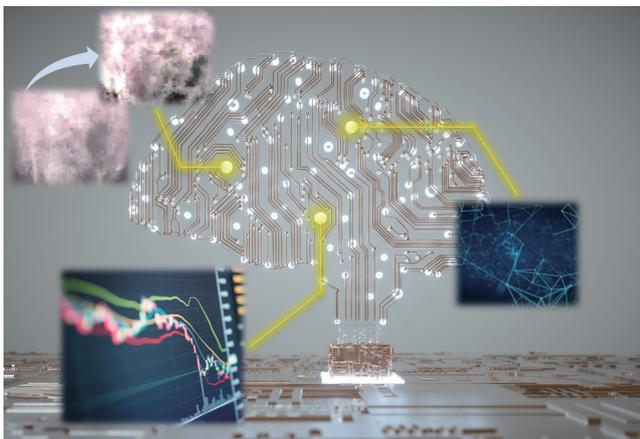


ごみ焼却発電施設の更なる安定操炉の実現 —ごみ層差圧安定化AIと燃焼画像予測AIの追加—



伊瀬 顕史 □
西原 智佳子 □
小貫 由樹雄 □
渡邊 剛 □
本山 真史 □
重政 祥子 □

要旨

当社は、これまでに複数のセンサーの挙動から数分～数十分後に燃焼悪化に陥る可能性を予測し、燃焼悪化を避ける追加制御を行うAIとして「燃焼状態予測システム」を開発してきた。今回、さらなる安定燃焼を目的として、このAIモデルの精度を向上させるとともに、ごみ層差圧安定化モデル（燃焼空気とごみ層差圧の関係性に異常が発生した際にごみ送り制御を補正するモデル）、動的状態予測モデル（直近数十分間の炉内の燃焼動画から5分後の炉内画像を予測するモデル）の2つのモデルを追加した。

これら3つのモデルを統合したAIモデルを用いて実機で長期間の実証試験を行った結果、従来のAIモデルよりも良好な燃焼状態を維持できることがわかった。また、自動燃焼制御のみで制御する場合と比較して、燃焼悪化時間が58%低減し、手動介入回数も86%低減した。

キーワード

自動燃焼制御, AI, 安定操炉, 燃焼悪化低減, 手動介入低減, 省力化

1. 緒言

ごみ焼却発電施設では、地域で回収、または持ち込まれたごみを焼却炉で焼却し、発生させた蒸気によって発電を行っている。

施設に搬入されるごみには、水分を多く含む低発熱量の野菜のくず、紙や剪定枝、高発熱量のプラスチックなど、多種多様なものが含まれている。ごみの燃焼安定性には、このようなごみ種など多くの要因が関係するが、正確に把握することはできない。

そこで当社は、多様なごみが投入されても安定した操炉を実現するために、各種センサー値を活用した、AIによる燃焼状態予測システムを開発し、一定の成果を上げてきた。しかし、本システムは、ごみ質の急変や炉内の火格子上のごみ量が均一でない場合において、燃焼状態をうまく把握できないという問題があった。

そこで、2021年～2022年度にかけて、従来のAIモデルの精度を向上させるとともに、適切にごみ送りを実現する「ごみ層差圧安定化モデル」と炉内燃焼画像を予測する「動的状態予測モデル」を追加、統合し、実機で長期間の実証試験を行った¹⁾。本稿では、追加した各モデルの精度と、統合したモデルの実証試験の結果について報告する。

2. 実証設備

本試験を実施した施設概要を表1に示す。本施設は全連続燃焼式のストーカ炉のごみ焼却発電施設で、ごみ処理能力は110 t/dayが3炉、計画のごみ低位発熱量は9.9 MJ/kg（標準）である。

