

石炭燃焼ボイラの燃焼システム

Combustion System for Coal Firing Boiler

近年、エネルギーの有効活用が叫ばれるなかであって、石炭が再び火力発電用燃料として見直され始めてきた。ボイラの大容量化に伴う石炭燃焼設備の大容量化への対応、石炭性状の異なる多種外国炭の燃焼技術を確認する必要がある。特に、大気汚染防止面からNO_x及び灰中未燃分を抑制した燃焼を行なわせるための燃焼機器、バーナの開発が急務となり、バブコック日立株式会社の工場内実験炉、実缶などでの開発を手がけ、国内炭のほか各種外国炭をも含め今後のニーズに対応できる成果を得ている。なお現在、更に環境改善を図る技術開発を行なっている。

益子庄一* Syōichi Mashiko
三田武雄* Takeo Mita

本稿では、石炭燃焼システム及び確立された技術として現在実缶で採用されている環境改善技術について述べる。

1 緒言

昭和48年末のいわゆるオイルショック以来、我が国では燃料のいっそうの有効利用が叫ばれると同時に、石炭燃料が再び注目を浴びるようになった。このため、SO_x(硫黄酸化物)、NO_x(窒素酸化物)低減のため燃料の軽質化、気体燃料への移行が進むなかで、石炭に対しても液体燃料、気体燃料と同様、NO_x、CO(一酸化炭素)煤塵などを低減した燃焼技術の確立を図ることが急務となり、更に国内石炭の安定供給が困難な実情から、各種外国炭の使用に対応できる燃焼機器の開発が必要となった。

今後、石炭燃焼ボイラを設計していく上で欠くことのできない環境改善燃焼技術、及びそれに対応した燃焼システムについて以下に述べる。

- (1) 燃焼用空気中のN₂(窒素分子)が高温で酸化されるもの。
- (2) 燃料中に含まれる窒素化合物の酸化によって生成されるもの。

前者はその生成原因からThermal NO(又はThermal NO_x)と呼ばれ、後者はN(窒素)の供給源が燃料であることからFuel NO(又はFuel NO_x)と呼ばれている。

燃料中のN含有率は、原油及び石炭の産地により異なるが、

A重油：0.005～0.08%(重量)

B及びC重油：0.08～0.4%(重量)

石炭：0.5～2.5%(重量)

の範囲にあるのが大部分である。石炭中に含有されているN分は液体燃料に比べて多く、それだけNO_xを生成しやすい。低NO_x石炭バーナの開発に当たっては、Fuel NO_xの低減を図ることが重要となる。

図1に、NO_x低減法の考察過程を示す。

2 環境改善燃焼技術

2.1 NO_x低減対策

燃焼の際生成するNO_xは、次の二つのものである。

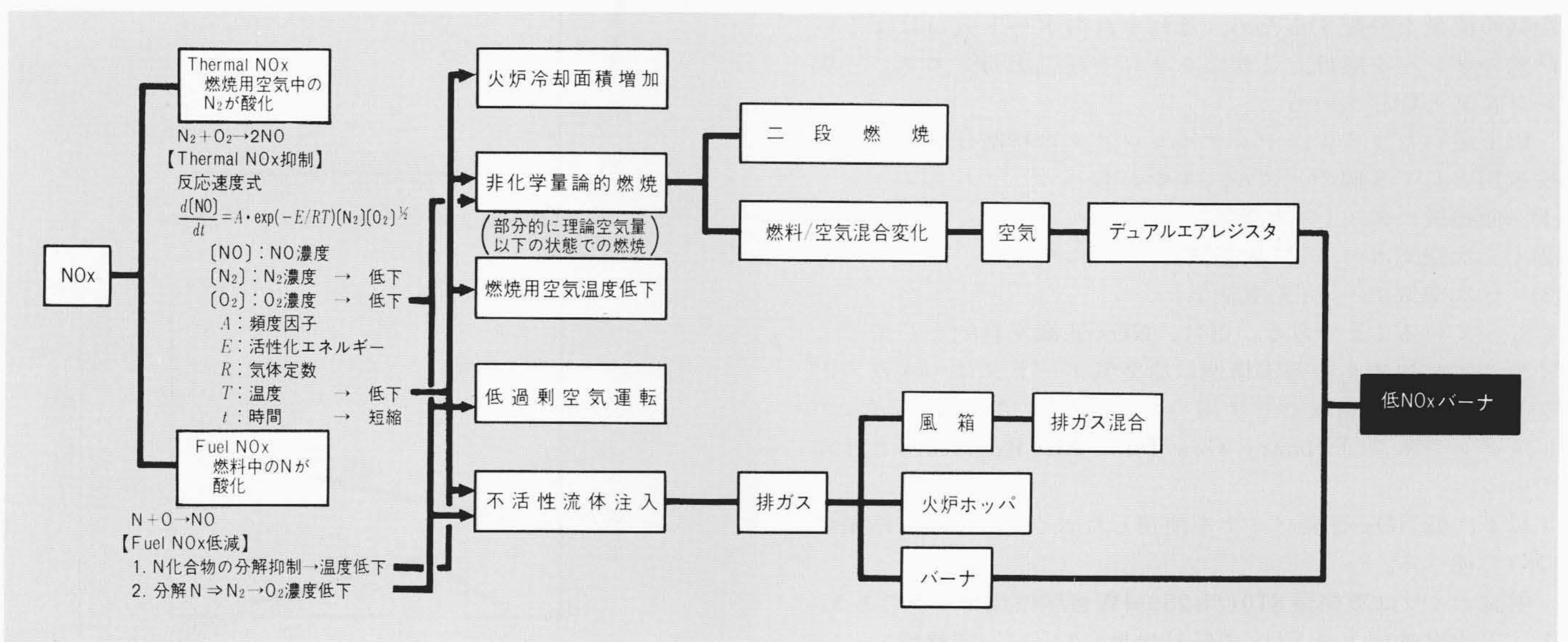


図1 NO_x低減法考察過程 NO_x発生機構としては、Thermal NO_xとFuel NO_xに分類される。また、NO_xの生成を抑制する方法を合わせて示した。

