

KOBELCO

技報

Vol.23
(通巻42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＞
「考える力」を磨き、新たな価値創造へ | |
| 2 | 湿式炭化用途展開に向けた技術検証 | Technical Verification for Expanding the Applications of Hydrothermal Carbonization |
| 10 | 固定式タンク洗浄装置 “CIPeace®” の上市 | Launch of the Fixed-Type Tank Cleaning Device “CIPeace®” |
| 15 | 廃棄物焼却発電の高温高圧化における
回転ストーカ炉・ロータリージョイントの構造検証 | Structural Verification of Rotary Stoker and Rotary Joint under High-Temperature and High-Pressure Conditions in Waste-to-Energy Plants |
| 21 | 廃棄物焼却炉ボイラのシャワークリーニングを
用いた排水クローズドシステムの開発 | Development and Demonstration of a Closed-Loop Wastewater Treatment System Using Boiler Shower Cleaning in Waste-to-Energy Plants |
| 27 | 高純度水素発生装置 HHOG® の CO ₂ 排出削減
用途への適用
— TOTO 株式会社における衛生陶器焼成工程の
水素混焼の取り組み— | Application of the HHOG® High-purity Hydrogen Oxygen Generator for CO ₂ Emissions Reduction
— Hydrogen Co-firing in the Sanitary Ware Firing Process at TOTO Ltd. — |
| 32 | TOPICS | |

<巻頭言>

「考える力」を磨き、新たな価値創造へ



取締役社長 **奥村 英樹**
Hideki Okumura

環境・エネルギー分野を取り巻く事業環境は、これまでにないスピードで変化している。

カーボンニュートラルの実現、資源循環の高度化、デジタル化の進展など、私たちに求められる役割はますます広がり、かつ複雑化している。そのような中で、企業として持続的に成長し、社会に価値を提供し続けるためには、技術力そのものに加えて「考える力」の重要性がこれまで以上に大きくなっていくことを感じる。

当社グループはこれまで、水処理・廃棄物処理・プロセス機器といった分野で技術を磨き、お客様、ひいては社会課題の解決に取り組んできた。私たちの事業は人々の暮らしや産業活動を支える社会基盤そのものと言える。しかし、社会課題は一層多様化し、要求水準も高まっている中、単に既存技術を適用するだけでは、これからの時代に十分とは言えない。その中で必要なのは、前提を疑い、本質を見極め、新たな解を導き出す力、すなわち「考える技術」である。

現場に目を向けると、日々の業務の中で多くの判断が行われている。忙しさの中で、過去のやり方や前例に頼ってしまうこともあるかもしれない。しかし、本当にそれが最適なのか、「なぜそうするのか」を一人ひとりが自分の言葉で説明できるか。この積み重ねが、組織としての力の差につながっていく。私は、すべての社員に対して「一度立ち止まって考えること」を大切にしてほしいと考えている。

また、よく考え、本質を探究する姿勢は個人だけで完結するものではなく、異なる専門性や視点を持つ仲間と議論し、お互いに問いを投げかけることで、より良い答えに近づくことができる。

本技報に掲載された各論文・報告は、そうした試行錯誤の成果であり、まさに「構想力」「創造力」の結晶と言える。それぞれの取り組みが、現場の課題から出発し、新たな価値創出へとつながっていることに、心強さを感じている。経営としても、風通しが良く、率直に意見を交わせる環境作りに加えて、挑戦を後押しし、失敗から学ぶことのできる組織風土の醸成に引き続き取り組んでいく。

社会からの期待は決して小さくない。だからこそ、私たちは自ら考え続けなければいけない。一人ひとりの思考と挑戦の積み重ねが、当社グループの未来を切り拓き、ひいては持続可能な社会の実現に寄与すると信じている。

本技報に込められた知見と挑戦が、当社グループの技術力を更に高め、新たな社会価値創出につながっていくことを期待している。

湿式炭化用途展開に向けた技術検証

Technical Verification for Expanding the Applications of Hydrothermal Carbonization

川嶋 淳*・片山裕美子*・多田三葉美**

Jun Kawashima・Yumiko Katayama・Minami Tada

バイオマスの炭化物であるハイドロチャーとバイオチャーの特徴や差異について調査し、適する利活用分野について検討した。

本研究では、様々な湿潤系バイオマスを対象として湿式炭化によりハイドロチャーを製造し、原料選定および処理条件検討に資するデータベースを構築した。その結果、ハイドロチャーの発熱量は原料中の有機分および灰分と強い関係を示し、処理温度が炭化特性を支配する主要因子であることを確認した。さらに湿式炭化の副生物である脱水ろ液の利用検討として植害試験を行い、肥料として利用できる可能性が示唆された。

This study investigated the characteristics of hydrochar and biochar, which are both biomass carbonized products. It also examined their differences and potential fields of application.

Hydrochar was produced by hydrothermal carbonization from a variety of wet biomass feedstocks, and a database was constructed to support feedstock selection and the optimization of processing conditions. The results showed a strong correlation between the calorific value of hydrochar and the organic matter and ash contents of the feedstock, which confirmed that the processing temperature is the main factor governing carbonization characteristics. Furthermore, phytotoxicity tests were conducted to evaluate the use of the dewatering filtrate, a by-product of the hydrothermal carbonization process. The results suggested the potential use of the filtrate as a fertilizer.

Key Words :

カーボンニュートラル
湿 式 炭 化
バ イ オ 炭
湿 式 炭 化 物
未利用バイオマス燃料化
未利用バイオマス肥料化

Carbon neutrality
Hydrothermal carbonization
Biochar
Hydrochar
Fuel production from underutilized biomass
Fertilizer production from underutilized biomass

ま え が き

脱炭素の流れが加速する中、化石燃料に代わるカーボンニュートラル（CN）燃料として、バイオマス由来炭化物の需要が高まってきている。

これまでは木材や稲わらなどの含水率の低いバイオマスを酸素の少ない状態で高温処理して作られるバイオ炭（バイオチャー）が広く燃料として利用されていたが、CN 燃料需要の高まりから世界的に原料バイオマスの争奪戦が激化しており、バイオチャー製造に適した木質系バイオマスの大量入手が

困難な状況が発生している。

一方、農業残渣や家畜糞尿、食料・飲料残渣等の湿潤系バイオマスは含水率が高いことから炭化の前に予備乾燥が必要であり、燃料化には多大なエネルギーが必要であった。このため炭化原料としての利活用はほとんど行われず、産業廃棄物として処分されることが多かった。

当社が下水汚泥の燃料化を目的として開発を進めている「湿式炭化」は、湿潤状態のバイオマスを低エネルギーで炭化できる技術である。この技術を適用

*技術開発センター 技術開発部 資源循環技術室

**エンジニアリング本部 プロジェクト部 脱炭素設計グループ

して作られる炭化物（ハイドロチャー）は、バイオチャーに替わるCN燃料としての利活用が有望視されている。

本報では、バイオチャーとハイドロチャーの特徴・差異について解説し、未利用であった下水汚泥や前述のような含水率の高いバイオマスから製造されたハイドロチャーについて得られた知見、ならびに湿式炭化の副生物である脱水ろ液の利活用検討結果について報告する。

1. バイオチャーとハイドロチャーの特徴

1.1 製造方法

バイオマスを炭化する際の方式と処理温度の違いにより、生成された炭化物はバイオチャーとハイドロチャーに分類される。製造方法の違いを表1に示す。

バイオチャーは350℃以上で生成されるのに対し、¹⁾ハイドロチャーは180～320℃の比較的低温の液中で加圧された水熱条件下で生成される。^{2,3)}この温度条件の違いにより、バイオチャーは低含水原料、ハイドロチャーは高含水原料に適する特性を有する。

1.2 構造および物性の違い

バイオチャーとハイドロチャーの本質的な差異は、炭素構造および化学組成にある。炭化物の構造の違いを表2、物性の違いを表3に示す。

バイオチャーは芳香族炭素（PAC: Polycyclic Aromatic Carbons）を多く含む安定な構造を有するのに対し、ハイドロチャーはアルキル構造や親水性

官能基を多く含む不安定な構造を有する。この構造差により、土壤中においてバイオチャーは分解されにくく高い炭素固定能を示す一方、ハイドロチャーは分解されやすく炭素が再放出されやすい。⁴⁾

このような構造・物性の違いは、両者の炭素固定性能および用途適性に直接影響を与える。炭化物の100年炭素残存率イメージを図1に示す。⁵⁾

バイオチャーは燃料利用のほか、高い安定性に起因して長期炭素固定や土壌改良用途に適するのに対し、ハイドロチャーは反応性の高さや低灰分特性を活かし、燃料利用や湿潤バイオマス処理との親和性が高い。加えて、湿式炭化では無機成分の一部が液相へ移行するため、比較的灰分が少ない。以上を踏まえると、バイオチャーは長期炭素固定および土壌改良用途に適し、ハイドロチャーは、燃料利用や湿潤バイオマス処理に適する。

1.3 バイオチャー・ハイドロチャーの品質の違い

各種原料をバイオチャー・ハイドロチャーに処理した際の品質の違いを表4に示す。^{6,7,8)}

炭化物の高位発熱量は、同じ原料の場合、ハイドロチャーの方がやや多い傾向は認められたが、大きな差は認められない。

灰分については、ハイドロチャーでは液相側に抜ける性質があり、炭化物に含まれる量は少なくなる。バイオチャーに比べて、CIなど燃焼炉に悪影響を及ぼす無機成分を低減することが可能である。

下水消化汚泥を原料とした場合、バイオチャーは400℃で15分の熱分解処理により製造されるのに対し

表1 炭化物 製造方法の違い

炭化物	製造方法	過した原料	備考
バイオチャー	燃焼しない炭素濃度の下、350℃超の温度でバイオマスを加熱して作られる固形物	水分少ないもの	ICPPガイドラインの定義
ハイドロチャー	主に高水分（70～90%）のバイオマスを前乾燥、前処理なしで、亜臨界温度（180～320℃）と自生圧力（2～6 MPa）で、5～240分間処理したあと、固液分離して得る。	水分多いもの	水溶性成分の一部は液相に移行する

表2 炭化物の構造の違い

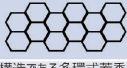
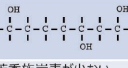
	バイオチャー	ハイドロチャー
炭素骨格	 H/Cが低い	 H/Cが高い
説明	安定した構造である多環式芳香族化合物(PAC)を多く含む ※バイオ炭のうち約75%がPACと言われる ⁴⁾ ⇒ 分解しづらく炭素が固定されやすい	芳香族炭素が少ない アルキル部分を多く含む 親水性官能基を多く含む ⇒ 分解しやすく炭素が放出されやすい

表3 炭化物 物性の違い

性状	バイオチャー	ハイドロチャー	備考
多孔性、比表面積	多孔性、比表面積大	密実、比表面積小	バイオチャーのほうがメタン発酵促進効果が高い傾向あり
形態	グラファイト様層	球状粒子	(→比表面積大きく微生物の棲家になる)
構造	芳香族基	アルキル基	バイオチャーの方が安定で炭素固定化能高い
C含有率	60-80 wt. %	58-64 wt. %	バイオチャーの方が炭化率が高い
H/C	<1.5*	<2.3	*欧州のカーボンクレジットにおけるバイオ炭規格のH/Cは<0.7で、専門家なかでも定義に違いあり
O/C	<0.7	<1.7	
pH	アルカリ性	酸性	
灰分	残存	脱灰（液相側に移動）	

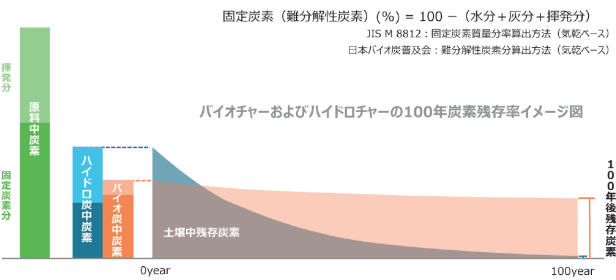


図1 炭化物100年炭素残存率イメージ

表4 各種原料のバイオチャー・ハイドロチャー品質の違い

分類	原料	反応温度 ℃	反応時間 min	固形分 回収率 %	灰分 %	H/C	O/C	高位 発熱量 MJ/kg	引用元
バイオチャー	大麦わら	400	120	31	13.4	0.40	0.11	26.02	文献6
	農業残渣 消化汚泥	500	60	33.1	24.6	0.50	0.07	24.64	文献7
	下水汚泥	450	60	60.99	41.99	0.72	0.11	16.57	文献8
	下水消化汚泥	400 [※]	15 [※]	57.4	47.6	0.98	0.16	15.24	試験結果
ハイドロチャー	大麦わら	250	120	37	0.43	0.86	0.21	27.49	文献6
	農業残渣 消化汚泥	250	180	51	12.3	1.06	0.20	26.47	文献7
	下水汚泥	180	60	62.32	34.51	1.21	0.14	19.75	文献8
	下水消化汚泥	170 [※]	120 [※]	42.1	35.4	1.59	0.32	17.45	試験結果

※ 回分式試験データ取得時の条件

し、ハイドロチャーは170℃で120分の湿式炭化処理により製造される。バイオチャーは固形分回収率が57.4%と高く、炭素化の指標であるH/C比およびO/C比がそれぞれ0.98、0.16と低いことから、ハイドロチャーより炭素濃縮が進行している。一方、ハイドロチャーはH/C比1.59、O/C比0.32と酸素および水を多く含み、固形分回収率は42.1%と低いものの、バイオチャーと比較して低温条件で製造可能である。また、ハイドロチャーでは無機成分が液相へ移行するため灰分含有率が低くなる傾向が見られた。

2. ハイドロチャーデータベースについて

2.1 目的

本検討では、農業残渣、食品残渣、家畜糞尿、一廃系廃棄物およびそれらのメタン発酵残渣を対象として湿式炭化試験を実施し、得られた炭化物の性状データを整理・蓄積することで、原料特性と炭化物性状の関係性を明らかにすることを目的とした。併せて、得られた知見を体系化し、原料選定および処理条件検討に資するデータベースを構築した。

2.2 データベース構築の概要

湿潤系バイオマス各種原料を対象とした湿式炭化試験を実施し、炭化物および脱水ろ液の性状データを統一的に整理することでデータベースを構築した。

原料は、農業残渣（もみ殻、麦わら等）、飲料粕（コーヒー粕、ビール粕等）を含む食品残渣、家畜糞尿、一廃系廃棄物に加え、これらのメタン発酵残渣を含む多様なバイオマスを対象とした。バイオマス原料の略称と正式名称を表5に示す。

取得項目は、炭化物については高位発熱量、収率、含水率、元素組成（C、H、O等）、固定炭素および揮発分とし、脱水ろ液については有機物濃度とした。また、試験条件は温度170～230℃、処理時間2～8時間、酸添加の有無を主要な変動因子として整理し、条件差による影響も含めてデータベース化した。

2.3 湿式炭化試験結果

2.3.1 原料と炭化物の発熱量の関係

原料の高位発熱量とハイドロチャーの高位発熱量

表5 バイオマス原料略称と正式名称

略称	正式名称	備考
DDGS	Distillers Dried Grains with Solubles	エタノール製造時の蒸留粕（飼料原料）
DCS	Digested Corn Stover	コーンストーバーのメタン発酵消化残渣
CS	Corn Stover	トウモロコシの茎葉などの非食部
MBG	Mexican Bagasse	メキシコ産サトウキビ搾りかす
CSG	Corn Stover Stalk	コーンストーバーの茎部分
CGF	Corn Gluten Feed	トウモロコシ由来の飼料副産物
PS	Paper Sludge	製紙時に出る短繊維・無機物の濃縮・脱水物
フムス	humus	バイオマスのメタン発酵残渣物

（乾燥ベース）の関係を原料種別に図2～図4に示す。原料と炭化物の発熱量には概ね正の相関が見られ、原料中の有機成分が高いほど炭化物の発熱量が高くなる傾向が確認された。原料の種類ごとに分類して評価したところ、下記の通りとなった。

- ・農業残渣：原料の高位発熱量とハイドロチャーの高位発熱量に正の相関が確認された。

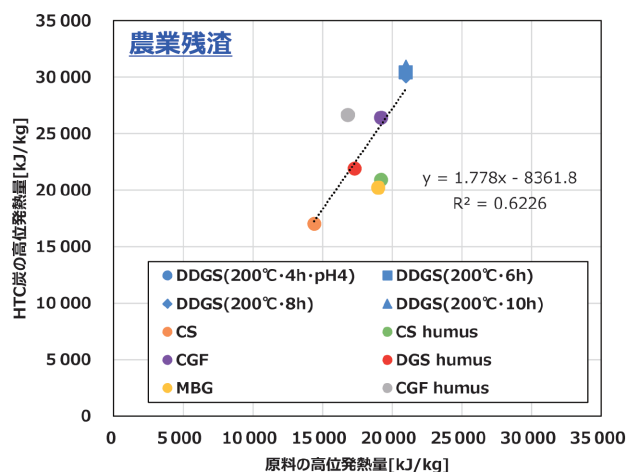


図2 農業残渣の原料－湿式炭化物 高位発熱量の関係

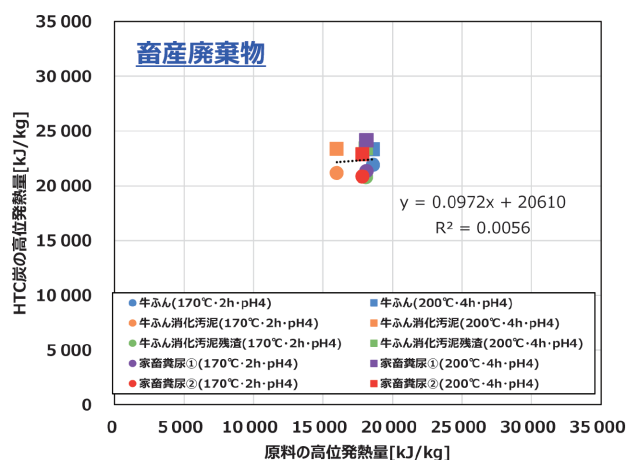


図3 畜産廃棄物の原料－湿式炭化物 高位発熱量の関係

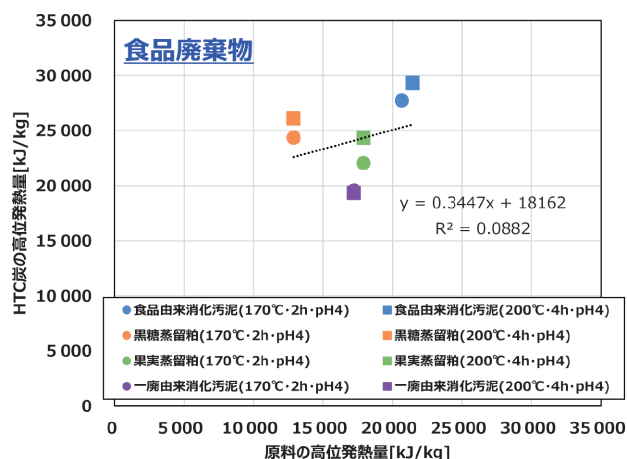


図4 食品廃棄物の原料－湿式炭化物 高位発熱量の関係

- ・畜産廃棄物：原料の高位発熱量に関わらずハイドロチャーの高位発熱量は20 000~25 000 kJ/kg の範囲であった。
 - ・食品廃棄物：一部を除き原料の高位発熱量とハイドロチャーの高位発熱量に正の相関が確認された。
- 食品廃棄物において原料の高位発熱量が低いにも

