Environment Research and Technology Development Fund

# 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

3-1804 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

平成30年度~令和2年度

# 英文課題名

Establishment of "Bottom Ash Green Reforming Technology" Combining Physical Sorting and Aging Processes

# <研究代表機関> 国立研究開発法人国立環境研究所

# <研究分担機関> 鳥取県衛生環境研究所 福岡大学

# <研究協力機関> (株)フジタ 公益財団法人廃棄物・3R研究財団 東京都環境科学研究所

○図表番号の付番方法について
 「Ⅰ.成果の概要」の図表番号は「0.通し番号」としております。なお、「Ⅱ.成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。
 「Ⅱ.成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号.通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和3年5月

目次

I.	成果の概要	$\cdots 1$	
	1. はじめに (研究背景等)		
	2. 研究開発目的		
	3. 研究目標		
	4. 研究開発内容		
	5. 研究成果		
	5-1. 成果の概要		
	5-2.環境政策等への貢献		
	5-3.研究目標の達成状況		
	6. 研究成果の発表状況		
	6-1. 査読付き論文		
	6-2. 知的財産権		
	6-3. その他発表件数		
	7. 国際共同研究等の状況		
	8. 研究者略歴		
П	・成果の詳細		
	Ⅱ-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	••••• 1	9
	(国立研究開発法人国立環境研究所)		
	要旨		
	1. 研究開発目的		
	2. 研究目標		
	3. 研究開発内容		
	4. 結果及び考察		
	5. 研究目標の達成状況		
	6. 引用文献		
	<ul> <li>Ⅱ-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</li> <li>(鳥取県衛生環境研究所)</li> </ul>	<b>室 ・・・・・</b> 3	3
	要旨		
	1. 研究開発目的		
	2. 研究目標		
	3. 研究開発内容		
	4. 結果及び考察		
	5. 研究目標の達成状況		
	6. 引用文献		
	<ul> <li>Ⅱ-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</li> <li>(国立研究開発法人国立環境研究所)</li> </ul>	••••• 4	5

# 要旨

- 1. 研究開発目的
- 2. 研究目標
- 3. 研究開発内容
- 4. 結果及び考察
- 5. 研究目標の達成状況
- 6. 引用文献

Ⅱ-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	$\cdots \cdots 5 9$
(福岡大学)	
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細 ・	$\cdots$ 75
IV. 英文Abstract ·	••••• 80

### I. 成果の概要

課題名 3-1804 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

課題代表者名 肴倉宏史(国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 室長)

重点課題 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

行政要請研究テーマ(行政ニーズ) 非該当

研究実施期間 平成30年度~令和2年度

研究経費

(千円)

	契約額	実績額 (前事業年度繰越分支出額含む)
平成 30 年度	17, 863	17, 890
令和1年度	17, 952	17, 221
令和2年度	16,095	16, 257
合計額	51, 910	51, 368

本研究のキーワード 焼却主灰、金属回収、有害金属、土木資材、物理選別、エアテーブル、エージ ング、炭酸化、環境安全性

研究体制

- (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 (国立研究開発法人国立環境研究所)
- (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 (鳥取県衛生環境研究所)
- (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 (国立研究開発法人国立環境研究所)
- (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 (福岡大学)

研究協力機関

(株)フジタ

公益財団法人廃棄物·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)

わが国では3Rが進展し、一般廃棄物の総排出量(44百万トン:H27年度、環境省一般廃棄物処理実態 調査に基づく。以下同じ)はH12年度から約2割減少し、最終処分量(H27年度:4.2百万トン)は、よ り顕著に、約6割減少した。その間、総排出量に対する焼却率は76~79%で高止まりが続いており、最 終処分に占める焼却残渣の割合は54%から76%へ上昇した。これらの数値から明らかなように、焼却残 渣は今日の一般廃棄物処理における最大の課題であり、特に最終処分場を持たず長期的な見通しが不 透明な自治体にとっては、適切かつ有効な選択肢を一つでも多く持つことが渇望されている。

先行研究「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」(環境研究総合推進費、H26-28年度実施、代表:看倉、分担:成岡・佐藤)では、焼却残渣全体の約70~80%を 占める焼却主灰は、飛灰や落じん灰(焼却炉火格子から落下した残渣)等と比較して有害金属の含有量 が低く、エージング等の処理をすれば土木資材利用できる可能性が高いことが示された。また、欧州で はエアテーブル等を用いて焼却主灰から貴金属を選別回収する資源化施設が急速に拡がっていること を把握した。このプロセスは、鉛等の有害金属も付随して除去される可能性がある。さらに、焼却残渣 中の鉛は主にビニール・樹脂類等の特定の廃棄物に由来する可能性が示唆された。以上のように、特に 発生割合の大きい焼却主灰の資源化に繋がる多くの知見が蓄積された。

# 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。具体的には、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(メッシュ状のテーブルを傾斜させ、下から空気を吹き込みながら振動させて行う乾式比重選別装置)等を用いた物理選別と、エージング(ある温度・水分・ガス条件で灰を一定期間養生し安定化する処理方法)を組み合わせた改質技術の確立を目指すこととした。これらの技術は焼成や溶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。そこで本研究にて確立を目指す、環境負荷の低い改質技術を「グリーン改質技術」と呼び、有用な技術システムとして提示することを目指すこととした。

# 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	
サブテーマリー	一 肴倉宏史/国立研究開発法人国立環境研究所	
ダー/所属機関		
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。	

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
サブテーマリー	成岡朋弘/鳥取県衛生環境研究所
ダー/所属機関	
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。

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		
サブテーマリー	飯野成憲/国立研究開発法人国立環境研究所		
ダー/所属機関			
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
サブテーマリー	佐藤研一/福岡大学
ダー/所属機関	
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

本研究の最終目標は、現在の主たる最終処分廃棄物である焼却主灰を対象に、「グリーン改質技術」 を確立する(サブテーマ2~4)とともに、この技術を鍵として、自治体ごとの制約条件(地域特性)に 応じて、土木資材化、セメント原料化、最終処分等の適切な方策を提示する(ST-1)ことである。「グ リーン改質技術」とは、有価有害金属の由来等の特定(ST-2)に基づき、物理選別によって金属量を低 減し(ST-3)、エージングによって溶出性や物理的な安定性の向上を図る(ST-4)一連の工程を呼ぶ。

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:焼却残渣の資源化の 現状を環境省全国一般廃棄物処理実態調査データに基づき整理するとともに、グリーン改質化の環境負 荷について、溶融スラグ化、セメント原料化、最終処分等と比較評価し、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として含有量基準と溶出量基準を設定し、実際に焼却主灰 に対してエアテーブル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した。目標品質の達成可 能性について検討を行い、グリーン改質技術の今後目指すべき方向性を考察した。また、廃棄物・3R研 究財団 ブレークスルー促進事業「地域特性に即した焼却主灰の資源化・リサイクルに関するスキーム構 築」との共同での研究実施体制を構築し、焼却プラントメーカー参画の元、アドバイザリー会合等を実 施し研究の社会実装化について議論を重ねた。

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:焼却主灰中の 各元素の由来を明らかにするため、インプットである焼却対象廃棄物の品目ごとに蛍光X線分析を実施 した。主灰中の金属の含有量及び存在形態を明らかにするため、発生元の異なる7種の焼却主灰の金属含 有量分析やX線回折測定等を実施した。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:焼却主灰は金属 粒子、ガラス・陶磁器類、焼却灰粒子等の混合物である。そこで物理選別方法として、エアテーブル選 別、渦電流選別、破砕選別を対象として、焼却主灰へ適用するための条件の最適化と効率を把握するた めに、磁選や分級などの前処理条件、空気量、斜度、ディバイダー位置等の選別条件を詳細に検討し、 これらの結果を総括することにより、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:本技術はアーム車の脱着 式コンテナ(約8 m<sup>3</sup>)を改造したものに焼却主灰を入れ、散水とCO<sub>2</sub>を富化したガスを通気して灰を安定 化するものである。本研究では全国6施設の焼却主灰の物理・力学・溶出特性を調べ、オンサイトエー

3

ジング技術として散水・炭酸化処理を行った際の溶出挙動をカラム試験にて検証した。佐賀市清掃工場のCCUプラントからの回収CO<sub>2</sub>や排ガスを用いて、現地にて炭酸化処理を行い、それら改質灰の土木資材として性能評価や、長期溶出性の評価を行った。また実規模のコンテナを用いてオンサイトエージング技術の実証試験を行い、散水による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。

さらに、サブテーマ1から4の連携により、エージング⇒エアテーブル、エージング⇒渦電流、エアテ ーブル⇒エージング、渦電流⇒エージングなど条件を変えて改質処理を実施し、金属含有量、溶出量、 物理・力学特性等への影響について評価を実施し、グリーン改質技術は焼却主灰の環境安全品質向上に プラスの効果を与えることを確認した。

#### 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

本研究課題は公益財団法人廃棄物・3R研究財団における廃棄物・3R技術ブレークスルー促進事業「地 域特性に即した焼却主灰の資源化・リサイクルに関するスキーム構築」(焼却プラントメーカー3社が参 加)との連携によるコンソーシアム型の研究体制を構築することにより、調査研究の遂行において実務 者からの助言を直接的に得ることが可能となり、社会実装に向けて研究を効率的に進めた(図1-1)。



図1-1 当該推進費におけるコンソーシアム型の研究スキームの構築

焼却主灰、溶融スラグ等の熱処理残渣の資源化等に影響を及ぼす要因について、環境省一般廃棄物処 理実態調査結果を元に、解明を試みた。熱処理残渣が発生しているのは1641市区町村中、185市区町村は 熱処理残渣を全量資源化している一方で、資源化率0%の市区町村は829を数えた。各市区町村で最も多い 資源化方法の分布(図1-4)を見ると、溶融スラグ化は東海・北陸以東の本州にやや多いなどの地域性が 確認された。委託による最終処分を行っている市区町村も多い。全国の熱処理残渣の資源化率は29.3%で あり、資源化では溶融が12.7%、セメント原料化が9.7%を占め、グリーン改質技術と最も近い「造粒・破 砕」を含む「その他資源化」も4.2%を占めている(図1-5)。資源化率は人口10-30万人規模が最大で、 100万人以上と1万人未満が低い。一人当たりの最終処分場残余容量は、資源化等の状況の相違が最も顕 著に現れた。すなわち、0~0.35 m<sup>3</sup>人の資源化率は46%である一方、1 m<sup>3</sup>人以上では11%であった。



図1-4 熱処理残渣の主要な資源化方法の分布

地域特性に応じたグリーン改質技術適用性について、 輸送コスト、処理コスト、有用金属の回収による自治体の 便益に着目し、落じん灰を含む都市ごみ焼却主灰の有効 利用計画を提示することを試みた。物理選別やエージン グ処理を主体とした焼却主灰の資源化フローを想定した

(図1-6)。都市ごみ焼却主灰の輸送コスト、処理コスト、 落じん灰等の売却による便益に着目し、都市ごみ焼却主 灰等の発生量、各施設の受入能力を推計し、地域特性に応 じた処理方法と処理先を計算に基づき提示した。主な結 果として、灰粒子の年間受入能力約147万tに対し推計発 生量は約242万tであること、損益分岐点となる輸送距離 は114kmであること、最適な資源化施設は都道府県によっ て異なること等を示した(図1-10)。



図1-5 各要因別の資源化等の割合



図1-6 都市ごみ焼却主灰等の資源化フロー

焼却主灰グリーン改質技術の環境負荷の指標として温室効果ガス(GHG)排出量に着目し、グリーン改 質(物理選別+エージング)、セメント原料化、埋立処分、および、集約型還元溶融との比較評価を行 った。その結果、グリーン改質技術はセメント原料化と同等程度のGHG排出量となり得ることが示された (図1-12)。GHG排出量に大きな割合を占める項目は還元溶融プロセス、セメント原料、金・銀鉱石であ った。ただしこれらの結果は不確定要素が大きく、数値の精度向上が必要である。輸送距離についても 結果に影響を及ぼす。GHG排出量はシステム境界にも大きく依存するため、さらに適切な評価を行うため の検討を重ねる必要がある。

グリーン改質技術によって処理されて得られる「グリーン改質主灰」が土木資材として備えるべき物 理・力学特性と環境安全性に関する品質基準を検討した。用途としては、市町村や都道府県が公共工事 で利用することを念頭に置き、路盤材または盛土材とした。物理・力学特性は、路盤材は修正CBR値、盛 土材は一軸圧縮強さを文献に基づき設定した。環境安全品質は、土壌汚染対策法を参考に、含有量基準 および溶出量基準と同等の値とし、項目は重金属等に限定することとした。



図1-12 GHG排出量試算結果の例

埋立処分

集約型 還元溶融

セメント原料化

グリーン改質

サブテーマ3および4と連携して、1つの焼却主灰に対して物理選別(エアテーブル選別、渦電流選別) とエージング(炭酸化)を連続して行い、焼却主灰中の重金属含有量と溶出量の改善効果について検討 を行った。物理選別は含有量の低減に、エージング処理は溶出量の低減に効果を発揮することが期待さ れる。処理した灰に対して、含有量評価として、王水抽出とアルカリ溶融法による全含有量分析、なら びに1規定塩酸抽出による含有量試験等を行った。また、溶出特性評価として、環境庁告示13号溶出試験 および、屋内小型ライシメーター試験を行った。全含有量は、FeとCrは、磁選によって40%程度低下した。 CuとPbはエアテーブル選別が低い結果が得られた。1規定塩酸抽出によるPbの抽出量は、土壌含有量基準 150 mg/kgを達成することは困難であり、金属様粒子の排除が重要であることとともに、粉砕されやすい 灰分粒子の由来となるPbの低減も必要であることが示唆された。溶出特性では、Pbについて、炭酸化に よる不溶化効果が長期的に持続することを確認できた。

焼却主灰グリーン改質技術の現状を総括して適切な方策を提示するとともに、導入を実現するための ガイドラインの構成案を提示した。ただし、含有量基準の目標品質を必ずしも達成できなかったこと等 を慎重に考慮し、ガイドラインは構成案の公表に留めることとした。構成案は本研究を通して取り組ん だ内容を網羅しており、また、その流れにそって理解することでグリーン改質技術を導入し、さらに改 善を図ることが可能なものとなっている。サブテーマ2から4では基準達成に繋がる多くの知見が蓄積し ており、その知見を十分に活用し、焼却主灰グリーン改質技術導入の実現を目指す必要がある。

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

有害金属の由来となる廃棄物の品目の特定を目指して、焼却対象廃棄物の品目ごとの金属含有量デー タを収集した。まず、一般廃棄物の焼却処理施設Aにおいて、事業所の展開検査の際に焼却対象廃棄物を 分析試料として品目毎に分類して採取した。採取した試料は、品目毎に重量を測定した後、40℃で乾燥 させ、再び乾燥後の重量を測定した。乾燥後の試料を対象に、蛍光X線分析装置により、金属元素の含有 率を測定した。その結果、有価金属の含有が確認されたのは、金属非鉄類からの銅であった。また、有 害金属の高濃度の含有が確認されたのは、ゴム・皮革類であった。ゴム・皮革類には、64,000ppmのクロ ムが含有していた。当該試料は革製品であり、クロムなめし革であることが示唆された。石・陶磁類に は、45,000ppmの鉛が含有していた。当該試料は、黄色の陶器であり、黄色の顔料に鉛が含まれているこ とが示唆された。焼却対象廃棄物試料中の金属含有率を求めた結果廃棄物試料全体としてみた場合は、 有用金属については、銅が57ppm含有しており、有害金属としては、鉛が39ppm、クロムが530ppm含有す るという結果が得られた(図2-3)。





図 2-3 焼却対象廃棄物試料中の金属含有率

焼却対象品目が焼却主灰および落じん灰中の金属含有量や存在形態へ及ぼす影響を明らかにするた め、発生元の異なる7種類の主灰を対象に、含有量及び存在形態の分析を行った。焼却主灰の冷却方法や 不燃物の破砕残渣の焼却が焼却主灰の金属含有量や化合物に及ぼす影響について考察するために、焼却 後の主灰の冷却を水冷で行っている施設を5施設、空冷で行っている施設を2施設選定した。また、焼却 対象物に施設内で発生する不燃物破砕後の可燃性残渣を含めている施設はそのうちの6施設である。さ らに、金属の簡便な分離を目的として、磁力選別を行った場合の元素の分配について併せて分析した。 その結果、磁束密度約500mTのネオジム磁石により磁力選別された分画は全体の30~40%程度であった。 また、いずれの試料においても0.25mm以上の粒径において磁力選別される分画の割合が高く、0.25mm未 満の粒径では、ほぼ残渣が占めていた。金属含有量は、試料による差異は認められず、磁力選別、残渣

図2-8 含有量に対する各分画の寄与率(MS:磁着分、R:残渣分)

のそれぞれの分画でほぼ同様の傾向がみられた。磁力選別の分画では、Feの含有率が最も高く10<sup>4</sup>のオーダーであり、Zn、Ti、Pb、Cu、Baが10<sup>2</sup>~10<sup>3</sup>のオーダーで続いた。金属含有量の序列は、磁力選別の分画ではFe>Zn、Ti>Pb、Cu、Ba>Zr、Ni、Cr、Sb、Sn>Mn、残渣の分画ではFe、Zn、Ti>Pb、Cu、Ba>Zr、Ni、Cr、Sb、Sn>Mnであった。含有量に対する粒径別の各分画の寄与率を計算したところ、Pbは、概ね 全ての試料において残渣分画の寄与率が磁力選別分画に対して高く、Cuと比較して残渣分画の寄与率の 高さが明瞭であった。すべての粒径分画をまとめた含有量に対する寄与率を整理した(図2-8)。このう ちPbについては残渣分画の寄与率が高く、磁力選別によって4割~7割程度のPbを残渣分画に選別できる ことが示唆された。X線回折分析の結果、金属の結晶化合物としてHematite(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)が同定された(表2-3)。湿灰ではFriedel's salt(3CaO・Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・CaCl<sub>2</sub>・10H<sub>2</sub>O)が確認された。乾灰においては検出されな かった。一方で、乾灰ではPortlandite(Ca(OH)<sub>2</sub>)が検出された。その他、Katoite(Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>-x(OH)<sub>4</sub>x x=1.5-3)、Albite(NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)、Gehlenite(Ca<sub>2</sub>Al(AlSiO<sub>7</sub>))が検出された。

	WR1	WR2	WR3	WR5	WN1	DR1	DR2
Ettringite [3Ca0•Al <sub>2</sub> 0 <sub>3</sub> •3CaSO <sub>4</sub> •32H <sub>2</sub> 0]	-		0	-		-	
Friedel's salt [3Ca0 • Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> • CaCl <sub>2</sub> • 10H <sub>2</sub> O]	0	0	0	0	0	-	
Katoite [Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> -x(OH) <sub>4</sub> x x=1.5-3]	-			0	0	-	
Albite [NaAlSi <sub>3</sub> 0 <sub>8</sub> ]	-	0		-		-	
Portlandite [Ca(OH) <sub>2</sub> ]	-		-	-		0	0
Quartz [SiO <sub>2</sub> ]	0	0	0	0	0	0	0
Calcite [CaCO <sub>3</sub> ]	0	0	0	0	0	0	0
Gehlenite [Ca <sub>2</sub> Al(AlSiO <sub>7</sub> ) ]	0	0	0		0	-	0
Hematite [Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]	0	0	0	0	_	_	_

表2-3 同定された化合物組成

落じん灰の分離回収による焼却主灰の重金属削減効果の試算し、有害金属の排除方策としての検討を 行った。B施設における焼却残渣の各月の搬出量は、焼却主灰が最も多く150~200t前後、続いて固化飛 灰が70~150 t 前後であり、落じん灰は10t程度であった。Cu及びPbの含有率は落じん灰が焼却主灰より 高い傾向がみられた一方、Fe及びCrは明確な差異はみられなかった。最後に、落じん灰を分離回収する ことによる焼却主灰の重金属削減の効果について試算した結果、落じん灰の分離によってCuについては 5,400mg/kgから4,200mg/kgに、Pbについては350mg/kgから310mg/kgにそれぞれ減少し、低減効果が確認 された。



図2-12 4金属元素の焼却主灰と落じん灰の含有量の比較

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

エアテーブル選別前の焼却主灰の金属含有量を粒径別、分解方法別に分析し、Pb、Fe、Ca は篩下-王 水分解、As は篩下-アルカリ融解、Cu、Zn、Al では篩上-王水分解の割合が高いことを把握した。Pb、Fe、 Ca は微小粒子まで粉砕され王水に溶解されやすい形態の割合が高い一方、Cu、Zn、Al は微小粒子まで粉 砕されにくく、王水に溶解されやすい金属形態の割合が高い。Al は篩下試料も篩上試料と同等程度の Al が含まれていることから、金属態だけでなく、元々の形態が酸化物である Al や焼却過程で酸化物態に変 化した Al も一定程度含まれていると考えられた。



図3-2 主灰エアテーブルの構造及びパラメーター

エアテーブル選別を適用し、高密度粒子の粒子密度と金属含有量の関係を調査した。エアテーブル選別には日本エリーズマグネチックス㈱製、ポケットエアテーブルを使用した(図 3-2)。主灰の投入速度と排出速度を可能な限り等しくするため、振動数、エンドスロープ角、空気速度における主灰排出量から振動フィーダーの強度を決定した。その結果、0.5-1.0 mm、1.0-2.0 mmの粒径画分では粒子密度の増加に伴い Pb、Cu、Zn の金属含有量は増加する一方、Ca ではやや減少する傾向が確認された(図 3-3)。A1、Cr、Fe は粒子密度による変化は小さく、As は明確な傾向は確認されなかった。また、いずれの金属も2.0-4.0 mm、4.0-8.0 mmの粒子では粒子密度と金属含有量に明確な関係は確認できなかった。



図3-3 高密度粒子の粒子密度と金属含有量の関係(0.5-2.0mm)

高密度粒子と低密度粒子の粒子密度の差の増加に伴い効果的に高密度粒子と低密度粒子が選別され るという仮説を立て、両者の粒子密度差と総合分離効率によって整理した。その結果、0.5-2.0 mmのPb、 Cu、Zn、Cr、Feでは粒子密度差の増加に伴い総合分離効率が向上するが、うち、Cr、Feの総合分離効率 は低かった。A1、Ca、Asは粒子密度差によらず総合分離効率は低かった。よって、A1、Cr、Fe、Ca、As はエアテーブル選別による選別は困難であることが示唆された。続いて、粒径ごとにPb、Cu、Znの最も 総合分離効率が最大となった選別条件を用いて、当該条件下における選別前後の金属含有量を調査した。 低密度粒子の金属含有量に対する高密度粒子の金属含有量を算出した結果、Pb、Cu、Znともに篩上-王水 分解が特に高く、篩下-アルカリ融解では低かった(図3-7)。これは、粉砕が困難で王水に易溶な金属 態粒子では密度が大きいために効率的に選別できる一方、アルミノケイ酸塩等に取り込まれ王水に分解 しにくい形態の粒子は周囲の粒子と密度差が生じにくく、選別が困難になるためと考えられた。さらに、 各金属の随伴挙動を評価するために相関係数を算出した結果、高密度粒子(0.5-2.0 mm)の全含有量から 計算した金属別の相関係数(N = 20)は、Pb、Cu、Znは0.9を超える相関係数を示した。このことから、 エアテーブル選別によりこれらの金属は随伴して回収されることがわかった。Pbの由来は明らかではな いが、CuとZnは真鍮の割合が高いと考えられた。



