

製鉄所における燃料・電力・蒸気需給ガイダンスシステム

Fuel, Electric Power and Steam Supply and Demand Guidance System in Steel Works

谷津 一茂 YATSU Kazushige JFE スチール IT 改革推進部 主任部員 (副課長)
鈴木 勝也 SUZUKI Katsuya 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)
宇野 正洋 UNO Masahiro JFE スチール エネルギー技術部 主任部員 (課長)

要旨

JFE スチールでは、製鉄所における燃料、電力、蒸気といったエネルギーのロスを最小化することを目的に、最適なエネルギー需給運用についてオペレータへガイダンスするシステムを開発した。従来の運用は、ベテランの経験や勘に頼る部分が大きかったため、エネルギーロスの削減に限界があった。本システムの適用により、若手社員でもベテランと同様に最適な運用ができるようになり、都市ガスの使用削減、副生ガス・蒸気の放散削減などの改善を実現できた。

Abstract:

In order to minimize the loss of energy such as fuel, electricity and steam in steel works, JFE Steel has developed a system to provide a guidance to operators on the optimal energy supply and demand operation. Conventional operation relied heavily on the experience and intuition of experienced operators, which limited the reduction of energy loss. By applying this system, the optimal operation can be carried out regardless of operators' experiences. As a result, JFE Steel was able to achieve a reduction in the amount of city gas used and the amount of by-product gas and steam emitted.

1. はじめに

製鉄所では、その製造プロセスで燃料・電力・蒸気といったエネルギーを多く必要とし、CO₂の排出量も多いことから、エネルギーロスを最小化することは、省エネルギー化、コスト競争力向上、CO₂排出量削減の観点で重要な課題である。

JFE スチールでは、各種の測定データ、各工場の生産計画データに基づき、数時間先までのエネルギー需給の状況について高精度に予測する技術 (以下、需給予測モデル)、および需給予測モデルから得られた結果に基づきエネルギーロスを最小化するエネルギー需給運用の最適案を求める技術 (以下、最適運用シミュレーション) を開発^{1,2)}し、オペレータによる最適なエネルギー需給運用を支援するシステムとして実機化した。

本稿では、製鉄所におけるエネルギー需給運用の特徴について述べた後、本システムの概要と適用によって得られた効果の一例について報告する。

2. 製鉄所におけるエネルギー需給運用

製鉄所のエネルギーフローについて図 1 に示す。

燃料となる副生ガスは高炉、コークス炉、転炉から主に発生し、それぞれ B ガス、C ガス、LD ガスと呼ぶ。また、それぞれを混合し熱量調整したガスを M ガスと呼ぶ。これらの副生ガスには対応するガスホルダーがあり、パuffァとして貯蔵できる。副生ガスは、工場に優先的に供給するが、工場側の需要に対して供給が不足する場合には、都市ガスを外部から購入し補填する。また、発電設備にも副生ガスを供給しており、こちらも所定量に対し供給が不足する場合には、重油を外部から購入し補填する。逆に副生ガスの供給量が需要に対し過剰となり、ガスホルダーの貯蔵上限を超える場合は、無害化した後に外部へ放散する。

電力は、コークス乾式消火設備 (以下、CDQ)、ボイラータービン発電機 (以下、BTG)、などの設備により発電したものを工場へ供給しており、工場の需要に対し不足する場合は外部の電力会社から購入し補填する。購入できる量は、電力会社との契約で定めている上限があり、単価も時間帯によって異なる。

