



論文

下水フロック画像を用いた  
機械学習モデルによる  
汚泥とポリマーの攪拌状態の識別



## 目次

6	巻頭言 挑戦で築き上げる未来	月島機械株式会社 執行役員 本間 友基
8	論文 下水フロック画像を用いた機械学習モデルによる汚泥とポリマーの攪拌状態の識別	深澤 淳基
16	研究紹介1 CRYSTALLEX® Type DDの開発	津崎 裕也
21	研究紹介2 高付着性汚泥に適応したIDDの改良	中村 友二
26	研究紹介3 下水からの有機物回収技術に関する基礎的検討	橋本 悠司・高山 祐子
31	研究紹介4 高温アブレシブ摩耗試験機の開発と各種SCH材の高温摩耗特性	伊藤 久敬・清水 一道・楠本 賢太
36	技術・製品紹介1 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	木村 敏之
40	技術・製品紹介2 MAPにより脱水ろ液から効率的にリンを回収する技術に関する実証研究	青木 順・斉藤 功
43	技術・製品紹介3 CIP/SIP対応真空乳化装置クリアスタア®製品紹介	春藤 晃人
46	技術・製品紹介4 高圧噴流ノズルを用いた汚泥減容化処理システム	松島 泰生
50	技術・製品紹介5 有機凝結剤を用いた浄水汚泥の低減に関する実証研究	尾関 朝彦
56	技術・製品紹介6 サイクロンミル実用化、粉碎技術	石川 元・吉岡 里美
62	実績紹介1 船橋市高瀬下水処理場消化ガス発電事業	山本 浩己・中嶋 昭博
66	実績紹介2 綾瀬終末処理場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	古屋 一寿・大河原 隆生
70	実績紹介3 葛西水再生センター焼却2号炉	山本 隆文
72	実績紹介4 サイクロンミル	石川 元
76	解析グループ紹介 Part8 熱力学的平衡解析編	川端 友寛
79	分析グループ紹介 電池材料(リチウムイオン二次電池正極材)に関わる分析事例	日良 聡
84	月島茶房 デジタルツインの時代	今井 淳一
86	月島今昔物語 下水汚泥の炭化	上田 厚志
90	会社概要・編集後記	

表紙の写真



オオワシ(絶滅危惧種)

## CONTENTS

6	Foreword	Tsukishima Kikai Co., Ltd. Executive Officer HONMA Tomoki
8	Paper Identification of the Degree of Sludge/Polymer Mixing by the Machine Learning Model Using Floc Images	FUKASAWA Atsuki
16	Introduction of Research 1 Development of CRYSTALLEX Type DD	TSUZAKI Hiroya
21	Introduction of Research 2 Improvement of IDD Applied to Highly Adhesive Sludge	NAKAMURA Yuji
26	Introduction of Research 3 Fundamental Study of the Technology for Recovery of Organic Matter from Wastewater	HASHIMOTO Yuji / TAKAYAMA Yuko
31	Introduction of Research 4 Development of a High-Temperature Abrasive Wear Testing Machine and High-Temperature Wear Characteristics of Various SCH Materials	ITO Hisataka / SHIMIZU Kazumichi / KUSUMOTO Kenta
36	Technology / Products 1 Fine Particle Production Process by the Combination of CRYSTALLEX Type VF, BoCross Filter, and Inclined Disc Dryer	KIMURA Toshiyuki
40	Technology / Products 2 Demonstration Study on Technology for Efficient Phosphorous Recovery from Dewatering Filtrate Using MAP	AOKI Jun / SAITO Isao
43	Technology / Products 3 Introduction to CLEARSTAR CIP/SIP-capable Vacuum Emulsifier	SHUNDO Akihito
46	Technology / Products 4 Sludge Volume Reduction Treatment System Using High-Pressure Jet Nozzles	MATSUSHIMA Yasuo
50	Technology / Products 5 Demonstration Research on the Reduction of Water Purification Sludge Using Organic Coagulants	OZEKI Tomohiko
56	Technology / Products 6 Cyclone Mill Practical Application and Milling Technology	ISHIKAWA Hajime / YOSHIOKA Satomi
62	Introduction of Products 1 Digester Gas Power Generation Project at Funabashi City, Takase Treatment Plant	YAMAMOTO Hiroki / NAKAJIMA Akihiro
66	Introduction of Products 2 Introduction Record to Ayase Sewage Treatment Plant for Sewage Sludge Reduction and Energy Use System	FURUYA Kazutoshi / OKAWARA Takao
70	Introduction of Products 3 No. 2 Sludge Incineration Plant of the Kasai Water Reclamation Center	YAMAMOTO Takafumi
72	Introduction of Products 4 Cyclone Mill	ISHIKAWA Hajime
76	Introduction of CAE Group Part8	KAWABATA Tomohiro
79	Introduction of Chemical Analysis Group	HIRA Satoru
84	Tsukishima Teahouse	IMAI Junichi
86	Tsukishima Tales of Times Now Past	UEDA Atsushi
90	Corporate Profile/Editor's Note	

## 挑戦で築き上げる未来



本間 友基

月島機械株式会社 執行役員

月島グループが新たな体制での歩みを始めてから1年半、私たちは「環境技術で世界に貢献し未来を創る」という目標に向け、順調な船出を遂げています。皆さんが各分野で日々努力してきた結果、各事業での成果が次々と生まれつつあります。

水環境分野では、さらなる成長に向けた新たな取り組みが始まっています。今回の技報ではAI技術を活用して、下水汚泥のフロックの形状や間隙のサイズなどから最適な凝集剤の添加率を自動的に判断する研究に関する論文が掲載されています。この研究は昨年度の技報で報告された創エネルギー型脱水焼却システムの一部として組み込まれたもので、薬品使用量の最適化のみならず、焼却炉の燃料使用量削減にも貢献し創エネルギー型脱水焼却システムの制御の要となっています。

また、エネルギーの回収効率を高めるための新しい水処理技術の開発にも着手しており、大幅な省エネルギーが実現できる見通しです。こうした研究開発と技術革新により、持続可能な社会づくりに大きく貢献する存在へと成長しています。

産業分野では、既存技術の改良と新分野への展開が進んでおり、特にエネルギー関連事業においても徐々に成果が出始めています。リチウムイオン電池市場向けの技術開発が進展し、次世代のエネルギー市場における新たな可能性が広がっています。

私たちが推進しているDX技術や解析技術も、各プロジェクトにおいて設計やプロセスの革新を促進しており、より精密で効率的な成果を実現する基盤となっています。こうした技術革新の積み重ねは、皆さんが日々取り組んでいる業務と共に、私たちの未来を切り開いています。

地球規模での環境課題が深刻化する今、私たちの技術は持続可能な社会の実現に大きな役割を果たします。皆さん一人ひとりが、それぞれの役割で力を尽くし続けることで、未来に誇れる成果を築き上げていきましょう。共に、持続可能な未来に向けて希望と情熱をもって挑戦を続けていきましょう!



## 論文

下水フロック画像を用いた機械学習モデルによる汚泥とポリマーの攪拌状態の識別

# 下水フロック画像を用いた機械学習モデルによる汚泥とポリマーの攪拌状態の識別

Identification of the Degree of Sludge/Polymer Mixing by the Machine Learning Model Using Floc Images



深澤 淳基 FUKASAWA Atsuki

月島JFEアクアソリューション  
技術企画センター DX推進室

## Abstract

Dewatering is an essential process in sewage sludge treatment, and to achieve excellent dewaterability, the polymer needs to be injected with no excess or shortage and properly agitated with the sludge. In this study, attention was focused on the problem of identifying the state of agitation based on the images of flocs generated by mixing the sludge and polymer. The identification here was assumed to be an agitation state classification problem using floc images, and classification was verified. In the proposed methodology, a machine learning model that can realize high classification accuracy and model interpretability has been developed. The model was constructed using two characteristics extracted from an image, in other words, inter-floc gap and texture. As a machine learning model, the Explainable Boosting Machine was used, which allowed model interpretation while preserving high accuracy. The classification accuracy of the model was verified with both learned and extrapolated data, resulting in an accuracy of over 95% for both scenarios. Furthermore, a comparison with the Convolutional Neural Network (CNN) model, which is a black box model but is expected to have a high accuracy, showed that the proposed model has a classification accuracy equivalent to that of the CNN model despite being a transparent box model.

下水汚泥処理において脱水は重要な工程であり、優れた脱水性を達成するためにはポリマーを過不足なく注入し、汚泥と適切に攪拌する必要がある。本研究では、汚泥とポリマーを混合して生成されるフロックの画像から攪拌状態を識別する問題に着目した。また、ここでの識別はフロック画像を使用した攪拌状態の分類問題と仮定し、分類の検証を行った。提案手法では、高い分類精度とモデルの解釈性を実現できる機械学習モデルを開発した。このモデルは画像から抽出された2つの特徴、すなわちフロック間の間隙とテクスチャを用いて構築された。機械学習モデルとして、高い精度を保ちながらモデルの解釈が可能であるExplainable Boosting Machineを用いた。このモデルの分類精度は、学習データと外挿データの両方によって検証され、結果としてどちらのシナリオでも95%を超える精度が得られた。さらに、Black-boxだが高い精度が期待できるConvolutional Neural Network (CNN) モデルと比較を行った結果、提案したモデルはTransparent-boxでありながら、CNNモデルと同程度の分類精度を示した。

キーワード：脱水工程、フロック、テクスチャ、畳み込みニューラルネットワーク、Explainable Boosting Machine

Keyword: Dewatering process, floc, Texture, Convolution neural network, Explainable Boosting Machine

## 1 はじめに

下水汚泥の排出量は、人口増加や急速な工業化・都市化によって世界的に増加し続けている<sup>1)</sup>。下水汚泥の主成分は水であるため輸送と処理にかかるコストは高く<sup>2)</sup>、排水処理の総コストの半分以上を占める<sup>3)</sup>。

汚泥処理の中でも脱水は、汚泥の輸送や管理に関連するコストを削減し、乾燥や焼却などの後工程での燃料使用量の削減にも寄与するため、非常に重要な工程である。脱水工程において汚泥を減容化させるには、高分子凝集剤(ポリマー)を過不足なく薬注し<sup>4)</sup>、かつ汚泥とポリマーを適切に攪拌する必要がある。

実際の脱水機の運転管理においては、オペレータがポリマー薬注量と高速ミキサー回転数を調整することにより、最適なフロック形成を維持している。この手動操作はオペレータの経験に頼るところが大きいが、汚泥の性状は、時間とともに変化し続けるため、手動操作だけに頼って最適な運転状態を維持することは困難である。したがって、常に適切なフロック状態を維持しながら脱水機を運転するためには、自動制御システムの導入が不可欠である。

先行研究では、ポリマー薬注量を最適化する方法として様々な提案がなされている。例えば、ストリーミング電流<sup>5,6)</sup>、分離液粘度<sup>7)</sup>、UVによる吸光度<sup>8)</sup>のような方法がある。しかしながら、これらの方法は再現性やコストに課題があり普及していないのが実情である。筆者らは、低コストで再現性の高いフロック画像に基づいたポリマー薬注量の自動制御システムを開発し、実際の脱水機において連続運転を行い、従来のオペレータによる手動操作と比較してポリマー薬注量を36%削減できることを確認している<sup>9)</sup>。

一方、汚泥とポリマーの適切な攪拌については、明確に定義された化学的特性がないため、研究されている事例がほとんどない。本研究では、汚泥とポリマーの混合体であるフロックから攪拌状態を評価することに着

目した。具体的には、フロック状態を画像から推定し、攪拌状態を識別する機械学習モデルを構築した。実証実験では、脱水設備にInternet Protocol (IP)カメラを設置し、撮影した画像から解析を行った。

画像を用いた解析事例として、近年ではニューラルネットワークによるフロック状態の識別<sup>10)</sup>について報告されている。ニューラルネットワークは、画像から特徴を自動抽出し、識別まで行うことができる優れた手法である。しかしながら、ニューラルネットワークモデルは、Black-boxモデルであり、識別結果の説明性やモデルの解釈性が不明となっている。したがって、識別結果に誤りがあった場合に明確な原因が説明できず、モデルの信頼性を失う懸念がある。仮に設備が問題なく運転できていたとしても、モデルが誤った識別を行っている可能性があり、その識別に至った思考プロセスが人間にはわからないため、現場導入への課題となる可能性もある。

そこで本研究では、汚泥とポリマーの攪拌状態を高い精度で識別でき、かつ結果の説明性や解釈性が可能なTransparent-boxモデルであるExplainable Boosting Machine (EBM) モデルを適用した。攪拌状態の識別に必要な特徴の抽出は、普段オペレータが設備を運転する際に指標としている特徴を数値化し、機械学習モデルの説明変数とした。実際の汚泥脱水設備から取得した画像を用いて、提案のEBMモデルと従来のニューラルネットワークモデルの比較検証を行った結果、EBMが高い精度を保ちながら、現場導入に適したモデルであることを確認したので、以下報告をする。

## 2 設備概要

### 2.1 設備フロー

実証試験に使用した脱水設備のフローを図1に示す。まず、汚泥濃度3~4%程度の混合生汚泥とポリマーは、高速ミキサーによって

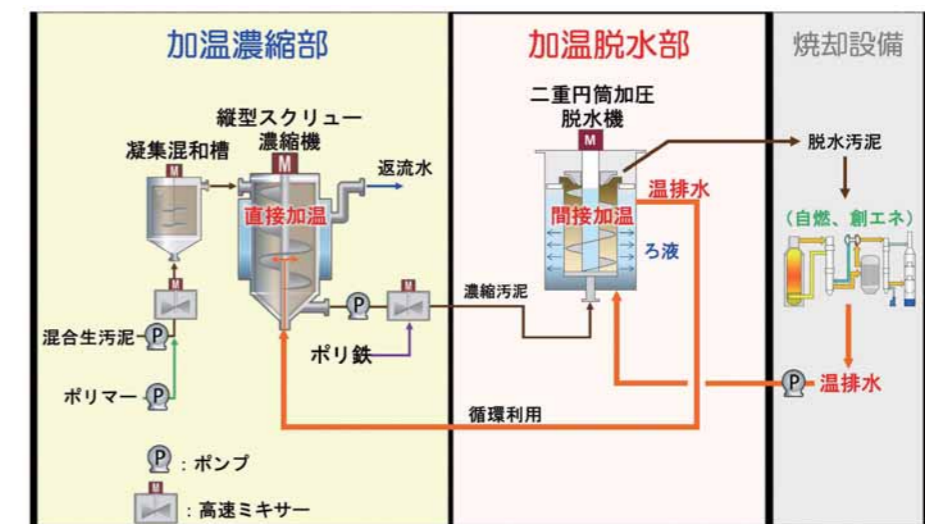


図1 検証に使用した脱水設備のフロー  
Fig.1 Flow of the dewatering process used for verification

攪拌され、凝集混和槽で緩速攪拌によりフロックが成長する。本研究では、凝集混和槽の上部にIPカメラ (CEPSA IPD-GB5231E) を設置し、フロック画像を撮影した (図2)。IPカメラの解像度は、704[px] × 480[px]で、フレームレートは30[fps]である。凝集混和槽で形成されたフロックは、次に縦型スクリー濃縮機「ロノッシュ®」に供給され、汚泥濃度8%程度まで濃縮された後、二重円筒加圧脱水機「トルネードプレス®」により含水率68~72%程度まで脱水される。なお、焼却設備からの温排水を脱水機と濃縮機に供給し、汚泥を加温することにより脱水効率を向上させている。

### 3 技術概要

攪拌状態の良し悪しを識別するため、フロックの画像から①攪拌不足 (undermixed)、②適切な攪拌 (suitable)、③過剰攪拌 (overmixed) の3つのラベルに分類することを試みた。このような分類問題においては、畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network, CNN) がよく用いられる。CNNは画像を入力することで簡単に分類器を生成することができるため、誰もが容易に使用することができる。また、様々なCNNのアーキテクチャを転移学習と



図2 凝集混和槽で撮影したフロック画像  
Fig.2 Image of flocs in the flocculation tank



図3 高速ミキサー回転数の違いによるフロック状態の変化  
Fig. 3 Differences in flocs at different rapid mixer speeds

して使用することで、問題に適した精度の高いモデルを選定することも強みであるが、Black-boxの性質から、モデルの解釈や分類結果の分析が難しい。

本研究では、分類結果の分析が可能なEBMを使用し、凝集の攪拌状態について上記3つのラベルに分類するモデルを構築した。

#### 3.1 攪拌状態のラベル分類

ポリマー薬注量を適値に固定し、高速ミキサー回転数を3パターン (低速、適切、高速) で運転した場合のフロック状態の変化を図3に示す。

高速ミキサーの回転数が高速および適切の場合は、いずれも粒状のフロックが形成されたが、高速では過剰攪拌によりフロックが粉碎されフロックサイズが小さくなった。一方、低速の場合は、攪拌不足により、汚泥とポリマーを十分に反応、凝集させることができなかったため、粒状のフロックが形成されなかった。

攪拌状態の分類に必要な目的変数として3つのラベル (undermixed、suitable、overmixed) を定義し、それぞれ、“undermixed”は攪拌不足によってフロック形成が不十分な状態、“suitable”は適切な回転数によって望ましいフロックが形成されている状態、“overmixed”は過剰攪拌によって、フロックが粉碎され、小さくなっている状態とした。

#### 3.2 特徴の選定

解釈可能な機械学習モデルを構築するためには、注意深く特徴を選定する必要がある。実設備の汚泥脱水機を運転管理しているオペレータが主に考慮している特徴はフロックサイズ、フロック間の間隙サイズ、テクスチャである (図4)。この3つの特徴から攪拌状態の識別に望ましいとされる特徴を選定した。

##### 3.2.1 フロックサイズ

個々のフロック半径や面積に着目した研究は広く行われているが<sup>11), 12), 13)</sup>、上水設備における報告結果が主であり、下水設備への適用報告はほとんどない。これは、下水設備で扱う汚泥は上水で扱う汚泥よりも濃度が高いためフロック同士の重なり合いによって、個々のフロックサイズを正確に測定するのが困難なためである。筆者らが行った研究においても、濃度が高い下水汚泥ではフロックを正確に識別することができなかったため<sup>9)</sup>、フロックサイズは攪拌状態の識別に不適当と判断した。



図4 フロック画像から得られる特徴  
Fig.4 Feature obtained with the floc image

##### 3.2.2 フロック間の間隙サイズ

フロック間の間隙サイズについては、汚泥濃度が高い下水汚泥であっても凝集状態を識別し、フロックの大きさとフロック間隙の大きさに正の相関があることが筆者らの研究で明らかになっている<sup>9)</sup>。したがって、フロック間の間隙サイズは攪拌状態の特徴として適当であると判断した。

##### 3.2.3 テクスチャ

テクスチャは物体の表面形状、感触、質感を表しており、攪拌状態の識別においては、図3(a) 攪拌不足と(b) 適切な攪拌のように表面形状や質感に大きく差がある場合に有効である。したがって、テクスチャも特徴として適当であると判断した。

以上より、機械学習モデルに必要な特徴として、フロック間の間隙サイズおよびテクスチャを選定した。

#### 3.3 特徴の抽出

##### 3.3.1 フロック間の間隙サイズの算出

間隙情報として、間隙半径と間隙数を使用した。間隙情報の特徴抽出フローについて図5に示す。まず、得られた原画像から間隙を検出する手法としてセマンティックセグメンテーションを用いた。セマンティックセグメンテーションとは、ピクセル単位で物体を識別する手法であり、本研究ではDeepLab v3+<sup>14)</sup>を使用した。検出した間隙から半径と個数を算出し、ヒストグラムにまとめたものを機械学習モデルの説明変数とした。

データをヒストグラムにまとめる場合、ビン数やビン幅を適切に設定する必要があるが、フロック状態によって適切とされるビン数やビン幅は異なるため、ここではビン数、ビン幅が異なる3つのヒストグラムを構築し、説明変数として使用した。なお、ビン数は5、10、15、ビン幅はオーバーフロー値をビン数で除算し、均一な幅となるように設定を行った。オーバーフロー値は45[px]とした。

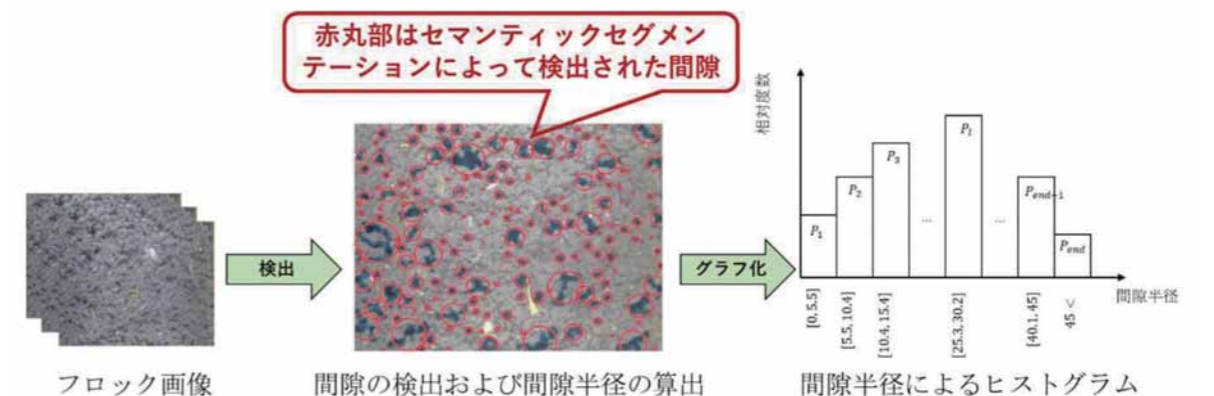


図5 セマンティックセグメンテーションを使用した特徴抽出のフロー  
Fig.5 Flow of feature extraction using semantic segmentation

### 3.3.2 テクスチャの算出

画像のテクスチャを定量化する手法として、濃度ヒストグラム法 (Gray Level Histogram Method, GLHM)、同時生起行列 (Gray Level Co-occurrence Matrix, GLCM)、濃度レベル差分法 (Gray Level Difference Method, GLDM) といった手法がある<sup>15)</sup>。

これら3つの手法のうち、画素間の規則性を相対的に評価でき、ヒストグラムで表すことのできるGLDMを選択した。図6がテクスチャ情報の特徴抽出フローである。GLDMは、ある画素の濃度と、方向 $\theta$ の距離 $d$ にある画素の濃度差の差が $\ell$ である確率 $P(\ell)$ を要素とする行列から統計量を計算する手法である。

本研究では、統計量まで計算せずに、濃度差をヒストグラムにまとめ結果を機械学習モデルの説明変数とした。なお、濃度差は、 $d=8$ 、 $\theta=135^\circ$ として算出し、ヒストグラムはすべての濃度差を網羅するため、ビン数を256に設定した。

### 3.4 EBMのアルゴリズム

本研究で使用する機械学習モデルは、Microsoft Researchが開発したEBMである。EBMはモデルの解釈を可能としており、Microsoftが提供している機械学習ツールのinterpretMLに含まれているため、容易に適用することができる。

EBMは一般化加法モデル (Generalized Additive Model, GAM) をベースとしており、これは以下のような式で表すことができる。

$$g(E[y]) = \beta_0 + \sum f_i(x_i) \quad (1)$$

ここで、 $f_i$ は特徴関数、 $g$ はリンク関数で、複数の特徴関数の結合で表される。GAMにおける各特徴関数の内容から、各説明変数がモデルの予測にどのように寄与しているか推定できる。

EBMは、さらなる精度向上のため、式(1)に2つの修正を加えている。1つ目は、バギングや勾配ブースティングといった最新の機械学習

手法を用いて各特徴関数を学習している。2つ目は、一対の相互作用項を自動的に識別している。これらの修正により、式(1)は以下のような式となる。

$$g(E[y]) = \beta_0 + \sum f_i(x_i) + \sum f_{i,j}(x_i, x_j) \quad (2)$$

式(2)に基づくEBMは、明瞭性を維持しながら精度をさらに向上させる。

本研究では、間隙情報とテクスチャ情報を説明変数とし、3つのラベルを分類するEBMモデルを構築する。

## 4 検証方法

フロック画像から攪拌状態を分類する問題として、従来のBlack-boxモデルであるCNNを使用した手法とTransparent-boxモデルであるEBMを使用した提案手法を比較する。ここでは、以下4つのCaseで比較を行った。

- Case 1: CNNモデル
- Case 2: 間隙情報のみを説明変数としたEBMモデル
- Case 3: テクスチャ情報のみを説明変数としたEBMモデル
- Case 4: 間隙およびテクスチャ情報を説明変数としたEBMモデル

Case 1のCNNモデルは、AlexNet<sup>16)</sup>、GoogLeNet<sup>17)</sup>、ResNet<sup>18)</sup>、DenseNet<sup>19)</sup>、EfficientNet<sup>20)</sup>を用いた。検証の詳細を表1に示す。

学習データは、夏季に取得したデータを使用し、k分割交差検証によって分類精度を確かめた。また、 $k=5$ とし、学習データを5分割して精度確認をした。テストデータでは、学習に使用していない異なる時期のデータ(外挿データ)を使用した。外挿データでテストを行うことで、モデルの汎化性能を検証するのが本研究の狙いとなる。

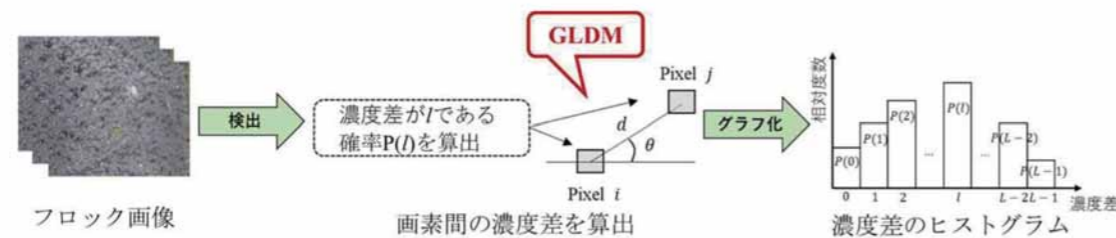


図6 GLDMを使用した特徴抽出のフロー  
Fig.6 Flow of feature extraction using GLDM

## 5 結果と考察

### 5.1 学習データに対する分類精度

学習データに対する分類結果を表2, 3に示す。表2は、Case 1であるCNNモデルのそれぞれの正解率を表している。

AlexNetは、ディープラーニングモデルの中でも比較的古いモデルであるが、正解率は98.5%と非常に高い結果となった。比較的新しいモデルであるDenseNetやEfficientNetにおいても、ほぼ100%の精度であり、全体平均として99.2%の高い正解率であった。

続いて、表3はCaseごとの正解率であり、テクスチャ情報を使用したCase 3以外は、正解率95%以上の高い精度となっている。最も高

い正解率だったのは、Case 1であったが、間隙情報とテクスチャ情報を使用したCase 4と同等の正解率であった。

以上のことから、間隙情報とテクスチャ情報を使用することで、CNNモデルとほぼ同精度のモデルを構築できることが示唆された。

### 5.2 テストデータに対する分類精度

汎用的なモデルを実現するためには、外挿データに対して高い分類精度を達成する必要がある。外挿データに対する分類結果を表4, 5に示す。表4は、Case 1であるCNNモデルのそれぞれの正解率を表している。

表1 検証の詳細  
Table1 Details of Verification

分類ラベル	"undermixed", "suitable", "overmixed"
学習データ数	夏季に取得した1ラベルあたり693枚の画像
テストデータ数	冬季に取得した1ラベルあたり100枚の画像
説明変数	Case 1: オリジナル画像 Case 2: ビン数が5,10,15の間隙半径のヒストグラム Case 3: ビン数が255の濃度差ヒストグラム Case 4: Case 2 + Case 3
学習器	Case 1: Convolutional Neural Network Case 2: Explainable Boosting Machine Case 3: Explainable Boosting Machine Case 4: Explainable Boosting Machine
モデル精度評価方法	k-Fold cross-validation (k=5)

表2 学習データに対するCNNモデルの正解率  
Table2 Accuracy of CNN in training data

AlexNet	GoogLeNet	ResNet	DenseNet	EfficientNet	平均
98.5%	98.0%	100.0%	99.7%	100.0%	99.2%

表3 学習データに対するCaseごとの正解率  
Table3 Accuracy of 4 cases in training data

Case 1 (CNNの平均)	Case 2	Case 3	Case 4
99.2%	96.1%	83.6%	97.6%

表4 外挿データに対するCNNモデルの正解率  
Table4 Accuracy of CNN in test data

AlexNet	GoogLeNet	ResNet	DenseNet	EfficientNet	平均
95.3%	96.0%	98.6%	99.3%	93.7%	96.6%

表5 外挿データに対するCaseごとの正解率  
Table5 Accuracy of 4 cases in test data

Case 1 (CNNの平均)	Case 2	Case 3	Case 4
96.6%	64.6%	76.7%	96.3%

EfficientNetを除く、すべてのCNNモデルにおいて、95%以上を超える正解率となった。EfficientNetは、学習データに対する正解率が100%だったのに対して、外挿データに対する正解率が93.7%であり、学習時に期待していた精度を発揮することができなかった。このように比較的新しいモデルであっても、必ずしも精度が高いモデルを構築できるとは限らないことが示された。

表5は、Caseごとの正解率である。特筆すべきは、Case 1およびCase 4の正解率が同等であるという点である。この結果から、間隙情報およびテキストチャ情報を使用したEBMモデルは、CNNモデルと同じ精度を発揮できるTransparent-boxモデルであると結論付けられる。

一方で、Case 2およびCase 3の正解率が80%を下回ることから、間隙情報およびテキストチャ情報のどちらか1つでは、分類が難しいことがわかる。この原因について混同行列に基づき、さらに考察を行う。

Case 2およびCase 3の混同行列を図7, 8に示す。図7より、Case 2では“suitable”と“undermixed”の分類が不得意で、全体的に精度が低くなっている。同様に、図8からCase 3は“suitable”と“undermixed”は正しく分類できていたが、“overmixed”の分類が不得意であることがわかる。ここで注目すべきはCase 2, 3が各々得意/不得意とする分類が異なっている点である。したがって、Case 2, 3の両方の特徴情報を持つCase 4では精度が向上し、図9のとおり、すべてのラベルで高い分類精度が得られた。

ここまでの結果およびモデルごとの特徴を表6に示す。表6のモデルの複雑性は、機械学習モデルの構造によるものであり、Case 1のCNNのように隠れ層が多いモデルほど複雑な構造となる。一方で、EBMはGAMをベースに構築されており、CNNと比べシンプルな構造である。学習にかかる時間は、特徴抽出を自動で行うためCNNは長

くなり、EBMは短い時間で学習が可能である。最も重要な点は、モデルの解釈性であり、Case 4はTransparent-boxモデルでありながら、高い分類精度を実現できた。

## 6 まとめ

本研究では、下水汚泥脱水機の性能を左右する凝集プロセスにおいて、汚泥とポリマーの攪拌状態を最適化するため、フロック画像に基づいてundermixed, suitable, overmixedの3つに分類するEBMモデルを構築した。EBMモデルとCNNモデルの比較検証を行った結果、以下の知見が得られた。今後は、実際の脱水設備に提

案したEBMモデルを導入し制御性能の評価を行っていく。

- 間隙およびテキストチャ情報を説明変数としたEBMモデルは、学習データに対して97.6%、外挿データに対して96.3%の分類精度を達成した。
- 同モデルはTransparent-boxでありながら、分類精度はBlack-boxであるCNNモデルとほぼ同等の結果が得られた。
- 説明変数に使用した“間隙情報”と“テキストチャ情報”は、各々が得意/不得意とする分類が異なっているため、いずれか1つを説明変数とした場合には分類精度が低下した。
- 従って、“間隙情報”と“テキストチャ情報”を組み合わせることが重要であり、お互いが補完することで高い分類精度を実現した。

		Prediction		
		overmixed	suitable	undermixed
Actual	overmixed	94	0	6
	suitable	0	0	100
	undermixed	0	0	100

図7 Case 2の混同行列  
Fig.7 Confusion matrix of Case2

		Prediction		
		overmixed	suitable	undermixed
Actual	overmixed	31	0	69
	suitable	0	100	0
	undermixed	1	0	99

図8 Case 3の混同行列  
Fig. 8 Confusion matrix of Case3

		Prediction		
		overmixed	suitable	undermixed
Actual	overmixed	90	0	10
	suitable	0	100	0
	undermixed	1	0	99

図9 Case 4の混同行列  
Fig.9 Confusion matrix of Case4

表6 モデルごとの特徴  
Table6 Characteristics of models

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
内挿データに対する正解率	high	high	middle	high
外挿データに対する正解率	high	low	middle	high
モデルの複雑性	difficult	easy	easy	easy
学習にかかる時間	long	short	short	short
Black-box or Transparent-box	Black-box	Transparent-box	Transparent-box	Transparent-box

### 参考・引用文献

- 1) Bartłomiej Michał Cieślak, Jacek Namieśnik, Piotr Konieczka, Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods, Journal of Cleaner Production, Vol.90, pp.1-15(2015)
- 2) Akrama Mahmoud, Jérémy Olivier, Jean Vaxelaire, et al., Advances in Mechanical Dewatering of Wastewater Sludge Treatment, Wastewater Reuse and Management, pp.253-303(2012)
- 3) D. Mowla, H.N. Tran, D. Grant Allen, A review of the properties of biosludge and its relevance to enhanced dewatering processes, Biomass and Bioenergy, Vol.58, pp.365-378(2013)
- 4) Carlos Barrera-Díaz, Gonzalo Martínez-Barrera, Osman Gencel, et al., Processed wastewater sludge for improvement of mechanical properties of concretes, Vol.192, pp.108-115(2011)
- 5) Charles P. Priesing, Ralph V. Wolfe, William A. Sack, et al., Plant-Scale Polyelectrolyte Treatment of Wastewater Using Streaming Current Control, Water Pollution Control Federation, Vol.41, pp.1524-1532(1969)
- 6) Mohammad M. Abu-Orf, Steven K. Dentel, Automatic control of polymer dose using the streaming current detector, Water Environment Research, Vol.70, pp.1005-1018(1998)
- 7) David H. Bache, Eleftherios N. Papavasiliopoulos, Viscous behaviour of sludge centrate in response to polymer conditioning, Water Research, Vol.34, pp.354-358(2000)
- 8) Fares A. Al Momani, Banu Örmeci, Optimization of Polymer Dose Based on Residual Polymer Concentration in Dewatering Supernatant, Vol.225, article number 2154(2014)
- 9) Atsuki Fukasawa, Tsuneo Yamato, Shinya Watanabe, Automatic Control of Polymer Dosage Using Floc Images in Sludge Dewatering Plant, Environmental Processes, Vol.11, article number 29(2024)
- 10) Hiroshi Yamamura, Eryanti Utami Putri, Takashi Kawakami, et al., Dosage optimization of polyaluminum chloride by the application of convolutional neural network to the floc images captured in jar tests, Separation and Purification Technology, Vol.237(2020)
- 11) Siwei Sun, Monroe Weber-Shirk, Leonard W. Lion, Characterization of Flocs and Floc Size Distributions Using Image Analysis, Environmental Engineering Science, Vol.33, pp.25-34(2016)
- 12) González-Galvis Juan Pablo, Jaramillo Londoño Angela Maria, Martínez Urrego Andres Felipe, Low-cost methodology for the characterization of floc size in low turbidity and low alkalinity waters using image analysis, Water Practice and Technology, Vol.17, pp.887-900(2022)
- 13) Rudy Syah Putra, Farikhatul Fitria, Effect of rapid-mixing duration on floc growth in the coagulation of peat water with Sesbania grandiflora seed as measured by DinoCapture 2.0, Proceedings of the 1st Nusa Tenggara International Conference on Chemistry (NiTRIC 2022), pp. 40-50(2023)
- 14) Liang-Chieh Chen, Yukun Zhu, George Papandreou, et al., Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation, Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 833-851(2018)
- 15) Yumi Iwamitsu, Kazuhisa Takemura, Osamu Matsumura, Drawing Picture of Mental Disorder Patient and its Image Analysis: Using Texture Analysis, Fourier Analysis, and Singular Value Decomposition, Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent Informatics, Vol.25, pp.651-658(2013)
- 16) Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever, Geoffrey E. Hinton, et al., ImageNet classification with deep convolutional neural networks, Communications of the ACM, Vol.60, pp.84-90(2017)
- 17) Christian Szegedy, Wei Liu, Yangqing Jia, et al., Going Deeper with Convolutions, Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1-9(2015)
- 18) Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, et al., Deep Residual Learning for Image Recognition, 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1-9(2016)
- 19) Gao Huang, Zhuang Liu, Laurens Van Der Maaten, et al., Densely Connected Convolutional Networks, 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1-9(2017)
- 20) Mingxing Tan, Quoc V. Le, EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks, Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning, Vol.97, pp.6105-6114(2019)



# CRYSTALLEX® Type DDの開発

## Development of CRYSTALLEX Type DD



津崎 裕也 TSUZAKI Hiroya  
月島機械株式会社  
計画部

### Abstract

In recent years, the importance of technological innovation has been increasing in a wide variety of fields, including the electronics field, such as batteries and electronic materials, the medical and healthcare field, and the energy field, as efforts to address future environmental and energy issues toward a sustainable society. Among those efforts, the development of most cutting-edge materials is one of the essential key technologies in Japan, and the development toward the enhanced functionality of materials has been promoted. In this paper, the focus is on fine particulation technology, which is one of the methods that enhances the functionality of materials, and the newly developed CRYSTALLEX Type DD as a fine particle crystallizer is introduced.

