

製鉄所における燃料・電力運用ガイダンスを実現する サイバーフィジカルシステム

Cyber-Physical System for Fuel and Power Management Guidance in Steel Works

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 グループリーダー
小室 正之 OMURO Masayuki JFE スチール 東日本製鉄所（千葉地区） エネルギー部 エネルギー室長
青木 圭太 AOKI Keita JFE スチール 東日本製鉄所（千葉地区） エネルギー部 エネルギー室 副室長

要旨

製鉄所の省エネルギーを図るために、JFE スチールは製鉄所における燃料・電力運用ガイダンスを実現するサイバーフィジカルシステムを開発した。本システムは生産計画に基づく需給予測を踏まえて、現在から数時間先までの燃料・電力購入および放散といったエネルギー運用損失を最小化するモデル予測制御を行う。得られた運用条件を定周期でオペレータにガイダンスし、運用を支援することで従来の運用がさらに効率的になる。これまでに JFE スチール西日本製鉄所（福山地区、倉敷地区）へ導入されており、東日本製鉄所（千葉地区）にも今回展開し全地区展開を完了している。

Abstract:

In order to reduce the energy loss on operation in steel works, JFE Steel developed a cyber-physical system for fuel and power management guidance. Based on the supply-and-demand predictions derived from the production plans, the system calculates the operation condition at each process to minimize the loss by a model predictive control. Management to reduce the loss is carried out in accordance with the predictions and calculated operation condition, contributing to improved operation. It has been applied to JFE Steel's West Japan Works (Fukuyama, Kurashiki) and expanded to East Japan Works (Chiba).

1. はじめに

製鉄所では鉄鉱石などの原料から鉄鋼製品を製造する上で、多くのエネルギーを必要とする。製鉄所の省エネルギーを図るために、製鉄所で使用する燃料・電力を適切に把握し効率的に運用することが望ましい。

これを解決するために、JFE スチールは燃料・電力運用ガイダンス技術を開発した。本技術はこれまでに JFE スチール西日本製鉄所（福山地区、倉敷地区）へ導入されており、東日本製鉄所（千葉地区）にも今回展開し全地区展開を完了している。本取り組みは、革新的な生産性向上および安定操業の実現を目指すために JFE スチールが積極的に推進しているデジタルトランスフォーメーション（DX）の一つとして位置づけられる。

本稿では、まず燃料・電力運用の概要と課題について説明した後、サイバーフィジカルシステム（CPS）の視点から燃料・電力ガイダンスについて述べ、東日本製鉄所（千葉地区）への適用例について示す。

2. 製鉄所における燃料・電力運用と課題

2.1 燃料・電力運用の概要

製鉄所では、高炉、コークス炉といった製鉄工程、転炉、連続鋳造といった製鋼工程、熱延、冷延といった圧延加工工程を経て鉄鋼製品を製造している。製鉄工程の高炉では、コークス炉で石炭を炭化させたコークスと鉄鉱石を溶かして溶銑を作り、製鋼工程の転炉で溶銑の成分調整を行い溶鋼としている。この一連の過程で、高炉ガス（B ガス）、転炉ガス（LD ガス）、コークス炉ガス（C ガス）と呼ばれる副生ガスが発生する。

図 1 に製鉄所におけるガス、電力、蒸気のフローを示す。発生した副生ガスは、圧延加工工程の熱延加熱炉などの工場や発電所で使用される。余剰となった副生ガスはガスホルダに貯蔵され、必要に応じて払い出されるが、ガスホルダの貯蔵量が上限に達した場合、余剰ガスは大気中に燃焼放散される。また、発電所は副生ガスを利用して電力や蒸気を生産させ、製鉄所のさまざまな工場へ供給している。ただし、副生ガスが不足となる場合には、燃料（都市ガスなど）、電力を製鉄所外から購入して使用している。