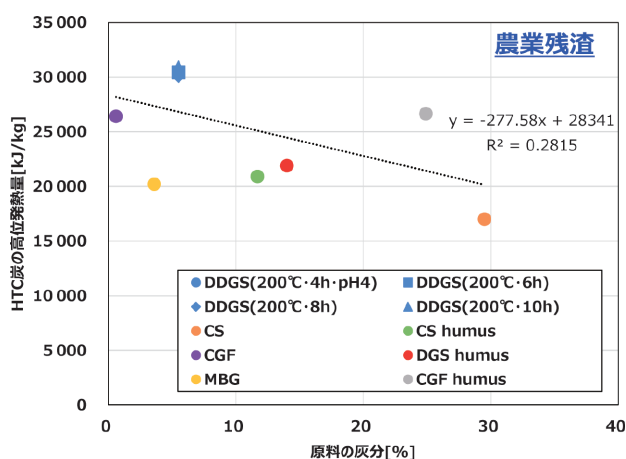


図5 農業残渣の原料灰分－ハイドロチャー高位発熱量の関係

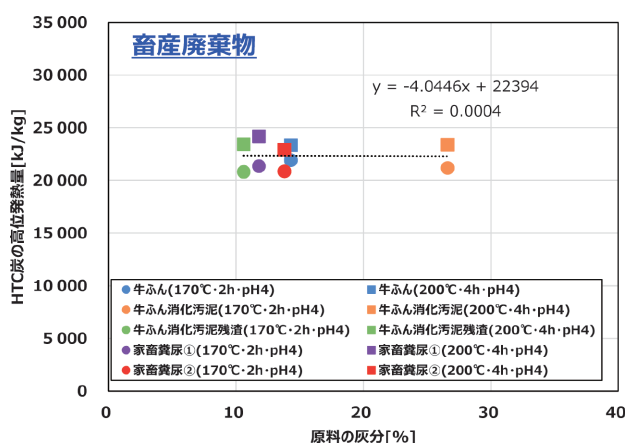


図6 畜産廃棄物の原料灰分－ハイドロチャー高位発熱量の関係

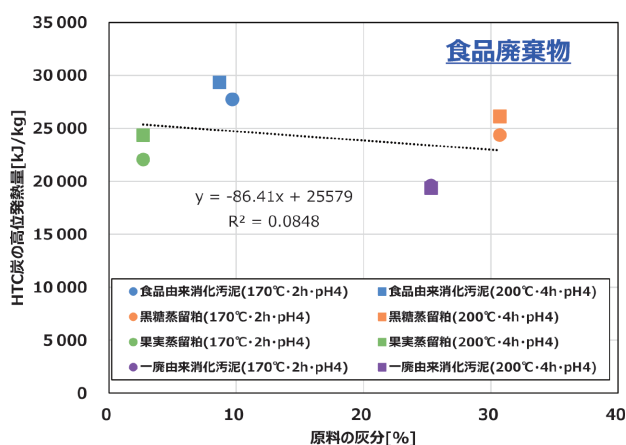


図7 食品廃棄物の原料灰分－ハイドロチャー高位発熱量の関係

関わらず炭化物の高位発熱量が高い一部原料については、分析結果から原料中に溶解性の灰分が非常に高く、炭化後の脱水にてろ液側に溶解性灰分が移行したことが主な要因と考えられる。

2.3.2 原料灰分と炭化物発熱量の関係

原料の灰分とハイドロチャーの高位発熱量の関係を原料種別に図5～図7に示す。農業残渣由来の原料では灰分が高い原料ほど炭化物の発熱量が低下する傾向が見られ、灰分含有量が炭化物の燃料特性に大きく影響することが確認された。畜産廃棄物では2.3.1の記載とも関連するが、原料の灰分量に関わらず高位発熱量は20 000~25 000 kJ/kg の範囲であった。食品廃棄物では相関が見られなかったが、これは他と比較し原料種にばらつきが大きいためと考えられる。

2.3.3 炭化物収率

全原料に対する炭化物収率を図8に示す。収率は原料によって大きくばらつき、一定の傾向は確認されなかった。一方で処理条件については温度を高く、時間を長くするほど収率が下がる傾向となった。その分、炭化が進み発熱量は向上すると考えられる。

2.3.4 原料分類別の炭化特性

原料とハイドロチャーの高位発熱量の相関を図9に示す。原料を種類別に整理すると、農業残渣および飲料粕（コーヒー粕、ビール粕等）は約25 000～30 000 kJ/kg 程度と高い発熱量を示す傾向が確認された。一方、汚泥や家畜糞尿等の灰分の高い原料では、炭化物の発熱量が約15 000～24 000 kJ/kg と相対的に低くなる傾向が見られた。

2.3.5 処理条件がハイドロチャー性状に与える影響

CS フムス（トウモロコシの茎葉のメタン発酵残渣）を対象とした処理条件の影響を表6に示す。処理温度条件の変化による影響として、170℃～200℃の範囲では処理時間、硫酸添加の有無による発熱量への影響はほとんどなく、230℃まで温度を上げることで発熱量が大幅に増加した。また、見た目にも明らかに炭化が進んでいることが確認できた。一方、酸添加による影響として、炭化物の高位発熱量が500～900 kJ/kg 程度上昇する傾向が見られた。また、収率については酸添加無し・200℃条件の系に着目すると、処理時間が4時間から6時間に延長されると収率が5.1ポイント低下したが、さらに8時間に延長されると4時間のときに対し11.1ポイント増加した。このことから、分解され溶解した有機物が処理時間の延長に伴い炭化物に転換されることが示され、適切な処理時間を選択することで収率を最大化できる可能性が示唆された。

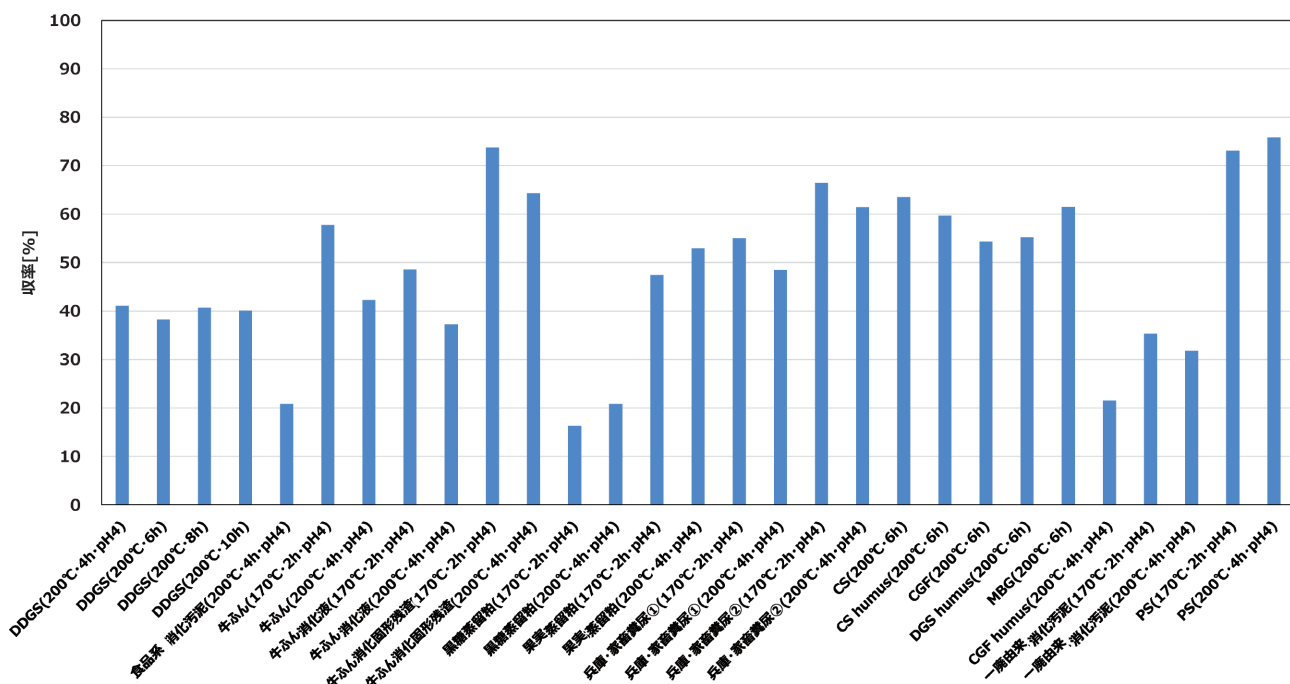


図8 原料別ハイドロチャー収率

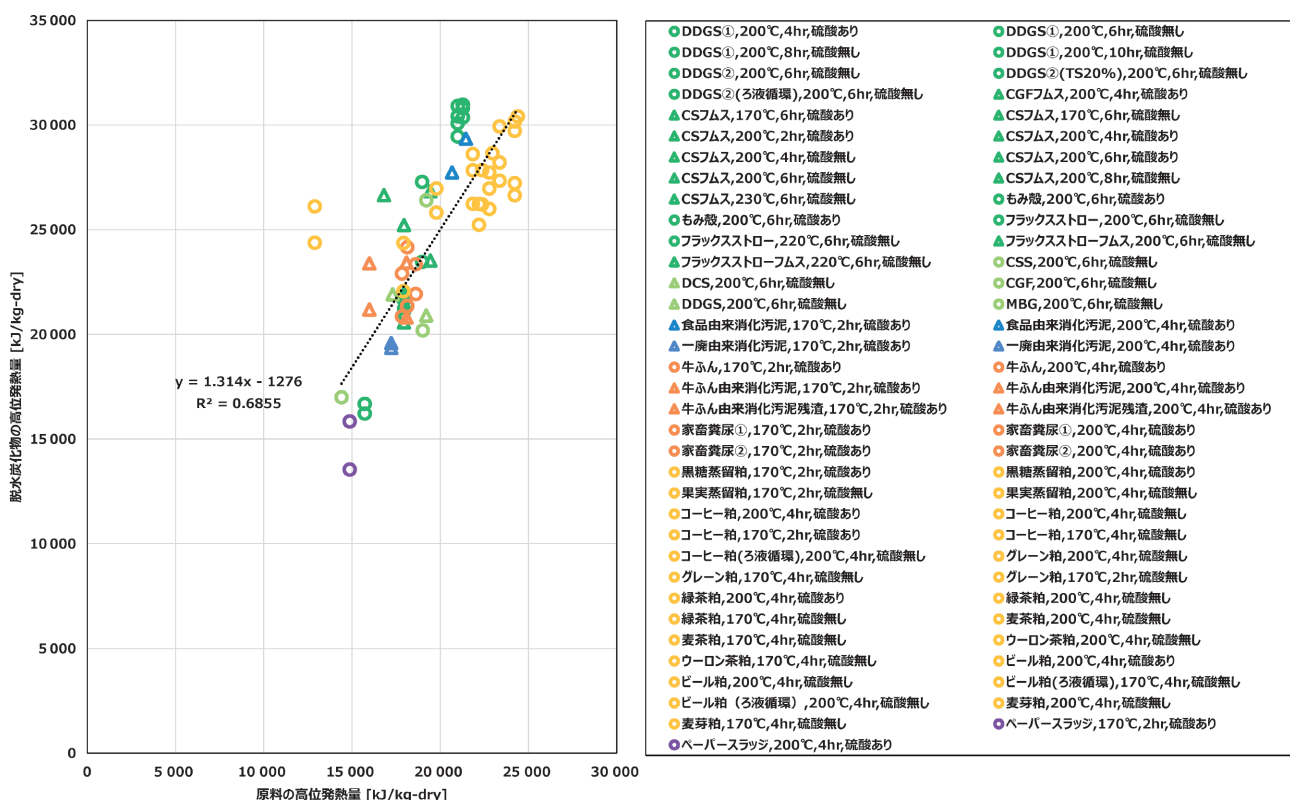


図9 原料-ハイドロチャーの高位発熱量の相関

2.3.6 炭化物の元素組成変化

炭化物の O/C 比および H/C 比の関係を図10～図13に示す。湿式炭化処理により O/C 比および H/C 比はいずれも低下し、炭素濃度の高い固体燃料へと変化する傾向が確認された。このことから、湿式炭化はバイオマスの燃料特性向上に有効であると考え

られる。⁹⁾

2.4 考察

本検討により、湿式炭化における炭化物性状は主として原料特性に大きく依存することが確認された。特に灰分含有量および有機分量が発熱量に影響する傾向を示したが、その影響の程度は原料分類に

表6 湿式炭化条件がハイドロチャー性状に与える影響

温度 (°C)	170	170	200	200	200	200	200	200	230
処理時間 (hr)	6	6	2	4	4	6	6	8	6
原料添加	あり	無し	あり	あり	無し	あり	無し	無し	無し
HTC炭の高位発熱量 (kJ/kg)	21 420	20 570	21 768	21 951	21 349	21 529	21 022	21 282	25 208
HTC炭の含水率 (%)	52.3	49.5	50.7	49.6	52.4	53	49.2	52.2	50.9
収率 (%)	81	70.4	77.6	72.1	73.7	56.4	68.6	84.8	47.6
炭化物外観									

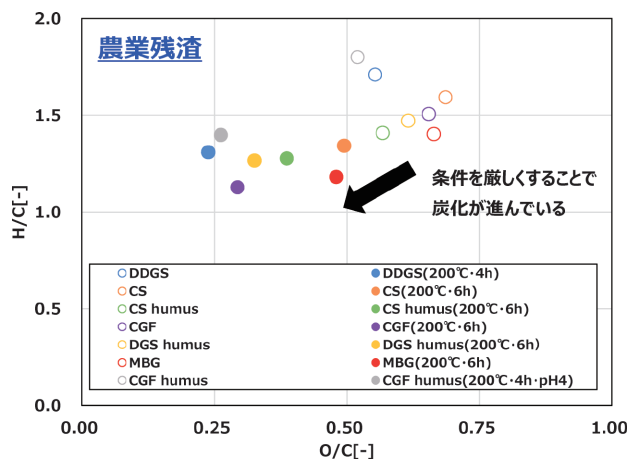


図10 農業残渣ハイドロチャーの O/C 比および H/C 比の関係

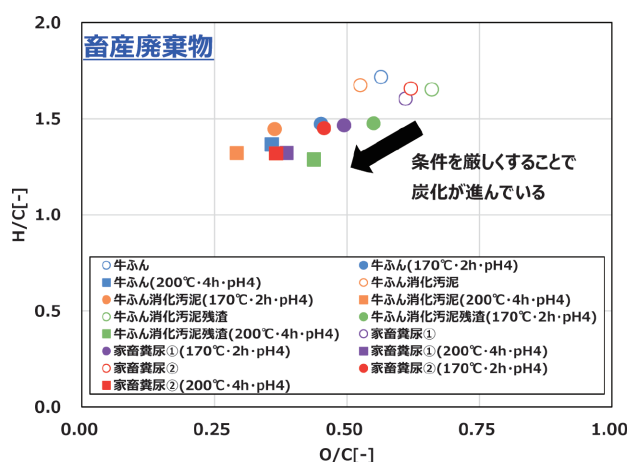


図11 畜産廃棄物ハイドロチャーの O/C 比および H/C 比の関係

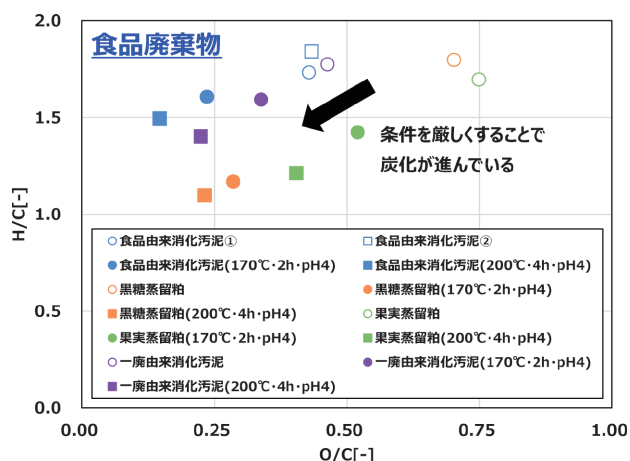


図12 食品廃棄物ハイドロチャーの O/C 比および H/C 比の関係

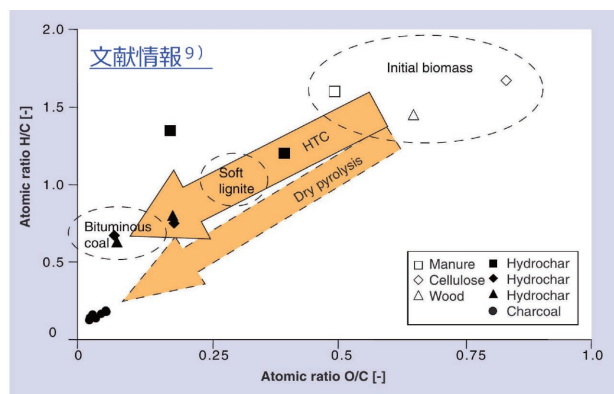


図13 農業残渣ハイドロチャーの O/C 比および H/C 比の関係 (文献情報)

