

TSUKISHIMA TECHNICAL REVIEW

# 月島技報

2025  
December

No. 28

月島ホールディングス



月島ホールディングス株式会社

論文

下水汚泥焼却プラントにおけるN<sub>2</sub>O低減技術  
(OdySSEA-Turbo™システム)の開発

月島技報 no. 28 2025

TSUKISHIMA TECHNICAL REVIEW

月島ホールディングス株式会社



Purpose

# 環境技術で 世界に貢献し 未来を創る

当社グループは創業以来120年に  
わたり、技術で産業の発展と環境問題の  
解決に貢献してまいりました。  
これからも時代の変化や社会のニーズに合わせ  
た技術を適用することで、世界的な社会課題で  
ある環境問題の解決に取り組み、豊かな未  
来を創ります。

グループ  
企業理念

- 1. 最良の技術をもって産業の発展と環境保全に寄与し、社会に貢献します
- 1. 市場のニーズを先取りし、最良の商品とサービスを顧客に提供します
- 1. 創意と活力によって発展し、豊かで働きがいのある企業をめざします

目次

6	巻頭言 研究開発とイノベーション	月島ホールディングス株式会社 常務執行役員 山田 彰彦
8	論文 下水汚泥焼却プラントにおけるN <sub>2</sub> O低減技術 (OdySSEA-Turbo ™システム) の開発	浦部 雅総
16	研究紹介1 下水汚泥焼却プラントにおける熱力学平衡計算の液相率を用いた灰焼結評価の新規手法	中村 友二・長沢 英和
20	研究紹介2 水熱前処理とAnMBRを組み合わせた脱水汚泥の集約消化プロセスの開発	倭 常郎・羽深 昭
26	技術・製品紹介1 CRYSTALLEX® Type VF-Laboの開発	八色 真
30	技術・製品紹介2 微生物固定化担体を用いた脱炭素型水処理プロセス	馬場 圭
34	技術・製品紹介3 デジタル変革を支える次世代統合ソリューション『OPTINOA®』の提供開始について	矢澤 伸弘・今井 勝彦
40	技術・製品紹介4 硫酸回収技術の紹介	山口 幸太郎
44	技術・製品紹介5 非常用浄水装置「みずキューブ®」	中島 史明・稲垣 敦史
48	技術・製品紹介6 省エネ型し尿処理プロセス「サイクルキューブ」	古原 翔太郎・宮本 一希
53	技術・製品紹介7 研究機のCEマーケティング自己宣言	野口 潤
56	技術・製品紹介8 クリーンサクション開袋機のコストダウン	瀧沢 憲治
62	実績紹介1 タイ王国におけるPMXとTETによる初協業プロジェクトについて	藤岡 重之
66	実績紹介2 CRYSTALLEX® Type VF-200	永澤 優馬
68	実績紹介3 消石灰スラリーによる下水汚泥流動焼却炉の焼結対策	富田 遼
73	実績紹介4 小山水処理センターにおける下水汚泥減量化・エネルギー利用設備の導入実績	末永 卓哉・朱 之璽
76	実績紹介5 いわき市下水汚泥等利活用事業	鈴木 信太郎・町田 高穂
80	解析グループ紹介 Part9 水噴霧解析編	長谷川 豪
82	会社概要・編集後記	

表紙の写真



アジアゾウ (絶滅危惧種)

CONTENTS

6	Foreword	Tsukishima Holdings Co.,Ltd. Managing Executive Officer YAMADA Akihiko
8	Paper Development of N <sub>2</sub> O Reduction Technology (OdySSEA-Turbo System) in Sewage Sludge Incineration Plants	URABE Masamichi
16	Introduction of Research 1 Novel Methodology for Ash Sintering Evaluation by Liquid Phase Ratio of Thermodynamic Equilibrium Calculation in Sewage Sludge Incineration Plants	NAKAMURA Yuji / NAGASAWA Hidekazu
20	Introduction of Research 2 Development of a Centralized Anaerobic Digestion Process for Dewatered Sludge Combined with Hydrothermal Pretreatment and AnMBR	YAMATO Tsunco / HAFUKA Akira
26	Technology / Products 1 Development of CRYSTALLEX Type VF-Labo	YAIRO Makoto
30	Technology / Products 2 Immobilized Microorganism Carrier for Decarbonized Wastewater Treatment Process	BABA Kei
34	Technology / Products 3 Launch of Next-Generation Remote Monitoring Service: Kanagawa Central Monitoring Center	YAZAWA Nobuhiro / IMAI Katsuhiko
40	Technology / Products 4 Introduction to Sulfuric Acid Recovery Technology	YAMAGUCHI Kotaro
44	Technology / Products 5 Emergency Water Purifier “MIZU cube”	NAKAJIMA Fumiaki / INAGAKI Atsushi
48	Technology / Products 6 Cycle Cube Efficient Sewage Treatment Process	KOHARA Shotaro / MIYAMOTO Kazuki
53	Technology / Products 7 EU Declaration of Conformity for Laboratory Mixers	NOGUCHI Jun
56	Technology / Products 8 “Clean Suction Bag Opener” Cost Reduction	TAKIZAWA Kenji
62	Introduction of Products 1 First Collaboration Project between PMX and TET in Thailand	FUJIOKA Shigeyuki
66	Introduction of Products 2 CRYSTALLEX Type VF-200	NAGASAWA Yuma
68	Introduction of Products 3 Sintering Prevention Measures for Sewage Sludge Fluidized Bed Incinerators Using Hydrated Lime Slurry	TOMITA Ryo
73	Introduction of Products 4 Introduction Record to the Oyama Sewage Treatment Plant for Sewage Sludge Reduction and Energy Utilizing System	SUENAGA Takuya / SHU Noji
76	Introduction of Products 5 Iwaki City Sewage and Various Sludge Effective Utilization Project	SUZUKI Shintaro / MACHIDA Takao
80	Introduction of CAE Group Part9	HASEGAWA Tsuyoshi
82	Corporate Profile/Editor's Note	





## 巻頭言

# 研究開発とイノベーション

月島ホールディングス株式会社  
常務執行役員

山田 彰彦

昨今の研究開発においては、AIなどの技術進展が非常に速く、海外企業との競争が激化しているため、より高い専門性を備えたスペシャリストが求められる。企業では必要な事業や開発に人材を集中させ、採算の厳しい事業から人材を移す事業転換がなされている。得意分野を厳選し絞り込み、専門性を高めることや後発でも差別化された個性的な製品の提供あるいは製品やサービスの魅力を上げることは開発戦略の一般的な解である。経営は従業員が夢を持って挑戦できる成長分野を定め、その研究開発に集中的に投資と人材投入を行い、環境(施設・体制)を整えることに注力する。一方従業員はチャレンジのチャンスを掴み、その実現にためまなく努力をし、その結果先進技術を持って貢献する存在にあることを期待される企業となること、が研究開発のゴールであると考えている。開発された製品はサプライチェーンにおいて不可欠な存在になることが肝要である。新たな発想により研究開発しイノベーションに結び付け、製品として世に送り出すこと。顧客ニーズに徹底的に応える中で製品(プロセス)の核となる部分を自社開発に特化することや、開発した技術と他の既存技術との組み合わせにより付加価値の高いものにすることが求められる。

現在R&Dセンターは次世代に向けた研究開発強化のため、その拠点として従来ない施設設備拡充の実現に向け関係事業会社と検討を進めている。一方、TSK・TSKE・TJAS・PMX<sup>注)</sup>の開発を担う4社が集合する中で、エンジニアを流動的に動員する人材面での開発体制の変革は、今後のイノベーションを達成

するための課題の一つと考えている。単一会社での開発にとどまらず将来に向け加速するソリューションを可能にし、顧客と共感しうる先進的な創造開発活動を行っていくことが目標となる。研究開発とものづくりは表裏一体であり、イノベーションはものづくりの肝でもある。我々の事業においては付加価値の高い製品の開発が未来のものづくりの根幹であり、研究開発はものづくりの未来に貢献するというビジョンもある。

イノベーションは若い世代が交流する機会を増やし、楽しみながら競い合う様な環境において挑戦と失敗の上に築かれる。その中で新たな発想が生まれビジネスチャンスを広げていくことが可能となる。エンジニアは研究開発を自らを磨く場と捉え、その達成により成長とより高い技術レベルへの人間形成が出来る。現在若い開発者が躍動する外国企業の若者の突破力には容易に太刀打ちすることはできない。ニーズの変化に敏感な若いエンジニアの確保と登用がこれからのR&Dセンターには必須であり、技術革新を担う人材、先進専門分野に挑戦、活躍できる人材を研究開発の実践により育成していきたい。

最後に  
R&Dセンターは研究開発を通して事業活動に貢献するため進化を続ける。

注) T S K ・ 月島機械株式会社  
TSKE ・ 月島環境エンジニアリング株式会社  
TJAS ・ 月島JFEアクアソリューション株式会社  
PMX ・ プライミクス株式会社



## 論文

下水汚泥焼却プラントにおけるN<sub>2</sub>O低減技術  
(OdySSEA-Turbo<sup>TM</sup>システム)の開発



# 下水汚泥焼却プラントにおけるN<sub>2</sub>O低減技術 (OdySSEA-Turbo™システム)の開発

Development of N<sub>2</sub>O Reduction Technology (OdySSEA-Turbo System)  
in Sewage Sludge Incineration Plants



浦部 雅総 URABE Masamichi

月島 JFE アクアソリューション株式会社  
技術本部 下水事業部  
熱プラント設計部  
熱エンジングループ

## Abstract

In response to recent global climate change issues, all industrial sectors in the world are starting to walk toward decarbonization, and domestically as well, the movement toward greenhouse gas reduction has been accelerating. Under such a background, in the field of sewage sludge incineration furnaces, the OdySSEA-Turbo system, which makes use of the advantages of a pressurized fluidized bed incineration furnace and the OdySSEA, has been developed. During the development, a demonstration test has been implemented by applying the localized agitation air blowing technology to the pressurized fluidized bed incineration furnace in incineration facility No. 4 of the Nanbu Sewage Treatment Plant, Chiba City.

Through a comparison with the same fuel efficiency condition as the conventional pressurized fluidized bed incineration furnace, it has been confirmed that the highest temperature of the free board increased by the localized blowing of agitation air, and it would be effective for the reduction of N<sub>2</sub>O emissions. Meanwhile, it has been suggested that, not only would it be possible to reduce the consumption of auxiliary fuel if the highest temperature of the free board were set to the same condition as the conventional ones but also, by switching between the control strategies, the operations that respond to various needs, such as the N<sub>2</sub>O prioritized operation, fuel efficiency prioritized operation, or balanced operation, would be possible.

近年の地球規模の気候変動問題を受け、世界各国あらゆる業種が脱炭素に向けて歩み始めており、国内においても温室効果ガス削減に向けた動きが加速している。このような背景を受け、下水汚泥焼却炉において、過給式流動焼却炉とOdySSEAの特長を活かしたOdySSEA-Turbo™システムを開発した。その中で、過給式流動焼却炉に局所攪拌空気吹込み技術を適用した実証試験を千葉市南部浄化センターの4号焼却設備で実施した。

従来の過給式流動焼却炉と同一の燃費条件で比較した場合、局所攪拌空気吹込みによってフリーボードの最高温度が上昇し、N<sub>2</sub>O排出量の削減に効果があることを確認した。またフリーボードの最高温度を従来と同一条件にした場合には、補助燃料を削減することが可能であり、制御方法の切り替えによって、N<sub>2</sub>O優先運転、燃費優先運転、またはバランス運転などの様々なニーズに対応した運転が可能であることが示唆された。

キーワード：N<sub>2</sub>O削減、流動焼却、局所攪拌空気吹込み技術

Keyword：N<sub>2</sub>O reduction, Pressurized fluidized bed incineration, Localized blowing of agitation air technology

## 1 はじめに

近年の地球規模の気候変動問題を受け、世界各国あらゆる業種が脱炭素に向けて歩み始めている。国内でも2030年度に2013年度比マイナス46%の削減を目指すこと、さらに50%の高みに向けて挑戦を続けるという目標が掲げられている。また、それを受けて各自治体においても目標設定を行い、温室効果ガス削減に向けた取り組みがなされている。一方で、国内下水道事業においては、国土交通省にて「下水道事業におけるエネルギー効率に優れた技術の導入について」が通知され、今後の下水汚泥焼却炉の設置・改築の交付金対象要件として廃熱回収効率や消費電力削減率に関する性能指標が設定されるなど、脱炭素に向けた動きが加速している。

国土交通省の試算によると、2022年度における下水道から発生する温室効果ガスの内、汚泥処理(焼却炉)から発生するN<sub>2</sub>O由来が20%を占めると報告されている<sup>1)</sup>。

既往の研究において、焼却炉では脱水汚泥が熱分解・揮発し、HCN, NCO, NH<sub>3</sub>等の揮発性窒素化合物を経由してN<sub>2</sub>Oが生成することが示されている<sup>2),3)</sup>。また、多くの実証研究において、流動床汚泥焼却炉のN<sub>2</sub>O排出量は、炉内最高温度と明確な負の相関を示すことが報告されている。例えば、Suzuki らは炉内最高温度が低い炉においてN<sub>2</sub>O 排出量が著しく増加すること<sup>4)</sup>、さらに炉内最高温度を約800° C から約850° C に引き上げることによってN<sub>2</sub>O排出量が約40%低減され

ることを報告している<sup>5)</sup>。炉内最高温度が高くなることによってN<sub>2</sub>O排出量が低減されるのは、N<sub>2</sub>O生成が進む前に、酸化・分解を受けやすくなること、生成されたN<sub>2</sub>Oも高温下で分解またはNO<sub>x</sub>/N<sub>2</sub>へ転化しやすくなるためと報告されている<sup>3),6)</sup>。

このような背景を受け、下水汚泥焼却炉において、温室効果ガスであるN<sub>2</sub>Oの更なる削減と、汚泥焼却設備で消費する以上の電力を発電可能な「OdySSEA-Turbo™」システムを開発した。

本稿では本システムの概要、下水処理場で実施した過給式流動焼却炉に局所攪拌空気吹込み技術を適用した実証試験の経過、及び得られた知見や導入効果を紹介する<sup>7)</sup>。

## 2 技術概要

本システムは、2023年10月1日に月島アクアソリューション株式会社とJFEエンジニアリング株式会社の国内水エンジニアリング事業部門の統合により、両社の持つコア技術である過給式流動焼却炉とOdySSEA 技術<sup>8)</sup>を融合し両者の特徴を最大限に発揮することで実現したものである。図1に示すとおり『過給式流動焼却炉』をベースに、OdySSEA の『局所攪拌空気吹込み技術』及び『高効率発電技術』を組み込んでいる。本システムの特長は主に以下の3点である。

(1) N<sub>2</sub>O排出量の大幅な削減

加圧下での燃焼により焼却炉内のO<sub>2</sub>分圧が高くなり、燃焼速

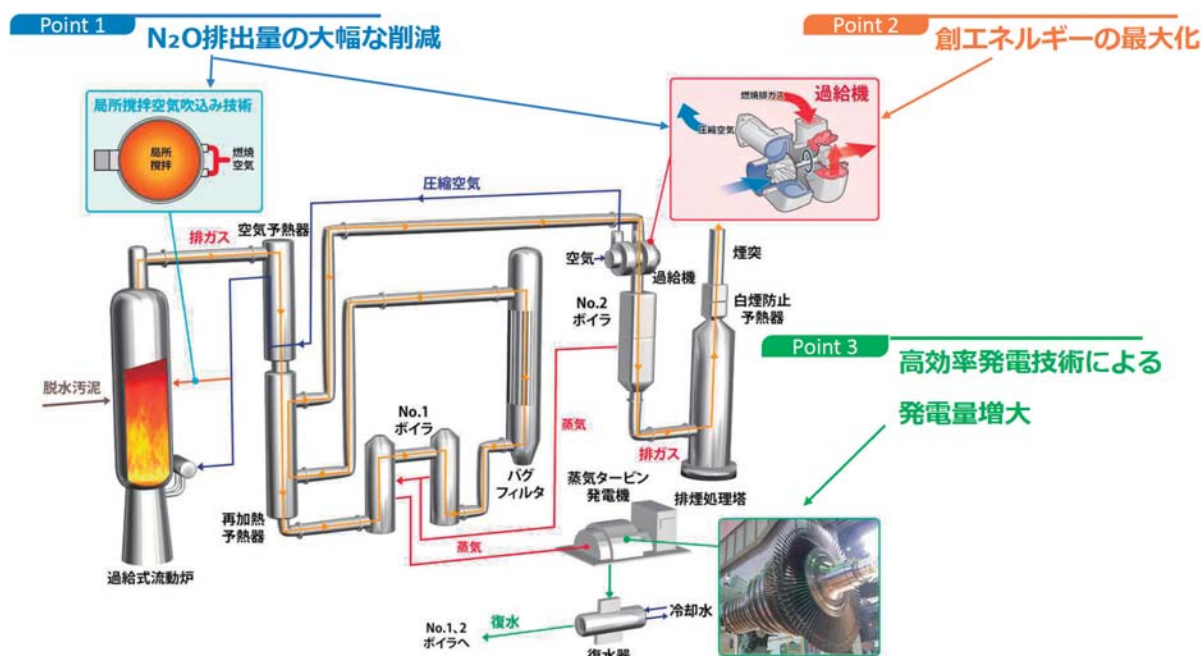


図1 OdySSEA-Turbo™システム概要  
Fig.1 OdySSEA-Turbo system overview



度が上昇することで焼却炉内に高温燃焼領域を形成する過給式流動焼却炉に対して、局所攪拌空気吹込み技術を適用し、焼却炉フリーボード部での更なる高温燃焼帯を形成することで、N<sub>2</sub>O排出量を削減することが可能となる。本技術は、局所攪拌空気を焼却炉の一方から吹き込むことで効果を発揮する点を特徴とし、省スペース化も実現している。

(2) 創エネルギーの最大化

過給機が従来のファン・ブロワ類を代替することで、従来の気泡流動炉と比較して40～60%程度の省電力が可能となり、創エネルギーの最大化に寄与している。

(3) 高効率発電技術による発電量増大

新たに開発した高効率小型復水式蒸気タービンを適用している。下水処理場に豊富に存在する処理水を用いた水冷式の復水器の採用と、タービン翼への蒸気噴出速度を最適化することで発電効率を最大化している。

3 検証方法

3.1 検証方法について

過給式流動焼却炉に対する、OdySSEA-Turbo™システムの一部である『局所攪拌空気吹込み技術の適用』については、実証試験及び解析によりその効果を確認した。実証試験は、2024年度より千葉市

から技術開発協力を得て、千葉市南部浄化センターの4号焼却設備（過給式流動焼却炉）に対して、図2に示す通り、焼却炉のフリーボード部に局所攪拌空気を供給するためのノズルとダクトを追加した。また、焼却炉内を高温燃焼させるため、焼却炉出口の効率的な冷却を目的とした水噴霧方式を変更する改造工事を実施した。解析では、実証試験と同じサイズの焼却炉とし、局所攪拌空気吹込み“なし”と“あり”2つの条件を比較するためのシミュレーションモデルを作成した。

3.2 実証試験の条件

表1に実証試験の条件を示す。対象汚泥は消化汚泥と混合生汚泥が混合された汚泥であり、実証期間中の脱水汚泥の含水率は約80%、可燃分は約82%であった。局所攪拌空気量の影響を調査するため、ここでは総燃焼空気量を一定にして、局所攪拌空気を吹込み“なし”から最大700Nm<sup>3</sup>/hに変化させてデータを取得した。なお、N<sub>2</sub>O排出量算出に使用するN<sub>2</sub>O濃度に関しては、連続測定データは設備付帯の連続分析計（非分散形赤外線吸収法）、第三者機関による分析はJIS K 0110（2018）-7.1により測定した。また、NO<sub>x</sub>濃度に関しては、連続測定データは設備付帯の連続分析計（非分散形赤外線吸収法）、第三者機関による分析はJIS K 0104（2011）-7.3により測定した。

3.3 解析の条件

局所攪拌空気吹込みにより、フリーボード部が温度上昇した結果のメカニズムを解明するため、燃焼解析を用いて、焼却炉内の状態を可視化し、焼却炉内の水蒸気濃度分布およびO<sub>2</sub>濃度分布について検討した。なお、今回の燃焼解析における比較に際して、投入汚泥量、汚泥性状、燃焼空気量、補助燃料量は局所攪拌空気吹込み“なし”と“あり”で同一条件とし、焼却炉出口の冷却水噴霧は条件として含めていない。

4 検証結果

4.1 実証試験

4.1.1 N<sub>2</sub>O排出量

炉内温度およびN<sub>2</sub>O排出量の関係を図3に示す。N<sub>2</sub>O排出量は、炉内最高温度と負の相関を示し、また同一の炉内最高温度で比較した場合、砂層平均温度が高いほどN<sub>2</sub>O排出量が低下する傾向を示した。炉内最高温度912℃以上の燃焼において、第三者機関による

表1 実証試験の条件  
Table1 Conditions of the filed test

条件	内容
投入汚泥量	70t-wet/日
汚泥条件	水分:約80% 可燃分:約82%
汚泥の種類	消化＋混合生汚泥の混合汚泥
燃焼空気量	総燃焼空気量 約4,200Nm <sup>3</sup> /h 局所攪拌空気量 ケース①: 空気吹き込み”なし” ケース②: 300～400Nm <sup>3</sup> /h (総量の約1割) ケース③: 600～700Nm <sup>3</sup> /h (総量の約2割)
補助燃料の条件	消化ガス

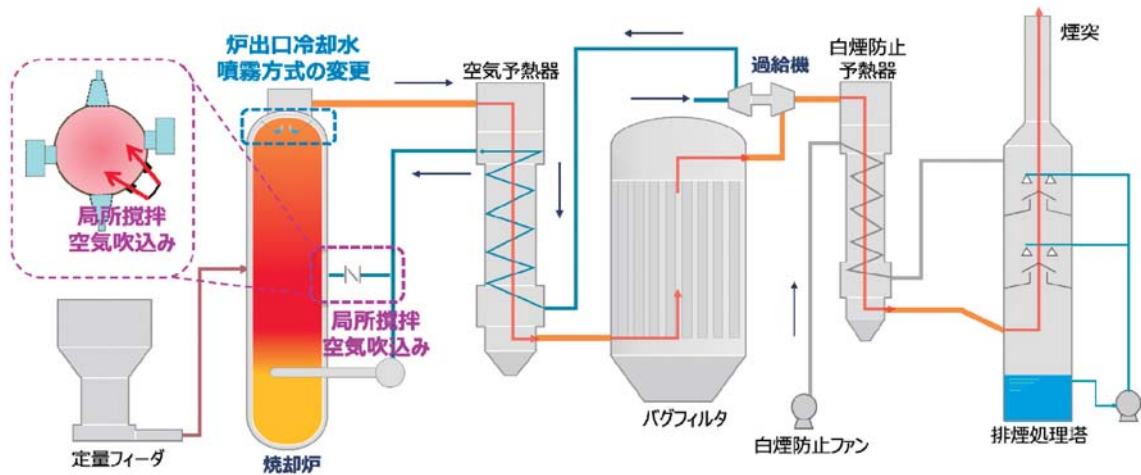


図2 実証試験の概要  
Fig.2 Overview of the filed test

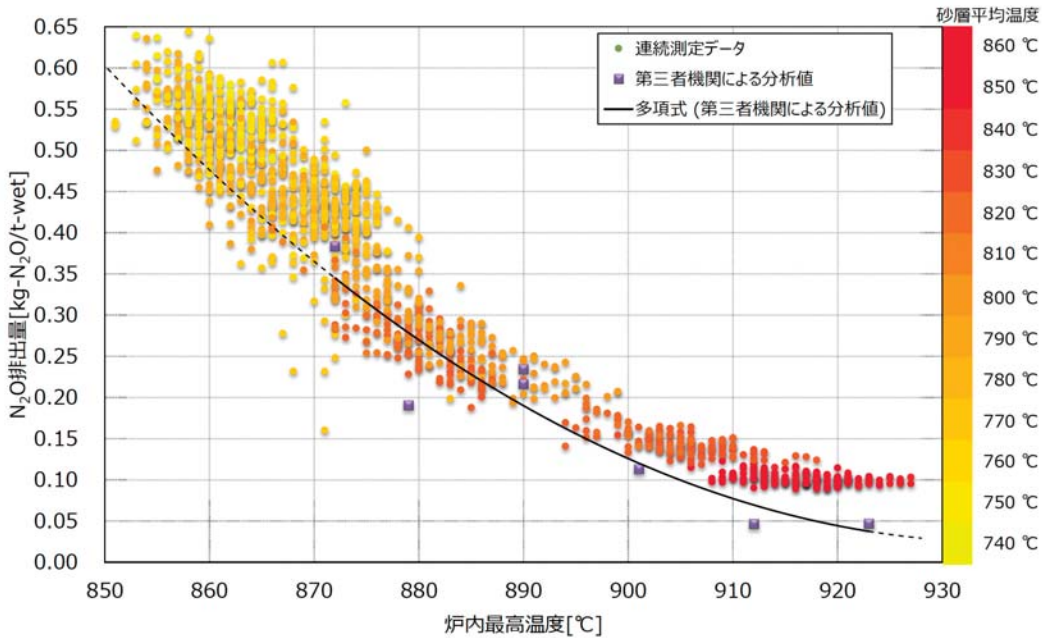


図3 炉内最高温度とN<sub>2</sub>O排出量  
Fig. 3 Relationship between maximum furnace temperature and N<sub>2</sub>O emissions

分析を複数回行い、N<sub>2</sub>O排出量0.05kg-N<sub>2</sub>O/t-wet未満(従来の流動焼却炉のN<sub>2</sub>O排出量0.645kg-N<sub>2</sub>O/t-wet<sup>9)</sup>に対して、1/10以下)になることを確認した。

#### 4.1.2 NO<sub>x</sub>濃度

今回、実証試験において、炉内を高温燃焼させることでNO<sub>x</sub>の増加が懸念されるため、排ガス中のNO<sub>x</sub>濃度変化についても確認を行った。炉内最高温度と煙突排ガス中のNO<sub>x</sub>濃度の関係を図4に示す。連続分析計および第三者機関による分析結果のいずれも、NO<sub>x</sub>濃度は炉内最高温度900℃以上の燃焼においても約5ppm(O<sub>2</sub>12%換算値)であり、大気汚染防止法施行規則で定められた250ppmに対して、十分に小さい値であることを確認した。

#### 4.1.3 局所攪拌空気吹込み技術の効果

過給式流動焼却炉に対して、局所攪拌空気吹込みを行った際の焼却炉高さ方向の温度分布を図5に示す。同一燃費(補助燃料使用量÷汚泥処理量)における焼却炉の温度データを抽出し、局所攪拌空気吹込み量の違いによる焼却炉内各所の温度を比較した。なお、総燃焼空気量は一定にし、局所攪拌空気吹込み量を実施した

場合は、その分砂層へ供給する燃焼空気量を減らした。

局所攪拌空気吹込み量を増加させることにより、焼却炉砂層部の温度が下がり、フリーボード部の温度が上がる結果となり、局所攪拌空気吹込み量を600～700Nm<sup>3</sup>/hr(総空気量の約2割)にすることによって、焼却炉内の最高温度は11℃上昇した。以上の結果から、過給式流動焼却炉に局所攪拌空気吹込み技術を適用することで、同一燃費条件で焼却炉内の最高温度が上昇することを確認した。

過給式流動焼却炉は、通常、焼却炉フリーボード部における最高温度設定に従い、補助燃料使用量や燃焼空気量等の制御を行っている。過給式流動焼却炉に局所攪拌空気吹込み技術を適用することにより、フリーボード部の温度上昇に追従して、補助燃料使用量が削減されることになる。

すなわち、同一燃費条件で運転すれば炉内最高温度の上昇によってN<sub>2</sub>O削減が可能であり、同一フリーボード最高温度条件で運転すれば補助燃料を削減できることとなる。制御方法の切り替えにより、N<sub>2</sub>O優先運転、燃費優先運転、またはバランス運転などの様々なニーズに対応した運転が可能であると考えられる。

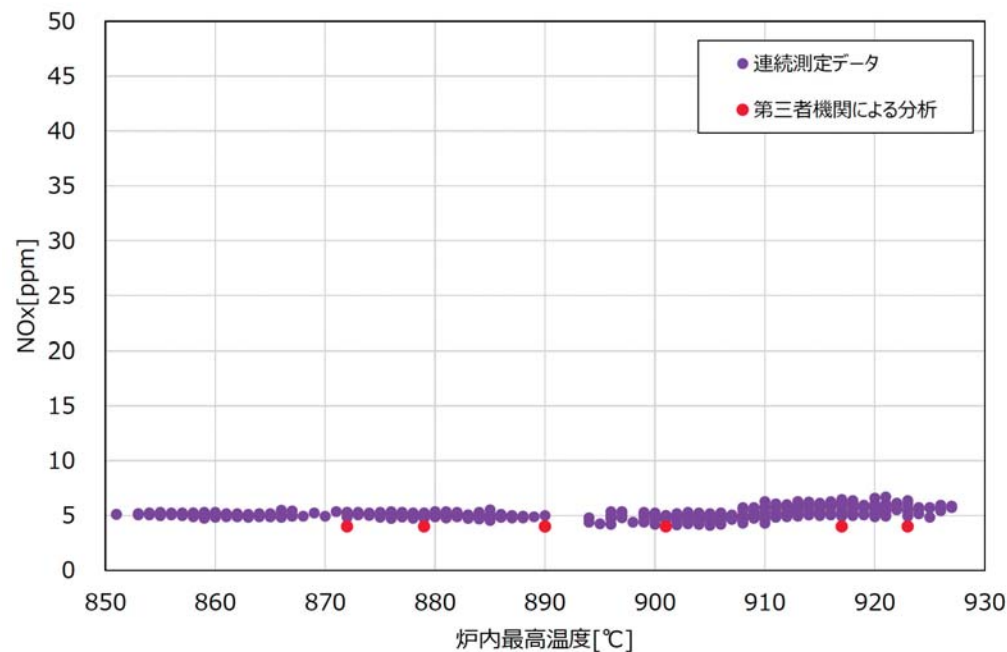


図4 炉内最高温度とNO<sub>x</sub>濃度

Fig.4 Relationship between maximum furnace temperature and NO<sub>x</sub> concentration

#### 4.2 解析結果

##### 4.2.1 焼却炉内の水蒸気濃度分布

焼却炉内の水蒸気の濃度分布を図6に示す。局所攪拌空気吹込み“なし”の条件では、焼却炉下部から供給する燃焼空気量が多く、汚泥が飛散し、フリーボード部まで同伴された水分が蒸発することで、蒸発潜熱により焼却炉内での温度上昇が抑制されていたものと推測

される。一方、局所攪拌空気吹込み“あり”の条件では、フリーボード部全体に水蒸気が多く存在している。局所攪拌空気吹込みに利用した分、焼却炉下部から供給する燃焼空気量が少なくなり、フリーボード部での汚泥の飛散が低減されることにより、砂層部で汚泥中の水分蒸発が多く発生し、蒸発潜熱により砂層部での温度低下が起こっていると考えられる。

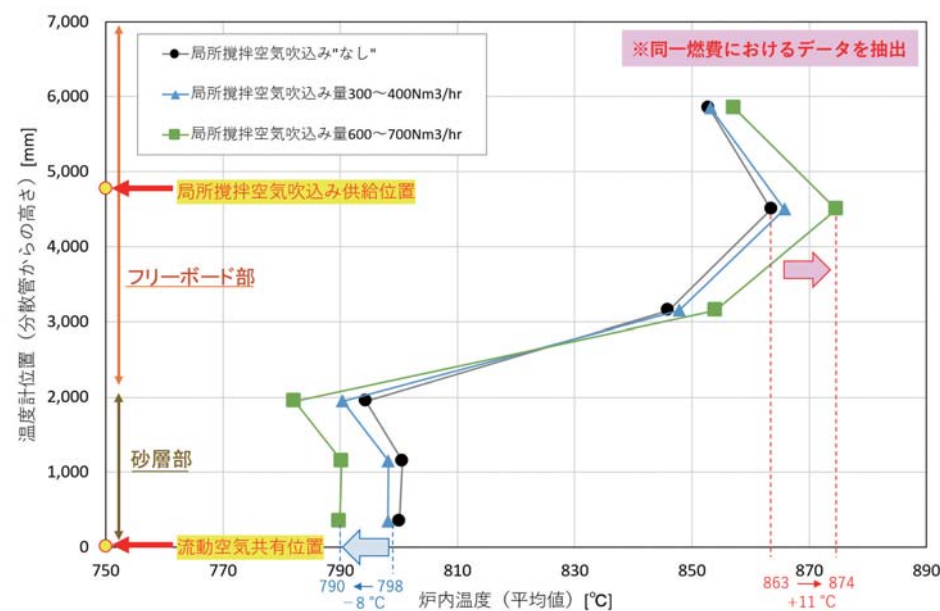


図5 焼却炉高さ方向の炉内温度分布

Fig.5 Vertical temperature distribution in the incinerator under various air injection conditions

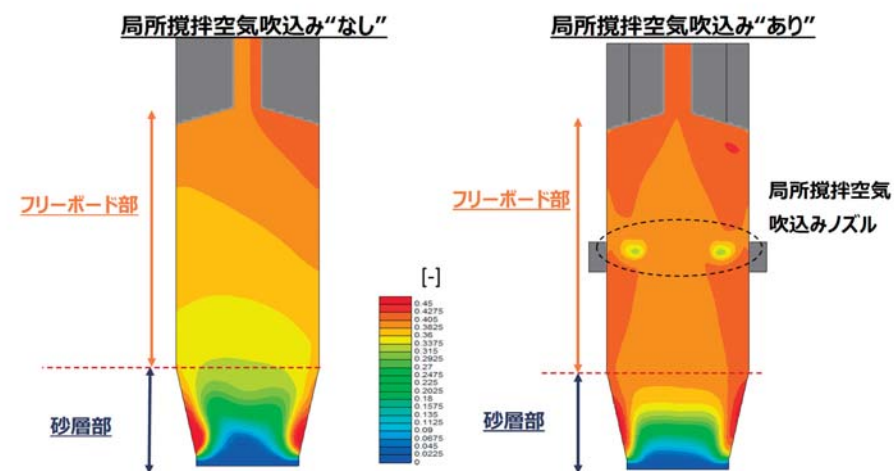


図6 焼却炉内の水蒸気濃度分布

Fig.6 Water vapor concentration distribution inside the incinerator

Left: Without the localized agitation air blowing, Right: With the localized agitation air blowing



