

製鉄所操業戦略モデル開発

Development of Steelworks Operation Strategy Model

小川 直孝 OGAWA Naotaka JFE スチール スチール研究所 カーボンニュートラルプロセス研究部 主任研究員 (課長)

要旨

複数の部門で構成される製鉄所では、操業計画は部門ごとではなく製鉄所全体を最適化し策定することが必要である。JFE スチールでは、全体最適を容易かつ高精度に実施すべく製鉄所操業戦略モデルを開発し、東日本製鉄所(京浜地区)に実装した。最適化対象は、製造コストおよび二酸化炭素排出量への影響が大きい高炉プロセスとエネルギー部門とし、製造コストおよび二酸化炭素排出量が所定の条件を満たすような主要な高炉操業諸元をガイダンスとして出力する。これにより、製鉄所全体での操業評価が容易になり、コストおよび二酸化炭素排出量の削減に貢献している。

Abstract:

In the steel works composed of multiple divisions, it is necessary to optimize and formulate the operation plan not for each division but for the whole steel works. JFE Steel has developed a steel plant operation strategy model for easy and accurate overall optimization, and implemented it in East Japan Works (Keihin District). The optimization target is the blast furnace process and the energy sector, which have a large impact on the production cost and carbon dioxide emissions. Main blast furnace operation conditions which satisfy the prescribed conditions are output as a guidance. It makes easy to evaluate the whole steel mill operation, and contributes to the reduction of cost and carbon dioxide emissions.

1. はじめに

JFE スチールでは、受注内容や製造コスト、二酸化炭素排出量等、さまざまな要素を考慮し操業計画を策定している。例えば生産計画は、受注内容(品目、量、品質、納期等)を前提条件とし、製鉄、製鋼、圧延等各部門の保全計画や個別事情を加味して策定する。一方、各部門における詳細な操業計画は、原料の需給計画やガス、電力、蒸気といった用役の需給計画を考慮しながら、製造コストおよび二酸化炭素排出量が最適となるよう策定する。

製鉄所の製造コストは原料費、用役費、資材費、外注費、労務費等で構成される。このうち、資材費、外注費、労務費等は一般的に他部門に影響を及ぼさないのに対し、原料費および用役費は部門を横断し相互に影響し合う。また、二酸化炭素排出量は主に還元材として使用する炭材や用役の需給、運用に強く依存する。そのため、製造コストおよび二酸化炭素排出量を最適化するためには、原料や用役の使用量が多い製鉄部門と製鋼部門、および用役の需給、運用を担当するエネルギー部門との連携を密にし、部門ごとではなく製鉄所全体で最適化する必要がある。

JFE スチール東日本製鉄所(京浜地区)では、部門を横断した操業計画策定モデルの第一弾として、高炉プロセス

とエネルギー部門を最適化する操業戦略モデルを構築した。本稿では、構築した操業戦略モデルの内容とモデルを活用した操業戦略策定事例を中心に述べる。

2. 製鉄所操業戦略モデルの概要

2.1 高炉プロセス

高炉は、炉頂からコークスと鉄鉱石を交互に装入し、炉下部にある羽口から熱風を吹き込み、羽口先で還元材中のカーボンと熱風の反応で発生した還元ガスにより鉄鉱石を還元し溶銜を得るプロセスである。還元材としては、コークスの他に安価な微粉炭が広く使用されており、還元材全体に占める微粉炭の比率が高くなるほど製造コスト面で優位となることが知られている¹⁾。

高炉で使用する主な用役としては、前記の熱風のほかに、熱風炉(高炉送風用空気を約1200℃まで昇温し熱風を得る設備)の燃料ガス、熱風中の湿分を調整するための添加蒸気、熱風中の酸素濃度を調整する富化酸素、微粉炭を粉砕および乾燥するための燃料ガス等があげられる。

また、羽口先で発生した還元ガスは炉内上昇過程で鉄鉱石を還元し炉頂から排出される。一般に、還元ガス中の還元成分(一酸化炭素および水素)が炉内で完全に消費されることはなく、これら可燃成分が残留した状態で排出される。そのため、炉頂からの排出ガス(高炉ガスと呼ぶ)は

