

アドバンストコンバインド発電プラント

—1,300℃級ガスタービンと再熱三重圧サイクルの組合せ—

High-Efficiency Advanced Combined Cycle Power Plants

川内章弘* Akihiro Kawauchi 武蔵 貢** Mitsugu Musashi
広瀬文之* Fumiyuki Hirose



関西電力株式会社姫路第一発電所6号機



中部電力株式会社川越火力発電所3号系列

アドバンストコンバインド発電プラントの全景

これらのプラントは、最新鋭の高温ガスタービンと再熱三重圧サイクルを組み合わせた、環境調和型の世界最高レベルの高効率コンバインドプラントである。

昨今のエネルギー情勢では、環境調和と省エネルギーを両立させる「高効率」と急峻(しゅん)な電力需要変化への対応を可能とする「高運用性」の両条件を満たす発電システムの確立が期待されている。

アドバンストコンバインド発電プラントは、最新型1,300℃級高温ガスタービンと再熱三重圧サイクルの排熱回収ボイラ・蒸気タービンを組み合わせた発電方式を採用し、排熱回収型コンバインドプラントとして高効率化や高運用性の確保の両立を可能とした最新鋭の発電プラントである。

日立製作所は、非再熱複圧コンバインド発電プラントで確立された技術を発展させ、関西電力株式会社姫路第

一発電所6号機では多軸型の、中部電力株式会社川越火力発電所3号系列では一軸型のアドバンストコンバインド発電プラントの計画・設計・据付け・試運転をそれぞれ完了した。いずれも無事営業運転を開始し、現在順調な運転を続けている。

今後は、高効率指向の多軸型や高運用性指向の一軸型の両型式のアドバンストコンバインド発電プラントの実績を基に、環境調和にいっそう配慮した高効率コンバインド発電プラントの開発と、燃料多様化に対応した次世代コンバインド発電プラントへの応用技術の確立を目指す考えである。

*日立製作所 日立工場 **パブコック日立株式会社 呉工場

1. はじめに

地球にやさしいクリーン燃料としてのLNG(液化天然ガス)はその大部分を輸入に頼らざるを得ないため、設備投資などを考慮して高効率発電システムでの利用が経済的である。

ACC(アドバンストコンバインド発電プラント)は、排熱回収型コンバインドプラントで1,300℃級高温ガスタービン、再熱三重圧サイクルの排熱回収ボイラ、および蒸気タービンを組み合わせた高効率発電システムである。

従来の汽力発電プラントを約15%以上(相対値)も上回る高いプラント効率と広い負荷範囲での高効率運用、従来の汽力発電プラントと同等以上の短い起動時間、および大きい負荷変化率の高運用性の両立が可能のため、各電力会社で一斉に建設計画がスタートした。

ここでは、関西電力株式会社姫路第一発電所6号機(以下、姫路第一6号機と言う。)の多軸型コンバインドプラント、および中部電力株式会社川越火力発電所3号系列(以下、川越火力3号系列と言う。)の一軸型コンバインドプラントの両型式のコンバインドプラントでの計画概要と試運転実績について述べる。

2. 計画概要

姫路第一6号機および川越火力3号系列の主要仕様を表1に示す。いずれも、最新型の1,300℃級高温ガスタービンと高圧、中圧、低圧の圧力の異なる三つのドラムを持つ再熱三重圧型排熱回収ボイラ、および再熱式混圧蒸気タービンで構成する。姫路第一6号機は、ガスタービン、排熱回収ボイラ3台、および蒸気タービン1台を組み合わせた多軸型システムで、川越火力3号系列は、ガスタービン、および排熱回収ボイラと蒸気タービンおのの1台を組み合わせた一軸型システムの7軸でそれぞれ構成されている。

プラント出力は、姫路第一6号機では670 MW、川越火力3号系列では1,650 MW(一軸当たり243 MW)とガスタービンの高温大容量化に伴って大型化の傾向が見られる。

プラント効率はガスタービン効率に依存するが、蒸気タービンの大容量化に伴って排熱回収効率の高い多軸型が一軸型を上回る傾向が見られ、いずれも48%を超える計画効率となっている。蒸気条件は経済性評価によって選定されるが、一般に多軸型コンバインドプラントでは蒸気タービンの大容量化に伴って蒸気圧力を高く選定することができ、蒸気温度は高温ガスタービンの採用によって汽力と同等の条件が可能となった。

表1 主要仕様

1,300℃級高温ガスタービンと再熱三重圧サイクルを組み合わせた多軸型および一軸型のアドバンストコンバインド発電プラントの主要仕様を示す。プラント効率は、計画値で48.5%以上(高位発熱量基準)となっている。

項 目		姫路第一6号機	川越火力3号系列
プラント	プラント定格出力/軸認可出力 プラント計画効率	670 MW ^{*1} /— 48.55% ^{*1}	1,650 MW ^{*2} /243 MW ^{*3} 48.5% ^{*2}
ガスタービン	型式/型名(燃焼温度) 出力×台数 燃焼器	開放単純サイクル一軸式/MS7001FA(1,274℃) 154.3 MW ^{*4} (140.3 MW ^{*1})×3台 乾式低NOx燃焼器	開放単純サイクル一軸式/MS7001FA(1,288℃) 158 MW ^{*3} (151 MW ^{*2})×7台 乾式低NOx燃焼器
蒸気タービン	型式/型名 出力×台数 入口圧力/入口温度 (高・中・低圧)	くし形衝動4流排気式再熱混圧復水型/TC4F-30 250.1 MW ^{*4} (249.1 MW ^{*1})×1台 14.6・4.31・0.49 MPa/538・538・250℃ ^{*1}	くし形衝動2流排気式再熱混圧復水型/TCDF-26 85 MW ^{*3} <84.72 MW ^{*2} >×7台 10.0・2.16・0.29 MPa/538・538・250℃ ^{*2}
排熱回収ボイラ	型式/台数 蒸発量(高・中・低圧) 脱硝装置/脱硝装置出口NOx濃度	排熱回収三重圧自然循環型/3台 171.8・25.9・31.0 t/h ^{*1} 乾式アンモニア接触還元法/9.7 ppm (16%O ₂ 換算値)	排熱回収三重圧自然循環型/7台 179.5・28.6・27.5 t/h ^{*2} 乾式アンモニア接触還元法/6 ppm (16%O ₂ 換算値)
運用性	起動時間(ホット起動時) 負荷変化率 運用負荷帯 プラント最低負荷	100分 5%/min(ガスタービン3台時) 45~100%負荷(ガスタービン3台時) 20%負荷(ガスタービン1台時) ^{*5}	70分(ガスタービン点火~全負荷) 5%/min 60~100%負荷(1軸当たり) 9%負荷 ^{*5}
営業運転開始		1996年5月	1996年6月(3-1軸), 同年8月(3-2, 3軸), 同年11月(3-4, 5軸), 同年12月(3-6, 7軸)

