

エネルギープラントの最適運用システム

特集

小出 哲也 (こいで てつや)

松本 宏治 (まつもと こうじ)

北川 慎治 (きたがわ しんじ)

1 まえがき

鉄鋼業は、好調な内外需要を背景に製造業向け生産が増加基調を続けている。一方、鉄鋼業はわが国の最終エネルギー消費の約11%を占める産業であるため、エネルギー使用効率の向上にはかねてから積極的な取組みを行っている。第一次石油危機以降約20%の省エネルギーを実現したが、さらに近年の地球規模での温暖化防止対策の重要性を強く認識し、省エネルギー対策の一層の取組みに努めている。その取組みの一つに生産工程における省エネルギーがあり、2010年度のエネルギー消費量を1990年度に対し、10%の削減を目標としている⁽¹⁾。

富士電機は、いち早く製鉄所エネルギー管理の有用性に着目し、エネルギー管理システムの代名詞ともなった“エネルギーセンター”を納入し続けている。製鉄所のエネルギー需給構造は多種多様であり、かつ相互に複雑な関係を持っている。エネルギーセンターが、エネルギーを安定的に供給するとともに、時々刻々と変化するエネルギー需給バランスに迅速に対応するためには、プロセスコンピュータによるリアルタイムなエネルギー需給予測機能と最適配分機能が必要不可欠である。

本稿では、このような背景を踏まえ、このたび、JFEスチール株式会社の協力を得て、エネルギー最適運用システムパッケージ「FeTOP⁽²⁾」の製鉄所内エネルギープラントへの適用を図り、シミュレーションによる最適運用の効果検証を実施したので紹介する。

2 エネルギープラントの最適運用

エネルギープラントは、工場、事務所、病院、大型ビルなどの設備において、電気、熱、蒸気などのさまざまなエネルギーを供給している。エネルギーを供給する機器は、発電機、ボイラ、熱源機器などさまざまである。各設備で必要とされるエネルギー需要に対して、電力、ガスなどの外部からの購入エネルギーも含めて各機器に適切に配分し、供給することが要求される。

図1 エネルギープラント最適運用を実現する機能



特に製鉄所内のエネルギープラントでは、生産設備から発生する副生ガス・熱をそれらのエネルギーの用途に合った形態に変換することで有効活用し、省エネルギーを実現している。エネルギー変換は、需要と供給のバランスを見極めながら実施する必要があり、適正な組合せと配分、つまり最適運用を行うことにより、外部からの購入コストの削減や環境負荷の低減を図ることが可能である。しかしながら、ボイラなどの機器では外部からの購入燃料に加え数種の副生ガスも燃料として同時に使用し、その配分にはさまざまな制約条件があるなど、他の業種のエネルギープラントに比べて製鉄所内エネルギープラントでは、より複雑で多数の制約条件を考慮しながら運用する必要がある。

また、エネルギーの需要・供給は常に変動し、副生ガスを貯えるホルダ設備などがあることから、ある一定期間の需給変動に対してどのような運用が最適なのかを決定する必要がある。したがって、図1に示すように、エネルギープラントの最適運用は、需給予測機能、最適運用決定機能、プラントシミュレータを活用して実現している⁽³⁾。つまり、まず需給予測機能において副生ガス発生量などさまざまなエネルギーの需要と供給の変動予測を行う。次に最適運用決定機能においてプラントシミュレータを利用しながら、多種多様な制約条件を考慮し、予測されたエネルギー需給を満たす最適な運用を決定する。

3 エネルギー最適運用システムパッケージ「FeTOP」

FeTOPにおける主要機能の概要と要素技術について述



小出 哲也

鉄鋼分野の計測制御システムのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機システムズ株式会社電機プラント本部第一統括部計測・制御技術部担当課長。



松本 宏治

産業プラント制御システムの企画・設計業務に従事。現在、富士電機システムズ株式会社電機プラント本部システム製作所技術センター課長補佐。



北川 慎治

数理応用ソリューション研究開発業務に従事。現在、富士電機アドバンストテクノロジー株式会社情報通信制御開発センター情報・制御システム部主任。電気学会会員、計測自動制御学会会員。

