

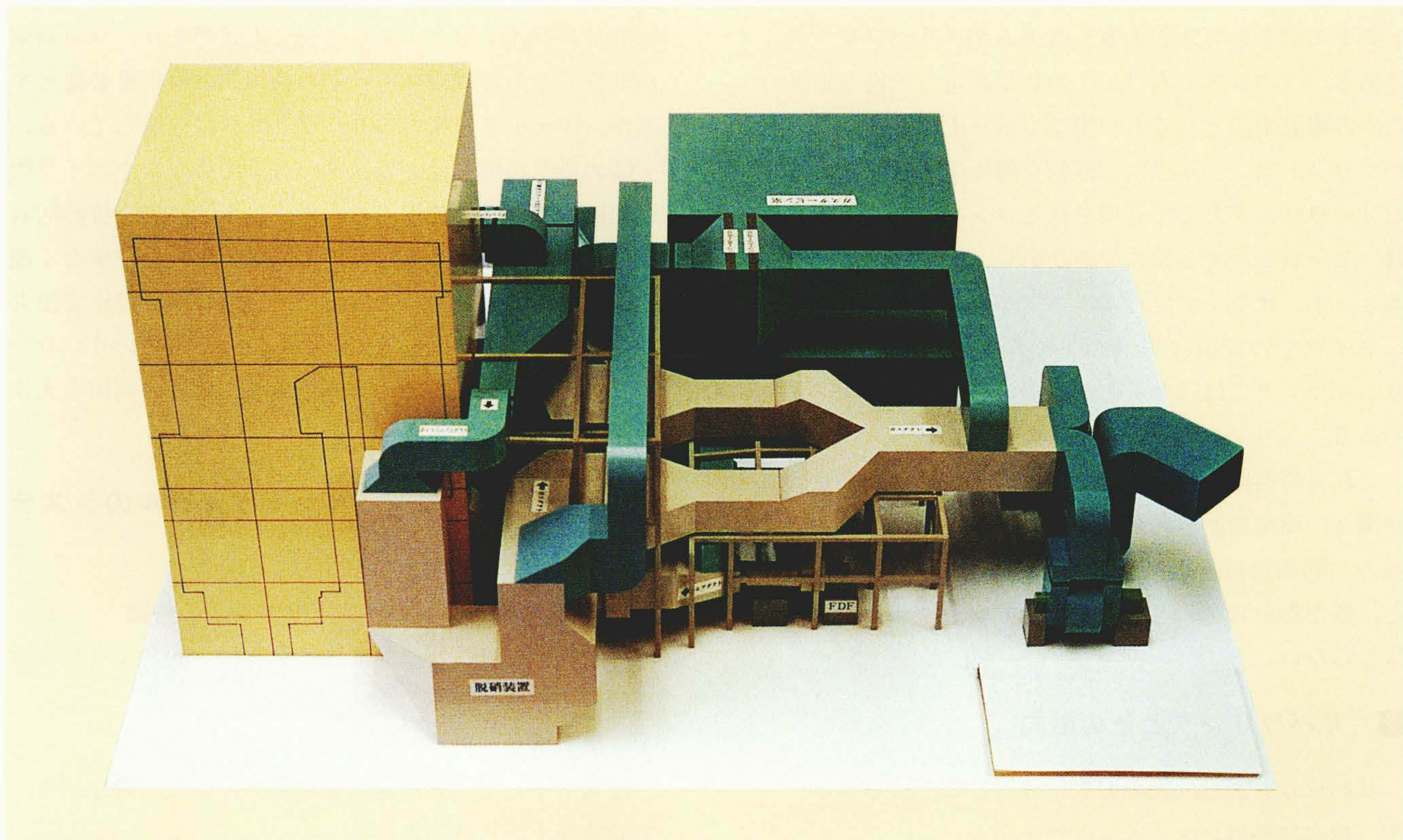
排気再燃形コンバインドサイクル適用による 既設火力の再生

Renewal of Existing Fossil Fired Plants Incorporating Fully Fired Combined Cycle

森川 健 悟* *Kengo Morikawa*

福本富美男* *Fumio Fukumoto*

川内 章 弘** *Akihiro Kawauchi*



設計中の排気再燃形コンバインドサイクルモデル 青色部が追設部位である。従来系統に匹敵する規模の煙風道系統を追設する。

最近の急激な電力需要の増加に対応して、新規プラントを立地する工事期間に比べて大幅に短い工事期間で出力増加が可能であり、効率向上も合わせて図ることのできる、既設火力とガスタービンを組み合わせたシステム、いわゆる「リパワリング」が注目されている。

このリパワリングには、いくつかの方式がある。その中でもガスタービンの排ガスをボイラ燃焼用酸素源として用いる排気再燃形コンバインドサイクル

が、停止期間の短縮と効率向上の点で優れていることから、主流のシステムとなっている。

日立グループは、コンバインドサイクルについて排熱回収形をはじめ種々のシステムの新技術を開発し、実機適用に取り組んできた。

排気再燃形コンバインドサイクルでもその特徴を生かすための最適システム構成の確立と新しいシステムであるため安定した運用を確保することを特に留意して設計を進めている。

* バブコック日立株式会社 呉工場 ** 日立製作所 日立工場

1 はじめに

最近の発電設備で特に必要とされることは、(1) 電力需要の増加に対応できる短期間の電源確保、(2) 地球環境問題によるCO₂排出量抑制の観点からのプラント効率向上、である。

上記の2点を満足することのできる既設火力とガスタービンを組み合わせて出力増加を図り、合わせてプラント効率の向上も可能とするシステムが「リパワリング」である。このシステムは、この数年の電力予備率確保のための緊急電源としてわが国でも取り上げられ、二、三のプラントは、2年以内に運転を開始する状況にある。

