付録 2

個別試験結果と評価詳細

実施代表者の所属機関:㈱石垣

実証テーマ名:ろ布走行式フィルタープレスを用いた放射線被ばく低減のための実証運転

事業の概要:

汚染土壌の分級処理等で発生する細粒土等をろ過脱水するためのフィルタープレス脱水工程において、作業員の被ばく低減に寄与することを目的に、自動運転を可能とする布走行式フィルタープレスを採用し、ろ布の取外し等をロボットで行うことにより、作業員の機側での作業時間を短縮できることを確認するための実証を行う。

実施内容:

1. ロボットシステムの準備
   ロボット、位置認識システム(MOS システム)、ロボット移動用機器を準備し、ろ布取り外し動作確認をしながら、ロボットハンド、ソフトなどの改良を行い、基本動作が実施できることを確認する。
2. ロボットシステムによるろ布取り外し等実証試験
   ろ布走行式フィルタープレス 1000mm 角×10 室にロボットシステムをセットし、ろ布の取り外し実証試験を行う。
3. 脱水運転において人手を介する作業の発生状況調査
   除染土壌に類似の水中濁質分を脱水している浄水場において、ろ布固定式、ろ布走行式フィルタープレスの作業時間実態調査をする。
4. 作業時間評価
   上記2, 3をあわせて、提案技術が作業時間短縮になっていることを確認する。

技術概要:

1. 試験フロー

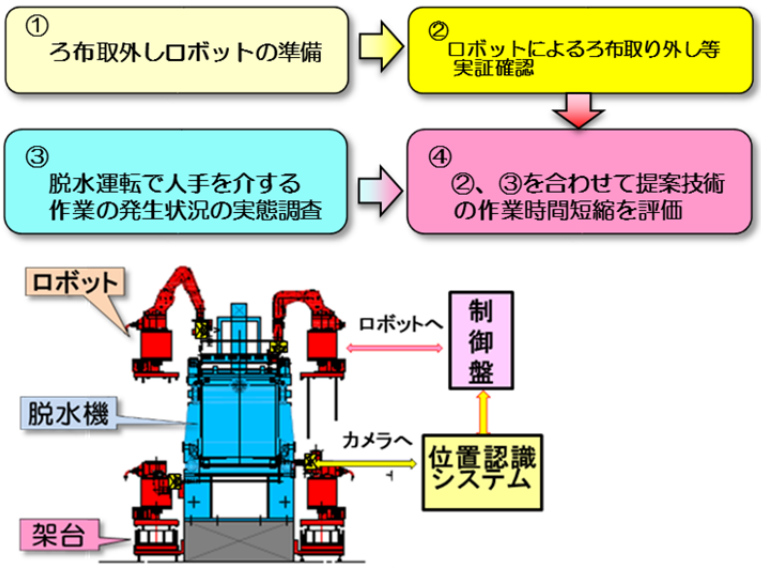


図 1 試験フローと全体構成

2. 試験目標

ロボットによるろ布取外し等の実証を行い、既存技術であるろ布固定式やろ布走行式(人介入型)と比較して提案技術では機側での作業時間が短縮されることを確認する。

3. 期待される効果

作業員の機側での作業時間を短縮することで、被ばくリスク低減に寄与し、長期間安定安全な脱水技術の確立が期待される。

実証結果:

1. ロボットによるろ布取り外し

位置認識(MOS)システムについては任意位置に固定したカメラで 1000 回の位置認識を行い、ばらつきを見た結果(表 1)、標準偏差(σ)を見ると 3σ で X、Y 方向は 2mm 以内、Z 方向は 3mm 以内であり、有効であった。ただし、夜間などで照明の主光源が変わると感度が低下したため、専用光源を装備するなどの対応が必要と考えられる。

表 1 MOS 認識精度 [単位:mm]

	X	Y	Z
標準偏差	0.52	0.57	0.86
3σ	1.56	1.71	2.58
平均値	−2.1	−1.6	−5.2

ロボットの動作結果は表 2 となり、対象物の把持動作の最大ズレは 5mm で設計値以内となり、ろ布取り外しは可能であった。ただし、一部の把持寸法が短いなどで外しミスが発生する可能性が残る部分については、MOS の精度向上とフィルタープレスの専用設計等の対策で対応可能と考える。

写真 1 ろ布吊り上げ

表 2 ロボット動作結果

項目	動作	動作確認 右	動作確認 左	測定値(数値は右側、左側) 最大ズレ寸法(mm) X方向	Y方向	Z方向
1	横行	○	○	-	-	-
2	リターンロール外し	○	○	1.5、1.5	2、3.5	3.5、4.5
3	リターンロール置き	○	○	-	-	-
4	下部ろ布芯金外し	○	○	2、2	3、2	3.5、5
5	ろ布を吊り上げ	○	○	2.5、2	3、3.5	3、5

2. 作業時間の実態調査と評価

3 ケ所の浄水場における機側での作業時間調査では、浄水場ごとに独自の点検を実施していた。調査結果と標準時間を加味して比較評価を行い、年間作業時間としてまとめた結果を表 3 に示す。提案技術を採用することで、被ばくリスクのある機側での作業時間が大幅に短縮されることがわかった。

表 3 機側での年間作業時間

	ろ布固定式	ろ布走行式(人介入型)	ろ布走行式(ロボット型)
時間(hr/年)	269	146	61
比率(%)	100	54	23

コスト評価:フィルタープレスの型式ごとの土壌 ton あたりの処理コストは表 4 のようになった。

表 4 処理コスト

	ろ布固定式 1,000×34 室	ろ布走行式(人介入型) 1,000×10 室	ろ布走行式(ロボット型) 1,000×10 室
処理コスト(円/ton 乾量)	6,500	6,300	8,500

コスト評価条件:ろ過性、処理量は以下の仮定の下にコスト算定する。

処理量 14ton-ds/日、週運転日数 5 日、年運転日数 260 日、日運転時間 18 時間/日、ろ過速度は以前に川内村で実施したテスト実績値とし、対象範囲はロボットを含んだ脱水機器の償却費と部品交換費、運転人件費等のランニングコストとする。

作業における安全上の注意:ロボット、脱水機使用における一般的な安全上の注意で対応可能。

除去物保管場所と保管状況:本実証試験中に、除染土壌を直接取り扱わなかったので、除去物は発生していない。

試験場所:神奈川県横浜市及び香川県坂出市

1.事業の概要

1.1 目的

汚染土壌の分級処理等で発生する細粒土等をろ過脱水するためのフィルタープレス脱水工程において、作業員の被ばく低減に寄与することを目的に、自動運転を可能とするろ布走行式フィルタープレスを採用し、ろ布の取り外し等をロボットで行うことにより、作業員の作業時間を短縮できることを確認するための実証を行う。

1.2 実施項目

(1)本業務の全体フローと実施項目

本業務の全体フローを図 1-1 に示す。

ⅰ)ロボットシステムの準備
・基本動作確認試験に必要な機器、ソフトを準備
・大日機械工業(株)にて基本動作確認試験

↓

ⅱ)ロボットによるろ布取り外し等実証試験
・(株)石垣坂出工場にて実機サイズテスト機実証試験

ⅲ)脱水運転で人手を介する作業の有無、作業発生状況の実態調査

↓

ⅳ)作業時間評価
上記ⅱ)、ⅲ)からロボットシステム型、人介入型、ろ布固定式フィルタープレスの脱水機側での作業時間数を比較評価し、提案技術による作業時間の短縮を確認
なお、それぞれの脱水機は、同一処理能力の装置サイズで比較

図 1-1 業務全体フロー

2. 試験装置

試験装置の全体構成を図 2-1 に示し、主要機器について概説する。

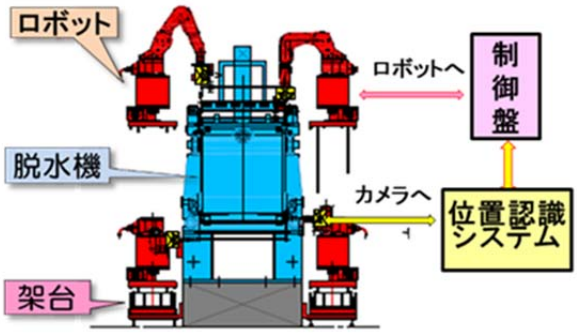


図 2-1 実験装置全体構成図

(1)本業務で使用する機器

ｉ）フィルタープレス

これまでの除染実証事業においてフィルタープレスは、ろ布固定式が使用されてきた。これらは脱水にかかわる性能については確認されているものの、実際使用に当たっては脱水ケーキの剥離性や構造上の問題で、運転管理作業時に汚染土壌近傍での作業が多くなり、被ばくリスクが高くなることが懸念される。

そこで、本業務では水道事業で30年以上使用され、鉱山事業や無機プロセスなどで1,500台以上の実績がある、全自動運転が可能なろ布走行式フィルタープレスを使用する。ろ布走行式フィルタープレスは一室ずつの作動ではなく、全室一斉作動となることにより、高いろ過速度が得られ、脱水機がコンパクトになる。また、ろ布を駆動してケーキ剥離を行うことで完全なケーキ剥離を可能としていることなどにより、運転管理での作業時間の短縮がはかれる。

さらに作業員被ばくの低減を目的に、ろ布交換をロボット化するに当たって、適用しやすくするための改造を施したものである。

ⅱ）位置認識システム

フィルタープレスのろ布をロボットで取り外すためには、取り外し対象物の位置認識を行うシステムが必要である。

今回対象となるフィルタープレスの部品は、運転に伴い停止位置が設計上の位置と異なり、最大数十 mm 程度外れる可能性がある。また、対象物はチェーンに吊り下げられた状態で固定されていない。このような条件では、接触式やレーザー式では簡単に位置検知するのが難しく、画像による位置認識システムが適していると考えられる。

現在、画像による位置認識システムは多く開発されているが、三次元的に形状を認識するものはなく、本業務ではカメラと対象物の位置が三次元方向に任意に変わる上に、狭い空間で対象物を掴む必要があるため、誤差の少ないシステムが要求される。

そこで岡山大学との共同研究を進めていた、ビジュアルサーボ技術のひとつである Move On Sensing システム(以下「MOS システム」という)を利用することとした。

この技術は対象範囲内にある対象物の位置を認識するために、対象物の色、形状をあらかじめ登録しておき、左右二台のカメラで撮影した画像情報(二次元) と事前登録した形状を二次元に投影したものとの一致割合を適合度として求め、最大適合度となる位置を特定するものである。ここで、最大適合度を短時間で求める手法としてコンピューター制御で汎用的に使用されている近似解探索手法である遺伝的アルゴリズム(GA:genetic algorithm)を採用している。

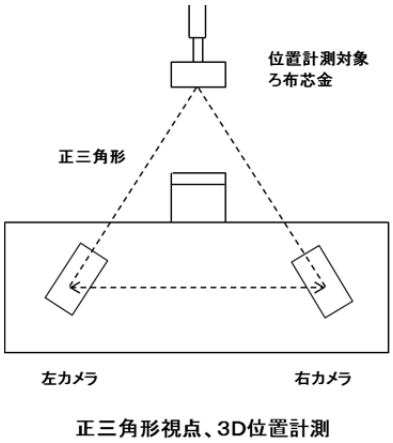


図 2-2 MOS カメラ図

iii）ロボット

ろ布取り外し作業を実施するためのロボット型式については単軸から多関節までさまざまな産業用ロボットがあるが、稼動範囲内ではさまざまな動きを標準的なソフトで簡単に実行でき、結果的にコンパクトな装置となるので、多関節(6 軸)ロボットを採用することとした。

3. 試験結果と評価

3.1 ロボットによるろ布取り外しの準備

準備段階ではロボットによるろ布取り外し構想に基づき、対象物の位置認識(MOS)システムの確認、ロボットによるろ布取り外しの具体的手法の確認などを実施した。

3.1.1 ロボットによるろ布取り外し構想

人と同様な手順でロボットがろ布を外す動作手順を以下に示す。

(1) 取外すろ布の正面までロボットが横行装置により移動する。(図 3-1)

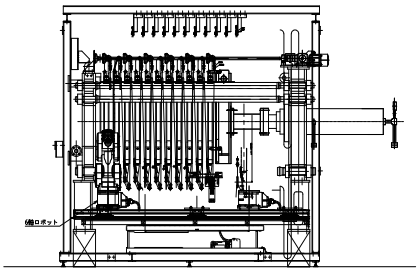


図 3-1 横行

(2) リターンロールの取り外し

ロボットがろ布を取外す場合は、タイクランプから外れたろ布下端がリターンロールの上に乗る可能性があり、人はその場合でもリターンロールの間を通してろ布を垂らすことができるが、ロボットでは難しいので、予めリターンロールを引き抜いておく。(図 3-2)

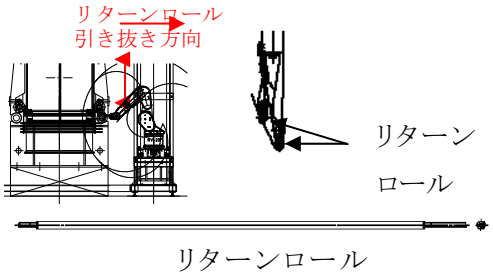


図 3-2 リターンロール引抜き

(3) 引き抜いたリターンロールを外側へ置く。(図 3-3)

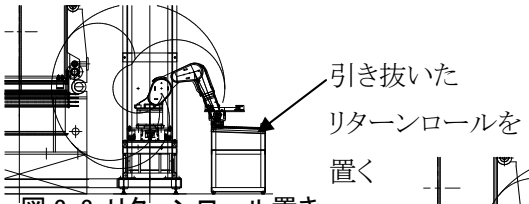


図 3-3 リターンロール置き

(4) ろ布芯金外し

ろ板下部にチェーンでぶら下がっているタイクランプからろ布芯金を外す。(図 3-4)

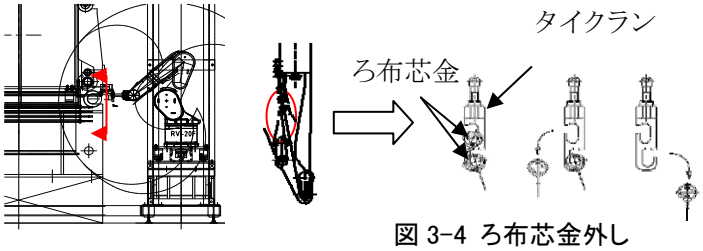


図 3-4 ろ布芯金外し

(5) ろ布吊り上げ

リフターを上昇させ、ロボットのレベルを高くしてろ布組品を吊り上げる。吊り上げた後、所定の場所にろ布を吊下げる。(図 3-5)

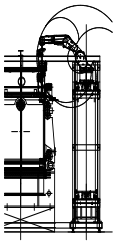


図 3-5 ろ布吊り上げ

3.1.2 MOS システムの確認

MOS 位置認識時に以下のような問題が発生し対応した。

(1) ノイズ

位置認識時の撮影画像にノイズが乗り、適合度が低く、位置精度が出ない。さまざまな試行を繰り返し、原因究明をしたところ、ロボットのサーボモーターの影響が最も大きいことがわかった。位置認識を行う前に、サーボモーターを OFF して、計測し、位置認識後、サーボモーターを ON することとした。

サーボモーターの ON,OFF で位置認識精度がどのように変化するのか調べるため、カメラと対象物の位置を固定した状態で位置認識を 1,000 回行い、位置データのばらつきを以下に示す。写真中の赤色が認識点を示す。

写真 3-1 右センサー：左右カメラ画像

表 3-1 ノイズの有無による測定ばらつき状況

測定回数 N=1,000 ［単位：mm］

	ノイズ	X	Y	Z
平均	無	−2.1	−1.6	−5.2
	有	−2.6	−1.6	−5.1
標準偏差	無	0.52	0.57	0.86
	有	2.7	0.63	4.6

ばらつきの標準偏差を見るとノイズの有無で X、Z 方向は大きく変化していることがわかり、サーボモーターを OFF する効果が高いことがわかった。ノイズなしの標準偏差を見ると 3σ で X、Y 方向 2mm 以内、Z 方向は 3mm 以内となった。

(2) 照明

MOS システムの色認識が自然光や蛍光灯の光の下では、感度良く認識されるが、工場内の水銀灯の光では極端に感度が低下し、適合度が上がらない状況となり、位置精度が出ない。LED 照明など色々な照明を試したが、やはり、自然光や蛍光灯照明が必要であった。今回は大きさと、重量の関係で照明をカメラに抱かせることができなかったが、軽量な照明をカメラに載せ、その光に合わせた調整をすることで認識精度は改善されると考える。

(3) 認識精度向上

MOS システムは対象物からずれた位置で位置認識するよりも、正面から位置認識をするほう

が、適合度が上昇し、位置精度が上がる。

ロボットハンドに取り付けた MOS システムのセンサーユニットを所定位置に移動して、位置認識をした後、位置のずれ量だけロボットでセンサーユニットを移動して、再度位置認識を行い、ずれ量がX、Y方向で2mm以内になるまで、繰り返すことで、対象物の正面から位置認識でき、精度が向上する。試験結果は表 3-2 に示す。

表 3-2　MOS による位置認識結果と適合度

測定回数 N=10　　[単位:mm]

	X	Y	Z	適合度
1 回目平均	1.32	1.07	-6.31	0.75
2 回目平均	-0.20	-0.24	-0.71	0.77

3.1.3 具体的手法の確認

(1) リターンロール取り外し動作

i) リターンロール取り外し、課題 1

リターンロールが長いため、ロボットの作業半径では、一回で引抜ができないので、リターンロール端部を把持して、途中まで引き抜いたところで、一旦離し、リターンロール中央部付近を把持しなおして、引き抜く。把持しなおす際にリターンロールの水平が維持できるように、引抜き側と反対側を支えて、押し込むハンドを使用する必要がある。

図 3-6 に把持直しの状況を示す。

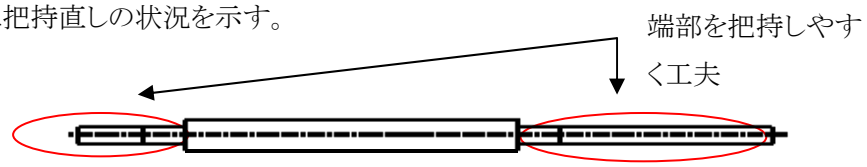


図 3-6 リターンロール

ii) リターンロール取り外し、課題 2

リターンロールの引抜き側を把持して引抜くとき、ブーツメタルの引抜き用の穴を通してゆっくりと引抜くが、穴とリターンロール外径の隙間は 3mm しかないので、脱水機の長手方向の芯に対しろ板が直角でなく、少しずれているとき、ロボットは直角方向にリターンロールを引抜こうとするので、引抜き途中で引抜き用の穴に擦りながら引抜くことになる。その際、リターンロールの回転溝がその穴の淵に引っかかり、抜けなくなる。

リターンロールを擦らずに抜くには、ロボットがろ板のずれ角度を考慮して引抜く必要があるが、ずれ角度の検出は難しいので、擦りながら抜いても回転溝が、穴の淵に引っかからないように、回転溝の引っかかる側の縁をなくした。

写真 3-2 にリターンロールの形状変更前後の形状をを示す。

写真 3-2 リターンロール回転溝加工変更

(2) 下部ろ布芯金取り外し動作

ろ布芯金に対する余裕度や取り外し動作の正確さなどから、さまざまなハンドを検討し、最終的にハンド 3 とすることで、タイクランプから外すことが可能となった。

写真 3-3 ハンド 1

写真 3-4 ハンド 2

写真 3-5 ハンド 3

(3) ろ布吊り上げ動作

ろ布吊り上げの際には、上部ろ布芯金の直下のろ布に穴を開け、その部分にハンドをかけて吊り上げるが、チェーンをスプロケットから外れるるまで吊り上げた後、そのままさらに吊り上げようとすると、垂れ下がったチェーンがスプロケットに引っかかり、チェーンのリンクを傷める可能性がある。一旦チェーンから外れる高さまで吊り上げた後、横方向に移動してスプロケットの通りからチェーンを外すことで、さらに吊り上げてもチェーンが再度スプロケットに引っかかることはなくなった。

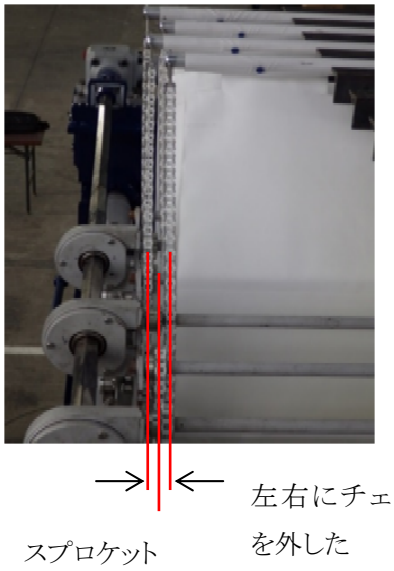


写真 3-6 ろ布吊り上げ

交互にチェーンの通りを外したので吊り上げ後は交互にずれている。

3.2 ロボットによるろ布取り外し等実証試験

(1) 実証試験結果

i) ロボットの動作状況

① リターンロール　　一連の動きを写真に示す。

写真 3-7 リターンロール、把持

写真 3-8 把持直し

写真 3-9 リターンロール引抜き

写真 3-10 リターンロールを置く

② ろ布芯金

ろ布芯金は両側とも同じハンドを使うが、逆向きで使用し、芯金を支持した後、ハンドを傾けることでタイクランプを押して、外す。

写真 3-11 ろ布芯金をすくう

写真 3-12 芯金を持ち上げる

写真 3-13 ハンドを傾斜して
タイクランプを押して外す

写真 3-14 ろ布芯金が外れた

③ ろ布吊り上げ

ろ布吊り上げは昇降装置でロボットを上に上げてからMOS位置認識、ろ布吊り上げと進む。

写真 3-15 リフトでロボットを上げる

写真 3-16 ろ布吊り上げ、開始

写真 3-17 所定位置のフックにかける

写真 3-18 ろ布吊り上げ完了

ⅱ）ロボット動作結果

全 10 室のろ布取り外し作業をロボットで実施できた。調査項目について表 3-3 に示す。ズレ寸法については、MOS で認識した位置に移動したロボットハンドの掴みの中心と、対象物の中心がどの程度ずれているかをスケールにて 0.5mm 単位で測定した。その結果 X,Y 方向で最大 3.5mm、Z 方向で 5mm ズレた。把持のためのハンドの余裕代を 5mm 以上取った設計としているので、許容範囲内である。ただ、ろ布芯金の Z 方向は部品構造上把持寸法が小さいため、より精度をあげることが望ましい。

各動作の所要時間については、まだ最適化の調整ができていなかったので、時間がかかったが、調整により各工程で 17～40 秒程度の短縮ができると考えている。

表 3-3　ロボット動作結果

項目	動作	動作確認		測定値			
		右側	左側	所要時間（秒）	最大ズレ寸法(mm)		
					X 方向	Y 方向	Z 方向
1	横行する。	○	○	5	－	－	－
2	リターンロールを外す。	○	○	168(146)	1.5、1.5	2、3.5	3.5、4.5
3	リターンロールを置く。	○	○	29(12)	－	－	－
4	下部ろ布芯金を外す。	○	○	90(50)	2、2	3、2	3.5、5
5	ろ布を吊りあげる。	○	○	121(89)	2.5、2	3、3.5	3、5

【評価方法】

・各項目について一室あたりの動作の所要時間（秒）を測定する。
・項目２，４，５は対象物（リターンロール、下部、上部ろ布芯金）に対するロボットの位置認識精度（目標位置からのズレ(mm)）を測定する。数値は脱水機右側、左側。
・所要時間の( )内数値は調整により、短縮される結果予想値。

3.3 機側での作業時間評価

点検管理作業はいずれの浄水場においても標準的な要領書でなく、独自の基準で実施されていた。ただ、本事業のように被ばく環境にある場合にはより被ばくリスクの高い作業が発生する可能性がある突発的な故障発生を抑制するために、要領書に従った点検が望ましいと考えられる。

このように、点検時間は浄水場ごとに独自基準となっており、ばらついているため実態調査の結果を持って作業時間比較を行うには合理性がないことや手順に従った点検の重要性から、作業時間比較については標準作業時間から実態ではどの浄水場においても実施していない部分についてのみ削除修正した標準作業時間で比較することとする。

なお、ロボット型でのロボットの定期的なメンテナンスはロボットを室外に移動して実施するとの考えから、機側での作業はないが、横行装置、昇降装置については 1 ヶ月、一年点検に追記する。また、突発的な対応の可能性は残るので、緊急時作業に追加する。

機側での作業時間は、ろ布固定式に対しろ布走行式(人介入型)にするだけでも 54%に低減され、さらにロボット型にすると 23%まで低減される。また、ろ布走行式(人介入型)に対しロボット型では 42%に低減される。非常に大きな削減効果があり、作業員の被ばくリスク低減に寄与すると考えられる。

表 3-4　型式別機側での作業時間比較

周期	作業内容	ろ布固定式	ろ布走行式（人介入型）	ろ布走行式（ロボット型）
		1,000×34 室	1,000×10 室	1,000×10 室
		時間(h)	時間(h)	時間(h)
毎日（260 日/年）	・ろ布位置確認、開板位置確認 ・摩耗・損傷確認	0.5	0.3	0
	・ケーキはく離機構確認、補助（ろ布固定式のみ）	3.4→0	0	0
1 週間（52 週/年）	・動作・損傷確認 (ﾘﾐｯﾄｽｲｯﾁ、ﾁｪｰﾝ、ｽﾌﾟﾛｹｯﾄ)	0.9	0.3	0
1 ヶ月（12 ヶ月/年）	・損傷チェック(ﾎｰｽ、ﾀﾞｲｱﾌﾗﾑ) ・ろ布交換、ロボット関係点検	3.8	2.6	1.9
1 年	・ﾀﾞｲｱﾌﾗﾑ、消耗品部品交換（ﾗｲﾅｰ、ﾊﾟｯｷﾝ、ﾎｰｽ等） ・主要部品消耗確認（締付ｼﾘﾝﾀﾞｰ、ﾓｰﾀｰ等） ・ロボット関係点検	43.2	17.8	29.8
緊急時	・電気部品故障対応 ・ろ布、ﾎｰｽ損傷対応 ・ロボット故障対応	3.2	3.1	8.1
合計時間（年間 260 日運転時）		269	146	61
作業時間比率(%)	ろ布固定式基準	100	54	23
	ろ布走行式（人介入型）基準	184	100	42

3.4 コスト評価

ｉ）コスト試算条件

処理量 14ton-ds/日、週運転日数 5 日、年運転日数 260 日、日運転時間 18 時間/日、ろ過速度は以前に川内村で実施したテスト実績値とし、各機種の脱水機サイズを求めた。

対象範囲はロボットを含んだ脱水機器の償却費と部品交換費、運転人件費等のランニングコストとする。

ⅱ）コスト試算

フィルタープレス型式別の土壌 ton あたりの処理コストを表 3-5 に示す。

表 3-5 処理コスト

	ろ布固定式 1,000×34 室	ろ布走行式 （人介入型） 1,000×10 室	ろ布走行式 （ロボット型） 1,000×10 室
処理コスト （円/ton 乾量）	6,500	6,300	8,500

4. まとめと今後の課題

4. 1 まとめ

(1) ロボットによるろ布取り外し

MOS システム、ロボットハンド、取り外し動作等の改善、調整を行うことで、1000 角×10 室のフィルタープレスの全てのろ布についてロボットによるろ布の取り外しが実証できた。

ⅰ）MOS システム

位置認識の精度は X、Y 方向で±2mm 以内であり、Z(奥行き)方向でのばらつきが少し大きい傾向を示すが、位置認識システムとしては有効であった。また、照明の種類により認識精度に影響を受けるので、照明の適合性を上げるための調整が必要となる。

ⅱ）ろ布取り外し動作

リターンロール外し、ろ布吊りについては、確実に成功している。ろ布芯金外しは MOS の位置認識精度や把持寸法が短い関係で外しミスが発生する可能性が残る。

また、作業時間については動作の最適化がまだはかれていないが、最終予想では 10 室の取り外しで、2hr 以内となる。人が行うと 2 名で 1hr 程度である。

(2) 機側での作業時間短縮

機側での作業時間はろ布固定式フィルターブレスに比べ、ろ布走行式(人介入型)で 46%減、ロボット型で 77%減となる。また、人介入型に比べ、ロボット型では、58%減となり、いずれの場合もロボット型を採用することで、被ばくリスクの低減に大きく寄与すると考えられる。

(3) コスト評価

処理量をあわせて試算した場合、脱水処理単価で比較するとロボットが余分に装備されるため、ろ布固定式、ろ布走行式(人介入型)に比べ 1.3 倍程度となる。

4. 2 今後の課題

(1) MOS システム

照明に対しては簡単に色調整を行う機能を付加したり、環境の影響を少なくするために、専用光源を設けるなどの対策で改善可能と考える。

精度向上については、対象物にカメラを近づけることにより、Z 方向の精度は向上するので、対象物の把持や取り外し動作を考慮した寸法にすることで、改善されると考える。

(2) ろ布取り外し

ロボットの把持寸法に余裕を持たせるなど、ロボット作業に適したフィルタープレスの設計をすることで、取り外し精度は向上するものと考える。

以上

実施代表者の所属機関：株式会社　日立機械

実証テーマ名：放射性物質に汚染された土壌の洗浄実験及び洗浄後の土壌の再利用に向けた検証

事業の概要：汚染土壌を分級後、移動式の汚染土壌洗浄装置（アースセーバー）を用いた洗浄実験を行うとともに、低濃度となった洗浄後土壌の再利用の可能性を検討する。また、実証の見学会及び再利用に関する住民の意思調査を実施する。

実施内容：

1. 分級試験検証

汚染土壌を湿式分級機で分級し、アースセーバーにて洗浄を行い、洗浄効果を確認する。
本試験を車載型の特性を活かし、浪江町内 4 ヶ所を移動して実施する。

2. 再利用に向けた検証

住民対象の見学会及び説明会を実施する。説明会では、洗浄後土壌の建設資材等への再利用品の紹介と住民アンケートを実施する。

技術概要：1：試験フロー

①表土剥ぎ
↓
②前処理
↓
③アースセーバーによる洗浄処理
↓
④洗浄土の埋戻し・再利用

湿式振動型分級機で、5mm 超と 5mm 以下の土壌に分級

5mm 以下の土壌を水のみで除染

アースセーバー外観
（車載型）

①表土剥ぎ

②前処理

③洗浄処理

④埋戻し・再利用

2. 試験目標

（1）分級試験の検証

汚染土壌の放射能濃度の低減効果、洗浄後土壌を元の土地に戻した後の空間線量率の変化を確認する。

（2）再利用に向けた検証

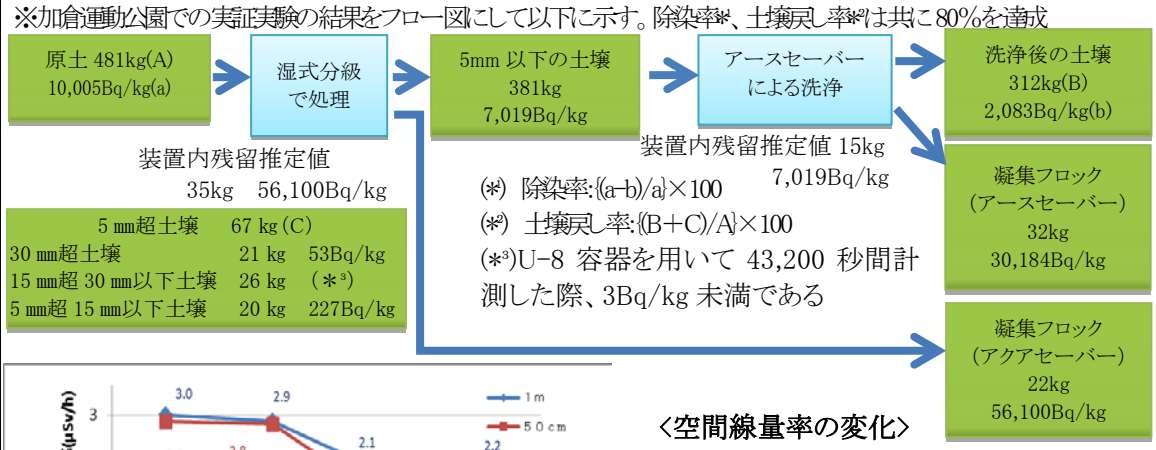
①路盤材等への活用の地元ニーズ・需要を調査する。
②地元関係者対象の見学会を開催し、洗浄後の土壌の再利用に関する意識調査を実施する。
③焼き固め、建築・土木用資材として適合性を検証する。

3. 期待される効果

汚染土壌の減容及び洗浄後土壌の再利用の促進。

実証結果　　〈汚染土壌の放射能濃度の低減効果〉

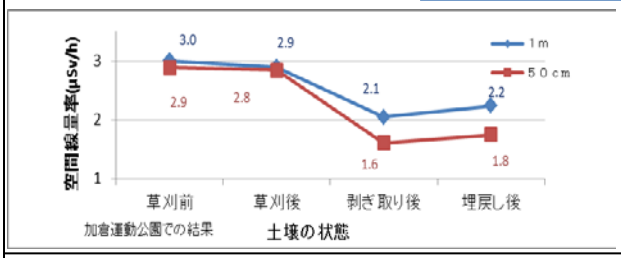
※加倉運動公園での実証実験の結果をフロー図にして以下に示す。除染率*1、土壌戻し率*2は共に80%を達成



(*1) 除染率:{(a−b)/a}×100

(*2) 土壌戻し率:{(B+C)/A}×100

(*3)U-8 容器を用いて 43,200 秒間計測した際、3Bq/kg 未満である



〈空間線量率の変化〉

左図に示すとおり、草刈後(土壌剥ぎ取り前)に比べて、土壌剥ぎ取り後よりは高いものの、洗浄後土壌の埋戻し後に低減したことを確認した。

現地ニーズの調査・把握

地元自治会等に協力を要請し、住民の方々を対象とした説明会(一部の会場では装置見学を含む)を実施し、その中で洗浄後土壌の再利用に関するアンケートを実施した。

アンケートでは、①洗浄した土壌を汚染は少し残るが元の場所に戻してよいか、②公共工事の資材に活用することに賛成か、の2点を質問したところ、参加者からは再利用に前向きな意見が多く寄せられた。

再利用製品・方法の検証

洗浄後土壌を用いて、焼き固め実験をし、外用建築資材として成型可能であることを確認した。

砂質分の多かった加倉運動公園と浪江中学校の洗浄後土壌を用いてセメント固化実験を実施し、福島県の建築・土木工事におけるコンクリート骨材として使用できる条件(JISA5308 のレディーミクストコンクリートの材料としての基準)を満たしていることを確認した。

除去物発生量評価:〈加倉運動公園の場合〉

原土の重量 481kg(放射能濃度 10,005Bq/kg)の処理にあたり、フィルター類は重量 75kg(放射能濃度 211Bq/kg)、総凝集フロックは重量 54kg (放射能濃度平均 43,142Bq/kg)が発生した。

作業員被ばく量評価:作業場所平均空間線量率(地上 100 cm) 3.59 μ Sv/h、作業時間 176 時間
作業員最大被ばく量 440 μ Sv/h(作業担当箇所:本機操作、作業時間 176 時間)
作業員平均被ばく量 260 μ Sv/h

コスト評価:	歩掛り(作業人工、作業速度):		
1 日 15tを処理するとして	前処理	9 人	0.5h/t
ランニングコスト+イニシャルコスト:1t当り 23 万円	アースセーバー 本体	4 人	0.5h/t

コスト評価条件:コストは直接費用のみで、1 日 8h 中(稼働 7h)とし、1 ケ月の稼働日を 20 日と想定。使用水の処理は(排出)1 週間に 1 度とし、追加水 1 日 3tとした。

除染作業における安全上の注意:
作業員必着物:マスク、ゴーグル、長靴、ヘルメット又は帽子、ゴム手袋、軍手
作業場の取扱い注意:重機取扱い、クレーン取扱い、汚染物取扱い

除去物保管場所と保管状況:双葉郡浪江町大字昼曽根 72 番

仮置場にフレキシブルコンテナにて保管

1. 実証試験の目的

除染により生じる放射性物質に汚染された土壌を 5mm 以下に分級し、植物も除去した後、移動式の汚染土壌洗浄装置(以下、「アースセーバー」と言う。)を用いて、水だけの高圧洗浄及び土壌研磨の実証を行う。その後、25μm 以下の高濃度となった微細土は凝集沈殿により分離回収し保管するとともに、低濃度となった砂質土は建設資材等への再利用の可能性を検討する。また、これらの土壌洗浄に係る実証を住民の前で実施するとともに、濃度の低くなった土壌の再利用に関する住民の意識調査を実施する。

2. 実証試験の内容

(1)分級試験

汚染土壌を湿式分級機で分級し、アースセーバーにて洗浄を行い、洗浄効果を確認する。

本試験を車載型の特性を活かし、浪江町内4ヶ所(加倉運動公園、浪江中学校、浪江東中学校、浪江町個人宅)を移動して実施する。

(2)再利用に向けた検証

住民対象の見学会及び説明会を実施する。説明会では、洗浄後土壌の建設資材等への再利用品の例の紹介と住民アンケートを実施する。

3. 土壌洗浄処理工程

3.1 原土剥ぎ取り → 3.2 30mm 超の土壌の分級 → 3.3 30mm 以下の土壌の分級 → 3.4 アースセーバーへ 5mm 以下の土壌投入

3.1 原土剥ぎ取り

(1)対象範囲の 5cm を重機で剥ぎ取る。

写真 3-1 土壌剥ぎ取り

(2)フレキシブルコンテナに約 500kg 詰める。

写真 3-2 原土フレキシブルコンテナ詰め

3.2 30mm 超の土壌の分級

(1)フレキシブルコンテナ内の土壌をスクリーンバケットに投入する。

写真 3-3 原土投入

(2)30mm 超の土壌と 30mm 以下の土壌に分級する。

写真 3-4 30mm 超の土壌

写真 3-5 30mm 以下の土壌

3.3 30mm 以下の土壌の分級

(1)30 ㎜以下の土壌を
分級機へ投入

写真 3-6　30 ㎜以下の土壌投入の様子

(2)15mm 超 30mm 以下の
土壌への分級

写真 3-7　15mm 超 30mm 以下の
土壌への分級の様子

(3)5mm 超 15mm 以下の
土壌への分級

写真 3-8　5mm 超 15mm 以下の
土壌への分級の様子

(4)5mm 以下の
土壌への分級

写真 3-9　5 ㎜以下の
土壌への分級の様子

3.4 アースセーバーへ 5mm 以下の土壌投入

3.4.1 アースセーバー第一ゾーン(土壌洗浄ゾーン)

(1)スクリューコンベアーを用い
アースセーバーへ投入する。

写真 3-10　5 ㎜以下の土壌の投入

(2)スクリューコンベアーから
土壌用 DEM へ入り、混合スラリーを形成する。

写真 3-11 土壌用 DEM

*DEM:高圧水を利用し、粒子を水に分散する装置

(3)DEM を通過した土壌が第一
洗浄装置のメッシュ網へ。

写真 3-12 第一洗浄装置

(4)第一洗浄装置のメッシュ網を通過
しなかった土壌が研磨装置へ。

写真 3-13 研磨装置

(5)研磨された土壌が第二洗浄装置のメッシュ網へ。通過しなかった 25μm 超 5 ㎜以下の土壌は洗浄終了。

写真 3-14 第二洗浄装置

(6)第一洗浄装置と第二洗浄装置のメッシュ網を通過した土壌は洗浄水タンクへ。

写真 3-15 洗浄水タンク

3.4.2 アースセーバー第二ゾーン(洗浄水処理ゾーン)

(1)洗浄水用 DEM にて凝集剤を添加

写真 3-16 洗浄水用 DEM

(2)洗浄水と凝集剤が混ざり、混合槽へ。

写真 3-17 混合槽

3.4.3 アースセーバー第三ゾーン(凝集フロック回収ゾーン)

(1)反応槽にて凝集フロックと上澄みに分離。

写真 3-18 反応槽

(2)上澄みは各フィルターへ。

写真 3-19 フィルター

(3)反応槽で分離した凝集フロックは回収装置へ。

写真 3-20 凝集フロック回収装置

(4)フィルターでろ過、脱臭・脱色した水は浄水タンクへ。

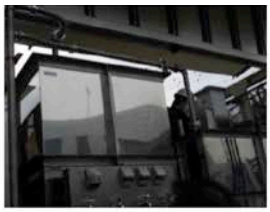


写真 3-21 浄水タンク

4.実証結果

4.1　加倉運動公園での試験結果

4.1.1　空間線量率測定結果

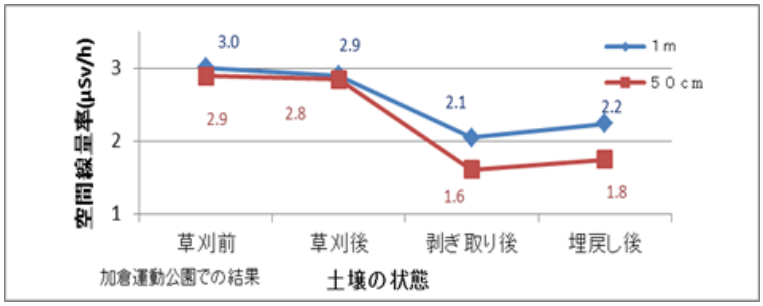
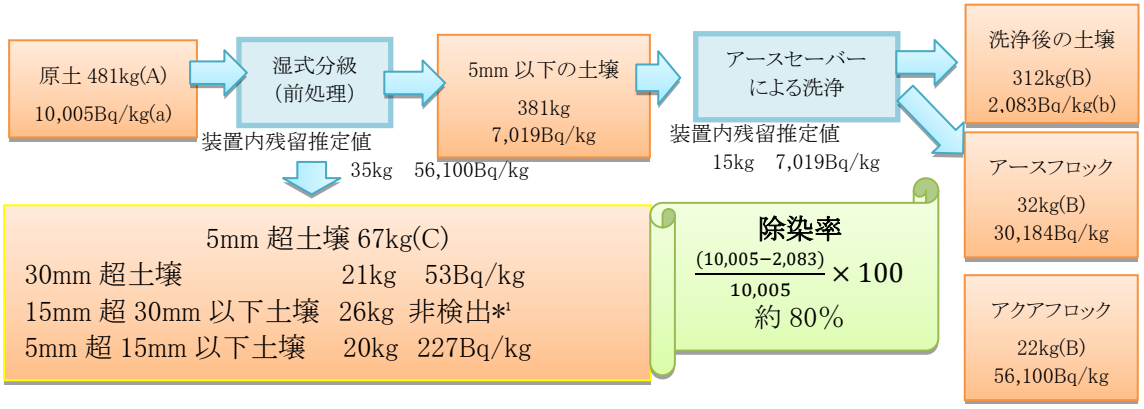


図 4-1　空間線量率測定結果

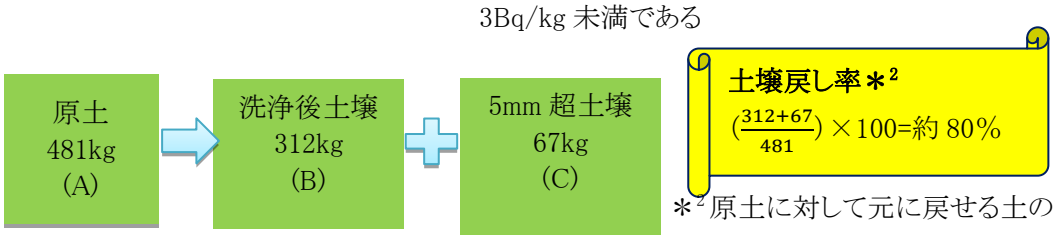
①草刈前、②草刈後、③土壌剥ぎ取り後、④洗浄土埋戻し後のそれぞれにおいて、地上から 50cm 地点と 1m 地点での空間放射線量率の測定を実施した。その結果を図 4-1 に示す。

草刈後（土壌剥ぎ取り前）に比べて土壌剥ぎ取り後よりは高いものの、洗浄後土壌の埋戻し後に低減したことを確認した。低減率は草刈前と比較すると、50cm で 38%、100cm で 27%であった。