べる。

3.1 予測機能

電気や熱などのエネルギー需要、および副生ガスなどの発生量は、工場の操業状態や気象条件などの多様な条件に影響される場合や、周期的に同じような傾向を示す場合など、さまざまな特性を有している。これらの特性を模擬するためには、主に次のモデルを用いる方法がある。

- (a) エネルギー消費設備の物理的特性式などを用いた物理モデル
- (b) 過去に蓄積した実績データなどを用いた統計モデル
- (c) 物理モデルと統計モデルを組み合わせたハイブリッドモデル

これらのモデルは、線形式で記述できる場合もあれば、非線形式による記述が必要な場合もあり、精度よく予測するためにはさまざまな予測方法を考慮する必要がある。

FeTOP では、さまざまな対象に対する予測機能を実現するため、パターン予測方式、重回帰方式、ニューラルネットワーク方式など複数の予測方法が利用可能である。

- (a) パターン予測方式は、過去の実績データから現在の状況にもっとも類似しているものを検索して予測値とする方法である。
- (b) 重回帰方式は、気温・湿度などの説明変数と、予測対象である電力需要などの目的変数との関係を線形式で近似し利用する方法である。
- (c) ニューラルネットワーク方式は、過去の実績を学習して非線形予測モデルを構築し、現在の状況に最も合う結果を出力する方式である。

この中でも、富士電機が独自に開発した構造化ニューラルネットワークは、従来のニューラルネットワークでは内部がブラックボックスであるため困難であった出力理由の説明を可能としている。図2に示すように、ネットワーク内部を入力因子ごとに構造化することで出力理由の説明を可能としており、さらに学習過程で不要な素子や結合を削除するため構造を最適化することができる。

3.2 プラントシミュレータ

プラントシミュレータは、各機器を物理モデルに基づく線形または非線形の特性格式でモデル化する場合や、応答局面法やニューラルネットワークなどの方法でモデル化する場合など、複数の方法でプラントの特性のモデル化に対応している。また、台数制御などのローカル制御やプラント固有の運用ルールなどの論理式などさまざまな表現方法でプラントの特性をモデル化することが可能となっている。さらに、最適運用を探索する際に必要となる各種制約条件や目的関数のモデル化に対応している。

プラントモデルの作成は、画面上でグラフィカルに行うことができる。ボイラやタービンなど、多くの機器については標準的なモデルが開発済みであり、テンプレートとして用意されている。それらのテンプレートを画面上に配置して接続することにより、プラント全体のモデルを作成する。モデルの特性や制約条件などのパラメータも画面上で設定可能である。さらに、画面上でモデル内の変数端子などを接続することにより目的関数をモデル化して最適化することが可能となっている。図3にプラントモデル作成例のイメージを示す。

