

世界最大変圧運転石炭火力プラントの完成

—相馬共同火力発電株式会社新地発電所1号機—

Completion of the World's Largest Capacity Coal-Fired Sliding Pressure Operation Thermal Power Unit

福本富美男* *Fumio Fukumoto*

森田茂樹* *Shigeki Morita*

長谷川博之* *Hiroyuki Hasegawa*

作花憲治** *Kenji Sakka*



相馬共同火力発電株式会社納め新地発電所1号プラント 1,000 MW石炭燃焼プラント2ユニットから成る発電所を示す。右側が1994年7月に営業運転を開始した1号プラントである。

わが国での新規火力発電設備は、石炭火力プラントが主流となってきており、大容量化に加え負荷調整機能を担う運用特性の改善、環境対策の強化が求められている。

日立製作所はこれらにこたえて、変圧運転石炭火力プラントとして世界最大容量である相馬共同火力発電株式会社納め新地発電所1号プラント(発電機出力1,000 MW)を完成した。このプラントには、高

効率燃焼技術を駆使した大容量変圧運転ボイラ、各種新技術によって高効率化を図った蒸気タービン、および最新の環境装置を適用し、高度な負荷運用が可能のように計画した。1993年9月から約10か月の試運転によって計画性能を十分に満足することを確認し、1994年7月に世界最大変圧運転石炭火力プラントとして営業運転を開始した。

* 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

新規国内火力発電プラントは、電源ベストミックスの観点から石炭火力プラントが主流となり、立地点候補の減少と建設費のトータルコストミニマムの観点から大容量化が図られてきた。一方、近年の原子力発電比率の増加に伴って、石炭火力プラントとはいえ大幅な電力需要変動に対応し中間負荷運用が求められている。さらに、環境保全のため環境装置を含めた火力発電所全体の機能・性能の向上が求められている。

日立製作所はこのような背景から、大容量変圧運転石炭火力プラントの開発に取り組み、このたび相馬共同火力発電株式会社納め新地発電所1号プラントとして変圧運転石炭火力プラントで世界最大の発電機出力1,000 MWプラントを完成した。ここでは、このプラントの計画概要と試運転実績について述べる。

2 1,000 MW変圧運転石炭火力プラント計画概要と特徴

2.1 計画概要

主要発電設備の概要を表1に示す。ボイラ、タービンおよび発電機はもとより、環境装置(この特集別論文「石

表1 主要発電設備の概要 相馬共同火力発電株式会社納め新地発電所1号プラント主要発電設備の概要を示す。

項 目	内 容
ボ イ ラ	貫流変圧型再熱式屋外形ボイラ 蒸発量 3,080 t/h(MCR時) 蒸気圧力 25.0 MPa 蒸気温度 542℃/567℃
タービン	再熱式クロスコンパウンド4車室4流排気型 出力 1,000 MW 蒸気圧力 24.1 MPa 蒸気温度 538℃/566℃ 回転数 3,000 r/min/1,500 r/min 真空度 -97.1 kPa
発 電 機	横置円筒回転界磁型耐爆構造式 容 量 634,800 kVA/519,900 kVA 水素圧力 0.41 MPa/0.31 MPa 周波数 50 Hz 端子電圧 20,000 V 力 率 0.90
復 水 器	表面接触冷却式-折流半区分連続使用型 冷却面積 50,600 m ² 真空度 -97.1 kPa 冷却水温度 19.0℃ 冷却水量 144,600 m ³ /h

注：略語説明 MCR(Maximum Continuous Rating)

炭燃焼ボイラの最新排煙処理技術」で詳述)を含めたプラントトータル設備を一括して日立製作所が受注し、相馬共同火力発電株式会社の初期基本計画の段階から検討に参画し、最適プラントシステムの取りまとめに努めた。発電設備の主な特徴について以下に述べる。

(1) ボイラ設備

このプラントに求められる高効率、および運用性を考慮し、信頼性に優れた変圧運転貫流ボイラを採用した。このプラントでは、多炭種に対応することが必要であり、その物性および燃焼特性を十分に考慮している。海外炭燃焼ボイラの特徴である炭種変化、経時的汚れによるボイラ特性変化に対応して、主蒸気温度制御に三段過熱低減装置を採用している。

また、高効率燃焼と環境保全のために日立-NRバーナを採用し、多炭種適用の観点からMPS-118型ミル(微粉炭機)にインバータ制御式回転分級機を採用した。

(2) 蒸気タービン設備

蒸気タービンは、実績の多い41インチ長翼を用いた再熱式クロスコンパウンド型4車室機とし、各種新技術を採用して高効率化を図った変圧運転方式の中間負荷運用にも対応できる機器である。

復水器は、立地点海水温度が低い(年平均：13.8℃、最高：26.2℃)ことを考慮し、海水温度19℃で設計真空度を-97.1 kPaとすることにより、プラント効率の向上を図った。