リパワリングとして適用されるコンバインドサイクルは、ヨーロッパで多数の実績があり、例えばドイツで16ユニット、オランダで11ユニットが数えられる。

ドイツでの実績はすべてが新設時点からの採用であり、オランダではほとんどが改造によるコンバインド化である。

これらの実績^{1),2)}は、参考とすべき点が多々あるが、わが国との環境規制値の相違や、コンバインド化後も既設並みの運用性確保が必要とされることなどを考慮すると、新たなシステムとして技術開発を進めていかなければならない。

2 リパワリングとその動向

リパワリングは、次の方式に分けることができる。

(1) 給水加熱形コンバインドサイクル

- (2) 排熱回収形コンバインドサイクル
- (3) 排気再燃形コンバインドサイクル

上記(1)~(3)方式の特徴の比較について表1に示す。

(1)の給水加熱形は、ガスタービン用煙突の設置と給水加熱に必要な熱量に適合するガスタービンとの組み合わせを前提として、工事のための発電停止期間が短い利点から緊急電源の適用に評価される方式である。

(2)の排熱回収形は、新設に適用されている多軸形排熱回収コンバインドサイクルと同じ方式であり、高い効率が期待できる。既設ユニットの長期間の停止を必要とするが、中・小容量火力のリパワリングには適している。

(3)の排気再燃形は、ガスタービンの排ガスをボイラ燃焼用酸素源として使用するため、給水加熱形や排熱回収形に比べて単位出力当たりの取り扱いガス量が少なく環境条件対応に優れている。また、短期の既設停止で出力増加と効率向上が図れることから、わが国でのリパワリング計画のすべてがこの方式であり、海外の実績も大多数がこの方式である。

3 排気再燃形コンバインドサイクルのシステム構成

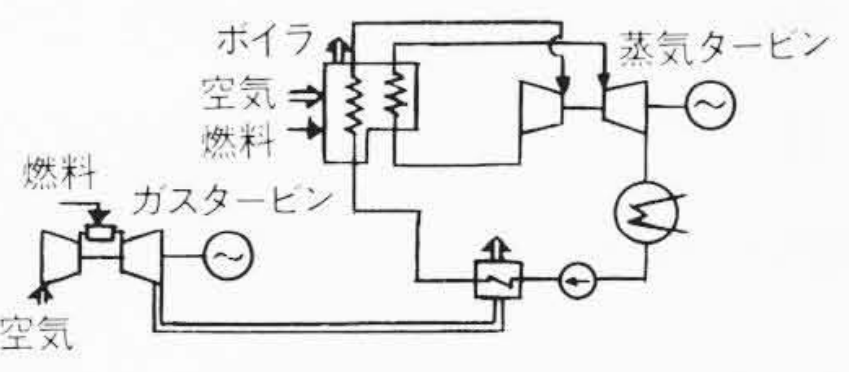
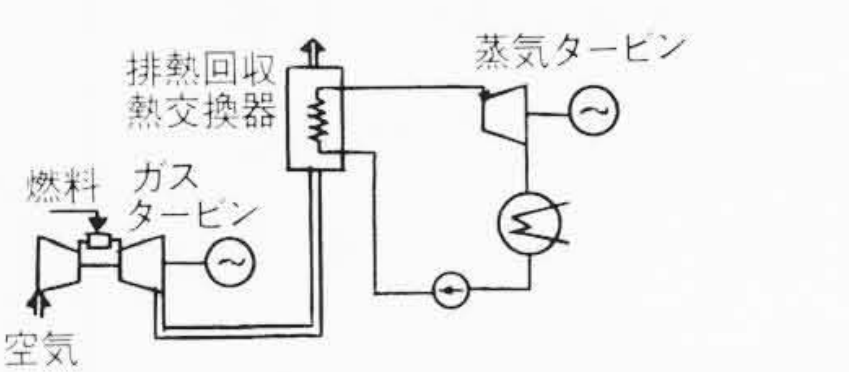
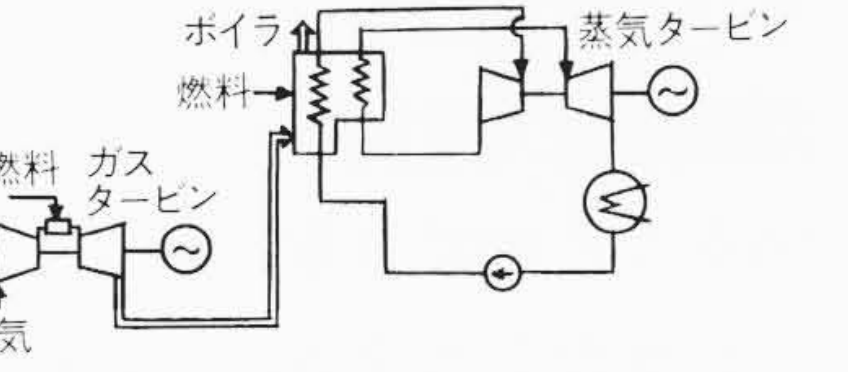
3.1 排気再燃形コンバインドサイクルの特徴

排気再燃形コンバインドサイクルは、次のような特徴を持っている。

(1) 出力増加，効率向上が図れること。

ガスタービン形式や適切なサイクル構成の選定によって効率向上が可能である。

表1 リパワリングの主要システム リパワリングの代表的なシステムについて、その系統、追設・改造項目と特徴についての比較を示す。

システムの種類 項 目	(1) 給 水 加 熱 形	(2) 排 熱 回 収 形	(3) 排 気 再 燃 形
1. システム概要	 ●ガスタービンの排ガスを蒸気サイクルの給水を加熱する。	 ●概設ボイラを撤去し、ガスタービンと排熱回収ボイラを設置する。	 ●ガスタービンの排ガスを、ボイラ燃焼用酸素源として利用する。
2. 主要追設、改造項目	(1) ガスタービン追設 (2) ガス給水加熱器追設 (3) 煙突追設 (4) 脱硝装置追設	(1) ガスタービン追設 (2) 排熱回収ボイラ追設 (脱硝装置を含む。) (3) 蒸気タービン流用の検討 (4) 煙突追設	(1) ガスタービン追設 (2) 煙道節炭器追設 (3) 脱硝装置改造または追設 方式によっては改造項目が異なる。
3. 効 率*	小	大	中
4. 改造範囲と工事期間**	小 (約3か月)	大 (2~3年)	中 (約6か月)

