

エネルギー供給プラントの省エネを実現する 最適運用システム TOPEMS™

TOPEMS™ Optimal Operation System to Achieve Energy Saving in Energy Supply Plants

山田 利広

大塚 博一

塚原 英樹

■ YAMADA Toshihiro

■ OTSUKA Hirokazu

■ TSUKAHARA Hideki

東芝は、ボイラや自家発電設備、冷凍機などのエネルギー供給機器を常に最適な運転状態に自動制御し、運転コスト削減と省エネを実現する、最適運用システムTOPEMS™を開発して多くの工場へ適用している。

このシステムは、工場における電力と熱（蒸気、冷水、及び温水）の需要を予測し、エネルギー供給プラントごとの最適な運転スケジュールを求めることが特長で、これによって大きな省エネ効果が得られる。更に、設備の容量や特性を変更した場合のエネルギー消費量の変化をシミュレーションで求めることができ、効果的な設備更新計画の策定を支援できる。

Toshiba has developed the TOPEMS™ optimal operation system, which makes it possible to reduce operating costs and save energy in energy supply equipment such as boilers, private electricity generators, refrigerators, and so on by automatically controlling them in the optimal condition, and has been providing this system to many factories with various energy needs.

TOPEMS™ offers the optimal operating schedule for each energy supply plant in a factory based on demand forecasts for electric power and heat (steam, cold water, and warm water). Furthermore, it supports the planning of effective facility replacement by simulating energy consumption in response to changes in the capacity and characteristics of energy supply plants.

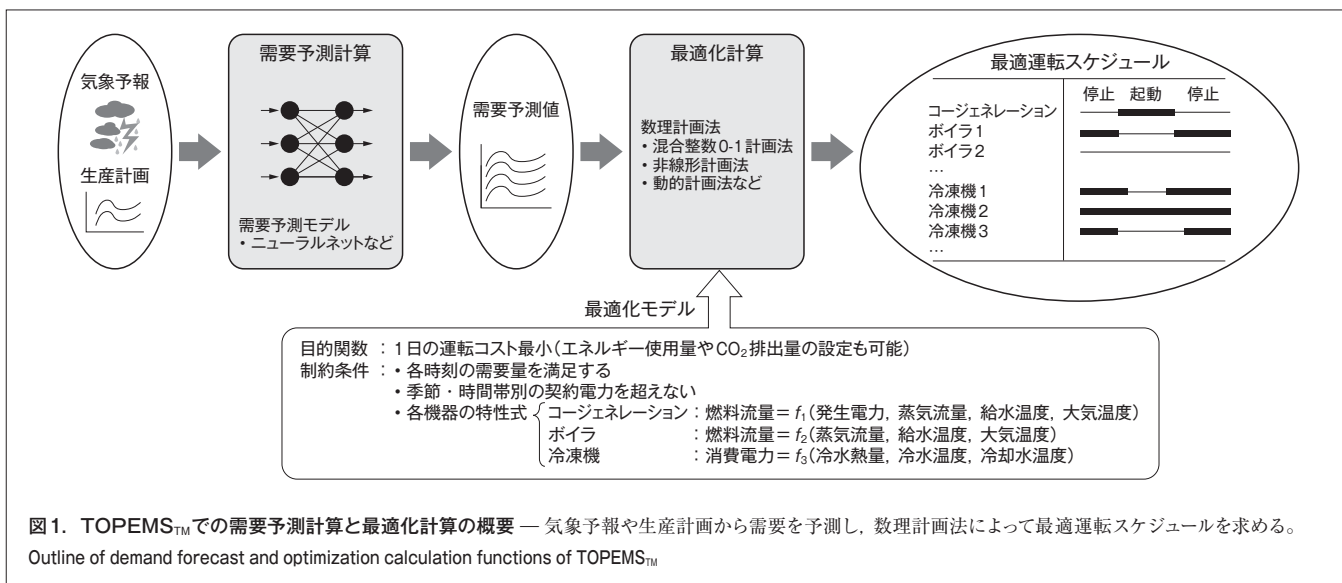
1 まえがき

工場では、電力だけでなく熱エネルギーも必要になる。熱エネルギーは、蒸気や冷水、温水といった複数の異なる形態で利用される。このため、工場に設置されるエネルギー供給プラントは、複数のエネルギー需要に同時に対応するため、様々な機器から構成されている。更に、同じ形態のエネルギーを生成する機器の種類も多いため、その運用は複雑になる。このように複数の機器から構成されるエネルギー供給

