

# 最新鋭1,000 MW級石炭燃焼ボイラの設計

## The State of the Art Design of 1,000 MW Class Coal Fired Boiler

石炭燃焼ボイラは、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、大容量化が図られつつある。平成2年6月には、国内では初めての1,000 MW石炭専焼ボイラが営業運転開始を予定しており、その後も多数の建設計画がある。今後の石炭火力は油火力の代替エネルギーとして、負荷調整能力の向上、環境対策の強化、設備の合理化など克服すべき課題が残されており、1,000 MW級ユニットでも同様である。

バブコック日立株式会社はこれらの課題に対し、大容量石炭燃焼ボイラを対象とした開発を進め、平成6年以降に営業運転に入る1,000 MW石炭専焼ボイラに適用可能な技術を確認した。

石田 忠\* *Tadashi Ishida*  
山内秀紀\* *Hideki Yamanouchi*  
三村哲雄\*\* *Tetsuo Mimura*  
山崎和彦\*\* *Kazuhiko Yamasaki*

### 1 緒 言

今後の新規火力は、電源のベストミックス化への対応として石炭火力の増加が見込まれる。石炭火力は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、単機出力は大容量化の傾向にある。バブコック日立株式会社(以下、バブコック日立と言う。)は大容量石炭燃焼ボイラの開発に積極的に取り組み、第一世代として昭和58年3月に国内最初の700 MW石炭燃焼ボイラを完成させた。さらに、平成2年6月には同じく国内では初めての1,000 MW石炭専焼ボイラが営業運転を開始する。また、第二世代の大容量石炭燃焼ボイラとして、平成6年には世界最大容量の変圧貫流形の1,000 MW石炭燃焼ボイラが営業運転を開始する予定である。

一方、今後建設が予定される石炭火力に対しては、次世代の大容量石炭燃焼ボイラと位置づけ、現在、設計および技術開発を進めている。これらの石炭燃焼ボイラは、従来のベース運用火力から、負荷調整機能を担う火力として、またいっそうの環境保全を図るため、従来の石炭燃焼火力の範囲を越えた、性能向上・機能向上が求められている。また、同時に合理的な設備の追求という要求も満たす必要がある。

バブコック日立は、これらの条件を満たすために、運用特性の改善、環境対策の強化、設備の合理化を重点に技術開発を進めており、平成6年に営業運転を開始する1,000 MW石炭専焼ボイラに適用可能な体制を整えている。この論文では、現在開発中の技術を述べるとともに、これらを適用した次世代のニーズに適合した1,000 MW級石炭燃焼ボイラの概要について論述し今後の参考に供したい。

### 2 次世代大容量石炭燃焼ボイラの特徴

今後の石炭燃焼ボイラは、まず第一に原子力プラントの増加に伴い、油・ガス燃焼ボイラに匹敵する負荷調整機能が要求されるものと予想される。すなわち、高負荷変化速度、フリンジ負荷変動の吸収など負荷調整能力の向上、最低安定負荷の低減、本格的DSS(Daily Start and Stop)運用対応のための起動時間の短縮、系統の信頼性向上のための所内単独運転などが主要な課題となる。また、安定した制御特性を得るためには、特性の異なる多銘柄炭に対して、制御パラメータを自動修正する機能も重要となる。

次に環境対策では、燃焼上の対策と脱硝装置の採用によりNO<sub>x</sub>(窒素酸化物)対策を行っているが、今後は立地条件から、よりいっそうの低減が要求されることも考えられる。また、騒音対策の強化など従来規制の強化は当然のことながら、景観保全も今後の火力プラントでは重要視されるものと予想される。

さらに効率向上面では、経済性の追求とCO<sub>2</sub>(二酸化炭素)低減の一環として、蒸気条件の向上が図られるものと予想される。これらの要求に対しては、常に経済性を念頭に置き、機能向上を図る必要がある。

自動化面では、運転保守の高度化に対応してマンマシンコミュニケーションの充実、設備監視の強化が重要である。自動化計画では、運転員・保修員への適切な運転ガイドのための支援システム、現場点検業務軽減のためのパトロールの省力化といった運転監視、容易な起動・停止を行うための操作の集約化と操作量の低減を図る必要がある。

\* バブコック日立株式会社 火力原子力本部 \*\* バブコック日立株式会社 呉工場

### 3 設計方針と適用技術

1,000 MW級石炭燃焼ボイラの設計にあたっては、高信頼性が最も重要であり、国内では1,000 MW石炭専焼ボイラの運転実績を持つ唯一のメーカーとして、その経験を十分に反映することが可能である。

表1に示した次世代の石炭燃焼ボイラとしての要求機能に対しては、信頼性確保はもちろんのこと経済的効果を常に追求することを前提に開発を進めている。

運用機能面では、ミル(微粉炭機)・バーナシステムのターンダウン拡大を図り、石炭専焼最低負荷の低減と負荷変化特性の向上を図る。ミルのターンダウンは、加圧力制御と回転分級機を活用したミル負荷制御を採用することによって拡大可能である。バーナのターンダウンは、高ターンダウンバーナを開発することによって拡大を図る。

環境対策面では、微粉炭バーナで低NOx化を達成した日立-NR(NOx-Reduction)バーナに改良を加えた超低NOxバーナ(以下、日立-NRⅡと略す。)の開発により、ボイラ本体および脱硝装置のコンパクト化を図り、かつ空気過剰率、灰中未燃分の低減から効率向上を図る。これは景観保全の観点からも効果がある。

蒸気条件の向上に対しては、材料面では高温強度が優れ、すでに実機に適用しているASTM SA213T91, SA335P91(9Cr改良材)を採用するとともに、超々臨界圧ボイラを対象とした実証試験で確立した高温腐食対策などの経験を反映し、信頼性の高い設計とする。

現在試運転中および設計中の1,000 MW石炭燃焼ボイラのミルは、石炭粉碎用では世界最大の容量であり唯一の運転実績を持つローラレースミル(MPS-118)を7台設置している。また、バーナは超低NOx日立-NRバーナを70本採用している。これは、スラッキング特性を考慮して、従来実績のあるバーナ入熱を採用したものである。しかし、操作端・検出端の増

表1 1,000 MW級石炭燃焼ボイラの特徴 今後の大容量石炭燃焼ボイラに要求される機能を集約したものである。

石炭燃焼火力を取り巻く動向	要求される機能	
原子力発電の比率増加	負荷調整機能の向上	最低負荷の低減 負荷変化速度の向上 起動時間の短縮
立地条件の整備	環境対策の強化	NOxレベルの低減 景観保全
CO <sub>2</sub> 低減	効率向上	蒸気条件の向上
建設費の低減	設備の合理化	設備のコンパクト化 機器の大容量化