注: *1 大気温度22℃時, *2 大気温度15℃時, *3 大気温度5℃時, *4 大気温度4℃時, *5 プラント定格出力に対する割合

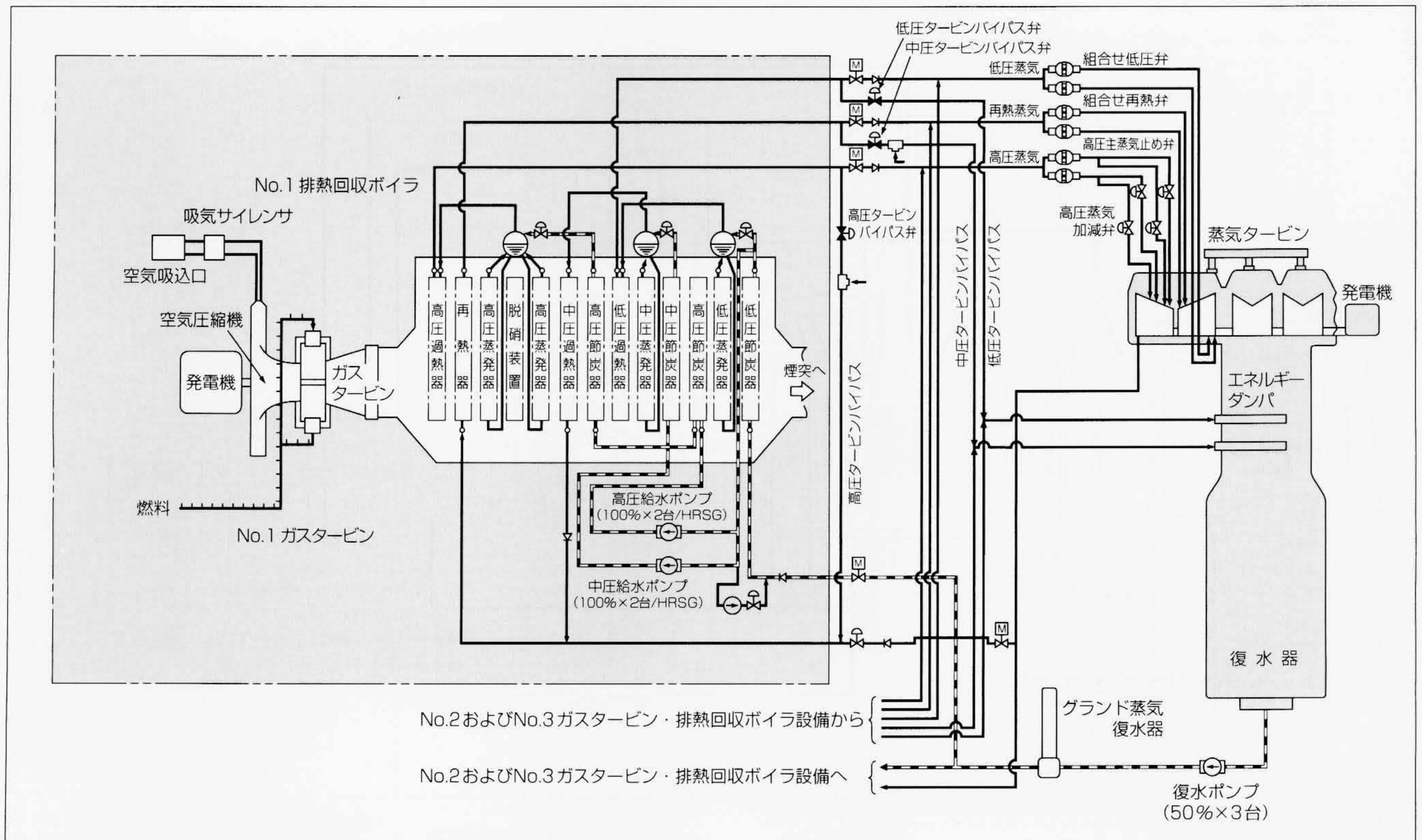


図1 多軸型コンバインド プラント システムの構成

姫路第一6号機は3台のガスタービン、排熱回収ボイラ、1台の蒸気タービンで構成しており、蒸気や給水系統は合流・分岐を持つ複雑な構成となっている。

プラント運用性では、起動時間は一軸型が多軸型より短い、負荷変化率では同等である。運用負荷帯は、ガスタービン空気圧縮機入口案内翼の絞り運用の採用によって多軸型が有利となっているが、プラント最低負荷は、一軸型が軸数の切替運用によって有利である。また、多軸型プラント特有の運用として、複数台のガスタービンや排熱回収ボイラを運転機に対して追加、切り離しを行う台数切替運用を可能としている。多軸型システム構成(姫路第一6号機)を図1に、一軸型システム構成(川越火力3号系列)を図2にそれぞれ示す。

3. ガスタービン技術

3.1 高効率高温ガスタービン

ガスタービンは燃焼温度を上昇させること、すなわち、高温化を図ることによって高い効率が得られる。最近の発電用ガスタービンの最新鋭機は燃焼温度が $1,300^{\circ}\text{C}$ 級であり、単機出力も150 MW以上と大容量機が主流となっている。

日立製作所は、燃焼温度 $1,300^{\circ}\text{C}$ 級としては、60 Hz機でF7F型とF7FA型、50 Hz機ではF9FA型ガスタービン

の機種をラインアップしている。F7FA型はF7F型の実績を基に改良したガスタービンであり、F型に比べて燃焼温度を 28°C 、圧力比を11%上昇させて約4%(相対値)の効率向上と6%の出力増加を図った機種として開発したものである。

各機種の仕様比較を表2に示す。ガスタービンの本体は、空気圧縮機、タービン、燃焼器の三つの部分で構成している。その本体断面図を図3に示す。各部の特徴について以下に述べる^{1), 2)}。

3.1.1 空気圧縮機

空気圧縮機の段数は、空気流量の増加を図るため、従来のF7型ガスタービンでの17段に対し、初段翼を追加して18段としている。この追加の初段翼は、翼外径の増大によって周速が大となり、翼面上での空気流速が遷音速状態となることから、既存の亜音速設計翼では損失が大となる。このため、翼形状をやや薄肉の直線形状とした遷音速設計とし、損失の低減を図っている。

