



## 最終処分に向けた減容技術等の評価（案）について

2024年7月12日

環境省環境再生・資源循環局

# 用語の説明（案）

- 本資料における用語について説明する

用語	説明
生成物	処理によって生成されるもののうち、放射能濃度が低減し、活用が可能と考えられるもの（分級：粗粒分、溶融：スラグ、焼成：焼成物など）。
濃縮物	処理によって生成されるもののうち、放射能濃度が比較的高くなったもの。
分級処理	土壌を粒径によって分離する技術。分離の基準となる粒径を分級点という。
粗粒分	分級処理によって得られる、粒径が分級点より大きい土壌。処理前の対象物に比べ、放射能濃度が低くなることが期待される。
細粒分	分級処理によって得られる、粒径が分級点より小さい土壌。処理前の対象物に比べ、放射能濃度が高くなることが期待される。
二次廃棄物	処理により発生する生成物・濃縮物以外で、不要となるもの（廃水、汚泥、設備の消耗品・交換品（ろ布、バグフィルタ等）など）
飛灰	熱処理により発生する排ガスに含まれる微粒子状の灰で、排ガス処理工程で回収される灰。放射性セシウムが比較的多く含まれる。
放射能濃度の低減化率（除染率）（%）	処理前の対象物と比較して生成物の放射能濃度が下がる割合 $= (1 - (\text{生成物の放射能濃度} \div \text{処理前対象物の放射能濃度})) \times 100$
減容化率（%）	処理前の対象物と比較して濃縮物の体積が減少する割合 $= (1 - (\text{濃縮物の体積} \div \text{処理前対象物の体積})) \times 100$
減量化率（%）	処理前の対象物と比較して濃縮物の質量が減少する割合 $= (1 - (\text{濃縮物の質量} \div \text{処理前対象物の質量})) \times 100$

# 用語の説明（案）、続き

用語	説明
ラボスケール	ビーカー等を用いた基礎データを取得するための規模
ベンチスケール	パイロットスケール機を設計、製造するためのデータを取得できる規模
パイロットスケール	実機の数分の1から10分の1程度の処理能力を有し、実機での性能等を確認できる規模

# 減容技術等の評価に関する整理方法について①

これまでの技術WGにおいて、減容技術等ごと（分級技術、熱処理技術等）の評価を行ってきたが、これまでの評価を踏まえつつ、今後のとりまとめに向けて、それぞれの技術の中での小分類ごとに整理・評価をし、総合評価を行うこととする。

※特に、一般の方向けのよりわかりやすい整理・とりまとめに努める。

<減容技術等の分類について（次ページに続く）>

大分類	中分類	小分類（案）	
減容化 （分離 濃縮）	分級処 理技術	湿式分級	通常分級：沈降分離等により、粒径で分別（分級点は主に75 $\mu$ m）
			高度分級（付着粒子の分離）：粒径での分別に加え、砂に付着する粘土・シルトを分離
			高度分級（分級点の小粒径化）：通常分級より分級点を小さくして分離
			高度分級（付着粒子の分離＋分級点の小粒径化）：砂に付着する粘土・シルトを分離する操作に加え、通常分級より分級点を小さくして分離
	乾式分級	通常分級：風力、気流遠心分離により、粒径で分別（分級点は主に75 $\mu$ m）	
		高度分級（付着粒子の分離）：粒径での分別に加え、砂に付着する粘土・シルトを分離	
		高度分級（付着粒子の分離＋分級点の小粒径化）：砂に付着する粘土・シルトを分離する操作に加え、通常分級より分級点を小さくして分離	
		高度分級（磁気による分離）：風力による分別に加え、磁気による分離	
熱処理 技術	熔融		
	焼成		

# 減容技術等の評価に関する整理方法について②

<減容技術等の分類について（前ページからの続き）>

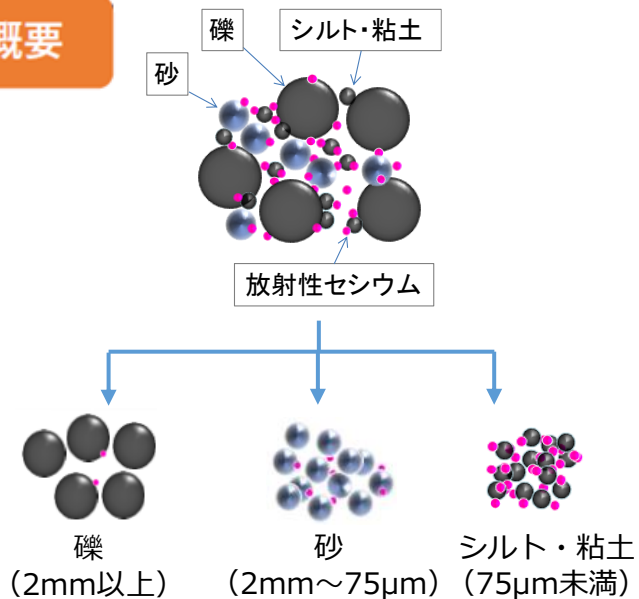
大分類	中分類	小分類（案）
減容化 （分離濃縮）	化学処理技術	酸処理
		溶融塩（+酸）処理
		アルカリ処理
		水熱処理（亜臨界状態での処理）
		洗浄剤処理
	飛灰洗浄技術（洗浄工程）	混合攪拌式
		散水式
	飛灰洗浄技術（吸着工程）	混合攪拌式（液中合成式）
		カラム式
安定化	安定化技術 （飛灰等を対象とする場合 ／廃吸着剤を対象とする場合）	セメント固型化
		ガラス固型化
		ジオポリマー固型化
		プラスチック固型化
		ゼオライト焼成（ゼオライト吸着剤の安定化）

# (参考)分級処理技術の概要と実証の概要

## <分級処理技術の概要>

放射性セシウムが、粗粒分（礫・砂）よりも細粒分（シルト・粘土）に付着しやすいという特性があることから、**除去土壌を粒径別に分離**することにより最終処分量を減少させる。

## 実証試験の概要



<実証設備全景>

## <主な設備>



土壌をほぐすための解泥機



水を投入



解泥後の土壌に水をかけながら、ふるいを振動させることで、主に「礫」を回収する設備



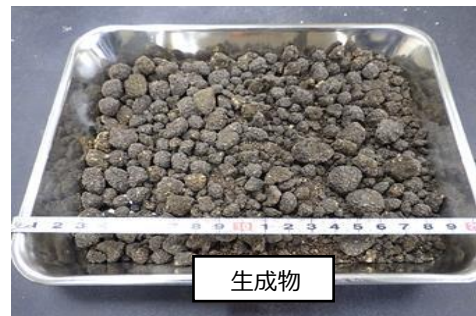
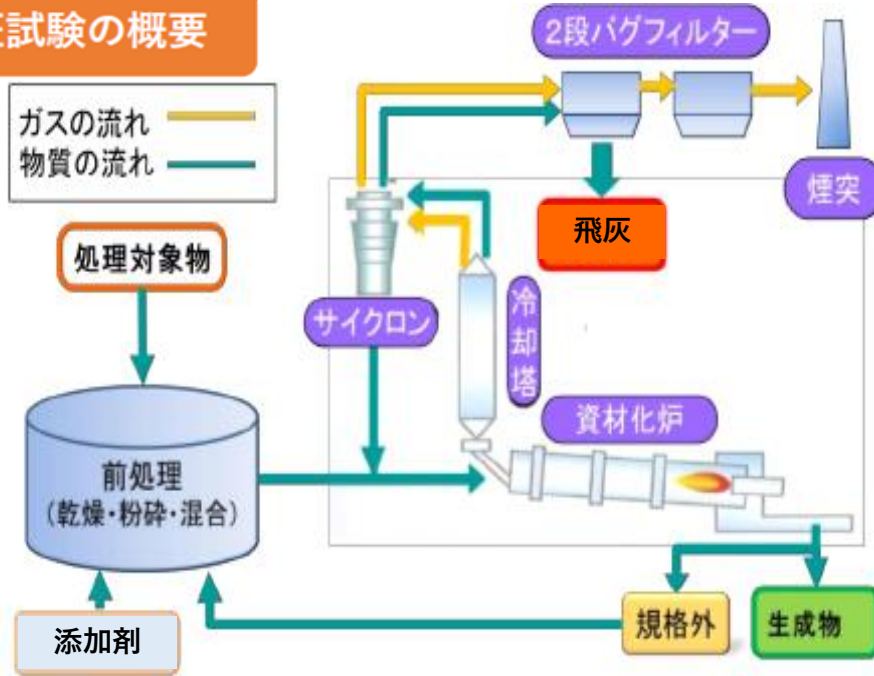
沈降分離により、砂と粘土・シルトを分別し、主に「砂」を回収する設備

# (参考) 熱処理技術の概要と実証の概要

## < 熱処理技術の概要 >

分級後の細粒分（シルト・粘土）、または放射能濃度の比較的高い土壌等を対象とし、**熱エネルギー**によって**放射性セシウムを気化させ**、**排ガス処理工程で飛灰として回収**することで最終処分量を減少させる。

### 実証試験の概要



生成物を活用したインターロッキングブロック

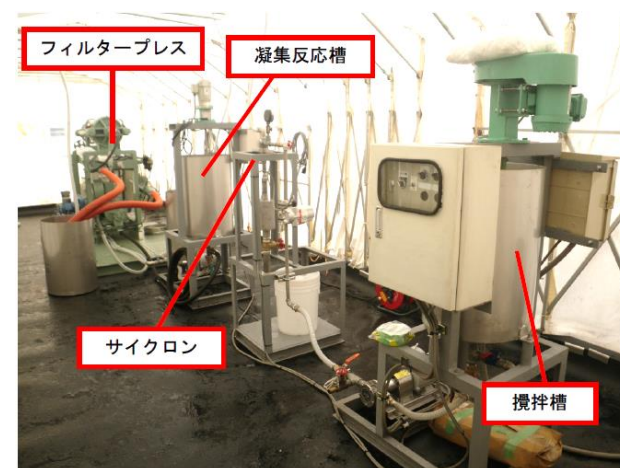
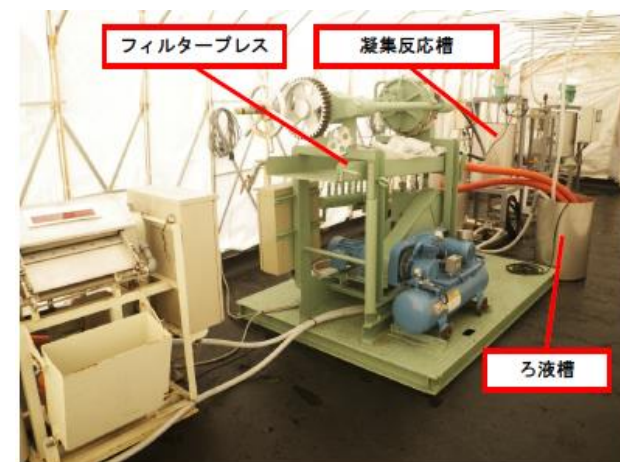
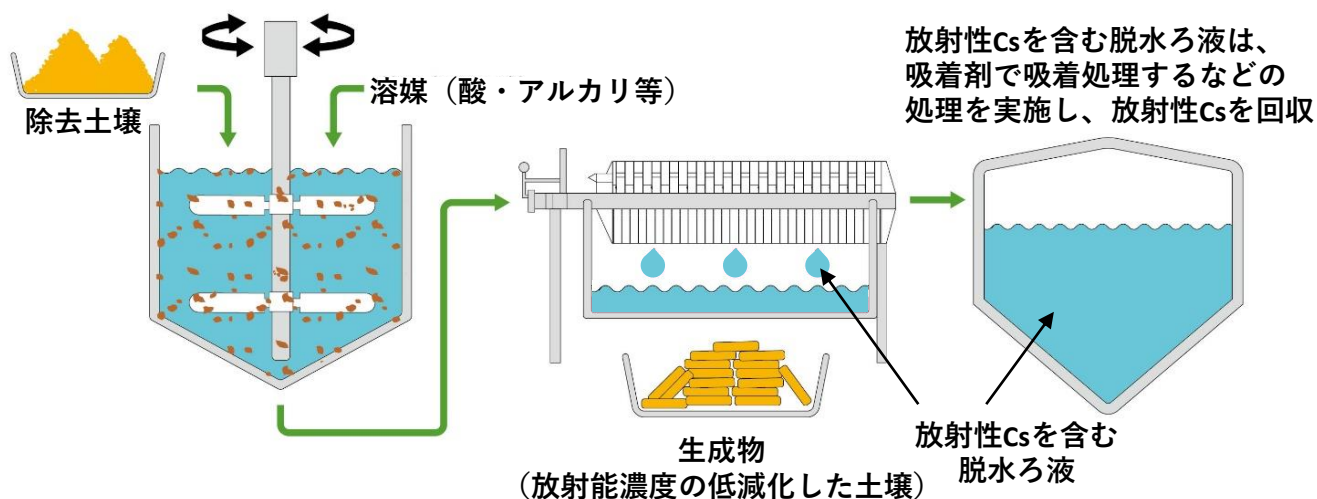
# (参考) 化学処理の概要と実証の概要

