(2σ)及び最大値と最小値を図 3.2-4 に示す。なお、表面線量率の変動係数(2σ/平均)は 20~124%であった。

表面線量率は一方向からの測定であり、標準偏差が大きナケースがあることが確認された。特に標準偏差が大きいのは FC01 であり、この FC01 の密度は約 1.78 と大きく、遮へい効果による放射線の減衰も大きく、密度の不均一性も考えられ、表面線量率へも影響するため、不均一性の 1 つの要因にはなると考えられる。

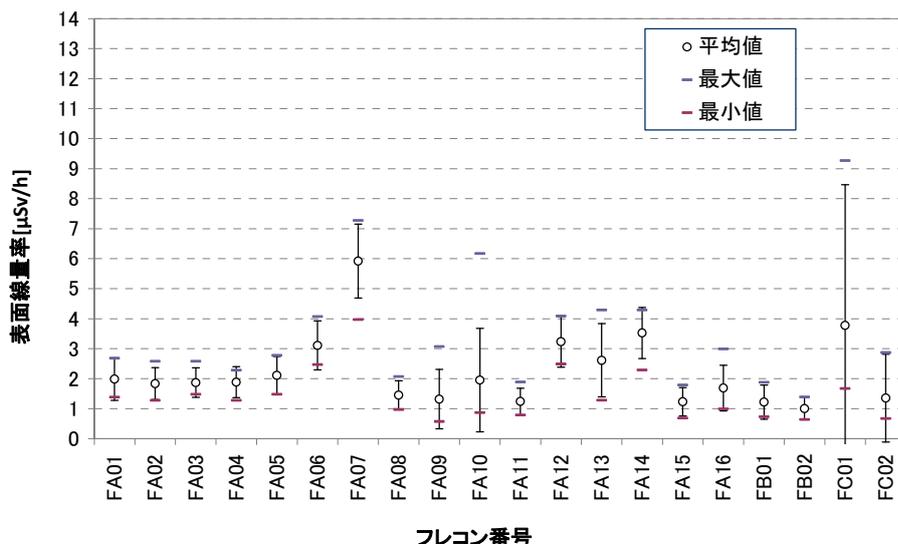


図 3.2-4 表面線量率測定結果 (土壌)

(3) 容器形状測定

フレコン容器 20 検体の形状測定結果をまとめたものを表 3.2-3 に示す。フレコン容器の直径φ110cm のときの検出器~フレコン容器間の距離をゼロとした場合の凹凸寸法は、-21.4~4.8cm であった。また、直径の平均値は約φ110cm でほぼ仕様値通りであるが、標準偏差(σ)は±5.2 cm であった。

表 3.2-3 形状測定結果 (土壌)

項目		上部 (75cm)	中部 (50cm)	下部 (25cm)	フレコン全体
凸 凹	平均[cm]	-4.0	-1.5	0.1	-1.7
	標準偏差σ[cm]	5.6	3.9	4.8	5.1
	凹最大値[cm]	-21.4	-15.2	-11.6	-21.4
	凸最大値[cm]	14.8	6.9	14.0	14.8
直 径	平均[cm]	106.6	109.8	112.2	109.6
	標準偏差σ[cm]	3.7	1.5	6.9	5.2
	最大値[cm]	115.9	115.0	132.2	115.0
	最小値[cm]	96.2	108.0	108.3	108.3

3.3 評価

実証試験で得られた測定結果に対して、工場での点線源を空間配置した模擬容積検体を用いての妥当性確認試験やシミュレーション計算での容器形状変形及び容器～検出器間距離変動に伴う放射能濃度への影響度合いの解析評価を基に評価を行った。

3.3.1 不均一性評価

測定方向を変えての 6 回の放射能濃度測定の結果の変動係数(2σ / 平均値)と変動係数が 10%以上の検体数とその割合をまとめたものを表 3.3-1 に示す。本項での不均一性は、Cs-134, Cs-137 の γ 線量の偏在による放射能濃度測定への影響を評価する。

表 3.3-1 放射能濃度の変動係数と変動係数の大きな検体数

種類	測定検体数	変動係数 (2σ / 平均値)	変動係数が 10%以上の 検体数
主灰	9	7.2~28.2%	8
飛灰	12	1.1~8.4%	0
土壌	20	4.6~44.0%	8

変動係数が 10%以上のケースでは、均一条件で求めた放射能換算係数をそのまま適用すると付加誤差が大きくなることから、その不均一の放射能濃度分布を推定し、付加誤差低減するために、表 3.3-2 に示す方法、測定回数 (1 回と 2 回のケース) にて、放射能濃度分布の推定検討を行った。2 つの検出器の計数比により推定する方法は、一方の検出器を基準にして、比を取ることで、基準側の検出器側に偏在があるかどうかを推定する。直接成分 (光電ピーク) と散乱成分 (コンプトン連続部) の計数比により推定する方法は、フレコン容器中で γ 線の透過距離が長くなるほど直接成分より散乱成分の割合が大きくなるため、奥行き方向の偏在を推定する。

表 3.3-2 放射能濃度分布の推定検討方法種類と測定回数条件

No.	不均一推定手法	測定回数 (角度)	
		1 回 (0-180°)	2 回 (0-180° 及び 90-270°)
1	両側の 2 つの検出器の計数比		
2	直接成分 / 散乱成分の計数比		

焼却灰及び土壌の放射能濃度の変動係数が 10%以上の検体について評価した結果を表 3.3-3 に示す。任意方向測定での変動係数が約 10~44%であったものが、1 回測定不均一推定を行いその補正を行うことで 7~26%に軽減され、2 回測定補正では 7~17%に軽減される。

表 3.3-3 放射能濃度分布の推定補正による誤差評価

No.	項目	主灰	土壌	最大
1	測定方向変動係数	10~28%	10~44%	44%
2	1 回測定不均一推定補正時の変動係数	7~21%	7~26%	26%
3	2 回測定不均一推定補正時の変動係数	7~15%	7~17%	17%

3.3.2 容器形状評価

容器形状の変形に対する放射能換算係数の変動はシミュレーション計算で事前評価している。計算体系としては、歪み、中心位置ずれ、膨らみの 3 種類を想定した。また、検出器～フレコン間距離ずれについても実施している。

今回の容器形状測定結果の±10cm程度は想定範囲内となる。容器形状の歪みによる変動は1～6%の変動で、設置位置の中心からのずれに対する変動は-2～1%で、容器形状が膨らむような変形（2つの検出器に対して両方とも近づくような変形）した場合、最大それぞれ5cm検出器に近接した場合、-4～+5%の変動が発生する。従って、容器形状の変更による付加誤差は±8.1%と見込まれる。

3.3.3 総合評価

本測定系の誤差要因としては、測定装置系の誤差と付加誤差（フレコン変形誤差と不均一性誤差）があり、それらを纏めたものを表3.3-4に示す。そのトータル誤差は1回測定の不均一性補正有りで最大±31%となった。不均一性が大きく補正があまり効かない検体が土壌で2検体(FA10及びFC01が不均一性誤差31%)あり、これを除けば±30%に収まっている。2回測定の不均一性補正有りでは±25%に収まることを確認した。従って、スクリーニング判定レベルに対して、この誤差分を安全側に考慮することで、実用的なスクリーニングが行える。

表 3.3-4 本測定系の誤差要因とトータル誤差

種類	測定方式	計数誤差 #1	放射能換算計数誤差 #2	放射能換算計数評価誤差 #3	フレコン変形誤差 #4	不均一性誤差 #5	トータル誤差
主灰	1回測定で、不均一性補正なし	4.2%	5.2%	13.0%	8.1%	28.2%	33%
	1回測定で、不均一性補正あり	4.2%	5.2%	13.0%	8.1%	21.0%	27%
	2回測定で、不均一性補正あり	4.2%	5.2%	13.0%	8.1%	15.0%	22%
飛灰	1回測定で、不均一性補正なし	4.2%	5.2%	13.0%	8.1%	8.6%	19%
	1回測定で、不均一性補正あり	4.2%	5.2%	13.0%	8.1%	8.6%	19%
	2回測定で、不均一性補正あり	4.2%	5.2%	13.0%	8.1%	8.6%	19%
土壌	1回測定で、不均一性補正なし	4.2%	5.2%	13.0%	8.1%	44.2%	47%
	1回測定で、不均一性補正あり	4.2%	5.2%	13.0%	8.1%	26.0%	31%
	2回測定で、不均一性補正あり	4.2%	5.2%	13.0%	8.1%	16.6%	24%

- #1 検出下限を 800Bq/kg, 判定値を 8,000Bq/kg とした場合の判定値に対する BG 計数率の標準偏差(3σ)として算出
- #2 放射能換算計数の計算における誤差 (表 3.1-2 記載の放射能換算計数の誤差)
- #3 放射能換算計数の計算値と測定値(試験結果)との差異として算出 (線源誤差含む) (表 3.1-2 参照)
- #4 フレコン変形に伴う付加誤差で、シミュレーション計算評価にて算出 (3.3.2 項参照)
- #5 γ線源の不均一性に伴う付加誤差で、今回の実証試験測定検体の最大のもとして記載 (表 3.3-3 参照)

3.3.4 ガイドライン放射能濃度簡易計算法との比較

焼却灰、土壌の測定結果に対して、線量率計による表面線量率からの放射能濃度の簡易計算法と簡易測定装置の測定結果の比較を図3.3-1に示す。

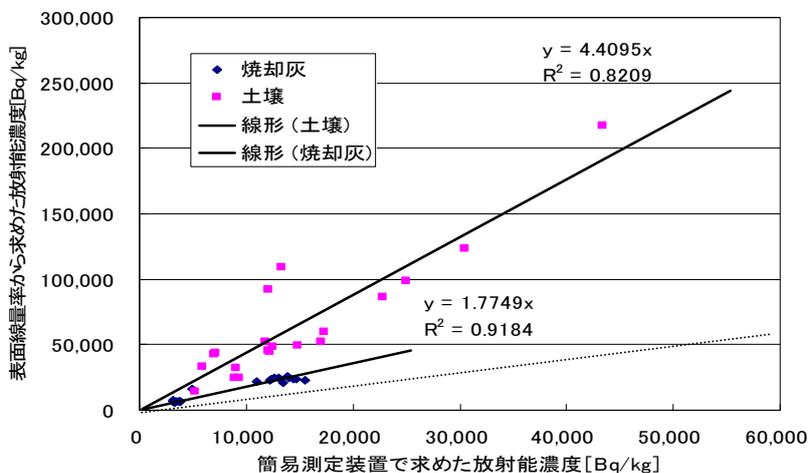


図 3.3-1 簡易計算法と簡易測定装置の放射能濃度比較

本装置結果に対して、近似直線の傾きより焼却灰で約 1.8 倍、土壌で約 4.4 倍にて、概ね相関があることが確認された。

簡易計算法では安全側評価となるように、表面線量率の最大値を用いているため、高めの値となっている。また、今回測定土壌は、生活圏森林土壌であり焼却灰と比べて、密度が小さいものが多く、簡易計算法では減衰補正影響が見かけ上大きく現れ、焼却灰より放射能濃度が高めの値になっていると考えられる。

3.3.5 測定時間と検出下限

今回実証試験の測定時間は 5 分と設定していたが、実用性を考えた場合には、短縮化が望まれるため、測定時間を 5 秒、10 秒、30 秒、60 秒での測定も実施した。BG 線量率が高い方が厳しい条件のため、BG 線量率が高い土壌測定にて評価した。その結果、約 30 秒から 1 分で Cs-137 の検出下限が 1,000Bq/kg 以下 (BG 線量率 : 0.25 μ Sv/h、放射能濃度 26850Bq/kg、密度 0.4g/cm³) にできることを確認した。

なお、計測範囲については、現状仕様で、約 10 万 Bq/kg 程度までは測定可能で、それ以上の場合には、コリメーション等を設置し、線量低減を図ることで対応することは可能と考える。

4. 実用性評価

今回実証試験を実施した郡山市内クリーンセンターでの焼却灰の搬出及び福島市内仮置場での土壌の搬入を代表例として検討した。今回測定した容器の放射能濃度レベル(数千～一万数千 Bq/kg)、BG レベル(～0.3 μ Sv/h 程度)においては、測定時間は 1 分程度にて、検出限界 1,000Bq/kg 以下(Cs-137)で誤差 \pm 30～ \pm 35%以内(不均一性及びフレコン容器形状変形含む)で測定が可能であることを確認した。

焼却灰の搬出時の適用例としては、焼却灰を詰めた容器は重機で一旦ユニックに載せ、ユニックから搬出用のトラックに積み込む手順で、このユニックからトラックへの積み込み時間は大凡 1 分/1 体であった。このケースでは、ユニック上に簡易測定装置を配置することで、先の容器の積み込みを行っている間に、次の容器の放射能濃度を測定することで、作業の負担無く測定が可能と考えられる。

土壌の搬入時の適用例としては、ユニック車で運んできた容器をユニックで降ろし、その容器をバックホー又はクレーン等の重機にて、所定の位置に仮置きする手順で、ユニックからの降ろし作業は大凡 1 分/1 体で、所定の位置への仮置作業は大凡 2 分/1 体と推定される。このケースでは、ユニックから容器を降ろす場所に簡易測定装置を設置することで、作業者の負担及び作業時間のロスも少なく、容器の放射能濃度を測定することが可能と考えられる。他のケースにおいても、工程、設置場所、台数等を適切に選定することで対応できると考えられる。

5. コスト評価

簡易測定装置による容器単位での放射能濃度測定に係わる付帯作業人工、作業付帯設備費及びランニングコストを評価し、その結果を表 5-1 に示す。

表 5-1 コスト評価（測定 1 週間当たり）

評価項目	評価内容	評価コスト	備考
付帯作業人工	設置+BG 測定= 2 人工 暖機運転= 2 人工	4 人工	測定自体は、班出入作業の内数とする。装置設置、BG 測定、暖機運転時間を評価対象とし、2 人作業とする。
付帯設備	発電機	2. 4 千円	1 週間のレンタル代
ランニングコスト	発電機ガソリン代	約 9 千円	1 5 0 円/ℓとして算出

6. 作業員被ばく量評価

6.1 作業員被ばく量評価

試験期間における測定試験作業と放射線管理に要した被ばく線量は表 6-1 の通りであった。

表 6-1 実証試験期間中の従事者の被ばく量

作業内容	測定試験	放射線管理	合計
作業工数 [人日]	24	8	32
総被ばく量 [μ Sv]	79	21	100
最大被ばく量 [μ Sv/人日]	6	4	—
平均被ばく量 [μ Sv/人日]	3.3	2.6	3.1 (平均)

※電子式線量計による測定値のためバックグラウンド線量率による被ばくを含む

6.2 作業環境の空間線量率評価

郡山市内クリーンセンター、福島市内仮置場のいずれにおいても、作業前と作業後の空間線量率に有意な変化はなく、郡山市内クリーンセンターで装置周辺： 0.18μ Sv/h、作業エリア周辺： 0.18μ Sv/h、福島市内仮置場で装置周辺： 0.25μ Sv/h、作業エリア周辺： 0.31μ Sv/h であった。

6.3 フレコン表面線量率測定に係る被ばく線量評価

サーベイメータを用いて有人でフレコンの表面線量率測定した場合の被ばく線量としては、今回ケースでは、①フレコン周辺空間線量率 0.84μ Sv/h で、②BG 線量率 0.25μ Sv/h で、③有人測定に要する時間を約 2 分/体（測定方法等により変わる）と想定し、④運搬するフレコン数を 200 体/日としたケースでは簡易測定装置を用いることにより $(①-②) \times ③ \times ④ = 約 4.0 \mu$ Sv/日の被ばく線量低減が期待できる。

7. まとめ

今回測定したフレコン容器 41 検体のデータ（放射能濃度レベル：数千～一万数千 Bq/kg、BG レベル： $\sim 0.3 \mu$ Sv/h 程度）においては、2 台の検出器による不均一性の推定補正を行うことで、1 回測定(回転無し)では、 $\pm 20 \sim \pm 35\%$ 、2 回測定(90° 回転有り)では $\pm 20 \sim \pm 25\%$ の誤差範囲で放射能濃度を測定できることを確認した。スクリーニング判定はこの誤差を考慮することで対応できる。測定時間については、BG レベル 0.3μ Sv/h 程度、検出限界は 1,000Bq/kg (Cs-137) の条件では約 1 分が達成できる見込みであり、実用的なレベルであると考え。なお、計測範囲については、現状仕様で、約 10 万 Bq/kg 程度までは測定可能で、それ以上の場合には、コリメーション等を設置し、線量低減を図ることで対応することは可能と考える。今後、回転の有無も含め、具体的かつ適切な条件設定を行うことで、個々のケースにも対応可能と考える。

実施代表者の所属機関：株式会社フジタ

実証テーマ名：焼却灰中放射性セシウムの高効率洗い出し技術の実証

事業の概要：

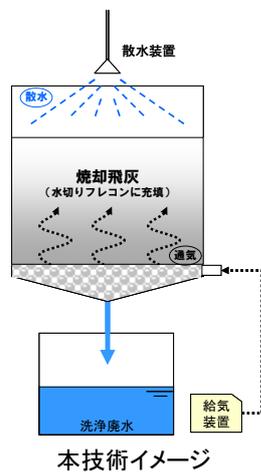
放射性セシウムの含有量及び溶出性が高い焼却飛灰の濃度低減と溶出抑制を目的として、機械攪拌等を用いることなく、間欠散水・通気を利用して廃水量を既往例の約 1/10 程度に抑えながら、同等の放射性セシウム洗浄効果を有する高効率洗い出し技術を実証する。

実施内容：

試験は散水、通気、粒径による洗い出し効果を検証するために予備試験（カラム試験）を行い、実証試験の諸条件を確定させたのち、実証試験を実施する。実証試験により実規模での装置仕様の検討やコスト試算、安全性評価を行う。

技術概要：

1、試験フロー



カラム試験

- ① 散水強度試験
- ② 通気試験
- ③ 粒径評価試験

実証試験

- ① 洗浄効果評価
・放射能濃度低減率、溶出抑制効果
- ② 装置仕様検討
・散水、通気装置、洗浄槽構造
- ③ 処理システム検討
・前処理（破碎、含水調整）
・処理能力、浸出水性状評価
・モニタリングシステム検討
- ④ 安全性評価
・空間線量率、粉じん
- ⑤ 最適システム検討
・前処理方法、減容化処理方法
- ⑥ 経済性評価

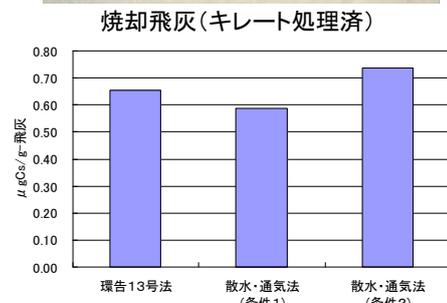
2、試験目標

- ・従来の約 1/10 程度の廃水量（液固比 0.5）で同等の洗い出し効果を目指す
- ・実規模での装置仕様、経済性、安全性の把握



3、期待される効果

- ・ 8,000Bq/kg 超の焼却飛灰を 8,000Bq/kg 以下に低減させることで放射性物質汚染対処特措法における管理型処分場での処分量を削減できる。
- ・ 洗浄により易溶出性画分を除去しているため、埋立後の溶出リスクを低減できる。
- ・ 廃水量を大幅に削減する特長を有するため、廃水処理施設の小型化、簡略化、省エネルギー化へ大きく寄与することが期待される。



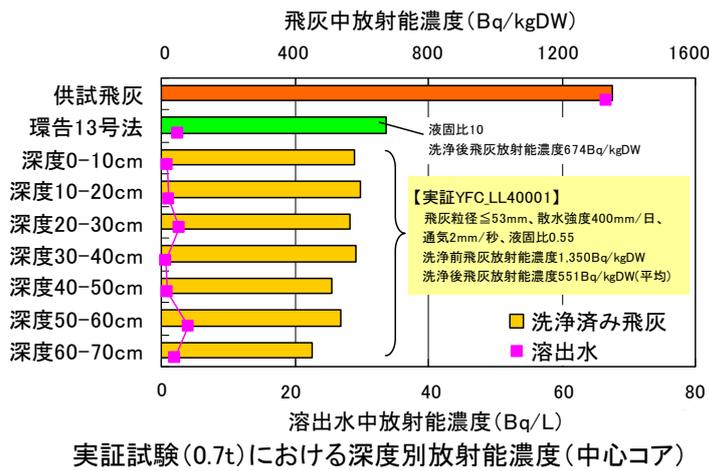
※環告13号法は液固比10、散水・通気法は液固比0.5~0.7
(液固比=廃水量/初期飛灰重量)

飛灰中安定 Cs の洗い出し量の比較(事前検討)

その他：

除染効果：

従来技術である機械攪拌を想定した環告13号法（液固比^{*}10、6hr 振とう）と比較して、本技術の実証試験結果（飛灰0.7t、液固比0.55、24hr 間欠散水・通気）によりほぼ同等の洗い出し効果を有することが実規模にて示された。本結果から本技術により易溶出性の放射性セシウムを含有する飛灰の放射能濃度と洗浄後飛灰の溶出リスクの低減が可能であることが確認された。



【本技術（実証試験全体）】
飛灰中放射能濃度（低減率）：
444～574Bq/kgDW（55～64%）
溶出値：0.7～6.0Bq/L



【従来技術（環告13号法）】
飛灰中放射能濃度（低減率）：
591～701Bq/kgDW（44～50%）
溶出値：2.4～4.7Bq/L

※液固比＝廃水量／初期飛灰重量

除去物発生量評価：

洗浄廃水発生量 0.5～0.6m³/t(飛灰)

吸着剤発生量 10kg/m³×0.5～0.6m³/t(飛灰)＝5～6kg/t(飛灰)（フッ素系吸着剤分散液使用時）

作業員被ばく量評価：

作業場所平均空間線量率 0.04 μSv/hr、作業時間 8 時間/日

作業員最大被ばく量 12 μSv（破碎処理・洗浄試験等管理担当、8 時間×13 日間）

作業員平均被ばく量 10 μSv

コスト評価：

59 千円/t(飛灰)

歩掛り（作業人工、作業速度）：

飛灰充填量 0.7t/フレコン袋、24hr 処理の場合、

洗浄作業人工 0.27 人工/t

洗浄作業速度 0.03t/hr

コスト評価条件：

飛灰処理量 5t/日、無放流（蒸発乾固）方式、乾燥物はフレコン保管

施設建屋建設費、吸着剤保管容器費、産廃処理費は除く

除染作業における安全上の注意：防じんマスク（捕集効率 95%以上）・ゴム手袋・ゴム長靴着用、試験を行った防塵テント内には集塵機を設置

試験場所（住所）：

宮城県山元町

除去物保管場所と保管状況（写真）：

飛灰は提供先へ返却、水処理に用いたゼオライト等汚泥は県内産業廃棄物処分場へ埋立処分

1. 供試材料

本テーマでは仮設焼却炉（ストーカ炉）にて災害廃棄物を焼却した際に排出される焼却飛灰を供試材料とした。飛灰はキレート処理され、フレコンバッグに約 2 ヶ月間保管されていたものを使用した。飛灰の状態としては写真 1-1 のように固化し大きな塊状になっている割合が大きかった。カラム試験では 53、19、9.5mm 以下に篩分けした飛灰を、実証試験では破碎後、53mm 以下に篩分けした飛灰をそれぞれ試験に用いた。



写真1-1 飛灰(有姿)

写真1-2 飛灰(53mm 以下)

写真1-3 飛灰(9.5mm 以下)

(1) 物理特性

図 1-1 に供試飛灰の破碎有無に伴う、粒度分布の相違を示す。試料は 53mm 以下のものを対象として、JIS A1204（土の粒度試験）で行った。破碎無しの飛灰粒度分布状況は 2-75mm に 70%、0.075-2mm に 13%、0.075mm 未満に 17%であった。一方破碎有りの飛灰粒度分布は 2-75mm に 46%、0.075-2mm に 18%、0.075mm 未満に 36%と破碎無しに比べて 2-75mm が減少し、0.075mm 未満が増加した。

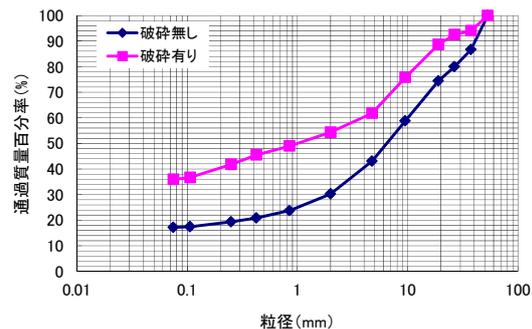


図1-1 供試飛灰の粒度分布

(2) 放射性セシウム の 溶出特性

本テーマでは比較として従来技術である機械攪拌による飛灰洗浄方式を用いた。従来技術の効果を想定した試験として液固比 10、6 時間振とう攪拌する環告 13 号法を実施した。本技術と従来技術の液固比、試験方法を表 1-1 に示す。本報告における「液固比」は特段記載が無い限り廃水ベースでの値である。

表1-1 本テーマにおける従来技術と本技術の比較

	従来技術	本技術
方式	機械攪拌	間欠散水・通気
液固比 ^{※1} (給水ベース)	5~10	0.7~1.0
液固比 ^{※2} (廃水ベース)	約 5~10	0.5 程度
試験方法	環告 13 号法 (液固比 10、6 時間振とう)	カラム試験 現地実証試験

※1 液固比(給水ベース) = 総給水量^{※3} / 初期飛灰重量
 ※2 液固比(廃水ベース) = 廃水量 / 初期飛灰重量
 ※3 総給水量 = 含水用給水量 + 洗浄処理用給水量

供試飛灰(≤53mm)の放射能濃度、含水率及び環告 13 号法による Cs 溶出量を表 1-2 に示す。供試飛灰はロット間で放射能濃度等に大きな差は見られなかった。また環告 13 号法で洗浄した後の飛灰の放射能濃度及び低減率を表 1-3 に示す。供試飛灰の連続溶出試験結果を図 1-2 に示す。連続溶出は JISK0058-1 有姿攪拌試験に準じた溶出試験を繰り返し 3 回行った。溶出率

(溶出水中放射エネルギー／飛灰中放射エネルギー) は1回目で69%、2回目で3.5%、3回目で0.5%であり、1回目で全体の95%が溶出することが確認された。

表1-2 供試飛灰の放射能濃度

試料	検体数	放射能濃度 (Bq/kg 有姿)	含水率 (%)	放射能濃度 (Bq/kgDW)	Cs 溶出量 (Bq/L)
供試飛灰	8	885±47	30±0.8	1,270±57	68±4

注1) kgDW : 乾燥重量、注2) ±S.D. (標準偏差)

表1-3 洗浄済み飛灰の放射能濃度及び低減率

試料	検体数	放射能濃度 (Bq/kg 有姿)	含水率 (%)	放射能濃度 (Bq/kgDW)	低減率 (乾重ベース)(%)
洗浄済み飛灰 (環告13号法)	8	279±33	57±2.7	645±65	50±5

注) ±S.D.

