

十條製紙株式会社石巻工場用

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

Computerized Power Plant Complex Control and Management System for Energy Saving

近年のエネルギー価格の高騰により、省エネルギーを主目的とした管理・制御システムの導入が各方面で実用化されつつあり、特に、多量のエネルギーを扱う自家用火力発電所でも、技術面、投資面で実用的な方法となってきた。

このたび、十條製紙株式会社石巻工場で稼動に至ったエネルギー管理システムは、自家用火力発電所の省エネルギー運転のほかに、運転の省力化、プロセスへのエネルギーの安定供給を図ることを目的とした総合管理・制御システムである。

本システムは、日立制御用計算機HIDIC 80を中核とし、制御装置、各種センサから構成され、昭和56年4月から実運用を開始し所期の目的を達成している。

本稿では、システムの目的、構成、機能及びシステム導入の効果について述べる。

高田保雄*	Yasuo Takata
大山 繁*	Shigeru Ooyama
加治 進**	Susumu Kaji
北原利正***	Toshimasa Kitahara
荻野 悟****	Satoru Ogino
町田哲夫*****	Tetsuo Machida
沼沢英世****	Hideyo Numasawa

1 緒 言

第一次、第二次のいわゆるオイルショック以来、どのようにして省エネルギーを図るかは、あらゆる産業で重要なテーマとなっている。

省エネルギー施策は大きく分けて、(1)省エネルギー形設備の導入、(2)排熱ボイラなどの排エネルギー回収設備の導入、(3)原料転換などによる省エネルギー化、(4)設備の運用を合理化し、省エネルギーを図る管理・制御システムの導入などに大別することができる。

特に、本稿で述べる省エネルギーを目的とした管理・制御システムとしては、近年受変電の負荷力率制御、ポンプの台数制御、速度制御、圧縮機の圧力制御、炉の低O₂制御など、各方面でこのようなシステムが実用化されつつある。

前述したような管理・制御システムに対しては、同時に工場運転・管理の強化、省力化を図る上からも大きな期待が寄せられており、特に、大規模な自家用発電設備をもつ工場では、エネルギーを最も多量に扱う自家用発電設備の運用を合理化することが省エネルギーへの寄与率も高く、その方法が重要な開発ポイントとなっていた。

このため、十條製紙株式会社では、日立製作所と共同で省エネルギーシステムの具体化を検討し、年間100億円を超えるエネルギーを消費する石巻工場を対象として、ボイラ・タービン負荷配分制御、受電デマンド制御などを主な機能として遂行する省エネルギーシステムを導入することとした。

システム開発に当たっては、石巻工場の運用、設備などの調査を行ない、必要とされる機能、制御方式、運用改善項目などの検討を行なった。更に、調査結果を基に、最適負荷配分制御を行なった際の導入効果試算のため、シミュレーションを実施し、事前の十分な検討、評価を行なっている。

また、本システムで、ボイラ・タービン負荷配分制御では、タービン特性を各加減弁での絞り損失を考慮した非線形のセクション特性としてとらえ、非線形のボイラ・タービン特性をもった問題の最適解を解く方法を開発している。

2 システムの概要

2.1 対象設備の概要

本システムの適用対象である自家用発電設備の概要を、図1に示す。対象設備の運用を調査した結果、以下に述べるような問題点をもっており、これらを改善していくことがシステム導入に際しての開発ポイントとなった。

- (1) 発電所は2箇所に分かれて立地しているが、製紙プロセスへの電気・蒸気は共同で供給しているため、各機器の負荷配分などは発電所間の電話連絡によって運転している。
- (2) 製紙プロセスの特徴として、抄紙機での紙切れなどによる蒸気需要の変動が頻繁に生ずるため、それに従って、供給圧力を適正に保ったり、容量、形式及び特性が異なるボイラ、タービン発電機を、効率良く安全に運転するため、負荷制限器や圧力調整器を操作することは多大の労力を要しており、総合的な省エネルギー運転には限界がある。特に、タービンのセクションごとの絞り損失まで考慮して操作することは、不可能に近い。
- (3) 受電電力は、電力会社と時間帯別調整契約を結んでおり、時間帯ごとに電力料金単価が異なり、更に受電可能電力量に制限のある契約となっているが、それも時間帯ごとに異なっている。

そのため、時間帯移行時には、発電出力の調整を行なうが、あらかじめ発電単価と受電単価との比較計算をしておき、発電量を決めている。また、一定時間内の受電量が契約量を越えないように発電量を調整しているが、監視、制御は人手を要し、限界もあるため、ある程度のマージンをもって運転されている。

2.2 システムの構成

本システム構成は、図2に示すように機能を総括的に遂行する日立制御用計算機HIDIC 80を中核とし、加減弁開度検出装置盤、変換器盤、電動機駆動装置盤などの付帯設備から構成される。これらの機器仕様を表1に示す。

