

大容量コンバインドプラント

Large Capacity Combined Cycle Plants

日立製作所では、既に国産1号機の排熱回収形コンバインドプラント141MWを日本国有鉄道川崎発電所に納入し、昭和56年4月から順調な営業運転を継続している。本プラントは典型的な毎日起動停止運用に供されており、また設備利用率約40%の中間負荷火力であるにもかかわらず、平均熱効率は超臨界圧プラントと同等の実績を保持している。

この設計製作経験に基づき、今後建設される本格的大容量プラントに対するプラントの構成、最適仕様、更に最適運用法について検討を行なった。コンバインドプラントはガスタービンのいっそうの高温化、大容量化の技術開発とあいまって、将来のエネルギー価格上昇に対応する有効な発電方式であり、また石炭ガス化発電へも拡大発展する重要な技術である。

荒川忠男* Tadao Arakawa
 花岡 浩* Hiroshi Hanaoka
 星野和貞** Kazusada Hoshino

1 緒 言

火力発電プラントの高効率化は発電業界での一貫した目標であり、これまでもあらゆる努力が払われてきた。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もこの高効率化を図る技術開発のひとつであり、米国及び欧州では、既に1970年代前半から商用に供され始め、現在では世界で合計約2,000万kWの容量に達している。

我が国では、ガスタービンはピーク用、あるいは非常用の設備として全設備容量の約1%しか建設されてきていなかったが、昭和56年4月、国内最初の排熱回収形コンバインドプラントとして日立製作所が納入した日本国有鉄道川崎発電所1号機141MWが商業運転を開始した¹⁾。更に米国などでのコンバインドプラントの信頼性が長期間の運転実績により十分に評価されるに至ったこと、入口ガス温度が1,100℃クラスの高効率ガスタービンの実現により、コンバインドプラントの効率が超臨界圧火力プラントに比べ将来約10%程度向上させられること、またLNG(液化天然ガス)、LPG(液化石油ガス)などのガスタービンに適したクリーンな燃料の導入が推進されたことなどを背景に、我が国でも500~1,000MWの大容量プラントの建設が具体化してきている²⁾。

2 コンバインドプラントの運転実績

米国での代表的な天然ガス燃焼のコンバインドプラントであるワートン発電所、及びアナダルコ発電所では各年間7,000~8,000時間運転されており、既に従来形の火力プラントと同等又はそれ以上に運用されている³⁾。

また、川崎発電所のコンバインドプラントは100MWガスタービン1台と44MW蒸気タービン1台から構成されており、毎日起動停止、年間運転時間が約5,000時間の典型的な中間負荷火力であるが、図1に示すように順調に運転を継続している。

図2に営業運動を開始してからの運転性能の推移を示す。同図でプラント出力が夏季低く、冬季高い傾向となっているのは、ガスタービンは大気温度が低いほうが高出力となる特性に加え、蒸気タービン出力も海水温度低による復水器真空度の変化の影響を受けるためである。また、発電端熱効率の推移からも、毎日起動停止を繰り返しているにもかかわらず、

運転後の性能劣化もなく良好な運転を続けていることが理解される。図3には、本コンバインドプラントと国内事業用火力プラントの利用率及び年間平均送電端熱効率(昭和55年)の比較を示すが、本プラントは設備利用率約40%の中間負荷火力として運用され、ガスタービンは入口ガス温度が1,000℃級にもかかわらず年平均熱効率は超臨界圧火力プラントと同等又はそれ以上の実績を挙げていることが分かる。

また昭和56年4月の営業運転開始以来、昭和57年6月までの累積起動回数は384回に達し、その内訳はホットスタート357回、ウォームスタート16回、コールドスタート11回となっている。

プラント起動は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全負荷まで電子計算機により自動的に行なわれており、特にホットスタートでは、ガスタービン起動から全負荷まで55分の短時間で実動している。

