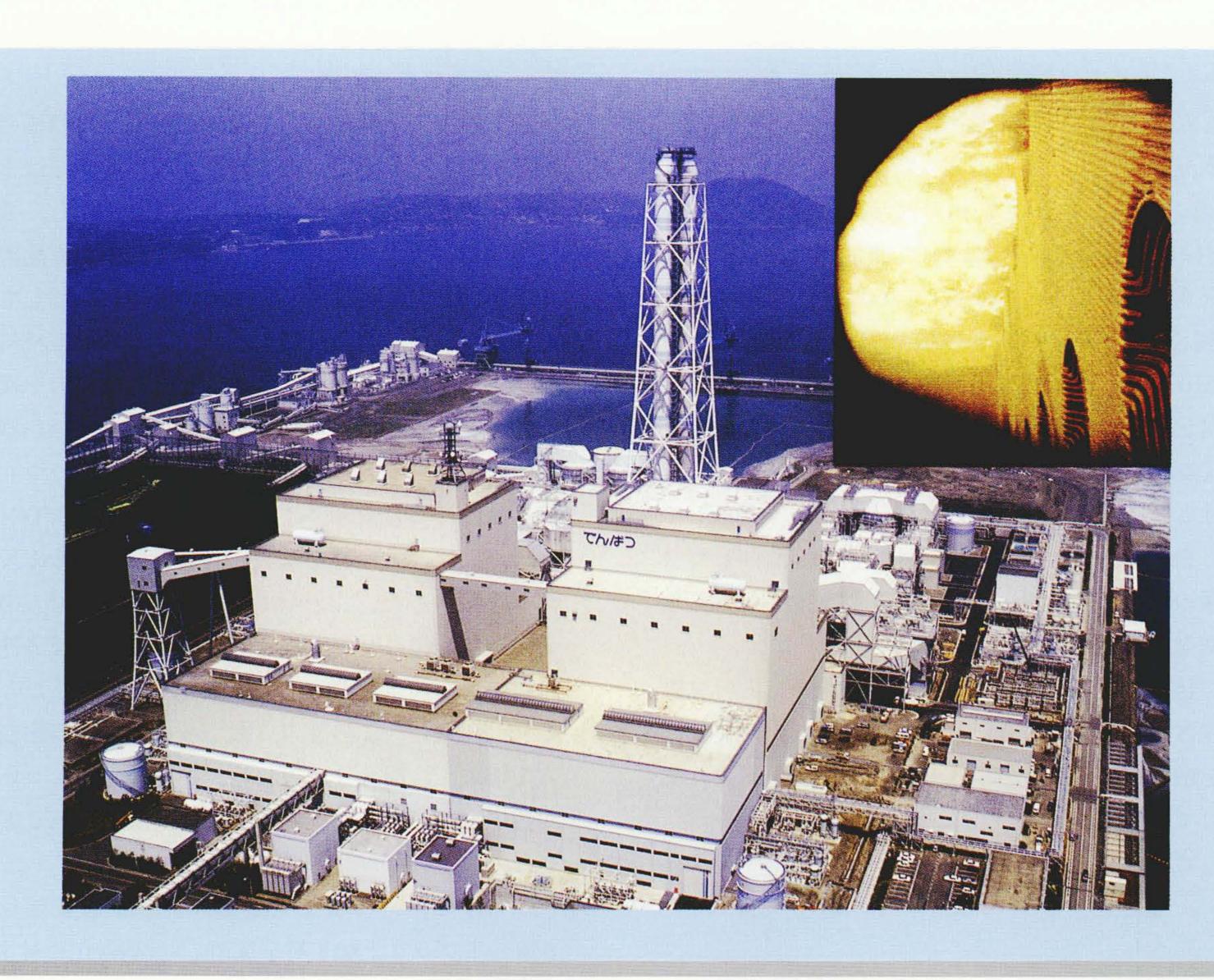
最新鋭大容量石炭焚ボイラの完成

電源開発株式会社松浦火力発電所2号ボイラの設計と試運転実績

Completion of the Latest 1,000 MW Coal Fired Boiler

Kazuhito Sakai

田辺武利 Atsushi Furukawa 深山幸穂 Taketoshi Tanabe Yukio Fukayama



電源開発株式会社松浦火力発電所の全景と日立-NRバーナの燃焼状況

建屋の右側に2号機が設置されている。この2号機で使用している南アフリカ炭専焼の300 MW時の日立-NR2バーナ火炎を右上に示す。

地球温暖化対策として火力発電プラントの高効率化が 求められている中で、わが国最高の蒸気温度593℃/ 593℃を採用した電源開発株式会社松浦火力発電所2号 機が1997年7月に完成した。日立製作所とバブコック日 立株式会社は、この1,000 MW発電プラントのボイラ設 備一式を納入した。

このボイラの設計にあたっては, 高蒸気条件に対応し た設備とするため、高温高強度材料を採用して信頼性を 維持する一方、最新の微粉炭燃焼技術を適用して高効率 化と環境保護に配慮を払った。また、高・低圧タービン バイパス システムを備えて起動時間の短縮を図り,多炭 種適応制御 "STARTS(Self-Tuning Art System)"を 初めて本格的に導入するなど,最新の技術を駆使して いる。

