

高効率コンバインド発電プラント

—熱効率50%実現への第一歩—

High Efficiency Combined Power Plant

村田重人* *Shigeto Murata*
広瀬文之* *Fumiyuki Hirose*
吉崎弘師** *Hiroshi Yoshizaki*



注：略語説明

ACCプラント (Advanced Combined Cycle Power Plant；燃焼温度1,300℃級の高性能ガスタービンを採用した新型コンバインドサイクル発電プラント)

中国電力株式会社柳井発電所の全景 1, 2号系列おのの700 MWのコンバインドサイクル発電プラントである。2号系列は、国内初の1,300℃級ガスタービンを採用したACCプラントで、2-1号系列は平成6年3月に営業運転を開始した。現在、2-2号系列の建設が平成8年1月の営業運転開始を目指して進められている。

地球温暖化に代表される地球的規模での環境問題とエネルギー資源節約の観点から、CO₂排出量の少ないクリーンな燃料であるLNG(液化天然ガス)を用いたコンバインド発電プラントは、優れた環境保全性と高いプラント熱効率、および運用性が社会的に評価され、そのニーズはいっそう高くなってきている。

日立製作所は、わが国初のコンバインド発電プラントを昭和56年に納入して以来、4プラントを製作、納入してきた。これらの実績をもとに、最新鋭の燃

焼温度1,300℃級高温ガスタービンを採用した、ACCプラント(アドバンスドコンバインド発電プラント)である中国電力株式会社柳井発電所(以下、柳井発電所と言う。)2-1号系列(350 MW)を平成6年3月に完成し納入した。このプラントは、試運転中に実施した性能試験で、発電端熱効率で47.2%と従来のコンバインド発電プラントの実績よりも約7%(相対値)高い値を実現するとともに、運開後も順調に運転を続けており、省エネルギー、環境問題にも大きく貢献することが期待できる。

* 日立製作所 日立工場 ** バブコック日立株式会社 呉工場

表1 ACCプラントの主要設備

柳井発電所2-1号系列(ACC)の主要設備を同1号系列(従来型)と比較して示す。F7F型ガスタービンの採用により、プラント出力および効率が大幅に向上している。

プラント名	柳井発電所1号系列	柳井発電所2-1号系列
運開年月	平成4年12月	平成6年3月
プラント出力	700 MW (125 MW×6軸)	350MW* (198 MW×2軸)
プラント効率 (大気温度 20℃)	43.32%	46.09%
ガスタービン型式 (ガスタービン動翼 入口温度)	F7EA型(1,104℃)	F7F型(1,260℃)
排熱回収ボイラ型式	自然循環型 非再熱複圧	自然循環型 非再熱複圧
蒸気タービン型式	SF-26 非再熱混圧型	DF-26 非再熱混圧型
燃焼器	乾式低NO _x 燃焼器	乾式低NO _x 燃焼器

注：＊ 2-2号系列完成時には700 MW(198 MW×4軸)

に、主要設備を表1にそれぞれ示す。主な特徴は以下のとおりである。

- (1) 最新鋭の1,300℃級ガスタービンを国内で初めて採用
- (2) 最適な機器配置と省スペース化を考慮し、ガスタービンは下方吸気方式および軸流排気方式を採用
- (3) 排熱回収ボイラは非再熱、自然循環方式複圧(二重圧)システムを採用

なお、このプラントはガスタービンと蒸気タービン、および発電機を1軸に直結した1軸型であるが、複数台のガスタービンと1台の蒸気タービンにそれぞれ発電機を接続した多軸型もある。また、排熱回収ボイラについては、このプラントのような高圧ドラム、低圧ドラムを備えた複圧システムのほかに、中圧ドラムを持つ三重圧システムや、蒸気条件の高温・高圧化を目的として再熱サイクルを採用したシステムも考えられている。これらのシステムは、このプラントをベースにより高い熱効率を目指すなど、ニーズに応じたシステム構成としており、現在建設が進められている^{1), 2)}。

2.2 高効率ガスタービン

ガスタービンの高効率化を図るには、燃焼温度の上昇が必要不可欠である。日立製作所は、これまで燃焼温度(タービン第1段動翼入口温度)が1,100℃級のガスタービン(F7E型)を主流としてきたが、このほどわが国で初めて1,300℃級ガスタービン(F7F型)を採用した。このF7F型ガスタービンは、1,100℃級として実績のあるF7E型、F7EA型をベースに高性能圧縮機の開発や新材料、新

