

都市ごみ焼却施設における高速飛灰炭酸化処理技術の検証

Demonstration Test of Accelerated Carbonation Technology for Fly Ash at a Municipal Waste Incinerator



前田有貴*
Yuki Maeda



中原慎太郎**
Shintaro Nakahara



藤原 大*
Hiroshi Fujiwara



皆川公司*
Koji Minakawa



島倉久範*
Hisanori Shimakura



Tom Bissett ***



Dr. Peter Gunning ***

飛灰がCO₂を吸収/固定化する炭酸化反応において、重金属類が飛灰に吸着/固定化されて不溶化する性質に着目し、都市ごみ焼却施設で発生した飛灰に、焼却排ガスに含まれるCO₂を吸収/固定化させる実機スケールでの炭酸化実証試験を実施した。実証試験の結果、焼却排ガスによる炭酸化処理において、環境省告示第13号試験に基づくPb、Cr⁶⁺の溶出濃度を、埋立て基準値以下まで低減できることを確認した。また従来の混練機によるキレート処理よりも、焼却ごみトン当たりのCO₂発生量を6.47 kg-CO₂/焼却ごみトンを削減できる見込みを得た。

A carbonation demonstration test was carried out to react / capture CO₂ at an actual waste to energy plant. During the carbonation reaction in which fly ash absorbs / captures CO₂, heavy metals are converted into insoluble compounds. As a result of the demonstration test, it was confirmed that carbonation treatment of fly ash by actual flue gas reduced soluble Pb and Cr⁶⁺ to a value below the leaching standard of JLT-13. In addition, fly ash treatment alone is expected to reduce the amount of CO₂ generated per ton of incinerated waste by 6.47 kg-CO₂ / ton of incinerated waste, compared to conventional chelating treatment.

Keywords:

都 市 ご み
焼 却 飛 灰
重 金 属 溶 出 抑 制
炭 酸 化
CO₂ 固 定 化
キ レ ー ト 処 理

Municipal solid waste (MSW)
Incinerator fly ash
Stabilization of heavy metal leaching
Carbonation
Carbon capture
Chelate treatment

【セールスポイント】

- ・ CO₂の固定化
- ・ CO₂の有効利用促進
- ・ キレート剤使用量の削減

ま え が き

温暖化対策においては、CO₂排出量をできるだけ減らそうとする取り組みから、最近ではCO₂の排出量と吸収量をイコールにするカーボンニュートラルを念頭においた取り組みに移行しており、2050年の

カーボンニュートラル達成に向け、CO₂の固定化(CCS)や利用(CCU)によるCO₂削減技術が注目されている。

本開発では、飛灰がCO₂を吸収/固定化する炭酸化反応において、重金属類が飛灰に吸着/固定化さ

*技術開発センター 新技術インキュベーション部

**技術開発センター 技術開発部 基盤技術室

***O.C.O TECHNOLOGY LTD.

れて不溶化する性質に着目し¹⁾、都市ごみ焼却施設で発生した飛灰に、焼却排ガスに含まれるCO₂を吸収/固定化させる実機スケールでの炭酸化実証試験を実施した。実証試験では炭酸化による①CO₂の有効利用促進と、②キレート剤使用量の削減効果について検証を行った。また炉形式・灰組成が炭酸化に与える影響を明らかにするため、複数の施設の灰を使ったラボスケールでの炭酸化試験も実施した。これら異なるスケールでの試験結果について報告する。

1. 試験内容

1.1 実証試験

実証試験はI市焼却施設（以降、I施設）にて実施した。施設概要を表1に示す。I施設はガス化燃焼炉であり、通常発生した飛灰はキレート剤で不溶化処理されている。実証試験ではこの実機飛灰を炭酸化装置へ搬送し、CO₂および水、薬剤をミキサーに投入し、炭酸化処理を行った。

実証試験は2ステップに分けて実施した。I施設における飛灰炭酸化技術のフローを図1に示す。STEP1ではCO₂ガス（CO₂：99.9%）を用いて炭酸化処理を行い、炭酸化条件の最適化の検討を行った。

