

モデル予測制御による製鉄所燃料・電力運用ガイダンスシステム

Guidance for Fuel and Power Management in Steel Works Through Model Predictive Control

小笠原知義 OGASAHARA Tomoyoshi JFE スチール スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部 主任研究員 (副課長)
林 弘治 HAYASHI Koji JFE スチール 西日本製鉄所 (倉敷地区) エネルギー部 エネルギー技術室長 (部長)
吉原 孝次 YOSHIHARA Koji JFE スチール 製鉄所業務プロセス改革班 主任部員 (課長)

要旨

JFE スチールは、製鉄所のエネルギーロス最小化を目的として、モデル予測制御技術を活用した運用ガイダンスシステムを開発した。本システムは、各工場の生産計画に基づき燃料・電力の需給状況を高精度に予測し、エネルギーロスが最小となる運用条件を数理計画法により求めるものである。本システムの適用により、製鉄所の燃料・電力運用が改善した。

Abstract:

In order to reduce energy loss in steel works, JFE Steel has developed a management guidance system which uses a model predictive control technology. The system predicts the fuel and power supply and demand accurately based on the production plan at each plant. Based on the predictions, the system calculates the operation condition at each process to achieve minimum energy loss through mathematical programming method. The guidance system has improved the operation.

1. はじめに

製鉄所では、高炉、コークス炉、転炉といった上工程で発生する副生ガス、ならびにその回収過程で得られる電力および蒸気が、所内工場および発電設備で使用されている。所内の燃料、蒸気、電力需要に対する供給不足は、所外からの購入で補っている。

上記の運用にあたっては、需給状況、発電設備の稼働状況、燃料・電力の購入単価などの契約情報に基づき、エネルギーロスが極小少なくなるように、各プロセスへの副生ガス配分、蒸気配分、電力購入量、燃料（重油、都市ガス）購入量、副生ガス貯蔵量等を決定することが求められる。現時点から数時間先までの需給状況を把握するには、各工場の詳細な生産計画や膨大な測定データが必要となるため、運用担当オペレータが、計算機システムの支援なしに、需給状況を予測しつつ最適な運用を常時行うことは困難である。

これまでに、様々なプラントの最適運用手法が提案されている。

福山ら¹⁾は、(a) 負荷予測機能、(b) プラントモデル化機能、(c) 最適運転機能、からなる最適運転システムを提案している。このシステムは、運用問題を混合整数非線形

計画問題（制約式および目的関数が非線形で整数変数を含む問題）として定式化し、負荷予測値に応じた最適運転条件を粒子群最適化手法により探索する。このような予測に基づく最適化手法は、製鉄所の燃料、蒸気、電力運用においても有効である。しかし、問題規模が大きくなると、短い時間（5分程度）で最適解を得ることが難しく、ガイダンスシステムの用途には適していない。

製鉄所を対象とした最適化システムとしては、運用問題を混合整数線形計画問題（制約式および目的関数が線形で整数変数を含む問題）に帰着し、それを解くことで発電設備への最適燃料供給量をオペレータにガイダンスする手法²⁾が提案されている。

また、この手法²⁾を所内の燃料、蒸気、電力の最適配分問題に拡張した定式化手法³⁾も提案されている。本手法³⁾は、互いに影響する燃料、蒸気、電力の運用を最適化するため、燃料供給量のみを最適化する手法²⁾と比較してエネルギーロス削減に有効であると考えられる。

上記の既存手法^{2,3)}は、需給予測値を入力して最適計算を行うものであり、需給予測誤差が計算結果に影響し、最適運用条件からの乖離をもたらす。このことから、需給状況が大きく変化する状況では、需給予測誤差も大きくなるため最適運用条件に近い運用が困難になるという課題があった。

そこで、JFE スチールでは、各工場の生産計画を用いた

高精度需給予測モデルを開発し、これを用いて計算された需給予測に基づき、エネルギーロスが最少となる運用条件をオペレータに提示する燃料・電力運用ガイダンスシステムを開発した。本ガイダンスシステムは、需給予測に基づき、最適運用条件を数理計画法で求めるモデル予測制御技術⁴⁾を活用している。