表2 F7型ガスタービンの仕様

各型式での仕様の比較を示す。燃焼温度の上昇による出力、効率の増加がわかる。

項目	仕様			
	F7E	F7EA	F7F	F7FA
定格出力(kW) (単純サイクル, 発電機端)	74,400	83,500	150,000	159,000
定格回転数(r/min)	3,600	3,600	3,600	3,600
効率(LHV)	31.9%	32.6%	34.5%	35.9%
燃焼温度/圧力比	1,085℃/ 11.5	1,104℃/ 12.4	1,260℃/ 13.5	1,288℃/ 15.0
排気温度(℃)	527	530	583	590
圧縮機段数(段)	17	17	18	18
タービン段数(段)	3	3	3	3
燃焼器(個)	10	10	14	14

注：大気条件(15℃/0.10 MPa)

冷却技術の採用により、1982年から約6年の歳月をかけて米国GE社が開発したもので、大容量かつ高効率のガスタービンである。また、F7F型に対して燃焼温度を28℃上昇させてさらに効率アップを図ったF7FA型も開発した。これらのF7型ガスタービンの仕様比較を表2に示す(F7F型ガスタービンの本体断面はこの特集号別論文「既設火力発電設備リパワリングの実現」を参照のこと)。

ガスタービン本体は、空気圧縮機、タービンおよび燃焼器の三つの部分で構成している。以下に、各部での新技術の内容について述べる。

(1) 空気圧縮機

空気圧縮機の翼列は、実績のあるF7E型圧縮機のスケールアップで設計した。また、空気流量増加に伴う圧縮機入口流路部の拡大に対応し、従来の圧縮機段数17段に初段翼を追加して18段とした。追加した初段翼では、翼外径の増大によって周速が大きくなるため、翼面上での空気流のマッハ数が増大し遷音速となる。既存翼形状は亜音速設計のため、遷音速状態で用いた場合は損失が大きくなることから、翼形状をやや薄肉の直線形状とした遷音速設計として損失を低く抑えた。

(2) タービン

タービン段数は、性能や実績面からF7型として採用した3段とした。翼は三次元設計としており、第3段動翼からの出口ガスを軸方向に排出する軸流排気とすることによって損失の低減を図った。第1段動翼は燃焼温度の大幅な上昇に対応するため、リターンフロー冷却翼を採用した。これによって冷却を強化し、燃焼温度1,260℃に対しても翼の温度としてはF7E型、F7EA型と同等ま

たは低く抑えることができる。

(3) 燃 焼 器

燃焼器には、低NO_x化を図った乾式低NO_x燃焼器を採用し、F7E型、F7EA型からF7F型への容量増加に対応して設置数を10本から14本に増加させた。

燃焼器は図2に示すように、希薄予混合燃焼法を採用した2段燃焼器であり、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。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用い、高負荷帯では拡散と予混合の2種類の燃焼を併用するのが特徴である。広い負荷帯にわたって安定した燃焼を確保し、低NO_x化を図るには、拡散燃焼部と予混合燃焼部の空気配分の最適化が重要である。このため、主室、副室への空気流量を調整するための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した。この方式の採用により、広い負荷範囲で予混合燃焼を達成でき、低NO_x化を図ることが可能となった。

2.3 排熱回収ボイラ(HRSG)および脱硝装置

ACCプラントに採用の1,300℃級ガスタービンは、従来(1,100℃級)に比べ排ガス量が約30～50%、排ガス温度が約60～90℃上昇している。したがって、排熱回収ボイラもそれに伴い、表3に示すように蒸気条件の高温・高圧化および大容量化を図った。以下に、柳井発電所2-1号系列の排熱回収ボイラの特徴について述べる。

(1) 高効率化

ガス量の増加および入口ガス温度の上昇に伴い、蒸発量は1号系列に比べ約50%増加し、高圧蒸気温度も従来火力ボイラ並みの温度となる。ガス温度・蒸気温度の高温化に伴う高温酸化の面から、伝熱管には高クロム系フィンチューブを採用し、信頼性向上を図るとともに、ボイラの高効率化を達成した。

(2) セレイテッドフィンチューブの採用

排熱回収ボイラの伝熱管には、多量のガスタービン排ガス熱量を効率よく蒸気に置き換えるために、スペースファクタのよいスパイラルフィンチューブを採用し、従来、フィン型式としてソリッドフィンを選定していた。しかし、このプラントでは熱回収量の増加に伴い排熱回収ボイラが大型化するため、バブコック日立株式会社で新たに研究開発した高性能セレイテッドフィンチューブを採用した。