* バブコック日立株式会社呉工場

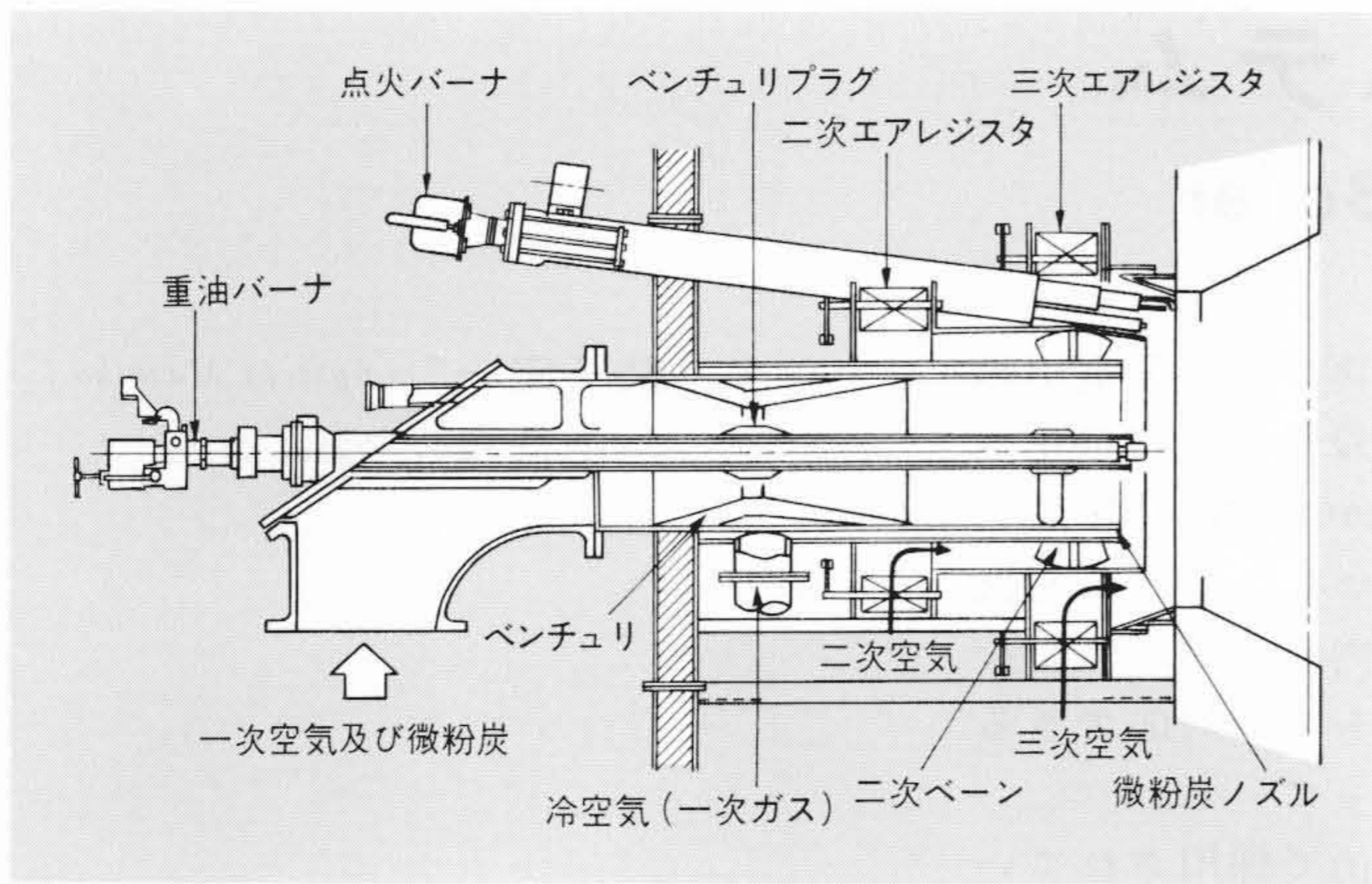


図2 デュアルエアレジスタ 低NOxバーナであるデュアルエアレジスタの構造図を示す。

2.2 低NOx石炭バーナ

低NOx石炭バーナはデュアルエアレジスタを用い微粉炭燃焼用として開発されたもので、完全な燃焼を行ないながらNOxの生成を抑制することを目的としている。

デュアルエアレジスタの構造を図2に示す¹⁾。微粉炭ノズルはエアレジスタの中心に配置され、このノズルから微粉炭と微粉炭輸送の空気(一次空気)を火炉内に噴出して燃焼させる。微粉炭ノズルの外周には、微粉炭ノズルと同心に筒状のスリーブ2個を備えており、それぞれのスリーブで形成された環状の通路のうち、内側を冷空気ポート又は一次ガスポート、外側を二次空気ポートと呼んでいる。また二次空気ポートの外側スリーブとバーナスロート部で形成された環状通路を、三次空気ポートと呼んでいる。冷空気ポートは、ウインドボックスからの燃焼用空気とは別に、押込送風機出口から取り出された冷空気、又はボイラ排ガスを供給できるように計画されたポートである。このボイラ排ガスを一次ガスと称している。

二次空気ポート、三次空気ポートには、ウインドボックスから燃焼用空気が供給される。これらのポートに供給される空気の流量を分配するため、それぞれのポート入口による戸式のダンパを設け、これらをそれぞれ二次レジスタ、三次レジスタと称している。

以上述べたように、デュアルレジスタの特徴は燃焼用空気投入用として3個のノズル、すなわち

- (1) 微粉炭ノズル(一次空気)
- (2) 二次空気ポート(二次空気)
- (3) 三次空気ポート(三次空気)

をもっていることである。更に、NOx低減を目的としてデュアルエアレジスタの基本構造に冷空気ポート又は一次ガスポートを備えた低NOxバーナ用のレジスタを、特にP.Gデュアルエアレジスタ(Primary Gas Dual Air Register)と呼んでいる。

以下、低NOx石炭バーナを使用したボイラでの運転結果について述べる。

供試ボイラは蒸発量810t/h 250MW自然循環ボイラである。

(1) 二段燃焼によるNOxの低減効果(タービン定格時)

二段燃焼比率[(バーナスロート部通過空気量/理論空気量)×100]とNOx濃度の関係を、従来のサーキュラバーナとデュアルエアレジスタとで比較したものを図3(a)に示す¹⁾。サーキュラバーナで二段燃焼を行なわないときのNOx濃度を100%

としたとき、二段燃焼を行なうことにより低減率31%であったものが、デュアルエアレジスタの採用だけで低減率39%を、更に二段燃焼を併用することにより低減率63%を得た。

NOx低減方策として、デュアルエアレジスタと二段燃焼を併用することによりNOxの低減効果は増大する。

(2) 排ガス中のCO

図3(b)に、二段燃焼比率を変化させたときのCO挙動の一例を示す。二段燃焼の強化によってCOが増加したあと減少する傾向を示している。二段燃焼比率の変化は二次空気流量、三次空気流量の変化となりその結果、バーナスロート部での燃焼用空気の噴出速度が変わる。一方、燃料(一次空気)の噴出速度は一定であるため、バーナスロート部では空気側と燃料側との相対速度が変化する。計算上相対速度が零になる二段燃焼比率とCO濃度のピーク点がほぼ一致していることから、相対速度が零になったときCO濃度が増加するものと考えられる。

表1及び図4は、同形の低NOx石炭バーナにより工場試験炉で実験したときの試験条件とNOx及びCO発生値の測定結果を示したものである。

(3) 燃焼灰中の未燃分

NOxの低減運転、すなわち二段燃焼比率を増加させることによって未燃分は増加の傾向を示し、二段燃焼比率を最小から最大に変化させたとき、図5に示すように26%の増加となった。

未燃分の挙動は、燃料の性状が支配的であるが、未燃分低減策としては電力会社の協力を得て、実缶により燃料側では微粉粒度や石炭/一次空気比の選定、燃焼用空気側では各々のバーナへの均一配分及びエアレジスタの開度調整によって、