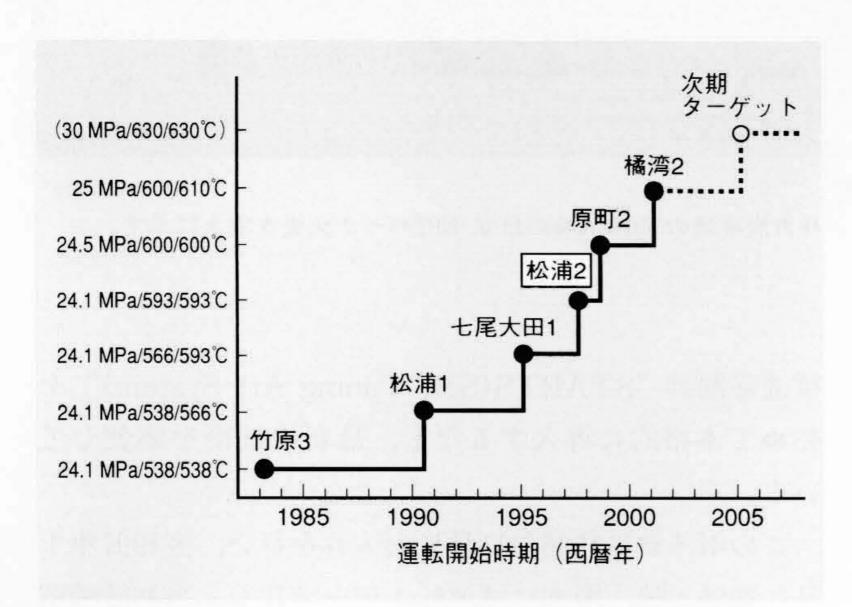
このボイラは1996年11月に火入れを行い,翌1997年1 月に初併入後,順調に試運転工程を消化し,当初計画値 を十分上回る良好な性能を確認して運開を迎えることが できた。この成果を基に、蒸気温度600℃/600℃を採用 した1,000 MWプラントの設計, 製作を完了し, 現在, そ の試運転を進めている。さらに、いっそうの高性能化を 図り,かつ経済性にも優れた発電用ボイラの実現に向け て技術開発と設備の合理化に努めている。

1. はじめに

地球温暖化対策として、火力発電プラントから排出されるCO₂の削減が求められており、わが国や欧州では新設プラントの蒸気条件によるプラント効率の向上が進められている。最近の大容量石炭焚ボイラの蒸気条件は、従来の標準的な主蒸気圧力24.1 MPa,蒸気温度538 ℃/566 ℃から、近年では温度を600℃レベルまで高めた設計が主流となっている¹⁾(図 1 参照)。

電源開発株式会社松浦火力発電所 2 号機(以下,松浦 2 号と言う。)では、わが国で初めて蒸気温度に593℃/593℃を採用している。そのほかに、東北電力株式会社原町火力発電所第 2 号機²⁾では600℃/600℃,電源開発株式会社橋湾火力発電所第 2 号機ではさらに10℃高い600℃/610℃まで再熱蒸気温度が向上しており、急ピッチで高温化が進んでいる。このような蒸気条件の向上には、高温強度と耐食性に優れた 9~12%Crフェライト鋼と、高強度オーステナイト鋼の実用化が大きく寄与している。日立グループは、電源開発株式会社と共同して21世紀初頭の目標を30 MPa/630~650℃に定め、いっそうの技術開発を進めている³)。

ここでは、主蒸気温度600 ℃ クラスのプラントの先駆けと位置づけられ、バブコック日立株式会社がボイラ設備一式を納入した松浦 2 号ボイラの設計概要と試運転実績について述べる。



注:略語説明

竹原3(電源開発株式会社竹原火力発電所3号機) 松浦1(電源開発株式会社松浦火力発電所1号機)

七尾大田1(北陸電力株式会社七尾大田火力発電所1号機)

松浦2(電源開発株式会社松浦火力発電所2号機)

原町2(東北電力株式会社原町火力発電所2号機) 橘湾2(電源開発株式会社橘湾火力発電所2号機)

図1 バブコック日立製石炭焚ボイラの蒸気条件の変遷

主蒸気温度は600 ℃ クラスが標準となりつつある。松浦 2 号はその初号機と位置づけられる。

2. ボイラ設計の概要

松浦2号機は、出力1,000 MWの石炭焚変圧貫流プラントである。このボイラに適用した新技術を図2に示す。わが国最大容量クラスの最新鋭プラントであり、信頼性と経済性の両面を重視し、総合的にバランスの取れた設計となるように配慮している。

2.1 高蒸気条件対応

蒸気温度の上昇に対しては、過熱器、再熱器の伝熱面積を増加させる必要があるが、このボイラではまず、火炉サイズを燃焼と灰付着の観点から適正化し、さらに板型過熱器を火炉上部に設置するなど、伝熱面配置の合理化を実施して、過度の伝熱面積の増加を抑制している。