近年、持続可能な社会へ向けた将来の環境・エネルギー問題への取り組みとして、電池・電子材料などのエレクトロニクス分野、メディカル・ヘルスケア分野、エネルギー分野など様々な分野において技術革新の重要性は増している。その中でも、先端材料の開発は、日本国内における重要な基幹技術の一つであり、材料の機能性向上にむけた開発が推進されている。本稿では、材料の機能性向上させる方法の一つである微粒子化技術にフォーカスし、微粒子晶析装置として新開発したCRYSTALLEX® Type DDを紹介する。

キーワード：高剪断力、超微粒子  
Keyword : High shearing force, Super fine particles

## 1. はじめに

近年、持続可能な社会へ向けた将来の環境・エネルギー問題への取り組みとして、電池・電子材料などのエレクトロニクス分野、メディカル・ヘルスケア分野、エネルギー分野など様々な分野において技術革新の重要性は増している。その中でも、先端材料の開発は、日本国内における重要な基幹技術の一つである。例えば、二次電池分野における電池材料の高容量化・耐久性向上、医薬分野における医薬品のバイオアベイラビリティ (Bioavailability) の向上、エネルギー分野における光触媒のエネルギー変換効率の向上などがあげられる。いずれも材料そのものの機能性を向上することが課題である。材料の機能性を向上させるための方法には、大きく分けて、素材や成分そのものを変える方法と材料の物性を変える方法の2種類がある。本稿では、後者の物性を変えるための方法の一つである微粒子化にフォーカスし、微粒子晶析装置として新開発したCRYSTALLEX® Type DDを紹介する。

## 2. 微粒子製造技術

微粒子化によるメリットは、粒子の比表面積が増加されることにより、反応性、溶解性などの機能性の向上が期待できる点である。微粒子の製造方法は、粒子を粉砕することで微細化する「ブレイクダウン (Break-down) 法」と化学反応などによる粒子合成によって微粒子を製造する「ビルドアップ (Build-up) 法」に大別される。

ブレイクダウン法は、粉砕機などを用い、大きな粒子に加える機械的エネルギーを変化させることで粒子径を調整する微粒子の製造法である。さらに乾式粉砕法と湿式粉砕法に区分されるが、乾式粉砕法では微粒子化が進むと粒子同士が凝集しやすくなるため、ナノサイズの微粒子製造には、湿式粉砕法が用いられる。この方法は比較的容易かつ安価に微粒子を製造できるため、広く商用規模の量産設備に採用されている。ただし、粉砕操作の特性上、粒子形状や粒度分布が不均一になりやすく、粒子の機能性は低下する。また、機械摩擦などによるコンタミも課題である。

一方、ビルドアップ法による微粒化は、ゾル-ゲル法や晶析法などに代表され、化学反応や物質の化学特性を利用してナノサイズからマイクロサイズまでの微粒子の生成と粒子径制御を行う。ビルドアップ法は、ブレイクダウン法では製造が困難なナノサイズの粒子の製造が可能であり、特に、反応晶析法は、粒子形状制御が可能である点や粒度分布を均一にしやすい点など、高機能な微粒子を製造する技術としてメリットがある。

表1 ブレイクダウン法とビルドアップ法の比較  
Table1 Comparison between breakdown method and build-up method

	ブレイクダウン法	ビルドアップ法
代表的製造方法	粉砕法	晶析法、ゾル-ゲル法
運転操作	容易	各種運転パラメータの調整が必要
粒子形状制御	困難	容易
粒度分布	不均一	均一
その他	装置摩擦によるコンタミリスクあり	—

## 3. 反応晶析法

反応晶析法とは、2つ以上の流体を反応させ得られた生成物が溶液中に溶存しにくい、つまり、溶解度が小さいことを利用して、結晶として析出させる方法である。酸とアルカリの中和反応により生成物を沈殿させる方法などがそれにあたり、特別、高温高圧下で行うようなエネルギー負荷の高い反応操作を必要としない。

この方法では、溶媒に対する目的成分や生成物の溶解度が低いことを利用して、2つ以上の流体が接触するポイント (以下晶析ポイントという。) でナノサイズの結晶核が生成し、一次粒子となる。一次粒子を晶析装置内で流動させながら、繰り返し晶析ポイントを通過させることで、新たに発生する結晶が、一次粒子そのものの成長や一次粒子同士の結合による二次粒子形成に介在し、結晶を成長させ、ナノサイズからマイクロサイズの所望の粒子径の結晶を得る。

### (1) 均一な粒度分布

晶析法の運転方式は、連続式と回分式に大別される。連続方式は、回分式に比べ、晶析装置の単位容積当たりの生産量を多くすることができ、生産性が高いが、運転中に連続的に結晶を晶析装置から抜き出すため、短時間で晶析装置から排出される結晶や逆に長時間滞留した後に排出される結晶などが混在することになり、結晶の成長時間に差異が生じ、粒度分布はブロードになる。一方、回分式は、晶析ポイントで発生した結晶を所定の粒子径に成長させるまで、結晶を晶析装置から抜き出すことは無いため、結晶成長時間に差異が無く、比較的、均一な粒度分布の結晶を得ることができる。

これが、ビルドアップ法である晶析法が、ブレイクダウン法である粉砕法では困難とされる均一な粒度分布の粒子を製造できる理由である。

### (2) 高真球度

粒子の機能性を高めるために、一般的には、真球度の高い粒子が求められる。これは、高真球度粒子ほど流動性が良くハンドリングのしやすさから生産設備における負荷が低減され、また、粒子の反応性や溶解性などの化学的特性の均一化が図れるなどのメリットを有するからである。反応晶析法において、高真球度の微粒子結晶を得るために重要なことは、晶析ポイントに所定の『循環流量』を供給しつつ、さらに十分な『剪断力』を与えることである。

『循環流量』と『剪断力』が結晶品質に与える影響は以下のとおりである。

#### 1) 循環流量

所定の循環流量を確保することは、晶析ポイントにおける2つ以上の流体の混合状態を均一にすると同時に、装置内で流動する結晶の成長の差異も小さくする。そのため、結晶粒度分布の均一性向上に効果的である。

#### 2) 剪断力

①晶析ポイントでは2つ以上の流体の拡散、混合が律速であるため、高剪断力により流体の分散性を高め、局所的な濃度の偏りを低減することで、安定した結晶核発生と結晶成長を促し、結晶粒子径や結晶形状の均一性を向上させる効果がある。

②剪断力が高い程、凝集による二次粒子形成時に粒子径が小さく、真球度の高い結晶を得やすくなる。

『CRYSTALLEX®シリーズ』は、このような高真球度微粒子の製造を目的に、従来の攪拌槽型晶析装置にはない高い剪断力を有する装置として開発された。



## 4. CRYSTALLEX®シリーズ

『CRYSTALLEX®シリーズ』には、CRYSTALLEX® Type VF (以下 Type VF)とCRYSTALLEX® Type DD (以下 Type DD)の2タイプがある。

Type VFは、2010年に開発された高剪断力型晶析装置であり、本稿で紹介するType DDは、Type VFよりさらに剪断力を向上させた超高剪断力型晶析装置として、今年から販売を開始していく(図1参照)。

Type VFの基本構造は、リアクタ、滞留槽、循環ポンプが配管で連結されたループ型の構造を採用している(図2参照)。原料はリアクタ部へ、副原料は滞留槽または循環ポンプのサクシオン部へ供給され、リアクタ部での反応晶析により、結晶を生成する。結晶製品は、結晶スラリーとして滞留槽から排出される。結晶の粒子径制御は、循環ポンプの循環流量を変動させることによる「リアクタ内部の剪断力」の調整

と装置内における「結晶の滞留時間」の調整にて行う。晶析ポイント(リアクタ)と滞留槽を分離することで、従来の攪拌槽型晶析装置に比べ、強い剪断力を効率的に晶析ポイントへ伝達することができる。

一方、Type DDは、リアクタ、滞留槽、循環ポンプを配管で連結したループ型構造はType VFと同じであるが、リアクタ部に最高速50m/secで回転する攪拌翼を設置することで、超高剪断力を生み出す(図2参照)。

攪拌槽、Type VF、Type DDの剪断力比較を図3に示す。攪拌槽型における剪断力を1とした場合、Type VFは4倍、Type DDは100倍である。

さらに、主原料をリアクタに設置された攪拌翼のシャフト内部を經由して、回転する攪拌翼の先端部からリアクタ内部へ噴射することで、最も剪断力の高い攪拌翼の先端部を晶析ポイントにすることができる。これにより、攪拌翼が生み出す超高剪断力を無駄なく最大限に晶析ポイントへ伝達することができる。

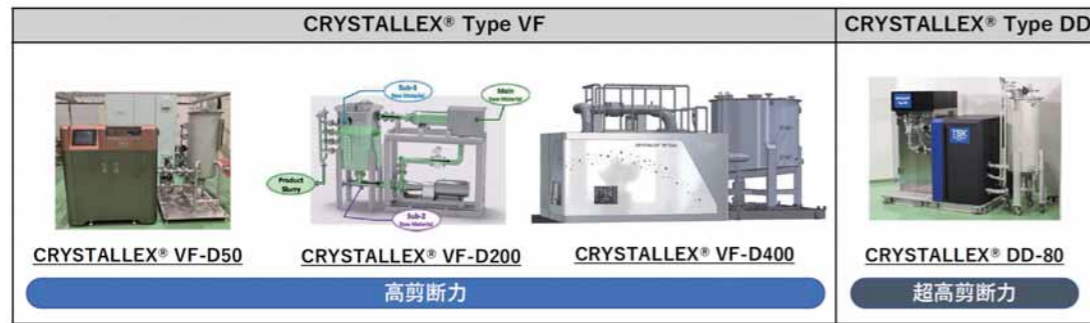


図1 CRYSTALLEX® シリーズ ラインナップ  
Fig.1 CRYSTALLEX series lineup

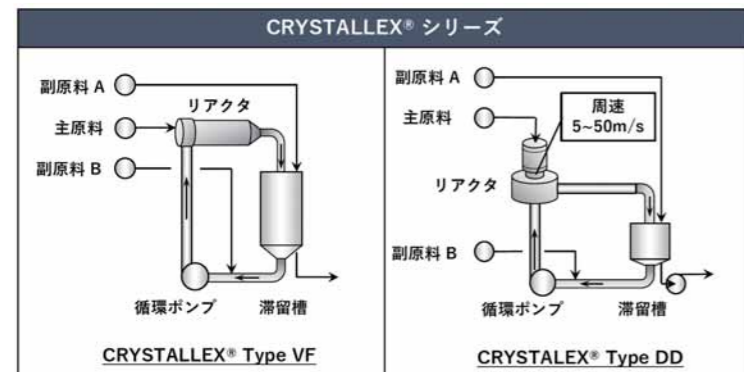


図2 CRYSTALLEX® シリーズ外形図  
Fig.2 Outline drawing of CRYSTALLEX series

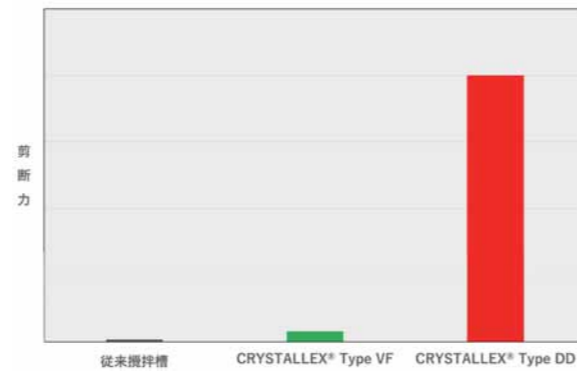


図3 剪断力比較  
Fig.3 Comparison of shearing force

## 5. 高真球度微粒子結晶の製造

ここでは、リチウムイオン電池用正極材前駆体であるNCM(ニッケル・コバルト・マンガン)水酸化物を例に高真球度微粒子結晶の製造について紹介する。

図4にリチウムイオン電池向け正極材前駆体における粒子径と晶析装置の適用範囲を示す。Ni含有量が80%以上のNCM前駆体において、粒子径d50が3~5μm以下の範囲では、剪断力の低い従来の攪拌槽型晶析装置は、生産性及び製品品質が低下してくる。これに対し、Type VFは、d50=3~13μmの粒子径範囲、Type DDは、d50=1~10μmの粒子径範囲をカバーする。特にd50が3μm以下の粒子径領域においては、高真球度かつ均一な粒度分布の製品を商用規模で量産することは難しいが、Type DDでは、その粒子範囲にて真価を発揮する。

CRYSTALLEX®シリーズで製造した微粒子サンプルの一例を表2に示す。SEM画像に示すとおりType VF、Type DDいずれも高い真球度の結晶を得ることができるが、粒子径d50が3μm以下の領域では、Type VFで製造する微粒子の真球度は低下してくるため、より高剪断力を有するType DDを適用する。

## 6. 商用規模における生産技術

(1)スケールアップリスクの低減

従来の攪拌槽型晶析装置のスケールアップにおいて、良く用いられるスケールアップ手法は、相似形の晶析装置において、単位容積あたりに与える攪拌動力を一定にする『P/V一定』である。一般的に相似形でスケールアップした装置であれば、単位容積当たりの生産量も同じになることから、P/V一定はすなわち、単位生産量当たりの動力を一定にすることになり、攪拌の観点としては適当なスケールアップ手法と言える。しかし、スケールアップの倍率が大きくなるほどに、攪拌により生み出される吐出量、すなわち、『循環流量』と『剪断力』の乖離は大きくなる。前述のとおり、反応晶析において、高真球度の微粒子結晶を製造するために重要なパラメータは、『循環流量』と『剪断力』であるため、CRYSTALLEX®シリーズは、スケールアップリスクを低くするために、『循環流量』と『剪断力』の乖離を小さくすることに配慮して設計されている。

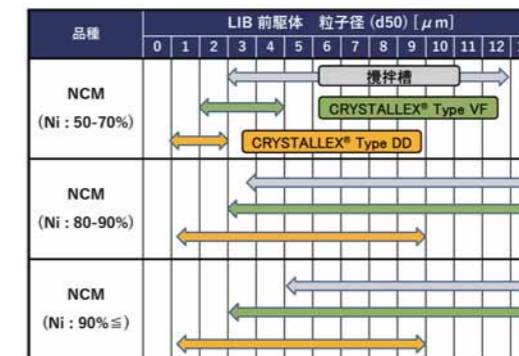


図4 リチウムイオン電池用正極材前駆体の粒子径と晶析装置の適用範囲  
Fig.4 Application range of the crystallizer in the particle size distribution of lithium-ion battery precursor

表2 CRYSTALLEX® シリーズで製造したリチウムイオン電池用正極材前駆体(NCM水酸化物)  
Table2 Lithium-ion battery precursor (NCM hydroxide) produced with CRYSTALLEX series

運転方式		CRYSTALLEX® VF			CRYSTALLEX® DD			
		連続式	連続式	回分式	連続式	連続式	回分式	
SEM	x 5,000							
	x 10,000 ~ x 20,000							
粒子径 [μm]	d10	1.3	2.0	4.7	2.4	0.42	0.68	1.0
	d50	3.8	4.9	10.3	3.6	1.32	2.5	1.40
	d90	6.6	9.0	19.8	5.1	2.5	4.5	1.93
T.D. [g/cc]		2.1	2.1	2.1	2.0	1.6	1.9	1.7
(参考値) 攪拌槽TD 1.9±1.0								

(2)『循環流量』と『剪断力』の調整機能の向上

さらに、Type DDにおいては、『循環流量』を循環ポンプ、『剪断力』をリアクタに設置した高速攪拌翼で個別に調整することが可能である。従来の攪拌槽やType VFでは、攪拌機や循環ポンプの回転数の調整により、循環量や剪断力を調節するが、(循環流量) / (剪断力) 比は一定であった。例えば剪断力を下げて、粒子径を大きくしようとするとき、同時に装置内の混合の均一性を確保するために必要な循環流量まで同時に下がってしまう。逆に剪断力を上げて粒子径を小さくしようすると、必要以上に循環流量も大きくなり、かなりの動力が必要となり、消費動力の割に剪断力は上がらない。前述のとおり、Type DDでは、『循環流量』と『剪断力』を個別に制御することができるため、(循環流量) / (剪断力) 比を任意に設定することができる。これにより、粒子径や粒子形状を調節する際に微妙なパラメータの設定が可能となり、粒子径や粒子形状の制御性能は大幅に向上する。

(3) 商用規模での高い生産性

CRYSTALLEX®シリーズの先行機であるType VFは、以下のような高い生産性を有する。

① CAPEX (Capital Expenditure) の低減

高い剪断力による流体の分散性向上により結晶の成長速度を促進し、結晶成長に必要な時間を短縮する。このため、従来の攪拌槽型晶析装置に比べ、装置1基当たりの生産能力を高くすることができ、装置の設置台数を削減することが可能である。

② OPEX (Operating Expenditure) の低減

前述の生産性の高さから、従来の攪拌槽型晶析装置と同じ生産量で比較した場合、装置容積は、攪拌槽型の1/5~1/3程度になる。容積が小さい分、運転立ち上げに要するスタートアップ時間を短縮ことができ、スタートアップ時に発生するオフスベック品の排出量を70~80%削減することができる。

CRYSTALLEX®シリーズの後継機であるType DDも、Type VFの生産性の高さを継承した設計としている。今年から販売を開始していくType DDはテスト機スケールであり、商用機スケールは、今期中に開発を完了する予定である。

7. まとめ

本稿では、将来の微粒子化需要の増加へ対応する技術として、CRYSTALLEX®シリーズ Type VFおよび開発機のType DDによる高機能微粒子の製造技術の原理およびメリットを紹介した。現在は、主な適用材料として、リチウムイオン電池用正極材前駆体をターゲットに研究を進めているが、反応晶析法での製造が可能な材料であれば、本製造技術は適用可能である。また、現状、ブレイクダウン法(粉碎法など)で生産されている材料において、ブレイクダウン法特有の粒子形状や粒度分布が不均一になりやすい課題や機械摩耗などによるコンタミの問題などを抱えている製造プロセスの改善策としても効果が期待できる。

材料の機能性向上に向けての微粒子化と一言と言っても、その製造方法は数多く存在する。しかしながら、製品品質と経済性の要求を両立させる製造法となると極めて限定される。また、今後は、これらに加え、持続可能な社会のために、環境負荷を低減した製造法の構築が必須である。反応晶析による微粒子製造技術は、大きなエネルギーを必要とせず、比較的低温の環境下で目的物を製造することができる。また、ナノサイズからのビルドアップ法でもあることから、粒子径や形状が均一な高品質の微粒子の製造にも効果的である。CRYSTALLEX® Type DD は、このように環境負荷が低く、高品質の微粒子を製造できる反応晶析法に高剪断力と高い生産性を付加することで、将来の高機能微粒子需要へ対応していくことを目的とした装置である。

しかしながら、ニーズも多様化している昨今、様々な分野の要求へ答えるためには、より一層の技術力向上が求められる。持続可能な社会の構築には、速い環境の変化に追従するための弛まぬ技術革新の継続が必要不可欠である。今後も市場要求に合わせ、当社技術の改良・改善を継続していきたい。

表3 晶析装置の機能比較  
Table3 Comparison of crystallizer feature

	従来の攪拌槽	CRYSTALLEX® Type VF	CRYSTALLEX® Type DD
スケールアップ手法	相似形 P/V一定が一般的	循環流量、剪断力の乖離は小さい	循環流量、剪断力の乖離は小さい
スケールアップリスク	スケールアップ倍率の増加に伴い、リスクも増加	低い	低い
循環量/剪断力比	一定	一定	任意に設定が可能
粒子径の制御性能	やや高い	やや高い	高い

# 高付着性汚泥に適応したIDDの改良

## Improvement of IDD Applied to Highly Adhesive Sludge



中村友二 NAKAMURA Yuji  
月島JFEアクアソリューション株式会社  
技術企画センター研究開発室

### Abstract

When drying highly adhesive sludge in a conventional inclined disc dryer (IDD) under stable conditions, the addition of hydrated lime was necessary. However, since the addition of hydrated lime leads to increased operating costs, a drying method with IDD that does not use hydrated lime was demanded. In this study, a method that does not require the addition of hydrated lime has been developed for dewatered sludge with very high adhesiveness, such as mixed raw sludge. From the test results, it has become evident that it is important to fill the IDD with a sufficient amount of dry sludge as an initial fill and to avoid creating a high water containing area in the dryer by simultaneously supplying sludge from multiple ports. In the system, the vapor velocity in the upper 8 kg-H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>H range could be obtained under the condition of 0.6 MPaG (165°C) vapor use. In addition, as a startup method from a state where there is no initial fill of dry sludge, the use of a dry sludge substitute was studied and is introduced as well.

従来インクラインドディスクドライヤ (IDD) で高付着性の汚泥を安定して乾燥させる場合、消石灰の添加が必要であった。しかしながら消石灰の添加はランニングコストの上昇につながることから、消石灰を使用しないIDDでの乾燥方法が求められた。本研究では混合生汚泥のように付着性が非常に高い脱水汚泥に対して、消石灰添加を必要としない方法を開発した。試験結果から、初期充填としてIDD内に十分な量の乾燥汚泥を充填すること、複数箇所から汚泥を同時供給することで乾燥機内に高含水領域を作らないことが重要であることが明らかとなった。本システムにおいて、0.6MPaG (165°C) 蒸気使用の条件下で8kg-H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>H台後半の蒸発速度を得ることができた。また初期充填する乾燥汚泥が無い状態からの起動方法として、乾燥汚泥代替品の使用を検討したのであわせて紹介する。

キーワード：インクラインドディスクドライヤ、高付着性汚泥、初期充填、複数箇所同時供給、消石灰不要

Keyword : Inclined disc dryer, Highly adhesive sludge, Initial filling, Feeding from some ports simultaneously, Without adding calcium hydroxide

## 1. はじめに

インクラインドディスクドライヤ（以下IDDと称す。）は、中空の傾斜させた扇形のディスクを配置した2本または4本のシャフトを有する間接加熱式の乾燥機である。通常は蒸気を熱源とし、ディスク、シャフト及びケーシングを加熱する。IDDは傾斜させたディスクによるクリーニング効果があるため、下水脱水汚泥用の乾燥機として多くの実績があるが、混合生汚泥のような特に付着性が高い汚泥種によっては乾燥機内部への付着が発生し、乾燥能力が著しく低下することが分かっている。その対策として消石灰添加を行ってきたが、消石灰の使用は設備費及びランニングコストが上昇するため事業へのインパクトが大きい。そこで、本研究では付着性が特に高い汚泥に対し、IDDにて消石灰を使用しない方法を開発したので紹介する。

## 2. 開発のコンセプト

脱水汚泥を乾燥させる場合、含水率60%付近までが付着性が高く、それ以下では付着性が低下することがこれまでの経験上分かっている。本開発では以下2つのコンセプトを掲げ、バッチ試験及び連続試験機を用いた試験により検証を行った。なお、蒸発速度の目標値は8kg-H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>H以上とした。

### (1) 乾燥汚泥の戻し灰

乾燥機から排出される乾燥汚泥を乾燥機上流に戻す操作（以下戻し灰と称す。）を行う。乾燥汚泥と脱水汚泥を混合して見かけ上の平均含水率を60%以下とし、付着性の高い含水率帯を回避することにより、乾燥機内部での付着抑制を試みた。

### (2) 脱水汚泥の分散供給

従来、脱水汚泥は乾燥機の上流部1か所に全量供給していたが、供給部付近での高含水率領域の形成により付着が進行することから、乾燥機内に含水率60%以上の高含水率領域が形成されないように、複数箇所に分散して供給を行う。脱水汚泥の一部とそれに見合った量の戻し灰を上流部から供給し、乾燥が進んだ後段で脱水汚泥の一部を供給、更に後段で脱水汚泥を供給するといった方法により、戻し灰量を最小にすることを試みた。

## 3. 試験方法及び結果

### 3.1 バッチ試験機による基礎試験

試験には有効伝熱面積0.3m<sup>2</sup>のIDDバッチ試験機を用いた。試験で使用する脱水汚泥はA処理場より消化汚泥+生汚泥の混合汚泥をご提供いただいた。

まず当初のコンセプトどおり、戻し灰としての乾燥汚泥と脱水汚泥を平均含水率が60%未満となる割合で供給したところ、ディスクやシャフトに汚泥が付着し、シャフトとケーシング間に汚泥が滞留してデッドスペースが発生したため、乾燥不良となった。同比率で事前混合した

ケースでも付着が発生したため、方向性の修正が必要となった。

乾燥汚泥と脱水汚泥の比率、脱水汚泥の供給方法（間欠供給での供給量とインターバル）を変えながら試験を進めた結果、IDD内に十分な量の乾燥汚泥を初期充填した状態から脱水汚泥を供給することで安定した運転が継続できることが判明した。

安定した乾燥を行うためには、供給された脱水汚泥がいかに早く乾燥汚泥と混合されて細かくなり、機内に分散されるかが重要となる。乾燥汚泥の機内充填高さ（以下粉面と称す。）が低いと脱水汚泥がシャフトをスムーズに乗り越えることができずに滞留し、混合に時間を要することになる。逆にディスクが隠れるくらいまで粉面を上げると脱水汚泥がディスク間に巻き込まれにくくなり、同じく混合に時間を要するようになる。シャフトの上端が隠れる程度の粉面だと汚泥の巻き込み、シャフトの越流がスムーズになり、混合、解砕、分散がされやすく、蒸発速度が大きくなる。また機内の平均含水率が40%を超えるあたりからディスク、シャフトへの付着が増加することが確認されたため、常時それ以下となる負荷で運転することが望ましいことが判明した。

バッチ試験機では0.6MPaG（165℃）の蒸気使用条件下で、7kg-H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>Hが最大の蒸発速度であった。

### 3.2 連続試験機による連続試験

試験にはIDD連続試験機を用い、出口堰を設けてディスク24枚分、有効伝熱面積4.2m<sup>2</sup>として試験を行った。回転数は実設備と同じディスク先端の周速0.4m/sをベースとし、回転数を変えた試験も実施した。始めは堰を設けてディスク6枚分（以下1エリア運転と称す。）のみの状態で基礎試験を行い、次に12枚分（以下2エリア運転と称す。）、24枚分（以下全エリア運転と称す。）と領域を広げながら試験を進めた。図1に試験設備のフローを、図2にIDD連続試験機の模擬図を示す。

#### (1) 乾燥汚泥の機内重点高さ（粉面）の影響調査（1エリア運転）

1エリア運転では基礎試験として、乾燥汚泥の機内充填高さ（粉面）の影響調査を行った。粉面がシャフト上となる状態を保持することでバッチ試験時よりも汚泥粒径が細かくなり、蒸発速度の改善が認められた。

#### (2) 乾燥機の各種運転条件に関する影響調査（2エリア運転）

2エリア運転では脱水汚泥の供給個数と供給方法の影響、シャフトの回転数の影響、蒸気圧（温度）の影響、乾燥機本体の傾斜の影響について確認した。

まず脱水汚泥の供給個数は1ヶ所供給と2ヶ所で比較を行った。図2に示すように1ヶ所はディスク12枚を二分する中心位置に供給し、2ヶ所についてはディスク12枚を二分した6枚分、その6枚を更に二分した中心位置2ヶ所に供給口を設けた。1ヶ所については連続供給とし、2ヶ所供給については2ヶ所それぞれから連続供給する方法と1ヶ所ずつ交互に供給する方法の計3種類で比較をした。

シャフトの回転数は実機とのディスク先端での周速合わせと、回転数を下げた2条件の計3条件で比較をした。蒸気圧については0.6MPaG（165℃）と0.7MPaG（170℃）の2条件、乾燥機本体の傾斜について

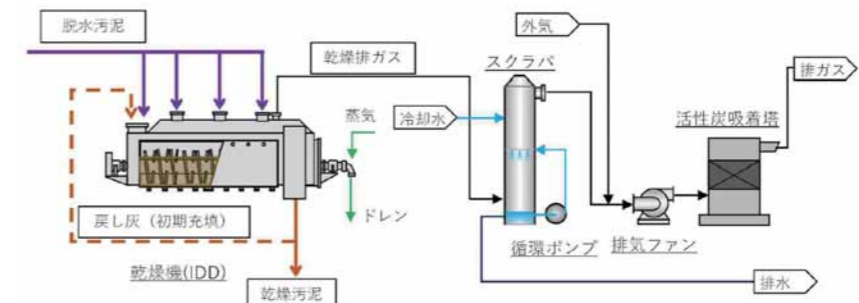


図1 連続試験設備フロー  
Fig.1 Schematic flow of continuous test apparatus

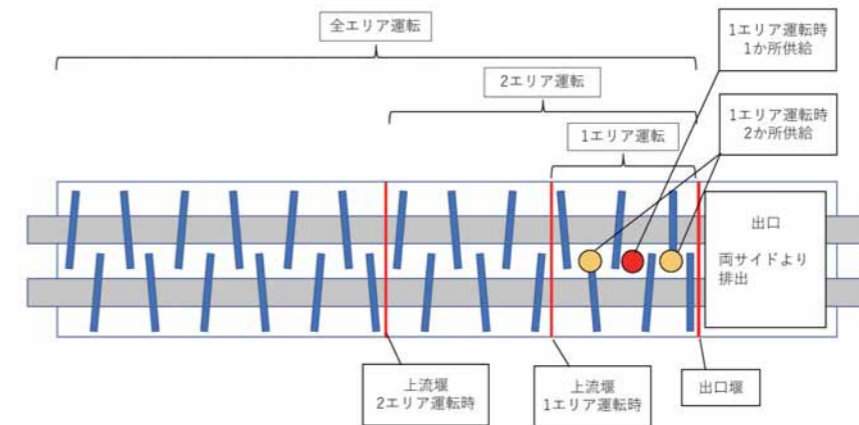


図2 IDD連続試験機模擬図  
Fig.2 Schematic drawing of IDD (continuous test machine)

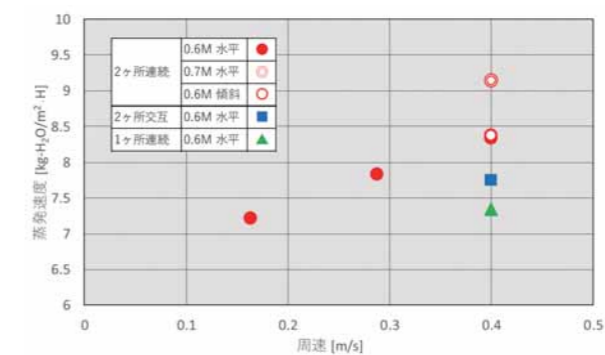


図3 各条件における蒸発速度 (2エリア運転)  
Fig.3 Evaporation rate on each condition (2 areas operation)

は水平と実機相当の傾斜をつけた2条件とした。各条件での蒸発速度を図3に示す。

供給方法については2ヶ所連続供給が最も大きい蒸発速度を得ることができた。そのため2ヶ所連続供給にてシャフトの回転数、蒸気圧、本体の傾斜の影響調査試験を行った。シャフトの回転数については

回転が速いほど大きい蒸発速度が得られた。蒸気圧については圧力が高いほど温度差が大きくなるため、大きい蒸発速度が得られた。本体の傾斜については実機程度の傾斜であれば水平と同等の結果となった。ただし、上流部（出口と反対側）でもシャフト上端が隠れる高さの粉面を維持するため、出口堰を傾斜分高くする必要がある。

(3) 脱水汚泥の供給方法に関する影響調査(全エリア運転)

全エリア運転では供給方法の影響調査をメインに試験を行った。2ヶ所連続、3ヶ所連続、4ヶ所連続、4ヶ所のうちの2ヶ所ずつ交互(出口から奇数番目と偶数番目の交互)の4条件とした。全エリア運転時の汚泥供給位置について図4に示す。また各条件での蒸発速度を図5に示す。

4ヶ所連続運転については負荷を変えた2条件で行っており、棒グラフではその平均値、矢印は2条件の蒸発速度の幅を示している。3ヶ所連続供給と4ヶ所連続供給運転の蒸発速度が8kg-H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>H台の後半という大きい結果となった。試験後の供給口付近の付着量は、3ヶ所連続供給>4ヶ所連続供給となっており、長時間の安定運転という視点から4ヶ所連続供給の方が望ましいと判断した。

バッチ試験及び連続試験の結果から、付着性の高い汚泥をIDDで乾燥させる場合、以下の対策を講じることにより消石灰を添加することなく安定して乾燥できることが明らかとなった。

- ① 運転する前に機内にあらかじめ乾燥汚泥を充填する。
- ② 機内の含水率を40%以下に維持する。
- ③ 機内の乾燥汚泥充填高さをシャフト上になるように保持する。
- ④ 脱水汚泥の供給口を複数箇所設けて分散供給することにより、機内に局所的な高含水領域が生じないようにする。

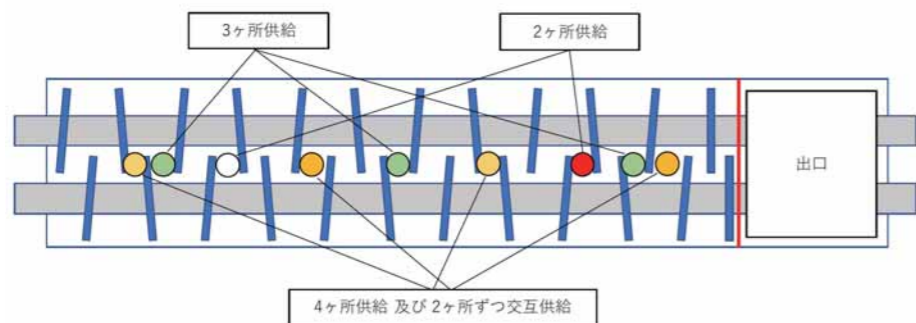


図4 IDD連続試験機における汚泥供給位置(全エリア運転)  
Fig.4 Position of sludge feeding on IDD continuous test machine (All areas operation)

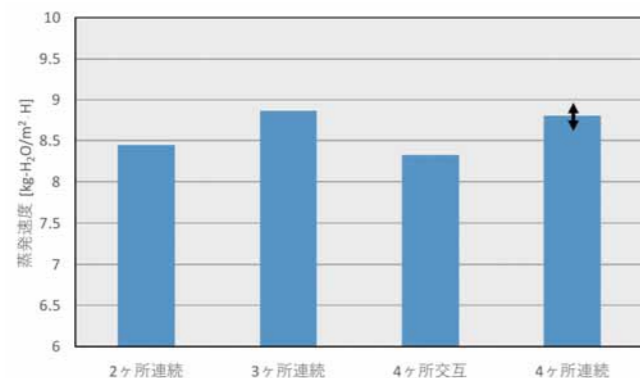


図5 各条件における蒸発速度(全エリア運転)  
Fig.5 Evaporation rate on each condition (All areas operation)

3.3 乾燥汚泥代替品としての初期充填用バイオマスの検討

本システムは乾燥汚泥の初期充填が重要なポイントとなるが、初回の設備起動時には充填する乾燥汚泥が製造されていない。乾燥汚泥のない初回起動時は、負荷を下げて付着を極力抑えながら乾燥を進め、徐々に内部充填量を増加していく方法も考えられるが、その他の方法として、外部から乾燥汚泥の代替品を搬入して初期充填する方法について検討した。ホットプレートを用いた簡易試験を行い、代替品としての可能性を調査した。代替品候補としてはまとまった量が入手可能な有機物であり、汚泥に混入しても燃料利用が可能なバイオマス系のものを選定した。表1に代替品候補として選定したバイオマスを示す。

おがくず、もみ殻、木くずと脱水汚泥の混合品をホットプレート上で乾燥し、乾燥のしやすさを比較した。結果を図6に示す。

おがくず混合品の蒸発速度が最も大きく、もみ殻混合品、木くず混合品の順となった。これは元のバイオマス系代替品の粒度が大きく影響していると考えられ、粒径が細かいほど蒸発速度が大きくなる傾向にある。次にバイオマス系代替品に水を添加し吸湿性を確認した。おがくずと木くずは含水率50%でも問題なく吸湿したのに対し、もみ殻は20%付近から水が浸透するようになり、それ以上では表面に水が浮いた状態となった。設備起動運転中は過乾燥による発火防止のため散

水が必要となるが、吸水性の悪さは懸念材料となる。これらのことからおがくずが最適と判断した。しかしながら、おがくずは世界的な木材の高騰といった問題がある。もみ殻は粉碎することで吸水性が向上し、畜産業などではおがくずの代替品として利用が進んでいることから、粉碎もみ殻で吸水試験を行った。吸湿性は向上し含水率40%程度までは吸湿できることが確認された。もみ殻は季節変動が大きいものの、運賃を除いて無償で入手できるケースもあり、おがくずに次ぐ代替品候補として期待できる。簡易試験による評価であるため、さらなる調査、検討が必要である。

4. 実設備検討

乾燥汚泥を初期充填した状態で複数箇所から同時供給することから、IDD内を押し出し流れではなく、押し出し流れと完全混合槽の中間として考える。計算方法については省略するが、200m<sup>2</sup>機で含水率80%の脱水汚泥を30%まで乾燥させる場合の機内の含水率分布計算結果のグラフを図7に示す。

2ヶ所供給では供給部付近の含水率が40%を大幅に超えており、

供給部付近の付着が発生すると推測される。3ヶ所供給で約40%、4ヶ所供給では40%未満となっており、設備の安定性を考慮すると4ヶ所の方が望ましい。入口出口の条件により3ヶ所供給を採用する場合も十分考えられる。

設備面としては初期充填用の乾燥汚泥を貯留するホッパ、搬送用のコンベヤ類が新たに必要となる。またIDDには複数箇所供給を行うための計器類の追加が必要となる。

5. おわりに

これまでIDDにて消石灰を使用して運転していた高付着性汚泥に対して、消石灰を使用することなく乾燥システムを開発した。乾燥汚泥の初期充填と機内で高含水率領域を形成させないための複数箇所同時供給がポイントであり、0.6MPaG(165℃)蒸気使用の条件下において8kg-H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>H台後半の蒸発速度を得ることができた。しかしながら、実機レベルにスケールアップした時の検証が不足しており、実機での検証運転が課題として残されている。

表1 バイオマス系代替品一覧  
Table1 List of alternative biomass

おがくず	もみ殻	木くず
3mm以下	1~3mm×5~8mm	3~10mm角の薄片(数百μ)
含水率: 12.4%	含水率: 11.2%	含水率: 8.9%
0.14 (かさ比重ゆるめ)	0.10 (かさ比重ゆるめ)	0.05 (かさ比重ゆるめ)
0.18 (かさ比重かため)	0.13 (かさ比重かため)	0.07 (かさ比重かため)

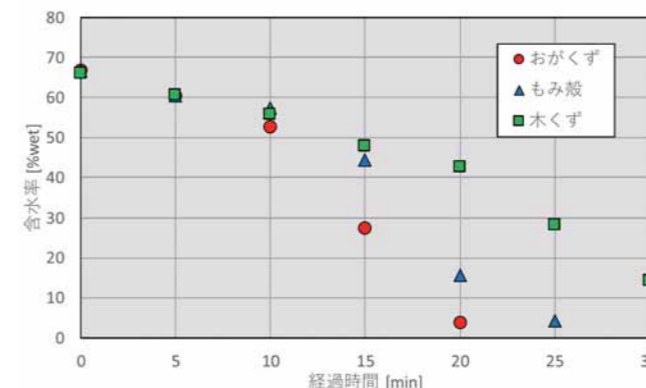


図6 ホットプレート試験による脱水汚泥+代替品の含水率経時変化  
Fig.6 Temporal change of moisture content of sludge and alternative biomass on hot plate test

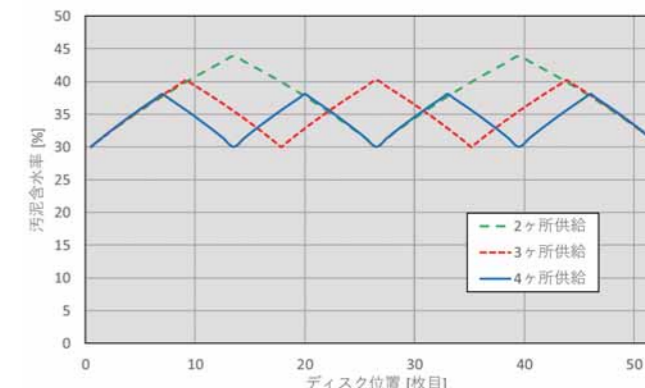
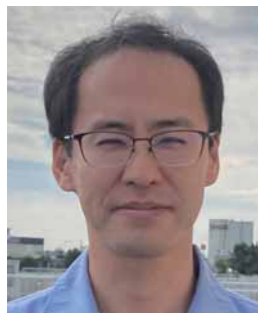


図7 IDD内汚泥含水率分布(計算値)  
Fig.7 Moisture content distribution of sludge in IDD (by calculation)

# 下水からの有機物回収技術に関する基礎的検討

Fundamental Study of the Technology for Recovery of Organic Matter from Wastewater



橋本 悠司 HASHIMOTO Yuji  
月島JFEアクアソリューション株式会社  
技術企画センター研究開発室



高山 祐子 TAKAYAMA Yuko  
月島JFEアクアソリューション株式会社  
技術企画センター研究開発室

## Abstract

The majority of greenhouse gas emissions in the sewage sector is derived from electricity consumption, and the achievement of electricity independence for sewage treatment plants would make a major contribution to the realization of carbon neutrality in the sewage sector. To achieve that goal, intensive energy conservation and energy creation are necessary, and as a way to achieve both of them at the same time, there is the technology to recover organic matter from sewage.