■篩下-王水分解 ■篩下-アルカリ融解 ■篩上-王水分解

#### 図3-7 選別前後の金属含有量

焼却主灰を土木材料として利用する際に最も課題となるPbに着目し、Pbの総合分離効率が最も高い条件下においてサイドスロープ角のみを0°から最大の3°まで変化させ、選別量の増加が総合分離効率に及ぼす影響、焼却施設への適用時の選別可能量を推計した。その結果、サイドスロープの増加に伴い総合分離効率が向上し、選別量の増加に伴いテーブル上の主灰と空気の接触状態が変化し分離効率の向上に何らかの形で寄与したと考えられた。さらに、当該条件を元に、物理選別設備を設置する際の最小処理単位と想定される都市ごみ焼却施設におけるエアテーブル選別可能量を推計した。

エアテーブル選別における焼却主灰の含水率が選別特性に及ぼす影響を明らかにするため、含水率 0%、 10%、15%にて選別実験を実施した。エアテーブル選別後の高密度粒子及び低密度粒子のかさ密度差は、 含水率の上昇とともに縮小した。なお 0.5-1.0mm の分画では下部からの空気により一定程度乾燥が進み、 影響は限定的であった。エアテーブル選別前後における金属含有量は、含水率の違いによらず 0.5-1.0mm、 1.0-2.0mm の高密度粒子と低密度粒子の金属含有量には比較的差が見られた。一方、Cr ではいずれの粒 径においても高密度粒子と低密度粒子の金属含有量の違いは小さく、分離が不十分であった。粒径ごと の含水率と総合分離効率の関係(図 3-11)では、Cu の場合、1.0-2.0mm で含水率の増加に伴い総合分離 効率は低下したが、Pb 及び Cr は 0.5-1.0mm、1.0-2.0mm では含水率が増加しても総合分離効率に大きな 変化は見られなかった。

渦電流選別による焼却主灰の選別特性を評価するため、分離板(デバイダ)の高さ方向を3パターン 設定し実験を行った(図 3-12)。その結果、Pb、Cu、A1ともに選別後に反応物の含有量が高くなった。 反応物への分配率はPbやA1では非反応物への分配率が高く、Cuは反応物への分配率が高かった。メタ ル粒子の割合が影響したと考えられる。Pbの総合分離効率は、試料のばらつきも考えられるが、デバイ ダの位置によって変化することが把握できた。デバイダ位置のわずか1mm程度の違いが重量分配率、金属分配率に影響するため、デバイダ位置の微調整等、テクニカルな対応が必要である。



図3-23 物理選別によるCuのサブスタンスフロー

破砕によりメタル粒子とミネラル粒子を分離する単体分離を促進することで金属回収効率の向上を 目指し(図3-17)、インパクトミルによる主灰の破砕による元素の分配挙動を評価した。使用したイン パクトミルの出口側にはスクリーンがあり、口径を変更できる構造となっている。実験の結果、CuやA1 では回転速度を増加させると2.0-4.0mmの比較的大きなメタル粒子として回収された。一方、Pbは回転速 度の増加に伴い重量割合の変化と同様に小粒径への分配率が増加した。破砕処理では後段の処理として 想定される渦電流選別やエアテーブル選別が困難な<0.5 mmの粒子割合を増加させる点について留意が 必要である。 最後に、物理選別工程の組合わせによる焼却主灰のマテリアルフロー及び金属のサブスタンスフロー を推計し、渦電流選別では多くが非反応物として残留すること、渦電流選別およびエアテーブルを組み 合わせることでA1は4.0-8.0mmの低比重粒子では96%まで、Cuは2.0-4.0mmの高密度粒子では23%まで濃縮 できることを示した(図3-23)。一方で、Pbは渦電流選別、エアテーブル選別において特定の画分に濃 縮することが困難であることが分かった。

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

全国から焼却主灰を6試料採取し、物理特性として密度試験、粒度試験を、力学特性としてコーン指 数試験を行った。灰粒子密度の施設間の相違は鉄等の金属粒子の含有量が影響している可能性が考えら れた。粒度はいずれの試料においても広い範囲で分布しており、焼却主灰は締固め特性の良い試料であ ることが示唆された(図4-2)。コーン指数は焼却主灰によってばらつきが見られたが、最大乾燥密度 が大きいほどコーン指数値も大きくなる傾向にあった(図4-4)。最も低いコーン指数値を示した焼却 主灰においても一軸圧縮強さに換算した強度は約1,800 kN/m<sup>2</sup>に相当することから、焼却主灰は盛土材 に必要な強度を十分に満たしていることが確認された。



図4-5 シリアルバッチ試験による溶出液中pH, EC, TOC, Na, CI, Pb濃度

エージングによる焼却主灰の品質向上を目指すための基礎調査として、6種類の焼却主灰に対して、 溶出操作を3回繰り返すシリアルバッチ試験を行った(図4-5)。全ての焼却主灰に共通して、pHは繰り 返し溶出により大きな変化は見られなかったが、EC、TOC、Na、C1では1回目の溶出量が最も多く、繰り 返し回数とともに減少した。C1は乾灰が湿灰よりも高い濃度の傾向を示した。乾灰はフリーデル氏塩の ような難溶性塩が生成していなかったためと推察される。Pbは乾灰の方が湿灰よりも溶出量が高い傾向 が見られ、また、2回目以降も1回目と同等程度の溶出量の主灰が多く、水洗いのみでは十分な水量が必 要であると推察された。

コンテナエージングの小型試験装置として、円筒型の 透明塩化ビニール製カラム(φ104×400H mm)を用いた 散水・通気試験を6種類の主灰に適用した(図4-6)。散 水量は主灰の質量に対して0.50~0.65 L/kgとし、C02は カラム下部より濃度100%のC02ガスを給気した。その結 果、溶出率はNaが0.83-1.0と高い値を示したのに対し て、C1は0.56-0.91と焼却主灰によって異なり、難溶性 塩の生成量の影響が示唆された。カラム試験終了後、充 填高さ別に環境庁告示13号溶出試験(JLT-13)を行った。 その結果、すべての灰種でPb濃度の低下は確認された (図4-8)。一方、一部の灰で、炭酸化によるCr(VI)溶 出濃度が顕著に増加した。

CO<sub>2</sub>分離・回収施設(CCUプラント)を設置・稼働して



いる佐賀市清掃工場の協力のもと、精製前の排ガス(以降、ExG)および分離精製された回収CO<sub>2</sub>(以降、CO<sub>2</sub>)をそれぞれ用いて、同工場から発生する焼却主灰のオンサイト(現地)炭酸化処理を行った(ベン チ試験、図4-11、図4-12)。焼却主灰中のPb溶出濃度は、初期濃度3.5 mg/Lに対して、排ガス処理区(ExG 区)で平均0.09 mg/L、回収CO<sub>2</sub>処理区(CO<sub>2</sub>区)で0.04 mg/Lまで低下した。ExG区よりもCO<sub>2</sub>区でPb濃度が より低く抑えられていた要因としては、CO<sub>2</sub>濃度や供給速度が炭酸化の進行に影響した可能性が考えられ る。六価クロム(Cr(VI))やホウ素(B)は炭酸化処理により増加する傾向があることが確認された。炭 酸化処理による粒度分布等への顕著な差は認められず、物理特性への影響はほとんど無いことが示唆さ れた。締固め度90、95%に締固めた焼却主灰の修正CBR値の把握を行ったところ、炭酸化処理により最大 乾燥密度がわずかに低下し、最適な水分量が約5%増加することが示唆された(図4-15)。修正CBR値は、 未処理区に比べ炭酸化処理区で低下した。未反応のCaOやCa(OH)<sub>2</sub>がCaCO<sub>3</sub>に変化し、灰の固結力が低下し たこと、試験に用いる供試体は一度解砕した後に作製すること、などが影響を与えていると考えられる。



図4-8 改質前後焼却主灰の溶出試験におけるPb濃度(1~3回目はシリアルバッチ試験結果)



図4-11 ベンチ試験外観(回収CO<sub>2</sub>通気時)



図4-15 乾燥密度と含水比の関係(E-b法)



図4-12 試験槽構造の概要





オンサイトエージング技術の実証として、実規模のコンテナを用いての試験を行った。コンテナ試験 の試験装置は、下部に通気するガスを通す空間を確保するための二重床構造を有したSUS製のコンテナ (3600×1910×970H mm)を用いた(図4-20、4-21)。散水+CO<sub>2</sub>区において発生した浸出水中濃度と浸出 水量から算出した塩類の溶出量及び溶出率は、Naで0.73、Kで0.96、C1で0.85となり、カラム試験での報 告値に近い値が、実規模のコンテナ試験でも得られた。エージング前後の試料を用いた溶出試験(図4-27)では、Pbの溶出濃度は、CO<sub>2</sub>区、散水+CO<sub>2</sub>区ともに大きく低減した。低減率は、CO<sub>2</sub>区で95~97%、散 水+CO<sub>2</sub>区で96~99%以上であり、2つの処理区ともに全サンプルで土壌環境基準の0.01mg/Lを満足した。 Cr (VI)はCO<sub>2</sub>区、散水+CO<sub>2</sub>区で0.03~0.04mg/Lと定量下限値の0.02mg/Lに近い値で明確な濃度の増加は確 認されなかった。締固め試験では炭酸化処理により最大乾燥密度がわずかに低下し、最適な水分量が3% 程度増加することが示唆された。修正CBR値はベンチ試験と同様に炭酸化によって低下したが、下層路盤 基準の30%を満たした。



図4-20 コンテナエージング試験外観



図4-21 散水処理状況



図4-27 散水+CO<sub>2</sub>区の溶出濃度

炭酸化処理はPbの溶出は大きく抑制できるが、焼却主灰の種類によってはCr(VI)の溶出が促進される。 そこで、焼却主灰に薬剤を添加し溶出抑制効果を検証した。薬剤は、Cr(VI)をCr(III)へと還元する還元 剤として硫酸鉄(II)の水溶液を使用した。その結果、Cr(VI)濃度は未処理やCO<sub>2</sub>区に比べ、Fe剤を添加し た処理区では、0.1mg/L以下まで低下し、Cr(VI)の溶出抑制効果を確認できた。養生日数による濃度変化 は確認されず、養生期間は1日以上で良いことが示唆された。密閉養生後に大気曝露を行ったところ、pH は未処理群で10程度、炭酸化処理群では9.0程度で推移した。B濃度は大気曝露後にB濃度が増加し、特に 炭酸処理群で0.05から最大で0.6mg/L程度まで増加した。Cr(VI)については、大気曝露(炭酸化)すると、 一部、再溶出したが、再溶出量はFe剤の添加量が多くなるほど抑えられ、鉄剤の添加率が2%の処理区 (CO<sub>2</sub>+Fe2%)では、土壤環境基準0.05mg/Lを下回った(図4-32)。さらに、Fe剤を添加することで、炭酸 化処理を行わない場合よりも、大気曝露時のCr(VI)溶出リスクを下げられる可能性が示唆された。



最後に、オンサイトエージング技術を組み込んだ「焼却主灰のグリーン改質技術」の流れを示し、オ ンサイトエージング技術と従来のエージングとの比較を行った。従来のエージング技術は自然の降雨に よる塩類の洗い出しと大気中の二酸化炭素による炭酸化を主な反応とする。しかし、エージング期間を 踏まえると国内における実現性は低い。オンサイトエージングは清掃工場の敷地内での実施を想定し、 排ガス由来のCO<sub>2</sub>ガスを用いることで短期間での安定化促進処理を行うことができる。エージング用のコ ンテナ等の設備や排ガス中のCO<sub>2</sub>を利用するためのコスト(排ガス前処理等)が必要となるが、エージン グのための新たな施設を建設する必要が無く、初期投資を抑えられる点や、高価な液化CO<sub>2</sub>ガスを購入し なくて良い点など、促進エージングに要する費用を抑制できることも大きな特長である。今後は土木資

材化までの一連の流れで実証試験を行い、グリーン改質技術の確立を図っていくことが必要である。ま た新しい一般廃棄物焼却主灰のリサイクル方法として社会実装していくためには、自治体と共同で実績 をつくりながら、必要な許認可等の手続きを整備していくことが求められる。

## 5-2.環境政策等への貢献

#### <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) 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ことと同時に、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削減を図 ることが望まれる。

#### (2) 有害金属の溶出抑制

都市ごみ焼却主灰に散水・CO<sub>2</sub>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・CO<sub>2</sub>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、焼却主灰によっては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。

#### 5-3.研究目標の達成状況

サブテーマ1から4によって構成される本研究の取り組みにより、研究目標を達成した。

サブテーマ1では、グリーン改質技術の環境負荷とコストを定量評価した。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、他のサブテーマと連携して作製した改質主 灰を評価した。さらに、グリーン改質技術の導入効果を総括し、改質技術導入ガイドラインの構成案を 提示した。以上により、目標どおりの成果を挙げた。

サブテーマ2では、焼却対象廃棄物の品目ごとに金属含有量するとともに、焼却対象品目等の異なる 主灰に対して金属含有量分析やX線回折測定等を実施し、基礎的なデータを蓄積した。さらに、有害金 属の排除方法の検討では、主灰および落じん灰の金属組成の月変動を調査し、落じん灰排除による削減 効果を評価した。以上により、目標どおりの成果を挙げた。

サブテーマ3では、エアテーブル選別を焼却主灰へ適用するための磁選や分級、含水率などの焼却主 灰の状態やその前処理方法、空気量、斜度等の設定条件を詳細に検討し、鉛等の有害金属、銅等の有用 金属の随伴挙動を明らかにした。さらに、渦電流選別と破砕選別の適用性を検討し、各技術を組み合わ せた選別フローの設計法を提示した。以上により、目標を上回る成果を挙げた。

サブテーマ4では、エージング処理した焼却主灰の物理・力学・溶出特性を明らかにした。また屋内 外での長期溶出特性としてライシメーター試験により1年以上のデータを取得した。オンサイトエージ ング技術として、コンテナを用いた散水・炭酸化処理方式について、実規模で実証すると共に、炭酸化 処理により生じる可能性のあるCr(VI)溶出対策として、鉄系薬剤の効果を明らかにした。以上により、 目標を大きく上回る成果を挙げた。

# 6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

13件

# <主な査読付き論文>

- 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.
- 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.
- 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CO<sub>2</sub>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

# 7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

# 8. 研究者略歴

# 研究代表者

肴倉 宏史

北海道大学大学院工学研究科修了、博士(工学)

現在、国立研究開発法人国立環境研究所

資源循環・廃棄物研究センター 循環利用・適正処理処分技術研究室 室長

# 研究分担者

1) 成岡 朋弘

広島大学大学院生物圈科学研究科修了、博士(学術)

現在、鳥取県衛生環境研究所 水環境対策チーム チーム長

2) 飯野 成憲

首都大学東京大学院都市環境科学研究科修了、博士(工学)

現在、国立研究開発法人国立環境研究所 福島支部 汚染廃棄物管理研究室 研究員

3) 佐藤 研一

九州大学大学院工学研究科修了、博士(工学) 現在、福岡大学 工学部 社会デザイン工学科 教授

### Ⅱ. 成果の詳細

## Ⅱ-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

国立研究開発法人国立環境研究所

資源循環・廃棄物研究センター 肴倉宏史 福島支部 汚染廃棄物管理研究室 飯野成憲

<研究協力者>

公益財団法人廃棄物・3R研究財団 企画部 渡邉洋一・山口純二 国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター Back Seungki

#### [要旨]

当該研究を社会実装を見据えながら着実に進めるために、当該推進費研究チームと廃棄物3R研究財 団のブレークスルー促進事業とによるコンソーシアム型の研究体制を構築した。焼却主灰のグリーン改 質技術導入を実現するために、資源化の現状、環境負荷、コスト等を明らかにし、他の資源化方法と比 較した。再生製品の品質基準を調査し、グリーン改質主灰の基準を設定し、物理選別とエージングから 成るグリーン改質技術を適用してその効果を確認した。研究全体の成果を踏まえた焼却主灰グリーン改 質技術導入ガイドラインの構成案を提示した。

#### 1. 研究開発目的

焼却主灰の最適な資源化方法は処分場残余容量やセメント工場立地等の状況に依存すると考えられる ことから、輸送、利用、処分等を通じた環境負荷やコスト等を評価し、地域特性に適した選択方法を提 示する。また、改質処理を行った主灰(グリーン改質主灰)が満足するべき有害物質含有・溶出量や物 理・力学特性等の品質基準を設定し、グリーン改質主灰の評価を実施する。さらに、研究全体で得られ た内容を助言委員会で検討し、ガイドラインにとりまとめる。以上の方法により、焼却主灰グリーン改 質技術導入の実現を目指す。

#### 2. 研究目標

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。

#### 3. 研究開発内容

当該推進費研究チームと廃棄物3R研究財団のブレークスルー促進事業「地域特性に即した焼却主灰の 資源化・リサイクルに関するスキーム構築」とによるコンソーシアム型の研究体制を構築し、研究対象 試料の提供や各種調査を進めた。

焼却主灰を主とする熱処理残渣の資源化の現状を把握するため、市区町村レベルで精査し、資源化と 委託処分の選択等に影響する因子を明らかにした。焼却主灰の輸送コスト、処理コスト、落じん灰等の 売却による便益に着目し、焼却主灰等の発生量、各施設の受入能力を推計し、地域特性に応じた処理方 法と処理先を計算により提示した。環境負荷の指標として温室効果ガス(GHG)排出量に着目し、資源化 技術との比較評価を行い、焼却主灰グリーン改質技術はセメント原料化と同等程度の低い環境負荷であ ることを示した。

再生製品の品質基準を調査し、グリーン改質主灰が目標とするべき品質基準(含有量基準、溶出量基 準)を設定するとともに、実際に、エアテーブルまたは渦電流による物理選別と促進エージングを焼却 主灰に連続して適用し、グリーン改質技術により、含有量基準と溶出量基準の両面から、焼却主灰の環 境安全性が実際に向上できることを確認した。

最後に、焼却主灰グリーン改質技術を総括し、ガイドラインの構成案を提示した。

# 4. 結果及び考察

## 4.1 コンソーシアム型研究体制の構築

サブテーマ1では助言委員会の設置を実施項目の一つに設定した。そこで、当該環境研究総合推進費 (以下、「当該推進費」という。)によるアドバイザリーボード会合と並行して、公益財団法人廃棄物・ 3R研究財団における廃棄物・3R技術ブレークスルー促進事業「地域特性に即した焼却主灰の資源化・リ サイクルに関するスキーム構築」(以下、「ブレークスルー促進事業」という。)と本研究課題との連 携によるコンソーシアム型の研究体制を構築した。ブレークスルー促進事業は当該推進費より1年先行 して開始され、その中で当該推進費の獲得を目指した。スキームの概要を図1-1に示す。ブレークスルー 促進事業には廃棄物・3R研究財団、大手ストーカー式焼却プラントメーカー3社、および、国立環境研究 所が参画し、東京都環境科学研究所もオブザーバーとして参加している。当該推進費のキックオフミー ティングならびに第1回から第3回のアドバイザリーボード会合には、ブレークスルー促進事業からも全 メンバーがオブザーバー参加し、研究内容について検討を重ねた。

ブレークスルー促進事業では焼却残渣リサイクルを実施している地方公共団体や事業者へのヒアリン グ調査や、焼却主灰をリサイクル材料として取り扱うための法解釈・整理等を行い、グリーン改質技術 の意義づけと社会実装を目指した。また、焼却主灰試料の採取・提供面で当該推進費の遂行に多大な貢 献をいただいた。



図1-1 当該推進費におけるコンソーシアム型の研究スキームの構築

# 4.2 全国市区町村における熱処理残渣の資源化状況とその要因

焼却主灰資源化の必要性は各自治体の置かれている状況によって異なると考えられる。そこで、環境 省 一般廃棄物処理実態調査結果<sup>1)</sup>(以下、「一廃処理実態調査」という)を整理し、焼却主灰、焼却飛 灰、溶融スラグ等の熱処理残渣の資源化等に影響を及ぼす要因の解明を試みた。

まず、可燃ごみ等の熱処理(焼却、灰溶融、ガス化溶融)から資源化や最終処分(以下、「資源化等」 という)までの流れを、図1-2のように整理した。一廃処理実態調査結果は市区町村別データと施設別デ ータに分かれているため、両者を紐付けし、さらに、事務組合に所属する市区町村は地域ごとに処理量 や人口によって事務組合の処理量等を各市区町村に配分して各市区町村の各値を推定した。また、図1-2に示すように、溶融処理には市区町村等が自ら行うガス化溶融や灰溶融と、民間等に委託して行う灰溶 融があり、最終処分には市区町村自区内の施設に処分する場合と、民間等に委託する場合がある。そこ で、溶融スラグの資源化が報告されている市区町村で、焼却施設にガス化溶融が無く、且つ、灰処理設 備に溶融が無い場合は、「委託」と判定した。最終処分は、市区町村別データの最終処分量が施設別デ ータから計算した埋立量を確実に上回っている場合、「委託有り」と判定した。



図1-2 可燃ごみ等の熱処理から資源化や最終処分までの流れ



全1719市区町村(本研究では東京特別区は1つと数えた)中、熱処理残渣が発生しているのは1641市区 町村にのぼった。図1-3より、熱処理残渣の最終処分は、関東から近畿にかけて、ならびに四国と九州の 一部は委託を行っている市区町村が多い。このうち185市区町村は熱処理残渣を全量資源化している一 方で、資源化率0%の市区町村は829を数えた。図1-3より、熱処理残渣を全量資源化している市区町村は 分散しており、人口規模の小さい市区町村に多いようである。図1-4より、各市区町村で最も多い資源化 方法の分布を見ると、溶融スラグは東海・北陸以東の本州にやや多いようであり、特に、茨城県、千葉 県、神奈川県は溶融スラグ化を委託している市区町村が多く見られる。セメント原料化は中国、九州に 多く、札幌市、東京都の大都市の他、セメント工場付近の市区町村が多いことがわかった。

図1-5に、各要因別の資源化等の割合を示す。資源化率0%または100%の市区町村が多いことに留意する 必要はある(それぞれ829、185を数えた)が、全体では、熱処理残渣の資源化率は29.3%であり、最終処 分70.3%のうち委託有りが約半分を占めていることがわかった(図1-5(a))。自ら所有する埋立地に最 終処分を行わない場合の選択肢として資源化と委託による最終処分があると考えられるが、資源化を選 択する/しない理由について、さらに追跡することが重要と思われる。資源化の選択肢では、委託を含 む溶融が12.7%で、次いでセメント原料化が9.7%であった。また、「その他資源化」も4.2%を占めている。 その他資源化の内容を別途調査したところ、「焼成」や、「造粒・破砕」が多かった。造粒・破砕は焼 却灰から異物を除去しセメント等を添加して固形化するもので、グリーン改質技術と位置づけが非常に 近い。なお、金属類の資源化は、溶融メタルや回収される鉄・アルミ等の売却が主であった。

資源化率に対する人口の影響(図1-5(b))を見ると、資源化率は人口10-30万人規模が最大で、それより大規模、小規模の市区町村の資源化率はいずれも徐々に減少し、100万人以上と1万人未満が低い傾向が明らかとなった。特に、100万人以上の大都市は自ら所有する海面処分場へ最終処分を行っているため、資源化や委託処分の割合が少ないと推察された。人口密度(図1-5(c))は(b)人口ほど明確な傾向は見られなかった。

次に、各市区町村における一人当たりの最終処分場残余容量に着目して整理した結果、資源化等の状況の相違が最も顕著に現れた(図1-5(d))。すなわち、0~0.35 m<sup>3</sup>/人の資源化率は46%である一方、1 m<sup>3</sup>/人以上では11%であった。残余容量0 m<sup>3</sup>/人の市区町村は465を数えたものの、資源化率は最大ではなかった。熱処理残渣資源化の要因として残余容量は大きく影響しているものの、他の要因として、例えば委託費が影響している可能性が考えられる。さらに熱処理方式別(図1-5 (e)~(g))や、全連、准連、バッチなどの運転時間別(図省略)に残余容量で整理した。本研究の対象であるストーカー式の熱処理残渣を見ると(図1-5(e))、資源化としてはセメント原料化の割合が高かった。