メタル温度の上昇に対しては、高温高強度材料を適用して管肉厚を従来プラント並みとして熱応力を緩和し、信頼性を高めている。すなわち、つり下げ過熱器伝熱管には火SUS304J1HTB(18Cr9Ni3CuNbN)、つり下げ再熱器伝熱管には火SUS321J1HTB(18Cr10NiTiNb)、さらに、高温部大径管には火STPA28(9Cr1MoVNb)をそれぞれ採用した。このボイラに採用したこれらのステンレス鋼は、優れた高温強度を持ち、しかも経済性のある材料で、このボイラで初めて全面的に採用したものである(図3参照)。この選定にあたっては、材料強度はもちろんのこと、耐食性、溶接性、加工性などについて慎重かつ広範にテストを実施のうえ、問題のないことを確認した4)。

この中で、特に水蒸気酸化スケール対策としては、ショットブラスト加工材を採用した。高温化に対する信頼性が鍵となるが、700℃までその有効性を確認している。また、高温腐食に対しては、低硫黄炭(1%以下)の場合には18%Cr鋼で十分である。将来的に高硫黄炭燃焼を考慮する必要がある場合には、20~25%Cr鋼の適用を検討することになると考えている。

2.2 多炭種焚変圧運転対応

火炉水冷壁は信頼性の高いスパイラル壁とし、変圧運転時に管内流動の安定化と火炉出口流体温度分布の均一化を図った設計としている。過熱器には3段スプレ方式を採用している。このボイラではスプレによる過熱度制御法を初めて適用し、灰付着や燃焼特性の相違による火炉熱吸収量変動に対してボイラ特性の安定化を図っている。

