

# 貯蔵設備の効率的利用による自家用火力発電プラントの省エネルギー運用

## Energy Saving Operation of Inplant Power Systems by Effective Utilization of Energy Holders

低成長経済下で、省エネルギーは産業界の必須の課題となっている。本報では、製紙工場での黒液貯蔵タンクなど、エネルギー貯蔵設備を数理計画手法によって有効利用し、従来よりも更に省エネルギー化を達成する計算機制御技術のための新しいソフトウェア多段LP法について報告する。このソフトウェアは、プラント内に存在する貯蔵設備の運用に着眼し、貯蔵エネルギーの時間的な運用方法を決定するものであって、これの適用によりエネルギーの貯蔵を考慮しない従来の最適配分よりも、いっそう効果的な省エネルギーを達成することができる。ここでは、多段LP法の原理、実際の自家用火力発電プラント(王子製紙株式会社春日井工場)への適用検討結果、更に今後のプラント全体の運用システムについて述べる。

倉地 彬\* Akira Kurachi  
 神長英俊\*\* Hidetoshi Kaminaga  
 船橋誠壽\*\*\* Motohisa Funabashi  
 西谷卓史\*\*\* Takushi Nishiya  
 加治 進\*\*\*\* Susumu Kaji  
 射場大造\*\*\*\*\* Daizô Iba

### 1 緒言

低成長経済下では、製品コストに占めるエネルギー費用をいかに削減するかということが、エネルギー多消費形産業で重要な課題となっている。王子製紙株式会社及び日立製作所は、このような状況のもとで、エネルギー設備の合理的な運用を図る新技術の開発を進め、日立製作所で開発した多段LP法を適用することを計画し、共同でモデルの開発及び実際の自家用火力発電プラント(王子製紙株式会社春日井工場)への適用検討を行なった。

省エネルギーのための計算機制御技術は、通常のプロセス制御と同様、二つの階層に分けられる<sup>1),2)</sup>。下位レベルの制御は、個々のプロセス機器に対する省エネルギー制御であり、上位のレベルは、プラント全体にわたる経済的なエネルギー配分制御である。

個々のプロセス機器制御としては、受変電の負荷力率制御、ポンプなど補機の台数制御、速度制御などが挙げられる。これらの制御は、省エネルギーのための重要な第一ステップであり、既に各方面で実用化されつつある。

上位の配分制御としては、ボイラ、タービンの経済負荷配分制御に代表される、エネルギー供給設備の総合的効率運用が挙げられる。これらは、時々刻々変動するエネルギー需要に応じて、エネルギー供給設備を全体として最も経済的となるように運転するものである。この方法も、大規模な自家用発電プラントで実用化され、エネルギー費用の数パーセントが削減されたという報告もある<sup>3)</sup>。

このように、省エネルギーのための制御技術を概観すると、個々の機器制御からプラント全体にわたる経済的負荷配分にまで至り、計算機制御による省エネルギーは、もはや限界に達しつつあるように思えるかもしれない。しかし、多くのプラントのエネルギーフローをよくみると、そこには更に省エネルギーを生み出せる大きな可能性が秘められていることが分かる。32ビット制御用計算機の開発というハードウェアの進歩を背景として、この可能性を具体化するため開発した省エネルギー用ソフトウェアが、ここで紹介する多段LP法で

ある。

これまでに、日立製作所では大規模な数理計画問題の効率的求解法を開発し、上水道の配水コントロールシステム<sup>4),5)</sup>や、多数の貯水池、ダムを効率的に運用する接続水系管理システム<sup>6),7)</sup>を実用化してきた。ここで述べる多段LP法は、これらの手法を、電力、蒸気、燃料など多種類の物質流れまで考慮できるように発展させたものである。

本報では、省エネルギー計算機制御のための新しいソフトウェア多段LP法の原理を紹介するとともに、実プラント(王子製紙株式会社春日井工場)への適用方法、更に今後の展望について述べる。

### 2 動的最適化の必要性和問題点

従来に増して、更に省エネルギーを達成する可能性のかぎは、黒液貯蔵タンクなどのエネルギー貯蔵設備の効率的な運用にある。図1に示す簡単なプラントを例に、貯蔵設備を含めた動的最適化の必要性を説明する。