加によって設備費が増加し、また信頼性、省スペース・メンテナンスの簡略化も考慮して、大容量ミル、バーナの開発を進めている。

これらの技術の一例を以下に述べる。

#### (1) 運用機能の向上

石炭専焼時の最低安定負荷の低減は、石炭燃焼ボイラでの主要な課題の一つである。石炭燃焼ボイラの最低安定負荷低減の変遷を図1に示す。石炭の安定着火を支配する主要な要因としては、石炭・空気比、微粉粒径分布などがあげられ、それぞれの対策が施されている。日立-NRバーナは、三次空気の強旋回機構と保炎リングの採用により、従来のバーナに比べて大幅に着火特性を改善したものであり、すでに20%ECR(Economical Continuous Rating)前後の低負荷運転を達成している。現在開発中の日立-NRⅡバーナは新たな技術開発によって、バーナ単体のターンダウンを拡大して、15%ECRの最低安定負荷を達成する。バーナの試験状況を図2に示す。このバーナの採用と前述のミルのターンダウンの拡大により、100%ECR~50%ECR間のミル起動・停止の回避が可能となり、負荷変化特性の改善とAFC(Automatic Frequency Control)運用に対する不感帯の設定が不要となり、負荷調整能力の向上が可能となる。この方式の最大の特徴は、バーナ入口にサイクロンなどの付属装置が不要であり、従来どおりのコンパクトなバーナ配置が可能となり、メンテナンスの簡略化も可能となる。

1,000 MW石炭燃焼ボイラの負荷変化特性および起動特性は、大形燃焼炉とボイラリアルタイムシミュレータを組み合わせ、実際の燃焼状態を加味しシミュレーションにより評価を行っている。これらのシミュレーション結果から、厚肉部および弱点部位の寿命評価を行い、1,000 MW級ボイラでも十分中間負荷運用・本格的DSS運用が可能であることを確認している。AFC時の燃焼特性およびボイラ特性シミュレーショ