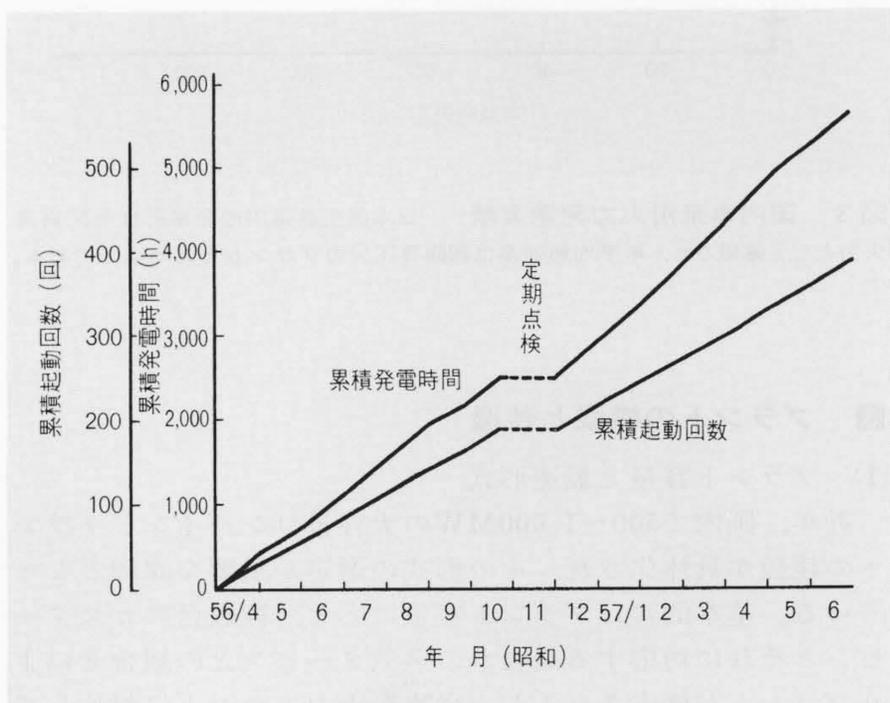


図1 日本国有鉄道川崎発電所の運転実績 日本国有鉄道川崎発電所は、昭和56年4月の営業運転開始以来、順調に運転が継続されている。

* 日立製作所電力事業部 ** 日立製作所日立工場

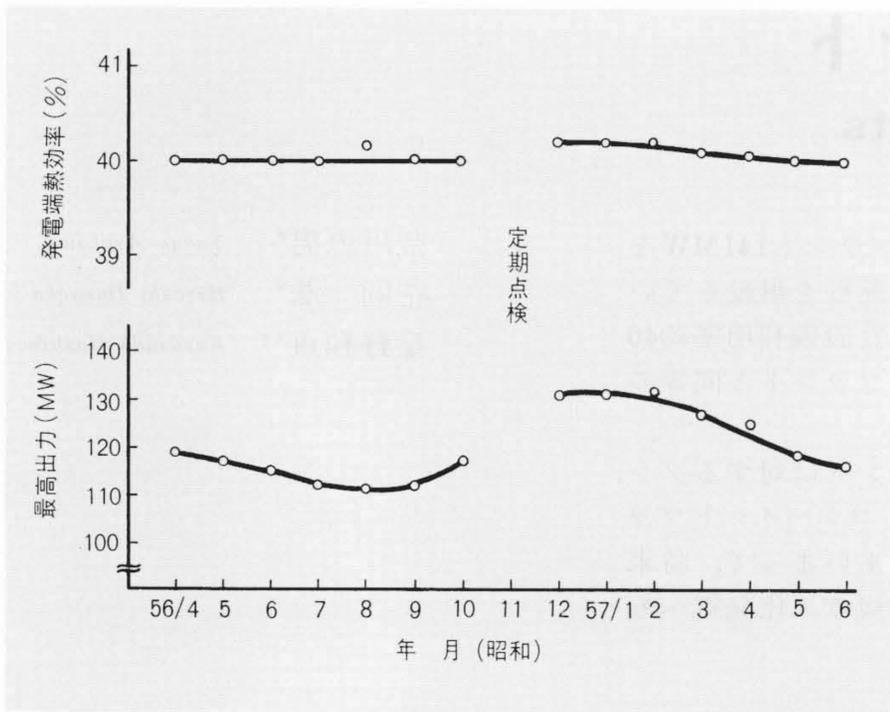


図2 日本国有鉄道川崎発電所の運転性能の推移 ガスタービンはベース負荷運用であるが、発電端熱効率は40%以上を維持している。

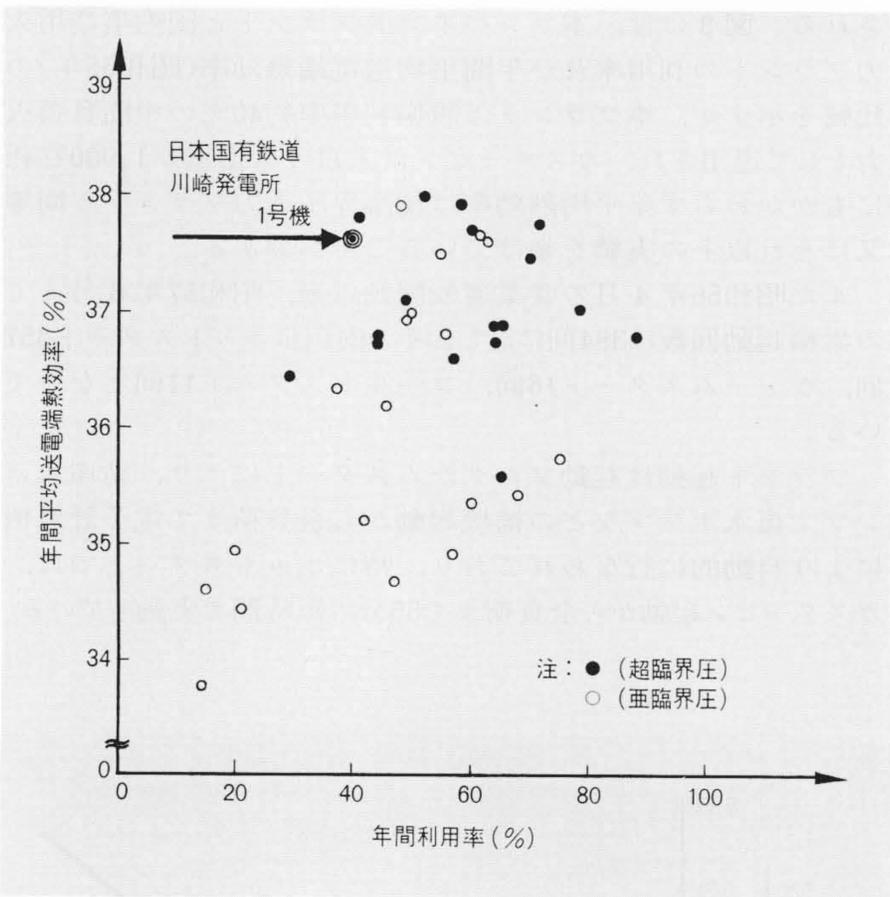


図3 国内事業用火力発電実績 日本国有鉄道川崎発電所は中間負荷火力として運用され、年平均熱効率は超臨界圧火力プラントと同等以上である。

3 プラントの構成と特徴

(1) プラント容量と最適形式

近年、国内で500~1,000MWの大容量コンバインドプラントの建設が具体化され、その形式の選定が重要な課題となっている。基本的にはプラント容量に応じ、複数台のガスタービンとそれに対応する幾台かの蒸気タービンとの組合せによりプラントが構成されるが、従来形火力プラントに対比して特異な点はガスタービンの大気温度特性に応じて、コンバインド出力も変化することである。表1に示した日立-GE形ガスタービンの場合、図4に示すようなプラント出力が可能であるが、同図中の出力幅は大気温度0~30℃に対応するものであり、コンバインドプラントとしてどの大気温度での出力

表1 日立-GEガスタービンの主要仕様(ベース負荷, ISO基準) 上記は天然ガス燃焼で、標準パッケージ形の吸気及び排気損失を考慮した性能を示す(熱効率は低位発熱量基準)。

形 式	F 6 B	F 7 E	F 9 E
出 力 (kW)	36,630	76,500	108,800
熱 効 率 (%)	30.6	31.9	31.7
第1段動翼入口ガス温度(℃)	1,104	1,104	1,085
排 ガ ス 温 度 (℃)	549	538	522
周 波 数 (Hz)	50/60	60	50

