

廃棄物処理プラントの売電利益最大化—操業計画システム

Profit Maximization for Waste Treatment Plants—Operation Planning System

三宅 奨 MIYAKE Sho JFE エンジニアリング DX 本部 DX & ICT センター DX プロジェクト推進部
【現 AI & ソフトウェア開発部】
河辺 夏希 KAWABE Natsuki JFE エンジニアリング DX 本部 DX & ICT センター データプラットフォーム開発部

要旨

廃棄物処理プラントにおける操業計画の自動立案システムを社内開発した。本システムは、各種制約条件を考慮しながら、売電利益が最大になる年間運転計画を立案する。技術的な特徴は、実務上の制約条件を網羅した評価関数を構築したこと、遺伝的アルゴリズムと動的計画法を組み合わせで独自の工夫をすることで効率的な解の探索を行えること、および実務利用に耐えるシステム構成を採用したことである。2023 年度内に環境本部 24 工場への導入を完了し、従来比で約 2% の売電利益が向上したと試算できる工場も確認された。本システムは統合運営プラットフォームの重要な構成要素として、廃棄物処理プラントの自動運転を支える基盤となっている。

Abstract:

The authors have internally developed an automated operation planning system for waste treatment plants. This system creates annual operation plans that maximize power sales profits while satisfying various operational constraints. The key technical achievements are threefold: construction of evaluation functions that comprehensively cover practical operational constraints, development of an efficient solution search method combining genetic algorithms and dynamic programming with original improvements, and implementation of a practical system configuration. The system was implemented in 24 waste treatment plants during FY2023, with some facilities achieving approximately 2% increase in power sales profit compared to conventional planning. As a crucial component of the integrated operation platform, this system provides the foundation for autonomous operation of waste treatment plants.

1. はじめに

廃棄物処理プラントにおいては、年間の廃棄物搬入量に対応した操業計画の策定が不可欠である。当該計画の立案にあたっては、ごみピットの容量制約、各炉の処理能力上下限、設備の定期修繕に伴う業者手配、および人員配置等、多岐にわたる制約条件を考慮する必要がある。加えて、各焼却炉における日々の廃棄物焼却量は、発電タイミングによる売電単価の変動、発電効率、消費電力効率等に影響を及ぼすため、事業収益に直結する重要な要素となる。

従来、これらの複雑な制約条件を考慮した操業計画の立案は、各工場の所長に委ねられており、必ずしも利益最大化の観点から最適な計画が策定されているとは限らなかった。

本稿では、利益最大化を実現しつつ、複雑な運用制約に対応できる操業計画システムの開発について報告する。近年におけるクラウドコンピューティング技術の進展および最

適化アルゴリズムの発展により、従来困難とされてきた大規模な運営計画の最適化が技術的に実現可能となった。これを背景として、当社において本システムの内製開発に至ったものである。

本システムは、環境本部の統合運営プラットフォーム「J-Answer (ジェイアンサー[®])」の重要な構成要素として位置づけられている¹⁾。2023 年度内に当社運営の 24 工場への導入を完了しており、新設工場設計時における最適運転計画の立案および売電収益試算にも活用できる。なお、本システムは特許出願済みである。

2. システム概要

2.1 基本機能

本システムは、設定された各種条件に基づき、複雑な運用制約を考慮しながら、利益を最大化するための年間操業計画を自動で作成するものである。具体的には、日単位・炉単位での最適な廃棄物焼却量を算出する。計画の作成にあたっては、膨大な操業パターンの中から最適な組み合わせ