表1 実証試験施設の概要

受入れ方式	ピット&クレーン方式
炉形式	全連続燃焼式ストーカ炉
ごみ処理能力	110 t/day×3炉（合計330 t/day）
ごみ低位発熱量	9.9 MJ/kg（基準）
排ガス処理設備	無触媒脱硝+ろ過式集じん器
発電設備	蒸気タービン発電機（9,550 kW）

3. 従来型のAI燃焼システムの実証試験

3.1 システムの概要 当社のごみ焼却発電施設には、燃焼状態の変化に応じて、焼却炉へ供給するごみや空気の供給量を自動で調整する自動燃焼制御（Automatic Combustion Control：以下、ACC）が採用されている。

当社は、ごみ焼却発電施設のさらなる安定操炉と省力

□ 環境事業本部 開発センター

化に向け、ACCの補助として、AIによる「燃焼状態予測システム」を開発した²⁾。このシステムの概要を図1に示す。本システムには、数分～数十分後に燃焼悪化に陥る可能性を予測するAIモデルが組み込まれており、このAIモデルが出力する結果に基づいて、燃焼悪化状態に陥らないようにACCのごみ送り速度や燃焼空気流量の操作に対して追加の制御を行う。

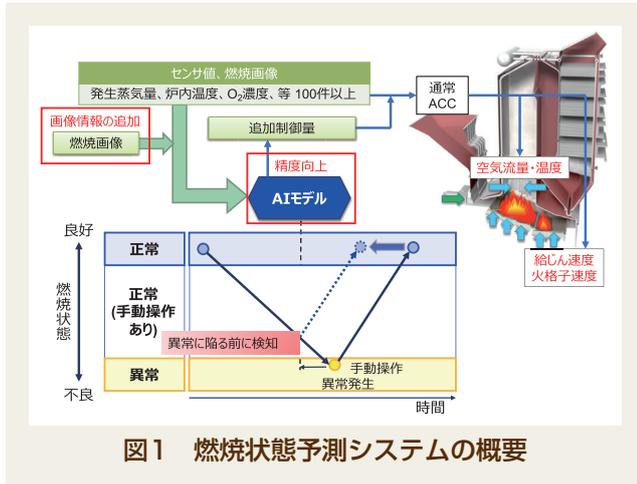


図1 燃焼状態予測システムの概要

3.2 評価結果 燃焼状態予測システムの評価結果を表2に示す。操炉中にモデルが制御に介入した時間を示す「介入時間」は955 min/day、モデルが反応すべきタイミングに反応していなかった回数を示す「見逃し回数」は0.0回/dayであり、この期間、見逃しは発生しなかった。

表2 燃焼状態予測システムの精度評価結果
(モデル稼働日数0.9日)

評価項目	単位	結果
介入時間	[min/day]	955
見逃し回数	[回/day]	0.0

4. 新規追加AIモデルの実証試験

従来型のAI制御システムは、発生蒸気量や炉出口O₂濃度、炉内温度などの複数のセンサー値が入力され、燃焼状態やその予測結果を出力する。しかし、ごみ質の急変や炉内の火格子上のごみ量が均一でない場合に、稀に燃焼状態を正しく判定できないという問題があった。

そこで、従来型のAI制御システムに、ごみ層差圧のセンサー値を用いて適切なごみ送りを行う「ごみ層差圧安定化モデル」と、直近数十分間の炉内の燃焼動画から将来の燃焼画像を予測する「動的状態予測モデル」³⁾を新たに追加し、ACCの操作に対してより正確な追加制御を行う燃焼制御システム（以下、改良型AI制御システム）を開発した。

4.1 ごみ層差圧安定化モデル ごみ層差圧安定化モデル（以下、安定化モデル）は、火格子上のごみ量の異常（ごみ枯れ等）を予測し、ACCのごみ送り制御に対して補正を行うことで、ごみ層差圧を安定させる。

安定化モデルのみを用いてACCの制御を補正する試験を実施し、通常制御時（ACCのみで制御）のデータと比較した結果を図2～図4、表3に示す。安定化モデルは2021年12月、通常制御は2021年10月のいずれも日中1日のデータを用いて、蒸気量SV（Set Valueの略称であり、目標値を指す）が同じ期間で比較した。

