

回転ストーカ炉の運転自動化

Automatic Operation of Rotary Combustor

工藤貴洋*・立見友幸*・梶原吉郎(技術士(衛生工学部門))*・奥住宣裕**・田代和樹***・生田直央***

Takahiro Kudo・Tomoyuki Tachimi・Yoshio Kajihara・Nobuhiro Okuzumi・Kazuki Tashiro・Naohisa Ikuta

当社の主要製品である回転ストーカ式焼却炉は、回転火格子による三次元的な攪拌によりごみの分布が一様に維持され、安定性に優れているという特長がある。この特長を生かしながら、熟練を要する燃焼や公害監視にかかわる運転員の操作ノウハウを自動制御に取込むことで、DCS操作の削減に取組み、連続25日間DCS手動介入操作なしでの安定運転を実現した。さらに、炉内の燃焼画像と炉内温度などの各種プロセス値とに基づいて燃焼状態を分類し、制御量を補正する改良型インテリジェント制御システムを開発し、燃焼安定性が約4割向上することを確認した。

The Rotary combustor, which is our major product, maintains a uniform distribution of waste through three-dimensional stirring combustion with a rotating grate, and has excellent combustion stability. By taking advantage of this feature and incorporating the operational know-how of operators involved in combustion and pollution monitoring, which require high skills, into the automatic control, we have worked to reduce the number of DCS (Distributed Control System) operations and achieved stable operation without manual intervention of the DCS for 25 consecutive days. In addition, we developed an improved intelligent control system that classifies the combustion state based on images of combustion from inside the furnace and various process values such as furnace temperature, and corrects the control amount. We were able to confirm that combustion stability is improved by about 40%.

Key Words :

回転ストーカ式焼却炉
運 転 自 動 化
操 業 安 定 化
インテリジェント制御

Rotary combustor
Automatic operation
Operational stabilization
Intelligent control

【セールスポイント】

- ・回転ストーカ式焼却炉は火格子の構造上、吹抜けなどによる変動が起こりにくく安定性に優れている。
- ・運転員の操作ノウハウを自動制御に取込むことで、DCS手動介入操作なしで長期間安定運転が可能である。

ま え が き

近年、少子高齢化や労働力不足の問題によって熟練したオペレーターの確保が難しくなりつつある状況において、操業安定化および省力化に向けたDCS (Distributed Control System, 分散形制御システム) 操作の自動化はその重要度を増している。

そこで当社では、熟練を要する燃焼や公害監視にかかわる運転員の操作ノウハウを自動制御に取込むことで、DCS操作の削減に取組んだ。その結果連

続25日間DCS手動介入操作なしでの運転を実現し、さらなる安定操業や省力化に貢献できることを確認した¹⁾。さらに、炉内の燃焼画像と炉内温度などの各種プロセス値とに基づいて燃焼状態を分類し、その燃焼状態に応じて制御量を補正することにより最適な燃焼状態に速やかに移行させる改良型インテリジェント制御システムを開発した。

まず1.項ではDCS操作自動化への取組みについて述べる。続いて2.項では実証試験の概要と試験

*環境エンジニアリング事業本部 環境プラント事業部 プラント技術部 機能開発室

**環境エンジニアリング事業本部 環境プラント事業部 アフターサービス部

***環境エンジニアリング事業本部 計電装技術部 開発室

結果について、3.項では改良型インテリジェント制御システムについて述べる。

1. DCS 操作自動化への取組み

DCS 操作自動化への課題抽出のため、運転員への操作ノウハウのヒアリング、ならびに、項目ごとの手動介入頻度を整理した。13日間（2023年6月20日～7月2日）の項目ごとの手動介入頻度を表1、各項目に応じた制御対象を表2に示す。これらの項目について、介入に踏み切った現象とそれに至った要因を項目毎に分析し、それらの予防操作と発現した際の操作を徹底的に自動化することで、手動介入操作の削減に取り組んだ。

表1 操作項目ごとの手動介入頻度

操作項目	頻度
燃焼空気に関する操作	54回/日
燃焼ガス温度に関する操作	18回/日
ごみ送りに関する操作	9回/日
給じんに関する操作	6回/日
排ガス処理に関する操作	1回/日
その他	6回/日

