



# 飛灰洗浄・吸着・安定化技術の評価等について

2023年9月27日

環境省環境再生・資源循環局

- (1) 飛灰洗浄・吸着・安定化技術実証の概要
- (2) 用語の定義
- (3) 飛灰洗浄・吸着・安定化技術の概要整理
- (4) 飛灰洗浄・吸着・安定化技術実証事業の概要
- (5) 実証試験のインプットとアウトプットの整理
- (6) 実証技術の評価(案)
- (7) 組合せに対する留意点
- (8) マッピング
- (9) 論点

# (1) 飛灰洗浄・吸着・安定化技術実証の概要

## ■ 実証試験が実施された技術を年度別に示す

凡例：技術のタイプ  
実証規模

  直轄型

  公募型

	分類	H23～ H24	H25	H26～ H29	H31	R2～R3	R4	R5
飛灰洗浄	混合攪拌式		15～50kg/バッチ		10kg未満/バッチ		550kg/バッチ	
	散水式		700kg/バッチ					
吸着	混合攪拌式		吸着剤：フェロシアン化 ニッケル		吸着剤：フェロシアン 化鉄、75L/バッチ		吸着剤：フェロシアン 化鉄、1m <sup>3</sup> /バッチ	
	カラム式						吸着剤：フェロシアン 化銅、50L/h	吸着剤： フェロシアン 化銅
							吸着剤：ゼオライト 20L/h	
						吸着剤：ケイチタン 酸塩他、9L/h		
安定化	セメント固型化						10L/バッチ	110L/バッチ
	ゼオライト焼成				アルカリ解体・ゼオライト 再吸着・焼成		1.4kg/バッチ	
	ガラス固型化						4kg/バッチ	

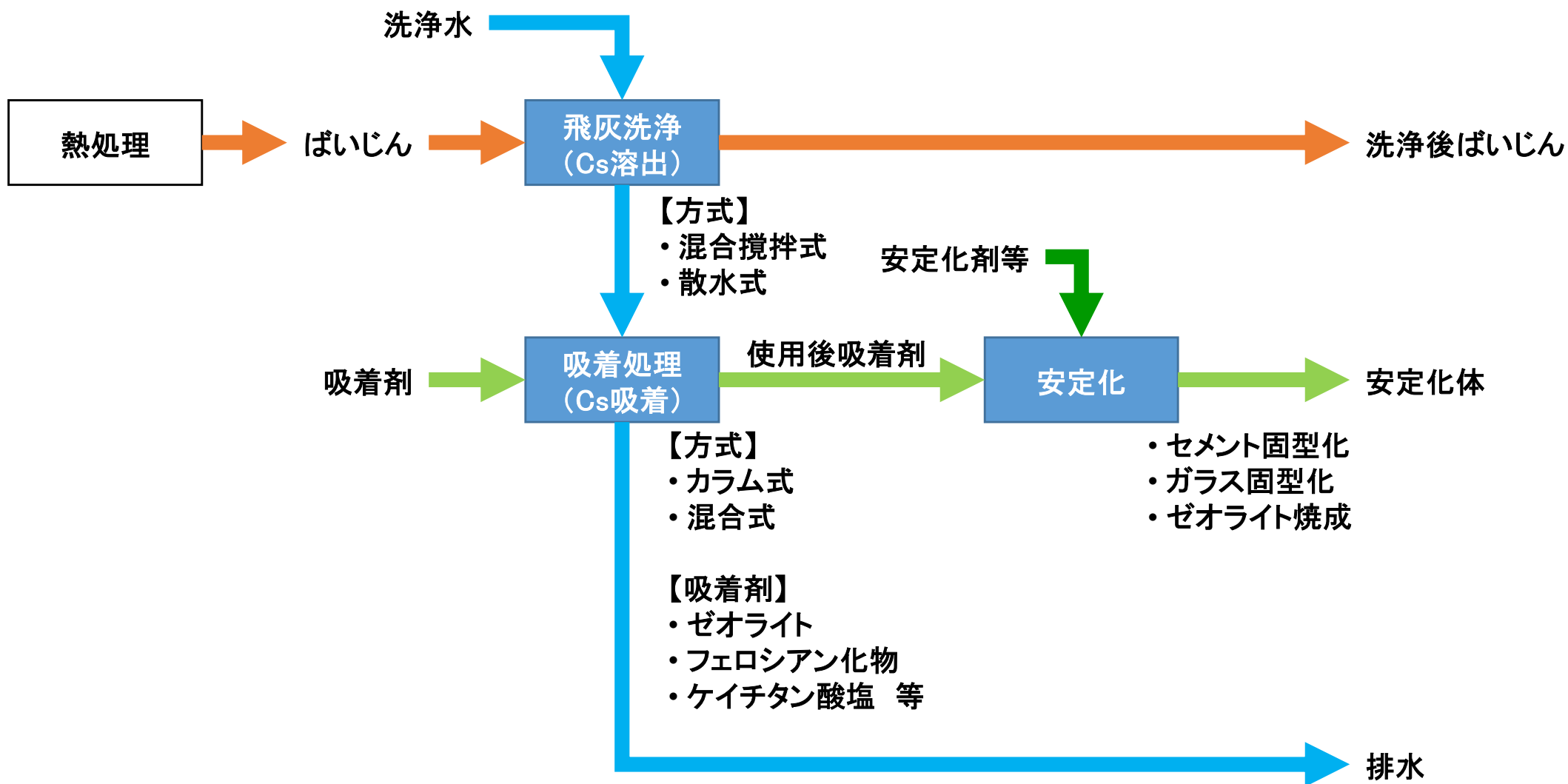
## (2)用語の定義

### ■ 本資料における用語の定義を示す。

用語	定義
主灰	熱処理によって発生し、炉下部から排出される灰
ばいじん(飛灰)	熱処理によって発生し、炉上部から排出される排ガスに含まれる微粒子をバグフィルタ等で捕集したもの
処理後物	処理によって主に処理対象物由来で生成されるものの内、除染、減容が期待されているもの(洗浄後ばいじん)
二次廃棄物	処理によって主に処理対象物以外のもの由来で発生するもの(汚泥等)
パイロットスケール	実機と同様の機能を備え、実機の性能を模擬するに足るレベル
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レベル
ラボスケール	ビーカー等を用いた基礎試験レベル
除染率	ばいじんを洗浄することで、放射能濃度が下がった割合 $= (\text{洗浄前ばいじん放射能濃度} - \text{洗浄後ばいじん放射能濃度}) \div \text{洗浄前ばいじん放射能濃度} \times 100$
放射エネルギー収支	処理対象物(ばいじん等)中の放射エネルギーを100とした時の、処理後物、二次廃棄物等の放射エネルギー
重量収支	処理対象物(ばいじん等)の処理重量を100とした時の、添加物、処理後物、二次廃棄物等の重量
放射エネルギー移行率(%)	安定化対象物に含まれる放射エネルギーが安定化体に移動した割合 $= \text{安定化体放射エネルギー} \div \text{安定化対象物放射エネルギー} \times 100$

### (3) 飛灰洗浄・吸着・安定化技術の概要整理

- 飛灰洗浄・吸着・安定化技術は、飛灰洗浄工程(Cs溶出)、吸着工程、安定化工程から構成されている。



# (3) 飛灰洗浄・吸着・安定化技術の概要整理

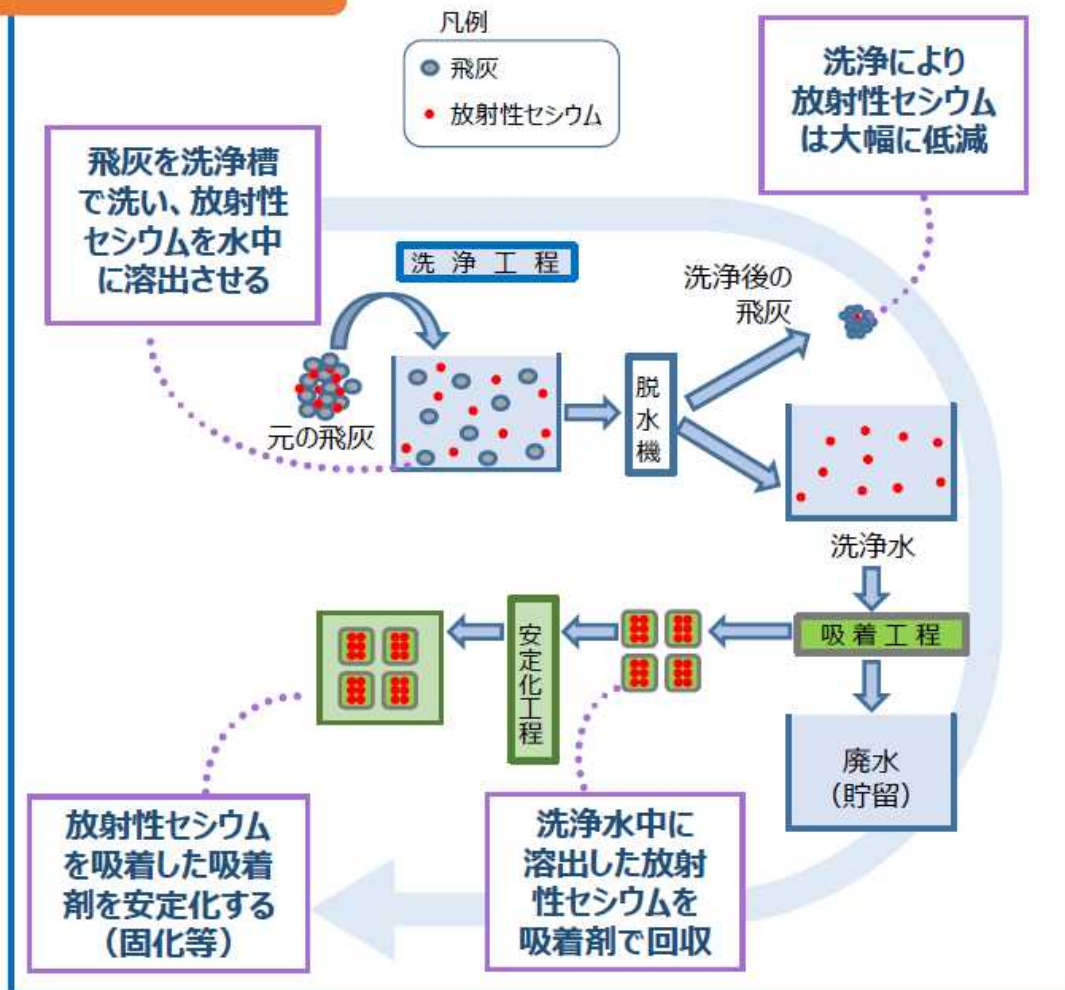
## ■ 灰洗浄処理技術の原理・特性を示す。

項目	飛灰洗浄(Cs溶出)		吸着処理(Cs吸着)		安定化		
	混合攪拌式溶出	散水式溶出	混合攪拌式吸着	カラム式吸着	セメント固型化	ゼオライト焼成	ガラス固型化
原理	ばいじんと水を混合・攪拌することで、ばいじん中のセシウムを溶出させる。	ばいじんに散水することで、ばいじん中のセシウムを溶出させる。	セシウムを含む水と吸着剤を混合・攪拌することで、水中のセシウムを吸着剤に濃縮する。	吸着剤を入れた容器にセシウム含有水を通すことで、水中のセシウムを吸着剤に濃縮する。	セシウムの濃縮物とセメントを混合することで、セシウムを固定化する。	セシウムが吸着したゼオライトを加熱することにより、セシウムを固定化する。	安定化対象物とガラスの混合物に電気を流し、安定化対象物を溶融、固型化する。
特性	温度	常温	常温	常温	水蒸気分解: 500°C程度 固型化:常温	1,050°C	900~1,400°C
	添加物	水	水	吸着剤	吸着剤	過熱水蒸気 セメント ゼオライト	空気
特徴	完全混合式反応。ばいじんを均一に洗浄できる。一方、ばいじんを低濃度まで洗浄するためには比較的大量の水を必要とする。	押し出し流れ式反応。原理的には比較的少量の水でばいじんを洗浄できるが、洗浄が不均一になる可能性がある。	完全混合式反応。吸着剤に均一にセシウムを吸着させることができる。	押し出し流れ式反応。	過熱水蒸気の凝縮水にセシウムが混入する可能性がある。	高温で処理するため、放射性セシウムが排ガスに混入する可能性がある。	高温で固型化するため、放射性セシウムが排ガスに混入する可能性がある。
実証実績	直轄(その1)(R4) 公募(H25、H31)	公募(H25)	直轄(その2)(R4)	直轄(その1、その2、その3)(R4)	直轄(その1)(R4)	直轄(その2)(R4)	直轄(その3)(R4)

