



飛灰洗浄・吸着・安定化技術実証事業の 実施状況について

2025年2月7日

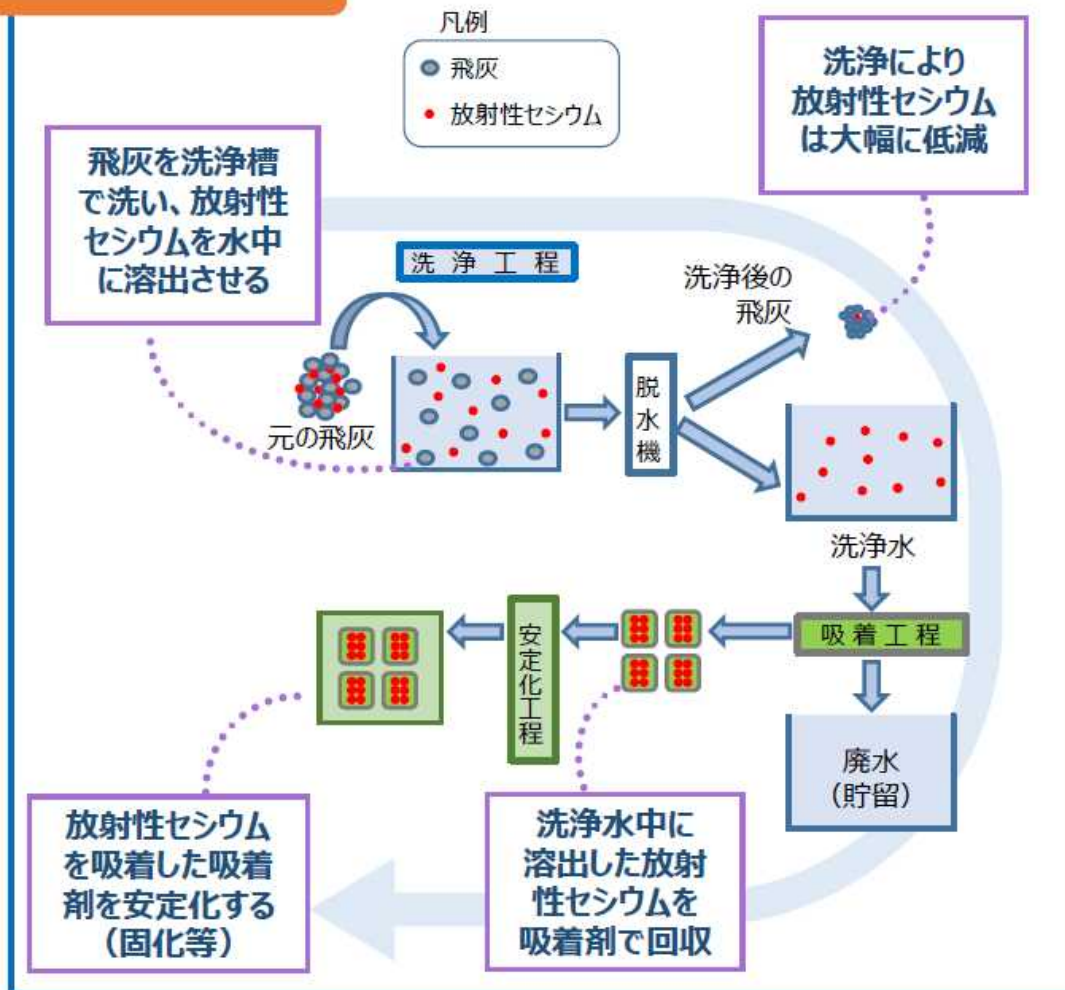
環境省環境再生・資源循環局

中間貯蔵施設における除去土壌等の減容化技術等検討WG(第10回)

