

技報

Vol.18
(通巻35号) **No.1**

ENGINEERING REPORTS
KOBELCO ECO-SOLUTIONS CO.,LTD.



Keep the Earth Sky-blue

神鋼環境ソリューション

目次	CONTENTS
1 <巻頭言> 新たな価値を生み出す環境工学へ	
2 電熱スクリュ式炭化炉を用いた 汚泥燃料化技術の実証	Demonstration Experiment of Sewage Sludge Fuelization Technology Using Carbonization Furnace with an Electric Heating Screw
8 ゼブラフィッシュを用いた 強制経口投与手法の開発	Improvement for an Oral Gavage Dosing Method in Zebrafish
13 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
19 廃棄物からの貴金属回収	Precious Metal Recovery from Waste
22 施設・技術紹介	
24 論文発表一覧・登録特許一覧	

新たな価値を生み出す環境工学へ



北海道大学大学院工学研究院 環境工学部門

教授 **木村 克輝**
Katsuki Kimura

私は膜を用いた水処理を専らに研究しています。膜処理は上下水道でも実用化されましたが、主流技術とはなり得ていません。膜処理を上下水道で積極的に使えば世の中が変わる、と信じる当方と仲間達は、「どうして膜処理は採用されづらいのだろうか」とずっと考えてきました。膜を導入した処理場で「なぜ膜処理を採用したのか」というヒアリングを続けていると、ある共通項が浮かび上がってきました。膜処理にこだわりを持つ人、熱量のある人がいるかどうかが、大きな要素となっていたようです。しかしこういったスペシャリストが育ちににくくなっているのが日本の大きな組織、特に行政ではないでしょうか。頻繁な配置変更で優秀なジェネラリストが多数育つ一方で、突き抜けた専門知識を持ちづらいジェネラリストにとっては施設更新の決断でリスクの少ない前例踏襲が第一選択肢となることは想像に難くありません。上下水道を含む環境工学で、同じものを淡々と作り続け、粛々と動かすことを第一によしとする風潮が生まれかねないことを危惧しています。最近の学生にとって、環境工学がそれほど魅力ある分野となっていないように思われるのですが、新しいことにチャレンジをする雰囲気には乏しい分野であると捉えられているのではないのでしょうか。

「価値の創造」がキーワードだと思います。膜処理にあてはめれば、「そんなに処理水質を向上させてどうするの？今の急速ろ過と活性汚泥で十分だ」という考えが大勢であるように思われます。膜処理を積極的に使えば、川や海の水質はまだまだ向上させられるはずです。きれいになった川や海には人が集まるようになり、いろいろな経済活動の展開がありえます。上流の下水処理水が一部入った水源を用いて下流で浄水処理を行う、いわゆる水の繰り返し利用は我が国を含めて世界中で常態化していますが、これも双方で膜処理を入れれば飛躍的に水道水の安全性を向上させられます。紙幅の都合で詳細は割愛しますが、膜処理の積極的導入で下水道は創エネルギーインフラに転換できるとも考えています。現在、下水処理は全電力消費量の数%を消費しています。これに相当するエネルギーを生み出せるのならば、いくらかの処理コスト増がある（我々の実験結果からはコスト増はないだろうと考えていますが）にしても膜処理の使用を考えてよいのではないのでしょうか。上下水道単体での便益ではなく、広い視野で膜処理が生み出す価値に着目すべきです。

新技術の導入推進にあたっては、日本社会に根強く存在するゼロリスク指向の払拭が課題となります。チャレンジが奨励される社会への変化、これを後押ししてくれる制度の充実を期待するものです。

電熱スクリュ式炭化炉を用いた汚泥燃料化技術の実証

Demonstration Experiment of Sewage Sludge Fuelization Technology Using Carbonization Furnace with an Electric Heating Screw



竹田尚弘*
Naohiro Takeda



島村育幸*
Yasuyuki Shimamura



谷山拓生**
Hiroki Taniyama



鈴木亮介**
Ryosuke Suzuki



松井 朗*
Akira Matsui



坂井義広***
Yoshihiro Sakai

令和3年に閣議決定された第5次社会資本整備重点計画では、下水道バイオマスリサイクル率や下水道分野における温室効果ガス排出削減量に数値目標が設定された。当社では、このような社会ニーズに応えるため、下水汚泥のエネルギー利用を目的に、「電熱スクリュ式炭化炉を用いた汚泥燃料化技術」の実証を実施し、本技術が安定した発熱量の汚泥燃料を製造でき、かつ省エネルギー化が可能となる技術であることを確認した。本実証試験の成果をもって、日本下水道事業団の新技术Ⅰ類に選定された。

In the 5th Priority Plan for Social Infrastructure Development, which was approved by the Cabinet in 2021, numerical targets were set for the sewerage biomass recycling rate and the amount of greenhouse gas emission reduction in the sewerage field. In order to meet such social needs, we have demonstrated "sewage sludge fuelization technology using a carbonization furnace with an electric heating screw" for the purpose of utilizing the energy contained in sewage sludge. And, we have confirmed that this technology can produce sludge fuel of a stable calorific value and can save energy. Based on the results of this demonstration test, it was selected for the "JS Innovation Program" of the Japan Sewage Works Agency.

Key Words :

電 熱 ス ク リ ュ
炭 化
固 形 燃 料 化
汚 泥 燃 料

Electric heating screw
Carbonization
Conversion to solid fuel
Sludge fuel

【セールスポイント】

- ・電気を熱源とする電熱スクリュを活用したコンパクトな炭化炉と、熱風発生炉等が不要となるシンプルなフローで構成。
- ・安定した発熱量の汚泥燃料を製造でき、かつ省エネルギー化が可能。

ま え が き

下水汚泥は、人間の生活に伴い発生するため、日本全国に点在する地域バイオマスであると同時に、エネルギーの需要地である都市部で集約して発生する都市型バイオマスでもある。この下水汚泥の有効

利用を推進するため、令和3年度に閣議決定された第5次社会資本整備重点計画¹⁾では、下水道バイオマスリサイクル率（下水汚泥中の有機物の内、ガス発電等エネルギー利用や緑農地利用等、有効利用された割合）を33.8%（令和元年度）から45%（令

*技術開発センター 技術開発部 資源循環技術室

**技術開発センター プロセス技術開発部 資源循環技術室（開発当時所属）

***環境エンジニアリング事業本部 水環境技術本部 資源循環技術部

和7年度)に、また、下水道分野における温室効果ガス排出削減量を210万トンCO₂(平成29年度)から352万トンCO₂(令和7年度)に引き上げる目標が設定された。

下水汚泥を無酸素状態で熱分解し汚泥燃料にする炭化技術は、汚泥焼却と比較してN₂O(地球温暖化係数がCO₂の298倍)の発生量が少ないことと、得られた汚泥燃料を火力発電所等で使用することにより化石燃料の使用量を減らせることから、温室効果ガス削減効果が大きな技術である。

また、下水道の機能・サービス水準の持続可能性の観点から、今後の汚泥処理は広域化・共同化が進むと予想されており、汚泥燃料化技術にも汚泥性状変動への対応が求められている。また汚泥燃料化設備の導入には、得られた汚泥燃料の品質(発熱量、安全性、臭気)の確保と、設備の省エネルギー性能が重要である。

こうした背景のもと、当社は日本下水道事業団(以下、「JS」という。)と平成30年度から令和2年度にわたって「電熱スクリュ式炭化炉を用いた品質制御型汚泥燃料化システムに関する共同研究」と題した共同研究を行った。本研究では、電気を熱源として汚泥を加熱する「電熱スクリュ」を活用したコンパクトで熱風発生炉等が不要となる炭化炉を用い、シンプルなフローで構成された燃料化システム「電熱スクリュ式炭化炉を用いた汚泥燃料化技術」(以下、「本技術」という。)を開発した。

本報では、共同研究の成果を踏まえて令和3年3月にJSの新技术I類に選定された本技術^{2), 3)}の開発内容について報告する。

1. 技術の概要

1.1 システムフロー

本技術は、下水処理場で発生する脱水汚泥を対象に、炭化炉から発生する乾留ガスの燃焼熱を熱源として脱水汚泥を乾燥した後、炭化処理により汚泥燃料を製造するものである。本技術で用いる電熱スクリュ式炭化炉は、電気を熱源として汚泥を加熱するため、従来の炭化炉で必要であった熱風発生炉が不要であり、シンプルなフローとなっている。

図1に本技術のシステムフローを示す。脱水汚泥を乾燥機に投入し、水分を蒸発させ含水率30%以下に乾燥した後、電熱スクリュ式炭化炉にて発熱体であるスクリュとの直接接触により乾燥汚泥を炭化し、これを冷却・調湿して汚泥燃料を製造する。次いで、養生ホッパで汚泥燃料表面の酸化を促進させ、発熱発火性のある汚泥燃料を安定化する。また、燃焼炉では乾燥排ガスおよび炭化炉から発生する乾留