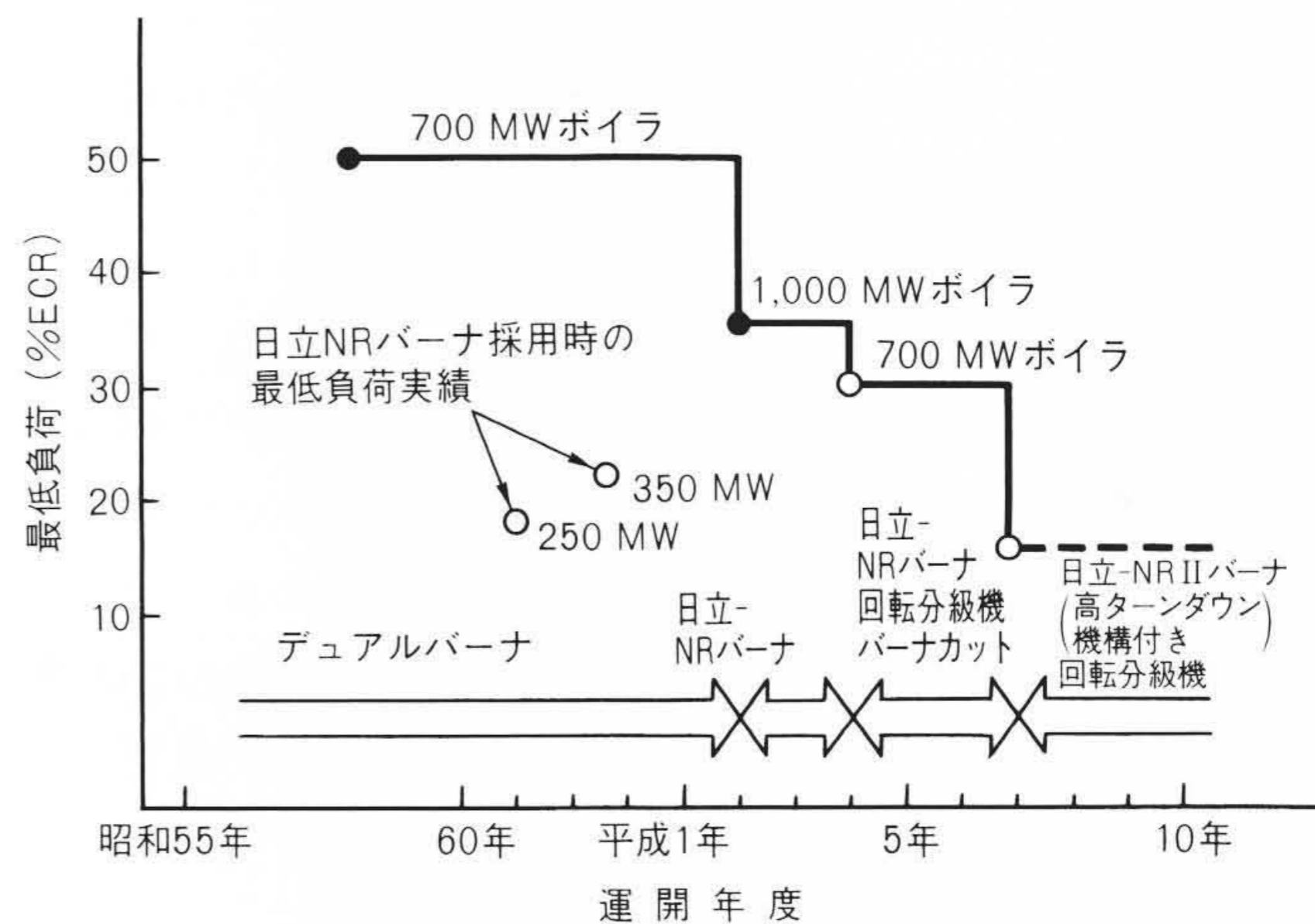


図1 最低負荷低減対策の経緯 燃焼技術の改善によって、石炭燃焼ボイラの最低安定負荷は、油・ガス燃焼ボイラと同一レベルになろうとしている。

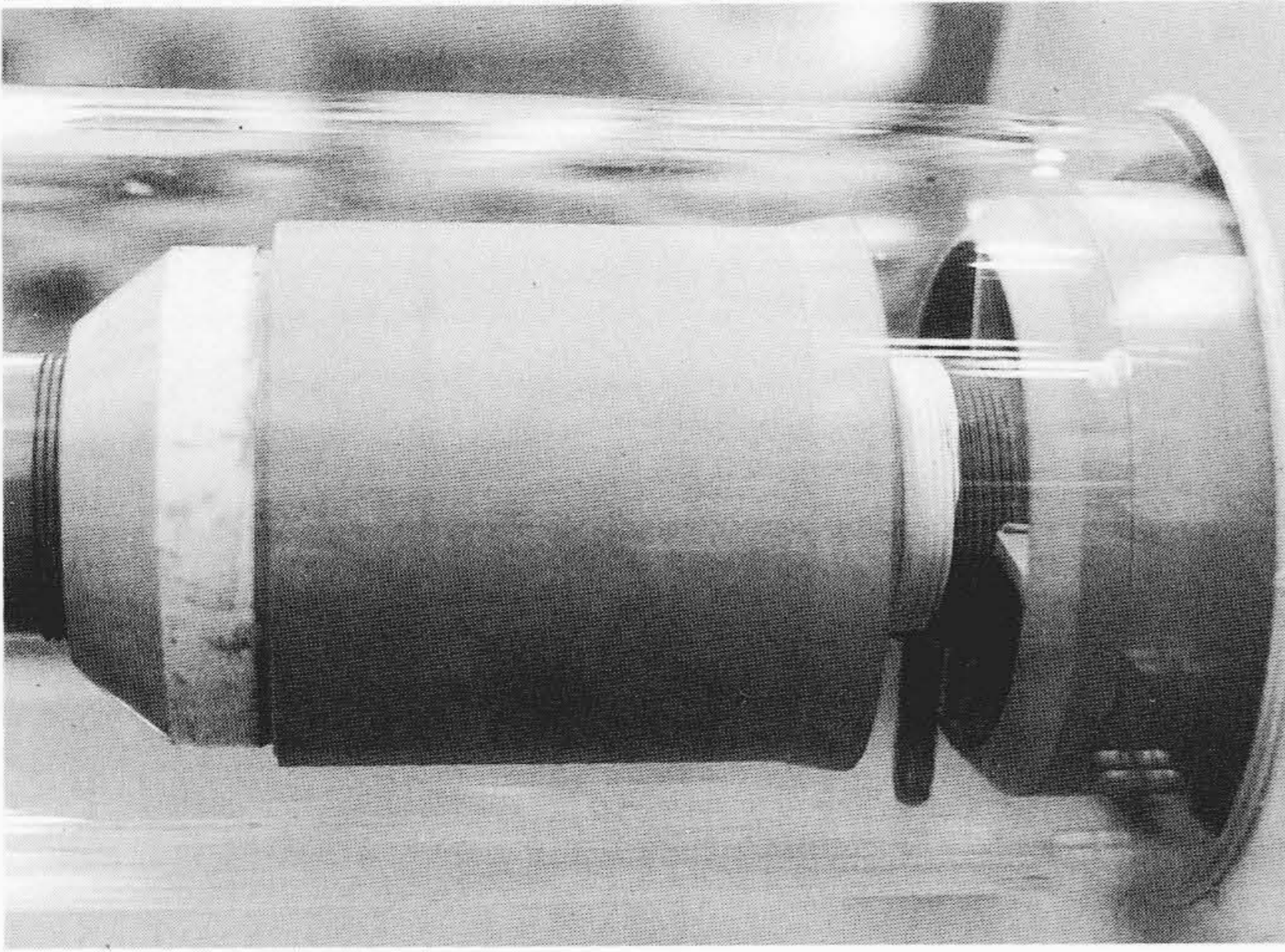


図2 高ターンダウンバーナのコールドモデル試験状況 微粉分離性能をコールドモデルによって確認している。

ンの解析結果を図3に示す。

今後計画されるボイラでは、さらに広範囲な性状を持つ石炭が導入されるものと考えられる。これら多種銘柄炭に適合する制御特性を確保することは、実運用を考慮した場合不可欠となる。これに対しては、1,000 MW石炭燃焼ボイラで適用

している燃焼監視システム、現在設計中の多炭種適合制御システムの適用により、石炭性状に対応した制御パラメータの自動補正が可能である。

(2) 環境対策の強化

NO<sub>x</sub>レベル低減技術の変遷を図4に示す。NO<sub>x</sub>低減技術の進歩につれて、ボイラでのNO<sub>x</sub>発生レベルは年ごとに低減されている。現在、日立-NRバーナと還元二段燃焼法の開発により、従来形のデュアルバーナと二段燃焼法に比べNO<sub>x</sub>レベルは約60%に低減されている。現在開発を進めている超低NO<sub>x</sub>バーナ(日立-NR II)は、日立-NRバーナのNO<sub>x</sub>還元特性と着火特性をさらに強化したものである。バブコック日立の燃焼試験炉でのデータを図5に示すが、NO<sub>x</sub>レベルの低減と同時に未燃分の低減が可能となっている。このバーナは、図6に示すとおり大形燃焼炉で実機スケールの試験を行い、実機適用が可能な状態にある。

(3) 設備の大容量化

現在設計中の700 MWと1,000 MW石炭燃焼ボイラに適用しているミルとバーナの仕様比較を表2に示す。ミルは石炭燃焼ボイラ用としては世界最大容量で、唯一運転実績を持つMPS-118を採用し、バーナはスラッキングトラブル回避の観点から、入熱を抑え員数を増加する設計としている。