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



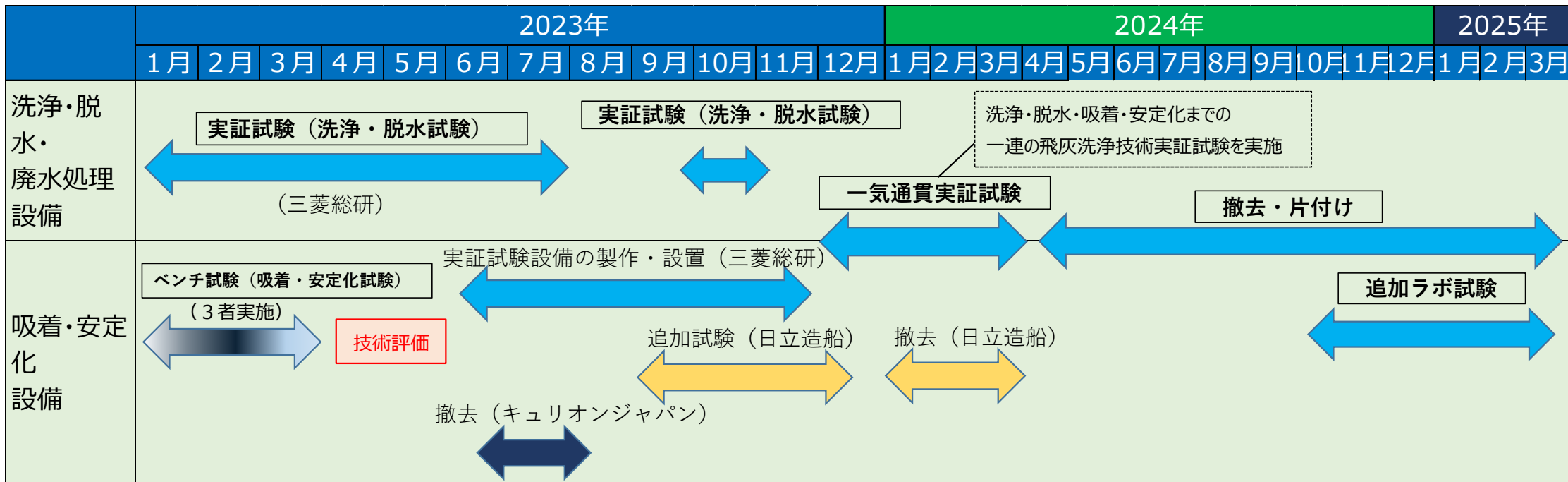
その2事業者：実証試験設備



その3事業者：実証試験設備

飛灰洗浄・吸着・安定化試験全体のスケジュール

- 2021年度からの準備段階を経て、2023年1月5日に飛灰を搬入し、実証試験を順次開始。
- 2023年度初めの技術評価を経て、2023年度にその1事業者による一貫通貫試験を実施。
- 2024年度は一部追加のラボ試験を実施しつつ、試験設備の解体・撤去・後片付けを実施中（2025年1月現在）。



各事業者による実証試験の概要・実証試験テント内の配置



吸着試験



安定化試験
(ガラス固化)



安定化体
断面



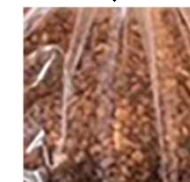
吸着試験



安定化試験
(焼成)



焼成前



焼成後

吸着・安定化ベンチ試験

③その3業務エリア
(キュリオンジャパン)

②その2業務エリア
(日立造船)

吸着・安定化ベンチ試験

①その1業務エリア
(三菱総研)

受入・洗浄・脱水実規模試験
吸着・安定化ベンチ試験
廃水処理設備

【鋼製容器からの飛灰取り出し】
(浮上式) (回転式)



