

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



西原 智佳子 ①
 小浦 洋平 ①
 益岡 俊勝 ②
 木村 友哉 ②
 矢路 隼斗 ③
 南 一彦 ④
 本山 真史 ①
 平林 照司 ②
 古林 通孝 ⑤
 近藤 守 ⑥

要旨

当社は2017～2020年度にかけて、東京二十三区清掃一部事務組合の協力を得て「清掃工場における制御技術の高度化研究開発」を実施し、杉並清掃工場において「ごみバンカ&ごみクレーン3Dシステム」と「燃焼状態予測システム」を試験的に運用した。この結果、「ごみバンカ&ごみクレーン3Dシステム」については、均質化されたごみを所定量確保できた時点でクレーンを休止させることにより、クレーンの総移動距離を8%低減でき、それに伴い消費電力量を52 kWh/day削減できた。一方、「燃焼状態予測システム」については、1ヵ月以上の蒸気発生量や炉内温度に関わる安定操炉の継続と、2度の2週間以上の完全自動運転（焼却炉のごみ送り系や燃焼空気系など計25種の操作端に対して手動介入しないこと）を実現し、さらなる安定操炉の実現や運転管理の省力化に貢献できることを確認した。

キーワード

ごみクレーン、自動燃焼制御、AI、安定操炉、燃焼悪化低減、省力化

1. 緒言

ごみ焼却発電施設はごみを衛生的に焼却処理しながら安定的に発電できるため、分散型エネルギー源の一つとして期待が高まっている。また、その売電収益は地方自治体にとって貴重な財源の一つとなっている。

ごみ焼却発電施設に搬入されるごみには、水分を多く含む低熱量のちゅう芥、紙や剪定枝、高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。そのため、施設の安定操炉の実現には、焼却前のごみをバンカ内で十分に攪拌し、ごみ性状の均質化を図るとともに、焼却炉内では発熱量や性状の異なる様々なごみに対しても良好な燃焼状態を維持することが重要である。

当社はごみ焼却発電施設の安定操炉のために運転管理技術の高度化を目指し、2017～2020年度にかけて東京二十三区清掃一部事務組合の協力を得て「清掃工場における制御技術の高度化研究開発」を実施した。本稿

では、この開発の中で杉並清掃工場において試験的に運用した「ごみバンカ&ごみクレーン3Dシステム」と「燃焼状態予測システム」の実証試験結果について報告する。

2. 実証施設

本研究を実施した杉並清掃工場の施設概要を表1に示す。本施設はストーカ式のごみ焼却発電施設で、ごみ処理能力は300 t/day×2炉、計画のごみ低位発熱量は10.2 MJ/kg（基準）である。

表1 杉並清掃工場の施設概要

| | |
|---------|-------------------------------------|
| 受入れ方式 | ピット&クレーン方式 |
| 炉形式 | 全連続燃焼式・ストーカ式焼却炉 |
| ごみ処理能力 | 300 t/day×2 炉（合計 600 t/day） |
| ごみ低位発熱量 | 10.2 MJ/kg（基準） |
| 排ガス処理設備 | ろ過式集じん器 + 湿式洗煙塔 + 触媒脱硝装置 |
| ボイラ | 最大蒸発量 63.21 t/h/炉 (4 MPa、400 °C) |
| 発電設備 | 蒸気タービン発電機 (24, 200 kW) |

- ① 環境事業本部 開発センター
 ② 機械・インフラ事業本部 電子制御ビジネスユニット 制御機器部
 ③ 開発本部 技術研究所 知能機械研究センター
 ④ 環境事業本部 設計統括部 環境エネルギー設計部
 ⑤ 環境事業本部 開発センター 博士(工学)
 ⑥ 環境事業本部 設計統括部

3. ごみバンカ&ごみクレーン3Dシステム

3.1 システムの概要 ごみバンカ内の攪拌をより効果的に行うために、当社のごみバンカ&ごみクレーン3Dシステム（以下、3Dシステム）を開発した。3Dシステムでは、**図1**に示すように、搬入車両情報やごみクレーン情報を基に、バンカ内のごみ情報（搬入日、攪拌具合）を三次元管理し、可視化できる。さらに、このシステムには、「攪拌度優先投入」と「AI自動運転」の2つの機能が装備されている。

