

# 日本国有鉄道向けコンバインドサイクル発電プラントの制御システム

## Control Systems for Combined Cycle Power Plants of Japanese National Railways

起動・停止時間が短く、熱効率の良いという特長をもったガスタービンと排熱回収ボイラ、蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクル発電プラントが日本国有鉄道で我が国として初めて採用され、昭和56年4月から営業運転に入った。ここでこの新しいプラントの制御システムについて、特色のある構成、機能、仕様及び現地試験結果について説明する。適切な制御方式、高度の自動化機能により、毎日繰り返されるホットスタートは予定どおり起動-全負荷55分を達成し、負荷変化率は5%/minが可能なこと、蒸気タービン負荷しゃ断にも対応できることを実機試験結果により示した。

寺崎 博\* *Hiroshi Terasaki*  
 福島弘一郎\*\* *Kôichirô Fukushima*  
 山口麗文\*\*\* *Kazufumi Yamaguchi*  
 北原利正\*\*\* *Toshimasa Kitahara*  
 小松喜一郎\*\*\*\* *Kiichirô Komatsu*

### 1 緒言

首都圏の新たな運転用電力の増加に対処するため、日本国有鉄道では自営電力設備の増強計画を立てられ、老朽化した川崎発電所1号機をRepowering<sup>\*1)</sup>することになった。この計画は既設のスペースに収まり、出力が以前に比べ約2倍に増大し、起動・停止時間が短く、毎日の起動・停止に耐え、しかも効率の良いプラントといった多くの要求条件を満たすものとして、ガスタービンと排熱回収ボイラ、蒸気タービンを

組み合わせたコンバインドサイクル発電プラントが最適なものとして選定された。このガスタービンの排熱回収を主体とした形式は我が国では最初のものであり、昭和54年7月にガスタービン室立柱後、据付試運転を行ない、昭和56年4月から営業運転に入っている。ここにこの新しいコンバインドサイクル発電プラントの制御システムを中心に、その構成機能及び試運転結果を紹介する。