注：* ガスタービンと既設設備との適合性で効率は大きく異なる。
** 代表例を示す。ボイラ形式、ガスタービンとの適合性、適用改造範囲によって工事期間は大きく異なる。

(2) 既設設備の有効利用が可能なこと。

既設ボイラ設備、燃料設備、煙突などの流用が可能である。

(3) 短いプラント停止期間(解列～火入れ)で、リパワリング改造が実施可能なこと。

既設機運転中に土木建築、機器追設などの工事が、定期検査期間中に改造工事がそれぞれ実施できる。

(4) 環境対応が比較的容易なこと。

ガスタービン追設によって増加するNO_x(窒素酸化物)には、既設脱硝装置の改造などによって対応が可能である。

3.2 基本計画条件とシステムの選定

既設のボイラ・蒸気タービンプラントを排気再燃形コンバインドサイクル化する場合、ガスタービン容量の選定、ガスタービン・蒸気タービンおのこの単独運転実施の有無、および排出ガス・排水性状の計画条件がそのシステム構成に特に大きく影響する。

3.2.1 既設プラントとガスタービンの組み合わせ

ガスタービン形式と台数の選定例を図1に示す。

既設プラントとガスタービンの組み合わせでは既設ボイラのガス量に適合したガスタービン形式、台数の選定が重要である。ボイラ燃焼用として供給される空気およびガス量に占めるガスタービン排ガス量の割合(ガスタービン排ガス量比)と、プラント効率向上量の関係について、その検討例を図2に示す。

ガスタービン容量が小さいとボイラ燃焼用の排ガス量が不足するためFDF(Forced Draft Fan)で必要な酸素量を補うことになり、全量ガスタービン排ガスで賄う場合に比べて排熱利用割合が減少するためプラント効率向上量は低下する。このためガスタービン形式や台数の選定にあたっては、既設ボイラ排ガス量に適合したガスタービンを選定したほうがプラント効率向上望ましい。

3.2.2 ガスタービン排ガスの冷却とシステム構成

ガスタービン排ガスの冷却に関し、システムの構成とその比較を表2に示す。

ガスタービン排ガスをそのまま燃焼用酸素源として直接ボイラに導入するシステム(高温ウインドボックス方式)は、排ガスを給水系によって冷却するシステム(低温ウインドボックス方式)に比べ抽気量が多く、再生サイクル効率を高く保てるため、プラント効率向上量は増加する。