## < 化学処理技術の概要 >

分級後の細粒分（シルト・粘土）、または放射能濃度の比較的高い土壌等を対象とし、**酸、アルカリ等の溶媒を用いて土壌中の放射性セシウムを溶媒中に溶出させる**ことで、土壌から放射性セシウムを分離・回収し、最終処分量を減少させる。

## 実証試験の概要

土壌の化学処理による、放射性セシウム分離処理の一例



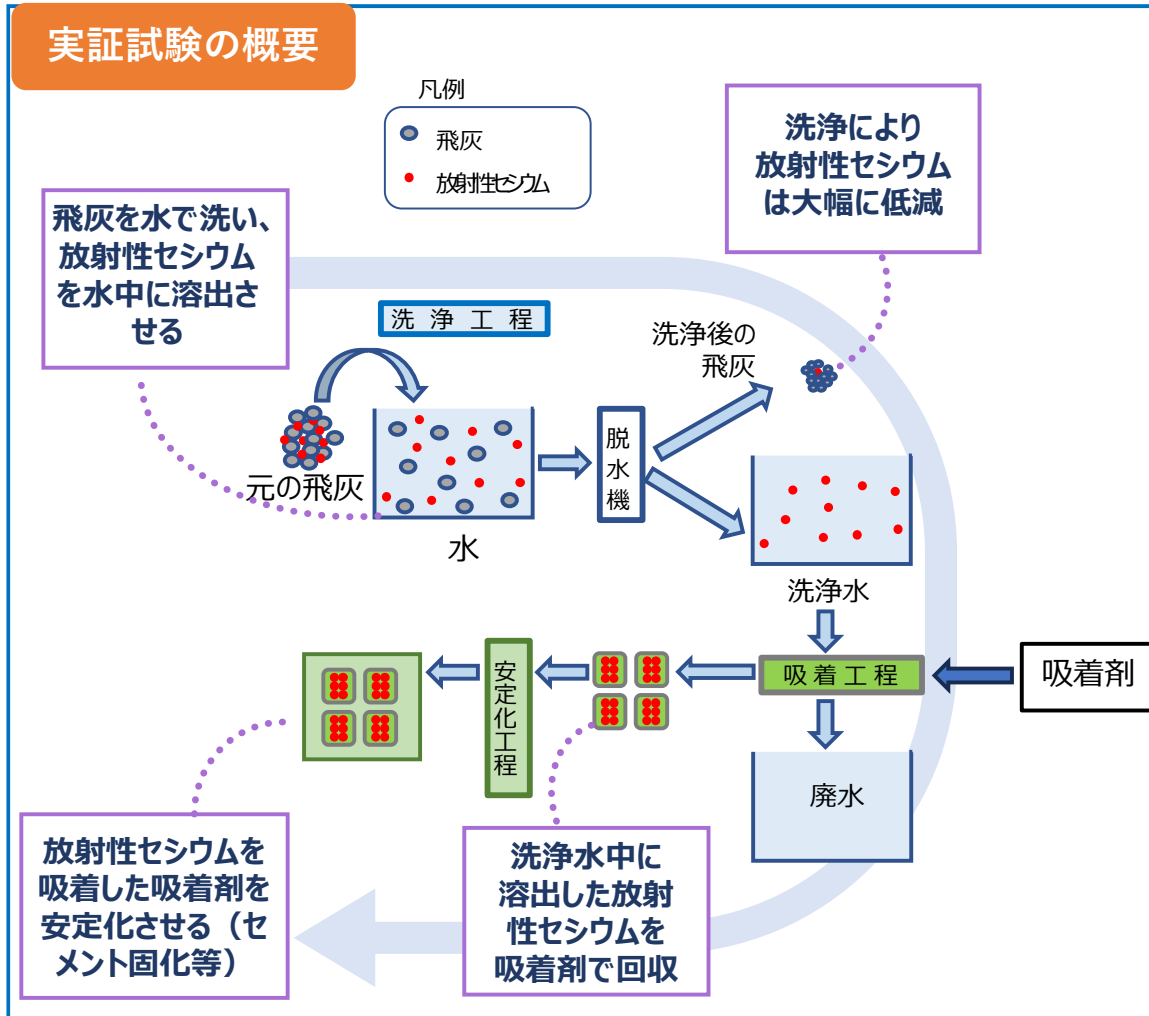
実証試験設備の一例



# (参考) 飛灰洗浄・吸着・安定化技術の概要と実証の概要【実証中】

## < 飛灰洗浄・吸着・安定化技術の概要 >

熱処理により発生した飛灰に付着した放射性セシウムは水に溶けやすいことから、飛灰を水で洗浄することでセシウムを水に溶出させ、吸着剤により吸着・安定化することで最終処分量を減少させる。



洗浄工程設備



吸着工程設備

# 減容技術等の評価に関する整理方法について③

< 減容技術等の評価項目について >

評価項目（案）	
課題となり得る事項	性状や量を踏まえた、二次廃棄物の処理や生成物の利用の困難度
	作業者・環境への影響
	大規模化の可能性
処理効果	減容化率・減量化率
	（放射能濃度が下がった生成物の）放射能濃度の低減化率
	（安定化技術について）溶出性、安定性等
処理能力	処理能力（処理にかかる時間やメンテナンス頻度等も考慮）
コスト等	コスト
	（使用エネルギー量（CO <sub>2</sub> 排出量））
<b>上記の評価を踏まえた総合評価</b>	

# 減容技術等の評価に関する整理方法について④

## <評価に当たっての視点（案）>

- 原理の異なる技術を横並びで評価することは難しいことから、p3、p4の中分類（分級処理技術、熱処理技術等）ごとに、小分類の技術の比較評価を行うこととする。
- p8で「課題となり得る事項」（性状や量を踏まえた二次廃棄物の処理や生成物の利用の困難度、作業員・環境への影響、大規模化の可能性）については、クリティカルな課題（※）があれば技術の採用が難しくなる。よって、ここでの課題に対する対応が難しい場合には、他の項目の評価によらず、低い評価とする。  
※ここでのクリティカルな課題とは、技術的な解決策や前例が無く、達成／実現が難しい課題を想定。
- 「減容化率」「減量化率」については、中分類ごとに、小分類の技術の比較評価を行い、最も評価の高いものを◎、それに次ぐものを○、△などと評価する（評価根拠の説明等も付記）。
- 生成物の放射能濃度の低減については、その後の処理・利用の観点から8,000Bq/kg以下となることを目安とし、更に濃度低減が図られる場合には、相対的に高い評価とする。
- 「処理能力」については、実証試験の実施スケールおよび大規模化の可能性を踏まえて評価する。
- 「コスト」についても、中分類ごとに、小分類の技術の比較評価を行い、最もコストの低いものを◎、それに次ぐものを○、△などと評価する（評価根拠の説明等も付記）。
- なお、比較する小分類が2種類の場合で、両者の評価が同等の場合は両者とも○とする。
- 上記での「他の項目の評価によらず、低い評価とする場合」を除き、総合評価に当たっての各評価項目の重み付けについて、最終処分量の低減という目的を踏まえれば、「処理効果」が最も重要と考えられる。また、処理効果や処理能力が同等の場合には、コストが低いものの総合評価を相対的に高くする。

# 減容処理技術の評価基準（案）

- 各減容処理技術の評価基準に関する説明を示す。

評価項目（案）		評価根拠の説明等
課題となり得る事項	性状や量を踏まえた、二次廃棄物の処理や生成物の利用の困難度	以下の課題が発生する場合、他の項目の評価によらず、低い評価とする。 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 二次廃棄物の性状や量により、処理・処分が著しく困難。</li> <li>• 生成物の性状（放射能濃度等）や量により、再生利用が困難。</li> <li>• 作業者の放射線被ばくや、その他の労働環境の基準等に適合しない。</li> <li>• 環境負荷（環境基準の超過など）が高く、改善が困難。</li> <li>• ベンチスケール以上での実証試験や類似設備での実績がなく、大規模化が困難。</li> </ul>
処理効果	生成物の放射能濃度の低減効果	◎：処理により対象処理物が <b>8,000 Bq/kg</b> を大きく下回る。 ○：処理により対象処理物を概ね <b>8,000 Bq/kg</b> 以下にすることが可能。 △：放射能濃度の低減化率が低く、処理対象物を <b>8,000 Bq/kg</b> 以下にすることが困難。
	減容化率・減量化率	◎：比較技術の中で減容（量）化率が最も高い。 ○：比較技術の中で減容（量）化率が高い。 △：比較技術の中で減容（量）化率が低い。
	（安定化技術について）溶出性等	◎：放射性セシウムの溶出性が低い。 ○：放射性セシウムの溶出性がやや高い。（放射性セシウムの溶出に対しては、最終処分場での対策が可能。） △：放射性セシウムの溶出性が高い。（放射性セシウムの溶出に対しては、最終処分場での対策が可能。）

# 減容処理技術の評価基準（案）、続き

評価項目（案）		評価根拠の説明等
処理能力	処理能力（処理にかかる時間やメンテナンス頻度等も考慮）	<p>◎：パイロットスケール以上での実証試験の実績があり、既存の装置での処理が可能。</p> <p>○：ベンチスケール以上での実証試験の実績があり、既存の装置の改造により処理が可能。</p> <p>△：ベンチスケール以上での実証試験の実績がない。</p>
コスト等	コスト、使用エネルギー量（CO <sub>2</sub> 排出量）	<p>◎：比較技術の中で低コスト</p> <p>○：比較技術の中で中程度のコスト</p> <p>△：比較技術の中で高コスト</p>
上記の評価を踏まえた総合評価（案）		