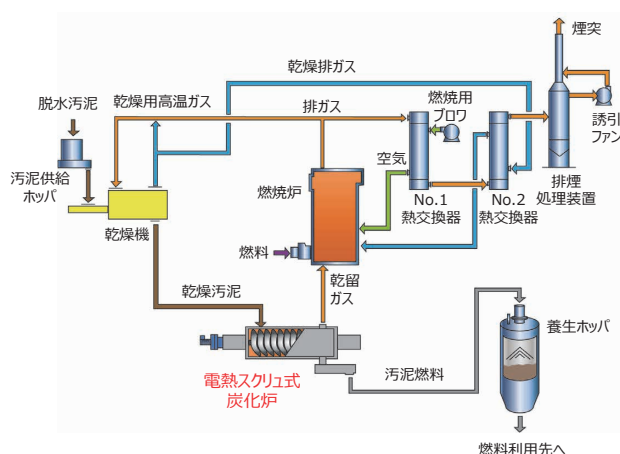


図1 電熱スクリュ式炭化炉を用いた汚泥燃料化技術のシステムフロー

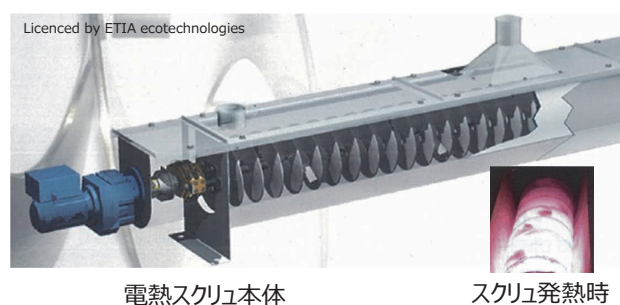


図2 電熱スクリュ式炭化炉の構造

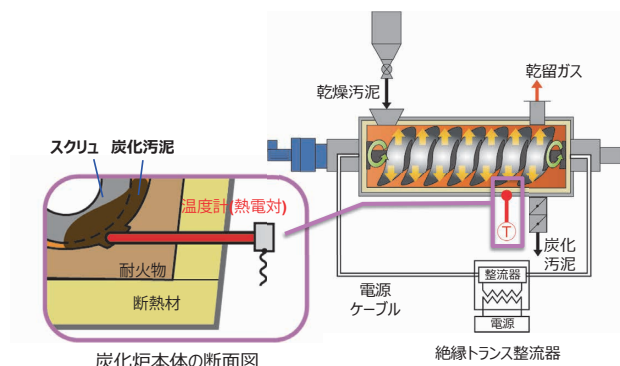


図3 炭化汚泥の温度測定方法

ガスを完全燃焼する。発生する燃焼排ガスの一部を乾燥機の熱源として利用すると同時に、燃焼炉での燃焼空気にも熱回収する。

1.2 電熱スクリュ式炭化炉の特長

電熱スクリュ式炭化炉は、スクリュに直流電流を流してスクリュ自体をジュール熱で発熱させ、汚泥を搬送しつつ直接接触加熱することで乾燥汚泥を炭化するものである(図2参照)。汚泥は発熱体である一本のスクリュ羽根と広い面積で直接接触しながら炭化されるため、熱伝達効率が高い。さらに、炭化炉の底部に設けた熱電対を炭化汚泥に直接接触させることで、炭化汚泥自体の温度計測を可能として

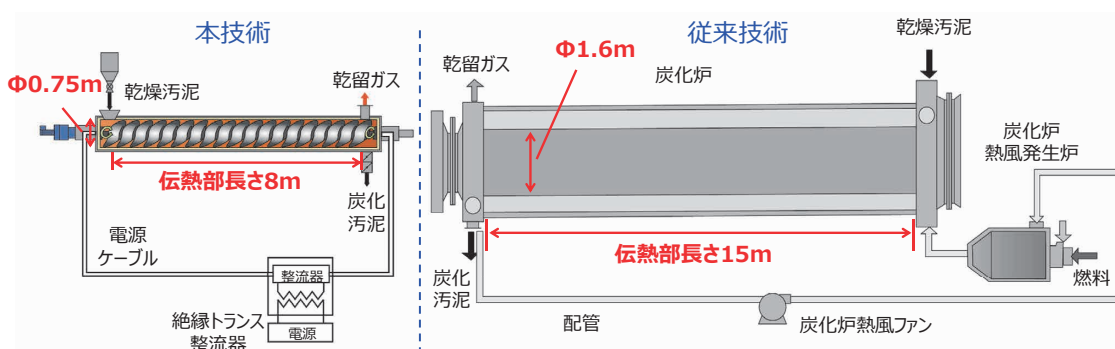


図4 100 t-wet/d 炉における本技術と従来技術の炭化炉比較（炉サイズと必要な補機類）

いる（図3参照）。

電熱スクリュ式炭化炉は、炭化汚泥の温度を直接接触測定できることと併せ、熱源が電気であることから、応答性良く炭化温度を維持できる。また、搬送形式がスクリュであるため、汚泥性状（粒径やかさ比重等の物理特性）の変動によらず炉内滞留時間（炭化時間）を一定に維持できる。これら汚泥燃料の発熱量を決定する炭化温度と炭化時間の制御により、安定した発熱量の汚泥燃料を製造可能という特長を有する。

また、熱伝達効率に優れるため、従来技術である外熱キルン式と比較し炭化炉本体をコンパクト（炉口径、長さ共に約半分）にできることや、熱風発生炉が不要であることから（図4参照）、炭化炉全体の熱損失が少なくなり、投入エネルギーの大幅な削減が可能となる。さらに、炭化炉内部は、U字型トラフにスクリュを載せたシンプルな構造であることから、炭化炉の蓋を開放するだけで炉内に入らず点検が可能であり、メンテナンス性に優れるという特長も有する。

2. 実証試験

本技術の導入効果を確認するため、規模の異なる二種類の試験設備を用いて、ラボ試験ならびに実証試験を行った。以下に試験内容を報告する。

2.1 試験の概要

開発技術の主要機器である電熱スクリュ式炭化炉の1 t-wet/d 規模（脱水汚泥量換算）の試験機（写真1参照）を当社技術研究所内に設置しラボ試験を、脱水汚泥処理能力10 t-wet/d の汚泥燃料化システム実証設備（写真2参照）を下水処理場に設置して実証試験を実施した。試験概要を表1に、試験設備の概要を表2に示す。

2.2 試験結果

試験で得られた汚泥燃料の分析を行い、炭化特性の評価を行った。また、汚泥燃料の品質として、発熱量、発熱発火性、ならびに臭気を評価した。



写真1 電熱スクリュ式炭化炉外観
（脱水汚泥量換算 1 t-wet/d 規模）



写真2 汚泥燃料化システム実証設備外観
（脱水汚泥処理能力10 t-wet/d）

表1 試験概要

試験	ラボ試験	実証試験
原料汚泥	・ 未消化汚泥 ・ 消化汚泥	・ 設備を設置した下水処理場の未消化汚泥
炭化温度	350 ~ 500 ℃	
炭化時間	15分	
目的	・ 炭化温度、原料汚泥性状の違い（消化の有無）による炭化特性の評価	・ 実機規模での炭化特性の評価 ・ 商用規模での導入効果の試算

表2 試験設備の概要

試験	ラボ試験	実証試験
設備規模	1 t-wet/d (脱水汚泥量換算)	10 t-wet/d (脱水汚泥処理能力)
設備	電熱スクリュ式 炭化炉	汚泥燃料化 システム一式
炭化炉サイズ	φ130×L1 700	φ300×L5 900
定格電力	15 kW	55 kW
設置場所	当社技術研究所	下水処理場

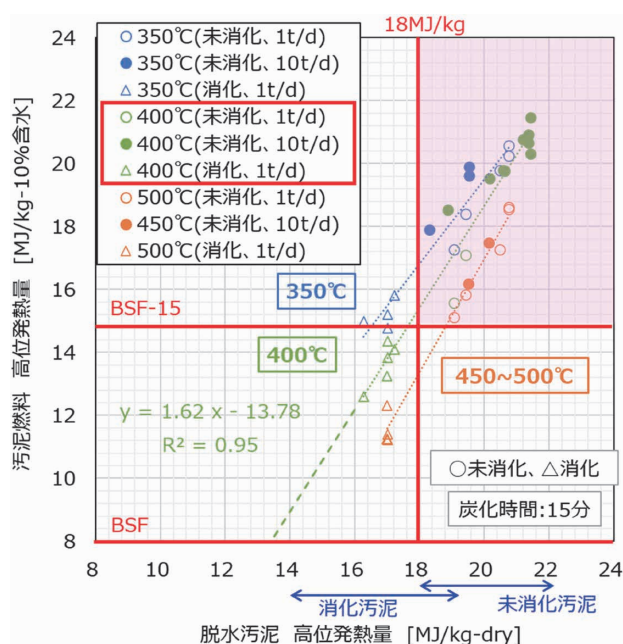


図5 脱水汚泥と汚泥燃料との高位発熱量の相関

1) 汚泥燃料の発熱量

本技術の炭化温度と炭化時間を精度良く一定に維持できるという特長から、原料の脱水汚泥と製品の汚泥燃料との高位発熱量（総発熱量）の関係は、消化の有無や設備規模にかかわらず、炭化温度毎に明確な線形の関係があることを確認した（図5参照）。

本技術の標準的な炭化条件である400℃15分では、脱水汚泥の高位発熱量18 MJ/kg-dry 以上の場合に汚泥燃料のJIS規格（JIS Z 7312「下水汚泥固形燃料」）で定めるBSF-15（高位発熱量15 MJ/kg 以上）を、同16 MJ/kg-dry 以上の場合にBSF（同規格、同8 MJ/kg 以上）を満足することが確認された。またBSFを満足する脱水汚泥の高位発熱量の下限値は14 MJ/kg-dry であると試算された。

以上より、本技術は、汚泥燃料の発熱量が消化の有無や設備規模にかかわらず、脱水汚泥の発熱量から炭化温度により一義的に決定されるという炭化特性を有することを確認した。

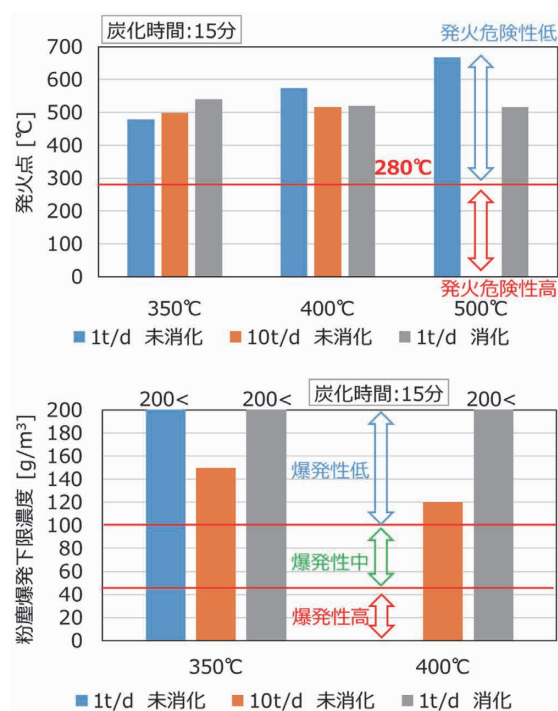


図6 汚泥燃料の発火点、粉塵爆発性

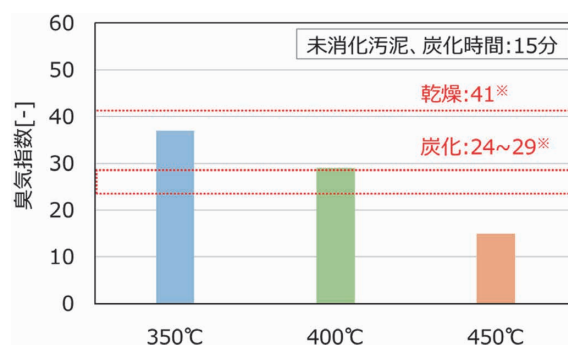


図7 汚泥燃料の臭気

2) 汚泥燃料の発熱発火性

汚泥燃料の発熱発火性の指標として、JSの「下水汚泥固形燃料発熱特性評価試験マニュアル」⁴⁾に従い、発火点と粉塵爆発性を評価した（図6参照）。汚泥燃料の発火点はマニュアルに記載の280℃以上であり発火危険性が低いという評価、粉塵爆発性も粉塵爆発下限濃度が100 g/m³ 以上で爆発性が低いとの評価となった。