ただし、低温ウインドボックス方式でもボイラ蒸発器で排ガス冷却を行うことが可能であれば、高温ウインドボックス方式並みのプラント効率を確保できる。

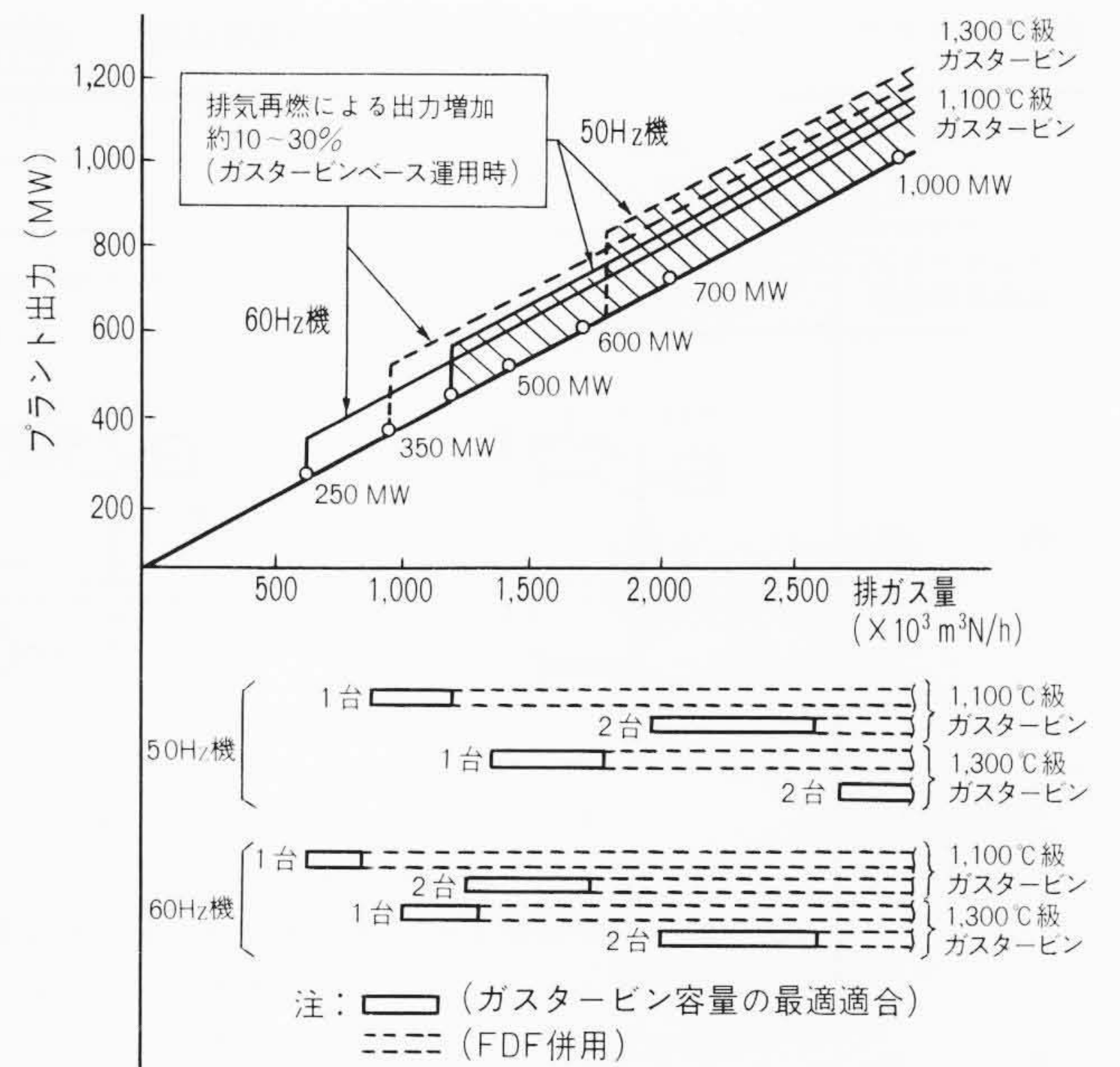
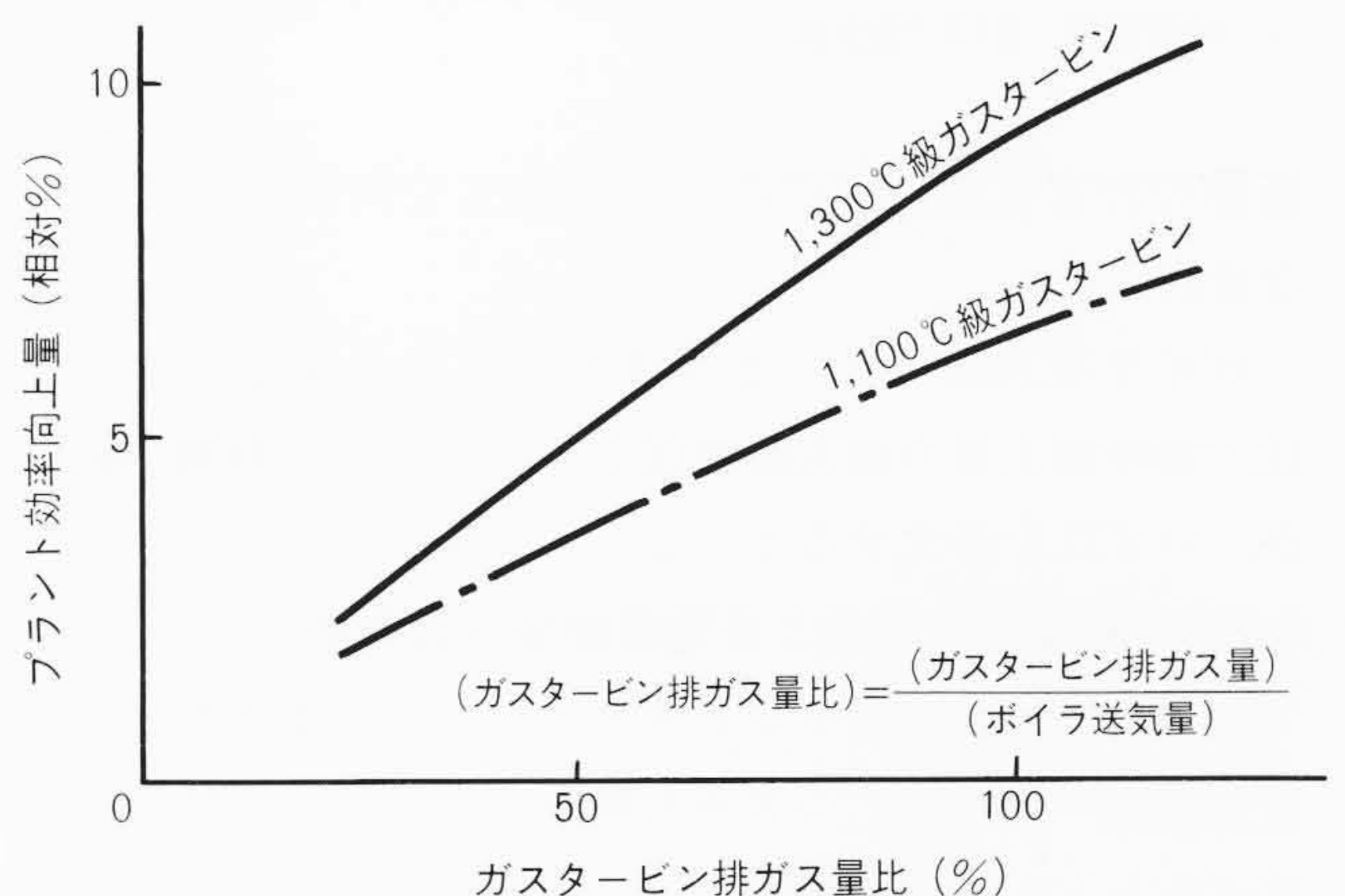