表1 施設概要

焼却炉処理能力	138t/日（46t/日×3炉）
焼却炉形式	流動床式ガス化燃焼
排ガス処理方式	消石灰・活性炭供給，BF

表2 施設一覧

	施設名	焼却炉形式
①	I施設	ガス化燃焼炉
②	K施設	ガス化燃焼炉
③	H施設	ガス化燃焼炉
④	A施設	ガス化溶融炉
⑤	O施設	ガス化溶融炉
⑥	N施設	回転ストーカ炉

次にSTEP2では、STEP1で検討した最適条件を基に、I施設の焼却排ガス（CO₂：8-10%-wet）を用いて炭酸化効果の確認を行った。

炭酸化後の処理灰については環境省告示第13号試験（以下、環告13号試験）に基づいてpH、Pb、Cr⁶⁺を分析し、最終処分場での埋立て基準を満たしていることを確認した。

1.2 適応施設の検証

ラボ試験は焼却炉形式、排ガス処理方式の異なる6施設（I施設を含む）で実施した。小型ミキサーを各施設に持ち込み、サンプリングした飛灰について小型ミキサー（+CO₂ガス）で炭酸化処理を行った。試験を行った施設一覧を表2に示す。炭酸化後の処理灰については実証試験同様、環告13号試験に基づきpH、Pb、Cr⁶⁺を分析した。