As a basic study regarding the methodology to recover organic matter from sewage, laboratory-scale experiments using actual sewage were conducted, and it has been demonstrated that the target organic matter recovery rate of 75% could be achieved by high-speed MBR technology that combines the high-speed active sludge method and membrane filtration. Also, the impact of dissolved oxygen concentration (DO) and hydrologic retention time (HRT) as operating conditions on the organic matter recovery rate and treated water quality was investigated and is presented here as well.

下水道分野における温室効果ガス排出量の過半は消費電力に由来するものであり、下水処理場の電力自立化を達成することができれば、下水道分野におけるカーボンニュートラルの実現に大きく貢献することができる。そのためには徹底的な省エネルギー及び創エネルギーが必要であり、それらを同時に達成する方法として、下水からの有機物回収技術がある。

下水からの有機物回収手法に関する基礎的な検討として、実下水を用いたラボスケールの実験を行い、高速活性汚泥法と膜ろ過を組合せた高速MBR技術により、目標としている有機物回収率75%が達成可能であることを示した。また、運転条件としてDO(溶存酸素濃度)とHRT(水理学的滞留時間)が有機物回収率や処理水質に与える影響について調査したので併せて紹介する。

キーワード: 高速MBR、バイオソープション、有機物回収  
Keyword: High-rate membrane bioreactor, Biosorption, Recovery of organic matter

## 1. はじめに

国内下水道分野における温室効果ガス排出量はCO<sub>2</sub>換算で年間約530万トンであり、そのうち53.7%が下水処理場の電力由来とされ<sup>1)</sup>、下水道分野におけるカーボンニュートラル実現に向けては、徹底的な省エネルギー及び創エネルギーにより処理場電力の自立化を図ることが、その一助となりうる。

一方、下水処理に広く導入されている活性汚泥法は、下水中の有機物を分解するために多大なエネルギーを必要としている。もし、この有機物を分解せずに除去・回収する手法が実現すれば、大幅な省エネルギー化が可能であり、さらに回収した有機物から嫌気性消化によりバイオガスを得ることで、創エネルギーも同時に達成することが可能となる。本研究では、電力自立化を達成可能なレベルでの有機物回収を実現する手法について、回収率の目標値を75%とし、実下水を用いたラボスケール実験装置を用いて基礎的な検討を行った。

## 2. 検証内容

下水から有機物を回収する手法として物理学的、化学的、生物学的な手法が考えられる<sup>2)</sup>。予備試験において凝集沈殿による物理化学的手法を検討したが、凝集剤添加に伴い経済性が損なわれることが予想された。また、流入下水に含まれる有機物のうち溶存している成分も回収する必要があることから、生物学的手法である「高速活性汚泥法」、また、同法と膜分離を組合せた「高速MBR」について検討を行った。

### 2.1 高速活性汚泥法

高速活性汚泥法 (High-rate activated sludge; HRAS) とは、一般的な標準活性汚泥法よりも短い滞留時間、かつ低い溶存酸素濃度 (DO) 下で運転することで、以下2つの事由により有機物含有率の高い汚泥を回収できるプロセスである<sup>3,4)</sup>。

- ① 微生物による有機物の分解が抑制される。
- ② 溶解性有機物が微生物に吸着されて汚泥として回収できる。

本研究では、高速活性汚泥法の運転条件 (DO 及び汚泥返送率) が有機物回収率に与える影響を調査した。汚泥の回収は高速活性汚泥法の後段に重力沈降槽を設け、沈降分離により行った。なお、最初沈殿池 (図1) の代替プロセスとして検討するため、対象の汚水は実下水処理場から採取した最初沈殿池流入水とした。さらに高速MBRの予備試験として、高速活性汚泥法とろ過による固液分離を組合せた手法についても検討を行った。

### 2.2 高速MBR

高速膜分離活性汚泥法 (高速MBR) は、前述の高速活性汚泥法と膜分離活性汚泥法 (MBR) を組合せたプロセスである<sup>5)</sup>。高速MBRは通常のMBRと比較し、膜ファウリングを引き起こしやすいため、セラミック平膜を用いた高速MBR槽内にスポンジ担体を添加することで膜ファウリングを抑制する方法が報告されている<sup>6)</sup>。

図2に高速MBRのテスト装置を示す。本研究では、先行研究と同様にスポンジ担体を添加した高速MBRにおいて、DO 及び水理学的滞留時間 (HRT) が有機物回収率に与える影響を調査した。なお、対象の汚水は膜ファウリングを引き起こしやすい最初沈殿池の流入水ではなく越流水とした。したがって、実際の下水処理場に導入する場合には、最初沈殿池の後段の反応槽 (図1) が高速MBRに置き換わることになる。

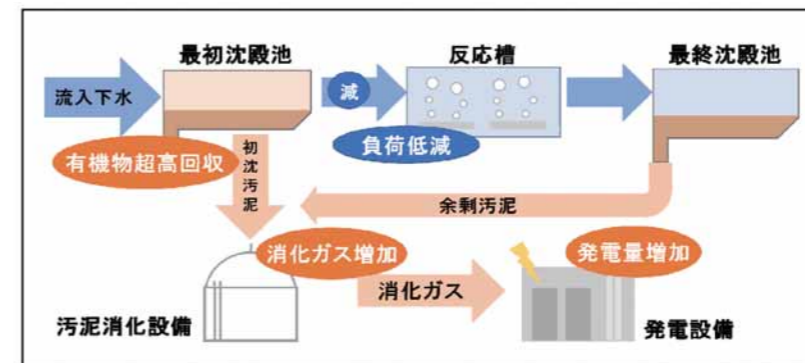


図1 下水からの有機物回収の概念図  
Fig.1 Concept of organic matter recovery from sewage

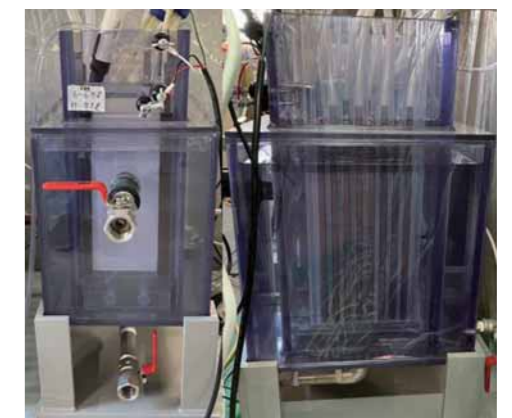


図2 高速MBR装置  
Fig.2 High-rate MBR equipment.

### 3. 実験方法

#### 3.1 高速活性汚泥法

図3に高速活性汚泥法の実験装置フローを示す。原水は下水処理場からサンプリングした最初沈殿池流入水とし、処理量を3 L/hに設定した。生物吸着槽は容量1.5 Lであり、槽内DOを維持するため、槽底部に設置した散気装置よりばっ気を行い、ばっ気風量はDOが一定となるように自動制御を行った。また、生物吸着槽内の汚泥沈降を防止するため、攪拌機により連続的に攪拌を行った。沈殿槽は容量6 Lのものを、内部に設置した撹拌機を約1rpmで回転させ、下部から引き抜いた汚泥の一部は生物吸着槽へ返送し、残りは余剰汚泥として系外へ排出した。

表1に実験条件を示す。実験①では生物吸着槽内DOを1.0mg/Lに統一し、汚泥返送率を33%~100%の範囲で変動させた。実験②では汚泥返送率を33%に固定し、生物吸着槽内DOを変動させ、それぞれ汚泥返送率と生物吸着槽内DOが有機物回収率に与える影響について調査を行った。

#### 3.2 高速活性汚泥法とろ過の組合せ

高速活性汚泥法とろ過による分離を組合せた場合の有機物回収率を推定するため、前項の実験装置から得た試料を複数の孔径のフィルターを用いてろ過し、孔径による有機物回収率の違いを調査した。試料のサンプリング箇所は図3に示す①~③である。②生物吸着槽内の混合液、③処理水をろ過したケースに加え、比較対象として①原水(最初沈殿池流入水)についても調査を行った。

#### 3.3 高速MBR

図4に高速MBRリアクターの概略図を示す。下水処理場内にラボスケールの高速MBR(有効容積7.8 L)を設置し、最初沈殿池越流水を原水として実験を行った。分離膜は孔径0.1μmのセラミック製平

膜を使用し、膜の下部に設置したパイプから散気をすることで、容量10%(v/v)のスポンジ担体を流動させた。膜の逆洗は9分の膜透過運転後に1分上水を通水させて行い、15日間の運転期間中は薬品による膜の洗浄は行わなかった。逆洗時間も考慮した正味の膜フラックスは16 L/m<sup>2</sup>/hとした。表2に各リアクターの運転条件を示す。条件①を対象系とし、条件②ではHRTを1.1hから2.0hに増加させ、条件③ではDOを1.6mg/Lから2.3mg/Lに増加させて比較を行った。

表1 高速活性汚泥法実験条件  
Table1 Test condition of HRAS

項目	実験①		実験②	
	返送率 [%]	DO [mg/L]	返送率 [%]	DO [mg/L]
条件1	100	1.0	33	1.0
条件2	75	1.0	33	0.75
条件3	50	1.0	33	0.5
条件4	33	1.0	33	0.1

表2 高速MBRリアクター運転条件  
Table2 Test condition of high-rate MBR

	条件①	条件②	条件③
HRT [h]	1.1	2.0	1.1
SRT [h]	12	12	12
送風量 [L/min]	3	3	6
pH [-]	7.5	7.4	7.3
温度 [°C]	19.3	19.9	19.0
DO [mg/L]	1.6	1.6	2.3

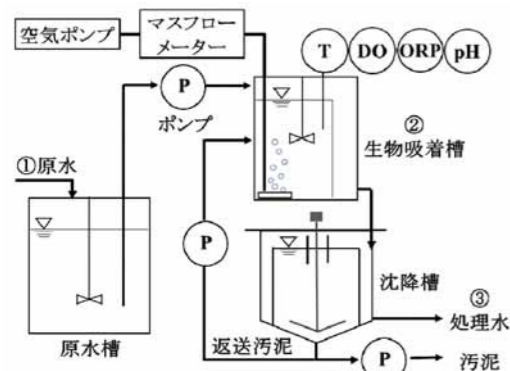


図3 高速活性汚泥法実験装置フロー  
Fig.3 Test equipment of HRAS process

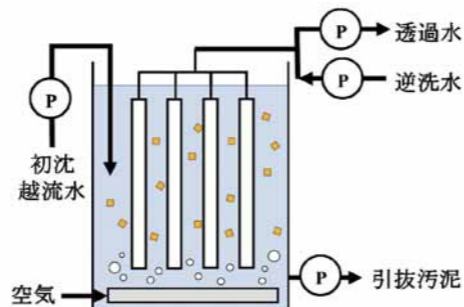


図4 高速MBRリアクター概略図  
Fig.4 Test equipment of high rate MBR

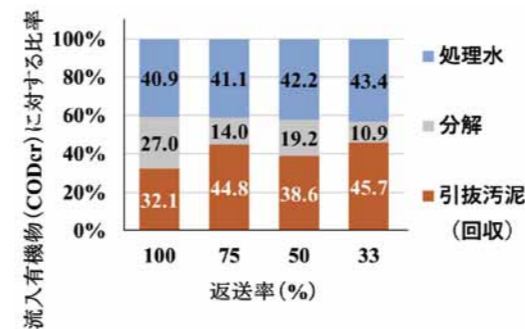


図5.1 返送率と有機物回収率の関係  
Fig.5.1 Relation between return sludge rate and organic matter recovery rate

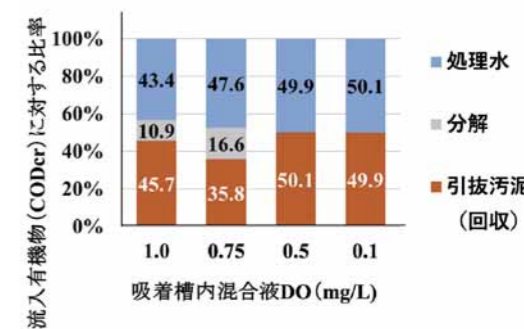


図5.2 DOと有機物回収率の関係  
Fig.5.2 Relation between DO and organic matter recovery rate

### 4. 結果

#### 4.1 高速活性汚泥法

図5.1、図5.2に実験結果を示す。有機物回収率は、原水のCODcr量に対して引抜汚泥として回収されたCODcr量の比率として定義した。また、原水のCODcr量から引抜汚泥及び処理水のCODcr量を差し引いたものが槽内で分解されたCODcrとした。

汚泥返送率の影響を調査した実験①では、若干のばらつきはあるものの返送率が低下するに従い、有機物の分解が抑制され、有機物回収率が増加する傾向を示した。一方、処理水に含まれる有機物量は返送率の低下に伴い増加する傾向が確認された。最も有機物回収率が高かった汚泥返送率33%に条件を固定し、生物吸着槽のDOを変化させた実験②では、DO 1.0 mg/L及び0.75 mg/Lの条件においては有機物の分解が見られたが、DOを下げた0.5 mg/L、0.1 mg/Lの条件では有機物の分解が見られず、有機物回収率は約50%と最も高くなったものの、目標回収率75%を達成することができなかった。また、DOの低下に従い処理水質は悪化する傾向が確認された。

#### 4.2 高速活性汚泥法とろ過の組合せ

図6に実験結果を示す。①原水(最初沈殿池流入水)を直接ろ過した場合、孔径0.45μmで分画した条件においてもCODcr回収率は約65~70%程度であり、目標回収率75%を達成することができなかった。すなわち、孔径0.45μmのフィルターを通過するような溶解性の有機物も回収しなければ、目標回収率の達成は困難である。

②生物吸着槽、③処理水を対象にろ過した場合は、孔径0.45~1μmで分画した条件で目標回収率75%を達成した。高速活性汚泥法(生物吸着)とろ過を組合せることにより、直接ろ過では回収できなかった溶解性有機物も回収することが可能となったため、有機物回収率が向上したものと推察される。

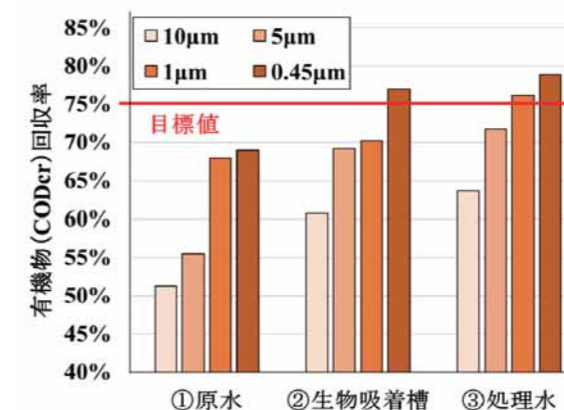


図6 高速活性汚泥法と固液分離との組合せによる有機物回収率  
Fig.6 Organic matter recovery rate of the combination of HRAS and solid-liquid separation

4.3 高速 MBR

図7にCODcrの測定結果から求めた有機物収支を示す。対象系の条件①に対し、HRTを1.1hから2.0hに増加させた条件②では、処理水中の有機物比率が減少し、引抜汚泥の有機物比率も減少しており、リアクター内での有機物が分解される結果となった。HRTが長くなれば、必然的にリアクター内の微生物と有機物の接触時間も長くなるため、有機物が分解されたものと推測される。また、DOを1.6mg/Lから2.3mg/Lに増加させた条件③においても条件②と同様の結果となった。DOが高くなるほど有機物の分解が促進されるため、対象系の条件①と比較して有機物の回収率が低下したものと推測される。条件②、③のいずれも処理水の有機物比率が減少し、処理水質が向上していることから、有機物回収率と処理水質はトレードオフの関係にあった。したがって、HRTとDOの制御により処理水質と有機物回収率をコントロールすることが可能であると示唆された。

15日間の連続運転では膜間差圧が漸増したものの、急激な上昇は見られず、膜ファウリングは十分にコントロールできていた。逆洗とスポンジ担体の膜洗浄により、ファウリングの抑制と有機物回収を両立した運転が可能であった。

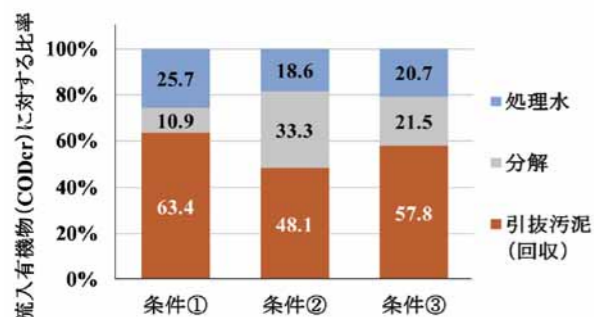


図7 高速MBR有機物収支  
Fig.7 Organic matter balance of high-rate MBR

5. 結論

下水中の有機物を徹底的に回収するためのプロセスとして、「高速活性汚泥法」及び本法とMBRを組合せた「高速 MBR」について基礎的な検討を行い、以下に示す知見を得た。

- ▶ 高速活性汚泥法や流入下水の直接ろ過といった単一手法だけでは、目標の有機物回収率75%を達成できず、高速 MBRにより目標を達成できる可能性が示された。
- ▶ 高速 MBR は、HRT や DO を上げると処理水質が向上するが、有機物の分解が進行し、有機物回収率は低下した。すなわち、処理水質と有機物回収率はトレードオフの関係にあった。
- ▶ 15日間の連続運転において、運転期間中の膜間差圧は十分に抑制的であったことから、担体添加と逆洗によりファウリング抑制と有機物回収を両立した運転が可能であった。

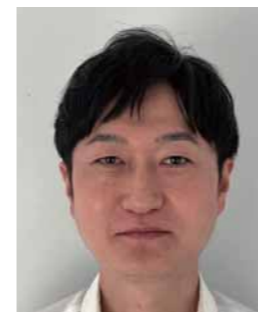
今後は高速 MBR のスケールアップや本システムで回収した汚泥について嫌気性消化試験を行い、バイオガス生成ポテンシャルについて評価を行っていく。

参考文献

- 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) (2024年7月現在)
- 2) I.Sancho et al., 2019. Science of the Total Environment., 647, 1373-1384.
- 3) Guven et al., 2019. Progress in Energy Combustion Science., 70, 145-168.
- 4) 下水道施設計画・設計指針と解説(2019)
- 5) Faust et al., 2014. Water Res.56,258-266.
- 6) 佐賀サムエル旗生ら(2021).第58回下水道研究発表会講演集,745-747.

高温アブレシブ摩耗試験機の開発と各種SCH材の高温摩耗特性

Development of a High-Temperature Abrasive Wear Testing Machine and High-Temperature Wear Characteristics of Various SCH Materials



伊藤 久敬 ITO Hisataka  
月島環境エンジニアリング株式会社  
プロジェクト部



清水 一道 SHIMIZU Kazumichi  
国立大学法人室蘭工業大学  
もの創造系領域 機械ロボット工学ユニット



楠本 賢太 KUSUMOTO Kenta  
国立大学法人室蘭工業大学  
もの創造系領域 機械ロボット工学ユニット

Abstract

The combustion temperature in industrial waste incinerators has increased recently, and as a result, the grates of gasification kiln stoker furnaces experience faster wear.

Since the grate life affects the length of operation and is directly related to running costs, it is extremely important to select the most suitable material considering cost-effectiveness.

We have developed a high-temperature abrasive wear tester capable of testing under high temperatures of 1173 K and confirmed the wear characteristics of various SCH materials under high temperatures, including other high-temperature tests.

昨今、産業廃棄物焼却炉の炉内燃焼温度が高温となる傾向にある。それにより、当社で取り扱うガス化キルン・ストーカー炉のストーカー炉火格子が早期損耗するケースが見受けられる。

火格子の寿命は操業日数、ランニングコストに直結するため、費用対効果を含め最適な材質を選定することが極めて重要となる。

今回1,173Kという環境下で試験のできる高温アブレシブ摩耗試験機を開発し、そのほか高温下で実施できる試験を含め各種SCH材の高温下での摩耗特性を確認した。

キーワード：高温アブレシブ摩耗試験機、高温エロージョン摩耗試験機、SCH材の高温摩耗特性

Keyword : High-temperature abrasive wear tester, High-temperature erosion tester, High-temperature wear characteristics of SCH materials.



## 1. はじめに

産業廃棄物の焼却設備ではエネルギーの効率利用、高効率発電の観点から、焼却炉内燃焼温度の高温化が求められている。また、産業廃棄物が多種多様となり性状のばらつきによる燃焼負荷の変動が大きくなることから、燃焼温度が高温になる傾向が見受けられる。そのため、当社で取り扱うガス化キルン・ストーカ炉のストーカ炉で使用される火格子では高温腐食や高温摩耗に起因する損傷劣化が問題となっている。特に、高温度域における耐摩耗性を向上させることが操業運転日数の確保およびコストの面から極めて重要である。

高温度域における耐摩耗性の評価としては高温下での硬さ試験やエロージョン摩耗試験が一般的である。それらに加え、今回はストーカ炉の使用環境下に近い条件による評価を行うことを目的に、高温アブレシブ摩耗試験機を開発した。これらの試験方法により、ニッケル(Ni)含有量の異なるJIS材にて、各種高温下での耐摩耗性の評価を行った。

なお、試験機の開発及び試験の評価は国立大学法人室蘭工業大学と共同で実施した。

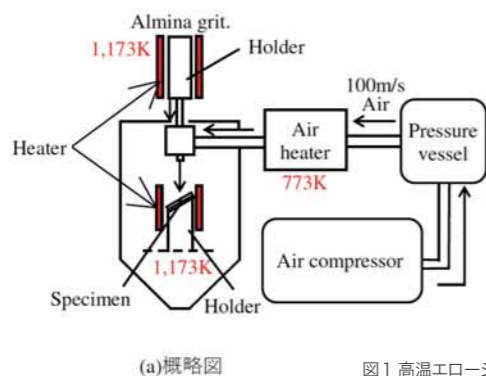
## 2. 各種高温試験機の仕様

### 2.1 高温硬さ試験機

高温硬さ試験には株式会社ミツヨ製の高温ピッカース硬さ試験機(AVK-HF)を用いた。

### 2.2 高温エロージョン摩耗試験機

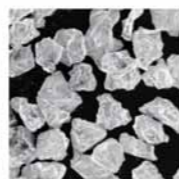
試験機の概略を図1に示す。高温環境下を忠実に再現可能なエロージョン摩耗試験機を使用した。供試材は衝突角度が変更できるホルダに固定し、ヒータにて加温できる試験機となっている。供試材に衝突させる粉体(アルミナグリット)は粉体用のホルダに充填し、ヒータにて加温する。粉体はエアヒータにて加温された圧縮空気により射出され供試材に衝突させる。



(a)概略図

図1 高温エロージョン摩耗試験機

Fig.1 High temperature erosion wear tester



粒径 0.85~1.18mm  
硬さ 1,250HV  
融点 2,345K

(b)粉体：アルミナグリット

## 3. 各種高温試験および結果

### 3.1 試験条件および評価方法

#### 3.1.1 供試材

供試材は、Ni含有量の異なる耐熱鋳鋼であるオーステナイト系のSCH17、SCH22およびSCH42を用いた。供試材の化学組成を表1に示す。化学組成は発光分光分析装置およびエネルギー分散型X線分析(EDS)を用いて測定した。

表1 供試材の化学組成  
Table1 Chemical composition of sample material

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	W
SCH17	0.28	0.81	1.35	28.8	8.52	Bal.	-
SCH22	0.36	1.00	1.41	25.2	17.9	Bal.	-
SCH42	0.31	1.27	1.30	27.2	41.6	Bal.	5.0

#### 3.1.2 高温硬さ試験

供試材の寸法は7.0×7.0×5.0mmとし、試験温度は1,173Kとした。供試材の昇温速度は10K/minとし、試験温度に達してから5分間保持した後、試験を行った。不活性ガスにはアルゴンガスを使用し、圧子にはダイヤモンド圧子を用いた。試験荷重は98Nとし、荷重保持時間は10秒とした。

評価方法は圧痕の対角線の長さを0.5μm単位まで読み取り、直交する対角線の長さとの平均値を用いて換算表から硬さを算出した。この条件において7点測定し、最大値と最小値を省いた5点の平均値を各供試材の高温ピッカース硬さとした。

#### 3.1.3 高温エロージョン試験

試験条件は、供試材温度および粉体温度を1,173K、圧縮空気温度を773Kに加温し、圧縮空気速度は100m/sとし試験片に4回、計2kgのアルミナグリットを衝突させた。試験片寸法は50×50×10mmとし、衝突角度を30degとした。

評価方法は被衝突材の摩耗量を粉体の総噴射量で除した損傷速度(cm<sup>3</sup>/kg)とした。摩耗試験前後における供試材質量を電子天秤(精度0.1mg)にて測定し、その質量差を密度で除して摩耗体積を算出し摩耗量とした。

## 3.2 試験結果

### 3.2.1 組織観察

高温試験を行う前に各供試材のNi濃度の違いによる表面形態を評価するために組織観察を行った。組織写真および炭化物面積率を図2に示す。

すべての供試材で基体組織はオーステナイトである。光学顕微鏡(OM)からは、SCH22及びSCH42では、炭化物がオーステナイト粒界に晶出している様子が観察された。また、EDS面分析結果より炭化物はクロム(Cr)を主体に形成されていた。

炭化物面積率はSCH17で3.2%、SCH22で5.5%、SCH42で16.3%となりNi含有量の増加に伴い、炭化物面積率も増加する傾向が見られた。

### 3.2.2 高温硬さ測定結果

高温硬さ試験結果を図3に示す。SCH42が146HVと最も高い値を示し、SCH17が108HVで最も低い値を示した。炭化物面積率の増加に伴い、高温硬さが高くなる傾向を示した。

### 3.2.3 高温エロージョン摩耗試験結果

高温エロージョン摩耗試験結果を図4に示す。SCH17が2.746×10<sup>-2</sup>cm<sup>3</sup>/kgで最も損傷速度が小さく、SCH42の損傷速度が最も大きく

	SCH17	SCH22	SCH42
OM			
SEM			
EDS (Cr)			
炭化物面積率	3.2 %	5.5 %	16.3 %

図2 組織写真および炭化物面積率  
Fig.2 Structure photo and carbide area ratio

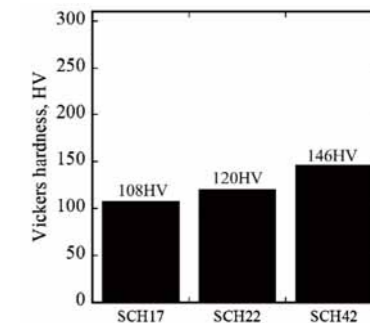


図3 高温硬さ試験結果  
Fig.3 High temperature hardness test results

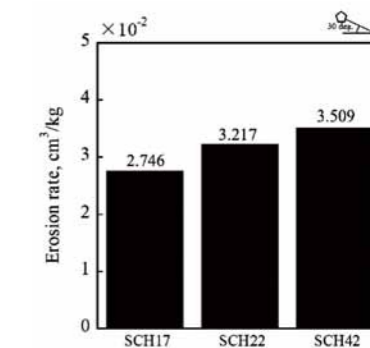


図4 高温エロージョン摩耗試験結果  
Fig.4 High temperature erosion wear test results

摩耗輪を供試材に押し付けることにより、アブレシブ摩耗を生じさせる装置とした。

本試験機の仕様は荷重約60、120、180N、回転数250～350rpm、試験温度は室温～1,073Kとなる。供試材はヒータを設置したホルダに固定し、所定の温度まで自動加温、温度制御できる試験機となっている。

## 5. 高温アブレシブ摩耗試験および結果

### 5.1 試験条件および評価方法

供試材を約1,073Kに加温し、供試材を摩耗輪に荷重61.74Nにて押し付け、350rpmの回転数で30秒間の試験時間とする指標とした。

試験前後の質量を電子天秤(測定精度0.1mg)で測定し、摩耗量を算出した。各供試材における密度が異なるため、摩耗量のみで評価した場合、正確な評価ができない。そこで摩耗量の評価には摩耗した体積と荷重、摺動距離の関係である摩耗率(Wear rate: mm<sup>3</sup>/N・m)とした。評価式を次に示す。

$$\text{摩耗率}[\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}] = (\text{摩耗減少量}[\text{g}]/\text{供試材の密度}[\text{g}/\text{mm}^3]) / (\text{荷重}[\text{N}]\times\text{摺動距離}[\text{m}])$$

### 5.2 試験結果

高温アブレシブ摩耗試験結果を図6に示す。SCH17が6.033mm<sup>3</sup>/N・m×10<sup>-3</sup>と最も摩耗率が低く、SCH42が最も摩耗率が高い結果となった。高温エロージョン摩耗試験同様、高温硬さが高い値の材料ほど高温摩耗特性が悪い傾向を示した。

## 6. 耐摩耗試験の考察

高温エロージョン摩耗特性及び高温アブレシブ摩耗特性は同様の傾向を示し、高温硬さが高い材料ほど高温耐摩耗特性が劣る結果となった。

前述のとおり一般には高温硬さが高い材料ほど高温エロージョン摩

耗特性が良いことが報告されている。そこで、高温エロージョン摩耗メカニズムを考察するために、高温エロージョン摩耗試験後の断面観察を行った。SEM及びEDS(Cr)面分析の結果を図7に示す。各供試材とも摩耗表面に晶出炭化物が確認された。SCH17では微細な針状の炭化物が晶出していたが、SCH42では粗大な炭化物が基地のオーステナイト結晶粒を包むように析出していた。そのため、SCH42では粉粒体の衝突によって、材料表面近傍の結晶粒界に晶出した脆い炭化物が粉碎され、基地とともに摩耗面から離脱していくことで摩耗が進展したと考えられる。

Niはオーステナイト安定化元素であり、オーステナイト中に炭素(C)の代わりに固溶する。そのため、Ni含有量の増加に伴いオーステナイト粒界の炭化物が粗大化し、高温硬さは上昇したものの摩耗量が増加したと推察される。

## 7. おわりに

本試験では各種SCH材の高温摩耗特性を調査した。Ni含有量が多く、高温硬さが高い材料ほど高温下での耐摩耗性が低い傾向を示した。

今回高温エロージョン摩耗試験機に加え、高温アブレシブ摩耗試験機を開発し、実際のストーカ炉の環境下に近い新しい試験方法による評価手法を検討した。

今後、今回得られたNi含有量、炭化物の晶出形態の違いによる高温摩耗特性の知見を基に、新規材料の開発も検討していく。

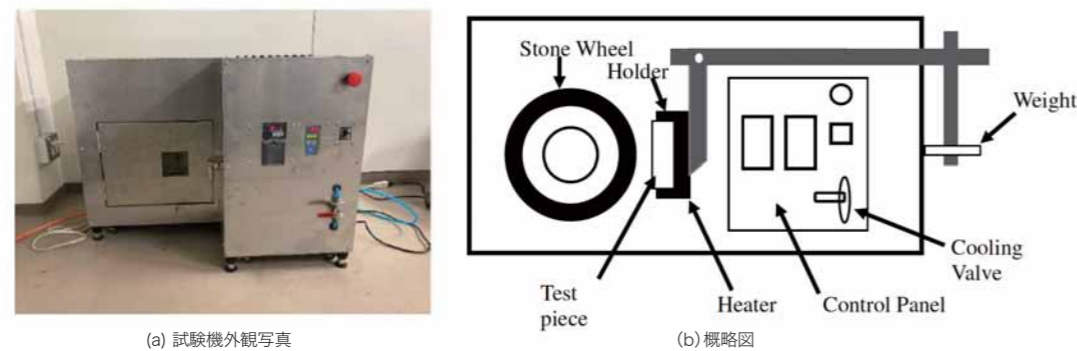


図5 高温アブレシブ摩耗試験  
Fig.5 High temperature abrasive wear tester

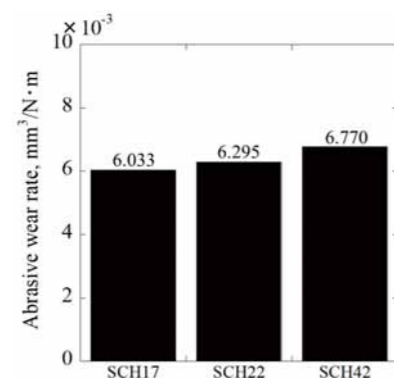


図6 高温アブレシブ摩耗試験結果  
Fig.6 High temperature abrasive wear test results

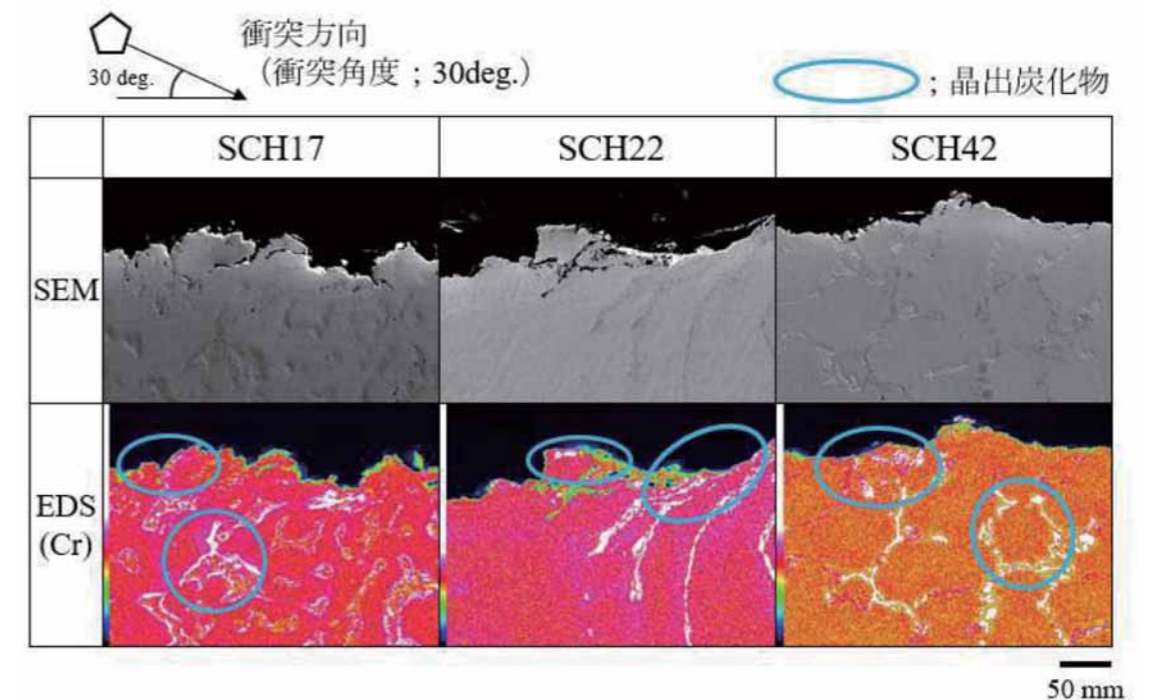


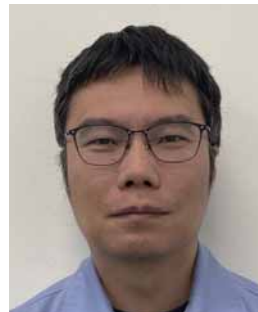
図7 摩耗断面  
Fig.7 Wear cross section

### 参考文献

- 1) Kazumichi Shimizu, Riki Hendra Purba, Kenta Kusumoto, et al. : Wear, Vol.426-427 Part A (2019) pp.420-427
- 2) Kenta Kusumoto, Kazumichi Shimizu, et al. : Materials and Design Vol.88 (2015) pp.366-374

# CRYSTALLEX<sup>®</sup> Type VF、BoCross<sup>®</sup>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

Fine Particle Production Process by the Combination of CRYSTALLEX Type VF, BoCross Filter, and Inclined Disc Dryer



木村 敏之 KIMURA Toshiyuki

月島機械株式会社  
計画部

## Abstract

近年、二次電池正極活物質前駆体などの製造において、最終製品の性能を向上するために可能な限り微粒子の粒径を小さくすることが望まれている。しかし、d50粒径で数 $\mu\text{m}$ のスラリーは、ろ過性が悪く、フィルタープレス（加圧ろ過）の適用も困難となる。また、フィルタープレス方式では、ケーキ層の全体を均一に洗浄することが難しい。

本稿では、CRYSTALLEX<sup>®</sup> Type VFで生産した微粒子スラリーを、BoCross<sup>®</sup>フィルタでろ過・洗浄し、得られた濃縮スラリーをインクラインドディスクドライヤで、スラリーから乾燥するプロセスの検討結果を報告する。

キーワード：反応晶析、クロスフローろ過、洗浄、乾燥、正極材前駆体  
Keyword：Reaction crystallization, Crossflow filtration, Washing, Drying, Precursor of cathode material

## 1. はじめに

二次電池分野などの無機系、セルロースなどの有機系、様々な微粒子の需要が伸びている。新たな高性能粒子の開発が進み、ミクロン、ナノ粒子の市場が拡大傾向にある。種々の固体、スラリーを扱ってきた月島機械として、晶析、ろ過、乾燥などのコア技術をカスタマイズし、微粒子分野にも技術を展開すべく、各単位操作機器、プロセスの検討を行っている。

近年、二次電池正極活物質前駆体などの製造において、最終製品の性能を向上するために可能な限り微粒子の真球度を高く、粒径を小さくすることが望まれている。しかし、反応晶析の条件を調整して、d50粒径で数 $\mu\text{m}$ のスラリーを生産した場合、ろ過工程において、形成されるケーキ層のろ過抵抗が非常に大きくなるため、一般に使用されるフィルタープレス（加圧ろ過）などの適用は困難である。また、フィルタープレス方式では、ろ室全体を均一なケーキ厚みとすることが難しく、洗浄水はケーキ厚の薄い箇所に集中して透過しやすい一方、ケーキが厚い箇所は洗浄水が透過しにくいいため、ケーキ層の全体を均一に洗浄することが難しかった。

本稿では、CRYSTALLEX<sup>®</sup> Type VF（以下VFC）で生産した微粒子スラリーを、BoCross<sup>®</sup>フィルタ（以下BXF）によりろ過・洗浄し、BXFからの濃縮スラリーをインクラインドディスクドライヤ（以下IDD）で乾燥するプロセスの検討結果を報告する。