さらに、後述するように、多炭種適応制御"STARTS (Self-Tuning Art System)"を実用化して、ボイラ制御を高度化した。

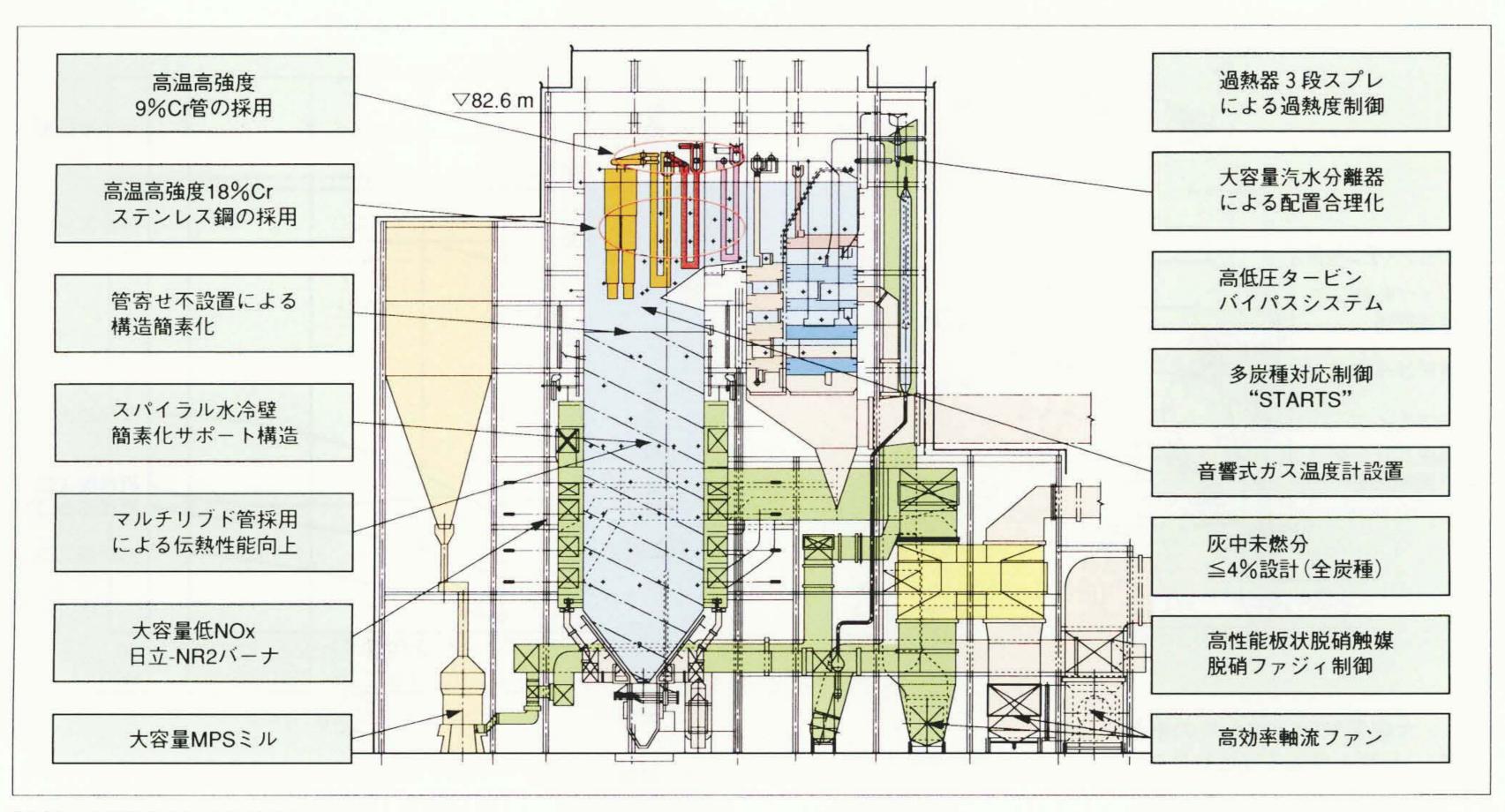


図2 松浦2号の新技術

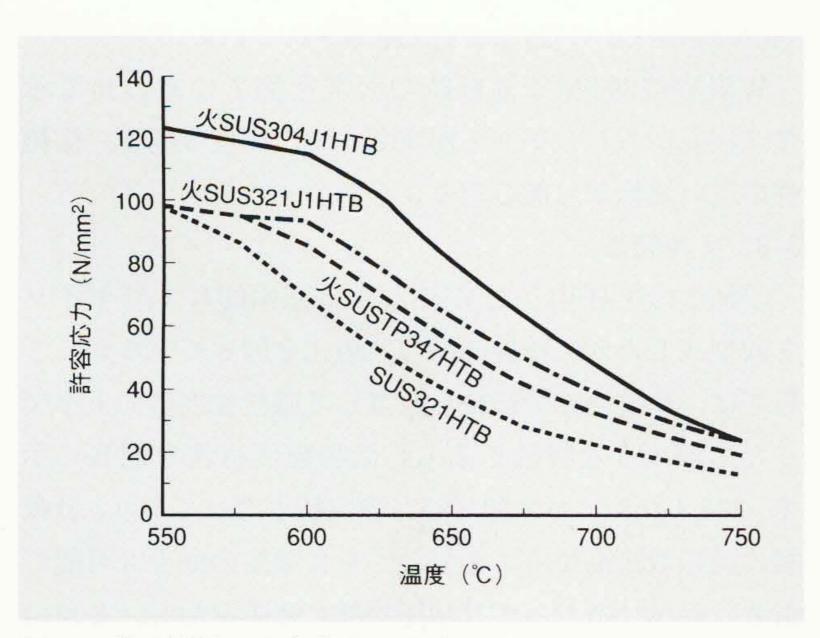
高性能・信頼性・経済性の面でバランスの取れた設計の大容量石炭焚ボイラである。

2.3 燃焼設備設計

高効率化と低NOx化を図るため、最新型の日立-NR2 バーナを採用した(図4参照)。このバーナは、火炎内脱 硝を基本原理とする日立-NRバーナの高温還元炎をさ らに強化するように改善を図ったもので、その性能は、 先行機である500 MWボイラで実証済みである5)。

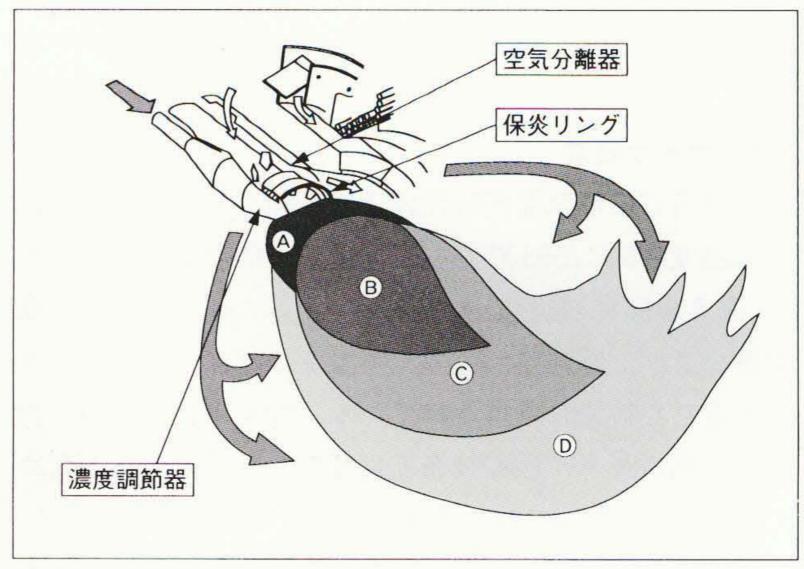
このバーナの性能を十分に発揮するには、微粉粒度の

向上が有効である。新型回転分級機付きの大型MPSミル を設置することにより、いっそうの燃焼効率の向上を図 った(図5参照)。さらに、加圧システム系を改善し、幅 広い運用条件下での安定した運用ができるように配慮し ている。



高温材料の許容応力の比較

火SUS304JIHTBは、従来のステンレス鋼に比べて高温強度が大幅 に高くなっている。



注: A (揮発分燃焼), B (還元剤発生領域) C(火炎内脱硝領域), D(酸化領域)

