

2018-2020年度 環境研究総合推進費 3-1804【委託費(環境問題対応型研究)】

(主)重点課題⑨ 3Rを推進する技術・社会システムの構築

(副)重点課題⑩ 廃棄物の適正処理と処理施設の長寿命化・機能向上に資する研究・技術開発

物理選別とエージングを組み合わせた 「焼却主灰グリーン改質技術」の確立

国立研究開発法人国立環境研究所
鳥取県衛生環境研究所
福岡大学

肴倉 宏史・飯野 成憲
成岡 朋弘
佐藤 研一

研究協力機関

(株)フジタ、(公財)廃棄物・3R研究財団、東京都環境科学研究所

1. はじめに(研究背景等)

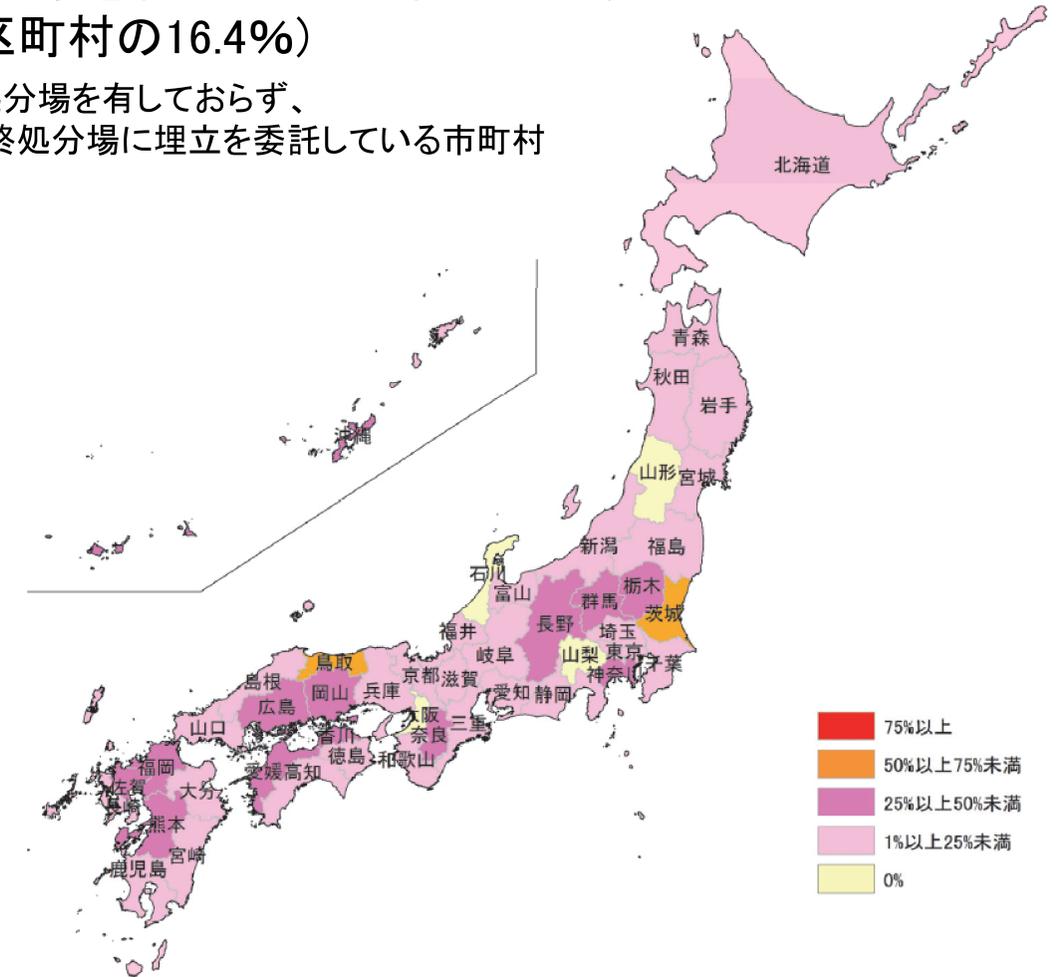
一般廃棄物の排出量、焼却量および最終処分量の変化

		2000年度 (H12)	2015(H27)年度 対2000比	2019(R1)年度 対2000比
排出・焼却	総排出量(千トン)	54,834	43,981 -19.8%	42,737 -22.1%
	焼却量(千トン) (直接+処理残渣)	42,149	34,813 -17.4%	34,428 -18.3%
	焼却率	76.9%	79.2% ↑ 2.3	80.6% ↑ 3.7
最終処分	最終処分量(千トン)	10,514	4,165 -60.4%	3,798 63.9%
	最終処分された焼却残渣量(千トン)	5,682	3,163 -44.3%	2,948 -48.1%
	焼却残渣率	54.0%	75.9% ↑ 21.9	77.6% ↑ 23.6

環境省 一般廃棄物処理統計より抜粋・計算

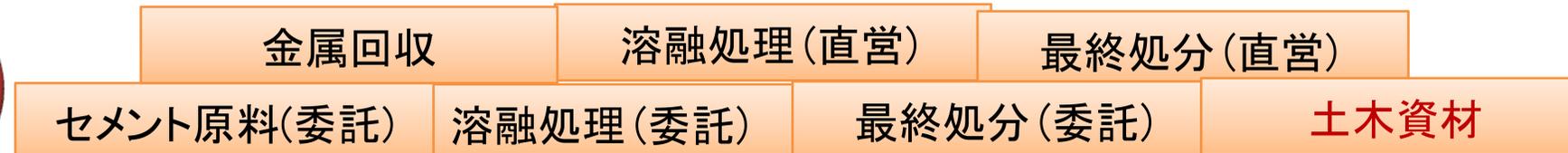
最終処分場を有していない市区町村数^注: 285
(全市区町村の16.4%)

注) 最終処分場を有しておらず、
民間の最終処分場に埋立を委託している市町村



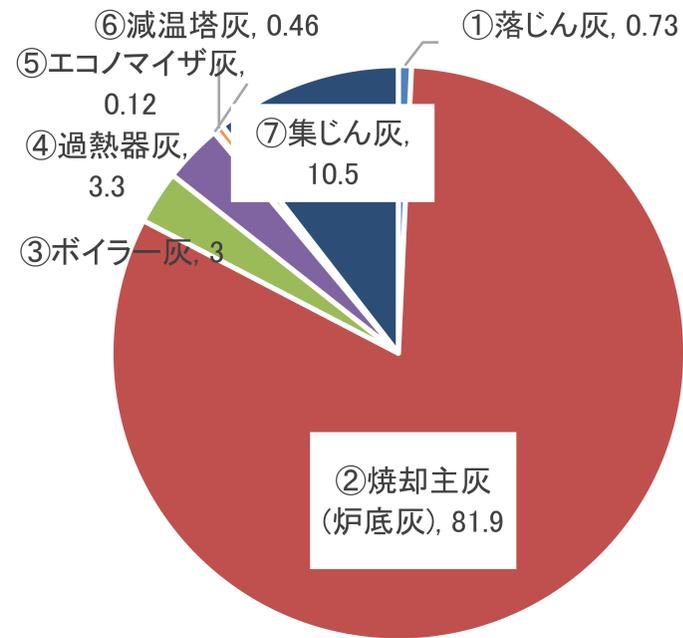
出典: 環境省「一般廃棄物の排出及び処理状況等(令和元年度)について」

- 焼却残渣は今日の一般廃棄物処理における最大の課題
- 特に、最終処分場を保有しておらず長期見通しが不透明な自治体は、処理や処分の**選択肢を一つでも多く持つ**ことを渴望

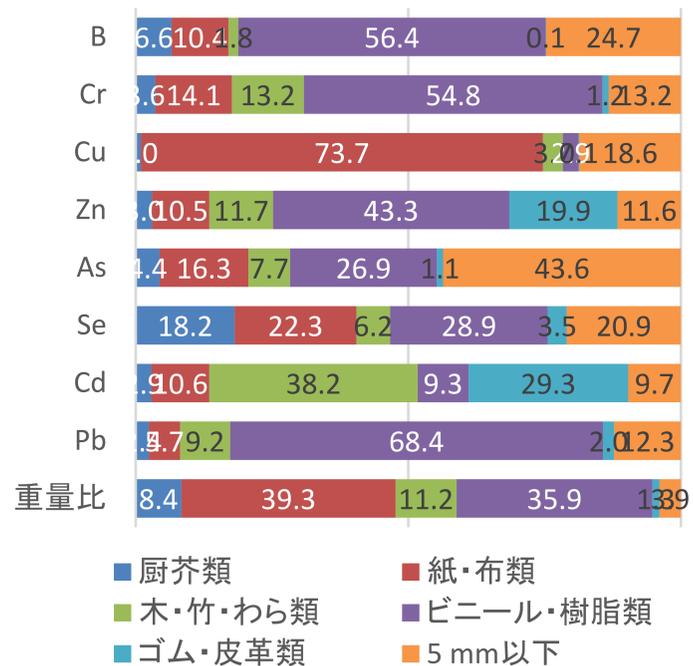


前進研究(3K143007)から得られた知見と課題

H26-28「有用・有害金属挙動に着目した都市ごみ焼却残渣の循環資源化トータルスキーム」



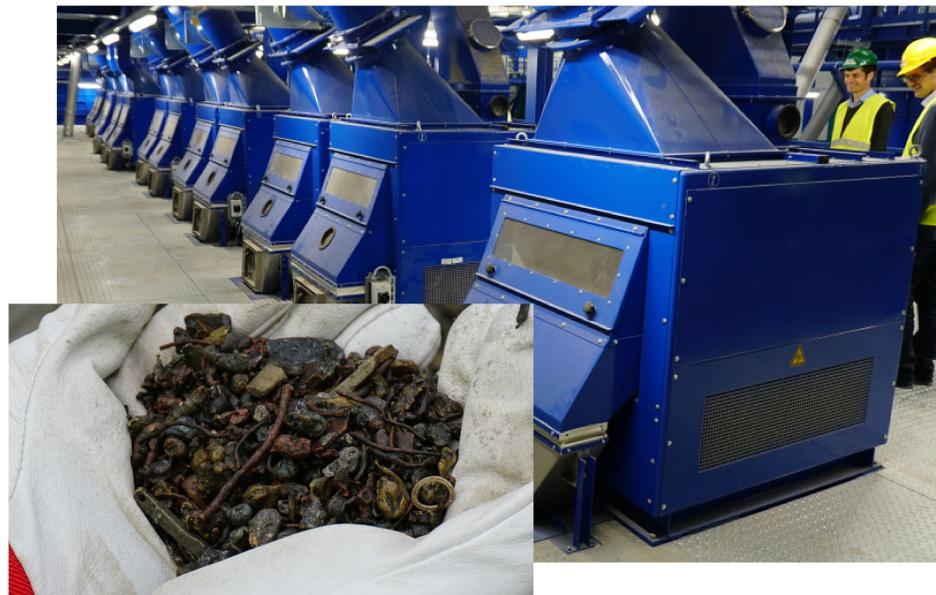
焼却残渣の発生割合 (例)