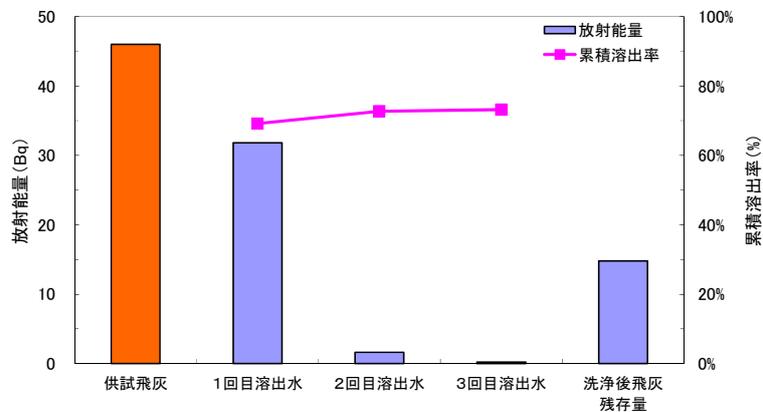


図1-2 供試飛灰の連続溶出

2. 現地カラム試験

(1) 目的と方法

本技術での供試飛灰の溶出特性を把握し、実証試験に向けて散水強度、通気量、飛灰の粒径等の仕様を決定することを目的としてカラム試験を実施した。

図2-1にカラム試験装置を示す。試験装置は円筒型の透明塩ビ製カラム(φ104×400mmH)を用い、飛灰を1カラムにつき約2.8kg、高さ約300mm充填した。飛灰充填後、チュービングポンプを用いて上部から間欠的に給水し、処理区に応じてカラム下部よりブロアにて給気を行った(写真2-1)。カラム試験条件を表2-1に示す。

カラム試験ではまず含水用として各カラムに約500ml程度給水し、浸出水が確認された時点から液固比0.5となるように散水強度および散水期間を設定した。通気は基本設定を2mm/秒とし、その2倍、4倍量の処理区を設けた。試験期間中は1カラムに

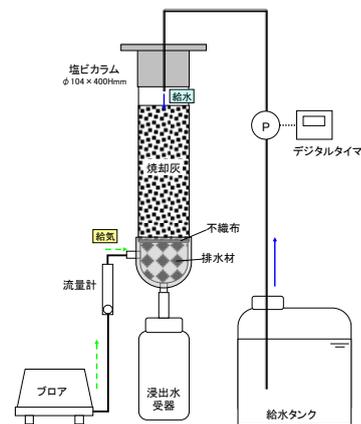


図2-1 カラム試験装置



写真2-1 カラム試験状況

つき4回(例:2、6、21、26時間後)浸出水をサンプリングし、それぞれを検液とした。また試験終了後、カラム内の洗浄済み飛灰を上、中、下層に3等分に分割し、それぞれを分析用試料とした。

分析項目は以下のとおり。放射能濃度はゲルマニウム半導体検出器により測定した。

【浸出水】pH、電気伝導率(EC)、浸出水及び溶液密度、各種イオン濃度、放射能濃度

【飛灰】含水率、放射能濃度、溶出値(JISK0058-1)

表2-1 カラム試験条件

No	カラム名称*	試験条件概要	期間(日)	最大粒径(mm)	飛灰量(kg)	密度(g/cm ³)	給水量		通気(mm/秒)
							液固比	強度(mm/日)	
1	YFC_N32000	320mm/日	0.6	9.5	2.8	1.0	0.5	320	0.0
2	YFC_N32001	320mm/日,通気	0.6	9.5	2.8	1.0	0.5	320	2.0
3	YFC_N16000	160mm/日	1.1	9.5	2.8	1.0	0.5	160	0.0
4	YFC_N16001	160mm/日,通気	1.1	9.5	2.8	1.0	0.5	160	2.0
5	YFC_N8000	80mm/日	2.2	9.5	2.8	1.0	0.5	80	0.0
6	YFC_N8001	80mm/日,通気	2.2	9.5	2.8	1.0	0.5	80	2.0
7	YFC_N16002	160mm/日,通気量2倍	1.1	9.5	2.8	1.0	0.5	160	4.0
8	YFC_N16004	160mm/日,通気量4倍	1.1	9.5	2.8	1.0	0.5	160	8.0
9	YFC_L16001	160mm/日,通気,粒径中	1.1	19	2.8	1.0	0.5	160	2.0
10	YFC_LL16001	160mm/日,通気,粒径大	1.1	53	2.8	1.0	0.5	160	2.0
11	YFC_N16001n	160mm/日,通気N ₂	1.1	9.5	2.8	1.0	0.5	160	2.0
12	YFC_N16001c	160mm/日,通気CO ₂	1.1	9.5	2.8	1.0	0.5	160	2.0
13	YFC_N64000	640mm/日	0.3	9.5	2.8	1.0	0.5	640	0.0

※カラム名称の凡例



(2) 結果

1) 散水強度試験

散水強度を80~640mm/日に変更したカラムの浸出水として洗い出された累積放射エネルギーを図2-2に示す。また試験終了後に採取したカラム内飛灰の層別の放射能濃度を図2-3に示す。散水強度320mm/日以上では放射性セシウム(137Cs)の洗い出し量が減少する傾向が確認された。一方で洗浄後飛灰の放射能濃度は上層、下層に大きな差はなく、中層において洗い出し量が少ないカラムほど放射能濃度が高くなっていった。この結果から散水強度を上げることにより中層付近において水みちが形成され、洗い出し量の減少が生じた可能性が考えられ、本技術において適切な散水強度の設定が必要であることが示された。

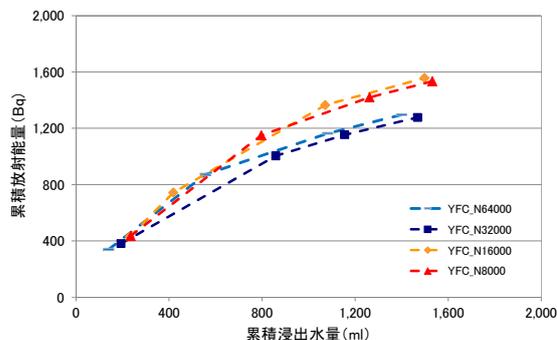


図2-2 洗い出し累積放射エネルギー

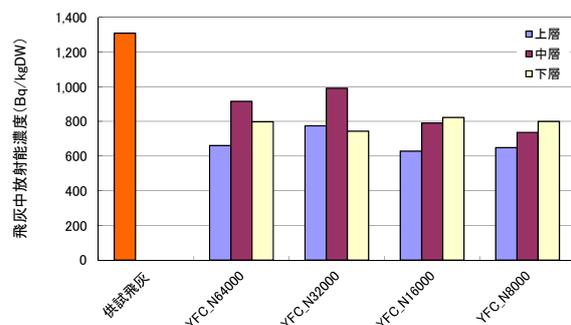


図2-3 洗浄済み飛灰放射能濃度

2) 通気試験

通気の有無による洗い出し量の変化を図2-4に示す。散水強度320、160mm/日では通気により洗い出し量が約1割程度増加する傾向が確認された。一方で80mm/日処理区では通気による効果は確認されなかった。図2-5に洗浄済み飛灰の層別の放射能濃度を示す。洗い出し量の増加が確認された処理区では、主に中層の濃度低減が確認された。

次に通気量の変化による洗い出し量への影響について図2-6に示す。通気量を2mm/秒から2倍、4倍量としたが、洗い出し量は増加せず、通気無と同等かそれ以下の結果となった。また通気媒体を窒素と二酸化炭素ガスに変更した処理区で比較したところ(図2-7)、ガスの種類による洗い出し量に差は認められなかった。これらの結果から本技術における通気の効果としては、空気中の二酸化炭素等による化学的な作用ではなく、水みち形成を抑制する物理的な作用が影響していることが推察された。またその通気量については適切な設定が必要であることが確認された。

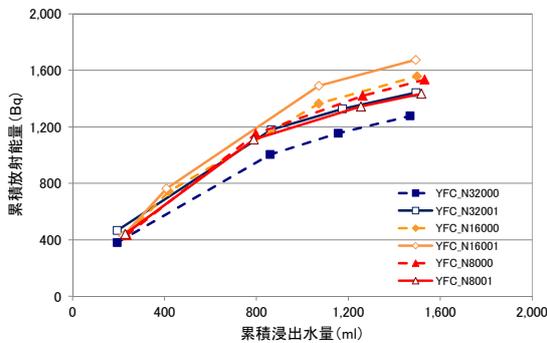


図2-4 洗い出し累積放射エネルギー
(通気有無)

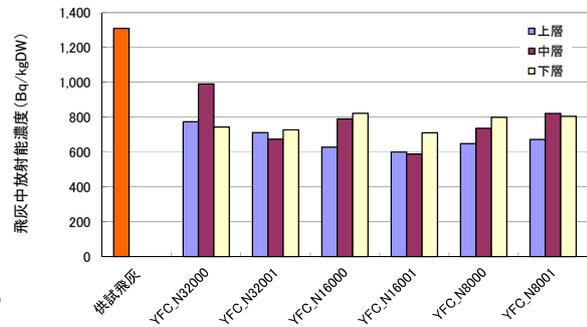


図2-5 洗浄済み飛灰放射エネルギー濃度
(通気有無)

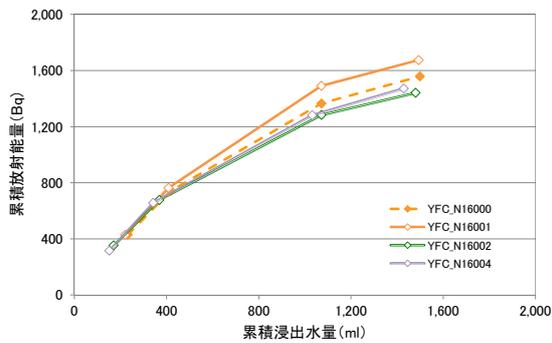


図2-6 洗い出し累積放射エネルギー
(通気量)

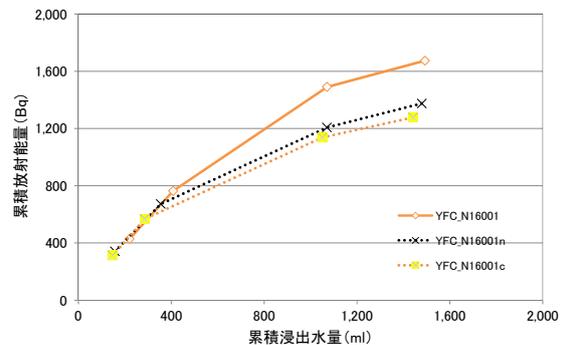


図2-7 洗い出し累積放射エネルギー
(通気媒体)

3) 粒径評価試験

カラムに充填する飛灰の粒径を9.5、19、53mm以下と変え、それぞれの溶出量の差について検証を行った。試験の結果、粒径が大きいものが多いカラムほど放射性セシウムの洗い出し量が減少する傾向が認められた。特に53mm以下(YFC_LL16001)では上、中、下層ともに放射能濃度の低減率が低い結果となった(図2-8、9)。

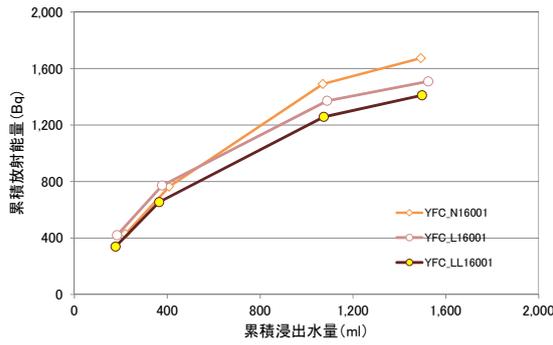


図2-8 洗い出し累積放射エネルギー (飛灰粒径)

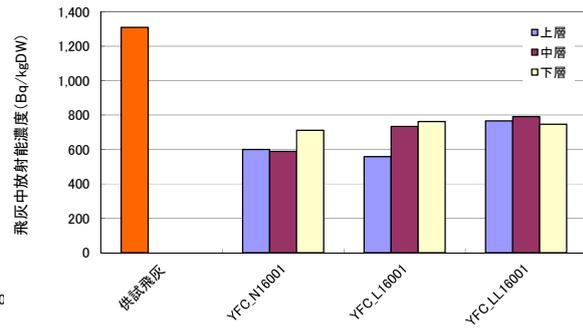


図2-9 洗浄済み飛灰放射能濃度 (飛灰粒径)

3. 現地実証試験

(1) 目的と方法

カラム試験の結果、本試験に用いた飛灰は液固比 0.5 程度で放射性セシウムを洗い出すことができることが確認されたことを受けて、実規模での装置仕様の検討及び洗い出し効果の検証を行うことを目的として現地実証試験を行った。実証試験の作業フローを図3-1に示す。

実証試験で使用した飛灰はキレート処理により固化・塊状化されており、前処理としてバックホウによる一次破碎、破碎機（ロールクラッシャー）による二次破碎を必要に応じて行った。破碎した飛灰を水切りフレコンに充填し、重量及び表面線量率等を測定した後、洗浄装置へ設置した。洗浄槽内のフレコンに対して処理を開始する前に含水用として、浸出水が確認されるまで約 0.12L/kg(飛灰)を給水した。洗浄槽では上部からスプリンクラーによる散水、下部からはコンプレッサーによる通気を行える仕様とし、それぞれ流量計を設置し、試験期間中の給水・給気量を計測した。また本試験では浸出水モニタリング槽を設け、槽内に GM 式水中サーベイメータを浸漬させることにより浸出水中の放射線量の経時的な変化を常時計測するシステムを開発・設置した。試験終了後、水切りフレコン内の飛灰についてφ75mmVU塩ビ管を用いて水平方向に3地点コアサンプリングし、採取したコアを垂直方向に3点の合計9点の洗浄済み飛灰サンプルを採取した。本試験では図3-1の作業フローを1回として、0.35tを3回、0.7tを1回の計4回の試験を行った。実証試験の各処理区条件を表3-1に示す。

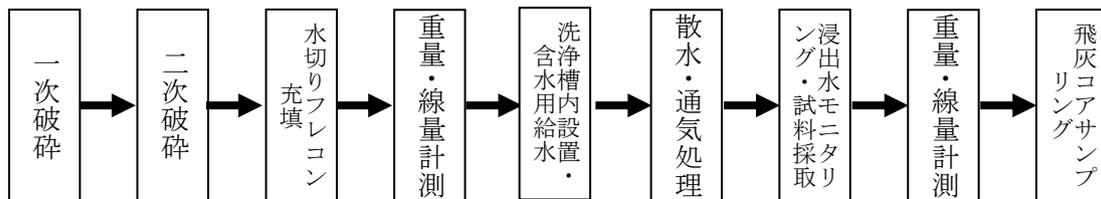


図3-1 実証試験フロー



写真3-1 一次破砕



写真3-2 二次破砕



写真3-3 洗浄槽内設置



写真3-4 散水処理

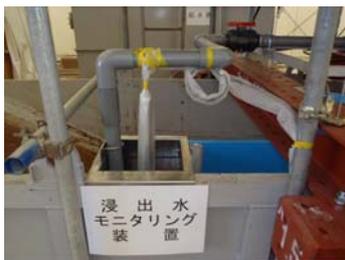


写真3-5 浸出水モニタリング装置



写真3-6 コアサンプリング

表3-1 実証試験条件

No	カラム名称	試験条件概要	期間 (日)	最大 粒径 (mm)	飛灰量 (t 有姿)	密度 (g/cm ³)	給水量		通気 (mm/秒)
							液固 比	強度 (mm/日)	
1	実証 YFC_LL24001	240mm/日,通気	1.0	53	0.35	1.0	0.65	240	2.0
2	実証 YFC_LL24000	240mm/日	1.0	53	0.35	1.0	0.65	240	0.0
3	実証 YFC_LL40001	400mm/日,通気	1.0	53	0.70	1.1	0.55	400	2.0
4	実証 YFC_LL48000	480mm/日	0.5	53	0.35	1.0	0.65	480	0.0

(2) 洗浄効果

1) 飛灰中放射能濃度の低減率及び溶出値

表3-2に実証試験における環告13号法と本技術による飛灰中放射能濃度の低減率及び溶出値を示す。実証試験での洗浄後の飛灰の含水率は $47.6 \pm 2\%$ であった。環告13号法の飛灰中放射能濃度の低減率が44~50%、洗浄済み飛灰の溶出値(JISK0058-1)が2.4~4.7Bq/Lであったのに対して、液固比0.55の処理区(実証YFC_LL40001)では低減率は58~61%、溶出値は1.2~5.1Bq/Lであり、ほぼ同等の洗い出しの効果が得られた。水切りフレコン内の断面・深度方向の飛灰放射能濃度についても顕著な分布は確認されず、ほぼ一様に洗い出しが行われたことが確認された(図3-2、3)。一方、実証試験全体において洗浄後飛灰の溶出値については、下層が他層よりも高くなる傾向が確認された。これは本技術が上部から下部へ通水する方式であるため、下部への残留分が多くなりやすいことが要因と考えられるが、全層の平均値としては、4回の実証試験で1.9~3.9Bq/Lであり問題にならない濃度と考えられた。通気による効果としては、浸出水への溶出量として通気有において6%増加が確認され、低減率が通気有では61~63%、通気無55~57%と通気有において低減率も高くなった(実証YFC_LL24001、実証YFC_LL24000)。散水強度を2倍、散水期間を1/2とした処理区(実証YFC_LL48000)では各層で低減率はほぼ同等、溶出値がやや上昇する傾向が確認された。

表3-2 飛灰中放射能濃度の低減率及び溶出値

処理区	初期飛灰放射能濃度 Bq/kgDW	環告13号法			本技術			
		洗浄済飛灰放射能濃度 Bq/kgDW	低減率 %	溶出値 Bq/L	試料採取地点	洗浄済飛灰放射能濃度 Bq/kgDW	低減率 %	溶出値 Bq/L
実証 YFC_LL24001	1,220	631	48	4.7	上層	471	61	0.7
					中層	444	64	1.9
					下層	453	63	3.1
実証 YFC_LL24000	1,260	701	44	2.4	上層	563	55	1.3
					中層	557	56	1.1
					下層	548	57	3.7
実証 YFC_LL40001	1,350	674	50	2.5	上層	574	58	1.2
					中層	554	59	3.0
					下層	524	61	5.1
実証 YFC_LL48000	1,180	591	50	2.4	上層	493	58	2.2
					中層	452	62	3.6
					下層	513	57	6.0

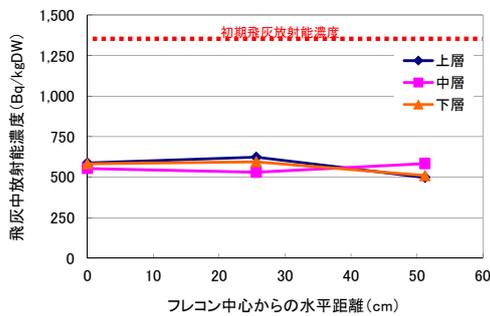


図3-2 断面方向の放射能濃度 (実証 YFC_LL40001)

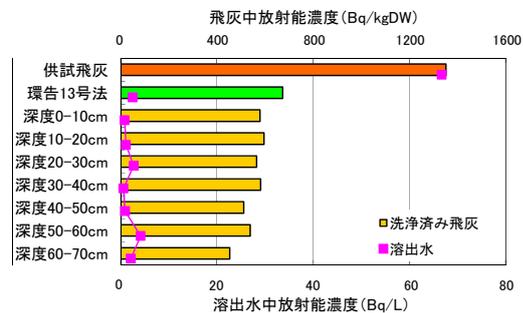


図3-3 深度別放射能濃度 (実証 YFC_LL40001 中心)

2) 高濃度飛灰への適用可能性について

本試験では供試飛灰放射能濃度が約 900Bq/kg と本技術のターゲットとする 8,000Bq/kg 超の灰ではなかったが、今回の試験とほぼ同様の条件にて行った一般廃棄物（一廃）焼却施設飛灰でのカラム試験では低減率約 90%となり、22,000Bq/kgDW 以上の飛灰を 3,000Bq/kgDW 以下まで低減できることが報告されている¹⁾ (図3-4)。本実証試験により、カラム試験

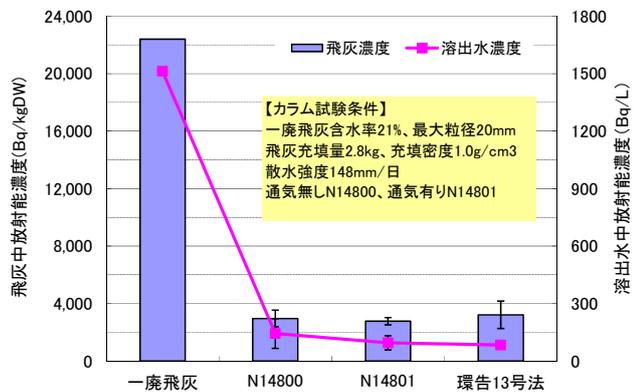


図3-4 一廃飛灰での低減効果

から実規模へのスケールアップが可能であることが確認されたことから、易溶出性の放射性セシウムを含有する飛灰については、本技術を用いることで 8,000Bq/kg 以下に低減することは可能であると考えられる。

3) 表面線量率

実証試験において飛灰を充填した水切りフレコンに対して表面線量率等の計測を行った。計測は NaI シンチレーションサーベイメータ (NHC7、富士電機) (2013年8月27日校正) を用いて行った。洗浄前後の有姿での表面線量率の結果を表3-3に示す。フレコン内の飛灰の含水率は洗浄前が約 30%、洗浄後は約 47%であった。

表3-3 フレコン表面線量率

処理区	BG (μ Sv/h)	初期飛灰(μ Sv/h)			洗浄済み飛灰(μ Sv/h)			低減率(%)
		1cm (コリメータ有)	1cm (コリメータ無)	100cm	1cm (コリメータ有)	1cm (コリメータ無)	100cm	1cm (コリメータ無)
実証 YFC_LL24001	0.034	0.075	0.127	0.036	0.041	0.068	0.034	46
実証 YFC_LL24000	0.037	0.074	0.126	0.042	0.032	0.061	0.036	52
実証 YFC_LL40001	0.035	0.078	0.151	0.043	0.044	0.077	0.037	49
実証 YFC_LL48000	0.034	0.070	0.131	0.040	0.039	0.065	0.036	51

4) 浸出水モニタリング

写真3-7に実証試験の排水状況を示す。洗浄槽にて飛灰から浸出した水は手前側の浸出水モニタリング槽(容量26L、滞留時間1.4~2.7hr)に入り、モニタリング槽からオーバーフローした水が下の受け槽に貯留される。計測中心点がモニタリング槽中央に来るように設置されたGM式水中サーベイメータ(S&DLサーベイメータ、 $\phi 42 \times 530$ mm)(写真3-8)による20分間毎の積算カウント値経時変化例を図3-4に示す。測定はモニタリング槽が空の状態である散水・通気処理開始前の含水用給水時から開始し、処理開始約1.5時間後に槽が満水となりオーバーフローが始まり定常状態となった。図より槽内の放射線量が浸出水の貯水とともに大きく上昇してほぼ一定となった後、減少する傾向を示すことが確認された。また減少の傾きは減少直後が急であるが、時間とともに緩やかになってくることが本計測から明らかになった。