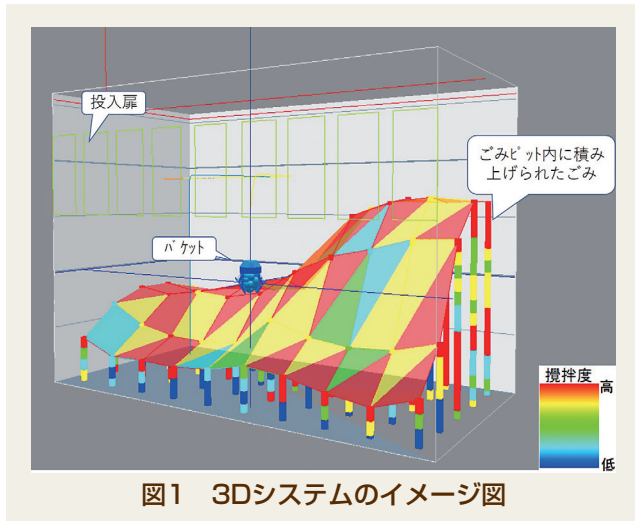


図1 3Dシステムのイメージ図

3.1.1 攪拌度優先投入 従来のごみクレーン自動運転では、攪拌具合（攪拌度）に関係なく、ごみバンカの投入エリア内で最も高い位置のごみが焼却炉に投入されるように制御されていた。これに対し、今回開発した攪拌度優先投入では、攪拌度の高いごみが優先的に投入される。これにより、常に均質化されたごみが焼却炉に投入され、燃焼状態の安定化に寄与することができる。なお、ここでの攪拌度とは、ごみの攪拌具合を投入日や攪拌回数などを基に数値化したものである。

3.1.2 AI自動運転 ごみが搬入される昼間と搬入されない夜間では、ごみクレーンによる最適ごみの攪拌・積み替え方法は異なる。AI自動運転では、ごみ搬入の有無に対して異なるAIアルゴリズムを用い、クレーン1台で均質化されたごみを作製するための最適な攪拌・積み替え方法を策定する。

(1) 昼間AI自動運転 昼間のごみクレーン自動運転ではごみ搬入が繁忙な時間帯でも均質化されたごみを作製する必要がある。このため、昼間AI自動運転には以下の3点をAIアルゴリズムに反映させた。

- ① ごみクレーン1台による受入エリアからのごみ積み替え運転
- ② 燃焼状態に影響を及ぼす異質ごみ（剪定ごみ、破碎ごみ）のバラマキ運転
- ③ 投入ホッパ側のエリアを二分し、投入エリアと攪拌・積み替えエリアとして交互に運用（夜間AI自動運転も同様）

上記①については、投入扉前のごみのつかみ位置を変

更し、ごみ搬入が繁忙な時間帯でもクレーン1台で効果的にごみの積み替えが行えるようにした。

上記②については、**図2**に示すように、ごみバンカ上方に監視カメラを設置し、バンカ内の異質ごみを検出できるようにした。さらに、検出された異質ごみの位置情報をごみクレーンに送信し、優先的にバラマキ運転を行うことで、燃焼悪化を未然に防ぐように運転した。

また、上記③については、**図3**に示すように、投入ホッパ側のエリアを左右に二分して、投入エリアと攪拌・積み替えエリアをそれぞれ1日毎に切り替えるように運用し、確実に攪拌されたごみを投入するようにした。

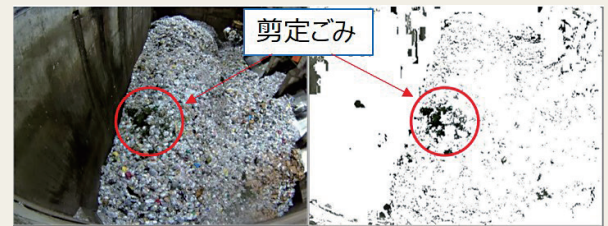


図2 ごみバンカの監視カメラによる異質ごみ検出画像



図3 AI自動運転時のごみバンカ運用方法

(2) 夜間AI自動運転 夜間のごみクレーン自動運転では翌日に焼却炉へ投入するごみを作製する必要があるため、夜間AI自動運転には以下の3点をAIアルゴリズムに反映させた。

- ① 一定以上の攪拌度まで均質化されたごみを作製（翌日に焼却炉へ投入するごみを作製）
- ② 受入エリアの掘下げ
- ③ 上記①の完了時点で、ごみクレーンを休止

