

三菱低揮発分炭だき新低 NOx CUF ボイラの開発と実用化

Development and Operation Results of
Mitsubishi Low-Volatile Matter Fired New Low NOx CUF Boiler

技術本部 徳田君代^{*1} 岡元章泰^{*2}
原動機事業本部 荒川善久^{*3}
長崎造船所 前田隆之^{*4} 中原強^{*5}

最近、エネルギーの有効利用の観点から、石炭だきボイラ燃料として低揮発分炭を使用する要求が増加している。低揮発分炭は、通常のれき青炭に比べ着火、燃焼性に劣り、NOx、未燃分共に大幅に増加することが予想される。当社は、低 NOx でかつ低空気比でも安定燃焼可能な CUF (Circular Ultra Firing) 方式に加え、操作性、保守性に優れかつ従来型 PM (Pollution Minimum) バーナの低 NOx、高燃焼性能を上回る A-PM (Advanced-PM) バーナを開発、実用化した。運転実績では、自家発用微粉炭だきボイラとしては世界最高レベルの低 NOx、高効率燃焼を達成し、現在順調に稼働中である。

There is a growing demand for the use of non-bituminous coal in coal fired boilers in order to achieve effective energy utilization. However it is more difficult to ignite and maintain the combustion of non-bituminous, in comparison with bituminous, coal. An advanced type PM burner (Advanced-Pollution Minimum burner), which was developed from original PM technology burner, was applied this new low NOx CUF boiler. The A-PM burner has a simple construction which provides good operability and maintainability. The A-PM burner combined with CUF (Circular Ultra Firing) and MACT (Mitsubishi Advanced Combustion Technology) systems, have high combustion efficiency and low NOx emission characteristics. This boiler achieves the lowest NOx emissions and the highest thermal efficiency of any industrial pulverized coal-fired boiler, and has been operating successfully since it started commercial operation in November 1996.

1. まえがき

我が国の電力需要は今後も増加していくことが予想され、事業用・産業用及び IPP (独立発電事業) 用向けの発電設備の建設が行われ、特に燃料の安定供給・経済性を考慮して石炭だきボイラが多く計画されている。また石炭だきボイラの中でも、微粉炭だきボイラは蒸気条件の高圧高温化や急速起動、負荷追従性に優れており、実績も多く信頼性が高い。

しかし、石炭は灰や硫黄を含むだけでなく、重油の約 10 倍の有機窒素分を含有しているため、NOx 発生量が多いとされてきた。

今回採用した A-PM (Advanced-Pollution Minimum) バーナは微粉炭の濃淡分離器を内蔵型とし、一つの微粉炭流の中で濃淡の分布を形成させることにより、バーナノズル数及びダンバ数を低減し、操作性、保守性を向上させ、かつ従来型 PM バーナの低 NOx、高効率燃焼性能を上回るバーナである。

本報では、A-PM バーナの開発研究の成果とこれを採用した平成 8 年 11 月に運転した(株)神戸製鋼所加古川製鉄所向け 450 t/h ボイラの特徴と運転実績を紹介する。

2. 新型 A-PM バーナの開発研究

2. 1 A-PM 低 NOx 化の基本思想

A-PM バーナにおいて、従来 PM バーナより一層の低 NOx 化を図る上での基本概念は以下のとおりである^{(1)~(3)}。

(1) バーナ着火部

この領域では、低 NOx 化のために低空気比、高温化が必要となる。微粉炭濃度を濃淡に分けて行う PM バーナは、着火が良く高温燃焼が得やすいので、元来優れた低 NOx 特性を有する。従来型 PM バーナでは上下に完全に分離された濃淡微粉炭流を、A-PM バーナは同心円上に配置する形で一つにまとめ、バ

ーナ全体での着火の向上を図り、より一層高温で低空気比の NOx 還元域を形成するバーナとした。

(2) バーナ部~AA (Additional Air) 間

この領域では、良好な混合及び十分な滞留時間が、低空気比と高温化に加えて必要である。局部的な酸素過剰領域は逆に NOx を生成するため、炉内空気比を可能な限り均一とすること及び燃焼 (酸化) 反応後の NOx 還元域における実質滞留時間を拡大することが重要である。このため NOx 還元域をバーナ着火部近傍に形成した後は空気拡散を促進し、短炎化を図ることによって実質滞留時間を拡大する。この際、旋回燃焼方式であることは空気比の均一化及び実質滞留時間の拡大に有効であるが、今回更にバーナ風箱を分離することにより火炉高さ方向の空気噴流を分割し、炉内流動の最適化及び NOx 還元域の拡大を実現した。

