

日本産業機械工業会会長賞
**「ごみピット 3Dシステムを活用した
 ごみクレーン A I 自動運転装置」**
 カナデビア株式会社

1. 装置の詳細説明

(1) 従来のごみクレーン自動運転装置

ごみ焼却発電施設で稼働するごみクレーンは、走行と横行、巻上の駆動装置を備えた3軸制御の天井クレーンで、開閉動作によりごみを掴むバケットを上昇・下降することで、搬入されたごみを移送し、焼却炉にごみを投入する設備である（図表1）。焼却炉は24時間連続運転であり、クレーンオペレータの負担は大きく、ごみクレーンの自動運転化の要求は高い。当社では、ごみクレーン自動運転装置を開発し1981年に1号機を納入して以降、国内に110装置以上を納入してきた。

ごみクレーン自動運転装置は、ごみクレーンの各軸の位置とバケットで掴んだごみの重量などを認識し、バケットが振れないように各軸の速度を制御しながら目標位置までごみを移送する。従来のごみクレーン自動運転装置の構成図を図表2に示す。

従来の自動運転では、図表3に示すようにバケットの大きさにより、ごみピットをマトリクス上に分割したブロック単位（番地）で管理しており、ブロックの集合である運転エリアを任意に設定することができる。図表3の例では、積替元エリア（D1-D12）から積替先エリア（A7-B12）へごみの移送を行いながら、焼却炉ホップのごみが少なくなると投入エリア（A1-B6）のごみを掴んで焼却炉への投入を自動運転で実行する。

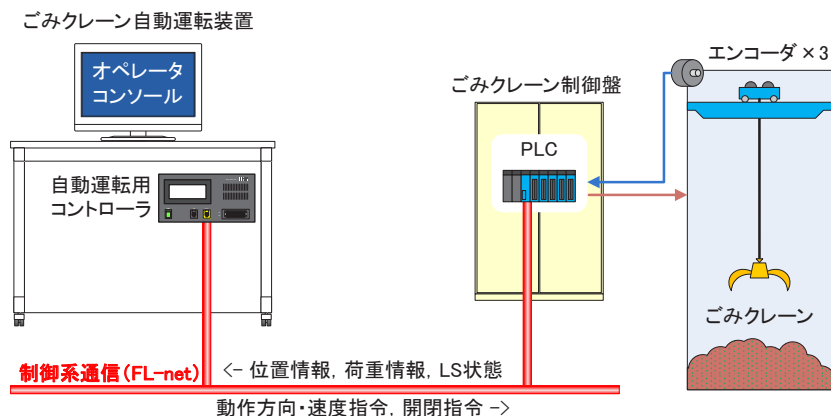
また、バケットがごみに着地すると、重量の変化とワイヤロープの繰り出し長から該当番地のごみの堆積高さ（ごみレベル）を計測しており、ごみピット全域のごみレベルを把握している。



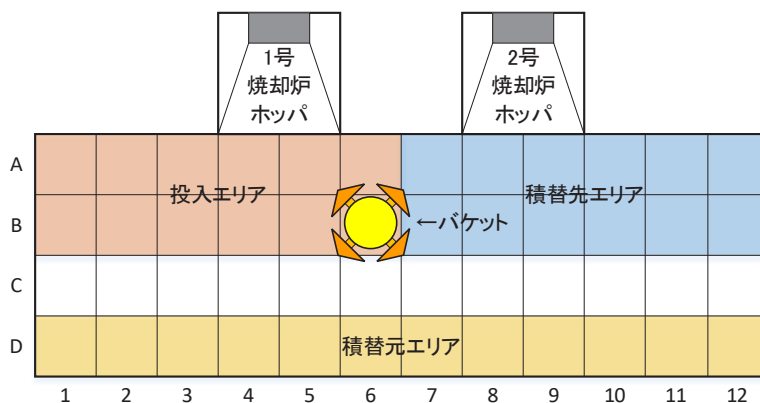
図表 1 ごみ焼却発電施設のごみクレーン

図表 4 に自動運転で把握しているごみレベルの例を示す。自動運転でごみを掴む際は、エリア内で最もごみレベルの高い番地を選択し、積替先エリアにごみを投下する際は、エリア内で最もごみレベルの低い番地を選択することで、できるだけごみレベルを平坦にし、自動運転でも安定してごみを掴める状態を維持している。