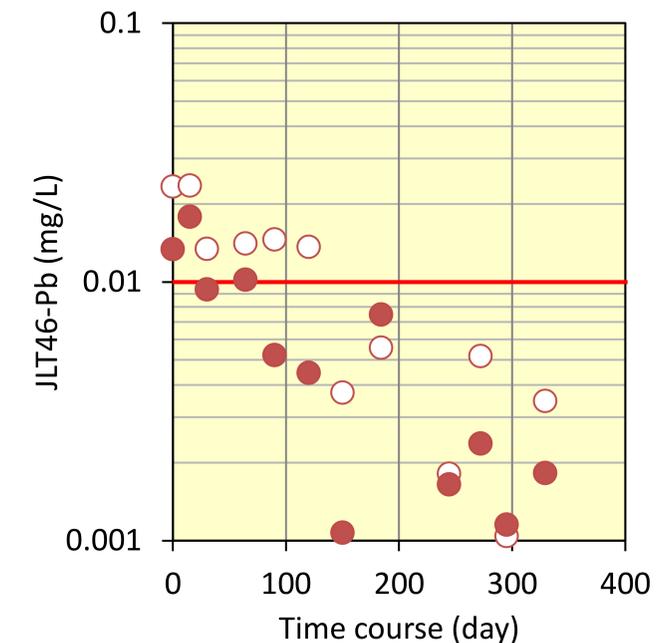
焼却残渣の元素の由来

各焼却残渣の元素含有量 (mg/kg)

	A施設				B施設			
	①落じん灰	②焼却主灰	⑤~⑥煙道灰	⑦集じん灰	①落じん灰	②焼却主灰	③~⑥煙道灰	⑦集じん灰
B	148	328	255	162	109	119	114	85.8
Cr	885	719	793	307	683	601	370	203
Cu	22300	1780	2000	870	12900	1870	205	418
Zn	72600	4280	9760	13000	13900	2310	4170	8590
As	18.2	7.0	10.4	14.5	10.0	5.2	10.1	21.7
Se	<1.0	<1.0	<1.0	2.1	<1.0	<1.0	2.4	6.7
Ag	165	18.0	14.2	19.2	219	21.5	7.7	22.4
Cd	5.8	2.7	18.4	107	1060	2.6	11.6	54.0
Au	0.95	0.51	1.3	<0.05	1.3	0.07	0.37	0.11
Hg	0.098	<0.001	0.054	10.9	0.014	0.006	0.070	23.9
Pb	12700	460	1330	3480	7930	294	372	942



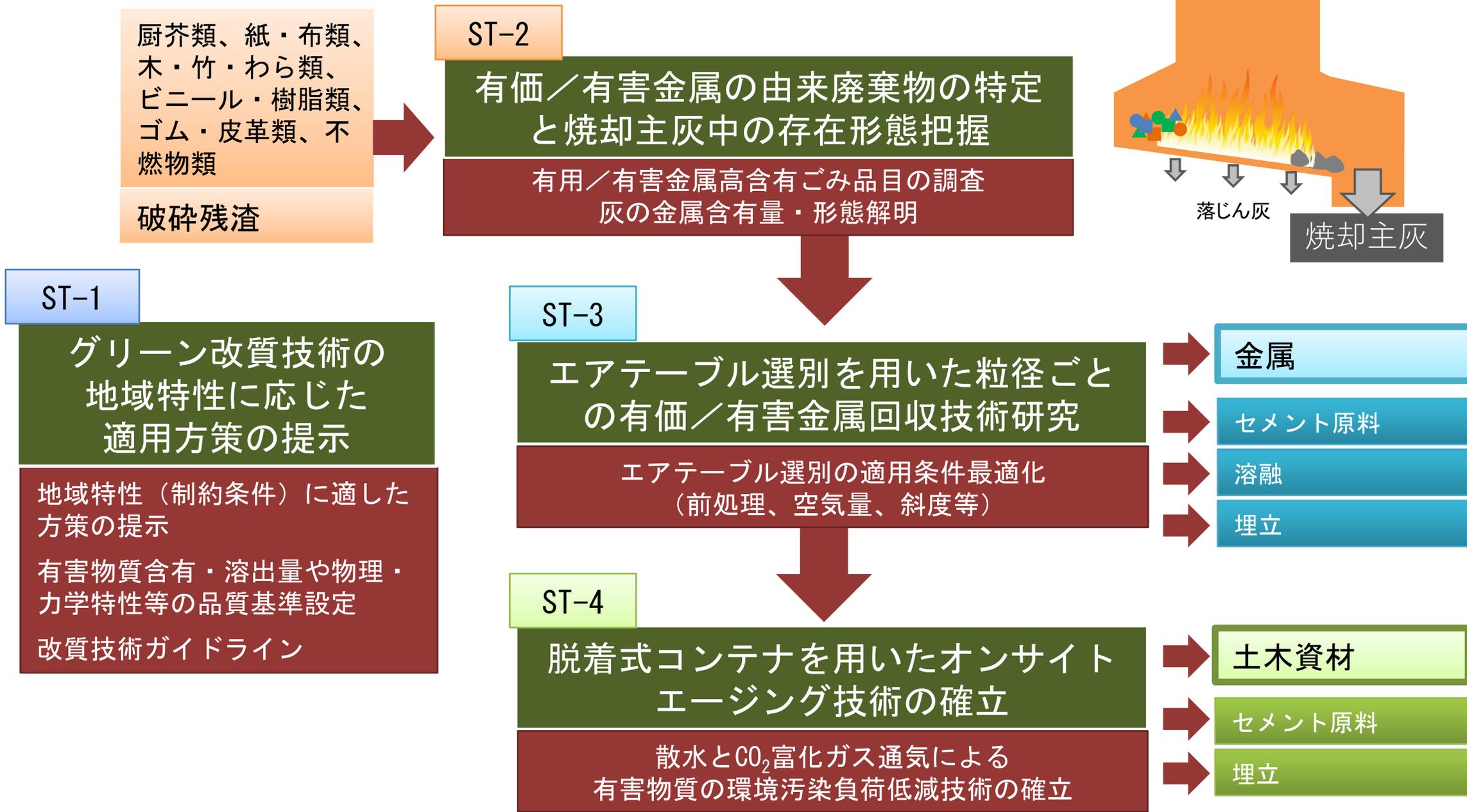
焼却主灰からの金属回収施設 (欧州)



屋外エージングによる鉛溶出濃度の変化

2. 研究開発目的

本研究では、先行研究の知見を基盤に、「グリーン改質技術」の完成を目指すことを目的とした。



「グリーン改質技術」とは・・・
 都市ごみを焼却処理して発生する主たる残渣である焼却主灰を対象に、**エアテーブル**（乾式比重選別装置の一種）等を用いた物理選別と、**エージング**（ある温度・水分・ガス条件で灰を養生し安定化する処理方法）を組み合わせた改質技術

これらの技術は焼成や熔融などの熱処理よりも投入エネルギーが特段に低く、また、有害金属や塩素等の含有量の低減や溶出抑制が進み、焼却主灰を土木資材利用／セメント原料化／最終処分する際の環境への影響を大きく下げることが可能である。

3. 研究目標

全体目標	一般廃棄物焼却主灰を対象に、物理選別とエージングを組み合わせた「グリーン改質技術」の適用性を明らかにし、焼却主灰の有効利用や処理処分の適切な方策を提示する。
------	--------------------------------------------------------------------------------

サブテーマ1	焼却主灰グリーン改質技術の地域特性に応じた適用方策の提示	サブテーマ3	エアテーブル選別を用いた粒径ごとの有価／有害金属回収技術研究
リーダー/ 所属機関	肴倉宏史／国立研究開発法人国立環境研究所	リーダー/ 所属機関	飯野成憲／国立研究開発法人国立環境研究所
目標	改質技術の環境負荷を評価する。改質主灰が満たすべき有害物質含有・溶出量や物理・力学特性等の品質基準を設定し、他のサブテーマで得られた改質主灰を評価する。研究全体で得られた内容をガイドラインにとりまとめる。	目標	エアテーブル選別、渦電流選別等の物理選別における、選別効率や有価金属の富鉱比等のデータを蓄積し整理することで、各技術を組み合わせた選別フローの設計法を提示する。

サブテーマ2	有価／有害金属の由来廃棄物品目の特定と焼却主灰中の存在形態把握	サブテーマ4	脱着式コンテナを用いたオンサイトエージング技術の確立
リーダー/ 所属機関	成岡朋弘／鳥取県衛生環境研究所	リーダー/ 所属機関	佐藤研一／福岡大学
目標	由来廃棄物品目と焼却主灰の分析を行い、データを蓄積する。得られたデータを元に、インプットから見た焼却主灰の重金属量低減のための方策を整理し、その効果を定量的に示す。	目標	オンサイトエージング技術の確立を目指し、エージング処理した焼却主灰の土木資材として特性評価、ならびに屋内外での長期溶出性評価を行う。蓄積されたデータに基づき、オンサイトエージング処理の実施方法を提示する。

4. 研究開発内容

サブテーマ1 焼却主灰グリーン改質技術の地域特性に応じた適用方策の提示:

- 焼却炉メーカーが参画する廃棄物・3R研究財団との**研究実施体制**を構築した。
- 焼却残渣の**資源化の現状**を市区町村レベルで整理した。
- グリーン改質化の**コストと環境負荷**を他の技術と比較評価し、**地域特性**に応じて最適化する手法を示した。
- グリーン改質主灰の**目標品質**を設定し、サブテーマの連携により、実際に焼却主灰に対して物理選別と促進エージングから成る**グリーン改質技術を適用・評価**した。

サブテーマ2 有価／有害金属の由来廃棄物品目の特定と焼却主灰中の存在形態把握:

- **焼却対象廃棄物**の品目ごとに蛍光X線分析を実施し、焼却主灰中各元素の**由来解明**に向けた基礎データを蓄積した。
- **全国7施設の焼却主灰の磁着性と粒径ごとの金属含有量**分析やX線回折測定等を実施し、主灰中の金属の含有量及び存在形態を把握した。
- **焼却主灰と落じん灰の金属含有量の月変動を調査**し、得られたデータを元に、落じん灰排除による重金属量低減のための方策を整理し定量的に示した。

サブテーマ3 エアテーブル選別を用いた粒径ごとの有価／有害金属回収技術研究:

- **エアテーブル**を用いた焼却主灰の乾式比重選別により、焼却主灰中の金属ごとの回収効率を詳細に評価した。
- さらに、**渦電流選別と破碎選別**について、焼却主灰へ適用した場合の効率を把握した。
- 得られた結果に基づき、**焼却主灰に最適な物理選別フロー**を提案した。