本システムは、既設自家用発電設備に導入される場合が多

* 十條製紙株式会社 ** 日立製作所システム事業部 *** 日立製作所大みか工場 **** 日立エンジニアリング株式会社

***** 日立製作所システム開発研究所

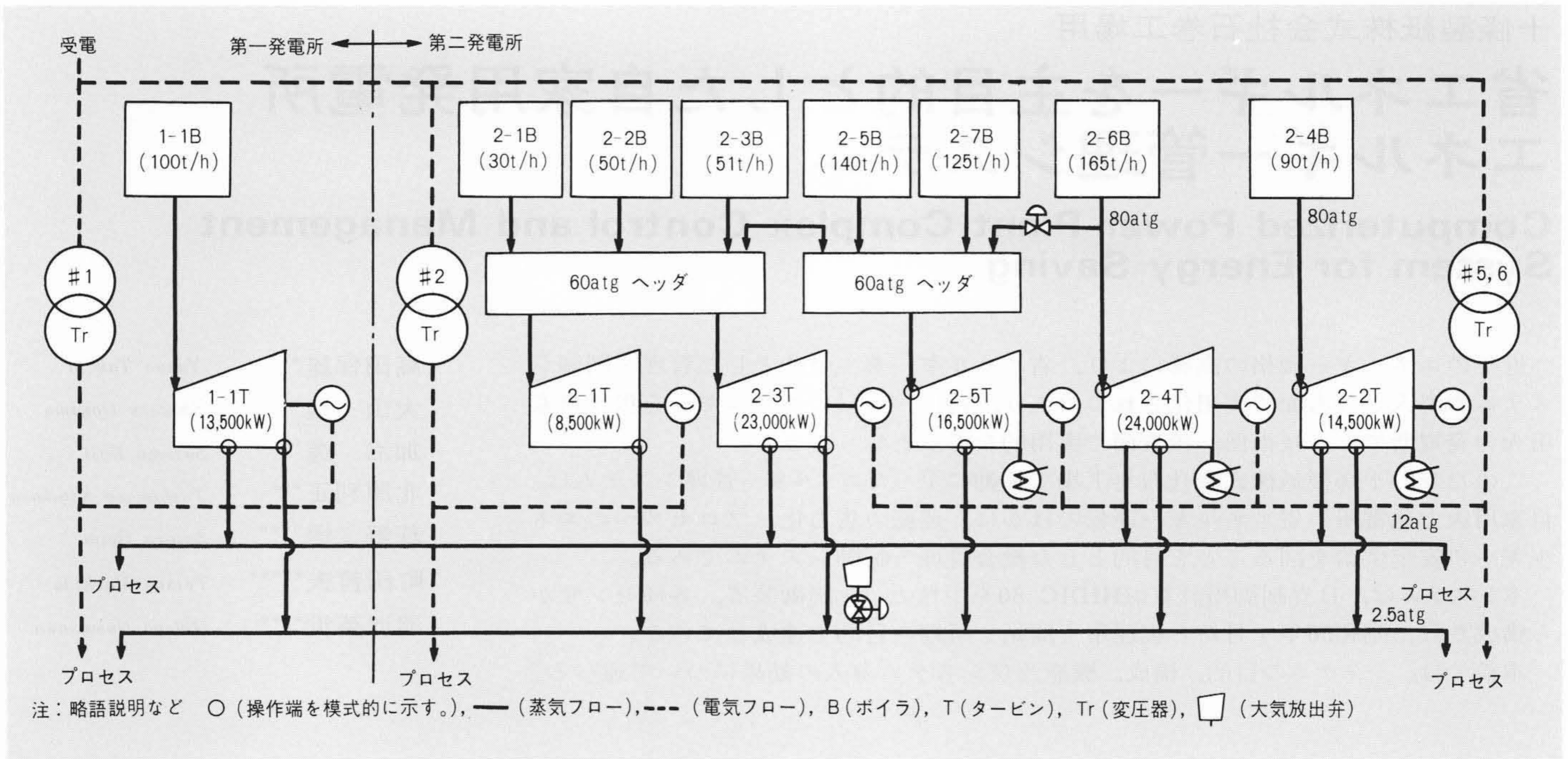


図1 設備フロー図 自家用発電設備の概略仕様及び蒸気・電気の流れ並びに操作端を示す。

く、計算機設備導入に伴い、既設設備を改造した内容のものも少なくない。

既設設備での改造内容は、圧力、温度、流量、加減弁開度、発電機出力などの計算機入力用センサ及び制御操作端となる速度・負荷設定器、抽(背)気圧力調整器などの改造又は新規取付が主である。

計算機システムの目的・機能により計算機入力用センサの員数は大きく左右される。表2に本システムでの各機能別計

算機入出力項目を示す。

3 システムの目的と機能

本システムは、自家用発電設備の経済的な運転を主目的とし、更に運転の省力化、プロセスへの蒸気、電気エネルギーの安定供給を目的としており、それにプロセス運用上必要な機能を加味して以下に述べるような各機能を計画した。

