

最近の石炭燃焼技術

Recent on Coal Combustion Technologies

バブコック日立株式会社は、石炭燃焼ボイラでの低NO_x燃焼のニーズにこたえるため、昭和61年度機械学会賞を得た日立-NRバーナを国内外の石炭燃焼ボイラに適用して高い評価を得るとともに、欧州での低NO_x化改造プロジェクトにも供給して良好な成果を取めている。

また、油・ガス燃焼ボイラに匹敵する負荷変化調整機能、および本格的DSS (Daily Start and Stop)運用への対応のために、各種の燃焼制御技術を開発し大形のテスト炉や実機での検証を通じて実用化している。

森田 茂樹* Shigeki Morita
峰 健治** Kenji Mine
川瀬 隆世* Takayo Kawase
小豆畑 茂*** Shigeru Azuhata

1 緒言

わが国の厳しい環境保全の要請にこたえるために、日立グループでは早くからその重要性を認識し研究開発に力を入れてきた。その結果、排煙脱硫・排煙脱硝技術とともに、低NO_x燃焼技術でも欧米各国へ技術供与を行うまでの進展をみせ、国内外から高い評価を得ている。

しかし、環境問題に対する世界的な関心の高まり、燃料の多様化・運用性の向上・経済性の追求というたゆみない技術の高度化が要求されるなかで、燃焼技術はますます重要性を持つとともに多岐にわたる開発が必要となってきた。

本稿では、石炭火力発電所の置かれている現状に対し、特に微粉炭燃焼技術に関する最近の取り組みと、その成果について述べる。

2 石炭燃焼ボイラの技術課題

2.1 発電用石炭の性状

わが国の火力発電プラントで使用される石炭は、エネルギーのセキュリティ確保のために、世界各国から輸入されており、その性状は多種多様である。

石炭は図1に示すように、それぞれの成分が複雑に関連しあいながら種々の特性を持っており、ボイラの設計にあたっては柔軟な対応が必要である。

2.2 石炭燃焼ボイラの技術改革ニーズ

石炭燃焼ボイラの主要なニーズとしては、環境保全の観点から、

- (1) 低NO_x、高効率燃焼
- (2) ボイラ効率向上

運用面からの改善項目としては、

- (3) 起動時間の短縮
- (4) 負荷変化率の向上
- (5) 最低負荷率の切り下げ
- (6) 機器信頼性の確保

さらに、経済性の観点から、

- (7) 所内動力低減

などがあげられる。システムの最上流にあって、石炭の特性の変化による影響を顕著に受けるのが燃焼関連技術であり、

図2に示すような対応策が要求されている。

3 日立グループの燃焼研究

日立グループでは、研究所および担当工場がそれぞれの技術的機能を最大限に発揮した研究開発を進めている。各部署間は開発プロジェクトによって連携を図っており、基礎研究から実証試験に至るまで一貫して推進する日立グループ独自の研究開発体制を確立している。例えば、日立製作所 日立研究所 COTEC センタ (Coal Technology センタ：以下、COTECセンタと略す。) で得た基礎研究の成果を実用化するための重要なインタフェースとしてバブコック日立株式会社 呉研究所 (以下、呉研究所と言う。) が機能している。

3.1 基礎研究

基礎研究での理論の構築と的確な技術選択のためには、精度の高い実験を行って現象を解明することが不可欠である。COTECセンタでは、各種の火炎計測技術を用いて、反応と流動の両面から火炎の研究を進めている。また呉研究所では、各種パイロット試験や数値解析などによって相似則の検討と構造スクリーニングを行い、実機の設計に反映している。