日立-NR2バーナ

空気分離器と濃度調節器によって高温還元炎を強化し,火炎内脱 硝の高度化を実現した。

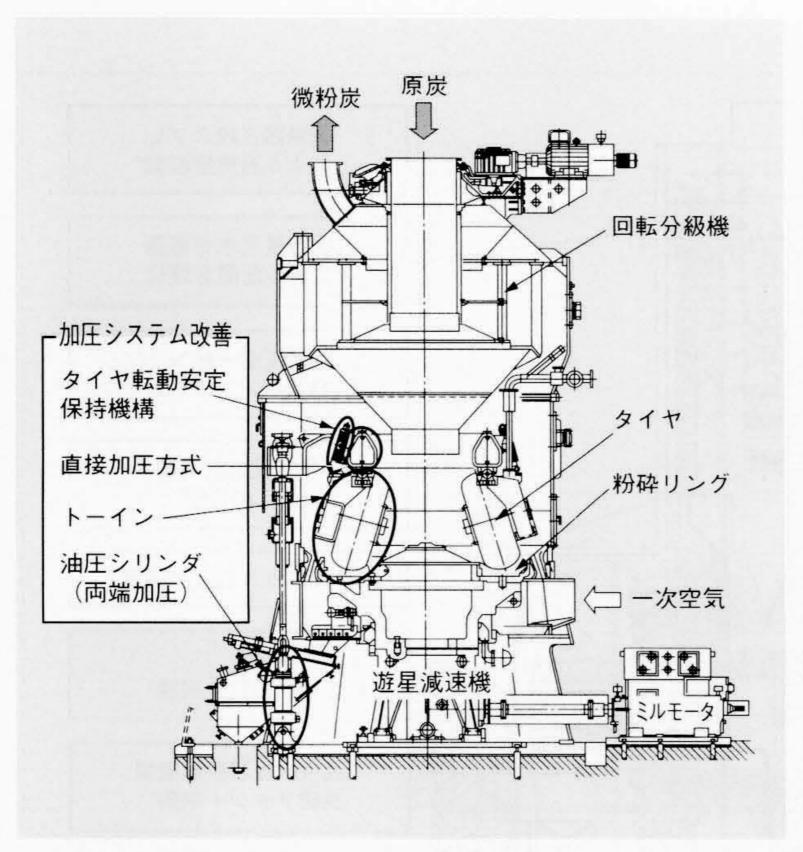


図 5 大容量MPS118ミルの構造

回転分級機を備えて高性能化を図り,いっそうの燃焼効率向上を実現している。

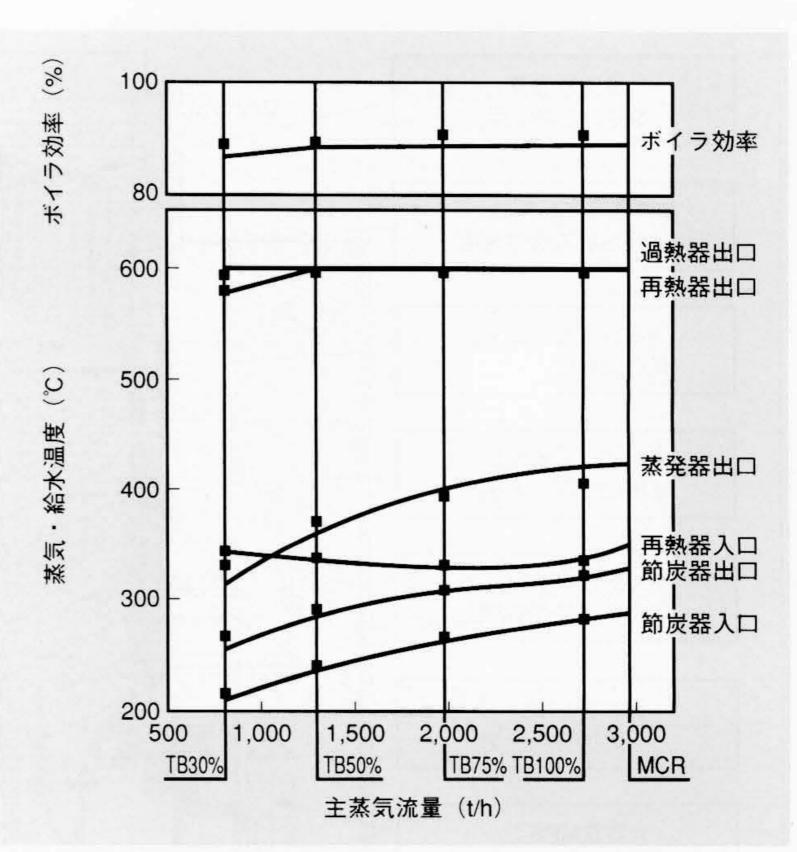
3. ボイラ運転実績

このボイラは、1994年6月に立柱し、1996年11月に火入れを、さらに翌年1月に初併入して本格的な試運転を開始した。7月の運転開始までの半年間で、豪州炭(以下、B炭と言う。)と、南アフリカ炭(以下、W炭と言う。)の2炭種について調整を行った。これらの石炭はいずれも燃料比が高く、灰付着も多いという特徴を持ち、ボイラにとっては厳しい銘柄であるが、計画を上回る良好な試運転結果が得られた。この章では、その実績について述べる。

3.1 ボイラ性能

する良好な結果が得られた。

各負荷での蒸気温度特性はほぼ計画どおりであり、高蒸気温度593℃/593℃で安定運用が可能なことを確認した(図6参照)。過熱器スプレシステムに採用した過熱度制御により、蒸発器出口の流体温度はほぼ計画値どおりの安定した特性に維持されている。つり下げ過熱器、再熱器の出口メタル温度分布も良好で、負荷変化時も含めて警報以下となっており、信頼性の高い運転が可能である。ボイラ効率についても、灰中未燃分、排ガス温度とも計画よりも低く、全負荷帯にわたって設計値を十分満足