# (4) 飛灰洗浄・吸着・安定化技術実証事業の概要

- 名称: 仮設灰処理施設で発生する飛灰を対象とした灰洗浄実証試験業務
- 期間: 2021年度～2024年度(準備、撤去含む)
- 内容: ①飛灰の洗浄・脱水パイロット試験(その1事業者)  
 ②吸着・安定化ベンチ試験(その1、その2、その3事業者)  
 ③洗浄・脱水、吸着、安定化の一気通貫パイロット試験(その1事業者)

## 実証試験の概要



## 実証設備



- ・ 場所: 中間貯蔵区域内
- ・ 実証試験テント: 幅33m × 奥行75m



その1事業者・洗浄設備



その1事業者・吸着設備



その2事業者:設備全体



その3事業者:設備全体

# (5) 実証試験のインプットとアウトプットの整理

## ■ 実証試験のインプットとアウトプットを示す。

分類	飛灰洗浄 (Cs溶出)				吸着処理 (Cs吸着)						安定化				
	水混合攪拌式溶出			散水式溶出	混合攪拌式吸着			カラム式吸着			セメント固化	ゼオライト焼成	ガラス固化		
技術	(単一槽における溶出・吸着)				フェロシアン化物による吸着						ケイチタン酸塩による吸着	ゼオライトによる吸着	水蒸気分解・カラム内固化	焼成	ジオメルト
					フェロシアン化ニッケルによる吸着	フェロシアン化鉄による吸着		フェロシアン化銅他による吸着							
実施年度	H25 (公募)	H31 (公募)	R4 (直轄:その1)	H25 (公募)	H25 (公募)	H31 (公募)	R4 (直轄:その2)	R4 (直轄:その1)	R4 (直轄:その3)	R4 (直轄:その2)	R4 (直轄:その1)	R4 (直轄:その2)	R4 (直轄:その3)		
装置規模	15~50 kg/ハッチ	10kg未満/ハッチ	550kg/ハッチ	350、700kg/ハッチ	500L/ハッチ	75L/ハッチ	1m <sup>3</sup> /ハッチ	50L/h	9L/h	20L/h	10L/ハッチ	1.4kg/ハッチ	4kg/ハッチ		
イン プ ット	主な対象物	ストーカ炉ばいじん	焼却炉等のばいじん	双葉町仮設灰処理施設その1のばいじん(表面溶融炉)	ストーカ炉ばいじん	ばいじん洗浄水(ばいじん混在)			ばいじん洗浄脱水ろ液			PB+Fe(OH) <sub>3</sub> 汚泥のアルカリ分解液			
	主対象の放射能濃度	ばいじん①: 43,200 Bq/kg ばいじん②: 29,400 Bq/kg	27,000 Bq/kg	400,000 Bq/kg	1,180~1,350 Bq/kg	Cs溶出と同時処理のため特定不可	270 Bq/kg	28,000 Bq/kg	33,000 Bq/kg	28,000 Bq/kg	140,000 Bq/kg	-		3.0~3.9 MBq/kg	
	その他	水:5~10 L/kg-ばいじん フェロシアン化ニッケル担持鉄粉粒子(直径100nm)	水:6L/kg-ばいじん	水:8L/kg-ばいじん	水:0.55~0.65L/kg-ばいじん 空気:	フェロシアン化ニッケル担持鉄粉粒子(直径100nm): 0.002~0.059 kg/kg-ばいじん	フェロシアン化カリウム 硫酸鉄	フェロシアン化カリウム 硫酸鉄	フェロシアン化銅、フェロシアン化ニッケル、フェロシアン化コバルト	ケイチタン酸塩、フェロシアン化鉄系	ゼオライト	過熱水蒸気 セメント ゼオライト	空気	ガラス形成剤(SiO <sub>2</sub> 、CaCO <sub>3</sub> 、B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	
ア ウ ト プ ット	主な処理後物、吸着体、安定化体	洗浄後ばいじん放射能濃度(Bq/kg-dry)				使用済吸着剤放射能濃度(Bq/kg)						安定化体放射能濃度(Bq/kg)			
		ばいじん①: 1,470~12,000 ばいじん②: 1,240、3,020	脱水汚泥: 26,600	脱水汚泥: 6,300~13,000	444~574	汚泥: 480,000~1,060,000	PB+Fe(OH) <sub>3</sub> 汚泥: 440,000	PB+Fe(OH) <sub>3</sub> 汚泥: 46,000~21,800,000	使用済吸着剤: 21.8~59.5MBq/kg	使用済吸着剤: 2.2~6.2MBq/kg	使用済吸着剤: 2.8MBq/kg	固化体: 10~30MBq/kg	固化体: 0.02~40MBq/kg	固化体: 0.70~0.85MBq/kg	
	その他	使用済吸着剤: 440,000~1,153,000 Bq/kg 分離水: 11~380 Bq/L	分離水: 270Bq/L	脱水ろ液: 33,000	浸出水: 330~1,700	脱水ろ液: 10~1,190	分離水: 1.4	分離水: 3.8~4.5	分離水: <1.6~<1.7	分離水: <0.91	分離水: 100~310	凝縮液: 40	排ガス	排ガス	



# (5) 実証試験のインプットとアウトプットの整理

- 実証試験(公募:H25)のインプットとアウトプットを示す。
- ✓ ばいじんを散水式洗浄し、Csを含む浸出水をカラム式吸着処理する。Cs吸着工程、安定化工程は未実施。

工程	飛灰洗浄(Cs溶出)	吸着処理(Cs吸着)	安定化
技術	混合攪拌式溶出 散水式溶出 その他(なし)	混合攪拌式吸着 カラム式吸着 その他(なし)	セメント固型化 焼成 ガラス固型化 その他(なし)

インプットとアウトプット

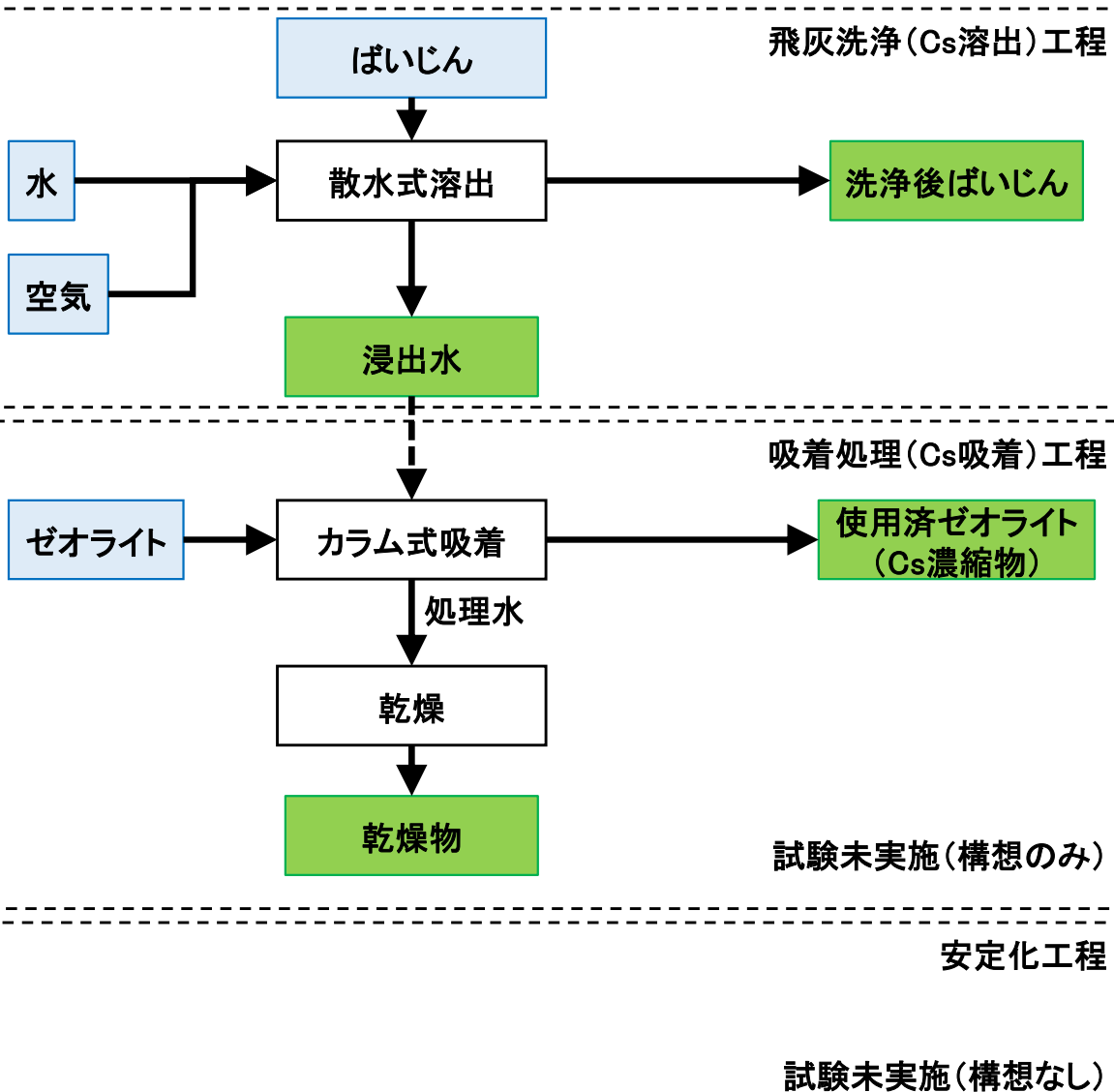
項目	放射能濃度 (Bq/kg-dry)	放射エネルギー収支 (%)	重量収支 (%)
ばいじん	1,180	100	100
水	—	—	65
空気	—	—	—
洗浄後ばいじん	486	32	100
浸出水	350~1,600	73	(65)*