## 2. 各機器の特徴

自社機器であるVFC、BXF、IDDの特徴を下記に記載する。

### <VFCの特徴>

- ・正極材前駆体の場合で、d50粒径：3～13 $\mu\text{m}$ と広い範囲の製造に適用可能
- ・真球度の高い微粒子結晶を製造可能
- ・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
- ・要求品質に応じて連続式、バッチ式の両方に適用可能

### <BXFの特徴>

- ・分離可能な固体粒子径0.01 $\mu\text{m}$ （MF、UF）以上
- ・ろ液中への固形物の漏れがなく、固体を完全回収
- ・均一な洗浄が可能



図1 VFC-D50試験機  
Fig.1 VFC-D50 test machine

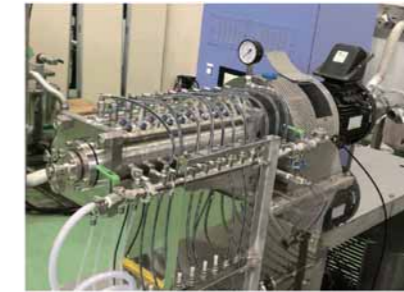


図2 BXF-0.26m²試験機  
Fig.2 BXF-0.26m² test machine



図3 IDD-0.56m²試験機  
Fig.3 IDD-0.56m² test machine

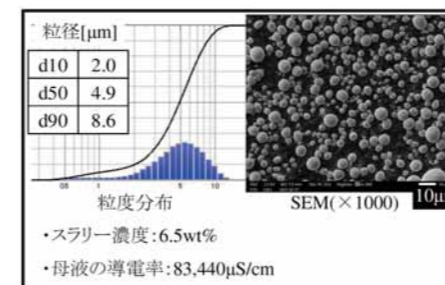


図4 VFC出口スラリー分析データ  
Fig.4 Analysis data of VFC outlet slurry

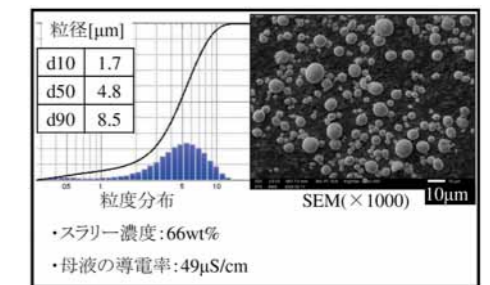


図5 BXF出口スラリー分析データ  
Fig.5 Analysis data of BXF outlet slurry

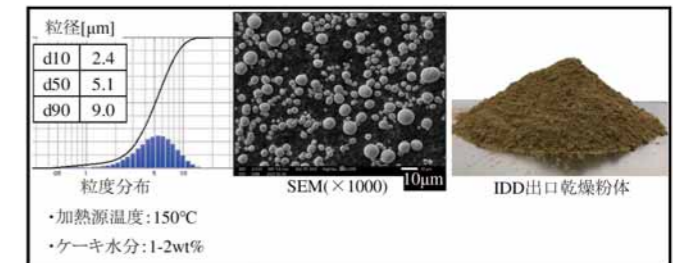


図6 IDD出口乾燥粉体分析データ  
Fig.6 Analysis data of IDD outlet dry powder

- ・スラリーの高濃縮が可能
  - ・密閉構造
- <IDDの特徴>
- ・傾斜ディスクによるセルフクリーニング効果により、付着性のある処理物にも適用可能
  - ・単位容積あたりの伝熱面積が高く、省スペース
  - ・加熱源に蒸気又は熱媒油を用いており、200 $^{\circ}\text{C}$ 程度までの加熱処理が可能
  - ・間接加熱型のため、排気量が少ない

## 3. 適用確認試験

### 3.1 試験概要と試験装置

R&Dセンターに設置した小型の各試験装置（Fig.1～3）を用いて、正極材前駆体の反応晶析（連続式）、ろ過洗浄、乾燥試験を行い、以下について確認を行い、適用可否を評価した。

- (1) VFCで生成したスラリーの母液に含まれる不純物が除去されていること
- (2) BXFで濃縮されたスラリーがIDD内でダマにならずに乾燥粉体になること
- (3) 各工程で粒子の破碎、粒度分布の変化が少ないこと

### 3.2 試験結果と評価

試験結果をFig.4～6に示す。なお、原料液由来の母液中不純物である $\text{Na}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NH}_3$ 除去の指標として、導電率を用いた。

- (1) VFCで生産されたスラリーを、BXFでスラリー濃度6.5wt%から66wt%まで濃縮できた。  
（本スラリーはスラリー濃度66wt%でも流動性があり、送液が可能であった）
- (2) ろ液は透明であり、固形物のろ液側への損失はなかった。
- (3) イオン交換水による洗浄により、ろ液の電気伝導率が処理前の1/1700となり、十分に洗浄された。
- (4) BXFで65wt%まで濃縮されたスラリーをIDDに投入し、Fig.6に示す乾燥粉体を得ることができた。
- (5) BXF、IDDの処理を経ても、d50粒径はほとんど変わらなかった。  
BXF、IDD処理により破損された粒子の増加は、SEMで確認されなかった。  
以上より、正極材前駆体の反応晶析、ろ過・洗浄、乾燥に対して、VFC-BXF-IDDプロセスの適用を確認することができた。

## 4. VFC-BXF-IDDプロセス

### 4.1 プロセスの特徴

VFCにより真球度の高い粒子を生成し、サブミクロンまで対応できるBXFをろ過・洗浄に適用して、IDDでスラリーからの乾燥を実現することで、以下の特徴を持ったプロセスを構築できる(特許出願中)。

- ・粒径が小さく、従来のろ過機ではろ過・洗浄が難しい微粒子製造に適用可能
- ・ろ液中への粉体ロスがなく、回収率が高い
- ・付着、閉塞などのトラブルが起きやすいろ過機と乾燥機間の脱水ケーキの搬送機、解砕機、粉体定量供給機が不用(ただし、高濃度スラリーのハンドリングに対する考慮は必要)
- ・反応晶析で生成した球形粒子をろ過・洗浄・乾燥して乾燥粉体を製造することで、乾式粉砕での微粒子製造よりも、真球度の高い粒子を生産可能

### 4.2 プロセスフロー

プロセス概要・フローをFig.8~10に示す。

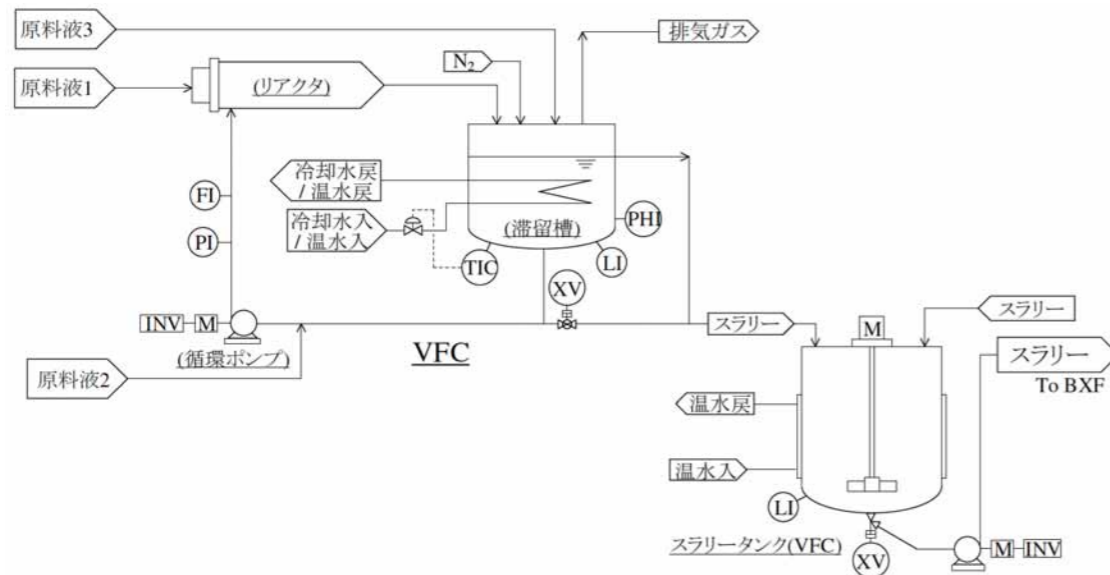
## 5. まとめ

本稿では、VFC-BXF-IDDを組み合わせた微粒子製造プロセスの検討結果を紹介した。本プロセスは、特にd50粒径で数 $\mu\text{m}$ の微粒子製造に対して、真球度、洗浄性、回収率、マテリアルハンドリングトラブル回避の点で優位性が出せると考えている。引き続き、プロセスを構成する自社機器のブラッシュアップとともに、補機や制御システムを含めた最適化、コンパクトな配置設計を進めていきたい。

また、今回は正極材前駆体を対象に本適用確認試験を行ったが、今後は、二次電池材料分野以外でも試験提案、案件発掘に努め、微粒子分野での受注拡大につなげたいと考えている。

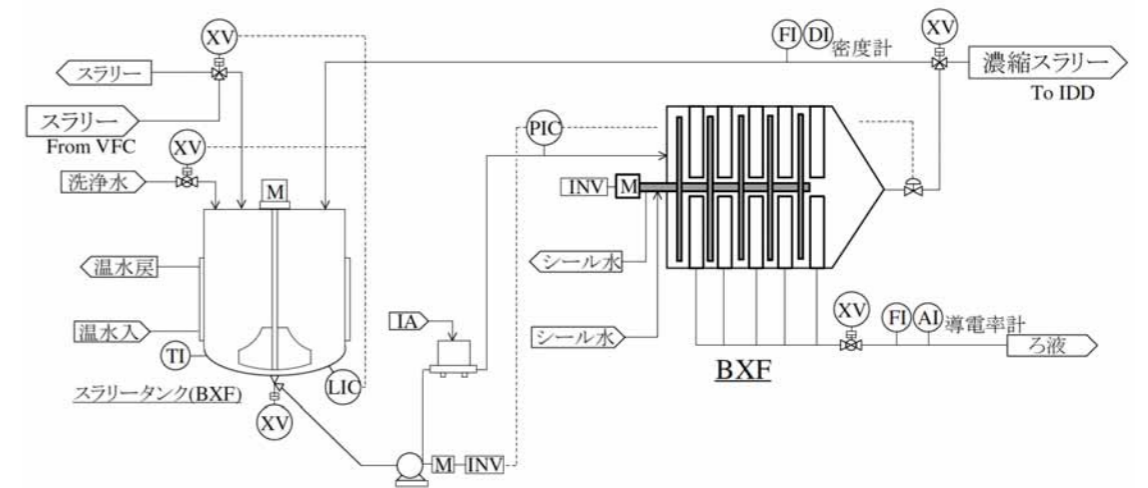


図7 VFC-BXF-IDDプロセスのブロックフロー  
Fig.7 Block flow diagram of VFC-BXF-IDD combination process



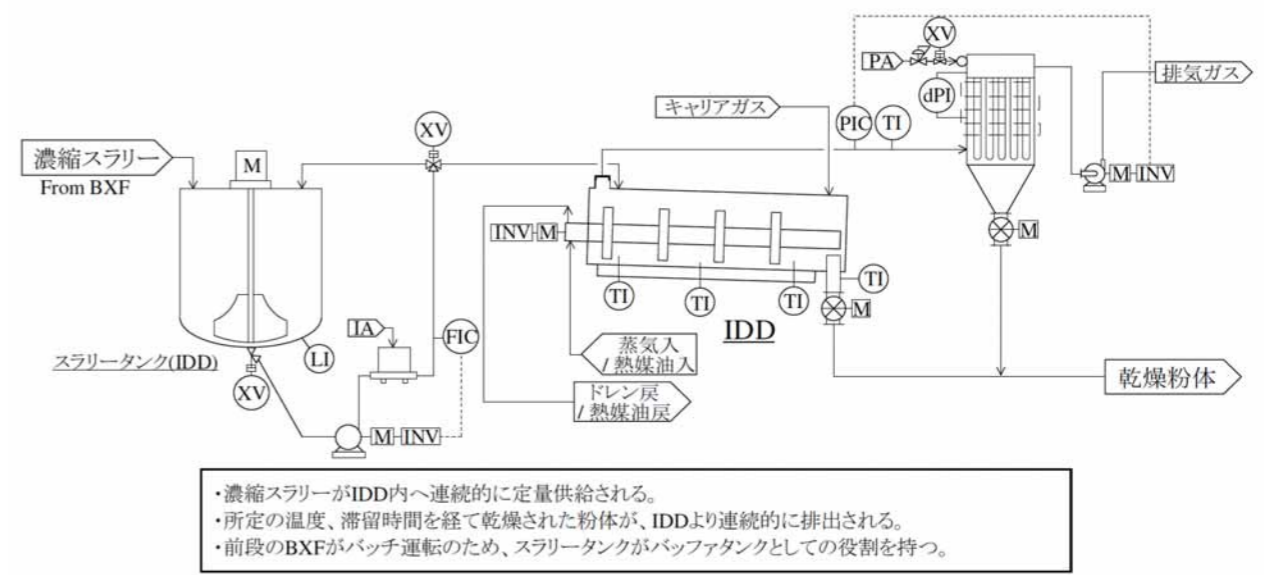
- ・循環ポンプにより系内のスラリーがリアクタ、滞留槽を循環し、リアクタ内では強撹拌場が形成される。
- ・主原料液が強撹拌場に定量供給され、反応により球状粒子が生成される。
- ・滞留槽は結晶の成長に必要な滞留時間を確保する役割を担う。
- ・連続式では、供給原料液と等量のスラリーが、滞留槽よりオーバーフローでスラリータンクへ排出される。
- ・後段のBXFがバッチ運転のため、スラリータンクがバフファタンクとしての役割を持つ。

図8 VFC周りプロセス概要・フロー  
Fig.8 Process outline and process flow of VFC



- (1) スラリータンク(BXF)にスラリーが張り込まれる。スラリーがBXFへ圧入され、ろ液は連続的に排出される。ろ液が排出され濃縮されたスラリーはスラリータンクへ返送、スラリーがスラリータンクとBXF間で循環される。ろ液が抜かれた分、スラリーがスラリータンク(BXF)に補給される。スラリータンク内が所定のスラリー濃度になるまで継続され、スラリーが初期濃縮される。
- (2) 初期濃縮後、スラリー補給は停止され、洗浄液がスラリータンクに補給される。同様にろ液が抜かれることで、母液が洗浄液に置換される。
- (3) ろ液の導電率が所定値まで低下したら、洗浄終了とみなし、洗浄液の補給は停止される。スラリーは送液可能な性状が保てる限界まで最終濃縮される。
- (4) 最終濃縮されたスラリーがスラリータンク(IDD)に移送され、(1)の工程に戻る。

図9 BXF周りプロセス概要・フロー  
Fig.9 Process outline and process flow of BXF



- ・濃縮スラリーがIDD内へ連続的に定量供給される。
- ・所定の温度、滞留時間を経て乾燥された粉体が、IDDより連続的に排出される。
- ・前段のBXFがバッチ運転のため、スラリータンクがバフファタンクとしての役割を持つ。

図10 IDD周りプロセス概要・フロー  
Fig.10 Process outline and process flow of IDD

### 参考文献

- 1) 銅谷陽：渦流式微粒子晶析装置を用いた電池材料生産技術の開発, TSK技報No.21, pp.6-13 (2018)
- 2) 神戸達哉：渦流式微粒子晶析装置の新展開, TSK技報 No.23, pp.30-32 (2020)
- 3) 栗田新平：ダイナミッククロスフローろ過装置 BoCross<sup>®</sup>フィルタ, TSK技報 No.23, pp.14-20 (2020)
- 4) 佐藤澄人：二次電池材料向乾燥機, TSK技報 No.22, pp.26-29 (2019)

# MAPにより脱水ろ液から効率的にリンを回収する技術に関する実証研究

Demonstration Study on Technology for Efficient Phosphorous Recovery from Dewatering Filtrate Using MAP



青木 順 JUN Aoki  
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 下水計画部



斉藤 功 ISAO Saito  
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 下水計画部

## 1. はじめに

わが国では、肥料原料となるリンのほぼ全量を輸入に頼っているが、昨今の国際情勢などに伴う輸入価格の高騰を受け、国内における代替資源の確保が課題となっている。本技術は、下水汚泥資源から効率的にリンを回収し、肥料原料として利用、肥料の国産化、安定供給に寄与するものである。

月島JFEアクアソリューション(株)と横浜市が共同で応募した本技術の提案が、国土交通省の「下水道革新的技術実証事業(B-DASHプロジェクト)」の一つとして採択され、2023年度より国土技術政策総合研究所からの委託研究として実証を行い、得られた成果を基に技術の普及拡大をはかるものである。



図1 MAPの一例  
Fig.1 An example of MAP

## 2. 本技術の概要、特徴

本技術は、消化汚泥の脱水ろ液に水酸化マグネシウムを注入し、脱水ろ液中の溶解性リンを、肥料原料として利用可能なMAP(リン酸マグネシウムアンモニウム)として結晶化させ、粒子の状態で回収するものである。

図1にMAPの一例を示す。

### 2.1 従来のMAPによるリン回収技術

従来のMAPによるリン回収の基本フローを図2に示す。装置は主に、原水供給手段、反応塔及び分離部、処理水中の微細なMAP粒子を回収する液体サイクロン、反応塔内で成長したMAP粒子の引抜き手段、MAP分離装置、ホッパー、及び水酸化マグネシウムの注入装置から構成される。

技術の概要は以下のとおりである。

- ・MAPの結晶化反応が行われる反応塔は、二重円筒構造となっており、原水は内筒へ供給される。
- ・同時に、塔の下部より内筒へ空気を供給することにより、内筒の中では上昇流、内筒の外側では下降流となる循環流が形成される。
- ・反応塔上部より水酸化マグネシウムを注入することにより、脱水ろ液中のリン酸イオンとアンモニウムイオンが、マグネシウムイオンと反応してMAPの結晶が生成する。
- ・生成した微細なMAPの結晶は、反応塔内の循環流にともない流動しながら、結晶表面で生じる晶析反応の進行により成長し、粒径の大きくなったMAPの結晶が反応塔下部(コーン部)に沈降する。

- ・処理水は、MAP反応塔上部の分離部から越流し流出する。処理水とともに、微細なMAP粒子の一部が流出するため、液体サイクロンにより微細なMAP粒子を回収し、反応塔へ戻すことにより、MAPの回収率を高める。
- ・反応塔下部に沈降したMAP粒子を定期的(数回/週程度)に引き抜き、MAP分離装置により水切りを行った後、ホッパーに貯留する。

### 2.2 本技術の特徴

今回のB-DASHプロジェクトにおける実証技術フローを図3に示す、また、本技術の特徴を以下に記載する。

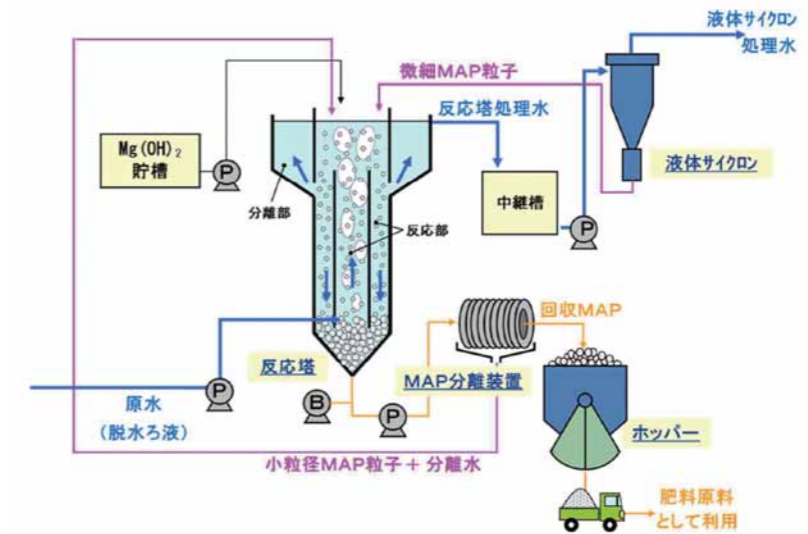


図2 従来のMAPによるリン回収の基本フロー  
Fig.2 Basic flow of phosphorus recovery using MAP

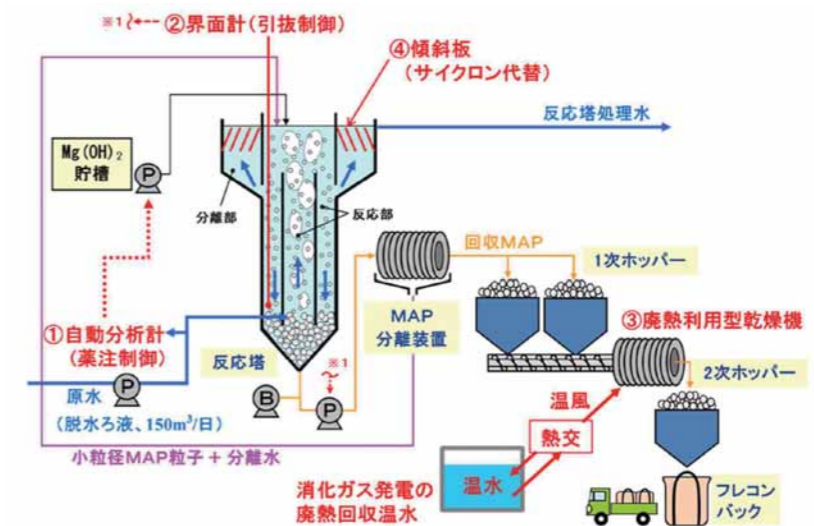


図3 本技術の実証フロー  
Fig.3 Demonstration flow of this technology

## Abstract

わが国では、肥料原料となるリンのほぼ全量を輸入に頼っており、また近年価格が高騰している。このため、下水汚泥資源からリンを回収し、肥料原料として利用することが期待されている。月島JFEアクアソリューション(株)と横浜市が応募した本技術は、国土交通省の「下水道革新的技術実証事業(B-DASHプロジェクト)」の一つとして採択され、2023年度より実証研究を行っている。本技術は、消化汚泥の脱水ろ液に水酸化マグネシウムを注入し、脱水ろ液中の溶解性リンを肥料原料として利用可能なMAP(リン酸マグネシウムアンモニウム)として回収するものである。

本報では、技術の特徴、実証フィールド、今後の普及展開について記載する。

キーワード: MAP/リン回収機材前駆体  
Keyword: MAP, Phosphorous recovery

(1) 計測技術を活用した省力化

① 原水のリン自動分析計の導入

従来、マグネシウムの注入量の設定は、週1回程度のリン分析結果をもとに、余裕をみた注入率にて手動で実施していた。今回、原水のリン自動分析計を導入することにより、原水のリン濃度に対してモル比によるマグネシウム注入量の自動制御を実施し、省力化を図る。

② 反応塔への界面計の導入

従来、MAPの引扱は週1.2回の頻度で作業員立ち合いのもと手動で実施していた。今回、反応塔に界面計を導入することにより、沈降MAP量を把握し、引扱操作の自動制御を実施し、省力化を図る。

(2) MAP含水率低減による品質向上

③ 廃熱利用型乾燥機の導入

従来、MAPはホッパーにて貯留、自然乾燥のみで10%を超える含水率となっていた。今回、廃熱利用型乾燥機によりMAP含水率を1%以下に低減することで、扱いやすい肥料原料となり、利用の促進が期待できる。乾燥機は、消化ガス発電の廃熱を利用するため、他の熱源を用いることなく省エネ乾燥が実現できる。

(3) 傾斜板の導入による省エネルギー化

④ 液体サイクロンの代替として傾斜板の導入

従来は反応塔処理水中に含まれる微細なMAP粒子の回収に液体サイクロンを使用していたが、液体サイクロンへの供給ポンプ動力が大きいため省エネルギー性に課題があった。本技術では、液体サイクロンへの代替として傾斜板を導入することで、サイクロン供給ポンプが不要となり省エネルギー化を図る。傾斜板の効果は、沈殿部の上部に設置することで水面積負荷の低減を図り、液体サイクロンを使用せずに微細なMAP粒子の流

出を抑制し、回収率の低下を軽減する。

なお、傾斜板の導入効果を検証するために、液体サイクロンを使用したフロー（傾斜板の導入無し、図4）についても実証を行い、回収率、省エネ性などについて評価を実施する。

### 3. 実証フィールド

今回の実証設備は、横浜市下水道河川局北部汚泥資源化センターに建設、2024年3月に稼働を開始した。北部汚泥資源化センターでは、市内5か所の水再生センター（下水処理場）の汚泥を集約し、濃縮→消化→脱水→焼却・低温炭化の汚泥処理を実施しており、消化汚泥の脱水ろ液の発生量は約2,000m<sup>3</sup>/日に及び、リン回収において高いポテンシャルを有している施設である。

実証施設は、150m<sup>3</sup>/日の脱水ろ液からリンを回収する能力を有し、MAPとして年間約40ton程度の生産を見込むことができる。

### 4. 今後の普及展開

首都圏初となる、今回の下水汚泥資源からのリン回収の実証を皮切りに、今後国内外において普及展開を目指す。

国内の普及範囲としては、全国約2,200か所のうち、消化設備を導入している約300か所の下水処理場が対象となる。このうち約100か所で消化ガス発電を実施しており、本技術の廃熱利用型乾燥機も適用可能と考えられる。さらに、バイオマス活用の観点から、消化設備の新規導入が今後増加すると予想され、将来の市場拡大が期待される。

B-DASHプロジェクトで得られた成果を基に、本技術の普及展開を図り、下水汚泥資源の利用による肥料の国産化、安定供給に寄与し、最先端技術を活用した資源循環型社会の構築を通じて、持続可能な社会の実現に貢献していく所存である。

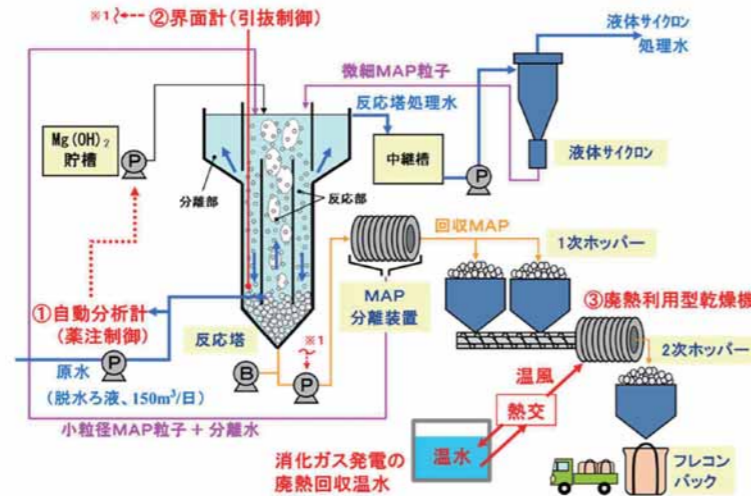


図4 液体サイクロンを使用した場合の実証フロー  
Fig.4 Demonstration flow using a liquid cyclone

## CIP/SIP対応真空乳化装置 クリアスタア®製品紹介

Introduction to CLEARSTAR CIP/SIP-capable Vacuum Emulsifier



春藤 晃人 SHUNDO Akihito

プライミクス株式会社  
乳化分散技術研究所

### Abstract

医薬品製造におけるGMPの観点から、CIP (Cleaning in Place : 定置洗浄) やSIP (Sterilization in Place : 定置滅菌) に対応した装置の要求が高まり、当社でもその開発に取り組んでいる。クリアスタア®は2009年に製品化され販売しているCIP/SIP対応の真空乳化装置である。本稿ではクリアスタア®の装置概要を紹介するとともに、課題や今後の展望について述べる。

キーワード：真空乳化機、CIP、SIP、スクレーパー  
Keyword : Vacuum emulsifier, CIP, SIP, Scraper

### 1. はじめに

1950年代より主要な産業の製造プロセスにおいて、ファクトリーオートメーションが進み様々なモノづくりの製造工程が自動化されている。当社が取扱っている高速攪拌機においても、自動化を取り入れた生産管理システムへの要望が高まるとともに、とりわけ医薬品業界ではGMP (Good Manufacturing Practice) のガイドラインに準拠した品質管理が求められるようになりCIP (Cleaning in Place : 定置洗浄) やSIP (Sterilization in Place : 定置滅菌) に対応した装置が必要となってきた。一方でヨーロッパを中心とした高速攪拌機の市場では、1980年頃に連続式高速攪拌機を容器底に取り付けた外部循環方式のバッチ式高速攪拌機が開発された。これらの装置は医薬品業界に向けてCIPやSIPに対応しつつ市場を拡大していき、日本においても、1990年代後半に輸入販売されるようになってきた。このような状況下で当社でもこれらの要望に対応する真空乳化装置/システムの開発に取り組み始め、2009年に販売を開始したのがクリアスタア®である。本稿ではクリアスタア®の概要と機能を紹介するとともに課題や今後の展望について述べる。

## 2. クリアスタア®の装置概要

クリアスタア®は低速攪拌機と高速攪拌機を組合せた複合型攪拌機である。その外観を図1に、概略図を図2に示す。容器底部の高速攪拌部にネオカイザー®を配置し、その吐出能力により槽内の処理液を循環経路で槽内に送り戻すように設計されている。フローパターンは内部循環、外部循環、シャワーボール循環の3経路があり、配管に設置した自動バルブによって切り替えることができる。また、低速攪拌部は錨型のアンカー翼をアレンジした形状となっており、比較的高粘度の処理液を槽内全体に流動させる役割をもっている。これら2つの攪拌部を槽内の処理液の粘度や状態に応じて運転条件を変えて目的とするエマルジョン製品などを製造することができる。



図1 クリアスタア®の外観

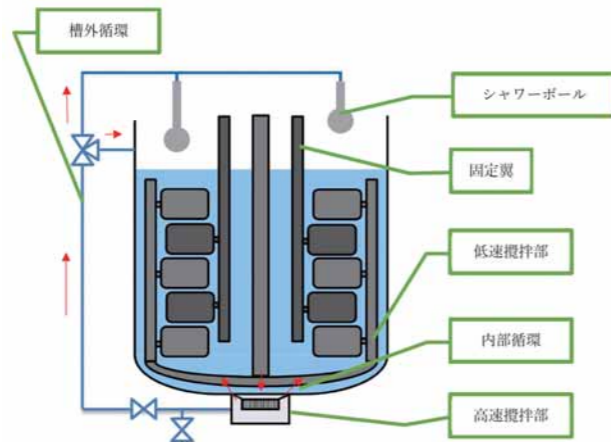


図2 クリアスタア®の概略図  
Fig.2 Schematic diagram of CLEARSTAR

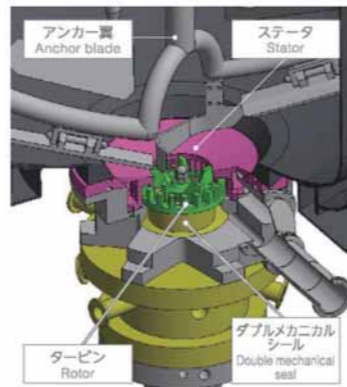


図3 高速攪拌部(ネオカイザー®)  
Fig.3 High speed mixing section

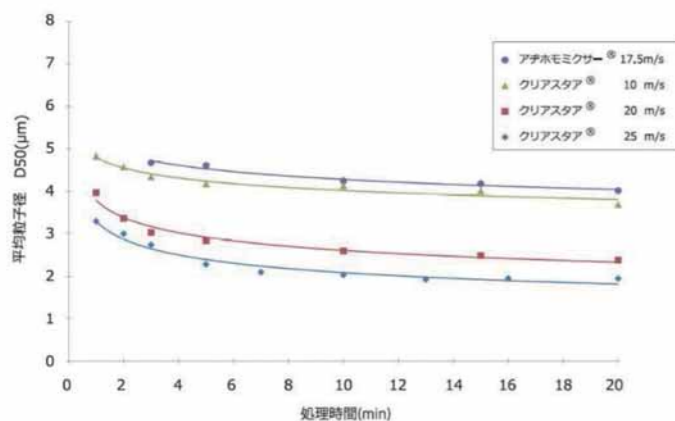


図4 クリアスタア®とアチホモミキサー®の乳化粒径の比較  
Fig.4 Comparison of emulsion particle size between CLEARSTAR and AGI HOMO MIXER

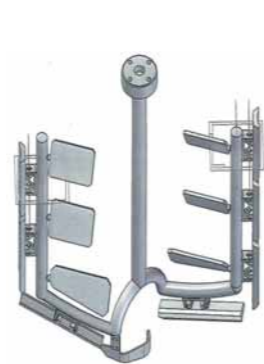


図5 低速攪拌部  
Fig.5 Low speed mixing section



図6 スクレーパーと取付ピン  
Fig.6 Scraper and mounting pin

### 2.1 高速攪拌部

容器底部の高速攪拌部のネオカイザー®を図3に示す。櫛歯状のステータとタービンを組合せた形状のネオカイザー®は、最大周速30m/sの高速運転が可能で、剪断力が高い。図4に示すとおり乳化実験においては、アチホモミキサー®とクリアスタア®の比較で同等の周速で粒子径がより細くなることが確認されている。通常は外部循環経路のバルブは閉じられており、高速攪拌部を運転すると上部の吸入口より吸い込まれた処理液は櫛歯で剪断を加えられ、吸入口の周囲に設けられた吐出口より内部循環として循環される。やや粘度の高い液体の上下対流を促す場合には、外部循環の経路のバルブを開き、槽上部に設けられた吐出口を経て外部循環で循環させることも可能である。また、洗浄時には、シャワーボール循環の経路のバルブを開き、容

器内の高速攪拌部の吐出能力により、シャワーボールを駆動させ洗浄液を循環させることができる。

### 2.2 低速攪拌部

低速攪拌部には図5のようなアンカーミキサーが槽の中央に配置されている。形状は通常の錨型と異なり、中心軸からオフセットした位置を起点として槽壁面に沿うように設計されている。この形状により正転で運転した際に容器底の処理液は中心方向に流れ、高速攪拌部の吸い込みを補助する役割を持っている。また、槽壁に接するように設置されたPTFE製のスクレーパーは、正転・逆転のどちらの運転でも壁面をかき取る両方向スクレーパーとなっている。洗浄性を考慮し、接液部にボルトなどの締結部品を設けず溶接で固定し、図6のように固定ピンで留められたスクレーパーの取付穴はクローバー型で、シャワーボールによる洗浄液で容易に洗い流しやすくなるように工夫されている。

## 3. CIP/SIP

クリアスタア®の機能的な特徴の一つがCIP/SIPに対応した自動運転ができることである。CIPは適切な洗浄剤を用いて、装置、配管などを取り外すことなく一連の設備を洗浄する方法である。また、SIPは装置を取り外すことなく一連の設備を滅菌する方法である。滅菌媒体として130℃程度の飽和蒸気を用いる方法が一般的である。1) これを実施するCIP/SIP対応の設備・機器は以下のような点が求められる。

- ・発塵箇所がないこと。
  - ・装置配管は、その内面が平滑で洗浄が容易で、洗浄の確認が容易なこと。
  - ・装置、機器に付帯する配管は滞留箇所を可能な限り少なくすること。
  - ・配管やバルブなどは排水ができる構造とし、勾配を配慮すること。
  - ・洗浄剤を供給する場合には、安定して流量、圧力、温度、洗剤濃度などを保つよう設計すること。
  - ・洗浄物は再汚染させないこと。
  - ・滅菌すべき全ての表面に飽和蒸気が到達し、所定温度で所定時間保持できること。
  - ・蒸気及び凝縮水の適切な排出口が設置されていること。
  - ・装置の耐熱性・耐圧性ととも蒸気の装置材質が適合していること。
- これらの要求を満たした装置/システムとして、クリアスタア®は設計されている。

### 3.1 CIP

クリアスタア®は容器底部に設置したネオカイザー®の吐出能力で、容器上部のシャワーボールを駆動し容器内全体を洗浄することが可

能である。一般にCIPの工程は以下の4つの工程を順次確認しながら進めていく。

- ① 予備洗浄 付着した処理液残渣を温水や水などでかけ流し大部分の汚れを落とす工程
- ② 洗剤洗浄 汚れに応じた洗剤を用いて、シャワーボール循環や攪拌による液流を利用して汚れを落とす工程
- ③ すすぎ洗浄 温水や水を用いて洗剤洗浄で使った洗剤をシャワーボール循環や攪拌による液流を利用してすすぐ工程
- ④ リンス 純水などの清浄な水でのかけ流しを行い洗剤を完全に落とす工程

クリアスタア®では、それぞれの工程でバルブの開閉、攪拌部の回転数、攪拌時間をプログラムして最適な洗浄条件を組み込み自動運転することができる。

### 3.2 SIP

クリアスタア®では蒸気滅菌でSIPに対応するため、細部の構造が設計されている。設計に当たって重要なポイントは、空気溜まりやデッドレグをなくし、凝縮水が溜まらないようにすることである。そのため、凝縮水が残らないように配管に傾斜をつけて、最低部にドレンを設け、バルブやセンサについても凝縮水が溜まらないものを選定している。クリアスタア®の特徴的なところはメカニカルシールの摺動面が開閉できることである。これにより、メカニカルシールの摺動面も含め洗浄滅菌することができる。実際の滅菌工程では、容器内のあらゆる場所でも121℃以上が15分以上維持できるように設定する必要があり、それらも考慮されて設計されている。

## 4. おわりに

クリアスタア®はこれまでに述べた一連の機能を搭載し2009年に上市後、これまでに30台以上の納入実績がある。しかし、その後の市場環境の変化に追従していくには、まだまだ開発の余地がある製品でもある。中でも、化粧品の市場に展開していくには、顔料などの粉体原料の投入や更なる高粘度への対応、ファンデーションやマスクのような難洗浄性製品の洗浄方法の確立など、改善改良や用途開発が必要である。今後もこれらの市場要求に応えるべく開発を続けることで、更により良い製品としていくことが我々の今後の課題である。

### 参考文献

- 1) 佐々木次雄, 鷺見裕, 櫻井信豪: WHO-GMPシリーズ③無菌医薬品GMP, じほう, pp.57-58 (2012)

# 高圧噴流ノズルを用いた 汚泥減容化処理システム

Sludge Volume Reduction Treatment System Using High-Pressure Jet Nozzles



松島 泰生 MATSUSHIMA Yasuo

月島JFEアクアソリューション株式会社  
環境施設事業部プロジェクト推進部

## Abstract

し尿処理施設において、余剰汚泥発生量の削減は古くから求められているものの、決定的な減容化技術が普及しているとは言い難い状況である。その理由としては、得られる汚泥減容効果に対して消費エネルギーや薬品使用量が大きいことであると考えられる。上記課題を解決すべく、高圧噴射ノズルを用いた汚泥減容化技術であるスマートスラッジ®を開発した。

当社グループ運転管理施設にて実証試験を行った結果、余剰汚泥発生量が過去5年間と比較して19.9~21.4%減少し、水質や電力・薬品使用量への悪影響も確認されなかった。ノズルは長期間安定して使用でき、運転費用も非常に安価であることも確認した。