図2は、蒸気量DV（Deviation Valueの略称であり、制御値から目標値を引いた偏差の値を指す）、図3は燃焼火格子（前段）のごみ層差圧の偏差、図4は燃焼火格子（後段）のごみ層差圧の偏差のプロセスデータをそれぞれヒストグラムで表したグラフであり、いずれも橙色が安定化モデル制御時、青色が通常制御時のデータを指す。

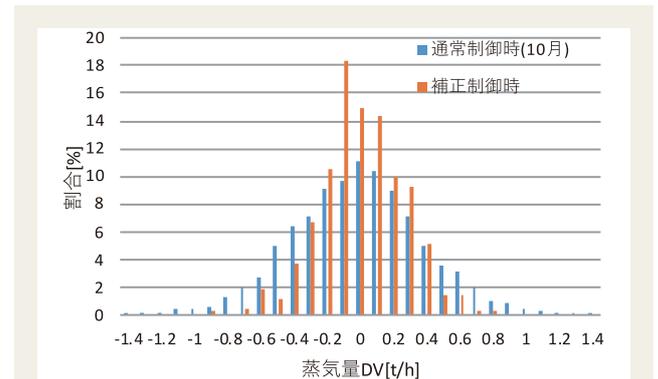


図2 安定化モデルと通常制御の比較（蒸気量DV）

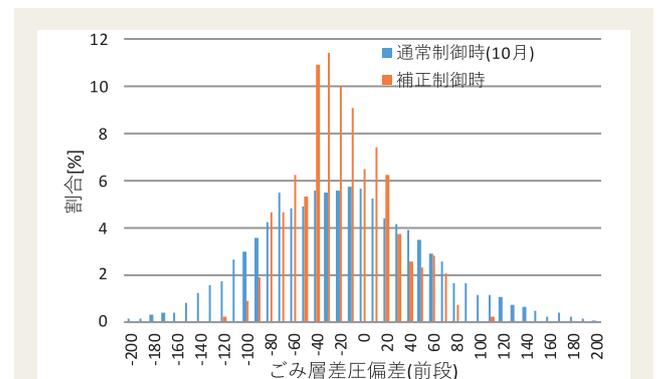


図3 安定化モデルと通常制御の比較
(ごみ層差圧偏差 (前段))

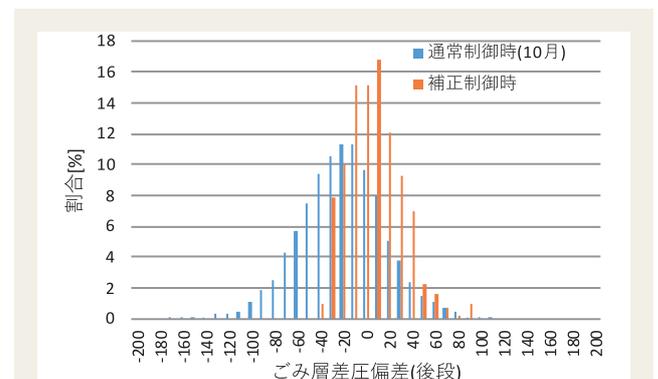


図4 安定化モデルと通常制御の比較
(ごみ層差圧偏差 (後段))

図2において、安定化モデルの方が全体的に0付近の割合が増えている。つまり、より設定値に近い蒸気量を維持しており、通常制御よりも蒸気量が安定していると言える。また、図3と図4のどちらも同じように、安定化モデルの方が0付近の割合が増えており、通常制御よりもごみ層の差圧が安定していると言える。