本稿では、製鉄所における燃料・蒸気・電力フローの概要について述べた後、本ガイダンスシステムの機能と適用結果を紹介する。

2. 製鉄所における燃料・蒸気・電力フロー

製鉄所における燃料・蒸気・電力フローを図1に示す。製鉄所では、高炉で発生するBガス(Blast Furnace Gas)、コークス炉で発生するCガス(Coke Oven Gas)、転炉で発生するLDガス(LD Converter Gas)といった副生ガス、または、それらを混合して熱量調整したMガス(Mixed Gas)を所内工場や発電設備で使用する。ガス供給量が所内工場の需要に対して不足する場合には、都市ガスで補填して需要を満足させる。また、発電設備に対するガス供給量が所定量に対して不足する場合には、重油で補填する。これらの補填燃料は所外から購入するため、使用量に応じてコストおよびエネルギーロスが生じる。反対に、ガス供給量が需要に対して過剰となる場合は、燃焼させて無害化した後、大気中に放散することになるが、これはエネルギーロスにつながるため、最小限に抑制すべきである。このため、副生ガス貯蔵設備であるガスホルダの活用や使用先へのガス配分量の調整が必要となる。蒸気は、転炉ガスや焼結炉からの排熱回収ボイラ、CDQ(Coke Drying Quenching: コークス乾式消火設備)のボイラ、発電設備のタービン中段からの抽気によって供給され、所内工場で使用される。蒸気需要に対して供給量が不足する場合には、所外から購入する。所内工場の電力需要は、CDQ、TRT(Top-pressure Recovery Turbine: 高炉炉頂圧発電)、発電設備での発電と電力会社からの購入電力で充足させる。購入量については契約量(購入量上限)を超過しないように管理する必要がある。また、電力単価が時間帯によって異なるため、単価の高い時間帯で副生ガス供給量に余裕がある場合には、発電設備の出力を高く設定して購入電力量を低減させるなど、時間帯や需給状況によって運用を変える必要がある。

3. ガイダンスシステム

本章では、開発したガイダンスシステムの概要とその機能について述べる。

3.1 ガイダンスシステムの概要

近年、フィジカル空間の莫大なセンサ情報(ビッグデータ)

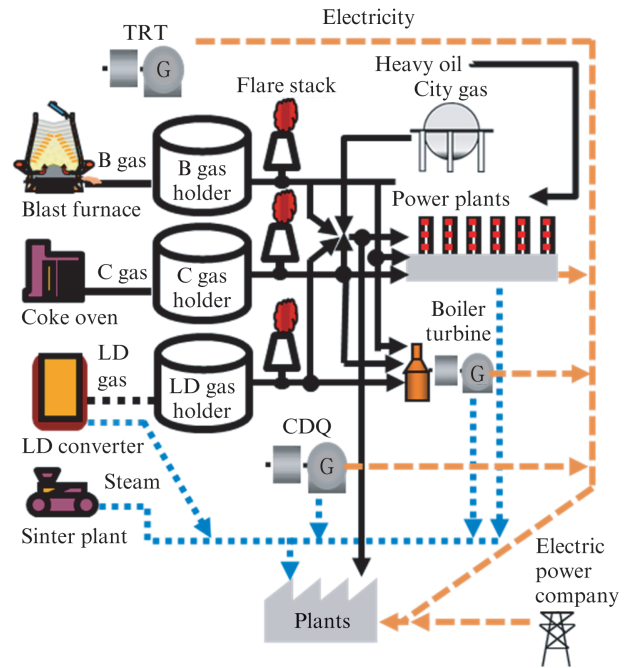


図1 製鉄所における燃料・蒸気・電力フロー
Fig. 1 Fuel, steam, and power flow in steel works

をサイバー空間に集約し、これを各種手法で解析した結果をフィジカル空間にフィードバックすることで価値を創出するCyber Physical System⁵⁾やSociety 5.0⁶⁾が提唱されている。JFEスチールにおいても、上記に基づく開発を推進するためデータインフラの整備を進めており、各種測定データや各工場の生産計画を収集できるようになっている。また、混合整数線形計画問題のソルバーの性能向上により、比較的高速で解ける環境も整ってきた⁷⁾。

既存手法で解決できない需給予測の高精度化のため、各工場の生産計画を用いた高精度需給予測モデルを開発し、これを用いて計算された予測に基づき、燃料、電力の最適配分をリアルタイムで提示する燃料・電力運用ガイダンスシステムを開発した。