* バブコック日立株式会社 呉工場 ** バブコック日立株式会社 *** 日立製作所 日立研究所 工学博士

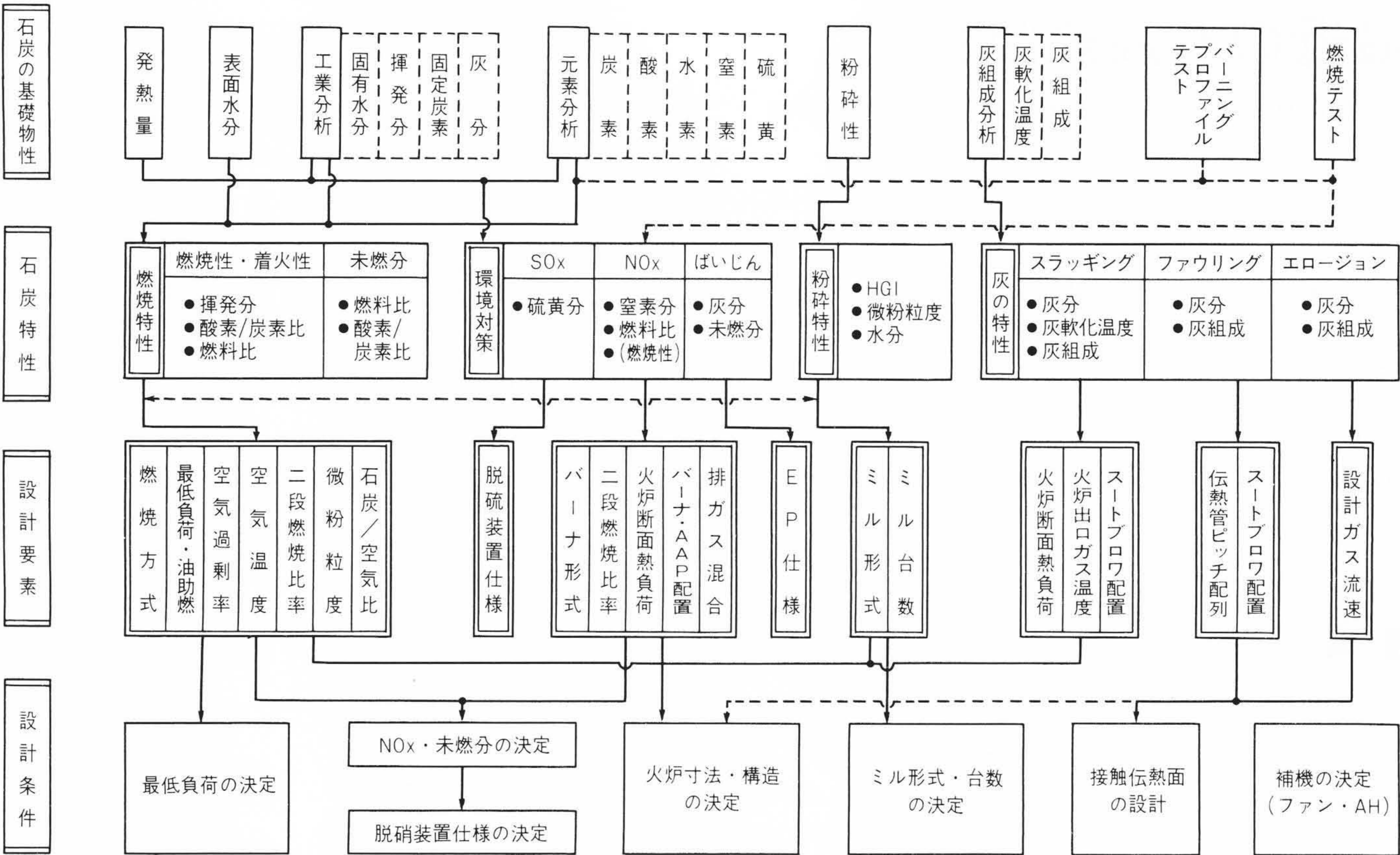


図1 石炭性状とボイラ設計 石炭の性状によって、ボイラの収熱特性や燃焼排ガスの性状が大きく異なるため、設計にあたっては詳細・多岐にわたる検討が必要である。

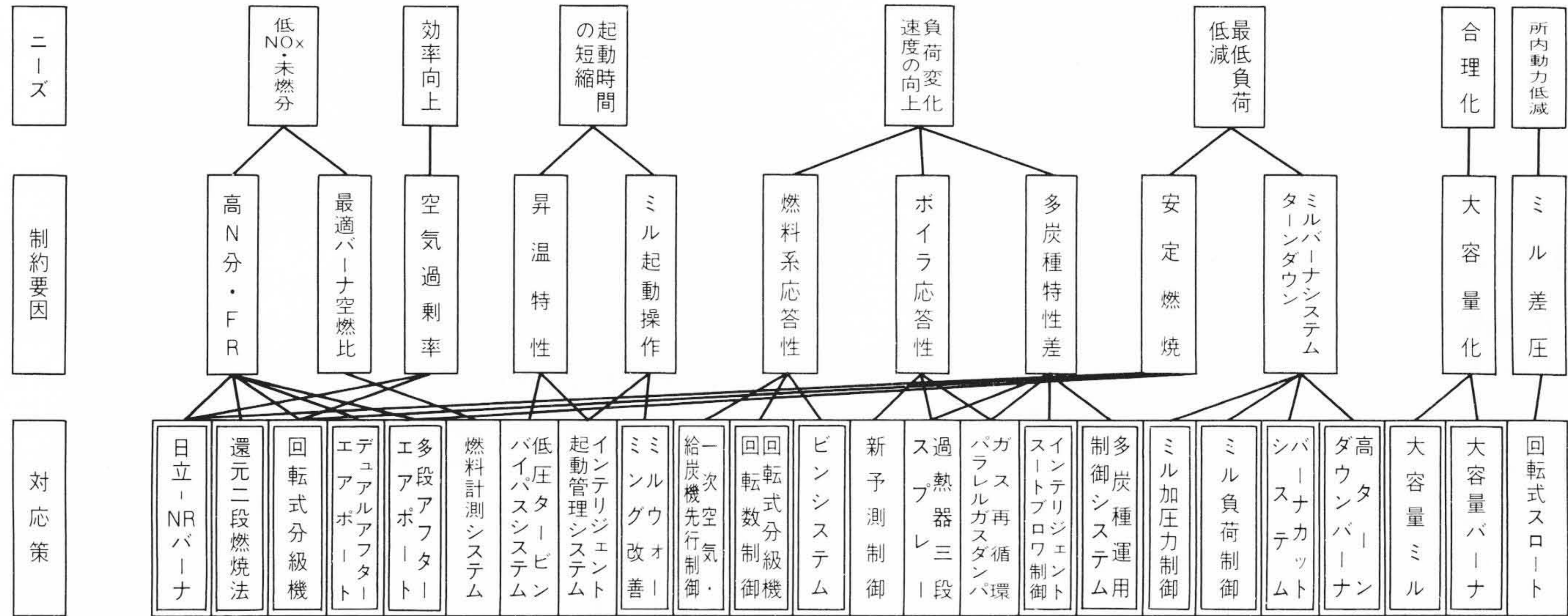


図2 石炭燃焼技術の課題と対策 石炭火力での燃焼技術の課題は多岐にわたっており、この図は最近の対策を示す。

3.2 実用機へのスケールアップ

新技術を実用機へ適用するまでのステップとして、呉工場内の大形燃焼試験設備を用いて実証試験を行っている。大形燃焼試験設備の外観を図3に示す。この設備はデジタル制御に関する最新の技術を駆使しており、

- (1) 実機相当容量単一バーナ(4,000 kg/h)の性能把握試験
- (2) マルチバーナシステムによる実用模擬燃焼試験
- (3) 動特性〔負荷変化, AFC (Automatic Frequency Control), ランバックなど〕シミュレーション試験
- (4) 多種燃料〔油, ガス, 石炭(褐炭, 無煙炭含む), CWM

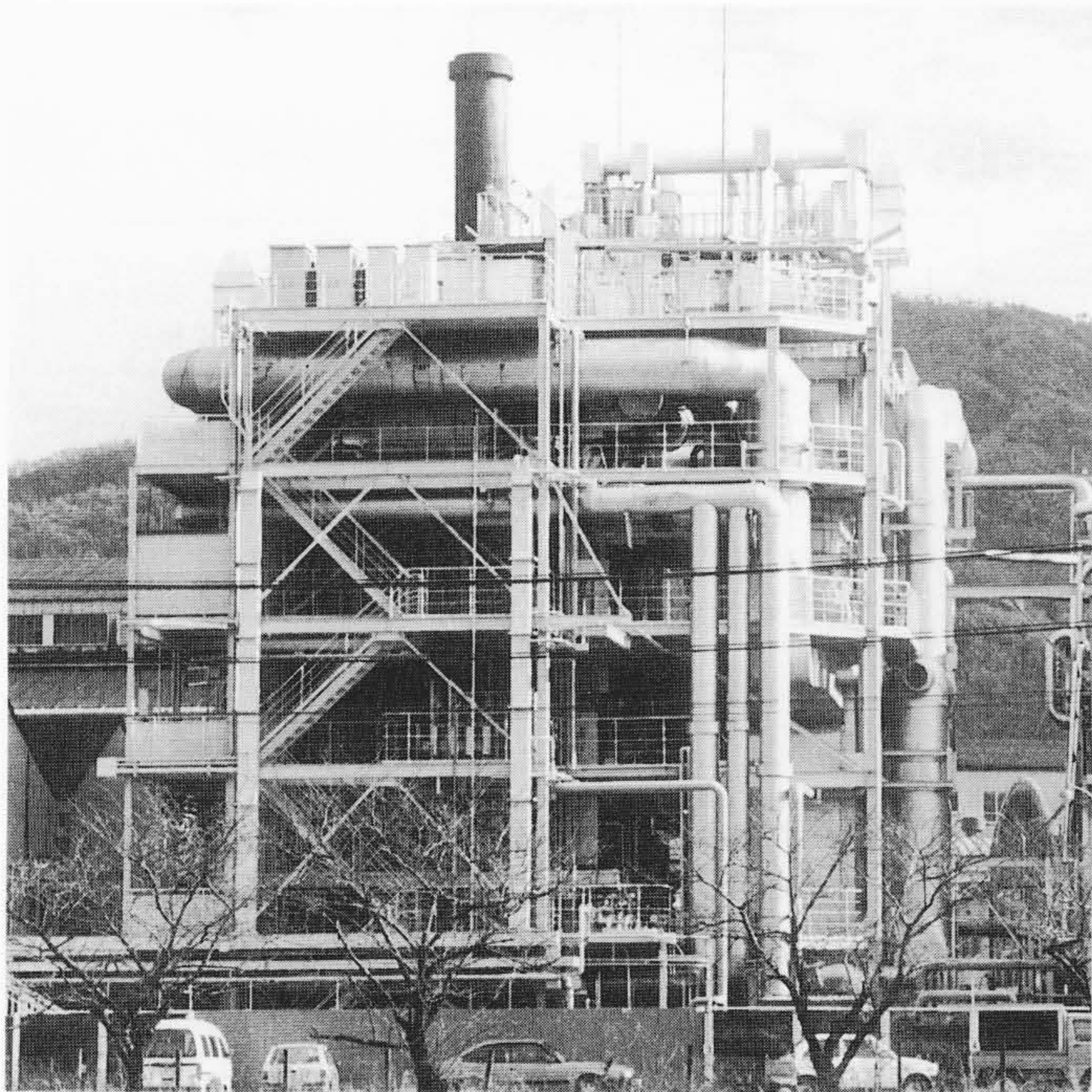


図3 大形燃焼試験設備 実機規模のシングルバーナと12台のマルチバーナを持つ世界最大級の実証試験設備であり、コンピュータを駆使した最新の研究手法を取り入れている。

(Coal Water Mixture), メタノールなど] 対応試験を行うことができる。動特性シミュレーション試験とは、実際の燃焼による特性データをボイラ・ミル動特性シミュレーションモデルにオンラインで入力するものであり、制御システムの構成を図4に示す。これは、日立グループが開発した最新のパイロット試験手法であり、実機運転に類似した燃焼実験を行いながら、ボイラの蒸気特性に関する精度の高いシミュレーション結果をリアルタイムで得ている。

4 要素技術

既述した石炭火力のニーズに関する技術課題と対応策の中で、特に燃焼技術に関連する主なものについて以下に述べる。

4.1 高効率低NO_x燃焼技術

高い燃焼効率を維持しながら同時に低NO_x燃焼を達成するためには、バーナの高性能化はもちろんのこと、さらにミルの性能(粉碎特性)、各種操作条件(燃焼用空気の配分)、火炉(形状、バーナ配置)、燃焼関連機器(アフタエアポート)などの各要素技術の高度化を図ることが必要であり、図5にその概念を示す。

ボイラの心臓とも言えるバーナについては、日立-NRバーナをすでに実用化しており、国内外の低NO_xプロジェクトに適用してその優れた性能が高く評価されている。特にオランダではこの技術の供与先であるライセンシーが1989年度のオランダ環境賞に輝くなど、大気環境問題の解決に大きく貢献している。火炎内でNOを還元する日立-NRバーナ独自の燃焼機構を図6に示す。日立-NRバーナを既設のボイラに採用することにより、石炭によってはすでに重油燃焼並みの低NO_x化(ボイラ出口で70 ppm程度)が確認されている^{1)~3)}。

現在、日立-NRバーナを装備した電源開発株式会社松浦火力発電所1号機(1,000 MW)が平成2年6月末の運転開始に向けて試運転中である。このボイラで使用される石炭は、表1に示すように幅広い性状を持っている。一般に、石炭中に含まれる窒素(N)の含有率が高いほど、また燃料比(=固定炭素/揮発分)が高いほど、低NO_x燃焼が困難であると言われている。このボイラでは、わが国で発電用として常用している海外炭の中では最も高N・高燃料比の石炭も燃焼しているが、図7に示すようにきわめて良好な燃焼性能を得ている。