プラントでは、製造ラインの操業状態や外気状態などの影響を受けて変動するエネルギー需要に合わせて、稼働させる機器やその負荷配分を最適化することが、省エネのために重要である。

そこで東芝は、数理最適化技術を適用した省エネ最適運用システムTOPEMS™を開発し、半導体工場や医薬品工場、飲料工場の熱源設備と、製紙工場や化学工場のボイラ、タービン、及び発電機 (BTG) 設備などへ適用している^{(1), (2)}。

このシステムはエネルギー需要の予測に基づいて各機器の



最適運転スケジュールを算出し、自動制御することで、4%を超える運転コストの削減を実現できる。また、設備更新の検討にも活用でき、より効率的なエネルギー供給プラントを計画的に構築するための支援ができる。

ここでは、TOPEMSTMの概要と、最適運転の効果例、及び設備更新の検討例について述べる。

2 TOPEMSTMの概要

2.1 需要予測計算と最適化計算

このシステムの特長である需要予測計算から最適化計算による最適運転スケジュール出力までの処理の概要を、図1に示す。

このシステムでは、まず、各エネルギーの需要を予測する。次に、予測された需要値に対する各機器の起動や停止、負荷配分といった運転状態を最適化計算し、最適運転スケジュールを出力する。

需要予測モデルは、外気の温度や湿度とエネルギー需要との関係を過去の運転データから学習させたもので、脳の活動を模倣した数学モデルであるニューラルネットなどで構築している。これに気象予報値や生産計画を入力することで、将来の需要の変化を予測する。予測には必ず誤差が生じるため、実需要によって誤差補正を自動的にを行い、精度を高めている。

最適化モデルは、各機器のエネルギーの入出力特性、各種

の制約条件、及び目的関数を定義している。ここで使う目的関数としては、運転コストの最小化や、原油換算エネルギー使用量の最小化、二酸化炭素(CO₂)排出量の最小化などを選んで設定できる。この最適化モデルに需要予測値を入力し、混合整数0-1計画法や、非線形計画法、動的計画法などの数理計画法によって高精度な最適化計算を行い、各機器の最適な運転スケジュールを求める。

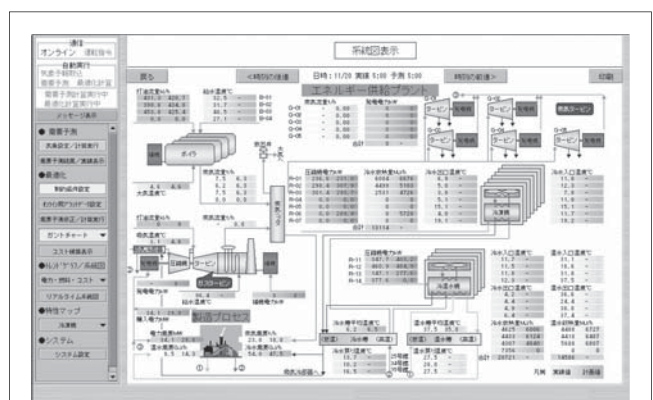
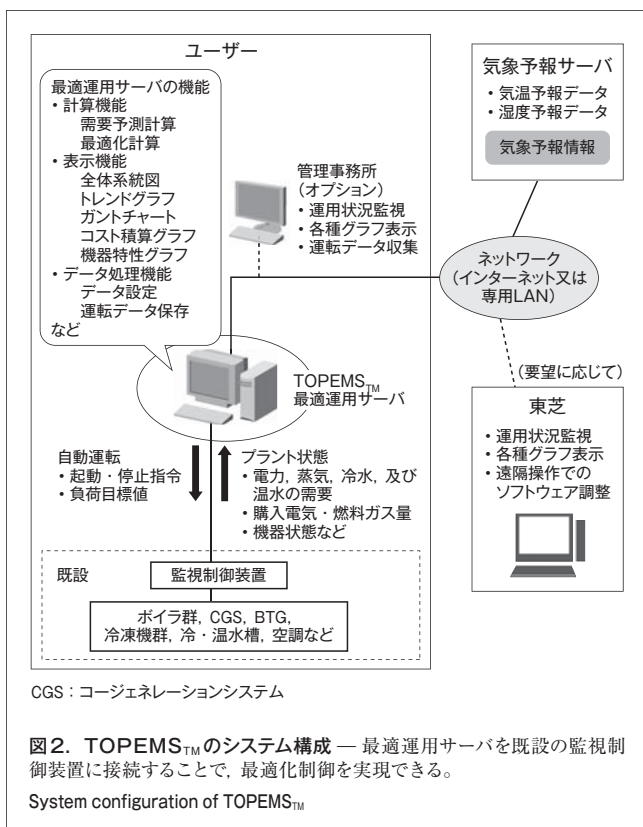
この結果に従って各機器を自動運転することで、省コスト、省エネ、及び省CO₂を実現できる。需要予測計算が難しい工場に対しては、現在のエネルギー需要に対して逐一最適化制御を行うことで、同様の効果が得られる。

