

コンバインドプラント Combined Cycle Power Plant

石油価格の高騰、一次エネルギー源の多様化及び環境保全に対する社会的要求に対応するため、LNG、LPGなどのクリーン燃料の導入が推進されている。一方、高効率化の要求にこたえられる発電方式として、我が国でもガスタービンと蒸気タービンのコンバインドプラントの建設、計画が本格的に始動した。日立製作所では、かねてから排熱回収形コンバインドプラントの開発に着手し、その製作態勢を整えており、国産1号機が日本国有鉄道川崎発電所に納入され、昭和56年から営業運転が開始された。本稿は日立製作所のコンバインドプラントの基本構成と性能の紹介、構成主機の計画上の技術的要点、シミュレーションによる制御特性の解析結果などについて紹介する。

乾 泰二* Taiji Inui
西嶋庸正** Tsunemasa Nishijima
日下 巖*** Iwao Kusaka
柏原克人** Katsuto Kashiwahara
福島弘一郎* Kôichirô Fukushima

1 緒 言

石油価格の高騰や一次エネルギーの長期安定供給への社会的要求に対処するため、我が国でも大容量石炭火力発電所の建設、計画が加速的に見直されているが、もう一つの課題である環境保全への対応のため、LNG(液化天然ガス)、LPG(液化石油ガス)などのクリーン燃料の導入や、更には石炭のガス化、液化によるクリーン化技術の研究が推進されている。

この高価格なクリーン燃料に対しては、従来にも増して高い発電効率が要求されるが、在来の火力発電方式では、大容量超臨界圧プラントであっても39%前後にとどまっている。この高効率化の要求にこたえられる発電方式として、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドプラントが各方面で真剣に検討されている。

コンバインドプラントとしては、主にガスタービンを中心とした排熱回収方式と、蒸気タービンを中心とした排気再燃方式の2方式が1970年代の前半から飛躍的に建設され、現在までに世界の合計で約19,000MWに達する。後者は欧州を中心に発達した方式で、蒸気タービンを中心としているため、発電効率の向上に限界がある。一方、前者は米国を中心に発達したもので、今後期待されるガスタービンの高温化技術の開発に伴い、50%以上の発電効率が期待される方式であり、今後のコンバインドプラントの主流であると考えられる。

日立製作所では、かねてから¹⁾この排熱回収形コンバインドプラントの開発に着手し、その製作態勢を整えており、国産1号機が日本国有鉄道川崎発電所に納入され、昭和56年度から営業運転が開始されている。一方、海外では日立製作所がガスタービンで提携を行なっている米国のゼネラル・エレクトリック社(GE社)でSTAGプラントと称され、現在までに39プラント約9,000MW以上の受注、納入実績をもち、そのうち25プラントが順調に営業運転を行なっており、合計の累積運転時間は、1980年末には約30万時間に達する。図1に、代表例として天然ガス燃焼プラントの一つであるワートン発電所、及びアナダルコ発電所の運転状況を示すが、運転開始後着実に運用されていることがうかがえる。特に、1980年には各々年間8,000時間、及び7,000時間以上運転されており、米国での火力プラント又は原子力プラントの年間平均運転時間が各々6,800時間、6,000時間であり²⁾、したがって、米国ではコ

