

# 減容技術の現状と課題について

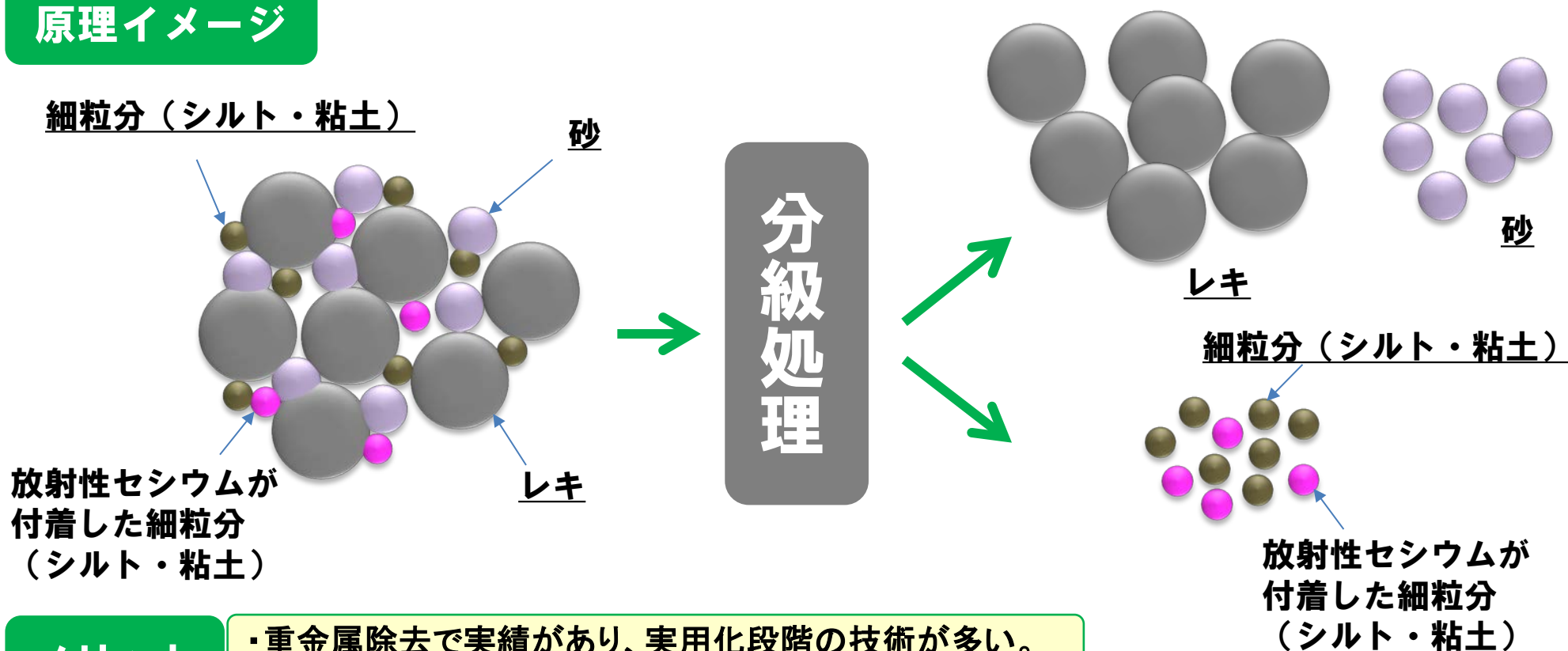
平成27年7月21日

環境省

## 除去土壌の減容技術（1/6）～分級処理～

- 分級処理は、セシウムが細粒分（シルト・粘土）に付着しやすいという特性を踏まえ、土壌を細粒分（シルト・粘土）と砂・レキに分離する方法。
- 放射性セシウムが細粒分に付着しやすいという特性は、他の重金属に共通するものであり、重金属を除去する技術として、従来から多用されている。

### 原理イメージ



### メリット

- ・重金属除去で実績があり、実用化段階の技術が多い。
- ・大量かつ比較的安価に処理が可能。

# 除去土壌の減容技術（2/6）～分級処理～

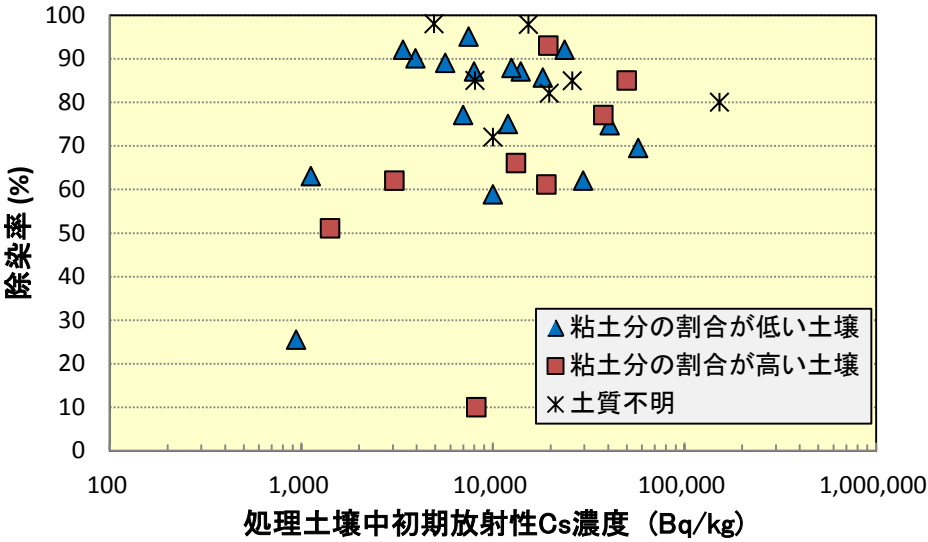
| 平均除染率※1<br>【%】(範囲)×件数> | 平均濃縮率※2<br>【倍】(範囲)×件数> | 平均処理コスト※3<br>【万円/t】(範囲)×件数> |
|------------------------|------------------------|-----------------------------|
| 75(10～98)×32>          | 6.7(1.3～34)×13>        | 1.2(0.4～3)×19>              |