表2 各項目に対する制御対象

項目	制御対象
燃焼空気	・押込空気流量 ・二次空気流量
燃焼ガス温度 (二次燃焼室)	・循環ガス量
ごみ送り	・回転ストーカ式焼却炉回転数
給じん	・給じんプッシャ作動間隔
排ガス処理	・消石灰供給量

2. 実証試験

2.1 施設概要

実証試験施設の概要を表3に示す。炉形式は65t/日の回転ストーカ式焼却炉（以後、回転ストーカ炉）であり、この炉は優れた耐久性とごみ量やごみ質の変動にも対応可能な柔軟性を有している。本施設は

表3 施設概要

処理量	130 t/日（65 t/日×2炉）
炉形式	全連続運転式回転ストーカ炉
発電設備	蒸気タービン （発電量：2 420 kW）
燃焼ガス冷却設備	廃熱ボイラ（4 MPa×400℃）
排ガス処理設備	乾式処理 （消石灰、活性炭吹き込み） ろ過式集じん器、脱硝反応塔 排ガス再循環

回転ストーカ炉、後燃焼装置、二次燃焼室、減温塔、ろ過式集じん器、脱硝反応塔により構成されている。

2.2 回転ストーカ式焼却炉の特長

回転ストーカ炉の概要を図1に示す。炉の形状は円筒形であり、断面は図2に示すとおり円形を成している。火格子は、ボイラ水管とフィンで構成されている。フィンには空気孔が設けられており、焼却炉下部の風箱から空気孔を介して炉内のごみ層底部より燃焼空気が供給され、ストーカ燃焼を形成している。炉内では層厚の薄い端部を中心に連続的にごみが燃焼し、図2のように火炎が渦状に形成される。熱分解ガスは上部に抜けることなく、火炎と燃焼空気により形成される火炎渦で激しく攪拌され、軸方向に炉内を通過する過程で完全燃焼が行われる。また、炉内のごみは炉の回転で横方向へ移動し、持ち上げられたごみは反転しながら、斜め前方に転がり落ちる動きをする。横方向への移動があるため、ごみの分布は一樣に維持され、いわゆる吹抜けなどによる変動が起こりにくい。このように、回転ストーカ炉は構造上、燃焼がほぼ炉内で完結し、安定性に

