

大容量石炭ボイラの燃焼技術

Combustion Technology for Large Capacity Coal Fired Boilers

火力発電用燃料として石炭が復活して以来、約10年を経過するが、より厳しい環境の保全や中間負荷的運用と信頼性の向上が望まれる一方、石炭性状の多様化や大容量化にも適した高度な燃焼システム技術が要求されている。

これらに対応するため、日立グループは早くから基礎的な研究を進めるとともに、現象解明や予測解析を行う手段としてモデル実験やシミュレーション手法の開発に注力してきた。更に、大形のテスト炉や実機での燃焼試験による検証を通じ、一貫した実用機設計技術の蓄積を図ることができた。ここでは、火力発電の置かれている現状に対し、大容量の石炭火力を対象とした燃焼技術と中間負荷への取組みの概要について、その成果を中心に紹介する。

高橋 芳孝* Yoshitaka Takahashi

稲田 宏* Hiroshi Inada

小豆畑 茂** Shigeru Azuhata

沖浦 邦夫*** Kunio Okiura

1 緒言

国内の電力供給体制での石炭火力の役割は、ますます重要になりつつある。昭和52年に石炭の新設火力が復活して以来、環境保全や海外輸入炭を対象とした燃焼技術、環境システムが開発され、着実にその需要の増加を見ている。

一方、低成長経済下の社会的背景によって、電力需要の増加がスローダウンしている傾向は見られるものの、昭和50年代から60年代への電力の推移は、原子力のベース供給力としての着実な伸びに対し火力の昼夜間や季節間の需要格差の増大に対するミドルあるいはピーク供給力としての役割へと変化しつつある¹⁾。このように、石炭火力の置かれている状況は、10年前のベース火力としての海外炭対応から中間負荷対応へと移行し、更に経済性の追求や環境面での改善が望まれている。このような情勢に対し、たゆみなく進められている燃焼技術開発の中で、環境対策・高効率・運用性・信頼性などに対する技術状況を中心に、その内容について報告する。

2 石炭燃焼ボイラの技術改革

2.1 石炭需要構成の変化

戦後の産業復興に対する電力需要の急増をまかなうため、電力供給のベースはそれまでの水主火従から石炭、油の火力が主要供給源となり、同時に設備の大容量化と効率の大幅向上が図られた。

図1に示す国内事業用新設火力の変遷を見ると、昭和40年代の高度成長期には、経済的かつ豊富な石油を中心に発電設備が急増した。しかし、二度にわたるオイルショックによって大きな転換を迎え、石油火力への依存度は、昭和48年の約70%から現在の約30%にまで下降した。これに代わり伸展してきたのが原子力と他の化石燃料で、原子力はベース力として着実にその割合が増加している。このため火力発電は、ベ

ースからミドルにあるいはピーク供給力へとその役割が変化し、火力の中では、埋蔵量の点から石炭が最も安定して供給可能とされている。資源エネルギー庁の昭和62年度電力施設計画によれば、昭和58年に大幅な手直しが行われた電力のエネルギー需給見通しの改正に対し、景気の冷え込みによる下方修正があり、多少の繰延べ調整が出ている。しかし、電源多様化の基本路線は変わらず、石炭火力の構成比は、ベストミックスの柱としての着実な開発が見込まれている。

一方、石炭の調達は図2に示すとおり、電力事業用一般炭の需要が増加するのに対し、国内炭の生産は縮小される方向でありそのほとんどを海外炭に頼らざるを得ない状況にある²⁾。また、石炭貿易の面からは昭和60年度の日本の輸入量が9,369万tにのぼり2位フランスの4倍以上であり、今後世界の石炭市況を左右する一端を担うことになるのも確実である。このため、今後は価格と量の安定供給を基調にして、石炭の利用拡大と炭種の多様化が図られる見通しにある。

2.2 石炭ボイラの技術改革ニーズ

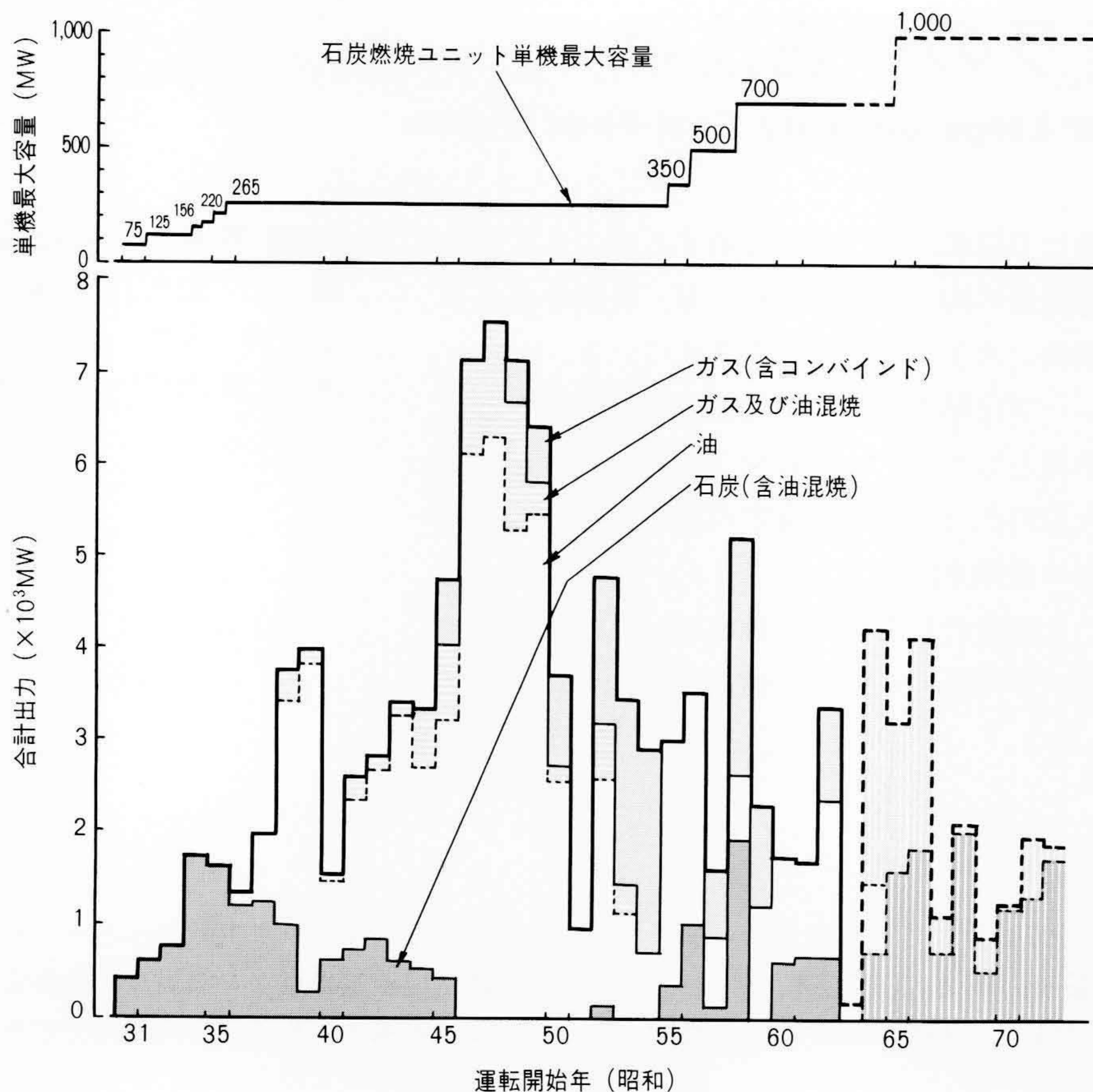
以上のエネルギー情勢の中で石炭利用に与えられた命題は多く、よりきめ細かい高度な対応が要請される。発電用石炭火力の改革ニーズを列記すると以下のようになる。