大型補機の一つである循環水ポンプには可動翼式を採用し、部分負荷運転時の所内動力節減を図った。

さらに、復水ポンプおよび復水ブースタポンプは、50%容量機2台(予備機なし)とし設備仕様の合理化を図った。

(3) 制御装置

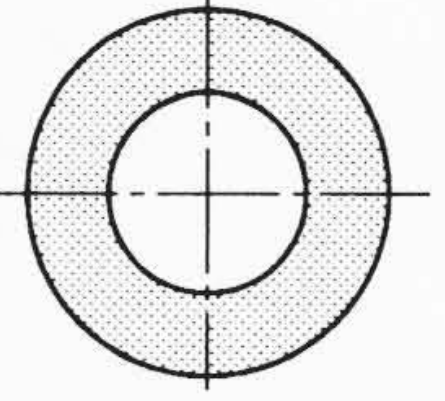
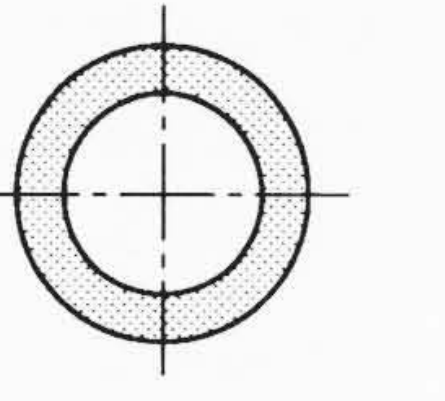
高効率かつ高度な需給調整機能を確保し、さらに運転・保守の信頼性・安全性および省力化を図るために、制御用計算機を中核とした総合自動化システムを採用した。ボイラ制御については先行石炭燃焼プラントでの改良点を反映して、負荷変化時のNOx・未燃分の抑制およびミル停止時の安定化を図った。また、タービンガバナ制御には、電子油圧式ガバナを採用し、制御機能および信頼性の向上を図った。

2.2 大容量化への考慮事項

大容量化に対して特に考慮した事項について以下に述べる。

(1) 変圧運転ボイラの特徴であるスパイラル壁は、火炉壁の荷重を火炉壁管で支持する従来の垂直管火炉壁に比

表2 過熱器出口管寄せの比較
厚肉部で発生応力の大きくなる過熱器出口管寄せに高温・高強度材料を適用し、薄肉化を図った。

	従来材料	高温・高強度材料
材質	STPA24	SA335P91
外径×肉厚(mm)	812.8×176	660.4×99
		

べて垂直荷重に対する考慮が必要となる。大容量化によってスパイラル壁高さが約20%高くなり、スパイラル壁の支持荷重も増加することから、管内圧、火炉炉内圧などの荷重条件を組み合わせた詳細応力解析に基づく強度評価によってスパイラル壁の健全性確認を行った。

(2) 厚肉部で発生応力が大きくなる四次過熱器出口管寄せなどに高温・高強度材料を積極的に採用し、従来材料の場合に比べて大幅に薄肉化することによって応力低減を図った(表2 参照)。

2.3 多炭種炭適用に関する考慮事項

海外炭の中には、比較的炭化度の低い石炭がある(以下、低炭化度炭と言う)。このため、各種燃焼実験設備を用いてこれらの燃焼特性を把握するための大規模な燃焼実験を実施し、その結果をボイラ基本設計に反映した。

なお、低炭化度炭の特徴としては、石炭灰の溶融温度が低く、火炉や過熱器、再熱器への灰付着が強いこと(スラッシング・ファウリング)、石炭全水分が25%程度と歴青炭に比べ多いことなどがあげられる。

(1) 燃焼特性

バブコック日立株式会社呉工場に設置した大型燃焼試験炉(入熱27 MW)を使用して、実際に種々の低炭化度炭を専焼または一般的な海外炭とブレンドして燃焼し、その燃焼特性およびスラッシングにかかわる火炉収熱特性について検討した。

実験結果の一例を図1に示す。低炭化度炭は発熱量が低いが良好な燃焼性能が得られた。特に、低炭化度炭をブレンドすることによって日立-NRバーナの特徴である着火保安性能が十分に発揮され、顕著な灰中未燃分低減効果が確認された。一方、燃焼灰のスラッシング特性については、低炭化度炭のブレンドによって低炭化度炭特有のスラッシング特性に偏る傾向が得られた。