(3) AA 後部

アディショナルエア投入後は、低温・低空気比とすることが必要となる。ただし、この領域では低空気比がそのまま高未燃分化となるため、特に均一な炉内空気比低減が必要である。

AA の投入を 2 段化した均一炉内拡散法を採用することにより、NOx、CO 共低減することができる。本ボイラでは A-PM バーナと組合せて採用した。

2. 2 A-PM バーナの構造

今回 A-PM バーナを計画するに当り、燃焼性能にとどまらず構造の簡素化、操作性、耐久性等の面からも検討を加えた。A-PM バーナの構造上の特徴は次のとおりである。

- (1) 微粉炭の濃淡分離器を内蔵型とし、一つの微粉炭流の中で濃淡分布を形成した。
- (2) 分割型バーナ風箱とした。(従来は一体型バーナ風箱)
- (3) バーナノズル数を低減した。

*1 長崎研究所次長

*2 長崎研究所火力プラント研究推進室

*3 原動機技術センターボイラ技術部ボイラ技術二課長

*4 火力プラント設計部陸用ボイラ設計二課長

*5 火力プラント設計部陸用ボイラ設計一課

三菱重工技報 Vol. 35 No. 1 (1998-1)

表1 計測項目及び計測装置
Measuring items and instruments

計測項目	計測装置	計測位置
給炭量	ロードセル	PC ピン
微粉炭の粒度分布	JIS 標準	ミル出口
排ガス分析	O ₂ 測定	ジルコニア磁気式
	CO 測定	非分散形赤外線式
	NO _x 測定	化学発光式
火炎温度	光高温計	炉のぞき窓
灰中未燃分	JIS 標準	サイクロンセパレータ 及びバグフィルタ

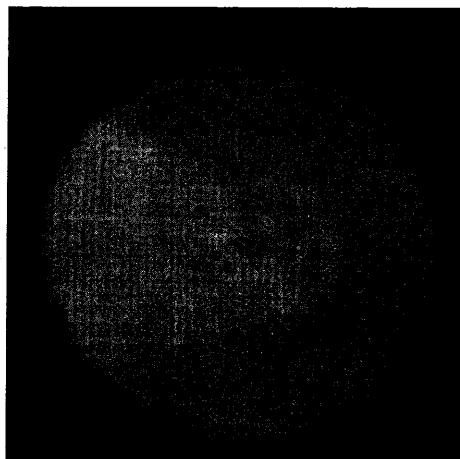


図1 A-PM バーナの燃焼状況
Flame of A-PM burner

2.3 A-PM バーナの開発試験

本ボイラに採用されている A-PM バーナの開発に当ってまず、シミュレーション解析による微粉炭管内流れの予測を実施し、この予測を基にバーナ及び内蔵型微粉炭濃淡分離器形状を計画した。次にバーナ内部の流動特性を確認するために、実機サイズバーナによるコールドフロー試験を実施した。最後に 4 t/h 規模の燃焼試験を実施し、バーナ形状の最終決定及び性能の確認を行った。

(1) シミュレーションによるバーナ部流動解析

本 A-PM バーナに内蔵される微粉炭濃淡分離器の最適形状と配置を決めるため、固気混相流シミュレーションを実施した。PM バーナに不可欠で、かつ重要な一次空気中石炭の濃淡分離器の最適化に当っては、従来の濃淡分離性能を維持しつつ、分離器の簡素化及びコンパクト化を図ることを基本思想として、ダクト内蔵型濃淡分離器を対象にシミュレーション検討を行った。最終的には PM バーナの特徴である濃淡燃焼の特性を發揮するために必要な分離性能を確保している分離器形状を決定した。