- (1) 運用特性の向上
- (2) 環境対策の強化
- (3) 高効率・低コスト
- (4) 信頼性の確保

すなわち、炭種の多様化や固体燃料であるがためのハンディがあろうとも、従来の油火力並みあるいはそれ以上の機能と経済性・環境保全性が要求されてくる。

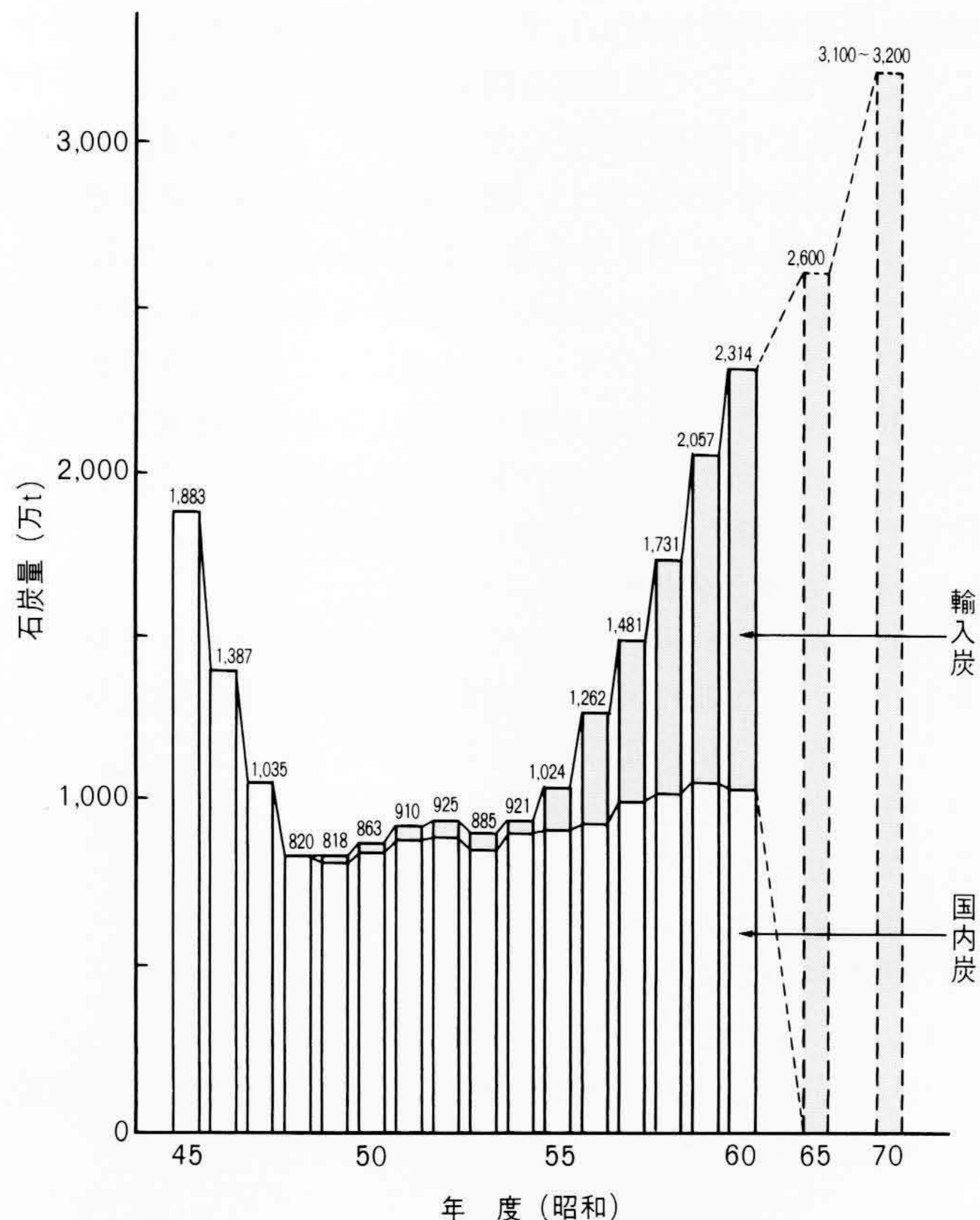
これらのニーズに対応するため、常に次世代に目を向けた新技術への挑戦が必要となる。図3は、環境保全の一つとし

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



参考資料 1. 火力原子力発電 31巻, 291号, 32~38巻
2. 日刊電気通信 第9491号
注: 昭和63年度以降は, 開発計画分を含む。

図1 国内事業用新設火力発電所の変遷
石炭火力は昭和50年代の復活後, 全体に占める構成比の増加と容量の上昇が目覚ましい。



参考資料 1. コールノート(昭和61年度版 資源エネルギー庁石炭部監修)
2. 石炭ニュース(No.1049, 1987.5.20)

図2 国内電力用石炭需要推移(一般炭) 今後の石炭需要は, 海外炭に全面的に依存する。

て石炭燃焼時のNO_x(窒素酸化物)対策に対する日立グループの取組み経緯を示す。従来から電気事業に対する厳しい環境規制に適合すべく研究開発を通じて万全の対策を実施してきたが, 現在は最新形低NO_x(日立-NR)バーナの開発によって, 過剰空気量の低減や最低負荷低減など経済性や運用面への波及効果も大きい。

3 燃焼関連の基礎研究と技術的アプローチ

3.1 実用機設計手法の高度化

前述の石炭火力に対する近年の情勢に対応し, 日立グループは微粉炭燃焼技術開発として, 単に燃焼の現象だけでなく

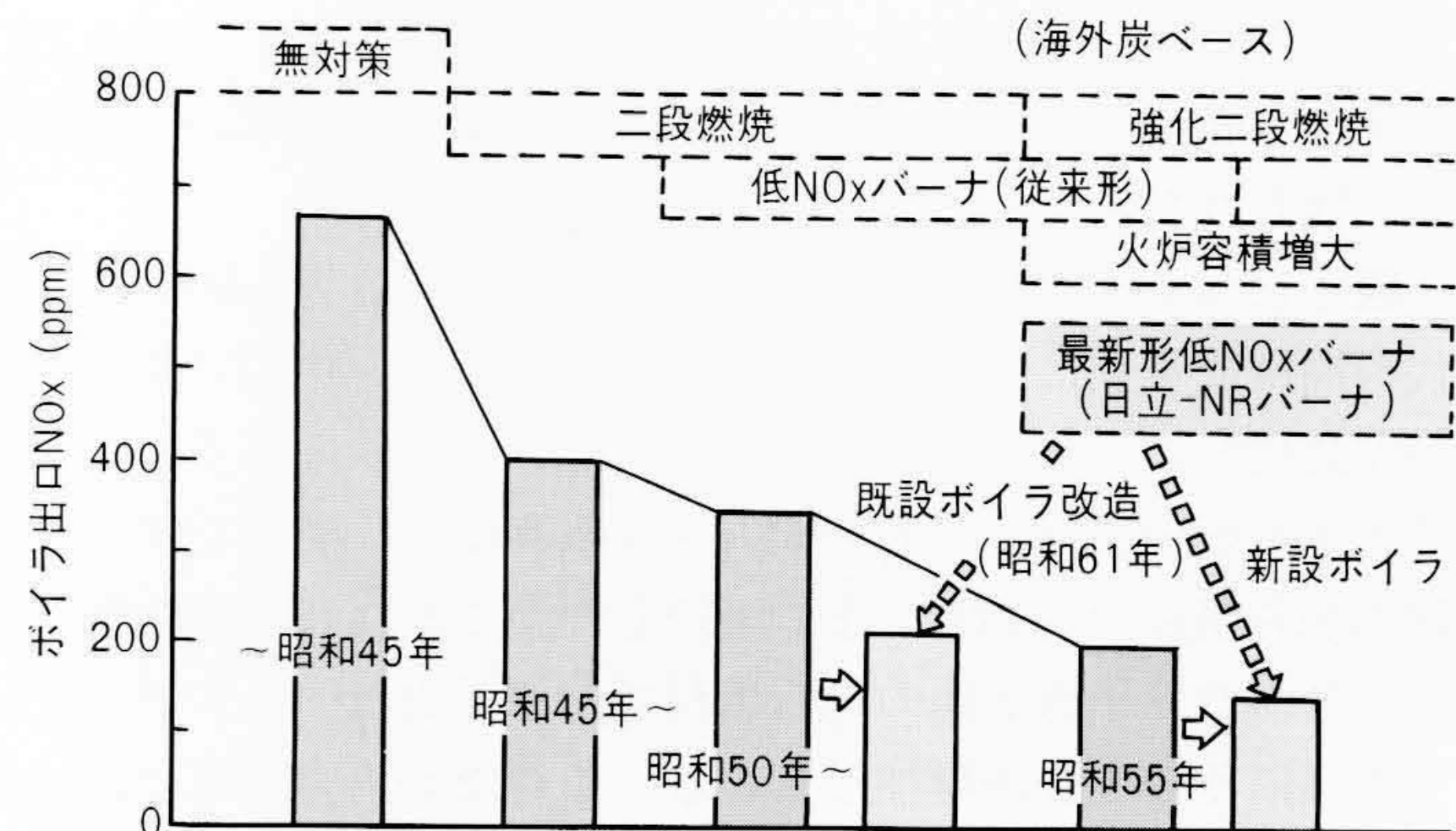


図3 石炭燃焼ボイラのNO_x対策と最新形低NO_xバーナの効果
最新のNO_x対策としては, 火炎内脱硝効果の新バーナによって大幅な低減が図れる。

反応・伝熱・流動などの要素研究や、ボイラ及び周辺機器とのかかわり合いを含む多角的研究解析手法を考慮し、取り組んできた。

図4は、石炭燃焼ボイラの実用機を設計するために、これを取り巻く各種の検討手段を示したものである。石炭の種類は非常に幅広く、燃焼性や灰の性質が全く異なってくるため、ボイラの設計は、その種類に応じて合理的に決定されなければならない。このためには、多数の石炭を使用してその個別の性質を体系的に解析、整理し、燃焼試験による特性結果との相関づけが重要である。更に燃焼だけでなく、石炭の粉碎や貯蔵、炉内あるいはバーナ部の流動などの要素試験と燃焼反応の各種モデリング(シミュレーション)の手法をも導入することによって、理論的解析に裏づけされた定量的評価と設計が可能となる。

これらの結果から、着火性やNO_x生成などの燃焼特性とスラッキングなどの灰の特性の検討予測を行い、実機設計に必要なバーナ運転条件の設定や火炉寸法など構造仕様の決定を行うことができる。

3.2 実用機へのステップ

(1) 石炭の燃焼性評価

石炭の性質と燃焼性との関連も、燃料比(固定炭素/揮発分)による従来の整理では定性的評価にとどまってしまう。このため最近では、図5に示すような石炭の内面的性質に着目し、運転操作上の影響因子をパラメータとした関係を求めて、着火性や燃焼効率を検討し設計に反映している。

(2) 基礎燃焼試験

この石炭の燃焼過程での基礎的特性を把握するため、実施した試験結果の一例を図6に示す。微粉炭を円筒形の高周波炉に空気とともに供給したときの各種ガス組成と、N(窒素)化

合物の流れ方向の挙動を示したもので、空気比が低い場合にNO_xの還元剤となる中間生成物が多量に生成されることが分かる。この結果から、単に燃焼排ガスの性状を予測するだけでなく火炎内の素反応や基礎的燃焼反応の解析を行い、実用機への応用を図ることが重要となってきた。

(3) コールド流動試験

燃焼を中心とする火炉内の挙動として伝熱に関しては、比較的理論体系が確立されているのに対し、バーナ部や炉内の流動は、温度や密度の急激な変化とともに微粉炭と燃焼ガスの固気2層系の反応を伴うため、単純ではない。