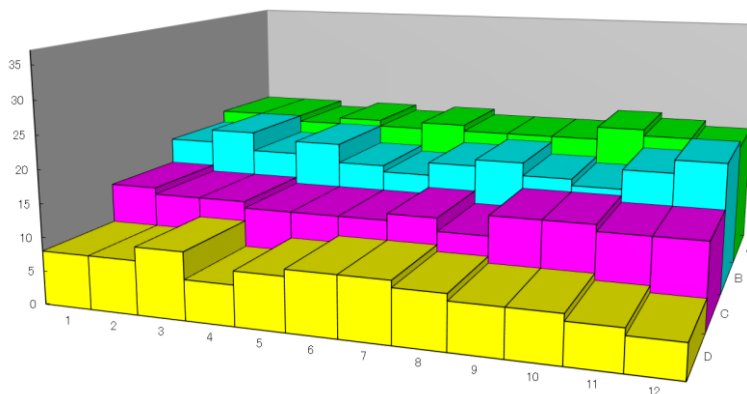
以上のように、ごみクレーン自動運転装置は、ごみピットの状況により、オペレータが適宜運転エリアを設定・変更することで、ごみピットを適正に維持し、焼却炉に安定してごみを供給する装置である。



図表 2 従来のごみクレーン自動運転装置の構成図



図表 3 ごみピットの番地、運転エリア



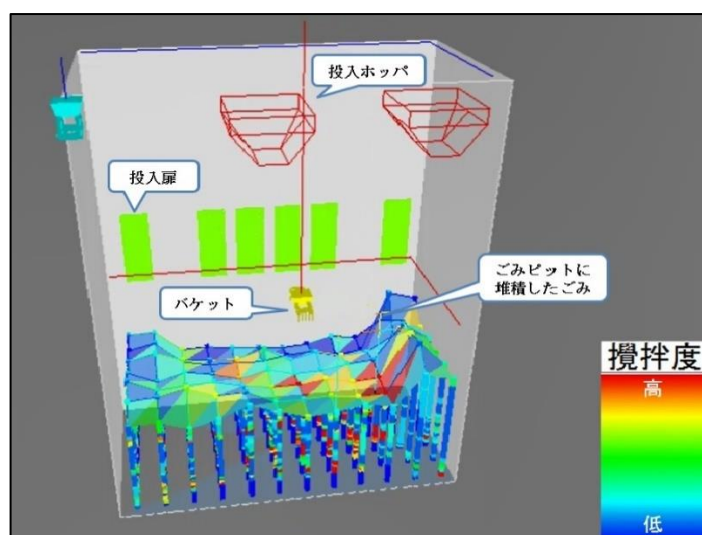
図表 4 ごみピットレベル

(2) ごみピット 3D システム

ごみ焼却発電施設において良好な燃焼状態を維持し、発電量を安定させるためには、前段のごみピット内でごみを十分に攪拌し、ごみ性状を均質化しておくことが重要である。

ごみピット3Dシステムは、ごみ投入扉からの搬入、ごみクレーン動作、及びごみレベルの変化からごみピット内のごみの移動をトレースし、ごみピット全域のごみ情報（攪拌度、搬入日別含有率）をマッピングして管理するもので、図表5に示すように三次元のごみピット情報を可視化できるシステムである。

ここで、攪拌度はごみの混ざり具合を示す独自の指標であり、ごみクレーンによるごみの掴み、投下によって値を加算し、その度合いは投下高さなどにより変動する。また一定期間移動しないごみは攪拌度の値を減算することで、圧密され燃焼し難いごみに変化する様子を再現している。