現在の一廃処理実態調査結果には、発生する残渣の種類と発生量や、熱処理や最終処分の委託状況 は公開されていない。より正確な課題整理に向けて、現状把握と公表が望まれる。



 <sup>■</sup>金属類
 ■溶融スラグ
 ■溶融スラグ化(委託)
 ■セメント原料化
 ■飛灰の山元還元
 ■その他資源化
 ■最終処分(委託有り)
 ■最終処分
 ■保管
 図1-5
 各要因別の資源化等の割合

#### 4.3 地域特性に応じたグリーン改質技術適用性の検討

輸送コスト、処理コスト、有用金属の回収による自治体の便益に着目し、グリーン改質技術、すな わち物理選別・エージング処理と各資源化方策を地域特性に応じて組み合わせ、落じん灰を含む都市ご み焼却主灰の有効利用計画を提示することを試みた。

まず、金属粒子の物理選別やエージング処理を主 体とした焼却主灰の資源化フローを想定した<sup>2)</sup>(図 1-6)。1 次物理選別では、自治体の焼却施設内で主 に異物除去、磁力選別による磁着物の回収、渦電流 選別による銅・アルミ等の金属粒子を主体とした粒 子(以下、「金属粒子主体回収物」という)の回収を、 エージング処理では、CO<sub>2</sub>ガスを吹き込みながらコン テナによる焼却主灰の安定化を想定している。回収 後の灰粒子は最終処分、土木資材化、セメント原料 化、焼成、溶融のいずれかにより資源化するものと した。なお、落じん灰は金属粒子主体回収物ととも にエアテーブル等の高度選別技術により選別し、2 次選別残渣を溶融処理により金属を資源化するもの とした。続いて、一廃処理実態調査結果1)(平成30 年度実績)の中間処理後再生利用量(溶融スラグ、 焼却灰・飛灰のセメント原料化)、焼却残渣の最終処 分量の合計値を国内で発生する焼却残渣量とし、そ の他の生成物の発生量を表 1-1 に従って推計した。 また、年間受入能力(t)については、セメントの場 合、全工場が脱塩施設を有するものと仮定してクリ ンカ製造能力<sup>3)</sup>の2%、民間溶融施設<sup>4)</sup>、焼成施設<sup>5)</sup>、 金属粒子主体回収物及び落じん灰(以下、「落じん灰 等」という) 受入施設については HP 情報又はヒアリ ングにより日処理能力×300日とした(図 1-7)。さ らに、Google map のマイマップ機能により、都道府 県庁所在地から各施設へのトラックによる輸送距離 を計測し、焼却主灰 1t あたりの輸送コストの算出 には輸送コスト関数<sup>6)</sup>を用いた。処理コストについ ては、1 次物理選別を自治体で行うことを想定して いるため、最終処分を除き既往文献 <sup>7)</sup>より、異物除 去及び磁力選別により 10,000 円/t 安価になるもの とした(表 1-2)。土木資材化、公共の溶融処理につ いては、それぞれ、代表的なデータを得ること、当 該自治体以外で処理することが困難と考えられたこ とから記載していない。最後に、受入能力の制約条 件の下で輸送・処理コストの合計が最小となる都道 府県別の処理先と処理量について、オペレーション ズリサーチ手法の1つである混合整数計画法により 算出した。計算においては、地理的に溶融施設、焼 成施設へのトラック輸送が困難な沖縄県を除きセメ ント原料化、溶融、焼成、最終処分のいずれも最低 1000t/年を処理するものとした。



図1-6 都市ごみ焼却主灰等の資源化フロー

表1-1 焼却主灰等の発生量の推計方法

生成物	記号	計算根拠/ 参考文献	推計発生量 (t/年)
焼却残渣(主灰+飛灰)	Α	2)	3,836,314
主灰	В	A×0.75	2,877,236
異物・鉄くず	С	B×0.1	287,724
金属粒子主体回収物	D	(B-C)×0.05	129,476
落じん灰	E	B×0.015	43,159
灰粒子 ※水分含む	F	B-(C+D+E)	2,416,878



表1-2 処理コスト・便益

手段	処理コスト・ 便益(円/t)	参考	
1次物理選別+エージング	10600	レマリング	
2次物理選別	-10000	C 7 9 2 9	
最終処分	9,000~36,000	8), 地方別	
セメント原料化	20,000		
溶融	29,000	5)	
焼成	8,000		

※セメント原料化は脱塩・水処理を含む

図1-8に受入能力と推計発生量の関係を示す。灰 粒子については年間受入能力が約147万tに対し、推計発生量は約242万tであった。一方、落じん灰等に ついては、受入能力約1万tに対し推計発生量は約17万tであり、現状では受入能力が不足していること がわかった。 図1-9に落じん灰を受入施設に売却する 際の輸送コスト<sup>6)</sup>と売却による便益の損益 分岐点となる輸送距離の関係を示す。損益 分岐点は114kmと計算され、静岡県及び山 梨県のみが自治体の負担がなく落じん灰を 売却できることがわかった。しかしなが ら、当該輸送コスト関数について、10tト ラックを利用し、帰り便は空輸送を想定し ていることから、損益分岐点となる輸送距 離は伸びる可能性がある。

図1-10に輸送・処理コストの合計が最小

となる都道府県別の処理先と処理量を示す。関東地方南 部、中部地方の一部、四国地方ではセメント原料化が一 定程度選択された。これは、セメント工場との距離が近 く、最終処分コストが比較的高額であることによるもの と考えられた。北海道、東北、近畿、中国、九州地方で は最終処分が選択された。今回の計算では、環境省の一 般廃棄物処理実態調査からは最終処分コストの範囲を明 確化することが困難であったことから、文献値<sup>8)</sup>より地 方別の平均値とした。詳細な処理コストとその範囲につ いてはさらに精査が必要である。関東、中部地方ではい ずれも処理コストが比較的安価な焼成施設の受入可能量 と同量が処理されるものと計算され、当該都道府県から の受入量を合計すると、受入可能量を超えることがわか







損益分岐点

った。これは、本計算では全国の自治体全体としての最適解ではなく、都道府県別の最適解を求めたた めである。なお、いずれの都道府県においても溶融処理は最低量の1,000tとなった。

以上より、都市ごみ焼却主灰の輸送コスト、処理コスト、落じん灰等の売却による便益に着目し、都 市ごみ焼却主灰等の発生量、各施設の受入能力を推計し、地域特性に応じた処理方法と処理先を計算に より提示した。その結果、落じん灰等については、受入能力が不足していること、損益分岐点となる距 離は114kmであることがわかった。都道府県別の処理先および処理量については、地域により選択される 施設は異なった。なお、物理選別やエージングを主体とした都市ごみ焼却主灰の有効利用については、 特にストーカー式焼却施設において含水率が高い主灰により物理選別が困難になることから乾燥施設等 の導入コスト、導入時期、自治体の有する焼却施設への導入スペース等について総合的に検討する必要 があると考えられた。



# 4.4 焼却残渣の各処理・処分・リサイクル方策における環境負荷の評価

近年、焼却残渣は約70%が埋立処分されており、残りは溶融スラグ化またはセメント原料化が主要なリ サイクルの選択肢となっている。そこで、これら既存の選択肢と、本研究で主要課題としている「焼却 主灰グリーン改質技術」、すなわち物理選別とエージングによる土木資材化の環境負荷について比較評 価を試みる。

最終処分場を保有しない自治体は、例えば、関東地方の焼却施設から東北地方の民間最終処分場へ焼 却残渣を搬出する事例も少なくない。民間事業者による集約型の溶融処理やセメント原料化についても 同様に、受入場所が遠方のため、輸送距離が長い場合もある。グリーン改質技術は、焼却施設ごとの設 備の設置や、都道府県単位程度の集約処理施設の立地も検討が可能と考えられる。これらのような輸送 距離の違いは焼却残渣の輸送に起因する環境負荷に影響すると考えられる。また、溶融スラグ化は副生 成物として溶融飛灰と溶融メタルを生成し、これらは金属精錬の原料としてリサイクルされていること から、溶融スラグ化は金属鉱石の採掘等を代替すると捉えることが可能である<sup>90</sup>。一方で、グリーン改質 技術における物理選別は有害金属と同時に有価金属の回収も期待され、溶融スラグ化と同等かそれに近 い効果を得られる可能性がある。さらに、グリーン改質技術のうちのエージングによる二酸化炭素吸収 は、その名前のとおり、温室効果ガスである二酸化炭素を吸収することから、その効果を含めて定量評 価しておくことが重要である。

そこで、環境負荷の指標として温室効果ガス(GHG)排出量に着目し、上記諸要因の影響について、既 往研究<sup>9</sup>を拡張する形で検討を行った。本研究では、グリーン改質(物理選別+エージング)、セメント 原料化、埋立処分、および、集約型還元溶融を評価の対象とした。ベースとしたシステムは、文献<sup>2</sup>に基 づき、次のとおりである。(1)いずれのプロセスフローも焼却残渣の再資源化によって代替される資源の 「原料調達段階」から評価対象とする。(2)焼却残渣の輸送はシステム境界内とする。(3) 最終処分や集 約型還元溶融施設はシステム境界内とする。(4)セメント製造、砕石製造、非鉄製造における「製造段階」 は各プロセス共通のためシステム境界外とする。図1-11に、グリーン改質技術(物理選別+エージング) を導入した場合のプロセスフローとシステム境界を示す。ここでは集約型物理選別施設を想定した。回 収物は銅・鉛・亜鉛等も若干含まれる可能性はあるが、金・銀鉱石のみを代替できるものとし、また、 物理選別による金・銀の回収率は不明なため、ここでは集約型還元溶融による回収量の50%に設定した。 また、飛灰はグリーン改質の対象外のため、最終処分されることとした。図では「集約型還元溶融に対 応する従来プロセス」ならびに「セメント原料化に対応する従来プロセス」が含まれている。焼却残渣 の処理方法として集約型還元溶融もしくはセメント原料化を選択したケースではこれらのプロセスによ るGHG排出量はゼロとなり、それぞれに代わって集約型還元溶融もしくはセメント原料化のプロセスそ のものによるGHG排出量が評価されることになる。さらに、グリーン改質によって得られるはずであった 金銀鉱石代替物や砕石は別途調達する必要が生じるため、そのための従来プロセスが評価の対象となる。

ここで、物理選別プロセスにおけるGHG排出係数は、同様のプロセスを運用する事業者のヒアリングより、32.2 kg-CO<sub>2</sub>/t-灰とした。また、エージングプロセスにおけるCO<sub>2</sub>吸収量は、サブテーマ4の実験結果を参考に、40.0 kg-CO<sub>2</sub>/t-灰とした。その他のGHG排出係数等のパラメーターは文献<sup>2)</sup>の値を引用した。 グリーン改質およびセメント原料化は焼却主灰のみを対象とし、これらのケースでは焼却飛灰は最終処 分を行うこととし、主灰と飛灰の発生割合は3:1とした。

図1-12に、GHG排出量試算結果の例を示す。この図では、各ケースのGHG排出量に大きな割合を占める 項目は還元溶融プロセス、セメント原料、あるいは、金・銀鉱石であることがわかる。しかし、これら の結果については、いずれも、次に述べるように留意が必要である。まず、集約型還元溶融は還元溶融 プロセスにおける電力消費によるGHG排出量が多いため合計890 kg-CO<sub>2</sub>/t-灰に達しており、セメント原 料化は他のケースに石灰石の消費が組み込まれるため合計370 kg-CO<sub>2</sub>/t-灰で最も少ない結果となって いる。しかし、将来的な電力事業の低炭素化が進み、仮に2050年度目標(80%削減による0.111 kg/kWh) を達成すれば、合計390 kg-CO<sub>2</sub>/t-灰となり、他のケースと同程度になり得る。次にセメント原料につい ては石灰石の消費によるGHG排出量が160 kg-CO<sub>2</sub>/t-灰を占めているが、セメント製造におけるカルシウ ム源には石炭灰や下水汚泥などGHG排出量の少ない循環資材も含まれていることや焼却残渣自体からの CO<sub>2</sub>排出量もゼロではないため、最大値としての見積りである。また、金・銀鉱石によるGHG排出はセメント原料化と埋立処分では300 kg-CO<sub>2</sub>/t-灰であり、グリーン改質ではその半分の150 kg-CO<sub>2</sub>/t-灰を占めるが、物理選別による金・銀鉱石代替物の回収はセメント原料化や埋立処分の前処理としても適用が可能であり、また、回収率も不明である。

次に輸送距離について考察する。図1-12の試算における輸送距離は、物理選別施設:50 kmとし、他 は文献<sup>2)</sup>の設定を引き継ぎ、埋立処分:15 km、セメント製造施設:80 km、還元溶融施設:300 kmとし ている。しかし、焼却施設の立地場所によっては最終処分場やセメント製造施設も遠距離である場合も 想定される。仮に、物理選別施設以外がすべて300 kmの場合、セメント原料化と埋立処分のケースにお ける、輸送に係るGHG排出量はいずれも41 kg-CO<sub>2</sub>/t-灰となり、グリーン改質のケース(17 kg-CO<sub>2</sub>/t-灰)との差は24 kg-CO<sub>2</sub>/t-灰になる。輸送距離はGHG排出量の全体に占める割合は小さいものの、還元 溶融等の他の主要な因子は上述したような不確定要素があることや、GHG排出量の合計値はシステム境 界の設定範囲に依存することを踏まえればその差異を引き続き検討することは重要と考えられる。



図1-11 グリーン改質技術(物理選別+エージング)のプロセスフローとシステム境界<sup>2)を参考</sup>



図1-12 GHG排出量試算結果の例

# 4.5 グリーン改質主灰が目標とする品質基準の設定

グリーン改質技術は、物理選別によって重金属等の有害物質の含有量を低減し、エージングによって 有害物質の溶出抑制を図り、焼却主灰を土木資材として利用可能なものとすることを目指している。そ こで、グリーン改質技術によって処理されて得られる焼却主灰を「グリーン改質主灰」と呼び、グリー ン改質主灰が土木資材として備えるべき物理・力学特性と環境安全性に関する品質基準を検討する。

土木資材として想定する用途としては、市町村や都道府県が公共工事で利用することを念頭に置き、 路盤材または盛土材とする。路盤材は上層路盤材と下層路盤材に大きく分類され、上層路盤材は支持力 の大きい良質の材料が、下層路盤材は比較的支持力が小さくとも安価な材料が求められる。要求される 修正CBR値は、それぞれ80%および30%とする場合が多い<sup>10)</sup>。盛土材については、一般的に求められる一軸 圧縮強さは100~300 kN/m<sup>2</sup>である<sup>11)</sup>。物理・力学特性に関する基準は、路盤や盛土の適用箇所や材料ご とに他の項目についても設定されている場合があるものの、それぞれ、修正CBRや一軸圧縮強さは最も重 要な項目であることから、上記の値をグリーン改質主灰の物理・力学特性に関する基準の当面の目標と する。

次に環境安全品質基準については、グリーン改質主灰中の有害物質が周辺環境へ悪影響を及ぼすこと が無いように設定する必要がある。なお、路盤や盛土は供用を終えて掘削等の形質変更を行う場合には、 その工事規模によっては土壌汚染対策法の調査命令の対象となる可能性がある。土壌汚染対策法は特定 有害物質が周辺環境へ悪影響を及ぼす可能性に関して、調査対象となる土壌対して特定有害物質の含有 量基準や溶出量基準を設定し、基準を超過した場合は区域指定を行い適切な対策を講じることとなる<sup>12)</sup>。 そこで、グリーン改質主灰が目標とする環境安全品質基準は土壌汚染対策法の含有量基準および溶出量 基準と同等の値とする。なお、近年、道路やコンクリートの材料として用いられるスラグ類に関するJIS において環境安全品質基準の導入が進んでおり、測定対象とする有害物質については土壌汚染対策法に 示されるVOCや農薬等を含む全項目ではなく、スラグ類に対して留意するべきものとして重金属等に限 定されている<sup>13)</sup>。そこでグリーン改質主灰もこれに準じて、重金属等を当面の評価対象とする。試験方 法は、スラグ類のJISでは溶出量試験にJIS K0058-1の5.(有姿撹拌試験)を採用していることから路盤 材に対してはこれを採用し、盛土材はJISに含まれていないことから、土壌汚染対策法における評価方法 である平成15年環境省告示18号を採用する。表1-3に、以上を整理したグリーン改質主灰の目標品質基準 (案)を示す。

				成十林	
物理・力学特性	評価項目	修正CBR		一軸圧縮強さ	
	基準値	上層路盤材:80%以上		100 kN/m <sup>2</sup> 以上	
		下層路盤材:30%以上			
環境安全性	評価項目	溶出量	含有量	溶出量	含有量
	試験方法	JIS K0058-1の5.	JIS K0058-2	H15環告18号	H15環告19号
	カドミウム	0.01 mg/L以下	150 mg/kg以下	0.01 mg/L以下	150 mg/kg以下
	六価クロム	0.05 mg/L以下	250 mg/kg以下	0.05 mg/L以下	250 mg/kg以下
	水銀	0.0005 mg/L以下	15 mg/kg以下	0.0005 mg/L以下	15 mg/kg以下
	セレン	0.01 mg/L以下	150 mg/kg以下	0.01 mg/L以下	150 mg/kg以下
	鉛	0.01 mg/L以下	150 mg/kg以下	0.01 mg/L以下	150 mg/kg以下
	砒素	0.01 mg/L以下	150 mg/kg以下	0.01 mg/L以下	150 mg/kg以下
	ふっ素	0.8 mg/L以下	4000 mg/kg以下	0.8 mg/L以下	4000 mg/kg以下
	ほう素	1 mg/L以下	4000 mg/kg以下	1 mg/L以下	4000 mg/kg以下

表1-3 グリーン改質主灰目標品質基準(案)

# 4.6 グリーン改質技術による焼却主灰の品質向上の検討

グリーン改質技術は、物理選別によって重金属等の有害物質の含有量を低減し、エージングによって 有害物質の溶出抑制を図り、焼却主灰を土木資材として利用可能なものとすることを目指している。熱 処理が不要なため、エネルギーやコスト面で溶融やセメント原料化に対して有利だが、焼却主灰中の重 金属等有害物質の残留については、生活環境保全上の支障を生じないように、十分に注意を払う必要が ある。そこでサブテーマ3および4と連携して、1つの焼却主灰に対して物理選別(エアテーブル選別、渦 電流選別)とエージングを連続して行い、焼却主灰中の重金属含有量と溶出量の改善効果について検討 を行った。物理選別とエージング処理のそれぞれの詳細な検討内容は各サブテーマの報告によるが、物 理選別は含有量の低減に、エージング処理は溶出量の低減に効果を発揮することが期待される。

一般廃棄物焼却主灰1試料を用いて試験を実施した。処理の 組み合わせだけでなく、その順序が与える影響を調べるため に、図-13に示した9処理区を設定した。9処理区の詳細は次の通 りである。まず、①未処理の焼却主灰を、②1500 Gで磁力選別 を行い、さらに③炭酸化を行った。③炭酸化は、清掃工場の排 ガスを100%に精製した炭酸ガスを、含水率15%に調整した焼却 主灰に導入した。方法の詳細は別報<sup>2)</sup>に記したとおりである。 また、磁力選別後の灰を篩別し、0.5~8 mmの画分に対して④ エアテーブル選別または⑦渦電流選別を行い、高比重画分と非 鉄金属画分をそれぞれ除去した。エアテーブル選別では高比重 画分のかさ比重が1.1 g/cm<sup>3</sup>となるように条件を調整し、重量割 合で約75%の低比重画分を回収した。渦電流選別では、非鉄金属 画分を5-10% 選別し、90-95% の画分を実験試料として回収した。 その後、未処理の0.5 mm以下画分を再混合して試料とした。③ 炭酸化後の灰に対しても、⑥エアテーブル選別と⑨渦電流選別 を行い、また、④エアテーブル選別後と⑦渦電流選別後の灰に 対しても、0.5 mm以下画分を再混合した後、それぞれ⑤、⑧炭 酸化処理を行った。

処理した灰に対して、含有量評価として、王水抽出とアルカ リ溶融法による全含有量分析、ならびに1規定塩酸抽出による 含有量試験等を行った。また、溶出特性評価として、環境庁告



#### 図1-13 組み合わせ処理(含有量評価)



示13号溶出試験および、屋内小型ライシメーター試験(図1-14)を行った。なお、溶出特性評価は図-1の ①、④~⑨は含有量評価と溶出特性評価は同一であるが、②と③が異なっており、②は炭酸化(含有量評 価の③と同じ)、③排ガス(C02濃度7%の現地排ガスで処理、呼び名:排ガス)となっている。

王水抽出等の酸分解では前処理として粉砕を行うが、粉砕困難な、鉄、アルミニウム、銅、真鍮、ス テンレス等の金属片が残留する。そこで、焼却主灰15gをアルミナ製ミル(MixerMill)で10分間粉砕処 理後、0.5mmふるいで篩別し、篩上と篩下に分けて王水抽出を行った。篩下は灰分主体のため王水抽出 後に多くの残渣が残留したことからメタホウ酸リチウムを融剤としてアルカリ溶融を行った。王水抽出 液とアルカリ溶融液のそれぞれをICP-0ESまたはICP-MSで定量し、抽出量(mg/kg)の和を全含有量とし た。1規定塩酸抽出は、2mm以下に粗砕した試料6gを3検体分取して、1規定塩酸を200mL加えて2時間振 とうを行い、0.45 µmメンブランでろ過による抽出液をICP-0ESまたはICP-MSで定量した。

続いて、図1-14に示した小型ライシメーターを用いて埋め立て利用時を模擬した屋内試験を実施した。 カラム内には、処理区ごとに試料2500gDWを密度1g/cm<sup>3</sup>となるように充填した。試験は恒温室(25℃)で 行い、カラムの上部から、ローラーポンプおよびデジタルタイマーを用いて、充填面に対し日本の年平 均降水量程度となるように、4mm/日の散水を行った。今回の報告では、試験開始から154日目までの浸出 水を対象とし、浸出水採取時点での累積浸出水量(mL)を充填した灰の乾燥重量(gDW)で除した値を累積 液固比(L/S)として用いた。



図1-15 全含有量分析結果

図1-15に、A1、Fe、Cr、Cu、ZnおよびPbの全含有量分析結果を示す。全含有量(3画分の合計値)に着 目すると、A1は、処理によって低下する傾向は見られなかった。FeとCrは、磁選によって40%程度低下し たが、その後の処理ではほとんど変わらなかった。Cu、Zn、Pbは、ばらつきが大きかったようであるが、 CuとPbに関しては、エアテーブル選別が低い結果が得られているようである。Pb含有量は、エアテーブ ル選別によって未処理の場合から約80%低減できた。次に、各画分の抽出量を見ると、Feの磁選による全 含有量の低下は主に篩下-王水画分であったことがわかる。Crは、ややばらつきはあるが、篩下-王水で 抽出されたのは30-40%程度と少なかった。Cuは、篩上-王水のばらつきが大きい。図1-16に、1規定塩酸

抽出試験によるPbの抽出量を示す。全含有量試験の結果と類似した 傾向を示したが、特に、図1-17に示すように、篩上-王水との相関が 高かった。エアテーブル選別は、未処理の場合と比較して62-73%低 減できたが、今回の試料では、土壤含有量基準を下回ることはでき なかった。土壌含有量基準150 mg/kgの達成に向けては、金属様粒子 の排除が重要であることとともに、粉砕されやすい灰分粒子の由来 となるPbの低減も必要であることが示唆された。炭酸化と物理選別 の実施順序に関しては、結果に大きな相違は見られなかった。炭酸 化の際は含水比調整が必要であるため、作業環境の面からは、先に 炭酸化を実施することで後の物理選別で粉じん発生を大幅に抑制で きることがわかった。なお、鉛含有量や抽出量の低減傾向は磁選の みによっても観察された点は、さらに検討を重ねるべき点である可 能性が残される。