(2) コールドフロー試験

シミュレーションで得られた結果を基に設計したバーナの微粉炭流動特性を、実機サイズバーナを用いたコールドフロー試験により検証した。試験は実機の微粉炭管形状を模擬し、実機と同一サイズ、管内流速、気固比 (Air/Coal) 及び微粉炭濃淡分離器にて空気と微粉炭を搬送し、ノズル出口における微粉炭分布を計測した。その結果、内蔵型微粉炭濃淡分離器が計画どおりの良好な分離性能であることを確認した。

(3) 燃焼試験

燃焼試験は、当社長崎研究所の 4 t/h 燃焼試験設備を使用して実施した。計測項目を表1に示す。炉本体は内径 4.4 m、長さ

表2 供試炭分析値
Analysis of coals tested with burner

項目	銘柄	H 炭	
全水分	(%)	8.1	
表面水分	(%)	5.6	
工業分析 (恒温)	水分	(%)	3.3
	固定炭素	(%)	52.3
	揮発分	(%)	30.3
	灰分	(%)	14.1
	高位発熱量 (kcal/kg)		6700
	全硫黄	(%)	0.44
元素分析 (無水)	C	(%)	71.8
	H	(%)	4.6
	S	燃焼性 (%)	0.42
		不燃性 (%)	0.03
	O	(%)	7.0
	N	(%)	15.3

20 m の二重壁となっており、海水で冷却されるが、内壁の一部には耐火材をライニングしており、炉温を実機並みに高く保持して微粉炭の自己着火性、NO_x 発生、灰中未燃分を実缶並みにするよう工夫してある。燃焼用空気は、押込み通風機 (FDF) によりまず空気予熱機 (AH) に送られ、ここで実缶と同じ 300 °C 前後の温度まで加熱されてバーナに送られる。このうちの一部はオーバファイアエア (OFA) として、バーナ後流の炉周壁から炉内に吹込まれる。その他、微粉炭搬送用一次空気としても分岐され、冷空気と混合されて所定の温度で微粉炭ビン (PC bin) 下部に至り、フィーダにより切出される微粉炭をバーナに搬送する。本設備には、重油ライン・軽油ラインも通じており、前者は重油たき上げによって火炉壁耐火材が所定の温度に達した後微粉炭が投入される。炉に吹込まれた微粉炭は、最初はイグナイタの助燃で着火し、数分経過後は炉内のふく射熱で自己着火し燃焼する。この炉にて、最適形状・配置の内蔵型微粉炭濃淡分離器を備えた実機模擬のバーナについて燃焼試験を実施した。

表2に試験で用いた石炭性状、及び図1にバーナ部着火状況を示す。OFA 量変化、負荷変化等いずれの条件においても安定な着火及び燃焼状況を達成し、NO_x、未燃分共計画を満足する良好な値であった。またバーナノズルメタル温度もすべて問題なく、試験終了後の炉内点検においてもバーナの焼損は皆無であった。

3. 450 t/h CUF ボイラの特徴

3.1 計画概要

(株) 神戸製鋼所加古川製鉄所第7号ボイラは高効率発電用ボイラであり、高効率化、信頼性向上及びランニングコスト低減のため、新技術や従来の大型事業用ボイラで採用されている各種技術を数多く適用している。本ボイラは平成8年11月に運転を開始し、現在順調に操業を継続中である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