バーナ部あるいは二段燃焼用のAAP(After Air Port)部の流動は、燃料やガスとの混合状態によって燃焼反応の形態が全く異なってくるため、非常に重要である。このため、種々の相似則を応用した流動試験方法が提案されている。バブコック日立株式会社では、一例として、実機の約 $\frac{1}{30}$ のプラスチックモデル内に液体の流れを形成し、着目したノズルからトレーサ粒子を流体とともに噴出させ、画像処理との組合せにより解析する流動試験装置を使用している。この方法では、3次元で速度分布や濃度分布のパターンを同時に解析することができ、比重や粒径の異なる粒子を使用すれば、微粉炭粒子を模擬した試験としても応用できるため、その活用範囲は広い。

(4) 大形燃焼試験

基礎燃焼試験を通じて得られた最適燃焼方法あるいは流動試験による微粉炭と燃焼用空気一掃ガスとの最適混合方法に対し、実機での予想特性と各部バーナ構造や運転条件の選定のため、シングルバーナあるいはマルチバーナによる総合的な燃焼試験が行われる。特に燃焼性能としては、静的な特性だけでなく、前述の中間負荷対応をも考慮した操作条件の設

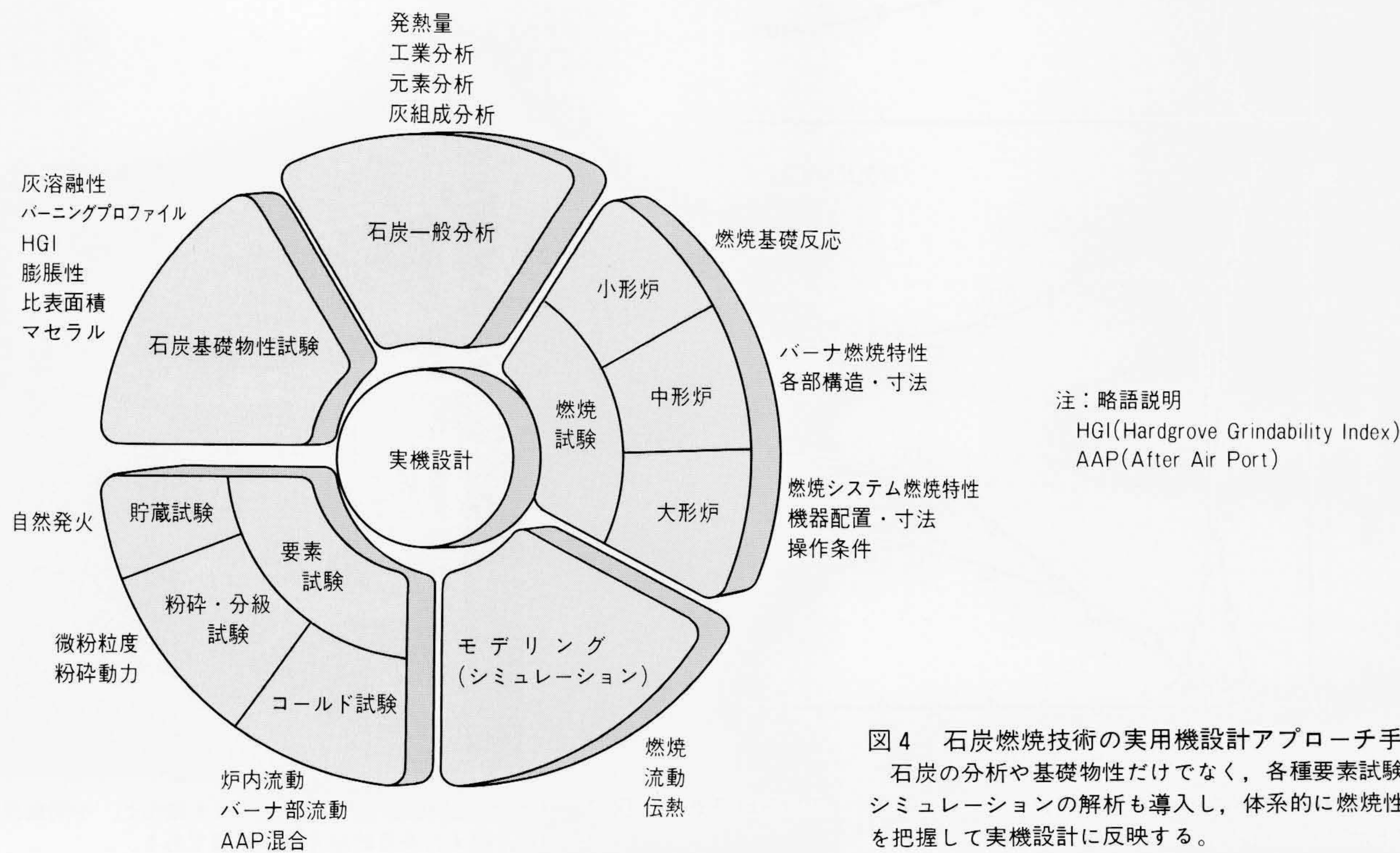


図4 石炭燃焼技術の実用機設計アプローチ手段
石炭の分析や基礎物性だけでなく、各種要素試験とシミュレーションの解析も導入し、体系的に燃焼性能を把握して実機設計に反映する。