図表 5-1 ごみピット 3D システムの表示画面（攪拌度表示）



図表 5-2 ごみピット 3D システムの表示画面（搬入日別含有率表示）

熟練したオペレータはごみの色や細かさなどを見て、表層部のごみの状態を把握しているが、4班2交代で運転しているため、目視できない深層部を含めたごみピット全域の情報を次の班へ伝達するのは困難である。ごみピット3Dシステムの特長は、オペレータが目視可能な堆積したごみの表層部だけでなく、深層部までごみ情報を可視化できる点である。

しかし、攪拌度や搬入日別含有率の計算は、ごみレベルの変化にも依存しており、ごみレベルの検出精度が要求される。前述のようにバケットがごみに着地した際にはワイヤロープの繰り出し長から計測するが、ピット内にごみを投下した場合や、投入扉からごみが搬入された場合は、ごみの重量や投入扉の在車信号を元にごみレベルを推定している。

ごみレベルの推定誤差による影響を少なくするため、ごみピット3Dシステムのオプション機能として、LiDAR (Light Detection And Ranging) によるごみレベル計測が選択可能である。ごみピット上部のホップステージに設置した2台のLiDARにより、ごみピット全域のごみの堆積状態を一定周期で計測し、計測した正確なごみレベルの変化を元に攪拌度や搬入日別含有率を算出する。図表6にLiDARで計測したごみピットの堆積データを示す。

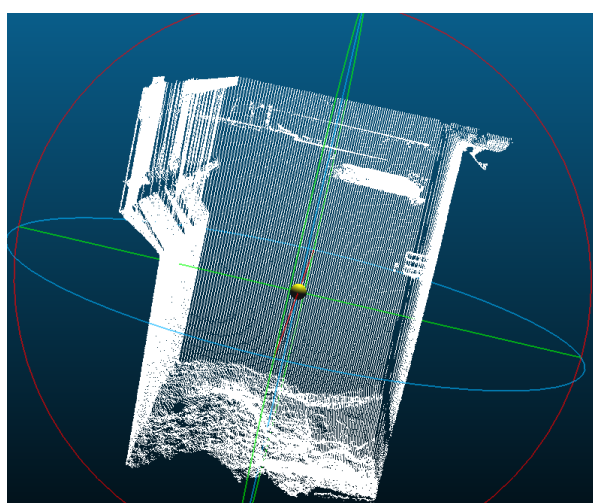
(3) ごみクレーンAI自動運転装置

ピット全域のごみ情報を活用することで、より安定した効率のよい自動運転を実現するため、ごみピット3Dシステムを核に、AIアルゴリズムを実装してごみクレーンAI自動運転装置を開発した。

従来のごみクレーン自動運転装置は、オペレータが設定した運転エリアに従い、ごみレベルによって掴み番地、投下番地を決定していたが、ごみクレーンAI自動運転装置は、次の機能によりごみクレーンの動作を決定する。

1) AI投入機能

ごみピット3Dシステムで管理しているごみピット情報に基づき、攪拌度の高いごみを優先的に投入することで安定燃焼に寄与できる。しかし、攪拌度の指標のみで運転を継続するとごみピットのごみレベルが偏ったり、段差ができたりすることで、ごみを掴み難い状態になり、供給量が安定しなくなる。



図表6 LiDARで計測したごみピットの堆積データ

AI投入機能は供給量を安定させるために、攪拌度とごみレベルの二つの指標から投入に最適なごみのつかみ位置をファジイ推論で決定し、ごみクレーン自動運転装置に指令する機能である。投入ごみの攪拌度の急激な変化を抑えながら、運転しやすいピットを維持することができる。

2) 昼間AI自動運転機能

一般的な昼間のごみクレーンの運転では、搬入ごみがプラットホームに溢れないよう、搬入ごみが堆積するごみ投入扉下のエリア（受入エリア）からごみの積替えが必要である。燃焼状態に影響を及ぼす異質ごみ（剪定ごみ、破碎ごみ、汚泥など）が纏まって搬入された場合には、ごみピット内の広い範囲にばら撒いて攪拌している。