(2) ボイラ火炉の基本設計

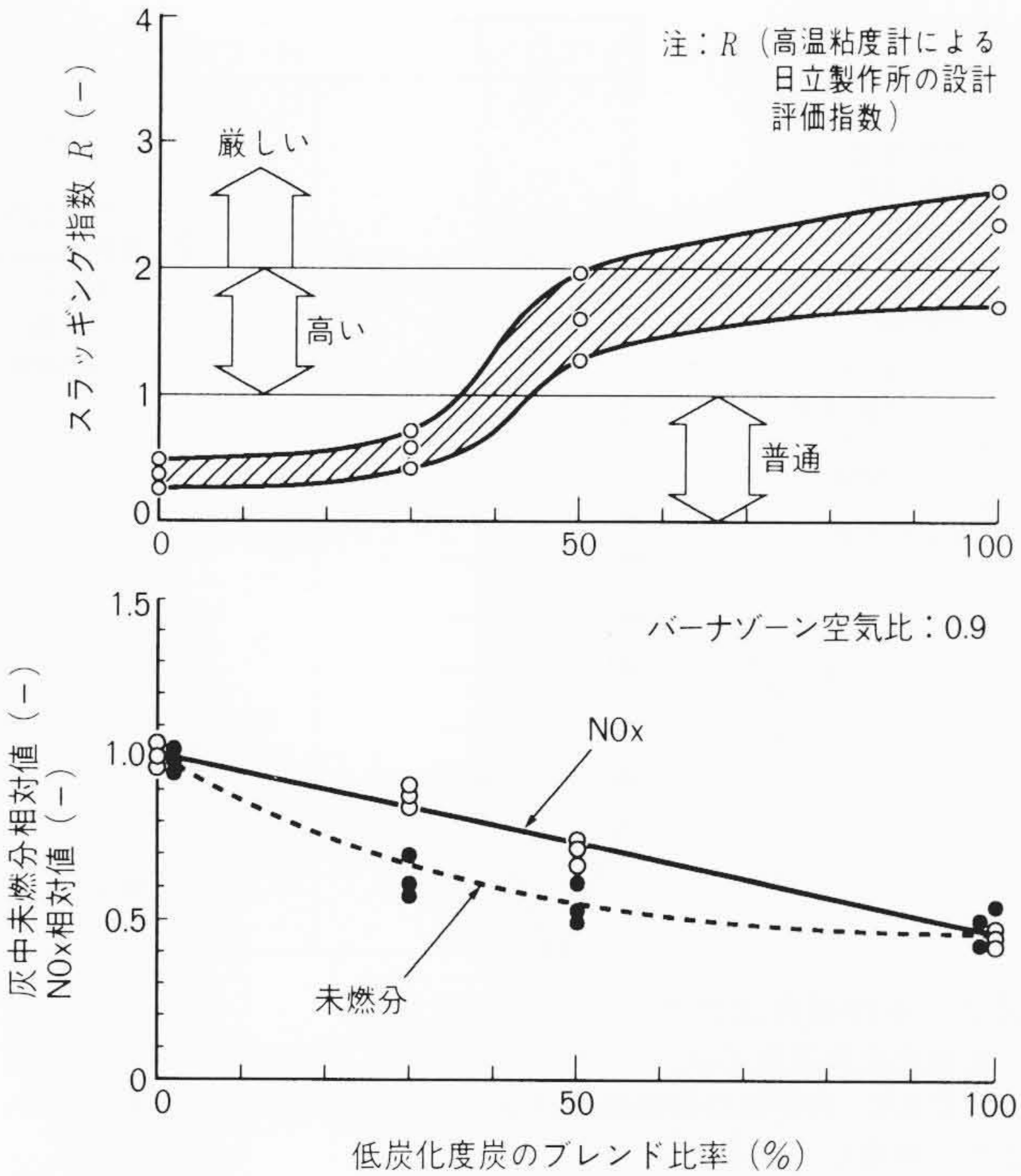


図1 低炭化度炭ブレンド比率と燃焼特性
燃料比の低い低炭化度炭をブレンドすることによって燃焼効率が向上し、NOxも低減されるが、燃焼灰のスラッシング特性は、低炭化度炭の特性に急激に近づく。

前述の試験結果で得られたNOx-灰中未燃分特性やスラッシング特性について十分に検討し、ボイラ火炉設計を行った(図2 参照)。このプラントは、当面高負荷帯の運用が主体となり、しかも多くの海外炭に対して統一された運用制御とすることに主眼をおいているため、特にスラッシングに対して十分な配慮を払った。

(3) 高水分への対応

低炭化度炭は水分が多いので、石炭の乾燥熱源確保のためにミル入口温度を高く保つことが必要となる。このため、一次空気予熱器入口に一次蒸気式空気予熱器を設置し、冬季の大気温度が低い状態で、一次空気予熱器出口温度を高く保ち、ミル入口温度を維持できるようにした。

2.4 制御計画

制御計画は高効率、高信頼性、高寿命化とともに中間負荷運用として安全確実な負荷変化が容易にできるように運転操作性向上を目指した広範囲なCRTオペレーション化の採用とともに、起動・停止をはじめ各種運転操作を自動化している。

制御装置は、大容量で高速処理可能なHIDIC V90/65型ユニット制御用計算機がボイラ自動制御装置、自動ミルバーナ制御装置、主タービン制御装置、シーケンス制御装置などの専用制御装置を統括監視制御する、階層形

