

KOBELCO

技報

Vol.21
(通巻40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＞
「脱炭素」社会における廃棄物処理を思い描く | |
| 2 | 高速炭酸化技術 CarboneI™ による
CO ₂ 固定化・資材化技術の開発 | Development of CO ₂ Mineralization Technology Using the
Accelerated Carbonation Technology CarboneI™ |
| 9 | 回転ストーカ炉の運転自動化 | Automatic Operation of Rotary Combustor |
| 14 | 予測制御による回転ストーカ式ごみ焼却炉の
蒸気量安定化 | Reduction of Steam Volume Fluctuations in Rotary
Combustors Using Prediction-based Controls |
| 20 | 廃棄物からの貴金属回収の効率化 | Improving the Efficiency of Precious Metal Recovery from
Waste |
| 24 | 多機能グラスライニング HybridGL® の新製品
HYX-E95®, HYX-HE95® | New multifunctional glass-lining HybridGL®
HYX-E95® and HYX-HE95® |
| 29 | 施設・技術紹介 | |
| 31 | TOPICS | |

「脱炭素」社会における廃棄物処理を思い描く



京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻

准教授 **大 下 和 徹**

Kazuyuki Oshita

2015年のパリ協定、2020年の首相による「2050年カーボンニュートラル宣言」を経て、「脱炭素」という言葉が、世の中に定着しつつあります。かつては「低炭素」という言葉が巷にあふれていましたが、とにかく減らすことに重きを置いた「低炭素」から、実質ゼロを目標とした「脱炭素」へ、ハードルが数段上がった感があるのは、皆の共通認識であると思います。

最近、私の所属する京都大学の1年生の授業で、新聞記事上で「廃棄物」や「ごみ」と「低炭素」、「脱炭素」という言葉が、ともにどのように取り扱われてきたか？朝日新聞のデータベースで調べてもらったことがあります。「低炭素」という言葉は、1997年の京都議定書の後で使われ始めた言葉で、これが、廃棄物との関係において「脱炭素」に切り替わり始めたのが2014年ごろからです。廃棄物のキーワードとしては、プラスチックや放射性廃棄物とともに記事として取り扱われていることがわかりました。私の所属する研究室での廃棄物等に関する研究テーマも、脱炭素に関連するものがずいぶん増えてきました。

様々な情報があふれ、一層混沌とした現代社会に住む我々にとって、2050年を思い描くことは容易ではありません。ある学会の研究グループで、2050年における廃棄物処理はどうなるのか？という議論をしたことがあります。プラスチックは全部マテリアルリサイクルにまわって、ごみが燃えにくくなる？電力やガスは全てカーボンニュートラルになるから、それらを使っても温室効果ガスの排出にはカウントしなくて済む？でも、ごみ発電の電力や、メタン発酵からのバイオガスは温室効果ガスの削減にもはや寄与しなくなる？ごみ焼却由来の熱エネルギーは排ガス中のCO₂吸収に使うようになる？そのような未来社会の想像を皆でするのですが、どうも現実味がなく、思考がついていきません。経済的な面からだとならにそうです。おそらくそのくらい大きな変革がこの分野にも求められていると考えなければならないでしょう。

「脱炭素」社会の構築には、技術開発や技術革新が必要であり、大学で廃棄物処理技術の研究開発を行ってきた立場としては、強いドライビングフォースになると信じてやみません。しかし、これらは基礎研究に立脚したものであるべきです。廃棄物・循環資源の分野においても、大学はその役割を担う中核としてありたいと考えますし、産業界にもその一翼を、これまで以上に担っていただきたいと思います。また国や地方自治体からのサポートや連携も必要です。

また、2050年を迎えるころには、現在の大学3年生から社会人10年目ぐらいまでの若い方が、社会の舵取りを担うようになるでしょう。この観点からは、本分野における技術開発や技術革新とともに、若い方々の育成が一層重要になります。優秀な人材を社会に送り出すために、学生の教育にも頑張りたいと考えています。若い社会人の皆様はさらなる研鑽を、また各業界は彼らの育成にもご尽力いただきたいと思います。おそらく、これから10年が正念場です。

高速炭酸化技術 CarboneTMによるCO₂固定化・資材化技術の開発

Development of CO₂ Mineralization Technology Using the Accelerated Carbonation Technology CarboneTM

前田 有貴*・藤原 大*(工学博士)・後藤 幸宏**・福富 裕太***・南淵 智洋****・Dr. Peter Gunning*****

Yuki Maeda・Hiroshi Fujiwara・Yukihiro Goto・Yuta Fukutomi・Tomohiro Nambuchi

2050年カーボンニュートラル達成に向け、当社では高速炭酸化技術「CarboneTM」の開発に取り組んできた。本開発ではまず都市ごみ飛灰を対象として炭酸化によるCO₂吸収および重金属溶出抑制効果を確認し、続いてその応用展開として木質バイオマス灰等への炭酸化適用および資材化検討を行ってきた。木質バイオマス灰の炭酸化・資材化実証試験においては、炭酸化造粒物が土壌環境基準の溶出基準を満足するとともにカーボンネガティブ資材となる見込みを得た。さらに、炭酸化物がコンクリート材料として利用できることを確認し、コンクリート製品へ適用するとともに CarboneTMの標準ユニットの販売を今年度より開始した。

To achieve carbon neutrality by 2050, we have been working on the development of an accelerated carbonation technology for CO₂ mineralization with O.C.O Technology. This development started with the carbonation of municipal solid waste fly ash, focusing on reducing heavy metal leaching by carbonation, and has also been applied to the carbonation of biomass ash and other materials. In demonstration tests for the mineralization and valorization of biomass ash, the carbonated granulated product satisfied the leaching criteria of the Soil Environmental Standard. Based on initial tests, the product is expected to be a carbon negative material. The development of uses for the valorized products was also studied in parallel. A modularized unit incorporating the accelerated carbonation technology CarboneTM was launched this fiscal year.

Key Words :

炭 酸 化	Carbonation
木 質 バイ オ マ ス 灰	Biomass ash
重 金 属 溶 出 抑 制	Reducing heavy metal leaching
資 材 化	Valorization
造 粒	Pelletizing
カーボンニュートラル	Carbon neutrality
ネガティブエミッション技術	Negative emission technologies
鉱 物 化	Mineralization

【セールスポイント】

- ・ CO₂の固定化・有効利用
- ・ 産業副産物の資材化
- ・ 標準ユニット

*技術開発センター 技術開発部 資源循環技術室 **プロセス機器事業部 水素事業推進部 開発室 ***技術開発センター 基盤技術室
**** プロセス機器事業部 技術部 装置設計室 *****O.C.O TECHNOLOGY LTD.

ま え が き

2050年カーボンニュートラル達成のためには、従来の省エネ・創エネだけでは削減しきれないCO₂排出量を相殺するために、CO₂を吸収・除去するネガティブエミッション技術が不可欠とされる（図1）。ネガティブエミッション技術とは、大気中のCO₂を回収・吸収し、さらに貯留・固定化することで大気中のCO₂除去に資する技術であり、人為的な工程を加えることで自然のCO₂吸収・固定化の過程を加速させる技術やプロセスである。

当社では、ネガティブエミッション技術になり得る鉱物化技術の一つである、高速炭酸化技術の開発に取り組んできた。都市ごみ焼却飛灰の炭酸化実証試験においては飛灰のCO₂吸収および重金属溶出抑制効果を確認し、その応用展開である製鋼スラグや木質バイオマス灰の炭酸化・資材化検討においてはカーボンネガティブ資材の製造にめどをつけた。

本紙では、当社での高速炭酸化技術の概要および一連の開発経緯を紹介するとともに、検討の一事例として木質バイオマス灰へのCO₂固定およびアップサイクルを目的とした実証試験について報告する。また、炭酸化・資材化技術を商用化した標準ユニッ

トについて紹介する。

1. 高速炭酸化技術「Carbonel™」の概要

高速炭酸化技術「Carbonel™」は、飛灰やスラグ等のCaやK、Mgなどを含んだ産業副産物等を炭酸化原料とし、わずかな水の存在下でCO₂と反応することで炭酸カルシウム（CaCO₃）等の炭酸塩としてCO₂を固定化する技術である。通常、炭酸化反応は自然界では数カ月以上を要するが、本技術では数分～数十分と高速で行うことが特徴である。さらに、本技術は乾式での処理であるため、排水が発生しないシンプルなプロセスである。また、炭酸化（CO₂の固定化）反応に伴うpHの低下などによって、重金属の溶出抑制も可能となり、都市ごみ焼却施設や木質バイオマス発電所から排出される飛灰の重金属溶出抑制薬剤費の低減技術としても有効である。

本技術はイギリスのO.C.O Technology社の技術をベースとしており、CO₂濃度が希薄な排ガスを直接CO₂源として利用するなど、同社と共同で改良を行った技術である。同社は2012年よりイギリス国内で飛灰を原料として炭酸化・資材化を行い、現在イギリス国内で4工場を運営し、年間約40万tonの骨材を製造・販売している。

2. 各種原料の炭酸化・資材化検討

2.1 都市ごみ焼却飛灰の炭酸化実証試験²⁾

当社でははじめに都市ごみ焼却飛灰への炭酸化プロセスの適用から検討を開始し実施で実証試験を行った。本試験では、一般廃棄物焼却施設から発生する焼却排ガスを用いた炭酸化試験を行い、飛灰のCO₂吸収および、炭酸化によるPb、Cr(VI)の溶出抑制効果を確認した。

また、従来のキレート処理と炭酸化処理におけるCO₂削減要因と増加要因から算出したCO₂削減効果を表1に示す。いずれの処理においても装置動力由来のCO₂が発生するが、炭酸化処理においては従来

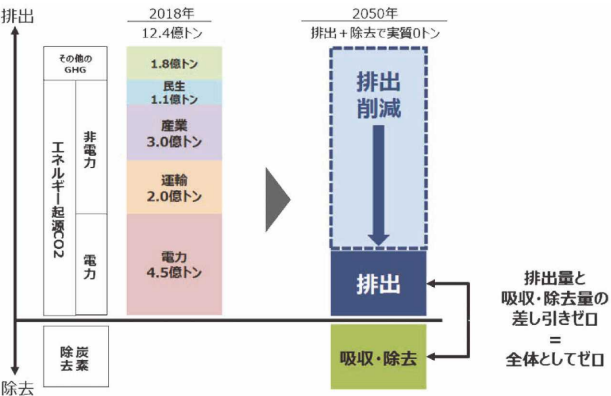


図1 ネガティブエミッション技術の位置づけ¹⁾

表1 廃棄物焼却施設におけるCO₂削減効果

		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)

のキレート処理に比べ、薬剤使用に伴うCO₂排出量が少なく、さらに飛灰がCO₂を吸収することから、CO₂排出量の削減が可能となる見込みが得られた。

このことから、当社の都市ごみ焼却施設案件での提案を開始し、2施設での採用が決定している。

2.2 他原料の炭酸化・資材化検討

次に、Carbonel™の応用展開として、製鋼スラグや木質バイオマス灰を原料とした、炭酸化・資材化プロセスの検討を行った。炭酸化によりCO₂を固定した製鋼スラグや木質バイオマス灰にフィラー、バインダーなどを加えて造粒物を製造し、土木・建築資材や肥料としての利用可能性を検討した。

本検討ではまず、1バッチ数十kgのラボスケールで炭酸化造粒試験を行い、CO₂吸収量の最大化や目標強度を満たす造粒物製造方法等の処理条件の最適化の検討を行った。検討の結果、製造した炭酸化造粒物は目標強度を十分に達成しており、既存の人工軽量骨材と同等の物理性状を示すことを確認できた。

3. 木質バイオマス灰の炭酸化・資材化実証³⁾

上記結果を受けて、次ステップとして実機スケールでの実証試験に移行し、土木・建築資材の試作等に必要な炭酸化造粒物のサンプル製造を行った。本章では本件検討の一例として、木質バイオマス灰を原料とした実証試験について報告する。

3.1 実証試験 コンセプト

木質バイオマス発電は2012年7月に再生可能エネルギーの固定価格買取制度が開始されて以降、全国各地で建設、運用が急増した一方、大量にバイオマス灰が発生し、その多くは重金属が含まれる等が原因で産廃処分されていることから、環境負荷や処分費の軽減に向け、木質バイオマス灰を再資源化および有効利用することが求められている。

一般にカーボンニュートラルとされる木質バイオマス発電とCCSとを組み合わせた技術はBECCS(Bio Energy with Carbon Capture and Storage)と呼ばれており、バイオマス燃焼時のCO₂を貯留することで、大気中のCO₂を除去・減少できるネガティブエミッション技術の一つと考えられている。

当社は木質バイオマス発電所から排出されるバイオマス由来のCO₂を、同施設で発生する灰に固定化し、CO₂排出量マイナスを実現することに加え、CO₂を固定化した炭酸化物を資材化、有効利用することで環境負荷と灰処分費の軽減に貢献することを目標に本検討に取り組んだ(図2)。

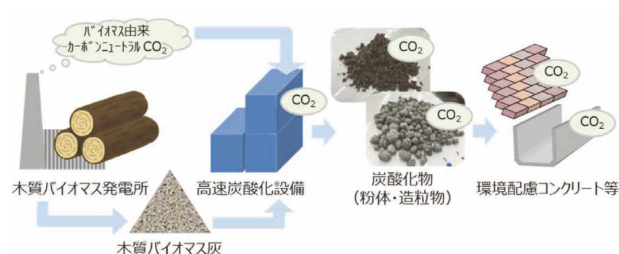


図2 実証試験 コンセプト

3.2 実証設備 概要

当社技術研究所内に1バッチ数百kgの実証設備を設置し、2022年より運転を開始した。実証設備の全景を図3、実証設備における炭酸化・資材化フローを図4に示す。実証設備は1.2節の都市ごみ焼却飛灰の炭酸化で用いた実機スケールのミキサーやペレタイザを中心に、木質バイオマス灰・フィラー・バインダーの供給ライン、CO₂供給器等の付帯設備から構成されている。未処理の木質バイオマス灰(以下、原灰)をミキサーに充填した後、重金属溶出抑制剤と水を添加して混合した。CO₂ガス(純度>99.6%)と大気を、所定のCO₂濃度になるよう混合した模擬排ガスをミキサーへ導入して炭酸化処理を行い、炭酸化物Ⅰ(粉体)を製造した。また、粉体にフィラー、バインダーおよび水を加え、ペレタイザで造粒し、大気雰囲気下で所定期間養生することで炭酸化物Ⅱ(造粒物)を製造した。



図3 炭酸化・資材化実証設備

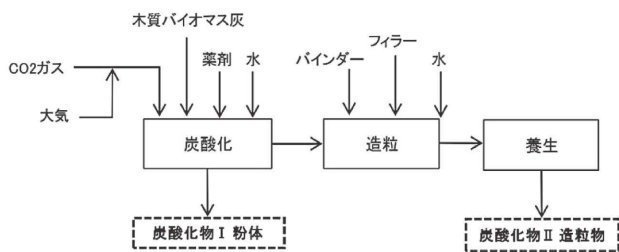


図4 炭酸化・資材化フロー

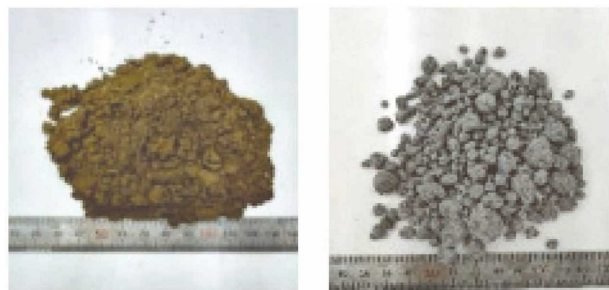


図5 炭酸化物（左：粉体、右：造粒物）

3.3 試料

本試験では3カ所の木質バイオマス発電所から発生する木質バイオマス灰（原灰）を使用した。各原灰の性状を表2に示す。いずれも主な成分はSi, Ca, Kであり、化学組成において大きな違いがないことを確認した。なお、灰Bと灰Cは混合処理されることを想定し、一定の比率で混合して試験に供した（以下、灰BC混合灰）。

3.4 分析方法

原灰1 tonあたりのCO₂吸収量は、炭酸化処理による全炭素量（以下、TC）の増加が炭酸塩の生成によるものとし、炭酸化処理前後の灰サンプルについてTCを測定し、以下の式を用いて算出した。

<数式>

CO₂吸収量 [kg-CO₂/ton-原灰]

$$= (TC_{\text{炭酸化灰}} - TC_{\text{原灰}}) \times (M_{\text{CO}_2} / M_C) \times 1,000 \text{ [kg/ton]}$$

TC_{炭酸化灰}：原灰1 tonを炭酸化した粉体中の全炭素量 [%]

TC_{原灰}：原灰1 ton中の全炭素量 [%]

M_{CO₂}：二酸化炭素のモル質量 [g/mol]

M_C：炭素のモル質量 [g/mol]