本技術で製造した汚泥燃料の発熱発火性は低く、安全性を確認できた。

3) 汚泥燃料の臭気

汚泥燃料の臭気は、炭化処理を行うことで乾燥汚泥より臭気指数を低減でき、炭化温度400℃以上の条件にて、日本下水道協会の「下水道施設計画・設計指針と解説 2019年版」⁵⁾に記載の炭化の臭気指数（図中※印）以下にまで低減可能であることを確認した（図7参照）。

3. 下水処理場への導入効果試算

10 t-wet/d の実証試験にて得られた成果をもとに、本技術と従来技術の投入エネルギー、用役費、温室効果ガス排出量の比較を行った。試算条件を表3に示す。比較対象とする従来技術は、「外熱キルン式炭化」による汚泥燃料化技術とした。なお、試算結果は当社試算によるものである。

3.1 投入エネルギー削減効果の試算

未消化汚泥、消化汚泥それぞれに対して、本技術ならびに従来技術の投入エネルギー試算結果を図8に示す。

本技術の特長である炭化炉がコンパクトであること、ならびに熱風発生炉が不要になることにより炭化炉全体の放熱量が削減されるため、従来技術の外熱キルン式と比較し、投入エネルギーを未消化汚泥の場合で46 %、消化汚泥の場合で38 %削減できると試算された。

また、消化処理を行っている場合、本技術では、場内で発生する消化ガスを燃料として用いることにより、燃料の大半を消化ガスで賄うことが可能であると試算された。

以上より、本技術により従来技術と比べて投入エネルギーを40 % 程度削減できることが期待される。

表3 導入効果の試算条件

比較対象	本技術	従来技術
方式	電熱スクリュ式炭化	外熱キルン式炭化
試算規模	脱水汚泥投入量 100 t-wet/d 規模	
汚泥性状	含水率	未消化汚泥：78 % 消化汚泥：81 %
	可燃分	未消化汚泥：80 % 消化汚泥：66.7 %
消化の場合の試算条件	・消化は未消化汚泥を全量消化 ・消化ガスで都市ガスを代替	

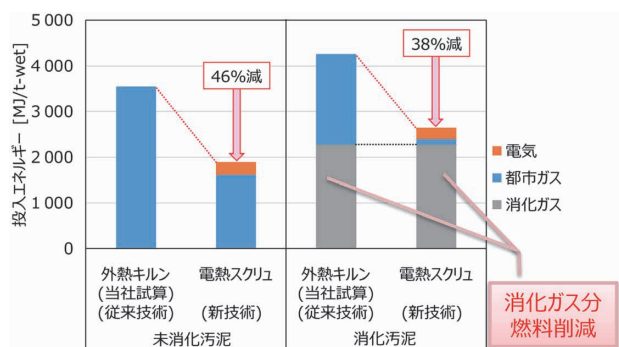


図8 投入エネルギー試算結果

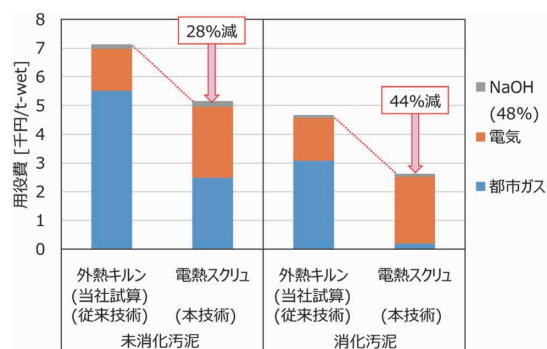


図9 用役費試算結果

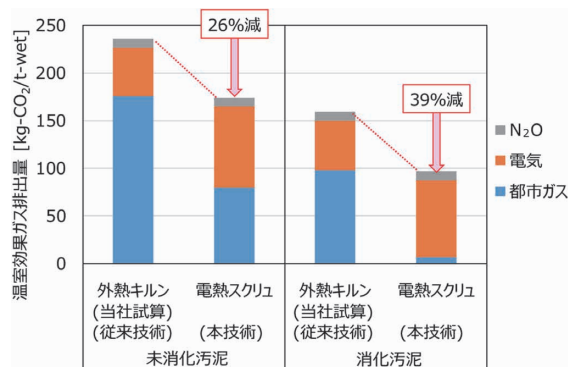


図10 温室効果ガス排出量試算結果

3.2 用役費削減効果の試算

未消化汚泥、消化汚泥それぞれに対して、本技術ならびに従来技術の用役費試算結果を図9に示す。

前項で述べた投入エネルギー削減効果により、用役費についても未消化汚泥の場合で28 %削減できると試算された。また、消化ガスを燃料として活用する消化汚泥の場合は、用役費の大半が電気となり、従来技術と比較して44 %削減できると試算された。

3.3 温室効果ガス排出量削減効果の試算

未消化汚泥、消化汚泥それぞれに対して、本技術ならびに従来技術の温室効果ガス排出量試算結果を図10に示す。

3.1項で述べた投入エネルギー削減効果により、温室効果ガス排出量についても未消化汚泥の場合で26 %と試算され、消化汚泥の場合は、温室効果ガスの大半が電気由来となり、従来技術と比較して39 %削減できると試算された。

前項ならびに本項での試算結果から、特に消化ガスを補助燃料として利用可能な処理場において、本技術の大きな導入効果が期待できる。

むすび

JS との共同研究にて、電熱スクリュ式炭化炉を用いた汚泥燃料化技術の実証試験を行い、本技術で得られた汚泥燃料の品質の評価、ならびに下水処理場への導入効果試算を行った。汚泥燃料の発熱量は、

汚泥性状（消化の有無）や設備規模にかかわらず、炭化温度毎に明確な線形の関係にあることを確認し、本技術による汚泥燃料への炭化特性を明らかにした。また本技術の導入により、従来技術と比較して投入エネルギー量、用役費、温室効果ガス排出削減の効果が期待できることを確認した。

これらの成果をもって、本技術は下水汚泥固形燃料化技術として初めてJSの新技术I類に選定された。

国内の焼却・溶融・燃料化設備の設置数は約300基であるが、これらの大半は焼却設備である。今後、既設炉の更新等に伴い燃料化設備の採用が進むと同時に、広域化・共同化に伴う集約処理等が進むことも想定される。対象とする汚泥の性状が変化しても安定した発熱量の汚泥燃料を製造でき、省エネルギー化が可能な本技術が、下水汚泥のエネルギー利用に貢献できるものと考ええる。

謝 辞

本技術の共同研究者である日本下水道事業団ならびに関係各位の多大なるご協力に深く感謝いたします。

[参考文献]

- 1) 国土交通省：第5次社会資本整備重点計画（令和3年度～令和7年度：令和3年5月28日閣議決定）
- 2) 日本下水道事業団 技術戦略部：月刊下水道，44巻，9号（2021），p90-95
- 3) 竹田尚弘：再生と利用，45巻，167号（2021），p38-40
- 4) 日本下水道事業団 技術戦略部：下水汚泥固形燃料発熱特性評価試験マニュアル，2008年3月
- 5) 公益社団法人 日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説－2019年版－，2019年10月

ゼブラフィッシュを用いた強制経口投与手法の開発

Improvement for an Oral Gavage Dosing Method in Zebrafish



藤原尚美*
Naomi Fujiwara



豊久志朗***
Shiro Toyohisa



井土俊輔**
Shunsuke Ido



古川 賢****
Satoshi Furukawa
博士 (獣医学)

医薬、農薬、食品分野においては、マウスやラットへの被験物質の経口投与が実用化されており、さらには、繁殖が容易かつ省スペースで大量に飼育できるゼブラフィッシュを用いた研究が進められている。ゼブラフィッシュにおける被験物質の投与は飼育水や餌へ混合する方法や、麻酔による強制経口投与が行われている。これらの方法では、魚体への正確な摂取量や麻酔の影響が課題であった。我々は、これらの課題を解決するため、ゼブラフィッシュへの新たな強制経口投与手法を開発し、無麻酔で正確な投与ができ、かつ、反復投与も可能であり、有効であることがわかった。

In the fields of pharmaceuticals, agrochemicals, and foods, oral administration of test substances to mice and rats has been put to practical use. In addition, research has been conducted using zebrafish, which are easy to breed and can be bred in large quantities in a small space. In zebrafish, the test substance is administered by mixing with rearing water or food, or by forced oral gavage dosing using anesthesia. In these methods, the exact amount of intake to the fish and the effect of anesthesia were issues. To address these limitations, we developed a new method of gavage for zebrafish, and found that it is effective for accurate gavage without anesthesia and repeated gavage is also possible.