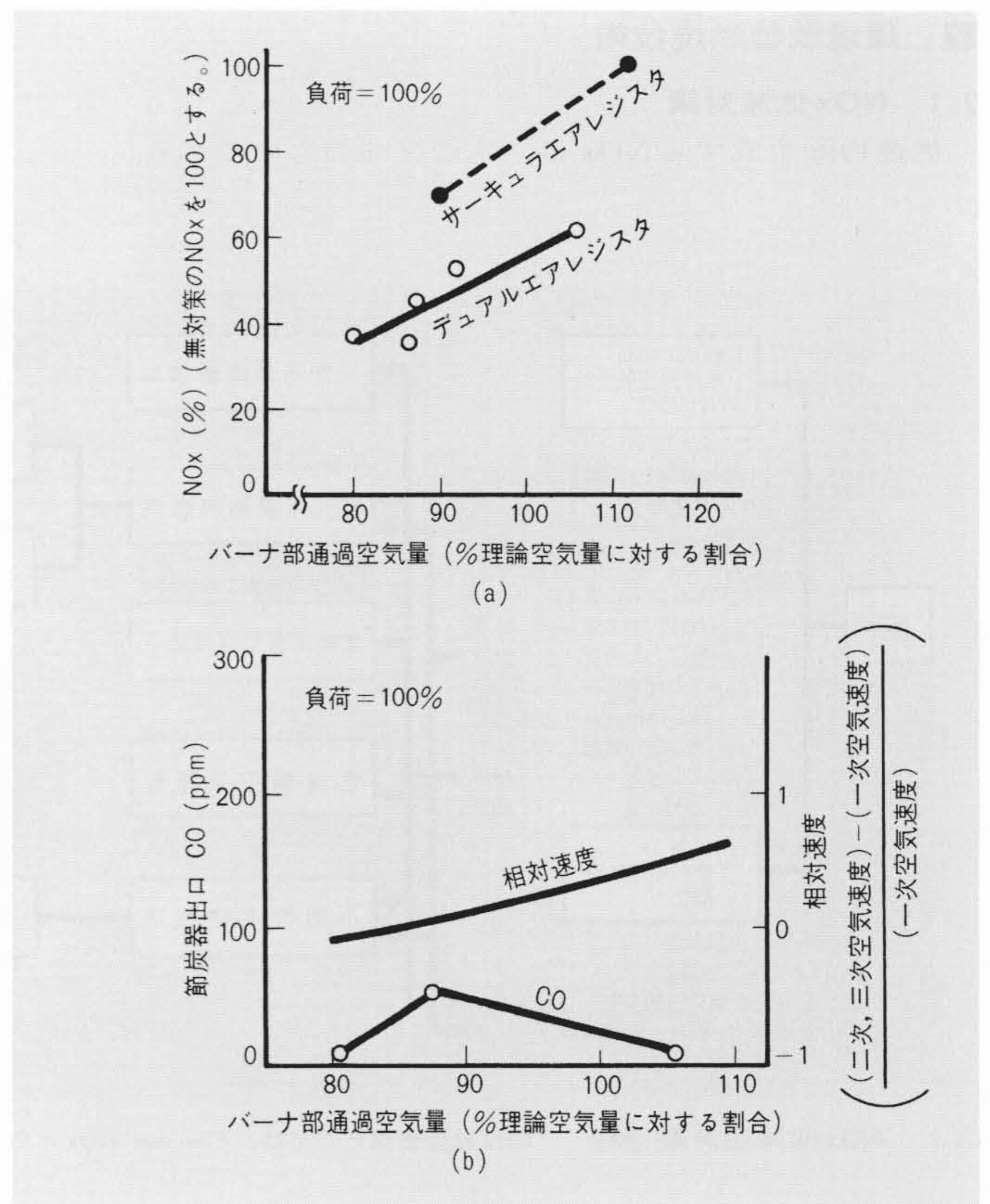


図3 二段燃焼とNOx及びCO 低NOxバーナと従来形式バーナのNOxレベルの比較及びCOとバーナスロート相対速度の関係を示す。

表1 工場燃焼炉試験条件 工場燃焼試験設備と試験条件及び供試燃料を示す。

項目	石炭銘柄	国内炭	外国炭			
			A	B	C	
乾炭高位発熱量	kcal/kg	6,040	6,494	6,900	6,970	
工業分析	固有水分	%	1.90	2.04	2.60	3.60
	揮発分	%	32.29	25.64	28.20	32.10
	固定炭素	%	40.91	55.74	57.30	53.10
全	灰分	%	24.90	16.58	12.00	11.10
	硫黄分	%	1.0	0.83	0.70	0.52
元素分析	炭素	%	59.86	67.76	71.98	69.30
	水素	%	4.08	3.53	4.12	4.50
	窒素	%	1.09	1.61	0.90	1.60
	酸素	%	8.07	8.41	10.02	12.60
	燃焼性硫黄	%	0.64	0.63	0.42	0.50
	フッ素	ppm	106	1,681	—	—

1. 火 炉
 - 形 式：横置水冷円筒形
 - 寸 法：内径2.2m×長さ9 m
 - 燃焼容量：最大13×10⁶kcal/h
2. 供試エアレジスタ
 - (1) デュアルエアレジスタ
 - (2) P.Gデュアルエアレジスタ
3. 供試石炭
 - (1) 国内炭：1,000kg/h
 - (2) 外国炭A：930kg/h
 - (3) 外国炭B：870kg/h
 - (4) 外国炭C：870kg/h
4. 空気温度：300°C
5. 火炉出口：O₂ 3.0%
6. 燃料分析