写真3-8 GM式サーベイメータ

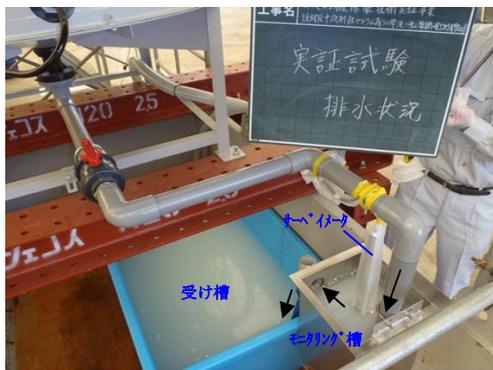


写真3-7 実証試験排水状況

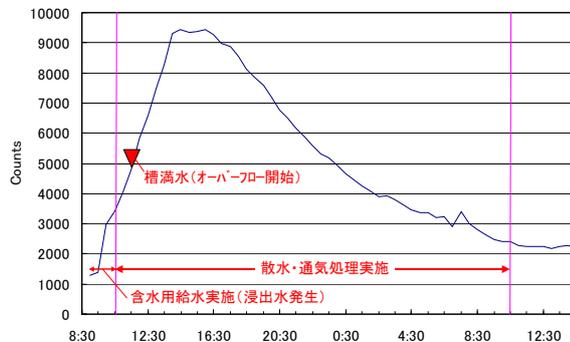


図3-4 浸出水モニタリング結果
(実証 YFC_LL40001・滞留時間 1.6hr)

(3) 安全性評価

1) 空間線量率

実証試験期間中、NaIシンチレーション式スペクトロメータ(RT-30、GEORADIS社)を使用して、空間線量率を常時計測した。空間線量率は0.03~0.04 μ Sv/hで推移しており、バックグラウンドから大きな変化は認められなかった。

2) 作業員被ばく量

作業員の被ばく量については個人線量計(DOSEi、富士電機)を携帯させ、毎日被ばく量を報告・記録した。作業員の被ばく量は以下のとおりであった。

- ・作業場所平均空間線量率 0.04 μ Sv/h、作業時間 8時間/日×13日間
- ・作業員最大被ばく量 12 μ Sv(主な作業: 飛灰破碎処理、洗浄試験、浸出水管理)

3) 粉じん測定

本試験における粉じん調査を行った。調査は実証試験作業の中で最も粉じんの発生が想定される①破碎処理と、②下部からの通気実施時の洗浄槽上部についてそれぞれ測定を実施した。測定はローボリウムエアサンプラー(SIP-32L、柴田科学)及びデジタル粉じん計(LD-3K2、柴田科学)を用いて行った。粉じん測定の結果、B測定値は①0.13mg/m³、②0.12mg/m³と管理濃度である3mg/m³を大きく下回る値であった。

(4) 作業効率調査

実証試験において、0.7tを充填した水切りフレコンの洗浄槽への設置へ10分、含水用の給水に40分を要した。洗浄に要する時間を24時間とすると合計時間は24.8時間/袋となった。作業人数については、洗浄槽への設置2人、含水用給水に1人必要であったが、散水・通気処理が開始されるとタイマー制御で運転されるため、初動確認を行った後の実働人数はゼロであった。

4. システム検討

(1) 前処理方法

本試験で使用した飛灰はキレート処理された後に約2ヶ月間保管されていた飛灰であり、固化がすすみ塊状になっていた。カラム試験及び実証試験の結果、細かい粒径の割合が増加することにより放射性セシウムの洗い出しが進むことが示された。このことから塊状化した飛灰については前処理として破碎処理を行うことが有効であると考えられる。

本実証試験では固化した飛灰を破碎する方法として、本試験ではバックホウによる一次破碎、ロールクラッシャーによる二次破碎を行った。クラッシャー方式は飛灰の含水率が高いと付着により処理不能になったが、適切な含水率調整、破碎方式の選定により処理向上が図られることを確認した。バックホウ方式は比較的付着に強いが、処理能力が低いためバケットの改良が必要であることが確認された。両方式とも低含水時で実施する場合は集塵機等による粉じん対策が必要である。

(2) 減容化処理方法

・吸着剤検討

本技術の特長として少ない水量で洗い出しを行うため、排出される廃水も高塩濃度(実証 YFC_LL40001 廃水: pH10.9、EC 20.9S/m、Cl⁻ 180,000mg/L)になる。高塩濃度下においてCs吸着剤であるプルシアンブルー(以降PB)の吸着性能について検討を行った。供試材料として市販のPB分散液(PB含有量10%)を用いた。添加PB量及び反応時間とCs低減率の関係を図4-1に示す。試験の結果、PB量1g/L(反応時間100分)で廃水中の放射性セシウムの99%が除去され、高塩濃度下においてもCs除去が可能であることが確認された。

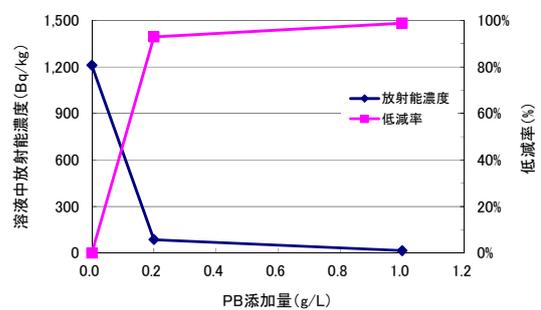


図4-1 吸着剤量と低減率

(3) 最適フロー検討

本技術を組み込んだ飛灰洗浄システムのフローを図5-1に示す。前処理としての破碎は対象とする飛灰の性状により要否を判断する。洗浄廃水中の放射性セシウムは吸着剤で除去し、吸着剤はコンクリートボックス等遮蔽壁を有するエリアにて保管する。Cs除去後の処理水については、高濃度塩類及び重金属も含まれることが予想されるため下水道放流もしくは濃縮・乾燥による無放流が想定されるが、本洗浄技術の廃水の特徴（少量・高塩濃度）を考えると図のような無放流タイプにおいてその優位性が大きくなると考えられる。さらに乾燥物の保管方法や被ばく防護等の課題はあるが、本技術の特徴から洗浄廃水を直接乾燥させることができればシステムとして大幅なコスト削減につながる可能性がある。

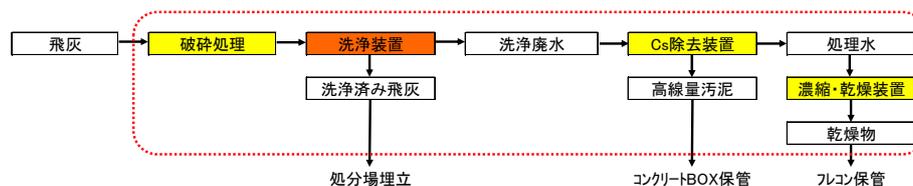


図5-1 飛灰洗浄フロー(赤枠内:防じん建屋内に設置)

5. 経済性評価

上記飛灰洗浄フローについて従来技術と本技術のコスト比較を行った(表5-1)。

表5-1 本技術と従来技術のコスト比較(5t/日、無放流)

飛灰洗浄方式	単位	機械攪拌式洗浄 (従来技術)	散水・通気洗浄 (本技術)
【試算条件】			
液固比	m ³ /t	5	0.5
廃水量	m ³ /日	25	2.5
労務	人工	3	2
【コスト】			
洗浄工程	円/t(飛灰)	17,800	7,700
廃水処理工程	円/t(飛灰)	31,800	31,100
濃縮・乾燥工程	円/t(飛灰)	29,900	13,100
労務費	円/t(飛灰)	10,800	7,200
処理単価(合計)	円/t(飛灰)	90,300	59,100

6. まとめ

- ・本技術(散水・通気洗浄)により易溶出性の放射性セシウムを含有する飛灰の放射能濃度低減と洗浄後飛灰の溶出リスク低減が可能であり、指定廃棄物減容に寄与しうる結果であった。
- ・実証試験により実規模において従来技術の約1/10相当である液固比0.55にて従来技術とほぼ同等の洗い出し効果が得られ、洗浄廃水量の大幅な削減が可能であることが確認された。
- ・本技術は可動部が少なくスケールアップしやすいこと、また従来技術に比べ低エネルギー、低コストな技術であることから飛灰洗浄システムの全体コスト削減への貢献が期待できる。
- ・本技術の通気の効果としては、水みち形成を抑制する補助的な作用であることが示唆された。その増加分としては飛灰の性状にもよるが約1割程度と推定された。

【参考文献】1)久保田ら、散水・通気法による焼却飛灰中放射性セシウムの高効率洗い出し技術の開発、第24回廃棄物資源循環学会研究発表会論文集、pp.579-580、2013

実施代表者の所属機関：大成建設株式会社

実証テーマ名：磁性ナノ粒子を利用した焼却飛灰からの放射性セシウム回収技術

事業の概要：焼却飛灰に加水したスラリーに、吸着剤を担持した少量の磁性ナノ粒子を直接添加・混合した後、磁力選別機を通過させて放射性セシウムを回収する飛灰除染技術を検討する。磁力選別に小型汎用機（ネオジム磁石使用）を活用し、除染済みスラリーも小型真空脱水装置で処理する一連のコンパクトな放射性セシウム回収システムを検証する。

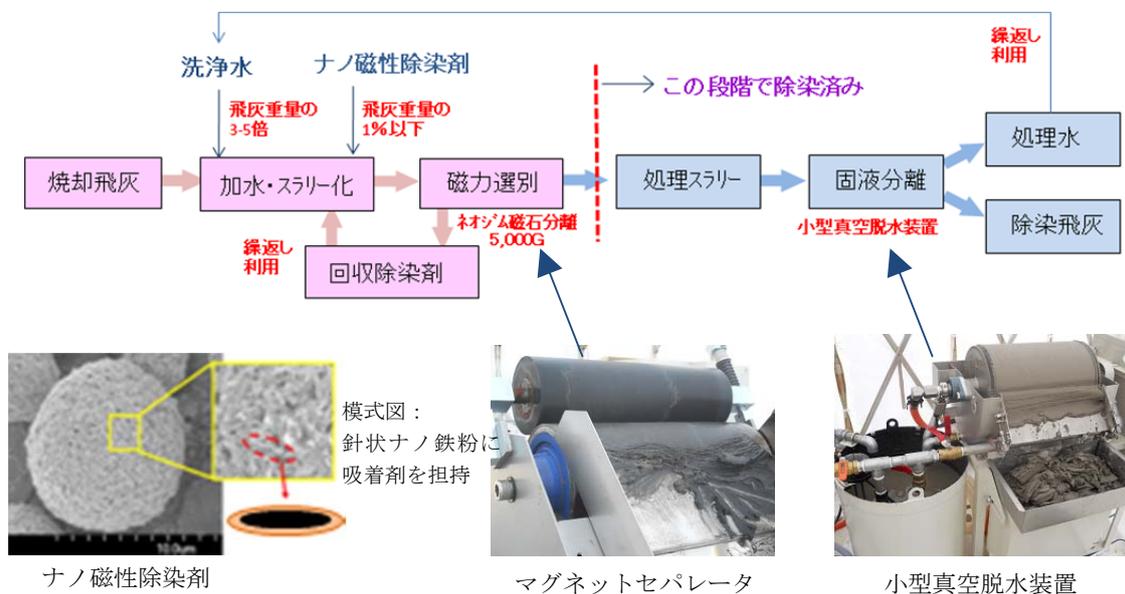
実施内容：

デモ機レベルの実証プラントを用いて、飛灰洗浄とナノ磁性吸着剤による可溶性セシウム回収技術を検証する。

- (1) 除染効率・物質収支の評価 (2) 経済性の評価 (3) 安全性の評価

技術概要：

【試験フロー】



【試験目標】

- (1) 飛灰中の可溶性セシウムをナノ磁性除染剤（対飛灰重量比 0.2～1% 添加）で回収
- (2) ネオジム磁石使用の小型汎用機による磁力選別と小型真空脱水装置を組み込んだ処理システムの検証
- (3) 実処理時の経済性・安全性評価に資するデータ把握

【期待される成果】

- (1) 可溶性セシウム回収による放射性セシウムを含んだ焼却飛灰の減容化
- (2) 可溶性セシウムを少量の除染剤へ吸着し、溶出リスクを抑制して安全に保管
- (3) 仮設焼却施設等に併設可能な小型の飛灰処理システムの提案

その他：特になし

除染効果：

実証プラントにおける試験条件と処理飛灰の分析結果を以下に示す。Case 2以降は、磁力選別機を通過させた飛灰スラリーを攪拌槽に戻して50分間循環処理し、除染剤を念入りに回収することで、平均82%の除染率が得られた。一部のケースでは水溶性Cs含有比率を上回る除染率が得られ、回収除染剤を繰り返し利用した試験ケースでも、70%程度の除染率は得られた。

処理飛灰の再溶出試験結果から、液相の放射能濃度は低濃度に抑制された。また、除染剤（フェロシアンイオン含有）由来の全シアンは排水基準に合致し、飛灰由来のPbおよびCdは定量下限値未満であった。

Case No.	飛灰試料	攪拌槽条件			磁力選別機 流量** (L/min)	除染後飛灰 放射能濃度 (Bq/kg-dry)	除染率 (%)	処理飛灰の再溶出試験 (固液比1:10、6時間)				
		固液比	除染剤 添加率 (%)	攪拌 時間 (min)				放射能 濃度 (Bq/kg)	T-CN (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	
Case 1	①	1:5	1	30	5	27,000	36.9	—	—	—	—	
Case 2		1:5	1		10	5,200	87.7	<13	0.7	<0.01	<0.01	
Case 3		1:5	0.5		10	5,800	85.5	40	0.5	<0.01	<0.01	
Case 4		1:5	0.2		10	10,000	76.5	135	0.4	<0.01	<0.01	
Case 5		1:5	0.5		10	7,700	80.9	25	0.3	<0.01	<0.01	
Case 6		Run 1	1:10*		0.5	20	3,200	92.0	31	0.2	<0.01	<0.01
		Run 2					6,700	82.9	88	0.2	<0.01	<0.01
		Run 3					9,300	76.2	99	0.2	<0.01	<0.01
Case 7		1:10	0.2		60		4,400	89.3	25	<0.1	<0.01	<0.01
Case 8		②	1:5		0.5		30	2,700	90.4	51	<0.1	<0.01
Case 9	Run 1	①	1:10*	60	4,300		89.3	39	<0.1	<0.01	<0.01	
	Run 2				10,000		74.7	155	0.1	<0.01	<0.01	
	Run 3				13,000		67.4	206	<0.1	<0.01	<0.01	
Case 10	②	1:5	0.2	60	6,600		75.5	92	<0.1	<0.01	<0.01	

* Case 6およびCase 9は、新たな飛灰に対して、洗浄水および回収除染剤を3回繰り返し利用した。

** Case 2以降は、攪拌槽と磁力選別機（マグネットセパレータ）で飛灰スラリーを50分間循環し、除染剤回収効果を向上させた。

参考：飛灰① 平均放射能濃度 41,000 (Bq/kg-dry)、水溶性Cs比率86% (pH調整、固液比1:5)

飛灰② 平均放射能濃度 28,000 (Bq/kg-dry)、水溶性Cs比率88% (pH調整、固液比1:5)

除去物発生量評価：

○処理系への投入量

項目	重量(t)	体積(m ³)	備考
飛灰	1.0	1.18	指定廃棄物
洗浄水	3.3	3.3	繰り返し利用含む想定
磁性除染剤	0.002	0.002	飛灰重量の0.2%
pH調整剤	0.1	0.0625	75%硫酸
合計	4.4	4.5	

○処理系からの回収量

項目	重量(t)	体積(m ³)	備考
放射性Cs濃縮物	0.034	0.023	除染剤+飛灰磁化物+含水を含む
洗浄後飛灰	1.1	0.84	<8,000Bq/kg以下、含水率56%
回収洗浄水	3.3	3.09	Cs放流基準合致、 重金属類排水基準合致
合計	4.4	4.0	

作業員被ばく量評価：

作業場所平均空間線量率 除染前エリア 1.2 μSv/hr、除染後エリア 0.2 μSv/hr

作業員最大被ばく量 24 μSv (作業時間7時間×14日間の累計)

作業員平均被ばく量 19 μSv

コスト評価：

処理単価 46千円/t (暫定)

歩掛り (作業人工、作業速度)：

作業人工：0.5人工/t、作業速度：0.5t/hr

コスト評価条件：

処理飛灰量 4 t/day (200~240t/dayクラスの仮設焼却炉等に併設する。)

処理期間 2年間 (飛灰処理量3,000t) *防護建屋および回収除染剤の保管費用含まず。

除染作業における安全上の注意：スラリー化する前段階の飛灰取扱いに際しては、マスク、保護服、保護帽を着用し、集塵機を稼働させた。

試験場所 (住所)：

栃木県那須塩原市

除去物保管場所と保管状況：処理飛灰と回収除染剤を混合して、提供時のフレコンに戻し、放射能濃度を測定後に飛灰提供元 (那須塩原市クリーンセンター) へ返却

【I. 供試飛灰試料の初期性状評価】

実証プラントでの試験に着手する前に、供試飛灰試料（都市ごみ焼却施設排出）の放射能濃度、水溶性セシウムの含有量、その他性状評価のための分析および室内での除染試験を実施した。

1. 飛灰試料（有姿）の放射能濃度および含水率

飛灰試料①で 35,000Bq/kg、飛灰試料②で 24,500Bq/kg であり、焼却プラントから処理灰として排出されたものであり、20%弱含水している状態であった（表 1.1）。

表 1.1 飛灰有姿での放射能濃度測定結果

飛灰試料	放射能濃度(Bq/kg-wet)			含水率 (%)	放射能濃度(Bq/kg-dry)		
	Cs-134	Cs-137	合計		Cs-134	Cs-137	合計
飛灰試料①	11,000	24,000	35,000	18.9	13,600	29,600	43,200
飛灰試料②	7,500	17,000	24,500	16.5	9,000	20,400	29,400

2. 飛灰試料の水溶性セシウム含有率の評価

通常の水溶出試験および実際の処理を想定した場合の pH 調整しながらの攪拌混合による溶出試験で評価した場合の水溶性セシウム含有率を表 1.2 に示す。

2.1 水溶出試験

飛灰試料を固液比 1 : 10 で溶出試験（6 時間往復振とう）し、固液分離後のろ液側と残渣側の放射能濃度および、残渣側の含水率を測定した結果を表示す。ろ液中の放射能濃度を 10 倍（固液比 1 : 10）し、初期放射能濃度と比較した結果を水溶性 Cs 比率とした。飛灰試料①および②ともに 94%となった。

2.2 pH 調整時の水溶性セシウムの溶出状況

実証プラントでの処理を想定して、飛灰 150g に洗浄水 750g を加えた固液比 1 : 5 のスラリーとし、飛灰 150g に対して pH 調整用の 75%硫酸を 12mL 添加する条件で、200rpm で 60 分間攪拌した場合の放射能濃度の測定結果を示す。水溶性 Cs 比率は若干低減し、飛灰試料①で 86%、飛灰試料②で 88%であった。

表 1.2 飛灰試料の水溶性セシウム含有率

試験方法	飛灰試料		放射能濃度 (Bq/kg)			含水率 (%)	水溶性Cs 比率(%) *
			Cs-134	Cs-137	合計		
水溶出試験 (固液比1:10)	飛灰試料①	ろ液	990	2,300	3,300	—	94
		残渣	730	1,600	2,300	49.4	
	飛灰試料②	ろ液	700	1,600	2,300	—	94
		残渣	530	1,100	1,600	52.3	
pH調整溶出時 (固液比1:5)	飛灰試料①	ろ液	1,800	4,200	6,000	—	86
		残渣	1,700	3,700	5,400	62.9	
	飛灰試料②	ろ液	1,400	2,900	4,300	—	88
		残渣	1,200	2,600	3,800	60.6	

* 水溶性 Cs 比率の算出方法

水溶出試験の場合：（ろ液の放射能濃度×10 倍）と初期放射能濃度（Bq/kg-wet）の比率

pH 調整溶出の場合：（ろ液の放射能濃度×5 倍）と初期放射能濃度（Bq/kg-wet）の比率

3. 飛灰洗浄水および飛灰のその他性質

3.1 飛灰洗浄水の水質

前記 2.および 3.における液相（飛灰洗浄水）の水質分析結果を表 1.3 に示す。

pH 調整することで、飛灰由来の鉛溶出量は低減し、逆にカドミウムの溶出量が増大する結果であった。排水基準を上回る溶出量を確認した項目は、鉛およびカドミウムであった。

表 1.3 飛灰洗浄水の水質分析結果

測定項目	単位	飛灰試料①		飛灰試料②		参考 排水基準
		水抽出 固液比1:10	pH調整時 固液比1:5	水抽出 固液比1:10	pH調整時 固液比1:5	
pH	—	12.3	8.5	12.3	8.4	5.8-8.6
EC	mS/m	4,600	8,100	5,000	8,500	—
蒸発残留物	mg/L	37,000	66,000	40,000	74,000	—
ナトリウム	mg/L	3,000	5,900	3,300	6,500	—
カリウム	mg/L	4,300	8,000	4,000	7,600	—
カルシウム	mg/L	5,600	10,000	5,900	11,000	—
塩化物イオン	mg/L	19,000	32,000	18,000	26,000	—
カドミウム	mg/L	0.01未満	0.32	0.01未満	0.42	0.1 以下
全シアン	mg/L	0.1未満	0.1未満	0.1未満	0.1未満	1 以下
鉛	mg/L	0.78	0.17	2.6	0.26	0.1 以下
クロム	mg/L	0.10未満	0.10未満	0.10未満	0.13	—
六価クロム	mg/L	0.05未満	0.05未満	0.07	0.11	0.5 以下
ひ素	mg/L	0.01未満	0.01未満	0.01未満	0.01未満	0.1 以下
水銀	mg/L	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	0.005 以下
セレン	mg/L	0.01未満	0.01	0.01未満	0.02	0.1 以下

3.2 重金属含有量

底質調査法（環水大水発第 120725002 号）に準拠して測定した飛灰試料の重金属含有量を表 1.4 に示す。鉛、クロム、カドミウムなどが高濃度で確認された。

表 1.4 重金属含有量 (mg/kg-dry)

項目	カドミウム	全シアン	鉛	クロム	ひ素	水銀	セレン
飛灰試料①	61	1未満	860	150	10	12	1.3
飛灰試料②	46	1未満	1000	180	9.9	5.6	1.3

3.3 飛灰の磁化物量

1L ビーカーに飛灰有姿試料 150g を分取し、750g の水道水を添加した後 10 分程度攪拌混合（200rpm）した後に、マグネットバー（表面磁束密度 5,000 ガウス）を挿入して、回収した飛灰磁化物の重量を表 1.5 に示す。

表 1.5 飛灰磁化物量

項目	単位	飛灰試料①	飛灰試料②
回収重量（湿潤）	g	6.76	9.43
含水率	%	61.4	61.9
乾燥重量	g	2.6	3.6
比率	%	1.7	2.4

飛灰試料に含まれる磁化物量は飛灰試料①で 1.7%、飛灰試料②で 2.4%であった。なお、別途蛍光 X 線分析した結果からは、Fe、Si、Al などの元素含有量が飛灰元試料と比較して増加していた。

4. 室内除染試験

試験手順 (写真 1.1 参照)

- ・1L ビーカーに飛灰 150g を 5 倍量もしくは 3 倍量の水道水を添加してスラリー化し、75% 硫酸を 12mL 添加して攪拌を継続した。
- ・スラリー pH を測定し、磁性除染剤を飛灰重量の 1% 添加した。
- ・適宜スラリー pH を確認しながら、pH10 を超過しないように 75%硫酸を追加し、90 分程度まで攪拌混合した。
- ・ビーカーにマグネットバー (ネオジム磁石内臓の SUS 円筒器具で、その表面磁束密度 5,000G ガウス程度) を挿入して、飛灰スラリーから磁性除染剤を回収し、除染剤回収後のスラリーについて、放射能濃度と液相の全シアン濃度を測定した。

試験結果

表 1.6 および表 1.7 に試験結果を示す。固液比 1 : 5 での除染率は飛灰①で 93%、飛灰②で 90%となった。固液比 1 : 3 では除染率がそれぞれ 80%および 76%の結果であった。また、固液比 1 : 3 の試験では pH 調整用の硫酸添加時に発煙や発熱がみられたため、実証プラントでは固液比 1 : 5 の条件をベースに実施することとした。



写真 1.1 スラリー化した状況およびマグネットバーでの除染剤回収状況

表 1.6 固液比 1 : 5 のときの放射能濃度と全シアン溶出量

試料名		放射能濃度 (Bq/kg-wet)			含水率 (%)	放射能濃度 (Bq/kd-dry)	除染率 (%)	全シアン (mg/L)
		Cs-134	Cs-137	合計				
飛灰試料①	ろ液	12	25	37	—	—	—	0.5
	残渣	310	650	960	69.3	3,100	93	—
飛灰試料②	ろ液	<5	12	<17	—	—	—	0.2
	残渣	310	600	900	69.1	2,900	90	—

表 1.7 固液比 1 : 3 のときの放射能濃度と全シアン溶出量

試料名		放射能濃度 (Bq/kg-wet)			含水率 (%)	放射能濃度 (Bq/kd-dry)	除染率 (%)	全シアン (mg/L)
		Cs-134	Cs-137	合計				
飛灰試料①	ろ液	< 9	24	< 33	—	—	—	2.0
	残渣	860	1,900	2,760	67.9	8,600	80	—
飛灰試料②	ろ液	9	12	21	—	—	—	1.3
	残渣	780	1800	2,580	64.4	7,200	76	—

【Ⅱ. 実証試験設備での試験結果】

1. 実証プラント設備の概要 (図 2.1、図 2.2)