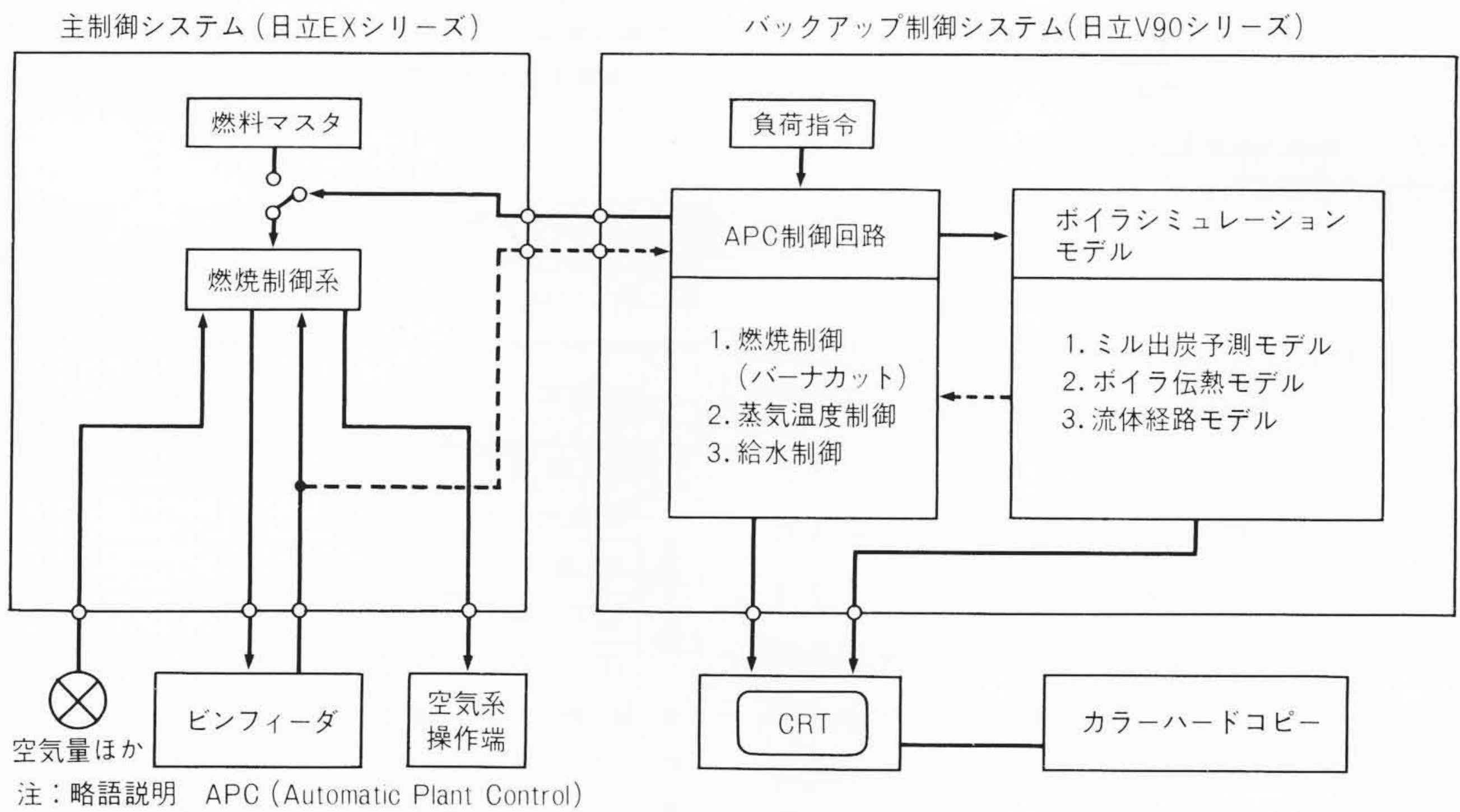


図4 大形燃焼試験設備での制御システムの構成 燃焼試験炉の主制御システム(全フィードバック制御方式)に、プラントシミュレーションCPUを増設して動特性解析を可能とした最新の燃焼制御研究設備である。

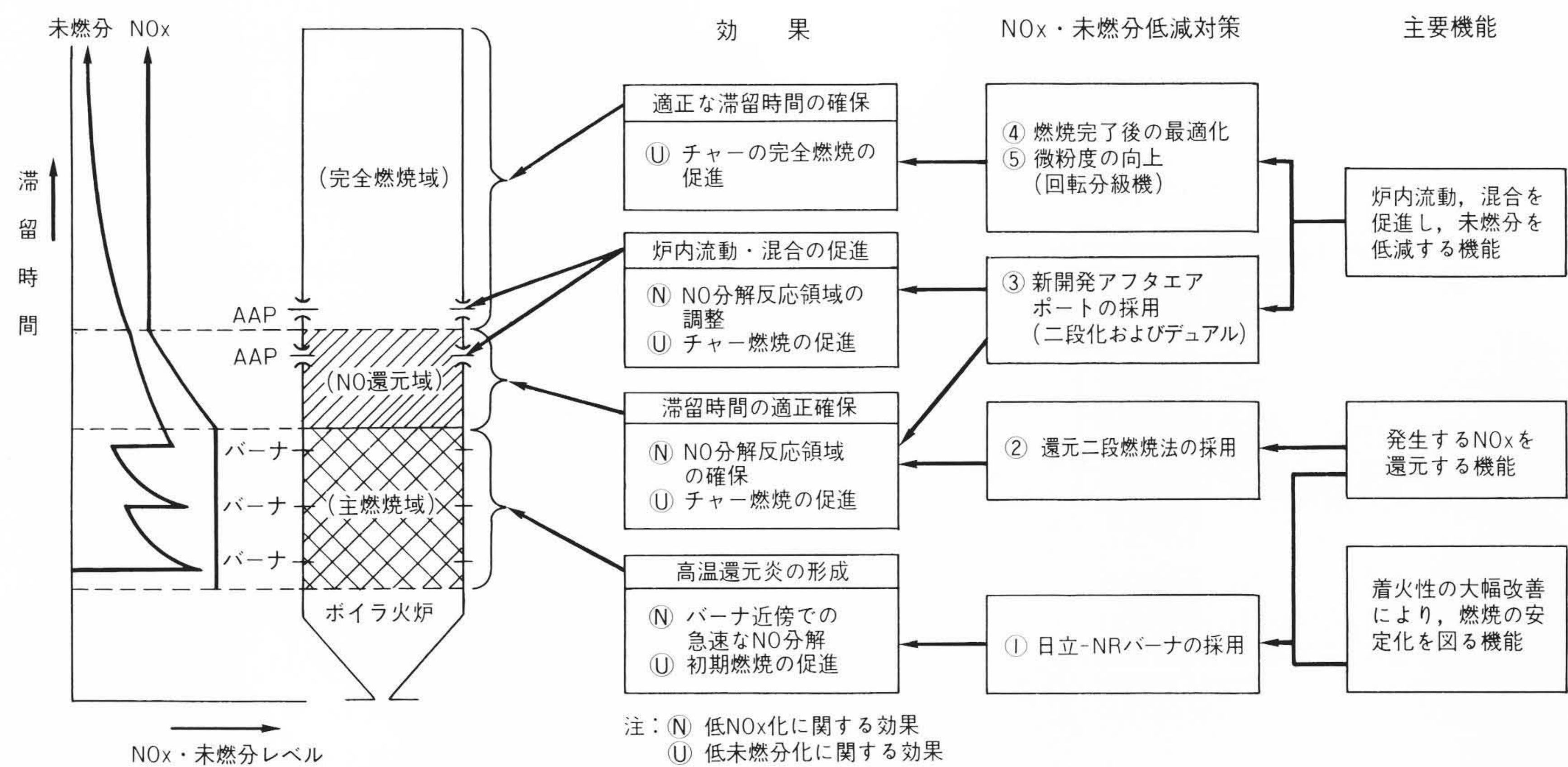


図5 高効率低NOx燃焼技術に関する設計の基本概念 高効率化と低NOx化は、相反する一面を持つと考えられていたが、日立-NRバーナとミル・火炉の最適な組み合わせによって、これを克服している。