2026 年 4 月 3 日受付

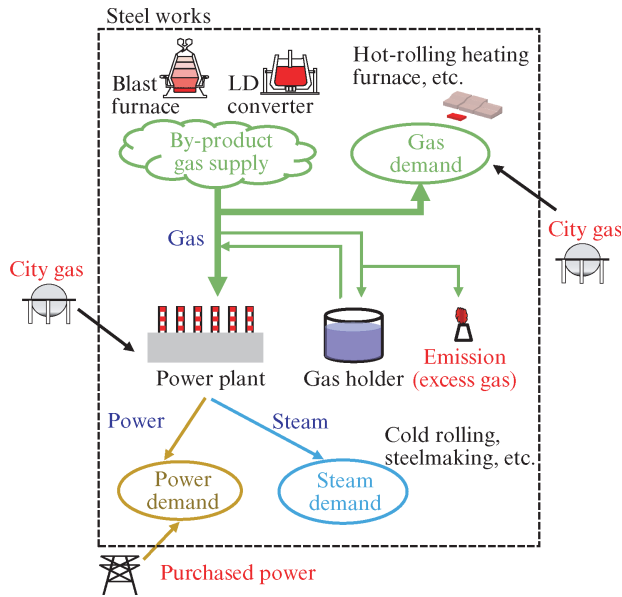


図1 製鉄所におけるガス、電力、蒸気フロー

Fig. 1 Gas, power, and steam flow in steel works

2.2 運用上の課題

製鉄所では、省エネルギーの観点で運用効率化が求められる。そのため、ガス、電力、蒸気の効率的な配分が必要となるが、その配分はさまざまな条件によって変化する。刻々と変化する需給状況として、契約電力に対する余裕、ガスの需給バランス、ガスホルダーレベルや設備の稼働状況などを考慮する必要がある。また、発電所については、需給状況を踏まえながら発電効率の違いなどを考慮して、効率的な配分のために最適な運用をオペレータが行う。これらの運用条件の組合せは多岐に渡るため、オペレータは運用条件を見出すために相当な時間や労力を要している。実際の運用はオペレータの経験や能力によるところが大きく、想定

外のケースとなった際には燃料・電力の追加購入や放散といったエネルギー運用損失が生じていた。

3. 燃料・電力運用ガイダンス

本章では、上述の課題を解決するために導入された燃料・電力運用ガイダンスの開発経緯、ガイダンスを実現するサイバーフィジカルシステム、モデル予測制御の活用について述べる。

3.1 運用ガイダンスの開発経緯

JFE スチールは当初、燃料運用を対象とした燃料最適化システム¹⁾を開発導入し、その後、電力を含めた燃料・電力最適化システム²⁾へ拡張している。さらに、高精度な需給予測モデルを開発し、それらをモデル予測制御により組み合わせることで、燃料・電力運用ガイダンスを行うサイバーフィジカルシステム³⁻⁵⁾を実現した。これまでに JFE スチール西日本製鉄所（福山地区、倉敷地区）へ導入されており、東日本製鉄所（千葉地区）にも今回展開し、全地区展開を完了している。

3.2 サイバーフィジカルシステム

JFE スチールは、自ら学習し自律的に最適自動操業を行うインテリジェント製鉄所⁶⁾を目指している。そのコア技術がサイバーフィジカルシステム⁷⁾であり、それは仮想空間（サイバー）に設けた物理/統計モデルと実際の製鉄所（フィジカル）とを結び付け、仮想空間でのシミュレーションにより見出した最適操業の方案を実際の製鉄所に適用することにより、トラブル抑止、商品歩留り・品質の向上、開発の迅速化、労働生産性の向上および熟練者減少への対応を図ろうとするものである。サイバーフィジカルシステムの構築にあたっては、フィジカルデータを取得する計測技術、サイバー