4.1.2　試験結果のフロー図



＊1：非検出：U-8 容器を用いて 43,200 秒間計測した際、3Bq/kg 未満である



＊2 原土に対して元に戻せる土の割合。

装置内残留推定値はアースセーバー分については、5mm 以下の土壌と同じ放射能濃度である。前処理分は凝集された微細土と同等の放射能濃度とした。

湿式分級及び移動式汚染土壌洗浄装置（アースセーバー）による水だけの洗浄を行うだけで、砂質土である約 10,000Bq/kg の汚染土壌を、約 2,000Bq/kg 程度にできることを確認した。

除染率及び土壌の戻し率はともに 80%であった。

4.1.3 土壌・浄水の放射能濃度測定結果

対象土壌	放射能濃度(Bq/kg)		乾燥重量(kg)		含水率(%)	
原土	10,005		481		7.05	
30mm 超の土壌	非検出*[1]		21		1.16	
15mm 超 30mm 以下の土壌	非検出*[1]		26		1.60	
5mm 超 15mm 以下の土壌	227		20		3.56	
5mm 以下の土壌	7,019		381		16.16	
25μm 超 5mm 以下の土壌	2,083		312		6.52	
凝集フロック(アクア/アース)	56,100	30,184	22	32	70.07	56.70
浄水タンク水	非検出*[1]					

放射能濃度が 10,005Bq/kg の原土を用いて試験をした結果、前処理工程の段階で採取した 30mm 超の土壌と 15mm 超 30mm 以下の土壌は、放射能濃度が非検出の測定結果となった。

5mm 以下に分級した土壌の濃度は 7,019Bq/kg であり、これをアースセーバーで洗浄した結果、放射能濃度は 2,083Bq/kg まで低減した。

また、洗浄に使用した水は、放射性セシウムは検出されない測定結果であった。これにより循環洗浄水としても使用することが可能であり、使用後現地で川に放流することも可能であった。

＊[1]:非検出:U-8 容器を用いて 43,200 秒間計測した際、3Bq/kg 未満である。

4.2 その他 3 ヶ所(浪江中学校、浪江東中学校、浪江町個人宅)での試験結果

4.2.1 空間線量率測定結果

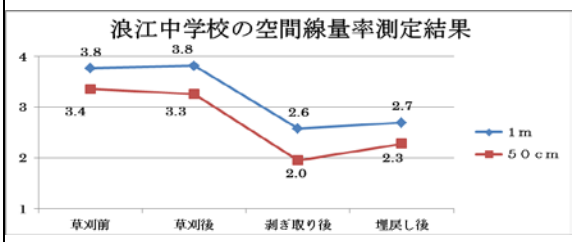


図 4-2 浪江中学校

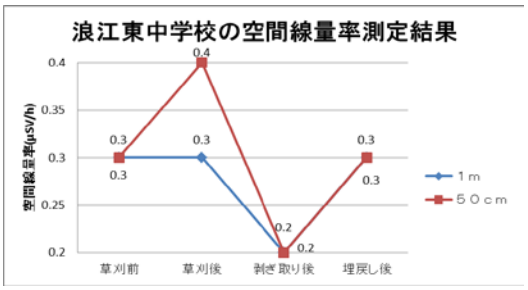


図 4-3 浪江東中学校

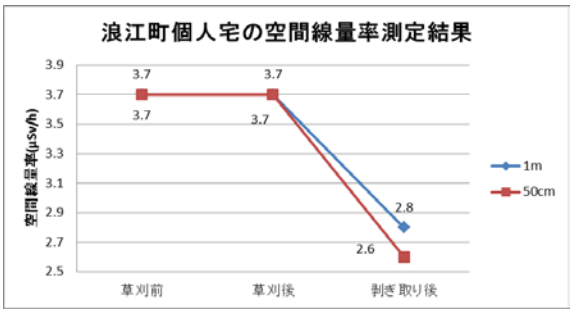


図 4-4 浪江町個人宅

浪江中学校での空間線量率の測定結果は、概ね加倉運動公園での結果と同じ傾向であった。

一方で、浪江東中学校では、原土の濃度が低かったため、有効なデータは確保できなかった。

個人宅では、実証試験の見学会を行った都合上、洗浄後土壌の埋め戻し後の空間線量率の計測は行っていないが、草刈前から土壌剥ぎ取り後までの測定結果については概ね加倉運動公園での結果と同じ傾向であった。

4.2.2 土壌・浄水の放射能濃度測定結果（その他3カ所）

表 4-2 他 3 ヶ所での各土壌・浄水の放射能濃度・重量・含水率の測定結果

	浪江中学校			浪江東中学校		浪江町個人宅	
	乾燥重量(kg)	放射能濃度(Bq/kg)	含水率(%)	湿潤重量(kg)	放射能濃度(Bq/kg)	湿潤重量(kg)	放射能濃度(Bq/kg)
原土	586	26,145	6.90	505	508	823	16,633
30mm 超の土壌	0.011	43,336	40.22	－	302	－	3,450
15mm 超の 30mm 以下土壌	0.35	911	7.56	－	278	－	3,697
5mm 超の 15mm 以下土壌	4.3	1,088	4.94	－	非検出*[2]	－	7,985
5mm 以下の土壌	470	8,565	11.60	－	572	－	11,576
25μm 超の 5mm 以下土壌	368	5,171	6.46	－	359	－	5,152
浄水タンク水	－	非検出*[2]	－	－	非検出*[2]	－	非検出*[2]
凝集フロック アクアセーバー	28	100,178	65.19	－	500	51	3,924
凝集フロック アースセーバー	18	92,729	65.62		245		21,112
除染率	－	80%	－	－	29%	－	69%
戻し率	65%	－	－	－	－	－	－

浪江中学校、浪江東中学校、浪江町個人宅の 3 カ所において、それぞれ表土を 5cm 剥ぎ取り、前処理を行い、その後、アースセーバーにより土壌洗浄を行った。

浪江中学校は原土が 26,145Bq/kg と放射能濃度が高く、前処理で分別した 30mm 超分は礫分がなく、植物の根という状態だった。これにより、洗浄しても放射能濃度は下がらず、表土より高い測定結果となった。5mm 超の土壌については約 1,000Bq/kg の放射能濃度が検出された。

5mm 以下の土壌の放射能濃度は 8,565Bq/kg であり、これをアースセーバーで洗浄した結果、5,171Bq/kg となった。放射能濃度は原土に対し、80%低減したことが確認された。

洗浄に使用した水は、加倉運動公園での結果と同様に、放射性セシウムは検出されない測定結果であった。

浪江東中学校と個人宅での測定結果は、現地での臭化ランタン測定器による湿潤データとなる。

浪江東中学校では、表土を簡易測定したところ、500Bq/kg 程度の放射能濃度しかなく、また、粘土質の形状であったことから、有効なデータを採取出来なかった。

また、個人宅においては、実証試験の見学会及び住民説明会を中心に行ったため、重量の計測を行わなかった。

＊[2]:非検出:U-8 容器を用いて 43,200 秒間計測した際、3Bq/kg 未満である。

5. 地元関係者を対象とした見学会・住民説明会及びアンケート

5.1 目的

現在の除染では、庭等の汚染された土の表面は剥ぎ取られ、他の地域から持ってきたきれいな土が埋め戻されている。また、剥ぎ取られた土は、その全量が仮置場等で保管され、今後福島県内の除去土壌については、中間貯蔵施設への輸送・保管が検討されている。

地元関係者を対象とした見学会・住民説明会では、汚染された土壌をその場で洗浄し、放射性物質の濃度をできるだけ引き下げ、その土を元の場所に戻す又は建設資材として再利用するための実験内容を実際に見学していただき、事業内容を詳しく説明することで、地元関係者に土壌の再利用に関する理解を深めていただくことを目的に実施した。また、説明会終了後には、洗浄後の土壌の再利用に関する意識調査を実施した。

5.2 説明会の日時・場所

・10月　7日（火）　浪江町個人宅（アースセーバー見学会も実施）
・10月26日（日）　福島県福島市上浜町 10-38　福島県教育会館
・11月　2日（日）　福島県二本松市本町 2-3-1　市民交流センター

5.3 見学会及び説明会参加者への案内方法

浪江町から福島市、二本松市へ避難されている地元住民の方々を対象にして、仮設住宅の区長様や自治会役員様に参加者を集うための協力を要請した。その結果、今回の実証事業に興味をもった地元関係者が個人宅では、24 名、福島市では 30 名、二本松市では 39 名、合計 93 名の参加者を得た。

5.4 アンケートの内容

アンケートでは以下 2 問の質問を行った。

1) 自分の土地の土を除染する方法として、望ましいのは
   ① 汚染土は剥ぎ取り、他から持ってきたきれいな土を戻す。
   ② 剥ぎ取った土を洗浄し、汚染は少し残るが、自分の家の土地に戻す。
   ③ どちらでも構わない。
   ④ その他
2) 洗浄後の土の放射性物質の濃度が国の再利用基準等を下回った場合、その土を建設資材として、あなたの住む町の公共事業に使うのは賛成か
   ① 賛成
   ② 反対
   ③ どちらでも構わない
   ④ その他

5.5 アンケートの結果と考察

本実証の説明会（一部の会場では装置見学を含む）に参加された方は本実証事業に興味を持たれた方が大半と考えられるが、アンケートの結果では汚染土壌の洗浄と洗浄後土壌の再利用に大きな賛同が得られた。これにより、今後も継続的に洗浄土壌の再利用に向けた将来的な可能性を追求していく必要があると考えられる。

質問 1）自分の土地の土を除染する方法として、望ましいのは？

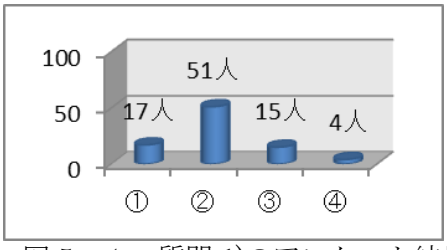


図 5－1　質問 1)のアンケート結果

質問 2）公共事業の資材に活用することに賛成か？

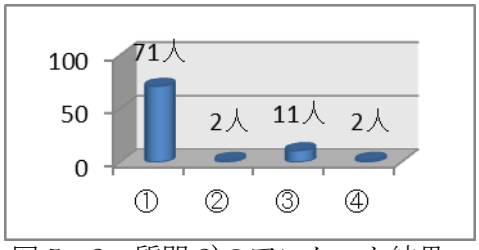


図 5－2　質問 2)のアンケート結果

5.6 住民説明会の様子

5.6.1 浪江町での住民説明会

写真 5-1　浪江町個人宅での住民説明会の様子

現地での質問と答え（一部）

・草はどうするのか？
（焼却炉で灰にすることで減容を行える）
・除染はまだ時間がかかるのか？
（弊社の立場では答えられない）

5.6.2 福島市での住民説明会

写真 5-2　福島市での住民説明会の様子

・山から除染しないとだめなのではないか？
（そういうご意見もあります）
・中間貯蔵施設への搬入は 5 年で終わるのか？
（弊社の立場では答えられない）
・仮置き場で減容はできるのか？
（技術的には可能です）

5.6.3 二本松市での住民説明会

写真 5-3　二本松市での住民説明会の様子

・ため池はいつ頃から除染するのか？
（弊社では判らない）
・洗浄した土はすぐに戻せるのか？
（元の放射能濃度にもよるが、多少放射能濃度が残っても良いのであれば可能）
・いつから減容が始まるのか？
（弊社の立場では答えられない）

6.再利用製品・方法の検証

6.1 焼き固め実験

洗浄後土壌を用いて、外用建築資材として成形可能であることを確認するため、焼き固め実験を行った。加倉運動公園、浪江中学校、浪江東中学校にて 25μm 超 5 ㎜以下の土壌を採取し、サンプルとした。

洗浄前の土壌

洗浄後の土壌

焼き固め後

1 配合比 90:10
2 配合比 85:15
3 配合比 80:20

6.2 セメント固化実験

福島県の建築・土木工事におけるコンクリート骨材として使用できる条件である JISA5308 を満たすことを確認するため、加倉運動公園と浪江中学校の洗浄後の土壌を用いてセメント固化実験を実施し、洗浄後の土壌(砂質分)をモルタルテストピースとして作成、測定を行った。加倉運動公園、浪江中学校、浪江東中学校にて 25μm 超 5 ㎜以下の土壌を採取し、サンプルとした。

試験項目	加倉運動公園	浪江中学校	規格値
絶乾密度(g/cm$^{3)}$	2.50	2.64	2.5 以上
表乾密度(g/cm$^{3)}$	2.59	2.69	
吸水率(%)	3.39	1.72	3.5 以下
微粒分量(%)	0.8	0.4	3.0 以下
粘土塊量(%)	0.45	0.25	1.0 以下
有機不純物	同じ	淡い	標準色液と比較して淡い
塩化物量(%)	0.002	0.002	NaCl として 0.04 以下
安定性(%)	2.5	2.1	10.0 以下
アルカリ骨材反応	無害	無害	無害であること
JISA5308 への適合	可	可	

洗浄前の土壌

洗浄後の土壌

モルタルテストピース

6.3 考察

・洗浄後の土壌を用いて、焼き固め実験をし、外用建築資材として成型可能であることを確認した。

・砂質分の多かった加倉運動公園と浪江中学校の洗浄後土壌を用いてセメント固化実験を実施し、福島県の建築・土木工事におけるコンクリート骨材として使用できる条件(JISA5308 のレディーミクストコンクリートの材料としての基準)を満たしていることを確認した。

洗浄後の土壌(砂質分)は、建設・土木工事におけるコンクリート材料としての基準(JISA5308 レディーミクストコンクリート基準)を満たしており、製品のコンクリートについても圧縮強度が十分であること(JISA1108 コンクリートの圧縮強度試験方法で評価)が確認され、今後の復旧工事などにおいてコンクリート基礎や防潮堤の芯材に利用可能であることを確認できた。

7.作業員被ばく検証

・現場作業者は全員ガラスバッチを着用、後日線量測定をした。
・現場責任者は個人被ばく線量計より毎日測定した。
・実証試験前と試験後にホールボディカウンター検査を受けた。

7.1 作業員被ばく線量評価

・作業場所平均空間線量率(地上 100cm)3.59μSv/h
・各作業場所での空間線量率と作業時間

【場所】	【空間線量率(μSv/h)】	【作業時間(h)】
・加倉運動公園	3.0	80
・浪江中学校	3.8	40
・浪江東中学校	0.3	34
・個人宅	3.9	22

・作業員最大被ばく線量 440μSv/h(作業担当箇所:本機操作)作業時間 176 時間
・作業員平均被ばく線量 0.25mSv/h 平均作業時間 176 時間
・ホールボディカウンター検査の結果は、全員非検出であった。

8. コスト検証と評価

8.1 イニシャルコスト(土壌処理量 15t/日、稼働日 20 日/月として)

(1)湿式分級機・・・1,500 万円 5 年リース (3)アースセーバー・・・・15,000 万円 5 年リース
(2)アクアセーバー(水処理)・・・ 6,000 万円 5 年リース

8.2 ランニングコスト(1t を処理するための費用)

・粘土分多めの土壌 ・砂質分多めの土壌
計 375,230 円 計 116,910 円 平均値(実用値) 200,000 円

8.3 総処理コスト

1t 当たりのコスト及び総処理量(5 年稼働の場合)

実用経費 (平均的なランニングコスト)	イニシャルコスト (設備費+維持費)	人件費	処理単価	総処理量
20 万円	約 1.5 万円	約 1.5 万円	約 23 万円	18,000t

9. 除染作業における安全上の注意

9.1 作業員必着物

・マスク、ゴーグル、長靴、ヘルメットまたは帽子、ゴム手袋、軍手

9.2 作業場の取り扱い注意

・重機取扱い、クレーン取扱い、汚染物取扱い

10. 試験場所

10.1 試験場所住所

・加倉運動公園:福島県双葉郡浪江町大字加倉字下加倉 40-1
・浪江中学校 :福島県双葉郡浪江町川添字南大坂 28
・浪江東中学校:福島県双葉郡浪江町幾世橋来福寺西 73
・浪江町個人宅

11. 除去物保管場所と保管状況

除去物保管場所と保管状況は、浪江町との協議により下記のようにした。

11.1 除去物保管場所

・福島県双葉郡浪江町昼曽根 72 番 仮置き場

11.2 除去物保管状況

・仮置き場にフレキシブルコンテナにて保管。

実施代表者の所属機関：中外炉工業株式会社

実証テーマ名：バイオコークス化による放射性物質に汚染された有機物の減容・安定化の実証と減容化による輸送効率の向上と安全性及び経済性の検証

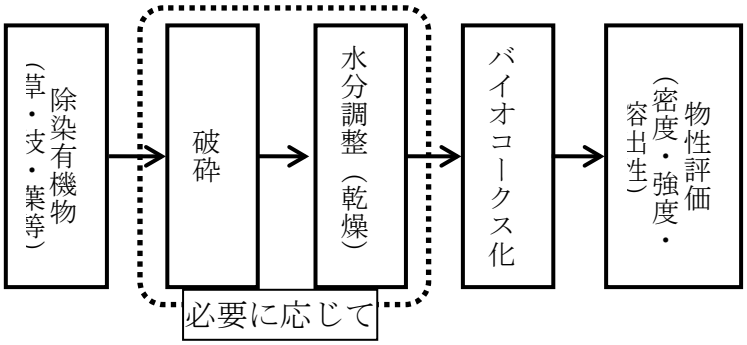
事業の概要：川俣町山木屋地区で収集された汚染樹木枝葉を用いてバイオコークス化による減容化を行い、減容による輸送効率の向上、安全性および経済性を評価する。

実施内容：

1. モバイル型バイオコークス製造設備一式を福島県川俣町内の実証サイトに設置する。
2. 現地にて収集された草、枝、葉等の試験原料（処理対象物）の性状把握行い、性状により前処理（破砕、乾燥）を実施する。
3. 処理対象物を用いてバイオコークスを製造し、製造物の性状評価（密度、強度）を行う。
4. 処理システムの安全性を評価するため Cs の溶出性を実施する。
5. 処理システムの有効性・経済性を評価するため、システム導入による初期投資コスト、設備運転維持コストを評価する。
6. バイオコークス製造時に発生する粉塵、放射性物質を測定する。

技術概要：

1. 試験フロー



バイオコークス製造装置

2. 試験目標

1）比重 1.2 以上に成型し、フレキシブルコンテナ解袋前に比べて 1/6 以下に減容化させる。

2）装置のリース費用、ランニングコスト、人件費を含めて 1 トン当たり 5 万円以下で処理する。

3）バイオコークスの性状、安全性評価を行い、安全性を検証する。

3. 期待される効果

1）減容化により効率的に除染物を輸送することができる。

2）発酵、発火、荷くずれ、Cs の溶出等が抑制され仮置場、中間貯蔵施設での保管を省力化することができる。

3）輸送時等に万が一事故発生しても高強度であるため放射性物質の飛散を抑制することができる。

その他：

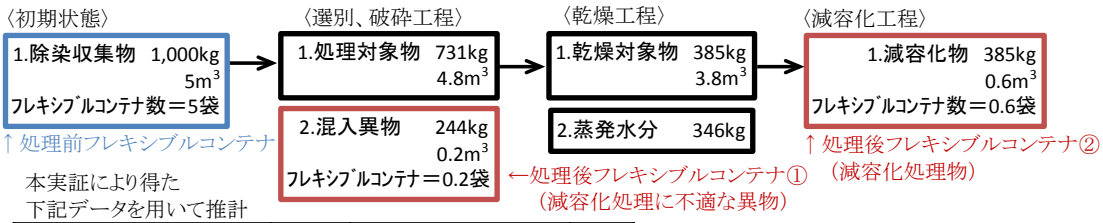
事業の結果：除染物として収集された枝葉、草をバイオコークス化することにより右表のようにフレキシブルコンテナ内充填時かさ密度、圧縮強度、落下強度、Cs の水への溶出性がそれぞれ向上した。

		未処理	減容化処理
フレキシブルコンテナ内充填時かさ密度	ton/m^3	0.2	0.7
圧縮強度	MPa	0	11 以上
落下強度 SI_4^{25}	%	0	99 以上
Cs の溶出率	%	7.5%	0.4%

土砂混入率	wt%	0	5	15	25
製造可否		可	可	可	否
比重	ton/m^3	1.20	1.20	1.26	－
圧縮強度	MPa	22.6	23.9	19.9	－
落下強度 SI_4^{25}	%	99.9	99.8	99.7	－

前処理（処理物の選別、破砕、乾燥）後の原料に混入する土砂が 15wt%までであれば強度の優れる成型物の製造が可能であることがわかった。

本事業で得られたデータを元に 1000kg の除染物を減容化処理した場合のフローと処理物の重量、体積の推移を下図に示す。除染物には土砂が混入しているため本技術で処理するため土砂等の異物を選別除去後に減容化処理する。これにより除染収集物を仮置場で減容化することにより 1/6 以下に減容化できる見込みを得た。減容化物は未処理物に比べ強度と Cs の不溶出性に優れるため、より簡便・効率的に運搬・保管が行えると考えられる。



本実証により得た
下記データを用いて推計

処理原料内異物混入率†	25%	乾燥後かさ密度※	0.1
処理原料水分	50%	減容化後かさ密度※	0.7
処理原料かさ密度※	0.2	乾燥後水分	5%
土砂かさ密度※	1.25		

※かさ密度はフレキシブルコンテナに充填時のもの（単位ton/m^3） †処理原料内の異物は減容化処理に不適な25%であるため選別工程にて除去し、減容化処理実施する。

作業員被ばく量評価：試験の材料として用いた除染草木の表面線量率が 0.05～0.15 μSv/hr と低かったが、作業現場の空間線量率が平均 0.5 μSv/hr でありそれに大きく影響を受けた結果となった。

作業区分	被ばく線量（人・μSv）	実績工数（人日）
合計	515.0	155.0

コスト評価：7 万円/ton（減容化処理のみ。合計費用 7.9 万円より運搬費用 0.9 万円を減じた）

歩掛り（作業人工、作業速度）：作業人工：5 人/日、作業速度：4.8ton/日

コスト評価条件：日量 4.8ton,水分 50%,異物混入率 25%の除染物を新設する減容化処理設備（装置価格 3.1 億円(工事費含む),稼動年数 9 年,ランニングコスト 1.1 億円/年）にて減容化処理した場合。

除染作業における安全上の注意： 原料選別、原料破砕、原料乾燥工程において粉塵が発生するため集塵ならびに作業員への保護具の着用が必要。

試験場所（住所）：
福島県川俣町山木屋地区

除去物保管場所と保管状況（写真）：原料提供いただいた大成 JV 殿へ返却し、大成 JV 殿管理の仮置場にて保管

1 目的

川俣町山木屋地区で収集された汚染樹木枝葉を圧縮成型・減容化し、高比重、高圧縮強度、耐候性という特徴を有するバイオコークスの製造の実証を行う。あわせて、仮置き場から中間貯蔵施設への輸送に係る安全性、効率性、経済性の検証及び中間貯蔵施設での減容処理までの期間の安定保管に係る安全性の検証を行う。試験として、試料条件(形状・水分・異物混合率)と成形物品質(見かけ比重、冷間圧縮強度)の関係および輸送時の破損有無を確認し、減容化による輸送効率の向上、安全性および経済性を評価する。

2.事業の内容

2.1 バイオコークスとは

バイオコークスはバイオマス固形燃料であり、光合成由来の植物性廃棄物から保有するエネルギーの損失が殆どなく製品化され、エネルギー利用と石炭コークス代替として利用が期待できる。これまでの試験で木屑、樹皮(バーク)、コーヒ粕、茶粕、籾殻、廃菌床等の様々な植物性廃棄物から製品化できることが確認されており、その製造原理、特徴、製造方法や性状は既報の文献[(1)(2)(3)]の通りである。

2.2 バイオコークス製造設備

(1)概要

製造装置の構成機器とその役割を記す(写真1参照)。

ｉ）原料ホッパ

原料を外部から受入れる。

ⅱ）縦圧縮シリンダ

ホッパから定量切り出された原料を反応容器手前に充填する。

ⅲ）横圧縮シリンダ

面圧 20MPa(総荷重 16 トン)の力で原料を加熱部に押し込む。

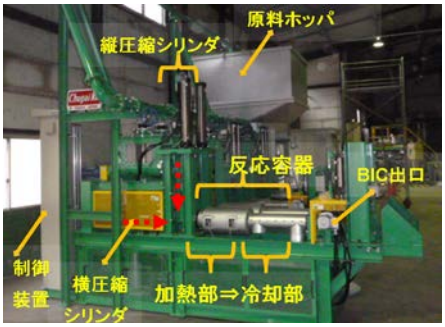


写真１　バイオコークス製造装置

ⅳ）反応容器

パイプ状の容器内で原料を加圧減容化し、所定の温度と時間を掛けて加熱・冷却を行い、製品(バイオコークス)化する。

（ｖ）バイオコークス出口

反応容器から排出される製品を一定長さで切断し、原料受け箱にためる。

（ⅵ）制御装置

反応容器を監視制御して、前後機器や関連機器との協調を図り、設備の効率的な運転を維持する。

(2)特長

ｉ）1 ユニット当たり重量 1.2 トン程度のコンパクトな装置で、3 ヶ月という短納期で納入可能。設

置工事も短期間で済む。(原料供給、製品排出除く)

ⅱ) 運転は完全自動化されており、夜間は無人運転可能である。

ⅲ) 熱源の電熱ヒーター、駆動の油圧動力を合わせてバイオコークス1トン当たりの生産に必要な電力は 170kwh 程度の動力で製造できる。

2.3 事業全体フロー

本事業の全体フローを図 1 に示す。

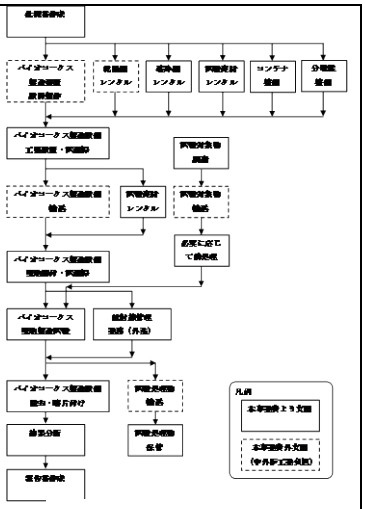


図 1 事業全体フロー

3.試験準備

(1)破砕機(写真 2、能力:300kg/hr、電力:750W,概略寸法:750mm*450mm*950mm)、乾燥機(写真 3、能力:50kg/hr、電力:12kW,概略寸法:2300mm*1000mm*1700 mm)を調達した。

(2)福島県川俣町で実施する実証試験に際して、40 フィートコンテナ内部にバイオコークス製造設備一式(破砕機、乾燥機、バイオコークス製造装置)を格納した(図 2)。

(3)試運転実施後、大型トレーラにて実証事業実施場所へ輸送し、現地にて調達した敷鉄板、連結ハウスなどと一緒に据付行った(写真 4)。

(4)試験原料として福島県川俣町山木屋地区の除染物をフレキシブルコンテナ 14 袋(原料種:枝葉、草)を受領した。フレキシブルコンテナ梱包状態にてかさ密度 0.19～0.45ton/m^3、表面線量率 0.17～2.05 μSv/hr であった。

写真 2 破砕機

写真 3 乾燥機

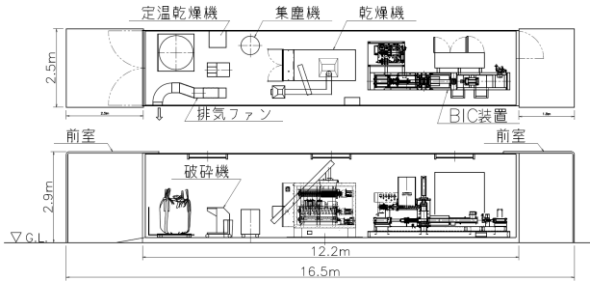


図 2 コンテナ内装置配置図

写真 4 実証事業現地全景

4 バイオコークス製造試験結果と評価

4.1 土砂混入率を変えての製造試験(大阪での事前試験)

4.1.1 製造条件

(1)加熱帯温度:200℃

(2)原料投入時間:10 秒

(3)原料押込み時間:330 秒

(4)使用原料:製材所より発生のカンナ屑　写真 5 参照。　水分 10%

(5)土砂混入率:土砂混合後の絶乾重量に対して重量で 0,5,15,25wt%の土砂を混入した原料を用いた。使用した土砂は写真 6 参照。

写真 5　原料カンナ屑

写真 6　使用した土砂

4.1.2 結果

土砂混入率 0,5,15,25%にて製造試みた際の製造の可否、製造原単位、比重、圧縮強度、落下強度を表 1 に示す。圧縮試験機、落下強度試験機ならびに土砂混入率 25wt%の原料にて製造した際の排出部の写真を写真 7～9 に示す。

表 1　バイオコークス製造結果と製造物の物性

土砂混入率		0 wt%	5 wt%	15 wt%	25 wt%
製造の可否		可	可	可	否
製造原単位	kWh/ton	480	449	413	-
比重		1.20	1.20	1.26	1.30(参考)
圧縮強度	MPa	22.6	23.9	19.9	15.3(参考)
落下強度　SI_4^{25}	%	99.9	99.8	99.7	-

写真 7　圧縮試験機

写真 8　落下強度試験機

写真 9　土砂混入率 25%原料排出部

土砂混入率 25wt%にて排出部において製品が崩壊し、連続しての製造ができなくなった。これより土砂混入率が 15%を超える場合、事前に土砂を除去する必要があることがわかった。土砂混入率増加に伴い比重は上昇し、圧縮強度は低下した。落下強度は土砂混入率によらず 99%以上となり、得られた減容化物を運搬し、車両から落下する事故が起こったとしても容易に回収することができ放射性物質の飛散を防止することができる。

4.2 製造能力(サイクルタイム)を変えての製造試験(大阪での事前試験)

4.2.1 製造条件

(1)加熱帯温度:200℃

(2)原料投入時間:10 秒

(3)原料押込み時間:330 秒および 210 秒

(4)使用原料:製材所より発生のカンナ屑　水分 10%

4.2.2 結果

製造能力を変えて製造したバイオコークスの製造原単位、比重、フレキシブルコンテナ充填時かさ密度、圧縮強度、落下強度を表 2 に示す。製造能力向上に伴い、製造原単位は低下し、比重、圧縮強度は低下した。これは加熱時間が短縮されバイオコークス化反応が不十分となったためであると考えられる。しかし圧縮強度はフレキシブルコンテナ内に充填して保管していても荷くずれ、沈降することはない強度である。落下強度は生産能力によらず 99.9%となり、運搬時の落下事故が発生しても容易に回収でき、放射性物質の飛散を防止することができる。

表 2　バイオコークス製造結果と製造物の物性

製造能力	kg/day	160	225
製造原単位	kWh/ton	480	333
比重		1.20	1.11
フレキシブルコンテナ充填時かさ密度	ton/m^3	0.70	0.65
圧縮強度	MPa	22.6	18.1
落下強度　SI_4^{25}	%	99.9	99.9

4.3 草本系バイオマスによる製造試験(大阪での事前試験)

4.3.1 製造条件

(1)加熱帯温度:160℃

(2)原料投入時間:9 秒(枯葉)　15 秒(草)

(3)原料押込み時間:330 秒(枯葉)、230 秒(草)

(4)使用原料:①枯葉　水分 5%　②伐採した草(主に芝生)　水分 5%

4.3.2 結果

枯葉、草および 4.1.1 で実施のカンナ屑の製造条件(原料水分、加熱帯温度)ならびに製造原単位、製造したバイオコークスの比重、圧縮強度、落下強度を表 3 に示す。枯葉、草はカンナ屑に比べて低い加熱温度で製造しているが比重はほぼ同じかそれ以上となった。これは草本系バイオマスに含まれるリグニン成分が木質系バイオマスに比べて多いため、より低温でバイオコークス化反応することができるという従来の研究と同じ結果である。また加熱温度が低いため製造原単位はカンナ屑での製造に比べて低下した。

表 3　バイオコークス製造結果と製造物の物性

原料種		枯葉	草	カンナ屑
原料水分	%	5	5	10
加熱帯温度	℃	160	160	200
製造原単位	kWh/ton	432	391	480
比重		1.21	1.25	1.20
圧縮強度	MPa	14.9	34.7	22.6
落下強度 SI_4^{25}	%	99.5	99.9	99.9

4.4 除染収集物によるバイオコークス製造試験（福島での実地試験）

4.4.1 原料

(1) 除染業者より受領した草

(2) 除染業者より受領した枝葉

(3) 事業実施現場にて伐採した草

それぞれの外観写真を写真 10～12 に示す。

写真 10　除染草

写真 11　除染枝葉

写真 12　現地伐採草

4.4.2　選別処理

除染収集物内に大量の土砂、大きな径の枝、金属片など本事業にて処理できない異物が含まれており、選別する必要があることがわかった。除染物に含まれている土砂が少ない場合（約 25%未満）は揺動式砂篩機を用いて土砂ならびに大きな異物を 2cm 目開きふるいのふるい上、3mm 目開きふるいのふるい下で選別実施した（写真 13）。土砂が多い場合（約 25%以上）はフォークを用いて使用できるバイオマス原料のみを手動にてできるだけ取り出した（写真 14）。

写真 13　砂篩機での選別

写真 14　フォークでの選別

4.4.3　破砕処理

各原料を汎用裁断機にて破砕行った。除染物を破砕した後の写真を写真 15,16 に示す。定格 10mm に破砕する装置であるが、装置への原料の投入向きにより長尺の原料は定格どおりには破砕できずに長いままで排出されるものも含まれた。

写真 15　破砕後除染草

写真 16　破砕後枝葉

破砕処理の平均能力は 49kg/hr、破砕原単位は 6.6kWh/ton であった。重量はそれぞれ 5%水分重量(バイオコークス製造条件)に換算したときのもの。

4.4.4 乾燥処理

各原料を乾燥機にて乾燥を行った。除染物を乾燥した後の写真を 17,18 に示す。乾燥処理により水分約 5%に調整した。

写真 17 乾燥後除染草

写真 18 乾燥後枝葉

乾燥処理の平均能力は 2.5kg/hr、乾燥原単位は 3096kWh/ton、使用する水は $2m^3$/ton であった。重量はそれぞれ 5%水分重量(バイオコークス製造条件)に換算したときのもの。

4.4.5 製造能力(サイクルタイム)を変えてのバイオコークス製造試験

(1)製造条件を表 4 に示す。

表 4 バイオコークス製造条件

原料種		除染収集枝葉		除染収集草	
水分	%	5		5	
加熱帯温度	℃	160		160	
原料投入時間	秒	9		14	
原料押込み時間	秒	275	160	360	210

(2)結果

枝葉、草を原料に製造した際の製造能力、製造原単位、製造原単位、比重、圧縮強度を表 5 に示す。製造中のバイオコークス装置の排出部ならびに製造したバイオコークスの写真を写真 19,20 に示す。土砂混入率約 20%にて安定的に製造することができた。製造能力の増加に伴い製造原単位、比重、圧縮強度は低下した。これは加熱時間が短縮されバイオコークス化反応が不十分となったためであると考えられる。しかし強度はフレキシブルコンテナ内に充填して保管していても荷くずれ、沈降することはない強度である。

表 5 バイオコークス製造結果と製造物の物性

		除染収集枝葉		除染収集草	
土砂混入率	wt%	23		22	
製造能力	kg/hr	155	195	149	222
製造原単位	kWh/ton	480	370	483	313
比重		1.21	1.16	1.34	1.21
圧縮強度	MPa	19	9.1	14	10

写真 19　バイオコークス装置排出部　写真 20　製造したバイオコークス

4.4.6　土砂混入率を変えてのバイオコークス製造試験

(1)製造条件

(ⅰ)加熱帯温度:160℃

(ⅱ)原料投入時間:10 秒

(ⅲ)原料押込み時間:240 秒

(ⅳ)使用原料:現地にて伐採した草　水分 5%

(ⅴ)土砂混入率:土砂混合後の絶乾重量に対して重量で 0,5,15,25,35wt%の土砂を混入した原料を用いた。

(2)結果

土砂混入率 0,5,15,25,35%にて製造した際の製造の可否、製品の比重、圧縮強度を表 6 に示す。4.1 で実施のカンナ屑を用いての土砂混入試験と異なり、土砂混入率 35%でも安定して製造することができた。これは原料が草であり、カンナ屑に比べて容易に高密度に成型できる原料であるため排出部において本圧縮工程の加圧力に耐え 35%でも安定して製造できたと考えられる。

表 6　バイオコークス製造結果と製造物の物性

土砂混入率		0 wt%	5 wt%	15 wt%	25 wt%	35 wt%
製造の可否		可	可	可	可	可
比重		1.21	1.17	1.20	1.34	1.43
圧縮強度	MPa	19	10	9.4	11	15

土砂混入率 0%にて製造したバイオコークスならびにバイオコークス化する前の原料のセシウム 137 の水への溶出性を環境省発行の放射能濃度等測定方法ガイドライン第2版に定められている方法にならい、攪拌時間 15,30,60 分後の水への溶出率を測定した結果を図 3 に示す。未処理に比べてバイオコークス化することにより溶出率が 1/17～1/43 に抑制されることがわかった。これは減容化処理により水とバイオマスの接触する表面積が低下し、表面に付着しているセシウムの溶出量が抑えられた結果であると考えられる。

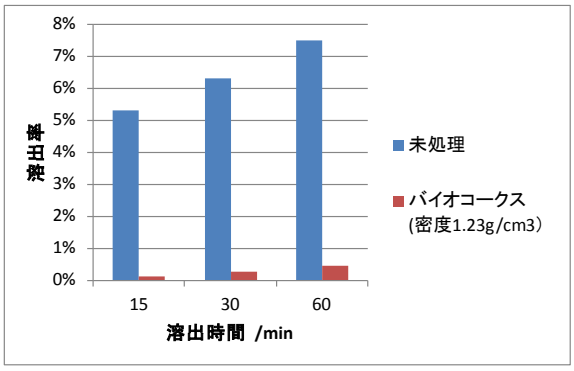


図 3 除染収集草中の Cs137 の溶出率

4.4.7 放射線管理

(1) 空間線量率

実証事業実施場所の空間線量率は 0.72～1.21μSv/hr であった。敷鉄板敷設後の鉄板上は 0.42～0.62μSv/hr であった。

(2) 各工程の粉塵発生量、作業員被ばく量

バイオコークス化各工程での粉塵発生量および作業員の被ばく線量は表 7 の通り。被ばく線量率は、材料として用いた除染草木の表面線量率が 0.05～0.155μSv/hr 表面と低線量率であることから、同一作業区分中の材料による放射線量率より作業現場の空間線量率に大きく影響を受けた結果となった。

表 7 減容化処理各工程での発生粉塵量、被ばく線量

	粉塵量 (mg/m^3)	被ばく線量 (人・μSv)	実績工数 (人日)
1.選別工程	1.95	68.3	20.2
2.破砕工程	3.0	134.7	36.8
3.乾燥工程	2.9	259	80.5
4.バイオコークス化工程	1.9	53	17.5
合計	-	515	155

(3)バイオコークス製造時の放射性物質飛散量

ハイボリュウムエアサンプラを用いて、バイオコークス製造時に開口部となる原料ホッパ入口部、バイオコークス排出部の発生粉塵量と放射能量測定した際の写真を写真 21,22、分析結果を表 8 に示す。これによりバイオコークス製造時に放射性物質の飛散なきことがわかった。

写真 21 原料ホッパ入口部　　写真 22 バイオコークス排出部

表 8 バイオコークス製造時の装置周辺放射能量測定結果

	ホッパ入口部	排出部	バックグラウンド (装置停止時)
粉塵量(mg/m^3)	1.5	1.8	0.3
放射能量(Bq/m^3)	ND	ND	ND

粉塵濃度は柴田化学デジタル粉塵計 LD-5 にて測定 K 値: 0.15 mg/m^3/cpm　集塵装置稼働させず。放射能量測定の検出限界 ^{134}Cs:5.9x10^{-3} Bq/m^3 ,^{137}Cs:5.6x10^{-3}Bq/m^3 ,^{131}I:1.4x10^{-2} Bq/m^3

5. システム評価

5.1 処理物フレキシブルコンテナ充填時のかさ密度

比重 1.2 のバイオコークスを 1m^3 フレキシブルコンテナバッグ（直径 1100mm の円柱形状）に無作為に充填した際のかさ密度は 0.7ton/m^3 となった。これは最密充填した際の約 2/3 である。

5.2 コスト評価

本実証事業で得られたデータを用いて、日量 4.8ton の減容化処理設備を新規に設置し、表 9 に示す運転条件で減容化処理し、中間貯蔵施設に運搬する際のコストを表 10 にまとめた。また本設備で 1000kg の除染物を処理した際の重量と容積の変化を図 4 に記す。除染物には土砂が混入しているため本技術で処理するため土砂等の異物を選別除去後に減容化処理する。この試算によりフレキシブルコンテナバッグ 5 袋の除染収集物が本システムでの減容処理により 0.8 袋になり、その減容化率は 1/6 となることが推算された。処理コストは表 9 より除染物 1 トンあたりの減容化処理費用は 7 万円、搬送費用は 0.9 万円と試算された。

表 9　実機プラントの運転条件

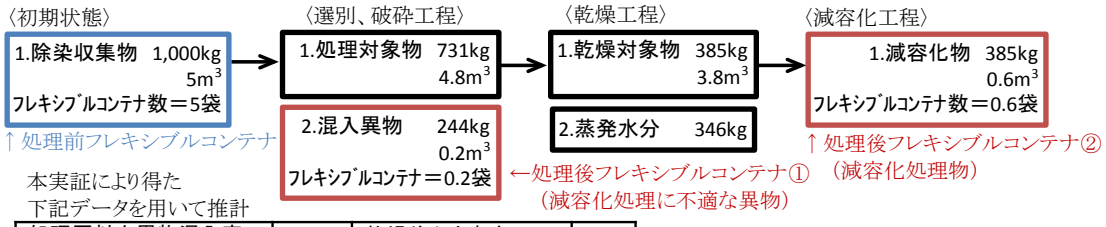
被処理物		除染バイオマス
被処理物内異物混入率	%	25
被処理物水分	%	50
バイオコークス水分	%	5
バイオコークス生産量	t/日	1.9
稼働日数	日/年	330
運転時間	hr/日	24
年間運転時間	hr/年	7,920

表 10　本システム導入による費用効果

減容化処理費用（①+②）	万円/ton	7.0
①　初期投資コスト	万円/ton	2.3
②　設備運転維持コスト	万円/ton	4.7
搬送費用（⑤x⑦）	万円/ton	0.9
③　運搬物重量	ton/台	3.0
④　運搬フレキシブルコンテナ袋数	袋/ton	0.8
⑤　4 トンダンプ単価	万円/台/日	6
⑥　積載フレキシブルコンテナ数	袋/台	5
⑦　必要ダンプ数（④÷⑥）	台/ton	0.15
トータルコスト	万円/ton	7.9

①内訳：バイオコークス製造装置一式、据付工事費、建屋工事費、輸送費

②内訳：人件費（篩い分け選別、破砕、乾燥、バイオコークス製造等）、ユーティリティ費、メンテナンス費



本実証により得た
下記データを用いて推計

処理原料内異物混入率†	25%	乾燥後かさ密度※	0.1
処理原料水分	50%	減容化後かさ密度※	0.7
処理原料かさ密度※	0.2	乾燥後水分	5%
土砂かさ密度※	1.25		

※かさ密度はフレキシブルコンテナに充填時のもの（単位ton/m³）　†処理原料内の異物は減容化処理に不適な25%であるため選別工程にて除去し、減容化処理実施する。