ンバインドプラントは既に火力プラント、原子力プラントと同等又はそれ以上に運用されていることがうかがえる。

2 コンバインドプラントの基本構成

コンバインドプラントは図2に示すように、1基又は複数基の大容量ガスタービンと、それぞれのガスタービンに1缶

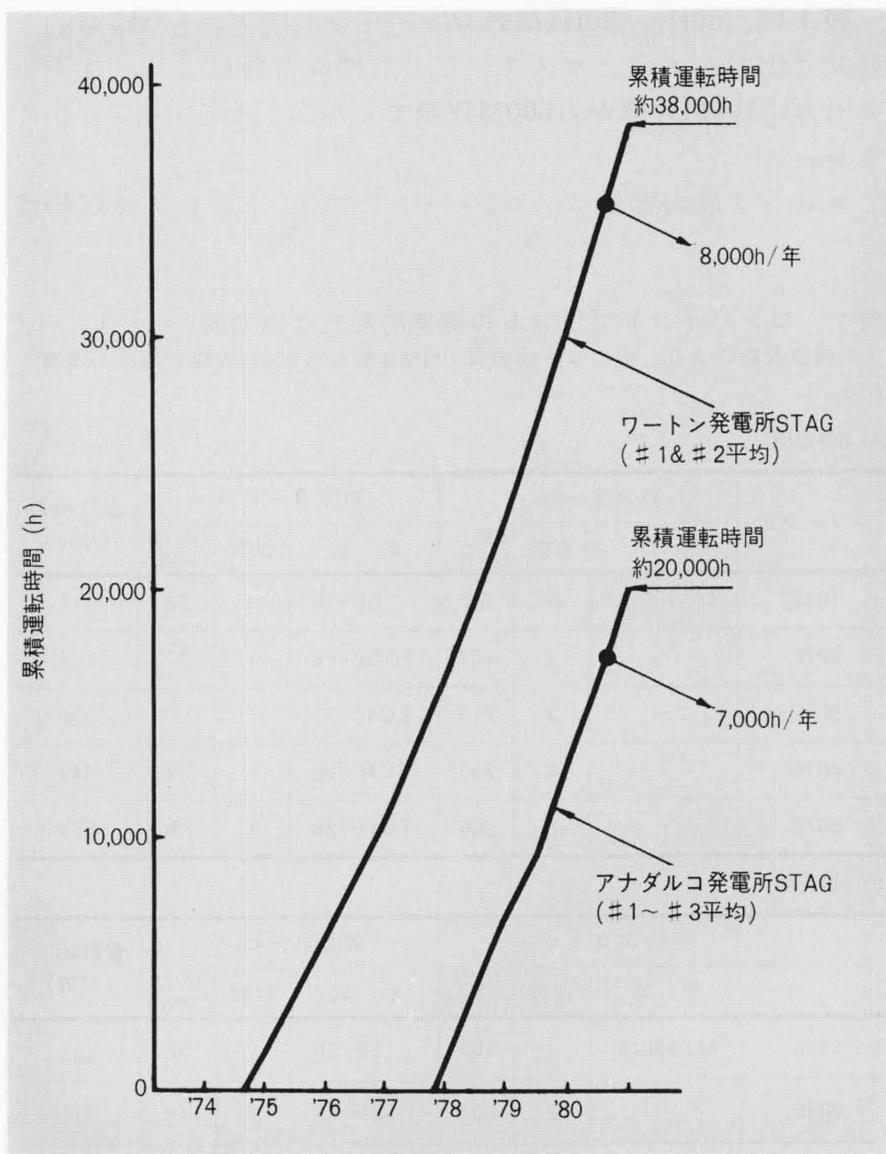


図1 米国STAGプラント累積運転時間(代表例) 運転開始後着実に運用されている。1980年には年間8,000時間、7,000時間以上運転されている。

* 日立製作所電力事業本部 ** 日立製作所日立工場 *** バブコック日立株式会社呉工場

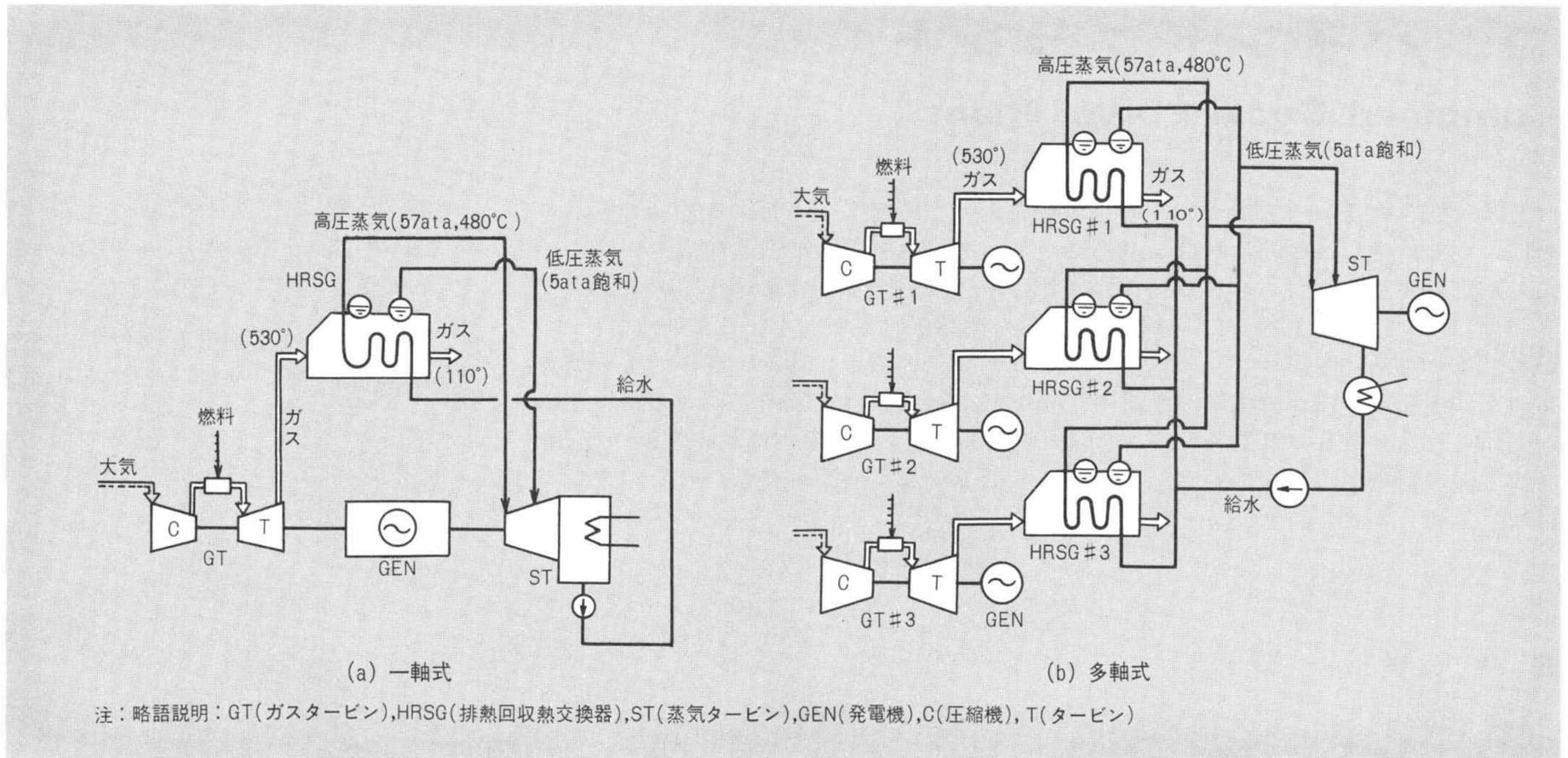


図2 コンバインドプラントの基本構成 コンバインドプラントは、1基又は複数基のガスタービンとそれに付随する排熱回収熱交換器、及び1基の蒸気タービンから構成される。

ずつ設置されるHRSG (Heat Recovery Steam Generator : 排熱回収熱交換器)及びその発生蒸気によって駆動される1機の蒸気タービンとで構成される。

