

複合プラントの非線形数理計画法による エネルギー最適運用

*1 八島 高雄(やしま たかお)

*2 津田 宗(つだ たかし)

① まえがき

昭和48年の第一次石油ショック以来、昭和54年の第二次石油ショックを経て今日に至るまで、我が国産業界においては、そのショックを吸収し、健全な発展を続けるために、省エネルギー対策を積極的に進めてきている。

現在のエネルギーの消費水準、あるいは生活水準を変えなく、技術開発によって損失を減らすこと、あるいはエネルギーの利用率を高めることが、省エネルギーの本質である。一方、産業界の省エネルギー設備投資で即効のある比較的容易な案件は、既に実施に移され、各社とも高度の省エネルギー技術開発と取り組んでいる。

省エネルギーの技術開発の中で、「工程の省略・結合」、「各工程エネルギーの節約」、「排エネルギーの回収」と同じく「トータルエネルギーコストの引下げ」を目標としたエネルギーの最適運用システムは、重要なテーマとなっている。

近年、エネルギー供給源の多様化と各プロセスのエネルギー使用形態の変化・使用量変動の増大により、エネルギーの需給調整をオペレータの判断だけで的確に行うことが困難になってきている。このため、各工場操業情報を基に生産管理とエネルギー管理を一体化する必要が強まってきた。各種数理計画法の適用技術の開発に伴い、計画レベルから実操業レベルに至るまできめ細かなエネルギー最適運用がオンラインリアルタイムで実施可能となった。

以下に富士電機が開発した「非線形数理計画法によるエネルギー最適運用」について、エネルギー最適運用の動向、数理計画法を応用した最適化技術の進展、非線形数理計画法のアルゴリズム、最適化システムのサポート技術、及び鉄鋼プラントへの適用例を紹介する。

② エネルギー最適運用システムの動向

産業部門のうちエネルギー多消費業種と呼ばれる鉄鋼、セメント、紙・パルプ、総合化学、及び一般製造業におけるエネルギー原単位改善のための主要な省エネルギー対策は、

(1) 操業技術の改善による省エネルギー

例：高炉燃料比の低減、燃焼管理の改善、動力設備の効率運転、セメントミルの効率的運用など

(2) 生産設備の効率化による省エネルギー

例：連続鋳造、セメント高効率ミルの採用など

(3) 排エネルギーの回収、有効利用による省エネルギー

例：副生ガスの回収、排熱回収、排熱発電など

(4) エネルギーの最適運用による省エネルギー

例：エネルギーセンタによる一元管理

である。

各々の省エネルギー項目のみならず、エネルギーセンタによりエネルギーを一元管理し適正配分することは、工場全体のトータルエネルギーの最適運用のためになくはならないものである。

このため鉄鋼業においては二十数年前からエネルギーセンタの導入が始まり、現在では規模の差はあれ、すべての製鉄所にエネルギーセンタが設置されている。

鉄鋼以外の分野でも、一部で実施されつつあり、今後本格的な導入が行われようとしている。

エネルギー最適運用システムの動向を図1に示す。

主な特長は次のとおりである。

(1) 複数エネルギーがあり、エネルギー相互間の代替が可能であり、エネルギーバッファ機能がある場合に、

- (a) エネルギーバッファの活用
- (b) 副生エネルギーの回収
- (c) 複数エネルギー使用設備のエネルギー配分
- (d) 複数台の動力設備の効率運用
- (e) 自家発電所の効率運用
- (f) 工程調整

などにより、省エネルギー効果をあげている。

(2) 実プラントは原単位が変動（非線形的）しており、非線形計画法による効果が大きい。

(3) エネルギー最適運用のためには、需要予測の精度をあげることが必要不可欠である。また生産計画システムとエネルギー管理システムとの一体化が必要である。

③ 数理計画法を応用した最適化技術の進歩

エネルギー最適運用を実現するためには各設備の特性を明らかにした上で、数理計画法が適用できるように定式化を行う。従来はコンピュータの容量、速度の関係から線形計画法が適用されていたが、各設備の非線形性が無視できないので実用上の制約が多かった。