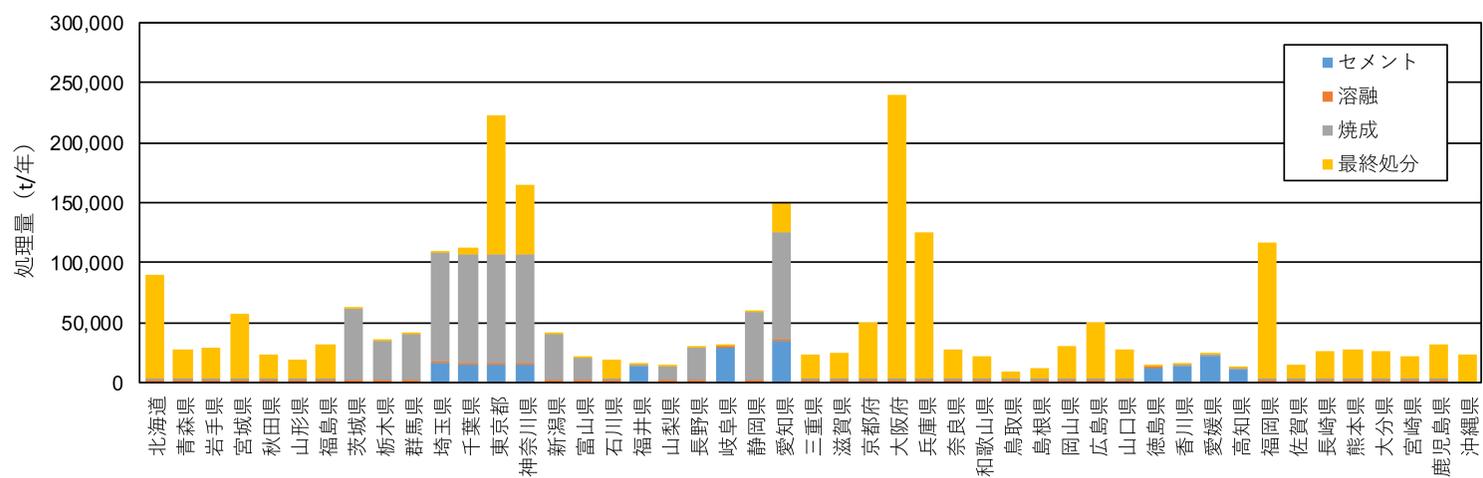
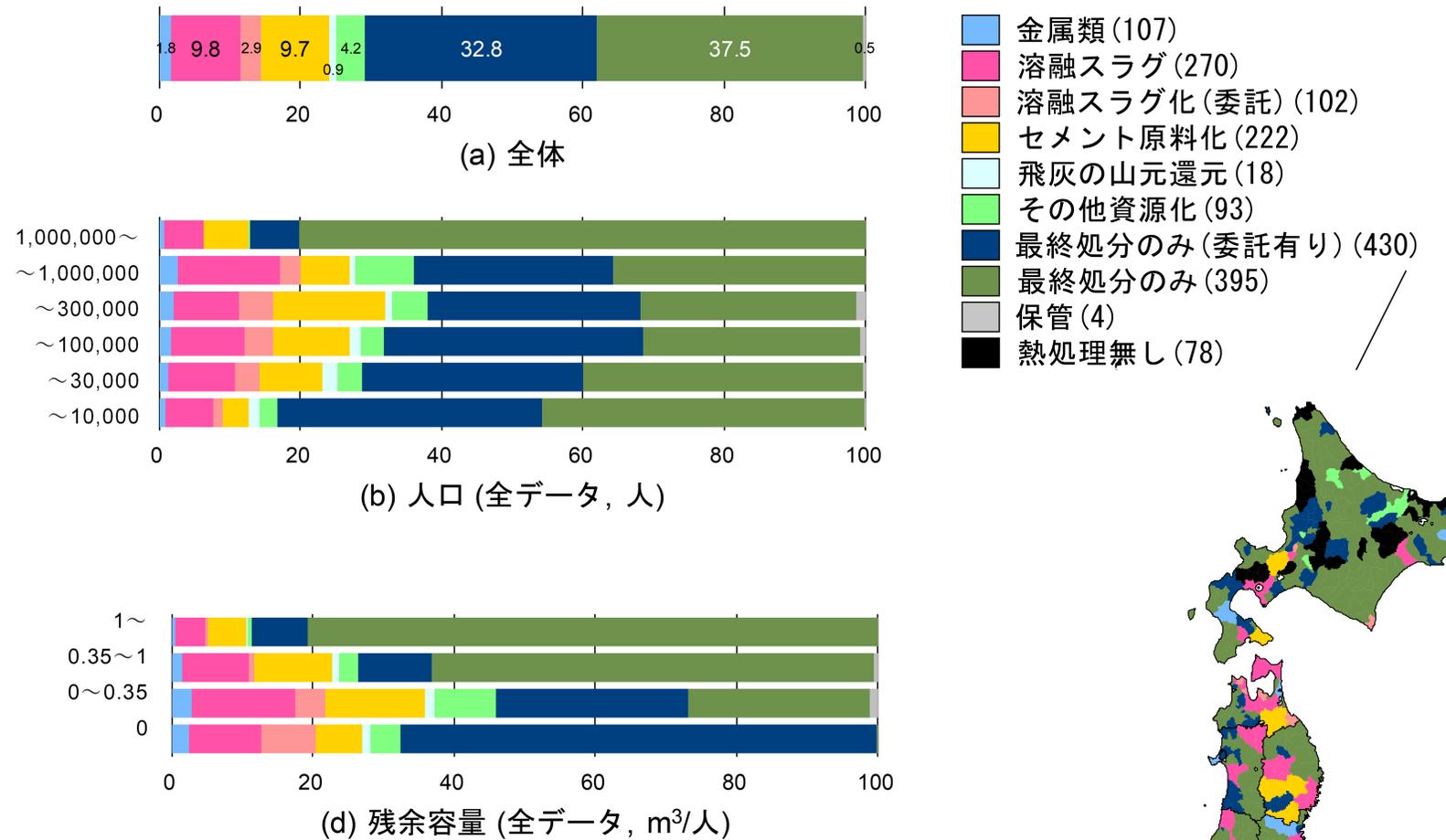
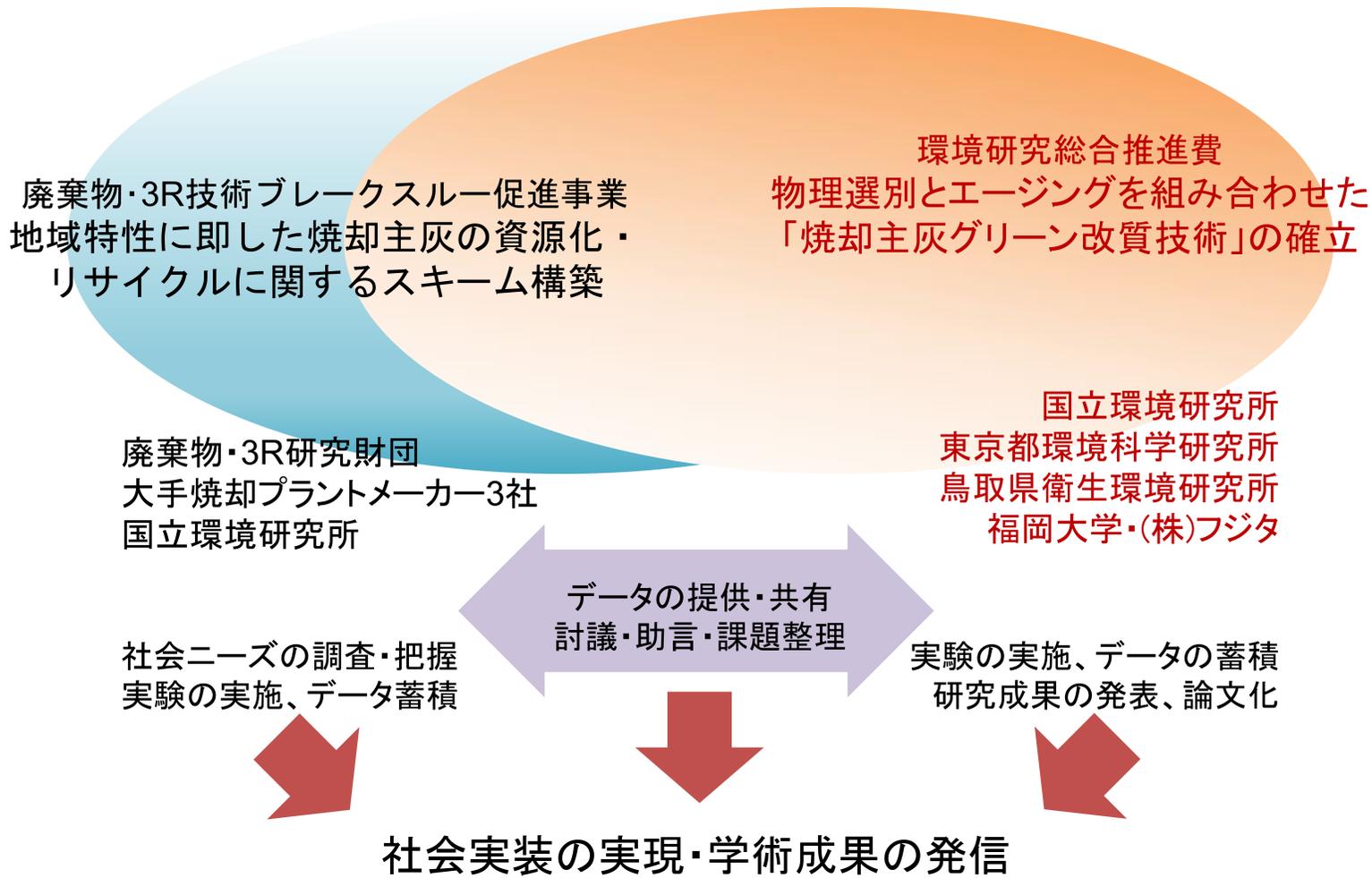
サブテーマ4 脱着式コンテナを用いたオンサイトエージング技術の確立:

- **全国6施設の焼却主灰**を用いて散水・炭酸化処理を行い、改質灰の溶出挙動をカラム試験にて検証した。
- **佐賀市清掃工場CCUプラント**からの回収CO₂や排ガスを用いて、現地にて炭酸化処理を行い、改質灰の土木資材性能や長期溶出性を評価した。
- **実規模コンテナを用いてオンサイトエージング**技術の実証を行い、散水洗い出しと炭酸化によるPb難溶化効果を確認した。
- 炭酸化処理により懸念されるCr(VI)溶出についても添加する**鉄剤の用法と効果**を明らかにした。

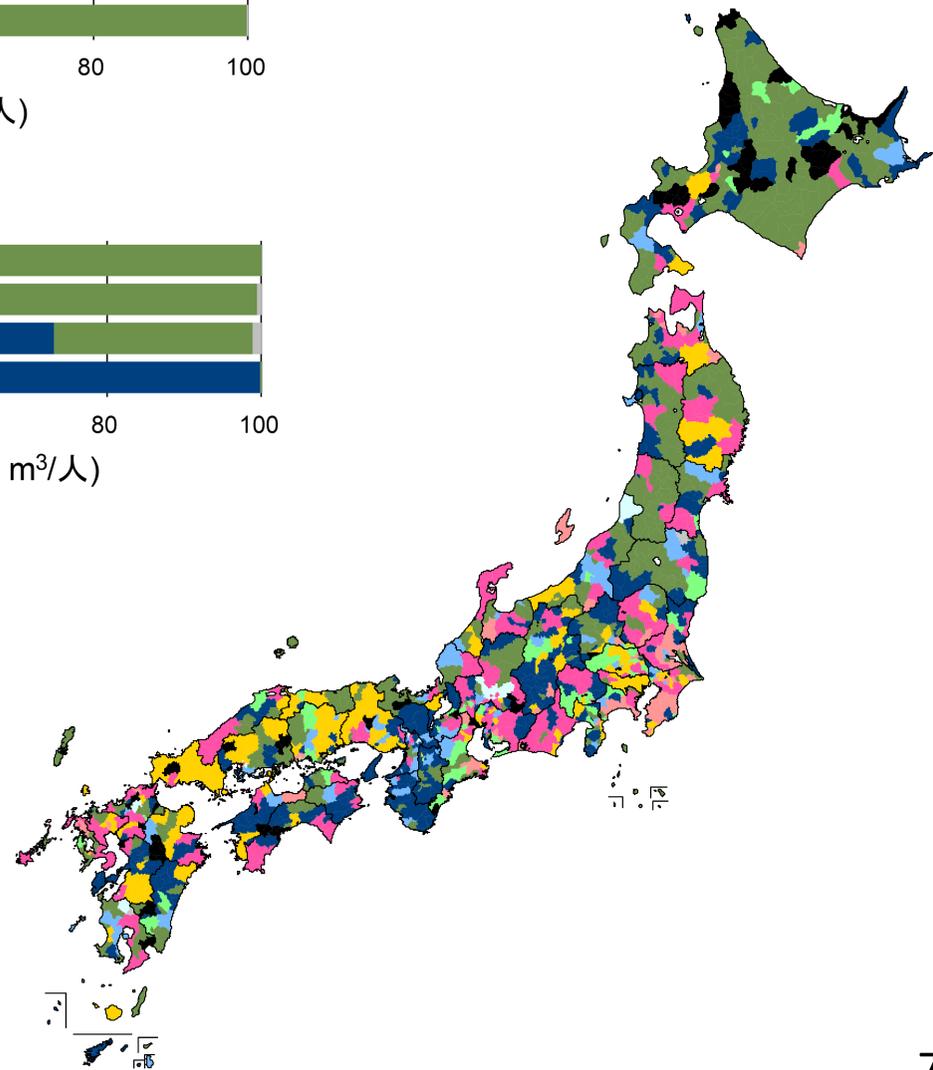
得られた結果に基づきグリーン改質技術の適用性を評価し、グリーン改質技術導入ガイドラインの構成案を提示した。