Keywords:

ゼブラフィッシュ
強制経口投与
無麻酔

Zebrafish (*Danio rerio*)
Oral gavage
Unanesthetized

【セールスポイント】

- ・ゼブラフィッシュは低コストで、広い飼育スペースを必要としないため、複数の試験を実施することが可能であり、国内外で多く活用されている。
- ・開発した強制経口投与手法は、無麻酔で反復投与が可能である。

まえがき

当社では、工場、最終処分場を対象とし、ミジンコ、藻類および魚類を用いた毒性試験を行い、排水や浸出水などの環境影響評価を行っている¹⁾。我々は、魚類を用いた研究^{2) 3) 4)}を進める中で、医薬、農薬、食品分野におけるゼブラフィッシュによる毒

性 / 薬効評価方法の検討を開始した。これらの分野では、ラットやマウスなど（以降、げっ歯類を称す）の評価試験として直接、胃内に被験物質を投与する強制経口投与法が多用されている。魚類における飼育水添加による曝露では、魚体の被験物質の摂取量が不明であり、げっ歯類と毒性 / 薬効を単純に比較

*技術開発センター 技術開発部 資源循環技術室 **技術開発センター 新技術インキュベーション部

*** (株)イー・アール・シー高城

**** 日産化学(株) 生物科学研究所 安全性研究部

することができない。魚類における強制経口投与は確立されているものの、既存の方法では麻酔の影響を受け、技術的難易度が高い。そこで、我々はこれらの課題を解決するために、ゼブラフィッシュへの無麻酔で反復投与可能な強制経口投与手法の開発を進めている。

1. 実験動物を用いた投与手法とゼブラフィッシュ

動物実験では一般的にげっ歯類が用いられるが、その飼育/管理には大掛かりな施設が必要であり、これに替わるもしくはこれと併用する実験動物として、魚類が注目されている。その中でもゼブラフィッシュは繁殖が容易で、脊椎動物として哺乳類やヒトとのゲノム相関性が高く有用なモデル生物である。

1.1 ゼブラフィッシュとは

ゼブラフィッシュは、硬骨魚類条鰭綱の真骨魚類（コイ目コイ科ダニオ属）に属し、インド、バングラデシュおよびネパールなどの南アジア諸国を流れる川が原産地である（図1）。体長は4～5cmの小型魚であり、大量飼育が可能である。

ゼブラフィッシュは小型淡水魚のメダカ（*Oryzias latipes*）と同様に、OECD（Organisation for Economic Co-operation and Development：経済協力開発機構）テストガイドラインや化審法（化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律）の生態毒性試験において従来から用いられていた。ゼブラフィッシュの動物実験としての歴史は、1980年代に分子生物学者ジョージ・ストライジンガー（オレゴン大学）が、実験動物として取り扱うようになったことが始まりと言われている⁵⁾。ゼブラフィッシュを実験動物として用いるメリット^{5) 6)}は、以下のとおりである。

- ①実験室で飼育・産卵が容易で1回に100～300個もの卵を得られるため、多数の条件での試験が可能
- ②飼育に広い空間や大掛かりな施設を必要としないため、げっ歯類と比較して低コスト



図1 ゼブラフィッシュ
当社隅晃彦氏による撮影

- ③体外受精であることから受精卵の回収が可能
 - ④胚が透明なので発達過程を観察でき、研究対象となる特定の発達ステージを選抜することが可能
- ゼブラフィッシュを用いた研究論文が増加しており（図2）、2018年には3 000報を大きく超え、10年前の約3倍となっている。また、ゼブラフィッシュの毒性に関する論文についても同様の傾向が見られ、最新の年報では10年前の4倍に増加しており、ゼブラフィッシュを用いた研究が盛んに行われていることがわかる⁷⁾。

1.2 りげっ歯類およびゼブラフィッシュにおける被験物質の投与手法

げっ歯類においては、様々な被験物質の投与手法が実施されており、強制経口投与、腹腔内投与および静脈内投与は、被験物質の投与量をもとに体重当たりの正確な曝露量を把握することができる。ゼブラフィッシュにおいても、げっ歯類と同様に強制経口投与^{8) 9)}、腹腔内投与および静脈内投与が実施されているものの、いずれも麻酔下での投与であり、その影響が危惧される。さらに、腹腔内投与および静脈内投与は、技術的に難易度が高く、反復投与が難しいとされている。一方、簡易な投与手法としては、飼育水に添加する方法（飼育水添加）や餌に混合する方法（混餌投与）が用いられている²⁾（図3）。しかし、Rafaelらの研究では、げっ歯類の強制経口投与による半数致死量（LD₅₀）とゼブラフィッシュの飼育水添加による半数致死濃度（LC₅₀）について比較したところ¹⁰⁾、両者の間には相関がみられなかった（表1）。飼育水添加および混餌投与ではゼブラフィッシュが被験物質をどれだけ取り込んだのかが不明であり、曝露量ベースでのゼブラフィッシュとげっ歯類の比較が困難である。よって、ゼブラフィッシュをげっ歯類に代わる実験動物として用いるためには、両者間で相関性が高く、曝露量ベースでの比較が可能な投与手法の開発が望まれる。

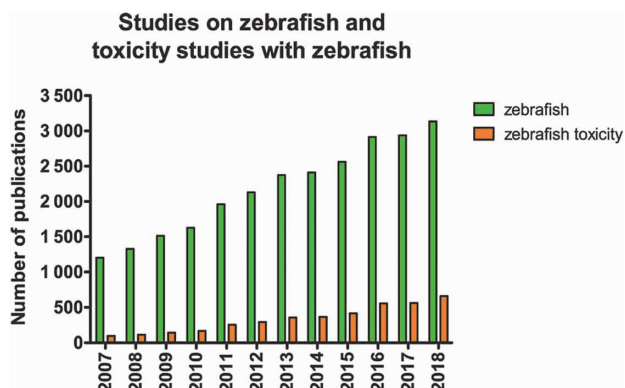


図2 ゼブラフィッシュを用いた研究論文数⁷⁾

飼育水に被験物質を添加する方法 餌に被験物質を混合する方法 麻酔下で強制的に経口投与する方法

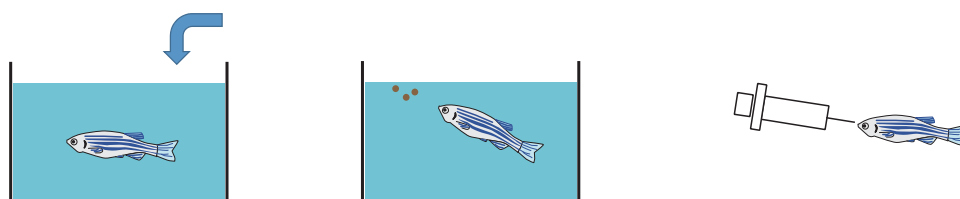


図3 ゼブラフィッシュへの経口投与手法

表1 げっ歯類とゼブラフィッシュの各投与手法による相関¹⁰⁾

げっ歯類/投与手法	ゼブラフィッシュ/飼育水添加	被験物質数
経口投与	0.28*	54
マウス 腹腔内投与	0.442*	47
静脈内投与	0.678*	46
経口投与	0.086*	47
ラット 腹腔内投与	0.582*	30
静脈内投与	0.667*	41

*げっ歯類の各投与手法によるLD₅₀とゼブラフィッシュの飼育水添加によるLC₅₀の相関係数を示す

2. ゼブラフィッシュを用いた強制経口投与手法の改良

従来、ゼブラフィッシュへの強制経口投与では、麻酔下で用手にて魚体の保定を行い、細い中空の管（以降、ゾンデと称す）を用いて被験物質を投与していた（以降、従来法と称す）。しかし、従来法では魚体の姿勢を直線的に保定することが難しいため、投与時にゾンデによって消化管を損傷したり、ゾンデが腸管内にまで到達しないことで口腔や食道に被験物質が滞留し、吐き戻す場合がある。さらに、被験物質の影響に加えて麻酔の影響も考慮する必要がある。そこで、我々は無麻酔下で魚体を直線的に保定するための保定装置を作製し、無麻酔下でゾンデにて投与する方法を考案した（以降、改良法と称す）。

2.1 投与後の魚体内での被験物質吸収状況

改良法による、ゼブラフィッシュにおける被験物質の吸収状況を確認するため、トリパンブルーを投与し、1時間、3時間、8時間および24時間経過ごとに、サンプリングした。魚は安楽死させた後、ブアン液にて固定し、肉眼的および組織学的に観察した。トリパンブルーは投与1時間後には上部腸管内に認められ、その後、下部腸管へと移動し、24時間後には体外に排泄されることを確認した（図4）。

2.2 投与後の被験物質の吐き戻し確認

投与後、ゼブラフィッシュが被験物質を水槽内にて吐き戻した場合、正しく毒性/薬効を評価するこ

トリパンブルー吸収状況

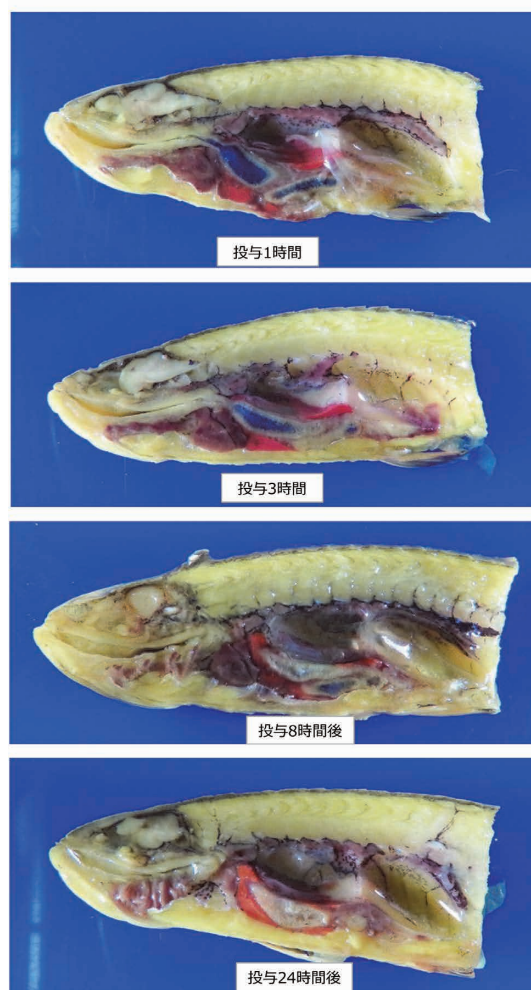


図4 時間経過による被験物質吸収状況の見える化
日産化学(株) 古川賢様による解剖と撮影



図5 メチレンブルーを用いた従来法と改良法の比較

とができない。このため、改良法による被験物質の吐き戻しの有無を確認するため、従来法と改良法についてゼブラフィッシュにメチレンブルーを単回投与し、目視観察を実施した。その結果、従来法では吐き戻しが認められたのに対し、改良法では認めなかった（図5）。これにより改良法では無麻酔下であっても、保定装置により魚体を適切な姿勢に保定することで、被験物質を確実に腸管内に投与できる有用な方法であることが確認された。また、改良法ではゼブラフィッシュを手にて装置に保定したが、そのストレスを無くすため、ゼブラフィッシュに全く触れることなく保定する方法を検討している。この方法ではゼブラフィッシュを水槽から掬い取り、水流を利用し、保定するものであり、これにより一層、ストレスを軽減した強制経口投与を行うことが期待できる。