また、本シミュレータはオンラインの最適運用システムで利用される場合に加え、最適運用システムのエンジニア

図2 構造化ニューラルネットワークの概要

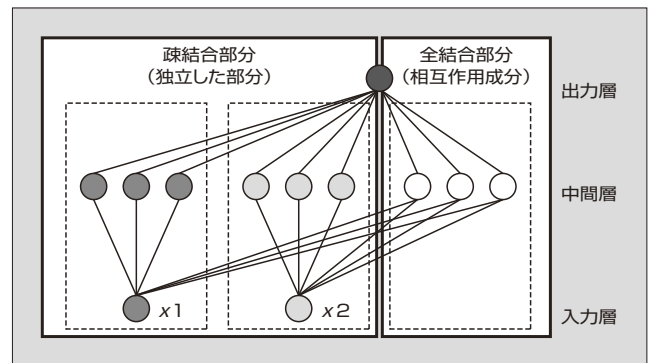
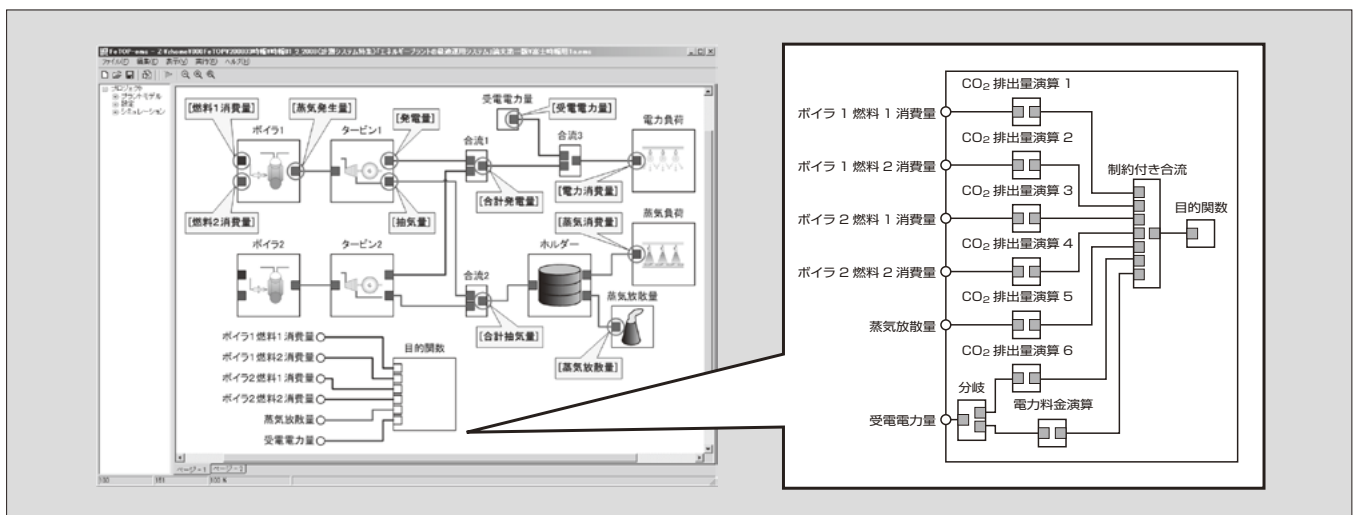


図3 プラントシミュレータでのプラントモデル作成例



リングや、設備選定などのプラント設計検討などのためのオフラインシミュレーションにも利用可能としている。このために、プラント上のどの変数を独立変数として入力して、どの変数を従属変数（モデル式の計算により求められる変数）とするのか、また最適化によって決定する状態変数をどの変数とするのか、ユーザーが任意に設定可能であり、一度設定した後も画面上で容易に変更可能としている。これは、これら変数種別の設定情報と機器モデルの接続情報をもとに、シミュレータ内部でモデル計算アルゴリズムを自動的に構築することにより実現している。

3.3 オフラインシミュレーション機能

FeTOP の最適運用決定機能は、上述のプラントシミュレータを利用して実現している。したがって、制約条件や目的関数の構成は、プラントシミュレータの画面上で簡単に作成することができ、プラント上のどの変数を状態変数にするかの指定も簡単に実施することができる。これにより、オンライン最適化のみならず、オフラインの最適化シミュレータとしてさまざまなシナリオに対する最適化計算や、最適化を行わずユーザーが設定した運用状態でのシミュレーションを実施することも可能である。

例えば、コスト最小化を目的とした場合と CO₂ 排出量最小化を目的とした場合の最適運用解の比較や、ある運用状態を仮定した場合の副生ガス必要発生量の推定など、さまざまな検討のためのシミュレーションを実施することができる。

さらに、複数ケースの入力条件と計算結果をまとめて保存し再利用することができるため、運転計画の事前評価や過去の運転実績の検証による改善策の検討、エネルギープラント最適運転計画の立案とその効果の検証、さらには設備選定などのプラント設計検討などを行うことができる。

3.4 最適運用決定機能

エネルギープラント最適運用を実現するためには、発電機などの機器の起動・停止（離散量）や発電出力（連続量）などを同時に決定する必要がある。従来、機器特性や運用条件を線形関数で近似した混合整数計画問題として

定式化し解かれていた⁽⁵⁾。しかし、実プラントへの適用時には、機器の非線形特性に加え、台数制御などの制御ロジックや設備運用条件などの論理式を考慮する必要がある。これらをそのままの形で取り扱うためには、非線形な混合整数計画問題として定式化し解く必要がある。従来は非線形混合整数計画問題に対する有効な手法が存在しなかったが、近年ではメタヒューリスティクスと呼ばれる手法を用いて解くことができる。FeTOP は、その一つである PSO (Particle Swarm Optimization)⁽⁶⁾ を適用した最適化機能を実装している。