図 4　処理物の重量と容積の変化

6.まとめ

バイオコークス製造装置の改造、他機器の調達行い大阪で実施の事前試験ならびに、福島県川俣町で実施の除染収集物を用いた減容化試験により以下の知見を得た。

1)　除染有機物をバイオコークス化するに当たり土砂混入率の制限、異物がある場合除去が必要であることがわかった。

2)　土砂の混入率が15wt%までであれば、強度他の品質を満たす基準となる比重1.2を超える成型物の製造が可能であることを確認した。

3)　1)の条件を満たせば本減容化処理によりフレキシブルコンテナ解袋前に比べて1/6以下に減容化が可能になる見通しを得た。

4)　減容化した試料と未処理の試料のセシウムの溶出性を測定し、溶出時間が 60 分の条件にて溶出量が 1/17 に抑えることができることがわかった。

5)　除染収集物を本システムで減容化後中間貯蔵施設へ運搬した場合、図 6 の条件下で除染物 1 トン当たり 7.9 万円の費用がかかることが試算された。

6)　前述のとおりバイオコークス化により、処理前に比べて体積は 1/6 になり、強度とセシウムの不溶出性に優れる固形物となるため、より簡便・効率的に運搬・保管が行えると考えられる。

7)　上記に加え、バイオコークスは有機物の腐敗や発酵を抑制する効果が既に確認されている[(4)]ほか、成型品は放射性物質の管理を適切に行うことで焼却炉の燃料として活用可能である。そのため、本技術は、仮置場に保管されている除染有機物について、その地域での焼却が困難な場合には、中間貯蔵施設への輸送及び輸送後の焼却を前提とした中間処理として有効と考えられる。

7.参考文献

(1) 井田ら,日本エネルギー学会誌, Vol.91(2009),p41
(2) 川見ら,高温学会誌, Vol.35(2009),p97
(3) 水野ら,実験力学, Vol.13(2013),p190
(4) 環境省　除染技術探索サイト(https://www2.env.go.jp/dtox/)　整理番号 T-00023

— 以 上 —

実施代表者の所属機関　：　株式会社日本プラント建設

実証テーマ名　：

熱分解法による「避難指示区域に残置された漁網等：処理困難廃棄物」の安全な処理方法

事業の概要　：

放射性物質に汚染され、かつ、鉛等有害物質を含有する漁網や農業用塩化ビニール類を窒素雰囲気下での熱分解反応により減容化し、生成する有害元素を固定化する技術の実証を行う。また、鉛は中間保管施設の遮蔽体等への再利用の可能性を検証する。

実施内容　：

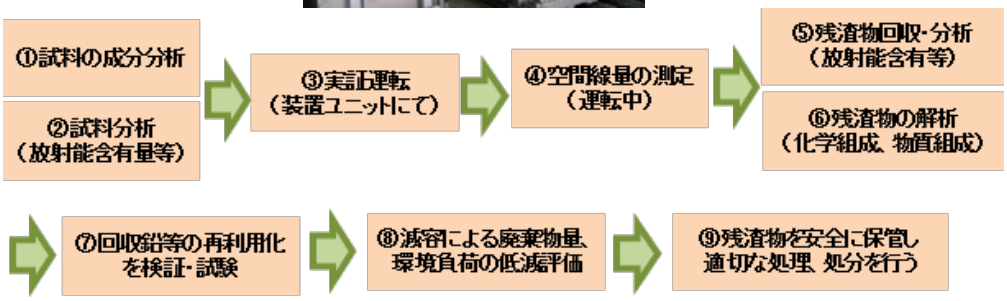
1）鉛等有害物質を含有する漁網を熱分解装置で減容・減量し、含有されていた鉛を回収する。

2）農業用塩化ビニール類を熱分解装置で減容・減量する。

3）漁網処理回収鉛の物性を評価する。

概要　：

1.試験フロー



2.試験目標

1）熱分解処理による漁網から鉛等の回収処理が安全かつ適切に処理できることを検証する。

2）農業用塩化ビニール類等の混合災害廃棄物を熱分解し安全かつ適切に減容できることを実証する。

3）回収した鉛が中間保管施設の遮蔽体等に再利用できる可能性を評価する。

3.期待される効果

1）漁網や農業用塩化ビニール類の減容による廃棄物量の低減。

2）処理困難廃棄物の安全な処理による環境負荷の低減。

4.実証結果 ：

鉛含有漁網及び処理困難廃棄物の熱分解処理を実施した結果、いずれの廃棄物も熱分解処理が有効な方法であることを確認した。以下に、その結果を示す。

1.漁網から鉛の回収に関する技術の実証結果

		熱処理前				熱処理後					備考
		重量(Kg)	容積(L)	放射能濃度(Bq/Kg)	放射能量(Bq)	重量(Kg)	容積(L)	放射能濃度(Bq/Kg)	放射能量(Bq)	鉛回収の有無	
1.魚網(1)	鉛有 太い	8.69	13.03	2,027	17,600	3.12 (鉛3.02)	5.77	410 鉛 52 炭素 36,000	1,280	有	漁網の繊維分はほとんどがガス化し、処理後の重量は、ほぼ鉛である。
2.魚網(2)	鉛無	5.37	8.57	653	3,510	0.07	0.05	24,800	1,740	無	漁網の繊維分はほとんどがガス化している。
3.魚網(3) ＋落葉	鉛有 落葉	16.42 魚網 10.44 落葉 5.98	34.5	413,000 魚網 417 落葉 1,132,000	6,770,000	8.18	12.30	248,000 鉛 23,780 炭素 941,000	2,030,000	有	魚網+ｾｼｳﾑ汚染の落葉試料の負荷。

1)熱分解処理により、鉛含有の漁網から鉛粒を回収できることを確認した。また、繊維分のほとんどは残渣とならず、ガス化したことを確認した。

2)放射濃度の低い漁網(1)から回収した鉛については、乾式の篩選別では、鉛の放射能濃度は 52Bq/kgであった。一方、水を用いた洗浄では鉛の放射能濃度が 86Bq/kgとなり、いずれの場合もクリアランスレベル(100Bq/kg)を下回る結果で、再利用の可能性があることを確認した。ただし、漁網(3)＋セシウム汚染の落葉試料により放射性セシウムを負荷した試料から回収した鉛粒については水洗浄により一定の濃度低下はあったものの、洗浄のみではクリアランスレベル以下とはならなかった。

2.処理困難廃棄物に関する熱分解処理技術の実証結果

	熱処理前				熱処理後				備考
	重量(Kg)	容積(L)	放射能濃度(Bq/Kg)	放射能量(Bq)	重量(Kg)	容積(L)	放射能濃度(Bq/Kg)	放射能量(Bq)	
5.農業用塩化ビニール類	2.78	37.11	2,310	6,420	0.30	0.05	44,600	13,400	99%減容している
6.災害混合廃棄物	6.20 木材 2.56 樹脂 1.56 落葉 2.08	32.62	394,000 木材 143,000 樹脂 6,970 落葉 990,000	2,440,000	2.26	10.90	3,100,000	7,010,000	木材・竹+ｼﾞｭｰｽｹｰｽ+落葉の混合試料

参考データ） 災混合廃棄物

実証試験時の汚染状況測定			
測定場所	濃度	単位	測定方法
炉内壁	$<1.1\times10^{-1}$	Bq/cm^2	GM
タール液	不検出	Bq/kg	Ｇｅ
排気ガス	$<1.2\times10^{-7}$	Bq/cm^3	※GM

参考データ） 農業用塩科ビニール類

排ガス測定			
測定物質	濃度	単位	分析方法
メタノール	130	ppm	ガスクロマトグラフ分析法
ブタン	2		
メタン	28		

※GM 実測方法:「排気系ガスをダストサンプラー配管に導き、設置したろ紙へ放射性塵埃・エアロゾル等を付着させて、ろ紙を検査開発㈱(茨城県東海村)にて GM 計数管測定器で測定した。

1)塩化ビニール類の熱処理では、最大約 99%の減容化率、約 89%の減量化率を確認した。

2)熱分解処理後の残渣物は微量であり、今回は助燃材等としての再利用の可能性は見出せなかった。また排ガスでも、濃度的に燃料利用等の可能性は見出せなかった。

3.回収鉛の放射能濃度

漁網(1)鉛有

	放射能濃度(Bq/Kg) 処理前	処理後	
篩分別	2,030	鉛	52
		炭素	36,000
水洗浄		鉛	86
		炭素	－

漁網(3)

(鉛有・落葉)

	放射能濃度(Bq/Kg) 処理前	処理後	
篩分別	6,600,000	鉛	24,000
		炭素	940,000
水洗浄		鉛	2,000
		炭素	－

1)放射能濃度の低い漁網(1)から回収した鉛粒は、水洗浄のみでクリアランスレベル(100Bq/kg)を下回る 86Bq/kgとなり、再利用の可能性があることを確認した。ただし、セシウム汚染の落葉試料により放射性セシウムを負荷した試料から回収した鉛粒については、水洗浄により一定の濃度低下はあったものの、洗浄のみではクリアランスレベル以下とはならなかった。

作業員被ばく量評価:

被ばく線量は、最低 15μSv から最大 465μSv の間であり、総被ばく線量は 1,545μSv で、平均個人被ばく線量は 193μSv であった。

コスト評価: (概算)
64 千円/㎥

放射能対応装置価格 750,000 千円/5 年、人件費 130,000 千円/5 年
電気料等 81,000 千円/5 年 合計 961,000 千円

コスト評価条件:5 年間の想定ケース(15,000 ㎥処理/5 年)、10 ㎥/日処理(24 時間運転)、稼動日数:年間 300 日

除染作業における安全上の注意:防護用マスク・タイベックス、手袋、眼鏡等の保護具

試験場所(住所):福島県双葉郡浪江町大字井出字大倉 50

除去物保管場所と保管状況:自治体等の協議を経て適切に処分する。一時保管として、左記試験場所に保管する。

1.業務の目的

放射性物質に汚染され、かつ、鉛等有害物質を含有する処理困難廃棄物の漁網や農業用塩化ビニール類の安全な処理方法の評価のため、空気中の窒素を利用し、窒素雰囲気下での熱分解反応により、廃棄物を減容化し、残渣物やスクラバ水等に分離、生成する有害元素を固定化する技術の実証を行う。また、炭素等を含む残渣物や回収ガス類は焼却炉での焼却処理の可能性、鉛は中間保管施設の遮蔽体等への再利用の可能性を検証する。

1.1 熱分解炉技術の概要

(1)本技術は、空気中の窒素を高濃度に濃縮し、高純度の窒素雰囲気下、400℃～500℃領域で熱分解反応を利用して、処理対象物を熱分解し、重量を減少させ、炭素リッチの残渣物を生成し、同時に放射性セシウムや有害元素の残渣物内への固定化を行うものである。

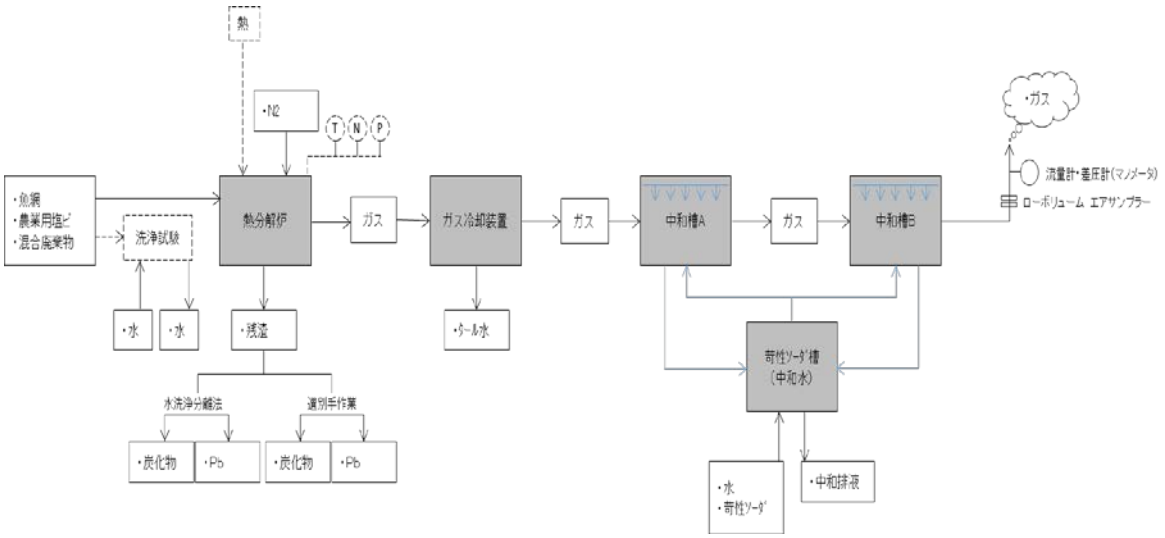
(2)過去の実績から、この方法は酸化化合物(CO_2、ダイオキシン類等)を発生させることなく、有害物質や放射性物質をガス中に移行させない廃棄物処理方法である。窒素雰囲気下の熱分解反応は還元性雰囲気の中で進行し、反応は緩慢であるが反応残渣物は炭素リッチな複合化合物を形成し安定している。

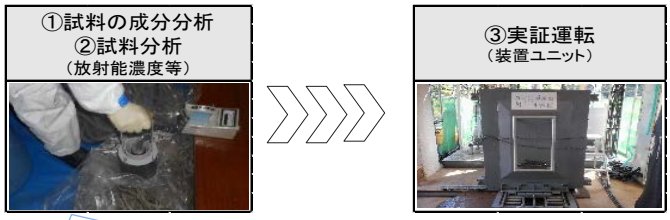
(3)固体排出物について、実績として、炭素等を含む残渣は 500℃を超える高温域まで安定しており耐熱性を有している。一方高温で酸素が存在する環境下では、炭素リッチの残渣物は燃焼する。今後、焼却施設の安定な稼働段階において、投入する放射性物質濃度を把握し燃焼炉の助燃材として、残渣物等もリサイクル使用の可能性がある。また、これまでに鉛回収の可能性を把握しており、鉛含有廃棄物から鉛を回収し、その再利用の可能性も有している。さらにガス類(油脂性タール液)の回収も一定の実績を有して、その資源化の可能性もある。

2.実施内容

1)鉛等有害物質を含有する漁網を熱分解装置で減容・減量し、含有されていた鉛を回収する。
2)農業用塩化ビニール類を熱分解装置で減容・減量する。
3)漁網処理回収鉛の物性を評価する。

3.試験フロー





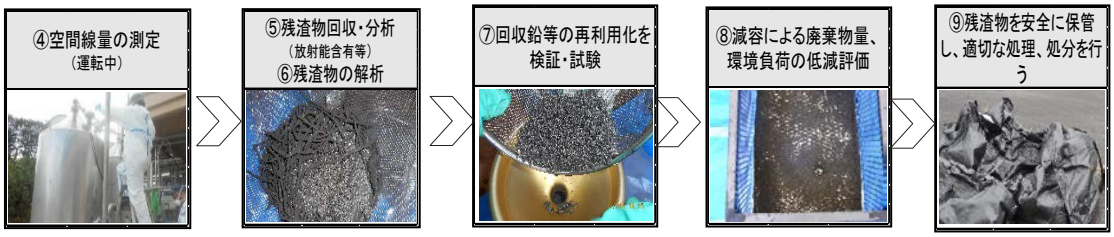
内容・形状	主成分、含水率、重量、容積	
①鉛が含有されている。太い径の網綱（ロープ）鉛の粒・連鎖状素材が組み込まれている。②直径3.8cm長さ11.5mの魚網を使用。③5本のロープで構成されている。④1本あたり、径1.89mmの鉛が試料の長さ分、編みこまれていた。	主成分	二酸化ケイ素 酸化アルミニウム 酸化第二鉄
	含水率	0.36%
	重量	8.69kg
	容積	13.03L

内容・形状	主成分、含水率、重量、容積	
①鉛が含有していない。中太の網綱（ロープ）の素材である。鉛は外見からも網糸の分解からも見つけられない。繊維のみの素材である。	主成分	二酸化ケイ素 酸化アルミニウム 酸化第二鉄
	含水率	0.10%
	重量	5.37kg
	容積	8.57L

内容・形状	主成分、含水率、重量、容積	
魚網を置き、その上にビニール袋に入った放射能に汚染された落ち葉を乗せ試験試料とした。	重量	16.42kg
	容積	34.5L

内容・形状	主成分、含水率、重量、容積	
農業用塩化ビニール。	主成分	酸化アルミニウム 酸化マグネシウム 二酸化ケイ素
	重量	2.78kg
	容積	37.11L

内容・形状	主成分、含水率、重量、容積	
木質材、ジュースケースをビニール袋に入れ、下に引き、その上に放射能に汚染されている落ち葉をビニール袋に入れ上に置き試験試料とした。	重量	6.2kg
	容積	32.62L



4. 試験結果

4.1 漁網(1)の試験

(1)漁網(1)の処理前後の外観

漁網(1)は連鎖状の鉛粒と漁網繊維からなっている。この漁網は熱分解により、少量の炭素化合物と鉛粒が生成された。以下に熱処理前と熱処理後の写真を示す。

熱処理前

熱処理後

(2)熱処理結果

ⅰ)漁網の主成分はポリエチレン系高分子樹脂繊維であり、窒素雰囲気 450℃での熱分解により、重量減少は当初の 8.69kg から 3.12kg となった。3.12kg の大半が鉛である。450℃の数時間で漁網の組成は熱分解しいている。

ⅱ)処理前の試料の放射性セシウム汚染濃度は 2,027Bq/kg であった。熱分解後の放射能濃度は 410Bq/kg の測定値である。

		熱処理前				熱処理後					備考
		重量(Kg)	容積(L)	放射能濃度(Bq/Kg)	放射能量(Bq)	重量(Kg)	容積(L)	放射能濃度(Bq/Kg)	放射能量(Bq)	鉛回収の有無	
1.魚網(1)	鉛有 太い	8.69	13.03	2,027	17,600	3.12 (鉛3.02)	5.77	410 鉛 52 炭素 36,000	1,280	有	漁網の繊維分はほとんどがガス化し、処理後の重量は、ほぼ鉛である。

ⅲ)漁網(1)の減量化率は、62.4%、{100-(3.12/8.69)×100≒64. 20}、減容化率は 55.7%、{100-(5.77/13.03)×100≒55.72}との結果となった。漁網鉛有の試料は、残渣物はほとんどが鉛粒の重量である。残渣物には、放射性セシウムが濃縮されている。

漁網(1)	減量化率、減容化率	
	減量化率	64.20%
	減容化率	55.72%

(3)放射能の挙動

	試験対象物	放射能			試料材質
		Cs-134【Bq/kg】	Cs-137【Bq/kg】	Cs-134+Cs-137【Bq/kg】	
熱処理前の試料	水洗浄なし	487	1,540	2,027	ポリエチレン
	水洗浄後の試料	280	856	1,136	ポリエチレン
熱処理後の試料	熱処理後の残渣物	305	105	410	灰化物
	ふるい選別後の炭素	8,690	27,300	35,990	灰化物
	水洗浄後の鉛	17.6	68.2	85.8	鉛
	タール水	86.2	<7.02	<8.84	ポリエチレン(熱分解後)

ⅰ)漁網(1)の水洗浄により放射性セシウム濃度は 2,027Bq/kgから 1,136Bq/kgとなり、44%の放射性セシウムが洗浄された。

ⅱ)熱処理後の残渣物の放射性セシウム濃度は 410Bq/kg であり、ふるい選別後の残渣物は 35,990Bq/kgであった。

熱処理前の漁網 2,027Bq/kg から熱処理後の残渣物の 35,990Bq/kgとなり熱分解処理により約 18 倍に放射性セシウムは濃縮されている。

鉛粒やタール水の放射性セシウム濃度などから放射性セシウムのほとんどが残渣物である炭素粉末に残留していると推測される。

ⅲ)水洗した鉛粒の放射性セシウム濃度は 85.8Bq/kgであり、クリアランスレベルの 100Bq/kg以下となった。これは、鉛再利用の可能性を示唆するものである。

ⅳ)タール水の放射能濃度は不検出であった。

4.2 漁網(2)の試験

(1)漁網(2)の処理前後の外観

熱処理前

熱処理後

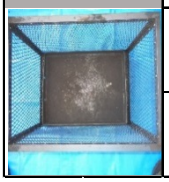
(2)熱処理結果

		熱処理前				熱処理後					備考
		重量(Kg)	容積(L)	放射能濃度(Bq/Kg)	放射能量(Bq)	重量(Kg)	容積(L)	放射能濃度(Bq/Kg)	放射能量(Bq)	鉛回収の有無	
2.魚網(2)	鉛無	5.37	8.57	653	3,510	0.07	0.05	24,800	1,740	無	漁網の繊維分はほとんどがガス化している。

ⅰ)主成分が炭化水素系高分子樹脂繊維である漁網(2)を 450℃で窒素雰囲気で熱分解した。漁網(2)は鉛なしの素材であるため、5.37kg の漁網が、熱分解により 0.07kg にまで重量減少をしている。

ⅱ)漁網(2)の 98.7%の重量が 450℃の熱分解プロセスでガス化している。放射能バランスは、熱処理前では 3,510Bq の放射性セシウム量が、熱分解残渣物には 1,740Bq の放射性セシウム量となった。この数値の差は、熱分解前の分析測定用の試料採取と熱分解後の熱分解残渣物からの分析用試料採取の濃度バラツキ等によるものと想定している。

ⅲ)漁網・鉛無の容積の減容化率を計算すると、99.4%になる。鉛も無くほとんどの漁網繊維体積は熱分解してガス化している。

漁網(2)	減量化率、減容化率		備考
	減量化率	98.80%	鉛の含有は無し
	減容化率	99.47%	漁網の繊維分ほとんどがガス化した。

(3)放射能の挙動

	試験対象物	放射能			試料材質
		Cs-134【Bq/kg】	Cs-137【Bq/kg】	Cs-134+Cs-137【Bq/kg】	
熱処理前の試料	水洗浄なし	153	500	653	ポリエチレン
	水洗浄後の試料	95.9	267	363	ポリエチレン
熱処理後の試料	熱処理後の残渣物	5,830	19,000	24,830	灰化物
	タール水	90.1	<7.29	<8.87	ポリエチレン(熱分解後)

ⅰ)漁網(2)は鉛を含まない。熱処理前の放射性セシウム濃度は、653Bq/kgであり、水洗浄後の放射性セシウム濃度363Bq/kgであった。44.4%の放射性セシウムが水洗浄で洗浄された。

ⅱ)熱分解後の残渣物の放謝性セシウム濃度は 24,830Bq/kgとなり、653Bq/kg の 38 倍の濃度に濃縮されている。

ⅲ)タール水の放射能濃度は検出限界以下の値である。

4.3 漁網(3)＋落葉の試験

(1)漁網(3)＋落葉の処理前後の外観

熱処理前

熱処理後

(2)熱処理結果

		熱処理前				熱処理後					備考
		重量(Kg)	容積(L)	放射能濃度(Bq/Kg)	放射能量(Bq)	重量(Kg)	容積(L)	放射能濃度(Bq/Kg)	放射能量(Bq)	鉛回収の有無	
3.魚網(3)＋落葉	鉛有落葉	16.42 魚網 10.44 落葉 5.98	34.5	413,000 魚網 417 落葉 1,132,000	6,770,000	8.18	12.30	248,000 鉛 23,780 炭素 941,000	2,030,000	有	魚網+ｾｼｳﾑ汚染の落葉試料の負荷。

ⅰ)漁網(3)の主成分は炭化水素系高分子樹脂の繊維であり、16.42kg の試料は、8.18kg の残渣物になり、50.2%の重量が熱分解反応により減少している。

漁網(3)＋落葉	減量化率、減容化率	
	減量化率	50.20%
	減容化率	64.30%

ⅱ)417Bq/kg の放射性セシウム濃度の漁網と、1,132,000Bq/kg の濃度の放射性セシウム汚染の落葉を混合し、同じ炉で熱分解している。この時に 248,000Bq/kg の放射能濃度の残渣物が生成される。熱分解前の 16.42kg の試料では 6,770,000Bq の放射能量であったものが、熱分解後には 8.18kg の熱分解残渣物になり、2,030,000Bq の放射能量を確認している。

ⅲ)放射能バランスが乱れている理由は熱処理後の残渣は鉛と炭素残渣物の混合物で現在測定値として 248,000Bq/kgが記載されているが、実態はもっと大きいものと考えられる。

(3)放射能の挙動

	試験対象物	放射能			試料材質
		Cs-134【Bq/kg】	Cs-137【Bq/kg】	Cs-134+Cs-137【Bq/kg】	
熱処理前の試料	水洗浄なし 漁網	107	310	417	ポリエチレン
	水洗浄なし 落葉	275,000	857,000	1,132,000	なし
熱処理後の試料	熱処理後の残渣物	59,700	188,000	247,700	灰化物
	ふるい選別後の炭素	229,000	712,000	941,000	灰化物
	水洗浄後の鉛	475	1,570	2,045	鉛
	タール水	91.9	<6.72	<8.50	ポリエチレン(熱分解後)

ⅰ)417Bq/kgの放射性セシウム濃度である漁網と放射性セシウム濃度が1,132,000Bq/kgの落葉と混合し、試験を行った。

ⅱ)熱分解後の漁網残渣物と鉛の混合物は、247,700Bq/kgの濃度を示した。ふるい選別後の残渣物炭素は941,000Bq/kg の濃度を示している。

ⅲ)タール水の放射性セシウム濃度は不検出であった。

5.処理困難廃棄物の試験結果

5.1 農業用塩化ビニール類の試験

(1)農業用塩化ビニール類の処理前後の外観

熱処理前

熱処理後

(2)熱処理結果

	熱処理前				熱処理後				備考
	重量(Kg)	容積(L)	放射能濃度(Bq/Kg)	放射能量(Bq)	重量(Kg)	容積(L)	放射能濃度(Bq/Kg)	放射能量(Bq)	
5.農業用塩化ビニール類	2.78	37.11	2,310	6,420	0.30	0.05	44,600	13,400	99%減容している

ⅰ)農業用塩化ビニールの主成分は炭化水素系の高分子樹脂繊維であり、これを窒素雰囲気の 450℃で熱分解すると、当初の試料 2.78kg が、0.30kg の残渣物に重量減少している。

ⅱ)重量の減量化率は 89.2%、容積の減容化率は 99.9%と計算される。

排ガス測定			
測定物質	濃度	単位	分析方法
メタノール	130	ppm	ガスクロマトグラフ分析法
ブタン	2		
メタン	28		

農業用塩化ビニール類	減量化率、減容化率	
	減量化率	89.20%
	減容化率	99.90%

ⅲ)熱処理実証試験用に採取した農業用塩化ビニール類の放射性セシウム濃度が 2,305Bq/kg であり、熱処理後の残渣物の放射性セシウム濃度は、44,600Bq/kg であった。約 19.3 倍に放射性セシウムが残渣物に閉じ込められて濃縮されている。

(3)放射能の挙動

	試験対象物	放射能			試料材質
		Cs-134【Bq/kg】	Cs-137【Bq/kg】	Cs-134+Cs-137【Bq/kg】	
熱処理前の試料	水洗浄なし	525	1,780	2,305	ポリエチレン
熱処理後の試料	熱処理後の残渣物	10,700	33,900	44,600	灰化物
	タール水	<7.47	<7.71	不検出	ポリエチレン(熱分解後)

ⅰ)処理前の農業用塩化ビニール類の放射性セシウム濃度は、2,305Bq/kg であった。

ⅱ)最初の 2,305Bq/kg の濃度が、残渣物の放射性セシウム濃度は 44,600Bq/kgであった。放射性セシウムは 19 倍に濃縮されている。

ⅲ)タール水は不検出の結果であった。

5.2 災害混合廃棄物の試験

(1)災害混合廃棄物の処理前後の外観

熱処理前

熱処理後

(2)熱処理の結果

	熱処理前					熱処理後				備考
	重量(Kg)		容積(L)	放射能濃度(Bq/Kg)		放射能量(Bq)	重量(Kg)	容積(L)	放射能濃度(Bq/Kg)	放射能量(Bq)	
6.災害混合廃棄物	6.20		32.62	394,000		2,440,000	2.26	10.90	3,100,000	7,010,000	木材・竹+ジュースケース+落葉の混合試料
	木材	2.56		木材	143,000						
	樹脂	1.56		樹脂	6,970						
	落葉	2.08		落葉	990,000						

実証試験時の汚染状況測定			
測定場所	濃度	単位	測定方法
炉内壁	$<1.1\times10^{-1}$	Bq/cm^2	GM
タール液	不検出	Bq/kg	Ｇｅ
排気ガス	$<1.2\times10^{-7}$	Bq/cm^3	※GM

※GM 実測方法:「排気系ガスをダストサンプラー配管に導き、設置したろ紙へ放射性塵埃・エアロゾル等を付着させて、ろ紙を検査開発㈱(茨城県東海村)にて GM 計数管測定器で測定した。

ⅰ)6.20kg の木材・ジュースケース・落葉の災害混合廃棄物は、500℃の窒素雰囲気での熱分解により 2.26kg の残渣物になり、減量化率は 63.5%となった。

災害混合廃棄物	減量化率、減容化率	
	減量化率	63.50%
	減容化率	66.60%

ⅱ)木材・ジュースケース・落葉から構成される災害混合廃棄物の処理前の総放射能量は、2,440,000Bq であり、熱処理後の残渣物の総放射能量は 7,010,000Bq である。放射能比で数値の上では 2.9 倍の値になっている。

ⅲ)放射能バランスが 2.9 倍に増大している理由は木材、樹脂、落葉の 3 種の熱分解残渣の放射性セシウム濃度測定値 3,100,000Bq/kgが、3種の木材・樹脂・落葉の熱分解残渣の平均値を示していないとためと考えられる。①熱分解前の試料のサンプリング、②熱分解後の残渣試料のサンプリングプロセスで落葉の濃縮された残渣物炭素系粉末と木材や樹脂の残渣物が非均質に残留し、これらの影響も含まれていると想定される

(3)放射能の挙動

	試験対象物	放射能			試料材質
		Cs-134【Bq/kg】	Cs-137【Bq/kg】	Cs-134+Cs-137【Bq/kg】	
熱処理前の試料	水洗浄なし 木材	34,900	108,000	142,900	なし
	水洗浄なし ｼﾞｭｰｽｹｰｽ	1720	5250	6970	ポリエチレン
	水洗浄なし 落葉	240,000	750,000	990,000	なし
熱処理後の試料	熱処理後の残渣物	751,000	2,350,000	3,101,000	灰化物
	タール水	<4.18	<6.87	不検出	ポリエチレン（熱分解後）

ⅰ)熱分解前の木材放射性セシウム濃度は 142,900Bq/kg、ジュースケース放射性セシウム濃度は 6,970Bq/kg、木の落葉の放射性セシウム濃度は990,000Bq/kgである。

ⅱ)熱分解後の残渣物放射能濃度が、3,101,000Bq/kgとなっている。

ⅲ)タール水は不検出の結果であった。

6. 鉛回収の放射能濃度

(1)水洗浄により、残渣物炭素と鉛の分離を確認し、鉛粒を回収した。

漁網の水洗浄状況（写真下）

(2)篩選別により残渣物炭素と鉛の分離を確認し、鉛粒を回収した。

鉛の篩選別の状況(右写真)

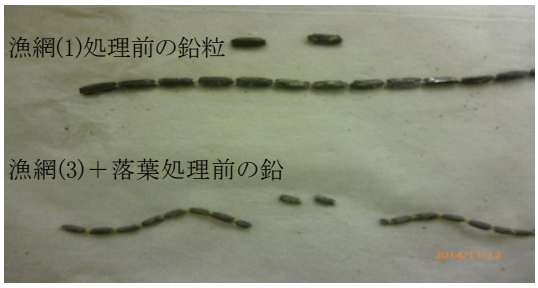
(3)放射濃度の低い漁網(1)から回収した鉛については、乾式の篩選別では、鉛の放射能濃度は52Bq/kgであった。一方、水を用いた洗浄では、鉛の放射能濃度が、86Bq/kgとなり、いずれの場合もクリアランスレベル(100Bq/kg)を下回る結果で、再利用の可能性があることを確認した。ただし、漁網(3)＋セシウム汚染の落葉試料により放射性セシウムを負荷した試料から回収した鉛粒については、水洗浄により一定の濃度低下はあったものの、洗浄のみではクリアランスレベル以下とはならなかった。

○漁網(1)の処理前後の放射能濃度

	放射能濃度(Bq/Kg)		
	処理前	処理後	
篩分別	2,030	鉛	52
		炭素	36,000
水洗浄		鉛	86
		炭素	－

○漁網(3)＋落葉の処理前後の放射能濃度

	放射能濃度(Bq/Kg)		
	処理前	処理後	
篩分別	413,000	鉛	23,780
		炭素	941,000
水洗浄		鉛	2,045
		炭素	－



漁網(1)の処理後の鉛

漁網(3)＋落葉の処理

7.まとめ

鉛含有漁網及び農業用塩化ビニール類、災害混合廃棄物の熱分解処理を実施した結果、いずれの廃棄物も安全に処理できる可能性が確認された。以下に、その結果を示す。

(1)鉛含有漁網の熱分解処理

熱分解処理により、鉛含有の漁網から鉛粒を回収できることを確認した。また、繊維成分のほとんどは残渣物とならず、ガス化したことを確認した。

漁網の中に編み込まれた鉛の大きさは長さ 6.06mm 円柱状のものと長さ 3.46mm のものがあった。450℃での熱分解試験により鉛は 328℃で溶融して粒状になり長さ 2.07mm と長さ 1.66 ㎜の鉛粒になっていた。これは、当初の円柱状のものが溶融により液体の表面エネルギーを最小にする化学的特性として球体化したものと考える。

漁網(1)	減量化率、減容化率	
	減量化率	64.20%
	減容化率	55.72%

漁網(3)＋落葉	減量化率、減容化率	
	減量化率	50.20%
	減容化率	64.30%

(2)鉛含有漁網の熱分解処理による回収鉛の物性確認

放射能濃度の低い漁網(1)から回収した鉛粒については、水洗浄でクリアランスレベル

100Bq/kg を下回る 86Bq/kgとなり、再利用の可能性があることを確認した。ただし、セシウム汚染の落葉を負荷した漁網から回収した鉛粒については、水洗浄では十分な濃度低減を確認できなかったため、さらなる鉛の洗浄が必要であったと考えられる。

(3)処理困難廃棄物の熱分解処理

塩化ビニール類の熱処理では、最大約 99%の減容化率、約 89%の減量化率を確認した。

災害混合廃棄物については、約 67%の減容化率、約 64%の減量化率を確認した。

農業用塩化ﾋﾞﾆｰﾙ類	減量化率、減容化率	
	減量化率	89.20%
	減容化率	99.90%

災害混合廃棄物	減量化率、減容化率	
	減量化率	63.50%
	減容化率	66.60%

(4)熱分解処理後の生成ガス再利用

熱分解処理後の残渣炭化物は微量であり、今回の対象物では助燃材等としての再利用の可能性は見出せなかった。また、ガスについても、今回の実証試験からは成分的に燃料利用等の可能性は見出せなかった。

農業用塩ビの排ガス測定値

排ガス測定			
測定物質	濃度	単位	分析方法
メタノール	130	ppm	ガスクロマトグラフ分析法
ブタン	2		
メタン	28		

(5)熱分解処理による放射能移行確認

熱分解装置内の①採取試料の検査結果、②タール液、③排気ガスの分析結果では放射性セシウムは不検出または検出限界以下であったことを確認した。このことから、放射性セシウムは気体へ移行していないと考えられる。

漁網(3)＋落葉の検査結果

実証試験時の汚染状況測定			
測定場所	濃度	単位	測定方法
炉内壁	$<1.1\times10^{-1}$	Bq/cm^2	GM
タール液	不検出	Bq/kg	Ｇｅ
排気ガス	$<1.0\times10^{-7}$	Bq/cm^3	GM

(6)放射性セシウムの鉛Pbへの移行について

今回、鉛の金属の分析は出来ていない。鉛内部へのセシウムの固溶は評価できなかった。

しかし、水洗浄で鉛粒表面の汚染粉末等は清浄化されため、回収鉛の洗浄方法をさらに工夫すれば一層の除染が期待される。回収鉛の再利用の可能性があると考えられる。

8.コスト評価(概算)

(1)コスト評価の前提として、10 m^3/日の性能の熱分解炉を、年間 300 日運転、5 年継続使用した場合の概算の運転コストを評価した。

□熱分解装置　10 ㎥/日処理用　 5 年稼働のコスト評価

ⅰ)熱分解装置価格

10 ㎥/日処理用　　750,000 千円　24 時間稼動　2 バッチ設定

小　　計　　750,000 千円

ⅱ)人件費

作業員　4,000 千円/年×4 人/日×5 年	80,000 千円
オペレーター　5,000 千円/年×2 人/日×5 年	50,000 千円
小　　計	130,000 千円

ⅲ)ユーティリティ

電気料 12,000 千円/年×5 年	60,000 千円
メンテナンス費用 2,400 千円/年×5 年	12,000 千円
中和剤 480 千円/年×5 年	2,400 千円
その他 600 千円/年×5 年	3,000 千円
排水処理 72 千円/年×5 年	3,600 千円
小　　計	81,000 千円
合　　計	961,000 千円

(2)1 ㎥処理量/64 千円

単価算出根拠

10 ㎥/日×300 日/年×5 年＝15,000　年間処理量　15,000 ㎥

装置価格	750,000 千円÷15,000 ㎥＝50 千円
人件費	130,000 千円÷15,000 ㎥＝9 千円
ユーティリティ	81,000 千円÷15,000 ㎥＝5 千円
合　　計	64 千円/㎥

9.今後の課題

小規模レベルの熱分解炉を用いて鉛含有漁網や塩化ビニールなど処理困難廃棄物の熱分解が可能であることが確認できたが、今後、これらの廃棄物を処理する場合の課題について以下に示す。

(1)熱分解処理を窒素雰囲気下でバッチ処理を行うことから、鉛含有漁網や塩化ビニール等処理困難廃棄物の性状や処理量に応じて、窒素ガス供給速度や供給時間等の最適化が必要となる。

(2)熱分解前の洗浄により予め処理物の放射能濃度を低下することが有効との知見が得られ、実際の熱分解処理を計画する場合は、洗浄プロセスの導入の検討が必要となる。

(3)熱分解処理による放射性物質の大半が炭化物に濃縮することが確認されたため、熱分解処理物の取り出し時や鉛回収時の洗浄処理時など、放射能濃度を含有する炭化物による外部被ばくや内部被ばくを低減するための装置や手順の確立が実機適用時は必要となる。

実施代表者の所属機関：共和化工株式会社

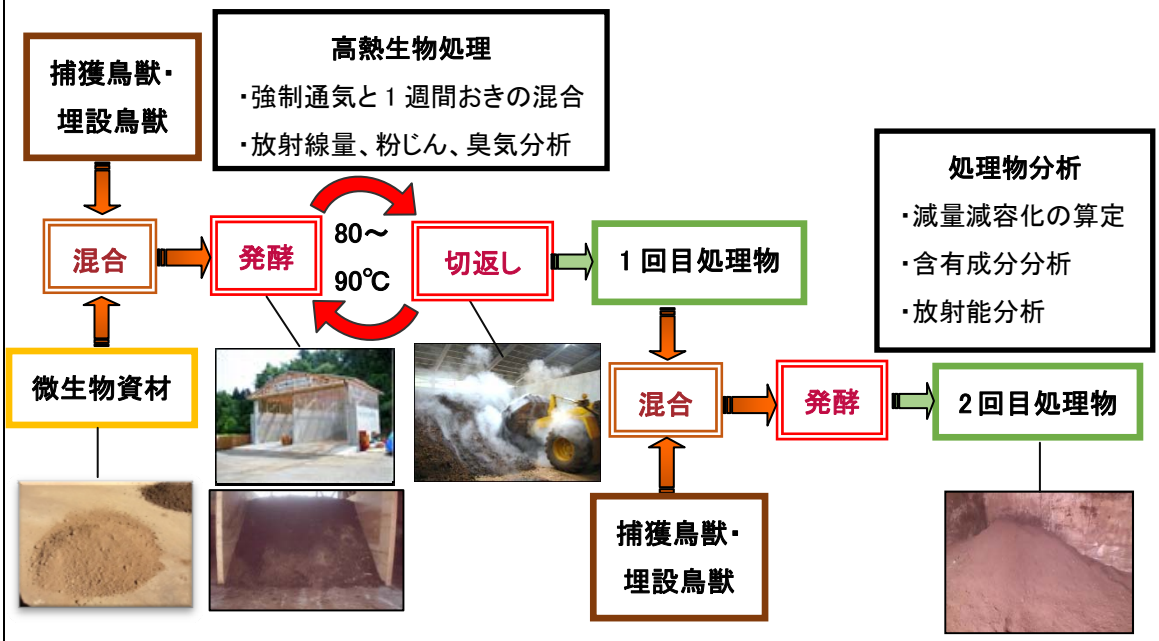
実証テーマ名：捕獲有害鳥獣の安全な処理システムの実証

事業の概要：放射能汚染された有害捕獲鳥獣及び埋設鳥獣の高熱生物処理技術を実証する。本技術の効率性、処理物の保管上の安全性、被焼却性等を検証する。

実施内容：(1)捕獲鳥獣、埋設鳥獣の高熱生物処理を 2 回の連続処理で行う。(2)放射性物質の移行状態を検証する。(3)処理時の環境影響(放射線量、粉じん、臭気等) を評価する。(4)処理物の微生物資材としての循環利用性を評価する。(含有成分分析、放射性物質の溶出試験、微生物叢の確認等)

技術概要：

「試験フロー」



「試験目標」

1. 捕獲鳥獣または埋設鳥獣の連続処理において、保管上の安全性があり、かつ微生物資材として循環利用または最終処理(焼却等)可能な処理物を得る。

2. 処理時の粉じん、臭気および放射線量に対する影響評価を行い、作業時の安全対策マニュアル作成のためのデータを得る。

「期待される効果」

1. 鳥獣埋設処理の問題点(埋設地の不足、環境衛生面の悪化)を解決することができる

2. 処理物を循環利用できるため、資材費や処理物の保管スペースが少なくて済む

3. 放射能汚染家畜など様々な動物性廃棄物処理への応用が可能

実証効果：表1. 減容・減量効果

試験材料	回数	実証前			実証後			減容・減量効果		
		容積	重量	乾重量	容積	重量	乾重量	減容率	減量率	減量率乾
		[㎥]	[t]	[t]	[㎥]	[t]	[t]	[%]	[%]	[%]
捕獲鳥獣(a)	1回目	0.85	0.85	0.22				17	33	21
(a)＋資材		13.20	10.82	7.01	10.95	7.20	5.51			
捕獲鳥獣(a)	2回目	0.85	0.86	0.21				23	26	7
(a)＋資材	※1	16.22	11.06	7.23	12.54	8.20	6.74			
埋設鳥獣(b)	1回目	8.60	11.20	7.53				17	30	14
(b)＋資材		25.50	25.60	16.93	21.10	17.98	14.62			
埋設鳥獣(b)	2回目	8.81	11.45	9.31				20	22	8
(b)＋資材	※2	26.44	26.25	18.09	21.12	20.46	16.67			

※1　1回目での捕獲鳥獣量が少なかった影響により、容積確保のために微生物資材 2t を追加投入。また水分調整のため水 1　t を追加。
※2　1回目処理物 17.98　t のうち、10.8　t を循環利用し、7.18 t を余剰分として保管。また水分調整のため水 4　t を追加。

表2. 捕獲鳥獣、埋設鳥獣および処理物中の放射性物質

	投入物(a)	処理物(b)	b/a
	[Bq]	[Bq]	[%]
捕獲鳥獣1回目処理物	806,489	828,000	102.7
捕獲鳥獣2回目処理物	1,196,566	1,025,000	85.7
埋設鳥獣1回目処理物	3,032,081	3,092,560	102.0
埋設鳥獣2回目処理物	3,955,721	3,662,340	92.6

表3. 処理物の成分

試験材料	水分	灰分	可燃分	高位発熱量	低位発熱量
	[%]	[%]	[%]	[kJ/kg]	[kJ/kg]
捕獲鳥獣	23.63	44.22	32.15	5,710	4,440
埋設鳥獣	15.87	60.84	23.29	4,930	4,010

【減容・減量効果（表 1）】
- 捕獲鳥獣は微生物資材とともに分解され、減量効果を確認した
- 埋設鳥獣では捕獲鳥獣と同等程度の効果が確認できた
- 埋設鳥獣に混在する土壌の影響を長期の循環利用において検証する必要がある

【放射性物質マスバランス（表 2）】
- 放射性物質は処理物に残留し、粉じんへの移行は見られなかった
- 処理物濃度は捕獲鳥獣で 125 Bq/kg、埋設鳥獣で 179 Bq/kg であった

