工場群における
電力・蒸気の最適供給システム

瀧口幸弘・金子準二

1. まえがき

今日のエネルギー高価格時代において，省エネルギー対策は，重要な問題の一つである．省エネルギーは大別して，使用面，供給面の二つが考えられる．また，これらは，相互に関連を有するもので，使用面の節約を供給面から合理的なものにしなければならない．

今回は，工場群各部門で使用する電力・蒸気をもっとも経済的に供給するためのシステムについて報告し，非線形最適問題の事例紹介としたい．

電力と蒸気は，蒸気タービンを介すれば，まったく同じエネルギーであるから，見方を変えると，化学プロセスの「質量と熱量の最適バランス問題」といえる．

2. 対象設備

当社宇部地区には，業種の異なる4工場(宇部窒素工場，宇部カプロラクタム工場，宇部セメント工場，宇部鉄工所)が隣接して存在する．このうち3工場は，発電形式の異なる(抽気復水，抽気背圧，復水式)自家用火力発電所5基をもつ．この他に水力1基があり，タービンは11台におよぶ．

工場間は蒸気ラインで連結され，相互の融通が可能である．一方，受電については，上記4工場の他，関係会社1工場と共同して，中国電力(株)に対し，共同受電契約(特約)を行ない，一括して受電している．**図5**を参照されたい．

3. 電力・蒸気の供給合理化の要因

電力・蒸気の供給合理化に影響する要因としては，つぎのような項目が考えられる．

(1) 重油価格の変動

石油ショック以降原油の輸入価格の高騰がいちじるしく，しかも安定した価格でない．

(2) 燃料の多様化

長期的視野にたって，燃料多様化を進めており発電用燃料の一部に石炭を使用している．

(3) 公害規制

公害規制は年々きびしくなっており，低硫黄燃料の使用が必要で，ボイラーごとに燃料価格が異なる．

(4) ボイラー，タービンの効率

ボイラー，タービンは蒸気条件(温度，圧力)が相違するほか，"2."にも述べたように，発電形式が異なるため，効率に差異がある．

(5) 電力料金

購入電力料金は，燃料価格によって高騰し，また，契約電力，昼間および夜間によっても変わる．

4. システム化の必要性

"3."に述べたように，合理的供給を検討する場合影響する要因が多岐にわたる他，つぎのようなことがいえる．

(1) ボイラー，タービンの特性

ボイラー，タービンの特性は効率自体その出力によって変動するもので，とくにタービンでは，各部を通過する蒸気量また復水部については海水温度，あるいは復水器のよごれ等によっても異なり，これらの考慮が必要である．

(2) 操業度の変化

高度経済成長期のように，ほとんどの部門がフル稼動する時代ではなく，刻々と操業度が変化し，使用する電力・蒸気の場所および量が変動するので，それに対応した合理的供給計画立案には問題が多い．

(3) 省エネルギーの合理的評価

当システムを利用すれば，プロセス改善によって，電力・蒸気節約案が計画された場合，それに対応する供給メリットの算定が合理的に行なえる．

(4) 系が複雑である

図5からわかるように，蒸気・電力の使用場所が同一工場内でも各所にあり，また生産プロセスへの給水加熱や熱回収等があり，それが工場ごとに分散している．電力についても同様で，ある工場で多量に電力を使用する場合，発電出力を増加しなければならない．

どのボイラーでどれだけ蒸気を発生させ，どのタービンへ送るか，さらに工場間の融通も含めて，いずれの配管でどのタービン，あるいは生産工程へ蒸気を送るか，またどのタービンでどれだけの発電をしなければならないかを決定しなければならない．

(5) 客観性を有すること

従来各工場は，それぞれの立場で供給合理化を行ない，工場間の融通蒸気量は融通価格をもとに決定してきた．しかし融通価格自体は基本予算時に決め，かつ期中一定のままなので各種状況の変化に応じて物量を決める基準とは本来なりえないことは明らかである．