よって異なった。農業残渣や飲料粕のような有機分の多い原料では高い発熱量が得られる一方、汚泥や家畜糞尿等の灰分が多い原料では相対的に低い発熱量となる傾向が見られた。このことから、原料選定においては灰分や有機分含有量を指標とした評価が有効であると考えられる。

また、処理条件の影響については、温度が炭化物性状を支配する主要因子であり、発熱量向上の観点では高温条件が有効であることが示された。

2.5 まとめ

本検討では、多様なバイオマス原料を対象とした湿式炭化試験データを整理し、39種類の原料について原料特性と炭化物性状の関係を体系的に整理したデータベースを構築した。その結果、炭化物の発熱量は原料の有機分および灰分に強く依存すること、また処理条件としては温度が主要な支配因子であることを確認した。これらの知見は、原料選定およびプロセス設計に有用な基礎情報となる。

3. 脱水ろ液の肥料利用検討

3.1 目的

湿式炭化の固液分離で発生する脱水ろ液には、反応により溶出した有機物および無機塩類が含まれる。様々なバイオマス由来の脱水ろ液成分を調査したところ、肥料の主要栄養成分である窒素、リン、カリウムが含有されていることが見出されたことから、肥料としての利用可能性があると考えられる。脱水ろ液の肥料としての有効性を確認するため、植害試験を行った。

3.2 植害試験の概要

穀物由来のエタノール発酵残さ、コーヒー粕およびビール粕を原料とした湿式炭化脱水ろ液を真空蒸発により濃縮し、そのろ液の肥料適用性を評価するため、植害試験を実施した。

試験条件

- ・肥料の品質の確保等に関する法律において肥料登録するために必要な「植害試験」に準拠（但し、今回は8連ではなく4連で実施）。
- ・外的環境の影響を受けにくい室内（温度、日照を管理）で実施。
- ・供試作物はコマツナ。
- ・供試肥料区および対照肥料区にはそれぞれ同量の化成肥料を施用する。
- ・栽培期間は原則として播種後3週間。
発芽率、草丈、生体重などを測定・評価。

表7に試験に使用した脱水ろ液の窒素含有量を示す。対照系は化成肥料で窒素添加総量を施用し、窒素以外の成分が供試植物の生育に及ぼす影響について検討した。

3.3 植害試験結果

3.3.1 発芽阻害

図14に播種後7日目の発芽率の比較を示す。すべての試験区において発芽率は90%以上を示し、顕著な発芽阻害は確認されなかった。

3.3.2 根張り状況

図15に播種後21日目の底面部根張りの状況を示す。標準区とコーヒー粕区はポットの全面に満遍なく根が張っていたが、草丈と生体重量の値が比較的大きかった DDGS 区とビール粕区は底面側に根が集中していた。根張り状況に差異は認められるものの、地上部生育に顕著な影響は及ぼさないと考えられた。

3.3.3 地上部生育状況

図16に播種後日数別の供試植物の生育状況を示す。全ての脱水ろ液濃縮液において草丈および生体重量が対照区を上回り、肥料効果の有効性が示唆された。特に穀物由来のエタノール発酵残さ由来およびビール粕由来の脱水ろ液濃縮液では、高い生育促進効果が認められた。

図17にコーヒー粕由来脱水ろ液濃縮液投与区の生育状況を示す。播種後21日目に葉の白化症状が確認された。他の試験区では白化は確認されていないことから、コーヒー粕由来成分の蓄積による生理障害の可能性が示唆された。

3.4 まとめ

今回植害試験に供した3種類の湿式炭化脱水ろ液は一定の肥料効果を有する一方、原料によっては植物への生理障害の可能性が認められたため、肥料利用にあたっては原料ごとの適性評価が必要と考えられる。

湿式炭化脱水ろ液そのものは肥料としての有効成

表7 植害試験に使用した脱水ろ液の窒素含有量

資材	窒素含有量 (%)	100mg-N 相当添加量 (g/pot)	総量 (g, n=4)
DDGS 濃縮液	6.56	1.5	6.1
コーヒー粕 濃縮液	2.86	3.5	14
ビール粕 濃縮液	7.05	1.4	5.7

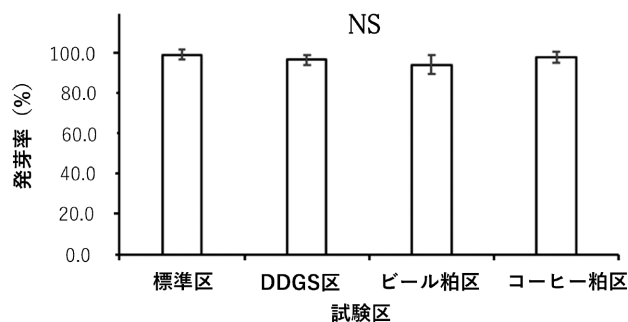


図14 播種後7日目の発芽率比較

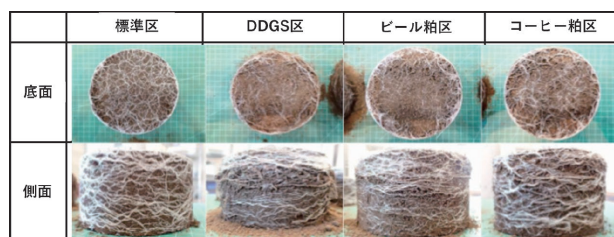
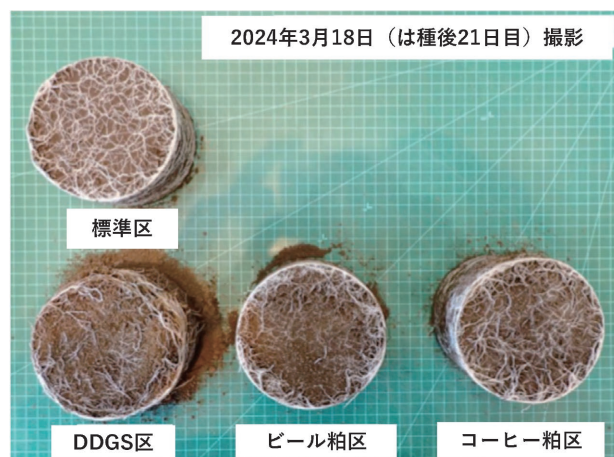


図15 播種後21日目の底面部根張りの状況

分濃度が希薄であり、肥料利用のためには濃縮が必要である。今回試験では濃縮手段として真空蒸発を適用したが、大量の脱水ろ液の濃縮にはより簡便で低エネルギーな技術適用が望まれる。脱水ろ液肥料利用のためには、肥料効果・肥料需要・コスト・濃縮技術等について検討や課題解決が必要であると考えられる。

播種後7日目



中間調査(播種後14日目)



最終調査(播種後21日目)



図16 播種後日数別の生育状況



図17 コーヒー粕区の生育状況

む す び

下水汚泥以外の湿潤系バイオマスの湿式炭化データを蓄積するとともに、脱水ろ液の肥料利用の可能性について検討した。今後、湿式炭化技術を様々な用途に展開するうえで、有用な基礎的情報が収集できたと考える。今後は本知見を活用し、食品残渣、農業残渣、家畜系廃棄物、下水汚泥など幅広い湿潤系バイオマスへの適用を進めることで、顧客の脱炭素化および循環型社会の実現に貢献していきたい。

[参考文献]

- 1) 岸本文紅, バイオ炭の農業利用と脱炭素～国内外の動向と今後の展望, 日本LCA学会誌, 18 (1): 36-42 (2022).
- 2) H. S. Kambo, et al., A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physicochemical properties and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 45, p359-378 (2015).
- 3) M. T. Islam, et al., Recent Progress on Emerging Applications of Hydrochar, Energies, Vol. 15, (2022).
- 4) S. Masoumi et al., Hydrochar: A Review on Its Production Technologies and Applications, catalysts, Vol. 11, No. 8, 939 (2021).
- 5) Schmidt et al., Permanence of soil applied biochar, the Biochar Journal (2022).
- 6) Sevilla M, et al., "Hydrothermal carbonization of biomass as a route for the sequestration of CO₂: chemical and structural properties of the carbonized products", Biomass Bioenergy; (2011).
- 7) E. Miliotti, et al., "Lab-scale pyrolysis and hydrothermal carbonization of biomass digestate: Characterization of solid products and compliance with biochar standards", Biomass and Bioenergy; (2020).
- 8) M. Alipour, et al., "Bioavailability and eco-toxicity of heavy metals in chars produced from municipal sewage sludge decreased during pyrolysis and hydrothermal carbonization", Ecological Engineering; (2021).
- 9) Libra, Judy A, et al., "Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis", Biofuels; (2011).

固定式タンク洗浄装置“CIPeace®”の上市

Launch of the Fixed-Type Tank Cleaning Device “CIPeace®”

水谷祐太*・竹井一剛**・田村晴海**・有木陽菜**

Yuta Mizutani・Kazuyoshi Takei・Harumi Tamura・Haruna Ariki

拡散噴霧技術を適用した固定式タンク洗浄装置「CIPeace」を開発した。直線噴霧と拡散噴霧の組み合わせにより、従来課題であった装置上部の洗浄効率向上を実現した。その結果、直線噴霧のみの場合と比較して洗浄時間を1/3、使用洗浄液量を1/4に低減した。固定式の特徴であるコンタミレス性を維持しながら洗浄液使用量を削減することに成功し、化学品製造プロセスにおける環境負荷低減を達成した。

We developed a fixed-type tank cleaning system, CIPeace applying a spray diffusion technology. The combination of direct jet spraying and diffused spraying enabled improved cleaning efficiency in the upper part of the cleaning device, which had been a challenge for conventional systems. Compared with a system employing only direct jet spraying, CIPeace reduced the cleaning time by approximately 67% and the consumption of cleaning solution by 75%. The system successfully reduced cleaning solution consumption while maintaining the contamination-free characteristics inherent to a fixed cleaning configuration, thereby reducing the environmental impact of chemical manufacturing processes.

Key Words :

CIP（Cleaning In Place）技術
拡 散 噴 霧
固定式タンク洗浄装置
洗 浄 効 率 向 上
コンタミネーション防止（コンタミレス）

【セールスポイント】

- ・高効率洗浄（洗浄時間1/3、洗浄液量1/4）
- ・コンタミレス構造（固定式）

ま え が き

医薬品及び電子材料分野では、製品の高純度化・高品質化の要求が年々高まってきており、製品設備における洗浄性能の重要性は、ますます増大している。特に、プロセス機器の洗浄においてはCIP（Cleaning In Place）洗浄が主流となっており、図1に示す当社プロセス機器事業部のGL（グラスライニング）反応機や粉体機器にも採用されている。CIP洗浄とは工場生産設備の配管・タンク・熱交換器などの機器を分解することなく、薬品や水を配管内に循環させて内部を効率的に洗浄する技術である。例としてGL反応器に洗浄装置を設置した際の缶内洗浄の模

式図を図2に示す。同技術は、作業者の曝露防止、安全性向上、省力化、洗浄品質の安定化、さらにはコンタミネーションリスク低減といった観点から広く普及している。

一方で、CIP洗浄の中核を担う洗浄装置には、依然として改良の余地が残されている。特に医薬用途では回転式に見られる摺動部からの摩耗粉混入リスクを回避するため固定式が主流であるが、回転式と比較した際の洗浄効率の低さが課題となっている。

また、近年は環境負荷低減や省資源化の観点から、洗浄液使用量削減も重要な性能指標となっている。

*プロセス機器事業部 品質保証室

**プロセス機器事業部 技術部 装置設計室

使用される機器例

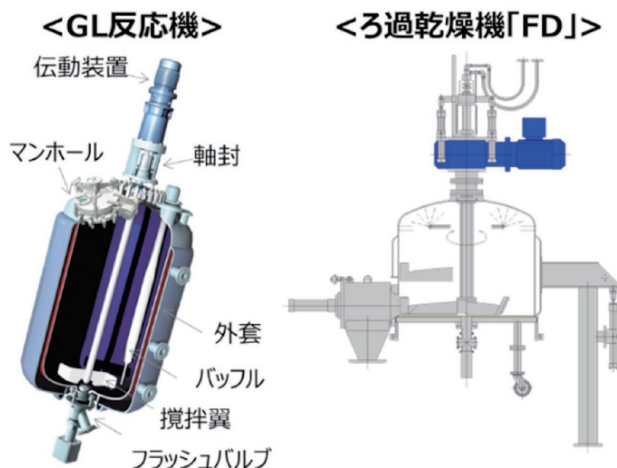


図1 当社 GL 反応器とろ過乾燥機 (FD)

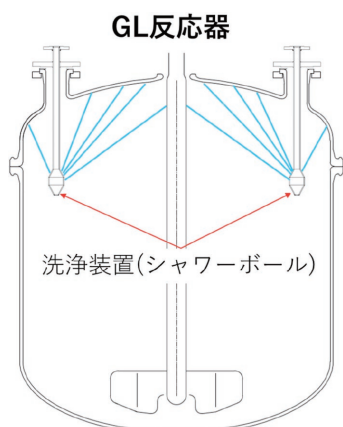


図2 洗浄装置の設置模式図

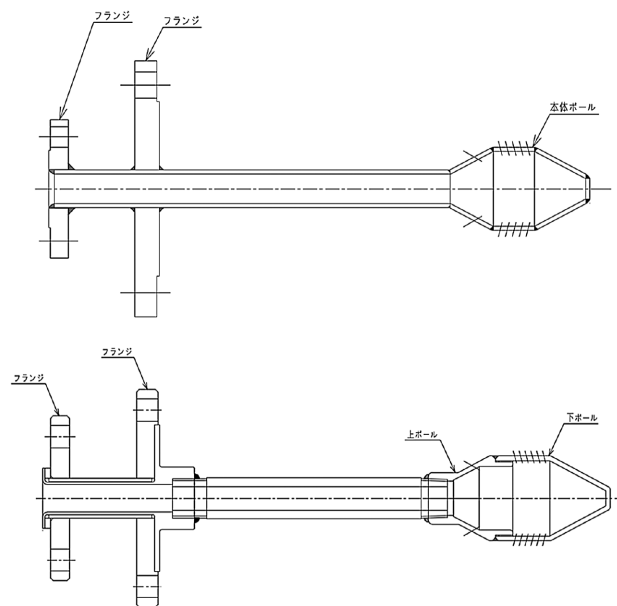
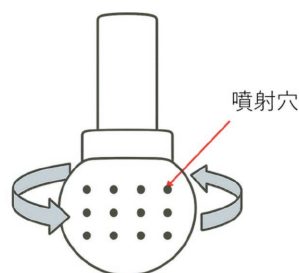


図3 固定式洗浄装置の構造
(上：金属製 CIPeace, 下：PTFE 製 CIPeace)



洗浄水が噴射した際の勢いで
先端のボールが回転する

図4 回転式洗浄装置のイメージ図

本報ではこれらの課題を解決するために開発した、拡散噴霧技術を応用した固定式タンク洗浄装置「CIPeace (シーアイピース)」について報告する。

1. CIP 洗浄技術

1.1 高効率洗浄実現に向けた従来技術の課題

CIP 洗浄装置は、大別すると「固定式」と「回転式」に分類される。固定式は図3に示す通り、摺動部を持たずコンタミネーションリスクが低い一方、直線噴霧による洗浄に限定されるため、洗浄ムラが生じやすく、洗浄時間が長くなり、その結果洗浄液量が増大する傾向にある。これに対し回転式は図4に示す通り、回転噴霧により均一な洗浄を実現できるものの、回転部の摩耗に起因する摩耗粉の発生や定期メンテナンスが課題となる。表1にそれぞれの性能比較を示す。特に医薬用途においては、異物混入リスクの低減が最重要視されるため、固定式洗浄装置の採用が一般的である。一方で、従来の固定式洗浄装置には、以下のような課題が存在していた。

・噴射穴はドリル加工の制約上、洗浄装置の施工面

表1 固定式・回転式洗浄装置の性能比較

タイプ	洗浄液量	洗浄時間	コンタミレス
固定式	△	△	○
回転式	○	○	×

に対して垂直方向にしか設けられず、洗浄に最適な噴射角度を設定できない。このため洗浄液の到達範囲に偏りが生じ、洗浄ムラの要因となる(図5)。
・洗浄装置本体は、壁面にあたることで跳ね返り流れ落ちた洗浄液に頼って洗浄されるため、洗浄残りが発生しやすく、自己洗浄性に課題がある。

これらの課題を解決し、コンタミネーションリスクを排除しながら高効率な洗浄を実現する固定式洗浄装置の開発が求められていた。さらに、これらの問題は洗浄性能の低下のみならず、洗浄結果を常に同じ状態に管理できていることを確認する洗浄バリデーションにおいても再現性確保の阻害要因となっ

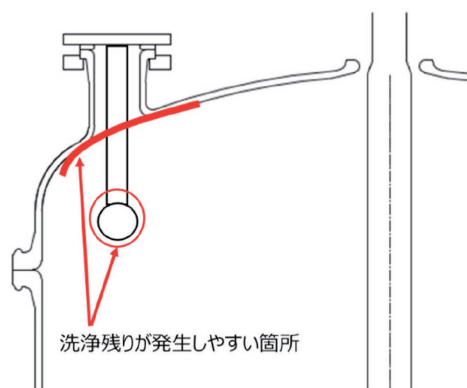


図5 洗浄残りが発生しやすい箇所（従来）

ていた。このため、医薬分野においては品質保証上の観点からも重要な改善対象となっていた。

1.2 拡散噴霧技術

本開発では、固定式洗浄装置が有するコンタミレス性を損なうことなく、回転式洗浄装置に匹敵する洗浄性能を実現することを目指した。そこで、新たなアプローチとして拡散噴霧技術を採用した。拡散噴霧は、図6に示すように、2本の直線状噴霧流を衝突させることで広範囲に拡散した楕円形に広がるフルコーン状噴霧を形成する技術である。これにより、従来の直線噴霧では困難であった洗浄装置上部の範囲についても均一な洗浄が可能となる。この特性を活用し、図7に示すように、洗浄装置近傍の洗浄ムラが生じやすい領域には拡散噴霧を、遠距離領域には直線噴霧を配置することで、高効率な洗浄が可能となる。拡散噴霧技術の特徴は、噴霧が壁面での跳ね返りに依存せず、噴霧口近傍で広範囲に拡散する点にある。これにより、タンク形状の影響を受けにくく、洗浄液を均一に分布させることが可能となるため、安定した洗浄性能が得られる。拡散噴霧孔は、孔径、孔間距離、および衝突角度の最適化により、均一な液滴分布と広い噴霧範囲を両立した。