## 《分級処理に必要な付帯技術》

- 付帯技術
  - ・ 超音波  
水や溶剤を振動させ洗浄する
  - ・ ジェット水流  
高圧水等により洗浄する
  - ・ スクラビングフローテーション  
擦り洗いで汚染物質を剥離させ、浮上泡で回収する
  - ・ ナノバブル(マイクロバブル)  
極微小気泡を含む水により洗浄する

※1 除染率(%) = (1 - 浄化物の放射能濃度 ÷ 処理対象物の放射能濃度) × 100  
※2 濃縮率(倍) = 分離濃縮物の放射能濃度 ÷ 処理対象物の放射能濃度  
除染率及び濃縮率は、各試験に用いた試料(土壌、焼却灰)の放射能濃度及び性状等が異なるため参考値  
※3 処理コストは、排水処理等付帯設備の範囲やコスト評価項目(設備費、運転費、資材費、労務費等)が異なるため参考値  
以下、化学処理、熱処理、洗浄処理についても同様。また多件数の場合、平均値とした

|       | 課 題                                       | 対応案                                           |
|-------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 除染効果  | レキや砂の表面に固着したセシウム<br>の除去                   | レキや砂の表面に固着したセシウム<br>を効果的に剥離させる研磨等の技術<br>評価・選定 |
|       | 粘土分の割合が高い土壌<br>は濃縮物量が多くなるため<br>効果的な分級が難しい | セシウムが固着した粘土を選択的に<br>分離する技術の開発                 |
| 処理コスト | -                                         | -                                             |
| 添加物   | -                                         | -                                             |
| 環境側面  | -                                         | -                                             |