5. 研究成果 5-1 成果の概要

サブテーマ1 焼却主灰グリーン改質技術の地域特性に応じた適用方策の提示



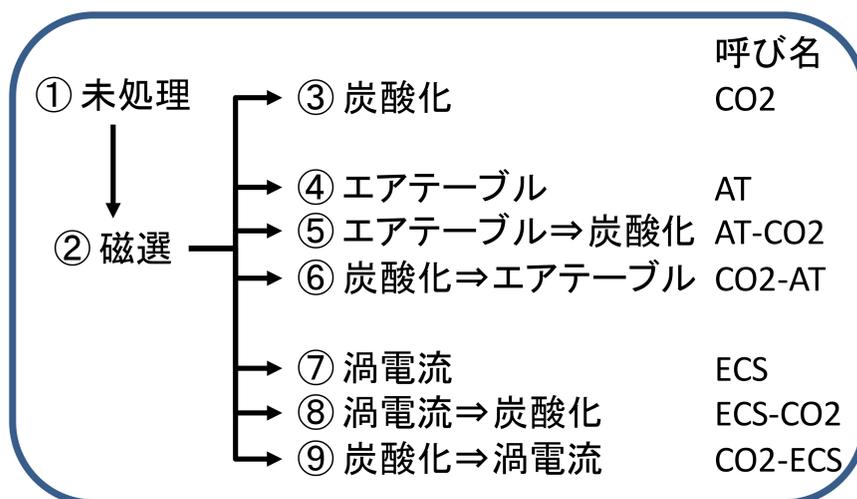
- 焼却炉メーカーが参画する廃棄物・3R研究財団との研究実施体制を構築した。
- 焼却残渣の資源化の現状を市区町村レベルで整理した。
- グリーン改質化のコストと環境負荷を他の技術と比較評価し、地域特性に応じて最適化する手法を示した。



5. 研究成果 5-1 成果の概要

サブテーマ1 焼却主灰グリーン改質技術の地域特性に応じた適用方策の提示

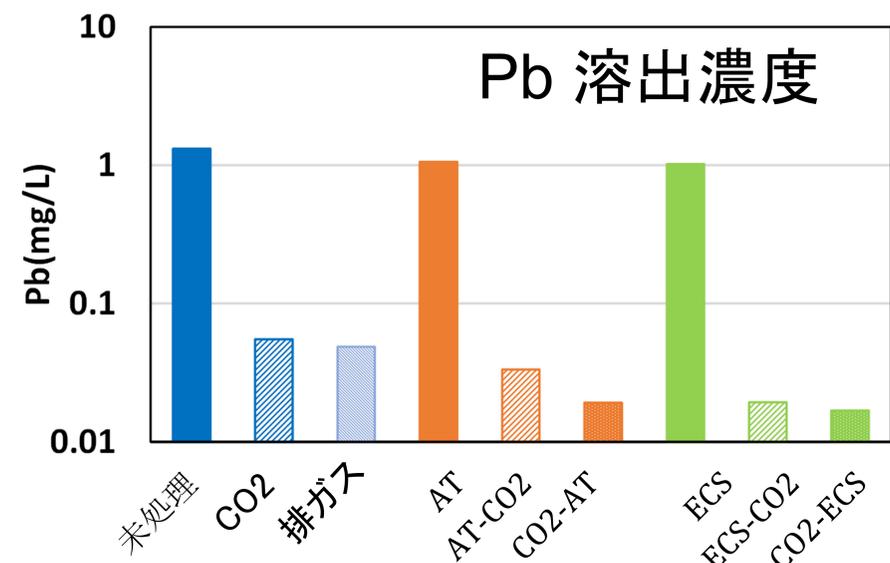
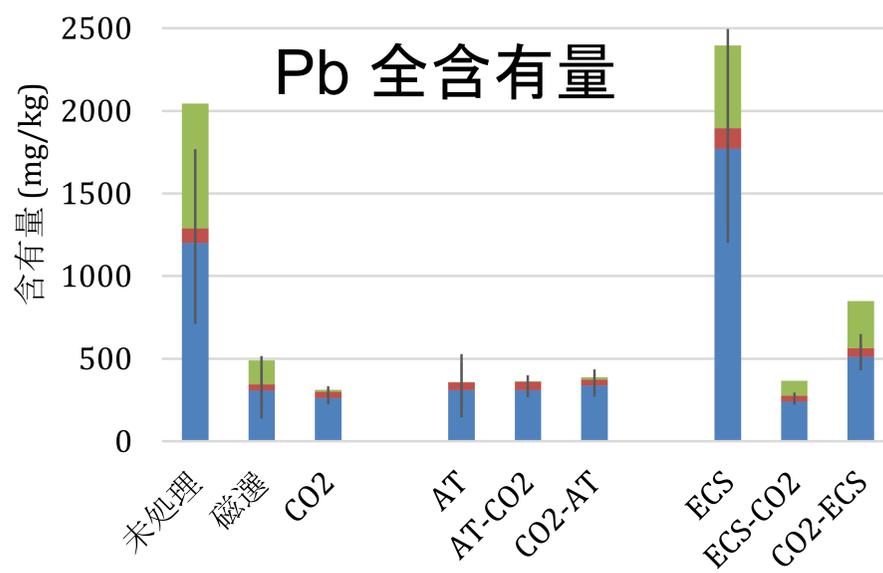
■ サブテーマ間の連携により、様々な組合わせで処理を実施



エアテーブル選別(AT)により、Pb全含有量を約80%低減し、1N塩酸抽出量も約60%低減できた。

また、炭酸化(CO2)により、Pb溶出濃度を約1/20以下に低減できた。

しかし目標基準150 mg/kg, 0.01 mg/Lを十分には下回ることができなかった。



要素技術		適用先			
		金属精錬原料	セメント原料	建設資材 (路盤・盛土)	最終処分
主灰物理選別	エアテーブル	○重量粒子回収		○異物除去	
	渦電流	○非鉄回収		○異物除去	
	磁力	○鉄回収		○異物除去	
	破碎	○金属粒子分離		○異物分離 △鉛粒子 △細粒化した灰の取扱い(建)	
促進エージング	散水(少量)		○塩素除去	○塩の洗出し △六価クロム(薬剤で対応可能)	
	炭酸化			○鉛不溶化 ○pH低下	
落じん灰分離		○一次選別不要で一部(落じん灰)を金属資源化可能			

○ 炭酸化は湿灰に対して乾燥・解きほぐし効果があり、物理選別の前処理として有効
 ※ 建設資材と最終処分では要求品質のレベルが異なる。

焼却主灰グリーン改質技術導入ガイドライン(案)

- 本ガイドラインの目的
 - 焼却主灰リサイクルのあるべき姿
 - 一次選別と二次選別(精選別)について
- 「焼却主灰グリーン改質技術」とは
 - 物理選別の役割
 - 焼却主灰からの有価金属回収(貴金属)
 - 焼却主灰中有害金属含有量の低減
 - 促進エージングの役割
 - 焼却主灰中有害金属の不溶化
 - 焼却主灰中塩類の洗い出し
 - pHの低下
 - 落じん灰の分離排出
- 適用先と目標品質
 - 建設資材
 - 路盤材 ※含有量基準有り(トレーサビリティ望ましい)
 - 盛土材 ※含有量基準無し(トレーサビリティ必須)
 - 金属精錬原料
 - セメント原料
 - 最終処分
- 一次選別・エージング処理フロー
 - 基本的なフロー
 - 併設と集約施設の選択
 - 物理選別と促進エージングの順序
 - 湿式排出方式の場合
 - 乾式排出方式の場合
- 建設資材化実現に向けた改善方策
 - 焼却ごみ元素組成の改善(鉛の排除)
 - 破碎可燃残渣
 - 鉛含有量の高い可燃ごみ
 - 改質主灰の物理・力学特性と環境安全品質の改善
 - 粒度調整
 - 副資材の添加(セメント、鉄系添加剤)
 - 改質主灰利用時のトレーサビリティ確保
- 参考資料(研究成果)
 - 可燃ごみ、焼却主灰、落じん灰の元素組成
 - 金属粒子を含む残渣の元素組成分析方法
 - 焼却主灰・粒子密度別
 - エアテーブル選別処理特性
 - 促進エージング技術

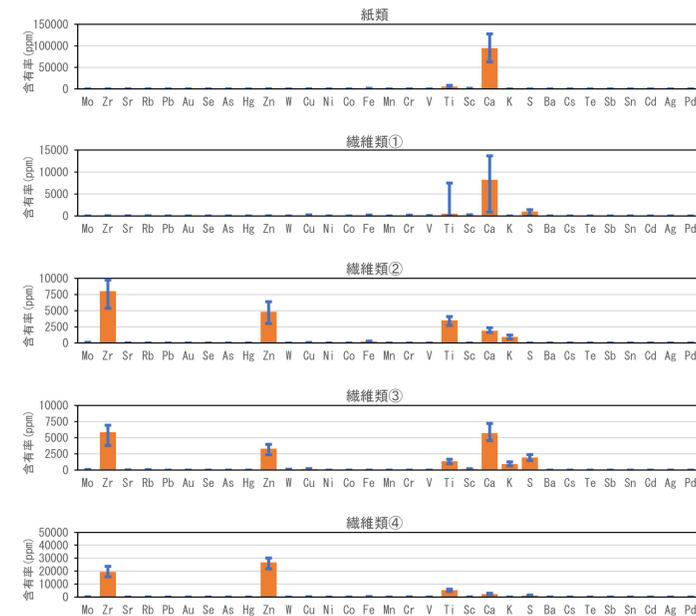
■ 主灰の環境安全性の向上に大きな効果があることを確認

■ 改質技術を総括し、導入ガイドラインの構成案を提示

5. 研究成果 5-1 成果の概要

サブテーマ2 有価／有害金属の由来廃棄物品目の特定と焼却主灰中の存在形態把握

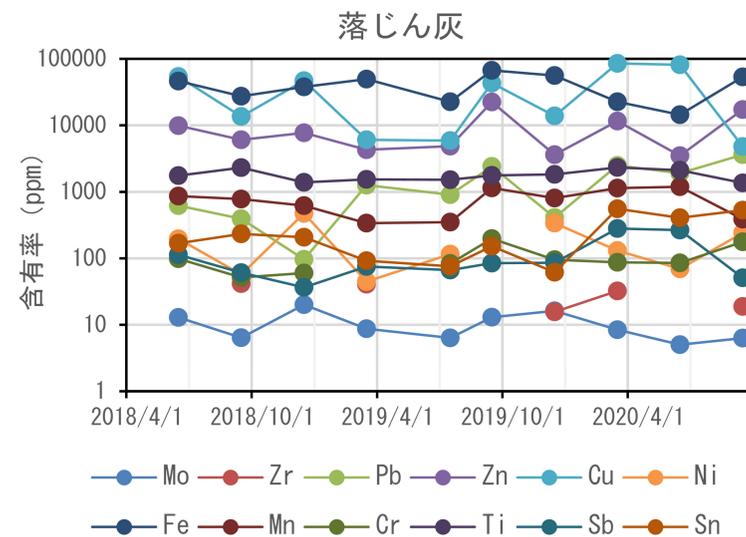
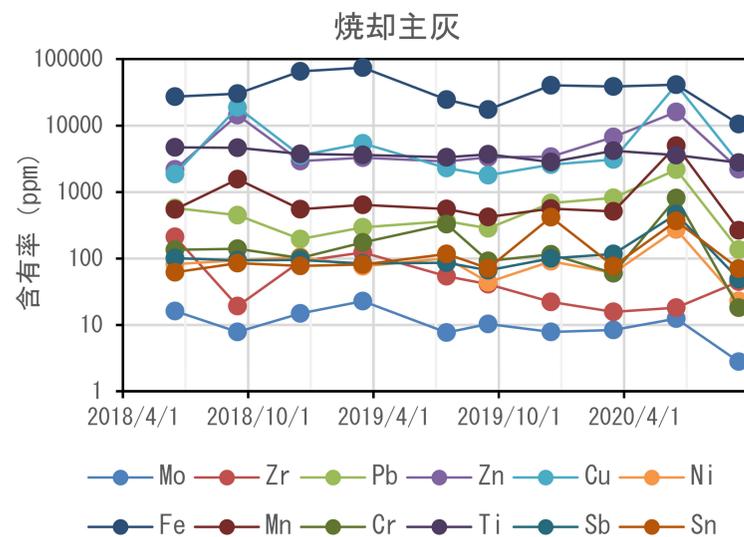
■ 焼却対象廃棄物の品目ごと金属含有量データを蓄積