表3は、安定化モデル制御時と通常制御時における各プロセスデータの平均値及び標準偏差を示す。蒸気量DVの標準偏差は0.42から0.25まで約40%低下、ごみ層差圧偏差（前段）の標準偏差は72.2から40.1まで約44%低下、ごみ層差圧偏差（後段）の標準偏差は37.4から24.1まで約36%低下している。以上から、安定化モデルは通常制御よりも蒸気量とごみ層差圧を大きく安定させることがわかった。

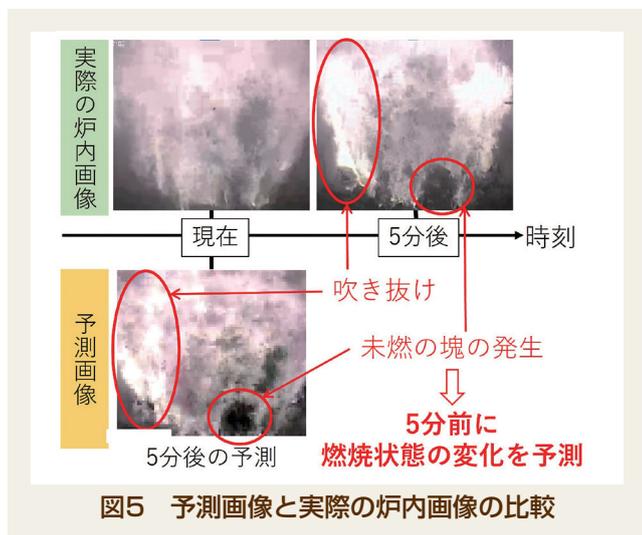
表3 安定化モデルと通常制御時のプロセスデータの比較

センサー名	評価項目	通常制御時 (2021/10)	安定化モデル 制御時
蒸気量 DV[t/h]	平均値	-0.021	0.005
	標準偏差	0.42	0.25
ごみ層差圧偏差 (前段)[Pa]	平均値	-17.5	-18.3
	標準偏差	72.2	40.1
ごみ層差圧偏差 (後段)[Pa]	平均値	-21.5	6.6
	標準偏差	37.4	24.1

4.2 動的状態予測モデル

動的状態予測モデルは、直近数十分間の炉内の燃焼動画から予測モデルを作成し、一定時間後の炉内画像を予測するモデルである。実際の炉内画像と予測画像を比較した結果を図5に示す。現在時刻において5分後に未燃の塊や吹き抜けが発生する予測画像を出力しており、実際に5分後の炉内画像でも同様の現象が発生していることから、5分後の燃焼状態を概ね予測できていることがわかる。

動的状態予測モデルによる制御では、後燃焼段の燃焼を安定させることを目的とした。予測した画像の燃焼状態（ごみ枯れ、正常、塊など）を画像識別プログラムで判定し、本試験では、後燃焼火格子速度や後燃焼火格子の空気流量の補正量を決定した。



動的状態予測モデルのみを用いてACC制御を補正する試験を日中3日間行った結果を図6と表4に示す。図6は、後燃焼段の燃焼面積をヒストグラムで表したグラフであり、横軸は燃焼面積の範囲、縦軸は割合 [%]、赤色が動的状態予測モデル稼働中の結果、青色がACC制御のみの結果である。動的状態予測モデル稼働中の方が、燃焼面積が小さい割合が増えていることから、燃え切り位置がより上段側で安定していると考えられる。

表4に燃焼面積の統計量（平均値、標準偏差、最大値）を示す。動的状態予測モデルを稼働させた結果の方が、燃焼面積の平均値、標準偏差がともに小さくなっている。これにより、動的状態予測モデルが事前に燃焼状態を予測し、燃焼悪化を回避するようACC制御を補正することで、後燃焼段の燃焼を安定させることがわかった。