キーワード：高圧噴流、ノズル、汚泥、可溶化、減容化  
Keyword : High pressure jet, Nozzle, Sludge, Solubilization, Volume reduction

## 1. はじめに

排水処理などから発生する汚泥は、日本国内の産業廃棄物排出量の約4割<sup>1)</sup>を占めている。し尿処理分野においても維持管理費に占める汚泥処分費の割合は大きく、余剰汚泥発生量の削減は古くから求められている。

汚泥減容化の技術は様々なものが開発され、一部が市場に導入されているものの、決定的な減容化技術が普及しているとは言い難い状況である。その理由としては、得られる汚泥減容効果に対して消費エネルギーや薬品使用量が大きいことであると考えられる。

本稿では、上記課題を解決すべく開発した、高圧噴射ノズルを用いた汚泥減容化技術である「スマートスラッジ®」について紹介する。

## 2. スマートスラッジ®の概要

スマートスラッジ®の概要及び特長は以下のとおりである。

### (1) 概要

- ・余剰汚泥を特殊ノズル(以下ノズル)に通液
- ・ノズル内で汚泥細胞膜を破壊し可溶化
- ・可溶化液を生物処理槽で再処理し汚泥を減容化

### (2) 特長

- ・設置面積は1m<sup>2</sup>程度とコンパクト(配管ラインの途中に設置)
- ・既設への後付けも配管工事のみ(大規模な設備工事は不要)
- ・圧倒的な低ランニングコスト(加熱や薬品は不要)

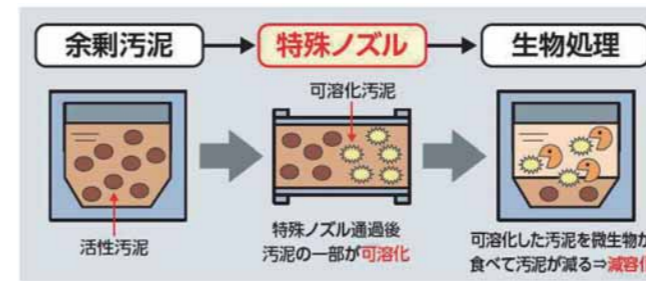


図1 スマートスラッジ®原理  
Fig.1 Smart sludge principle



図2 装置外観  
Fig.2 Apparatus appearance

## 3. 可溶化特性確認試験(ラボ試験)

スマートスラッジ®による可溶化特性を把握することを目的に、ノズル通過回数当たりの溶解性有機物(COD<sub>Cr</sub>)濃度を確認するラボ試験を実施した。なお、ノズル通過回数とは対象汚泥を循環通液した回数である。

複数回試験を実施し、ノズル通過により液中COD<sub>Cr</sub>濃度が上昇する、つまり汚泥が可溶化されていることを確認した。また、1回の通液で液中COD<sub>Cr</sub>濃度が約20%上昇することから、少ない通過回数で高い可溶化効果があることも確認できた。

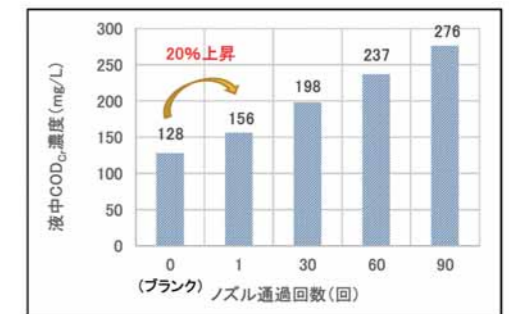


図3 ラボ試験結果  
Fig.3 Lab test results

## 4. 実証試験(実施設における減容化効果確認)

### 4.1 実施施設

当社運転管理施設にてスマートスラッジ®を用いた実証試験を実施した。

処理方式：高負荷膜分離脱窒素処理方式+高度処理  
処理能力：27kL/日(し尿：19kL/日、浄化槽汚泥：8kL/日)

### 4.2 試験装置の構成

実証試験装置の処理フローを図4に示す。装置は実施施設の中でMLSSが最も高濃度である返送汚泥ラインに設置しており、バルブなどの付帯設備を含めても全長約1mのコンパクトな設備構成である。実施施設の返送汚泥ポンプは一軸ねじ式ポンプを採用しているため、定圧・定量の条件で運転が可能である。

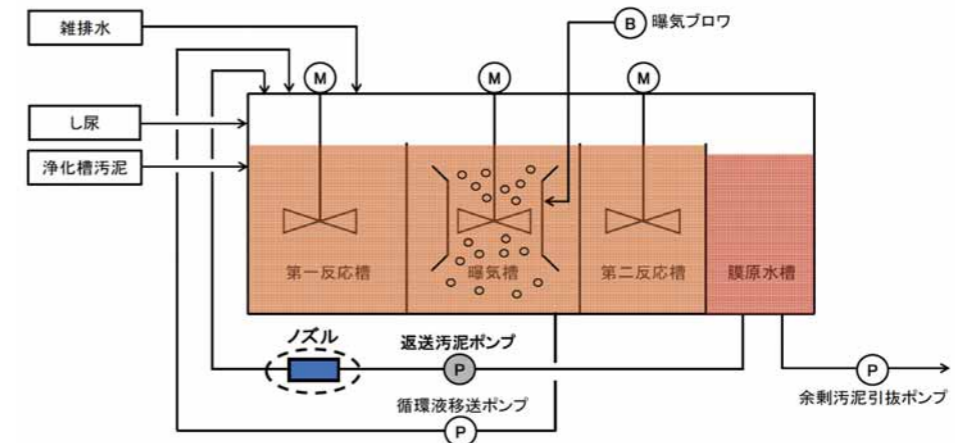


図4 処理フロー  
Fig.4 Processing flow



4.3 運転条件(2022年1月~9月)

運転条件を表1に示す。また、主な評価項目は以下の4点とした。

- (1) 余剰汚泥発生量(過去5年間との比較)
- (2) 運転への影響(処理水質、薬品使用量)
- (3) 試験装置の状態(閉塞の有無など)
- (4) 運転費用

4.4 試験結果

4.4.1 余剰汚泥発生量

「汚泥再生処理センター等施設設備の計画・設計要領(2021改訂版)」<sup>2)</sup>においては、し尿・浄化槽汚泥ともに「6kg-SS/kL-搬入量」の余剰汚泥発生率とされているが、実施施設ではスマートスラッジ<sup>®</sup>導入前で2.40~2.81kg-SS/kL-搬入量と計画・設計要領と比較して低い発生率であり、導入後は1.91~2.25kg-SS/kL-搬入量となり、更に低い発生率を達成することができた。実施施設の試験開始前過去5

年間平均値と実証試験期間を比較したものを表2に示す。スマートスラッジ<sup>®</sup>の導入により、余剰汚泥発生率は0.49~0.58kg-SS/kL-搬入量(19.9~21.4%)減少し、季節による大きな違いは見られなかった。

4.4.2 運転への影響

生物処理水質について、実施施設の試験開始前過去5年間平均値と実証試験期間の比較を表3に示す。汚泥の可溶化により生物処理水のCOD<sub>Mn</sub>・色度の上昇や曝気槽におけるスカム発生量の増加が懸念されたが、水質は試験開始前と同等であり、スカム発生量が増加することもなかった。このことから、可溶化処理で増加した有機物は生物処理で問題なく分解されていたと考えられる。

その他に、有機物濃度の高い返送汚泥による曝気風量の不足についても懸念されたが特に影響はなく、第一反応槽(脱窒槽)に返送されることにより、有機物が脱窒の炭素源として利用された(メタノール代替)と考えられる。

表1 運転条件  
Table1 Operating conditions

条件	項目	数値	単位
実施施設	し尿搬入量	18~25	kL/日
	浄化槽汚泥搬入量	3~6	kL/日
	主処理投入量	20~40	m <sup>3</sup> /日
	生物処理槽汚泥濃度	6,800~8,800	mg/L
	返送汚泥量	238(8~11Q)	m <sup>3</sup> /日
試験装置	返送汚泥濃度	7,800~10,000	mg/L
	ノズル通過時間	24時間連続	
	ノズル通過圧力	0.1	MPa

表3 生物処理水質  
Table1 Biologically treated water quality

項目	単位	生物処理水(膜処理水)	
		過去5年間平均	実証試験期間
pH	-	7.2	7.3
COD <sub>Mn</sub>	mg/L	39	37
SS	mg/L	3.0	1.9
NH <sub>4</sub> -N	mg/L	1.0	1.5
NO <sub>3</sub> -N	mg/L	0.6	0.5
PO <sub>4</sub> -P	mg/L	28	31
色度	度	235	233

表2 余剰汚泥発生量  
Table2 Amount of residual sludge generated

項目	単位	冬季(1~3月)		春季(4~6月)		夏季(7~9月)	
		過去5年間平均	実証試験期間	過去5年間平均	実証試験期間	過去5年間平均	実証試験期間
し尿・浄化槽汚泥搬入量	kL/日	26.0	25.9	27.9	28.3	27.3	26.8
余剰汚泥引抜量	m <sup>3</sup> /日	6.4	6.3	7.0	6.8	6.1	5.9
余剰汚泥濃度	mg/L	11,000	8,800	11,200	9,400	10,700	8,700
余剰汚泥固形物量	kg-SS/日	63.6	55.3	78.6	63.6	65.6	51.4
余剰汚泥発生率 ※1	kg-SS/kL-搬入量	2.71	2.13	2.81	2.25	2.40	1.91
減容化率 ※2	%		-21.4		-19.9		-20.4

※1 余剰汚泥発生率とは、余剰汚泥固形物量(kg/日)をし尿・浄化槽汚泥搬入量(kL/日)で除した値とする  
 ※2 減容化率とは、余剰汚泥発生率について、実証試験期間と過去5年間の平均値を比較した値。減容化している場合は0未満の数値となる

4.4.3 試験装置の状態

2022年1月からスマートスラッジ<sup>®</sup>の運転を開始し、2024年6月現在も稼働中であるが、異物などによるノズル閉塞や圧力の上昇は一度もない。また、定期的(1回/半年)にノズル内部を点検しているが、摩耗や腐食などの異常は確認されておらず、返送汚泥ポンプの流量低下や異音・振動の発生などのトラブルも発生していない。(図5,図6)

4.4.4 運転コスト

実施施設の薬品使用量については、試験期間中に増加した項目はなかったが、ノズルの設置により返送汚泥ポンプの電流値が3.8%上昇した。これにより電力量は3.4kWh/日増加したが、電気料金単価を20円/kWhとした場合の増加コストは68円/日であり、実施施設全体の電力料金に対する上昇率は僅少であった。



図5 ノズル内部確認  
Fig.5 Check inside the nozzle

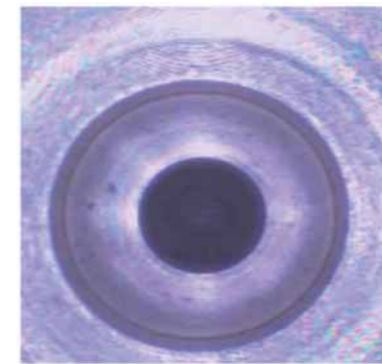


図6 ノズル内部  
Fig.6 Inside the nozzle

5. まとめ

- ・スマートスラッジ<sup>®</sup>導入により実施施設の余剰汚泥発生量が過去5年間と比較して19.9~21.4%減少した。
- ・実施施設の水質や電力・薬品使用量への悪影響は確認されなかった。
- ・ノズルは長期間安定して使用でき、運転費用も非常に安価であることも確認した。

6. 今後の展開

スマートスラッジ<sup>®</sup>は豊富なラインナップで幅広い条件に対応可能であり、これまでに国内6ヶ所のし尿処理施設に導入されており、今後も省スペース・省エネ・低コストな汚泥減容化技術として導入を目指していく。  
 また、本技術をバイオガスプラントに導入することにより、バイオガス回収量の増加が見込まれることから、今後様々な分野への展開も進めていく。

表4 標準型式  
Table4 Standard model

型式	標準流量	配管サイズ
SS-100	100 L/min	40A
SS-150	150 L/min	50A
SS-200	200 L/min	50A
SS-300	300 L/min	60A
SS-400	400 L/min	60A
SS-500	500 L/min	80A

※最大1,200L/minまで対応可能

表5 納入実績  
Table5 Delivery record

納入所在地	処理規模	処理方式	型式
長崎県	27 kL/日	高負荷	SS-200
徳島県	35 kL/日	高負荷	SS-200
愛媛県	220 kL/日	高負荷	SS-500
千葉県	60 kL/日	前脱水+標脱	SS-500
広島県	35 kL/日	標脱	SS-150
北海道	285 t/日	畜産系BGP	SS-200

※2024年7月末時点

参考文献

- 1) 環境省環境再生・資源循環局:産業廃棄物排出・処理状況調査報告書 令和4年度速報値(概要版)
- 2) 公益社団法人全国都市清掃会議:汚泥再生処理センター等施設設備の計画・設計要領2021改訂版

# 有機凝結剤を用いた 浄水汚泥の低減に関する実証研究

## Demonstration Research on the Reduction of Water Purification Sludge Using Organic Coagulants



尾関 朝彦 OZEKI Tomohiko

月島JFEアクアソリューション株式会社  
技術企画センター 研究開発室

### Abstract

有機凝結剤はその高い荷電中和能力により無機凝集剤(硫酸バンド)の使用量低減及び発生汚泥量低減が期待される。工業用水での使用実績はないため、導入効果を検証する目的で実証実験を行った。実証実験の結果、有機凝結剤の注入率0.2mg/Lにおいて無機凝集剤と併用することで、無機凝集剤の注入率が21.5%低減され適切な運転が行えることを確認した。また、実証運転における低減効果を12ヶ月で試算した結果、無機凝集剤使用量は202.8t(19.9%)の低減、排出CO<sub>2</sub>量は5.4t-CO<sub>2</sub>の低減、運転費用は年間約200万円の低減を確認した。

キーワード：有機凝結剤/硫酸バンド注入率低減/搬出汚泥量の低減/CO<sub>2</sub>排出量の低減

Keyword: Organic coagulants, Reduction in aluminum sulfate injection rate, Reduction in the amount of sludge removed, Reducing CO<sub>2</sub> emissions

## 1. はじめに

全国の水道事業者における電力消費は、年間73.3億kWhと国内総電力消費の0.8%(平成28年度実績)を占めており<sup>1)</sup>、エネルギー消費型産業となっている。令和3年10月22日に「地球温暖化対策計画」(改定)が閣議決定され、水道事業者におけるCO<sub>2</sub>排出削減目標は、2030年度に21.6万トン-CO<sub>2</sub>削減(2013年度比約5%)の目標が掲げられている。また、人口減少社会の到来、節水型社会への移行や産業構造の変化などにより水道料金収入は減少傾向にあり<sup>2)</sup>、特に中小規模の地方自治体は財政難であるため、低コストと脱炭素を両立する難しい事業運営が求められている。

このような背景から、当社は浄水場の凝集沈澱プロセスに着目し、無機凝集剤の添加量を低減するとともに汚泥発生量を低減させることが可能な「有機凝結剤」を提案している。有機凝結剤は、高いカチオン電荷密度を持っているため、硫酸バンドやポリ塩化アルミニウム(PAC)などの無機凝集剤に比べて、少ない添加量で懸濁粒子の荷電中和が可能である。当社は、福山市及び福山市立大学との産官学の共同研究のもと、有機凝結剤による無機凝集剤の低減効果を確認するため、広島県福山市箕島浄水場の凝集沈澱プロセスにて実証試験を行っており、本稿では、実証試験結果並びに導入効果(CO<sub>2</sub>排出量や運転費用の削減効果)について報告する。

## 2. 検証概要

有機凝結剤による無機凝集剤の低減効果を検証するため、1) 事前確認試験、2) 実設備における実証試験を行った。事前確認試験では、ジャーテストを用いた室内試験により有機凝結剤の適正注入率を確認し、実証試験では有機凝結剤の注入設備を浄水場に設置し、2023年7月1日から2024年3月31日まで検証した。

### 2.1 実証フィールド

実証試験は、工業用水の配水能力113,000m<sup>3</sup>を有する広島県福山市箕島浄水場で実施した。本浄水場は芦田川から取水し、無機凝集剤として硫酸バンドを用いた凝集沈澱処理を行った後、工業用水を供給している。近年の大雨などによる原水の高濁度化や、渇水時に河口堰において異常発生した藻類の流入により、硫酸バンドの

使用量の増加や、凝集を補助する高分子凝集剤を併用するなどの対応が必要となっている。また、濁質量と硫酸バンドの使用量の増加によって汚泥発生量も増加し、後段の汚泥処理施設の電力量も高くなっており、硫酸バンドの低減が求められている。

### 2.2 有機凝結剤

有機凝結剤は高いカチオン電荷密度を有し懸濁粒子の荷電中和を行う薬品である。ただし、架橋作用がないため、フロック形成には無機凝集剤と併用が必要となる。無機凝集剤の注入量が多い工場などの排水処理において凝集剤の使用量や汚泥量を減らすため、多くの導入事例がある。

有機凝結剤の主成分であるポリアミンは、水生生物に有害な物質ではあるものの、注入後に劣化・分解が進み、放流後は希釈拡散によって自然界中では環境に悪影響を及ぼさないレベルになると考えられる。今回の実証フィールドは工業用水を供給する浄水場であり、飲料使用を目的としていないこと、有機凝結剤注入時の送水水質分析を行った結果、福山市条例で定める工業用水供給基準を超過する可能性はないことから、有機凝結剤の使用により問題を生じることはないと判断した。

## 3. 事前確認試験

有機凝結剤は、工業用水分野での使用実績がないため、実証試験の事前確認試験として、ジャーテストを実施し、最適注入率を確認した。表1に使用薬品を示す。

### 3.1 試験装置及び手順

ジャーテストは以下の手順で行った。図1にジャーテストの試験状況を示す。

<ジャーテストの手順>

- ① 原水500mLを500mLビーカーに採取
- ② 有機凝結剤を所定量添加し、150rpmで60秒間攪拌
- ③ 硫酸バンドを所定量添加し、150rpmで60秒間攪拌

- ④ 40rpmで60秒間の緩速攪拌
- ⑤ 緩速攪拌中に、生成されたフロックの大きさを目視にて評価
- ⑥ 緩速攪拌後静置させ、フロック沈降性及び処理水清澄性を評価
- ⑦ 静置3分後に処理水を回収し、各種分析を実施

### 3.2 実験条件

表2にジャーテストの条件を示す。ジャーテストは原水(濁度7.7度)に対して実施し、条件①は硫酸バンドのみを使用した。条件②は硫酸バンドと有機凝結剤の併用し、有機凝結剤による硫酸バンドの低減効果を確認した。

表1 ジャーテストに使用した薬品  
Table1 Chemicals used in the jar test

使用薬品	薬品名
有機凝結剤	オルフロックCL-472
無機凝集剤	硫酸バンド



図1 ジャーテスト状況  
Fig.1 Jar test

表2 ジャーテストの条件  
Table2 Jar test conditions

番号	①				②-1				②-2				
硫酸バンド	mg/L	30	40	50	60	30	40	50	60	30	40	50	60
有機凝結剤	mg/L	-	-	-	-	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4

### 3.3 事前確認試験

実証試験における有機凝結剤の注入率を決定するため、ジャーテストによる事前確認試験を実施した。図2にジャーテストの結果を示す。箕島浄水場の凝集沈澱処理後の年間平均濁度は1度程度であり、ジャーテストの有効性を評価する指標値とし、図中に破線で示した。

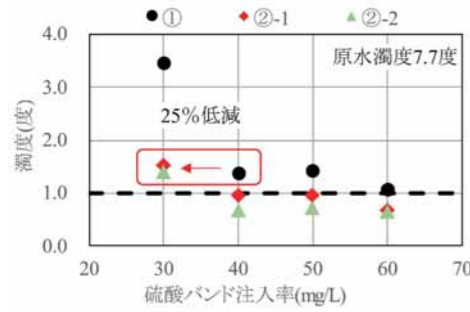


図2 ジャーテストの結果  
Fig.2 Jar test results

#### (1) 硫酸バンドのみ(条件①)

硫酸バンドの注入率が30mg/Lで濁度は3.4度、注入率40mg/Lで濁度は1.4度となった。注入率60mg/Lまで増加させた場合、濁度は1.1度まで低下したが、注入率40mg/Lとの差は0.3度と小さかった。

#### (2) 硫酸バンドと有機凝結剤の併用(条件②-1、②-2)

硫酸バンドの注入率30mg/Lの場合、有機凝結剤の注入率が0.2mg/L、0.4mg/Lで濁度がそれぞれ1.5度、1.4度まで低下した。硫酸バンドのみの注入率40mg/Lと同程度の濁度となり、硫酸バンドの注入率は有機凝結剤の併用により約25%低減できることが確認された。有機凝結剤の注入率については、0.4mg/Lの方が濁度が低くなる傾向を示したが、注入率0.2mg/Lと大きな差はみられなかった。

有機凝結剤と硫酸バンドを併用することで硫酸バンドを25%低減できることを確認した。有機凝結剤の注入率は0.2mg/Lと0.4mg/Lとで遜色ない処理性能を確認した。費用対効果を考慮した結果、実証試験の有機凝結剤の注入率は0.2mg/Lに設定することとした。

## 4. 実証試験

### 4.1 実証概要

図3に箕島浄水場の概略フローを示す。有機凝結剤及び硫酸バンドの注入は、着水井の後段、混和池の入口に行った。図4に実証装置の外観を示す。実証装置は、薬品注入ポンプ、薬液貯槽、制御盤で構成される。実施期間は2023年7月1日から2024年3月31日まで行ったが、2023年8月から翌年1月までの間、浄水場の排水処理施設に不具合が発生したため、この期間は十分な連続データを取得できなかった。排水処理施設が正常化した2024年2月1日から3月31日までの2ヶ月間に取得したデータを元に検証を行った。

### 4.2 実証試験の条件

#### (1) 硫酸バンドの注入率及び調整率

箕島浄水場では、硫酸バンドの注入率は原水濁度に応じた計算式に基づいて設定している。これを硫酸バンド注入率(計)とする。実際の運転管理では沈澱池中間濁度をみながら調整を行うことが多い。そのため、現地にてジャーテストを行い、結果を元に硫酸バンド注入率(計)を補正している。この実際に補正した注入率を硫酸バンド注入率(実)とする。この計算による注入率と実際の注入率の差を調整率と定義した。式1の調整率がマイナスの場合、硫酸バンドの注入率が減ったことになる。実証試験における硫酸バンド調整率の目標は、事前確認試験結果を参考に-20%とした。

$$\text{調整率}(\%) = \frac{\text{硫酸バンド注入率(実)} - \text{硫酸バンド注入率(計)}}{\text{硫酸バンド注入率(計)}} \times 100 \dots (式1)$$

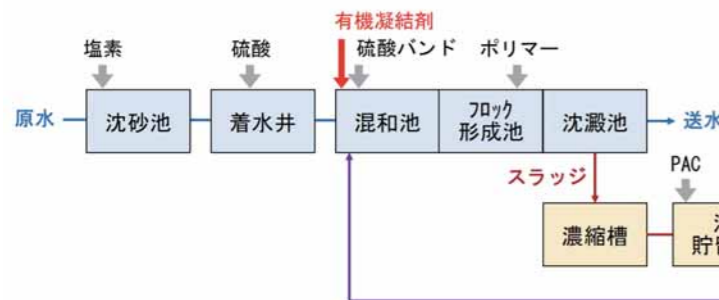


図3 箕島浄水場概略フロー  
Fig.3 Flow of Minoshima Water Purification Plant



図4 実証装置  
Fig.4 Demonstration device

#### (2) 有機凝結剤の注入率

有機凝結剤注入率は、事前確認試験の結果から最適注入率と判断した0.2mg/Lに固定して実証試験を行った。なお、注入量は取水流量に比例計算とした。

### 4.3 試験結果

図5に実証期間中の計算による硫酸バンド注入率、実際の硫酸バンド注入率及び硫酸バンド調整率を示す。図中破線は目標調整率-20%を示している。また図6に原水と送水濁度を示す。

2月6日から2月28日において、調整率-20%を目標に運転を行った結果、平均調整率は-17.6%、平均送水濁度は1.1度と良好な処理を行うことができた。

2月29日から3月31日では、目標調整率-20%を更に下回る運転を行った結果、平均調整率は-24.7%、平均送水濁度は1.1度と良好な処理を行うことができた。

有機凝結剤と硫酸バンドを併用することで実証期間中の硫酸バンドの平均調整率は-21.5%となり、実証目標の-20%を達成した。また、硫酸バンドを低減したことによる処理性については、有機凝結剤を併用することで硫酸バンドの調整率を-20%に設定しても送水濁度は1度前後で推移しており、問題なく処理できることを確認した。

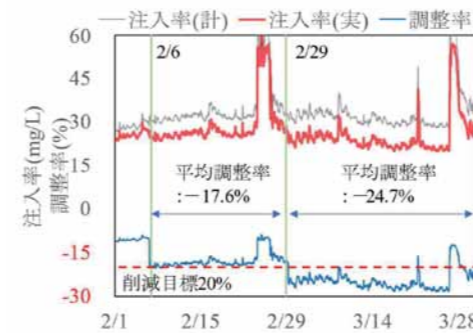


図5 硫酸バンドの注入率と調整率  
Fig.5 Aluminum sulfate injection rate and reduction rate

## 5. 導入効果検証

### 5.1 試算条件

実証を行った2ヶ月間における硫酸バンドの使用量、排出汚泥量、排出CO<sub>2</sub>量、費用を試算した。表3に試算に使用した箕島浄水場の運転条件を示す。

### 5.2 硫酸バンド注入量の低減

表4に硫酸バンド注入量の低減結果を示す。箕島浄水場では同一原水を用いた有機凝結剤の有り無しでの横並び運転による検証ができないため、実証期間中の有機凝結剤無しの硫酸バンド注入率は、原水濁度から計算した硫酸バンド注入率(計)と等しくなるものと想定した。

実証期間中に注入した実際の硫酸バンドの使用量は135.9tであり、原水濁度から計算した理論上の硫酸バンド使用量は169.7tであった。したがって、有機凝結剤を併用することにより、硫酸バンドの使用量は2ヶ月間で33.8t(19.9%)低減できる試算結果となった。

硫酸バンドの使用量の低減により、納入回数は2ヶ月で3回低減できることが分かった。さらに、実証2ヶ月間の結果から12ヶ月分として

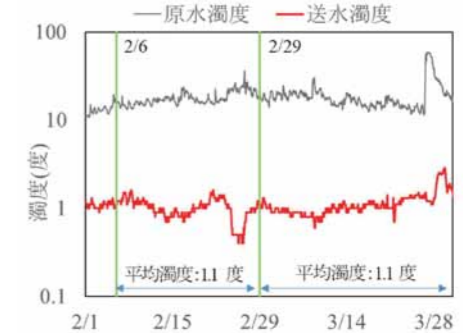


図6 実証期間中の送水濁度  
Fig.6 Turbidity of water supply during the verification period

表3 導入効果の試算条件  
Table3 Conditions for calculating the effect of introduction

項目	平均	最大	最小
取水量 (m <sup>3</sup> /日)	84,347	95,326	56,688
原水濁度 (度)	18.0	58.9	10.6
送水濁度 (度)	1.1	2.8	0.4

表4 硫酸バンド注入量の低減結果  
Table4 Reduction in the amount of aluminum sulfate injected

項目	使用量 (t)	納入回数 (回)
注入率(実)	135.9	12
注入率(計)	169.7	15
差分(2か月)	33.8	3
試算(12か月)	202.8	18

再試算すると、硫酸バンドは202.8t/年、納入回数は18回/年の低減が可能と示唆された。

### 5.3 排出汚泥量の低減

表5に排出汚泥量の低減結果を示す。実証期間の2ヶ月の排出汚泥実績は5,182m<sup>3</sup>であった。原水濁度から計算した理論上の硫酸バンド注入率より発生する汚泥量を試算すると5,377m<sup>3</sup>となり、実績量と試算量との差は195m<sup>3</sup>であった。脱水機の処理能力実績値は199m<sup>3</sup>/日であるため、実証運転により脱水機処理量1日分に相当する汚泥量を低減できたと考えられる。

また、排出汚泥量から搬出脱水ケーキ量を計算すると、搬出脱水ケーキ量は11.8t(汚泥濃度:2.1%、汚泥比重1,005kg/m<sup>3</sup>、脱水ケーキ含水率65%)、乾燥汚泥量は4.1t-DSの低減となり、硫酸バンド注入率を20%低減することで、汚泥量を3.6%低減できると試算された。

表5 排出汚泥量の低減結果  
Table5 Reduction in sludge discharge

項目	汚泥量 (m <sup>3</sup> )	ケーキ量 (t)	乾燥汚泥量 (t-DS)
注入率(実)	5,182	314.0	109.9
注入率(計)	5,377	325.8	114.0
差分(2か月)	195	11.8	4.1
試算(12か月)	1,170	70.8	24.6

表6 CO<sub>2</sub>低減量結果  
Table6 CO<sub>2</sub> reduction results

項目	CO <sub>2</sub> 量(t-CO <sub>2</sub> )	
	実証(2ヶ月)	12か月試算
薬品由来	0.747	4.482
電力由来	0.045	0.270
ケーキ搬出由来	0.162 (搬出2回)	0.648 (搬出8回)
合計	0.954	5.400

脱水ケーキの搬出は10t車で行われることから、2回分の搬出を低減可能である。さらに、実証2ヶ月間の結果から12ヶ月分として試算すると、脱水機の運転は6回/年、脱水ケーキ量は70.8t/年、搬出回数は8回/年の低減が可能と示唆された。

### 5.4 排出CO<sub>2</sub>量の低減

CO<sub>2</sub>低減量を、①薬品由来、②電力由来、③搬出脱水ケーキ由来より試算し、その結果を表6に示す。

薬品由来によるCO<sub>2</sub>低減量は、硫酸バンドの製造と運搬分の低減分と有機凝結剤の製造と運搬の増加分を合計した結果、0.747t-CO<sub>2</sub>であった。電力由来によるCO<sub>2</sub>低減量は、脱水機を1日稼働した場合の電力量から試算した結果、0.045t-CO<sub>2</sub>であった。搬出ケーキ由来によるCO<sub>2</sub>低減量は、ケーキ搬出2回分の削減として0.162t-CO<sub>2</sub>であった。2ヶ月間の実証試験において、CO<sub>2</sub>低減量の合計は0.954t-CO<sub>2</sub>であった。12ヶ月分として試算すると、5.4t-CO<sub>2</sub>/年の低減が可能と示唆された。

### 5.5 運転費用の低減

表7に運転費用の試算結果を示す。運転費は、硫酸バンド購入費、有機凝結剤の購入費、脱水機の稼働電気代、脱水ケーキの処分費から算出した。

硫酸バンドは33.8t低減できたが、有機凝結剤が新たに1.0t増加した。その結果、薬品購入費は188,660円低減する結果となった。脱水機を1日稼働した場合の電気量(144 kWh/日)から、電気代は3,893円の低減となった。脱水ケーキの排出量が11.8t低減できたことから、その処分費(運搬と処分)は133,340円の低減となった。実証を行った2ヶ月間における運転費の低減効果は合計で325,894円であり、12ヶ月分として試算すると、1,955,363円/年の低減が可能と示唆された。

表7 運転費用試算  
Table7 Operating cost estimate

項目	単価	低減量	低減費用
硫酸バンド費	25,700 円/t	33.8 t	868,660 円
有機凝結剤費	680,000 円/t	-1.0 t	-680,000 円
電気代	27.04 円/kWh	144 kWh	3,894 円
スラッジ処分費	11,300 円/t	11.8 t	133,340 円
合計(2か月)			325,894 円
試算(12か月)			1,955,363 円

## 6. 実機導入における課題

2023年12月25日から有機凝結剤の注入不良が確認された。これは、液温低下による有機凝結剤の粘度上昇により、実証で用いた薬品注入ポンプでは圧送できなくなったことが原因と推察する。有機凝結剤の粘性は、図7に示すように、液温15℃では3,000mPa・sであるが、注入不良が発生した際は、外気温が0℃付近、液温も5℃を下回っていたため、有機凝結剤の粘性が7,000mPa・s付近まで上昇したと考えられる。これに対して、実証で用いた薬品注入ポンプの対応粘度は3,000mPa・sであるため、液温低下時に対応できなかった。

この対策として、①希釈対応、②高粘性対応ポンプの選定がある。実証試験では、①の希釈対応を行った。希釈により薬液の粘性は下がり、注入不良は解消したが、実機導入に向けた場合に次のような問題を確認した。有機凝結剤は原液以外での搬入ができないため、希釈し始めると以降常に希釈して運用する必要がある。また、有機凝結剤は高粘性液体のため、確実に水と混合するには攪拌機などの付加設備が必要になり、省エネ化を考えると望ましくない。以上のことから今後の実設備化には有機凝結剤の冬期の高粘性化を念頭に置き、②の高粘性液体を適切に移送可能な高粘性対応ポンプを選定することが望ましい。

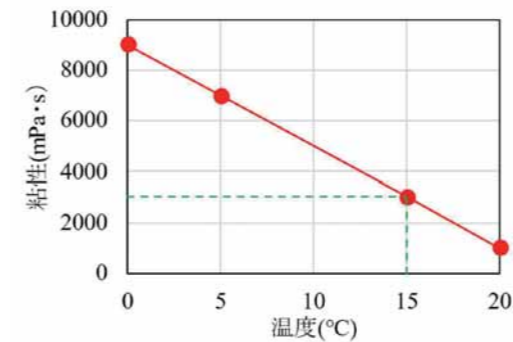


図7 有機凝結剤の液温による粘性変化  
Fig.7 Viscosity change of organic coagulant with liquid temperature

## 7. 今後の展開

浄水場の凝集沈澱プロセスにおいて、無機凝集剤(硫酸バンド)に加えて有機凝結剤を併用注入することにより、無機凝集剤の注入量を20%以上低減させ、運転費用やCO<sub>2</sub>排出量を低減できることを確認した。これら実証試験の結果を踏まえて、同様の課題を抱えている工業用水道施設へ実機導入を進めていく。

<謝辞>実証試験のフィールド、及び浄水場の運転データをご提供いただきました福山市様、実証試験への多くのご助言とご指導をいただきました福山市立大学の清水准教授に深く感謝いたします。

### 参考文献

- 厚生労働省、株式会社日水コン：脱炭素水道システム構築に向けた調査等一式報告書(2020)
- 総務省自治財政局：「水道財政のあり方に関する研究会」報告書(2018)
- 水道技術ジャーナル：浄水用高分子凝集剤について教えてください(2021)

# サイクロンミル実用化、粉砕技術

## Cyclone Mill Practical Application and Milling Technology



吉岡 里美 YOSHIOKA Satomi  
株式会社静岡プラント



石川 元 ISHIKAWA Hajime  
月島機械株式会社 営業部

### Abstract

サイクロンミルは対象物を選ばない万能型の気流式粉砕機である。食品、工業（二次電池材料、樹脂、セラミックス、金属）など様々な分野のなかでも近年は、国の施策と相俟って二次電池素材の粉砕及び解砕の工程に大きな実績をあげており、0.5～100μm程度の粉体製造ラインに活用されている。本稿では、サイクロンミルの特長を踏まえ、これら成長分野での粉砕装置として、その活用技術及び応用について述べる。

キーワード：サイクロンミル、粉砕、粉体、二次電池  
Keyword : Cyclone mills, Grinding, Powders, Rechargeable batteries

## 1. はじめに

食品、工業（二次電池材料、樹脂、セラミックス、金属）など様々な分野において微粉末を利用した研究開発が活発に進められており、そのなかで微細化された材料の性能や粉砕時の磨耗による金属コンタミ（不純物の混入）の低減などはもちろん、生産設備自体の低価格化、より低いランニングコストといった、より一層の収益性確保が求められている。

サイクロンミルは株式会社静岡プラントで開発され、販売開始より23年で約230台の販売実績を持つ粉砕装置であり、その開発原点より、従来の機械式ミルの粉砕原理を踏襲せず、高速気流の持つせん断力に着目し、製造機械としての実体化のための理論研究と開発を進めてきた。その結果、サブミクロンオーダーの微粉末を、非常に効率よく、かつ高精度に製造できる粉砕装置となっている。また、生産プロセスの大幅な簡略化が可能ことから、装置の初期導入コストの低減、ランニングコストの低減など、微粉末をより現実的なコストで生産できる機械として各分野より高い評価を受け、産業分野における微粉末の利用、高付加価値商品化に貢献するに至っている。以下にその詳細を述べる。

## 2. 粉砕原理

サイクロンミルの主となる粉砕メカニズムは以下の点があげられる。

- (1) 気流の高速回転に伴う粒子同士の圧縮・衝突・せん断力による粉砕
- (2) 高速な流体（空気など）そのものの衝撃、せん断力による粉砕

図1にサイクロンミルの粉砕室内の構造を示す。粉砕室に投入された材料は、高速旋回気流に乗り粉砕室内で高速に回転しながら、気流の持つせん断力による破砕と高速で回転する粒子同士の衝突による破砕を繰り返すことで、より細かな粒子に粉砕される。このとき、未粉砕の質量の大きな粒子は遠心力により粉砕室の外周方向に誘導され、反対に粉砕の進んだ質量の小さな微粒子は軸方向に集合する。粉砕粉の排出口側に設けられたブロワーの吸引力とインペラの回転による遠心力を排出口側粉砕室の傾斜壁でコントロールすることにより、極めてシンプルな機構ながら、非常に高い分級精度で効率よく連続処理を行うことができる。

粉砕粒径はインペラの回転速度、寸法、間隔及びブロワーの吸引力などのパラメータを適切に与えることにより制御が可能である。

## 3. 特長

### 3.1 イニシャルコスト、ランニングコストの低減が可能

サイクロンミルは乾式粉砕でありながら、図2に示すような分布幅の狭い非常に微細な領域の微粉末を低コストで生産することができる。

乾粉を製品とする場合においては、液化工程を含んだ時点で脱液・

乾燥などの処理工程が必要となる。ゆえに可能な限り乾燥雰囲気での全工程の処理を行うことが最善である。この意味において粉砕工程が乾式にて処理可能であるということはイニシャルコストの面で非常に有利である。

また、ワンパスで数mmの原料をμmオーダーの微粉末にすることができるため、原料前処理工程が省力化できる。サブミクロンオーダーの微粉砕領域において、しばしば比較されるのがジェットミルといわれる圧縮エア源を用いた粉砕装置である。表1に一般的な二次電池材料を大量生産を目的とした場合のジェットミルとサイクロンミル600S型装置との比較を示す。ジェットミルの稼働には、高速な気流を作り出すために外部に大型コンプレッサーなどの高圧空気源を必要とする。サイクロンミルの場合、高速気流はモーターで駆動されるインペラにより発生する構造である。また、モーターの仕事は原料の破砕を直接行うことなく、インペラの回転を維持することに使われる。この原理の違いが、大きなランニングコストのメリットを生み出している。