上記①と上記②を達成するために、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: 以下、GA) を用いて、最適な攪拌・積み替え方法を策定するようにした。GAとは、進化論的計算手法の代表例であり、生物の進化のメカニズムをプログラム上で再現するアプローチである。具体的には、相当数ある攪拌・積み替え方法（遺伝子に相当）に対して、それぞれの方法で運転したときのバンカ状態を攪拌度の分布や掘下げ具合で点数化し、これらの点数を指標にして遺伝子を選択・交叉・突然変異させ、次世代の遺伝子群を作成した。この一連の計算は終了条件を満たすまで繰り返し行われ、最終的に最も点数の高くなった攪拌・積み替え方法をごみクレーン自動運転に活用した。

また、上記③については、この攪拌・積み替え方法によって、一定以上の攪拌度まで均質化されたごみを所定量確保できた時点で、ごみクレーンを休止させるようにした。

3.2 試験結果

3.2.1 最適な攪拌度の決定

2019年11月に実施した攪拌度優先投入試験における、攪拌度と発生蒸気量の落ち込み度の関係を図4に示す。なお、ここで発生蒸気量の落ち込み度とは、発生蒸気量(SV-PV)/SVが正数のときのみを抽出し、攪拌度毎に平均化した値である。

攪拌度を1.3以上まで上げると、発生蒸気量の落ち込み度は減少し、燃焼状態の安定化に寄与することが確認できた。このことから、ごみの均質化の指標となる攪拌度の閾値は1.3とした。

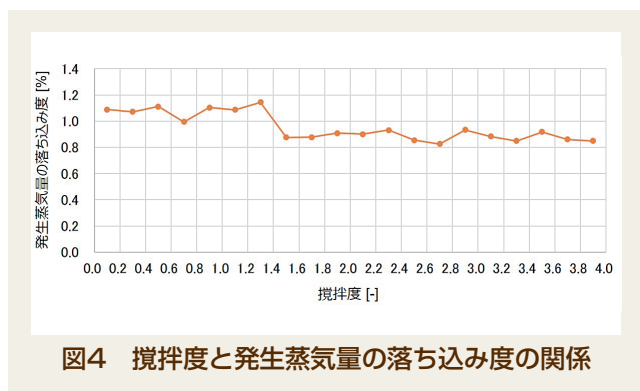


図4 攪拌度と発生蒸気量の落ち込み度の関係

3.2.2 3Dシステムの運用試験結果

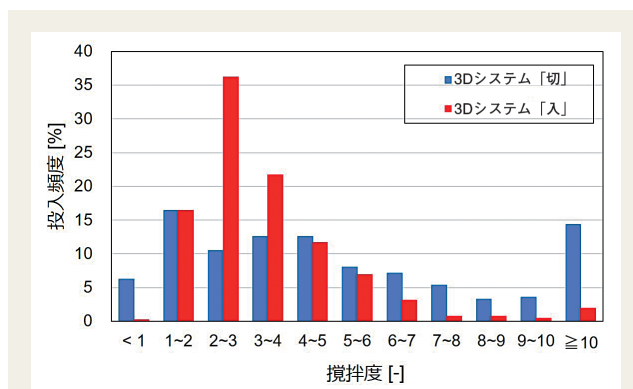
2020年12月18日～12月24日の7日間において、3Dシステムを杉並清掃工場で運用した(以下、入運転)。また、比較データは3Dシステムを運用していない期間とし、10月13日～10月19日の7日間とした(以下、切運転)。

運用試験期間中における、焼却炉に投入されたごみの攪拌度の評価結果と攪拌度の度数分布を表2と図5にそれぞれ示す。また、この期間中の発生蒸気量(PV-SV)/SVの標準偏差を表2に併記する。

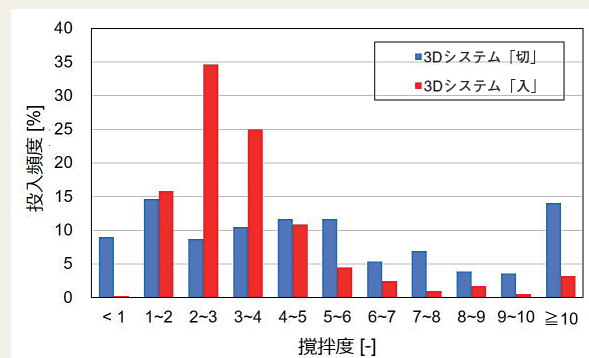
表2 投入ごみの攪拌度の評価結果

| | 3Dシステム 切運転 | | 3Dシステム 入運転 | |
|--------------------------------|---------------|-------|---------------|-------|
| | 10/13～10/19 | | 12/18～12/24 | |
| | 1号炉 | 2号炉 | 1号炉 | 2号炉 |
| 平均 [回] | 5.3 | 5.4 | 3.4 | 3.6 |
| 攪拌度 1.3 未満の投入頻度 [%] | 12.2 | 15.9 | 3.6 | 3.7 |
| 発生蒸気量 (PV-SV)/SV の [-] 標準偏差 | 0.022 | 0.024 | 0.017 | 0.017 |