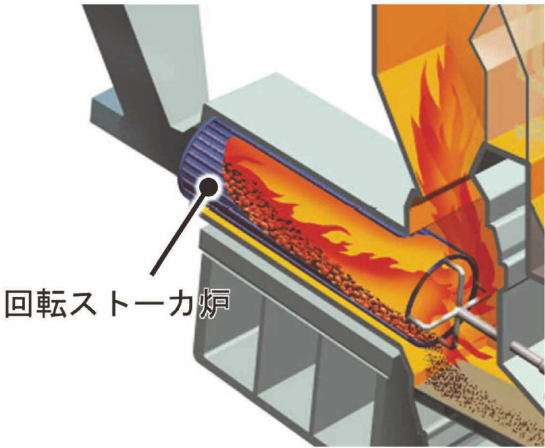


図1 回転ストーカ炉

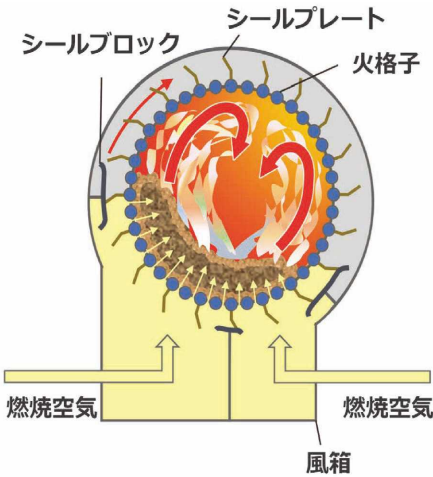


図2 回転ストーカ炉断面図

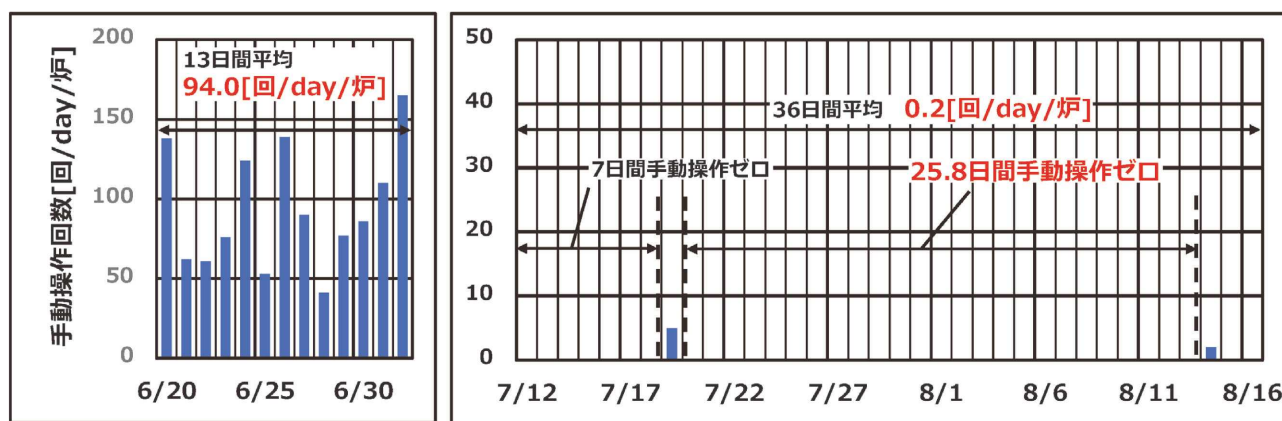


図3 (左) 従来制御時の手動介入回数, (右) 調整後の手動介入回数

優れていることから、比較的自動運転に適しているといえる。

2.3 操作ノウハウの自動制御への導入

運転員への操作ノウハウのヒアリングを基に、燃焼状態判断や手動介入操作のタイミングおよび操作量を制御ロジックに反映した。

自動制御の一例として、ごみ送り速度（回転ストローカ炉回転数）制御について説明する。ごみ送り速度制御は二次燃焼室温度が低下しないよう回転ストローカ炉回転数を自動調整しているが、従来制御では二次燃焼室温度の急低下時に制御が間に合わず、手動介入操作を行うことがあった。操作ノウハウのヒアリングから、二次燃焼室温度内の温度分布がある条件になると二次燃焼室温度が低下することが分かったため、制御ロジックへ反映し、制御タイミングの調整を行った。

そのほかの制御項目についても運転員の操作ノウハウを自動制御に取込んだ。

2.4 評価方法

運転操作の自動化の評価は、①手動介入回数の低減率、②燃焼管理温度の標準偏差、③主蒸気流量の変動係数にて行った。それぞれの算出方法を次に示す。

①手動介入回数の低減率

手動介入回数の低減率[%]

$$= \frac{\text{従来制御時の手動介入回数[回]} - \text{調整後の手動介入回数[回]}}{\text{従来制御時の手動介入回数[回]}} \times 100$$

②燃焼管理温度の標準偏差

$$\text{燃焼管理温度の標準偏差[℃]} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

n : データ数, x_i : 燃焼管理温度[℃],

$\bar{x}$: 燃焼管理温度の平均値[℃]

③主蒸気流量の変動係数

主蒸気流量の変動係数[%]

$$= \frac{\text{主蒸気流量の標準偏差[t/h]}}{\text{主蒸気流量の平均[t/h]}} \times 100$$

2.5 試験結果

従来制御（13日間：2023年6月20日～7月2日）と調整後（36日間：2023年7月12日～8月16日）の運転結果を示す。

①手動介入回数の低減率

従来制御と調整後の1炉1日ごとの手動介入回数を図3に示す。従来制御では1日平均して94.0回の手動操作があったが、調整後は1日平均して0.2回となり、手動介入回数の低減率は99.8%であった。また、試験期間中、最長25.8日間の手動介入ゼロを継続した。

②燃焼管理温度の標準偏差

従来制御と調整後の燃焼管理温度の標準偏差を図4に示す。燃焼管理温度は1時間平均とし、1日ごとの標準偏差を算出した。調整後は従来制御と比べて標準偏差が13.5℃から8.5℃と37.6%縮小しており、燃焼安定性が向上していることが確認できた。