2023 年 9 月 26 日受付

可燃ガスとして製鉄所内で再利用するために回収している。また、高炉ガスは炉頂部でも数百 kPa 程度の圧力を有しているため、炉頂圧発電設備で電力回収も行っている²⁾。

これら使用または回収している用役の原単位と還元材の原単位（還元材比と呼ぶ）とは、相互に密接に関連している。例えば還元材比が高くなると、カーボンと反応するための必要酸素量が増えるため、熱風原単位は上昇する傾向となる。その結果として熱風炉燃料ガスおよび調湿用添加蒸気の原単位も上昇する。この時、羽口先で発生する還元ガス量は増加し、高炉ガス回収および炉頂圧発電の原単位も上昇する傾向となる。

2.2 エネルギー部門

エネルギー部門では、用役種ごとに需給管理しており、各部門の安定した生産活動を支えている。製鉄所では、前述した高炉ガスのほかに、コークス製造過程でコークス炉ガスが、溶銑の精錬過程で転炉ガスが副生する。これら副生ガスは製鉄所内で主に燃料ガスとして使用される。また、東日本製鉄所（京浜地区）には、余剰となる副生ガスを燃料として活用し電力に変換する自家発電設備が併設されており、製鉄所内の電力需要および蒸気需要に対応している。

このように、ガス、電力および蒸気それぞれの需給には密接な関係があるが、いずれかの用役に過不足が生じた場合には、外部とのエネルギー売買が必要となる。例えば高炉ガス不足により電力需要を満たせない場合には、自家発電設備の燃料用として都市ガスや重油を購入するか、もしくは電力会社から電力を購入することになる。反対に、高炉ガスが余剰となり自家発電量が電力需要を上回る場合には、電力売却も選択肢の一つとなる。これらは外部とのエネルギー売買契約やコスト、二酸化炭素排出量を考慮し決定している。

2.3 製鉄所全体評価の必要性

以上のように、高炉操業はエネルギー部門が管理する用役需給に少なからず影響する。そのため高炉単独でのコストおよび二酸化炭素排出量評価と、エネルギー部門までを考慮した評価とでは結果は異なる。図1は、ある高炉操業諸元から異なる6つのアクションI～VI（表1）を起こした場合のコスト評価結果である。ここでアクションとは、それぞれコークス比（溶銑製造1トン当たりのコークス使用量）2 kg/t相当の増熱操作と減熱操作の組合せを指し、高炉内の熱収支は等価に保たれるものの炉外のエネルギー収支や物質収支には変化をもたらすものである。図1の縦軸は、評価コストを指数化したものである。評価コストは、アクションを起こす前後の製造コスト差として算出し、Cost merit index は、アクションVIの高炉プロセスの評価コストを1と定義し求めた。図中の棒グラフは高炉およびエネルギー部門それぞれを、折れ線グラフは両者を合算した全体の Cost

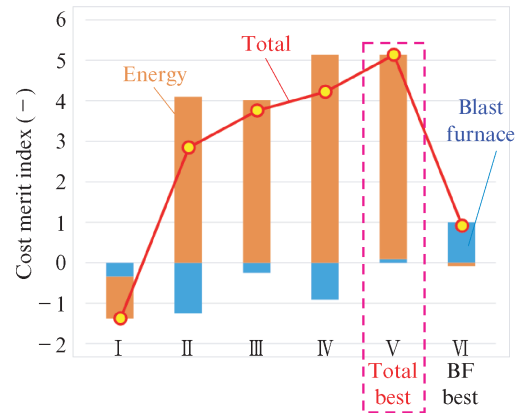


図1 コスト評価例

Fig. 1 Cost evaluation example

表1 高炉操業アクション (図1)

Table 1 Operational action in blast furnace (Fig. 1)