3.2 ボイラ設備

本ボイラは高効率化のため主蒸気条件が 174 kgf/cm²G × 569/541°C という自家発では高い蒸気条件を採用している。

主な特徴としては次の項目が挙げられる。

(1) 自然循環、再熱温度ダンバ制御の採用

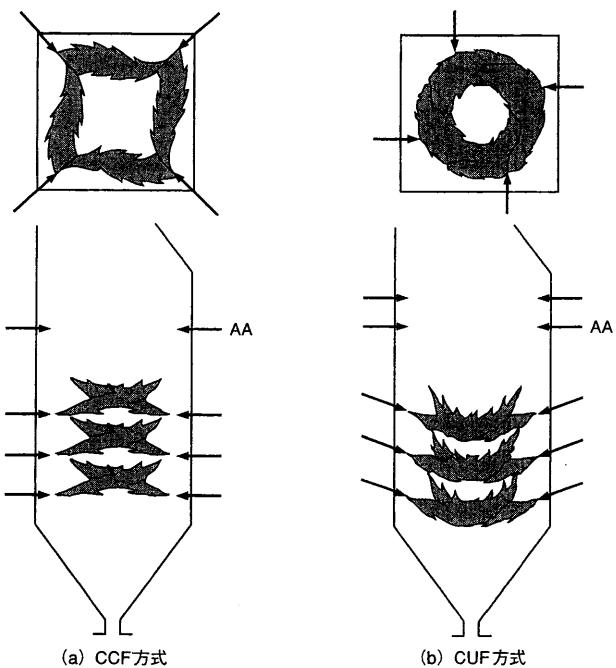


図2 CUF方式 CCF方式と CUF方式の比較概念図を示す。
Firing system of CCF and CUF

当社最高圧力の自然循環型ボイラを採用し、ボイラ水循環ポンプを取りやめた。また事業用ボイラで採用されている再熱蒸気ダンバ制御を自家発ボイラでは初めて採用し、ガス再循環ファンを取りやめた。これらにより補助動力の低減、メインテンス性の向上を図った。

(2) CUF (Circular Ultra Firing) 方式の採用

石炭だきボイラで多くの実績があるCCF (Circular Corner Firing) 方式を改良した CUF 方式を採用した。図2に CCF 方式と比較した CUF 方式の概念図を示す。 CUF 方式はバーナを火炉壁中央寄りに配置し、かつ燃料と空気をやや下向きに投入し火炉全体で旋回燃焼させる燃焼方式である。そのため CCF 方式と比較してバーナ部のふく射強度が増大し、安定で高効率な燃焼が可能となった。また、従来燃焼が難しいとされてきた低揮発分炭の燃焼性がより向上した。

(3) A-PM バーナの採用

図3に従来型 PM バーナと A-PM バーナの構造比較を示す。 A-PM バーナは内蔵型の濃淡分離装置を用いることにより、一つの微粉炭流のなかで濃淡分布を形成させる構造としている。このバーナの採用により、操作性、保守性の向上を図るととも

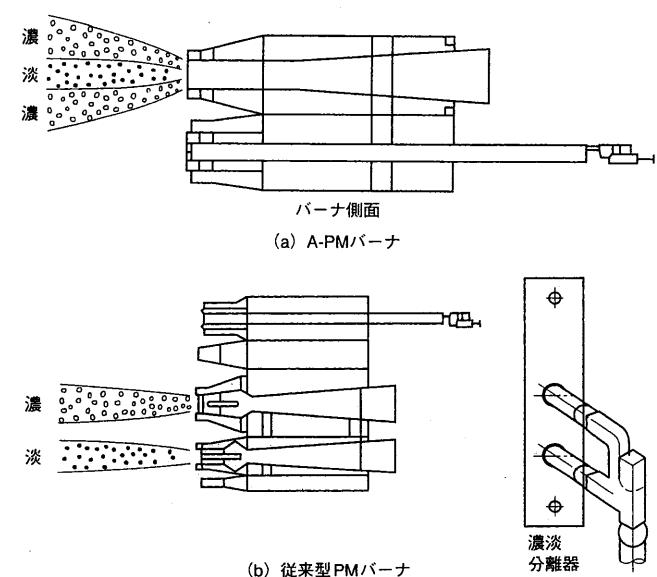


図3 A-PM バーナ 従来の PM バーナと A-PM バーナの構造比較
A-PM burner

に、燃料・空気の拡散混合性が更に改善され、火炎の高温化、短炎化が達成され、低 NOx、高効率燃焼が可能となった。

(4) AA の均一炉内拡散法

アディショナルエアを 2 段化し、上段と下段の空気投入方向を変えることにより、火炉上部での空気比均一化を図っている。

4. 450 t/h CUF ボイラの運転実績

4. 1 ボイラ性能

平成 8 年 11 月に実施した性能試験結果及び平成 8 年 12 月に実施した低揮発分炭燃焼試験を表 3 (a) に、また性能試験及び試運転に使用した石炭性状を表 3 (b) に示す。

ボイラ効率（低位発熱量基準）は、性能試験時において 94.4 %、燃焼性に劣るとされてきた低揮発分炭燃焼試験時においても 93.5 %（いずれも計画条件補正後）と、石炭だきとしては極めて高いボイラ効率が達成できた。