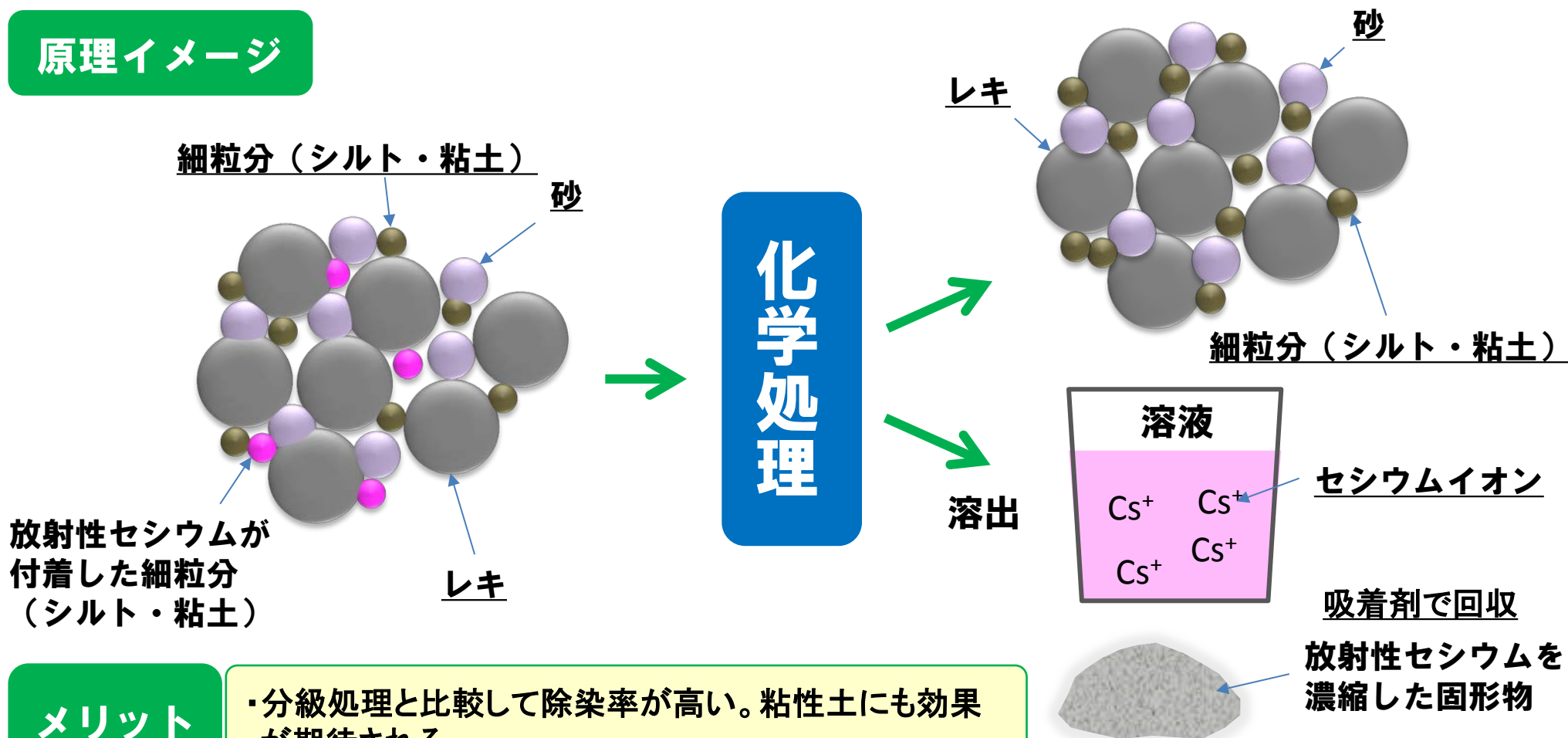


土壌の性状及び放射性セシウム濃度に着目した除染率の調査事例

## 除去土壤の減容技術（3/6）～化学処理～

- 化学処理は、強酸などの溶媒を使用し、土壤中のセシウムを溶液中に溶出させて、土壤からセシウムを分離する方法。
- 溶液中のセシウムは、吸着剤等で回収する。

### 原理イメージ



### メリット

- 分級処理と比較して除染率が高い。粘性土にも効果が期待される。

# 除去土壌の減容技術（4/6）～化学処理～

| 除染率※1<br>【%】<件数> | 濃縮率※2<br>【倍】 | 処理コスト※3<br>【万円/t】<件数> |
|------------------|--------------|-----------------------|
| 52～96<5>         | －            | 6～10<2>               |

## 《化学処理に必要な溶媒・吸着剤》

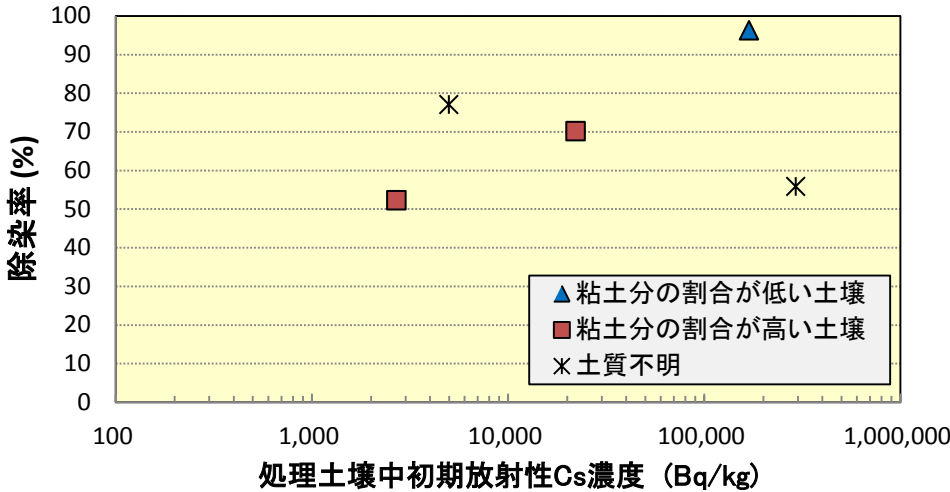
### ● 溶媒

- 酸溶液  
(シュウ酸、硫酸、塩酸、硝酸、フッ化水素酸等)
- アルカリ溶液  
(水酸化ナトリウム等)

### ● 吸着剤(排水処理に使用)

- フェロシアン化鉄(プルシアンブルー)  
鉄とフェロシアン化物から成り、立体構造を持ち、その隙間にセシウムを選択的に吸着する
- ゼオライト  
ケイ素、アルミニウム、酸素が結合し、細孔のある立体構造をもち、その隙間にセシウムを吸着する
- ケイチタン酸塩  
ケイ素、チタン、酸素が結合し、細孔のある立体構造をもち、その隙間にセシウムを吸着する

|       | 課 題                   | 対応案                          |
|-------|-----------------------|------------------------------|
| 除染効果  | 土壌の性状による依存性           | 対象土壌の適切な選択                   |
| 処理コスト | 分級処理と比較して高い           | 放射能濃度の高い処理対象物や分級処理後の粘性土等への適用 |
| 溶媒    | 浄化物における、酸等の薬剤の残留      | 放射能濃度・性状に応じた処理技術の選定・評価       |
| 吸着剤   | 溶液性状等に合わせた吸着条件の適切な設定  | 最適な吸着剤の選定や処理条件等の検討           |
|       | 吸着後の長期安定性が不明          | 長期安定性の評価                     |
| 環境側面  | 排水への有害物質の混入           | 適切な排水処理の実施                   |
| 浄化物   | 土壌の性状・組成が変化し、用途が限定される | 再生利用先の用途開拓                   |



土壌の性状及び放射性セシウム濃度に着目した除染率の調査事例

## 除去土壤の減容技術（5/6）～熱処理～

- 熱処理は、土壤からセシウムの分離を促進する反応促進剤を相当量加えて加熱し、気化したセシウムを冷却し固形物として回収する方法。
- 処理後の生成物（溶融物・焼成物）は、極めて低い放射能濃度の浄化物になる。

### 原理イメージ



### メリット

- 粘性土や砂質土などの性状に係わらず適用でき、除染率も高い。



除去土壌の減容技術（6/6）～熱処理～

| 除染率※1<br>【%】<件数> | 濃縮率※2<br>【倍】<件数> | 処理コスト※3<br>【万円/t】<件数> |
|------------------|------------------|-----------------------|
| 94～99.8<3>*      | 10～20**<3>       | 21<1>                 |

\* 反応促進剤未添加のデータを除く  
\*\* 分離濃縮物は排気側に回収されたばいじんを評価

《熱処理の加熱方法と反応促進剤》

● 加熱方法

溶融：融点以上まで加熱しセシウムを揮発させる

- ・ 燃焼式溶融炉（油等の燃料で加熱）
- ・ 電気アーク溶融炉（電力を利用しアーク熱により加熱）
- ・ プラズマ溶融炉（電力を利用しプラズマ放電により加熱）