このような観点から，当社では石油ショック以降，この問題について直ちに検討をはじめ，昭和50年標記システムの開発を行ない，51年末完成し，以来期待どおりの成果を上げている．

5. モデル化の概要

システム開発は，コーディネイターとして，本社電力部およびシステム部があたり，各工場のスタッフ部門の協力のもとにつぎの手順にしたがって行なわれた．

(1) 各発電プラント別に熱精算図を作成する．これはメーカー提出のタービン蒸気消費線図およびボイラー性能表をもとに，運転実績を考慮して負荷別，季節別に作成する(**図3**参照)．

(2) 上記の熱精算図をもとに，簡素化および数式化を行なう．たとえば，**図4**に示すプラントについては，工場へ送出する三つの蒸気条件別蒸気量をそれぞれ W_1, W_2, Q_1, 発電電力を P_1, 必要燃料を F とするとき，$F=f(W_1, W_2, Q_1, P_1)$ なる関係式を作成する．所内電力についても同様な式を作成する．このとき季節変動は復水や純水温度または蒸気消費率の変化によって説明がついた．負荷変動に関して，変動範囲の狭いタービンは入口蒸気量等の1次式であらわし，広いタービンは入口蒸気量等の2次式であらわす．

(3) 各プラントおよび各工場を結ぶ蒸気配管および電線路を調べ，対象工場群全体の熱精算を行なうための数式を作成する．

(4) ボイラー，タービン，抽気調圧弁条件，配管，電線路等の運転制限範囲等の技術上の制約条件をすべて列挙する．

(5) でき上ったモデルを実績データを用いてチェックする．また定検等の特殊運転についてもチェックする数式モデルの精度も把握する．

6. システムの検討

この種の問題に対し利用可能汎用システムとして，つぎのものが考えられる．

(1) FMPS (Functional Mathematical Programming System, 日本ユニバック社提供)このシステムにはLP(Linear Programming), GUB(Generalized Upper Bound), MIP(Mixed Integer Programming), SEP(SEparable Programming)が含まれている．

(2) PROSLATOR(PROcess SimuLATOR, 日本ユニバック社提供) このシステムは，化学プロセスの特性を数学モデルとして表現し，数値実験を行なうためのもので，ある程度の最適化が行なえるようになっている．

ここで開発しようとするシステムは DDC(Direct Digital Control)的要素と，生産計画および設備計画または省エネルギー評価プログラム的要素の両面を要求される．そこで下記のシステム条件を設定し，この条件のもとに上記システムを検討した結果，新たにシステムを開発することに決めた．

システム開発条件

(1) 非線形の条件付最適化計算ができること

(2) 端末機からも利用できること

(3) 計算時間は極力短かくすること

(4) プログラムおよびその実行時の占有主記憶を小さくすること

(5) システムのメインテナンスを要する部分を少なくすること

(6) 総合的検討が容易にできるようにアウトプットの図化ができること

(7) 基礎的一般データの保存が可能なこと

(8) プログラムは**図1**のように三つの部分に機能分離する．

7. 解析手法について

最適計算には，以下に示すような部分的線形計画法(Sectionally Linearized LP, 近似計画法, Method of Approximation Programming)を採用した(**図2**参

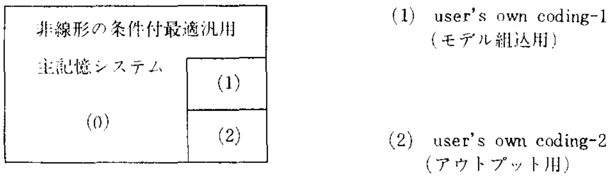

図 1

照).

(1) 概要

ＬＰ計算に必要な行列を容易にプログラム内でつくり出すことができるようにつぎの手順にしたがう.