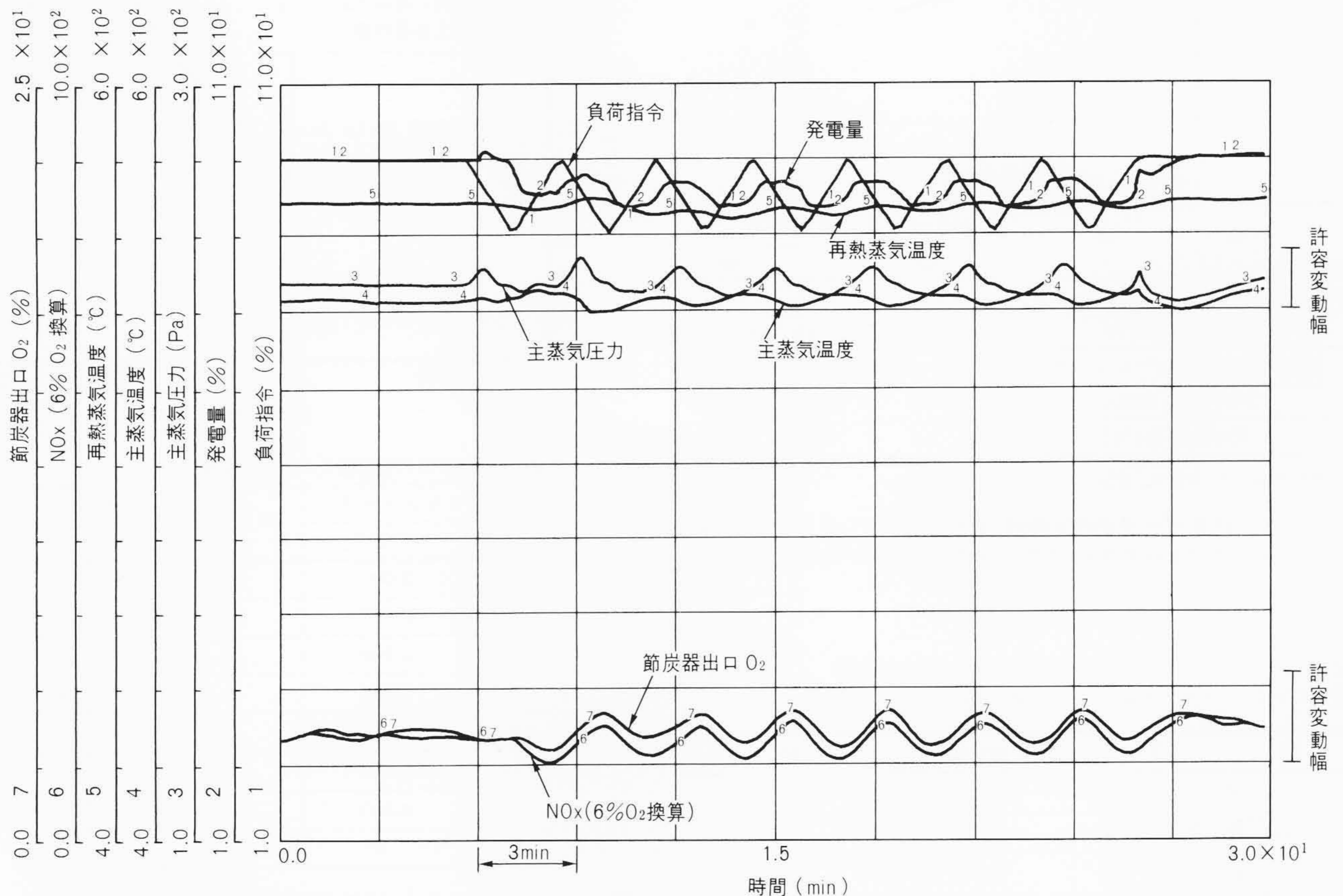


図3 AFCシミュレーション結果(95%±5%, 7%/min) 大形燃焼設備とシミュレータを組み合わせた石炭燃焼ボイラの負荷変化試験でも、安定した制御特性が得られている。