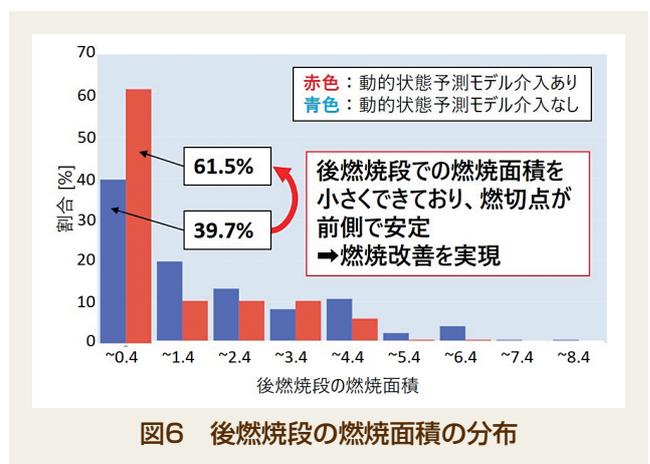


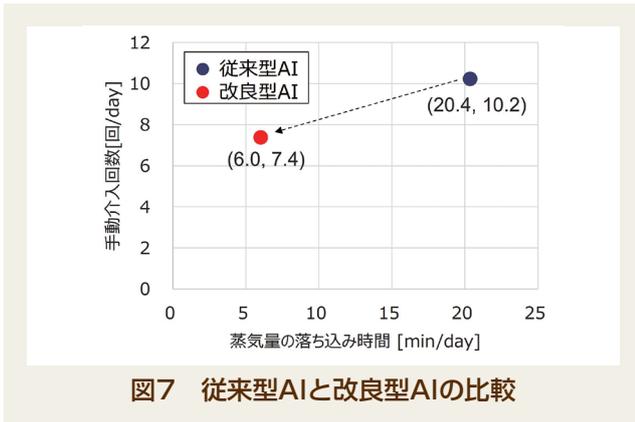
表4 後燃焼段の燃焼面積の統計量

	動的状態予測モデル 介入なし	動的状態予測モデル 介入あり
平均	1.61	約60% → 0.95
標準偏差	1.85	約76% → 1.41
最大	7.50	5.50

5. 改良型のAI燃焼制御システムの実証試験

5.1 従来型と改良型の性能比較 3章で示した従来型のAI制御システムと、従来型のシステムに4章で示したモデルを統合した改良型のAI制御システムの性能比較を実施した。できるだけ燃焼状況に近い条件で従来型と改良型の性能を比較するために、平均発生蒸気量や低位発熱量に近い3日間ずつのデータを用いた。また、燃焼悪化を示す指標として、発生蒸気量の落ち込み時間（発生蒸気量 (PV-SV)/SV<-8%となる時間）をもちいて評価をおこなった。

性能比較の結果を図7に示す。横軸が1日当たりの蒸気量の落ち込み時間、縦軸が1日当たりの手動介入回数を表し、左下ほどより良い性能であることを示している。



従来型のAI制御システムでは蒸気量の落ち込みが20.4 min/day、手動介入回数が10.2回/dayであったのに対して、改良型AI制御システムではそれぞれ6.0 min/day、7.4回/dayと大きく減少しており、従来型よりも良好な燃焼状態を維持できることがわかった。

5.2 改良型の長期実証試験 改良型AI制御システムの長期稼働試験を2022年11月～2023年2月の延べ約73日間にわたって実施した。試験期間中の操炉状況と結果を表5に示す。評価には、ACCのみで運転した前

年度同時期の約20日間のデータと、ACC+改良型AI制御システム（以下、ACC+AI）で運転した約21日間のデータを用いて、延べ日数、低位発熱量、発生蒸気量といった運転条件が「ACCのみ」と「ACC+AI」で同程度になるようにした。また、燃焼状態の指標として、5.1節と同様の発生蒸気量の落ち込み時間をもちいた。