2.3 改良法による反復投与の実施

反復投与を実施する際、従来法では、繰り返し麻酔を実施しなければならず、供試魚への麻酔の影響が危惧される。もし、改良法で反復投与ができるならば、麻酔の影響を受けることなく、投与を行うことが可能となる。そこで、我々は改良法で反復投与が可能か否かについて検討を行った。ゼブラフィッシュのオス5匹、メス5匹を用いて、改良法にて飼育水を週3回と週5回の頻度で4週間反復投与を行った。その結果、週3回および5回ともに、体重減少や死亡は認められず、改良法による反復投与が可能であることを確認した。

3. 今後の課題

改良法で得られた成果として、肉眼的に被験物質の吐き戻しがないことを確認した。しかし、極微量の吐き戻しについては、肉眼的には確認することができない。そこで、投与後のゼブラフィッシュを戻

した飼育水について被験物質を分析し、詳細に吐き戻しの有無を検討する予定である。さらに、麻酔の影響について、反復投与により従来法と改良法について魚体への影響を比較することで、反復投与における麻酔の影響について検討する予定である。病理学的な経験が豊富な日産化学（株）の協力を得ながら、改良法による摂取量の精度向上、活用方法についての研究を行う。

むすび

我々が考案したゼブラフィッシュの強制経口投与手法は、無麻酔かつ正確な曝露量を把握でき、さらに反復投与が可能であるという優れた特長を有し、適用拡大が期待される。今後は、この手法がげっ歯類の毒性/薬効評価前のスクリーニングの投与法として活用されることを目指し、基礎データを収集してゆく。

[参考文献]

- 1) 藤原尚美ら：金属製品製造工場のWETを用いた排水中毒性要因の推定とその改善例，環境化学，25，p35-42. (2015)
- 2) Zang L. et al.: A Novel Protocol for the Oral Administration of Test Chemicals to Adult Zebrafish. *Zebrafish.*, 8, p203-210. (2011)
- 3) Yumiko H. et al.: sequential histological changes in the liver of medaka exposed to methylazoxymethanol acetate. *JSTP.*, 33, p219-226. (2020)
- 4) Meguro S. et al.: Body Fat Accumulation in Zebrafish Is Induced by a Diet Rich in Fat and Reduced by Supplementation with Green Tea Extract. *PLOS ONE* 10. 0120142. (2015)
- 5) 弥益恭：ゼブラフィッシュの発生遺伝学，裳華房，p1-7. (2015)
- 6) 蔭池勇太ら：ゼブラフィッシュモデルの環境毒性学研究における有用性，日衛誌，71，p227-235. (2016)
- 7) Steven C. et al.: Use of Zebrafish in Drug Discovery Toxicology. *Chem. Res. Toxicol.*, 33, p95-118. (2020)

- 8) Collymore C. et al.: Gavaging adult zebrafish . J. Vis. Exp., 78, 50691. (2013)
- 9) Dang M. et al.: Long-term drug administration in the adult zebrafish using oral gavage for cancer preclinical studies. Dis. Model. Mech., 9, p811-820. (2016)
- 10) Rafael M. et al. : comparison of zebrafish and rodent toxicity data., Society of Toxicology, March 10-14, Baltimore. (2019)