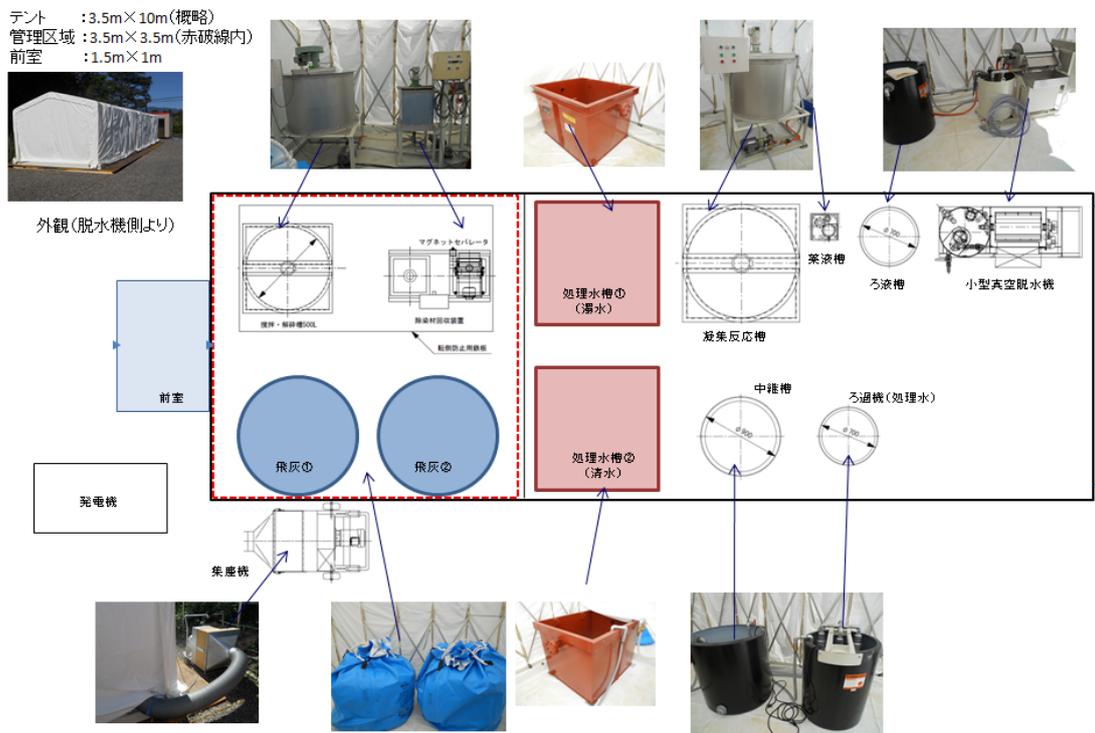


図 2.1 設備のレイアウト図 (3.5m×10の仮設テント内に設置)

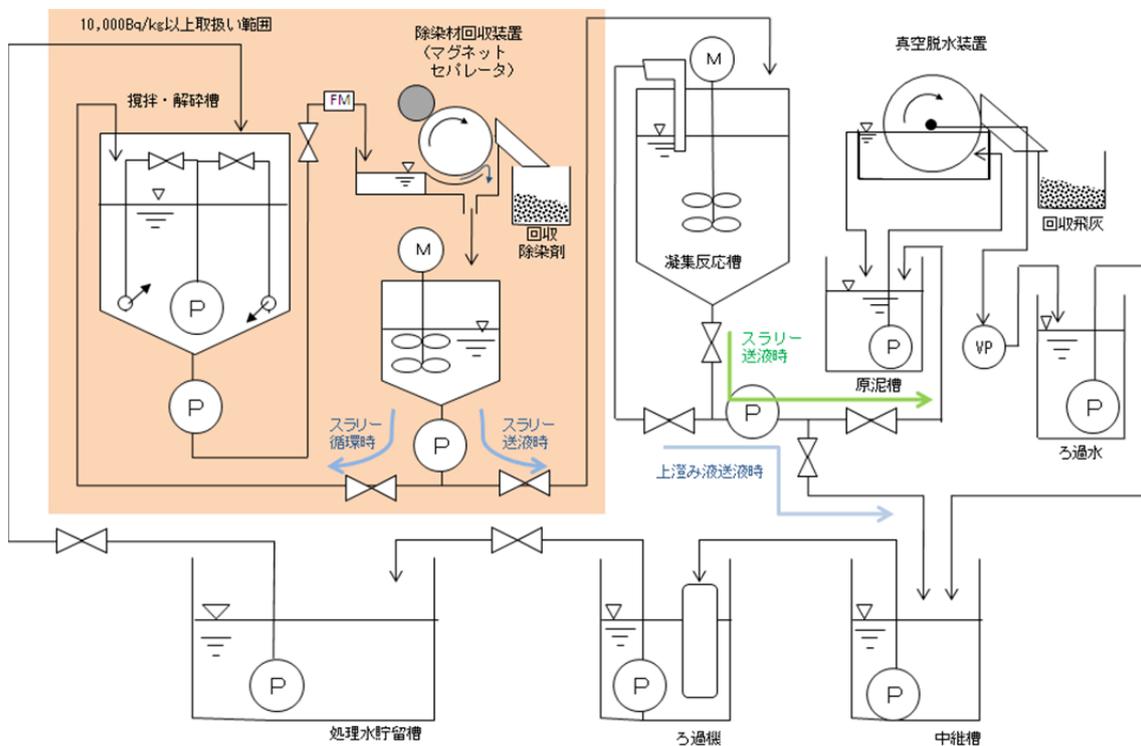


図 2.2 実証試験設備のフロー図

2. 試験パラメーター一覧

試験パラメータを表 2.1 に示す。スラリー固液比、除染剤添加率、攪拌時間をパラメータとし、セパレータ流量は 5~20L/min とした。なお、Case 2 以降は、マグネットセパレータを通過した飛灰スラリーを再度攪拌槽に戻し、50 分間循環させたものを処理済みスラリーとして凝集反応槽へ移送した。各試験ケースでの飛灰スラリー量が異なるが、セパレータでの累積流量は、攪拌槽で作製したスラリー体積の 4 倍から 8.8 倍に該当した。

表 2.1 試験パラメーター一覧

Case No.	飛灰	攪拌槽条件			セパレータ条件		備考
		固液比	除染剤添加率 (%)	攪拌時間 (min)	流量 (L/min)	攪拌槽⇄セパレータ循環	
1	飛灰①	1:5	1	30	5	有り (50min)	—
2		1:5	1		—		
3		1:5	0.5		—		
4		1:5	0.2		—		
5		1:5	0.5		—		
6		1:10	0.5		除染剤3回繰返し		
7		1:10	0.2		—		
8	飛灰②	1:5	0.5	30	20	—	Case 3 比較
9	飛灰①	1:10	0.2	60	—	—	除染剤3回繰返し
10	飛灰②	1:5	0.2	60	—	—	Case 4,7比較

3. 試験結果の評価

3.1 飛灰除染率の評価

各試験ケースにおける、除染前後の飛灰中放射能濃度と含水比、および除染率を表 2.2 に示す。Case 1 は低流量でセパレータを通過（ワンパス処理）させたが、除染後飛灰側に磁性除染剤が残存したため、除染率は 36.9%に留まった。攪拌槽～セパレータを循環させた Case 2 以降は、良好な除染率が得られた。

表 2.2 除染前後の放射能濃度と含水率・除染率

Case No.	除染前飛灰 (Bq/kg-wet)			含水率 (%)	除染後飛灰 (Bq/kg-wet)			含水率 (%)	除染率 (%)	
	Cs-134	Cs-137	合計		Cs-134	Cs-137	合計			
Case 1	11,000	24,000	35,000	17.3	3,600	8,400	12,000	55.1	36.9	
Case 2	11,000	24,000	35,000	17.3	650	1,500	2,150	58.6	87.7	
Case 3	10,000	23,000	33,000	18.1	750	1,800	2,550	56.3	85.5	
Case 4	11,000	24,000	35,000	17.3	1,600	3,400	5,000	49.8	76.5	
Case 5	11,000	22,000	33,000	18.4	960	2,500	3,460	55.2	80.9	
Case 6	Run 1	9,800	23,000	32,800	19.1	470	1,000	1,470	54.7	92.0
	Run 2	9,700	22,000	31,700	18.9	840	1,900	2,740	58.9	82.9
	Run 3	9,700	22,000	31,700	18.9	1,200	2,800	4,000	57.0	76.2
Case 7	9,900	23,000	32,900	19.2	580	1,300	1,880	56.9	89.3	
Case 8	7,100	17,000	24,100	15.3	400	840	1,240	54.4	90.4	
Case 9	Run 1	10,000	23,000	33,000	19.1	570	1,400	1,970	54.7	89.3
	Run 2	9,800	23,000	32,800	18.9	1,300	2,900	4,200	58.9	74.7
	Run 3	10,000	23,000	33,000	18.9	1,700	4,000	5,700	57.0	67.4
Case 10	6,900	16,000	22,900	15.3	920	2,100	3,020	54.4	75.5	

3.2 処理後飛灰の性状について

小型真空脱水機で回収した洗浄後飛灰（処理飛灰）のうち、湿潤状態で 8,000Bq/kg を下回った Case2 以降について、再度溶出試験（環告 13 号）を実施した際の液相の放射能濃度および水質の分析結果を表 2.3 に示す。

表 2.3 処理飛灰の再溶出試験

Case No.	飛灰試料	攪拌槽条件			放射能濃度			その他水質			
		固液比	除染剤添加率 (%)	攪拌時間 (min)	Cs-134 (Bq/kg)	Cs-137 (Bq/kg)	合計 (Bq/kg)	pH (-)	T-CN (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)
Case 2	①	1:5	1	30	<4	9	<13	10.5	0.7	<0.01	<0.01
Case 3		1:5	0.5		11	29	40	10.4	0.5	<0.01	<0.01
Case 4		1:5	0.2		40	95	135	10.6	0.4	<0.01	<0.01
Case 5		1:5	0.5		8	17	25	9.7	0.3	<0.01	<0.01
Case 6		Run 1	1:10		0.5	9	22	31	9.4	0.2	<0.01
	Run 2	24		64		88	10.1	0.2	<0.01	<0.01	
	Run 3	26		73		99	9.8	0.2	<0.01	<0.01	
Case 7	②	1:10	0.2	60	6	19	25	9.2	<0.1	<0.01	<0.01
Case 8		1:5	0.5	30	16	35	51	9.9	<0.1	<0.01	<0.01
Case 9	Run 1	①	1:10	60	12	27	39	9.4	<0.1	<0.01	<0.01
	Run 2				45	110	155	10.1	0.1	<0.01	<0.01
	Run 3				56	150	206	9.8	<0.1	<0.01	<0.01
Case 10	②	1:5	0.2	60	26	66	92	9.7	<0.1	<0.01	<0.01

3.3 処理後の洗浄水中の放射能濃度

小型真空脱水機より得られたろ液中および、凝集反応槽での上澄み液中の放射能濃度を表 2.4 に示す。表中で網掛けの部分は、全量脱水機にて処理した試験ケースである。

1 回洗浄の試験では、除染剤添加率 0.5% までは、放流基準 (Cs-134/60+Cs-137/90 ≤ 1) に合致する結果であった。また、繰返し洗浄試験 (Case 6 および Case 9) では、新たな飛灰に対して処理をするごとに液相の放射能濃度が上昇した。Case 4 と Case 7 の比較で、攪拌時間あるいは固液比を大きく取れば、液相の放射能濃度を低減できることがわかった。

洗浄水を処理系内で再利用する場合には、ある程度の放射能濃度は許容されるが、系外へ最終放流する際には、ストックした洗浄水に改めて磁性除染剤を添加して攪拌・回収するなど、放射能濃度をより低減する処理が必要となる。

表 2.4 処理後の洗浄水に含まれる放射能濃度

Case No.	飛灰試料	攪拌槽条件			脱水機ろ液			凝集沈殿槽上澄み		
		固液比	除染剤添加率 (%)	攪拌時間 (min)	Cs-134 (Bq/kg)	Cs-137 (Bq/kg)	合計 (Bq/kg)	Cs-134 (Bq/kg)	Cs-137 (Bq/kg)	合計 (Bq/kg)
Case 1	①	1:5	1	30	<4	6	<10	<4	7	<11
Case 2		1:5	1		7	19	26			
Case 3		1:5	0.5		19	48	67	18	48	66
Case 4		1:5	0.2		120	290	410	110	270	380
Case 5		1:5	0.5		21	47	68	16	43	59
Case 6	Run 1	1:10	0.5	15	36	51	16	40	56	
	Run 2			67	160	227				
	Run 3			190	460	650				
Case 7	②	1:10	0.2	60	29	68	97	34	69	103
Case 8		1:5	0.5	30	17	43	60			
Case 9	Run 1	①	1:10	60	40	91	131	39	100	139
	Run 2				170	380	550			
	Run 3				350	840	1190			
Case 10	②	1:5	0.2	60	52	110	162			

3.4 処理後の洗浄水のその他水質

表 2.5 に処理後の洗浄水のその他水質の分析結果を示す。上澄み液の網掛け部は、全て脱水処理した試験ケースを示す。飛灰スラリーから除染剤を回収後、凝集反応槽へ移送した段階で、ポリ硫酸第二鉄と高分子凝集剤を添加している。

除染剤由来の全シアン (T-CN) については、一部の試験ケースで排水基準 (1mg/L 以下) を超過したが、0.2%~0.5%の添加量で pH を 10 未満にコントロールすれば低濃度に抑制できることがわかった。

飛灰由来の鉛 (Pb) およびカドミウム (Cd) は、表 1.4 で示した pH 調整条件での抽出時の溶出濃度は大きく下回っていたが、一部の試験ケースで排水基準 (いずれも 0.1mg/L 以下) を超過する結果であった。なお、これらの一部サンプルについて、ろ過処理 (ろ紙 5C 通過) を施したところ、鉛は全て排水基準に合致した。一方、カドミウムについては濃度低減するものの、一部ケースで 0.1mg/L を依然として上回る結果であった。

表 2.5 洗浄水のその他水質分析結果 (赤色は排水基準超過)

Case No.	脱水機ろ液						凝集沈殿槽上澄み						
	pH (-)	EC (mS/m)	SS (mg/L)	T-CN (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	pH (-)	EC (mS/m)	SS (mg/L)	T-CN (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	
Case 1	10.5	7000	21	—	—	—	10.1	7000	110	6.7	0.06	0.01	
Case 2	9.9	7100	10	1.2	0.03	0.09							
Case 3	9.6	7100	9	0.4	0.03	0.08	9.2	7100	29	0.3	0.05	0.15	
Case 4	10.4	7500	1.3	1.5	0.04	<0.01	10.1	7500	140	1.6	0.06	<0.01	
Case 5	10	7500	51	0.4	0.02	0.04	9.4	7600	190	0.4	0.03	0.06	
Case 6	Run 1	9.5	4200	120	<0.1	0.06	9.0	4200	88	<0.1	0.08	0.08	
	Run 2	9.9	7300	42	0.2	0.02							
	Run 3	9.5	11000	100	0.2	0.07	0.18						
Case 7	9.1	4200	28	<0.1	0.08	0.10	8.8	4400	20	<0.1	0.08	0.15	
Case 8	9.5	7200	91	0.2	0.12	0.08							
Case 9	Run 1	8.3	4200	150	<0.1	0.13	0.11	7.6	4200	200	<0.1	0.21	0.16
	Run 2	8.8	7100	150	<0.1	0.13	0.12						
	Run 3	9.4	10000	40	0.2	0.10	0.14						
Case 10	9.9	7600	22	0.4	0.06	0.04							

3.5 マスバランスの評価

各試験ケースにおける放射能濃度と重量から Bq 値でマスバランスを評価した結果、93%~107%の範囲となった (表 2.6)。なお、Case 3~5 の上澄み液について、濃度だけ記載があるものは、少量の上澄み液を採取した後に全量脱水処理している。

表 2.6 マスバランスの評価

試験ケース	投入			回収												回収/投入 (%)		
	放射能濃度 (Bq/kg)	飛灰投入量 (kg)	投入放射能 (Bq)	除染剤			処理飛灰			ろ液			上澄み液				回収放射能合計 (Bq)	
				放射能濃度 (Bq/kg)	回収重量 (kg)	回収放射能 (Bq)	放射能濃度 (Bq/kg)	回収重量 (kg)	回収放射能 (Bq)	放射能濃度 (Bq/kg)	回収重量 (kg)	回収放射能 (Bq)	放射能濃度 (Bq/kg)	回収重量 (kg)	回収放射能 (Bq)			
Case 1	35,000	50	1,750,000	560,000	1.48	828,800	12,000	72.4	868,800	10	180	1,800	11	30	330	1,699,730	97.1	
Case 2	35,000	20	700,000	610,000	0.97	591,700	2,150	29.0	62,350	26	90	2,340				656,390	93.8	
Case 3	33,000	20	660,000	720,000	0.78	561,600	2,550	22.0	56,100	26	90	2,340	66			620,040	93.9	
Case 4	35,000	20	700,000	1,060,000	0.58	614,800	5,000	19.2	96,000	410	90	36,900	380			747,700	106.8	
Case 5	32,000	20	640,000	840,000	0.60	504,000	3,460	24.0	83,040	68	90	6,120	59			593,160	92.7	
Case 6	Run1	32,800	15	492,000	510,000	0.84	428,400	1,470	15.9	23,373	51	90	4,590	56	30	1,680	458,043	93.1
	Run2	31,700	15	903,900	990,000	0.88	871,200	2,740	17.6	48,224	227	100	22,700				942,124	104.2
	Run3	31,700	15	1,346,700	1,130,000	1.02	1,152,600	4,000	16.8	67,200	650	100	65,000				1,284,800	95.4
Case 7	32,900	25	822,500	690,000	1.16	800,400	1,880	27.9	52,452	97	130	12,610	103	120	12,360	877,822	106.7	
Case 8	24,100	20	482,000	480,000	0.92	441,600	1,240	20.4	25,296	60	100	6,000				472,896	98.1	
Case 9	Run1	33,000	15	495,000	660,000	0.68	448,800	1,970	16.7	32,899	131	90	11,790	139	30	4,170	497,659	100.5
	Run2	31,800	15	925,800	1,060,000	0.74	784,400	4,200	16.8	70,560	550	110	60,500				915,460	98.9
	Run3	33,000	15	1,279,400	1,240,000	0.82	1,016,800	5,700	16.3	92,910	1,190	110	130,900				1,240,610	97.0
Case 10	22,900	40	916,000	780,000	0.94	733,200	3,020	46.0	138,920	162	195	31,590				903,710	98.7	

4. 処理効率の検討

4.1 攪拌・解砕槽での攪拌時間

本実証試験では、除染剤添加後の攪拌時間として、30分と60分の試験ケースを実施した。処理飛灰の放射能濃度の観点からは30分程度の攪拌時間で十分であったが、0.2%の添加量で脱水後ろ液側の放射能濃度を十分に低下させるには、60分の方が望ましい結果であった。バッチ処理方式の計画上では、最大2時間程度まで攪拌時間を取れるようにすることが望ましいと考える。

また、本実証試験の飛灰試料のように処理飛灰として塊状の飛灰を含むような場合には、攪拌槽の前段に別途解砕機が必要となる。一例としては、ドラムウォッシャーなどの利用が考えられる。

4.2 マグネットセパレータ (図 2.3)

本実証試験では、最大容量 80L/min のマグネットセパレータを使用し、20L/min の速度でスラリーを通過させて、磁性除染剤を回収した。8時間稼働で 9.6m³/day のスラリー処理能力となる。なお、右図に示すようにマグネットコア部の隙間をスラリーが通過していく構造であり、流量を 5L/min に絞るよりも 20L/min の方が除染剤の回収効率が向上した。

また、試験 Case 2 以降は実験操作として、攪拌槽とセパレータを循環し、作成したスラリー体積の 3~5 倍程度の累積通過量となるまで循環させることで、磁性除染剤の回収量が向上し、室内除染試験と同等の除染効果を得ることができた。

実際の処理に際しては、マグネットセパレータを 5 台程度直列に配置することで、ワンパスでの飛灰スラリー処理が可能となる。

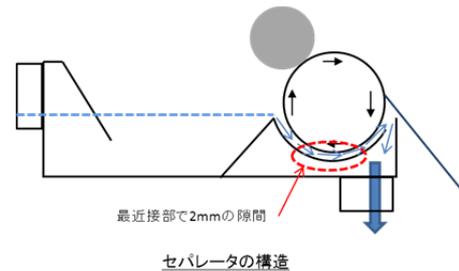


図 2.3 セパレータでの除染剤回収状況



図 2.4 真空脱水機での飛灰回収状況

4.3 固液分離 (小型真空脱水機)

表 2.7 に試験機での処理実績と、スケールアップした実機での処理速度を示す。

小型真空脱水機では、60秒(脱水/吸引)⇒10秒反転で処理しており、1サイクル140秒である。1サイクルあたりの処理実績(飛灰回収量平均値)は1.14kgである。

試験機を24時間稼働させる条件で、1日あたりおよそ700kgの洗浄後飛灰が得られることになる。洗浄後飛灰の含水率平均値は55.9%であり、飛灰の非水溶性成分量に換算すると310kgとなり、飛灰の非水溶性成分の比率は48%であるから、飛灰元試料として646kgに相当する。

実処理にあたっては、ドラム径をφ300mmから500mmに、長さを41cmから70cmにするこ

表 2.7 真空脱水機処理量

項目	試験機	実機	
ドラムサイズ	φ300mm ×L41cm	φ500mm ×L70cm	
ろ過面積 (m ²)	0.28	1.33	
処理速度	kg-処理灰 1サイクルあたり	1.14	5.42
	kg-元飛灰 1日あたり	646	3,069

とで、4.7倍(3.1 t/day)まで処理速度を増加することができるので、実処理ではスケールアップした真空脱水機を2台で、十分1日あたり4tの飛灰を処理できる計算となった。

5. 安全に関する事項

5.1 試験エリアおよび周辺の空間線量率

試験期間中の空間線量率の測定結果(1例)を図2.5に示す。飛灰フレコン設置個所および回収除染剤保管箇所(赤枠内右上)を中心に、空間線量率が上昇している。周辺の空間線量率は、除染剤回収箇所の外周で0.6 μ Sv/hまで上昇し、フレコン設置個所の背面が0.9 μ Sv/hまで低下した他は、大きな変動は無いことを確認した。

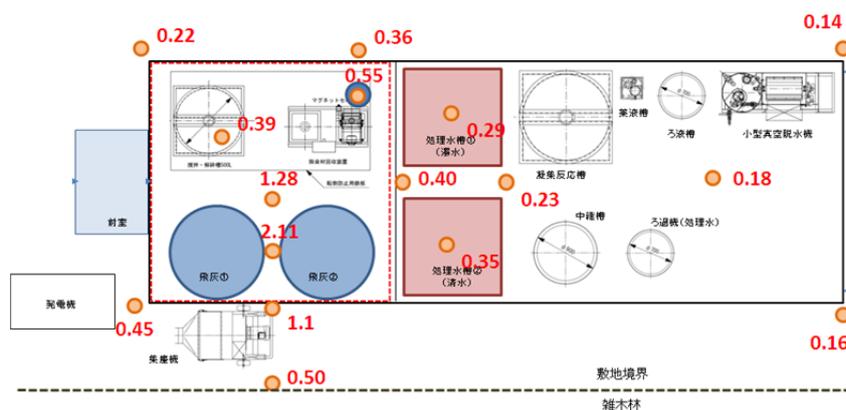


図 2.5 空間線量率(単位: μ Sv/h)の測定結果(Case 2 終了時点)

5.2 作業員被ばく量

実証試験の作業は、作業担当者2名と作業指揮者1名の構成で実施した。スラリー化する前の飛灰試料の取扱い時には、マスク、保護帽、保護服を着用し、集塵機を稼働させた。その他の作業時には、マスク、保護帽、作業服とした。

個人線量計による作業員の1日最大被ばく量は3 μ Sv(飛灰の分取・投入、攪拌槽等での作業)であり、累積最大被ばく量は24 μ Sv(作業時間7時間 \times 14日間)であった。

なお、飛灰フレコンから飛灰を分取している作業および攪拌槽に飛灰を投入する作業中に粉じん濃度測定を実施したが、高濃度粉じん作業(10mg/m³)には該当しなかった。

5.3 放射性セシウム濃縮物(回収除染剤)の取扱い

本試験を通じて処理した飛灰305kgに対して、磁性除染剤(1.49kg)と飛灰磁化物を合わせた回収物が12.4kg(湿潤)発生した(放射能濃度は平均78万Bq/kg)。実証事業としては、処理飛灰と混合してフレコンに戻した後に提供元に返却したが、実処理に際しては、安全な保管方法を検討する必要がある。

本技術で使用した磁性除染剤の吸着性化合物であるフェロシアン化ニッケルは、フェロシアン化鉄と同様に、200 $^{\circ}$ C程度以下の環境で保管する限りは安定である。また、磁性粉も周囲が酸化鉄となっており、火気に触れるようなことが無ければ燃焼することは無い。ただし、中間貯蔵期間等の長期保管を想定した場合、バインダー成分やフェロシアン化物自体のCN基の安定性に関して更なる検討が必要となる。

現時点では、回収除染剤は密閉容器に収納し、コンクリートピット内などに遮蔽保管する方法が想定される。なお、密閉容器は離隔距離を確保し容器表面での空間線量率を低下する目的で、二重容器等が望ましいことも考えられる。