また、需要値や燃料単価、契約電力などの様々なパラメータを変更して、最適化シミュレーションを行うことができる。これによって、将来、需要量が増減した場合の影響や、契約形態の変更などを検討できる。更に、機器の特性や容量などのパラメータを変更した場合の検討もでき、効果的な設備更新計画を策定できる。

2.2 システム構成

TOPEMSTMのシステム構成を図2に示す。最適運用サーバを発電設備や熱源機器の既設の監視制御装置に接続し、最適制御を行う。需要予測計算に必要な外気の温度や湿度の予報値は、外部の気象予報サーバから、最長48時間先までのデータを1時間刻みで取得できる。最適運用サーバのマンマシンインターフェースはWebアプリケーションになっており、設備管理部門の事務所などでも運用状況の監視やデータの収集ができる。

最適運用サーバでは、需要予測計算や最適化計算を行うとともに、全体系統図やトレンドグラフ(傾向表示)、ガントチャート(起動・停止スケジュール)、コスト積算グラフ、機器特性グラフなどを表示できる。全体系統図の表示例を図3に、コスト積算グラフの表示例を図4に示す。



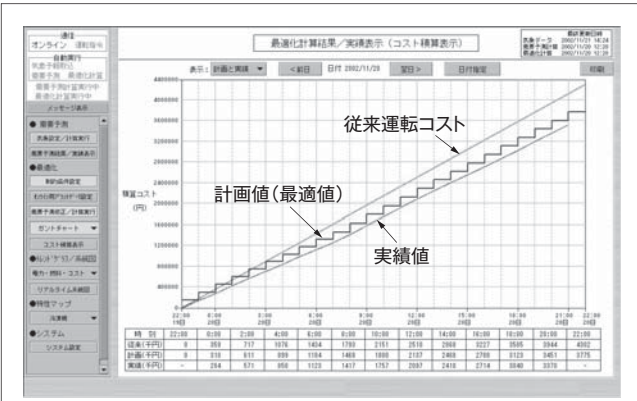


図4. コスト積算グラフの例 — 計画値(最適値)と実績値に加えて、最適化を行う前のスケジュールによる運転(従来運転)のコストも表示され、効果を確認できる。

Example of stacked line chart of costs

3 適用事例

3.1 対象プラント

TOPEMSTMの機能を検証するため、最適化の対象としたプラントの概略構成を図5に示す。このプラントでは電力のほか、蒸気、冷水、及び温水という熱エネルギーを供給している。

電力需要は、工場全体を対象とした使用電力で、購入電力とガスタービン型のコージェネレーションシステム(CGS)による発電電力で賄っている。購入電力の上限は電力会社との契約で決められている。

蒸気の供給源としては、CGS及び4台のボイラがあり、これらは蒸気吸収式冷凍機へも蒸気を供給している。

冷水は、5台の蒸気吸収式冷凍機、7台のターボ冷凍機、及び4台のダブルバンドル冷凍機で生成され、冷水槽を介して供給される。ダブルバンドル冷凍機は温水も同時に生成でき、温水槽を介して温水需要を賄っている。