図1 プラント出力とガスタービンの選定 排気再燃形コンバインドサイクルでの既設プラント出力、排ガス量に対するガスタービン型式、台数の選定例を示す。



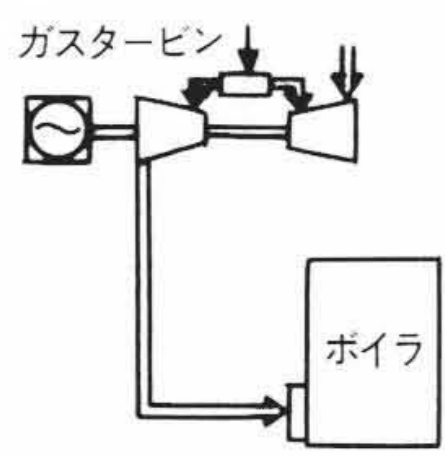
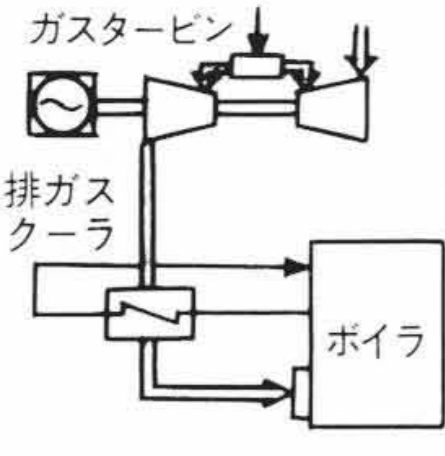
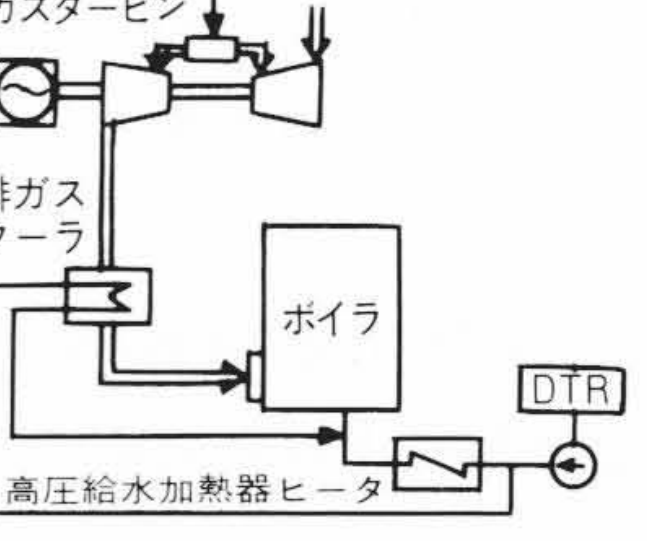
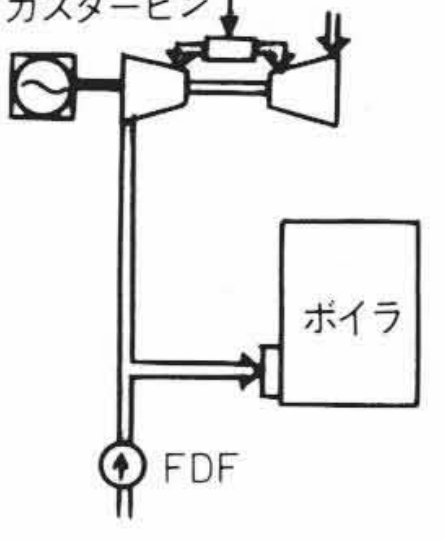
注: ボイラ送気量(ボイラ燃焼用として供給する空気とガス量)

図2 ガスタービン排ガス量とプラント効率向上量 定格負荷運転時のボイラに投入するガスタービン排ガス量とプラント効率向上量の関係を示す。この図は、ガスタービン排ガスクーラ非設置の検討例を示したものである。

高温ウインドボックス方式では、ガスタービン排ガス温度はガスタービン形式にもよるが、500～600℃である。既設の汽力単独運転で300～350℃程度の空気を取り扱うときに比べて、ウインドボックス、風道などの燃焼用空気系統は、材質変更による耐熱強度向上ほかの大幅な改造が必要となる。

コンバインド化の改造期間短縮のために改造範囲縮小化を考慮する場合は、ガス給水加熱器を設置するか、また効率は低下するが、FDFからの空気希釈して既設

表2 ガスタービン、ボイラ周りのシステム構成比較 排気再燃形コンバインドシステムでのシステム構成例とその特徴の比較を示す。

	高温ウインドボックス方式	低温ウインドボックス方式		
		ガス給水加熱器		FDF空気混入
ガスタービン排熱回収機器	ボイラ	ボイラ蒸発器	給水系	(ボイラ)
構成				
ボイラ本体改造範囲	大	やや大	やや小	小
特徴	●ガスタービン排熱をボイラ内で回収するため、プラント効率は最もよい。 ●ボイラ本体とウインドボックスの結合部に特別な構造を用いる。	●プラント効率は高温ウインドボックス方式と同程度である。 ●ボイラ蒸発器から配管引き回しが必要である。	●プラント効率は高温ウインドボックス方式、およびボイラ蒸発器によるガスタービン排熱回収方式と比べてやや落ちる。 ●給水系への配管引き回しが必要である。	●プラント効率は給水系によるガスタービン排熱回収方式と同程度である。 ●ウインドボックス入口温度を制御するために十分なFDF通風量を確保する必要がある、乾ガス損失大。 ●排ガスとFDF空気合流部に特別な構造を用いる。

注：略語説明 DTR (脱気器)

機器の許容温度以下に冷却することで対応することになる。

ボイラ投入ガスタービン排ガス温度の選定については、効率向上量の最大限確保か、または改造期間の縮減か、いずれを優先するかによって決定することになる。

3.2.3 基本運用条件と各種規制値への対応

排気再燃形コンバインドサイクルの運用条件および各種規制値への対応とシステム構成の関連について以下に述べる。

(1) 既設単独運転実施の有無

排気再燃形コンバインド化に際し、既設単独運転を考慮する場合、ガスタービンの停止時も汽力単独運転が可能な利点があるが、両運転用機器の混在と単独運転およびコンバインド運転の切替用機器の追設のために配置構成が厳しくなる。

このため、既設単独運転の実施の有無については、当該プラントの配置スペースの余裕、今後のプラントの運用の考え方などについて総合的に評価し、決定する必要がある。

(2) ガスタービン単独運転実施の有無

ガスタービン単独運転を実施するためには、既設とは別にガスタービン用煙突の設置が必要となる。ヨーロッパでは新設時点からこの排気再燃形を適用することが多

いことと、運用性の自由度重視から大多数のプラントがガスタービン用煙突を設置している。わが国では、ガスタービン単独運転は効率も低く、出力増加と効率向上を目的とするコンバインド化の観点から必要性が少ないこと、また環境規制に対応した設備投資が必要となることなどの理由からガスタービン用煙突を設置しない傾向にある。