図2にガイダンスシステムの概要を示す。本システムは、需給予測機能、制約値作成機能、最適運用シミュレーション、ガイダンス機能で構成する。

需給予測機能では、燃料・電力需給を予測する。予測は、設定した計算周期で数時間先まで行う。表1にそれぞれの予測モデルの出力と必要とする入力を示す。ここで、#6のMガス需要と#7の電力需要の予測は、消費量が多い熱延工場と厚板工場のみを対象とする。また、#9の蒸気需要は、RH(2次精錬設備)を予測対象とする。それら以外の比較的消費量が少ない工場については、現時刻の需要が将来にわたり継続すると仮定する。需要予測機能については、3.3節で詳述する。

制約値作成機能では、最適運用シミュレーションで必要となるエネルギー設備(ガスホルダや発電設備)の運用上

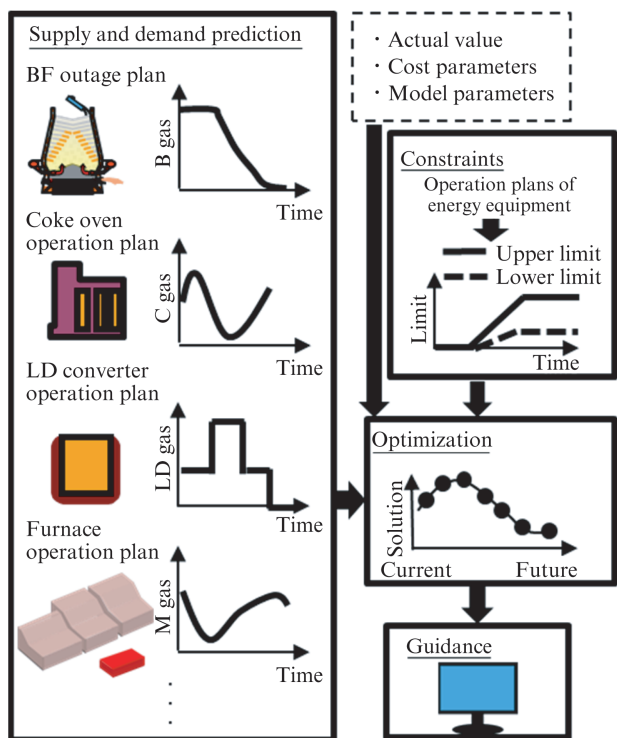


図2 新運用ガイダンスシステム

Fig. 2 Guidance system for fuel and power management

下限等の制約値を各設備の稼働・停止計画に基づいて作成する。

最適運用シミュレーションでは、需給予測値、制約値、測定値、エネルギーロスの計算に必要な電力単価等のコストパラメータ、ならびに、設備モデルのパラメータのデータに基づいて、運用問題を表す混合整数線形計画問題を解くことで、エネルギーロスが最少となる運用条件を求める。本問題は、現時刻から数時間先までの運用条件を需給予測と同じ計算周期で求めるものであり、最適運用条件が時系列として得られる。最適運用シミュレーションについては、3.2節で詳述する。

ガイダンス機能では、最適運用シミュレーションで求めた解と、現時刻での測定データを並べて表示してオペレータにガイダンスする。

3.2 最適運用シミュレーション

本節では、最適運用条件を求める最適運用シミュレーションを説明する。

3.2.1 最適化問題への定式化

本機能で解く問題は、線形不等式と線形等式からなる制約条件の下で、評価関数 f を最小化する問題である。評価関数と制約条件は式1から式4のように表される。

- ・ 評価関数

$$f = c^T x \dots\dots\dots (1)$$

表1 各予測モデルの出力と必要な入力

Table 1 Output and required inputs of each prediction model

Number of model	Output	Input
#1	B gas supply	・ Blast furnace outage plan
#2	B gas demand	・ Blast furnace outage plan ・ Amount of throughput in coke oven
#3	C gas supply	・ Amount of throughput in coke oven
#4	C gas demand	・ Blast furnace outage plan ・ Amount of throughput in coke oven
#5	LD gas supply	・ Start/Finish time of blowing of O2 at LD converter ・ Molten steel weight
#6	M gas demand	<Hot strip mill, Plate mill> ・ Furnace: Insert and extraction time of each slab ・ Dimensions and weight of each slab
#7	Electricity demand	<Hot strip mill, Plate mill> ・ Furnace: Extraction time of each slab ・ Dimensions and weight of each slab ・ Rolling conditions of each slab
#8	Steam supply	・ Start/Finish time of blowing of O2 at LD converter ・ Operation plan of Sinter plant ・ Operation plan of CDQ boiler
#9	Steam demand	<RH> ・ Start/Finish time of RH processing ・ Molten steel weight