鋼製容器
を水中に沈
める



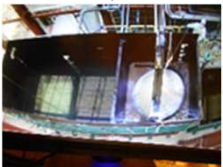
鋼製容器
を回転槽に
セットする



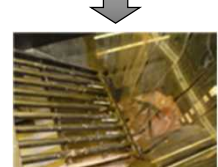
内袋を
浮上させ
てすくう



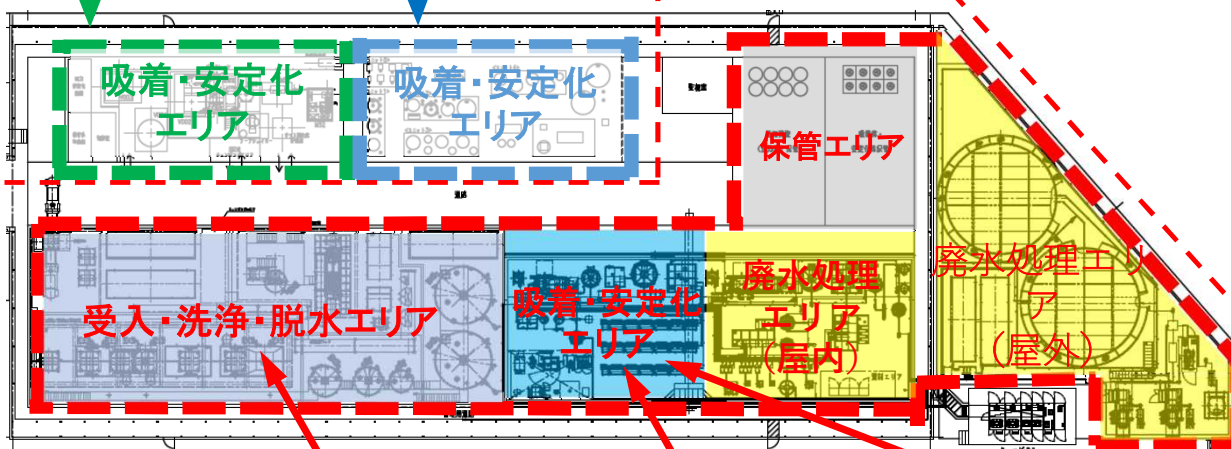
鋼製容器を
回転させ、
内袋を落下
させる



内袋を剣
山に下ろ
して破袋
する



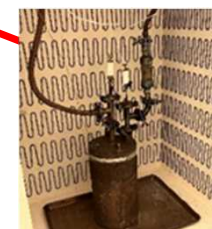
水槽の底に
設置してあ
る剣山で破
袋する



受入・洗浄・脱水試験



吸着試験



安定化試験
(セメント固化)

※安定化体・廃水等は安全に保管し、処分方法については検討中

実証試験結果（その1事業者）

➤ 実証試験結果（その1事業者）は、以下の通り。

●飛灰の受入、洗浄処理

- ・鋼製容器合計80個（飛灰約44 t、平均38.7万Bq/kg）を受け入れ、飛灰の8倍量の水によって攪拌式での飛灰の水洗浄処理を実施した。1バッチ（1容器）当たりの飛灰の処理量は約550 kgである。
- ・洗浄処理にあたり、飛灰の鋼製容器からの取出し・内袋の破袋方法の検討を合わせて行い、それぞれ実効性のある方式を確認した。

●洗浄後飛灰

- ・洗浄後、脱水ろ液（平均約4万Bq/kg）が得られ、放射性セシウムの98%以上が脱水ろ液に移行することを確認した。
- ・飛灰の性状の変動等の影響により、脱水後飛灰の放射能濃度が8,000Bq/kgを超えることがあったため、脱水後飛灰の放射能濃度の低減化に関して、ラボスケールでの酸洗浄等の追加試験を実施し、一定の効果があることを確認した。（なお、固型化により放射能濃度が1/3程度に低減することにも留意。）
- ・その他、脱水後飛灰の固型化、脱水後飛灰からの重金属の溶出防止等に関する課題や条件を整理し、一部はラボスケールでの追加試験を継続中（2025年1月現在）。

●脱水ろ液の吸着・廃吸着剤の安定化処理

- ・カラム式の吸着方法で、フェロシアン化銅を吸着剤として充填したカラムを直列6段につなぎ、脱水ろ液から放射性セシウムが選択的に吸着されることが確認された。また、吸着剤の放射能濃度は最大で1.1億Bq/kgに達した。
- ・カラム6段目からの排水の放射能濃度は特措法の排水基準を下回った。
- ・吸着後のカラムを順次交換する方式を検討・実施した。
- ・廃吸着剤の安定化処理として、カラム内で吸着剤を加熱分解後、セメント固型化を実施した。固型化体からの溶出試験を行った結果、放射性セシウムは検出下限値未満となった。

●飛灰洗浄による減容効果

- ・飛灰を洗浄し、その脱水ろ液中の放射性セシウムを吸着剤に吸着させた後に安定化することで、安定化体の体積は元の飛灰の体積と比較して減容化が可能。
- ・元の飛灰と安定化体（ドラム缶内でのセメント固型化）を比較した場合の減容効果（パイロットスケール）は、1/100程度となることを実証試験で確認。（吸着剤へさらに吸着することにより、より高い減容化を達成できる可能性がある。）