PSO は、動物などの群れの動きを模倣した多点探索の最適化手法である。図 4 に示すように、探索領域に複数の探索点を配置し、評価のよい点の情報を共有し、その情報に基づいて探索点の移動を繰り返すことによって最適解を求める。近年、さまざまな改良手法^{(7),(8)}が提案されており、FeTOP においても複数の改良手法が利用可能である。

富士電機では、機械部品生産工場のエネルギープラントに対して PSO を適用した最適運用システムを納入し、省エネルギー、および CO₂ 排出量の削減に貢献した実績がある。しかしながら、一般的に製鉄所内のエネルギープラントにおいては、各副生ガスの使用量などを状態変数とするため、状態変数間の相互干渉が強く、その配分関係にも多数の制約条件があるなど、最適化問題として解くことがより難しくなっている。これに対して FeTOP では、PSO の探索アルゴリズムが簡易であり、探索中に独自の改良を追加することが容易であるという特徴を利用して、対象プラント固有の改良を加えることが可能な構成としている。

例えば、製鉄所内のエネルギープラントの最適運用では上述したように膨大な数の制約条件式を考慮する必要があり、通常はこれらの制約をペナルティ関数法によって考慮することになる。つまり、各制約に対する逸脱量の加重和をペナルティ項として目的関数に加えることにより制約を満たす解を得ようとするものである。しかし、ペナルティ項の追加は、探索の効率を著しく低下させる現象を生じさせる場合がある。そこで、探索中に追加する独自処理の中で、特定の制約逸脱を解消するような解の改良処理を追加可能な構成としている。例えば、ホルダ容量が上限になっ