\*浸出水の重量は、容量と同じとした

\*試験誤差等のため、アウトプット収支は必ずしも100とはならない場合がある。

洗浄後ばいじん、安定化体の性状

	洗浄後ばいじん	安定化体
溶出液放射能濃度 (Bq/L)	65 (Hot)	(安定化試験無し)
溶出率 (%)	70 (Hot)	(安定化試験無し)
一軸圧縮強度 (kPa)	—	(安定化試験無し)



試験未実施(構想のみ)

安定化工程

試験未実施(構想なし)

# (5) 実証試験のインプットとアウトプットの整理

- 実証試験(公募:H25)のインプットとアウトプットを示す。
- ✓ ばいじん、水、吸着剤が担持された鉄粉を混合し、Csを吸着した鉄粉を磁力を用いて分離する。安定化工程は未実施。

工程	飛灰洗浄(Cs溶出)	吸着処理(Cs吸着)	安定化
技術	混合攪拌式溶出 散水式溶出 その他(なし)	混合攪拌式吸着 カラム式吸着 その他(なし)	セメント固型化 焼成 ガラス固型化 その他(なし)

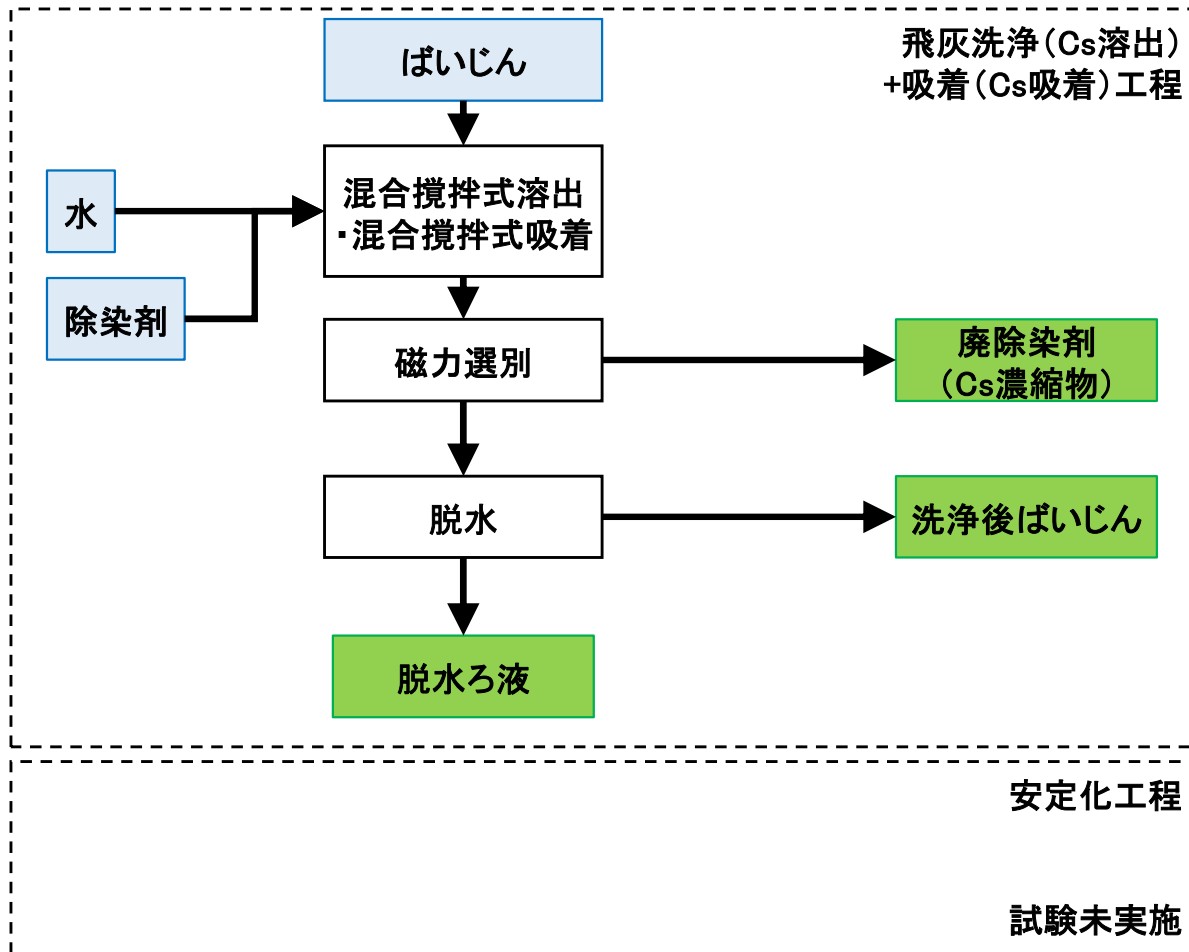
インプットとアウトプット

項目	放射能濃度 (Bq/kg-wet)	放射能量収支 (%)	重量収支 (%-wet)
ばいじん	32,800	100	100
水	0	0	1,000
除染剤 (フェロシアン化ニッケル担持鉄粉粒子)	0	0	0.5
洗浄後ばいじん	1,470	5	106
廃除染剤	510,000	87	6
脱水ろ液	51	1.3	800

※試験誤差等のため、アウトプット収支は必ずしも100とはならない場合がある。

洗浄後ばいじん、安定化体の性状

	洗浄後ばいじん	安定化体
溶出液放射能濃度 (Bq/L)	31 (Hot)	(安定化試験無し)
溶出率 (%)	21 (Hot)	(安定化試験無し)
一軸圧縮強度 (kPa)	—	(安定化試験無し)



# (5) 実証試験のインプットとアウトプットの整理

## ■ 実証試験(公募:H31)のインプットとアウトプットを示す。

- ✓ ばいじんと水を混合することでCsを溶出させ、Csを含む脱水ろ液を吸着処理する。Csを吸着した吸着剤を焼成により安定化する。

工程	飛灰洗浄(Cs溶出)	吸着処理(Cs吸着)	安定化
技術	混合攪拌式溶出 散水式溶出 その他(なし)	混合攪拌式吸着 カラム式吸着 その他(なし)	セメント固型化 焼成 ガラス固型化 その他(なし)

### インプットとアウトプット

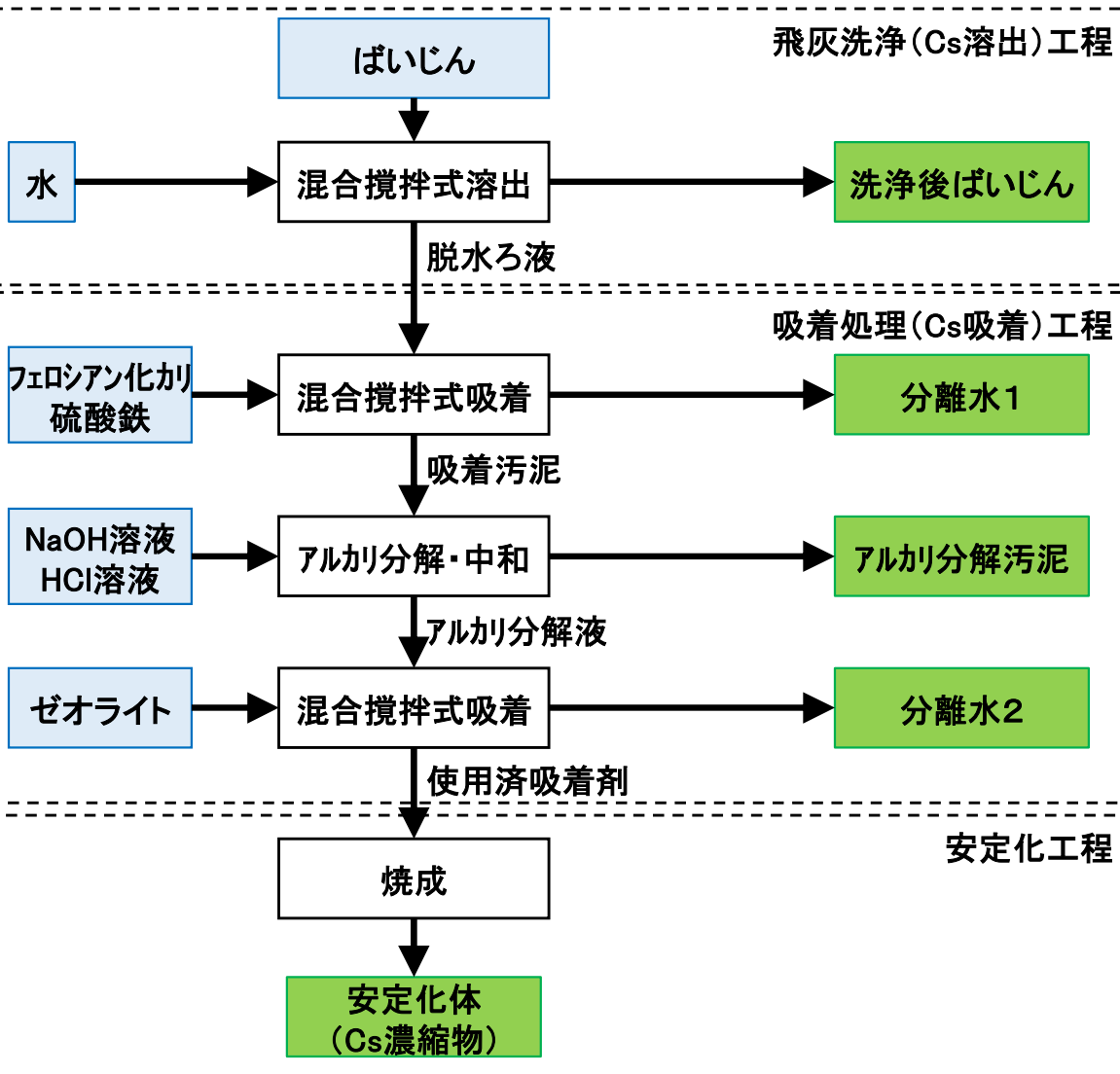
項目	放射能濃度 (Bq/kg)	放射エネルギー収支 (%)	重量収支 (%-wet)
ばいじん	26,600	100	100
水	0	0	600
フェロシアン化カリ	0	0	—
硫酸鉄	0	0	—
NaOH溶液	0	0	23
HCl溶液	0	0	—
ゼオライト	0	0	1
吸着汚泥	440,000	5	0.3
洗浄後ばいじん	26,600	97	97
アルカリ分解汚泥	—	—	—
安定化体	27,000	0.6	0.6
分離水1	1.4	0.0	527
分離水2*	5,700	8	36

※微細ゼオライトを含む

※試験誤差等のため、アウトプット収支は必ずしも100とはならない場合がある。

### 洗浄後ばいじん、安定化体の性状

	洗浄後ばいじん	安定化体
溶出液放射能濃度 (Bq/L)	未測定	< 2 (Hot)
溶出率 (%)	未測定	< 0.07 (Hot)
一軸圧縮強度 (kPa)	—	未測定



# (5) 実証試験のインプットとアウトプットの整理

■ 実証試験(直轄:R4(その1事業))のインプットとアウトプットを示す。

✓ ばいじんと水を混合することでCsを溶出させ、Csを含む脱水ろ液を吸着処理する。Csを吸着した吸着剤をセメントにより固型化する。

工程	飛灰洗浄(Cs溶出)	吸着処理(Cs吸着)	安定化
技術	混合攪拌式溶出 散水式溶出 その他(なし)	混合攪拌式吸着 カラム式吸着 その他(なし)	セメント固型化 焼成 ガラス固型化 その他(なし)