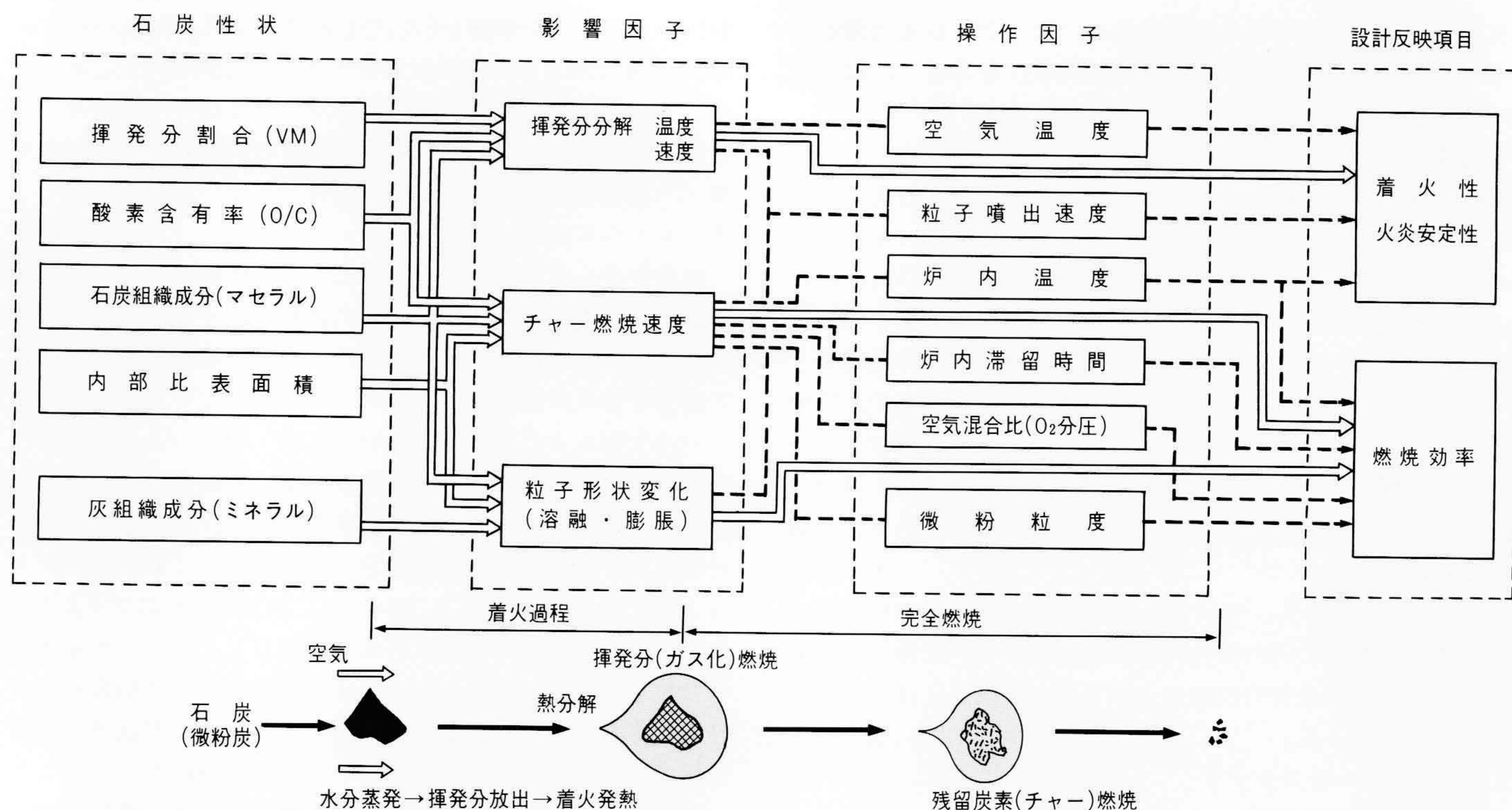


図5 石炭粒子の燃焼モデルと燃焼性影響因子 石炭の組成と燃焼過程は複雑なため、固有の性質や操作因子を多角的に分析して設計に反映する。

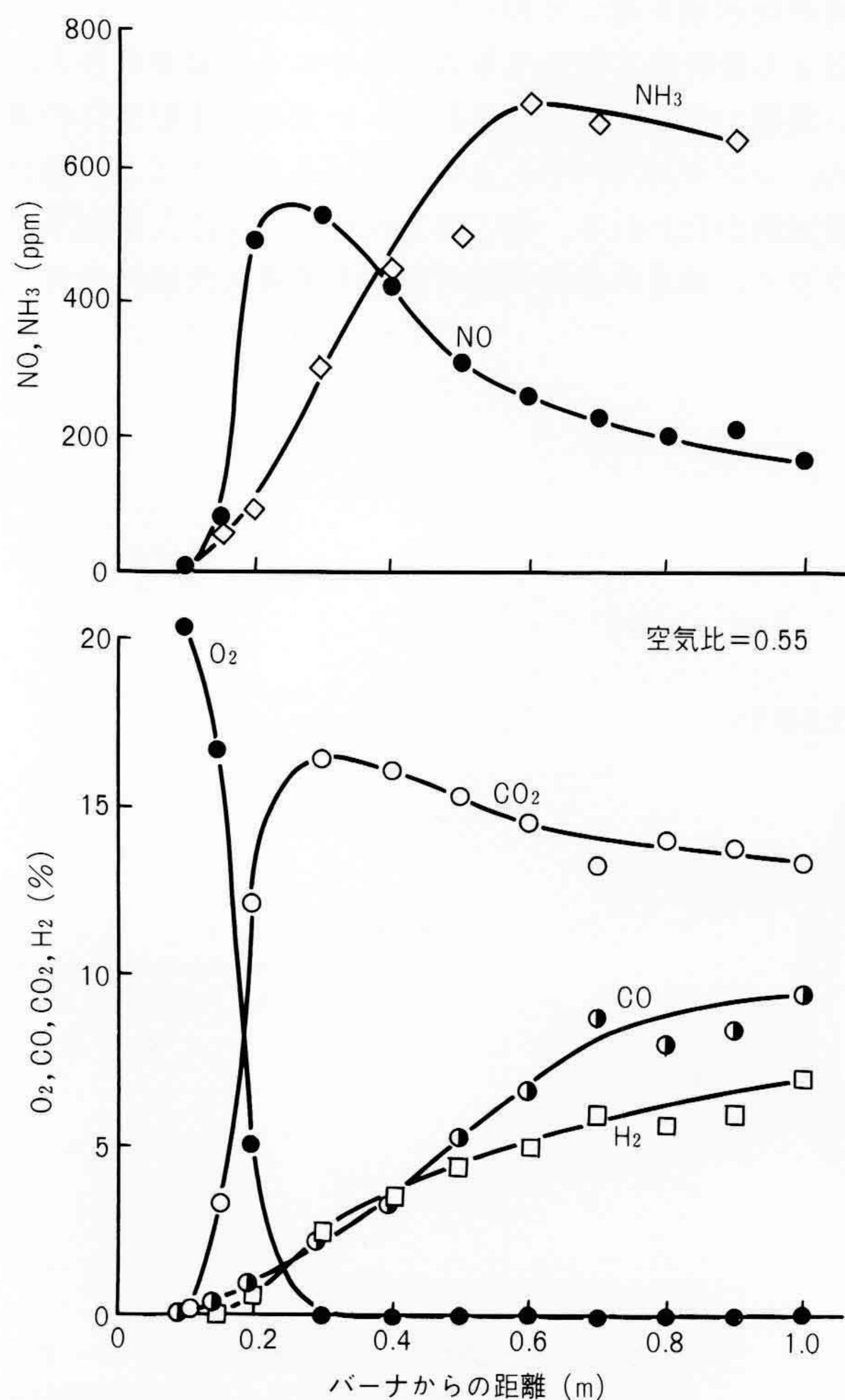


図6 微粉炭燃焼時のガス生成特性例(高周波炉) 基礎燃焼炉での各種ガスの生成特性から、実機への応用が図れる。

定を行い、動的な排ガスの性状変化を計測・解析できる設備が不可欠である。このため、昭和62年5月から図7に示す大形燃焼試験設備をバブコック日立株式会社呉工場に新設し、試験研究を推進している。

本設備の特徴としては、実缶相似性を重視し、最新のボイラ設計と同一手法によって火炉構造や寸法が決定され、対向

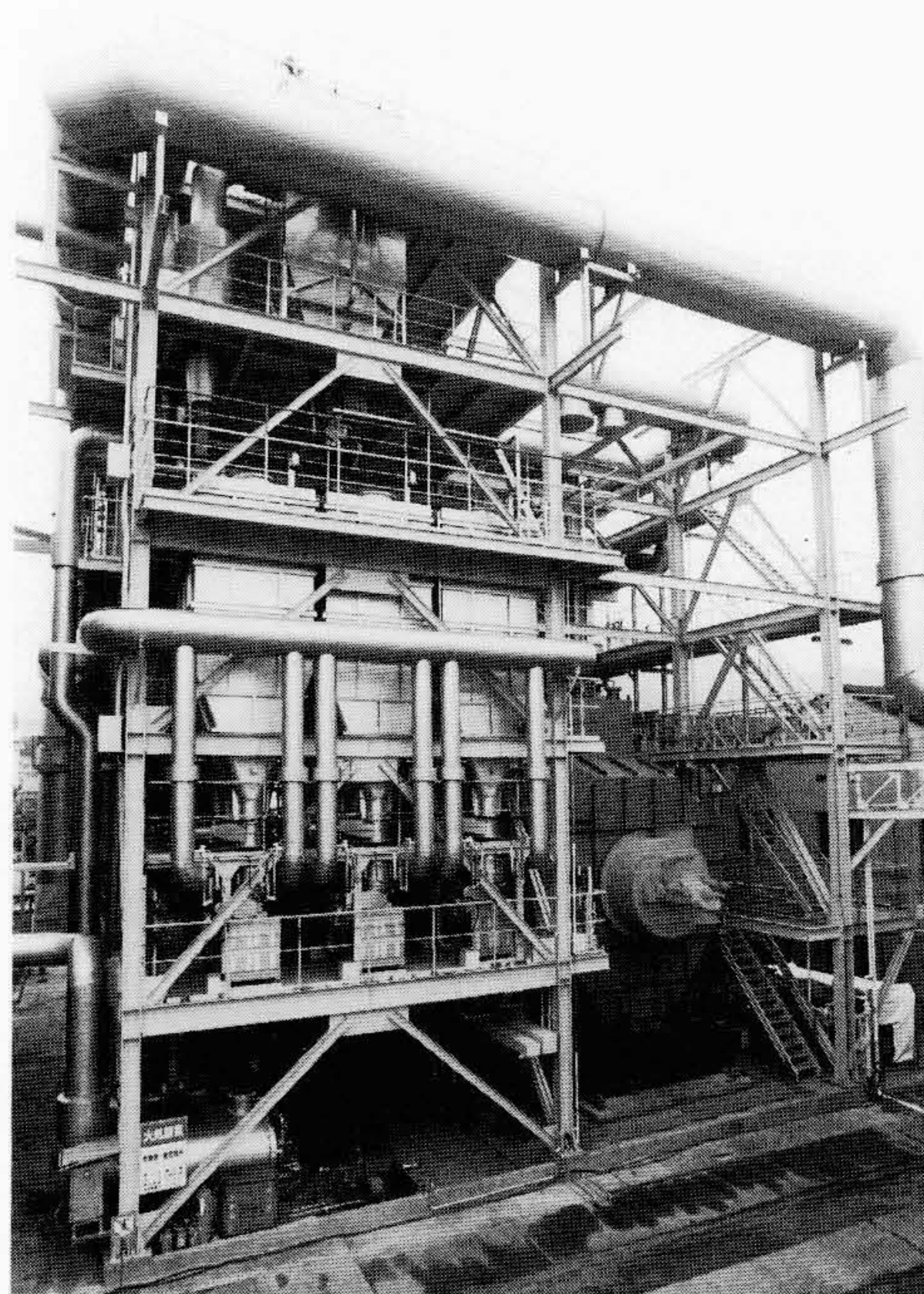


図7 大形燃焼試験設備 各種燃料多様化と、中間負荷対応の実缶と同一機能を備えた多目的総合試験設備である。

マルチバーナによる実缶模擬燃焼，単一バーナによる大容量（実缶の50～70%相当容量）燃焼，特殊バーナ配置による無煙炭燃焼などのテストが可能である。また多種燃料〔油・ガス・歴青炭のほかに，褐炭・無煙炭・CWM(Coal Water Mixture)・メタノールなど〕の専焼，混焼にも適応できる。更に，中間負荷運用に対応した特性把握試験が可能となるように各種の最新鋭機能を導入し，

- (a) オンライン計測とデジタル制御方式(制御ブロック1,500のデジタルコンピュータとマンマシン制御及びCRT：Cathode Ray Tube表示による全データオンライン解析)
- (b) 実機同等指令機能と制御回路(フィードバック，先行制御及びAFC・FCB・ランバックを含む負荷変化追従性，最低燃焼安定負荷の解析)
- (c) 燃焼関連周辺新技術(セラミックスイグナイタ，火炎画像処理，現場異常監視システム)

などを備えた多目的総合燃焼試験設備となっている。

4 シミュレーション技術

基礎燃焼炉や大形炉による燃焼特性を試験によって把握する手段と並行して，現象理論に基づく解析計算(モデリング=シミュレーション)手法の開発を進めてきた。この解析手法の状況を図8に示す。微粉炭燃焼の解明には，単一バーナに対するSPACE(Simulation Program for Advanced Coal

Combustion Evaluation)と複数バーナに対するHICCS(Hitachi Innovative Coal Combustion Simulator)燃焼性プログラム³⁾のほかにNO_x特性の予測シミュレーションプログラム⁴⁾が完成している。また，燃焼場での同時現象として重要な伝熱に対しては，熱流束計算のMONFUR⁵⁾(Monte Carlo Method for Furnace Simulation Program)や火炉内流動に対する3次元流動モデルFLAPF(Flow Analysis Program in Furnace)，粒子軌跡プログラムPATER(Particle Trajectory Analysis Program)などが開発されている。更に，燃焼性に大きく影響する微粉炭の粉碎特性の解析やボイラの起動特性を評価するシミュレーションプログラムによって動的解析を実施している。以下にその一例を紹介する。