製造した炭酸化物の環境安全性評価は、土壤環境基準である環境庁告示第46号（以下、環告46号）試験に基づき行った。

3.5 試験結果

3.5.1 炭酸化物の概要

図5に実証設備を用いて製造した炭酸化物（粉体、造粒物）の外観を示す。粉体は、炭酸化処理時の水

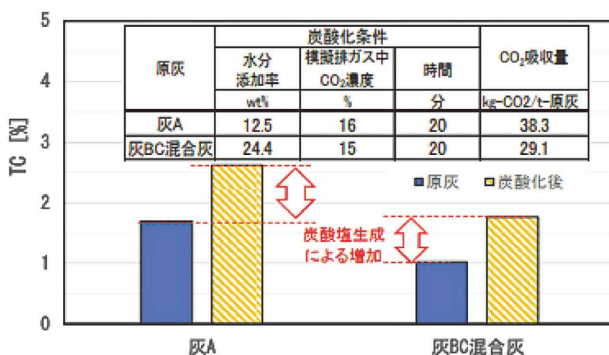


図6 各灰の炭酸化条件およびCO₂吸収量

添加により10～15%程度の水分を含んでいる。造粒物のサイズはペレタイザの運転条件や製造後のふるい分けにより、粒度調整可能である。粉体・造粒物はそれぞれ、混和材やコンクリート骨材・路盤材等の利用を想定している。

3.5.2 CO₂吸収量

図6に実証設備による粉体製造時における炭酸化条件、CO₂吸収量及び炭酸化前後のTC分析結果を示す。各灰のCO₂吸収量は灰Aでは38.3 kg-CO₂/t-原灰、灰BC混合灰では29.1 kg-CO₂/t-原灰であった。

灰BC混合灰より灰AのCO₂吸収量が高かったのは、炭酸化塩を生成するCa, Kの含有量が灰Aの方が多かったためと考えられ、CaだけでなくKも炭酸化してCO₂吸収に寄与したと推定される。

また表3に示すよう、灰Aおよび灰BC混合灰のいずれも、炭酸化に要する実証設備の使用電力由来のCO₂排出量（Scope 2）と比べて、炭酸化によるCO₂吸収量（Scope 1）が大きかったことから、CO₂排出量がゼロ以下となるカーボンネガティブ資材となる見込みを得た。

表2 原灰の種類および化学組成

灰種	燃焼方式	化学組成 [%]						
		Ca	K	Mg	Na	S	Al	Si
灰A	流動床式ガス化燃焼	9.5	8.1	1.7	1.1	0.6	6.4	20
灰BC混合灰	流動層ボイラ(灰B)、 逆送トラベリングストーカーボイラ(灰C)	6.7	6.3	1.7	0.9	0.7	5.0	25

表3 炭酸化物 I（粉体）製造における CO₂排出量収支

【単位: kg-CO ₂ /ton-原灰】				
	対象	灰A	灰BC 混合灰	備考
Scope1 (直接的な排出)	木質バイオマス灰 が吸収するCO ₂	-38.3	-29.1	図6参照
Scope2 (エネルギー起源の 間接排出)	炭酸化する要する 実証プラントの 使用電力由来	11.5	18.3	CO ₂ 排出量原単位: 0.309 kg-CO ₂ /kWh ※3
CO ₂ 排出量収支 (Scope1+2)		-26.8	-10.8	

※3 関西電力全体の調整後のCO₂排出係数(2021年度、2023年2月1日公表)

3.5.3 炭酸化物の環境安全性評価

表4に各原灰および造粒物の溶出試験(環告46号)の結果を示す。重金属溶出抑制剤としてファインアッシュ®SK-1相当品を所定量添加した。原灰において、灰AではCr(VI)・Fが、灰BではCr(VI)・Seが環告46号の基準値を超過していたが、炭酸化・造粒することで重金属等の基準値を満足することを確認した。

また重金属の含有量(環告19号)試験においても、原灰、造粒物のいずれも基準値を満足することを確認しており、これらの結果から造粒物の環境安全性は問題なく、木質バイオマス灰の資材化が可能であ

るという見込みを得た。

3.6 実証試験まとめ

木質バイオマス灰を用いて、実機スケールのミキサーおよびペレタイザなどからなる実証設備による炭酸化・資材化を実証し、原灰1tonあたり29.1～38.3kgのCO₂が吸収／固定化された炭酸化物(粉体、造粒物)の製造を可能とした。粉体状の炭酸化物ではCO₂排出量がゼロ以下であることを確認し、造粒物においては、重金属溶出抑制薬剤との併用により、環告46号の溶出基準を満足することを確認した。

4. 実用化・普及に向けて

4.1 Carbonel™ ユニット

以上の実証試験を踏まえて、炭酸化・資材化プロセスを備えたCarbonel™ユニットの設計を実施し、2024年4月より当社プロセス機器事業部で販売を開始した。Carbonel™ユニットの特徴として、実証設備同様、炭酸化、混合、造粒工程に必要な装置で構成される一方、ユニット化することにより実証設備比約1/2の設置面積となり、車載可能なサイズを実現し、それにより現地工事のコストダウン、工期短縮に寄与することができる。また連続バッチ運転でできるオプションの原料供給装置を加えることによ

表4 環告46号溶出試験結果

単位: mg/L(pHを除く)		Pb	Cr(VI)	Se	F	B	pH
環告46号基準値		≤0.01	≤0.05	≤0.01	≤0.8	≤1	—
灰A	原灰	0.006	0.15	0.01	1.43	0.08	12.2
	造粒物	<0.001	<0.05	0.01	0.48	0.78	11.4
灰BC 混合灰	原灰	<0.001	0.25	0.011	<0.08	1.0	10.1
	造粒物	<0.001	0.016	0.01	<0.08	0.4	8.9

表5 構造用軽量コンクリート骨材の規格および試験値⁴⁾

		人工軽量骨材		炭酸化造粒物		
		規格値(JIS A 5002)		木質灰		
試験項目		試験方法	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材
物理特性	絶乾密度 [g/cm ³]	JIS A 1109, JIS A 1110	区分L 1.3未満 区分M 1.3～1.8 区分H 1.8～2.3	区分L 1.0未満 区分M 1.0～1.5 区分H 1.5～2.0	1.76 区分M	1.80 区分H
	実積率 [%]	JIS A 1104	区分A 50以上 区分B 45～50	区分A 60以上 区分B 50～60	69.8 区分A	66.3 区分A
	微粉分量 [%]	JIS A 1103	規定なし	10以下	1.4	1.49
	粘土塊量 [%]	JIS A 1137		1以下	0.2	0.07
	有機不純物	JIS A 1105	試験溶液の色が標準色液より淡い		合格	
	安定性試験 [%]	JIS A 1122	規定なし (副産軽量骨材では20以下)		23.1	73.3
	強熱減量 [%]		1以下 (天然・副産軽量骨材では5以下)		7.8	7.2
化学特性	酸化カルシウム [%]	JIS R 5202	規定なし (天然・副産軽量骨材では50以下)		14.4	13.7
	三酸化硫黄 [%]		0.5以下		1.5	1.5
	塩化物 [%]	JIS A 5002	0.01以下		0.44	0.13

り、灰処理量は年間約3,000 ton、造粒物生産量は年間約5,000 tonを想定している。原料としては、木質バイオマス灰に限らず、Caなどを多く含み、高いCO₂吸収量が期待できる製鋼スラグやペーパースラッジ焼却灰、セメントキルダスト、再生骨材製造時に発生する微粉分等でも適用可能性があり、各産業での灰処分費の削減やCCU材料の製造等での活用が期待される。

4.2 資材化物の土木・建築資材としての適用性評価

木質バイオマス灰を原料として Carbonel™ により製造した造粒物について、土木・建築資材としての適用性を評価することを目的に、構造用軽量コンクリート骨材の規格（JIS A 5002）に準拠して物理化学特性を評価した⁴⁾。その結果、Carbonel™ により製造される造粒物は、物理性状において軽量骨材の規定を満足することを確認した（表5）。また、本技術で製造した造粒物（炭酸化骨材）を用いたコンクリートは、一般的な人工軽量骨材を用いた場合と同等の圧縮強度を示すことが確認され、コンクリート製品として適用できる可能性が示された（図7）。

造粒物は、その他にも路盤材や地盤改良材料、アスファルト混合物など、建設・土木業界での利用も期待される。また、炭酸化原料となりうる製鋼スラグや木質バイオマス灰には、多様な肥料成分も含まれており、肥料・農業資材への適用可能性も考えられる。

4.3 資材化物の利用事例

以上の検討などをもとに、木質バイオマス灰を原料として Carbonel™ により製造したCO₂を固定した粉体および造粒物（Carbonel™ 資材）を実際のコンクリート製品として製造した事例を以下に紹介する。極薄コンクリートである HPC®（ハイブリッドプレストレストコンクリート）では、Carbonel™ により製造した造粒物を材料の一部として使用し、

CO₂排出量削減へ貢献するものとして2025年大阪・関西万博のパビリオンで利用されることが決定している⁵⁾（図8）。

また、株式会社坂内セメント工業所においては、Carbonel™ により製造した粉体を利用したU字側溝や防草ブロック、鉄筋の代わりに竹を用いる竹筋コンクリートの試作を行い、製品として製造可能であることを確認している（図9）。竹筋コンクリートとの組合せの取組みでは、鉄筋製造時のCO₂排出量の低減と合わせて粉体の利用によるCO₂固定により、CO₂削減量の最大化が期待される。



図8 Carbonel 資材の利用事例（写真：細矢仁）

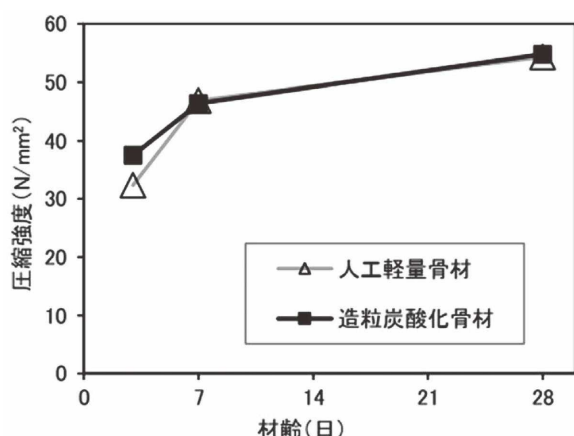


図7 圧縮強度試験結果⁴⁾



図9 Carbonel 資材のU字側溝への利用事例

む す び

高速炭酸化技術「Carbonel™」の都市ごみ焼却施設への適用からの応用展開として、木質バイオマス灰を原料とした実機スケールでの炭酸化・資材化実証試験および資材化物のコンクリート材料としての適用性評価を実施した。検証の結果、以下のことを確認した。

- ・ 原灰1 ton あたり29.1～38.3 kg のCO₂が吸収／固定化された炭酸化物（粉体、造粒物）の製造が可能であることを確認した。
- ・ 炭酸化に要する実証設備の使用電力由来のCO₂排出量と比べて、炭酸化によるCO₂吸収量が大きいため、CO₂排出量がゼロ以下となるカーボンネガティブ資材となる見込みを得た。
- ・ 炭酸化・造粒することで重金属等の溶出基準値を満足することを確認した。
- ・ 木質バイオマス灰を原料としてCarbonel™により製造した造粒物が、構造用軽量骨材の物理性状の規定を満足することを確認した。

Carbonel™により製造したCO₂を固定した粉体・造粒物は、実際のコンクリート製品にも利用されはじめており、CO₂排出量削減への貢献が期待される。

今後は、全国の木質バイオマス発電所などの産業副産物を排出する施設を中心に、排ガスを直接利用して炭酸化・資材化が可能であるCarbonel™ユニットを普及させ、木質バイオマス灰等の産業副産物の資源化による地産地消および天然資源の枯渇抑制し、ひいてはCO₂固定化による脱炭素の促進によりカーボンニュートラルの達成に貢献していく所存である。

[参考文献]

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁, 国立環境研究所 温室効果ガスインベントリオフィス「日本の温室効果ガス排出量データ」
- 2) 前田有貴ら：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, 神鋼環境ソリューション技報, Vol.18, No.1, pp13-18 (2021)
- 3) 後藤幸宏ら：高速炭酸化処理による木質バイオマス灰へのCO₂固定化・資材化の実証, 第34回廃棄物資源循環学会発表会講演論文集, pp.431-432 (2023)
- 4) 取違剛ら：造粒炭酸化骨材のセメント系材料への適用性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.28-33 (2023)
- 5) 阿波根昌樹ら：HPC（ハイブリッドプレストレストコンクリート）の活用, 建築技術, No.894, pp.102-205 (2024)

回転ストーカ炉の運転自動化

Automatic Operation of Rotary Combustor

工藤貴洋*・立見友幸*・梶原吉郎(技術士(衛生工学部門))*・奥住宣裕**・田代和樹***・生田直央***

Takahiro Kudo・Tomoyuki Tachimi・Yoshio Kajihara・Nobuhiro Okuzumi・Kazuki Tashiro・Naohisa Ikuta

当社の主要製品である回転ストーカ式焼却炉は、回転火格子による三次元的な攪拌によりごみの分布が一様に維持され、安定性に優れているという特長がある。この特長を生かしながら、熟練を要する燃焼や公害監視にかかわる運転員の操作ノウハウを自動制御に取込むことで、DCS操作の削減に取組み、連続25日間DCS手動介入操作なしでの安定運転を実現した。さらに、炉内の燃焼画像と炉内温度などの各種プロセス値とに基づいて燃焼状態を分類し、制御量を補正する改良型インテリジェント制御システムを開発し、燃焼安定性が約4割向上することを確認した。

The Rotary combustor, which is our major product, maintains a uniform distribution of waste through three-dimensional stirring combustion with a rotating grate, and has excellent combustion stability. By taking advantage of this feature and incorporating the operational know-how of operators involved in combustion and pollution monitoring, which require high skills, into the automatic control, we have worked to reduce the number of DCS (Distributed Control System) operations and achieved stable operation without manual intervention of the DCS for 25 consecutive days. In addition, we developed an improved intelligent control system that classifies the combustion state based on images of combustion from inside the furnace and various process values such as furnace temperature, and corrects the control amount. We were able to confirm that combustion stability is improved by about 40%.

Key Words :

回転ストーカ式焼却炉
運 転 自 動 化
操 業 安 定 化
インテリジェント制御

Rotary combustor
Automatic operation
Operational stabilization
Intelligent control

【セールスポイント】

- ・回転ストーカ式焼却炉は火格子の構造上、吹抜けなどによる変動が起こりにくく安定性に優れている。
- ・運転員の操作ノウハウを自動制御に取込むことで、DCS手動介入操作なしで長期間安定運転が可能である。

ま え が き

近年、少子高齢化や労働力不足の問題によって熟練したオペレーターの確保が難しくなりつつある状況において、操業安定化および省力化に向けたDCS (Distributed Control System, 分散形制御システム) 操作の自動化はその重要度を増している。

そこで当社では、熟練を要する燃焼や公害監視にかかわる運転員の操作ノウハウを自動制御に取込むことで、DCS操作の削減に取組んだ。その結果連

続25日間DCS手動介入操作なしでの運転を実現し、さらなる安定操業や省力化に貢献できることを確認した¹⁾。さらに、炉内の燃焼画像と炉内温度などの各種プロセス値とに基づいて燃焼状態を分類し、その燃焼状態に応じて制御量を補正することにより最適な燃焼状態に速やかに移行させる改良型インテリジェント制御システムを開発した。

まず1.項ではDCS操作自動化への取組みについて述べる。続いて2.項では実証試験の概要と試験

*環境エンジニアリング事業本部 環境プラント事業部 プラント技術部 機能開発室

**環境エンジニアリング事業本部 環境プラント事業部 アフターサービス部

***環境エンジニアリング事業本部 計電装技術部 開発室

結果について、3.項では改良型インテリジェント制御システムについて述べる。

1. DCS 操作自動化への取組み

DCS 操作自動化への課題抽出のため、運転員への操作ノウハウのヒアリング、ならびに、項目ごとの手動介入頻度を整理した。13日間（2023年6月20日～7月2日）の項目ごとの手動介入頻度を表1、各項目に応じた制御対象を表2に示す。これらの項目について、介入に踏み切った現象とそれに至った要因を項目毎に分析し、それらの予防操作と発現した際の操作を徹底的に自動化することで、手動介入操作の削減に取り組んだ。

表1 操作項目ごとの手動介入頻度

操作項目	頻度
燃焼空気に関する操作	54回/日
燃焼ガス温度に関する操作	18回/日
ごみ送りに関する操作	9回/日
給じんに関する操作	6回/日
排ガス処理に関する操作	1回/日
その他	6回/日

表2 各項目に対する制御対象

項目	制御対象
燃焼空気	・押込空気流量 ・二次空気流量
燃焼ガス温度 (二次燃焼室)	・循環ガス量
ごみ送り	・回転ストーカ式焼却炉回転数
給じん	・給じんプッシャ作動間隔
排ガス処理	・消石灰供給量