2. 試験結果

2.1 実証試験

実証試験ではSTEP1とSTEP2で、それぞれ3

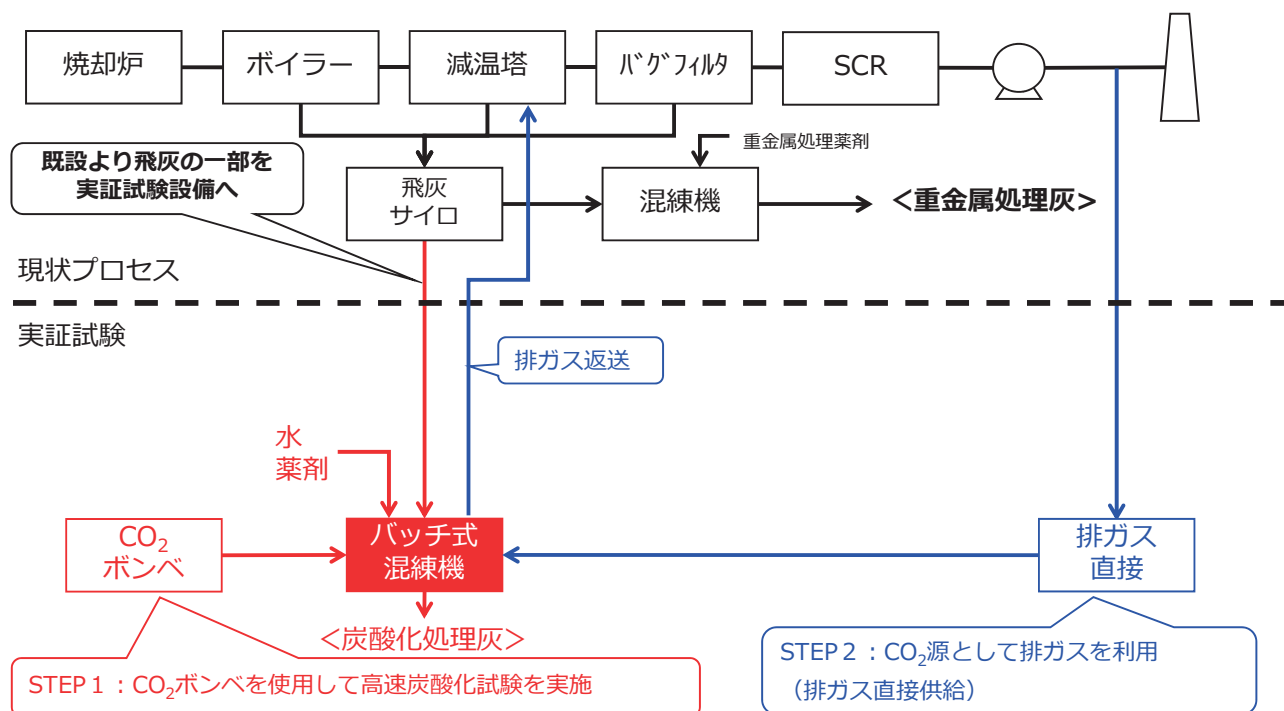


図1 炭酸化フロー

種類の検証を行った。結果を以下に示す。

1) CO₂添加量と重金属溶出抑制効果

飛灰に対するCO₂添加量を変化させ、CO₂吸収量と重金属溶出抑制効果の相関を検証した。

2) 薬剤添加効果

無機系薬剤（以下、SK-1）を添加し、重金属溶出抑制効果を検証した。

3) 連続試験

同一条件で安定的に飛灰を処理できることを確認するため、1日の焼却炉運転に相当する飛灰の炭酸化処理を行った。

2.1.1 STEP 1（CO₂ガス）

1) CO₂添加量と重金属溶出抑制効果

飛灰炭酸化における最適条件の検討のため、まずは飛灰に対する適切な水添加率の調査を行った。調査の結果、既存の混練機と同程度の15 wt%/飛灰が適切と判断し、以降の試験では主に水添加率15 wt%/飛灰で実施した。（図2）

次にCO₂添加量と重金属溶出抑制効果について調査を行った。図3、図4は炭酸化処理時間（CO₂添加量）とCO₂吸収量、重金属溶出濃度の関係を示しており、飛灰に対してCO₂添加量を変化させている。図3はPb溶出濃度について示しており、原灰のpHは11.8と高く、Pbの溶出濃度も10.2 mg/Lと基準値（0.3 mg/L）より高かったが、炭酸化処理によりPb

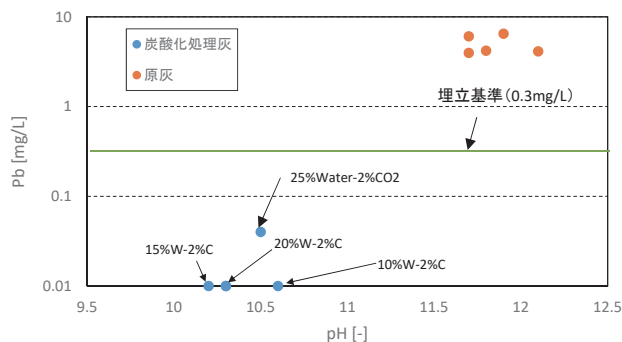


図2 水添加率と pH, Pb の溶出濃度の関係（STEP 1）

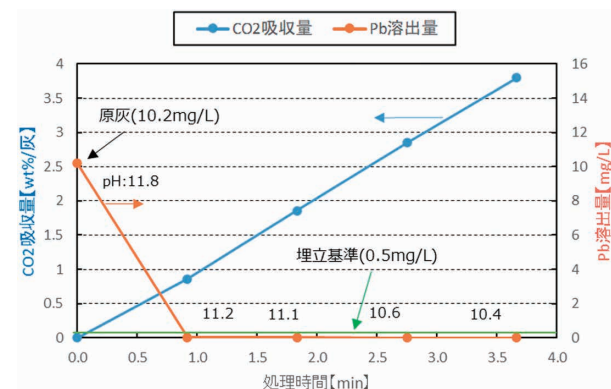


図3 CO₂吸収量と pH, Pb の溶出濃度の関係（STEP 1）

溶出濃度を基準値以下に抑制できることを確認した。また図4に示すCr⁶⁺溶出濃度においても、Pbの溶出同様、と基準値（1.5 mg/L）と同等のCr⁶⁺溶出濃度（1.3 mg/L）を、炭酸化処理に0.2 mg/L以下まで抑制できることを確認した。なお図3、図4の試験においては水とCO₂ガスのみを用いており、薬剤は添加していない。