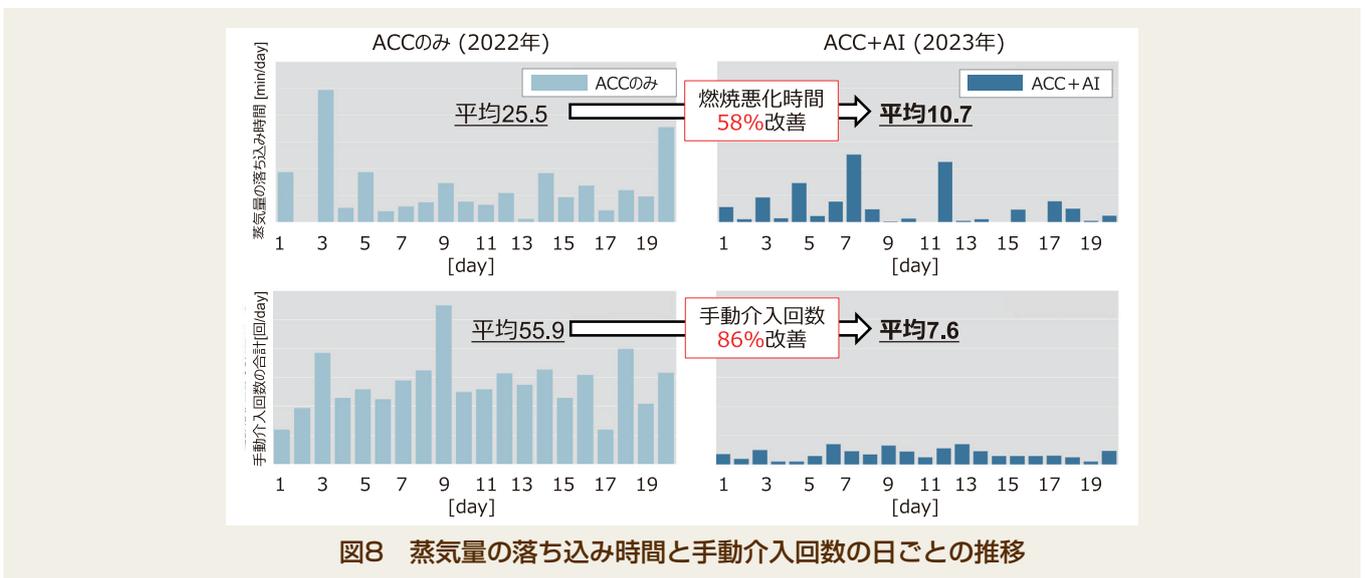
ACC+AIで運転した期間のごみの平均低位発熱量は11.1 MJ/kg、平均発生蒸気量は13.8 t/h、平均炉出口温度は982℃であり、ACCのみで運転した前年度同時期の期間に比べて、炉出口温度はやや低めであったが、発生蒸気量や低位発熱量は、ほぼ同じ運転状況であった。

表5に示す通り、蒸気量の落ち込みの1日当たりの時間は58%低減し、煙突入口排ガスのNO_x、CO濃度が50 ppm、100 ppmを超過する頻度についてもACCのみで運転した期間に比べて、それぞれ41.1%、92.7%低減した。本結果から、このシステムは長期的にも良好な燃焼状態を維持できると言える。

また、日ごとの蒸気量の落ち込み時間と手動介入回数の推移を図8に示す。いずれも横軸が試験期間中の日にちを示し、縦軸は上段と下段の図でそれぞれ蒸気量の落ち込みの時間と手動介入の回数を示す。