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

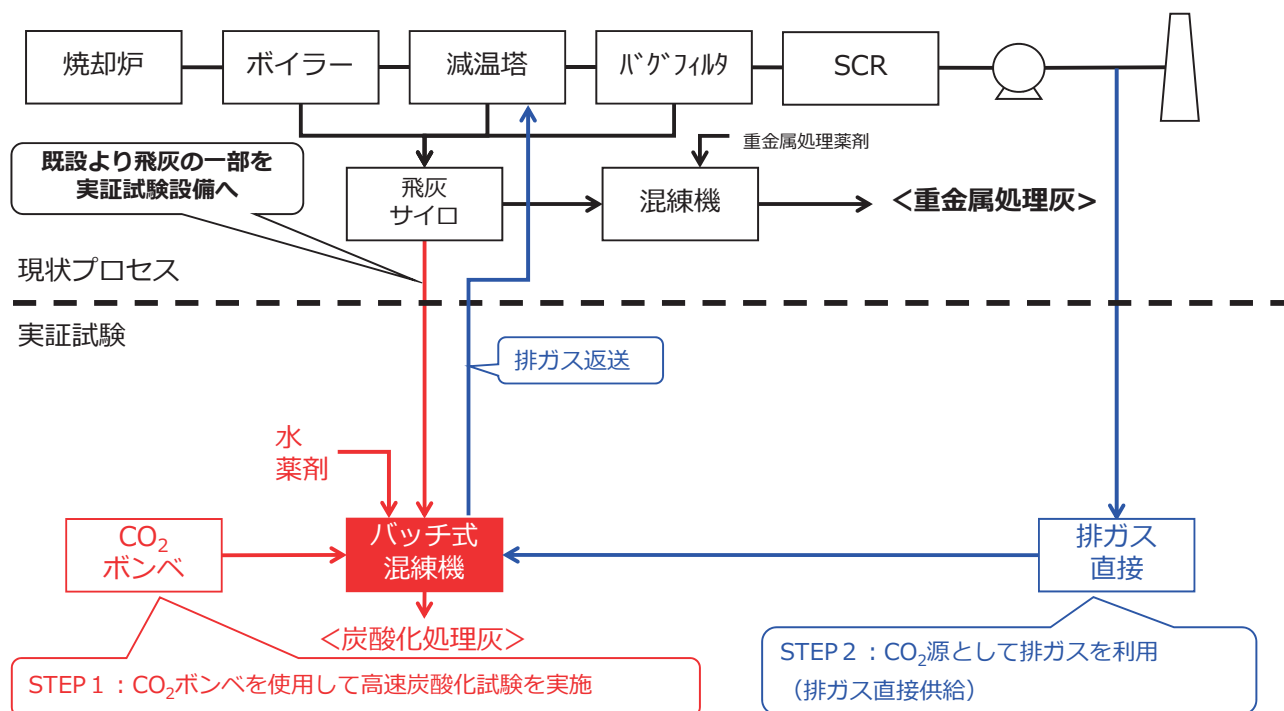


図1 炭酸化フロー

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

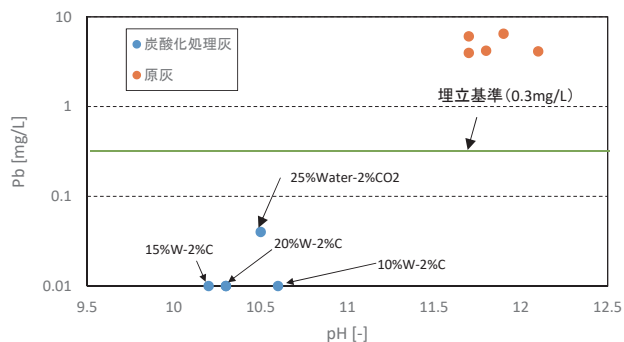


図2 水添加率と pH, Pb の溶出濃度の関係（STEP 1）

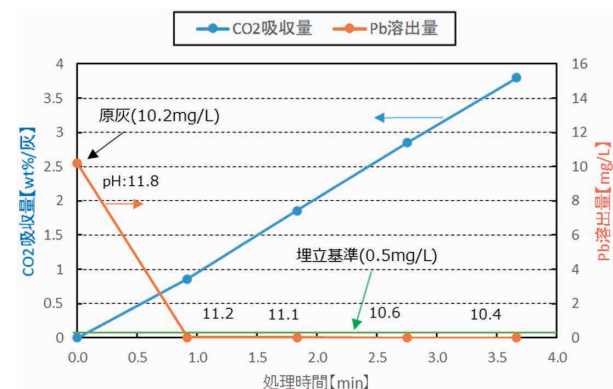


図3 CO₂吸収量と pH, Pb の溶出濃度の関係（STEP 1）

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

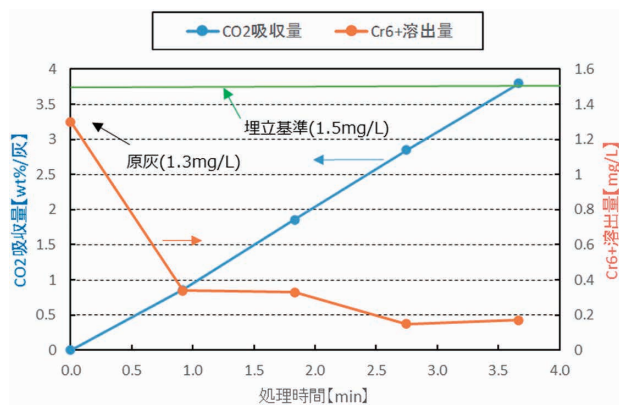


図4 CO₂吸収量と Cr⁶⁺ 溶出濃度の関係（STEP 1）

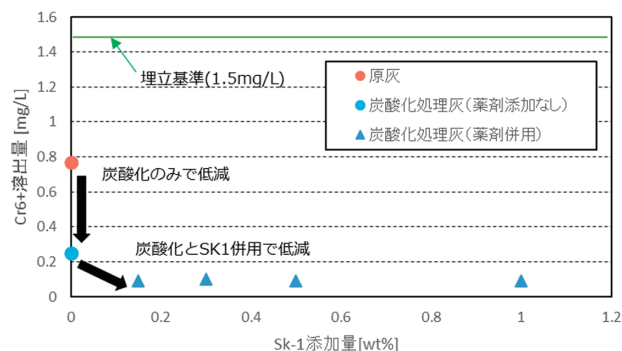


図5 SK-1添加量と Cr⁶⁺ 溶出濃度（STEP 1）

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

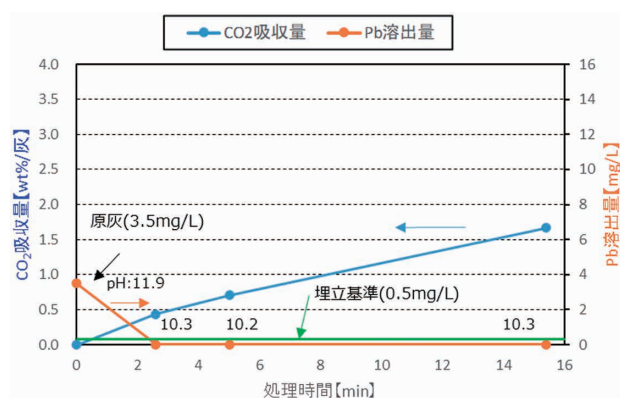
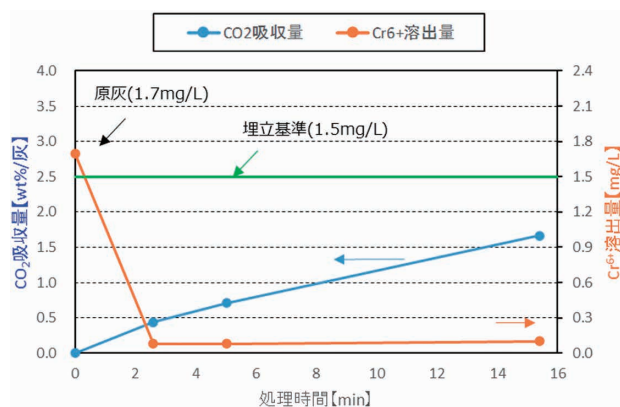
図6 CO₂吸収量とpH、Pbの溶出濃度の関係(STEP 2)図7 CO₂吸収量とCr⁶⁺溶出濃度の関係(STEP 2)図8 SK-1添加量とCr⁶⁺溶出濃度(STEP 2)

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		

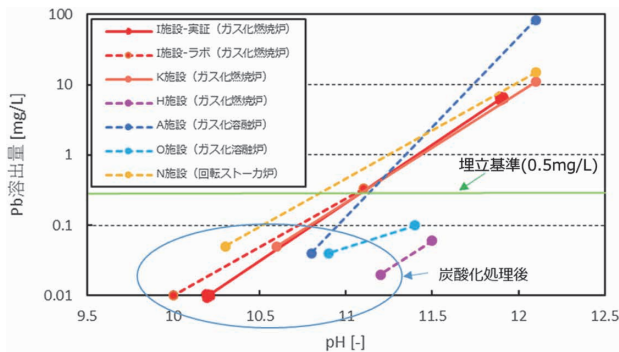
CO₂排出量原単位:※¹財団法人クリーンジャパンセンター「ごみ焼却灰リサイクルの温室効果ガス排出削減・ライフサイクル管理に関する調査研究」より, ※²北陸電力(2019年度)

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)

廃棄物からの貴金属回収

Precious Metal Recovery from Waste



谷田克義*
Katsuyoshi Tanida
博士（工学）



藤原 大**
Hiroshi Fujiwara
博士（工学）



藤田 淳***
Jun Fujita
技術士（衛生工学部門）

ごみの熱処理残渣からの貴金属回収において、ストーカ炉では落じん灰に高濃度に貴金属が濃縮されていることが知られているが、当社の主力設備である流動床炉においても貴金属が濃縮されている熱処理残渣があると考えられた。調査の結果、流動床炉の底に残存する砂（炉底砂）に高濃度に貴金属が濃縮されており、その金濃度は数十～数千 mg/kg と非常に高濃度であることが分かった。炉底砂は貴金属、特に金の資源価値が高いことから精錬事業者へ販売し、金の回収を行うスキームを構築した。

When it comes to recovering precious metals from waste incineration residue, it is well known that, riddling ash in a stoker type incinerator is rich in precious metals, so we tried to find residues that contained high concentrations of precious metals in a fluidized bed type furnace, which is our core product. As a result of investigations, we found that bottom sand that remains on the bottom of a fluidized bed furnace contains high concentrations of precious metals such as gold, which can range from several dozen to several thousand mg/kg. Because of the high resource value of precious metals and especially gold, a scheme for recovering gold that involves selling bottom sand to smelters has been established.

Key Words :

流	動	床	Fluidized bed
炉	底	砂	Bottom sand
熱	処	理	残渣
貴	金	属	Precious metal
回		収	Recovery
精		錬	Smelting

【セールスポイント】

- ・流動床でごみを焼却することで、貴金属を濃縮することが可能である。
- ・貴金属が濃縮された炉底砂は販売でき、貴金属を回収することが可能である。

ま え が き

近年、熱処理残渣からの有価金属の回収や熱処理残渣の土木資材としての有効利用に関して、盛んに検討が行われている。ストーカ炉においては、燃え殻は機械的に押し出されて炉下から排出されるが、

その過程で火格子の隙間から落下した熱処理残渣である落じん灰中に有価金属が高濃度で含まれていることが報告されている¹⁾。一方、流動床炉においても有価金属が濃縮されている残渣があると考えられる。流動床式ガス化炉と流動焼却炉の2つの形式の

*技術開発センター 技術開発部

**技術開発センター 新技術インキュベーション部（ロンドン駐在）

***環境エンジニアリング事業本部 環境プラント技術本部 技術企画部 開発室

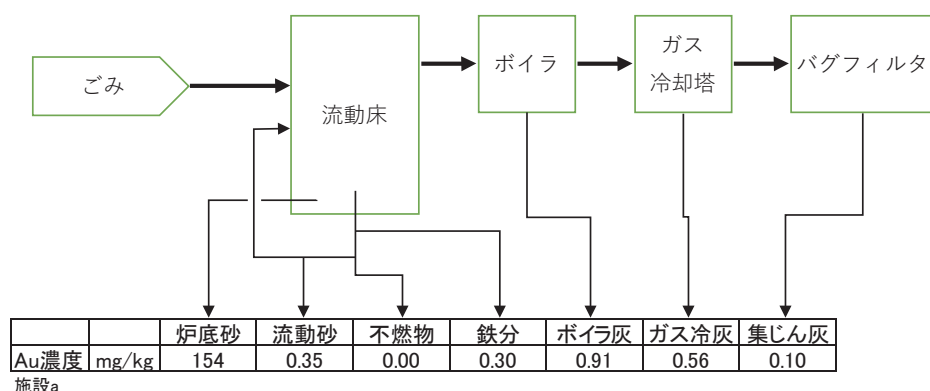


図1 流動焼却炉の残渣における金濃度の分布

焼却炉において様々な熱処理残渣の貴金属を分析したところ、流動床炉の炉底に堆積している砂（炉底砂と呼ぶ）に高濃度に有価金属が濃縮されていることを見出した。

図1に流動焼却炉（施設a）の各残渣の金濃度を示す。排ガス側のボイラ灰、ガス冷灰、集じん灰では徐々に金濃度が低下しており、比重の重い金が排ガスの上流側で高い濃度で検出されていることが分かる。しかしながら炉底砂以外の残渣に含まれる金の濃度は1 mg/kg未満であり、有価物として回収できる濃度ではなかった。一方、炉底砂の金濃度は154 mg/kgと突出して高いことが分かる。本稿では、炉底砂の貴金属濃度について紹介するとともに、炉底砂の取り扱いについても紹介する。

1. 炉底砂について

炉底砂とは上述の通り、流動床炉の炉底に堆積した砂である。当社の流動床炉の炉底部分は空気分散板が設置されており、空気が出る穴より下にある砂は流動しないため、ここに比重の大きい貴金属が濃縮したと考えられる。

炉底砂の回収方法は、以下の通りである。図2に示すように、流動床炉の砂は、炉停止時に炉底の抜出管を通じて炉外に排出されるが、その際に炉底部

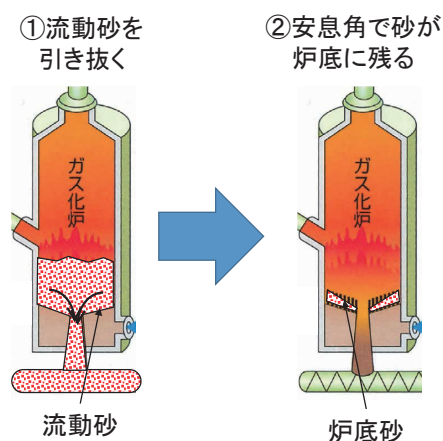


図2 炉底砂について

の砂は安息角が炉床の角度よりも大きいため、炉底に残る。これを回収することで炉底砂を得ることができる。

2. 炉底砂における有価金属の濃度

表1に炉底砂の貴金属の分析結果を示す。分析は、流動床炉を備える流動床式ガス化炉と流動焼却炉について行った。各施設では、通常のごみの他に、他所灰や掘り起こしごみ、リサイクル残渣が焼却されている。

表1から分かるように、炉底砂には数十～数千

表1 炉底砂の貴金属分析結果

施設	Au	Ag	Cu	炉形式	備考
	mg/kg	mg/kg	mg/kg		
施設A	1 330～6 300	1 650～9 120	77 400～142 000	流動床式ガス化炉	他所灰
施設B	64	139	36 100		リサイクル残渣
施設C	23～3 320	28～2 040	33 200～90 900		リサイクル残渣
施設D	14～1 030	125～1 200	24 400～65 000		リサイクル残渣
施設E	79～148	176～239	48 500～55 300		リサイクル残渣
施設F	5～615	16～1 050	9 300～58 600		掘り起こしごみ、リサイクル残渣
施設a	64～154	350～515	15 300～31 800	流動焼却炉	
施設b	8～70	50～190	37 600～58 600		リサイクル残渣
施設c	62	64	157 000		リサイクル残渣

mg/kg の金、銀が含まれていた。この値は落じん灰の値²⁾の数倍～数十倍であり、濃縮することなく精錬を行い金を回収できる濃度である。また銅も数千～十数万 mg/kg 含まれていた。特に他所灰を受け入れている施設 A において貴金属の濃度が高かった。多くの施設において、リサイクル残渣を受け入れているが、貴金属の濃度にはバラツキがあり、リサイクル残渣の受け入れと貴金属濃度には明確な関係性は確認できなかった。また同じ施設でも測定時期や系列などによって貴金属濃度が大きくばらつく結果となった。