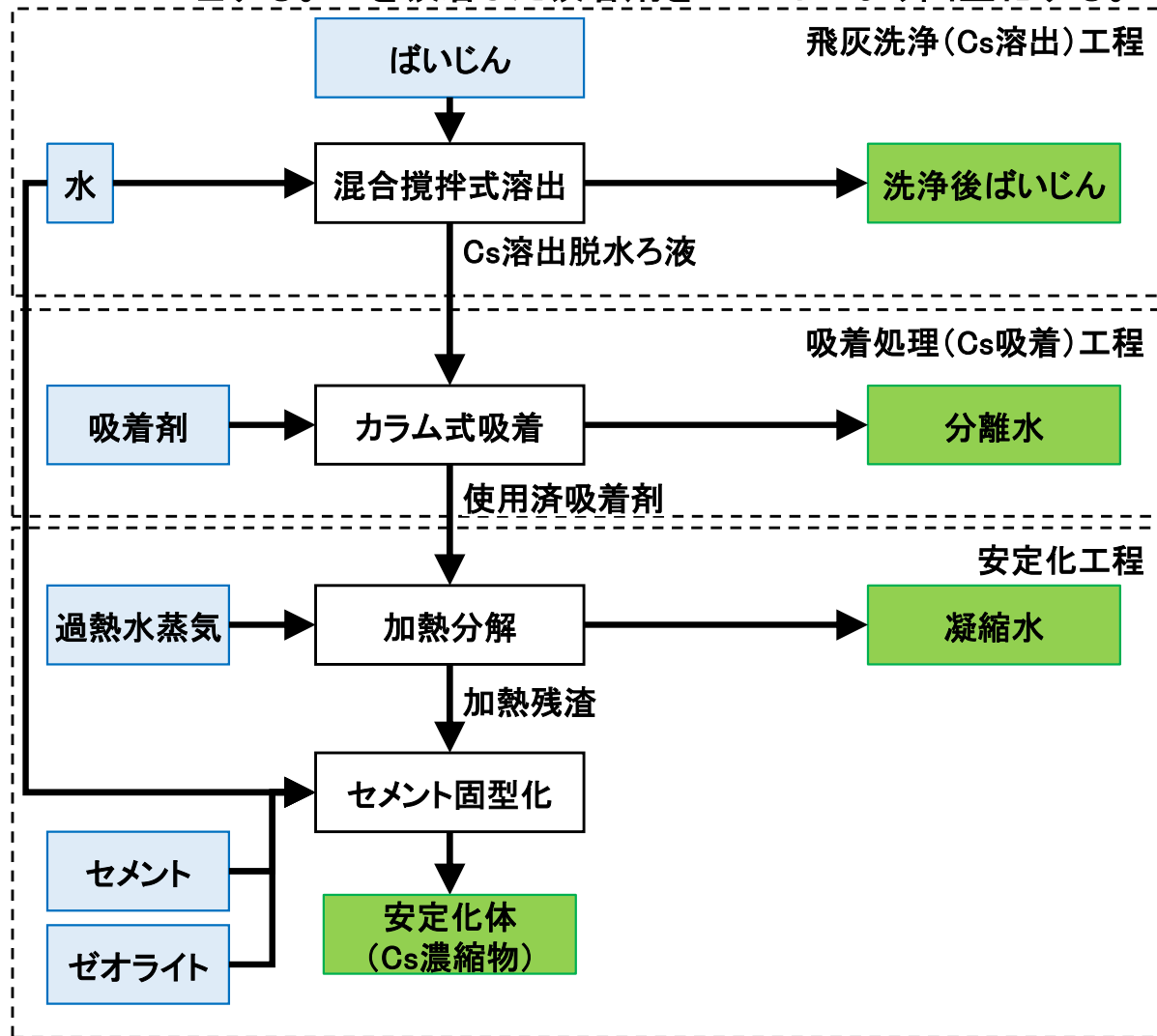
インプットとアウトプット

項目	放射能濃度 (Bq/kg)	放射エネルギー収支 (%)	重量収支 (%-wet)
ばいじん	290,000	100	100
水(Cs溶出)	0	0	801
吸着剤(CuHCF)	0	0	0.5
過熱水蒸気	0	0	13
水(安定化混合)	0	0	0.1
セメント	0	0	1.2
ゼオライト	0	0	0.2
Cs溶出脱水ろ液	33,000	98	1,137
使用済吸着剤	59,500,000	98	0.6
洗浄後ばいじん(脱水ケーキ)	5,086	1	38
分離水	1.7	0.005	(863)
凝縮水	40	0.002	13
安定化体	30,700,000	98	2

※試験誤差等のため、アウトプット収支は必ずしも100とはならない場合がある。

洗浄後ばいじん、安定化体の性状

	洗浄後ばいじん	安定化体(内容物)
溶出液放射能濃度 (Bq/L)	380 (Hot)	—
溶出率 (%)	44 (Hot)	10 (Cold)
一軸圧縮強度 (kPa)	—	7.62



# (5) 実証試験のインプットとアウトプットの整理

## ■ 実証試験(直轄: R4(その2事業))のインプットとアウトプットを示す。

- ✓ Csを含む脱水ろ液を吸着処理し、Csを吸着した吸着剤を焼成により安定化する。

工程	飛灰洗浄(Cs溶出)	吸着処理(Cs吸着)	安定化
技術	混合攪拌式溶出 散水式溶出 その他(なし)	混合攪拌式吸着 カラム式吸着 その他(なし)	セメント固型化 焼成 ガラス固型化 その他(なし)

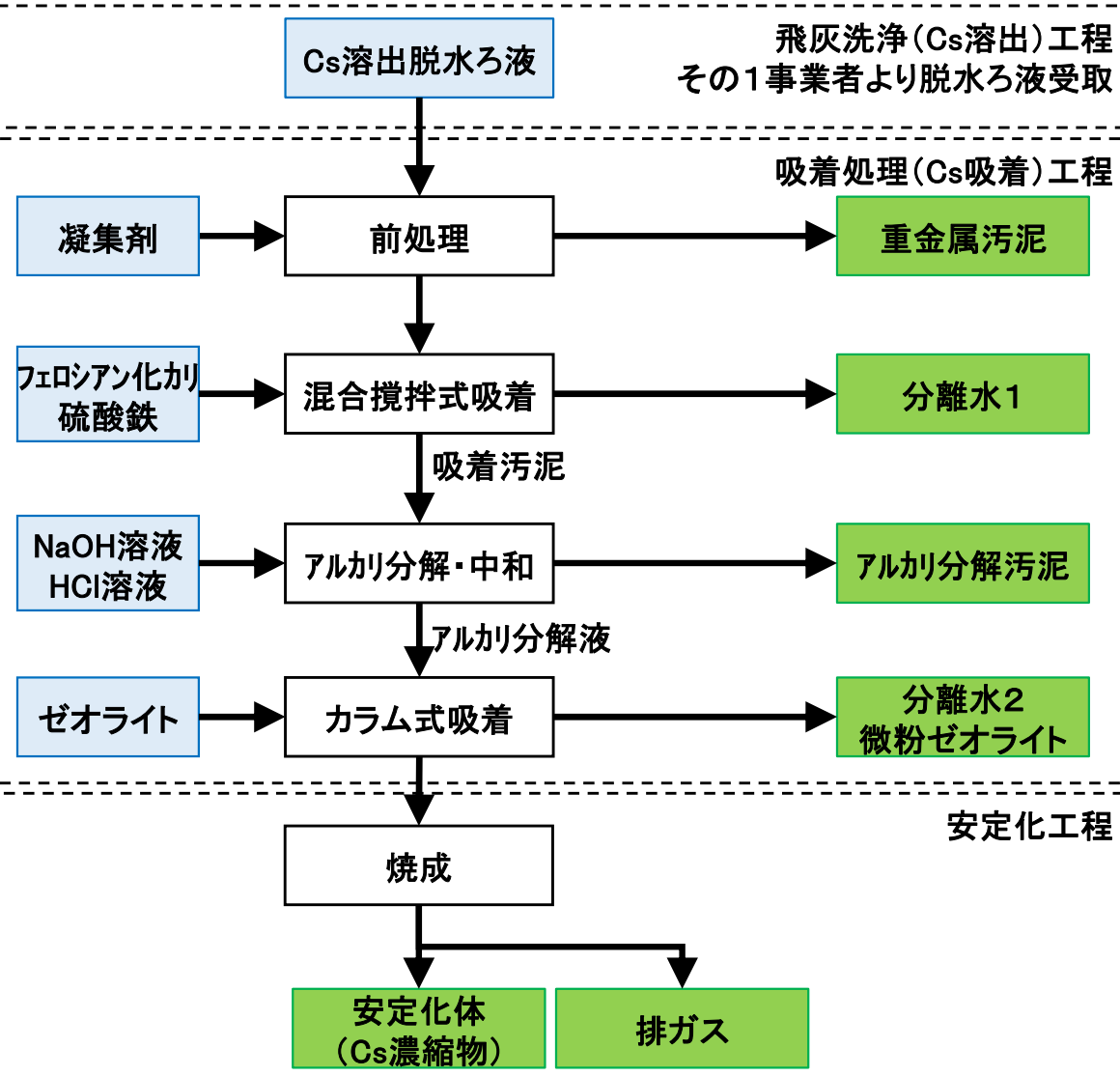
### インプットとアウトプット

項目	放射能濃度 (Bq/kg)	放射能量収支 (%)	重量収支 (%-wet)
Cs溶出脱水ろ液	28,000	100	100
凝集剤 (ポリ鉄、PAC)	0	0	1
フェロシアン化カリ硫酸鉄	0	0	0.02 (発生PBとして)
NaOH溶液 HCl溶液	0	0	15
ゼオライト	0	0	0.2
吸着汚泥	10,500,000	95	0.3
アルカリ分解液	140,000	75	15
重金属汚泥	41,200	2	1
分離水1	4.2	0.02	103
アルカリ分解汚泥	3,110,000	21	0.2
分離水2	100	0.1	15
微粉ゼオライト	2,800,000	1	0.01
安定化体	2,170,000	13	0.2
排ガス	—	0.0003	—