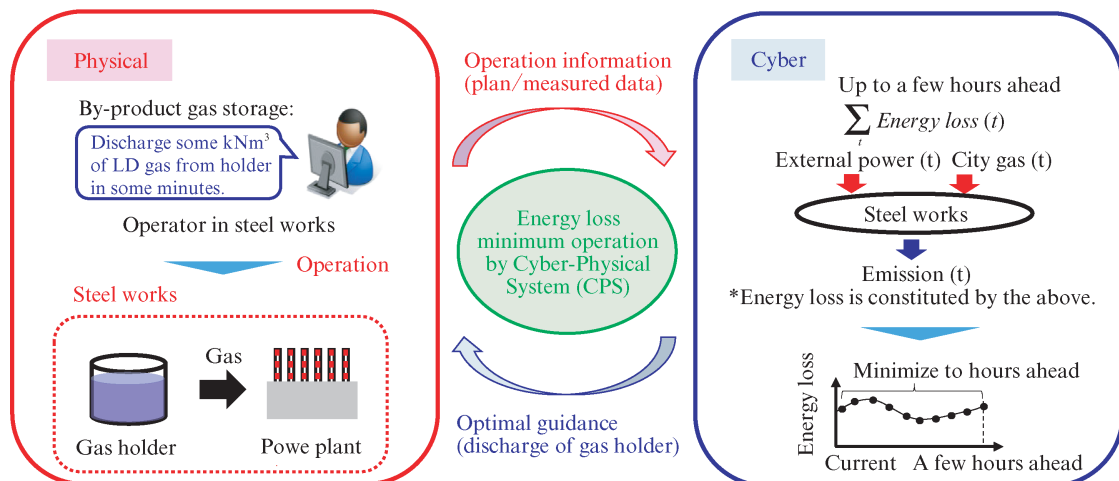


図2 燃料・電力運用ガイダンスのサイバーフィジカルシステム

Fig. 2 Cyber-physical system for fuel and power management guidance

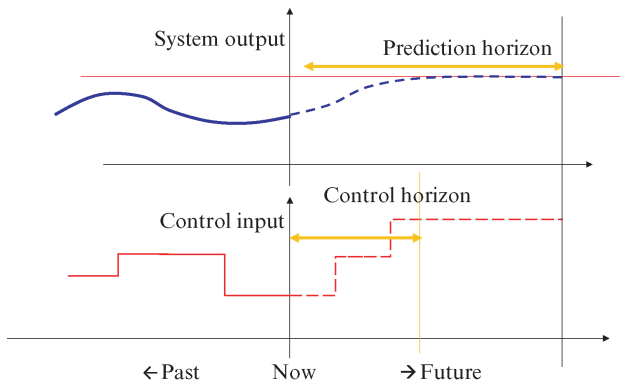


図3 モデル予測制御の概念図

Fig. 3 Concept of model prediction control

空間におけるモデル（デジタルツイン）をベースとした制御技術，それらを構成するシステム技術が肝要とされている。本稿で言及している燃料・電力運用ガイダンスのサイバーフィジカルシステムは JFE スチールのプライベートクラウド (J-OSCloud) 上に構築されており，この概念を体現したものである。その構成を図2に模式的に示す。サイバー空間では，入力された計画データや測定データの運用情報を用いて，事前に需給予測を行ったうえで，現在から数時間先までのエネルギー運用損失が最小となるように，運用条件のシミュレーションとしてモデル予測制御を行う。サイバー空間で得られた「ガスホルダの払出し」といった最適ガイダンスをフィジカル空間へ定周期でリアルタイムに提示し，製鉄所のオペレータの燃料・電力運用を支援する。ガイダンス例として，「副生ガス貯蔵量に関して〇分後，転炉ガス〇kNm³を払出す」といったメッセージがオペレータへ提示される。これにより，従来の運用がさらに効率的になる。

3.3 モデル予測制御の活用

上述のように，本ガイダンスのサイバーフィジカルシステムではモデル予測制御⁷⁾を活用している。モデル予測制御とは，制御対象を精緻にモデル化（物理モデル，統計モデル等）し，プラントの未来の挙動を予測し，予測値が目標どおりになるように操作量を決定するアルゴリズム全般を指す。図3はモデル予測制御の概念図である。下段の制御入力に対して，プラントは上段のシステム出力に対応した挙動を示す。