経済的な運転の観点からは、投資効果の大きい通常運転時

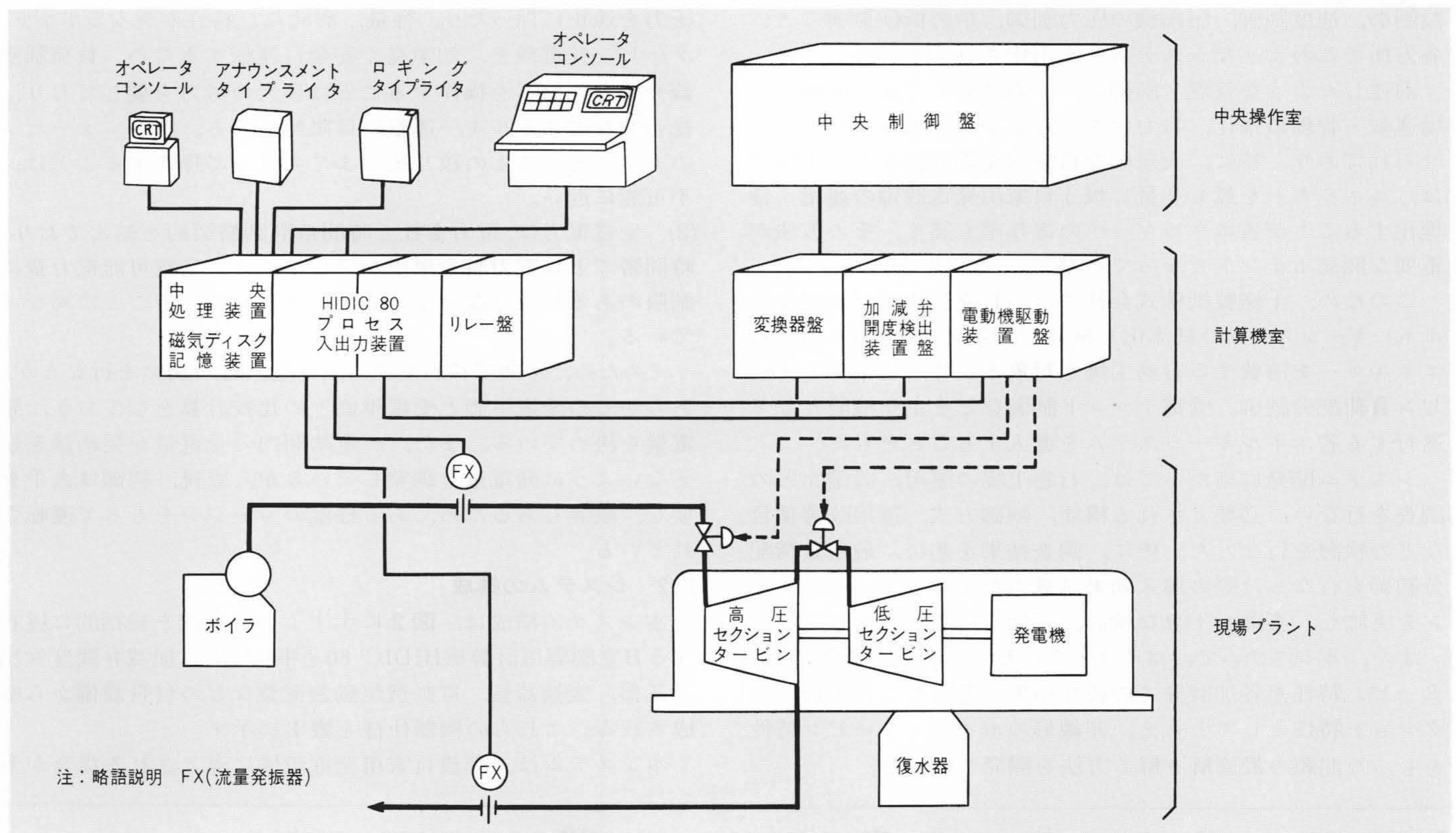


図2 システム構成図 機能全体を総括的に実施する制御用計算機と付帯設備との関連を示す。

表1 システム構成機器 本システムでの計算機設備及び付帯設備のハードウェア構成を示す(プロセス入出力装置点数は、使用点数を示している)。

装置	構成
中央演算処理装置 (CPU)	HIDIC 80 コア容量：64k語
コンソール入出力装置 (CI/O)	入出力タイプライタ 光電式紙テープ読取器
磁気ドラム記憶装置	記憶容量：1M語
プロセス入出力装置 (PI/O)	アナログ入力：240点 デジタル入力：200点 パルス入力：30点 デジタル出力：60点 パルス出力：13点
オペレータコンソール	デスク形：1台(ブザー、チャイム付属)
タイプライタ	シリアルプリンタ：2台
CRT表示器	20inカラーブラウン管、キーボード付：3台 (うち1台は、オペレータコンソール組込み)
付帯設備	加減弁開度検出器盤及び変換器盤 電力変換器、接点増幅用リレーなど
電動機駆動装置盤	速度・負荷調整器駆動装置：3台 抽(背)気圧調整器駆動装置：9台

注：略語説明 CRT(Cathode Ray Tube)

を対象として考え、時々刻々の購入エネルギー費用を最少に抑えるように計算機内でコスト計算を行ない、運転条件を決め制御することとした。

表3 にシステムの目的と機能、及びそれらの関連を示す。

3.1 システムの機能

前述の目的を実施するための機能関連を図3 に示す。

3.1.1 制御機能

制御機能としては、購入エネルギー費用を最少とする電気、蒸気の配分値を計算する最適負荷配分計算を中心として、余力監視、受電デマンド監視、異常処理の各処理が、プラント運用上の制約条件を算出する。

更に、プロセスへの蒸気の安定供給を図るためと、圧力の適正化による発電機出力の増加のため、プロセス蒸気圧力制御機能を具備している。

(1) 余力監視は、タービン及び大気放出弁を制御するに当たり、関連する機器が安全な領域内で動作するように、各タービンのセクションごとの蒸気流量余力、重油ボイラの蒸気余力、大気放出弁及び減圧弁の通過蒸気量余力などを算出するものである。この計算結果により、機器制御時の自家用発電設備の安全性が確保される。

(2) 受電デマンド制御は、受電電力量を実時間で監視し、30

表2 プロセス入出力項目 計算機の機能項目ごとに使用されるプロセス入出力項目が分かる(○印は既設利用あるいは改造、◎印は新設項目であることを示す)。

プロセス入出力項目	機能					
	余力監視	受電デマンド監視	最適負荷配分計算	最適負荷配分制御	異常処理	データロガ
ボイラ発生蒸気温度	○	—	○	—	—	○
ボイラ発生蒸気圧力	○	—	○	—	—	○
ボイラ発生蒸気流量	○	—	○	—	—	○
ボイラ重油流量	—	—	—	—	—	○
ボイラ重油圧力	○	—	—	—	—	○
タービン蒸気温度	○	—	○	—	—	○
タービン蒸気圧力	○	—	○	—	—	○
タービン蒸気流量	○	—	○	○	—	○
タービン加減弁開度	◎	—	◎	—	◎	◎
ガバナ・圧力調整器ストローク	—	—	—	◎	◎	◎
プロセス蒸気圧力	—	—	—	—	○	○
発電機出力	—	—	○	○	—	○
発電電力量	—	○	—	—	—	○
受電電力量	—	○	—	—	—	○
ボイラ・タービン関係故障	—	—	—	—	○	○
ガバナ駆動装置	—	—	—	◎	—	—
圧力調整器駆動装置	—	—	—	◎	—	—
計算機除外	—	—	—	—	○	—

分間の積算電力量を予測し、予測値が電力会社との契約電力量を超えないための自家用発電電力量を計算するものである。この計算結果に基づいて、最適負荷配分計算で各タービン発電機に発電出力を割り振るため、受電電力量が契約値を超えることの防止を図り、更に契約値一杯まで受電電力量を購入することができる。

(3) 異常処理は、自家用発電設備の異常を検知した場合、異常設備にかかわる機器の制御端の設定値を現状位置にとどめ、計算機制御対象から切り離すものである。最適負荷配分計算は、切り離された制御端を除いた範囲で計算を行ない、制御を続行するため、正常機器内での経済的運転が継続できる。