Action no.	Heating operation	Reducing operation
I	Coke ratio	Pulverized coal ratio
II	Coke ratio	Blast moisture
III	Coke ratio	Blast temperature
IV	Pulverized coal ratio	Blast moisture
V	Pulverized coal ratio	Blast temperature
VI	Blast moisture	Blast temperature

merit index を示している。高炉単独ではアクションVIが最適であるのに対し、エネルギー部門を考慮した総合評価ではアクションVが最適であることがわかる。また、高炉でマイナス評価となる場合でも、エネルギー部門で大幅なプラス評価となりプラスの総合評価を得るケースが複数存在する。このように、部門操業計画の策定に際しては、部門単独のみならず製鉄所全体で評価することが望まれる。

2.4 製鉄所操業戦略モデル

製鉄所操業戦略モデルは、部門を横断し製鉄所全体でのコストおよび二酸化炭素排出量の評価を可能とするツールである。戦略モデルの概略を図2に示す。説明変数として主要な高炉操業諸元を、目的関数として総合コストまたは二酸化炭素排出量を設定し、目的関数が所定の条件を満たすような説明変数の組合せを推奨操業諸元として出力する。高炉プロセスとエネルギー部門間で受け渡される各用役量は、既存の高炉物質熱収支モデルや熱風炉モデルを活用して算出することを基本とするが³⁾、しばしば発生する理論値と実績値との乖離を補うためにデータサイエンス的な工夫を施している。また、説明変数の変化に対応して各用役の需給バランスが変化すると、エネルギー部門では自家発電量や外部とのエネルギー売買量を調整するなど、リバランスさせる必要が生ずる。そのため、本モデルでは用役需給のリバランスロジックをあらかじめ組み込んだ。ロジックが複数

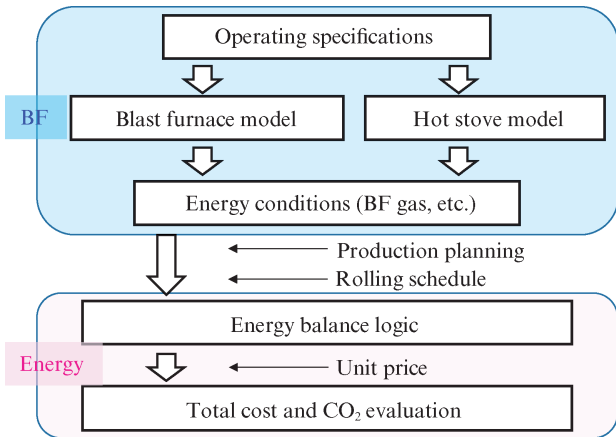


図2 戦略モデルの概略

Fig. 2 Overview of strategy model

想定される場合は、各想定ケースについて並列に計算し、それぞれの目的関数を評価することによりロジックの優劣を示すことも可能となる。

図3に戦略モデルの計算フローを示す。計算前提として製鉄所各部門の生産計画を入力すると、高炉プロセスでは出鉄量に対応した標準的な操業諸元が自動表示される。同様にエネルギー部門においても、粗鋼生産量や出鉄量、圧延稼働スケジュールに対応した標準的な用役需給および自家発電量が自動表示される。これら標準的な操業状態を「ベース」と呼ぶ。次に、説明変数である主要な高炉諸元を変化させる（変化させた操業状態を「ケース」と呼ぶ）とロジックに沿って目的関数が自動評価される。ここで、説明変数の探索範囲は、アクション量の上下限值と刻み値としてユーザー設定したものである。このように、本モデルでの目的関数の評価は「ベース」と「ケース」とを比較して行う相対評価である。相対評価とすることで、計算範囲の限定により短時間で計算できると同時に、標準状態からの変化とすることで現実的で採用率の高い推奨諸元を得られる。