2) 薬剤添加効果（CO₂ガス）

STEP 1におけるSK-1添加によるCr⁶⁺溶出抑制効果を図5に示す。CO₂ガスによる炭酸化処理においてCr⁶⁺溶出濃度が低減されていることを確認したが、SK-1添加により、さらにCr⁶⁺溶出濃度が低減することを確認した。

3) 連続試験（CO₂ガス）

STEP 1における連続試験結果を表3に示す。1日の焼却炉運転に相当する飛灰量（9バッチ分）のPb, Cr⁶⁺は全て埋立て基準を満たしており、同条件で安定的に処理されていることを確認した。また各バッチ試験で処理した灰を縮分後に混合し、水銀やカドミウムなどその他重金属類、DXNs類も分析したが全て環境基準値以下の値であった。

2.1.2 STEP 2（焼却排ガス）

1) CO₂添加量と重金属溶出抑制効果

水添加率15 wt%/飛灰で、炭酸化処理時間（焼却

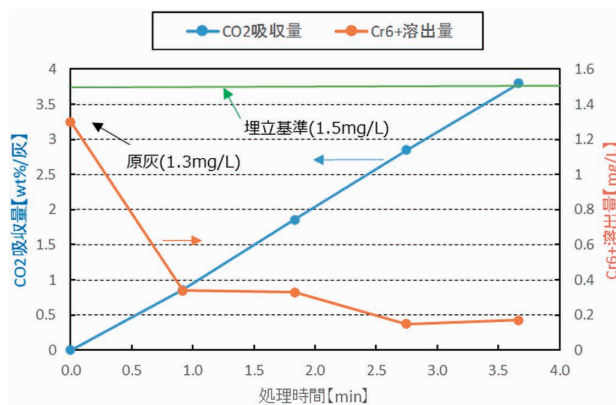


図4 CO₂吸収量と Cr⁶⁺ 溶出濃度の関係（STEP 1）

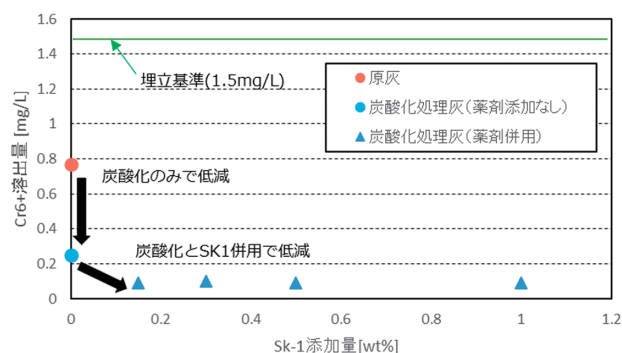


図5 SK-1添加量と Cr⁶⁺ 溶出濃度（STEP 1）

表3 連続試験結果 (STEP 1)

	溶出基準値	原灰	炭酸化処理									参考 キレート 4%添加
			No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	
pH	—	11.5 ～ 12.0	10.3	10.4	10.3	10.3	10.3	10.2	10.2	10.2	10.3	
Pb 【mg/L】	0.3	4 ～ 10	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.03
Cr ⁶⁺ 【mg/L】	1.5	0.5 ～ 2.0	0.09	0.09	0.08	0.09	0.08	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09

排ガス添加量)を変化させ、炭酸化効果の確認を行った。STEP 2における炭酸化処理時間とCO₂吸収量、重金属溶出濃度の関係を図6、図7に示す。STEP 1と同様、炭酸化処理前の飛灰のpHは11.9と高く、Pbの溶出濃度も3.49 mg/Lと基準値(0.3 mg/L)より高かったが、炭酸化処理によりPb溶出濃度を基準値以下に抑制できることを確認した(図6)。またCr⁶⁺溶出濃度においても、炭酸化処理により基準値(1.5 mg/L)以下に抑制できることを確認した(図7)。なお、STEP 1同様、図6、図7は水と既設焼却排ガスのみ用いており、薬剤は添加していない。

2) 薬剤添加効果(焼却排ガス)