最近ではハードウェアの進展から非線形計画法の直接適用が可能となり、実用的な最適化が図られ、具体的な成果が報告されている。

生産計画システムと一体化したエネルギー最適運用、特にエネルギーバッファや製品バッファのある複合プラントの最適運用は、通常のプラントに比べると簡単ではない。

図1 エネルギー最適運用システムの動向

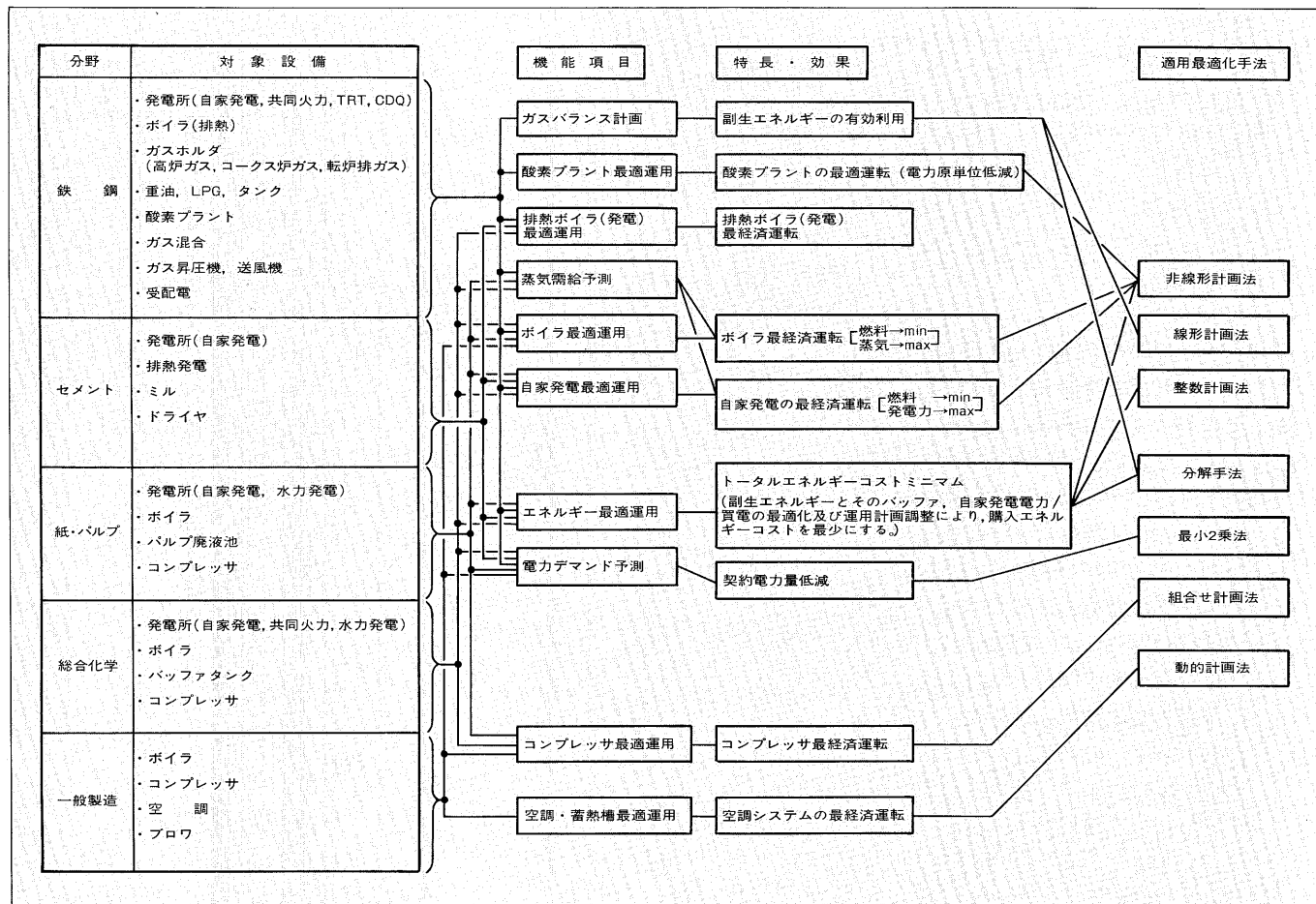


図2 大規模問題解法のアルゴリズム

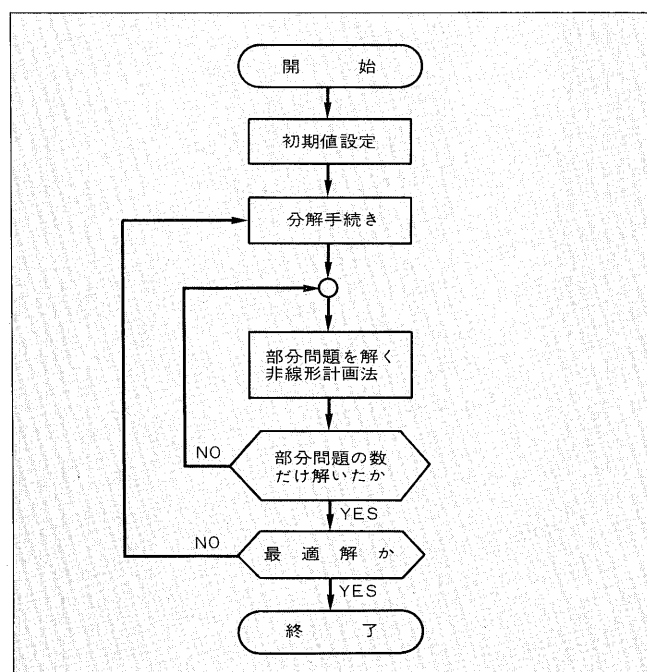


表1 数理計画法パッケージ

数理計画パッケージ	パッケージの特徴	効果的問題例
線形計画法(LP)パッケージ	改訂シンプレクス法, 有界変数法を用い小容量化, 高速化を図る。	エネルギーバッファの運用
非線形計画法パッケージ	簡略形準ニュートン射影乗数法。LPの有界変数法LPの有界変数法に対応する手法を用い小容量化, 高速化を図る。	ボイラ, タービンなどの非線形プラントの最適運用
分解法による大規模線形計画法パッケージ	図2における子問題がLPで, 小容量化が図られている。	長期操業計画
分枝限定法による0-1混合整数計画法パッケージ	変数に0-1の2値をとる整数が含まれる。分枝限定法による。	機器(台数)選定
分解法による0-1混合整数計画法パッケージ	上記パッケージに分解法パッケージを導入し小容量化, 高速化を図ったもの。	機器(台数)の長期的判断

アルゴリズムが複雑になる。