表1に、60Hz、50Hz用のコンバインドプラントの標準的な形式と出力を示す。ガスタービンの構成台数により、ユニット出力は100MW級から600MW級まで幅広く選定することができる。

ユニット最大容量は、コンバインドプラントとしての起動性

を考え、蒸気タービンを3車室以下で選定すると500~600MW級となる。

ガスタービン1基、蒸気タービン1基の組合せの場合には、両者を1台の共通発電機を介して機械的に直結した一軸式とすることにより、コンパクトな構成が可能である。一軸式は各軸が基本的に独立しているため、運用上のフレキシビリティに富む。熱効率は、プラント定格出力時は蒸気タービンが大容量になる分には多軸式が良いが、部分負荷時には運転ユニット台数の切替えにより逆転する。以上から、概してベース負荷で高負荷帯での熱効率を追究する場合には多軸式が、中間負荷運用で運転のフレキシビリティを重んずる場合には一軸式が適している。

主蒸気条件は、どの形式も定格出力時で高压側が57気圧、480°C、低压側が5気圧、飽和と同一であるため、各形式の特性、性能は基本的には大略同一である。これらの蒸気条件は、HRSGでの排熱回収効率、蒸気タービン効率との兼ね合い及びその経済性を考慮し決定してある。

サイクル構成上、ガスタービンに低NO_x(窒素酸化物)形燃焼器を採用して水又は蒸気噴射量の軽減を図っており、また、蒸気サイクルとして混圧蒸気サイクルを採用して熱効率の向上を図っている³⁾。なお、HRSGの入口部で少量の助燃を行なう助燃方式は、ガスタービンの排ガス温度が低いときの熱効率向上方式として有効であったが、現在の商用ガスタービンではその熱効率改善量が小さいため、系統がシンプルな非助燃方式を標準としている。

3 コンバインドプラントの特長

表2にコンバインドプラントの諸性能を、在来の超臨界圧火力プラントと対比し示す。コンバインドプラントは次に述べるような特長をもっている。

(1) 高効率、省資源形の発電プラントである。

定格出力時の熱効率は、送電端熱効率で42%以上と、在来の超臨界圧火力プラントに比べて10%の熱効率改善がなされる。これにより、600MW級発電所の場合には、年間燃料使用

表1 コンバインドプラントの標準的な形式と出力表 ガスタービンの構成台数により、ユニット出力は100MW級から600MW級と幅広く選定される。

(a) 60Hz用

シリーズNo.	ガスタービン			蒸気タービン			合計出力 (MW)
	形式	台数	出力 (MW)	形式	台数	出力 (MW)	
107E	MS7001E	1	73	SF-26	1	38	111
207E	"	2	147	TCDF-26	1	77	224
307E	"	3	219	TC4F-23	1	117	336
407E	"	4	293	TC4F-26	1	156	449
507E	"	5	366	TC4F-26	1	196	562

(b) 50Hz用

シリーズNo.	ガスタービン			蒸気タービン			合計出力 (MW)
	形式	台数	出力 (MW)	形式	台数	出力 (MW)	
109E	MS9001E	1	103	SF-26	1	52	155
209E	"	2	205	TCDF-26	1	106	311
309E	"	3	308	TC4F-23	1	159	467
409E	"	4	410	TC4F-26	1	216	626

注: 1. 大気条件(1,033ata 15°C 相対湿度60%)
 2. ガスタービン(ベース負荷 LNG燃焼 インジェクションなし)
 3. 復水器真空(60Hz地区 722mmHg, 50Hz地区 728mmHg)

量で約5万tの節減が可能となる。

(2) 運転特性が良好で中間負荷運用に適する。

夜間停止後の再起動(ホットスタート)で、起動-全負荷が在来火力が2~2.5時間必要とするのに対し1時間以内で達成でき、また、起動損失が少なく、頻繁な起動・停止運用に対し有効である。

コンバインドプラントは、そのほかに温排水量の軽減など多くの利点をもっており、またNOxについては、低NOx形燃焼器、水又は蒸気噴射などのガスタービン燃焼器での対策と、排煙脱硝装置の併用により対処している。

4 コンバインドプラントの構成主機

(1) ガスタービン

ガスタービンは、コンバインドプラントの中心主機として高効率、高信頼性が要求される。コンバインドプラントに使用されるガスタービンは、日立-GEパッケージ式大容量ガスタービンで3,600回転数機、単機容量70MW級のMS7001形及び3,000回転数機、単機容量100MW級のMS9001形であり、そのEモデル機はヘビィーデューティ形ガスタービンでは、世界最高級の入口ガス温度をもつ最新鋭の高効率ガスタービンである。過去、世界のガスタービンの納入実績の約50%は、GE社系ガスタービンが使用されており、日立製作所は1964年からこのGE系ガスタービンを共同製作し、累計製作台数は300台以上に達する。MS7001E形ガスタービンは、GE社で1977年末から営業運転を開始し、既に90台近い受注、納入

表2 在来の火力発電プラントとの比較 在来火力発電プラントに対し、10%の発電効率の改善が可能である。

項目		火力発電プラント	コンバインドプラント
プラント		600MW (TC4F-33.5) LNG燃焼	一軸I07EX5 LNG燃焼
蒸気条件		246atg 538/566℃ 一段再熱	56atg 480℃ 非再熱混圧
出力	発電端	600MW	600MW級
熱効率 (HHV) %	発電端	39.5%	43.0%
	送電端 (比較)	38.4% (ベース)	42.4% (+10.7%)
運用 特性	起動時間 (点火~全負荷) (ホット)	2~2.5時間	1時間以内
	負荷変化率 高負荷 低負荷	5%/分 3%/分	5~6%/分 2~3%/分
	最低負荷	15~20%	(4%)~20%*
温排水量		100%	60~70%
年間使用 燃料**	燃料量差	ベース	⊖50,000t