#### 4.2.2 焼却炉内のO<sub>2</sub>濃度分布

焼却炉内のO<sub>2</sub>濃度分布を図7に示す。局所攪拌空気吹込み“なし”の条件ではフリーボード中部までO<sub>2</sub>が存在している。一方、局所攪拌空気吹込み“あり”の条件では、砂層への燃焼空気量が相対的に少ないため、フリーボード下部で低空気比領域が形成され、その後、局所攪拌空気により二段燃焼が発生することで、フリーボード部での温度上昇が起こったと考えられる。

## 5 まとめ・将来の展望

### 5.1 実証試験のまとめ

千葉市南部浄化センターの過給式流動焼却炉で行った局所攪拌空気吹込み技術の実証試験により、以下の項目を確認した。

- ① N<sub>2</sub>O排出量は、炉内最高温度912℃以上にて、N<sub>2</sub>O排出量0.05kg-N<sub>2</sub>O/t-wet以下を達成した。
- ② 煙突排ガス中のNO<sub>x</sub>濃度は、炉内最高温度900℃以上の高温燃焼時においても約5ppmを示した。
- ③ 局所攪拌空気吹込みにより、同一燃費条件で焼却炉フリーボード部の温度上昇を確認し、N<sub>2</sub>O排出量の削減を達成した。

### 5.2 将来の展望(OdySSEA-Turbo™の導入効果)

実証試験および動的シミュレーションを活用し、従来の気泡流動炉、過給式流動焼却炉(既設炉)、OdySSEA、OdySSEA-Turbo™(今回実証)の4ケースについて温室効果ガス排出量を試算し、比較を行った。試算条件は、混合生汚泥150t-wet/日、含水率74%とした。汚泥含水率74%の場合は、焼却炉が補助燃料を必要とすることなく自然するため、N<sub>2</sub>O由来および電力由来の温室効果ガス排出量を算出した。

図8に温室効果ガス排出量を比較した結果を示す。従来の気泡流動炉の温室効果ガス排出量を100としたときに、過給式流動焼却炉やOdySSEAでは約60～65%の削減率だが、この2つを組み合わせた「OdySSEA-Turbo™」システムは、創エネルギー効果により101.1%の削減率が可能な試算となっている。なお、過給機と復水式タービンの運転挙動についても動的シミュレーションで確認しており、負荷変動における追従性や停止時の安全性についても問題ないことを確認している。

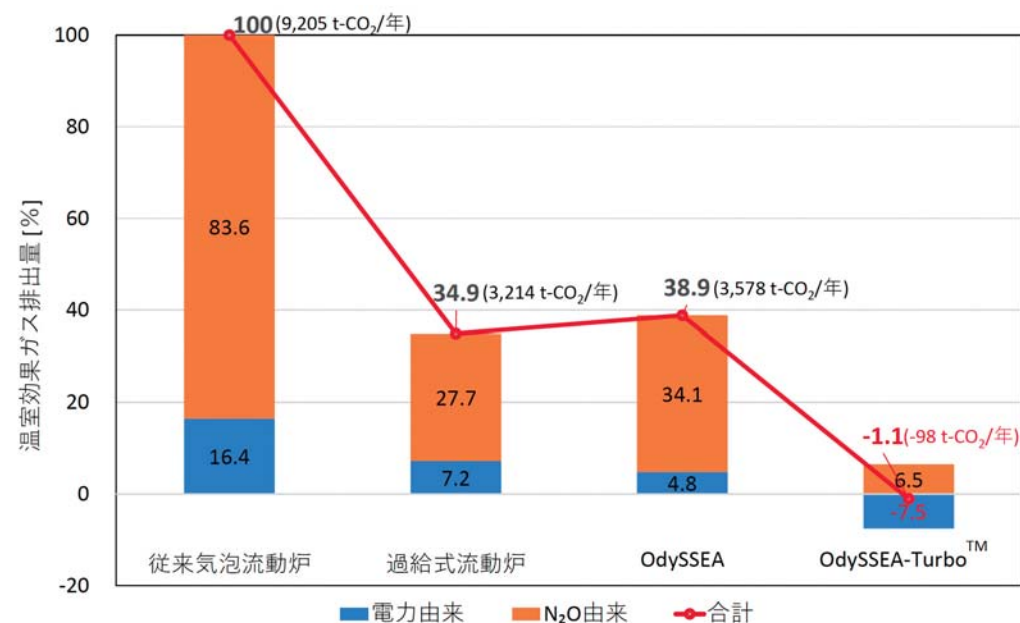


図8 焼却システム毎の温室効果ガス排出量比較  
Fig.8 Comparison of greenhouse gas emissions of various incineration systems

## 6 謝辞

実証試験を行うにあたり、技術開発協力をいただきました千葉市に深く感謝の意を表させていただきます。

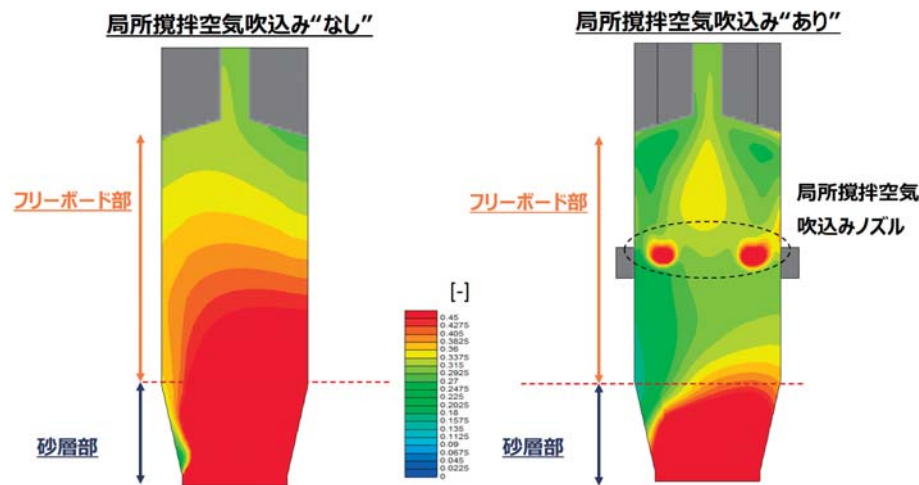


図7 焼却炉内のO<sub>2</sub>濃度分布  
Fig.7 Oxygen Concentration Distribution Inside the Incinerator  
Left: Without the localized agitation air blowing, Right: With the localized agitation air blowing

### 参考・引用文献

- 1) 国土交通省ホームページ、[https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/crd\\_sewage\\_tk\\_000124.html](https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/crd_sewage_tk_000124.html)
- 2) Mizuochi, M., Sato, K., Inamori, Y., and Matsumura, M. (1998) Emission characteristics of greenhouse gas N<sub>2</sub>O from sewage sludge incineration process. Japanese Journal of Water Treatment Biology, 34(4), 267-277.
- 3) Yasuda, K.; Takahashi, M.; Yajima, I.; Kaneko, M. (2005). The Emission Behaviors of Nitrous Oxide Caused by Sewage Sludge Incineration. Waste Management Research, Vol. 5, No. 4, pp. 142-150
- 4) Suzuki, Y., Ochi, S.-I., Kawashima, Y., & Hiraide, R. (2003) Determination of emission factors of nitrous oxide from fluidized bed sewage sludge incinerators by long-term continuous monitoring. Journal of Chemical Engineering of Japan, 36(4), 458-463.
- 5) Suzuki, Y., Murakami, T., & Kitajima, A. (2014) Development of an advanced sewage sludge incinerator, “turbocharged fluidized bed incinerator” — The role of AIST in the development of a new system. Synthesiology (English edition), 7(1), 12-21.
- 6) Zhang, H., Huang, Q., Wang, X., Liu, J., Liu, J., & Jiang, X. (2022) Mechanisms of the N<sub>2</sub>O formation and decomposition over coal char surface. Combustion and Flame, 238, 111923.
- 7) 浦部雅総ほか、千葉市南部浄化センター汚泥焼却炉4号炉におけるN<sub>2</sub>O削減技術実証試験。下水道研究発表会講演集。2025, vol.62, pp.199-201.
- 8) 菅原充ほか、温室効果ガス削減を考慮した発電型汚泥焼却技術における温室効果ガス削減実証結果。下水道研究発表会講演集。2019, vol.56, pp.575-577.
- 9) 環境省・国土交通省、下水道における地球温暖化対策マニュアル、平成28年3月



# 下水汚泥焼却プラントにおける熱力学平衡計算の液相率を用いた灰焼結評価の新規手法

Novel Methodology for Ash Sintering Evaluation by Liquid Phase Ratio of Thermodynamic Equilibrium Calculation in Sewage Sludge Incineration Plants



中村 友二 NAKAMURA Yuji  
月島 JFE アクアソリューション株式会社  
研究開発室



長沢 英和 NAGASAWA Hidekazu  
月島 JFE アクアソリューション株式会社  
研究開発室

## Abstract

In the sewage sludge incineration facilities, the ash sintering has frequently been a problem, and the risk of its occurrence is increasing as incineration temperatures are higher to reduce nitrous oxide with a high greenhouse effect. Previously, the methodologies for estimating sintering risk based on ash composition were proposed, but research in consideration of incineration temperature has not been sufficient. An experiment was performed using the equipment that simulated an incineration furnace using an electric furnace, and an investigation was made on the relationship between the ash composition and the quantity of ash that adhered to the furnace wall during high temperature incineration. The liquid phase ratio of ash that adhered was acquired on the basis of experimental results and thermodynamic equilibrium calculation results, and a regression model was created by machine learning on the calculated results. The methodology is introduced on determining the occurrence of ash sintering based on ash composition and incineration temperature of dewatered sludge.

下水汚泥の焼却設備において、たびたび問題となる灰の焼結は、温室効果が高い亜酸化窒素低減のための焼却温度の高温化に伴い、その発生リスクが高まっている。従来、灰組成より焼結リスクを推測する手法が提案されているが、焼却温度を考慮した研究は十分ではない。電気炉を用いて焼却炉を模擬した装置で実験を行い、灰の組成と高温焼却時の炉壁への灰付着量の関係を調査した。実験結果と熱力学平衡計算結果から灰が付着する灰の液相化率を求め、計算結果を機械学習させることにより回帰モデルを作成した。脱水汚泥の灰組成と焼却温度から灰焼結発生の有無を判断する手法について紹介する。

キーワード：灰焼結評価、焼結防止剤、熱力学平衡計算、回帰モデル、機械学習  
Keyword：Ash sintering evaluation, Sintering inhibitor, Thermodynamic equilibrium calculation, Regression model, Machine learning

## 1. はじめに

下水汚泥の焼却設備では汚泥性状により、灰の焼結が発生し流動不良や煙道の閉塞といったトラブルが発生することが知られている。近年では温室効果が高い亜酸化窒素 (N<sub>2</sub>O) を低減するための焼却温度の高温化や下水汚泥中のリン濃度の上昇等により、焼結発生リスクは高まっている。焼結発生のリスクを評価するため、いくつかの研究グループによりそれぞれ評価指標式が発表されている<sup>1) 2) 3)</sup>。いずれの指標式もリンや金属等の灰成分中の濃度を用いており、焼却温度の項がないため、焼却温度の高温化に対応できていない。宮本らは、焼却灰組成から熱力学平衡計算を行った計算結果と焼却灰中の成分分析結果を比較する方法<sup>4)</sup>、アレニウス則を用いて焼却温度の項を含めた指標式<sup>5)</sup>を提唱しているが、焼却温度を考慮した下水汚泥焼却時の灰焼結の研究はまだ十分とは言えない。

本研究では、焼却温度を考慮した灰焼結の評価方法を確立するにあたり、電気炉を使用し焼却炉を模擬した試験設備を用いることで高温での焼却試験を行った。焼結防止用の薬品添加率を変えることで、異なる灰組成での焼却試験を行い、灰の焼結有無及び灰のフリーボード部の炉壁への付着量を測定した。次に、各試験条件の灰組成を用いて熱力学平衡計算ソフトにより温度ごとの灰の液相化率を計算し、焼却試験結果を基にして試験温度における灰の焼結が発生する液相化率を決定した。また、灰組成、焼却温度、熱力学平衡計算ソフトより求めた液相化率のデータを機械学習させることにより、回帰モデルを作成した。これにより灰組成と燃焼温度から熱力学平衡計算を行うことなく焼結発生の有無を評価すること、焼結防止のための薬剤添加量を決定することが可能となる。

## 2. 実験方法

焼却試験には流動焼却炉を模擬した上下2段に管状電気炉(石川産業株式会社 TF-0610501)を並べた装置を使用した。試験装置の写真を図1に示す。

炉心には上下段それぞれ石英管(φ55mm I.D.×750mmL)を使用した。上段は焼却炉のフリーボード部を、下段は砂層部を模擬している。下段の石英管のヒーター下端部にはφ50mmの分散板に見立てた焼結金属をセットし、石英管と焼結金属の隙間はセラミックブランケットでシールした。焼結金属上に200mmの高さで流動砂(Silica sand No.5: approx. 0.3-0.6mm)を充填し、焼結金属の下より圧縮空気を供給した。脱水汚泥は上下の電気炉間の中間部より圧送ポンプで供給した。排ガスに同伴される焼却灰はセラミックフィルタ(Isolite Insulating Products Isofil IV-1000)で除塵して回収した。焼却試験には混合生汚泥と焼結防止剤としての消石灰スラリーを使用し、十分混合してから供給した。管状電気炉は上段下段で別々に温度制御が可能であり、上段のフリーボード部は920℃、下段の砂層部は760から770℃となるように温度コントローラーで制御した。焼結防止剤の添加量を変えた焼却試験を行い、フリーボード部内壁への灰付着量を測定した。

## 3. 実験結果

焼結防止剤添加後の灰組成、焼結評価指標値、焼却試験後のフリーボード部への灰付着割合を表1に示す。焼結評価指標値は大江山<sup>1)</sup>が提唱した式(1)を用いて算出した。

表1 実験条件と結果

Table1 Test condition and results

		C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
Freeboard Temperature	[°C]	920	920	920	920	920
Ash Composition						
Na	[mol%]	1.71	1.64	1.56	1.44	1.39
Mg	[mol%]	6.32	6.10	5.78	5.35	5.14
Al	[mol%]	9.01	8.69	8.23	7.62	7.32
P	[mol%]	31.7	30.5	28.9	26.8	25.7
K	[mol%]	4.03	3.89	3.69	3.41	3.28
Ca	[mol%]	17.0	19.9	24.1	29.8	32.5
Fe	[mol%]	13.8	13.3	12.6	11.6	11.2
Amount of additive	[% **]	1.46	1.98	2.81	4.06	4.75
Sintering Index	[-]	1.27	1.35	1.47	1.65	1.76
Amount of adhered ash*	[wt%]	12.3	6.7	3.5	2.7	0.4
Sintering Judgement	[-]	Very heavy	Heavy	Mild	Mild	None

\* : adhered ash / all ash × 100

\*\* : Ca(OH)<sub>2</sub>[g-ds] / Sludge[g-ds before adding] × 100

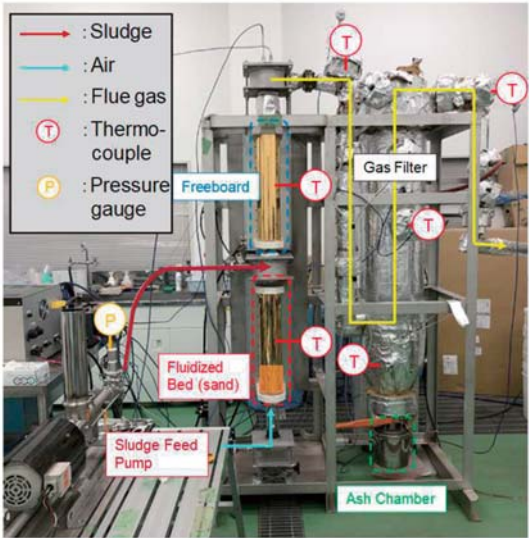


図1 試験装置  
Fig.1 Apparatus of incineration test



焼結評価指標値(Sintering Index) =  $[Na+K+2 \times (Mg+Ca) + 3 \times (Al+Fe)] / (3 \times P) \cdots \cdots$ 式(1)

ここで式(1)における各元素記号の部分については、各成分のモル濃度(mol%)を示している。またフリーボード部への灰付着割合は、石英管内壁に付着した灰の量と理論上発生する焼却灰の量から算出した。

付着した灰の割合が10%以上の場合をVery heavy、5%以上10%未満をHeavy、2%以上5%未満をMild、2%未満をNoneとした。Sintering JudgementがVery heavyであるC-1とNoneであるC-5のフリーボード内部の写真を図-2 a)と図-2 b)に示す。

C-1では厚みのある塊状になった灰の付着が確認できるが、C-5では静電気が主原因と推測されるわずかな付着があるのみで塊状の付着

は確認されなかった。

焼却温度が850℃の条件にて、大江ら<sup>1)</sup>の評価方法ではSintering Indexが1.05以上であれば、焼結なしに安定運転が可能とされてきたが、920℃の試験ではSintering Indexが1.27のC-1の条件では発生する焼却灰の12%以上がフリーボードの内壁に付着する結果となった。C-2、C-3、C-4、C-5と消石灰スラリーの添加量を増加させるにつれてフリーボード壁面への灰付着量は低減するが、Sintering Indexが1.65でも2%以上の灰が付着することが確認された。Noneと評価できたのはSintering Indexが1.76のC-5のみであった。また、添加量の増加により灰の壁面への付着量が低減することから、消石灰は焼結防止剤として有効であることが確認された。



図2 フリーボード内壁の灰付着状況  
Fig.2 Inside wall of the freeboard

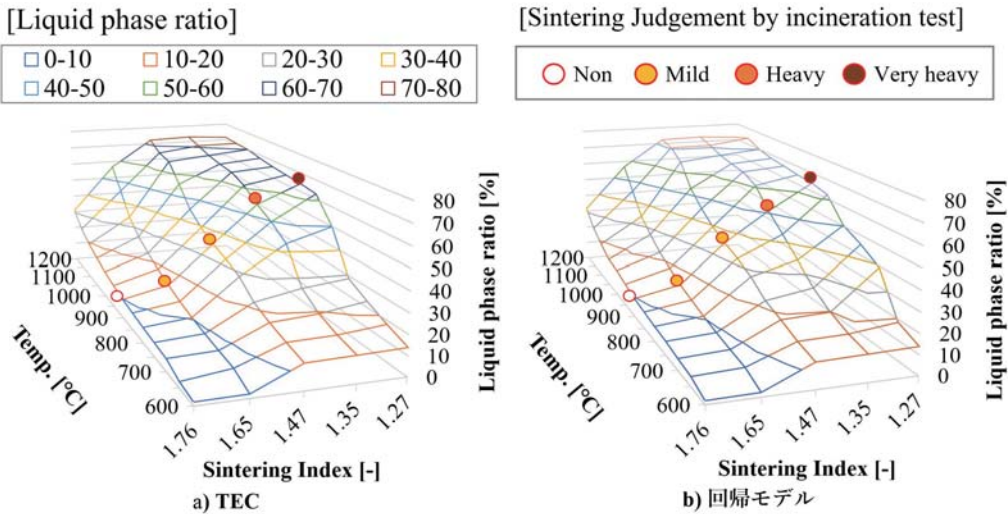


図3 焼却温度、液相率、焼結指標値の関係  
Fig.3 Relationship between temperature and liquid phase ratio

## 4. 考察

焼却灰は複雑な反応により多岐にわたる化合物を含んでいる。焼却灰の焼結は灰を構成する成分の一部が溶融することによって発生すると推測される。従来は式(1)で示されるように、Pを焼結発生の主要因と考え、Pと高融点の化合物を生成する元素が十分に存在すれば焼結を防止できるという考えが主流であった。しかしながら焼却試験結果が示すように、焼結を防止するには多量な焼結防止剤の添加が必要であった。焼却温度が高温になるほど灰中の反応が複雑になると推測されることから、従来灰焼結には重要視されてこなかった成分を含めて熱力学平衡計算(Thermodynamic Equilibrium Calculation: 以下TEC)を行うこととした。

焼却温度と灰組成から、焼却灰中の溶融する成分の割合(液相化率)をTECにより求めた。Sintering Index、焼却温度、計算より求めた液相化率の関係を図-3a)の3Dグラフに示す。

また、グラフ上の920℃の部分にプロットし、焼却試験でのSintering Judgementのクラス分けを表1に示す。消石灰添加量を増加させ、Sintering JudgementがVery heavy、Heavy、Mild、Noneと下がるにつれて焼却灰の液相化率が下がっており、付着量と液相化率の関係性が逆転することがなかったことから、焼却灰の焼結発生と液相化率には相関性があることが見いだせる。焼却温度920℃の条件下において灰焼結の問題がなく運転ができるのは、液相化率が10%以下になる場合と推測される。焼結防止剤の添加なしで液相化率が10%を超える場合は焼結防止剤を添加して液相率が10%以下になるように調整することで、運転中の焼結が防止できる。

TECは、あくまでも反応時間を無限大としたときの結果であり、焼却炉内での滞留時間では平衡に達していない可能性が高い。焼却温度が低い場合は平衡に到達するまでの時間が長く、温度が高いと短くなる。そのため、焼却温度が異なる場合は焼結発生有無の閾値となる焼却灰の液相化率の数値は変わると推測される。焼却温度が高くなると平衡に達する時間が短くなるため焼結が発生する液相化率は低くなり、焼却温度が低いと液状化に時間を要するため焼結が発生する液相化率が高くなると推測される。

次にTECを行うことなく焼却灰の液相化率を求める手法について検討した。TECに使用した灰組成、焼却温度のデータとTECで求めた液相化率のデータより回帰計算モデルを作成した。本事例では、限られた学習データから高精度な回帰モデルを構築するために、連続性を備えた内部構造を持つ一般化線形モデル(Generalized Linear Model: 以下GLM)を採用した。回帰計算モデルでの計算結果の3Dグラフを図-3 b)に示す。X軸をSintering Indexとしているが、TEC、回帰計算モデルとも灰組成のデータを使用している。両者を比較するとSintering Index 1.27の低温域で誤差が大きい部分があるが、その他の領域では誤差は小さくなっている。TECの結果に対する回帰モデルの精度を平均絶対パーセント誤差(Mean Absolute Percentage Error: 以下MAPE)により評価した。MAPEは、計算した全温度範囲600℃から1200℃では4.8%、800℃から1200℃の範囲では2.1%となり、精度の高い回帰モデルであると判断できる。

## 5. まとめ

焼却温度が高い920℃の条件で焼却炉を模擬した試験を実施し、結果を解析することで、以下の知見を得ることができた。

- a) TECより求めた液相化率と灰焼結には相関性があり液相化率での灰焼結発生の予測が可能である。
- b) TECの計算結果と機械学習させた回帰モデルのMAPEが5%未満であり、回帰モデルで液相化率の予測が可能である。
- c) 焼結発生のリスクが高いと判断された場合、焼結防止剤添加後の灰組成で再度計算することにより、適切な薬剤添加量を求めることが可能である。

今回の試験は焼却温度920℃、焼結防止剤に消石灰スラリーを使用した限定された条件での結果であり、焼却温度、汚泥種、焼結防止剤の種類は変えていない。今後は、広範囲の焼却温度、汚泥種、焼結防止剤種での試験データを取得し、焼却温度と灰組成のみで焼結発生の有無が予測できる回帰モデルを作成することが最終目的である。

### 参考文献

- 1) Ooe, H., Kashiwabara, Y., Hatano, M., Nakazawa, K., Nagaizumi, Y., Hayashi, T., Doumyou, M., Terakoshi, K., Kobayashi, T. & Takada, M. (2016) Japan Patent, JP5976152
- 2) Ishii, Y., Takahashi, M., Yabe, Y., Tamai, H. & Kamikoseki, H. (2012) Japan Patent, JP4871329
- 3) Tsukahara, J., Murata, M., Nakamura, H., Saito, H., Takai, M., Takeshima, T., Kanjo, T., Saito, S. & Nakata, Y. (2015) Japan Patent, JP5881260
- 4) Miyamoto, T., Nakamura, Y., Takaoka, M., Tanaka, S., Shiota, K., Oshita, K., Ito, R., Tanifuji, K., Kobayashi, T., Shishida, K. & Okayasu, Y. (2023) Effects of co-firing sewage sludge and plant biomass on phosphorous and potassium compounds in incinerated ash, Japanese Journal of JSCE, 79 (25), 10.2208/jscej.23-25041
- 5) Miyamoto, T., Nakamura, Y., Takaoka, M., Ito, R., Tanifuji, K., Kobayashi, T., Shishida, K. & Okayasu, Y. (2024) Characteristics of substances adhering on electric furnace walls during co-combustion of sewage sludge and plant biomass, Journal of Japan Sewage Works Association, 61 (745), 86-99, 10.24748/jswa.61.745\_86



# 水熱前処理とAnMBRを組み合わせた 脱水汚泥の集約消化プロセスの開発

Development of a Centralized Anaerobic Digestion Process for Dewatered Sludge Combined with Hydrothermal Pretreatment and AnMBR



倭 常郎 YAMATO Tsuneo  
月島JFEアクアソリューション株式会社  
研究開発室



羽深 昭 HAFUKA Akira  
北海道大学大学院工学研究院  
環境創生工学部門

## Abstract

Energy recovery using anaerobic digestion is essential for the achievement of 2050 carbon neutrality goals in the sewage processing facilities. While, in small-scale sewage processing facilities, the implementation of such system has not progressed because of the difficulties with securing facility construction costs. In this research, a new process is proposed that carries out anaerobic digestion of dewatered sludge generated in multiple small-scale processing plants and centralized to a hub processing plant. In the process, the centralized and dewatered sludge is processed with hydrothermal pretreatment by making use of the dewatered separation liquid acquired through the water-addition/re-dewatering as the substrate by generating the biogas with high speed using the anaerobic membrane bioreactor (AnMBR). The result of the investigation of hydrothermal processing conditions showed the improved sludge solubilization ratio of sludge to 20.9% and decreased moisture content of hydrothermal dewatering residue to 76.6% through the treatment at 150°C for one (1) hour. The resulting hydrothermal dewatered separation liquid was supplied to the AnMBR, and the operation was conducted with the step-by-step shortened hydrological residence time (HRT). As a result, the HRT was reduced to as short as five (5) days without causing the accumulation of volatile fatty acids (VFAs). The biogas generating speed was indicated as 1.74 L/L/d, and the methane yield was 0.25 L/g-COD under this condition.

下水処理場における2050年カーボンニュートラルの達成には、嫌気性消化を活用したエネルギー回収が不可欠である。しかしながら、小規模の下水処理場では、設備建設にかかる費用等の確保が難しく、導入が進んでいない。本研究では、複数の小規模処理場で発生した脱水汚泥を拠点処理場に集約して嫌気性消化を行う新たなプロセスを提案する。

本プロセスは、集約した脱水汚泥を水熱前処理し、その後に加水分離液を基質とし、嫌気性膜分離法(AnMBR)によって高速にバイオガスを生成するものである。水熱処理条件を検討した結果、150℃、1時間の処理で汚泥の可溶化率は20.9%に向上し、水熱脱水残渣の含水率は76.6%まで低下した。

得られた水熱脱水分離液をAnMBRに供給し、段階的に水理学的滞留時間(HRT)を短縮しながら運転を行った。その結果、揮発性脂肪酸(VFAs)の蓄積を引き起こすことなく、HRTを5日まで短縮することが可能であった。このときのバイオガス生成速度は1.74 L/L/d、メタン収率は0.25 L/g-CODを示した。

キーワード：嫌気性膜分離法、脱水汚泥、水熱処理、集約消化、消化ガス  
Keyword: Anaerobic membrane bioreactor, Dewatered sludge, Hydrothermal treatment, Centralized anaerobic digestion, biogas

## 1. はじめに

国土技術政策総合研究所の下水道技術開発会議 エネルギー分科会の報告書によると、下水処理場において2050年カーボンニュートラルを実現するためには全ての下水処理場の汚泥を嫌気性消化する必要があると示されている<sup>1)</sup>。しかしながら、小規模下水処理場においては、消化槽の建設費、運転管理費、敷地面積の確保が困難であるため、日本全国の約2,200箇所の下水処理場の内、嫌気性消化の導入は約300箇所にとどまっている<sup>2)</sup>。このような背景から、スケールメリットによって費用削減が期待できる下水汚泥の集約消化が注目されている<sup>3)、4)</sup>。

脱水汚泥を用いた集約消化として、これまでに高濃度消化法が研究されてきた<sup>5)</sup>。この方法は集約した脱水汚泥に加水を行い、通常よりも高い汚泥濃度(TS10%程度)に設定することにより消化槽の小型化を図っている。しかしながら、嫌気性消化の水理学的滞留時間(以下HRT)は、通常30日程度で運転されるため、消化槽の小型化には限界があった。

本研究では脱水汚泥の集約消化に向け、極めて短いHRTで運転可能な水熱前処理と嫌気性膜分離法(以下AnMBR)を組み合わせた新たな消化プロセスを提案する(図1)。本プロセスは、まず集約した脱水汚泥に水熱処理を施して可溶化を行う。水熱処理後の脱水汚泥に加水し、可溶化した有機物を液相に回収する。その後、凝集剤を添加せずに脱水し、脱水残渣と脱水分離液に分離する。脱水分離液には、水熱処理と加水によって溶存態有機物が高濃度で含まれており、これをAnMBRの基質に用いることで消化効率の向上及びHRTの短縮が可能である。

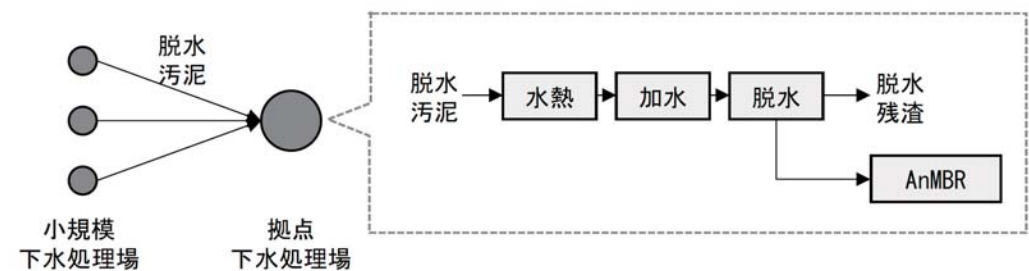


図1 水熱前処理とAnMBRを組み合わせた消化プロセス  
Fig.1 Digestion process combining hydrothermal pretreatment and AnMBR

本報では、提案するプロセスにおいて最適な水熱前処理条件を検討するとともに、AnMBRのHRTを最短2日まで徐々に短縮し、各運転条件で得られるバイオガス生成速度やメタン収率、メタン濃度を明らかにした。

## 2. 実験方法

### (1) 水熱条件の検討

最適な水熱前処理条件を検討するために使用した脱水汚泥には、A市の下水汚泥処理施設から採取した混合生脱水汚泥を用いた。汚泥の含水率は約75%であった。この脱水汚泥をオートクレーブ(アルプ株式会社、MCS-3032S)を用いて水熱処理を行った。水熱条件については、温度を120～150℃、処理時間を0～10 hとした。水熱処理後、水道水を用いて汚泥のTSが7%程度になるように加水し、遠心分離機を用いて遠心強度1940 ×g (3000 rpm、10 min)で遠心分離し、脱水分離液と脱水残渣を得た。

水熱処理による脱水汚泥の可溶化率及び脱水残渣の含水率をもとに最適水熱条件を求めた。可溶化率(%)は式(1)によって算出した。

$$\text{可溶化率}(\%) = \frac{sCOD_{HTP} - sCOD_0}{tCOD_0 - sCOD_0} \quad \dots \text{式(1)}$$

$sCOD_{HTP}$  : 脱水汚泥を水熱処理・加水・脱水して得た脱水分離液の溶解性化学的酸素要求量

$sCOD_0$  : 脱水汚泥に加水・脱水して得た脱水分離液の溶解性化学的酸素要求量

$tCOD_0$  : 脱水汚泥に加水したものの全化学的酸素要求量

(2) AnMBRの構成

有効容積 6.0 Lの消化槽と膜モジュールを接続し、槽外型 AnMBR を構築した(図2)。消化温度を37℃に維持し、分離膜には公称孔径 30 nm、内径 8 mm、長さ 1000 mmのPVDF製中空糸膜を7本用いた(PENTAIR plc, X-FLOW COMPACT 0.15)。有効膜ろ過面積は0.15 m<sup>2</sup>である。AnMBR 運転期間中は汚泥循環ポンプで消化汚泥を循環させることにより、クロスフロー流速 0.02 m/sの条件のもと、内圧式クロスフローろ過を行った。膜ろ過用ポンプの設定流量を変更することによって膜ろ過フラックスを制御した。発生したバイオガスは湿式ガスメーターを介してアルミニウム製のガスバッグに回収した。

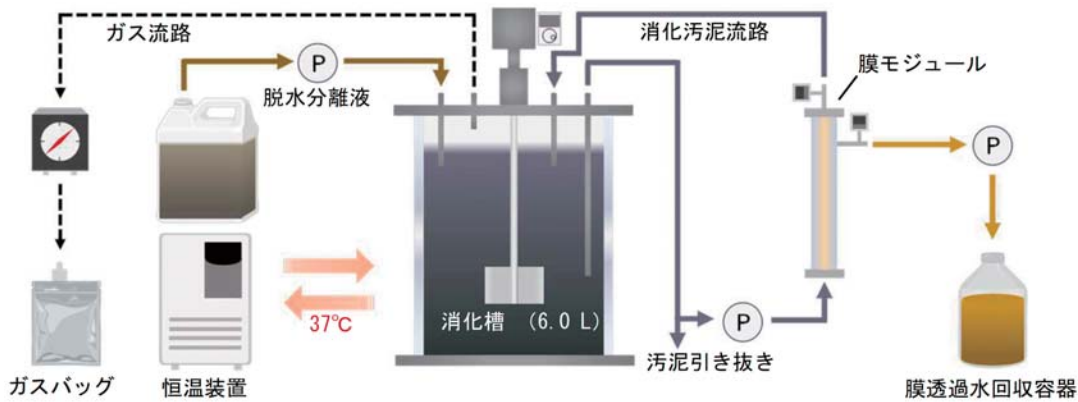


図2 AnMBR実験装置の概略図  
Fig.2 Schematic diagram of the AnMBR experimental apparatus

表1 AnMBRの運転条件  
Table1 Operating conditions of the AnMBR

条件	運転方式	基質	期間 (d)	HRT (d)	SRT (d)	有機物負荷量 (g-tCOD/L/d)	膜ろ過フラックス (LMH)
馴致	CSTR	余剰汚泥	55	60	60	0.36	—
1			60	30	30	0.85	
2	AnMBR	脱水分離液	25	60	120 → ∞	0.41	0.014 → 0.028
3			25	30	∞	0.71	0.056
4			14	15	1050	1.84	0.11
5			14	10	1050	2.78	0.165
6			15	5	1050	4.37	0.332
7			14	2	1050	12.3	0.832