3Dシステムを運用することにより、均質化されていないごみ(攪拌度1未満)や必要以上に攪拌されているごみ(攪拌度4以上)の投入頻度は減少した。特に、3Dシステム運用時における攪拌度1.3未満の投入頻度は、1号炉では12.2%から3.6%に、2号炉では15.9%から3.7%に低減



(a)1号炉



(b)2号炉

図5 3Dシステムの入切運転における焼却炉投入ごみの攪拌度の度数分布

でき、これに伴って発生蒸気量(PV-SV)/SVの標準偏差も小さくなり、3Dシステムは燃焼状態の安定化に大きく貢献することができた。さらに、夜間AI自動運転の「攪拌度1.3以上のごみを所定量確保できた時点でごみクレーンを休止」の効果によって、必要以上にごみが攪拌されることがなくなり、攪拌度の平均は低く抑えられた。

運用試験期間中のごみクレーンの稼働状況(1日平均)を表3に示す。

表3 ごみクレーンの稼働状況(1日平均)

| | 3Dシステム 切運転 | | 3Dシステム 入運転 | |
|--------------|---------------|------|---------------|-----|
| | 10/13～10/19 | | 12/18～12/24 | |
| | 1号炉 | 2号炉 | 1号炉 | 2号炉 |
| 2台運転時間 [min] | 109 | 0 | | |
| 総移動距離 [km] | 35.5 | 32.7 | | |
| 消費電力量 [kWh] | 714 | 662 | | |

昼間AI自動運転の「ごみクレーン1台による受入エリアからのごみ積み替え」が機能したことにより、3Dシステム運転中は1台のごみクレーンで攪拌・積み替えを対処することができた。また、夜間AI自動運転のごみクレーン休止の効果も加わり、総移動距離を8%低減でき、消費電力量を52 kWh/day削減できた。さらに、図6に示すように、昼間AI自動運転の「異質ごみのパラマキ運転」により、ごみバンカ内のごみを均質化することができた。

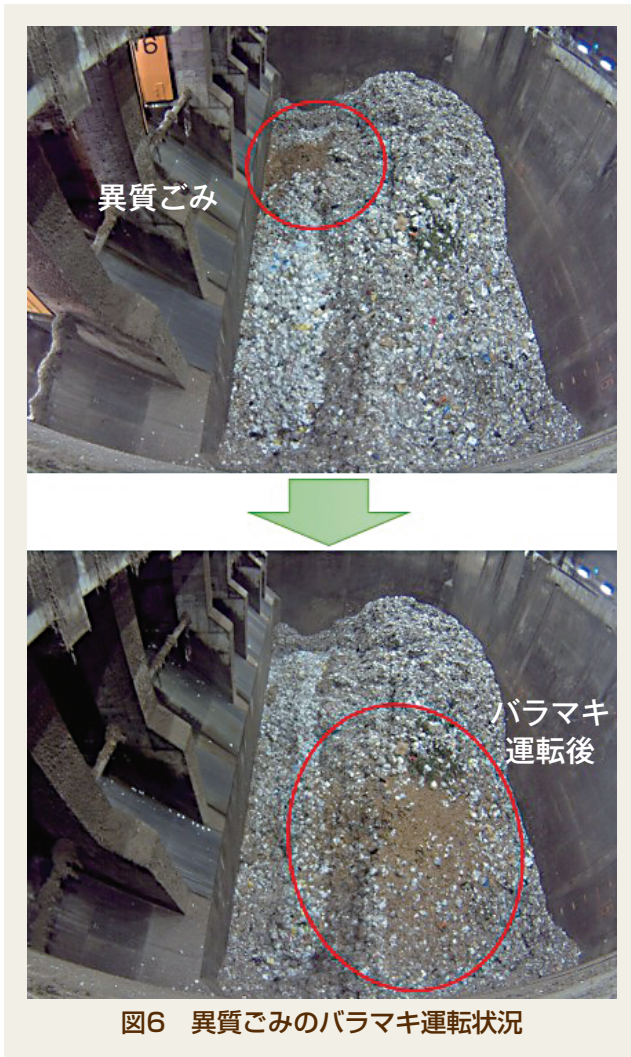


図6 異質ごみのバラマキ運転状況

4. 燃焼状態予測システム

4.1 システムの概要 燃焼状態予測システムの概要を図7に示す。

ごみ焼却発電施設では、発熱量の異なる様々な種類のごみが炉へ供給された場合でも安定した燃焼状態を継続することが必要である。そのため、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。このACCはごみ性状の変動に対応できるように調整されているが、稀にその制御範囲を逸脱する場合があります、そのときは経験を積んだベテラン運転員による手動介入が不可欠となる。