(4) プロセス蒸気圧力制御は、製紙プロセスへの供給蒸気圧力を常時監視し、規定値内に制御するためのものである。

3.1.2 マンマシンコミュニケーション機能

運転員と自家用発電設備とのインタフェース機器として、第二発電所にCRT表示器を組み込んだオペレータコンソールデスク及びCRT表示器を設置している。更に第一発電所にCRT表示器を設置し、図3 に示す各種ガイダンス、監視が第二発電所と同様に行なえるようになっているが、すべての操作は、

表3 システムの目的と機能 機能項目と、それらの機能が、どういう観点でシステムの目的を実行しているかが分かる。

機能	目的	省エネルギー	省力	安定供給
制御機能	<ul style="list-style-type: none"> 最適負荷配分制御 受電デマンド制御 プロセス蒸気圧力制御 	<ul style="list-style-type: none"> ボイラ・タービンの効率差による蒸気量経済配分 受電電力量と自家発電量の経済的配分 受電電力量と契約電力量とのマージンの削減 プロセス蒸気圧の適正化による発電出力の増加 	<ul style="list-style-type: none"> 負荷配分制御の自動化 受電デマンド監視・制御の自動化 プロセス蒸気圧力制御の自動化 受電時間帯切り替り時の自動操作 	<ul style="list-style-type: none"> 蒸気負荷変動の局所化 製紙プロセスでの蒸気圧力変動防止 各機器の能力制限内での運転
マンマシン機能	<ul style="list-style-type: none"> CRT表示処理 (状態表示 負荷配分表示 各種ガイダンス) オペレータコンソール処理 警報処理 	<ul style="list-style-type: none"> 省エネルギー化のためのガイダンス 	<ul style="list-style-type: none"> 各種ガイダンスによるオペレータ操作指示 負荷配分状況、機器状況の集中監視 	<ul style="list-style-type: none"> 異常の早期発見 異常発生時での対応の迅速化
記録機能	<ul style="list-style-type: none"> 運転記録 操作指示記録 日報・月報作成 	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー原単位などの正確な把握 	<ul style="list-style-type: none"> 管理帳票の自動作表 	<ul style="list-style-type: none"> 運転記録による操業解析

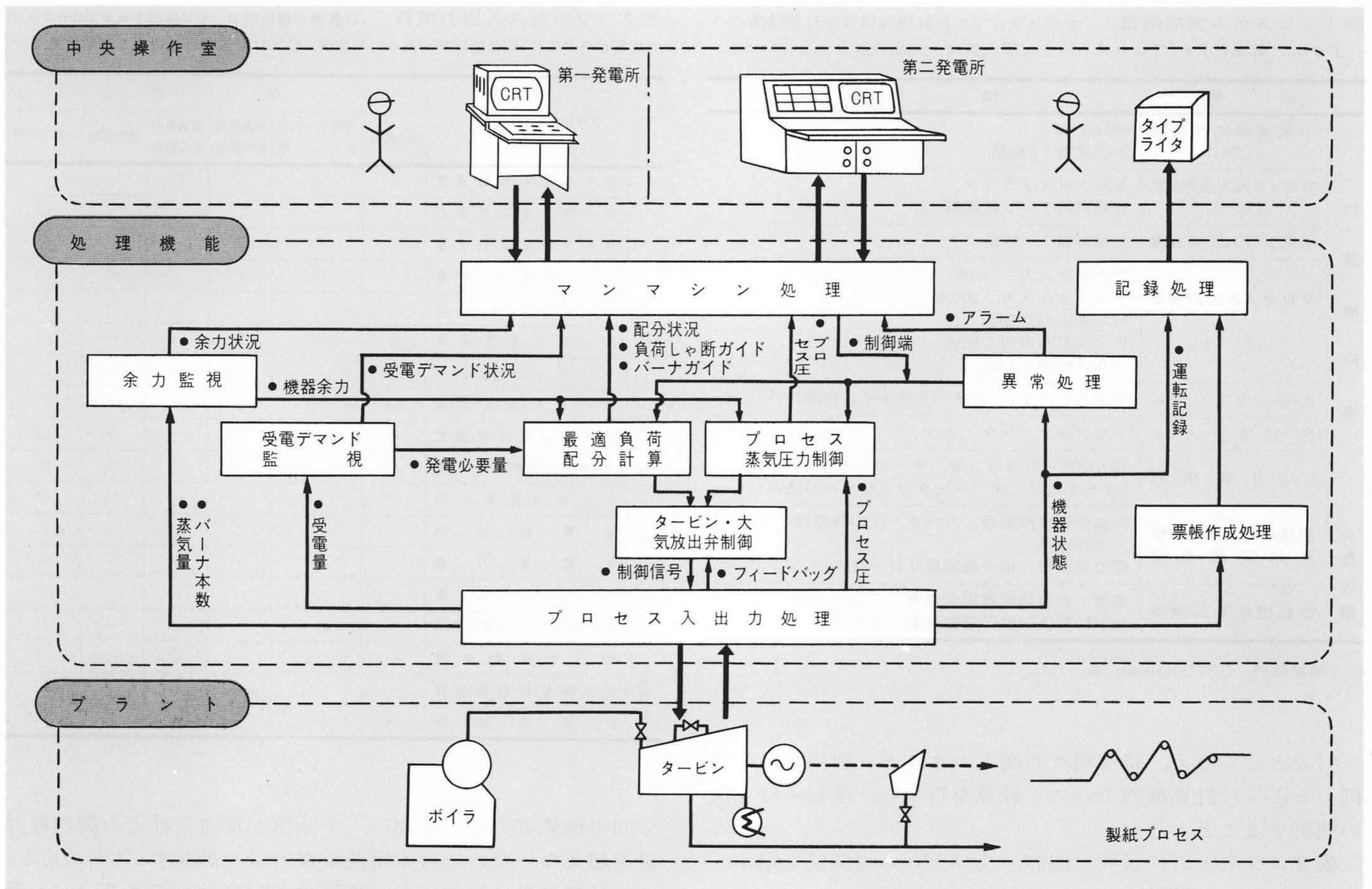


図3 機能関連図 処理項目とそれらの関係を示しており、本システムの全体処理が分かる。

前記オペレータコンソールデスクから集中的に行なわれる。

オペレータコンソールデスクは、警報表示窓、計算機異常表示パネル及び制御端を選択したり、計算機と制御端のインタフェースの入、切を行なう操作パネルから構成される。

図4にオペレータコンソールデスクの外観を示す。

3.2 計算機制御インタフェース

計算機と制御操作端のインタフェースは、図5に示すオペレータコンソールに設けられたモード選択、制御操作端スイッチで行なうことにより、計算機からの最適負荷配分制御、プロ