③主蒸気流量の変動係数

従来制御と調整後の主蒸気流量の変動係数を図5に示す。調整後は従来制御と比べて5.0%から3.0%へと約4割縮小しており、主蒸気流量の変動を抑制できていることが確認できた。

3. 改良型インテリジェント制御システム

さらなる燃焼安定性向上のために、炉内の燃焼画像と炉内温度などの各種プロセス値に基づいて燃焼

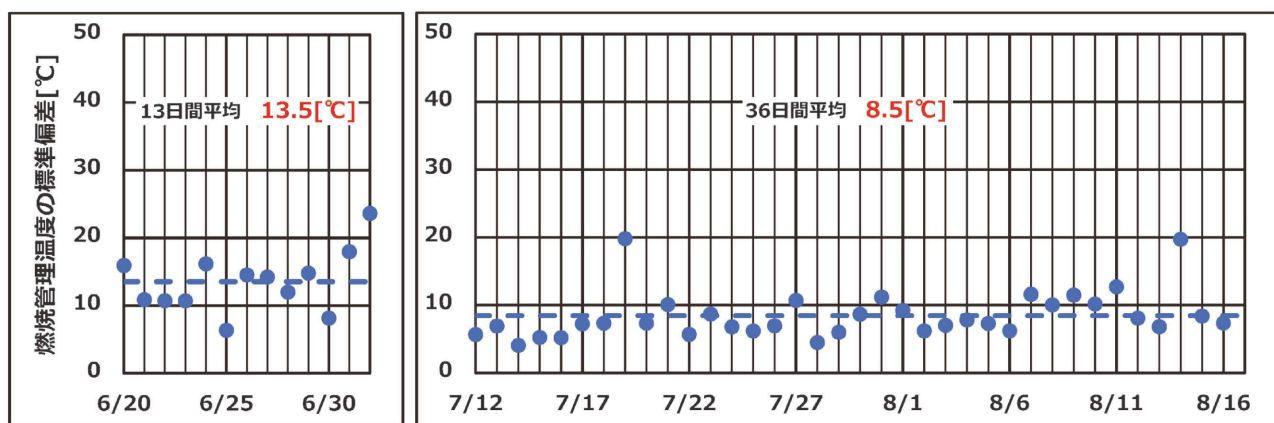


図4 (左) 従来制御時の燃焼管理温度の標準偏差, (右) 調整後の燃焼管理温度の標準偏差

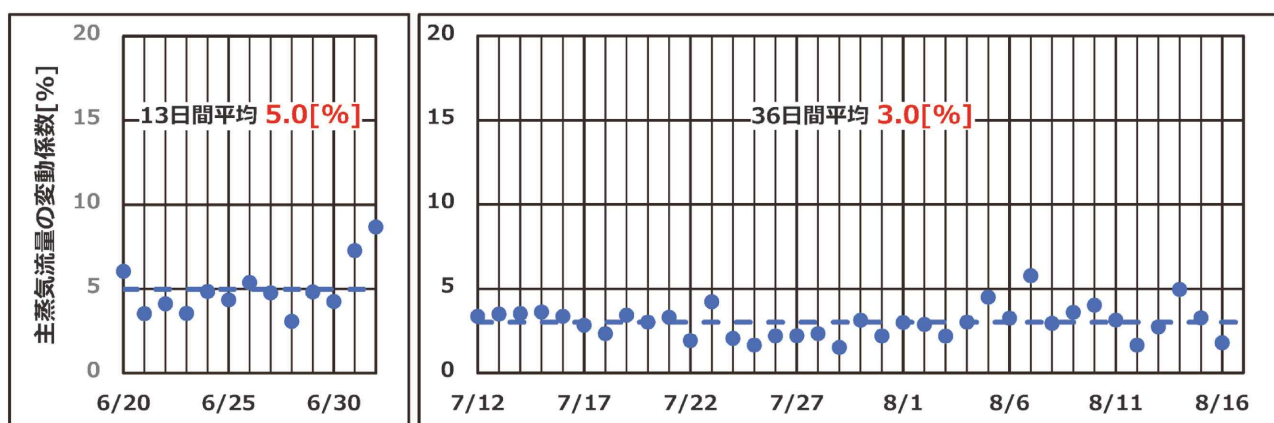


図5 (左) 従来制御時の主蒸気流量の変動係数, (右) 調整後の主蒸気流量の変動係数

状態を分類し、その燃焼状態に応じて制御量を補正することにより最適な燃焼状態に速やかに移行させる改良型インテリジェント制御システムを開発した。ここでは制御システムの概要とその効果について説明する。