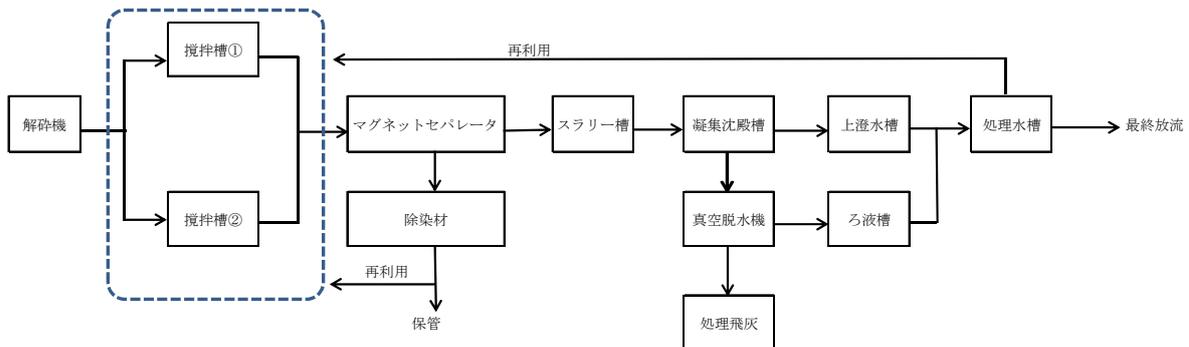
6. 実処理の検討

○処理条件

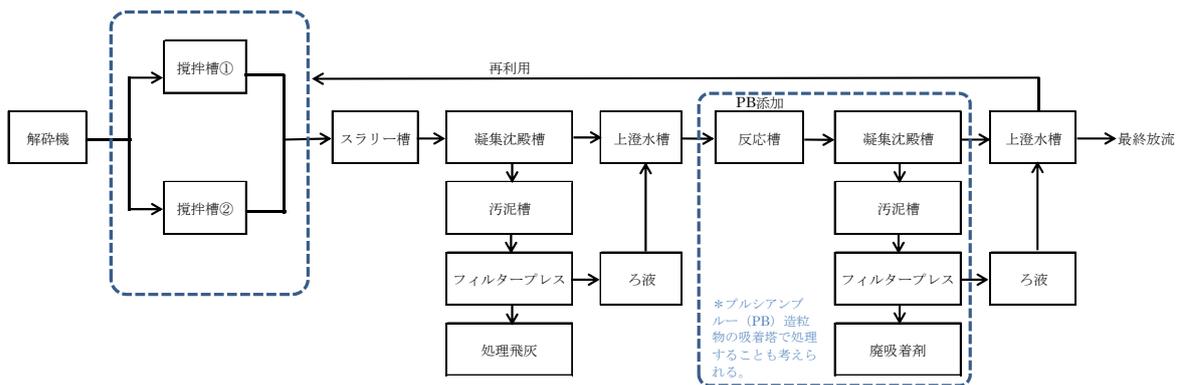
- ・200～240 t/day 規模の（仮設）焼却炉から発生する飛灰 4 t/day の処理を想定
- ・2年間稼働させ、延べ 3,000 t 程度の飛灰を処理する場合を想定する。

○処理フロー

【提案技術：設置面積 10m×20m】



【比較技術：設置面積 20m×20m】



○コスト評価（単位：千円）

区分	本提案技術		比較技術	
	費用	備考	費用	備考
プラント費用	45,000	フロー図参照	80,000 ～96,000	フロー図参照（フィルタープレス2連の場合は96,000、吸着塔の場合は80,000）
薬材等費用	57,000	除染剤：飛灰の0.7kg/t 使用と仮定。 単価（想定）20千円/kg pH調整剤：飛灰1 tあたり100kg	24,000 ～69,000	除染剤：5kg/t 使用と仮定。単価（想定）1～4千円/kg *材料コストは、使用するブルシアンブルーのグレード（通常、ナノ、造粒有無など）による pH調整剤：飛灰1 tあたり60kg
労務費	36,000	2人/日×300日と想定	54,000	3人/日×300日と想定
総額	138,000	飛灰3,000 tあたり	174,000 ～203,000	飛灰3,000 tあたり
処理単価	46		58～68	

○その他留意事項等

- ・放射能濃縮物の保管、防護建屋などは別途とする。
- ・どこまで放射能濃度の濃縮を許容するかによっても、処理コスト等に変動あり。
- ・薬材（除染剤）費用はいずれも実処理実績が無い状況での想定コストであり、使用量等に応じてより安価になると考えられる。

実施代表者の所属機関：株式会社 E&Eテクノサービス

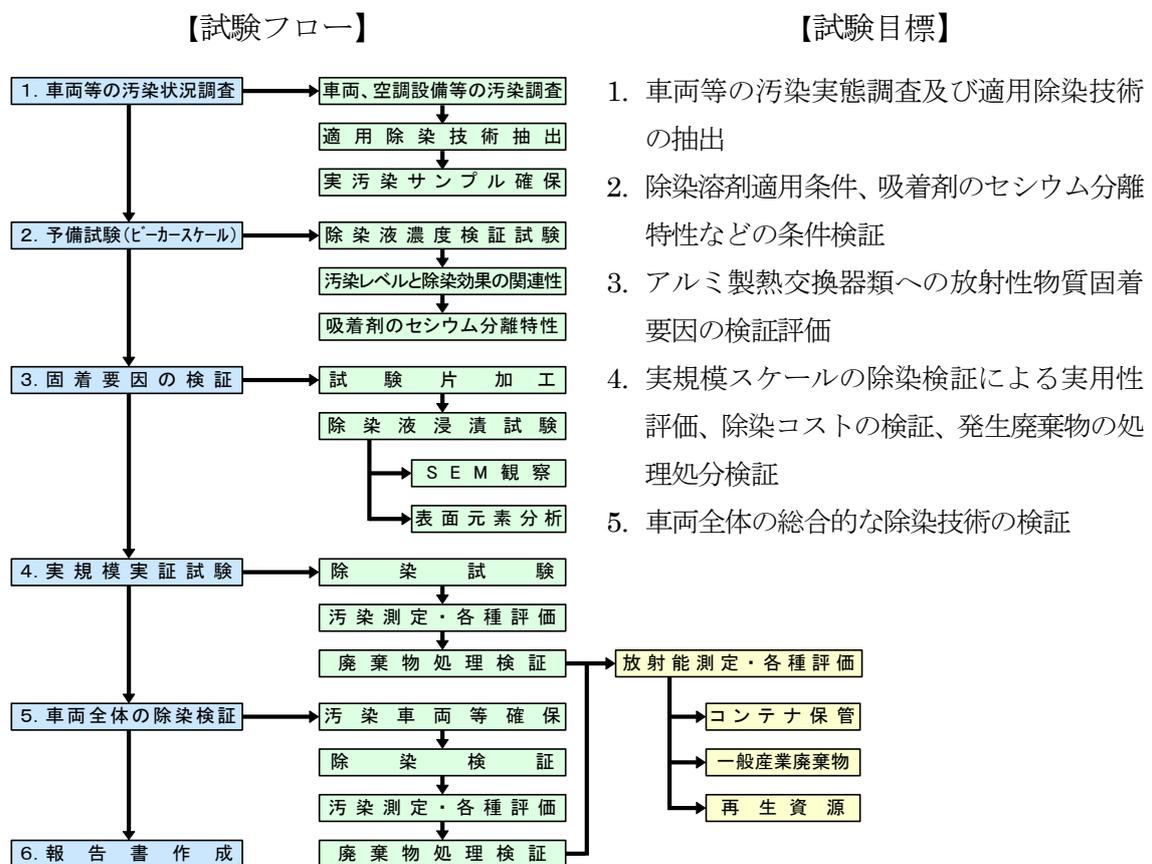
実証テーマ名：車両及びアルミ製熱交換器の除染実証試験

事業の概要：原子力災害の影響を受けた地域で稼働した各種車両や重機あるいは空調設備では特に熱交換器類の汚染レベルが高いが有効な除染手段は提供されていない。今回これらを除染するために開発した有機酸を主体とする除染溶剤を用いた除染技術の実用化検証を行う。

実施内容：

- (1) 車両及び空調用熱交換器の現状調査及び適用可能除染技術の抽出と体系化
- (2) 熱交換器類の表面の放射性物質固着要因の検証
- (3) 実際の汚染車両、解体廃棄物及び空調用熱交換器による実用検証

技術概要：



【期待される効果】

1. 車両や空調設備に使用されているアルミ製熱交換器類の効果的除染技術の提供
2. 放射性廃棄物として処理処分されていない解体廃棄物などの再資源化技術の提供
3. 発生する除染廃液や二次廃棄物の適切な処理技術の提供
4. 上記技術を包括した除染装置、運用システム、除染サービスの提供

その他：

社内ピーカースケール試験の成果は原子力学会で発表済（2012年秋 C46、2013年春 A44）
除染技術に関する特許出願（特願 2012-284399「除染装置」）

除染効果：

【車両等の汚染状況調査】（補足説明資料 1 項参照）

【除染溶剤適用条件確認試験】（補足説明資料 2 項参照）

溶液温度、濃度及び除染時間はラジエータピースによるビーカースケール試験の結果から、温度 50℃、5 倍希釈濃度（原液 1：水 4）、除染時間 30 分を基本条件に設定した。

【アルミ製熱交換器への放射性物質の固着要因】

（補足説明資料 3 項参照）

SEM 観察、EDX 分析で Ca 化合物及び Si 化合物など硬質スケールの存在を確認した。

【実サイズサンプルによる除染実証試験】

（補足説明資料 4 項参照）

図-1 に示すようにラジエータ、コンデンサ及び家電コンデンサは除染前汚染レベルに関わらず B.G. レベルまで除染された。除染廃液（10,872Bq/kg）はゼオライトによる吸着処理により 72.5Bq/kg まで廃液中の放射性物質を除去できた。

【実車両除染検証】（補足説明資料 5 項参照）

図-2 に示すように除染後の車両各部の線量当量は、 $\geq 30 \mu\text{Sv/h}$ を確認した高汚染車両において、除染終了後の線量当量は $2.16 \mu\text{Sv/h}$ に低減された。

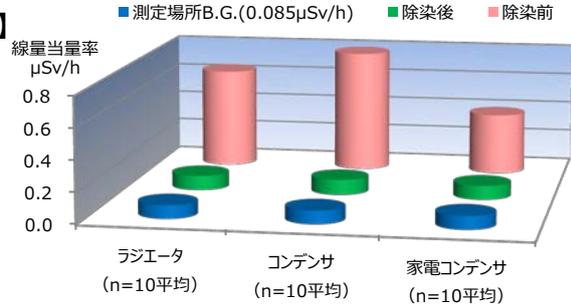


図-1 実規模実証試験結果(線量当量率の変化)

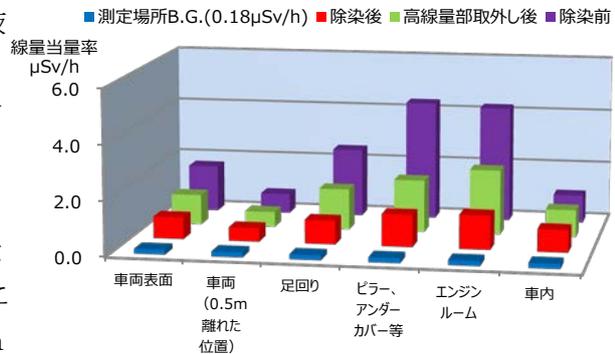


図-2 車両本体の除染結果(除染車両平均)

除去物発生量評価：

熱交換器 1 枚当たり：フィルタ、吸着材、作業副資材：0.3kg(20)、除染廃液：3kg(30)（特別産業廃棄物として一般処理可）、セシウム吸着用ゼオライト 0.4kg(0.60)

車両 1 台当たり：ウェス（乾燥後廃棄）、ゴム手袋、シート：5kg(1200)

作業員被ばく量評価：作業場所平均空間線量

車両調査及び車両除染時 $2.0 \mu\text{Sv/h}$ 6h×10 日

その他の実証試験時 < $1.0 \mu\text{Sv/h}$ 作業時間 6h×40 日

1 日当たり最大被ばく量 $7.0 \mu\text{Sv}$ （高汚染車両除染時の胸部）作業時間 6 時間

作業員平均被ばく量 < $1.0 \mu\text{Sv}$ （胸部）

コスト評価：(材料)

熱交換器 約 363 円/枚

車両本体 約 3,000 円/台

歩掛り（作業人工、作業速度）

熱交換器：2 名体制で 6 枚/日

実車両除染：4 名体制で 1 台当たり 1.5 日

コスト評価条件：アルミ製熱交換器除染については、除染溶剤単価 200 円/kg、除染溶剤 100kg で 60 枚を除染、ゼオライト 75 円/kg×23kg

車両本体については紙ウェス 500 円×3 束、洗浄液、柄付ブラシ、スコッチブライトなど

除染作業における安全上の注意：汚染車両、熱交換器類及び廃棄物の取扱時の作業者はマスク、手袋、保護メガネ、タイバックあるいは保護エプロン、胸部には個人線量計を着用

試験場所（住所）：茨城県ひたちなか市、福島県岩瀬郡鏡石町

除去物保管場所と保管状況（写真）：作業時に発した廃棄物はコンテナに収納し、試験場所に保管

1. 車両等の汚染状況調査

(1) 調査方法の概要

図-1に示す車両各部のポイントについて、GMサーベイメータによる $\beta(\gamma)$ 線の計数率 (cpm) 及びNaIサーベイメータによる線量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$) の測定を実施した。

また、付着性汚染の有無を確認するため必要に応じてスマヤろ紙により、表面汚染の有無を確認した。表-1に測定ポイントと測定数を示す。

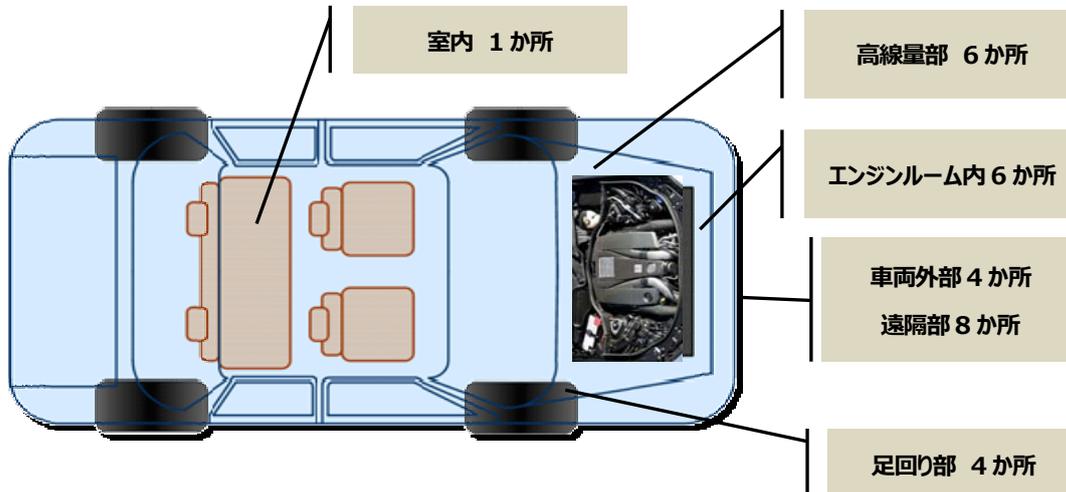


図-1 車両測定場所の概要

表-1 測定ポイントの詳細と測定数

測定区分	測定部分	測定数
車両外部	正面、側面 2 か所、後部の車両表面	GM 及び NaI 各 4 か所
車両遠隔部	正面、側面 2 か所、後部の 0.5m, 1.0m 離れた位置	GM 及び NaI 各 8 か所
足回り部	前後タイヤ・ホイール、前後のタイヤハウス内	GM 及び NaI 各 4 か所
高線量部	ラジエータ前部、ボンネット表面、ワイパー部、換気取入れ口近傍、ピラー部、フロントウインド表面	GM 及び NaI 各 6 か所
エンジンルーム内	ラジエータ後部、シュラウド上部、エアフィルタケース表面、インタークーラ(対象車のみ)、ボンネット裏、雨樋部、エンジンルーム内面	GM 及び NaI 各 6 か所
室内	前後座席 4 か所	GM 及び NaI 各 4 か所

(2) 調査結果

結果を表-2に示す。

当社福島事業所の供用車両、震災時に茨城県高萩市内といわき市内を頻繁に往復した履歴のあるタクシー車両、リサイクル業者において保管中の車両など合計 11 台の車両から汚染を確認したが、特に、浪江町、富岡町、南相馬市などで登録されていた車両 9 台（何れもリサイクル業者で保管中の車両）において高い汚染を検出した。

また、タクシー 1 台及び当社供用車両 2 台から若干の汚染を検出したが、何れもラジエータ近傍で $0.3\mu\text{Sv/h}$ で、車両表面、室内、エンジン本体、タイヤハウス内に汚染は検出されなかった。

表-2 車両の汚染調査結果

車両情報			汚染状況平均（線量当量率 $\mu\text{Sv/h}$ ）（）内：最大値						
No.	車種	登録地区または供用地区	車両表面	車両（0.5m離れた位置）	足回り	ピラー、アンダーカパー等	エンジンルーム	室内	備考
1	当社福島事業所供用車両	除染重点区域を中心に運用	0.08 (0.09)	0.08 (0.09)	0.08 (0.09)	0.08 (0.09)	0.24 (0.30)	0.08 (0.09)	
2	当社福島事業所供用車両	除染重点区域を中心に運用	0.08 (0.09)	0.08 (0.09)	0.08 (0.09)	0.08 (0.09)	0.25 (0.30)	0.08 (0.09)	
3	タクシー	高萩市内～いわき市内供用	0.08 (0.09)	0.08 (0.09)	0.09 (0.09)	0.10 (0.20)	0.30 (0.40)	0.09 (0.10)	4台の調査車両中1台が汚染
4	軽乗用車	双葉町	0.61 (1.85)	0.17 (0.29)	0.40 (0.62)	0.70 (2.61)	1.10 (2.70)	0.22 (0.25)	
5	乗用車（スポーツタイプ）	浪江町	3.65 (6.80)	1.57 (2.40)	6.30 (10.60)	10.61 (26.50)	≥ 13.07 (≥ 30.0)	2.06 (2.30)	各部に高濃度付着汚染
6	乗用車（ワンボックス）	大熊町	0.87 (1.14)	0.44 (0.48)	1.21 (1.32)	1.78 (5.90)	1.53 (3.72)	0.58 (0.62)	
7	乗用車（ワンボックス）	大熊町	0.93 (1.20)	0.59 (0.72)	2.43 (4.50)	1.75 (4.05)	2.20 (4.75)	0.58 (0.65)	
8	乗用車（ワゴン）	大熊町	0.56 (1.04)	0.27 (0.38)	0.88 (1.40)	1.00 (2.40)	1.78 (4.40)	0.32 (0.38)	
9	乗用車（ワゴン）	富岡町	9.31 (25.40)	3.22 (6.15)	11.78 (17.10)	≥ 12.54 (≥ 30.0)	≥ 18.79 (≥ 30.0)	3.85 (4.05)	各部に高濃度付着汚染
10	乗用車（ワゴン）	大熊町 富岡町	2.75 (4.95)	1.41 (2.05)	8.13 (14.00)	5.38 (12.50)	8.30 (15.60)	1.93 (2.10)	
11	軽乗用車	不明（警戒区域避難車両）	1.29 (1.95)	0.59 (0.73)	2.58 (3.50)	1.87 (4.60)	2.33 (6.35)	0.91 (0.95)	
12	軽乗用車	南相馬市	0.43 (0.50)	0.25 (0.27)	1.23 (1.80)	0.91 (1.45)	1.27 (3.95)	0.33 (0.36)	

2. 除染溶剤適用条件確認試験

(1) 除染溶剤適用条件確認試験の実施手順

アルミ製熱交換器の高圧水等による洗浄では、大きな除染効果が得られなかったことから、除染溶剤を用いた浸漬洗浄による除染方法が有効であると考え、汚染されたラジエータ及びびコンデンサを用いたピーカースケールによる除染液の適用条件確認試験を実施した。

図-2に試験手順の概要を示す。

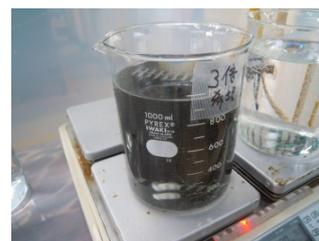
試験は対象となるラジエータ及びびコンデンサを10x10cmに切断し、それぞれのピースの汚染状況を確認したものを試験片として使用した。



(a) 事前測定



(b) 試験ピースの測定



(c) 浸漬試験

図-2 除染溶剤適用条件確認試験手順

除染液には当社が調合したスルホン酸系有機酸にキレート剤、界面活性剤を加えたもの（以下、除染溶剤という。）と一般的に広く用いられるカルボン酸であるシュウ酸を用いて試験した。溶剤濃度は、除染溶剤の原液中のスルホン酸濃度 $\approx 7.7\text{mol/l}$ に対し、3倍希釈（原液1：水2 $\approx 2.3\text{mol/l}$ ）、5倍希釈（原液1：水4 $\approx 1.3\text{mol/l}$ ）及び7倍希釈（原液1：水6 $\approx 0.9\text{mol/l}$ ）とし、シュウ酸溶液の濃度については、シュウ酸二水和物の25℃での飽和濃度13%に近い10%水溶液（ $\approx 0.8\text{mol/l}$ ）を使用した。

(2) 除染溶剤適用条件確認試験結果

図-3(a)~(d)に除染溶剤適用条件確認試験の結果を示す。試験の結果、除染溶剤温度においては50℃が最も良好であった。濃度においては3倍希釈と5倍希釈の溶液に変化は見られなかったが、コスト及び酸性物質の取扱いの点からより低濃度の5倍希釈溶液を選定した。また、除染時間は30分を試験条件に設定したが、汚染レベルやサンプル性状に応じて柔軟に対応するものとした。

図-3(d)に示すようにシュウ酸の除染性能も良好であったが、シュウ酸の場合、多量に取り扱うためには毒物及び劇物取締法による規制を受けること、シュウ酸カルシウム等の反応生成物についても有毒性が懸念される点からスルホン酸系の除染溶剤を用いることとした。

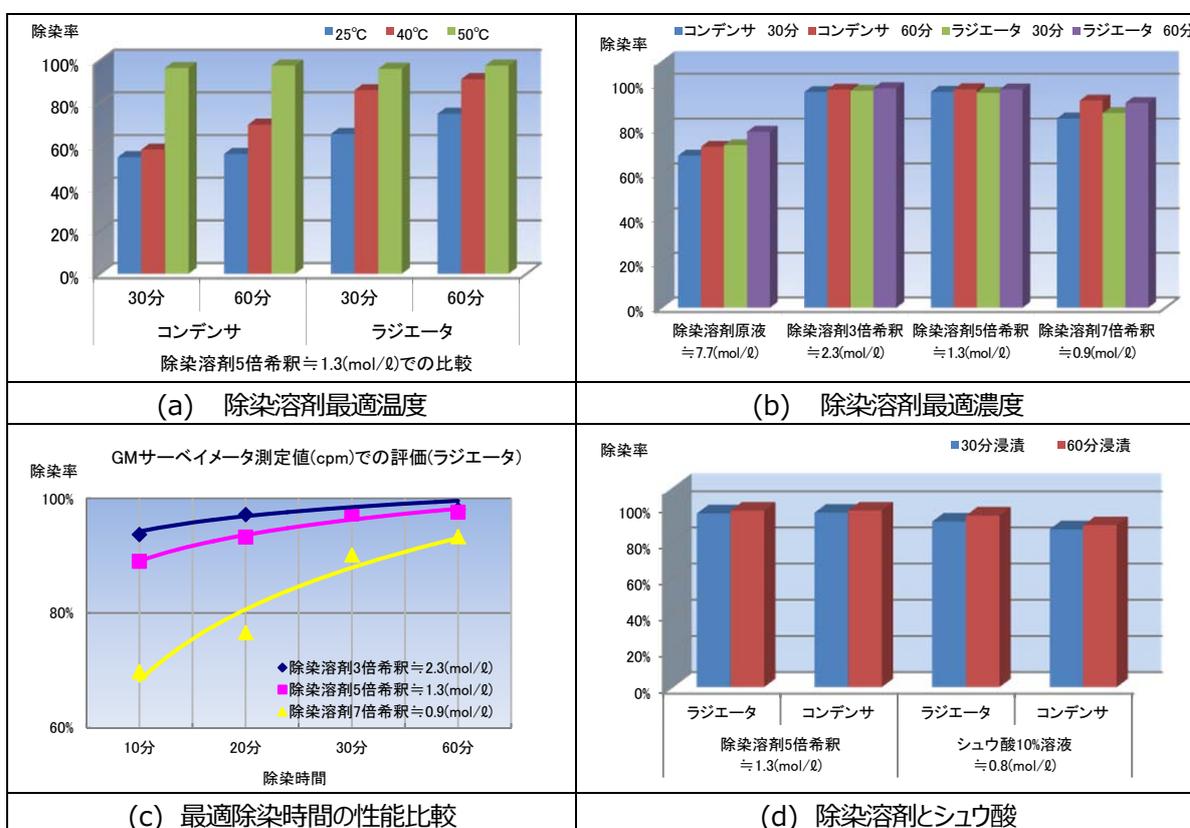


図-3 除染溶剤適用条件確認試験の結果

3. アルミ製熱交換器類への放射性物質の固着要因

(1) アルミ製熱交換器類の主な材質

ラジエータ、コンデンサ等アルミ製熱交換器に使用される材料は、JIS Z3263「アルミニウム合金ろう及びブレーシングシート」で規定される3000系のAl-Mn系合金、4000系のAl-Si系合金及び5000系Al-Mg系合金がベースとされ、フィン、チューブ及びろう材等交換器の使用箇所、製造方法に応じたAl合金で構成されている。また、コンデンサやエバポレータについてはZn防食処理や樹脂コーティング等の表面処理がなされている。