蒸気は、転炉や焼結炉からの廃熱回収、および CDQ、BTG のボイラーからの抽気によって供給され使用される。副生ガスや電力と同様に、需要に対し不足する場合は外部

2022 年 9 月 9 日受付

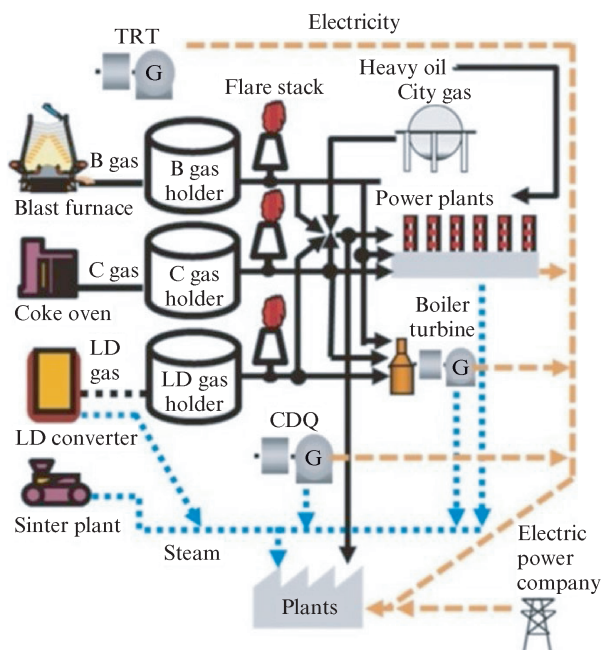


図1 製鉄所におけるエネルギーフロー
Fig. 1 Energy flow in steel works

から購入し補填する。

上記のようなエネルギーは、エネルギーセンターと呼ばれる部署で24時間365日の体制でオペレータにより運用管理されている。各製造プロセスや発電設備等への副生ガスの配分および電力・重油・都市ガス等の外部エネルギーの購入量を決定する際には、需給のバランスを取りつつ、副生ガスの放散などによるエネルギーロスや外部購入によるコストロスが最小限となるように志向している。

しかし、製鉄所のエネルギー需給構造は、その配分の組み合わせ、運用上の制約条件が多様多様であることから、非常に複雑なものとなっているため、体系的な支援なしで最適な需給運用を継続的に行うことは難しい。従来は、ベテランとされる経験豊富なオペレータに頼る部分も大きかったため、エネルギーロスやコストロスの削減には限界があった。

上記の背景を踏まえ、経験の浅い若手オペレータでも、経験豊富なベテランのオペレータと同様にエネルギーロスを最小化するエネルギー需給運用を継続的に実施できるように、ガイダンスシステムを開発した。

3. ガイダンスシステムの概要

本システムの全体構成を図2に示す。構築環境、本システムを構成する情報連携機能、需給予測・最適化機能および画面機能について、順に以降の各節で述べる。

3.1 構築環境

本システムは、IT領域に属するJFEスチールのプライ

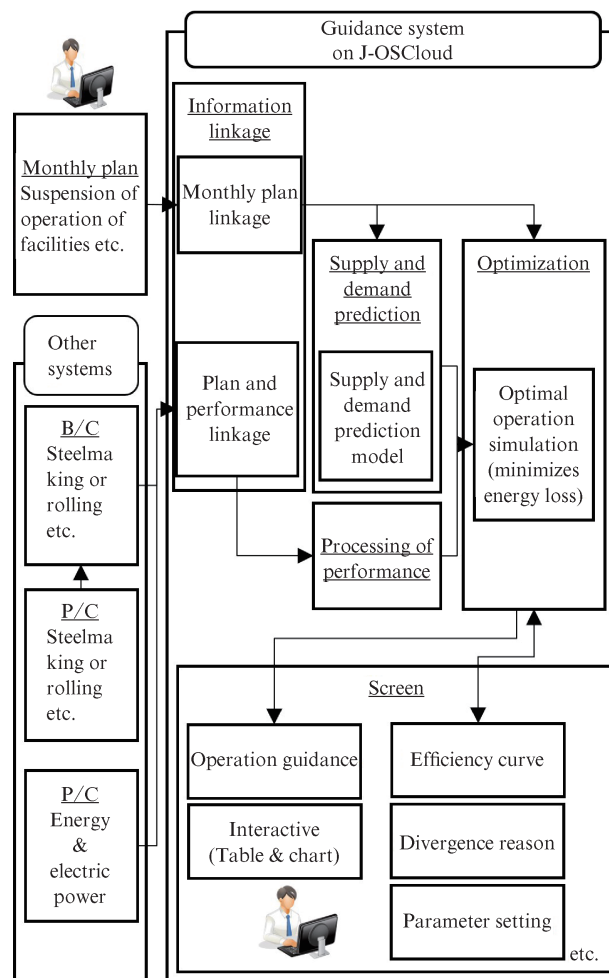


図2 ガイダンスシステムの全体構成
Fig. 2 Overall configuration of guidance system

ベートクラウド（以下、J-OSCloud）上に構築している。

通常、管理系のシステムと操業系のシステムとは、それぞれ分離されたネットワークの領域に設置しており、それぞれをIT領域、OT領域と呼ぶ。例えば、ユーザーがメールや資料作成などで利用する端末（以下、ユーザー端末）はIT領域に属しており、ユーザー端末からのOT領域への直接のアクセスは、セキュリティ上の理由から原則禁止としている。

