

# アドバンスト コンバインド サイクル発電プラント

## Advanced Combined Cycle Power Plants

クリーンな燃料であるLNGを燃料とするコンバインドサイクル発電プラントは、その特長である高い熱効率と優れた運用性および万全な環境対応が評価され、国の内外で建設が活発に行われている。日立製作所では、わが国で最初のコンバインドサイクル発電プラントである東日本旅客鉄道株式会社川崎発電所1号機を昭和56年に納入した実績をもとに、中国電力株式会社柳井発電所および九州電力株式会社新大分発電所の建設を現在推進中である。

さらに平成年度に入って、1,300℃級の高温ガスタービンの実用化により、アドバンスト コンバインド サイクル発電プラントの計画が本格的に開始されており、そのシステム構成および構成機器にさらに新しい技術が採用され、基本計画設計が現在進められている。

野口芳樹\* *Yoshiki Noguchi*

保泉真一\* *Shin'ichi Hoizumi*

重中利則\*\* *Toshinori Shigenaka*

### 1 緒 言

二度にわたる石油危機を契機として、化石燃料の消費節約の社会的要求は発電プラントの効率向上技術の開発を促進してきた。コンバインドサイクル発電プラントは、ガスタービンのブレイトンサイクルと蒸気タービンのランキンサイクルとを組み合わせる原理的に高効率が可能であり、昭和50年代に入って、わが国での大規模電源設備として急速に発展してきた。

日立製作所では、早くからコンバインドサイクル発電プラントの開発に着手し、大容量ガスタービンを用いたわが国初の排熱回収形コンバインドサイクル発電プラントを昭和56年に完成させた。すなわち、東日本旅客鉄道株式会社川崎発電所1号機141 MWである。その後現在までのわが国のコンバインドサイクル発電プラントは、4プラントが運転中で建設中のプラントを合わせると合計発電出力は5,000 MWを超える。

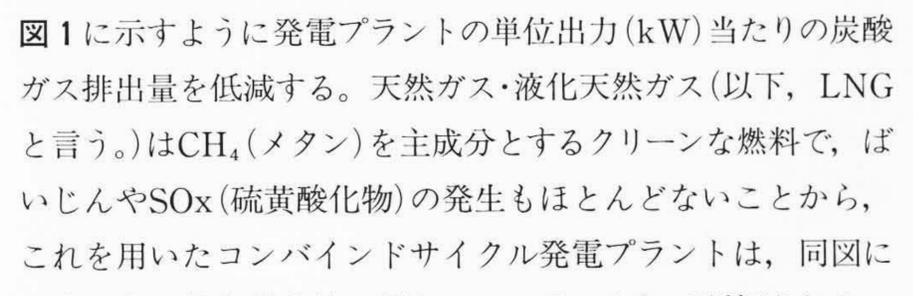
昭和60年代から平成年度に入って、1,300℃級の高温ガスタービンの実用化により、アドバンスト コンバインド サイクル発電プラントの計画が本格的に開始されている。本稿では、その発電プラントの特徴と技術状況を中心に述べる。

### 2 発電プラントの技術動向

発電プラントに対するニーズは、高効率・環境保全・高運用性を高い信頼性で達成することである。

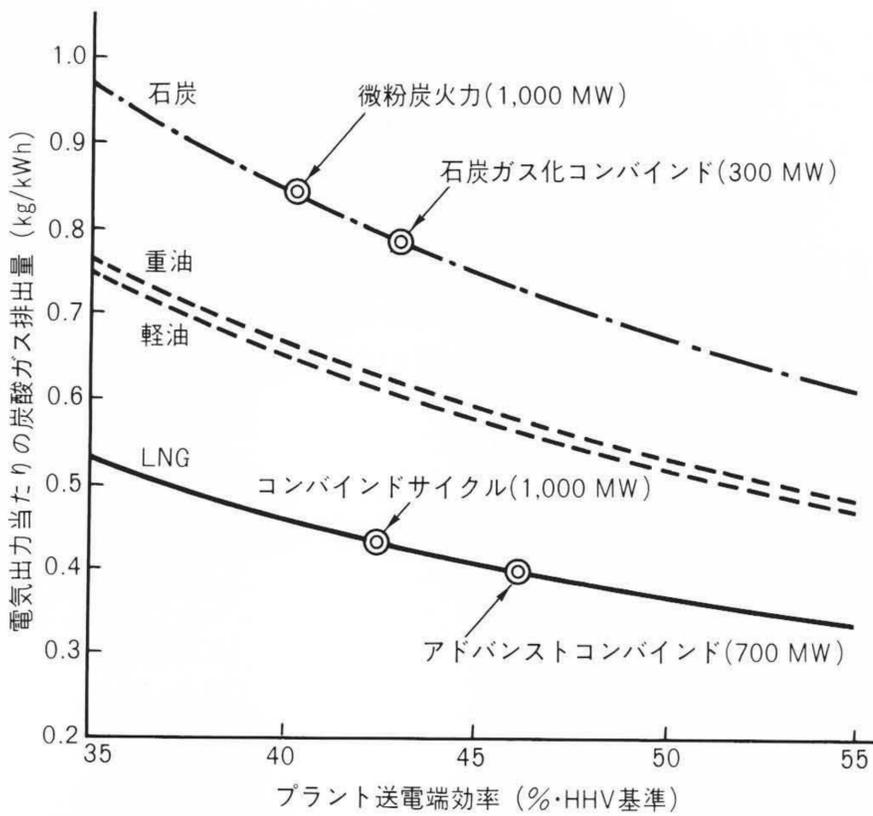
コンバインドサイクル発電プラントは、現在最も熱効率の高い実用化された大容量発電プラントで、現有のガスタービン(1,100℃)を用いた場合でも、発電端熱効率は従来の超臨界

圧ガス燃焼発電プラントに比較して8~10%(相対値)も高い。1,300℃級ガスタービンを用いたアドバンスト コンバインド サイクル発電プラントでは、さらに効率向上がなされ15~20%(相対値)も高い発電端熱効率で計画されている。