このような中、当社はACCのさらなる高度化に向けて、「正常維持モデル」と「異常回避モデル」という役割と特徴の異なる2つのAIモデルを開発した。これらのモデルは運転員の代わりに燃焼状態に応じてACCに自動介入するもので、クルマの自動運転に例えると、正常維持モデルは最適なハンドル操作と速度調整の役割を担い、異常回避モデルは将来の燃焼悪化を予測し、回避する緊急ブレーキの役割を果たしている。燃焼状態予測システムには、これら2つのAIモデルが組み込まれている。

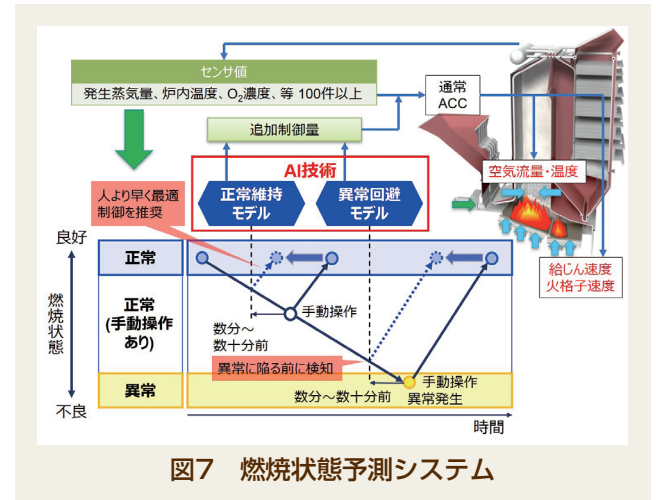


図7 燃焼状態予測システム

4.2 AIモデルの概要 AIモデルの作成に使用したセンサの一例を表4示す。モデルの作成には発生蒸気量や炉内温度、ごみ層厚など、焼却炉内の燃焼状態を表すセンサのプロセス値を用いた。

表4 使用センサの一例

発生蒸気量、炉出口O₂濃度、ストーカ空気流量、ごみ層厚、給じん速度、ストーカ速度、ストーカ温度、炉内温度

(1) **正常維持モデル** 正常維持モデルでは、複数のセンサの挙動から燃焼状態の良し悪しを1分毎に判断し、ストーカ上のごみ量が適正に保たれるように、ACCのごみ送り系の操作端に対して追加介入した。

(2) **異常回避モデル** 異常回避モデルでは、複数のセンサの挙動から数分~数十分後に燃焼悪化に陥る確率を30秒毎に予測し、燃焼悪化に陥らないように、ACCのごみ送り系や燃焼空気系の操作端に対して追加介入した。ここで、燃焼悪化とは表5に示す条件のいずれかに陥ることとして定義した。

表5 燃焼悪化の定義

- 1) 発生蒸気量の偏差が設定値に対して-10%未満
「 $(PV-SV)/SV < -10\%$ 」
- 2) 炉内温度が850℃未満
- 3) バーナを使用

4.3 試験結果

(1) **2019年度の実証試験** 2019年度のAIモデルによるACC介入試験は2号炉で行い、12月2日13時~12月20日16時(1回目試験)と1月7日10時~2月5日9時(2回目試験)の計47.1日間実施した。また、比較データはACCのみで運転した期間とし、10月26日~12月1日と12月21日~1月6日の計54.0日間とした。

2019年度の実証試験期間中の操炉状況を表6に示す。

ごみ投入量は262~295 t/day、ごみの低位発熱量は10.9~11.3 MJ/kg、発生蒸気量は42.4~47.1 t/h、炉出口温度は954~969℃であり、ACCのみで運転した12月21

日～1月6日は他の期間に比べて焼却負荷が低めで運転されていた。また、炉出口排ガスのO₂濃度は3.5～3.9%、BF出口排ガスのNO_x濃度は65～87 ppm、煙突入口排ガスのCO濃度は1.7～4.7 ppmであり、ACC+AIモデルで運転した1月7日～2月5日は他の期間に比べて、ごみの低位発熱量が高い日数が多かったため、NO_x濃度が低く、CO濃度が高くなる傾向にあった。