図1に示すプラントでは、生産プラントで発生する黒液をタンクに一時貯蔵し燃料として再利用する。ここで黒液とは、木材から原料成分を取り出すために、木釜で蒸解させたとき

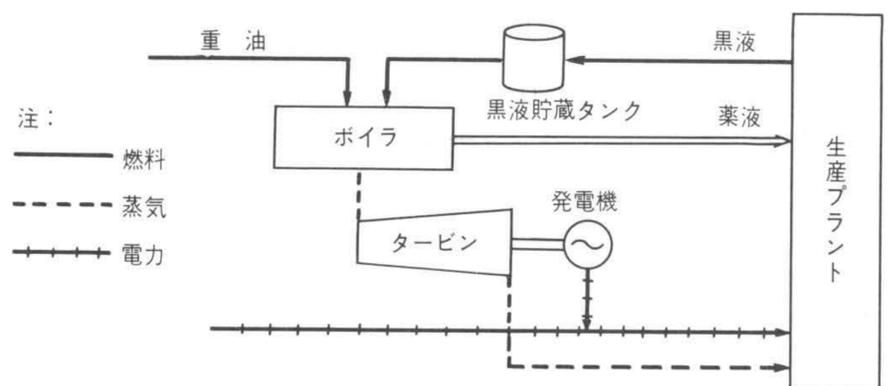


図1 エネルギープラントの模式図 多くのプラントには貯蔵設備があり、これを効率運用することによって、いっそうの省エネルギーが期待できる。しかし、このためには動的最適化問題を解明しなければならない。

\* 王子製紙株式会社春日井工場施設部 \*\* 王子製紙株式会社技術本部制御システム部 \*\*\* 日立製作所システム開発研究所  
 \*\*\*\* 日立製作所システム事業部 \*\*\*\*\* 日立製作所大みか工場

に溶出した木材中の有機分と、蒸解に使用した薬液の混合したものである。この黒液を約70%まで濃縮して、ボイラで燃焼する。この際、有機分は熱として回収され、蒸解用の薬液は緑液として回収される。黒液が不足する場合には重油をたき、更に場合によっては買電により電力をまかなう。

もし、生産プラントから発生した黒液をそのまま燃焼してゆくとすれば、場合によっては蒸気バランス上不必要な蒸気を発生させる場合も想定される。したがって、黒液タンクの容量を考慮して有効に黒液を運用すれば、購入エネルギー費用の大幅な低減を得ることができる。しかし、生産状況に応じて蒸気、電力の需要は時々刻々変化し、更に、黒液発生量も変化する。したがって、このような時々刻々変化するエネルギーの需要条件を満足させながら、ある期間内の合計購入エネルギー費用をいかに低減するかということが課題となる。これに対処するには、もはや人間の経験にたよるのではなく、数学的な手段によらざるを得なくなってくる。

このようなプラント運用の経済化の問題を、数学的な最適化問題として記述すると、次式のようにになる。

$$\text{タンクのバランス: } v(t) = v(t-1) + x_p(t) - x_B(t) \dots\dots(1)$$

$$v(0) = v_0 : \text{既知}$$

$$\text{エネルギーフローのバランス: } g(X(t)) = 0 \dots\dots(2)$$

$$\text{目的関数 (購入エネルギーコスト): } f = \sum_{t=1}^K f(t) \dots\dots(3)$$

$$f(t) = c_e(t)x_e(t) + c_B x_{BL}(t) \dots\dots(4)$$

ここに、 $v(t)$ は時刻 $t$ での貯蔵量であり、 $x_p(t)$ 、 $x_B(t)$ はそれぞれ黒液の発生量とボイラでの使用量を表わす変数である。また、 $g$ は各エネルギーのバランスを示す制約条件であり、 $f$ は買電量 $x_e(t)$ と重油使用量 $x_{BL}(t)$ に対する総費用である。すなわち、物理的な制約条件であるバランス式を満たすような黒液貯蔵量、電力・蒸気などのフロー量の中で、エネルギーコストを最小とするものを数学的な手段によって求めることになる。