焼成：融点より低い温度で加熱しセシウムを揮発させる

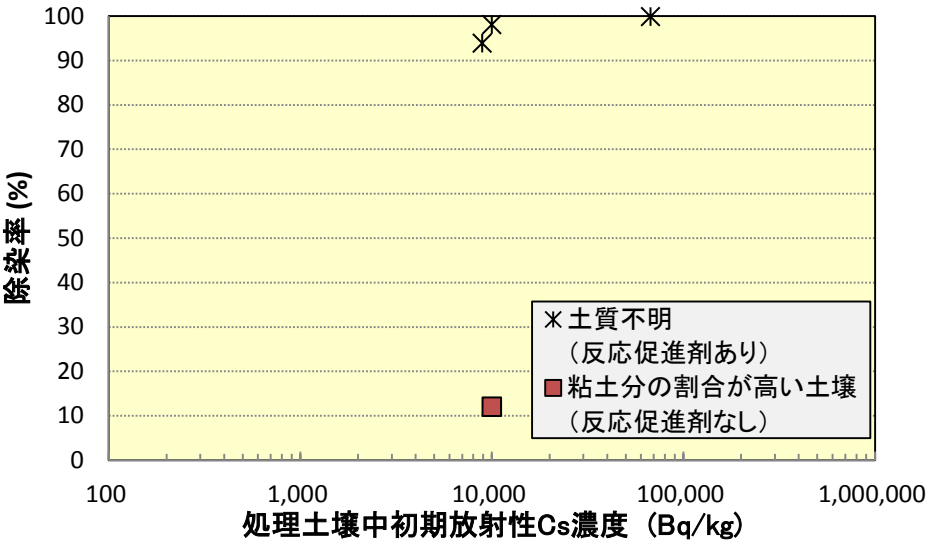
- ・ ロータリーキルン（円筒型炉を回転させて攪拌しながら加熱）
- ・ 焙焼炉（炉内に空気を吹き込み、流動層を形成して攪拌しながら加熱）

● 反応促進剤

セシウムの揮発分離を促進させる薬剤

- 塩化カルシウム、炭酸カルシウム、二酸化ケイ素 等

|       | 課 題                            | 対応案                                               |
|-------|--------------------------------|---------------------------------------------------|
| 除染効果  | -                              | -                                                 |
| 処理コスト | 燃料や電力を要し、分級や化学処理と比べて高い         | 溶融温度を下げる反応促進剤の使用等<br>放射能濃度の高い処理対象物や分級処理後の粘性土等への適用 |
| 反応促進剤 | 処 理 対 象 物 によっ て は 相当量の反応促進剤が必要 | 少量で効果を発揮する反応促進剤の開発                                |
| 環境側面  | 排気中のセシウム、塩素等の対策                | 確実な排気処理等の実施                                       |
| 浄化物   | 土壌の性状・組成が変化し、用途が限定される          | 再生利用先の用途開拓                                        |



土壌の性状及び放射性セシウム濃度に着目した除染率の調査事例

## 焼却灰の減容技術(1/7) ～焼却灰とは～

- 焼却灰には、可燃物を焼却炉で燃やした後に残った主灰(燃えがら)及び飛灰(燃焼ガスと共に巻き上がるばいじん)がある。一般に主灰中のセシウムは水に溶けづらく、飛灰中のセシウムは溶けやすい。

### 焼却処理

#### 可燃物



枝



落ち葉

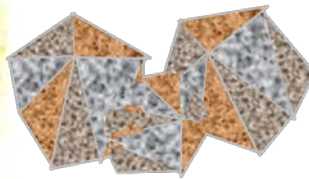


草

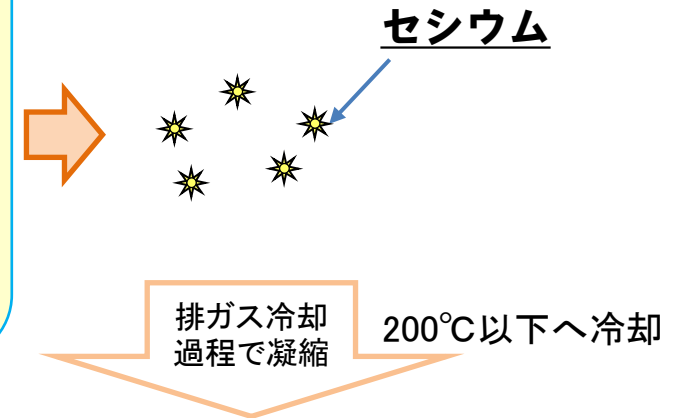
セシウムは、セシウムアルミノシリケート( $\text{CsAlSi}_x\text{O}_y$ )等の化合物や非結晶質のものとして、焼却炉の炉底に残る主灰とともに回収されるものと、気化し塩化セシウム等の形態で飛灰とともに排ガス用フィルター(バグフィルター等)に捕集されるものがある。



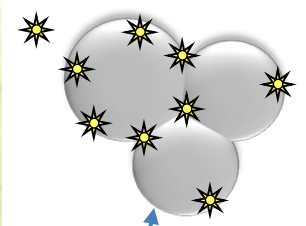
主灰  
(焼却炉の炉底に残る灰)



主灰



飛灰  
(排ガス用フィルターに回収されたばいじん)