図 4 PSO の探索の概念

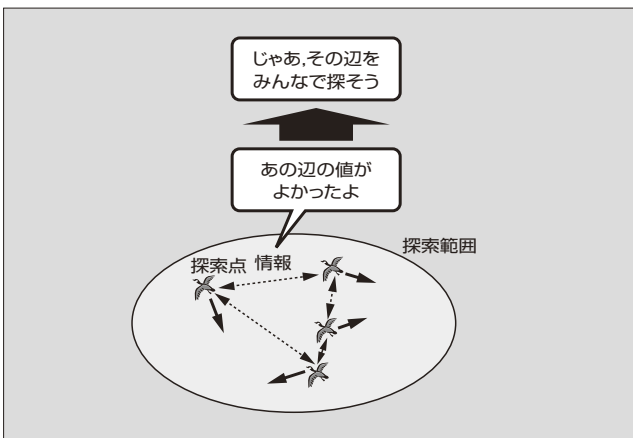


図 5 モデルとした製鉄所内エネルギープラント

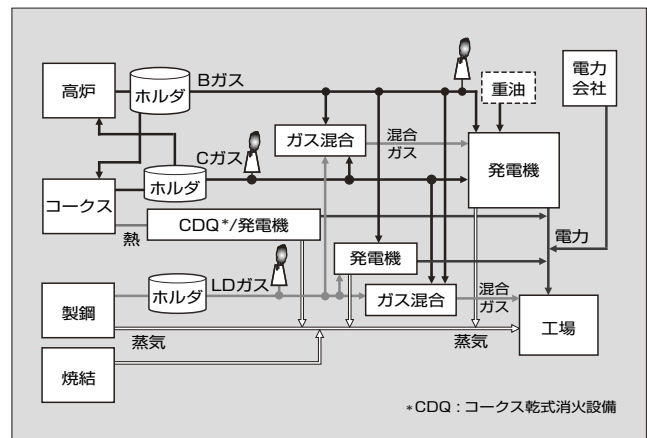


図6 最適運用によるエネルギー消費量削減効果の一例

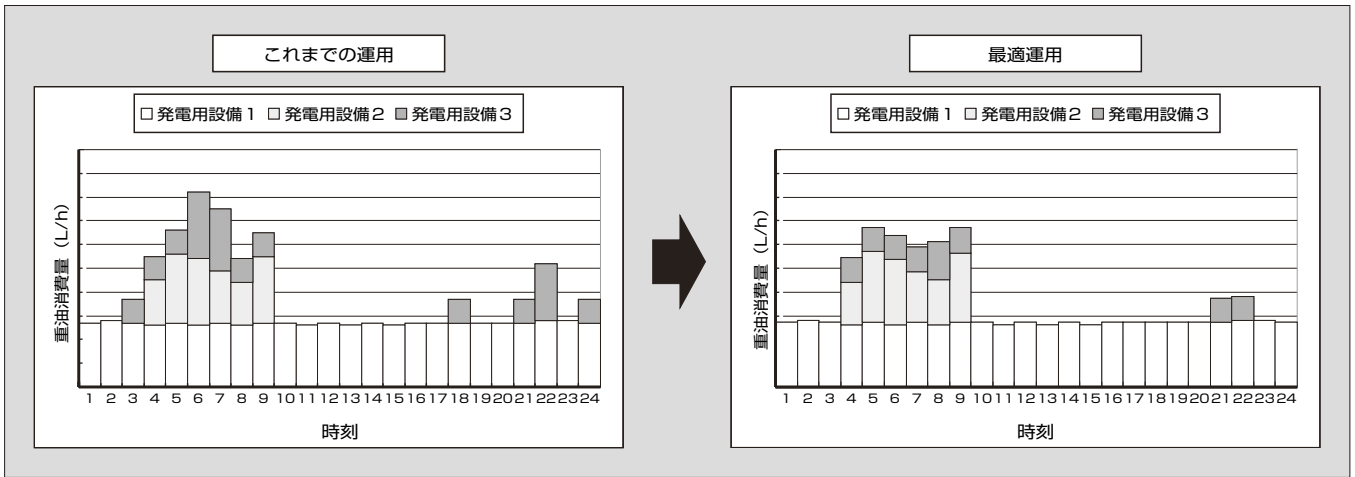
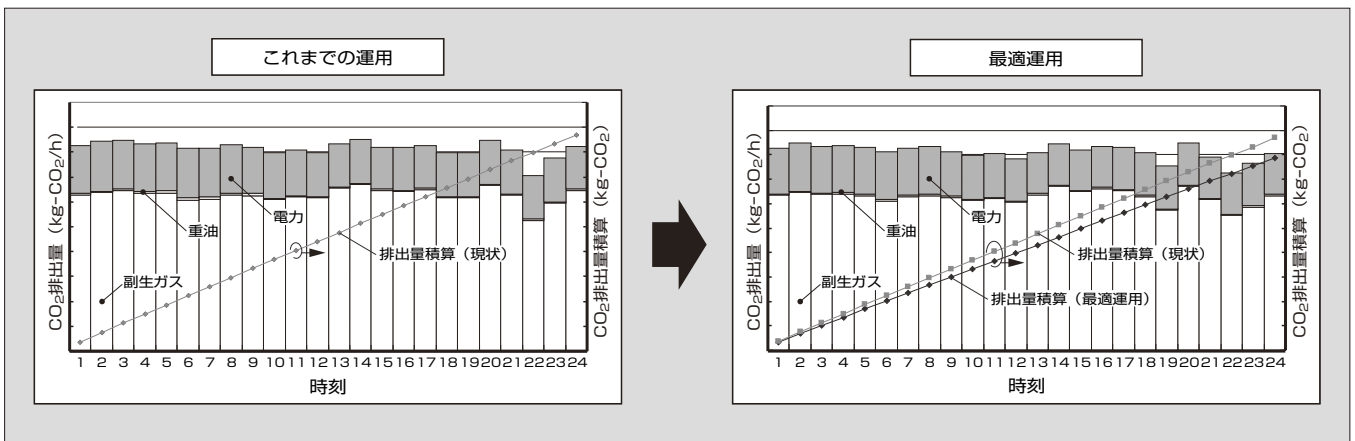


図7 最適運用によるCO₂排出量削減効果の一例



てガスを放散するにもかかわらず、ガスを購入するという矛盾した運用解を修正するような改良処理を実装することにより、解の探索効率を向上させることが可能となっている。さらに、ペナルティ項を追加する場合には、通常その重み係数の調整が必要であるが、その値を探索中の目的関数値などに応じて自動的に変更することができる機能も追加している。これらの改良により、探索の効率化を実現している。