(イ) 数式モデルを変数 $\boldsymbol{Z}=(Z_1, Z_2, \cdots, Z_{N+M})$, 等号式 $\boldsymbol{F}(\boldsymbol{Z})=\boldsymbol{O}$ および変数別上下限式 $\boldsymbol{L}\leqq\boldsymbol{Z}\leqq\boldsymbol{U}$ のみであらわす.

(ロ) つぎに等号式の数 $-\boldsymbol{M}$ 個だけ変数 $\boldsymbol{Z}$ の内から従属変数 $\boldsymbol{Y}$ として選び出す. 残りの変数を独立変数 $\boldsymbol{X}$ とよぶ. 従属変数 $\boldsymbol{Y}$ の選び方は, なるべく独立変数 $\boldsymbol{X}$ のみによって explicit にあらわされるものを選んだほうが, (2)の項で述べる変形手法に便利である.

(ハ) いま $\boldsymbol{X}$, $\boldsymbol{Y}$ の値, $\boldsymbol{X}_k$, $\boldsymbol{Y}_k$ が与えられている時, その点のまわりでテーラー展開し, 線形化することを考える. 1次項までとるとつぎのようになる.

$$\begin{bmatrix} dF_1 \\ \vdots \\ dF_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial F_1}{\partial x_N} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_M}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial F_M}{\partial x_N} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} dx_1 \\ \vdots \\ dx_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial y_1} & \cdots & \frac{\partial F_1}{\partial y_M} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_M}{\partial y_1} & \cdots & \frac{\partial F_M}{\partial y_M} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} dy_1 \\ \vdots \\ dy_M \end{bmatrix}$$

または,

$$d\boldsymbol{F}=\left[\frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial \boldsymbol{X}}\right]_k d\boldsymbol{X}+\left[\frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial \boldsymbol{Y}}\right]_k d\boldsymbol{Y} \qquad (1)$$

一方 $\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}+d\boldsymbol{X},\ \boldsymbol{Y}+d\boldsymbol{Y})=\boldsymbol{O}$

よって, $d\boldsymbol{F}=0$ (2)

(1), (2)式によって,

$$d\boldsymbol{Y}=-\left[\frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial \boldsymbol{Y}}\right]_k^{-1}\left[\frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial \boldsymbol{X}}\right]_k d\boldsymbol{X}=-\boldsymbol{D}d\boldsymbol{X} \qquad (3)$$

ここで $\boldsymbol{D}$ は partials matrix とよばれる. 最適化計算では(3)式を用いてＬＰを解く.

行列 $\boldsymbol{D}$ は $\partial\boldsymbol{Y}/\partial\boldsymbol{X}$ と書くこともできるので式 $\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X},\boldsymbol{Y})=\boldsymbol{O}$ を直接偏微分することによって求まる下記の連立方程式を解くことによって得ることができる.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_i} \\ \vdots \\ \frac{\partial F_M}{\partial x_i} \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial y_1} & \cdots & \frac{\partial F_1}{\partial y_M} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_M}{\partial y_1} & \cdots & \frac{\partial F_M}{\partial y_M} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_i} \\ \vdots \\ \frac{\partial y_M}{\partial x_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad i=1,\cdots,N \qquad (4)$$

与えられた $\boldsymbol{X}$, $\boldsymbol{Y}$ の各変数の上下限値をそれぞれ $\boldsymbol{U}_x$,

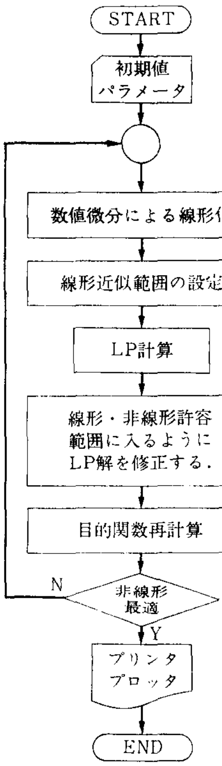

図 2

$\boldsymbol{U}_y$, $\boldsymbol{L}_x$, $\boldsymbol{L}_y$ とすると,

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{U}_x &\geqq \boldsymbol{X}_k+\triangle \boldsymbol{X}_k \geqq \boldsymbol{L}_x \\ \boldsymbol{U}_y &\geqq \boldsymbol{Y}_k+\triangle \boldsymbol{Y}_k \geqq \boldsymbol{L}_y \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