従来の多くのエネルギー経済配分では、(1)式を考慮していなかった。このため、最適化問題としては、各時刻 $t$ ごとの小さな問題、すなわち制約 $g(X(t)) = 0$ の下でコスト $f(t)$ を最小化するという問題を解けばよかった。しかし、黒液貯蔵タンクのようなエネルギー貯蔵設備を考慮しようとする、(1)式から分かるように、二つの時刻にまたがった量 $v(t)$ 、 $v(t-1)$ を同時に決定しなければならず、結局、時刻 $t=1$ から $t=K$ にわたる問題を一挙に解かねばならない。プロセス変数が50個、最適化する時間区間が72(=K)段、例えば1時間単位に3日間分あったとしても、3,600元の大規模な最適化問題を解く必要がある。制御に必要な他の計算処理と同時にこのような大規模な最適化問題を制御用計算機で解こうとすると、従来の数学的手法<sup>8),9)</sup>では多大な計算時間を必要とするため実用不可能となる。この問題点を解決し、大規模な最適化問題を効率よく解くために開発したのが、以下に述べる多段LP法である。

### 3 多段LP法

多段LP法<sup>10)</sup>では、決定すべき変数を二つのグループ、すなわち変数間の関係式(1)式及び(2)式を意識することなく自由に決定できる独立変数のグループと、(1)式及び(2)式に基づいて、独立変数から決定できてしまう従属変数のグループに分ける。そして、(3)式で表わされる目的関数に対する独立変数の変化の影響度合(相対コスト)を調べ、この影響度合の最も大きい

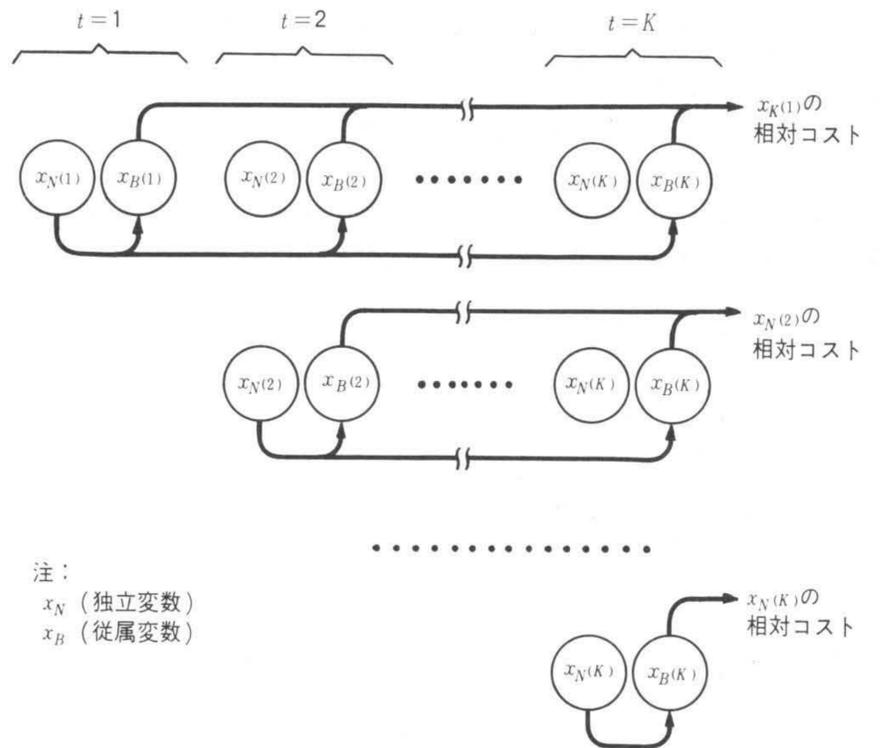


図2 多段LP法の計算過程 ある時刻 $t$ の独立変数が変化すれば、その変化は貯蔵量の変化を通じて $t+1, \dots, K$ 時刻の従属変数にだけ影響する。このように、動的最適化問題は特有の形式をもっており、目的関数への影響度合を、この図のように構造化することによって効率よく求解できる。