まとめると本技術の特徴は以下の通りである。

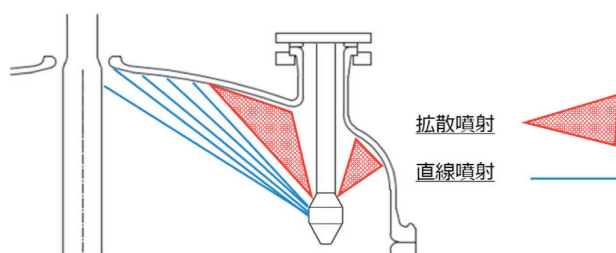


図7 拡散噴霧と直線噴霧の使い分けのイメージ図

- ・特殊なスリット加工が不要で、直線孔のみで構成可能
- ・噴霧の拡散により洗浄装置近傍の洗浄ムラを低減

2. 方法

2.1 実証設備と試験条件

グラスライニング反応槽（φ1200 mm）の上蓋を対象として洗浄試験を実施した（図8）。

本試験では、開発品の洗浄性能を評価するため、洗浄評価手法として一般的に用いられるリボフラビン試験を採用した。本手法は医薬分野において広く用いられており、汚染物質の代替として蛍光性物質であるリボフラビンを反応槽内に均一に噴霧した後、洗浄装置による洗浄を実施する。

洗浄後、ブラックライトを照射し、緑色に蛍光発光するリボフラビンの残存状況を確認することで洗浄状態を評価した。リボフラビンの発光が認められない場合は洗浄が十分であると判断し、発光が認められる場合は洗浄残りが存在すると判断した。

2.2 試験結果

比較結果を以下に示す。図9に直線噴霧のみを用いた洗浄装置の結果、および拡散噴霧と直線噴霧を組み合わせた CIPeace の洗浄結果、表2に洗浄評価結果を示す。

直線噴霧のみのケースでは、洗浄開始1分後に洗浄装置設置ノズル近傍で洗浄残りが確認され、洗浄完了までに合計3分を要した。一方、CIPeace（開

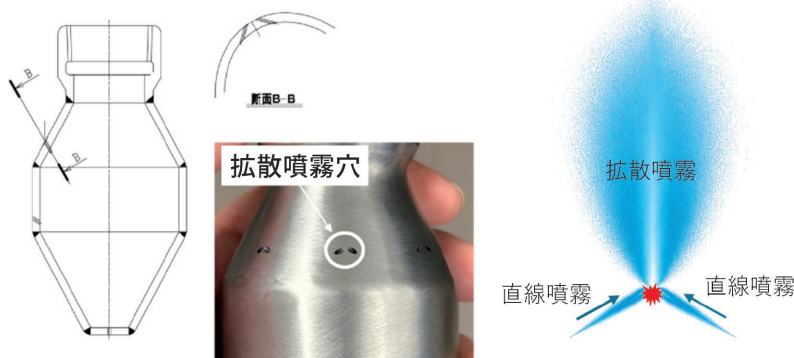


図6 拡散噴霧技術について

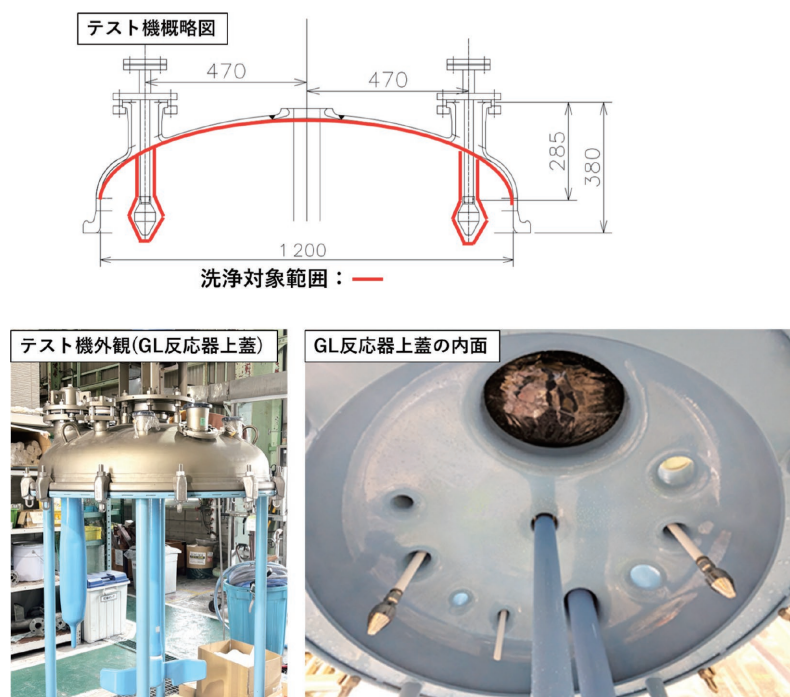


図8 テスト装置概略図と実物写真

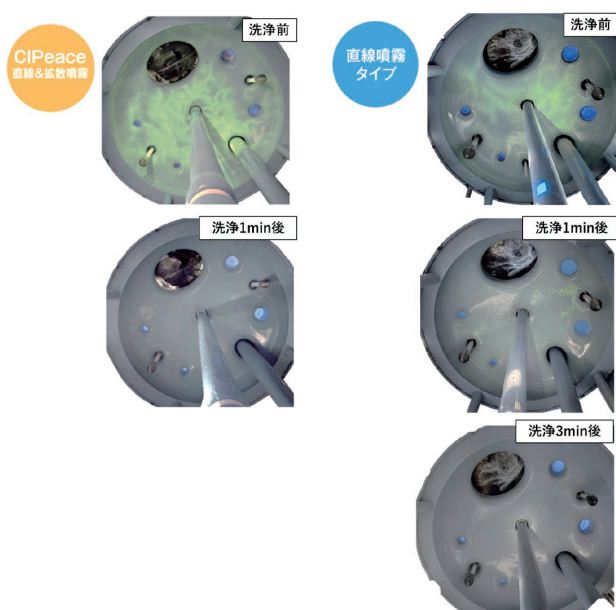


図9 CIPeaceと直線噴霧のみを用いた洗浄装置の洗浄結果

表2 洗浄評価の結果

洗浄評価	CIPeace	直線噴霧ケース
洗浄時間(min)	1	3
流量(L/min)	45	60
使用洗浄液量(L)	45	180

※洗浄圧力0.15MPa

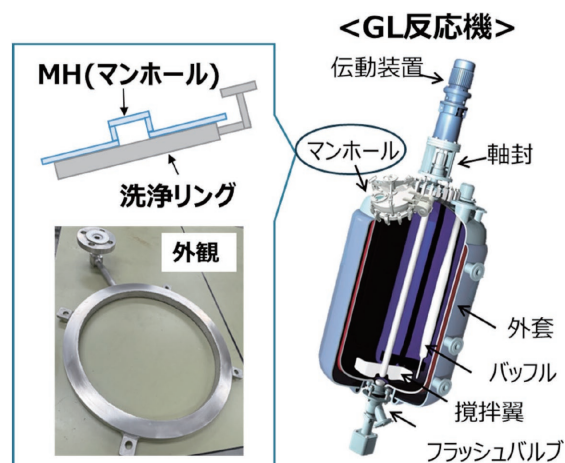


図10 MH 洗浄用リング

発品)では、1分でノズル近傍を含む上鏡全面の洗浄が完了し、洗浄残りは確認されなかった。これにより、洗浄時間を約1/3に短縮できることを確認した。洗浄時間の短縮は設備稼働率および作業効率の向上だけでなく、使用する洗浄液量の低減にも寄与し、環境負荷低減の観点からも有効である。

2.3 他装置への拡散噴霧の適用効果

拡散噴霧技術はCIPeaceに限らず、各種CIP洗浄装置への適用が可能である。例えば、図10に示すマンホール部洗浄リングや、図11に示すヘッダー管の配管部に拡散噴霧孔を設けることで、マンホール蓋部、ヘッダー配管内部の効率的な洗浄に適用できる。図12にマンホール洗浄リングへ拡散噴霧技

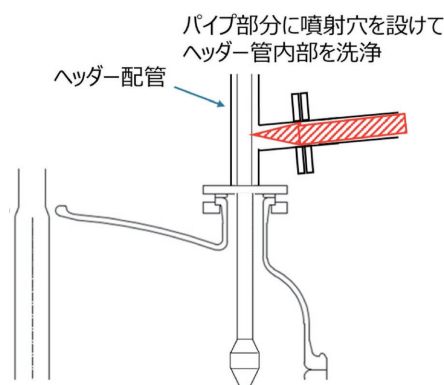


図11 ヘッダー管内部洗浄のイメージ図

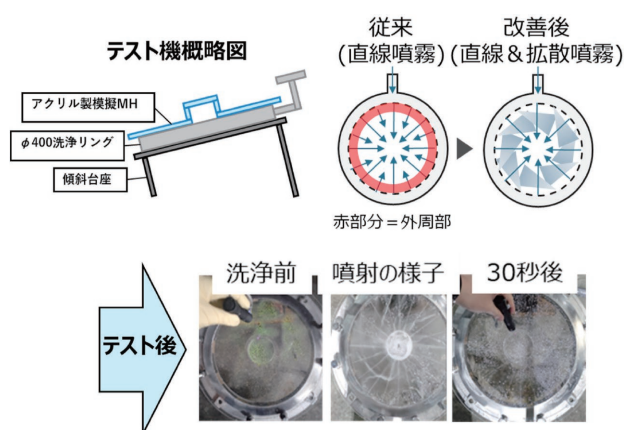


図12 洗浄リングテスト概略図とテスト結果

術を適用した事例を示す。拡散噴霧の適用により、外周部および隙間部の洗浄残りが解消され、洗浄の均一性が向上した。これは、拡散噴霧によって形成される旋回流により、洗浄液がリング内部へ均一に供給されたことによるものと考えられる。また、洗浄時間は従来の1～2分から約30秒へ短縮された。

2.4 まとめ

本開発では、固定式洗浄装置の利点であるコンタミレス性を維持しながら、直線噴霧技術に拡散噴霧技術を組み合わせることで洗浄性能の向上を実現した。主な成果を以下に示す。

- ・ 洗浄時間を従来比約1/3に短縮
- ・ 洗浄液使用量を従来比約1/4に削減
- ・ 固定式洗浄装置の利点であるコンタミレス性を維持
- ・ 拡散噴霧技術の適用により、他のCIP洗浄デバイスにおいても洗浄性能向上を確認

以上の結果より、本技術は洗浄工程の効率化、設備稼働率の向上、ならびに洗浄液使用量の削減による環境負荷低減に有効であることを確認した。

むすび

本稿では、拡散噴霧技術を適用した固定式洗浄装置「CIPeace」を開発し、その有効性を検証した。

本技術により、従来の固定式洗浄装置における課題であった洗浄ムラを改善し、コンタミネーションリスクを抑制しながら高効率なCIP洗浄を実現した。特に、洗浄時間の短縮および洗浄液使用量の削減を達成できたことは、経済性と環境負荷低減の両面において大きな効果を有する。また、洗浄工程の効率化による設備稼働率の向上にも寄与し、生産性向上の観点からも有効であることを確認した。

今後は、各種プロセス機器への適用拡大ならびに図13に示すように製品ラインナップの充実を進めるとともに、医薬・電材分野を中心とした市場展開を推進し、洗浄品質の向上と省資源化に貢献していく。



金属製CIPeace



導電性PTFE製CIPeace
(左：CIPeace-50, 右：CIPeace-80)

図13 製品ラインナップ

廃棄物焼却発電の高温高压化における回転ストーカ炉・ロータリージョイントの構造検証

Structural Verification of Rotary Stoker and Rotary Joint under High-Temperature and High-Pressure Conditions in Waste-to-Energy Plants

前田健一*技術士(上下水道部門)・梶原康司*・梶原吉郎** 技術士(衛生工学部門)・若松秀樹***技術士(衛生工学部門)・島 孝一****

Kenichi Maeda・Yasushi Kajiwara・Yoshio Kajihara・Hideki Wakamatsu・Koichi Shima

廃棄物焼却発電設備においてボイラ水配管から、回転ストーカ（以下 RC）を構成する水管に循環水を分配する装置がロータリージョイント（以下 RJ）である。現設計の RJ は約30年前に10 MPa × 300℃を想定して開発された。開発当初に得られた知見が現設計に適用されており、シール性能の高い海外製のグランドパッキン（以下 GP）や、グランドシール部へのクロムメッキ処理を必要としている。

今回の検証により、安価かつ短納期である国産 GP で、同等のシール性を確保できることが見出された。また、試験期間を通じてクロムメッキなしでもスティックスリップ現象*は起こらず、機械加工のみでも問題ないことを確認した。

※スティックスリップ現象：摩擦面で固着と滑りが交互に発生することによる振動現象

In waste-to-energy incineration power plants, the rotary joint (RJ) is a device that distributes circulating boiler water from the boiler water piping to the water tubes that constitute the rotary stoker (RC). The current RJ was originally designed about 30 years ago for operating conditions of 10 MPa and 300℃. The design continues to reflect the engineering knowledge established at the time of its initial development. Therefore, it requires the use of high-performance imported gland packing (GP) and chromium plating on the gland sealing surface to maintain adequate sealing performance.

The present study demonstrated that a domestically manufactured GP, which is more cost-effective and available within shorter lead times, can achieve sealing performance equivalent to that of the imported GP. In addition, no stick-slip phenomenon was observed throughout the test period, even in the absence of chromium plating, indicating that satisfactory performance can be achieved with a machined sealing surface alone. These results demonstrate the feasibility of cost reduction through the adoption of these measures.

Key Words :

ロータリージョイント	rotary joint
グランドパッキン	gland packing
スティックスリップ	stick-slip

【セールスポイント】

- ・ 価格、入手性が課題であった従来の海外製 GP と安価、短納期である国産 GP の漏洩蒸気量を比較した結果、海外製 GP 平均28.6 L/h に対して、国産 GP 平均18.7 L/h と国産 GP の方が少なかった。
- ・ クロムメッキを施工しない二重連絡管でもスティックスリップによる騒音が発生しないことも確認し、LCC、EPC コストの低減が現実的となった。

*エンジニアリング本部 技術部 プラント技術室 機能開発グループ **エンジニアリング本部 技術部 プラント技術室 基本計画グループ

エンジニアリング本部 技術部 プラント技術室 装置技術グループ *CS 本部 アフターサービス部 設備改善技術室

まえがき

近年、廃棄物焼却発電設備においてボイラの高温・高圧化が進展しており、当社においても常用圧力6 MPa、450℃の蒸気条件が採用されている。回転ストーカ炉はボイラ水管構造であり、RJを介してボイラ飽和水を冷却水として循環させている¹⁾。RJは約30年前（IHI 当時）に10 MPa×300℃を想定して開発されたが、蒸気条件の高温高圧化に伴い、実機条件に即した性能評価が求められている。RJは軸受およびシール装置から構成され、構造上、図1のように一定量の蒸気漏れを許容する設計となっている。

シール装置にはGPを採用しているが、従来は海外製品を使用しており、価格および入手性が課題であった。さらに、軸とGPの摺動部におけるスティックスリップ現象に起因する騒音対策として、二重連絡管表面にクロムメッキが施されており、コスト増加要因となっていた。

これらの課題を踏まえ、本開発では実機同等サイズの試験装置を製作し、技術研究所において実証試験を実施した。本報では、本試験で実施した漏洩蒸気量の定量測定結果、ならびにコストダウンの検証と効果について報告する。

写真1に本試験装置の全景を示す。試験は、当社技術研究所にて実施した。本試験装置は、第一種圧力容器に該当するため、構造検査、設置届および落成検査などの対応が必要であった。安全弁の設定圧は8.2 MPa(G)とした。

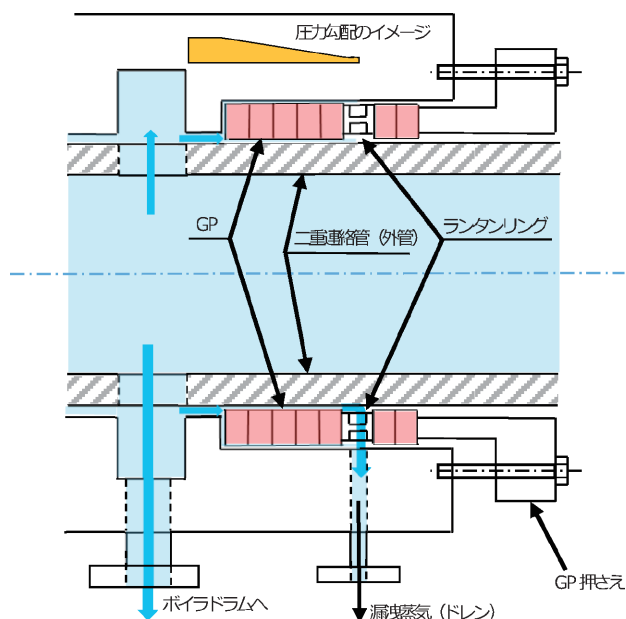


図1 GP部ランタンリングからの漏れ

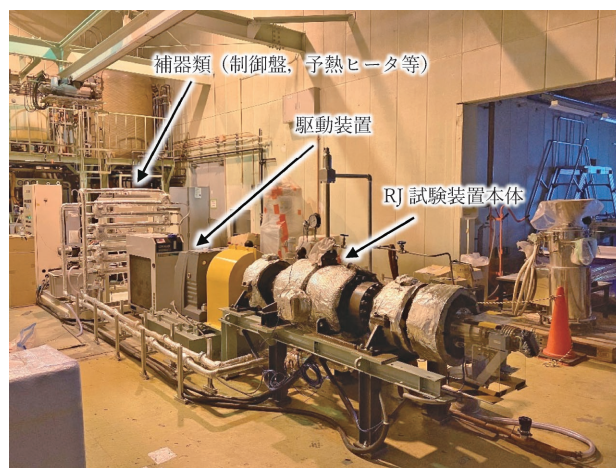


写真1 試験装置全景

1. RJ 実証試験装置

1.1 試験装置フロー

図2にRC炉の全体構成を示す。固定配管から供給されたボイラ水は、RJから連絡管に導かれて、炉壁水管内を循環し、再び二重連絡管、RJを経由して固定配管に導かれる。

図3に試験装置フローを示す。今回の試験は二重連絡管とRJとのシール部の検証を目的として実施したものである。そのため、連絡管は外径および材質を実機と同一とした上で、形状については二重管とせず単管（ドラム）で模擬し、回転数は実機に合わせて0.03 rpmとした。また、トルクについても実機と同等となるようモータおよび減速機を選定した。さらに、実機と同様のシールを前後二箇所にて設け、漏洩蒸気量を測定するために凝縮器を設置した。