(3) 各種規制値への対応

コンバインド化後、各種規制値に対して検討が必要な項目として、温排水の量と温度および排出NOx量がある。

温排水の量と温度の増加については、制限値を守るために既設蒸気タービン出力の制限を行うか、またはCWP (Circulating Water Pump) 容量の増加、さらには必要な場合、復水器の改造も行って既設蒸気タービンの出力を確保するか、どちらかを選択することになる。

コンバインド化後のNOxは、既設ボイラの発生NOxにガスタービン発生NOxが加わるために汽力単独運転時よりも厳しくなる。NOx制限値を守るには、コンバインド化後のNOx予測値を基に、脱硝装置の新設または容量増加で対応することになる。

3.3 排気再燃コンバインドサイクルの計画例

現在計画している典型的な例である二つのシステム (高温ウインドボックス方式と低温ウインドボックス方

式)についてその系統を図3, 4に、両者の改造内容、計画条件の比較を表3に示す。

図3に示すシステム(ケースA)の主な特徴は、適正な容量のガスタービンを選定し、ボイラ燃焼用酸素を基本的にガスタービン排ガスから賄って、高温ウインドボックス方式を適用する効率向上に重点を置いた方式である。

一方、図4に示すシステム(ケースB)は、ガス給水加熱器の設置とガスタービンとFDFの併用による燃焼空気システムを適用する改造停止期間短縮を考慮したシステムである。

4 関連技術と運用特性

排気再燃形コンバインドサイクルは、ヨーロッパで多数の実績があるとはいえ、わが国での環境規制値の対応、各構成機器の最新技術の適用とシステム化などを考えると、新システムとして十分に開発、評価し実機計画を行っていく必要がある。

特に検討を要するものとしては、燃焼特性と運転方法の確立である。この点については、十分な検討を行って実機適用に際して問題のないことを確認している。

4.1 ウインドボックス酸素濃度低下時の燃焼特性

わが国で排気再燃形コンバインドプラントの適用対象となっているガス燃焼プラントでは、従来NO_x低減のた

めGM(排ガス混合)を強化した場合でもウインドボックス酸素濃度は約17%である。

ボイラ燃焼用酸素をガスタービン排ガスだけで供給するコンバインドサイクルシステムでは、ガスタービン形式にもよるが、ウインドボックス酸素濃度は13~14%となり燃焼上厳しくなる。

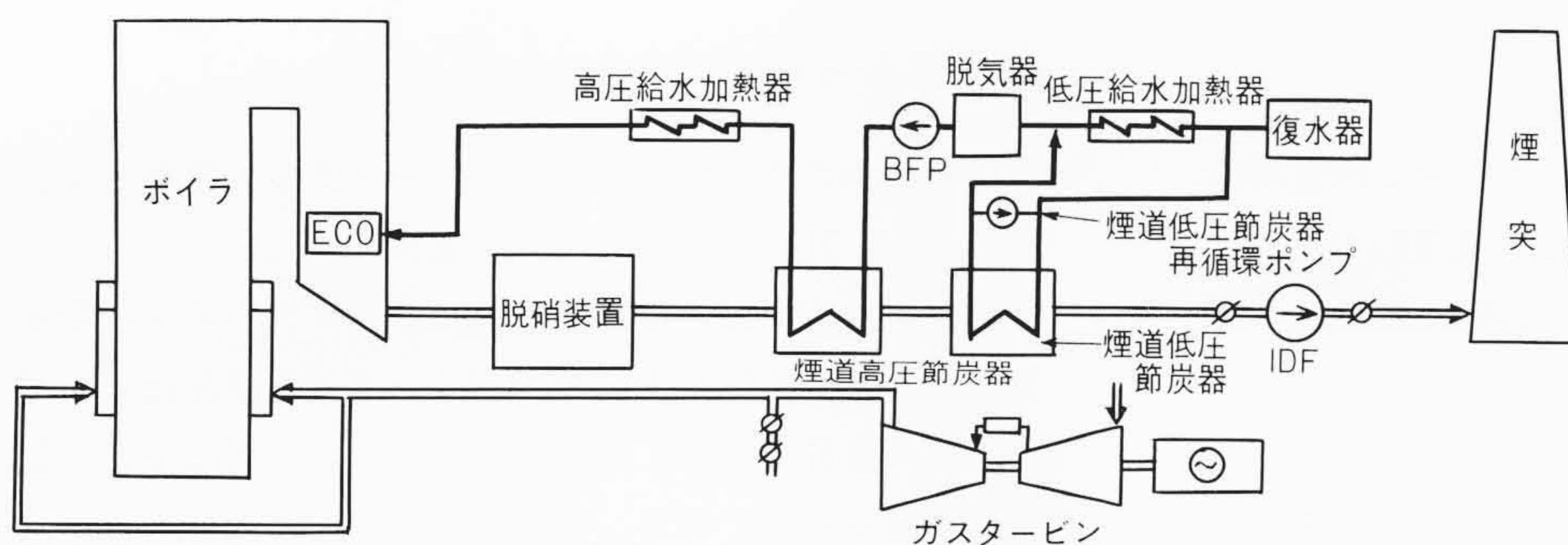
このため、大形テスト炉で実機条件を模擬して試験を行った。その結果、従来バーナでは約15%まで、改良形ガス燃焼用バーナシステムでは約13%までそれぞれ安定した燃焼が可能なことを確認しており、低酸素濃度燃焼についての問題はないことを確認した。

4.2 コンバインド運転時のNO_x特性

コンバインド運転時には、ボイラ発生NO_xに加えてガスタービンで発生したNO_xが持ち込まれることから、脱硝計画では、これらを考慮したNO_x予測値を基に検討する必要がある。