実証試験結果（その2事業者）

➤ 実証試験結果（その2事業者）は、以下の通り。

●脱水ろ液の吸着・安定化処理

- ・その1事業者が調製した飛灰洗浄後脱水ろ液を使用し、以降の吸着・安定化試験を実施した。
- ・初めに、脱水ろ液から重金属類が凝集沈殿処理により除去された。
- ・次に、液中合成式で得たフェロシアン化鉄により、脱水ろ液中の放射性セシウムを吸着させ、脱水機により固液分離することにより吸着後のフェロシアン化鉄と吸着処理水を得た。フェロシアン化鉄による脱水ろ液からの放射性セシウム除去率は99.9%であった。
- ・更なる濃縮化を図るため、吸着後のフェロシアン化鉄をアルカリ分解し、アルカリ分解液中へ放射性セシウムを溶出させた後、アルカリ分解液中放射性セシウムをゼオライトによって再度、吸着・回収した。なお、吸着後のフェロシアン化鉄からのアルカリ分解溶液中への放射性セシウム溶出率は99%であった。
- ・ゼオライトを充填したカラムを直列に8段つなぎ、アルカリ分解液中の放射性セシウムを吸着した結果、ゼオライトの放射能濃度は最大で1.1億Bq/kgに達した。
- ・このときの放射性セシウム除去率は99.9%であり、ゼオライトカラム8段目からの排水の放射能濃度は特措法の排水基準を下回った。
- ・吸着後ゼオライトを1,100℃で非晶化処理することにより、安定化体とした。安定化体からの放射性セシウム溶出率は0.002%程度となった。

●飛灰洗浄による減容効果

- ・元の飛灰と安定化体（ゼオライト焼成物）を比較した場合の減容効果（ベンチスケール）は、数百分の1程度となることを実証試験で確認した。（ゼオライトへさらに高濃度に吸着させることにより、より高い減容化を達成できる可能性がある。ただし、最終処分の形態については別途検討を要する。）

実証試験結果（その3事業者）

➤ 実証試験結果（その3事業者）は、以下の通り。

●脱水ろ液の吸着・安定化処理

- ・その1事業者が調製した飛灰洗浄後脱水ろ液を使用し、以降の吸着・安定化試験を実施した。
- ・吸着剤にケイチタン酸塩（CST）とフェロシアン化物、それぞれ数種を採用し、カラム方式によって脱水ろ液中の放射性セシウムが吸着されることを確認した。
- ・本実証試験では通水量が少なかったため、吸着剤の放射能濃度は400万Bq/kgとなった。
- ・吸着処理水の放射能濃度は特措法の排水基準を下回った。
- ・吸着後のCSTをガラス固型化体として安定化した。固型化体の放射性セシウム溶出率は0.003%未満となった。フェロシアン化物はCSTと比較してガラス固型化に要する添加物量が多くなる結果となった。

●飛灰洗浄による減容効果

- ・元の飛灰と安定化体（ガラス固型化物）を比較した場合の減容効果（ベンチスケール）は1／10程度となった。（通水量が少なかったため減容効果は限定的であったが、吸着ラボ試験の結果を踏まえると更なる減容効果が想定される。ただし、最終処分の形態については別途検討を要する。）