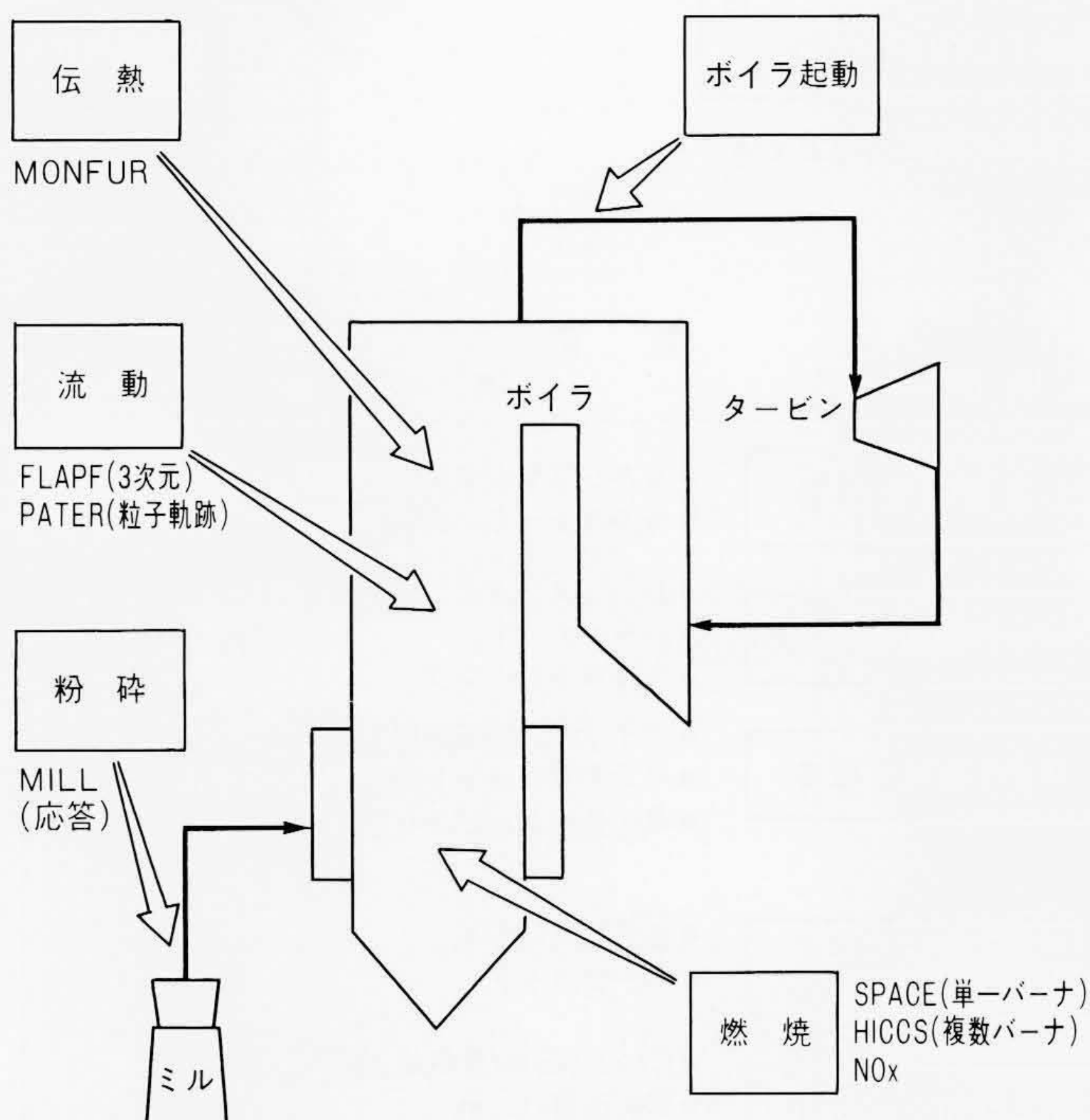
4.1 燃焼率—NO_x予測

ボイラでの燃焼性は燃料性状だけでなく，火炉やバーナの形状・寸法，更には運転操作条件などの影響因子があるため一律の評価は難しい。前記プログラムでは，これらの要因を個別に整理し体系的に理論構築を図った。図9は，その一例を示し，大容量石炭燃焼ボイラでの燃焼率とNO_xの予測値を炭種別に計算した結果を表している。この図のように性状の異なる石炭の燃焼特性を詳細に検討することが可能となった。

4.2 ミル予測適応制御

石炭の直接燃焼方式では，油やガス燃焼と比較しミルでの粉碎に伴う応答遅れがあるため，燃料量の計測信号を直接制御装置へフィードバックすることができない。このため，現状ではミルでの応答遅れを考慮したミル出炭量推定値で制御しているが，負荷の急激な変化に対しては，その精度に限界が出てくる。

この問題点を打開するために，ミルでの粉碎-出炭に対する動特性モデルを開発した。図10にこの方式を採用した場合の負荷上昇時の特性例を示す。発電機出力負荷50%から75%へ5%/minで上昇したとき，蒸気温度の変動が最大—9℃から



注：略語説明ほか

MONFUR(Monte Carlo Method for Furnace Simulation Program)

FLAPF(Flow Analysis Program in Furnace)

PATER(Particle Trajectory Analysis Program)

MILL(プログラム名称)

SPACE(Simulation Program for Advanced Coal Combustion Evaluation)

HICCS(Hitachi Innovative Coal Combustion Simulator)

図8 ボイラ燃焼関連解析手法(シミュレーション)

大形ボイラ用の燃焼及び各種動特性のモデリング項目を示す。

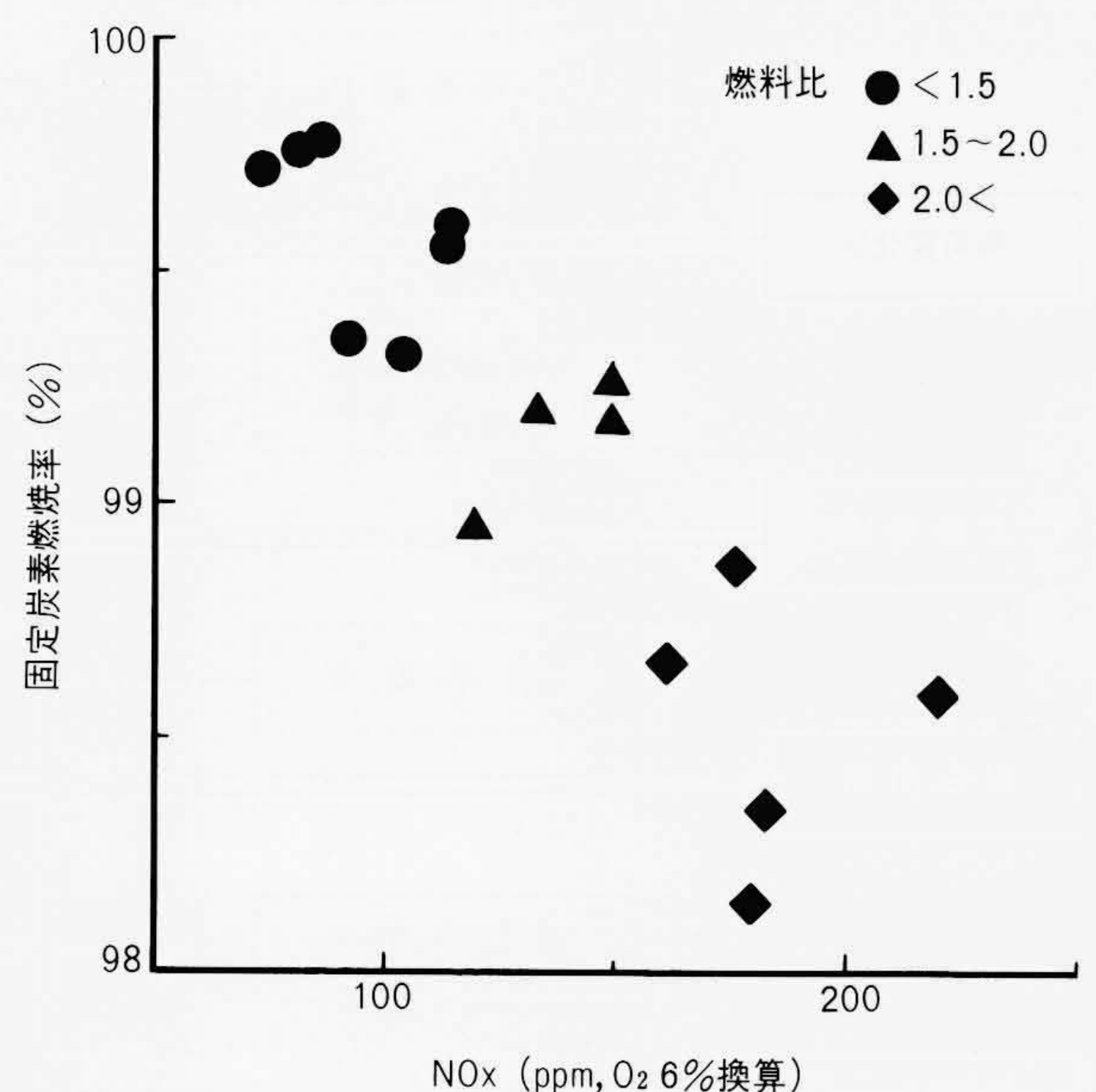


図9 シミュレーションによる炉出口のNO_x・燃焼率計算例

大容量石炭ボイラで火炉サイズ・微粉炭粒度などの条件を設定して，各炭種の燃焼特性をシミュレーション計算した例を示す。

－2℃へと改善されている。このようにミルの予測適応動特性モデルを制御装置に組み込むことによって、多炭種に対する出炭量予測の精度が向上し、ミル負荷変化時の蒸気温度変動を改善できる。