セレイテッドフィンチューブは、図3に示すようにフィンに切れ込みを入れ、伝熱効率を向上させたもので、ソリッドフィンチューブよりも伝熱面積を約10%程度低

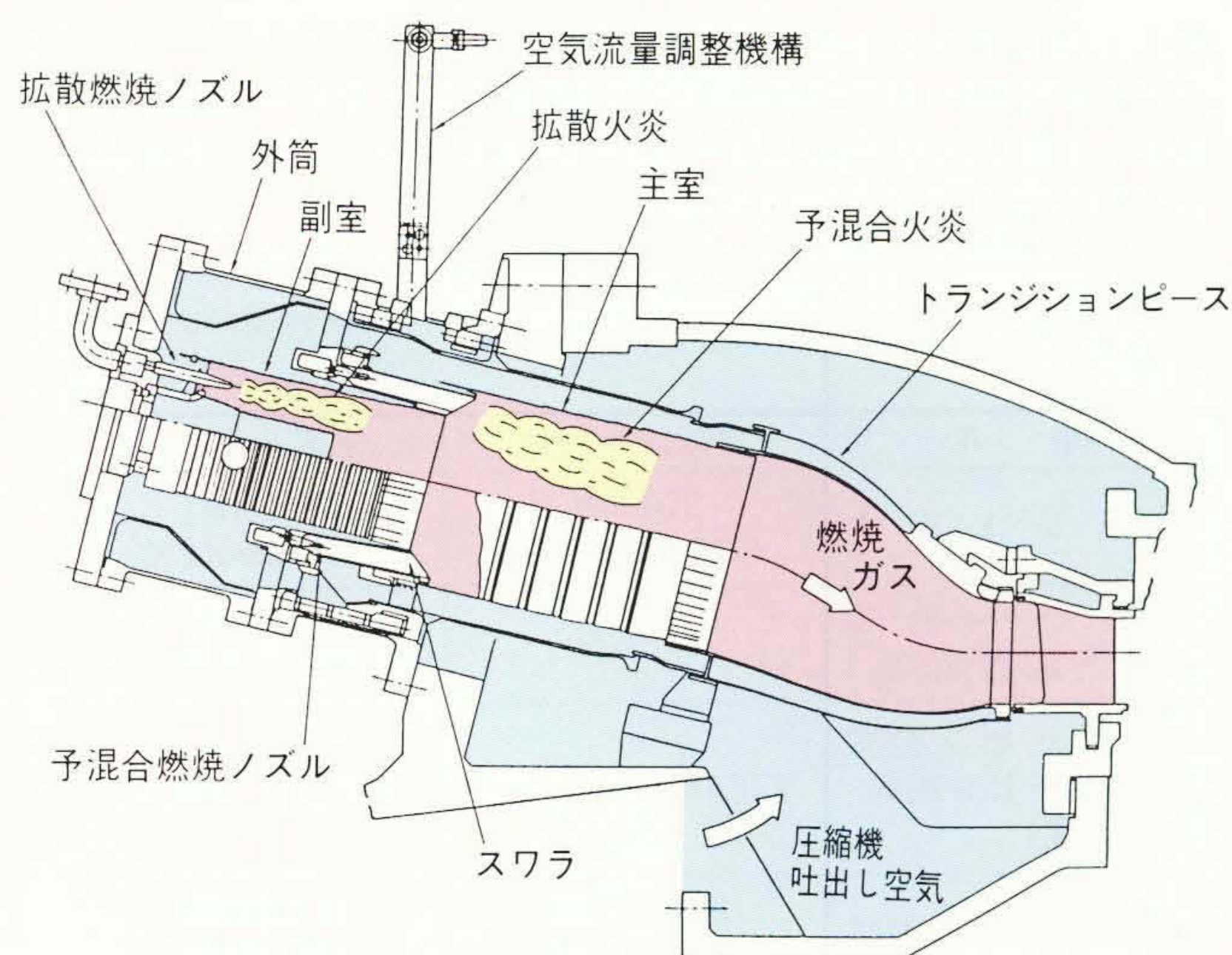


図2 乾式2段燃焼器の構造

乾式2段低NO_x燃焼器の構造断面を示す。この燃焼器はF7F型を示しており、周方向に14本配置されている。

表3 排熱回収ボイラ仕様

1,300℃級ガスタービンの採用により、排熱回収ボイラの蒸発量が増大するとともに、蒸気温度、圧力の高温・高圧化を図った。

プラント名	柳井発電所 1号系列	柳井発電所 2-1号系列
ガスタービン型式	F7EA (1,100℃級)	F7F (1,300℃級)
ガスタービン排ガス量(t/h)	1,046	1,313
ガスタービン出口排ガス温度(℃)	541	637
蒸気サイクル	非再熱 複圧	非再熱 複圧
排熱回収ボイラ性能	高圧	低圧
蒸発量(t/h)	128.0	27.0
蒸気温度(℃)	490	171
蒸気圧力(MPa)	5.98	0.72
脱硝率(%)	80	80
寸法 幅 × 高さ × 長さ(m)	7.6 × 10.7 × 24.7	8.9 × 14.8 × 28.9

