

日本国有鉄道川崎発電所向け

141MWコンバインドプラントの概要と試運転実績

Outline and Operational Experience of 141 MW Combined Plant for Kawasaki Power Station, J. N. R.

近年、高効率で中間負荷運用にも適する発電設備の必要性が増大している。この要求を満たすものとして、ガスタービンとその排熱を回収する蒸気タービンとを組み合わせたコンバインドプラントの開発に努めてきたが、このたび日立製作所は日本国有鉄道川崎発電所にこの新方式による発電設備を納入した。

このプラントは、97MW大容量ガスタービンと44MW蒸気タービンとの組合せにより、最大出力141MWを発電するコンバインドプラントで、在来形の最新鋭汽力発電設備に匹敵する熱効率をもち、60分以内で起動が可能な毎日起動停止運用の自家発電設備である。5箇月半の試運転の後、昭和56年4月から営業運転が開始されたが、高効率、中間負荷運用としての機能は試運転中の諸試験によって実証された。

近藤 忠雄* Tadao Kondô
荒川 忠男** Tadao Arakawa
栗林 哲三** Tetsuzô Kuribayashi
福島 弘一郎** Kôichirô Fukushima

1 緒言

最近の火力発電設備は、エネルギー情勢を反映し従来にも増して高効率が望まれるとともに、原子力発電設備のベースロード運用などを背景として、火力発電設備への中間負荷運用の必要性が高まりつつある。

一方、日本国有鉄道の電鉄負荷では、電鉄負荷特有の朝・夕のピーク負荷に対応して、発電設備の毎日起動停止運用が要求されている。

今回、日本国有鉄道で自営電力管内の電力需要増大に対処するため、川崎発電所構内で既設機(1号機)の増強取替えが計画された。¹⁾旧1号機(運転開始昭和33年1月)は、石炭専焼ボイラをもつ60MWの汽力発電設備であり、新1号機はこの旧設備を撤去して、その跡に建設するもので、設置面積の限定、高効率化、出力の大幅増加、運用性など種々検討を行ない、国内で初めての排熱回収式コンバインドプラントを導入することになった。

このコンバインドプラントは、昭和54年7月ガスタービン室立柱後、順調に建設の上、試運転調整が進められ、昭和56年4月に営業運転が開始された。

コンバインドプラントとして当初意図した機能は、試運転中の諸試験によって十分実証され、現在、毎日起動停止運用を行ない順調に運転されている。

ここに本プラントの設備概要と試運転実績の一端について紹介する。

2 発電方式の選定とコンバインドプラントの特徴

1号機のリプレース計画として、汽力プラントとコンバインドプラントについて種々比較検討を行ない、新しい発電方式であるコンバインドプラントが採用された。図1に本コンバインドプラントの概念図を示す。

計画時、特に留意した点と本コンバインドプラントの特徴について以下に述べる。

(1) 省エネルギー・省力化に対応する設備であること。

発電端熱効率は40.1%とし、自動化機能全体を電子計算機

で処理するようにする。

(2) 毎日起動停止が容易で、起動時間が短い設備であること。

夜間及び週末停止後の起動はすべて自動化し、ホットスタートは60分以内で起動できるようにする。

(3) 旧1号機撤去面積内で建設できる最大出力の設備であること。

旧1号機出力60MWに対し新1号機は141MWとする。

(4) 環境対策形設備であること。

ガスタービン燃焼器に水噴射方式を、排ガスボイラに排煙脱硝装置を組み込み、低NOx(窒素酸化物)化を図る。また、ガスタービンは新設の防音壁建屋内に設置する。

(5) 旧1号機の建物・工作物を最大限に活用できる設備であること。

コンバインドプラントリプレースの特徴を生かし、既設タービン室・ボイラ室の建物、タービン架台、取水放水路などを利用する。

3 設備概要

3.1 プラント概要

表1に主要設備の仕様を、図2に系統構成を示す。

本プラントは、ガスタービン発電装置1台、排ガスボイラ1缶及び蒸気タービン発電装置1台とその補機から成る非助燃・排熱回収式コンバインドプラントである。まず、ガスタービンの燃焼器で圧縮空気と燃料を混合燃焼させた1,065°Cの燃焼ガスによりガスタービンを回転させ、97.1MWの発電出力を得る。ガスタービンで仕事をした後の553°Cの排ガスは、排ガスボイラで163T/h, 56atg, 473°Cの蒸気を発生させ、この蒸気で蒸気タービンを回転させ44.2MWの発電出力を得る。この性能は、大気温度4°C, 最大ピーク条件のもので、発電端熱効率は40.07%(高位基準)である。