3.1 改良型インテリジェント制御システムの概要

インテリジェント制御システムは、2000年に開発された多入力多出力の制御システム²⁾であり、各種プロセス値から燃焼パターンを9パターンに分類し、ファジィ制御を用いて先行的に各種制御量を同時に補正することにより、最適な燃焼状態に速やかに移行させ、排ガス性状の適正化、燃焼の安定化と蒸発量の安定化を両立させるものである。図6に燃焼状態の分類を示す。従来は燃焼状態の判別に回転ストーカ炉入口温度と風箱圧力から算出したごみ層厚を用いていたが、より直接的な検出を行うため、これらを回転ストーカ炉内の燃焼画像から判別した燃焼位置と炉内温度などの各種プロセス値から判別した後燃焼装置のごみ量の組み合わせから燃焼状態を分類するよう改良を行った。例えば、適切な燃焼

位置よりも上流側において燃焼し、後燃焼装置のごみ量が少ない状態であると分類された場合には(1の状態)、給じん量を増やし、ごみ送り速度(回転ストーカ炉回転数)を速くする。また、適切な燃焼位置よりも下流側において燃焼し、後燃焼装置のごみ量が多い状態であると分類された場合には(9の状態)、給じん量を減らし、ごみ送り速度(回転ストーカ炉回転数)を遅くする。これらの補正を連続的に行うことで燃焼位置および後燃焼装置のごみ量の変動を小さくすることにより、燃焼安定性を向上させることができる。

3.2 改良型インテリジェント制御システム導入の効果

回転ストーカ炉を有する表3とは別の施設に改良型インテリジェント制御を導入し、効果を確認した。導入前と導入後の燃焼管理温度の標準偏差を図7に示す。燃焼管理温度は1時間平均とし、1日ごとの標準偏差を算出した。導入後は導入前と比べて標準偏差が10.0°Cから6.1°Cと39.1%縮小しており、燃焼安定性が約4割向上していることが確認できた。