CSTR : 完全混合槽型反応器  
AnMBR : 嫌気性膜分離法  
HRT : 水理学的滞留時間  
SRT : 汚泥滞留時間

(3) AnMBRの運転条件

運転条件を条件1～7まで設定し、馴致期間を含めて合計222日間運転した(表1)。馴致期間と条件1は膜ろ過を行わない完全混合槽型反応器(CSTR)として運転し、基質には余剰汚泥を用いた。条件2～7ではAnMBRで運転し、HRTを段階的に短縮した。基質には脱水分離液を用いた。

馴致期間及び条件1～2では週に1回又は2回基質の投入を行い、条件3～7では基質投入用ポンプを用いて連続的に基質を投入した。

3. 実験結果と考察

(1) 水熱条件の決定

水熱温度を150℃に固定し、可溶化率と脱水残渣の含水率に与える水熱時間の影響を調査した(図3)。sCODは0.5 hで18.0 g/Lまで大きく上昇し、その後は3 hで29.8 g/Lとなったが、3 h以降ではsCOD、可溶化率の上昇はほとんど見られなかった。脱水残渣の含水率については、Blankが86.5%に対し、水熱1 hで大きく減少し76.6%となった。1 h以上の水熱処理による含水率低下はわずかであり、水熱5 h後の含水率は74.9%であった。

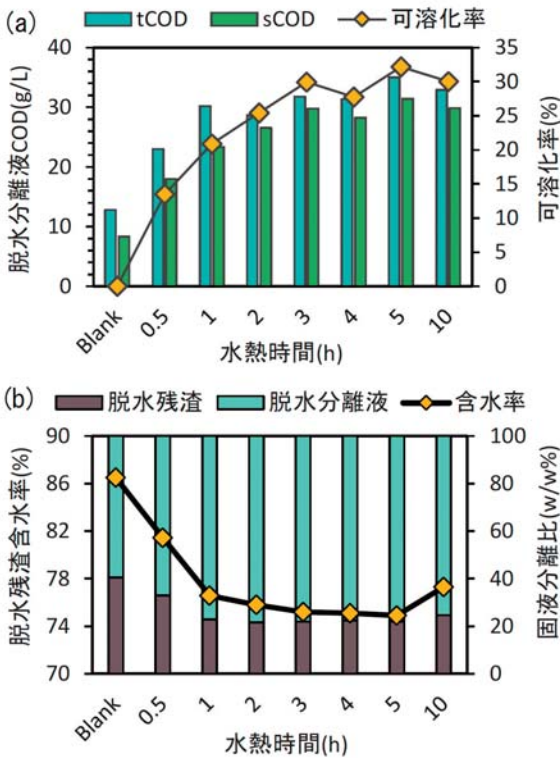


図3 水熱温度150℃で水熱時間を変化させたときの(a)可溶化率、(b)含水率  
Fig.3 Effects of hydrothermal retention time at 150 °C on:  
(a)Solubilization ratio, (b)Moisture content

水熱時間を1 hに固定し、水熱温度を変化させて検討を行った(図4)。水熱温度が上昇するほど脱水分離液中のsCODと可溶化率が上昇する傾向があり、水熱温度を高くすることで、より有機物の可溶化が促進された。また、脱水残渣の含水率も水熱温度上昇に伴い低下した。

水熱しない場合(Blank)と比較して、水熱時間0.5 hで脱水分離液sCODが2倍以上に上昇していることや、水熱時間1 hで脱水残渣の含水率が下限に近かったことから、本研究では水熱条件を150℃、1 hとし、その後の嫌気性消化実験を行った。

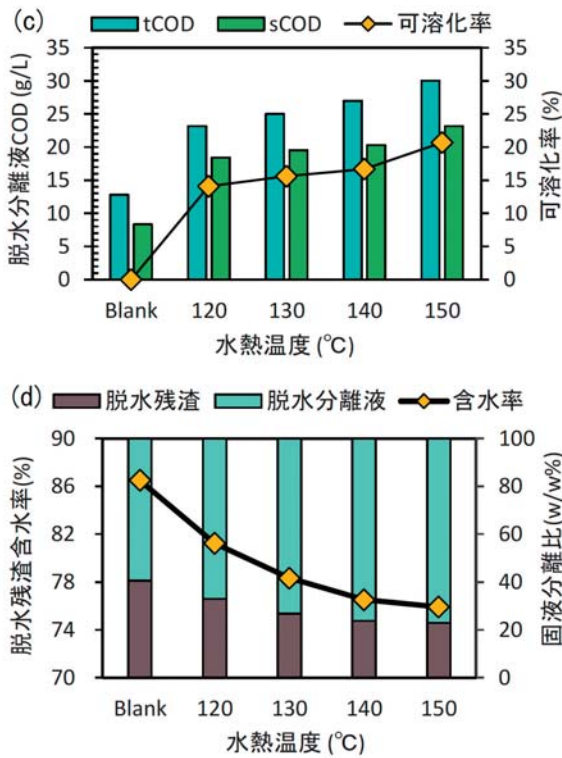


図4 水熱時間1hで水熱温度を変化させたときの(a)可溶化率、(b)含水率  
Fig.4 Effects of hydrothermal temperature at a retention time of 1 h on:  
(a)Solubilization ratio, (b)Moisture content



(2) 投入基質と消化汚泥の性状

投入基質として用いた余剰汚泥及び水熱脱水分離液の性状を表2に示す。消化汚泥の各性状は条件1終了時まででは安定して推移していた(図5)。条件2において、基質を余剰汚泥から水熱脱水分離液に変更し、SRTを120 dで運転したところ、消化汚泥のTSが2.2 g/L、VSが1.5 g/Lまで減少した。水熱脱水分離液は懸濁態物質が著しく少なく、また消化槽内の菌体増殖速度よりも消化汚泥の引き抜きが多かったため、TS及びVSが減少したものと推測される。性状回復のためSRTを延長した結果、条件3で酸化還元電位(ORP)が正常値に回復し、TSの上昇も確認できたため、条件4以降はSRTを1050 dとして運転を行った。

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nは条件2以降、上昇傾向を示した。条件2以降基質として用いた水熱脱水分離液中に含まれるNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nが余剰活性汚泥と比較して高濃度であったことが考えられる。条件6以降は1.5 g/Lを推移し、消化阻害が起こりうるとされる水準よりも低い濃度であった<sup>6)</sup>。

表2 投入した余剰汚泥と水熱脱水分離液の性状

Table2 Characteristics of the fed surplus sludge and hydrothermal dewatering filtrate

項目	余剰汚泥(n = 26)	脱水分離液(n = 15)
tCOD (g/L)	23.6 ± 0.3	25.5 ± 3.4
sCOD (g/L)	—	21.7 ± 2.8
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg-N/L)	35.0 ± 17.0	330 ± 50
pH (-)	6.58 ± 0.10	5.28 ± 0.09
TS (g/L)	18.3 ± 2.0	—
VS (g/L)	14.8 ± 1.6	—
SS (mg/L)	—	420 ± 110
VSS (mg/L)	—	370 ± 100

tCOD : 全化学的酸素要求量  
sCOD : 溶解性化学的酸素要求量  
NH<sub>4</sub><sup>+</sup> : アンモニア態窒素濃度  
pH : 水素イオン指数  
TS : 総固形物濃度  
VS : 強熱減量(有機物濃度)  
SS : 浮遊物質濃度  
VSS : 浮遊物質の強熱減量(浮遊物質の有機物濃度)

(3) バイオガス生成性能

a) バイオガス生成速度

図6に各運転条件におけるバイオガス生成速度と有機物負荷量(以下OLR)を示す。基質に脱水分離液を用いた条件2〜7では、HRTの短縮に伴ってバイオガス生成速度が増加し、条件7で平均約4.0 L/L/dを記録した。水熱処理により、嫌気性消化において律速段階であった有機固形物の可溶化過程が省略され、バイオガス生成が高速化したと考えられる。しかしながら、条件7では揮発性脂肪酸(以下VFAs)の蓄積が見られたため、本実験において問題なく運転ができたのはHRT5 dである条件6までといえる。Wuら(2021)は水熱処理を施した下水汚泥を基質として、本研究の条件5と近いOLR条件(OLR = 2.79 g-tCOD/L/d)でCSTRでの嫌気性消化を行い、HRT 20 dにおいてバイオガス生成速度0.21 L/L/dを記録している<sup>7)</sup>。本研究では脱水分離液とAnMBRを用いることで、同OLR条件において1.2L/L/dを達成し、HRTを短縮すると同時により大きいバイオガス生成速度を得ることができた。

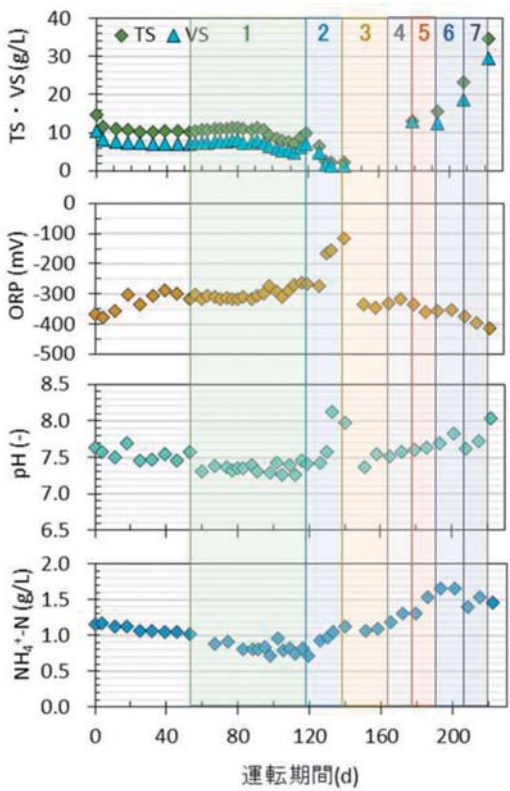


図5 リアクター内の各データの経時変化(図中番号は表1条件番号を示す)  
Fig.5 Temporal variations of reactor parameters

b) メタン収率、メタン濃度

基質に脱水分離液を用いた条件2〜7の全ての条件で条件1より高いメタン収率を記録し、HRT10 dである条件2の0.32 L/g-tCODが最大であった(図7)。水熱処理によって、脱水分離液に含まれる易生物分解性有機物の割合が余剰汚泥と比較して高くなったことが要因と考えられる。一方で、条件6及び条件7ではメタン収率が減少傾向を示し、条件7におけるメタン収率は0.21 L/g-tCODであった。HRTの短縮に伴ってOLRが上昇し、微生物による有機物の消費速度を上回ったことが原因と考えられる。条件7はVFAsの蓄積が見られ、VFAsが膜透過水から流出したことによりメタン収率が減少したものと推測される。

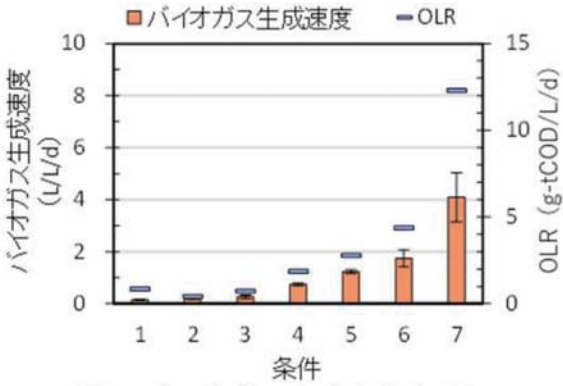


図6 バイオガス生成速度とOLR  
Fig.6 Biogas production rate and OLR

4. まとめと今後の展望

本研究における検討範囲では、水熱温度150℃、水熱時間1 hが最適な水熱条件であった。また、水熱脱水分離液を基質としてAnMBRで嫌気性消化を行った結果、HRT 5 dまでの条件では安定運転が行えた。

今後は150 ℃よりも高い水熱温度で水熱処理を行い、可溶性効果や脱水性向上効果の比較を行う。AnMBRについては、さらなる処理速度向上に向けて高温条件等の嫌気性消化を検討する。

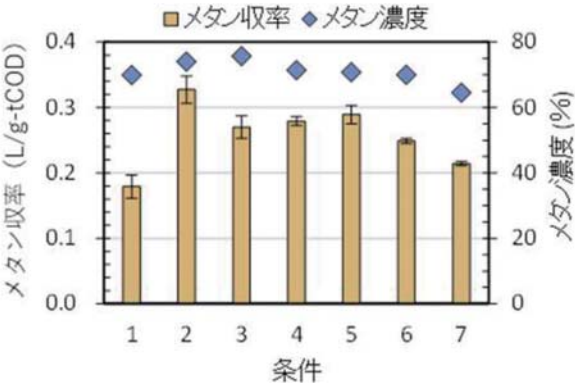


図7 メタン収率とメタン濃度  
Fig.7 Methane yield and methane concentration

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所:カーボンニュートラルの実現に貢献するための下水道技術の技術開発等に関するエネルギー分科会報告書, [https://www.nilim.go.jp/lab/eag/pdf/202203\\_energybunkaikaihokokusyo.pdf](https://www.nilim.go.jp/lab/eag/pdf/202203_energybunkaikaihokokusyo.pdf)
- 2) 日本下水道協会 HP:下水汚泥のエネルギー利用の課題,<https://www.jswa.jp/recycle/energy/e201/>,2024年4月閲覧
- 3) 日高平, 對馬育夫, 津森ジュン, 南山瑞彦:下水の脱水汚泥性状が中温嫌気性消化に及ぼす影響,土木学会論文集G,71巻7号,III\_27-37,2015.
- 4) Hämäläinen, A., Kokko, M., Chatterjee, P., Kinnunen, V., Rintala, J.: The effects of digestate pyrolysis liquid on the thermophilic anaerobic digestion of sewage sludge — Perspective for a centralized biogas plant using thermal hydrolysis pretreatment, Waste Management, 147, pp. 73-82, 2022
- 5) 高島正信, 矢口淳一, 中尾裕一: 窒素・リン回収を伴う下水汚泥の高濃度・高温嫌気性消化システム,土木学会論文集G,75巻7号,pp. III\_435-442,2019.
- 6) 野池達也:メタン発酵,pp. 122-123,2009
- 7) Wu, L.J., Li, X.X., Liu, Y.X., Yang, F., Zhou, Q., Ren, R.P.: Optimization of hydrothermal pretreatment conditions for mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of high-solid sludge, Bioresource Technology, 321, 124454, 2021

# CRYSTALLEX® Type VF-Laboの開発

Development of CRYSTALLEX Type VF-Labo



八色 真 YAIRO Makoto  
月島機械株式会社  
プロセス装置技術部新事業開発グループ

## Abstract

The CRYSTALLEX Type-VF is a reactive crystallization equipment that can create uniform crystalline micro particles utilizing the high shearing force generated by the eddying flow (swirl flow) and has been used mainly for production of secondary battery materials. With the conventional minimum line-up, the large processing quantity and the equipment size was the bottleneck for the consideration for its small-quantity and multi-type application. Hence, a small-sized equipment (CRYSTALLEX Type-VF Labo) that allows the lab scale use was developed. The result of performance verification showed the achievement of the equivalent crystal quality to that acquired with those of conventional sizes. The verification of applicability to other materials and the improvements, such as the addition of controlling functions, will be considered in the future. In the sales viewpoint, through the implementation of the equipment to the users of the development divisions of enterprises and the research institutes, we will provide the services that support the streamlining of development, such as the reduced development lead time and a reduced workload.

CRYSTALLEX® Type-VFは、渦流（旋回流）による高せん断力を活用し、均一な結晶微粒を生成できる反応晶析装置であり、主に二次電池材料の製造に用いられてきた。従来の最小ラインナップでは、処理量や装置サイズが大きく、少量・多品種の適用検討の障壁となっていた。そこで、ラボスケールでの使用を可能にする小型装置（CRYSTALLEX® Type-VF Labo）の開発を行った。性能確認の結果、従来サイズと同等の結晶品質が得られた。今後は、他材料への適用性確認や制御機能の追加等の改良を検討する。販売面では、企業の開発部門や研究機関のユーザー様に対して、本装置の導入を通じて、開発リードタイムの短縮、作業負荷軽減などの開発効率化を支援するサービスを提供する。

キーワード：反応晶析、ラボ装置、二次電池材料、連続晶析、バッチ晶析  
Keyword：Reactive crystallization, Laboratory equipment, Secondary battery materials, Continuous crystallization, Batch crystallization

## 1. はじめに

CRYSTALLEX® Type-VFは、渦（旋回流）による高いせん断力を用い、均一な結晶微粒を生成させることが特徴の晶析装置である。主に中和反応による沈殿結晶生成などの反応晶析に用いられ、二次電池材料での使用実績を有する。

近年、電池材料などの高付加価値材料向けの検討や大学や研究機関等の材料開発の初期段階における検討依頼により、少量・多品種での引き合いが増加している。これに伴い、従来最小ラインナップであったリアクター径50mm（以下VF-D50）スケールテスト機でのテストでは処理能力が過剰で、原料の用意が困難・予算に合致しないといった適用検討の障壁となる局面が発生していた。またVF-D50は外形寸法がW1100× L1250× H1335程度（図1）であり、最低でも10L程度のスラリーが生産されるため、スペースや安全性の理由から室内ラボでの使用がはばかられ、比較的大規模な実験エリアや人員を確保しなければならない問題があった。

そこで本開発では、上記の課題（省処理量・省スペース）を解決し、室内ラボスケールで使用できる装置 VF-Laboの開発を試みた。

## 2. 開発方法

### 2.1 設計、製作方針

CRYSTALLEX® Type-VFは、リアクター、タンク、循環ポンプで構成される（図2）。VF-Laboの設計仕様をVF-D50と比較した表を表1に示す。全体サイズを小さくしつつも、同じ反応機構を維持する寸法としてリアクター径を約10mm（D10）に設定し、これを基準に装置のスケールダウンを検討した。ラボでの使用を想定し、装置が実験台に設置できる大きさに収まるよう配慮し、電源は単相AC100V仕様とした。また、連続晶析とバッチ晶析の両方に対応できる仕様とした。さらに、導入検討の初期段階や大学等の研究機関で使用されることも考慮し、制御盤を持たせないことで装置コストを抑え、少ない予算でも導入が可能となることを目指した。循環ポンプは従来の遠心渦巻き式から空圧式ダイヤフラムポンプに変更したが、脈動防止ダンパーを後段に取り付けることで圧力変動の影響を抑えた。

### 2.2 性能確認テスト

VF-D50と類似の条件で晶析テストを行い、同等品質の結晶が製造の可否について確認した。



図1 CRYSTALLEX® Type VF-D50写真  
Fig.1 Photograph of CRYSTALLEX Type VF-D50

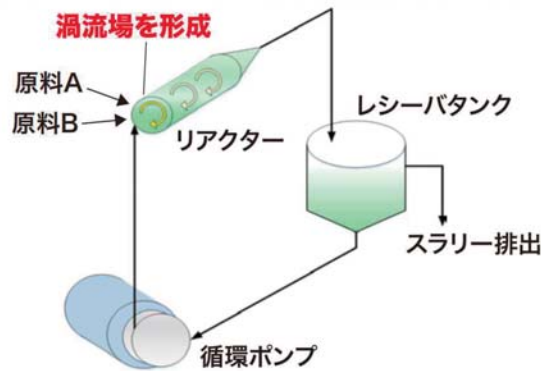


図2 CRYSTALLEX® Type-VFの概略図  
Fig.2 Schematic diagram of CRYSTALLEX Type-VF

表1 CRYSTALLEX® Type VF-LaboとType VF-D50の仕様比較  
Table1 Specification comparison of CRYSTALLEX Type VF-Labo and Type VF-D50

	VF-Labo	VF-D50
外形寸法	450mmW×800mmL×600mmH	1100mmW×1250mmL×1335mmH
代表リアクタ径	10mm	50mm
生産スラリー量 （バッチ運転時）	約1~5L	約10~50L
全体重量	約50kg	約1500kg
電源仕様	単相AC100V	三相AC200V



3. 開発結果

3.1 製作結果

完成した開発機の写真を図3に示す。開発したVF-Laboは、一般的な実験台の寸法に対して設置しやすいサイズに収まった。また一回の試験で使用する液量はおよそ1~5Lであり、市販されている容器等でハンドリングしやすい量と言える。

3.2 性能確認結果

二次電池材料として使用されるNi, Co, Mn水酸化物のバッチ反応晶析に装置を適用し、VF-LaboとVF-D50を用いて類似条件で晶析を行った。結晶の品質比較を行った結果を図4に示す。条件の細かな違いにより粒子径や粒子形状に若干の差があるが、両者の粉体測定値は最大でも30%程度の差に収まっていることから、スケールダウンした開発機においても従来スケール同様の反応機構を維持できていると考えられる。両者の粒子径や球形度の微調整は循環ポンプによる流量などの装置運転パラメータを改善することによりカバーできる範囲であると思われる。また、ポンプをダイヤフラムに変更したことによる明確な影響は確認されなかった



図3 CRYSTALLEX® Type VF-Labo写真  
Fig.3 Photograph of CRYSTALLEX Type VF-Labo

4. 今後の方針

4.1 装置改良

4.1.1 追加性能確認

対象物によってスケールダウンの影響度合いに差がある可能性を考慮し、Ni, Co, Mn水酸化物以外の晶析への適用データを蓄積し、結果に応じた装置改良をする必要があると考える。特に、粒子径やスラリーの固形分濃度・粘度等の違いは流れの状態への影響が大きいと推測される。さらに、全体スケールが小さくなったことによる閉塞・熱バランス変化・攪拌状態の変化など、スケールダウン機特有の現象への理解を深めることが課題である。

4.1.2 制御性向上

今回は、コストを抑えてCRYSTALLEX® Type-VFを導入しやすくする方針で設計を行ったが、本装置を実際の材料製造に用いたり、スケールアップ時の制御法案の確認を行ったりすることも想定される。今後はサイズ感を維持しつつ自動制御機能を有し、運用性を高めた装置の開発を行いたいと考える。一般に晶析は、晶析開始から終了（連続晶析の場合は状態の安定）までに要する時間が長いため、自動での制御機能を持った装置を複数台設置することで、複数条件を並列して効率化することも想定される。この場合においても、装置自体がコンパクトである点はメリットと言える。

4.2 販売戦略

処理量と導入コストを下げたことで、予算や原料の限られる検討の初期段階や、大学・研究機関などへの販売が期待できる。また全体サイズを抑えたことによる輸送・設置の容易さを生かし、貸出や展示会への出展などの運用が考えられる。限られた予算内でも本装置で適用性が確認できれば、上位サイズであるVF-D50以上での適用検討がしやすくなると思われる。

5. まとめ

本開発では、少量・多品種の適用検討における課題を解決するため、従来機をスケールダウンシラボスケールでの使用に適した小型装置CRYSTALLEX® Type VF-Laboを製作した。装置サイズ・処理量・導入コストを抑えたことで、初期段階での検討や研究機関での活用可能性が広がることを期待している。今後はさらなる材料への適用性検証や制御機能の強化を進め、より多様なニーズに応える装置としての展開を目指していきたいと考える。

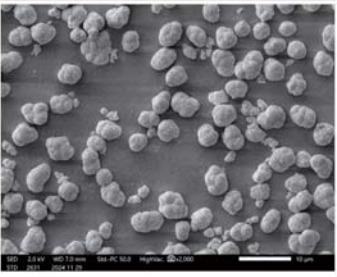
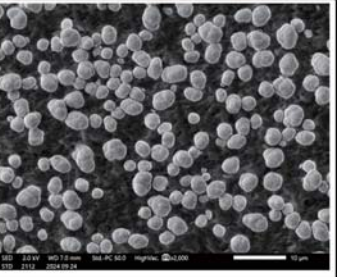


	VF-Labo	VF-D50
SEM写真		
		
d10粒径 μm	2.6	2.1
d50粒径 μm	3.8	3.0
d90粒径 μm	5.4	4.1
タップ密度 g/cm <sup>3</sup>	1.9	1.9
比表面積 m <sup>2</sup> /g	13	16

図4 VF-LaboおよびVF-D50の結晶品質比較  
Fig.4 Comparison of crystal quality between VF-Labo and VF-D50

# 微生物固定化担体を用いた 脱炭素型水処理プロセス

Immobilized Microorganism Carrier for Decarbonized Wastewater Treatment Process



馬場 圭 BABA Kei  
月島JFEアクアソリューション(株)  
技術企画センター

## Abstract

With the advanced treatment process that utilizes our immobilized microorganism carrier, the preservation of nitrification capability for the drifting sludge in even a shorter time than the required ASRT has been verified. The feature of preserved nitrification capability for the drifting sludge even with the short ASRT will lead to low MLSS operation and low DO operation and will greatly contribute to the energy reduction of wastewater treatment processes.

In order to demonstrate the energy reduction possible through the low MLSS and low DO operation of the carrier injection type advanced treatment process, a test was conducted in the carrier method experiment pond in the Iriezaki Wastewater Treatment Center, Kawasaki City.

As a result of demonstration test, the process was verified capable of performing low MLSS and low DO operations and showed the reduction of power consumption by 5% to 15% compared to the relevant pond that simulated the operating condition in the past fiscal year, and the reduction of 50 to 60% compared to the conventional circulation type nitrification denitrification method. The amount of generated greenhouse gas was reduced by 40% to 50% compared to the standard activated sludge method and the conventional circulation type nitrification denitrification method.

当社微生物固定化担体を利用した高度処理プロセスでは、所要ASRTより短い時間でも、浮遊汚泥の硝化能力が保持されることが確認されている。この短いASRTでも浮遊汚泥の硝化能力が保持される特徴は、低MLSS運転と低DO運転につながり、水処理プロセスのエネルギー削減に大きく寄与する。

この担体投入型高度処理プロセスを低MLSS、低DO運転することで、エネルギー削減が可能となることを実証するために、川崎市入江崎水処理センター担体法実池での試験を行った。

実証試験の結果、本プロセスは低MLSS及び低DO運転が可能であり、過年度の運転条件を模擬した対照池に対して、電力消費量を5～15%、従来の循環式硝化脱窒法に対して50～60%削減となった。温室効果ガス発生量は、標準活性汚泥法及び従来の循環式硝化脱窒法に対して40～50%の削減となった。

キーワード：微生物固定化担体、ASRT、エネルギー削減、温室効果ガス削減  
Keyword：Immobilized microorganism carrier, ASRT, Energy reduction, Greenhouse gas reduction

## 1. はじめに

下水道分野では、2050年のカーボンニュートラルに向け、エネルギー消費の削減が求められており、「地球温暖化対策計画」において、①省エネの促進、②汚泥焼却の高温化による一酸化二窒素の削減、③下水汚泥のエネルギー化（創エネ）、④再エネ利用の拡大が対策として示されている。一方、下水道分野で大きな割合を占める水処理プロセスにおける消費電力量や温室効果ガス発生量に関しては、カーボンニュートラルに向けた大きな課題と考えられる。

本報告では、微生物固定化担体（以下 担体と記す）を利用した脱炭素型水処理プロセスに関して、実証試験結果を基に、消費電力や温室効果ガス発生量の削減効果について記載する。

## 2. 実証技術の概要、特徴

### 2.1 実証技術の概要

実証した本プロセスの概略フローを図1に示す。処理方式は、担体利用嫌気・無酸素・好気法で、無酸素タンク後段は微好気タンクとして運用している。微好気タンクは、表層DOを1mg/L程度で運転することで、同一槽内で硝化と脱窒を同時に行い、循環液の低減を可能としている。好気タンクには、硝化促進のため担体が投入されている。好気タンクは、DO制御により散気空気量を調整できる設備となっている。

### 2.2 微生物固定化担体【バイオチューブ】

当社の担体であるバイオチューブは、ポリプロピレンを主原料とし、内径3mm、外径4mm、長さ5mmの中空円筒状の微生物固定化担体で

ある(図2参照)。バイオチューブは以下の特徴があり、約45万 m<sup>3</sup>/日の処理能力を有する設備の採用実績を有している。

- 生分解されず磨耗・劣化しない材質のため、23年間担体を補充することなく安定運転できることを確認している。
- 中空円筒状で比表面積が大きく、表面の微小な凹凸加工により微生物が付着しやすい構造のため、有用微生物を大量に固定化できる。
- 比重が水とほぼ同等（約1.01）のため、標準・深槽いずれの反応タンクにおいても、良好に流動する。
- バイオチューブを利用することで、標準法反応タンクの滞留時間で高度処理が可能になるため、反応タンク増設工事が不要となる。

### 2.3 低MLSS、低DO運転による散気空気量(プロフ動力)の削減

担体法施設において浮遊汚泥の硝化速度を測定した結果を図3に、硝化菌保持に必要な好気タンク内固形物滞留時間（ASRT）の算出式を式(1)<sup>1)</sup>に示す。図3の15℃付近の低水温期のASRTは4.2日であり、式(1)で計算される硝化菌保持に必要なASRT10.7日(δ=1.35)に対し半分以下であったが、浮遊汚泥は十分な硝化能力を有していた。浮遊汚泥が短いASRTで硝化能力を有したのは、担体表面で増殖した高濃度の硝化菌が、随時剥離し浮遊汚泥に供給されたためと考えられる。

$$\theta \text{XA} = \delta \cdot 20.65 \exp(-0.0639T) \quad \dots \dots \dots \text{式(1)}$$
$$\theta \text{XA} : \text{硝化菌保持に必要なASRT (H)}$$
$$\delta : \text{流入 T-N の負荷変動に対する補正係数 (1.2 \sim 1.5)}$$
$$T : \text{水温 (}^{\circ}\text{C)}$$

この短いASRTで浮遊汚泥が硝化能力を有する特徴により、本プロセスは低MLSSで運転することが可能となる。そのため、活性汚泥

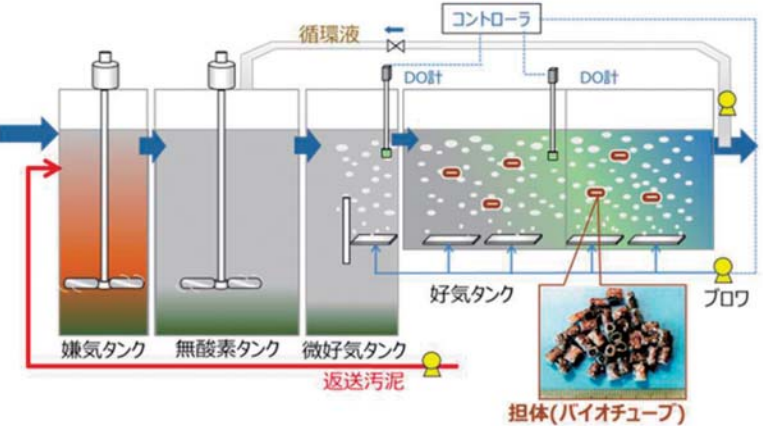


図1 実証施設概略フロー  
Fig.1 Demonstration facility overview

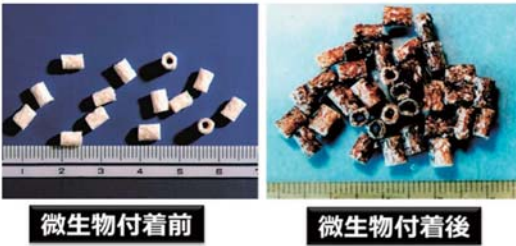


図2 バイオチューブ  
Fig.2 BIOTUBE

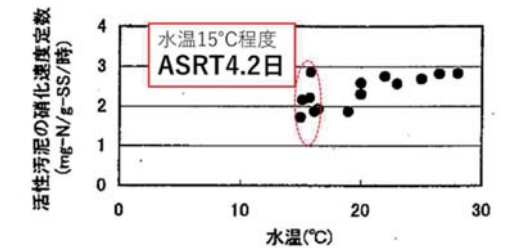


図3 担体法での浮遊汚泥の硝化速度  
Fig.3 Nitrification rate of suspended sludge in carrier process



の内生呼吸量を低減でき、必要酸素量が少なくなる。さらに、浮遊汚泥で硝化処理が可能となるため、低DOでの運転が可能となり、飽和DOとの差が大きくなるため酸素供給量が少なくてできる。この必要酸素量が少なくなることと、酸素供給量が少なくなることの相乗効果により、散気空気量が少なくて、プロワ動力の削減が可能となる。

### 3. 実証研究

#### 3.1 実証フィールド、設備

実証試験は、川崎市入江崎水処理センター西系水処理施設で実施した。施設の概要を表1に、計画水質を表2に示す。同施設の概略フローは図1に示したとおりである。西系水処理施設は、1系列2池×4系列の合計8池である。実証試験はこの中の2池を実証池と対照池として実施した。実証期間中、図1のフローに示した好気タンクのDO計を用い、好気タンクのDO制御により散気空気量を調整した。

#### 3.2 実証研究結果

##### 3.2.1 ASRTと硝化状況

実証期間の水温と処理状況を図4に示す。DOは実証池1mg/L、対照池2mg/Lを目標に、MLSSは実証池1000mg/L、対照池1750mg/L

Lを目標に運転した。

処理水のNH<sub>4</sub>-Nについて見ると、12月末から2月末までの期間に実証池で残存が見られた。対照池及び実証池の他の期間は完全硝化されていた。NH<sub>4</sub>-Nの残存が見られた期間の実証池のASRTは2.4日程度で、完全硝化した対照池のASRTは3.6日程度であった。実証池において12月末から増加した処理水NH<sub>4</sub>-Nは、1月末を境に減少しているが、この期間水温とASRTに大きな変化は見られなかった。よって、この期間の水温は、硝化菌がウォッシュアウトする境界のASRTだったと推定される。本施設において、冬季はASRT3.6日程度とし、それ以外の期間は2.4日程度とすることで、硝化処理は良好に行われると考えられる。実証池でNH<sub>4</sub>-Nの残存が見られた期間の式(1)から算出した所要ASRTが7～8日程度であったのに対し、実証のASRTが2.4～3.6日で良好な硝化処理が可能であったのは、前述の担体の効果と考えられる。

##### 3.2.2 電力量及び温室効果ガス削減効果の試算

実証池と対照池の運転が安定していた期間について、電力量及びCO<sub>2</sub>発生量の削減効果を検討した。試算条件を表3に示す。実証池又は対照池の条件を、西系全体の8池に適用したとして試算を行った。表4に試算結果を示す。同表には標準活性汚泥法と循環式硝化脱窒法の電力量<sup>3)</sup>を併記した。なお、実証試験では実証池の攪拌機