よってＬＰでの上下限値は,

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{U}_x-\boldsymbol{X}_k &\geqq \triangle \boldsymbol{X}_k \geqq \boldsymbol{L}_x-\boldsymbol{X}_k \\ \boldsymbol{U}_y-\boldsymbol{Y}_k &\geqq \triangle \boldsymbol{Y}_k \geqq \boldsymbol{L}_y-\boldsymbol{Y}_k \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

以上により非線形の目的関数と制約条件はＬＰに適した一次式に変換された. (目的関数も一つの従属変数とみなせる.)

(2) 変形手法

従属変数 $\boldsymbol{Y}$ が独立変数 $\boldsymbol{X}$ によって explicit にあらわされている場合が多い. この場合, 連立方程式を解かずに後述する数値微分によって簡単に求まる. このため連立方程式を解くことをやめ計算時間の節約と, システムの繁雑さを避けるため, user's own coding-1の機能として, 独立変数 $\boldsymbol{X}$ より従属変数 $\boldsymbol{Y}$ を算出するルーチンと規定する. 従属変数 $\boldsymbol{Y}$ が implicit の場合 user's own coding-1 内で収束反復するか, 連立方程式を解くかすればよい. しかし, このようにすると user's own coding-1 の作成にノウハウが必要となる. したがって, ここでは implicit な従属変数を導入し, その上下限を ε 以下とする.

$$F(y_k,\ \boldsymbol{X})=0\ \Rightarrow \begin{cases} y_k'+F(y_k,\ \boldsymbol{X})=0 \\ |y_k'|\leqq\varepsilon \end{cases} \tag{7}$$

(3) 数値微分

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_j}=\frac{y_i(x_1,x_2,\cdots,x_j+\triangle x_j,\cdots,x_N)-y_i(x_1,x_2,\cdots,x_j-\triangle x_j,\cdots,x_N)}{2\triangle x_j} \tag{8}$$

(4) タブローの節約

(イ) 基底変数に対する単位行列をタブローからはずす

(ロ) 独立変数増分 $\triangle x_i$ には本来非負条件はない．そこで $\triangle x_i$ をつぎのように二つの非負変数に分解し，有界変数法を応用してつぎのように考える．

$$\triangle x_i=\triangle x_i^+-\triangle x_i^- \tag{9}$$

$\triangle x_i^+$ と $\triangle x_i^-$ のタブロー中の係数は符号が異なるだけで同時に基底変数となり得ない．また片方が基底に入っている時には対応する Reduced Cost は零となる．これらの性質を用いて $\triangle x^+$ または $\triangle x^-$ のどちらか一方分のタブローしか作成しないこととする．

(ハ) ただ一つの人為変数を使用した罰金法を用いた．従来の手法とこの手法との例を以下に示して説明とする．

従来法

$$\begin{aligned} 2x_1+3x_2\qquad\quad &+\lambda_1-\mu_1=-8 \\ 2x_2+5x_3&+\lambda_2-\mu_2=-10 \\ 3x_1+2x_2+4x_3&+\lambda_2-\mu_3=-16 \end{aligned} \tag{9}$$

可能基底解　$x_i=0,\ \lambda_i=0$

$\mu_1=8,\ \mu_2=10,\ \mu_3=16$

可能初期解　$\mu_i=0$

1－人為変数法

$$\begin{aligned} 2x_1+3x_2\qquad\quad &+\lambda_1+(8/K+1)\mu=K \\ 2x_2+5x_3&+\lambda_2+(10/K+1)\mu=K \\ 3x_1+2x_2+4x_3&+\lambda_3+(16/K+1)\mu=K \\ &\mu\leqq K \end{aligned} \tag{10}$$