圧力、温度はそれぞれ水供給高圧ポンプ、ならび

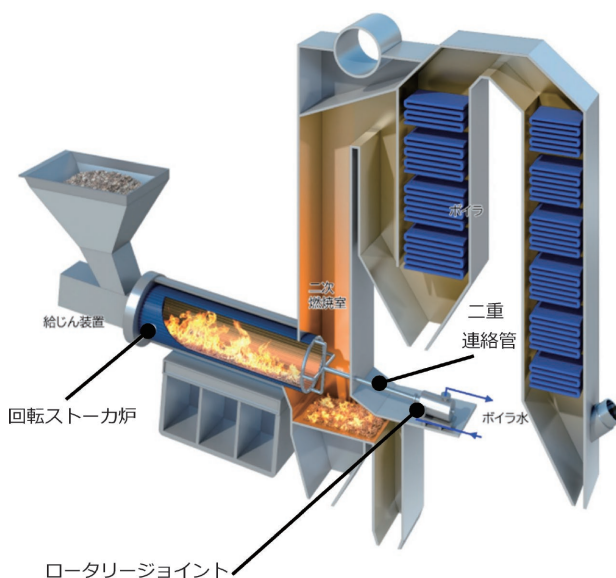


図2 実機ロータリージョイント位置図

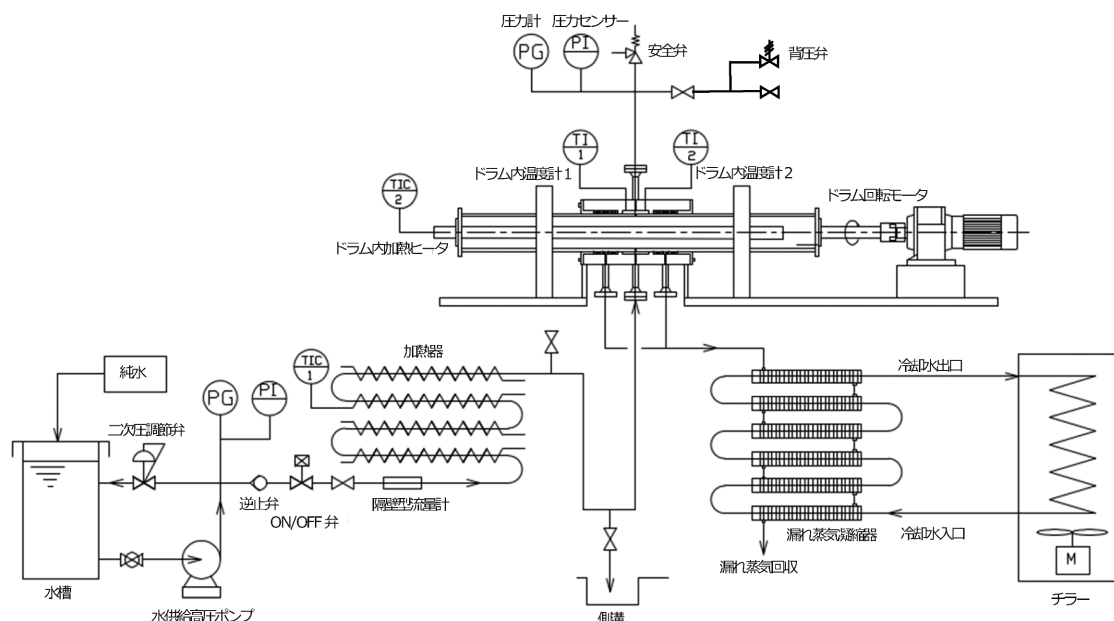


図3 試験装置フロー

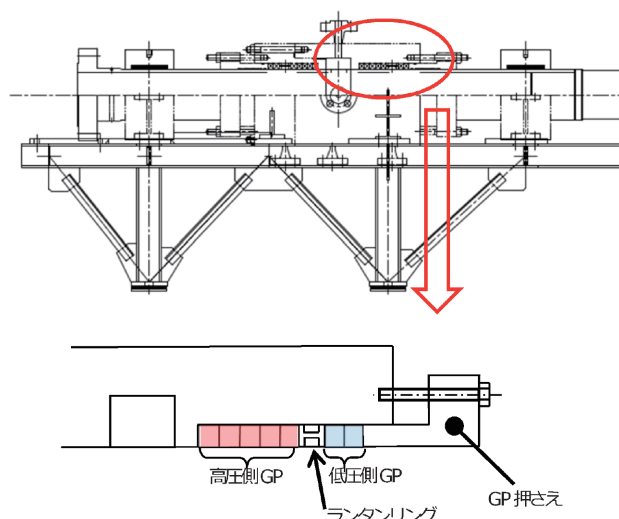


図4 GP 取付部

にドラム端部フランジに取り付けたヒータにより、実機相当まで昇圧および昇温した。

1.2 GP 取付部

図4はGP取付部を簡略的に図示したものである。実機と同じく、片側7本のGPを左右2箇所に設置した。

奥側が高圧側で5本、ランタンリングを挟んで手前側が低圧側で2本取付けた。ランタンリングを挟むことにより、外部にある程度の蒸気を漏洩させ、低圧側から炉室内に蒸気が漏れることを防止している。

2. 漏洩蒸気定量試験

海外製 GP と国産 GP の漏洩蒸気量を測定して比較した。

表1 海外製 GP 漏洩蒸気定量試験条件

RUN No.	設定温度 (°C)	実測平均漏温度 (°C)	設定圧力 (MPa)	実測平均圧力 (MPa)	軸回転数 (r.p.m.)	漏洩蒸気量 (kg/h)	備考
1-1	270	268.1	7.2	7.17	0.03	24.1	
1-2		267.9		7.16		27.4	
1-3	275	272.8		7.17		28.0	
1-4		275.9		7.23		29.2	
1-5	280	275.5		7.24		35.5	
1-6		268.4		7.17		30.3	
1-7	255	254.0	6.0	5.99	0.12	26.5	
1-8	262	259.8	6.4	6.33		29.1	
1-9	266	265.8	6.8	6.75		27.0	
1-10	270	268.0	7.2	7.19		30.2	加速試験
1-11		267.2		7.16		28.0	
1-12	(常温→) 270	267.3		7.20	0.03 (→0.01)	28.5 (主条件分のみ)	常温高圧試験も実施

2.1 漏洩蒸気定量試験 Run 1 (海外製 GP)

2.1.1 試験条件 (海外製 GP)

従来品の海外製 GP を使用した漏洩蒸気定量試験の条件を表1に示す。設定圧力は7.2 MPa(G)，設定温度は270℃をベースにして試験した。

試験圧の7.2 MPa(G)は、6.0 MPa、450℃ボイラの蒸気ドラムの最高使用圧力（高質ごみ）6.81 MPaに、ボイラ循環水ポンプの吐出圧0.37 MPaを加えた値が7.18 MPaになることから決定した。

7.2 MPa(G)の飽和温度は、約289℃であり当初、設定温度280℃にて試験を実施したが、当該温度付近で、安全弁が度々作動したことから、飽和温度より低い設定で試験を行った。

2.1.2 試験結果 (海外製 GP)

海外製 GP での漏洩蒸気定量試験の結果を図5に示す。試験条件表1の通り、温度は254.0～275.9℃、圧力は5.99～7.24 MPa(G)の範囲で変化させたが、

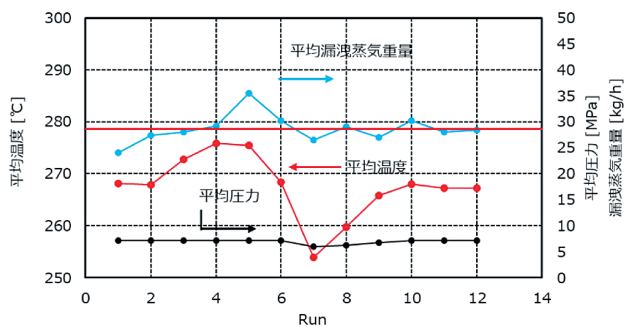


図5 漏洩蒸気量定量試験結果（海外製 GP）

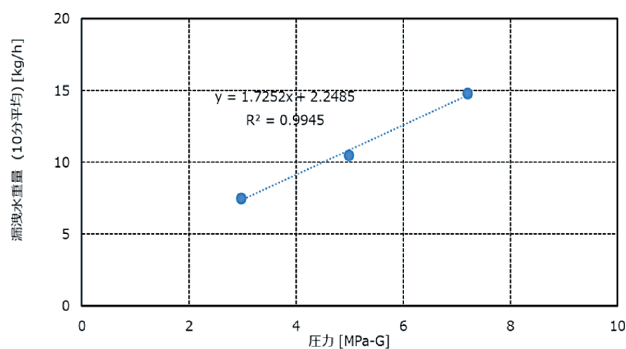


図8 常温高压試験漏洩水量試験結果

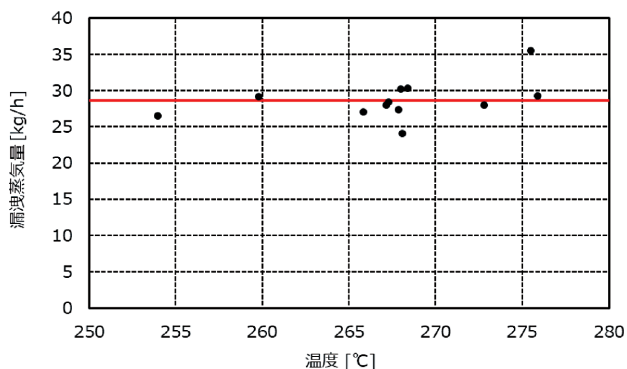


図6 漏洩蒸気量定量試験結果（海外製 GP）
（温度と漏洩蒸気量の関係）

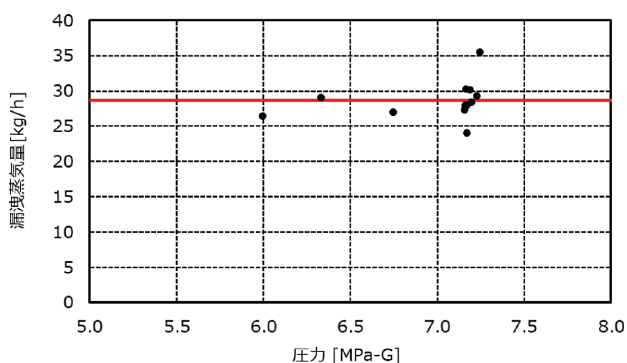


図7 漏洩蒸気量定量試験結果（海外製 GP）
（圧力と漏洩蒸気量の関係）

漏洩蒸気量は、平均28.6 L/h となった。

図6は温度と漏洩蒸気量の関係、図7は圧力と漏洩蒸気量の関係を示す。上記の範囲では温度、圧力を変化させても漏洩蒸気量に大きな変化はなかった。

2.1.3 常温高压試験

GP の特性を調査するためにヒータを使用せずに圧力のみ高めた試験を実施した。図8に常温高压試験時の圧力と漏洩水量の関係を示す。高温高压の場合と異なり、常温では、圧力と GP 漏洩水量は比例関係になった。

表2 国産 GP 漏洩蒸気量定量試験条件

RUN No.	設定温度 (°C)	実測平均温度 (°C)	設定圧力 (MPa)	実測平均圧力 (MPa)	軸回転数 (r.p.m.)	漏洩蒸気量 (kg/h)	備考
2-1	250	248.4	7.2	7.19	0.03	35.2	
2-2		249.7		7.19		11.7	
2-3		249.7		7.19		13.4	
2-4		249.2		7.19		16.6	
2-5	235	234.5	6.0	5.97		13.9	
2-6	240	239.3	6.4	6.38		19.7	
2-7	245	243.9	6.8	6.78		19.2	
2-8	250	248.7	7.2	7.18		19.7	

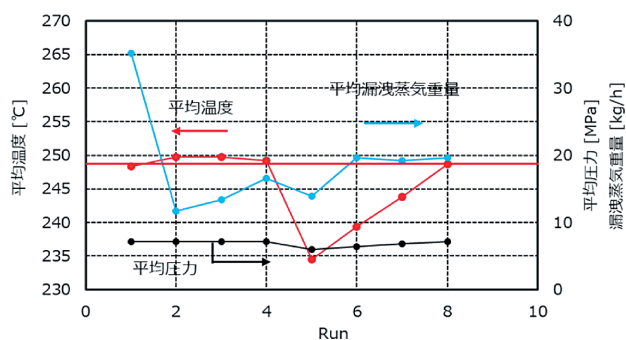


図9 漏洩蒸気量定量試験結果（国産 GP）

2.2 漏洩蒸気量定量試験 Run 2（国産 GP）

2.2.1 試験条件（国産 GP）

海外製 GP の次に国産 GP を使用して漏洩蒸気量定量試験を実施した。試験条件を表2に示す。設定圧力は、海外製 GP と同じ7.2 MPa(G)をベースとした。

試験温度は、海外製 GP と同じ270℃では、安全弁が作動するトラブルが解決していなかったため、250℃ベースに変更した。

2.2.2 試験結果（国産 GP）

国産 GP での漏洩蒸気量定量試験の結果を図9に示す。初日の漏洩蒸気量は、1日を平均すると35.2 L/h と、海外製 GP に比べてやや多かったが、試験開始後3.5 h までは漏洩蒸気量は60 L/h 程度であったものが徐々に低下して、試験終了時には10 L/h 程度まで下がった。GP が馴染んだことが漏洩蒸気量

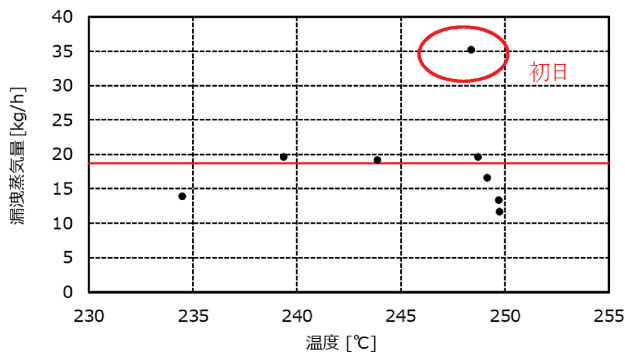


図10 漏洩蒸気量定量試験結果（国産 GP）
（温度と漏洩蒸気量の関係）

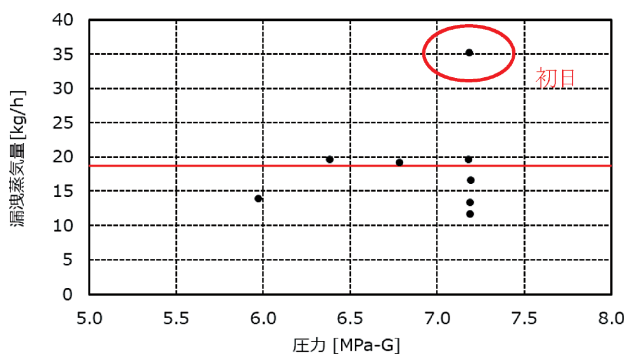


図11 漏洩蒸気量定量試験結果（国産 GP）
（圧力と漏洩蒸気量の関係）

が低下した原因と考えられる。

試験条件表 2 の通り、温度は 234.5 ～ 249.7℃、圧力は 5.97 ～ 7.19 MPa(G) の範囲で変化させたが、初日も含めた漏洩蒸気量は、平均 18.7 L/h となった。これは、従来の海外製 GP の平均 28.6 L/h よりも少ない漏洩量であった。

図10は温度と漏洩蒸気量の関係、図11は圧力と漏洩蒸気量の関係を示す。上記の範囲では海外製 GP と同様に温度、圧力と漏洩蒸気量の間に明確な相関関係は見出せなかった。

3. クロムメッキ施工の要否確認

本試験では、海外製 GP、国産 GP とともに二重連絡管を模擬したドラムは、機械加工（表面粗さ = 1.6 μm）を行ったのみで、クロムメッキは施工していなかったが、試験期間を通じてスティックスリップ現象は 1 度も起きなかった。

軸回転時と軸停止時の等価騒音レベルを測定した結果を表 3 に示す。軸停止時と軸回転時の等価騒音レベルの差は、1 dB 以下でありスティックスリップによる騒音が発生していないことが数値でも確認出来た。

クロムメッキを施工しなくてもスティックスリップによる騒音が発生しなかった要因としては、GP

表 3 騒音測定結果（クロムメッキ施工なし）

GP名	測定日	実験 圧力 (MPa)	実験 温度 (℃)	回転数 (r.p.m.)	等価騒音 レベル LAeq(dB)	軸停止 等価騒音 レベル LAeq(dB)	ΔL (dB)
GrafolanHT6570 +T/#9077-L	'26/1/30	7.2	270	0.1	65.2	64.9	0.3
	'26/2/3	7.2	270	0.03	70.6	70.2	0.4
パルカー 6399R+VF22R	'26/3/11	7.2	250	0.03	71.3	71.0	0.3