高熱効率は最近注目されている広域環境保全に対しても、1に示すように発電プラントの単位出力(kW)当たりの炭酸ガス排出量を低減する。天然ガス・液化天然ガス(以下、LNGと言う。)はCH<sub>4</sub>(メタン)を主成分とするクリーンな燃料で、ばいじんやSO<sub>x</sub>(硫黄酸化物)の発生もほとんどないことから、これを用いたコンバインドサイクル発電プラントは、同図に示すように最も保全性に優れたシステムとして評価される。高効率を達成するためのガスタービンは、高温で燃焼されるため燃焼排ガス中のNO<sub>x</sub>(窒素酸化物)の発生量は増加する傾向にあり、これを抑制する低NO<sub>x</sub>燃焼器の開発は最も重要な開発課題の一つである。水や蒸気を使わない乾式燃焼技術と触媒によるアンモニア接触還元技術との組み合わせによるNO<sub>x</sub>低減の目標値は、年を追うごとに厳しくなっている。

発電用燃料のベストミックス化の動向は、中間負荷火力のニーズを増加させ、DSS(毎日起動・停止)や負荷変化を頻繁に行う運用が要求される。コンバインドサイクル発電プラントは、DSSを行うプラントとしても優れた機能を持っており、東京電力株式会社富津火力発電所2号系列では、ガスタービンと蒸気タービンが直結して共通の発電機を駆動する一軸形コンバインドサイクル発電プラントとして営業運転に入っており、良好な運転実績を得ている。

\* 日立製作所 日立工場 \*\* バブコック日立株式会社 呉工場



注：略語説明 HHV (高位発熱量)

図1 プラント効率向上による炭酸ガス排出抑制の効果 LNGを主燃料とするコンバインドサイクル発電プラントは、環境保全性に優れた発電システムである。

現在、中国電力株式会社柳井発電所1号系列および九州電力株式会社新大分発電所1号系列が、ともに自主技術による一軸形コンバインドサイクル発電プラントとして建設が進められている。

アドバンストコンバインドサイクル発電プラントでは、1,300℃級のガスタービンとシステム技術の最適化によって、時代のニーズに最も適した発電プラントの条件を備えている。

- (1) 発電端熱効率が46~48%と実用システム中で最高
- (2) 乾式低NOx燃焼器による環境排出NOx量の低減
- (3) 一軸単機容量が200~300 MWと中容量火力並み

蒸気タービン・発電機・排熱回収ボイラなどの主要機器および制御装置を国産化することによって、信頼性の高い発電プラントとして実用化を目指している。

### 3 アドバンストコンバインドサイクル発電プラントの計画

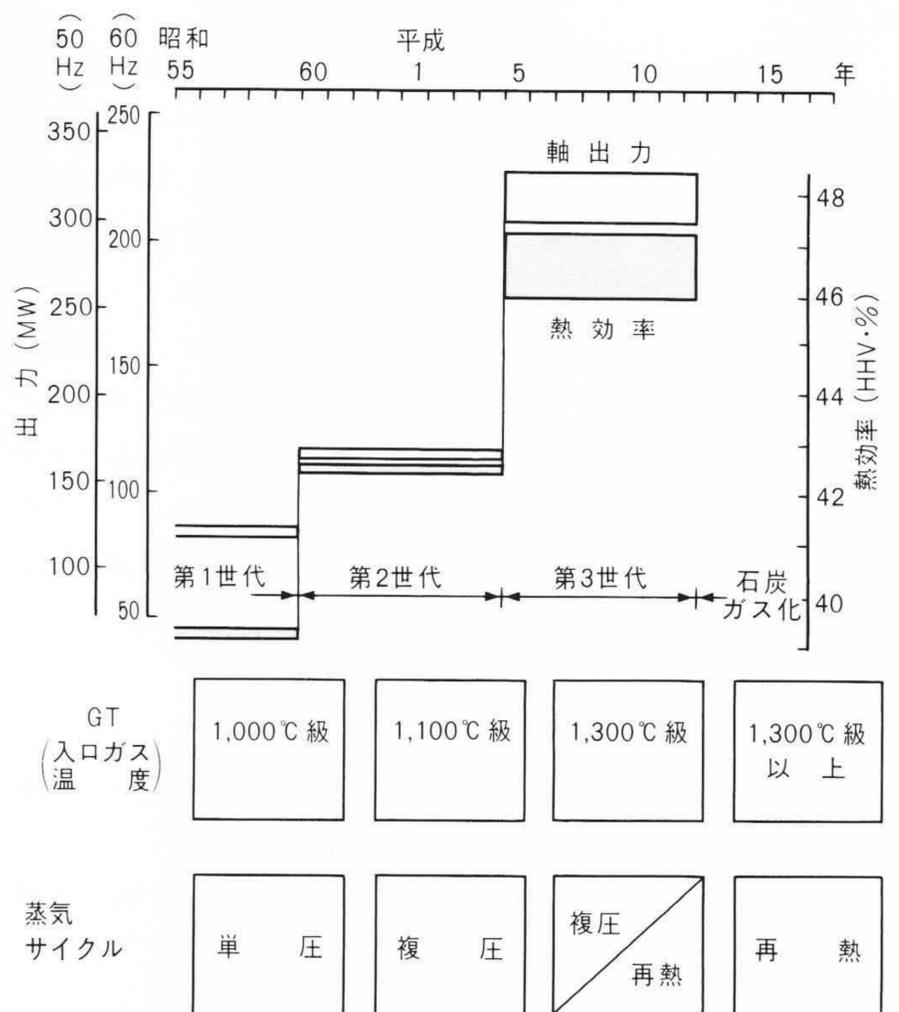
#### 3.1 発電システムの特徴<sup>1)</sup>

製品サイクルとして成長期にあるガスタービンを主機とするコンバインドサイクル発電プラントは、ガスタービン入口ガス温度の高温化によって、プラントの熱効率向上と単機容量の増大が可能であり、高い発展性を持っている。アドバンストコンバインドサイクル発電プラントは、1,300℃級のガスタービンを用いた「第3世代」のコンバインドサイクル発電プラントである。ガスタービン入口ガス温度と一軸形コンバインドサイクル発電プラントの出力および熱効率の関係を図2に示す。現在運転中または建設が行われている1,100℃級