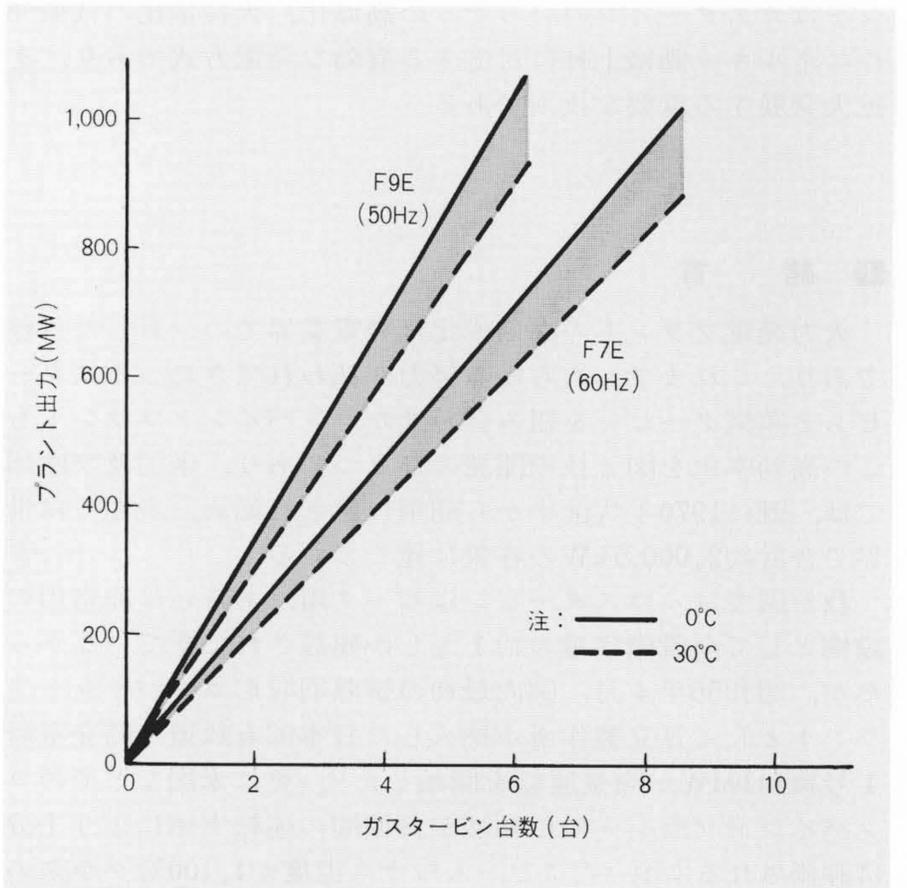


図4 ガスタービン台数とコンバインドプラントの出力 プラント容量に応じ、複数台のガスタービンとそれに対応する幾台かの蒸気タービンによりプラントが構成される。

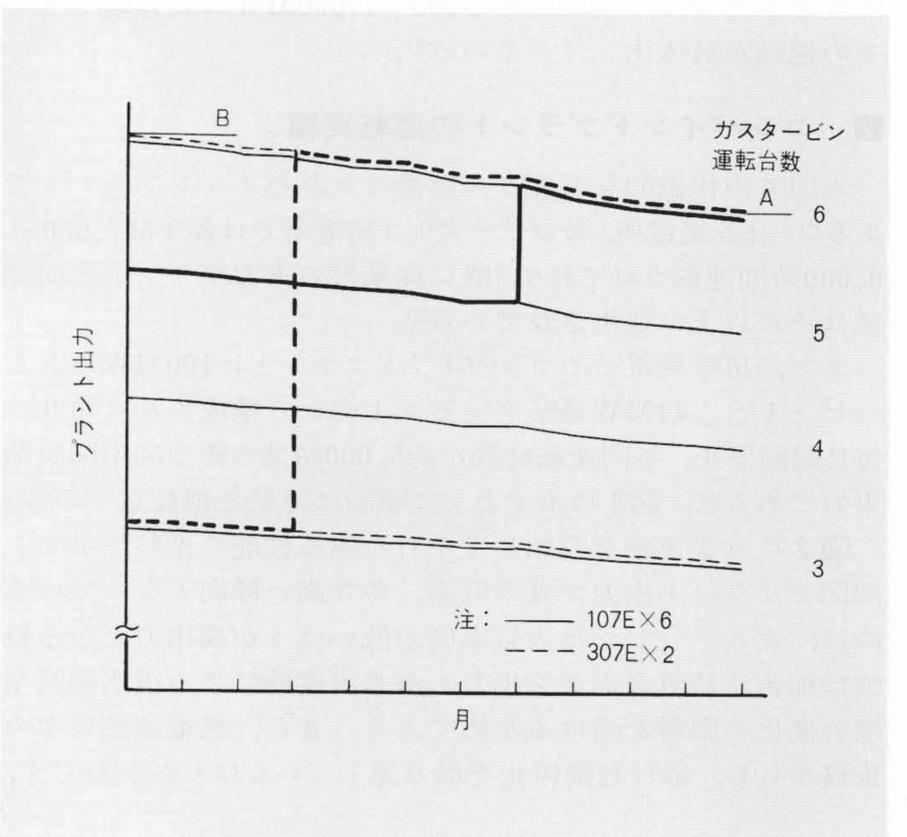


図5 年間出力曲線 定期点検を考慮し、太線で示した範囲が最大出力曲線となる。

を定格とするかが問題となる。コンバインドプラントについては図5にその一例を示すように、各月の可能最大出力を平均大気温度の低い月から高い月に順次並べた年最大出力曲線が作成される。ここで夏季、大気温度の高いときの出力を定格出力とした場合(同図のA点)、コンバインドプラントの大気温度特性から、それ以下の大気温度には部分負荷運転を行なう必要があり、プラント容量としては余裕をもったものとなる。また逆に、大気温度の低い冬季を定格出力とした場合(同図のB点)、それ以上の大気温度時に定格出力を確保できなくなるが、ガスタービンをベース負荷で運転できるため、一般に効率の良い運用が可能となる。更に定期点検を考慮した年最大出力曲線はプラント構成により異なり、一軸形(107E)、多軸形(307E)の例では同図に示すそれぞれ太線のようになる。