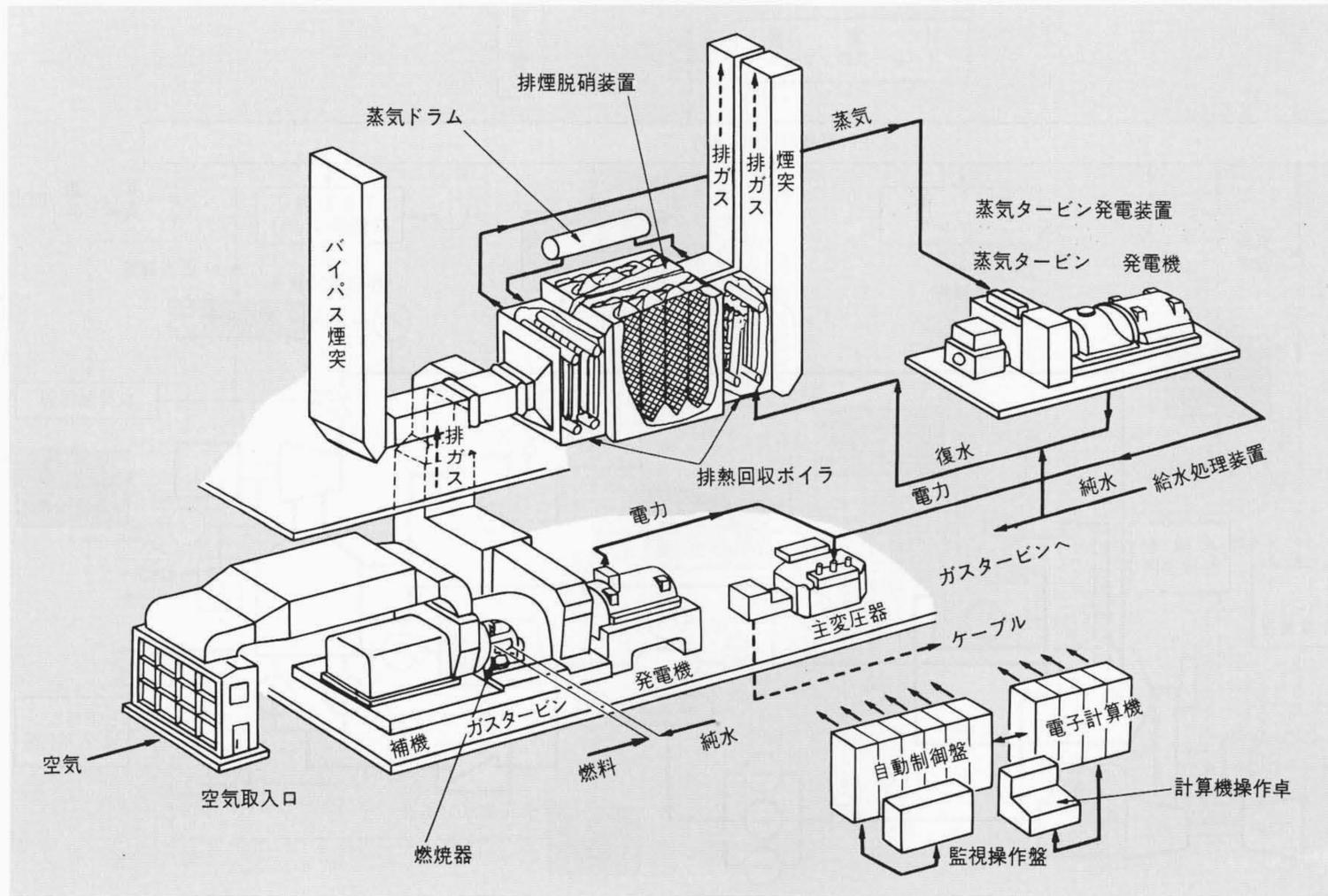


図1 主機全体構成  
 図2 主要機器全体構成のイメージが分かる。

\*1) Repowering: 旧発電所の一部利用可能な部分を再利用し、その他は撤去更新し新たな発電所として生まれ変わらせること。

\* 日本国有鉄道東京電気工事局 \*\* 日立製作所電力事業部 \*\*\* 日立製作所大みか工場 \*\*\*\* バブコック日立株式会社呉工場

## 2 プラント概要

### 2.1 主機全体構成

川崎発電所コンバインドサイクル発電プラントの全体構成を図1に示す<sup>1)</sup>。Repoweringプラントであるため、排熱回収ボイラが既設ボイラ建屋2階床上にあり、蒸気タービン発電機は既設台座上に据え付け、ガスタービン発電機は新設した建物の1階に設置されている。排ガスダクトにはバイパス煙突が付いており、排熱回収ボイラへのガスをシャ断してガスタービン単体だけの運転も可能になっている。排熱回収ボイラ中間部には排煙脱硝装置が組み込まれており、排ガスNOx(窒素酸化物)を規制値以下に抑えられるようになっている。制御装置が設置してある建物は既設のものを内部改装して使用しているが、そこに収められた制御装置はすべて最新のものを使用している。各主機の主要な諸元を表1に示す。

### 2.2 プラント系統構成

プラント系統構成及び関連する制御回路を図2に示す。ガスタービンの排気はダクトで排熱回収ボイラへ導かれ、ボイラ水を加熱し蒸気を発生させる。ボイラから発生した蒸気は蒸気タービンへ導かれ、蒸気のもつエネルギーは電力として回収される。蒸気タービンの手前から100%容量をもったタービン・バイパス系統が分岐し、復水器へつながれている。この系統は、蒸気タービン起動前に発生した蒸気のダンプ、及び負荷運転中に蒸気タービンがトリップしたとき、ガスタ

ービン及び排熱回収ボイラを単独で運転継続させるために使用する。蒸気タービンを通った蒸気は、復水器で冷却され復水となる。復水器の復水は復水ポンプで汲み出され、低圧給水加熱器で加熱されたのち脱気器で脱気される。脱気された給水は給水ポンプで加圧され排熱回収ボイラへ送られる。ボイラの節炭器を通る給水量が少なくなると節炭器内でスチーミング(蒸発)を起こし、水の流れをブロックしたり、ハンマリングを生ずる可能性がある。そこで節炭器出口から給水を

表1 主機主要諸元 本表での出力の値は、大気温度4℃でピーク運転を行なったものである。

項目	諸元	
総合出力	141,300kW	
発電端熱効率	40.07%(高位基準)	
ガスタービン	形式	開放単純及び複合両用サイクル軸形(MS9001B)
	出力	97,100kW(複合時), 100,000kW(単独時)
	燃料	灯油
蒸気タービン	形式	非再熱式I車室I流排気形(SF-23)
	出力	44,200kW
	主蒸気圧力	56atg
	主蒸気温度	473℃
排熱回収ボイラ	形式	自然循環排熱回収形
	蒸発量	163.1T/h
	主蒸気圧力	62.7atg
	主蒸気温度	478℃