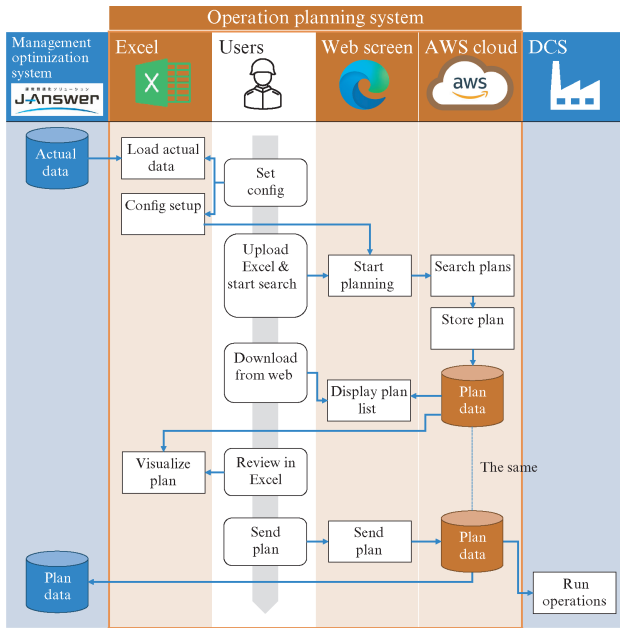


図 1 システムフローと機能概要

Fig. 1 System flow and functional overview

せを探索する手法を採用している。

システムのフローおよび機能の概要を図 1 に示す。各工場の所長および担当者は、図 1 のユーザー列に記載の流れに従い、計画を作成・確認できる。ユーザーインターフェースは Excel およびウェブ画面を併用している。また、一部の工場においては、作成された計画を DCS（分散制御システム）に直接連携し、実際の運転に反映させることも可能となっている。

2.2 利用される業務

本システムは、入札提案時の試算、運転工場の次年度計画・予算立案、運転中の当年度実績を基にした見直しという 3 つの主要な業務で利用される。

3. システムの技術的特徴

本システムの主要機能は、年間を通した操業計画 x の評価値を $y=f(x)$ として表現し、その評価値 y を最大化するための操業計画 x を導出することにある。具体的には、日単位・炉単位での年間焼却量計画を決定する。この機能を実現するための技術的構成要素は、実務に即した計画評価関数の設計、計画を効率的に探索する手法の確立、実務利用に耐えられるシステムの構築の 3 点に分類される。以下、各項目について説明する。

3.1 実務に即した計画評価関数の設計

年間計画 x に対する評価関数 $f(x)$ は、以下の式 (1) で表現される。この関数の値が最も大きくなる年間計画 x を探

表 1 制約条件一覧

Table 1 List of constraints

No.	Category	Description
1	Waste pit management	Upper/lower limit control of pit level, year-end level adjustment, deviation control from median level
2	Scheduled maintenance	Ensuring required shutdown days for each furnace within designated periods
3	Continuous operation/shutdown	Upper/lower limit control of consecutive operation and shutdown days for each furnace
4	Number of operating furnaces	Restriction on simultaneous operating furnaces during specific periods
5	Startup/shutdown coordination	Avoidance of overlapping startup/shutdown operations on the same day
6	Inter-furnace balance	Equalization of shutdown days among furnaces
7	Incineration volume fluctuation	Limitation on daily fluctuation range of incineration volume
8	Startup/shutdown prohibition period	Restriction on startup/shutdown operations during specific periods
9	Ash pit management	Upper limit control of main ash and fly ash pit levels including year-end

索する。

$$\text{評価関数 } f(x) = \text{売電収益} - \text{各種費用} - \text{操業ペナルティ} \quad (1)$$

以下、売電収益、各種費用、操業ペナルティそれぞれの考え方、計算ロジックの概要を説明する。

3.1.1 売電収益

年間計画焼却量に対し、月別・運転炉数別に設定された過去実績に基づく係数を適用して計画発電量を算出する。そこから実績ベースの消費電力量を差し引いて売電量を求め、日別の電力単価を乗じて売電収益の基礎額を算出する。さらに、各工場固有の契約条件を加味して最終的な売電収益を決定する。本システムは、年間目標売電量に対する達成率に応じた収益配分等、複雑な年間通算条件にも対応可能である。

3.1.2 各種費用

各種費用は、買電費（基本料金、従量課金）、灰処理費（搬出、処分費）、各種薬剤費、上下水料金、立上げ・立下げに伴うバーナー燃料費で構成される。特に買電費については、月ごとに発電量が消費電力量を下回った日があった場合の基本料金割増分も考慮している。また、工場ごとの使用薬剤の違いにも対応でき、ストーカ炉のみならずガス化溶融炉特有の費用も計上できる。