# 分級処理技術の比較、総合評価（案）

➤ 分級処理技術の評価（案）を示す

評価項目（案）		湿式分級				乾式分級			
		通常分級	高度分級		通常分級	高度分級			
		粒径による分離 (振動篩、沈降分離等)	付着粒子の分離 (機械式研磨等)	分級点の小粒径化 (磁気分離、浮遊選別等)	付着粒子の分離+小粒径化 (機械式研磨+高圧エジェクター等)	風選別 (風力+気流遠心分離)	付着粒子の分離 (気流遠心分離+機械式研磨)	付着粒子の分離+小粒径化 (気流遠心分離+機械式研磨)	風選別+磁気分離 (風力による分級+磁気選別)
課題となり得る事項	性状や量を踏まえた、二次廃棄物の処理や生成物の利用の困難度、作業員・環境への影響、大規模化の可能性	特に問題はない。	特に問題はない。	特に問題はない。	特に問題はない。	特に問題はない。	特に問題はない。	特に問題はない。	特に問題はない。
		—	—	—	—	—	—	—	—
処理効果	減容化率・減量化率 (中分類内での相対的な評価)	◎ 減容化率8~57% (国直轄) 減量化率32~82% (国直轄)、54~79% (H23, H31-R2)	○ 減容化率7~45% (国直轄)、 42~59% (H23, 1件) 減量化率31~81% (国直轄)、71~82% (H23, 5件)	○ 減容化率70~86%、 減量化率52~70% (H29, 2件)	△~○ 減量化率0~94% (H23, 2件, H26, 1件, H30, 1件, H31, 1件, R3, 2件)	◎ 減量化率52~82% (H25, 1件)	△ 減量化率27~34% (H23, 1件)	○ 減量化率36~57% (H23, 1件)	○ 減量化率21~89% (R3, 1件)
	(放射能濃度が下がった生成物の)放射能濃度の低減効果	○ 51~82% (国直轄)、 60~79% (H23, 1件, H31-R2, 1件)	◎ 58~88% (国直轄) 58~97% (H23, 5件)	△ 16~63% (H29, 2件) 生成物のうち、比較的粒径の小さいものについて、放射能濃度の低減効果が低い場合がある。	△~○ 23~98% (H23, 2件, H26, 1件, H30, 1件, H31, 1件, R3, 2件) 生成物のうち、比較的粒径の小さいものについて、放射能濃度の低減効果が低い場合がある。	○ 15~41% (H25, 1件)	○ 63~86% (H23, 1件)	△~○ 38~74% (H23, 1件) 生成物のうち、比較的粒径の小さいものについて、放射能濃度の低減効果が低い場合がある。	△~○ 0~58% (R3, 1件)

# 分級処理技術の比較、総合評価（案）、続き

評価項目（案）		湿式分級				乾式分級			
		通常分級	高度分級			通常分級	高度分級		
		粒径による分離 (振動篩、沈降分離等)	付着粒子の分離 (機械式研磨等)	分級点の小粒径化 (磁気分離、浮遊選別等)	付着粒子の分離+小粒径化 (機械式研磨+高圧エジェクター等)	風選別 (風力+気流遠心分離)	付着粒子の分離 (気流遠心分離+機械式研磨)	付着粒子の分離+小粒径化 (気流遠心分離+機械式研磨)	風選別+磁気分離 (風力による分級+磁気選別)
処理能力	処理能力（処理にかかる時間やメンテナンス頻度等も考慮）	◎	◎	△	○	△	△	△	△
		水の循環利用が可能。 実証試験の規模：20t/h(国直轄), 2t/h, 10t/h	水の循環利用が可能。 実証試験の規模：10t/h(国直轄), 2.5kg/h, 0.15t/h, 1t/h, 2t/h	既存の装置の処理能力が小さい。 実証試験の規模：0.1t/day, 1t/day, 36kg/バッチ	実証試験の規模：660L/h, 40t/h 2t/h, 20m <sup>3</sup> /h, 250L/バッチ, 40t/day	実証試験の規模：0.2~2t/h	実証試験の規模：データなし (300kg/h規模の類似装置あり)	実証試験の規模：データなし (300kg/h規模の類似装置あり)	実証試験の規模：1t/h
コスト等 (※)	イニシャル・ランニングコスト、エネルギー使用量 (中分類内での相対的な評価)	◎	○	△	△	○	◎	◎	○
		2.8万円/t(国直轄)、0.7万円/t(H23)	3.2万円/t(通常分級工程(2.8万円/t)を含む、国直轄)、0.9万円~1.5万円(H23、5件)	0.95~17万円/t(H29、2件)	1.5万~23万円/t(H23、2件、H26、1件、H30、1件、H31、1件、R3、2件)	3.1万円/t(H25、1件)	0.5~0.8万円/t(H23、1件)	0.5~0.8万円/t(H23、1件)	2.3万円/t(R3、1件)
上記の評価を踏まえた総合評価（案）		処理効果、処理能力、コストを踏まえ、分級処理技術においては、優先的に検討され得る技術。	通常分級で得られた粗粒分の放射能濃度が高い場合に、オプションとして活用することが可能。	処理能力が小さく、生成物の一部について濃度低減効果が低い。	一定の処理効果が得られているものもあるが、生成物の一部について濃度低減効果が低い。	処理効果が高いが、処理能力が小さい。	一定の放射能濃度の低減効果はあるが、処理能力が小さい。	一定の減量効果はあるが、処理能力が小さい。	一定の減量効果はあるが、処理能力が小さい。

※ここでのコスト等のデータは各実証事業において想定された条件の元で算出されたものを含み、今後精査が必要。

# 熱処理技術の比較、総合評価（案）

## ➤ 熱処理技術の評価（案）を示す

評価項目（案）		熱処理	
		溶融	焼成
課題となり得る事項	性状や量を踏まえた、二次廃棄物の処理や生成物の利用の困難度、作業者・環境への影響、大規模化の可能性	特に問題はない。	特に問題はない。
処理効果	減容化率・減量化率 (中分類内での相対的な評価)	○ 減容化率83.4～89.2% 減量化率89.7～98.5%	○ 減容化率 72.4～92.5 % 減量化率 88.9～95.8 %
	(放射能濃度が下がった生成物の)放射能濃度の低減効果 (生成物の発生量)	○ Cs除去率 97.1～99.3 %程度。 157～1,430 Bq/kg (スラグ) / 11.5万～46.6万 Bq/kg (飛灰) スラグの発生量は添加剤により、処理前対象物の1.3～1.4倍程度となる。 ※仮設灰処理施設での生成物（スラグ）は平均3,000 Bq/kg程度（焼却灰の処理）。	◎ Cs除去率99.7 %程度。 生成物は100 Bq/kg以下となるが、発生量は添加剤により、処理対象物の～2倍程度となる。
処理能力	処理能力（処理にかかる時間やメンテナンス頻度等も考慮）	○ 実証事業の規模：3t/day、25kg/バッチ 150t/day の仮設灰処理施設が稼働中。	○ 実証事業の規模：10t/day 300t/day の類似施設が稼働中。
コスト等（※）	イニシャル・ランニングコスト、エネルギー使用量 (中分類内での相対的な評価)	○ コストは30万～40万円/t（要精査）。	○ コストは30万～40万円/t（要精査）。
上記の評価を踏まえた総合評価（案）		処理効果、処理能力が高く、大規模化が可能。生成物（スラグ）の再生利用の用途先等の検討が必要。	処理効果、処理能力が高く、大規模化が可能。生成物の放射能濃度は大きく低減する。（再生利用の用途先等の検討が必要。）

※ここでのコスト等のデータは各実証事業において想定された条件の元で算出されたものを含み、今後精査が必要。



# 化学処理技術の比較、総合評価（案）

## ▶ 化学処理技術の評価（案）を示す

評価項目（案）		化学処理				
		酸処理	溶融塩（+酸）処理	アルカリ処理	水熱処理	洗浄剤処理
課題となり得る事項	性状や量を踏まえた、二次廃棄物の処理や生成物の利用の困難度、作業者・環境への影響、大規模化の可能性	ベンチスケール以上での実証試験の実績がなく、大規模化が困難。酸を含む廃スラッジが処理土壤量の4割程度発生する。	ベンチスケール以上での実証試験の実績がなく、大規模化が困難。廃酸が処理土壤量の2倍程度に加え、アルカリ廃液も発生するため、廃液の発生量が多い。	ベンチスケール以上での実証試験の実績がなく、大規模化が困難。アルカリ、酸、高分子凝集剤を含む廃スラッジが処理土壤量の3割程度発生する。	ベンチスケール以上での実証試験の実績がなく、連続化・大規模化が困難。	ベンチスケール以上での実証試験の実績がなく、大規模化が困難。界面活性剤、塩類等を含む廃スラッジが処理土壤量の10倍程度発生する。
処理効果	減容化率・減量化率 （中分類内での相対的な評価）	◎ 減容化率77～93%（H23, 1件） 減量化率98～99%程度（廃吸着剤まで）（H25, 1件）	○ 減量化率60～75%	○ 減量化率63～70%	◎ 減量化率70～99%	△ 放射能濃度の低減化効果が低く、減量化できない。
	（放射能濃度が下がった生成物の）放射能濃度の低減効果	○ 77～93%（H23）、40～69%（H25） 生成物には酸等が含まれるため、再生利用には処理が必要。	◎ 96～99% 生成物には酸が含まれるため、再生利用には処理が必要。	△～○ 35～68% 生成物にはアルカリが含まれるため、再生利用には処理が必要。	△～○ 12～92%	△ 0～22%
処理能力	処理能力（処理にかかる時間やメンテナンス頻度等も考慮）	△ ベンチスケール以上での実証試験の実績がない。実証試験規模：0.02 kg～0.5 kg/バッチ	△ ベンチスケール以上での実証試験の実績がない。実証試験規模：20g/バッチ （R6ラボスケールでの連続化のための試験を実施中）	△ ベンチスケール以上での実証試験の実績がない。実証試験規模：10 kg/バッチ	△ ベンチスケール以上での実証試験の実績がない。実証試験規模：2 g～500 g/バッチ, 4.8 kg/h	△ ベンチスケール以上での実証試験の実績がない。実証試験規模：0.25 kg/バッチ
コスト等（※）	イニシャル・ランニングコスト、エネルギー使用量 （中分類内での相対的な評価）	○ 5万～10万円/t（H23）、10万円/t（H25）	○ 13万円/t	◎ 0.7万円/t （粗粒分洗浄設備は含まれていない。）	△～○ 4.3万円/t（H27）、5.9万円/t（H27）、322万円/t（H28）	△ 188万円/t（ランニングコストのみ）
上記の評価を踏まえた総合評価（案）		大規模化の可能性等に課題あり。	大規模化の可能性等に課題あり。	大規模化の可能性等に課題あり。	大規模化の可能性等に課題あり。	大規模化の可能性等に課題あり

※ここでのコスト等のデータは各実証事業において想定された条件の元で算出されたものを含み、今後精査が必要。

# 飛灰洗浄技術（洗浄工程）の比較、総合評価（案）

▶ 飛灰洗浄技術（洗浄工程）の評価（案）を示す

評価項目（案）		飛灰洗浄処理	
		混合攪拌式	散水式（+通気）
課題となる得る事項	性状や量を踏まえた、二次廃棄物の処理や生成物の利用の困難度、作業員・環境への影響、大規模化の可能性	特に問題はない。	特に問題はない。
		—	—
処理効果	減容化率・減量化率 （中分類内での相対的な評価）	—	—
	（放射能濃度が下がった生成物の）放射能濃度の低減効果	飛灰洗浄処理工程では濃縮物は発生せず。	飛灰洗浄処理工程では濃縮物は発生せず。
		◎	○
97%（国直轄），2～92%（H25, H31）。洗浄後飛灰が8,000Bq/kgを超える場合について、R6国直轄事業内で追加確認を検討中。	56～63%		
処理能力	処理能力（処理にかかる時間やメンテナンス頻度等も考慮）	○	○
		実証試験規模: 10～50 kg/バッチ, 550 kg/バッチ～連続処理（国直轄）	実証試験規模: 700 kg/バッチ
コスト等（※）	イニシャル・ランニングコスト、エネルギー使用量（中分類内での相対的な評価）	—	—
		※以下は洗浄処理以外の工程も含む数値 4.6万円/t飛灰（H25, 洗浄・吸着工程）、 68万円/t飛灰（H31, 洗浄吸着安定化）、 37万円/t飛灰（ランニングコストのみ, R4-5直轄, 洗浄（脱水）工程）	5.9万円/t飛灰（H25, 洗浄・廃水（脱水なし）工程）
上記の評価を踏まえた総合評価（案）		放射能濃度の低減効果が高く、飛灰洗浄技術（洗浄工程）においては、優先的に検討され得る技術。使用する水の量が多いため、廃水処理等の検討が必要。	廃水量は抑制的であるが、放射能濃度の低減効果（洗浄効果）が比較的低い。