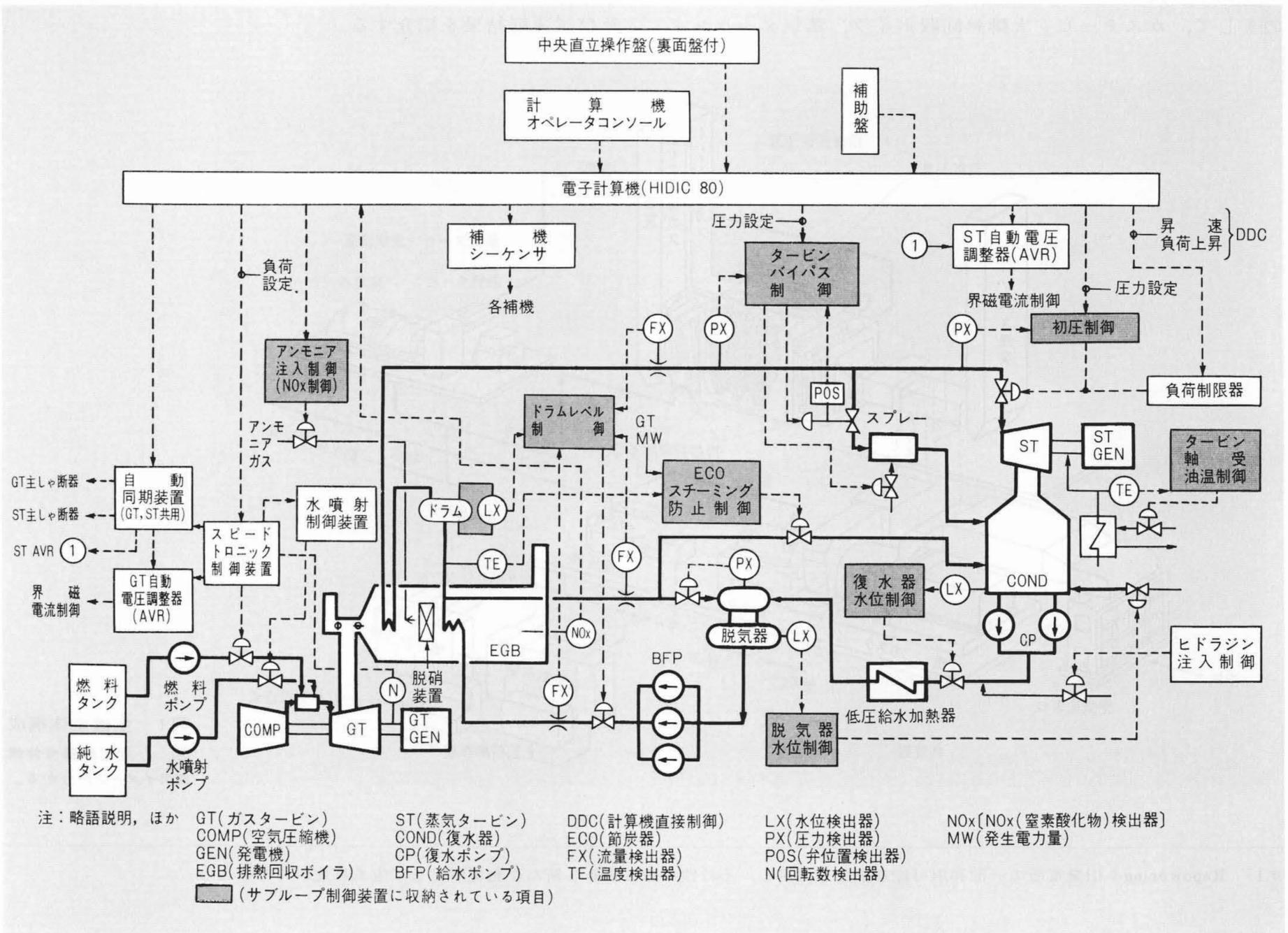


図2 コンバインドサイクル発電プラント系統図 配管系統と制御系統の関係が全体的に把握できる。

分岐し、脱気器又は復水器へ循環するラインを設け、低流量域ではこのラインを通して給水の一部を再循環させ、節炭器内に十分な流量が流れるようにしている。この節炭器から再循環する給水は、脱気器へ優先的に導いて熱回収し、余りを復水器へダンプする。

2.3 主な制御系統

図2に示したコンバインドサイクル発電プラントの特徴的な制御系統について、以下に説明を加える。

(1) 節炭器のスチーミング防止制御

ガスタービン負荷の関数として定めた節炭器再循環量をベースとし、この値に節炭器出口給水温度を飽和温度よりも一定値低くなるように補正したものを、目標流量として制御する。

(2) ドラムレベル制御

節炭器再循環が起動初期から実施されているため、常時ドラム水位に主蒸気量、節炭器再循環量及び給水量を加えた4要素制御になっている。

(3) タービンバイパス制御

プラント起動・停止時には、主蒸気圧力をタービンバイパス弁により制御する。通常、負荷運転中には、主蒸気圧力制御は蒸気タービン初圧制御により行ない、タービンバイパス制御の設定値は初圧制御の設定値よりも若干高く設定され、主蒸気圧力過大のときの逃し圧力制御になる。スプレー量は、タービンバイパス弁入口の蒸気エンタルピーに比例した値として計算され投入される。