- ・ 制約条件

$$Ax \leq b \dots\dots\dots (2)$$

$$A_{eq} x \leq b_{eq} \dots\dots\dots (3)$$

$$l_b \leq x \leq u_b \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 c, b, b_{eq}, l_b, u_b は、実数ベクトルであり、 A, A_{eq} は実数行列である。 x は決定変数ベクトル（要素は、連続変数または整数変数）である。

本システムでは、評価関数 f にエネルギーロス ($f_{loss}(k)$) と、運用の安定性を評価するペナルティ ($f_{penalty}(k)$) の和を設定した (式5)。ここで、添字 k ($=1, 2, \dots, N$) は将来の時刻を表し、予測値の計算周期を T (min) とすれば、現時刻から Tk (min) 後に相当する。 $f_{loss}(k)$ は、燃料（重油、都市ガス、蒸気）消費、電力購入量、発電によるエネルギーロスの和であり、 $f_{penalty}(k)$ は、決定変数の時間変化に重み係数をかけた値と制約条件の緩和量を評価した値の和である。 $f_{penalty}(k)$ を評価関数に含めることにより、決定変数の時間変化が抑制される。また、制約条件の緩和により、解が得られやすくなる。最終的に設定する評価関数は、終端時刻 N までの合計値とする。

$$f = \sum_{k=1}^N (f_{loss}(k) + f_{penalty}(k)) \dots\dots\dots (5)$$

続いて、本稿で設定する制約条件を示す。

3.2.2 ガス・蒸気バランス制約

各種ガス (B ガス, C ガス, LD ガス, M ガス)・蒸気が, 各時刻で供給量と使用量が等しくなるような等式制約である。B ガスのバランス制約を例示すると式 6 に示す等式となる。

$$\sum_{i=1}^{n_{Bs}} S_{Bi}(k) = \sum_{j=1}^{n_{Bd}} D_{Bj}(k), \quad k=1,2,\dots,N. \dots\dots (6)$$

ここで, n_{Bs} : 高炉の数, n_{Bd} : 需要設備の数, $S_{Bi}(k)$: 第 i 高炉からの B ガス供給量 (GJ/h), $D_{Bj}(k)$: 設備 j での B ガス使用量 (GJ/h) (B ガスホルダの飲み込み・払い出し量も含む) を示す。なお, $S_{Bi}(k)$ は, 予測値であり, $D_{Bj}(k)$ は, 予測値または決定変数である。

3.2.3 ガスホルダモデル

製鉄所には, 各種ガスごとにガスホルダが設置されており, 飲み込み・払い出し量の調整により, 供給量と使用量の不均衡を解消する役割を担う。

ガスホルダレベルの制約式を式 7, 式 8 に示す。

$$H_L(1) = H_{LMea} + H_G(1)T / 60, \dots\dots\dots (7)$$

$$H_L(k) = H_L(k-1) + H_G(k)T / 60, (k=2,\dots,N). \dots\dots\dots (8)$$

ここで,

$H_L(k)$: ガスホルダレベル (GJ), $H_G(k)$: ガスホルダ飲み込み・払い出し量 (GJ/h), H_{LMea} : ガスホルダレベル測定値 (GJ), T : 周期 (min) であり, $H_L(k)$ と $H_G(k)$ は決定変数である。

また, $H_L(k)$ と $H_G(k)$ には, 運用上の上下限が定められており, これに対応するために式 9, 式 10 に示す制約を課す。

$$L_{H_L} \leq H_L(k) \leq U_{H_L}, \dots\dots\dots (9)$$

$$L_{H_G} \leq H_G(k) \leq U_{H_G}. \dots\dots\dots (10)$$

さらに, $H_G(k)$ の時間変化について, 式 11, 式 12 に示す上下限制約を課す。

$$\Delta L_{H_G} \leq (H_G(1) - H_{GMea}) / (T / 60) \leq \Delta U_{H_G}. \dots (11)$$

$$\Delta L_{H_G} \leq (H_G(k) - H_G(k-1)) / (T / 60) \leq \Delta U_{H_G}, (k=2,3,\dots,N). \dots\dots\dots (12)$$