年間平均熱効率の向上という観点から一軸形と多軸形コンバインドプラントの比較を行なうと、

- (a) コンバインドプラントをどのような位置付けで運用するのかによって、年間平均効率は左右される。よって、ベースロード用として設置するのであれば、多軸形のほうに有利性が出てくる。
- (b) 定期点検の影響を考慮すると、一軸形はプラント構成が多数ユニットから成り、基本的に定期点検は1ユニットごとに行なえるため、年間を通じてプラント負荷を確保することができるなどの傾向があり、これら要因の影響を十分考慮した上でコンバインドプラントの最適形式を選定する必要がある。

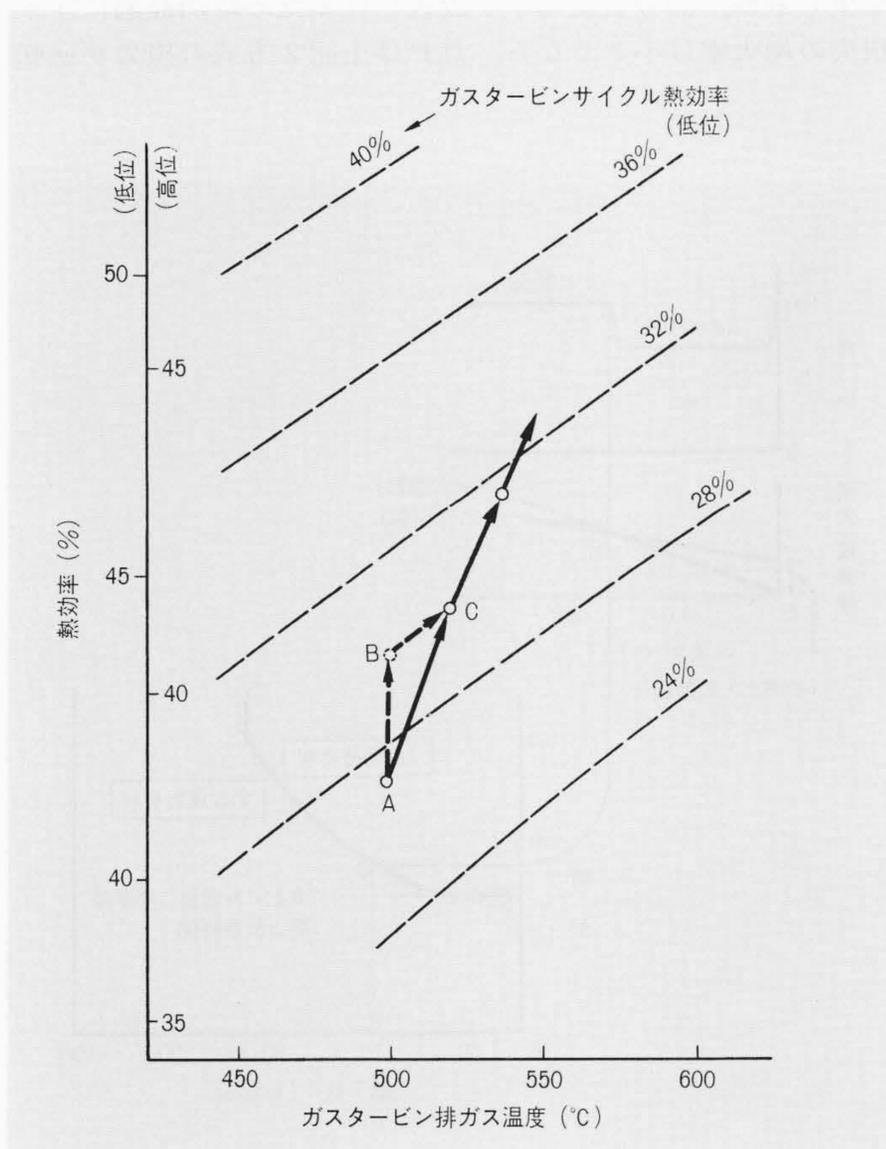


図6 コンバインドプラントの熱効率向上 ガスタービン燃焼温度の上昇により、ガスタービン効率が向上するとともに、排ガス温度の上昇によりボトムサイクルの熱効率が向上する。

(2) 熱効率と機器構成

コンバインドプラントの熱効率は、ガスタービンの熱効率とボトムサイクルの熱効率によって決定され、これは一般にガスタービンの燃焼温度に大きく影響を受ける。図6にコンバインドプラントの熱効率の向上を示すが、燃焼温度の上昇によりガスタービン効率がAからBへ向上すると同時に、排ガス温度の上昇によりボトムサイクルの熱効率がBからCへ向上し、トータルとしてコンバインドプラントの熱効率はAからCへ向上することになる。

更に、ボトムサイクルの熱効率は、排熱回収熱交換器と蒸気タービンサイクルの構成によっても異なり、最適なサイクルの選定はガスタービン排ガス温度の影響を受ける。日立製作所でも、非再熱-再熱及び単圧-混圧-三重圧などのサイクルについての検討が行なわれているが⁴⁾、現状のガスタービン排ガス温度では非再熱形で単圧もしくは混圧形のプラント構成が望ましく、現在、国内で計画が進められているコンバインドプラントでも上記形式についての検討が行なわれている。

実用機に関しては熱効率とともに、信頼性及び運用性をも十分考慮した設計を行なう必要があり、大容量コンバインドプラントでは複数台のガスタービンが設置されるため、熱効率が著しく損われない範囲でプラント構成をよりシンプルにすることが望ましく、熱効率の経済性とプラント建設費のバランスを考えた総合評価が必要となる。

表2に非再熱形で単圧、混圧、フラッシュ混圧の各方式の比較を示すが、それぞれ下記のような特徴をもっている。

(a) 単圧形

熱効率は他の方式に比べやや劣るが、系統構成が最もシンプルで米国GE(General Electric)社での実績も最も多い。オイルショック前に計画されたものが多い。