2. 実証試験

2.1 施設概要

実証試験施設の概要を表3に示す。炉形式は65t/日の回転ストーカ式焼却炉（以後、回転ストーカ炉）であり、この炉は優れた耐久性とごみ量やごみ質の変動にも対応可能な柔軟性を有している。本施設は

表3 施設概要

処理量	130 t/日（65 t/日×2炉）
炉形式	全連続運転式回転ストーカ炉
発電設備	蒸気タービン （発電量：2 420 kW）
燃焼ガス冷却設備	廃熱ボイラ（4 MPa×400℃）
排ガス処理設備	乾式処理 （消石灰、活性炭吹き込み） ろ過式集じん器、脱硝反応塔 排ガス再循環

回転ストーカ炉、後燃焼装置、二次燃焼室、減温塔、ろ過式集じん器、脱硝反応塔により構成されている。

2.2 回転ストーカ式焼却炉の特長

回転ストーカ炉の概要を図1に示す。炉の形状は円筒形であり、断面は図2に示すとおり円形を成している。火格子は、ボイラ水管とフィンで構成されている。フィンには空気孔が設けられており、焼却炉下部の風箱から空気孔を介して炉内のごみ層底部より燃焼空気が供給され、ストーカ燃焼を形成している。炉内では層厚の薄い端部を中心に連続的にごみが燃焼し、図2のように火炎が渦状に形成される。熱分解ガスは上部に抜けることなく、火炎と燃焼空気により形成される火炎渦で激しく攪拌され、軸方向に炉内を通過する過程で完全燃焼が行われる。また、炉内のごみは炉の回転で横方向へ移動し、持ち上げられたごみは反転しながら、斜め前方に転がり落ちる動きをする。横方向への移動があるため、ごみの分布は一樣に維持され、いわゆる吹抜けなどによる変動が起こりにくい。このように、回転ストーカ炉は構造上、燃焼がほぼ炉内で完結し、安定性に

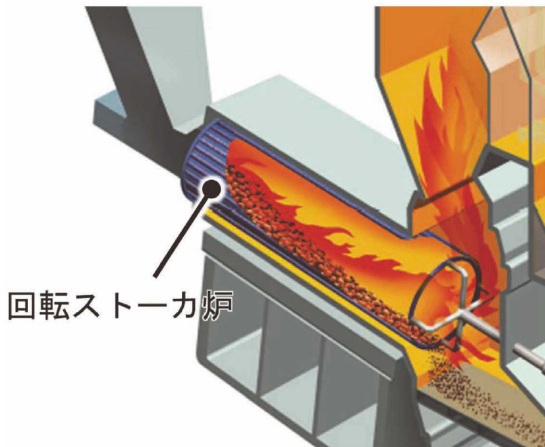


図1 回転ストーカ炉

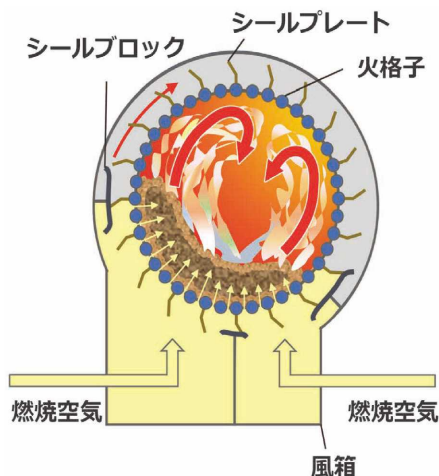


図2 回転ストーカ炉断面図

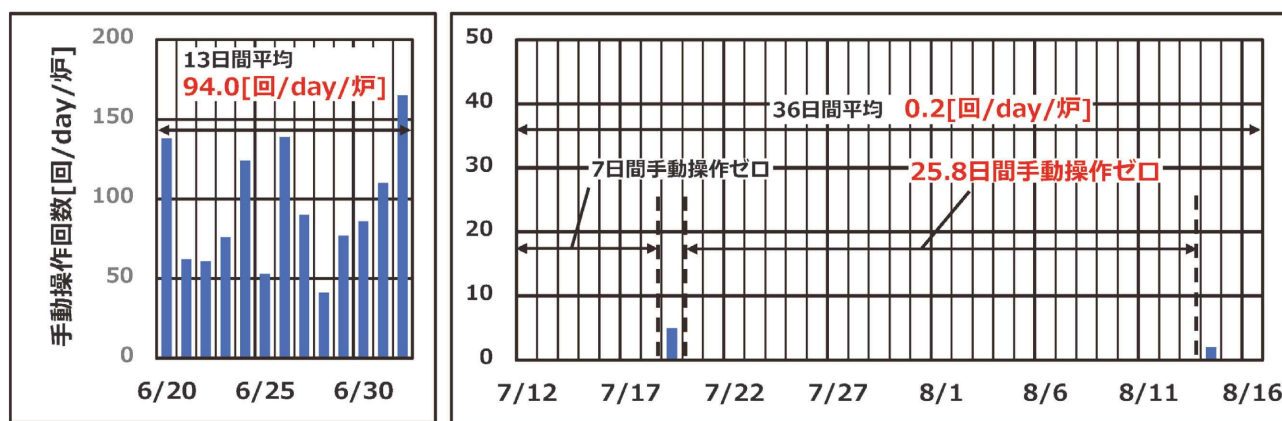


図3 (左) 従来制御時の手動介入回数, (右) 調整後の手動介入回数

優れていることから、比較的自動運転に適しているといえる。

2.3 操作ノウハウの自動制御への導入

運転員への操作ノウハウのヒアリングを基に、燃焼状態判断や手動介入操作のタイミングおよび操作量を制御ロジックに反映した。

自動制御の一例として、ごみ送り速度（回転ストローカ炉回転数）制御について説明する。ごみ送り速度制御は二次燃焼室温度が低下しないよう回転ストローカ炉回転数を自動調整しているが、従来制御では二次燃焼室温度の急低下時に制御が間に合わず、手動介入操作を行うことがあった。操作ノウハウのヒアリングから、二次燃焼室温度内の温度分布がある条件になると二次燃焼室温度が低下することが分かったため、制御ロジックへ反映し、制御タイミングの調整を行った。

そのほかの制御項目についても運転員の操作ノウハウを自動制御に取込んだ。

2.4 評価方法

運転操作の自動化の評価は、①手動介入回数の低減率、②燃焼管理温度の標準偏差、③主蒸気流量の変動係数にて行った。それぞれの算出方法を次に示す。

①手動介入回数の低減率

手動介入回数の低減率[%]

$$= \frac{\text{従来制御時の手動介入回数[回]} - \text{調整後の手動介入回数[回]}}{\text{従来制御時の手動介入回数[回]}} \times 100$$

②燃焼管理温度の標準偏差

$$\text{燃焼管理温度の標準偏差}[\text{℃}] = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

n : データ数, x_i : 燃焼管理温度[℃],

$\bar{x}$: 燃焼管理温度の平均値[℃]

③主蒸気流量の変動係数

主蒸気流量の変動係数[%]

$$= \frac{\text{主蒸気流量の標準偏差}[\text{t/h}]}{\text{主蒸気流量の平均}[\text{t/h}]} \times 100$$

2.5 試験結果

従来制御（13日間：2023年6月20日～7月2日）と調整後（36日間：2023年7月12日～8月16日）の運転結果を示す。

①手動介入回数の低減率

従来制御と調整後の1炉1日ごとの手動介入回数を図3に示す。従来制御では1日平均して94.0回の手動操作があったが、調整後は1日平均して0.2回となり、手動介入回数の低減率は99.8%であった。また、試験期間中、最長25.8日間の手動介入ゼロを継続した。

②燃焼管理温度の標準偏差

従来制御と調整後の燃焼管理温度の標準偏差を図4に示す。燃焼管理温度は1時間平均とし、1日ごとの標準偏差を算出した。調整後は従来制御と比べて標準偏差が13.5℃から8.5℃と37.6%縮小しており、燃焼安定性が向上していることが確認できた。

③主蒸気流量の変動係数

従来制御と調整後の主蒸気流量の変動係数を図5に示す。調整後は従来制御と比べて5.0%から3.0%へと約4割縮小しており、主蒸気流量の変動を抑制できていることが確認できた。

3. 改良型インテリジェント制御システム

さらなる燃焼安定性向上のために、炉内の燃焼画像と炉内温度などの各種プロセス値に基づいて燃焼

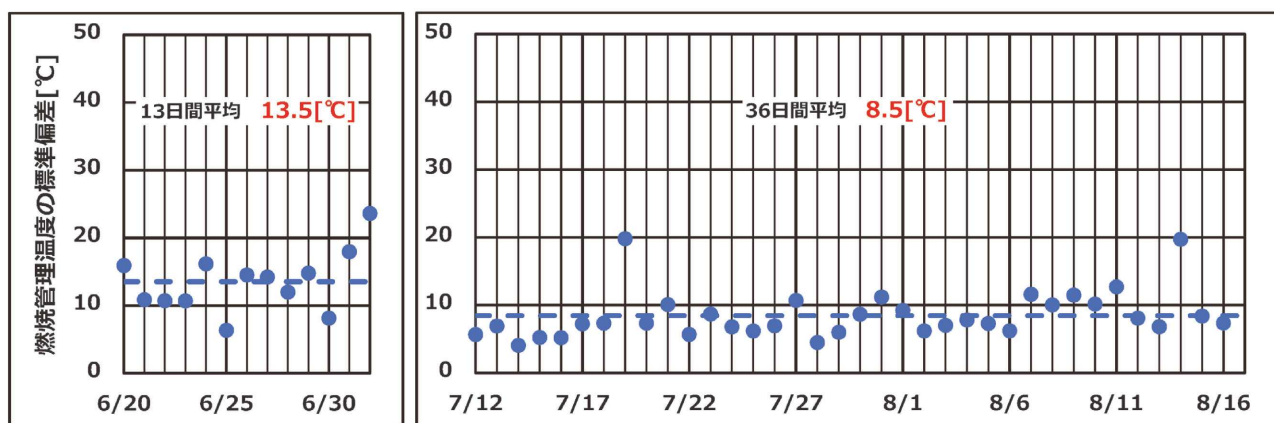


図4 (左) 従来制御時の燃焼管理温度の標準偏差, (右) 調整後の燃焼管理温度の標準偏差

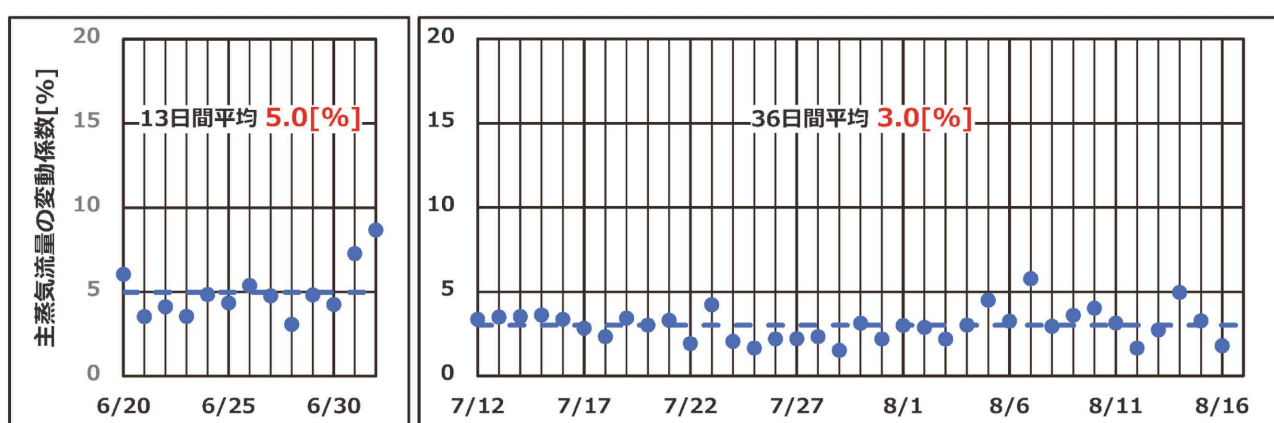


図5 (左) 従来制御時の主蒸気流量の変動係数, (右) 調整後の主蒸気流量の変動係数

状態を分類し、その燃焼状態に応じて制御量を補正することにより最適な燃焼状態に速やかに移行させる改良型インテリジェント制御システムを開発した。ここでは制御システムの概要とその効果について説明する。

3.1 改良型インテリジェント制御システムの概要

インテリジェント制御システムは、2000年に開発された多入力多出力の制御システム²⁾であり、各種プロセス値から燃焼パターンを9パターンに分類し、ファジィ制御を用いて先行的に各種制御量を同時に補正することにより、最適な燃焼状態に速やかに移行させ、排ガス性状の適正化、燃焼の安定化と蒸発量の安定化を両立させるものである。図6に燃焼状態の分類を示す。従来は燃焼状態の判別に回転ストーカ炉入口温度と風箱圧力から算出したごみ層厚を用いていたが、より直接的な検出を行うため、これらを回転ストーカ炉内の燃焼画像から判別した燃焼位置と炉内温度などの各種プロセス値から判別した後燃焼装置のごみ量の組み合わせから燃焼状態を分類するよう改良を行った。例えば、適切な燃焼

位置よりも上流側において燃焼し、後燃焼装置のごみ量が少ない状態であると分類された場合には(1の状態)、給じん量を増やし、ごみ送り速度(回転ストーカ炉回転数)を速くする。また、適切な燃焼位置よりも下流側において燃焼し、後燃焼装置のごみ量が多い状態であると分類された場合には(9の状態)、給じん量を減らし、ごみ送り速度(回転ストーカ炉回転数)を遅くする。これらの補正を連続的に行うことで燃焼位置および後燃焼装置のごみ量の変動を小さくすることにより、燃焼安定性を向上させることができる。

3.2 改良型インテリジェント制御システム導入の効果

回転ストーカ炉を有する表3とは別の施設に改良型インテリジェント制御を導入し、効果を確認した。導入前と導入後の燃焼管理温度の標準偏差を図7に示す。燃焼管理温度は1時間平均とし、1日ごとの標準偏差を算出した。導入後は導入前と比べて標準偏差が10.0°Cから6.1°Cと39.1%縮小しており、燃焼安定性が約4割向上していることが確認できた。

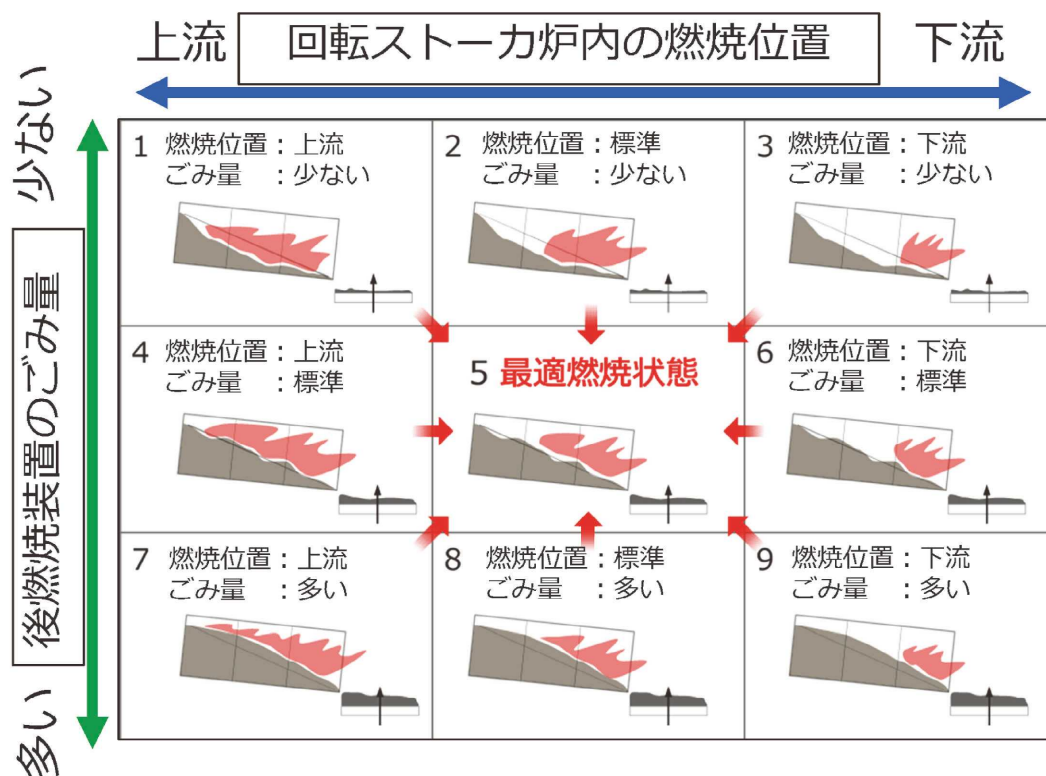


図6 改良型インテリジェント制御における燃焼状態の分類

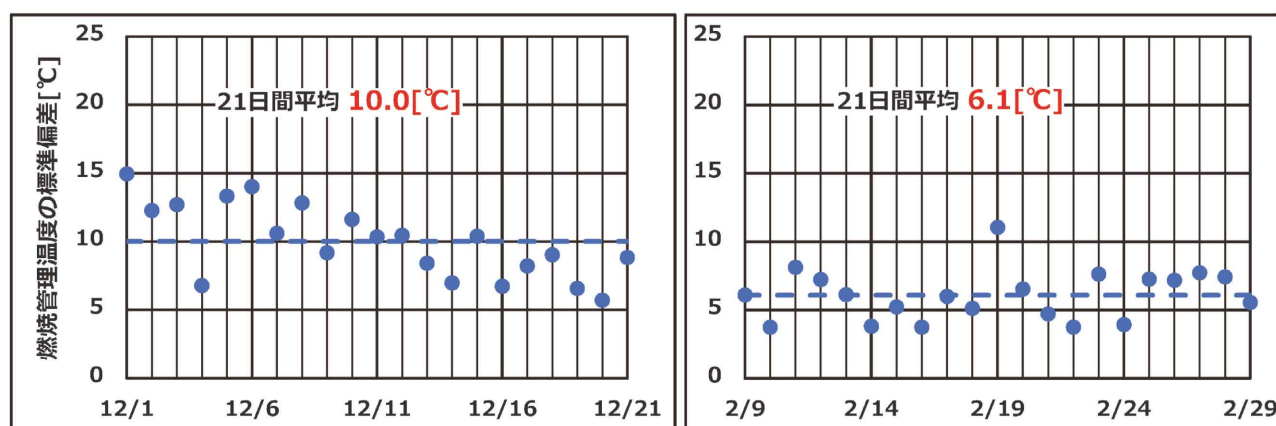


図7 (左) 改良型インテリジェント制御導入前の燃焼管理温度の標準偏差,
(右) 改良型インテリジェント制御導入後の燃焼管理温度の標準偏差

む す び

運転員の操作ノウハウを自動制御に取込むことで、DCS 操作の削減に取組んだ結果、連続25日間手動介入操作なしでの運転を実現し、燃焼管理温度、主蒸気流量の安定性が約4割向上していることを確認した。