5 中間負荷火力への取組み

中間負荷運用を対象とした石炭燃焼ボイラの主要課題としては、図11に示す項目が挙げられる。すなわち、運用性の改善事項としては、

- (1) 負荷変化率(追従性)の向上
- (2) 起動時間の短縮
- (3) 最低負荷の低減
- (4) 運転信頼性の向上

更に運転省力化などがあり、デジタル制御技術が不可欠となる。また、これらに関連した石炭燃焼であるがための検討事項と考えられるものとしては、

- (1) ミル応答遅れ
- (2) ボイラ時定数増加
- (3) 燃焼不安定
- (4) 多炭種対応

などが挙げられる。以下に、これらの課題に対する具体的な取組み例を示す。

5.1 低NOx高効率燃焼バーナ

燃焼の中心はバーナである。石炭の変化に富む性質に対し、安定した着火性や保炎性が得られ燃焼効率が良く低NOxの運転が可能なバーナが、最低負荷の低減や負荷変化の追従に必

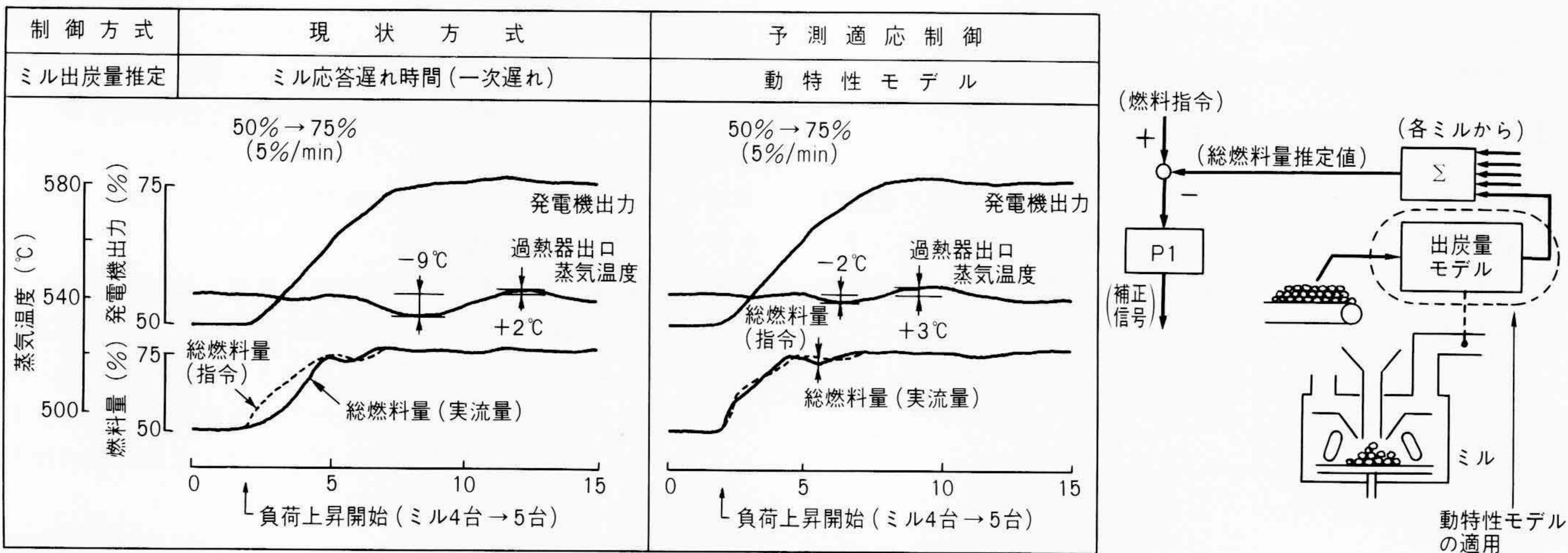


図10 ミルシステム予測適応制御 動特性モデルの適用によって、出炭量予測の精度が向上する。

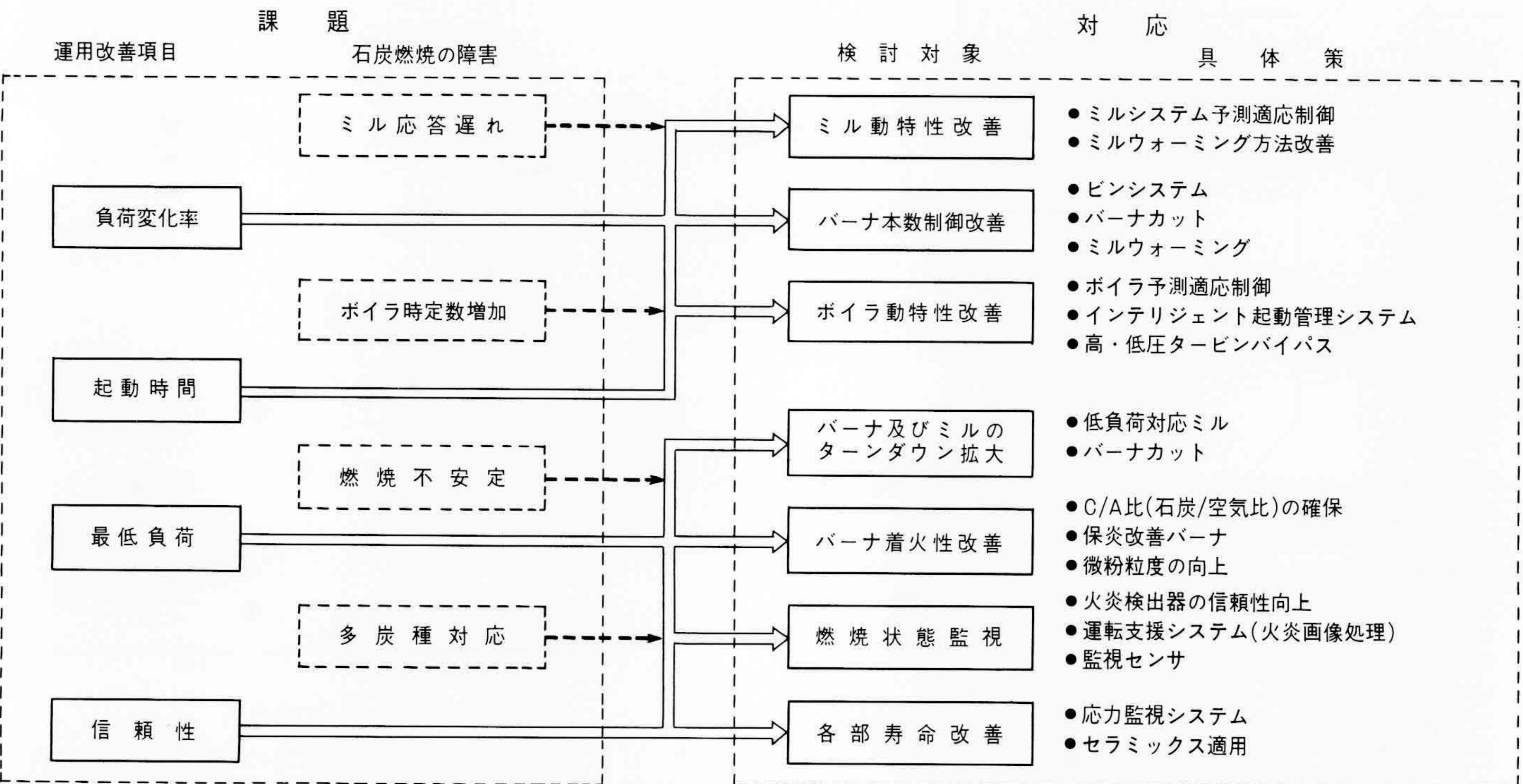
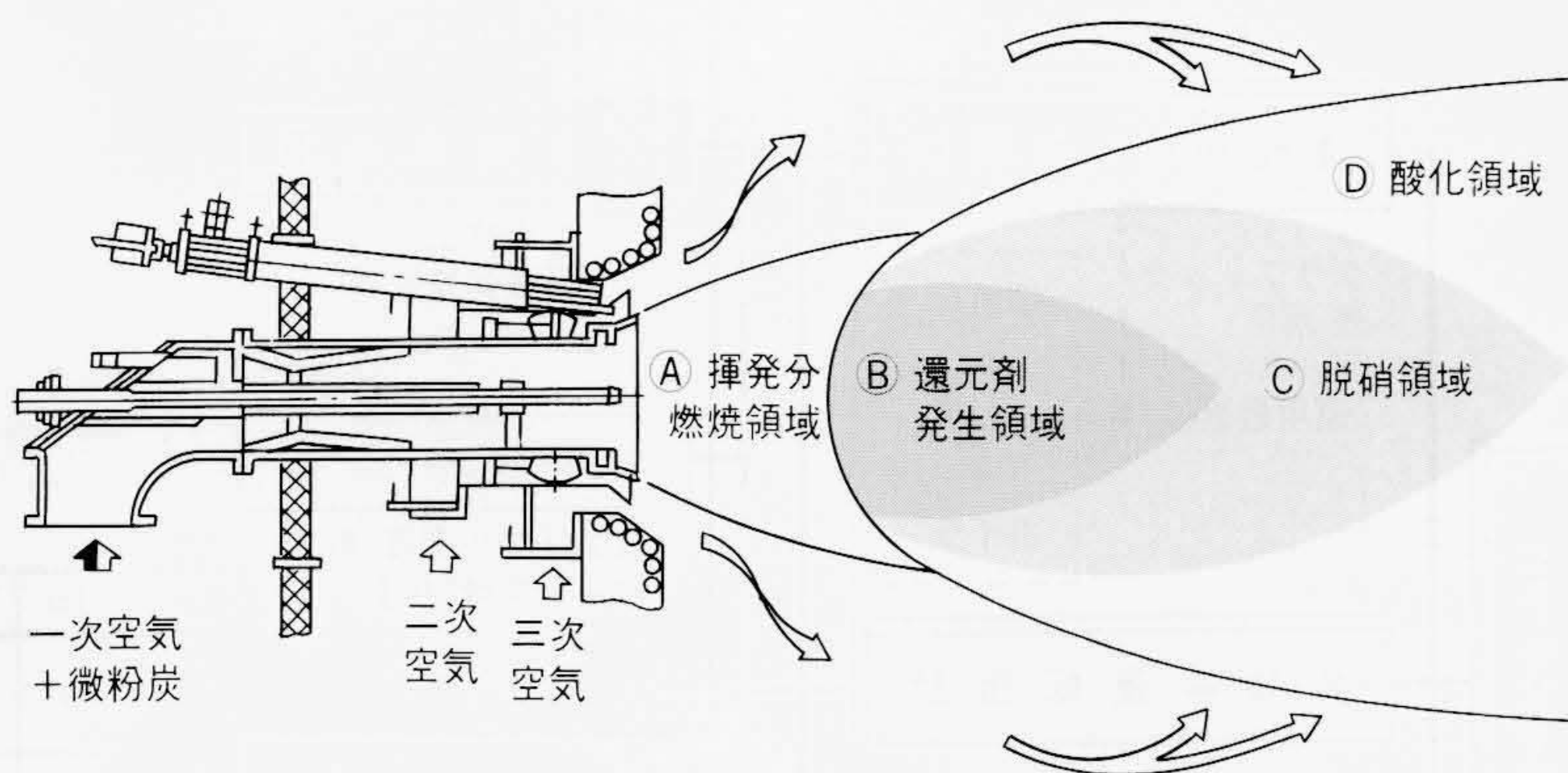