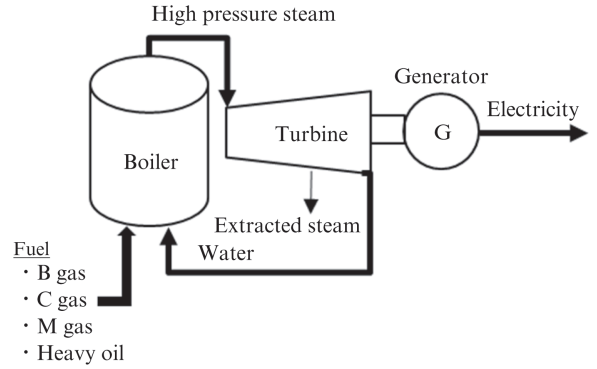


図 3 火力発電設備

Fig. 3 Thermal power plant

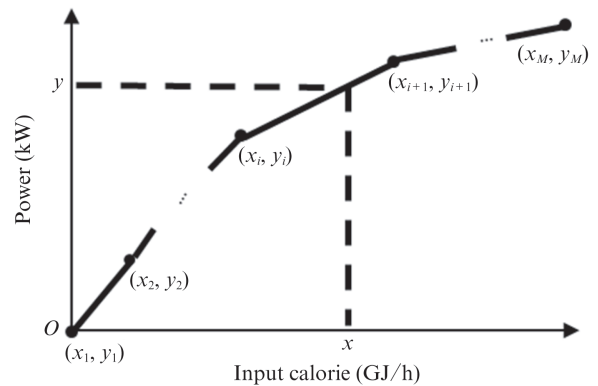


図 4 区分線形関数による曲線近似

Fig. 4 Curve approximation through piecewise linear function

3.2.4 電力バランスモデル

所内の発電量 (TRT, CDQ, 発電設備) と電力会社からの電力購入量の合計が, 所内工場での使用量の合計と等しいという等式制約となる。

3.2.5 発電設備モデル

発電設備モデルの例として, 図 3 に示す各種副生ガス (B ガス, C ガス, M ガス) と重油を燃料として発電する火力発電設備について説明する。本設備では, 各種副生ガスと重油の合計熱量に応じて発生する高圧蒸気をタービンの回転エネルギーに変換して発電する。これは, 副生ガスと重油の合計熱量を入力とし, 発電量を出力とするシステムとみなすことができる。その入出力特性は, 非線形性である。このような入出力特性は, 図 4 に示すように, M 点の折曲点

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_M, y_M). \text{ただし, } x_1 < x_2 < \dots < x_M.$$

からなる区分線形関数で表現する。この関数は, 各時刻 k における投入熱量合計値 $x(k)$ (GJ/h) と, それに対応する発電量 $y(k)$ (kW) との関係を表す等式制約および不等式制約⁸⁾で記述できる。

また、蒸気需要を充足させるためにタービン中段からの抽気を行う際には、発電量は減少する。これを考慮するために、抽気量を $V_{Es}(k)$ (ton/h) として、それによる発電量の減少を表す定数 $\alpha_{Es} < 0$ (kW/(ton/h)) とすれば、抽気を考慮した発電量 $y'(k)$ (kW) は、式 13 の等式制約で記述できる。

$$y'(k) = y(k) + \alpha_{Es} V_{Es}(k) \dots\dots\dots (13)$$

このほかに、ある発電設備では、配分する C ガス熱量 $V_C(k)$ が、規定量 V_{th} 以下の時は、重油を規定量 L_{HO} 以上使用する必要がある。混合整数計画問題では、このような IF-THEN ルールも不等式制約として記述できる。C ガス熱量 $V_C(k)$ がある規定量 V_{th} 以下となる場合に 1 となり、規定量より大きい場合に 0 となるバイナリ変数 (決定変数) $\delta_C(k)$ を導入すれば、上記ルールは、式 14 の不等式で表現できる。

$$-M\delta_C(k) + \epsilon \leq V_C(k) - V_{th} \leq M(1 - \delta_C(k)) \dots\dots (14)$$