(4) タービン初圧制御

通常、負荷運転中の蒸気タービンの運転方法としては、ボイラから発生した蒸気を効率よく飲み込む必要があり、ター

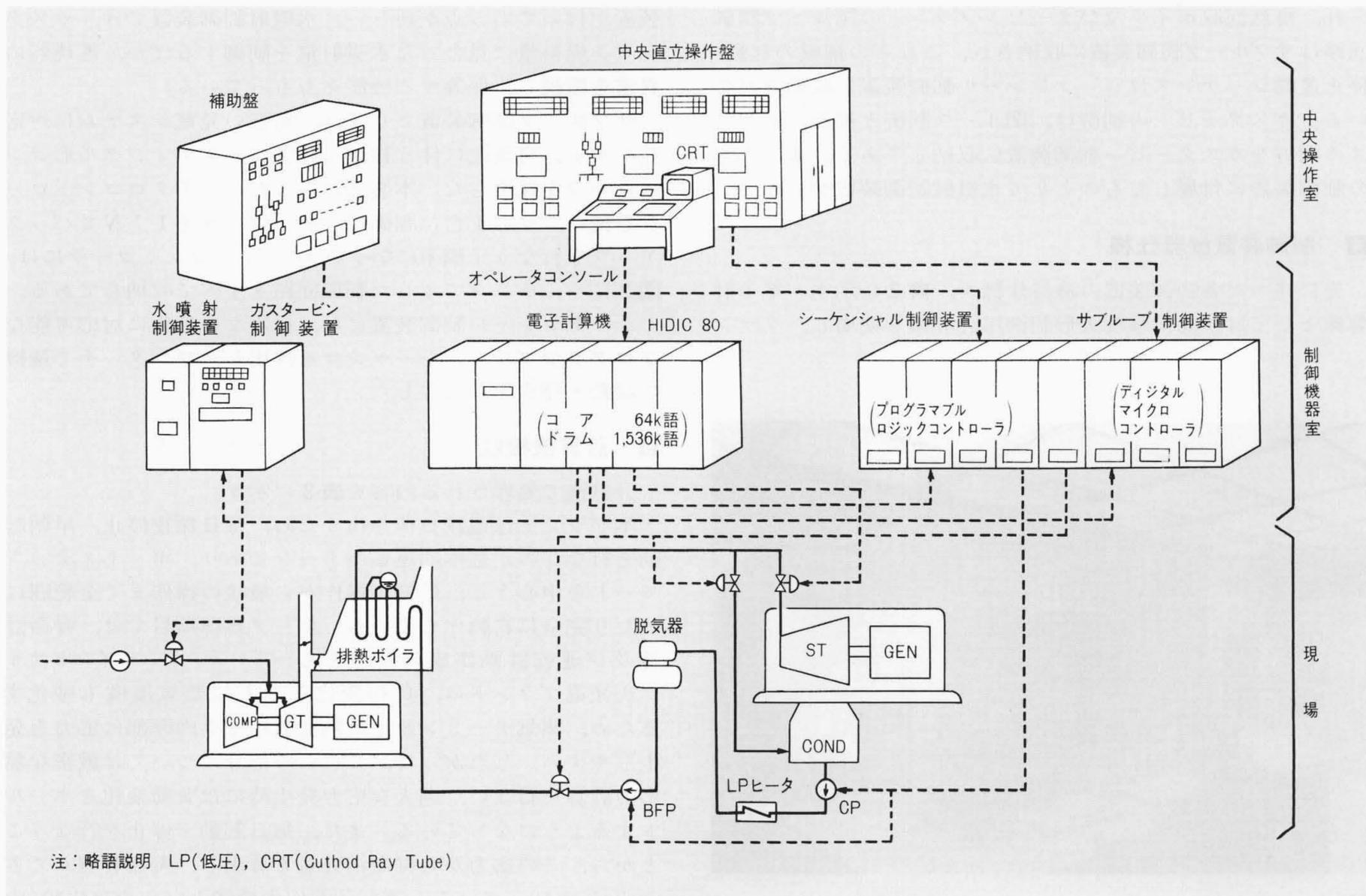
ビンの加減弁はタービン入口圧力(初圧)を一定にするように制御される。したがって、ガスタービンからの入熱が増え、発生蒸気量が増加するとタービン入口圧力が上昇し、初圧制御でこの圧力上昇を下げるように加減弁を開き、これにより蒸気タービン出力が増加するというプロセスをとる。したがって、蒸気タービンの出力は直接制御されずプラント合計出力としてガスタービンを含め間接的に制御される。しかし、タービンバイパス制御により主蒸気圧力が制御されるプラントの起動・停止時には、計算機が直接負荷制限器を操作することにより、蒸気タービン負荷は制御される。なお、主蒸気圧力の設定値としては、低負荷時の効率低下を抑えるため変圧設定となっている。

(5) 脱気器及び復水器水位制御

本プラントは閉サイクル式補給水制御をとっており、復水器の水位は復水流量で一定に制御され、ボイラ内の保有水量の変化は脱気器貯水タンクで吸収する方式になっている。したがって、脱気器の水位設定値は負荷の関数で変化し、脱気器水位がこの設定値よりも下がった場合には、復水器へ補給水を補給し、復水器水位制御により脱気器へ送水される。

(6) 総合負荷制御

コンバインドサイクル発電プラントの負荷制御は、次のように計算機の直接制御で行なわれる。目標負荷が計算機内で中給負荷要求信号から作られ、この値とガスタービン発生電力及び蒸気タービン発生電力の加算値とが比較され、偏差の演算結果がガスタービンの制御装置であるスピードトロニックの負荷設定器へ与えられる。スピードトロニックは、この負荷になるようにガスタービン燃料量を制御する。すなわち、



注：略語説明 LP(低圧), CRT(Cathod Ray Tube)

図3 制御装置全体構成図 中央操作室及び制御機器室に収納される制御装置の全体及び関連を示す。

ガスタービン及び蒸気タービンの二つの出力をみて、ガスタービン燃料を操作している。ガスタービンの燃料量が変化してから蒸気タービン出力が変化するまでには、数分の時間遅れがあるため、一時的にはガスタービンの負荷を増加又は減少してこの遅れ分をカバーし目標負荷に迅速に追従させるようになっている。

(7) NOx制御

ガスタービン燃焼器へ燃料量にほぼ比例した量の水を噴射することにより、まずガスタービン出口NOx量を減少し、続いて排熱回収ボイラの中間部に設けた排煙脱硝装置(乾式アンモニア接触還元分解法)により更にNOx量の減少を行ない、ボイラ出口NOx量を規定値以内に収めている。脱硝装置の反応に必要なアンモニア量は、ガスタービン排気NOx量、排気量及び燃料量から制御装置内で算出している。

3 制御装置の全体構成

制御装置の全体構成を図3に示す。中央操作室には、自動化オペレータコンソール、中央直立操作盤及び補助盤が設置されている(図4)。通常の起動・停止及び負荷変化はすべて自動化されており、オペレータコンソールからワンタッチの指令を与えると、後はすべて自動的に操作が進行する。これらの操作の進行監視にはCRT(ブラウン管表示器)が使用されている。中央直立操作盤には、サブグループ制御及びシーケンシャル制御の操作スイッチ、主要監視計器及び警報窓が設置されており、計算機を使用しないときの操作や自動化の補助的な監視、操作が行なえるようになっている。補助盤には、補機の単独操作スイッチや付帯設備のスイッチが取り付けられている。制御装置はすべて制御機器室に収納されている。自動化は日立制御用電子計算機HIDIC 80が中心となって実施され、排熱回収ボイラ及びタービンプラントの閉ループ制御回路はサブグループ制御装置に収納され、これらの補機の起動・停止連動シーケンスはシーケンシャル制御装置に収納されている。ガスタービンの制御は、閉ループ制御と補機シーケンスの両方をガスタービン制御装置に収納してある。また、この制御装置に付属したものと水噴射制御装置がある。