この問題は線形計画法を含む分解手続きを行う親問題と、非線形計画法を繰り返し用いる子(部分)問題の2レベル構造に分解され求解される。この手続きを図2に示す。分解手続きは複合プラントの種類や性質により異なり、個別に開発する要素もある。子問題を解く際には汎用の数理計画法の各パッケージが用いられるように設計する。したがって、子問題で使用される非線形計画法を含む数理計画法の各パッケージは汎用性があり、かつ小容量、高速である

ことが強く望まれる。

表1に富士電機が開発している数理計画法パッケージの代表的な例をその特徴とともに示す。線形計画法と非線形計画法の基礎パッケージ、及び小容量化と高速化のための分解処理パッケージがある。

4 非線形数理計画法のアルゴリズム

一般の工業のほとんどの設備においては、部分負荷で効率が低下する性質があるので、非線形特性を考慮することは重要である。このような性質が無視できないとき、これを直線近似して線形計画法を用いた場合と直接非線形計画法を用いた場合とでは解が異なる。したがって線形計画法では間違った運用を提示することになるので、設備の特性によって正しく数理計画法を選択すべきである。

富士電機の非線形数理計画法のアルゴリズムの特徴は、線形計画法パッケージの特徴である有界変数法の機能を非線形計画法に持たせたところにある。有界変数法とは、例えば設備能力の上限及び下限の制約を他の制約条件と区別することにより、記憶容量を大幅に減少させ、高速化を図る手法である。表2は非線形計画法の代表的な解法とその性質を示しており、富士電機の非線形数理計画法パッケージは、小容量化、高速化の必要性からこれらの長所だけを有効に組み合わせている。具体的なアルゴリズムを以下に示す。