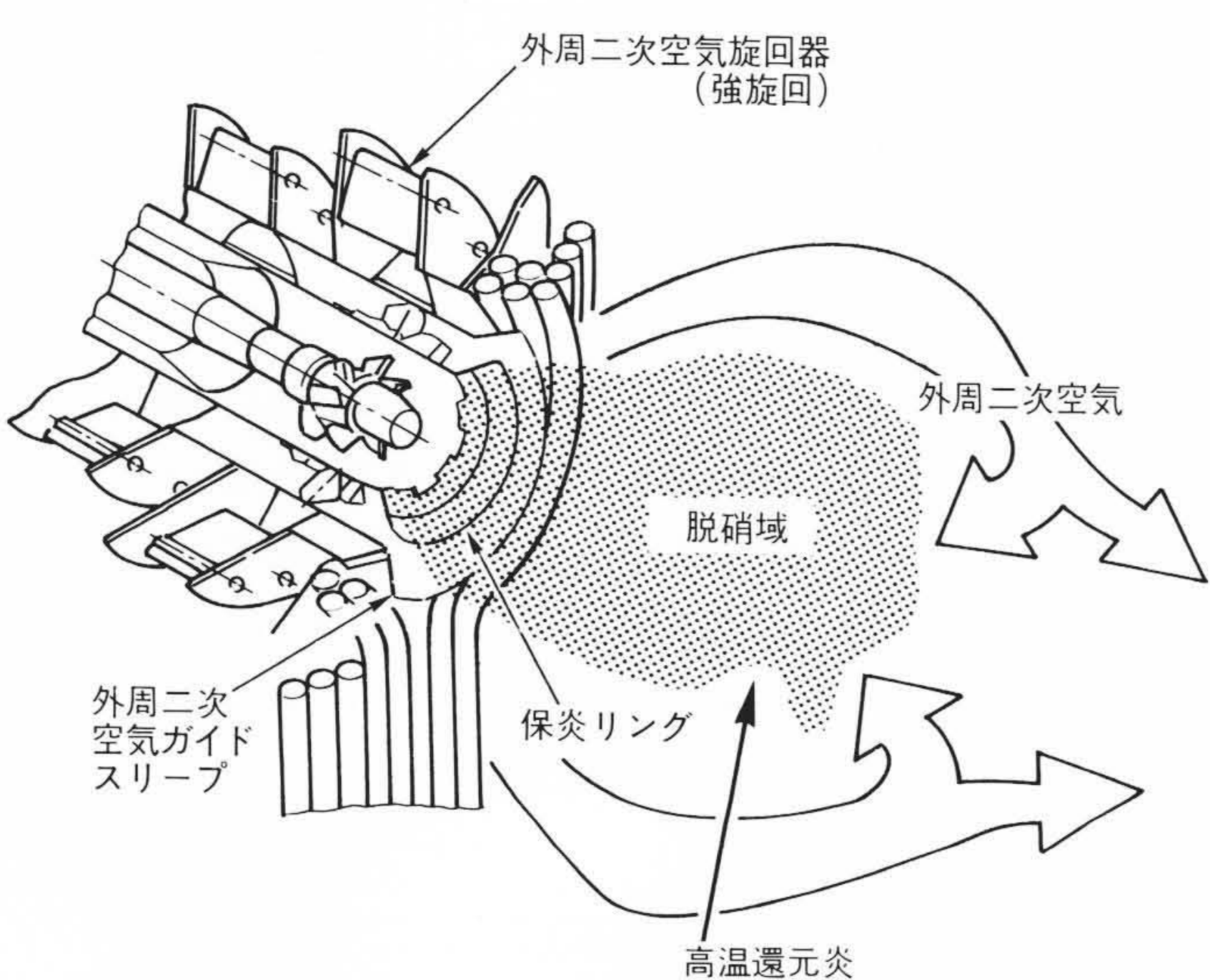


図6 日立-NRバーナ 高温の低空気比火炎によって、火炎内脱硝を促進する日立-NRバーナの火炎構造を示す。

またバブコック日立株式会社では、次世代の石炭火力のニーズに対応するため、さらに低NOx化を目指した超々低NOxバーナ(日立-NR2バーナ)を開発中である。日立-NR2バーナは、日立-NRバーナの原理を踏襲し、よりいっそうの着火の強化と還元炎の拡大を図るものである。日立-NR2バーナを用いて、バーナ近傍のガス濃度の挙動を測定した結果を図8に示す。着火の促進によって高い燃焼効率を維持しながら、火炎内でのNO分解反応の促進が図られている。現在、大形燃焼試験炉を用いて実機規模バーナ(4,000 kg/h)による製品化検討を行っており、図9に示すような良好な結果を得ている。

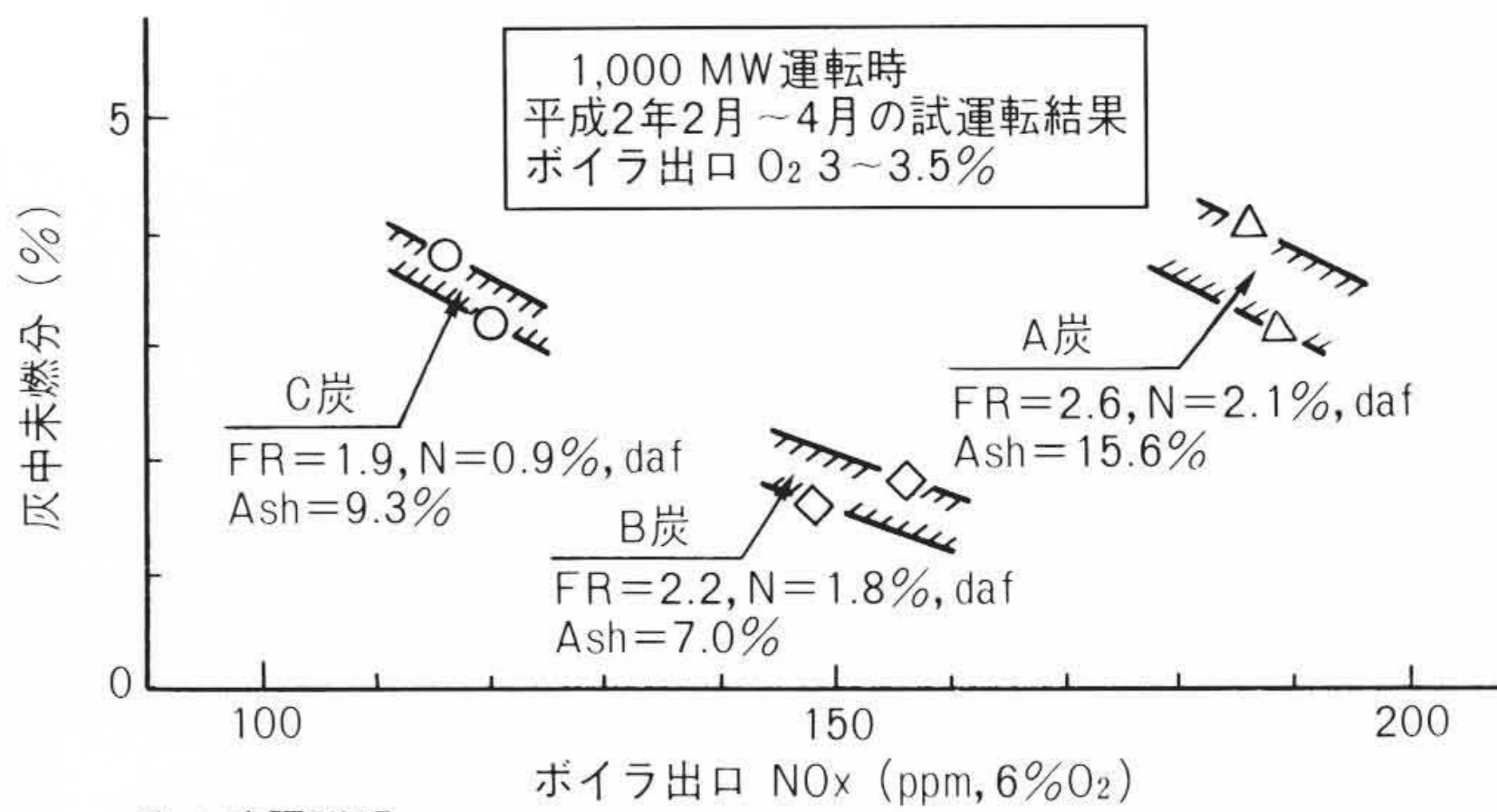


図7 1,000 MWボイラでのNOx・灰中未燃分性能 1,000 MW定格運転時のNOx・灰中未燃分を示す。日立-NRバーナの採用により、燃料比が2.5を超える石炭を燃焼させた場合でもボイラ出口NOxは200 ppm以下に抑制されている(表1に石炭の性状を示す)。

表1 1,000 MWボイラの計画炭性状 平成2年6月末の運転開始に向けて試運転中の1,000 MW石炭燃焼ボイラは、広範囲におよぶ石炭性状に対してNOxが200 ppm以下の運転を行えるように設計されている。

分析項目	単位	設計炭	計画石炭	
			最小値	最大値
高位発熱量	J/kg	25.1以上	24.2	29.0
工業分析	固有水分	恒湿, %	1.5	9.6
	揮発分	恒湿, %	23.9	40.6
	固定炭素	恒湿, %	38.5	59.1
	灰分	恒湿, %	3.5	26.0
全硫黄分	恒湿, %	1.0以下	0.2	1.3
燃料比	—	2.4以下	1.1	2.4
窒素	無水無灰, %	2.1以下	0.8	2.1
灰軟化温度	酸化, °C	1,200以上	1,210	>1,500