発生蒸気量(PV-SV)/SVの標準偏差はAIモデルの有無により違いはみられなかったが、ごみ層厚(PV-SV)の標準偏差はACC+AIモデルで運転した期間の方が小さくなった。これにより、AIモデルにはストーカ上のごみを適正に保たせる効果があることを確認できた。

手動介入回数と燃焼悪化時間の推移を図8に示す。ここで、手動介入回数の対象とした操作端は焼却炉のごみ送り系や燃焼空気系などの計25種である。

ACCのみで運転した期間の手動介入回数は8.3回/dayと12.8回/dayに対して、ACC+AIモデルで運転した期間では0.4回/dayと1.0回/dayになり、AIモデルにより93%

低減することができた。特に、ACC+AIモデルで運転した期間の内、1回目試験では17日間、2回目試験では19日間、手動介入を行うことなく、安定運転することができた。また、表5で定義した燃焼悪化の発生時間についても、ACCのみで運転した期間では5.7分/dayと5.4分/dayに対して、ACC+AIモデルで運転した期間では67%低減の2.2分/dayと1.4分/dayになり、AIモデルは燃焼悪化の回避に大きく貢献することができた。

(2) 2020年度の運用試験 2020年度は11月16日9時～12月25日17時の39.3日間、2号炉に導入したAIモデルを杉並清掃工場において運用した。また、比較データはACCのみで運転した期間とし、9月24日0時～11月4日9時、11月14日0時～11月16日9時および12月25日17時～12月27日10時の計45.5日間とした。

2020年度の運用試験期間中の操炉状況を表7に示す。

ACCのみでの運転期間とACC+AIモデルでの運転期間について、ごみ投入量は286 t/dayと285 t/day、ごみの低位発熱量は11.4 MJ/kgと11.7 MJ/kg、発生蒸気量は

表6 2019年度の実証試験期間中の操炉状況

| 期間 | ACCのみ | | ACC+AIモデル | |
|------------------------------------|------------|-----------|--------------------|----------------|
| | 10/26～12/1 | 12/21～1/6 | 12/2 13時～12/20 16時 | 1/7 10時～2/5 9時 |
| 日数 [day] | 37.0 | 17.0 | 18.1 | 29.0 |
| ごみ投入量 [t/day] | 295 | 262 | 294 | 286 |
| ごみ低位発熱量 [MJ/kg] | 11.0 | 11.2 | 10.9 | 11.3 |
| 発生蒸気量 [t/h] | 46.9 | 42.4 | 47.1 | 47.0 |
| 炉出口温度 [°C] | 962 | 954 | 965 | 969 |
| 炉出口 O ₂ 濃度 [%-dry] | 3.5 | 3.6 | 3.6 | 3.9 |
| BF 出口 NO _x 濃度 [ppm-dry] | 83 | 77 | 87 | 65 |
| 煙突 CO 濃度 [ppm-dry] | 2.1 | 1.7 | 1.8 | 4.7 |
| 発生蒸気量(PV-SV)/SVの標準偏差 [-] | 0.022 | 0.023 | 0.021 | 0.023 |
| ごみ層厚(PV-SV)の標準偏差 [Pa] | 81 | 83 | 67 | 55 |

表7 2020年度の運用試験期間中の操炉状況

| 期間 | ACCのみ | ACC+AIモデル |
|--|---|--------------------|
| | 9/24 0時～11/4 9時 11/14 0時～11/16 9時 12/25 17時～12/27 10時 | 11/16 9時～12/25 17時 |
| 日数 [day] | 45.5 | 39.3 |
| ごみ投入量 [t/day] | 286 | 285 |
| ごみ低位発熱量 [MJ/kg] | 11.4 | 11.7 |
| 発生蒸気量 [t/h] | 47.3 | 48.5 |
| 炉出口温度 [°C] | 962 | 973 |
| 炉出口 O ₂ 濃度 [%-dry] | 3.3 | 3.4 |
| BF 出口 NO _x 濃度 [ppm-dry] | 83 | 82 |
| 煙突 CO 濃度 [ppm-dry] | 3.4 | 3.7 |
| 発生蒸気量(PV-SV)/SVの標準偏差 ¹⁾ [-] | 0.022 | 0.020 |
| ごみ層厚(PV-SV)の標準偏差 [Pa] | 90 | 58 |