※試験誤差等のため、アウトプット収支は必ずしも100とはならない場合がある。

### 洗浄後ばいじん、安定化体の性状

	洗浄後ばいじん	安定化体
溶出液放射能濃度 (Bq/L)		33 (Hot)
溶出率 (%)		0.012 (Hot)
一軸圧縮強度 (kPa)		未測定



# (5) 実証試験のインプットとアウトプットの整理

■ 実証試験(直轄:R4(その3事業))のインプットとアウトプットを示す。

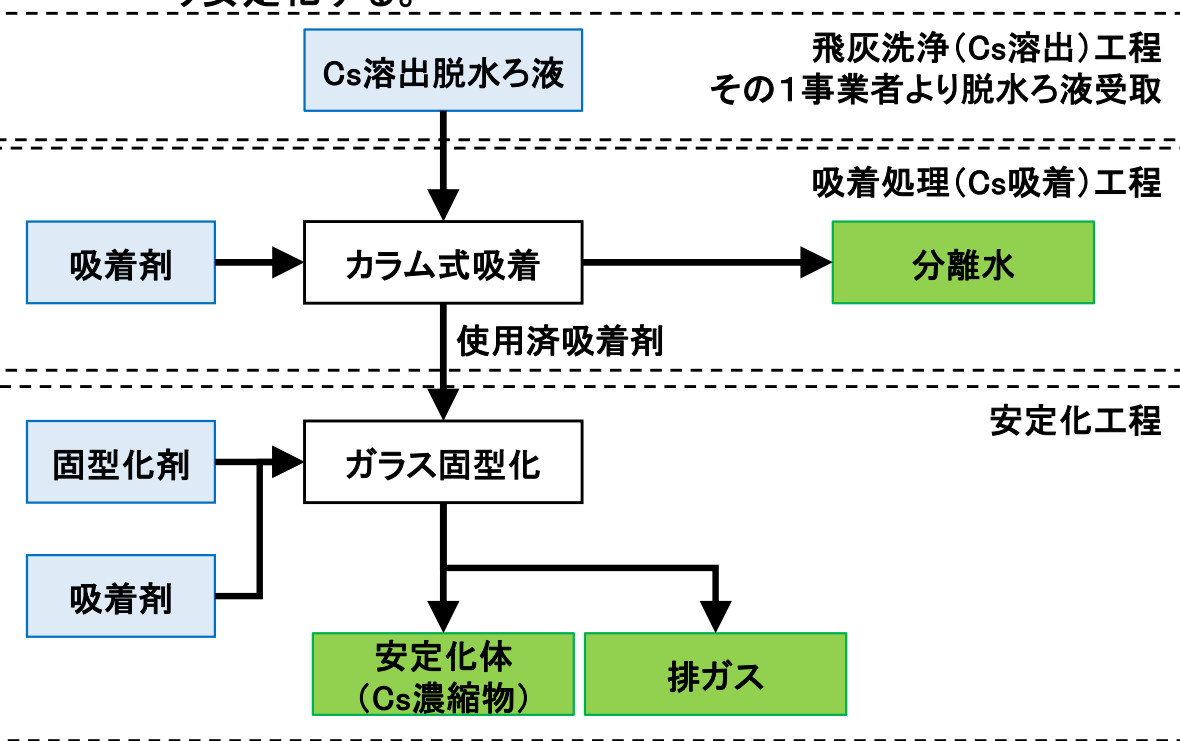
✓ Csを含む脱水ろ液を吸着処理し、Csを吸着した吸着剤をガラス固型化により安定化する。

工程	飛灰洗浄(Cs溶出)	吸着処理(Cs吸着)	安定化
技術	混合攪拌式溶出 散水式溶出 その他(なし)	混合攪拌式吸着 カラム式吸着 その他(なし)	セメント固型化 焼成 ガラス固型化 その他(なし)

## インプットとアウトプット

項目	放射能濃度 (Bq/kg)	放射エネルギー収支 (%)	重量収支 (%-wet)
Cs脱水ろ液	28,000	100	100
吸着剤 (CST H type)	0	0	0.9
固型化剤	ガラス形成剤	0	1.9
	ベースフリット トップオフフリット	0	2.3
使用済吸着剤	2,970,000	99	0.9
分離水	<0.84	0.003	100
安定化体	730,000	98	4
排ガス	—	0.9	—
装置内ダスト	—	0.9	—

※試験誤差等のため、アウトプット収支は必ずしも100とはならない場合がある。



## 洗浄後ばいじん、安定化体の性状

	洗浄後ばいじん	安定化体
溶出液放射能濃度 (Bq/L)	—	<1.9 (Hot)
溶出率 (%)	—	<0.0026 (Hot)
一軸圧縮強度 (kPa)	—	—

## (6) 実証技術の評価(評価項目について)

- 評価項目を示す。赤文字の評価項目は、次頁以降に評価結果(案)を示す。

評価対象	要素技術	評価項目
各要素技術共通の評価	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>・①パイロットスケールの試験成果あるいは実設備の実績</li> <li>・②実機レベルでの実施可能性</li> <li>・③作業員、環境への安全性等の確保</li> <li>・④運搬等の扱いやすさ(追加の遮へい体の必要性など)</li> <li>・⑤二次廃棄物、副生成物の量、処理方法(施設解体も含む)</li> <li>・各技術のコスト、システム化したコスト、最終処分を含むコスト、追加の施設・設備解体を含むコスト</li> <li>・放射能の収支(減衰を含む)</li> </ul>
各技術ごとの評価	分級、化学処理、熱処理、灰洗浄	<ul style="list-style-type: none"> <li>・減容化率、減量化率</li> <li>・⑥生成物の再生資材としての活用の可能性</li> <li>・⑦処理能力や処理条件</li> <li>・⑧立地条件(プラント用水や電力の確保等)</li> </ul>
	安定化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・⑨最終処分要件(Cs溶出、重金属溶出、長期安定性等)</li> </ul>
	最終処分	<ul style="list-style-type: none"> <li>・最終処分の量・方式(ピット処分、トレンチ処分)、場所(理解醸成、用地取得)</li> <li>・最終処分における管理方法</li> <li>・最終処分費用(用地取得、建設、運搬、維持管理)</li> </ul>
	再生利用	<ul style="list-style-type: none"> <li>・再生利用の用途(要求品質(材質、安全))、量、時期</li> <li>・再生利用可能な放射能濃度8,000Bq/kg以下の定義(どの量の平均か)</li> </ul>

# (6) 実証技術の評価(灰洗浄処理技術)(案)

## ■ 実証技術の評価(案)を示す

評価項目	評価基準	飛灰洗浄(Cs溶出)		吸着処理(Cs吸着)		安定化		
		混合攪拌式	散水式	混合攪拌式	カラム式	セメント固型化	ゼオライト焼成	ガラス固型化
①パイロットスケールの試験成果あるいは実設備の実績	◎:パイロットスケールレベル・実設備の実績あり	◎	◎	○	○	◎	—	◎
	○:ベンチスケールレベルの実績まで △:ラボスケールレベルの実績まで	550kg/バッチのパイロットスケールで実施済み	700kg/バッチのパイロットスケールで実施済み	1m <sup>3</sup> /バッチのベンチスケールレベル	50L/hのベンチスケールレベル	檜葉町セメント固型化処理施設稼働済み。原子力施設における実績あり。	1.4kg/バッチのベンチスケールレベル。ただし、R5年度に引き続き性能確認予定。	原子力施設で稼働実績あり
②実機レベルでの実施可能性	◎:想定される規模の実機が存在する	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎
	○:複数系列化により対応可能 △:商業設備のスケールアップが必要	都市ごみ焼却灰(主灰、ばいじん)の洗浄施設における実績あり <sup>1)</sup>	小型の洗浄装置の実績あり <sup>2)</sup>	浄水設備等で実績あり <sup>3)</sup>	原子力施設で実績あり <sup>4)</sup>	檜葉町セメント固型化処理施設における実績あり <sup>5)</sup>	想定される必要能力160kg/日を備えた実用レベルの焼成設備が存在する <sup>6)</sup>	米国、英国等で施設稼働実績あり <sup>7)</sup>

出典 1)太平洋セメント(株)、ニュースリリース、<https://www.taiheiyo-cement.co.jp/news/news/pdf/191202.pdf>  
 2)(株)フジタ、コンテナを用いた焼却灰などのオンサイト安定化促進処理、<https://www.fujita.co.jp/solution-technology/3130/>  
 3)厚生労働省、「水道事業における高度浄水処理の導入実態及び導入検討に関する技術資料」について、<https://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/jousui/01.html>  
 4)経済産業省資源エネルギー庁、<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyos/osensuitaisaku01.html>  
 5)環境省、固型化処理施設の施設概要、[http://shiteihaiki.env.go.jp/tokuteihaiki.umetate\\_fukushima/cement\\_solidification\\_plant/about.html](http://shiteihaiki.env.go.jp/tokuteihaiki.umetate_fukushima/cement_solidification_plant/about.html)  
 6)例えば(株)栗本鐵工所、連続・バッチ外熱式ロータリーキルン、<https://www.kurimoto.co.jp/product/item/RotaryKiln.php>  
 7)ヴェオリア、GeoMeltガラス固化技術、<https://www.nuclearsolutions.veolia.com/ja/our-expertise/technologies/geomelt-karasuguhajishu>



## (6) 実証技術の評価(灰洗浄処理技術)(案)

### ■ 実証技術の評価(案)を示す

評価項目	評価基準	飛灰洗浄(Cs溶出)		吸着処理(Cs吸着)		安定化		
		混合攪拌式	散水式	混合攪拌式	カラム式	セメント固型化	ゼオライト焼成	ガラス固型化
③ 作業員、環境への安全性等の確保	◎: 汎用的な対応で容易に確保可能、 ○: 汎用設備で対応可能であるが、設備が複雑あるいは比較的大規模 △: 特別な対応が必要	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
		隔離、遠隔操作することで安全性を確保可能	粉じん対策等により安全性を確保可能	隔離、遠隔操作することで安全性を確保可能	原子力施設で実績あり	檜葉町セメント固型化処理施設における実績あり	粉じん対策、遠隔操作等により安全性を確保可能	米国、英国等において放射性物質処理の実績あり
④ 運搬等の扱いやすさ	◎: 汎用的な対応で容易に対応可能、 ○: 汎用的および電離則等の範囲で対応可能 △: 特別な対応が必要	○	○	○	◎	◎	△	◎
		ばいじん、脱水ろ液の飛散防止等が必要	ばいじんの飛散防止が必要	吸着後に分離した高濃度の使用済み吸着剤への対応が必要	原子力施設で実績あり	檜葉町セメント固型化処理施設における実績あり	焼成炉から容器への封入機構の開発が必要	米国、英国等における実績あり

# (6) 実証技術の評価(灰洗浄処理技術)(案)

## ■ 実証技術の評価(案)を示す

評価項目	評価基準	飛灰洗浄(Cs溶出)		吸着処理(Cs吸着)		安定化		
		混合攪拌式	散水式	混合攪拌式	カラム式	セメント固型化	ゼオライト焼成	ガラス固型化
⑤二次廃棄物、副生成物の量、処理方法	◎:量が比較的少なく、処理方法の目処が立つ ○:処理方法の目処は立つが量が多い △:処理方法の検討が必要	○	◎	△	○	△	—	△
		散水式と比較して、洗浄水量が多い。	混合攪拌式と比較して、洗浄水量が少ない。	アルカリ分解汚泥が発生するため、別途処理が必要。塩濃度の高い廃水が発生。	Csを概ね除去された洗浄水、および安定化工程に送られる使用済吸着剤以外に発生物はない。塩濃度の高い廃水が発生。	凝縮水にセシウムが若干移行する可能性があるため、処理の必要性について検証が必要。	排ガスにセシウムが移行するため、別途処理が必要。R5年度に引き続き性能確認予定。	排ガスにセシウムが移行するため、別途処理が必要
⑥生成物の再生資材としての活用の可能性	◎:用途案に対する品質(安全性、安定性等)を確認済み ○:品質を確認中 △:品質確認が必要	△	△	評価対象外	評価対象外	評価対象外	評価対象外	評価対象外
		洗浄後ばいじんの再生資材としての調査・検討が必要	洗浄後ばいじんの再生資材としての調査・検討が必要					