図1-18、1-19、1-20に、環告13号溶出試験による溶出液中のPb、 Cr(VI)、B濃度をそれぞれ示す。Pbは、炭酸化を行った処理区群(②、 ③、⑤、⑥、⑧、⑨)では、未処理①に比べ1/20から1/50程度に濃度 が低下し、不溶化効果が確認できた。一方、物理選別のみ行った④ および⑦では、Pbの溶出濃度に殆ど変化は認められなかった(図1-18)。Cr(VI)は、これまでの報告<sup>14)</sup>と同様に炭酸化処理区群では溶出 濃度が増加する傾向がみられた(図1-19)。Bは炭酸化のみ行った② や炭酸化後に物理選別を行った⑥、⑨では溶出が確認されたが、他 の処理区ではすべて定量下限値0.1mg/Lを下回った(図1-20)。



図1-16 1規定塩酸抽出試験結果 (Pb)



図1-17 篩下-王水抽出量と 1規定塩酸抽出量の関係(Pb)

図1-21、1-22、1-23に、小型ライシメーターから得られた浸出水中のPb、Cr(VI)、B濃度の散水に伴う 変化を示す。Pbは、炭酸化処理区群で低濃度を保っていた(図1-21)。Cr(VI)では炭酸化処理区群のCr(VI) 濃度が高く推移し、溶出試験結果(図1-19)に比べて炭酸化処理の有無による差が明確にみられ、炭酸 化によるCr(VI)の溶出促進が確認された(図1-22)。またBでは、溶出試験(図1-20)と同様に、炭酸化 後に物理選別を行った⑥、⑨で、順番が逆の⑤、⑧よりも浸出水中の濃度が高く推移した(図1-23)。炭 酸化を単独で行った場合では、CO<sub>2</sub>ガスを用いた②に比べ排ガスを用いた③は低い値を保持していた。こ れらのことからBでは炭酸化の方法や程度が溶出挙動に影響を与える可能性が示唆された。一方、溶出試 験とは異なり、炭酸化を行っていない①、④、⑦で初期に浸出水中に高濃度で溶出する傾向が見られた。



# 4.7 焼却主灰グリーン改質技術導入ガイドラインの検討

本研究課題では、焼却主灰グリーン改質技術の導入を実現するためのガイドラインの作成について検 討を進めることとしている。そこで、表1-4のようにグリーン改質技術を総括して適切な方策を提示し、 図1-24のような構成によるガイドライン案を提示した。ガイドラインの主対象はグリーン改質技術を導 入しようとする市区町村・事務組合とした。前述したように、物理選別とエージングを適用することで、 焼却主灰の環境安全性は大幅に向上できることが確認できた。しかしながら、主に含有量基準について、 目標品質を必ずしも達成できないことが確認されたことも事実である。先に掲げた目標品質は、現在、 様々な再生製品に対して適用されているものと同等の品質基準であるが、近年、ある再生製品について、 県が提示する品質基準を満足できないことから業務停止命令を受けた事例がある。これらの点を踏まえ ると、基準達成が困難なケースが残されるまま、ガイドラインを公表することは、広く焼却主灰の資源 化に対する社会的な信用の確保という観点から、時期尚早と判断し、さらに研究を重ねる必要があると いう結論に達した。以上の理由により、ガイドラインについては、図1-24に示す構成案の提示に留める こととした。構成案は本研究を通して取り組んだ内容を網羅しており、また、その流れにそって理解す ることでグリーン改質技術を導入し、さらに改善を図ることが可能なものとなっている。本研究課題は 今後の焼却主灰資源化研究の更なる発展に向けて、多くの知見を蓄積し、成果を広く発信したものであ り、極めて有益な取り組みであったと自負している。最大の課題は焼却主灰中へ移行する焼却対象廃棄 物中の有害物質の低減である。安定的に基準を満足できる廃棄物の分別方法や灰の選別方法を確立でき れば、焼却主灰グリーン改質技術の導入は実現可能と考える。

# 表1-4 グリーン改質技術の導入効果の総括

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	〇重量粒子回収		〇異物除去	
	渦電流	〇非鉄回収	O異物除去		
	磁力	〇鉄回収	〇異物除去		
	破砕	〇金属粒子分離	〇異物分離		取扱い(建)
促進エージング	散水(少量)		〇塩素除去	○塩の洗出し △六価クロム(薬剤で対応可能)	
	炭酸化			〇鉛7 OpH	下溶化  低下
落じん灰分離 O-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。



図1-24 グリーン改質技術導入ガイドラインの構成案

# 4.8 まとめ

- ・当該推進費研究チームと廃棄物3R研究財団のブレークスルー促進事業とによるコンソーシアム型の研 究体制を構築した。
- ・焼却主灰を主とする熱処理残渣の資源化の現状を市区町村レベルで精査し、市区町村の人口と最終処 分場の残余容量が主要な因子であることを明らかにした。
- ・焼却主灰の輸送コスト、処理コスト、落じん灰等の売却による便益に着目し、焼却主灰等の発生量、 各施設の受入能力を推計し、地域特性に応じた処理方法と処理先を計算により提示した。
- ・環境負荷の指標として温室効果ガス(GHG)排出量に着目し、焼却主灰グリーン改質技術と他の資源 化技術との比較評価を行い、セメント原料化と同等程度の環境負荷であることを示した。
- ・再生製品の品質基準を調査し、グリーン改質主灰が目標とするべき品質基準(含有量基準、溶出量基準)を設定した。
- ・エアテーブルまたは渦電流による物理選別と促進エージングを焼却主灰に適用し、グリーン改質技術

により、含有量基準と溶出量基準の両面から、焼却主灰の環境安全性が実際に向上できることを確認した。

・焼却主灰グリーン改質技術を総括し、導入ガイドラインの構成案を提示した。

## 5. 研究目標の達成状況

グリーン改質技術の環境負荷とコストを定量評価した。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、他のサブテーマと連携して得られた改質主灰を評価した。さ らに、グリーン改質技術の導入効果を総括して適切な方策を提示し、改質技術導入ガイドラインの構成 案を提示した。以上により、当該サブテーマの目標は概ね達成することができた。

## 6. 引用文献

# 参考文献

1) 環境省(2020)平成30年度一般廃棄物処理実態調査,

https://www.env.go.jp/recycle/waste\_tech/ippan/h30/index.html (2020.11.04 閲覧)

- 2) 肴倉宏史(2018):都市ごみ焼却残渣の資源化の現状と課題,廃棄物資源循環学会誌, Vol. 29, No.
   5, pp. 339-348
- 3) 一般社団法人セメント協会, http://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jc.html (2020.11.04 閲覧)
- 4) 一般社団法人日本産業機械工業会エコスラグ利用普及委員会:2018 年度版 エコスラグ有効利用の 現状とデータ集
- 5) クリーンジャパンセンター(2010):ごみ焼却灰リサイクルの温室効果ガス排出削減・ライフサイク ル管理に関する調査研究 —民間施設を活用したごみ焼却灰のリサイクルに関する調査研究(その 2)
- 6) 飯野成憲,荒井康裕,稲員とよの,小泉明(2016):都市及び周辺地域におけるごみ焼却灰のセメン ト資源化システムに関するモデル分析,土木学会論文集G(環境),Vol. 72,No.6(環境システム 研究論文集 第44巻),Ⅱ\_35-Ⅱ\_44
- 7) 飯野成憲,荒井康裕,岡田万由子,稲員とよの,小泉明(2017)都市ごみ焼却灰の脱塩処理コスト を考慮したセメント資源化モデル.土木学会論文集G(環境), Vol. 73, No.6(環境システム研 究論文 第45巻),Ⅱ\_179-Ⅱ\_188
- 8) 一般財団法人経済調査会:月刊積算資料 公表価格版 2018 年1月号
- 9) 山口直久、河井紘輔、大迫政浩、松藤敏彦:集約型還元溶融施設による焼却残渣再資源化事業のマ テリアルフロー解析による資源代替性およびLCC02評価,廃棄物資源循環学会論文誌, Vol. 29, pp. 191-205, 2018.
- 10) 公益社団法人地盤工学会:地盤材料試験の方法と解説, p. 402, 2009.
- 11) 一般社団法人セメント協会:セメント系固化材による地盤改良マニュアル第4版, p. 248, 2014.
- 12) 環境省:土壌汚染対策法について、http://www.env.go.jp/water/dojo/law/kaisei2009.html (2019.05.07確認)
- 13) 肴倉宏史:環境安全品質基準に関する最近の動向と課題、地盤工学会誌、Vol. 64, No. 11/12, pp. 8-11, 2016.
- 14) M. Fernandez Bertos et al., Journal of Hazardous Materials, B112, pp.193-205, 2004.

# Ⅱ-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

鳥取県衛生環境研究所 水環境対策チーム 成岡朋弘 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 肴倉宏史

<研究協力者>

国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター Back Seungki

### [要旨]

焼却主灰中重金属の由来を特定するとともに、その低減方策を検討することを目的とし、以下の調査 を実施した。まず、焼却主灰中の各元素の由来を明らかにするため、インプットである焼却対象廃棄物 の品目(厨芥、木・紙、ビニール・樹脂、不燃物類等)ごとに蛍光X線分析を実施して金属含有量を測定 した。また、主灰中の金属の含有量及び存在形態を明らかにするため、発生元の異なる7種の焼却主灰を 対象に、金属含有量分析やX線回折測定等を実施した。さらに、1施設を対象に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。

#### 1. 研究開発目的

重金属含有量の高いごみ品目の排除や、落じん灰の主灰への混合回避による、焼却主灰中重金属量の 低減効果を具体的に示す。このため、金属含有量分析をごみ品目毎に重ね、データの精度を高める。ま た、焼却ごみ品目の異なる焼却施設から焼却主灰ならびに落じん灰を収集し、各灰の金属含有量や金属 存在形態を明らかにする。

## 2. 研究目標

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。

#### 3. 研究開発内容

焼却対象廃棄物の品目ごとの金属含有量データの収集:焼却主灰中の各元素の由来を明らかにするため、インプットである焼却対象廃棄物の品目(厨芥、木・紙、ビニール・樹脂、不燃物類等)ごとに蛍 光X線分析を実施して金属含有量を測定した。測定対象元素には、有害金属(Pb、Cd、Cr、Hg、As、Se) と貴金属(Au、Ag、Cu、Pt、Pd)を含めた。

主灰中の金属の含有量及び存在形態の分析:焼却対象品目が焼却主灰および落じん灰中の金属含有量 や存在形態へ及ぼす影響を明らかにするため、焼却対象品目等の異なる主灰に対して金属含有量分析や X線回折測定等を実施した。

有害金属の排除方法の検討: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。

#### 4. 結果及び考察

#### 4.1 焼却対象廃棄物の品目ごとの金属含有量データの収集

有害金属の由来となる廃棄物の品目の特定を目指して、以下の方法により、焼却対象廃棄物の品目ご との金属含有量データを収集した。

一般廃棄物の焼却処理施設Aにおいて、事業所の展開検査の際に焼却対象廃棄物を分析試料として品 目毎に分類して採取した。採取した試料は、品目毎に重量を測定した後、40℃で乾燥させ、再び乾燥後 の重量を測定した。表2-1に採取した試料の一覧を示す。採取した試料は大分類として可燃物と不燃物に
分類した。乾燥重量ベースで可燃物は98.9%、不燃物は1.1%という割合であった。可燃物については、中 分類として、紙類、繊維類、厨芥類、木草類、プラスチック類、ゴム・皮革類、その他可燃物の7品目に 分類した。また、不燃物については、中分類として、金属鉄類、金属非鉄類、ガラス類、石・陶磁類、 その他不燃物類の5品目に分類した。さらに、小分類として、繊維類は4分類、ゴム・皮革類は5分類、金 属鉄類は2分類、金属非鉄類は3分類、ガラス類は2分類にそれぞれ分類した。

	品目分類		乾燥則	重重	乾燥後				
大分類	中分類	小分類	重量(kg)	割合(%)	重量(kg)	割合(%)			
	紙類	紙類	112. 2	36.56	77.0	44.94			
	繊維類	<ul> <li>繊維類①</li> <li>繊維類②</li> <li>繊維類②</li> </ul>	21.2	6. 92	20. 5	11.98			
		<u>繊維類③</u> 繊維類④							
	厨芥類	厨芥類	92.6	30.16	19.7	11.51			
可燃物	木草類	木草類	19.2	6.25	3.5	2.03			
	プラスチック類	プラスチック類	44.6	14.53	38.0	22.16			
	ゴム・皮革類	ゴム・皮革類① ゴム・皮革類②							
		ゴム・皮革類③ ゴム・皮革類④	1.9	0. 61	1.6	0.95			
		ゴム・皮革類⑤							
	その他可燃物類	その他可燃物類	13. 2	4.30	9.2	5.38			
	金属鉄類	金属鉄類① 金属鉄類②	0.1	0. 02	0. 1	0.04			
不恢物	金属非鉄類	金属非鉄類① 金属非鉄類② 金属非鉄類③	0. 1	0. 04	0. 1	0. 05			
-1 × <i>K</i> 193	ガラス類	ガラス類① ガラス類②	1.3	0. 42	1.3	0. 75			
	石・陶磁類	石・陶磁類	0.1	0.04	0.1	0.07			
	その他不燃物類	その他不燃物類	0.5	0.16	0.2	0.14			
合計			307.0	100.00	171.2	100.00			

表2-1 採取試料一覧

乾燥後の試料を対象に、蛍光X線分析装置(Thermo Fisher Scientific社製 XL3 t-950S)により、金属元素の含有率を測定した。蛍光X線分析装置の分析モードは、ppmオーダーの金属の分析に適応した土 壌モードとし、分析時間は、3つのフィルターについてそれぞれ10秒間とした。また、分析回数は、紙類 n=20、繊維類①n=20、繊維類②③④それぞれn=3、厨芥類n=20、木草類n=10、プラスチック類n=15、ゴム・ 皮革類①②③④⑤それぞれn=3、その他可燃物類n=5、金属鉄類①②それぞれn=3、金属非鉄類①②③それ ぞれn=3、ガラス類①②それぞれn=3、石・陶磁類n=3、その他不燃物類n=3とした。

分類した各試料の分析結果を可燃物については図2-1、不燃物については図2-2にそれぞれ示す。有価 金属の含有が確認されたのは、金属非鉄類②の銅であった。金属非鉄類②には、4,000ppmの銅が含有し ていた。当該試料は金属製の容器であり、銅の他にはマンガン、鉄、亜鉛等の金属も含有していた。ま た、有害金属の高濃度の含有が確認されたのは、ゴム・皮革類①のクロム、石・陶磁類の鉛であった。

ゴム・皮革類①には、64,000ppmのクロムが含有していた。当該試料は革製品であり、クロムなめし革で あることが示唆された。クロムなめし革は通常で30,000~50,000ppmの酸化クロムを含有している。一方、 石・陶磁類には、45,000ppmの鉛が含有していた。当該試料は、黄色の陶器であり、黄色の顔料に鉛が含 まれていることが示唆された。

以上の結果から、対象とした焼却対象廃棄物試料中の金属含有率を求めた結果を図2-3に示す。廃棄物 試料全体としてみた場合は、有用金属については、銅が57ppm含有していた。また、有害金属としては、 鉛が39ppm、クロムが530ppm含有していた。







図2-2 不燃物に分類した試料の金属含有率





焼却対象品目が焼却主灰および落じん灰中の金属含有量や存 在形態へ及ぼす影響を明らかにするため、以下の方法により、主 灰中の金属の含有量及び存在形態の分析を行った。分析の対象と した試料は、一般廃棄物焼却施設の焼却主灰であり、表2-2に示 す7施設において採取した。なお、焼却主灰の冷却方法や不燃物 の破砕残渣の焼却が焼却主灰の金属含有量や化合物に及ぼす影 響について考察するために、7施設の内訳として、焼却後の主灰 の冷却を水冷で行っている施設を5施設、空冷で行っている施設 を2施設選定した。また、焼却対象物に施設内で発生する不燃物

表2-2 供試料一覧

試料名	乾湿	不燃残渣投入
WR1	湿灰	0
WR2	湿灰	0
WR3	湿灰	0
WR5	湿灰	0
WN1	湿灰	×
DR1	乾灰	0
DR2	乾灰	0

破砕後の可燃性残渣を含めている施設はそのうちの6施設である。各施設で採取した焼却主灰は、目開き 10mmのふるいで分級し、ふるい下の試料を供試料とした。供試料は、まず、ネオジム磁石(磁束密度: 約500mT)で磁力選別を行い、磁力選別の画分(MS)と残渣の画分(R)に分画した。次に、それぞれの 分画を、目開き5mm、2mm、1mm、0.5mm、0.25mm、0.125mm、0.063mmのふるいで分級した(例:図2-4)。 続いて、ふるいで分級したそれぞれの分画について重量を測定し、金属の含有率をエネルギー分散型蛍 光X線分析装置(サーモ社製 XL3 t -950S)で測定した。また、結晶化合物については、磁力選別分画の 割合が高かった0.25mm以上の分画と残渣分画の割合が高かった0.25mm未満の分画に分けてX線回折分析 装置(リガク社製 RINT3000)でそれぞれ分析した。

		粒径										
試料名	分画名	<0.063mm	0.063-	0.125-	0.25-	0.5-1mm	1-2mm	2-5mm	5mm<			
WR1	MS 磁力選 別		0.1251		U. Simi							
	R 残渣		Rege						and the second			
WR2	磁力選 別								No.			
	残渣											
WR3	磁力選 別								Sel.			
	残渣	A CAR				1-÷			-			
WR5	磁力選 別		17									
	残渣								A C			

図2-4 粒度分別した試料の様子(WR)

さらに、金属の簡便な分離を目的として、磁力選別を行った場合の元素の分配について併せて分析した。その結果、磁束密度約500mTのネオジム磁石により磁力選別された分画は全体の30~40%程度であった。また、磁力選別による分画の粒径別の重量割合を図2-5に示す。粒径別にみると、磁力選別の分画の割合は、いずれの試料においても0.25mm以上の粒径において高かった。一方で、0.25mm未満の粒径では、ほぼ残渣が占めていた。



図2-5 磁力選別による分画の粒径別の重量割合

図2-6にエネルギー分散型蛍光X線分析装置により分析した各分画の金属含有率を示す。金属含有量は、 試料による差異は認められず、磁力選別、残渣のそれぞれの分画でほぼ同様の傾向がみられた。磁力選 別の分画では、Feの含有率が最も高く10<sup>4</sup>のオーダーであり、Zn、Ti、Pb、Cu、Baが10<sup>2</sup>~10<sup>3</sup>のオーダー で続いた。一方、残渣の分画では、Fe、Zn、Tiが10<sup>3</sup>のオーダーで高く、Pb、Cu、Baが10<sup>2</sup>~10<sup>3</sup>のオーダ ーで続いた。金属含有量の序列は、磁力選別の分画ではFe>Zn、Ti>Pb、Cu、Ba>Zr、Ni、Cr、Sb、Sn >Mn、残渣の分画ではFe、Zn、Ti>Pb、Cu、Ba>Zr、Ni、Cr、Sb、Sn>Mnであった。含有量に対する粒 径別の各分画の寄与率を計算したところ、Cuについては、WR1の磁力選別の2mm-5mmの分画で特異値がみ られるが、概ね全ての試料において残渣分画の寄与率が磁力選別分画に対して高かった。Pb(図2-7)に ついても、概ね全ての試料において残渣分画の寄与率が磁力選別分画に対して高く、Cuと比較して残渣 分画の寄与率の高さが明瞭であった。一方、Crについては、試料によるばらつきが目立つが、磁力選別 分画の寄与率が残渣分画よりも高い粒径が多かった。



図2-6 各分画の金属含有率 (一部)





図2-8には、Fe、Cu、Pb、Crについて、各試料の磁力選別分画及び残渣分画として、すべての粒径分画 をまとめた含有量に対する寄与率を示す。Feについては、磁力選別により、6~8割が分離できていた。 Cuについては、WR1及びDR1では磁力選別分画の寄与率が残渣分画を上廻っていたが、他の5試料では、残 渣分画の寄与率が磁力選別分画の寄与率を上廻り、磁力選別によってCuが残渣分画に選別される傾向が みられた。Pbについては残渣分画の寄与率が高く、磁力選別によって4割~7割程度のPbを残渣分画に選 別できることが示唆された。Crについては、試料ごとのばらつきがあるが、磁力選別分画に3割~7割が 選別された。

図2-9にX線回折分析の結果、表2-3に同定された結晶化合物組成をそれぞれ示す。金属の結晶化合物として同定されたものは、Hematite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)のみであり、WR1、WR2、WR3、WR5において検出された。その他の結晶化合物については、全ての試料においてQuartz (SiO<sub>2</sub>)及びCalcite (CaCO<sub>3</sub>)が検出された。また、湿灰であるWR1、WR2、WR3、WR5及びWN1においてはFriedel's salt (3CaO・Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・CaCl<sub>2</sub>・10H<sub>2</sub>O)が確認されたが、乾灰においては検出されなかった。一方で、乾灰であるDR1及びDR2においては、

Portlandite (Ca(OH)<sub>2</sub>) が検出されたが、湿灰においては検出されなかった。その他の結晶化合物については、Katoite (Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>-x(OH)<sub>4</sub>x x=1.5-3)、Albite (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)、Gehlenite (Ca<sub>2</sub>Al(AlSiO<sub>7</sub>))が検出された。







図2-9 X線回折分析結果

	WR1	WR2	WR3	WR5	WN1	DR1	DR2
Ettringite [3Ca0•Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> •3CaSO <sub>4</sub> •32H <sub>2</sub> O]	I	I	0	I	_	_	-
Friedel's salt $[3Ca0 \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O]$	0	0	0	0	0	_	-
Katoite $[Ca_3Al_2(SiO_4)_3-x(OH)_4x x=1.5-3]$	I	I	_	0	0	_	-
Albite [NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]	I	0	_	I	_	_	-
Portlandite [Ca(OH) <sub>2</sub> ]	1	Ι	-	-	-	0	0
Quartz [SiO <sub>2</sub> ]	0	0	0	0	0	0	0
Calcite [CaCO <sub>3</sub> ]	0	0	0	0	0	0	0
Gehlenite [Ca <sub>2</sub> Al(AlSiO <sub>7</sub> ) ]	0	0	0		0	_	0
Hematite [Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]	0	0	0	0	_	_	-

表2-3 同定された化合物組成

4.3 落じん灰の分離回収による有害金属の排除方策の検討

落じん灰を焼却主灰から分離回収し、落じん灰を金属リサイクル会社に売却している一般廃棄物焼却 処理施設Bにおいて、2018年4月から2020年9月まで焼却主灰、落じん灰を各月に採取し、金属含有率をエ ネルギー分散型蛍光X線分析装置(サーモ社製 XL3 t -950S)で分析した。また、施設から搬出される焼 却残渣の重量のデータを入手した。以上を元に、落じん灰の分離回収による焼却主灰の重金属削減効果 の試算し、有害金属の排除方策としての検討を行った。