以上のことからサイクロンミルは、サブミクロンオーダーの微粉砕領域において設備の導入から生産まで、トータルでのコスト低減が可能である。

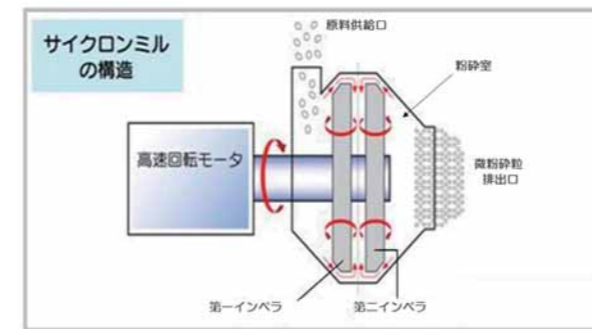


図1 サイクロンミルの構造  
Fig.1 The structure of Cyclone Mill

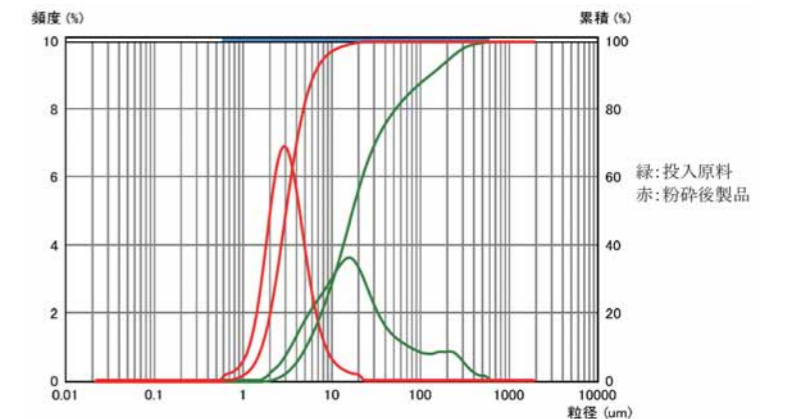


図2 酸化チタン系材料の粉砕前後の粒度分布  
Fig.2 Particle size distribution before and after pulverized TiO<sub>2</sub>-based material

表1 サイクロンミルとジェットミルの比較  
Table1 Comparison of Cyclone Mill and Jet Mill

項目	ジェットミル	サイクロンミル600S型
粉砕原理	同体摩擦粉砕	同体摩擦粉砕
粉砕能力	1～5mmの原料を粗粉砕機にて前処理粉砕したうえで、5～10μmに粉砕	1～5mmの原料を投入し、全量を5～10μmに粉砕
処理能力	最大処理能力は75kWコンプレッサー使用で50kg/h	最大処理能力は55kW主軸モーター使用で350kg/h
システム構成	微粉砕工程のほかに、粗粉砕工程が必要	微粉砕工程のみ
初期導入コスト	1,000kg/hにするには20台必要。多額の投資	1,000kg/hにするには3.3台。少額の投資
電力ランニングコスト	消費電力に対する処理量は0.5kg/kWh	消費電力に対する処理量は5～8kg/kWh

3.2 機械的磨耗、コンタミ(不純物)が少ない

サイクロンミルの粉碎メカニズムは粒子同士の衝突と流体(空気など)のせん断力を利用している。従来の機械式高速回転ミルと異なり、粉碎物を運動媒体であるインペラ及びインペラ周囲のケーシング内壁に衝突させる粉碎機構ではないため、粉碎室中の運動媒体であるインペラやケーシングの磨耗を極めて小さく抑えることができる。粉碎室内部構造の磨耗が少ないことは、機械そのものの寿命、保守に対して優位性を示すばかりではなく、微粉末製造装置の本来的な性能要求である、不純物コンタミを最小限に抑えることについても大きなアドバンテージとなっている。

この特長によりサイクロンミルは、高い安全性や衛生性を求められコンタミを嫌う食品の粉体や、機能性微粉末としての性能を求められ高い純度を要求される各種化学品粉体及び二次電池向け粉体などの粉碎設備として多くの実績を持つに至っている。

3.3 幅広い材料特性に対応が可能

3.3.1 水分、油分

乾式微粉碎処理においてはその含水率、含油率が常に問題となる。特に食品原料の場合は、十数パーセントの水分、油分を含有していることがある。従来の機械式粉碎機の場合には、水分、油分を多く含む原料を粉碎すると粉碎過程で原料がペースト状になり、粉碎できない、又は粉碎品を取り出すことができないという問題がある。

サイクロンミルは、粉碎過程において分離した水分はミルを通過する大量の空気とともに外部に排出されるため、乾燥した微粉末が得られる。また、油分の多い原料あるいは付着性の強い原料で例えば大豆やコーヒー豆といった場合も、その気流粉碎と粒子同士の衝突による粉碎機能と高速な空気流により、原料組織から分離した油脂分の飛散と内部構造への付着を抑制することが可能である。

3.3.2 低融点・熱変質性

材料のなかには、粉碎時に生じる熱によって変性するものや、溶融するものがある。従来の機械式粉碎機の場合には粉碎時の温度上昇が避けられないものが多い。

サイクロンミルは、従来の機械式粉碎機のように、密閉した空間内で粉碎物をインペラやケーシング内壁に衝突させたり、摩擦させる粉碎方式ではなく、粒子同士の衝突及び気流のせん断力により粉碎された粒子が常に、原料供給口から供給される大量の空気とともに排出される構造のため、粉碎時の発熱自体が少なく、なおかつ放熱自体が極めて容易な粉碎方法である。これら特長を活かし、低分子アミノ酸や熱硬化性樹脂といった従来では材料前処理なしでは乾式粉碎処理が困難であった材料においても、微粉化処理が可能である。

3.3.3 硬度、比重

従来の機械式粉碎機では、柔らかい原料や比重の軽い物質に対しては粉碎に必要なエネルギーの伝達が困難であるため、粉碎効率を極端に落とす必要がある上に、非常に微粉末化が難しいという難点があった。

サイクロンミルは高速回転する気流を利用し粒子同士の衝突エネルギー及び気流のせん断エネルギーを利用するため、気流に乗りさえすればあとは速度エネルギーに大きく依存され微粉化される。

このため、比重が軽く、軟質性の麻、綿といった各種繊維系のものまで微細化が可能である。

3.4 温度・湿度・ガス濃度などの粉碎処理環境に柔軟な対応が可能

目的の製品の特徴によっては、材料段階から化学反応の防止、酸化防止、脆化处理、熱変性の防止などの様々な目的で、システム全体のプロセス雰囲気制御が必要となる場合がある。その場合、プ

ロセス環境をより効率良く安定化させる必要がある。加えて、処理環境が変化することによって機械の耐性、能力に大きな変化があってはならない。

サイクロンミルは構造的にもシステマ的にもシンプルであり、なおかつ豊富な実績と多彩なアプリケーションを備えているため、処理雰囲気

コントロールといった付帯的要素に対しても柔軟な対応が可能である。これにより、プラント全体の一部としても容易に組み込むことができる。

図3はその一例である。通常ブローアの排気はプロセス系外へ排出されるが本図は粉碎プロセス内のガスを置換し、循環させることで規定されたガスを使用し、能力を低下させることなく一定の濃度で粉碎処理が可能である。同様に温度、湿度などについても同様なフローを用いてシンプルに条件の構築が可能である。

3.5 シンプルな構造で保守が容易

図4にサイクロンミルの分解時の粉碎室の開放状態を示す。サイクロンミルの粉碎室はスライド式分離構造(Wシリーズ)あるいはヒンジ式開閉構造(Sシリーズ)、大型機は吊上げ式分離構造(600S型)を採用しており、容易に分解が可能である。また、粉碎室の分解、内部インペラの取り外しなどは、ほかの機械式ミルやジェットミルと異なり、内部構造は極めてシンプルで表面が平滑なため、食品や医薬品のように頻繁に内部の洗浄や清掃が必要な分野への適用で高い作業効率を発揮する。

これら高い洗浄性と容易な分解作業は、多品種小ロット生産や様々な条件を変えての試験粉碎などの用途で品種切り替えを容易に行っている。

また、ケーシングに設置されている開閉スイッチにより、粉碎室解放時にはインペラが起動しない二重化インターロックが常設されており、洗浄・清掃などで開閉頻度の多い運転環境でも安全に作業ができるような設計となっている。

4.仕様

小ロット多品種生産から大容量の微粉末生産への対応を目的とし、時間処理能力数kg/h~300kg/hまでの各生産能力に応じた機種を展開している。そのなかにも、対向逆回転方式(Wシリーズ)と同一軸同回転方式(Sシリーズ)の機種がある。その代表としての最小(150シリーズ)と最大(600シリーズ)サイズの機種仕様を表2に示す。



図4 サイクロンミル 分解時の様子  
Fig.4 State of Cyclone Mill when open



図5 アルミナ+ジルコニア製インペラ  
Fig.5 Alumina + Zirconia Impeller

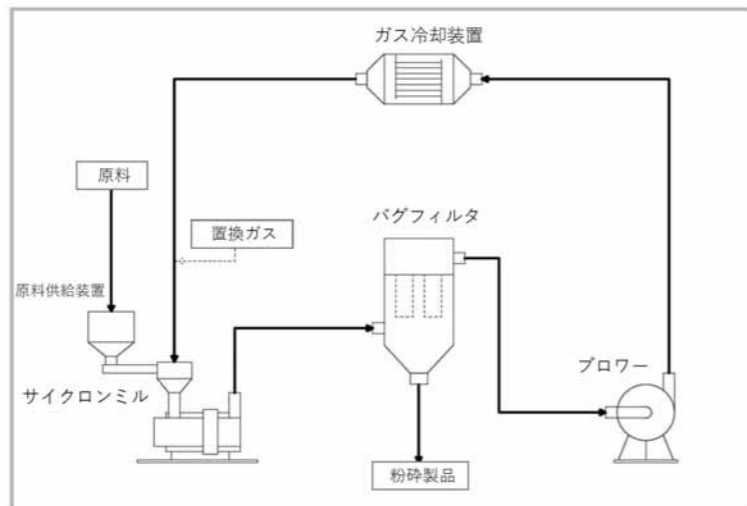


図3 ガス循環型粉碎システムフロー  
Fig.3 Flow sheet of the pulverizing of gas circulation

表2 主要諸元  
Table2 Product specification

	150BMS型	150BMW型	600S型	600W型
インペラ径 (mm)	150	150	600	600
処理量 (kg/h)	1~20	1~10	30~600	30~250
モーター容量 (kW)	4.1x1台	4.1x2台	55x1台	55x2台
寸法 (mm)	W775xD350 xH1,058	W1,200xD350 xH1,360	W1,440xD1,650 xH1,575	W3,225xD2,550 xH2,535
重量 (kg)	86	250	2,800	5,800
外観				

## 5. 微粉末補集 ドーム型サイクロン

サイクロンミルにて粉碎した微粉末の補集においては、従来型より微粉末の回収効率の高いドーム型サイクロンを採用している。(図6)

従来、バグフィルターを主に使用していたが、食品など最終的に殺菌、滅菌処理が必要な材料の粉碎には高い安全性が求められる。バグフィルター内部を食品衛生上問題の無い状態を維持するためには、定期的な洗浄、フィルターエレメントなどの交換など手間や費用を必要とする。

そこで、消耗品がなく、衛生状態維持のための分解洗浄が容易なサイクロンを開発した。

従来の標準的なサイクロンとドーム型サイクロンにおいて同一の粉体を流動、補集し粒子径分布測定を行った結果の比較事例を図7に示す。標準型と比べドーム型サイクロンの粒度分布は、微粒子側が多く検出されている。

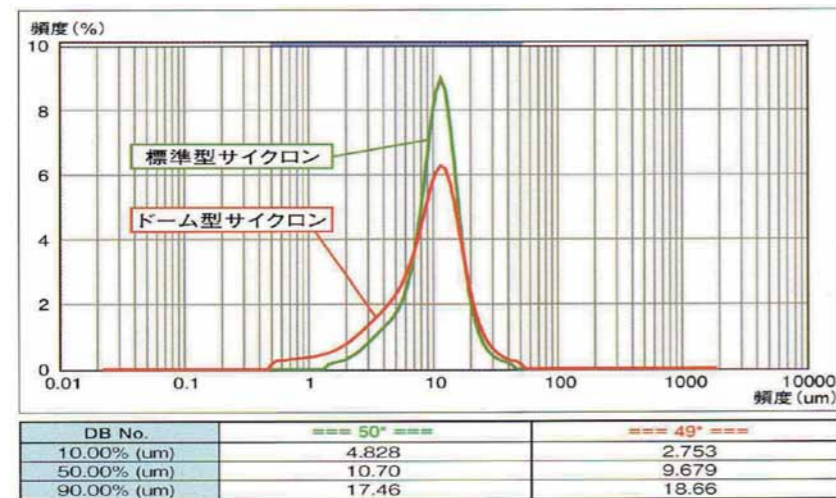


図6 ドーム型サイクロン  
Fig.6 Dome-type cyclone

## 6. まとめ

株式会社静岡プラントでは幅広いニーズに対応するため、全ラインナップのテスト機を用意し、実粉にて小型機による条件出しから大型機による実生産ラインの検証テストまで、実施することが可能である。

今後は、従来困難であった材料の凍結粉碎や機能材料のコーティングなど、付加価値のあるシステム構成による拡販を目指したい。



試料：カーボン粉

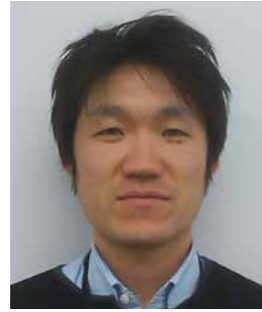
図7 標準型とドーム型サイクロンの捕集品比較  
Fig.7 Comparison of collected materials between standard and dome-type cyclones

# 船橋市高瀬下水処理場消化ガス発電事業

Digester Gas Power Generation Project at Funabashi City, Takase Treatment Plant



山本 浩己 YAMAMOTO Hiroki  
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 水汚泥設計部



中嶋 昭博 NAKAJIMA Akihiro  
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 水汚泥設計部

## Abstract

カーボンニュートラル社会の実現のため下水汚泥を利用したバイオガス発電が推進されており、水循環政策として2030年までに発電量を約13万MWh増加させる数値目標が示されている。また、近年では自治体の財政悪化や技術者不足などへの対策として、民間企業の有する技術の導入や建設・運営コスト削減を目的にDB方式、DBO方式、民設民営方式などの発注方式が増加している。

このような背景の中、下水汚泥よりバイオガスを生成するプロセスを「DB方式」で建設し、バイオガス発電で売電回収する「民設民営方式」を実施する、船橋市高瀬下水処理場の消化ガス発電事業を受注した。本稿ではその概要や特徴について報告する。

キーワード：カーボンニュートラル、消化ガス発電事業、鋼板製消化タンク、消化ガス発電機

Keyword：Carbon neutral, Digester Gas Power Generation Project, Stainless Steel Digester Tank, Digester Gas Power Generator

## 1. はじめに

近年、カーボンニュートラル社会の実現を目指し、再生可能エネルギーの導入を促進する取り組みとして、下水道分野では下水汚泥を有効活用したバイオガス発電が推進されている。水循環政策におけるロードマップ<sup>1)</sup>では、2030年までに下水汚泥を活用した発電量として約13万MWh増(2018年度比)の数値目標が示されている。現在、全国の約2,200か所の下水処理場のうち約100か所でバイオガス発電が実施されており、今後も更なる増加が見込まれている。

公共下水道事業では、設計は発注者である自治体が行い、施工を民間企業に発注する設計施工分離発注とすることが一般的である。また、施工は機械設備と電気計装設備を分離し、それぞれを単独工事として発注する機電分離発注を基本としている。しかし近年、自治体の財政悪化や技術者不足が課題になっており、従来の設計施工分離、機電分離の発注方式からの見直しが進められている。このような観点から、民間企業の有する先進的な技術の導入や建設・運営コストの削減を目的に、機械・電気計装設備を一体とする「機電一体」の「設計・施工一括発注(DB: Design-Build)方式」、更に運営も含めた「設計・施工・運営一括発注(DBO: Design-Build-Operation)方式」、設計・建設・保有・運営を全て民間企業がおこなう「民設民営方式」などの発注方式が増加している。

このような状況の中、当社は、下水汚泥よりバイオガスを生成するプロセスを「DB方式」で建設し、バイオガス発電で売電回収する「民設民営方式」を実施する、船橋市高瀬下水処理場の消化ガス発電事業を受注した。

本稿では、本事業の概要や特徴について紹介する。

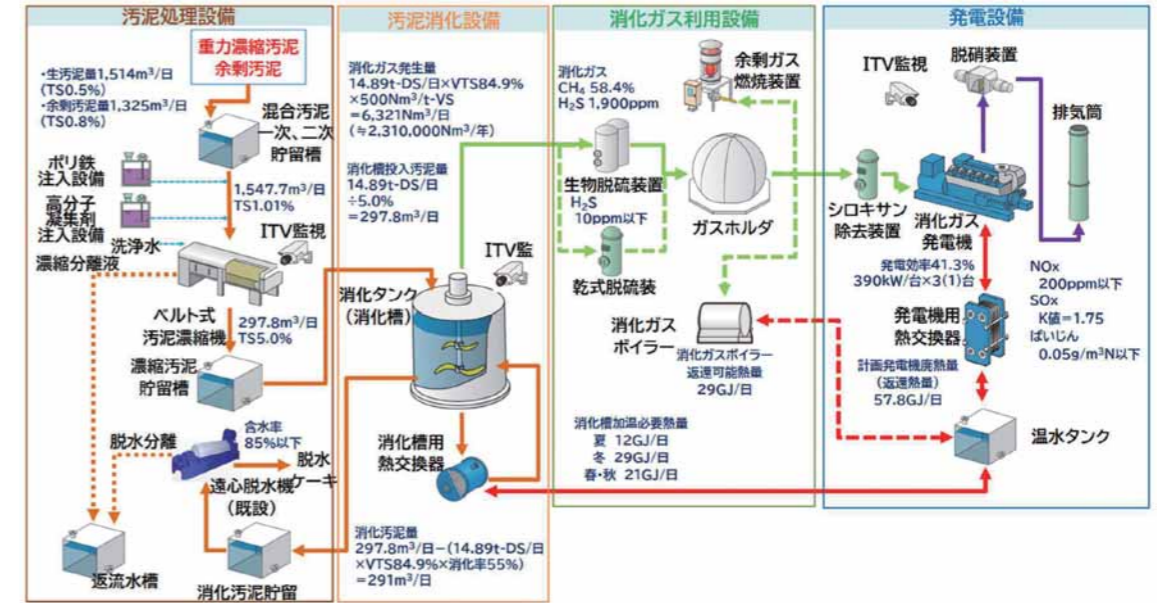


図1 プロセス概要  
Fig.1 Process Overview

## 2. プロセス概要

本事業は、バイオガス生成プロセスとバイオガス発電プロセスから構成される(図1参照)。

### 2.1 バイオガス生成プロセス(DB方式)

従来、本施設では下水処理工程で発生した汚泥は重力濃縮槽→遠心濃縮機→遠心脱水機を経て場外に搬出されていた。これに対して本事業では、下水汚泥の消化による減容及びバイオガス発電を行うため、設備改造を実施した。改造内容としては、重力濃縮後の汚泥を消化に適した水分量とするため、既設遠心濃縮機からベルト式汚泥濃縮機へ更新した。また、その「濃縮汚泥」を微生物とともに加温攪拌することで分解し「消化ガス(バイオガス)」を生成するための消化タンクの新設を行った。消化ガスは、中に含まれる硫化水素を除去したのち新設のガスホルダに貯蔵する。消化汚泥は既設脱水機で処理されたのち、「脱水汚泥」として下水処理場外に搬出され、セメント材などに再資源化される。

### 2.2 バイオガス発電プロセス(民設民営方式)

本プロセスは、ガスホルダに貯蔵された消化ガスを利用して、390kWの出力を有するガスエンジン発電機3台により発電し、JFEエンジニアリング(株)の100%子会社であり、小売電気事業者のアーバンエナジー(株)を通じて船橋市内の企業などへ売電するものである。バイオガス発電設備を設置した土地の占用料や、バイオガス売却費を船橋市が当社より得る一方で、当社は売電により収益を得る事業スキームであり、20年間に渡り運営を行う。

## 3. 技術の特徴

### 3.1 鋼板製消化タンクとインペラ式攪拌機「ダイナミキサー BB」(以下DMBB)

消化設備には当社で多数の建設実績がある全溶接式鋼板製消化タンクと消化タンク攪拌機を採用している。

消化タンクは長期間の使用においてタンク底部側壁部近傍には砂分などの堆積が発生し、タンクの有効容量減少や開放清掃作業時の浚渫費用増加が懸念される。この対策として、底部堆積物を抑制する底部噴射機構を新規設計・設置した(図2参照)。タンク底部側壁

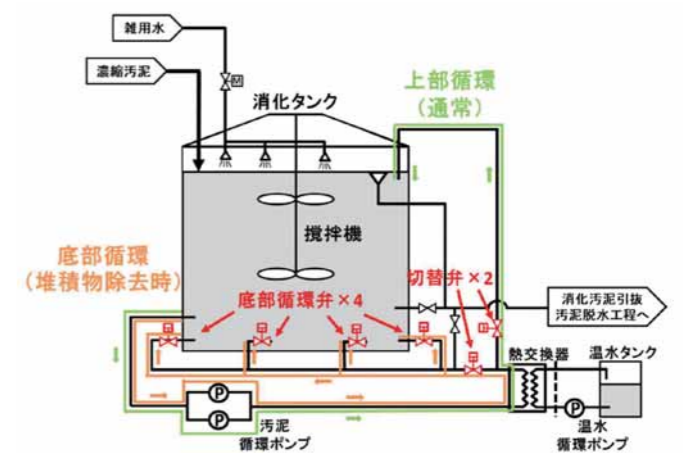


図2 底部噴射機構  
Fig.2 Mechanism of sludge injection at the bottom of tank



部に沿うように設置した底部循環弁付近のノズルから汚泥を噴射し、これを4箇所のノズル間で順次連続して行うことで、シンプルなタンク形状において消化槽底部の全周にわたって堆積物を流動化し効率的な堆積物抑制を可能としている。本機構を元に、別途パイロットプラントを用いた実証試験を行い、「噴射ノズル式鋼板製消化タンク」として日本下水道事業団より新技術I類に選定済みである。

消化タンク攪拌機は、しきや繊維類のからみつきがなく、逆転運転が不要であることを特長とする独自技術の特殊後退翼を持つDMBB(図3参照)を採用している。本攪拌機は日本下水道新技術機構より建設技術審査証明を取得済みで、国内160基以上の豊富な納入実績を有している。

### 3.2 消化ガス発電機

当社では、消化ガス発電機の抱負な実績があり、ラインナップの拡充を図っている。本事業では発電効率41.3%を達成する高効率で世界的に実績の豊富なCaterpillar社製MWMガスエンジンを採用し、JFEエンジニアリング鶴見製作所にて消化ガス発電機としてパッケージングを行った(図4参照)。

消化ガス供給量、消化槽の必要加温熱量の季節変動及びメンテナンス性を考慮に入れ、予備機を持たせた発電出力390kW/台×3台(2台運転、予備1台)による構成とした(表1参照)。



図3 DMBB  
Fig.3 Appearance of DMBB impeller

表1 消化ガス発電機仕様  
Table1 Specification of Digester Gas Power Generator

発電効率	41.3%
出力	390kW
電圧	6,600V
エンジン型式	TCG3016-V8 希薄燃焼方式
回転数	1,500 r/min
台数	3台 (2台運転、予備1台)



図4 消化ガス発電機  
Fig.4 Appearance of digestion gas power generator

## 4. 設計・建設時の工夫

### 4.1 設計メンバーの早期現場常駐及び

#### 試運転実施体制について

コロナ禍におけるリモート業務体制が整備されたことから、本社との連絡・連携にも支障がないと判断し、当初は試運転開始にあわせて現地滞在を予定していた設計担当者を機械据付工事段階から現地に常駐させることとした。

この結果、設計・施工担当メンバーと施工業者間の意思疎通が非常に速やかに進み、現地を見て判断できるため微少な変更、改造についても迅速に対応でき、設計判断待ちも少なくスムーズに工程が進捗した。市や運営管理事業者とも、問題点や要望事項などの打ち合わせを現地で速やかに実施することが可能となり、信頼関係の向上に繋げることができた。

また、本事業はフルターンキープラントに近く、自分たちで設計～施工～試運転を最後まで主体的に経験するべきと考え、当初予定していた試運転助勢は依頼せず、若手メンバーを中心にシベタラン社員にてフォローを行う、社内メンバーのみの体制にて試運転を行う方針とした。現地現物を実際に確認しつつ要領書準備、資材手配、測定、分析を実施した。

若手メンバーの活躍もあり、客先を含む様々な関係者などとのコミュニケーションの重要性を理解しながら、運転立上げ完了～工事完成引渡しまで無事に実施することができ、若手メンバーには成功体験とともに、今後の業務への経験と自信に繋がったと思っている。

### 4.2 槽用途及び汚泥ライン切替工事への対応

本事業では汚泥槽の増設費用削減を主目的として、仮設汚泥貯留槽を設けず、運転継続中の既設濃縮汚泥貯留槽及び既設余剰汚泥貯留槽などの一部槽の使用用途を変え、消化汚泥貯留槽や混合汚泥の一次・二次貯留槽として再利用するようなフローを構築した。そのため、改造工事及び試運転においては既設運転を継続させつつ、複雑な槽・ラインの改造及び切替作業をスムーズに実行する必要があった。この課題に対応するため、改造工事・試運転に先立って各工程を細分化した上で、フローシート上のラインを色分けすることで複雑な切替工程の視覚化を図った。同資料を用いて客先や運営管理事業者と密に協議を重ねながら工程を進行することにより、試運転時に必要となる仮設改造作業の見落としを防ぐとともに、切替による既設運転への影響を最小化することに成功した。結果としてトラブルや遅延もなく、全工程を無事に終了することができた。

## 5. おわりに

供用開始後に一時的な消化不良によるガス発生量の低下が発生したが、設計・建設時に築いた信頼関係のおかげで、市や運営管理事業者と三者一体となり原因究明、復旧へ向けた対応を迅速に実施することができ、さらに得られた知見より、今後の安定運転につなげる管理体制を構築することができた。

また、蓄積した運営管理実績より、2023年度後半からは更なるガス発生量向上と運転安定化を目標とし、順調に稼働しているところである。



図5 完工後施設の外観機  
Fig.5 Appearance of completed facilities

### 引用文献

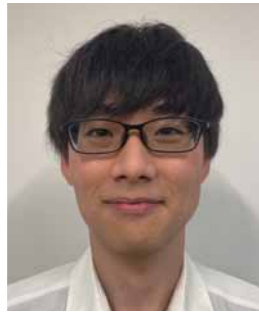
1) 内閣官房水循環政策本部事務局:水循環政策における再生可能エネルギー導入促進に向けた数値目標 (2023.9.14公表)

# 綾瀬終末処理場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 Ayase Sewage Treatment Plant for Sewage Sludge Reduction and Energy Use System



古屋 一寿 FURUYA Kazutoshi  
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



大河原 隆生 OKAWARA Takao  
月島JFEアクアソリューション株式会社  
調達部

## Abstract

当社は、2024年3月に綾瀬終末処理場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（DB方式）及び消化ガス発電設備（民設民営方式）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綾瀬市と契約を締結した外部利用先で活用される。また、生成した消化ガスの一部は綾瀬市より当社が買取り、消化ガス発電を行いFIT制度を利用して電力会社に売電している。

キーワード：綾瀬市、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：Ayase City, Sewage sludge reduction, Energy utilizing, Sludge concentrate-digestion-dewatering and drying system, Digestion gas power generation

## 1. はじめに

綾瀬終末処理場は、綾瀬市東部処理地区の汚水を標準活性汚泥法で処理する分流式の処理場で、発生する脱水汚泥（約5,000t/年）は場外へ搬出し、セメント原料や肥料として処分<sup>1</sup>されていた。

綾瀬市では、汚泥減量化、温室効果ガス削減及び事業の安定化を図るため、2020年6月に指名型プロポーザル方式で提案を募集し、2020年11月に当社が優先交渉権を獲得した。その後も課題解決に向け当社のノウハウを最大限活用するため綾瀬市と官民の対話・協議を約1年間にわたって重ね、2021年11月に「綾瀬終末処理場消化槽設置に伴う汚泥減量化と消化ガス発電事業基本契約」、「綾瀬終末処理場消化施設等整備事業設計・建設工事」（DB方式）及び「綾瀬終末処理場消化ガス発電事業契約」（民設民営方式）を締結した。

本施設は、2024年3月に完工し、4月より運用を開始したので、その設備概要について紹介する（図1）。



図1 設備全景  
Fig.1 Overall view of facilities

表1 設備概要  
Table1 Equipment Overview

設備名称	設備概要	主要機器	建設方式
機械濃縮設備	重力濃縮混合汚泥を一定、高濃度まで濃縮し消化タンクへ供給する設備	ろ過濃縮機「ロノッシュ®」 容量:2m <sup>2</sup> ×1基 運転時間:24h/日	DB方式
消化設備	濃縮汚泥を中温消化する設備	消化タンク 容量:1,800m <sup>3</sup> ×1槽 運転時間:24h/日	
脱水乾燥設備	消化汚泥を脱水、燃料化する設備	脱水乾燥システム (汚泥脱水機+汚泥乾燥機) 容量:5m <sup>3</sup> /h×1式 運転時間:24h/日	
消化ガス発電設備	消化ガスを燃料として発電する設備	マイクロコージェネレーションシステム 容量:25kW×3基 運転時間:24h/日	民設民営方式

## 2. 設備概要と導入効果

### 2.1 設備概要

本設備は、表1及び図2に示す機械濃縮設備、消化設備、脱水乾燥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)

- ・重力濃縮混合汚泥を高濃度にろ過濃縮することで消化設備を小型化
- ・鋼板製消化タンクの採用で工期を短縮し建設費を低減
- ・脱水機と乾燥機を一体化し、低コストで汚泥を燃料化（肥料利用も可能）
- ・消化ガスコージェネレーションシステムを採用し発電廃熱を消化タンク加温に活用

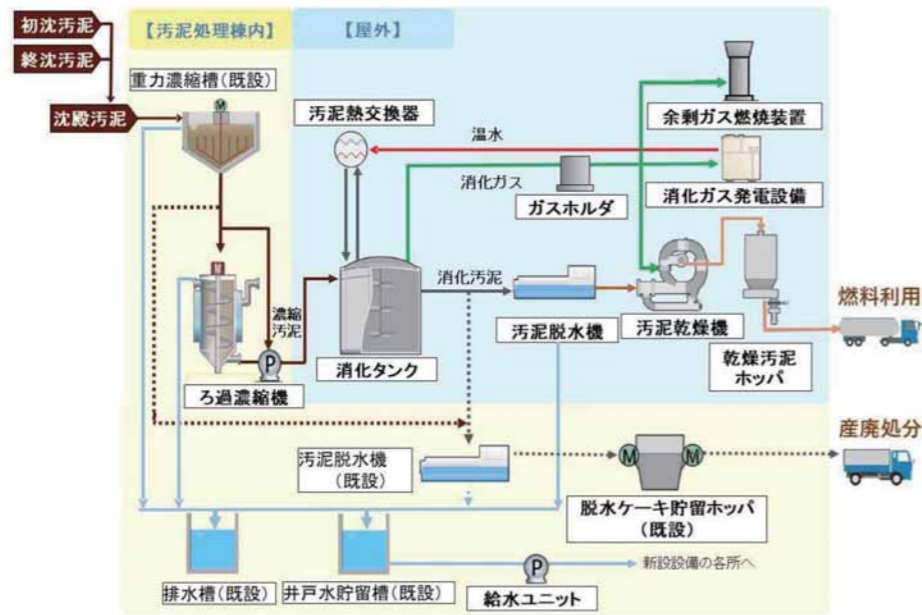


図2 概略設備フローシート  
Fig.2 Outline facility flow sheet

## 2.2 導入効果

本設備の導入により以下の効果が見込まれている<sup>1)</sup>。

- ・年間約5,000t発生している脱水汚泥を消化・脱水乾燥により約900tの乾燥汚泥に削減  
(汚泥処分費の削減効果)
- ・汚泥消化で発生する消化ガスをFIT発電事業者(当社)へ売却<sup>\*1</sup>  
(販売収益の確保)

※1 売却した消化ガスによる発電量は、62万kWh/年の見込みで、一般家庭163世帯分に相当(2.2の導入効果のメリットを享受)

## 3. 性能試験結果

設備試運転は、2023年9月下旬より開始し、機械濃縮設備、消化設備、脱水乾燥設備及び消化ガス発電設備の順に立上操作を行った。2024年2月には、性能試験を行い次の結果を得た。

機械濃縮設備は、5時間の連続運転で約5%の高濃度汚泥を固形物回収率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、消化タンク立上操作完了後(所要日数:40日)、消化率50%以上、消化ガスメタン濃度60vol%以上であることを確認した。脱水乾燥設備は、24時間の連続運転で含水率20±5%の乾燥汚泥を安定的に製造できることを確認した。表2は、乾燥汚泥の性状分析結果を示す。低位発熱量は、18,400J/g(絶乾ベース)で燃料利用

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

項目	単位	測定結果
含水率	%	19.4
強熱減量	Dry%	84.6
全塩素	Dry%	0.09
発熱量(絶乾低位)	J/g	18,400

可能な発熱量を有していることを確認した。また、乾燥汚泥の形状は粒状(50%平均粒径:約830μm)でジェットバック車による搬出先への運搬が可能であることを確認した。

## 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のエネルギー・肥料への利用が求められていることから、汚泥の減量化と安定化を図り、生成物を燃料や肥料として利活用可能な本技術への期待も大きいと考える。本業務で得られた知見は、当社技術の更なる向上と技術革新に利活用し、最良の技術をもって環境保全に貢献していく所存である。

### 参考文献

1) 下水道協会誌,第59巻,第718号, pp.34-37 (2022), 綾瀬終末処理場における汚泥減量化とエネルギー利用の取り組みについて:綾瀬市土木部下水道課長

# 葛西水再生センター焼却2号炉

No. 2 Sludge Incineration Plant of the Kasai Water Reclamation Center



山本 隆文 YAMAMOTO Takafumi  
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

## Abstract

2024年3月に東京都下水道局の葛西水再生センターへ納入した焼却設備について紹介します。

東京都下水道局との共同研究により、エネルギー自立型焼却炉として承認された機種で、弊社のシステムはターボ型流動炉とバイナリー発電ユニットを組み合わせた設備です。

汚泥焼却工程におけるCO<sub>2</sub>排出量を削減するため、補助燃料を必要とせず、また、発電目標単価よりも安価な発電を行うことで電力量が焼却設備における使用電力を上回ることができます。

キーワード：ターボ型流動炉、エネルギー自立型焼却炉、バイナリー発電、超低含水率汚泥、自然

Keyword：Turbo-type fluidized bed incinerator, Energy independent incinerator, Binary power generation, Super-low-moisture sludge, Self-combustion,

## 1. はじめに

東京都下水道局では、地球温暖化対策を推進するために省エネ・再エネ効果の高い技術の導入が進められ、高温焼却や補助燃料使用量削減によって一酸化二窒素及び二酸化炭素排出量を大幅に削減されましたが、焼却時に買電よりも安価な発電を行うことで電力使用による二酸化炭素排出量も削減できる「エネルギー自立型焼却システム」の導入が進められてきました。本稿では、葛西水再生センターに納入したエネルギー自立型焼却炉を紹介します。

## 2. 設備構成

エネルギー自立型焼却炉は、省エネ性に優れた過給式流動炉（ターボ型流動炉）とバイナリー発電機を組み合わせたものです。過給式流動炉は消費電力とCO<sub>2</sub>排出量の大幅な削減が可能です。今回はさらに白煙防止用過給機を採用することで白煙防止ファンも不要となります。バイナリー発電機の熱源は蒸気で、流動空気予熱器及び白煙防止空気予熱器にて排ガスで加熱された流動空気及び白煙防止空気の廃熱が予熱空気用ボイラ及び白煙防止用ボイラで蒸気として回収されます。バイナリー発電機では両ボイラで発生した蒸気を冷媒加熱熱源として焼却設備の消費電力を上回る電力を発電することができます。焼却能力は300t/日（12.5t/h、24時間運転）です。図1に外観写真、図2に概略フローを示します。

## 3. 目標性能の達成度

目標性能と試運転における達成度を表1に示します。全ての項目で目標性能を達成します。

### 3.1 補助燃料使用量

【目標性能】 補助燃料は必要としない

脱水汚泥含水率が設計条件を逸脱している期間以外は、自然して炉内温度も安定しています。

### 3.2 N<sub>2</sub>O排出量

【目標性能】 1.15 kg-N<sub>2</sub>O/t-DS以下（計算値）

試運転時の定格運転における煙突入口排ガス中N<sub>2</sub>O濃度は平均28ppmで、排出原単位は0.73 kg-N<sub>2</sub>O/t-DSです。

### 3.3 使用電力

【目標性能】 161kWh/t-DS以下（計算値）



図1 エネルギー自立型焼却炉外観（葛西水再生センター）  
Fig.1 Appearance of energy independent incinerator (Kasai Water Reclamation Center)

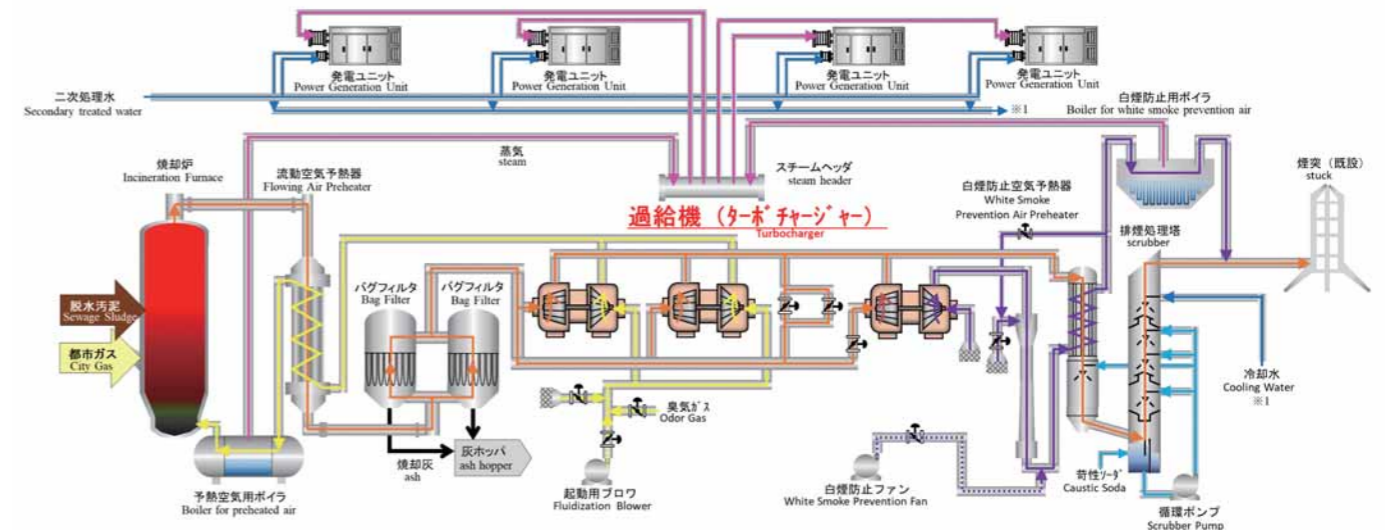


図2 エネルギー自立型焼却炉の概略フロー  
Fig.2 Outline flow of energy independent incinerator

過給機自立時の設備使用電力は309kW（白煙防止用過給機自立時は274kW）で、使用電力原単位は92kWh/t-DS（81kWh/t-DS）です。使用電力も目標性能を満足します。