注:略語説明など (計画値), ■(B炭燃焼時実績) TB(Turbine), MCR(Maximum Continuous Rating)

図6 蒸気・給水温度特性

過熱度制御により、ほぼ計画どおりの安定した熱吸収特性となっている。

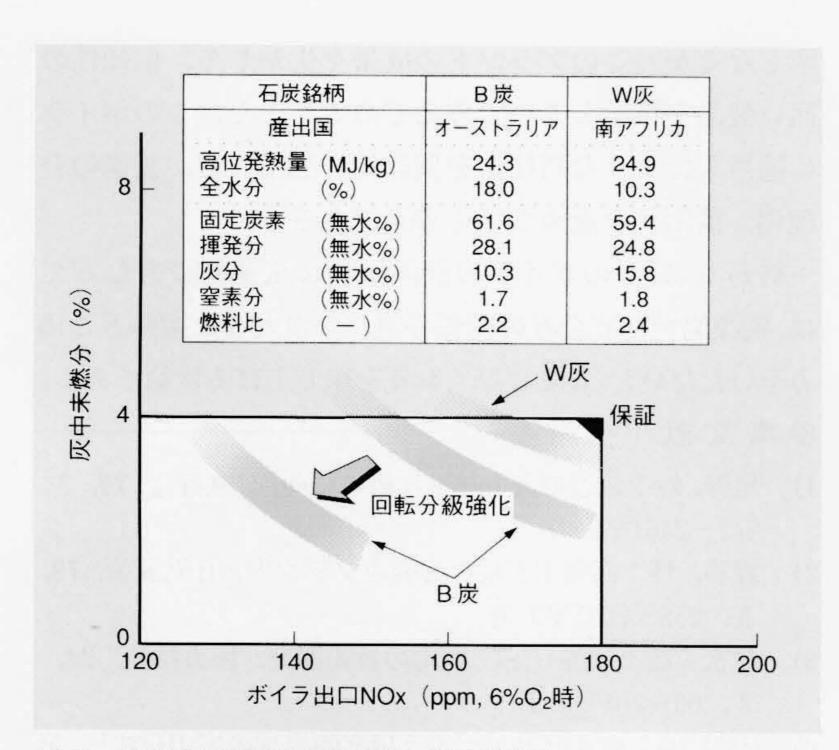
3.2 燃焼性能

燃焼調整試験の結果をまとめて図7に示す。試運転に使用した石炭は、同図に示すように、燃料比、窒素分とも高く、NOx・未燃分低減の観点からは厳しいものであるが、保証値を満足する燃焼性能を確認することができた。特に、ミルの回転分級機の回転数を上げることにより、NOx・未燃分とも大幅に低減させることができ、日立-NR2バーナの性能が十分発揮されている。

W炭専焼300 MW運転時の火炎を**図7** にあわせて示す。根元からしっかりと保炎されて、輝度も高く、信頼性の高い運転が可能である。

3.3 ミル特性

松浦2号で採用したMPSミルは基本的に1号ボイラと同型式であり、粉砕部品の共用化を図っているが、2号では、新型回転分級機を設置して微粉粒度の向上を図ったのが大きな特徴である。微粉粒度特性を図8に示す。200メッシュパス80~95%の実績となっており、分級機の回転数を高めることで、さらに粒度の向上も可能である。設計にあたっては加圧機構に改善を加え、ミルの起動・停止時や分級機回転数の増加時を含むミル運用範囲全域で安定して運用できることが確認できた。



燃焼調整試験の結果(定格負荷時)

