AIを活用したごみ焼却施設の運転支援システム

國政瑛大*

キーワード：人工知能(AI)、燃焼監視、遠隔監視システム

1. はじめに

ごみ焼却施設は地域のエネルギーセンターとしての機能が期待されており、発電施設として計画的で安定した運転が必要となっている。ごみ焼却施設は通常時、自動燃焼制御(ACC)により安定した燃焼状態を維持するが、不均質なごみの処理を対象としているため、ごみ質の急変により不安定な燃焼状態となった場合には、安定燃焼とするために燃焼状態に応じた手動運転操作が必要となる。ごみ質による燃焼状態の変化が時々刻々とプロセスデータや炉内燃焼映像に現れ、推移していく施設の運転状況において、ベテラン運転員は、保有するノウハウに基づき燃焼状態を監視し、必要に応じて最適な操作を実施して安定燃焼を維持している。このような施設運転データ(プロセスデータ、燃焼画像および手動運転操作履歴)は分散型制御システム(DCS)に蓄積されていたが、これまで十分に活用されてこなかった。

近年、情報技術の進歩により人工知能(AI)の利活用が幅広い産業分野の製品・サービスで拡大しつつあり、日々の生活や仕事の場面で人による認識や判断行為を補助する役割で実用化が進んでいる。人口の継続的減少が予測される我が国の状況から、ごみ焼却施設においてもAIを活用し、運転員の負担軽減やベテランの運転ノウハウをシステム化する検討が行われている。

2. 遠隔監視システムと運転支援システム

2.1 遠隔監視システム

当社では遠隔監視・支援システム「KEEPER」

を運用している。本システムは90年代に開発・運用してきた遠隔診断支援装置をベースに、IT技術の発展にあわせてシステム設計したものである。このシステム構成の概略を図1に示す。

使用する通信回路は専用回線(IP-VPN: Internet Protocol Virtual Private Network)を利用し、一般のインターネット回線から分離するとともに通信データを暗号化することでセキュリティを万全なものとしている。各施設には遠隔監視用PCを設置して別途データを処理させることにより、プラント制御装置と分離させ、制御装置の性能および安全性を確保している。当社内に設けたサポートセンターに、DBO(Design Build Operate)方式として受注し、運営を行う9施設(2020年3月現在)の運転データを収集し、当社ベテラン運転員やエンジニアにより運転状況の確認・診断を行っている。

図1 遠隔監視・支援システム(KEEPER)構成図

Combustion Image Recognition Technology Utilizing AI for WtE Plant

* 川崎重工業㈱エネルギー・環境プラントカンパニープラントディビジョン環境プラント総括部環境プラント部装置技術課 Akihiro KUNIMASA

2.2 運転支援システム

長期にわたるごみ焼却施設の運営では、施設の安心・安定運転とライフサイクルコスト（LCC）の抑制が重要である。また人口の継続的減少が予測される我が国の状況から、自動運転システムの拡充による運転員の負担軽減も今後重要性を増していくと考えられる。

ごみ焼却施設の運営における主要管理項目とその対応システムの関係を図2に示す。長期間にわたる運営に必要な項目は、これまでベテラン運転員のノウハウでサポートされていたものが多く、これらの項目をシステム化することで、充実した運転支援を提供することができる。現在、当社は施設の運営の各重点技術分野に対し、最新ICTを活用してシステム化、かつ相互に連携することによる統合的な運転支援システム（Smart WtE Operation[®]構想）の開発を進めている。この統合的な運転支援システムは自動燃焼制御システム（Smart ACC）、クレーン最適運用システム、AIによる操作支援システム（統合的な運転支援システムとは区別して、以下、AI活用の運転支援システムと称す）、最適運転計画システムの各要素システムで構成される。これらのシステムが相互に連携・連動することで、施設の運営に必要となる、より広範囲の運転支援が提供可能となる。

3. AI活用の運転支援システム

3.1 システムの概要

当社のAI活用の運転支援システム（図2太枠部）は、燃焼の安定化と運転員負担低減を目的に、焼却炉の運転において実施される手動運転操作をAI学習の適用範囲とし、最適な操作として運転員にレコメンド出力するシステムとして開発したものである。東京工業大学発のベンチャー企業であり独自のAI技術を保有するSOINN（株）（以下、SOINN）と協力し、ごみ焼却施設向けに開発したAIを活用したシステムである。SOINNのAI技術は、燃焼調整操作が必要となる燃焼状態を炉内監視用ITV映像及びプロセス値から識別するとともに、状況の変化に合わせて自ら学習し、性能を保つ機能をもつ。図3はAI活用の運転支援システム概要図である。AIは入力された施設運転データ（プロセスデータ、燃焼映像および手動運転操作履歴）を関連付けて操作を学習し、そして過去に手動運転操作が行われた運転状況と類似していると判断した場合に、その操作レコメンドを自動出力するものである。学習の過程においてはSOINNのAIが持つニューラルネットワーク情報処理（アルゴリズム）により多量のデータであってもより強い関連性を最適化して学習する。

3.2 システムの運用

当社はベテラン運転員の手動運転操作を含む施

図2 ごみ焼却施設の運営における主要管理項目とその対応システムの関係

図3 AI活用の運転支援システムの概要図

設運転データにAIを活用した運転操作レコメンドシステム(以下:本システム)を開発した。2018年8月より松阪市クリーンセンター(施設概要:表1)に本システムを実装し、システムの運用を開始している¹⁾。