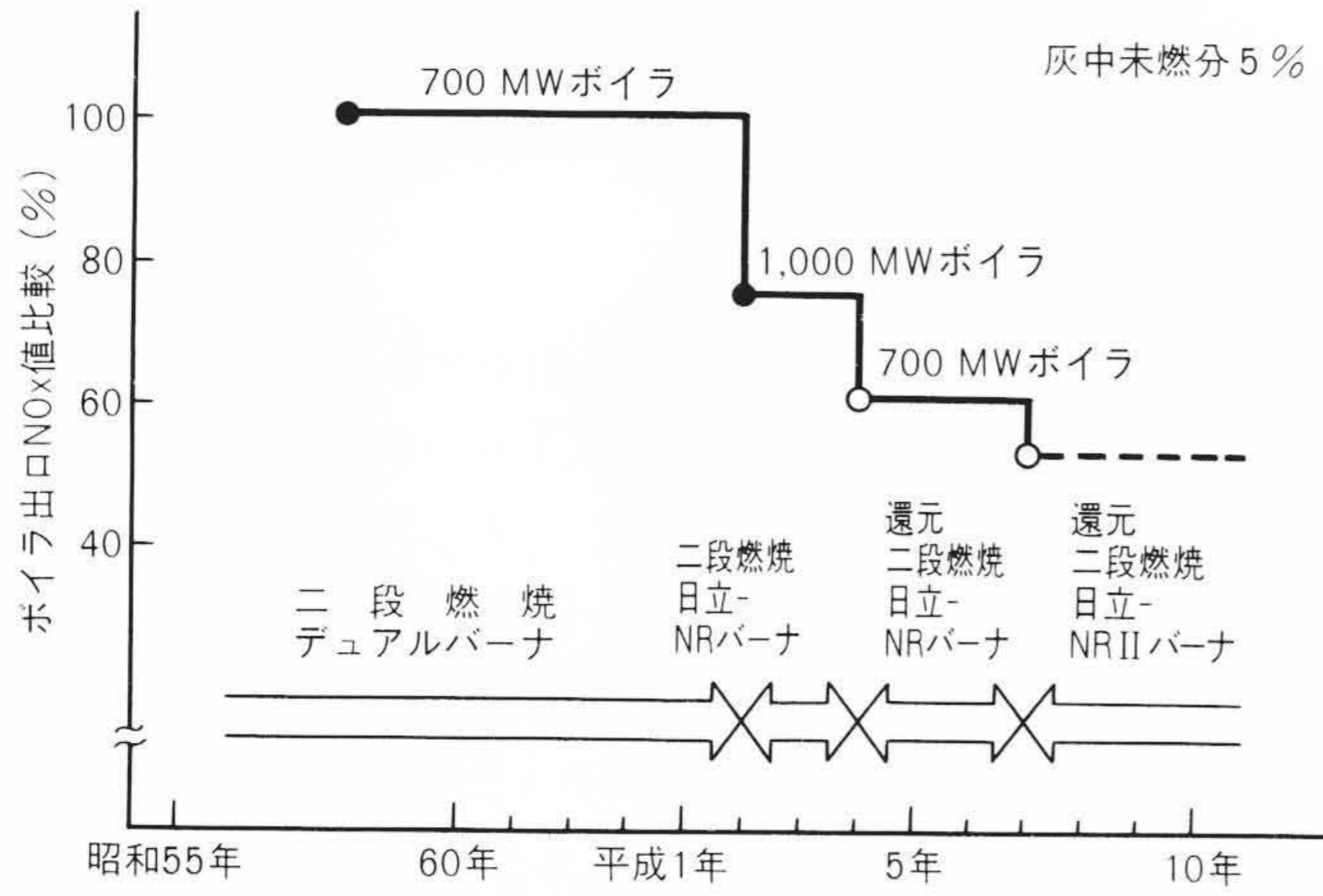


図4 NOx対策の経緯 低NOxバーナの開発と火炉設計手法の確立によって、NOxレベルは昭和60年代の技術に比べて約50%の低減も可能となっている。

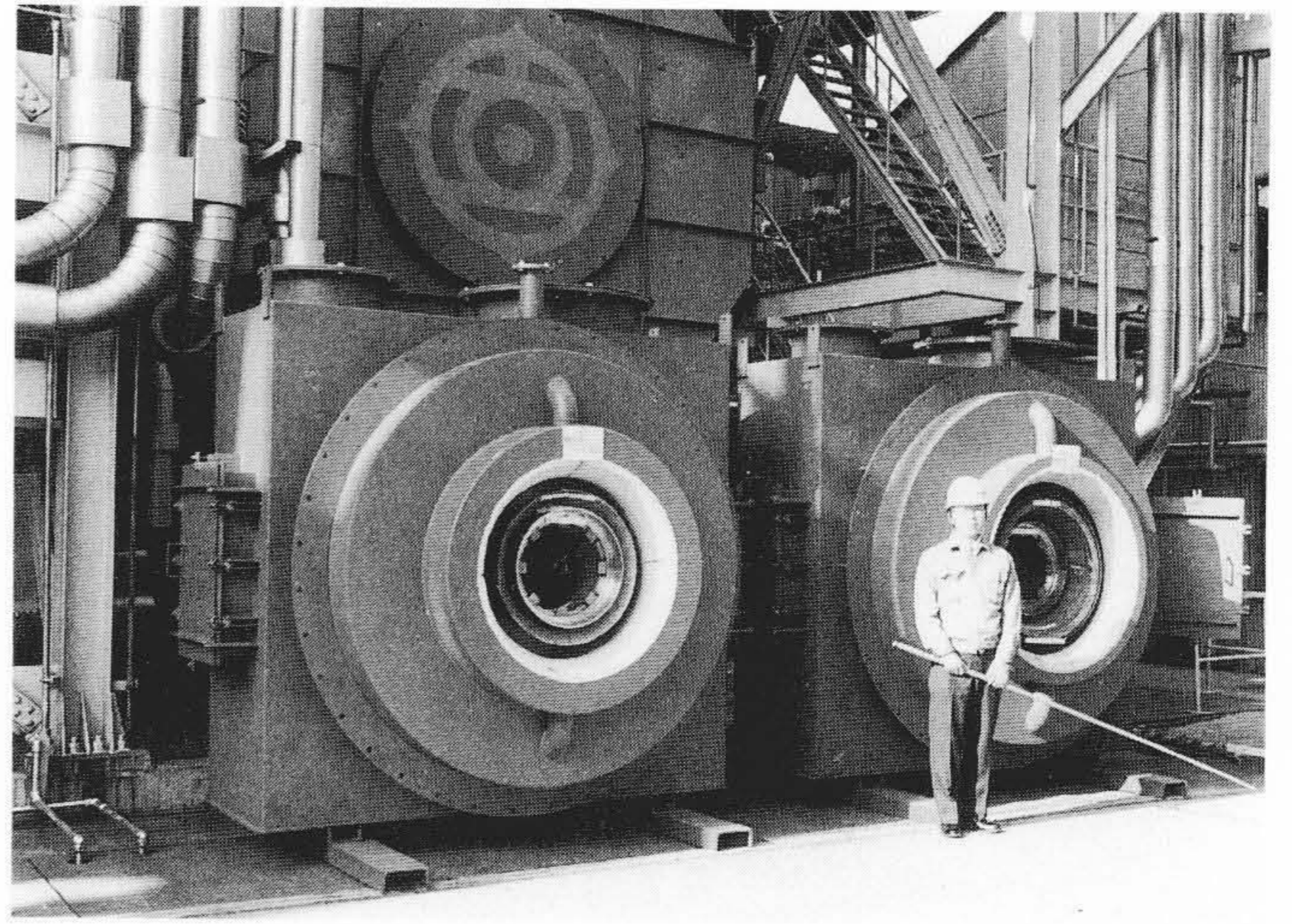
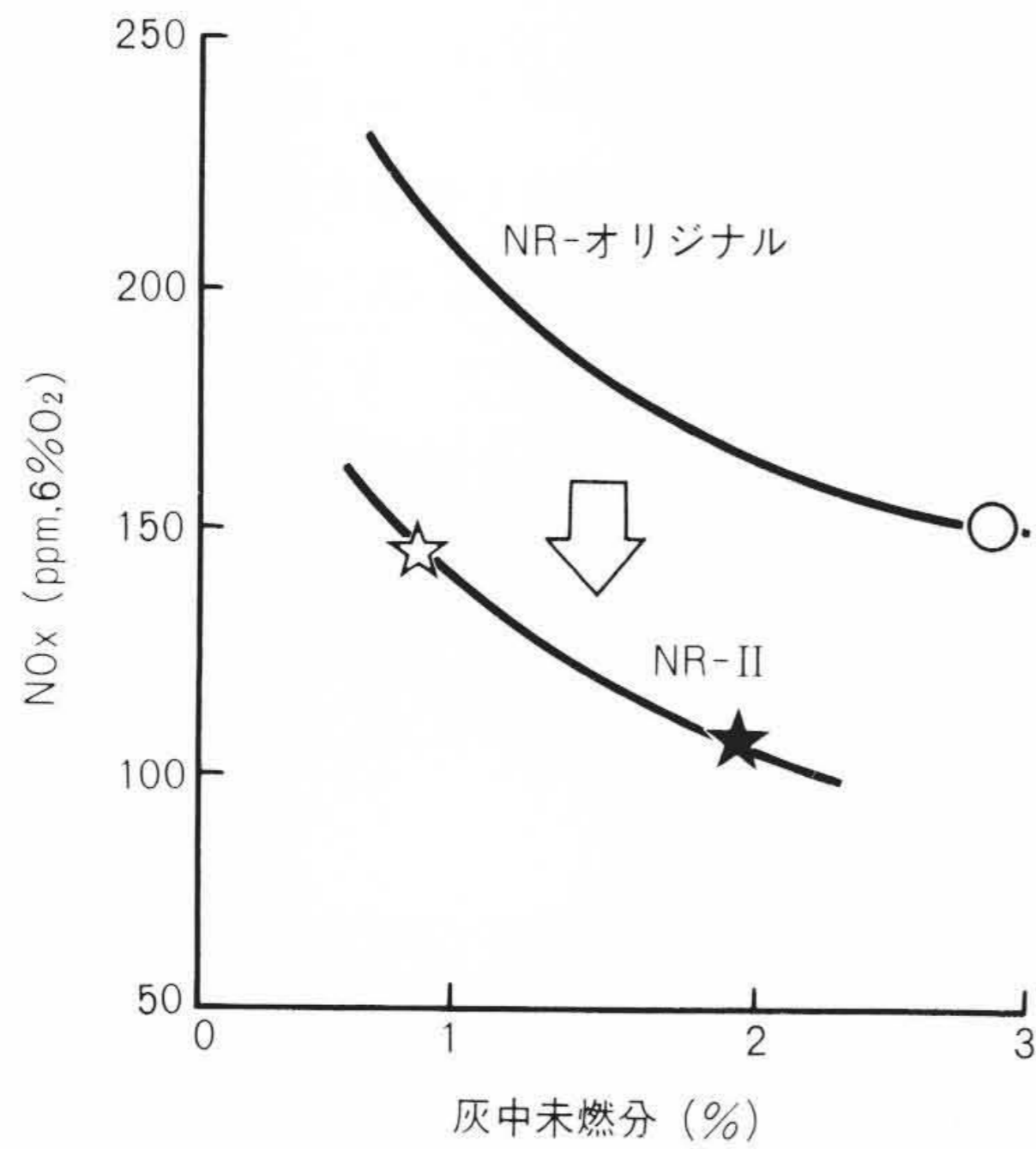