(b) 混圧形

低圧蒸発器で発生した蒸気をタービン低圧部に導入するため、系統構成はやや複雑となるが、熱効率は最も高い。表2には脱気器を設置せず、復水器で脱気を行なう場合を示している。

(c) フラッシュ混圧形

低圧蒸発器は設置されないが、低圧節炭器からの熱水をフラッシュタンクに導いて低圧蒸気を発生させ、タービン低圧部に蒸気を導入する。脱気器が設置されフラッシュタンクでの余剰発生蒸気は脱気器で熱回収される。系統的には脱気器非設置形も考えられ、系統のシンプルさ、熱効率共(a)、(b)の中間に位置するプラントである。

4 運転制御

(1) プラントの負荷運用

原子力発電の増大、更に石炭火力発電の導入に伴って、石油及びLNG火力発電はますます需給調整用としての任務が高まってくる。大容量コンバインドプラントも中間負荷火力に位置付けされるので、全負荷範囲にわたる高効率、高経済性の実現が重要な課題となってくる。この点で最も問題となるのはガスタービンの運転台数の切替であるが、

- (a) 負荷変化要求に対応する運転性の面では全台運転が好ましい。
- (b) 高効率運転のためには負荷要求に対応した最小台数運転が好ましい。

という相反する要因のバランスを取る必要が生ずる。(b)の台数切替では、起動停止に伴う熱損失のほかにも、ガスタービ

表2 単圧プラントと混圧プラントの比較 最適形式の選定は、熱効率の経済性とプラント建設費のバランスを考えた総合評価が必要となる。

系 統 構 成	単 圧	混 圧	フラッシュ混圧
	復水器脱気	復水器脱気	脱気・混圧用加熱器
性能	ベース	+3.0%	+1.3%
GE社 実績	ワートン (407B) スターリントン (207B) サンタン (107B) フェニックス (107C) アナダルコ (107E)	富津火力発電所 (109E)	ベエイエリア (407E) ストーブルック (307E) ルサーヌバレー (507E)

注：略語説明 ST(蒸気タービン), HRSG(排熱回収熱交換器), DTR(脱気器), FT(フラッシュタンク), GE社(米国General Electric社)
上図中、HRSGは横形で表現しているが、GE社では立形を標準としている。

ンの寿命消費量増加に伴う保守費の増加も経済性の評価に加える必要が出てくる。図7はこの間の相関関係を負荷運用のニーズに対応づけて図示したものである。

具体的に日間負荷変化を考えてみると、昼休み時のように一時的に負荷降下する場合に、その降下負荷持続時間との関連でガスタービン運転台数を切り替えるべきか否か、また夜間の低電力需要に対してコンバインドプラントを他に優先して停止すべきか、最少台数で運転を継続すべきかが検討課題となる。前者の場合は、部分負荷の低効率による損失及び起動停止損失による燃料コスト差、所要電力コスト差、保守費の差などについて総合的な経済評価を行なう必要がある。図8は一軸が6台あるプラントで、プラント負荷が定格負荷から一時的に70%まで負荷降下した場合の計算例を示すものである。70%負荷では6台と5台のいずれでも運転可能であるが、

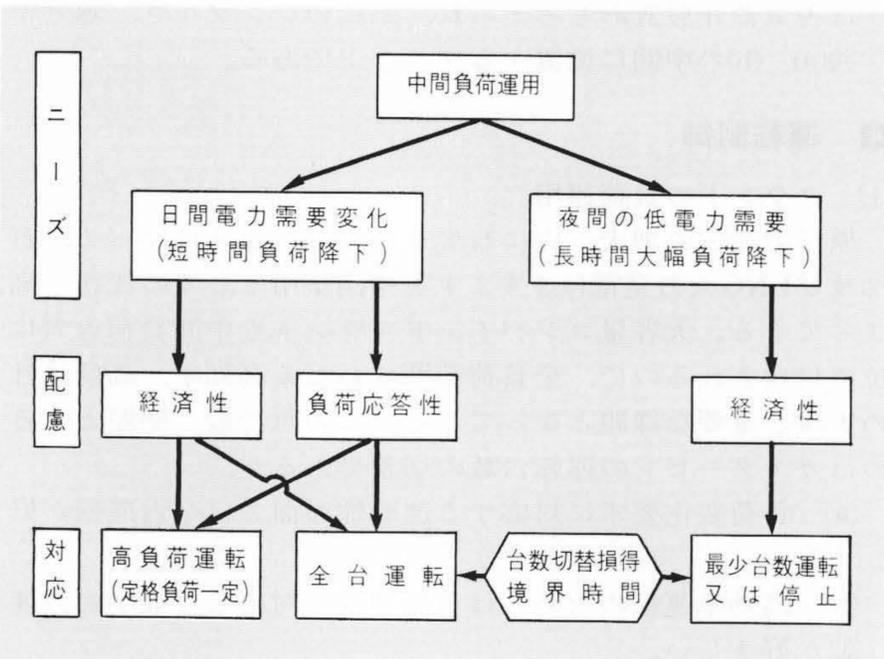


図7 負荷運用上のニーズと対応 コンバインドプラントの運用面で、ガスタービンの運転台数の切替が重要な問題となる。

6台のままの運転では各台の効率低下が大きく、損失は線Aで示すように時間経過とともに急速に損失が大きくなる。一方、1台を停止・起動させ、5台を運転継続させる1台切替方式の場合は、線Bで示すように、1台分の停止・起動損失が生じるが、部分負荷効率が改善されるため時間経過に伴う損失の増大率は小さくなる。点Pは上記2方式の損失が逆転