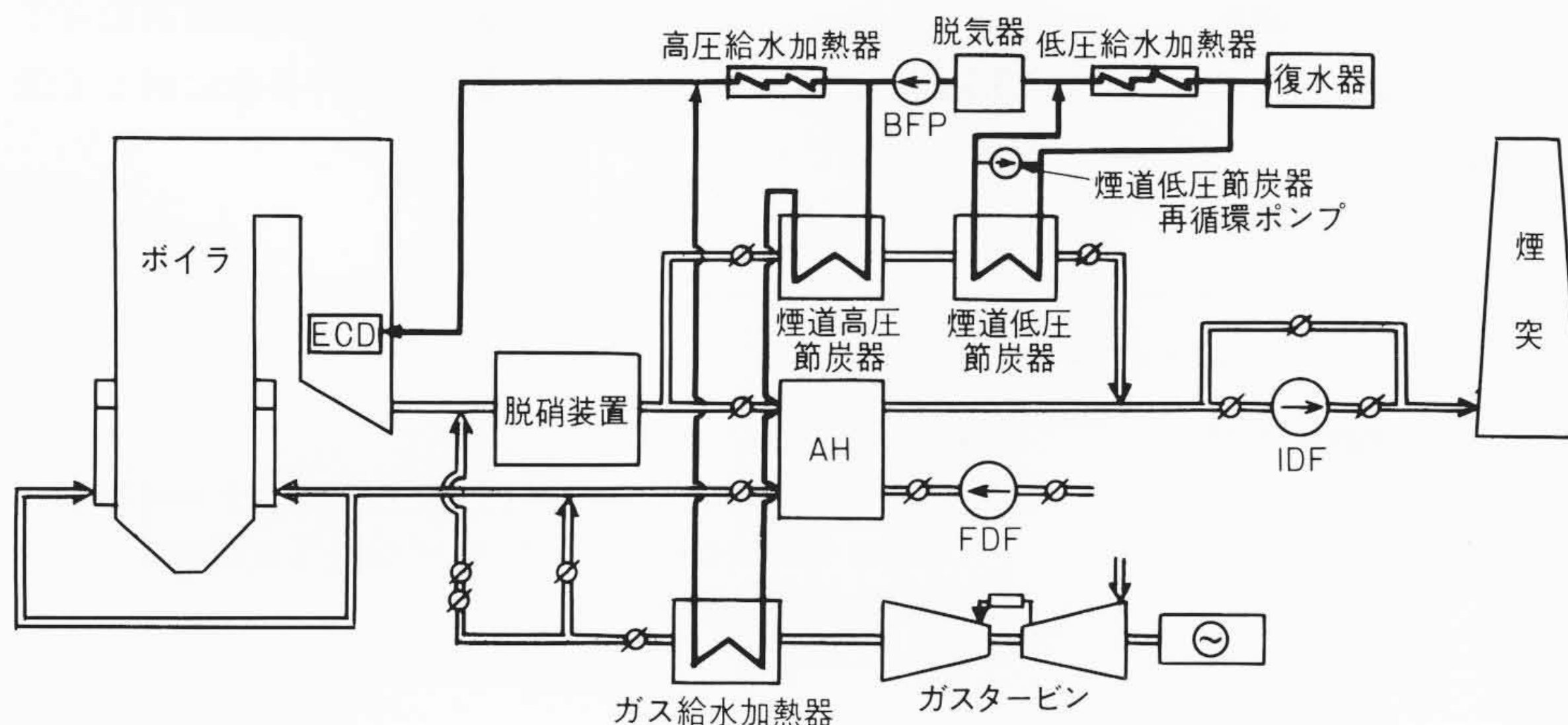
ガスタービン発生NO_xは、ボイラ内の高温域で分解、還元化することから、ボイラ出口NO_xはボイラ発生NO_xにガスタービン発生NO_xを単純加算した量よりも減少する傾向がある。

この特性についてテスト炉で試験を行って確認した結果、バーナ空気比(二段燃焼比率)によって炉内投入NO_xの還元量は大きく変化することがわかった。



注：略語説明 IDF(誘引通風機)
BFP(ボイラ給水ポンプ)
ECO(節炭器)

図3 排気再燃形コンバインドシステム系統例(ケースA) ガスタービン排ガスをそのままボイラ燃焼用酸素源として投入する高温ウインドボックス方式の排気再燃コンバインドサイクル系統例を示す。



注：略語説明 FDF(押込通風機)
AH(再生式空気予熱器)

図4 排気再燃形コンバインドシステム系統例(ケースB) ガスタービン排ガスをクーラで冷却し(低温ウインドボックス方式)、ボイラ燃焼用酸素源としてガスタービン排ガスに加えFDF空気も併用する排気再燃形コンバインドサイクル系統例を示す。

表3 排気再燃形コンバインドサイクル化計画代表例の比較
高温ウインドボックス方式と低温ウインドボックス方式の追設、
改造内容および運用計画の比較を示す。

項目	ケースA (高温ウインドボックス方式)	ケースB (低温ウインドボックス方式)
運転操作	(1)コンバインドサイクル運転だけでボイラ単独運転は不可 (2)FDFは撤去 (3)ガスタービン起動後、蒸気タービン起動	(1)コンバインドサイクル運転およびボイラ単独運転が可能 (2)FDF常時運用(2台常用) (3)蒸気タービン起動後ガスタービン起動 (4)ボイラバイパス制御(ウインドボックスO ₂ 制御+節炭器出口O ₂ 制御)
主要追設機器	(1)ガスタービン×1台 (2)煙道節炭器×1系列 (3)IDF×1台 (4)脱硝装置×1系列 (5)ボイラバイパスダクト (6)補助空気ファン (7)煙道低圧節炭器再循環ポンプ	(1)ガスタービン×1台 (2)煙道節炭器×1系列 (3)ガス給水加熱器×1台 (4)IDF×2台 (5)ボイラバイパスダクト (6) (7)煙道低圧節炭器再循環ポンプ
主要改造機器	(1)再熱器伝熱面積追設 (2)バーナ(低O ₂ 燃焼バーナ) (3)ウインドボックス(高温用) (4)二次過熱器一部カット (5)一次過熱器一部蒸発器化 (6)再熱器スプレー常用化(高負荷域)	(1)再熱器伝熱面積追設 (2)燃焼設備～点火トーチフレッシュエア化 (3)脱硝装置改造 (4)再熱器スプレー常用化(ボイラ単独運転時)