図6 日立-NRバーナ，日立-NR IIバーナの外觀(4 t/h) 両者の特性比較を行うため、実機規模の燃焼試験を実施した。



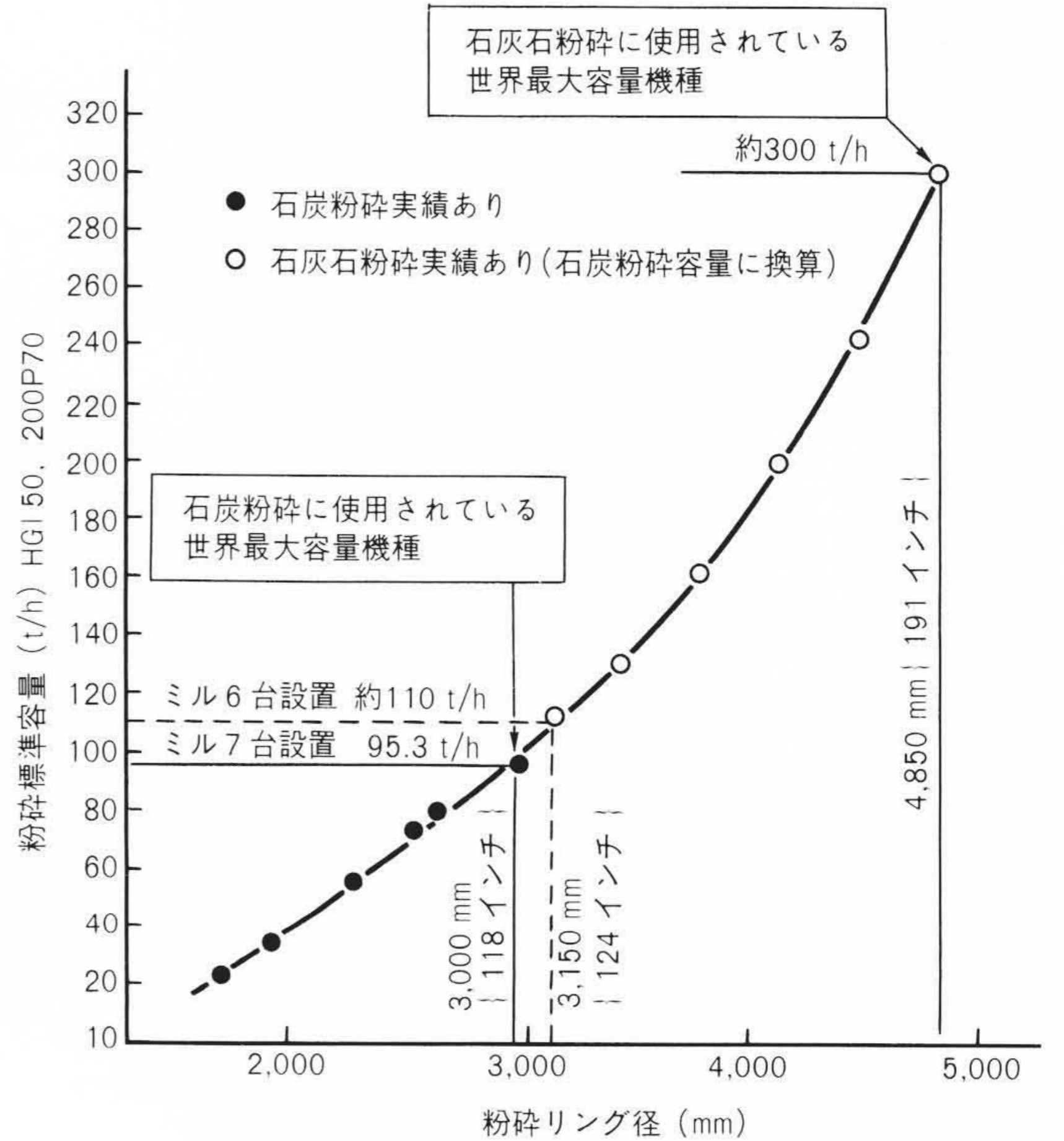
項目	NRオリジナル		NR-II	
	○	☆	★	★
バーナ空気比(-)	0.9	0.9	0.8	0.8
火炉出口O <sub>2</sub> (%)	3~3.5	3~3.5	3~3.5	3~3.5
微粉炭粒度(200メッシュパス%)	80~83	80~83	80~83	80~83
NOx(ppm,6%O <sub>2</sub> )	150	145	105	105
灰中未燃分(%)	2.9	0.8	1.9	1.9

注：燃料比=2.2, N分=1.8%

図5 日立-NR IIバーナのNOx特性(燃焼試験炉でのテスト結果) 日立-NRバーナに比べてさらにNOx・未燃分の低減が可能である。

表2 700 MW・1,000 MWボイラのミルとバーナ比較 ボイラの大容量化に伴い、バーナ本数，ミル台数が増加する。

項目		700 MWボイラ	1,000 MWボイラ
ミル	形式	MPS-118	MPS-118
	設置台数	6台	7台
	容量	84 t/h	95 t/h
バーナ	形式	日立NRバーナ	日立NRバーナ
	本数	48本	70本



MPS-118以上の大容量ミルの納入実績

MPSミルシリーズ		納入台数	原料	
型番	mm		石炭	石灰石
118	3,000	51	○	-
124	3,150	8	-	○
136	3,450	9	-	○
148	3,750	12	-	○
163	4,150	9	-	○
177	4,500	2	-	○
191	4,850	2	-	○
合計		93		

図7 MPSミルサイズと粉砕標準容量 石灰石粉砕用としてMPS191が稼動しているが、石炭粉砕用ではMPS118が世界最大容量である。MPS124も石灰石粉砕用に稼動している。

次世代の大容量石炭燃焼ボイラでは、ミルについては設備とメンテナンスの合理化および省スペースの観点から、1,000 MW機でも700 MW機と同様6台設置とすることで、大容量MPSミルの開発を進めている。MPSミルのシリーズと粉砕実績を図7に示す。現在世界で最大のミルは、石炭・石灰石粉砕用ともにMPSミルであり、いずれも国内で運転されている。これらの実績をベースに、今後の1,000 MW機は、大容量化を図ったMPS-124を標準とし、また計画炭種によっては現在採用しているMPS-118も採用する。現在、MPS-124は石灰石粉砕用に稼動しており、このミルを石炭粉砕用に一部改造することにより、運転実績に基づいた信頼性の高い1,000 MW機適用のミルが開発可能である。MPS-118と同124の比較を図8に示す。

日立-NRバーナの容量の変遷を図9に示す。バーナ容量の選定にあたっては、スラッキングトラブル抑制と燃焼特性確保を考慮して、最大約7 t/h・本と制限してきたが、流動解析などの確証試験結果を踏まえて、実缶で約9.5 t/h・本の実績が得られた。これらの成果を1,000 MW機に適用することによって、700 MW機と同一の設備構成が可能となる。