■ 7種の主灰を粒度別、磁力別に元素・鉱物組成を調査

試料名	分画名	粒径							
		<0.063mm	0.063-0.125mm	0.125-0.25mm	0.25-0.5mm	0.5-1mm	1-2mm	2-5mm	5mm<
WR1	MS 磁力選別								
	R 残渣								
WR2	磁力選別								
	残渣								
WR3	磁力選別								
	残渣								
WR5	磁力選別								
	残渣								

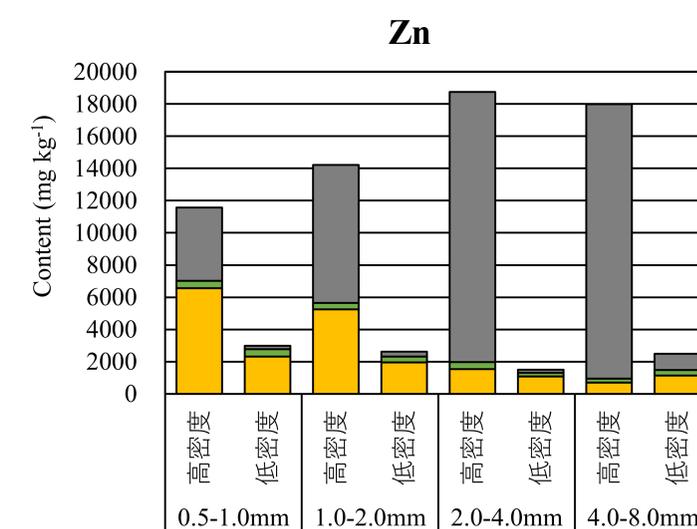
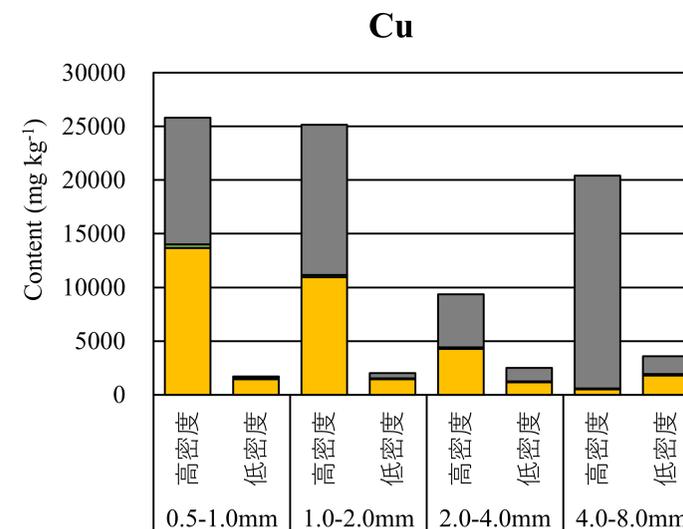
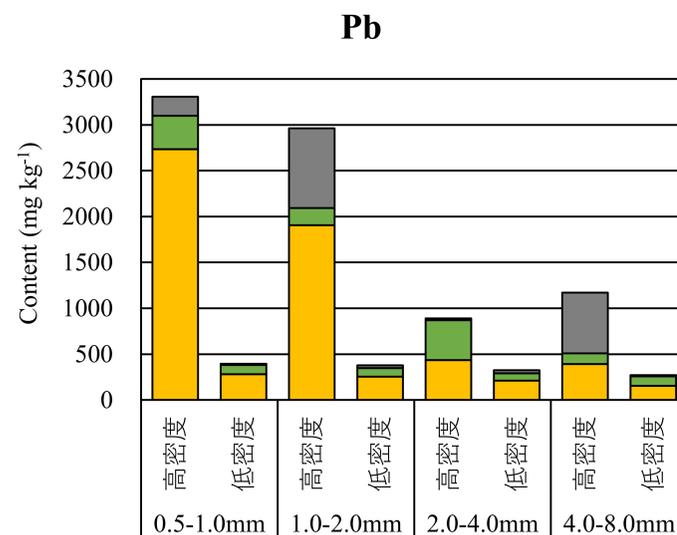
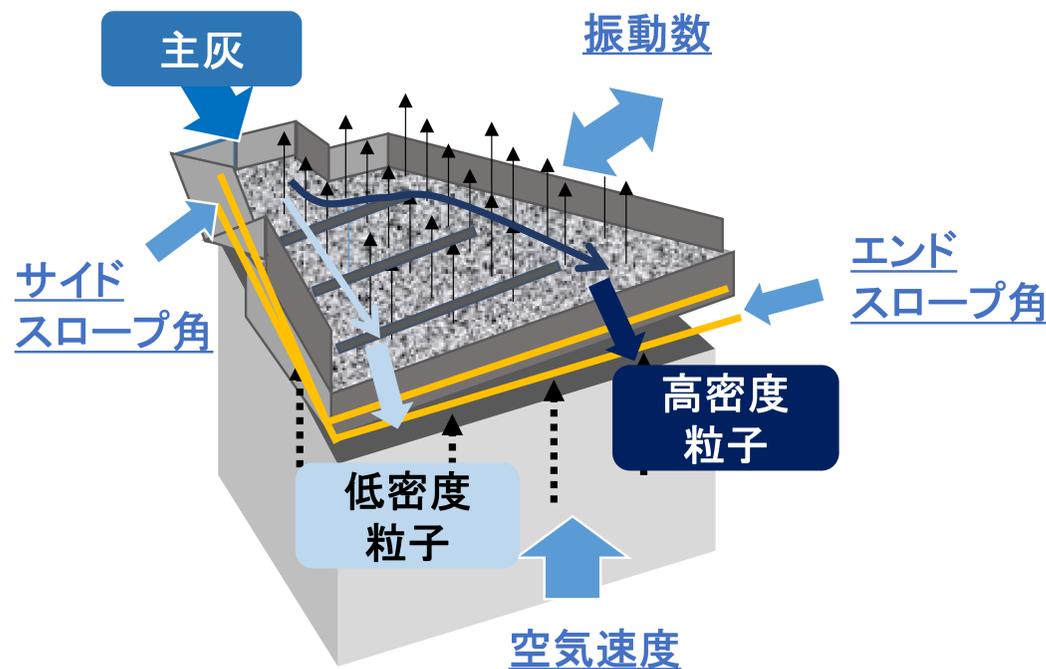
■ 焼却主灰と落じん灰の金属組成の月間変動を調査



■ 落じん灰分離等による有害金属削減効果を評価

5. 研究成果 5-1 成果の概要

サブテーマ3 エアテーブル選別を用いた粒径ごとの有価／有害金属回収技術研究

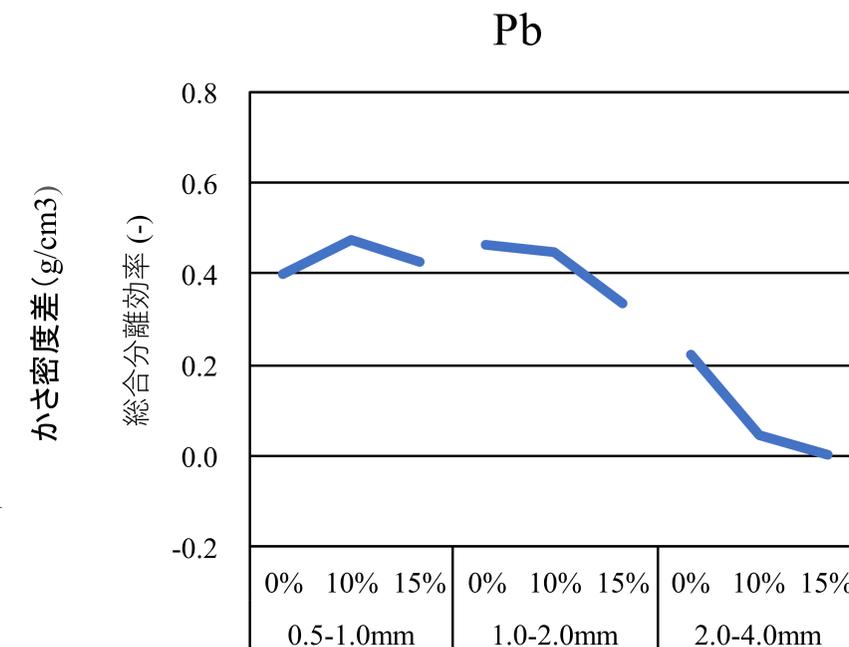
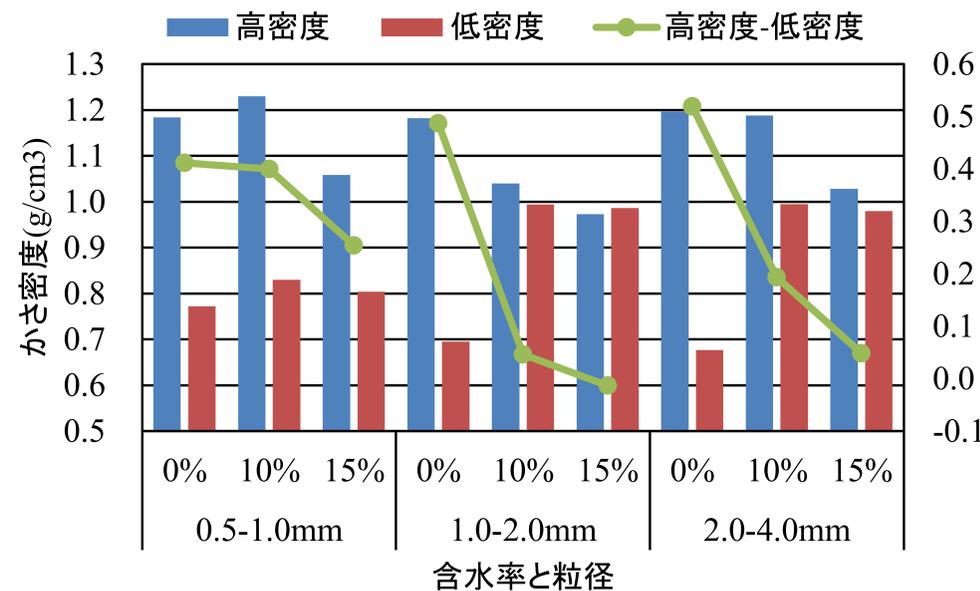