B施設における焼却残渣の排出量を図2-10に示す。各月の搬出量は、焼却主灰が最も多く150~200t前後、続いて固化飛灰が70~150t前後であり、落じん灰は10t程度であった。搬出割合は、焼却主灰が60%、固化飛灰が38%、落じん灰が2%であった。なお、B施設においては、現状では、焼却主灰はセメントとしてリサイクルするためにセメント事業者に処理委託、固化飛灰は最終処分場で埋立処分を行っている。図2-11に焼却主灰及び落じん灰の金属含有率の変動を示す。金属含有率は、焼却主灰では、Feの含有率が最も高く10<sup>4</sup>のオーダーであり、Zn、Ti、Cuが10<sup>3</sup>オーダーで続いた。一方、落じん灰では、Cu、Feが10<sup>4</sup>のオーダーで高く、Zn、Tiが10<sup>3</sup>のオーダーで続いた。図2-12にFe、Cu、Pb、Crの4金属元素について焼却 主灰と落じん灰の含有率の比較を示した。Cu及びPbの含有率については、落じん灰の含有率が焼却主灰より高い傾向がみられた。一方、Fe及びCrの含有率については、焼却主灰と落じん灰で明確な差異はみられなかった。



図2-10 焼却残渣の搬出量(2018年4月~2020年9月)



図2-11 焼却主灰及び落じん灰の金属含有率の変動



図2-12 4金属元素の焼却主灰と落じん灰の含有量の比較

落じん灰を分離回収することによる焼却主灰の重金属削減の効果について試算した(表2-4)。2018年 4月から2020年9月までの間にB施設から搬出された落じん灰は180tであり、その全量がC社に売却された。 この間に落じん灰に含まれていたCuは含有率からおよそ7tであったと試算される。また、同様に、Pbに ついてはおよそ0.3トン、Crについてはおよそ0.02tが落じん灰として搬出されたと試算される。一方、 この間に搬出された焼却主灰は5,400tであり、焼却主灰に含有していた金属については、Cuが23t、Pbが 1.7t、Crが0.6tであった。これらの数値に基づいて、落じん灰を含む場合と分離した場合の焼却主灰の 金属含有量をそれぞれ試算した結果を表7に示す。落じん灰の分離によってCuについては5,400mg/kgか ら4,200mg/kgに、Pbについては350mg/kgから310mg/kgにそれぞれ減少し、低減効果が確認された。Crに ついては、落じん灰に含まれる量が焼却主灰と比較して微量であるため、低減効果はみられなかった。

	Cu	Pb	Cr							
	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)							
落じん灰非分離	5,400	350	100							
落じん灰分離	4,200	310	100							

表2-4 落じん灰分離による削減効果

### 5. 研究目標の達成状況

焼却対象廃棄物の品目ごとの金属含有量データの収集を行い、インプットである焼却対象廃棄物の品 目(厨芥、木・紙、ビニール・樹脂、不燃物類等)ごとに蛍光X線分析を実施して金属含有量を定量した。 主灰中の金属の含有量及び存在形態の分析では、焼却対象品目等の異なる主灰に対して金属含有量分析 やX線回折測定等を実施し、焼却対象品目が焼却主灰中の金属含有量や存在形態へ及ぼす影響を明らか にした。さらに、有害金属の排除方法の検討では、主灰および落じん灰の金属組成の月変動を調査し、 落じん灰排除による削減効果を評価した。以上により、研究目標を達成することができた。

### 6. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

Ⅱ-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

国立研究開発法人国立環境研究所

福島支部 汚染廃棄物管理研究室 飯野成憲 資源循環・廃棄物研究センター 看倉宏史

<研究協力者>

東京都環境科学研究所 環境資源研究科 辰市祐久 国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター Back Seungki

[要旨]

エアテーブル選別を焼却主灰へ適用するための条件の最適化と効率を把握するため、磁選や分級な どの前処理、空気量、斜度等の設定条件を検討した。研究計画ではエアテーブルを主体とした条件設定 を主な研究テーマとして想定していたが、実施設において主灰の含水率が高い場合に処理に支障がでる ことや、渦電流選別、破砕選別も実施している例が見られたため、当初の計画よりも研究範囲を広げて 実施した。

エアテーブルによりPb、Cu、Znは随伴して回収され、Pb及びCrでは含水率の影響を受けにくいー 方、Cuでは比較的影響を受けやすいと考えられた。Cuは渦電流選別では効率的に回収され、破砕選別に いおいて濃縮できる可能性があるものの、渦電流選別やエアテーブルにより処理が困難な0.5mm以下の 粒子の割合を増大させることがわかった。

### 1. 研究開発目的

近年、国内における主灰からの金属回収の取組が加速しており<sup>1,2)</sup>、大和田らは一般的な物理選別フローにおける金属成分の挙動を調査するとともにエアテーブル選別が重金属類、特に金等の貴金属の濃縮に効果的であることを指摘している<sup>3)</sup>。エアテーブル選別は比重の違いにより不適物等を除去する目的で使用され、プラスチック混合物からのPVCの分離<sup>4)</sup>、プラスチックと金属の分離におけるエアテーブルの各種パラメーターが選別効率に及ぼす影響<sup>5,6)</sup>、エアテーブル選別の分離機能<sup>7)</sup>等が過去に研究されている。エアテーブル選別を主灰からの金属回収に適用することにより、高密度粒子を分離回収し金属を製錬原料として、低密度粒子を土木資材やセメント原料として有効利用することが出来れば主灰の有効利用、さらには最終処分量の削減に貢献できると考える。なお、都市ごみ焼却施設から排出される主灰は一般的に水冷されるが、実機でのエアテーブル選別では高含水の主灰はデッキ面での固着等のトラブルを引き起こしやすいとという課題がある。

エアテーブル選別以外の物理選別技術として、欧州や国内で一般的な渦電流選別や破砕選別等が挙げ られる。渦電流選別は良導体に変化磁界を作用させると、電磁誘導によりその物質中に渦電流が発生し、 作用させた変化磁界との間に反発力を生じることを利用した選別技術である<sup>8)</sup>。国内では一般廃棄物の 不燃ごみからアルミニウムを回収するために利用される事例があるが、近年は焼却残渣からの有用金属 の回収にも活用され始めている<sup>1)</sup>。その他の主な選別技術として、破砕選別がある。主灰は、一般的に単 独あるいは合金等の金属のみからなるメタル粒子とCa、A1、Siといった鉱物からなるミネラル粒子から 成る。破砕によりメタル粒子とミネラル粒子を分離する単体分離を促進することで金属回収効率の向上 が期待できる。

一方、物理選別において主に金をはじめとした有用金属の回収が重視され、主灰に含まれる有害金属 を除去し環境安全性を高めることを目指した研究は少ない。エアテーブル選別、渦電流選別、破砕選別 において有用金属に有害金属を随伴して回収することで、主灰から有用金属と有害金属を同時に回収す ることが期待できる。しかし、エアテーブル選別、渦電流選別、破砕選別プロセスにおける金属回収条 件、随伴挙動、さらにはこれらの選別プロセス全体としての金属のサブスタンスフローについては、こ れまでほとんど研究されていない。

そこで本研究では、これらの物理選別技術において有用金属とともに有害金属を随伴して回収するこ とを目指し、物理選別における有用・有害金属の選別特性、主灰の含水率が金属選別特性に及ぼす影響、 選別プロセスにおけるサブスタンスフローについて調査した。

### 2. 研究目標

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。

### 3. 研究開発内容

エアテーブル選別を焼却主灰へ適用するための条件の最適化と効率を把握するため、磁選や分級な どの前処理、空気量、斜度等の設定条件を検討した。研究計画ではエアテーブルを主体とした条件設定 を主な研究テーマとして想定していたが、実施設において主灰の含水率が高い場合に処理に支障がでる ことや、渦電流選別、破砕選別も実施している例が見られたため、当初の計画よりも研究範囲を広げて 実施した。

### 4. 結果及び考察

## 4.1 エアテーブル選別における主灰中の金属の選別特性

### 4.1.1 エアテーブル選別前主灰の金属含有量

図 3-1 にエアテーブル選別前の主灰の金属含有量を示す。篩下-王水分解、篩下-アルカリ融解のエラ ーバーは5回測定の最大値と最小値を示している。2.0-4.0 mm および4.0-8.0 mm の粒子、特にPbとAs では篩下試料のばらつきが大きかった。Pb、Fe、Ca では篩下-王水分解、As では篩下-アルカリ融解、Cu、 Zn、A1 では篩上-王水分解の割合が高く、Pb、Cu、A1 については既往の研究成果<sup>9)</sup>と同様の傾向であっ た。Pb、Fe、Ca は微小粒子まで粉砕され王水に溶解されやすい形態の割合が高いと考えられた。一方、 Cu、Zn、A1 は微小粒子まで粉砕されにくく、王水に溶解されやすい金属形態の割合が高いと考えられた。 A1 については主灰中に金属 A1 の存在が確認されているが<sup>10)</sup>、篩下試料も篩上試料と同等程度の A1 が 含まれていることから、元々の形態が酸化物である A1、焼却過程で酸化物態に変化した A1 も一定程度 含まれていると考えられた。

### 4.1.2 高密度粒子の粒子密度と金属含有量の関係

エアテーブル選別には日本エリーズマグネチックス(㈱製、ポケットエアテーブルを使用した。装置本 体の概要を図3-2に示す。本体は網目付のデッキ、ファン、振動用モーターより構成される。ホッパーよ り主灰を投入し、電子振動フィーダーによりエアテーブル本体に供給される。エアテーブルはデッキの 振動と空気の上昇流によってデッキ上の粒子を持ち上げて広げ、粒子の層を形成する。振動と空気によ り低密度粒子は浮き上がり、高密度粒子は沈んでデッキ表面に接触する。デッキの前進と返しの動きで 高密度粒子はデッキに沿って動き、エンドスロープ角の高い方(図3-2の向かって右側)に向かう<sup>4)</sup>。一 方、低密度粒子はデッキと粒子間に生じる摩擦力が低下しエンドスロープ角の低い方(図3-2の向かって 左側)に向かう。高密度粒子と低密度粒子はスプリッターにより分けられ、それぞれ容器に回収される。 振動数の増加は高密度側に粒子を向かわせ、かつ排出速度を増加させる。空気速度の増加はエンドスロ ープ角の低い方に粒子を向かわせ、サイドスロープ角の増加は排出速度を高める。したがって、エンド スロープ角、振動数、空気速度のバランスにより高密度粒子と低密度粒子の重量割合や選別特性が決定 され、いずれかのパラメーターのみを増減させると、高密度側あるいは低密度側の容器のいずれか片方 に回収され、選別が出来なくなるという特徴がある。



図3-1 エアテーブル選別前の主灰の金属含有量



図3-2 主灰エアテーブルの構造及びパラメーター

処理量は振動数やサイドスロープ角の影響を受ける。そこで、主灰の投入速度と排出速度を可能な限 り等しくするため、各振動数、エンドスロープ角、空気速度における主灰排出量から振動フィーダーの 強度を決定した。選別条件の決定においては、サイドスロープ角を全て0°に固定した上でエンドスロー プ角、振動数、空気速度を変化させ粒子全体がデッキ上に隙間なく広がる条件とした。主灰投入直後お よび排出終了直前はデッキ上に粒子が存在しなくなる部分が生じることから、当該時間を除いて高密度 粒子および低密度粒子を回収し、重量割合、処理速度を測定した。

図 3-3 および図 3-4 に高密度粒子の粒子密度と金属含有量の関係を示す。金属含有量は篩下-王水、 篩下-アルカリ融解、篩上-王水分解の合計量である。図 3-7 より、0.5-1.0 mm、1.0-2.0 mmの粒径画 分では粒子密度の増加に伴い Pb、Cu、Zn の金属含有量は増加する一方、Ca ではやや減少する傾向が確 認された。A1、Cr、Fe では粒子密度による金属含有量の変化は小さく、As では明確な傾向は確認され なかった。また、図 3-4 より、いずれの金属も 2.0-4.0 mm、4.0-8.0 mmの粒子では粒子密度と金属含 有量 に明確な関係は確認できず、試料のばらつきの影響と考えられた。



図3-4 高密度粒子の粒子密度と金属含有量の関係(2.0-8.0mm)

# 4.1.3 高密度粒子と低密度粒子の粒子密度差と総合分離効率の関係

高密度粒子と低密度粒子の粒子密度の差の増加に伴い、効果的に高密度粒子と低密度粒子が選別されるという仮説を立て、両者の粒子密度差と総合分離効率 η Nの関係を整理した。さらに、総合分離効率の 最も高い条件における選別前後の金属含有量を整理した。ここで総合分離効率 η Nは

$$\eta_N = \frac{X_2}{X_1} + \frac{Y_3}{Y_1} - 1 \tag{1}$$

で示される。Xは資源物中の対象物質含有量、Yは不適物中の対象物質含有量、添え字1は選別前、添え字 2は回収物、添え字3は除去物を示す。式(1)の右辺第1項はXの回収率、第2項はYの除去側への回収率であ り、完全に分離できると<sub>η N</sub>は1となる<sup>11)</sup>。<sub>η N</sub>の物理的意味は、全処理量のうち理想分離(濃縮物中の着 目成分の品位と回収率がともに1)が達成された割合である<sup>12)</sup>。

エアテーブル選別において、高密度粒子を分離回収し、低密度粒子を土木資材やセメント原料化により有効利用を目指す目的からは高密度粒子、低密度粒子のいずれも回収物となるが、ここでは2:高密度 粒子、3:低密度粒子とした。 $X_2$ および $X_3$ は全含有量 (mg/kg)と重量割合(-)の積より計算した。不適物と は金属に着目した場合、当該金属以外であることを示し、 $Y_2$ および $Y_3$ は(1,000,000 - 全含有量)(mg/kg) と重量割合(-)の積より計算した。 $X_1$ および $Y_1$ は高密度粒子、低密度粒子の全含有量と重量割合より計算 した。

図3-5および図3-6に高密度粒子と低密度粒子の粒子密度差と総合分離効率の関係を示す。図3-9より、 0.5-2.0 mmのPb、Cu、Zn、Cr、Feでは粒子密度差の増加に伴い総合分離効率が向上する傾向が確認され たが、このうちCrおよびFeの総合分離効率は0.0-0.1程度と低かった。A1、Ca、Asでは粒子密度と総合分 離効率の間に明確な関係は確認されず、いずれも低い総合分離効率であったことから、A1、Cr、Fe、Ca、 Asではエアテーブルによる十分な選別は困難であることが示唆された。図3-6より、2.0-4.0 mm、4.0-8.0 mmの粒子ではいずれの金属も粒子密度差と金属含有量に明確な関係は確認されなかった。



図3-5 粒子密度差と総合分離効率の関係(0.5-1.0mm)



図3-6 粒子密度差と総合分離効率の関係(2.0-8.0mm)

# 4.1.4 総合分離効率が最大の選別条件における金属形態と濃縮挙動

表3-1に粒径ごとのPb、Cu、Znの最も総合分離効率が高い選別条件、図3-7に当該条件下における選別 前後の金属含有量をそれぞれ示す。表3-1より粒子径が大きくなるにつれて適切なエンドスロープ角は 高くなる傾向が確認された。篩下-王水、篩下-アルカリ融解、篩上-王水分解別の金属の濃縮挙動を評価 するため、図3-7より低密度粒子の金属含有量に対する高密度粒子の金属含有量を算出した(表3-2)。 表3-2より、Pb、Cu、Znともに篩上-王水分解が特に高く、篩下-アルカリ融解では低かった。これは、粉 砕が困難で王水に易溶な金属態粒子では密度が大きいために効率的に選別できる一方、アルミノケイ酸 塩等に取り込まれ王水に分解しにくい形態の粒子は周囲の粒子と密度差が生じにくく、選別が困難にな るためと考えられた。

率の高い選別条件	

粒子径 (mm)	金属	エンドス ロープ角 (°)	振動数 (s <sup>-1</sup> )	空気速度 (m s <sup>-1</sup> )
0510	Pb	10.5	7.79	1.23
0.3-1.0	Cu, Zn	10.5	8.35	1.74
1.0-2.0	Pb, Cu, Zn	10.5	7.79	2.36
2040	Pb	10.5	7.79	2.78
2.0-4.0	Cu, Zn	12.5	7.79	2.10
4.0-8.0	Pb, Cu	14.5	8.90	2.64
	Zn	13.5	7.24	2.01

# 表3-2 低密度粒子の金属含有量に対する高密 度粒子の金属含有量

金属	粒子径 (mm)	篩下- 王水分解	篩下- アルカリ 融解	篩上- 王水分解	合計
Pb	0.5-1.0	9.7	3.7	16.2	8.4
	1.0-2.0	7.5	1.9	29.2	7.8
	2.0-4.0	2.1	5.3	0.6	2.7
	4.0-8.0	2.5	1.2	45.2	4.3
Cu	0.5-1.0	9.5	1.9	114.9	15.1
	1.0-2.0	7.6	1.9	29.7	12.5
	2.0-4.0	3.7	1.9	3.9	3.7
	4.0-8.0	0.3	0.5	12.0	5.7
Zn	0.5-1.0	2.8	1.0	22.5	3.9
	1.0-2.0	2.7	1.1	27.7	5.4
	2.0-4.0	1.4	1.9	93.4	12.5
	4.0-8.0	0.6	0.7	16.8	7.2



■篩下-王水分解 ■篩下-アルカリ融解 ■篩上-王水分解

図3-7 選別前後の金属含有量

# 4.1.5 高密度粒子に含まれる金属の随伴挙動

選別後の粒子に含まれる各金属の随伴挙動を評価するため、相関係数を算出した。表3-3に高密度粒子 (0.5-2.0 mm)の全含有量から計算した金属別の相関係数(N = 20)を示す。Pb、Cu、Znは0.9を超える相 関係数を示しており、エアテーブル選別によりこれらの金属は随伴して回収されることがわかった。Pb の由来は明らかではないが、CuとZnは真鍮の割合が高いと考えられた。

表	3–3	高密度	【粒子	(0.5-	2.0 m	m) の	全含有	量	0.6			1
か	ら計算	した	金属別	の相関	関係数	(N =	20)		0.5			
	Pb	Cu	Zn	Al	Cr	Fe	Ca	As	j ∰a 0.4 ∎			
Pb	1.00								雤 0.3			1
Cu	<u>0.96</u>	1.00							0.2		0 5 1 0mm	
Zn	<u>0.90</u>	0.92	1.00						縦 0.1			
Al	0.31	0.31	0.54	1.00					0.1			
Cr	0.78	0.76	0.80	0.39	1.00				0.0		-	1
Fe	0.72	0.70	0.63	0.39	0.71	1.00				リリリン 1 サイドスロ	.5 1ープ(゜)	5
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	图3-8 5	テイトスローフタ	<b>∃と</b> ηの関係(P	D)

### 4.1.6 サイドスロープ角の変化が総合分離効率及び選別可能量に及ぼす影響

主灰を土木材料として利用する際には、Pbの含有量が課題になることが多いことから、Pbの総合分離 効率が最も高い条件下においてサイドスロープ角のみを0°から最大の3°まで変化させ、選別量の増加 が総合分離効率に及ぼす影響、焼却施設への適用時の選別可能量の推計を実施した。

図3-8に表3-1のPbの最適選別条件からサイドスロープ角のみを変化させた場合の総合分離効率の影響を示す。サイドスロープの増加に伴い、分離効率が向上した。選別量の増加に伴いテーブル上の主灰と空気の接触状態が変化し分離効率の向上に何らかの形で寄与したものと考えられた。

本実験ではサイドスロープを最大にすると選別量、総合分離効率のいずれも向上することがわかる。当 該条件を元に、物理選別設備を設置する際の最小処理単位と想定される都市ごみ焼却施設におけるエア テーブル選別可能量を推計した(表3-4)。上段は焼却施設処理能力から計算したエアテーブル選別推計 量、下段は本実験で用いたエアテーブルのエンドスロープ長さ(30cm)をベースに10倍にスケールアッ プした場合の選別推計量である。エアテーブルの機種や構造にもよるが、太字で示すように各粒径で4台 程度のエアテーブルが必要となり、設置スペース、費用の観点から主灰全量の選別は困難と考えられた。

						■■高密度	💻 低密度 🛛 🛶	-高密度-低密度	
					1.3				0.6
表3-4 递	髬別可能	能量の	推計		1.2 (Em 1.1 1.0				0.5 0.4
項目	数値	単位	記号	備考	- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		┛╾╲┛┛╴┛┛	╺┛╾╸╲┫╴┛┫┥	0.3 畄
焼却施設処理能力	300	t/day			图 0.8	╏╌╢╉╢┰	╶┛──╲╵┛╌┛┨╸		0.2 世
乾灰発生量(鉄・異物除く)	18	t/day	а		<b>夜</b> 0.7	╺╻╗╌╗┫╌╗╋╴		┫╤╌┛┫╌╲┫┥	0.1 H
エアテーブル選別割合	0.736	-	b	3.1より	0.6		▋▋▐▋▌゙゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚	▝▋▋─▋▋─₿₿	0.0
エアテーブル選別量	13.2	t/day	с	a*b	0.5	09/ 109/ 159/	09/ 109/ 159/	09/ 109/ 159/	-0.1
(各粒径が等量発生した場合)	3.31	t∕day	d	c/4	_	070 1070 1370	070 1070 1370	070 1070 1370	
エアテーブル選別量						0.5-1.0mm	1.0-2.0mm	2.0-4.0mm	
(各粒径が等量発生した場合)	160	g/min	е				含水率と粒径		
単位換算(8h/day稼動)	0.08	t/day	f	e*60*8*10 <sup>-6</sup>	図	3-9 選別後	の粒子のかる	さ密度(wet)	
<u>スケールアップ(10倍)</u>	0.8	t∕day	g	f*10	-				

### 4.1.7 エアテーブル選別における含水率が選別特性に及ぼす影響

サイドスロープ角を0°に固定し、含水率0%、10%、15%にて選別実験を実施した。含水率0%における選 別条件はPbにおいて最も総合分離効率の高い条件とした。含水率を変更することで主灰とデッキ面に働 く摩擦力等の力学特性が変化することから、含水率10%、15%における実験条件は、含水率0%における条 件から一部変更した。

図3-9にエアテーブル選別後の高密度粒子及び低密度粒子のかさ密度及びそれらのかさ密度差を示す。 いずれの分画においても、含水率の上昇とともに高密度粒子と低密度粒子のかさ密度の差が縮小し、バ ルクとしての比重選別は困難となっていると考えられる。0.5-1.0mmの分画では、含水率が上昇しても低 密度粒子のかさ密度の増加は限定的であった。この一因として、0.5-1.0mmの含水した粒子は表面積が大 きいことから、エアテーブルのエンドスロープに粒子が到達する前に下部からの空気により一定程度乾 燥が進んだことが考えられる。

図3-10にエアテーブル選別前後における金属含有量を示す。Cuでは大部分が王水分解画分であったことから、メタル粒子が多いと考えられた。一方、Crではアルカリ融解画分の割合が比較的多く、王水等の強酸に難溶な酸化物の形態の割合が多いと考えられた。Pb、Cuの場合、含水率の違いによらず0.5-1.0mm、1.0-2.0mmの高密度粒子と低密度粒子の金属含有量には比較的差が見られた。一方、Crではいずれの粒径においても高密度粒子と低密度粒子の金属含有量の違いは小さく、分離が不十分であった。理論上、エアテーブル選別後は選別前の金属含有量よりも高密度側では高含有量、低密度側では低含有量となるが、2.0-4.0 mmでは、一部選別前に比べ高密度側、低密度側のいずれも高含有量、あるいは低含有量になるなど選別前後の収支が合わず、ばらつきの影響と考えられた。なお、高密度粒子と低密度粒子の重量比は概ね3:7~4:6程度であった。