NOx低減を図るなかで図5に示すように未燃分を低減させることができた。

3 石炭燃焼システム

これからの石炭火力は、前章で述べたように環境改善、そ

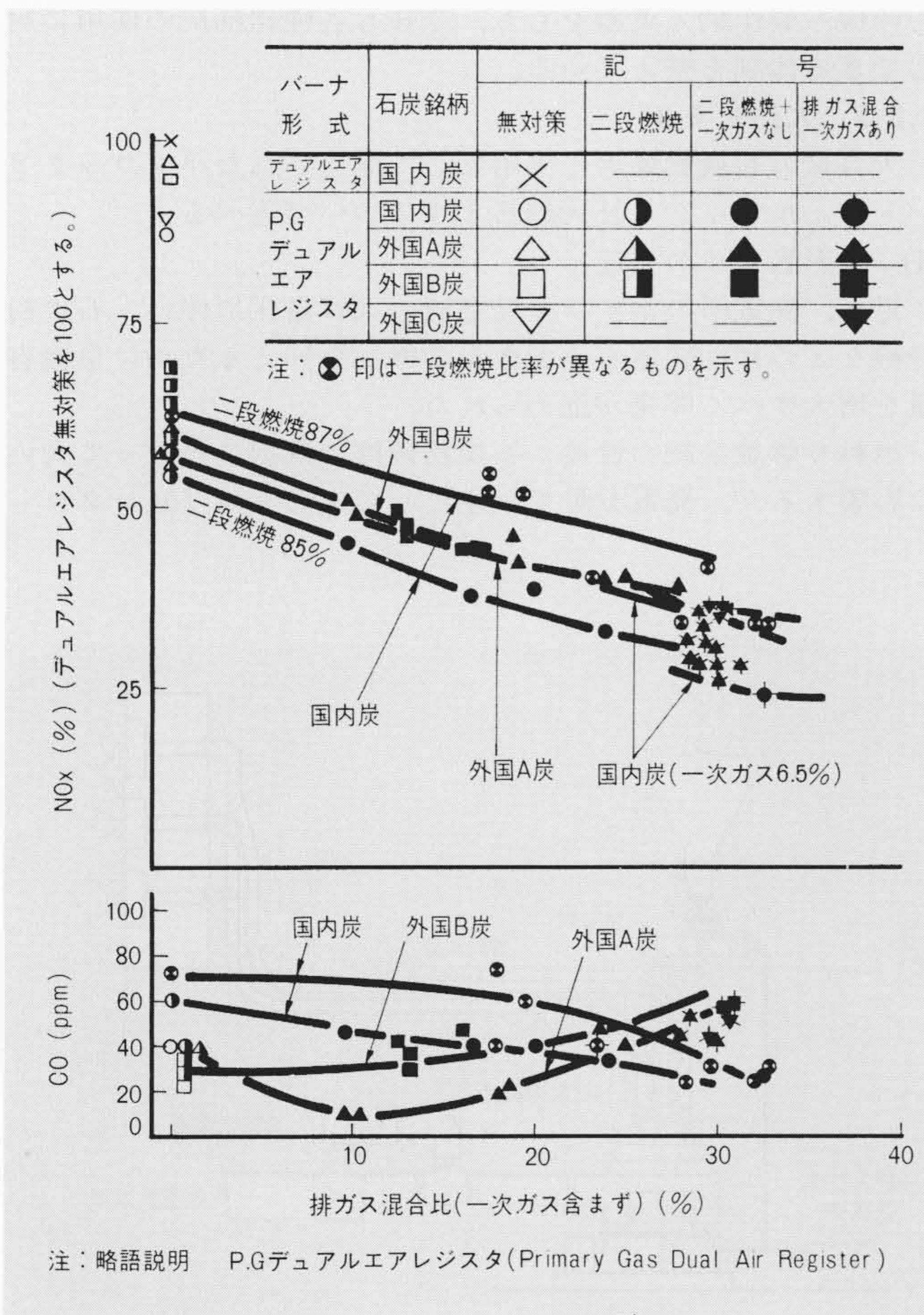


図4 工場燃焼炉試験結果 工場燃焼試験でのNOx低減方策とNOx, COのデータを示す。

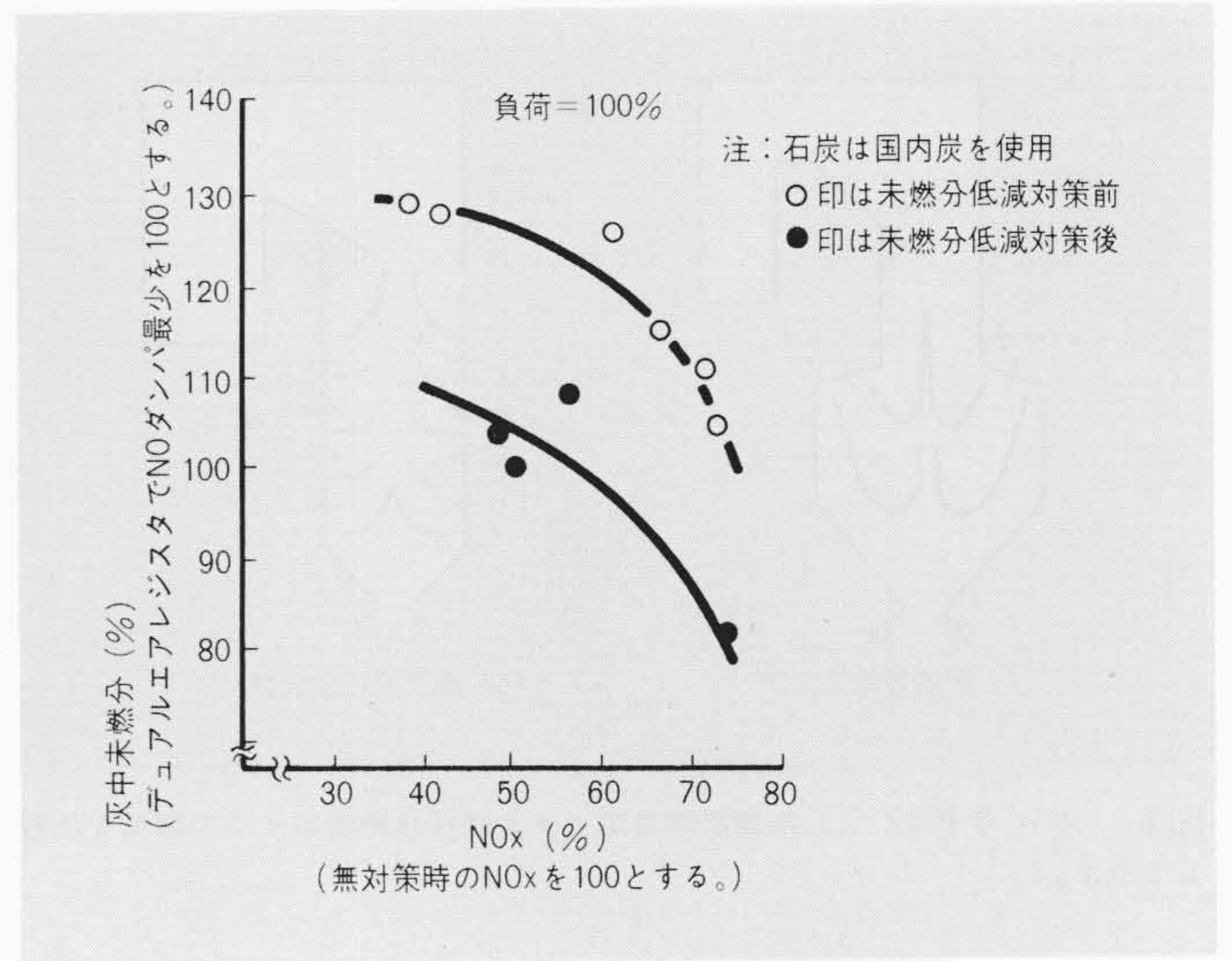


図5 NOxと未燃分 NOxの低減と未燃分増加を石炭燃焼調整の前後で比較して示す。

して諸外国の多種銘柄炭への対応性が要求される。

以下バブコック日立株式会社の石炭燃焼システムについて述べる。

3.1 ボイラ燃料としての石炭及びボイラ形式²⁾

石炭は、その燃焼性、ボイラ伝熱面、燃焼装置などの設計に対する指針を与えるために、炭化度により、表2に示すように褐炭、歴青炭及び無煙炭に大別される。

このようにして分類された石炭をボイラ燃料として使用する場合には、それぞれの石炭の諸性質に適したボイラ設計を行なうために各種の対策が必要であり、これらが設計上の特徴となって現われてくる。

(1) 無煙炭燃焼ボイラ

無煙炭は、石炭のなかで最も炭化度の進んだものとして区分されており、固定炭素分と揮発分の比では5.5以上、すなわち揮発分が約15% (無水無灰基準) 以下となっている。

このため、燃焼性が悪く通常、燃焼炉の形式を図6(a)に示すように徳利形(Wing Furnace)とし、火炎がU字形又はW字形を画くような燃焼をさせ、燃焼時間が十分確保されるように配慮される。

(2) 歴青炭燃焼ボイラ

歴青炭は、ボイラ燃料として比較的良質な石炭であり、我が国で現在稼働している石炭燃焼ボイラも、また今後建設予定の700MW, 1,000MW大容量石炭燃焼ボイラもこの分類に属する石炭が使用される計画である。

石炭中の揮発分は20~50%含まれているため比較的燃焼しやすく、図6(b)に示すようなボイラ構造としている。

今後我が国に輸入される石炭は低硫黄分1%以下、高窒素

表2 炭種別による石炭工業分析の一例 石炭の炭種別分類とそれら石炭の工業分析値の一例を示す。

分析値	単位	無煙炭	歴青炭	亜歴青炭	褐炭
水分	%	10.8	7.0	30.0	35.6
揮発分	%	3.6	37.5	32.6	26.9
固定炭素	%	44.6	39.3	31.6	26.6
灰分	%	41.0	16.2	5.8	19.9
高位発熱量(湿炭)	kcal/kg	3,435	6,120	4,520	3,556
硫黄分	%	1.0	4.3	0.34	2.4