を間欠運転したが、本比較では連続運転とし、対照池と同等な条件で試算した。

同表に見られるように、水量当たりの電力量は、対照池0.133～0.163kWh/m<sup>3</sup>に対し、実証池0.116～0.154kWh/m<sup>3</sup>であり、低MLSS、低DO運転することで5～15%の電力削減効果が見られた。また、標準活性汚泥法0.2kWh/m<sup>3</sup>、循環式硝化脱窒法0.3kWh/m<sup>3</sup>と比較して、実証池の電力量は大幅に小さかった。CO<sub>2</sub>発生量は、循環式硝化脱窒法を100%とした場合、標準活性汚泥法は96%となる。実証池は50～60%となり、標準活性汚泥法及び循環式硝化脱窒法に対して半分程度のCO<sub>2</sub>発生量であり、脱炭素に大きく寄与できるプロセスであると考えられる。

表3 試算条件(西系全池適用時)  
Table3 Calculation conditions(Applied to all ponds in the west series)

西系全池(8池)適用時			条件① 7/5～8/26		条件② 8/27～9/13		条件③ 9/17～10/31		条件④ 11/1～12/4	
			対照池	実証池	対照池	実証池	対照池	実証池	対照池	実証池
水量	流入水量	m <sup>3</sup> /日	101,948	100,998	116,060	115,365	100,488	99,160	98,012	105,534
	返送比	—	0.27	0.26	0.26	0.26	0.28	0.26	0.29	0.27
	硝化液循環比	—	1.21	1.21	1.32	0.91	0.87	0.89	0.66	0.85
反応タンク	水温	℃	29.2	29.0	29.1	28.9	27.2	27.0	23.0	22.8
	MLSS	mg/L	1,850	1,068	1,700	990	1,786	1,027	1,900	1,440
水質	掘付DO計		mg/L	1.8	1.0	2.0	1.3	1.7	1.0	2.1
	反応タンク流入	BOD	mg/L	63.3	63.3	41.0	41.0	51.7	51.7	57.8
		T-N	mg/L	20.8	20.8	16.5	16.5	21.3	21.3	19.8
	処理水	BOD	mg/L	2.1	2.8	1.7	0.7	1.7	2.7	3.0
		T-N	mg/L	4.9	6.2	4.2	5.4	7.1	7.8	6.3
	空気量		m <sup>3</sup> /日	519,939	480,090	480,695	418,708	484,317	426,208	397,811

電力：排出係数0.408kgCO<sub>2</sub>/kWh(東電2023年度)  
N<sub>2</sub>O：排出量<sup>2)</sup>(kgN<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup>)標準法0.000142、高度処理0.0000117、排出係数265  
メタン：排出量<sup>2)</sup>(kgCH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup>)標準法、高度処理0.00088、排出係数28

表4 試算結果(西系全池適用時)  
Table4 Calculation results(Applied to all ponds in the west series)

西系全池(8池)適用時			条件① 7/5～8/26		条件② 8/27～9/13		条件③ 9/17～10/31		条件④ 11/1～12/4		標準活性汚泥法 <sup>3)</sup>	循環式硝化脱窒法 <sup>3)</sup>
			対照池	実証池	対照池	実証池	対照池	実証池	対照池	実証池		
電力量	合計(MWh/年)		4,880	4,516	5,988	5,042	5,559	5,016	4,744	4,459	—	—
	割合	ブロウ	81%	80%	76%	78%	82%	80%	79%	77%	—	—
		攪拌機	10%	11%	11%	13%	11%	13%	13%	14%	—	—
		循環ポンプ	7%	7%	11%	6%	4%	5%	4%	5%	—	—
		返送汚泥ポンプ	2%	2%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	—	—
	水量当りの電力量 (kWh/m <sup>3</sup> )		0.163	0.154	0.141	0.120	0.152	0.139	0.133	0.116	0.200	0.300
水量当りの CO <sub>2</sub> 発生量 (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	電力	0.066	0.063	0.058	0.049	0.062	0.057	0.054	0.047	0.082	0.122	
	N <sub>2</sub> O <sup>2)</sup>	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.038	0.003	
	メタン <sup>2)</sup>	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	
	合計	0.094	0.091	0.085	0.077	0.090	0.084	0.082	0.075	0.144	0.150	
	比率	63%	60%	57%	51%	60%	56%	55%	50%	96%	100%	

#### 参考文献

- 日本下水道協会、「下水道施設計画・設計指針と解説」、2019年度版
- 環境省・国土交通省、「下水道における地球温暖化対策マニュアル」、平成 28 年3月
- 日本下水道新技術機構、「活性汚泥法等の省エネルギー化技術 に関する技術資料」、2014年3月

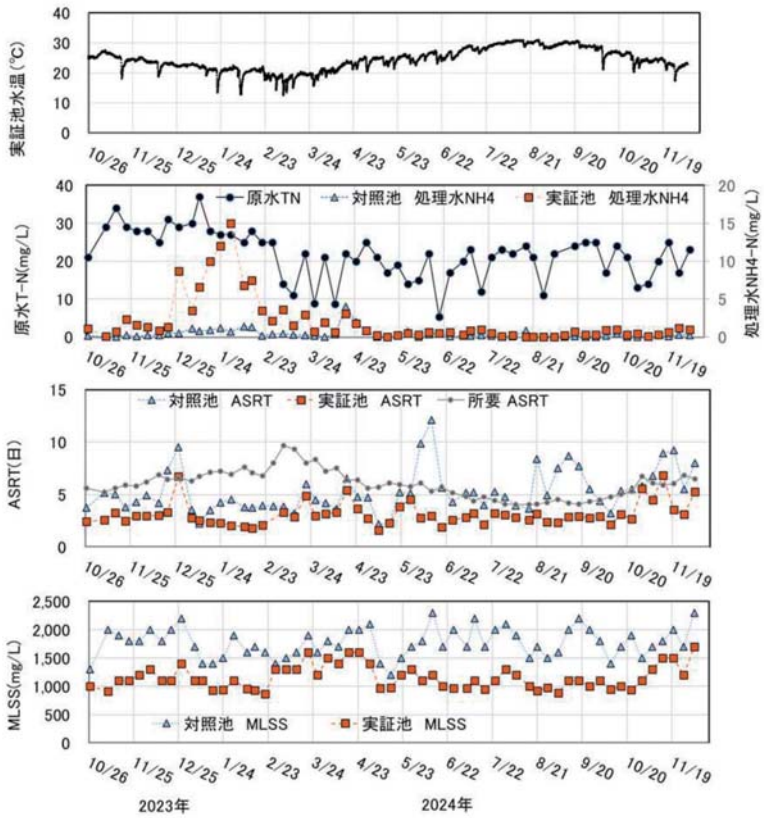


図4 処理状況  
Fig.4 Processing status



# デジタル変革を支える次世代統合ソリューション『OPTINOA®』の提供開始について

Launch of Next-Generation Remote Monitoring Service:  
Kanagawa Central Monitoring Center



矢澤 伸弘 YAZAWA Nobuhiro  
月島 JFE アクアソリューション(株)  
技術企画センター DX推進室



今井 勝彦 IMAI Katsuhiko  
月島ジェイテクノメンテサービス(株)  
維持管理本部 DX推進室 集中監視センター

## Abstract

We launched the OPTINOA next-generation integrated DX solution that supports the digital innovation of the water infrastructure toward the realization of a circulation-type society. Before launching the service, as the aim to strengthen the remote monitoring and broad-area surveillance systems, we established a new centralized monitoring center at the Kawasaki office, the technological hub of our group. Through the center, the operation by a three-hub system linked to the previously operated centralized monitoring centers in Tokyo and Nagasaki has become possible. With the system, through the mutual backup by scattered monitoring hubs, a sturdy broad-area surveillance system will be maintained even in the event of a disaster. Additionally, a cloud base data utilization platform has been structured at the time of launching the service, and the unification of management and the utilization of data have been made possible. Furthermore, by applying the advanced self-controlling technologies and anomaly detection technologies that utilize the AI developed and implemented by us for today, an advanced operation management linked to the sites and the remote locations has been realized. Through those efforts, OPTINOA can be provided as an integrated solution that supports the digital innovation of the water infrastructure.

循環型社会の実現に向けて、水インフラのデジタル変革を支援する次世代統合DXソリューション『OPTINOA®』の提供を開始した。本サービスの開始に先立ち、遠隔・広域監視体制の強化を目的として、当社グループの技術拠点である川崎オフィスに新たな集中監視センターを設置した。これにより、これまで運営してきた東京および長崎の集中監視センターと連携した三拠点体制による運用が可能となった。本体制では、分散した監視拠点による相互バックアップを通じて、災害時にも強靱な広域監視体制を維持することができる。また、サービス開始に合わせてクラウドベースのデータ活用プラットフォームを構築し、データの一元管理と利活用を可能とした。さらに、我々がこれまでに開発・導入してきたAIを活用した高度な自律制御技術や異常検知技術を適用することで、現場と遠隔地が連携した高度な運転管理を実現している。これらの取り組みにより、『OPTINOA®』は水インフラのデジタル変革を支える統合ソリューションとして提供可能である。

キーワード：遠隔監視、集中監視、リモート監視、AI、異常予兆、設備台帳、設備保全、クラウド  
Keyword：Remote monitoring, Centralized monitoring, Remote surveillance, AI, Anomaly detection, Equipment inventory, Equipment maintenance, Cloud computing

## 1. はじめに

月島JFE アクアソリューション株式会社(以下 TJASという。)グループは、2023年10月に月島ホールディングス株式会社の水環境事業とJFEエンジニアリング株式会社の国内水エンジニアリング事業部門が統合し、水インフラを担う企業グループとして新たなスタートを切った。これにより、上下水道分野において長年にわたり培ってきた技術力と実績を結集し、地球環境の保全および社会課題の解決に向けた総合力の強化を図っている。

一方、近年顕在化している少子高齢化に伴う労働人口の減少や、2050年の脱炭素社会の実現に向けた社会構造の急速な変化により、従来の枠組みでは対応が困難な課題が増加している。こうした状況において、業務や事業の効率化・最適化、技術革新を推進するDXソリューションの開発は、当社グループが持続的に社会へ貢献し続けるための重要な取り組みである。

このような背景からこのたび、循環型社会の実現に向けて顧客と共に課題を解決し、最適なソリューションを提供することを目的とした、デジタル技術を活用した水インフラの変革を支援する次世代統合ソリューション『OPTINOA®(オプティノア)』の提供を開始した(図1)。本稿では、その概要について紹介する。

## 2. 次世代総合DXソリューションOPTINOA®(オプティノア)について

『OPTINOA®』は、「OPTIMIZATION(最適化)」「INNOVATION(変革)」「AQUA(水)」の三つの語を組み合わせた造語であり、当社グループが長年にわたり上下水道施設をはじめとする水インフラの運営管理において培ってきたデジタル技術を集約した次世代DX総合ソリューションである。

本ソリューションは、施設管理の効率化および強靱化を遠隔支援によって実現する「集中監視センター」、運転データの利活用を促進する「データ活用プラットフォーム」、施設データを一元的に管理し、ストックマネジメントおよびアセットマネジメントを推進する「設備保全管理システム」の三つの基盤機能から構成されている(図2)。これらに加えて、当社グループがこれまでに開発・導入してきたAIによる自律制御技術や異常検知技術を統合的に提供可能である。



図1 次世代総合DXソリューション「OPTINOA®」のロゴ  
Fig.1 Logo of next-generation comprehensive DX solution [OPTINOA]



図2 「OPTINOA®」の全体像  
Fig.2 Overview of [OPTINOA]



2.1 神奈川集中監視センターの概要

2025年6月、当社グループの技術拠点である川崎オフィスに神奈川集中監視センターを設置した(図3)。当センターは、当社グループが既に運用している東京および長崎の集中監視センターと連携した三拠点体制により、全国各地において展開するPPP(Public Private Partnership:官民連携)事業や維持管理業務の現場支援を行う体制を構築している。災害等によりいずれかの監視センターに障害が発生した場合には、他のセンターによる相互バックアップ支援が可能であり、継続的かつ安定的な監視体制の確保を実現している。



図3 新規設置した神奈川集中監視センター  
Fig.3 Newly established "Kanagawa Central Monitoring Center"

2.2 データ活用プラットフォームの概要

PPP事業や維持管理業務の効率化・自律化/自動化・最適化のために必要なデータを収集・一元管理し利活用することを目的に、クラウドベースのデータ活用プラットフォームを構築した(図4)。JFEエンジニアリング株式会社が提供するデータ解析プラットフォームPla'cello®とも連携可能であり、設備の状態を可視化、解析をすることが可能となっている。さらに、本システムはこれまで開発してきたAIによる自動化/自律化システムや異常検知システムともシームレスで連携可能である。

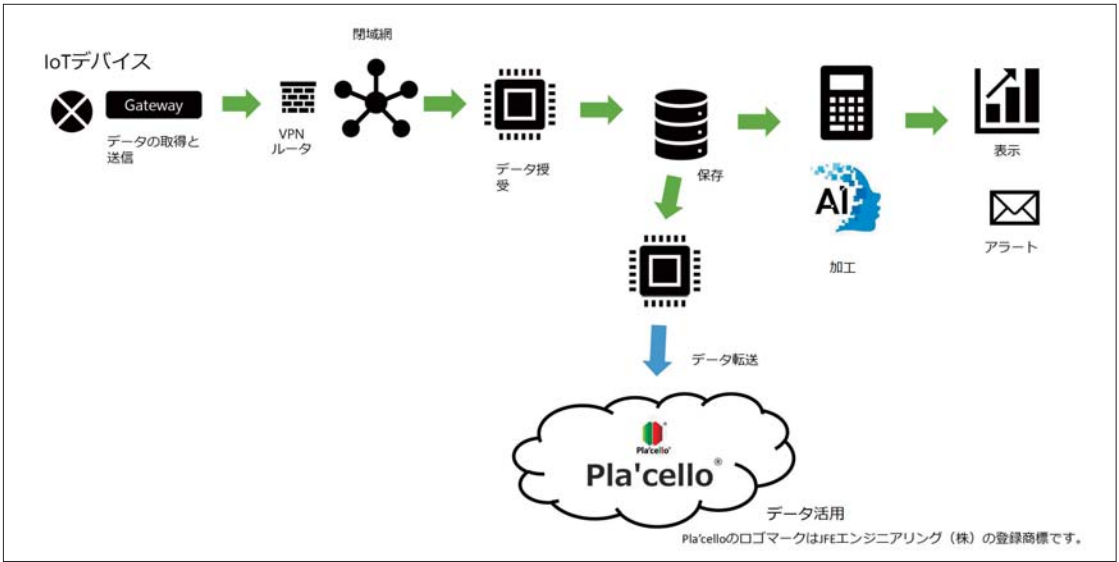


図4 データ活用プラットフォーム  
Fig.4 Data utilization platform

2.3 自律型制御システムの概要

OPTINOA®では最新AI技術を活用し、従来必要とされた熟練者による運転を省力化することが可能である。一例として図5に示す当社グループの創エネルギー型脱水焼却システムの実証設備では、「画像解析モデル」、「機械学習モデル」、「モデル予測制御」を組み合わせることで、脱水設備から焼却設備、熱回収システムまでを通じて30日間の無操作運転を達成している<sup>1)</sup>。

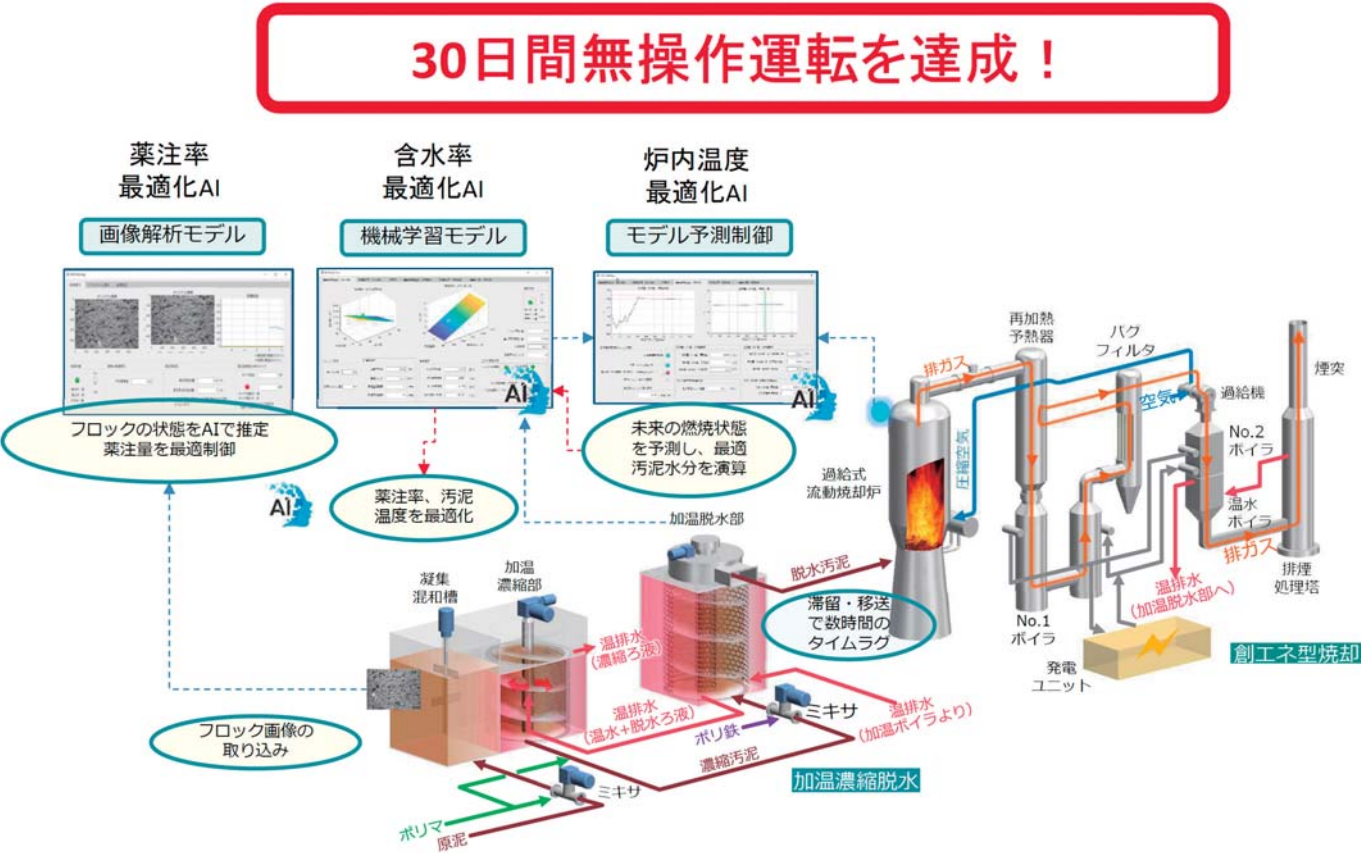


図5 自律型制御システム  
Fig.5 Autonomous control system

2.4 常検知システムの概要

OPTINOA®の機能として、維持管理の現場において活用可能な汎用型画像異常検知システムを開発した。このシステムは、カメラで取得した画像から「いつもと違う状態」を検知することが可能であり、現場においてAI監視モデルの生成および調整が可能なシステムとして実用化した(図6)。過去の画像データを使い現地で異常検知モデルを学習・構築することが可能であり、学習データを使うことにより「いつもと違う」を数値化し、しきい値を変更することにより異常の検知レベルを調整することができる。

その他、ドローンの活用により、従来、足場の建設が必要だった焼却炉内部の検査を効率化しており、撮影した動画をAI解析し、「ひびの幅や長さ」を自動計測することにより焼却炉のメンテナンスの最適化を提案可能であり、当社グループの様々なDX技術と組み合わせ、現場と遠隔地が連携した高度な運転管理を実現している。これらの取り組みにより、『OPTINOA®』は水インフラのデジタル変革を支える統合ソリューションとして提供可能である(図7)。

汎用画像検知システム



図6 汎用画像異常検知システム  
Fig.6 General-purpose image anomaly detection system

3. 終わりに

本稿では、当社グループが提供を開始したDXソリューション『本稿では、当社グループが提供を開始したDXソリューション『OPTINOA®(オプティノア)』の概要について紹介した。OPTINOA®は、上下水道分野における長年の技術的蓄積と、最新のデジタル技術を融合させた総合的なDXソリューションであり、施設管理の効率化・強靱化、データ利活用の高度化、AIによる自律制御および異常検知の実現など、多面的な機能を備えている。

今後、少子高齢化や脱炭素社会の進展に伴い、水インフラの維持管理に求められる要件はますます高度化・複雑化することが予想される。こうした社会的要請に応えるためには、現場の知見と先端技術を融合させた柔軟かつ持続可能なソリューションの構築が不可欠である。

当社グループは、OPTINOA®を核としたDX推進を通じて、顧客と共に課題を発見・解決し、安心・安全な水環境の実現に貢献していく所存である。今後も技術の研鑽と現場力の強化を重ね、社会に信頼される水インフラのパートナーとしての役割を果たしていく。

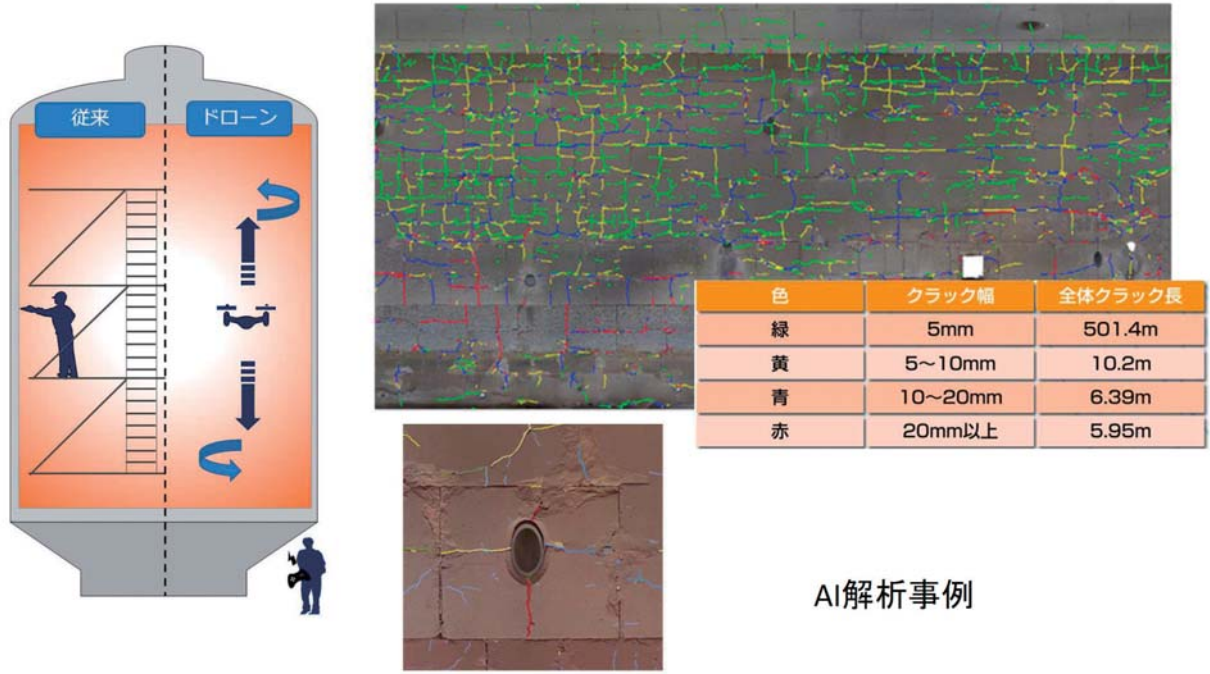


図7 ドローンによる炉内点検  
Fig.7 Inspection inside the furnace using a drone

参考文献

1) 矢澤伸弘,山本 稔: 創エネルギー型脱水焼却システムのAIによる30日間連続無操作運転達成報告, 月島技報(月島ホールディングス株式会社), No.26, pp8-16, (2023)



# 硫酸回収技術の紹介

## Introduction to Sulfuric Acid Recovery Technology



山口 幸太郎 YAMAGUCHI Kotaro

月島環境エンジニアリング株式会社  
大同ケミカル本部プラント技術グループ

### Abstract

In the field of metal surface treatment, inorganic acids, such as sulfuric acid or hydrochloric acid, have been used from long before, and the majority of waste acids after use are disposed of after a neutralization process. Instead, our company developed a treatment plant that turns used waste acids into a reusable state through concentration and crystallization technologies and have accumulated substantial results.

In this paper, sulfuric acid recovery technology is introduced that handles sulfuric acid – ferrous sulfate solution and sulfuric acid – aluminum sulphate solution as waste acids.

金属の表面処理分野では、古くから硫酸や塩酸などの無機酸が使用されており、使用後の廃酸の多くは、中和処理を経て廃棄されている。これに対して、当社では、使用済みの廃酸を濃縮及び晶析技術によって、再利用可能な状態にする処理プラントを開発し、多くの実績を積み重ねている。

本稿では、廃酸として「硫酸-硫酸鉄溶液」及び「硫酸-硫酸アルミニウム溶液」を対象とした硫酸回収技術について紹介する。

キーワード：酸回収、濃縮、晶析、再利用

Keyword：Acid recovery, Concentration, Crystallization, Reuse

## 1. はじめに

鉄鋼業界や電子部品業界では、硫酸や塩酸などの無機酸を用いた酸洗やエッチングなどの表面処理が広く行われており、その過程で使用済みの廃酸が発生する。これらの廃酸は、一般的に排水処理設備にて中和処理され、廃棄されるケースが多い。

これに対し、当社の酸回収装置を用いることで、廃酸を「遊離酸」と「無機塩」に分離・回収することが可能となる。回収された遊離酸は生産ラインで再利用でき、無機塩は無機系凝集剤などとして有効活用できる。このように、当社では、酸回収技術を通して、環境負荷の低減と持続可能な生産活動に貢献している。

本稿では、廃酸として「硫酸-硫酸鉄溶液」及び「硫酸-硫酸アルミニウム溶液」を処理対象とした硫酸回収技術について紹介する。

## 2. 硫酸-硫酸鉄溶液の硫酸回収技術

### 2.1 プロセスフロー（図1）

鉄鋼業界の酸洗槽では、硫酸濃度約200g/L、鉄濃度約60g/L程度の廃硫酸が発生する。この廃硫酸は、温度を低下させることで溶解度が大きく下がる特性があるため、冷却操作によって硫酸鉄七水塩（ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ）の結晶を晶析缶で析出させることができる。そのスラリー液を液体サイクロンと結晶分離機で、回収硫酸と硫酸鉄七水塩結晶に分離・回収する。回収硫酸は、予冷器で熱交換され、酸洗槽にて再利用できる。一方、硫酸鉄七水塩結晶は、排水処理設備の凝集剤や磁性体の原料として、有効活用できる（図1）。

### 2.2 掻き取り式晶析缶

本プロセスでは、結晶が壁面に付着しやすいという性質があるため、当社では掻き取り式晶析缶を採用している。晶析缶は、ジャケット構造となっており、ブラインを用いて0℃付近まで冷却することで、硫酸鉄七水塩結晶を析出させている。

結晶は、伝熱面である晶析缶の壁面で発生・付着するが、そのままでは、伝熱面が結晶で覆われ、冷却効率が低下してしまう。しかし、本掻き取り式では、晶析缶の構成部品である掻き取り羽根によって、常に伝熱面を清浄な状態に保ち、冷却能力の低下を防ぐことが可能となっている。

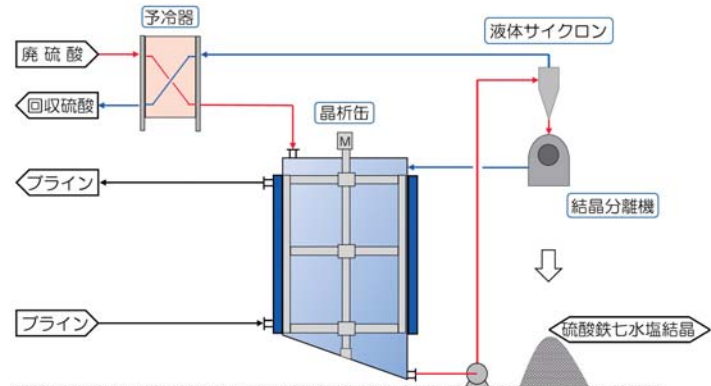


図1 硫酸-硫酸鉄回収フロー図  
Fig.1 Process flow diagram of sulfuric acid and ferrous sulfate recovery

## 3. 硫酸-硫酸アルミニウム溶液の硫酸回収技術

### 3.1 プロセスフロー（図2）

前述の硫酸-硫酸鉄溶液の硫酸回収と比較すると、硫酸-硫酸アルミニウム溶液の硫酸回収装置の方が複雑になる。

まず、廃硫酸の濃度が低いため、単純に冷却しても結晶は析出しない。そのため、初めに水分を除去し、硫酸アルミニウムの濃度を高める必要がある。さらに、濃縮した硫酸アルミニウム溶液を単純に冷却しても、水飴状の高粘度状態になってしまうため、硫酸と結晶の分離が困難になる。このような性状に対応するため、晶析プロセスには、特殊な手法を採用している。

本硫酸回収装置は、濃縮プロセスと晶析プロセスの二つから構成され、回収硫酸と硫酸アルミニウム結晶を分離機にて分離・回収することが可能となる。回収された硫酸は生産ラインで再利用され、硫酸アルミニウム結晶は凝集剤として有効活用される（図2）。

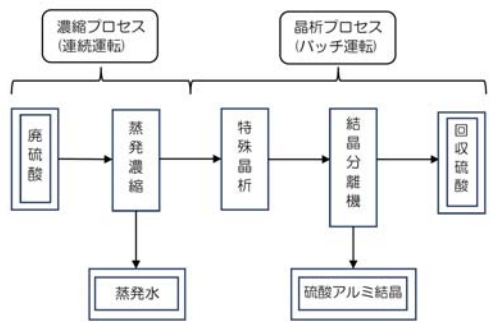


図2 硫酸-硫酸アルミニウム回収プロセス  
Fig.2 Process flow diagram of Sulfuric acid and aluminum sulfate recovery

### 3.2 濃縮プロセス

#### 3.2.1 濃縮プロセスフロー（図3）

濃縮プロセスにおいては、処理量にもよるが省エネルギー化の観点から、多重効用真空蒸発方式を採用するケースが多い。濃縮条件としては、濃縮液が約60℃の飽和濃度になるように設計されている。

多重効用真空蒸発方式では、真空ポンプによって系内を減圧にすることで、溶液の沸点を下げ、低圧の蒸気で濃縮が可能となる。さらに、蒸発によって発生した水蒸気を次段のより沸点の低い溶液の加熱源として再利用することで、全体の蒸気使用量を削減できる。なお、本プロセスで三重効用以上の構成にする場合は、濃縮液の流し方には工夫が必要である。結晶の析出防止や晶析工程の温度バランスを考慮して、錯流方式（液流れ：3効用→1効用→2効用）が最適である（図3）。

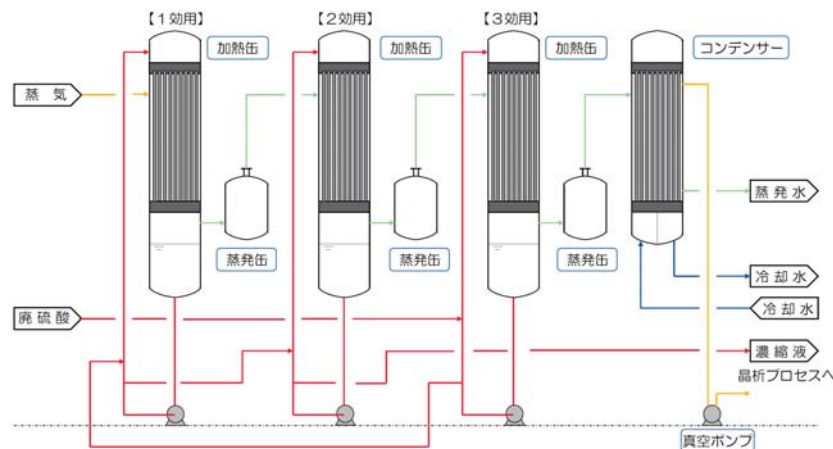


図3 濃縮プロセスフロー図  
Fig.3 Process flow diagram of concentration system

3.2.2 機器選定と注意点

定常運転においては結晶の析出が起らない設計としているため、濃縮プロセスには熱交換効率が良い薄膜流下方式を採用している。硫酸による腐食性を考慮し、熱交換器にはグラファイト製の多管式、循環ポンプはフッ素樹脂ライニングのマグネットポンプ、タンク類は主にFRP製を採用している。

濃縮装置の運用における注意点として、濃縮状態では温度が低下すると硫酸アルミニウムの結晶が析出する可能性があるため、過濃縮の防止や温度低下時の対策が重要となる。また、廃硫酸中にシリカなどの不純物が含まれている場合、濃縮過程でそれらが析出する可能性があるため、事前の成分確認や運転条件の検討が求められる。

3.3 晶析プロセス

3.3.1 晶析プロセスフロー（図4）

前述のとおり、硫酸アルミニウムの晶析では、操作方法を誤ると微細結晶の発生により水飴状の高粘度状態となり、結晶分離が困難になる。そのため、晶析プロセスにおいては、微細な結晶の発生を抑え、いかに効率的に結晶を成長させるかという視点が重要となる。

当社では、実験及びミニプラントによる検討に加え、自動化プロセスを踏まえた上で、以下の三つの条件を設定している。

(1) 飽和濃度域での種晶投入

種晶は、最終的に分離された結晶の一部を再投入する方法もあるが、手作業となるため、当社ではスラリー槽からのスラリー液を

自動的に投入する方法を採用している。

(2) 昇温による微細結晶の再溶解

晶析初期に発生する微細な結晶は、昇温操作によって再溶解させ、成長した結晶のみを残すようにする。すなわち、図5で示すような「冷却-昇温-冷却-昇温-冷却」といった温度制御を段階的に行い、微細な結晶の発生を抑制する。

(3) 温度勾配(℃/時間)の制御

急激な冷却を避けるため、冷却工程では、一定の温度勾配になるように制御をかけている。

これらの条件を考慮しながら装置設計を行い、装置規模(=コスト)に直結する全体のバッチ処理時間を最適化したプロセス設計を行った。

このような操作により、安定したスラリー液を生成し、結晶分離機によって、硫酸と硫酸アルミニウム結晶に効率的に分離・回収することが可能となる(図4)。

3.3.2 機器選定と注意点

加温・冷却用の熱交換には、ジャケットタイプの晶析缶ではなく外部循環方式の多管式熱交換器を採用している。ジャケットタイプの晶析缶では、材質としてグラスライニングを採用することになるが、総括伝熱係数が小さく、かつ晶析缶のサイズにより伝熱面積に制約が発生する。また、加温と冷却を繰り返す本プロセスでは、熱衝撃への配慮が必要であり、制御が複雑になるため、ジャケットタイプの熱交換器は本

プロセスに適さないと判断している。

一方、外部循環方式の多管式熱交換器を採用することで、総括伝熱係数が大きく、かつ装置選定(伝熱面積等)の自由度が高くなる。硫酸による腐食性を考慮し、多管式熱交換器にはグラファイト製を採用する。循環ポンプには、耐食性及び耐摩耗性を考慮したポンプの選定が必要になる。

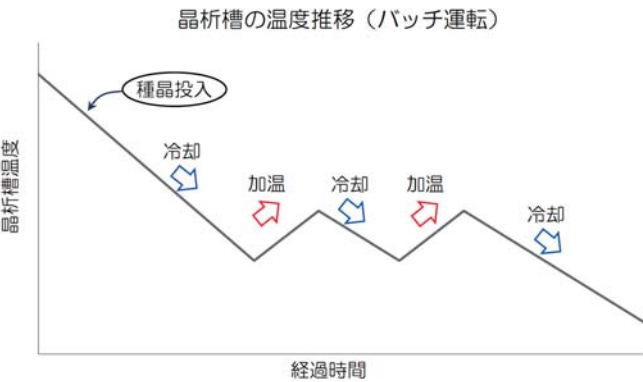


図5 晶析操作における温度変化  
Fig.5 Temperature profile during crystallization

4. おわりに

本稿では、硫酸鉄溶液と硫酸アルミニウム溶液を対象とした硫酸回収技術について紹介した。当社の回収装置は、これまで廃棄処理されていた廃酸を資源として再利用可能にするものであり、「環境技術で世界に貢献し未来を創る」という月島ホールディングスのパーパスにも合致している。

一方で、装置にかかる初期コストの面から、導入を慎重に検討する企業が多いのも現状である。今後も、装置全体のコストダウンを視野に入れつつ、より効率的かつ経済的なプロセス設計の提案を継続していくことで、環境負荷の低減と資源循環の促進に貢献していきたい。

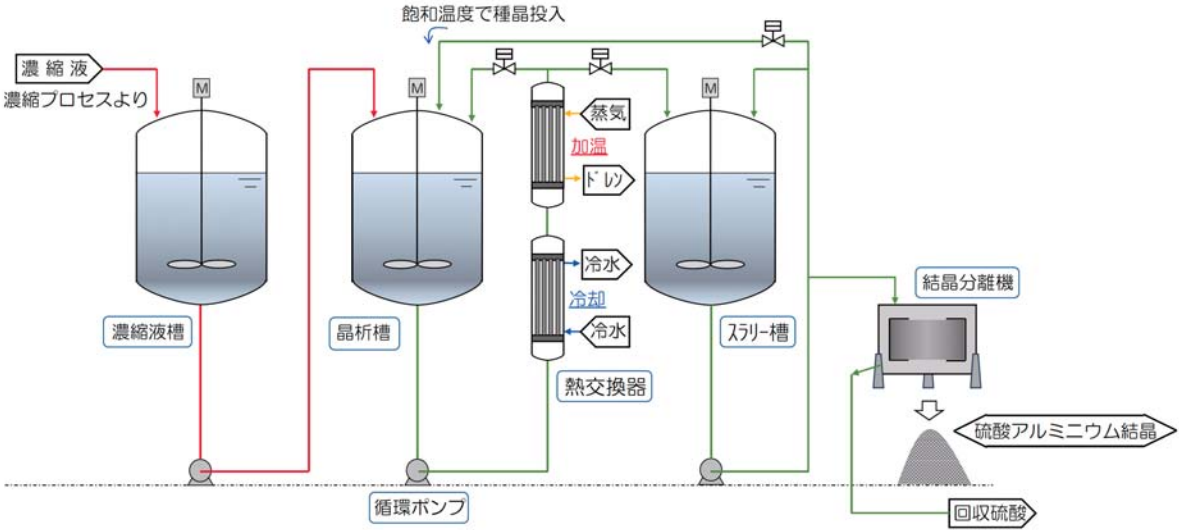


図4 晶析プロセスフロー図  
Fig.4 Process flow diagram of crystallization system



# 非常用浄水装置「みずキューブ®」

Emergency Water Purifier “MIZU cube”



中島 史明 NAKAJIMA Fumiaki  
月島ジェイアクアサービス機器株式会社  
技術管理部 設計管理課



稲垣 敦史 INAGAKI Atsushi  
月島ジェイアクアサービス機器株式会社  
技術管理部

## Abstract

The MIZU cube introduced in this paper is equipment that can contribute to ensuring a hygienic environment for local residents by easily creating household water from the nearest water source, even in the event of the shutdown of water supply lines due to a large scale disaster or other reasons.