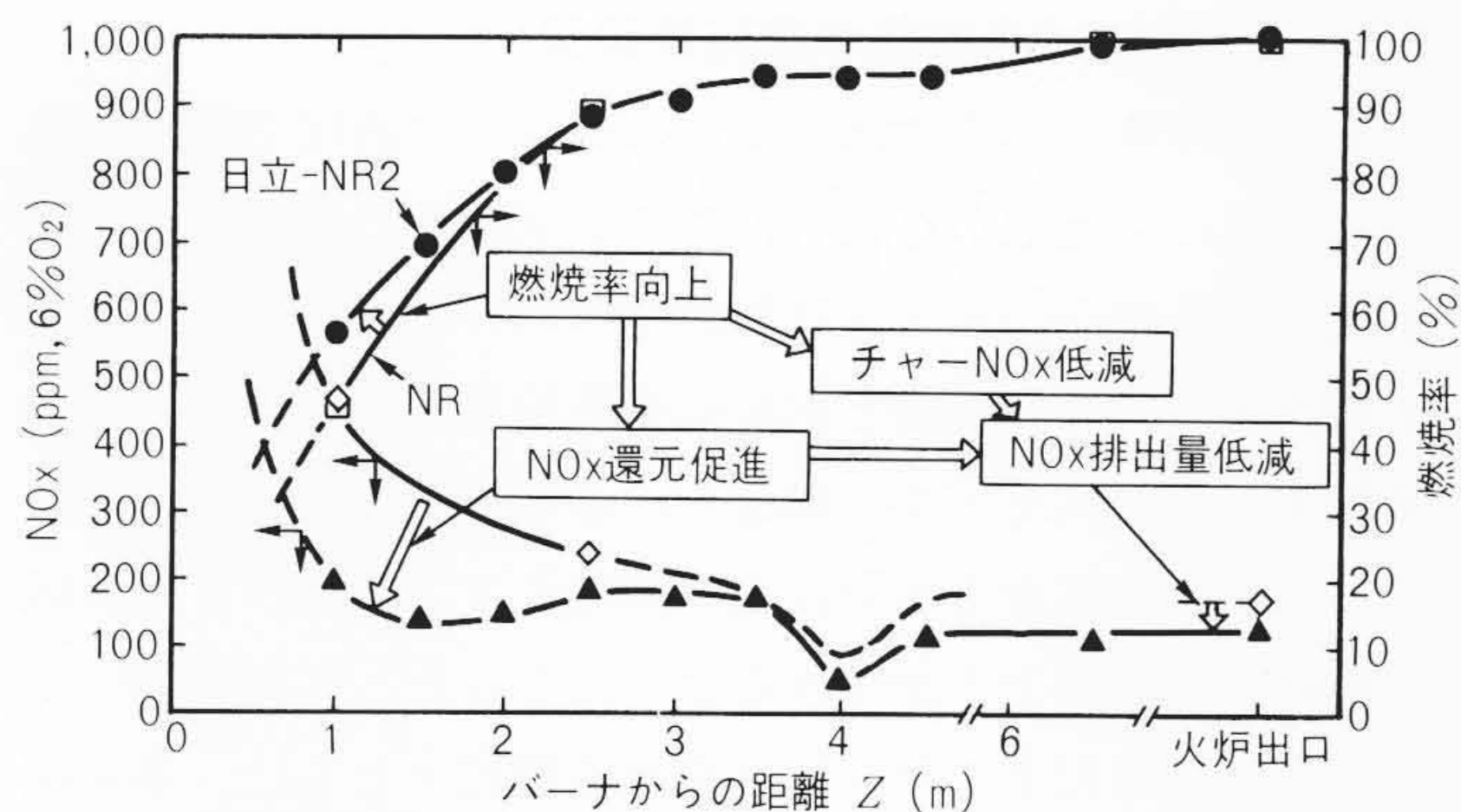


図8 次世代形超々低NOxバーナ(日立-NR2バーナ)の火炎構造
高温還元雰囲気さらに強化したバーナの開発によって、1990年代後半の石炭火力の環境対策に対応できるようになった。この図は、石炭量500 kg/hのシングルバーナテストでの火炎構造を示すものである。

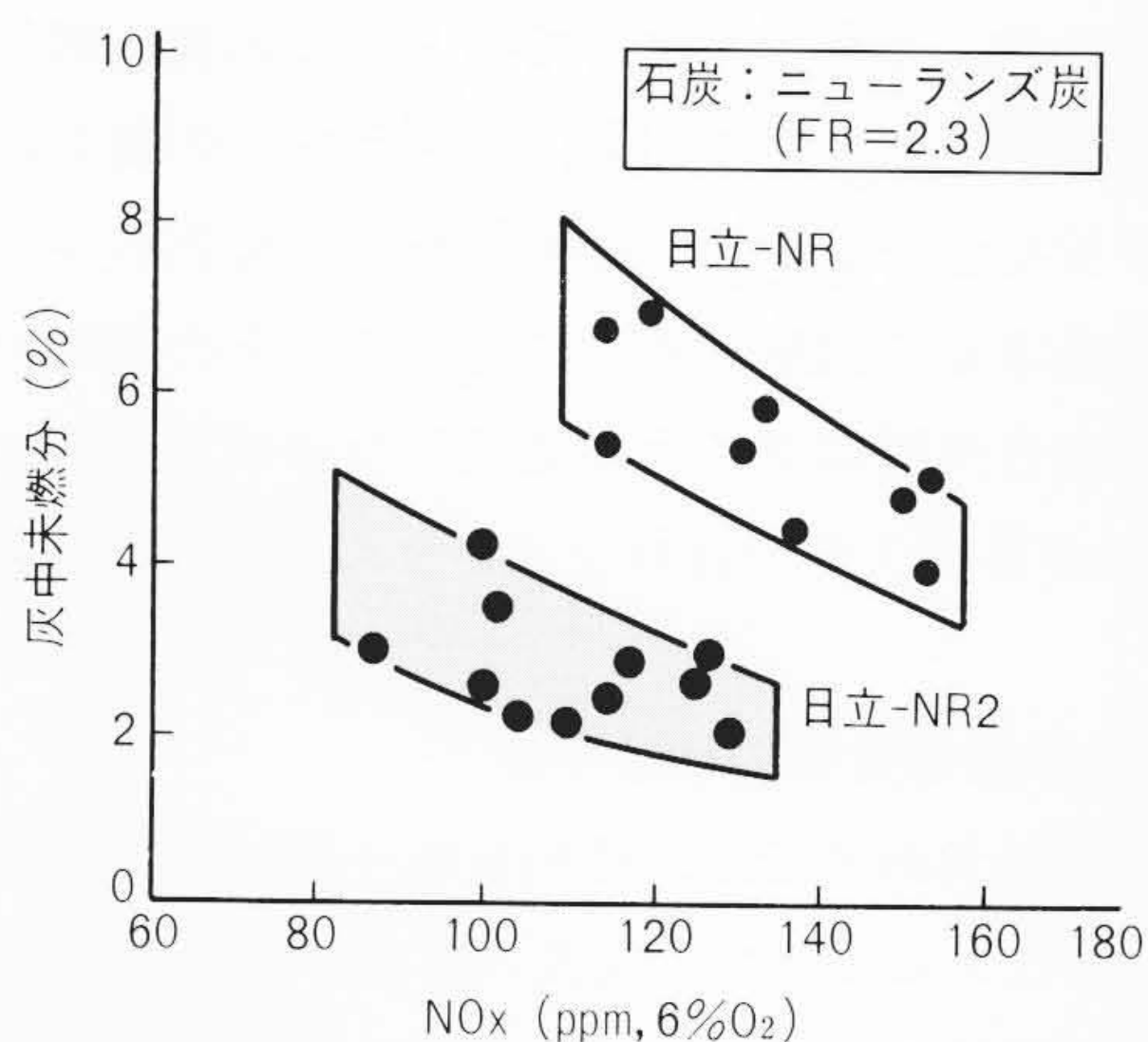


図9 日立-NR2バーナのNOx・灰中未燃分性能 大形燃焼試験炉での実機規模バーナ(石炭量4,000 kg/h)によるNOx・灰中未燃分性能の比較試験結果を示す。日立-NR2バーナの顕著な低NOx・低未燃分性能が実証されている。

4.2 起動時間の短縮

石炭燃焼ボイラの起動時間を短縮するためには、点火から併入に至る過程でミル起動操作を迅速に行うことが重要である。ミルの起動にあたっては、一次空気によるミル本体の予備加熱(ウォーミング)が必要であり、これにより、石炭投入初期に原炭中の水分によって粉砕が悪化したり、微粉炭の搬送が阻害されることなく安定した燃焼を維持することができる。

しかし、石炭の自然発火に対する安全性の観点から、ミル入口一次空気温度が制限されるため急速な加熱は困難であり、従来はミルウォーミングに1台当たり約10～15分を要していた。しかも、ウォーミング用一次空気の炉内への投入に起因する燃焼の外乱を避けるため、ウォーミングはミル1台ごとに実施していた。したがって、従来方式では全数ミルを投入するための所要時間が約50～60分となり、プラントの起動時間が長くなる要因の一つとなっていた。ボイラ点火後早期に全数ミルのウォーミングを完了する(早期ウォーミング)と