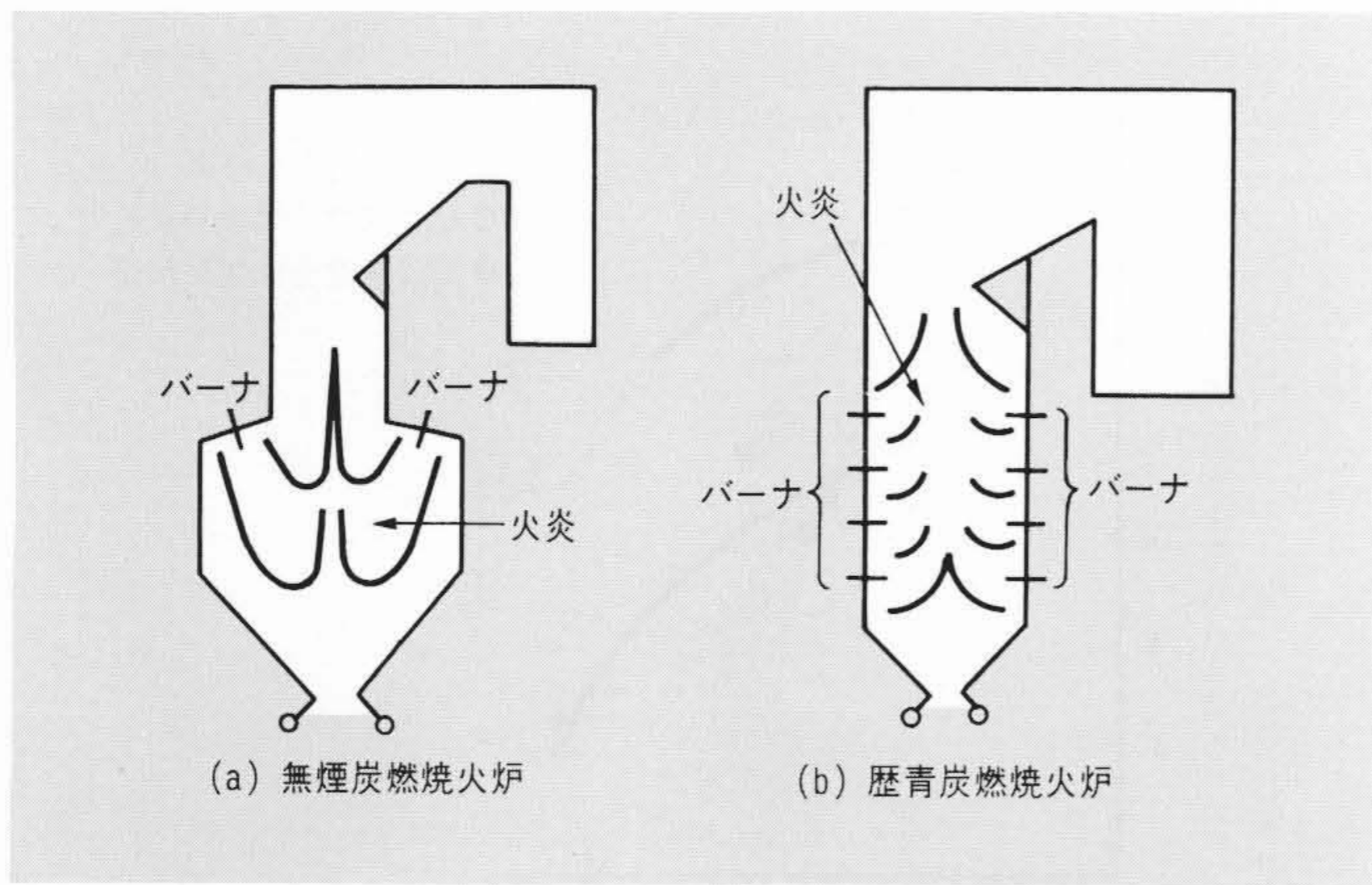


図6 ボイラ形状 無煙炭燃焼ボイラと歴青炭燃焼ボイラの構造を比較して示す。

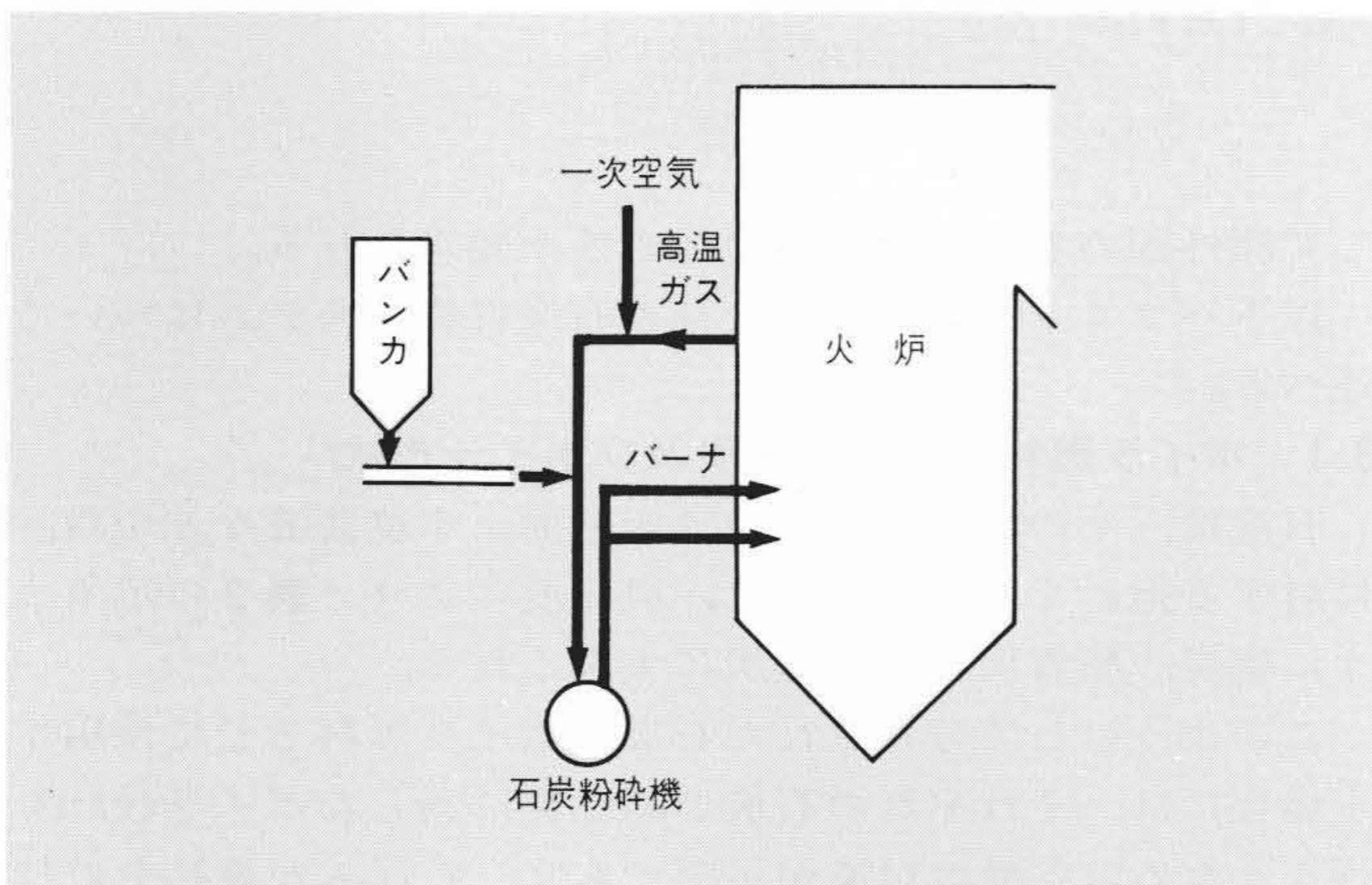


図7 褐炭燃焼概念系統 褐炭燃焼ボイラの石炭水分乾燥に関する概念系統を示す。

分1.8%以下及び燃料比(固定炭素%/揮発分%)1.5~2.4の歴青炭と予想され、燃焼技術面から窒素酸化物や未燃分の抑制、集塵器の効率など、従来技術に加え新たな検討が必要となり、このためバブコック日立株式会社では自社工場内の燃焼炉あるいは実缶で輸入炭の燃焼特性試験を実施し、研究を続けている。

(3) 褐炭燃焼ボイラ

褐炭は炭化度の低いもので、35%以上の水分を含んでいる。この多量に含まれている水分を乾燥させるためには、高温の乾燥媒体が必要となり、50~60%の水分の場合では炉内燃焼ガスを石炭粉砕機に導入して微粉炭の乾燥、バーナ口までの搬送を行ない、35~40%の水分の場合には独立した一次空気予熱器に節炭器入口の高温ガスとの熱交換によって得られた高温空気によって、微粉炭の乾燥及び搬送を行なうように設計される。概念系統を図7に示す。

3.2 石炭燃焼システム系統

微粉炭燃焼方式には直接燃焼方式と貯蔵燃焼方式があり、燃焼装置系統及び構成機器は多少異なる。

(1) 直接燃焼方式

直接燃焼方式は、石炭粉砕機で粉砕された微粉炭を直接バーナに送る方式で、系統の一例を図8に示す。

直接燃焼方式の長所は、設備が簡単で取扱いが容易であること、設備費が低廉であること、予熱空気による石炭粉砕機

内部で乾燥が行なわれ、一般に乾燥機を省略できることなどが挙げられ、最近のボイラにはほとんどこの方式が採用されている。

(2) 貯蔵燃焼方式

貯蔵燃焼方式は、石炭粉砕機で粉砕された微粉炭を、いったん微粉炭貯蔵槽(ビン)に入れて蓄えておき、微粉炭フィーダにより必要量を空気流に載せてバーナに送る方式である。

図9は石炭粉砕機としてチューブミルを用いた場合の単位貯蔵式の系統例を示す。

貯蔵燃焼方式の長所は、微粉炭の燃焼率が石炭粉砕機の容量により直接制限を受けないので、ボイラ負荷の変動に追従しやすいこと、石炭粉砕機はボイラの負荷に関係なく、その最高効率で運転できること、また石炭粉砕機故障の場合でも、ある時間貯蔵した微粉炭でボイラの運転が可能であることなどである。

