

## 〈研究発表〉

# 創エネルギー型脱水焼却システムの AI による 30 日連続無操作運転達成報告

矢澤 伸 弘<sup>1)</sup>, 山本 稔<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>月島 JFE アクアソリューション(株) 技術企画センター DX 推進室 室長  
(〒 212-0013 神奈川県川崎市幸区堀川町 580 ソリッドスクエア西館 E-mail:n\_yazawa@tjas.co.jp)

<sup>2)</sup>月島 JFE アクアソリューション(株) 技術企画センター DX 推進室 DX 技術推進グループリーダー  
(〒 212-0013 神奈川県川崎市幸区堀川町 580 ソリッドスクエア西館 E-mail:minoru\_yamamoto@tjas.co.jp)

### 概要

少子高齢化による人口減少社会において、インフラ維持のための人材確保が喫緊の課題となっている。また、COP21 の「パリ協定」や政府の「2050 年カーボンニュートラル」宣言により、脱炭素社会の実現に向けた取り組みが本格化しており、下水道施設においても新技術の創出が求められている。このような背景の中、当社は AI 技術を活用した自律制御システムを活用し、創エネルギー型脱水焼却システムを 30 日間、人の操作なしで安定運転を達成した。今回開発したシステムの概要、監視体制、得られた知見、導入効果について報告する。

キーワード：人工知能、創エネルギー、自律制御、無操作、集中監視センター

原稿受付 2024.7.1

EICA: 29(2・3) 88-92

## 1. はじめに

近年、日本は少子高齢化による人口減少社会となっており、インフラを維持していくための人材確保についても今後、非常に厳しい状態となることが顕在化しつつある。また、COP21 の「パリ協定」<sup>1)</sup> や政府から温室効果ガスの排出を全体としてゼロを目指す「2050 年カーボンニュートラル」が宣言<sup>2)</sup>されたことなどにより、脱炭素社会の実現に向けた取り組みが本格化している。当社グループの主な事業分野の一つである下水処理においても、これらの課題を解決するための新技術の創出が求められている。

このような背景から、AI 技術を活用した自律型制御システムを活用することにより、当社がすでに開発していた創エネルギー型脱水焼却システムを 30 日間、オペレータの操作なしで実証設備を安定運転する検証を行った。ここでは、今回検証に適用した自律型制御システムと監視体制および得られた知見、導入効果について報告する。

## 2. 無操作運転のための技術

今回、AI 技術を含む「自律型制御システムによる無操作 30 日間連続自動運転」を目指し検証を行った。また、自律型制御システムによる安全で確実な操業を行うため、当社グループが保有する集中監視センターを活用した「設備と人の見守り機能」についても検証を行った。

一般的に汚泥焼却炉は炉内温度を高温にキープす

ることにより CO<sub>2</sub> の約 300 倍の温室効果ガスである N<sub>2</sub>O の排出量を低減できることが知られているが、温度を上げ過ぎると耐火材の劣化などが懸念されるため、許容範囲に限りなく近い高温で安定した温度制御が必要である。しかしながら、従来の PID 制御や人による調整では、今回のような大きな時間遅れをもつ脱水機と焼却炉を組み合わせたプロセス全体の安定制御は困難であった。

本システムは、焼却炉の未来の温度を予測し、その予測結果から脱水機の含水率を制御することにより、従来成し得なかった「補助燃料が不要」かつ「変動の少ない安定した炉内温度」を、オペレータの操作無しで自動運転できることを目標としている。

### 2.1 自律型制御システムの概要<sup>3)</sup>

創エネルギー型脱水焼却システムは、「加温脱水工程（加温濃縮部と加温脱水部により構成される）」および「創エネルギー型焼却工程（過給式流動炉と高効率発電システム）」で構成され、補助燃料が不要で脱水・焼却設備に消費する電力以上の電力を発電可能な技術である。

また、それぞれの工程において、従来の制御技術では自動運転が困難なプロセスがあるため、AI 技術により自動化し、オペレータの操作が不要な自律型制御システムの構築を目指した。Fig. 1 は、創エネルギー型焼却脱水システムの簡易フローであり、AI 技術の適用箇所を枠で囲んでいる。