製鉄所の省エネルギーを図る上で課題となっている燃料・電力の購入や放散といったエネルギー運用損失を最小化するために，この制御手法を活用する。以下に，本ガイダンスのモデル予測制御を構成する需給予測とシミュレーションについて述べる。

3.3.1 需給予測

計画データや測定データは高炉，コークス炉，転炉，熱延加熱炉などを対象としたものであり，各工場の需給予測は，これらに基づく現在から数時間先までの予測である。予

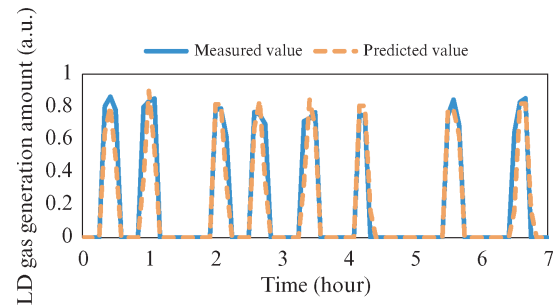


図4 転炉ガス予測値と測定値の比較

Fig. 4 Comparison between predicted and measured values of LD gas generation

測にあたっては，統計モデルによって高炉ガス，コークス炉ガス，転炉ガスの発生量，および熱延加熱炉での混合ガス使用量を求める。なお，混合ガスは，副生ガスと都市ガスを混合したものである。具体的には，高炉ガスとコークス炉ガスのモデルはそれぞれ休風計画と装炭計画を用いた発生パターンのモデルであり，転炉ガスや加熱炉ガスのモデルは生産計画を用いた回帰モデルである。

図4に転炉ガスの発生量予測の一例を示す。転炉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。本例では，転炉操業によるガス発生量の測定値と比較して，良好な精度で予測できていることが分かる。

3.3.2 シミュレーション

この需給予測を踏まえて，モデル予測制御のために，燃料・電力シミュレーションを行う。これは評価関数と制約条件からなる数理計画によるものである。図5に示すとおり，制約条件として，発電所の発電機能力，副生ガスを貯蔵するガスホルダ容量，および製鉄所内のガス，電力，蒸気の需給バランスなどが挙げられる。評価関数は，現在から数時間先までの燃料・電力購入，放散等のエネルギー運用損失である。制約条件を課した上で評価関数を最小化する混合整数線形計画問題（数理計画問題の一種）として定式化する。これを分枝限定法⁸⁾と呼ばれる求解法によって効率的に解くことで，エネルギー運用損失の最小条件を求める。最終的に，得られた運用条件や予測値および実績値を定周期でオペレータへ提示し，オペレータによる運用を支援する。

なお，エネルギー運用損失の表現は種々あるが，近年ニーズが顕在化しているカーボンニュートラルの観点でCO₂排出量の削減が喫緊の課題となっていることから，局面に応じてCO₂排出量も評価できるようにしている。

4. 東日本製鉄所（千葉地区）への適用例

燃料・電力運用ガイダンスの，ガスホルダの効率的な払出しへの活用例を述べる。モデル予測制御を活用したアクションとして，転炉ガス発生の将来予測に対応して，転炉

Constraints

Modeling of characteristics, rules and phenomena

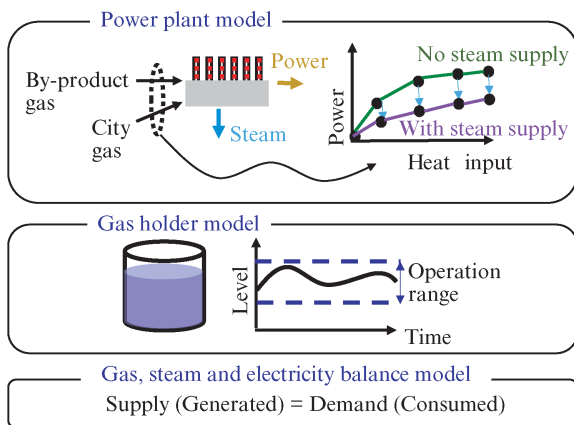


図5 燃料・電力シミュレーションの制約条件
Fig. 5 Constraints of fuel and power simulation

ガスの発生前に、貯蔵されているガスを事前にガスホルダから払出す（制御入力）。事前に払出された転炉ガスは熱延加熱炉や発電所などで使用されるため、燃料・電力の購入削減につながる。さらに、ホルダレベル（システム出力）を下限まで下げておくことにより、転炉ガスの放散を行わずに、発生する転炉ガスを回収できる。