4 適用事例

製鉄所内エネルギープラントをモデルとしたオフラインシミュレーションを実施した事例を紹介する。

製鉄・製鋼プラントからのガスや熱というエネルギー源などの供給と、製造過程や下流工程に必要なエネルギー（電力・ガス・蒸気）需要に対するエネルギー配分を、重油購入コストなどの運用コストの最小化、ならびにCO₂排出量の最小化を目的とした最適化の評価を実施した。評価は、図5に示すモデルプラントにおいて、非常操業時におけるエネルギーの需要と供給の実績データを用いて、プラント運用を最適化シミュレーションによって最適化し

た場合の評価値と、実運用状態をもとに算出した評価値を比較することにより実施した。幾つかの非常操業状態を模擬した数ケースのシミュレーション結果から、最適化により運用コストについては平均で約1～3%の削減効果を、CO₂排出量については年間約7.2万t-CO₂の削減効果が得られることを確認した。図6に運用コスト最小化による効果の一例として重油消費量の削減効果を、また、図7にCO₂排出量最小化によるCO₂排出量の削減効果を示す。

5 あとがき

鉄鋼業に代表されるエネルギープラントの最適運用システムについて、その検証成果を述べた。

この成果を生かし、ユーザーニーズに応えるべくさらに発展させることで、効率的かつ最適なエネルギー運用を実現するとともに、世界規模での温暖化抑制対策の一助となるべく、努めていく所存である。

最後に、製鉄所内エネルギープラントへの最適運用の効果検証の実施にあたり、多大なご協力・ご助言をいただいたJFEスチール株式会社様に深く感謝する次第である。

参考文献

- (1) 社団法人日本鉄鋼連盟.
http://www.jisf.or.jp/business/ondanka/sinchoku/index.html
(参照 2007-11-30)
- (2) 菊池健ほか. 最適化エネルギーマネジメントシステム FeTOP の開発. 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会. 2003, 2A4-7.
- (3) 項東輝ほか. 原動力設備プラントの最適運用と適用事例. 富士時報. vol.77, no.2, 2004, p.166-170.
- (4) 飯坂達也ほか. 構造化ニューラルネットワークの新しい学習法と最大電力需要予測への適用. 電気学会論文誌 B. vol.124, no.3, 2004, p.347-354.
- (5) 伊藤弘一, 横山良平. コージェネレーションの最適計画. 産業図書. 1990.
- (6) Kennedy, J. et al. Particle Swarm Optimization. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. vol.IV, 1995, p.1942-1948.
- (7) 福山良和. メタヒューリスティック手法の電力・エネルギー分野への適用例. 電気学会論文誌 B. vol.124, no.5, 2004, p.679-682.
- (8) 相吉英太郎, 安田恵一郎 編. メタヒューリスティクスとその応用. オーム社. 2007.

解説 SIL と PFD

IEC 61508 (JIS C 0508) では、機能安全を構成する機器やシステムの安全度を示す尺度として、SIL (Safety Integrity Level)が定義されている。SILは“安全度水準”と呼ばれ、4段階 [SIL1 (低) ~ SIL4 (高)] のレベルがあるが、SIL4が適用されることはほとんどない。このレベルは、PFD (Probability of Failure on Demand : 低頻度作動要求あたりの機能失敗平均確率) によって表される。PFDは、複数のパラメータ (機器の検出できない危険側故障の割合、テスト間隔、共通要因故障など) から計算式で求められる。表にSILとPFDの関係为例として示す。例えば、SIL2を満たす機器やシステムを実現するためには、 $10^{-2} > PFD \geq 10^{-3}$ を満足する必要があることが分かる。この意味は、危険側故障の頻度が、100年に1回以下

であることである。逆に、機器やシステムのPFDが $10^{-3} > PFD \geq 10^{-4}$ (危険側故障の頻度が、1,000年に1回以下) であることが示せば、その安全度水準はSIL3となる。ただし、機器については、第三者認証機関からSILの認定を受けておく必要がある。

表 SILとPFDの関係

安全度水準 (SIL)	作動要求時あたりの機能失敗平均確率 (PFD)
4	10^{-5} 以上 10^{-4} 未満
3	10^{-4} 以上 10^{-3} 未満
2	10^{-3} 以上 10^{-2} 未満
1	10^{-2} 以上 10^{-1} 未満



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。