3.1.2 タービン

タービン段数は、性能や実績面から従来のF7型ガスタービンと同様の3段としている。タービン翼については、

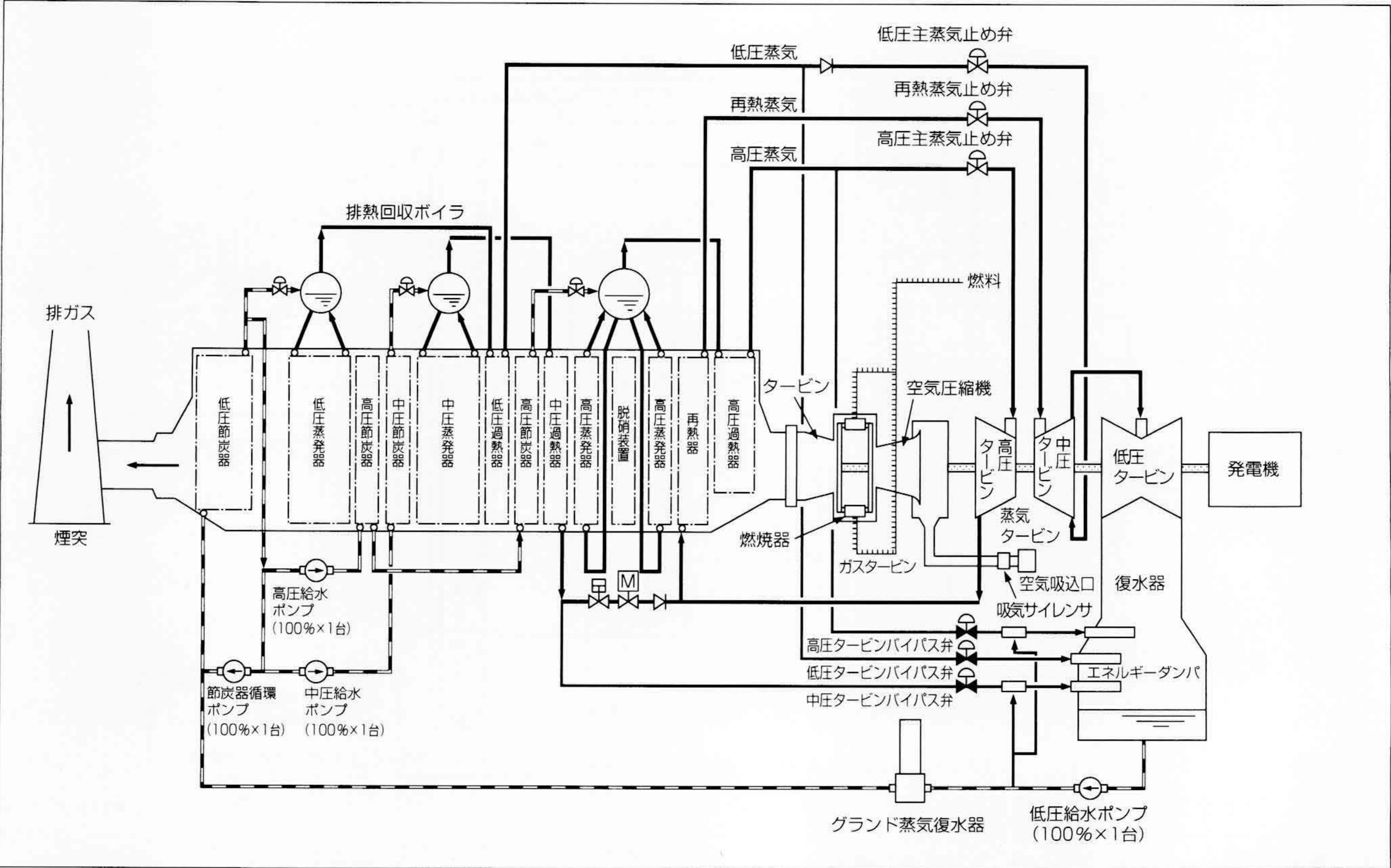


図2 一軸型コンバインド プラント システムの構成
川越火力3号系列では、ガスタービン、蒸気タービンや発電機が同一軸で連結されたシンプルなシステム構成となっている。

第1段動翼は燃焼温度上昇の対応としてジェットエンジンに多く使用されているリターンフロー冷却翼を採用している。また第3段動翼については、出口の燃焼ガスの流れ方向を軸流とすることで、損失の低減を図っている。その他の翼については、従来技術同様の冷却構造や製

造方法を採用している。また、最適な材料選定を行うとともに耐腐食を目的とした各種コーティングを施し、耐久性、信頼性の向上を図っている。

表2 ガスタービンの仕様比較

1,300℃級大容量ガスタービンの仕様比較を示す。燃焼温度、圧力比が高いため、ガスタービン効率34%(LHV)以上の高効率機となっている。

項 目	仕 様		
	F7F	F7FA	F9FA
定格出力(kW) (単純サイクル・ 発電機端)	150,000	159,000	226,500
定格回転数(r/min)	3,600	3,600	3,000
効率(%・LHV)	34.5	35.9	35.7
燃焼温度(℃)/ 圧力比	1,260/ 13.5	1,288/ 15.0	1,288/ 15.0
排気温度(℃)	583	590	591
圧縮機段数(段)	18	18	18
タービン段数(段)	3	3	3
燃焼器(個)	14	14	18