図3-10 エアテーブル選別前後の金属含有量



図3-11 含水率と総合分離効率

図3-11に粒径ごとの含水率と総合分離効率の関係を示す。上述のとおり一部選別前後の収支が合わな かったため、高密度粒子と低密度粒子の金属含有量と重量比から選別前の金属含有量を算出した。Pb及 びCrの場合、0.5-1.0mm、1.0-2.0mmでは含水率が増加しても総合分離効率に大きな変化は見られなかっ た。一方、Cuの場合、1.0-2.0mmで含水率の増加に伴い総合分離効率は低下した。含水率が総合分離効率 に及ぼす影響は元素により異なると考えられた。図3-13のかさ密度と合わせて考察すると、含水率の増 加に伴い高密度粒子と低密度粒子のかさ密度差は縮小するが、元素によっては総合分離効率への影響は 限定的であることから、バルクとしてではなく主灰に含まれる微量の金属粒子が、周囲に存在するCaや Si等からなるミネラル粒子との密度差によってミクロレベルで分離しているものと思われる。

# 4.2 渦電流選別による主灰の選別特性評価

電磁誘導効果により金属を選別回収する渦電流選別技術を主灰に適用し、選別条件を変化させた際の 金属選別特性を評価した。また、エージング技術として炭酸化処理に着目し、炭酸化の有無による渦電 流選別の影響についても評価した。

分離板(デバイダ)の高さ方向を3パターン設定し、ローターとコンベア表面の接点、すなわち最も磁力が強い位置をHigh、そのときの表面磁力を1とし、磁力がHighの1/10となる高さをMiddle、同1/100となる高さをLowとした(図3-12)。コンベアの進行方向のデバイダ位置は、渦電流を発生させずにコンベアのみを60m/minで運転したときの主灰の粒子軌道を事前に確認し、その軌道の最遠方(ローターから遠い方向)位置とした。選別実験はコンベア速度60 m/min、ローター回転速度約4200rpmで実施し、反応物及び未反応物を回収した。



図3-12 渦電流選別機の構造と実験方法

図3-13に選別実験前のCO<sub>2</sub>-ECS及びECS-CO<sub>2</sub>の分級試料の金属含有量を示す。金属別にみると、Pbは篩下 -王水画分の割合が高いことから、微小粒子まで粉砕されやすく、メタル粒子が多いと考えられた。Cuは 篩上-王水分解画分の割合が高いことから粉砕されにくく、メタルの形態の割合が高いと考えられた。A1 は篩下-アルカリ融解画分の割合が高い傾向が見られたことから、王水では溶解しにくいカルシウムシ リケート等の形態の割合が高いと考えられた。いずれの金属においても篩上-アルカリ融解の割合は小 さく、篩上に残る残渣の多くがメタル形態と推測された。





図3-14 渦電流選別前後の金属含有量(ECS-CO2) ※L:Low, M:Middle, H:High

図3-14にECS-CO<sub>2</sub>の渦電流選別前後における金属含有量、図3-15に選別後の分配率を示す。図3-14より、 Pb、Cu、A1ともに選別後に反応物の含有量が高くなっている一方、図3-15より反応物への分配率はPbや A1では非反応物への分配率が高かった。詳細は省略するが0.5~8.0 mm粒径において、非反応物への重量 分配率が約10%と低いためであると考えられた。一方、CuはPbやA1と比較して全体的に反応物への分配率 が高かった。これは、メタル粒子の割合が多いことによるものと考えられた。図3-16にPbの総合分離効 率を示す。4.0-8.0mmのECS-CO<sub>2</sub>のMiddleにおいて高い値を示したが、試料採取時のばらつきの影響と考 えられた。ECS-CO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>-ECSの傾向は概ね一致しており、ECS-CO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>-ECSともに2.0mm以下の粒子はLow、 2.0mm以上の粒子はMiddleからの採取が望ましく、Highの位置では磁力が最も強いもののデバイダと粒子の距離が短く分離効率が低かったものと推測された。全体としては、ECS-CO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>-ECSともに総合分離 効率は低く渦電流選別によるPbの分離には限界があると考えられた。



図3-15 渦電流選別後の反応物、非反応物の分配率(ECS-CO<sub>2</sub>)



### 4.3 インパクトミル破砕による主灰の選別特性評価

破砕によりメタル粒子とミネラル粒子を分離する単体分離を促進することで金属回収効率の向上を 目指し(図3-17)、インパクトミルによる主灰の破砕による元素の分配挙動を評価した。国内清掃工場 から採取した主灰の含水率を約10%にして炭酸ガスを吹き込み、磁力選別で鉄くず等を除去した後、篩振 盪器により粒度分布を確認した。粒度分布に合わせて試料を再度混合、縮分し、試料約250 gを約200 g/ 分の速度でインパクトミルに投入し、破砕した。インパクトミルの出口側にはスクリーンがあり、口径 を変更できる構造となっている。破砕前後の粒度分布の変化は、スクリーン口径と破砕速度の両方の影 響を受けると考えられることから、表3-4に示す実験条件で破砕実験を実施した。過破砕となることが懸 念されたが、試験的に回転速度2,000 rpmでのみスクリーン口径0.7 mmで破砕実験を実施した。スクリー ン口径の選択においては、物理選別の可能な0.5 mm以上の重量割合が大きくなる条件とした。



図3-18 破砕前後の粒度分布と重量割合

図3-18に破砕前後の粒度分布と重量割合を示す。凡例は粒径、横軸はスクリーン口径と回転速度である。スクリーン口径が6.0 mmの場合が最も0.5 mm通過粒径の割合が少ないことから、物理選別が可能な範囲が広いことになる。スクリーン口径が6.0 mmの場合に単体分離が効果的に進んでいるか否かについては汎用機器での確認は困難であるが、いずれの回転速度においても口径6.0 mmのスクリーンを使用し、以下に示す元素分配率を評価した。

図 3-19 は回転速度の違いによる破砕前後の各粒径への元素分配率を示したものである。比較のた め、図 3-20 より抜粋した破砕前後の重量割合も併せて示す。Ca、Si、Fe、C1、A1、Zn、Pb では回転速 度の増加に伴い重量割合の変化と同様に小粒径の分配率が増加した。一方で、Cu については破砕前に 比べ物理選別が不可能な<0.5 mmの分配率が増加しているものの、回転速度を増加しても各粒径への分 配率の変化は小さい。したがって、Cu については単体分離を促進させつつ後段に実施する可能性があ る渦電流選別あるいはエアテーブル選別で分離できる粒径範囲を維持することが可能と考えられた。な お、A1、Cu の 2.0-4.0 mm に着目すると、回転速度を増加しても分配率が大きく変化していない。これ は、破砕強度を上げてもメタル粒子として残留したためと考えられる。Pb については、2000rpm ではや や<0.5mm への分配率が小さくなっているが、元素含有量のばらつきの影響によるものと考えられた。



図3-19 回転速度の違いによる破砕前後の各粒径への元素分配率

# 4.4 物理選別による主灰のマテリアルフロー及び金属のサブスタンスフローの推計

選別条件及び国内における処理フロー<sup>1)</sup>を参考に、各種物理選別技術を組み合わせた際の重量ベース のマテリアルフロー及び金属のサブスタンスフローを推計した。なお、サブスタンスフローは重量に金 属含有量を掛けることで計算しているため、選別前後において合計量は一致しないことに注意が必要で ある。

空冷式の国内ストーカー式都市ごみ焼却施設から排出された乾燥主灰(乾灰)約80 kgを磁力選別によ

り選別した。>8.0mmの分画試料については、磁力選別後の試料を篩で<0.5mm、0.5-1.0mm、1.0-2.0mm、 2.0-4.0mm、4.0-8.0mm、>8.0mmに分画後、>8.0mmの試料から塊を150個選び、重量測定後、それぞれハン ドヘルド型蛍光X線分析装置で元素の分析を行った。元素ごとに塊重量で重み付けして8.0mm<の分画試 料全体の元素濃度値を計算した。また、微粉砕試料につては王水抽出とフッ酸分解を行い、ICP-MSにて 元素を定量した。渦電流選別機により分離した反応物と非反応物については、0.5-1.0mm、1.0-2.0mm、 2.0-4.0mm、4.0-8.0mmの分離した反応物と非反応物を分画試料と同様に蛍光X線分析、ICP-MS分析を行っ た。

図3-20に主灰1,000kgを処理した際のマテリアルフロー、図3-21~図3-24にFe、A1、Cu、Pbのサブスタンスフローを示す。

図3-20より、渦電流選別では多くが非反応物として残留することがわかる。図3-21より、Feは多くが 磁力選別により回収される。図3-22、図3-23より、渦電流選別およびエアテーブルを組み合わせること でA1は4.0-8.0mmの低比重粒子では96%まで、Cuは2.0-4.0mmの高密度粒子では23%まで濃縮することがで きた。図3-24より、Pbは渦電流選別、エアテーブル選別において特定の画分に濃縮することが困難であ ることが分かった。





# 図3-20 物理選別による主灰のマテリアルフロー

図3-21 物理選別によるFeのサブスタンスフロー



#### 図3-22 物理選別によるAIのサブスタンスフロー







図3-24 物理選別によるPbのサブスタンスフロー

### 4.5 まとめ

エアテーブル選別を焼却主灰へ適用するための条件の最適化と効率を把握するため、磁選や分級など の前処理、空気量、斜度等の設定条件を検討した。さらに、当初計画から範囲を拡げ、渦電流選別、破 砕選別についても検討を実施し、物理選別による主灰のサブスタンスフローを計算した。

エアテーブル選別では以下の事項を明らかにした。

1) 選別前の主灰の金属含有量を測定した結果、Pb、Fe、Caでは篩下-王水分解の形態割合が高いことか

ら、粉砕、王水溶解が容易な形態の割合が高いと考えられた。Cu、Zn、Al では篩上-王水分解の割合 が高いことから、粉砕が困難で王水溶解が容易な金属形態の割合が高いと考えられた。

- 2) 高密度粒子の粒子密度と金属含有量の関係では、0.5-1.0 mm、1.0-2.0 mmのPb、Cuでは粒子密度の 増加に伴い金属含有量は増加する一方、Caでは減少する傾向が確認された。
- 3) 高密度粒子と低密度粒子の粒子密度差と総合分離効率の関係では、0.5-2.0 mmのPb、Cu、Zn、Cr、 Feでは粒子密度差の増加に伴い総合分離効率が向上するが、うち、Cr、Feの総合分離効率は低かっ た。A1、Ca、Asは粒子密度差によらず総合分離効率は低かった。よって、A1、Cr、Fe、Ca、Asはエ アテーブル選別による選別は困難であることが示唆された。
- 4) Pb、Cu、Znの総合分離効率が高い選別条件における低密度粒子の金属含有量に対する高密度粒子の 金属含有量の比率を計算したところ、いずれの金属も篩上-王水分解が特に高く、篩下-アルカリ融 解では低かった。金属態粒子では周囲の粒子との密度差により効率的に選別できる一方、アルミノ ケイ酸塩等に取り込まれた粒子は周囲の粒子と密度差が生じにくく、選別が困難になると考えられ た。
- 5) 0.5-2.0 mmの高密度粒子の全含有量から金属別の相関係数を計算したところ、Pb、Cu、Znは0.9を 超える相関係数を示し、エアテーブル選別によりこれらの金属は随伴して回収された。
- 6)処理量の増加により分離効率が向上した。一方、選別可能量の推計より主灰全量のエアテーブル選別は困難と予想された。
- 7) 含水率の増加に伴い選別後の高密度粒子と低密度粒子のかさ密度の差は縮小する傾向が見られ、バルクとしての比重選別は困難になると考えられた。
- 8) Cuは大部分がメタル粒子である一方、Crは強酸に難溶な粒子も存在していたと考えられた。
- 9) エアテーブル選別後の金属含有量及び総合分離効率より、Pb及びCrでは含水率の影響を受けにくい 一方、Cuでは比較的影響を受けやすいと考えられた。

渦電流選別による主灰の選別特性評価として、以下の事項を把握した。

- 1) Pb、Cu、A1は渦電流選別後に反応物の含有量が上昇した。
- 2) Pb、A1は非反応物側に分配しやすい一方、Cuはメタルの割合が高く効率的に反応物側に選別できた。
- 3) 課題として、選別前後の金属の物質収支の乖離があることが挙げられる。また、実験を通じてデバ イダ位置のわずか1mm程度の違いが重量分配率、金属分配率に影響するため、デバイダ位置の微調整 等、テクニカルな対応が必要である。

インパクトミルによる主灰の破砕選別特性を評価し、以下の結果を得た。

- 1) CuやA1では回転速度を増加させるとメタル粒子として2.0-4.0mmの比較的大きな粒径に分配された。
- 2) 破砕処理の欠点として、後段の処理で実施する可能性がある渦電流選別やエアテーブル選別を困難 とする<0.5 mmの粒子割合を増加させる点が挙げられる。

最後に、物理選別による主灰のサブスタンスフローを計算した結果、渦電流選別では多くが非反応物 として残留すること、渦電流選別およびエアテーブルを組み合わせることでA1は4.0-8.0mmの低比重粒 子では96%まで、Cuは2.0-4.0mmの高密度粒子では23%まで濃縮できることを示した。一方で、Pbは渦電流 選別、エアテーブル選別において特定の画分に濃縮することが困難であることが分かった。

### 5. 研究目標の達成状況

エアテーブル選別を焼却主灰へ適用するための磁選や分級、含水率などの焼却主灰の状態やその前 処理方法、空気量、斜度等の設定条件を詳細に検討し、鉛等の有害金属、銅等の有用金属の随伴挙動を 明らかにした。さらに、渦電流選別と破砕選別の適用性を検討し、各技術を組み合わせた選別フローの 設計法を提示した。以上により、2. に示した研究目標を達成できた。

## 6. 引用文献

- 1) 飯野成憲, 肴倉宏史: 焼却残渣等の物理選別施設に係る技術情報調査, 東京都環境科学研究所年報 2019, pp. 12-13 (2019)
- 2) 飯野成憲,石田泰之:都市ごみ焼却残渣のセメント原料化,廃棄物資源循環学会誌, Vol. 29, No. 5, pp. 374-383 (2018)
- 3) 大和田秀二,杉澤建:一般廃棄物焼却主灰中の金属元素の存在状態と物理選別による濃縮,廃棄物 資源循環学会誌, Vol. 29, No. 5, pp. 366-373 (2018)
- 4) 古山隆, ドドビバジョルジ, 柴山敦, 藤田豊久: 摩擦帯電選別とエアテーブル選別による PVC 選別 プロセスの開発, 環境資源工学, Vol. 53, No.3, pp.153-159 (2006)
- 5) 大井英節, 荒井怜, 菊池英治, 伊藤信一: 廃電子部品破砕物のエアテーブルによる分別, 資源と素 材, Vol. 113, pp. 577-581 (1997)
- 6) 大井英節,菊池英治:エアテーブルによる廃電線破砕物の分別,資源処理技術, Vol. 45, No. 3, pp. 183-187 (1998)
- 7) G. Chalavadi, R. K. Singh, A. Das: Processing of coal fines using air fluidization in an air table, Int. J. Miner. Process. Vol. 149, pp. 9-17 (2016)
- 8) 大和田秀二:電気的選別,資源と素材, Vol. 113, pp. 920-923 (1997)
- 9) 飯野成憲,辰市祐久,肴倉宏史,久保田洋,繁泉恒河,高地春菜,佐藤研一,藤川拓朗:渦電流選別 による都市ごみ焼却主灰の金属選別特性,第31回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集,pp. 305-306 (2020)
- 10) A. Saffarzadeh, N. Arumugam, T. Shimaoka: Aluminum and aluminum alloys in municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash: A potential source for the production of hydrogen gas, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 41, pp. 821-831 (2016)
- 11) 松藤敏彦:環境問題に取り組むための移動現象・物質収支入門 現象の定式化・モデル化・データ解 析の基礎, 丸善出版, pp15-16 (2014)
- 12) 大和田秀二:粉砕・選別技術総論, Journal of MMIJ, Vol. 123, pp. 575-581 (2007)

Ⅱ-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

福岡大学 工学部 社会デザイン工学科 佐藤研一

<研究協力者>

福岡大学 工学部 社会デザイン工学科 藤川拓朗 株式会社フジタ 技術センター 環境研究部 久保田洋・繁泉恒河・髙地春菜

### [要旨]

本技術はアーム車の脱着式コンテナ(約8m<sup>3</sup>)を改造したものに焼却主灰を入れ、散水とCO2を富化し たガスを通気して灰を安定化するものである。本サブテーマでは多種の焼却主灰への適用性や他の資材 との混合による改質主灰の特性向上について研究を重ねた。

主な成果として、全国6施設の焼却主灰について物理・力学・溶出特性を明らかにし、散水・炭酸 化処理を行った焼却主灰の溶出挙動についてカラム試験にて検証した。佐賀市清掃工場のCCUプラント からの回収CO<sub>2</sub>や排ガスを用いて、現地にて炭酸化処理を行い、それら改質灰の土木資材として性能評 価や、長期溶出性の評価を行った。さらに、実規模のコンテナを用いてオンサイトエージング技術の実 証試験を行い、散水による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。最後に、オンサイトエージング 技術の導入方法を提案した。

### 1. 研究開発目的

本技術はアーム車の脱着式コンテナ(約8m<sup>3</sup>)を改造したものに焼却主灰を入れ、散水とCO<sub>2</sub>を富化し たガスを通気して灰を安定化するものである。本STでは多種の焼却主灰への適用性や他の資材との混合 による改質主灰の特性向上を試みる。

#### 2. 研究目標

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。

### 3. 研究開発内容

全国6施設の焼却主灰について、物理・力学・溶出特性を調べるとともに、オンサイトエージング 技術として散水・炭酸化処理を行った際の溶出挙動についてもカラム試験にて検証した。佐賀市清掃工 場のCCUプラントからの回収CO<sub>2</sub>や排ガスを用いて、現地にて炭酸化処理を行い、それら改質灰の土木資 材として性能評価や、長期溶出性の評価を行った。また実規模のコンテナを用いてオンサイトエージン グ技術の実証試験を行い、散水による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。最後に、オンサイト エージング技術の導入方法を提案した。

#### 4. 結果及び考察

### 4.1 焼却主灰の物理・力学特性評価

はじめに焼却主灰の物理・力学特性を把握するため、全国から焼却主灰を6試料採取し、物理特性として密度試験、粒度試験を、力学特性としてコーン指数試験を行った。灰粒子の密度は、JIS A 1202土 粒子の密度試験に準じて行ったが、熱による化学変化を考慮し、真空脱気法を採用した。粒度試験は JIS A 1204に準拠したが、主灰の礫・砂分等に付着している細粒分を考慮し、事前処理としてJIS A 1103洗い試験を実施した。なお、サブテーマ4は(株)フジタとの共同研究をさらに進展し実用化を目指 すものであり、当サブテーマについてもコンソーシアム型研究として位置づけられる。

図4-1に灰粒子密度を、図4-2に粒径加積曲線を示す。ここで、試料名中のDは乾灰を、Wは湿灰を示 す。また、Rは焼却対象ごみに破砕可燃残渣を含み、Nは含まないことを示す。灰粒子密度はDR-2におい て最も低く、DR-1において高くなった。このように粒子密度に差を及ぼす要因として、鉄等の金属含有 量が影響している可能性が考えられる。また粒度分布では、焼却主灰により多少のばらつきが見られる ものの、いずれの試料においても粒径が広い範囲にわたって分布しており、焼却主灰自体が締固め特性 の良い試料であることが示された。



力学特性についてはJIS A 1228コーン指数試験を行うことで盛土材としての適応性を検討した。試 験は、JIS A 1210締固め試験法に準じA-a法で求めた最適含水比で含水調整を行った後、灰粒子に水を 十分吸収させるため、容器に入れて密閉し24時間放置したものを使用した。締固めた供試体(φ100× 125mm)に対してコーンの貫入抵抗力を計測した。

結果を図4-3および図4-4に示す。コーン指数は焼却主灰によってばらつきが見られるが、最大乾燥 密度が大きいほどコーン指数値も大きくなる傾向にあることが分かる。また、一般的に盛土材として求 められる一軸圧縮強さはqu=100~300 kN/m<sup>2</sup>であり<sup>1)</sup>、コーン指数は一軸圧縮強さの約5倍に相当する<sup>2)</sup>。 したがって、本研究で最も低いコーン指数値を示したDR-2においても一軸圧縮強さに換算した強度は約 1,800 kN/m<sup>2</sup>に相当することから、焼却主灰は盛土材に必要な強度を十分に満たしおり、力学面におい て盛土材としての利用が可能であることが示唆された。



### 4.2 シリアルバッチ試験における溶出特性

エージングによる焼却主灰の品質向上を目指すための基礎調査として、6種類の焼却主灰に対して、 溶出操作を3回繰り返すシリアルバッチ試験を行った。溶出操作の1回目は風乾操作による炭酸化の影響 を考慮して、昭和48年環境庁告示第13号(以降、JLT13法とする)に準拠した。その後、ろ紙上残渣物



は溶出容器に戻さず、上澄水除去後の焼却主灰にイオン交換水を添加し、繰り返し溶出試験を行った。 2回目以降の添加水量については、1回目と同様の水量(初期重量に対して液固比10)とした。

図4-5にシリアルバッチ試験の各溶出液中のpH、電気伝導率(EC)、全有機炭素濃度(TOC)、ナト リウムイオン(Na)、塩化物イオン(C1)、鉛(Pb)濃度を示す。pHは繰り返し溶出により大きな変化 は見られなかった。全ての焼却主灰でECは繰り返し回数とともに減少した。またTOC、Na、C1では1回目 の溶出量が最も多くなる同じ傾向を示しており、特にNaは6種の焼却主灰ともに8~9割が1回目に溶出し た。C1は乾灰のDR-1、DR-2がWR-3を除く他の湿灰よりも高い濃度を示した。これはフリーデル氏塩のよ うな難溶性塩<sup>3)</sup>が乾灰では生成していなかったためと推察される。6種の中ではWR-3がTOCやC1が他の灰 種の2倍近い高い値を示した。これは焼却された廃棄物の組成や燃焼条件、使用薬剤等の影響と考えら れる。Pbは乾灰(DR)の方が湿灰(WR)よりも溶出量が多くなる傾向が見られた。2回目以降の溶出量 も1回目と同等程度の主灰が多く、Pbの洗い出しには十分な水量(液固比)が必要であることが示唆さ れた。

### 4.3 散水・通気カラムによるエージング試験

コンテナエージングの小型試験装置として、円筒型の透明塩化ビニール製カラム(φ104×400H mm)を 用いた散水・通気試験を実施した。カラム試験装置を図4-6に示す。焼却主灰を有姿重量2.9 kg(乾灰は 加水)となるように充填後、散水処理としてチュービングポンプを用い、カラム上部からタイマー制御 により点滴状に焼却主灰上面に給水を行った。通気処理としては、カラム下部より液化CO<sub>2</sub>ボンベからの 100%CO<sub>2</sub>ガスを給気し、バルブ付面積式流量計による流量調整を行った。浸出水はカラム下部に設けた受 器に貯め、一定期間ごとに採取し水量を記録した。実験は25℃恒温室内で行った。試験条件を表4-1に示 す。処理区として、散水処理のみ(散水区)、散水後に炭酸化処理(散水+CO<sub>2</sub>区)、炭酸化処理のみ(CO<sub>2</sub> 区)の3処理区を設定した。

カラムからの浸出水について、電極法にてpH、ECを、イオンクロマトグラフ法にて各種イオン濃度 (Na、Ca、C1)を、TOCを燃焼触媒酸化法にて行った。またPbはICP質量分析法、六価クロム(Cr(VI)) はジフェニルカルバジド吸光光度法で分析を行った。

処理区	充填重量	充填高さ	充填密度	液固比(排水)*	$\mathrm{CO}_2$ 量	処理時間
	kg	cm	g/cm <sup>3</sup>	mL/g	g/kgDW	hr
散水				0.50 - 0.65	_	24
散水+CO <sub>2</sub>	2.9	28~41	0.9~1.2	0.50~0.65	60	18+6
$\mathrm{CO}_2$				_		6