The treatment process of the equipment consists of the pre-treatment (coarse filtering), precision filtration, activated charcoal treatment, and the addition of an antiseptic (chloride), and that realizes the water purification treatment process applied by the water purification plants inside a very compact equipment. The processing capacity is approximately 0.5 m<sup>3</sup> per hour. The main component, the filters, are the cartridge type and are replaceable without tools, which facilitates ease of maintenance and management. The overall equipment is covered in consideration of both safety as well as design aesthetics and thus provides an appearance that blends seamlessly when installation is in a public facility or an evacuation center.

As application case examples, the previous model was used for the purpose of livelihood support in the city of Odesa, Ukraine, and at disaster sites after the Noto Peninsula Earthquake. We would like to contribute to maintaining the living environment for disaster refugees and provide disaster support by securing a safe and sanitary household water supply in the event of large-scale disasters in the future.

本稿で紹介する「みずキューブ®」は、大規模災害等により、水道の供給が停止した場合にも、身近な水源から容易に生活用水を造水し、地域住民の衛生環境の確保に寄与できる装置である。

本装置の処理工程は、「前処理(粗ろ過)」「精密ろ過」「活性炭処理」「消毒剤(塩素)添加」で構成されており、浄水場で適用されている浄水処理工程を非常にコンパクトな装置内部で実現している。処理能力は時間当たり約0.5m<sup>3</sup>である。主要部である各フィルターはカートリッジ式で、工具等を用いずに交換できるため維持管理が容易である。また装置全体はカバーが施されているため、安全性とともに意匠性にも配慮しており、公共施設や避難所などに設置しても違和感が無い外観となっている。

適用事例としては、前身機種がウクライナ・オデーサ市や能登半島地震後の被災地での生活支援等で活用された実績がある。今後も大規模災害が発生した際等に、安全で衛生的な生活用水を確保することで被災者の生活環境の維持と災害支援に貢献したい。

キーワード：浄水、膜ろ過装置、生活用水、非常用水  
Keyword：Water purification, Membrane filtration system, Household water, Emergency water supply

## 1. はじめに

近年、わが国では地震や短時間集中豪雨等の自然災害が頻発しており、これに伴うインフラ施設及び電気、ガス、水道をはじめとするライフラインへの影響は非常に大きなものとなっている。その中でも、生活用水の不足は、清潔な環境の維持を困難とするだけでなく感染症の拡大等の健康障害を引き起こす要因となる。

本稿で紹介する「みずキューブ®」は、「災害時等の水道水の供給が滞った場合においても、必要となる生活用水を身近な水源から誰でも容易に造水できる装置」というコンセプトで開発された製品である。本装置で造水された用水は、洗濯、清掃、入浴など生活に必要な様々な用途に使用可能である。

当社では、従来から同等の機能を有する装置を開発、提供してきたが、今回、その意匠性、操作性、可搬性の向上を図ったので紹介する。

## 2. 概要

### 2.1 特徴

本装置は、単純な膜ろ過方式ではなく「前処理(粗ろ過)」「精密ろ過」「活性炭処理」「消毒剤(塩素)添加」の処理工程で構成されている。コンパクトな装置内において浄水場で適用されている浄化方法と同等の処理工程を実現している。処理能力は時間当たり約0.5m<sup>3</sup>であり、非常時の1人当たりの必要水量を100L/日とすると、1日10時間の稼働で約50人分の造水が可能である。

実際の使用に当たっては、河川等の身近な原水貯留部に本体付属のホースを挿入した後に、装置本体の電源ボタンを押し、蛇口をひねれば容易に生活用水の造水が可能となっている。電源は100Vで停電時も汎用の発電機で対応可能である。

本装置の主要部となるプレフィルタ、中空糸膜、活性炭の各フィルターは、カートリッジ式で容易に交換が可能である。交換に際して工具等は必要としない。

さらに、装置全体にカバーが施されているため、安全性とともに意匠性が高く、公共施設や避難所など多様な場所に設置・保管しても違和感が無い外観となっている。

### 2.2 仕様、フロー

本装置の外観を図1に、仕様を表1に、処理フローを図2に示す。本装置は、装置付属のポンプにて原水を吸い込む。ポンプの吸込ホースには目開き400μmの吸込ストレーナーが設置されている。

装置本体では、まず目開き100μmのプレフィルタによりごみや大きな汚れが除去される。次に、中空糸膜による精密ろ過が行われる。中空糸膜のろ過精度は0.1μmであり、一般的な浄水場の膜処理設備と同等である。

続いて、活性炭フィルターにより色度や臭気成分が除去され、最後に塩素系消毒剤が添加され滅菌処理が施される。

以上のとおり、本装置の処理フローは、浄水場で適用されている浄水処理方法と同等の非常に信頼性の高いものである。

表1 仕様  
Table1 Product specification s of MIZU cube

項目	仕様
造水量	0.5m <sup>3</sup> /時
使用可能な原水	河川水、湖沼水、井水、プール水、防火用水等
取水方法	自吸式ポンプ(吸込揚程 ー2m)
電源	AC100V
処理に関する項目	吸込ストレーナー目開き :400 μ m
	プレフィルタ目開き :100 μ m
	中空糸膜モジュール :ろ過精度 0.1 μ m
	活性炭フィルター :活性炭素繊維
	処理水残留塩素 :0.1～0.2mg/L
外形寸法	全幅 520mm×全長 745mm×全高 685mm
重量	約 50kg
材質	フレーム:アルミニウム、カバー:鋼板、アルミニウム



図1 外観  
Fig.1 Exterior of MIZU cube



図2 処理フロー  
Fig.2 Process flow diagram of MIZU cube

2.3 外観、構造

本装置は、機器類が露出しておらず、装置全体がカバーで覆われている。運搬時の利便性や運転操作時の安全性を確保するとともに、意匠性にも考慮し設置環境への適合性を配慮した外観となっている。

装置の外観は前出の図1のとおりである。コンパクトで大きなスペースを必要とせず、災害時や非常時の使用とともに、平常時の保管、使用においても周辺の環境に調和できるキューブ型となっている。

カバーについては、外観だけでなく、操作性や維持管理性を考慮し、側面全てが開放可能な構造となっている。カバーの開放状態及びカバーの内部を図3、図4に示す。

図3、図4の側面開口部の扉は、開閉を容易とするためアルミニウム製とし軽量化も図っている。

また、運搬作業を容易にするために、上部の取っ手は十分な長さを確認し、カバーと一体化した構造とすることでスマートな外観を実現している(図3)。

さらに、装置重量は約50kgであるが、運搬・移動性を考慮し下部にはキャスターを取付けることで、平地、舗装道路等であれば大人一人で、起伏のある場所でも二人で移動や運搬が可能である。

2.4 運転方法、維持管理性

本装置の原水供給ポンプは圧力給水式を採用しており、通電状態において主電源ボタンを押して蛇口を開ければ造水が開始できる。

対象の原水としては、表1のとおり、河川水、湖沼水、井水、プール水、防火用水等の多くの身近な水が適用可能である。本体付属のホースをこれらの原水貯留部に挿入すれば、前述のとおり本体の蛇口を開けることで造水が開始される。

プレフィルター、中空糸膜、活性炭の各フィルターは、それぞれ原水の夾雑物や懸濁物質の捕捉、色度や臭気の除去を目的としている。活性炭フィルターは吸着能力の低下時に、それ以外のフィルターは閉塞時に交換が必要となる。本装置のフィルターはカートリッジ式であり交換作業に際しては工具類を必要としない。前述のとおり、本体カバーの側面の開放が可能であり(図4)、フィルター交換作業が容易である。

最後段の塩素系消毒剤の混入器(図2及び図3)は、浄水ラインの水圧を利用して注入側のピストンを駆動し消毒剤を吸引注入する方式としており、ポンプ動力は必要としていない。維持管理作業としては、消毒剤を消費量に応じて消毒剤ボトル(図3)に補充するのみである。

また、使用状態の外観を図5に示す。蛇口部を収納している扉は、造水時には開放状態となるため、強風時等の使用も考慮し本体上部に折り返して収納される構造としている。



図5 使用状態  
Fig.5 Exterior of MIZU cube in operating condition

3. 適用事例と今後の展開

当社は、水インフラ整備を通じた社会貢献を重要な使命と位置づけており、本装置は「災害時等に必要となる生活用水を身近な水源から誰でも容易に造水できる装置」というコンセプトで開発されたものである。

実際に被災地で活用いただいた事例としては、前身の機種ではあるが、以下が挙げられる。

①JFEエンジニアリング(株)より横浜市に寄付され、横浜市よりウクライナ・オデーサ市へ供給し現地の生活支援に貢献。

②令和6年能登半島地震に際し、JFEエンジニアリング(株)よりJFE環境サービス(株)羽咋市内の事業所及び志賀町に供給し、現地の災害支援に貢献。

当社は、既に一部の自治体と「災害支援の協定」を締結しているが、今回紹介した「みずキューブ®」が更に有効に活用されるよう、今後も、より多くの自治体・諸団体の皆様方との連携を推進し、本装置の有効活用を図っていきたい。

また、近年では下水処理場等の公共インフラ施設を「地域の防災拠点」とする検討が始められている。

当社が所属している月島JFEアクアソリューショングループでは、多くの浄水場や下水処理場、し尿処理場の運転管理を受託している。当社としても本装置の適用を通じてこのような「公共施設の防災拠点化」にも貢献していきたい。

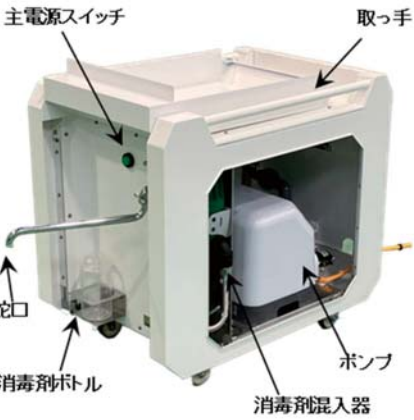


図3 点検扉開放状態(ポンプ側)  
Fig.3 Inside of MIZU cube (Pump side)



図4 点検扉開放状態(フィルター側)  
Fig.4 Inside of MIZU cube (Filter side)



# 省エネ型し尿処理プロセス『サイクルキューブ』

Cycle Cube Efficient Sewage Treatment Process



古原 翔太郎 KOHARA Shotaro  
月島 JFE アクアソリューション株式会社  
技術本部下水事業部環境施設技術部環境施設2グループ



宮本 一希 MIYAMOTO Kazuki  
月島 JFE アクアソリューション株式会社  
技術本部下水事業部環境施設技術部環境施設1グループ

## Abstract

In the sewage sludge and sewage treatment facilities, the trends of a decrease in the volume of delivered sewage due to the spread of sewer lines and septic tanks, as well as the increase in the mixed-in proportion of septic tank sludge, and the lowering of delivered sludge concentration due to the decrease in the non-flush toilet using population, are in progress; accordingly, the efficient processing technologies responding to changes in the circumstances are required.

In order to solve those challenges, we developed the energy saving sewage treatment technology Cycle Cube that combines the microorganism bio-carrier and the sensor-controlled cycle process.

In this paper, an overview of the Cycle Cube technologies is introduced, and the treatment performance and energy-saving effect achieved through the demonstration tests and implementation in the real facilities are discussed as well.

し尿・汚泥再生処理施設においては、下水道や浄化槽の普及に伴うし尿搬入量の減少や浄化槽汚泥混入比率の上昇、非水洗化人口の減少に伴う搬入物の低濃度化が進んでおり、状況の変化に応じた効率的な処理技術が求められている。

このような課題に対して、当社では微生物担体とセンサー制御式サイクル運転を組み合わせた省エネ型のし尿処理技術である『サイクルキューブ』を開発した。

本稿では『サイクルキューブ』の技術概要を紹介するとともに、実証試験及び実施設への導入で得られた処理性能や省エネ効果について述べる。

キーワード：担体、サイクル運転、センサー  
Keyword：Bio-carrier, Cycle process, Sensors

## 1. はじめに

し尿・汚泥再生処理施設は全体の約70%が供用開始から20年以上経過しており、施設の老朽化が進んでいる。老朽化の進行に伴い、今後も継続的な施設整備が求められているが、地方自治体の財政状況は厳しく、整備費には限りがあるのが実情である。

一方、処理対象物の性状に目を向けると、下水道や浄化槽の普及に伴うし尿搬入量の減少や浄化槽汚泥混入比率の上昇、非水洗化人口の減少に伴う搬入物の低濃度化が進んでおり、状況の変化に応じた効率的な処理技術が求められている。

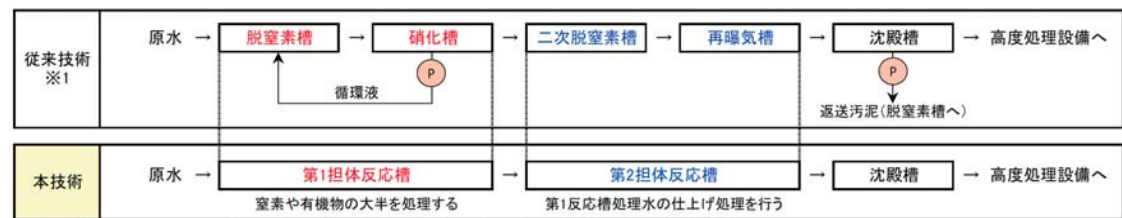
本稿では、上記課題を解決すべく開発した省エネ型し尿処理プロセス『サイクルキューブ』について、技術概要、特長、実証試験で得られた効果及び実施設への導入事例について紹介する。

## 2. 『サイクルキューブ』の概要と特徴

### 2.1 概要

『サイクルキューブ』（以下本技術）は、従来技術をベースに以下の技術要素を付加したものである。従来技術と本技術の概略フローを図1に、サイクル運転の流れを図2に示す。

- (1) 担体：水槽内に効率的に微生物を保持し、容積あたりの処理効率を向上させている。
- (2) サイクル運転：1槽で好気(硝化)⇔嫌気(脱窒)を繰り返すもので、回分式技術を応用している。
- (3) センサー制御：水槽内の処理状況を監視し、処理終点でブローワーを停止し省エネ効果を得る。



※1：従来技術とは、標準脱窒素処理方式<sup>1)</sup>、高負荷脱窒素処理方式<sup>1)</sup>等の連続式の処理方式を指す

図1 概略フロー  
Fig.1 System architecture

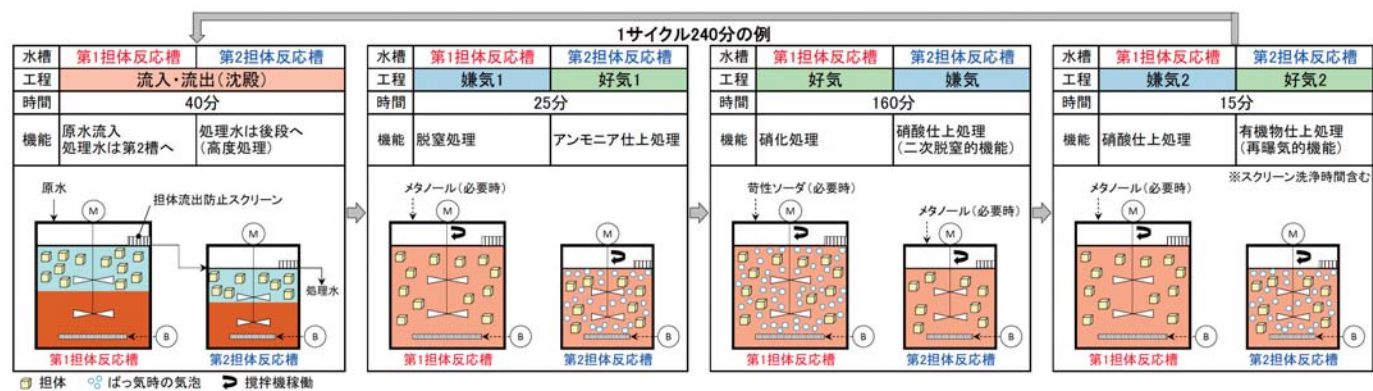


図2 サイクル運転の流れ  
Fig.2 Flow of cycle process

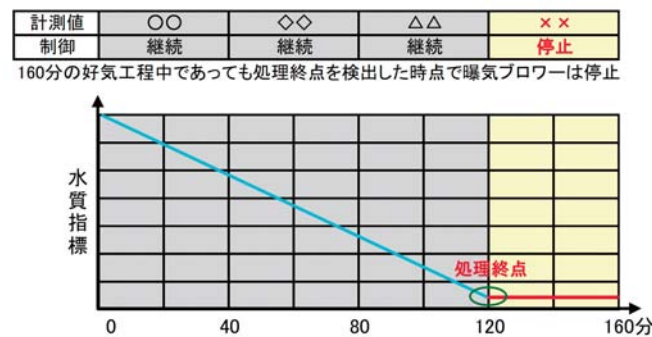


図3 制御概念  
Fig.3 Control concept

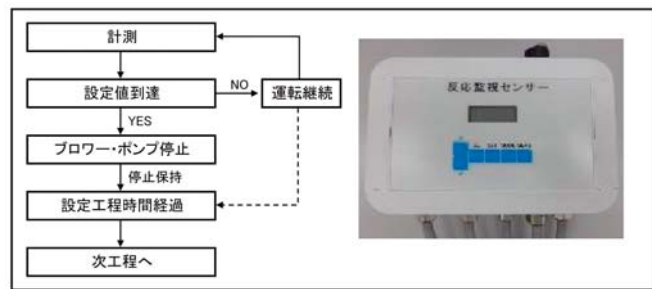


図4 制御フロー、変換器外観  
Fig.4 Control process and sensor

### 2.2 特長

- (1) シンプルな設備構成による電力費・整備費の削減

図1に示すとおり、従来技術は、「脱窒素槽→硝化槽→二次脱窒素槽→再曝気槽」の4槽が必要であるが、本技術では第1・第2担体反応槽の2槽にその機能が集約される。これにより、電力費や整備費の大きい循環液移送ポンプや返送汚泥ポンプは不要となる利点がある。

- (2) センサー制御による省エネ(コスト削減)

センサー制御は、当社独自の反応監視センサーやDO計等を組

み合わせた制御である。水槽内液の特定周波数における抵抗値(Ω)やDO値(mg/L)が、処理中と処理終点付近で異なる挙動を示すことを利用し、硝化・脱窒反応の終点を検出する。終点を検出した場合は、設定した処理工程時間内でも曝気ブローワーやメタノール注入ポンプを自動で停止し、処理に寄与しない無駄な曝気動力や薬品消費を抑制する。

なお、従来技術の場合は、水槽内の有機物や窒素濃度は絶えず変動しており、処理終点の検出・制御の難度は高かったが、サイクル運転の場合は変化が直線的であり、センサー制御との相性が良い。



(3) 運転サイクル数変更による搬入量減少への効率的な対応

サイクル運転における各工程の比率、1日の稼働サイクル数、1週間の稼働日数等の運転条件は、納入後も制御盤上の簡易な操作で調整可能である。し尿・汚泥再生処理施設は、竣工時が搬入量のピークでその後は年々減少していくケースが一般的であるが、本技術は稼働サイクル数や稼働日数を減らすことで無駄な電力・薬品の消費を抑制できる。つまり、水槽や機器の仕様などのハード面を変えることなく、ソフト面の調整のみで搬入量減少に容易に対応できる点が本技術の利点である。

なお、槽内の腐敗防止を目的とし、停止日は自動で4時間当たり10分間の曝気を行う。

3. 実証試験

3.1 試験設備の構成及び試験条件

当社グループ運転管理施設に試験設備を設置し、実証試験を実施した。試験設備の定格処理能力は1.44kL/日とし、処理対象原水は

既設原水配管から一部バイパスして採取したものを使用した。なお、し尿は除渣後のもの、浄化槽汚泥は除渣後に油分除去装置を通過した分離液を対象とした。

試験は2019年4月～9月、2020年1～2月、7～9月に実施した。途中の空白期間は別目的の試験期間や休止期間であり、試験結果の集計からは除外している。

3.2 試験結果

3.2.1 処理性能

表1に示すとおり、夏季(高温期)、冬季(低温期)も含めて、投入原水及び担体処理水(第2担体反応槽越流水)の性状から算出される除去率は目標値を満足した。

なお、担体処理水を装置から採取し凝集沈殿処理した平均水質は、BOD3mg/L、COD<sub>Mn</sub>5mg/L、SS6mg/L、T-N8mg/L、T-P0.47mg/Lであり、一般的な凝集沈殿処理水と同等であった。

3.2.2 センサー制御による省エネ効果(コスト削減効果)

センサー制御による省エネ効果を確認するために、投入量を通常の

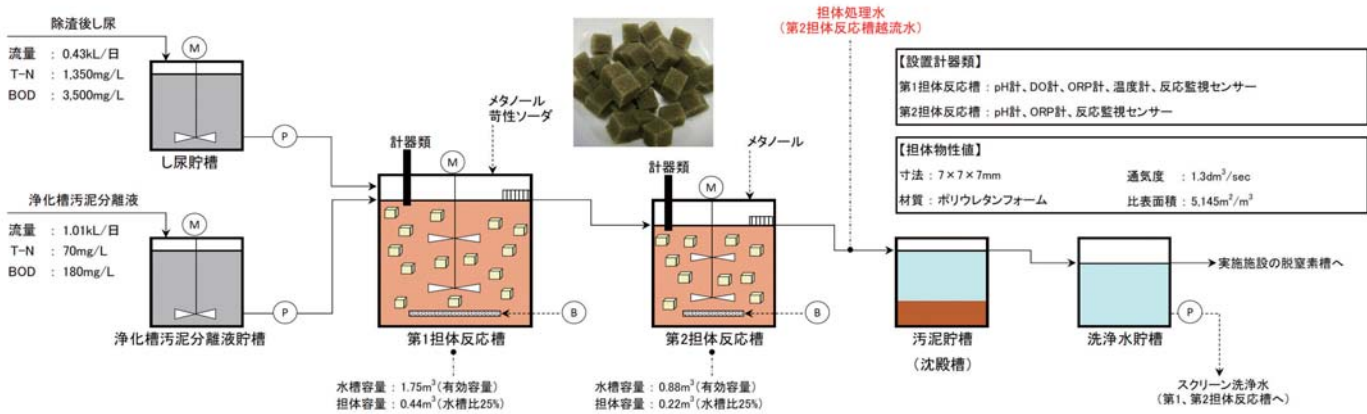


図5 実証試験設備の処理フロー  
Fig.5 Processing flow and operating conditions

表1 投入原水及び処理水性状  
Table1 Quality of raw and treated water

期間 季別		除去率 目標値	2019年4～6月 春季			2019年7～9月 夏季			2020年1～2月 冬季			2020年7～9月 夏季		
			投入原水	担体処理水	除去率[%]	投入原水	担体処理水	除去率[%]	投入原水	担体処理水	除去率[%]	投入原水	担体処理水	除去率[%]
BOD	mg/L	95 %以上	1,154	57	95.1	1,147	48	95.8	1,701	25	98.5	1,130	26	97.7
COD <sub>Mn</sub>	mg/L	85 %以上	768	108	85.9	798	97	87.8	730	69	90.5	615	64	89.6
SS	mg/L	90 %以上	1,201	76	93.7	1,626	58	96.4	1,447	22	98.5	995	22	97.8
T-N	mg/L	90 %以上	479	45	90.6	454	31	93.2	514	18	96.5	448	13	97.1
T-P	mg/L	50 %以上	67	31	53.7	82	25	69.5	65	16	75.4	58	22	62.1
し尿投入量	kL/日		0.43			0.43			0.43			0.51		
浄化槽汚泥分離液投入量	kL/日		1.01			1.01			1.01			0.91		
T-N容量負荷	kg-N/m <sup>3</sup> ・日		0.39			0.37			0.42			0.36		
反応槽内水温	℃		平均29.9			平均33.6(最高36.8)			平均22.3(最低18.6)			平均33.8(最高37.2)		

60%とした上で、曝気ブロワー風量及び好気工程時間(160分/サイクル)は100%負荷時と同じ条件で運転する試験を実施した。

試験期間中、第2担体反応槽越流水の水質は目標値を満足した上で、曝気ブロワーの平均稼働時間は111分/サイクルとなり、曝気ブロワー動力を約30%削減できた。また、メタノール添加量は制御開始前と比較して74%削減できた。本試験を通じて、センサーにより適切に処理終点を検出し、負荷変動に追従した制御が可能であること、過剰な曝気やメタノール添加を抑制し省エネ・低コストの運転が可能であることが確認された。

4. 実施設への導入

4.1 導入施設及び条件

当社グループが運転管理を行っている福井県坂井市の「さかいクリーンセンター」に、本技術を導入した。本技術導入前後の概略フローを図6に示す。本施設は供用開始から約14年が経過しており、搬入量は計画値の約60%まで減少し、搬入物濃度も低下している。そこで、固形物除去後に生物処理を行う方式から固形物を含めて直接処理を行う方式に変更し、本技術を導入した。

また、本施設の処理水排出先は公共下水道であり、河川放流と比

較するとBODやT-Nの排出基準が高いため、第2担体反応槽を設けず第1担体反応槽のみで処理する方式とした。これは、排出基準の遵守と施設の運転費・整備費削減の両立を意図したものである。

担体は実証試験と同様のものを使用し、充填率も同様に水槽容量比25%とした。運転サイクルは、1サイクルあたり流入20分、嫌気60分、好気140分、流出20分とし、1日あたり6サイクルを基本条件とした。

4.2 試験結果

4.2.1 処理性能、担体の耐久性

データ集計期間(2024年7月～12月)において、担体反応槽処理水の窒素除去率は平均93%と良好な処理性能であった。また、表2に示すとおり、施設の最終的な放流水は下水道への排除基準を満足していた。

担体は運転開始から1年が経過しても良好な状態を維持しており、鉄筋コンクリート水槽においても担体の摩耗は生じなかった。よって、担体の耐久性に問題はなく、長期間使用可能と推察される。

4.2.2 センサー制御による省エネ効果(コスト削減効果)

センサー制御による省エネ効果を確認するとともに、負荷上昇時も問題なく処理できるよう、好気工程は140分/サイクルとして連続運転を実施した。

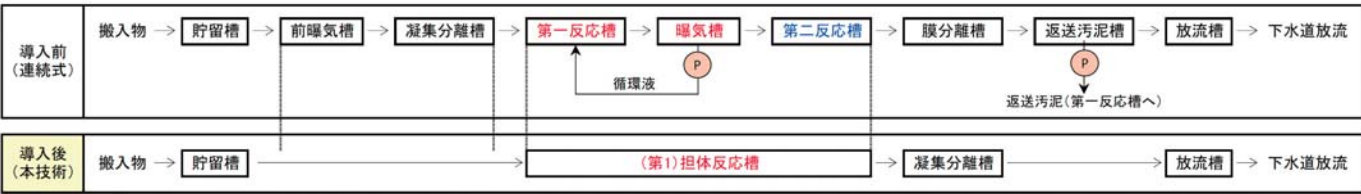


図6 導入前後の概略フロー  
Fig.6 System architecture

表2 放流水性状及び排出基準  
Table2 Quality of treated water and limit for discharge

項目	単位	排出基準	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均
pH	—	5を超え9未満	8.4	7.7	7.6	7.5	7.9	7.7	7.8
BOD	mg/L	220mg/L未満	25	7	10	29	14	40	21
SS	mg/L	150mg/L未満	14	13	9	9	23	17	14
T-N	mg/L	240mg/L未満	56	49	40	19	20	51	39
T-P	mg/L	32mg/L未満	4.2	0.9	0.2	0.5	1.1	2.8	1.6



センサー制御の結果、曝気ブロー平均稼働時間は106分となり、処理水質を満足しながら曝気ブローの運転を適正に制御できることを確認した。メタノールについては本技術導入前から使用しておらず、導入後も引き続き使用していない。

なお、処理場では想定を超える流入負荷時に処理が困難となることは避ける必要があるため、余裕のある曝気ブロー稼働時間及び風量設定のもと、センサーで処理終点を検出し、処理水質の悪化防止と省エネの両立を図ることは合理的であると考えられる。

4.3 プロセス変更による電力費及び整備費の削減効果

従来技術から本技術への変更により主処理に係る複数の機器を休止することができた。これにより、表3に示す消費電力削減効果が得られた。これは施設全体の消費電力の10～15%に相当し、CO<sub>2</sub>削減にも寄与する。

また、休止機器は整備を行う必要がなくなるため、今後10年間で整備費用を20,000千円以上縮減可能である。

表3 変更前後の運転機器数・消費電力の比較  
Table3 Reducible equipment and power consumption

対象機器	型式	動力	変更前(連続式)		変更後(本技術)	
			運転機器数	消費電力 <sup>※1</sup>	運転機器数	消費電力 <sup>※1</sup>
		[kW/基]	[基]	[kWh/日]	[基]	[kWh/日]
第一反応槽攪拌装置 (担体反応槽攪拌装置)	竖型パドル式	11.0	1	185	1	185
曝気装置	竖型軸流式	7.5	1	126	0	0
曝気ブロー	ルーツブロー	3.7	2(交互1)	62	2(交互1)	62
循環ポンプ	一軸ネジポンプ	11.0	2(交互1)	185	0	0
第二反応槽攪拌装置	竖型パドル式	5.5	1	92	0	0
返送汚泥ポンプ	一軸ネジポンプ	3.7	2(交互1)	62	0	0
膜吸引ポンプ (担体処理水移送ポンプ)	一軸ネジポンプ	1.5	2(交互1)	25	2(交互1)	25
膜分離装置	浸漬型平膜	-	2	-	0	-
合計				738	合計	272

※1 負荷率は0.7、24時間運転として算出。交互機は消費電力の算出に含まない

参考文献

1) 全国都市清掃会議：汚泥再生処理センター等施設整備の計画・設計要領2021改訂版

5. まとめ

- ・負荷変動や季節(水温)変動に対して、サイクル運転による処理は安定した性能を発揮した。
- ・センサー制御により安定処理を維持しつつ、曝気ブロー動力やメタノール量を削減できることを確認した。
- ・従来技術と比較して水槽数や機器点数を削減でき、電力費・整備費の削減につながることを確認した。

6. 今後の展開

今後は実施設におけるデータを蓄積し長期的な検証を行う。また、し尿・汚泥再生処理分野を中心に導入を進めていくとともに、バイオガスピラントの排水処理等、より幅広い分野への水平展開についても検討していく。

研究機のCEマーキング自己宣言

EU Declaration of Conformity for Laboratory Mixers



野口 潤 NOGUCHI Jun  
プライミクス株式会社  
乳化分散技術研究所 用途開発課

Abstract

Our company has been deploying the manufacturing and mixing equipment for the electrode slurry for lithium-ion batteries since the 1990s and commercialized the models HIVIS DISPER MIX 3D-2 and FILMIX 56-L, the compact mixers that can handle the research and small-lot production. Since 2023, we started the self-declaration of CE marking with the aim of expanding the sales of laboratory mixers for the European markets. We have been complying the requirements of EMC and low-voltage directives, and achieving compliance through design changes and various tests for the model HIVIS DISPER MIX 3D-2.Two sets of the HIVIS DISPER MIX 3D-2 have already been delivered to Europe and acquired a positive evaluation; accordingly, we will be promoting CE compliance for other models and will aim for the establishment of a trusted brand and customer satisfaction.