図4 オペレータコンソール外観 自家用発電設備を集中監視し、制御するオペレータコンソールの外観を示す。

セス圧力制御が遂行される。

本システムの計算機と操作端のインタフェースに当たって考慮した点は、以下に述べるとおりである。

- (1) 他のタービンとの関連、あるいは一部機器の特殊運転に対し、適応性のある処理がとれるように計算機とのインタフェースは各操作端ごとで可能とした。
- (2) プラント条件を操作端インタフェース許可条件に入れ、その条件でボイラ・タービン運転表示を行なうことにより、運転員の誤操作防止と同時にプラント運転状態概要が一目で分かる機能とした。
- (3) プラント状態に何らかの異常が生じたとき、全操作端除外及び各タービン操作端除外との併用により、プラントの安全性と最適負荷配分制御の持続性との協調を図った。
- (4) 中央制御盤取付けの各操作端コントロールスイッチ操作で、操作端計算機除外となる手動優先方式とした。

3.3 最適負荷配分計算

最適負荷配分計算は、プラント状態量を取り込み、プラント状態量の補正を行なう流量補正計算と、その補正データに基づき運転費用の最少化を図るための負荷配分を行なう最適負荷配分計算に分類できる。

3.3.1 流量補正計算

最適負荷配分計算では、プロセス状態量の真値を把握する必要がある。流量補正計算では、検出器精度に誤差の大きい流量を各検出器の精度に応じて重みづけを行ない、タービン加減弁開度及び発電機出力を用いて最小二乗法により補正した。なお、関係式が非線形であるため、非線形最小二乗法を用いた。

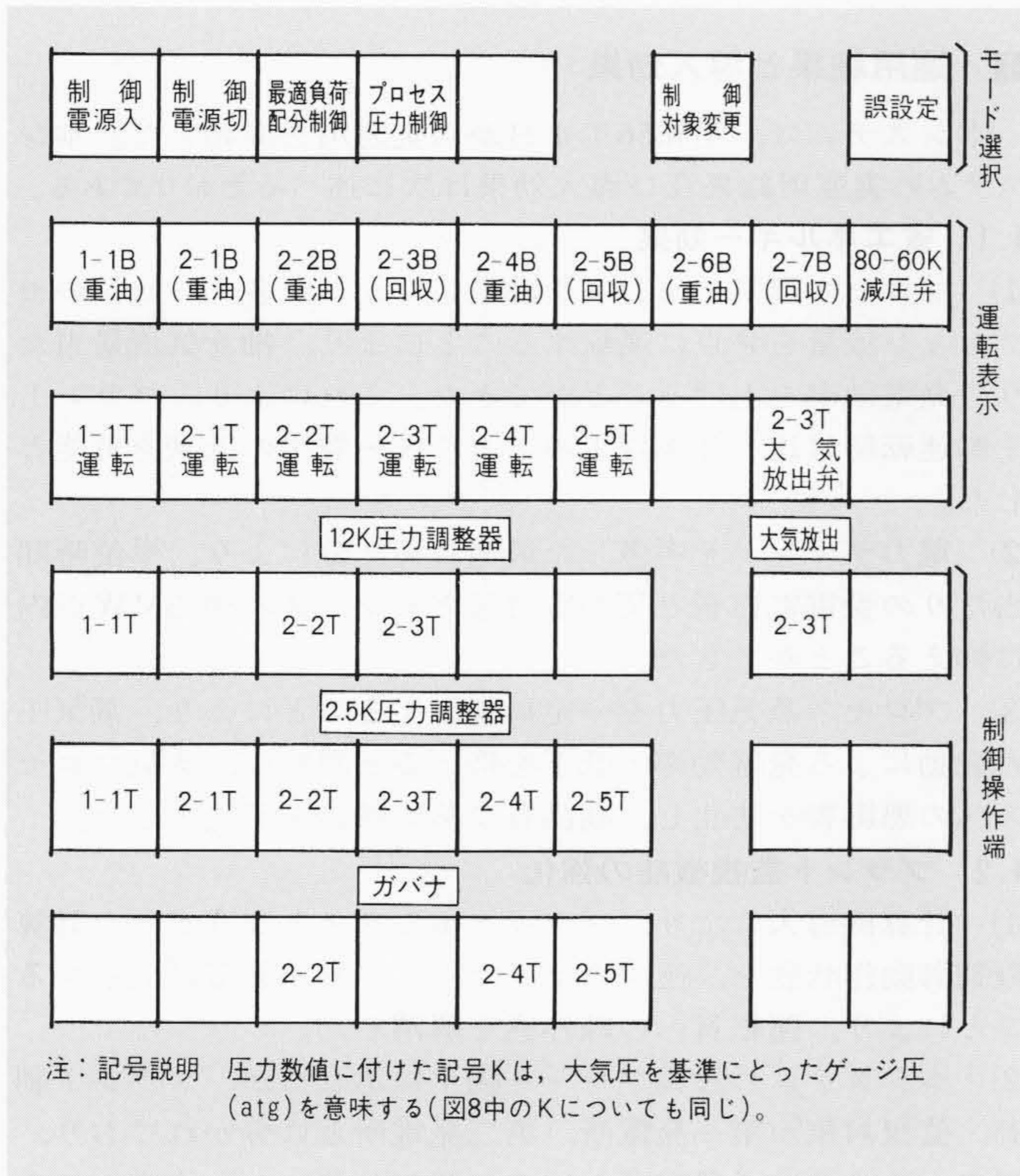


図5 オペレータコンソール 計算機制御を実施するため、機能選択及び制御操作端の構成を示す。

3.3.2 最適負荷配分計算

最適負荷配分計算は、プロセス側が要求する電力デマンド、蒸気デマンド及びその他の制約条件を満足しながら運転費用(買電費用及び蒸気費用)を最少とする各タービンの抽(背)気流量、発電機電気出力及びボイラ蒸発量を決定するものであり、次のような非線形問題として表現できる。