締付方法の確立、GP 性能の向上、二重連絡管表面の機械加工精度が向上したことが挙げられる。

4. コストダウン試算

国産 GP の漏洩蒸気量平均値は、18.7 L/h であり、従来の海外製 GP の 28.6 L/h と比較して少なかった。また、クロムメッキを施工しない二重連絡管でもスティックスリップによる騒音は発生しなかったため、国産 GP 採用による LCC 低減と、クロムメッキ不要による EPC コスト低減が現実的となった。

処理規模 150 t/d ・ 炉、ボイラ 6 MPa の 2 炉、運営期間 20 年でコストダウンの試算を行った結果、EPC コスト削減額は、7 200 千円／2 炉、LCC 削減額は、11 100 千円／20 年 ・ 2 炉と算出された。

5. RJ 漏洩蒸気への油分の混入

5.1 RJ 漏洩蒸気凝縮水の油分分析

RJ 漏洩蒸気の凝縮水には、GP に含浸された油分が混入する。凝縮水の適正処理のため、今回の試験で生じた凝縮水中の油分についても分析を行った。

表 4 に海外製 GP の終了時、国産 GP の開始時と終了時のヘキサン抽出物質の分析結果を示す。国産 GP 使用時の漏洩蒸気へのヘキサン抽出物質は、試験開始時 92 mg/L に対して、終了時には 1.2 mg/L、海外製 GP では、終了時のデータのみであるが 3.6 mg/L まで低下していた。経過日数の増加に伴い、検出下限未満まで低下することも考えられ、一定期間経過後は特段の処理を行わずに再利用水として使用できる可能性が示唆された。

5.2 GP 含油量の分析

漏洩蒸気への油分の混入は、GP のどの箇所から漏出したものか確認するために試験終了後の GP を取出し、含油量の分析を行った。サンプリング箇所は図12上段の軸側、中間部、外側と下段の GP 位置の組合せとした。分析結果を表 5 に示す。

表 4 漏洩蒸気凝縮水中の油分の推移

試料名	採水日	試験 経過 日数	ヘキサン 抽出物質 (mg/L)
海外製GP終了時	'26/2/3	13	3.6
国産GP開始時	'26/3/2	1	92
国産GP終了時	'26/3/11	8	1.2

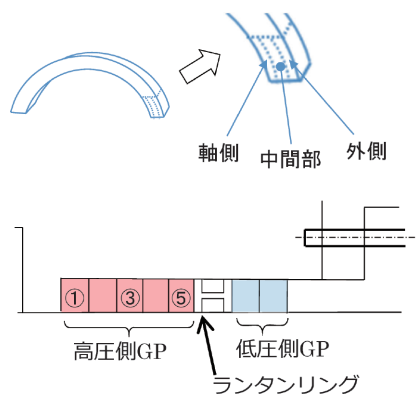


図12 GP サンプリング箇所

表5 GP の含油量分析結果

試料名		含油量(wt%)
新品		3.8
終了時① 高圧側 最内側	軸側	0.47
	中間部	0.03
	外側	0.79
終了時③ 高圧側 中間部	軸側	2.1
	中間部	1.9
	外側	2.2
終了時⑤ 高圧側 最外側	軸側	1.1
	中間部	1.1
	外側	1.3

分析結果から最上流側に位置する最内部の含有量が最も低下していた。また軸側、中間部、外側の別では、特に①では中間部が最も含有量が低下していた。軸側、外側から油分が流出すると内部から油分が供給されるようになっていると考えられる。

6. 海外製 GP と国産 GP の比較まとめ

海外製 GP と国産 GP の比較評価をまとめて表6に示す。国産 GP は、これまで当社が標準的に採用していた海外製 GP よりもメリットが多かった。ただし、今回は試験期間が短く、長期的な評価については実機での運用を通じて検証する必要がある。

表6 海外製 GP と国産 GP の比較評価

項目	海外製 GP	国産 GP
価格	高価	安価
入手性	長納期	短納期
蒸気漏洩量	平均 28.6L/h	平均 18.7L/h
騒音性	スティックスリップ発生無	スティックスリップ発生無
運転実績	当社実績多数	実績無
漏洩蒸気凝縮水中の油分	3.6mg/L (13日後)	1.2mg/L (8日後)

む す び

RC 炉に循環水を分配する装置である RJ の GP は、これまで海外製のため価格と入手性が課題であった。本試験では、安価で入手性の良い国産 GP での蒸気漏洩量を測定し、従来の海外製 GP での蒸気漏洩量と比較した。結果は、海外製平均 28.6 L/h、国産 GP 平均 18.7 L/h となり国産 GP の方が少ない結果となった。

また、スティックスリップによる騒音発生を抑えるために、これまで二重連絡管にはクロムメッキが施工されてきた。本試験においてクロムメッキを施工しない二重連絡管を模擬したドラムで試験し、スティックスリップによる騒音が発生しないことを確認した。

以上のことより、国産 GP 採用による LCC 低減と、クロムメッキ不要による EPC コスト低減が現実的となった。

さらに漏洩蒸気凝縮水中の油分の分析を行い、試験の経過に伴い、油分が低下することを確認した。このため一定期間経過後は特段の処理を行わずに再利用水として使用できる可能性が示唆された。

[参考文献]

- 1) 成澤道則：神鋼環境ソリューション技報 vol.15 No.2, (2019/3)

廃棄物焼却炉ボイラのシャワークリーニングを用いた排水クローズドシステムの開発

Development and Demonstration of a Closed-Loop Wastewater Treatment System Using Boiler Shower Cleaning in Waste-to-Energy Plants

立見友幸*・工藤貴洋*・梶原吉郎**技術士(衛生工学部門)

Tomoyuki Tachimi・Takahiro Kudo・Yoshio Kajihara

排水クローズドシステムを採用する廃棄物焼却発電設備向けに、ボイラの伝熱面洗浄に用いるシャワークリーニング装置を活用した排水濃縮水処理システムを開発した。本システムでは、排水濃縮水をボイラ内部へ噴霧し蒸発処理することで、排水処理機能と伝熱面洗浄機能を両立する。

実機での実証試験の結果、排水濃縮水を継続的に噴霧した場合においても、排水処理システムとして安定した運転が可能であることを確認した。また、シャワークリーニングによる付着灰の除去により熱回収性能が向上することを確認した。さらに、本技術は排水処理設備の簡素化に加え、ボイラおよび建屋のコンパクト化に寄与できることを確認した。

We developed a concentrated wastewater treatment system utilizing a boiler shower cleaning solution for boiler heat-transfer surfaces intended to waste-to-energy plants that incorporate a closed-loop wastewater treatment system. In this system, concentrated wastewater is sprayed into the boiler, where it is evaporated, which enables both wastewater treatment and heat-transfer surface cleaning.

Demonstration tests conducted at a commercial-scale plant showed that the system could stably be operated even under continuous spraying of concentrated wastewater. In addition, the removal of ash deposits by the shower cleaning system improved the boiler's heat recovery performance. The study also demonstrated that the proposed technology could contribute not only to the simplification of wastewater treatment facilities but also to the downsizing of both the boiler and the plant building.

Key Words :

排水クローズドシステム

closed-loop wastewater treatment systems

シャワークリーニング

shower cleaning

【セールスポイント】

- ・排水濃縮水の蒸発処理とボイラ伝熱面の洗浄を同時に実現することで、安定した排水処理と設備のコンパクト化を両立した。
- ・シャワークリーニングによる付着灰除去により熱回収性能の改善を確認した。

ま え が き

近年、廃棄物焼却発電設備では、発電効率の向上や環境負荷低減に加え、設備のコンパクト化およびライフサイクルコストの低減が重要な技術課題となっている。特に、下水道が普及していない地域では排水クローズドシステムが採用され、膜処理設備を導入し、ろ過水をプラント用水として再利用する

場合がある。その際、膜処理設備からは一部排水濃縮水が発生し、系内で処理することとなる。この排水濃縮水の処理方法が設備構成や運転性能に大きく影響する。排水濃縮水の蒸発処理方式は、減温塔の要否、炉内熱収支、設備高さ、建屋規模および運転安定性に影響を及ぼすことから、より合理的な処理技術の確立が求められている。

*エンジニアリング本部 技術部 プラント技術室 機能開発グループ

**エンジニアリング本部 技術部 プラント技術室 基本計画グループ

一方、廃棄物焼却ボイラでは伝熱面への付着灰の堆積により熱回収性能が低下することから、付着灰の除去による伝熱性能の維持も重要な課題である。シャワークリーニングはボイラ内部に付着した灰を洗浄・除去する技術として適用が進められているが、その活用方法についてはさらなる展開の可能性を有している。

図1に廃棄物焼却発電設備の概略フローおよび本技術の適用位置を示す。排水クロードシステムでは、排水処理設備から発生する濃縮水の処理が必要となる。本技術は、ボイラの2パスに設置したシャワークリーニング装置を活用し、濃縮水の蒸発処理と伝熱面洗浄を同時に実施するものである。ボイラ2パスは、焼却炉から流出した高温排ガスが通過するボイラ煙道の2段目にあたり、本技術ではこの区画に設置したシャワークリーニング装置を用いて濃縮水の蒸発処理を行う。本システムの適用により、排水処理設備の簡素化に加え、熱回収性能の維持・向上、ボイラおよび建屋のコンパクト化ならびに運転性向上が期待される。本報では、実機試験による評価結果について報告する。

1. 実証試験装置

1.1 シャワークリーニング装置

図2に本試験で使用したテスト用のシャワークリーニング装置を示す。シャワークリーニング装置はホース昇降機およびシャワーノズルから構成され

ており、本機をボイラ上部に設置し、ボイラ内部に投入したシャワーノズルをホース昇降機によって上下に移動させながら伝熱面に水を噴霧する。

図3に本試験で使用した回転式シャワーノズルを示す。シャワーノズルには、供給水の水流を利用して回転しながら水を噴霧する回転式と、内部の衝突板によって噴霧流を放射状に拡散させる固定式がある。回転式は広範囲へ均一に水を供給できることから、本試験では主として回転式シャワーノズルを使用した。

一方、排水濃縮水には塩類などの無機成分が含まれているため、蒸発に伴う析出物によって回転機構やノズル流路が閉塞することが懸念された。そこで、本試験では回転式シャワーノズルを用いてその適用性を評価した。なお、固定式シャワーノズルについても適用を検討したが、本報では回転式シャワーノズルによる評価結果について述べる。

なお、噴霧された水は伝熱面に付着した後に蒸発し、液体から気体への相変化に伴う体積膨張によって堆積飛灰を剥離・除去することで、ボイラ内部を洗浄する。

1.2 試験フロー

図4にシャワークリーニング装置によるボイラ2パス水噴霧の試験フローを示す。既設の排水処理設備で発生した排水濃縮水を給水タンクに一時的に貯留した後、給水ポンプによってシャワークリーニン

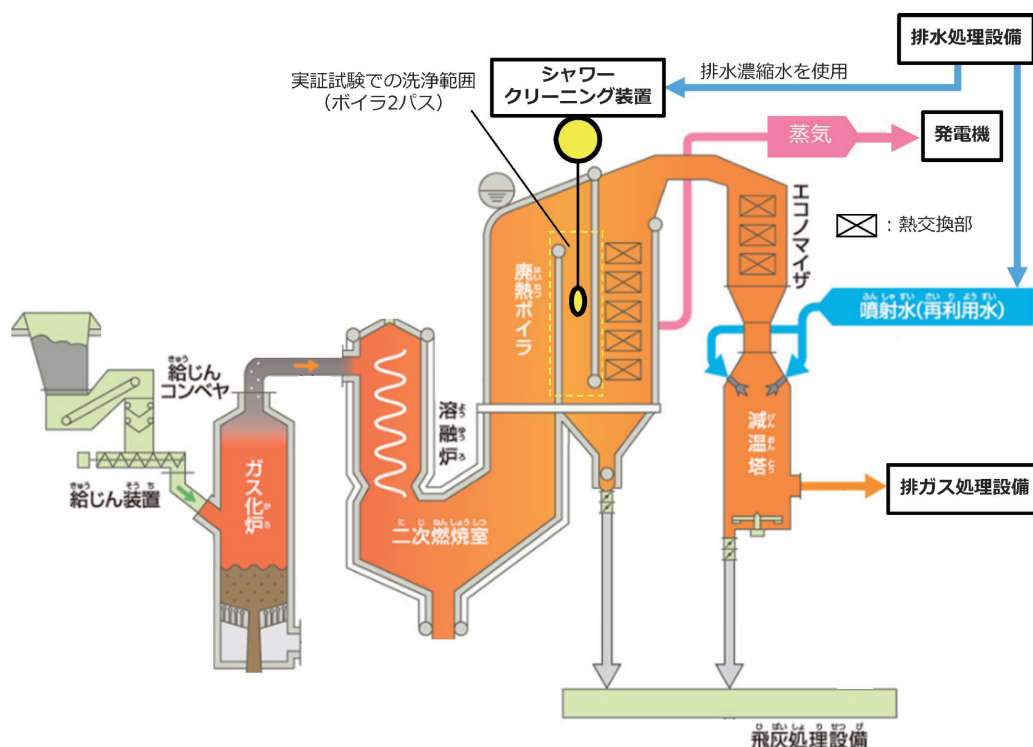


図1 シャワークリーニングを用いた排水クロードシステムの概要

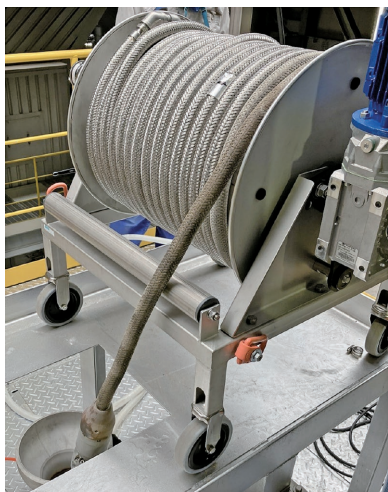


図2 シャワークリーニング装置

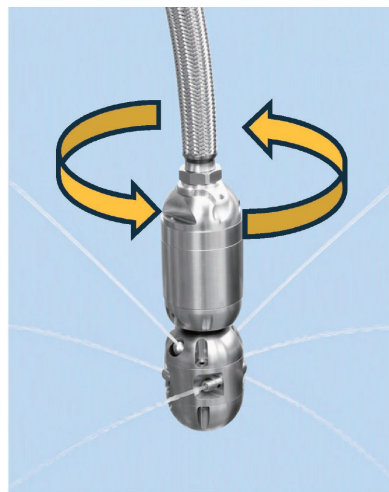


図3 回転式シャワーノズル

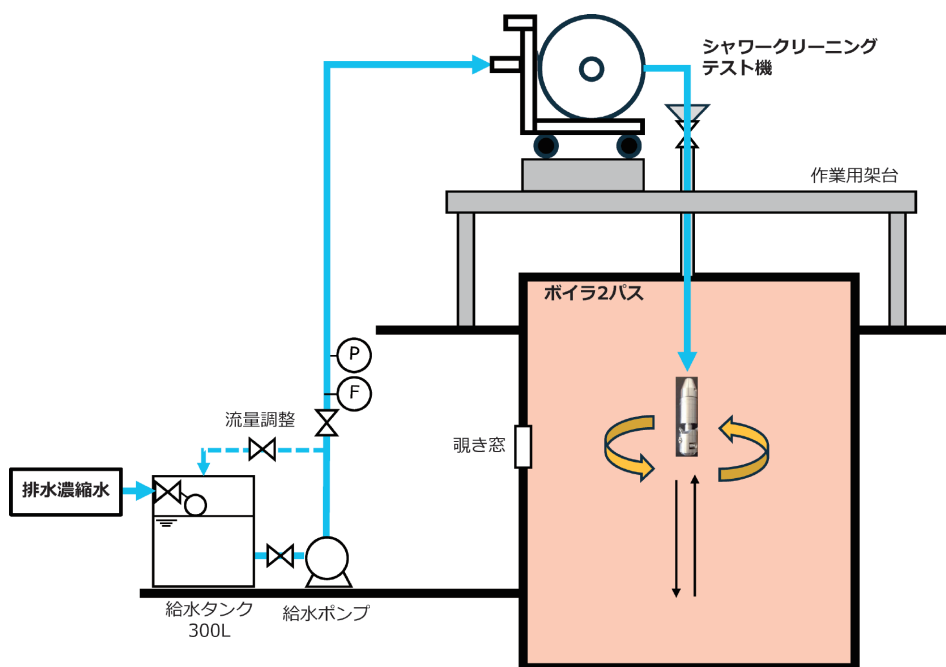


図4 試験フロー

グ装置へ供給した。供給された排水濃縮水は、ボイラ2パス上部に設置したシャワークリーニング装置を介してボイラ内部へ噴霧され、蒸発処理された。

本試験では、ボイラ2パスへの水噴霧による排水処理能力および運転安定性を検証するとともに、熱回収性能や排ガス特性への効果を評価した。

2. 試験方法

2.1 排水濃縮水

本試験では、実施設の排水濃縮水を使用した。表1に代表的な成分の分析結果を示す。排水濃縮水には塩化物や硫酸塩等の無機塩類が含まれていることから、蒸発処理に伴うスケール生成やボイラ伝熱面への影響を調査した。

表1 排水濃縮水の主要成分

分析項目	濃度	単位
浮遊物質量 (SS)	< 1 ~ 7	mg/L
溶解性蒸発残留物	1000 ~ 1300	mg/L
全硬度	210 ~ 270	mgCaCO ₃ /L
ナトリウム	270 ~ 300	mg/L
塩化物イオン	310 ~ 370	mg/L
硫酸イオン	300 ~ 470	mg/L
カルシウム	79 ~ 100	mg/L

2.2 水噴霧条件

実機における排水濃縮水の発生量を想定し、水噴霧量は1回当たり約200～300 Lとした。噴霧は約1時間ごとに実施し、排水濃縮水の蒸発処理および付着灰の除去を行った。

2.3 評価項目

本システムの適用性を評価するため、短期評価項目および長期評価項目を設定した。

短期評価項目として、水噴霧時の焼却炉のオペレーション、ボイラ蒸気量、排ガス温度、飛灰搬送設備の運転状況およびユーティリティ使用量を調査し、水噴霧中の運転安定性への影響を確認した。