ガスタービンを用いた「第2世代」のコンバインドサイクル発電プラントに比較すると、次のような特徴を持っている。

タービン入口ガス温度が1,260℃と約170℃上昇し、これに伴ってコンバインドサイクル発電プラントの熱効率が8~10%(相対値)向上し大幅な燃料消費量の低減が可能となる。これは、蒸気条件に従来火力並みの538℃級の高温を採用し、再熱サイクルが可能となったためで三重圧サイクルも構成可能である。一方、NOx排出レベルを抑制する技術の実用化の見通しが得られている。

圧縮機の処理空気量が従来の1.5倍に増加し、発電出力が約2倍になったため、単位キロワット当たりの排ガス量および温排水量は減少している。また、ガスタービン単機容量の増加に伴い、コンバインドサイクル発電プラントの出力は一軸形の場合、60 Hz機で220 MW、50 Hz機で320 MW級と現状のコンバインドサイクル発電プラントの約2倍の容量が可能となり、配置面積の縮小や建設費の低減などのスケールメリットが期待できる。蒸気タービンの車室は、非再熱単車室単流排気から、再熱(または非再熱)2車室複流排気となる。ガスタービンは軸流方向排気が採用され、一軸形コンバインドサイクル発電プラントではガスタービン—圧縮機—高・中圧タービン—発電機の順に配置される。ガスタービンと蒸気タービンは、固定カップリングで結合されている。



注：略語説明 GT (ガスタービン)

図2 ガスタービン入口ガス温度とプラント出力および熱効率 1,300℃級ガスタービンの採用により、46%を超える熱効率が実現可能となる。

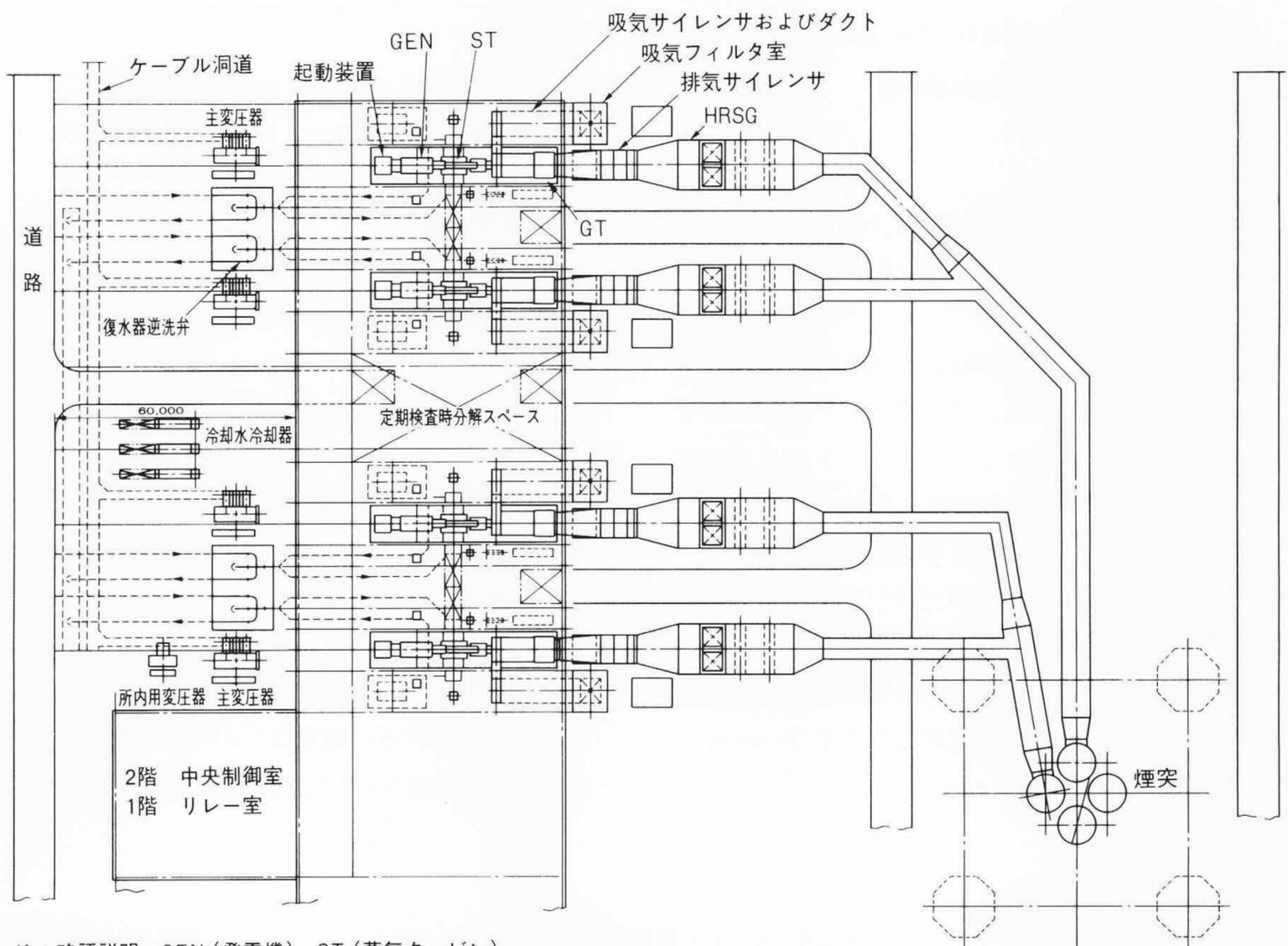
### 3.2 配置・環境計画

ガスタービン、蒸気タービンおよび発電機は、屋内に配置され、排熱回収ボイラは屋外に配置される。発電プラントの出力が増加したことにより、アドバンスト コンバインド サイクル発電プラントでは従来と同じ非再熱・複圧サイクルで構成した場合でも、単位出力当たりの敷地面積は約70%程度で計画できる。敷地の有効利用のため立体配置とし、復水器は下方排気、発電機は低圧タービン端と従来の汽力プラントに近い配置ができ、保守性も優れている(図3)。

わが国の環境対策は世界でも最も厳しい規制が適用されており、今後も年々厳しくなる傾向にある。日立グループでは、

アドバンスト コンバインド サイクル発電プラントに対応したNOx低減のため、かねてからガスタービン乾式低NOx燃焼器および高性能排煙脱硝装置の開発に着手し、1,100℃級では実用化しており1,300℃級でも実用化の見通しを得ている。ガスタービン燃焼器でのNOx低減方式としては、従来技術である水または蒸気噴射による湿式法に代わって乾式法が実用段階に入っている。