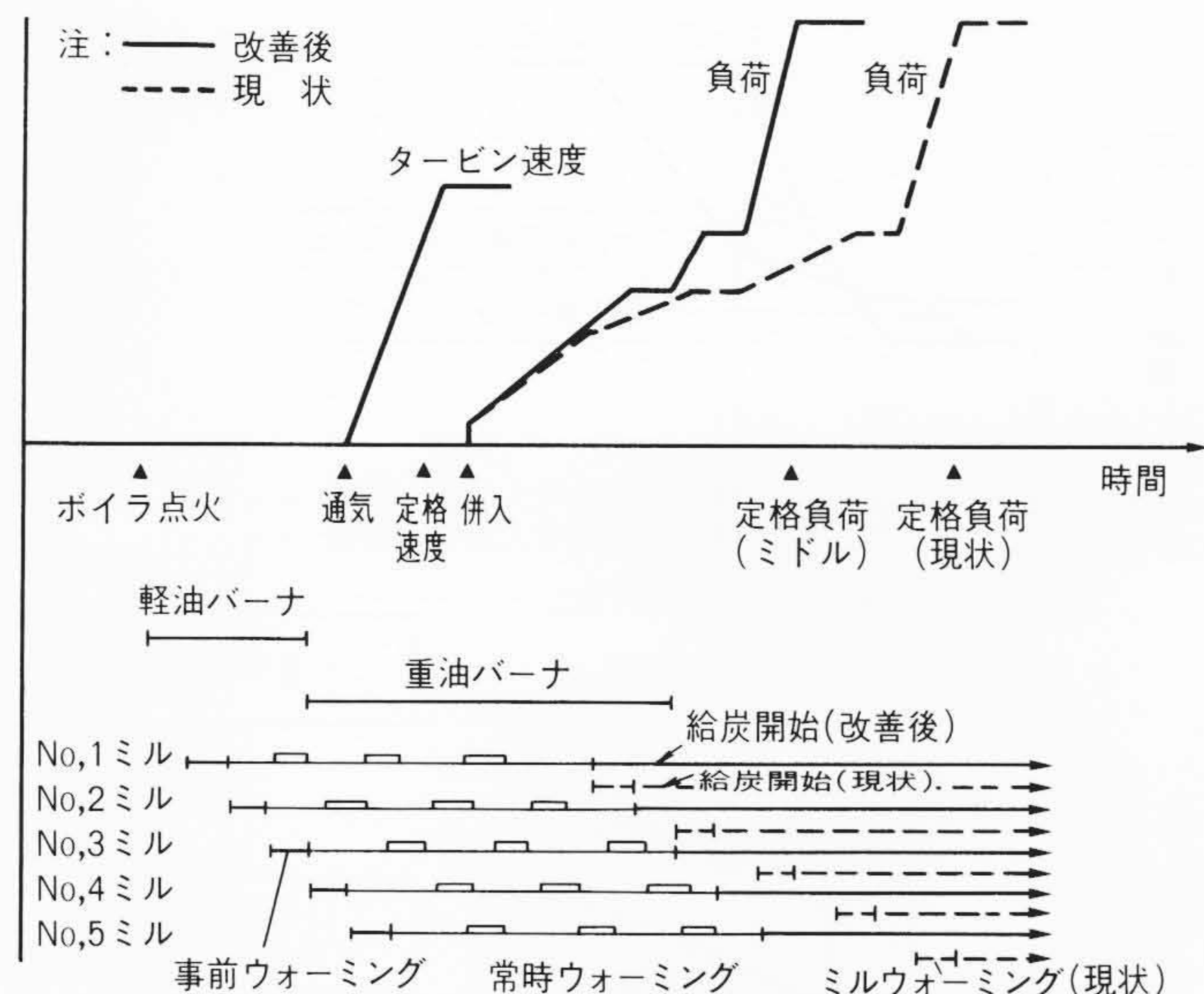


図10 ミルウォーミング技術の改善によるボイラ起動時間の短縮
従来の石炭火力とミドル形石炭火力のウォーミング手順を比較して示す。

もに、起動までの待機中にも必要な温度を維持しておく(常時ウォーミング)方式を用いれば、この問題を大幅に改善することができる。この方式の採用により、一次空気系に設けた専用の空気供給系によって、ウォーミング空気量を必要最小限とするとともに、間欠運転によって温度を維持することができるので、燃焼への外乱も回避できるようになった。このようなミル運用方式の例を図10に示す。ミルウォーミングによる影響は顕著に改善され、これにより、ユニット起動時間を30分程度短縮することができる。

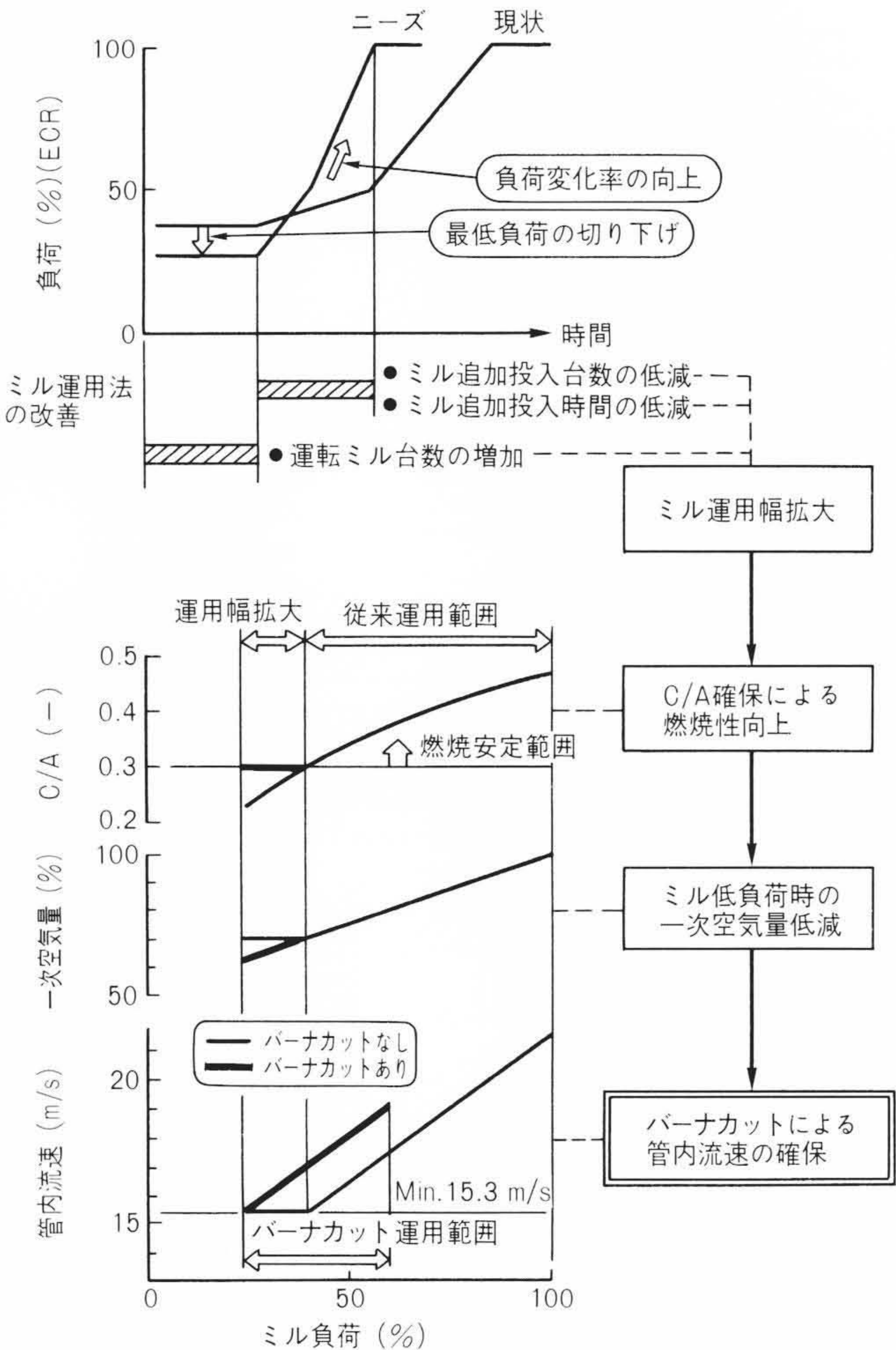
4.3 負荷変化速度(追従性)の向上

石炭燃焼ボイラでは、負荷変化時のミル起動・停止に伴う燃料量のステップ状の変化、および燃料要求指令に対する炉内への実際の燃料投入の遅れが蒸気温度制御系への外乱要因となり、その結果、タービンの負荷変化速度が制限される。下記にあげる対策は、負荷変化追従性の向上策として最近活用されているものである。

- (1) バーナカットシステム……………ミル起動・停止の回避
- (2) ミル回転式分級機の回転数制御……………ミル応答性の改善

4.3.1 バーナカットシステム

バーナカットシステムとは、ミルに直結した複数個のバーナのうち任意のバーナを単独に点・消火する手法である。これにより、図11に示すように微粉炭の搬送に必要とされる管内の一次空気流速を維持することができる。また、この方式を採用することによって、ミル低負荷帯での一次空気量を低減することができるので、着火安定性から要求される微粉濃度の観点で制限されていたミル負荷の切り下げを図ることができる。このシステムによって、従来40～50%であったミル最低負荷を30%程度まで低減でき、負荷変化時のミル起動・停止操作を極力少なくすることが可能となる。