可能基底解　$x_i=0,\ \lambda_i=B$

$\mu=0$

可能初期解　$\mu=K$

ここで K はある正の定数

(注) RHS を係数としたことになる．

(注) 上記2手法の罰金は異符号である．

(ニ) 計算精度を上げるため倍精度計算とした．

(ホ) 線形化による誤差を小さくするために，独立変数に対する線形近似範囲の設定とともに従属変数に対しても線形・非線形範囲を設定している(図3参照)．

(ヘ) 変数の上下限内に最適解が存在する場合には上述の各設定範囲をある値以下になるまで徐々に狭めていって最適解の精度を上げるようにした．

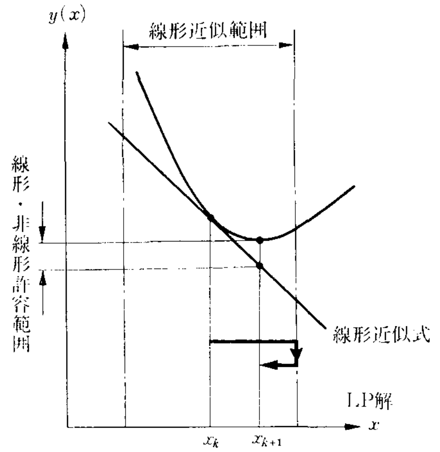

図 3

(ト) 計算時間を短縮するために，目的関数の変化量の大小を判別する基準をあらかじめインプットしておき，2回以上連続してこの値より小さな目的関数の増分でLPが成功した場合には，線形近似範囲を1/2ずつ狭めてゆく．また逆に3回以上連続して大きな目的関数の増分でLPが成功した場合にはその範囲を2倍ずつ拡げていくようになっている．

(チ) 非線形最適解の判定は前項の変更後の線形近似範囲がある値以下になったか，またはLP解(x_i の変化分)がすべてある値以下になった時の2通りである．

(リ) 計算済データを利用し，その一部を修正し，再計算を引続いて何度か行なうことが可能である．

(ヌ) インプットデータ(初期値)としては，計画用データと稼動中のデータ(計測データ)との2種類が許されている．

(ル) GP(Goal Programming)的手法の導入

インプットミスや操業条件によっては大気ブロー等が必要となり通常のモデルでは制約条件を満足しない(実行不可能な)場合がある．このような場合計算途中結果をプリントしても問題点の発見が困難な場合が多い．ここでは重要なバランス式(等号制約式)には過不足変数を導入した．過不足変数は x^+ と x^- の対とし非負条件のもとに次式のように本来のバランス式に組入れる．