さらに、炉内の燃焼画像と炉内温度などの各種プロセス値とに基づいて燃焼状態を分類する改良型インテリジェント制御システムを開発し、燃焼管理温度の安定性が約4割向上することを確認した。

その後、表3の施設においても改良型インテリジェント制御のさらなる改善を図り、燃焼安定性を向上させた。そして現在、手動介入操作なしで連続25日間以上の運転を継続中である。今後もさらなる安定操業や省力化に貢献していく所存である。

[参考文献]

- 1) 工藤ほか：ごみ焼却施設の運転自動化の取組み，第45回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集（2024），p52-54
- 2) 齋藤ほか：回転ストーカ炉のインテリジェント制御，石川島播磨技報，40巻，第6号（2000），p315-319

予測制御による回転ストーカ式ごみ焼却炉の蒸気量安定化

Reduction of Steam Volume Fluctuations in Rotary Combustors Using Prediction-based Controls

柴崎 絢史*・福川 宙季*・渡邊 圭*・谷田 克義*(工学博士)・奥住 宣裕**

Ayato Shibazaki・Hiroki Fukukawa・Kei Watanabe・Katsuyoshi Tanida・Nobuhiro Okuzumi

ごみ焼却炉の燃焼安定化には、廃熱ボイラで発生する蒸気量を安定化させることが重要である。当社の回転ストーカ式ごみ焼却炉では、現在値に基づくフィードバック制御により蒸気量を安定化させているが、制御遅れによるばらつきの面でさらなる改善を試みた。未来の蒸気量の予測結果に基づいて制御量を決定する蒸気量予測制御を適用した結果、蒸気量設定値からの蒸気量のばらつきを抑制することができた。

Reducing steam volume fluctuation in boilers of combustors is required for stable combustion. As our rotary combustors use feedback-based controls that rely on real-time steam volume, delays in controls reacting resulted in steam volume instability, and we wanted to rectify this issue. We introduced our technology, which bases control on predictions of steam volume to our rotary combustor. We were able to confirm that the prediction control technology could effectively reduce fluctuations in steam volume.

Key Words :

回転ストーカ式ごみ焼却炉

Rotary combustor

機 械 学 習

Machine learning

蒸 気 量 安 定 化

Stable steam volume

燃 焼 安 定 化

Stable combustion

【セールスポイント】

- ・機械学習で未来の蒸気量を予測し、制御量を決定
- ・蒸気量30分移動平均値を連続して設定値 $\pm 3\%$ 範囲内に抑制
- ・二次燃焼室温度が安定化し、給じん手動介入の回数が低減

ま え が き

近年、資源枯渇や環境問題、廃棄物問題を背景に、国際的に循環型社会の形成に向けての取組みがなされている。国内では資源循環の取組みの一例として、2022年4月1日に、政府が「プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律」を施行し、廃プラスチックの排出抑制や自主回収、再資源化といったプラスチック資源循環を促進させている¹⁾。廃棄物処理分野においては、廃プラスチックの減少に伴うごみカロリー低下によって、炉内の安定燃焼が困難になることが懸念されている。そのため、焼却炉には、ごみ質に関係なく安定した燃焼を維持できることが

求められている。

当社の回転ストーカ式ごみ焼却炉（以下、回転ストーカ炉）を使用する廃棄物処理施設では、焼却炉の廃熱を用いて、施設付帯のボイラで蒸気を発生させており、蒸気を蒸気タービンの作動流体とすることで発電に有効利用している。この蒸気量が蒸気量設定値に従うように炉内の燃焼を自動制御しており、蒸気量を安定化させることは炉内の燃焼安定化につながる。当社の従来の蒸気量制御は、蒸気量の現在値に基づいて燃焼用空気流量と炉内への給じん量を決定するフィードバック制御（以下、FB制御）であった。しかし、FB制御は燃焼状態への応答性

*技術開発センター 基盤技術室

**環境エンジニアリング事業本部 環境プラント事業部 アフターサービス部 設備改善技術室

に課題があり、制御がごみ質変動に対して遅れることによって、炉内の燃焼の変動を助長させ、蒸気量が安定化しないことがあった。

そこで、廃棄物処理施設のプロセス情報を用いて未来の蒸気量を予測し、その予測結果に基づいて制御量を決定して蒸気量の変動を安定化させる蒸気量予測制御技術を開発することを目指した。

当社の回転ストロカ炉を使用する廃棄物処理施設では、蒸気量設定値を一定にして運転する場合（以下、SV 一定運転）と、1 日のごみ焼却量を一定に保つために蒸気量設定値を自動調整して運転する場合（以下、SV 自動運転）がある。そのため、SV 一定運転、SV 自動運転のどちらにおいても、蒸気量を安定化させる必要がある。

本稿では、当社の回転ストロカ炉を使用する廃棄物処理施設に蒸気量予測制御を導入し、SV 一定運転時および SV 自動運転時のどちらにおいても、蒸気量の安定化効果を確認したので報告する。

1. 蒸気量予測制御

1.1 回転ストロカ炉

図 1 に回転ストロカ炉の概略フローを示す。ごみクレーンでごみホッパに投入されたごみは、給じん装置のプッシュによって炉内に供給される。炉内へ供給されたごみは、炉体の傾斜と回転により、ごみ層を形成して後段に送られる。炉壁面には空気孔が設けられており、燃焼用空気が焼却炉下部の風箱から空気孔を介して炉内に供給され、ストロカ燃焼を

形成する²⁾。ごみの燃焼によって発生した燃焼ガスは後段の二次燃焼室に移動して完全に焼却され、さらに後段の廃熱ボイラで水に熱を与えることにより、蒸気を発生させる。このときの蒸気発生量に応じて燃焼制御が自動で行われるが、炉内のごみ質の変動やごみ量の過不足が生じて燃焼が不安定になった場合、運転員が給じん装置の周期設定値の変更や手動操作を行うことで燃焼を安定化させている。したがって、炉内の燃焼安定化は、給じん装置の手動介入の低減につながる。

1.2 従来制御の課題と対策

図 2 に蒸気量の従来制御と予測制御の概略図を示す。図 2 の上段は蒸気量のトレンドであり、下段は蒸気量に基づいた制御量のトレンドである。従来の蒸気量制御は、蒸気量の現在値に基づいて、前段の燃焼用空気流量と給じん装置の周期設定値を制御する FB 制御であった。図 2 に示すように、FB 制御では、蒸気量が減少して蒸気量設定値から逸脱した場合、蒸気量を増大させる制御が加わるが、この制御の効果が蒸気量に現れるまでには遅れが生じる。そのため、制御の効果が蒸気量に現れた時には、蒸気量は既に増大しており、制御によってさらに増大して蒸気量設定値から逸脱することがある。この対策として、蒸気量が減少して蒸気量設定値から逸脱することを予測し、蒸気量を増大させる制御を前もって加えるようにすれば、蒸気量を増大させる制御の効果が、蒸気量を増大させたい時に適切に加わる

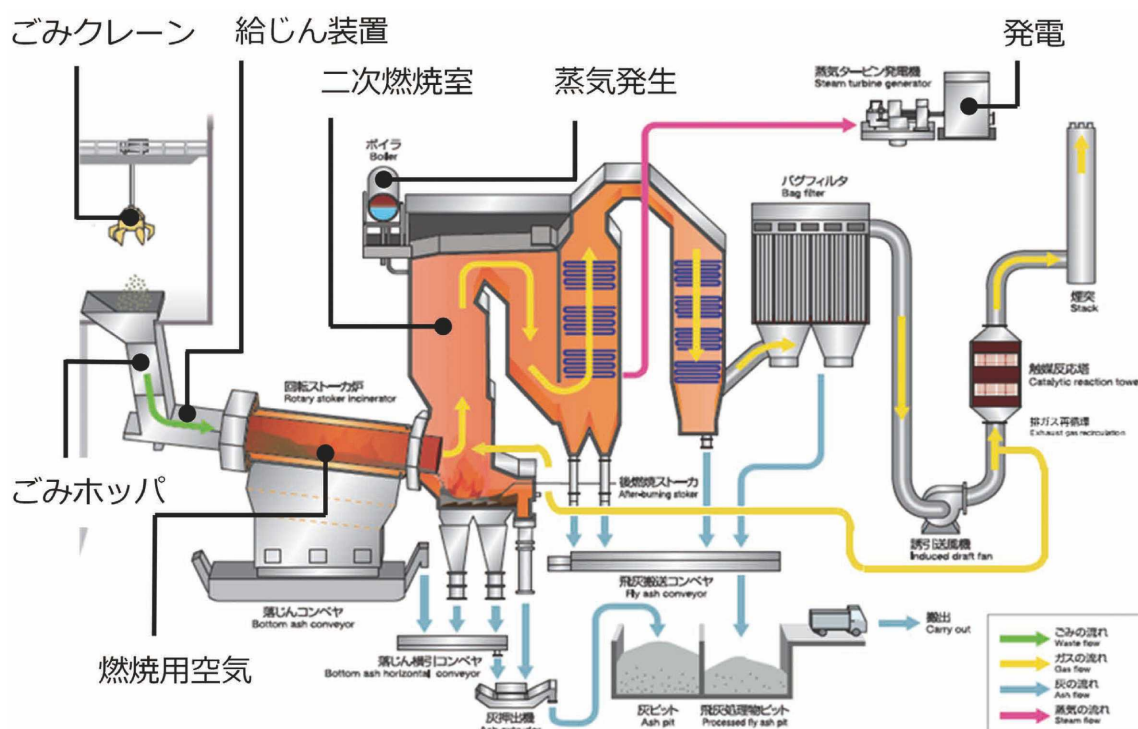


図 1 回転ストロカ炉の概要フロー

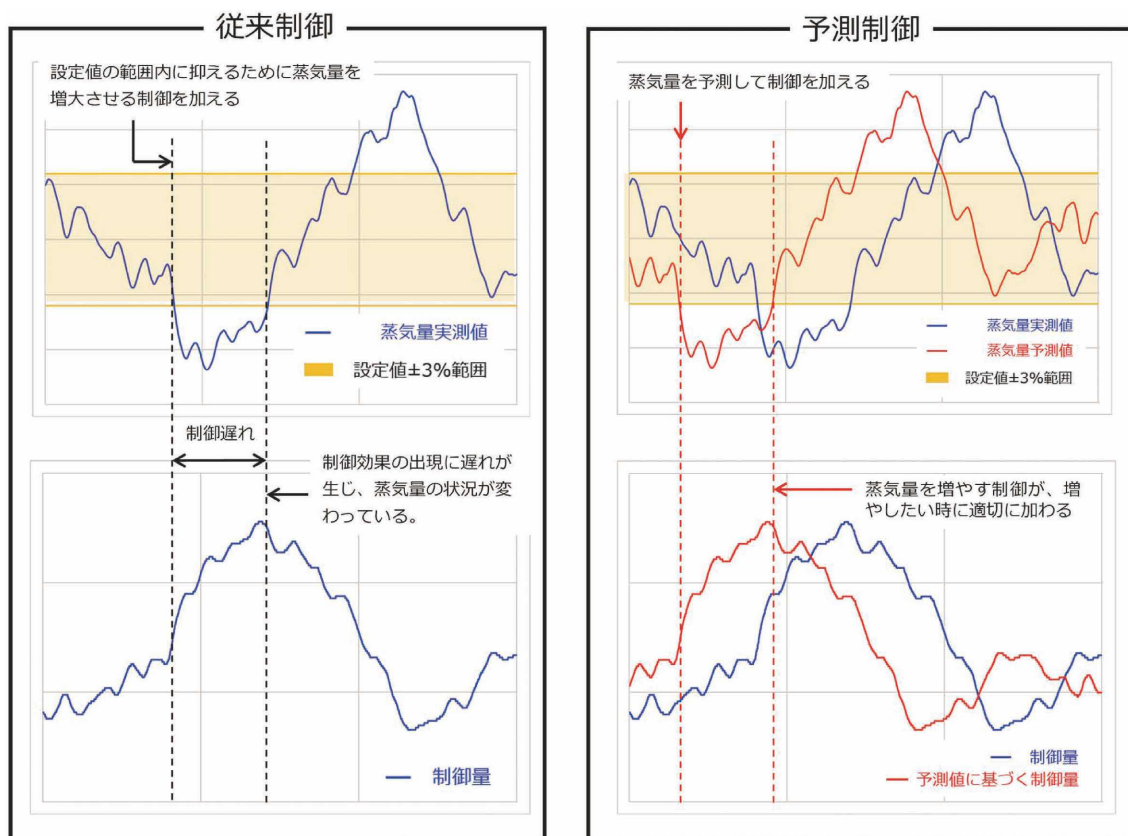


図2 従来制御と予測制御

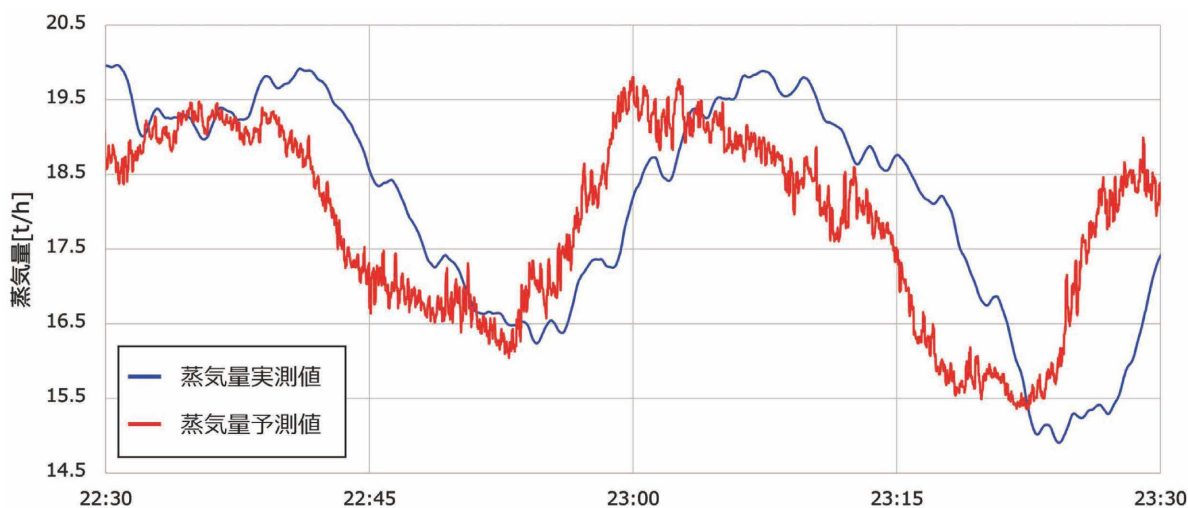


図3 蒸気量予測の一例

ようになると期待できる。

1.3 蒸気量予測制御

図3に回転ストーカー炉における蒸気量予測の一例を示す。図の青色線が蒸気量1分移動平均値の実測値であり、赤色線が蒸気量1分移動平均値の予測値である。蒸気量予測モデルの作成にあたって、二次燃焼室温度や二次空気流量などの廃棄物処理施設のプロセス情報を複数選定し、さらにこれらのラグ特徴量および移動平均特徴量を説明変数として追加したことにより、概ね蒸気量を予測できた。