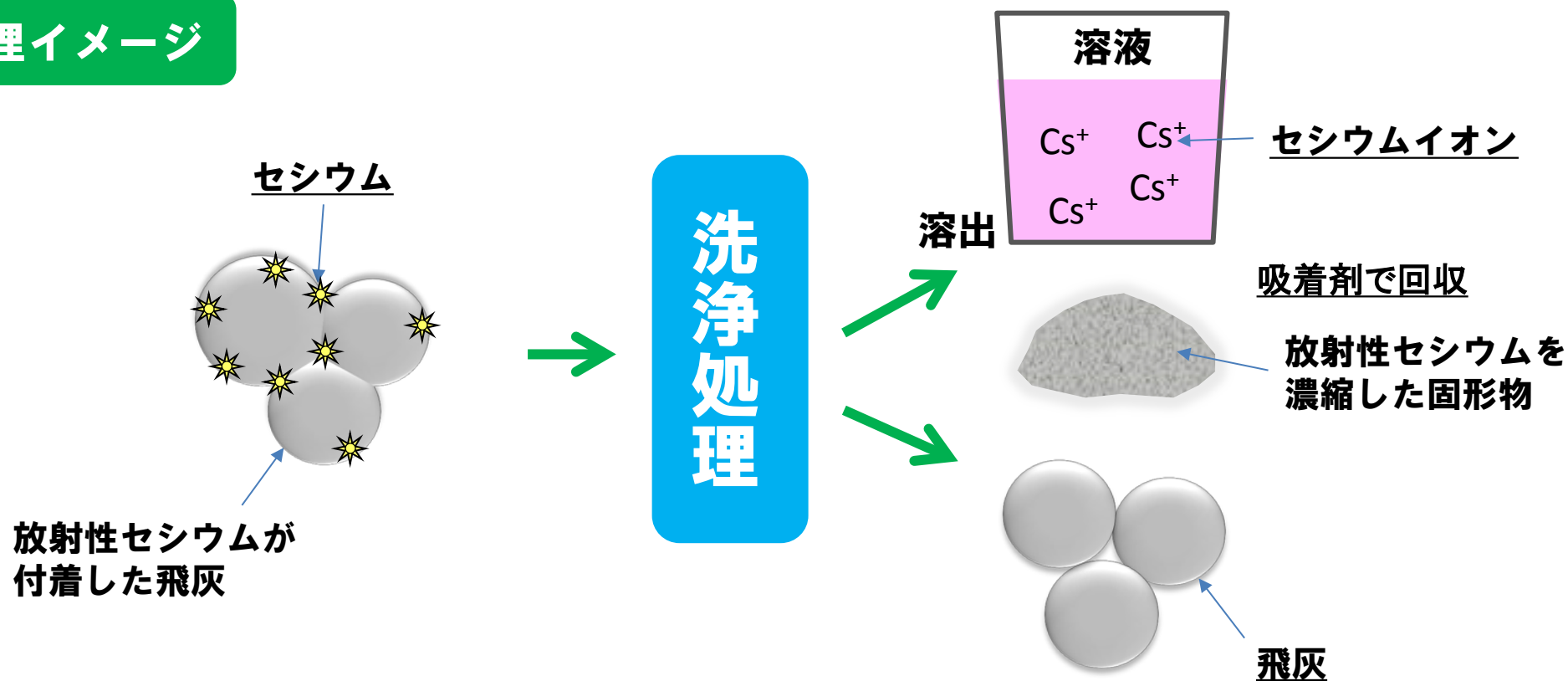
ばいじん(飛灰)の粒子  
(平均は数十 $\mu\text{m}$ )



## 焼却灰の減容技術（2/7）～洗浄処理～

- 洗浄処理は、飛灰に付着したセシウムを水に溶出させ、飛灰からセシウムを分離する方法。
- 溶液中のセシウムは、吸着剤等で回収する。

### 原理イメージ



### メリット

- ・一般に飛灰に付着しているセシウムは水に溶けやすく高い除染率が得られる。

焼却灰の減容技術（3/7）～洗浄処理～

| 除染率※1<br>【%】<件数> | 濃縮率※2<br>【倍】<件数> | 処理コスト※3<br>【万円/t】<件数> |
|------------------|------------------|-----------------------|
| 55～89<5>         | 460～1690* <2>    | 5～7<3>                |