機器配置は、前記図1に示すように、ガスタービンは細長い防音壁の新設建屋の中に収納され、排ガスダクトは消音器を出たのち屋外で立上り排ガスボイラ、あるいはバイパス煙

* 日本国有鉄道東京電気工事局 ** 日立製作所電力事業本部

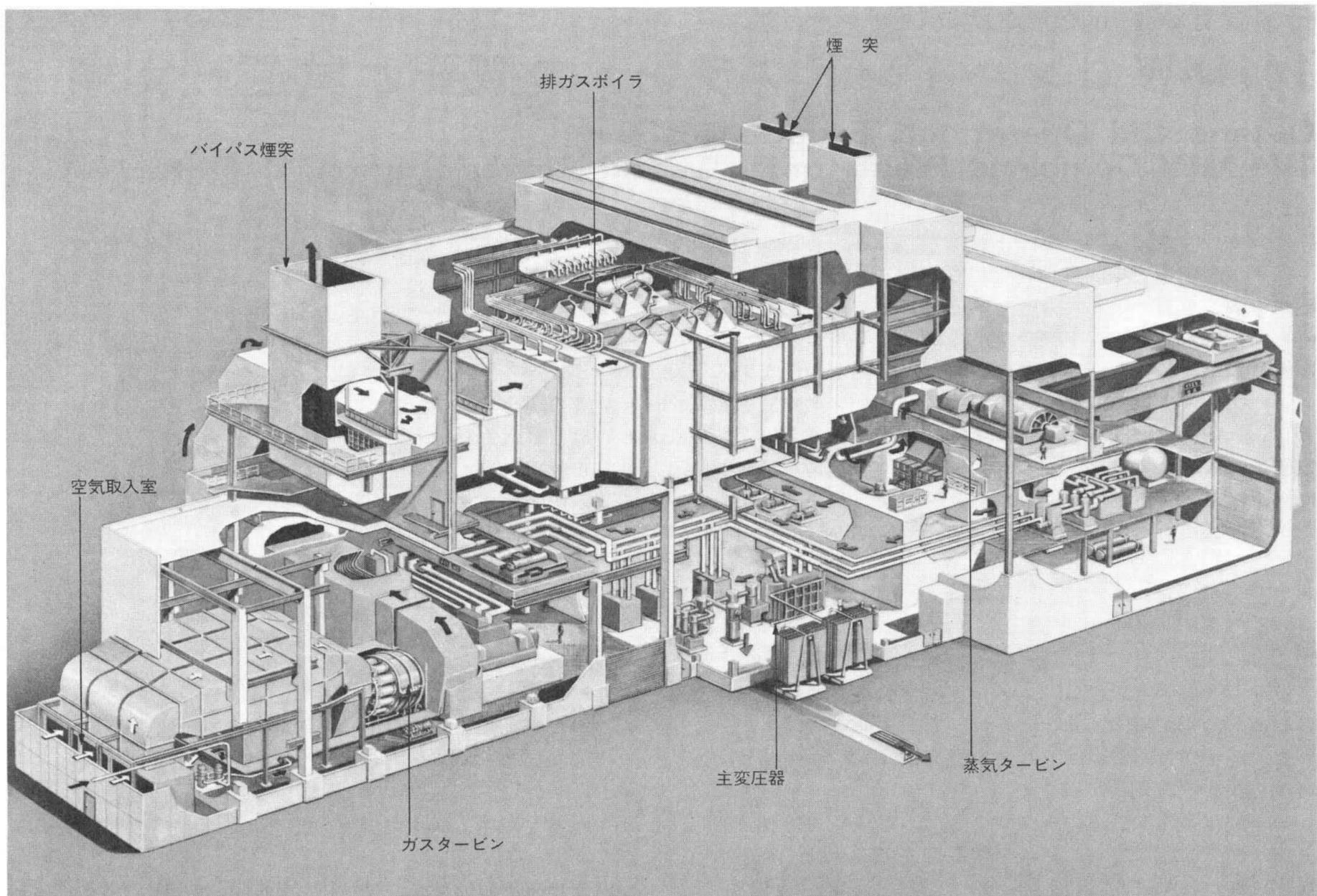


図1 コンバインドプラント概念図 ガスタービンは新設建屋内に、排ガスボイラ及び蒸気タービンは既設建屋内に収納されている。

突につながる。排ガスボイラは、横形で既設のボイラ建屋2階床上と新設のボイラ建屋2階床上にまたがって設置されている。ボイラ構造は、既設のボイラ柱間に入るように過熱器を除き煙突までのガス流路が2分割されている。蒸気タービンは、既設の建屋とタービン架台を利用し設置され、主変圧

器などの電気品は、既設ボイラが撤去された跡の1階スペースに設置されている。

3.2 ガスタービン

本プラントの主要機器であるガスタービンには、日立-GE形ガスタービンの最大容量機であるMS9001Bを採用してお

表1 主要設備の仕様 ピーク負荷、大気温度4℃時の性能を示す。

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1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1車室1流排気形 (SF-23)
	出力	44,200kW
	主蒸気圧力	56atg
	主蒸気温度	473℃
排ガスボイラ	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℃