ここで、 M は、非常に大きい定数であり、 ϵ は微小な定数とする。また、 $\delta_C(k)$ を使用して重油熱量 $V_H(k)$ の下限制約は、式 15 の不等式で記述できる。

$$V_H(k) \geq \delta_C L_{HO} \dots\dots\dots (15)$$

なお、最適運用シミュレーションでは、エネルギーロスの観点から重油使用量を最小化するように、分枝限定法⁹⁾により配分計算を行う。分枝限定法は、離散変数を含む最適化問題に対して効率的に解を探索する手法である。実行可能解 (最適解とは限らない、すべての制約を満たす解)のうち、一部の離散変数を連続変数に緩和した問題を解き、その評価関数の値と実行可能解の評価関数の値を比較することで、評価関数が改善する見込みのない解の候補を探索せずに、改善する可能性のある解の候補のみを探索する。これにより、すべての離散変数の値の組み合わせを列挙することを回避している。

3.2.6 決定変数の時間変化抑制のための制約条件

評価関数のペナルティ ($f_{penalty}(k)$) 項に、燃料配分等の決定変数の時間変化を含めることで、過度な変動を抑制する。ここでは、時間変化の絶対値を計算するための制約式を示す。

ある燃料配分決定変数を $V_x(k)$ 、その時間変化の大きさの最大値を表す決定変数を $\Delta V_x(k) \geq 0$ 、現時刻の測定値を I_x として、式 16、式 17 に示す不等式制約を課す。

$$-\Delta V_x(1) \leq (V_x(1) - I_x) / (T/60) \leq \Delta V_x(1), \dots (16)$$

$$-\Delta V_x(k) \leq (V_x(k) - V_x(k-1)) / (T/60) \leq \Delta V_x(k), \\ (k=2,3,\dots,N). \dots\dots\dots (17)$$

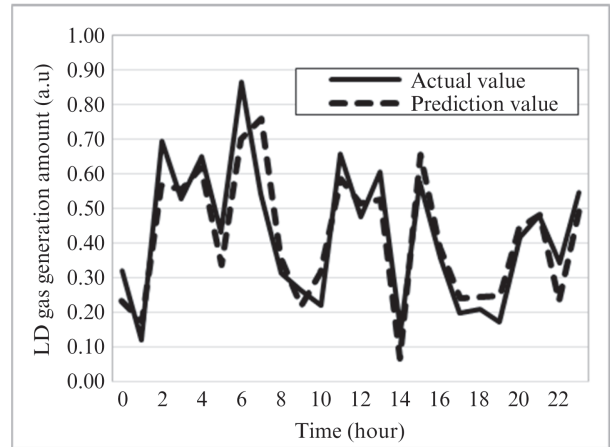


図5 LDガス予測値と測定値の比較

Fig. 5 Comparison between prediction and measurements of LD gas generation

そして、重み定数 $\alpha_x \geq 0$ として、式 18 のとおり評価関数のペナルティ項を設定する。

$$f_{penalty}(k) = \alpha_x \Delta V_x(k) \dots\dots\dots (18)$$

3.2.7 その他の制約条件

詳細は割愛するが、例えば以下に関する制約式がある。

- 電力購入量制約
- 設備の運用モード、運用ルール
- 燃料・蒸気不足等の操業リスクを考慮するための制約
- 燃料、蒸気配分量の上下限、変化速度

3.3 需給予測機能

本機能は、燃料・電力需給を予測する機能である。本節では、その一例として、LDガスの発生量予測について説明する。

LDガスは転炉吹錬による脱炭反応で発生し、その発生量は処理量や吹錬形態等に依存する。本システムでは、予測に必要なとなる操業情報を、転炉の操業に使用しているプロセス計算機から一定周期でリアルタイムに収集し、それを説明変数とした重回帰モデルにより、LDガス発生量を予測する。