また、長期評価項目として、ボイラ水管の減肉、水管付着飛灰性状およびシャワークリーニング装置の耐久性等を調査した。これらの調査を通じて、高頻度の水噴霧が設備の健全性および運転特性に及ぼす影響を評価した。

3. 性能評価

3.1 排水処理システムとしての適用性評価

表2に適用性評価結果を示す。オペレーションについては、水噴霧に伴う操作量の増加は認められず、運転管理上の大きな支障は確認されなかった。ボイラについては、図5に示す通り、噴霧水の蒸発により蒸気量および排ガス流量は一時的に変動したものの、許容範囲内の変動であり、安定した運転が可能であった。飛灰搬送設備については、試験中のボイラ2パスからの排出飛灰の性状に大きな変化は認められず、搬送系においても二重ダンパやコンベヤの過負荷等の異常は発生しなかった。排ガス処理設備についても、アンモニア使用量などのユーティリティ消費量は通常運転時と同等の範囲で推移した。また、排水濃縮水に含まれる塩化物成分による排ガス処理設備への影響は限定的であり、消石灰使用量についても大きな変化は認められなかった。

また、長期的な影響を確認するために実施したボイラ内部調査および水管肉厚測定の結果、本試験に

よる減肉や損傷は認められなかった。シャワークリーニング装置のノズル閉塞についても試験期間中に問題は発生せず、排水濃縮水の連続噴霧に対する適用性を確認した。

以上の結果より、本システムは排水処理設備として必要な処理能力を有するとともに、短期的および長期的な観点から安定した運転が可能であることを確認した。

3.2 シャワークリーニングによる洗浄効果

図6に、シャワークリーニング実施後のボイラ内部を示す。洗浄範囲外の飛灰付着状況と比較すると堆積飛灰が少なく、伝熱面が隅々まで良好に洗浄されていることを確認した。

図7、図8にボイラ2パスの入口および出口の排ガス温度の推移を示す。入口温度は洗浄前後でほぼ同等であったのに対し、出口温度は洗浄後に低下し、その傾向は約6日間継続した。このことから、シャワークリーニングによる付着飛灰の除去によって伝熱面の熱伝達が改善され、ボイラ2パスの熱回収性能が向上したものと考えられる。

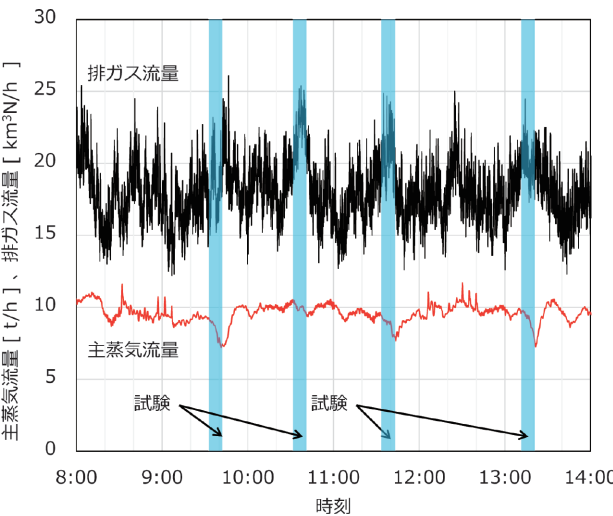


図5 蒸気量および排ガス流量の変動

表2 排水処理システムとしての適用性評価

区分		結果	評価
オペレーション		試験期間中の操作量は変わらない	良好
ボイラ	蒸気量	噴霧中は蒸気量が減少するが、許容範囲	良好
	排ガス	噴霧水蒸発分だけ流量は増加するが、通常の範囲内	良好
飛灰搬送	飛灰	排出飛灰は湿潤せず、いつも通り～わずかに湿る程度	良好
	搬送系	2重ダンパ、コンベアの過負荷無し	良好
排ガス処理	ユーティリティ	アンモニア使用量等、通常の範囲内	良好



図6 試験終了から6日後のボイラ内部（左：洗浄範囲外，中央・右：洗浄範囲内）

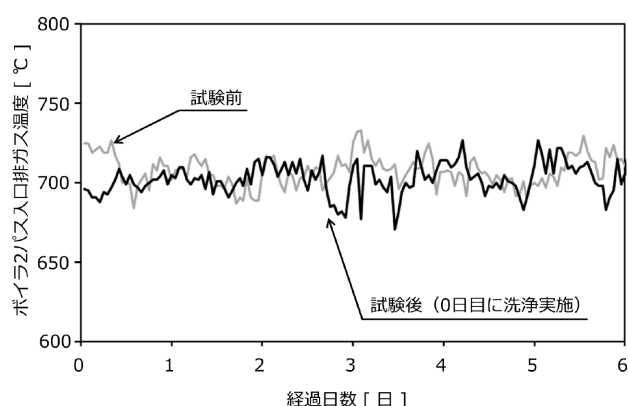


図7 ボイラ2パス入口排ガス温度推移

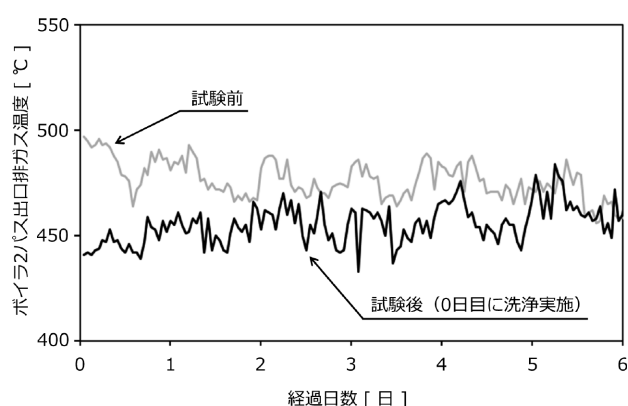


図8 ボイラ2パス出口排ガス温度推移

4. ライフサイクルコスト（LCC）

4.1 評価条件

排水濃縮水の処理方式による設備構成およびライフサイクルコストへの影響を評価するため、代表的な処理方式を対象として比較検討を行った。評価対象は、炉内で処理する方式、本開発のボイラ2パス

で処理する方式、および減温塔で処理する方式とし、設備構成ならびに維持管理を含めた総合的な観点から評価した。

4.2 評価結果

表3にLCC評価結果を示す。本開発方式では、排水濃縮水をボイラ2パスで蒸発処理することによ

表3 LCC 評価結果

	Case 1	Case 2	Case 3
排水濃縮水 処理方式	炉内噴霧方式 [比較]	ボイラ2パス噴霧方式 [本開発方式]	減温塔に噴霧 [従来方式]
建屋躯体	基準	低減 (建屋規模の縮小)	Case 1と同等
ボイラ	基準	低減 (ボイラ本体、耐火材の縮小)	低減 (エコノマイザの縮小)
減温塔	無し	Case 1と同等	増加 (減温塔導入、及び、維持管理)
シャワークリーニング装置	無し	増加 (装置導入、及び、維持管理)	Case 1と同等
総合評価	基準	Case1と概ね同等～微増傾向	Case1より増加傾向

り、排水処理設備の簡素化に加え、ボイラおよび建屋のコンパクト化が可能となることを確認した。一方で、本システムを構成するシャワークリーニング装置の導入および維持管理が必要となる。各方式を総合的に比較した結果、本開発方式は他方式と同等のライフサイクルコストを有するとともに、設備構成の合理化や運転面での付加価値を有することが確認された。

む す び

本開発では、ボイラ2パスに設置したシャワークリーニング装置を用いて排水濃縮水を噴霧処理するシステムを開発し、実証試験を実施した。

その結果、排水濃縮水を高頻度で噴霧した場合においても、排水処理システムとして安定した運転が可能であることを確認した。また、シャワークリーニングによる伝熱面洗浄によって熱回収性能の向上が確認された。また、回転式シャワーノズルが本システムに適用可能であることを確認した。

以上より、本技術は排水処理機能とボイラ性能向上を両立できる技術であり、排水クローズドシステムを採用する廃棄物焼却発電設備における新たな排水処理方式として有効であることを確認した。

以 上

高純度水素発生装置 HHOG[®] の CO₂排出削減用途への適用

— TOTO 株式会社における衛生陶器焼成工程の水素混焼の取り組み—

Application of the HHOG[®] High-purity Hydrogen Oxygen Generator for CO₂ Emissions Reduction

— Hydrogen Co-firing in the Sanitary Ware Firing Process at TOTO Ltd. —

氏林亮太*・田平智哉**

Ryota Ujibayashi・Tomoya Tahira

当社の高純度水素発生装置 HHOG は、水と電気から高純度水素を製造し、供給する水電解式水素発生装置である。近年、CO₂排出量削減に向けた取り組みの一環として、再生可能エネルギー由来の電力を利用して製造したグリーン水素の利活用が拡大している。

TOTO 株式会社では衛生陶器の焼成工程において都市ガスと水素を併用する水素混焼技術確立し、HHOG（SH-100D-G II）により製造したグリーン水素を活用している。同取り組みにより、年間140 t（7 % 相当）の CO₂排出量削減効果が見込まれている。

The HHOG[®] High-purity Hydrogen Oxygen Generator is a water electrolysis system that produces and supplies high-purity hydrogen using water and electricity. In recent years, the utilization of green hydrogen produced by electricity from renewable energy sources has expanded as part of the efforts to reduce CO₂ emissions. TOTO Ltd. has established a hydrogen co-firing technology that utilizes both piped gas and hydrogen in the sanitary ware firing process. The green hydrogen utilized in the process is produced by the HHOG[®] (SH-100D-GII) system. The initiative is expected to contribute to the reduction of CO₂ emissions by approximately 140 tons per year, equivalent to about 7 % of the current emissions.

Key Words :

水	電	解	Water electrolysis
プ	ロ	ト	Proton exchange membrane
ン	交	換	
膜			
高純度水素発生装置			High-purity Hydrogen Oxygen Generator
水	素	混	Hydrogen co-firing
焼			
再生可能エネルギー			Renewable energy
カーボンニュートラル			Carbon neutrality

【セールスポイント】

- ・純度99.999 % 以上の水素ガスを簡単に安定供給できる。
- ・主なユーティリティは水と電気であり化学薬品を使用しないこと、そして水素製造工程における副産物は酸素ガスのみであることから、安全で環境負荷が低い。
- ・国内外における HHOG の納入実績は約260台（2026年 4 月時点）であり、固体高分子電解質膜を用いる水素発生装置の国内トップシェアを有する。

*プロセス機器事業部 水素事業推進部 エンジニアリング室

**プロセス機器事業部 水素事業推進部 営業室

まえがき

近年、地球温暖化の進行に伴う異常気象の増加や環境問題の深刻化を背景として、世界各国で温室効果ガス排出量の削減に向けた取り組みが加速している。日本においても2050年カーボンニュートラルの実現を国家目標として掲げており、産業部門を中心にCO₂排出量削減が求められている。このような状況の中、既存のエネルギー利用プロセスへ水素を導入し、化石燃料の使用量削減を図る取り組みが広がっている。

TOTO株式会社（以下、TOTO）では衛生陶器の焼成工程におけるCO₂排出量削減を目的として、都市ガスとグリーン水素を混ぜて焼成する水素混焼技術確立し、世界で初めて*水素混焼での衛生陶器の生産を開始した。本取り組みでは当社製高純度水素発生装置（High-purity Hydrogen Oxygen Generator, HHOG）のSH-100D-G IIにより製造された水素ガスが使用されている。

本事例は、将来の水素社会を見据えた先進的な取り組みの一つである。本稿では、当社水素発生装置の特徴と、TOTOが推進する水素混焼の取り組みの概要について紹介する。

1. 高純度水素発生装置 HHOG¹⁾

1.1 プロトン交換膜による水電解の原理

HHOGはプロトン交換膜（Proton Exchange Membrane, 以下 PEM）を用いた水の電気分解により水素を発生させる。

PEM型水電解は、純水を直接電気分解して水素と酸素を発生する方式である。固体高分子膜を用いるため、アルカリ水電解のように電解液を循環させる必要がなく、水以外の原料を必要としない。そのため、水素の発生工程において不純物の混入が生じにくく、精製工程を経ることなく、高純度の水素を安定的に得ることができる。

さらに、副生成物が酸素のみであるため、廃液が発生しない環境負荷の低い水素製造方式であるといえる。

1.2 システムフロー

HHOG内のシステムフローを図1に示す。

装置内の純水装置で製造された純水は、循環水ポンプによって電気分解モジュールへ供給される。電気分解モジュールに整流器から直流電流を印加することで水の電気分解が生じ、水素と酸素が発生する。電気分解に使用されなかった純水は純水タンクに戻り、再度フローを循環する。

循環経路に配置されたイオン交換樹脂、ファイナルフィルター、および熱交換器により、循環水の水

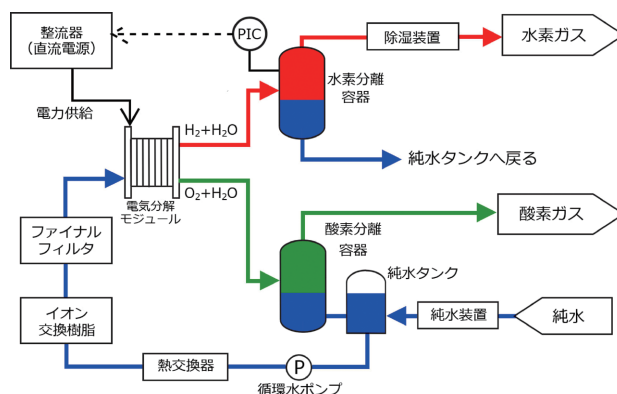


図1 HHOG システムフロー

質および水温は適切な状態に維持される。

電気分解モジュールで発生した水素は、水素分離容器において同伴する水分と分離された後、除湿装置において十分に乾燥され、供給される。

水素と同時に発生した酸素は、酸素分離タンクへ送られ、同伴水分と分離されて大気に放出される。

HHOGの水素発生量は、水素分離タンクの圧力を指標として制御されている。水素分離タンクの圧力が一定となるよう電解モジュールへの供給電流を調整することで、水素消費量の変動に応じた運転を可能としている。

このように、利用側での水素需要に追従して水素発生量をコントロールできるため、装置内に保有される水素量を最小限に抑えることができる。

1.3 装置ラインナップ

HHOGでは、水素発生量5~100 Nm³/hをカバーする機種ラインナップを有している。

装置様式で大きく2つの型があり、小型のパッケージ型（5 Nm³/hおよび10 Nm³/h、写真1）と、大型のスキッドマウント型（20~100 Nm³/h、写真2）が存在する。

また、HHOGの運転に必要なユーティリティ設備を標準装備したオールインプラン機（5 Nm³/hおよび10 Nm³/h、写真3）もラインナップしている。オールインプラン機では、計装空気、窒素ガス、冷却水の供給装置を内包しており、必要なユーティリティを電気と水道水のみで削減している。

今回、TOTOへ納入した設備は、スキッドマウント型のSH-100D-G IIであり、水素発生量は100 Nm³/hである。SH-100D-G IIは、近年の水素需要の拡大に対応するべく、大容量化を追求して2021年にラインナップへ追加した当社最大容量の高純度水素発生装置である。従来のSH-50D-G II（50 Nm³/h）2台の構成と比較して、コストを約26%、設置スペースを約40%削減しており、導入における経済性と設



写真1 パッケージ型 HHOG (5 Nm³/h)

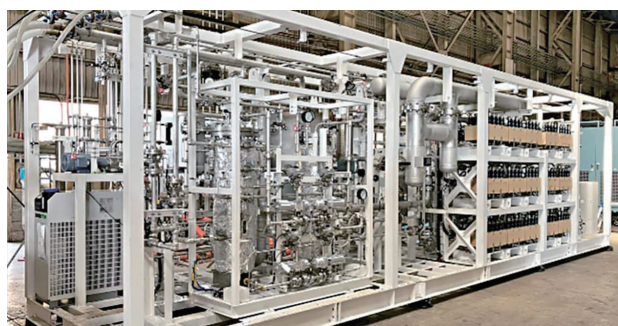


写真2 スキッドマウント型 HHOG (100 Nm³/h)



写真3 HHOG オールインプラン (10 Nm³/h)

置スペース効率の向上を実現している。

供給する水素の純度および圧力は、いずれの機種においても99.999%以上、0.82 MPaGである。この高純度水素は、燃料電池用途に加え、半導体製造工程など高い純度が求められる用途に適用可能である。

また、供給圧力が1 MPaG未満であることから、高圧ガス保安法において定められる許可申請や、保

安管理体制の設置が不要である。

さらに、HHOGでは、水素製造設備として必要な機器を内包したパッケージ構造を採用しており、現地据付後は電力および水道水などの各種ユーティリティを接続することで水素製造を開始できる。このため、現地工事を簡素化でき、導入時の負担を低減することができる。

近年は、再生可能エネルギー由来の余剰電力活用など、カーボンニュートラルを目的とした水素利用への関心が高まっている。こうした背景のもと、水素をオンサイトで製造・利用するシステムの需要が拡大しており、HHOGは従来の研究用途や工業用途に加え、新たな水素活用に向けた事業・実証案件においても引き合いが増加している。

2. TOTOのカーボンニュートラルに向けた取り組み²⁾とHHOGの用途

2.1 背景

製造業は国内のエネルギー消費およびCO₂排出量の大きな割合を占めることから、脱炭素社会の実現に向けた重要な対象分野となっている。

特に、窯業・陶磁器産業では、製品の品質や強度を確保するために高温焼成工程が不可欠である。そのため、焼成工程は製造工程全体の中でもエネルギー負荷が大きく、CO₂排出の主要因となっている。陶器製造分野における脱炭素化を実現するためには、この焼成工程におけるエネルギー利用の改善が不可欠である。

TOTOが製造する衛生陶器においても同様の課題が存在している。同社の発表によると、衛生陶器製造におけるScope 1排出量（企業が事業活動で直接的に排出するCO₂排出量）の約70%を焼成工程が占めており、工場全体のCO₂排出量削減を進める上で焼成工程の改善が極めて重要であることが示されている。