表2 MS9001Bガスタービン仕様 本機は日立-GE形ガスタービンの中の最大容量機である。ピーク負荷、大気温度4℃時の性能仕様を示す。

項目	単位	単純サイクル時	複合サイクル時
形式	—	開放単純及び複合両用サイクル1軸形	
定格出力	kW	100,000	97,100
熱効率(低位基準)	%	30.12	29.20
空気流量	kg/h	1,271,470	1,271,470
燃焼温度	℃	1,062	1,065
排気温度	℃	543	553
入口圧損/出口圧損	mmAq	101.6/203.2	101.6/762
水噴射量	%	1.00	1.00
燃料噴霧方式	—	低圧空気噴霧方式	
起動装置	—	モータ	
吸気サイレンサ形式	—	パラレルバツフル形 (9m長)	
排気サイレンサ形式	—	パラレルバツフル形 (8m長)	
吸気フィルタ形式	—	キュービック式フィルタエレメント使用	
水噴射方式	—	燃焼器内噴射	

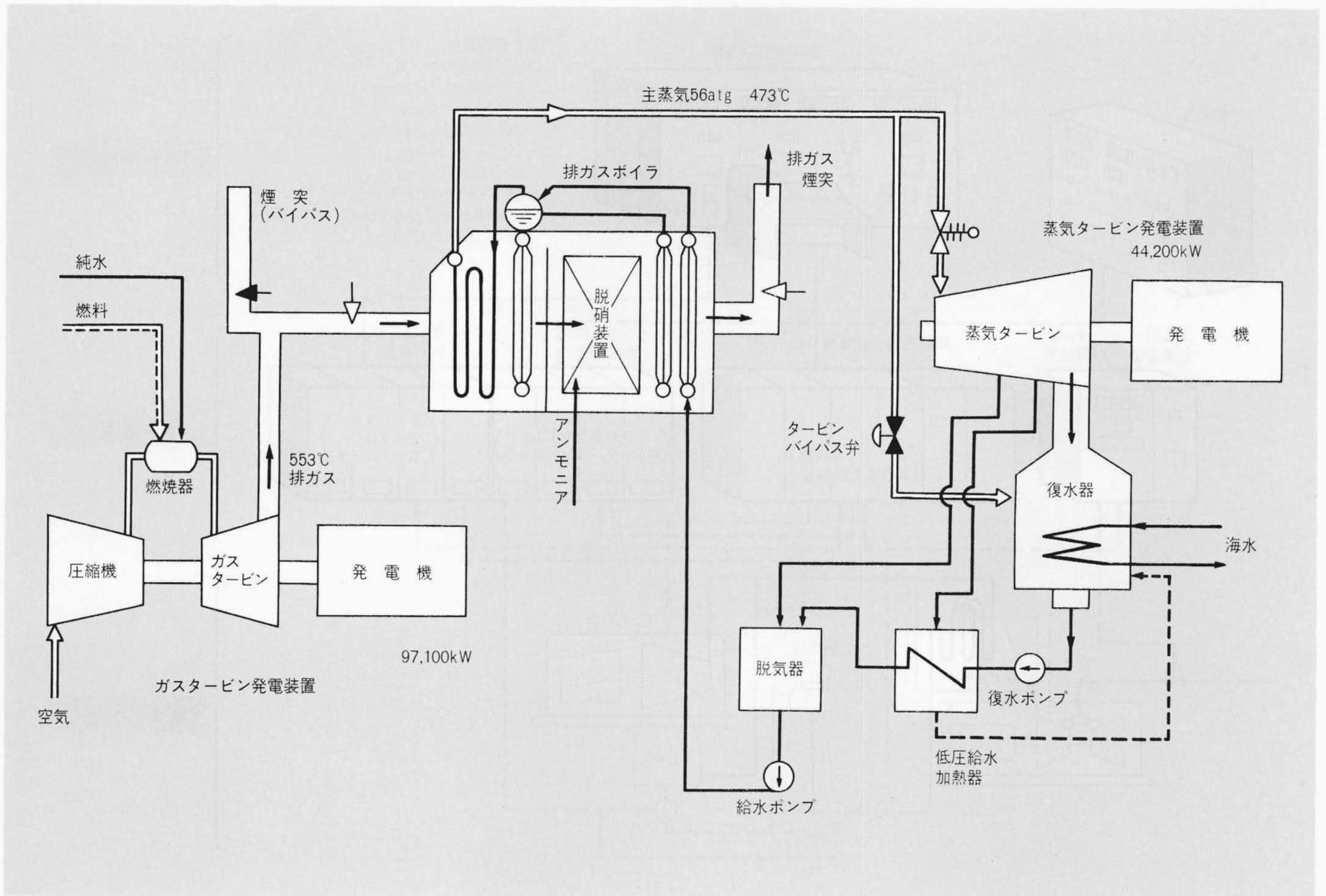


図2 サイクル構成 非助燃・排熱回収式コンバインドプラントの系統構成を示す。

り、その仕様を表2に示す。

本ガスタービンの特長は、既に昭和46年に運転を開始し、現在までに200台以上の運転実績をもつ60Hz用大形ガスタービンMS7001の、50Hz用スケールアップ機であり、随所にMS7001の経験が織り込まれている。

ガスタービンの高温部には高級耐熱材料を使用しているが、燃焼温度(タービン入口ガス温度)がピーク負荷で1,065°C、ベース負荷で1,004°Cと高いため、第1段動翼及び第1段、第2段静翼には空気冷却方式を採用している。