図4に蒸気量予測制御の概要を示す。蒸気量予測制御では、蒸気量の予測結果に基づいて燃焼用空気流量および給じん周期設定値の制御補正量を決定し、制御補正量を従来の蒸気量制御で決定した制御量に加算する。作成した蒸気量予測モデルをこの制御に組み込み、プロセス情報をリアルタイムで蒸気量予測モデルに与えて蒸気量を予測することで、蒸気量の予測値に基づいた燃焼空気流量と給じん周期設定値の制御補正量を従来の蒸気量制御にリアルタイムで加算できるようにした。

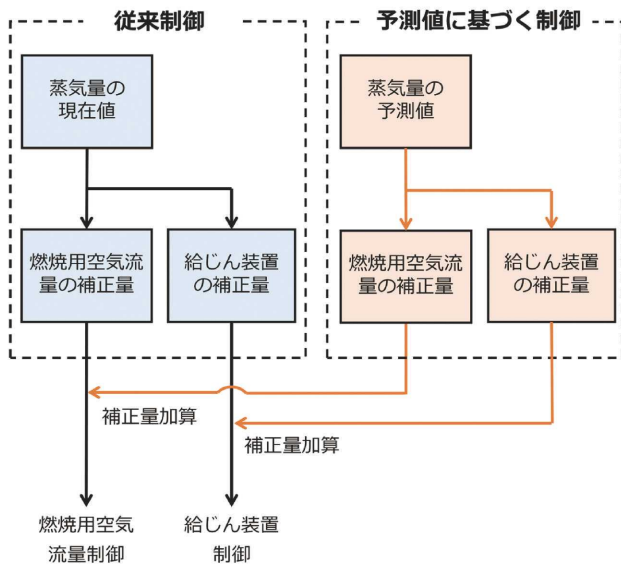


図4 蒸気量予測制御の概要

2. 実機試験

2.1 SV一定運転での蒸気量安定化

まず、蒸気量予測制御の効果を確認するため、SV一定運転時に蒸気量を連続して安定化させることを目的として、蒸気量予測制御を適用し、短期間の試験を実施した。図5に、蒸気量予測制御をSV一定運転時に適用したときのトレンドを示す。図5の青色線と橙色線はそれぞれ、蒸気量30分移動平均値と蒸気量設定値 $\pm 3\%$ を表す。蒸気量予測制御を適用することにより、蒸気量30分移動平均値が、蒸気量設定値 $\pm 3\%$ の範囲内に収まり、蒸気量のばらつきを抑制できた。

2.2 SV自動運転での蒸気量安定化

蒸気量予測制御を、SV自動運転時に適用し、長期間の試験を実施した。表1に同一期間に2炉運転

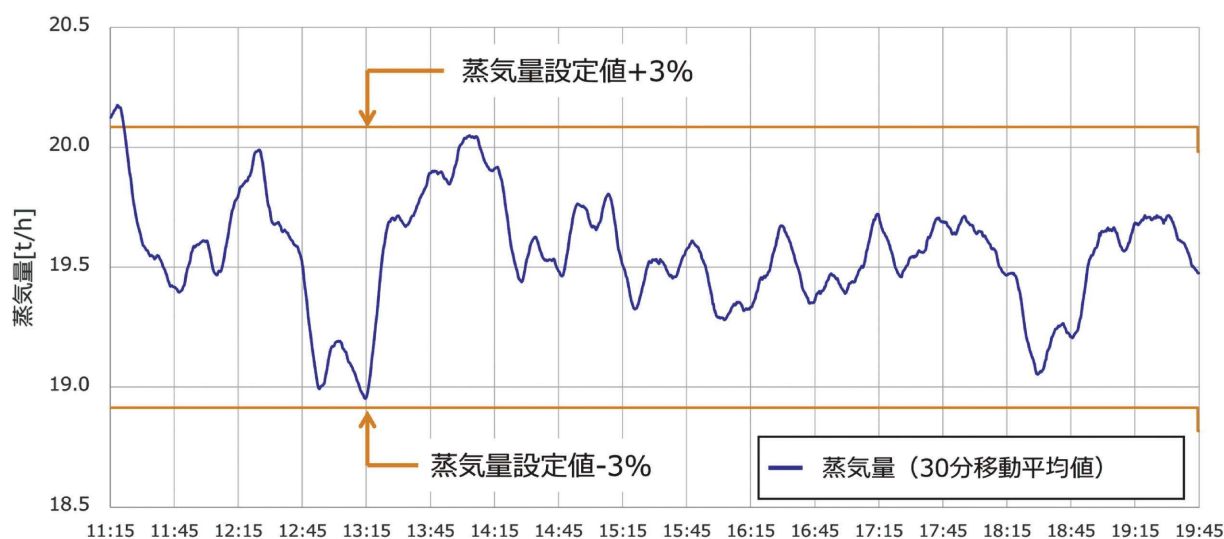


図5 SV一定運転での蒸気量トレンド

表1 蒸気量30分移動平均値の各値

		焼却炉①		焼却炉②	
		期間A	期間B	期間A	期間B
		予測制御	従来制御	従来制御	従来制御
蒸気量30分移動平均値	平均値[t/h]	19.2	20.0	19.3	20.1
	標準偏差[t/h]	0.937	1.11	1.22	1.14
	変動係数[-]	0.0488	0.0557	0.0630	0.0567
	設定値 $\pm 3\%$ に入った割合[%]	81.1	65.6	62.7	65.2

していた2つの焼却炉における、蒸気量30分移動平均値の各値を示す。表1の期間Aと期間Bは同一日数であり、連続した約1カ月間のデータを使用している。焼却炉①の期間Aでは蒸気量予測制御を適用させ、焼却炉①の期間B、焼却炉②の期間Aと期間Bでは従来制御とした。蒸気量30分移動平均値が蒸気量設定値 $\pm 3\%$ の範囲内に入った割合は、従来制御で運転した焼却炉①期間B、焼却炉②期間Aおよび期間Bでは、概ね63.0～65.0%であったが、蒸気量予測制御を適用させた焼却炉①期間Aでは81.1%となって約16.0ポイントの向上が見られた。また、蒸気量の全体としての変動について変動係数で比較すると、蒸気量予測制御を適用した焼却炉①期間Aが最も小さくなった。つまり、蒸気量予測制御の適用により蒸気量30分移動平均値が蒸

気量設定値 $\pm 3\%$ に入る割合が増大したことに加え、蒸気量の全体としてのばらつきが小さくなったといえる。

図6に、SV自動運転において蒸気量予測制御を適用したときの蒸気量30分移動平均値のトレンドを示す。図6の青色線と橙色線はそれぞれ、蒸気量30分移動平均値と蒸気量設定値 $\pm 3\%$ を表す。蒸気量予測制御を適用することで、蒸気量設定値が変動する運転条件下においても、最大で連続19時間、蒸気量設定値 $\pm 3\%$ の範囲内に蒸気量30分移動平均値を安定化させることができた。

2.3 二次燃焼室の燃焼安定化

表2に表1と同一期間における二次燃焼室温度の各値、給じん周期設定値の手動変更回数および給じん手動操作回数を示す。試験を実施した当該施設は

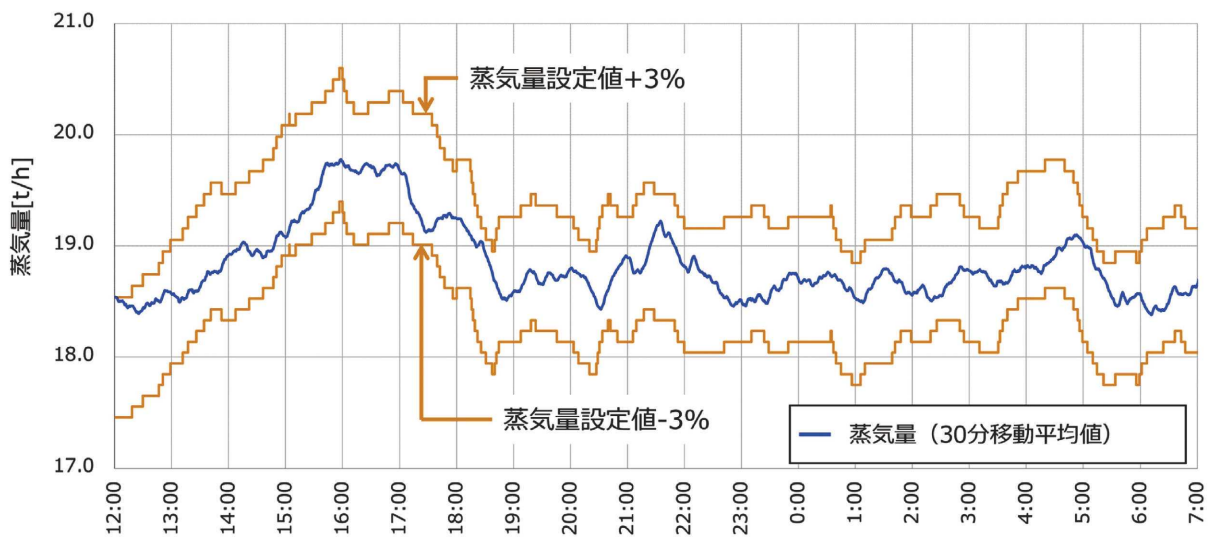


図6 SV自動運転での蒸気量トレンド

表2 二次燃焼室温度と給じん手動介入の各値

		焼却炉①		焼却炉②	
		期間A	期間B	期間A	期間B
		予測制御	従来制御	従来制御	従来制御
二次燃焼室 温度	平均値[℃]	947	948	943	950
	標準偏差[℃]	10.8	14.2	18.4	14.4
	変動係数[-]	0.0115	0.0150	0.0195	0.0152
	890℃を下回った 回数[回/日]	0.26	0.96	1.7	0.48
給じん手動 介入	給じん周期設定値の 手動変更回数[回/日]	0.037	0.30	0.30	0.26
	給じん手動操作回数 [回/日]	0.037	0.93	0.037	0.33

二次燃焼室温度890℃以上を1つの監視基準としていることから、二次燃焼室温度が890℃を下回ったときの回数で比較したところ、従来制御では概ね0.50～1.7回/日であったのに対して、蒸気量予測制御を適用させたときでは0.26回/日といずれの従来制御時よりも減少した。二次燃焼室温度の変動係数は、従来制御では概ね0.0150～0.0200だったことに対して、蒸気量予測制御を適用したときでは0.0115に低下することも確認できた。このことから、蒸気量の予測制御により蒸気量が安定するとともに、二次燃焼室温度も安定させることができたといえる。

給じん周期設定値の手動変更回数は、従来制御では概ね0.26～0.30回/日だったが、蒸気量予測制御を適用させたときでは0.037回/日と従来制御よりも減少した。給じん手動操作回数については、期間Aにおける焼却炉①の蒸気量予測制御と焼却炉②の従来制御では同等であるが、同じ焼却炉で比較した場合、期間Aと期間Bの給じん手動操作回数の差は、蒸気量予測制御を適用した焼却炉①では約0.89回/日、焼却炉②では約0.30回/日であり、蒸気量予測制御を適用したときの方が、手動操作回数がより低減した。ただし、差分は丸める前の値から算出した。蒸気量予測制御により給じん操作が従来のFB制御よりも先行して行われたことで、従来のFB制御で見られた操作遅れによる変動が低減されたことが、これらの手動操作回数の低減につながったと考えられる。

む す び

当社の回転ストーカ炉における蒸気量の安定化を目的として、未来の蒸気量の予測に基づいて制御する蒸気量予測制御を廃棄物処理施設に導入した。

蒸気量予測制御をSV一定運転時に適用した結果、蒸気量30分移動平均値を蒸気量設定値±3%の範囲内に連続して抑制することができた。

蒸気量予測制御をSV自動運転時に適用した結果、蒸気量30分移動平均値が蒸気量設定値±3%の範囲内に入った割合について、蒸気量予測制御を適用したときは約81.1%となり、従来制御時と比較して約16.0ポイントの向上が見られた。蒸気量30分移動平均値は、最大で19時間連続で蒸気量設定値±3%の範囲内で安定化した。燃焼安定化効果については、二次燃焼室温度の変動が小さくなり、基準値以下への低下回数が減少した。また、運転員による給じん手動介入の回数も低減できた。

廃棄物の種類の変化などの影響で、焼却炉の燃焼安定化は今後さらに重要になると予想される。当社では、さらなる技術開発に取り組み、回転ストーカ炉の燃焼性能を高めていく所存である。

[参考文献]

- 1) 環境省：プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律の概要（2021），<https://www.Env.Go.jp/content/000050286.pdf>
- 2) 鈴木崇之ほか：神鋼環境ソリューション技報，Vol.19，No.1（2022），p.26-30

廃棄物からの貴金属回収の効率化

Improving the Efficiency of Precious Metal Recovery from Waste

立見友幸*・藤田 淳** (技術士(衛生工学部門))・石井 豊***・栗須祥寛****・森茂真菜****
藺田雅志**** (技術士(衛生工学部門))

Tomoyuki Tachimi・Jun Fujita・Yutaka Ishii・Yoshihiro Kurisu・Mana Morishige・Masashi Sonoda

当社の主力設備のひとつである流動床式ごみ焼却炉において、流動床炉の底に残存する砂（炉底砂）に貴金属が濃縮し、その金濃度は数百～数千 mg/kg と非常に高濃度であることを前回紹介した¹⁾。今回は、貴金属を再利用する資源循環および施設の収入増加に貢献するため、貴金属が炉底砂中で濃縮するメカニズムや廃棄物に含まれる貴金属の由来を調査し、貴金属濃度の高い炉底砂を回収する方法を見出した。

In our previous report, we explained that precious metals are found in the bed sand remaining at the bottom of the fluidized bed furnace, and that the gold concentration in the bed sand is very high, ranging from hundreds to thousands of mg/kg. In this report, we present our findings on a mechanism to accumulate precious metals in the bed sand, the origin of the precious metals contained in the waste, and the efficient method of recovering the bed sand, in order to achieve resource recycling and improve the facility's profitability.