燃料比2.2から2.4の石炭でも保証値を満足しており, 300 MW時 の保炎性も良好である。

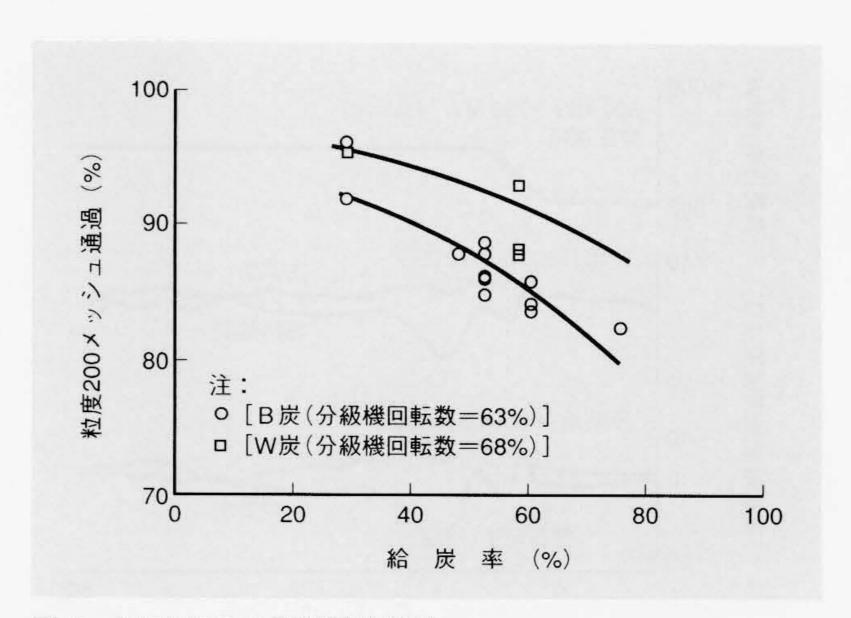
3.4 ボイラ動特性

このプラントは中間負荷運用を考慮した変圧運転ボイ ラであり、ボイラ動特性も重視した設計とした。負荷変 化率は300~500 MW, 500~1,000 MWでそれぞれ2%/ min, 4%/minであるが, 蒸気温度偏差, 圧力偏差とも 許容値を満足しており、優れた負荷追従性を持っている ことを確認した。

また, 起動・停止時間の短縮を目的として, 高・低圧 タービン バイパス システムを採用している。これによ り,起動初期の燃料投入量を増加させることが可能とな り、ホット スタート モードで、起動時間を大幅に短縮 することができた。

4. 多炭種適応制御

多炭種適応制御 "STARTS" は、電源開発株式会社と の4年間の共同研究6の成果として、松浦2号で実用化 された。このシステムの開発の背景は、石炭粉砕速度, 燃焼速度, 熱伝達率など, ボイラ特性パラメータのラン ダムな変動に対処する制御技術の必要性である。すなわ ち, 多様な炭種や混炭の燃焼の場合はもとより, 同一銘 柄の場合でも、石炭性状のばらつきと、伝熱面の汚れの 進行やはく離に起因して, 例えば, 負荷変化時の蒸気温 度などの制御偏差が生じており、このシステムは、ボイ ラ特性パラメータの変動に対する安定性と高速負荷追従 性の向上を実現する。



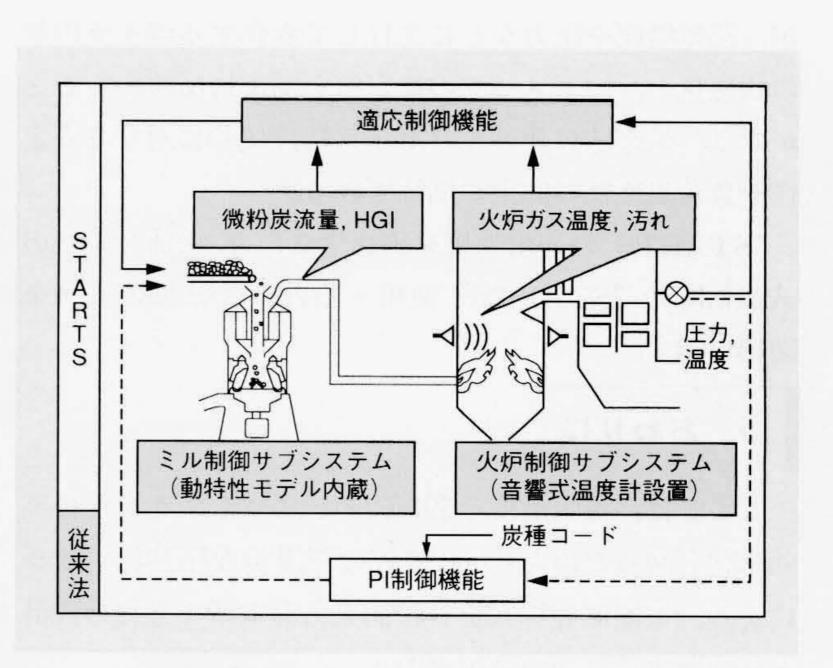
MPSミルの微粉粒度特性 200メッシュパス80%を十分上回る微粉粒度が得られた。

制御システムの構成

このシステムは、ミル制御サブシステムと火炉制御サ ブシステムで構成している(図9参照)。

このうち、ミル制御サブシステムは、オンライン計測 が困難な各バーナ入口微粉炭流量, 同粒度分布, HGI (Hard Groove Index)などをミル差圧の計測とミル動特 性モデルによる解析機能で推定して制御に反映させ,各 バーナ入熱の目標値への追従, ミル保有炭量の最適化, および負荷変化中のミル台数増減スケジューリングを実 施する。

また, 火炉制御サブシステムでは, 火炉ノーズ下部の 音響式ガス温度計測とボイラ動特性モデルによる解析機 能とを組み合わせ、火炉出口ガス温度、燃料比、伝熱面 汚れなどを推定して制御に反映させている。音響式ガス