乾式低NOx燃焼器の構造を図4に示す。希薄燃焼により低NOx化を図るためマルチノズル方式を採用し、さらに全運転域で拡散燃焼を行うF1燃料ノズル(希薄燃焼ノズル)と、負荷域の途中から予混合燃焼を行うF2燃料ノズル(予混合ノズル)



注：略語説明 GEN (発電機), ST (蒸気タービン)  
HRSG (排熱回収ボイラ)

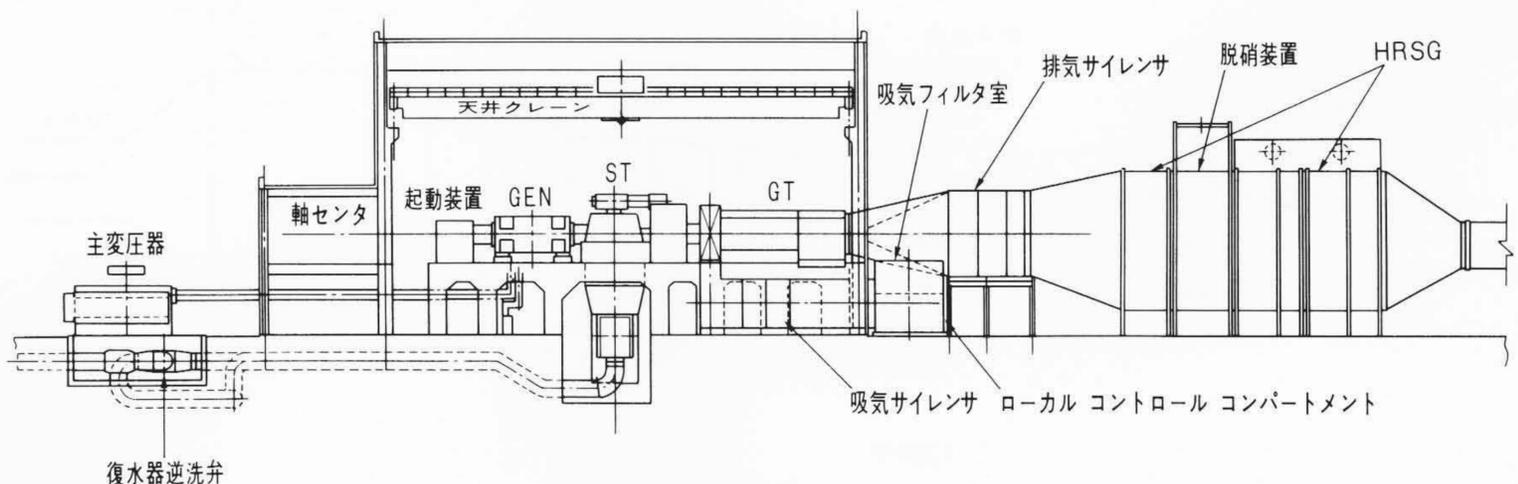


図3 アドバンスト コンバインド サイクル発電プラントの配置 単位出力当たりの敷地面積は、従来形コンバインドサイクルに比べて約70%と、敷地の有効利用が可能である。



に適している。部分負荷時には、図6に示すように互いに独立している軸の切換運転を行うことにより、高効率を得ることができる。

非再熱・単車室蒸気タービンを備えた一軸形コンバインドサイクル発電プラントは、「第2世代」コンバインドサイクル発電プラントの主流となっているが、アドバンスト コンバインド サイクル発電プラントではさらに発展させて、再熱・2車室蒸気タービンを直結することで計画されている。

ガスタービン排ガス温度が590℃と高温となるに伴い、これまでの非再熱形から再熱形を採用する効果が大きくなる。再熱形の場合、非再熱形に比べて蒸気サイクル・蒸気条件の高級化によってプラントの熱効率は約1.5% (相対値)の向上が期待できる(表1)。

一方、複数台のガスタービン・排熱回収ボイラに対し、1台の蒸気タービンが設置される多軸形コンバインドサイクル発電プラントでは、定格時の熱効率が一軸形に比べて約1.5%

表1 非再熱形と再熱形 ガスタービン排ガス温度の高温化に伴い、再熱形サイクルの選定が可能となる。

		非再熱形	再熱形
構成			
性能	プラント出力	60 Hz 220 MW	50 Hz 303 MW
	プラント効率	約46%	約46%
蒸気条件	高压蒸気圧力	70~75 bar	100~110 bar
	高压蒸気温度	538℃	538℃
	再熱蒸気温度	—	538℃
配置		ベース	排熱回収ボイラ、蒸気タービンなどの全長がやや長くなる。

注：略語説明 HP (高压), IP (中压), LP (低压)