3.3 石炭粉砕機

3.3.1 石炭粉砕機の種類

石炭粉砕機は、バーナとともに微粉炭燃焼装置の最も重要なもので、その性能は、ボイラの安定した運転を左右するものである。

バブコックアンドウィルコックス社の石炭粉砕機は、主に下記のようなものがあり、表3に構造及び仕様比較を示す。

- (1) チューブミル
- (2) Eミル(リングボールミル)
- (3) G.Sミル(ハンマミル)
- (4) ハンマクラッシャ

バブコック日立株式会社では、上記のいずれの形式の石炭粉砕機も製作納入実績をもち、今後も各種銘柄炭の使用に対応できる体制を整えている。

3.3.2 大形Eミル

大容量の石炭燃焼ボイラ用として開発されたバブコックアンドウィルコックス社大形Eミルについて述べる。

(1) 大形Eミルの発達

近年、発電所のボイラや発電機の大容量化に伴い、石炭粉砕機などの補助装置も極力数量の増加を抑えるために単機容量を増大すべく開発が進められた。

燃料や燃焼系統の性能が石炭粉砕機を選択に当たって大いに影響するが、発電分野では主として縦形ミル(リングロー

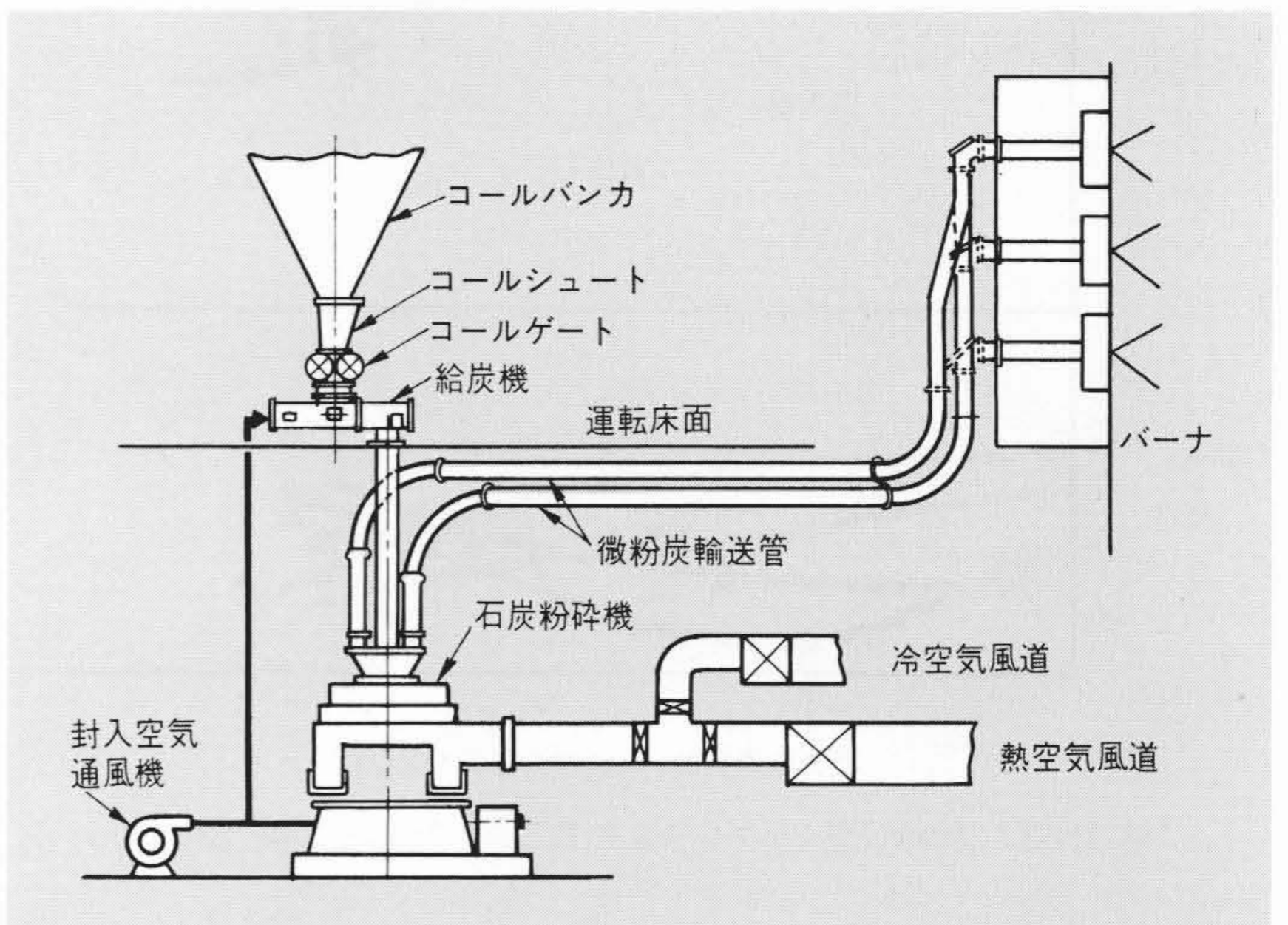


図8 直接燃焼式石炭燃焼装置系統 Eミルを使用した直接燃焼式石炭燃焼装置の概略系統を示す。

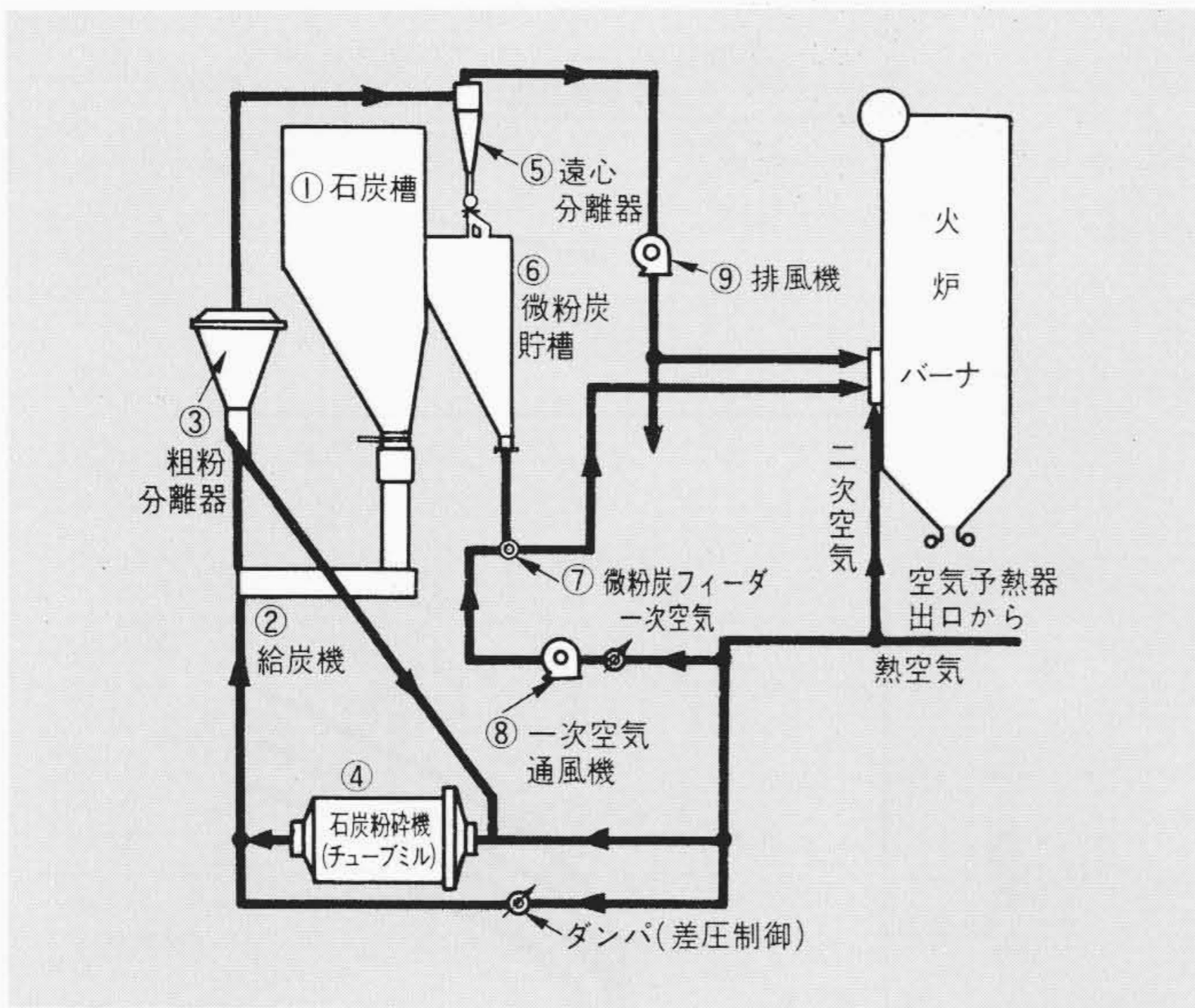


図9 単位貯蔵式石炭燃焼装置系統 チューブミルを使用した単位貯蔵式石炭燃焼装置の概略系統を示す。

ルミル、リングボールミルなど) チューブミル、ハンマミルが使用される。

大容量ミルが開発された当初では、チューブミルが使用されており、修理が短時間で済むという長所があった。しかし、チューブミルは主として排炭機の併用が必要となるため、同ファンの修理に時間と費用がかかること、また消費電力が大きいという短所がある。更に、チューブミルに内圧を加えて直接燃焼方式にするためには、トラニオン部でシールし、ま