### 3.4 発電単価

【目標性能】 14円/kWh以下（計算値）

蒸気発生量は脱水汚泥の焼却量及び含水率で左右されますが、蒸気発生量が多いときで発電ユニット3基運転が確認できており、発電ユニット内使用電力を除いた送電端電力は115kW/基×3=345kWとなります。白煙防止用過給機が自立していない場合の使用電力309kWを上回る発電量であり、発電電力>消費電力となります。また、このときの発電単価は（発電設備建設費の25年平均+年間維持管理費）/（発電量+使用電力目標性能値から下振れしている電力）で算出され、目標性能を満足する12.1円/kWhとなります。

## 4. まとめ

前段の脱水設備は、補助燃料使用量ゼロを実現し、また、多くの蒸気を回収するために、超低含水率型脱水機（別途工事）が採用されており、試運転では含水率71～74%の脱水汚泥を取扱いました。流動性のない脱水汚泥で定格供給に苦労した部分もありましたが、72時間連続の定格負荷運転を実施し、全ての目標性能を満足することができました。

エネルギー自立型焼却炉の共同研究契約において、引渡し後1年間の事後評価を行うことが定められているため、引き続き目標性能に関わる運転状況を把握していきます。

表1 試運転時における検証項目の目標値と達成度  
Table1 Target values and achievement of verification items during commissioning

検証項目	目標値	試運転結果
① 補助燃料	必要としない	自然
② 一酸化二窒素の排出量	1.15kg-N <sub>2</sub> O/t-DS以下	0.73kg-N <sub>2</sub> O/t-DS
③ 使用電力量	161kWh/t-DS以下	92kWh/t-DS
④ 発電単価	14円/kWh未満	12.1円/kWh

# サイクロンミル

Cyclone Mill



石川 元 ISHIKAWA Hajime  
月島機械株式会社  
営業部

## Abstract

昨今微粉碎技術が注目される中、乾式気流粉碎機サイクロンミルはこの20年の間に様々な分野において採用されてきた。食品用途では茶葉、蕎麦粉、大豆など。工業用途では水酸化リチウム、カーボンなどの二次電池材料をはじめ、酸化チタン、シリカなど。これらはこれまで粒度分布や処理量の面から困難とされてきた原料の粉碎を次々と可能にしてきた結果である。今後も活躍の場を増やしていくであろうサイクロンミルについて、これまでの実績の一部を紹介する。

キーワード：サイクロンミル、粉碎、乾式、二次電池  
Keyword : Cyclone mill, Grinding, Dry, Secondary battery

## 1. はじめに

2004年12月、月島マシンセールス株式会社(当時)が日機装株式会社とトルネードミルの販売代理店契約を締結して以来、20年が経つ。その間、2005年6月に契約先は静岡プラントサービス(現株式会社静岡プラント)へ、機器名称はサイクロンミルへと変わったが、両社の努力により徐々に販売実績を積み上げ、業界での認知度も上がってきている。

昨今は微粉碎技術がこれまで以上に重要視され、数mmの粉体原料をワンパスで数 $\mu\text{m}$ の微粉末に粉碎可能なサイクロンミルは当初ターゲットとしていた食品業界以外にも様々な業界から注目を浴びるようになった。

特に近年は、他社機器では粉碎出来ない難しい原料が持ち込まれる。これらを静岡プラントで各種テスト機により原料に合わせて処方を検討し、ひとつひとつクリアしながら実績を積み上げ、現在に至る。

今では様々な業界で実績があるサイクロンミルの納入事例を、今回は営業目線で紹介する。

図1、2、3に業界別、材料別食品向け、材料別工業向けの納入実績をそれぞれ示す。

## 2. 特長

技術的な説明は別稿の製品紹介に譲り、営業的に捉えているサイクロンミルの特長を記す。

- (1) 気流粉碎のため機械的な摩耗が少なく、よってコンタミの発生も少ない
- (2) 粉碎原料の発熱が少ない
- (3) ワンパスで数mmの原料を数 $\mu\text{m}$ まで均一な粉碎が可能
- (4) 高圧空気源が小さいため、ランニングコストを抑えられる
- (5) 小型機から大型機までのラインナップにより生産規模に合わせたサイズ選定が可能
- (6) 投入から分級・回収まで一連のシステムで構成されているため省人化にも貢献
- (7) 前後工程とのインライン化やドライエアーや窒素の循環ラインの構築も可能



図1 納入実績(業種別)  
Fig.1 Delivery record (by Industries)

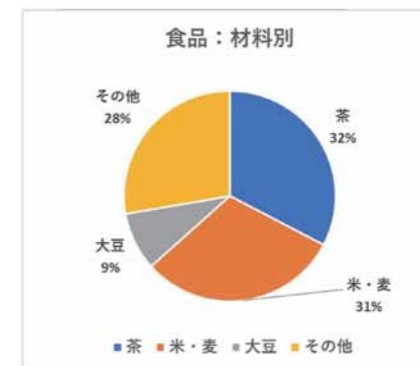


図2 食品向け納入実績(材料別)  
Fig.2 Delivery record for foodstuff (by materials)

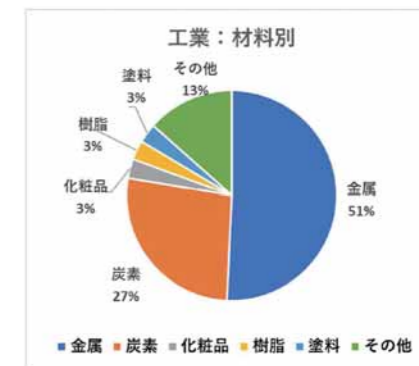


図3 工業向け納入実績(材料別)  
Fig.3 Delivery record for Industrialstuff (by materials)

## 3. 納入事例紹介

以下に納入事例を紹介する。

### 3.1 茶葉の粉碎

近年お茶の効能が見直され、健康飲料、食品としての消費量が増えているが、粉末としても様々な採用事例がある。

飲料用として代表的なのは、今ではコンビニエンスストアで当たり前のように見かけるペットボトルに入った緑茶である。多くの国内飲料メーカーがラインナップを揃えており、ショーケースのスペースを一番占拠している飲料と言っても過言ではない。また、回転寿司チェーンに行くと席に必ずあるセルフサービスの粉末状のお茶も誰もが知るところである。

食品用では従来の和菓子だけではなく、抹茶味のチョコレート、アイスクリーム、パフェ、ケーキなど様々な洋菓子でも消費者からの人気が高まっており、粉末状にして使用されている例は多い。

その他、抗菌用としても評価され、粉末にして使用されている。これらに使用される茶葉の粉碎工程において、サイクロンミルは多くの採用事例がある。

サイクロンミルで粉碎する利点として、以下のことがあげられる。

- (1) コンタミが少ない
- (2) 発熱が少ないため品質劣化も少なく、発色もきれいな緑色を保つ(図4)
- (3) 硬い葉脈の部分も同時に投入してもワンパスで均一な粒子に粉碎し、かつ大量処理が可能(図5)
- (4) 従来の抽出法のお茶とは異なり、茶葉全量を微粉碎し利用することでお茶の栄養素や食物繊維を100%摂取可能
- (5) 茶葉全量を利用することで、これまで大量の産業廃棄物となっていた抽出粕の発生量を大幅に低減できる



図4 茶葉(粉碎後)  
Fig.4 Tea leave (after pulverization)

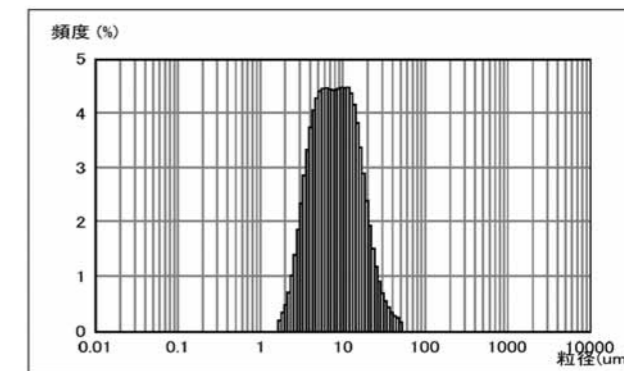


図5 茶葉の粒度分布(粉碎後)  
Fig.5 Particle size distribution after pulverized Tea leaves

上記のことから茶葉はサイクロンミルで粉碎することにより、高品質で均一で栄養素が詰まった茶葉を大量に生産できる設備であり、産業廃棄物を減らすエコな設備でもあると言える。

## 3.2 二次電池材料の粉砕

近年、サステナブル社会の実現の観点から化石燃料からの脱却が叫ばれるなか、二次電池の需要が高まっており、特にこれからは電気自動車やハイブリッド車への普及拡大が期待されている。

二次電池には各社様々な粉体原料を採用しているが、その粉砕用途として、サイクロンミルは多くの納入実績がある。

二次電池の開発は日進月歩の状況にあり、開示されない秘密事項も多く、記載出来ない若しくは開示されない情報も多いが、サイクロンミルで粉砕するメリットとして以下のことがあげられる。

- (1) 金属コンタミが少ない
- (2) ワンパスで10 $\mu$ m前後の均一な微粉末が得られる (図6)
- (3) 前後工程に組み込み、インラインのもと、大量生産が可能
- (4) エアパーズ若しくは窒素パーズ下での循環ラインが組める
- (5) 気流により原料が磨砕されるため、粒子は丸い形状で均一な微粉末が得られる

電池材料ではただ粒子径が均一だけでなく、形状も均一であることが良いとされる傾向にある。サイクロンミルは前工程から出てきた原料をエアパーズ若しくは窒素パーズ下にて、ワンパスで10 $\mu$ m前後の均一な粒径、均一な形状の微粉末に、全てインラインの中で時間当たり数100kgの大量処理ができる設備であると言える。

これらのことからサイクロンミルは二次電池製造工程において要求される能力と機器の長所が合致した、最も適した粉砕機であるとも言える。

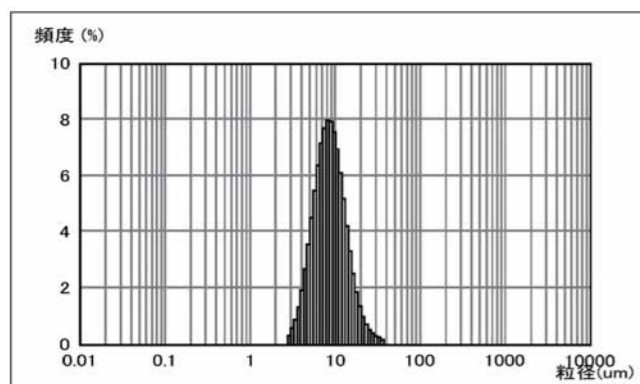


図6 水酸化リチウムの粒度分布 (粉砕後)

Fig.6 Particle size distribution after pulverized Lithium hydroxide

## 4. おわりに

冒頭にも記載したがサイクロンミルは他社では出来なかった原料を株式会社静岡プラントと当社のメンバーが一つ一つ丁寧に対応し、新たな発見をしながらクリアしてきた機器である。

手前味噌ではあるが、サイクロンミルの大型機600S、600Wの2機種種の1号機を納入したのはともに当社(旧月島マシンセールス)である。600W受注の際は、まだ完成していない段階から関わり、株式会社静岡プラントと協力しながら納入まで漕ぎ着けたという実績もある。

サイクロンミルにはこれまで多くの分野への納入実績に加え、これから芽吹くであろう新分野においても必要不可欠な機器となれる無限の可能性がある。

また、今回紹介した納入事例にもあるように、産業廃棄物の低減や化石燃料からの脱却など、『環境保全に寄与する』、『サステナブルな社会を実現する』といった月島ホールディングスグループの企業理念にも合致した機器でもある。

これからも同社と協力しながら、引き続き月島機械の取扱機器として、活躍の舞台を増やしていきたいと考える。

## 5. 謝辞

本稿執筆にあたり、情報提供や御指導・御教示を頂いた株式会社静岡プラント 戸田泰寛社長、安井崇部長、吉岡里美氏には深く御礼を申し上げます。

# 熱力学的平衡解析編

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  
川端 友寛

## 1. はじめに

我々の生活する世界には様々な法則がある。質量保存の法則、万有引力の法則など枚挙にいとまが無いが、化学反応や熱力学の分野にもそのような法則は当然存在しギブス自由エネルギー最小の原理もその一つである。

自由エネルギーとは熱力学における状態量の一つであり、化学変化を含めた熱力学的系の等温過程において、系の最大仕事量、自発的变化の方向、平衡条件などを表す指標となる。等温等積過程の自由エネルギーをヘルムホルツ自由エネルギーと呼ぶのに対し、等温等圧過程の自由エネルギーはギブス自由エネルギーと呼び分けられる。

## 2. 熱力学的平衡組成

ここではアルカリ金属及びアルカリ土類金属の塩化物の反応としてNaCl、KCl、BaCl<sub>2</sub>の3成分を混合し、温度を変化させることによってどのような形態となるか解析した結果を紹介する。

### 【解析条件】

- 対象物質：NaCl 50mol, KCl 30mol, BaCl<sub>2</sub> 20mol
- 温度：525~625°C
- 圧力：1atm

解析結果を図1に示す。BaCl<sub>2</sub>は544.27°Cまでモル数が解析条件の20molのままであることから、その温度までは他物質と反

応せず単体で存在している。またNaClとKClは544.27°Cまでカリウムを含む岩塩 (Rocksalt) 80molとして存在している。さらに温度を上昇させていくと固体で存在していたBaCl<sub>2</sub>や岩塩の融解が始まることになる。544.27°C以上の温度ではBaCl<sub>2</sub>と岩塩は温度上昇に伴って曲線的に融解し熔融塩 (Salt-liquid) となる。554.08°CにてBaCl<sub>2</sub>が全て融解し、それ以上の温度では岩塩がほぼ直線的に融解する。最終的には624.28°Cにて全ての物質が熔融塩となる。

これらの結果を実験で求めるためには各温度を保持したまま成分分析をする必要がある。ただしそれは現実的に不可能であり、熱力学的平衡解析の優位な点であると言える。

系自発的变化はギブス自由エネルギーが減少する方向に進行し、閉鎖された系ではギブス自由エネルギーが最小値となるときに温度・圧力・体積・組成などの巨視的な性質が時間的に変化せず系外と熱や物質のやり取りをしない状態に達する。この状態を熱力学的平衡状態と呼ぶ。

解析グループでは任意の系における熱力学的平衡状態を計算する汎用ソフトを用いた解析を実施しており、本稿ではその機能の一部を紹介する。

## 3. 三成分系状態図

前章では組成一定の条件下で熱力学的平衡組成の温度依存性を解析したが、温度一定の条件下で組成が変化した場合の熱力学的平衡組成を解析することも可能である。その場合は三成分系状態図で整理すると結果が明快である。

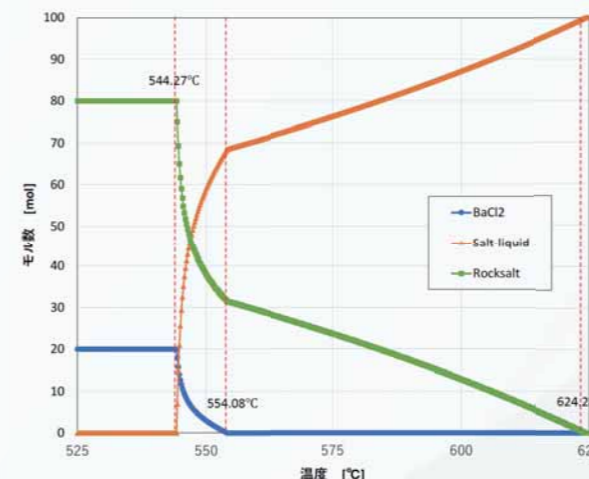


図1 熱力学的平衡組成解析結果  
Fig.1 The analysis results of thermodynamic equilibrium composition

### 【解析条件】

- 対象物質：NaCl, KCl, BaCl<sub>2</sub> (混合率任意)
- 温度：600°C
- 圧力：1atm

解析結果を図2に示す。図2の中の星印(★)は2章での解析に用いた組成割合 (NaCl : KCl : BaCl<sub>2</sub> = 50 : 30 : 20) を示している。星印が含まれる領域は600°Cでは岩塩と熔融塩からなる領域であり、2章の結果と一致する。そして図2から明らかなように600°Cでの存在形態は組成割合によって多種多様に変化している。2章の結果ではカリウムはNaClとともに岩塩で存在していたが、NaClの少ない領域ではBaCl<sub>2</sub>と反応しK<sub>2</sub>BaCl<sub>4</sub>として存在している様子が見取れる。また、図2中央付近では600°Cにおいて全ての物質が熔融塩として存在している領域も観察される。

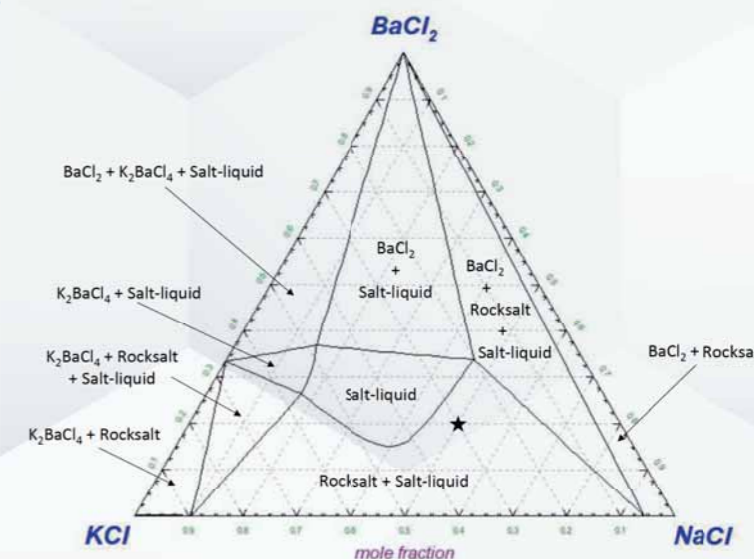


図2 三成分系状態図解析結果  
Fig.2 The analysis results of ternary phase diagram

## 4. 液相面投影図と固相面投影図

同じ温度であっても生成物や融解の度合いが組成によって異なることは前章で述べた。それでは各組成によって全ての物質が融解する温度や全ての物質が固体で存在する温度はどのようになっているのであろうか。それらを把握するためには液相面投影図や固相面投影図を用いるのが便利である。液相面投影図とは全ての物質が液体(溶融塩)として存在している状態から固体が析出し始める温度を、固相面投影図とは全ての物質が固体で存在している状態から融解が始まる温度を三成分系状態図に投影した図である。

これまで扱ってきたNaCl, KCl, BaCl<sub>2</sub>三成分の液相面投影図を図3、相面投影図を図4に示す。

図3の液相面投影図からは組成が図の中心付近に近づくにつれ

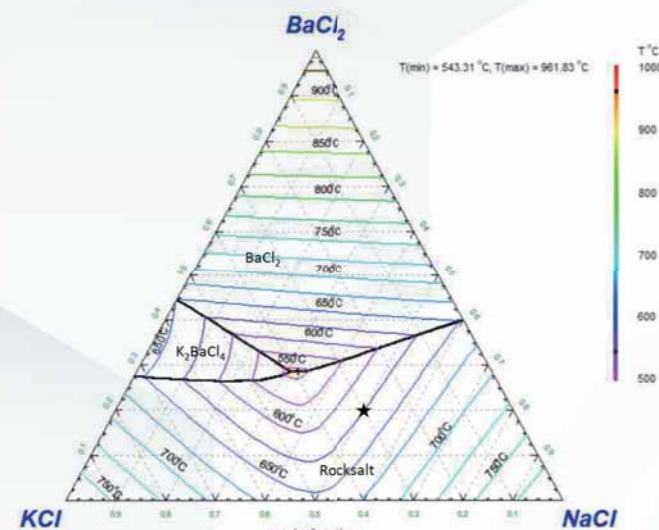


図3 液相面投影図解析結果  
Fig.3 The analysis results of liquidus projection

て固体の析出開始温度(固体が溶けきる温度)が低くなり、各頂点に近づくにつれてその温度が高くなっている様子が見て取れる。今回取上げた3つの物質に関しては純物質に近づくほど融解しにくい系であることがわかる。星印が示す組成では約625°Cで固体が溶けきることがわかり、これは2章で示した624.28°Cと良く一致する。

図4の固相面投影図からはBaCl<sub>2</sub>+岩塩の領域ではカリウムの割合が大きくなるほど融解開始温度が低下し、K<sub>2</sub>BaCl<sub>4</sub>+岩塩の領域では逆にカリウムの割合が大きくなるほど融解開始温度が上昇する傾向が見て取れる。2章で示した融解開始温度は544.27°Cであり、星印のプロットと整合がとれている。

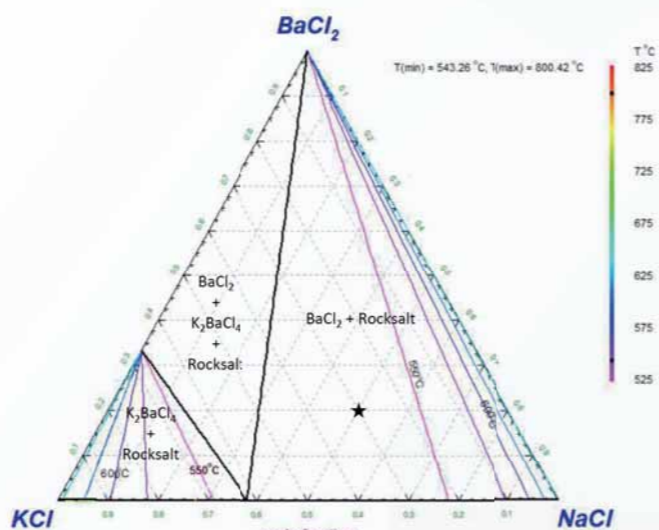


図4 固相面投影図解析結果  
Fig.4 The analysis results of solidus projection

## 5. おわりに

本稿では熱力学的平衡組成を計算する解析ソフトの機能の一部を紹介してきた。実際には解析で用いたような物質に加えて混入物質が少なからず存在し、その影響により解析結果との差異が生じることがあるのは否めない。ただし、これらのデータは実験などでは求めることができないものであり、比較参照用としてでも提供ができる

ということ自体が解析の強みであると考えられる。

今後は様々な案件で熱力学的平衡組成の解析を実施するなかで依頼内容に則した解析方法を提案・実施し、当社グループの技術サポートをしていきたい。

# 電池材料(リチウムイオン二次電池正極材)に関する分析事例

月島ホールディングス株式会社  
R&Dセンター 分析グループ  
日良 聡

## 1. はじめに

R&Dセンターでは、本誌で紹介したCRYSTALLEX<sup>®</sup> Type VF、CRYSTALLEX<sup>®</sup> Type DDの受注に向け、各顧客の要求に対するこれらの装置の適用可否の確認を目的とした試験を実施している。試験で製造された粒子サンプルが顧客の定めている基準を満たすものかどうか、分析グループでそれぞれの項目について分析・評価を

行っている。リチウムイオン二次電池(以下LIB)正極材の前駆体で用いられる材料は粉体であり、電池性能向上のためには、粒子のサイズや形状、物性の制御が求められる。そこで、本稿ではLIB正極材前駆体粒子の分析の中で、評価形状や物性評価技術について解説する。

## 2. 粒度分布測定

従来のLIB正極材前駆体粒子の粒径は10μm前後であったが、近年では特にEV向け利用における航続距離延長を目的とした電池の堆積エネルギー密度の増加が求められており、それに伴い前駆体粒子もより微粒子化(1~5μm)が求められている。また、生産時の歩留まりの改善や、後の工程における性能低下を防止するために、生産される粒子は粒度分布の狭い粒子群であることも求められている。

粒子径の測定は「レーザ回折・散乱方式」の粒度分布測定装置を用いる。図1に装置の構成例を示す。レーザ回折・散乱方式は、測定対象粒子群にレーザ光を照射した際に粒子から発生する散乱光パターンから粒子の大きさを、散乱光の強度から粒子の数を識別し、検出された散乱光強度分布から粒度分布を計算する。粒度分布の算出は、粒径ごとに理論的に計算された散乱パターンとの比較によって行う。光散乱は粒子の大きさ(x)と光の波長(λ)から図2に示すパターンに分類され、粒子径が比較的大きく、かつ散乱角度が小さい場合はフラウンホーファ回折理論が、それ以外の場合はミー散乱理論が用いられる。

ほとんどの粒子は形状が複雑であり、球や立方体のように定量的に表現することが難しい。そこで、測定粒子と同じ散乱パターンを示す球体の直径をその粒子の粒子径と定義することで、粒子径を算出している<sup>1),2)</sup>

図3にLIB正極材前駆体粒子の粒度分布測定結果を示す。グラフの横軸は粒子径(μm)、縦軸は相対粒子量(%)を示し、ヒストグラムで粒度分布を、折れ線グラフで積算分布を表している。折れ線グラフと横軸の交点の粒子径がその積算%における粒子径となり、任意%粒子径(50%粒子径など)と呼称される。なお、レーザ回折・散乱方式で算出される粒度分布結果は多くの場合、体積基準で示すこと

が多いが、体積基準の粒度分布結果から個数基準の粒度分布結果を計算することも可能である。

また、粒度分布の広がりやを評価する手段として、10%粒子径(d10%)、50%粒子径(d50%)、90%粒子径(d90%)の結果を次の式に当てはめて算出した値(スパン)が指標として用いられる。スパンが小さいほど分布が狭いと言える。<sup>5)</sup>

$$\text{スパン算出式} : \frac{(d90\% - d10\%)}{d50\%} \dots \text{式(1)}$$

図3の測定結果の例では平均粒径(d50%)は3.0μm、スパンは0.74となる。

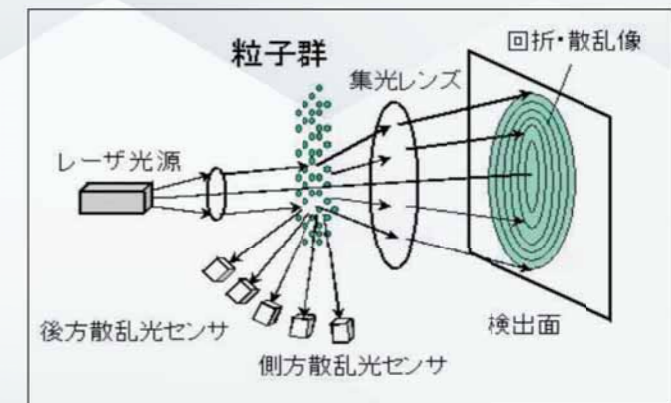


図1 レーザ装置構成図<sup>3)</sup>  
Fig.1 Laser equipment configuration diagram<sup>3)</sup>



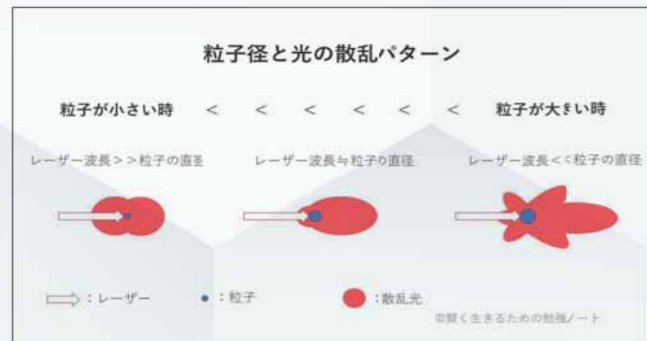


図2 光散乱パターン<sup>4)</sup>  
Fig.2 Light Scattering Patterns<sup>4)</sup>

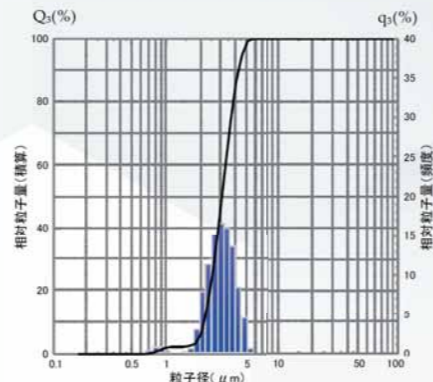


図3 LIB正極材前駆体の粒度分布測定結果の一例  
Fig.3 Example of particle size distribution measurement results of LIB cathode material precursor

### 3. 電子顕微鏡 (SEM) による表面形状観察

LIBの高性能化要素の一つに高出力化があげられる。出力を高めるためには正極材の単位重量当たりのエネルギー密度を高める、つまり高容量化が求められ、エネルギー密度を高める方法の一つに粒子の充填性向上が挙げられる。一般的に粒子を充填・圧縮する場合は、粒子が球状に近い(真球度が高い)ほど充填性が向上する。また、正極活物質粒子を電極上に充填する際に、粒子表面にひび割れがない形状であることで均一で欠損の無い電極を形成することが可能となり、このような電極は優れた充放電特性を持つ。<sup>6)</sup>

以上のことから前駆体粒子の形状や表面状態を制御することが求められ、これらの評価には電子顕微鏡 (SEM) が用いられる。SEMは試料の拡大像を得るために電子線を用いることで、光学顕微鏡

では観察できない微小な表面構造を観察する能力を有している。SEMの観察能力は、「見分けることのできる2点間の最小間隔」で定義された「分解能」という言葉で表され、一般的に人間の目の分解能は0.2~0.3mm、白色光を用いる光学顕微鏡で0.2~0.3μmであるのに対し、電子顕微鏡は電子線を発生させる際の加速電圧によって異なるものの、0.5~4nmと肉眼の10万分の1程度になる。図4に装置の構成例を示す。<sup>7)</sup> 電子銃から発生された電子線はレンズで集束され、走査コイルによって試料表面を走査する。試料表面に電子が接触することで試料からは二次電子や反射電子のほか、図5に示すような各種信号が発生し、これらの信号は検出器に集められた後に電的に変換され画像として表示される。二次電子と反射電子

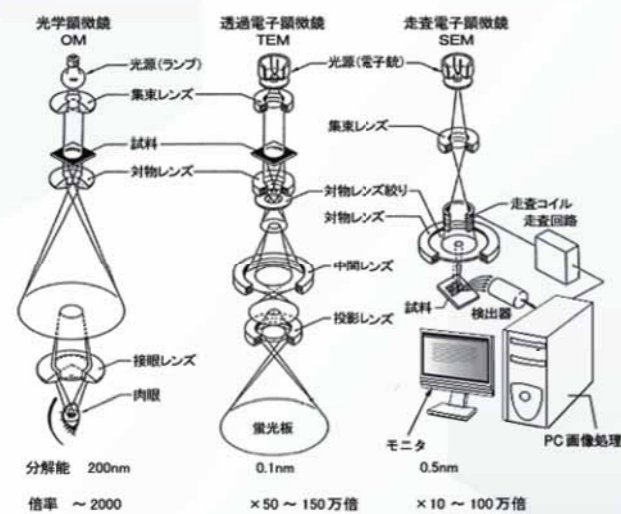


図4 SEM装置構成例<sup>7)</sup>  
Fig.4 SEM system configuration example<sup>7)</sup>

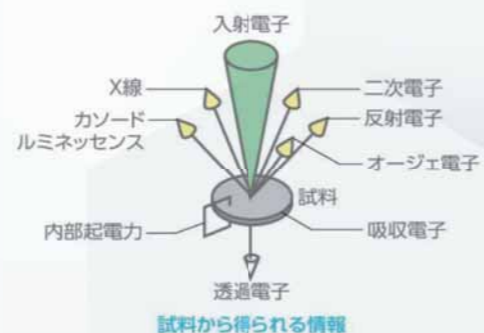


図5 電子照射により発生する信号例<sup>7)</sup>  
Fig.5 Example of signal generated by electron irradiation<sup>7)</sup>

の違いは電子の持つエネルギーにあり、エネルギーが50eV以下の電子を二次電子、それ以上の電子を反射電子と言う。一般的に観察に用いられるのは二次電子像であり、二次電子像はエネルギーが低いため、より表面近傍の微細な構造を観察できるのに対し、反射電子像では試料内部に侵入、散乱し放出された比較的高エネルギーの電子を検出するため、二次電子像に比べると試料の極表面形状を捉えることは苦手である。しかし、反射電子は入射電子の試料への入射角、つまり試料表面の凹凸によって放出される方向が異なる角度依存性を持っており、より凹凸が強調された像が得られる。また、反射電子の放出量は元素によって異なり、原子番号の大きい元素ほど発生量が大きくなることから、組成分布情報を得ることが可能である。<sup>8)</sup>

図6にLIB正極材前駆体粒子のSEM画像を示す。多くの粒子が真円に近い形状であるが、一方で一部の粒子にクラックが発生していることが確認できる。

また、最近の取組みとして、これまでSEM画像から分析者が感覚的に評価していた粒子の真球度を、粒子の外周径や面積を計測し

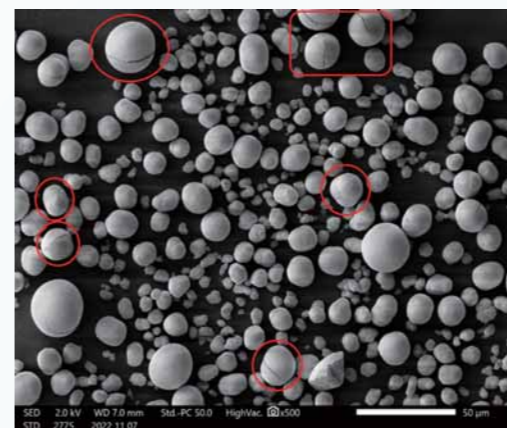


図6 LIB正極材前駆体粒子のSEM画像とクラック粒子  
Fig.6 SEM image of LIB cathode material precursor particles and cracked particles

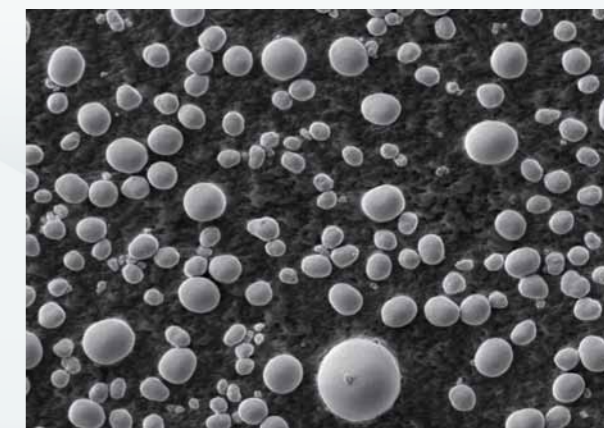


図7 円形度算出粒子群の一例  
Fig.7 Example of a group of particles for circularity calculation

表1 円形度測定結果の一例  
Table1 Example of circularity measurement results

測定対象粒子径 (μm)	円形度 (n=10測定平均)	標準偏差 (n=10測定)
3.5以上	0.83	0.005

## 4. 比表面積測定

一般的な粉末材料において、そのほとんどの場合、反応は粒子表面で進行すると考えられることから、粒子の表面積が大きくなるほど反応性が高くなると言える。同様にLIB正極材料においても、表面積が大きいくほど電解液との接触面積が大きくなり反応が進行しやすいと考えられる。一方で、比表面積がある一定の値以上の正極材料を用いた場合、充放電の繰り返しに伴う電極活物質の膨張、収縮による電極からの剥離を要因とする電気抵抗の増加が発生し、その結果、サイクル特性が低下するという報告もある。<sup>10)</sup> 以上のことから、前駆体粒子の表面積をある一定の範囲に制御する技術が求められており、表面積の評価はガス吸着法(BET法)による比表面積測定装置を用いて行っている。

BET法による比表面積測定は、固体表面への気体分子の吸着、つまり物理吸着に基づいている。物理吸着は低温下での分子間力による可逆的な吸着反応であるため、測定は液体窒素雰囲気下で行う。一般的に吸着温度が一定であれば吸着するガス分子の数は圧力に依存する。図8に固体表面への気体分子の吸着プロセス概念図を示す。気体分子はまず固体表面に吸着していき(吸着初期)、やがて表面を覆いつくす(単分子層吸着)。表面が全て覆われた後は気体分子同士が吸着し、何層もの吸着層が形成され(多分子層吸着)、やがて細孔内が気体分子で満たされると気体分子は凝縮する(毛管凝縮)。吸着した分子が離れることを脱着と言うが、ある圧力下で吸着と脱着が平衡状態となることで、見かけ上、吸着が停止し

たように見える状態のことを吸着平衡と言い、その時の圧力を吸着平衡圧と言う。一定温度における吸着平衡圧と吸着量の関係をグラフにプロットしたものを吸着等温線と言い、横軸に飽和蒸気圧(p0)に対する吸着平衡圧(p)の比である相対圧(p/p0)を、縦軸に吸着量(v)をとる。また、図8に吸着等温線と上記の吸着プロセスの関係を示す。比表面積は、粒子表面に大きさ(専有面積)が既知である気体分子(一般的には窒素を用いる)を吸着させ、吸着した分子の数を計測することで求められる。つまり、粒子表面のみに気体分子が吸着した際の吸着量である単分子層吸着量(v<sub>m</sub>)を算出する必要がある。単分子層吸着量の算出にはBET理論を適用する。BET理論の詳細は省略するが、BET理論から以下の式(BETの吸着等温式)が導かれる。

$$\frac{p}{v(p_0-p)} = \frac{1}{v_m \cdot c} + \frac{c-1}{v_m \cdot c} \times \frac{p}{p_0} \quad \dots (3)$$

ここで、  
 p : 吸着平衡圧 [Pa]  
 p0 : 飽和蒸気圧 [Pa]  
 v : ガス吸着量 [mol/g]  
 v<sub>m</sub> : 単分子層吸着量 [mol/g]  
 c : 吸着分子の凝縮係数 [-]