注：* 小括弧内はI07E×1台運転時を示す。

** 利用率60%の場合を示す。

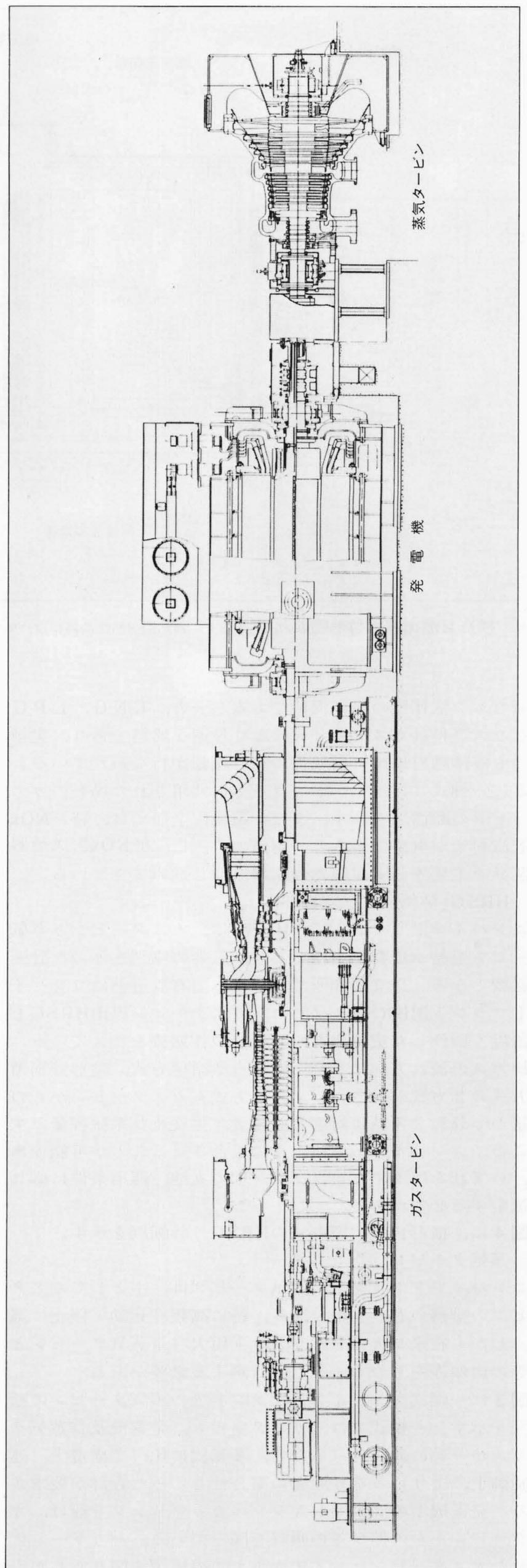


図3 一軸式コンバインドI07E主要機器 一軸式は多軸式に比べて、中間負荷運用で運転のフレキシビリティを重んずる場合に適している。

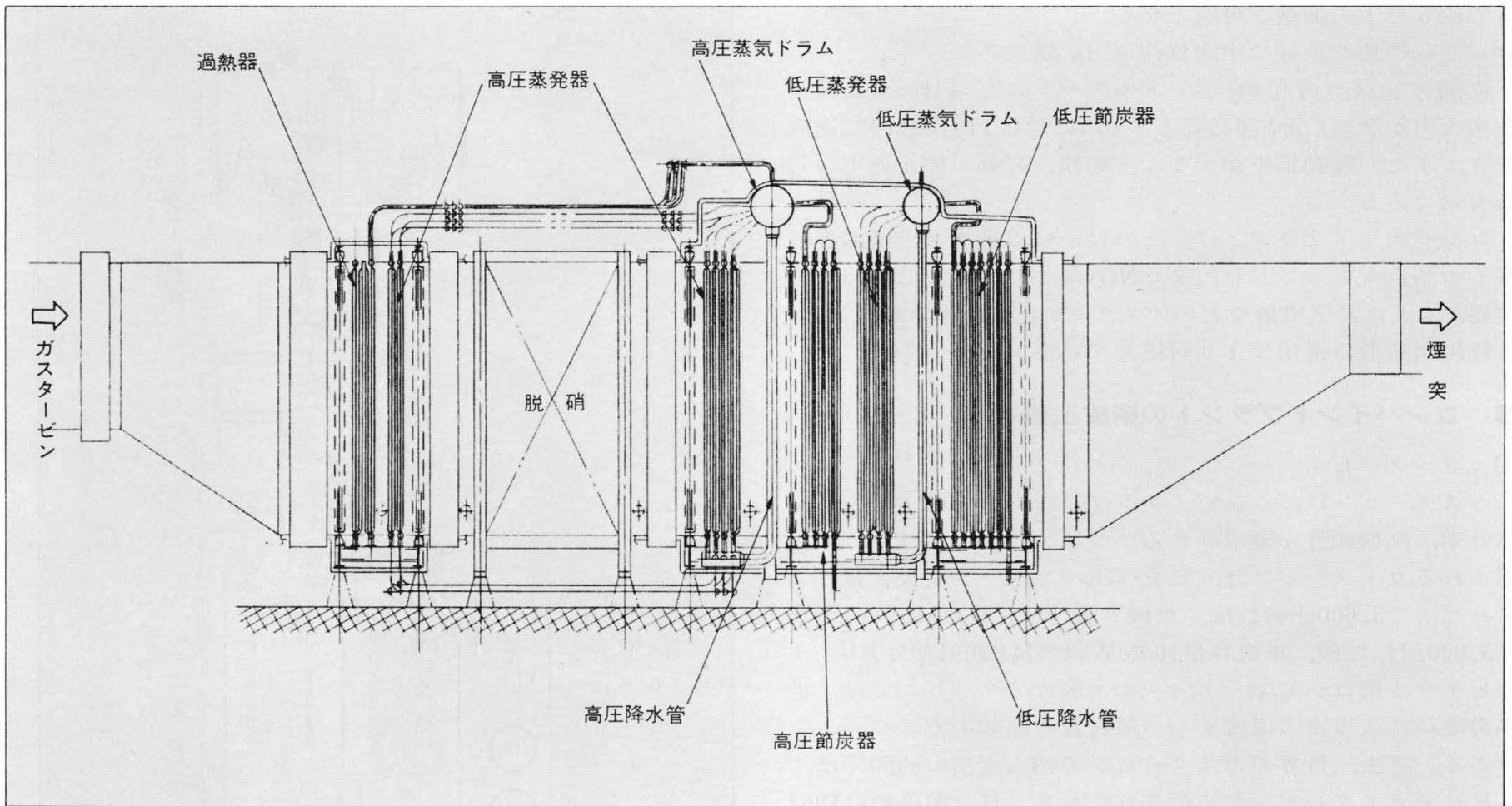


図4 横形自然循環式排熱回収熱交換器 排熱回収熱交換器には、他に縦形強制循環方式があり、両方式共コンバインドプラント用機器として利用される。

実績をもつ信頼性の高い機種である。一方、LNG、LPGなどガス燃料はガスタービンにとり最適な燃料であり、実績的にも液体燃料に比べ信頼性の高い運転が行なわれている。図3に一軸式コンバインドプラントに使用された場合のガスタービンの断面図を示す。また、環境保全面では、特にNOxの低減対策が重要であるとの認識のもとに、低NOx形燃焼器の開発を工場内の実規模燃焼試験を通じ進めてきている。

(2) HRSG(排熱回収熱交換器)

コンバインドプラントでのHRSGは、ガスタービンと蒸気タービンを結ぶ重要な主機であり、三者の協調をとった計画が必要となる。日立製作所では、日本国有鉄道納めコンバインドプラント用HRSGをはじめ、ガスタービン専用HRSGを10缶近く製作した実績をもち万全の製作態勢を整えている。

排ガスの流れ方向により、横形自然循環方式、縦形強制循環方式の2方式がある。いずれの方式もガスタービンからの大量かつ急激な入熱に対応した構造、強度及び系統容量とすることでコンバインドプラントに適合させることが可能であり、いずれを採用するかはプラントの立地、運用条件に応じて選定する必要がある。

図4に、横形自然循環方式のHRSGの計画例を示す。

(3) 蒸気タービン

コンバインドプラント用蒸気タービンは、主としてガスタービンの排熱の有効利用を図り、特に高頻度起動・停止に適し、しかも在来の火力発電プラント用大容量蒸気タービンと同等の信頼性をもつものとして計画する必要がある。

図3に一軸式コンバインドプラントでの蒸気タービンの断面図を示す。一軸式では、ガスタービン、発電機及び蒸気タービンが一軸に連結されるため、多軸式に比べて構造上、運転制御上、よりいっそう両者の整合性をとった設計が要求される。発電機との間にフレキシブルカップリングを設け、ガスタービンからの伸び差の吸収を図っている。パッケージ化されたガスタービンとレイアウト上での協調を図り、しかも