■ 篩下-王水分解 ■ 篩下-アルカリ融解 ■ 篩上-王水分解

■ 有価・有害金属は各粒径で高密度側に濃縮。各ファクターの影響を詳細評価。

■ 金属の随伴挙動を評価

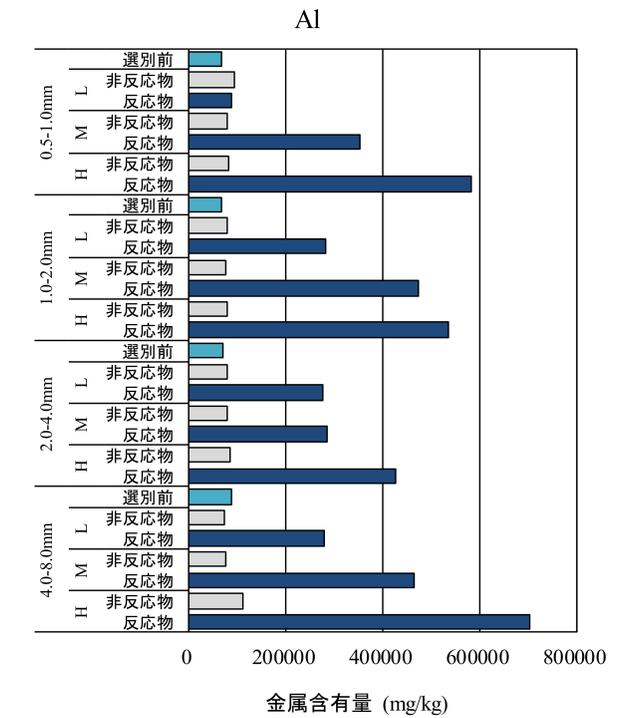
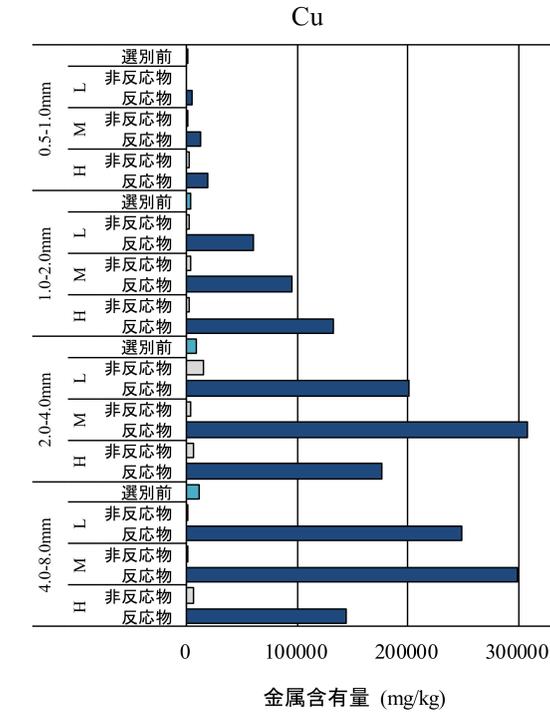
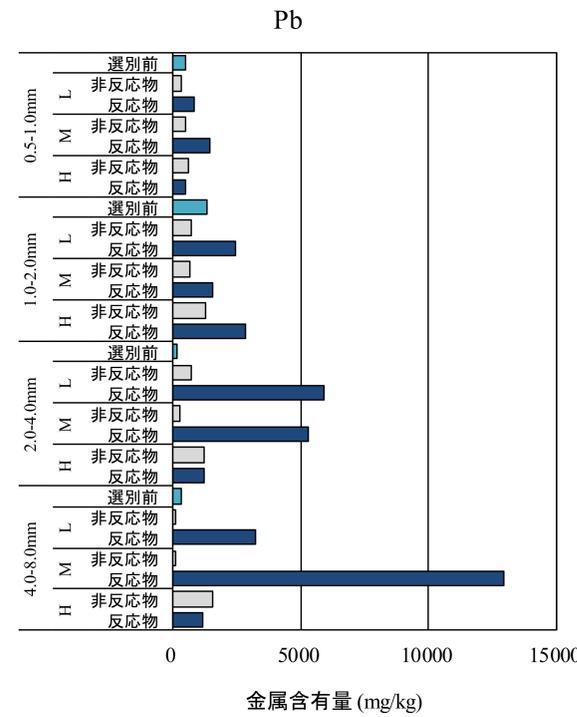
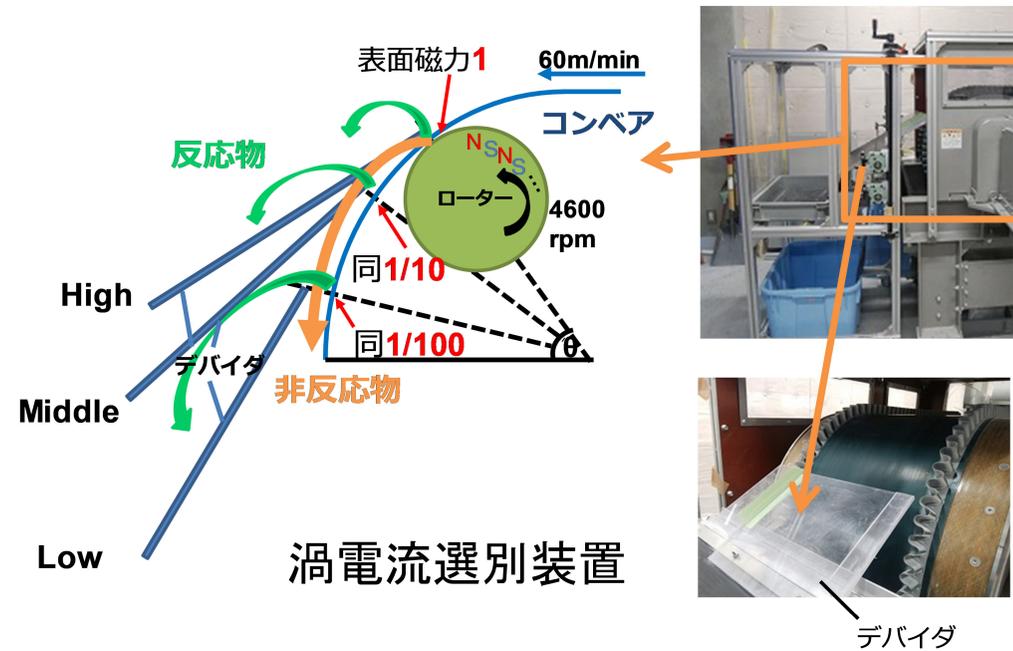
	Pb	Cu	Zn	Al	Cr	Fe	Ca	As
Pb	1.00							
Cu	0.96	1.00						
Zn	0.90	0.92	1.00					
Al	0.31	0.31	0.54	1.00				
Cr	0.78	0.76	0.80	0.39	1.00			
Fe	0.72	0.70	0.63	0.39	0.71	1.00		
Ca	-0.41	-0.44	-0.29	0.18	-0.24	-0.51	1.00	
As	0.28	0.28	0.13	-0.12	0.24	0.56	-0.60	1.00