表3 各種ミルの比較表 各種ミル形式の比較を示す。

項目	形式	チューブミル	Eミル	GSミル	ハンマクラッシュ
粉砕作用		衝撃及び重力によって粉砕	重力及びばねなどを利用してすりつぶす。	衝撃によって粉砕する。	衝撃によって粉砕する。
粉砕部金属接触状態		各ボール及びボールとライナ点接触	接 触	無 接 触	無 接 触
形 式		横 形	縦 形	横 形	横 形
粉 碎 程 度		微 粉 碎	微 粉 碎	中 粉 碎	粗 粉 碎 中 粉 碎
大きさの範囲		小形~大形	小形~大形	小形~大形	中形~大形
パイライト除去		完全に粉になるまで粉砕。	パイライトボックスに落とす。	パイライトボックスに投げ込む。	除去不可
粉砕部の摩耗量調整		ボール補充	フィルインボール	な し	ハンマとスクリーンギャップ調整
騒 音		最も大	大	最も小	小
ファン通過空気		微粉炭及び空気	空 気	空 気	空 気
使用炭種		無煙炭 半歴青炭 歴青炭	半歴青炭 歴青炭	半歴青炭 歴青炭	半歴青炭 歴青炭
製作実績		あ り	あ り	あ り	あ り
適用炉形		乾式燃焼炉に使用	乾式燃焼炉に使用	乾式(褐炭), 湿式燃焼炉(サイクロン燃焼炉)に使用	湿式燃焼炉(サイクロン燃焼炉)に使用
微粉粒度試験方法		分離器ダンパ及び出口円筒	分離器ダンパ及び出口円筒	分離器ダンパ	ケージ調整
主な消耗品及びその使用限度		ボールシエラライナ	ミルボールリング	粉砕ヘッド アーマプレート	ハンマヘッド スクリーンバー, プレーカプレート

たボイラ負荷に合わせてミル出力を制御することが必要であり、この点が問題である。

チューブミルの開発は種々の問題を伴うため、それに代わるものとして多くの利点をもつEミル(リングボールミル)の大容量化が行なわれた。

大形Eミルは、スモールボールのELミルを更に改良したものでその目的は、

- (a) 動力消費の減少
- (b) 摩耗部の寿命の増大
- (c) 保守費の低減
- (d) 石炭粉砕機の直径を大きくしないでミル出力を増大させる。

ことであり、バブコック社グループ共同で研究が行なわれた結果、結論としては出力増加はミルボール径を大きくしてその数を少なくし、かつ回転数を下げることにより得られることが判明した。実機による調査結果より、同一のEミルに比べて大形Eミルの場合、ミル出力は約25%増加し、一方、動力消費がわずかではあるが減少して粉砕部の保守を著しく減じることが確認され、現在の大形Eミルが完成された。

大形Eミルの運転実績としては、ボイラに微粉炭燃焼方法が採用されて以来、バブコックアンドウィルコックス社では最初の30年間に約4,000台のEタイプミルが、その後は大容量のラージボールミルEタイプミルが業界の需要に応じており、約500台以上のミルが運転に入っている。これらのうち約40%が次の(2)で述べる10Eミルで、30%が8.5Eミルである。バブコック日立株式会社ではスモールボールEタイプミル136台、ラージボールEタイプミル59台を製作した。

(2) 形式及び仕様

現在までに開発された大形Eミルの形式及び仕様を表4に示す。

ここで、形式を示すアルファベットEの前にある7, 8.5などの数値は、粉砕リングレース径(×10in)を示し、アルファベットEのあとにある数値は粉砕ボールの数を示す。

(3) 構造

図10に大形Eミルの構造を示す。ミルは駆動部、粉砕部、加圧部及び分離部の四つの部分から構成されている。

表4 大形Eミル仕様一覧表 大形Eミル(リングボールミル)の仕様(容量, 出力ほか)比較一覧表を示す。

項目・単位	形 式	7E10	8.5E10	8.5E9	10E10	10.9E11	11.9E11	12E10	13E11	13E10
標準容量 (HGI=50, 粒度 200メッシュ70%)	t/h	17.3	27.4	30.5	40.6	45.7	56.9	64.0	71.1	76.2
電動機出力	kW	132	205	230	305	345	425	480	530	570
主軸回転数	rpm	45	40	40	37	37	34	34	34	34
連結方式		直 結								
給炭方式		中 央 給 炭								
リングレース径	mm	1,778	2,160	2,160	2,540	2,768	3,023	3,050	3,300	3,300
	in	70	85	85	100	109	119	120	130	130
同形状		上 下 リ ン グ 同 形								
ボール(中空) 外 径	mm	533	654	730	768	768	838	921	921	978
	in	21	25 3/4	28 3/4	30 1/4	30 1/4	33	36 1/4	36 1/4	38.5
同 数 量		10	10	9	10	11	11	10	11	10
フィルインボール 外径	mm	464	584	660	699	699	764	851	851	907
	in	18 1/4	23	26	27.5	27.5	30	33.5	33.5	35 3/4
	数量	1	1	1	1	1	1	1	1	1
リング加圧方法		N ₂ シ リ ン ダ 方 式								
分 離 器		可 動 ベ ー ン 形								

注: 略語説明 HGI(ハードグループインデックス)