※ここでのコスト等のデータは各実証事業において想定された条件の元で算出されたものを含み、今後精査が必要。

# 飛灰洗浄技術（吸着工程）の比較、総合評価（案）

▶ 飛灰洗浄技術（吸着工程）の評価（案）を示す

評価項目（案）		飛灰洗浄技術（吸着工程）	
		混合攪拌式（液中合成式） （フェロシアン化物）	カラム式 （フェロシアン化物, ケイチタン酸塩, ゼオライト）
課題となり得る事項	性状や量を踏まえた、二次廃棄物の処理や生成物の利用の困難度、作業員・環境への影響、大規模化の可能性	特に問題はない。	特に問題はない。
処理効果	減容化率・減量化率 （中分類内での相対的な評価）	○ 減量化率96～99%	○ 減量化率98～99%
	（放射能濃度が下がった生成物の）放射能濃度の低減効果	○ 濃度低減率99.5～99.9%	○ 濃度低減率99.9%
処理能力	処理能力（処理にかかる時間やメンテナンス頻度等も考慮）	○ フェロシアン化物の液中合成・吸着、その後はアルカリ分解はバッチ処理。液中合成式ではより短時間で吸着平衡に達する。 実証試験規模：500 L/バッチ, 75 L/バッチ, 1 m <sup>3</sup> /バッチ（国直轄）	◎ 連続処理が可能。カラム塔を直列につなぐことにより、複数系列化、大規模化が比較的容易。 実証試験規模：50 L/h（国直轄、フェロシアン化物）、9 L/h（国直轄、ケイチタン酸塩）、20L/h（国直轄、ゼオライト）
コスト等（※）	イニシャル・ランニングコスト、エネルギー使用量 （中分類内での相対的な評価）	— ※以下は吸着処理以外の工程も含む数値 4.6万円/t飛灰（H25, 洗浄・吸着工程含む） 68万円/t飛灰（H31, 洗浄吸着安定化） 510万円/t飛灰（R4-5 国直轄, 吸着安定化工程, 液固比10で推計、51万円/m <sup>3</sup> ろ液（吸着安定化工程））	— ※以下は吸着処理以外の工程も含む数値 150万円/t飛灰（R4-5 国直轄, 洗浄吸着安定化工程、液固比10で推計、15万円/m <sup>3</sup> ろ液（洗浄吸着安定化工程）） 97万円/t飛灰（R4 国直轄, 吸着安定化工程、液固比10で推計、9.7万円/m <sup>3</sup> ろ液, 吸着安定化工程）
上記の評価を踏まえた総合評価（案）		放射性セシウムの吸着効果を確認。安定化処理、最終処分までを含めた評価が必要。	放射性セシウムの吸着効果を確認。安定化処理、最終処分までを含めた評価が必要。

※ここでのコスト等のデータは各実証事業において想定された条件の元で算出されたものを含み、今後精査が必要。

# 安定化技術（廃吸着剤）の比較、総合評価（案）

➤ 安定化技術（廃吸着剤）の評価（案）を示す

ジオポリマー固型化は廃吸着剤を対象とした実証試験は行われていない。

評価項目（案）		安定化技術（対象物が廃吸着剤および廃吸着剤洗浄水の場合）			
		セメント固型化	ガラス固型化	プラスチック固型化	（吸着剤がゼオライトの場合）ゼオライト焼成
課題となり得る事項	性状や量を踏まえた、二次廃棄物の処理や生成物の利用の困難度、作業者・環境への影響、大規模化の可能性	特に問題はない。	特に問題はない。	特に問題はない。	特に問題はない。
		—	—	—	—
処理効果	溶出性、安定性等 （中分類内での相対的な評価）	○ 溶出率：フェロシアン化物分解後、ステンレスカラム内固型化0%（溶出なし）、フェロシアン化物分解残渣固型化体、最大78% フェロシアン化物未分解固型化体0.04%。 （国直轄） 充填率：0.5 kg/L	◎ 溶出率：0.003%未満（国直轄）、0.12% 充填率：0.032～0.7 kg/	◎ 溶出性：検液ND（<18.8 Bq/L） 充填率：1.1 kg/L	◎ 溶出率：0.001～0.0022%
		◎	○	○	○
処理能力	処理能力（処理にかかる時間やメンテナンス頻度等も考慮）	パイロットスケールでの実証試験あり。 実証試験規模：10～200L/バッチ	実証試験ではベンチスケールのみ。 実証試験規模：4kg/バッチ、0.57L/バッチ	実証試験ではベンチスケールのみ。 実証試験規模：55ml/バッチ	実証試験ではベンチスケールのみ。 実証試験規模：1.4kg/バッチ
コスト等（※）	イニシャル・ランニングコスト、エネルギー使用量（中分類内での相対的な評価）	—	—	—	—
		※以下は安定化処理以外の数値を含む 150万円/t飛灰（国直轄、洗浄吸着安定化工程含む）	39万円/t飛灰（固型化のみ） ※以下は安定化処理以外の数値を含む 97万円/t飛灰（R4 吸着安定化工程、液固比10で推計） 9.7万円/m <sup>3</sup> ろ液（R4 吸着安定化工程）	（参考値）12.1万円（薬品費のみ）	※以下は安定化処理以外の数値を含む 510万円/t飛灰（R4 吸着安定化工程、液固比10で推計） 51万円/m <sup>3</sup> ろ液（R4 吸着安定化工程）
上記の評価を踏まえた総合評価（案）		最終処分場の構造等の検討と合わせて評価が必要。	溶出抑制効果は高い。最終処分場の構造等の検討と合わせて評価が必要。	溶出抑制効果は高い。最終処分場の構造等の検討と合わせて評価が必要。	焼成（非晶化）により溶出抑制効果を高めることができる。最終処分場の構造等の検討と合わせて評価が必要。

※ここでのコスト等のデータは各実証事業において想定された条件の元で算出されたものを含み、今後精査が必要。

# 安定化技術（飛灰等）の比較、総合評価（案）

➤ 安定化技術（飛灰等）の評価（案）を示す

評価項目（案）		安定化技術（対象物が飛灰等の場合）			
		セメント固型化	ガラス固型化	ジオポリマー固型化	プラスチック固型化
課題となり得る事項	性状や量を踏まえた、二次廃棄物の処理や生成物の利用の困難度、作業員・環境への影響、大規模化の可能性	特に問題はない。	特に問題はない。	特に問題はない。	特に問題はない。
		—	—	—	—
処理効果	溶出性、安定性等 (中分類内での相対的な評価)	○ 溶出率：17～21 % 充填率：0.4～1.27 kg/L	— 溶出率：データなし 充填率：0.7 kg/L	○ 溶出率：7.2～23 % 充填率 0.5 kg/L 程度	◎ 溶出率：6.6 % 充填率 0.9 kg/L
		◎	△～○	○	○
処理能力	処理能力（処理にかかる時間やメンテナンス頻度等も考慮）	実証試験規模：0.3 m <sup>3</sup> /バッチ, 0.2 m <sup>3</sup> /バッチ, 30 L/バッチ, 64 L/バッチ, 30 kg/バッチ	実証試験ではベンチスケールのみ。 実証試験規模：10 kg/バッチ, 0.57 L/バッチ	実証試験規模：2L～20L/バッチ	実証試験ではベンチスケールのみ。 実証試験規模：55ml/バッチ
		◎	△	○	—
コスト等 (※)	イニシャル・ランニングコスト、エネルギー使用量（中分類内での相対的な評価）	1.4万円～12万円/t対象物（飛灰or土壌）	80万～800万円/t飛灰	72万円/t対象物	（参考値）12万円/t対象物（薬品費のみ。）
		<b>上記の評価を踏まえた総合評価（案）</b> 特定廃棄物セメント固型化処理施設での実績、管理型処分場での埋立実績あり。最終処分場の構造等の検討と合わせて評価が必要。		<b>最終処分場の構造等の検討と合わせて評価が必要。</b>	

※ここでのコスト等のデータは各実証事業において想定された条件の元で算出されたものを含み、今後精査が必要。

(参考資料)

減容技術等の評価項目に関する整理

# 減容技術等の評価項目に関する整理①

<各処理技術ごとの評価項目に関する整理（分級処理技術の場合\_湿式分級）>

	湿式分級			
	通常分級	高度分級		
	粒径による分離（振動篩、沈降分離等）	付着粒子の分離（機械式研磨等）	分級点の小粒径化（磁気分離、浮遊選別等）	付着粒子の分離+分級点の小粒径化（機械式研磨+高圧エジェクター等）
実証事業での実績	H30-31（1件、国直轄事業） H23（1件）、H31-R2（1件）	H23（5件）、H30-31（1件、国直轄事業）	H29（2件）	H23（2件）、H26（1件）、H30（1件）、H31（1件）、R3（2件）
実証事業で用いた対象物	土壌、2,290～10.2万 Bq/kg	土壌、4,000～10.6万 Bq/kg	土壌、4.8万～21万 Bq/kg	土壌、2,800～4.2万 Bq/kg
実証事業の規模	20t/h（国直轄）、2t/h、10t/h	10t/h（国直轄）、2.5kg/h、0.15t/h、1t/h、2t/h	0.1t/day、1t/day、36kg/バッチ	660L/h、40t/h 2t/h、20m <sup>3</sup> /h、250L/バッチ、40t/day
大規模化の可能性	実機規模（40t/h）の装置あり。複数系列化が可能。水の循環利用が可能。	実機規模（20t/h）の装置あり。複数系列化が可能。水の循環利用が可能。	既存の装置の処理能力が小さい。複数系列化には多くの要素装置が必要。	実機規模の装置あり。解泥機、150t/h；エジェクター、250t/h等
減容化率	8～57%（国直轄）	7～45%（国直轄）、42～59%（H23、1件） その他はデータなし	データなし	70～86%（データなしの実証試験多数）
減量化率	32～82%（国直轄）、54～79%（H23、H31-R2）	31～81%（国直轄）、71～82%（H23、5件）	減量化率52～70%（H29、2件）	減量化率0～94%（H23、2件、H26、1件、H30、1件、H31、1件、R3、2件）
放射能濃度の低減化率（除染率）	51～82%（国直轄）、 60～79%（H23、1件、H31-R2、1件）	58～88%（国直轄）、58～97%（H23、5件）	16～63%（H29、2件） （生成物のうち、比較的粒径の小さいものについて、放射能濃度の低減効果が低い場合がある。）	23～98%（H23、2件、H26、1件、H30、1件、H31、1件、R3、2件） （生成物のうち、比較的粒径の小さいものについて、放射能濃度の低減効果が低い場合がある。）
生成物/濃縮物の放射能濃度	484～2.1万 Bq/kg（粗粒分） 4,190～13.3万 Bq/kg（脱水ケーキ）	530～1.6万 Bq/kg（粗粒分） 1.7万～36.3万 Bq/kg（細粒分、脱水ケーキ）	2.1万～5.5万 Bq/kg（20-75 umの画分） 2.1万～9.6万 Bq/kg（<20 um）	330～1.3万 Bq/kg（粗粒分） 2,700～10万 Bq/kg（濃縮物）
生成物/濃縮物の性状	礫含水率：18%、砂含水率：23% 細粒分含水率：40%（高分子凝集剤を含む場合がある）	含水比：17% 粗粒分はコンクリート骨材として利用可能、細粒分は脱水ケーキ	小径化による濃度が低減化できていない。フロスの処理の確認が必要。細粒分は脱水ケーキ状、界面活性剤の混入あり	粗粒画分の粒径範囲は実証事業によって異なる。細粒分は脱水ケーキ状、界面活性剤の混入の場合あり
コスト（イニシャル+ランニング）	2.8万円/t（国直轄事業）、0.7万円/t（H23）	3.2万円/t（国直轄事業、通常分級工程（2.8万円/t）を含む）、0.9万円～1.5万円（H23、5件）	0.95万円/t～17万円/t（H29、2件）	1.5万～23万円/t（H23、2件、H26、1件、H30、1件、H31、1件、R3、2件）
二次廃棄物等の性状や量	有機物、廃水（設備解体時）<50Bq/L、ろ布等	有機物、廃水（設備解体時）<50Bq/L、ろ布	2m <sup>3</sup> /tの泡浮遊選鉱処理水（界面活性剤を含む）、有機物分解廃液、磁気フィルター	無機系凝集剤、高分子凝集剤を含む廃水、フロス（有機物を含む浮遊物）等