Key Words :

流	動	床	Fluidized bed
炉	底	砂	Bed sand
熱	処	理	Thermal treatment residues
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、金や銀、白金等の貴金属の需要増加に伴い貴金属価格が高騰しており、貴金属を効率的に回収し再利用する資源循環の需要が高まっている。また、当事業に関連する廃棄物処理分野でも、廃棄物からの貴金属回収ニーズが顕在化している。

当社製品である流動床式ごみ焼却炉のうち、空気分散板方式を採用の炉においては、炉を立下後に空気分散板の空気ノズルよりも下方の不動層に残った砂（炉底の分散板上に残存して堆積している砂。以下、「炉底砂」という）の中に、投入ごみ由来の金や銀が一定濃度で含まれることが分かっている。当社が納入した流動床炉を有するごみ処理施設のうち、炉底砂中の金濃度が数十～数千 mg/kg のレベルで検出されている施設では、精錬事業者による炉底砂の有価引取を開始しており、各施設の収入増に貢献している。

一方、上記施設のうち、一部では貴金属濃度が引取基準未満となり炉底砂を引取できなくなることがあるなど、上記以外の施設では常に貴金属濃度が低

*環境エンジニアリング事業本部 環境プラント事業部 プラント技術部 機能開発室 **技術開発センター 技術開発部
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 基盤技術室
*****環境エンジニアリング事業本部 環境プラント事業部 アフターサービス部

いため有価物としての引取自体ができない状況にある。これらは、貴金属が砂層中で濃縮・分布するメカニズムを十分把握できていないこと、砂層に含まれる貴金属がどのような廃棄物に由来するのか不明であることに起因すると考えられる。

本開発では、目的である貴金属の資源循環および施設の収入増加に貢献するため、貴金属が炉底砂中で濃縮するメカニズムや廃棄物に含まれる貴金属の由来の明確化、効率的な炉底砂回収方法の確立に取り組んだ。

1. 貴金属が濃縮するメカニズムの調査

1) 流動層中の貴金属分布の把握

ベンチ実験装置を用いて、流動層内における貴金属の挙動を調査した。図1に流動層内の金の濃度分布を示す。RUN1（処理時間：4 h）では金の偏在は見られず、分析検出下限値である1 mg/kg 付近で均一に分布していた。一方、RUN2（処理時間：24 h）では、上層で不検出だった金が、下層では約3 mg/kg 検出されており、金濃度は炉底に近づくにつれ高くなる傾向が確認された。図2に示すように長時間の

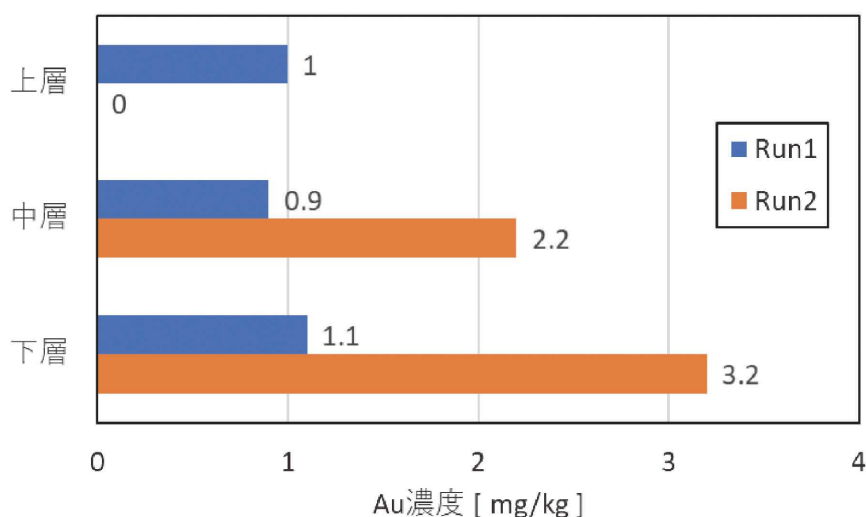


図1 ベンチ実験後の流動砂中 Au 濃度

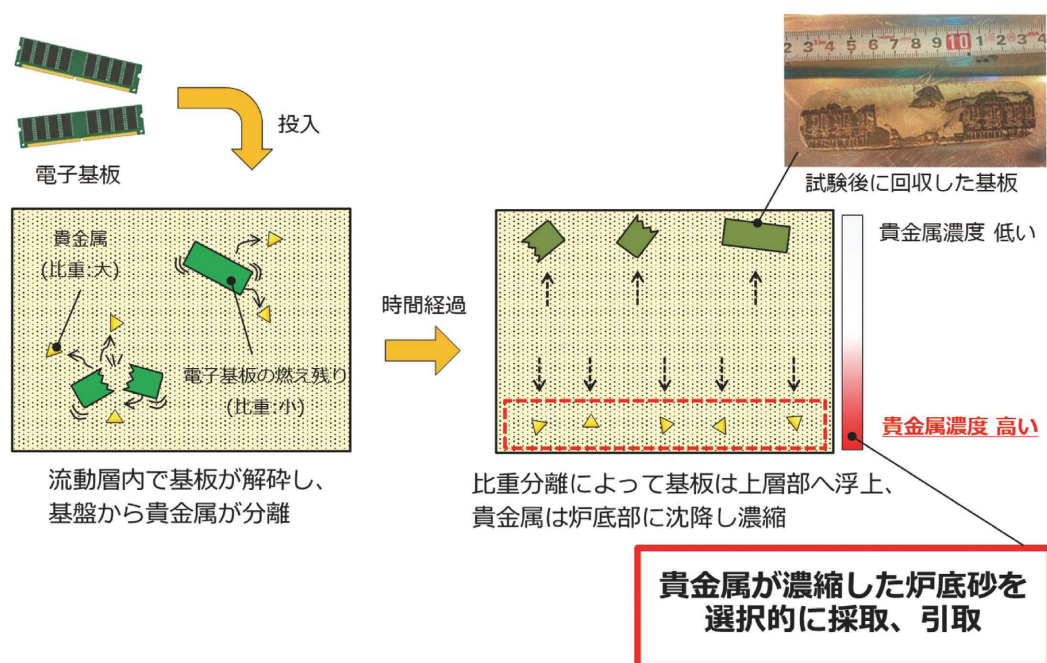


図2 電子基板中の貴金属が流動砂中で濃縮する想定メカニズム

流動によって被処理物の破碎が進行し、金が下層に沈降し濃縮することが実験的に示唆された。

2) 実炉の炉底砂における貴金属分布の把握

実機において、図3に示す6箇所の炉底砂を採取し、金の濃度分析を調査した。図4に施設A、施設Bにおける流動層の金の濃度分布を示す。施設Aにおいては、金濃度はごみ投入口付近が最も高くなった。一方、施設Bにおいては、施設Aのような金の偏在は見られなかった。

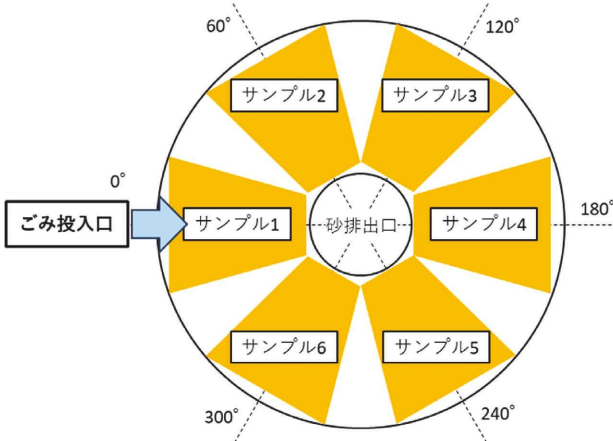


図3 炉底砂の採取場所 - 平面図
(サンプル1～6の計6箇所)

また、施設Aではごみ投入口付近の炉底砂の上層部分に厚さ数十mm程度の亜鉛の塊と、釘やねじ等の細長い金属部品の堆積が確認されたが、施設Bではそれらを確認できなかった。このことから、施設Aでは投入された金属部品中のはんだ等の亜鉛が熔融され炉底部に沈下・滞留し、滞留した熔融亜鉛によって金属部品が捕縛され、堆積したと推察する。さらには貴金属も金属部品と同様にごみ投入口付近の炉底砂に捕縛されたことで、金の濃度分布に差異が生じたと考える。

3) 引取対象拡大の可能性検討

現在の引取対象であるAu、Ag以外の貴金属として、近年市場価格が高騰しているPd、Ptについても引取対象となり得るか検討した。表1に施設Bの炉底砂の貴金属の分析結果を示す。引取業者へヒアリングを行い、Pd、Ptについても数十mg/kgオーダーにおいても引取対象となることを確認した。

2. 効率的な流動砂からの貴金属回収方法

施設Aにおいてごみ投入口付近の炉底砂の金濃度が高かったことから、高濃度の炉底砂を選択的に回収することで、余分な運搬費や精製費等が抑えられ、買取額が上昇することが期待される。回収する範囲を①炉底砂全体（従来の方法）、②ごみ投入口

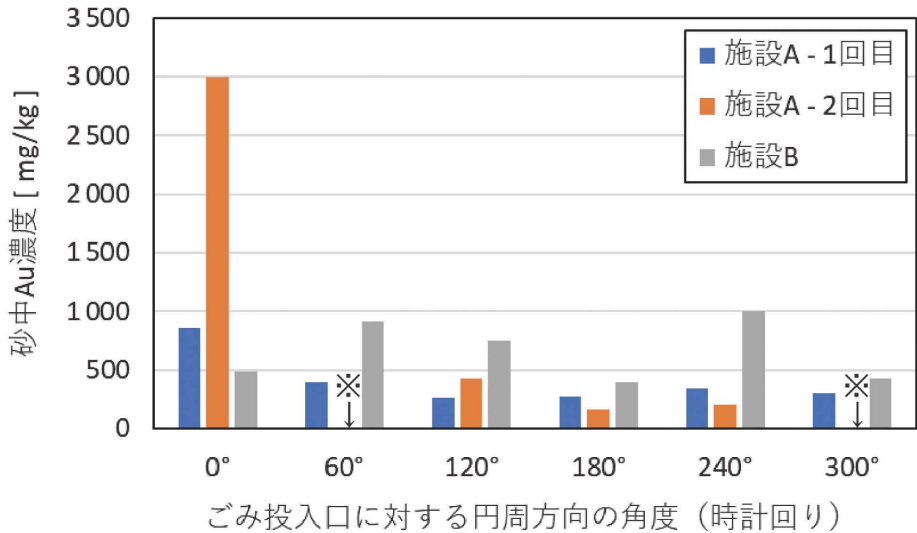


図4 炉底砂中のAu濃度の比較 (施設A-2回目の“※印”は分析せず)

表1 施設Bにて炉底砂中に含まれる各成分の分析結果

成分 [単位]	Au [mg/kg]	Ag [mg/kg]	Pd [mg/kg]	Pt [mg/kg]	Cu [%]
分析値	310	612	25	92	2.9

付近のみ、③ごみ投入口を中心に半周分とした場合においてFSを実施した結果、③半周分を回収した場合において従来よりも効率的に貴金属を回収できることが示唆され、従来よりも3倍程度買取額が上昇すると試算された。

3. 貴金属回収に有効なごみ条件の判定方法

文献調査^{2,3)}より、焼却炉に投入される小型家電の量が多いほど炉底砂中に貴金属が高濃度で存在する可能性が高いと考え、それらがごみ焼却炉へ投入される度合いを「小型家電投入ポイント」として施設毎に数値化し、炉底砂中の貴金属濃度との相関を調査した。小型家電投入ポイントは、小型家電リサイクル法に該当する90品目（PC類除く）が自治体のごみの仕分けルールにおいてそれぞれが何ごみに分類され、さらに、施設内で金属ごみとしてどの程度選別されているかを考慮して算出したものであり、例えば、小型家電90品目のほとんどが燃えるごみとして分類され、そのまま炉に投入される施設においてはポイントが高くなり、小型家電の分別回収や手選別によってそれらが炉に投入されにくい施設においてはポイントが低くなるように計算式を設計

した。

図5に調査結果を示す。小型家電投入ポイントと流動砂中Au濃度に一定の相関があることから、小型家電投入ポイントの試算により炉底砂中Au濃度をある程度予測可能であることが示唆された。

む す び

流動床炉内で貴金属が濃縮するメカニズムを調査し、炉底砂からの貴金属回収方法を効率化した。また、Pd、Ptも引取対象となることを確認したことから、施設の収入の向上が見込まれる。今後も貴金属回収技術をブラッシュアップさせ、資源循環に貢献していきたい。

[参考文献]

- 1) 谷田ほか：廃棄物からの貴金属回収，神鋼環境ソリューション技報，Vol.18 No.1（2021）
- 2) 村上進亮ほか：焼却残渣に含まれる金属資源の由来，廃棄物資源循環学会誌，Vol.29 No.5（2018）
- 3) 川口光夫ほか：廃電気電子製品（ノートPC，プリンター，TV）の基板中の金属量調査，第20回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，pp.175-176（2009）

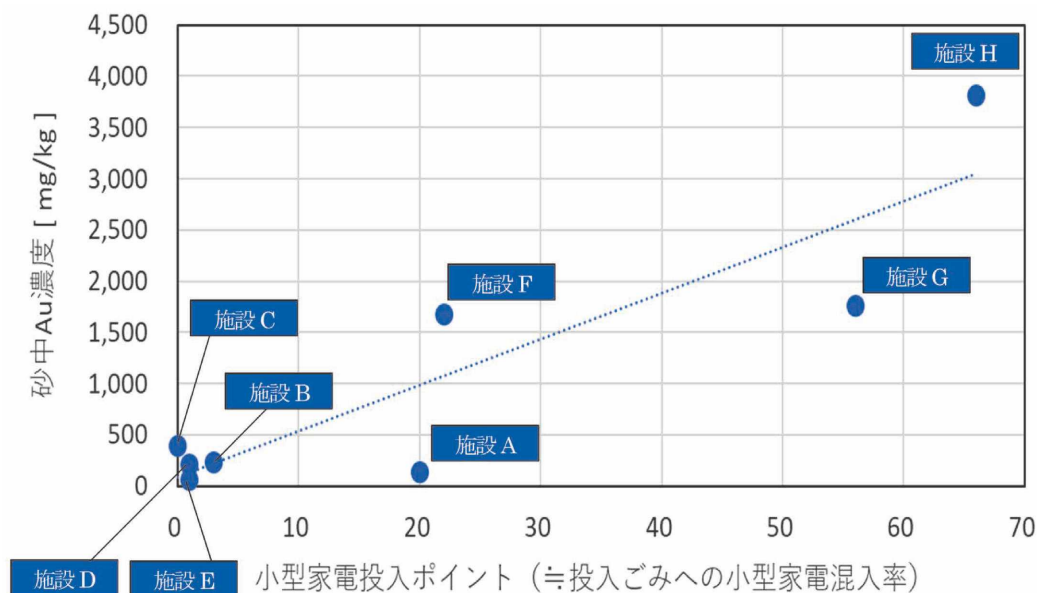


図5 小型家電混入率と砂中Au濃度の相関

多機能グラスライニング HybridGL[®] の新製品 HYX-E95[®], HYX-HE95[®]

New multifunctional glass-lining HybridGL[®] HYX-E95[®] and HYX-HE95[®]

多田篤志*・岡井光信**・前背戸智晴*** (工学博士)・宮内啓隆****・香川博行*

Atsushi Tada・Mitsunobu Okai・Tomoharu Maeseto・Hiroataka Miyauchi・Hiroyuki Kagawa

当社は2017年に二種類の機能を備えた世界初のハイブリッドグラス HYX（ハイクロス）シリーズを上市した。これまで HYX-HE[®]（高伝熱性＋耐静電気）、HYX-HP[®]（高伝熱性＋医薬向／視認性・洗浄性）、HYX-H95[®]（高伝熱性＋低溶出性）の3つの組み合わせのハイブリッドグラスを商品化しているが、今回新しい組み合わせである HYX-E95[®]（耐静電気＋低溶出性）の開発に成功、さらにその成果を活用して三種類の機能を備えた HYX-HE95[®]（高伝熱性＋耐静電気＋低溶出性）の開発に成功した。

In 2017, we started sales of the first hybrid glass HYX series with two types of functions. So far, we have commercialized hybrid glass types in three combinations: HYX-HE[®] (high thermal conductivity and antistatic properties), HYX-HP[®] (high thermal conductivity, visibility and washability suitable for pharmaceutical production), and HYX-H95[®] (high thermal conductivity and low elution). This time we have succeeded in developing a new combination, HYX-E95[®] (antistatic properties and low elution), and the next-generation hybrid glass HYX-HE95[®] with three functional characteristics: high thermal conductivity and antistatic properties and low elution.

Key Words :

ハイブリッドグラス	Hybrid glass-lining
耐 静 電 気 グ ラ ス	Antistatic glass
医 薬 向 グ ラ ス	Pharmaceutical glass
低 溶 出 グ ラ ス	Low elution glass
高 伝 熱 グ ラ ス	High thermal conductivity glass
複 層 グ ラ ス 構 造	Multi-layered glass lining

【セールスポイント】

HYX-E95

- ・ 9500の低溶出性に ECOGL II 耐静電気性を付与したグラス、電材用途で耐静電気対策が可能
- ・ 標準グラス9000よりも耐食性にも優れており、より幅広い用途に対応可能

HYX-HE95

- ・ これまでにない高伝熱性と耐静電気性と低溶出性の3つの機能を備えたグラス
- ・ 低溶出が必要な用途で耐静電気対策を実施、かつ加熱冷却時間を短縮することで生産性が向上

HYX シリーズ

- ・ 高伝熱性、耐静電気性、医薬向け／視認性・洗浄性、低溶出性を、ユーザのニーズにあわせて機能の組合せ可能
- ・ HYX-HE, HYX-HP, HYX-H95は、内容物に接液する表層グラスが、実績のある機能性グラス（ECOGL II, PPG, 9500）であり、過去の実績を重視するユーザにも採用が容易。

*プロセス機器事業部 生産部 製造室 **プロセス機器事業部 技術部 開発室 ***プロセス機器事業部 事業推進部 ****プロセス機器事業部 品質保証室

まえがき

グラスライニング（Glass lining, 以下 GL）とは素地金属上に高耐食性のガラス層をライニングすることによって、ガラスの耐食性と鋼の強靱性を兼ね備えた複合材料であり、腐食性の強い製造・反応プロセスで使用可能な耐食材料である。当社は、化学・医薬プラントなどで使用される GL 製反応機、貯槽、熱交換器、粉体機器などを製造・販売する GL 事業を実施しており、創業より70年以上にわたって、GL 機器のトップメーカーとして、国内外の化学産業に携わり、ともに歩んできた。

GL 機器は古くは醸造等の食品市場、石油化学市場向の用途が主であったが、現在はファインケミカル、電材、医薬市場向が主な用途となっており、用途の移り変わりにともなって、GL 機器に求められる性能も変化し、ガラスの耐食性、洗浄性はもちろんのこと、プラスアルファの機能性が求められるようになった。

国内 GL トップメーカーの当社にはユーザから多様なニーズが寄せられ、ガラスの耐食性向上に加えて、図1のように様々な機能を備えたガラスを商品化してきた¹⁾。現在、当社が製造する GL 機器の半数以