また、国内設置ガスタービンとして、環境対策には特に留意し、排出ガス中のNO_x低減策として、燃焼器への水噴射方式を採用している。

3.3 排ガスボイラ

排ガスボイラの形式は、自然循環排熱回収形・非助燃・横置き形で、燃料燃焼装置、通風装置及び水冷壁、火炉をもたない、いわゆる熱交換器ともいえるダクトボイラであるが、熱回収の向上と頻繁かつ急速な起動停止に対応できるよう下記の点に配慮し設計している。

- (1) ガスタービン特有の多量の排ガスを効率よく蒸気に置き換えるため、スペースファクタの良いスパイラルフィン付チューブを採用した。
- (2) 急激なガスタービン排ガス温度変化に十分耐え得るように、熱伸びの自由、熱応力の低減を図った構造としている。
- (3) ドラムレベルのスウェリング現象に対処するため、同等蒸発量の通常ボイラよりも大きなドラムサイズとしている。

また、乾式アンモニア接触環元式排煙脱硝装置は、各負荷

にわたり高効率脱硝が得られるように蒸発器を分割して最適温度域(300~400°C)に組み込んでいる。

3.4 蒸気タービン

蒸気タービンは、急速起動停止及び負荷変化を考慮する設計事項として中間負荷運用火力の蒸気タービンと大きな変わりはないが、部分負荷時の蒸気温度はガスタービン排ガス温度の低下に追随して低下するため、最終段湿り度の緩和と熱効率の向上を目的として、ガスタービン負荷80~60%で56atgからゲージ圧力42atgへの部分変圧運転を行なうようにしている。また、加減弁は前圧制御によっている。

3.5 制御装置

制御装置の全体構成を図3に示す。自動化機能全体を電子計算機が総括的に実施しており、それぞれの制御機能はサブグループ制御装置、シーケンシャル制御装置、ガスタービン制御装置などにより実行されている。中央操作室の制御盤は、次に述べるように機能分担してある。

(1) オペレータコンソール

自動モードでの起動停止操作、負荷変化操作及びデータ表示用

(2) 中央直立制御盤

手動による補助操作や状態監視用

(3) 補助盤

付属設備の操作及び各操作端の単独操作用

本プラントの自動化機能としては、毎日の起動停止で操作する項目はすべて自動化されており、通常の負荷運用運転でも、中給指令からの運転計画の作成、これによる負荷変化、初圧