測定値と予測値の時系列の比較を図5に示す。転炉操業による発生量 (測定値) の増減に対応して、精度良く予測できている。

4. 計算例と実運用効果

本章では、計算例を示した後、実運用でのエネルギーロス削減効果について述べる。

図6に、発電設備の出力計算例を示す。エネルギーロスへの影響が大きい昼間の電力購入量を抑制するため、発電

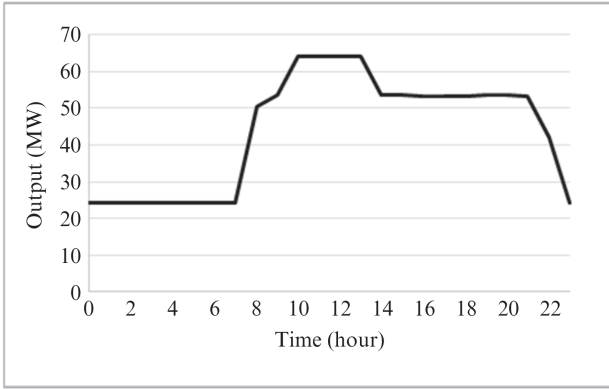


図6 発電量計算値

Fig. 6 Calculation result: output of power plant

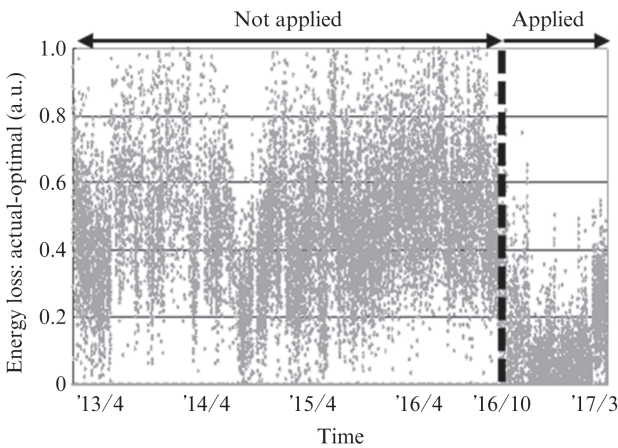


図7 エネルギーロスの実績値と最適値の差

Fig. 7 Trend of difference between actual energy loss and optimal energy loss

設備にガスを多く配分し、出力を高く設定している。

次に実運用効果について説明する。ガイダンスシステムに従ってエネルギー運用を行うことにより、エネルギーロスの実績値と最適値の差が縮小し、その縮小分が効果となって表れる。図7に、実績値と最適値の差(=実績値-最適値)の時系列チャートを示す。図7の縦軸が0に近いほど、実運用が最適運用条件に近づいていることになる。2016年10月の本システム稼働以降、実績値と最適値の差が縮小しており、本システムがエネルギーロス削減に寄与していること

が分かる。

5. おわりに

- JFE スチールは、エネルギーロス最小化を目的として、燃料・電力運用ガイダンスシステムを開発した。
- 本システムは、各工場の生産計画に基づき燃料・電力の需給状況を高精度に予測する需給予測機能、設備の稼働状況に基づき最適運用シミュレーションで必要となる制約値を作成する制約値作成機能、エネルギーロスが最小となる運用条件を数理計画法で求めるモデル予測制御技術を活用した最適運用シミュレーション、ガイダンス機能からなる。
- 本システムの適用により、燃料・電力運用が改善した。

参考文献

- 1) 福山良和, 戸高雄二. 環境における計測・制御・モデリング: ユーティリティ設備の最適運転による省エネルギー. 計測と制御. 2006, vol. 45, no. 10, p. 871-874.
- 2) Akimoto, K.; Nagare, T.; Ishida, N.; Sannomiya, N.; Nishikawa, Y.; Tsuda, T. New Energy Control System at Kawasaki Steel's Mizushima Works. IFAC Proceedings Volumes. 1989, vol. 22, no. 11, p. 281-286.
- 3) 吉原孝次, 林弘治. 製鉄所におけるエネルギー全体最適化システムの開発. 日本鉄鋼協会, 第140回制御技術部会. 2008, 制技140-1-4.
- 4) Maciejowski, J. M. モデル予測制御—制約のもとでの最適制御. 足立修一訳, 菅野政明訳, 東京電機大学出版局, 2005, 416 p.
- 5) Jeannette, M. W. Cyber-Physical Systems. Computing Research News. 2009, vol. 21, no. 1, p. 4.
- 6) 畑中健志, 永原正章. Society 5.0のためのシステム制御技術. 計測と制御. 2019, vol. 58, no. 8, p. 579-582.
- 7) 藤澤克樹, 品野勇治. 最適化と計算の今後—大規模問題をどこまで解決できるのか?—. オペレーションズ・リサーチ. 2014, vol. 59, no. 1, p. 11-19.
- 8) 藤江哲也. 整数計画法による定式化入門. オペレーション・リサーチ. 2012, vol. 57, no. 4, p. 190-197.
- 9) 坂和正敏. 数理計画法の基礎. 森北出版, 1999, 227 p.



小笠原知義



林 弘治



吉原 孝次