図1 機能性ガラス開発の系譜



図2 HybridGL® ブランドロゴ

上が機能性ガラス仕様の機器であり、機能性ガラスは一部のユーザの要望ではなく、市場全体から求められるようになったと考えられる。

当社では、業界に先駆けて二種類の機能を備えたハイブリッドガラス（HYX シリーズ）を商品化し、HYX シリーズのラインナップの拡充を図っている。さらに『今後、グラスライニングはハイブリッドの時代になる』との思いから、認知度の向上を図り、性能を実感してもらい、信頼を得ることを目的として、ハイブリッドガラス（HYX シリーズ）を「HybridGL®」としてブランド化し、ロゴ（図2）を制定して、拡販活動を開始した。

本稿では、ハイブリッドガラス開発の経緯と最新の HYX シリーズである HYX-E95と HYX-HE95を紹介する。

1. HYX シリーズ組合せ拡大の歩み

1.1 複層ガラス構造の採用

当社の機能性ガラスの大きな特徴として、異なる種類のガラスを積層して施工する複層ガラス構造がある。耐静電気ガラス ECOGL を商品化する際に採用した構造であり、絶縁性の標準ガラス（9000）の表層に導電性ガラスを施工することによって（表1-b）、発生した静電気を逃がすだけでなく、静電気放電に対して強い耐性を備える（図3）という他社の耐静電気ガラスにない特性を有した耐静電気ガラスとなっている²⁾。

この構造は当社独自の構造であり、ECOGL を他社製品と差別化したとともに、後の機能性ガラスの開発、更には HYX シリーズの開発に活かされている。高伝熱性ガラス9000HT II は、この複層ガラス

表1 ECOGL II, 9000HT II の複層ガラス構造 断面模式図

種類	a) 標準ガラス	b) 耐静電気ガラス	c) 高伝熱ガラス
名称	9000	ECOGL II	9000HT II
断面構造			
特長	・耐食性のバランスが優れた当社の標準ガラス	・表層を導電性にする事で静電気放電への耐性を強化	・下層高伝熱化+ガラス厚み調整 ⇒ U値×1.5倍 ・表層は実績ある9000ガラス

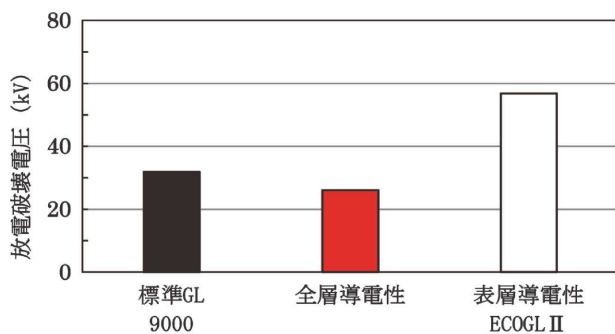


図3 グラス構造による耐放電破壊性の違い

構造に着想を得て、高伝熱ガラスの表層に標準ガラスを施工するという構造で商品化した(表1-c))。このような構造にすることによって、水の昇温時間が約30%短縮、総括伝熱係数(U値)が9000比で約1.5倍(図4)に伝熱性を向上させることが可能になったとともに、接液部のガラスがこれまで使用実績の多い9000であるため、ガラス材質の変更によるプロセスへの影響を考慮する必要がないガラスとなっている²⁾。そのためガラスの使用実績を重要視するユーザにおいても採用頂くハードルが低くなり、高伝熱による生産性向上の効果を容易に享受頂くことが可能な商品となった。

1.2 HYX シリーズへの発展

機能性ガラスの種類は増加したが、それとともにお客様の要望・ニーズも多岐にわたり、一つの機能性ガラスでユーザの要望を満足することは難しくなってきた。そのような要望に応えるために、二つの機能を備えた新ガラスの開発を開始した。

二種類の機能を備えたガラスを零から開発するには長期の開発が必要となるが、9000HT IIの構造を参考に複層ガラス構造を利用して、二種類の既存ガラスを改良して積層することによって、比較的短期間で二つの機能性ガラスをハイブリッド化することが可能になる。そこでまずは広い分野でニーズがある高伝熱性と別の機能性をハイブリッド化するべく、9000HT IIの表層ガラスを9000から別の機能性ガラスに変更することを検討した。

異なるガラスを積層する技術はECOGL IIの商品

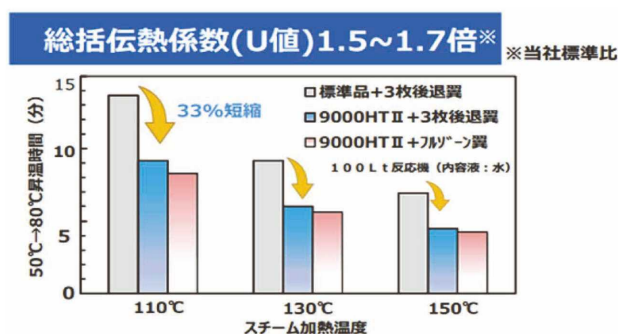


図4 9000と9000HT IIの昇温所要時間の比較
各スチーム温度にて水100 Lを50℃から80℃に昇温するために要した時間

化、生産によって培われていたが、ガラス厚みが厚いと伝熱性が悪化するため、高伝熱性を担保するには施工するガラスの厚みを一定範囲に調整する必要がある。標準ガラスより施工が難しい機能性ガラスの厚みを0.1 mm単位でコントロールしながら積層施工することは容易ではなく、実験室レベルのサンプルを完成させることはできたとしても、10 m³以上のサイズの実機に対して複層ガラス構造を再現することは非常に高いハードルであった。

しかしながら、当社の技能者の優れたガラス施工技術と焼成技術、高伝熱ガラスの配合を調整したうえで、施工テストを繰り返すことによって、実機への施工が可能となり、世界初の二種類の機能を備えたハイブリッドガラスHYXシリーズを2017年に商品化するにいたった。

当社では2017年の上市以降、これまでにHYXシリーズのラインナップとして、表層ガラスを導電性ガラス(ECOGL II)にした『高伝熱性 + 耐静電気性 (HT II + ECOGL II)』のHYX-HE (表2-d)), 表層ガラスを医薬向ガラス(PPG)にした『高伝熱性 + 医薬向/視認性・洗浄性 (HT II + PPG)』のHYX-HP (表2-e)), 表層ガラスを低溶出ガラス(9500)にした『高伝熱性 + 低溶出性 (HT II + 9500)』のHYX-H95 (表2-f))と、高伝熱性を基本とした3種類の組合せを商品化した。図5に示す通り、HYX-HE, HP, H95いずれのガラスも、ハイブリッ

表2 HYXシリーズの複層ガラス構造 断面模式図

種類	c) 高伝熱ガラス	d) 高伝熱+耐静電気ガラス	e) 高伝熱+医薬向ガラス	f) 高伝熱+低溶出ガラス
名称	9000HT II	HYX-HE (HT II + ECOGL II)	HYX-HP (HT II + PPG)	HYX-H95 (HT II + 9500)
断面構造				
特長	- 下層高伝熱化+ガラス厚み調整 ⇒ U値×1.5倍 - 表層は実績ある9000ガラス	- 下層高伝熱化+ガラス厚み調整 ⇒ U値×1.5倍 - 表層はECOGL II 用導電性ガラス	- 下層高伝熱化+ガラス厚み調整 ⇒ U値×1.5倍 - 表層は医薬向ガラス (PPG)	- 下層高伝熱化+ガラス厚み調整 ⇒ U値×1.5倍 - 表層は低溶出ガラス (9500)

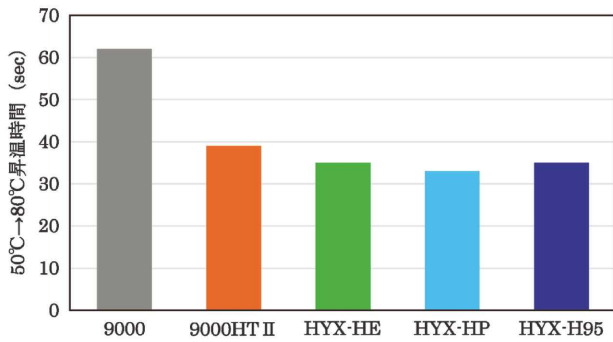


図5 9000、9000HT IIとHYXシリーズの所要昇温時間の比較
80×80×6t炭素鋼板に各ガラスを施工したサンプルをホットプレート上で加熱した際の表面温度を測定
サンプル表面温度が50℃から80℃に到達するまでの時間を比較

ド化したうえで9000HT IIと同等の高伝熱性を担保できていることがわかる³⁾。

2. 新たなHYXシリーズの開発

2.1 HYX-E95 (耐静電気性+低溶出性)

高伝熱性と他の主要な機能性の組合せの商品化が完了したことから、次の段階として残る三種類の機能性(耐静電気性、医薬向/視認性・洗浄性、低溶出性)の組み合わせの検討を開始した。特に溶剤等が使用される分野においては静電気対策が求められるが、同時に製品の純度を向上させるため低溶出性を求められるニーズが増加している。このような要求に対応するため『耐静電気性+低溶出性(ECOGL II+9500)』HYX-E95を優先して商品化することにした。

このガラスがこれまでのHYXシリーズと大きく異なるのは、接液部のガラスが従来のガラスではなく、新たなガラスになることである。ECOGL IIの静電気放電に対する耐性が強いという特性を担保するため、基本構造はECOGL IIと同様に絶縁性ガラスの表層に導電性ガラスを施工する必要がある(表3-g)、更に内容液に接する導電性ガラス部分は低溶出性能を担保する必要がある。

そのため新たな導電性ガラスを開発するべく、低溶出ガラス(9500)をベースとして導電性物質を添

加することを検討した。9500ガラスの成分調整、導電性物質の添加量の調整を重ねた結果、静電気を逃がすための導電性と、低溶出性を両立した新しい導電性低溶出ガラスの開発に成功し、新しいHYXシリーズHYX-E95の商品化に至った。表4、図6、に示すとおりHYX-E95は、ECOGL IIと同等の表面抵抗率、9500と同レベルの低溶出性を示すことがわかる。

2.2 HYX-HE95(高伝熱性+耐静電気性+低溶出性)

新しい導電性低溶出ガラスが開発できたことによって、HYX-E95の下層の絶縁性ガラスを高伝熱ガラスに置換える(表3-h))ことで、高伝熱性、耐静電気性、低溶出性の3種の機能性を備えたガラスを実現できる可能性が高くなった。これまで2種類の機能性を組合せることで、ユーザのニーズに合わせた最適な組合せを提案していたが、3種類の機能を組合せることができれば、一つのガラスでより広い範囲の要望に対応することが可能になり、HYXシリーズは新しい段階に進化することとなる。

実現化の検討に際しては、個々の要素となる機能性ガラスは既に完成しているため、それらを複層ガラス構造で組合せることができれば良いが、高伝熱

表4 HYX-E95の低溶出+導電性ガラスの表面抵抗率

ガラス	表面抵抗率(Ω/□)
9000	$>10^{13}$
ECOGL II	$10^9 \sim 11$
HYX-E95	$10^9 \sim 11$

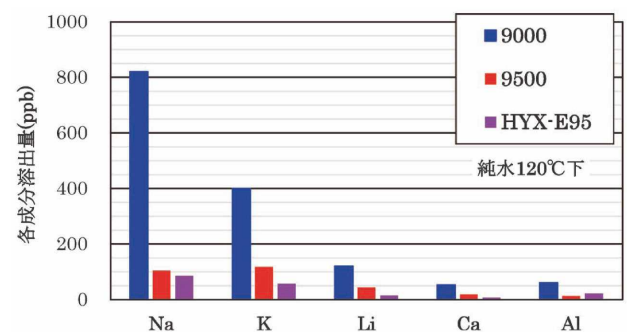


図6 HYX-E95と9500、9000の溶出性比較

表3 HYX-E95、HYX-HE95開発の流れ 断面模式図

種類	b) 耐静電気ガラス	g) 耐静電気+低溶出ガラス	c) 高伝熱ガラス	h) 高伝熱+耐静電気+低溶出ガラス
名称	ECOGL II	HYX-E95 (ECOGL II + 9500)	9000HT II	HYX-HE95 (HT II + ECOGL II + 9500)
断面構造				
特長	・表層を導電性することで静電気放電への耐性を強化	・導電性+低溶出ガラスを表層施工して静電気放電への耐性を担保	・下層高伝熱化+ガラス厚み調整 → U値×1.6倍 ・表層は実績ある9000ガラス	・下層高伝熱化+ガラス厚み調整 → U値×1.6倍 ・表層は導電性+低溶出ガラス



図7 HYX-HE95® の性能概要

性を追加するためには、先述したとおりガラスの厚みを一定範囲に調整する必要がある。

施工に関しては、当社が保有するガラスで最も施工難度の高いガラスとなり、実際に15 m³サイズの実機で施工テストを実施し、問題点を検証した結果、施工可能であることを確認した。その結果『高伝熱性 + 耐静電気性 + 低溶出性 (HT II + ECOGL II + 9500)』の3つの機能性を備えた新たなHYXシリーズHYX-HE95を商品化するに至った。図7にHYX-HE95の性能概要を示す。

むすび

HYXシリーズ開発の流れから、今春上市したHYX-E95, HYX-HE95の開発の経緯とその性能について紹介した。

HYX-E95, HYX-HE95については、上市後間もないが、ユーザから高評価をいただき、既に一号基の注文を頂くにいたった。直近ではGL機器全体の約1/3以上においてHYXシリーズを採用頂くほど好評頂いている。特にHT II, ならびに高伝熱性を追加したHYXシリーズは、顧客の生産性が向上することで省エネを推進し、脱炭素社会の実現に貢献する商品であり、当社からもご採用頂くことを強く推奨している。

HYXシリーズは、今後も『医薬向 / 視認性・洗浄性 + 低溶出性 (PPG+9500)』などのさらなるラインナップの拡充を計画しているが、それ以外にもユーザの要望をいち早くキャッチし満足いただけるような製品づくり、顧客の効率的な生産活動への寄与を通じた社会への貢献ができるような製品づくりを実践していく所存である。

[参考文献]

- 1) 宮内啓隆ほか, グラスライニング創業70周年を迎えて, 神鋼環境ソリューション技報, Vol.13, No.1, (2016), p.2-14
- 2) 椿野直樹ほか, 最新のグラスライニング (2018年), 神鋼環境ソリューション技報, Vol.14, No.2, (2018), p.29-32
- 3) 前背戸智晴ほか, HybridGL® 新製品 HYX-H95®, 神鋼環境ソリューション技報, Vol.19, No.1, (2022), p.14-16

食品廃棄物のメタン発酵リサイクル施設 「バイオガス KOBE」 完成

神戸環境クリエート（株）と当社の共同出資により設立された株式会社コベックより、2022年4月に受注したバイオガス KOBE は、受入設備からメタン発酵、汚泥処理、排水処理、ガスの脱硫まで行い、神戸環境クリエート（株）が運営するバイオガス発電施設にガスを供給する設備です。メタン発酵槽の容量は、3 000 m³で、一日の最大受入量は58 t/日、バイオガス発生量は258 Nm³/h を計画しています。発生したバイオガスは脱硫処理後、バイオガス発電機に利用し、余った熱はメタン発酵槽の加温に使用することでエネルギーを有効活用します。