注：ISO条件による。

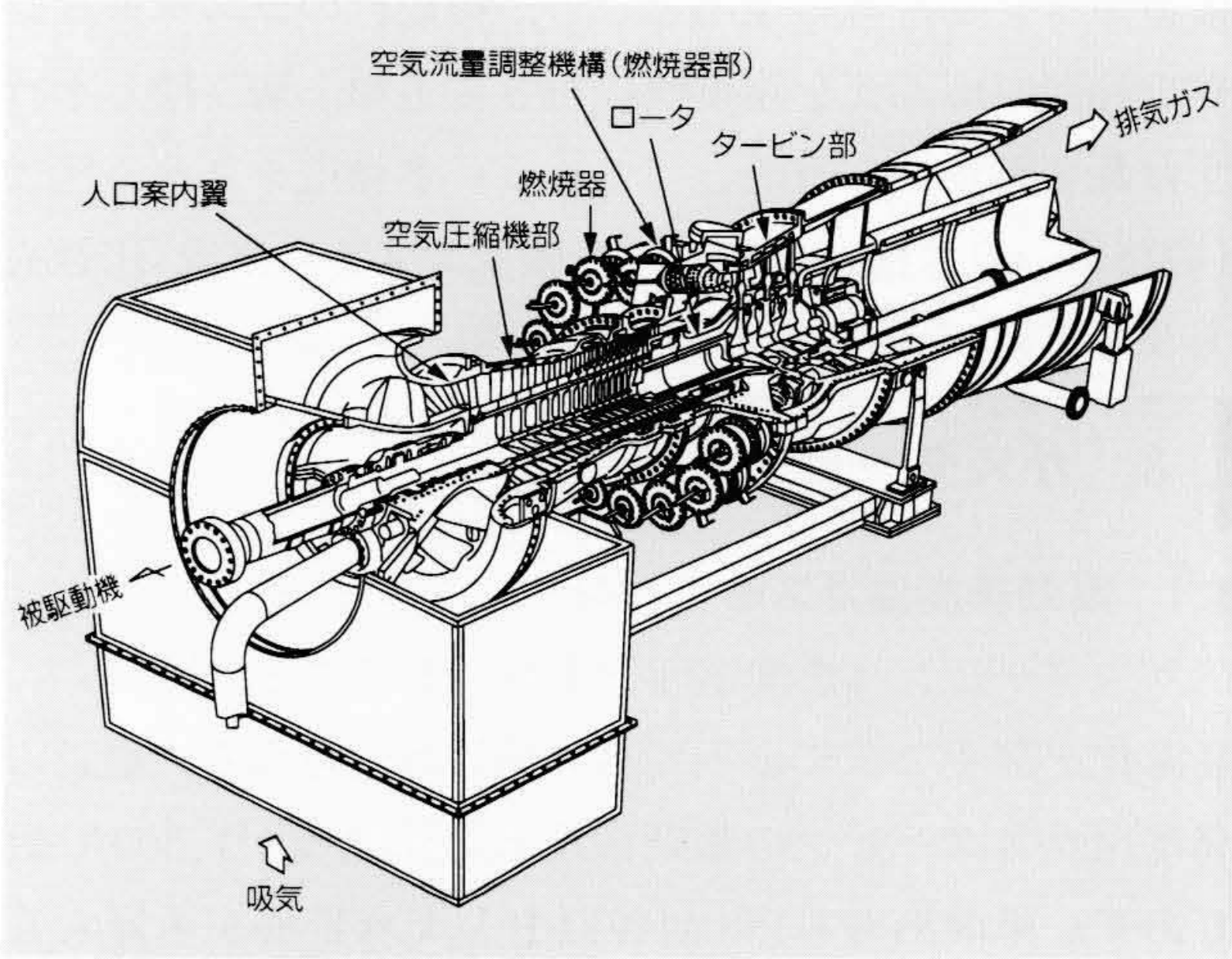


図3 F7FA型ガスタービン本体の断面図
主に空気圧縮機、燃焼器、タービンの三つの部分で構成し、最新鋭機として随所に高効率、高出力を実現するためのくふうを凝らしている。

3.1.3 燃焼器

燃焼器は、拡散燃焼を行う副室と予混合燃焼を行う主室で構成する二段燃焼方式の低NO_x燃焼器を採用している。

ガスタービンの起動から低負荷帯までは安定した火炎が得られる拡散燃焼を使用し、高負荷帯では拡散と予混合の燃焼を併用している。このため広い負荷にわたって安定した燃焼を確保できる。特に、予混合燃焼部は燃空比調整のため、燃料流量に応じて空気流量を調整することが可能なように燃焼器には空気流量調整機構を設置し、負荷に応じて空気流量配分を最適化するようにしている。この方式の採用により、広い範囲での予混合燃焼を確保して低NO_x化を可能としている。

3.2 ガスタービンの運転実績

姫路第一6号機では、多軸型特有のガスタービン1台運転から3台運転に至るまでの運転で不連続点のない幅広いプラント負荷運用を可能とするため、ガスタービン1台運転時のプラント最大出力とガスタービン2台運転時のプラント最低出力がラップするように計画し、これを実現している。

特に、低NO_x燃焼器の採用により、拡散と予混合併用時の燃焼切替帯は運用上不連続点となるため、運用負荷範囲は燃焼切替帯以上とする必要がある。これに対応してこのプラントでは、より低負荷での予混合燃焼を可能とするように、空気流量調整機構だけでなく、空気圧縮機の入口に設置されている入口案内翼の開度を通常よりも閉めて空気流量を絞る方式を採用している。この方式により、ガスタービン負荷で約30%の燃焼切替を達成している。なお、運用負荷帯でのガスタービン出口排出NO_x濃度の実績は、約60 ppm以下(16%O₂換算)となっている。

また、川越火力3号系列は一軸型コンバインドプラントであり、プラントの負荷運用は要求負荷に応じて運転軸数の増減と各軸ごとの負荷調整によって対応している。一軸当たりの運用負荷帯は、高効率でかつガスタービンでの安定した低NO_x運転が可能な拡散と予混合燃焼併用時としており、約60～100%負荷を基本としている。この負荷帯でのガスタービン出口NO_x濃度の実績は50 ppm以下(16%O₂換算)となっている。

なお環境規制値の点から、燃焼器は姫路第一6号機に比べてより低NO_x化を図る必要があるため、予混合燃焼部での燃焼量を増加することにより、さらにNO_x濃度の低減を実現するなどのくふうを凝らしている。

4. 排熱回収ボイラ技術

4.1 非再熱複圧と再熱三重圧排熱回収ボイラの仕様

従来の1,100℃級ガスタービン用非再熱複圧排熱回収ボイラと、最新型の1,300℃級ガスタービン用再熱三重圧排熱回収ボイラの主な仕様を表3に示す。最新型では、ガスタービンからの排ガス量が約1.5倍、排ガス温度が約70℃上昇し、かつ蒸気条件も高温、高圧化したことにより、伝熱面積も約1.85倍に大型化している。

4.2 フィンチューブ技術

上記のような伝熱面積の増大に対応するため、高伝熱効率フィンチューブとしてセレイテッド フィン チューブを開発し、実用化した。セレイテッド フィン チューブは、従来の帯状の薄板を伝熱管に巻き付けて溶接したソリッド フィン チューブに対し、巻き付け加工時に帯状の板にスリットを入れ、仕上がり形状を花びら状にしてガス流動に乱れを起こすようにくふうしたものである。ガス側の流動抵抗は若干大きくなるものの、伝熱効率の向上によって総合評価として約10%の伝熱面積の低減を図ることができる(図4参照)。なお、セレイテッド フィン チューブは、既設の東日本旅客鉄道株式会社川崎発電所2号機、および中国電力株式会社柳井発電所第2号系列でその性能を実証している。今回、川越火力3号系列に適用してコンパクト化を図った。