$$(\text{本来のバランス式})-x^++x^-=0$$

$$(\text{本来の目的関数})+M'(x^++x^-)\rightarrow\min$$

このようにしておくと，インプットミス等が容易に発見できるようになる．

8. システム開発による効果

このシステム開発による成果は充分にあった．以下お

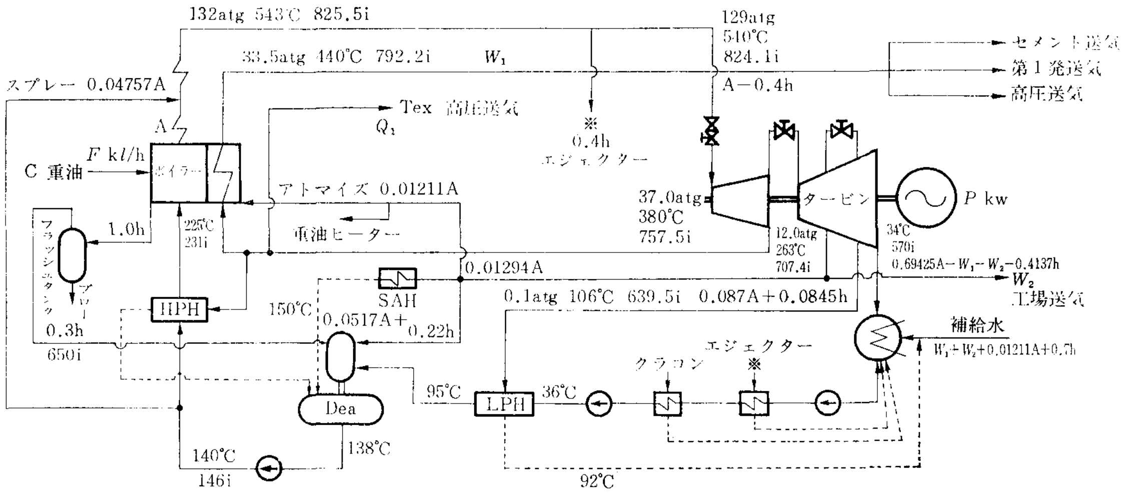

図 4 熱精算図

もな事項について列挙する．

(1) このシステム開発をきっかけに，供給設備の合理的運用を全社的立場から考えようとする認識が，各工場で一層強くなった．したがって電力・蒸気の融通がスムーズに行なえるようになり，最適運転が実現できるようになった．

(2) 個別工場だけでは解決できない設備の合理化が可能となった．これは電力・蒸気設備にとどまらず製品設備にまでおよんだ．

(3) 受電契約において，契約電力を極力小さくすることが望ましい．当システムの目的関数は比例費ミニマムとしているが，発電用燃料単価を零にして計算すれば，簡単に受電ミニマムの値が得られる．この値は契約電力の値決定に大いに参考になっている．

(4) 各種設備の省エネルギー化案や電力・蒸気供給設備新設案に対する評価が正確にできる．

(5) 各エネルギー設備の数式化によって，どの設備も同一精度で議論できるようになった．また時々刻々ボトルネックがどこにあるか把握できるようになった．

9. 問題点と今後の対策

(1) 制約条件および目的関数は連続で，かつ局所最適しか求まらない．

(2) ボイラーおよびタービン台数が多いため操作条件(定検その他)によって，それらの停止または稼動が問題となる．これをモデル化するためには，整数計画法等を用いなければならないが，プログラムの複雑化，計算時間に問題があるため現在のところそれらは考慮していない．

(3) 罰金法とGP的な手法による罰金の2種類を導入したため計算精度は単精度では不充分となってしまった．したがって現在倍精度演算で計算している．各罰金の大きさは試行錯誤によって決めた．

(4) 工場間に電力・蒸気の融通があるため，これはまた独立採算制をとっている事業部間の融通でもあり，経理上仕切り価格(融通価格)の設定が必要となってくる．この問題に関し Shadow Price 案，製品を含むマクロモデル案その他があり未だ結論を得ていない．現在は変動費のみを考慮して決めている．

(5) 使用している各種パラメータの客観性，および信頼性を高めるために，非線形モデルのパラメータ決定問題として，このシステムを有効利用している．その場合このシステムの user's own coding-1 を統計解析でいう構造方程式で書きかえ，目的関数として残差の2乗を用いればよい．

10. おわりに

システム開発直後は，開発者が省エネルギー化案の立案者であったため，省エネルギー金額年1億円以上のシステムの評価を受けた．現在の立案者は開発者以外であるため，システムの評価は単なる便利なプログラムという程度である．これは"実践的ORの誉れ"なのか，それとも開発者のひがみなのかいろいろと考えさせられる．