【処理物の特性・安全性】
- 処理物はごみ質分析の結果から焼却可能であることが示された（表 3）
- 処理物は低水分で灰分が高く、低位発熱量が約 4,000[kJ/kg]であり、火災等の危険性は低い（表 3）
- 腐敗鳥獣由来の病原菌（破傷風菌、ボツリヌス菌、豚丹毒菌等）は死滅した

【環境評価】
- 混合作業時の発酵槽の粉じん（最大 16.93[mg/m^3]）等対策を講じる必要あり

二次発生物量評価（処理物及びスクラバー循環水）：
捕獲鳥獣：処理物 8.2 [t] ／捕獲鳥獣(0.85×2) [t] ＝処理物発生率 4.8 倍※1
　※1：2 回の連続試験のため、発生率が高いが、鳥獣の増量及び処理物の長期の循環利用で解決できる
埋設鳥獣：処理物(7.18+20.46) [t] ／埋設鳥獣(11.2 +11.45)[t] ＝処理物発生率 1.2 倍※2
　※2：土壌混入の影響を受けるため、長期の循環利用では影響を検討する必要がある
スクラバー循環水：250 L（実設備では規模に応じて脱臭設備からの廃液が発生することを考慮する）

作業員被ばく量評価：作業場所平均空間線量率 0.503μSv/hr、作業時間 675 時間（78 日間）
作業員最大被ばく量　145μSv（観測員、288 時間）、作業員平均被ばく量　84.25μSv

コスト評価：

概算	施設建設費 (千円)	運転管理費 (千円/年)
捕獲鳥獣	66,000	20,000
埋設鳥獣	100,000	30,000

歩掛り：

	作業人工		作業速度(t/日)	
	実証試験(人工/t)	実設備(人工/年)	実証試験	実設備
捕獲鳥獣	1.18	2	0.02	1
埋設鳥獣	0.088	2	0.266	5

コスト評価条件：処理速度　捕獲鳥獣 1 t/日、埋設鳥獣　5 t/日の建設費及び運転管理費

除染作業における安全上の注意：ヘルメット、メガネ、防塵マスク、防護服等の着用。

試験場所（住所）：福島県南相馬市

除去物保管場所と保管状況（写真）：フレキシブルコンテナに詰め、試験場所に一時保管した後に、当社保管場所に移動予定。

1. 背景及び目的

写真 1. 捕獲鳥獣

福島県ではイノシシ等の有害鳥獣の生息数が急増し、離農や帰還事業に深刻な影響を与えている。ほとんどの個体は食肉の規制値 100[Bq/kg]を超えているため、捕獲後は焼却や埋設等により処理しなければならない。各自治体では、作業面や技術面、処理費用面から焼却処理を進めることが困難なため、集中的に埋設処理を実施しているが、埋設場所の逼迫、放射性汚染物質の管理、埋設死体の腐敗による環境汚染リスク等の問題があり、埋設に代わる有効で安全な処理システムの事業化が早急に望まれている。

本事業では、捕獲された有害鳥獣の最終処理(焼却等)の前段階処理として、①処理期間が短くて済む、②動物の死体をそのまま直接処理できる、③処理物の減量減容割合が高い、という特徴を有する好気性高熱菌群を用いた高熱生物処理技術の実証を行い、安全性・効率性及び保管に関する安全性等を検証した。

2. 実施項目

2.1 高熱生物処理の実証施設(図 1)

- 発酵槽(幅 3.0 m、奥行き 5.1 m、高さ 2.8 m)2 槽(捕獲鳥獣用、埋設鳥獣用)
- 混合用のホイールローダー及びブロワーによる床下からの給気による好気性発酵システム
- 排ガス(粉じん及び臭気)捕集用スクラバー

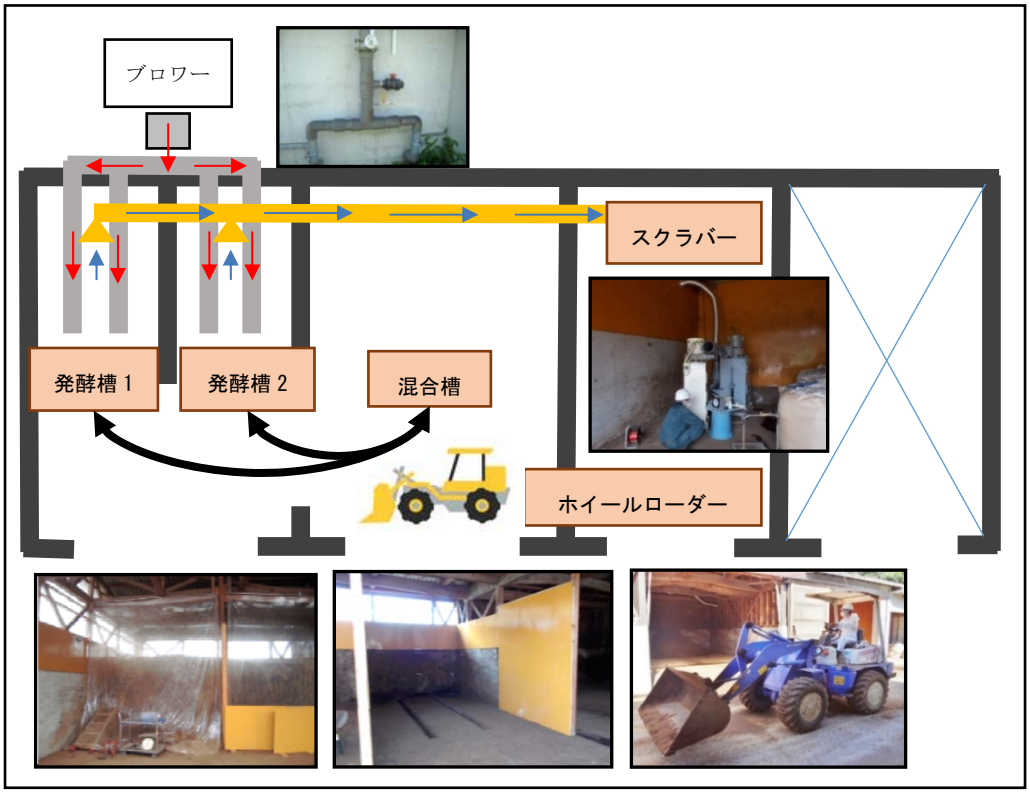


図 1. 実証施設及び設備の概要

2-2. 捕獲鳥獣及び埋設鳥獣の準備

(1) 捕獲鳥獣の状況

・福島県南相馬市内で捕獲されたイノシシは体重 7-100 kg、体長 50-140 cm と大小様々であった。大腿筋の一部を採取し、放射性セシウム濃度を分析した結果、109-5,200 Bq/kg と個体ごとに放射能汚染の差が見られた。約 850 kg（1 回目 16 頭、2 回目 37 頭）を実験に供した。

写真 2. 捕獲鳥獣の計測および試料採取の様子

・捕獲鳥獣の生体あたりの放射性物質量は以下の計算式（●）から算出した。

イノシシの筋肉の割合	41.18%
日本養豚研究会誌（24 巻, 4 号, 1989 年）	
ウシの筋肉へのセシウム分布比	68.75%
日本獣医師会雑誌　65　645-652(2012)	

生体中のセシウム量[Bq]＝生体重[kg]×0.4118×筋肉中セシウム濃度[Bq/kg]/0.6875

● 生体中のセシウム量[Bq]＝生体重[kg]×筋肉中セシウム濃度[Bq/kg]×0.599

(2) 埋設鳥獣の状況

福島県南相馬市小高区角部内に埋設されたイノシシの掘削を 2014 年 8 月 6 日および 10 月 9 日に実施し、1 回目 11.2 t、2 回目 11.45 t を実験に供した。イノシシは腐敗が進行し、埋設地の土壌と交じり合った状態であった。放射性セシウム濃度は腐敗部分で 279-2,620 Bq/kg、土壌で 154 Bq/kg であった。

写真 3. 埋設鳥獣の掘削および埋設鳥獣の外観

2-3. 高熱生物処理

(1) 運転管理

・捕獲鳥獣及び埋設鳥獣の重量をトラックスケール等で計測し、容積から混合比率を決定した。

・約 45 日間の好気性高熱発酵を経て、処理物を得た。切返し作業は 5-6 回とした。

・1 回目の処理物を重量計測した後で微生物資材として用い、新たに捕獲鳥獣または埋設鳥獣を処理した(2 連続処理)。

・発酵槽の給気量は 0.06 及び 0.16 [m³/min]となるようにバルブを調整した(図 2)。

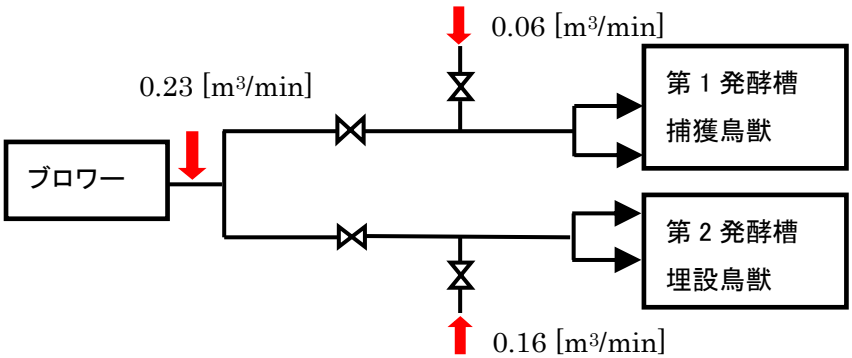


図 2. 発酵槽の給気量

・分解反応中の堆積物は 1 週間おきに交互に入れ替えることにより切返し作業を実施した(図 3)。

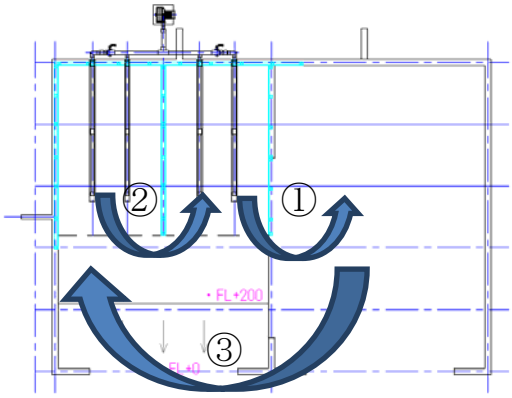


図 3. 捕獲鳥獣・埋設鳥獣処理における混合作業フロー

・埋設鳥獣 1 回目処理の余剰処理物ならびに 2 回目処理物はフレキシブルコンテナに詰めて、実証施設内スペースに保管した(写真 4)。

写真 4. フレキシブルコンテナに保管した処理物

3. 実験結果及び評価

3.1 捕獲鳥獣処理

(1) 混合比率

1 回目は捕獲鳥獣 851.5 kgと微生物資材 8.97 t を混合し、発酵槽に堆積した。2 回目は捕獲鳥獣 859 kgと微生物資材 7.2 t(1 回目処理物)のほかに追加微生物資材 2 t を混合し、発酵させた。1 回目処理では捕獲鳥獣が予定より少なかったため、微生物資材の混合比率がアンバランスとなり、2 回目処理の容積を確保する分の微生物資材を追加投入する必要が生じた。いずれも水分が約 35%となるように、水 1t を加えて調整した。

写真 5. 微生物資材と捕獲鳥獣の混合作業の様子

(2) 温度推移

温度は 75-80℃(熱電対)、80-95℃(アルコール温度計)で推移し、良好な発酵であった。混合作業(切返し)時は水蒸気が上がる様子が見られた。35 日目以降は 75℃まで上がらなくなり、捕獲鳥獣の分解が完了した。

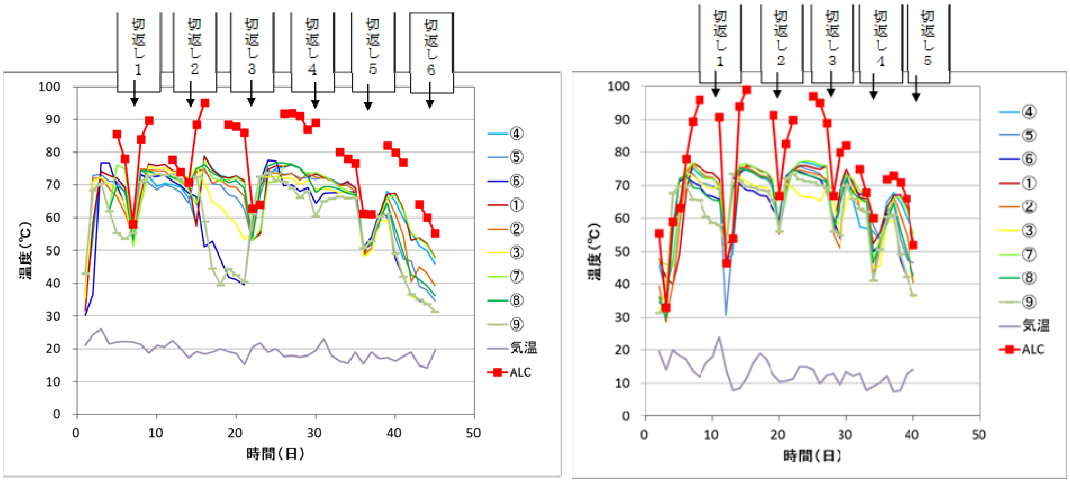


図 4. 捕獲鳥獣 1 回目処理(左)及び 2 回目処理(右)の温度推移

写真 6. 温度計測場所(左)、堆積物上部のアルコール温度計による計測(ALC、右)

(3) 減容・減量効果

処理 1 回目 2 回目ともに、捕獲鳥獣は微生物資材と共に分解され、減量した。

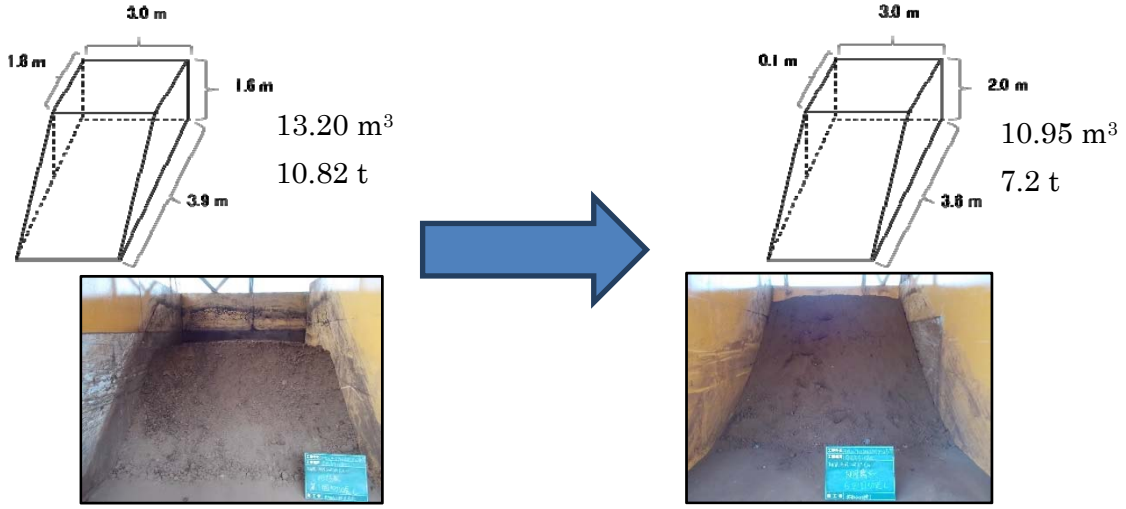


図 5. 捕獲鳥獣処理 1 回目の容積変化（左：開始時、右：45 日目）

表 5. 捕獲鳥獣の減容・減量効果

試験材料	回数	実証前			実証後			減容・減量効果		
		容積	重量	乾重量	容積	重量	乾重量	減容率	減量率	減量率乾
		[m³]	[t]	[t]	[m³]	[t]	[t]	[%]	[%]	[%]
捕獲鳥獣(a)	1回目	0.85	0.85	0.22				17	33	21
(a) + 資材		13.20	10.82	7.01	10.95	7.20	5.51			
捕獲鳥獣(a)	2回目※1	0.85	0.86	0.21				23	26	7
(a) + 資材		16.22	11.06	7.23	12.54	8.20	6.74			

※1： 1回目での捕獲鳥獣量が少なかった影響により、容積確保のために微生物資材2tを追加投入。水分調整のため、水1 t追加。

(4) マスバランス

捕獲鳥獣の放射性セシウムは処理物に残留し、排ガスへの移行は見られなかった。

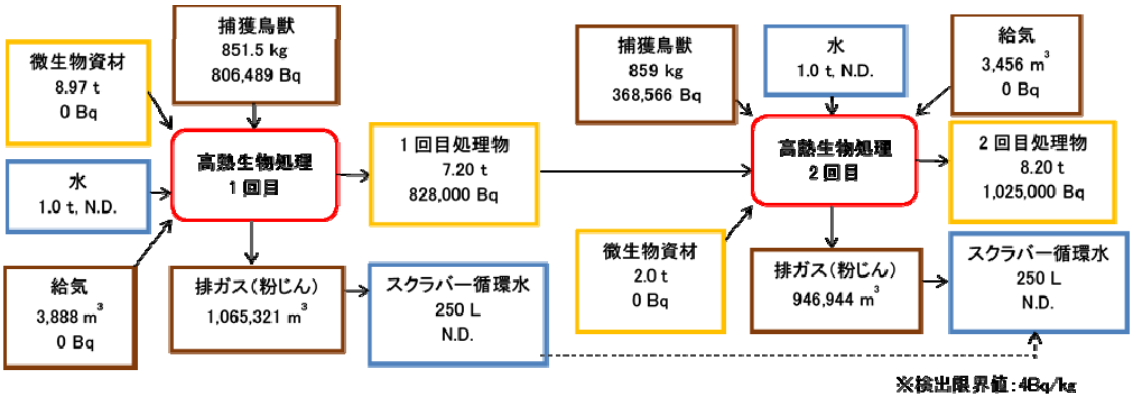


図 6. 捕獲鳥獣処理のマスバランス

3.2 埋設鳥獣処理

(1) 混合比率

1 回目は埋設鳥獣 11.2 t と微生物資材 12.4 t を混合し、水分率が約 33%になるように水 2 t を加えて調整した。埋設鳥獣のほかに土壌が多く混入したことが影響し、1 回目処理物 17.98 t のうち、7.18 t の余剰処理物が発生した。2 回目は埋設鳥獣 11.45 t と微生物資材 10.8 t(1 回目処理物)を 4 t の水を加えて水分調整し、堆積・発酵させた。

写真 7 微生物資材と埋設鳥獣の混合作業の様子

(2) 温度推移

捕獲鳥獣よりも容積を確保したこと等により、長期にわたり 80℃以上に達した。35 日目以降は 80℃よりも上がらなくなり、埋設鳥獣の分解が完了した。

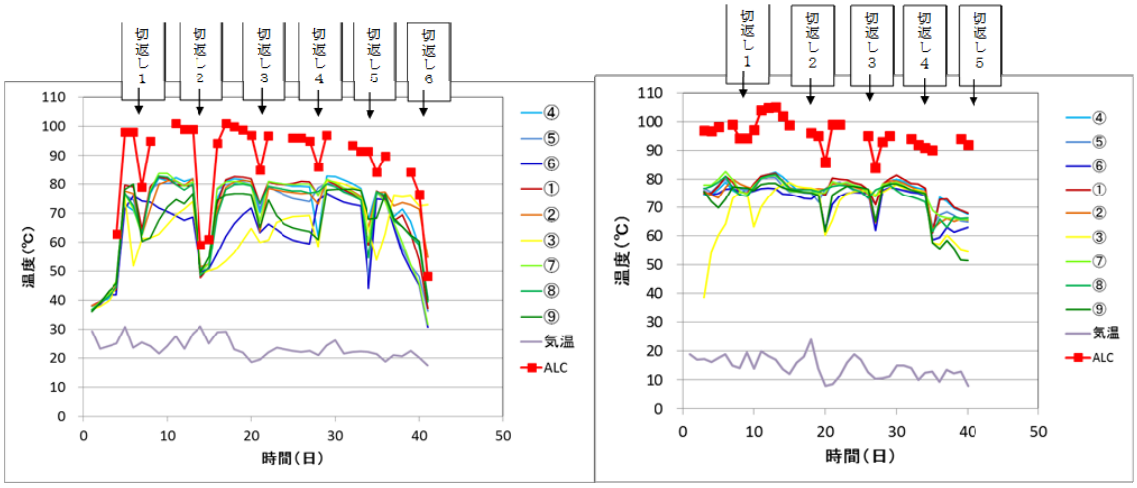


図 7. 埋設鳥獣 1 回目処理(左)及び 2 回目処理(右)の温度推移

(3) 減容・減量効果

埋設鳥獣は捕獲鳥獣と同程度の効果であった。

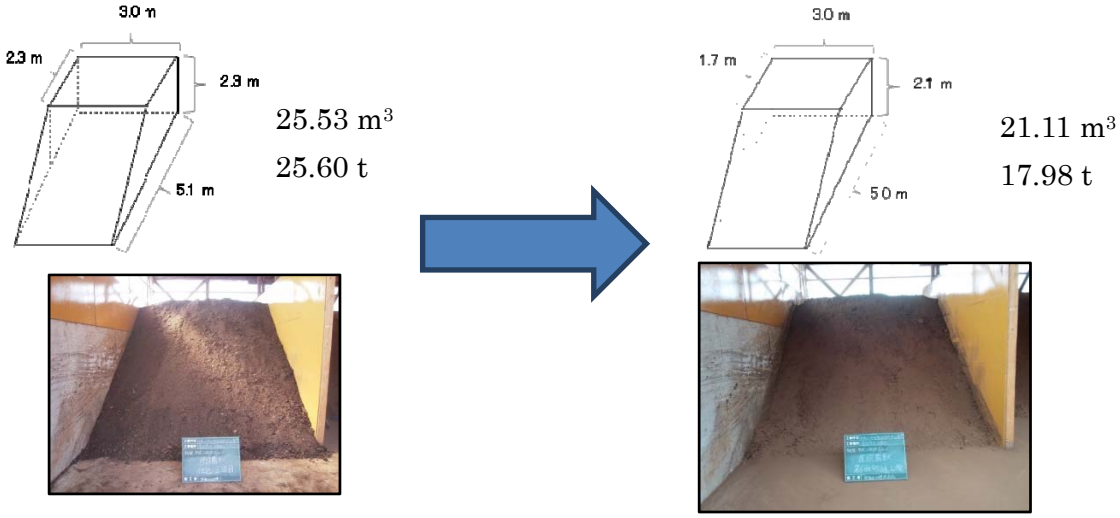


図 8. 埋設鳥獣処理 1 回目の容積変化（左：開始時、右：45 日目）

表 6. 埋設鳥獣の減容・減量効果

試験材料	回数	実証前			実証後			減容・減量効果		
		容積	重量	乾重量	容積	重量	乾重量	減容率	減量率	減量率乾
		[m³]	[t]	[t]	[m³]	[t]	[t]	[%]	[%]	[%]
埋設鳥獣(b)	1回目	8.60	11.20	7.53				17	30	14
(b) + 資材		25.50	25.60	16.93	21.10	17.98	14.62			
埋設鳥獣(b)	2回目※2	8.81	11.45	9.31				20	22	8
(b) + 資材		26.44	26.25	18.09	21.12	20.46	16.67			

※2： 1回目処理物17.98 tのうち、10.8 tを循環利用し、7.18 tを余剰分として保管。水分調整として水4 t追加。

(4) マスバランス

埋設鳥獣の放射性セシウムは捕獲鳥獣処理と同様に、処理物に残留し、排ガスへの移行は見られなかった。

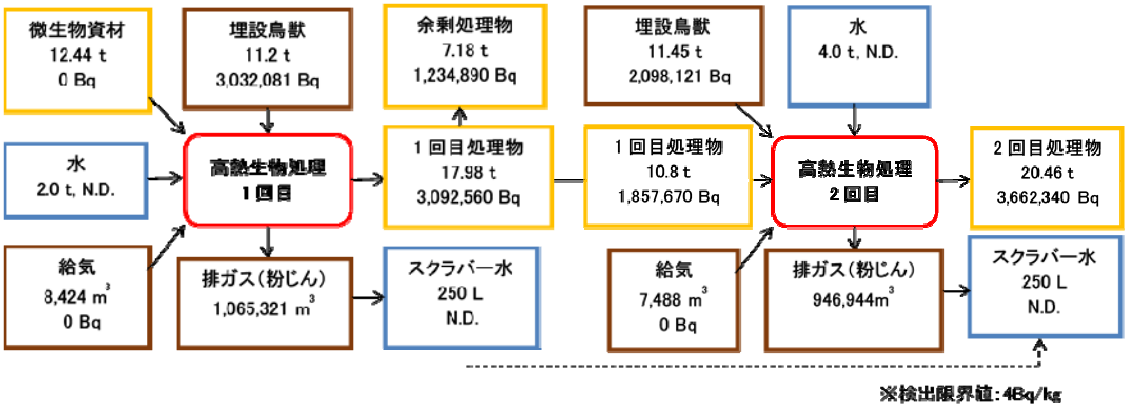


図 9. 埋設鳥獣処理のマスバランス

3.3 処理物の特性

(1) ごみ質分析

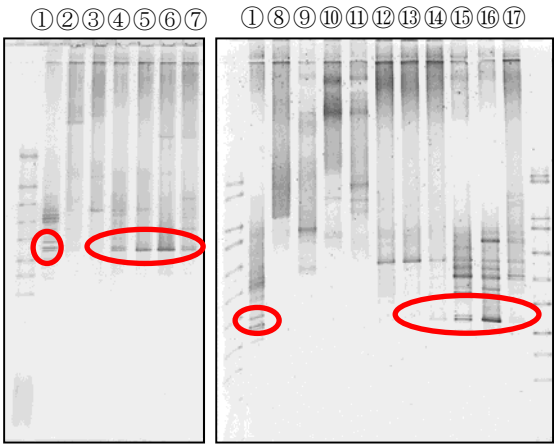
捕獲鳥獣処理物は水分が 23%、可燃分が 32%であり、低位発熱量は 4440 [kJ/kg]であった。埋設鳥獣処理物は水分が低いが、灰分の占める割合が高く、低位発熱量は約 4000 [kJ/kg]であった。いずれも焼却による減量化が可能であることを確認した。成分は低質ごみと同程度であり、処理物自体が火災を引き起こす危険性は低いと考えられた。

表 7. 捕獲鳥獣及び埋設鳥獣処理物のごみ質分析結果

試験材料	水分	灰分	可燃分	高位発熱量	低位発熱量
	[%]	[%]	[%]	[kJ/kg]	[kJ/kg]
捕獲鳥獣処理物	23.63	44.22	32.15	5,710	4,440
埋設鳥獣処理物	15.87	60.84	23.29	4,930	4,010

(2) 微生物叢解析

捕獲鳥獣及び埋設鳥獣処理物の微生物叢解析(16S rDNA PCR 及び変性剤濃度勾配電気泳動法)において *Planifilum* sp.等の遺伝子が高熱生物処理過程及び処理物において強く検出された(図 10、赤い円で示したバンド)。微生物資材の好気性好熱菌群が優勢に活動し、捕獲鳥獣及び埋設鳥獣の発酵分解に大きく関与していること、ならびに処理物が微生物資材と同等の微生物叢を保持していることが示された。



①微生物資材
②捕獲鳥獣切返し 1 回目
③捕獲鳥獣切返し 2 回目
④捕獲鳥獣切返し 3 回目
⑤捕獲鳥獣切返し 4 回目
⑥捕獲鳥獣切返し 5 回目
⑦捕獲鳥獣処理物
⑧埋設土壌
⑨埋設鳥獣 1
⑩埋設鳥獣 2
⑪埋設鳥獣 3
⑫埋設鳥獣切返し 1 回目
⑬埋設鳥獣切返し 2 回目
⑭埋設鳥獣切返し 3 回目
⑮埋設鳥獣切返し 4 回目
⑯埋設鳥獣切返し 5 回目
⑰埋設鳥獣処理物

図 10. 捕獲鳥獣処理物及び埋設鳥獣処理物の菌叢解析

(3) 放射性物質溶出試験

各処理物 2 kg と、それと同量である 2 L の水、1N HCl または 1N NaOH を混合し、20℃で 6 時間振とう混和した。遠心分離(3,000×g、10 分間)後の上澄液と沈殿物を回収し、放射性物質量を計測した結果、放射性セシウムは残渣に存在していた(表 8)。処理物中の放射性セシウムは酸やアルカリに対して安定であると考えられた。

表 8. 処理物溶出処理後の抽出液及び残渣の放射性セシウム濃度 ND; <4 [Bq/kg]

試験材料	水抽出		HCl 抽出		NaOH 抽出	
	抽出液	残渣	抽出液	残渣	抽出液	残渣
	[Bq/kg]					
捕獲鳥獣処理物	ND	51	ND	55	ND	64
埋設鳥獣処理物	ND	122	ND	127	ND	129

3.4. 環境評価

(1) 空間線量率

実証施設周辺における空間線量率は場所ごとの差が見られたものの、実証試験中において顕著な変動は見られず、実証試験による影響はほとんどないことを確認した。

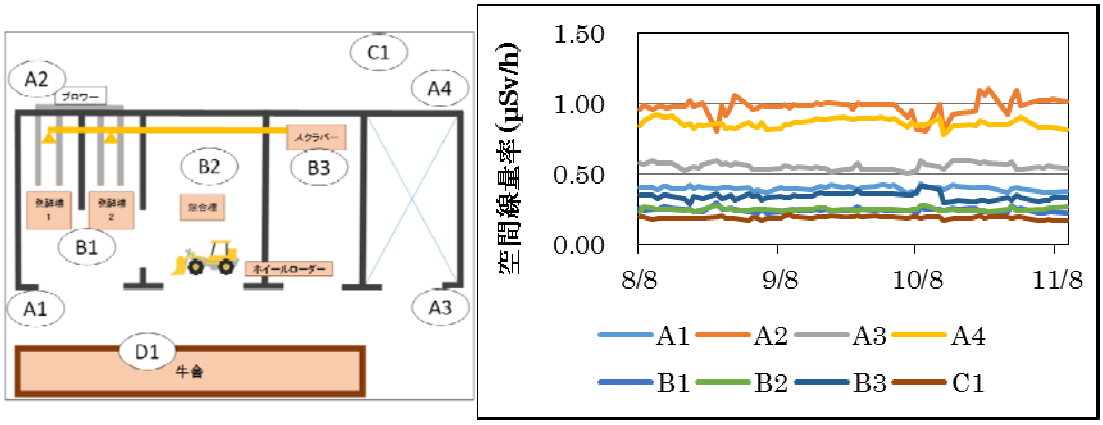


図 11. 実証施設周辺の空間線量率

(2) 粉じん及び臭気

定常時における実証施設内外での粉じん濃度は 0.05～1.61 [mg/m³] であったが、切返し作業時は最大 16.93[mg/m³]を示し、高濃度粉塵作業 (10[mg/m³]以上)に該当することが明らかとなった。したがって、切返し作業時は捕集効率 80%以上の防塵マスクやゴーグルを着用することが望ましい。また、切返し作業時の実証施設外の粉じんは最大 3.73[mg/m³]であったことから、切返し作業時における施設規模に応じた集じん設備が必要である。

アンモニアは敷地境界線では 0.1[ppm]以下であったが、発酵槽において 1-13[ppm]、スクラバー出口において 6-110[ppm]が検出された。メチルメルカプタンは発酵槽において 0.011[ppm]、スクラバー出口で 0.022[ppm]であった。本実証では、スクラバーは集塵用・循環水のみの構造であるため、出口の臭気濃度が高く検出されたと考えられる。

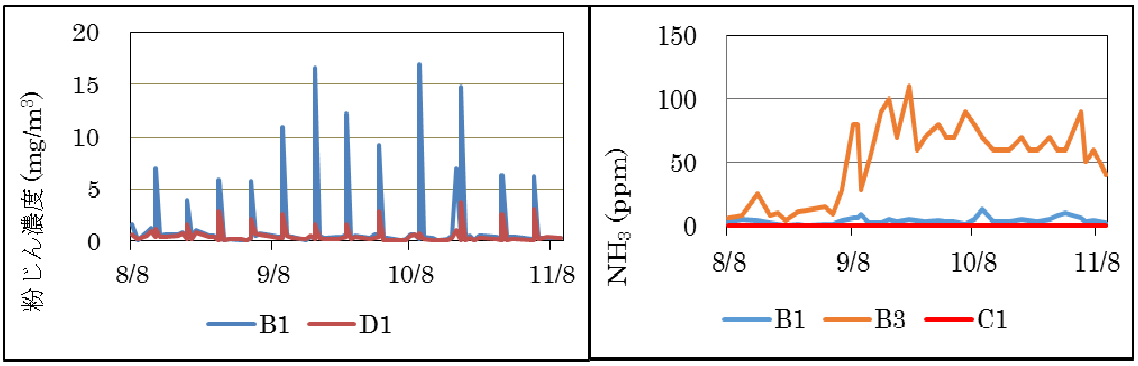


図 12. 発酵槽(B1)、スクラバー出口(B3)、敷地境界線(C1)及び建屋外(D1)における粉じん(左)とアンモニア濃度(右)

(3) 作業員被ばく量

作業員の内訳は観測員 1 名、ホイールローダー従事者 1 名、切返し時の分析作業員 2 名である。

作業員の個人線量積算計及び作業時間記録から、本実証における作業員全体の作業時間は 675 時間(78 日間)であった。また、作業場所の平均空間線量率は 0.499 μSv/hr であった。

作業員最大被ばく量は観測員の 145 μSv (288 時間)となり、作業員平均被ばく量は 84.25 μSv であった。

(4) 病原菌検査

捕獲鳥獣・埋設鳥獣の処理中間物及び処理物について、PCR 法による各種病原菌遺伝子の存在を調べた。その結果、捕獲鳥獣処理においては、切返し 1 回目及び 2 回目の残渣物からボツリヌス菌、ガス壊疽菌群、豚丹毒菌が検出され、埋設鳥獣及び埋設土壌から破傷風菌、ガス壊疽菌群、豚丹毒菌が検出された。処理物では全て不検出であった。本技術により、対象病原菌が増殖することなく死滅・不活化されたことが示され、安全な処理物が得られた。

5. まとめ及び今後の進め方

捕獲鳥獣ならびに埋設鳥獣の高熱生物処理を実施した結果、両者はいずれも分解されることを確認した。2 連続の処理における高温化の達成、好気性好熱菌群の増殖の確認等により、処理物が循環利用可能であることが示された。処理 30 日後から温度が上がりにくくなる傾向が見られ、これを経ることが処理完了の指標の一つとなることを確認した。

開始時に多量の微生物資材と加水が必要になるが、捕獲鳥獣の 1 回の投入量の増加や長期の循環利用により、実規模での処理物の発生量は少なくなると考えられ、捕獲鳥獣の減量が期待できる。一方、埋設鳥獣は周囲の土壌も含めた処理が必要であり、土壌の影響を長期の循環処理において検討することが今後の課題である。

処理物は焼却可能であるが、火災等の危険性は低く、病原菌が死滅していることから、安全性が高く、衛生的である。ただし、風等で飛散しやすいため、フレキシブルコンテナに保管しなければならない。捕獲鳥獣・埋設鳥獣の放射性物質量は処理物に濃縮されるので、処理物の放射能汚染度を必ずチェックし、厳密に管理する。課題として、捕獲鳥獣・埋設鳥獣の処理規模に応じて、適切な集塵構造や脱臭設備を検討する必要がある。

実施代表者の所属機関：大成建設株式会社

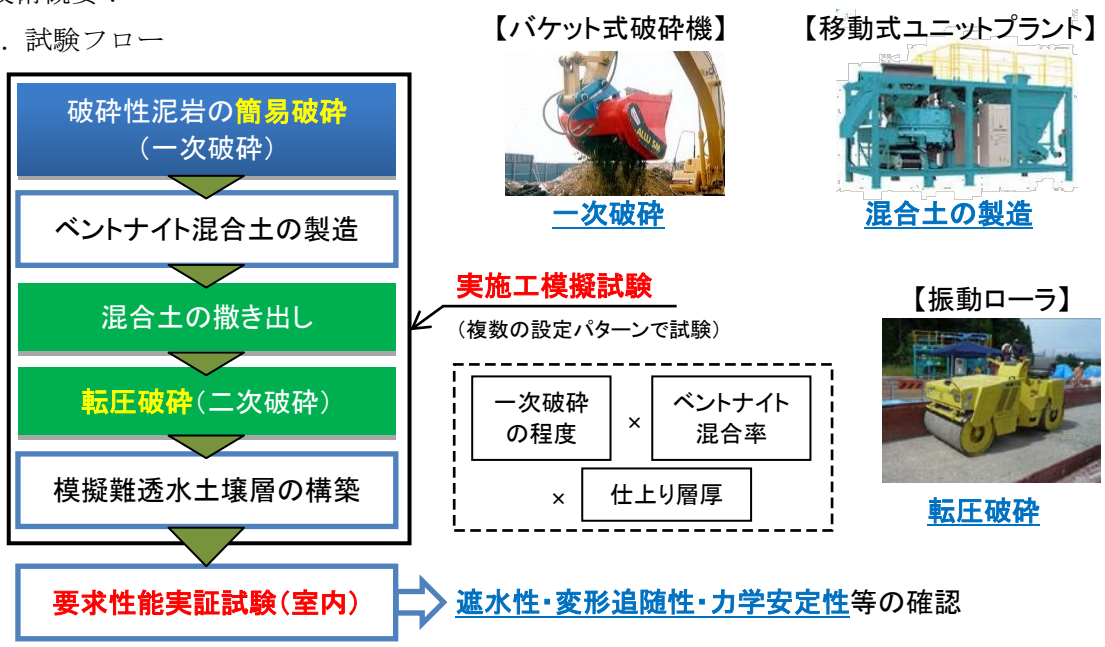
実証テーマ名：簡易的破砕方式による現地掘削土を用いた難透水土壌層の効率的施工技術

事業の概要：中間貯蔵施設造成時に発生する脆弱な破砕性泥岩を想定し、簡易な一次破砕と転圧破砕により密な骨格構造を形成する難透水土壌層の施工方法について、実施工模擬試験を行い、施工した難透水土壌層の遮水性能、力学特性、施工コスト等の評価を行う。

実施内容：①実規模レベルでの実用性・効率性を確認する「実施工模擬試験」、②施工した模擬難透水土壌層の性能を確認する「要求性能実証試験（室内試験）」、③最も実用的かつ効率的なベントナイト混合土の製造・施工パターンの選定、④既存技術（購入砂とベントナイト 10%の混合土を想定）とのコスト比較

技術概要：

1. 試験フロー



2. 試験目標

(1) 良質な母材を用いた既存技術と同等の施工品質の達成

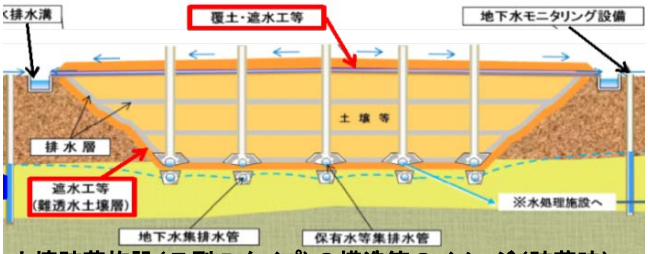
(2) 実用的かつ効率的なベントナイト（Be）混合土の製造・施工条件の抽出

(3) 歩掛りの取得とコスト評価

3. 期待される効果

(1) 実用的かつ効率的な実施工技術の提案

(2) 既存技術に対するコスト削減



土壌貯蔵施設（Ⅱ型Ｂタイプ）の構造等のイメージ（貯蔵時）

その他：

地質の類似性の確認（向山層と大年寺層）：

- 本試験に用いた泥岩（向山層）と中間貯蔵サイトの大年寺層について、「地質年代」「物理・化学的特性」「力学性状」の観点から、文献調査・室内試験を実施。
- 各観点からの類似性を検証し、向山層の適用妥当性を確認した。

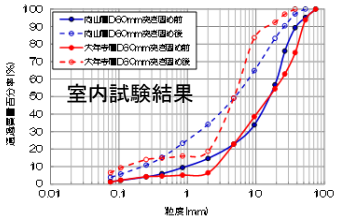


図 1　両層の粒度分布の比較

難透水土壌層の要求性能達成の確認：

- 泥岩（向山層）を母材とした場合、ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ混合率 5%以上の混合土で、所定の遮水性（透水係数 10^{-8}m/sec 以下）、変形追随性及び力学安定性（既存技術と同等）を満足した。
- 泥岩にベントナイトを 5%以上混合したケース 1~5 の方が、泥岩単体のケース G よりも施工中及び施工後の力学安定性、変形追随性の観点から優位であった。

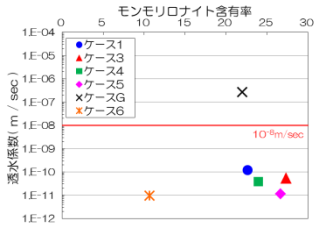


図 2　遮水性の確認

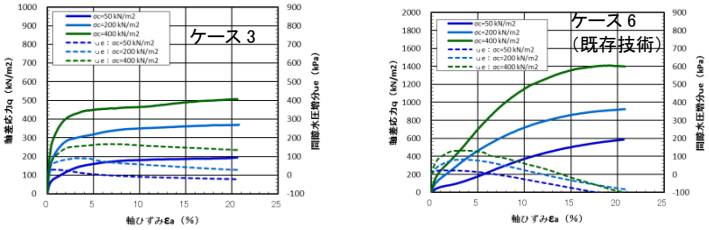


図 3　変形追随性･力学安定性の確認の一例（CUB 試験結果）

実用的かつ効率的なベントナイト混合土の製造・施工パターンの選定：

- 各項目の総合評価の結果、最適パターンとして、一次破砕後の泥岩の最大粒径 40mm、ベントナイト混合率 5%、仕上り層厚 12.5cm としたケース 3 を選定した。

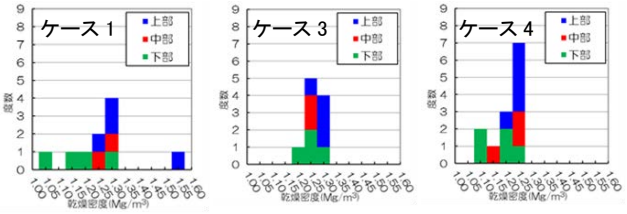


図 4　各ケースの層内での乾燥密度分布

表 1　各ケースの総合評価結果

母材		泥岩 60mm	泥岩 40mm			
ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ混合率		5%	5%		10%	0%
仕上り層厚(cm)		12.5	12.5	17	12.5	12.5
ケース名		1	3	4	5	6
製造施工	粒度評価	△	○	△	○	△
	混合性状	○	○	○	○	—
	密度評価	△	◎	×	○	×
要求性能	遮水性	○	○	○	○	×
	変形追随性及び力学安定性	○	○	○	○	×
総合評価		△	◎	×	○	×

コスト評価：	歩掛り（作業人工、作業速度）：
既存技術に対する全工事費のコスト削減率：30%	一次破砕:10t/day, 0.7m³ﾊﾞｹｯﾄ式破砕機使用 混合土の製造：4.1min/ﾊﾞｯﾁ, 0.5t 練り移動式ﾕﾆｯﾄﾌﾟﾗﾝﾄ使用

コスト評価条件：ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ混合率：既存技術 10%、本技術 5%、層厚：難透水土壌層・覆土 50cm、材料費：購入砂￥3,500/m³、ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ¥40,000/m³、一次破砕費：￥1,800/m³、土量換算係数：0.9、掘削土量のうち破砕性泥岩の割合：50%、残土処理費：￥1,500/m³、表土剥ぎ取り費：￥100/m²

安全上の注意：有資格者による玉掛け作業、安全帯の着用（高所作業時）、サージカルマスク・保護メガネの着用（ベントナイト混合土の製造時・転圧時）

試験場所（住所）：	除去物保管場所と保管状況：
宮城県名取市（実施工模擬試験） 神奈川県横浜市（各種室内試験）	収集運搬･処分を､各事業許可証を有する事業者に委託。 電子ﾏﾆｭﾌｪｽﾄによる追跡管理で適正な処分を確認済み。