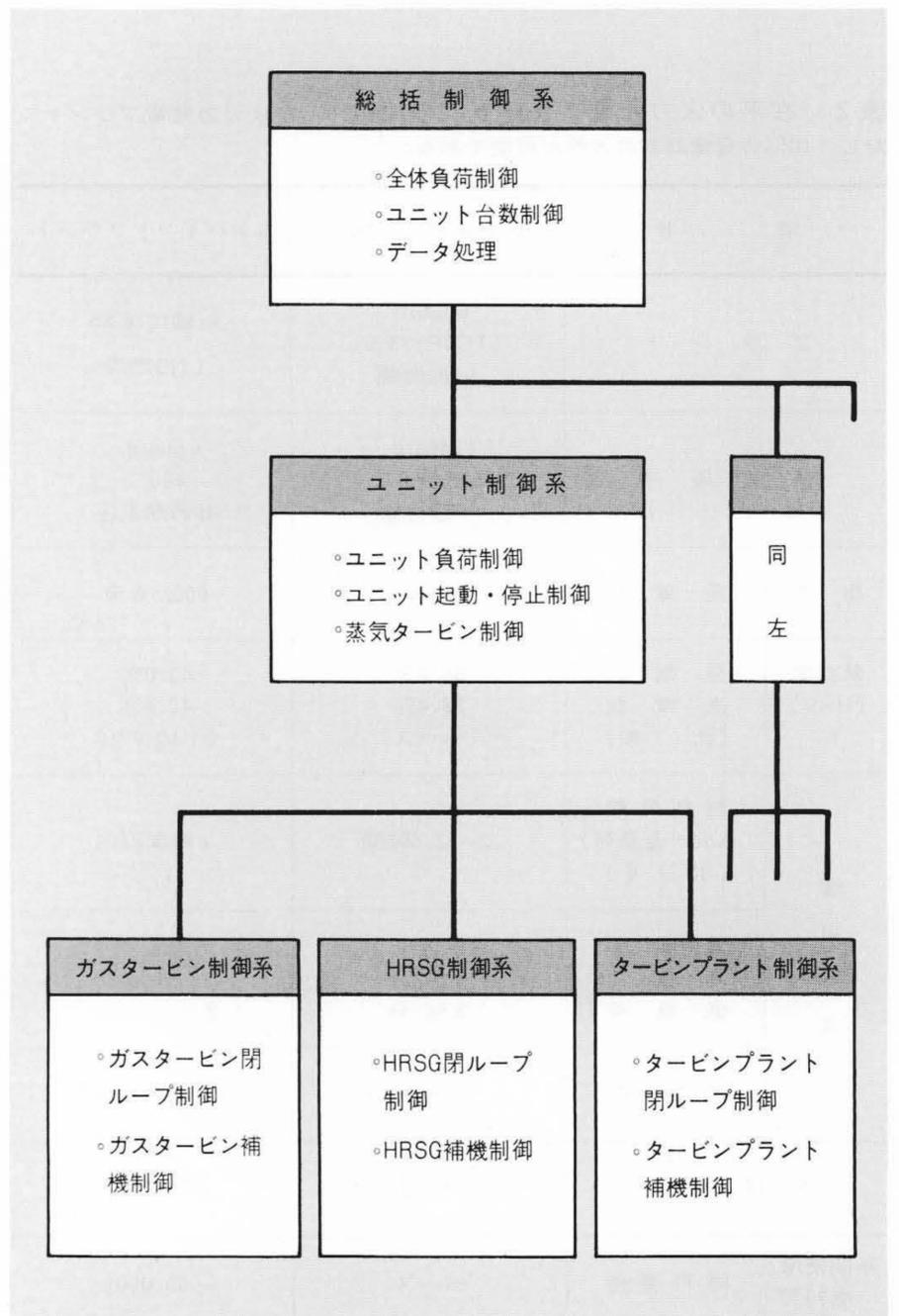


図5 コンバインドプラント制御系全体構成 各制御系が階層的に構成されること、及び各系の主な機能を示す。

発電機ロータの引き抜き点検を容易にするため、小形化、パッケージ化を図っている。また、起動時にガスタービンの回転上昇率がそのまま蒸気タービンに適用されることになるため、ロータ径、形状を適切に選定し、ロータ熱応力の低減を図っている。その他、ガスタービンの排熱の有効利用上、蒸気条件は完全変圧、変温運転となり、これに対処した構造などの工夫もなされている。

(4) 制御装置

複数台の一軸コンバインドプラント用制御装置の全体構成を図5に示す。制御装置の構成として各機器の制御系、ユニット全体の制御系、ユニットを総括する制御系といった階層

構成をとっている。通常、一つのプラントは複数台のガスタービンで構成されるため、全体の負荷要求に対して、全体的な効率が最大となるように各ガスタービンの負荷配分や起動・停止といった台数制御を、総括制御系で行なう点が従来の火力と大きく相違している。これに伴い各機器の起動・停止操作もすべて自動化を行ない、ワンタッチで起動・停止を可能としている。また、各ユニットごとに独立した運転も可能にするため、それぞれ独立の制御盤や制御装置を設けており、全体的に制御機器の量は従来の火力よりも多くなっている。一方、コンバインドプラントは新しい構成のプラントであるため、運転や制御の妥当性を設計段階で確認しておく必要が