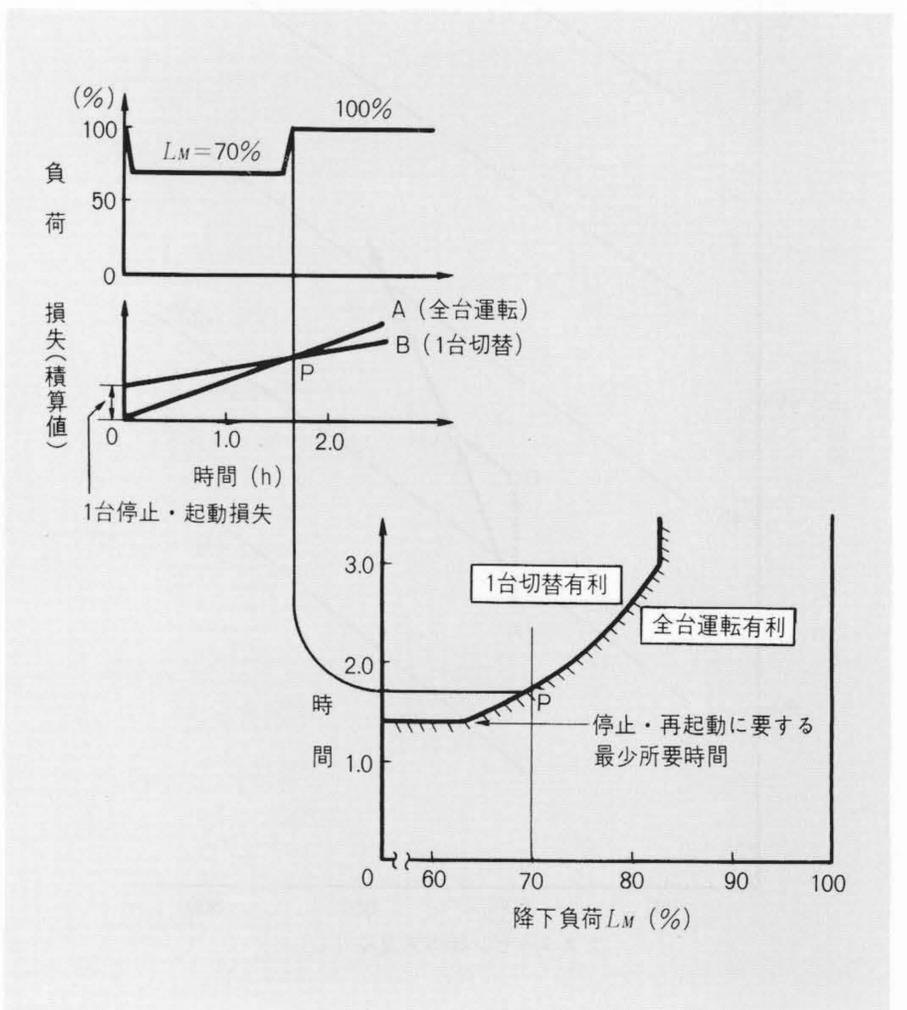


図8 負荷降下パターンと台数切替判定方法 負荷降下パターンに対応して、最適な台数切替運用法が存在する。

する点であり、負荷降下後の継続時間が短ければ6台運転、長ければ1台切替が経済的となる。同図の右側は降下負荷 L_M をパラメータにとったもので、 L_M が大きいほど損失が逆転する時間は長くなることを示す。このことから負荷降下パターンに対応して、最適な台数切替運用が存在することが分かるが、ガスタービンの停止と再起動に約1.5時間要することも考慮すると、昼休み時程度の短時間の負荷降下であれば全台運転を継続したほうが良いといえる。

多軸形の場合は一軸形とは台数切替損失、部分負荷効率が相違するが、台数切替が有利となる境界時間は一軸形の場合と大差ない結果を得ている。

夜間の低電力需要に対しては、上記結果からも台数切替により要求負荷に対応した最少台数運転とするのが良いといえる。更に、コンバインドプラントと同容量のミドル火力機について、一方は停止、他方は最低負荷を保つケースを想定して経済比較を試みると、8時間停止程度であればコンバインドプラントを停止させたほうが有利との結果を得た。これは熱容量の大きな火力機の起動停止損失に比べて、プラント容量が同程度のコンバインドプラントの起動停止損失は $\frac{1}{3}$ と非常に小さいためである。このことからコンバインドプラントは、経済性の面からも毎日起動停止運用に適したプラントであるといえる。

(2) 制御システム

大容量コンバインドプラントの制御システムの構成に際しては、高効率、複数主機というプラントの特徴を配慮したシステムとするために、運用性の面では、

- (a) 小人数運転員での運転を可能とする完全自動化
- (b) プラント高効率性を十分に発揮させる最適台数制御を採用するほかに、中央操作盤の思いきった縮小化を図る必要がある。すなわち、従来火力の考えで監視操作器具を取り付けると、盤幅が1プラント当たり15~20mにも及んでしまうので、
 - (a) 小容量主機であるための制限条件の緩和や系統構成の単純化を考慮した計測項目、及び専用指示計、記録計の厳選
 - (b) デジタル装置による選択表示の採用
 などにより中央操作盤を火力プラント並みの寸法に抑える必要がある。

また、信頼性、保守性の面では各軸の故障、補修が他の軸に影響を与えないことが重要であり、各軸の監視制御は自律性をもった軸制御装置が行ない、プラント全体としての総括監視、台数制御などの最適化は総括計算機が行なうシステム構成として、高信頼性を確保するのが合理的である。

また主機単位に分散配置されたシステム構成に対し、中央設置の制御装置と現場設置の装置間的高速シリアル伝送方式を採用し、ケーブル量と布設工数の削減を図ることも本プラントに適した方法である。

更に、主機のブロック構成化に対応し、電気系統、制御装置のブロック構成を運用性、信頼性、経済性の面から検討してゆくことも大容量コンバインドプラントの課題の一つである。

5 ガスタービンの新技術

(1) ガスタービンの大容量・高温化

ガスタービンはコンバインドプラントの主機であり、プラント効率に与える影響もプラント構成機器中で最大である。図9に日立-GEガスタービン大容量化の推移を示す。大容量化に当たっては、設計的に相似則をできる限り採用しており、