多炭種適応制御 "STARTS" の構成 ミルや火炉制御サブシステムで構成する。

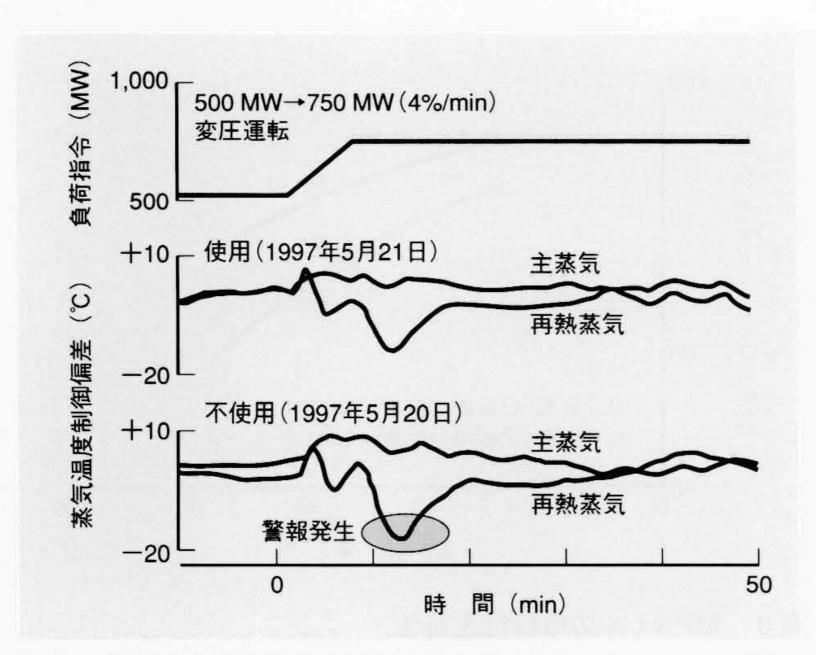


図10 "STARTS"の使用・除外の比較

"STARTS"使用により、大幅な石炭性状変動に適応し、良好な負荷変化性能を確保できる。

温度計測はガス温度と音波伝搬時間の関係を利用しており、非接触で耐久性、精度に優れ、M系列位相変調波の炉内送出と新しい信号処理法の開発がにより、このたび大容量石炭焚ボイラに適用が可能になった。

4.2 従来法との比較

多炭種適応制御"STARTS"は、石炭粉砕性、燃料比、伝熱面汚れなど(ボイラパラメータ)や、ミル出口微粉炭流量、火炉出口ガス温度など(ボイラ内部の状態量)の推定値から操作量を算出する方式と位置づけられる(図9上段参照)。一方、従来法は、蒸気温度や圧力(ボイラ出力)など観測値から炭種コード(使用炭種銘柄の代表性状に応じて制御設定値などを調整)に応じて操作量を算出する方式である。"STARTS"は、直接計測が困難であるが、蒸気温度や圧力などに先行して変化するボイラ内部の状態量と、パラメータの推定値を制御に反映することができ、従来法に比べて、ボイラ特性変動に対する安定性や負荷追従性の向上が期待できる。

"STARTS"の適用効果を確認するため、松浦2号での 試運転時の"STARTS"使用・除外試験結果の一例を 図10に示す。

5. おわりに

ここでは、蒸気温度を593℃まで高めてプラントの高効率化を図った出力1,000 MWの石炭焚変圧運転ボイラによる、電源開発株式会社松浦火力発電所2号機の設計と試運転実績について述べた。

今後は、蒸気温度600℃クラスの石炭焚プラントが標

準となるが、このプラントの成果を生かして、信頼性の 高い製品を供給していく考えである。また、このボイラ に適用したような新技術を積極的に活用して、設備の合 理化、簡素化を進めていく考えである。

終わりに、このボイラの計画、建設、試運転にあたっては、電源開発株式会社の関係各位から多大なご指導とご協力をいただいた。ここに厚くお礼を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 星野,外:最近の火力発電技術の動向,日立評論,**79**,3,242~246(平9-3)
- 2) 森谷,外:高効率石炭火力発電プラント,日立評論,79, 3,255~260(平9-3)
- 3) 村松:超々臨界(USC)発電の技術開発,圧力技術,34, 2,60~70(平8-2)
- 4) 田村,外:超々臨界圧ボイラ用高強度材の実用化技術,第 4回動力・エネルギー技術シンポジウム(平6-12)
- 5) J. Matsuda, et al.: Latest Design and Experience of Coal Fired Benson Boiler, 4th International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, Lisbon, Portugal (1997-7)
- 6) 新井,外:多炭種適応ボイラ制御システムの開発,火力原 子力発電,47,11,1255~1262(平8-11)
- 7) Y. Fukayama, et al.: Acoustic Gas Temperature Measurement for Controlling Boilers; '96 Symposium on Flexible Automation, ASME, 433-440, Boston, USA (1996-7)

執筆者紹介



酒井和人

1982年バブコック日立株式会社入社, 呉工場 火力設計部 所属 現在, 事業用ボイラの基本設計・開発に従事 E-mail:sakai@bhk.kure.co.jp



古川 淳

1974年バブコック日立株式会社入社, 呉工場 火力設計部 所属 現在, 事業用ボイラの構造計画業務に従事



田辺武利

1982年バブコック日立株式会社入社, 呉工場 燃料装置設計部 所属 現在, 事業用ボイラの微粉炭機の設計に従事



深山幸穂

1978年バブコック日立株式会社入社, 呉研究所 制御研究部 所属 現在, 火力プラントの運転特性解析, 制御, 計測信号処理 の研究に従事 IEEE会員, 日本機械学会会員

E-mail: fukayama-y@krl.bhk.co.jp