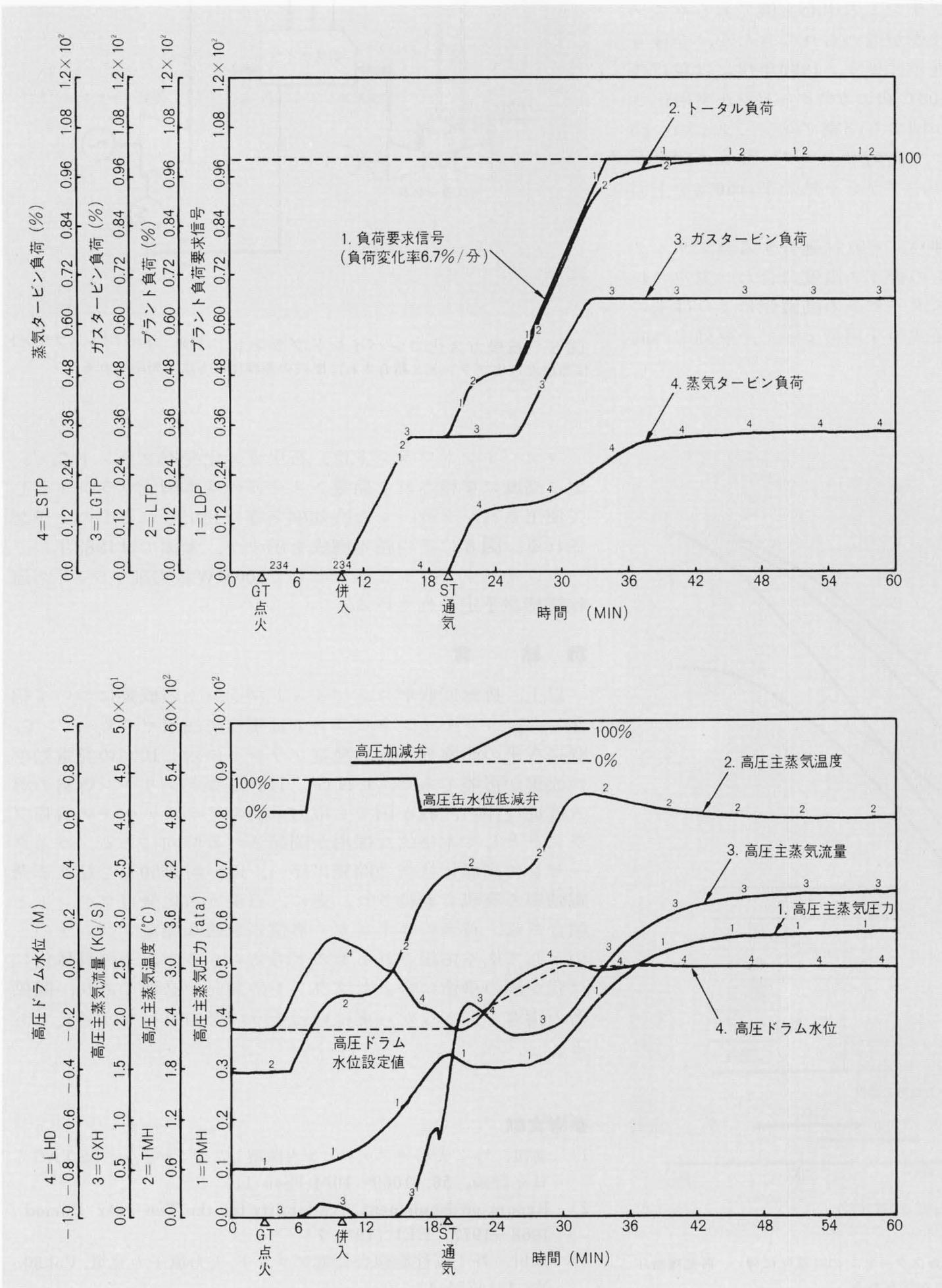


図6 ホットスタート起動特性 一軸コンバインドプラントの起動特性をシミュレーションした結果を示す。

ある。このため、プラント特性解析用のシミュレータを開発し、その特性の解析を行なっている。一軸コンバインドプラントのホットスタート特性についてその解析結果の一部を図6に示す。これにより、起動時ガスタービン排熱の急増によるドラム水位の急上昇に対して、設定値の一時的降下や缶水低減弁による対処、及びガスタービン負荷による蒸気温度変化に対しては蒸気タービンの熱応力による制御を行なうといった対策や検証が行なわれている。なおこのシミュレータモデルの妥当性については、日本国有鉄道川崎発電所の運転実績により検証、修正が行なわれ、シミュレーションの信頼性は極めて高いものとする事ができた。

5 今後の発展

排熱回収形コンバインドプラントの中心主機であるガスタービンは、従来から高温化技術が進められてきたが、今後も新材料の開発、冷却技術の進歩により、1990年代には現行の1,100°C級に対し1,400~1,500°C級のガスタービンが実用化されると予測されており、我が国でも国家プロジェクトの一環として「ムーンライト計画」で高効率ガスタービンの開発が進められている。これにより、プラント熱効率は50%を上回ることが期待される。

ガスタービンの高温化に伴い、それに適合する蒸気サイクルは、対応するガスタービンの排ガス温度に合わせ選定される。図7に示すように、ガスタービンの高温化により従来の非再熱複圧式から再熱複数圧式の採用によって、熱効率の向上が図られる。