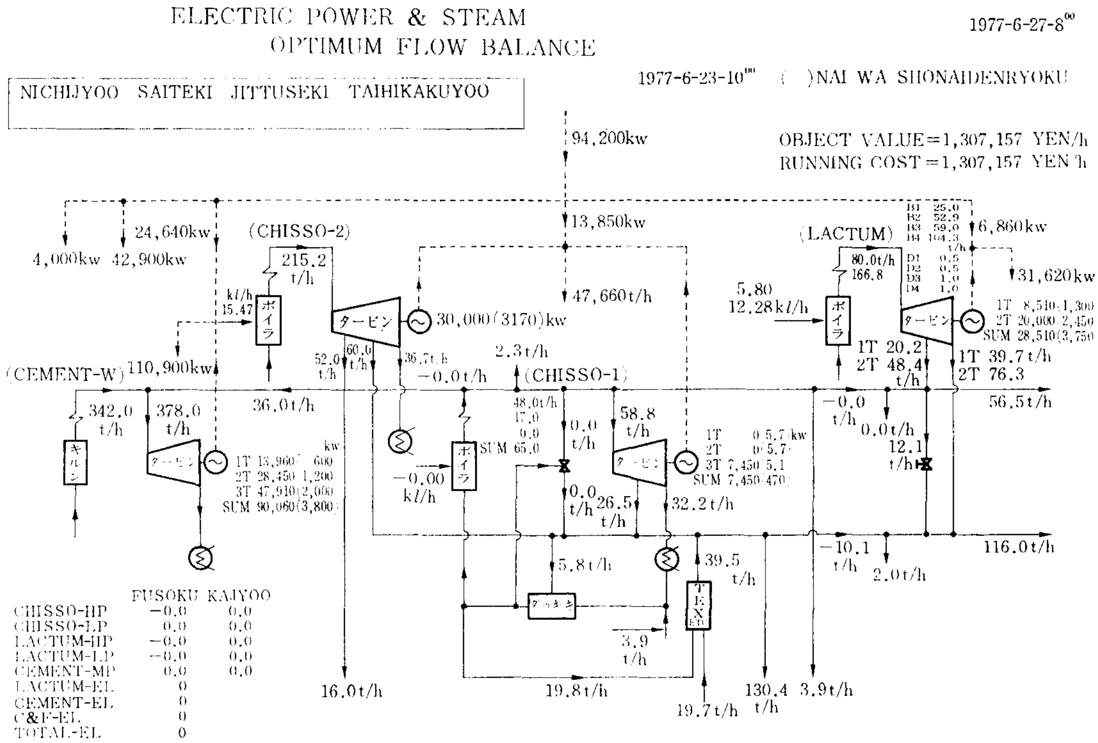

図 5

参 考 文 献

[1] 井尻雄士「計数管理の基礎」岩波書店

[2] H. P. キュンチ他，刀根薫監訳「電子計算機のための数理計画法」日科技連

[3] 東山尚「プロセスの計画，設計及び制御」化学装置 1968, 12

[4] 小野勝章「計算を中心とした線形計画法」日科技連

[5] 鴇田正春「プロセス操業最適化のシステム考察」化学機械技術 21

[6] I.C.I MONOGRAPH 5/黒田充訳「企業効果のための管理手法シリーズ5 非線形最適化の技法」培風館

(たきぐち・ゆきひろ 宇部興産㈱電力部
かねこ・じゅんじ 宇部興産㈱システム部)

OR手帳

“せんみつ”は3シグマのそと

ものになるかどうかよくわからない仕事の引き合いなどがあると，「これはせんみつだけど……」というようなことをいう．辞書を引くと，せんみつや(千三屋)とは，「うそばかりいう人(千に三つしかほんとうのことがない)」とある．

ところで，正規分布表を見ると，平均値を中心にしてプラスマイナス3シグマの範囲内の確率が0.9973であるから，3シグマの外にはずれるのは全体の約0.3%であり，これはちょうど1,000に三つ，すなわちせんみつである．

また，カードパンチを外注したりすると（検証パンチをしなときには)，1,000枚に3枚ぐらいはミスパンチがあるというが，これもせんみつである．

蛇足だが，“せんだみつお”をせんみつというのは当たっていると思う．

平本 巌（日科技研）

フォーラム