STEP 2におけるSK-1添加によるCr⁶⁺溶出抑制効果を図8に示す。焼却排ガスによる炭酸化処理においてもSTEP 1と同様の効果を確認することができた。これにより、炭酸化処理を行うことで従来のキレート剤添加は不要となり、かつ少量のSK-1添加(I施設では0.3 wt%/飛灰)でCr⁶⁺溶出基準値を満たすことが分かった。

3) 連続試験(焼却排ガス)

STEP 2における連続試験の結果を表4に示す。STEP 1と同じく、1日の焼却炉運転に相当する飛灰量(9バッチ分)の飛灰炭酸化処理を行ったところ、STEP 1と同様の効果を確認することができ、焼却排ガスによる炭酸化処理においてもPb、Cr⁶⁺は全て基準値以下になることを確認した。

2.2 ラボ試験

炉形式・灰組成が炭酸化に与える影響を明らかにするため、複数の施設でラボスケールの炭酸化試験を行った。小型ミキサーで水添加率を変化させ、炭酸化処理を行ったところ、Pbはいずれの施設でも基準値以下まで抑制できることを確認した。またI施設において、実証試験とラボ試験の結果を比較したところ、炭酸化処理を行うことで、同様の傾向で

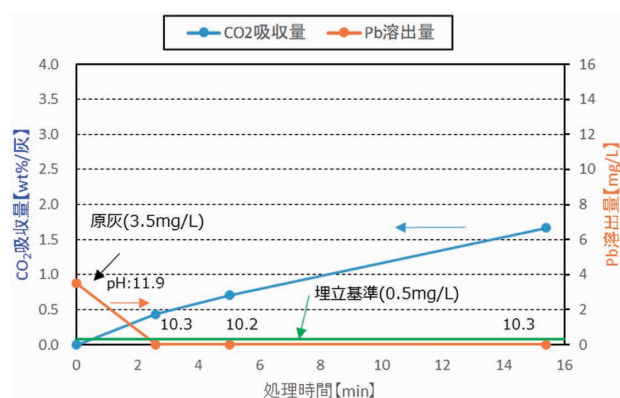
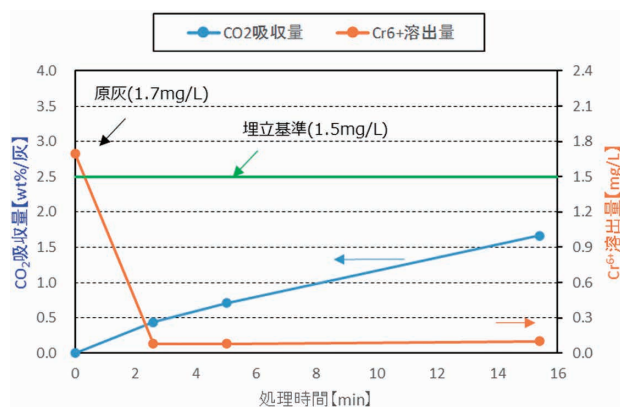
図6 CO₂吸収量とpH、Pbの溶出濃度の関係(STEP 2)図7 CO₂吸収量とCr⁶⁺溶出濃度の関係(STEP 2)図8 SK-1添加量とCr⁶⁺溶出濃度(STEP 2)

表4 連続試験結果 (STEP 2)

	溶出基準値	原灰	炭酸化処理								
			No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9
pH	—	11.5 ~ 12.0	10.4	10.2	10.1	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.3
Pb 【mg/L】	0.3	2 ~ 3	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Cr ⁶⁺ 【mg/L】	1.5	0.5 ~ 1.5	0.08	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.07

表5 CO₂削減効果 (I 施設)

		項目	従来 (連続式混練機)	炭酸化 (バッチ式混練機)	備考
CO ₂ 削減 要因	①	灰が吸収するCO ₂	0.00	-1.06	飛灰に対しCO ₂ 吸収量2%と仮定
	②	キレート剤 (従来:4.0%添加⇒炭酸化:0%)	5.61	0.00	CO ₂ 排出量原単位: 2.6583 kg-CO ₂ /キレートkg※ ¹
CO ₂ 増加 要因	③	灰処理に要する消費電力由来	0.24	0.38	CO ₂ 排出量原単位: 0.497 kg-CO ₂ /kWh※ ²
	④	SK-1 (従来:0%添加⇒炭酸化:0.3%)	0.00	0.05	CO ₂ 排出量原単位: 0.3282 kg-CO ₂ /SK1-kg
合計			5.85	-0.62	
削減量 kg-CO ₂ /焼却ごみトン			6.47		