1. 実施概要

1.1 目的

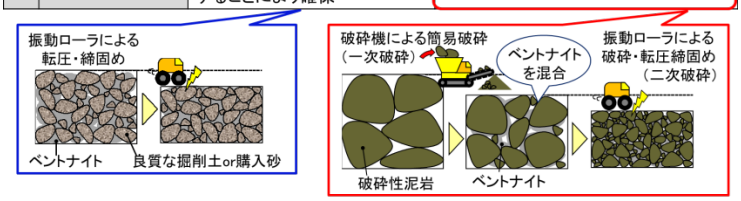
本事業では、現地発生する脆弱な破砕性泥岩を想定し、その破砕性を活かした簡易な一次破砕と転圧時の破砕効果により母材を改質し、難透水土壌層に転用する効率的施工技術について実証試験を行う。室内試験レベルで要求性能を実証した本技術について、実施工レベルの施工試験により要求性能の検証を行うことを目的とする。

1.2 本技術の原理と新規性

既存技術では、あらかじめ粒度調整した良質な母材（購入砂）を用いることが多いが、本技術では、施工プロセスを通じて母材の粒度が自ずと改善されるため、事前に粒度調整する必要がなく、現地掘削土を手間とコストを掛けずに難透水土壌層に転用できる。また、転圧破砕効果により母材骨格構造が密となるため、少量のベントナイトと混合することにより、空隙の間詰め効果が得られ、高い遮水性、変形追随性、力学安定性を効果的に付与することが可能となる。

表 1-1 本技術と既存技術の技術比較

項目		既存技術	提案技術
使用材料		・母材：良質な掘削土 or 購入砂 ・ベントナイト混合率：10～15%	・母材：現地掘削土（破砕性泥岩） ・ベントナイト混合率：5%
母材の選定 ・粒度調整		要	不要 （簡易破砕と転圧による改質効果）
要求性能	透水性 （K：10^{-8}m/sec以下）	母材間の疎な間隙をベントナイトで埋めることにより確保	転圧破砕による密な母材骨格構造の形成と少量のベントナイトによる間詰効果により確保 （ベントナイトは特に変形追随性の向上に寄与）
	変形追随性		
	力学安定性	良質な土質材料を母材に選定することにより確保	



1.3 実施内容

本事業における主な実施内容は以下に示す通りである。

- 実施工模擬試験及び要求性能実証試験により、実規模レベルで所定の要求性能を満足する難透水土壌層が構築できることを確認する
- 複数実施パターンの中から、最も実用的かつ効率的なベントナイト混合土の製造・施工パターンを選定する
- 既存技術とのコスト比較を行う

（ここでは既存技術として、購入砂にベントナイトを 10%混合することを想定）

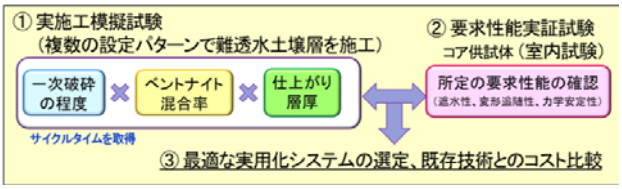


図 1-1 本事業における主な実施内容

2. 実証試験の実施内容

2.1 実施工模擬試験

(1) ベントナイト混合土の製造

図 2-1 ベントナイト混合土の製造フロー

一次破砕の状況　バケット式破砕機　一次破砕前の泥岩　一次破砕後の泥岩

図 2-2 一次破砕の詳細

(2) 試験ケース

表 2-1 難透水土壌層の製造・施工パターンと含水比設定

	母材	一次破砕の程度	ベントナイト混合率	仕上り層厚	混合土製造時の含水比設定	目標乾燥密度（Mg/m³）
ケース 1	破砕性泥岩	最大粒径 60mm 程度	5%	12.5cm	40%	1.20
ケース 2				17cm		
ケース 3	破砕性泥岩	最大粒径 40mm 程度	5%	12.5cm	40%	1.20
ケース 4				17cm		
ケース 5			10%	12.5cm	40%	1.20
ケース G			0%	12.5cm	自然含水比 37.6%	1.20
ケース 6	購入砂	---	10%	12.5cm	20%	1.65

（予備試験の結果、ケース 2 は実施見送り）

(3) 転圧締固め試験

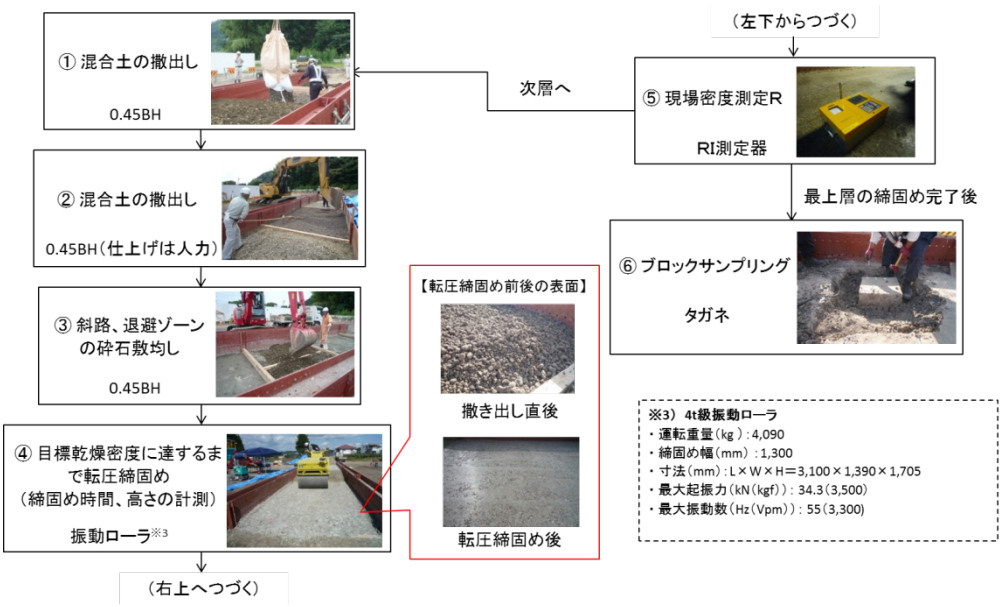
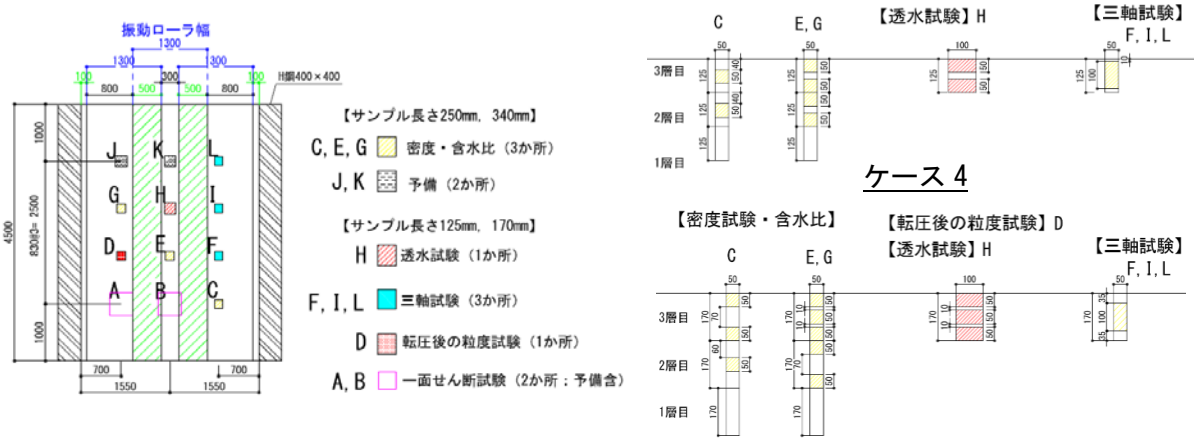


図 2-3 転圧締固め試験のフロー

2.2 要求性能実証試験

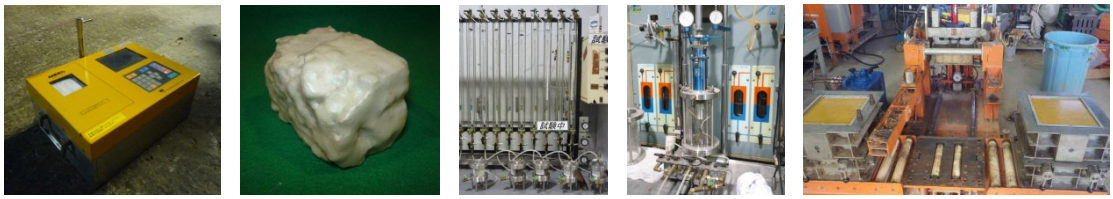
(1) 試料採取位置



【平面図】 【断面図】

図 2-4 試料採取位置図

(2) 測定･試験項目



RI 測定　密度測定　透水試験　三軸圧縮試験　大型一面せん断試験

図 2-5 各種試験機および状況

3. 試験結果及び評価

本章に示す以下の各評価項目について、実施内容と検討フローを表 3-1 に示す。

3.1 地質の類似性の確認評価

本実証試験で用いた破砕性泥岩（向山層）と中間貯蔵施設立地サイトに分布する大年寺層について文献調査及び室内試験を実施し、以下の観点から両者の類似性について検討した。

【地質年代】

- 両者ともに新第三系鮮新統の上部に属する仙台層群の泥岩（シルト岩）・砂岩であり、約 50～100 万年程の地質年代の差であり、類似性のある地層と判断できる（図 3-1 参照）。

【物理・化学的特性】

- 両者ともに膨潤性の粘土鉱物であるモンモリロナイト含有率が他の母材（山砂など）、花崗岩などと比較すると大きく、粘土鉱物組成が類似している。
- 非晶質シリカ（SiO2）含有量に関しては、大年寺層の方がやや多いが、両者に大差はない。
- 浅海性の海成層である大年寺層と陸成層の向山層の違いにより、モンモリロナイト含有率は向山層の方が多いが、物理・化学的特性としては類似性のある地層と判断できる。

【力学性状】

- 圧縮指数 Cc の傾き、圧密降伏応力 Pc の値はともにほぼ同様な傾向を示しており、圧縮性状の観点から類似性のある地層と判断できる。
- 突固め試験結果より、向山層泥岩と大年寺層泥岩には破砕による粒径変化の類似性が見られることから、破砕特性についても類似性のある地層と判断できる（図 3-2 参照）。

上記に示す各観点から類似性を検証した結果、本実証試験に向山層を適用した場合でも大年寺層と同様の結果が得られると判断される。したがって、破砕の容易性を利用した本技術の中間貯蔵施設立地サイトへの適用妥当性を確認できたといえる。

表 3-1 各評価項目の実施内容と検討フロー

評価項目	母材の妥当性の検証
地質の類似性の確認評価	母材の破砕性を活かした本技術の中間貯蔵施設立地サイトへの適用の妥当性を検証

ベントナイト混合土の製造・施工条件に関する妥当性評価

評価項目	ベントナイト混合土の製造・施工プロセスの検証	
粒度評価	粒度評価の観点から、一次破砕の程度、ベントナイト混合率、仕上り層厚の妥当な範囲を絞り込み	ベントナイト混合土の製造・施工条件の妥当な範囲の絞り込み
移動式ユニットプラントの混合性状の評価	混合の均一性の観点から、一次破砕の程度、ベントナイト混合率の妥当な範囲を絞り込み	
密度評価	転圧締固め後の密度のばらつきの観点から、一次破砕の程度、ベントナイト混合率、仕上り層厚の妥当な範囲を絞り込み	

要求性能に関する評価

評価項目	施工した難透水土壌層の品質確認	
遮水性評価	所定の透水係数（10^{-8}m/sec）を満足する製造・施工パターンを選定	要求性能の達成の有無の確認及び実用的かつ効率的な製造・施工パターンの選定
モンモリロナイト含有量の評価	【付随評価】 透水係数の支配的要因を推定 （また、有効粘土密度と透水係数の関係についても整理）	
変形追随性及び力学安定性の評価	既存技術と同等の変形追随性及び力学安定性を有する製造・施工パターンを選定	

評価項目
コスト評価

図 3-1 地質年代の類似性

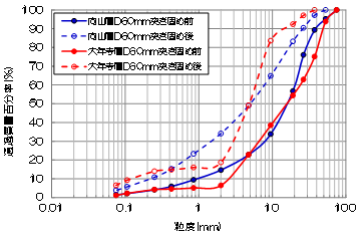


図 3-2 突固め前後の粒度分布
（向山層 VS 大年寺層）

3.2 ベントナイト混合土の製造・施工条件に関する妥当性評価

(1) 粒度評価

各施工ステップにおける母材の破砕程度を確認するため、一次破砕後、ベントナイト混合土の製造後及び転圧締固め後においてそれぞれ粒度試験を行った。以下に得られた知見を示す。

- バケット式破砕機を用いた簡易な破砕でも、室内試験と同程度の破砕が可能である。
- 移動式ユニットプラント(ベントナイト混合土製造プラント)を用いた混合土製造でも、泥岩は破砕され、粒度改善されることから、一次破砕の程度の違いによる混合後の粒度分布への影響は緩和される(以上、図 3-3 参照)。
- いずれの製造・施工パターンでも、転圧締固めにより粒度分布が大幅に改善されるが、転圧による破砕効果は、一次破砕後の最大粒径が大きいほど、層厚が厚いほど得られにくく、ベントナイト混合率が小さいほど大きいことが確認できた(図 3-4 参照)。

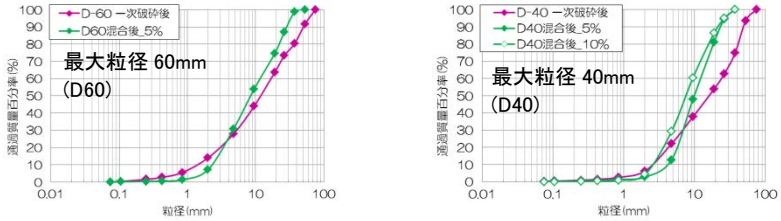


図 3-3 一次破砕後及び混合後の粒度評価

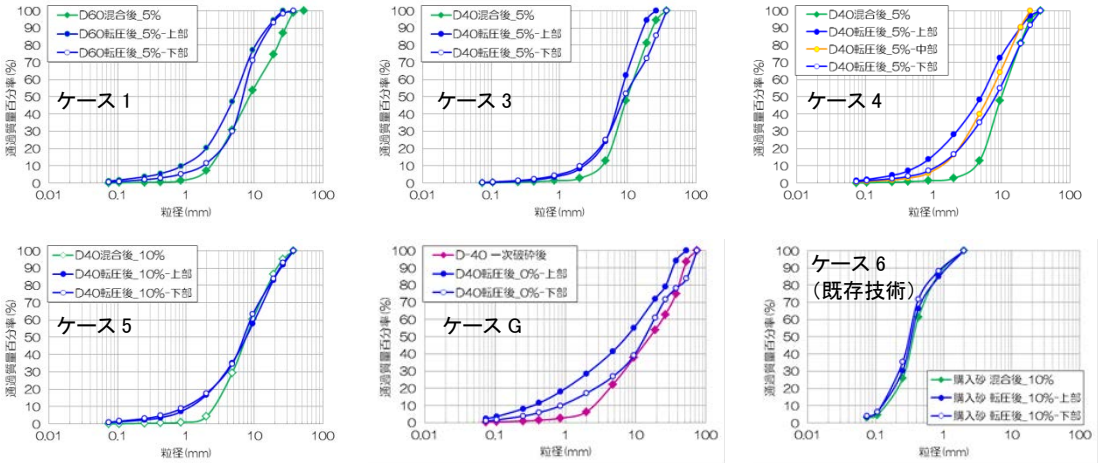


図 3-4 混合後及び転圧破砕後の粒度分布の比較

(2) 移動式ユニットプラント(ベントナイト混合土製造プラント)の混合性状の評価

移動式ユニットプラント(ベントナイト混合土製造プラント)において、ベントナイト混合土の製造パターンの違いが、ベントナイトの混合性状(均一性)に及ぼす影響を確認するため、各製造パターンの 5、10、15 バッチ目でそれぞれ 3 点試料を採取し、メチレンブルー吸着量を測定した。

測定の結果、いずれの製造パターンでも、バッチ内・バッチ間ともに顕著なばらつきは認められず、実規模プラントを用いて均一に混合できることを確認した。なお、計算値とは、母材及びベントナイト単体のメチレンブルー吸着量を基に乾燥重量混合比より求めた理論上の値である。

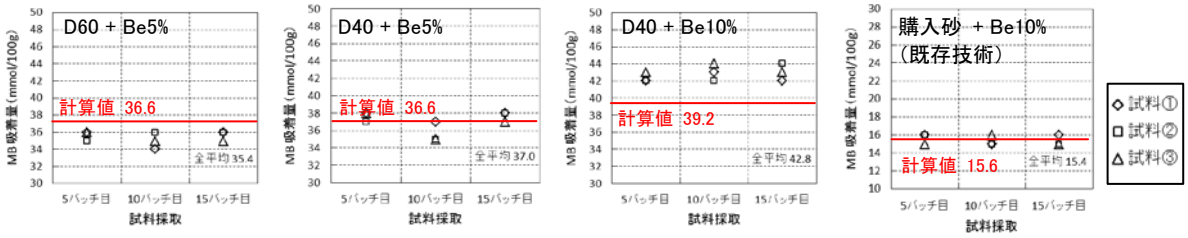


図 3-5 各製造パターンにおけるメチレンブルー吸着量

(3) 密度評価

ベントナイト混合土の製造・施工パターンの違いが、転圧締固め後の密度分布に及ぼす影響を確認するため、「高さ測定」、「RI測定」、「試料採取」による各方法で密度を測定した。なお、目標乾燥密度は、泥岩を用いたケース 1～5 及び G で 1.2Mg/m³、購入砂を用いたケース 6 で 1.65 Mg/m³ である。試料採取による密度測定の結果、泥岩を用いたケースでは、層内での密度のばらつき抑制の観点から、一次破砕の程度を 40mm 以下、仕上り層厚は 12.5cm とする方が望ましく、ベントナイト混合率は 5%及び 10%でも目標乾燥密度を達成できることを確認した（図 3-6 参照）。一方、転圧締固めに伴う高さ測定による密度評価結果より、混合率 5%とした方が転圧回数を減らせることを確認した（図 3-7 参照）。

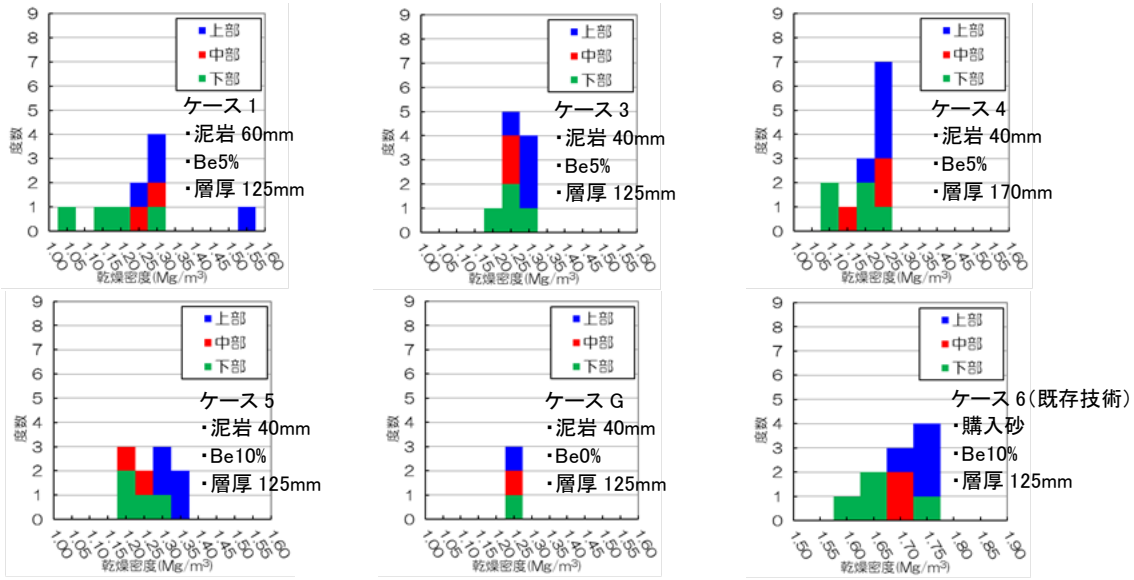


図 3-6 各ケースの層内での乾燥密度分布（試料採取による密度評価）

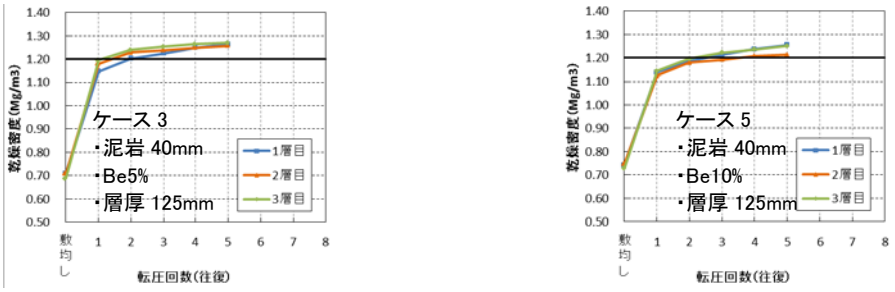
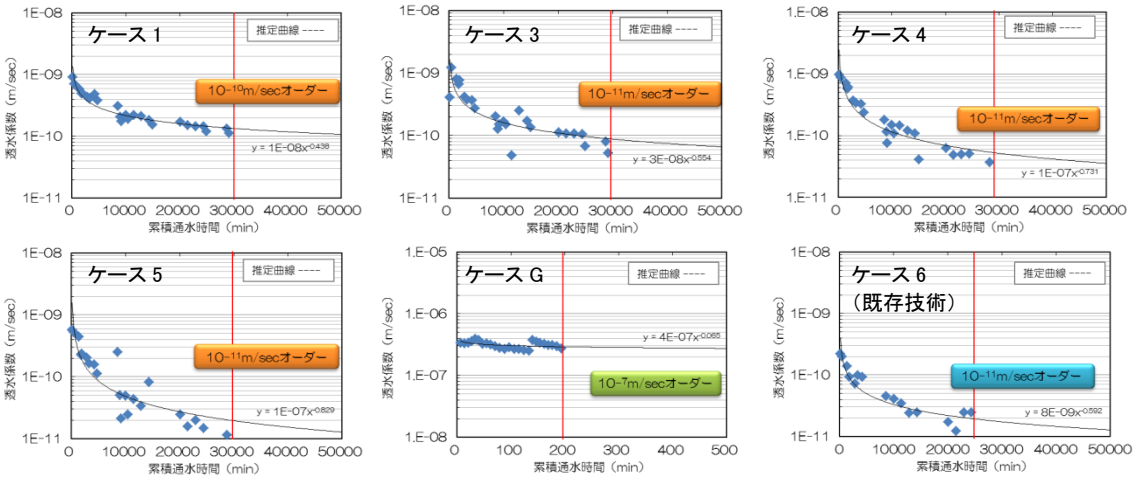


図 3-7 転圧締固めに伴う乾燥密度の変化（高さ測定による密度評価）　　能に関する評価

(1) 遮水性評価

ベントナイト混合土の製造・施工パターンの違いが、転圧締固め後の透水係数に及ぼす影響を確認するため、変水位透水試験により透水係数を測定した。遮水性の要求性能として、管理型最終処分場等の遮水層に要求される透水係数 10^{-8}m/sec 以下を達成しているかどうかを確認する。

測定の結果、泥岩にベントナイトを混合したケース 1～5 では、透水係数は 10^{-10}～10^{-11}m/sec オーダーを示し、いずれも要求性能である 10^{-8}m/sec 以下を満足している。一方、泥岩単体のケース G では 10^{-6}～10^{-7}m/sec オーダーであり、要求性能を満足しなかった。



＊ 試験の性質上、累積通水時間は透水性により異なる。

図 3-8 各ケースの上部供試体の透水係数

(2) モンモリロナイト含有率の評価

変水位透水試験と同一試料を用いてメチレンブルー吸着量を測定し、モンモリロナイト含有率を確認する。これにより、透水係数とモンモリロナイト含有率との相関を評価した（図 3-9 参照）。また、有効粘土密度と透水係数の関係についても整理した結果（図 3-10 参照）、モンモリロナイト含有率が大きく有効粘土密度が大きいほど、透水係数が低いことが確認できた。

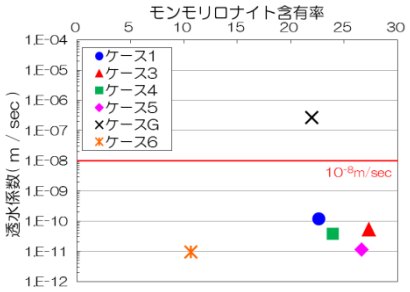


図 3-9 透水係数とモンモリロナイト含有率の関係

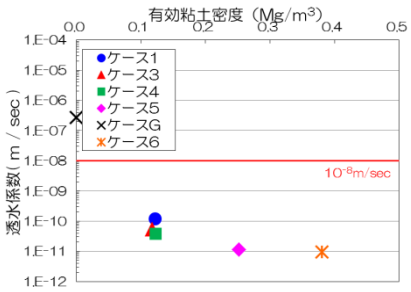


図 3-10 透水係数と有効粘土密度の関係

(3) 変形追随性及び力学安定性の評価

難透水土壌層は、土壌貯蔵施設の底部及び斜面部に設置されることから、特に斜面部の場合、施工時の上載荷重の変化、応力状態の変化による変形に対し力学的安定性と変形追随性が要求される。そこで、土被り 15～20m 程度までの有効拘束圧を想定した圧密非排水三軸圧縮（CUB）

試験及び大型一面せん断試験を実施し、購入砂を母材に用いた既存技術と同等の変形追随性及び力学安定性を有しているかどうかを確認した。なお、ベントナイトを含まないケース G では、ブロック試料の自立性が乏しく欠如し、両試験を実施することができなかった。

以下に両試験により得られた知見を示す(図 3-11 及び図 3-12 参照)。

- ベントナイト混合率が 0%のケースでは、残留応力はひずみの進行とともに急激に減少し、期待できないことが予想され、低配合のベントナイト混合土の方が施工中及び施工後の力学安定性、変形追随性の観点から優位であることを確認した。
- 泥岩にベントナイトを 5%以上混合したケースでは、残留応力が維持され、急激なひずみ軟化を生じず、変形追随性を有する既存技術と同等の難透水土壌層が構築できる。

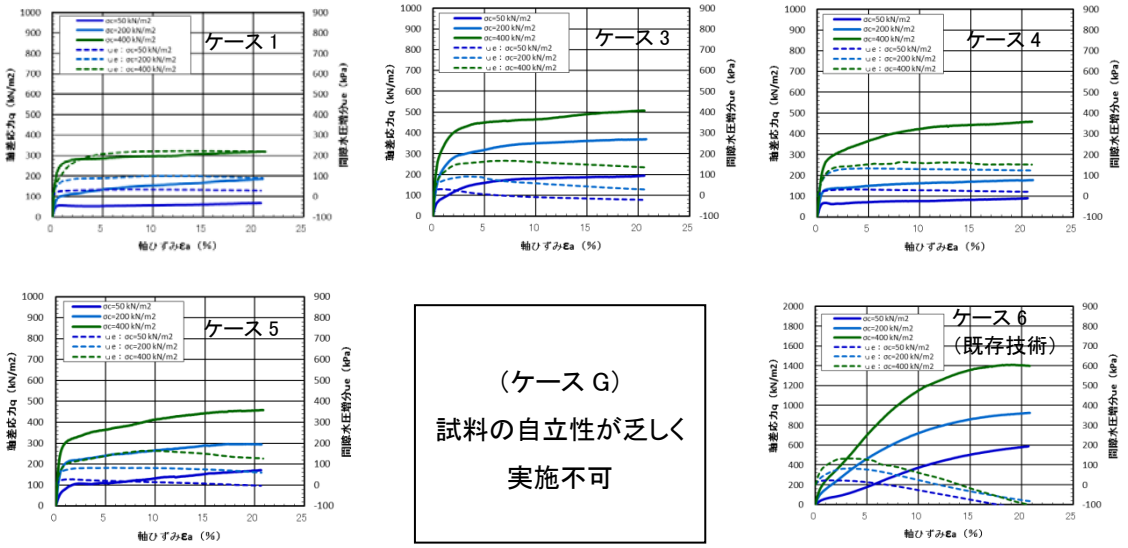


図 3-11 圧密非排水三軸圧縮試験結果(軸差応力－軸ひずみ曲線)

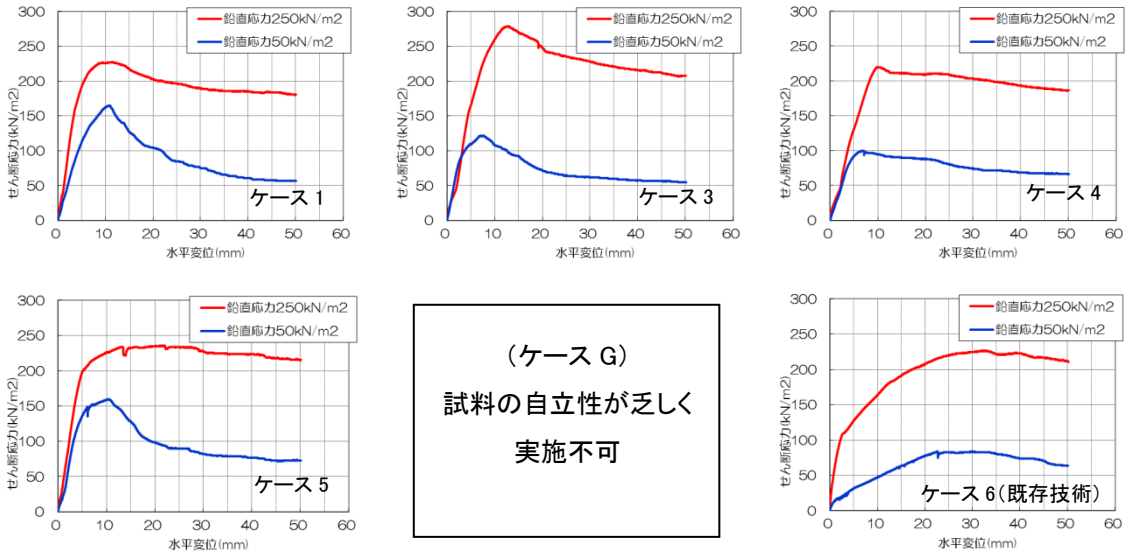


図 3-12 大型一面せん断試験結果(せん断応力－水平変位曲線)

3.4 実用的かつ効率的なベントナイト混合土の製造・施工パターンの選定

表 3-2 に示した検討フローに基づき、3.2 及び 3.3 に示した各評価項目に対して、破砕性泥岩を母材とした各製造・施工パターンの評価結果のまとめを表 3-2 に示す。本実証試験における総合評価の結果、最も実用的かつ効率的な製造・施工パターンとしてケース 3 を選定した。

表 3-2 破砕性泥岩を用いた各製造・施工パターンの評価結果のまとめ

母材		泥岩 60mm	泥岩 40mm			
ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ混合率		5%	5%		10%	0%
仕上り層厚(cm)		12.5	12.5	17	12.5	12.5
ケース名		1	3	4	5	G
製造施工	粒度評価	△	○	△	○	△
	混合性状	○	○	○	○	---
	密度評価	△	◎	×	○	×
要求性能	遮水性	○	○	○	○	×
	変形追随性及び力学安定性	○	○	○	○	×
総合評価		△	◎	×	○	×

3.5 コスト評価

(1) 歩掛りの取得

実施工模擬試験において、0.7m³バケット式破砕機による一次破砕及び 0.5t 練りの移動式ユニットプラントによるベントナイト混合土の製造に要するサイクルタイムを取得した。

フレキシブルコンテナ1袋当たり(約 700kg)の一次破砕に要する時間は、一次破砕の程度(破砕後の最大粒径 60mm 以下もしくは 40mm 以下の違い)によらず、中央値で 120～130 秒程度であった(図 3-13 参照)。また、1 バッチ当たり(約 400kg)のベントナイト混合土の製造に要する時間についても製造パターンで大きな差はなく、中央値で 220～260 秒程度であった。

以下のコスト比較では、表土の剥ぎ取り、混合土の製造、振動ローラによる転圧締固めの工程は本技術と既存技術で共通であることから、一次破砕の歩掛りを考慮して試算する。

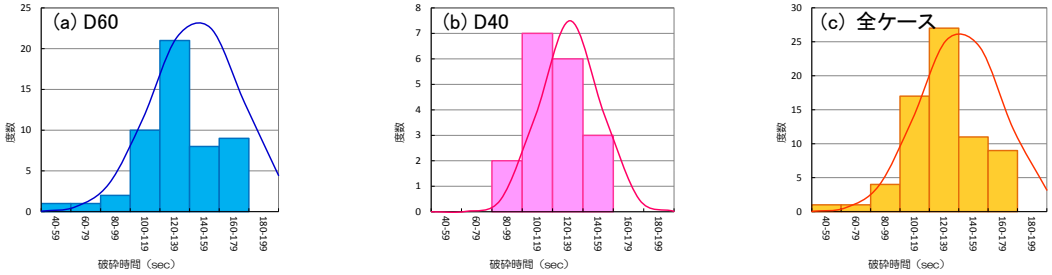


図 3-13 取得した歩掛りの一例(一次破砕の歩掛り)

(2) コスト比較

最も実用的かつ効率的な製造・施工パターンとして選定したケース 3（本技術）と母材に良質な購入砂を用いる既存技術により、土壌貯蔵施設Ⅱ型(B タイプ)の難透水土壌層及び覆土を構築する場合の工事費について、コスト比較を行った。実証試験における歩掛りを分析した結果、実施工での一次破砕の歩掛りを 100t/day と仮定してコスト試算に用いた(表 3-3 参照)。

試算の結果、既存技術に対し全工事費で 30%のコスト削減が見込まれる結果となった。

表 3-3 コスト試算に用いた一次破砕の歩掛りの根拠

一次破砕のサイクルタイム／フレキシブルコンテナ1体　（0.7m³バケット式破砕機1台使用）						時間効率
作業内容（実証試験）	掘削ズリ運搬・準備 （仮置き試料の投入準備）	破砕機ﾊﾞｹｯﾄへの投入時間 （ﾌﾚｷｼﾌﾞﾙｺﾝﾃﾅ→破砕機ﾊﾞｹｯﾄ）	簡易破砕（一次破砕） 破砕作業（ﾊﾞｹｯﾄ式破砕機）	破砕後試料の計量・仮置き （ﾌﾚｷｼﾌﾞﾙｺﾝﾃﾅ計量→仮置き）	合計／1体	1
実証試験所要時間(min)	6.5～8.5	3.0～4.0	1.5～2.5	9.0～10.0	20.0～25.0	
作業内容（実施工ﾍﾞｰｽ）	********** **********	破砕機ﾊﾞｹｯﾄへの投入時間 （破砕機ﾊﾞｹｯﾄ積込み）	簡易破砕（一次破砕） 破砕作業（ﾊﾞｹｯﾄ式破砕機）	ﾀﾞﾝﾌﾟﾄﾗｯｸへの積込み （破砕機ﾊﾞｹｯﾄ→ﾀﾞﾝﾌﾟﾄﾗｯｸ）	0.5～0.6t （ﾌﾚｷｼﾌﾞﾙｺﾝﾃﾅ1体分）	1/10
実施工所要時間(min)		0.2	1.5～2.5	0.2	2.4	

一次破砕の製造数量（フレキシブルコンテナ数量）／日　（0.7m³バケット式破砕機×1台）

所要時間	ﾌﾚｷｼﾌﾞﾙｺﾝﾃﾅ数量　（体）	破砕重量　（t）	実証試験実績 日当り施工数量　（t/day） （0.7m³ﾊﾞｹｯﾄ式破砕機×1台）	実施工 日当り施工数量（t/day） （0.7m³ﾊﾞｹｯﾄ式破砕機×1台）
20～25min	1	0.55～0.8		
60min（1hr）	3	1.65～2.4		
1Day（実働6hr）	18	9.9～14.4	10	100

表 3-4 コスト比較結果（本技術対既存技術）

適用土量 （千 m³）	破砕性泥岩の 再利用率	コスト削減率			
		表土剥ぎ取り費	材料費	残土処理費	合計
1,131	17%	0%	−48%	−16%	−30%

*ベントナイト混合率：既存技術 10%、本技術 5%　　*層厚：難透水土壌層 50cm、覆土 50cm
*材料費：購入砂¥3,500/m³、ベントナイト¥40,000/m³、 一次破砕費¥1,800/m³
*土量換算係数を 0.9、掘削土量のうち 50%が破砕性泥岩
*残土処理費¥1,500/t、 表土剥ぎ取り費¥100/m² と仮定し試算
（実証試験結果より、ベントナイト混合土製造、締固め転圧は既存技術と同等と仮定）

4. まとめ

- 本試験に用いた破砕性泥岩（向山層）と中間貯蔵施設立地サイトに分布する大年寺層の類似性を文献調査及び室内試験により確認し、破砕の容易性を利用した本技術の中間貯蔵施設立地サイトへの適用が妥当であることを示した。
- 泥岩（向山層）を母材とした場合、ベントナイト混合率 5%以上の混合土で、中間貯蔵施設の土壌貯蔵施設に求められる所定の遮水性、変形追随性及び力学安定性を満足することが確認できた。母材に大年寺層を用いる場合は、向山層よりもモンモリロナイト含有率が小さいことから、混合率は 5～10%程度が妥当な設定値と予想される。
- 泥岩にベントナイトを 5%以上混合することにより遮水性、変形追随性が向上し要求性能を満足するが、ベントナイトを混合しない場合はこれらの要求性能を満足しなかった。
- 泥岩にベントナイトを 5%以上混合したケース 1～5 の方が、泥岩単体のケース G よりも施工中及び施工後の力学安定性、変形追随性の観点から優位であった。
- 各評価項目を総合評価した結果、最も実用的かつ効率的な製造・施工パターンとして一次破砕後の泥岩の最大粒径を 40mm 以下、ベントナイト混合率を 5%、仕上り層厚を 12.5cm としたケース 3 を選定した。
- 難透水土壌層及び覆土の施工に掛かる費用について、ケース 3 と既存技術を用いたコストを比較した結果、既存技術に対するコスト削減率は 30%となった。
- なお、本試験では振動・騒音に配慮し、4t 級振動ローラを用いたが、実施工では 10t 級土工用振動ローラの使用が想定される。その際には、仕上り層厚、必要転圧回数等の施工方法が変わるため、モデル施工等により再評価する必要がある。

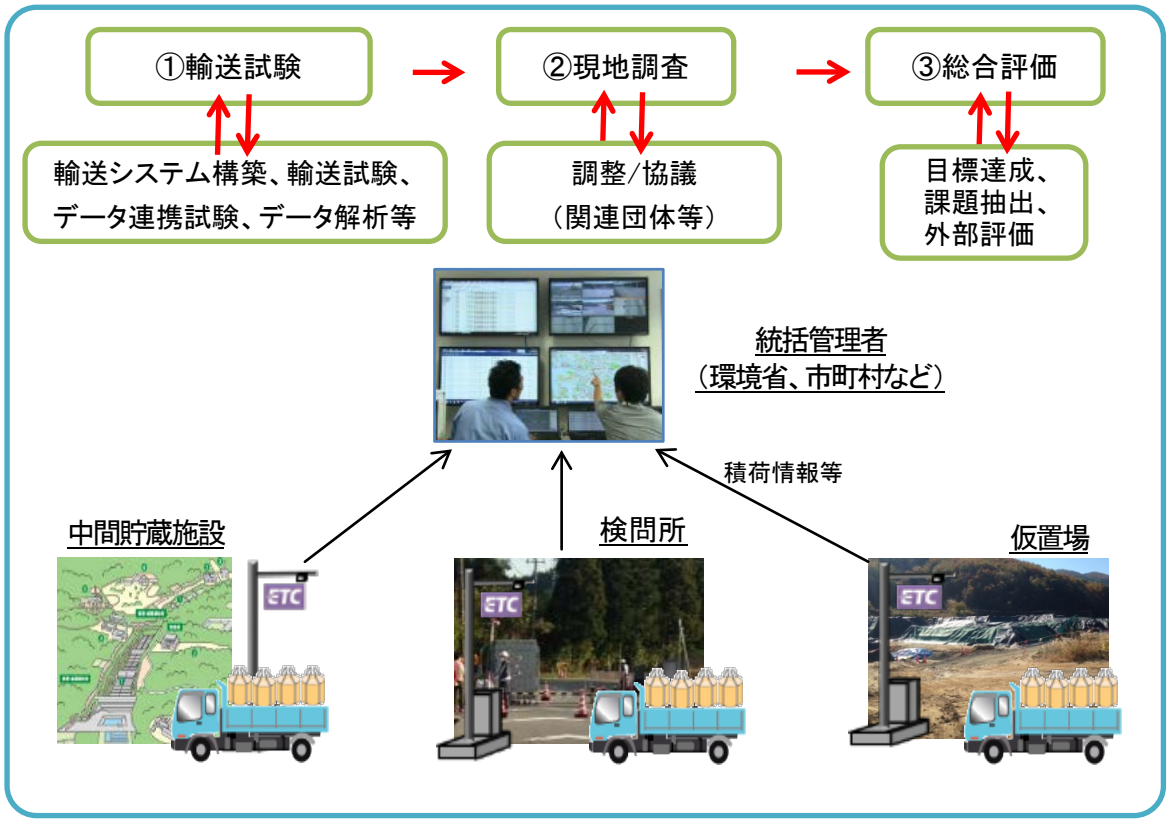
実施代表者の所属機関：阪神高速道路株式会社

実証テーマ名：
福島県内除去土壌等の輸送に係る ETC 無線認証技術を活用した大量運搬管理システムの実証

事業の概要：
仮置き場から中間貯蔵施設までの除去土壌等の輸送する手法として、ETC 無線認証技術を活用した運搬管理システムを実証し、有効性を実証する。

実施内容：
（1）ETC 無線認証を活用した運搬管理システムによる処理・確認時間短縮効果の検証
（2）仮置場等の電波環境によるシステムの適用性の検証
（3）汎用車両運行管理システムと ETC システム併用による車両運行管理方法の検証

技術概要：
【試験フロー】



【試験目標】
（1）仮置場での受け渡し確認時間の短縮効果の検証
（2）入域管理区域での車両確認時間の短縮効果の検証
（3）中間貯蔵施設搬入時の受入確認時間の短縮効果の検証

【期待される効果】
（1）仮置き場、入域管理区域、中間貯蔵施設の入退管理の効率的な車両管理
（2）本格実施にむけた除去土壌等の輸送システムの技術的課題の抽出

その他：

導入効果：

○ETCシステムは、フレキシブルコンテナと車両の紐付が可能であり、仮置場、検問所、中間貯蔵施設入口での車両の自動認証ができることを確認し、許可車両情報や搬入物情報の確認時間の短縮ができることを確認した。（輸送の円滑化）

システムの動作に起因するサイクルタイムの比較　（単位：秒）

	仮置場			検問所	中間貯蔵施設		
	入口	積込作業場	出口		入口	積降作業場	出口
ETCｼｽﾃﾑ	2	163	2	6 ※1	2	131	6 ※1
GPSﾊﾞｰｺｰﾄﾞｼｽﾃﾑ（ETCｼｽﾃﾑを1とした時間比率）	54 (27.9)	576 (3.5)	312 (162.3)	※2	68 (35.3)	432 (3.3)	50 (8.0)