飛灰試験結果の比較

	その1事業者	その2事業者	その3事業者
飛灰洗浄	実施	洗浄工程は未実施 (その1事業者による飛灰洗浄水を後段の吸着試験以降に利用)	洗浄工程は未実施 (その1事業者による飛灰洗浄水を後段の吸着試験以降に利用)
飛灰処理量	約44t (540~580 kg/1 バッチ)		
洗浄水量	8~8.5 t/飛灰t		
飛灰の放射能濃度	18万~59.9 万Bq/kg (平均 38.7万Bq/kg)		
洗浄後飛灰の濃度	3,210~29,100 Bq/kg-wet (平均15,000 Bq/kg-wet)		
脱水ろ液の放射能濃度	8,310~54,100 Bq/kg (平均 38,670 Bq/kg)	28,000 Bq/kg (R4) 36,000~43,000 Bq/kg (R5)	28,000 Bq/kg
吸着処理後廃水の放射能濃度	< 6.5 Bq/L	< 6.5 Bq/L	< 6.5 Bq/L
吸着方式、通水速度 (SV (1/h)) ¹⁾	カラム式 (直列6段)、SV(1/h)=5	液中合成式 (フェロシアン化鉄) + カラム式 (ゼオライト、直列8段)、(カラム工程での通水速度) SV(1/h)=1	カラム式、SV(1/h)=5
吸着剤	<ul style="list-style-type: none"> フェロシアン化銅 ケイチタン酸塩 	<ul style="list-style-type: none"> フェロシアン化鉄+ゼオライト 	<ul style="list-style-type: none"> ケイチタン酸塩 フェロシアン化物
廃吸着剤放射能濃度	<ul style="list-style-type: none"> ~1.1億Bq/kg (10または100 Lカラム) 	<ul style="list-style-type: none"> ~1.1億Bq/kg (2 Lカラム、ゼオライト) 	<ul style="list-style-type: none"> ~400万Bq/kg³⁾ (2 Lカラム)
飛灰からの減量化率 ²⁾	<ul style="list-style-type: none"> ~99% 	<ul style="list-style-type: none"> ~99% 	<ul style="list-style-type: none"> ~99%⁴⁾
安定化方法	<ul style="list-style-type: none"> カラム内セメント固型化またはカラム保管 (10または100 Lカラム) 	<ul style="list-style-type: none"> ゼオライト焼成 	<ul style="list-style-type: none"> ガラス固型化
固型化体溶出性または溶出率	<ul style="list-style-type: none"> 検出限界以下 (環告13号) (固型化体: ステンレスカラム内でのセメント固型化) 	<ul style="list-style-type: none"> 0.003%未満 (環告13号) (固型化体: ゼオライト焼成体 (粒状)) 	<ul style="list-style-type: none"> 0.003%未満 (JIS K 0058-1:2005) (ガラス固型化体)

1) SV (Space Velocity, 空間速度) ; 吸着処理の通水速度を表す。吸着剤容積に対する1時間当たりの通液量を表し、たとえば、1m³の樹脂に1時間当たり5m³通液した場合、SV=5と示す。 2) 吸着剤への濃縮率によって変動する。 3) 実証試験での通水量が少ない。 4) コールド試験の結果を含む。

令和6年度追加試験の状況（その1 事業者）

本実証試験は令和5年度で所定の試験を終了したが、実機化の検討のために、以下の項目1～4について、追加でラボ試験等を実施した。

1. 洗浄後飛灰の不溶化处理
2. ミニカラム吸着試験
3. 廃吸着剤のセメント固型化
4. 洗浄後飛灰の放射能濃度低減策（酸洗浄等）の検討

結果の概要は以下のとおり。

■ 目的

洗浄後飛灰（脱水ケーキ）を対象に、溶出しやすい放射性Cs・鉛・カドミウムの不溶化処理を行い、産業廃棄物の埋立判定基準を満足する不溶化処理条件を明らかにする。

■ 結果

洗浄後飛灰（脱水ケーキ）を、4種類のキレート剤使用して不溶化処理した後、溶出試験（環告13号溶出試験）を実施した。いずれのキレート剤においても重金属類の溶出は抑えられ、埋立処分基準を満足する結果が得られた。

追加試験 1. 洗浄後飛灰の不溶化处理 環告13号溶出試験

【環告 1 3 号溶出試験の結果】

キレート剤			A		B		C		D		
キレート剤添加率 (%)			3.3	4.7	3.3	4.7	1.1	2.1	1.1	2.1	
			(推奨値)	(余剰添加)	(推奨値)	(余剰添加)	(推奨値)	(余剰添加)	(推奨値)	(余剰添加)	
項目	単位	不溶化处理前	不溶化处理後								埋立処分基準
Hg	mg/L	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.005
Cd	mg/L	0.3	0.044	0.032	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.09
Pb	mg/L	0.72	0.19	0.17	0.02	0.02	0.07	<0.01	0.04	0.08	<0.3
Cr ⁶⁺	mg/L	<0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<1.5
As	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.3
Se	mg/L	<0.002	<0.002	<0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	<0.002	0.002	<0.3

追加試験 2. ミニカラム吸着試験

■ 目的

フェロシアン化物およびケイチタン酸塩（CST）を充填したカラムによる放射性Cs吸着特性を明らかにするため、飛灰洗浄で生じる洗浄廃液を用いて、フェロシアン化銅とCSTの2種類の吸着剤を用い、吸着能力を比較する。