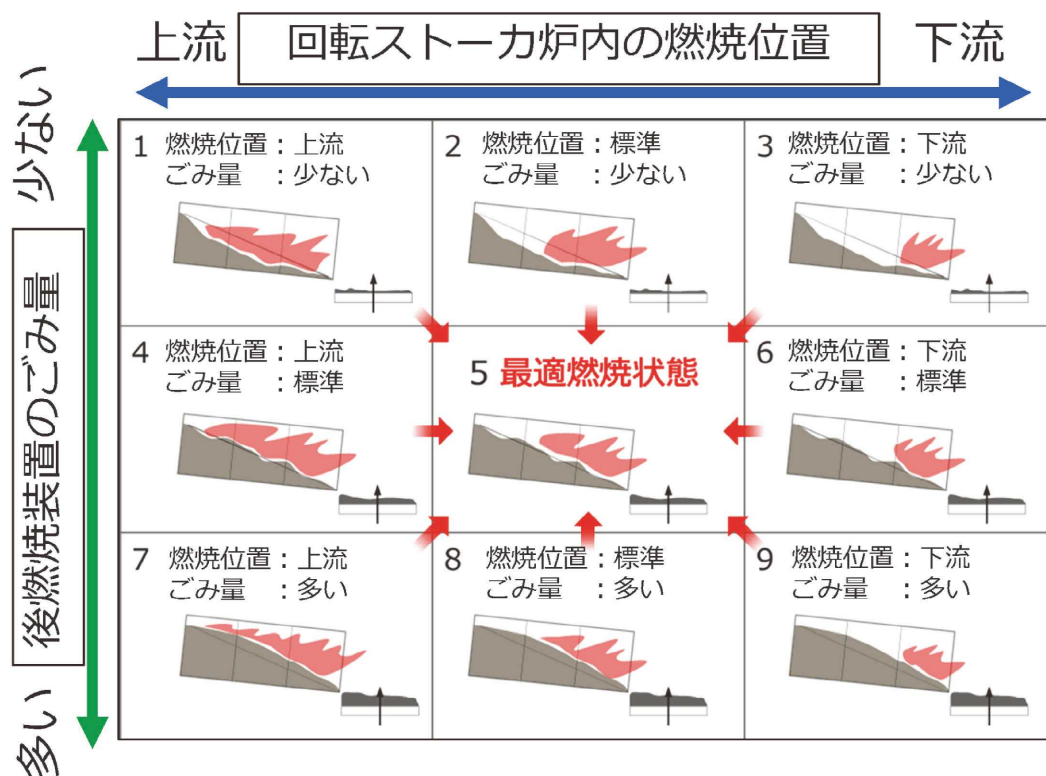


図6 改良型インテリジェント制御における燃烧状態の分類

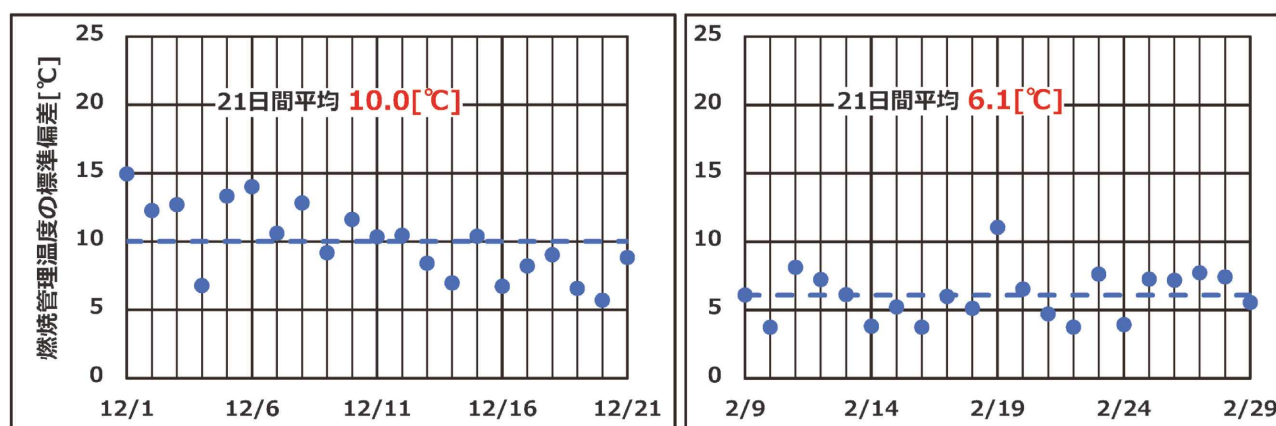


図7 (左) 改良型インテリジェント制御導入前の燃焼管理温度の標準偏差,
(右) 改良型インテリジェント制御導入後の燃焼管理温度の標準偏差

む す び

運転員の操作ノウハウを自動制御に取込むことで、DCS 操作の削減に取組んだ結果、連続25日間手動介入操作なしでの運転を実現し、燃焼管理温度、主蒸気流量の安定性が約4割向上していることを確認した。

さらに、炉内の燃焼画像と炉内温度などの各種プロセス値とに基づいて燃焼状態を分類する改良型インテリジェント制御システムを開発し、燃焼管理温度の安定性が約4割向上することを確認した。

その後、表3の施設においても改良型インテリジェント制御のさらなる改善を図り、燃焼安定性を向上させた。そして現在、手動介入操作なしで連続25日間以上の運転を継続中である。今後もさらなる安定操業や省力化に貢献していく所存である。

[参考文献]

- 1) 工藤ほか：ごみ焼却施設の運転自動化の取組み，第45回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集（2024），p52-54
- 2) 齋藤ほか：回転ストーカ炉のインテリジェント制御，石川島播磨技報，40巻，第6号（2000），p315-319