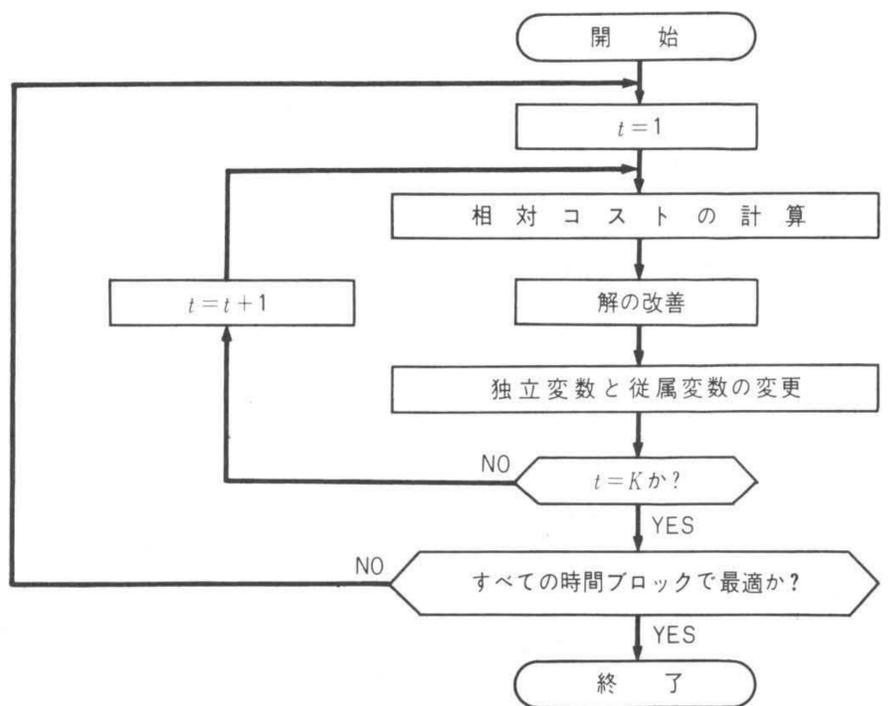


図3 多段LPの計算フロー 各時間ブロックの独立変数に対し相対コストを求め、解の改善を行なう。これをすべての時間ブロックに関し解の改善ができなくなるまで繰り返すことによって、最適解を求めることができる。

独立変数を変化させることによって、目的関数の値を減少させる。この独立変数と、変数の動ける領域の限界に達した従属変数とを入れ替えることによって、独立変数と従属変数のグループ分けを変更する。この手順を反復することによって最適解を求める。この考え方は、従来のLP法の求解過程に外ならないが、多段LP法では、関係式(1)式及び(2)式が特殊な形をしていることに着目して、この求解過程を効率化している。

すなわち、各時刻 $t$ に対する変数のグループの分け方に着目する。そして、図2に示すような形で各時刻の独立変数の変化が、他の時刻の従属変数に与える影響の変化を調べることによって相対コストを調べ、グループの分け方を変更する。グループの分け方の変更が二つの時刻 $t, t' (t \neq t')$ の変数間にまたがる際には、同図に示すような簡明な構造が保てなくなる。しかし、この場合にも、基底分解法<sup>11)</sup>という考え方を発展させることによって、独立変数の変化が他に及ぼす影響

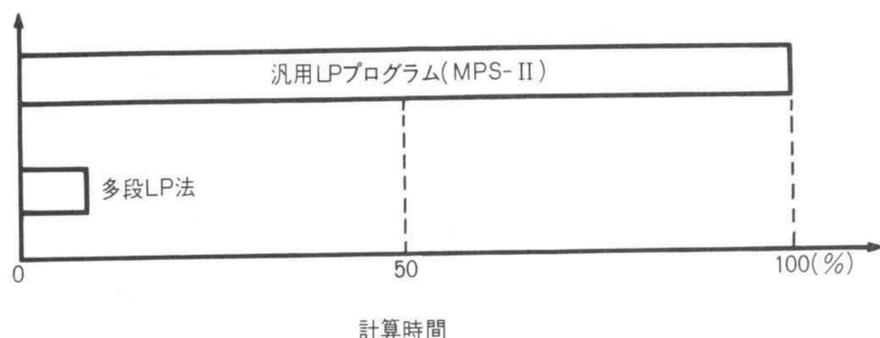


図4 多段LP法とLPとの計算時間比較 多段LP法による計算時間は、LPに対し $\frac{1}{10}$ 以下とすることができた。

を単純に求めることを可能とした。

このような調べ方をすると、相対コストが半ば解析的に求められる。このことは、最適解の求解計算量を大幅に削減することになる。図3には、この考え方を組み込んだ求解過程の全体フローを示す。