1) 11月21日に発生したホップブリッジの時間帯を除く。

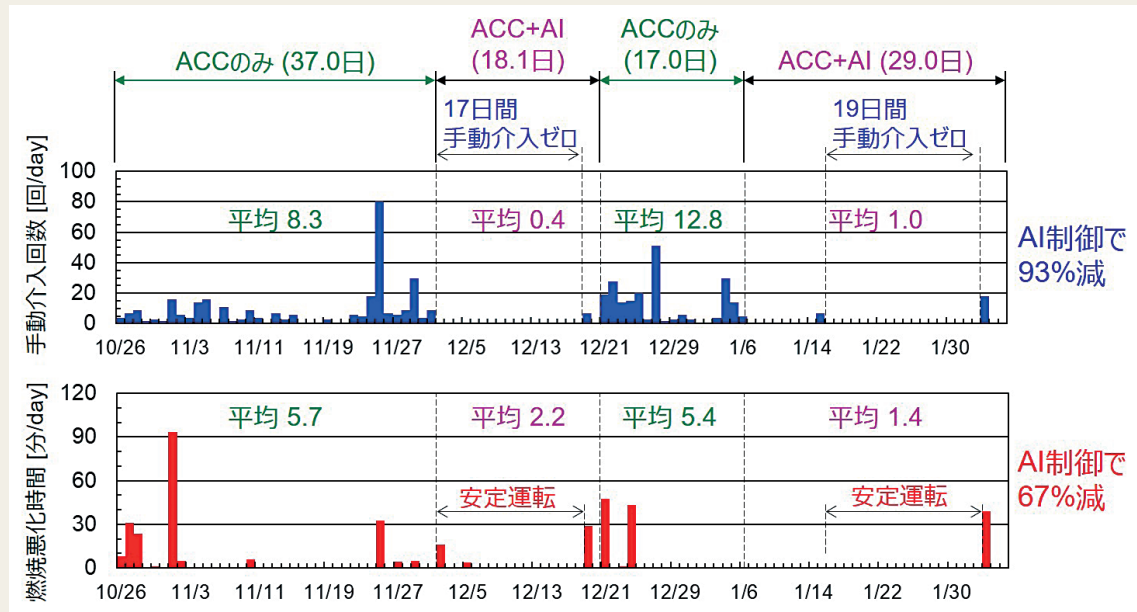


図8 2019年度の実証試験における手動介入回数と燃焼悪化時間の推移

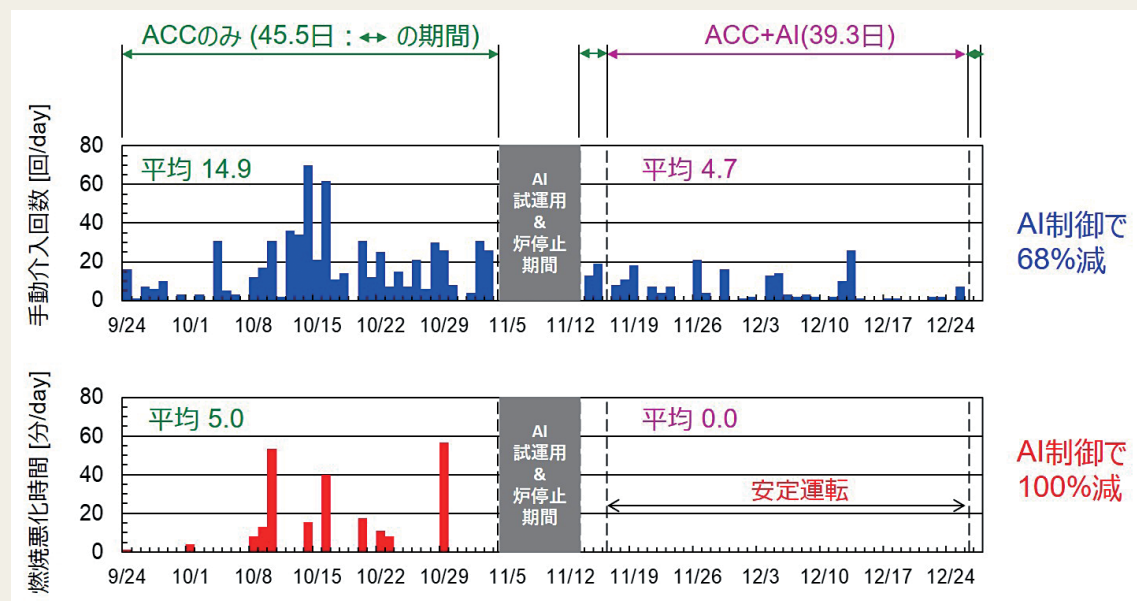


図9 2020年度の運用試験における手動介入回数と燃焼悪化時間

47.3 t/hと48.5 t/h、炉出口温度は962℃と973℃、炉出口排ガスの O_2 濃度は3.3%と3.4%、BF出口排ガスの NO_x 濃度は83 ppmと82 ppm、煙突入口排ガスのCO濃度は3.4 ppmと3.7 ppmであり、双方に違いはみられなかった。