注：大気温度15℃、軸100%負荷時

減することが可能となる。そのため、設備のコンパクト化や省資源化に有利である。

(3) 本体構造

伝熱管のサポート構造として、従来は下部管寄せサポート構造を採用していた。このプラントでは排熱回収ボイラの大容量化に伴って伝熱管の長さが増大したため、従来の火力ボイラで実績のある上部からのつり下げサポート構造を採用した。つり下げサポート構造は、伝熱管の強度面で有利であるうえ、サポート構造も簡素化できる利点がある。また、頻繁な起動・停止や高負荷率運転により、各部材の温度差に起因した熱応力や内圧応力が

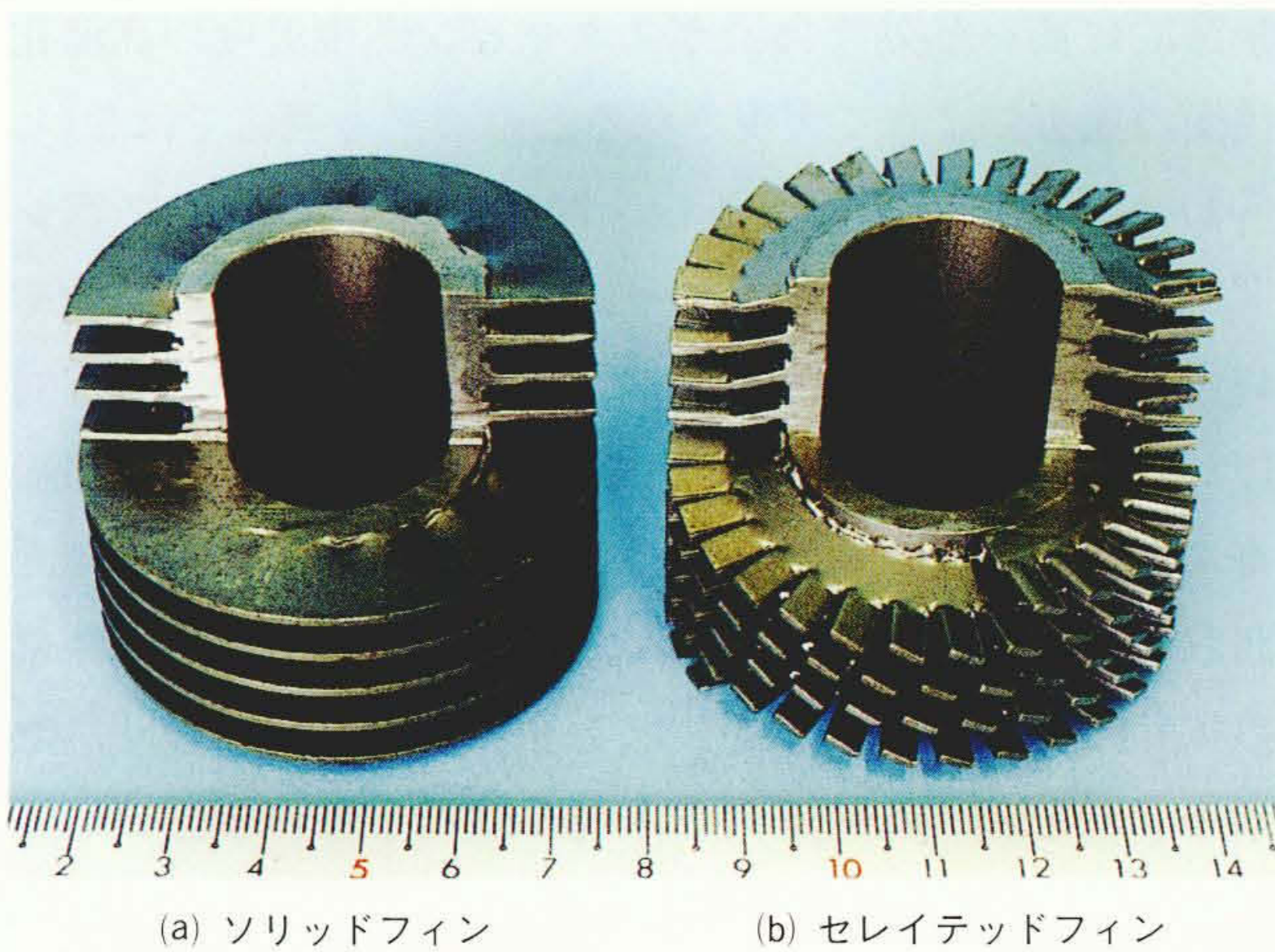


図3 フィン形状

ソリッドフィンチューブと比べ、伝熱面積を約10%低減可能なセレイテッドフィンチューブの採用により、設備のコンパクト化を図った。