3.1.3 操業ペナルティ

収益性のみならず、運転上の制約条件も重要な評価要素となる。表 1 に示すとおり、違反条件や望ましくない運転条件についても評価している。例えば、売電収益が当社利益となる契約においては焼却量の増加が収益向上に寄与するが、ごみピットの下限レベルを下回る焼却は許容されない。また、年度始めと年度末のごみピットレベル差に制限を設けることで、年度末における過度な焼却を防止している。これら実務から抽出されたさまざまな制約条件への対応は、先行特許²⁾と比較しても優位性がある。これらの制約条件が満たされない場合は、金額換算した操業ペナルティとして評価関数に反映される仕組みとしている。

3.2 計画を効率よく探索する手法の確立

3.2.1 技術的課題

計画 x の最適化は、日・炉ごとの年間焼却計画 x に極めて膨大な自由度（探索空間）が存在すること、および評価関数 f に微分不可能で非連続な条件が多いことから、技術的難易度が高い問題である。例えば、3 基の焼却炉を有する場合、各炉の日々の運転状態・焼却量を 1 年分決定するには、理論的には天文学的な組み合わせが存在し得る。

このような課題に対して、3.2.2 項で述べる各手法を用いることで対応した。実務条件での試行では、2 炉構成でシンプルな制約条件では 1 時間以内に、3 炉構成かつ複雑な制約条件であっても数時間以内に、実用的なレベルの最適計画に収束することを確認している。また、クラウド上で実行される計算コストは 2025 年 1 月時点で 1 時間あたり約 1 米ドル程度であり、工場の経済規模を考慮すると十分な費用対効果があると考えられる。

3.2.2 採用した最適化手法

本システムでは、上記の技術的課題に対応するため、メタヒューリスティクス（発見的手法）の一つである遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm; GA）およびその補助手法として動的計画法（Dynamic Programming; DP）を採用した。GA は、探索空間が大きく複雑な問題に対して多様な解の探索が可能であり、スケジューリング問題においても優れた性能を示した例がある³⁾。処理フローの概要を図 2 に示す。

3.2.3 最適化処理における工夫

本システムでは、効率的な計画探索を実現するため、以下の点について工夫を施している。

(1) 初期値の設定

メタヒューリスティクスにおいては、初期値が結果に影響を与えることがある。本システムでは、条件次第で高速に近似的な最適解を計算可能な DP により概略解を初期値として算出することで、探索効率の向上を図っている。DP では、日をまたぐ制約条件の一部のみを考慮することで計算量の発散を防止している。さらに、特殊な計算方法を導入することで通常並列計算が難しい DP で並列計算を可能にし、処