表4-1 カラム試験条件





図4-7に各焼却主灰の散水処理区のNa、C1溶出率を示す。本テーマでの溶出率とは、各処理区の浸出水 量とその濃度の積より求めた累積溶出量を、それぞれの焼却主灰のJLT13法での溶出量(シリアルバッチ 試験の1回目)で除した値である。溶出率はNaが0.83-1.0と高い値を示したのに対して、C1は0.56-0.91 と焼却主灰によって大きくばらつく結果となった。C1については、図4-5の結果で述べたように、フリー デル氏塩のような難溶性塩が少ない乾灰ではJLT13法における溶出量が高くなりやすいため、散水処理 の溶出率としては低くなったと考えられる。ただし本研究で実施したカラム試験での液固比は0.50-0.65 であり、JLT13法の1/20程度であることを鑑みると、全体として効率的な洗い出しが行われていたと考え られる。

カラム試験終了後、カラム内の処理済み焼却主灰は垂直方向に3等分に分割し、それぞれ上・中・下層 として分析用試料とした。処理前および処理後の各焼却主灰試料についてJLT13法で溶出試験を行い、溶 出液を検液とし、各種分析を行った。

その結果、pHについては、散水区ではシリアルバッチ試験の結果とはほとんど変わらなかったのに対して、散水+CO2区、CO2区では炭酸化によるpH低下が確認された。DR-1、WR-2、WN-1でpH12からpH10程度まで大きく低下していた。一方でWR-3ではpH低下がほとんど生じなかった。

図4-8にカラム試験後の各層の焼却主灰の溶出液中Pb濃度を示す。炭酸化による焼却主灰のPb溶出抑 制は知られており<sup>4)</sup>、本研究でも同様にすべての灰種でPb濃度の低下は確認された。DR-1は初期濃度が 20mg/L以上と高く、繰り返し溶出や散水処理でも1~9mg/L程度までしか低下しなかったが、炭酸化処理 を行うことにより、0.01mg/L以下まで低下することが確認された。WN-1については、初期濃度が0.2mg/L と低いが、炭酸化処理により0.001mg/Lまで低下した。WR-3については、他の灰種に比べて明らかにPb濃 度の低下幅が小さい結果となった。カラム試験開始時は灰表面に水が多く認められるような湿潤状態で あり、表面水により焼却主灰の炭酸化が阻害された可能性が示唆された。

炭酸化によりCr(VI)の溶出が促進されることはこれまでにも報告されている<sup>5)</sup>。本研究ではWR-1で炭酸化によるCr(VI)溶出濃度が顕著に増加した一方で、WN-1はほとんど増加しなかった(図4-9)。このように、炭酸化によるCr(VI)溶出増加の程度は焼却主灰によって異なることが明らかになった。



図4-8 改質前後焼却主灰の溶出試験におけるPb濃度(1~3回目はシリアルバッチ試験結果)



図4-9 溶出液中のCr(VI)濃度

### 4.4 CCU施設における炭酸化処理試験(ベンチ試験)

清掃工場として、日本初のCO<sub>2</sub>分離・回収施設(CCUプラント)を設置・稼働している佐賀市清掃工場の協力のもと、精製前の排ガス(以降、ExG)および分離精製された回収CO<sub>2</sub>(以降、CO<sub>2</sub>)をそれぞれ用いて、同工場から発生する焼却主灰について、オンサイト(現地)にて炭酸化処理のベンチ試験を行った。 CCUプラントにおけるガスの流れと、ガス採取位置を図4-10に示す。炭酸化処理は、コンテナエージング 用のコンテナと同構造を有した樹脂製のベンチ試験槽(1,200×750×400H mm)(図4-11)を用いた。本 試験槽では下部からガスを通気し、上向流で内部の焼却主灰とCO<sub>2</sub>を反応させることが可能である(図4-12)。



図4-10 CCUプラントにおけるガスの流れと本試験におけるガス採取位置



図4-11 ベンチ試験外観(回収CO<sub>2</sub>通気時)

図4-12 試験槽構造の概要

試験には佐賀市清掃工場より採取した焼却主灰をふるい分けは行わず、有姿の状態で用いた。焼却 主灰は乾灰の状態であったため、含水率15%になるように加水し、ベンチ試験槽に充填した。試験は回 収CO<sub>2</sub>(CO<sub>2</sub>)排ガス(ExG)の2種類のガスで行った。試験条件を表4-2に示す。それぞれのガス中のCO<sub>2</sub> 濃度は異なるため、灰あたりのCO<sub>2</sub>供給量が同じになるように、通気時間と通気速度で調整した。ベン チ試験槽内での炭酸化反応のばらつきを確認するため、試験終了後に試験槽内の水平方向で4カ所(P1 ~P4)の位置から、それぞれの充填高さに対して上・中・下の3分割(ExGは上・下の2分割)し、焼却 主灰の個別サンプルを採取した(図4-12)。採取した焼却主灰のJLT13法により溶出試験を行った。

処理区	焼却灰量 kgDW	充填高さ cm	充填密度 g/cm <sup>3</sup>	CO <sub>2</sub> 濃度 %	CO2量 g/kgDW	通気時間 hr
ExG	140	22	0.70	7	90	19
$\mathrm{CO}_2$	290	38	0.86	100	93	6.5

表4-2 ベンチ試験条件

図4-13にベンチ試験槽内の個別サンプルの鉛(Pb)溶出濃度を示す。焼却主灰中のPb溶出濃度は炭酸化処理により低減できることは、4.3 カラム試験でも確認しており、今回のベンチ試験においても、初期濃度3.5 mg/Lが排ガス処理区(ExG区)で平均0.09 mg/L、回収CO<sub>2</sub>処理区(CO<sub>2</sub>区)で0.04 mg/Lまで低下していることが確認された。また採取した全てのサンプルでPb濃度の低下が確認され、炭酸化反応がベンチ試験槽全体で生じていたことが確認された。ExG区よりもCO<sub>2</sub>区において、Pb濃度がより低く抑えられていた要因としては、CO<sub>2</sub>濃度や供給速度が炭酸化の進行に影響した可能性が考えられる。

表4-3は、各処理区の焼却主灰について、複数個所から採取した混合サンプルについて、土壌環境基準を定める環境庁告示第46号(以降、JLT46とする)に準拠し、溶出試験を行った結果を示す。Pb溶出 濃度は未処理区では高い値を示したが、炭酸化処理により土壌環境基準(0.01mg/L)未満まで低下して いることが確認された。一方で、六価クロム(Cr(VI))やホウ素(B)は炭酸化処理により増加する傾 向があることが確認された。特にCr(VI)については、土壌環境基準(0.05 mg/L)を超過する可能性が 本試験でも示されたため、対応を検討する必要性が示された。



図4-13 個別サンプルのPb溶出濃度 (JLT13)

表4−3 混合サンノルの浴出濃
-----------------

分析項目		未処理	ExG	CO2	
pH		12.78	11.92	10.94	
Pb	mg/L	4.7	0.02	< 0.01	
Cr(VI)	mg/L	0.04	0.19	0.15	
В	mg/L	< 0.01	0.19	0.93	
Cd	mg/L	< 0.001	< 0.001	< 0.001	
F	mg/L	0.35	0.18	0.29	

粘土 Fc  $\rho_{\rm s}$ 100 処理区 Uc Uc' (g/cm<sup>3</sup>) (%) 未処理 2.38531.33.811.780 ٢ 58.314.7ExG 2.3684.814.4 $CO_2$ 2.360134.514.9

表4-4 各焼却主灰の物理特性

 $\rho_s: 灰粒子密度、Uc: 均等係数、Uc': 曲率係数 Fc: 細粒分含有率$ 



図4-14 各焼却主灰の粒度分布

次にオンサイト炭酸化処理前後の焼却主灰の物理特性を表4-4に、粒度分布を図4-14に示す。炭酸化 処理により粒度分布等への顕著な差は認められず、物理特性への影響はほとんど無いことが示唆され た。

炭酸化処理を施した焼却主灰の路盤材としての適用性を検討するため、修正CBR試験(JIS A 1211)を 行い、締固め度90、95%に締固めた焼却主灰の修正CBR値の把握を行った。供試体作製はE-b法で求めた 最適含水比で試料の含水比調整を行い、各層それぞれ17、42、92回突き固めを行った。その後、吸水膨 張試験と貫入試験を行い、修正CBR値を求めた。また同様に盛土材 としての適用性を検討するため、締 固め試験A-a法により直径10 cm、高さ12.5 cmのモールドに各層、同一エネルギーで突固め作製した供 試体に対してコーン指数試験(JIS A 1228)を行った。

図4-15にE-b法を用いた締固め試験での乾燥密度と含水比との関係を示す。試験に用いた各焼却主灰 で明確なピークが確認された。この結果から、炭酸化処理により最大乾燥密度がわずかに低下し、最適 な水分量が約5%増加することが示唆された。図4-16に修正CBR試験の結果を示す。未処理区では、締 固め度に関係なく、上層路盤材の品質基準である80%を満たしていた。一方、炭酸化処理を行ったExG 区とCO<sub>2</sub>区では、下層路盤材の基準である30%は満たしたが、未処理区に比べ明らかに修正CBR値が低下 する傾向が示された。炭酸化処理による修正CBR値の低下は湿灰でも報告<sup>6)</sup>されており、炭酸化による 修正CBR値の低下の要因としては、炭酸化処理により未反応のCa0、Ca(OH)<sub>2</sub>がCaCO<sub>3</sub>に変化したことで、 灰の固結力が小さくなったことが考えられる<sup>7)</sup>。また、試験に用いる供試体は固結した試料を一度解砕 した後、再度突き固めを行い作製するため、この解砕により生じる粘着力の減少<sup>8)</sup>が修正CBR値の低下



図4-15 乾燥密度と含水比の関係(E-b法)



図4-16 修正CBR值

図4-17は、A-a法を用いた締固め試験での乾燥密度と含水比との関係を示す。最大乾燥密度に変化は 認められないが、最適含水比は、CBR試験結果のように炭酸化処理によって約5%増加する傾向が見ら れた。 図4-18に、締固め試験結果によって得られた最大乾燥密度と最適含水比を使用して行った、コ ーン指数試験の結果を示す。修正CBR試験の結果と同様に、コーン指数は炭酸化処理によって、未処理 区よりも減少する傾向が示唆されたが、減少幅は修正CBR値に比べると小さかった。盛土材として求め られる一軸圧縮強さはqu = 100~300 kN/m<sup>2</sup>であり、コーン指数は一軸圧縮強さの約5倍に相当する<sup>1)</sup>こ とを考慮すると、本検討で用いた試料のうち、最も低いコーン指数値を示したExG区の焼却主灰におい ても一軸圧縮強さに換算した強度が約1,700 kN/m<sup>2</sup>に相当する。よっていずれの試料も盛土材として必 要な強度を十分に満たしており、焼却主灰は炭酸化処理の有無に関わらず力学面において盛土材として の有効利用が可能であることが示唆された。





図4-17 乾燥密度と含水比の関係(A-a法)



### 4.5 コンテナエージング試験

オンサイトエージング技術の実証として、実規模のコンテナを用いての試験を行った。コンテナ試 験の試験装置は、下部に通気するガスを通す空間を確保するための二重床構造を有したSUS製のコンテ ナ(3600×1910×970H mm)を用いた。焼却主灰は清掃工場の灰クレーンより直接コンテナに充填し、 有姿で試験に供試した。表4-5にコンテナ試験条件を示す。炭酸化処理区(CO<sub>2</sub>区)での充填重量は 2,020 kg、散水+炭酸化処理区(散水+CO<sub>2</sub>区)では充填重量は2,090 kgであった。CO<sub>2</sub>は液化CO<sub>2</sub>ボンベ より100%CO<sub>2</sub>ガスをバルブ付面積式流量計によって流量を調整し、コンテナ下部より上向流で通気し た。CO<sub>2</sub>区および散水+CO<sub>2</sub>区ともに、CO<sub>2</sub>の供給量は60 g-CO<sub>2</sub>/kgDWとなるように流量および通気時間を設 定した。散水+CO<sub>2</sub>区における散水は、散水制御装置を用いて、累積浸出水量を有姿の焼却主灰重量で除 した液固比が18時間で0.65となるように散水間隔を定め、コンテナカバーをかけた状態で、散水フレー ムより霧状で行った。実証試験状況を図4-19~22に示す。

図4-23に試料採取および温度測定位置を示す。主灰とCO<sub>2</sub>の反応による発熱状況をモニタリングする ために、コンテナ内のT1~T8の8点において、鉛直方向は充填高さの半分の中層の位置で、K熱電対を用 いて測定した。また、試験終了後に図4-23に示す試験槽内のP1~P3の3点から、上層(Upper)、中層

(Middle)および下層(Lower)の3試料を採取するとともに、全体混合サンプル(Mix)も1つ作製し、 JLT13法による溶出試験を行った。

処理区	分級	充填重量 kg	充填高 cm	充填密度 g/cm <sup>3</sup>	液固比(排 水) ml/g	CO <sub>2</sub> 供給量 g/kgDW	処理時間 hr
$\rm CO_2$	古次	2,020	94-95	1.0	-	60	6
散水+CO <sub>2</sub>	有安	2,090	24-20	1.2	0.65	60	18+6

表4-5 コンテナエージング試験条件



図4-19 焼却主灰充填状況



図4-21 散水処理状況



図4-23 灰中温度測定および試料採取位置



図4-20 コンテナエージング試験外観



図4-22 炭酸化処理状況



図4-24 灰中温度の変化 (CO<sub>2</sub>区)

図4-24にコンテナ内の焼却主灰中の温度推移を示す。T1~T8の全ての測定点において明らかな温度 上昇が確認された。主灰に含有されるCa(OH)<sub>2</sub>が炭酸化されCaCO<sub>3</sub>になる反応は発熱反応であることが知 られており<sup>9)</sup>、このことから本試験において、コンテナ全体で炭酸化反応が進んだことが示唆された。 また図4-25にCO<sub>2</sub>区の炭酸化処理前後の全炭素量(TC)、無機炭素量(IC)の変化を示す。炭酸化処理 により、P1~P3全てのサンプルにおいて増加が確認され、炭酸化による炭酸塩の形成が確認された。IC 量増加量から試算されたCO<sub>2</sub>吸収量としては約17 g-CO<sub>2</sub>/kgDWであった。

表4-6に散水+CO<sub>2</sub>区において発生した浸出水中濃度と浸出水量から算出した塩類の溶出量及び溶出率 を示す。溶出率では、Naで0.73、Kで0.96、C1で0.85となり、図4-7で示したカラム試験での報告値に近 い値が、実規模のコンテナ試験でも得られることが示された。NaとK溶出率に差が見られた原因とし て、本試験では浸出水の採取時において、大量の白色沈殿が生じていたことから、一部のNaが化合物として沈殿した可能性が考えられた。



表4-6	散水処理によ	る溶出量及び	バ溶出率※

		散水+CO2区	JLT13法	
供試灰量	kg	2,050	0.05	
液固比	ml/g	0.65	10	
Na溶出量	g	3,800	0.13	
(溶出率)		(0.73)	(1.0)	
K溶出量	g	1,300	0.032	
(溶出率)		(0.96)	(1.0)	
Cl溶出量	g	2,400	0.068	
(溶出率)		(0.85)	(1.0)	

※溶出率=Σ (浸出水量×濃度) /JLT13の溶出量

図4-26、27にCO<sub>2</sub>区、散水+CO<sub>2</sub>区のそれぞれの溶出液中Pb、Cr(VI)、ホウ素(B)濃度を示す。Pbは2 つの処理区ともに、炭酸化によって溶出濃度が大きく低減した。低減率は、CO<sub>2</sub>区で95~97%、散水+CO<sub>2</sub> 区で96~99%以上であり、2つの処理区ともに全サンプルで土壌環境基準の0.01mg/Lを満足する結果を示 した。

Cr (VI) はカラム試験等により炭酸化による溶出の増加が懸念されるが、本試験ではCO<sub>2</sub>区ではP3の下層のみ、散水+CO<sub>2</sub>区ではP1の上層、中層およびP3の中層で、JLT13法1回目よりも高い濃度で検出されたが、その濃度は0.03~0.04mg/Lと定量下限値の0.02mg/Lに近い値であることから、サンプル誤差である可能性が考えられ、炭酸化による明確な濃度の増加は確認されなかった。これはカラム試験WN-1と同様の挙動であった(図4-9)。

BはCO<sub>2</sub>区では、P1の下層を除き、全ての層でJLT13法1回目とほぼ同等か、または低い溶出濃度であったが土壌環境基準である1.0mg/Lを超過していた。一方で、散水+CO<sub>2</sub>区では、全てのサンプルでJLT13法の2回目濃度(0.4mg/L)に近い示しており、洗い出しによるB濃度の低減効果が明らかになった。





修正CBR試験の結果を示す。図4-16と同様に、未処理区に比べ炭酸化処理区では修正CBR値が低下する傾向が示された。ただし佐賀市主灰同様に下層路盤基準の30%は満たしていた。また同サンプルにおいて 吸水膨張量を測定したが、全てのサンプルについて膨張比1%以下であり、良好な結果が得られた。



### 4.6 Cr(VI)溶出対策

これまでの試験結果から、焼却主灰の安定化促進処理として炭酸化処理を行った場合、焼却主灰の 種類によってCr(VI)の溶出促進現象が生じることが示されている。そこで改質灰の土木資材化において 課題となるCr(VI)の溶出について、薬剤を添加した際の溶出抑制効果を検証した。薬剤は、Cr(VI)を Cr(II)へと還元する還元剤として硫酸鉄(II)の水溶液を使用した。試験は炭酸化処理の有無、養生日数 による性状の変化および大気曝露での溶出特性の変化について調査するため、それぞれ処理区を設けて 比較した。

供試試料として、4.4 ベンチ試験と同様に、佐賀市清掃工場から提供を受けた主灰を用いた。炭酸 化処理についてはベンチ槽を用い、事前に含水率が20%となるように水を添加し、CO<sub>2</sub>供給量を90g-CO<sub>2</sub>/kgDWとして、液化CO<sub>2</sub>ガスボンベ由来の濃度100%のCO<sub>2</sub>ガスを6時間通気した。

薬剤について、FeSO<sub>4</sub>・7H<sub>2</sub>Oを18wt%の水溶液(Fe剤)に調整して用いた。薬剤添加の際は、有姿重量 300gの主灰に対し、FeSO<sub>4</sub>の濃度が1、2、3、5%となるように加え、容量2Lのモルタルミキサーを用い て、20秒間撹拌した。このとき、炭酸化を行っていない試料に関しては、乾灰であったことから、炭酸 化後の灰の含水率を参考に、水を加えて含水率15%に調整して使用した。含水率の調整は薬剤の添加と 同時に行った。

処理区としては、未処理、未処理にFe剤を添加、炭酸化処理、炭酸化処理後にFe剤添加の4処理区と した。表4-7に処理条件を示す。撹拌後の試料は密閉した状態で室内25℃にて養生し、1、2、5、9日後 にJLT13法により溶出試験を実施した。また、9日間の養生終了後、試料をバットに移し、室内で大気曝 露試験として風乾操作を行った。試料は風乾開始から14日後に回収し(含水率2~5%まで低下)、 JLT13法により溶出試験を行った。

処理区名	炭酸化	薬剤混合	FeSO₄ 混合率	含水率	養生日数
			%	%	
未処理	×	×	-	15.0	
Fe	×	0	1,2,3,5	15.0	密閉 1,2,5,9日 国族 14日
CO 2	0	×	-	15.8(炭酸化後)	(密閉9日後)
CO <sub>2</sub> +Fe	0	0	1,2,3,5	15.8(炭酸化後)	

表4-7 Fe 剂混合試験条件

図4-30に密閉養生期間と溶出液中のpHおよびCr(VI)濃度の変化を示す。Cr(VI)濃度は未処理やCO2区
に比べ、Fe剤を添加した処理区では、0.1mg/L以下まで低下しており、焼却主灰における溶出抑制効果が確認された。またpH、Cr(VI)ともに養生期間における大きな濃度変化は確認されなかった。このことからFe添加後の養生期間としては1日以上で良いことが示唆された。



図4-30 密閉養生期間とpH, Cr (VI) 溶出濃度

密閉養生後に行った大気曝露(風乾操作)による溶出特性への影響について、pHを図4-31に、Cr(VI) を図4-32に示す。

pHは、大気曝露により未処理群(未処理+Fe)だけでなく、炭酸化処理群(CO<sub>2</sub>+Fe)でも低下した。 またFe剤添加量が多くなるほど曝露前はpHが低下し、曝露後は未処理群でpH10、炭酸化処理群でpH9.0 程度で推移した。B濃度はpHの影響を受けることが知られており<sup>10)</sup>、本試験でも大気曝露後にB濃度が 増加した。特に炭酸処理群で0.05から最大で0.6mg/L程度まで増加することが確認された。

Cr (VI)については、Fe剤を使用することにより未処理+Fe1%区でも0.019mg/Lまで低下することが確認された。しかし、その後に大気曝露(炭酸化)されることでCr (VI)が0.18mg/Lと再溶出することが明らかになった。この傾向は全ての処理区で見られ、再溶出量はFe剤の添加量が多くなるほど抑えられることも示唆された。一方で、未処理群に比べ、炭酸化処理群ではCr (VI)の再溶出濃度が低く、鉄剤の添加率が2%の処理区(C0<sub>2</sub>+Fe2%)で0.04mg/Lと土壌環境基準である0.05mg/Lを下回っていた。

これらの結果から、焼却主灰中のCr(VI)溶出対策としてFe剤が有効であることが示された。焼却主 灰の改質処理として炭酸化処理を行うことで、Cr(VI)の溶出濃度は一時的に増加するが、そこにFe剤を 添加することで、炭酸化処理を行わない場合に比べて、Fe剤添加後のCr(VI)の再溶出リスクを下げるこ とができる可能性が示唆された。







## 4.7 オンサイトエージング技術の可能性検討

本サブテーマでの検討結果を加え、オンサイトエージング技術を組み込んだ「焼却主灰のグリーン改 質技術」の流れについて図4-33に示す。オンサイトエージングの目的は、散水による脱塩と炭酸化によ るPb等の難溶化促進である。本研究によりカラム試験において、実機と同様の溶出挙動を示すことが確 認されている。



## 図4-33 焼却主灰のグリーン改質技術の流れ

グリーン改質技術の基本プロセスとして、

① <u>対象焼却灰の特性把握</u>

シリアルバッチ試験等を通じて、対象焼却灰の塩類・重金属の含有量や溶出ポテンシャルを調 査する。またカラム試験により、散水処理による洗い出し効果、炭酸化による Pb 溶出抑制効果や Cr(VI)の溶出リスクの評価を行う。 ② オンサイトエージング処理の選択

①の結果を受けて、既存施設の設備や必要となるコストを鑑み、オンサイトで行う安定化促進 処理を選択する。例えば、排水処理が難しい場所では、排水の発生しない炭酸化処理のみを行う 等である。

③ 分級·選別処理

サブテーマ3にて検討したように、実際の土木資材化処理フローでは安定化促進処理の前後で、 分級や磁選・非鉄選別といった処理を行う。これら処理により粗大物が除かれ、粒度が調整しや すくなるとともに、鉄や非鉄金属といった有価の金属回収も可能となる。またストーカー式焼却 炉の落じん灰にはCu、Zn、Pb等の重金属類が含まれており、これを分別回収することは、資源 循環だけでなく焼却灰の環境負荷低減への効果が期待できる。焼却主灰が乾灰の場合は、加水す るエージングの前に分級・選別を行うのが望ましく、湿灰の場合はエージング後の方が炭酸化処 理により、主灰の水分状態が改善される分、効率的である。