繰り返し作用することから、応力低減にも配慮した構造である。

なお、排熱回収ボイラの輸送・据付け方法には大型モジュール化工法を採用することにより、製品品質の向上および現地据付け期間の短縮化を図った。

(4) 脱硝装置

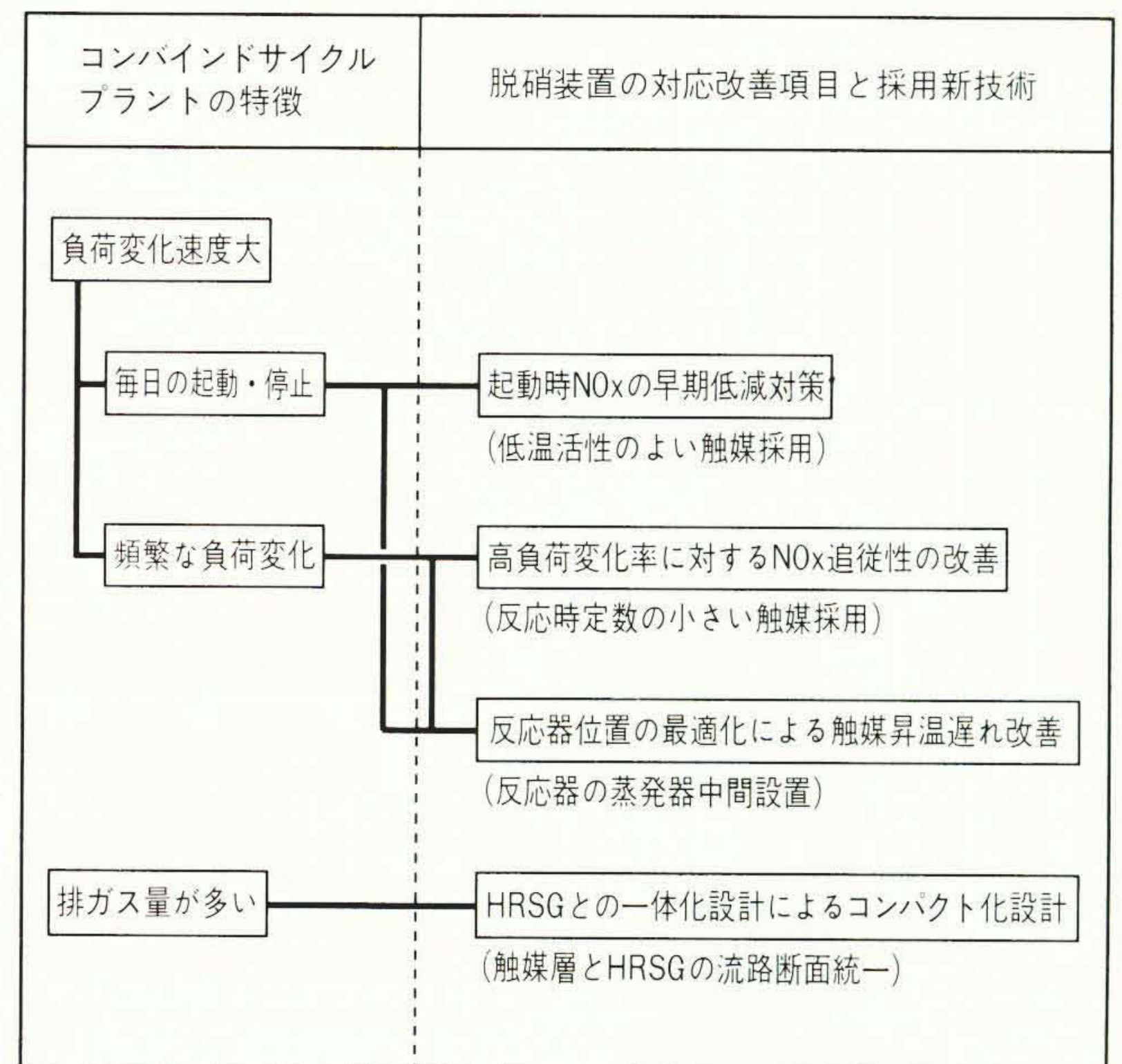
コンバインドサイクル発電プラントは、従来の同容量ボイラに比べて処理するガス量は多いがプラント効率が高く、負荷変化速度が速いため起動・停止が容易で、かつその負荷変化は短時間で広範囲に行える特徴がある。このため、コンバインドサイクル発電プラント用脱硝装置は、負荷変化に対する脱硝性能の追従性を追求したもので、毎日の起動・停止および頻繁な負荷変化対応を考慮した最新の設備である。これらの運用に対応するため、脱硝装置には図4に示す新技術を採用した。