当社は1990年代よりリチウムイオン電池などの極板スラリー製造攪拌装置を展開し、研究、少量生産に対応する小型攪拌装置ハイビスディスパーミックス3D-2型、フィルミックス®56-L型を製品化した。2023年よりヨーロッパ市場向け研究機拡販を目的にCEマーキング自己宣言に着手、EMC指令及び低電圧指令の要求に対応し、設計変更や各種試験を経てハイビスディスパーミックス3D-2型については適合を達成した。ハイビスディスパーミックス3D-2型は既にヨーロッパに2台納入、評価を得ており、今後は他機種へもCE対応を展開し、信頼されるブランド構築と顧客満足向上を目指す。

キーワード：EMC指令、低電圧指令、ノイズ対策、絶縁距離  
Keyword：EMC Directive, Low voltage directive, Noise countermeasures, Insulation distance

1. はじめに

当社では二次電池(主にリチウムイオン電池、燃料電池、全固体電池)の極板スラリーを製造する攪拌装置を1990年代から積極的に市場に展開しており、現在も引き続き電池分野に特化した専門プロジェクトを立ち上げ、開発・推進を行っている。その過程において、電池極板スラリーの試作研究や少量生産に対する攪拌装置の開発も進めており、これまでにプラネタリーミキサーのハイビスディスパーミックス3D-2型(図1)および連続式攪拌機のフィルミックス®56-L型(図2)を製品化してきた。いずれも開発から既に数年が経過しているが、ヨーロッパ電池市場への研究機の拡販を目的として両機種に対するCEマーキング自己宣言に取り組んだ。

ハイビスディスパーミックス3D-2型は、低速のひねりブレードと高速のホモディスパーを組み合わせた3軸遊星方式の分散、混合、混錬機である。図3に攪拌部形状を示す。各種材料への対応力の配慮を踏まえ、研究開発現場における試作用途での活用を想定した仕様となっている。一方、フィルミックス®56-L型は、攪拌工程の連続化を実現した画期的な装置であり、プレミキシングした電池極板スラリーをポンプで送液して分散処理を行う。図4に攪拌状態を示す。連続分散処理によって、バッチ処理では得難い処理の安定性や再現性が確保でき、生産設備においては生産性の向上と省人化を同時に実現する。特に電池材料など高い均質性が求められる分野において、量産工程へのスムーズな移行を支援する装置として期待されている。

本稿では、2023年より着手したCEマーキング対応について報告する。

2. CEマーキング自己宣言への取り組み

2.1 CEマーキング

CEマーキングとはEU(欧州連合)地域で販売される特定の製品に対して貼付が義務付けられている安全マークである。製品の製造者は、製品が販売される前に適合性評価を実施しなければならない、それに満足する製品のみがCEマークの付与を許可される。

2.2 適用指令

CEマーキングにおける自己宣言は一部の第三者認証機関による認証が義務付けられている製品を除き、原則として製造者が自らの責任で行う方式である。ただし、自己宣言とは言っても単に自己判断で済ませられるものではなく、適切な検査機関や認証機関による検査、試験



結果に基づき、安全性、信頼性が十分に確認されているという根拠をもって、宣言を行う必要がある。

宣言にあたって適用した指令はEMC指令(2014/30/EU)、低電圧指令(2014/35/EU)で、適用した整合規格は、EN61326-1:2013(EMC)、EN61010-1:2010+A1:2019 第3版(安全)である。初期段階ではCEマーキングについての知識が乏しい状態で、事前に対策も施さずに標準仕様の状態で第三者認証機関で検査を受けたため、対策と修正に膨大な時間と労力を費やすこととなった。

## 2.3 EMC指令

EMC指令に基づく試験には、大きく分けてEMI(エミッション)とEMS(イミュニティ)の2つがある。中でも特に苦勞したのはEMIの中の伝導エミッション試験で、これは電源線や通信線に伝導される高周波を測定して規定以下である事を確認するノイズ試験である。エミッション試験の状態を図5に示す。

フィルミックス®56-L型では、ノイズフィルタを直列に2個付けてクリア出来た。ノイズ対策には一定のセオリーは存在するものの、全ての



図1 ハイビスディスパーミックス3D-2型  
Fig.1 HAVIS DISPERSER MIX 3D-2



図2 フィルミックス®56-L型  
Fig.2 FILMIX 56-L



図3 攪拌部形状  
Fig.3 Mixing part shape

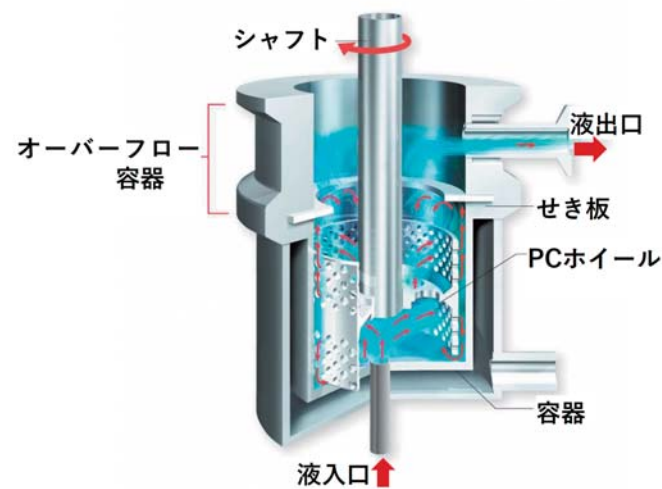


図4 攪拌状態  
Fig.4 Mixing status



図5 エミッション試験  
Fig.5 Emission test

ケースに通用する正解がないのが実情のようである。例えばノイズ対策品として推奨されているフェライトビーズを試してみたが、両機種には全く効果が見られなかった。その他シールド処理、アースの見直し等考えられる限りの対策を講じた。ノイズ対策は、結局のところトライアンドエラーの繰り返しを地道に続けるしかないようである。こうした施行錯誤を半年以上かけて繰り返した結果、EMC試験をクリアすることができた。

## 2.4 低電圧指令

低電圧指令における適合性評価として目視検査と各種運転試験の2つを実施した。まずは目視検査であるが、実機に加えて外形図、回路図、ブロック図、配線図等の図面チェックが行われた。中でも最も問題となったのは、ハイビスディスパーミックス3D-2型の基板における絶縁距離の確保であった。この基板は当社のパートナー企業が設計、製作したオリジナルの基板であるが、当初からCEマーキング準拠を前提に設計されていなかったため、必要な絶縁距離の確保に対する認識が不十分であった。全ての基板において高圧部と低圧部の絶縁が適切に行われていない場合は、絶縁距離が規定値を満足しなければならないという指摘を受け、最終的に全ての基板を再設計して強化絶縁を施すこととした。基板の設計から製作までの期間に6か月を要したため、その間目視検査は中断することになった。また取扱説明書では従来記述していなかった下記項目の説明が必要であった。

- ①使用・保管のための温度・湿度・高度など使用環境条件
- ②過電圧カテゴリ(電気機器は、電源系統からの落雷やサージなどの一時的な過電圧を受けることがあり、その大きさは電源との接続位置(コンセント接続や分電盤への端子接続など)によって大きく異なるため、設計上の耐電圧性能を示す区分のこと)
- ③汚染度(塵埃、液体、気体などの周囲環境が絶縁への汚染の原因となるため、環境条件は分類され規定される)
- ④換気の要求(例えば処理した液が可燃性のガスを発生する場合、安全基準・健康基準を満たすために換気扇を設置することなどの指示が必要となる)
- ⑤機器上に使用したラベルの記号の意味と説明

例えば⑤では機器本体に定格周波数、定格電圧、定格電流値のラベル表示が必要で、またヒューズホルダーの近傍にはそれぞれ定格電圧、定格電流、遮断容量、溶断特性のラベル表示が必要であった。最終的には機器本体に多数のラベルを貼付する結果となったことからラベル表示の重要性についても理解が深まった。

リスクアセスメントでは、いかに安全面を考慮して設計に反映させるかという視点で、安全性について改めて考える機会となった。加えて絶縁材料の難燃性に関しては、パーツによって難燃性グレードが異なり認証書を入手するのに多くの時間と労力を要したが、適材適所の難燃性グレードの選定が重要であることを認識できた。

8か月に渡る目視検査に合格し、最終の各種運転試験となった。試験内容としては絶縁耐力試験、衝撃試験、落下試験、高負荷試験、温度測定、ラベルの耐性試験(使用環境下で剥がれたり、劣化しない

ことを確認する試験)等を行った。ハイビスディスパーミックス3D-2型は、これら全ての検査、試験が完了して自己宣言書を作成することが出来た。フィルミックス®56-L型については高負荷試験を残すのみではあるが、認証機関から自己宣言の許可は頂いている。

## 3. まとめ

CEマーキング自己宣言は、当社にとって重要なマイルストーンであり、これらは当社初の研究機でのCEマーキング対応であった。CEマーキング自己宣言後、ハイビスディスパーミックス3D-2型は既に2台がヨーロッパの顧客に納入されており、好意的な評価を得ている。今回の取組みを通じて、安全に関する規格要求事項の精読やリスクアセスメント、文書作成など、社内にとっても大きな学びの機会となった。また、「何が国際的に安全とされているのか」「お客様にとっての安心とは何か」という点についての理解が深まった。

今回の取組みは、既存製品に対する後付けでのCEマーキング対応という点でも意義が大きく、今後の製品開発や海外展開に向けた重要な足掛かりとなった。

今後はこの知見を活かし、他の研究機についても順次CEマーキング対応を進め、より多くの海外市場への展開を図っていく予定である。国際的な安全・環境要件に適合した製品提供を通じて、信頼されるブランドづくりと顧客満足の向上を目指していきたい。



# クリーンサクション開袋機のコストダウン

“Clean Suction Bag Opener” Cost Reduction



瀧沢 憲治 TAKIZAWA Kenji

月島機械株式会社  
プロセス装置技術部 FAグループ

## Abstract

The Clean Suction Bag Opener developed in-house 30 years ago for the goal of zero-mixing of foreign substances when opening a bag was a fully automatic bag opener with excellent features, but the disadvantage was the costly sophisticated mechanism. A cost reduction of 20% plus was achieved by reviewing and simplifying the mechanisms of major three zones, conveying, cutting, and suction discharging, while preserving its excellent features as they are. The processing capacity has become approximately twice as high, and the reliability of the device was improved as well.

開袋時の異物混入ゼロを目標に30年前自社開発された「クリーンサクション開袋機」は、優れた特長を持った全自動開袋機であったが、複雑な機構なため高額であることが欠点であった。搬送部、切断部、吸引排出部の主要3部分について機構を見直し簡素化を図ることで、優れた特長はそのままに20%強のコストダウンを実現することができた。また、処理能力は約2倍となり、装置の信頼性も向上した。

キーワード：粉体、開袋機、空気輸送、コンタミレス、コストダウン、粉袋

Keyword : Powder, Bag opener, Pneumatic conveying, Low-contamination, Cost reduction, Powder bag

## 1. はじめに

およそ30年前に製薬会社と共同で開発した「クリーンサクション開袋機」は、粉体の入った袋（以下、粉袋）の開封時における、製品への異物混入がほぼゼロという、他社に無い優れた特長を有した全自動開袋機であった。しかしながら、複雑な機構のため高額であることが客先に受け入れられず、その後の受注に結び付かない大きな要因の1つとなっていた。

この度、粉袋搬送部、切断部、吸引排出部の主要3部分について機構を根本から見直し、大幅な簡素化を行うことにより、優れた特長はそのままに20%強のコストダウンを実現することができた。また開袋能力はほぼ2倍に増加し、機械の信頼性も向上させることができたので、以下に詳細を述べる。

## 2. コストダウン及び改良ポイント

### 2.1 粉袋搬送部

粉袋は、整袋部→切断部→吸引排出部→空袋処理部と順番に運ばれ、自動開袋されていく。各工程にはそれぞれの処理を担当する自動装置が配置されるため、旧型機の搬送機構には、粉袋搬送には不向きを承知でトッププレート付きのチェーンコンベヤを採用していた（図1）。チェーンコンベヤは、箱などの変形しにくい物体の搬送には適しているが、粉袋のように自重で大きく変形する物体の搬送には不向きである。重量があり剛性の無い粉袋は、搬送チェーンの間や、乗り継ぐ次のコンベヤとの間に自重で垂れ下がり、搬送不良が生じやすい。直近の納入事例では、垂れ下がりを防止するためにチェーン列数を2列から4列に増やしたが、その分コストは増加してしまった。内部粉体が排出された空袋搬送に関しても、軽いがゆえにチェーンコンベヤ上で滑りやすく、ここでも搬送不良が生じやすい。さらに、停止位置でも問題があった。搬送が完了してコンベヤを停止するタイミングは、搬送先で光電センサーが粉袋を検知した時点であるが、粉袋がオーバーテープでシールされている場合、はみ出たオーバーテープが粉袋本体より先に検知され、粉袋到着前にコンベヤが停止してしまうこともあった。

以上のことを踏まえ、新型機では平滑なテーブル上をブルドーザーのように粉袋を押して搬送する方式を採用した（図2）。粉袋を押出すためのゲートが3式あり、それぞれ跳ね上げ式に開閉可能な構造となっていることに加え、3式のゲートと一緒に水平方向に移動可能な機構となっている。図3に沿って運転要領を以下に述べる。

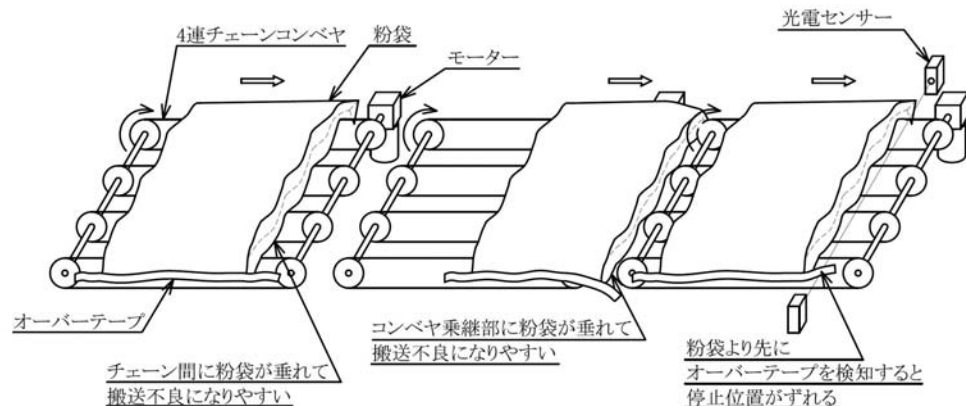


図1 旧型機の粉袋搬送要領(4連チェーン3段チェーンコンベヤ式)  
Fig.1 Powder bag transfer procedure for the old model

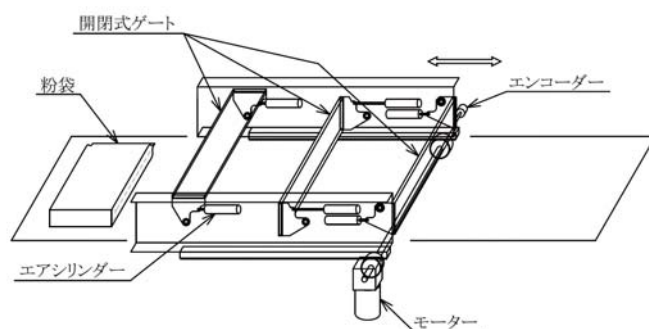


図2 新型機の粉袋搬送機構(押し出し式)  
Fig.2 Powder bag transfer mechanism for the new model

- ①ゲート3が開の状態、粉袋がゲート2と3の間に供給される。ここへの粉袋の搬送は、ベルトコンベヤ、ローラーコンベヤ、プッシャーのような方式となる。
- ②ゲート3が閉となる。
- ③3つのゲートと一緒に水平方向に進進し、粉袋は搬送される。
- ④切断部から吸引部まで移送された位置で搬送を停止する。搬送系はラックアンドピニオン駆動として、ピニオン軸にエンコーダーを設置してある。停止位置のエンコーダーパルス数はあらかじめ設定しておく。
- ⑤3つのゲートが開となる。
- ⑥元の位置まで水平後退する。ゲートは開状態となっているので、粉袋はゲートで押し戻されることなく、その位置にとどまる。
- ⑦ゲート1、ゲート2が閉となると、搬送装置は初期状態に戻る。

チェーンコンベヤの場合、整袋部～切断部～吸引排出部～空袋処理部間で駆動モーターが3式必要だったのに対し、新型機では3つのゲートを搬送するための1式とすることができた。搬送チェーン、スプロケット類が、安価な跳ね上げ式ゲートに変わり、コストダウンが実現できた。また搬送不良が減少し、機械動作の信頼性は大幅に向上した。

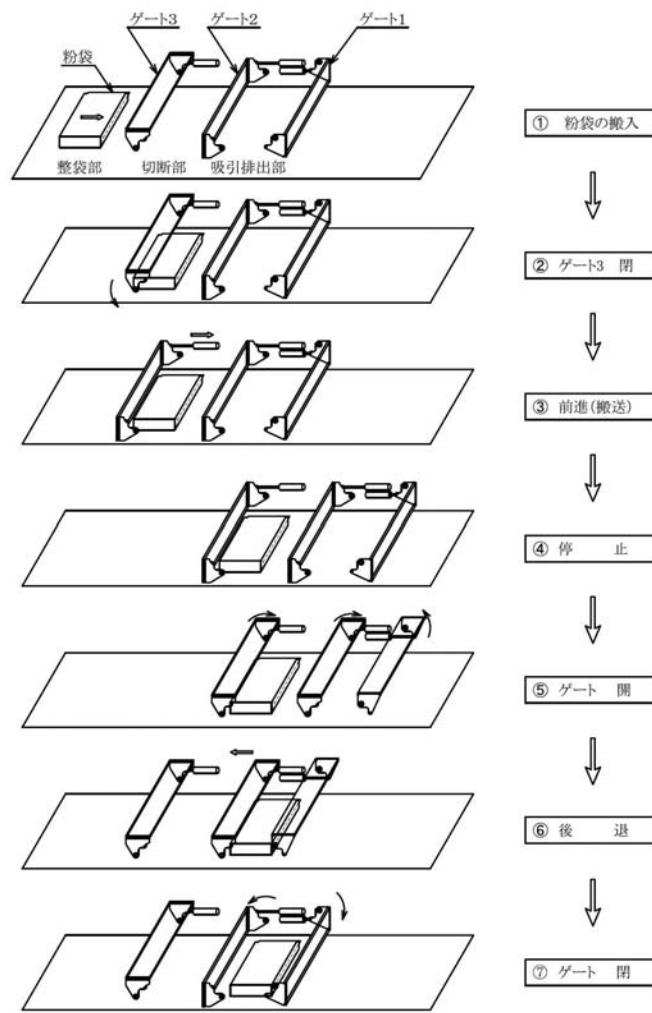


図3 新型機の粉袋搬送要領  
Fig.3 Powder bag transfer procedure for the new model

2.2 切断部

粉袋内部に吸引ノズルを差し込む口として、粉袋を切断する必要がある。図4に旧型機の切断要領を示す。切断する際は、切断表面に張力を与えないと切断物が刃から逃げる現象が発生し、切断不良が起りやすく、紙片の発生原因ともなる。ゆえに、切断前に、正方形開口のあるカット部抑え板を粉袋の上から押し当てて切断表面に張力を与える。粉袋の切断形状は、円筒の吸引ノズルを差し込むために正方形にしたい、かつ切断した部分が本体と分離して回収困難となるのを避けるために、粉袋中央部を「コ」の字状に切断し、本のページをめくるように開いて正方形の開口を作る。実際の三辺切断動作は、直線切断を3回行う複雑な動作となるため、カッター刃を持たせた産業ロボットを採用していた。その後、紙めくり装置で紙を挟んでめくりあげる。めくりあげた紙と粉袋の間に紙保持棒を差し込み、めくりあげた紙を紙保持棒に載せて、一連の動作は終了する。

よく考えられた非常に面白い動きであるが、複雑で可動部が多い分、調整部も多くトラブルも発生しやすい。冬場は問題なく運転できていたが、夏になって室温が上昇し、袋材の剛性が低下してめくり部が棒から滑り落ちるような予想もしなかったトラブルも発生した。

図5が新型機の切断要領である。「コ」の字切断はやめ、一直線のみの切断とした。切断表面に張力を与える方法としては最も簡単な機構を追求し、粉袋の下から押し上げるのみとした。一直線という単純な切断動作なので、刃の駆動装置として産業ロボットは不要となり、入刀方向と切断方向に可動するエアシリンダー2本で構成することができた。加えて、カット部抑え板、紙めくり装置、紙保持棒も全て無くなったことにより、大幅なコストダウンとなった。また、カット部抑え板を粉袋

に押しえつけると袋内圧力が上昇する。この内圧の影響で、旧型機ではカット1刀目に内部粉が噴き出ることがあったが、新型機構では内圧上昇が無くなりこの発塵を抑制することもできた。

2.3 吸引部

粉袋表面に付着した異物を製品に混入させないために、「クリーンサクシオン開袋機」では、吸引ノズルによる吸引排出方法を採用している。図6が旧型機の吸引排出要領である。切断部で「コ」の字にカットした部分が紙保持棒に載った状態となったが、隣の吸引排出部にも同様な紙保持棒が用意されている。切断部から吸引排出部に粉袋が移動する際には、紙を落とすことなく2つの紙保持棒にカットした部分が載り移りながら粉袋は運ばれる。粉袋が吸引排出部に到着すると、吸引排出部の紙保持棒は袋の搬送方向に対し垂直方向に水平移動することにより紙をめくって、粉袋に正方形の開口を作る。ここに吸引ノズルが差し込まれ、内部粉体を吸い出す。

袋内粉体を吸引ノズルで全量排出するには、粉袋内の全粉体をノズルの吸引口を集める必要がある。単に吸引ノズルで吸っていただけでは、袋内の全粉体は集まって来ない。旧型機では、すり鉢状のテーブルに粉袋を載せて、テーブルを激しく振動させることにより粉体をノズル吸引口に集めていた。しかし振動による機器への悪影響は予想以上に大きく、テーブル溶接部の破損、モーターケーブル損傷による地絡、かしめ部摩耗による丁番の脱落破損等、様々なトラブルが発生した。

図7が新型機の吸引排出要領である。すり鉢状の振動テーブルは廃止し、上下に観音扉状に開閉するテーブルを採用した。ノズルを粉

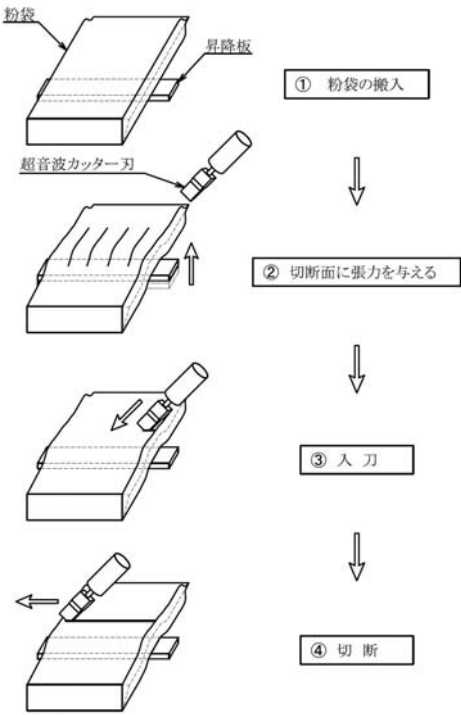


図5 新型機の袋切断要領  
Fig.5 Powder bag cutting procedure for the new model

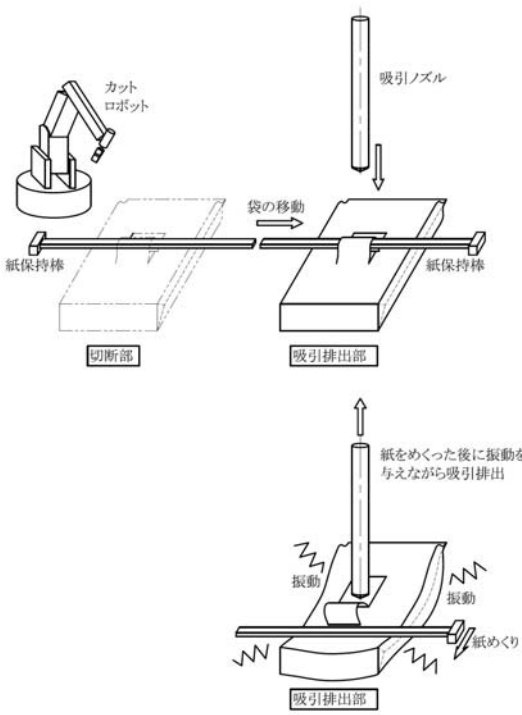


図6 旧型機の吸引排出要領  
Fig.6 Suction and discharge procedure for the old model

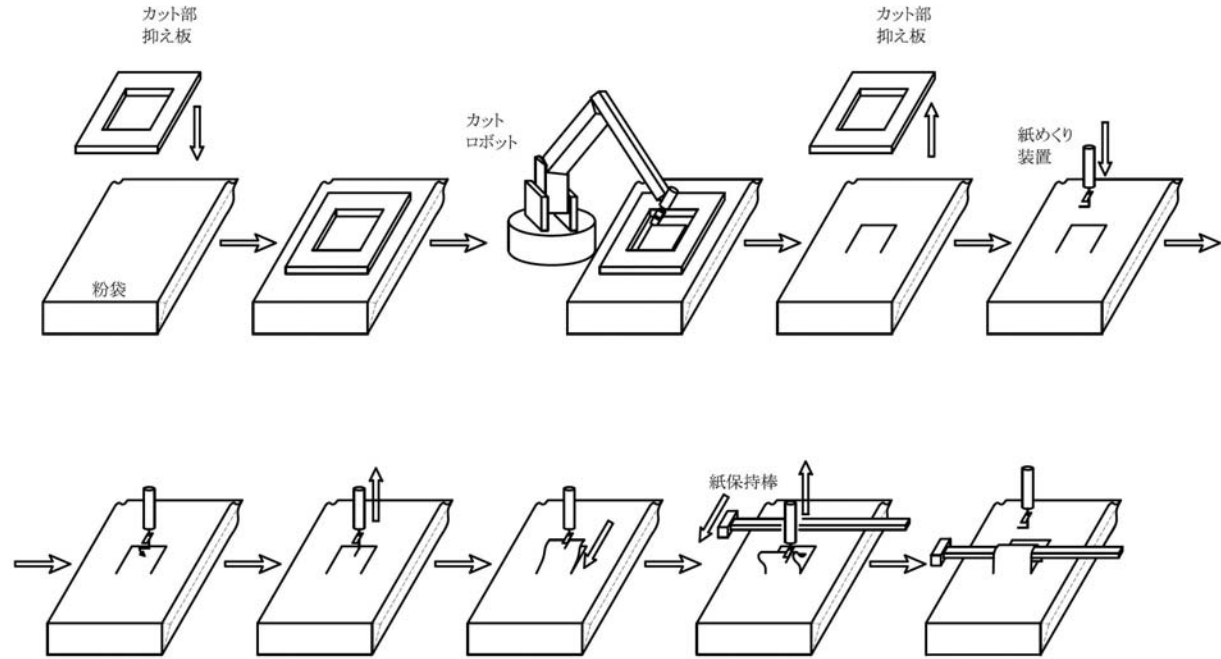


図4 旧型機の袋切断要領  
Fig.4 Powder bag cutting procedure for the old model

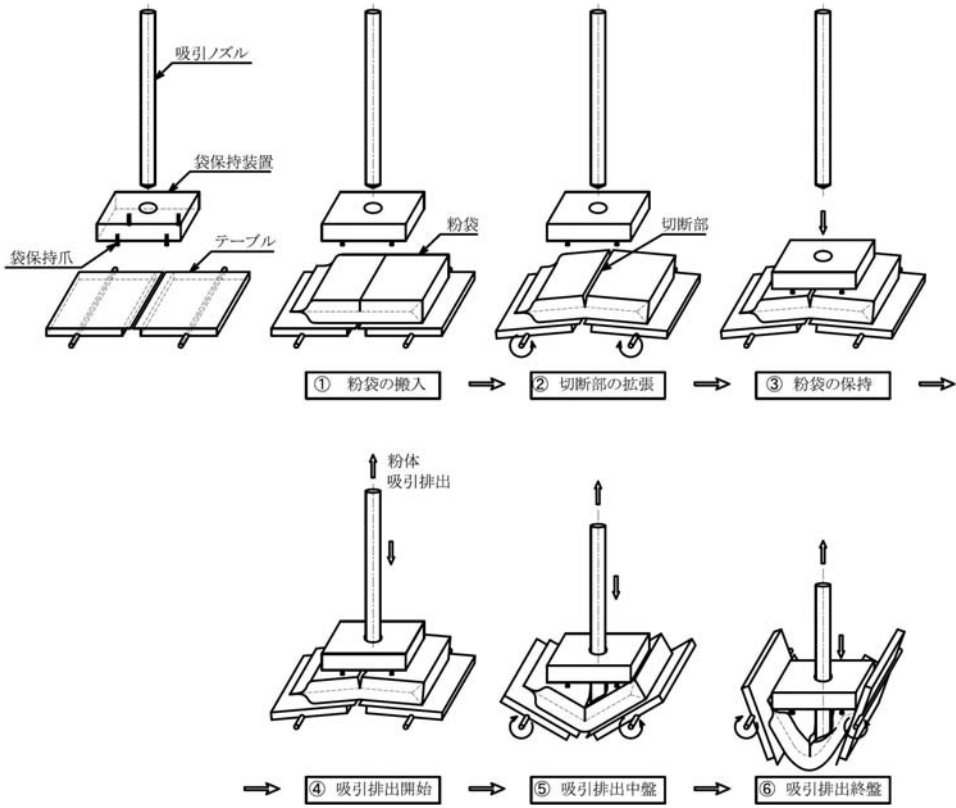


図7 新型機の吸引排出要領  
Fig.7 Suction and discharge procedure for the new model



袋へ差し込む前にテーブルを上方向に若干開くことにより、切断口を広げる。この動作が粉袋に吸引ノズルが差し込まれる際の、袋材の破損を回避する。袋保持部が粉袋の上部を保持した後、吸引ノズルが下降して粉袋内部に差し込まれ、内部粉体の吸引排出を開始する。内部粉体が少なくなるに従い、テーブルの傾斜が徐々に大きくなる。粉体は傾斜に沿って滑り落ちることによりノズルの吸引口に集まり、吸引排出されていく。吸引排出終盤では、吸引ノズルの先端で袋の底を押し込んで形成される窪みに粉体を集める。この時点で袋性状に依っては吸引ノズルに袋自身が吸い付けられて吸引口を塞ぎ、吸引排出不良を起こすことがある。そのような場合は、ノズル先端から圧縮空気を放出して袋材の吸着を防ぐとともに、袋皺に入り込んだ粉を流動させて、最終的な残粉量を減らす。

ノズルの昇降アクチュエーターとして、旧型機は、サーボモーターで駆動するボールねじと走行ガイドが一体化した市販品を使用していた。新型機ではコストダウンのために、インバータ制御の電動シリンダーと走行ガイドを組み合わせたが、ステンレス製の市販製走行ガイドが予想以上に高価で、この部分のコストダウン効果は薄い結果となった。

2.4 開袋能力、異種粉体兼用開袋

「クリーンサクシオン開袋機」は製品への異物混入防止を第一として開発されたため、開袋能力に関しては二の次となっていて、他社製品同等とはとても呼べない状況であった。これは異物混入防止として優位な、吸引排出方式を採用していることが主原因である。開袋能力の低さで導入を断念する顧客も割合は少ないが存在するため、新型機では吸引ノズルを太くして能力増加を図った。吸引ノズルの断面積を旧型機の約2倍とし、樹脂ビーズでのテストではあるが、旧型機のおよそ2倍の能力を達成することができた。この開袋能力の倍増は、吸引ノズル径の拡大のほかに、開閉テーブルを採用した影響も大きい。旧型機のすり鉢振動テーブルよりも新型機の開閉テーブル方式の方が内部粉体を吸引ノズル口に集めやすく、効率的に吸引排出できるようになった。吸引部の改造ではコストダウンの効果は薄かったが、開袋能力の点では大きな成果を得ることができた。

「クリーンサクシオン開袋機」は、吸引ノズルと空送配管を複数用意すれば、1台の開袋機で複数の粉袋がクロスコンタミなく開袋可能という特長を有していた。新型機も紙保持部と吸引ノズルの駆動部配置を工夫し、同様の特長を付加することができる構造となっている。

3. まとめ

月島機械の「クリーンサクシオン開袋機」は、開袋時の異物混入がほぼゼロという、他社に無い特長を持つ特殊な開袋機である。共同開発した医薬業界はもとより、食品業界、二次電池業界も含め、異物混入防止の要求は近年ますます高まりを見せる。一方、各業界で人手不足が進み、開袋のような重労働作業は機械に任せたいとの要望も近年よく耳にする。異物混入の無い自動開袋機は、今後ますますニーズの高まる装置と考える。コストダウンという名目で主要部の機構を見直し、開発を行ったが、機械の信頼性の向上及び開袋能力の向上も実現できたので、各種工場に広く導入され社会に貢献できることを期待している。

参考文献

1) 瀧沢憲治 異物混入ゼロを目指した、異種多粉体兼用自動開袋機 ～ニュークリーンサクシオン開袋機『化学装置 2023年3月号』 pp.29～31  
2) 瀧沢憲治 異物混入ゼロを目標に開発した自動開袋機 『産業機械 2025年3月号』 pp.44～47

# タイ王国におけるPMXとTETによる 初協業プロジェクトについて

First Collaboration Project between PMX and TET in Thailand



藤岡 重之 FUJIOKA Shigeyuki  
プライミクス株式会社 技術本部 システム設計部  
現月島機械株式会社 プラント設計部

## Abstract

プライミクス株式会社は、「混ぜる」技術を核に、医療品、化粧品、電池、機能性材料など多岐にわたる分野のものづくりを支える高速攪拌機メーカーである。2020年5月、PMXは月島機械株式会社（現・月島ホールディングス株式会社）のグループ会社となったが、これまでグループ内で協力してプラント建設を行う機会は無かった。