昼間AI自動運転では、上述した運転を自動で行うために、ごみ搬入時間帯には搬入車両をできる限り妨げないよう、ごみ投入扉からのごみ搬入とごみクレーンの干渉が最小限になるような掴み位置に変更して運転している。また、ごみピット上方に監視カメラを設置して、映像を解析することで異質ごみの搬入を検出し、検出された異質ごみの位置と優先的なばら撒き運転をごみクレーンに自動的に指令する機能である。図表7は異質ごみ（破碎ごみ）の搬入を検出してばら撒いた際のごみピットの状態である。

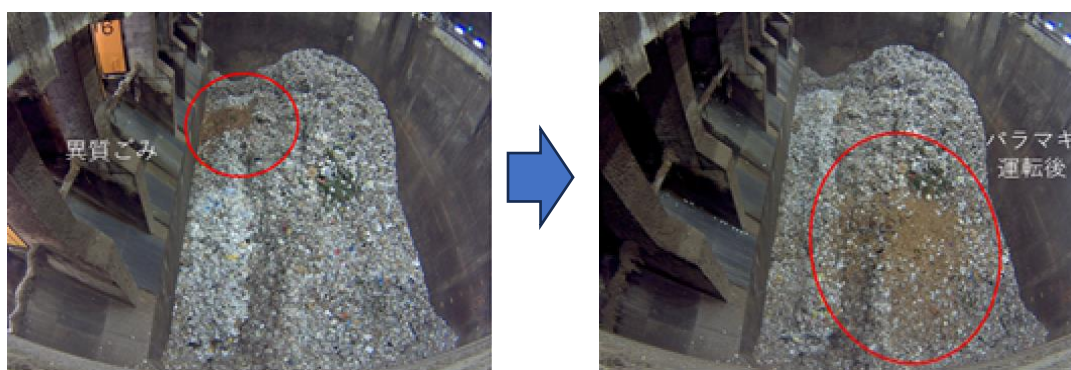
昼間の作業は多岐に渡るため、マルチエージェントを応用したアルゴリズムにより、どの作業を優先して実行するかを決定している。

3) 夜間AI自動運転機能

一般的な夜間のごみクレーンの運転では、翌日に焼却炉へ供給するごみの攪拌・積上げと、翌日の搬入に備えて受入エリアのごみを掘下げる。

夜間AI自動運転は、昼間AI自動運転で積替えたごみと受入エリアのごみを混合しながら（攪拌度を上げながら）積替えることで翌日のごみを確保するため、遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm）を用いて最適な積替え手順を決定し、ごみクレーンに自動的に指令する機能である。最適な積替え手順を演算する際は、次のパラメータを入力する。

- ① 翌日に焼却炉へ供給するごみの量（作りこむごみの目標体積）
- ② 焼却に適したごみの攪拌度（作りこむごみの目標攪拌度）
- ③ 翌日朝までに掘下げる受入エリアのごみレベル（目標掘下げ高さ）



図表7 異質ごみ（破碎ごみ）を検出してばら撒いた際の状態

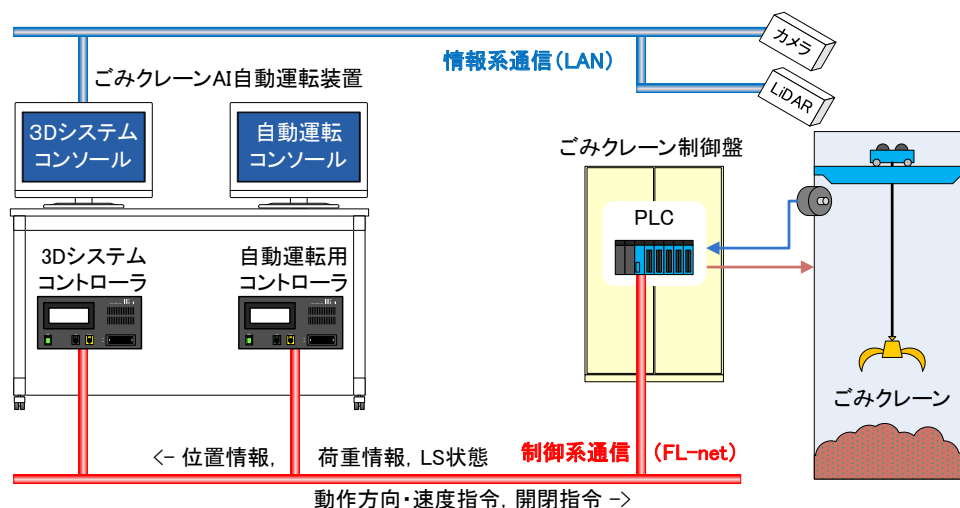
上記の入力した目標値を全て達成した時点でごみクレーンを自動的に休止させる（焼却炉への投入のみ継続）ことで、無駄な運転を少なくし省エネ及び消耗部品の劣化抑制にも寄与する。