以上に述べた新たな方法によって、計算時間がどれほど短縮できるかを示したのが図4である。計算例は次章に述べる製紙工場エネルギープラントの運用計画である。汎用LPプログラムでは、時間に関する最適化問題を一挙に解かせた。これに対し多段LP法は、問題構造に適した求解方法をとっているために、計算時間比にして汎用LPプログラムの $\frac{1}{10}$ 以下という結果を得ている。

一般に最適化計算(LP法)に必要な計算量は、決定すべき変数の個数の2乗~3乗のオーダーと言われている。従来の計算機が最適化していた問題で、数十段の時間的要素を考慮しようとする計算量は $10^2$ 倍以上になってしまう。制御用計算機のハードウェアの進歩に加えて、多段LP法というソフトウェアの進歩によって、この困難な壁を突破することが可能となった。

#### 4 実プラントへの適用検討

前章までに述べた多段LP法の適用例として、王子製紙株式会社春日井工場でのエネルギープラント運用計画について述べる。

対象エネルギープラントは図5に示す構成である。本プラントの基本的な目的は、紙の製造プロセスに蒸気と電力を供

給することにある。各ボイラで発生した蒸気は、タービン発電機で発電を行なった後にプロセスに供給され、電力は買電とともにプロセスに供給される。ボイラの燃料としては木釜で発生した黒液、木くず(バーク)、重油の3種類がある。黒液の貯蔵量は木釜からの黒液発生量、精製した薬液(白液)の木釜への供給量及びボイラでの黒液燃焼量によって変化する。

エネルギーコストのうち、買電の単価は作業時間帯によって大幅に変化する[図6(a)]が、他のエネルギーコスト(バーク、重油)は一定であり、黒液のコストはゼロとして扱う。したがって、上記のエネルギープラントの運用計画としては、買電単価の高い時間帯の買電コストを下げるためには、各時間帯での蒸気・電力の需要を満足させながら、黒液をどのように貯蔵すればよいかということを知る必要がある。

ある4日間のプロセス操業計画に対し、多段LP法を用いて求めた運用計画の結果を図6に示す。同図(a)は黒液の貯蔵量変化を示すものである。ここでは4日後の黒液貯蔵量は $800\text{m}^3$ 以上にする制約を与えている。同図(b), (c)は、それぞれボイラ蒸発量とタービン発電機の出力を示す。ここで、8B停止の期間は制約条件として与えた。これらの図から、買電単価の高い時間帯に発電量が増加し、買電コストを節約している様子が分かる。

従来、このような運用計画はオペレータの経験に頼って行なわれていたが、考慮すべき変数が多いために、貯蔵設備を効率的に運用することは困難であった。これに対し、多段LP法を用いた運用計画では、プロセスでのエネルギー需要の変化や買電コストを考慮し、貯蔵設備の最も効率的な運用を行なうことができる。本章のプラントでは、多段LP法を用いることによって、従来と比べて数パーセントのエネルギーコスト削減が期待できる。

#### 5 今後の展望

本報で述べた多段LP法は、プラントの省エネルギー運用への適用を中心として述べたものである。しかし、その数学的構造から明らかなように、適用はエネルギー分野に限定されるものではない。内部に貯蔵設備を含むような一般的なプラントに広く適用でき、これまで経験的にしか運転できなかった設備から、その能力を最大限に引き出すことが可能となる。