簡略形準ニュートン射影法

$$\begin{cases} \text{最小化: } f(x) \\ \text{条件: } x_l^{\min} \leq x_l \leq x_l^{\max} \quad l = 1, \dots, n \end{cases}$$

ステップ0：許容方向も含めた有効制約の添字の集合を I_1 とし、 $k = 0$ とする。

$$x^0 \in R^n \quad (H_0)_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \in I_1 \\ 0 & i \neq j \text{ 及び } i = j \in I_1 \end{cases}$$

ステップ1： $d^k = -H_k J^T f(x^k)$ とする。

ステップ2-1：(有効制約戦略*)

$i \in I_1$ なる x_i のこの配が許容方向になれば、すべて I_1 から外す。このとき、Zoutendijk* の規則を考慮する。 H_k を下式に従い更新し、 $k = k+1$ としてステップ1へ。

$$(H_k)_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j = s \\ 0 & \text{その他} \end{cases} \dots\dots\dots(1)$$

ステップ2-2： $d^k = 0$ ならばステップ4へ、さもなければ、 $x^{k+1} = x^k + \alpha^k d^k \in M(x^k, d^k)$ [一次元探索]。

ステップ3：新しい変数が I_1 になったら、下式に従い更

新し、 $k = k+1$ としてステップ1へ。

$$(H_k)_{ij} = (H_k)_{ij} - (H_k)_{ir}(H_k)_{jr} / (H_k)_{rr} \dots\dots\dots(2)$$

さもなければ、下式に従い更新し、 $k = k+1$ としてステップ1へ。

$$H_{k+1} = H_k + \left(1 + \frac{(\gamma^k)^T H_k \gamma^k}{(\delta^k)^T \gamma^k} \right) \frac{\delta^k (\delta^k)^T}{(\delta^k)^T \gamma^k} \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{\delta^k (\gamma^k)^T H_k}{(\delta^k)^T \gamma^k} \quad \frac{H_k \gamma^k (\delta^k)^T}{(\delta^k)^T \gamma^k}$$

ステップ4： $(\lambda g)_i = \{-\nabla f(x^k)\}_i \quad i \in I_1$

として $(\lambda g)_i \quad i \in I_1$ のすべてが許容方向でなければストップ、さもなければ、許容方向にあるもののうち絶対値最大のものを I_1 から取り除き、式(1)に従い H_k を更新し、 $k = k+1$ としてステップ1へ。

<注> *：有効制約戦略、Zoutendijk の規則の詳細については参考文献(5)を参照されたい。

以上のアルゴリズムは前述の設備能力の上限及び下限の制約、すなわち変数の上下限制約の処理に射影法を導入している。式(1)は、関数の改善される方向が変数の上限又は下限を破るとき、その変数の探索をそこで止めている。逆に内側を向いたとき、その変数の探索を復活させているのが式(2)である。式(3)は通常 BFGS 公式である。このように変数の上下限制約式を探索方法に置き換えたことにより、記憶容量を減少させ高速化を図っている。

変数の上下限制約以外の制約を有する非線形計画問題については、乗数法を採用し、この準ニュートン射影法を用いることにより、非線形数理計画法のアルゴリズムを完成させている。この結果、従来のアルゴリズムに比し 1/3 ~ 1/4 の高速化を図っている。

基本的最適化モデル構築技術の進歩とともに、ここに示した非線形計画法の処理方法が改良されており、その成果を適用することによって実プロセスでの利用が促進されている。

5 エネルギー最適運用システムのシステム構成具体例

鉄鋼業におけるエネルギー最適運用システムの全体機能を図3に、またハードウェア構成を図4に示す。この特長を以下に述べる。

(1) システムを階層化する。

データベースとセンサベースにより構成され、データベースは更に中央データベースとエネルギー最適運用データ

表2 非線形計画法の代表的解法

分類	代表的アルゴリズム	解法	性質
制約のない非線形計画法	共役方向法	共役こう配法	微係数を用いない手法としては、最も強力である。
	準ニュートン法	BFGS法	微係数を用いる手法としては、現在のところ最も強力である。
制約付非線形計画法	変換法	乗数法	アルゴリズムが簡単で記憶領域が少ない。制約のない非線形計画法のパッケージが利用できる。制約式の線形性が生かない。
	射影法	こう配射影法	準ニュートン法を利用すれば収束が速い。制約式の線形性が十分に生かせる。アルゴリズムが複雑で記憶領域を多く要する。