これまでTOTOでは、焼成工程におけるCO₂排出量削減を目的として、燃料転換や設備改善などの取り組みを継続的に実施してきた。創業当初は石炭を燃料として使用していたが、よりCO₂排出量の少ない都市ガスへの転換を進め、2007年までに国内外の全ての窯で燃料転換を完了している。さらに、生産設備の高効率化にも取り組み、小倉工場では2022年に断熱性能の高いファイバー窯を導入した。この設備更新により、1971年から使用していたレンガ窯と比較して約40%のCO₂排出量削減を達成している。

これらの取り組みにより一定のCO₂排出量削減効果が得られていたものの、2050年のカーボンニュー

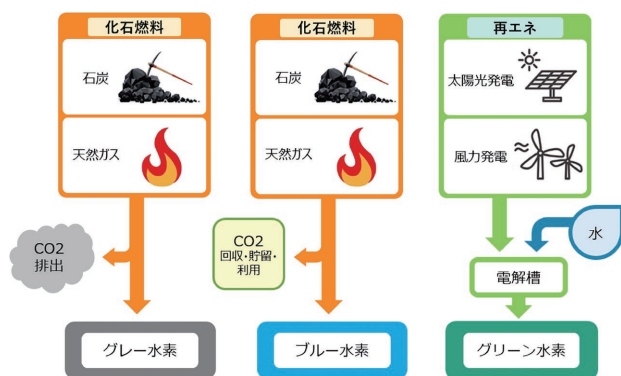


図2 グリーン水素製造プロセス³⁾
(出典：経済産業省資源エネルギー庁)

トラルの実現に向けては従来の燃料転換や省エネルギー化のみでは十分ではなく、さらなる排出量の削減を可能とする革新的な技術の導入が必要であった。特に高温熱源を必要とする製造プロセスでは、電化のみで対応することが難しい。

この課題に対する有力な解決手段の一つとしてエネルギー源としての水素の利用が注目されている。水素は燃焼時にCO₂を排出せず、高温燃焼が可能であることから、従来の化石燃料に代わる次世代エネルギーとして期待されている。さらに、再生可能エネルギー由来の電力を用いて水を電気分解することで製造されるグリーン水素（図2）は、製造から利用までの過程においてCO₂排出を大幅に抑制できるため、カーボンニュートラル実現に向けた有力な手段として位置付けられている。

このような背景のもと、TOTOでは焼成工程の脱炭素化を実現する有効な手段として水素に着目し、焼成工程における都市ガスと水素の混焼を開始した。

2.2 グリーン水素混焼技術

水素混焼とは、従来の都市ガスを主燃料とする焼成窯に、水素を一定割合混合して燃焼させる焼成技術である。従来の燃焼設備を活用しながら燃料の一部を水素に置き換えることで、燃焼時に排出されるCO₂の削減を図ることができる点が最大の特長である。

TOTOは2023年より小倉工場において衛生陶器生産における水素混焼技術の実用化検証を進めており、2024年には水素試験窯を導入した。さらに2025年には、再生可能エネルギー由来の電力を利用してグリーン水素を製造する拠点「Sui Station」（写真4）を建設し、当社製高純度水素発生装置（SH-100D-G II、写真5）を導入した。設備で製造したグリーン水素を用いて実生産を想定した検証を重ねた結



写真4 Sui Station



写真5 SH-100D-G IIの設置状況

果、水素混焼技術を確立し、2026年1月から実際の衛生陶器製造窯での運用を開始している。

現在は体積比約20%の水素混焼率で稼働しており、この取り組みによって年間約140トン、約7%のCO₂排出量削減が見込まれている。

本取り組みは製造業の脱炭素化に向けた有効な手段として位置づけられ、「北九州市低炭素水素認証制度」を取得している。今後は混焼率の向上及び他工場への展開が計画されている。

むすび

今後、産業用途に加え、燃料用途など幅広い分野での水素利用拡大が見込まれており、水素は脱炭素社会の実現を支える重要な要素として、その役割を一層高めていくものと考えられる。その中で、水電解装置メーカーには、単なる装置供給だけではなく、顧客のCO₂排出量削減やカーボンニュートラル実現に貢献するソリューションを提供していくことが求められる。このような多様化する市場のニーズに応えるためには、当社はHHOGの性能向上、省エネルギー化、高効率化、信頼性および保守性の向上といった技術開発を継続するとともに、水素の活用シーンやシステム全体を踏まえたソリューション提案に取り組んでいく必要がある。

当社は今後も、市場ニーズを的確に捉えた HHOG の技術革新と製品価値の向上を継続し、水素の活用を支える基盤技術の提供を通じて、再生可能エネルギーとグリーン水素を活用した脱炭素化の推進に貢献するとともに、持続可能なカーボンニュートラル社会の実現に寄与していく。

* ユーロモニター・インターナショナル調べ。2026 年 2 月～3 月に実施したカスタム調査による。
本クレームは、2023 年の衛生陶器生産量（100 万个単位）に基づく世界の衛生陶器メーカー上位 20 社および中国の衛生陶器メーカー 3 社を対象に検証されたものである

[参考文献]

- 1) 小野田草介：エネルギー・資源学会会誌第 46 卷（水電解式高純度水素発生装置 HHOG[®]），Vol. 46, No.6（2025）pp.29-32
- 2) TOTO 株式会社：「衛生陶器製造における水素混焼を開始」，TOTO 株式会社ニュースリリース，https://jp.toto.com/company/press/2026_02_06/，（2026/2/6）
- 3) 経済産業省資源エネルギー庁：「次世代エネルギー「水素」，そもそもどうやってつくる？」，https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/suiso_tukurikata.html，（2026/7/27）

技術研究所 冷却塔実験設備の完成

～次世代の冷却塔開発を支える実験・評価基盤の構築～

技術研究所内に建設を進めていた冷却塔実験設備が2026年3月に完成し運用を開始しました。

近年、冷却塔には省エネルギー化や高性能化に加え、多様な顧客ニーズへの対応が求められています。新製品や新技術の開発においては、実機に近い条件で性能や運転特性を評価できる環境が重要となります。本設備は、冷却塔本体に加えて、熱源設備（ボイラ）、循環ポンプ、各種計装機器および監視システムを備えた総合試験設備となっており、実機に近い運転条件を再現できることから、性能評価や省エネルギー技術、新規部材・新技術の検証など、幅広い研究開発に活用することができます。

なお、本設備は当部門で開発した冷却塔運転管理システムを導入しており、運転データの収集・分析に加え、計測項目の拡張や自律運転機能などの新たな機能の開発・検証を行う予定です。

今後は、本設備を活用して冷却塔の省エネルギー化や高性能化を推進するとともに、新たなソリューションの開発・検証を進め、付加価値の高い製品・サービスの創出につなげてまいります。

【設備概要】

- 冷却塔 : 循環水量210 m³/h 38.0℃ - 32.0℃ - 27.0℃（入口水温—出口水温—湿球温度）
寸法4 400 mmW × 7 500 mmL × 8 500 mmH
- 熱源設備 : SQ-3000AS（三浦工業（株）製ボイラ）相当蒸発量3 000 kg/h, 熱出力1 881 kW
- 運転管理システム : 自動計測33項目（水温、外気温度、振動、動力、風量）※拡張可能



冷却塔実験設備

「ボルト締結型グラスライニング消化タンク」 が日本下水道事業団の新技术Ⅰ類に選定

当社は、地方共同法人日本下水道事業団（以下、JS）と「ボルト締結型グラスライニング消化タンク」（以下、「本技術」）を共同研究・開発し、2026年3月4日、JSの新技术Ⅰ類に選定^{※1}されました。

本技術は、有機性汚泥を分解・減量しバイオガスを発生させる消化タンクに、鋼材とガラス（ガラス）が一体化した高耐食性のグラスライニングパネルを採用し、パネル同士をボルト締結して組み立てる新しい技術です。施工・品質管理が容易となることで、消化設備のLCC（ライフサイクルコスト）を大幅に縮減します。本技術により、下水道事業におけるカーボンニュートラルの実現に不可欠な嫌気性消化技術の普及・導入を促進します。

当社は、本技術をはじめとしたカーボンニュートラルに資する技術を全国のお客様へ導入することにより、2030年度に目指すべき事業像として掲げる「カーボンニュートラルのトップ企業」を実現できるよう今後も取り組んでまいります。

本技術について

- （１）技術名 : ボルト締結型グラスライニング消化タンク（商品名：ブルーダイジェスター）
- （２）選定日 : 2026年3月4日
- （３）技術概要 : 工場で製作したグラスライニング製パネルを現地でジャッキアップして、パネルをボルト締結する構造により、消化設備における建設費やLCCを低減可能。また、従来技術である消化タンクの運転支援技術、低動力攪拌機も適用でき、消化性能は従来通り。

本技術の適用条件

- 規模 : 消化タンク容積 9 000 m³以下
- 対象汚泥 : 下水汚泥（初沈、余剰）
- 投入汚泥濃度 : TS 6 % 以下
- 消化条件 : 中温消化
- その他 : 設置場所での気温条件をもとに保温厚さ、沿岸部では塩害対応等を検討する

※1 JSの単独又は共同研究により新規に開発された技術について、JSが受託建設事業における適用性を確認した技術として選定すること



ブルーダイジェスターの外観
（保温材施工前）

技術の特長

建設費の縮減

ボルト締結でパネルを接合し、組立には組立用足場が不要なジャッキアップ工法を採用する。従来の溶接型から施工性および品質管理性がさらに向上。また、高耐食性のガラスライニングパネルにより防食塗装を不要とする。これらにより消化タンクの建設費を縮減。

運転管理の省力化・省人化

各種センサ類を用いて消化タンク内部の運転状況を可視化し、トラブルを未然に防止。インペラ式攪拌機により低動力化し、さらに堆積物排出運転が可能で浚渫が不要。維持管理性が向上し、省力化を実現。

導入効果

嫌気性消化の導入コストを縮減、嫌気性消化の普及に貢献

消化タンク単体の建設費を3～4割縮減。タンク本体の組立には特殊な資格や技能が不要であり、建設に掛かる工数を大幅に縮減する。大規模処理場では嫌気性消化の導入効果がさらに拡大し、これまで導入が難しかった処理場では導入の可能性が広がる。

「廃棄物処理施設の基幹的設備改良工事」の受注と完了

～施設の長寿命化と CO₂ 削減に貢献～

廃棄物処理施設は竣工後の年数が進むにつれて経年劣化による不具合や性能低下が起こってきます。これに対して将来も安定的にごみ処理事業を継続していく必要があることから、後継となる新しい施設の建設以外に、既存施設の主要設備・機器の更新や改良を行って施設の延命化を図る「基幹的設備改良工事」が行われています。

当社ではお客様のニーズに応えるべく、基幹的設備改良工事を通して、延命後の長期的な安定稼働の確保と最新技術の導入による CO₂ 排出量の削減を行っています。さらにこれまで蓄積してきた運転ノウハウを最大限活用して施設を適切な管理のもと長期間にわたり使用可能とすることで、廃棄物処理施設の整備に係わるトータルコストの縮減と平準化に寄与し、安定かつ安心・安全な廃棄物処理の実現に貢献しています。

基幹的設備改良工事では、現在の施設がごみ処理運転に伴って排出する CO₂ 量を、改良工事を行うことで一定割合以上の削減を達成する等の要件を満たすことで、環境省の二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金または循環型社会形成推進交付金を受けることが可能となっています（いずれの補助金/交付金を受けるかは種々要件によります）。本項で紹介する事業では、いずれもこれらの補助金・交付金を活用することで各自治体の事業費抑制に貢献しています。

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、これまで培ってきた計画から設計・建設・運営・維持管理までの一連の基盤技術に最新の技術を導入し、新設工事のみならず高いニーズがある基幹的設備改良工事へ最適な提案で応え、2030年度に目指すべき事業像として掲げる「カーボンニュートラルのトップ企業」を目指し、今後も SDGs の実現に向けて取組んでいきます。

【基幹的設備改良工事の受注】

1. さしまクリーンセンター寺久熱回収施設

基幹的設備改良工事

- ①施設竣工：2008年3月（受注時 約17年経過）
- ②工 期：2025年7月から2028年3月まで
- ③焼却方式：流動床式ガス化溶融炉
- ④施設規模：206 t/日（103 t/24 h × 2 系列）
- ⑤本工事の特徴：

- ・稼働後約17年経過した同施設の機能を回復させると同時に、工事後15年以上の施設延命化を図ります。
- ・最新設備の導入、プレミアム高効率モータ採用、インバータ化、発電能力増強等により省電力化を図ります。
- ・上述設備改善での省電力化により CO₂ 排出量を3%以上削減することで、環境省の循環型社会形成推進交付金を活用します。



【基幹的設備改良工事の完了】

1. ビュークリーンおくえつ 基幹的設備改良工事

①施設竣工：2006年7月（受注時 約17年経過）

②工 期：2023年7月から2026年2月まで

③焼却方式：流動床式ガス化溶融炉

④施設規模：92 t/日（46 t/24 h × 2 系列）

⑤本工事の特徴：

- ・稼働後約17年経過した同施設の機能を回復させると同時に、工事後15年以上の施設延命化を図りました。
- ・最新設備の導入，プレミアム高効率モータ採用，インバータ化，タービン発電化等により省電力化を図りました。
- ・上述設備改善での省電力化により CO₂排出量を 5 % 以上削減することで，環境省の二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金を活用しました。
- ・工事は停止中の系列で順次実施することで，通常操業に支障なく進めました。



HybridGL[®] 新製品 HYX-E95R[®]，HYX-HE95R[®] の上市

当社グラスライニング（GL）製機器は、石油化学・電子材料・医薬品・食品など、幅広い分野の生産プロセスで使用されている。当社はこれら市場のニーズに対応するため機能性ガラスの開発を続けており、2017年以降、複数の機能性ガラスを組み合わせたハイブリッドガラス HybridGL を数多く上市している。静電気の発生を伴うプロセスでは耐静電気性が要求されるが、同時に電子材料分野を中心に低溶出性の更なる高度化が要求されており、2023年に耐静電気ガラス ECOGL II と低溶出ガラス 9500 の機能を組み合わせた HYX-E95 を上市した¹⁾。

しかしながら、近年、導電性物質に起因するごくわずかな溶出さえ課題となるケースが出てきた。そこで導電性を維持しつつ、導電性材料由来成分の溶出をさらに抑制することを狙いとして、導電性材料を見直した HYX-E95R（耐静電気＋低溶出性）、HYX-HE95R（高伝熱性＋耐静電気＋低溶出性）を新たに上市した。

狙い通り上市直後に電子材料分野で採用されており、今後も高純度製品を生産する顧客に向け提案を進めていく。

HYX-E95R，HYX-HE95R の特徴

（１）断面構造（表１）

HYX-E95R は耐静電気性と低溶出性を両立した表層を備えた構成である。HYX-HE95R はこれに高伝熱性ガラス層を組み合わせた構成である。過去に上市した耐静電気 GL と同様に、表層導電構造により放電エネルギーを面方向に分散して緩和させ、ガラスの破損が抑制される²⁾。

表１ 新製品 HYX-E95R，HYX-HE95R の断面構造

名称	HYX-E95R	HYX-HE95R
機能	耐静電気＋低溶出性	高伝熱性＋耐静電気＋低溶出性
断面構造	耐静電気＋低溶出性ガラス 絶縁性ガラス 下引きガラス 鋼板	耐静電気＋低溶出性ガラス 高伝熱性ガラス 下引きガラス 鋼板

（２）表面抵抗率（表２）

HYX-E95R および HYX-HE95R は、ECOGL II や HYX-E95，HYX-HE95 より低い表面抵抗率を示し、耐静電気 GL に要求される導電性を有する。

表２ 新製品 HYX-E95R，HYX-HE95R の表面抵抗率 仕様値

ガラス	表面抵抗率 ($\Omega/\square$)
9000	$>10^{13}$
ECOGL II	$10^{9\sim11}$
HYX-E95, HYX-HE95	$10^{9\sim11}$
HYX-E95R, HYX-HE95R	$<10^9$

(3) 溶出性 (図1)

HYX-E95R および HYX-HE95R は、低溶出性 GL である 9500 と同等の溶出性を有する。また、導電性物質を見直したことで、導電性物質に起因する金属溶出も低減される。

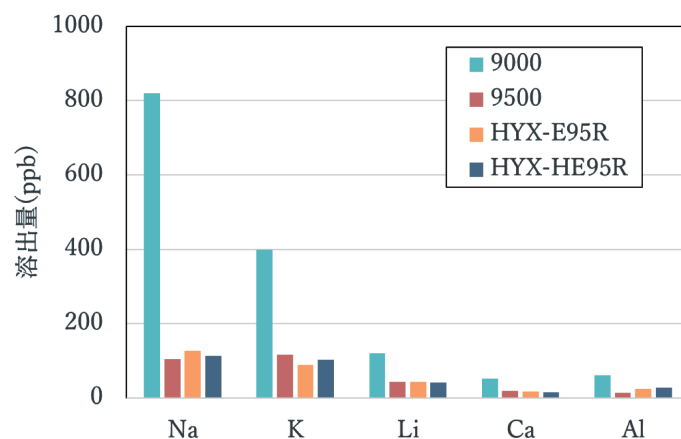


図1 新製品 HYX-E95R, HYX-HE95R の溶出量 測定結果例
※試験は120℃の純水にテストピースを浸漬した溶出液を分析

[参考文献]

- 1) 多田篤志ら：神鋼環境ソリューション技報, vol.21, No.1 (2024), p.24-28
- 2) 多田篤志ら：神鋼環境ソリューション技報, vol.7, No.1 (2010), p.9-15

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2-21 (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	〒108-8688 東京都港区高輪2丁目22-1 THE LINKPILLAR 2	☎ (03)5931-3701 FAX(03)5931-5701
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
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
デジタルイノベーションLab長崎	〒850-0033 長崎県長崎市万才町3-5(朝日生命長崎ビル)	☎ (095)832-2300
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 Doun 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 2026年度 Vol.23 No.1 通巻42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/出浦哲史 委員/中田博一・神地泰宏・中嶋雄大・藤田淳・浦上和也・荻野行洋・北岡俊男

《発行》2026年9月16日印刷 2026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