このたび月島機械株式会社のタイ現地法人であるTSK ENGINEERING (THAILAND) CO., LTD.とPMXが協力し、製造設備の設計、製造から建設工事、試運転に至るまでを一貫して対応した。

本稿では、グループ協業による初の取り組みとなったプロジェクトの概要と実績、プロジェクトで得た教訓について紹介する。

キーワード：プライミクス、TSKタイ、海外プラント建設、協力、経験  
Keyword：PRIMIX, TSK ENGINEERING (THAILAND), Oversea plant Construction, Collaboration, Experience

## 1. はじめに

タイ王国は、東南アジアの中心に位置し、日系企業にとって主要な進出先の一つとなっている。2025年時点において、タイには約6,000社の日系企業が登記されており、これは東南アジア諸国の中でも突出して多い数である。

本報では、プライミクス株式会社（以下「PMX」という。）とTSK ENGINEERING (THAILAND) CO., LTD.（以下「TET」という。）がグループ協業により初めて、製造設備の設計・製造から建設工事までを一貫して対応、無事2024年12月に完工し、引き渡しが行われた案件の工事实績と共にプロジェクトで得た教訓について報告する。

## 2. 受注の背景

本案件のエンドユーザーは、頭髮化粧品を製造するOEMメーカーである。PMXはこれまでに同社国内工場向けに10基を超える真空乳化装置や溶解槽を納入している実績がある。しかしながら、PMX単独では海外工事への対応が困難であり、加えて競合他社がタイ国内にメンテナンス拠点を有していたことから、同社がタイ進出を検討していた当初は競合製品の採用を前提にプロジェクト検討が進行していた。

この状況に対し、2020年にPMXが月島機械グループ（当時）の一員に加わりタイ国内でEPC及びメンテナンスができるTETと同じグループとなったことから、PMXはTETとの協業体制をエンドユーザーへ提案

した。これにより、PMX製品の採用が再検討され、最終的にPMXとTETによる受注が決定された。図1のプロジェクト体制表に記載の通り、調査設備は全て月島グループが設計・製造・施工を担った。

## 3. プロジェクト体制について

受注後のプロジェクト体制について、図1に示す。

## 4. 建設地

今回の工場はタイ王国サムットプラカーン県バーンボー郡に位置するアジア工業団地（スワンナプーム）内に建設された。同団地は、バンコク・スワンナプーム国際空港の東約21kmに広がる工業団地であり、タイ工業団地公社との共同管理のもと運営されている。工業団地全

体の敷地面積は4,027ライ（645ヘクタール）に及び、周辺には以下の主要物流拠点が存在する。

- ・ラッカバン内陸コンテナデポ
- ・スワンナプーム国際空港内の無関税ゾーン（カスタムフリー・ゾーン）
- ・バンコク港（クロントゥーイ）
- ・レムチャバン港

これらの施設に近接していることから、同工場は輸送面において極めて優れた立地条件を有している。

またバンコク中心部から車で約1時間とアクセスがよく、従業員の確保にも適した立地である。

## 5. 設計から試運転までの工程

受注から現地試運転までの工程表を図2に示す。

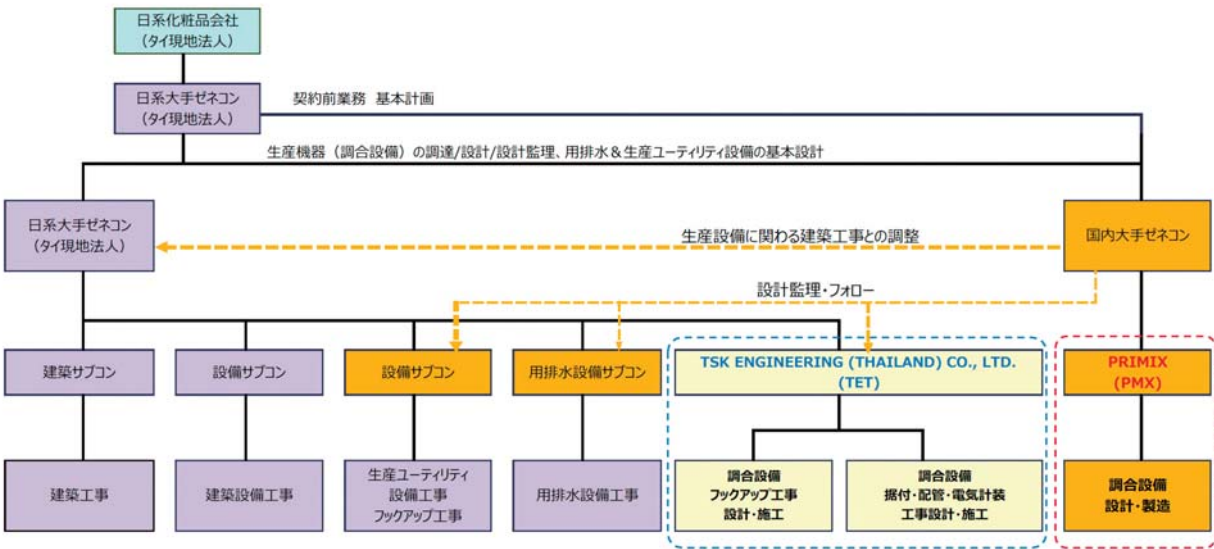


図1 プロジェクト体制表  
Fig.1 Project organization chart

工程	詳細	担当	開始	完了	FY2023				FY2024			
					1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
マイルストーン	設備受注	PMX	2023年4月	-	★							
	引渡し		-	2024年12月							★	
設計	基本設計	PMX	2023年4月	2023年6月								
	詳細設計：											
	P&ID・配置図・機器図	PMX	2023年7月	2023年12月								
	架構図・配管図	TET	2023年10月	2024年4月								
製作	機器製作・輸出梱包	PMX	2024年1月	2024年6月								
	海上輸送	客先	2024年7月	2024年8月								
	架構製作	TET	2024年6月	2024年8月								
現地工事	据付・配管・電気計装工事	TET	2024年8月	2024年11月								
現地試運転	機器試運転	PMX	2024年12月	2024年12月								
	客先試運転	客先	2025年1月	2025年2月								

図2 工程表  
Fig.2 Master schedule



## 6. 設計体制

本プロジェクトにおける製造設備の設計及び製作は、PMXが主体となって実施した。PMXは基本計画としてフローシート及びプロットプランの作成を担当し、TETが3Dモデリングや配管設計を担当した。図3に設備の全景、図4にTETが作成した3Dモデルをそれぞれ示す。製造設備の肝となる機器設計・製作はPMXで完結した。設計から製作、検査、海上輸送、現地工事、試運転完了に至るまでの約2年間、顧客との間で週次のWeb会議を通じて継続的な技術調整を行った。2024年1月に配管設計が本格化されて以降はTETも会議に参加し、詳細設計及び現地工事計画について十分なすり合わせを行った上で、2024年7月より建設工事を開始した。

## 7. 主な課題と対応

本プロジェクトでは、以下のような技術的・運用的課題が発生し、それぞれに対して対応を行った。



図3 製造設備 全景  
Fig.3 Plant overview

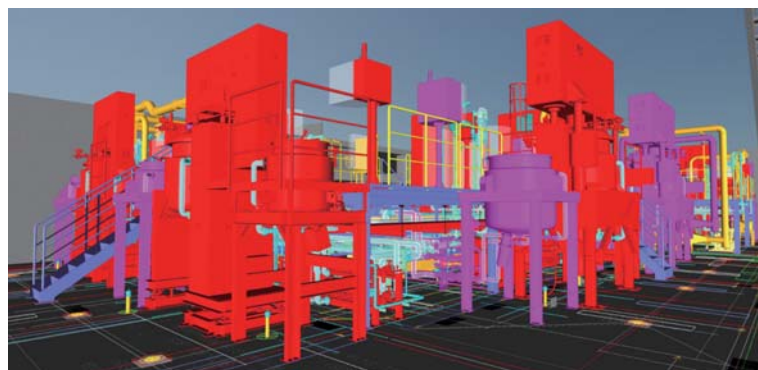


図4 将来機器(マゼンタ色部分)を含めた製造設備3Dモデル(TET作成)  
Fig.4 Plant 3D model including for future equipment (Prepared by TET)

### 7.1 輸出手続き

PMX独自の運転制御システム「ホミコン」を稼働させるためのノートPCを航空便にて輸出した。これらはリチウムイオン電池が搭載されており、危険物扱いとなるため、輸出手続きに時間と労力を要した。

### 7.2 輸入通関手続きの遅延

PMX機器の輸入通関は、TETが手配したフォワーダーが対応した。事前に通関遅延が予想されたロードセルやケミカルアンカーなどを別梱包とする対策を講じていたが、一部構成機器のHSコードの違いを指摘され、通関手続きが約1か月遅延した。

### 7.3 据付工事での工程キャッチアップ

通関遅延により工期への影響が懸念されたことに加え、床下に配管トレンチが設けられており当初予定していたカニクレーンが使用できない事態となったが、据付工事期間として約2ヶ月を確保していたため、作業人員の増員及び並行作業の実施により工程短縮が図られた。



図5 右：真空乳化機(アチホモミキサー®)、左：高速乳化分散機(溶解槽)  
Fig.5 Right: Vacuum mixer / Emulsifier (AGI HOMO MIXER),  
Left: High speed disperser (HOMOGENIZING DISPER)

PMXからの据付指導員は1名のみだったが、安全を確保しつつ作業が進められ、無事完了した。

### 7.4 完成検査対応

工事期間中、顧客及びエンドユーザーによる完成検査を計3回実施した。1回目は機器据付完了時点、2回目は指摘事項の是正確認、最終検査では設備全体の完成状態を確認した。PMX機器は工場出荷前に立会検査を実施済みであり、現地検査では主にPMX機器とTET架台が組み立てられた後の出来栄や清掃具合の指摘が中心であった。一部、PMX機器とTET架台とのステージの取り合いについては、手直しが発生したが、TETの協力により対応を完了した。

図5に真空乳化装置と溶解槽を示す。写真手前がPMX機器とTET架台とのステージ取り合い部を示すが、完成状態ではTET架台側から隙間を埋めるカバーを取り付け、ロードセルの機能を確保しつつ、ステージ下に原料が落ちにくい構造とした。

### 7.5 試運転対応

PMXが納入する設備では、原料投入量管理のためロードセルを採用するケースが多いが、今回の設備でも全ての製造タンクにロードセルを設置した。試運転時に校正したロードセルは、PMX手配としてタイへ輸出した。校正作業は、タイ国内でロードセルを取り扱う商社へ発注したが、英語による意思疎通が困難であった。翻訳アプリやTETの通訳を現地に招いて対応を試みたものの、連携が不十分であり、同商社での調整は未完了のまま終了せざるを得なかった。最終的には、日本人スタッフが駐在するロードセルの校正業者へ依頼し、校正を完了した。ロードセルは輸入手続きが煩雑である上、現地での校正作業や納入後のメンテナンスを考慮すると、今後は現地調達の可能性を検討する必要がある。

また、通常PMXの機器においては、試運転時に調整事項が発生した場合、工場の組立担当者を現地へ派遣して対応することが多い。しかし海外においてはその対応が困難であり、現地設計担当者が現地調達可能な部材を活用し、TETメンバーの協力を得ながらトラブル

を解決したこともあった。このように現地の状況に合わせて臨機応変に対応することもPMXメンバーにとって良い経験になったと考える。

### 7.6 リモートアクセスルーターの納入

本設備は顧客にとって初の海外納入案件であり、PMXとしても稀な海外対応事例であった。そのため、現地でソフトウェアトラブルが発生した際に日本から迅速な対応を行う手段が確立されておらず、対応遅延による生産停止が懸念されていた。

これに対し、インターネット経由で制御システムにアクセス可能なリモートアクセスルーターを導入した。日本からの遠隔対応を可能とする体制を構築したことで、現地へ技術者の派遣を行うことなく、ソフトウェアの確認や設定変更が実施できるようになった。

導入初期には通信不良によりリモート接続が不可能な状況が発生したが、接続方式の見直し及び設定の変更により安定した通信環境が確保できた。その後、顧客運転開始後に発生したエラーに対して、日本からの遠隔操作により迅速な原因特定と対応を行い、生産停止時間を最小限に抑えることができたことで、顧客から高い評価を得た。

今回の対応により、海外案件におけるソフトウェアトラブルの対応力が強化され、今後の海外納入案件においても同様のリモートアクセス体制を構築することで、対応の迅速化と顧客満足度の向上が期待される。

## 8. その他

PMXのメンバーにとって、今回のような長期にわたる海外工事への対応は初めての経験だった。これまでの海外対応は、1週間程度の短期出張によるスーパーバイザー（以下「SV」という。）業務が中心であり、最長で約2ヶ月間の現地滞在は前例が無かった。

そのため、渡航前にはTET出向経験者によるSV業務に関するレクチャーを実施し、現地での生活環境や業務遂行に関する指導を行った。また、現地ではTETの支援により、ホテル・レンタカーの手配、昼食のアレンジ、出張者の生活面でのケアなど、きめ細かなサポートを受けた。これらの支援の結果、体調不良を訴えるメンバーもなく、試運転完了までの工程を円滑に完了することが出来た。

## 9. おわりに

本プロジェクトは、PMXが2020年に月島機械グループ(当時)の一員となったことが受注の決め手となったほか、初めて建設工事を含む一貫対応を行った案件であり、無事完工、引き渡しに至った。

今後は海外案件のみならず、国内においても同様の事例を積み重ね、グループ会社間での協業体制を強化することで、各社が相互に成長し、技術力・対応力の向上を図っていくことが重要である。また、今回のロードセルに関する課題を教訓とし、グループ間での所掌分けの最適化を含めた改善を進めていく必要がある。

本件を通じて得られた知見と経験を活かし、今後のプロジェクトにおいてもグループ全体での連携を深めていきたい。



# CRYSTALLEX® Type VF-200

CRYSTALLEX Type VF-200



永澤 優馬 NAGASAWA Yuma  
月島機械株式会社  
プロセス装置技術部 新事業開発グループ

## Abstract

近年、二次電池の正極材前駆体に代表される無機系の材料等、微粒子の需要が高まっている。CRYSTALLEX® Type VFは、リアクター内に強力かつ均一な攪拌場を形成することで、高真球度の微粒子を高い生産性で生産可能な装置である。今までは二次電池の正極材前駆体製造向けに販売を行ってきたが、他の微粒子材料に対象を広げ販促活動を進めており、昨年、電子部品材料である「四酸化三マンガ」の製造用として受注した。

本稿では、中国A社向けの案件向けに実施したCRYSTALLEX® Type VFの仕様変更（酸化用のガス吹込み、塩化物水溶液に対する耐食対応）について紹介する。

キーワード：微粒子、リチウムイオン二次電池、電子材料、反応晶析、酸化反応  
Keyword：Fine particle, lithium-ion secondary battery, electronic materials, reaction crystallization, oxidation reaction

## 1. はじめに

二次電池の正極材前駆体に代表される無機系の材料の製造において、最終製品の性能向上のために、小粒径かつ高真球度の粒子の製造が求められている。

CRYSTALLEX® Type VF（以下VF）は、小粒径・高真球度の製品を高効率で生産可能な装置であり、今までは二次電池の正極材前駆体を製造向けに技術開発を進めてきたが、近年では他の微粒子材料に適用対象を広げ活動を進めている。昨年には、電子部品材料である「四酸化三マンガ」の製造用として中国A社向けにCRYSTALLEX® Type VF-200（以下VF-200）を受注した。「四酸化三マンガ」の製造プロセスは、従来の正極材前駆体の製造プロセスとは異なるため、従来のVFから仕様変更を行った。

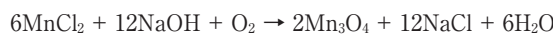
本稿では、VFの特徴と、従来のVF-200からの仕様の変更点について紹介する。

## 2. VFの特徴

図1にVFの概略フローを示す。VFは、リアクター・循環ポンプ・滞留槽・循環配管等から構成される晶析装置である。循環ポンプを用いて系内のスラリーをリアクター内に高速で流入させることにより強力かつ均一な攪拌場を形成し、リアクターに供給される原料を速やかに混合・分散する。その結果、小粒径かつ高真球度の製品を得られるとともに、滞留時間が短い中でも十分な粒子成長が得られ、単位容積あたりの生産性が高いことが特徴である<sup>1)~3)</sup>。そのため、従来の攪拌槽型の晶析装置と比較し、装置サイズ低減による建設コストの削減や、Start-up時間の短縮によるOff-spec品の削減が可能である。

## 3. 実績紹介

昨年、中国のA社から「四酸化三マンガ」製造用としてVF-200を受注した。本案件における原料は塩化マンガ（ $MnCl_2$ ）と水酸化ナトリウム（ $NaOH$ ）、そして酸素（ $O_2$ ）である。まず、塩化マンガと水酸化ナトリウムの中和反応により水酸化マンガ（ $Mn(OH)_2$ ）を生成し、生成した水酸化マンガを酸素で酸化することで、四酸化三マンガ（ $Mn_3O_4$ ）を得る。



本案件では、ガスの吹込み、塩化物イオンを含む水溶液対応として、従来のVF-200から下記①、②について改造を行い、さらに装置の改良として下記③を行った。

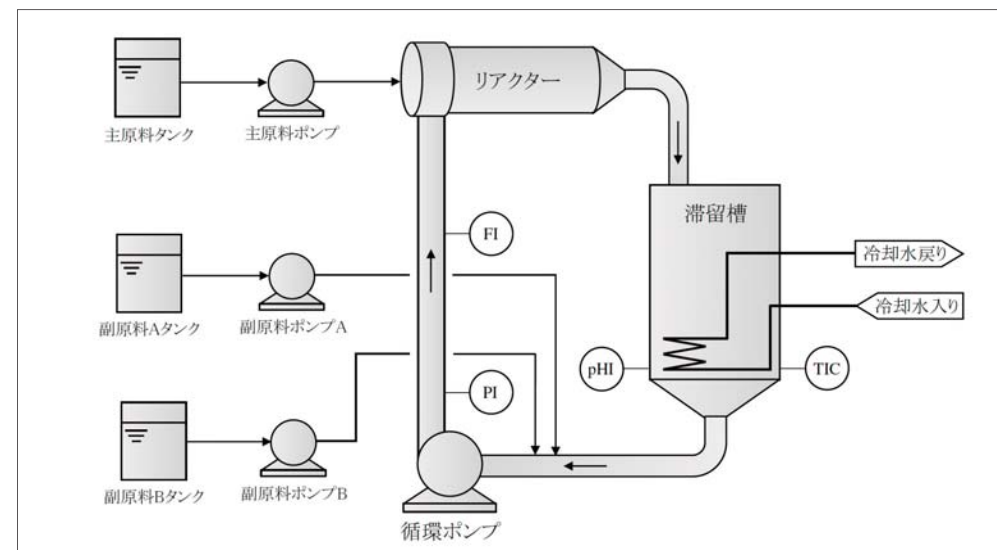


図1 CRYSTALLEX® Type VFの概略フロー  
Fig.1 Process Flow of CRYSTALLEX Type VF

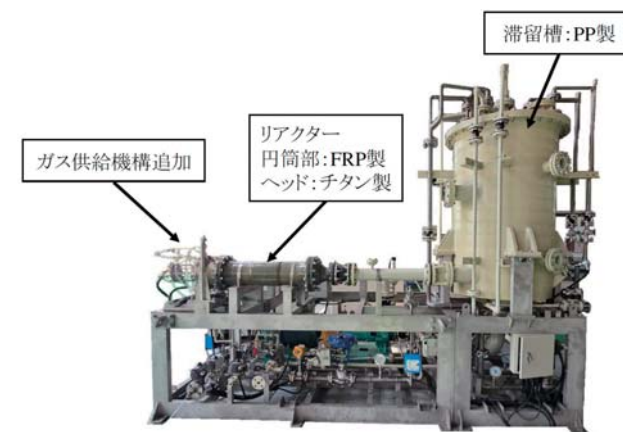


図2 中国A社向けのCRYSTALLEX® Type VF-200実機写真  
Fig.2 Photo of actual CRYSTALLEX Type VF-200 for company A in China

- ① ガス供給機構の追加  
従来のVF-200ではリアクター部に供給する原料は液体原料のみであり、液-液反応のみを対象としていたが、酸素源としてエアを供給する機構を設けたことにより気-液反応も対応可能な仕様とした。
- ② 材質変更  
本案件では塩化物イオンを含む原料が使用されるため、耐食仕

様としてリアクター部をチタン、FRP製、滞留槽や循環配管をPP製（滞留槽内の冷却コイルはチタン製）とした。従来のSUS製では対応できなかった酸性のプロセスや、塩化物イオンを含むプロセスにも適応可能な仕様とした。

- ③ 構造変更（リアクターの高さ低減）  
従来のVF-200は、リアクターから滞留槽への戻り配管が、滞留槽の天板に接続されていたため、リアクター位置が高くなり、リアクターのメンテナンス用ステージが必要であった。本案件においては、リアクター高さ及び配管接続位置の見直しにより、従来型で設置していたメンテステージが不要となり、メンテナンス性が向上した。

## 4. まとめ

CRYSTALLEX® Type VFは、従来の攪拌槽型の晶析装置と比較して、小粒径かつ高真球度の製品を得ることに優れており、昨今の微粒子需要の高まりにおいて、活躍が期待される装置である。本稿で紹介した改良を加えたことにより、さらなる適用拡大につなげたい。

本稿で紹介した案件は、CRYSTALLEX® Type VFにおける初の中国での受注案件である。グループ会社である「月島プライミクス上海」には、本案件に関わるテスト対応に始まり、客先との商談、調達・装置の組立てに至るまで、多大なるご尽力を賜り、深く感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 銅谷陽：渦粒式晶析装置を用いた電池材料生産技術の開発，月島技報 2018 No.21, p.6-13 (2018)
- 2) 神戸達哉：渦粒式微粒子晶析装置の新展開，月島技報 2020 No.23, p.30-32 (2020)
- 3) 木村敏行：CRYSTALLEX® Type VF、BoCross®フィルタ、インクラインドディスクドライヤによる微粒子製造技術，月島技報 2024 No.27, p.36-39 (2024)



# 消石灰スラリーによる 下水汚泥流動焼却炉の焼結対策

Sintering Prevention Measures for Sewage Sludge Fluidized Bed Incinerators  
Using Hydrated Lime Slurry



富田 遼 TOMITA Ryo

月島JFEアクアソリューション株式会社  
下水計画部ソリューション1グループ

## Abstract

近年、高度処理等の導入により下水汚泥中のリン濃度が上昇し、流動焼却設備の排ガスダクトや空気予熱器において焼結による付着・閉塞などのトラブルが発生する要因となっている。焼結は、脱水汚泥中のリン酸化合物が炉内で低融点物質を生成することで発生すると考えられているが、リン酸は十分な塩基類（鉄、アルミニウム、カルシウム等）が存在すると高融点のリン酸塩を生成することが知られている。本稿では、過給式流動炉の実機において脱水汚泥と消石灰を混合し焼却した際の焼結防止効果を、焼却灰の蛍光X線分析（XRF）、X線回折（XRD）、示差熱分析結果により検証した結果を報告する。

キーワード：下水汚泥、流動焼却炉、焼結、消石灰

Keyword：Sewage sludge, Fluidized bed incinerator, Sintering, Hydrated lime

## 1. はじめに

近年、高度処理等の導入により汚泥中のリン濃度が上昇しており、流動焼却設備の排ガスダクトや空気予熱器において焼結による付着・閉塞などのトラブルが発生する要因となっている（図1）。今回試験を実施した下水処理場の焼却炉においても、特に冬場に焼結が多く発生し、安定的な運転が継続できない状況となっている。焼結は、脱水汚泥中のリン酸化合物が炉内で低融点物質を生成することで発生するものと考えられているが、リン酸は十分な塩基類が存在すると高融点のリン酸塩を生成することが知られている。塩基類としては鉄、カルシウム等があり、焼結対策として鉄系ではポリ硫酸第二鉄（以下ポリ鉄）が使用されることが多いが、ポリ鉄に含有される硫黄分により、後段機器の低温腐食の可能性があること、脱硫用の苛性ソーダの使用量が増加するといった懸念点がある。本稿では、後段機器への腐食の影響がないカルシウム系の消石灰に着目し、過給式流動炉の実機において脱水汚泥と消石灰を混合し焼却した際の焼結防止効果を報告する。

## 2. 実証試験方法

### 2.1 実証試験場所・時期

某下水処理場における過給式流動焼却炉の実機を対象として、焼結の発生しやすい冬場である12月に実証試験を行った。

### 2.2 実証試験方法

#### (1) 消石灰注入箇所

消石灰はスラリー状で脱水汚泥供給ポンプのフィーダ部へ注入し、脱水汚泥と混合して焼却炉へ供給した（図2）。

#### (2) 消石灰注入量

当社グループが焼結発生の指標としている「焼結評価値（式1）」を基に、消石灰注入後の脱水汚泥の焼結評価値が1.1～1.4程度

となるように消石灰を注入した。一般的に、焼結評価値が1.0以下であると焼結リスクが高くなる傾向にある<sup>1)</sup>。

#### (3) 評価方法

消石灰を注入した脱水汚泥を焼却して発生した焼却灰と、消石灰を注入していない焼却灰に対して、蛍光X線分析（以下XRF）、X線回折（以下XRD）、示差熱分析を行い、結果を比較した。それぞれの分析の目的を以下に示す。

①XRF：分析結果より焼結評価値を算出する。

②XRD：消石灰注入により消石灰中のカルシウムがリンと結合し、リン酸カルシウムの結晶となっていることを確認する。

③示差熱分析：消石灰注入により吸熱反応（溶融反応）が高温側にシフトしていることを確認する。

$$\text{焼結評価値[一]} = \frac{\text{焼却灰に含有する塩基類の総価数}}{\text{有されるP(リン酸としての)価数}} = \frac{\text{Na} + \text{K} + \text{Ca} \times 2 + \text{Mg} \times 2 + \text{Al} \times 3 + \text{Fe} \times 3 \text{ [mol/Ash-g]}}{\text{P} \times 3 \text{ [mol/Ash-g]}} \dots \text{式1}$$

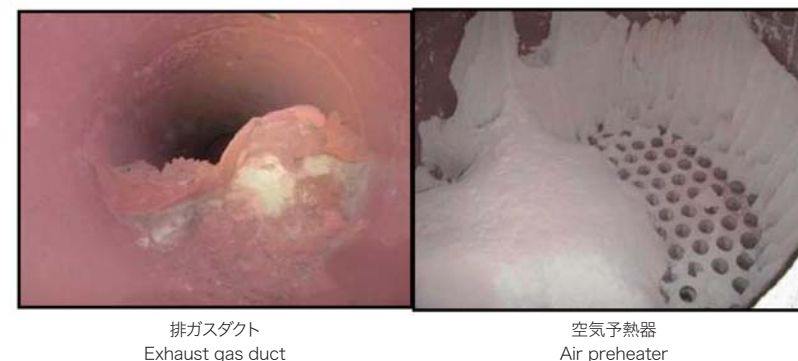


図1 焼結による堆積物  
Fig.1 Sintered deposit

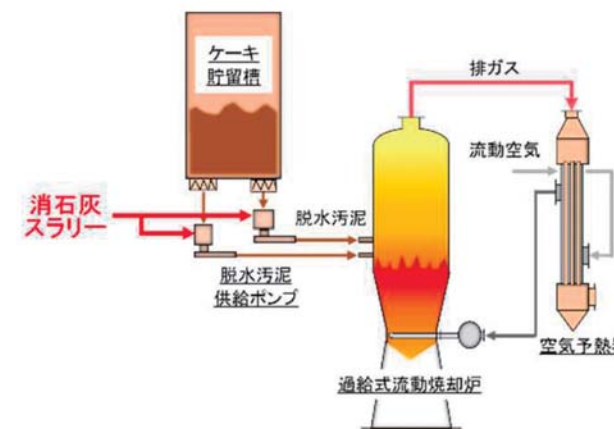


図2 消石灰注入箇所  
Fig.2 Hydrated lime feed point

3. 試験結果

3.1 XRF分析結果

表1にXRF分析結果およびXRF分析結果より算出した焼結評価値をまとめる。

消石灰注入によりカルシウム濃度が増加し、相対的にリン濃度が減少しており、焼結評価値が確実に上昇していることを確認した。12/7～9の脱水汚泥は焼結評価値が1.0以下であり、焼結リスクの高い汚泥であった。なお、当該下水処理場は汚泥発生量に応じて一炉運転と二炉運転を行っているが、一炉運転の際には余剰汚泥比率が高くなり、リン濃度が高まる傾向がある。表1においては、10/31および12/7～9が一炉運転を行っており、リン濃度が高くなっていた。

3.2 XRD分析結果

図3に一炉運転でリン濃度が高かった10/31および12/7～9の焼却

灰XRD分析結果を示す。消石灰を注入していない10/31の焼却灰と比較をすると、消石灰注入時の焼却灰はいずれもカルシウムとリンの化合物である「Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>（リン酸カルシウム化合物）」のピークが強くなっていることが確認できた。消石灰注入により、融点の高いリン酸カルシウム化合物が生成されており、焼結が発生しにくい焼却灰となっていることが確認できた。

3.3 示差熱分析結果

図4に一炉運転でリン濃度が高かった10/31および12/7～9の焼却灰示差熱分析結果を示す。消石灰を注入していない10/31の焼却灰については、790～800℃および890～900℃を開始温度とする二つの吸熱反応（＝灰の熔融）があることが確認できた。これに対して、消石灰を注入した焼却灰では吸熱ピークの消失および吸熱ピーク面積の減少が確認できた。消石灰注入により900℃までの領域で吸熱反応が起きず、同様に焼結が発生しにくいことを確認した。

3.4 運転データ

焼結発生時には以下のプロセスデータの挙動が変化し、焼結傾向を把握することが可能である。

- ①砂層圧損：砂層部に焼結物が付着・堆積し砂層圧損が顕著に上昇する。
- ②空気予熱器温度：空気予熱器に焼結物が付着・堆積し空気予熱器の熱交換効率が低下し、排ガス出口温度と流動空気出口温度の温度差が顕著に減少する。

実際に焼結が発生した際の運転データ（図5.7）と、消石灰注入時の運転データ（図6.8）を比較し、消石灰注入により焼結が発生していなかったことを確認する。

- (1) 砂層圧損  
焼結が発生していた際には約12時間の間に1kPa程度砂層圧損が上昇していたが（図5）、消石灰注入時には砂層圧損の上昇がなく安定運転を継続していたことを確認した（図6）。
- (2) 空気予熱器温度  
焼結が発生していた際には熱交換効率が低下するため、排ガス

出口温度（放熱側）が上昇し、流動空気出口温度（受熱側）が下降して、温度差が減少していたが（図7）、消石灰注入時は温度変動がなく安定運転を継続していたことを確認した（図8）。

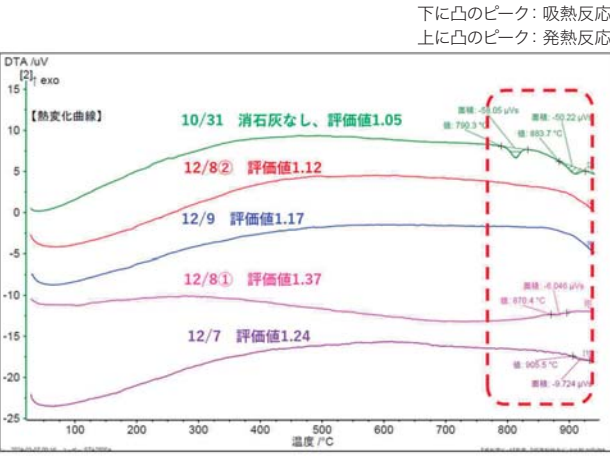


図4 示差熱分析結果  
Fig.4 Differential Thermal Analysis results

表1 XRF分析結果および焼結評価値 Table1 XRF analysis results and sintering assessment values											
消石灰注入	項目 ※1	単位	日 付								
			10/31	12/4	12/5	12/6	12/7	12/8①	12/8②	12/9	12/11
なし	CaO	%-Ash	8.2	8.7	9.1	10.1	8.6	8.6	8.6	8.5	10.7
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%-Ash	39.6	37.3	39.3	39.2	44.5	42.1	42.1	40.4	39.2
あり	CaO	%-Ash	—	—	16.1	21.4	23.3	27.9	17.8	14.7	15.5
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%-Ash	—	—	36.3	32.3	37.0	35.1	38.6	37.0	36.5
なし	焼結評価値	[—]	1.05	1.09	1.04	1.04	0.89	0.94	0.94	1.00	1.05
あり			—	—	1.22	1.41	1.24	1.37	1.12	1.17	1.19
	消石灰注入率 ※2	%	—	—	1.2	1.9	4.2	4.5	2.0	1.2	0.8