4 制御装置機器仕様

先に述べた各制御装置の機器仕様を、表2に示す。電子計算機としては、高信頼度大形制御用計算機を使用し、プラン

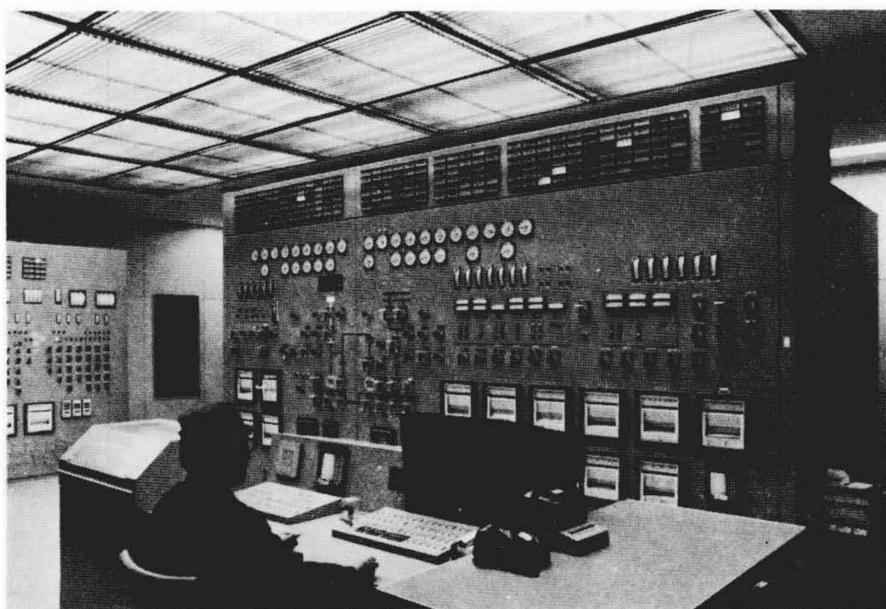


図4 中央操作室 前右側のデスクがオペレータコンソールで、後ろ側が中央直立操作盤である。

表2 制御装置機器仕様 多くのデジタル製品を使用している。

No.	機器名	仕様
1	電子計算機	HIDIC 80 主記憶容量：64k語 補助記憶容量：1,536k語 アナログ入力：272点 デジタル入力：504点 デジタル出力：332点 アナログ出力：4点
2	ガスタービン制御装置	スピードトロニックマークII
3	水噴射制御装置	デジタル式 燃焼器モニタ機能を含む。
4	サブグループ制御装置	HIACS-2000 (デジタル形) コントローラ：5台(1:Nバックアップ付)
5	シーケンシャル制御装置	HISEC-04 (プログラマブル形) コアメモリ：4k語
6	中央直立操作盤	垂直自立形 [幅4,800×奥行2,300×高さ2,300(mm)]
7	補助盤	垂直自立形 [幅1,500×奥行1,500×高さ2,300(mm)]
8	オペレータコンソール	デスク形 CRT：1台付

ト全体の制御、監視、作表、管理など広範囲の機能をもたせてある。ガスタービン制御装置自体は標準的なものであるが、付属装置としてマイクロコントローラを使用した水噴射制御装置が付いている点が新しい。水噴射制御装置では、ガスタービン燃料量に見合った水噴射量を制御するほか、燃焼器の異常を監視し、保護する機能をももっている。

サブグループ制御装置としては、新しい発電システムに対応しやすく、自動化に伴う複雑な制御に向くデジタル形コントローラを採用した。本装置には5台のマイクロコントローラを使い、うち1台は制御用コントローラを1:Nでバックアップを行なう予備系になっている。このコントローラには、図2にハッチングで示した制御回路をすべて収納してある。

シーケンシャル制御装置には、複雑な自動化に対応可能なプログラマブル形のシーケンサを採用し、ワンタッチで補機の起動・停止を可能にした。

5 計算機機能

計算機で処理される内容を表3に示す。

本プラントは電鉄負荷を担うため、毎日深夜停止、早朝起動を行なうのが基本的運転パターンであり、ホットスタートモードを中心とし、最初の操作から最後の操作まで全範囲にわたり完全に自動化している。データ処理項目では、寿命計算及び運転計画作成に特色をもっている。コンバインドサイクル発電プラントは、負荷変化とともに蒸気温度も変化するため、蒸気タービン及び排熱回収ボイラ肉厚部に応力を発生しやすい。したがって、これらの部分については厳密な熱応力計算を行ない、過大な応力発生時には負荷変化をホールドするようになっている。また、毎日起動・停止を行なうことから、この応力から寿命消費量を算出し、寿命管理ができるようになっている。運転計画作成機能というのは中給(中央給電指令所)から1日1回毎時の発生電力量がテレメータ

表3 計算機の処理内容 広範囲自動化、寿命計算、運転計画作成などに特徴的な機能がある。

分類	No.	内 容
計 算 機 制 御	1	自動化範囲 起動：循環水ポンプ起動～目標負荷 停止：負荷降下開始～循環水ポンプ停止 通常運転：負荷設定制御 初圧設定器変圧設定
	2	モード ホットスタート・ストップ中心 コールドスタート他のモードも一部の手動操作を加え可能とする。
	3	方式 計算機直接制御 計算機監視制御 シーケンシャルトリガ制御 } の複合方式
デ ー タ 処 理	1	警報監視 計算機入力項目及び計算値の上下限值
	2	熱応力及び寿命計算 (負荷ホールド機能含む) 蒸気タービン、ガスタービン 排熱回収ボイラ肉厚部
	3	性能計算 プラント効率、ガスタービン効率、蒸気タービン効率
	4	運転日誌 運転管理項目 50点
	5	補機運転記録 起動・停止時刻印字及び運転時間積算
	6	運転計画作成 中給指令から運転計画作成及び起動スケジュール作成
	7	オペレータリクエスト CRTのデータ表示、設定その他