注：略語説明 C/A (石炭/一次空気)

図11 バーナカットシステム ミルに直結した複数のバーナのうち、任意のバーナを単独に点・消火する手法によってフューエルパイプ内の微粉炭搬送空気流速を維持し、ミルの低負荷帯でも微粉炭/空気比の低下を防いで安定な燃焼を継続することができる。

4.3.2 ミル回転式分級機の回転数制御

石炭の直接燃焼方式では、ミルの負荷変化過程で給炭量と出炭量の間の時定数が存在し、これがボイラの負荷変化速度を増大させる場合の蒸気温度制御系への外乱の要因となる。

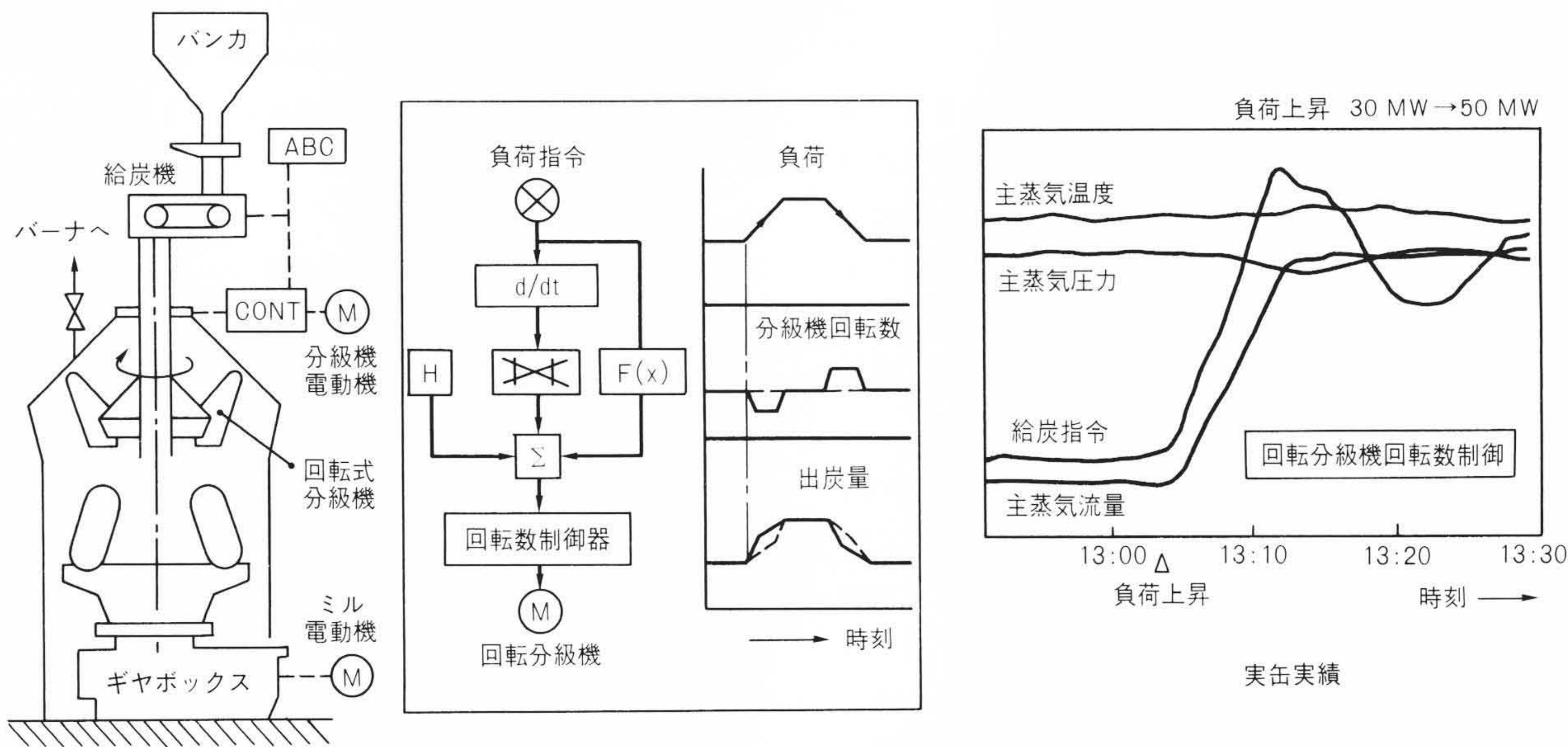
ミル内部での粉碎速度と出炭量を微粉炭の粒径分布の関数で演算する動特性モデルを構築し、これを制御に組み込んだミルシステム予測適応制御技術を開発することで、この課題を大幅に改善することができるようになった。この制御はミルの時定数に起因する蒸気温度変動の緩和とともに、多炭種対応に非常に有効である。

一方、ミルの時定数そのものを短縮する技術も必要である。近年、NO_x対策の強化と高効率燃焼の観点から石炭の微粉度の向上が注目されており、ミルの分級機に回転式分級機を採用するケースが増加している。この回転式分級機の回転数を制御することで、高負荷変化時でのミルの応答を調節できる制御方法を開発した。この制御は、プラントの負荷指令によるミル給炭量指令を受けて分級機回転数を変化させ、ミル内の石炭の循環量を調整するものである。その制御の概念と実際に産業用自然循環ボイラに適用した結果を図12に示す。

5%/minの負荷上昇で良好なボイラ入熱の追従性を確認した。

4.4 ボイラの最低負荷の切り下げ

ボイラの最低負荷帯では、微粉炭粒子群の輻(ふく)射受熱量が低下することによって、火炎の形成が困難になる。また、バーナの低負荷域ではミルのC/A (石炭/一次空気) 比率が低下することも燃焼不安定の要因となる。日立-NRバーナは、フューエルノズルの先端に保炎リングを装備しており、特殊な



注：略語説明 ABC (Automatic Boiler Control), CONT (Controller), d/dt (微分演算器), H (手動設定器), F(x) (関数発生器), Σ (加算器)

図12 回転式分級機の回転数制御 ミルに設置した回転式分級機の回転数を制御することによって、ミルの出炭動特性を最適な状態に保つことができる。この図は、産業用ボイラでの高負荷変化時の回転式分級機の回転数制御の検証例を示すものである。



図13 1,000 MWボイラでの保証最低負荷運転時の火炎状態
オーストラリア炭(燃料比2.2)を保証最低負荷で専焼(油助燃なし)を実施した場合のボイラ火炉内の燃焼状況を示す。鮮明な輪郭を持つ輝度の高い火炎を形成している。

装置類を追設することなく石炭専焼最低負荷を切り下げることができる。1,000 MWボイラでの保証最低負荷時の火炎写真を図13に示す。最低負荷運転時でもきわめて安定した着火を維持している。さらに、フューエルノズル内の微粉炭濃度分布の調整機能を追加することで、保炎リング近傍のC/Aと流速の最適化を図ることができる。これにより、バーナの低負荷帯での着火の促進と保炎の安定が得られることをパイロット試験で確認している。

4.5 多炭種対応技術

将来、輸入量の増加が予測される亜歴青炭や低揮発分炭への対応に関しては、次の技術を確認している。

- (1) 亜歴青炭……………スラッキング抑制技術
- (2) 低揮発分炭……………ミルの微粉度向上技術

日立-NRバーナでは、高温の低空気比火炎(還元炎)がバーナスロート近傍に接近するが、強旋回の外周空気流によってバーナ水冷壁はスラッキングや硫化腐食に対して安全な酸化雰囲気を保っている⁴⁾。

また、石炭性状の相違によって火炉水壁への灰付着現象も変化する。火炉各部の収熱量の微妙な変化を検知し、灰付着状態に応じて適切なスートブローイング操作を行うことができるインテリジェント形スートブロワ制御システムを実用化し、1,000 MWボイラに納入している。