（４）装置の構成

図表8にごみピット3DシステムとごみクレーンAI自動運転システムの構成図を、図表9に外観を示す。

従来のごみクレーン自動運転装置では、自動運転用コントローラが内部に記憶しているごみレベル情報を元に自動運転の作業と行先（番地）を決定するが、ごみクレーンAI自動運転装置では、自動運転用コントローラが作業と行先（番地）を3Dシステムコントローラに問い合わせ、3Dシステムコントローラの指示のとおりにごみクレーンを制御する。

なお、ごみクレーンAI自動運転装置では、従来の自動運転モードとAI自動運転モードを任意に切替できる。



図表8 ごみピット 3D システムとごみクレーン AI 自動運転装置の構成図



図表9 ごみピット 3D システムとごみクレーン AI 自動運転装置の外観

2. 開発経緯

(1) 開発経緯

ごみ焼却発電施設における燃焼の安定化には、ごみクレーンによるごみの均質化が最も効果的であるが、ごみクレーン操作とごみピット運用は、熟練運転員の経験に委ねるところが大きい。

当社では、1980年代からごみクレーン自動運転装置を納入してきたが、近年の計算機の性能向上により、ビッグデータやAIアルゴリズムの実装が可能になった。これらを活用し、熟練運転員の経験に代わって、ごみピット運用の自動化とごみクレーン自動制御の高度化を目指した。

以下に開発経緯を示す。

2013～2014 年度	ごみピット管理指標（攪拌度）の調査・開発
2015～2016 年度	ごみピット 3D システムの開発・実証
2017～2018 年度	AI 投入機能の開発、夜間 AI 自動運転機能の開発
2019～2020 年度	昼間 AI 自動運転機能の開発、ごみクレーン AI 自動運転の実証 第 1 号機納入
2021～2023 年度	ごみクレーン AI 自動運転の長期運用・応用実証

(2) 共同開発

本装置は、カナデビア株式会社、東京二十三区清掃一部事務組合が共同で開発を行った。それぞれが担当した開発の内容は、次のとおりである。

- ・カナデビア株式会社：
実証試験による AI 自動運転技術の確立及び本装置の設計・設置・試運転、データ収集・分析、本装置の改善
- ・東京二十三区清掃一部事務組合：
実証試験期間の施設運転、本装置・新技術の評価、課題の抽出など技術開発に有益な情報の提供

(3) 技術導入

なし

3. 独創性

ごみピット内のごみの状態を検出するため、ごみピット上部からのカメラ画像を解析する手法は多く研究されているが、検出範囲は撮影可能なごみの表層部に限られる。

ごみピット 3D システムで管理する攪拌度は独自に開発した指標で、ごみの燃焼のしやすさを数値化し、ごみピットの深層部までマッピングしたものである。

さらに、夜間 AI 自動運転機能では、燃焼に適した攪拌度のごみを必要量だけ生成するために、遺伝的アルゴリズムを用いて最適な積替え手順を決定しており、他に例がない。