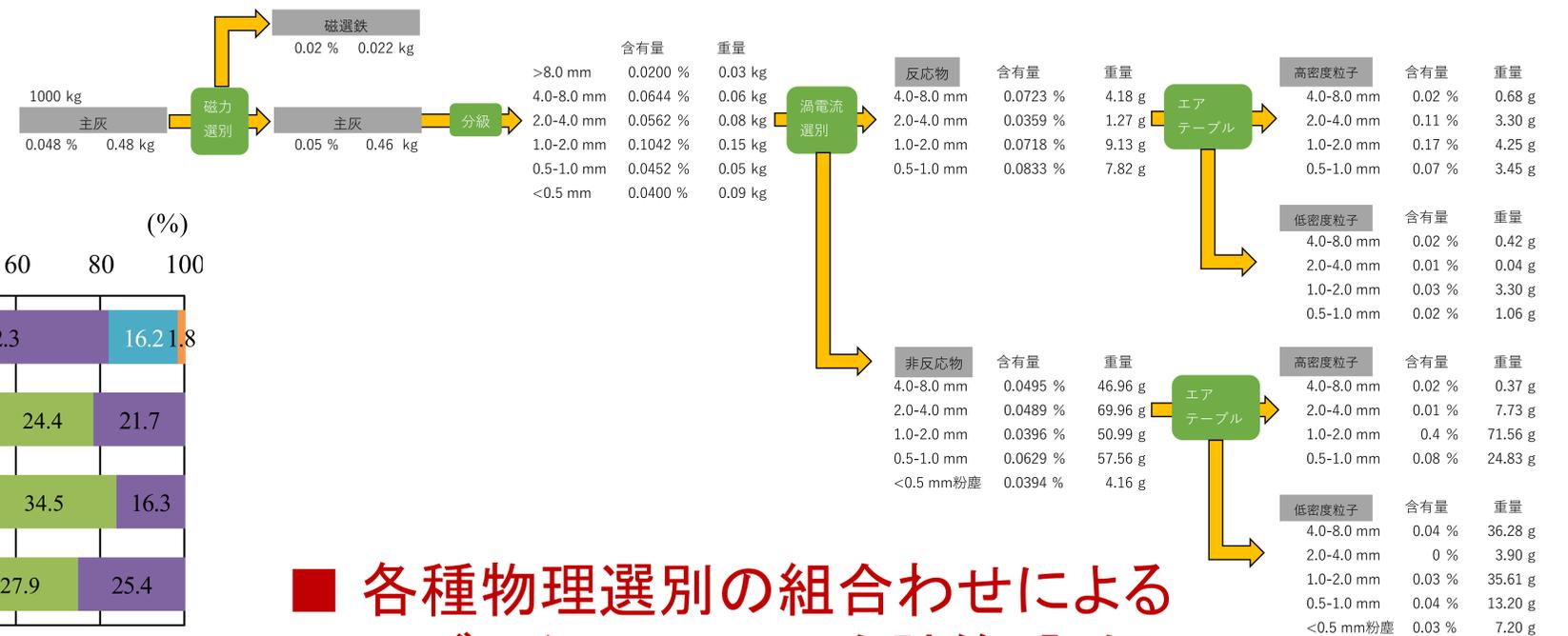
■ 焼却主灰含水率による分離効率の低下の粒度依存性を確認

5. 研究成果 5-1 成果の概要

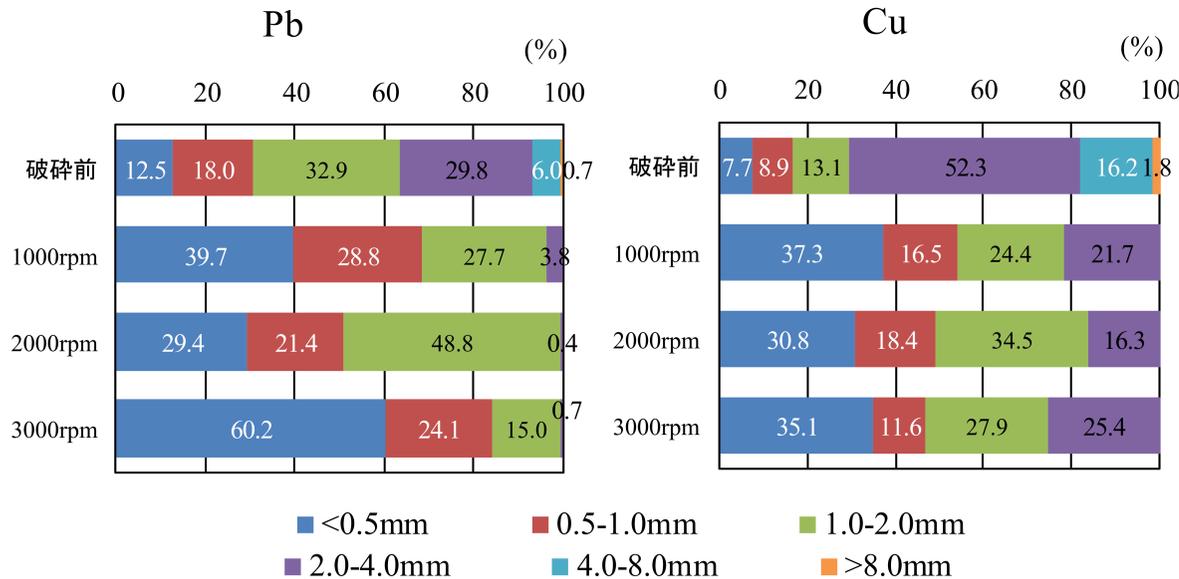
サブテーマ3 エアテーブル選別を用いた粒径ごとの有価／有害金属回収技術研究



渦電流選別、破碎選別による各金属の分離性を検討



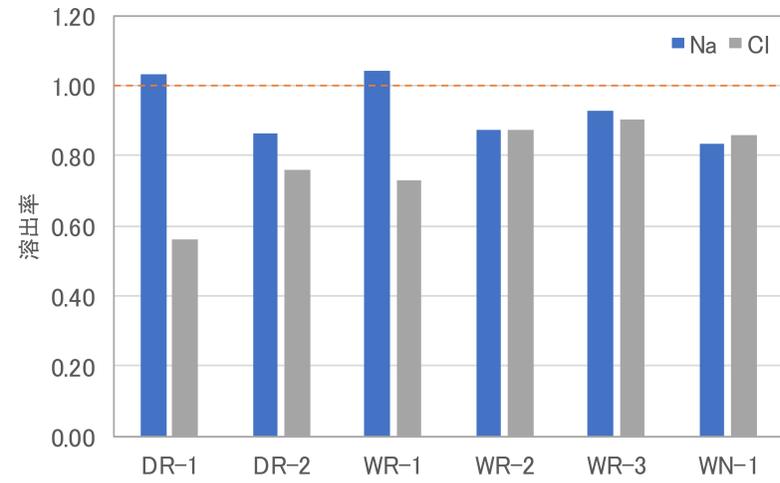
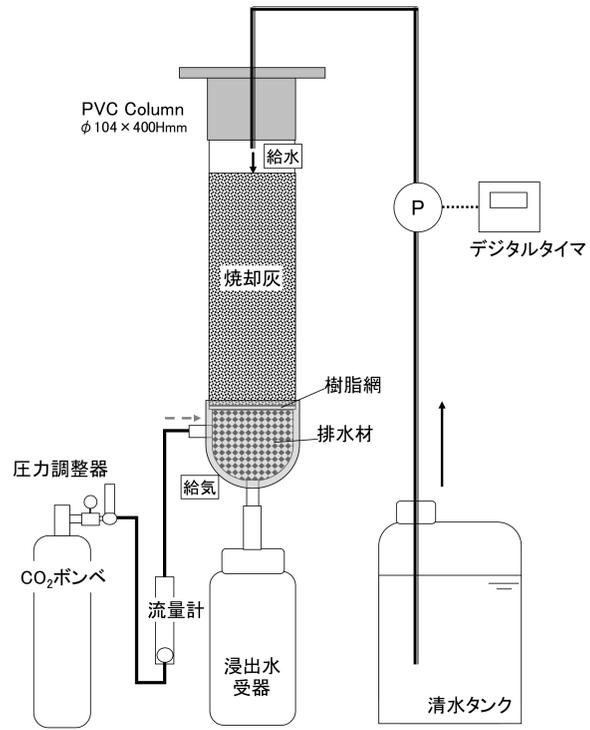
破碎選別装置



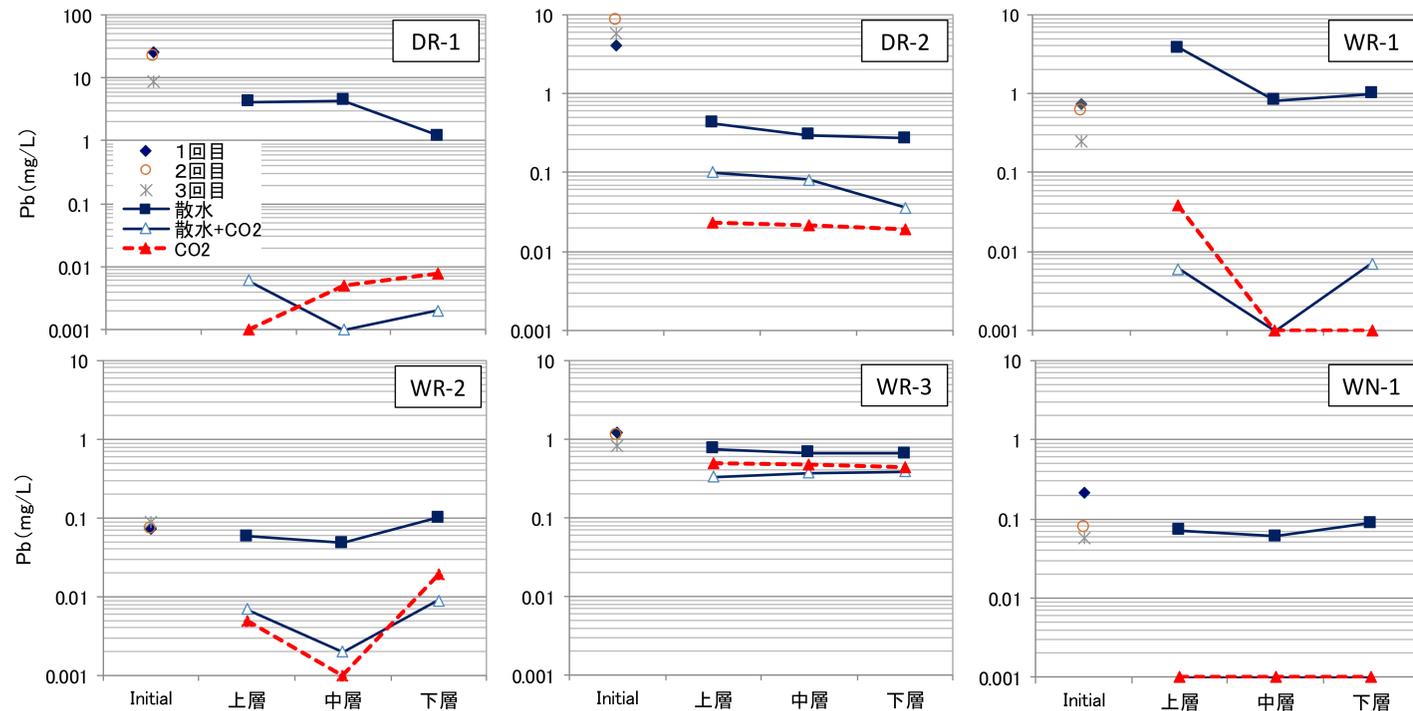
各種物理選別の組み合わせによるサブスタンスフローを計算・評価

5. 研究成果 5-1 成果の概要

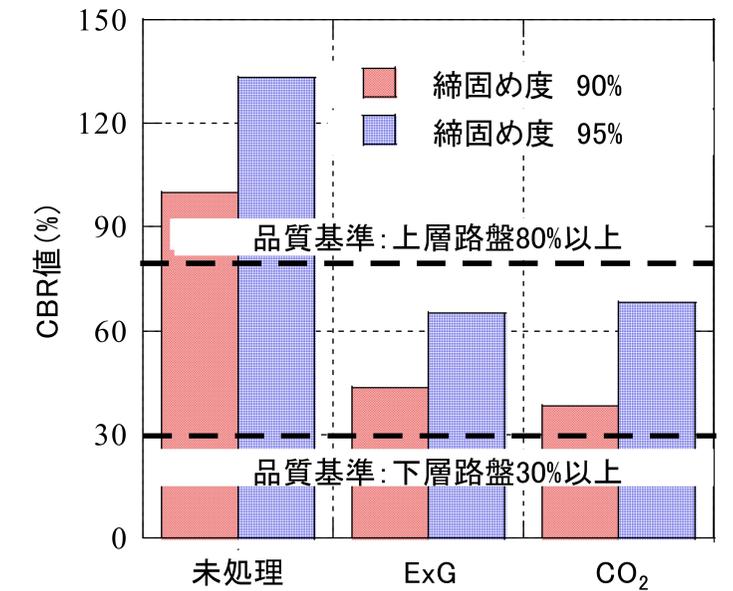
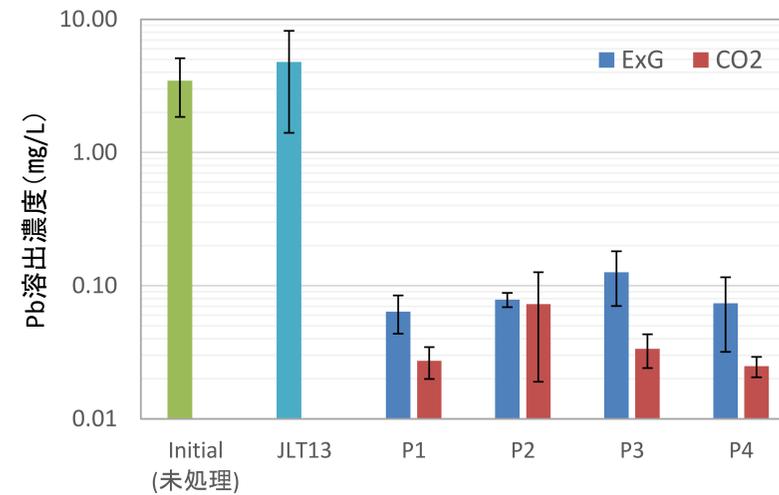
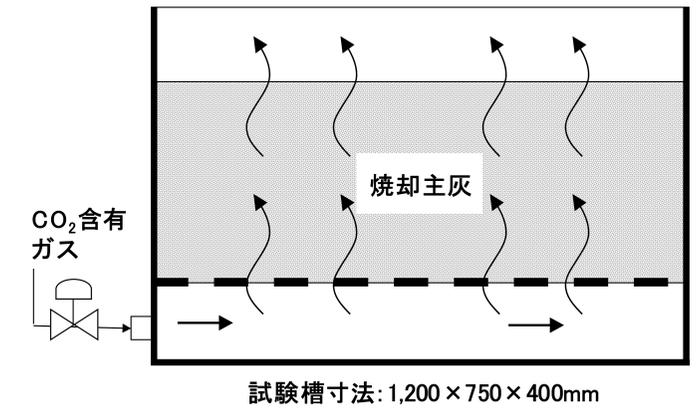
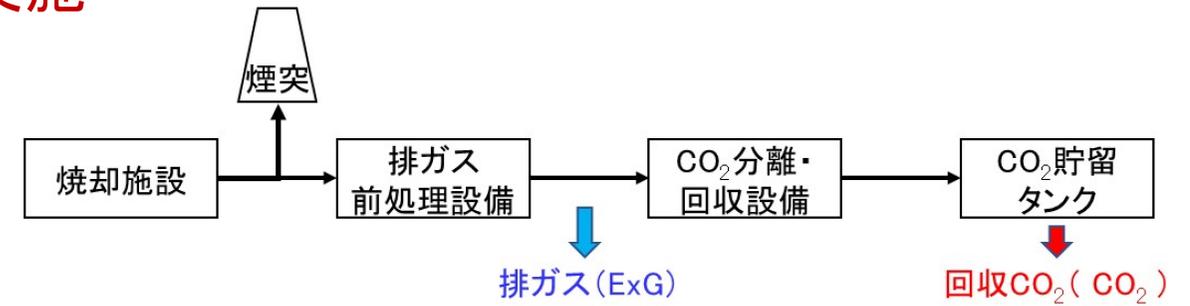
サブテーマ4 脱着式コンテナを用いたオンサイトエージング技術の確立