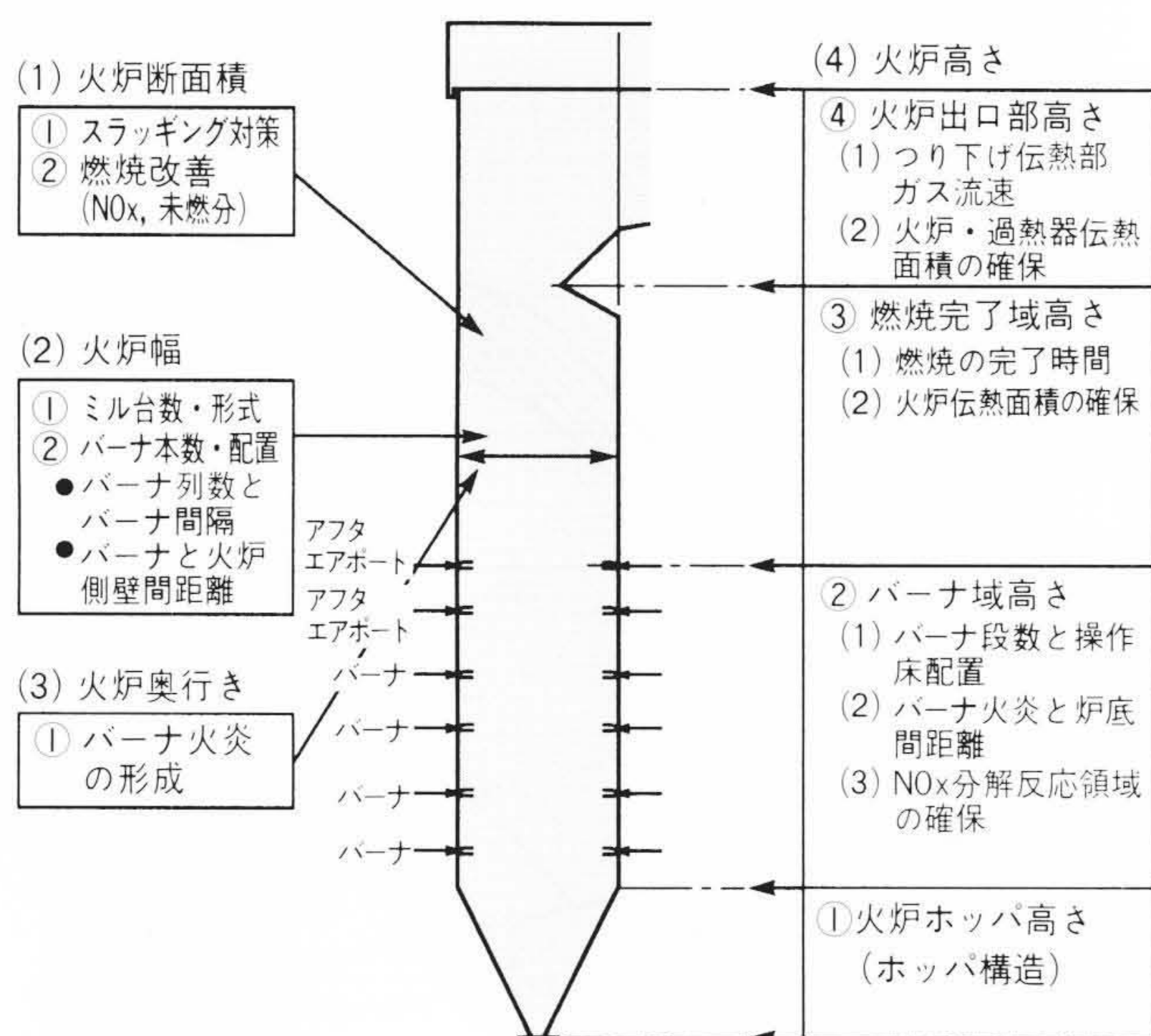


図2 多炭種炭混焼ボイラの火炉設計

低炭化度炭混焼では、バーナゾーンでのスラッシングの防止を図るとともに、火炉出口の燃焼ガス温度が経時的に大きく変動しないように考慮している。

分散システム構成である(図3参照)。

各サブグループ制御装置は、最新機種であるHIACS-3000Eを採用し、CRTオペレーションの拡張、伝送速度・演算速度の向上に対応したプラント総合ディジタル制御装置とした。

(1) ヒューマンコミュニケーション

大型補機、高速動作機器、非常用停止ボタンなどを除く補機操作、シーケンスマスタ、制御ステーションの操作スイッチをCRTオペレーションとし、警報窓の集約化

によって中央操作盤のコンパクト化を図った。また、通常運転操作はすべて自動化盤による中央集中監視制御方式とし、警報発生時には要因によって処置方法を示す警報ガイダンスを考慮している。

(2) 多炭種への考慮

炭種差によるボイラ特性変化に対応するため、過熱器スプレー比率設定、ガス再循環量設定、石炭粉碎性変化によるミル分級機回転数などの設定に対して炭種切り替えが可能となるように考慮している。また、火炉などの汚れに対してファジィな制御によってスートブロワの適正噴射を行うことにより、蒸気温度制御の安定化寄与を図っている。

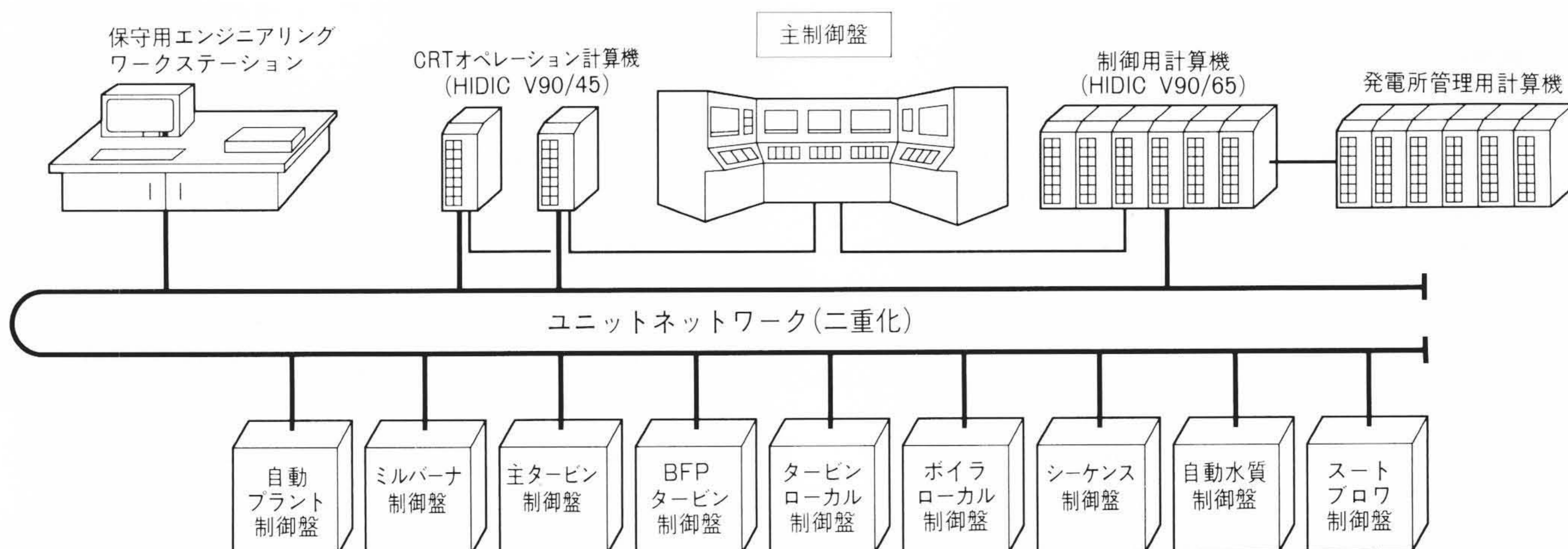
(3) 負荷変化率への考慮

3%/minの負荷変化率で安定した負荷変化運用ができるように、負荷変化バンドを最低負荷から定格負荷まで3分割し、負荷帯に応じたミル台数制御をAPC(ボイラ自動制御装置)とMBC(ミルバーナ制御装置)の協調化によって行っている。