※ここでのコスト等のデータは各実証事業において想定された条件の元で算出されたものを含み、今後精査が必要。

# 減容技術等の評価項目に関する整理②

< 各処理技術ごとの評価項目に関する整理（分級処理技術の場合\_乾式分級） >

	乾式分級			
	風選別（風力＋気流遠心分離）	高度分級		
		付着粒子の分離 （気流遠心分離＋機械式研磨）	付着粒子の分離＋小粒径化 （気流遠心分離＋機械式研磨）	風選別＋磁気分離 （風力による分級＋磁気選別）
実証事業での実績	H25 (1件)	H23 (1件)		R3 (1件)
実証事業で用いた対象物	雑草土砂混合物, 3,700 Bq/kg	土壌（田：7,700、畑：2,200、森林：38,000 Bq/kg）		土壌（3,900～4,500 Bq/kg）
実証事業の規模	0.2～2t/h	データなし	データなし	1t/h
大規模化の可能性	—	300kg/h規模の装置あり。	300kg/h規模の装置あり。	～1000kg/h（風選別）, ～1000 kg/h（永久磁石ドラム選別）の装置あり。
減容化率	データなし	データなし	データなし	データなし
減量化率	52～82 %	27～34 %	36～57 %	21～89 %
放射能濃度の低減化率（除染率）	15～41 %	63～86 %	38～74 %	0～58 %
生成物/濃縮物の放射能濃度	1,160～2,950 Bq/kg（粗粒分） / 3,080,300～14,000 Bq/kg（粗粒分） / 細粒分データなし	600～18,000 Bq/kg（粗粒分） / 細粒分データなし	600～18,000 Bq/kg（粗粒分） / 細粒分データなし	1,200～3,400 Bq/kg（粗粒分） / 3,100～6,300 Bq/kg（細粒分）
生成物/濃縮物の性状	—	—		生成物に磁性鉄粉の混入あり
コスト（イニシャル＋ランニング）	3.1万円/t	0.5～0.8万円/t		2.3万円/t
二次廃棄物等の性状や量	二次廃棄物量は限定的	バグフィルタ用ろ布等		磁性鉄粉、バグフィルタ用ろ布等

※ここでのコスト等のデータは各実証事業において想定された条件の元で算出されたものを含み、今後精査が必要。



# 減容技術等の評価項目に関する整理③

< 各処理技術ごとの評価項目に関する整理（熱処理技術の場合） >

	熔融	焼成
実証事業での実績	H28 (1件)、H24 (1件)	H23 (1件), H28-29 (国直轄事業)
実証事業で用いた対象物	土壌 (細粒分 < 75 um), 9,800~29,400 Bq/kg (プラント試験ではコールド試験)、主灰・飛灰, 6,600~23,000 Bq/kg	除去土壌 3,000~60,000 Bq/kg、焼却灰 9,000~110,000 Bq/kg
実証事業の規模 大規模化の可能性	3 t/day, 25 kg/バッチ 実機稼働中 (回転表面熔融炉 150 t/day)	10 t/day 類似の実機あり (ロータリーキルン、300 t/day)
減容化率	83.4~89.2 %	72.4~92.5 %
減量化率	89.7~98.5 %	88.9~95.8 %
放射能濃度の低減化率 (除染率)	97.1~99.3 %	99.7 %
生成物/濃縮物の放射能濃度	157~1,430 Bq/kg (スラグ) / 11.5万~46.6万 Bq/kg (飛灰) ※仮設灰処理施設での生成物 (スラグ) は平均3,000 Bq/kg程度 (焼却灰の処理)	100 Bq/kg以下 (焼成物) / 2.9万~90万 Bq/kg (飛灰)
生成物/濃縮物の性状	スラグ (添加剤のため、発生量は元土壌の1.3~1.4倍程度) 土木資材への再生利用実証結果あり。	生成物 (添加剤のため、発生量は元土壌の~2倍程度) 土木資材、農業資材への実証結果あり。
コスト (イニシャルコスト+ランニングコスト)	30~40万円/t (要精査)	30~40万円/t (要精査)
二次廃棄物等の性状や量	運転中の二次廃棄物は限定的 (耐火物、バグフィルター (数年に一度、部分的な交換)) 耐火物は高濃度となるが、運転中は再熱処理が可能。	運転中の二次廃棄物は限定的 (耐火物、バグフィルター (数年に一度、部分的な交換)) 耐火物は高濃度となるが、運転中は再熱処理が可能。

※ここでのコスト等のデータは各実証事業において想定された条件の元で算出されたものを含み、今後精査が必要。

# 減容技術等の評価項目に関する整理④

< 各処理技術ごとの評価項目に関する整理（化学処理技術の場合） >

	化学処理				
	酸処理	溶融塩（酸）処理	アルカリ処理	水熱処理（亜臨界状態）	洗浄剤処理
実証事業での実績	H23 (1件), H25 (1件)	R4-6(1件、継続中)	H28 (1件)	H27 (2件, 水熱爆砕、水熱抽出), H28,31(1件亜臨界イオン交換)	H27 (1件)
実証事業で用いた対象物	砂 (5100 Bq/kg), シルト (1.2万~29.3万 Bq/kg), 分級土壌 (<1mm, 2,700~21.2万 Bq/kg)	土壌 4,830~34万 Bq/kg	土壌 (<4.75 mm, 5,000 ~ 2.5万 Bq/kg)	土壌 (3,700 ~ 2.9万 Bq/kg) 焼却灰・飛灰 (4,100~2.4万 Bq/kg)	土壌 (2.9~3.5万 Bq/kg)
実証事業の規模	バッチ処理 0.02 kg ~ 0.5 kg	バッチ処理 20 g	バッチ処理 10 kg	準連続処理、バッチ処理 4.8 kg/h、2 g ~ 500 g	バッチ処理 0.25 kg
大規模化の可能性	—	—	—	—	—
減容化率	77~93% (H23)	データなし	データなし	データなし	放射能濃度の低減化効果が低く、減量化できない。
減量化率	98~99% (H25)	60~75%	63~70%	70~99%	
放射能濃度の低減化率	77~93% (H23)、40~69% (H25) (放射能収支が不明のため参考値)	96~99%	35~68%	12-92% (放射能収支不明のため、参考値)	0~22%
生成物/濃縮物の放射能濃度	(生成物) 78~8.4万 Bq/kg (廃液を吸着剤で濃縮) 1.4万~710万 Bq/kg	(生成物) 78~11,412 Bq/kg (濃縮物) 1.4万~59万 Bq/kg	(生成物) 3,628~8,464 Bq/kg (濃縮物) 41,250~50,719 Bq/kg	(生成物) 360~2.1万 Bq/kg (吸着剤) 6,300 ~ 36万 Bq/kg	(生成物) 1.9~3.7万 Bq/kg (濃度の低減化ができていない)
生成物/濃縮物の性状	処理後土壌に酸が含まれる	処理後土壌に酸が含まれる	処理後土壌にアルカリが含まれる	品質の確認が必要	洗浄効果が低く、生成物の濃度が高い。
コスト（イニシャルコスト+ランニングコスト）	5万~10万円/t (H23)、10万円/t (H25)	13万円/t	0.7万円/t	4.3万円/t (H27)、5.9万円/t (H27)、322万円/t (H28)	188万円/t (ランニングコストのみ)
二次廃棄物、副生成物等の性状や量	廃酸等が発生する。処理後物の中和、洗浄が必要。スラッジが処理土壌量の4割程度発生。	酸、アルカリ廃液が土壌量の各2倍程度発生。	廃アルカリが発生する。処理後物の中和、洗浄が必要。	処理水等、二次廃棄物の発生は限定的	廃酸、廃塩、添加物、洗浄水が二次廃棄物となる。処理後物の中和、洗浄が必要。

※ここでのコスト等のデータは各実証事業において想定された条件の元で算出されたものを含み、今後精査が必要。

# 減容技術等の評価項目に関する整理⑤

< 各処理技術ごとの評価項目に関する整理（飛灰洗浄技術（洗浄工程）の場合） >

	洗浄	
	混合攪拌式	散水式
実証事業での実績	H25 (1件), H31 (1件), R4-5 (1件、国直轄事業)	H25 (1件)
実証事業で用いた対象物	飛灰（ストーカー炉、焼却炉、表面溶融炉、2.7万～28万 Bq/kg(R4年度時点)、液固比5～10で攪拌洗浄	飛灰（ストーカー炉、1,200～1,400 Bq/kg）液固比0.55～0.65でシャワリング洗浄
実証事業の規模	10～50 kg/バッチ、550 kg/バッチ～連続処理（国直轄）	700 kg/バッチ
大規模化の可能性	550 kg～4 t/バッチ程度の大型化・複数系列化が可能（攪拌タンク容量：50 m <sup>3</sup> 、磁性分離：2000 L/min）	大規模化、複数系列化が可能（タンク容量：50 m <sup>3</sup> ）
減容化率	データなし	データなし
減量化率	飛灰洗浄処理工程では濃縮物は発生せず。	飛灰洗浄処理工程では濃縮物は発生せず。
放射能濃度の低減率	97%（国直轄）、2～92%（H25, H31） 洗浄後飛灰が8,000Bq/kgを超える場合について、R6国直轄事業内で追加確認を検討中。	56～63%
生成物/濃縮物の放射能濃度	（洗浄後飛灰）2,700～2.6万 Bq/kg  （洗浄廃水）51～3.2万 Bq/L（吸着工程へ）	（洗浄後飛灰）444～574 Bq/kg  （洗浄廃水）330～1,700 Bq/L
生成物の性状	磁力選別の場合、磁性粉末を含む。重金属を含む場合がある。反応促進剤として再利用（再熱処理）可能。	脱水ケーキ状、重金属を含む場合がある。反応促進剤として再利用（再熱処理）可能。350～1,600 Bq/L
コスト ※他の工程も含む数値あり	イニシャル+ランニング4.6万円/t飛灰（H25, 洗浄・吸着工程） イニシャル38万円/t飛灰, ランニング30万円/t飛灰（H31, 洗浄吸着安定化工程） ランニング37万円/t飛灰（R4-5, 洗浄（脱水）工程）	（H25, 洗浄・廃水（脱水なし）工程） イニシャルコスト 1.6万 円/t飛灰 ランニングコスト 4.3万 円/t飛灰
二次廃棄物等の性状や量	洗浄廃水に含まれる重金属対策として、キレート沈殿処理等が必要。また、高濃度塩分も含まれる。	洗浄廃水に含まれる重金属対策として、キレート沈殿処理等が必要。また、高濃度塩分も含まれる。