表5 既存ACCと改良型AI+ACCの比較

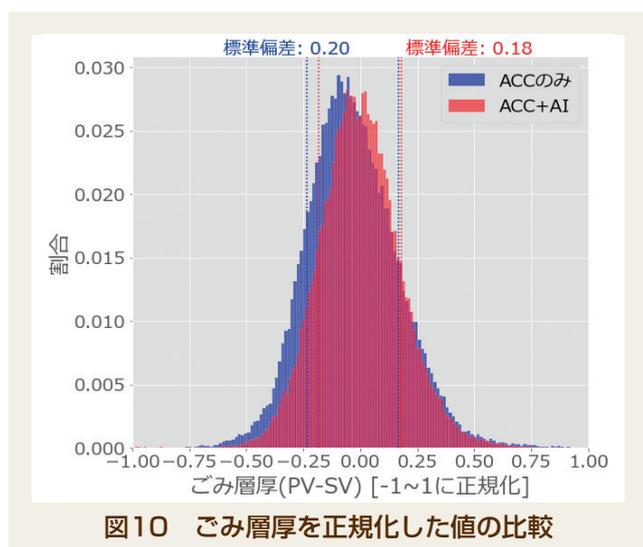
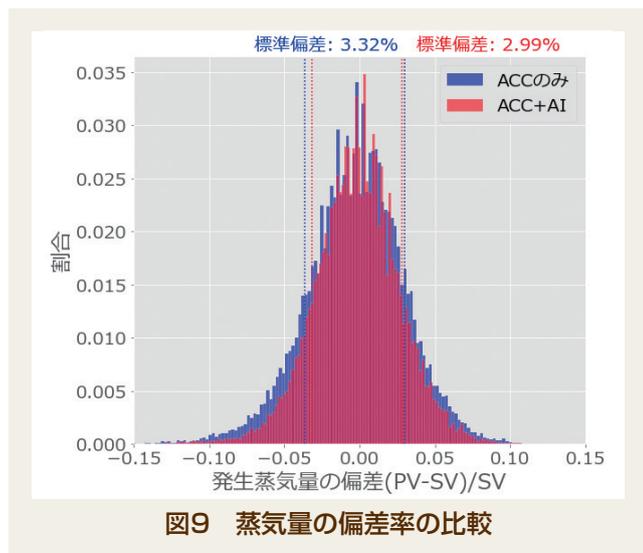
		評価用期間			実証期間全体
		ACCのみ	ACC+AI	削減率	ACC+AI
期間		2022/1/22 ～2/27	2023/2/6 ～2/27	-	2022/11/28 ～2/27
延べ日数	[day]	20.0	20.6	-	73.0
ごみの平均低位発熱量	[MJ/kg]	11.0	11.1	-	10.8
平均発生蒸気量	[t/h]	13.9	13.8	-	12.9
平均炉出口温度	[°C]	1016	982	-	980
平均炉出口O ₂ 濃度	[%-dry]	3.7	4.0	-	3.8
蒸気量の落ち込み時間	[min/day]	25.5	10.7	58%	10.2
煙突NO _x (瞬時)50ppm 超過頻度	[min/day]	197.1	116.1	41%	137.8
煙突CO(瞬時)100ppm 超過頻度	[min/day]	5.5	0.4	93%	0.7
手動介入回数の合計	[回/day]	55.9	7.6	86%	8.0



ACCのみで運転した期間の蒸気量の落ち込みの時間は25.5 min/dayであったのに対し、ACC+AIで運転した期間では10.7 min/dayであり、改良型AI制御システムの追加制御により58 %改善した。同様に、ACCのみで運転した期間の手動介入回数は55.9回/dayであったのに対し、ACC+AIで運転した期間では7.6回/dayであり、改良型AI制御システムの追加制御により86.4 %低減した。本結果から、改良型AI制御システムは、長期間にわたって、安定的に蒸気量制御できることがわかった。

次に、発生蒸気量とごみ層厚の安定性を確認するために、実証期間中のそれぞれの値の偏差をヒストグラムで比較した結果を図9、図10に示す。図9の横軸は発生蒸気量の偏差率、図10の横軸はごみ層厚の偏差を-1~1に正規化した値であり、どちらもACCのみの運転の場合が青色、ACC+AIの運転の場合が赤色である。