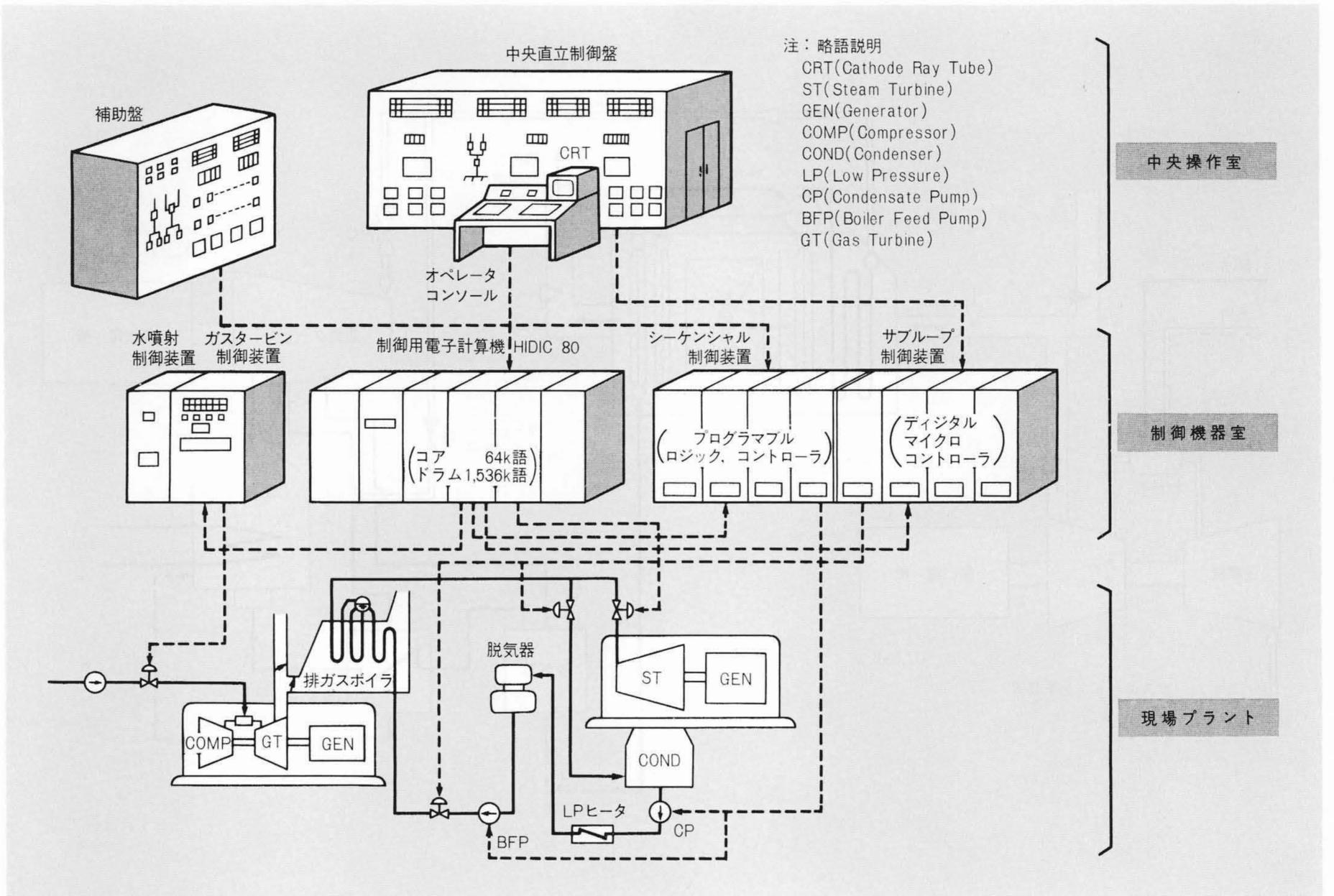


図3 制御装置の全体構成 自動化機能全体を電子計算機により総括制御する。

設定などが自動化されている。

サブーループ制御装置としては、バックアップ機能をもつ5台のマイクロプロセッサから成る分散形デジタル制御装置を使用し、ドラムレベル制御、タービンバイパス制御、初圧制御などの閉ループ制御を行なっている。

シーケンシャル制御装置としては、ロジックをプログラムで作るシーケンサを使用し、グラウンドシールや各ポンプの起

動停止の連動シーケンスを自動化している。

ガスタービン制御装置としては、標準的なガスタービン制御のほかに燃焼器モニタや水噴射制御機能が付加されている。

4 運転実績

試運転調整は、表3に示すようにガスタービン点火から営業運転開始まで予定どおりの工程で行ない、各種試験を実施

表3 試運転実施工程 試運転は計画工程どおり実施した。

試 運 転 項 目	実 施 月 日
ガスタービン点火	昭和55年10月17日
排ガスボイラ通ガス・昇圧	同年 10月18日
ガスタービン併入	同年 10月31日
ガスタービン $\frac{1}{4}$ 負荷 同負荷しゃ断試験	同年 11月 8日
蒸気タービン通気	同年 11月27日
蒸気タービン併入	同年 12月 5日
蒸気タービン $\frac{1}{4}$ 負荷	同年 12月17日
同負荷しゃ断試験	同年 12月19日
コンバインドプラント $\frac{1}{4}$ 負荷しゃ断試験	同年 12月20日
起 動 停 止 試 験	昭和56年 1月 7日～22日
竣 工 検 査	同年 2月 2日～ 6日
プラント性能試験	同年 2月 9日～13日
負 荷 追 従 試 験	同年 2月14日～25日
営 業 運 転 開 始	同年 4月 2日

表4 プラント性能試験結果主要値 試験の結果、計画値を3.3～4.3%(相対比)上回る良好な成果が得られた。

負 荷	単 位	ピ ーク		ベ ース		
		計 画	実 績	計 画	実 績	
大 気 温 度	℃	15	8.99	15	8.70	
出 力	ガスタービン	kW	90,300	97,206	81,500	88,432
	蒸気タービン	kW	43,400	44,517	37,400	38,289
	総 合	kW	133,700	141,723	118,900	126,721
	大気温度4℃時	kW	141,300	144,430	—	—
発 電 端 効 率(高 位) (計画運転条件補正後)	%	40.04	41.76	39.06	40.37	
所 内 比 率	%	—	1.22	—	1.33	
送 電 端 効 率(高 位)	%	—	41.25	—	39.83	

した。以下に試験結果の一端を紹介するが、当初意図したコンバインドプラントとしての機能は十分に実証できた。

なお、竣工検査を2月上旬に実施したのは、最大出力が得られる最低気温時を選んだもので、試運転開始から3月31日までの間、ガスタービンは1,094時間、蒸気タービンは745時間運転され、起動回数はガスタービンが130回、蒸気タービンが79回となっている。

4.1 プラント熱効率

表4にプラント性能試験の結果得られた主要値を示す。

発電端熱効率はピーク負荷時41.76%、ベース負荷時40.37%、送電端熱効率はピーク負荷時41.25%、ベース負荷時39.83%となっており、計画値を3.3~4.3%(相対比)上回る良好な結果が得られた。コンバインドプラントは所内比率が少ないのが特色であり、前記送電端熱効率は超臨界圧力火力発電設備を上回る熱効率となっている。また、最大出力は大気温度4°C時で出力141.3MWの計画であったが、実測値は出力144.4MW(4°C換算)であり、計画を2.2%上回る良好な結果が得られた。