2.5 燃焼新技術の適用

プラント効率向上のためには空気過剰率の低減がきわめて有効である。しかし、従来空気過剰率を低減した運用は燃料比(固定炭素/揮発分)が低く、燃焼性に優れた石炭に限られていた。

このプラントでは、先行機の豊富な経験を生かし、バーナ本数を56本とした。これによって各バーナ間およびバーナと火炉側壁の間隔が十分に確保され、二段燃焼を強化しても火炉壁への火炎衝突がなく、スラッシングと



注：略語説明 BFP (Boiler Feedwater Pump)

図3 制御システム構成

高速処理可能な大容量HIDIC V90/65型ユニット制御用計算機が各専用制御装置を統括する、階層型分散システムを採用している。

火炎冷却の双方が軽減されるため、安定した燃焼が確保され灰中未燃分の低減ができ、高燃料比炭でも15%以下の空気過剰率での運用が可能となった。

2.6 蒸気タービン新技術

(1) 高効率化新技術

このタービンでは以下に述べる新技術などを採用し、従来機に比較して高いタービン効率を実現した。

(a) コントロールボルテックスノズルの採用

直線形ノズル出口角をねじって、翼入口角度と蒸気入口角度との適正化を図ることによって蒸気流の乱れを減少させるとともに、翼先端部から漏れる蒸気を軸心方向に抑える働きによって漏れ蒸気量を減少させた。

(b) マルチプルフィンシールの採用

翼頂部シール構造は、埋込みテノンの採用によってシール可能な面を増加させ、4枚のフィンによるシール方式を採用した。

(c) ディフューザ付き排気室の採用

軸受コーン部にスムーズな蒸気ガイドを設けるとともに、最終段出口先端にはロング蒸気ガイドを設けてディフューザパスを形成し、排気を復水器内に吸い込ませるようにして、排気損失の低減を図った。

そのほかに次の新技術を採用している。

(d) 中圧排気室スクロールの採用

(e) バランス動翼の採用

(f) CCS(Computer Aided Clearance Control System)組立の採用

(2) コンバインドガバニング方式

このタービンでは、従来機の主蒸気止め弁バイパス弁による部分噴射起動方式に対し、コンバインドガバニング方式による全周噴射起動方式を採用することによって弁切替操作を省略するとともに、熱応力低減を図った。

(3) BFPタービン

このプラントは変圧運転プラントであり、所内単独負荷運転がないため、BFPタービン駆動蒸気のバックアップ系で起動・停止時に使用されてきた高圧蒸気系統を削除し、設備合理化を図った。試運転で通常起動・停止およびBFP 1台停止時50%負荷へのランバックなどの特殊運転時にも機能上まったく問題がないことを確認した。

3 運転実績

このプラントは、1992年8月本格工事に着工し、1993年9月に火入れ、10月に初併入を経て11月には出力1,000 MWに到達した。試運転は約10か月にわたり広範囲の石

炭性状(燃料比1.0~2.2)に対して実施し、1994年7月に世界最大変圧運転石炭火力プラントとして営業運転を開始した。この章では試運転の実績について述べる。

3.1 プラント性能

このプラントは、運転開始当初はベースロード火力、将来は中間負荷火力として運用されることを想定し、全負荷域での熱効率向上を最大の設計方針とした。このため、前述の高効率化新技術によって熱効率向上を図った。

性能試験結果では、定格出力1,000 MWの計画発電端効率41.9%に対し実績43.18%と計画値を上回る高効率を得られた(図4参照)。また、所内率も4.66%と低い値が確認され、送電端効率も41%を上回る高効率プラントであることを実証した。