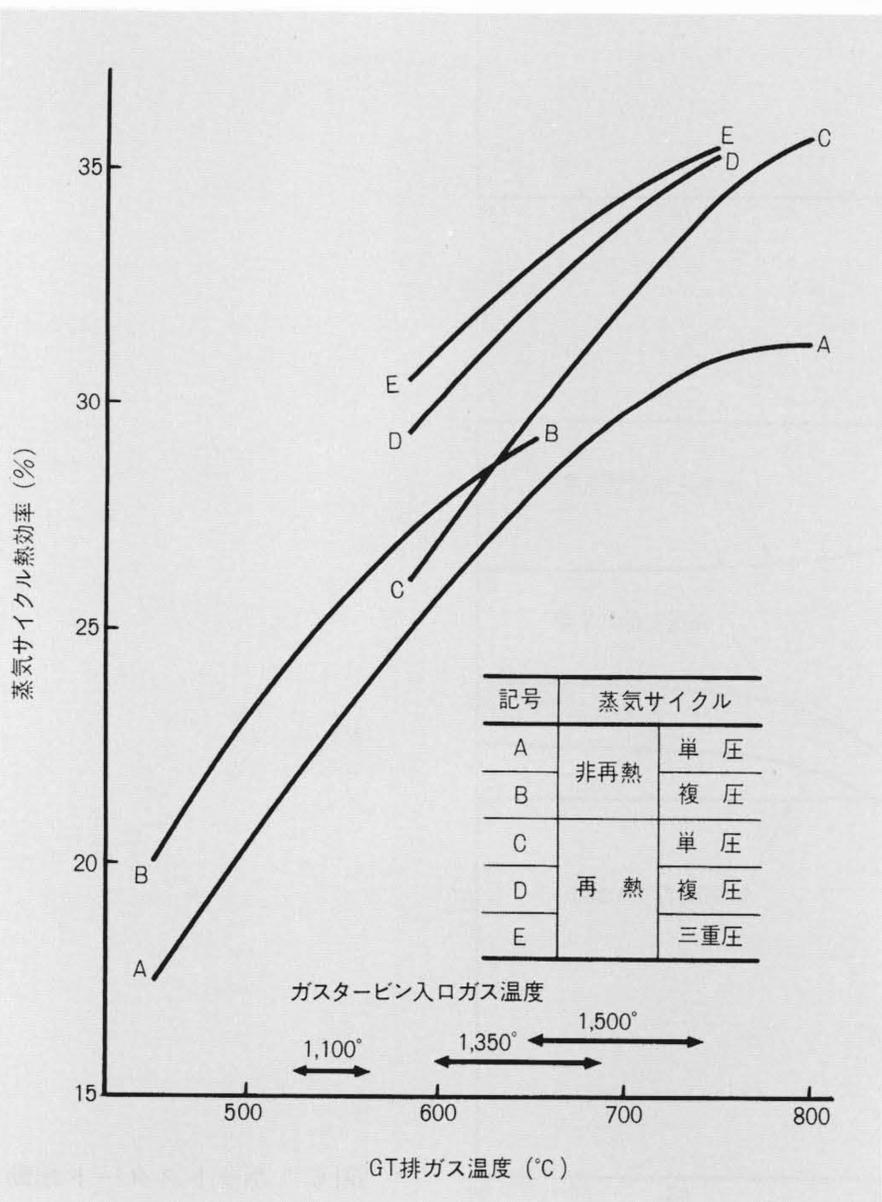


図7 蒸気サイクル熱効率 ガスタービンの高温化に伴い、再熱複数圧サイクルの採用により、熱効率の向上が図られる。

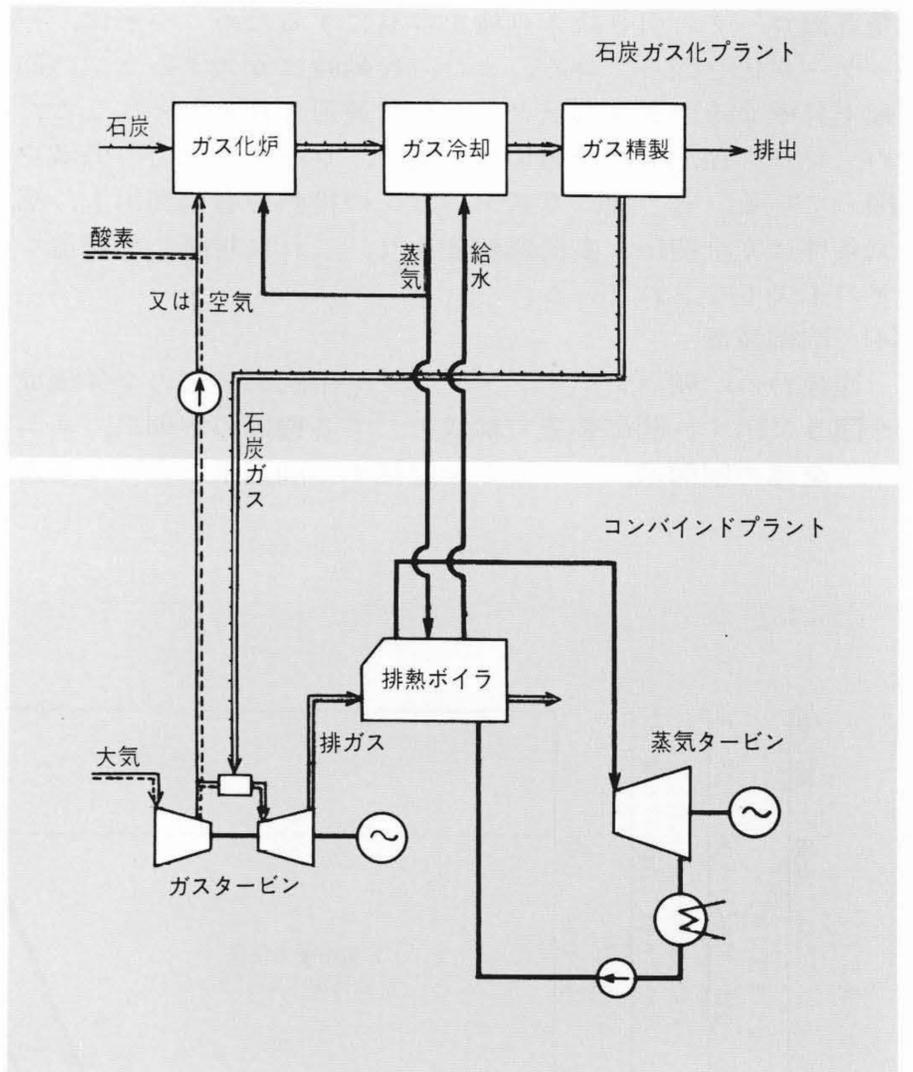


図8 石炭ガス化コンバインドプラント 将来、コンバインドプラントは石炭ガス化プラントと結合され、燃料の多様化にも広く対応される。

コンバインドプラントは、石炭ガス化発電プラントなど、更に高度に集積された発電システムの基本構成プラントとして使用され、クリーンな高効率発電に利用されるものと予想される。図8にその基本構成を示すが、米国では1983年にクールウオータプロジェクトとして100MW級実証プラントの運転開始が予定されている。

6 結 言

以上、排熱回収形コンバインドプラントの概要について紹介した。コンバインドプラントは現在の商用ガスタービンで、既に在来の超臨界圧火力発電プラントに対し10%の発電効率の改善が可能であり、LNG、LPGなどクリーン燃料の導入推進に伴い、我が国でも電力系統のミドル~ベース負荷プラントとして本格的な採用が開始される傾向にある。ガスタービンの高温化技術の開発に伴い、近い将来50%を超える発電効率の実現も期待され、更に、石炭ガス化発電プラントと結合され、将来のエネルギー事情に最適な発電プラントの一つとして広く応用されるものと考えられるが、その具体化には我が国の事情に合ったプラントの開発が必要であり、関係者の指導を仰ぎながら更にいっそうの努力を行なう考えである。

参考文献

- 1) 浦田, 外: 大形ガスタービンを採用したコンバインド(STAG), 日立評論, 56, 1069~1074(昭49-11)
- 2) Report on Equipment Availability for the Ten-year Period-1968~1977, EEI (1979-7)
- 3) 荒川, 外: 高性能複合発電プラント, 火力原子力発電, Vol.30, No.4 (昭54-4)