4.2 脱硝装置効率

脱硝率は、初期計画値90%に対し実測値95%、出口NH₃濃度も計画値10ppm以下に対し実測値2.3ppmと良好な結果が得

られた。

また、ガスタービンは燃焼器への水噴射により排ガスNO_x発生量を減少させるようにしているが、計画NO_x濃度を下回る好結果が得られた。

4.3 起動停止

図4に夜間停止9.5時間後のホットスタート実績例を示す。ガスタービン起動からプラント全負荷まで55分で起動でき、計画起動時間60分以内で起動できることが確認できた。起動プログラムスタートにより、循環水ポンプ、復水ポンプなどの補機起動からプラント全負荷まで電子計算機により自動的に行なわれる。夜間停止中、復水器真空は真空破壊されており、自缶の残圧蒸気を補助蒸気加熱器(電気ヒータ)により加熱後、蒸気タービングランドをシールし真空上昇する。ガスタービン起動により排ガスボイラを昇圧・昇温し、70%負荷で蒸気タービンを通気・併入する。その後、ガスタービンと蒸気タービンを同時に負荷上昇する。この蒸気タービン通気・併入時のガスタービン負荷は、蒸気タービンメタルマッチになるよう起動モードにより決められている。前記の補機起動を含めても、プラント全負荷まで70分以内という、極めて短時間で円滑に起動できる。