■ 結果

洗浄廃液（放射性Cs濃度24,000Bq/kg）を約1,900L通水したとき、フェロシアン化銅で1.6億Bq/kg超*、CSTで1.2億Bq/kg超*に達した。

このときの吸着処理比は、それぞれ、6,700、5,000程度となった。

*食品モニターでの測定値より

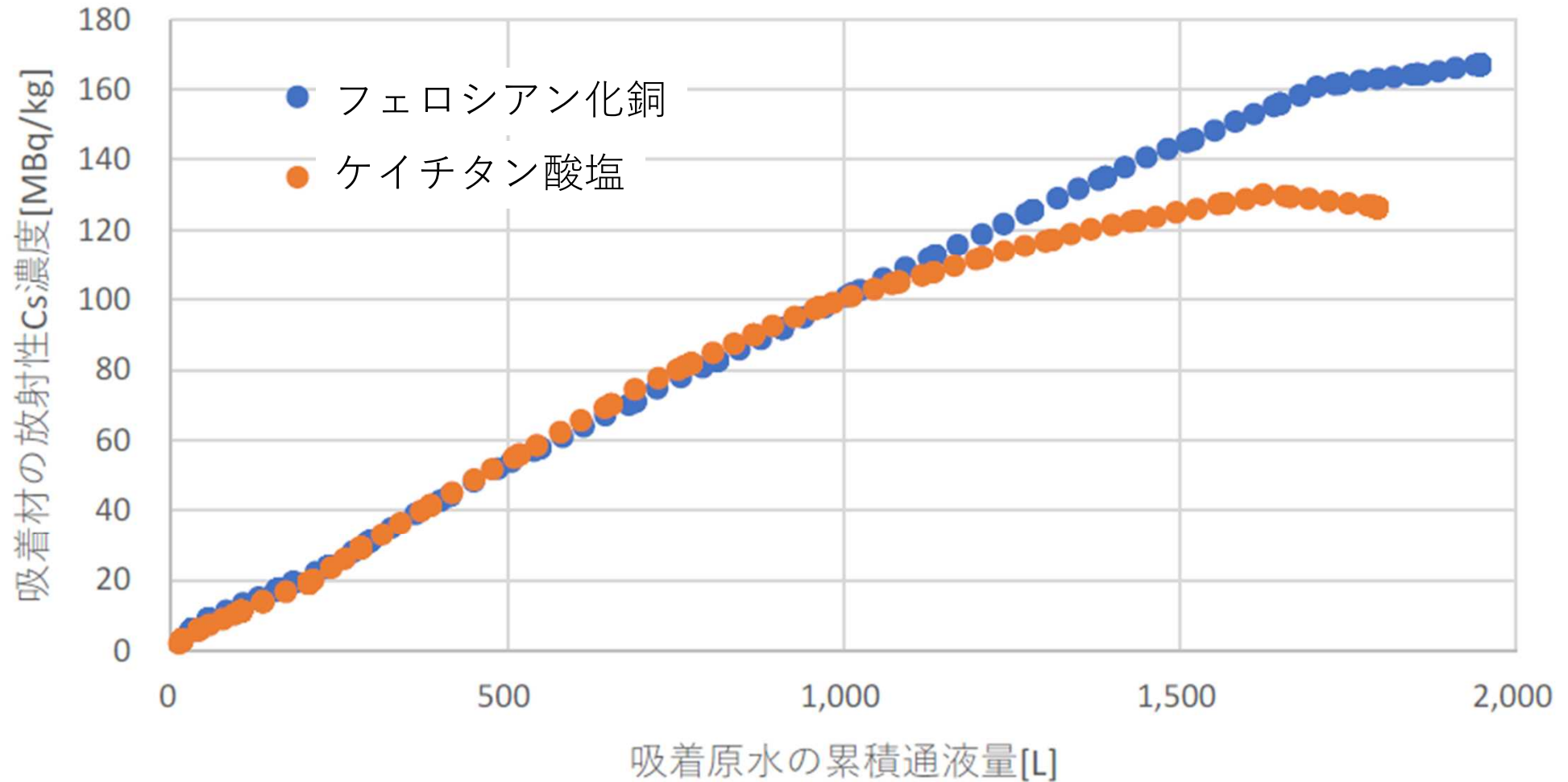
- ミニカラム内容積：約340mL
- 吸着剤（フェロシアン化物またはCST）充填量：200g程度（乾燥重量）
- 通水条件：1.5L/h（SV5を想定）
- 吸着濃度：カラム出口（吸着処理水）の放射性Cs濃度を1日1回測定することにより、吸着濃度を推定。