ただし、回収ボイラは、蒸発量の制御は行なえないため、その蒸発量を監視し、最適負荷配分計算の条件として与え、制御は重油ボイラで行なう。

プロセス蒸気デマンドなどを満足させるための m 個の等式制約条件

$$Gi(x) = 0 \quad i = 1 \sim m \quad \dots\dots\dots(1)$$

プロセス各設備条件などからの n 個の不等式制約条件

$$Hj(x) \leq 0 \quad j = 1 \sim n \quad \dots\dots\dots(2)$$

の付帯条件下で評価関数

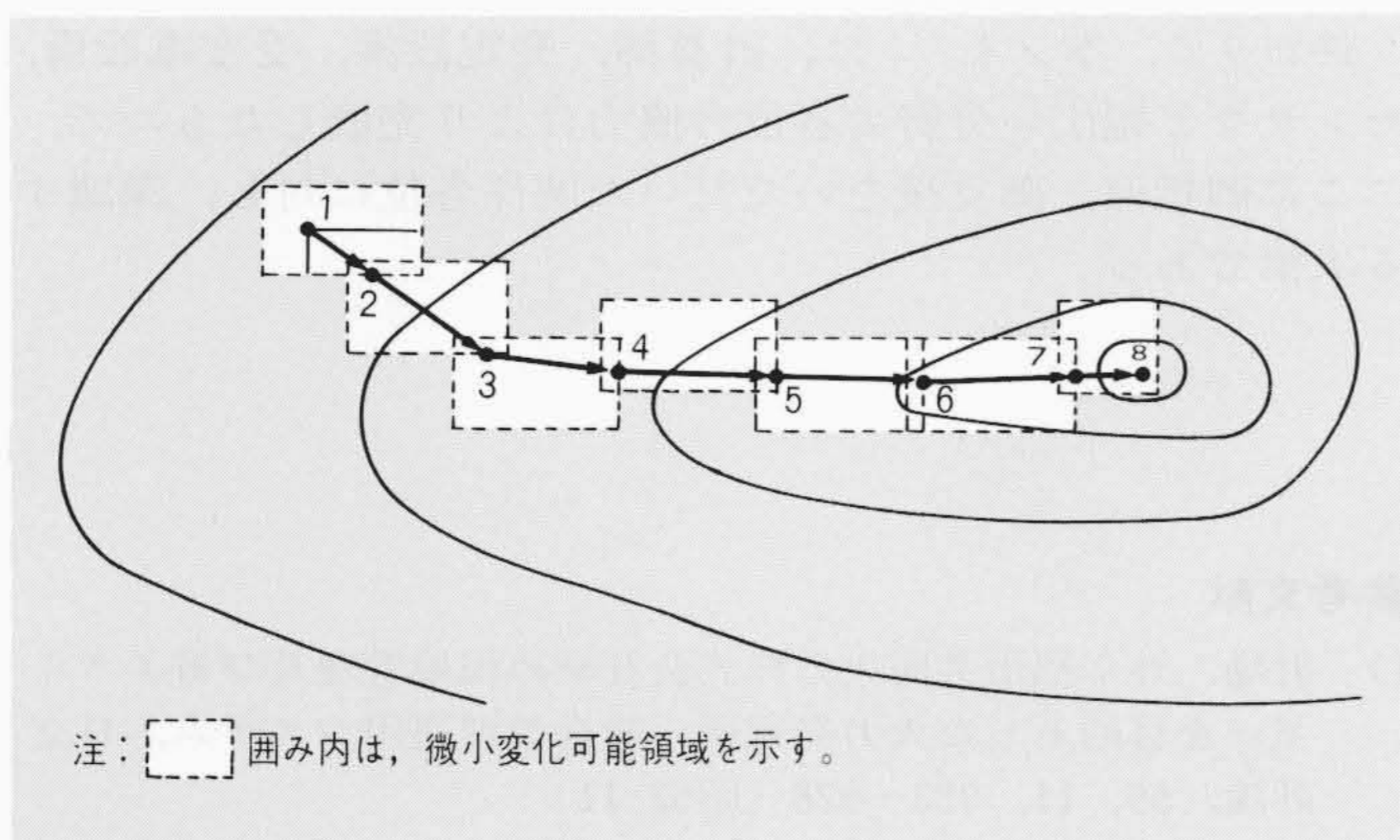


図6 計算概念図(評価関数Fの等高線と線形化の繰り返し) 初期値状態1から繰り返し計算により最適運転点8を求める。

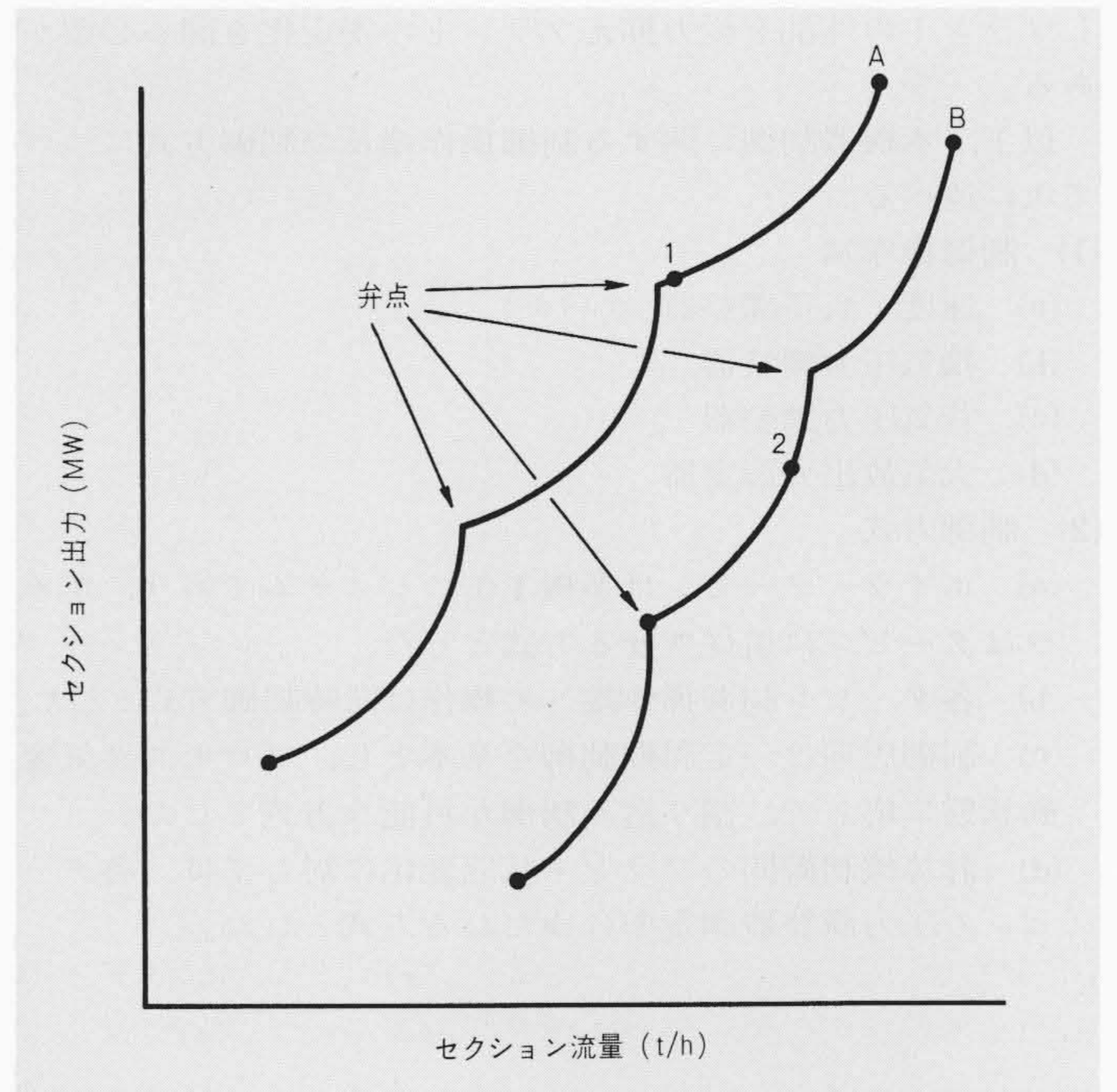


図7 セクション特性 運転点1, 2で弁点を考慮した負荷配分では、効率の良い特性Aの流量を減じ、特性Bの流量を増し、それぞれ弁点運転することにより、発電効率が上がることが分かる。

$$F = F(x) \quad \dots\dots\dots(3)$$

を最小とする独立変数 x を求める。

G, H, F : 汎関数

ここで前述の非線形問題(1)~(3)式を線形化し、

$$\text{等式制約条件} \quad \frac{\partial Gi}{\partial X} \Big|_{x=x_0} \cdot \Delta X = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{不等式制約条件} \quad \frac{\partial Hj}{\partial X} \Big|_{x=x_0} \cdot \Delta X \leq -H(x_0) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{評価関数} \quad \frac{\partial F}{\partial X} \Big|_{x=x_0} \rightarrow \text{最小化} \quad \dots\dots\dots(6)$$