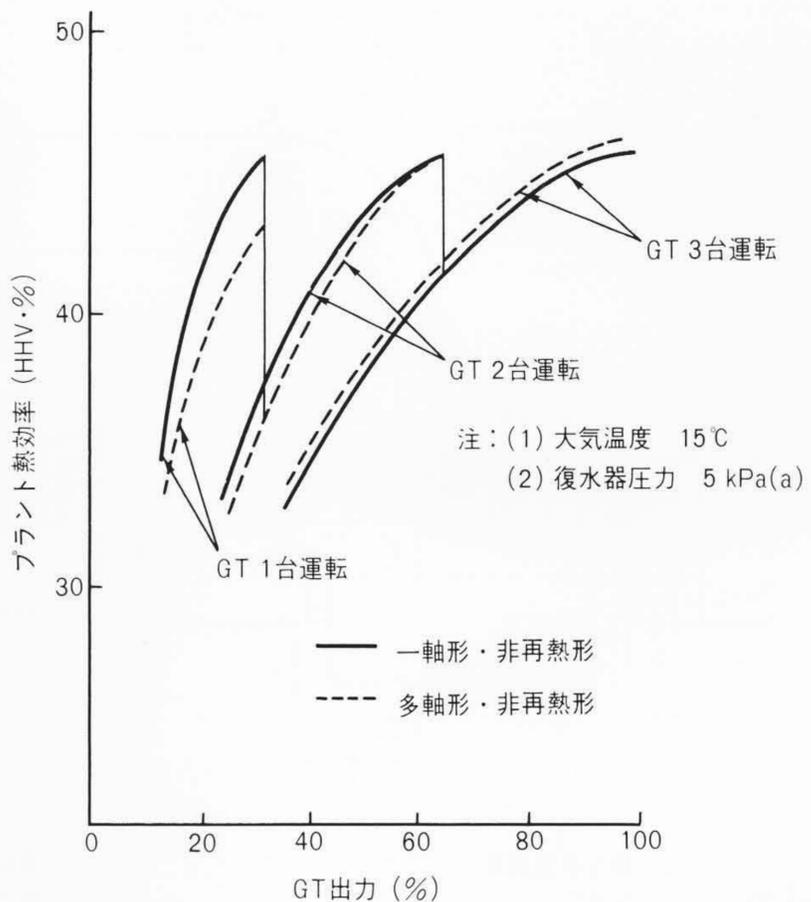
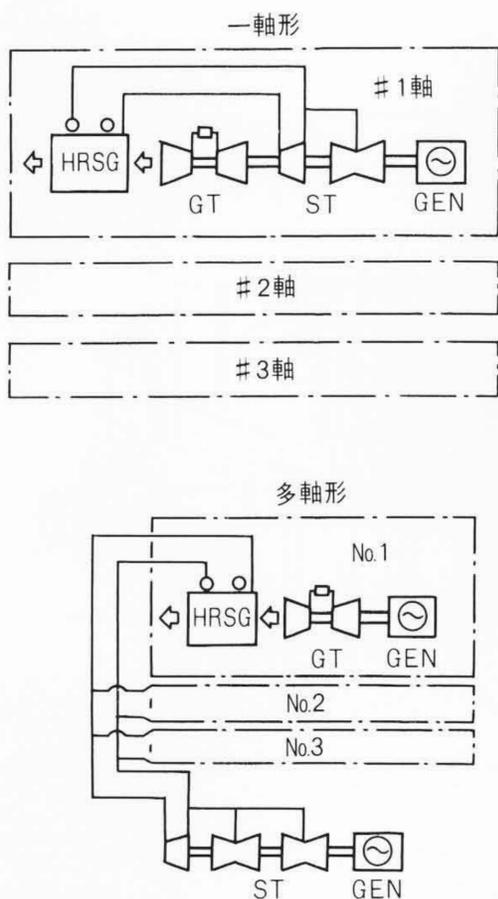


図6 一軸形と多軸形の熱効率比較 高負荷域では多軸形が優れるが、低負荷域ではガスタービンの切換運用により、一軸形が高効率となる。

高くすることができる。高負荷帯運用を主体とするプラントには多軸形を用いることにより、非再熱形でも熱効率の向上が図れる。この場合蒸気タービンの形式は、ガスタービン3台の場合の例では4流排気となる。

## 4 機器の特徴と信頼性

### 4.1 ガスタービン設備

アドバンスド コンバインド サイクル発電プラントの主機となる1,300℃級ガスタービンの技術開発は、すでに多数の納入実績があり性能と信頼性が確立されている1,100℃級ガスタービンをベースとしている。圧縮機については、従来の17段に遷音速初段翼を追加して段数を18段に増加して、空気流量を約1.5倍に増やしている。圧力比は11.5から13.5に高圧化して、燃焼温度の上昇に対応した比出力(単位空気量当たりの発電出力)を最大としている。タービン翼については、航空用ジェットエンジンで開発された高温材料や高度冷却技術の採用により、高温化への対応を図っている。

60 Hz向けの大容量ガスタービンであるF7F形(単機容量150 MW級)はすでに実用化され、また50 Hz向けのF9F形(200 MW級)も鋭意開発が推進されている。日立グループでは米国GE社(General Electric Co.)との共同製作協定に基づき1,300℃級大容量ガスタービンの製作を行うとともに、信頼性・保守性の向上に万全を期している。

### 4.2 蒸気タービン・発電機設備

ガスタービンの排ガス温度が590～600℃の高温化になるのに伴い、蒸気タービンの主蒸気温度は従来の大容量火力プラントと同等の538℃を採用し、高効率化を図っている。また、

現行のコンバインドサイクル発電プラントに比べ蒸気タービンへの蒸気流入量が増加するため、一軸形プラントでは最終段に26インチ翼を持つ複流形低圧タービンと高圧タービンの2車室構造としている(図7)。日立グループでは遷音速翼形を採用した高性能26インチ翼の開発をすでに完了しており、コンバインドサイクル発電プラント用蒸気タービンへの適用も可能である。

さらに、コンバインドサイクル発電プラントの特徴である高頻度起動・停止に対応するため、ロータ径、形状および材質の適切な選定を行い、特に一軸形の場合には、起動時のガスタービン回転数上昇に伴う蒸気タービン空転による温度上昇防止を目的とし、冷却蒸気導入などの考慮がなされている。非再熱形蒸気タービンの場合には、低圧部の湿り度が従来火力機よりも大きくなるため、ドレン排出機構、エロージョンシールドなどの対策を実施し、耐エロージョン性を向上させている。

アドバンスド コンバインド サイクル発電プラントで一軸形を構成する場合、発電機が蒸気タービン端に位置し、ガスタービンと蒸気タービンはカップリングで直結され、ガスタービンのスラスト軸受で蒸気タービンのスラスト力も負担する。また、潤滑油および制御油はガスタービンと蒸気タービンで共用する計画である。

### 4.3 排熱回収ボイラ設備

アドバンスド コンバインド サイクル発電プラントに採用のガスタービンは、従来に比べ排ガス量が約55%、排ガス温度が約60℃上昇している。したがって、排熱回収ボイラもそれらを踏まえ、蒸気条件の高度化および大容量化を考慮した