東日本製鉄所（千葉地区）における転炉ガスのガスホルダレベルを図6に示す。従来運用ではガスホルダから余剰ガスが放散される可能性があるが、ガイダンス導入後は、上述のようにガスホルダからの事前払出しとガスの有効活用により、ホルダレベルの上限到達を抑えることができていた。また、図7に示すようにガス放散リスクも低減できている。なお、ガス放散リスクとは、ホルダレベルの変動を指標化したものである。このように、本ガイダンスにより、効率的なガスホルダ運用ができるようになった。

5. おわりに

製鉄所における省エネルギーを図る上で、燃料・電力の購入や放散といったエネルギー運用損失が課題である。これを解決するため、JFE スチールは燃料・電力運用ガイダンスを実現するサイバーフィジカルシステムを開発した。

- ・モデル予測制御を活用したガイダンスシステムとしてこれまでにJFE スチール西日本製鉄所（福山地区、倉敷地区）に導入され、東日本製鉄所（千葉地区）にも今回展開し、全地区展開が完了している。
- ・ガイダンス適用後、ガス、電力、蒸気がより効率的に配分され、製鉄所の省エネルギーに貢献している。

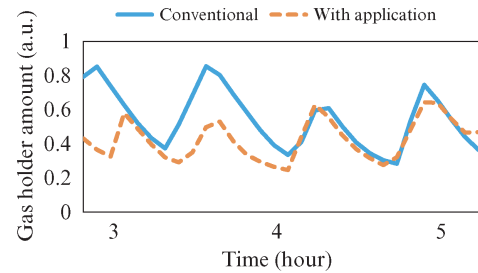


図6 転炉ガス放散の削減
Fig. 6 Reduction of LD gas emission

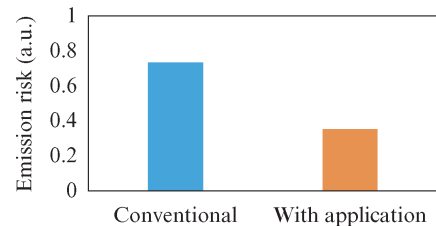


図7 ガス放散リスクの削減
Fig. 7 Reduction of gas emission risk

- ・また、近年ニーズが顕在化しているカーボンニュートラルの観点でCO₂排出量の削減が喫緊の課題となっていることから、局面に応じてCO₂排出量も評価できるようになっている。

本取り組みは、革新的な生産性向上および安定操業の実現を目指すためにJFE スチールが積極的に推進しているDXの一つとして位置づけられる。今後も引き続き、DXを通じて持続可能な社会の実現に努めていく。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 谷津一茂, 鈴木勝也, 宇野正洋. 製鉄所における燃料・電力・蒸気需給ガイダンスシステム. JFE 技報. 2023, no. 51, p. 20-24.
- 5) 鈴木勝也, 小笠原知義, 宇野正洋, 谷津一茂, 亀井卓哉. 製鉄所における燃料・電力運用ガイダンスシステムの開発. 日本エネルギー学会機関誌えねるみくす. 2023, vol. 102, no. 4, p. 401-405.
- 6) JFE ホールディングス DX REPORT 2021, p. 6.
- 7) 山口収, 飯塚幸理. JFE スチールの計測・制御・システム技術の発展と今後の展望. JFE 技報. 2025, no. 56, p. 1-7.
- 8) 茨木俊秀. 岩波講座 応用数学 [方法8] 離散最適化法とアルゴリズム. 1版, 岩波書店. 1993, 127p. (p. 75-77).

本稿は、主執筆者が同じく執筆した参考文献5)の一部表現を変更して引用しております。