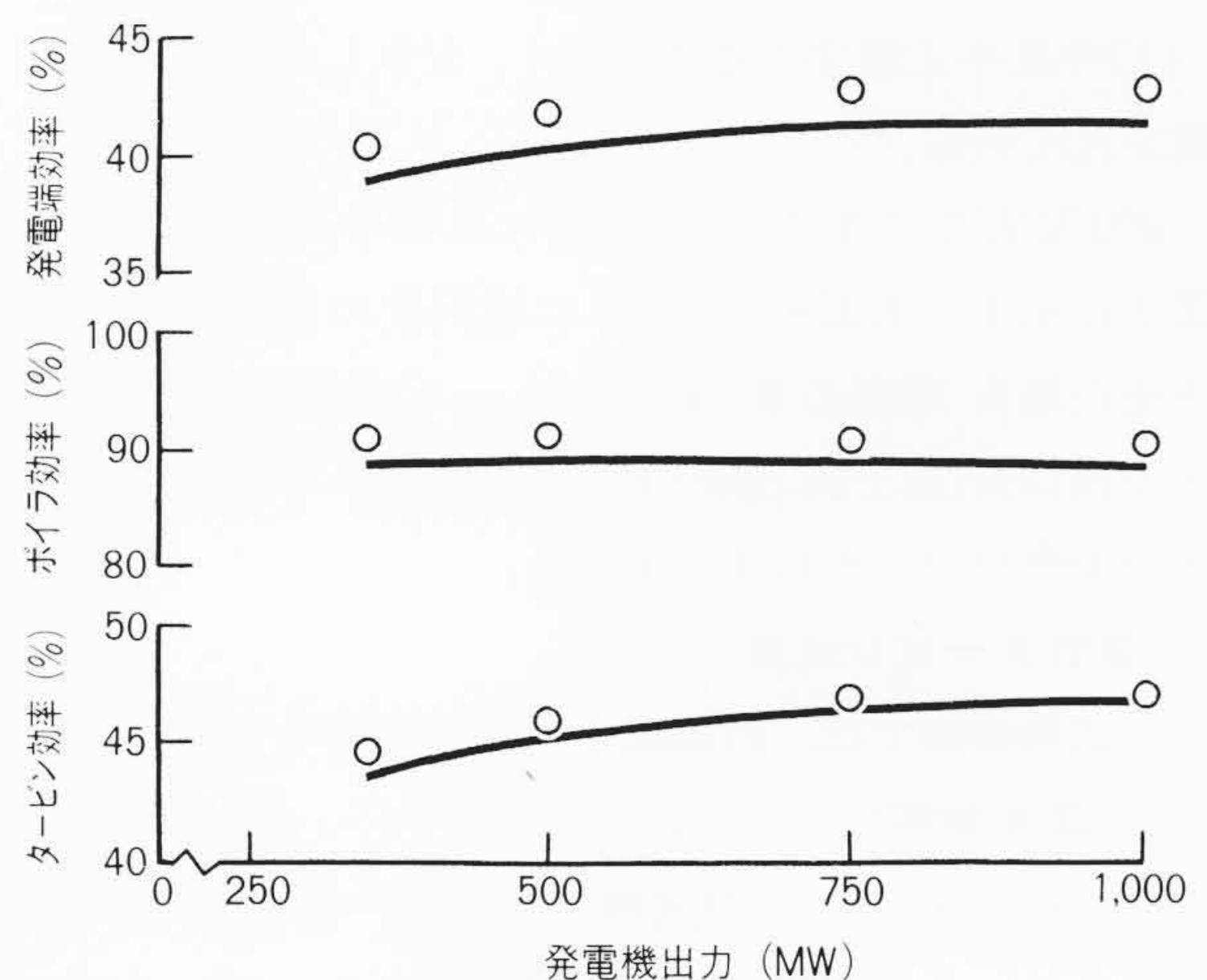
プラント起動特性は、8時間停止後起動で点火から定格負荷までの起動時間が計算機による全自動で162分(計画184分)を達成することができた。

なお、脱硝・集じん・脱硫の各環境装置についても、計画値を十分満足する結果を確認した。

3.2 ボイラ性能

各負荷での蒸気温度特性は、計画値とほぼ一致しており良好であることが確認できた(図5参照)。また、スパイラル壁出口メタル温度分布も、各負荷とも均一な分布を示しており(図6参照)、スパイラル壁の採用により、炉内熱負荷分布に影響されずに均一な熱吸収を得ることを確認した。

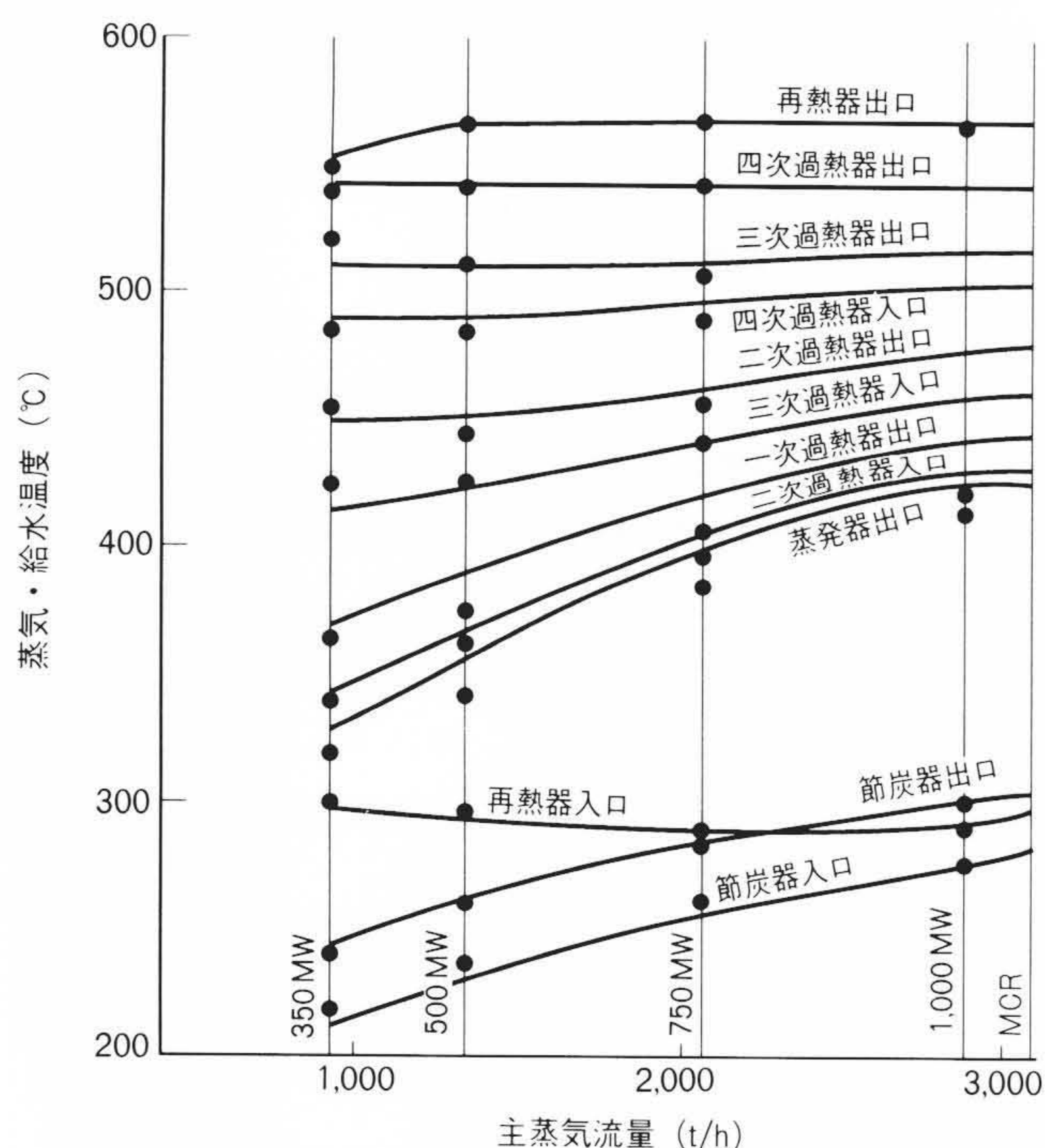
性能試験時による米国A炭(発熱量6,890 J, 燃料比1.1, 灰分7.1%)でのボイラ効率は、灰中未燃分が低いことな