なお、ウォームスタートは100分、コールドスタートは310

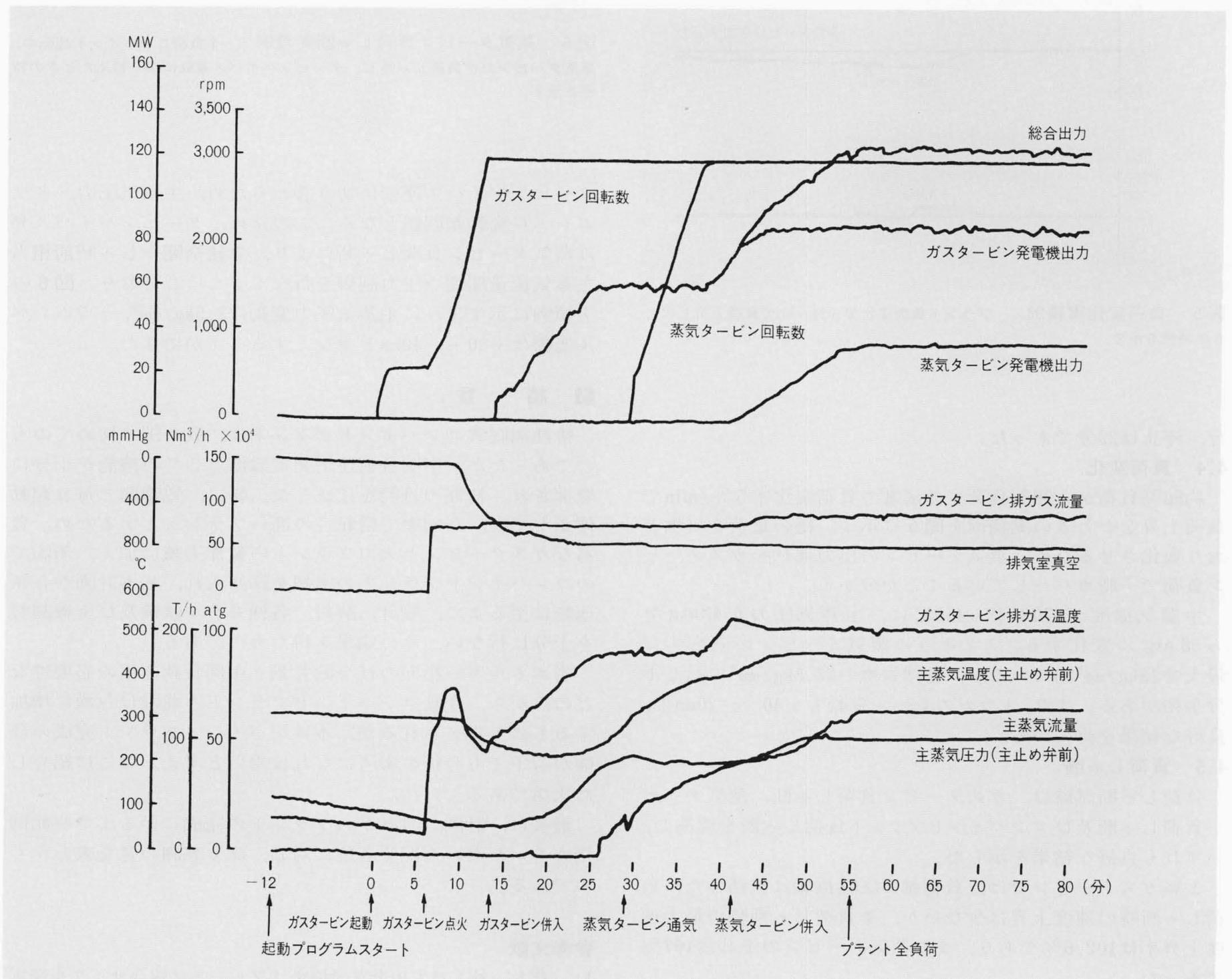


図4 ホットスタート実績例(9.5時間停止) ガスタービン起動からプラント全負荷まで、55分で起動できる。

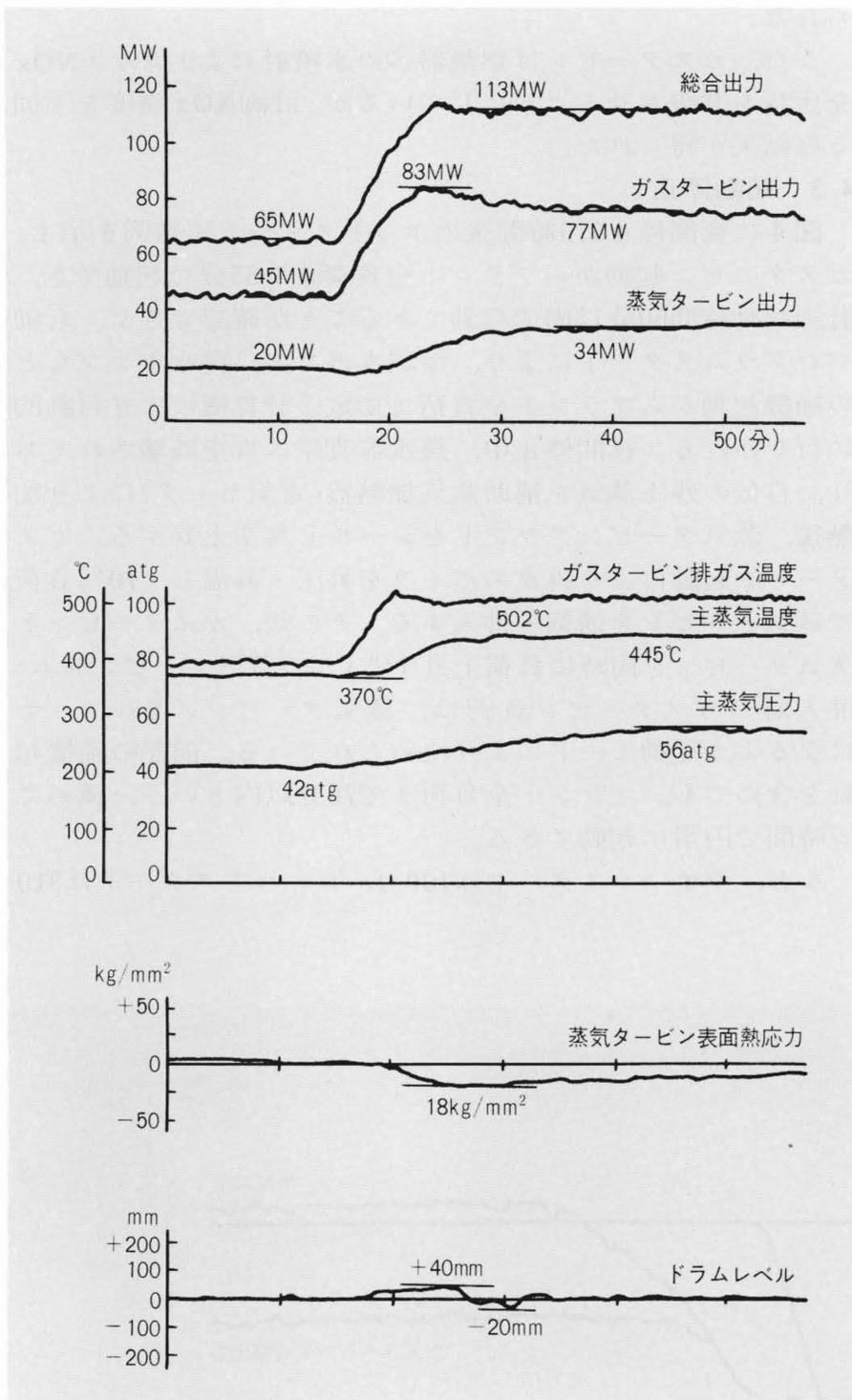


図5 負荷変化実績例 プラント負荷変化率5%/minで負荷上昇したときの特性を示す。

分、停止は29分であった。

4.4 負荷変化

約50%負荷から90%負荷まで通常の負荷変化率5%/minで負荷上昇したときの実績例を図5に示す。総合負荷を目標どおり変化させるため、蒸気タービンの出力遅れをガスタービン負荷で一時カバーしていることが分かる。

主蒸気温度が370°Cから455°Cに、主蒸気圧力が42atgから56atgに変化する。このときの蒸気タービンの熱応力は最大で18kg/mm²出ているが、管理目標の23.8kg/mm²に対し十分余裕がある。また、ドラムのレベル変動も+40~-20mmで、良好な結果を得ている。

4.5 負荷しゃ断

負荷しゃ断試験は、ガスタービン負荷しゃ断、蒸気タービン負荷しゃ断及びコンバインドプラント負荷しゃ断を実施し、いずれも良好な結果を示した。

1軸ガスタービンでは、負荷軸と圧縮機軸は直結のため負荷しゃ断時の速度上昇は少ないが、 $\frac{1}{4}$ 負荷しゃ断時の最大速度上昇率は102.6%であり、また蒸気タービンのそれは107%であった。