■ 焼却主灰6種をカラム装置を用いて散水・炭酸化し、溶出低減等を確認



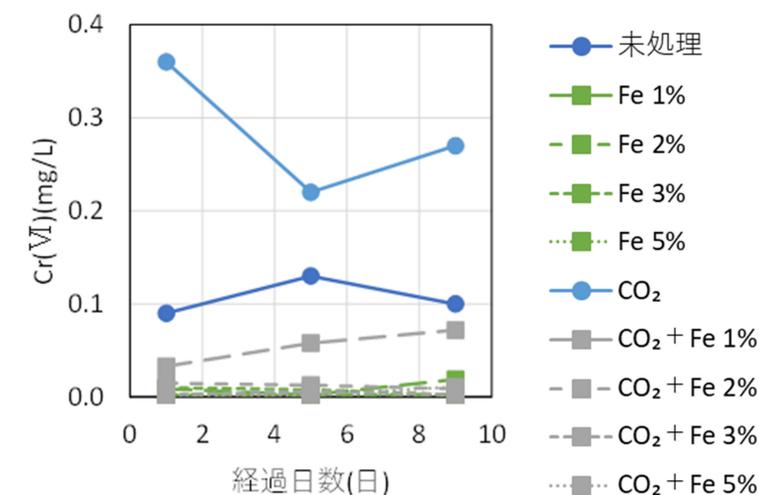
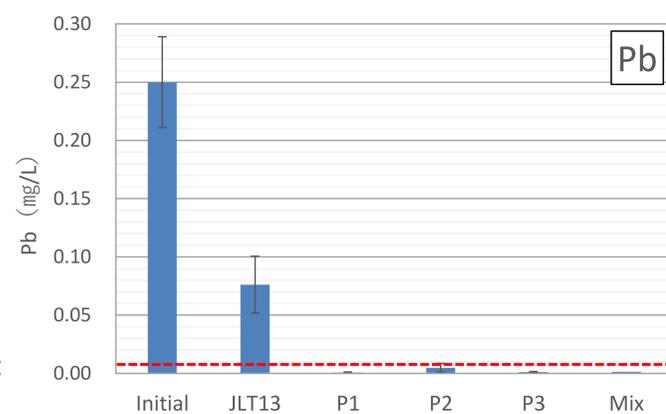
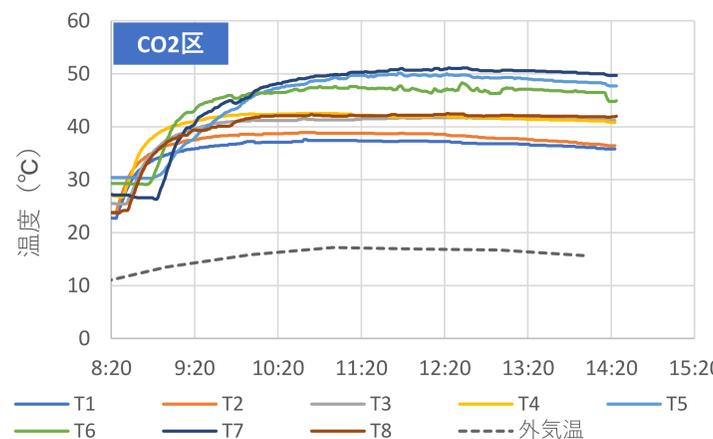
■ 実際の清掃工場で回収されたCO2による炭酸化処理を実施



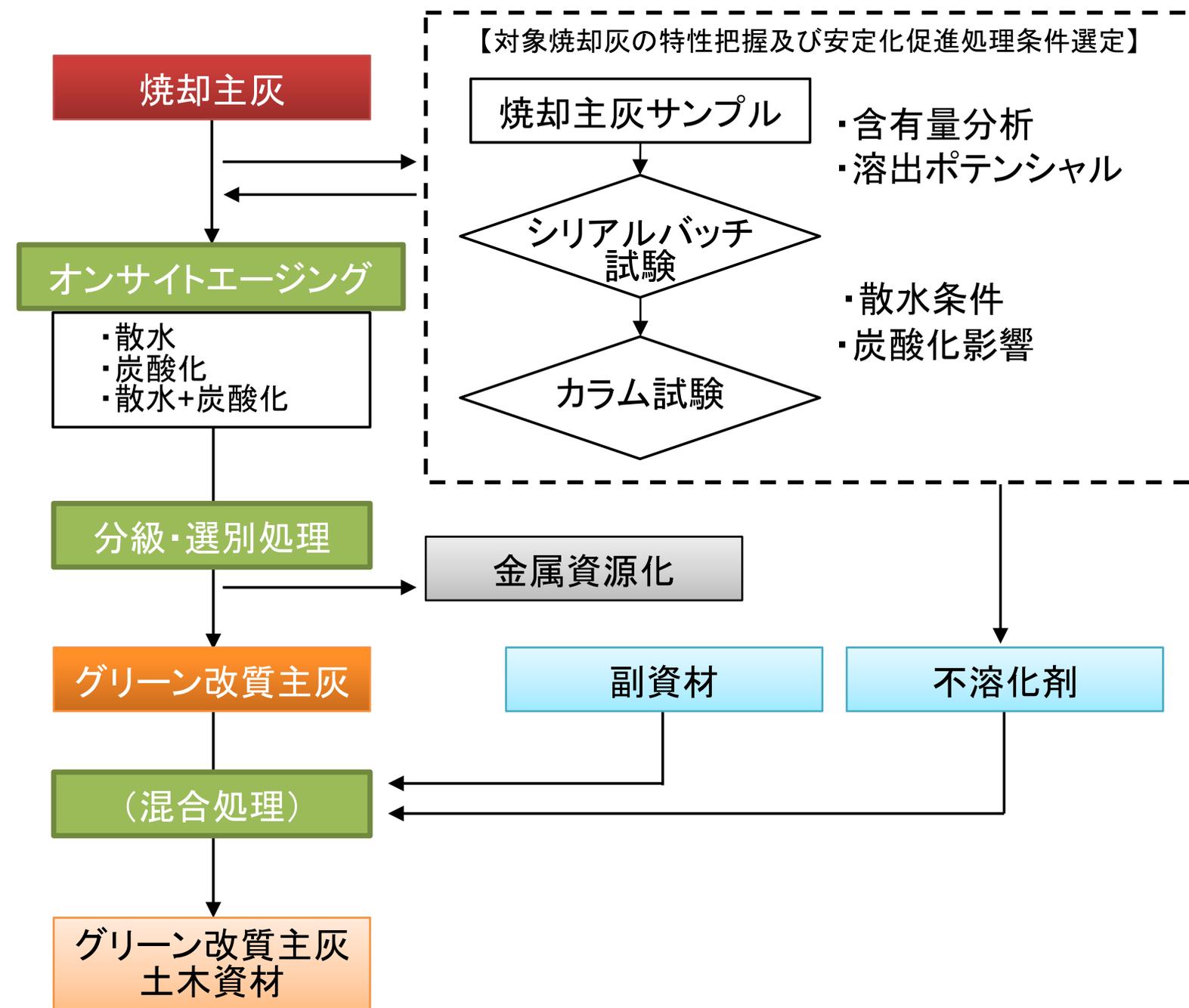
5. 研究成果 5-1 成果の概要

サブテーマ4 脱着式コンテナを用いたオンサイトエージング技術の確立

■ 実スケール (8 m³コンテナ)にて促進エージングを実施



■ 鉄剤による炭酸化時Cr(VI)溶出抑制対策とその長期安定性相乗効果を確認



■ 焼却主灰のグリーン改質技術適用フローを提示

5-2 環境政策への貢献

＜行政等が既に活用した成果＞ 特に記載すべき事項はない。

＜行政等が活用することが見込まれる成果＞

(1) 物理選別等による焼却主灰からの有価金属の回収と有害金属の排除

都市ごみ焼却主灰にエアテーブル選別等の物理選別を適用することにより、0.5-10 mm程度の比較的小さな粒度画分に含まれる有価金属を効果的に回収できると同時に、有害金属を効果的に排除できる。有価金属の回収・売却により廃棄物処理処分費用を低減可能であり、有害金属の排除により、焼却主灰の環境安全性を向上できる。また、落じん灰を分離排出することによっても、有価金属回収・有害金属排除を進めることが可能であり、これらの手法を駆使して、焼却主灰の品質向上とコスト圧縮を図ることが望まれる。

(2) オンサイト促進エージングによる有害金属の効率的な溶出抑制

都市ごみ焼却主灰に散水・CO₂吹き込みによる促進エージングを施すことにより、有害金属の溶出を抑制し環境安全性を高められる。本研究課題のサブテーマ4では、全国から採取した6種類の焼却主灰に対して散水・CO₂吹き込みによる促進エージングを実施し、最も懸念される有害物質である鉛の溶出抑制に効果があることが確認できた。ただし、六価クロムの溶出を抑制するための副資材の添加が必要となる場合があり、留意することが必要である。

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文 13件（以下は主要なもの）

- 1) Sakanakura H, Back S, Naruoka T. (2019) Contribution of Each Combustible Waste to the Element Content of MSW Incinerator Residue. Earth Environ. Sci. 265 012003.
- 2) Back S., Sakanakura H. (2020) Inventory of twenty-six combustible wastes as sources of potentially toxic elements: B, Cr, Cu, Zn, As, Sb, Ba, and Pb, J Material Cycles Waste Manage, 23, 664-675.
- 3) 飯野成憲, 辰市祐久, 肴倉宏史: 廃棄物資源循環学会論文誌, 31巻, 98-107 (2020), エアテーブル選別における都市ごみ焼却主灰中の金属の選別特性
- 4) Back S., Ueda K., Sakanakura H. (2020) Determination of metal-abundant high-density particles in municipal solid waste incineration bottom ash by a series of processes: Sieving, magnetic separation, air table sorting, and milling, Waste Management, 112, 11-19.
- 5) Back S., Sakanakura H. (2021) Distribution of Recoverable Metal Resources and Toxic Elements in Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash Depending on Particle Size and Density, Waste Manage, 126, 652-663.
- 6) 久保田洋、繁泉恒河、肴倉宏史、佐藤研一 (2019) 焼却主灰早期安定化のための散水処理と鉛不溶化処理の組合せ検討: 廃棄物資源循環学会論文誌、Vol.30, pp.48-61.
- 7) Fujikawa T., Sato K., Koga C., Sakanakura H. (2020) Effect of aging days on material characteristics and leaching properties of recycling incineration bottom ash from municipal solid waste, Waste and Biomass Valorization, 11(12), 7097-7107.
- 8) 繁泉恒河、久保田洋、高地春菜、佐藤研一、藤川拓朗、永山陽裕、肴倉宏史、藤田大吾 (2020) 清掃工場の排ガス・回収CO2を用いて促進炭酸化処理を施した焼却主灰の溶出および力学特性, 廃棄物資源循環学会論文誌, Vol.31, pp.116-130 <廃棄物資源循環学会論文賞受賞>
- 9) 久保田洋、繁泉恒河、永山陽裕、藤川拓朗、古賀千佳嗣、佐藤研一、肴倉宏史 (2020) 一般廃棄物焼却主灰の土木資材化に向けた散水・炭酸化処理による力学・溶出特性への影響と鉄剤および副資材の活用検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.15, No.3, pp.573-580

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表(査読なし)	9件
口頭発表(学会等)	25件
「国民との科学・技術対話」の実施	16件
マスコミ等への公表・報道等	0件
本研究に関連する受賞	2件