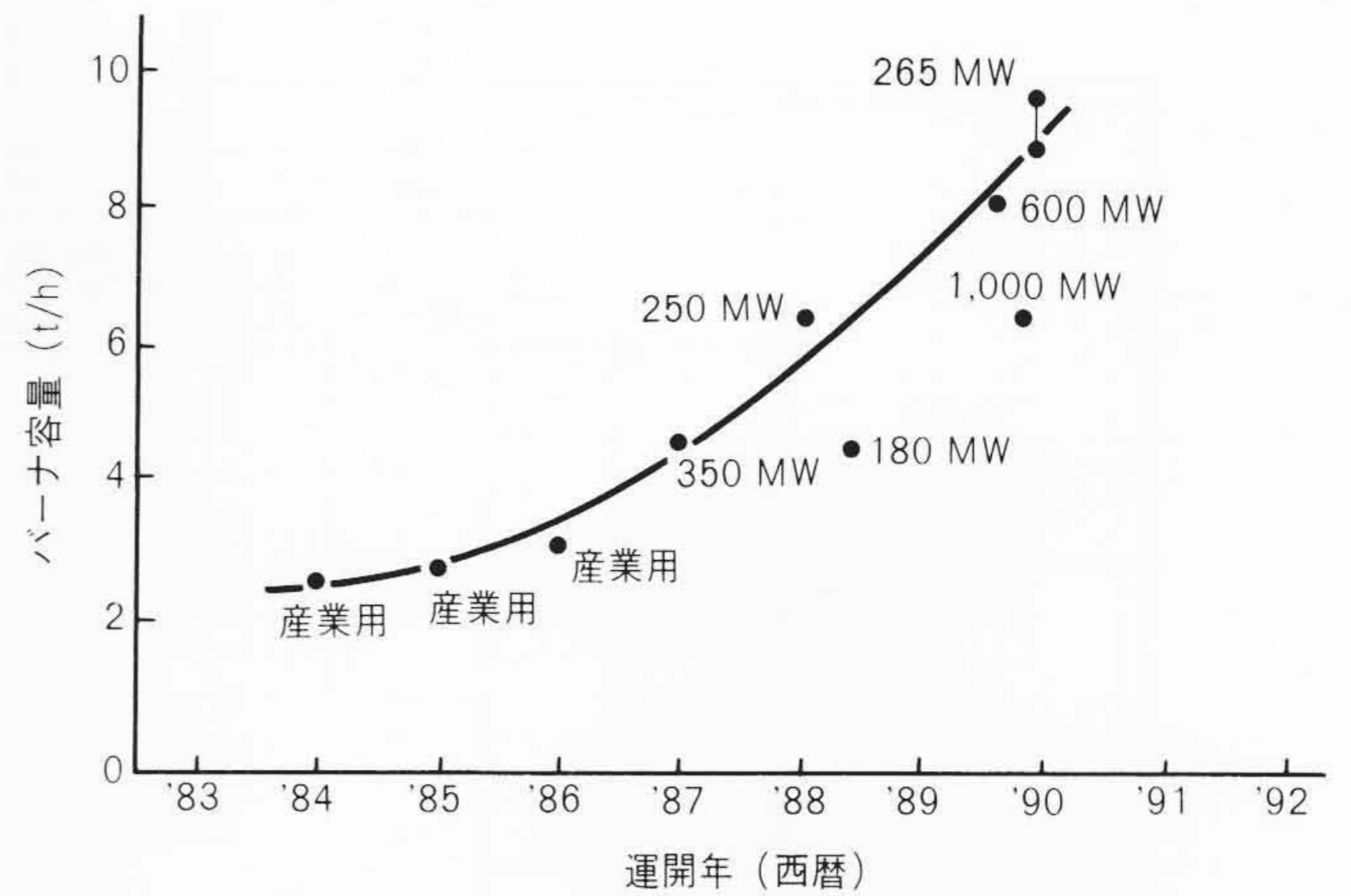


図9 日立-NRバーナ大容量化の変遷 実績に裏付けられた信頼性の高い大容量バーナの採用が可能である。

#### 4 最新鋭1,000 MW級石炭燃焼ボイラ

1,000 MW級石炭燃焼ボイラの設計方針と、現在開発中の技術の概要について述べた。これらの開発技術を反映した最

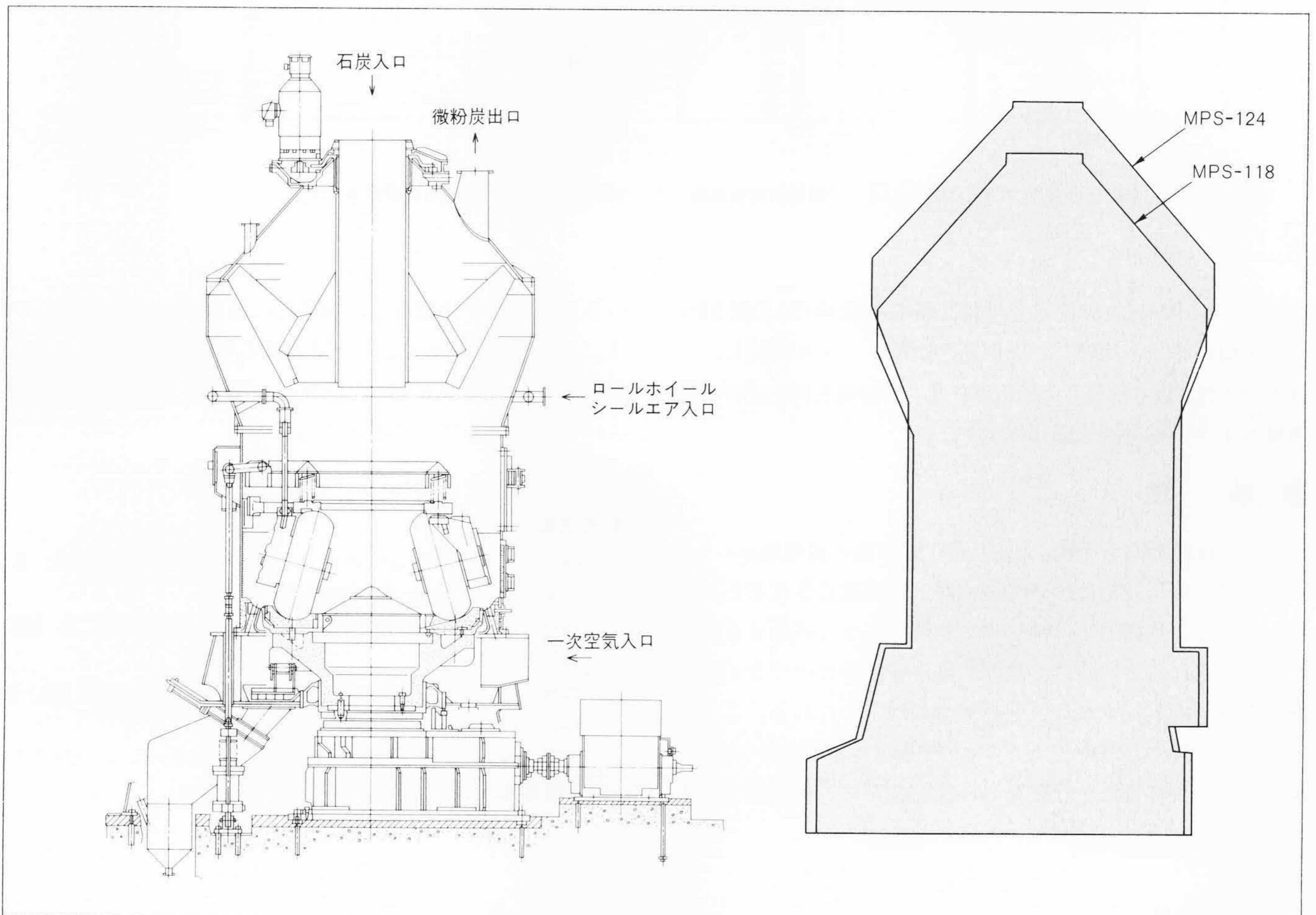


図8 MPSミルの構造とMPS118・124の比較 MPS124は石炭粉砕用に改造することによって、実績に基づく信頼性の高い設計が可能である。

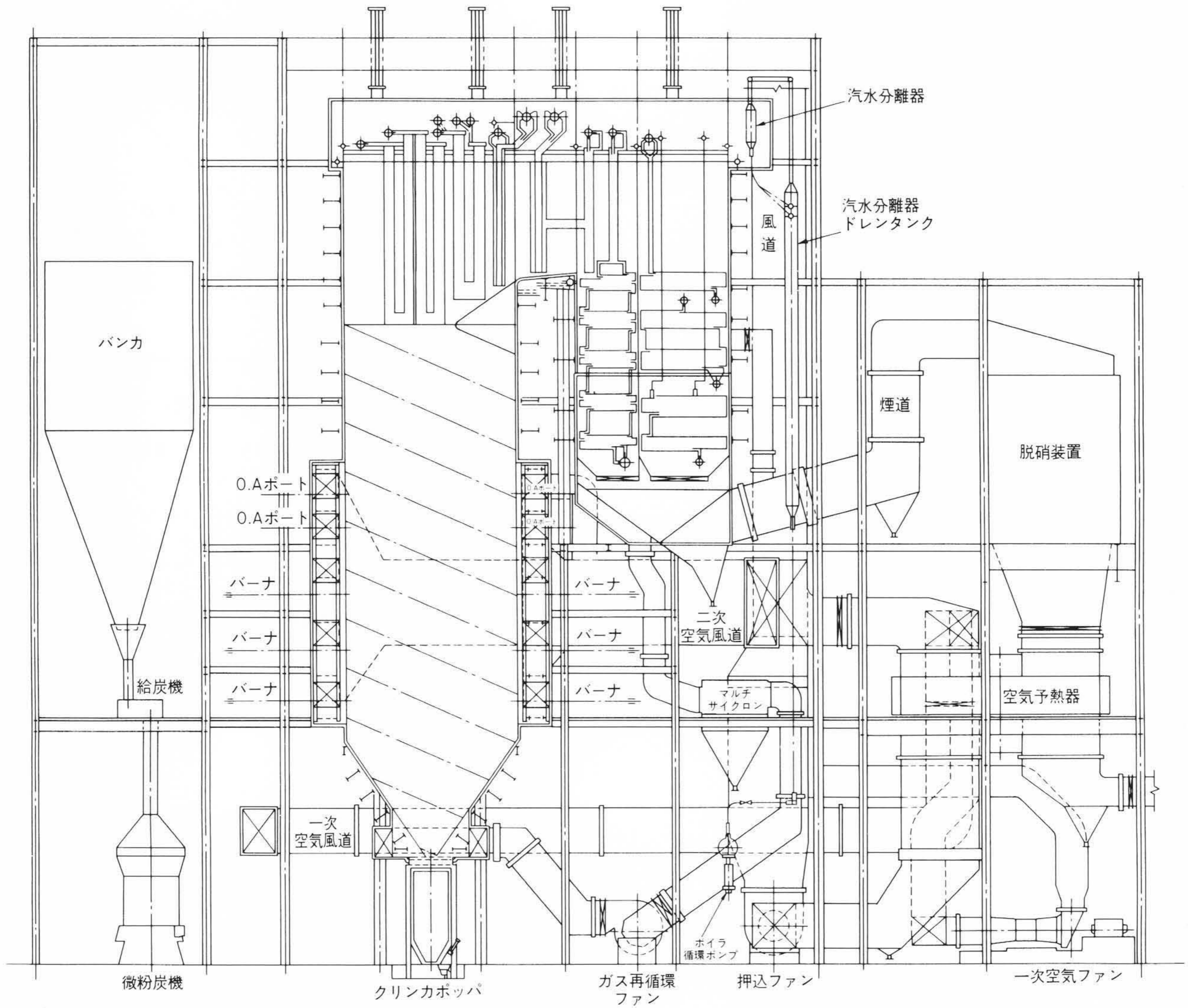


図10 1,000 MW石炭燃焼ボイラの構造図 最新技術を適用した1,000 MW石炭燃焼ボイラの構造を示す。

新鋭1,000 MW石炭燃焼ボイラは、現在設計中の1,000 MW石炭燃焼ボイラと比較し、火炉高さが数メートル低減し、ミル・バーナ台数も低減した構造となる。最新鋭1,000 MW石炭燃焼ボイラの構造図を図10に示す。