で与えられるので、この値を毎時達成するような電力設定値及び負荷変化開始点を計算して求め、自動設定を行なう機能である。

自動化の範囲及び内容は、起動を例にとり起動手順ごとに図5に示した。この図から制御方式、制御項目が全体的に分かる。

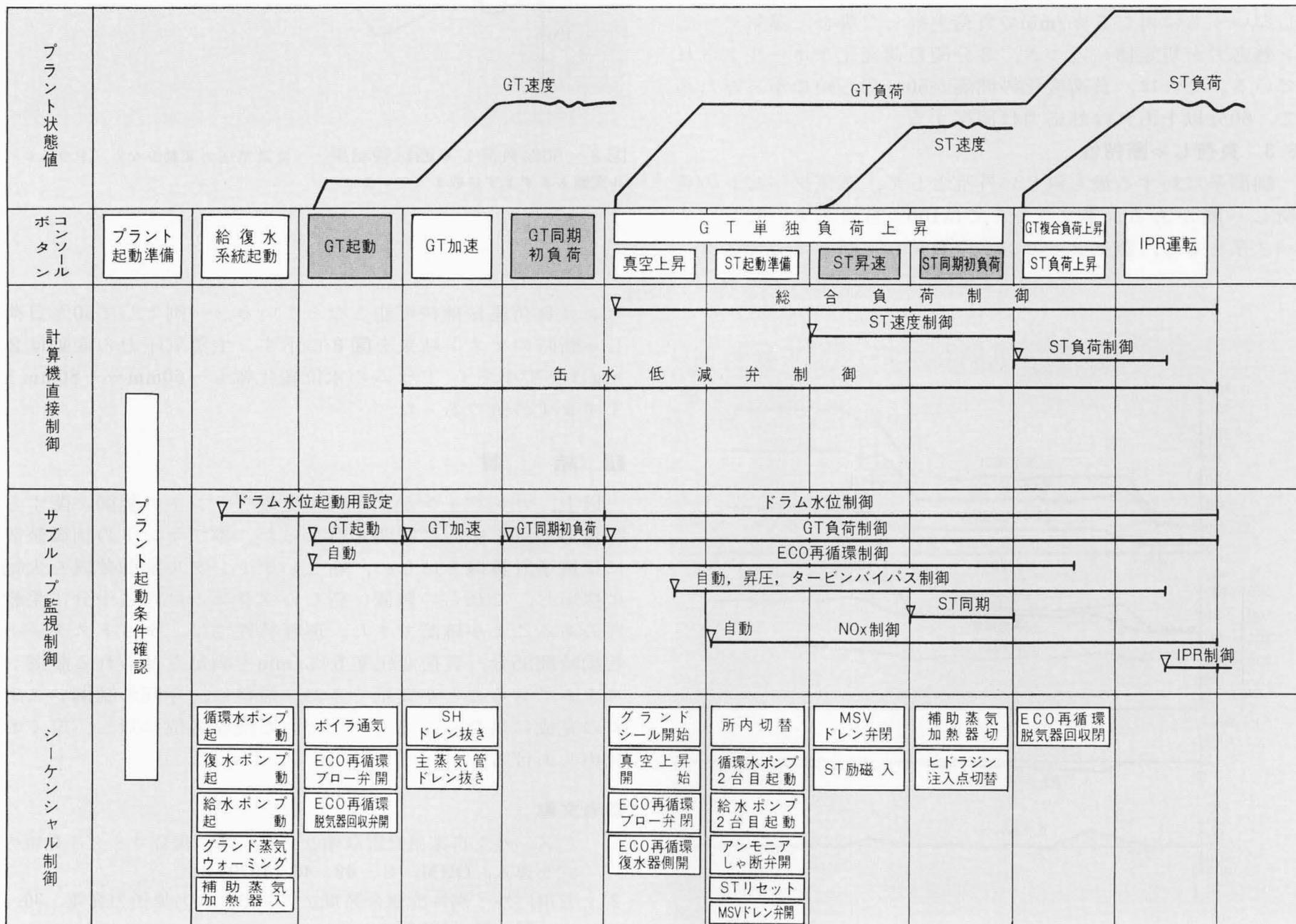
6 試運転結果

6.1 起動・停止試験

本プラントは毎日の起動時の起動損失を最小限にし、運転員の負担を減らすため短時間起動が設計目標の一つになっており、ホットスタートでガスタービン起動からベース負荷まで55分と設定された。このような短時間の起動操作を行なうためには、操作途中でのむだな時間は一切許されず計算機に行なわせて初めて可能になるものであった。この計算機制御でも毎日の起動・停止実績から操作上の所要時間を少しずつ短縮し、最終的に55分起動が可能になった。その結果を図6に示す。

6.2 負荷応答試験

負荷運用性の面から負荷変化率はできるだけ大きいことが望ましく、本プラントでは5%/minと設定された。この負荷変化のいちばん大きな制限要因として、蒸気タービンの熱応力が挙げられる。これはコンバインドサイクル発電プラントでは、ガスタービン排ガス温度が負荷にほぼ比例して変化する