横軸にp/p0、縦軸にp/[v(p0-p)]をプロットすることで式(3)から直線(BETプロット)が得られ、直線の傾き及び切片からv<sub>m</sub>を求

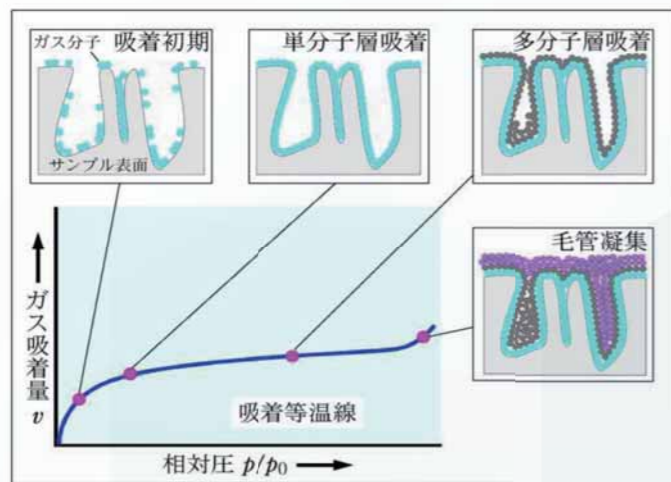


図8 気体分子の吸着プロセス概念図<sup>11)</sup>  
 Fig.8 Conceptual diagram of adsorption process of gas molecules<sup>11)</sup>

めることができる。<sup>11), 12)</sup> 図9にLIB正極材前駆体粒子の吸着等温線を、図10に図9の吸着等温線から求めたBETプロットをそれぞれ示す。BET吸着式は相対圧(p/p0)0.05から0.35の範囲で通常は成立するとされており、本サンプルでは特に直線性の高い相対圧0.102から0.297の間で一次式を作成し、単分子層吸着量(c)を算出した。表2に単分子層吸着量(v<sub>m</sub>)、及びBET比表面積計算結果の一例を示す。今後も比表面積測定データを蓄積していくことで、LIB前駆体粒子の比表面積と晶析パラメータの相関把握に貢献したいと考える。

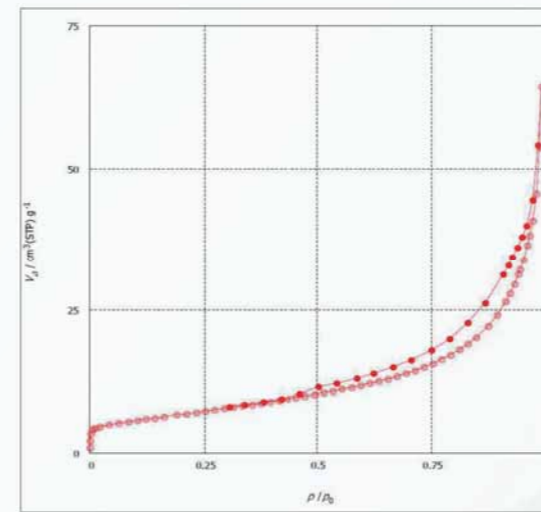


図9 LIB正極材前駆体の吸着等温線の一例  
 Fig.9 An example of adsorption isotherm of LIB cathode material precursor

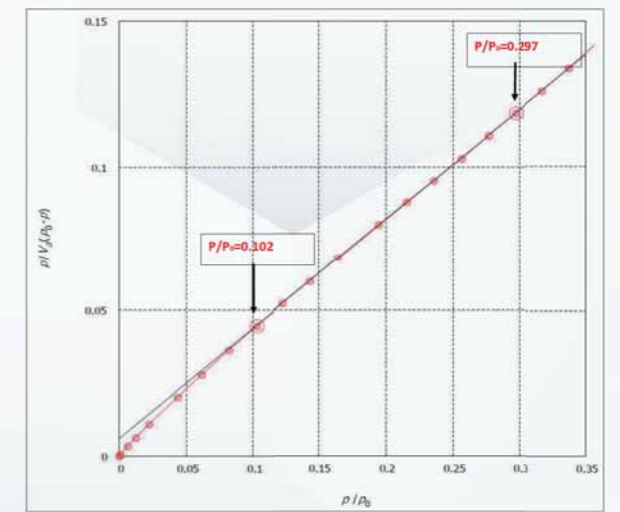


図10 BETプロットの一例  
 Fig.10 Example of a BET plot

表2 比表面積測定結果の一例  
 Table2 Example of specific surface area measurement results

単分子層吸着量 [v <sub>m</sub> ] (cm <sup>3</sup> (STP)/g)	BET比表面積 [a <sub>s,BET</sub> ] (m <sup>2</sup> /g)
2.60	1.13

## 5. 終わりに

本稿ではLIB正極材前駆体粒子の評価技術のうち、粒度分布測定、電子顕微鏡観察、比表面積測定について紹介した。今後必要

に応じて新たな分析技術、手法を検討しながら、各事業会社の研究、開発支援に努めていく所存である。

### 参考文献

- 1) 植淳一郎, 早川修 著 現場で役立つ粒子径計測技術
- 2) <https://www.an.shimadzu.co.jp/service-support/technical-support/analysis-basics/powder/lecture/middle/m01/index.html>
- 3) <https://www.an.shimadzu.co.jp/service-support/technical-support/analysis-basics/powder/lecture/practice/p01/lesson22/index.html>
- 4) [https://kashikoku-ikiru-benkyo.blog.jp/archives/work-laser-diffraction.html#google\\_vignette](https://kashikoku-ikiru-benkyo.blog.jp/archives/work-laser-diffraction.html#google_vignette)
- 5) 吉岡泰嗣, 清水直人: モチ米澱粉の熱水ナノスケール微細化, 日本食品工学会誌 Vol.15, No.2, pp.95-100 (2014)
- 6) 特許第7134590号
- 7) <https://www.jeol.co.jp/products/science/sem.html>
- 8) 乙部博英: 入門講座 分析機器の正しい使い方 走査電子顕微鏡, ぶんせき, No.11, pp.520-526 (2017)
- 9) 特許第7220849号
- 10) 特許第5826653号
- 11) 野呂純二, 加藤 淳: 比表面積, 細孔分布, 粒度分布測定, ぶんせき, No.7, pp.349-355 (2009)
- 12) <https://www.an.shimadzu.co.jp/service-support/technical-support/analysis-basics/powder/lecture/middle/m02/index.html>

※ ウェブサイトは全て2024年11月現在

# デジタルツインの時代

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  
今井 淳一



## 1. はじめに

昨今のAI技術に代表されるデジタルテクノロジーの発展とともに、「デジタルツイン」という言葉を見聞きする機会が増えてきました。これは、技術の進展による実用性の向上や、適用分野の拡大が関係していると考えられます。ここでは、デジタルツインの概要や適用事例を紹介します。

## 2. デジタルツイン(Digital Twin)とは

総務省の令和6年版の情報通信白書では「デジタルツイン(Digital Twin)とは、現実世界から集めたデータを基にデジタルな仮想空間上に双子(ツイン)を構築し、さまざまなシミュレーションを行う技術である。街や自動車、人、製品・機器などをデジタルツインで再現することによって、渋滞予測や人々の行動シミュレーション、製造現場の監視、耐用テストなど現実空間では繰り返し実施しづらいテストを仮想空間上で何度もシミュレーションすることがで

きるようになる。」<sup>1)</sup>と説明されています。図1にデジタルツインのイメージ、図2に活用例を示します。

### 2.1 デジタルツインの活用による主な効果

主な効果として以下の4つが挙げられます。

- (1) 最適化**  
仮想空間上で各種の検証について、条件を変えて繰り返し行うことができ、対象の最適化が容易。
- (2) リードタイム短縮**  
現実世界のデータに基づく高精度シミュレーションにより、現実世界の検証の手間や手戻りを削減。
- (3) リスク低減**  
仮想空間上で現実世界のデータに基づくリスクの予測や改善検討が可能。
- (4) コスト削減**  
仮想空間上で検証を繰り返すことで、現実世界での物理的検証のコストを削減。

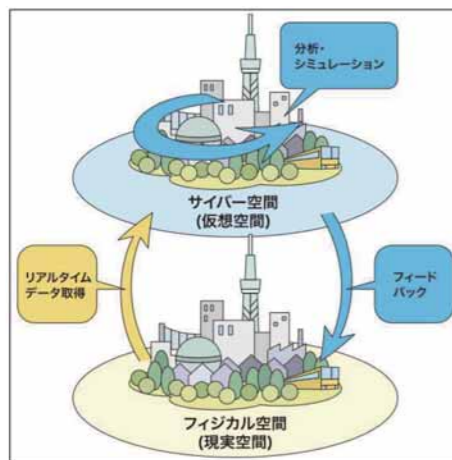


図1 デジタルツインのイメージ<sup>2)</sup>  
Fig.1 Image of the digital twin<sup>2)</sup>

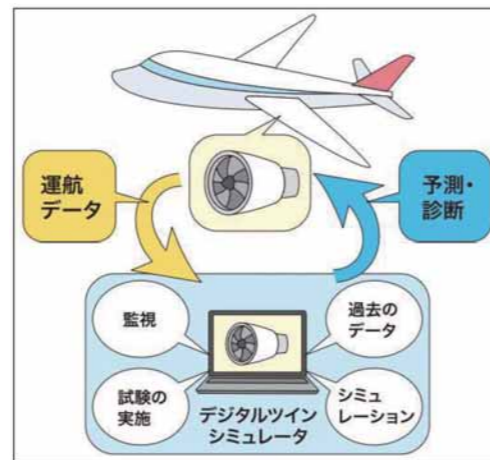


図2 デジタルツインの活用例<sup>2)</sup>  
Fig.2 Example of using the digital twin<sup>2)</sup>

### 2.2 主な適用分野

主な適用分野を以下にピックアップします。

- (1) 製造業**  
製品、生産ラインなどをデジタルツインで再現。開発・設計段階での仮想試作で手戻りを削減、実機・実設備のリアルタイム情報を反映することで、故障予測やメンテナンスの最適化などに活用。
- (2) 都市開発計画、交通**  
地形情報、建物、交通機関、気象情報などさまざまな情報を統合してデジタルツイン化。都市計画、公共機関の安全性・効率性改善、災害対策の検討、日照条件の確認、各種最適化など。
- (3) 建設**  
建設の企画、設計、施工、維持管理、運営などさまざまなフェーズでデジタルデータを活用。現場の安全性、生産性、環境性の向上など。
- (4) 医療、ヘルスケア**  
患者の体のデジタルツインを作成し、病気の進行予測や、手術など治療法のシミュレーションなどで活用。

## 3. 適用事例

### 3.1 国土交通省/ PLATEAU(プラトー)

2020年から国土交通省が主導して進めている「日本全国の3D都市モデルの整備・活用・オープンデータ化のプロジェクト」<sup>3)</sup>です。3D都市モデルとは、建物、道路、地形などの物理的な実体があるものだけでなく、人口情報、避難場所、土地利用などの情報も重ねた3Dのデジタル地図です。PLATEAUには表1に示すような都市に関するデータが格納されており、「こうしたデータをコンピュータ上で処理することで都市のデジタルツインを実現し、さまざまな分野で活用」<sup>3)</sup>できるとされています。

活用方法の例としては、洪水・津波などのシミュレーション、避難経路の可視化、防犯、まちづくりのための分析、日照条件の確認などがあげられています。

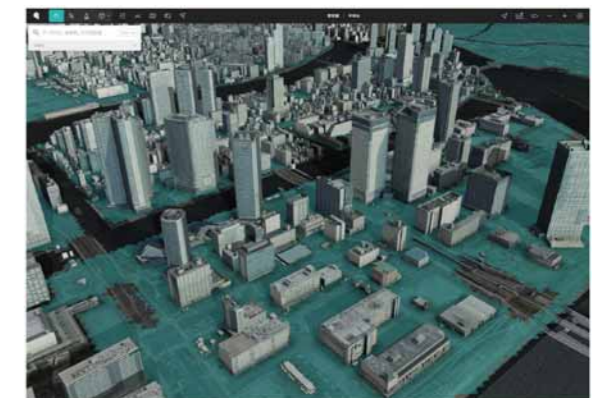
3D都市モデルデータは手続きが不要で、誰でも商用利用も含めて無料で自由に利用できます。図3はブラウザで表示した東京都中央区晴海付近の高潮浸水想定です(水色が浸水想定域)。

研究フィールドで自律型自動運転車の実証実験が行われ、フィールド全体の広域デジタルツインが経路上の停車車両と多数の歩行者を検知し、より安全で効率的な周辺道路への経路変更を遠隔で指令できたというものです。

自律型自動運転車の視界(車載センサ)は車両周辺に限られ、また、周囲の障害物によって死角が生じるケースも考えられるため、俯瞰的視点でリアルタイムに状況把握が可能なデジタルツインは、自動運転の分野でも活用場面が増えていくと考えられます。

表1 PLATEAUが3D都市モデルとして提供しているデータ<sup>3)</sup>を元に作成  
Table.1 Based on data provided by PLATEAU as a 3D city model<sup>3)</sup>

項目	解説
建築物	ビルや家屋などの情報
道路	車道や歩道などの情報
都市計画決定情報	「都市計画区域」「市街化区域」「用途地域(例:風致地区)」などの都市計画に関する情報
土地利用	「住宅用地」「商業用地」「工業用地」「田」「畑」などの土地利用に関する情報
災害リスク	「洪水浸水想定区域」や「土砂災害警戒区域」などの災害リスクに関する情報
都市設備	街路灯や道路標識、信号機、ベンチ、バス停など、移動しない小規模な設備に関する情報
植生	樹木や生け垣に関する情報
地形	地形の起伏に関する情報



東京都中央区晴海付近の高潮浸水想定  
図3 PLATEAU VIEWの画面例  
Fig.3 Example of PLATEAU VIEW screen

## 4. おわりに

デジタルツインは今回紹介したもの以外にもさまざまな分野で幅広く展開されてきており、今後も注目すべき技術と考えられます。弊社グループでもプラントなどへの適用を視野に検討を進めており、改めて紹介できれば幸いです。

### 参考文献

- 1) 総務省ホームページ, 令和6年版情報通信白書(<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r06/html/nd217530.html>) (2024年11月現在)
- 2) 総務省ホームページ, デジタルツインって何? ([https://www.soumu.go.jp/hakusho-kids/use/economy/economy\\_11.html](https://www.soumu.go.jp/hakusho-kids/use/economy/economy_11.html)) (2024年11月現在)

- 3) 国土交通省, PLATEAUホームページ, TOPIC 1:3D都市モデルでできること(<https://www.mlit.go.jp/plateau/learning/tpc01-1/>) (2024年11月現在)
- 4) 東京科学大学(旧・東京工業大学)ホームページ, 東工大ニュース(<https://www.titech.ac.jp/news/2024/069619>) (2024年11月現在)

# 下水汚泥の炭化

月島 JFE アクアソリューション株式会社  
技術本部技術企画センター  
上田 厚志

## 1. はじめに

今回のテーマは「下水汚泥の炭化」です。下水汚泥の炭化は、開発に着手したのが2004年、初の商用機が稼働したのが2012年なので、まだまだその歴史は浅いと言えます。短い歴史なりに大きな変化を遂げてきた炭化の技術。本稿ではその経緯と、今後、炭化はどこに向かうのか、ということについて触れてみたいと思います。

## 2. なぜ下水汚泥を炭化?

遡ること2004年、当時は下水処理場で発生する汚泥の7割以上は、セメントをはじめとした建設資材や農緑地向けのコンポスト(堆肥)などとして有効利用が図られていました。しかし、これらの用途は需給の変動が大きい上、市場としても大幅な成長が期待されるものではありませんでした。そうしたなか、当社が目指したのは、下水汚泥から燃料化物を製造し、それを石炭火力発電所などで利用する「汚泥燃料化」でした。現在、石炭火力発電所は、世界的な潮流として廃止の方向へ向かっていますが、2004年当時は、石炭の安定供給性や経済性などの観点

から、石炭火力はベースロード電源の一つとして位置づけられ、全電力に対して一定の比率を維持するものと考えられていました。そのため、下水汚泥から製造した燃料化物を石炭火力発電所で利用する取組みは、汚泥の安定的な有効利用先の確保と温室効果ガスの削減を同時に達成できる画期的なものだったのです。

一見、接点のない電力業界と下水業界、そこには運命的な出会いがありました。当時、RPS法\*により、電気事業者に対して再生可能エネルギーの利用が義務づけられ、バイオマスの利用拡大を目指す機運が高まっていました。電気事業者による様々な取組みがなされるなか、その先駆的な存在だったのが電源開発株式会社(以下 J-POWER)でした。J-POWERは長崎県松浦火力発電所において、日本初となる下水汚泥燃料化物の混焼試験を2003年より進めていました。一本のか細い人脈をきっかけとして出会った J-POWER と当社は、バイオマス燃料の利用促進というベクトルで一致を見出し、汚泥燃料化技術に関わる共同研究をスタートするに至りました。そこで生まれたのが「低温炭化」でした。

※RPS法：2002年6月に公布された「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法」のこと。電気事業者に対して一定量以上の新エネルギーなどを利用して得られる電気の利用を義務づけ、その利用を推進することを目的に制定された。2012年7月から「再生可能エネルギー特別措置法」が施行されたのに伴い廃止され、法的に引き継がれた。

## 3. 炭化技術の夜明け

J-POWER との共同研究では、燃料ユーザーの視点を重視し、①高発熱量、②低臭気、③低自己発熱性の3点を燃料化物の必須要件とし、開発のコンセプトに据えました。

汚泥燃料化の方法は、「乾燥」と「炭化」に大別されます。乾燥は、発熱量は高い一方で臭気が残ります。炭化の場合、高温(600~800℃)で処理するとほぼ無臭となりますが、揮発分の減少により発熱量が低下します。乾燥と高温炭化の中間領域で、最適な温度とは——両社が選択したのは、250~350℃の低温領域でした。100~250℃では不快臭の残留がどうしても避けられず、400~500℃程度



図1 実証プラント



図2 広島市の燃料化施設

では自己発熱性が高くなる特性があったのです。こうして、「低温炭化」の実用化に向けた開発がスタートしました。

2006年には実証プラント(図1)を建設し、様々な試験を行いました。乾燥機、炭化炉、排ガス処理設備などのハード面から、燃料化物の性状、さらにプラントの維持管理に至るまで、想定外の課題が次々と顕在化しました。課題の解決に向けては、当時の月島テクノメンテサービス(以下 TTMS)も含め、当社グループの総力をあげて取り組みました。

炭化特有の臭気(タール臭)が残留するという課題については、炭化炉内に汚泥と向流するガス流れをつくり、臭気成分が炭化物に再吸着するのを防ぐことで解決しました。さらに、炭化炉の前段に、約5mmφ程度のペレット状に成型する造粒プロセスを設けました。造粒プロセスの導入により、炭化物のハンドリング性が向上したばかりでなく、加熱が均一となることで炭化物性状が安定し、さらには、自己発熱性の抑制にも寄与しました。自己発熱性の抑制は、開発時に一番と言ってもよいくらい注力した項目で、自己発熱性の評価手法やその対応策の立案では、J-POWERの知見が大きな力となりました。

開発を進める一方で、J-POWERが保有する全国7ヵ所の石炭火力発電所周辺の自治体を中心に、営業活動も展開しました。この頃、当社の開発スケジュールに合致するタイミングで下水汚泥焼却炉の更新を検討していたのが、後に初号機の発注者となる広島市でした。広島市は、管轄する5つの水資源再生センターで発生する下水汚泥の100%の資源化を目指し、2008年6月に「汚泥燃料化事業」導入の方針を決定しました。入札は総合評価一般競争入札方式によるもので、価格はもとより、技術力や事業運営のノウハウまでが総合的に評価の

対象となりました。このとき提出した技術提案書は、実証試験で得た各種知見を反映させながら、低温炭化がもつ優位性を随所に盛り込みました。また、TTMSが下水の乾燥・焼却設備の維持管理で培った知見を反映するとともに、2006年4月に20年間の事業運営を開始した寒川浄水場排水処理 PFI 事業で構築した長期事業運営のノウハウも投入しました。こうして、2009年3月、多くの関係者の尽力と熱意により、広島市から初号機の受注獲得に至ったのです。

2010年10月、広島市の汚泥燃料化施設の建設工事に着工し、翌2011年9月、従事者延べ3万2,000名という大規模な工事を無事故・無災害で完遂、そこから約半年間の試運転を経て、2012年4月に営業運転を開始しました(図2)。開発初号機でありながら、稼働初年度から計画処理量を上回る実績を残しています。しかし、汚泥処理を着実にこなしたその裏側で、大きな課題に直面していました。炭化物の自己発熱性が想定以上に高かったのです。自己発熱性については、前述のとおり、開発段階で多大なパワーを割いて検討したという思いがあったので、関係者にとっては大きな衝撃でした。その後の調査で、自己発熱性を押し上げていた要因が、脱水工程で添加される薬剤由来であることがわかりました。運用上、その薬剤の使用を停止できなかったことと、他の下水処理場においても広く使用されている薬剤であったため、燃料化施設側で対応することを決定します。これは大幅な設備改造を意味し、大きな痛みを伴うものでした。大きな痛みと引き替えに、燃料化施設では、炭化物の自己発熱性を抑制する「安定化プロセス」を手に入れました。

#### 4. 炭化技術の進化

広島市以降、2011年に熊本市と大阪市から相次いで受注、さらに2012年には、横浜市（南部）の事業も獲得しました。順調に受注実績を積み上げつつあった汚泥燃料化事業でしたが、横浜市案件の受注後は、他社が採用している「乾燥」や「中温炭化」が価格競争力を増し始めます。そこで、当社では大幅なプロセス変更し、乾燥方式を直接熱風乾燥から間接加熱乾燥へ変更し、あわせて、排ガスからの廃熱回収も熱交換器から廃熱ボイラに方式を変更しました。また、多くの搬送機器が必要であった造粒プロセスも思い切って省略

しました（図3、図4）。造粒プロセスの省略により、ハンドリング性の向上や自己発熱性抑制の効果が得られなくなりますが、前述の「安定化プロセス」がこれらをカバーしました。そして、この大幅なプロセス変更によるプラントの簡素化が功を奏し、京都府案件の受注へとつながっていったのです。

京都府以降も受注を重ね、低温炭化による燃料化施設は、現在建設中の千葉市向けを含め9件に上ります。現在稼働中の施設の中では、京都市向けが最新となっています（図5）。

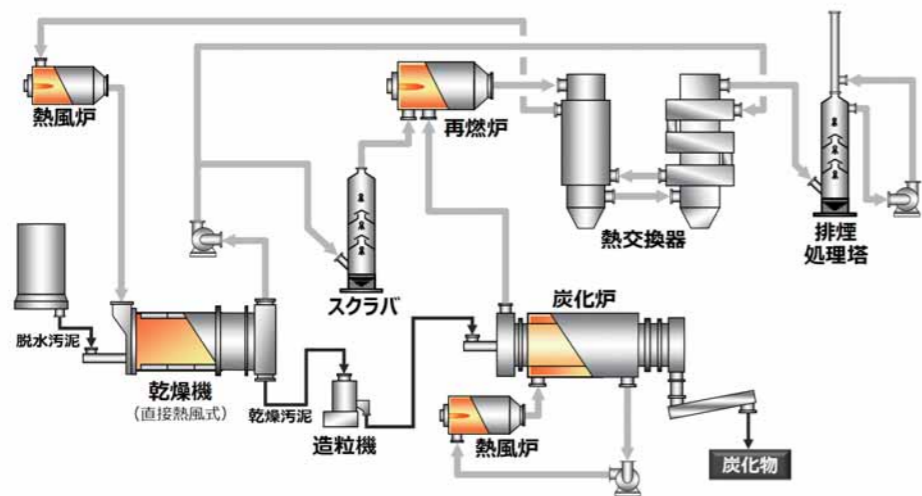


図3 従来のプロセス

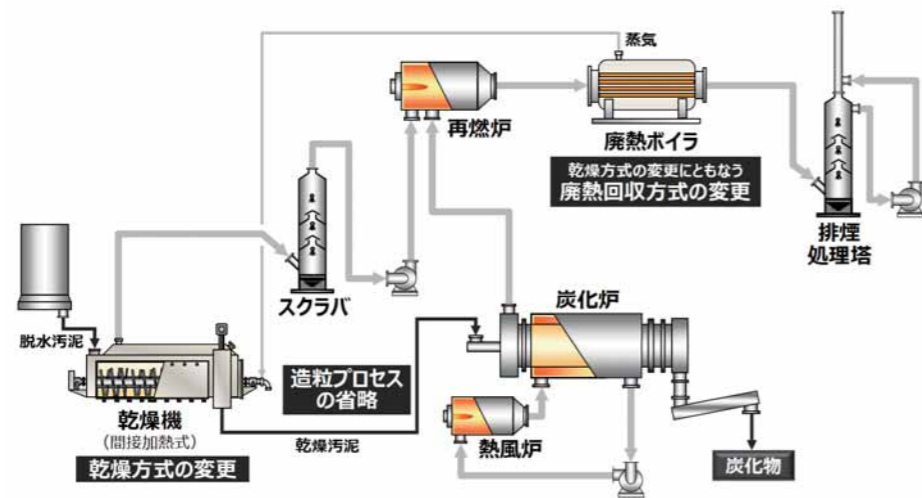


図4 変更後（現状）のプロセス



図5 京都市の燃料化施設

#### 5. 炭化の今後

下水汚泥燃料化は、温室効果ガス削減に貢献できる技術として、今後も普及拡大が望まれるところですが、燃料化物の利用先を取り巻く事情がここ数年で大きく変化してきています。2024年4月に開催された主要7カ国(G7)気候・エネルギー・環境相会合では、石炭火力は「30年代前半まで」か「1.5℃目標と整合する時間軸」での段階的廃止に合意がなされました。現段階で、G7の中で日本だけが石炭火力の廃止年限を実質的に設けていませんが、石炭火力廃止に向けた潮流は覆ることはないでしょう。石炭火力がなくなると、燃料化物の最も有望な利用先の一つを失うことになるため、石炭火力に替わる利用先の確保が求められます。

下水汚泥燃料化は、下水汚泥から製造した炭化物を燃料として利用する取組みですが、最近、その他の利用方法として、バイオ炭が注目されつつあります。バイオ炭とは「燃焼しない水準に管理された酸素濃度の下、350℃超の温度でバイオマスを加熱して作られる固形物」と定義された炭のことで、土壌への炭素貯留効果が認められ、J-クレジットの対象にもなっています。土壌への炭素貯留効果とは、炭化物中の炭素が長期間にわたり土壌中に留まることであり、その炭素がバイオマス由来であれば、大気中のCO<sub>2</sub>を土壌中に固定化したことになります。バイオマスが頑張ってくれたCO<sub>2</sub>を炭素とい

う形で土壌に固定化するので、大気中のCO<sub>2</sub>を除去したことになるわけですね。大気中のCO<sub>2</sub>を除去する技術は「ネガティブエミッション技術」と呼ばれ、バイオ炭のほか、わかりやすいところでは植林があります。DACCS(Direct Air Carbon Dioxide Capture and Storage)もその一つで、これは、機械的に大気中のCO<sub>2</sub>を集めて地中に貯留する技術で、非常に濃度の薄いCO<sub>2</sub>を分離・回収しなければならないため、大がかりな設備と多くのエネルギーを要します。その点、バイオ炭は植物の力を借りてCO<sub>2</sub>を集めるので、合理的と言えます。バイオ炭をはじめとしたネガティブエミッション技術は、カーボンニュートラル(ネットゼロ)を目指すには不可欠な技術です。人為的な温室効果ガスの削減には限界があり、どうしても化石燃料を使わざるを得ない分野が残ると言われており、その排出分をキャンセルするにはネガティブエミッション技術が必要なのです。

下水汚泥から製造した炭化物は、これまで燃料利用が主体でしたが、ここに来てバイオ炭という選択肢も出てきました。この先、さらなる新しい選択肢が出てくるかもしれません。当社としては、月島ホールディングスのパーパスである「環境技術で世界に貢献し未来を創る」理念のもと、時代から要求されるニーズに柔軟に対応していきたいと考えています。

## 会社概要

名称	月島ホールディングス株式会社 TSUKISHIMA HOLDINGS CO.,LTD.	従業員数	3,546名(連結) 107名(単体)(2024年9月30日現在)
代表取締役社長	川崎 淳	本社	〒104-0053 東京都中央区晴海3-5-1 TEL.03-5560-6511 FAX.03-5560-6591
創業	明治38年(1905年)8月	八千代事業所	〒276-0022 千葉県八千代市上高野1807番3 R&Dセンター TEL.047-494-4300 FAX.047-494-4321
資本金	6,646百万円		

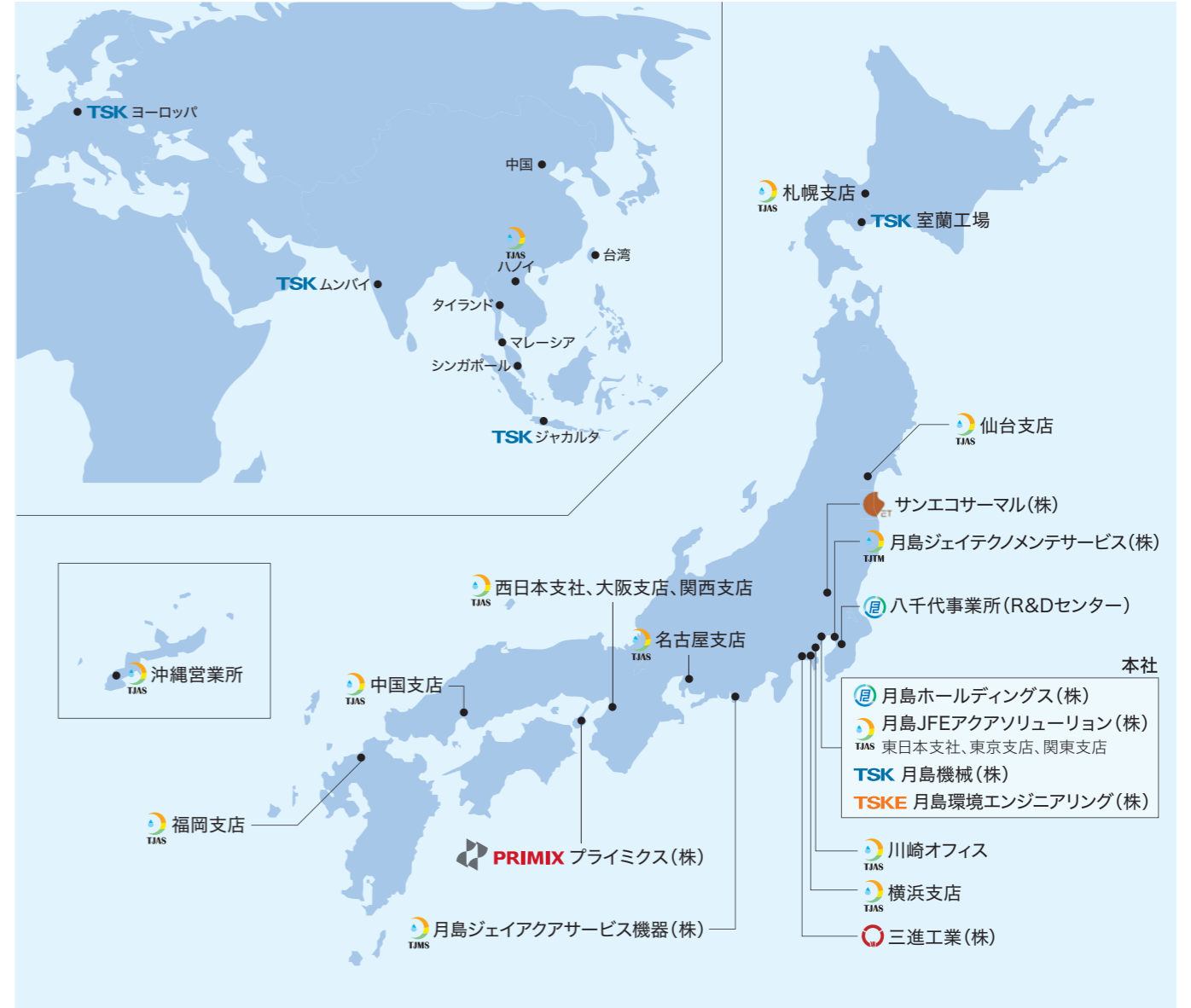
## 関連会社・事業所・事務所

月島JFEアクアソリューション(株)	月島機械(株)
〒104-0053 東京都中央区晴海3-5-1 TEL.03-5560-6031 FAX.03-3533-4103	〒104-0053 東京都中央区晴海3-5-1 TEL.03-5560-6427 FAX.03-3536-0575
東日本支社・東京支店	室蘭工場
〒104-0053 東京都中央区晴海3-5-1 TEL.03-5560-6541 FAX.03-5560-6593	〒051-0006 北海道室蘭市茶津町35-2 TEL.0143-57-1100/1101 FAX.0143-57-1102/1103
関東支店	〈海外〉
〒104-0053 東京都中央区晴海3-5-1 TEL.03-5560-6542 FAX.03-5560-6593	ジャカルタ駐在員事務所
西日本支社・大阪支店・関西支店	Jakarta Representative Office Setiabudi Atrium 2nd Floor, Unit 207 Jl. HR. Rasuna Said Kav. 62, Kuningan, Jakarta 12920, Indonesia TEL. +62-21-521-0491/0492 FAX. +62-21-521-0490
〒541-0048 大阪市中央区瓦町3-6-5(銀泉備後町ビル) TEL.06-6229-1331 FAX.06-6229-1415	ヨーロッパ駐在員事務所
札幌支店	Europe Representative Office Tullastraße 64 76131, Karlsruhe, Germany TEL. +49-721-9-64-56-785 FAX. +49-721-9-64-56-10
〒060-0807 札幌市北区北七条西4-1-2(KDX札幌ビル) TEL.011-726-0510 FAX.011-726-0520	ムンバイ駐在員事務所
仙台支店	Mumbai Liaison Office 903A, Raj Horizon, Ramdev Park Road, Mira Road East, Thane 401107, Maharashtra, India TEL. +91-9967645572
〒980-0014 仙台市青葉区本町1-11-2(SK仙台ビル) TEL.022-227-9267 FAX.022-223-0316	月島環境エンジニアリング(株)
横浜支店	〒104-0053 東京都中央区晴海3-5-1 TEL.03-6758-2310 FAX.03-6758-2324
〒231-0012 横浜市中区相生町3-56-1 (KDX 横浜関内ビル 12 階) TEL.045-651-7331 FAX.045-664-5086	月島ビジネスサポート(株)
名古屋支店	〒104-0053 東京都中央区晴海3-5-1 TEL.03-3533-4824 FAX.03-3536-0968
〒450-0003 名古屋市中村区名駅南1-17-29(広小路ESビル) TEL.052-581-2378 FAX.052-581-1624	サンエコサーマル(株)
中国支店	〒322-0017 栃木県鹿沼市下石川737-55 TEL.0289-72-0371 FAX.0289-72-0381
〒730-0015 広島市中区橋本町10-10(広島インテス) TEL.082-227-3093 FAX.082-223-8771	三進工業(株)
福岡支店	〒210-0861 神奈川県川崎市川崎区小島町4-4 TEL.044-266-0272 FAX.044-266-0271
〒810-0062 福岡市中央区荒戸2-1-5(大濠公園ビル) TEL.092-741-5736 FAX.092-761-4806	プライミクス(株)
沖縄営業所	〒656-2306 兵庫県淡路市夢舞台1-38 TEL.0799-72-0080 FAX.0799-72-0040
〒901-2131 沖縄県浦添市牧港2-54-2(沖縄土木設計ビル) TEL.098-874-5793 FAX.098-874-6262	
技術拠点/川崎オフィス	
〒212-0013川崎市幸区堀川町580番地ソリッドスクエア西館	
〈海外〉	
ハノイ駐在員事務所	Hanoi Representative Office Unit 13-03A, Prime Centre, 53 Quang Trung Street, Hai Ba Trung District, Hanoi, Viet Nam TEL. +84-(0)24-3766-9965/9967/9968 FAX. +84-(0)24-3766-9969

月島JFEアクアソリューション(株) グループ会社
月島ジェイテクノメンテサービス(株)
〒135-0031 東京都江東区佐賀1-3-7(月島ホールディングス永代ビル) TEL.03- 5245-7150 FAX.03- 5245-7155
月島ジェイアクアサービス機器(株)
〒436-0038 静岡県掛川市領家1450番地 TEL.0537-24-5531 FAX.0537-24-5518

## 関連会社(海外)

TSKエンジニアリング タイランド(株)	月島エンジニアリング マレーシア(株)
TSK ENGINEERING THAILAND Co.,Ltd. «TET» 14th Floor, Room No.1404, United Center Building, 323 Silom Road, Bangrak, Bangkok 10500, Thailand TEL. +66-2-231-1726 FAX. +66-2-231-1731	TSUKISHIMA ENGINEERING MALAYSIA Sdn. Bhd. «TEM» 月島エンジニアリング シンガポール(株)
月島機械(北京)有限公司TSK ENGINEERING CHINA CO., LTD. A1207, Vantone New World Plaza, No.2, Fu Cheng Men Wai St., Beijing, China TEL. +86-10-8590-6595 FAX. +86-10-8590-6593	TSUKISHIMA ENGINEERING SINGAPORE Pte. Ltd. «TES» Suite 16.04-05, 16th Floor, Wisma MCA, 163 Jalan Ampang, 50450 Kuala Lumpur, Malaysia TEL. +60-3-2162-8679 FAX. +60-3-2162-8377
BOKELA GmbH Tullastraße 64 76131, Karlsruhe, Germany TEL. +49-721-9-64-56-0 FAX. +49-721-9-64-56-10	TSKエンジニアリング 台湾(株) TSK ENGINEERING TAIWAN Co.,Ltd. «TETA» 6th Floor, No. 24, Minsheng West Road, Zhongshan District, Taipei City, Taiwan R.O.C TEL. +886-2-2523-6975 FAX. +886-2-2521-1429



### 月島ホールディングス株式会社ホームページへの掲載のお知らせ

月島技報は、ホームページからも閲覧できます。過去に発行しましたTSK技報もご覧いただけます。これにより、バックナンバーの技術情報が検索確認できるほか、いままで冊子版をお届けできていなかったお客様にも広くご覧いただけます。環境技術で世界に貢献し未来を創る、月島ホールディングスグループの技術情報をぜひご利用ください。

▶ <https://www.tsk-g.co.jp/tech/research/technoreview>

## 編集後記

生成AIがビジネスで活用されるようになり効率化が進んでいます。研究論文においては、AI生成コンテンツに対して、執筆者自身が十分に確認をし、責任を持つ必要があると言われていいます。一方、アウトラインの作成や要約、洗練された言葉選びには有効であるとも聞きます。今後、AIツールは論文執筆の便利なアシスタントとなっていくのではないかと思います。

さて、今号はグループ5社からの最新技術を紹介させていただきました。更なる飛躍を続ける月島ホールディングスグループの技術情報を、多くの方々にお届けできるよう努めて参ります。

山本 真一

## 月島技報 NO.27 2024

発行日:2024年12月16日 問い合わせ先:giho@tsk-g.co.jp

発行:月島ホールディングス株式会社 技報編集委員会

総責任者:山田 彰彦			
編集委員長:山本 真一			
副編集委員長:本間 友基	小林 俊樹	越智 崇	
編集委員:上田 厚志	河野 正泰	山根 陽一	倭 常郎
	馬場 圭	柴川 満	石井 究
	津崎 裕一	新田 博文	菊池 尚仁
	久保田 昌宏	新川 正人	長谷川 雄一
	近藤 尚子	鈴木 健治	橋本 桂子
	坂田 英子		加藤奈緒美