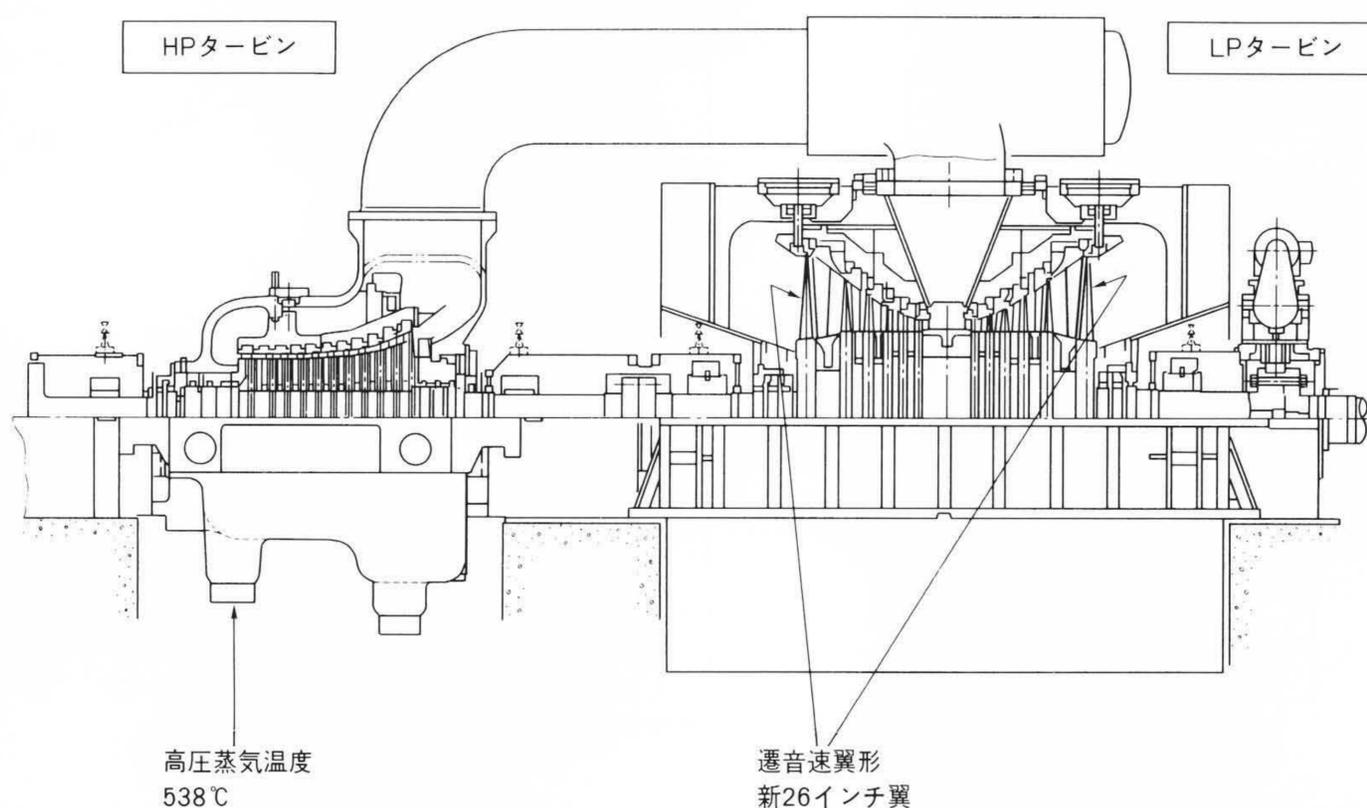


図7 アドバンスド コンバインド プラント用蒸気タービン 従来形火力プラントと同様の蒸気温度および高性能26インチ翼の採用により、高効率化を図っている。

計画を行う必要がある。

各ガスタービン形式に対応する排熱回収ボイラ仕様の試設計例を表2に示す。蒸発量は周波数60 Hzベースで約80%の増加となっており、高圧蒸気温度も従来火力ボイラ並みの温度となっている。また、排熱回収ボイラ出口ガス温度も100℃以下として熱回収の向上を図っている。

蒸気条件の高度化および大容量化に対する排熱回収ボイラの主な考慮事項としては、高効率化、信頼性向上およびコンパクト化の三つが挙げられる。高効率化では、高温・高圧化およびガス側圧力損失の低減も図っている。信頼性向上の観点からは、ガス温度・蒸気温度の高温化に伴うフィン材の高温酸化の面から、高クロム系フィンチューブを採用している。

さらに、大気温度およびガスタービン部分負荷時の排ガス温度の上昇による蒸気温度の高温化を制御するため、減温器を設置している。大容量化に対しては、フィンチューブ仕様の最適化によるコンパクト化を図っている。再熱・三重圧サイクルを採用した横形排熱回収ボイラの計画例を図8に示す。

また、排熱回収ボイラは高信頼性確保および据え付け期間の短縮化を図るため、大形モジュール化を採用しており、現在建設中のプラントでの排熱回収ボイラ大形モジュールの海上輸送状況を図9に示す。

#### 4.4 給・復水設備

アドバンスト コンバインド サイクル発電プラントでは、系統の簡素化および排熱回収ボイラでのより多くの熱回収を目的とし、給・復水系には通常火力プラントで用いられる給水加熱器は設置しないことで計画している。これに伴い、給水中の溶存酸素除去を目的とする脱気器も非設置とし、この代わりに復水器に脱気機能を付加した脱気復水器を採用することになる。

脱気復水器は通常運転時および起動時の脱気性能の向上を図るため、 $\frac{1}{5}$ 縮小モデル復水器での種々の実験を行い、図10に示す構造が確立され、特徴としては復水器内部に脱気用トレイを備え、またホットウェル中に補助蒸気を導入するなど