ミニカラム吸着試験の様子▶



追加試験 2. ミニカラム吸着試験

■ 吸着原水の通液量と吸着剤の放射性Cs濃度の関係



■ 目的

前項のミニカラム吸着試験で製造した使用後吸着剤（フェロシアン化物、CST）を用いて、セメント固型化し、溶出試験を行って固型化体の性能を評価する。

■ 結果

吸着剤とセメントの配合比率を変えて、セメント固型化物を作製した。一軸圧縮強度試験の結果、フェロシアン化物またはCSTに対して、2倍量のセメントを配合したとき、 $10\text{kg}/\text{cm}^2(1.0\text{MPa})$ 以上の強度を示した。

■ 目的

洗浄後飛灰（脱水ケーキ）を対象に、酸洗浄試験を行い、脱水ケーキの放射能濃度を安定的に8,000Bq/kg以下にできる洗浄条件を見出す。

■ 結果

塩酸を使った洗浄（分離式；酸洗浄→固液分離→中和→固液分離）により、32,000Bq/kg-Dryの洗浄後飛灰を5,540Bq/kg-Dryまで濃度低減させることができた。

①の分離式のケースで、0.3kgの脱水ケーキから2.271kgの脱水ろ液が生成しており、これは飛灰洗浄後の脱水ろ液に混ぜて処理する必要がある。

飛灰洗浄処理技術等実証施設 現場の状況

- 現在、その2事業者、その3事業者の設備は撤去済み。その1事業者設備の除染、解体、撤去を順次進めている。年度末までに完了予定。

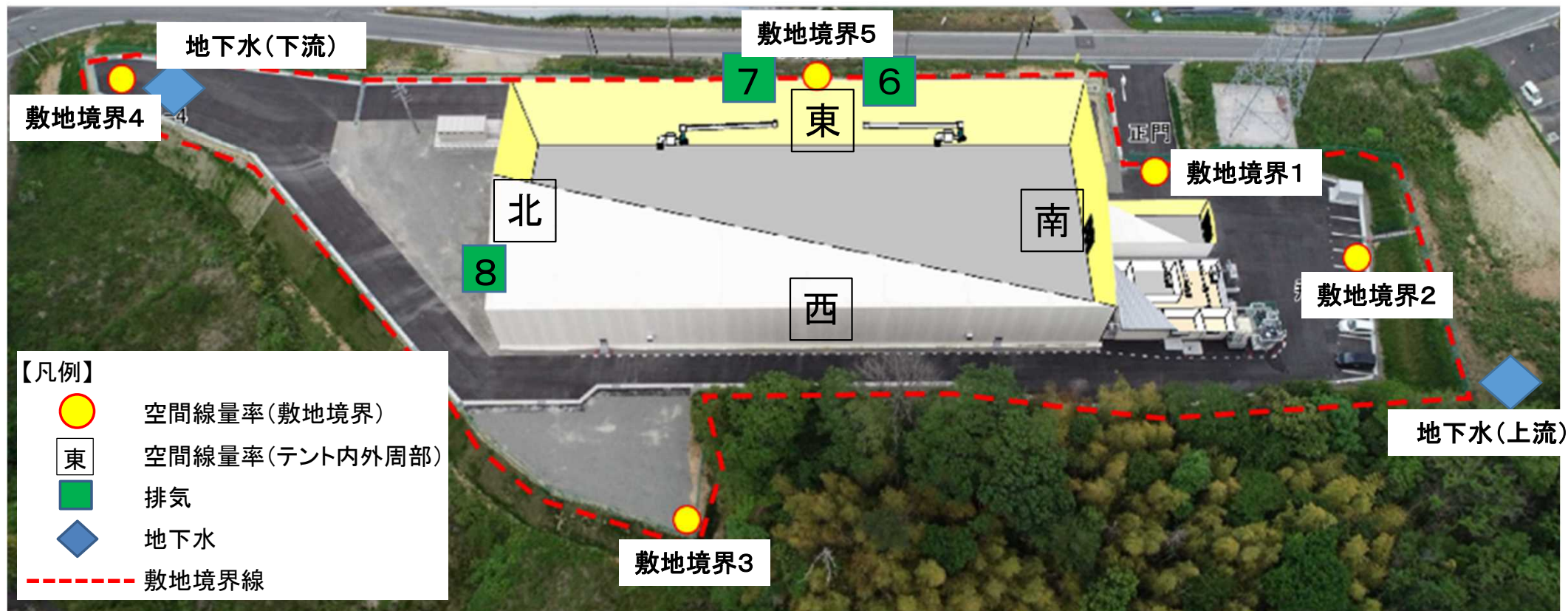
2024年10月 撮影

2024年10月 撮影



2024年12月 撮影

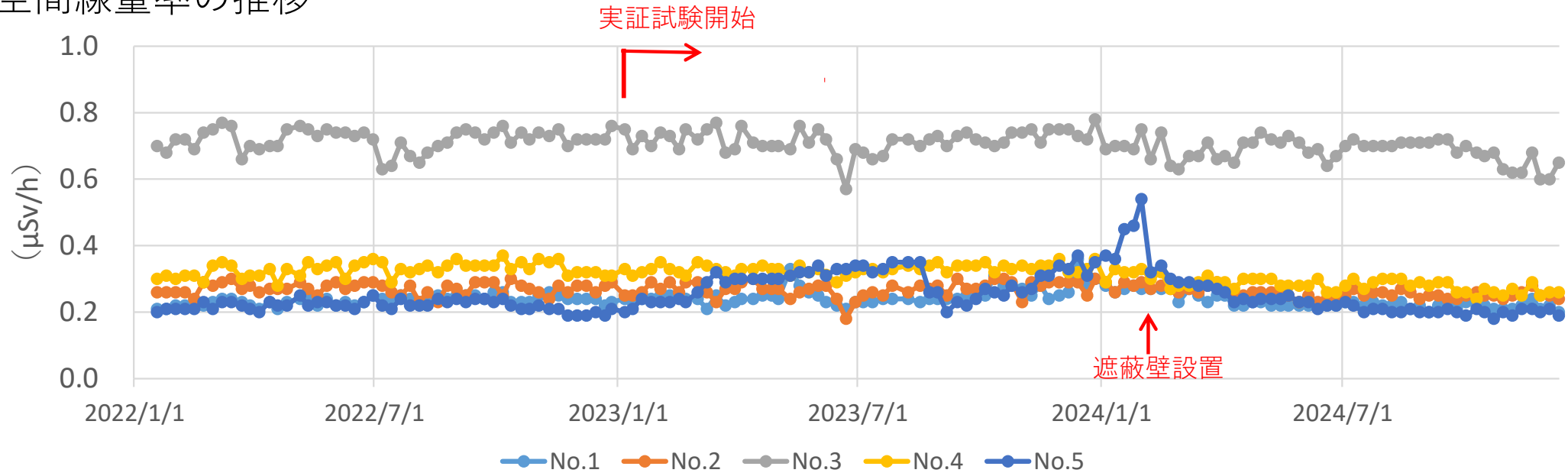