#### 2.1.1 薬注率最適化 AI

今回のシステムにおいて、加温脱水工程の性能は、

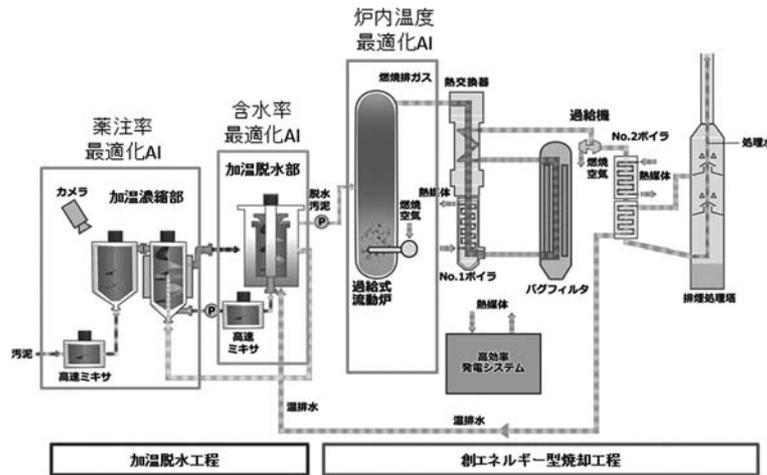


Fig. 1 Simplified flow of energy-creating dewatering incineration system and AI application points

高分子凝集剤の添加により得られる凝集フロックの形成状態に大きな影響を受ける。凝集フロックを最適な状態にするには、薬注率の調整を適切に行う必要があるが、凝集フロック形状の判別は、人の目視および場合によっては触覚などを駆使した熟練者の知見・技術に依存しているため、高分子凝集剤の添加量（薬注率）の調整は安定自動化が困難なプロセスの一つであった。

Fig. 2 に薬注率の自動制御システムの概略構成を示す。凝集混和槽にカメラを設置して凝集フロックを撮影し、取得した画像にディープラーニングの技術を用いることで凝集フロックの形成状態を特徴量として数値化し、薬注率の最適制御を構築した。

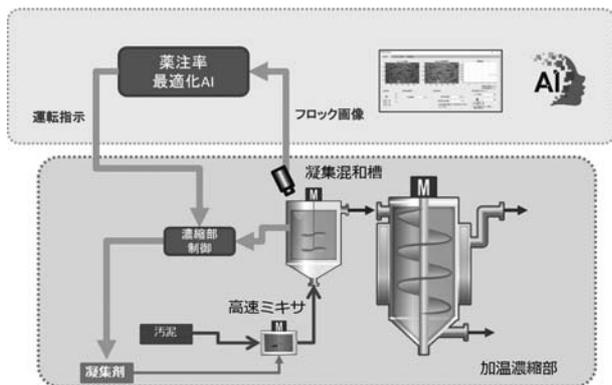


Fig. 2 Automatic chemical dosage control system using image recognition for sludge flocculator

Fig. 3 の左側に実際に撮影した凝集フロック画像を示す。凝集フロックは、高分子凝集剤の薬注率が最適であるほど粗大化するため、フロック間の間隙が大きくなる。本システムは、間隙を凝集フロックの状態判別指標とし、ディープラーニングの一つであるセマンティックセグメンテーションを使用して間隙を識別できる AI モデルを構築した。

セマンティックセグメンテーションは意味領域認識

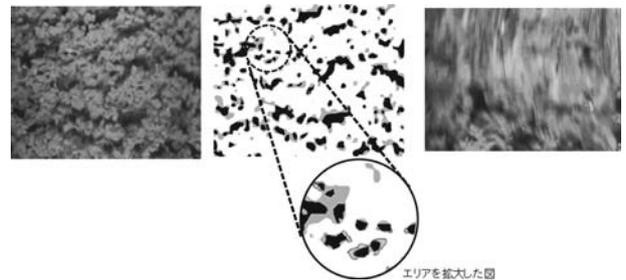


Fig. 3 Sludge floc image & Prediction results of semantic segmentation for area of floc gap and Sludge image with "blurring"

技術であり、画像内のどの位置にどのような物体が存在するのかを画素単位で認識できる技術である<sup>4)</sup>。この技術を利用することで、Fig. 3 の左側の画像を Fig. 3 の中央のように間隙部だけ自動検出することができる。Fig. 3 の中央の図において灰色部分はセマンティックセグメンテーションによる間隙認識領域、ハッチング部は人が間隙と認識した領域、黒部分は人とセマンティックセグメンテーションの認識が重なった領域となっている。これにより凝集フロックの良否を数値化することができ、人の経験に頼っていた薬注率の調整を自動化することを目指している。具体的には、検出した間隙部分の総和を「間隙面積」とし、薬注率を操作量として目標の間隙面積となるようサンプル PI 制御にて制御している。