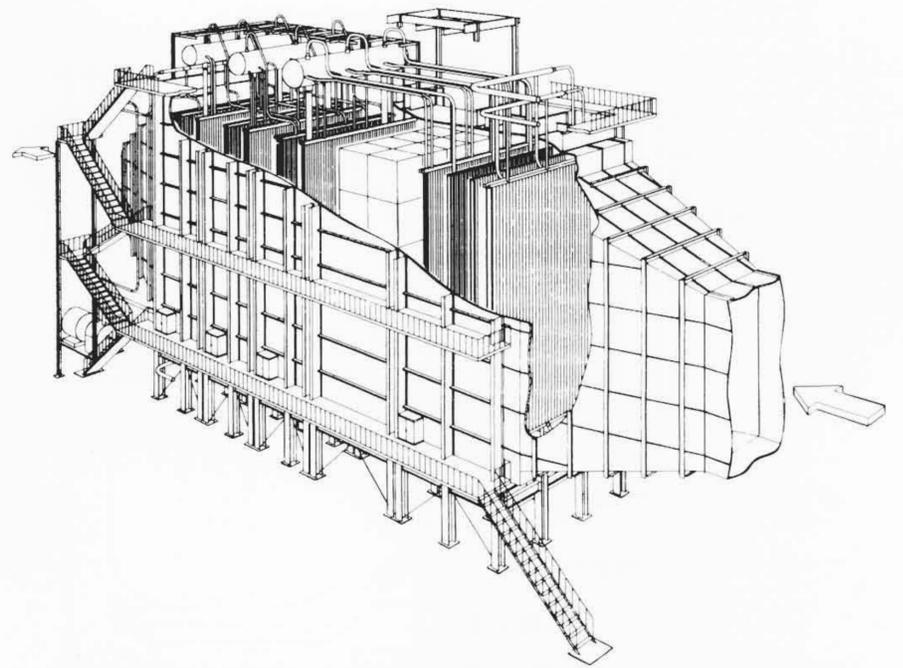


図8 再熱・三重圧横形排熱回収ボイラ 高効率で信頼性の高いコンパクト設計で、脱硝装置をボイラ内に組み込んでいる。

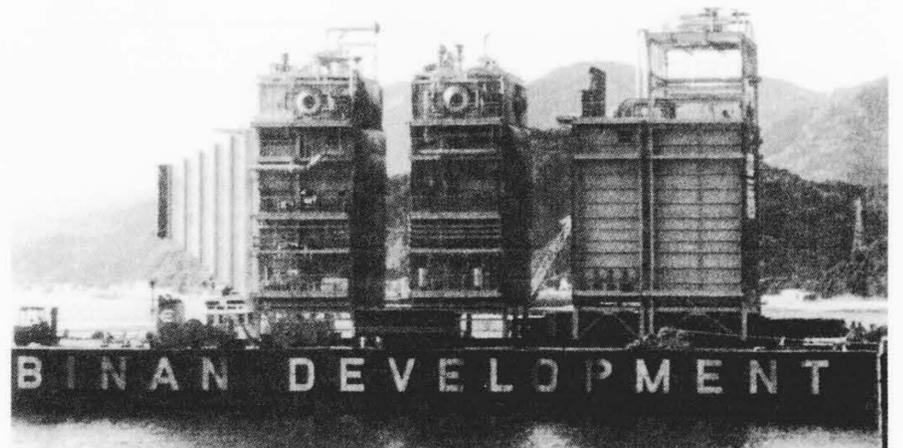


図9 排熱回収ボイラ大形モジュールの海上輸送 高信頼性、据付け期間の短縮化を図るため、排熱回収ボイラは大形モジュール化を採用している。

のくふうがなされている。この脱気器を採用している東京電力株式会社富津火力発電所2号系列の運転実績では、通常運転時の給水中溶存酸素濃度は計画値の7 ppbを十分満足する結果を得ている。さらに、復水器真空破壊後の再起動時でも図10

表2 排熱回収ボイラ仕様 1,300℃ガスタービンの採用により、排熱回収ボイラでの蒸発量が増大し、また蒸気圧力、温度も高級化する。

ガスタービン形式	F7E		F7F		F9F			
周波数 (Hz)	60		60		50			
ガスタービン排ガス量 (t/h)	989		1,529		2,205			
ガスタービン出口ガス温度 (°C)	533		595		598			
蒸気サイクル	非再熱・二重圧		非再熱・二重圧		再熱・三重圧			
排熱回収ボイラ性能	(高圧)	(低圧)	(高圧)	(低圧)	(高圧)	(中圧)	(低圧)	(再熱)
蒸発量 (t/h)	118.5	26.0	219.8	37.0	254.0	51.6	30.9	295.3
蒸気温度 (°C)	485	170	541	170	542	321	260	541
蒸気圧力 (bar)	59.8	6.9	75.5	6.9	103.1	24.2	3.5	22.5
出口ガス温度 (°C)	110		96		99			
寸法 幅×高さ×長さ (m)	7.6×10.7×23.7		10.7×14.8×23.6		12.0×19.3×37.2			