図11 石炭燃焼ボイラ中間負荷運用の課題と対応 石炭では、粉碎と燃焼性の相違を中心とした運用性の改善課題が中心となる。



注：略語説明 NR(NO_x Reduction)

図12 日立-NRバーナの低NO_x燃焼原理と火炎状況 揮発分の分解によって高温雰囲気中で還元剤を発生し、火炎内で脱硝反応を形成する。



す(須)であり、この開発に注力してきた。

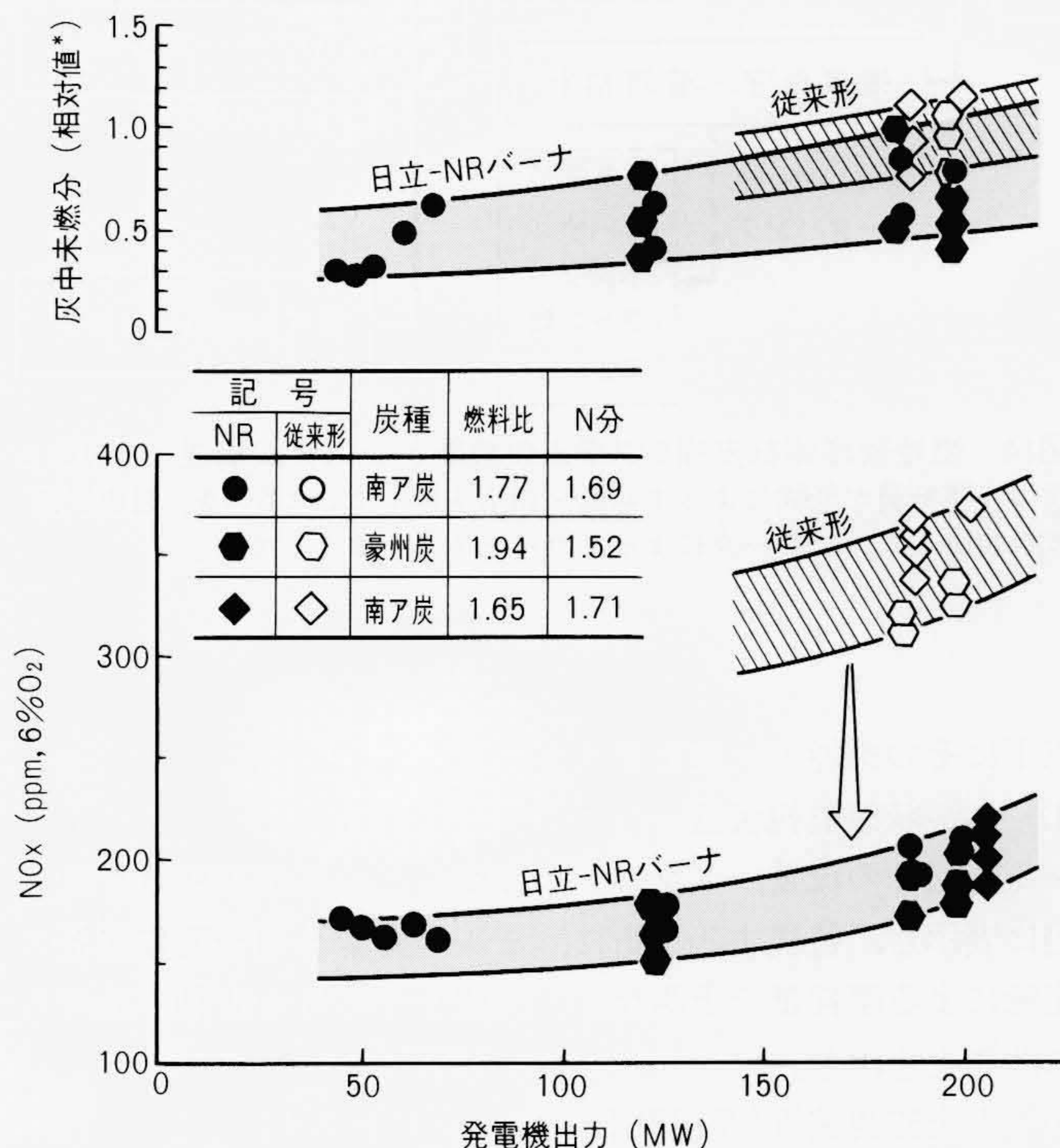
図12に、新開発の日立-NRバーナの概念とその実缶での火炎状況を示す。微粉炭中の揮発分の着火、還元剤(中間生成物)の発生、NO_xの還元と完全燃焼を行い火炎内で自己脱硝するバーナである。従来のNO_x対策が緩慢な燃焼による長炎形バーナとして燃焼空間を広く必要としたのに対し、急速着火による高温還元炎を形成するため短炎形となり、燃焼空間もコンパクトにできる利点がある。すなわち、低NO_xと燃焼効率の向上(未燃分の低減)が同時に達成できる。

図13に実缶での燃焼特性の例を示す^{※1)}。従来形(改造前)に対し、NO_x、未燃分とも大幅に低減されていることが分かる。更に、同時に着火・保炎性が大きく改善されたことから、石炭専焼での最低負荷が約50%から22%へと低減されている。このように、NO_xだけでなく、低空気過剰率での燃焼によるボイラ経済性の向上や各種の石炭性状に対する燃焼性の改善、更に火炎検出や蒸気温度の追従特性などのボイラ制御性への改善効果も確認された。

5.2 ビンシステム

更にボイラの負荷変動に対する理想的な追従性を確保するためには、ミルとバーナとを縁切りし、バーナでの要求信号に応じて燃料供給量を制御するいわゆるビンシステムがある。この方式では、粉碎した微粉炭をビン(貯槽)に一度貯蔵しておく必要があるため、自然発火や安定した払出しに対する検討課題が発生する。

このため、昭和61年度に7 m³の貯蔵ビンを含む微粉炭貯蔵システムを設置し、安全防災技術試験を行った^{※2)}。試験では各種炭種の微粉粒度、水分、初期温度及びビン内酸素濃度をパラメータにした低温酸化特性や各部の温度、発生ガスの計測と最適機器評価を行うとともに、温度異常上昇に対する各種対応技術試験を行った。試験結果としては昇温速度、ガス発生速度及び温度異常上昇時の鎮静化対策での温度降下速度



注：* 従来形豪州炭200MW時の平均値をベースとした相対比

図13 日立-NRバーナの燃焼性能(200MW石炭燃焼転換改造ボイラ) 従来形に比べて、NO_x・未燃分の同時低減と石炭専焼最低負荷の低減にも効果のあることが検証された。

や挙動などが解析され、ビンシステムの安全運用手法の指針が得られた。

5.3 燃焼管理運転支援システム

多種多様な石炭を使用する石炭火力では、最適な燃焼状態を保持するために総合的な判断が必要となってくる。今までには運転員の経験に頼っていたこれらの判断や運転指令を、機械によってサポートするものとして燃焼管理運転支援システムが考えられている。その目的は、燃焼調整に関するボイラの運転状態(排ガス性状・火炎状態)を定量的に計測し、総合的に表示・監視・記録することによって安全で、環境にマッチし、高効率な運用を図ることにある。石炭での燃焼管理システムの構成を図14に示すが、各要素技術の総合的な機能によって、経済的で信頼性の高いプラントの運用が達成される。