4.3 モジュール工法

排熱回収ボイラはこれまでも工場でモジュール化を行い、品質の向上、現地での組立作業量の低減を図っている。ACC用としていっそうの大型モジュール化に対応するため、製作工場であるバブcock日立株式会社呉工場に専用設備を導入し、排熱回収ボイラ天井部の屋内地上

表3 排熱回収ボイラの仕様比較

ACC用の排熱回収ボイラでは、伝熱面積を約1.85倍に大型化している。

項 目		1,100℃級 ガスタービン用	1,300℃級 ガスタービン用
HRSG型式		一軸非再熱複圧	一軸再熱三重圧
ガスタービン排ガス量		1,021 t/h	1,530 t/h
ガスタービン出口ガス温度		529℃	601℃
蒸気条件	蒸気量 圧 力 温 度	(高圧・低圧) 120.2・27.0 t/h 6.06・0.71 MPa(g) 482・171℃	(高圧・再熱・低圧) 179.5・199.4・27.5 t/h 10.5・2.23・0.39 MPa(g) 541・541・253℃
フィンチューブ型式		ソリッド フィン チューブ	セレイテッド フィン チューブ
伝熱面積比		100(ベース)	185

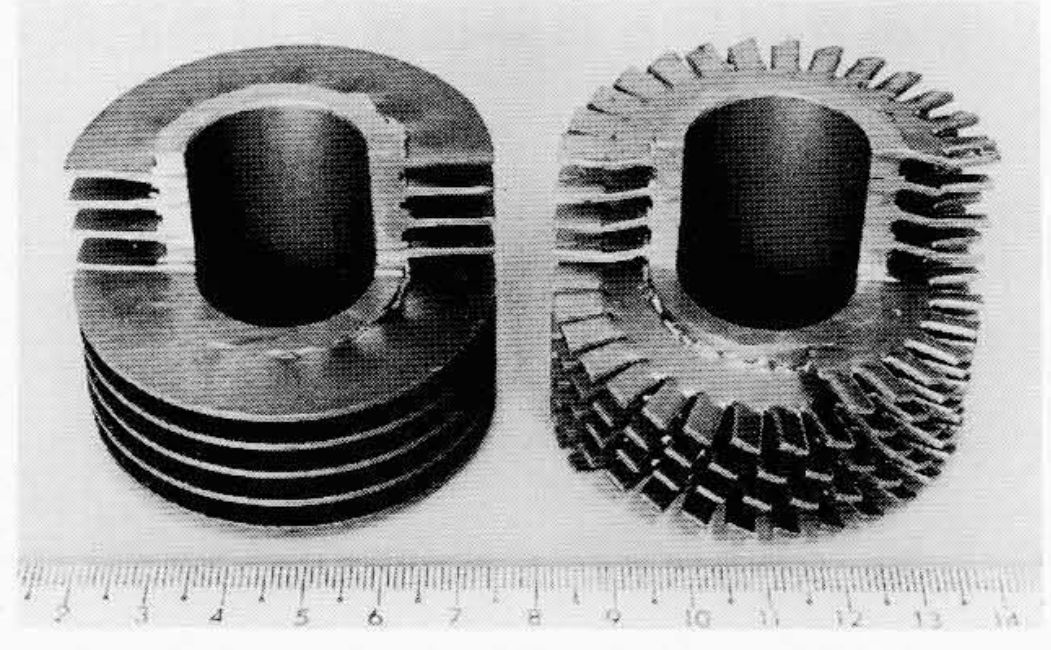
	ソリッドフィンチューブ	セレイテッドフィンチューブ
形状		
ガス側伝達率	100%	約120%
熱貫流率	100%	約110%
ドラフトロス	100%	約118%(単管比較)
伝熱面積	100%	約90%

図4 ソリッドフィンチューブとセレイテッドフィンチューブの比較

セレイテッドフィンチューブでは、ソリッドフィンチューブに比べて約10%の伝熱面積低減が図れ、設備のコンパクト化が可能となる。

組立、300 t門形クレーンによるモジュール所要工期の短縮を図った。現状では1モジュール当たり約1,000 tが標準的である。現地の水切りや搬入条件が整えば、さらに大型化も可能である。

4.4 多軸方式

姫路第一6号機では、従来の一軸方式に対してさらに高い発電端効率が望める多軸方式を採用した。多軸方式では、三軸分の高压蒸気、再熱蒸気、低压蒸気、および給水系が各軸止め弁を介して1台の蒸気タービン、復水系につながっている(図1参照)。このため、ユニットの

起動・停止、負荷変化(ガスタービンの運転台数増減を含む。)の際に、各圧力系統の止め弁とタービンバイパス弁をほかの軸の外乱にならないように操作しなければならない。これを解決するために、多軸用のプラント動特性解析技術を開発し、これを適用して運用を計画した。