※ここでのコスト等のデータは各実証事業において想定された条件の元で算出されたものを含み、今後精査が必要。

# 減容技術等の評価項目に関する整理⑥

## < 各処理技術ごとの評価項目に関する整理（飛灰洗浄技術（吸着工程）） >

	吸着					
	フェロシアン化ニッケル	フェロシアン化鉄		フェロシアン化銅	ケイチタン酸塩	ゼオライト
	(液中合成・混合攪拌式)			(カラム式)		
実証事業での実績	H25 (1件)	H31 (1件)	R4-5 (1件、国直轄事業)	R4-5 (1件、国直轄事業)	R4 (1件、国直轄事業)	R4-5 (1件、国直轄事業)
実証事業で用いた対象物	ばいじん洗浄水、 (濃度はCs溶出と同時処理のため特定できない)	ばいじん洗浄後脱水ろ液、 270 Bq/kg	ばいじん洗浄後脱水ろ液、 2.8万 Bq/kg	ばいじん洗浄後脱水ろ液、 3.3万 Bq/kg	ばいじん洗浄後脱水ろ液、 2.8万 Bq/kg	フェロシアン化物吸着剤アルカリ分解液、 14万 Bq/kg
実証事業の規模 大規模化の可能性	500 L/バッチ	75 L/バッチ	1 m <sup>3</sup> /バッチ	50 L/h	9 L/h	20 L/h
減容化率	データなし	データなし	データなし	データなし	データなし	データなし
減量化率	96% (元飛灰からの減量化)	99% (元飛灰からの減量化)	98% (元飛灰からの減量化)	99% (元飛灰からの減量化)	99% (元飛灰からの減量化)	98% (アルカリ分解後中和液からの減量化)
放射能濃度の低減率	99.9% (洗浄液からの低減化率)	99.5% (洗浄液からの低減化率)	99.9% (洗浄液からの低減化率)	99.9% (洗浄液からの低減化率)	99.9% (洗浄液からの低減化率)	99.9% (アルカリ分解中和液からの低減化率)
生成物/濃縮物の放射能濃度	吸着剤48万～106万 Bq/kg 廃水 10-310 Bq/L程度	吸着剤44万 Bq/kg 廃水10 Bq/L程度	吸着剤(プルシアンブルー→ゼオライト) 864万 Bq/kg 廃水100 Bq/L	吸着剤2,180万～5,950万 Bq/kg 廃水 <2 Bq/L	吸着剤297万～376万 Bq/kg 廃水 <1 Bq/L	吸着剤(焼成後) 280万 Bq/kg 廃水～100 Bq/L
生成物(廃吸着剤、廃水)の性状	汚泥状 吸着剤のアルカリ耐性が高い(pH11)	汚泥状(フェロシアン化鉄分解物)	汚泥状(フェロシアン化鉄分解物)	カラム内廃吸着剤 Bq/kg/廃水 <2Bq/L	カラム内廃吸着剤	廃吸着剤
コスト(イニシャル、ランニング) ※他の工程も含む数値あり	イニシャル+ランニング4.6万円/t飛灰(H25:洗浄・吸着工程)	イニシャル38万円/t飛灰、ランニング30万円/t飛灰(洗浄吸着安定化工程)	イニシャル+ランニング510万円/t飛灰(吸着安定化工程、液固比10で推計) イニシャル+ランニング51万円/m <sup>3</sup> ろ液(吸着安定化工程)	イニシャル+ランニング150万円/t飛灰(洗浄吸着安定化工程、液固比10で推計)、 イニシャル+ランニング15万円/m <sup>3</sup> ろ液(洗浄吸着安定化工程)	イニシャル+ランニング97万円/t飛灰(吸着安定化工程、液固比10で推計) イニシャル+ランニング9.7万円/m <sup>3</sup> ろ液(吸着安定化工程)	イニシャル+ランニング510万円/t飛灰(吸着安定化工程、液固比10で推計) イニシャル+ランニング51万円/m <sup>3</sup> ろ液(吸着安定化工程)
二次廃棄物等の性状や量	廃水の放射能濃度は10～400 Bq/kg程度、重金属も凝集剤処理により、排水基準を満たす。吸着剤はフェロシアン化ニッケル担持磁性粒子	廃水の放射能濃度は10-20 Bq/L程度、重金属も凝集剤処理により、排水基準を満たす。	LPB分解物、処理水(放射能濃度は100Bq/L(ゼオライト吸着後))	吸着剤分解時のHCN、NH <sub>3</sub> 、COガスが発生するため、トラップ設備が必要。処理水、重金属汚泥	過熱溶融時のCs揮散の恐れあり。オフガス処理用フィルター。	重金属汚泥(リンス後、8000 Bq/kg以下となる)

※ここでのコスト等のデータは各実証事業において想定された条件の元で算出されたものを含み、今後精査が必要。

# 減容技術等の評価項目に関する整理⑦

< 各処理技術ごとの評価項目に関する整理（安定化技術（廃吸着剤、廃吸着剤処理水））の場合 >

	安定化			
	セメント固型化	ガラス固型化	プラスチック固型化	ゼオライト焼成
実証事業での実績	R4-5 (1件、国直轄事業)	R4 (1件、国直轄事業)	H24(1件)	R4-5 (1件、国直轄事業)
実証事業で用いた対象物	水蒸気分解後のフェロシアン化物6000万～1.1億Bq/kg、カラム内固型化	廃ケイチタン酸塩 300万Bq/kg (R4)、熱処理した吸着剤の洗浄水 (H28、H31-R3)	ゼオライト廃吸着剤(7300 Bq/kg)	廃吸着剤ゼオライト、120～280万 Bq/kg
実証事業の規模	10 L/バッチ～200L/バッチ	4kg/バッチ、0.57 L/バッチ	55 mL/バッチ	1.4kg程度/バッチ処理, キルンサイズによる。加熱条件は1050℃, 1 h
大規模化の可能性	可能、特定廃棄物施設で実績あり (160t/日), 実用段階	50t/バッチ規模の実績 (海外) 実用段階	可能。プラスチックの自動混練・成形装置の実績あり、実用段階	焼成炉の実機160 kg/dayあり。
固型化体の放射能濃度	固型化体：廃吸着剤の1/3程度	固型化体：～3.2万Bq/kg	固型化体：7,300 Bq/kg	焼成体～4000万Bq/kg (平均930万Bq/kg)
固型化体の性状	溶出率：フェロシアン化物分解後、ステンレスカラム内固型化0% (溶出なし)、フェロシアン化物分解残渣固型化体、最大78% フェロシアン化物未分解固型化体0.04% 充填率：0.5 kg/L	溶出抑制効果が高い： 溶出率：0.003%未満 (国直轄R4)～0.12% (R3) 充填率 0.032kg/L～0.7 kg/L	溶出性：検液ND (<18.8 Bq/L) (吸着剤) 軽量 密度1.35g/cm <sup>3</sup> 程度 充填率 1.1 kg/L	溶出率：0.001～0.0022%
コスト (イニシャル+ランニング) ※他の工程も含む数値あり	150万円/t飛灰 (国直轄、洗浄吸着安定化工程含む)	39万円/t飛灰 (固型化のみ) 97万円/t飛灰 (R4吸着安定化工程、液固比10で推計) 9.7万円/m <sup>3</sup> ろ液 (R4吸着安定化工程)	(参考値) 12.1万円 (薬品費のみ)	510万円/t飛灰 (R4 吸着安定化工程、液固比10で推計) 51万円/m <sup>3</sup> ろ液 (R4 吸着安定化工程)
二次廃棄物等の性状や量	吸着剤分解時のHCN、NH <sub>3</sub> 、COガス、処理水。	排ガス対策のプレフィルター、HEPA フィルター、ガラスフィルター	プラスチックの重合化による固型化。水分が重合反応を阻害するため、対象物の脱水が必要。	焼成時にCsが排気側へ移行すると推測される。フィルター等オフガス対策が必要。

※ここでのコスト等のデータは各実証事業において想定された条件の元で算出されたものを含み、今後精査が必要。

# 減容技術等の評価項目に関する整理⑧

< 各処理技術ごとの評価項目に関する整理（安定化技術（飛灰等）） >

	安定化			
	セメント固型化	ガラス固型化	ジオポリマー固型化	プラスチック固型化
実証事業での実績	H23, H24, H25, H31; 各1件	R3(1件)	R2 (1件), R3-4 (1件)	H24(1件)
実証事業で用いた対象物	飛灰(800～14,720 Bq/kg), 土壌(19,950 Bq/kg)	模擬飛灰2,026mg-Cs/kg	土壌 7,000 Bq/kg, (その2) 飛灰、15万 Bq/kg,	焼却灰、飛灰(8,600～9,960 Bq/kg)
実証事業の規模	0.3 m <sup>3</sup> /バッチ, 0.2 m <sup>3</sup> /バッチ, 30 L/バッチ, 64 L/バッチ, 30 kg/バッチ	10 kg/バッチ、0.57L/バッチ	2 L/バッチ, 20 L/バッチ	55 mL/バッチ
大規模化の可能性	特定廃棄物施設で実績あり (160t/日),	50t/バッチ規模の実績 (海外)	200 L/バッチ (ドラム缶) 程度可能	プラスチックの自動混練・成形装置の実績あり
固型化体の放射能濃度	517～112,200 Bq/kg	599mg-Cs/kg	固型化体：4.1万 Bq/kg (飛灰)	固型化体：5,700, 5,400 Bq/kg
固型化体の性状	溶出率：17～21 % 充填率：0.4～1.27 kg/L	飛灰の場合：溶出率データなし 充填率 0.7kg/L	溶出率：7.2～23 % (土壌、飛灰) 充填率：0.5 kg/L 程度	溶出率：6.6 % (飛灰) 充填率：0.9 kg/L
コスト (イニシャル+ランニング)	1.4万円～12万円/t対象物 (飛灰or土壌)	80～800万円/t飛灰	72万円/t飛灰	(参考値) 12.1万円 (薬品費のみ)
二次廃棄物等の性状や量	—	排ガス対策のプレフィルター、HEPA フィルター、ガラスフィルター	二次廃棄物の発生は限定的	プラスチックの重合化による固型化。水分が重合反応を阻害するため、対象物の脱水が必要。

※ここでのコスト等のデータは各実証事業において想定された条件の元で算出されたものを含み、今後精査が必要。

## (参考資料)

減容処理によって得られた生成物の再生利用の実証例

- 土壌の湿式分級砂（粗粒分）の再生資材化の実証例
- 溶融スラグの再生資材化の実証例
- 焼成による生成物の再生資材化の実証例①～⑥

# 減容処理によって得られた生成物の再生利用の実証例

- 減容処理によって得られた生成物の再生利用に関する実証例について、2016年度から2023年度までに実施された事業の成果をまとめた。

対象物	再生利用の実証例	実証結果要約
土壌の湿式分級砂 (粗粒分)	盛土材としての適用性の評価	分級砂と山砂の混合土の土質試験より、道路盛土材として使用可能な材料と判断された。(P32)
	土木用資材 (コンクリートタイルの製造、細骨材)	強度、耐久性等の物性は各種基準を満足。(P33)
溶融スラグ	土木用資材 (盛土材) 土木用資材 (アスファルト舗装) 土木用資材 (路盤材) 土木用資材 (コンクリート)	利用用途に応じた安全性、安定性を確認した。その結果、各種用途への適用が可能であるとともに、適用拡大に当たっての課題を確認できた。(P34)
焼成による生成物	土木用資材 (インターロッキング (IL) ブロック)	歩道用および車道用ILブロック曲げ強度の基準を満足、製造管理値を満足 (P35)。
	土木用資材 (U字側溝)	強度、外観は生成物未使用品と同等 (P36)。
	農業用資材 (鉋さいけい酸質肥料)	焼成物は鉋さいけい酸質肥料と同様にケイ酸肥料として肥効があった。(P37)
	農業用資材 (酸性土壌改良材)	土壌の pH を上昇させる効果があった。(P38)
	土壌焼成物のセメント原料化の検討	焼成物を含むクリンカを用いて試製されたセメントJIS規格値を満たした。放射能濃度は検出限界以下。(P39-40)
	各種用途 (盛土材、に対する品質適合性評価、環境安全性評価)	各種用途に対する品質適合性評価および環境安全性評価にて、各種基準を満たすことが確認された。(P41)



# 土壌の湿式分級砂(粗粒分)の再生資材化の実証例①

## ■土壌の湿式分級砂(粗粒分)を盛土材として利用するための物理特性評価

分級後の土壌を用いて、土質試験を実施し、各種基準値\*1に照らし合わせることにより、盛土材料(路体・路床)としての適用性を評価した。

試験対象土壌試料:

- ① 通常分級後の土壌(礫・砂の分級後重量割合で混合)
- ② 遮蔽土嚢内の山砂
- ③ 容積比①9:②1 で混合したもの
- ④ 容積比①8:②2 で混合したもの
- ⑤ 容積比①7:②3 で混合したもの

分級砂と山砂を混合することにより、細粒分率が増加し、コーン指数:増大、CBR値:増大、締固めにより所要の密度を容易に得ることができた。

土質試験の値と各種基準値を照らし合わせると、混合土3種類全てにおいて、道路盛土材として使用可能な材料と判断された。

\*1公益社団法人日本道路協会編、『道路土工盛土工指針(平成22年度版)』平成22年4月初版第1刷発行 第4章設計 4-6盛土材料 p131

一般財団法人国土技術研究センター編『河川土工マニュアル』平成21年4月 第4章河川土工の施工 第4.2節施工計画 p160.