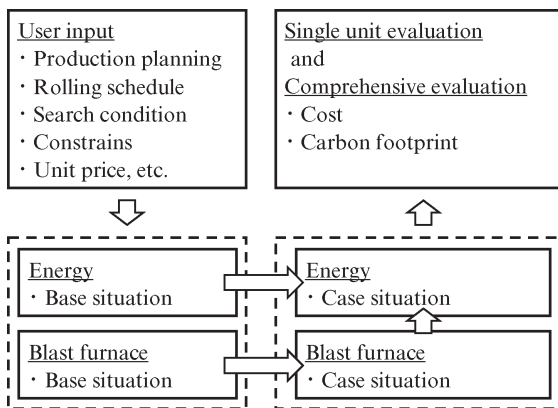


図3 計算フロー

Fig. 3 Calculation flow

3. 実装システム

3.1 全体構成

東日本製鉄所（京浜地区）に実装したシステムは、前章に記載した操業計画策定を行うパートのほかに、実績データ蓄積パート、前日操業評価パートを加えた3つのパートで構成されている。実績データ蓄積パートと前日操業評価パートは、毎日決まった時刻に起動し自動的に処理するようプログラムされている。

3.2 実績データの蓄積とデータ処理

実績データ蓄積パートでは、各部門の日ごとおよび時間ごとの実績データをシステム内に取り込み、時間ごとのデータは昼夜ごとのデータに変換した後蓄積する。ここで、昼夜とは電力会社との購入電力契約の時間帯により定義される。例えば、平日で20時を境に電力契約（購入電力単価等）が変化する場合には、20時までを昼、それ以降を夜と定義する。また、休日で一日を通して平日の夜間同様の契約の場合には、終日夜と定義する。

次に、各実績データを粗鋼生産量や出鉄量、圧延稼働実績、および昼夜の別により分けし、集計する。これは前章に記載したベース状態を自動表示するために必要な処理である。日々、新たなデータを取り込み区分ごとに集計していくことにより、実態に即したベース状態を維持できる。

また、高炉物質熱収支モデルおよび熱風炉モデルで計算される理論値と実績値との乖離を補正するためのデータ処理も併せて行われる。例えば高炉ガスの回収原単位はおおむね還元材比や羽口先で発生する還元ガスの化学組成から予測計算できるが、還元ガスの反応効率を正確に予測することは困難であるため、数パーセント程度の乖離は避けられない。他方、エネルギー部門ではこの数パーセント程度の乖離により用役バランスロジックを正確に選択できなくなる可能性もあるため、データ処理により理論値と実績値との乖離を監視し、必要に応じ操業担当者は理論値を補正した形でエネルギー部門へ用役データを受け渡せるようにしている。

3.3 前日操業の評価と最適操業の見える化

前日操業評価パートは、実績データ蓄積パートに続いて自動的に実行される。このパートでは、前日実績の高炉操業諸元および用役需給をベースとして、操業計画策定パートと同様の方法で最適な説明変数の組合せと、総合コストおよび二酸化炭素排出量の差分を出力する。日々の実績諸元と併せて最適諸元を出力することにより、操業担当者は最適操業の方向性を把握でき、日々の細かな操業方針の調整を行うことができる。

3.4 操業戦略の策定

操業計画策定パートは、他のパートとは異なり必要に応じて任意のタイミングでユーザーが起動する。高炉というプロセスの特性上、操業方針を大きく頻繁に変更することは好ましくないため、通常は月次の生産計画が立案されたタイミングや、月内でそれが修正された時、主要な工程が突発的に休止した時等、月間1~3回程度の活用を想定している。それ以外の操業計画の微調整には、前日操業評価パートに蓄積された最適諸元を参照する。

ところで、高炉部門における操業方針の最終決定は、本モデルで考慮した製造コストや二酸化炭素排出量のほかに、生産計画を維持するために不可欠である炉内通気性や、アルカリ、亜鉛等の不純物元素の収支、高炉本体および付帯設備の温度、圧力管理状況等、さまざまな要素を考慮し行う。これらすべての要素を本モデルに取り込むのは現実的な計算時間や計算精度を担保することが困難であるため見送っている。そのため、本モデルでコスト等の観点から出力する最適諸元は、操業方針決定においてはひとつの候補に過ぎない。以上から、実装システムではコストまたは二酸化炭素排出量またはその双方の観点から優位といえる20種類の推奨諸元を出力している。これにより意思決定の幅が広がり出力結果の採用率向上に繋げられる。