今回、凝集フロックの状態を解析するためにカメラを設置した凝集攪拌槽は、常に攪拌機により内部の汚泥が攪拌されており、撮影した画像にも周期的な揺らぎが発生している。攪拌機の攪拌羽根の影響を受けている瞬間の画像は「ブレ」が発生しており、セマンティックセグメンテーションの処理を行うには不向きな画像となっていた (Fig. 3 の右図)。そこで前処理としてオプティカルフロー (OF) として知られる画像内の動きを速度ベクトルとして取得できる画像処理にて「ブレ」を検出し、解析の対象から外す処理を加

えている。この前処理では OF で検出した速度ベクトルの特定方向の速度ベクトルの値が閾値を下まわったかどうか（即ちフロックの動きが遅くなったかどうか）を検出し凝集汚泥画像を取得している。

今回さらに、加温脱水工程を完全に無操作で自動運転するために薬注率最適化 AI の機能として、高速ミキサの回転数を調整する「高速ミキサ制御」を組み込んでいる。高速ミキサには凝集剤と汚泥を混合する攪拌機が設置されており「汚泥流量」や「汚泥の質」により回転数を最適に調整する必要がある。

今回、高速ミキサの回転数は、以下の式(1)により決定している。

$$\text{高速ミキサ回転数 } S = \text{係数 } A \times \text{汚泥流量} + \text{係数 } B + \text{切片 } C \quad (1)$$

この式は当社が実験で得た汚泥流量に応じた係数 A に、「間隙面積」により補正する係数 B を含んだ式となっている。係数 B は汚泥性状の変動などにより、設備運転中に変化させるための係数であり、具体的には「間隙面積」が「あらかじめ設定した値」を下回った場合に、薬注率を固定して高速ミキサの回転数を増減させ、複数の回転数による間隙面積を取得し、間隙面積が最適となる回転数を「高速ミキサ回転数 S」として代入し、係数 B としている。Fig. 4 の下部に高速ミキサ制御と薬注制御の処理フローを示す。

### 2.1.2 含水率最適化 AI と炉内温度最適化 AI

この制御システムでは加温脱水部と過給式流動炉は連動して制御し、過給式流動炉の炉内温度の安定化を目指している。今回構築したシステムでは、「エネルギー効率の最大化」かつ、「温室効果ガス (N<sub>2</sub>O) の発生を最小限に抑える」ことを目的として、加温脱水部の含水率を制御することにより過給式流動炉の炉内温度を目的の温度になるよう制御している。構築したシステムは上位側に過給式流動炉の温度制御を配置し、下位側に加温脱水部の含水率制御を配置するカスケード型の制御を行っている。

Fig. 5 の制御システムは、炉内温度を制御する「炉内温度最適化 AI」と脱水部の含水率を制御する「含水率最適化 AI」により構成され、それぞれの制御機

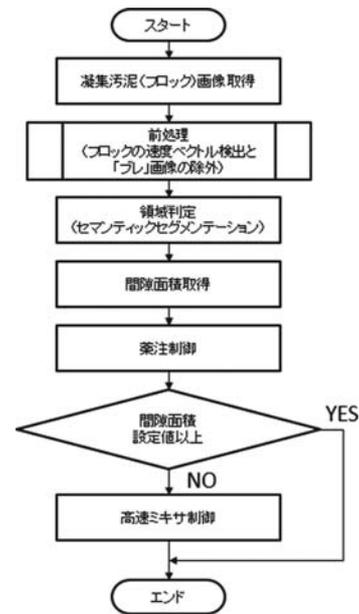


Fig. 4 Flowchart of automated chemical dosing system

能は以下となっている。

#### (1) 炉内温度最適化 AI

炉内温度最適化 AI には「機械学習モデル①」と「モデル予測制御」が組み込まれている。「機械学習モデル①」では加温脱水部の状態からリアルタイムに含水率を予測し、「予測含水率」を「モデル予測制御」に入力する。「モデル予測制御」では加温脱水部と過給式流動炉の現在までの運転状況および長い汚泥の搬送時間も考慮し、未来の炉内砂層温度を予測している。また、「モデル予測制御」の内部には最適化演算器が組み込まれており、目標の砂層温度にするための「目標となる最適な含水率」を演算・出力する。

#### (2) 含水率最適化 AI

含水率最適化 AI では、炉内温度最適化 AI から出力された最適含水率となるように加温脱水部を制御している。この含水率最適化 AI には、「機械学習モデル②」と「FB (フィードバック) 制御」が組み込まれている。「機械学習モデル②」は過去の運転データで学習されており、「目標となる最適含水率」と「汚