公益社団法人日本道路協会編、『舗装設計便覧』平成18年2月 第5章 アスファルト舗装の構造設計 p70.

国土交通省令(建設業に属する事業を行う者の再生資源の利用に関する判断の基準となるべき事項を定める省令 平成13年3月29日 国交令59

独立行政法人土木研究所編著『建設発生土利用技術マニュアル 第4版』平成25年12月1日 4.適用用途標準 p34. など

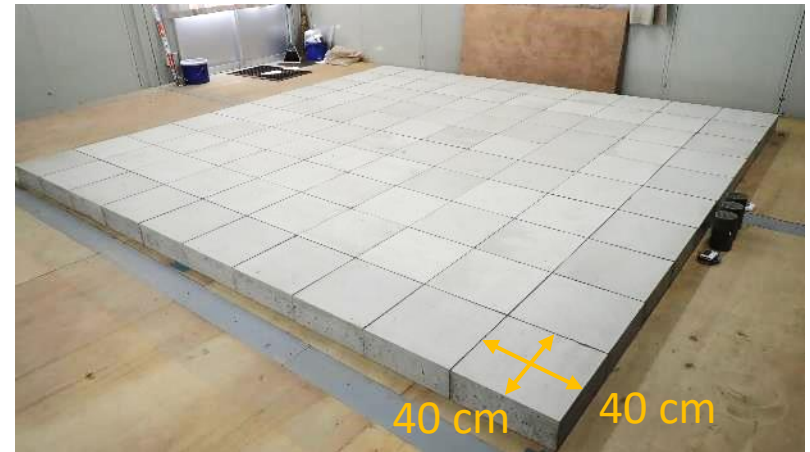
# 土壌の湿式分級砂(粗粒分)の再生資材化の実証例②

## ■ 土壌の湿式分級砂(粗粒分)をコンクリート骨材として利用するための実証例

国直轄の分級実証試験由来の分級砂(放射能濃度 1,000~2,700 Bq/kg)と山砂の約1:1の割合で混合した細骨材を使用し、コンクリートタイル(4.0m×4.0m×0.15m厚)を作製した。

強度、耐久性等の基礎物性は各種基準を満足し、通常品と同等またはそれ以上の値を示した。コンクリートタイルを100枚敷設した土間(写真、右)の中央での空間線量率は0.28 μSv/h程度(下図、右)であった。

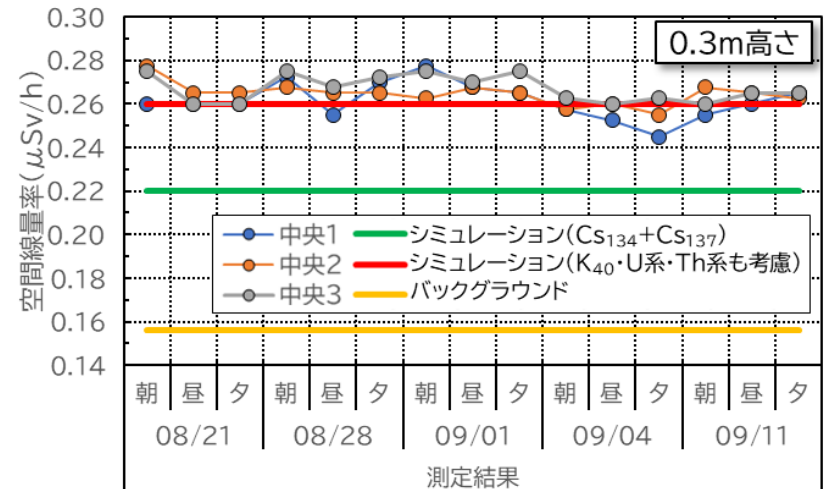
- 分級砂を含むコンクリートタイル100枚を敷設したコンクリート土間



- 分級砂を含むコンクリート基礎試験の様子



- コンクリートタイル土間の空間線量率のグラフ



# 溶融スラグの再生利用実証例

## ■ 溶融スラグを盛土材、路盤材、アスファルト舗装骨材、コンクリート骨材として利用

- ・ 双葉町仮設焼却第一施設・仮設灰処理第一施設で生成されたシャフト炉スラグおよび表面溶融炉スラグを用いて室内試験、試験施工等を行い、利用用途（盛土材、路盤材、アスファルト舗装骨材、コンクリート骨材）に応じた安全性、安定性を確認した。
- ・ モニタリング期間を通じて、盛土浸出水、舗装道路浸透水・表面水の水質について、放射性セシウム濃度は検出下限値未満であり、重金属濃度も参考値とした地下水環境基準に適合しており、環境安全性上の問題は認められなかった。
- ・ これらの溶融スラグについて、材料として構造物を構築したり、解体したりする場合における「使い易さ（勝手）」は、既に資源化が確立している製鋼スラグや都市ごみ溶融スラグ等と同等であった。

➤ 2024年6月現在、技術実証フィールドにて、

- ・ 双葉町仮設灰処理第二施設で生成されたコークスベッド炉スラグを用いて試験盛土実証試験を実施中
- ・ 三種類のスラグを用いた大型テストセルによる環境安全性試験の試験設備を構築中
- ・ 三種類のスラグを用いたインターロッキングブロックの試験施工を計画

➤ 試験盛土供用時の状況  
(除去土壌とスラグ割合1:1)



➤ アスファルト舗装道路構築状況  
(配合を変え5工区を施工)



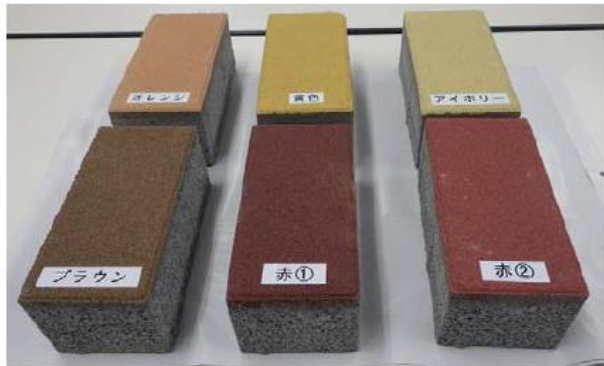
➤ コンクリート供試体屋外暴露状況



# 焼成による生成物の再生資材化の実証例①

## ■骨材の50%を焼成物に置き換え製造されたILブロックと敷設例

- 細骨材の50%を焼成物に置き換え製造されたILブロックの外観



合計22,000個以上を製造  
(長さ200mm×幅100mm×厚さ80mm)

### ILブロックの配合・管理値

#### ■ILブロック製造管理値

管理項目	管理値
充填率	90%(目安)
曲げ強度(14日強度)	5.0N/mm <sup>2</sup> 以上
寸法精度	±3mm

#### ■生成物管理値

管理項目	管理値
f-CaO量	1%以下
絶乾密度	2.5g/cm <sup>3</sup> 以上
吸水率	5.0%以下

#### ■配合

生成物の品質の変動によって充填率が変動することからフレコンごとに配合調整

配合	容積置換率(%)		水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	密度(g/cm <sup>3</sup> )				
	細骨材	粗骨材			1	3.16	2.56	2.83	2.71
					単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
				水	セメント	砂	粗骨材	生成物	
配合例①	50	0	33	60	131	400	570	840	604
配合例②	50	0	35	55	153	436	499	903	529

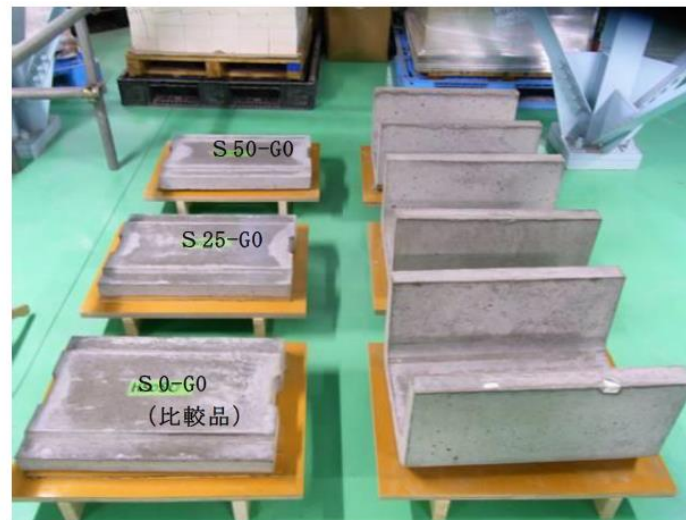
容積置換率 = 細骨材中の焼成物の容積

- 細骨材を生成物で置き換えたILブロックについて、生成物の細骨材置換率100%では、歩道用ILブロックの曲げ強度の基準3N/mm<sup>2</sup>以上、生成物の細骨材置換率50%では、車道用ILブロックの曲げ基準5N/mm<sup>2</sup>以上が確保できることが確認された。

# 焼成による生成物の再生資材化の実証例②

## ■ 細骨材の25, 50%を土壌の焼成物に置き換え製造された側溝の例

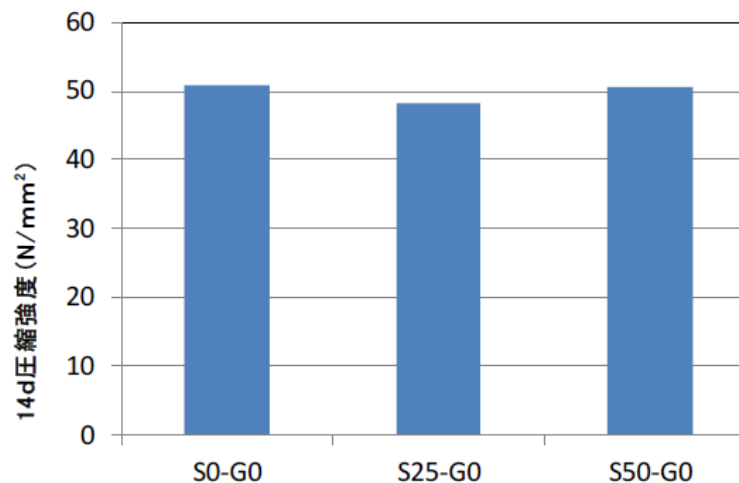
➤ 作製されたU字側溝（右）と蓋（左）



細骨材に対し、土壌の焼成物を 25 %、50 % と置換した配合でのU字側溝の作製例（写真）

硬化後のコンクリート供試体の強度特性には置換材の影響は認められず、50 %置換においても未使用品と同等の強度が得られた（下図）。

➤ コンクリート供試体の圧縮強度



# 焼成による生成物の再生資材化の実証例③

## ■ 農業用資材化の例\_焼成物を添加した土壌での水稻栽培試験

土壌の焼成物の成分が鉍さいけい酸質肥料に類似しているため、市販の鉍さいけい酸質肥料との施用比較試験が実施された。結果、生育阻害は認められなかった。

### 試料

焼成物① (1300 °C処理), 焼成物② (1400 °C処理), 鉍さいけい酸質肥料

### 方法

- ・ポット(φ160.4 × 197.5mm)による水稻栽培試験
- ・窒素、リン、カリウムは通常量を施用
- ・無添加を対照、参考として市販ケイ酸資材(ケイカル)添加を設置
- ・ポット当り4gの生成物・ケイカルを添加  
(ケイカルの推奨最大量200kg/10aに相当)