4. 特許の有無

次のとおり、特許7件を取得済み。

特許番号：第6381395号 / 名称：ごみピットにおけるごみ攪拌状態の表示装置

特許番号：第6632490号 / 名称：計算装置、計算装置の制御方法、制御プログラム、および記録媒体

特許番号：第6651309号 / 名称：ごみクレーン運転装置

特許番号：第6659474号 / 名称：クレーン制御装置、クレーン制御装置の制御方法、制御プログラム、および記録媒体

特許番号：第6714437号 / 名称：ごみクレーン運転装置およびごみクレーン運転方法

特許番号：第6812311号 / 名称：情報処理装置、情報処理方法、および制御プログラム

特許番号：第7025520号 / 名称：情報処理装置、情報処理方法、および制御プログラム

5. 性能

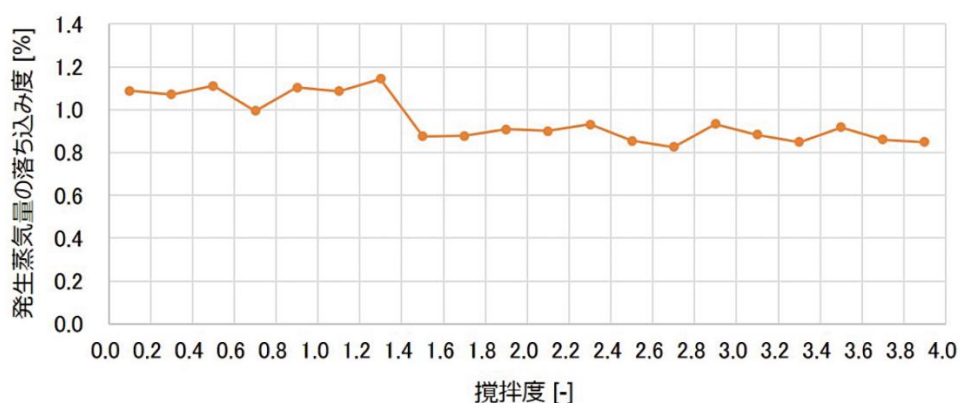
(1) 燃焼状態の安定化

実証試験において、本装置を連続運転した結果を報告する。まず、実証施設(300t/日×2炉)において、最適な攪拌度を調査した。攪拌度と発生蒸気量の落ち込み度の関係を図表10に示す。なお、ここでの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。

攪拌度が1.4以上のとき、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。

2020年12月18日～12月24日の7日間において、本装置を実証施設で運用した(以下、入運転)。また、比較データは本装置を運用していない期間とし、同年10月13日～10月19日の7日間とした(以下、切運転)。

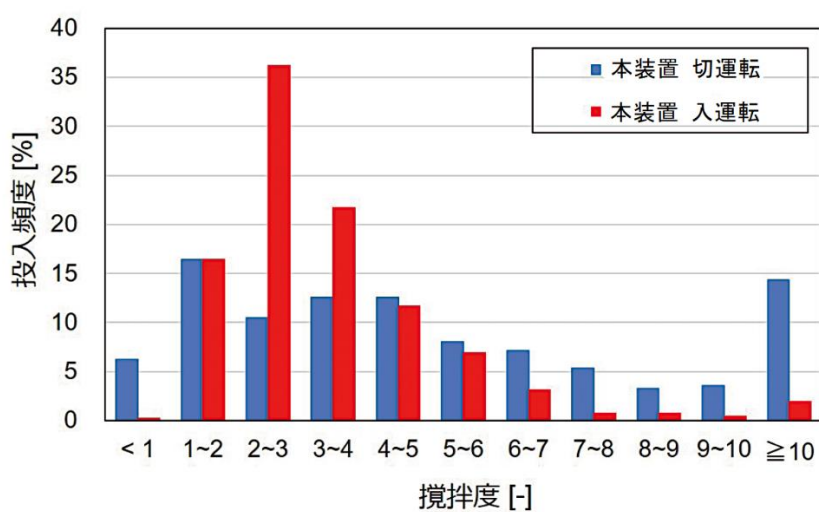
運用試験期間中における、焼却炉に投入されたごみの攪拌度の評価結果と攪拌度の度数分布を図表11と図表12にそれぞれ示す。また、この期間中の発生蒸気量(PV-SV)/SVの標準偏差を図表11に併記する。