一方、低揮発分炭に関しては、微粉度向上や火炉への微粉炭供給の配分技術の向上を目指して、各電力会社と密接な共同研究開発を行っている。

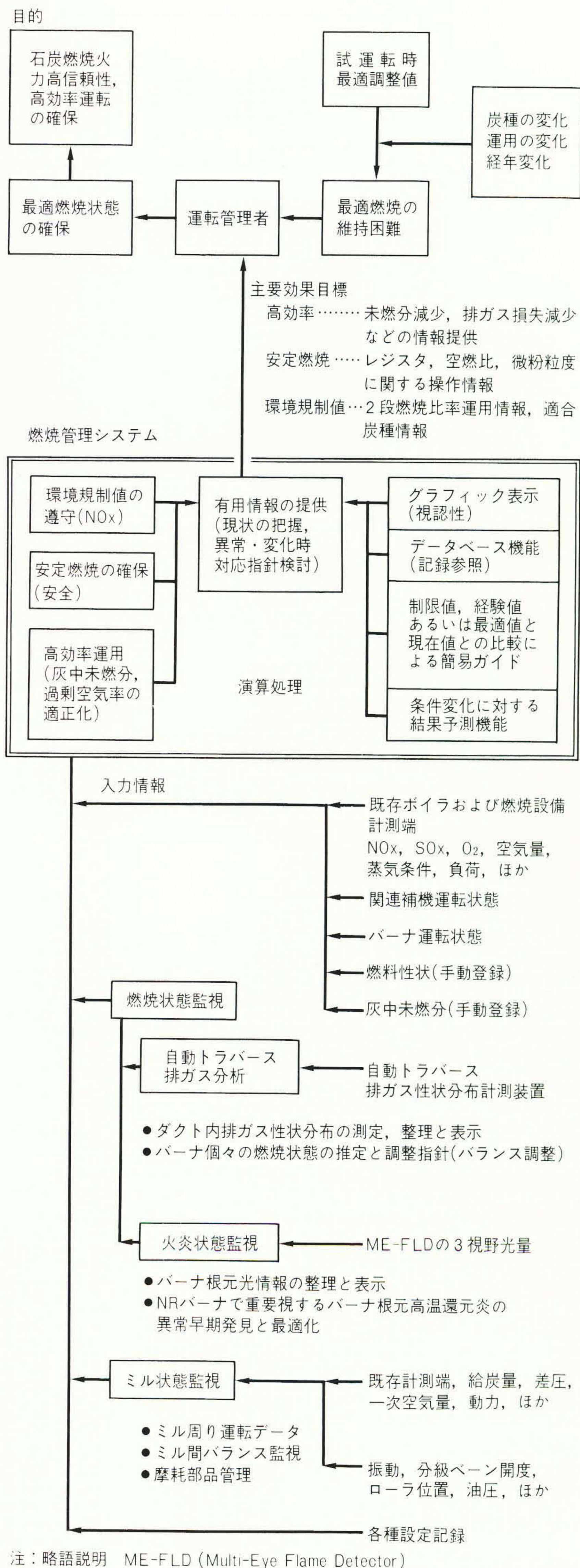


図14 燃焼管理システムの概要 最適な燃焼状態の維持に有効な情報の提供を計測技術と計算機システムによって実現することで、プラントの運転管理者が運転状態を体系的に把握し、次の対応に移るための検討指針を得ることができる。

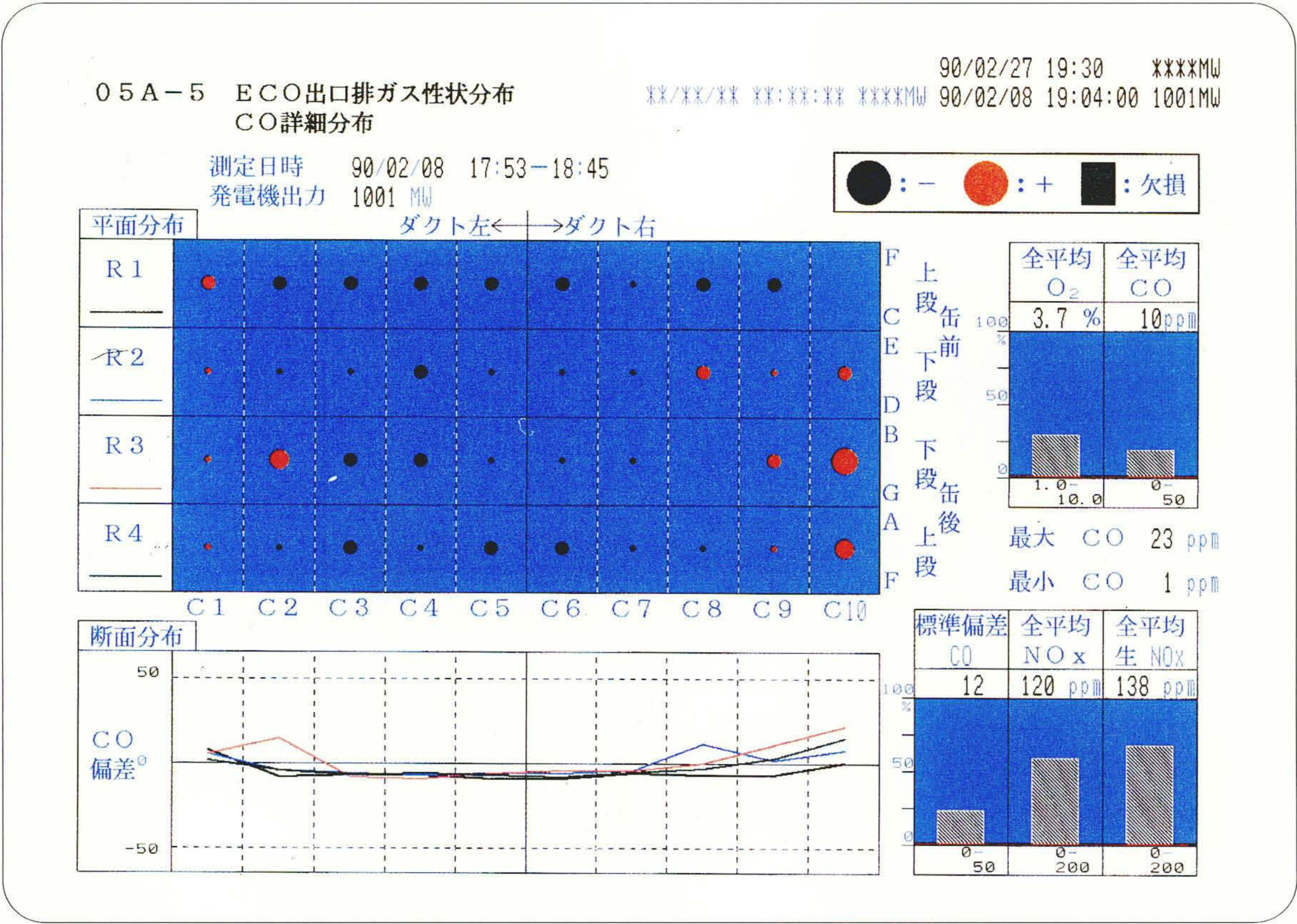


図15 新設1,000 MW石炭火力での燃焼排ガス自動トラバース結果例 燃焼管理システムの一機能である排ガス自動トラバースの結果に関するカラーCRT表示例を示す。節炭器出口の燃焼排ガス中のCO、O₂分布の迅速表示によって、均一な燃焼状態を診断することができる。

4.6 燃焼管理と運転支援システム

機器の経年変化、石炭性状の変化あるいはそれに伴う各操作条件の変化など、さまざまな要素の組み合わせによって燃焼状態は刻一刻と変化する。燃焼監視システムは、最適燃焼状態の維持に有効な情報の提供を計算機システムによって実現し、プラント運転管理者が運転状態を把握し、次の対応に移るための検討指針の援助を行うことを目的とするものである。大容量実機に適用する場合の実際の構成を図14に示す。入力情報として特に重要となる燃焼状態監視機能は、多視野形フレームデテクタによる火炎状態監視と、節炭器出口煙道に設けられる自動トラバース排ガス分析装置で構成される。1,000 MW石炭火力プラント試運転調整時の自動トラバース排ガス分析に基づくこのシステムの操作ガイドの一例を図15に示す。同図は煙道平面でのCOの分布を示したものであり、炉内の燃焼状態の均一性が視認できる。このシステムは各種操作量の最適値を与えるエキスパートシステムとしてばかりでなく、データベース機能を活用したプラント履歴の蓄積による保守管理システム、あるいは多炭種対応の自動調整システムとしての発展が可能である。また、情報入力に対して柔軟であることもこのシステムの特徴であり、火炎の輝度、ラジカル計測値も取り入れることができる。

5 結 言

石炭燃焼技術に関する最近の取り組みと開発の状況、また実用化された技術について例を示し述べたが、燃焼技術への要求と開発に秘められた可能性は多岐にわたり枚挙にいとまがない。

特に環境問題への取り組みについては、現状のレベルに満足することなく、世界での技術の最先端メーカーとして研究開発を精力的に推進している。また、ボイラ・タービンの制御および運用に関する日立グループのシステム技術を、燃焼制御の分野でも最大限に発揮するとともに、信頼性・経済性の向上も十分に加味した検討を行っていく考えである。

参考文献

- 1) S. Morita, et al.: Design Methods for Low-NO_x Retrofits Pulverized Coal Fired Utility Boilers, 1989 Joint Symposium on Stationary Combustion NO_x Control, EPA & EPRI, March 6-9, 1989
- 2) 森田：事業用微粉炭だきボイラーの低NO_x燃焼技術，ボイラ研究，第231号，4(1988)
- 3) 楢戸，外：微粉炭火炎内のガス組成変化の検討，日本機械学会論文集(B編)，55巻，517号(1989-9)
- 4) 吉廻，外：一様流中に直角に噴出した噴流の拡散，日本機械学会論文集(B編)，54巻，502号(1988-6)