3 ACCプラントの運転実績

この章では、営業運転に先立って行われた試運転の際に得られた実績データについて述べる。

3.1 熱効率

1,100℃級ガスタービンをを用いたコンバインドサイクル発電プラントでは、柳井発電所1号系列の場合、プラントの定格負荷で約43%の計画熱効率(実績は約44%)を持つ。これに対して、このプラントは1,300℃級ガスタービンの採用により、計画熱効率で約46%と相対値で約7%(計画値ベース)の効率向上が図られている。熱効率試験結果を大気温度5℃に補正した値について図5に示す。実績では計画値よりもさらに約1.7%(相対値)高い熱



注：略語説明 HRSG (Heat Recovery Steam Generator)

図4 脱硝装置の改善項目と採用新技術

コンバインドサイクルプラントの特徴を生かすため、脱硝装置に対しても多くの技術課題を解決するための新技術が採用されている。

効率が得られた。さらに大気温度20℃では、最高で約47.2%の熱効率を達成できることを確認した。

3.2 起動時間特性

DSS(毎日起動・停止)運用を主体とするコンバインドサイクル発電プラントにとっては、起動時間は運用性を評価するうえで重要な要素である

DSS運用に対応するホットスタートでの起動時間特性の実績値を図6に示す。ガスタービン起動から起動完了(排気温度制御到達または給電渡し負荷168 MW到達)