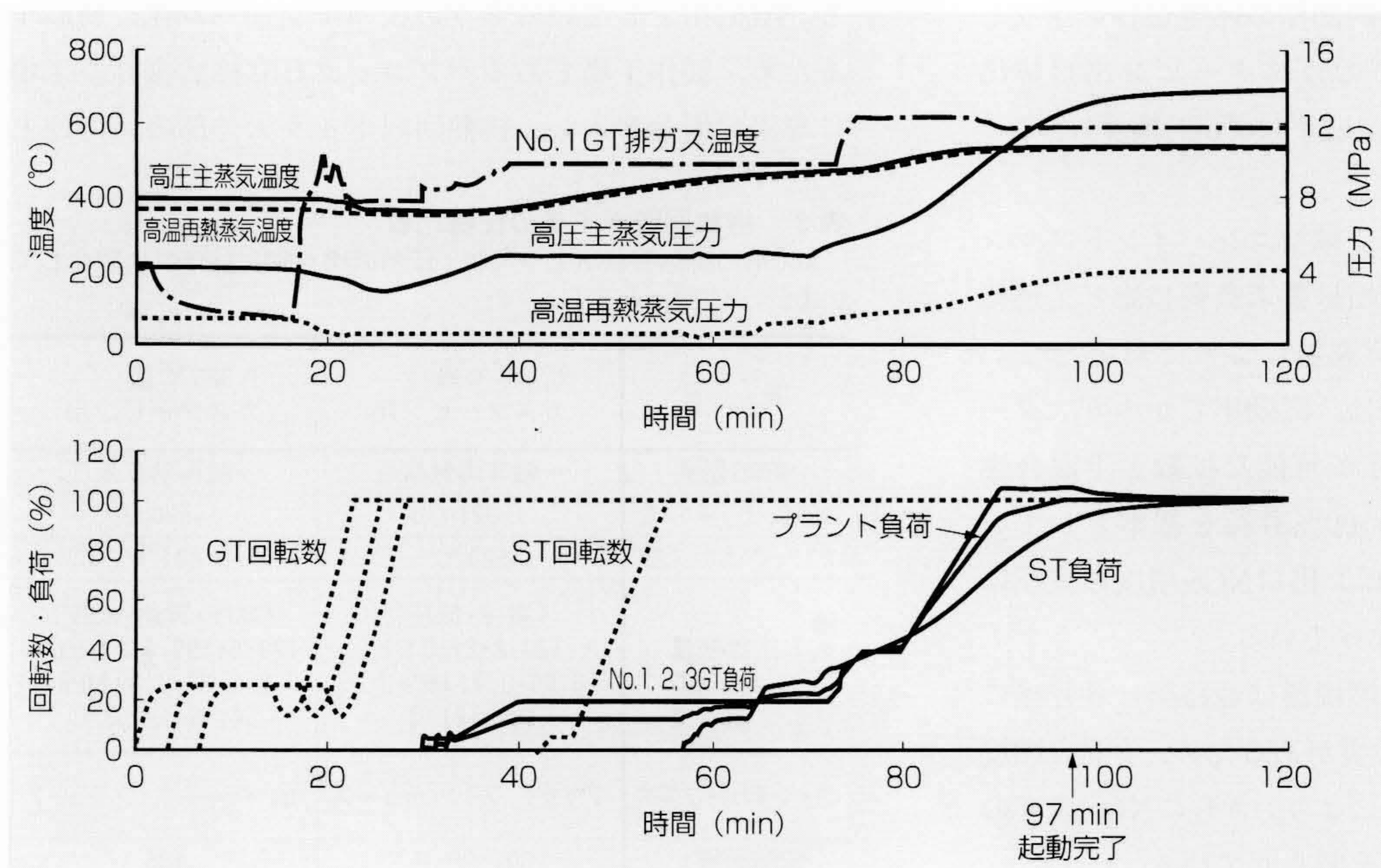
4.5 脱硝技術

発電設備建設の増加に伴って各プラントごとの環境規制値は年々厳しくなり、起動時や負荷変化時、停止時を問わず、NO_x排出量を可能なかぎり低く抑えることが要求されてきている。そのため、脱硝効率を従来の80%から85~90%台へと高め、ガスタービンのNO_x特性とマッチングさせた起動時NO_xの早期低減、高負荷変化率に対するNO_xの追従性、NH₃注入方式の改善などの新技術を採用することにより、高効率脱硝に対して十分満足する結果を得た。

5. 運転実績

姫路第一6号機は、1992年2月に着工し、1995年7月から本格試運転を開始した。川越火力3号系列は、1993年1月に着工し、1995年8月から本格試運転を開始した。このように、これら2プラントはほぼ同時期に計画および設計・据付け・試運転が実施された。

姫路第一6号機の起動方式は、ガスタービン1台で排熱回収ボイラや蒸気タービンを起動し、蒸気タービンが規定負荷に到達後、残りのガスタービンや排熱回収ボイラを追加する方式とした。起動時間短縮と蒸気系の追



注：略語説明
GT(ガスタービン)
ST(蒸気タービン)

図5 多軸型コンバインドプラント起動実績の例(姫路第一6号機)

3台のガスタービンを起動して蒸気タービン通気・併入後、蒸気系のつなぎ込みを実施し、ガスタービンと蒸気タービンを協調して負荷を上昇させる。11時間停止後のホット起動実績を示す。