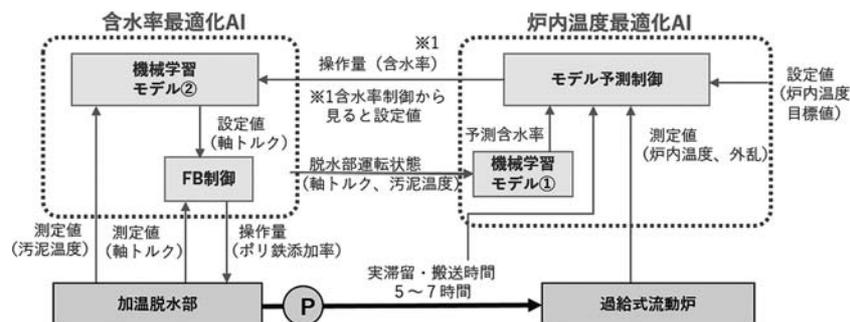


Fig. 5 Integrated control system for dehydrator and incinerator

泥温度」の入力から制御に必要な「軸トルク」が予測され出力される。「機械学習モデル②」から出力された「軸トルク」となるように無機凝集剤（ポリ硫酸第二鉄）の注入率を「FB制御」により制御し、目標となる含水率になるよう脱水部を制御している。

## 2.2 遠隔監視システム

今回、自律型制御システムを創エネルギー型脱水焼却システムに導入することにより、オペレータによる制御システムの操作は不要となることを目指している。現場の監視人員を削減するため以下の監視対応項目を追加し検証を行った。

- (1) 集中監視センターを活用した「人員」と「設備」の見守り
- (2) 設備監視カメラ
- (3) IoTカメラによる現場アナログゲージの自動読取り装置
- (4) バイタル情報（心拍数・転倒）自動検知システムによる見守り

### 2.2.1 集中監視センターを活用した「人員」と「設備」の見守り

これまで夜間に最低2名のオペレータが必要であった人員を1名に削減可能になると考え、今回夜間の監視は現場に1名を配置し検証を行った。

この人員配置により「安全で確実な操業」を行うため、当社グループで既に稼働中であった「集中監視センター」を活用し、現場のオペレータの休憩時等は遠隔地から監視することとし、オペレータの見守りと制御システムの監視を遠隔から行う検証を行った。

### 2.2.2 設備監視カメラ

集中監視センターからオペレータと設備の安全を遠隔から監視するため、日常点検ルートなど必要箇所に「設備監視カメラ」を追加設置し、遠隔から設備の状態を監視できる体制とした。

### 2.2.3 IoTカメラによる現場アナログゲージの自動読取り装置

実証設備は、建設当初は無人化を想定していなかったため、現場のアナログゲージの指示値の確認が定期的に必要であり、夜間の現場巡視点検が必要であった。

夜間1名による監視体制での現場巡視点検については安全上の課題があったため、先に記載の監視カメラの設置とIoTカメラによる現場アナログゲージの自動読取り装置を新たに設置し、夜間の現場巡視点検を不要とした。

### 2.2.4 バイタル情報（心拍数・転倒）自動検知システムによる見守り

現場1名体制においてオペレータの急な体調不良や不測の事故を「完全に防ぐ」ことは不可能と考え、迅速な対応を可能とするため、「スマートウォッチによる心拍数などのバイタル状態の自動監視」と「オペレータの転倒を自動検知」するシステムを導入した。

## 2.3 検証結果

### 2.3.1 自律型制御システムの検証結果について

自動運転についてはオペレータの操作なしで目標とした「自律型制御システムによる無操作30日間連続自動運転」を達成した。AI導入前は汚泥性状が変化した場合に加温濃縮脱水工程の薬注率などの調整や熱回収システムの温度調整が必要であり、1カ月の運転に約2,400回のオペレータの操作が必要であった。AI自律運転を導入後はオペレータの操作が不要となっている。

さらに、N<sub>2</sub>O排出量をさらに低減するため、「制御パラメータの変更」を期間中に3回行った。**Fig. 6**に30日間連続運転のトレンドグラフと制御パラメータ変更のタイミングを示す。パラメータ変更前のN<sub>2</sub>O排出量の平均値は0.046 kg-N<sub>2</sub>O/t-wetとなっていたが、パラメータ変更後の平均値0.012 kg-N<sub>2</sub>O/t-wetまで低下した。

### 2.3.2 制御パラメータの変更について

#### (1) 変更①：含水率予測モデルのパラメータ変更

炉内温度最適化AIに組み込んだ機械学習モデル①では、式(2)により加温脱水部から排出される汚泥含水率を予測している。線形回帰式を採用しており容易に係数A、Bまたは切片Cにて予測モデルの精度を上げられるようにしている。