※1 —XRF分析結果：カルシウム、リンのみを抜粋  
※2 —消石灰注入率[%]：消石灰DS量÷脱水汚泥中DS量×100

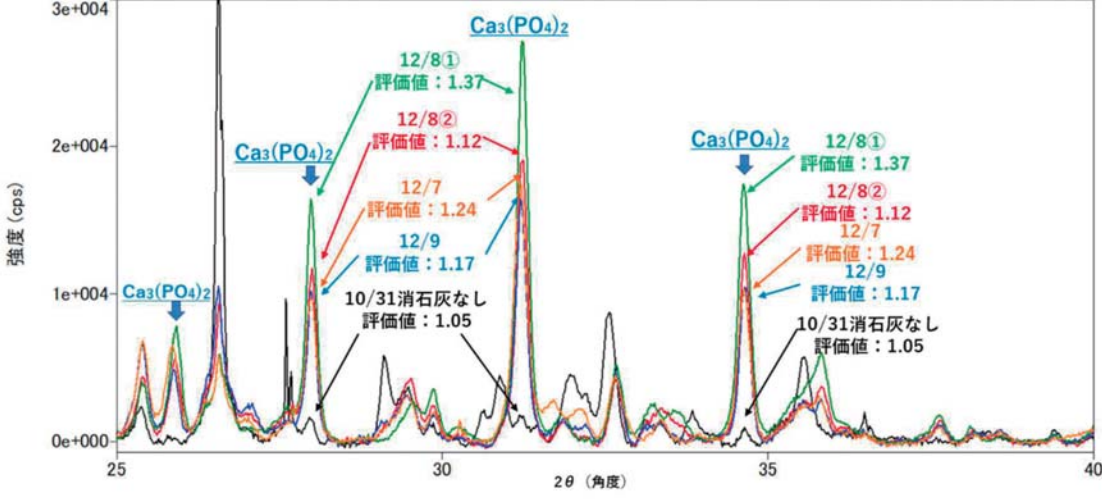


図3 XRD分析結果  
Fig.3 XRD analysis results

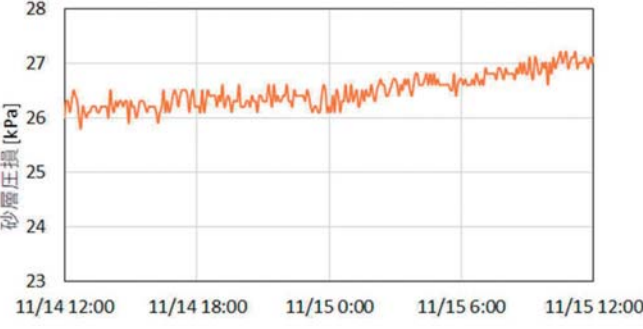


図5 焼結発生時の砂層圧損  
Fig.5 Sand bed pressure loss under sintering condition

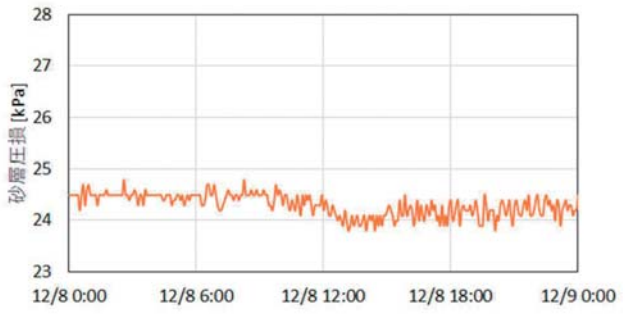


図6 消石灰注入時の砂層圧損  
Fig.6 Sand bed pressure loss during hydrated lime injection

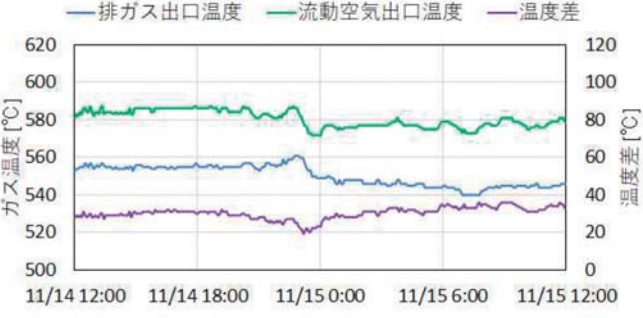


図7 焼結発生時の空気予熱器温度  
Fig.7 Air preheater temperatures under sintering condition

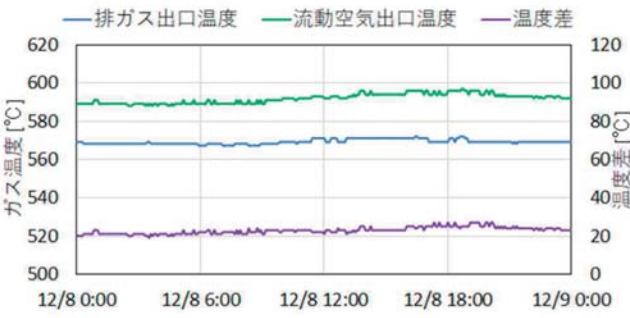


図8 消石灰注入時の空気予熱器温度  
Fig.8 Air preheater temperatures during hydrated lime injection









## 4. 他処理場における長期運転結果

今回試験を実施した処理場とは別の処理場に納入した過給式流動炉において、同様に消石灰注入運転を行っている。当処理場における長期的な消石灰注入運転による焼却炉内への焼結物の付着状況を、注入前後の開放点検時の写真で比較する（表2）。

消石灰注入前は炉壁、炉出口ダクト、空気予熱器管板部等に白色の焼結物が付着および堆積していることが確認されたが、消石灰注入後は付着および堆積は無く、焼結の発生は確認されなかった。

## 5. まとめ

- ・過給式流動焼却炉の実機での試験を通して、消石灰の注入が流動焼却炉における焼結対策として効果的であることを確認した。
- ・XRD 分析結果より、融点の高いリン酸カルシウム化合物が生成され焼結が発生しにくい焼却灰となっていることを確認した。
- ・示差熱分析結果より、900℃までの領域で吸熱反応が起きず、焼結が発生しにくい焼却灰となっていることを確認した。
- ・焼却灰の性状評価だけでなく、運転データからも焼結が発生していないことを確認した。

表2 消石灰注入前後の焼結物付着状況 Table2 Sintered deposits before and after hydrated lime injection		
	消石灰注入前	消石灰注入後
フリーボード 中部～上部		
炉出口ダクト		
空気予熱器 管板部		

※いずれの写真も内部清掃後6か月程度運転後のもの

### 参考文献

- 1) 上野勇, 秦野正人, 小林俊樹: 流動焼却設備における灰の焼結事例と焼結防止対策に関する報告, 第51回下水道研究発表会講演集, pp.994-996 (2014)

# 小山水処理センターにおける下水汚泥減量化・エネルギー利用設備の導入実績

Introduction Record to the Oyama Sewage Treatment Plant for Sewage Sludge Reduction and Energy Utilizing System



末永 卓哉 SUENAGA Takuya

月島 JFE アクアソリューション株式会社  
下水事業部水・汚泥設計部下水エンジン3グループ



朱 之璽 SHU Noji

月島 JFE アクアソリューション株式会社  
下水事業部熱プラント設計部熱エンジン1グループ

## Abstract

当社は、2024年3月に小山水処理センターで汚泥の減量化とエネルギー利用を図る濃縮・消化・脱水乾燥設備・消化ガス発電設備の建設工事を完了した。本施設は、2024年4月から運用が開始され、製造した乾燥汚泥は外部利用先で利活用される。また、生成した消化ガスは発電を行い、FIT制度を利用して電力会社に売電している。

キーワード：小山市、下水汚泥減量化、エネルギー利用、汚泥濃縮・消化・脱水・乾燥設備、消化ガス発電

Keyword：Oyama City, Sewage sludge reduction, Energy utilizing, Sludge concentrate-digestion-dewatering and drying system, Digestion gas power generation

## 1. はじめに

小山市では、消化施設の能力を増強し消化ガス発生量を最大化するとともに、消化ガス発電施設と固形燃料化施設の新設などを含めた、汚泥処理施設全体を事業範囲とするPFI事業について、2019年度から基本計画を開始した。2020年度から2021年度にかけてPFI事業者の選定手続きを行い、2021年7月30日に当社を代表とするグループが落札した。同年8月18日に基本協定を締結し、11月18日には当社グループが設立したSPC（特別目的会社）である小山エナジーサイクル株式会社が事業契約を締結した。

本施設は、2024年3月に完工、4月より運用を開始しており、本稿ではその設備概要について紹介する。

## 2. 設備概要と性能確認試験結果

### 2.1 設備概要

本設備は、図1と表1に示す機械濃縮設備、汚泥消化設備、固形燃料化設備、及び消化ガス発電設備から構成されており、以下の技術的な特徴を有する。

(技術的特徴)

- ・低動力かつシンプルな構造のベルト型濃縮機を導入し、混合汚泥を高濃度に濃縮することで、消化設備を小型化した。
- ・日本下水道事業団の技術評価を受けた鋼板製消化タンクを採用し、工期を短縮して建設費を削減した。
- ・固形燃料化設備は脱水乾燥システムを採用し、機内二液調質型

- 遠心脱水機から排出される低付着性かつ細粒状の脱水汚泥を円環式気流乾燥機へ連続的に直接投入することで、従来の乾燥設備に比べて省スペース・低コスト化を実現した。
- ・消化ガスコージェネレーションシステムを採用し、消化ガス発電設備の廃熱を回収して消化タンクの加温に活用した。

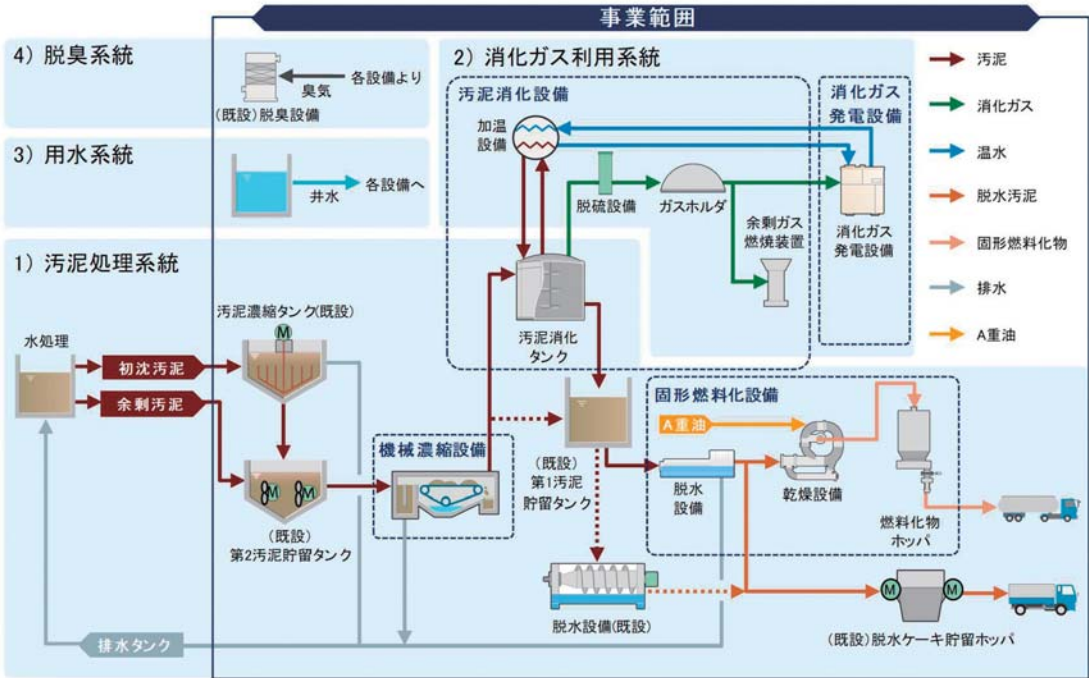


図1 汚泥処理フロー  
Fig.1 Flow of the sludge treatment

表1 設備概要  
Table1 Overview of facilities

設備名称	設備概要	主要機器	事業方式
機械濃縮設備	混合汚泥を一定、高濃度に濃縮し消化タンクへ供給する設備	ベルト型濃縮機 容量:770m <sup>3</sup> /日×1基 運転時間:24h/日	※1 PFI-BTO方式
汚泥消化設備	濃縮汚泥を中温消化する設備	下部コーン型鋼板製消化タンク 容量:2,600m <sup>3</sup> ×1槽 運転時間:24h/日	
固形燃料化設備	消化汚泥を脱水した後、熱風で直接乾燥を行い、乾燥汚泥は排ガスとともに貯留設備へ輸送する設備	脱水乾燥システム ・機内二液調質型遠心脱水機 ・円乾式気流乾燥機 容量:174m <sup>3</sup> /日×1系列 運転時間:24h/日	
消化ガス発電設備	消化ガスを燃料としてガスエンジンで発電し、廃熱を回収して消化槽の加温に再利用する設備	マイクロコージェネレーションシステム 容量:25kW×8台 運転時間:24h/日	

※1 民間事業者が公共施設を建設(Build)した後、施設完成時に所有権を国や地方公共団体に移転(Transfer)し、その後、民間事業者がその施設を維持・管理・運営(Operate)するPFI事業の一種である。

2.2 性能確認試験結果

設備試運転は、2023年12月初旬より開始し、機械濃縮設備、消化設備、固形燃料化設備および消化ガス発電設備の順に立上操作を行った。2024年3月には、性能確認試験を行い次の結果を得た。

- ・機械濃縮設備は、3日間24時間連続運転で約5%の高濃度汚泥を薬注率0.3%以下、固形物回収率95%以上で安定的に消化設備に供給できることを確認した。
- ・消化設備は、消化ガス発生量が550 Nm<sup>3</sup>/ton-投入 VS以上であることを確認した。
- ・固形燃料化設備は、3日間24時間連続運転の結果、燃料化物製造量平均3.12t/日、乾燥汚泥含水率約15%で安定的に製造できることを確認した。表2に、試運転期間中の乾燥汚泥の性状分析結果を示す。下水汚泥固形燃料JIS規格Biosolids Fuel (以下BSF) ※2を満たす燃料を製造できた。また、乾燥汚泥の形状は粒状(50%平均粒径:約738μm)でジェットバック車による燃料化物の有効利用先への運搬が可能であることを確認した。
- ※2 JIS規格による下水汚泥固形燃料の種類は、総発熱量によってBSF-15とBSFに区分される。
- ・消化ガス発電設備は、最大発電総出力200kWを確認し、発電設備全体の発電効率が平均32.1%、廃熱回収効率が平均53.3%を達成したことを確認した。

表2 乾燥汚泥性状分析結果  
Table2 Analysis results of dried sludge

項目	単位	測定結果
可燃分	dry%	84.2
灰分	dry%	15.8
高位発熱量	MJ/kg	19.7

参考文献

1) 下水道協会誌, No.753, Vol.62, p66 (2025/7), 小山市における下水汚泥有効利用の取組について:小山市下水道施設係長

3. 導入効果

小山市に対して、本設備の導入により2024年度に以下の効果が得られた<sup>1)</sup>。

- ・前年度に約1億6,000万円の予算措置をしていた下水汚泥脱水ケーキの産廃処分費用を削減できた。
- ・固定価格買取制度(FIT)を活用した売電収入の還元と固形燃料の売却を合わせて約6,300万円収益を確保した。
- ・製造した固形燃料化物は全量を石炭の代替燃料としてセメント工場等で利用し、セメント工場における化石燃料の使用量を削減した。また消化ガス発電もほぼ計画通りであり、温室効果ガスの削減に貢献した。

4. おわりに

昨今、脱炭素社会及び循環型社会に貢献するため、下水汚泥が持つエネルギーの有効利用が求められている。建設投資の面を踏まえると、中小規模処理場に対する燃料化設備の導入が難しい場合が多いが、今回適用した当社の脱水乾燥システムは従来よりも低コストに導入可能であった。当社技術のさらなる向上と技術革新に努め、下水汚泥の燃料化技術の普及拡大を図ることで脱炭素社会及び循環型社会の構築に貢献していく所存である。



# いわき市下水汚泥等利活用事業

Iwaki City Sewage and Various Sludge Effective Utilization Project



鈴木 信太郎 SUZUKI Shintaro  
月島 JFE アクアソリューション株式会社  
水・汚泥設計部下水エンジ1グループ



町田 高穂 MACHIDA Takao  
月島 JFE アクアソリューション株式会社  
熱プラント設計部熱エンジ4グループ

## Abstract

月島機械特別企業グループは、2025年1月にいわき市下水汚泥等利活用事業（以下本事業）の建設工事を完了した。本事業は、いわき市で発生する下水汚泥、浄化槽汚泥等を中部浄化センターにおいて嫌気性消化し、固形燃料化物としてサーマルリサイクルするものである。建設工事は当社を含む四社で協同企業体（JV）を構成し、維持管理運営は、当社を含む三社で出資して設立する特別目的会社（SPC）にて、2025年2月より20年間実施する。

キーワード：いわき市 汚泥濃縮・消化・脱水・乾燥設備 焼却 消化ガス発電  
Keyword：Iwaki City, Sludge concentration-digestion-dewatering and drying system, Incineration, Digestion gas power generation

## 1. はじめに

本事業は、福島県いわき市の三箇所の下水処理場から発生する下水汚泥・浄化槽汚泥等を集約処理し、固形燃料化物を製造、有効利用するものである。約4年の設計、建設、試運転期間を経て2025年2月より供用開始した。本稿では、導入した設備の概要と運転状況について紹介する。

## 2. プロセス概要

図1に本事業における処理プロセスを、図2に設備全景を示す。



図2 事業全景  
Fig.2 Project overview

### 中部浄化センター プロセスフロー

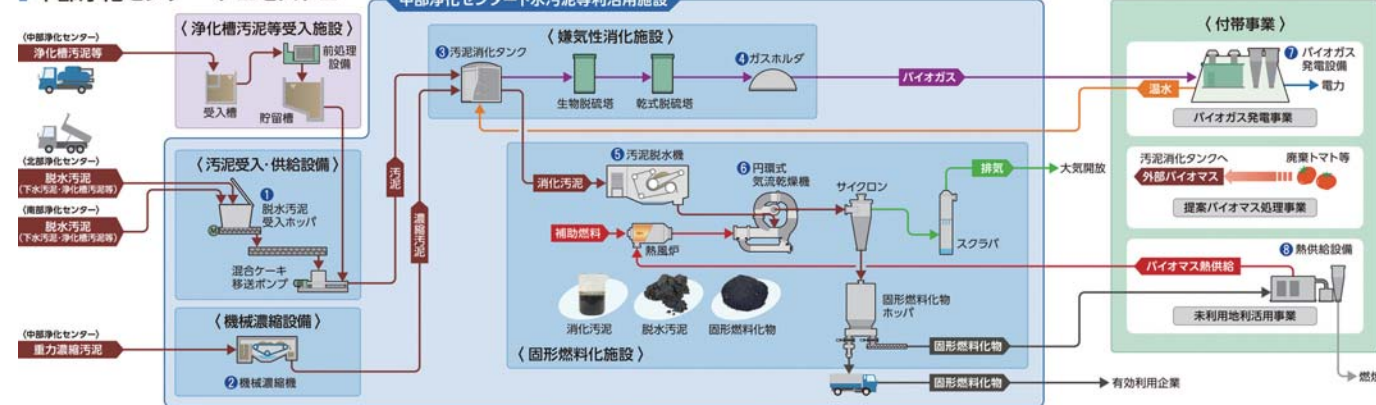


図1 事業概要  
Fig.1 Project outline

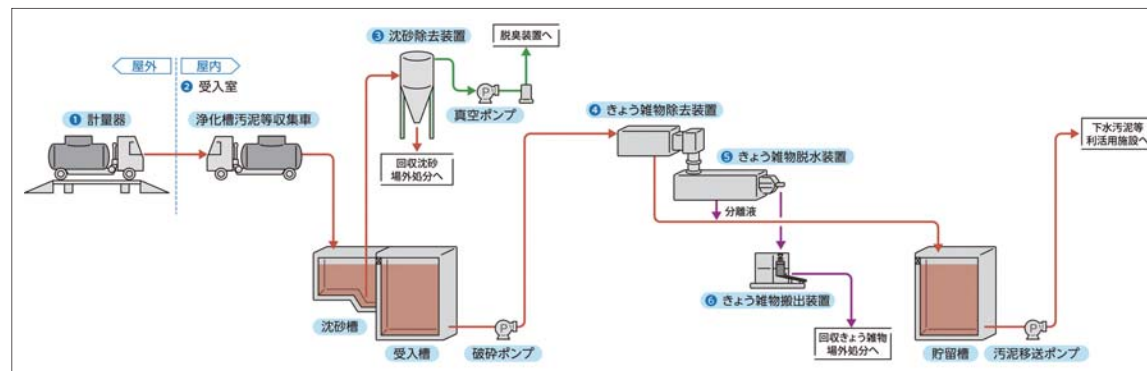


図3 浄化槽汚泥等受入施設フローシート  
Fig.3 Septic tank sludge receiving facility flowsheet

## 3. 設備の特徴

### 3.1 浄化槽汚泥等受入施設(図3)

本設備は、市内各所より回収した浄化槽汚泥やし尿など（以下浄化槽汚泥等）を受け入れて夾雑物を除去したのち、混合ケーキ移送ポンプを経由して消化タンクへ投入するための設備である。

浄化槽汚泥等を平均179kL/日受け入れ、沈砂は沈砂槽にて分離後、洗浄して回収し、場外処分とする。また、し渣は夾雑物除去装置にて回収し、夾雑物脱水装置を経て夾雑物搬出装置にて袋詰めされ、場外処分とする。沈砂・し渣を除去した浄化槽汚泥等は、受入供給設備に移送され、混合ケーキ移送ポンプ内で脱水汚泥と混ざりながら消化タンクへ供給される。

### 3.2 汚泥受入・供給設備

本設備は、市内の他の下水処理場より受け入れた脱水汚泥を、浄化槽汚泥等とともに消化タンクへ投入するための設備である。

受け入れた脱水汚泥は、ケーキ受入ホッパにて一時貯留したのち、



図4 混合ケーキ移送ポンプ  
Fig.4 Solid/liquid mixed sludge pump

混合ケーキ移送ポンプ(図4)によって、一定の割合で浄化槽汚泥等と混ぜ合わせながら消化タンクへ供給する。

混合ケーキ移送ポンプに直接脱水汚泥を供給することにより、従来



プロセスで必要だった脱水汚泥の再溶解設備が不要になるため、プロセスの簡略化による省スペース化を実現するとともに、維持管理の容易な設備とした。

### 3.3 機械濃縮設備

本設備は、中部浄化センターで発生する混合生汚泥（重力濃縮）を機械濃縮機で4.5%程度まで濃縮し、消化タンクへ投入するための設備である。受入量は平均525m<sup>3</sup>/日であり、既設重力濃縮槽からの引抜きが責任分界点となっている。

機械濃縮機は軽量の樹脂ベルトを回転させるだけのシンプルな構造のベルト式汚泥濃縮機（図5）を採用し、低動力による省電力化を実現するとともに維持管理の容易な設備とした。

### 3.4 嫌気性消化施設

本設備は、浄化槽汚泥等受入施設にて沈砂・し渣を除去した浄化槽汚泥等と、受入供給設備にて受け入れた脱水汚泥及び機械濃縮機で濃縮した混合生汚泥を汚泥消化タンクに投入し、汚泥消化タ

ンク攪拌機により汚泥の混合を行い、汚泥温度の均一化、消化の促進、汚泥沈降の防止を行う設備である。

汚泥消化タンクはコンクリート製の消化タンクに比べて初期投資額や設置工事期間の削減が可能な鋼板製消化タンク（図6）を採用した。また、大型のインペラを低速で回転させることで高い攪拌能力と優れた低動力性を両立したインペラ式攪拌機を採用した。さらに、汚泥消化タンクにパッファ機能を持たせることにより消化汚泥貯留槽を不要とし、省スペース化も実現した。

汚泥消化タンクから発生したバイオガスは生物脱硫装置、乾式脱硫装置にて脱硫後、ガスホルダにて一時貯留したのち、付帯事業のバイオガス発電設備へ供給する。発電の際に発生する熱（廃熱）を温水で回収し、汚泥消化タンクの間接加温に利用している。また、固形燃料化施設で発生した廃温水からの熱回収も可能な設備となっている。

ガスホルダは初期投資額や設置工事期間の短縮が可能であり、維持管理性にも優れているメンブレン式ガスホルダ（図7）を採用した。



図5 ベルト式汚泥濃縮機  
Fig.5 Belt type sludge thickener



図7 メンブレン式ガスホルダ  
Fig.7 Membrane type gas holder



図9 円環式気流乾燥機  
Fig.9 Circular airflow dryer



図6 鋼板製消化タンク  
Fig.6 Steel digestion tank



図8 ダウンサイジング型ベルトプレス  
Fig.8 Downsizing type belt press



図10 バイオガス発電設備  
Fig.10 Biogas power generation facility



図11 熱供給設備  
Fig.11 Thermal recycle facility

### 3.5 固形燃料化施設

#### 3.5.1 脱水設備

本設備は、消化タンクにて固形物濃度約2.6%に消化された汚泥を平均319.4 m<sup>3</sup>/日脱水し、含水率79%程度の脱水汚泥を後段の乾燥工程へ供給する設備である。

脱水機は、ベルトプレス脱水機に濃縮部と高濃度対応型フィード装置を組み合わせることで、脱水性能を維持しつつ省スペース化を実現できるダウンサイジング型ベルトプレス脱水機（図8）を採用した。

#### 3.5.2 乾燥設備

本設備は、2系列の気流乾燥設備で含水率約40%の固形燃料化物を6～11t-DS/日製造している。円環式気流乾燥機（図9）に供給される含水率79%程度の脱水汚泥は、350～450℃の熱風とともに円環内を循環する間に乾燥が進み粒子径が小さくなり、乾燥機出口排ガスに同伴されてサイクロンで固形燃料化物として回収している。乾燥に必要な熱風の熱量の80%以上は後述する未用地利活用事業より供給される廃熱で賄っており、事業全体として温室効果ガス排出を抑制している。

### 3.6 付帯事業

#### 3.6.1 バイオガス発電事業（図10）

当社を含む三社で出資し設立した特別目的会社（SPC）は、嫌気性消化施設で発生したバイオガスをいわき市より買い取り、民設民営のFIT事業において発電し電力会社へ売電している。350kW級の発電機を3台設置しており、現状約4,700Nm<sup>3</sup>/日のバイオガスで約10,000kWh/日発電している。また、2025年10月より、別途事業により廃トマトスラリーの消化槽受入も予定しており、発電量増加に寄与する見込みである。

なお、発電に伴い発生する温水を嫌気性消化施設の加温に使用しており、消化タンクに必要な熱量全量を発電の廃熱で賄うことが可能である。

#### 3.6.2 未用地利活用事業（熱供給設備）（図11）

本設備は、中部浄化センター内の未利用地に、固形燃料化物をサーマルリサイクルするためのバイオマスバーナを建設した。固形燃料化物をSPCがいわき市より買い取り、その燃焼熱を固形燃料化施設に供給している。固形燃料化物製造に必要な熱量の80%以上をバイオマスバーナからの供給熱で賄っている。

## 4. おわりに

多岐にわたる受入汚泥を嫌気性消化タンクで包括処理して固形燃料化物へと変身させる基幹事業と、消化ガスや固形燃料化物を有効利用する付帯事業、ともに、これから20年間の安定稼働に向けて、事業者一丸となって取り組んでいく所存である。



# 水噴霧解析編

## 1. はじめに

プラント設備において、排ガス処理、排ガスの過熱防止、装置保護・安定運転等の様々な目的で、水噴霧（以下スプレー）によるガス冷却が重要な役割を果たしている。そのため、設計時に噴霧液滴の挙動を把握し、ガス冷却の効果を確認することが重要となる。しかし噴霧液滴の挙動は、粒径分布、噴霧タイプ、噴霧位置、初速、噴霧方向、噴霧液滴周囲の温度及び流体の流れ等多くの要素により決まるため、詳細に把握することは容易でない。そこで解析グループでは、スプレーを再現した熱流体解析を行い、噴霧液滴挙動の把握やガス冷却効果の評価を行っている。

本稿では、一般的なプラント設備でのスプレーを用いたガス冷却塔を対象とし、その設計時の課題を解決するために実施する熱流体解析について、スプレー再現手法、設定項目及び事例を紹介する。

## 2. スプレーによるガス冷却の原理と設計時の課題

スプレーを用いたガス冷却では、微細化した噴霧液滴を高温のガス中に噴霧し、噴霧液滴が蒸発時に気化熱の原理で周囲から熱を奪うことにより、ガスの温度を下げるができる。

プラント設備でのスプレー設計時に、主に以下の課題が挙げられる。

- ・噴霧液滴とガスを十分に接触させる・・・確実にガスを冷却し、目標温度まで低下させる必要があるため。
- ・噴霧液滴の壁面への接触を防止する・・・ダストの付着や腐食を防止するため。

熱流体解析は数值的、視覚的に評価できるため、このような課題の達成状況を確認するための有効な一手段となっている。

表1 分散相モデルの噴霧液滴に関する主な設定項目  
Table1 Main settings of the dispersed phase model for spray droplets

設定項目	内容
噴霧タイプ	充填錐／中空円錐／点／線／面等（噴霧角度を調整可能）
液滴粒子径	粒径分布／単一粒径
液滴粒子の物性値	密度、比熱、飽和水蒸気圧、蒸発潜熱等
液滴粒子蒸発時の気体物性値	密度、比熱、熱伝導率、粘度等
噴霧位置、噴霧方向	座標、方向ベクトル
噴霧時液滴温度	数値
噴霧初速度	数値
噴霧質量流量	数値
壁面接触時	跳ね返り／完全蒸発／通過等
抵抗則	球形／非球形

月島ホールディングス株式会社  
R&Dセンター 解析グループ  
長谷川 豪

## 3. 熱流体解析でのスプレー再現

ここでは、格子法<sup>1)</sup>の汎用熱流体解析ソフトにおいて、スプレー再現モデルとして使用される分散相モデル（噴霧液滴）を説明する。メインのガス流れ（連続相）は格子法（オイラー的手法）により計算されるのに対し、分散相モデルでは噴霧液滴を粒子（分散相）として扱い、個々の粒子の運動は、粒子に作用する力のつり合いにより逐次計算される（ラグランジュ的手法）。また、ガスとの間で伝熱や物質移動も逐次計算される。図1に一連の相互作用を、表1に分散相モデルの噴霧液滴に関する主な設定項目を示す。連続相の主な設定項目については、参考文献1) p.56 図3中の格子法各種解析設定を参照頂きたい。

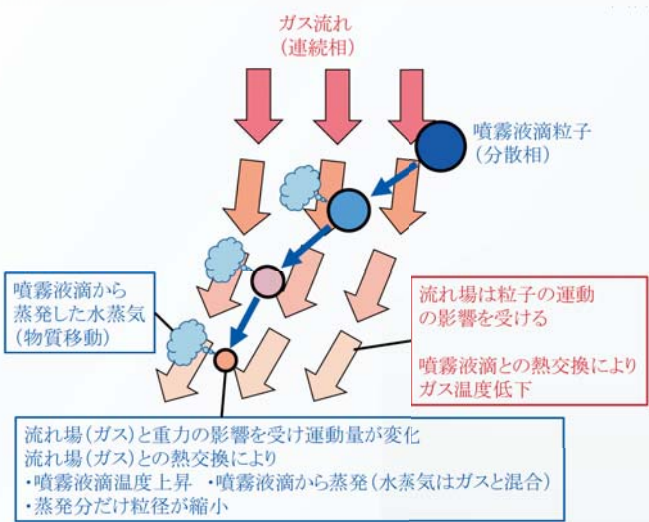


図1 ガス（連続相）と噴霧液滴（分散相）の相互作用  
Fig.1 Interaction between gas (continuous phase) and spray droplets (dispersed phase)

## 4. 熱流体解析事例

解析対象設備を排ガス冷却塔とし、スプレー時の装置内の噴霧液滴粒子軌跡、排ガス温度分布、壁面への噴霧液滴接触分布を可視化した熱流体解析事例を以下に述べる。

### <主な解析条件>

- ・排ガス冷却塔サイズ：直胴部内径約3m×全体高さ約14m
- ・使用ツール：汎用熱流体解析ソフト
- ・入口境界条件：流量約28,000kg/h、温度335℃の排ガスを冷却塔上部入口面から流入。
- ・出口境界条件：圧力約0.13MPaG
- ・壁条件：断熱。噴霧液滴接触時は噴霧液滴のまま跳ね返る。
- ・スプレー計算手法：分散相モデル
- ・スプレー条件：設計仕様より、水を四か所から流量約360kg/(h・本)、噴霧角度60°の充填錐で噴霧。  
CASE1：粒径6～300μm(平均径100μm)  
CASE2：粒径10～150μm(平均径59μm)

### <排ガス冷却塔設計時の課題>

- ①後段機器に熱損傷を生じない温度まで排ガスを冷却する。
- ②噴霧液滴が壁面に当たらずに塔内で完全蒸発（噴霧液滴が壁面に当たるとダスト固着の恐れ）。

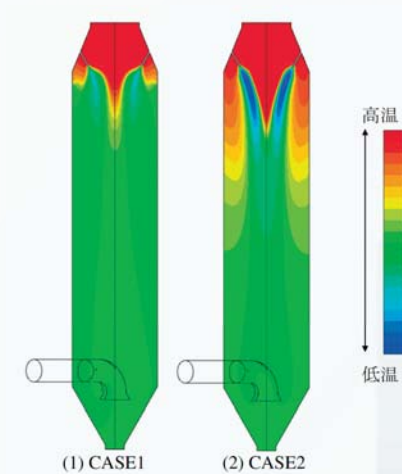


図2 排ガス温度分布  
Fig.2 Temperature contours of exhaust gas

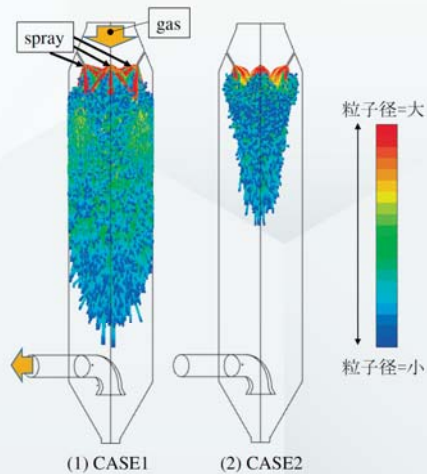


図3 噴霧液滴粒子軌跡  
Fig.3 Spray droplet trajectories

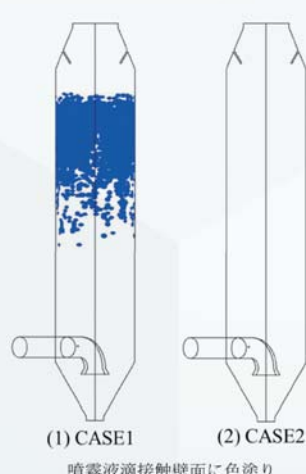


図4 壁面への噴霧液滴接触分布  
Fig.4 Spray droplet contact distribution on the wall

### <解析結果・評価>

図2～4に及び表2に解析結果を示す。

- ・設計課題①：CASE1、CASE2のどちらも達成（図2）。
- ・設計課題②：塔内完全蒸発→CASE1、CASE2のどちらも達成（図3）。  
壁面への接触→CASE1は接触あり、CASE2は接触なし（図4）。

以上より、平均粒径が小さいCASE2が両方の設計課題を満たした。

表2 熱流体解析結果  
Table2 Results of thermal fluid analysis

	達成すべき課題	CASE1	CASE2
設計課題①	排ガスの冷却（図2）	◎	◎
設計課題②	塔内完全蒸発（図3）	◎	◎
	壁面への接触（図4）	×	◎

※◎・・・課題を達成 ×・・・課題を達成しなかった

## 5. おわりに

スプレーによるガス冷却に関する熱流体解析の概要を紹介した。熱流体解析により、実測では難しい装置内の複雑なガスの流れ状態や噴霧液滴挙動の把握ができる。また、条件ごとの結果を数值的、視覚的に比較評価できるため、最適なスプレー条件を求めることも

可能である。

今後はスプレーを伴う熱流体解析の精度をより向上させ、当社グループのエンジニアリングの課題解決に貢献していきたい。

### 参考文献

- 1) 相馬悠佑：解析グループ紹介 Part5 流体解析手法編 ～格子法と粒子法～、TSK技報 No.24, pp.56-57（2021）