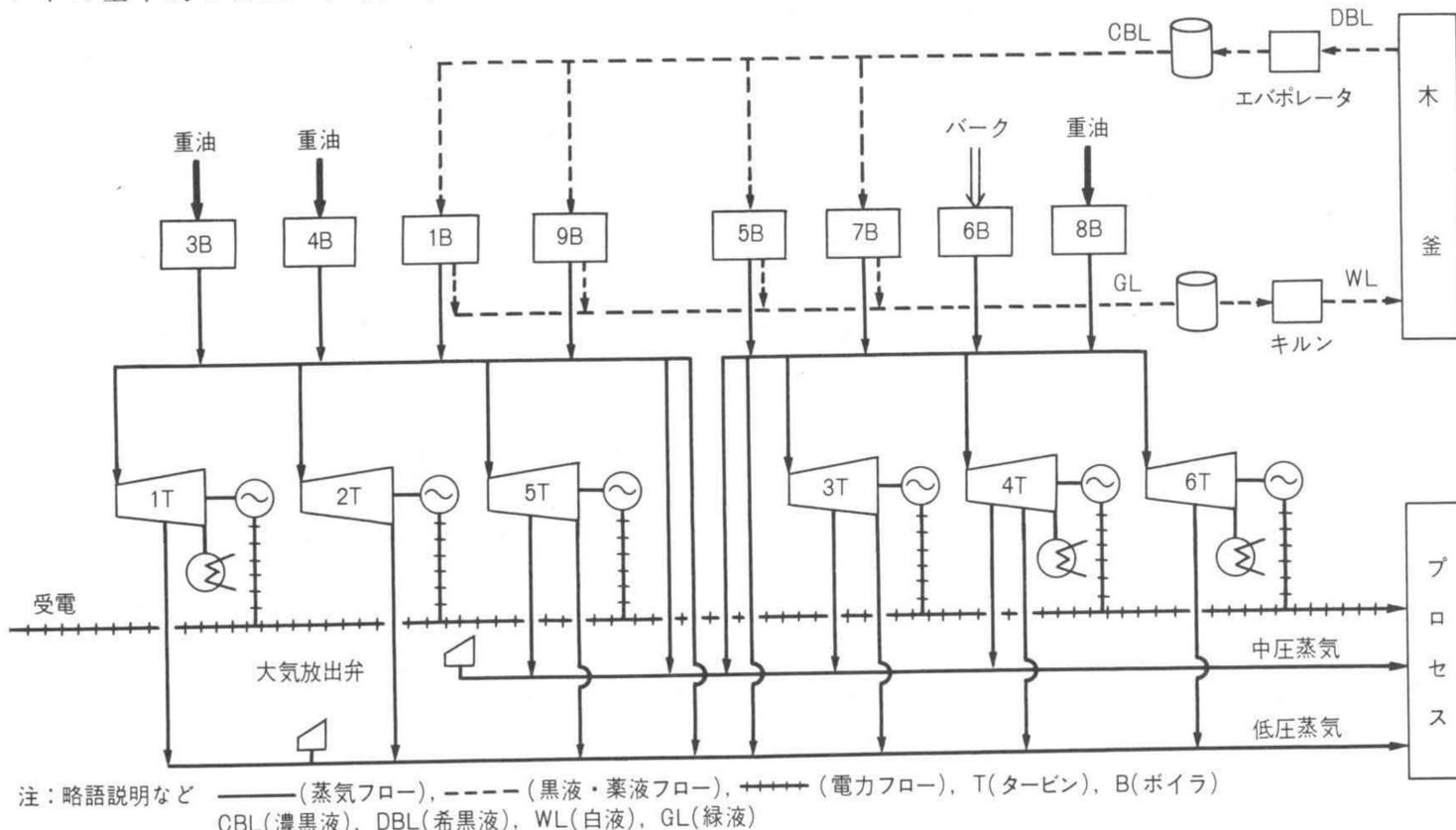


図5 製紙工場でのエネルギープラントのフロー図 製紙工場エネルギープラントでの蒸気、電力などの流れを示す。

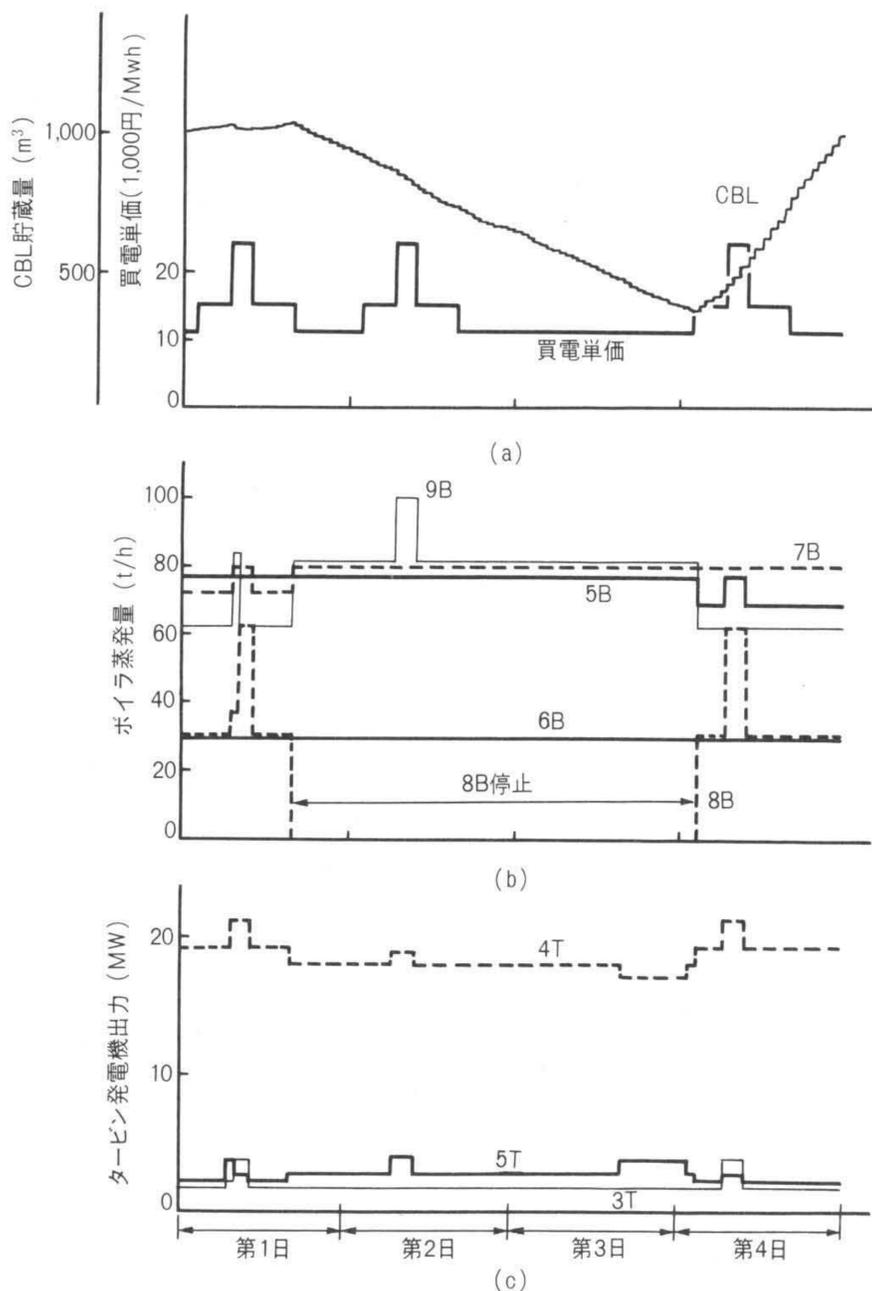


図6 運用計画結果の例 多段LP法による運用計画によって、(a)に示す買電単価の高い時間帯に(c)図の発電量が増加するため、買電コストを削減することができる。

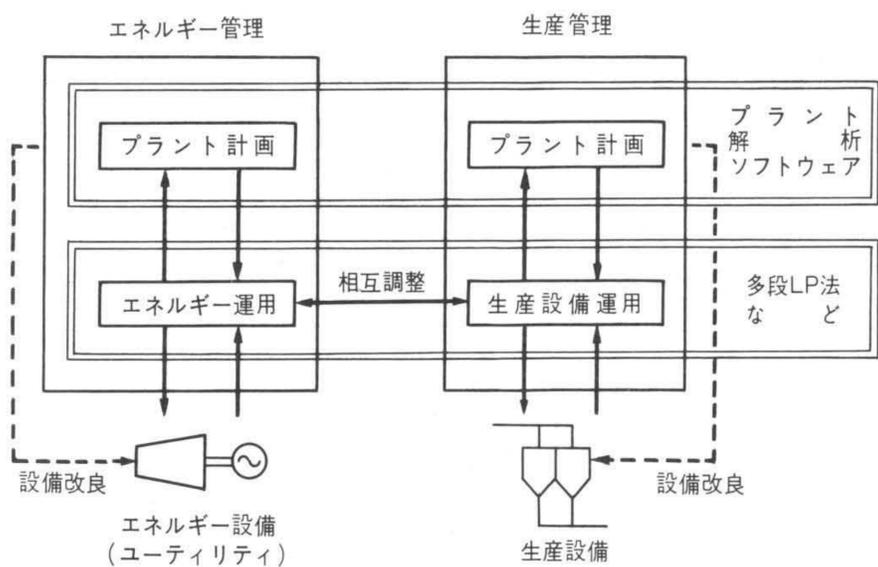


図7 プラントワイド運用システム エネルギー部門の運用計画と生産計画との相互調整によって、いっそうのエネルギーコスト削減ができる。

すなわち、エネルギー設備だけではなく、生産設備を含めたプラント全体の経済運用への展開も期待できる。

図7は、プラント全体の運用システムの実現イメージを描いたものである。エネルギー部門、生産部門は多段LP法を用いてプラント運用計画を行なうことを想定している。多段LP法では種々の制約が目的関数に及ぼす影響を求めることができるため、例えば生産計画をどのように変更調整すれば、より生産費用(エネルギーコスト、原料コストなど)を削減でき

るかという示唆を得ることが可能である。このようなエネルギー部門と生産部門とのやりとりを示したのが、同図中の相互調整である。

更に、プラント運用をその能力限界近くまで行なおうとするとその安全性確保やプラントの計画、改良は重要な課題である。今後プラント信頼性評価技法<sup>12)</sup>、故障波及解析評価技法<sup>13),14)</sup>、プラントシミュレータ<sup>15),16)</sup>などの適用を検討する必要があると考える。

## 6 結 言

大規模プラントの運用について、多段LP法の原理、適用例及び今後の展望を中心に述べた。適用例で示した王子製紙株式会社春日井工場のシステムは、昭和59年3月稼動予定である。