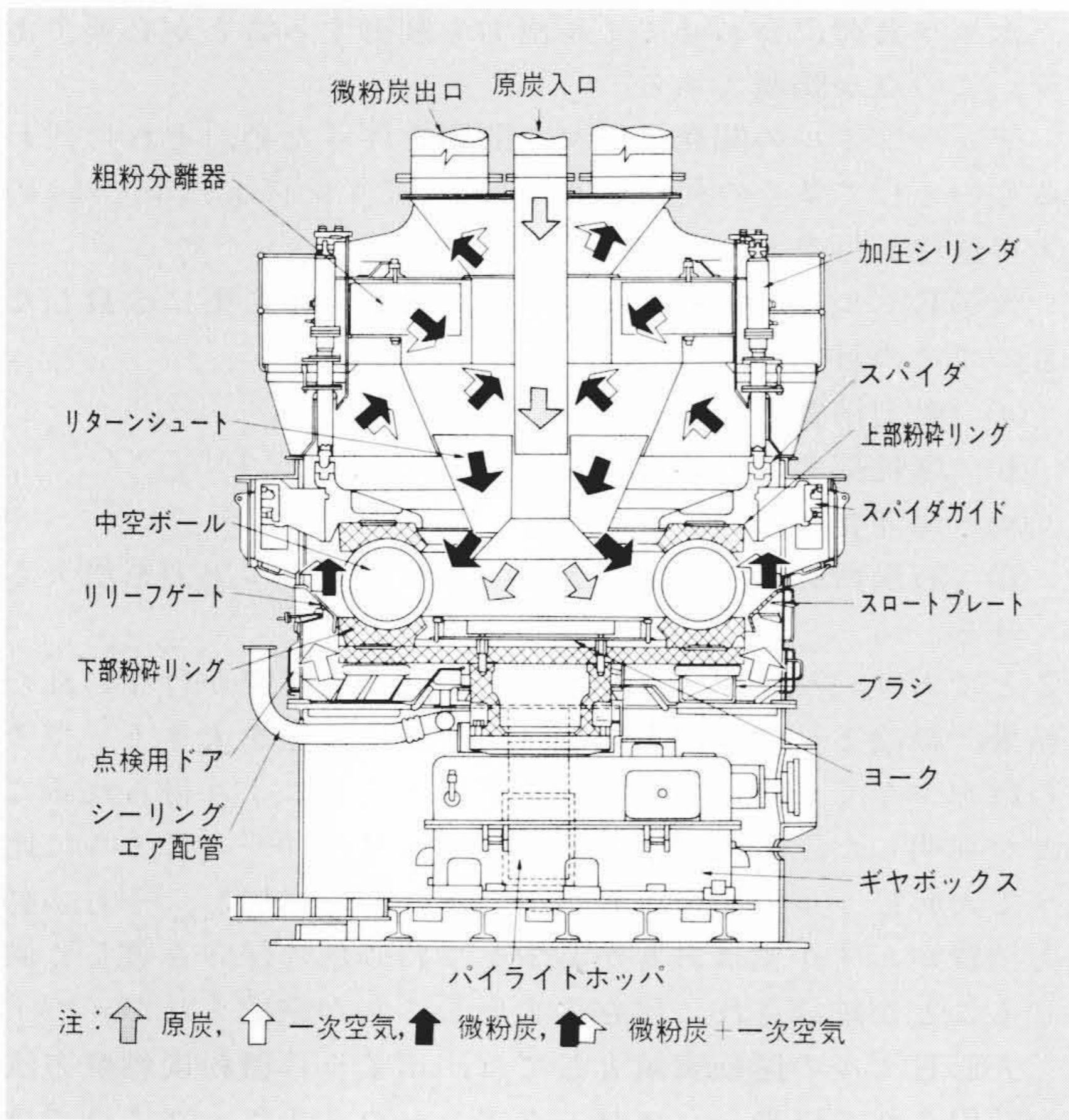


図10 大形Eミルの構造 大形Eミルの概念構造の断面及び原炭、一次空気、微粉炭の流れを示す。

駆動部はミル本体と分離可能な独立形のギヤボックスに内蔵されている。

粉碎部は上、下部粉碎リング、ボールなどから構成されており、下部粉碎リングはキーによりヨークに固定されている。上部粉碎リングはスパイダに固定され、加圧シリンダによって加圧されている。

加圧部はN₂ガスシリンダ、レバー装置などから構成され、圧力調整盤からのN₂ガス圧を、N₂ガス圧縮シリンダに受けてボールに圧力を加えるとともに、上部粉碎リングの回転を抑える役目をしている。

下部粉碎リングの回転につれて、ボールは上、下粉碎リングのレース面を自転及び公転しながら石炭を粉碎する。

石炭の乾燥と微粉炭輸送用の空気は、スロートプレートと下部リングの間の狭いスロート部を通り、急激に加速されて吹き出す。スロートプレートの一部にリリースゲートが設けてあり、給炭中の異物はこのゲートから排出される。

分離器は固定式で、調整ダンパにより空気流に旋回を起こし粗粉分離を行なう。

(4) 運転特性

ミルの出力制御は、燃料量要求信号により、一次空気ダンパと給炭機回転数とを同時に調整することにより行なわれる。したがって、微粉炭量とミルへの給炭量制御が同時に行なわれるため、ミル内には常に過不足なく石炭が送り込まれ、急激かつ大きな負荷変化に対しても十分な応答性を示す。

また、ミル出口空気温度を所定の温度に保つミル温度制御装置は、ミル出口温度を検出し、それが一定になるようにミル入口に設けられた冷空気ダンパを操作する。このダンパを通る冷空気が適量熱空気に混合されて、ミル入口空気温度をミルの負荷及び石炭表面水分乾燥に必要な所定の温度に調整する。

大形Eミルの特性として、図11(a), (b), (c)に電動機出力、一次空気温度、一次空気量及び圧力損失とミル負荷の関係を示す。

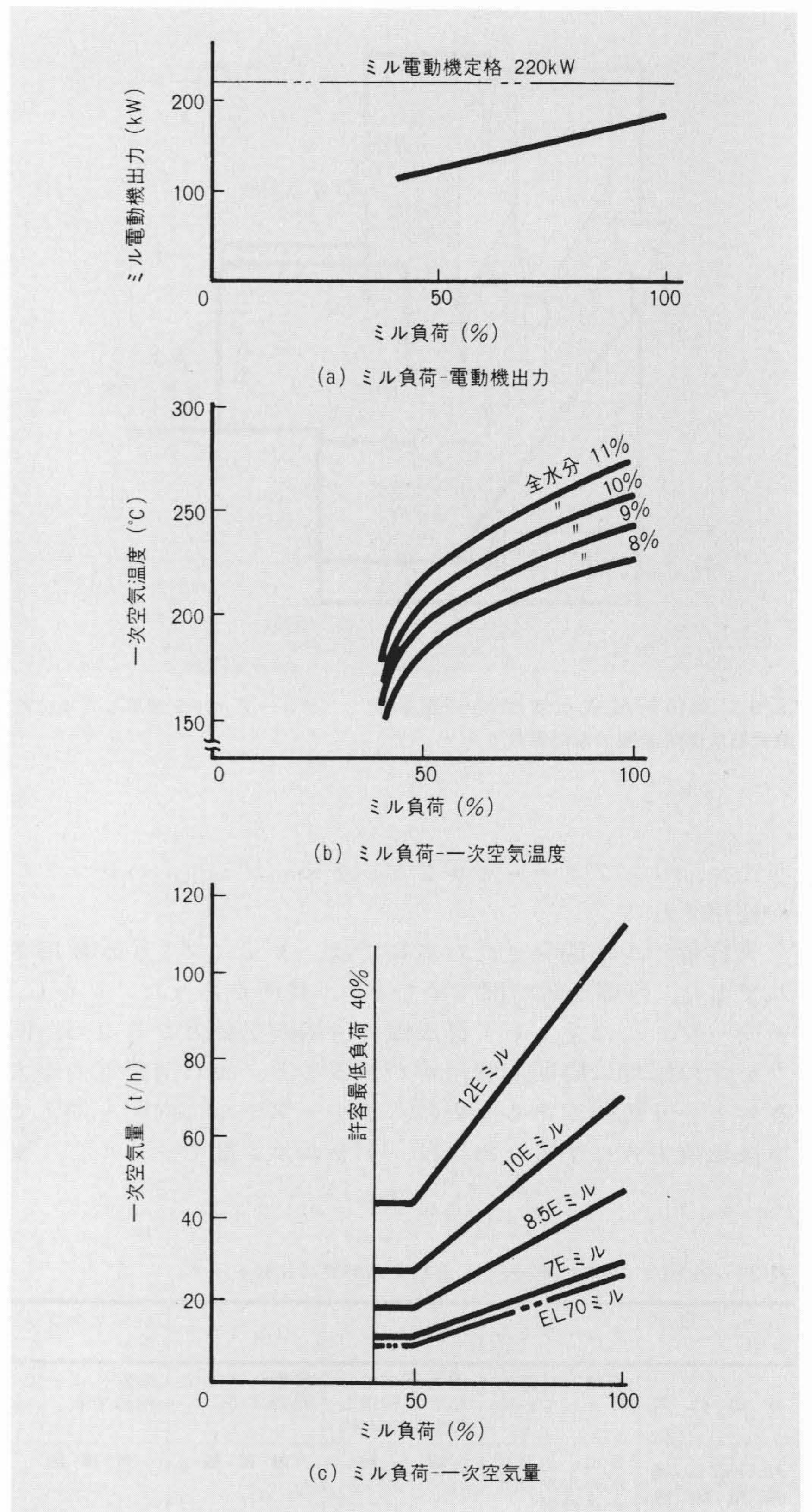


図11 ミル負荷-電動機出力ほか 大形Eミルの特性として、電動機出力、一次空気温度及び一次空気量を示したものである。

4 結 言

以上、石炭燃焼ボイラの燃焼システムと題し、これからの石炭燃焼プラントに要求される環境改善形、多種銘柄炭使用に対応した燃焼設備について述べた。

今後、国内外を問わず、大容量石炭燃焼プラントの計画が増加するなかで、諸外国炭固有の性状に対して更に環境改善燃焼技術を早急に開発し、合わせて燃焼効率の向上、及び補機動力の節減を配慮した省エネルギー形の燃焼システムの確立を進めてゆく考えである。

参考文献

- 1) 益子, 外: 低NO_x石炭バーナ, 火力原子力発電, 29, 6, 29~34 (昭53-6)
- 2) 高山, 外: 石炭燃焼ボイラの設計, 火力原子力発電ニュース, 第76号, 11~16 (昭54-8)