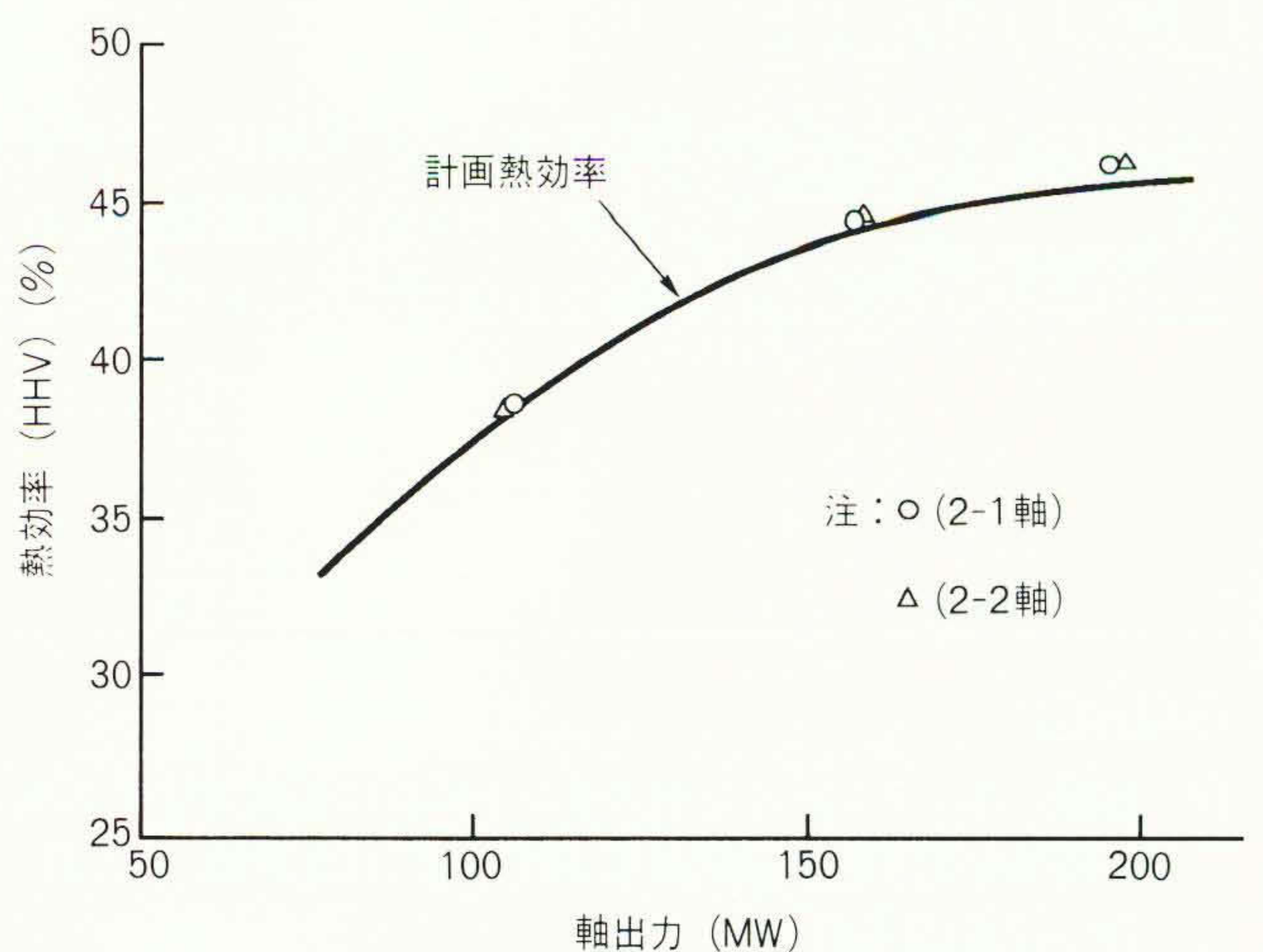


図5 プラント熱効率実績

F7F型ガスタービン(1,300℃級)の採用により、熱効率は1号系列実績(約44%)を大きく上回る46%以上を達成した(大気温度5℃時)。

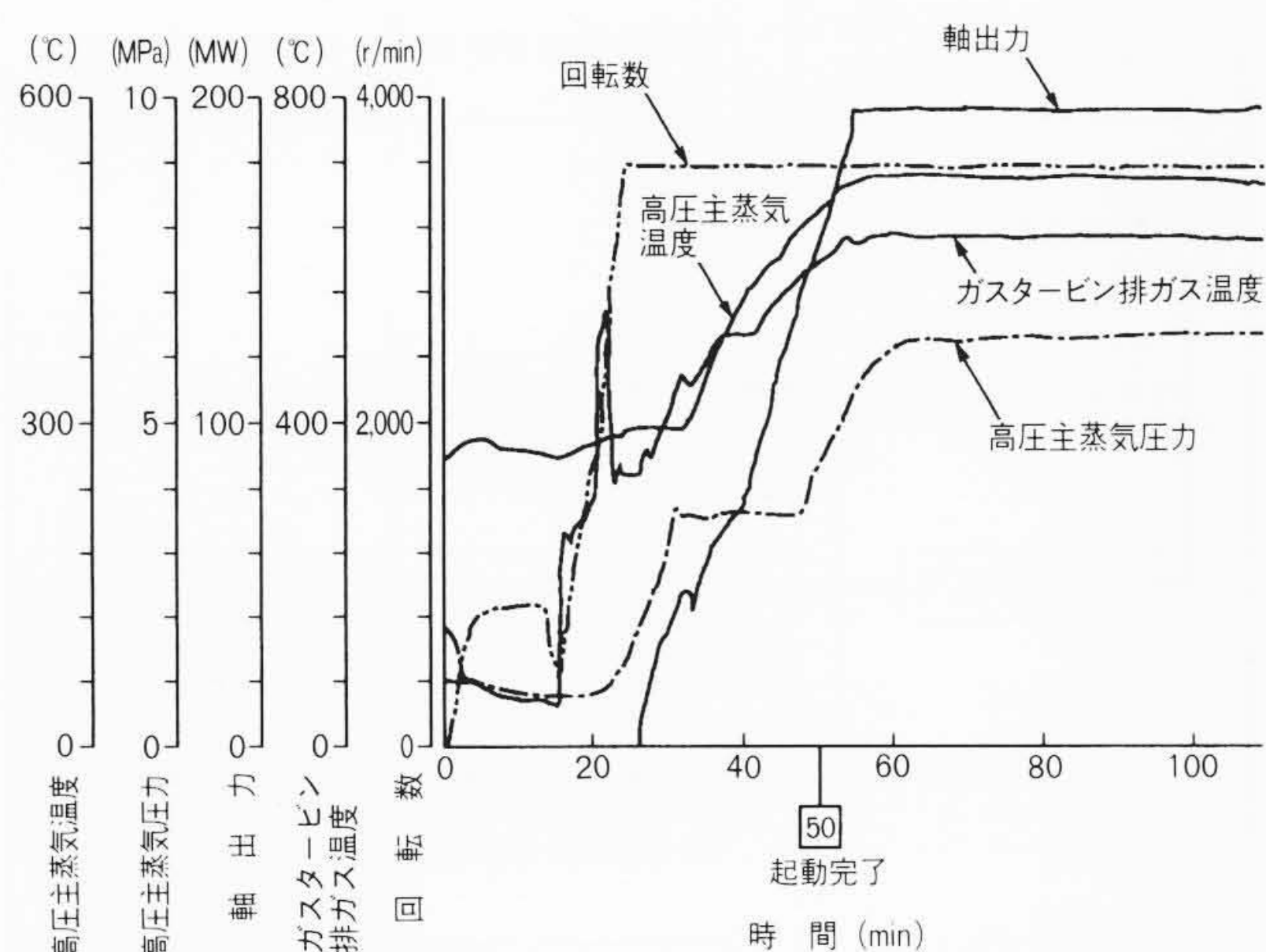


図6 起動時間特性

ホットスタートの場合を示す。設備容量の増大にもかかわらず、ガスタービン起動から起動完了まで50分の短時間起動を達成し、DSS運用に優れた設備であることを確認した。

までの実績所要時間は50分と短時間起動を達成することが可能である。

3.3 低NO_x燃焼器の実績

燃料としてLNGを用いたこのプラントでは、前述した乾式2段燃焼方式の低NO_x燃焼器の採用により、ガスタービン出口NO_x濃度約40～50 ppm(16%O₂換算)と計画性能を満足していることを実機で確認した。

3.4 排熱回収ボイラ性能

高伝熱効率型のセレイテッドフィンチューブを採用したこの排熱回収ボイラは、試運転結果から、計画ボイラ効率84.1%に対し実績は約85%と、計画値を満足する性能が得られていることを確認した。

4 将来への展望

コンバインドサイクル発電プラントの発展は、プラント構成機器の中心であるガスタービンの技術開発によるところが大きい。特に従来の火力発電プラントに比べて

飛躍的に高い熱効率は、ガスタービン燃焼温度の高温化技術の進歩によって実現されるといっても過言ではない。