本手法では、プラント内の貯蔵設備を利用し、エネルギーの時間的な配分を行なうことによって、いっそうの省エネルギーを達成でき、今後は生産設備をも含めたプラント全体の経済運用へと発展していくものと考えている。

終わりに、この手法の開発に当たり終始御援助、御指導をいただいた関係各位に対し、深謝の意を表わす次第である。

## 参考文献

- 1) A. Kaya, et al.: Energy Management Technology in Pulp, Paper, and Allied Industries, Automatica, 19, 2, 111~130 (1983)
- 2) 特集・工場におけるエネルギー管理システム, 省エネルギー, 34, 10, 2~45(1982)
- 3) 加治, 外: 省エネルギーを主目的とした自家用発電所エネルギー管理システム, 日立評論, 64, 6, 423~428(昭57-6)
- 4) 西岡, 外: 上水道配水コントロールシステム, 日立評論, 64, 6, 447~452(昭57-6)
- 5) S. Miyaoka, et al.: Optimal Control of Water Distribution Systems by Network Flow Theory, IEEE Trans., Vol. AC-29, No. 4 (to appear)
- 6) 船橋, 外: システム計画・制御技法の開発, 日立評論, 64, 6, 401~406(昭57-6)
- 7) F. Wakamori, et al.: Layered Network Model Approach to Optimal Daily Hydro Scheduling, IEEE Trans., Vol. PAS-101, No. 9, 3310~3314