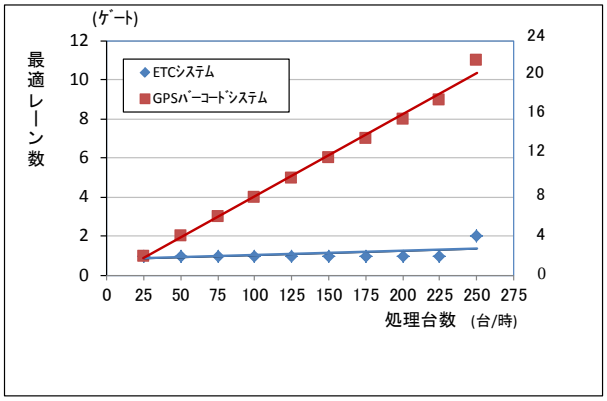
注）表中の数値は、20回の計測データの平均値を示す。
※1:検問所及び中間貯蔵施設出口においてはシステムによる認証に加えて監視モニターを用いた顔及び車両の空荷の目視確認を行っている。
※2:機能なし

○仮置場、検問所、中間貯蔵施設の出入口での入退域管理者の縮減が可能なことを確認した。（入退域管理者の縮減とそれによる作業者の被ばくの低減）

○汎用車両システム（GPS）と併用することで、渋滞等交通状況を考慮した運行管理が可能であることを確認した。（安心・安全な運行管理）

※課題：仮置き場や主要道路の一部で通信不能区間の対応。対策として運用面での対応、衛星電話等の活用検討が必要。

□一部課題は残るが、ETCシステムは、福島県内の除去土壌等の大量輸送における、安全・確実で有効なシステムであると考えられる。



作業員被ばく線量評価：

☆他システムよりも作業時間の短縮が確認されたことから、被ばく線量の低減が期待できる。

☆仮置き場（入口・出口）、帰還困難区域の検問所、中間貯蔵施設（入口・出口）における入退管理者の無人化も可能である。

☆高線量下である帰還困難区域内への流入制御により、運転手の被ばく線量の低減が期待できる。

	導入前	導入後
仮置場	1～2名	1名
検問所	2、3名※1	1名
中間貯蔵施設	1～2名※2	1名※3

※1：現地調査より　※2：推定（1 ﾚｰﾝあたり）
※3：ETC はﾚｰﾝ数に関わらず総合管理 1 名

コスト評価：仮置場、中間貯蔵施設等の設備費用
仮置場：20万円／箇所
中間貯蔵施設：400万円／箇所
中央システム構築：3億円

歩掛り（作業人工、作業速度）
運営に係る追加となる歩掛り
仮置場：1人/日・箇所
中間貯蔵施設：1人/日・箇所

コスト評価条件：
※仮置場は ETC モバイル使用
※ETC 設備は1レーンに ETC アンテナ2機設置
※中央システム構築はETCシステムに限らず、運行管理システム共通

実証試験における安全上の注意：
☆輸送試験：警備員の配備、作業員のヘルメット、安全帯の着用
☆現地調査：個人用被ばく線量計の携行、帰還困難区域内への立入時にはマスク、手袋の着用

試験場所（住所）：
☆輸送試験（大阪府大阪市）
☆現地調査（福島県浪江町、双葉町、大熊町　他）

除去物保管場所と保管状況（写真）：
該当なし

1. 輸送試験

1-1 システム構築

対象としたシステムの概要を表 1-1 に示す。

表 1-1　対象としたシステムの概要

既存の運搬管理システム		システムの概要		機器のイメージ
		輸送対象物の全数管理	輸送車両の運行管理［GPS 管理］	
ETC無線認証技術を活用した運搬管理システム	ETC システム	・ETC アンテナと ETC 車載器間の認証で車両情報を入手し、排出現場から処分場所までの車両管理を実施する。 ・ただし、個別容器管理は、ETCモバイルシステムとの連動により固体管理が可能。	・スマートフォン等のGPS位置管理システム（汎用車載端末）と連動させ、定期的に管理者側に現在の走行位置を送信し、走行位置を特定する。 ・位置情報送信は携帯電話通信網（3G回線）を利用する。	運転手側 管理者側 （アンテナ）
	ETC モバイル システム	・ETCアンテナの代用に ETC モバイル端末と車両の QR コードで車両運行管理を行う。 ・輸送物に貼り付けられたQRコードと車両情報を読取ることにより固体管理が可能。		運転手側 管理者側 （モバイル）
PCB輸送システム	GPS バーコード システム	・専用車載器とバーコードリーダーにより、排出現場から処理場までの工程を運搬物の個別容器に貼られたバーコードを用い、各対象物の個体レベルで管理する。	・専用車載端末のGPS位置管理機能により、定期的に管理者側に現在の走行位置を送信し、走行位置を特定する。 ・位置情報送信は、全国をカバーする衛星通信を利用する。	運転手側 （車載器+バーコード） 管理者側 （モバイル）
伝票管理システム	スマート デバイス システム	・スマートフォンを媒体として、これに運搬情報を手入力することで排出現場から処分場までの廃棄物の引き渡し、移動管理が可能。	機能なし	運転手側 （スマートフォン） 管理者側 （スマートフォン）
	RFタグ システム	・ICカードを媒体として、スマートフォンから運搬情報を手入力し、排出現場から処分場までの廃棄物の引き渡し、移動管理が可能。	機能なし	運転手側 （IC カード） 管理者側 （スマートフォン）

1-2 輸送試験

(1) 輸送試験の手順

試験を行った仮置場想定、検問所想定、中間貯蔵施設想定のうち、その代表的な施設である中間貯蔵施設想定を例にETCシステムにおける輸送試験の手順を図 1-1 に示す。

図 1-1　中間貯蔵施設想定試験（ETC システム）

(2) サイクルタイム

【計測の前提条件】

サイクルタイム計測の概念は図 1-2、計測方法の概要は以下のとおりである。

・10tダンプ車5台が車列を組み輸送を行うとした。

・車両1台あたりの走行や人・積荷の認証、荷の積込等に要する時間を計測した。(フレキシブルコンテナの運搬数は7個とした。)

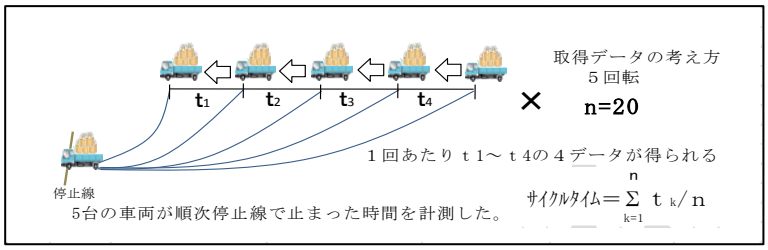


図 1-2 サイクルタイム計測の概念

・車両の走行は現地でストップウォッチを用い、入場許可証の確認やフレキシブルコンテナの登録等の細部の作業については、同時に撮影を行っていたビデオを持ち帰り机上で再計測を行った。

【計測結果】

■仮置場、中間貯蔵施設

計測結果(システム動作のみ)は表 1-2 に示すとおりである。

表 1-2 サイクルタイムの計測結果(システム動作のみ)

(単位:秒)

		仮置場			中間貯蔵施設		
		入口	積込作業場	出口	入口	積降作業場	出口
ETCシステム	ETCシステム	2	163※1	2	2	131※1	6※2
	ETC・モバイルシステム	33		46	45		50
GPSバーコードシステム		54	576	312	68	432	50
(ETCシステムを1とした場合の時間比率)		(28)	(4)	(162)	(35)	(3)	(8)
伝票管理システム	スマートデバイスシステム	19	461	14	19	334	23
	RFタグシステム	19	253	41	19	289	35

注)表中の数値は、20回の計測データの平均値を示す。

※1 ETCシステムは仮置場の積込作業場(フレキシブルコンテナ認証等)や中間貯蔵施設の積込作業場(フレキシブルコンテナの認証等)ではETCモバイルを用いている。

※2 検問所及び中間貯蔵施設出口においてはシステムによる認証に加えて監視モニターを用いた顔及び車両の空荷の目視確認を行っている。

システム動作のみ:車両の走行やフレキシブルコンテナの積み込み・積み降ろしのシステムの動作に関係なく運搬に共通して必要となる時間を除いたサイクルタイム。

○いずれのケースも ETC のサイクルタイム(処理時間)が最も短かった。

○GPSバーコードシステムでは、衛星回線接続に時間を要することが分かった。

■検問所

計測結果(システム動作のみ)は表 1-3 に示すとおりである。

表 1-3 検問所のサイクルタイム(システム動作のみ)

(単位:秒)

	検 問 所
ETCシステム	6
人による検問(地ヒアリング結果)	約40

注)表中の数値は、20回の計測データの平均値を示す。

※ETCシステムはシステムによる認証に約2秒、モニターによる顔認証に約4秒の計6秒、人による検問では許可証と車両及び乗車人員の確認に約40秒要している。

○ETCシステムの導入により、現状より大幅に処理時間が削減されることが分かった。

※ETC システムは ETC 認証時間 2 秒、顔認証時間 4 秒で合計 6 秒となる。

■サイクルタイム評価

○サイクルタイムの評価は後述の3. 滞留予測にて行うこととした。

□参考資料

■車両の走行やフレキシブルコンテナの積込み時間を考慮した総合計のサイクルタイム

総合計のサイクルタイムの計測結果（総合計）は表 1-4 に示すとおりである。

表 1-4　サイクルタイムの計測結果（総合計）

（単位：秒）

		仮置場			中間貯蔵施設			検問所
		入口	積込作業場	出口	入口	積降作業場	出口	
ETCシステム	ETCシステム	12	1988※1	12	11	1758※1	17※2	17
	ETC・モバイルシステム	44		56	54		61	－
GPSバーコードシステム		64	2401	322	77	2060	61	－
(ETCシステムを1とした場合の時間比率)		(5)	(1)	(26)	(7)	(1)	(4)	
伝票管理システム	スマートデバイスシステム	29	2287	24	28	1961	34	－
	RFタグシステム	29	2079	51	28	1917	45	－

注）表中の数値は、20回の計測データの平均値を示す。

※1 ETCシステムは仮置場の積込作業場（フレキシブルコンテナ認証等）や中間貯蔵施設の積込作業場（フレキシブルコンテナの認証等）ではETCモバイルを用いている。

※2 検問所及び中間貯蔵施設出口においてはシステムによる認証に加えて監視モニターを用いた顔及び車両の空荷の目視確認を行っている。

総合計：システムの動作に起因した時間に加え、車両の走行や、フレキシブルコンテナの積込・積降等の全時間のサイクルタイム。

■作業要素別内訳

中間貯蔵施設の入口、積降作業場を例とした作業要素別内訳は表 1-5～6 に示すとおりである。

表 1-5　中間貯蔵施設（入口）

（単位：秒）

		車両の走行	人・車両及び積荷の搬入開始確認（システム動作のみ）				合計	総合計（参考）
ETCシステム	ETCシステム	9	ETC電波照射により（自動認証）				2	11
			1.9					
	ETCモバイルシステム		許可証を提示（運転者）	許可証を確認（管理者）	許可証の確認とQRコードとモバイルで読み込み（管理者）	許可証を渡し車両発進（管理者・運転者）	45	54
			3.0	11.3	26.0	4.5		
GPSバーコードシステム			許可証を提示（運転者）	許可証を確認（管理者）	GPSシステムで搬入開始報告を送受信（運転者・管理者）	許可証を渡し車両発進（管理者・運転者）	68	77
(ETCシステムを1とした場合の時間比率)			3.0	11.3	49.0	4.5	(35)	(7.1)
伝票管理システム	スマートデバイスシステム		許可証を提示（運転者）	許可証を確認（管理者）		許可証を渡し車両発進（管理者・運転者）	19	28
			3.0	11.3		4.5		
	RFタグシステム		RFタグを提示（運転者）	許可証を確認（管理者）		RFタグを渡し車両発進（管理者・運転者）	19	28
			3.0	11.3		4.5		

注）表中の数値は、20回の計測データの平均値を示す。

表 1-6　中間貯蔵施設（積降作業場）

（単位：秒）

		車両の走行	フレコンバッグ積降作業			小計	人・車両及び積荷の認証（システム動作のみ）			合計	総合計（参考）
			クレーン積降準備	積降作業	クレーン仕舞込						
ETCシステム	ETCモバイルシステム	11	137.0	1150.0	330.0	1617	車両情報をモバイルで選択・確定（管理者）	フレコンバックのQRコードをモバイルで読み込み車両情報と解き（管理者）		131	1758
							38.2	92.6			
GPSバーコードシステム							バーコードリーダーを提示（運転者）	フレコンバックのバーコードをリーダーで読み込み車両と解きし車載器にリーダーをセット（管理者）	GPSシステムで積降完了報告を送受信（運転者・管理者）	432	2060
(ETCシステムを1とした場合の時間比率)							3.0	99.3	329.7		
							(0.1)	(4.6)		(3.3)	(1.2)
伝票管理システム	スマートデバイスシステム						スマートデバイスを提示し管理者が積載物情報を確認（運転者・管理者）	スマートデバイスのフレコンバックタグ情報（5桁）を照合・確認（管理者）		334	1961
							33.6	300.0			
	RFタグシステム						RFタグを提示し管理者がスマートフォンで積載物情報を確認（運転者・管理者）	フレコンバックのICコード（5桁）をスマートフォンで照合・確認（管理者）		289	1917
							42.5	247.0			

注）表中の数値は、20回の計測データの平均値を示す。

(3) 機能性の評価

輸送試験の結果から、ETCシステムはモバイルを併用することにより、フレキシブルコンテナと車両の紐付が可能であることを確認した。またETCゲートにより、仮置場、検問所、中間貯蔵施設での効率的な車両管理ができること確認した。

対象システムの操作性の評価は表 1-7 に示すとおりである。

表 1-7 対象システムの操作性の評価 （凡例 ○:自動）

		運転手の操作	積込作業時の操作	中間貯蔵入口での操作	チェック機能※	評価
ETC システム		○なし（自動）	△QR読込	○なし(自動)	あり	○
GPS バーコードシステム		△ボタン操作	△ﾊﾞｰｺｰﾄﾞ読込	△ボタン操作	あり	
伝票管理システム	SDｼｽﾃﾑ	△スマホ操作	△手入力	△スマホ操作	なし	
	RF ﾀｸﾞｼｽﾃﾑ	△カード受渡	△手入力	△カード受渡	なし	

※チェック機能とは、確実性を客観的に担保する機能である。（人による確認作業を自動的に行い、システム的にミスを防止する機能）

○ETCシステムはフレキシブルコンテナの積込・積降時の認証操作以外（入口・出口ゲート）は自動化されており人の手を介す必要がない。

1-3 データ連携試験

(1) リアルタイム配信試験結果

データ連携試験として、各輸送試験にて行われたETC認証情報から運搬情報等を、関係者(仮置場事務所、運搬業者、運転手、中間貯蔵施設事務所、行政（市町村等）、その他任意の第三者)へのリアルタイム配信(一斉メール)、各種電子運搬管理伝票の作成と中央データベースへの登録を確認した。また、関係者へのメール配信が 1 分以内で実施できたことも確認した。（ETC システム以外は、廃棄物処理法に基づいて作られているため、排出事業者、収集運搬業者、処分業者以外には配信できない。）

(2) 運搬管理伝票の登録試験結果

図 1-3 に登録実験（JWNET 連携）試験結果を示す。運搬管理伝票を外部機関である公益財団法人日本産業廃棄物処理振興センターの運営する JWNET へ運搬管理伝票の情報連携を実施した。連携内容は阪神高速の ETC 管理集計情報をもとに夜間連携のバッチ処理で実施し、翌朝連携処理を確認。よって、ETC 認証システムが他外部システムとの連携の拡張性があることを確認した。

図 1-3 登録実験（JWNET 連携）試験結果

2. 現地調査

2-1 ヒアリング調査

福島県内の仮置場、検問場所にてシステム適用性の検討を行うために、通信環境及びインフラ関連のヒアリング調査を実施した。

－通信インフラの現状－

・帰還困難地域の一部と山間部についてはサービス提供エリア外である
・通信基地局、移動基地局の設置は他インフラ（電気、光）が必要であり設置期間やコストに課題が残る
・衛星回線は、福島県内をカバーできること、ETCシステムの稼働可能な通信能力を有することを確認したが、一部運用コストに課題となる可能性がある

表 2-1 には、対象システムごとの3G電波通信不能地域における対応と評価を示す。

表 2-1　3G電波通信不能地域における対応と評価

対象システム		衛星電話	基地局増設	データ蓄積機能（通話可能エリアでのデータ送信機能）	評価
ETC システム		△要改良※1	○※2	要改良（スマホ対応）※3	
GPS バーコードシステム		○既　存	―	―	○
伝票管理システム	SDシステム	△要改良※1	○※2	要改良（スマホ対応）	
	RF タグシステム	△要改良※1	○※2	×	

＊1：衛星回線は、ETCシステムの稼働可能な通信能力を有する（128kbps 以上）
＊2：基地局増設による対応は技術的には可能（光回線敷設）であるが、コスト面で課題が残る
＊3：およそ30分程度の GPS データ蓄積機能をもつ機能が必要である

－今後の検討方策－

・ETC システム運用にあたっては、①ルータによる衛星回線活用や、②トラックに搭載するGPS位置管理用のスマートフォンにログ蓄積・配信機能の付加などの検討が必要

2-2 入域管理等の状況調査

中間貯蔵施設稼働後の交通負荷により滞留発生が懸念されるため、帰還困難区域への入退域に対する管理について関係機関（内閣府原子力災害対策本部）にヒアリング調査を行った。

－検問施設通過に関する現状－

・検問所は4～6名程度の有人で実施（交代要員含む）
・検問所により朝夕の時間帯で混雑が発生
・検問通過のための確認時間は 40 秒程度である

－今後の検討方策－

・中間貯蔵施設への運搬車両による新たな交通負荷が発生し、更なる滞留の悪化が懸念されるため、検問にETC機能を活用するなど効率的な対応の検討が必要

2-3 走行環境調査

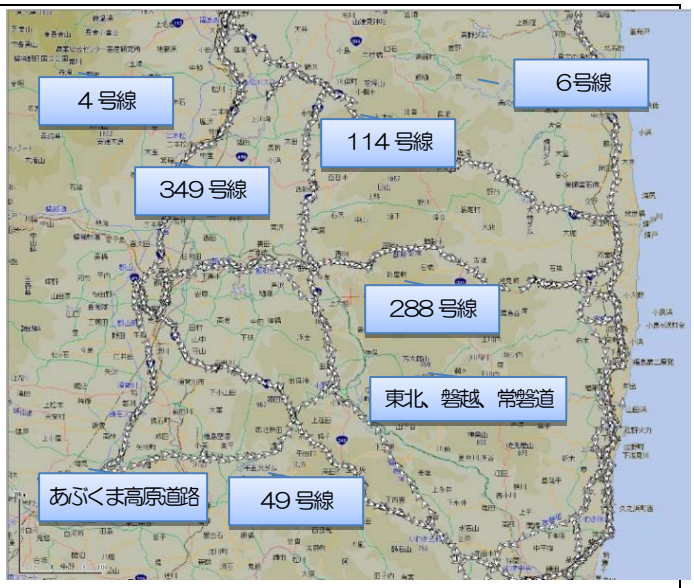
福島県の中間貯蔵施設運搬の運搬ネットワークとして、想定される主要道路を走行し、通信 3 キャリアの端末の GPS 状況、電波状況を調査した。図 2-1 に走行環境調査の結果を示す。

－輸送ルートネットワークの現状－

・主要道路にも帰還困難地域と山間部等（阿武隈高原）に通信不能エリアが存在
・GPS については主要道路上ではおおむね良好

【調査路線】

路線名	距離	旅行速度（実測）
4 号線	72km	38km/h
6 号線	93km	35km/h
114 号線	69km	38km/h
288 号線	66km	35km/h
49 号線	70km	42km/h
349 号線	46km	39km/h
東北道	46km	92km/h
磐越道	89km	97km/h
常磐道	61km	67km/h
あぶくま高原道路	38km	62km/h



※GPS ログ蓄積により走行軌跡描写

【調査結果（114 号線、288 号線）】
(1)GPS 受信状況
　114号線（福島－浪江）は良好
　288号線（郡山－双葉）は良好
(2)通信状況（通信キャリア3社）
下記エリアにおいて通信不能の通信キャリアがあった。
国道 288 号線（大熊町野上周辺）
国道 114 号線（浪江町室原周辺）

図 2-1　走行環境調査の結果

－今後の検討方策－

・通信不能エリアでは GPS ログ蓄積機能を搭載し、トレーサビリティ確保することが可能
・不測の事態に備えたリアルタイムの走行車両管理については、トラック相互の連携体制や衛星回線をもつ巡回車の走行などによる対応を検討

2-4 仮置場調査

環境省直轄の仮置場周辺のインフラ状況光回線敷設、通信環境状況を調査した。

－仮置き場における通信環境等の現状－

・直轄仮置場 17 ヶ所を抽出調査
・4ヶ所で携帯電話（3G 回線）が通信不能、1ヶ所で光回線敷設不能エリアが存在
・概ね携帯キャリア提供のエリアマップ通りの電波状況であることを確認

－今後の検討方策－

・光回線敷設可否については、所在地毎に個別に検討
・通信環境については、携帯キャリアのエリアマップを参考に調査
・光、携帯環境不能エリアについては、ルータによる衛星回線活用を検討

3. 滞留予測

(1) 評価方法

中間貯蔵施設の入口ゲートでの必要なレーン数と入口の必要配置人員で評価した。

(2) 試算方法

○中間貯蔵施設に1時間に流入するトラック台数を想定して計算

○算出は、トラック入場間隔はポアソン分布、入口処理時間（サイクルタイム）は指数分布に従うとし、滞留台数に上限値を定め、必要レーン数を算出

（「インターチェンジ幾何構造設計要領」H26.7（西日本高速道路株式会社）」を参照）

(3) 条件設定

○平均的な流入量として 125 台/時を想定 （4000 台/日÷8時間稼動÷4入口箇所数）

○感度分析として 25～250 台/時の範囲を設定

○入口での滞留台数が3台未満となるレーン数を試算

(4) 滞留長予測

滞留長予測の結果と評価は表 3-1 に示すとおりである。

表 3-1 滞留長予測の結果と評価（処理台数 125 台/時）

		入口サイクルタイム（サービスタイム）	最適（滞留台数3台未満）				評価
			レーン数	滞留台数	待ち時間	必要人員	
ETCシステム		11秒	1	0.6台	6.8秒	1人	○
GPSバーコードシステム		77秒	5	1.4台	21秒	10人	
伝票管理システム	SD・RF	28秒	2	0.6台	8.6秒	4人	

※)必要人員は、1レーンあたりゲート開閉操作1名、端末操作1名と想定、ただしETCシステムは自動認証のためゲートでは無人だが総合管理に1名を要する。

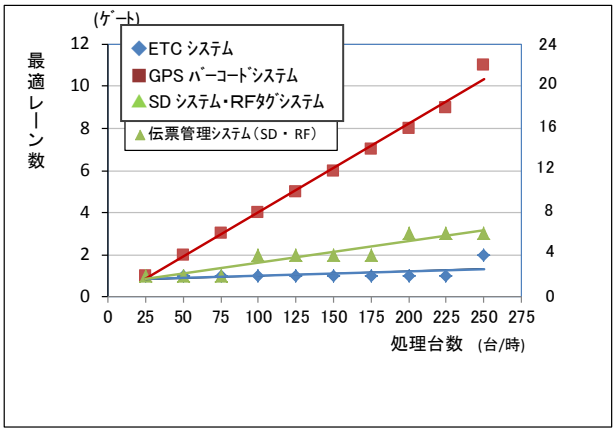


図 3-1 最適レーン数と必要人員の試算結果

実際の現場中間貯蔵施設入口への車両の到着は、時間帯により大きく変動するためこれに対応できる必要がある。そのため図3-1 に1時間あたりの車両の処理台数を 25～250 台とした最適レーン数と必要人員配置数の関係を示す。

この結果から、ETC システムでは1～2レーンで処理可能であるが、GPS システムでは1～11レーンと流入台数によって必要レーン数が大幅に変化する結果となった。

(5) 評価

入口での処理時間が最も短いこと、これに伴いトラックの流入量が変化しても、1～2レーンで滞留・渋滞を発生させない安定的な運用が可能であること、また各レーンに人を配置する必要がなく大幅に人員削減が可能なことから、ETCシステムが最適であると評価した。

(6) コスト比較

滞留長予測の結果から、表 3-2 のとおり中間貯蔵施設入口におけるコスト比較について、中間貯蔵施設の入口1箇所（車両1日 4,000 台を4入口で対応）を1年間稼働させたとして試算した。

表 3-2 中間貯蔵施設入口におけるコスト比較

	レーン数	ゲート※1	アンテナ1機（予備1機含む）	作業員（人）			計
ETC システム	1	600万円	400万円	1	32,600円／日※2	980万円／年（300日）	1,980万円
GPSバーコードシステム	5	3,000万円	－	10	213,000円／日※3	6,400万／年（300日）	9,400万円

※1：遮断機＋トラックスケール、 ※2：技術員＋特殊勤務手当、 ※3：交通誘導員A＋特殊勤務手当

4. 評価

(1)総合評価

○ETCシステムは、フレコンバックと車両の紐付が可能であり、仮置場、検問所、中間貯蔵施設入口での車両の自動認証ができることを確認し、許可車両情報や搬入物情報の確認時間の短縮ができることを確認した。（輸送の円滑化）

○仮置場、検問所、中間貯蔵施設の出入口での入退域管理者の縮減が可能なことを確認した。（入隊域管理者の縮減とそれによる作業者の被ばくの低減）

○汎用車両システム（GPS）と併用することで、渋滞等交通状況を考慮した運行管理が可能であることを確認した。（安心・安全な運行管理）

※課題：仮置き場や主要道路の一部で通信不能区間の対応。対策として運用面での対応、衛星電話等の活用検討が必要。

□一部課題は残るが、ETCシステムは、福島県内の除去土壌等の大量輸送における、安全・確実で有効なシステムであると考えられる。

(2)外部評価

外部評価委員からの評価結果は、以下のとおりである。（抜粋）

◇国立環境研究所：ETCシステムは、運搬車両の運行管理・全数管理について、各ポイントに設置したゲートによる車両の流入調整機能により、渋滞回避や入口滞留を抑制し、運行を最適化しうるシステムであると考えられた。運行時間の短縮による運転手の被ばく量低減や中間貯蔵施設入口等での作業員の人数の低減にも貢献しうるものと考えられた。

◇ITS-TEA：関連する技術を適切に組み合わせることで、本来必要とされる除染土壌等の大量運搬管理システムの全体像の構築が可能になると考えられるが、阪神高速道路の実証実験を通して、①システムに求められる要件と②ETC 技術の特徴を対応させた基本的な適用性の検討が進んでおり、ETC または ETC2.0※はその中で十分検討に値すると考えられる。

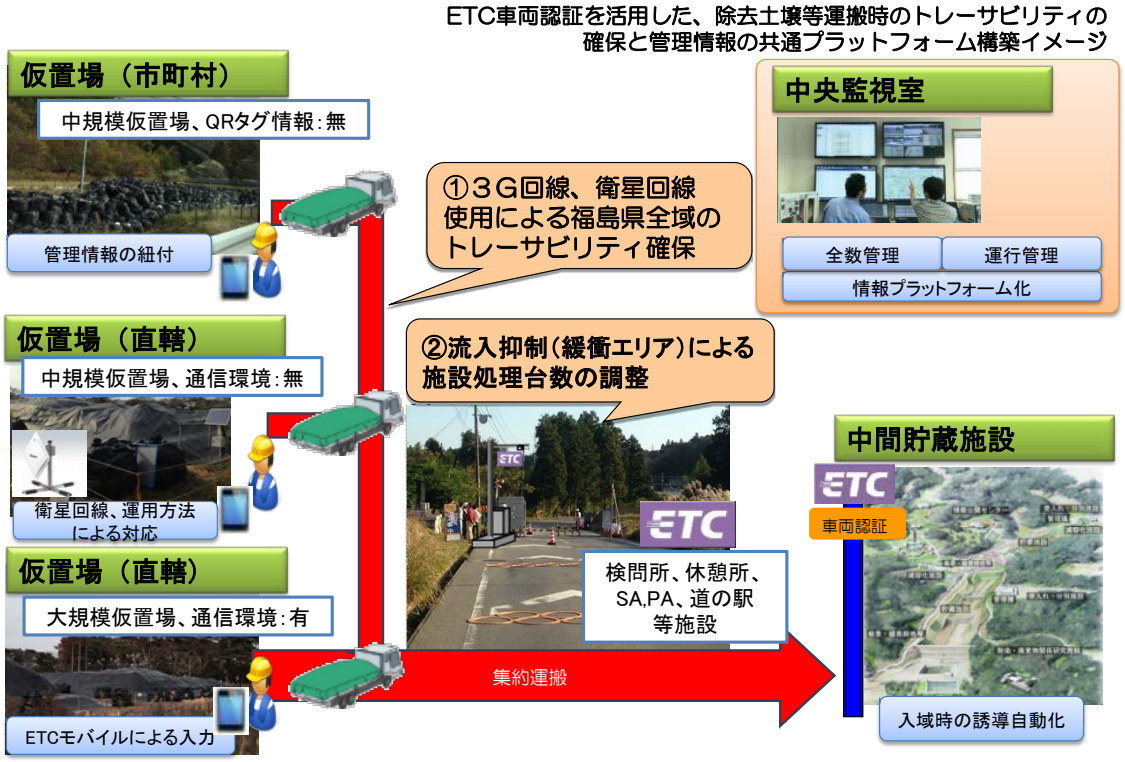
※ETC2.0 とは、自動料金収受に加え、渋滞回避、災害時支援や安全運転支援のサービスが受けられる。

5. 除去土壌等の輸送システムの課題と対応策

〈課題と対応策〉

課題		対策
電波の通信不能地域等が存在	山間部や帰還困難地域では電波不感地域が存在する。	・基地局、移動基地局を設置する。(光回線敷設が課題) ・携帯回線を衛星回線に変更する。(費用、回線速度が課題) ・汎用GPSシステムにログ蓄積機能を持たせる。(通信エリア入域後の通信で運用面から対応)
	上記ではリアルタイムでの連絡手段がない。	
	帰還困難地域では通電していないエリアが存在する。	・自家発電機(30A程度)を使用する。
新たな交通負荷による滞留発生	検問、中間貯蔵施設には、車両認証と本人確認が必要であり、時間を要する。	・運搬車両の認証はETCを設置(1秒)する。 ・本人確認は、カメラによる顔認証(数秒)などとのシステム連携を行う。
	一部の検問所で滞留が発生する。	検問にETCゲート設置し、円滑な車両認証を行う。
その他一般的課題	帰還困難区域内では、高線量下作業の可能性がある。	・検問所のETCによる入退出管理により、管理者数の縮減(特定線量下業務の削減)が可能。 ・帰還困難地域外のトラックの待機場所にETCゲートを設置し、台数管理を行うことにより、中間貯蔵施設への流入を制御し、運転手の光線量被ばく時間を短縮する。
	システム操作に不慣れな運転手による誤操作が懸念される。	ETC システムのゲートによる搬入場所、スクリーニング場所等への自動誘導により円滑な場内管理を実現する。
	複数現場から輻輳した場合の統括的な管理が必要である。	中央監視による一元的な情報管理によりトラブル発生時の迅速な対応が可能である。

今回実証から得られた仮置場搬出から中間貯蔵搬入までの統合管理システムイメージ



実施代表者の所属機関：清水建設株式会社

実証テーマ名：中間貯蔵施設におけるフレキシブルコンテナ破袋工程への非接触・高効率・省エネ型ウォータージェットカッターの適用技術実証

事業の概要：中間貯蔵施設における安全で効率の良い破袋システム（**添付資料1**）の構築に資するため、ウォータージェットカッターにより非接触でフレキシブルコンテナ底面のみを切開し袋材と分離して内容物を取り出す破袋技術に、フレキシブルコンテナ搬送設備を組込み、高速・連続処理を可能にした設備の処理能力を確認する。さらに、植物根から土壌を擦り取る可燃物分離設備とのシステム化検討の資料とするため、破袋後取り出した土壌について振動篩による篩い分けおよび破砕機による破砕処理実験を行い処理性能の確認を行う。

実施内容：

1）破袋設備へのフレキシブルコンテナ搬送設備の組込み

ウォータージェット破袋設備に、フレキシブルコンテナの整列、内容物の排出、破袋後の袋材回収を連続的に行うフレキシブルコンテナ搬送設備を組み込みシステム化する。

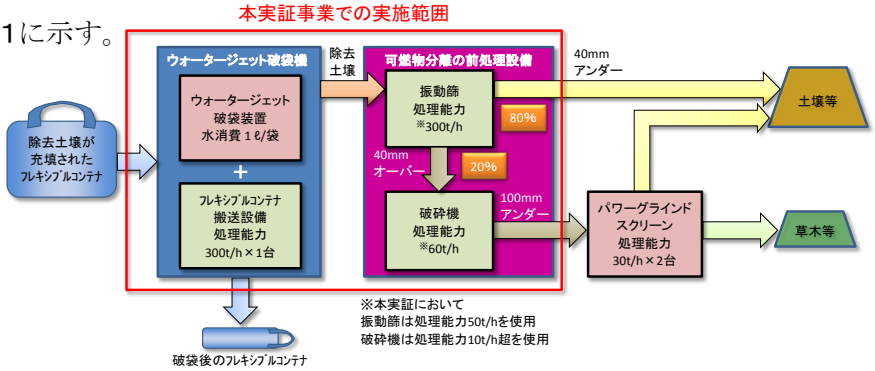
2）可燃物分離設備への前処理設備の組込み

可燃物分離設備への前処理として振動篩と破砕機を導入する。

技術概要：

1）試験フロー

試験フローを**図－1**に示す。



図－1 試験フロー

2）試験目標

フレキシブルコンテナ搬送設備の組込みによる連続破袋の実施状況を把握し、処理能力300t/h の実現性を確認する。また、可燃物分離の前処理設備の導入によって、破袋から草木等の分離処理までのシステム成立性を確認する。

3）期待される効果

①非接触かつ高速・連続的なフレキシブルコンテナ破袋・分別処理による、中間処理施設での運転コストの低減

②機械化による作業員の被ばく低減と作業の安全性向上

その他：特になし

実証効果：

1）破袋設備へのフレキシブルコンテナ搬送設備の組込み

・連続破袋を実証し、システム化（**図-2-1**）を確認した。

・6 袋/min の連続破袋を確認し、処理能力 300 t / h の破袋効率を実現した（**添付資料2**）。

・切削水の漏えいがなく、汚染水の発生がないことが確認できた（**添付資料3**）。

・6 重袋の破袋が可能なことを確認した（**添付資料4**）。

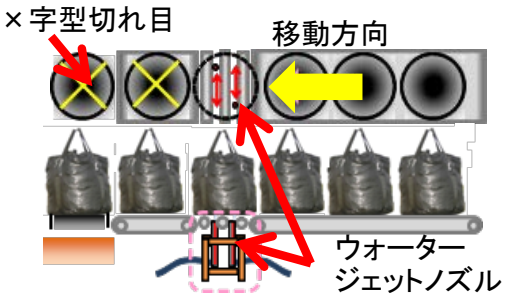


図-２-１　搬送・破袋システムのイメージ

2）可燃物分離設備への前処理設備の組込み

・宅地除染土壌及び農地除染土壌を使用して、草木等の混入が少ない土壌（40mm アンダー）と多い土壌（40mm オーバー）に篩分けができた（**図-2-2、添付資料5**）。

・草木等の混入が多い土壌については分離処理可能な 100m 以下に粒径を整えることができた。（**添付資料6**）

図-２-２　前処理設備の効果（宅地除染土）

以上の成果と共に実施設で適用する上での課題を抽出した（**添付資料7**）

除去物発生量評価：切削水による排水はほとんど発生しなかった（**添付資料3**）

作業員被ばく量評価：実証実験ヤードでの空間線量率モニタリングデータより

作業場所平均空間線量率　0.43～0.63 μ Sv/h（11/8～12/2）

現場滞在時間 9 時間/日とすると、作業員被ばく量は 3.9～5.7 μ Sv/日

コスト評価：(破袋のみ) 実証技術 380 円/袋 （人力破袋は 635 円/袋）	歩掛り（作業人工、作業速度）： 作業人工：８人工/１セット 作業速度：300 t / h （毎分６袋）

コスト評価条件：可燃物分離前処理は比較する人力破袋も同工程であるため破袋のみ対象。

・フレキシブルコンテナの荷下ろしから可燃物分離前処理へのベルコン積込までを対象

・毎分６袋、日稼働時間を６時間、月間稼働日数を 20 日、5 年間の稼働を考える

除染作業における安全上の注意：実証では、破袋・篩い分け・破砕等の作業時にフレキシブルコンテナから排出された除去土壌に直接接触する可能性があるため、マスク、綿手袋、保護帽を着用した。中間貯蔵施設では破袋以降は無人化し、遮蔽空間で処理する計画。

試験場所（住所）： 福島県双葉郡富岡町	除去物保管場所と保管状況（写真）：実証に用いた除染土壌フレキシブルコンテナは富岡町除染等工事（その２）で設けられた仮置場へ運搬され保管（**添付資料8**）。

添付資料1. 本技術実証テーマの着目点

中間貯蔵施設における処理フロー（**図－3**）では、フレキシブルコンテナを破袋して内容物を取り出し、必要に応じて除去土壌から草木等を分離するまでを破袋工程としている。

そこで、本技術実証ではこの破袋工程に着目し、ウォータージェットカッターを用いた非接触方式の破袋システム（**図－4**）を構築し、可燃物分離の前処理設備と連携した**図－1**に示す範囲の全体系システムについて成立性を実証した。具体的な実証実験設備配置図を**図－5**に、実証設備の全景写真を**写真－1**に示す。

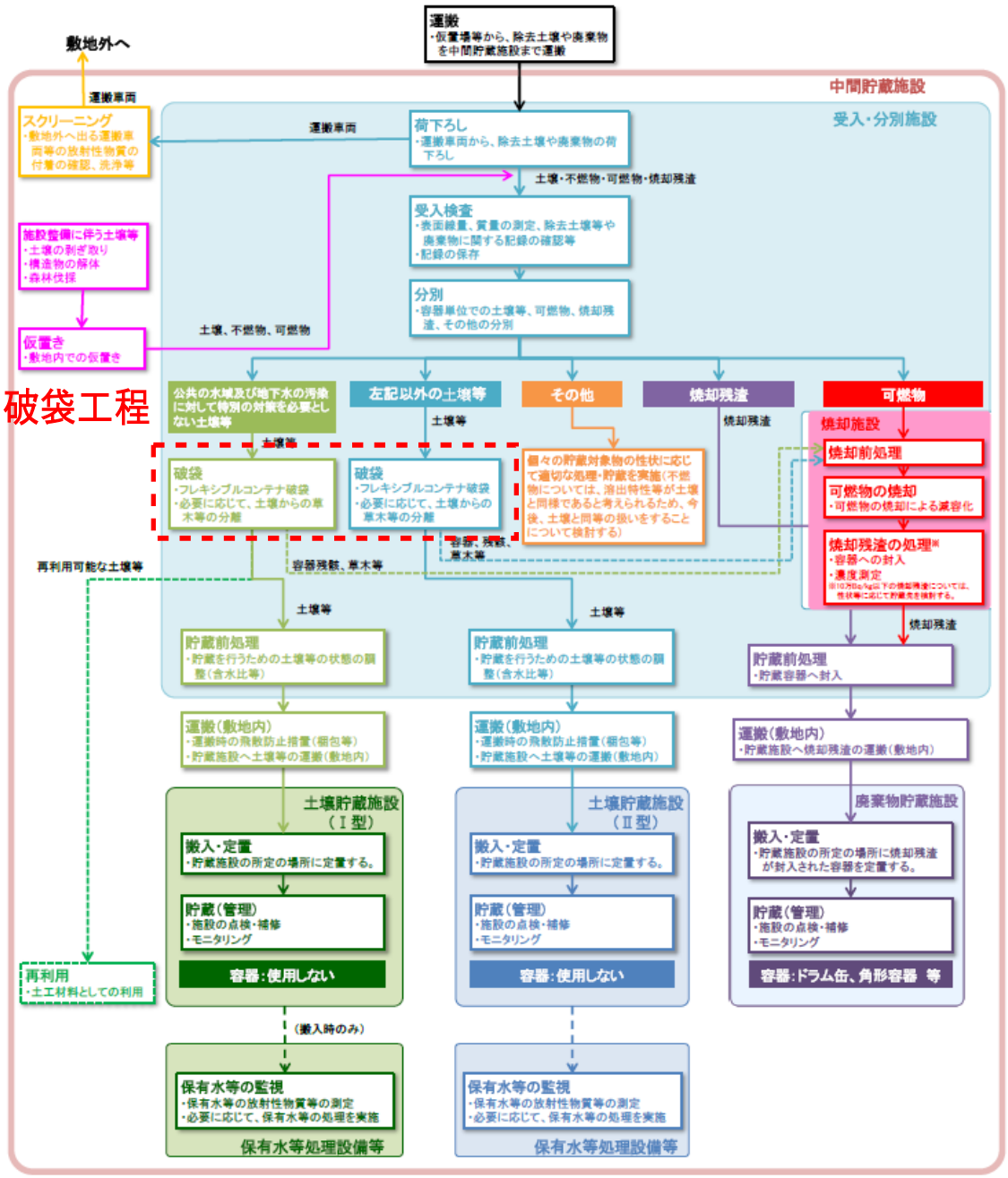


図-3　中間貯蔵施設における処理フロー

（「中間貯蔵施設安全対策検討会及び環境保全対策検討会の検討結果取りまとめ（平成25年10月）」より抜粋）

図-4　ウォータージェット破袋設備

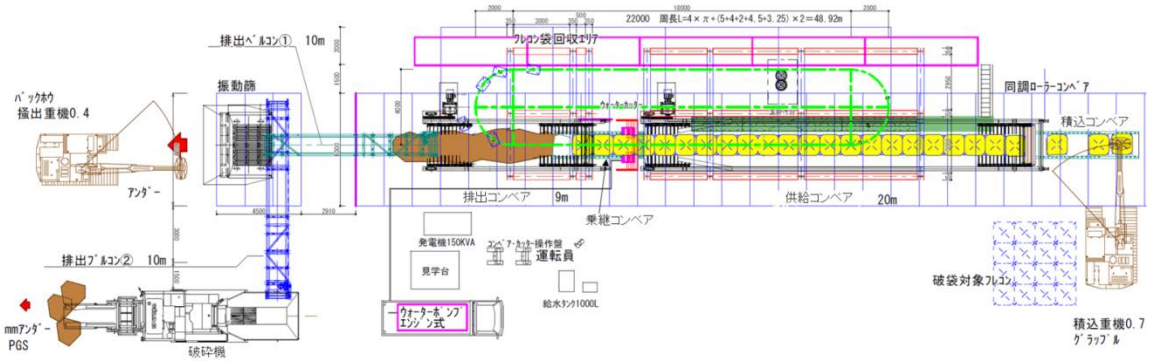


図-5　実証実験設備配置図

写真-1　実証実験設備全景（積込コンベア側から）

添付資料2. フレキシブルコンテナ搬送設備を組み込んだウォータージェット破袋設備の連続破袋性能確認

ウォータージェット破袋設備にフレキシブルコンテナ搬送設備を組み込み、連続破袋性能（毎分６袋処理）を確認した（**写真－2、写真－3**）。

2.1 フレキシブルコンテナの連続破袋能力

フレキシブルコンテナの連続破袋処理の実証実験を行い確認した。

写真-2 フレキシブルコンテナ連続破袋状況の確認

写真-3 フレキシブルコンテナの連続破袋完了状況

2.2 フレキシブルコンテナ底面の破袋状態

除去土壌排出後のフレキシブルコンテナ底面を観察し、袋材の切り残しの有無等を目視確認した。

写真－4 フレキシブルコンテナ底面の破袋状態

フレキシブルコンテナ底面の切削状態を確認し、袋材の切り残しが無いことを確認した。

添付資料3. 切削水発生量の確認

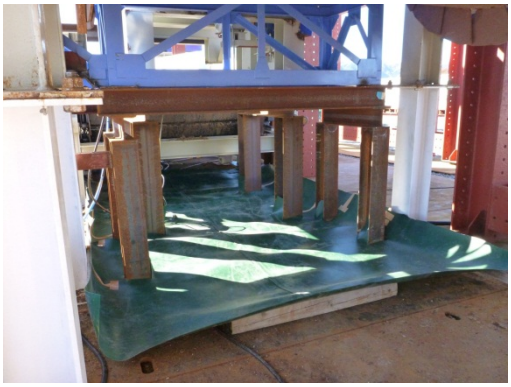
ウォータージェット破袋設備での使用水量を確認した上で、切削水の排水発生量とその放射性物質濃度を評価するために、破袋設備設置面に集水できる構造（遮水シート養生した防液堤）を設け、連続破袋性能確認試験における切削水の集水を試みた。