\* 分離濃縮物はセシウムを回収した吸着剤で評価

《洗浄処理に必要な付帯技術・吸着剤》

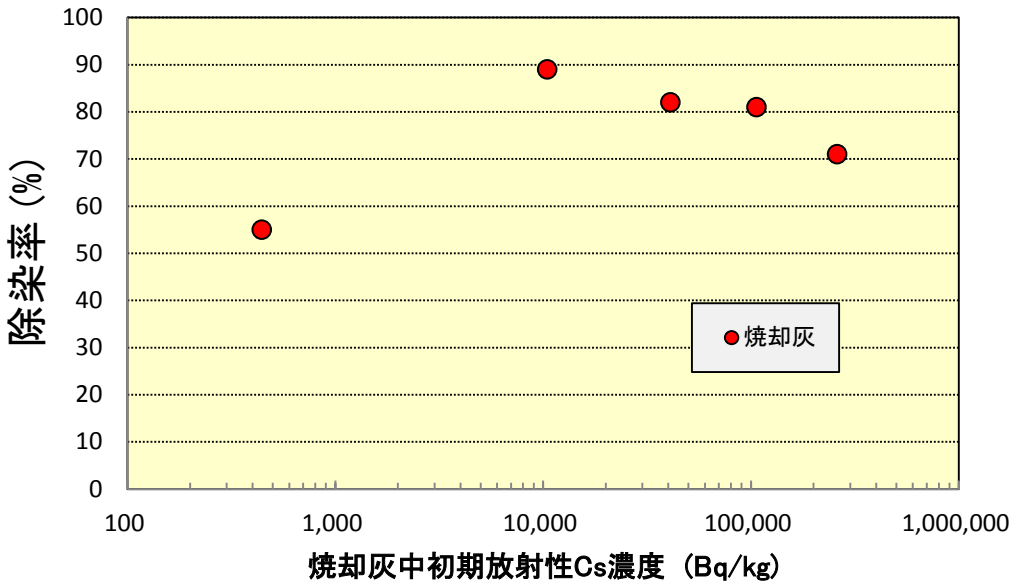
● 付帯技術

- 超音波  
水や溶剤を振動させ洗浄する
- ジェット水流  
高圧水等により洗浄する

● 吸着剤（排水処理に使用）

- フェロシアン化鉄（プルシアンブルー）
- ゼオライト
- ケイチタン酸塩

|       | 課 題                  | 対応案                   |
|-------|----------------------|-----------------------|
| 除染効果  | 灰種による依存性             | 対象灰種の適切な選択            |
| 処理コスト | -                    | -                     |
| 吸着剤   | 溶液性状等に合わせた吸着条件の適切な設定 | 処理に最適な吸着剤の選定や処理条件等の検討 |
|       | 吸着後の長期安定性が不明         | 長期安定性の評価              |
| 環境側面  | 排水への有害物質の混入          | 適切な排水処理の実施            |

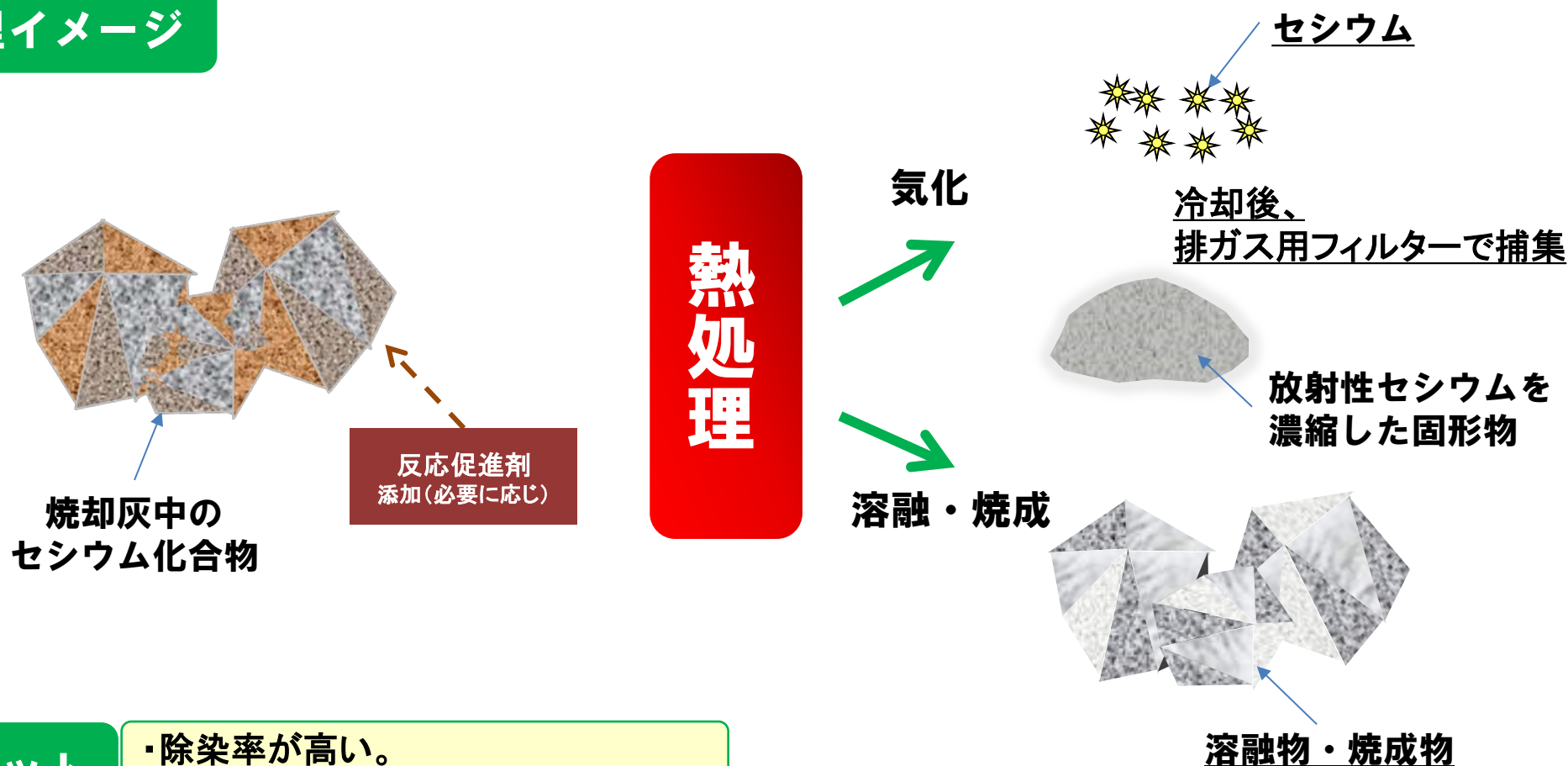


焼却灰及び放射性セシウム濃度に着目した除染率の調査事例

## 焼却灰の減容技術（4/7）～熱処理～

- ・ 熱処理は、焼却灰（主灰・飛灰）を溶融あるいは焼成させ、セシウムを気化して分離する方法。
- ・ これにより放射性セシウムの濃度を低減させた溶融スラグ等を回収する。
- ・ 気化したセシウムは、冷却し固形物として回収する。