注：略語説明など IPR(初圧制御), MSV(主蒸気止め弁), ■(押しボタン付), □(表示灯のみ)

図5 自動化範囲図(起動) 起動操作と使用される制御項目の関連が分かる。

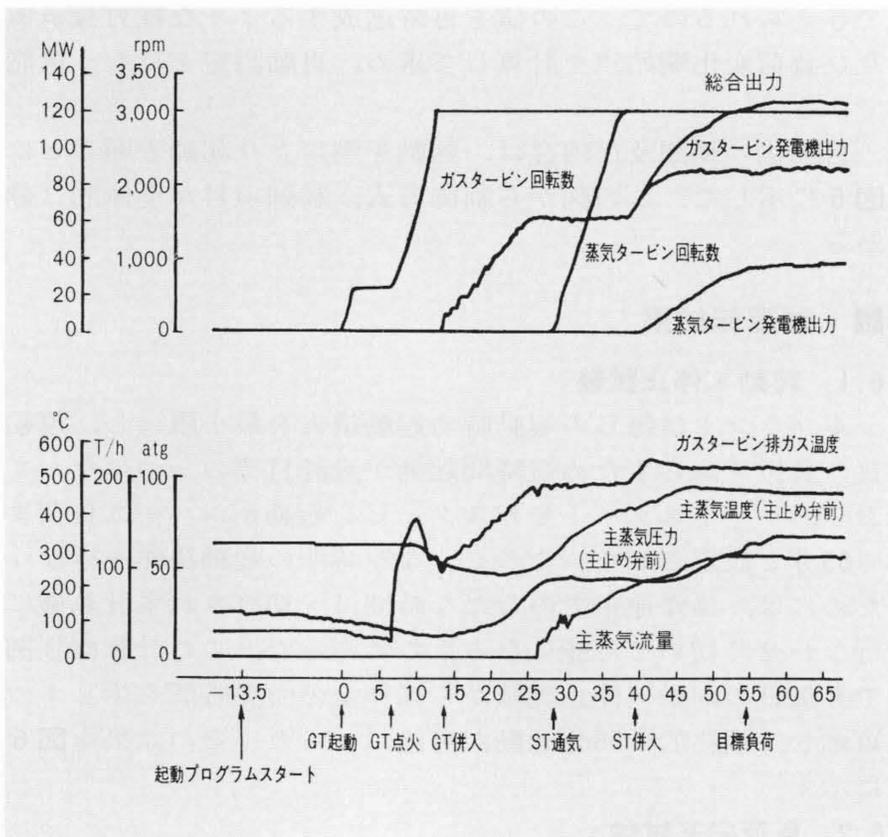


図6 ホットスタート実績曲線 55分という短時間で、目標負荷まで到達している。

るため、蒸気温度も大幅に変化することによる<sup>2)</sup>。図7に負荷応答試験結果の一例を示す。負荷変化率5%/minで最低負荷から約50%負荷まで負荷上昇した後、熱応力が完全に復帰しないうちに再び5%/minで負荷上昇した場合、蒸気タービン熱応力が規定値に近づき、3分間負荷変化がホールドされている。これは、負荷変化の間隔が50分弱しかなかったため、60分以上あれば熱応力は回復する。

### 6.3 負荷しゃ断特性

制御系に対する最も厳しい外乱として、蒸気タービンの負荷しゃ断がある。本プラントでは100%容量のタービンバイパス系をもち、蒸気タービンが全負荷しゃ断してもガスター