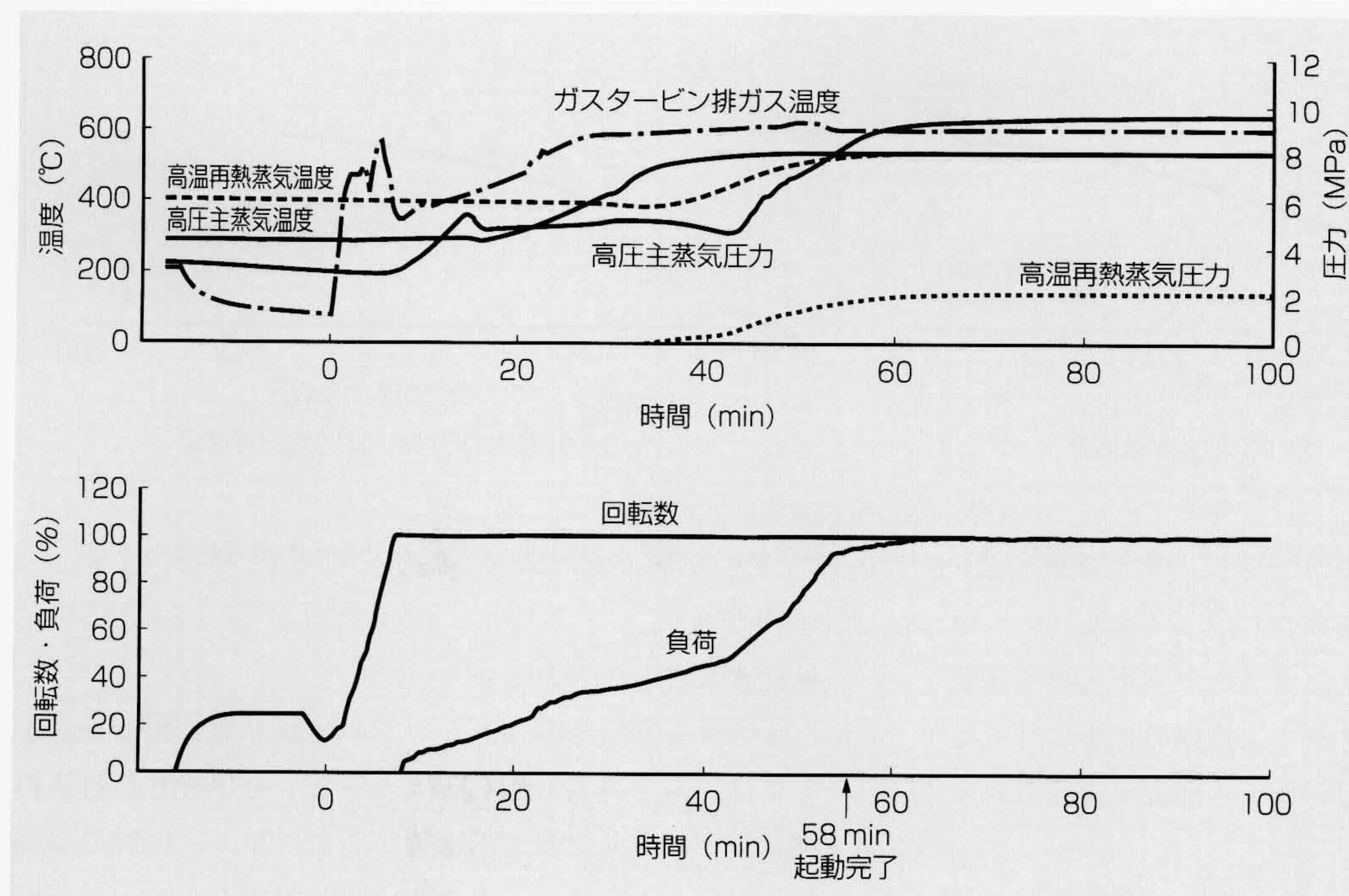


図6 一軸型コンバインドプラント起動実績の例(川越火力3号系列)

ガスタービン起動・併入後、高圧主蒸気温度が上昇し、通気温度が確立した時点で蒸気タービンを起動し、ガスタービンと蒸気タービンを協調して負荷上昇させる。8時間停止後のホット起動を示す。

加・切り離し運用をそれぞれ容易とするためのタービンバイパスシステムを設置し、蒸気タービンでは中圧起動方式を採用している。

毎日起動・停止運用では、ホット起動(同時起動モード)で起動時間97分(計画100分)を達成した。多軸型コンバインドプラントの起動実績として姫路第一6号機のホット起動特性を図5に示す。ガスタービン追加起動と蒸気系追加のためにガスタービン負荷保持を行うが、ガスタービン入口案内翼絞り運用のためガスタービン負荷保持中に昇温ができるので、蒸気系追加完了後に高い負荷変化率として起動時間の短縮を可能としている。

川越火力3号系列では、ガスタービン起動併入後、排熱回収ボイラ発生蒸気を蒸気タービンに通気する方式とし、ホット起動で起動時間58分(計画では70分)を達成した(ガスタービン点火から起動完了まで)。一軸型コンバインドプラントの起動実績として川越火力3号系列のホット起動特性を図6に示す。一軸型コンバインドプラントでは蒸気系追加などの運用はないため、蒸気タービンは高中圧起動方式とし、蒸気温度変化の小さい高負荷域で高い負荷変化率とした起動方式として起動時間を短縮している。

多軸型コンバインドプラントでは、運転中のユニットにガスタービンを追加起動させる運用が必要となるが、姫路第一6号機の追加起動試験では蒸気圧力・温度の変動も小さく、蒸気系追加もスムーズに実施できた。一軸

型コンバインドプラントの系列連用として川越火力3号系列では、5分間隔で一軸ずつ順次起動させる順次起動方式を実施した。

また姫路第一6号機では、ガスタービン空気圧縮機入口案内翼絞り運用の採用により、ガスタービン1台運用で20%から31%負荷、ガスタービン2台運用で29%から67%負荷、ガスタービン3台運用で45%から100%負荷(大気温度22°C時)と、ガスタービン運用台数の変化にかかわらず、連続したプラント負荷運用を可能としている。

なお両プラントとも、負荷変化運用や最低負荷、負荷遮断からランバック運用などについて、所要の性能を満足する結果を得ている。

プラント性能試験結果を図7に示す。プラント性能試験では、いずれのプラントでも、プラント効率計画値を満足することを確認し、100%負荷では49%以上(多軸型では約50%)(高位発熱量基準)を確認することができた。

ACCと従来プラントのプラント効率を比較して図8に示す。ガスタービンの高温大容量化、排熱回収サイクルの高級化に伴うコンバインドプラントの単機容量の増加、および高効率化の傾向が明確であり、従来の汽力に対するプラント効率の優位性は、ACCでますます顕著である。

6. 将来への展望

コンバインド発電プラントでのガスタービンは、効率、

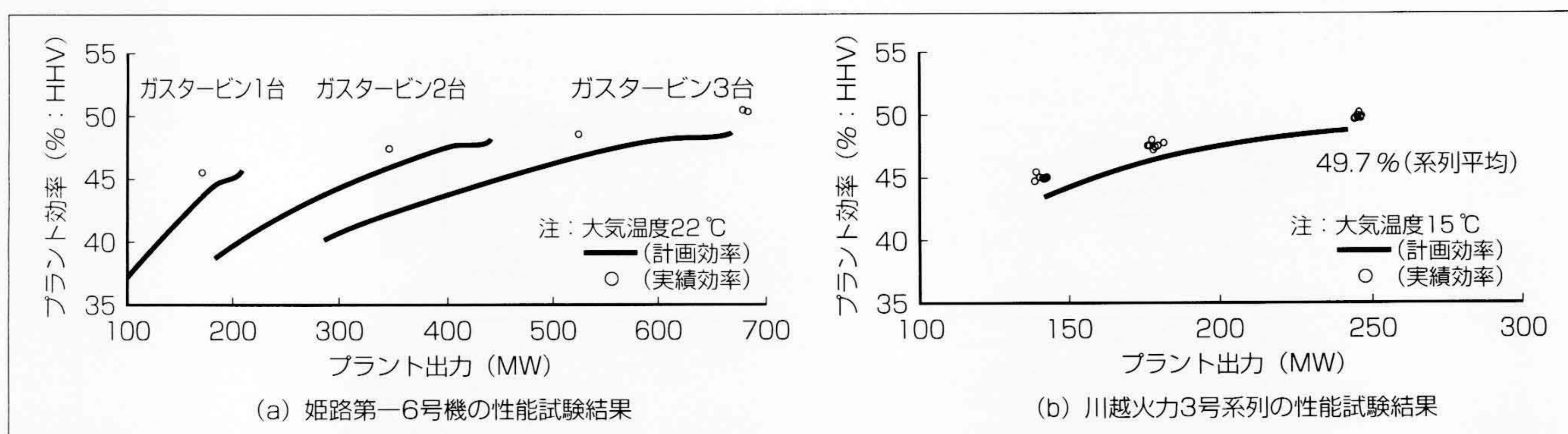


図7 プラント性能試験結果

100%負荷から部分負荷までの計画を上回る高効率が確認できた。100%負荷では、プラント効率50%に近い高効率が実現可能となった。

運用、および環境性能に大きなファクターを占める重要な主機であり、今後のガスタービン技術の進歩に伴ってコンバインド発電プラントのシステム構成が選定されると思われる。