本システムをOT領域へ構築した場合、将来的に、オペレータへガイダンスする最適な運用案について、他の操業系システムへの連携がしやすくなるといった利点はある。しかし、IT領域に構築した場合、エネルギーセンターに常駐しない技術スタッフが、自身のユーザー端末から本システムへアクセスすることで、エネルギーセンターにいるオペレータと情報を共有し遠隔で操業管理や実績解析ができるという業務効率化の観点、および将来の機能拡張の際に最新技術の柔軟な採用が期待できるという観点から、本システムはIT領域に属するJ-OSCloud上に構築した。

3.2 情報連携機能

情報連携機能は、生産計画・実績データ連携機能と月次計画連携機能からなる。生産計画・実績データ連携機能では、IT領域上のビジネスコンピュータ（以下、ビジコン）で管理している各工場の生産計画、および各工場やエネルギーセンターに設置しているOT領域上のプロセスコンピュータ（以下、プロコン）で管理している各種の測定データや実績データを収集する。JFE スチールでは、データサイエンス技術の活用、サイバーフィジカルシステムの開発により、データインフラ整備による情報の一元化を進めている。本システムでは、ビジコンで管理している製鋼工程の転炉吹錬計画データおよび圧延工程の加熱炉への装入計画データ、各工場のプロコンで管理している転炉の出鋼実績や加熱炉への装入実績、エネルギーセンターのプロコンで管理している各工場、設備の副生ガス、蒸気、電力の発生および使用実績など、さまざまなデータをリアルタイムで収集している。一方、月次計画連携機能では、自家発電設備などの月次の稼働計画、電力会社との契約情報など都度変更を伴う情報について、所定のフォーマットもしくは画面で入力された情報により収集している。

3.3 需給予測・最適化機能

需給予測機能では、需給予測モデルを活用し、現在から数時間先までの各工場の需給を予測する。予測する対象は、例えば、高炉、コークス炉、加熱炉などに関する副生ガス量である。BガスやCガスなどは停止計画と操業計画を用いたパターンに基づいた予測、LDガスや加熱炉で使用するMガスなどは、操業計画を用いた重回帰モデルにより計算している。

最適化機能では、需給予測機能で計算した予測値、および情報連携機能で収集した実績値、電力単価などのコスト変数、設備モデルの変数や制約値に基づき、製鉄所全体で見た現在から数時間先までのエネルギーロスが最小となる運用について最適運用シミュレーションを実施する。最適運用シミュレーションに関する技術の詳細については小笠原¹⁾の報告を参照されたい。

3.4 画面機能

本システムの主たる役割を担う機能は需給予測・最適化であるが、これと同等に重要な機能として見える化がある。本システムのようなオペレータの判断を支援するシステムは、画面に表示する情報の粒度や見やすさ、画面が持つ機能の使いやすさにより、継続的に利活用してもらえるかが左右されるためである。遠藤³⁾は問題の見える化については以下の5点に分類できると提唱している。

- (1) 異常の見える化
異常発生時にその事象が可視化されて共有されること
- (2) ギャップの見える化
計画や目標値に乖離が生じている場合、そのギャップが可視化されること
- (3) シグナルの見える化
異常そのものの内容ではなく、異常が発生したこと自体を知らせるシグナルを伝達すること
- (4) 真因の見える化
異常発生の原因を明らかにすること
- (5) 効果の見える化
問題解決策を立案するだけでなく、実行したうえで想定通りの効果が出ているかを示すこと

これらの見える化を踏まえつつ、実際に使用するオペレータ、技術スタッフと共に画面構成、機能を設計し、構築した。代表的な画面について以下に述べる。

3.4.1 運用ガイダンス画面

図3に運用ガイダンス画面を示す。オペレータによるエネルギー運用を支援する本システムのメイン画面であるため、見える化を特に意識している。構築に反映した特徴について見える化の分類別に以下に述べる。

- (1) 異常の見える化
ガス放散や蒸気放散などの異常を画面上にリアルタイムで表示する。同じ種類のエネルギーを取り扱う設備は、同じ領域内にまとめて配置することで異常をエネルギーの種類別に捉えやすくしている。
- (2) ギャップの見える化
それぞれの需給運用について、表示する色を使い分けて最適値と実績値を常に上段と下段に並べて表示することでギャップを捉えやすくしている。
- (3) シグナルの見える化
設定した閾値を超える乖離が発生しアクションが必要な箇所を別の色で強調して表示することで、オペレータの注意を喚起している。