蒸気タービン負荷しゃ断時は、ガスタービン運転中で蒸気

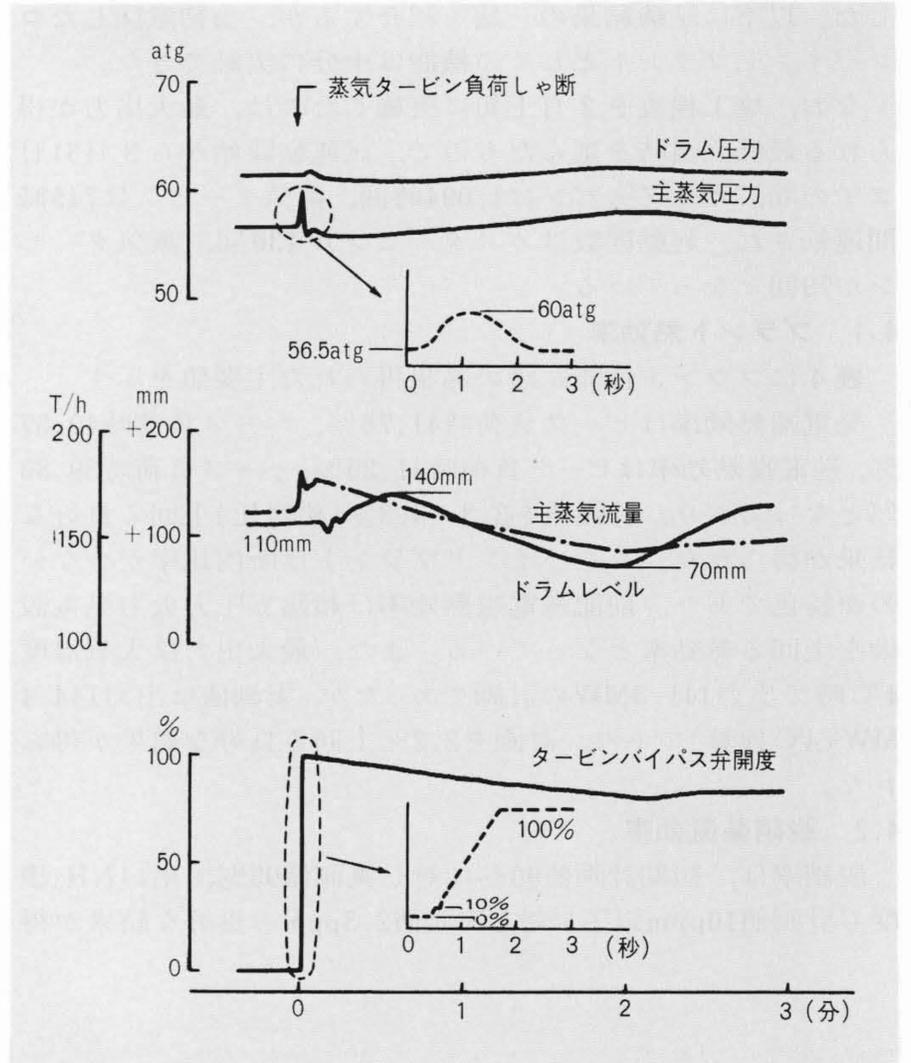


図6 蒸気タービン負荷しゃ断実績例 $\frac{1}{4}$ 負荷コンバインド運転中、蒸気タービンだけ負荷しゃ断し、タービンバイパス運転に切り替えたときの特性を示す。

タービンバイパス運転に切り替わるため、主蒸気圧力、ドラムレベル変動が問題となる。このため、タービンバイパス弁は蒸気タービン負荷しゃ断により、急速全開→しゃ断前相当主蒸気流量開度→圧力制御を行なうようにしており、図6の実績例に示すように主蒸気圧力変動は3.5kg/cm²、ドラムレベル変動は+30~-40mmと少なくすることができた。

5 結 言

排熱回収式コンバインドプラントは、我が国で初めてのものであったが、中間負荷運用発電設備としての機能が十分に発揮され、初期の目的を達成した。特に、短時間で毎日起動停止ができ、高効率で信頼性の高いプラントとするため、豊富なガスタービンと火力プラントの製作実績に加え、米国でのコンバインドプラントの実績を採り入れ、基本計画から試運転に至るまで、設計、解析、各種モデル試験及び実機調整を十分に行ない、その成果を得たものである。

省エネルギー指向の社会的背景と中間負荷運用の必要性などの点から、今後コンバインドプラントの建設は急激に増加するものと考えられるが、本コンバインドプラント完成の経験が若干でも今後の参考になれば幸いと考へ、ここに紹介した次第である。

最後に、計画、設計からプラントの完成に至るまで終始御指導をいただいた関係各位に対し、深く感謝の意を表わすものである。

参考文献

- 1) 芦名, 外: 自家用発電設備のリプレースに複合サイクル発電方式を導入, オーム社, OHM, 8月号 42~46 (1979-8)