松阪市クリーンセンターにおけるAI活用の運転支援システム構成を図4に示す。本システムでは施設の運転データであるDCSのプロセスデータおよび運転操作履歴, ITVの燃焼映像(写真1)が連続的にAI運転支援システムに入力され, AI

図4 AI活用の運転支援システム構成図

写真1 炉内監視用 ITV 映像

による演算を行い、燃焼状態に基づくレコメンドをリアルタイムで出力している。また本システムは遠隔監視・支援システム(KEEPER)と接続し、当社内の遠隔監視室で出力確認やデータ抽出、データ収集による学習期間のアップデートが可能となっている。

本システムが対象とする操作は焼却炉の燃焼調整運転に関係する10操作端(図5)を対象とし、増減の操作方向と合わせ計20操作である。過去にベテラン運転員が手動運転操作した運転状態と現在の状態が類似すると判定した場合、該当する操作を運転員に定性的な操作情報(以下、操作レコメンド)を提供する。各操作レコメンドはプラント画面上(図6)のレコメンド状態表示により確認可能となっている。

当社のAI活用の運転支援システムは、運転員の実操作を教師データとし、過去運転実績に基づく具体的な操作レコメンドを発信することが特徴である。そのため、運転経験の少ない運転員に対してはベテラン運転員の技術的ノウハウに基づき操作

図5 焼却炉の計10操作端

プラント画面

図6 操作レコメンド画面仕様

方法を支援・訓練するシステムとしても活用できる。

4. AI 運転支援システムの評価

4.1 評価方法

操作レコメンドの妥当性を評価するため、AI 技術を用いた認識システムで一般的に用いられる指標の ROC 曲線(Receiver Operating Characteristic Curve)と AUC (Area Under the Curve) で運用結果を評価した。

ROC 曲線は本システムのレコメンド結果と実操作の結果を表2の分類結果の定義に基づき True Positive Rate (TPR), False Positive Rate (FPR) でプロットしたグラフである。ROC 曲線

は原点 (TPR, FPR = 0, 0) と右上の点 (TPR, FPR = 1, 1) を結ぶ曲線であり、左上の点 (TPR, FPR = 1, 0) に近い曲線ほど判定性能が良いことを示す (図7)。また直線の場合はランダム同等の性能を示す。ROC 曲線で示された性能値は AUC として図7斜線部のように ROC 曲線下の面積値で表され、1～0 の範囲をとる数値データとして評価可能である。AUC の数値は表3のよ

図7 ROC 曲線および AUC の説明図

表2 分類結果の定義

		レコメンド結果	
		出力あり (Positive)	出力なし (Negative)
運転実績	実操作あり	True Positive (TP: 真陽性)	False Negative (FN: 偽陰性)
	実操作なし	False Positive (FP: 偽陽性)	True Negative (TN: 真陰性)

① True Positive Rate (真陽性率) = $TP / (TP + FN)$

② False Positive Rate (偽陽性率) = $FP / (FP + TN)$

表3 AUC 結果の評価

評価	AUC
高	0.8以上
中	0.6-0.8未満
低	0.6未満

図8 各操作における ROC 曲線

うに「高」・「中」・「低」3つのクラスに分け、段階的な指標で評価を行った。

4.2 システム運用の評価結果

試験期間（2018年10月1日～2019年2月15日）の1号炉のROC曲線(図8)およびAUCの評価結果を表4に示す。全操作のAUC平均値は0.75となり、操作ごとのAUC評価は、8操作(40%)が「高」、10操作(50%)が「中」、2操作(10%)が「低」であった。

操作種類ごとの結果では、ストーカ操作(各ストーカ停止時間操作)は計6操作のうち5操作で「高」、AUC平均値は0.83となり、高いAUC評価が得られた。また燃焼空気操作の後燃焼ストーカ空気操作も増・減操作ともにAUC 0.8以上となり、高いAUCであった。給じん操作はAUC平均値0.70であったが、期間中の操作回数が少なく、引き続き学習データを追加する必要があると考えられた。

5. おわりに

ICT分野の進歩はさまざまな分野や業務に活用され始めており、将来的に人による認識や判断行為を補助・代替する役割を担うと考えられる。ごみ焼却施設においても、燃焼の安定化に必要であったベテラン運転員のノウハウがシステムで提供されることで、だれもが安定した運転を実現することができる。本稿で紹介したAI活用の運転支援システムの運用結果では90%の操作がAUCの評価で「中」または「高」の評価を得ている。

安全・安心かつ経済的なごみ処理施設の運営に

表4 各操作における AUC 結果

			AUC
全操作平均			0.75
給じん操作	給じん装置	増	0.54
	ストローク	減	0.72
	給じん装置	増	0.8
	停止時間設定	減	0.74
ストーカ操作	乾燥ストーカ	増	0.81
	停止時間設定	減	0.71
	燃焼ストーカ	増	0.81
	停止時間設定	減	0.85
	後燃焼ストーカ	増	0.95
	停止時間設定	減	0.88
燃焼空気操作	乾燥ストーカ	増	0.55
	空気流量	減	0.74
	燃焼ストーカ	増	0.72
	空気流量(1)	減	0.76
	燃焼ストーカ	増	0.68
	空気流量(2)	減	0.64
	後燃ストーカ	増	0.86
	空気流量	減	0.89
	燃焼用空気温度	増	0.7
		減	0.67

不可欠なベテラン運転員のノウハウをすべての施設で提供することが可能となるよう、当社は本技術の導入に向けて今後も取組んでいく。

参考文献

- 1) 國政瑛大ら；人工知能（AI）を活用した運転支援システムの開発とその評価，第40回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集，Ⅱ-6-106，p.319-321，2019。