3. 炉底砂の性状

図 3 に施設 A と施設 G の炉底砂と貯留槽に貯留されていた循環砂の比重を示す。炉底砂の比重は循環砂の比重よりも大きいことが分かった。また炉底砂は貴金属の濃度が高い施設 A（施設 G の金濃度

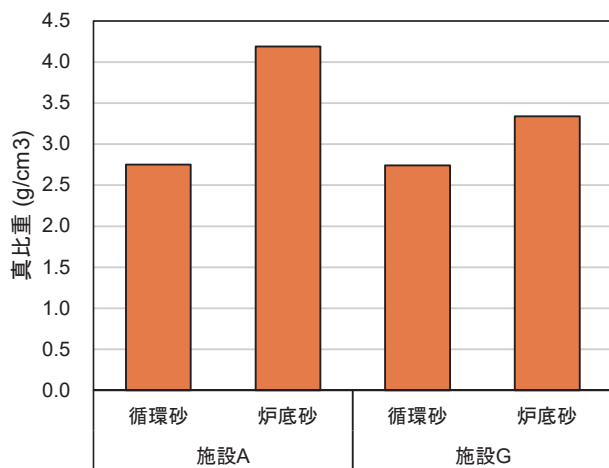


図 3 砂の比重

は施設 A の約半分)の方が真比重が高かったが、循環砂は比重に施設による差が見られなかった。これは炉底砂に含まれる貴金属の濃度に差があるのに対して、循環砂の貴金属濃度がほとんど同じであることに起因すると考えられる。

4. 炉底砂中の貴金属の存在形態

図 4 に炉底砂断面の SEM (走査電子顕微鏡) 画像および金の EPMA (電子線プローブマイクロアナライザ) 画像を示す。本画像から、約 1 mm の砂を構成する粒子の内部に直径約 20 μ m の粒子として金が存在していることが確認された。金は安定な物質であり、他の物質と反応せず、金そのままの状態での炉底砂中に含まれている例が確認された。

5. 炉底砂の取り扱い

現在、炉底砂に一定以上の金が含まれる数施設については、炉底砂を日本鉱産(株)に売却、三井金属鉱業(株)にて精錬し貴金属を回収している。今後も継続して炉底砂の貴金属含有量を調査し、引き続き貴金属回収の拡大を進める予定である。

むすび

流動床炉の炉底に堆積している炉底砂に着目して貴金属が濃縮されていることを確認した。またその炉底砂を回収し精錬工場にて山元還元するルートを確立できた。今後も、廃棄物に含まれる都市鉱山からの貴金属回収を拡大し、資源循環に貢献していきたい。

【参考文献】

- 1) 山本ら：廃棄物学会論文誌, 18 (5) (2007) p314-324
- 2) 村河ら：第41回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集, II - 2 - 47 (2020) p145-147

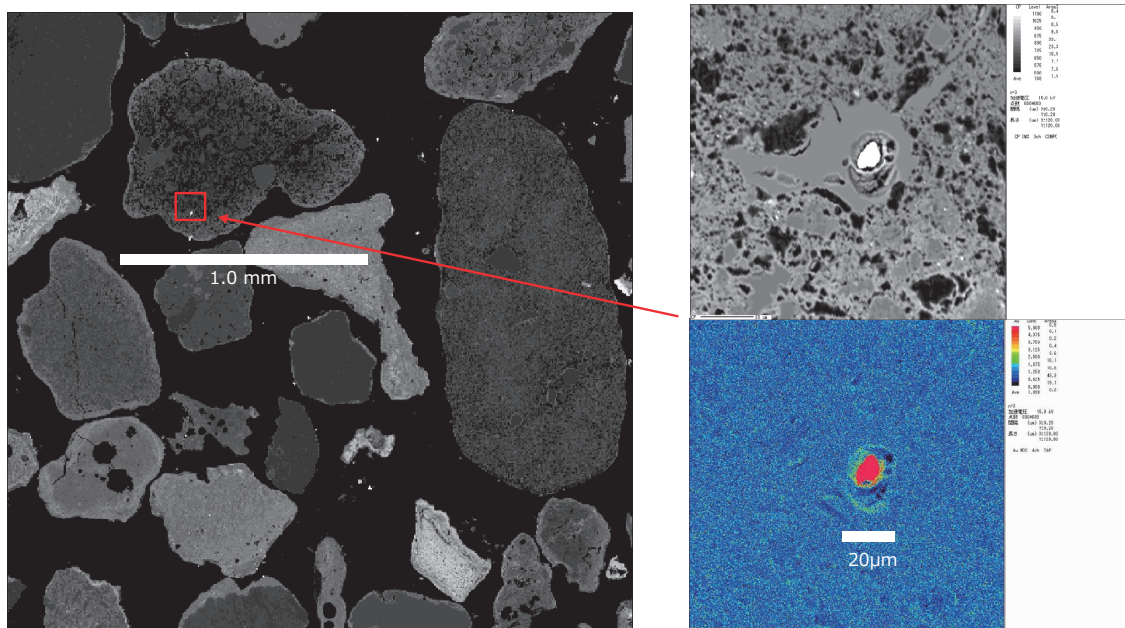


図 4 金の存在形態

グラスライニング反応機用フラッシュバルブ昇降ツール

グラスライニング（GL）反応機は多くの場合、底ノズルに液排出用フラッシュバルブが設置されます。近年、医薬やファインケミカル等の分野において、製品の高付加価値化や少量多品種生産の増加により、製品切り替え時にバルブを取り外し、洗浄する機会が増えています。

「クリーンフラッシュバルブ®」は当社が開発した軽量、コンパクトでクリーンなバルブです。一般に高所でのバルブ取り外し作業には危険が伴うため、当社ではフラッシュバルブ専用脱着装置として「弁軽くん®」を開発し、作業の安全性を追求してきました。このたび更なる利便性を追求し、弁軽くん®では対応できなかった、反応機の下に配管がある場合や、3.0 m 以上の高所位置にノズルがある場合を想定し、新たにフラッシュバルブ昇降ツールを開発しました。

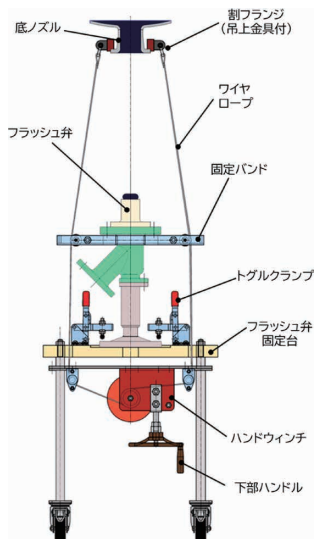


図1 昇降ツール外形図

【構造・特長】

（図1参照）ハンドウィンチによってワイヤを巻き取り昇降します。作業者は下部ハンドルを回すことでフラッシュバルブを昇降させることが出来ます。ワイヤロープを吊上げるため、割フランジを当社標準品から吊上げ金具がついた専用品に取り換える必要があります。

フラッシュバルブ昇降ツールの主な特長は以下の通りです。

- ①ハンドルでの簡単手動操作。電動ドライバでの操作も可能。
- ②ワイヤを巻き上げて昇降させるためセンターの位置合わせ不要。（図2参照）
- ③トグルクランプを採用しフラッシュバルブを固定板にワンタッチ固定可能。
- ④キャスタ付きで反応機の下へ楽に移動可能。

このフラッシュバルブ昇降ツールをもちいることで多様な反応機設置状況にも対応できるため、日常のメンテナンスを安全に行っていただくことができます。GL 機器を安全にご使用いただくためにも、定期的なメンテナンスを実施していただくようお願いします。

表1 フラッシュバルブ昇降ツール主要仕様

適用フラッシュバルブ形式	サイズ	タイプ
	50／40，80／50，100／80	手動・自動
適用可能高さ	手動バルブ：1.0～3.0m 自動バルブ：1.0～3.0m	
昇降可能質量	約 60 kg	

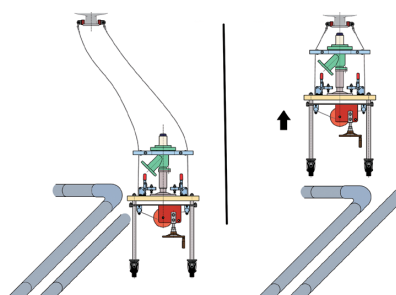


図2 昇降状況



図3 下部ハンドル

液だれ防止Eーマンホール

当社グラスライニング（GL）製機器は、耐食性と純度が求められる医薬、電材、食品、化学等の分野で長年にわたり使用されています。近年、とくに医薬、ファインケミカル等の分野においては原料の投入口として用いられるマンホールの洗浄性、コンタミレスが要求されます。「E-マンホール」はGL製機器用の使いやすく、クリーンなマンホールとして、上市以来多数のユーザに導入いただきました。マンホール一般の弱点として、蓋を開けた時に表面に付着した内容液が垂れ、垂れたところから腐食が起こるということがあり、クリーンな「E-マンホール」であっても完全にそれを回避することはできていませんでした。このような問題を解決するべく、このたび当社では蓋からの液だれを防止する新しいマンホールを開発しました。

【構造】

図1に示すように、蓋と視ガラスの間にエア吹出口を設けた耐食金属製の座を挟み込み、そこからエアを吹き出すことで蓋についた液を飛ばすという構造です。

※液吹き飛ばしに必要な流量：24 Nm³/hr 以上（当社実験による）

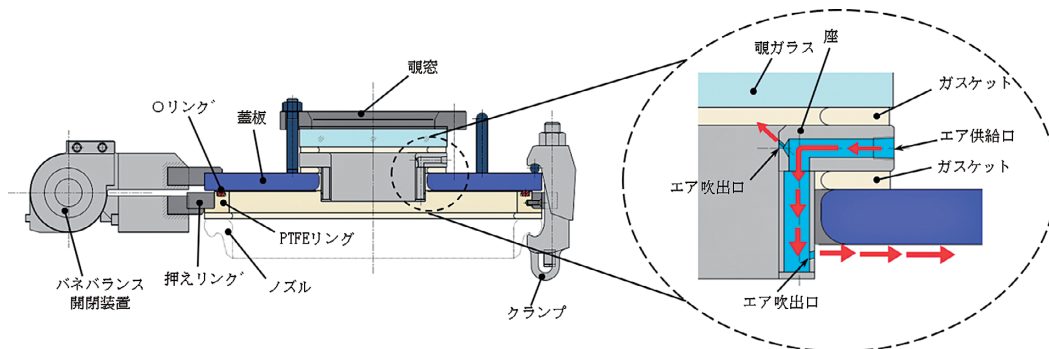


図1 液だれ防止E-マンホール構造図

【設計仕様】 ※基本的に E - マンホールと同じ。

- 設計圧力：F.V. ～ 0.2 MPa
- 設計温度：-30 ～ 158℃
- 適用法規：一圧，二圧，消防法
- 対応サイズ：φ300×400，φ400，φ450