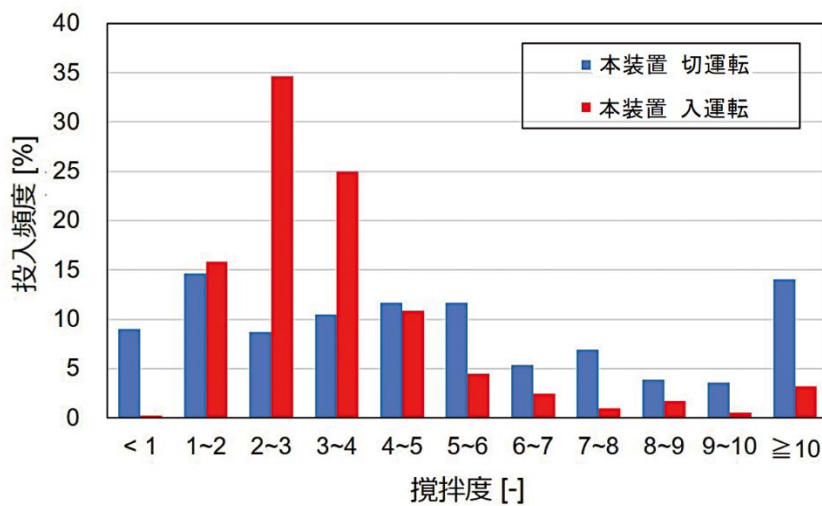
図表10 攪拌度と発生蒸気量の落ち込み度の関係

図表 11 投入ごみの攪拌度の評価結果

	本装置 切運転 2020/10/13~10/19		本装置 入運転 2020/12/18~12/24	
	1号炉	2号炉	1号炉	2号炉
平均攪拌度	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



(a) 1号炉



(b) 2号炉

図表 12 本装置の入切運転における焼却炉投入ごみの攪拌度の分布

本装置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、本装置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、本装置は燃焼状態の安定化に大きく貢献することができた。この結果は、2023年3月に納入した1号機から3号機においても同様の傾向が得られることを確認した。

さらに、夜間AI自動運転機能の「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）を図表13に示す。

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替え」が機能したことにより、本装置運用中は1基のごみクレーンで攪拌・積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35.5kmから32.7kmに約8%低減でき、消費電力量を714kWhから662kWhに約7%削減できた。

（2）自動化率の向上

前項の実証施設とは条件の異なる施設での導入効果を検証するため、別の施設（140t/日×3炉）に本装置を導入し、入運転と切運転のごみクレーン自動化率（自動運転時間/稼働時間）を比較した。評価期間のごみピット状況は図表14に示すとおり同程度の条件である。

評価期間のごみクレーン自動化率を図表15に示す。本装置の入運転時は自動化率が99.0%となり、切運転時と比較して35.2ポイント向上した。特に昼間の自動化率が大きく向上（60.8ポイント）しており、昼間AI自動運転機能によって効率的に受入エリアからの積替えと、異質ごみのばら撒きができたことで、手動介入することなく運転できたと言える。また、本装置の入運転期間を通じて燃焼に影響を与える問題は発生しなかった。

さらに長期間の運転状況を確認するため、実証完了した装置を現場に引渡し、常勤の運転員のみで運用を継続した。本装置引渡し前後における月単位での自動化率を図表16に示す。2022年12月21日に本装置を引渡して以降、自動化率が向上したことが確認できる。また、2023年3月には昼間AI自動運転機能における異質ごみのばら撒き動作の調整を行い、手動介入回数を減らすことができ、定常的に98%以上の自動化率を達成した。