## (6) 実証技術の評価(灰洗浄処理技術)(案)

### ■ 実証技術の評価(案)を示す

評価項目	評価基準	飛灰洗浄(Cs溶出)		吸着処理(Cs吸着)		安定化		
		混合攪拌式	散水式	混合攪拌式	カラム式	セメント固型化	ゼオライト焼成	ガラス固型化
⑦処理能力や処理条件	設備の稼働、運転において、 ◎:資源がかなり有効活用されていると思われる ○:資源が一定程度有効活用されている △:資源があまり有効に活用されていない	△	○	○	◎	○	◎	△
		洗浄水の液固比:5~10L/kg-ばいじん程度	洗浄水の液固比:0.6L/kg-ばいじん程度	吸着剤放射能濃度:46,000~21,800,000 Bq/kg	吸着剤放射能濃度:2,200,000~59,500,000 Bq/kg	安定化対象物である吸着剤の2~3倍のセメント、ゼオライトが必要	安定化のための添加剤が不要	安定化対象物である吸着剤の4~5倍のガラス形成剤が必要
⑧立地条件(プラント用水や電力の確保等)	◎:水、電力を使用しない ○:循環利用等により節約可能 △:大量の水、電力を必要とする	△	△	○	○	△	△	△
		洗浄水の液固比:5~10L/kg-ばいじん程度で、循環利用不可能	混合攪拌式より水使用量は少ないが、循環利用不可能	電動機に必要な電力程度	電動機に必要な電力程度	セメント固型化の前処理に用いる過熱水蒸気用の燃料が必要	1,000℃程度まで昇温する燃料が必要	ガラス形成剤を溶融する電力が必要

## (6) 実証技術の評価(灰洗浄処理技術)(案)

### ■ 実証技術の評価(案)を示す

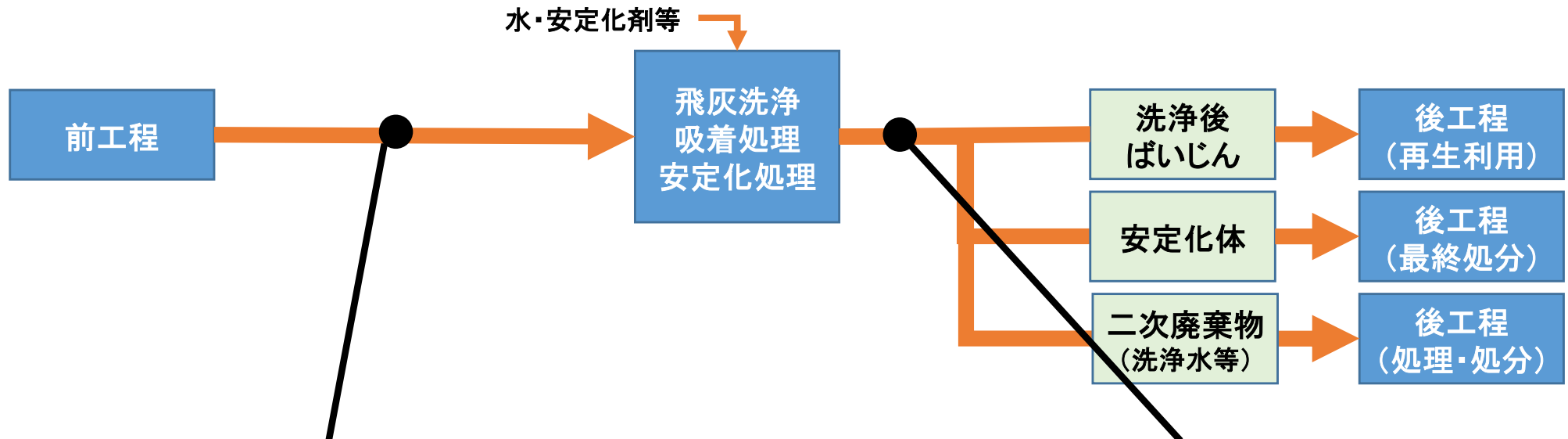
評価項目	評価基準	飛灰洗浄(Cs溶出)		吸着処理(Cs吸着)		安定化		
		混合攪拌式	散水式	混合攪拌式	カラム式	セメント固型化	ゼオライト焼成	ガラス固型化
⑨最終処分要件 (Cs溶出、重金属溶出、長期安定性)	◎:セシウムの溶出、重金属類の溶出、安定化体の強度に関する基準※を満足 ○:各基準に関し確認が必要 △:基準を満足していない	評価対象外	評価対象外	評価対象外	評価対象外	◎	—	○
						Cs溶出、重金属溶出、強度に関し確認済み	強度の確認が必要。R5年間に引き続き性能確認予定。	強度の確認が必要

※

- 溶出試験(JIS K 0058-1)の溶出液放射能濃度が、 $^{137}\text{Cs}$ について150Bq/L以下(特措法施行規則第26条第2項第2号ホ、平成24年1月13日環境省告示第3号(雨水その他の水が浸入した場合に溶出する事故由来放射性物質の量が少ない特定廃棄物の要件))を目安とした。
- 重金属類の溶出:規程された濃度(金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める省令)
- 安定化体の強度:一軸圧縮強度0.98メガパスカル以上(特措法施行規則第26条第2項第2号二、平成24年2月24日環境省告示第14号)

# (7) 組合せに対する留意点

## ■ 他技術との組合せにおいて、灰洗浄処理技術の設備、運転に関わる留意点



前工程	項目	留意点
熱処理	設備	ばいじんが潮解する場合には対応設備が必要 脱水を伴う安定化方式において、脱水ろ液にセシウムが含まれる場合、対策が必要。
	運転	ばいじんの組成が、Cs溶出、Cs吸着、安定化に影響を及ぼすことがあるか確認が必要。

後工程	分類	留意点
再生利用		洗浄後ばいじんの再生利用先の調査が必要。
		Cs溶出が不十分なばいじんの扱いに関する検討が必要。
最終処分	設備	全体の減容プロセスを想定した安定化体の放射能濃度、ならびに最終処分量の試算が必要。
		長期安定性の確認
		封入容器への影響
処理・処分	設備	二次廃棄物(汚泥等)の処理方法の検討、ならびに全体プロセスへの組み込みが必要。

## (8) マッピング

### ■ マッピングの目的

- ✓ ばいじんの洗浄処理に関する技術を俯瞰的に確認できるようにする。
- ✓ 複数の技術を同じ軸で比較することで、その特徴を分かりやすく示し、技術の抽出に活用する。
- ✓ 各技術の改善点を可視化し、今後の実証事業で確認・開発する事項の検討に活用する。

### ■ ばいじんからのセシウム溶出特性

- ✓ JISに則った溶出試験の結果、塩素含有率が高いほど溶出率が高く、ケイ素含有率が高いほど溶出率が低くなる傾向が認められた。ばいじんの性状によって洗浄効率が異なる可能性がある。

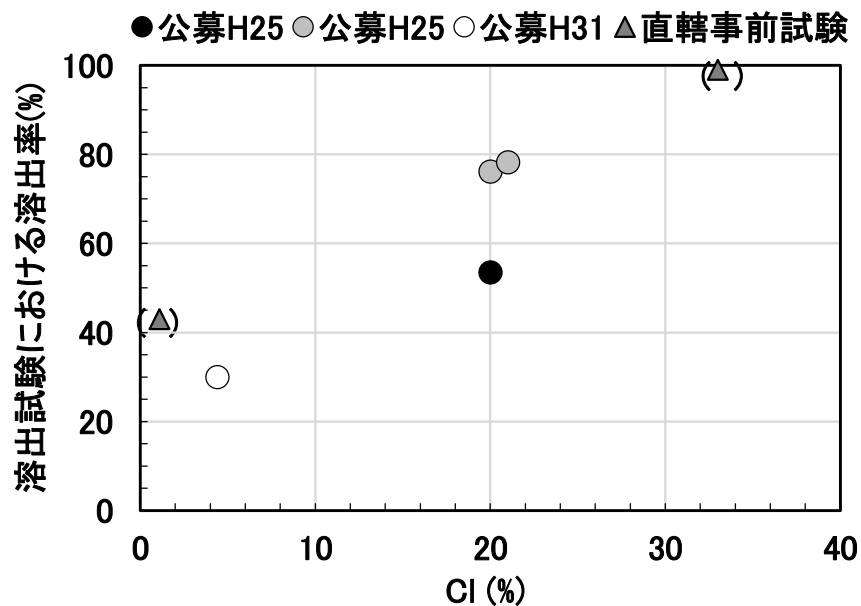


図 CI含有率と溶出率の関係

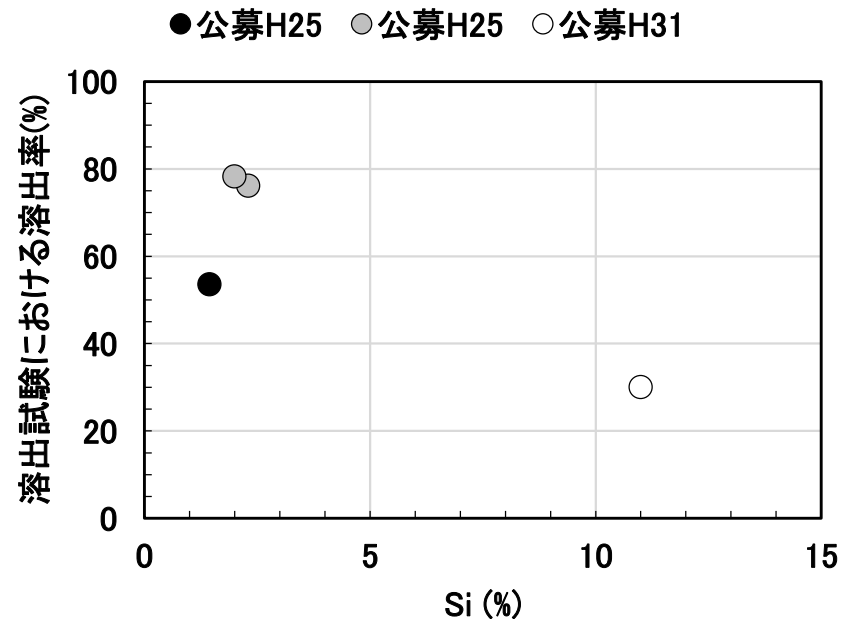


図 Si含有率と溶出率の関係

## (8) マッピング

### ■ 飛灰洗浄(Cs溶出): 洗浄性能の比較

- ✓ ばいじんの塩素含有率が低い場合を除いて、ばいじんの除染率は、「水、吸着剤混合攪拌式」、「水混合攪拌式」が高かった。
- ✓ 「水、吸着剤混合攪拌式」、「水混合攪拌式」は「間欠散水・通気式」と比較してCs溶出時の固液比が高いため除染率が高くなったと考えられる。
- ✓ Cs溶出後のばいじん放射能濃度、洗浄水放射能濃度によれば、水の利用率は「間欠散水・通気式」が高いと言える。