注：—(計画値)，○(実績値)

図4 プラント性能試験結果

性能試験によって発電端効率、ボイラ効率、タービン効率ともに高効率であることを確認した。



注：—— (計画値), ● (米国A炭実績)

図5 ボイラ蒸気温度特性

米国A炭実績蒸気温度特性は、計画値とほぼ一致した良好な特性であることを確認した。

どにより、計画値を十分満足し、高効率なボイラ運用が可能になった(図4参照)。

3.3 燃焼性能

試運転でれき青炭の燃焼特性確認試験を実施し、きわめて優れた燃焼性能が得られたことは、プラントの効率改善に大きく寄与している。1,000 MWでの空気過剰率は、当初の計画どおり常に15%以下での運転となっており、COや灰中未燃分の増加もなく、安定した燃焼状態が継続されている。

1,000 MWでのボイラ出口NO_xと灰中未燃分の関係を図7に示す。米国A炭のように燃料比の低い石炭を燃焼させた場合(微粉粒度200メッシュパス75%程度)には、ボイラ出口NO_xを60 ppm(6%O₂換算)まで低下させても灰中未燃分は1%以下であった。

3.4 蒸気タービン性能

性能試験結果では、計画値を上回る良好な熱効率が得られた(図4参照)。

また、蒸気タービン・発電機の振動は、各軸受で36 μm以下となり、きわめて良好な振動特性となっている。

4 おわりに

今後建設される石炭火力プラントは、大容量化とともに

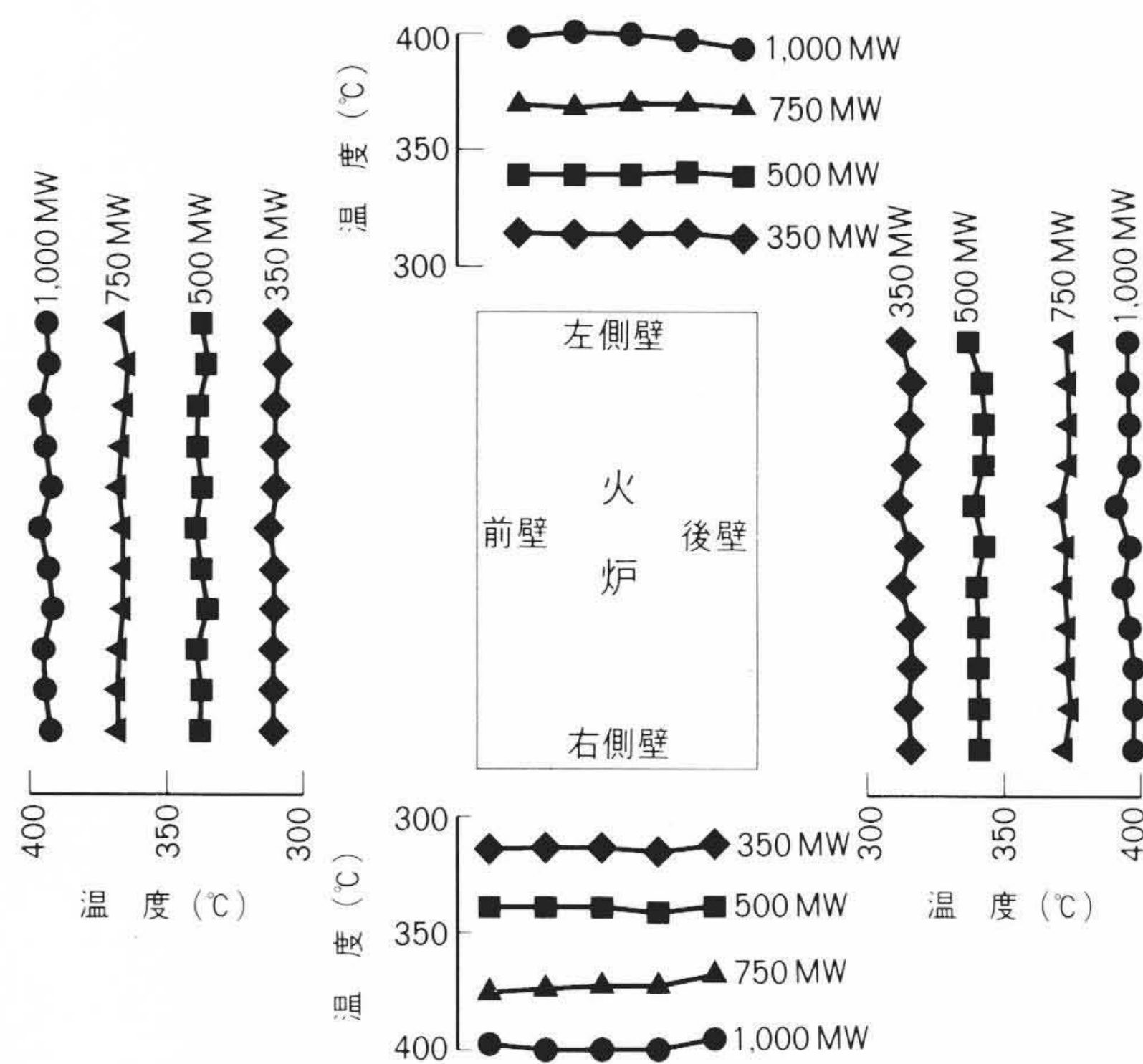


図6 スパイラル水冷壁出口メタル温度の分布

各負荷ともバランスのとれた温度分布を示しており、炉内熱負荷分布の影響を吸収していることがわかる。

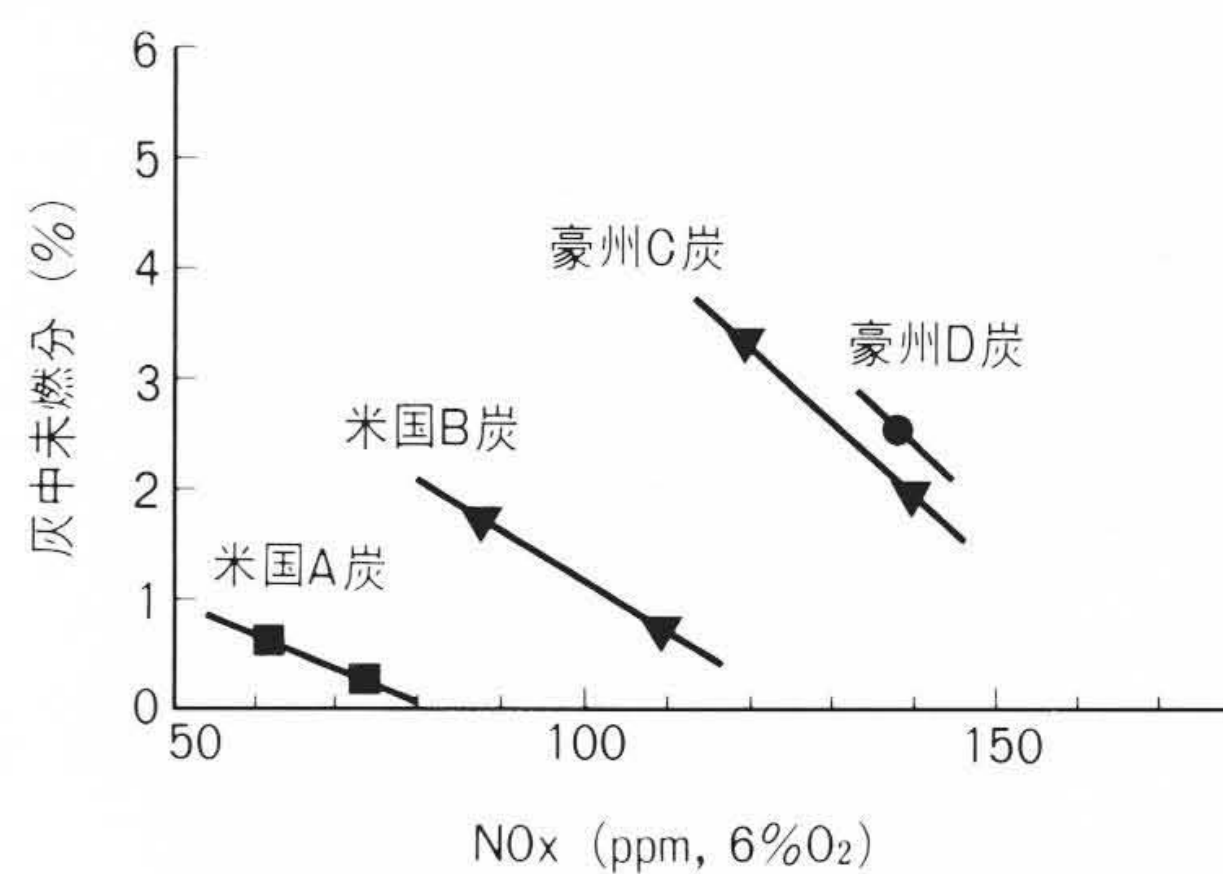


図7 ボイラ出口NO_xと灰中未燃分の関係

発電機出力1,000 MWでのボイラ出口NO_xと灰中未燃分の関係を示す。燃料比1.0~2.2の幅広い性状について良好な結果を得た。また、空気過剰率は計画どおり15%以下に制御されている。

にさらに高効率が要求され、環境対策の強化が必要となる。

ここでは、高効率・大容量化とともに環境対策に取り組んだ世界最大の変圧運転石炭火力プラントの計画と運転実績について述べた。今後ともこの実績を基に、積極的に高効率化、経済性向上への技術開発に取り組んでいく考えである。

最後に、このプラントの計画、建設、試運転についてご指導、ご協力をいただいた相馬共同火力発電株式会社の関係各位に対し感謝の意を表する。