### 原理イメージ



### メリット

- ・ 除染率が高い。
- ・ 安定した溶融スラグ等が得られる。

焼却灰の減容技術（5/7）～熱処理～

| 除染率※1<br>【%】<件数> | 濃縮率※2<br>【倍】<件数> | 処理コスト※3<br>【万円/t】<件数> |
|------------------|------------------|-----------------------|
| 99 <1>           | 7～17* <3>        | -                     |

\* 分離濃縮物は排気側に回収された飛灰で評価

《熱処理の加熱方法と反応促進剤》

● 加熱方法

溶融：融点以上まで加熱しセシウムを揮発させる

- ・ 燃焼式溶融炉（油等の燃料で加熱）
- ・ 電気アーク溶融炉（電力を利用しアーク熱で加熱）
- ・ プラズマ溶融炉（電力を利用しプラズマ放電により加熱）

焼成：融点より低い温度で加熱しセシウムを揮発させる

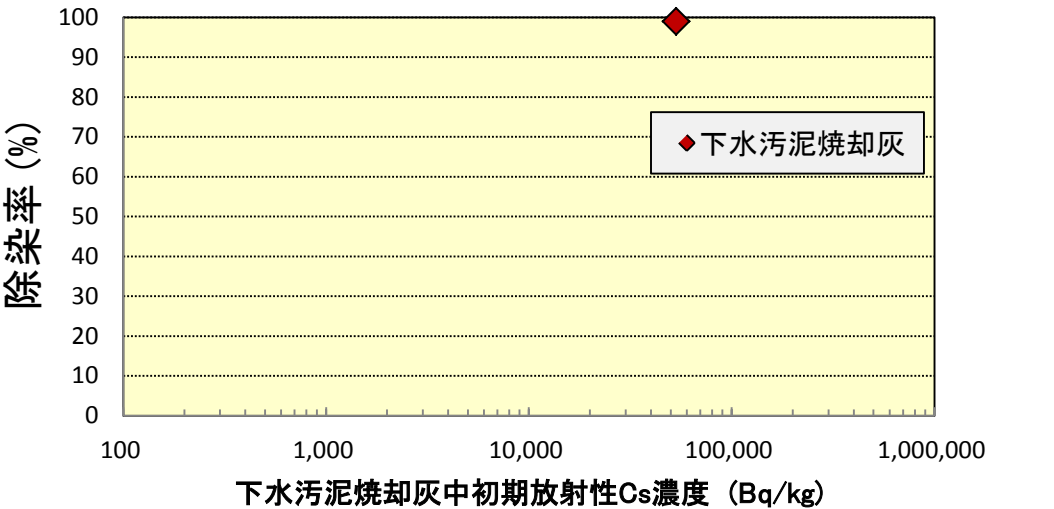
- ・ ロータリーキルン（円筒型炉を回転させ攪拌しながら加熱）
- ・ 粉砕機（反応促進剤との接触をよくするため、主灰を微粉状に粉砕する）

● 反応促進剤

セシウムの揮発分離を促進させる薬剤

- ・ 塩化カルシウム、炭酸カルシウム、二酸化ケイ素 等

|       | 課 題                 | 対応案                                                  |
|-------|---------------------|------------------------------------------------------|
| 除染効果  | -                   | -                                                    |
| 処理コスト | 燃料や電力を要し、洗浄処理と比べて高い | 溶融温度を下げる反応促進剤の選定・評価<br>洗浄効果のほとんどない主灰や放射能濃度の高い飛灰等への適用 |
| 反応促進剤 | 反応促進剤が必要            | 少量で効果を発揮する反応促進剤の開発                                   |
| 環境側面  | 排気中のセシウム、塩素等の対策     | 確実な排気処理等の実施                                          |
| 浄化物   | 浄化物の安定性             | 長期安定性、溶出性の評価                                         |