を最急降下法を用いて繰り返し解くことにより、図6に示すように最適運転点を求めることができる。

なお、セクション流量とセクション出力の相関を図7に示したが、セクション流量が弁点位置にある場合、タービン発電機の高効率運転が可能であることが分かる。最適負荷配分計算では、各タービンのセクション流量が弁点となるように運転点を決定する。

しかし、図7に示したようにセクション特性は多峰性をもっており、運転点決定に当たっては、弁点を考慮しないセクション効率特性を用いて、大域的な運転点を決定したあと、弁点を考慮したセクション特性を用い、セクション特性を局所線形化し、前記(4)~(6)式に示した線形問題を解くことにより、最適運転点を得る方法とした。

3.4 機器制御

本機器制御は、最適負荷配分目的達成のための重要な機能の一つであり、最適負荷配分計算機能で決定された制御量、すなわち抽(背)気量、復水量及び大気放出量を制御する。

自家発電設備は複数台数のボイラ・タービンが混在するため、各機器応答性の相違、プロセス蒸気の動的な挙動、複雑なプロセス蒸気配管網など、機器制御に関しプラント外乱となる要因が多々ある。このため、機器制御方式、制御操作端の決定に際し上記条件を踏まえ、制御パラメータを最適化

しプラントの外乱を極力抑えプラントの安定化を図る必要がある。

以下、本機器制御に関する制御操作端及び制御方式について次に述べる。

(1) 制御操作端

- (a) 速度・負荷調整器(ガバナ)
- (b) 抽気圧力調整器
- (c) 背気圧力調整器
- (d) 大気放出弁設定器

(2) 制御方式

- (a) ボイラ・タービンは多機1缶のシステムであり、ボイラはタービンに追従させる方式とした。
- (b) 各タービン制御操作端への操作は同時制御方式とした。
- (c) 制御周期は一定周期制御を基本とし、プロセス蒸気変動状態に応じて、割り込み制御が可能な方式とした。
- (d) 計算機制御間のプラント状態変化に対しては、各タービンの圧力調整器調定率にゆだねる方式とした。