これらの試験結果については、実機の種々の運転状態、運用幅を考慮し検討を加え、これを脱硝計画に反映した。

4.3 コンバインド運転方法確立

運転方法では、蒸気タービンとガスタービンの負荷配分、起動運用方法について、また汽力単独運転が可能なシステムでは、コンバインド運転との切換方法について、おのこの運転方法を決定する必要がある。

従来の知見から計画した運用方法案は、各項目についてシミュレーションを実施してプラント特性を確認する。シミュレーションの一例として、コンバインド運転と汽力単独運転切換時の特性を図5に示す。このように切換の移行もスムーズに行えることを確認した。

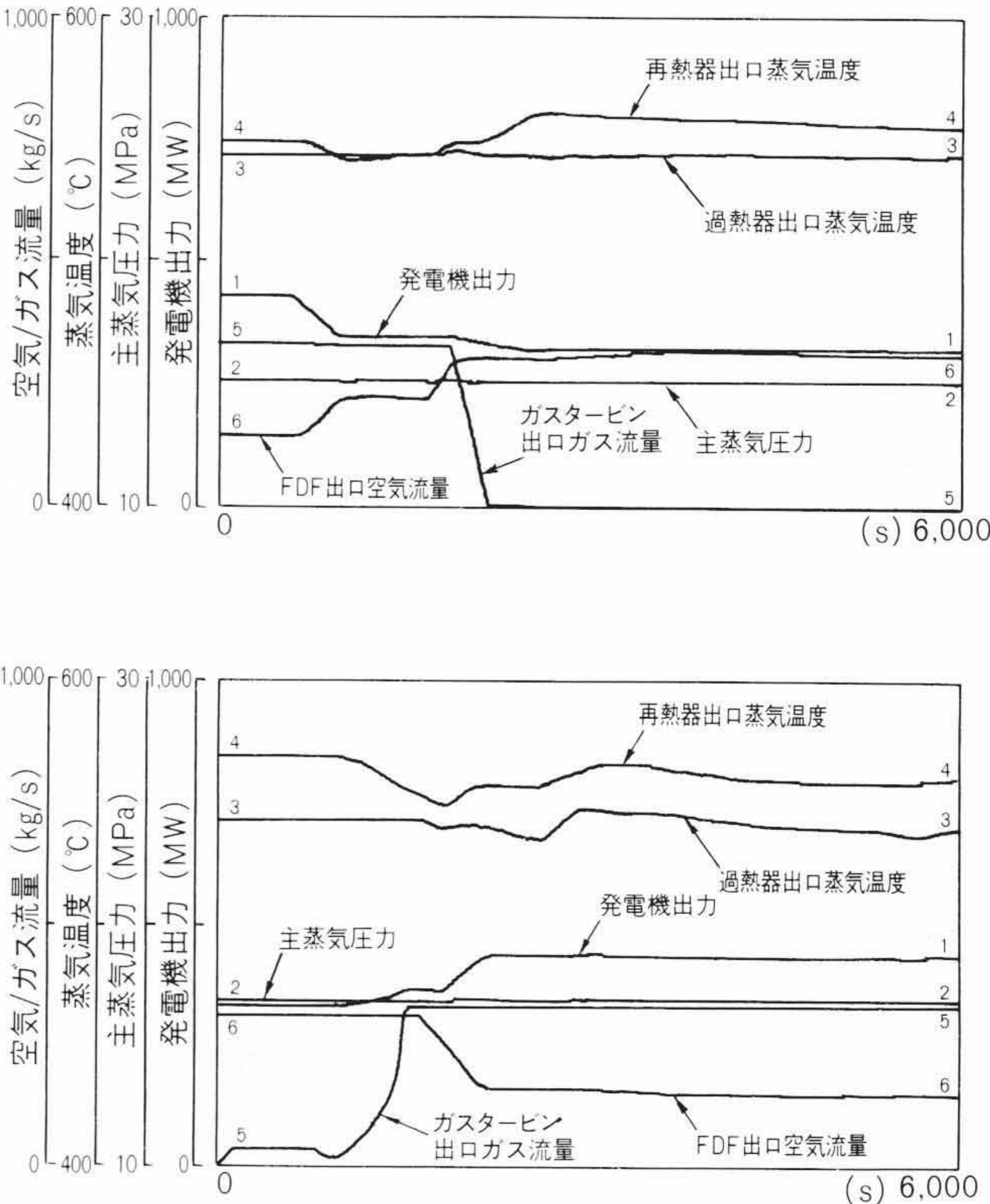


図5 コンバインド、汽力単独運転切換時ボイラ特性
コンバインド運転と汽力単独運転切換時のボイラ特性シミュレーション結果を示す。蒸気圧力、温度の変動が小で、スムーズに切換できることがわかる。

5 おわりに

以上、排気再燃形コンバインドサイクルの特徴と現在進めている計画の概要について述べた。

日立グループは、従来の排熱回収形コンバインドサイクルに加えて排気再燃形コンバインドサイクルについても、その特質を生かして、ユーザーのニーズに合わせ最適化を図る考えである。

終わりに、このシステムの確立と技術開発にあたってご指摘、ご指導をいただいた電力会社の各位に対して感謝する次第である。

参考文献

1) Th. Göstenkors und K. Köster : Erfahrungen und Ergebnisse eines vierjährigen Betriebes des 765-MW-Kombi-Blockes, VGB-KRAFTWERKSTECHNIK 69 Heft5, Mai 1989, S.483~490

2) Linnemeijer, M.J.J., Van Buijtenen, J.P. and Van Loon, A.U. Boosting Steam Plant Thermal Efficiency and Power Output through the Addition of Gas Turbines. ASME Paper 87-GT-4.