## 5 結 言

今後の技術動向を反映した、1,000 MW級石炭燃焼ボイラの設計方針と適用技術について述べた。今後建設される石炭燃焼ボイラは、技術的には油・ガス燃焼ボイラに匹敵する諸特性が要求されると同時に、経済的には建設費だけでなく運転費を考慮したトータルコストミニマムが求められる。これらの要求を実現するためには、多くの克服すべき課題があるが、現在までの大容量ボイラ開発の経緯と将来の石炭火力のある

べきニーズを十分把握し、積極的に技術開発に取り組んでいる。この論文で述べた1,000 MW級石炭燃焼ボイラは、この課題に真正面から取り組んだ成果の一部と言えるが、今後、さらに努力を重ねていく考えである。

## 参考文献

- 1) 磯田, 外: 大容量石炭燃焼ボイラの間荷運用技術, 日立評論, 67, 2, 97~102(昭60-2)
- 2) 政井, 外: 微粉炭新低NOx燃焼技術, 日立評論, 67, 2, 103~107(昭62-2)
- 3) 高橋, 外: 大容量石炭ボイラの燃焼技術, 日立評論, 69, 10, 897~904(昭62-10)
- 4) 船倉, 外: 1,000 MW用LNG燃焼変圧運転ベンソンボイラの計画と運転実績, 69, 2, 905~910(昭62-10)