ベースにより構成される。

(2) 生産計画と一体化する。

エネルギー最適運用システムを機能させるうえで、各種エネルギー（電力、蒸気、燃料、水、酸素、空気など）の需給予測精度向上は必須であり、このため中央データベースのもつ生産計画データと接続される。

エネルギー最適運用データベースシステムは、実績データを取り込み生産計画の修正機能を持っている。また、各種最適運用に非線形数理計画法を適用し、計算を行っている。

(3) センサベースは幾つかのサブシステムで構成する。

センサベースは、エネルギー別のサブセンタで構成され、サブシステムに対する指示及びサブシステム間の調整はエネルギー最適運用データベースシステムにて行う。

一般的に中央データベースは、生産管理用ビジネスコンピュータが分担し、エネルギー最適運用データベースシステムは、プロセスコンピュータが分担する。また、このプロセスコンピュータは幾つかのサブシステムも受け持つ。その他サブシステムは計装システムで実施される。

ハードウェア構成の特長は次のとおりである。

広域に分散されたフィールドデータの取込み及び各工場に最適な運用計算結果のガイドは、光データウェイで結合されたポート経由にて行われる。また、最適運用システムの高機能化に伴い、システム全体の信頼性が要求される。このため、ミニコンピュータを複数台設け、機能分担とバックアップ及びユーザーのプログラム開発に使用される。

非線形計画法を用いたエネルギー原単位低減の例を、酸素サブシステムについて示す。

本サブシステム導入後の原単位は図5に示すように推移し、20%の省エネルギーが達成された。

この効果の内訳は、複合システムとしての製品バッファの有効利用を図ることが約70%、非線形計画による効率改

善が約30%である。

酸素サブシステムにおける最適化手法では、非線形計画法パッケージを用いており、最適化変数は39、プログラムサイズは30kバイト、最適化ガイダンスは2時間に1回行われる。

⑥ 最適化システムのサポート技術

最適化システムは、アドバンスト制御の中の大規模な制御システムの一つである。制御システムの設計に、制御対象の正しいモデルが必要であるのと同じように、最適化システムの設計にも正しいモデルが必要である。

設計データに基づくモデルを事前検討やシステム設計段階では用いることもできるが、実データを解析して、設定したモデルを適正化しなくてはならない。

実際のプロセスデータからモデルを推定する前段階として、データの整合性のチェックが更に重要であり、質量バランス、エネルギーバランスのとれたデータに補正する必要がある。そのような処理を施した信頼できるデータを蓄積し、その解析経験を積まなくてはならない。最適化システムとサポート技術との関係を図6に示す。

オフラインサポートシステムでは、データ解析によるモデル推定を主に行う。この解析はオンラインシステムのバックグラウンド、又は別の独立したオフラインシステムでも実行が可能である。太線はモデルの係数の情報の流れを示す。オンライン最適運用システムの「状態推定」部分は、プロセスの実データ、設定したモデルと照合して異常データを処理するとともに、モデルのパラメータを補正して実際に合わせる機能をもつ。