#### ④ 混合処理

オンサイトエージング処理を行った改質灰については、本来であればそのまま土木資材化でき ることが望ましい。しかし上述したように、炭酸化による Cr (VI) 溶出や強度低下等の影響も想定 されることから、利用用途に応じて、副資材や不溶化剤と混合材料化する。副資材の目的として は、焼却灰の粒度を調整し、強度向上を図ることである。焼却灰は細粒分も多く含まれることか ら、コンクリートガラ由来の再生砂のような細粒分の少ない副資材が適していると考えられる。 不溶化剤は、本サブテーマ4で得られた結果を踏まえると、未処理状態では Pb が、炭酸化処理に より Cr (VI)の溶出が土壌環境基準を超過する傾向が見られた。炭酸化により Cr (VI)が溶出する 事象については、安定化の観点からは負の事象のように見えるが、これらの焼却灰は潜在的な溶 出リスクとして抱えていたものを早期に顕在化させていることになり、そこに対して必要な薬剤 処理を行うことになるため、将来的なリスク低減に寄与すると考えられる。

オンサイトエージング技術と従来のエージングとの比較を表4-8に示す。自然の降雨による塩類の洗 い出しと大気中の二酸化炭素による炭酸化を主な反応とするエージング処理は、欧州を中心に焼却主灰 を対象として行われており、処理後の主灰は路盤材などの土木資材としてリサイクルされている。一方 で、国内においてエージング処理はその期間の長さから実施できる施設としては、最終処分場にほぼ限 られている。しかし、焼却主灰リサイクルを進めたい自治体は最終処分場が逼迫していることが多く、 その実現性は低いのが現状である。それに対して、本研究で示したオンサイトエージングは、実施施設 として、清掃工場の敷地内を想定し、排ガス由来のCO<sub>2</sub>ガスを用いることで短期間での安定化促進処理 を行うことができる。エージング用のコンテナ等の設備や排ガス中のCO<sub>2</sub>を利用するためのコスト(排 ガス前処理等)が必要となるが、エージングのための新たな施設を建設する必要が無く初期投資を抑え られる点や、高価な液化CO<sub>2</sub>ガスを購入しなくて良い点など、促進エージングに要する費用を抑制でき ることも大きな特長である。

オンサイトエージングの規模感としては、例えば100 t/日の焼却施設において、散水+炭酸化による オンサイトエージング処理を行う場合、発生焼却主灰量を10 t/日とすると、コンテナを用いたオンサ イトエージング処理としては、8 m<sup>3</sup>タイプのコンテナであれば4台(2.5 t/日・台×4台)設置すること になる。必要となる散水量としては、液固比0.6として6 m<sup>3</sup>/日の排水が発生し、CO<sub>2</sub>量として60 g/kgDW とすれば、480 kg-CO<sub>2</sub>/日(含水率20%と仮定)であり、排ガス中のCO<sub>2</sub>濃度が5%とすると、1~2 m<sup>3</sup>/min・台程度の通気速度になると試算される。このことからコンテナを用いたオンサイトエージング を行う処理施設の規模としては、最大でも200 t/日クラスまでの焼却施設であることが適当と考えられ る。日本国内においては、200 t/日以下のクラスの焼却施設は全体の70%超を占めており<sup>11)</sup>、これらの 施設においてはコンテナを用いたオンサイトエージング技術の活用は可能と考えられる。また200 t/日 以上の施設の場合は、コンテナではなくヤードやピットで行う方式が考えられる。

今後は実際の排ガスを使用しながら、オンサイトエージング技術を含めた土木資材化までの一連の 流れで実証試験を行い、グリーン改質技術の確立を図っていくことが必要である。また新しい一般廃棄 物焼却主灰のリサイクル方法として社会実装していくためには、自治体と共同で実績をつくりながら、 必要な許認可等の手続きを整備していくことが求められる。

焼却灰の状態	オンサイトエージング	従来のエージング
実施施設	清掃工場	最終処分場
期間・面積	1日程度 0.39t-ash/m <sup>2</sup> ・日	3ヶ月~ 0.029t-ash/m <sup>2</sup> ・日 <sup>※</sup> ~
排水処理方法	既設水処理施設 炉内吹込み	既設水処理施設
CO <sub>2</sub> 源	排ガス	大気
主要コスト	エージング用コンテナ及び付帯設備 CO <sub>2</sub> 価格:約40~円/kg	運搬費(清掃工場→処分場)

表4-8 オンサイトエージング技術の特徴

※撒きだし高さ2m、エージング期間90日で設定

#### 5. 研究目標の達成状況

エージング処理した焼却主灰の物理・力学・溶出特性を明らかにした。また屋内外での長期溶出特 性としてライシメーター試験により1年以上のデータを取得した。オンサイトエージング技術として、 コンテナを用いた散水・炭酸化処理方式について、実規模で実証すると共に、炭酸化処理により生じる 可能性のあるCr(VI)溶出対策として、鉄系薬剤の効果を明らかにした。以上により、当該サブテーマの 研究目標を達成した。

## 6. 引用文献

- 一般社団法人セメント協会:セメント系固化材による地盤改良マニュアル第4版、 p.248、 2014.
- 2) 地盤工学会、 地盤調査の方法と解説、 丸善出版、 pp342、 2013
- 3) 今井敏夫、高野博之、朝倉宏、遠藤和人、井上雄三、都市ごみ焼却主灰の固化の液時観察と炭酸 化、第18回廃棄物学会研究発表会講演論文集、pp.821-823、2007.
- M. Fernandez Bertos, S. J. R. Simons, C. D. Hills, P. J. Carey, A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of C02, Journal of Hazardous Materials, B112, pp. 193-205, 2004
- 5) T. Van Gerven, E. Van Keer, S. Arickx, M. Jaspers, G. Wauters, C. Vandecasteele, Carbonation of MSWI-bottom ash to decrease heavy metal leaching, in view of recycling, Waste management, Vol. 25, pp. 291-300, 2005
- 6) 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,一般廃棄物焼却灰の散水・炭酸化処理による力学・溶出特性への影響と土木資材としての混合材料化検討,第13回環境地盤工学シンポジウム発表論文集,pp.177-182,2019
- 7) 野村弘,東條安匡,松尾孝之,黄仁姫,松藤敏彦,焼却灰の固結が重金属類の放出に与える影響,第
  24回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集,pp.617-618,2013
- Takuro Fujikawa, Kenichi Sato, Chikashi Koga, Hirofumi Sakanakura, Effective utilization of incineration bottom ash from municipal solid waste using agin method, Geo-Environmental Engineering 2017, pp. 1-6, 2017

- 9) 山田英夫、水酸化カルシウムの加熱炭酸化、Gypsum & Lime、No. 178、pp. 9-16、1982
- 10) 吉永淳、松脇崇晃、長谷川陽一、柳沢幸雄、貴田晶子、松江秀明、米沢仲四郎、廃棄物中ホウ素 の存在形態と溶出性、環境化学、第12巻、第2号、pp.333-342、2002
- 11) 環境省:一般廃棄物処理実態調査結果、
  http://www.env.go.jp/recycle/waste\_tech/ippan/index.html (2021.05.07 確認)

#### Ⅲ.研究成果の発表状況の詳細

## (1) 誌上発表

#### <査読付き論文>

## 【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない。

## 【サブテーマ2】

- 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
- 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.

## 【サブテーマ3】

- 1) 飯野成憲, 辰市祐久, 肴倉宏史(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. 廃棄物資源循環学会論文誌, 31, 98-107.
- 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.
- 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.

## 【サブテーマ4】

- 1) 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 不溶化処理の組み合わせ検討. 廃棄物資源循環学会論文誌, 30, 48-61
- 2) 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(2019)一般廃 棄物焼却灰の散水・炭酸化処理による力学・溶出特性への影響と土木資材としての混合材料化 検討.第13回環境地盤工学シンポジウム発表論文集,177-182
- 3) 永山陽裕,佐藤研一,藤川拓朗,古賀千佳嗣,久保田洋,繁泉恒河,肴倉宏史(2019)排出地 域・形態の異なる一般廃棄物焼却主灰の地盤材料への適用性.第13回環境地盤工学シンポジウ ム発表論文集,173-176
- 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.
- 5) 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C02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, 31, 116-130.
- 6) 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,15(3),573-580.
- 7) 永山陽裕、佐藤研一、藤川拓朗、古賀千佳嗣、久保田洋、繁泉恒河、高地春菜、肴倉宏史 (2020)清掃工場の排ガス及びC02により炭酸化処理を施した一般廃棄物焼却主灰の地盤材料

特性と長期安定性,第14回地盤改良シンポジウム論文集, pp. 377-380

8) Takuro Fujikawa, Kenichi Sato, Chikashi Koga, Hirofumi Sakanakura and Yosuke Nagayama (2021) Geotechnical characteristics of carbonated incineration bottom ash using exhaust and CO2 discharged from waste incineration facilities, 3rd International Symposium on Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics, 論文掲載 予定

## <その他誌上発表(査読なし)>

## 【サブテーマ1】

- 1) 肴倉宏史:都市ごみ焼却残渣の資源化の現状と課題 -資源価値の最大化に向けて-,廃棄物 資源循環学会誌,29(5)339-348,2018.
- 2) 飯野成憲、石田泰之:都市ごみ焼却残渣のセメント原料化、廃棄物資源循環学会誌,29(5) 374-383,2018.
- 3) 肴倉宏史(2021)一般廃棄物熱処理残渣の資源化、日本エネルギー学会機関誌えねるみくす、 100(1),48-54.
- 4) 肴倉宏史(2021)都市の物質循環の最終出口!?「焼却灰」のリサイクル,環境と測定技術, 48(1),17-23.

## 【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

## 【サブテーマ3】

- 1) 飯野成憲、辰市祐久、肴倉宏史(2019) 乾式比重選別機(エアテーブル) による都市ごみ焼却 主灰の選別条件の検討、東京都環境科学研究所年報2019、10-11
- 2) 飯野成憲、肴倉宏史(2019) 焼却残渣等の物理選別施設に係る技術情報調査、東京都環境科学 研究所年報2019、12-13
- 3) 飯野成憲, 辰市祐久, 肴倉宏史(2020) 都市ごみ焼却主灰の含水率が乾式比重選別の金属分離 効率に及ぼす影響. 東京都環境科学研究所年報2020, 10-11
- 4) 飯野成憲, 辰市祐久, 肴倉宏史(2020) 渦電流選別による都市ごみ焼却主灰の選別条件の検討. 東京都環境科学研究所年報2020, 12-13
- 5) 飯野成憲, 辰市祐久, 肴倉宏史(2020) インパクトミルによる都市ごみ焼却主灰の元素分配挙動. 東京都環境科学研究所年報2020, 14-15

【サブテーマ4】

特に記載すべき事項はない。

#### (2) 口頭発表(学会等)

#### 【サブテーマ1】

- 1) 肴倉宏史(2020) 「一般廃棄物処理実態調査結果」を用いた焼却残渣有効利用状況の解析.第 41回全国都市清掃研究・事例発表会,講演論文集,59-61
- 2) 肴倉宏史,飯野成憲,中川美加子, Back Seungki,植田健渡,久保田洋,繁泉恒河,高地春菜,佐藤研一,藤川拓朗(2020)炭酸化と物理選別を組み合わせた改質処理が焼却主灰中の重金属含有量に与える影響,廃棄物資源循環学会研究発表会,講演論文集,315-316.
- 3) 高地春菜、久保田洋、繁泉恒河、佐藤研一、永山陽裕、藤川拓朗、古賀千佳嗣、肴倉宏史、飯 野成憲、Back Seungki、植田健渡(2020)炭酸化と物理選別を組み合わせた処理が焼却主灰か らの重金属溶出に与える影響,第31回廃棄物資源循環学会研究発表会,講演論文集,377-378.

- 4) 肴倉宏史(2021) 全国市区町村における熱処理残渣の資源化状況とその要因. 第42回全国都市 清掃研究・事例発表会, 講演論文集, 139-141
- 5) 飯野成憲, 肴倉宏史(2021) 地域特性に応じた都市ごみ焼却主灰の有効利用計画. 第42回全国 都市清掃研究・事例発表会講演論文集, 136-138

## 【サブテーマ2】

- Sakanakura H., Back S., Naruoka T. (2018) Contribution of Each Combustible Waste to the Element Content of MSW Incineration Residue, The 10th International Conference on Combustion, Incineration/Pyrolysis, Emission and Climate Change, Bangkok, Thailand.
- 2) Back S., Nakagawa M., Ueda K., Sakanakura H. (2019) Development of an inventory of combustible wastes as sources of environmental concerning elements. The 30th Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management, Abstracts, 531-532

## 【サブテーマ3】

- Iino S., Tatsuichi S., Sakanakura H. (2019) Condition Settings of an Air Table for Metal Recovery from Incineration Bottom Ash, 2019 Spring Scientific Conference by Korea Society of Waste Management, Cheju, Korea
- Back S., Sakanakura H. (2019) Sorting of MSW incineration bottom ash according to size and density by applying Air Table separator, 2019 Spring Scientific Conference by Korea Society of Waste Management, Cheju, Korea
- Back S., Sakanakura H. (2019) Estimation of Element Distribution in MSW Incinerator Bottom Ash by Size and Density applying Air Table Separator, Sardinia 2019 - 17th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia, Italy
- 4) 飯野成憲、辰市祐久、肴倉宏史(2019) エアテーブルによる都市ごみ焼却主灰の比重選別条件 の検討,第30回廃棄物資源循環学会研究発表会,371-372,仙台市
- 5) Iino S., Tatsuichi S., Sakanakura H. (2020) Element Distribution Behavior of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash in Impact Mill Segregation, 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management, Tsukuba, Japan
- 6) 飯野成憲, 辰市祐久, 肴倉宏史(2020) 渦電流選別による都市ごみ焼却主灰の金属選別特性. 第31回廃棄物資源循環学会研究発表会講演原稿2020, 305-306
- 7) 飯野成憲, 辰市祐久, 肴倉宏史(2020)都市ごみ焼却主灰のエアテーブル選別における含水率 の影響. 第31回廃棄物資源循環学会研究発表会講演原稿2020, 313-314

## 【サブテーマ4】

- 久保田洋,繁泉恒河,藤川拓朗,古賀千佳嗣,佐藤研一,肴倉宏史:散水・促進炭酸化処理の 焼却主灰溶出性へ及ぼす影響:第29回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集,465-466, 2018,名古屋市.
- 永山陽裕,佐藤研一,藤川拓朗,古賀千佳嗣,久保田洋,繁泉恒河,肴倉宏史(2018)排出地 域・形態に着目した一般廃棄物焼却主灰の物理特性:平成30年度土木学会西部支部研究発表会 講演論文集,391-392
- 3) 永山陽裕、佐藤研一、藤川拓朗、古賀千佳嗣、久保田洋、繁泉恒河、肴倉宏史(2019) 排出地 域・形態に着目した一般廃棄物焼却主灰の物理・力学特性:第54回地盤工学研究発表会講演概 要集,さいたま市

- 4) 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、藤田大吾
  (2019) 清掃工場の排ガスおよび排ガスから分離回収したCO2 を利用した焼却残渣の炭酸化処理,第30回廃棄物資源循環学会研究発表会,同予稿集,363-364
- 5) 永山陽裕、佐藤研一、藤川拓朗、古賀千佳嗣、久保田洋、繁泉恒河、肴倉宏史(2019)清掃工 場の排ガス及び分離回収したC02を用いて炭酸化処理を施した一般廃棄物焼却主灰の地盤材料 特性,令和元年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集,pp.405-406.
- 6) 繁泉恒河、久保田洋、永山陽裕、藤川拓朗、古賀千佳嗣、佐藤研一、肴倉宏史(2019) 性状の 異なる一般廃棄物焼却主灰の散水・炭酸化処理による溶出特性への影響,第30回廃棄物資源循 環学会研究発表会,同予稿集,375-376
- 7) 高地春菜、久保田洋、繁泉恒河、佐藤研一、肴倉宏史(2019)焼却主灰の炭酸化処理における 六価クロムの溶出傾向と酸化還元電位の関係,第30回廃棄物資源循環学会研究発表会,同予稿 集,449-450
- 8) 永山陽裕、佐藤研一、藤川拓朗、古賀千佳嗣、肴倉宏史、久保田洋、繁泉恒河、高地春菜 (2020)清掃工場の排ガス及ぶC02による炭酸化処理を施した一般廃棄物焼却主灰の土木資材 利用に向けた検討、第55回地盤工学研究発表会,22-1-1-03.
- 9) 永山陽裕,佐藤研一,藤川拓朗,古賀千佳嗣,久保田洋,繁泉恒河,高地春菜,肴倉宏史 (2020)清掃工場の排ガス及びC02により炭酸化処理を施した一般廃棄物焼却主灰の地盤材料特 性と長期安定性,第14回地盤改良シンポジウム論文集,377-380.
- 10) 繁泉恒河,久保田洋,高地春菜,藤川拓朗,佐藤研一,肴倉宏史,藤田大吾(2021) 清掃工場 由来のC02を用いた炭酸化処理による焼却主灰の溶出特性への影響.第42回全国都市清掃研 究・事例発表会,講演論文集,133-135
- 11)永山陽裕,佐藤研一,藤川拓朗,古賀千佳嗣,久保田洋,繁泉恒河,高地春菜,肴倉宏史
  (2021)炭酸化処理を施した一般廃棄物焼却主灰の長期安全性評価,土木学会西武支部研究発 表会,同予稿集,387-388.

#### (3) 「国民との科学・技術対話」の実施

## 【サブテーマ1】

- 1) 肴倉宏史(2018) ごみ焼却主灰を安全にリサイクルする-エアテーブルでの金属選別とエージングによる安定化-,エコプロ2018 SDGs時代の環境と社会、そして未来へ,2018.12.06-08 (パネル展示),東京都
- 2) 肴倉宏史(2018)都市ごみ焼却残渣の有効利用推進に向けた現状と課題,地球環境技術推進懇 談会 循環・代謝型社会システム研究会,2018.06.12,大阪市
- Sakanakura H. (2018) Utilizing BOF slag and MSWI bottom ash in earth engineering with environmental safety in Japan, Global Harbor Cities Forum, 2018.09.25, Kaohsiung City, Taiwan
- 4) 肴倉宏史(2018)都市ごみ焼却残渣の有用・有害金属に着目した資源性最大化,東北大学レア メタル・グリーンイノベーション研究開発センター第4回フォーラム,2018.11.14,仙台市
- 5) 肴倉宏史(2019) 焼却残渣の環境安全管理と有効利用のあり方,廃棄物資源循環学会企画セミ ナー SDGsスタンダードな生活衛生・資源循環インフラー焼却・エネルギー回収・資源回収・ 最終処分の普及-,2019.11.14,東京都
- 6) 肴倉宏史(2019) 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,2019年度循環型社会形成推進研究発表会,2019.12.14,東京都
- 7) 肴倉宏史(2019) 【特別講演】一般廃棄物焼却灰のリサイクル~意義と課題~, 令和元年度 東京都環境科学研究所公開研究発表会, 東京都
- Sakanakura H. (2020) Recycling of MSW Incineration Ash in Japan, Europe, and Taiwan, Seminar on bilateral cooperation of waste in Thailand, 2020.02.05, Bangkok

- Sakanakura H. (2020) Characteristics of Waste to Energy Incineration Ash and the Recycling Technologies, Seminar on bilateral cooperation of waste in Thailand, 2020.02.05, Bangkok
- 10) 肴倉宏史(2020) 都市の物質循環の最終出口!?焼却灰のリサイクル,国立環境研究所公開シンポジウム,オンライン.
- 11) 肴倉宏史(2021) 都市ごみ焼却主灰の資源化に向けた取組,建設資源リサイクル研究会第148 回定例会,2021.02.09,オンライン.
- 12) Sakanakura H. (2021) Requirements in Setting the Environmental Safety Quality of Recycled Materials in Construction, Technical Meeting: The Project for Enhancement of Industrial Waste Management in Thailand, 2021.03.19, On-line.

## 【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

## 【サブテーマ3】

- 2018年7月21日 東京150年関連事業 東京都環境科学研究所 施設公開「Let'sサイエンス 2018」において、タイトル「「空気」と「振動」でプラスチックを分けよう」にてエアテーブ ルによる実演、パネル展示、説明を実施
- エコプロ2018 SDGs時代の環境と社会、そして未来へ(2018年12月6~8日、東京ビッグサイト)にてタイトル「ごみ焼却主灰を安全にリサイクルする-エアテーブルでの金属選別とエージングによる安定化-」としてパネル展示による研究紹介
- 3) 飯野成憲(2019)東京都環境科学研究所施設公開「Let'sサイエンス2019」(2019年7月20日)において、タイトル「「空気」と「振動」でプラスチックを分けよう」にてエアテーブルによる実演、パネル展示、説明を実施
- 4) 飯野成憲(2019)焼却灰の物理選別・脱塩について-23区最後の最終処分場の延命化のために
  -,令和元年度東京都環境科学研究所公開研究発表会,東京都

## 【サブテーマ4】

特に記載すべき事項はない。

(4) マスコミ等への公表・報道等>

特に記載すべき事項はない。

## (5) 本研究費の研究成果による受賞

- 1) 廃棄物資源循環学会奨励賞、飯野成憲(2018年6月1日)
- 2) 廃棄物資源循環学会論文賞(2021年5月予定)、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C02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,31,116-130.

#### Ⅳ. 英文Abstract

# Establishment of "Bottom Ash Green Reforming Technology" Combining Physical Sorting and Aging Processes

Principal Investigator: Hirofumi SAKANAKURA Institution: National Institute for Environmental Studies, Tsukuba City, JAPAN Tel: +81-29-850-2185 / Fax: +81-29-850-2840 E-mail: sakanakura@nies.go.jp

Cooperated by: Tottori Prefectural Research Institute of Sanitary and Environment, Fukuoka University

#### [Abstract]

Key Words: Incineration bottom ash, Metal recovery, Toxic metals, Civil engineering material, Physical sorting, Air-table, Eddy current, Aging, Carbonation, Environmental safety

The goal of this research is to establish "Green Reforming Technology" (GRT) for municipal solid waste (MSW) incineration bottom ash (IBA), which is currently the main final disposal waste in Japan. GRT refers to a combination of processes reducing metal content by physical sorting and improving leachability by carbonation aging.

In Sub-Theme 1, the current status of incineration residue recycling was summarized, and the environmental impact of Green Reforming Technology was compared with melting technology, cement-feeding technology, and final disposal. The target quality was examined for the reformed IBA, and the future direction of GRT was discussed. We established a joint research system with the Waste Management and 3Rs Research Foundation's Project, including incineration plant manufacturers to discuss the social implementation of this research project. In Sub-Theme 2, the amounts of heavy metals in MSW in each category were investigated to reduce metal content in IBA. IBA were collected from incineration plants across Japan, and the metal contents and chemical forms in each ash were investigated. IBA is a mixture of metal particles, glass and ceramics, and ash particles. In Sub-Theme 3, optimal conditions for air table sorting, eddy current sorting, and crushing methods to bottom ash were studied. Especially, air-table sorting was elaborated in terms of air velocity, slope, water content of ash, and so on. In conclusion, an optimal physical sorting flow for IBA was proposed. In Sub-Theme 4, the effect of accelerated carbonation aging technology on IBA was thoroughly investigated. IBA was stabilized by sprinkling water and venting CO2-enriched gas. The changes in physical, mechanical, and leaching characteristics were elucidated. Carbonation was carried out at an incineration facility using recovered CO2 and exhaust gas, and the performance of the reformed ash as a civil engineering material were evaluated.

Finally, through the collaboration of sub-themes 1 to 4, the reforming process was applied under different conditions such as aging to air table, aging to eddy current, air table to aging, eddy current to aging, and so on, and their effects on metal content, physical and mechanical properties, and leaching characteristics were evaluated. It was confirmed that the Green Reforming Technology has a positive effect on the improvement of environmental safety and quality of MSW incineration bottom ash.