異なる前提条件で試験的に操業した場合のケーススタディを行った。6種類の前提条件下で、あるベース状態から高炉プロセスで異なる6つのアクションを起こした場合のコストメリットを評価した。計算の前提条件を表2に、高炉プロセスでのアクション内容を表3に、計算結果を表4に示す。表2における圧延稼働計画は、主要なミルの稼働、非稼働の別を示している。圧延工程は電力需要が大きく、電力需給に及ばず影響が大きい。コークス単価および原油市況は、その組み合わせ次第で最適操業の考え方が変化する。例えば、コークスが安価で原油市況が高騰している場合には、高炉プロセスでコークス使用量（または微粉炭使用量）を増大させてでもガス回収量を増大させ、エネルギー部門で購入する都市ガスや重油量を抑制することが最適となることが多くなる。表3に示した6つのアクション1~6とは、高炉でコークス比2kg/t相当の増熱操作と減熱操作を複数組合せたもので、高炉内の熱収支は一定に保たれている。表4のCost merit indexとは、評価されたコストメリットを指数化したもので、条件1のアクション1の評価額を1と定義して求めた。表4では、条件毎にCost merit indexの1位および2位を強調して示している。1位となるアクションは4および5に限られるが、1位、2位の組合せは6つの前提条件すべてで異なることがわかる。先に述べたように、高炉操業方針の決定はコスト面のみならず様々な要素を勘案して決定するため、必ずしも1位のアクションが採用できるとは限らず、このような順位付けの変化を把握することは有用

表2 ケーススタディ条件

Table 2 Case study condition

	Prerequisites			
	Rolling schedule	Coke unit price	Oil market conditions	Tapping amount
Case1	Operation	Usually	Usually	Usually
Case2	Operation	Usually	Usually	High
Case3	Unattended	Usually	Usually	High
Case4	Unattended	Usually	Usually	Usually
Case5	Unattended	Usually	Soaring	Usually
Case6	Unattended	Soaring	Soaring	Usually

表3 高炉操業アクション

Table 3 Operational action in blast furnace

Action no.	Heating operation	Reducing operation
1	Pulverized coal ratio	Coke ratio
2	Coke ratio	Blast moisture
3	Coke ratio	Blast temperature
4	Pulverized coal ratio	Blast moisture
5	Pulverized coal ratio	Blast temperature
6	Blast moisture	Blast temperature

表4 ケーススタディ結果

Table 4 Case study result

	Cost merit index					
	Action1	Action2	Action3	Action4	Action5	Action6
Case1	1.0	1.8	2.5	2.8	3.3	0.5
Case2	0.8	1.5	2.5	2.3	3.3	1.0
Case3	0.5	-0.3	0.5	0.3	0.8	0.8
Case4	1.0	2.0	1.3	2.8	2.3	-0.8
Case5	0.8	2.0	1.0	3.0	1.8	-1.0
Case6	2.3	0.5	-0.5	3.0	1.8	-1.0

である。このように、本モデルはコスト評価等を容易に予測計算できるため、前提条件の変化が生じた場合でも、適時に全体の最適化に係る再計算を行うことで、スムーズな操業計画再策定の一助となる。

4. おわりに

以上のとおり、製鉄所操業戦略モデルにより、部門を横断した製鉄所全体の最適操業戦略を策定することが容易となった。今後は、京浜地区のみならず他拠点へも展開し、さらにはコークス部門や製鋼部門等の取り込みも図り、より高度で実用的な戦略モデルを構築する予定である。

参考文献

- 1) 稲葉晋一、八木順一郎。高炉への微粉炭吹込み技術の現状。鉄と鋼。1992, vol. 78, no. 7, p. 233-243.
- 2) 佐々木洋三。高炉炉頂圧発電の現状について。鉄と鋼。1978, vol. 64, no. 13, p. 92-99.
- 3) 小野陽一。Rist 操業線図(1)。鉄と鋼。1993, vol. 79, no. 9, p. 618-624.