(2) アルミ製熱交換器の固着物の分析

熱交換器への放射性物質の固着要因を解析するために熱交換器のフィン部、チューブ部を分解し、簡単な水洗浄を行った後に走査型電子顕微鏡（以下、SEMという。）での表面観察を行い固着物の位置を特

定した後、その部位のエネルギー分散型 X 線分光法（以下、EDX という。）分析を実施し固着元素の分析を行った。さらにその部位を除染溶剤で洗浄し固着物を除去した後に、再度 SEM 観察及び同一箇所の EDX 分析を行い洗浄前後の元素の状態を比較した。

図-4(a)及び(b)は、同一フィンの洗浄前後の SEM 観察結果の比較であるが、洗浄前のフィンにある固着物が洗浄後のフィンでは除去されてなめらかになっていることがわかる。このことから、固着物が溶剤により溶解して除去されていることがうかがえる。

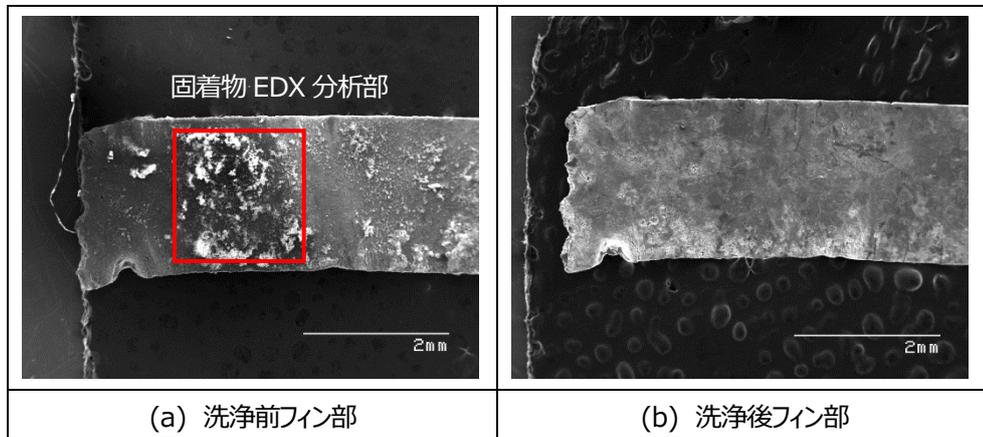


図-4 除染溶剤洗浄前後のラジエータフィン部 SEM 観察画像

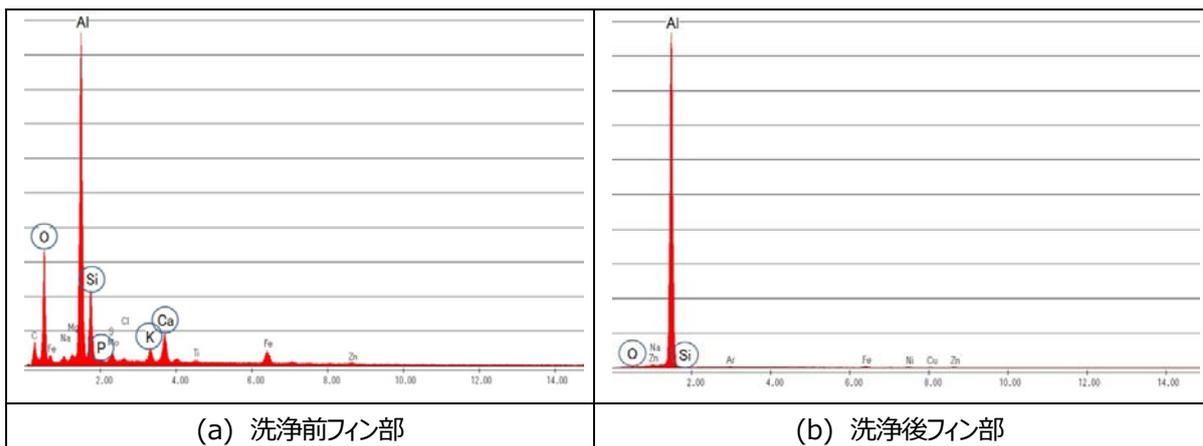


図-5 除染溶剤洗浄前後のラジエータフィン部 EDX 分析結果

図-5 は、フィン固着物と洗浄による固着物除去後の EDX 分析結果を比較したものである。EDX により検出された元素から JIS で規定されているアルミ合金の主要添加元素及び洗浄後に消失した或いは大きく EDX の検出ピークが変動した元素に着目すると酸素 (O)、ナトリウム (Na)、シリカ (Si)、リン (P)、イオウ (S)、塩素 (Cl)、カリウム (K)、カルシウム (Ca) が変化していることが分かる。また、フィン及びチューブから付着物を削り取りその粉体による X 線回折の結果からも図-5 に示すように Si、S、Cl、K、Ca が検出されている。このことから固着物質の成分は、カルシウム化合物（炭酸カルシウム、硫酸カルシウム、水酸化カルシウム等）及びシリカ化合物（酸化ケイ素）と推定される。これらの固着成分元素については一般的なエアコン等において発生する硬質スラッジの成分とも合致することから高圧水等の単純洗浄等での除染効果が上がらない理由と考えられる。

カルシウムは、海水、寒冷地での融雪剤、コンクリート建造物からの影響等により土壌や雨水に多く含まれるとされている。また、微量ではあるがリンやカリウムといった元素も確認できることから土壌、砂、ほこり等の粉塵が固着物に影響していると考えられる。これらの結果から推測すると雨水、粉塵が熱交換器に強制的に空気中の水分とともに吸入され蒸発乾固を繰り返し、カルシウム、シリカを主体とする化合物が徐々に堆積化して行く過程において放射性セシウム等をまき込み、放射性物質を含んだ固着物として硬質化して行くと考えられる。

4. 実サイズサンプルによる除染実証試験

(1) 実サイズサンプルの入手

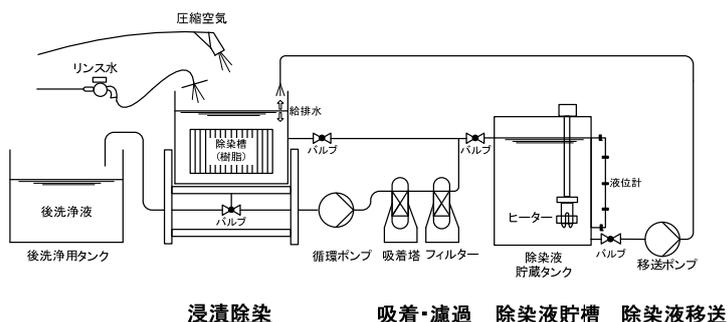
家電エアコンコンデンサは株式会社釜屋殿（Aグループ指定引取所）及び東日本リサイクルシステムズ株式会社殿（Bグループ指定引取所）の協力によりそれぞれ5枚ずつ合計10枚のサンプルを借用した。

また、車両用のラジエータとコンデンサは、茨城県内及び福島県内の自動車解体業者から入手したサンプルに実車両の除染実証により得られたサンプルを加えた合計22枚を使用した。

(2) 試験装置

図-6は実証試験に用いた当社所有のプロトタイプ除染装置を示す。

装置は、透明アクリル樹脂製の除染槽、除染溶剤貯留タンク、除染溶剤を双方向に移送可能な循環ポンプ2基、及びフィルタと吸着材を装備した濾過吸着装置から構成されている。



(a) 試験装置フロー



(b) 試験装置外観

図-6 試験装置の概要

(3) 試験手順

試験の流れを図-7に、試験の測定評価項目の詳細を表-4に示す。

除染サンプルは表面を10cmメッシュに区切り、GM及びNaIサーベイメータによる表面汚染を測定後、浸漬洗浄を実施した。また、時間経過による除染効果の進捗を確認するため10分毎にサンプルを引き上げ、GM及びNaIサーベイメータによる表面測定（高汚染ポイントのみ）を実施した。除染終了後のサンプルは仕上げ洗浄を実施し、乾燥後に再度10cmメッシュの測定を実施し前後の測定値から効果を検証した。



(a) 除染前サンプル



(b) 事前測定
(10cmメッシュで測定)



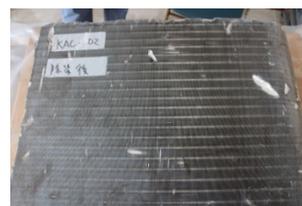
(c) 浸漬除染



(d) リンス洗浄 (水)



(e) 乾燥 (エアブロー)



(f) 除染後の測定

図-7 除染試験の流れ

表-4 測定評価項目

測定項目	測定方法（測定ポイント）	測定タイミング	評価項目
線量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	NaI サーベイメータ (全体を 10cm メッシュで測定)	除染前・後（全ポイント） 10 分間隔（高汚染ポイント）	除染前・後及び除染時間毎の 測定値変化
$\beta(\gamma)$ 計数率 (cpm)	GM サーベイメータ (全体を 10cm メッシュで測定)	除染前・後（全ポイント） 10 分間隔（高汚染ポイント）	除染前・後及び除染時間毎の 測定値変化
除染溶剤放射能濃度 (Bq/kg)	Ge 半導体検出器	除染前・後	溶液への Cs 溶出量 除染サンプルの放射能濃度
酸性度 (pH)	pH メータ (液攪拌後に 1 点をサンプリング)	除染前・後	除染溶剤の劣化状態

(4) 試験結果

除染前後の線量当量率を図-8 に示す。また、除染時間と線量当量率の変化の関係を図-9～図-11 に示す。各サンプルとも除染前の汚染レベルに関わらず除染後は B.G.レベルまで除染することができた。最初の 10 分でほとんどの汚染物質が除去され、汚染レベルの高低に関わらず最終的に B.G.レベルまで除染されることがわかる。家電コンデンサ K01 及び K02 において除染率の推移が緩やかであった理由は除染溶剤の対流が不十分であったためと推測される。家電コンデンサは、フィンチューブ式と呼ばれる熱交換器形状であり、車両用ラジエータ等のコルゲートフィン式と比べ、フィン間の隙間が狭い。そのため、対流が不十分であった場合、除染溶剤の反応が進まなくなると考えられる。そこで K03 以降のサンプルでは、除染溶剤の攪拌、対流に改善を施したところ、短時間洗浄時の除染効果に改善が図られた。

また、線量当量率測定と同時に実施した GM サーベイメータによる $\beta(\gamma)$ 線の測定評価（単位：cpm）においても同様の結果であった。

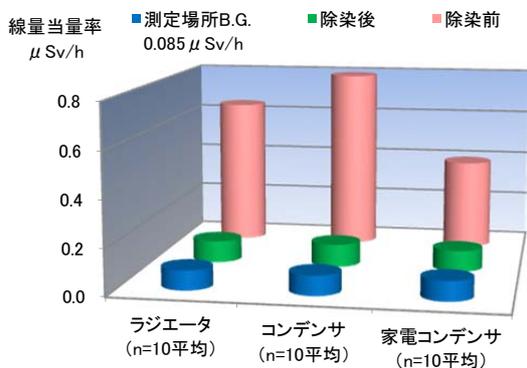


図-8 除染前後の線量当量率変化
(サンプル毎の平均値)

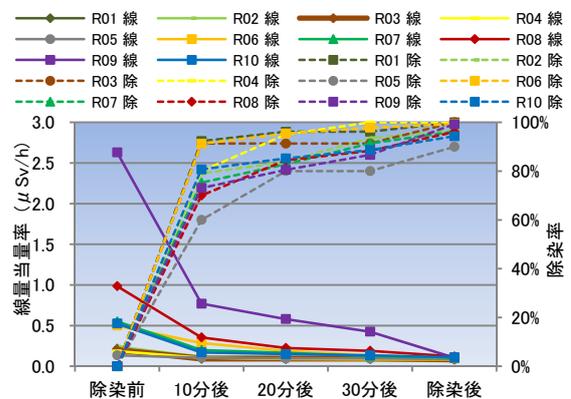


図-9 除染時間毎の線量当量率変化
(車両用ラジエータ)

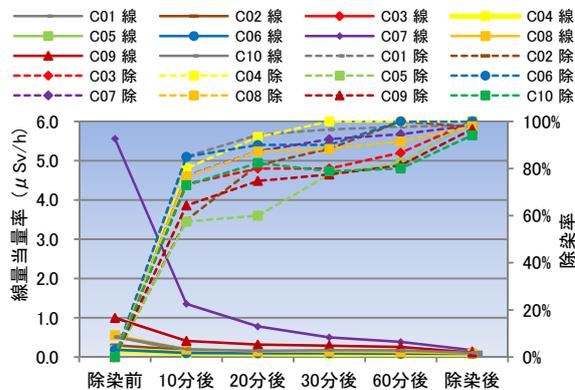


図-10 除染時間毎の線量当量率変化
(車両用コンデンサ)

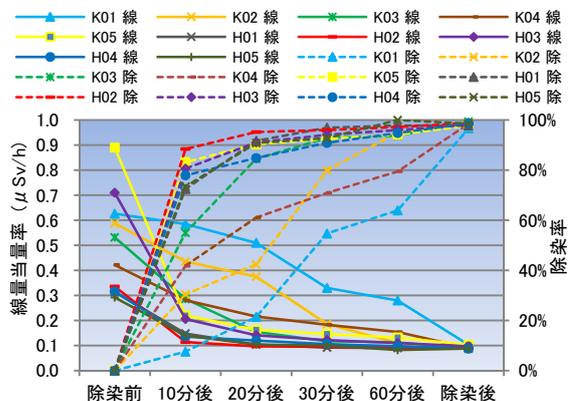


図-11 除染時間毎の線量当量率変化
(家電エアコン用コンデンサ)

※図-9～図-11 中において、線は線量当量率を、除は除染率を表す。

(5) 廃液処理検証

除染廃液の処分方法としては、そのままの状態でも密封保管する方法も考えられるが、酸溶剤の保管を行う場合、除染の際に熱交換器から溶出した有機物と酸の反応による発熱、酸とアルミニウム、有機物との反応によるガス発生、放射性セシウムの影響による水素発生など様々な検討課題が挙げられる。そこで除染溶剤中の放射性セシウムを吸着除去し、除染後の溶剤を一般の特別産業廃棄物である廃酸溶液として処理を行うための検証を行うこととした。試験は、実規模検証試験により発生した除染廃液（約 200 ℓ、222.2kg）を、4 項 図-6(b)に示す除染装置の吸着濾過装置（天然ゼオライト充填、1 カートリッジ 1.2kg）に循環させてセシウムの吸着分離を実施し、除染溶剤中に溶出した放射性セシウムを一般廃棄物として処分が行える放射能濃度（100Bq/kg 以下）まで吸着分離処理が可能かを確認した。

図-12 は、除染廃液の吸着分離試験の結果であり、ゼオライト充填カートリッジを交換し、Ge 半導体検出器の測定結果をプロットしたものである。

吸着分離前は、廃液中の放射能濃度は 10,872Bq/kg であったが、56 時間、ゼオライト充填カートリッジ 19 回交換により 72.5Bq/kg まで低減することができた。この処理に使用したゼオライトは 22.8kg（30.8 ℓ）であり、廃液からゼオライトへセシウムを吸着させることにより、放射性廃棄物の量を重量比で 89.7%、体積比で 84.6%減容することができた。

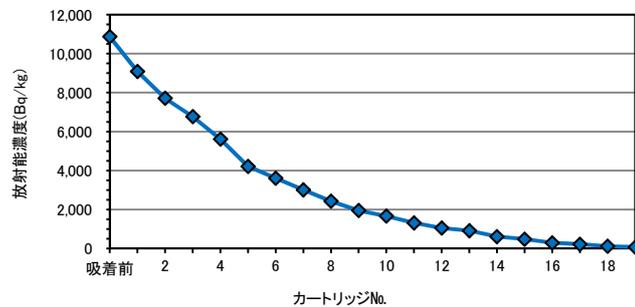


図-12 除染廃液吸着分離試験結果

5. 実車両除染検証

(1) 車両各部の適用除染技術の抽出と体系化

【試験手順】

1 項で実施の調査車両から 1 台の車両（表-2 No.4 に示す双葉町供用履歴の軽乗用車）を検証サンプルに使用し、車両各部位に対する各種除染方法（廃液発生のないふき取り法が原則）について適用性を検証した。車両各部の汚染状況を確認した上で、同一場所に複数の除染方法を適用することで各技術の除染効果を比較検証した。

試験の実施手順を図-13 に示す。



(1) サンプル車両の事前測定



(2) 評価部分の区画



(3) 高線量部品の取外し後



(4) タイヤハウスアンダーカバー（雨樋のドレン等で高線量）



(5) エンジン本体除染（スチーム洗浄）



(6) 室内各部の除染（除染溶剤併用ふき取り、スチーム等）

図-13 検証試験実施手順

【試験結果】

評価結果を表-5に示す。

ふき取り除染はほとんどの部位で有効だが、油脂汚れ部、タイヤなど表面に汚染が浸透している部位、シートや内貼りなどの布製品には中性洗剤やアルカリや酸性除染溶剤等を適切に併用する必要があること、また、スチーム除染の際にはブラシ等の機械的操作の併用が不可欠であるなどの知見を得た。

なお、スチームや除染溶剤等の薬液を使用時において発生するドレン水や薬液はふき取りにより回収したため除染廃液の発生はなかった。

表-5 適用除染技術のまとめ

適用場所		適用技術	浸漬洗浄 (酸性除染溶剤)	ふき取り法 (薬液併用含む)	スクラビング (薬液併用含む)	スチーム洗浄 (薬液併用含む)
ボディ表面 (塗装)、ウインド、 ブラ部品 (B.G.:80)			—	◎ (中性洗剤) (100 ⇒ 81)	—	—
足回り	タイヤ (B.G.:125)		—	○ (酸性除染溶剤) (694 ⇒ 298)	○ (オレンジオイル) (544 ⇒ 218)	○ (ブラシ併用) (472 ⇒ 185)
	ホイール (B.G.:125)		—	◎ (中性洗剤) (214 ⇒ 138)	—	—
	アンダーカバー (B.G.:62)		—	◎ (酸性除染溶剤) (529 ⇒ 79)	—	◎ (ブラシ併用) (265 ⇒ 88)
エンジンルーム	ラジエータ、コンデンサ (B.G.:64)		◎ (9909 ⇒ 158)	×	—	—
	エンジン本体 (アルミ) (B.G.:180)		—	◎ (酸性除染溶剤) (253 ⇒ 182)	◎ (中性洗剤) (291 ⇒ 220)	—
	油脂汚れ部 (B.G.:121)		—	○ (酸性除染溶剤) (641 ⇒ 255)	◎ (オレンジオイル) (869 ⇒ 190)	○ (アルカリ洗剤) (853 ⇒ 306)
	エキゾーストパイプ (高温暴露金属) (B.G.:122)		—	×	—	○ (ブラシ併用) (1472 ⇒ 648)
	エンジンルーム内面 (B.G.:140)		—	◎ (酸性除染溶剤) (302 ⇒ 162)	—	○ (ブラシ併用) (318 ⇒ 182)
室内	ダッシュボード (B.G.:114)		—	×	◎ (中性洗剤) (773 ⇒ 151)	—
	座席、カーペット (布) (B.G.:138)		—	○ (3050 ⇒ 917)	—	×

(単位 : cpm)

◎ 適合	測定場所 B.G.まで除染
○ 効果あり	初期値の 1/3 以下まで除染
×	初期値の 1/3 以上が残留
—	データなし 適用困難または他技術で除染可能

(2) 実車両による除染検証

汚染調査を実施した車両のうち 5 台を使用し、高線量部品取外し後の線量当量率測定後に 5 項、表-5 に示す除染方法を用いて実車両による除染検証を実施した。

表-6 は車両毎の詳細を示したものである。

除染した 5 台中の 3 台(No.3~5)は福島県内の警戒区域から持ち出された車両で汚染レベルも高く、いずれもエンジンルーム内のラジエータ近傍が高線量であったが、ラジエータ及びコンデンサ等を取り外すことで車両全体の線量当量率を大幅に下げることが確認できた。さらにふき取り等の除染により、最大 $\geq 30\mu\text{Sv/h}$ を確認した車両(No.4)では除染後は $2.16\mu\text{Sv/h}$ まで低減できた。No.4 及びNo.5 の 2 台が、目標とする $0.3\mu\text{Sv/h}$ (中古車業界自主基準等)まで除染を行えなかった理由は、最も汚染レベルの高いエンジンルームやエアダクト内は狭窄部分が多いためアクセスが難しく、ふき取り等では除染が困難であるためと考えられ、これらの部分を除染するためには、車両の分解等による部品の取外しが現状、不可欠であると思われる。

他の 2 台については汚染レベルが低く、汚染箇所がラジエータとコンデンサに限定されていたため、これらを取り外しただけで B.G.レベルまで低減できた。

エンジン本体、換気空調ユニットなど労力対除染効果が低い部位を除染するメリットは、除染の目標、目的あるいは車両の付加価値等により異なるため、一概に費用対効果として評価するのは難しい。しかし、熱交換器など解体廃棄物の再資源化を目的とした場合、浸漬による除染効果は実証済みであり、費用対効果を改善するには大量処理が可能な大容量装置を用いることで対応可能である。

表-6 実車両の除染結果（車両毎詳細）

No.	車種		汚染状況平均（線量当量率 $\mu\text{Sv/h}$ ） （）内：最大値					
			車両表面	車両 (0.5m 離れた位置)	足回り	ピラー、アン ダーカパー 等	エンジン ルーム	室内
1	当社福島事業所 供用車両 (B.G. : 0.08 $\mu\text{Sv/h}$)	除染前	0.08 (0.09)	0.08 (0.09)	0.08 (0.09)	0.08 (0.09)	0.24 (0.30)	0.08 (0.09)
		除染後	—	—	—	—	0.09 (0.10)	—
		除染率	—	—	—	—	93.8%	—
2	当社福島事業所 供用車両 (B.G. : 0.08 $\mu\text{Sv/h}$)	除染前	0.08 (0.09)	0.08 (0.09)	0.08 (0.09)	0.08 (0.09)	0.25 (0.30)	0.08 (0.09)
		除染後	—	—	—	—	0.09 (0.10)	—
		除染率	—	—	—	—	94.1%	—
3	軽乗用車 (B.G. : 0.085 $\mu\text{Sv/h}$)	除染前	0.61 (1.85)	0.17 (0.29)	0.40 (0.62)	0.70 (2.61)	1.10 (2.70)	0.22 (0.25)
		除染後	0.14 (0.17)	0.12 (0.13)	0.19 (0.19)	0.16 (0.18)	0.18 (0.21)	0.14 (0.15)
		除染率	89.5%	58.8%	66.7%	87.8%	90.6%	59.3%
4	乗用車 (スポーツタイプ) (B.G. : 0.18 $\mu\text{Sv/h}$)	除染前	3.65 (6.80)	1.57 (2.40)	6.30 (10.60)	10.61 (26.50)	≥ 13.07 (≥ 30.0)	2.06 (2.30)
		除染後	1.87 (2.27)	1.03 (1.23)	2.37 (3.35)	2.64 (3.72)	2.65 (3.69)	1.80 (1.98)
		除染率	51.3%	36.7%	64.2%	76.4%	$\geq 80.8\%$	13.8%
5	乗用車 (ワンボックス) (B.G. : 0.18 $\mu\text{Sv/h}$)	除染前	0.87 (1.14)	0.44 (0.48)	1.21 (1.32)	1.78 (5.90)	1.53 (3.72)	0.58 (0.62)
		除染後	0.40 (0.44)	0.34 (0.41)	0.55 (0.59)	0.57 (0.65)	0.71 (1.46)	0.33 (0.37)
		除染率	68.1%	38.5%	64.1%	75.6%	60.7%	62.5%

※除染率(%) = (除染前の線量当量率 - 除染後の線量当量率) / (除染前の線量当量率 - B.G.) × 100

6. コスト評価.