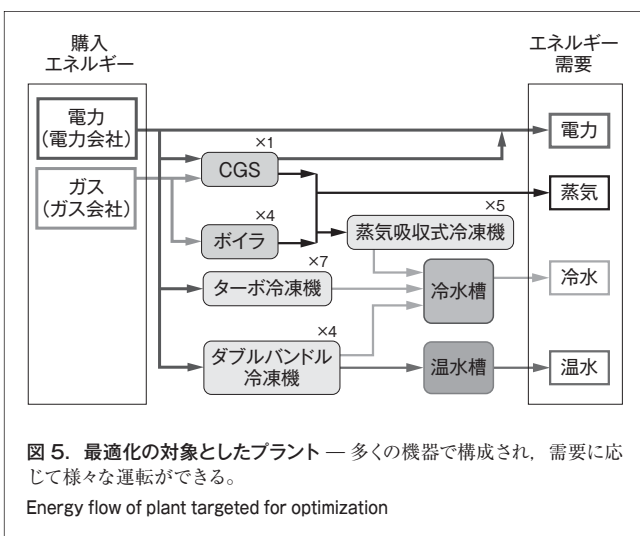


図5. 最適化の対象としたプラント — 多くの機器で構成され、需要に応じて様々な運転ができる。

Energy flow of plant targeted for optimization

このプラントの特徴は、CGSが導入されていること、冷凍機の種類が多いこと、及び冷・温水の蓄熱槽が設置されていることである。このため、エネルギー需要の変化に合わせて多様な運用ができる。運用のポイントは、CGSとボイラの蒸気負荷配分、蒸気吸収式冷凍機とターボ冷凍機の冷水負荷配分、及び蓄熱槽の蓄・放熱スケジュールである。

3.2 最適化モデル

対象プラントに、冷・温水槽があり、冷・温熱の蓄・放熱運転が可能である。つまり冷・温熱生成と使用を時間的にずらして運転できるということであり、したがって、燃料コストは1日の合計で評価する必要がある。このため、式(1)に示すような購入電力と購入燃料コストの1日合計を目的関数とし、これを最小化するモデルとした。

$$\sum_t [W_P(t) \times C_W(t) + \{F_C(t) + F_B(t)\} \times C_F] \quad (1)$$

ここで、 $W_P(t)$ は受電電力(kW)、 $F_C(t)$ 及び $F_B(t)$ はそれぞれCGSとボイラの燃料流量($\text{m}^3\text{N/h}$)^(注1)、 $C_W(t)$ は電力単価(円/kWh)、 C_F は燃料単価(円/ m^3N)である。電力単価は、季節・時間帯別の電力需給契約を考慮して、時間 t の関数とした。

制約条件は、電力、蒸気、冷水、及び温水の各エネルギーバランスと、機器の特性、運転上の上下制限約になる。

この事例では、機器の起動停止を含む最適運転スケジュールを算出するため、混合整数0-1計画法を適用した。

また、式(1)で電力単価及び燃料単価の代わりに、原油換算エネルギー使用量の係数又はCO₂排出係数を使うことによって、それぞれを最小化する運転スケジュールを求めることもできる。このように、目的関数を変えるだけで、違う目的の計算を容易に行えることも、数理計画法を利用するメリットである。

3.3 最適運転の検証試験結果

最適化を行う前のスケジュールによる運転(以下、従来運転と呼ぶ)時の運転コストと、最適運転検証試験で得られた運転コスト実績値の推移を図6に示す。

最適運転では従来運転と比較して昼間の運転コストが削減されており、1日の積算では4.5%の大幅なコスト削減になっている。また、原油換算エネルギー使用量及びCO₂排出量は、それぞれ3.1%、3.4%の削減になった。

従来運転と最適運転のコスト差の推移を、電力コスト及び燃料コストに分けて図7に示す。最適運転では、夜間の蓄熱運転を従来運転より多く行うことで、昼間の電力コストを削減している。また、燃料コストは従来運転が常に多くなっているが、これは最適運転の場合は需要予測計算に基づき、契約電力を超えない範囲でターボ冷凍機をより多く運転するようにし、効率の劣る蒸気吸収式冷凍機の運転台数を最小限にしているためである。この二つの複合的な要因によって、前述した

(注1) m^3N は0℃、1気圧の状態に換算した体積。

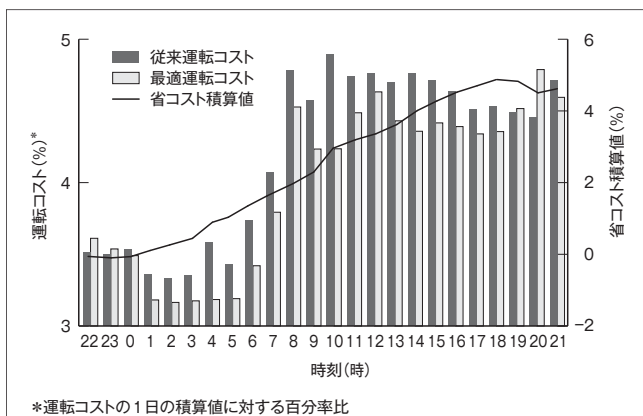


図6. 従来運転と最適運転のコスト比較 — 最適運転では、従来運転と比較して昼間の運転コストが削減され、1日の積算で4%を超えるコスト削減ができる。

Comparison of operating costs under conventional and newly developed operation schedules