環境モニタリング箇所(飛灰洗浄処理技術等実証施設)



- ・ 空間線量率、地下水の放射能濃度については、実証試験開始前より測定を実施。
- ・ テント内外周部の空間線量率：東0.19、南0.19、西0.24、北0.24 ($\mu\text{Sv/h}$) (2024年12月2日測定)
- ・ テント内からの排気中の放射能濃度については、2023年1月から測定を開始。

環境モニタリング測定結果(飛灰洗浄処理技術等実証施設)

●空間線量率の推移



●地下水中の放射能濃度

測定地点	測定項目	Cs-134 (Bq/L)	Cs-137 (Bq/L)
	測定日		
地下水(上流)	2024/10/1	ND	ND
	2024/11/5	ND	ND
	2024/12/3	ND	ND
地下水(下流)	2024/10/1	ND	ND
	2024/11/5	ND	ND
	2024/12/3	ND	ND

※NDとは、放射能濃度が検出下限値(1Bq/L)未満であることを示す。

●排気中の放射能濃度

測定地点	測定項目	Cs-134 (Bq/Nm ³)	Cs-137 (Bq/Nm ³)	
	測定日			
テント棟排気南	6	2024/8/6	ND	ND
		2024/9/10	ND	ND
		2024/10/8	ND	ND
テント棟排気北	7	2024/8/6	ND	ND
		2024/9/10	ND	ND
		2024/10/8	ND	ND
テント棟 排気ダクト出口 (排気時のみ計測)	8	2023/2/1	ND	ND
		2023/2/14	ND	ND
		2023/3/9	ND	ND

※NDとは、放射能濃度が検出下限値(1Bq/Nm³)未満であることを示す。