一方、発生蒸気量 (PV-SV)/SVとごみ層厚 (PV-SV)の標準偏差については、いずれもACC+AIモデルで運転した期間の方が小さくなり、AIモデルには発生蒸気量の安定性向上とストーカ上のごみ量を適正に保たせる効果があることを確認した。

手動介入回数と燃焼悪化時間の推移を図9に示す。

ACCのみで運転した期間の手動介入回数は14.9回/dayに対して、ACC+AIモデルで運転した期間では4.7回/dayであり、AIモデルにより68%低減することができた。また、表5で定義した燃焼悪化の発生時間について

も、ACCのみで運転された期間では5.0分/dayに対して、ACC+AIモデルで運転した期間では、11月21日に発生したホッパブリッジの時間帯を除くと、燃焼悪化は39.3日間で一度も発生しなかった。このように、AIモデルは良好な燃焼状態を維持しながら、現場の省力化に大きく貢献できることを確認した。

5. 結言

当社は2017～2020年度にかけて、東京二十三区清掃一部事務組合の協力を得て「清掃工場における制御技術の高度化研究開発」に取り組み、この研究の中で杉並清掃工場において「ごみバンカ&ごみクレーン3Dシステム」と「燃焼状態予測システム」を試験的に運用した。

得られた成果を以下に示す。

- ① 3Dシステムを運用することにより、均質化されていないごみ（攪拌度1未満）や必要以上に攪拌されているごみ（攪拌度4以上）の投入頻度は減少し、燃焼状態の安定化に大きく貢献することができた。
- ② 3Dシステムの運用期間中、1台のごみクレーンで攪拌・積み替えを対処することができた。また、均質化されたごみを所定量確保できた時点でクレーンを休止させることにより、総移動距離を8%低減でき、消費電力量を52 kWh/day削減できた。さらに、異質ごみのバラマキ運転により、ごみバンカ内のごみを均質化することができた。
- ③ ACC+AIモデルで運転することにより、手動介入回数も燃焼悪化の発生時間も大幅に減少した。特に、2019年度の1回目試験では17日間、2回目試験では19日間、手動介入を行うことなく安定運転することができ、2020年度には1ヵ月以上も燃焼悪化に陥ることなく安定操炉することができた。
- ④ ACC+AIモデルで運転することにより、ストーカ上のごみ量は適正に保たれるようになり、発生蒸気量の安定性は向上した。

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、消費電力量の低減」に貢献できることを確認した。

謝辞

本研究において、多大なご協力をいただきました東京二十三区清掃一部事務組合に心よりお礼を申し上げます。

文責者

日立造船株式会社 環境事業本部
開発センター EfWプロジェクトグループ
西原智佳子
Tel : 06-6569-0196
E-mail : nishihara.c@hitachizosen.co.jp

AI Technology for Stable Furnace Operation and Labor Saving in Energy-from-Waste Plants

Abstract

From FY2017 to FY2020, Hitachi Zosen conducted advanced research and development of control technology at an incineration plant with the cooperation of the Clean Authority of Tokyo. In this project, we piloted our Pit & Crane 3D System and our Combustion State Prediction System at the Sugunami Incineration Plant. The Pit & Crane 3D System succeeded in reducing the total travel distance of the crane by 8%, and consequently, power consumption by 52 kWh/day, by suspending the crane when a predetermined amount of homogenized waste has been secured. The Combustion State Prediction System realized a continued state of stable operation with respect to steam volume and furnace temperature for more than one month, and on two occasions, fully automatic operation—defined by the absence of manual operation of a total of 25 operating elements such as feeder speed, grate speed, and primary air flow rate—for more than two weeks. From these results, we confirmed that the systems can contribute to even stabler furnace operation and labor saving in the operation management of Energy-from-Waste plants.

Authors

Chikako Nishihara (Hitachi Zosen Corporation, E-mail : nishihara.c@hitachizosen.co.jp)
Yohei Oura Toshikatsu Masuoka Yuya Kimura Hayato Yaji
Kazuhiko Minami Shinji Motoyama Terushi Hirabayashi Michitaka Furubayashi
Mamoru Kondo