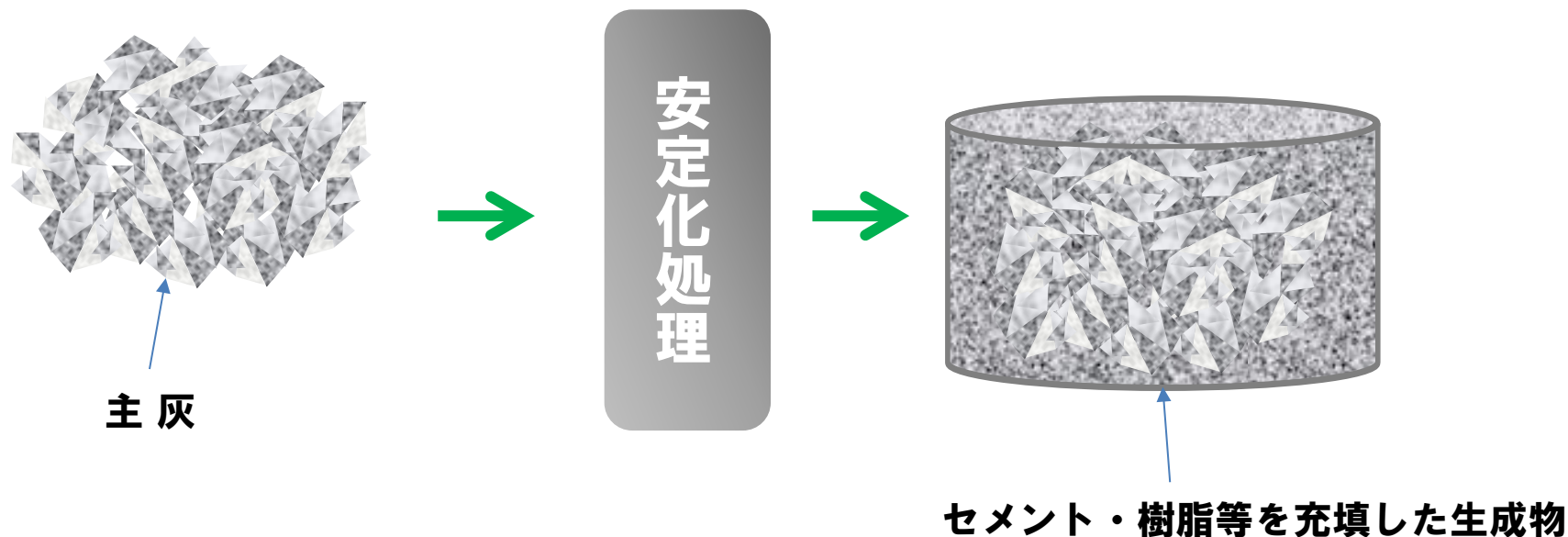


焼却灰及び放射性セシウム濃度に着目した除染率の調査事例

## 焼却灰の減容技術（6/7）～安定化処理～

- 安定化処理は、主灰等を充填物（セメントや樹脂等）中に閉じ込め、安定化する処理方法。

### 原理イメージ



# 焼却灰の減容技術（7/7）～安定化処理～

## 《安定化処理の方法と使用する充填剤》

### ● 安定化方法

- ・ セメント固化（セメントで均質に混合し焼却灰が容易に崩れないように固化する）
- ・ ジオポリマー化（飛灰にアルミン酸ナトリウム等を添加させジオポリマー※化させる）
- ・ 低温焼結（廃ガラス(カレット)と焼却灰を混合し電気炉で焼成させる）
- ・ 圧縮造粒（固化剤、ベントナイトを添加し加水混練して圧縮造粒する）

### ● 充填剤

- ・ セメント
- ・ アルミン酸ナトリウム
- ・ 廃ガラス(カレット)（ガラスを破砕して球状の粒にしたもの）
- ・ ベントナイト(粘土鉱物の一種)

※ ジオポリマーとは、一般にアルミノシリカ粉末とアルカリシリカ溶液（水ガラス）との反応により形成された非晶質の縮重合体（ポリマー）のこと。

|       | 課 題         | 対応案          |
|-------|-------------|--------------|
| 除染効果  | －           | －            |
| 処理コスト | －           | －            |
| 充填材   | 廃棄物量の増加     | 充填剤の選定・評価    |
| 環境側面  | －           | －            |
| 生成物   | 生成物の安定性、溶出性 | 長期の溶出抑制効果の検証 |



# 減容技術の特徴の暫定的整理

（除染率、濃縮率及び処理コストについては参考値）

## ■ 除去土壌

| 技術区分 | 除染率※1<br>【%】<件数>        | 濃縮率※2<br>【倍】<件数>          | 処理コスト※3<br>【万円/t】<件数>    | メリット                                            | デメリット                                                    |
|------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 分級処理 | 10～98<br>(平均75)<br><32> | 1.3～34<br>(平均6.7)<br><13> | 0.4～3<br>(平均1.2)<br><19> | 重金属除去で実績あり。<br>実用化段階の技術が多い。<br>大量かつ比較的安価に処理が可能。 | 除染率が化学処理や熱処理よりも低い。<br>粘土分の割合が高い土壌は濃縮物量が多くなるため効果的な分級が難しい。 |
| 化学処理 | 52～96<br><5>            | —                         | 6～10<br><2>              | 砂質土に適用できるほか、<br>粘性土にも効果が期待される。                  | セシウムの吸着剤が必要。<br>浄化物中に残留する溶媒等の<br>処理や排水処理が必要。             |
| 熱処理  | 94～99.8<br><3>          | 10～20<br><3>              | 21<br><1>                | 粘性土や砂質土などの性状に<br>係わらず適用でき、除染率も<br>高い。           | 相当量の反応促進剤が必要なため、<br>浄化物もその分増加。処理<br>コストが高い。排気処理等が必要。     |

## ■ 焼却灰

| 技術区分 | 除染率※1<br>【%】<件数> | 濃縮率※2<br>【倍】<件数> | 処理コスト※3<br>【万円/t】<件数> | メリット                                  | デメリット                           |
|------|------------------|------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| 洗浄処理 | 55～89<br><5>     | 460～1690<br><2>  | 5～7<br><3>            | 飛灰に付着しているセシウムは水に溶け<br>やすく、高い除染率が得られる。 | セシウムの吸着剤が必要。<br>排水処理が必要。        |
| 熱処理  | 99<br><1>        | 7～17<br><3>      | —                     | 除染率が洗浄処理より高い。<br>安定した熔融スラグ等が得られる。     | 反応促進剤が必要。処理コスト<br>が高い。排気処理等が必要。 |

平成23-26年度除染技術実証事業(内閣府、環境省)、平成26年度除去土壌等の最終処分に向けた減容化等に関する技術調査業務報告書(環境省)等より整理

※1 除染率(%) = (1- 浄化物の放射能濃度÷処理対象物の放射能濃度) × 100

※2 濃縮率(倍) = 分離濃縮物の放射能濃度÷処理対象物の放射能濃度

除染率及び濃縮率は、各試験に用いた試料(土壌、焼却灰)の放射能濃度及び性状等が異なるため参考値

※3 処理コストは、排水処理等付帯設備の範囲やコスト評価項目(設備費、運転費、資材費、労務費等)が異なるため参考値