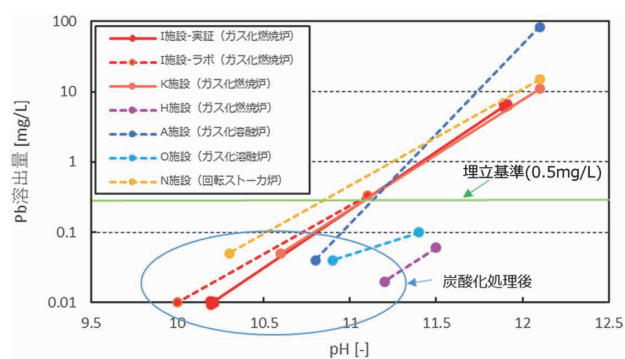
CO₂排出量原単位:※¹財団法人クリーンジャパンセンター「ごみ焼却灰リサイクルの温室効果ガス排出削減・ライフサイクル管理に関する調査研究」より, ※²北陸電力(2019年度)

図9 ラボ試験各案件 Pb 溶出比較

Pb 溶出抑制ができていることを確認した(図9)。一方, Cr⁶⁺については施設ごとで炭酸化前後の挙動が異なり, Cr⁶⁺ 溶出抑制に無機系薬剤(SK-1)の添加が必要な施設があることを確認した。

2.3 CO₂削減効果

従来の混練機によるキレート処理と炭酸化処理で, 飛灰処理における CO₂発生量の比較を行った。(表5) 従来のキレート処理では, キレートの薬剤製造や混練機の動力で CO₂が発生していた。一方で炭酸化処理はミキサーの動力で CO₂が発生している

が, 薬品をほとんど使用しなくてよいことや, 飛灰が CO₂を吸収することから, 従来よりも CO₂発生量が減少し, 飛灰処理単体では CO₂が削減できる試算となった。

なお, この CO₂削減量は, 焼却ごみに含まれる廃プラ由来の発生 CO₂を100とした場合のおよそ2.0 %と計算される。

む す び

都市ごみ焼却施設から発生する飛灰の炭酸化処理について実証試験を実施した。検証の結果, 以下のことを確認した。

- ・CO₂ガス, 焼却排ガスを用いて炭酸化試験を行い, 飛灰が CO₂を吸収することを確認した。また, 飛灰炭酸化では既存キレート処理に比べて CO₂排出量が削減可能である見込みを得た。
- ・飛灰炭酸化が飛灰からの Pb, Cr⁶⁺ の溶出抑制に有効であることを確認した。
- ・飛灰炭酸化と無機系薬剤(SK-1)の併用により, 炭酸化のみの場合よりさらに Cr⁶⁺ 溶出抑制が可能であることを確認した。本ケースでは従来のキレート剤添加は不要であり, かつ SK-1添加量は

少量（I 施設では0.3 wt%/ 飛灰）で Cr^{6+} の埋立て基準を満たすことがわかった。

- ・ラボ試験を実施した6 施設では、いずれの施設においても炭酸化処理により Pb を埋立て基準値以下まで抑制できることを確認した。一方、 Cr^{6+} については施設ごとで炭酸化前後の挙動が異なり、 Cr^{6+} 溶出抑制に SK-1 の添加が必要な施設があることを確認した。

今後は都市ごみ以外の分野に本技術を展開させる予定で、木質バイオマス灰や製鋼スラグについても炭酸化技術の適用を検討している。

[参考文献]

- 1) 本幡照文, 李政準, 張瑞娜, 崎田省吾, 島岡隆行: 焼却灰有効利用のための炭酸化による重金属の不溶化に関する基礎的研究, 環境工学研究論文集, Vol.41, p459-467 (2004)