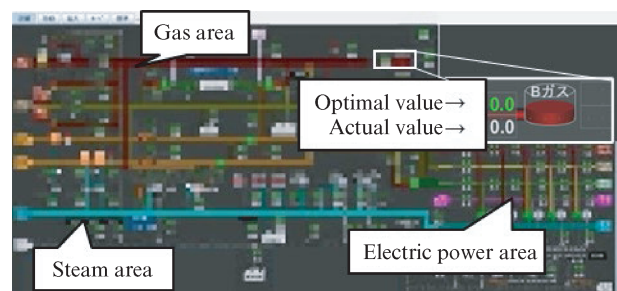


図3 運用ガイダンス画面
Fig. 3 Operation guidance screen

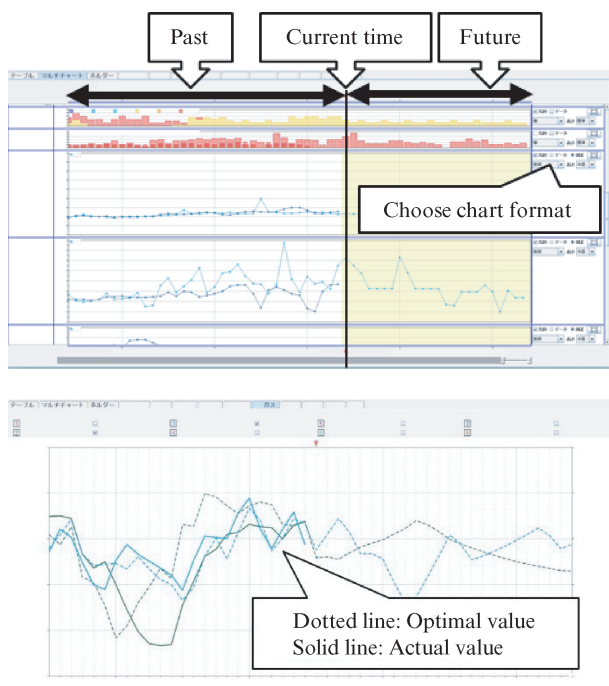


図4 マルチチャート（上段）と個別チャート（下段）
Fig. 4 Multi chart (top) and individual chart (bottom)

(4) 真因の見える化

本画面に表示する設備のアイコンから、3.4.3項で述べるモデル精度評価画面などの設定画面を表示する機能を設けることで、異常の真因を調査しやすくしている。

(5) 効果の見える化

ガイダンスされる最適な運用案を実施することで得られるコストメリットを常に表示することで、オペレータのコスト意識を醸成している。

需給予測および最適化の情報が更新される都度、上記の見える化を踏まえた情報のガイダンスに加え、必要な運用改善アクションについての具体的な指示内容も画面上でガイダンスできる。これによって、経験の浅い若手のオペレータでも、経験豊富なベテランのオペレータと同様に、最適な需給運用ができるようにしている。

3.4.2 インタラクティブ機能画面

インタラクティブ機能画面は、現在時刻を起点とする過去数時間分の最適値と実績値、および数時間先までの将来の最適値を表示する。テーブルタブ、マルチチャートタブ、個別のチャートタブからなり、テーブルタブは、Excelのような表形式で数値として表示し、マルチチャートは、図4の上段に示すとおり、テーブルタブの数値を基に、任意のデータについて、選択したグラフの形式で一覧表示する。個別のチャートタブは、図4の下段に示すとおり、運用に必要な監視ポイントであるガスホルダーレベル、ガス発生量・使用量など、より特化した対象の推移をテーブルタブの数値

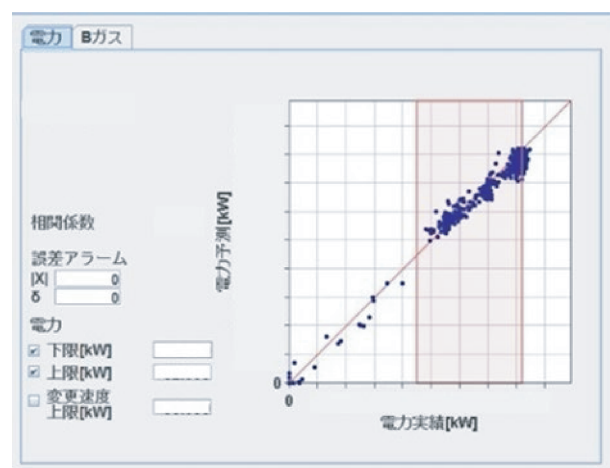


図5 モデル精度評価画面

Fig. 5 Model accuracy evaluation screen

を基に個別に表示する。直近の情報を提示する運用ガイダンス画面に対し、本画面は、個別の項目ごとに、広範囲な時間帯における詳細な異常やギャップを見える化している。

3.4.3 モデル精度評価画面

モデル精度評価画面は、図5に示すとおり、各モデルの出力値と実績値との乖離を評価することで、真因の見える化の役割を担っている。また、画面上からモデルのパラメータ値の設定変更を可能とすることで、本機能の中でモデル精度を維持できる。