ガスタービン技術では、高温化や低NO_x化が今後の開発の主題となり、また、既存のガスタービンの運用実績を反映した性能と設備の合理的な計画が推進されるものとする。一方、排熱回収設備では、高効率かつシンプルで合理的な設備設計が期待され、発電プラントとしての経済性をも含めたトータルバランスに配慮した計画が

推進されると思われる。

ガスタービンを利用したコンバインド発電プラントとしては、汽力発電設備にガスタービンを追設した排気再燃コンバインドプラントも運用されており、燃料の多様化に対応した各種のシステム構成に対する柔軟な対応が必要となる。

7. おわりに

姫路第一6号機、および川越火力3号系列では、再熱三重圧アドバンスドコンバインド発電プラントをほぼ同時期に計画・設計から建設・試運転まで短期間のうちに実施し、所定の性能や機能を確認することができた。

高効率アドバンスドコンバインド発電プラントは、環境調和に配慮した省エネルギー、かつ電力需要への対応が可能な電源確保の手段として有効である。今後は、環境性能のいっそうの向上、高効率化、あるいは高運用性などのプラント機能分割によるシンプルなシステム構成、燃料種別の多様化に対する対応などを考慮し、さらに開発・検討を進めていく考えである。

終わりに、各プラントの計画から建設・試運転に際し、各電力会社の関係各位からご協力をいただいた。ここに深く感謝する次第である。

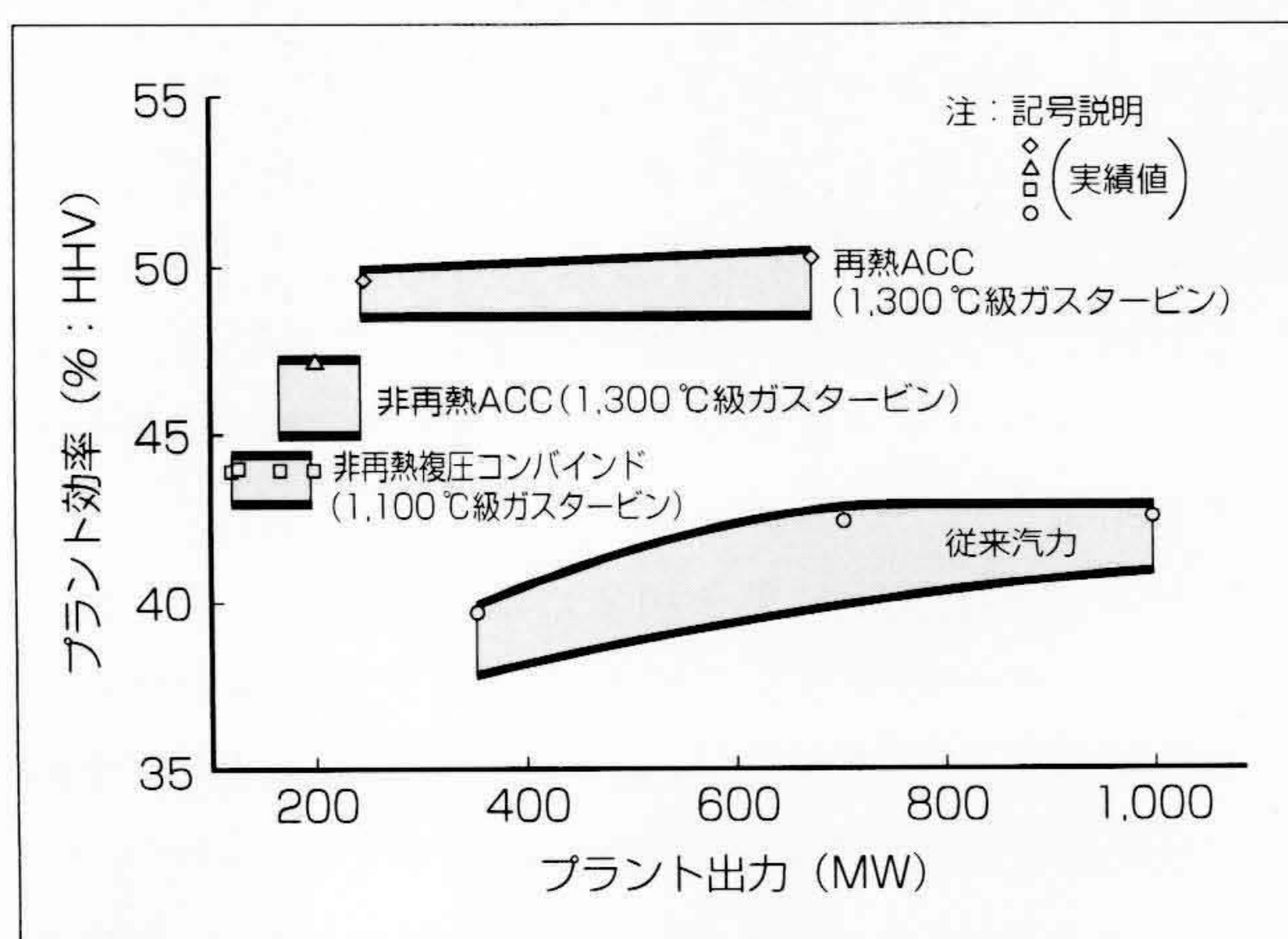


図8 プラント効率の比較

ACCは、最新鋭の高温・大容量ガスタービンと再熱三重圧サイクルを組み合わせた高効率発電プラントとして実績を上げている。

参考文献

- 1) 村田, 外: 高効率発電プラント, 日立評論, 76, 10, 717~722(平6-10)
- 2) 川内, 外: 既設火力発電設備リパワリングの実現, 日立評論, 76, 10, 723~728(平6-10)
- 3) 畠中, 外: 姫路第一発電所5・6号, 火力原子力発電, 469, 10, 56~68(平7-10)
- 4) 佐藤: 川越3・4号系列/新名古屋7号系列ACC発電設備の計画概要, 火力原子力発電, 469, 10, 69~78(平7-10)