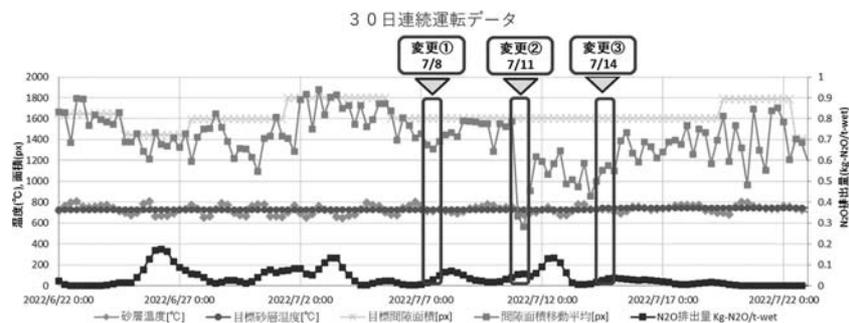


Fig. 6 Trend of 30-day continuous operation and control parameter change timing

$$\text{予測含水率 } W = \text{係数 } A \times \text{減速機トルク} + \text{係数 } B \times \text{汚泥温度} + \text{切片 } C \quad (2)$$

減速機トルクと汚泥温度から含水率を予測しているが、実証前半の運転データから予測精度を確認した結果、予測モデル構築時において特に低い減速機トルク範囲のデータが不足していると思われる予測誤差が発生していた。そこで係数 A、B および切片 C を調整することにより含水率の予測精度を向上させた。

(2) 変更②：薬注率最適化 AI 制御のパラメータ変更  
制御パラメータの「変更②」では、長期間運転することにより雨天時などの汚泥性状が変化した場合に 2.1.1 項で説明した「高速ミキサ制御」が過敏に反応してしまうことを防ぐため、高速ミキサ制御に入るための閾値を小さくし、薬注制御による運転期間を長くする措置を取り、薬注率最適化 AI の挙動を安定化させた。

(3) 変更③：目標の炉内砂層温度の変更

制御パラメータの「変更③」では、目標となる砂層温度のパラメータを 730℃ から 740℃ に上げている。これは制御パラメータの変更①と②により、炉内の温度が安定し運転上の制約となる温度付近まで目標値を上げることが可能となったためである。制約条件を超えた運転をしてしまうと「耐火材の劣化」や「リン焼結による排気ダクトの閉塞」の問題が発生するが、炉内温度を自律型制御システムにより安定化させることで、運転目標温度と制約条件温度のマージンを極限まで小さくすることが可能となった。

### 2.3.3 遠隔監視システムの検証結果について

検証の結果、「自律型制御システム」と「集中監視センター」を組み合わせることで適用することにより今回の設備の場合、3 名の人員削減効果が期待できることが実証された。また、今回対象としたプロセスは熱を扱うプロセスであり安全のため最低 1 名のオペレータを現場に配置しているが、安全上の課題や法規上の問題を

クリアすれば将来的にはさらなる人員削減効果が期待できる。

## 3. 今後の展望

今回、創エネルギー型焼却脱水システムにて従来熟練者の知見・技術が必要で自動化が難しかったプロセス（工程、操作）の自律制御を目指し、AI の技術を活用することにより安定した運転を実現し、実証炉で 30 日間のオペレータの操作なしでの自律運転を確認した。

一方で運転中に AI や制御パラメータを変更する修正を行っているため制御パラメータを自動調整するような俯瞰的な AI の開発予知があるものと考えている。

今後は、内閣府から提唱されている Society 5.0 にもあるような「超スマート社会」<sup>6)</sup> を目指し、より精度の高い制御や、長期安定化を進め、ロバストかつ最適な自動・自律運転が可能なシステムの構築を目指していく。

### 参考文献

- 1) 外務省：2020 年以降の枠組み：パリ協定、ホームページ  
[https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w\\_000119.html](https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000119.html)  
(2024 年 6 月 17 日現在)
- 2) 環境省：脱炭素ポータル カーボンニュートラルとは、ホームページ  
[https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon\\_neutral/about/](https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/)  
(2024 年 6 月 17 日現在)
- 3) 深澤淳基：AI 技術を活用した創エネルギー型脱水焼却システムの自動制御に関する取組み、月島機械(株) TSK 技報 No.24 (2021)
- 5) 斎藤康毅：ゼロから作る Deep Learning-Python で学ぶディープラーニングの理論と実装、オライリジャパン、(2016)
- 6) 内閣府：第 5 期科学技術基本計画、ホームページ  
<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index5.html>  
(2024 年 6 月 17 日現在)