3.4.4 乖離理由入力画面

オペレータが、確認した異常やギャップ、システムの改善要望事項などを入力し共有できる。共有された情報は、Excelベースで集計でき、技術スタッフによるモデルの精度評価（図5参照）や最適化パラメータの改善に活用される。

4. 適用効果

本システムを適用したJFEスチール西日本製鉄所（福山地区）では、適用前と比較し、都市ガスの使用量削減、副生ガスの放散量削減といったエネルギーロスの改善効果が得られている。

改善効果の一例として、本システムの適用前後におけるLDガスに関する効果について述べる。福山地区では、同一の製鋼工場内に複数基の転炉があり、定期的な炉修理のタイミングなどを除いて全基稼働しているため、転炉同士の吹錬がラップし、LDガスの発生量が局所的に多くなるタイミングが高頻度で生じる。適用前は、このタイミングや発生量の予測が難しかったため、事前のガスホルダーからのガス払い出しによる受け入れ容量の確保が十分でなく、ガスホルダーレベルの上限を超えてしまい放散するケースが頻発していた。図6に適用後のガスホルダーレベルの推移を示す。最適値は、ガスホルダーレベルの上限を超えない、

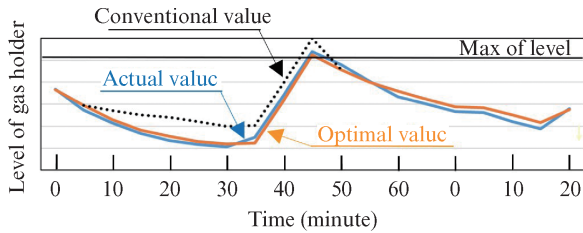


図6 ガイダンス適用前後のガスホルダーレベル
Fig. 6 Gas holder levels before and after application

つまりは放散を発生させないガスホルダーレベルの運用案を提示できており、実績値も最適値を追従している。LDガスの発生についての高精度な予測と、予測に基づく払い出しタイミングおよび払い出し量の最適値をオペレータへガイダンスできるようになったことで、従来と比較し放散量を削減できた。また、ガスホルダーレベルの最小値を、より設備の下限値に近づけた運用が可能となり、ガスホルダー運用の効率向上も図れている。

図7に適用前後のガス発生量に対する放散量の比（以下、放散率）の推移を示す。適用した2019年7月から設備点検期間を除いて着実に減少傾向となっており、本システムによるエネルギー需給運用の支援がエネルギーロスの削減に長期間にわたって寄与していることが分かる。

5. おわりに

JFEスチールではオペレータによる最適なエネルギー運用を支援するため、エネルギー最適運用ガイダンスシステムを開発した。本システムの特長は以下のとおりである。

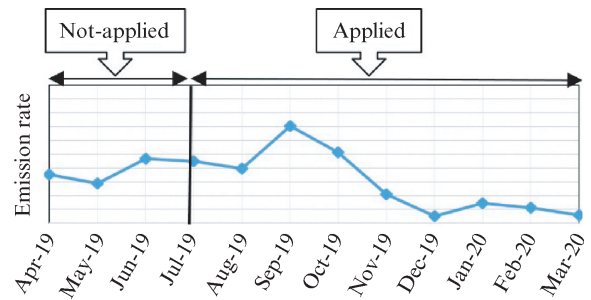


図7 LDガスの放散率推移
Fig. 7 Trends in emission rate of LD gas

- (1) 本システムは、JFEスチールのプライベートクラウドであるJ-OSCloud上に構築しており、その機能構成は情報をリアルタイムで収集するための情報連携機能、データサイエンス技術に基づく需給予測・最適化機能、および画面機能からなる。
- (2) 継続的な利用につなげるため、画面機能は特に見える化を意識し、実際に利用するオペレータや技術スタッフと共に設計し構築した。

本システムの適用により、若手、ベテランによらずオペレータによる最適なエネルギー需給運用が可能となったことで着実にエネルギーロスの削減が図れている。

参考文献

- 1) 小笠原知義, 林弘治, 吉原孝次. 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. JFE技報. 2020, no. 45, p. 26-31.
- 2) Suzuki, K.; Ogasahara, T.; Uno, M.; Yatsu, K. Application of Guidance System for Fuel and Power Management in Steel Works through Model Predictive Control. Mining, Mineral and Metal Processing. Sept 2, 2021, Nancy, France.
- 3) 遠藤功. 見える化 強い企業をつくる「見える」仕組み. 東洋経済新報社. 2005, 224p (p. 61-66).