線形回帰の理論はほぼ完成しているが、現状では非線形回帰の実用的な手法はほとんどないので、今後特に重要になるのは、非線形モデルの推定技術である。

図3 エネルギー最適運用システムの全体機能

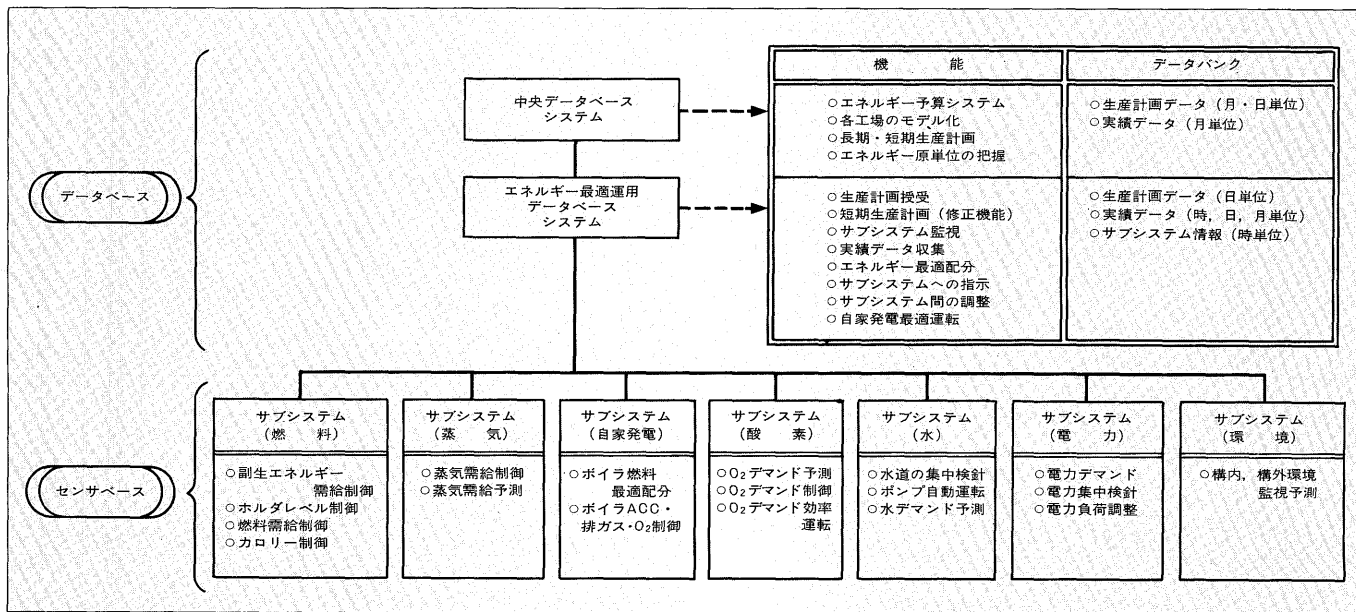


図4 エネルギーセンタシステムのハードウェア構成

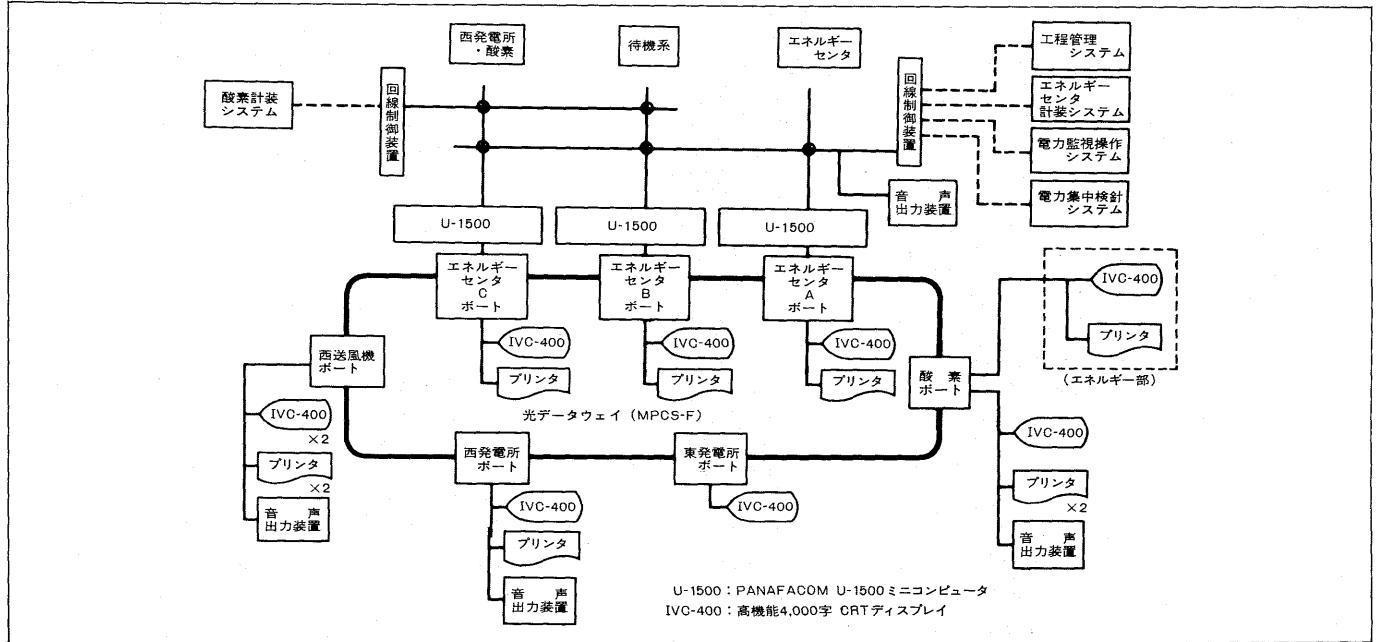


図5 酸素プラントにおける電力原単位の実績

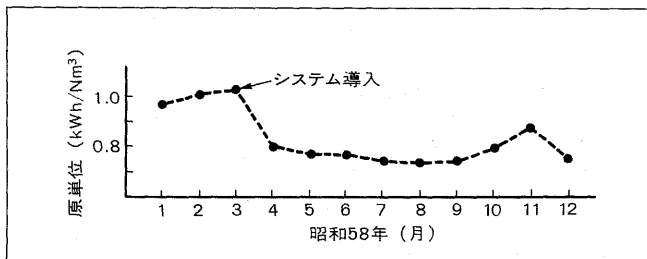
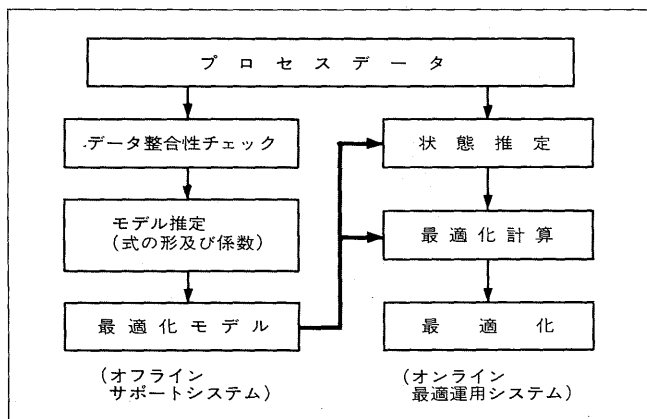


図6 最適化システムとサポート技術



運用について、その概要を紹介した。エネルギー最適運用の効果をより高めるためには、最適運用システムのサポート技術の充実とエネルギー需給予測の精度向上を考えたシステム構築が重要である。

今後共、富士電機は、鉄鋼、セメント、紙・パルプなどのエネルギー多消費産業向けエネルギー最適運用システムを、一般製造業にも容易に適用できるようにシステムのコンパクト化を図る一方、知識工学など新技術の適用を図りながら、より発展させた広域エネルギー最適運用システムの開発を進める所存である。

参考文献

- (1) 八島高雄ほか：エネルギーセンタの動向，富士時報，55，11，pp.727～735（1982）
- (2) 赤城啓允ほか：製鉄所における酸素プラント最適運用システム，富士時報，57，9，pp.526～529（1984）
- (3) 津田宗ほか：製鉄所における酸素プラント最適運用システム，第23回計測自動制御学会学術講演会，pp.251～252（1984）
- (4) 実用省エネルギー機器事典編集委員会編：省エネルギー機器事典，産業調査会 第1章（1982）
- (5) 今野浩・山下浩：非線形計画法，ORライブラリ6，日科技連（1978-3）
- (6) 三宮信夫ほか：酸素プラントの最適運用計画システム，第6回システムシンポジウム，pp.373～378（1984）

7 あとがき

複合プラントの非線形数理計画法によるエネルギー最適



*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。