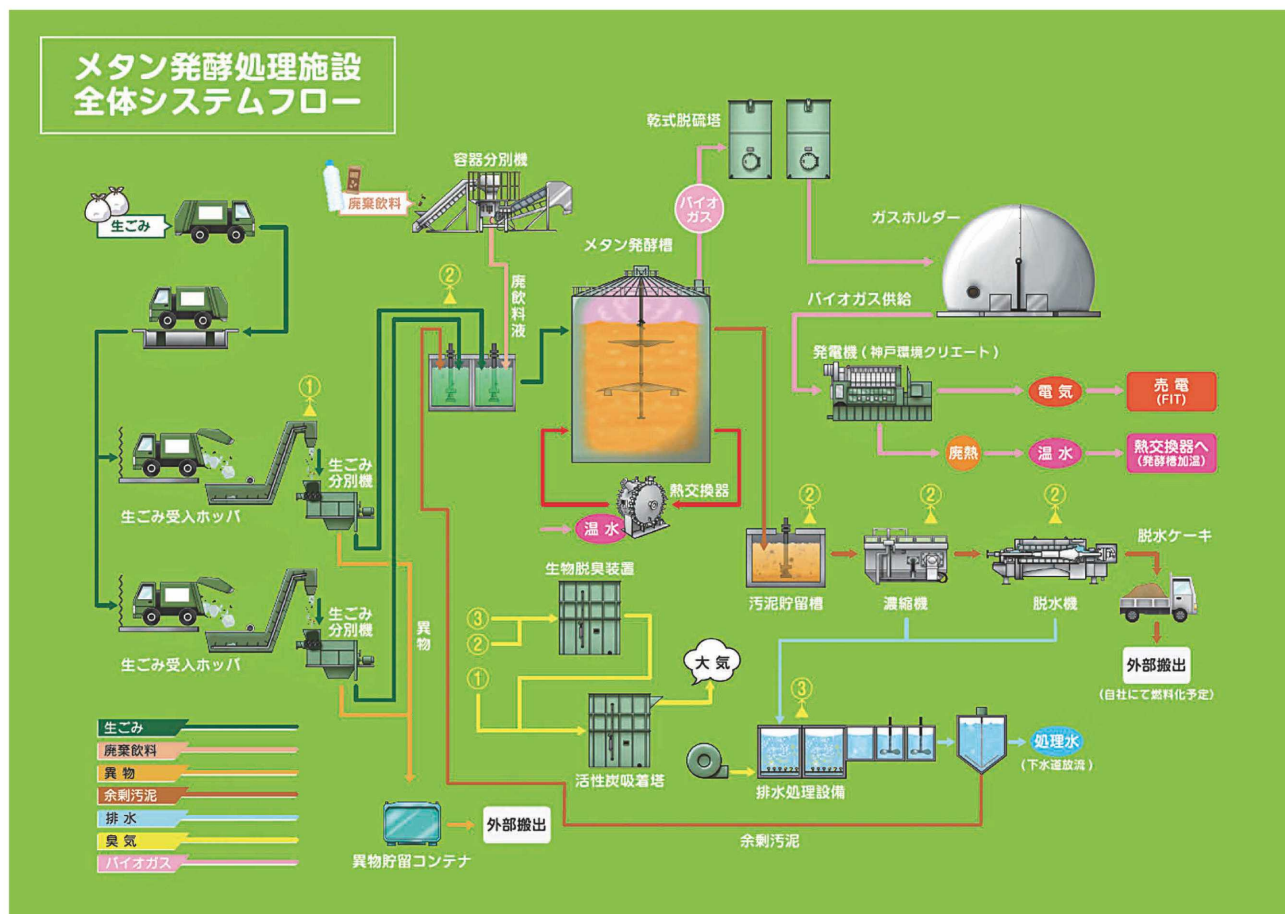
受入設備には、処理能力5 t/h の生ごみ分別装置2系列に加え、缶やペットボトル飲料を処理できる容器分別機を1台設置しており、幅広い廃棄物の受入れが可能です。受入れた原料は、容量173 m³の原料調整槽2基で貯留することで平準化されます。発酵槽から排出される汚泥は夾雑物スクリーンを通過し、生ごみ分別装置で取り切れなかったプラゴミ等を除去し、汚泥濃縮機・脱水機にて処理されます。汚泥濃縮機では汚泥の濃縮・洗浄を行うことで、脱水性能の向上を図っています。将来的には含水率の低い脱水汚泥を当社の燃料化技術により炭化することで、石炭火力発電所の燃料として利用することも計画されています。

工事の概要

- ・ 客先名 : 株式会社コベック（メタン発酵施設）
神戸環境クリエート株式会社（発電施設）
- ・ 工事名 : 株式会社コベック メタン発酵処理施設 新設工事
神戸環境クリエート株式会社 バイオガス発電施設 新設工事
- ・ 工期 : 2022年11月～2024年3月31日（メタン発酵施設）
2024年9月～2024年11月（発電施設）
- ・ 試運転期間 : 2024年4月～2024年12月（メタン発酵施設）
2024年11月～2024年12月（発電施設）
- ・ 設備能力 : 生ごみ受入量58 t/日、発電出力1 000 kW



バイオガス KOBE 外観写真



「令和5年度猪名川流域下水道原田処理場3系汚泥消化タンク設備工事」を受注

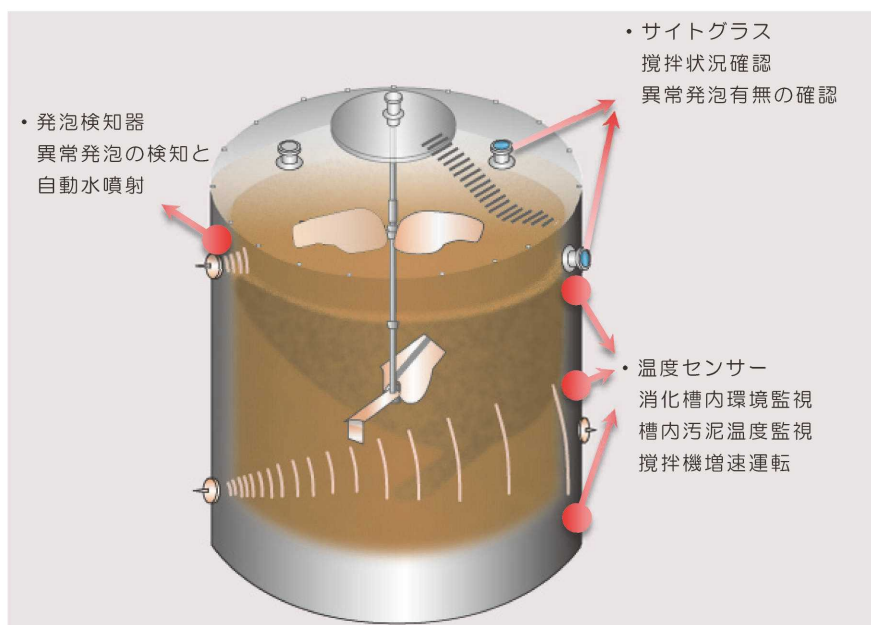
当社は、豊中市から、「令和5年度猪名川流域下水道原田処理場3系汚泥消化タンク設備工事」（以下、「本工事」）を受注し、2023年12月28日、工事請負契約を締結いたしました。

本工事は、原田処理場内（豊中市）において、消化槽を増設するものであり、安定した運転実績の多い中温・中濃度方式の鋼板製消化槽を採用しています。建設する鋼板製消化槽は、従来のコンクリート製タンクと比べ、建設工期の大幅な短縮、建設費の低減が可能となります。配置されたセンサによって槽内が可視化されることで、内部状況の把握が容易となり、消化性能低下の防止、安全運転にも寄与しています。また、下水汚泥の減量化・安定化技術である嫌気性消化は、これまで減量化を主要な目的としてきましたが、消化の過程で発生する消化ガスが、カーボンニュートラルなクリーンエネルギーであるため、発電等に有効活用することで化石燃料の節減とCO₂削減に貢献することができます。

猪名川流域下水道原田処理場は、豊中市・池田市・箕面市・豊能町・伊丹市・川西市・宝塚市・猪名川町の6市2町の広域な下水を処理し、人々の日々の暮らしを支えています。当社は「今を越える発想で、健やかな環境と暮らしを次世代へ」をミッションとするなかで、汚泥のエネルギー化技術を通じて、下水処理場の温室効果ガス削減に貢献して参ります。

本工事の概要

- (1) 工事内容：3系汚泥消化タンク設備の増設
 - ①汚泥消化タンク設備 1基（鋼板製消化槽6 000m³）
 - ②補機設備 1式
 - ③製作・据付・調整 1式
- (2) 工事場所：原田処理場内（豊中市原田西町1番1号）
- (3) 工期：契約締結日～2026年2月27日
- (4) 発注方式：一般競争入札
- (5) 契約金額：14億5百万円（消費税抜）



鋼板製消化槽の運転支援技術

須恵町外二ヶ町清掃施設組合から 「次期ごみ処理施設整備・運営事業」を受注

当社は、須恵町外二ヶ町清掃施設組合（以下、組合）から、「次期ごみ処理施設整備・運営事業（以下、本事業）」を受注し、2月7日に契約締結しました。

本事業は、一般廃棄物処理施設である次期ごみ処理施設の設計・施工及び運営・維持管理を行い、将来にわたり安全で安定したごみの適正処理、循環型社会を構築するためのエネルギー回収を進めることを目的とするものです。本施設の設計・施工業務は、当社と大豊建設株式会社、松尾建設株式会社、株式会社梓設計で構成する共同企業体（代表企業：当社）、また運営・維持管理業務は、当社と神鋼環境メンテナンス株式会社の共同出資により設立した特別目的会社が実施します。

本事業で採用する当社の「回転ストーカ式焼却炉」は、火格子がボイラ水管壁で構成されているストーカ式の焼却炉です。耐久性に優れ、幅広いごみ質に対応が可能であるという特長を持っているほか、熱を効率良く回収し、高効率なごみ発電を可能にします。回収したエネルギーの有効活用によりCO₂排出量を削減することで、環境負荷を低減させ、循環型社会の形成に貢献します。

加えて、本施設では、高温高压ボイラ等の採用によるエネルギー回収率の最大化、先進的な建築設計を取り入れ大幅な省エネルギー化を図った施設とすることで、組合を構成する3町（須恵町、粕屋町、篠栗町）のゼロカーボンシティ実現に貢献します。

周辺景観と調和するデザインとともに、環境問題やエネルギー問題を学習できる施設とすることで、地域住民に信頼され、身近に活用できる施設を目指します。「今を越える発想で、健やかな環境と暮らしを次世代へ。」をミッションとする当社では、今後も廃棄物処理施設の設計・建設からオペレーション・メンテナンスまで一貫したソリューションを提供し、地域社会発展の一翼を担ってまいります。

1. 本事業の概要

- (1) 事業内容：焼却施設の設計・施工業務、運営・維持管理業務
- (2) 場所：福岡県糟屋郡篠栗町大字若杉779番地18
- (3) ①設計・施工期間：2024年2月7日～2028年3月31日
②運営期間：2028年4月1日～2048年3月31日まで（20年間）
- (4) 契約金額：351億円（消費税抜）
- (5) 契約者：
①設計・施工業務：神鋼・大豊・松尾・梓特定建設工事共同企業体
②運営・維持管理業務：(株)わかすぎ環境サービス（(株)神鋼環境ソリューション、神鋼環境メンテナンス（株）の共同出資により設立する特別目的会社）
- (6) 施設の能力：169t/日（84.5t/日×2炉）
- (7) 処理方式：回転ストーカ式焼却炉
- (8) 処理対象区域：組合を構成する須恵町、粕屋町、篠栗町及び組合に可燃ごみの処理を委託している宇美町、志免町の5町

【施設の完成予想図】



水電解式水素発生装置「HHOG」を水素ステーションへ納入

～再エネ由来の CO₂フリー水素を供給～

当社は、再エネ由来の CO₂フリー水素を供給する水電解式水素発生装置「HHOG」を水素ステーションに納入しました。

HHOG は固体高分子電解質膜（PEM）を利用して純水を直接電気分解し、水素ガスをオンサイトで発生させる PEM 式の水素発生装置です。当社は、1993年に HHOG を開発・商品化し、これまで電子産業、金属熱処理の工業ガス用途や水素エネルギー用途に230基を超える納入実績を有します。近年、2050年カーボンニュートラルに関連して、再生可能エネルギーを利用して水電解で製造される CO₂フリー水素が注目されており、それらの分野を対象とした HHOG の納入事例が増えております。

当社は、「今を越える発想で、健やかな環境と暮らしを次世代へ」をミッションとする中で、今後も、これまで培ってきた技術力、経験を駆使し、次世代エネルギーとして期待される水素を活用した取り組みを積極的に進め、低炭素化社会の実現に貢献できるよう邁進してまいります。

・ENEOS 株式会社 Dr.Drive セルフ福島北幹線店水素ステーション

この度納入した HHOG は、系統から受電した再エネ電力を利用して CO₂フリー水素を製造します。

水素ステーション内に設置した水電解式水素発生装置により製造した CO₂フリー水素の供給は同じ ENEOS 株式会社の横浜旭水素ステーションに続く事例となります。

【概要】

注文主：ENEOS 株式会社

納入先：ENEOS 株式会社 Dr.Drive セルフ福島北幹線店水素ステーション

運営会社：株式会社クラシマ

用途：燃料電池自動車（FCV）

名称：水電解式水素発生装置（HHOG）

型式：SH-50D-G II（屋外仕様）× 2 台

能力：水素供給量 50 Nm³/h × 2

水素供給圧力 0.82 MPaG

水素純度 99.999 %

水素露点 -70℃（大気圧下）

本体寸法：2 100 mm W × 6 150 mm L × 2 700 mm H ※ 1 台当り



ENEOS 福島北幹線店水素ステーション

展示会だより

■ INCHEM TOKYO2023に出展

2023年9月20日～22日に東京ビッグサイトにて、公益社団法人化学工学会 / 一般社団法人日本能率協会主催の INCHEM TOKYO2023に出展致しました。

同展示会は化学産業全般の展示会であり、ファインケミカルや工業用化学品に関わる技術・サービスが対象。全体の来場者数は11,402人、当社ブースへは611名のお客様が来訪されました。

今回、当社は「カーボンニュートラル（CN）社会実現へのプロセスソリューション」をテーマに CN に貢献する製品を展示。各種製品の機能紹介だけでなく、機器採用による工程やエネルギー消費量の削減率等具体的な数値を示したことで、機器採用時のユーザ側メリットとして具体的なイメージが持ちやすいとして多くの前向きな評価を得ることが出来ました。本展示会で各社の環境配慮に対する意識の高まりを再認識。今後も市場課題を意識した展示・開発を進めていきます。

■ インターフェックス Week インファーマジャパンに出展

2024年6月26日～28日に東京ビッグサイトにて、RX Japan 主催のインターフェックス Week インファーマジャパンに出展致しました。

同展示会は医薬品・医療機器等の製造・開発に関する技術やサービスが対象。全体の来場者は31,977名、当社ブースへは236名のお客様が来訪されました。ユーザであるペプチスター社様と共同出展という初の試みとして「医薬品製造のゲームチェンジャー」をテーマに出展。当社と共同開発した攪拌式凍結乾燥機「RHEOFREED®」や、医薬業界で急速に研究開発が進む連続生産プロセス向けに「SMCR®」を展示。

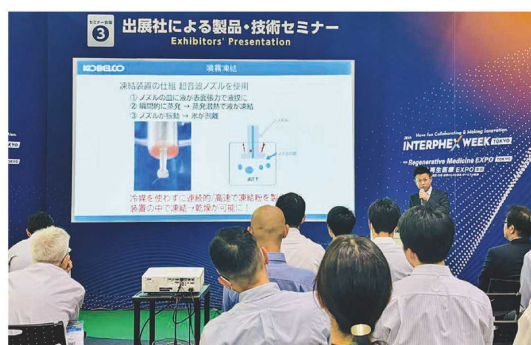
ペプチスター社様へ業務委託検討をされている製薬会社の方々や、既存プロセスで課題を持つ国内・海外ユーザの研究開発やマーケティング部門の方々も来場され、新たなアプローチ先を獲得。更には現地 PR やテスト要望、小型機製作や封じ込め対応等具体性のある要望を多く頂きました。用途に応じた装置改良等も積極的に行い、ニーズに応える製品提供を引き続き目指して参ります。



▲当社ブースの様子



当社ブースの様子▲



◀製品・技術セミナー

展示会だより

■下水道展 '24東京に出展

2024年7月30日～8月2日に東京ビッグサイトにて、公益社団法人日本下水道協会主催の「下水道展 '24 東京」に神鋼環境メンテナンスと共同でブースを出展しました。

下水道展全体の来場者数は約49,000人を数え、うち当社ブースには約900名のお客様が来訪されました。

今回当社ブースは、『下水処理場のカーボンニュートラル実現』と『持続可能な下水道事業の運営支援』の2テーマに沿って展示を行いました。カーボンニュートラルについては、当社新技術「水熱炭化技術」および消化等の組み合わせにより、下水処理場のCO₂排出量実質ゼロが実現可能となる点をPRしました。

下水道事業の運営支援については、当社の最新のDX技術や多様な官民連携事業への参画実績をご紹介します。

アテンドいただいた技術・営業の皆さんの細やかな対応のおかげで無事に展示会を執り行うことができました。ご協力のほど、誠にありがとうございました。

次回の大阪開催に向けて当社技術力を最大限にアピールできるようさらに改善を図ります。



当社ブースの様子

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(住友不動産大崎センター) ☎ (03)5931-3700 FAX(03)5931-5700
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
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 名古屋市西区名駅2丁目27-8(結屋プライムセントラルタワー) ☎ (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
九 州 支 店 / 〒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
北九州営業所 / 〒802-0005 福岡県北九州市小倉北区堺町2丁目1-1 ☎ (093)531-1861
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
プノンペン事務所 / Level 5, OHK Tower, Street 110 and Corner Street 93, Phum 3, Sangkat Srah Chak, Khan Daun Penh, Phnom Penh,
Kingdom of Cambodia ☎ +855-23-232-051
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 2024年度 Vol.21 No.1 通巻40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 <https://www.kobelco-eco.co.jp>

《編集委員》編集委員長/佐久間英明 委員/藤田淳・浦上和也・中田哲雄・吉田忠広・荻野行洋・梶原吉郎・南俊充

《発行》2024年9月17日印刷 2024年9月25日発行 年1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