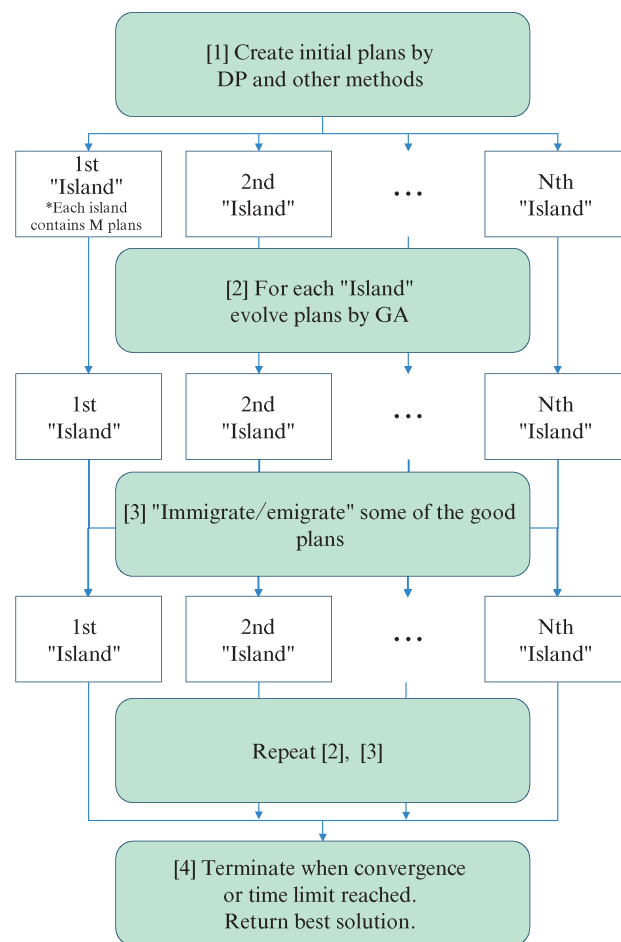


図 2 最適化計算処理フロー概要
Fig. 2 Optimization flow overview

理効率を大幅に向上させた。

(2) 評価関数の効率化

GA で大量の試行計算を行うためには、高速な年間計画評価が不可欠である。本システムでは、計算処理速度の高いライブラリを活用することで高速化を実現している。

また、評価関数内で実務に即した後処理を行うことにより、効率的な探索に寄与している。GA における多様性を維持するため、複数の評価基準を併用している。

(3) 探索手法のチューニング

操業計画には、固有の「好ましい」計画パターンが存在する。本システムでは、これらのパターンに効率的に到達できるように、複数の変異パターンを用いた探索を行っている。変異レートは局所解に陥りにくくように高めに設定している⁴⁾。また、複数の独立した計算単位で並列処理を行い、計算結果の一部を相互に共有することで、多様性を確保しつつ計算効率の向上を図っている⁵⁾。

3.3 実務利用に耐えるシステムの構築

本システムの計算を実行し実務利用するために、以下の 3 つの特徴を持つシステムを構築した。

3.3.1 高ユーザビリティ

ユーザーの実務利用を重視し、工場での既存業務に近いレイアウトを採用した Excel ファイルを主なユーザーインターフェースとした。予期せぬユーザー設定によるシステムエラーを防ぐため、設定の妥当性を Excel 上で判定し、クラウドシステムへの投入前にユーザー側で確認できる仕組みを実装した。また、Excel ファイルは工場共通のフォーマットとし、パラメータ設定のみで各工場やうるう年にも対応できる設計とすることで、保守性の向上を図った。

表 2 AWS Lambda と Fargate の比較

Table 2 Comparison of AWS Lambda and Fargate

Comparison item	General serverless processing	Our system
Overview	Easy to implement and lightweight, but limited execution time and customization	More complex setup, but supports long execution and high customization
Startup time	A few seconds or less	A few to tens of seconds
Execution time limit	Max. 15 minutes	Unlimited
Computing resources	Max. 6 vCPUs	Max. 16 vCPUs
Memory limit	Max. 10 GB	Max. 120 GB
Execution environment	Specific runtimes only	Any environment

(as of January 2025)

3.3.2 長時間実行

前述の並列計算を長時間実行し、かつ複数の工場からの要求に対応するためには、クラウドサービスの利用が必須である。一般的なクラウドアプリケーションで用いられるサービスには、実行時間や計算リソースに制約があり、本システムの要件を満たすことができなかった。そのため、本システムでは長時間実行が可能で柔軟な実行環境を採用した。これにより、最大 16 コアのマルチコア環境での長時間実行が可能となり、また複数の計算を並列で実行できるようになった。以下、表 2 に、一般的なクラウドサービスと採用したクラウドサービスの比較を示す。

3.3.3 DCS 連携

本システムの特徴として、実際の工場制御システム (DCS) との連携機能がある。自動作成された操業計画を、セキュリティや拡張性の高い通信プロトコルを用いて DCS に連携することで、計画に基づいた自動運転の実現が可能となった。この機能はすでに複数の工場で実装されている。

4. 操業計画システムによる売電利益向上例

本システムを運用している A 工場での使用例を図 3 に示す。同工場では、従来、夏季 (7-9 月) の売電単価が高いことから、この期間に多くの廃棄物を処理する計画としていた。しかし、本システムによる最適化計算の結果、4-6 月に焼却量を増やす計画に変更することで、売電利益を約 2% 向上できることが明らかとなった。これは、7-9 月は売電単価