図表 13 ごみクレーンの稼働状況（1日平均）

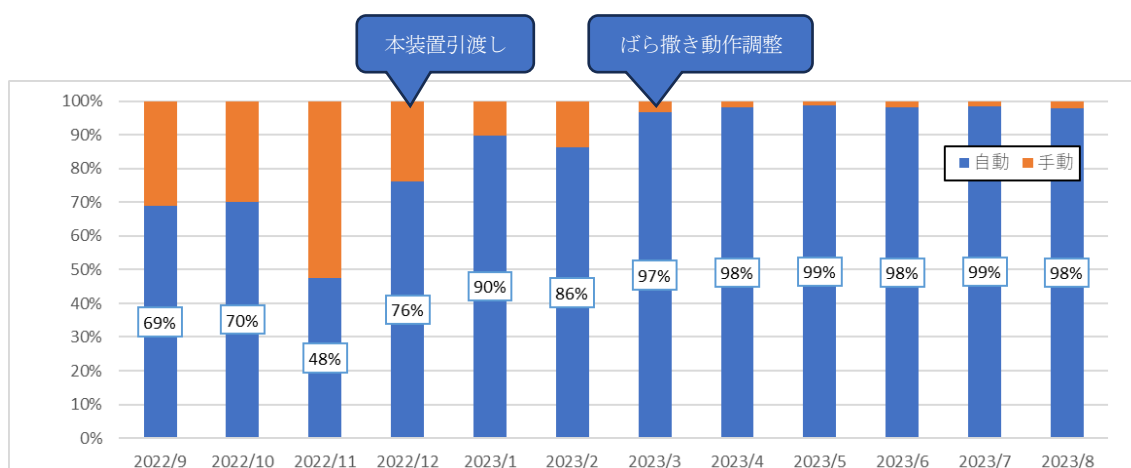
	本装置 切運転 2020/10/13～10/19	本装置 入運転 2020/12/18～12/24
2基運転時間 [min]	109	0
移動距離 [km]	35.5	32.7
消費電力量 [kWh]	714	662

図表 14 評価期間のごみピット状況

	本装置 切運転 2022/6/20～6/26	本装置 入運転 2022/6/13～6/19
平均ごみピット残量 [m ³]	3,424	3,555
平均ごみピット占有率 [%]	46	48
平均搬入量 [t/日]	249	243
平均焼却量 [t/日]	257	255

図表 15 評価期間のごみクレーン自動化率

	本装置 切運転 2022/6/20～6/26	本装置 入運転 2022/6/13～6/19	差分
自動化率 [%]	63.8	99.0	35.2
昼間の自動化率 [%] 7時～16時	38.3	99.1	60.8
夜間の自動化率 [%] 16時～翌7時	89.4	98.9	9.5



図表 16 本装置の入切運転における焼却炉投入ごみの攪拌度の分布

6. 経済性

本装置を導入した際の費用効果は施設規模によっても異なるが、5.（1）の燃焼状態の安定化で報告したとおり、ごみクレーンの稼働時間及び移動距離を抑えることができるため、消費電力と維持補修費の削減が期待できる。また、安定燃焼により発電も安定することで、確実な売電収益を得ることができる。

さらに、5.（2）で報告した自動化率の向上は省力化、省人化に直結し、施設の運転コストの削減に寄与する。

図表17に従来のごみクレーン自動運転装置との比較を示す。

7. 将来性

2050年カーボンニュートラルの実現に向け、処理過程でGHGを排出するごみ焼却発電に課題はあるものの、再生可能エネルギーの中でも太陽光発電や風力発電と比べて安定した電力を供給できることから、今後も果たす役割が期待されている。本装置がごみ焼却発電の安定稼働に寄与することは報告のとおりである。

また、全世界では人口増加により廃棄物処理プラントの市場規模も成長が続く。処理方式に限らず、ピット&クレーンによる供給方式は効率が良く、処理物の均質化には本装置の技術を転用することも可能と考えている。

一方、国内では少子高齢化により、施設運転員の確保や、クレーン運転の技術伝承が困難になることが予想され、本装置による省力化、省人化に期待できる。さらに、コロナ禍のようなパンデミックや災害などにより通常の運転体制を確保できない場合でも、本装置によってごみピット状態の共有が容易にできるため、遠隔からのサポートを含めサステナブルな運転体制の提供が可能となる。

図表 17 従来のごみクレーン自動運転装置との経済性比較

	従来装置	本装置
イニシャルコスト	100	294
保守費（20年）	100	277
人件費（20年）	100	65
トータルコスト（20年）	100	77