わが国で初めて営業運転を開始したこのACCプラントでは、1,300℃級ガスタービンの採用により、熱効率47.2%を達成し、実績ベースで従来よりも約7%(相対値)の効率向上を図ることができた。さらに、1,300℃級ガスタービンを採用する場合には、蒸気サイクルでの熱回収量を増大できることから、このプラントをベースに蒸気サイクルについてもいっそうの高効率化を図り、熱効率48%を超えるプラントも現在計画している。

コンバインドサイクル発電プラントのいっそうの高効率化を図るための技術開発は、今後さらに重要になると考えられる。特に、高効率化の中心となるガスタービンについては、1,500℃級の燃焼温度を実現するため、単結晶材などの新型材料による動翼の開発や冷却技術の改良などの研究開発を進めている。これに加えて、排熱回収ボイラ、蒸気タービンなどの蒸気サイクルのシステム最適化により、熱効率のいっそうの向上を図ることができ、近い将来には50%を超えるプラントの実現も期待できる。

5 おわりに

日立製作所は数多くのコンバインドサイクル発電プラントの計画、設計、建設、試運転に携わってきた実績をもとに、わが国初のACCプラントである柳井発電所2-1号系列を完成させ、これによりプラント熱効率50%を実現するための第一歩を踏み出した。

今後も最新の技術を採用した多くのコンバインドサイクル発電プラントの建設が計画されており、これまでに蓄積した実プラントでの豊富な経験をもとに、社会のニーズに合った最新の発電プラントの実現に向けて取り組んでいきたいと考えている。

参考文献

- 1) 高鷹, 外: コンバインドプラントにおける蒸気サイクルの高効率化と排熱回収ボイラの対応, 日立評論, 74, 11, 791～796(平4-11)
- 2) 武田, 外: 高効率コンバインド発電プラント, 日立評論, 74, 11, 775～780(平4-11)