- 8) C. R. Glassey: Nested Decomposition and Multi-Stage Linear Programs, Management Science, 20, 3, 282~292 (1973)
- 9) J. K. Ho, et al.: Nested Decomposition for Dynamic Models, Mathematical Programming 6, 121~140, North-Holland Publishing Company (1974)
- 10) 西谷, 外: 基底分解法による大規模システム動的最適化問題の一解法とエネルギー管理システムへの適用, 昭58, 第27回システムと制御研究発表講演会論文集(昭58-5)
- 11) A. F. Perold, et al.: A Basis Factorization Method for Block Triangular Linear Programms, (eds.) I. Duff, et al.: Sparse Matrix Proceeding 1978, 283~312, SIAM (1979)
- 12) 佐々木, 外: 原子力プラントの確率論的安全解析支援用プログラムの開発, 日立評論, 62, 9, 633~636(昭57-9)
- 13) 古河, 外: 故障波及過程モデル化の一研究, 電子通信学会論文誌, J-63-A, 3, 197~203(昭55-3)
- 14) 古河, 外: 時間付有向グラフ逆方向探索による故障源推定法, 計測自動制御学会論文集, 18, 12, 1140~1144(昭57-12)
- 15) 大成, 外: システムシミュレーション技術の動向, 日立評論, 64, 9, 633~638(昭57-9)
- 16) Ozawa, et al.: ALPPS-A CAE System for Plant Planning, Proceedings of SCSC, 1983, 856~861