3.1 使用水量

１袋当たり 1.3 リットルの使用水量を確認した。

3.2 切削水排水量

連続破袋によって発生する切削水の排水の有無を確認した。



(a)連続破袋前の防液堤内部

(b)連続破袋後の防液堤内部

写真－5 連続破袋前後の防液堤内部の状況

写真－5のように、ウォータジェット破袋設備の設置面には、連続破袋後において排出コンベアからの落下土壌のみで水分は見られなかった。すなわち、貯留するほどの切削水による排水は発生しなかった。

添付資料４．多層構造のフレキシブルコンテナ破袋実証

φ1300mm の2重内袋付きフレキシブルコンテナにφ1100 の2重内袋付きフレキシブルコンテナ入り除去土壌を収めた多重（6重）フレキシブルコンテナについてウォータージェット破袋装置での破袋が可能であることを確認した（**写真－6**）。また、グラップルによって破袋後の袋材（6層分）を掴み上げ、内容物を分別できることも確認した（**写真－7**）。

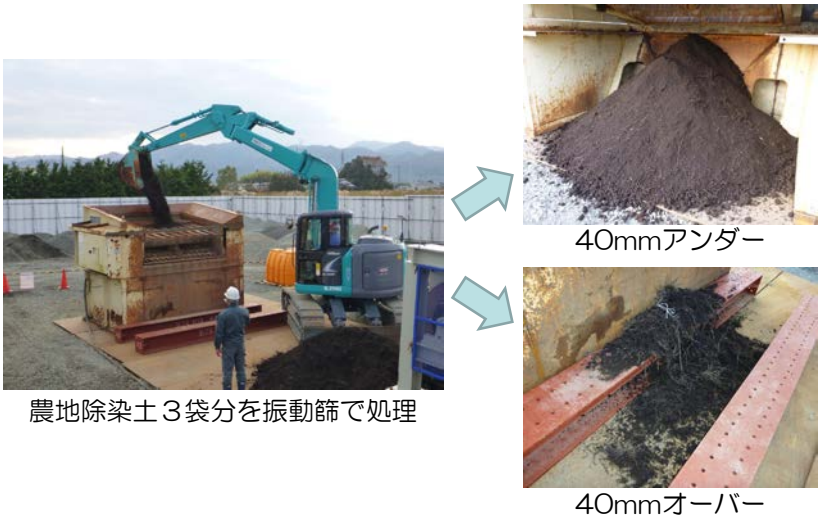
写真-6　φ1300mm＋φ1100mm 多重（6重）フレキシブルコンテナ破袋状況

写真-7　多重（6重）フレキシブルコンテナ袋材掴み上げ状況
（φ1300 の外袋は吊り下げで分離済み）

添付資料５．振動篩性能（粗粒分発生量）の確認

破袋後の除去土壌（３袋分）について前処理設備（振動篩、破砕機）にて処理を行い分別・破砕性能を確認した(**写真－8**)。除去土壌は農地除染フレキシブルコンテナと宅地除染フレキシブルコンテナの２種について評価した。

３袋分のフレキシブルコンテナ重量と 40mm を境に篩い分けされた粗粒分除去土壌を重量計測して粗粒分発生比率を確認した。



写真－8 振動篩による農地除染土の篩い分け状況

その結果、農地除染フレキシブルコンテナについての粗粒分発生比率は 2.4%、宅地除染フレキシブルコンテナについては 5.4%であった。

さらに、40mm 超に篩分けされた粗粒分を観察し、草木類や礫分等の分類を確認した。

(a) 農地除染フレキシブルコンテナから篩い分けた粗粒分(40mm オーバー)

(b) 宅地除染フレキシブルコンテナから篩い分けた粗粒分(40mm オーバー)

写真－9 振動篩によって篩い分けられた粗粒分(40mm オーバー)

農地除染フレキシブルコンテナからの粗粒分はほとんどが草木であった。宅地除染フレキシブルコンテナからも草木が多いが、石や礫、瓦の破片等も含まれていた（**写真－9**)。

添付資料６．破砕機性能（破砕状態）の確認

振動篩で篩い分けられた 40mm オーバーをさらに破砕した後、破砕機によって 100mm アンダーとなっていることを確認した（**写真－10**）。

写真－10 破砕機による粗粒分の破砕状況（農地除染フレキシブルコンテナ）

添付資料7．中間貯蔵施設の実施設へ適用する上での課題と対策の考え方

実証実験において確認された主な課題とその対策の考え方を示す。

7.1 様々な状態のフレキシブルコンテナへの対応について

破袋対象のフレキシブルコンテナには、破損状態にあったり、小型土のう袋が詰め込まれている（**写真－11**）などの様々なフレキシブルコンテナへ対応する必要がある。これに対しては、フレキシブルコンテナそのものや小型土のうが分離できずに土壌に混じってしまうため、後工程での除去（グラップル掴み上げ：**写真－7**、等）を考慮する必要がある。

写真-11 土のう袋が詰められたフレキシブルコンテナの例

7.2 積込コンベアにフレキシブルコンテナを積み込むグラップルの作業能率

積込ベルコンにフレキシブルコンテナを載せる積込機（グラップル）の能力が破袋能力に比べ不足していた。これに対しては、グラップルの積込能力が約 2.4 袋/台・min であったので、3 台の積込であれば毎分 6 袋の破袋能力に対応可能となる（**写真－12**）。

そのため積込コンベアレーンを長目に確保し、３台のグラップルで荷下ろしを行うことが考えられる（**図－6**）。

写真-12　グラップルによる積込状況（能力不足で供給コンベア上で玉突きできていない）

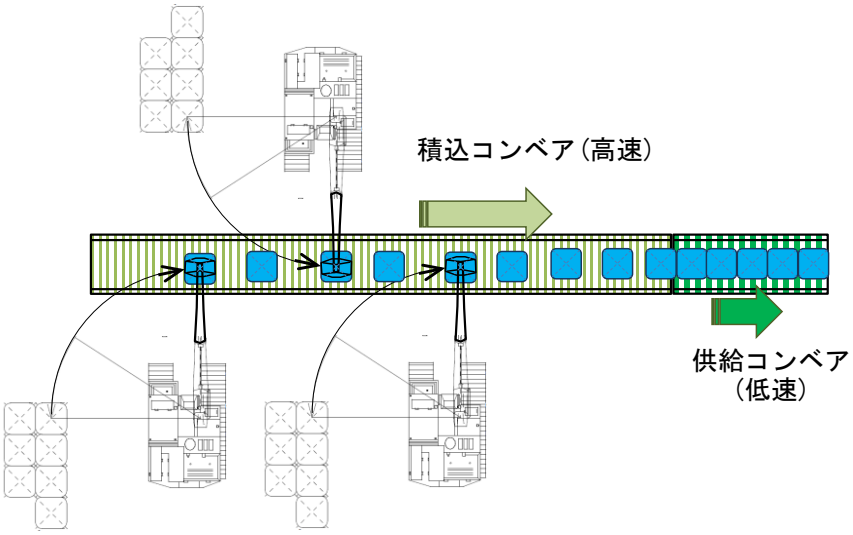


図-6　長めの積込コンベアと複数台のグラップルによる積込方法

7.3 何らかの要因（切り残し等）でフレキシブルコンテナ内に落下しきれない除去土壌等が残留

何らかの要因（切り残し等）でフレキシブルコンテナ内に落下しきれない除去土壌が残る場合があった（**写真－13**）。そういった場合でも、フレキシブルコンテナの処理では焼却処理の前に裁断過程が必要であり、その過程以降にさらに可燃物（フレキシブルコンテナ袋材）のみを選別・回収することで残留した土壌を含めた不燃物を分離することが考えられる。

写真-13　破袋後の残留土壌の発生状況

7.4 フレキシブルコンテナの位置ズレにより、×字型切れ目がずれる

ウォータージェットカッターのノズル制御については、玉突き状態の処理を前提とした一定サイクルでのスライド機構で実施（**写真-14**）したが、連続処理が進むにつれ、フレキシブルコンテナ毎のズレが生じ、ノズルのクロス位置が袋底面の中心からずれてくる。

これに対しては、ウォータジェットノズルの制御を高度化することにより対応可能と考える。例えば、フレキシブルコンテナをセンサーにより位置解析しながら適正に切断する等が考えられる。

写真-14　ウォータージェットノズルのスライド状況

7.5 積込時、玉掛作業時の作業員の被ばく対策

フレキシブルコンテナによっては高濃度の内容物が収納されている場合もあり、その場合には積込時、玉掛作業時（**写真－15**）における作業員の被ばくが課題となる。

積込時、玉掛作業時の作業員の被ばく対策としては、積込重機に遮蔽対策を行う、事前に吊り紐をまとめておくなどの玉掛作業システム化で対応することを考えている。

写真-15 フレキシブルコンテナの玉掛け作業状況

添付資料8. 除去物保管場所と保管状況

実証に使用した除去土壌フレキシブルコンテナは破袋実証後、除去土壌等は不燃物、破袋済みのフレキシブルコンテナは可燃除去物として、再度、富岡町除染等工事（その２）での工事管理に引き継がれ、所定のフレキシブルコンテナに再充填しタグ情報等を登録した後、小良が浜仮置場にて保管される（**写真－16**）。

写真-16 小良が浜仮置場（整備中）

実施代表者の所属機関:株式会社大林組

実証テーマ名:

作業員を必要としない大型荷下ろし・破袋設備及びフレキシブルコンテナ内腐敗水の浄化技術

事業の概要:

1. 除去土壌等の迅速かつ安全な荷下ろし・破袋システムを確立するため、作業員を必要としない荷下ろし・破袋技術を実証する。
2. 除去物に含まれる腐敗水を適切に処理するため、腐敗水の浄化技術を実証する。

実施内容:

1. フレキシブルコンテナ等をダンプアップにより荷下ろし、移送する専用コンベアと、連続的に破袋する大型破袋機を試作し、その性能を確認する。
2. 仮置きされたフレキシブルコンテナに含まれる有機物・放射性セシウムを含んだ腐敗水を放流可能なレベルに浄化する小型の水処理システムの効果を実証し、評価する。

技術概要:

1. 試験フロー

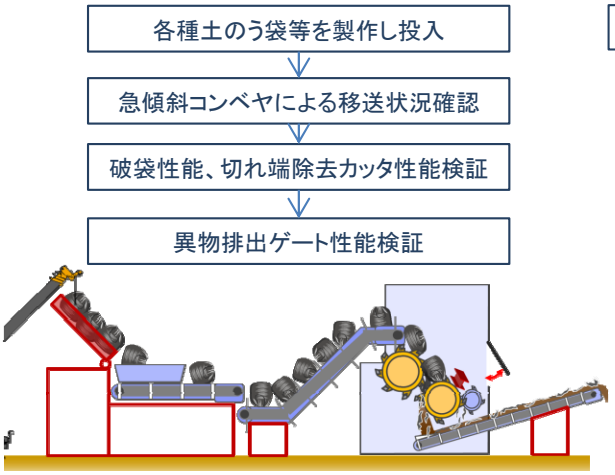


図1　大型破袋システムの試験フロー

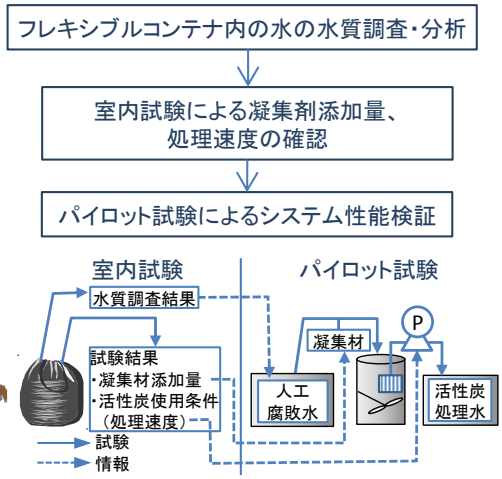


図 2　腐敗水浄化システムの試験フロー

2. 試験目標:

(1) 大型破袋システム全体の性能検証と単位時間当たりの処理能力を測定し歩掛を取得する。
(2) 腐敗水の組成を把握し、小型化した浄化設備により処理水が放流基準を満足することを確認する。

3. 期待される効果:

(1) 作業員を必要としない荷下ろし・破袋により、作業員の削減と被ばく量が低減でき、工事費も削減できる。
(2) 小型で移動可能な浄化システムにより、仮置場からフレキシブルコンテナを搬出する前に腐敗水を処理し、運搬時および破袋時等の安全性を確保できる。

<table>
<tr><td colspan="2">実証結果:
1. 大型破袋設備:投入、破袋、排出並びに破袋片の除去および異物排出を含む全過程を、玉掛け等作業員を介する作業なしに完遂できることを確認した。袋及び内容物の種類によらず良好な破袋性能を発揮し、処理能力は 260～430m³/h 程度となった。フレキシブルコンテナの材質による影響は大きくないが、PE 内袋付き耐候性大型土のう袋による二重封入袋については処理能力の低減が見られた。異物排出動作はシーケンス制御により、ロックから排出まで 120 秒で完了した。破袋直後に破袋片が刃に数枚巻き付くことはあるが、袋の切れ端除去装置により、巻き付き続けることによる破袋能力の低下を防止することができた。
2. 腐敗水浄化技術:フレキシブルコンテナ内腐敗水の凝集沈殿試験を行った結果、採用した天然由来凝集剤は、一般的な凝集剤である PAC(ポリ塩化アルミニウム)と高分子凝集剤による従来の処理と同程度の処理能力が得られ、小型化に有効であると判断された。さらに、処理量 1.5m³/h の簡易な小型パイロットプラントを試作し、模擬腐敗水による連続処理試験を実施した結果、処理水の COD(有機物濃度の一指標)等の放流基準を満たせることを確認した。</td></tr>
<tr><td colspan="2">除去物発生量評価:
1. 大型破袋設備:追加で発生する除去物はない。
2. 腐敗水浄化技術:SS 濃度 485mg/L、COD 濃度 440mg/L の腐敗水を処理した場合、試算では処理量 1m³ 当り凝集沈殿汚泥量は 0.4kg-dry、破過する活性炭は 4.6kg-dry 発生する。</td></tr>
<tr><td colspan="2">作業員被ばく量評価:
1. 大型破袋設備:大型破袋システムと従来工法の比較において延べ作業員数は 93%低減され、さらに個人の被ばく量は約 80%低減できるものと試算された。
2. 腐敗水浄化技術:従来の仮設水処理設備の運転と比較して差がない。</td></tr>
<tr><td>コスト評価:
1. 大型破袋設備: 290 円/m³(本システム)
560 円/m³(従来工法)
2. 腐敗水浄化技術:15,000 円/m³(本システム)
18,700 円/m³(既存の水処理装置)</td><td>歩掛り(作業人工、作業速度):
1. 大型破袋設備 :最大 430m³/h
2. 腐敗水浄化技術:最大 1.5m³/h</td></tr>
<tr><td colspan="2">コスト評価条件:
1. 大型破袋設備 :受入速度 1,000m³/h、実稼働時間 6.5 時間/日、3 年間(900 日)稼働
2. 腐敗水浄化技術:腐敗水量 40m³を 1.5m³/h 処理(仮設水処理装置 2.5m³/h、PAC 使用)</td></tr>
<tr><td colspan="2">安全上の注意:
1. 大型破袋設備 :破袋機内部の整備作業時の巻き込まれ等一般的機械災害対策が必要。
2. 腐敗水浄化技術:一般的に使用される仮設水処理設備と同じ対策となる。</td></tr>
<tr><td>試験場所(住所):
1. 大型破袋設備 :広島県福山市
2. 腐敗水浄化技術:福島県本宮市</td><td>除去物保管場所と保管状況(写真):
1. 大型破袋設備 :該当なし。
2. 腐敗水浄化技術:室内試験で発生した汚泥等は、試験水採取場所へ返却した。</td></tr>
</table>

1. 大型破袋システム

1.1 目的

本実証事業では、玉掛け・クレーン作業を排した作業員を必要としない大型荷下ろし・破袋設備（以後、大型破袋システムと記す）を試作し、その性能を検証することを目的とする。

1.2 実施内容

図 1-1 に本実証事業で使用した大型破袋システムの全体イメージを示す。本システムはダンプトラック等に積載されたフレキシブルコンテナまたは大型土のう袋等（以後、袋等の一般名称をフレキシブルコンテナと記す）をエプロンフィーダにダンプアップし、桟付き急傾斜コンベヤ（以後、傾斜コンベヤと記す）を介して破袋機投入部まで揚重し、自動的、連続的に破袋機に投入、破袋できるものである。

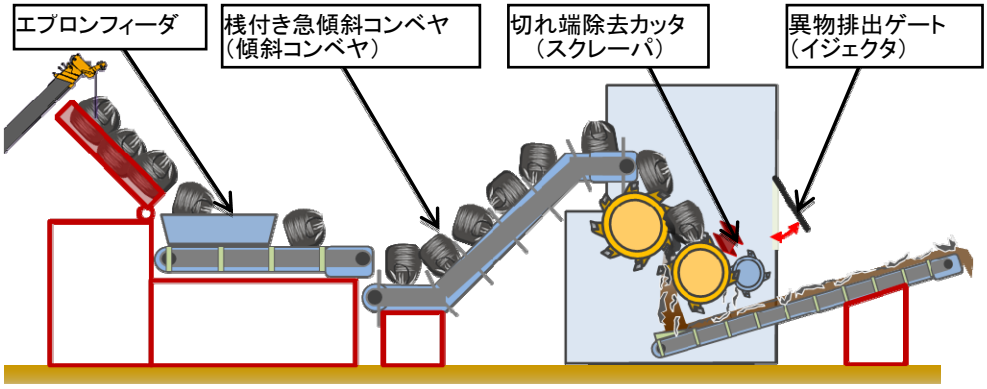


図 1-1 大型破袋システム全体イメージ

本実証事業では、大型破袋システムに真砂土などを封入したフレキシブルコンテナを投入し、その時間当たりの破袋能力を検証した。また、付帯設備として大型破袋機の刃に巻き付く破袋後のフレキシブルコンテナの切れ端や紐などを取り除く切れ端除去カッタ（以後、スクレーパ記す）と、大型破袋機の刃により破砕できず噛み込んだ異物を排出することができる異物排出ゲート（以後、イジェクタと呼ぶ。）を装備しており、それらの機能の有効性についても検証を行った。

1.3 試験体

被破袋物として、容器には耐候性大型土のう袋及びランニング型フレキシブルコンテナ（EVA）の２種を用い、内容物は真砂、粘性土及び草木の３種を用いた。また、内容物をフレキシブルコンテナに封入した上、さらにφ1.3m のポリエチレン二重内袋を装備した耐候性大型土のう袋に内容物を入れたフレキシブルコンテナに入れることでフレキシブルコンテナが二重になった状態での破袋可否の確認を処理能力試験とは別に行った。

耐候性大型土のう　ランニング型フレキシブルコンテナ　ポリエチレン二重内袋耐候性大型土のう

写真 1-1 各種袋の外観

1.4 試験機器

大型破袋システムの個別の機器を以下に説明する。

1.4.1 エプロンフィーダ

写真 1-2 にエプロンフィーダ単体の写真を示す。エプロンフィーダは傾斜コンベヤへの投入速

度を調整する役割を有し、直接傾斜コンベヤにダンプアップする場合に発生する傾斜コンベヤでのフレキシブルコンテナの積み重なりを防止でき、傾斜コンベヤから破袋機への投入速度を制御できる。実際に運用する際には、エプロンフィーダを複数台設置し、複数箇所でダンプが交互に荷下ろしできるため、十分なフレキシブルコンテナの供給量を確保できる。この場合、傾斜コンベヤ上の積載状態を感知してエプロンフィーダからの投入速度やタイミング、ダンプアップの指示等を、制御システムにより全自動で行うことが考えられる。

写真 1-2 エプロンフィーダ

1.4.2 傾斜コンベヤ

写真 1-3 に傾斜コンベヤの単体写真を示す。傾斜角は 40 度とした。通常のコンベヤの角度の限界は一般的に 15 度前後とされるが、破袋機に投入するための揚程を約 8m、コンベヤの傾斜角を 15 度するとコンベヤの斜行部分の設置長さだけで約 30m 必要となる。コンベヤの傾斜角を 40 度とすることで設置長を 9.5m 程度まで低減できる。フレキシブルコンテナを袋の形状のまま急傾斜のコンベヤで輸送する装置は、大林組が調査した範囲ではこれまで世界的に例がなく、本技術は中間貯蔵施設の受入・分別施設のコンパクト化に資するものと考えられる。

写真 1-3 傾斜コンベヤ

1.4.3 破袋部

掘削機の刃（以後、カッタティースと記す）を複数個取りつけた円筒（以後、カッタドラムと記す）を図 1-2 のように平行かつ高低差をつけて相対するように配し、両カッタドラムの隙間に、被破袋物を投入することで破袋する。

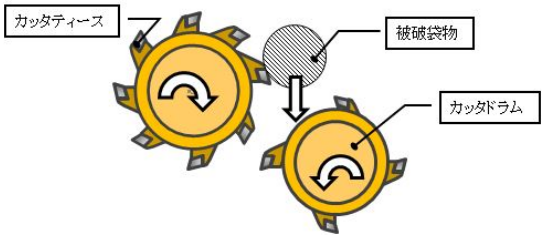


図 1-2 カッタドラムとカッタティース

1.4.4 スクレーパ

写真 1-4 にスクレーパの写真を示す。モータにより自転するスクレーパの凹み部分に対し、相対して回転するカッタドラムのカッタティースが通ることで、巻き付いた破袋片をこそぎ落とす仕組みとした。スクレーパ側にカッタティースのような構造を導入すると、そのカッタティースに破袋片が巻き付くことが懸念されたため、スクレーパ側にはカッタティースのような鋭利な形状のものは設置しなかった。

写真 1-4 スクレーパ

1.4.5 イジェクタ

写真 1-5 にイジェクタの構造写真を示す。

異物の排出はカッタドラム及びスクレーパの逆回転とゲートの開放によって行われる。これらを異物排出装置（イジェクタ）と称す。

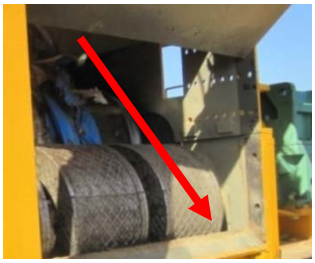


写真 1-5 イジェクタ機構の構造

1.5 試験結果

1.5.1 定性的観察

本実証試験により、玉掛け作業等作業員が直接的に除去土壌等に接近・介在することなしに、フレキシブルコンテナの荷下ろし、揚重、破袋、排出までの作業を機械化できることを確認した。

代表的な試験結果を写真 1-6 に示す。各種フレキシブルコンテナおよび内容物を組み合わせて破袋した結果、破袋後の破袋片は小さいもので 200mm 程度、大きいもので長さが 1,000mm 以上あったが、次工程のふるい分け工程でフレキシブルコンテナ破袋片と内容物に分離できると考えられるまで破袋できたと判断する。

写真 1-6 破袋結果例

1.5.2 処理能力評価

図 1-3 に各種フレキシブルコンテナおよび内容物に対する処理能力を示す。

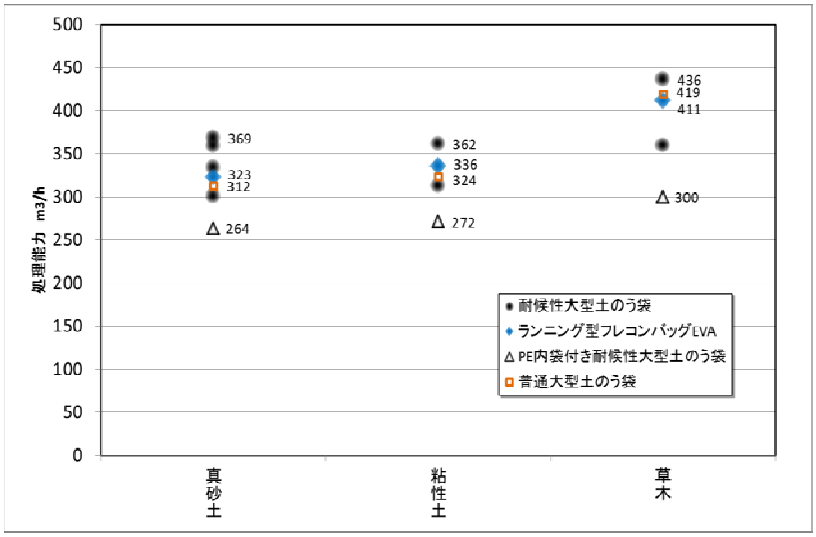


図 1-3 フレキシブルコンテナの種別と破袋処理能力の関係

破袋能力は、フレキシブルコンテナの材質と内容物の違いにより、264～436m³/h となった。フレキシブルコンテナの材質による破袋能力への影響は大きくないが、PE 内袋付き耐候性大型土のう袋による二重封入袋においては、処理能力の低減が見られた。

1.5.3 スクレーパとイジェクタの評価

イジェクタによる排出動作を試験した。排出動作はシーケンス制御により、ロックから60秒間でゲート開放、30秒間反転、30秒間でゲートを閉めつつ通常回転を行うよう設定した。このため排出動作にかかる時間は120秒が規定値となる。排出試験では、準備した異物のほとんどが破砕もしくは通過してしまい、カッタドラムによるロックからの排出動作の確認が困難であった。そこで、さらに大型の300×300mmのH形鋼を用いたところ、排出動作を設定した120秒で完了した。

スクレーパに関しては、破袋片の巻き付きを皆無にすることは困難であったが、スクレーパによりある程度巻き付いた後は、それ以上巻き付きが増えることはなかった。このため破袋片の巻き付きにより破袋能力が落ちるようなことはなかった。また数枚巻き付いた破袋片も異物排出試験で逆回転をすることでスクレーパによってこそげ落とされ、破袋片が脱落することから、本実証実験で試作したスクレーパ構造が有効であったと判断する。

1.5.4 安全評価

一日の作業時間を8時間として、作業員が除去土壌等に接近する時間を比較すると、既存工法では8時間となるが、本システムでは点検及びメンテナンス作業に要する1.5時間程度のみ（内訳は、始業前点検30分、終業後の点検30分、メンテナンス30分）と算定する。したがって、約80%の被ばく量の低減効果が得られると言える。

点検及びメンテナンス作業では、一般的なコンベヤ・破砕設備に対する主に巻き込まれ災害防止策が必要となる。

1.5.5 コスト評価

大型破袋システムを中間貯蔵施設の受入・分別施設で3年間（900日）または5年間（1,500日）運用した場合のコストを評価した。機械の実稼働時間を 6.5 時間、一時間当たりの処理量を1,000m³とした。比較対象の従来工法として、受入れには、バックホウオペレータ、ダンプ上での玉掛け者、玉外し者の3人が18ライン必要と想定する。加えて、線量測定後にフレキシブルコンテナを玉掛けする玉掛け者とバックホウ、破袋作業者の3人が18ライン、破袋された内容物を集積するためのバックホウ（またはホイルローダ）が6台必要と想定する。図 1-4 に従来工法のイメージを示す。これに対し、本実証事業で使用した大型破袋システムは、システム全体としての処理能力を200m³/h を採用すると 5 ライン必要となるが、機械故障などを想定した場合の冗長性の確保を考慮し6ライン設置すると仮定する。

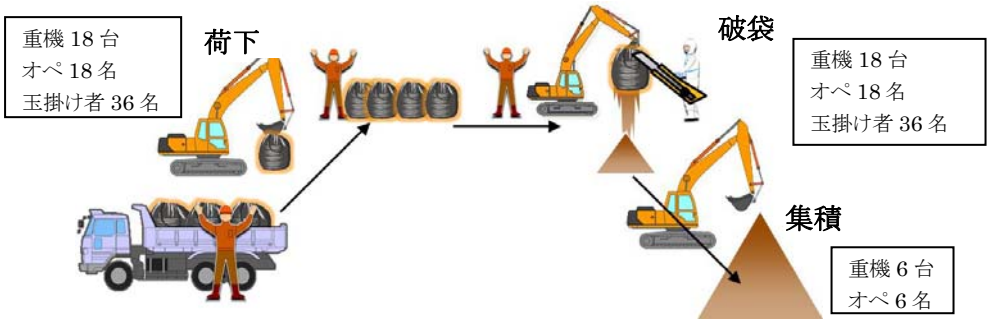


図 1-4 従来工法のイメージ図

表 1-1 大型破袋システムと従来工法とのコスト比較

	大型破袋システム (6 ライン)	従来工法 (18 ライン)	備考
取得価格	1,380,000,000 円	44,880,000 円	
設置撤去費	24,000,000 円	0 円	
運搬費(往復)	36,000,000 円	4,800,000 円	
オペレータ	81,000,000 円(3 人)	1,134,000,000 円 (42 人)	30,000 円/人日で概算
玉掛け者、破袋作業員	不要	1,944,000,000 円	
メンテナンス要員	135,000,000 円 (5 人)	135,000,000 円 (5 人)	
摩耗部品交換他メンテ	50,000,000 円	30,000,000 円	
合計	1,706,000,000 円 7,200 人日	3,292,680,000 円 107,100 人日	
単価	290 円/m^3	560 円/m^3	

1,000m^3/h の受入速度で 3 年間稼働すると仮定した場合、玉掛け作業を等を必要とする従来工法と比較し、コストは約 48%低減でき、延べ作業員数は 93%低減できる。また、単位体積当たりの単価は従来工法 560 円/m^3 に対し、大型破袋システムでは 290 円/m^3 となった。

2. 腐敗水浄化技術

2.1 目的

フレキシブルコンテナ内腐敗水に対して、仮置場で実施可能な簡易かつ小規模な腐敗水浄化技術を評価するため、実証試験により提案する浄化システム(図 2-1)の効果を実証する。

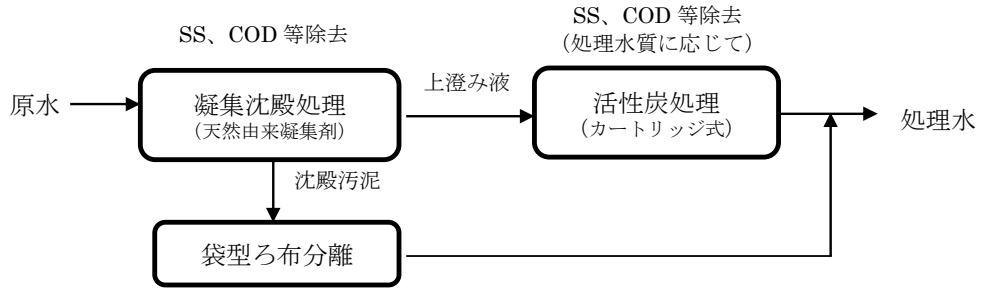


図 2-1 提案する腐敗水処理システム

2.2 実施内容

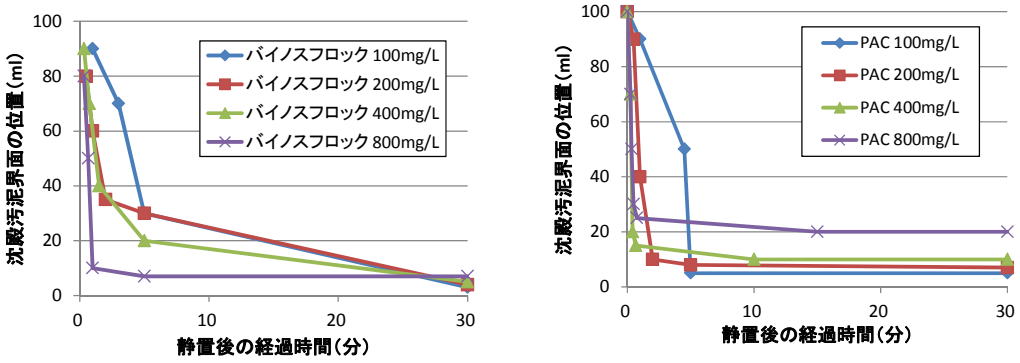
フレキシブルコンテナ内腐敗水を入手し、室内試験において凝集沈殿試験を実施し、COD(化学的酸素要求量:有機物の一指標)、放射性セシウム等の除去効果を確認する。凝集沈殿した処理水は、活性炭によるカラム吸着試験を実施し、残留する COD の除去効果を確認する。

続いて、室内試験のデータをもとに車載可能な小型のパイロットプラントを試作し、模擬腐敗水による連続処理試験を実施し、処理効果を確認する。なお、凝集剤は、1 種類の薬剤のみで凝集沈殿が可能となる天然由来凝集剤(商品名:バイノスフロック)を使用する。比較する凝集剤としては、濁水処理等で一般的に使用されている PAC(ポリ塩化アルミニウム)とし、高分子凝集剤を併用した。

2.3 室内試験

2.3.1 凝集沈殿試験

仮置場のフレキシブルコンテナ内から採取した水（排水①）を用いて、バイオノスフロックおよびPAC（高分子凝集剤併用）による凝集沈殿試験を実施した。沈殿開始後の沈降汚泥界面の位置（汚泥容量）の経時変化を図 2-2 に示す。経過時間 5 分までの初期沈降性について、バイノスフロックは PAC（高分子凝集剤併用）と同等な性能を示した。



【バイノスフロック】　　【PAC+高分子凝集剤】

図 2-2 沈降汚泥界面の位置の経時変化（排水①）

続いて、代表的な添加量で凝集沈殿を行い、上澄み液の詳細な水質データを入手した。添加量は、バイノスフロックと PAC いずれも 400mg/L とした。凝集沈殿後の上澄み液の水質を表 2-1 に示す。

表 2-1 添加量 400mg/L における凝集沈殿処理水の比較（排水①）

項目		フレコン内腐敗水	凝集沈殿処理水	
			バイノスフロック 400mg/L	PAC 400mg/L
SS	(mg/L)	485	52	15
COD_{Mn}	(mg/L)	440	130	160
Cs-134	(Bq/L)	4.9	3.9	3.3
Cs-137	(Bq/L)	13	11	12
大腸菌群数	(MPN/100mL)	23	8	17

SS については、バイノスフロックにより 89%、PAC により 97%除去されている。COD については、バイノスフロックにより 70%、PAC により 64%除去されている。放射性セシウムについては極めて濃度が低いが、バイノスフロックでは Cs-137 が 13Bq/L から 11Bq/L、PAC では 12Bq/L まで若干低下している。大腸菌群数についても放流基準値（3,000 個/ml≒300,000 MPN/100ml）に比べて極めて数が少ないが、バイノスフロックにより 23 MNP/100ml が 8 MNP/100ml、PAC により 17 MNP/100ml まで低下している。

凝集沈殿においてバイノスフロックは、一般的に使用されている PAC と同程度の効果を得られることを確認できた。バイノスフロックは、凝集したフロックを大きくするための助剤としての高分子凝集剤が不要であり、高分子凝集剤の添加・混合設備が不要となり、装置の小型化が図れる。

2.3.2 凝集沈殿上澄み液の活性炭カラム吸着試験

活性炭カラム吸着試験を実施し、活性炭カートリッジの通水速度と COD 吸着量を求めた。排水①をバイノスフロック(添加量 400mg/L)で凝集沈殿して入手した上澄み液を使用した。使用に際しては、活性炭カラムの閉塞防止を目的に、ろ紙(JIS 規定の定量分析用 5 種 C 相当品)でろ過した。COD 値は 182mg/L となる。カラムに石炭系活性炭を充填(φ1.8cm×30cm)し、カラム下方からペリスタポンプで定量注入した。試験状況を写真 2-1 に示す。なお、カラム内の通水速度(空間速度:SV 値=1 時間当たりの流量÷活性炭充填量)別に試験を行い、処理水の COD 値が安定するまで一定時間ごとに採水、分析した。SV 値は、3 ケース(3、6、9)とした。

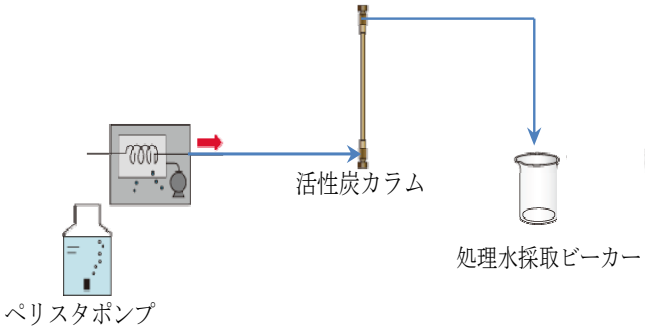


図 2-3 活性炭カラム吸着試験の概要図

写真 2-1 吸着試験の状況

3 ケースの SV 値で実施した際の処理水の COD 濃度の経時変化を図 2-4 に示す。通水開始後、50 分程度で処理水質は安定した。SV3 の処理水は 50mg/L(除去率約 70%)であり、放流基準値以下となり、排水①の水質では、SV3 での処理が好ましいと判断された。また、活性炭吸着試験の結果から求めた COD 吸着量は、活性炭 1g 当たり 28mg となった。

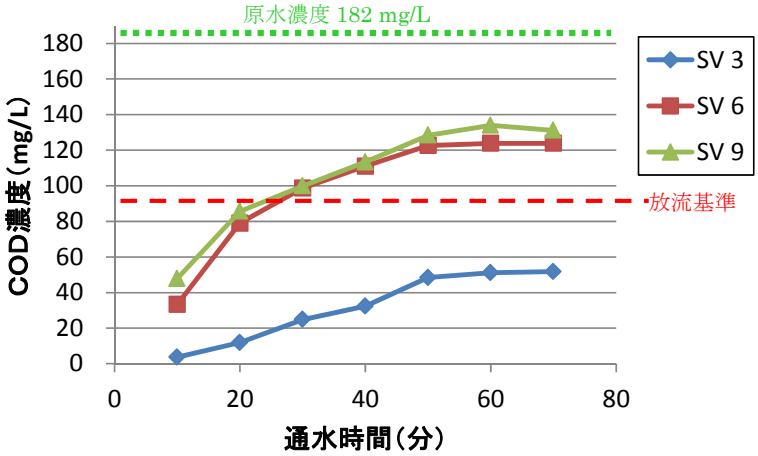


図 2-4 通水速度(SV 値)による処理水 COD 濃度の経時変化

2.4 パイロットプラント試験

2.4.1 パイロットプラントの設計・製作

パイロットプラントは、仮置場間の移動が容易な車載型(2t トラック)を想定した。さらに、各現場によって異なると思われる水質・水量に合わせて容易に調整することで放流基準を満たせるシステムを目指した。パイロットプラントのフローを図 2-5、全体像を写真 2-2 に示す。各仮置場では多

量の排水は発生しないと想定し、処理能力は最大 1.5m³/h とした。なお、製作後の予備運転試験の結果から一部改造を加えた。

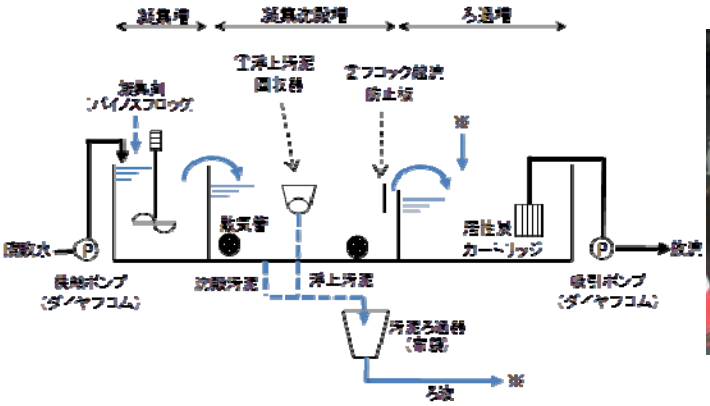


図 2-5 パイロットプラントのフロー

写真 2-2 パイロットプラントの全景

2.4.2 模擬腐敗水による連続処理試験

ベッセルタンクに水と腐葉土を添加し、約 3 週間養生して作成した模擬腐敗水を使用して試験を行った。バイノスフロックの添加量は 130mg/L とした。また、活性炭カートリッジの通水速度(SV 値)は、3 ケース(4、6、32)で実施した。

バイノスフロックを添加後、沈殿槽では良好なフロックが形成された。原水、凝集槽内の水、活性炭カートリッジ処理水の状況を写真 2-3 に示す。また、一部、浮上したフロックに対しては、改造時に設置したスカムスキマー(写真 2-4)と浮上汚泥を水流により中心部へ集める散気管の設置により回収が可能となった。また、処理水の水質(表 2-2)は、放流基準値を満たせることを確認した。

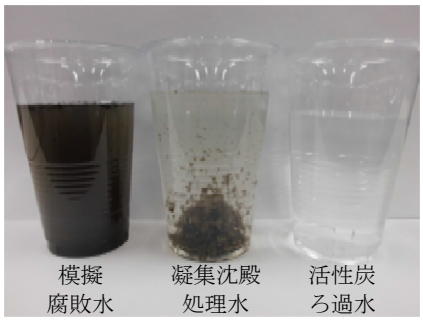


写真 2-3 処理水の状況

写真 2-4 浮上汚泥の回収

表 2-2 パイロットプラントの処理水の水質

項目	単位	模擬腐敗水	凝集沈殿処理水	活性炭カートリッジ処理水 通水速度(SV)			放流基準値	判定
				4	6	32		
pH	(—)	7.3	7.4	7.2	7.3	7.2	5.8～8.6	○
SS	(mg/L)	1,200	41	<4	<4	<4	60	○
COD_{Mn}	(mg/L)	160	29	6.3	7.2	8.5	90	○
大腸菌群数	(MPN/100mL)	68,000	−	49	23	23	300,000	○

2.5 腐敗水処理試験の評価

2.5.1 放射能濃度の低減効果

採取したフレキシブルコンテナ内腐敗水の放射性セシウム濃度は、極めて低濃度（Cs-137：13Bq/L）であるため判断が難しいが、バイノスフロックは一般的な凝集剤であるPACと効果は同程度であることを確認した。なお、課題としては、明確な評価をするためにも放射性セシウム濃度が高いフレキシブルコンテナ内腐敗水による実証が必要である。但し、バイノスフロックは、既に道路除染の洗浄水処理に使用されており、放射能濃度の低減方法として実績がある。

2.5.2 COD の除去効果

バイノスフロックは、一般的な凝集剤である PAC と比較して、同添加量において若干ではあるが除去効果が高いことを確認した。さらに、パイロットプラントによる模擬腐敗水（COD：160mg/L）の連続処理試験では、放流基準（90mg/L 以下）を満たせることを確認した。課題としては、明確な評価をするためにも実際に発生するフレキシブルコンテナ内腐敗水による実証が必要である。

2.5.3 大腸菌の除去効果

パイロットプラント試験では、模擬腐敗水中の大腸菌群数（68,000 MPN/100ml）は、放流基準値（3,000 個/ml≒300,000 MPN/100ml）より低い値ではあるが、処理水では 99%除去されていることを確認した。なお、フレキシブルコンテナ内腐敗水（23 MPN/100ml）による室内凝集沈殿試験では、極めて低い値であり効果の判断が難しいが、バイノスフロックは、一般的な凝集剤であるPAC（ポリ塩化アルミニウム）と同等の除去効果を確認した。

2.5.4 減容・減量化の効果

発生する凝集沈殿汚泥および吸着破過して処分する活性炭の量を、2.3.1 および 2.3.2 の室内試験結果を参考に試算した。フレキシブルコンテナ内腐敗水量 40m^{3}を処理すると仮定した場合、発生する沈殿汚泥量は、バイノスフロックでは 17.4kg-dry、一般的に使用されている PAC では 18.8kg-dry と約 7%削減、活性炭量は、バイノスフロックでは 186kg-dry、PAC では 229kg-dry と約 19%削減される試算結果となった。