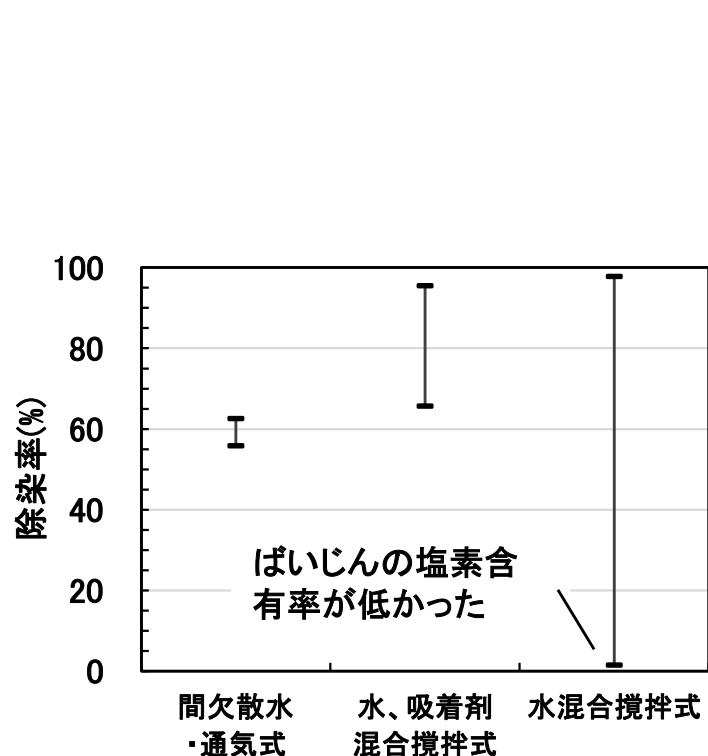


図 洗浄方式別の除染率

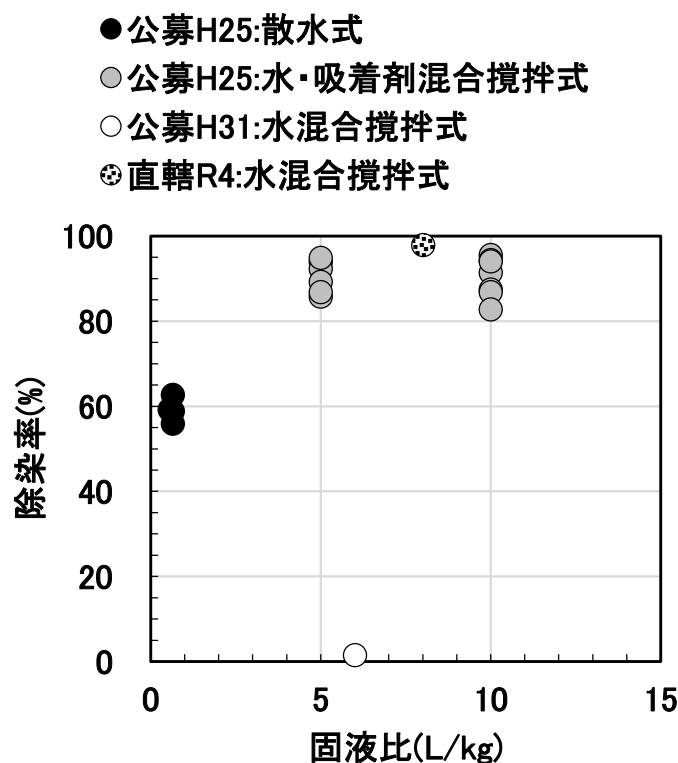


図 固液比と除染率の関係

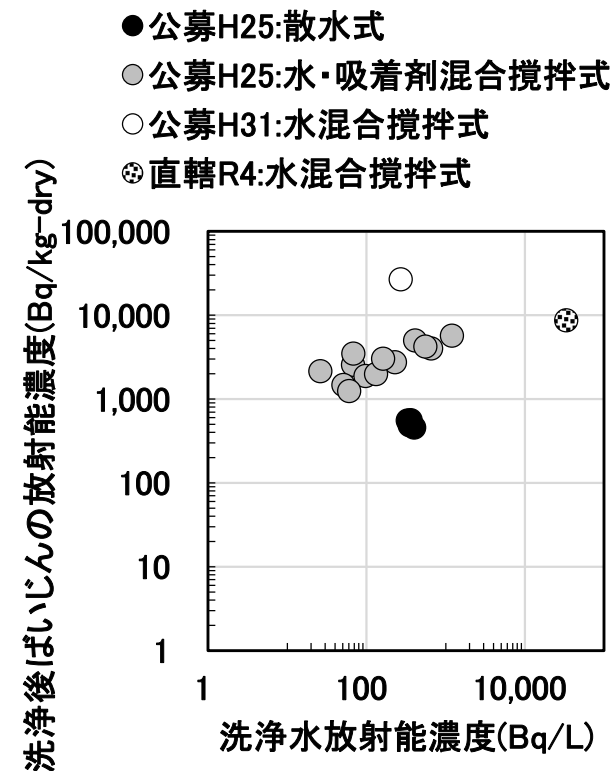


図 Cs溶出工程の性能比較

## (8) マッピング

### ■ 吸着 (Cs吸着): 吸着性能の比較

- ✓ カラム式吸着処理の吸着率は、混合式と比較して高い傾向であった。
- ✓ カラム式吸着処理の使用後の吸着剤の放射能濃度は、混合式と比較して高い傾向であった。
- ✓ 混合式、カラム式いずれも試験結果は試験条件に依存するため、吸着剤自体を評価するためには、吸着等温線等で比較する必要がある。

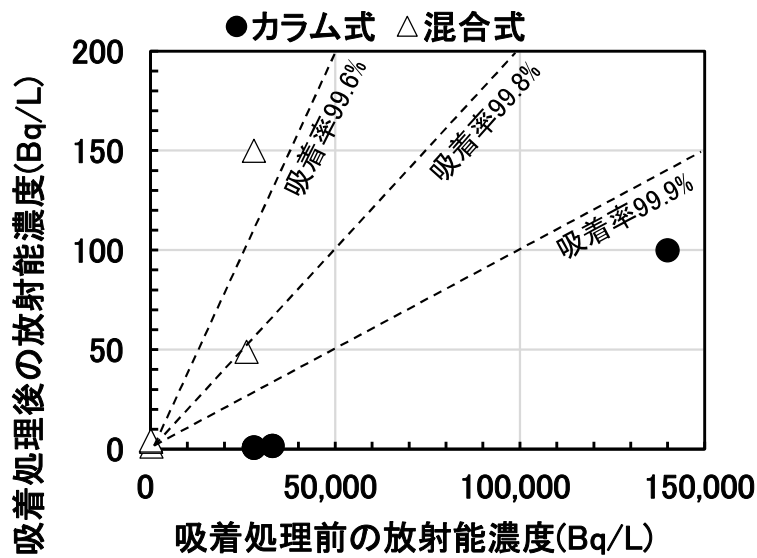


図 Cs吸着前後の放射能濃度

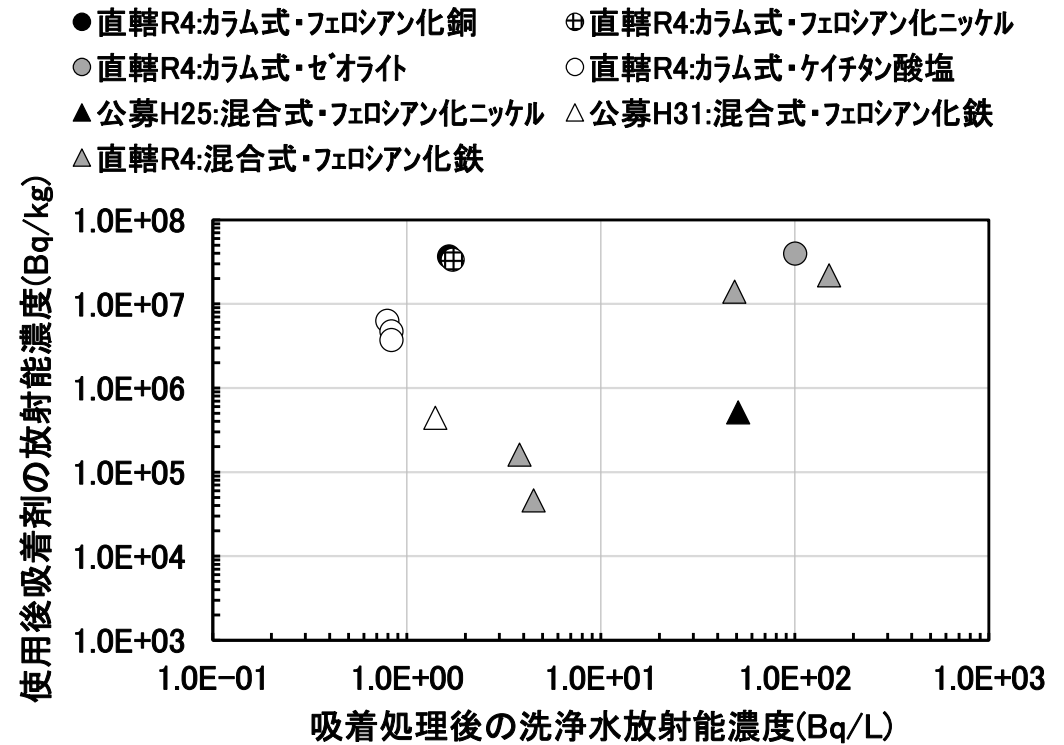


図 吸着工程の性能比較



## (8) マッピング

- 安定化: 安定化体への放射エネルギー移行率(安定化処理の前後を比較)の比較
- ✓ 第2回技術WGにおいて報告した安定化処理技術の放射エネルギー移行データに、灰洗浄実証試験の安定化試験時の放射エネルギー移行データを追記した。
- ✓ 灰処理実証試験の安定化試験においては、概ね高い放射エネルギー移行率を示した。