【エア吹込み効果の確認】

蓋内面に霧吹きで水滴を付けて蓋を開けたときの水滴の量を比較しました。図2,3の青い部分が水滴の付着していないGL面で、エア吹込みありでは明らかに水滴が除去されGL面がきれいに見えています。付着水の重量を測定ところ、エア吹込み無しでは9g、エアを吹きこむと1gと、大幅な改善が見られました。このように、液だれを気にすることなく開閉することが可能です。

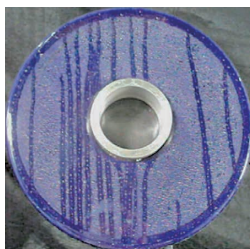


図2 エア吹込み無し

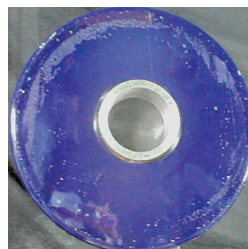


図3 エア吹込み有り
(3分間エア吹込み)

論文発表一覧（2020年4月～2021年3月）

発表年月	発 表 先	発 表 課 目
20年4月	(株) 環境新聞社 「月間下水道」	アンモニア計と制御盤から構成される風量調節弁制御装置
20年4月	ライフサイエンス出版 「薬理と治療」第48巻第4号	熱ユーグレナグラシリス EOD-1株含有食品の長期摂取安全性試験－ランダム化二重盲検プラセボ対照並行群間比較試験－
20年8月	(公社) 日本下水道協会 第57回下水道研究発表会	高濃度消化・省エネ型バイオガス精製による効率的エネルギー利活用技術実証結果
20年9月	第31回廃棄物資源循環学会研究発表会	金属ナトリウム分散体法による短鎖塩素化パラフィン類の無害化処理：スケールアップ試験の評価
20年9月	第31回廃棄物資源循環学会研究発表会	ごみビット3D計測技術の開発及び画像 AI 技術を用いたごみ種センシング機能の開発
20年9月	第67回日本栄養改善学会 学術総会	ユーグレナグラシリス EOD-1株の摂取が若年女性の整腸作用に及ぼす影響
20年10月	「Nutrients」	ユーグレナグラシリス EOD-1が健康な高齢者のテストステロンレベルに寄与する可能性
20年11月	(一社) 日本疲労学会 第16回日本疲労学会総会・学術集会	ユーグレナグラシリス EOD-1株の摂取が便秘傾向若年女性の疲労感に及ぼす影響
20年11月	(一社) 廃棄物資源循環学会 廃棄物資源循環学会論文誌	アカヒレとオオミジンコを用いた最終処分場浸出水管理
20年11月	(一社) 日本疲労学会 第16回日本疲労学会総会・学術集会	ユーグレナグラシリス EOD-1株由来パラミロン摂取による疲労感軽減効果
20年11月	福岡大学 産官学連携研究機関 資源循環・環境制御システム研究所 令和元年度 福大資環研研究成果発表会	産業廃棄物最終処分場早期安定化に関する研究
20年11月	福岡大学 産官学連携研究機関 資源循環・環境制御システム研究所 令和元年度 福大資環研研究成果発表会	バイオアッセイを用いた飛灰不溶剤への毒性評価
21年3月	(公社) 日本化学会 第101春季年会	金属ナトリウム分散体を用いる有機合成
21年3月	(公社) 土木学会西部支部 研究発表会	流動床式ガス化炉から排出される熱処理残渣の路盤材への適用
21年3月	(株) 環境産業新聞社 「都市と廃棄物」	バイオアッセイを用いた新たな浸出水と埋立地の安定化評価
21年3月	環境省、(一社) 廃棄物資源循環学会 令和2年度第3回シンポジウム地域循環共生圏における廃棄物エネルギー利用施設の果たす役割と可能性	先導的な廃棄物処理に係る技術事例報告5 「流動床ガス化とメタン発酵のコンバインドプロセスの要素技術検証」

登録特許一覧（2020年4月～2021年3月）

登録番号	発 明 の 名 称	権 利 者
6686210	排水処理方法及び排水処理設備	株式会社神鋼環境ソリューション
6691897	集水装置用有孔ブロック	株式会社神鋼環境ソリューション
6695744	スクリュウポンプ、およびその製造方法	株式会社神鋼環境ソリューション
6712571	水素・酸素発生装置	株式会社神鋼環境ソリューション
6716398	排ガス処理装置	株式会社神鋼環境ソリューション
6721929	微生物活性の推定方法、該推定方法を有する水処理方法、及び、該水処理方法を行う水処理設備	株式会社神鋼環境ソリューション、株式会社片山化学工業研究所、ナルコジャパン合同会社
6722231	炭化物処理装置および炭化物処理方法	株式会社神鋼環境ソリューション
6722235	炭化物処理装置および炭化物処理方法	株式会社神戸製鋼所、株式会社神鋼環境ソリューション
6731515	排水処理設備及び排水処理方法	株式会社神鋼環境ソリューション
6738920	二酸化炭素吸着設備	株式会社神鋼環境ソリューション
6752925	テストステロン分泌促進剤	株式会社神鋼環境ソリューション
6755841	廃棄物処理設備、金属回収方法及び廃棄物処理方法	株式会社神鋼環境ソリューション
6775806	電子供与体、及び、電子供与体を用いた4,4'-ビピリジンの合成方法	株式会社神鋼環境ソリューション、国立大学法人岡山大学
6779096	リグノフェノールの製造方法	株式会社神鋼環境ソリューション、株式会社藤井基礎設計事務所
6789270	水処理方法及び水処理設備	株式会社神鋼環境ソリューション
6807440	ナトリウムの失活方法	株式会社神鋼環境ソリューション
6811458	セルロース繊維組成物及びセルロース繊維複合材料、並びにこれらの製造方法	株式会社藤井基礎設計事務所、清水建設株式会社、株式会社神鋼環境ソリューション
6823615	水素ガス製造方法及び水素ガス製造設備	株式会社神鋼環境ソリューション
6829956	嫌気処理方法及び嫌気処理設備	株式会社神鋼環境ソリューション
6830046	P C B 処理方法	株式会社神鋼環境ソリューション
6831437	ナトリウム分散体およびナトリウム分散体の保管方法	株式会社神鋼環境ソリューション
6839047	消化汚泥脱離液の処理方法、その処理装置並びに排水処理方法及び排水処理装置	株式会社神鋼環境ソリューション
6840364	濃縮処理方法、及び濃縮処理装置	株式会社神鋼環境ソリューション、国立大学法人神戸大学
6854154	P C B 汚染物が取り扱われた作業場の除染方法	株式会社神鋼環境ソリューション
6856402	汚泥濃度の計測方法及び汚泥濃度の計測装置	株式会社神鋼環境ソリューション
6858683	穀物乾燥設備および熱供給装置	株式会社神鋼環境ソリューション

本 社 / 〒651-0072 神戸市中央区脇浜町1丁目4-78	☎ (078)232-8018 FAX(078)232-8051
〒651-0086 神戸市中央区磯上通2丁目2番21号(三宮グランドビル)	☎ (078)232-8018 FAX(078)232-8051
技 術 研 究 所 / 〒651-2241 神戸市西区室谷1丁目1-4	☎ (078)992-6500 FAX(078)997-0550
東 京 支 社 / 〒141-0033 東京都品川区西品川1丁目1番1号(住友不動産センター)	☎ (03)5931-3700 FAX(03)5131-5700
大 阪 支 社 / 〒541-8536 大阪市中央区備後町4丁目1-3(御堂筋三井ビル)	☎ (06)6206-6751 FAX(06)6206-6760
九 州 支 社 / 〒812-0012 福岡市博多区博多駅中央街1-1(新幹線博多ビル)	☎ (092)474-6565 FAX(092)441-4440
北 海 道 支 店 / 〒060-0004 札幌市中央区北四条西5丁目1-3(日本生命北門館ビル)	☎ (011)241-4647 FAX(011)241-5759
東 北 支 店 / 〒980-0811 仙台市青葉区一番町1丁目2-25(仙台NSビル)	☎ (022)716-6651 FAX(022)263-2049
名 古 屋 支 店 / 〒451-0045 名古屋市中区名駅2丁目27-8(名鉄ファミリーセントラルタワー)	☎ (052)581-9876 FAX(052)563-2313
北 陸 支 店 / 〒910-0859 福井県福井市日之出2丁目17-13	☎ (0776)27-7645 FAX(0776)27-0460
播 磨 製 作 所 / 〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島19	☎ (079)436-2500 FAX(079)436-2506
ロンドン事務所 / Building 3, Chiswick Park, 566 Chiswick High Road, London, W4 5YA, United Kingdom	☎ +44-208-849-5558

神鋼環境ソリューション技報 2021年度 Vol.18 No.1 通巻35号

《本社》株式会社神鋼環境ソリューション 〒651-0072 神戸市中央区脇浜町1丁目4-78

《編集発行》〒651-2241 神戸市西区室谷1丁目1-4 株式会社神鋼環境ソリューション 技術開発センター(神鋼環境ソリューション技報編集委員会事務局)
☎(078) 992-6527 FAX(078) 992-6504 <http://www.kobelco-eco.co.jp>

《編集委員》編集委員長/佐久間英明 委員/細田博之・高橋円・小川正浩・中田哲雄・吉田忠広・荻野行洋・青木勇・南俊充・須田龍生・松本勝生

《発行》2021年9月15日印刷 2021年9月24日発行 年2回発行《禁無断転載》《発行人》隅晃彦《印刷所》福田印刷工業株式会社

神鋼環境ソリューション