注：大気温度15℃、ガスタービンベース負荷時

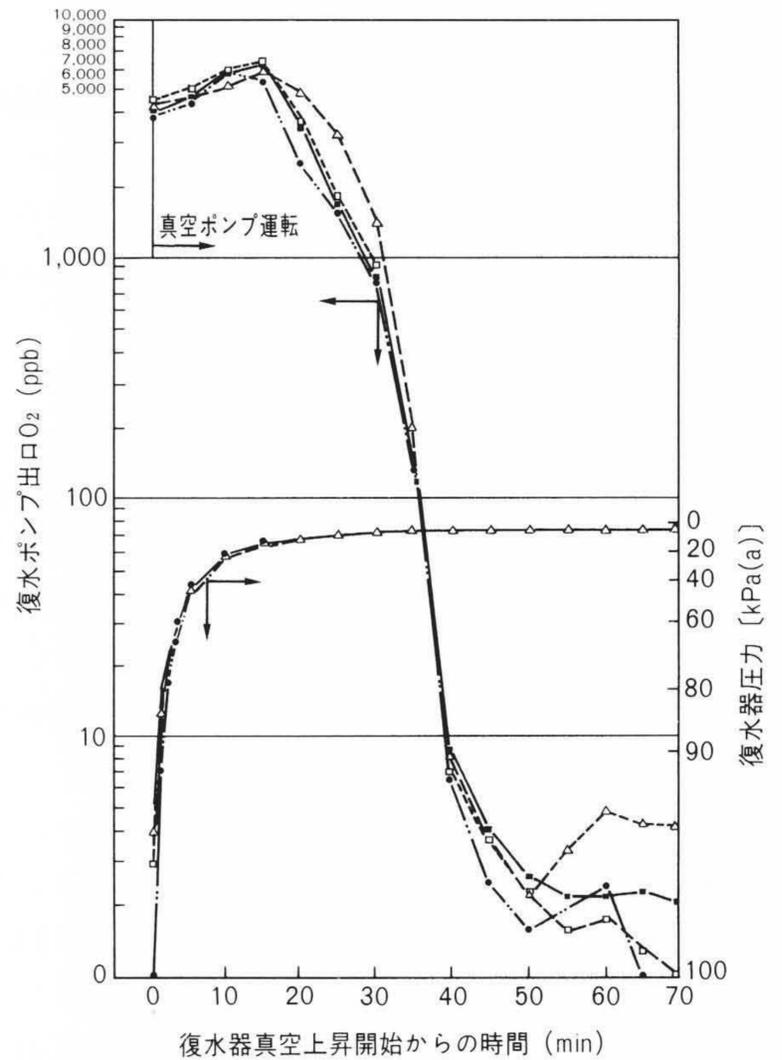
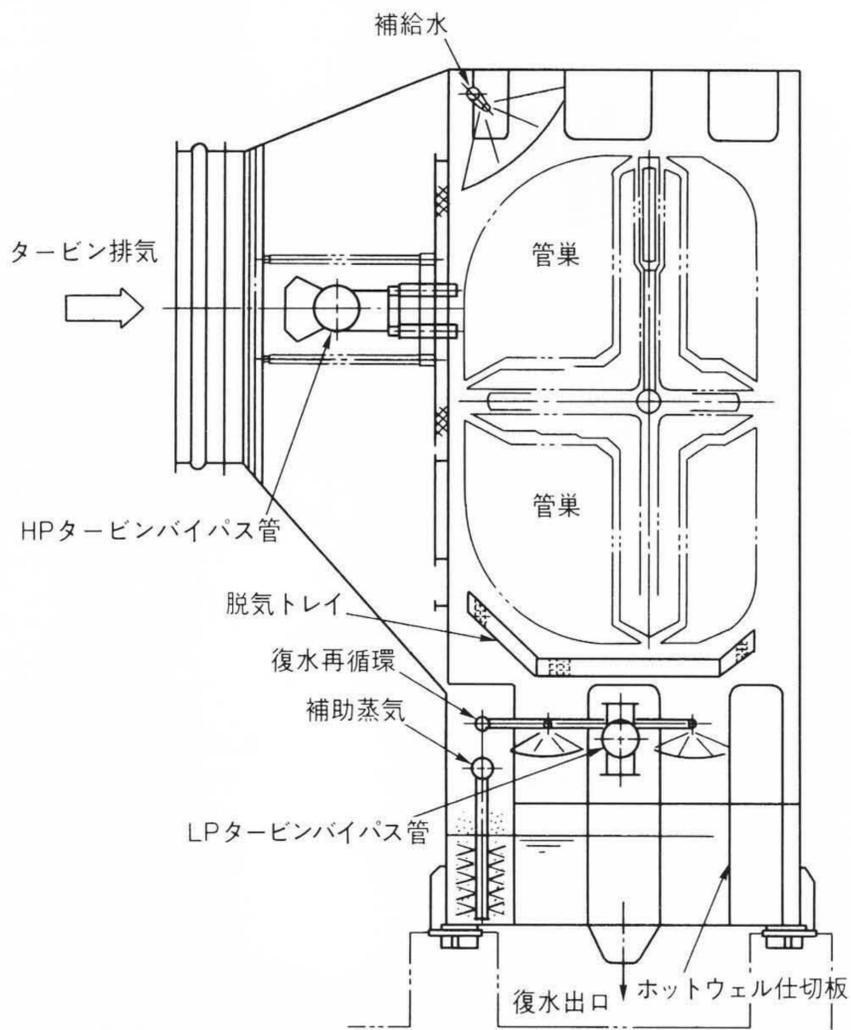


図10 脱気復水器の構造と起動時性能 脱気復水器の採用により、系統の簡素化が可能となる。

に示すように、真空ポンプ起動後約40分で起動時溶存酸素制限値である10 ppbに到達できることを確認している。

### 5 将来の展望

コンバインドサイクル発電プラントは、これまでLNG・天然ガス燃料で計画されてきた。電源設備の中で設備容量として大きな位置を占めるようになると、燃料の供給安定の面から油・石炭燃焼のコンバインドサイクル発電プラントのニーズが高まる。油燃焼コンバインドサイクル発電プラントの最大の問題は、天然ガスに比べて一段と高いNOxの発生レベルであり、低NOx燃焼技術はさらに一段と厳しい目標に臨むことになる。

石炭ガス化と組み合わせたコンバインドサイクル発電プラント用のガスタービンは、石炭ガス化複合発電技術組合のパイロットプラント用の12.5 MWガスタービンとして自主技術によって完成し、常磐共同火力株式会社勿来発電所内に据え付け中である。ガスタービンは石炭ガス燃焼運転を行う仕様で、圧縮機吐出し空気の $\frac{1}{5}$ をガス化炉反応用空気として供給し、再び燃料ガスとして戻ってきた約4,200 kJ/Nm<sup>3</sup>の低カロリーガスを用いて発電を行う最新のシステム技術が採用されている。

コンバインドサイクル発電プラントの熱効率は、従来の空気冷却方式では燃焼温度の上昇に対して冷却空気量が増加するため、1,300℃級が限界と言われてきた。しかし要素技術開

発として、翼材料製造技術開発・翼冷却技術の向上・冷却媒体のくふうなどが進められており、冷却空気量を極力低減して1,400~1,500℃の高温化技術を達成することで近い将来発電端熱効率で50%(高位発熱量)を超える発電システムも可能である。このように原理的に持っている高効率発電システムの可能性を時代のニーズに適合させる形で発展させて、さらに次世代のコンバインドサイクル発電プラントの開発に努めていきたい。

### 6 結 言

火力発電設備として大きな発展が期待される大容量コンバインドサイクル発電プラントについて述べた。約10年前に産声をあげたガスタービンと蒸気タービンを1台ずつ組み合わせた国産のコンバインドサイクル発電プラントの第1世代が、大容量発電システムとして第3世代技術の時代が始まろうとしている。世界で最も進んだアドバンスドコンバインドサイクル発電プラントは、一軸形・多軸形や再熱形・非再熱形などのニーズに適した多様な組み合わせを可能とし、システムとしても高度の技術を要求している。今後とも、将来のニーズにこたえられるよう技術開発に努めていきたい。

### 参考文献

- 1) 星野, 外: 大容量コンバインドサイクル, 火力原子力発電技術協会九州支部大会講演会前刷(平1/11)