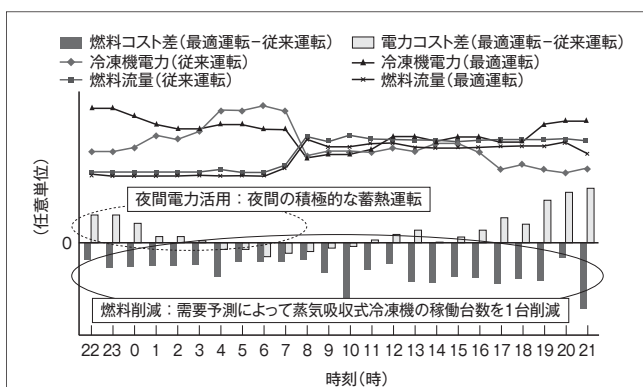


図7. 運転コスト差の推移 — 夜間電力の有効活用と蒸気吸収式冷凍機の稼働台数の削減によって、運転コストが低減できる。

Trends in cost difference between conventional and newly developed operation schedules during test

ような大幅な省コスト運転を実現している。

3.4 設備更新の最適化検討例

対象プラントの一部の構成機器について、設備更新を目的に運転方法や設備容量を変更した場合の最適化シミュレーション結果の例を、表1に示す。

ケース1は、前述した検証試験の実績値である。ケース2は、既設のCGSでは行っていない部分負荷運転を可能とした場合である。ケース3は、4台のボイラのうち一つをより小型のボイラに変更した場合である。ケース4は、冷凍機を部分負荷運転するようにした場合である。いずれのケースも、機器の運用性を向上させるため、大きな省コストと省エネが見込める。

ケース2とケース3は、ともに蒸気需要への追従性を高めるケースである。蒸気需要が少ない場合に余剰の蒸気が発生すると、ターボ冷凍機に比較して効率の劣る蒸気吸収式冷凍機を稼働させなければならない。CGSが最大負荷で運転する

表1. 設備更新シミュレーションの例

Example of results of simulation when parameters changed

ケース	内容	省コスト (%)	省エネ (%)	省CO ₂ (%)
1	検証試験実績値	4.5	3.1	3.4
2	CGS部分負荷運転	8.2	3.3	4.2
3	小型ボイラ設置	10.5	6.2	6.8
4	冷凍機部分負荷運転	7.0	3.7	4.1

場合は余剰蒸気が発生しやすい。また、大型のボイラでは運転可能な最低負荷も大きいいため同様の問題が発生しやすくなる。ケース2とケース3では、これを防止できる。

4 あとがき

工場のエネルギー供給プラントの運転コスト削減と省エネを実現するTOPEMS_{TM}について、システムの概要と適用した場合の効果について述べた。このシステムによって、既存の設備の運用を効率化でき、また、より効果的な設備更新計画を策定できる。

当社は今後も、このシステムのような製品を提供することにより、工場での省エネを推進し、地球環境負荷の低減に貢献する。

文献

- 下川浩之, ほか. “半導体工場における省エネ事例と熱源設備最適制御導入について”. 第1回エネルギー対策技術シンポジウム, 千葉, 2002-04, 日本能率協会, 2002, p.1-9.
- 山田利広, ほか. エネルギー供給機器向け省エネ最適運用システム TOPEMS_{TM}. 東芝レビュー. 62, 8, 2007, p.45-48.
- 村井雅彦, ほか. 省エネルギー・環境システムにおけるOR. オペレーションズ・リサーチ. 54, 4, 2009, p.199-204.
- 山田利広, ほか. “工場のエネルギー供給プラント向け省エネ最適運用システム”. 平成21年電気学会産業応用部門大会予稿集. 三重, 2009-08, 電気学会, 2009, p.S5-41-44.



山田 利広 YAMADA Toshihiro

電力システム社 新技術応用事業推進統括部 新技術応用システム技術部主務。最適運用システムの開発に従事。計測自動制御学会会員。
New Technology Application Business Div.



大塚 博一 OTSUKA Hirokazu

電力システム社 府中事業所 原子力プロセス監視制御システム部主務。最適運用システムの開発に従事。
Fuchu Complex



塚原 英樹 TSUKAHARA Hideki

電力システム社 府中事業所 原子力プロセス監視制御システム部。最適運用システムの開発に従事。
Fuchu Complex