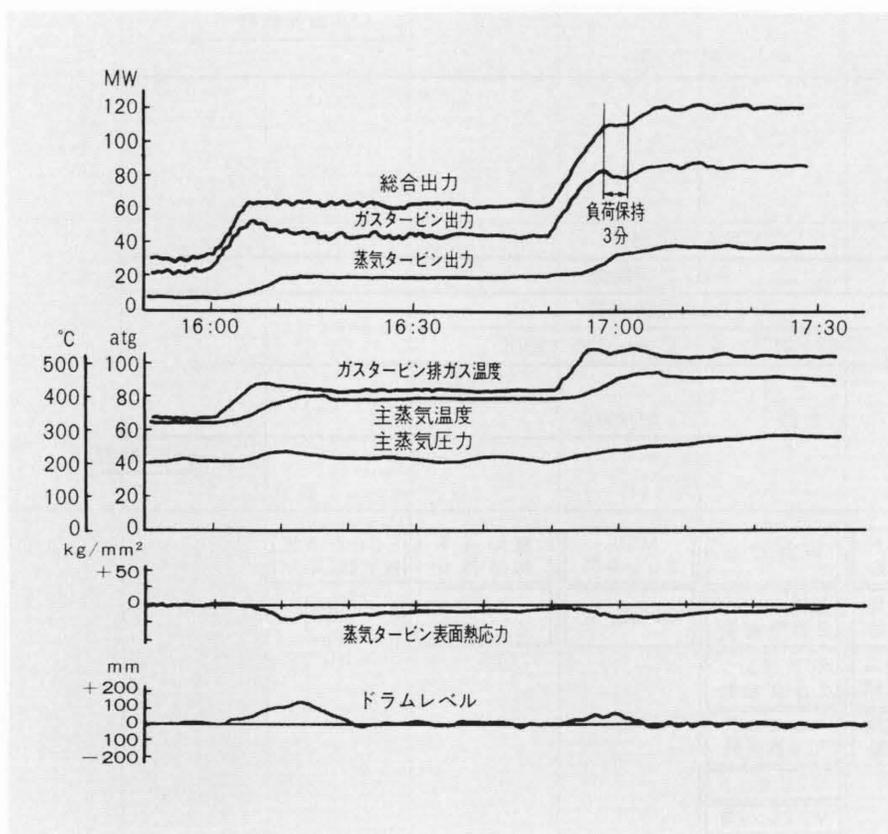


図7 負荷変化試験結果 タービン熱応力が完全に復帰しないうちの5%/min負荷変化により、3分間の負荷ホールドがかかった。

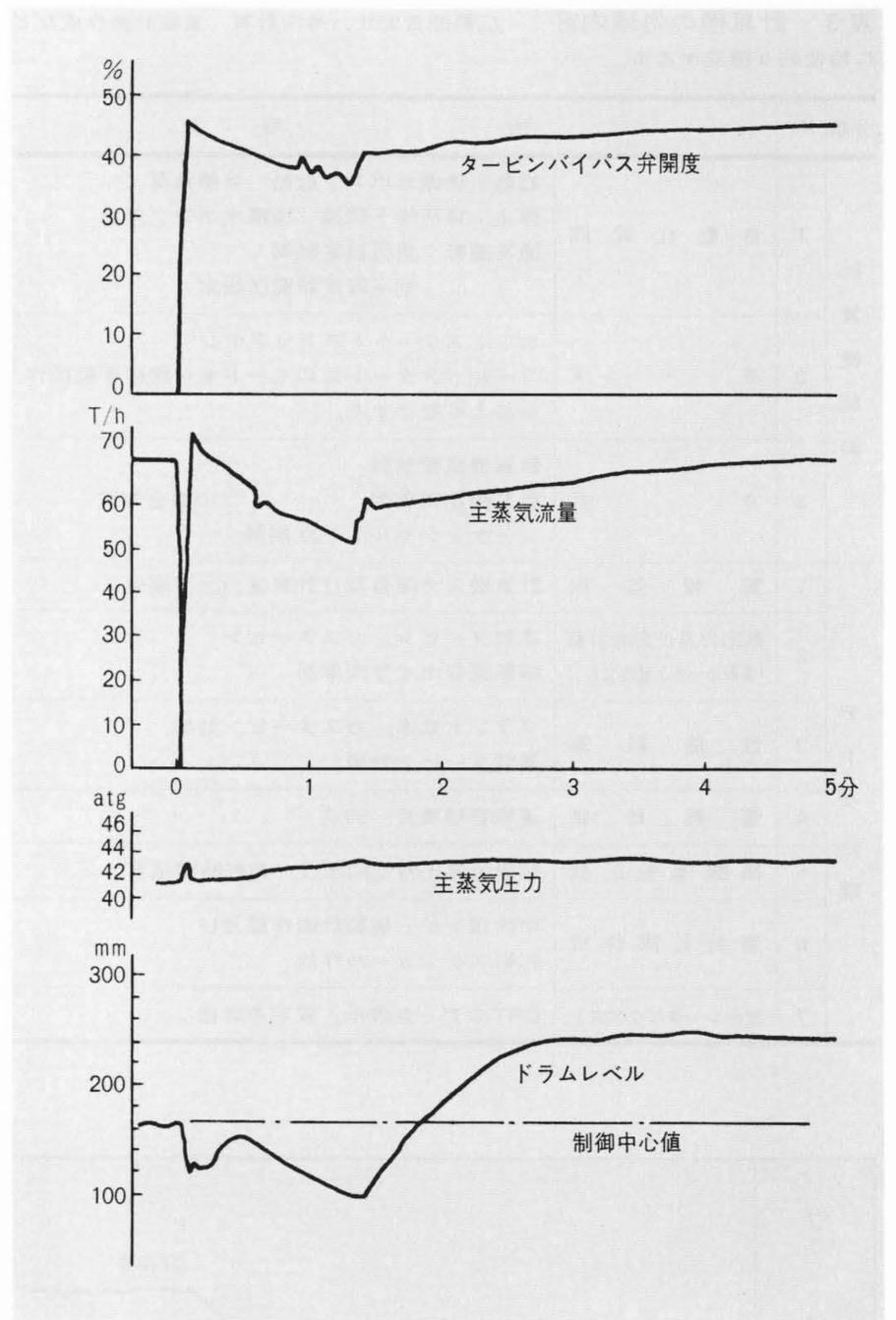


図8 50%負荷しゃ断試験結果 主蒸気圧力変動少なく、ドラムレベル変動もまずまずに収まっている。

ピンは負荷運転継続可能となっている。一例として50%負荷しゃ断時のテスト結果を図8に示す。主蒸気圧力の変動は2atgほどで小さく、ドラムの水位変化幅も-60mm~+80mmとまずまずの値であった。

## 7 結 言

以上、コンバインドサイクル発電プラントの制御に関する特色ある点を中心に説明を行なった。本プラントの制御装置には電子計算機をはじめ、新しいデジタル制御装置を大幅に採用し、これらの装置は新しいプラントに対し十分に柔軟性のあることが確認できた。運転特性では、ホットスタート起動時間55分、負荷変化率5%/minを満足させられる制御システムであることが実証できた。最後に、今回の制御システムの完成に当たり御協力いただいた関係各位に対し、厚くお礼申しあげる。

### 参考文献

- 1) 芦名, 外: 自家用発電設備リプレースに複合サイクル発電方式を導入, OHM, 8, 42-46 (1979-8)
- 2) 荒川, 外: 高性能複合発電プラント, 火力原子力発電, 30, 4, 55-91 (1979-4)
- 3) 松村: 複合発電プラントの運転制御, 火力原子力発電, 31, 7, 17-30 (1980-7)