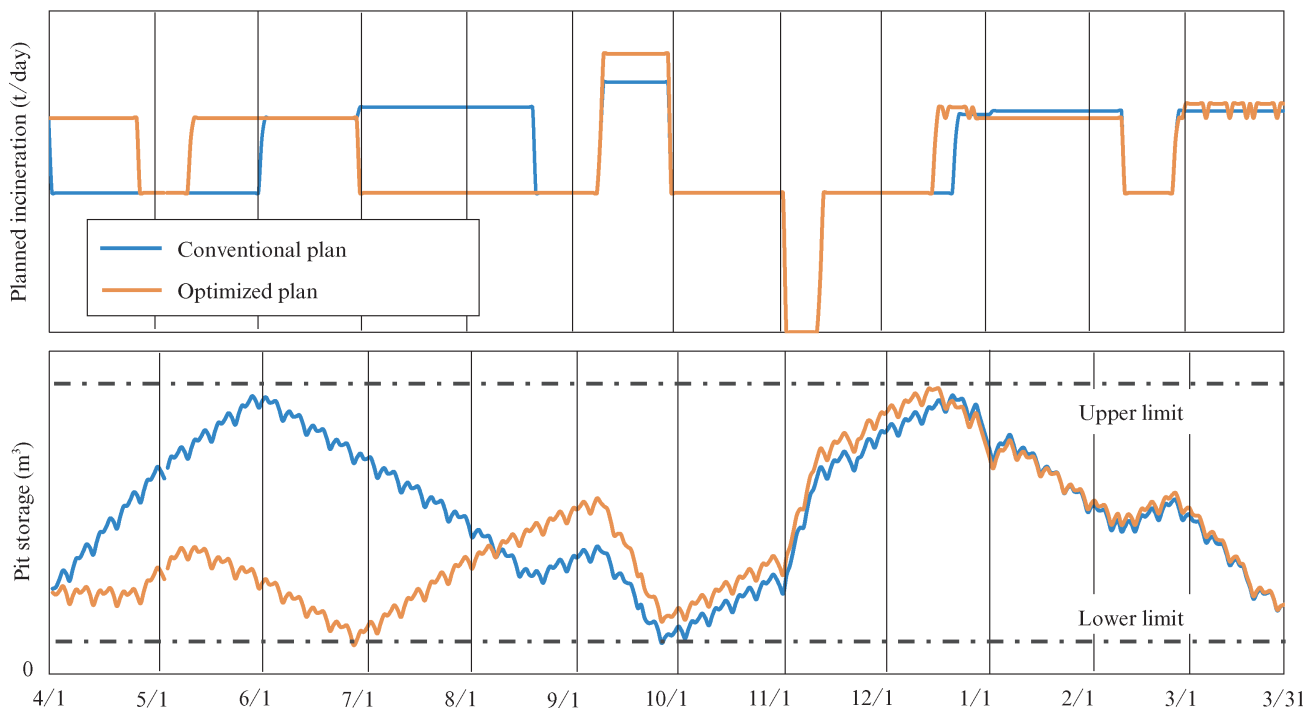


図 3 操業計画システムと従来方法の比較 (評価試算)¹⁾

Fig. 3 Comparison of optimized and conventional plans¹⁾

が高いものの消費電力量も多く、焼却量あたりの売電電力量は4-6月の方が多くなるためである。このように、本システムにより、複数の要因を総合的に考慮した最適な操業計画の立案が可能となった¹⁾。

5. おわりに

廃棄物処理プラントにおいて、利益および各種制約を考慮した最適な廃棄物処理計画を自動で立案するシステムを開発した。本システムは、2023年度内に当社運営の24工場への導入を完了し、2026年度現在も順調に運用を継続している。

導入効果として、従来の計画立案と比較して利益が向上したと試算できる工場も確認されており、システムの有効性が実証されている。

今後は、さらなる計算効率の向上やユーザーインターフェースの改善などのシステム高度化を進めるとともに、未導入工場への展開を推進する予定である。

参考文献

- 1) 田部史朗, 樋口真司. 操業計画自動策定技術と焼却炉自動運転技術の連携による最適操業の維持. 第46回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集. 2024, p. 46-48.
- 2) 川崎重工業株式会社. 特開 2019-067066. 廃棄物処理計画演算方法および廃棄物処理計画演算装置.
- 3) Katoch, S.; Chauhan, S. S.; Kumar, V. A review on genetic algorithm: past, present, and future. Multimedia Tools and Applications. 2020, vol. 80, p. 8091-8126.
- 4) Wirsansky, E. Hands-On Genetic Algorithms with Python. Packt Publishing. 2020, 346p (p.167-168).
- 5) Sekaj, I. Robust Parallel Genetic Algorithms with Re-Initialization. Proceeding of 8th Parallel Problem Solving Nature (PPSN). 2004, p. 411-419.