※1) 富山共同火力発電株式会社富山新港共同火力発電所第1、2号機

※2) 通商産業省資源エネルギー庁委託事業による電源開発株式会社からの委託研究

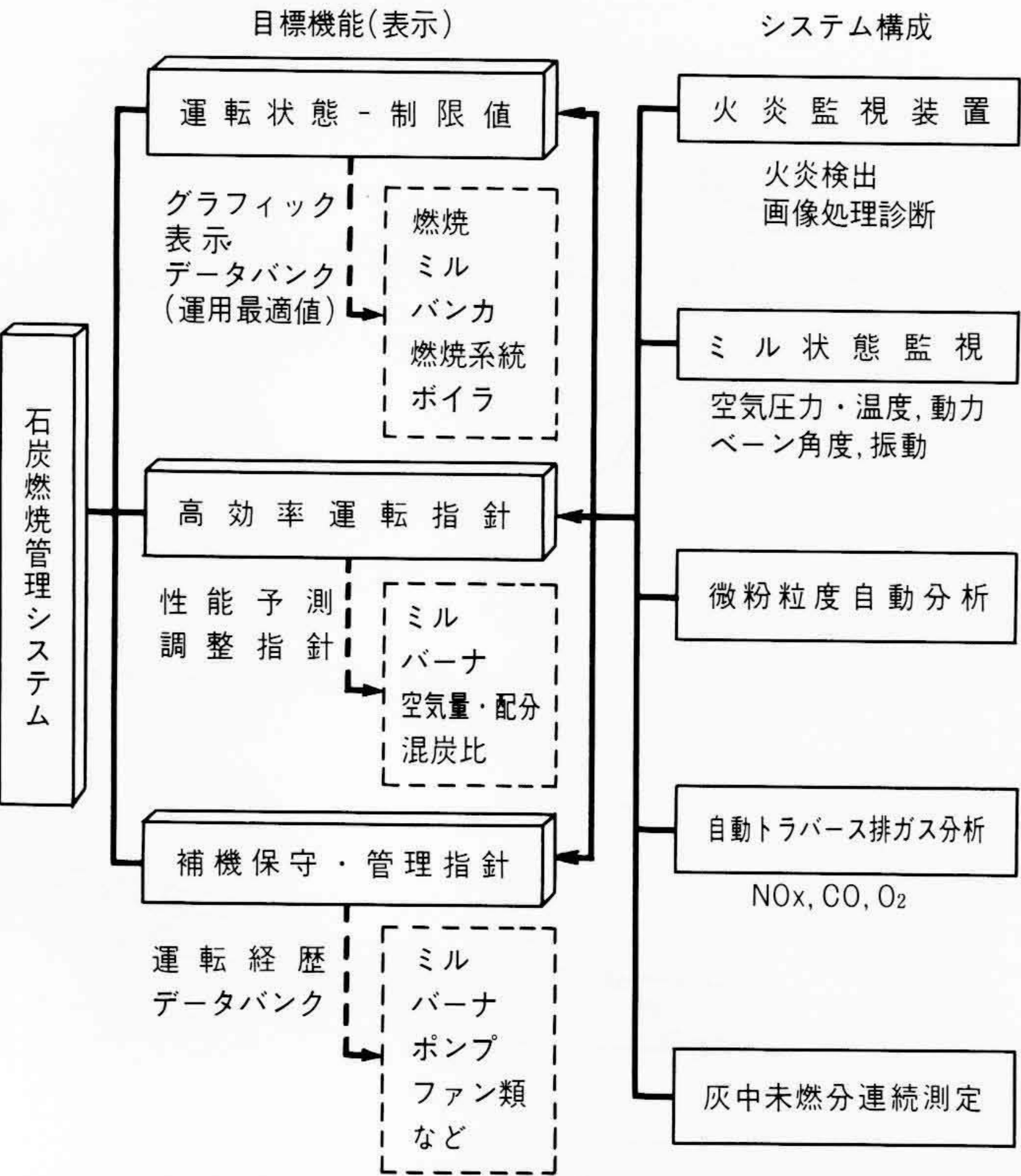


図14 燃焼管理運転支援システムの機能とシステム構成 運転支援は、運転員が経験によって判断・指令を出していたものを、自動計測・監視装置とコンピュータによってガイドできるようにする。

以下にその機能の一部を示す。

(1) ミル状態監視装置

ミル回りの流量、ドラフト、温度などの運転状態値を総合的に表示し、監視する。更に、ミルの異常予知や運転履歴の記録による摩耗量の予測など、的確な予防保全活動と故障の未然防止を図る。

(2) 火炎監視装置(多視野形フレームデテクタ)

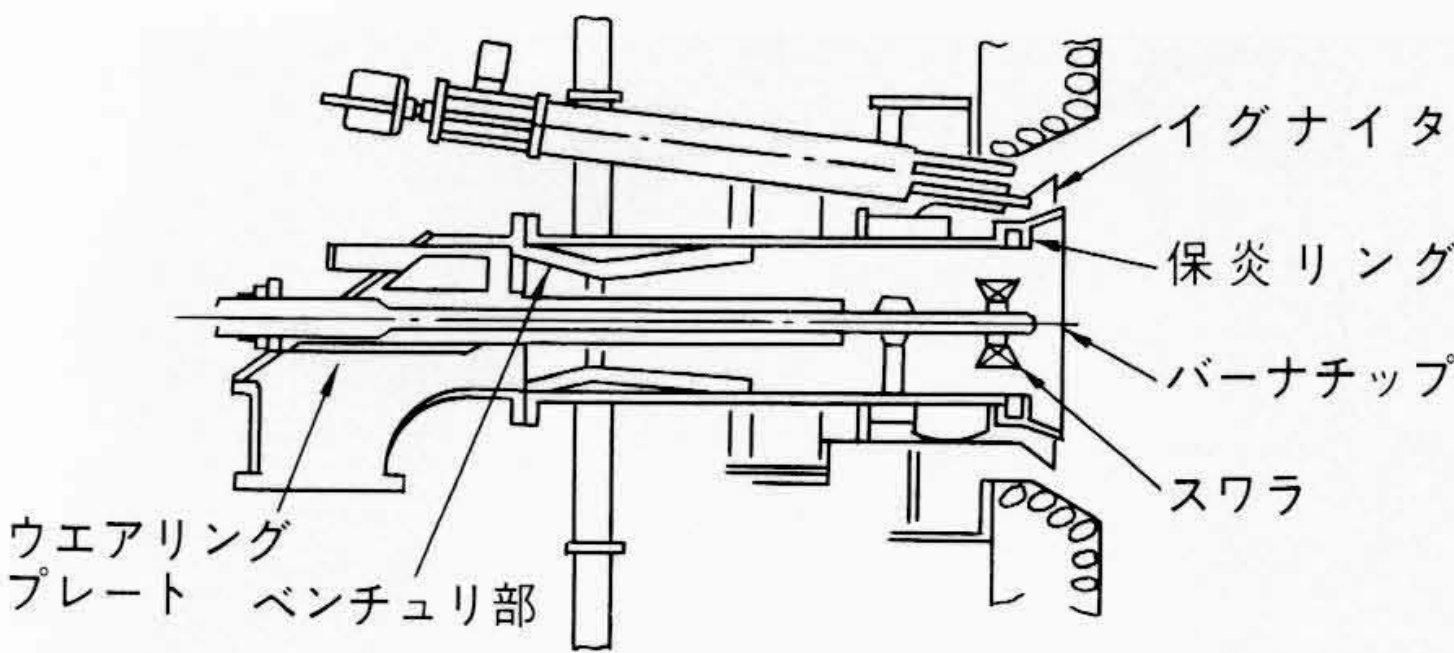
火炎を3視野で検出して各々2波長に分解し、計6個のセンサで火炎の有無を判定・監視する。情報は光ファイバケーブルで直接制御装置へ伝達され、多元的な解析、論理判断を行った上でリアルタイムで出力することが可能である。

(3) 画像処理システム

石炭の燃焼管理として、火炎の画像の処理によって個別バーナ火炎の温度や輝度の分布などを測定し、演算処理によって燃焼状態を指標化する。多数のバーナ全体の燃焼調整や未燃分の低減運用を可能にする。

5.4 セラミックスの適用

中間負荷運用への対応によって、各種運転条件に対しボイラ各部の温度・圧力・流量の変化が厳しくなるため、各部構造・材料面での検討も不可欠となる。このため、各部の応力解析の実施はもちろん微粉炭バーナ部など特に高温や摩耗の過酷な環境下で使用される部分には、セラミックスの適用が考慮されている。図15にバーナ各部のセラミックスの適用対象と使用材料の例を示す。このように日立グループでは、セラミックスの応用技術をボイラの信頼性向上や長寿命化を図るための重点課題の一つとして取り組んでいる。



No.	部 品 名	使用 環 境	適 合 材 料	備 考
1	イグナイタ	高温、熱衝撃、腐食性	ZrB ₂ /SiC+AlN	導電性セラミックス
2	保炎リング	高温、熱衝撃、腐食、摩耗性	Si ₃ N ₄ , SiC	油、微粉炭
3	バーナチップ	高温、熱衝撃、腐食、摩耗性	Si ₃ N ₄ , Sialon	CWMノズル用
4	スワラ	高温、熱衝撃、腐食、摩耗性	Si ₃ N ₄ , SiC	低質油、微粉炭
5	ベンチュリ部	摩 耗	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂	微粉炭
6	ウェアリングプレート	摩 耗	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂	微粉炭

図15 石炭バーナへのセラミックスの適用 高温及び摩耗の過酷な環境にさらされる部位に、適切なセラミックス材を選定し適用する。

6 結 言

石炭燃焼ボイラの中間負荷運用への対応を中心に、日立グループでの燃焼技術について述べた。これらをまとめると、
(1) 新形低NO_xバーナ(日立-NRバーナ)を開発し、実缶でのNO_x及び未燃分レベルの大幅低減と、22%低負荷専焼での着火・保炎性を検証した。
(2) 燃焼解析あるいはボイラやミルの動特性解析を行うプログラムを開発し、実缶設計の信頼性・経済性の向上を図った。
(3) 燃焼管理システムやビンシステムなどの周辺技術の検討を推進し、中間負荷対応策を確立している。

石炭火力の燃焼技術は、もはや燃焼だけでなくボイラ設備全体の制御・運用を考慮に入れたシステム技術へと変わっている。運用性改善には今後更に解決しなければならない課題もあるが、石炭の今後いっそうの多様化としての無煙炭や低品位炭、更にはCWMなどの新燃料にも対応できる燃焼システム技術を確立し、運用性だけでなく信頼性、経済性の向上を図ってゆく考えである。

参考文献

1) 小島：火力発電技術，日本機械学会誌，90，823，722～723(昭62-6)
2) 資源エネルギー庁石炭部：コールノート，資源産業新聞社(昭61年度版)
3) 政井，外：微粉炭燃焼ボイラにおける未燃分子測技法，火力発電，Vol.34，No.12，1401(1983)
4) T. Narita, et al.：Operating Experiences of Coal Fired Utility Boilers Using Hitachi NO_x Reduction Burners, 1987 Joint Symposium on Stationary Combustion NO_x Control, EPA & EPRI, March 23-26, 1987.
5) 政井，外：微粉炭低NO_x燃焼技術，日立評論，67，2，103～107(昭60-2)