(1) 熱交換器単体の除染コスト

今回の検証試験で使用した除染溶剤の製造コスト（原材料費、製造経費、容器代、ラベル代、運送費、税込）は、200 円/kg であった。当社の試算では除染溶剤 100kg 当たりのラジエータ類洗浄最低枚数 60 枚の条件で 1 枚当たりの洗浄コストは ¥ 333 となり、熱交換器 1 枚当たりの吸着材コスト 30 円を考慮しても 1 枚当たりの材料コストは約 363 円/枚となる。

(2) シュウ酸とのコスト比較

シュウ酸(二水和物)と比較した場合、シュウ酸(二水和物)の単価が 3,600 円/kg となるため、10%水溶液として使用する場合の液単価は 360 円/kg となり、除染溶剤に比較して 1.8 倍高価であった。

(3) 車両の除染コスト

ラジエータ部が 30 μ Sv/h を超える高汚染車両の事例において、使用した除染布（キムタオルなど）、除染溶剤（洗剤）、ブラシや養生シート等の資材を含め 1 台当たり約 3,000 円の資材費となった。

7. 歩掛り

(1) 熱交換器単体の除染作業

実証試験（放射線測定作業を含む）では 2 人体制で 1 日 6 枚が限度であった。しかし、熱交換器類は浸漬洗浄によるものであるため、水槽容積を上げることにより 1 回で複数枚の除染を行うことが可能となり、歩掛りの改善が期待できる。

表-7 実サイズサンプル実証試験における除染作業の歩掛り

	作業内容	作業員数	作業時間
熱交換器	熱交換器の事前放射線測定	2 名	0.6 時間
	熱交換器浸漬除染	2 名	1.0 時間
	除染後の放射線測定	2 名	0.6 時間

(2) 車両の除染作業

ラジエータ部が 30 μ Sv/h を超える高汚染車両の事例において、4 人で 2 日間を要した。

表-8 実車両除染実証試験における除染作業の歩掛り

車両の汚染レベル (除染前→除染後)	作業内容	作業員数	作業時間
高汚染車両 ($\geq 30\mu\text{Sv/h} \rightarrow 2.16\mu\text{Sv/h}$)	車両の事前放射線測定	2 名	0.8 時間
	ラジエータ、コンデンサの取外し	1 名	1.0 時間
	放射線測定により汚染部の特定	2 名	0.6 時間
	作業上邪魔になる部分の取外し	1 名	0.6 時間
	除染作業	4 名	12.5 時間
	除染後の放射線測定	2 名	0.5 時間
低汚染車両 (0.30Sv/h→B.G.)	車両の事前放射線測定	2 名	0.8 時間
	ラジエータ、コンデンサの着脱	外注	半日
	除染後の放射線測定	2 名	0.5 時間

8. まとめ

- 溶液温度、濃度及び除染時間は、ラジエータピースによるピーカースケール試験の結果及び溶剤コストと酸性物質の取扱いに対する容易性や安全性を考慮し、温度 50℃、5 倍希釈濃度（原液 1：水 4）、除染時間 30 分を以降の実証試験の基本条件とした。
- アルミ製熱交換器表面の固着物を EDX により分析した結果、カルシウム化合物、シリカ化合物など硬質スケールが堆積化したもので、放射性 Cs はそれらとともに固着すると考えられる。硬質スケール化した固着物は高圧水等による単純な水洗浄での除染が難しいことから、固着物を溶解除染するのに最適な方法として除染溶剤による浸漬洗浄を選択した。
- 実汚染サンプル除染実証試験において、車両用ラジエータ及びコンデンサ、空調用熱交換器は除染前の汚染レベル（0.12~4.90 μ Sv/h）に関わらず B.G.レベルまでの除染が可能であることを確認した。
- 汚染車両のサーベイの結果、汚染を確認したほぼすべての車両でラジエータ及びコンデンサ近傍の汚染レベルが最も高く、次いでボンネットの根元、空気取入れ口の順となった。
- 車両全体の除染の結果、高線量のラジエータ及びコンデンサ等を取り外すことで車両全体の線量当量率を大幅に下げることが確認できた。さらにふき取り等の除染により、ラジエータ近傍において最大 $\geq 30\mu\text{Sv/h}$ を確認した高汚染車両では、除染後は 2.16 $\mu\text{Sv/h}$ まで低減することができた。
- (5)において目標とする 0.3 $\mu\text{Sv/h}$ まで除染を行えなかった理由は、最も汚染レベルの高いエンジンルームやエアダクト内は狭窄部分が多いためアクセスが難しく、ふき取り等では除染が困難であるためと考えられ、これらの部分を除染するためには、車両の分解等による部品の取外しが現状、不可欠であると思われる。

実施代表者の所属機関：中外テクノス株式会社

実証テーマ名：重曹ブラスト（スーパーブラストシステム）によるリサイクル廃家電製品の除染

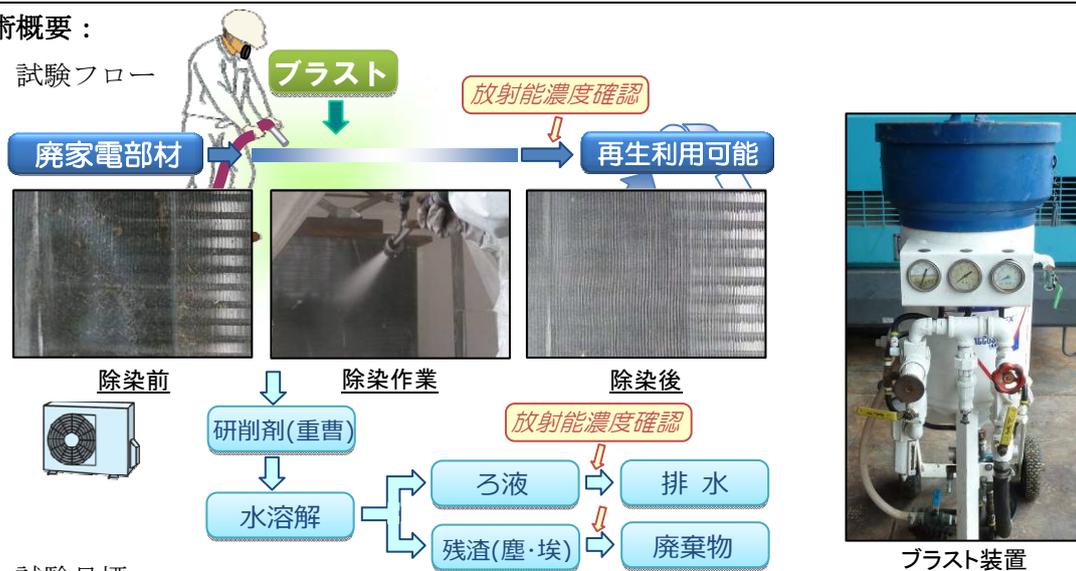
事業の概要：放射性物質を含んだ塵や埃が細部に入り込んだリサイクル対象の廃棄物は、その複雑な形状から除染が困難であるとみられている。本事業では、リサイクル対象の廃家電を対象に、除染効果と経済性を検討することによって、特殊重曹を研削材として噴射する重曹ブラスト工法がこれらの廃棄物に対する有力な除染技術であることを実証する。また、重曹は水溶性であることから、溶解することで「ろ過」によって汚染された付着物のみを回収できる。このため、除染廃棄物の減容化の可能性についても検討する。

実施内容：

- (1) ラジエータ等部材の小片を用いて除染を試行し、最適な施工条件を設定
- (2) 除染廃材を溶解した液や除染廃水をろ過処理して付着物のみを回収し、減容化を確認
- (3) 実際の大きさの部材を用いて除染率及びコストを算出
- (4) 素材や形状の違いを考慮した効果的な除染システムを検討

技術概要：

1. 試験フロー



2. 試験目標

- (1) 対象物の放射能濃度を 100 Bq/kg 以下に低減すること
- (2) 排水は、特措法による濃度限度*（下式により算出した値が1を超えない）を満足すること

$$\frac{^{134}\text{Cs の濃度 (Bq/L)}}{60 \text{ (Bq/L)}} + \frac{^{137}\text{Cs の濃度 (Bq/L)}}{90 \text{ (Bq/L)}} \leq 1$$

3. 期待される効果

- (1) リサイクル対象廃棄物の効率的な除染システムの構築
- (2) 除染困難であったリサイクル対象廃棄物が再生資源として利用可能

その他：本技術は、廃家電以外のリサイクル対象廃棄物の除染にも適用できるなど汎用性が高い。また、除染設備はトラックで運搬可能で機動性に優れており、点在する廃棄物仮置場での除染作業にも活用することが期待できるなど実用性も高い。さらに、既存の技術や資材等を一部流用できることから初期費用を軽減できるというメリットも有する。

除染効果：表1 重曹ブラストの施工時間（研削材量）の違いによる除染効果の試験結果

施工方法	対象物重量(kg)	吐出圧力(MPa)	研削材量(kg)	放射能濃度(Bq/kg)		
				除染前	除染後	除染率(%)
ドライ重曹ブラスト	0.075	1.32	0.65	17,000	3,300	80.6
ウエット重曹ブラスト	0.074	4.02	1.97	10,000	500	95.0

表2 ウエット重曹ブラストから発生した除染廃水処理試験結果

処理対象	処理水量(L)	放射能濃度(Bq/L)	処理方法	処理後放射能濃度(Bq/L)
ウエット重曹ブラスト廃水	12.0	298	孔径 1 μm ろ紙ろ過	134
			除染用フレコンバッグ*	28

※：ゼオライト機能紙を内袋した除染用のフレキシブルコンテナバッグ、孔径 1-2 μm。

表3 ウエット重曹ブラスト処理による廃家電（エアコン室外機）除染実証試験結果

対象部材	対象部材重量(kg)	研削材量(kg)	表面汚染計数率(cpm)			除染後放射能濃度(Bq/kg)
			除染前	除染後	除染率(%)	
ラジエータ (アルミ類・銅類)	2.74~3.89	3.42~6.30	449~4,777	24~788	83.5~98.1	94~2,400
ケーシング (金属類)	2.39~12.3	0.44~2.11	0~2,117	0~61	78.1~100	13~165
ファン・カバー (プラスチック類)	0.14~1.26	0.35~1.23	29~675	1~99	39.2~99.3	104~1,660
モータ (金属類)	1.32~2.04	0.10~0.35	35~313	3~16	73.2~99.0	未測定
基盤 (プラスチック類)	1.10~3.14	0.21~0.64	0~336	0~40	58.9~100	71~187
防音材 (プラスチック類)	0.19~1.25	0.26~0.57	0~257	0~186	3.0~100	11,200
ゴム (ゴム類)	0.10~0.22	0.07~0.31	7~12	0~0	100	63~160

備考）・表面汚染計数率(cpm)は、バックグラウンド値(28-53 cpm)を差し引いた値

表4 部材ごとの適したウエット重曹ブラスト施工方法の検討

対象部材	施工方法	研削材量(kg)	施工時間(hr)
ラジエータ	吐出圧力 0.4MPa、噴射角 75°、2度噴き	1.9	0.025
ケーシング、ファン・カバー、ゴム等	吐出圧力 0.4MPa、噴射角 75°、1度噴き	5.8	0.14

- ・表1 重曹ブラスト施工条件による除染効率に関する基礎試験結果から、0.01m²、0.074kg の対象部材に対して、最大 95.0 % の除染率が得られた。
- ・表2 ウエット重曹ブラストから発生した除染廃水処理試験結果から、ウエット重曹ブラストの廃水処理には、ろ過だけでは放射性物質の除去が不十分なため、ゼオライト等の吸着剤が必要となる。
- ・表3 ウエット重曹ブラスト処理による廃家電除染実証試験結果から、ラジエータ（平均重量 3.40kg）に対して、表面汚染を最大 98.1%低減することができた。
- ・表3 ウエット重曹ブラスト処理による廃家電除染実証試験結果から防音材のような繊維の中に放射性物質が入り込んでいる部材に対しては、当該方法は適用できない。

除去物発生量評価： ・ドライ重曹ブラスト（ラジエータ 1 kg 当り）：除染廃棄物 2.84 kg、廃材を水溶解することで除染廃棄物を減容することが出来る（ろ過残渣）0.025 kg（減重率 1 / 113）
 ・ウエット重曹ブラスト（ラジエータ 1 kg 当り）：処理水量 1.20 L（処理により下水放流可能な濃度）

作業員被ばく量評価： ・ウエット重曹ブラスト除染ブース内空間線量率：0.06 μSv/hr
 ・作業員最大被ばく量：1 μSv（ドライ重曹ブラスト作業 6 時間）
 ・作業員平均被ばく量：<1 μSv（平均作業時間 6 時間）

コスト評価：
 3,732 円/エアコン室外機 1 台（815 円/ラジエータ 1 個）
 歩掛り（作業人工、作業速度）：
 ・作業人工：0.048 人工/エアコン室外機 1 台（0.007 人工/ラジエータ 1 個）
 ・作業速度：エアコン室外機 6 台/hr（ラジエータ：40 個/hr）

コスト評価条件： ・除染目標：0.4 μSv/h まで表面線量率を低減 ・2 人作業 8 hr/日
 ・人件費：特殊作業員 19,400 円/8 hr として算定
 ・除染ブース設置等の設備に関する経費、廃家電を解体する作業、除染廃棄物処理費用は含まない。

除染作業における安全上の注意： 防じんマスク、レインウェア、ゴム手袋、長靴着用

試験場所（住所）： 千葉県市原市、千葉市
 除去物保管場所と保管状況（写真）： 千葉市の当社、関東環境技術センター放射性物質保管庫に保管



1. 除染効果

まず、リサイクル対象廃家電の部材を切断した小片を対象に基礎試験を行い、ブラスト処理の最適条件を設定して、実際の大きさ部材を対象に実証試験を行った。

(1) 基礎試験

表1-1 基礎試験における除染対象部材

家電製品名称	対象部材	材質	外観	試験片の大きさ
エアコン室外機	ラジエータ	アルミ・銅	複雑	約 100×100×20mm
洗濯機	水槽上部リング	プラスチック類	平滑	約 100×100×40mm
	操作盤	プラスチック類	平滑	約 200×70×20mm
	基盤	金属類・プラスチック類	複雑	約 200×50×5~40mm
テレビ	ディスプレイ	ガラス質	平滑	約 150×150×5mm
	裏面金属ケーシング	金属	凹凸	約 100×100×10mm

表1-2 基礎試験条件

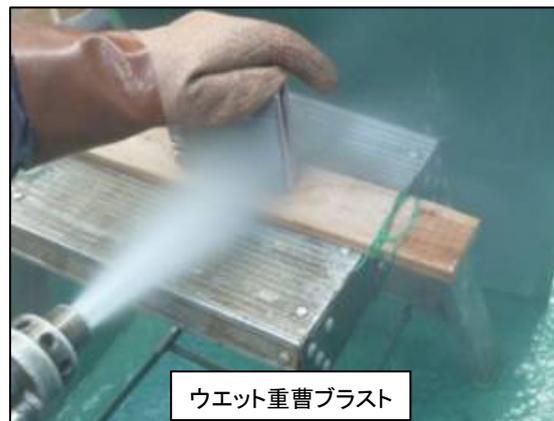
共通条件	オリフィス:0.125inch、ノズル:3/4inch、噴射距離:250mm、噴射角:90° (一定)			
ブラスト工法	研削材	研削材量	吐出圧力	施工速度
ドライ	重曹(特殊重曹)	0.18、0.33、0.49、 0.67 kg/min	0.2、0.3、0.4、 0.5 MPa	一定 (約 0.08 分/個)
ウエット	重曹(特殊重曹)			
ウエット	水のみ			
ドライ	重曹(特殊重曹)	一定 (0.49 kg/min)	一定 (0.4 MPa)	約 0.08~1.3 分/個
ウエット	重曹(特殊重曹)			
ウエット	水のみ			
ウエット	重曹(特殊重曹)			
				約 1.3~4 分/個

- ・ 基礎試験に用いた 100×100mm 試験片は、有姿のままゲルマニウム半導体検出器で除染前と除染後の放射能濃度を分析した。
- ・ 対象物の放射性セシウム濃度 (^{134}Cs と ^{137}Cs の核種) を測定して含量で評価した。
- ・ 放射能濃度の分析条件を以下に示す。

前処理	測定用容器	測定時間	検出下限	備考
なし	有姿の状態	1,000 秒以上	30 Bq/kg 以下	検出下限値は試料密度により変動する。 また、検出下限値以上で検出値が得られる場合は、この検出下限値は適用しない。



ドライ重曹ブラスト



ウエット重曹ブラスト

図1-1 基礎試験状況

1) 重曹ブラストの施工条件による除染効果の試験結果

表1-3 重曹ブラストの吐出圧力の違いによるラジエータの除染効果の試験結果

施工方法	対象物重量(kg)	吐出圧力(MPa)	研削材量(kg)	放射能濃度(Bq/kg)		
				除染前	除染後	除染率(%)
水ブラスト (研削材なし)	0.077	0.2	0.06	10,400	9,900	4.8
	0.065	0.3	0.11	2,230	2,110	5.4
	0.084	0.4	0.16	1,460	1,360	6.8
	0.071	0.5	0.22	6,600	4,900	25.8
ドライ重曹ブラスト	0.083	0.2	0.07	3,100	2,010	35.2
	0.067	0.3	0.13	6,700	3,500	47.8
	0.079	0.4	0.18	9,100	4,000	56.0
	0.072	0.5	0.23	6,100	1,680	72.5
ウエット重曹ブラスト	0.066	0.2	0.06	2,620	1,870	28.6
	0.071	0.3	0.11	6,900	4,500	34.8
	0.088	0.4	0.18	8,300	2,990	64.0
	0.068	0.5	0.26	7,300	1,900	74.0

備考)・除染前後の放射能濃度(Bq/kg)は、有姿のままゲルマニウム半導体検出器で分析

- ・吐出圧力を上げることで、高い除染効果が期待できる。しかし、吐出圧力を上げると研削材の使用量も多くなるため、コスト等に関して評価する必要がある。
- ・0.4MPaと0.5MPaを比較した場合、研削材の吐出量の増加と比較して、除染率はそれほど向上しないため、0.4MPaが適当であると判断した。

表1-4 重曹ブラストの施工時間(研削材量)の違いによるラジエータの除染効果の試験結果

施工方法	対象物重量(kg)	施工時間(min)	研削材量(kg)	放射能濃度(Bq/kg)		
				除染前	除染後	除染率(%)
水ブラスト (研削材なし)	0.075	0.08	0.17	7,800	7,700	1.3
	0.066	0.17	0.33	9,600	9,600	0.0
	0.066	0.15	0.30	1,300	1,210	6.9
	0.084	0.33	0.67	1,460	1,360	6.8
	0.073	0.67	1.33	9,200	8,000	13.0
ドライ重曹ブラスト	0.072	0.10	0.05	8,800	5,600	36.4
	0.069	0.18	0.09	8,200	4,000	51.2
	0.079	0.37	0.18	9,100	4,000	56.0
	0.078	0.63	0.31	1,800	550	69.4
	0.075	1.32	0.65	17,000	3,300	80.6
ウエット重曹ブラスト	0.063	0.08	0.04	9,200	5,600	39.1
	0.078	0.17	0.08	9,400	4,700	50.0
	0.088	0.37	0.18	8,300	2,990	64.0
	0.065	0.67	0.33	6,900	1,400	79.7
	0.072	0.76	0.37	6,800	1,280	81.2
	0.066	1.19	0.58	16,600	2,260	86.4
	0.083	1.70	0.83	1,480	143	90.3
	0.082	2.99	1.47	8,800	660	92.5
0.074	4.02	1.97	10,000	500	95.0	

備考)・除染前後の放射能濃度(Bq/kg)は、有姿のままゲルマニウム半導体検出器で分析

- ・ブラスト施工時間を長くしても除染率が高くないことから、一定時間以上は、沈着した放射性物質を除染することが困難であると考えられた。

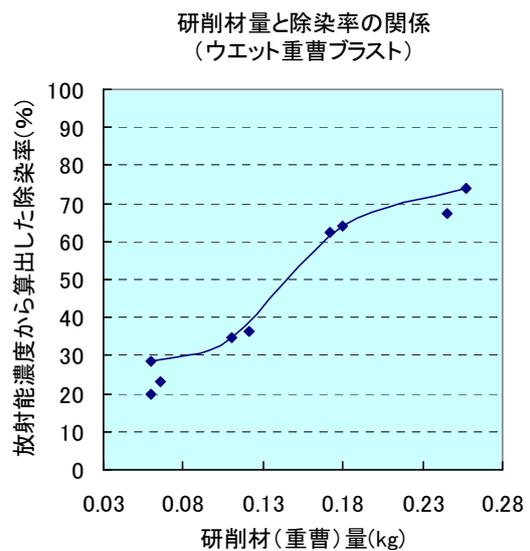
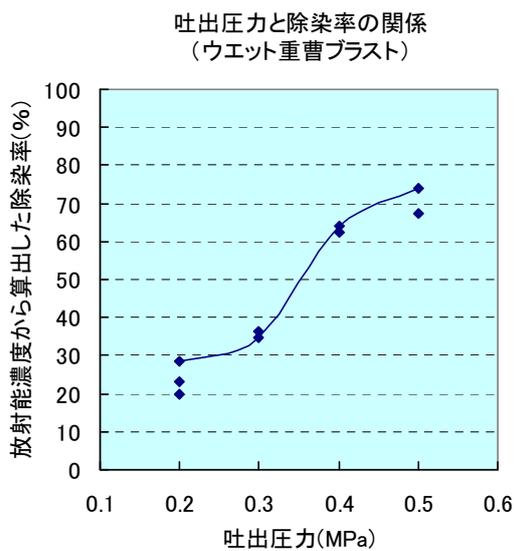
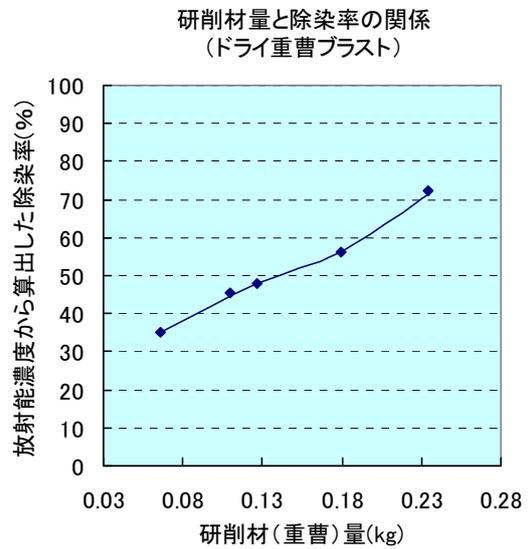
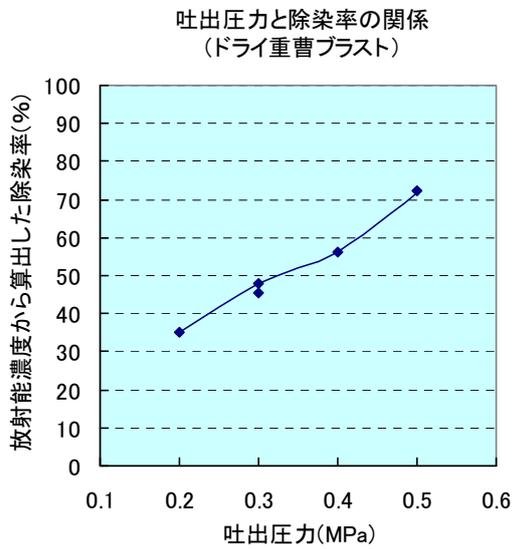
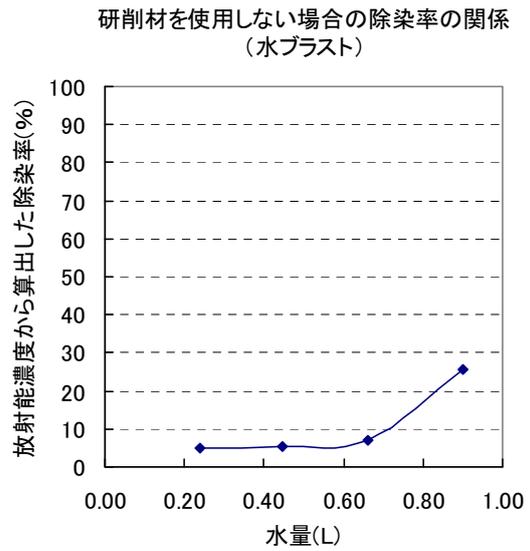
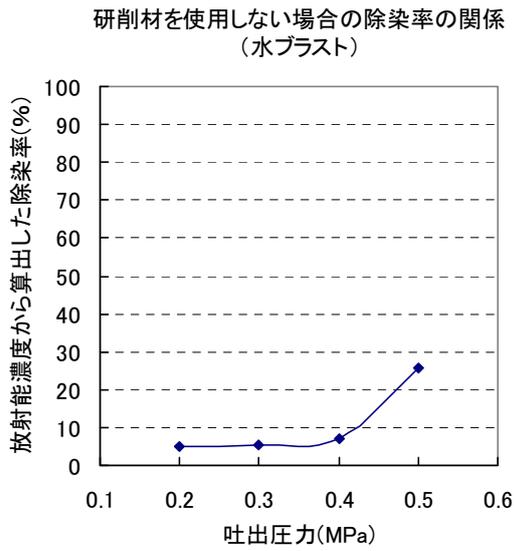