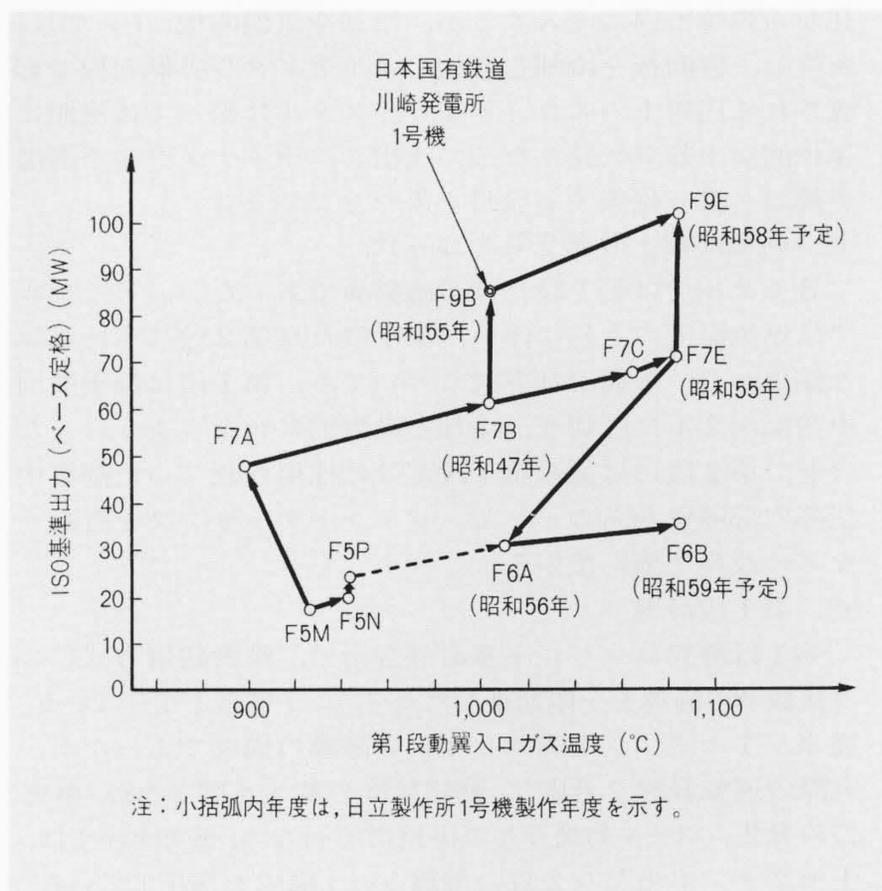


図9 日立-GEガスタービン大容量化の推移 F9ガスタービンは、F7ガスタービンをスケールアップしたものである。

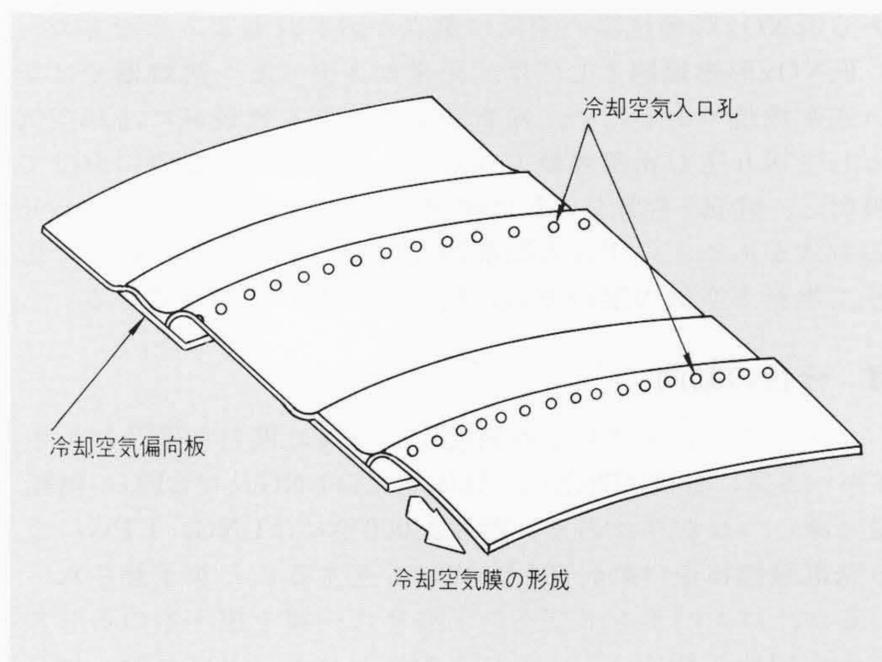


図10 スロット冷却形燃焼器部分断面図 スロット冷却形燃焼器の採用により、燃焼器ライナのメタル温度の大幅な低減が可能となった。

確立された技術に基づいた信頼性の高いガスタービンを目指している。ちなみに、50Hz地区用のF9ガスタービンは、60Hz地区用として数多くの実績をもつF7ガスタービンを1.2のスケール比でスケールアップしたものである。

F7及びF9ガスタービンの最新Eモデルには、過去の豊富な経験から、次のような設計改良が施されており、効率及び信頼性の両面の向上が図られ、本格的コンバインドサイクルプラントの実現を促すこととなった。

(a) スロット冷却形燃焼器

従来のルーバ冷却形に代わり、図10に示すスロット冷却形の採用により、燃焼器ライナのメタル温度を大幅に低減することが可能となり、同一燃料、同一燃焼温度条件で、ピークメタル温度は約100°C低減された。圧縮機出口からの冷却空気は、燃焼器1個当たり約4,000個ある冷却空気入口

孔から燃焼器内に流入するが、冷却空気偏向板(リング)に衝突し、偏向板を冷却した後、ライナメタルと偏向板で形成される円周上のスロットより、メタルに沿って後流側に連続的な冷却空気膜となって流出し、ライナメタルを高温燃焼ガスから保護する役目を果たしている。

(b) 高温動翼・静翼空気冷却方式

Bモデルでは第1段だけ空冷動翼であったが、Eモデルでは燃焼温度の上昇に伴い、第1段及び第2段に空冷動翼を採用した。静翼冷却方式についても、第1段は静翼断面中空部を2室に区切り、冷却を効果的に行なうようにしたほか、第2段には従来第1段だけに採用されていた静翼中空部内部隔壁からのインピンジメントクーリングを行なうなどの改良を施している。

(c) 第1段静翼

第1段静翼はコバルト基耐熱合金で、精密鑄造方式により複数個の静翼を一体鑄造したセグメント構造となっている。従来、1セグメント当たり4枚の静翼の構成であったが、実際の運転経験を考慮し、補修頻度の減少を図るため、熱応力の発生、シール効果などの再検討を行ない、Eモデルでは、1セグメント当たり2枚の静翼という構成を採用している。