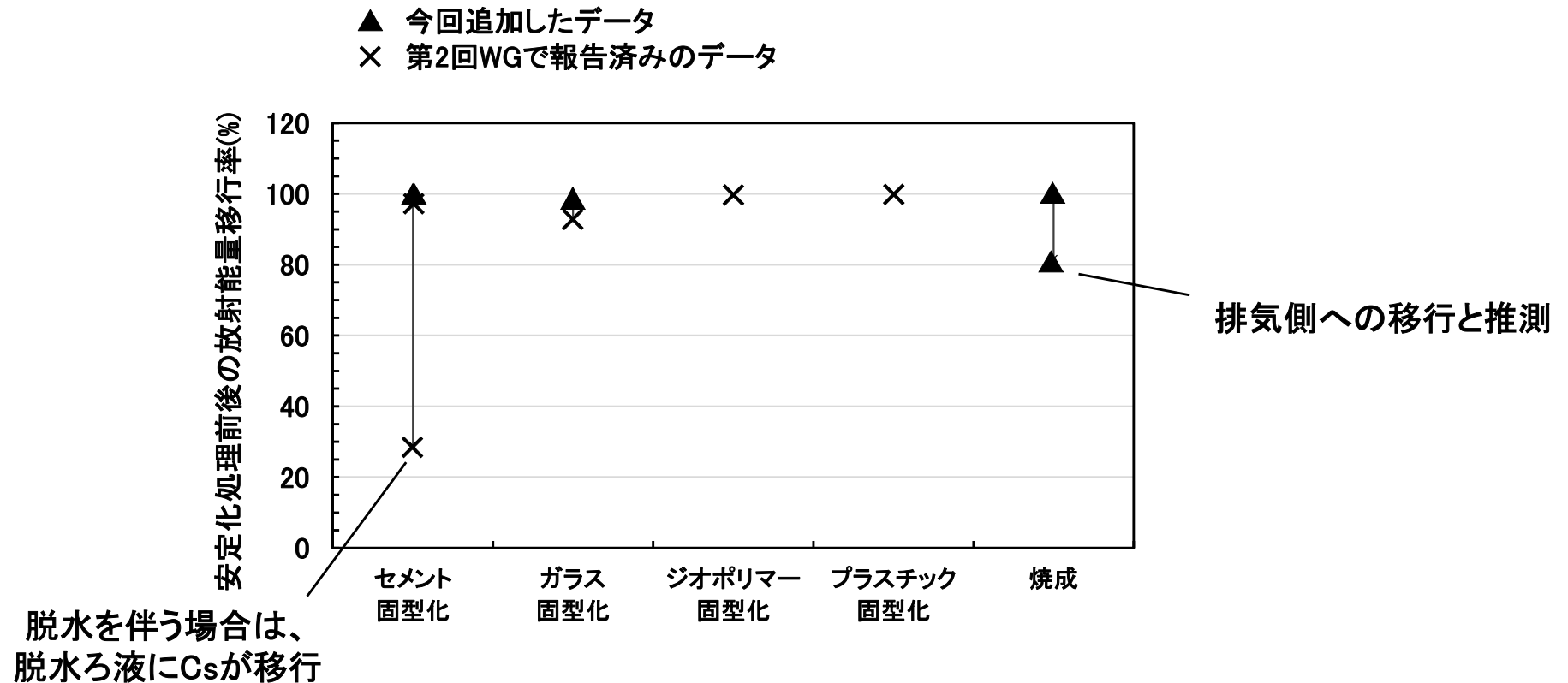


図 安定化体への放射エネルギー移行率

## (8) マッピング

### ■ 安定化：セシウム溶出の比較

- ✓ 第2回技術WGにおいて報告した安定化処理技術の安定化体のセシウム溶出データに、灰洗浄実証試験の安定化体のセシウム溶出データを追記した。
- ✓ 灰処理実証試験の安定化体は、放射能溶出濃度、溶出率ともに低い傾向であった。

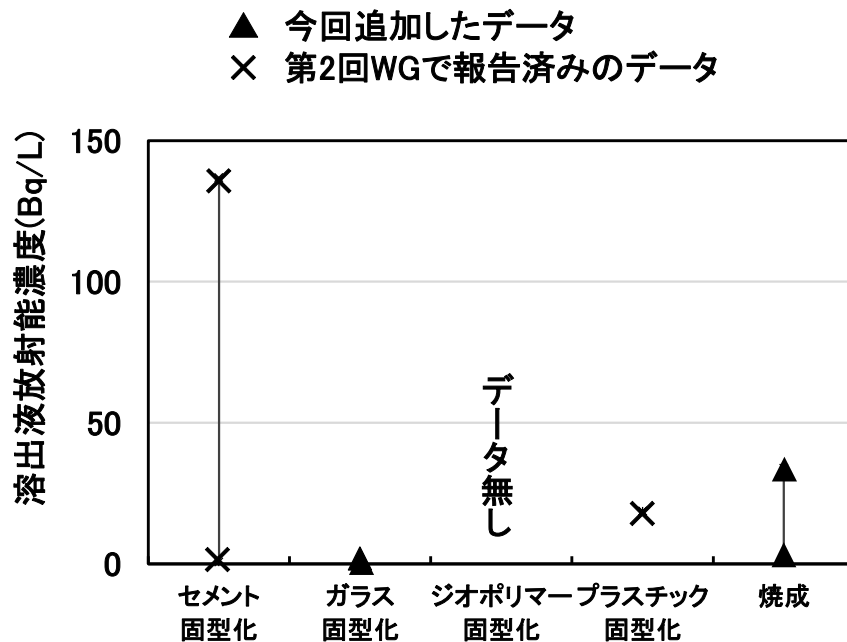


図 溶出試験溶出液の放射能濃度

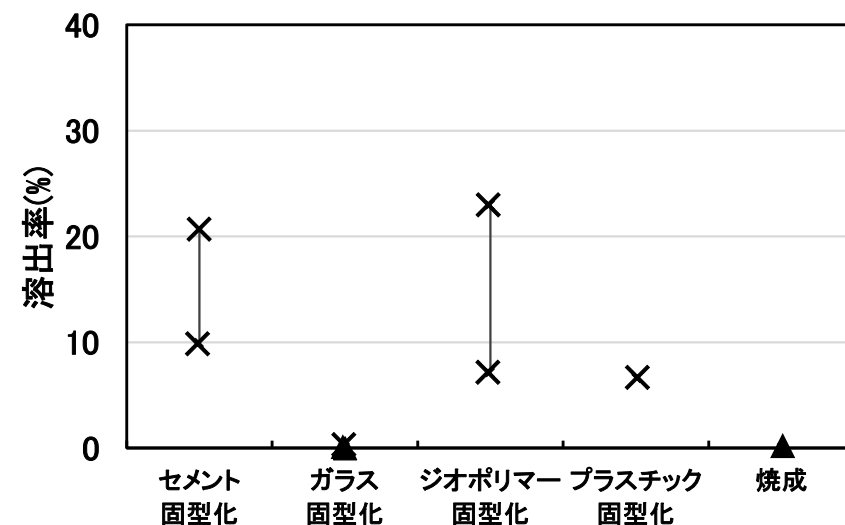


図 溶出試験における溶出率の比較

## (8) マッピング

### ■ コスト比較

- ✓ コストには実証当時の単価を反映
- ✓ コスト試算に含まれている要素工程が一樣ではないため、直接の比較は困難である
- ✓ 全体のコスト試算・精査が必要

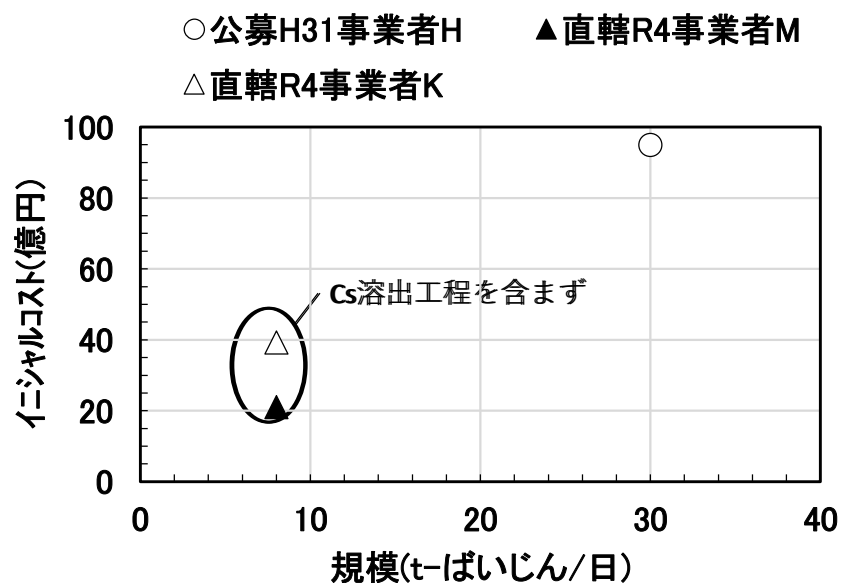


図 イニシャルコストの比較

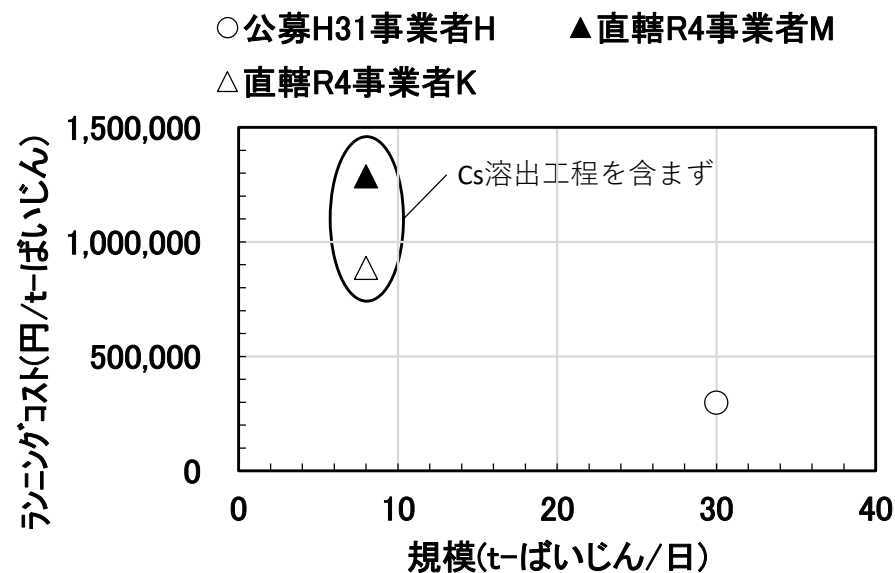


図 ランニングコストの比較

#### コスト試算に含まれる要素工程

	Cs溶出	Cs吸着	安定化
○公募H31事業者H	○	○	○
▲直轄R4事業者M	含まず*	○	○
△直轄R4事業者K	含まず*	○	○

## (9) 論点

### ■ まとめ

- A) 洗浄処理が比較的容易なばいじんに対しては、水洗浄することで放射能濃度400,000Bq/kg程度から8,000Bq/kg以下に除染できる可能性がある。
- B) 灰洗浄システムとしては、混合攪拌式洗浄、カラム式吸着、セメント固型化の検討が進んでいる。

項目	技術	実証事業での状況
① 飛灰洗浄(Cs溶出)	(混合攪拌式溶出)	ばいじんの除染率が、散水式溶出と比較して高い傾向であった。ばいじんの組成によっては溶出困難な場合もあるため、その扱いに関する検討が必要。
② 飛灰洗浄(Cs溶出)時の水の使用効率	(散水式溶出)	混合攪拌式溶出と比較し、水使用量が1/10程度である。
③ 吸着処理(Cs吸着)	(カラム式吸着)	吸着処理(Cs吸着)に用いられた後の吸着剤の放射能濃度は、カラム方式の方が混合攪拌式と比較して高い傾向であった。ただし、吸着剤自体の優劣については直接比較する必要がある。
③ 安定化	(セメント固型化)	セメント固型化は、セシウムの溶出濃度、一軸圧縮強度を確認した。
③ 二次廃棄物の性状	—	(セメント固型化の凝縮水、ガラス固型化の排ガス、焼成の排ガス・重金属汚泥・アルカリ分解汚泥それぞれの処理の確認が必要)
④ 低コスト化	—	灰洗浄処理技術に含まれる全ての要素工程(飛灰洗浄(Cs溶出)、吸着処理(Cs吸着)、安定化)を含むコスト試算・精査が必要。
⑤ 実設備の計画	—	(負荷変動への対応、建設期間、非常時の想定被害及び対応、性能保証項目・性能保証条件(機器、プロセス)など実設備の計画に当たって確認が必要)