図1-2 重曹プラストの吐出圧力と除染率の関係

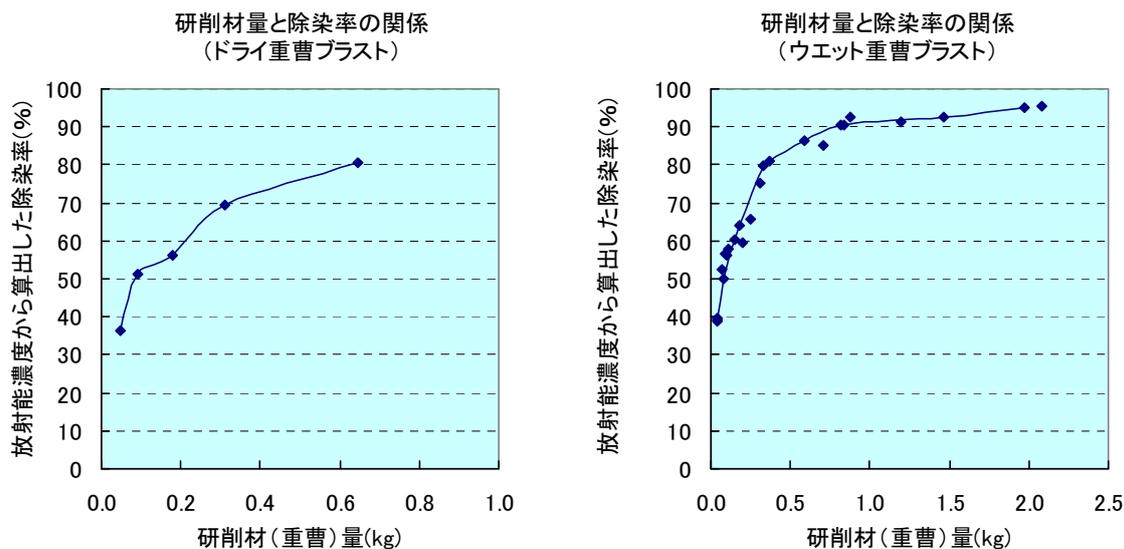


図1-3 重曹ブラスト施工時間と除染率の関係

表1-5 施工時間と研削材(重曹)量の関係

施工時間(min)	0.1	0.5	1	2	3	4
研削材(重層)量(kg)	0.05	0.25	0.5	1.0	1.5	2.0

備考) ドライ・ウエットブラストとも研削材(重曹)量は同じであった。

2) 各ブラスト工法と重曹ブラストとの比較

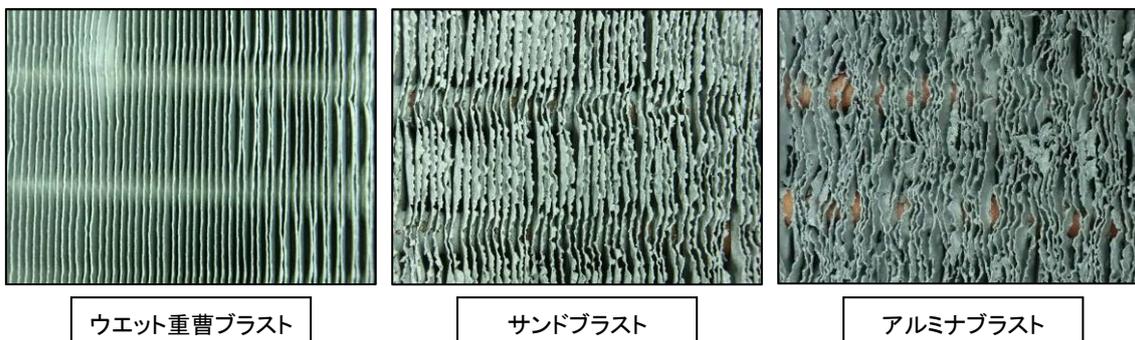


図1-4 各ブラスト工法によるラジエータアルミフィンの表面の状態

- ・ サンドやアルミナブラスト処理では、アルミフィンに損傷や屈曲がみられる。一方、重曹ブラスト処理では、比較的素材を傷めていないことがわかる。

表1-6 各ブラスト工法によるラジエータアルミフィンの重量減量

ブラスト工法	研削材量(kg)	処理時間(min)	放射能濃度除染率(%)	ブラスト処理前(kg)	ブラスト処理後(kg)	重量減量率(%)
ウエット重曹ブラスト	0.25	0.37	67.4	81.0	74.8	7.7
サンドブラスト	0.25	0.37	44.2	66.7	60.4	9.4
アルミナブラスト	0.26	0.35	88.6	64.0	56.3	12.0

3) 重曹ブラスト工法の評価

- ・ 研削材として重曹を使用した場合、サンドやアルミナと比較して、素材を傷めないことがわかった。理由としては、重曹のモース硬度が2.5と、サンド(珪砂)やアルミナよりも軟らかいためと考えられる。
- ・ このため、アルミやプラスチック等の軟らかい素材に対して除染効果が期待できる。
- ・ 重曹(炭酸水素ナトリウム: NaHCO_3)は、食用としても使用されており、安全性が高い。

(2) 除染廃水処理試験

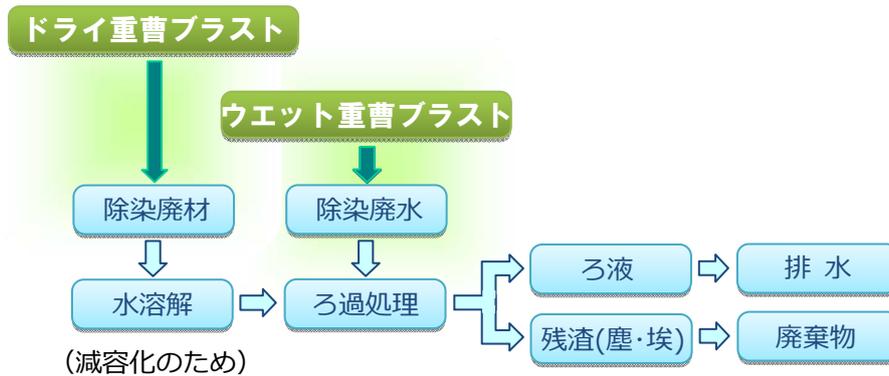


図1-5 除染廃水処理フロー

表1-7 除染廃水処理試験条件

ブラスト工法	処理対象	処理方法
ドライ重曹ブラスト	除染廃材	水溶解(減容化のため)後、孔径1μmろ紙によるろ過
ウェット重曹ブラスト	除染廃水	孔径1μmろ紙によるろ過
		孔径1-5μmろ布によるろ過
		孔径0.5-1μmろ布によるろ過
		除染用(ゼオライト)フレコンバック処理
		孔径0.45μmメンブレンフィルターろ過
		粉末凝集剤※0.05%添加後、孔径1μmろ紙ろ過
		液体凝集剤※0.35%添加後、孔径1μmろ紙ろ過

※：使用した凝集剤は、重曹水(アルカリ性)用の特注品

1) ドライ重曹ブラスト除染廃材(重曹)の水溶解による減容化試験結果

表1-8 ドライ重曹ブラスト除染廃材(重曹)の水溶解による減容化試験結果

項目	発生量	放射能濃度	セシウム量	除去率※	濃縮率
除染廃材	2.14 kg	5,400 Bq/kg	11,556 Bq	90.1 %	102 倍
ろ過処理水	22.5 L	51 Bq/L	1,149 Bq		減重率
ろ過残渣	0.019 kg	550,000 Bq/kg	10,450 Bq		1 / 113

※：除去率(%) = (除染廃材のセシウム量 - ろ過処理水のセシウム量) / 除染廃材のセシウム量

- ・ ドライ重曹ブラストによる除染作業で回収した廃材の減容化のために、水溶解して別処理した。
- ・ 溶解水は、孔径1μmろ紙によるろ過処理により、放射能濃度を51 Bq/Lに低減することができた。この濃度は、特措法による水中の濃度限度※を満足している。
※放射性物質汚染対処特措法施行規則(平成23年 環境省令第33号)に定める事業場及び最終処分場の周辺の公共用水域の水中の濃度限度を算定する式

ろ過処理水の放射能濃度		^{134}Cs の濃度 (Bq/L)		+	^{137}Cs の濃度 (Bq/L)		≤ 1
^{134}Cs	15 Bq/L	60 (Bq/L)			90 (Bq/L)		
^{137}Cs	36 Bq/L	15 (Bq/L)			36 (Bq/L)		
合計	51 Bq/L	60 (Bq/L)		+	90 (Bq/L)		= 0.65 ≤ 1

2) ウエット重曹ブラスト除染廃水処理試験結果

ウエット重曹ブラスト処理を行った場合、廃水が発生する。この廃水に対して、表1-9に示す処理方法を試行して、放射性セシウムの除去効果を確認した。

表1-9 ウエット重曹ブラスト除染廃水の処理試験結果

ウエット重曹ブラスト 除染対象物	廃水量 (L)	放射能濃 度(Bq/L)	放射性セシ ウム量(Bq)	処理方法	処理後 放射 能濃度(Bq/L)	放射性セシウム量(Bq)	
						処理後	除去率 (%)
ラジエータ	12.0	298	3,576	孔径 1 μm ろ紙ろ過	134	1,608	55.0
				除染用フレコンバッグ※ ¹ (ゼオライト)	28	336	90.6
ラジエータ	16.9	74	1,248	孔径 0.45 μm MF ろ過※ ²	47	793	36.5
				除染用フレコンバッグ※ ¹ (ゼオライト)	21	354	71.6
ラジエータ	136.2	271	36,910	孔径 1 μm ろ紙ろ過	170	23,154	37.3
					156	21,247	42.4
				孔径 1-5 μm ろ布ろ過	260	35,412	4.1
ラジエータ その他エアコン室外機 部材	205.6	1,570	322,740	孔径 0.5-1 μm ろ布ろ過	232	31,598	14.4
				孔径 1 μm ろ紙ろ過	346	71,126	78.0
				孔径 1-5 μm ろ布ろ過	530	108,950	66.2
				孔径 0.5-1 μm ろ布ろ過	420	86,338	73.2
ラジエータ 洗濯機水槽上部リング	34.6	570	19,739	除染用フレコンバッグ※ ¹ (ゼオライト)	54	11,101	96.6
				孔径 1 μm ろ紙ろ過	335	11,601	41.2
				粉末凝集剤※ ³ 10.05%添加	324	11,220	43.2
				孔径 1 μm ろ紙ろ過	337	11,670	40.9
				液体凝集剤※ ³ 10.35%添加			
				孔径 1 μm ろ紙ろ過			

※1 : ゼオライト機能紙を内袋した除染用フレキシブルコンテナバッグ(除染用フレコンバッグ)、孔径 1-2 μm

※2 : MF とは、メンブレンフィルターの略

※3 : 使用した凝集剤は、天然の鉱物を主成分とした、無機系凝集剤。重曹水による pH(アルカリ性)の影響を受けにくい

- ウエット重曹ブラスト廃水は、凝集剤を使用しても、微細粒子状物質を完全に分離することができず、放射性セシウムをろ別処理する事ができなかった。
- 廃水には、孔径 0.45 μm を通過する放射性セシウムが 36.5 % 存在したが、除染用フレコンバッグ処理により 71.6 % をろ別・吸着できることが確認できた。



図1-6 除染用フレコンバッグ処理状況

- 図1-6に示した除染用フレコンバッグは、試験用に作成した 30L 容量のものである。内側には、ゼオライト機能紙が内袋されている。除染用フレコンバッグに廃水を導入すると孔径 1-2 μm 程度でろ過される。

(3) 実証試験

基礎試験の結果から、ドライとウエット工法で除染効果に差が無いこと、ウエット工法のほうがドライ工法より作業中の粉じんの発生量が少なく作業性がよいことからウエットブラストを選定した。実証試験は、リサイクル対象廃家電のエアコン室外機を解体して、各部材を対象に実物大の状態ですらスト試験を行った。

実証試験は、除染前後でGMサーベイメータを用いて表面汚染計数率(cpm)を測定し、その結果を比較評価した。なお、測定時には鉛コリメータを使用した。

また、家電リサイクル事業所では、廃家電の受入時と出荷時に表面線量率を測定して自主管理している。このため、表面線量率での除染評価も実施した。

表1-10 除染実証試験対象部材

家電製品名称	対象部材	材質	形状	
エアコン室外機	ラジエータ(20台)	アルミ・銅	複雑	
エアコン室外機(5台)	ラジエータ	アルミ・銅	複雑	
	ケーシング	前面	金属	平滑
		底面	金属	平滑
	モータ	金属	平滑	
	コンプレッサ	金属	平滑	
	カバー	プラスチック類	複雑	
	ファン	プラスチック類	凹凸	
	基盤	金属類・プラスチック類	複雑	
	防音材	プラスチック類	繊維状	
	ゴム	ゴム	凹凸	

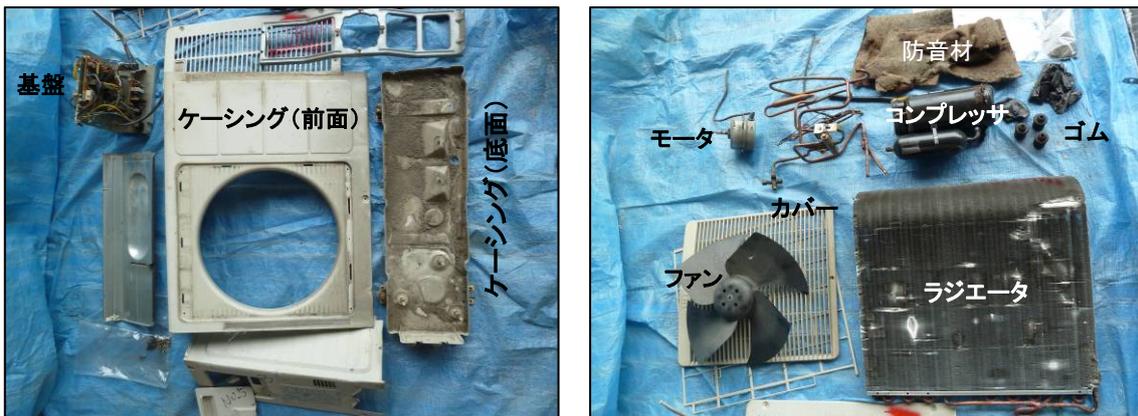


図1-7 除染実証試験対象部材

表1-11 除染前後の表面線量率測定結果

除染対象	表面線量率(μ Sv/h)		対象部材	表面線量率(μ Sv/h)	
	測定点	除染前		除染後	除染率(%)
エアコン室外機 No.1	ラジエータ側	0.35	ラジエータ 1	0.01	96.9
			ラジエータ 2	0.00	100
エアコン室外機 No.2	ラジエータ側	0.41	ラジエータ	0.01	97.6
エアコン室外機 No.3	ラジエータ側	0.40	ラジエータ	0.00	99.6
エアコン室外機 No.4	ラジエータ側	0.61	ラジエータ	0.00	99.2
エアコン室外機 No.5	ラジエータ側	1.10	ラジエータ 1	0.04	96.4
			ラジエータ 2	0.00	99.9

備考)・表面線量率(μ Sv/h)は、バックグラウンド値(0.06 μ Sv/h)を差し引いた値

- ・実証試験から除染前の表面線量率が0.35~1.10 μ Sv/hのエアコン室外機について、ウエット重曹ブラスト処理によりラジエータの表面線量率を0.04 μ Sv/h程度まで除染することができた。

表1-12 部材別除染実証試験結果

対象部材	部材重量 (kg)	研削材量 (kg)	表面汚染計数率(cpm)			表面線量率(μ Sv/h)			除染後射能 濃度(Bq/kg)
			除染前	除染後	除染率(%)	除染前	除染後	除染率(%)	
ラジエータ (アルミ類・銅類)	3.40	4.31	1,403	41	97.1	0.08	0.01	86.6	430
	3.40	4.41	1,233	24	98.1	0.05	0.00	100	269
	3.18	4.26	1,494	170	88.6	0.10	0.01	90.2	2,400
	3.10	4.41	449	25	94.3	0.07	0.00	97.7	880
	2.74	3.42	3,985	177	95.5	0.21	0.00	97.7	490
	3.89	4.49	4,777	788	83.5	0.26	0.04	84.7	2,120
	3.49	6.30	589	38	93.6	0.04	0.00	96.4	94
ケーシング (前面) (金属類)	8.06	0.44	1	0	100	0.01	0.00	100	72
	7.12	0.98	0	0	100	0.01	0.00	100	74
	6.59	1.99	12	0	100	0.00	0.00	100	17
	6.73	1.45	4	0	100	0.01	0.00	100	13
	12.30	2.02	17	1	95.9	0.01	0.00	100	38
ケーシング (底面) (金属類)	4.38	0.81	309	18	94.2	0.02	0.00	90.0	68
	3.84	0.58	280	61	78.1	0.02	0.01	44.4	165
	2.39	0.94	2,117	15	99.3	0.20	0.01	94.9	51
	7.37	1.30	1,427	13	99.1	0.06	0.01	82.8	13
	8.50	2.11	87	3	97.0	0.01	0.00	77.8	33
ファン (プラスチック類)	1.16	0.43	238	99	58.5	0.01	0.01	25.0	1,660
	0.74	0.62	44	4	90.4	0.01	0.00	100	132
	0.82	0.57	304	5	98.2	0.01	0.01	28.6	470
	1.16	0.79	675	4	99.3	0.02	0.00	83.3	104
	1.26	0.35	29	8	71.2	0.01	0.00	100	263
カバー (プラスチック類)	0.26	0.44	80	1	99.0	0.01	0.00	100	520
	0.14	0.37	79	14	81.9	0.01	0.00	50.0	308
	0.22	0.92	216	32	85.0	0.01	0.01	28.6	160
	0.44	1.23	83	7	91.6	0.01	0.00	100	560
	0.56	0.74	42	26	39.2	0.00	0.00	100	231
モータ (金属類)	2.00	0.12	169	16	90.5	0.01	0.00	100	-
	2.04	0.10	35	4	88.1	0.01	0.00	100	-
	1.62	0.28	273	3	99.0	0.01	0.01	28.6	-
	1.54	0.35	313	14	95.5	0.01	0.00	100	-
	1.32	0.11	57	15	73.2	0.01	0.00	100	-
基盤 (プラスチック類)	3.14	0.38	202	40	80.3	0.02	0.01	44.4	187
	2.04	0.21	37	15	58.9	0.01	0.00	100	-
	1.46	0.44	336	22	93.3	0.04	0.00	94.4	-
	1.10	0.64	198	22	88.8	0.01	0.00	100	71
	2.44	0.45	0	0	100	0.01	0.00	100	-
防音材 (プラスチック類)	0.80	0.26	15	13	14.5	0.01	0.00	100	-
	0.19	0.42	0	0	100	0.01	0.00	100	-
	0.23	0.49	257	186	27.7	0.00	0.00	100	11,200
	1.25	0.57	53	51	3.0	0.02	0.01	44.4	-
ゴム(ゴム類)	0.10	0.31	12	0	100	0.02	0.00	100	63
	0.22	0.07	7	0	100	0.01	0.00	100	160

備考)・表面汚染計数率(cpm)・表面線量率(μ Sv/h)は、それぞれのバックグラウンド値(28-53 cpm・0.02-0.03 μ Sv/h)を差し引いた値
 ・“-”は、未測定であることを示す

- ・ ゴム類に関しては、除染前の表面汚染計数率が低いですが、100 %除染できることが確認できた。今回の試験では、ゴムの劣化によりひび割れた奥部にまで放射性物質が入り込んだ部材が入手できなかったため、全てのゴムに有効であるとは言い難い。
- ・ 防音材は、27.7 %しか除染できず、除染後も表面汚染計数率が 186 cpm あることからブラストによる除染は適さないと判断した。表1-13に実証試験の除染効果から得られた施工方法を示す。

表1-13 部材ごとの適したウエット重曹ブラスト施工方法の検討結果

対象部材	施工方法	研削材量(kg)	施工時間(hr)
ラジエータ(重量 2.74~3.89 kg)	吐出圧力 0.4MPa、噴射角 75°、2度噴き	1.9	0.025
ケーシング、ファン・カバー、ゴム等 (重量 0.1~12.3 kg)	吐出圧力 0.4MPa、噴射角 75°、1度噴き	5.8	0.14

2. 除去物発生量評価

- ・ 除染により、ドライ重曹ブラスト工法では、除去した付着物を含む重曹が固形物として回収される（除染廃材）。また、ウエット重曹ブラスト工法では、除去した付着物と重曹が溶解した懸濁水として回収される（除染廃水）。
- ・ 除染による除去物発生量は表2-1のとおりである。

表2-1 除染による除去物の発生量と放射能濃度

ブラスト工法	対象重量	廃棄物処理	廃棄物発生量	単位除染廃棄物量		放射能濃度
ドライ重曹ブラスト	0.75 kg	未処理	研削材(重曹)2.14 kg	2.84 t/t	2.8 m ³ /t	5,400 Bq/kg
		水溶解後、ろ過処理	ろ過残渣 0.019 kg	0.025 t/t	0.03 m ³ /t	550,000 Bq/kg
			ろ過処理水 22.5 L	30.0 t/t	30.0 m ³ /t	51 Bq/L
ウエット重曹ブラスト	171.51 kg	未処理	除染廃水 205.6 L	1.20 t/t	1.2 m ³ /t	1,570 Bq/L
		除染用フレコンバッグ処理	残渣 0.53 kg	0.0031 t/t	0.003 m ³ /t	583,000 Bq/kg
			除染用フレコンバッグ 0.62 kg(1袋)	0.0036 t/t	0.03 m ³ /t	-
			除染廃水 205.1 L	1.20 t/t	1.2 m ³ /t	54 Bq/L

備考) ・単位除染廃棄物量は、除染対象重量(1t)当りの廃棄物発生量(t 又は m³)

3. 作業員被ばく量評価

- ・ ウエット重曹ブラストを用いた廃家電の除染作業において、1日における外部被ばく線量は、1mSvを超えるおそれは無いと考えられた。

表3-1 除染作業中の作業員被ばく線量及び作業環境測定結果

ブラスト工法	作業時間(h)	除染対象物平均放射能濃度(Bq/kg)	除染対象物全重量(kg)	個人被ばく量(μSv)	平均空間線量率(μSv/hr)	空気中の放射能濃度(Bq/m ³)
ドライ重曹ブラスト	6	6,774	0.75	1	0.08	4.7
ウエット重曹ブラスト	6	8,292	0.73	0	0.06	2.0 未満
サンドブラスト	3	11,250	0.46	0	0.10	6.9
アルミナブラスト	3	15,043	0.52	0	0.15	10.0

4. コスト評価

【コスト評価条件】

- ・ リサイクル業者が定めている出荷時の自主基準(0.2μSv/h以下、又は0.4μSv/h以下)を満足するための除染作業にかかるコストを評価した。
- ・ 歩掛りは、除染ブース設置・撤去費、機器損料、リース費(コンプレッサ等)、除染廃棄物処理費、廃家電を解体する作業は含まずに算定した。

表4-1 歩掛り(除染目標0.4μSv/hの場合)

品目	単価(円)	単位	エアコン室外機1台			
			ラジエータ以外の部材		ラジエータ	
			使用量	金額(円)	使用量	金額(円)
人件費(特殊作業員)	19,400	人工	0.040	776	0.007	136
特殊重曹	350	kg	5.8	2,030	1.9	665
水道料金	50	m ³	0.017	1	0.003	0
軽油	138	L	0.8	110	0.1	14
計			-	2,917	-	815
合計				3,732	円	

参考) アルミナ:¥400/kg、サンド(珪砂):¥50/kg

表4-2 コスト試算結果

設備維持管理コスト	1日当りの設備維持管理費
除染ブース設置・撤去費、機器損料、リース費用(コンプレッサ等)、除染廃棄物処理費用等	30,119円/日

5. 除染作業における安全上の注意

- 作業場内の粉じん測定の結果から、ドライ重曹ブラスト工法は高濃度粉じん作業に該当する。

表5-1 作業場内の粉じん濃度測定結果

ブラスト工法	ドライ重曹ブラスト	ウェット重曹ブラスト	サンドブラスト	アルミナブラスト
粉じん濃度(mg/m ³)	14	0.20	0.36	0.33
空間線量率(μSv/h)	0.08	0.06	0.10	0.15

- ドライ重曹ブラスト工法を実施する場合は、下表の黒枠に示す保護具が必要。

作業区分	放射能濃度 200万Bq/kg超	放射能濃度 200万Bq/kg以下 50万Bq/kg超	放射能濃度 50万Bq/kg以下
高濃度粉じん作業 (粉じん濃度10mg/m ³ 超)	長袖の衣服の上に二重の密閉型全身化学防護服 綿手袋の上に二重のゴム手袋 ゴム長靴 補集効率99.9%以上の防じんマスク(全面型)	長袖の衣服の上に密閉型全身化学防護服 綿手袋の上にゴム手袋、 ゴム長靴 補集効率95%以上の防じんマスク	長袖の衣服、 綿手袋 ゴム長靴 補集効率80%以上の防じんマスク
高濃度粉じん作業以外の作業 (粉じん濃度10mg/m ³ 以下)	長袖の衣服の上に密閉型全身化学防護服 綿手袋の上にゴム手袋、 ゴム長靴、 補集効率95%以上の防じんマスク	長袖の衣服の上に密閉型全身化学防護服 綿手袋の上にゴム手袋、 ゴム長靴 補集効率80%以上の防じんマスク	長袖の衣服 綿手袋 ゴム長靴 不織布製マスク

出典) 電離放射線障害防止規則(昭和47年9月30日労働省令第41号 最終改正:平成25年4月12日厚生労働省令第57号)

6. 除去物保管場所と保管状況

- 放射能濃度8,000Bq/kgを超える除染廃棄物は、千葉市の当社、関東環境技術センター放射性物質保管庫に保管している。

表6-1 除染で発生した廃棄物の放射能濃度測定結果

除染で発生した廃棄物	放射能濃度 (Bq/kg)	発生量(kg)	体積(m ³)	適用
除染残渣(廃水処理)	579,000	0.57	0.5	放射性物質保管庫に保管
1次フィルタ	12,900	0.04	0.002	放射性物質保管庫に保管

表6-2 保管環境における空間線量率の測定結果

対象	保管庫の囲いの境界における空間線量率(μSv/h)						BG(μSv/h)
保管庫	前:0.14	左:0.13	右:0.16	後:0.15			0.08
対象	保管容器から1cm離れた距離の表面線量率(μSv/h)						BG(μSv/h)
保管容器	上面:0.18	側面:0.25	側面:0.25	側面:0.25	側面:0.25	底面:0.24	0.08



除染廃棄物(ろ過残渣)

保管容器

放射性物質保管庫

図6-1 除染廃棄物の保管状況