図9、図10のどちらも、ACC+AIの方が標準偏差が小さく、分布のピークが0に近くなっていることから、発生蒸気量とごみ層厚のどちらも設定値により近い状態が維持できた。本結果から、本システムにより、長期間にわたってごみ量を適正に保ちつつ、発生蒸気量をより安定化できることがわかった。



以上から、改良型AI制御システムにより、長期的に炉内の火格子上的ごみ量を適正に保つことが可能で、それによって燃焼を安定化し、より安定的に蒸気発生量を保つことができた。

6. 結 言

当社は、これまでに複数のセンサーの挙動から数分~数十分後に燃焼悪化に陥る可能性を予測し、燃焼悪化を避ける追加制御を行うAIとして「燃焼状態予測システム」を開発してきた。

今回、さらなる安定燃焼を目的として、2021~2022年度にかけて、従来のAIモデルの精度を向上させるとともに、適切なごみ送りを実現する「ごみ層差圧安定化モデル」と炉内燃焼画像を予測する「動的状態予測モデル」を追加した、改良型AI制御システムを開発した。このモデルを用いて、実機で長期間の実証試験を実施し、以下の結果を得た。

- ① 燃焼状態予測システム、ごみ層差圧安定化モデル、動的状態予測モデルの単独試験をそれぞれ実施し、全てのモデルで有効性があることがわかった。
- ② 従来型のAI制御システムと改良型のAI制御システムの性能比較を実施し、改良型は従来型よりも良好な燃焼状態を維持できることがわかった。
- ③ 改良型AI制御システムの実証試験を実機で行った結果、改良型を稼働した方が燃焼悪化、手動操作ともに低減し、燃焼状態を安定化しつつ、運転員の負担を軽減できることがわかった。

SDGsに貢献する技術

本稿で紹介した技術により、ごみ焼却発電施設のさらなる安定操炉の実現、運転管理の省力化に貢献できることを確認した。

参考文献

- 1) 伊瀬顕史, 鉄谷尚史ほか: AI技術を活用したごみ焼却施設の長期的な安定操炉の実現, 第34回廃棄物資源循環学会研究発表会 講演原稿, 2023, pp.349-350.
- 2) 西原智佳子, 古林通孝ほか: AI技術を活用したごみ焼却施設の安定操炉と省力化の実現, 第43回全国都市清掃研究・事例発表会 講演論文集, 2022, pp.156-158.
- 3) Brendan, M.;Ise,A. et al. :Task-Relevant Encoding of Domain Knowledge in Dynamics Modeling : Application to Furnace Forecasting From Video, IEEE Access, 2022, vol.10, pp.4615-4627.

文責者

日立造船株式会社 環境事業本部
開発センター WtEプロジェクトグループ
伊瀬顕史
E-mail : ise.a@hitachizosen.co.jp

Further Stability of Waste to Energy Plants —Addition of AI Models for Garbage Layer Differential Pressure Stabilization and Combustion Image Prediction

Abstract

In our work with Waste to Energy plants to date, Hitachi Zosen has developed an AI model called Combustion State Prediction System, designed to predict the possibility of combustion deterioration in the next few minutes based on the behavior of multiple sensors, and to perform additional control to avoid that deterioration. In this project, we added two more AI models to improve the prediction accuracy. The first, called the Waste Layer Differential Pressure Stabilization model, corrects waste feeding control when the amount of waste on grates becomes abnormal. The second, called the Dynamic State Prediction model, predicts combustion images five minutes after based on combustion videos of the last several tens of minutes.

The results of a long-term verification test conducted with an AI model integrating the three models found that it can maintain a better combustion state than the conventional AI model. In addition, compared to a control group using only Automatic Combustion Control (ACC), the time for combustion deterioration was reduced by 58%, and the number of manual interventions was reduced by as much as 86%.

Authors

Akifumi Ise (Hitachi Zosen Corporation, E-mail : ise.a@hitachizosen.co.jp)

Chikako Nishihara

Yukio Onuki

Go Watanabe

Shinji Motoyama

Sachiko Shigemasa