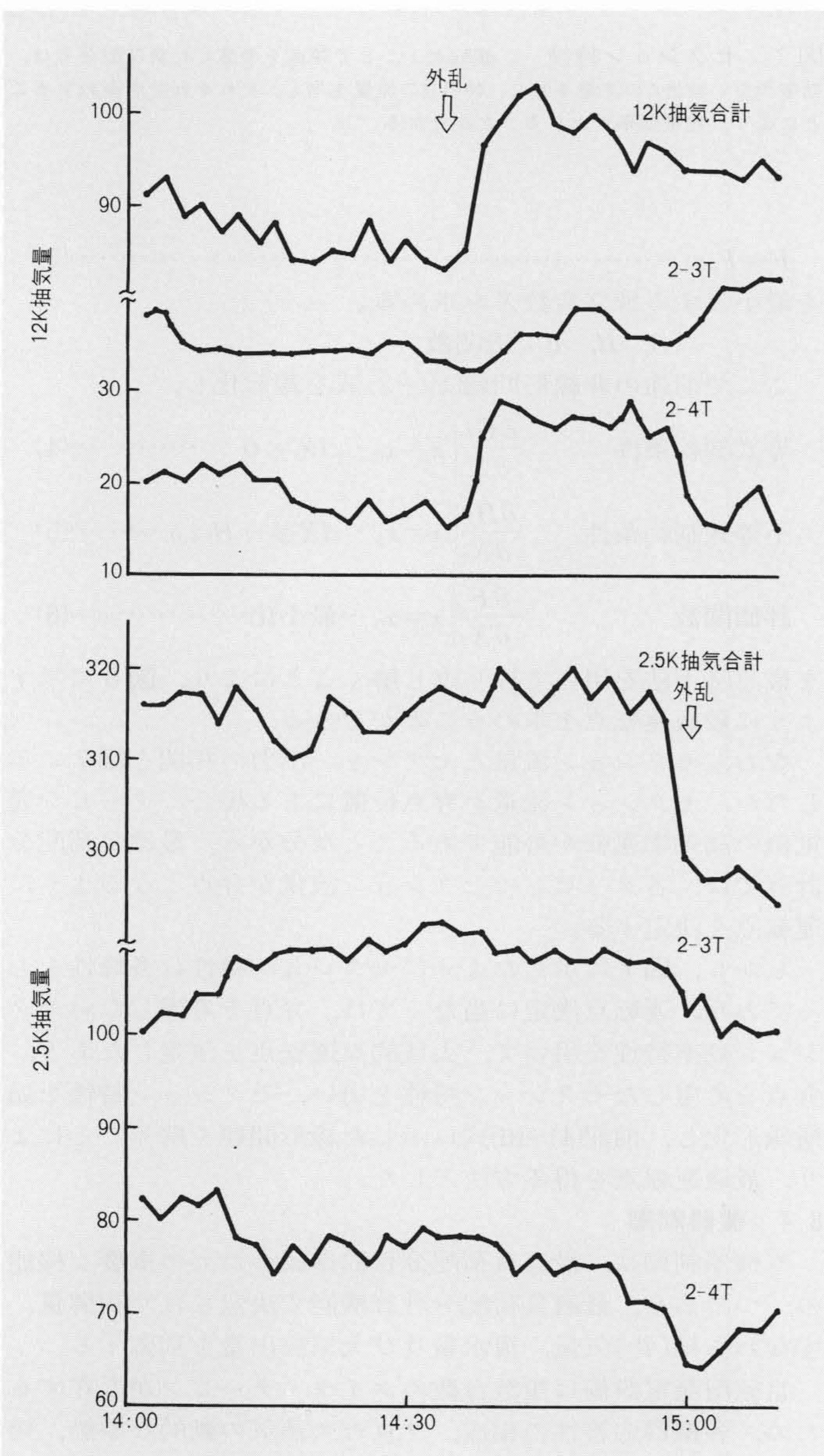


図8 実績運用記録 12K抽気量急変時2-4T抽気(外部制御)に抽気ごとられ、その後、効率の良い2-3T抽気に負荷移動している。このとき、2-3T高压セクションを一定とするように2-3T2.5K抽気は、2-4Tに移行している。

4 運用結果と導入効果

本システムは、昭和56年4月から実運用を開始した。本システムの実運用結果及び導入効果は次に述べるとおりである。

4.1 省エネルギー効果

- (1) プロセス蒸気デマンドを満足しながら、各タービンのセクション流量を弁点に運転することにより、抽背気流量当たりの発電効率を上げることができた。これにより、プラント手動運転時に比べ2%以上のエネルギー費用の低減を可能とした。
- (2) 電力デマンドを考慮した最適負荷配分により、単位時間当たりの受電電力量と契約電力量とのマージンを0.3MW以内に抑えることができた。
- (3) プロセス蒸気圧力を一定に制御することにより、蒸気圧力変動による発電効率の低下を抑えると同時に、蒸気プロセスへの悪影響を防止し、高品質な蒸気供給を可能とした。

4.2 プラント監視機能の強化

- (1) 計算機導入により、ブラックボックスとなりがちな計算機制御動作状態を、逐次カラーディスプレイ装置に表示することにより、運転員への疎外感を解消した。
- (2) 本システムの設備フローを図1に示したが、プラント制御・監視対象が第一発電所、第二発電所とに分かれており、従来、それぞれの発電所が独立に運転していたが、本システムの導入により発電プラントの一元管理が可能となり、発電プラントの綿密な監視、迅速な対処が可能となった。

4.3 省力効果

計算機システムからの(1)バーナ点・消火ガイダンス、(2)電力潮流オペレータガイダンスなどオペレータガイダンス機能の充実による運転員の労力負担の軽減を図った。

以上述べたように、本システムは発電プラントでの高効率運転を実現すると同時に、きめ細かな運転管理システムを実現することができた。

図8は、最適負荷配分制御の記録を示したものである。同図には示していないが、他のタービンの抽背気量は、各セクションの弁点に、ほぼ一定で運転している。

5 結 言

自家用発電所エネルギー管理システムについて、システムの目的、機能及び運転結果を中心に述べた。

本システムでは、多機多缶の発電所で、プロセスへエネルギーを安定に供給できる制御方法を確立でき、具体的な導入効果も確認できたことから、同様の発電所をもつ工場にもますます応用されていくものと考えている。

終わりに、本システムは、計算機、発電設備、受変電設備、センサなど幅広い分野の各位の協力により完成したもので、ここに御指導、御支援をいただいた関係各位に対し、深謝する次第である。

参考文献

- 1) 射場, 外: 福山共同火力株式会社社納め環境管理及び省エネルギーを目的とした火力発電所の総合管理運用システム, 日立評論, 59, 11, 923~928 (昭52-11)
- 2) 北原, 外: 神崎製紙株式会社富岡工場用産業用火力発電設備エネルギー最適運用制御システム, 日立評論, 62, 11, 807~812 (昭55-11)