(2) ガスタービン排気のNOx(窒素酸化物)の低減

NOx低減の方法として、蒸気又は水を燃焼器内に直接噴霧し、高温燃焼部を冷却する湿式法は、従来より実績面で先行しているが、熱効率の低下という欠点があるため、乾式法である低NOx形燃焼器の開発に重点がおかれるようになった。

低NOx形燃焼器としては、元来ガスタービン燃焼器では空気過剰燃焼であるため、希釈空気の一部を燃焼域に冷却空気として送り込む希薄燃焼方式、あるいは燃料を2段に分けて噴射し、希薄-希薄ないしは過密-希薄の2段燃焼を行なわせる方式がある。いずれも局部的高温燃焼部の除去が目的であり、燃料と空気の混合方式に特別の工夫がなされている。

6 今後の動向

コンバインドプラントの発展は、今後の電力事情及びエネルギー事情に密接に関連し、具体的にはLNG及びLPGの供給量と深いつながりがある。西暦2,000年にはLNG、LPGによる発電設備容量は約4,700万kWにも達することが予想されているが、コンバインドプラントもその一翼を担うものとして拡大が期待されている。これまでコンバインドプラントは高度なシステム技術をもっているため、その建設は先進国に限られていたが、最近になってその他の諸外国でも採用への気運が高まり、立地条件に柔軟に適應できるシステムの開発が必要になってきた。

更に、長期的なエネルギー源として石炭が注目されているが、その転換利用として石炭ガス化発電の技術開発が内外で鋭意進められている。LNGによるコンバインドプラントによって確立された技術は、この石炭ガス化と組み合わせたコンバインドサイクルとして引き継がれ、更にいっそうの高度システムに発展してゆくものと考えられる。

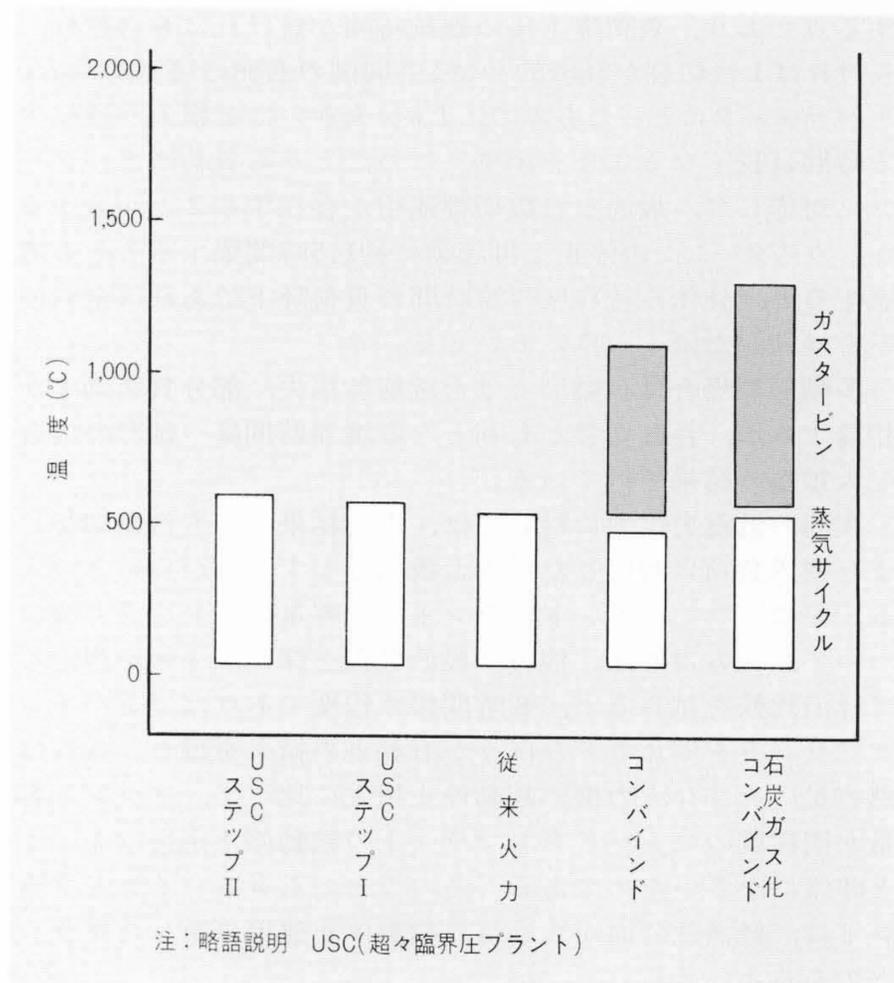


図11 今後の火力発電プラントの方向 今後の火力発電プラントでは、超々臨界圧プラントとコンバインドプラントが高効率化を目指す。

7 結 言

エネルギー価格の上昇、LNG、LPGなどクリーン燃料の導入推進を背景に、コンバインドプラントの本格的な採用が開始されている。この発電方式は、複数のガスタービンと蒸気タービンを組み合わせて大容量化を図るものであり、プラント容量、形式、機器構成の選定に当たっては従来の蒸気火力発電プラントとは異なった考慮が必要となってくる。また運転制御の面でもガスタービン運転台数の最適切替が必要となり、これらの検討結果について紹介した。火力発電プラントの高効率化、エネルギー源多様化への対応が今後いっそう必要となってくるが、図11に示したように蒸気条件の再向上を目指す超々臨界圧プラントの開発と並行して、コンバインドプラントの技術開発は今後の大きな課題となっている。

参考文献

- 1) 浅野：国鉄川崎発電所における複合サイクル発電設備の概要と運転実績，火力原子力発電，33，6，67～79(昭57-6)
- 2) 中村：富津火力1，2号の建設計画，火力原子力発電，33，5，1～13(昭57-5)
- 3) 乾，外：コンバインドプラント，日立評論，63，7，443～448(昭56-7)
- 4) 黒沢，外：コンバインドサイクル，火力原子力発電，32，10，169～177(昭56-10)