2.6 コストの評価

提案した本システム（パイロットプラント相当 1.5m^3/h）と既存のレンタルの小型仮設水処理装置（2.5m^3/h）を使用した場合のコストを比較した。仮置場 4 箇所を 1 か月間で移動して処理し、フレキシブルコンテナ内腐敗水の発生量は 1 箇所当たり 10m^3、水質は COD 濃度を 440mg/L とした。凝集剤は、本システムがバイノスフロック（400mg/L）、仮設水処理設備が PAC（200mg/L）と高分子凝集剤（3mg/L）とし、活性炭の COD 飽和吸着量は 28mg-COD/g とした。フレキシブルコンテナ内腐敗水 1m^3 当たりのコストを試算した結果を表 2-3 に示す。

提案システムでは、処理単価が 15,000 円/m^3、既存の仮設水処理設備では 18,700 円/m^{3}となり、20%程度低減できる試算結果となった。

表 2-3 コスト試算結果

	提案システム	仮設水処理装置	備考
設備取得費	3,000,000 円 ↓ 耐用年数3年として 減価償却費83,000 円/月と仮定	250,000 円/月 (レンタル)	
運搬車両費	150,000 円/月	200,000 円/月	レンタル費用 提案システム:2tトラック 仮設水処理装置:4tトラック
発電機	— (設備に含む)	50,000 円/月 (レンタル)	
燃料費	トラック 7,310 円 発電機 8,960 円	トラック 5,120 円 発電機 6,400 円	ガソリン160 円/L
作業員	240,000 円 (2日/週×4)	120,000 円 (1日/週×4)	30,000 円/人日
薬品費	バイノスフロッ(16kg) 16,000 円 活性炭(186kg) 93,000 円	PAC(16kg) 800 円 高分子凝集剤(0.12kg) 120 円 活性炭(229kg) 114,500 円	バイノスフロック 1,000 円/kg PAC 50 円/kg 高分子凝集剤 1,000 円/kg 活性炭 500 円/kg
合計	598,270 円/月	746,980 円/月	
単価	15,000 円/m^3	18,700 円/m^3	百円未満を四捨五入

2.7 安全上の注意

本処理システムは、既存の一般的な仮設水処理設備と比較して、操作・運転において安全上の注意点に差異はなく、同様な対策を施すのみで良い。なお、凝集剤であるバイノスフロックは、一般的な凝集剤である PAC 等と比べて、添加後も pH に影響を与えないため、フレキシブルコンテナ内腐敗水の pH が放流基準範囲内(5.8～8.6)であれば pH 調整の必要がなく、危険物である苛性ソーダや硫酸等の薬剤を扱う必要がなくなり、安全管理が軽減される。

3. まとめ

本実証事業では作業員を必要としない大型荷下ろし・破袋設備として、フレキシブルコンテナ等をダンプアップにより荷下ろし、移送する専用コンベアと、連続的に破袋する大型破袋機を試作し、その性能を確認し、また、フレキシブルコンテナ内腐敗水の浄化技術として、仮置きされたフレキシブルコンテナに含まれる有機物・放射性セシウムを含んだ腐敗水を放流可能なレベルに浄化する小型の水処理システムの効果を実証し、評価した。

その結果、作業員を必要としない大型荷下ろし・破袋設備では投入、破袋、排出並びに破袋片の除去、異物排出を含む全過程について、玉掛け等作業員を介する作業なしに完遂できることを確認した。また、フレキシブルコンテナ内腐敗水の浄化技術では、フレキシブルコンテナ内腐敗水の凝集沈殿試験を行った結果、採用した天然由来凝集剤は、一般的な凝集剤である PAC(ポリ塩化アルミニウム)と高分子凝集剤を使用した従来の処理と同程度の処理能力が得られることを確認した。これにより、高分子凝集剤の供給設備や混合する水槽が不要となり、小型化に有効であると判断された。さらに、小型化を図ったパイロットプラントを試作し、模擬腐敗水による連続処理試験を実施した結果、処理水は放流基準基準を満たすことを確認した。

実施代表者の所属機関:アレバ・エヌシー・ジャパン・プロジェクト(株)

実証テーマ名:除去土壌の濃度選別システムの実証

事業の概要:実用規模相当の除去土壌の濃度選別システムを用いた土壌選別試験を行い、選別精度、処理速度等の性能を確認する。また、前処理として異物分別、土壌のほぐし等をロールスクリーンで行った場合の土壌特性別の処理能力を把握する。

実施内容:除去土壌を収納したフレキシブルコンテナの一時保管場所から、簡易測定で放射能濃度8,000Bq/kg超過のフレキシブルコンテナを選抜し、濃度ごとに3区分する。それぞれの濃度区分の土壌をロールスクリーン(以下、「R/S」と呼ぶ)と汚染土壌選別装置(以下、「CSSU」と呼ぶ)を組合せたシステムで選別し、それぞれの処理能力と分離できる低濃度側土壌(8,000Bq/kg以下)の割合を検証する。また、R/Sで異物を除去した結果、土壌が減容化される割合を検証する。

技術概要:

1. 試験フロー

(1)フレキシブルコンテナの選抜・運搬

・簡易測定で 8,000Bq/kg 超過を選抜し、運搬

(2) 準備試験

・R/S と CSSU の処理能力確認

・分別された異物の評価

(3)濃度区分(簡易測定で 3 区分)

(4)本試験(濃度区分ごとに実施)

(4-1) 土壌分析と含水率調整

(4-2) 異物分別(R/S)

(4-3) 濃度選別(CSSU)

(4-4) 分析・統計解析

・低濃度側土壌を分析し濃度分布を推定

・抽出できた低濃度側土壌の割合を求める

(5)試験土壌の返却

2. 試験目標

(1) 濃度選別可能な土壌の前処理条件の確認

(2) 草木根の除去による減容化率の把握

(3) 簡易測定で 8,000Bq/kg 超過に区分される除去土壌から、本システムで 8,000Bq/kg 以下へ選別される割合

3. 期待される効果

土壌貯蔵施設(II 型)は土壌貯蔵施設(I 型)と比較すると、建設費のほか、浸出水の水処理設備の設置や運営管理が必要となるため、割高とされる。本システムでは、土壌貯蔵施設(II 型)へ搬入、貯蔵される見込みである 8,000Bq/kg 超過に区分される除去土壌の容量を減少させられるため、結果、土壌貯蔵施設の建設費並びに運営管理費を削減することができる。

その他:

実証試験の結果:

1. 濃度選別可能な土壌の前処理条件の確認と草木根の除去による減容化率の把握

(1) 前処理条件確認結果

機器・条件	処理速度(t/h)*1 含水率13%	処理速度(t/h)*1 含水率16%	CSSU への適用性(異物分別)	結果・考察
R/S (20mm,17°)	49	処理不能	含水率 13%は適用可	草木根が効率的に軽量物側へ分別された。φ30mm 程度の石も効率的に除去できたが、そのうち比較的小径は軽量物側へ分別された。含水率が高い場合、土壌の団塊化により分別が困難であった。
R/S (50mm,20°)	95	44	適用可	草木根が効率的に軽量物側へ分別された。草木根からの土壌分離がR/S(20mm)より効率的。比較的小径の石も重量物側へ分別された。含水率が高い場合も分別できたが、付着による処理速度の低下が見られた。
CSSU	100	61*2	―	土壌の供給時の落下、堆積による圧縮が生じ、土壌のかさ密度が変動し誤差要因となったことから、重量補正の組込みが不可欠であることが分かった。

*1 重機投入の待ち時間を除いた実測最大処理速度。

*2 改質により処理可能となった。改質なしには土壌の形成が困難で、正しい濃度選別ができなかった。

(2) CSSU の選別しきい値の決定

安全サイドで選別するため、8,000Bq/kg の選別濃度に対して、土壌のかさ密度と放射線計数率のばらつきを加味した 11%(1.96σ)の誤差を考慮し、選別しきい値を 7,100Bq/kg とした。

(3) 有機物の除去による減容化の把握

試験土壌には草木根がほとんど含まれておらず、減容化は評価できなかった。

2. 濃度選別試験

60 袋のフレキシブルコンテナをその表面線量率の簡易測定値から L(低濃度)、M(中濃度)、H(高濃度)の 3 区分に分け、濃度区分毎に R/S を通して異物除去してから CSSU に導き、濃度選別を実施した。これにより、濃度区分毎に低濃度側に選別される土壌の割合を把握した結果、濃度区分 L(礫混じり細粒分質砂、含水率 13%、かさ密度 1.3kg/L 程度)では低濃度側土壌を 37%回収することができたが、濃度区分 M と H では低濃度側土壌が全く得られなかった(図)。

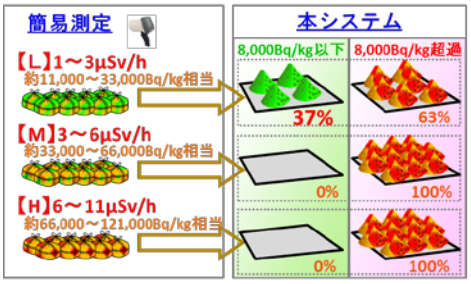


図 グラウンド表土の濃度選別結果

今回の試験結果では、簡易測定で表面線量率が 3.0μSv/h 以下のフレキシブルコンテナに対して本システムを適用した濃度選別が有効であることを確認した。また、CSSU の濃度測定値については、重量補正をした結果、Ge 半導体検出器による測定値との誤差の平均値(n=19)は 7.2%であった。

除去物発生量評価:試験に使用した除去土壌 70 袋は新たなフレキシブルコンテナ 70 袋に再収納し、一時保管場所へ返却した。破袋フレキシブルコンテナは新たにフレキシブルコンテナ 4 袋に収納し、一時保管場所へ保管した。

作業員被ばく量評価:作業場所平均空間線量率 2.0μSv/hr(作業時間 6 時間)、作業員最大被ばく量 13μSv(フレキシブルコンテナ取出し作業、作業時間 6 時間)、作業員平均被ばく量 7.4μSv

コスト評価: 1,452 円/t	歩掛り(作業人工、作業速度): 38 系列として試算、4 人工/1 系列(重機オペレーター含む)、50 t/h/系列(最大能力 100t/h/系列の 50%で試算)

コスト評価条件:7 年稼働(年間 300 日、日稼働 8 時間)とし、土壌投入用重機、R/S 給排用ベルコン、R/S→CSSU 移送用ベルコン、設備費並びに運転費・維持管理費を含む。作業員費は実証試験の実績値を参考とした。なお、除去土壌フレキシブルコンテナの運搬・破袋、選別後土壌並びに選別異物の搬出運搬・処分費用は含まない。

安全上の注意:粉じん防護マスクと保護メガネ、グローブを使用した。

試験場所(住所): 福島県双葉郡富岡町	除去物保管場所と保管状況(写真):使用した除去土壌と破袋フレキシブルコンテナはフレキシブルコンテナに収納し、一時保管場所へ返却・保管して現状復旧した。

1. 業務の目的

【実証テーマ名】除去土壌の濃度選別システムの実証

【事業の概要】実用規模相当の除去土壌の放射能濃度選別システムを用いた土壌選別試験を行い選別精度、処理速度等の性能を確認する。汚染土壌選別装置(以下 CSSU とする)の前処理として異物除去、土壌のほぐし等をロールスクリーン(以下、R/S とする)で行った場合の土壌特性別の処理能力等を把握する。

2. 除去土壌フレキシブルコンテナの取出しと選抜

実証試験では、除染モデル事業(2012 年)にて発生した除去土壌のうち、富岡町内の一時保管場所一箇所に保管されているフレキシブルコンテナを使用した。一時保管場所ではフレキシブルコンテナが 5 段程度に積まれ、遮水シートで覆われており、専用の治具を製作してクレーンで遮水シートをめくった(写真 1)。しかしながら、シートのめくり上げは困難を極めたため、北東部角側(図 1、採取エリア)からフレキシブルコンテナ 100 袋程度を取り出した(写真 2)。取り出したフレキシブルコンテナは一旦、測定・搬出エリアに置いてサーベイメータにより表面線量率を測定し、簡易測定の方法により現時点の放射能濃度を推定した(写真 3)。再測定し、選抜したフレキシブルコンテナを試験エリアに運搬した(図 1)。

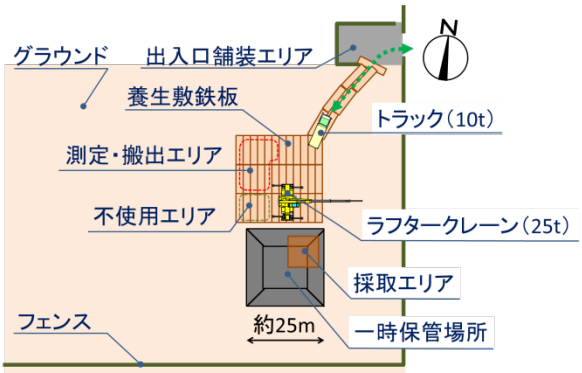


図 1 一時保管場所の作業配置

写真 1 一時保管場所の遮水シートめくり作業

写真 2 フレキシブルコンテナ取出し

写真 3 取出したフレキシブルコンテナの再測定

計画段階では、フレキシブルコンテナの選抜に当たり 8,000～30,000Bq/kg 程度の土壌(表面線量率にて 1～3μSv/h 程度)を選抜する予定であった。指定された一時保管場所のフレキシブルコンテナの除染時の測定値(除染モデル事業リスト)を基に現時点の値を確認したところ、1～3μSv/h は全体 1,305 袋のうち 22%程度しかないことが分かった(図 2)。従って、取出した 100 袋から線量の低い 70 袋を選定した。

選抜したフレキシブルコンテナを表面線量率の順に並べ、前処理条件の確認と減容化率の把握用に全体から均等に 10 袋のフレキシブルコンテナを抜き取った後、表面線量率の低い側から 20 袋ずつ濃度区分 L、M、H の 3 つの区分に振り分けた。その結果、濃度区分 L は 1～3μSv/h、濃度区分 M は 3～6μSv/h、濃度区分 H は 6～10μSv/h のフレキシブルコンテナとなった（図 3）。

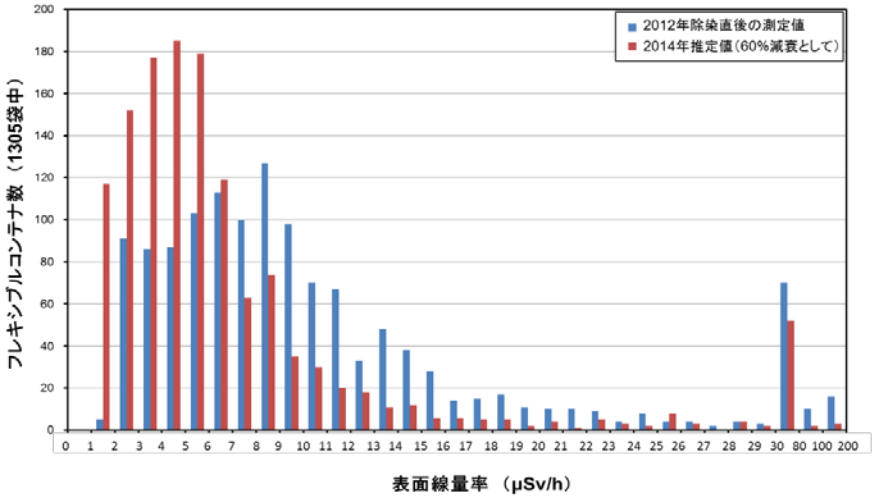


図 2　一時保管場所に保管されたフレキシブルコンテナの放射能濃度分布

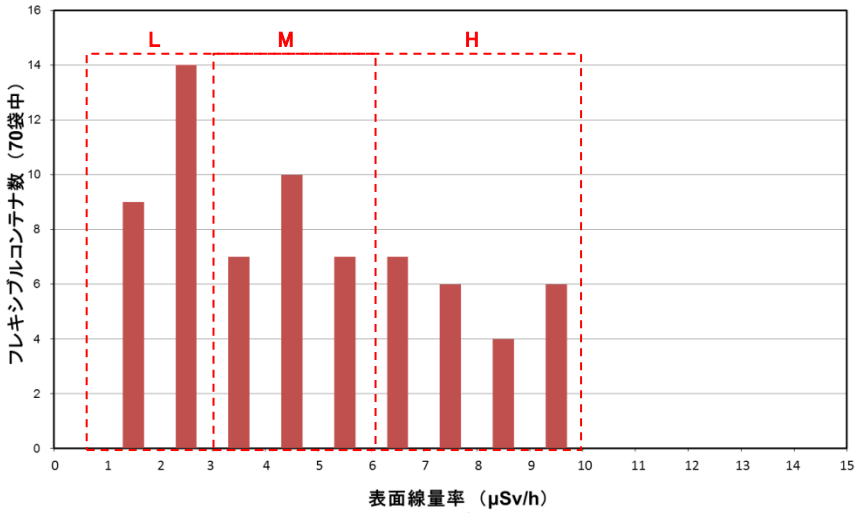


図 3　一時保管場所から選抜したフレキシブルコンテナ 70 袋の放射能濃度分布

3.　濃度選別可能な土壌の前処理条件の確認と草木根の除去による減容化率の把握

濃度選別試験に必要な以下の項目を確認することを目的として、濃度選別可能な土壌の前処理条件の確認と草木根の除去による減容化率の把握を行った。

(1) R/S、CSSU の適用可能な対象土壌の性状の確認

・R/S 並びに CSSU で適正なハンドリングが行える除去土壌の含水率とかさ密度

・含水率の高い除去土壌の改質による選別効果

・CSSU の運転に必要十分な異物除去が達成されるための R/S の目幅

(2) R/S 及び CSSU の処理能力

(3) CSSU で適切な濃度選別を行うためのしきい値の設定

3-1. 前処理条件の確認と減容化率の把握に用いた土壌の性状

一時保管場所より選抜した 70 袋の除去土壌フレキシブルコンテナのうち 10 袋を破袋してよく混合し、試験土壌（A:オリジナル）として前処理条件の確認と減容化率の把握に用いた。この土壌の初期含水率は平均 13%、強熱減量は 7%弱であった。また、粒度試験の結果、礫まじり細粒分質砂と分析され、0.075mm 以下の細粒分（シルトと粘土）を 24%近く含む砂だった（図 4）。A に加水したものを B、B に改質材を添加したものを C とした。

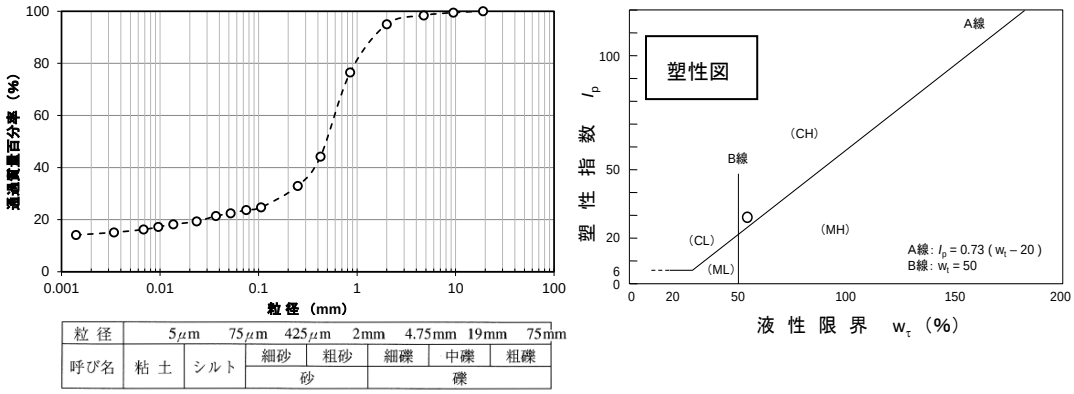


図 4 土質試験結果（準備試験）

3-2. 前処理条件の確認と減容化率の把握の結果

(1) R/S、CSSU の適用可能な対象土壌の性状

表 1 適用可能な対象土壌の性状

ケース	対象土	含水率	R/S 目幅と傾斜角	R/S 処理速度 [t/h] *	CSSU の運転
A-1	オリジナル	13%	50mm 20 度	95	○
A-2	オリジナル	13%	20mm 17 度	49	○
B-1	A+加水 3%	16%	50mm 20 度	44	△
B-2	A+加水 3%	16%	20mm 17 度	分別不能	実施せず
C	B+改質材 0.3%	15%強	50mm 20 度	53	○

*重機投入の待ち時間を除いた実測最大処理速度

【A-1】R/S で異物分別されたものは、石、草木根、付着土壌で全体の 0.25%あった。追加投入した草木根に付着していた土壌も分離され、草木根はオーバー物（軽量物側）、付着土壌はアンダー物として回収され、分別効果は良好であった（写真 4-6）。また、CSSU は問題なく稼働した（写真 8）。

【A-2】当然のことながら目幅が 20mm であるため 20mm 以上の石（写真 7）、土壌塊などがオーバー物として分別された。その量は全体の約 1%と R/S(50mm)よりも増加した。更に、オーバー物となったもののうち比較的小径のものは軽量物側へ分別された（写真 7 右）。

【B-1】R/S については土壌への加水により土壌が団粒化し A-1 と比較して処理速度が半減した。また、アンダー物を CSSU に投入したところ、粘性により投入ホッパ出口で土壌の閉塞が発生したため、ベルトコンベア上の土壌が一定の断面積に形成されず（写真 9）、濃度選別に支障が出た。CSSU の処理速度はベルト速度 50%時の実績値で 16.3t/h であった。

【B-2】土壌への加水により土壌が団粒化し R/S のスクリーン部が閉塞して機能しなかった。

【C】B-2 のとおり含水率が 16%になると CSSU 選別に支障が出たが、改質によって土壌の閉塞が解消し適正な稼働状態となった。CSSU の処理速度はベルト速度 50%時、30.6t/h であった。

(2) R/S 及び CSSU の処理能力

R/S の最大処理速度は 95t/h だった(表 1)。ベルト速度 50%時の CSSU の処理速度は実績値で 51t/h であり、ベルト速度 100%時には最大 100t/h の処理が可能である(ベルト速度による計数効率の差異は装置側で補正)。

写真 4 試験場より採取し除去土壌に添加した土壌付草根

写真 5 R/S(50mm)で軽量物側へ分別された草根

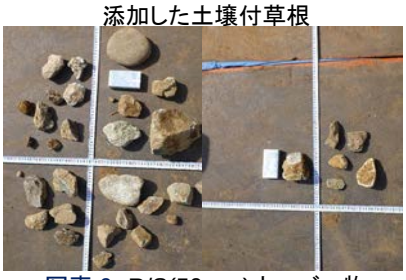


写真 6 R/S(50mm)オーバー物
(左:重量物側、右:軽量物側)

写真 7 R/S(20mm)オーバー物
(左:重量物側、右:軽量物側)

写真 8 土壌の形成が良好な状態
(含水率 13%)

写真 9 土壌の形成が困難な状態
(含水率 16%)

(3) CSSU で適切な濃度選別を行うためのしきい値の設定

CSSU の主な誤差要因は次の二つがある。

① 濃度測定領域(40L)の土壌のかさ密度の違いによる土壌重量のバラつき

② 放射線計測上の計数率のバラつき

要因①は R/S で異物除去した土壌を CSSU に投入し、放射線検出部直近の土壌を 5 回採取してかさ密度を測定した結果、平均 1.44kg/L、誤差 5.4%であった。②については、Ge 半導体検出器により放射能既知の線源を CSSU で測定し、約 8,000Bq/kg 計測時における計数率の誤差は 0.8%であった。このとき、次式より CSSU 全体の誤差(1σ)は 5.5%と求められ、信頼度 95%(1.96σ)の選別精度とした場合の誤差は 11%となった。従って、実証試験では 8,000Bq/kg の選別濃度に対し、CSSU の誤差 11%を安全側に考慮した選別しきい値 7,100Bq/kg にて選別を行うこととした。

$$\text{CSSU の誤差}(1\sigma) = \sqrt{(\text{土壌重量のバラつき})^2 + (\text{計数率のバラつき})^2} = \sqrt{(5.4)^2 + (0.8)^2} = 5.5 \ (\%)$$

3-3. 前処理条件の確認と減容化率の把握のまとめ

① R/S 並びに CSSU で適切なハンドリングが行える除去土壌の含水率を確認した結果、13%では支障なかったが、16%では改質が必要だった。

② 含水率 16%の土壌は団粒化により処理が困難であったが、ポリマー系改質材を重量比 0.3%添加混合することで改質効果が確認された。

③ 異物除去を目的とした R/S の目幅は、団粒化した土壌にも対応でき処理能力の高い 50mm の目幅を採用することとした。

④ R/S（20mm）、R/S（50mm）の処理速度は重機投入の待ち時間を除いた実測最大値でそれぞれ 49t/h、95 t/h、CSSU の処理速度はベルト速度 50%時の実績値で 51t/h であり、最大 100t/h であることが確認された。

⑤ CSSU の測定誤差を考慮し、濃度選別試験を選別しきい値 7,100Bq/kg で行うこととした。

表 2 前処理条件の確認と減容化率の把握のまとめ

機器・条件	処理速度（t/h）*1		CSSU への適用性（異物分別）	結果・考察
	含水率 13%	含水率 16%		
R/S（20mm,17°）	49	処理不能	含水率 13%は適用可	草木根が効率的に軽量物側へ分別された。φ30mm 程度の石も効率的に除去できたが、そのうち比較的小径は軽量物側へ分別された。含水率が高い場合、土壌の団塊化により分別が困難であった。
R/S（50mm,20°）	95	44	適用可	草木根が効率的に軽量物側へ分別された。草木根からの土壌分離が R/S(20mm)より効率的。比較的小径の石も重量物側へ分別された。含水率が高い場合も分別できたが、付着による処理速度の低下が見られた。
CSSU	100	61*2	―	土壌供給時の落下、堆積による圧縮が生じ、土壌のかさ密度が変動し誤差要因となった。ことから、重量補正の組込みが不可欠であることが分かった。

*1 重機投入の待ち時間を除いた実測最大処理速度。

*2 改質により処理可能となった。改質なしには土壌の形成が困難で、正しい濃度選別ができなかった。

4. 濃度選別試験

フレキシブルコンテナの濃度区分（L、M、H、各 20 袋）ごとに R/S（50mm）で異物を除去のうえ、CSSU で放射能濃度による選別試験を行った。CSSU の処理速度は、重機による土壌の供給速度に合わせて 50%に設定した。濃度選別試験に用いた濃度区分 M、H の除去土壌からは低濃度側土壌 8,000Bq/kg 以下）が選別されなかったため、濃度区分 L の結果について以下に記載する。

4-1. 濃度選別試験に用いた土壌の性状

濃度区分Lに選定したフレキシブルコンテナ 20 袋の除去土壌は前処理条件の確認と減容化率の把握のオリジナル土壌と同等であり、含水率は平均 12.9%、かさ密度は 1.4kg/L 程度、強熱減量は 7.5%程度であった。また、土質は礫まじり細粒分質砂であった。

4-2. ロールスクリーン

前処理条件の確認と減容化率の把握 A-1 と同条件であり、支障なく稼働した。異物除去率は 0.12%と低く、ほとんどが石だった（表 3）。

表 3 異物選別能力

大区分	小区分	重量[kg]	重量[%]
オーバー物（軽量物側）	草木根	0.0	0.00
	石	1.2	0.01
	雑物	0.2	0.00
	土壌	0.0	0.00
アンダー物	土壌	17051.8	99.88
オーバー物（重量物側）	石	18.8	0.11
	その他	0.0	0.00
合計		17072.0	100.00

4-3. 汚染土壌選別装置

(1) 土壌の濃度選別結果

図 5 に濃度区分 L の除去土壌を選別しきい値 7,100Bq/kg で選別した際の放射能濃度の経時変化（青色の線）を示す。CSSU に投入した除去土壌 17.8t のうち、選別しきい値を示す緑色の線を下回った範囲 10.3t が 8,000Bq/kg 以下の側に選別された。平均処理量は約 44t/h（総運転時間で計算すると約 43t/h）であった。

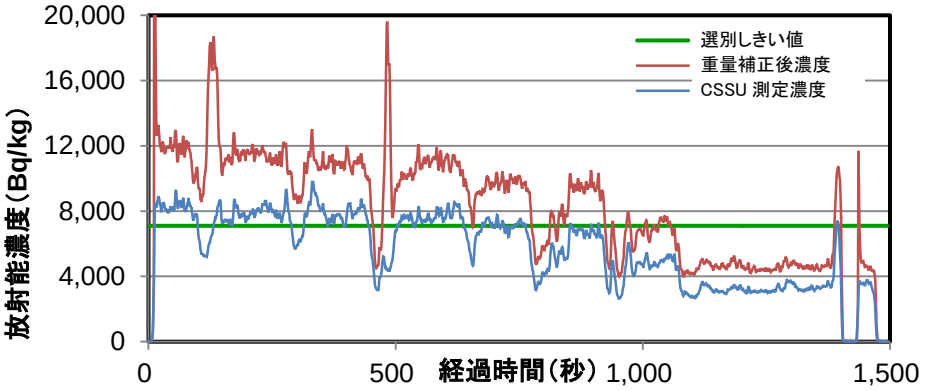


図 5 放射能濃度経時変化（濃度区分 L）

(2) 土壌の通過重量の測定結果

図 6 に、濃度区分 L 選別時の測定範囲における土壌重量の経時変化を示す。前処理条件の確認と減容化率の把握で実測により確認した測定範囲あたり（40L）の土壌重量は約 58kg であったが、実際の選別時の経時変化から求めた平均重量は約 41kg と差異が大きかった。濃度選別試験に用いた除去土壌は含水率の変動係数が 8%と小さく、性状がほぼ均質であったことから、土壌供給時に生じる圧縮の度合いがかさ密度に最も影響を与えたと考える。

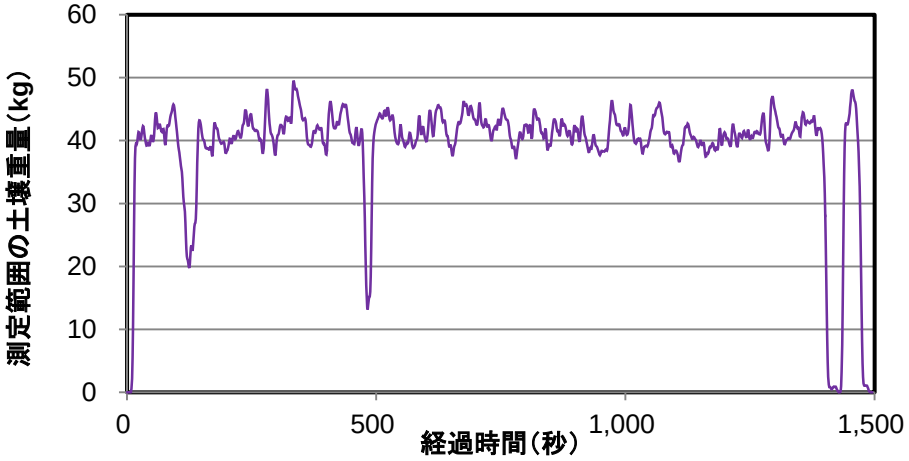


図 6 測定範囲の土壌重量経時変化（濃度区分 L）

(3) 放射能濃度の重量補正と精度評価

試験装置にはベルトスケールで計測した土壌重量をリアルタイムに放射能濃度に反映する機能がまだ実装されていないため、経時変化を基に補正計算した。その結果を図 5 に赤線で示す。補正にあたっては 1 秒ごとに計測されている土壌重量をもとに、前処理条件の確認と減容化率の把握で実測した重量 58kg に対する割合から補正を行った。

重量補正前の 8,000Bq/kg 以下側に選別された土壌を採取し、Ge 半導体検出器による測定値とCSSU の放射線検出器で計測された時間における重量補正後の放射能濃度の相関を図 7 に示す。相関係数は 0.995、決定係数 R^2 は 0.866 で、概ね高い相関が見られた。また、Ge 半導体検出器と比較した誤差の平均値（n=19）は 7.2%であった。

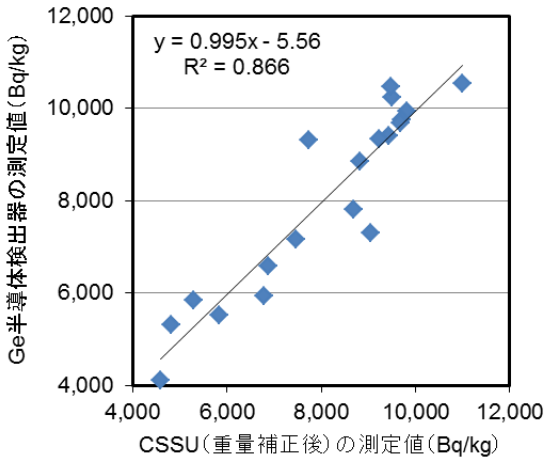


図 7　CSSU と Ge 半導体検出器による放射能濃度の相関

CSSU が 40L の土壌の平均放射能濃度を示すのに対し、Ge 半導体検出器ではその内の約 100mL の試料を測定するために単純比較し難しいが、データ上は高い相関が見られたことから放射能濃度の重量による補正の妥当性を確認した。前処理条件の確認と減容化率の把握において CSSU の理論上の誤差を 11%、選別濃度 8,000Bq/kg に対する安全側の選別しきい値を 7,100Bq/kg とした。重量補正を行わない場合、選別しきい値 7,100Bq/kg 以下の側に選別された土壌は Ge 半導体検出器の分析で半数が 8,000Bq/kg 超過に分布する結果であったが、重量補正により 7.2%の誤差で適切に選別できることが確認された。

濃度区分 L の土壌の濃度選別効果を重量補正後の濃度で再評価し、高濃度側、低濃度側に選別された土壌の濃度分布を図 8 に、選別後の各土壌量を表 4 に整理した。

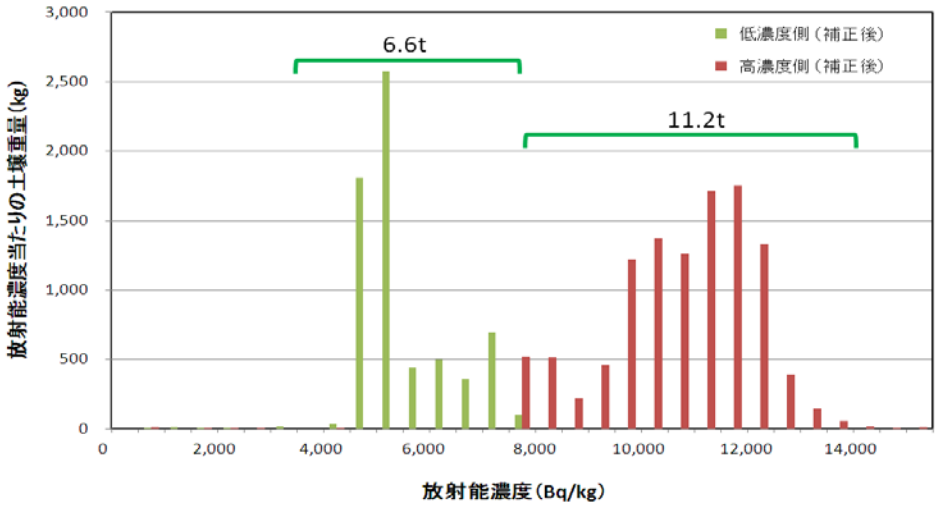


図 8　濃度区分Lの CSSU による選別結果（重量補正）

表 4　濃度区分 L の選別効果の再評価

	投入した土壌の総量	8,000Bq/kg 以下の土壌量	8,000Bq/kg 超過の土壌量
再評価前	17.8t	10.3t（58%）	7.5t（42%）
再評価後		6.6t（37%）	11.2t（63%）

4-4. 濃度選別試験のまとめ

- 実証試験に用いた一時保管場所のフレキシブルコンテナは比較的表面線量率が高いものが多く、放射能濃度も 33,000Bq/kg 超（簡易測定による表面線量率が 3μSv/h 超）が 80%程度であった。
- 選別濃度 8,000Bq/kg に対し、誤差を考慮した選別しきい値 7,100Bq/kg で選別した結果、濃度区分 L（3μSv/h 以下程度）の除去土壌から約 37%（重量補正後）が低濃度側に選別された。また、濃度区分 M 及び H の除去土壌からは、低濃度側の土壌は得られなかった。
- ベルトコンベア上に形成された土壌のかさ密度のバラつきが大きいため重量計測による放射能濃度の補正が必須であり、今回の補正方法で Ge 半導体検出器と良い相関が見られたことから、装置に自動演算ルーチンを組み込む必要があることが分かった。

5. コストシミュレーション

5-1. コスト算出における前提条件

以下の条件で必要な装置基数を算出した。

(ア) 処理期間（建設解体を含まず）：5 年、または 7 年　（2 ケース）

(イ) 日あたり処理時間：8 時間/日、または 24 時間/日　（2 ケース）

(ウ) 処理速度：R/S 及び CSSU 50t/h [注 1)]

(エ) 関連作業員数：R/S 3 名、CSSU 1 名[注 2)]

(オ) 処理：R/S への土壌投入作業から CSSU により高濃度側、低濃度側に選別される時点までとし、処理すべき除去土壌が、投入用重機の近くにすぐに投入できる状態で供給され、濃度選別後の土壌は速やかに移動されるものとする。また、R/S から CSSU への土壌の乗継は専用ベルトコンベアとした。

注 1）メンテナンス、稼働率などを考慮し、最大処理速度 100t/h の 50%とした。

注 2）ここでは、実証事業における機械配置、人員配置の実績から想定した。実事業に当たっては、システムの自動化や無人化を志向する必要がある。

5-2. ロールスクリーン

R/S のコスト試算結果を表 5 に示す。24 時間運転は 8 時間運転に比べて 2 倍程度高く、処理期間 5 年と 7 年では後者が若干安かった。これは R/S の設備費と比較して、人件費の夜間手当が割高であることが主因である。

表 5　コスト計算結果（R/S）

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
		5年8時間	5年24時間	7年8時間	7年24時間
処理単価	円/t	617	1036	604	997

5-3. 汚染土壌選別装置

CSSU コスト計算結果を表 6 に示す。R/S と同様に 24 時間運転は 8 時間運転に比べて高いが、設備数の低減と相殺されて影響は小さかった。処理期間 5 年と 7 年では後者が若干安い。

表 6 コスト計算結果（CSSU）

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
		5年8時間	5年24時間	7年8時間	7年24時間
処理単価	円/t	953	972	848	954

5-4. トータルシステムの評価

R/S と CSSU のコスト合算結果を表 7 に示す。処理期間によらず 8 時間運転が推奨される。

表 7 コスト合算結果（R/S+CSSU）

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
		5年8時間	5年24時間	7年8時間	7年24時間
処理単価	円/t	1570	2008	1452	1951

6. 今後の課題と改善案

6-1. ロールスクリーン

今回は農地土壌等に比べると比較的細粒分の少ないグラウンド土壌を主体とする土壌で試験を行ったが、加水して3%含水率を増加させただけでも大幅に処理能力が低下するという結果になった。処理性能に影響する項目として、目幅、傾斜角、長さ、幅が考えられるが、今後、求められる処理能力や土壌性状に応じて適切な条件を設定する必要がある。

6-2. 汚染土壌選別装置

① 重量補正

実証試験で用いた CSSU には、ベルトスケール（重量計）で測定した土壌重量をリアルタイムに放射能濃度計算に反映する機能がまだ実装されていないため、記録計のデータから計算で放射能濃度の補正を行った。補正の結果、Ge 半導体検出器で分析した選別後の土壌の放射能濃度と良い一致が見られたことから、CSSU の信頼性に問題が無いことを確認出来たが、CSSU の機能としての重量補正が必要であることが分かった。

② 選別ホッパの動作の改善

現在の仕様では土壌の流量が少ない場合に放射能濃度が正しく評価されず、誤って選別濃度以下側に流れた。これを防止するため、選別ホッパの初期位置を選別濃度超過側に向けることとし、土壌の流量が十分で放射能濃度が正しく求められ、かつ選別しきい値以下となった場合のみ選別濃度以下側に作動する仕組みや、土壌流量が少なくなることを回避するように R/S を含めた全体システムの構築が望まれる。

③ 多用な土壌性状への対応

今回の実験では、含水率 13%の土壌では問題なく選別が可能であったものの、加水して16%に含水率を増加させた土壌では CSSU のベルトコンベア上で土壌が形成できず十分な選別ができなかった。高含水土壌に対しては改質材を混合して物性を改善する方法もあるが、改質材混合には土壌の放射能濃度を均一化させてしまうというデメリットもあるため、基本的には機械装置上の工夫により多様な土壌でベルトコンベア上の形成が可能となる構造とすることが望まれる。

＜重量補正と流量確認に関する解説＞

図 9 に濃度区分 L の土壌を選別した記録計データを示す。

下側の青と赤のバーは以下を意味する。

➢ 青いバー：実際に選別を行った際に選別ホッパが選別濃度超過側に向いていた範囲。
無色部は選別濃度以下側に選別されたことを示す。

➢ 赤いバー：土壌重量による放射能濃度のリアルタイム補正を行い、かつ流量が少ない範囲を選別濃度超過側に選別するように装置改良できた場合の青いバーの修正。

なお、これらの改良を行った場合、土壌重量のバラつきによる誤差が解消されるため、誤差の主な要因は計数率のバラつきとなる。従って、実証試験では誤差を考慮のうえ選別濃度 8,000Bq/kg に対し、CSSU の選別しきい値を 7,100Bq/kg と設定したが、改良後は選別しきい値を 8,000Bq/kg としても良い精度で選別を行うことが出来ると考える。

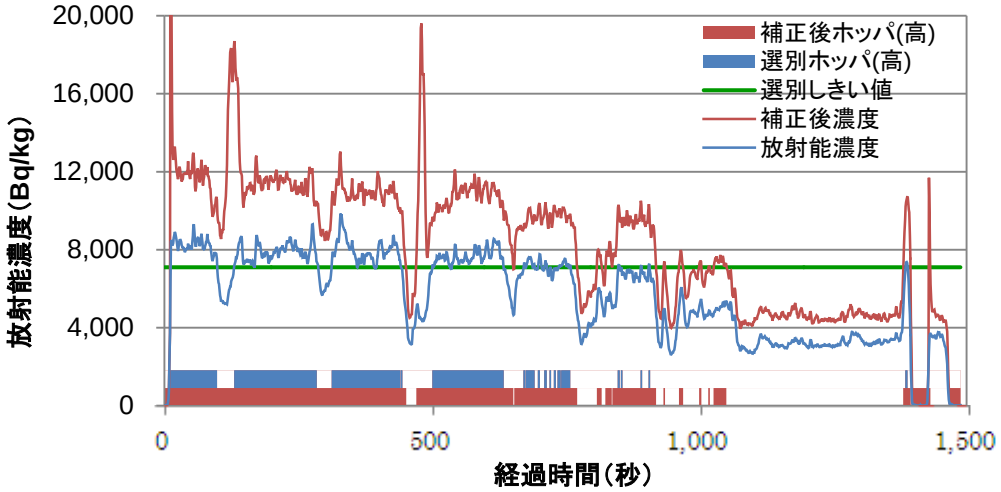


図 9 CSSU 改良後の選別ホッパの動作

④ 含水率の影響考慮について

実証試験においては、破袋、R/S 処理後の状態（湿土）で濃度選別を行った。

現在の CSSU では、乾土での放射能濃度分別を前提としていないため、含水率を小さい誤差で連続的に測定し、乾土としての濃度測定値（Bq/kg）をリアルタイムに計算するシステムにはなっていない。含水率を測定する方法としては、マイクロ波、近赤外線、中性子線、静電容量などを利用した方法が各分野で利用されているが、中間貯蔵施設の本事業で求める濃度測定精度、及び含水率測定精度を考慮して、多面的観点から採用可能なシステムを模索する余地はあると考えられる。

実証試験のように含水率 13%（乾土率 0.87）程度の場合、乾土濃度は湿土として測定された濃度より 14%程度高くなった。例えば、10～25%程度の範囲で含水率が変化する土壌を処理することを想定すれば、17.5%の含水率を一律に想定して、乾土としての濃度を計算する方法がある。この場合、最大 7.5%の含水率誤差を内包することになり、濃度としては 10%程度の誤差となると考えられる。それゆえ、乾土ベースでの放射能濃度のより正確な評価には、今後、含水率の誤差を考慮するための実験により、評価方法の比較検討が必要である。

以上