焼成物を添加した試験

7月15日(移植後29日)

左から無添加、焼成物①、焼成物②  
ケイカル

生育(8月1日、移植後46日調査)

(平均±SE、n = 4)

	草丈(cm)	茎数(本/ポット)
対照	103±2	20.8±0.5
焼成物①	102±1	25.0±1.3
焼成物②	102±1	31.0±3.2
ケイカル	103±2	24.0±1.5

- ・生育阻害は認められない
- ・草丈は対照、ケイカルと同等
- ・茎数は 焼成物① > 焼成物② = ケイカル > 対照

# 焼成による生成物の再生資材化の実証例④

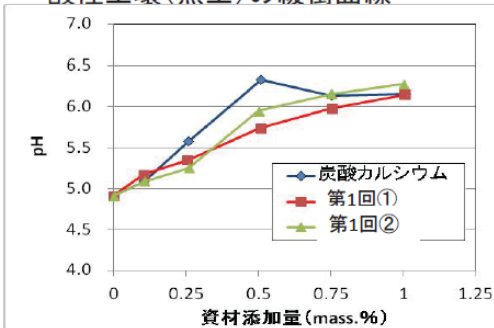
## ■農業用資材化の例\_焼成物の酸性土壌改良材としての評価

土壌焼成物は多量のカルシウムを含んでいることから、石灰質肥料と同様、酸性土壌改良材として期待できるため、緩衝曲線の測定 及び コマツナを用いた生物施用試験を行なった。酸性土壌に対しては、市販の炭酸カルシウムと同様にpHを上昇させる効果があった(下図、左)。コマツナ栽培試験では葉の黄変が観察された(下図、右)。

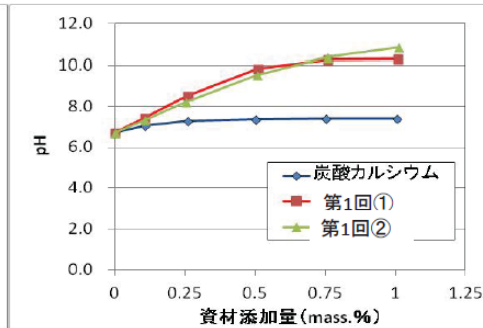
評価に用いた試料

	f-CaO (%)	CaO/SiO <sub>2</sub>
第1回①	9.2	2.5
第1回②	18.5	3.2

酸性土壌(黒土)の緩衝曲線



中性土壌(一般畑土壌)の緩衝曲線



供試資材 第2回①(1300°C処理)

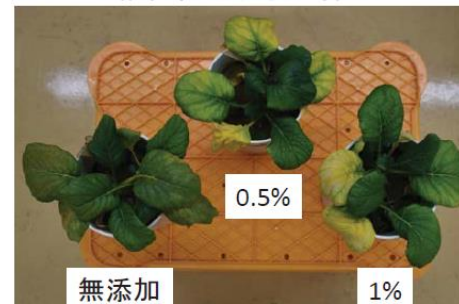
供試土壌 淡色黒ボク土(pH5.4)

処理 無添加(pH5.4)、0.5%(pH6.3、3.5g/ポット)、1%(pH7.1、7g/ポット)

方法 ・ポット(φ113×140mm)によるコマツナ栽培試験

・窒素、リン、カリウムは通常量を施用

・播種約1ヶ月後に採取



採取時の様子

生育調査(平均±SE, n=3)

処理	乾物重 (g/ポット)
無添加	4.69±0.29
0.5%	5.54±0.11
1%	5.43±0.45

有意な処理間差は認められなかった

- ・一般的に酸性土壌改良資材として使用される炭酸カルシウムと同様の改善効果
- ・中性土壌に添加した場合にはアルカリ性が極端に高くなるため注意が必要
- ・f-CaOが低い生成物を用いた場合でも同様の傾向

- ・いずれの処理についても生理障害と思われる症状が観察された
- ・生成物施用処理における生理障害の原因についてはさらなる検討が必要である

# 焼成による生成物の再生資材化の実証例⑤-1

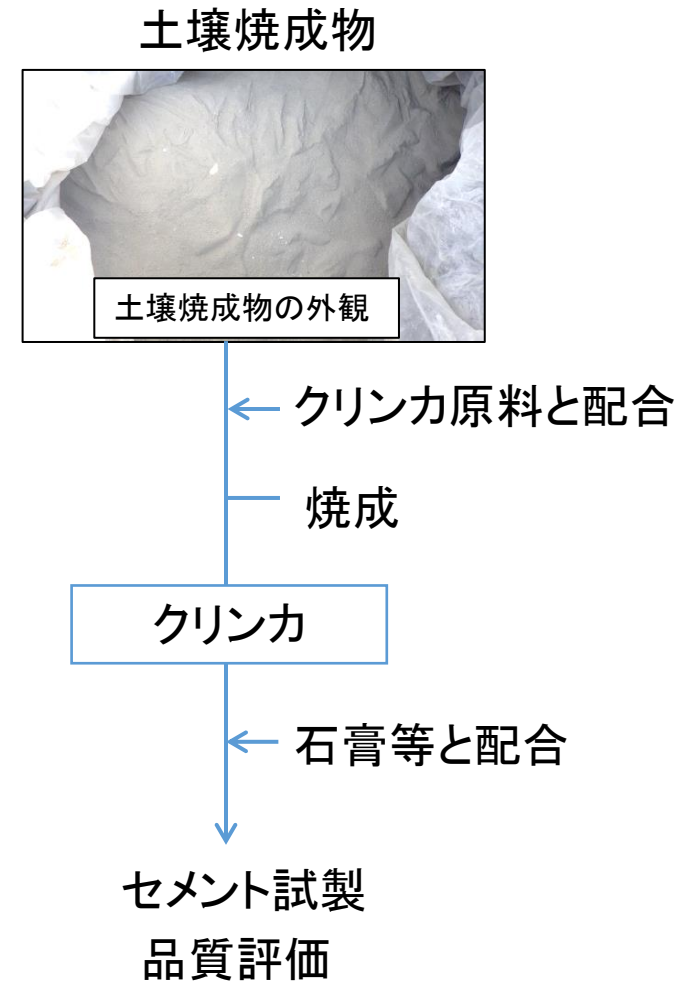
## ■ 土壌焼成物のセメント原料化の検討

### ① セメントクリンカ原料として利用

焼成物をクリンカ原料の代替物\*として用い、他の原料と混合しクリンカを焼成した。  
 焼成したクリンカを用いてセメントを試製し、その品質評価を行った。

\*セメントクリンカの主原料が、石灰石、粘土、珪石、鉄原料であることから、カルシウム分及びシリカ分を多く含む焼成物は、「石灰石・珪石代替原料」として利用できる可能性がある。

- 焼成物を含むクリンカを用いて試製されたセメントは普通ポルトランドセメントのJIS規格値 (JIS R 5210:2009 ポルトランドセメント) を満たした。
- 最大19.3 % (原単位: 199.2 kg-生成物/t-cli.) の焼成物を含むセメントにおいても、品質上の問題は認められなかった。
- 放射能濃度は検出下限値未満であった。





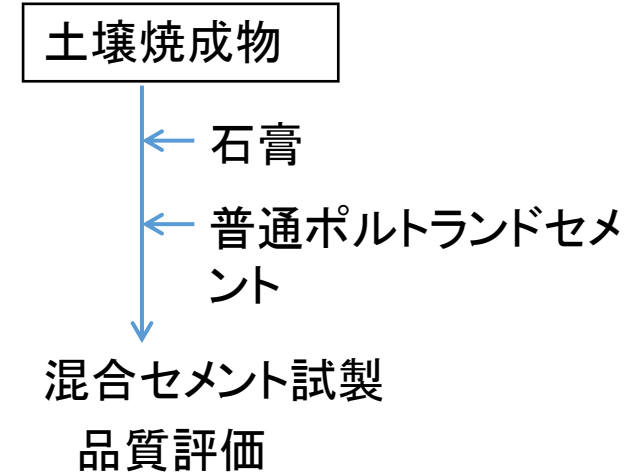
# 焼成による生成物の再生資材化の実証例⑤-2

## ■ 土壌焼成物のセメント原料化の検討

### ② セメントクリンカの一部を代替

焼成物で普通ポルトランドクリンカの一部を代替した混合クリンカを用いてセメントを試製し、その品質評価を行った。

- 試製した混合セメントは普通ポルトランドセメントのJIS規格値 (JIS R 5210:2009 ポルトランドセメント) を満たすことが確認された。
- 焼成物の配合比に関わらず、対照セメント (焼成物を含有しない) とほぼ同等の物理特性及び化学特性を示し、品質上の問題は認められなかった。
- 生成物由来の鉱物も確認できなかった。
- 放射能濃度は検出下限値未満であった。



# 焼成による生成物の再生資材化の実証例⑥

## ■盛土材、路盤材、コンクリート二次製品用骨材用途に対する品質適合性評価

土壌の焼成物は、各種用途に対して、利用可能な品質の材であることが示された。

用途	要求項目	要求品質	評価
盛土材	強度（コーン指数）	400 kN/m <sup>2</sup> 以上	◎：大幅にクリア
	塩化物含有量	1 mg/g 以下	◎：大幅にクリア
	電気伝導度	200 mS/m以下	○：場合により、混合・洗浄
	吸水膨張特性	膨張比3%以下	◎：大幅にクリア
	総合評価		
路盤材	呈色判定	呈色なし	◎：問題なし
	水浸膨張比 / %	1.0 以下	◎：大幅にクリア
	修正CBR / %	(受渡当事者間協議)	◎：粒度調整品でクリア
	総合評価		
コンクリート二次製品用骨材	アルカリシリカ反応性	無害である	◎：問題なし
	絶乾密度 / g/cm <sup>3</sup>	(砕砂) 2.5以上	○：混合利用可能
	吸水率 / %	(砕砂) 3.0以下	○：混合利用可能
	安定性 / %	(砕砂) 10以下	◎：大幅にクリア
	微粒分量 / %	(砕砂) 9.0以下	◎：大幅にクリア
	総合評価		

## ■環境安全性評価

土壌の焼成物は、重金属・有害物質の溶出量、含有量に関する基準\*を満たすことが示された。

\* JIS A 5031 溶融スラグ骨材に対する環境安全品質基準

	溶出量 / mg/l							
	カドミウム	鉛	六価クロム	ひ素	水銀	セレン	ふっ素	ほう素
生成物(一例)	<0.001	<0.001	<0.005	<0.001	<0.0005	<0.001	0.48	<0.1
規定*	<0.01	<0.01	<0.05	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.8	<1
	含有量 / mg/kg							
	カドミウム	鉛	六価クロム	ひ素	水銀	セレン	ふっ素	ほう素
生成物(一例)	<10	<10	<10	<10	<1	<10	600	<100
規定*	<150	<150	<250	<150	<15	<150	<4,000	<4,000

\*JIS A 5031 溶融スラグ骨材に対する環境安全品質基準より