4. 2 燃焼試験

4. 2. 1 燃焼特性

燃焼状態は、バーナ着火性、燃焼安定性共に良好であり、火炎の輝度も高い。特に Ex. O₂ が 2 % 以下の低空気比運転時でも燃焼状態は非常に安定している。またアディショナルエアを投入し、

表3 ボイラ性能試験結果と使用炭の性状

Results of boiler performance test and used coal analysis

(a) ボイラ性能試験結果

項目	単位	計画値	性能試験結果	低揮発分炭燃焼試験結果
蒸発量	t/h	450	451	456
蒸気圧力	kgf/cm ² G	174	171	171
蒸気温度 (SH/RH)	℃	569/541	569/542	569/541
給水温度	℃	274	271	271
使用燃料	—	A 炭	A 炭	A 炭 (66 %), B 炭 (34 %)
ボイラ効率 (低位基準)	%	92.9 [91.8]	94.4	93.5
NOx 濃度 (ECO 出口)	ppm (O ₂ = 6 %)	150 [200]	122	172
灰中未燃分	%	5 [12.4]	4.5	7.9
O ₂ 濃度	%	3.6	3.4	3.8

[] 内数値は、A 炭 (66 %) + B 炭 (34 %) 混焼時の計画値を示す。

項目	単位	A 炭 (れき青炭)	B 炭 (低揮発分炭)
表面水分		%	12.3
工業分析 気乾ベース	固有水分	%	4.2
	固定炭素	%	51.5
	揮発分	%	33.1
	灰分	%	11.2
元素分析 無水ベース	炭素	%	72.3
	水素	%	4.6
	硫黄	%	0.51
	酸素	%	9.3
	窒素	%	1.67
高位発熱量	kcal/kg	6 750	7 460

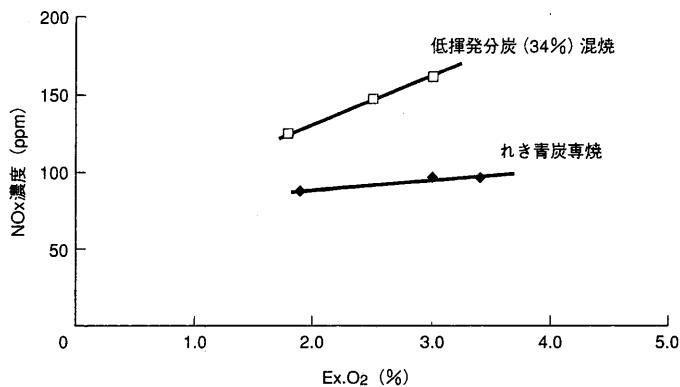


図4 れき青炭専焼及び低揮発分炭混焼におけるEx. O₂変化によるNOx発生特性 A-PMバーナ+CUF方式により、れき青炭専焼時だけでなく低揮発分炭混焼時においても低NOx、低空気比が達成できた。
NOx emission vs. Ex. O₂ for bituminous coal firing and low-volatile matter coal mixed firing

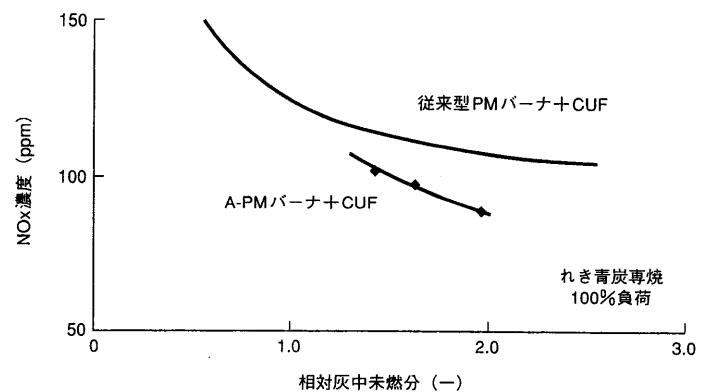


図5 れき青炭専焼時のPMバーナ型式によるNOx、未燃分特性 A-PMバーナは、従来型PMバーナと比較して良好なNOx、未燃分低減効果が得られる。
NOx emission vs. unburned carbon in fly ash for type PM burner at bituminous coal firing

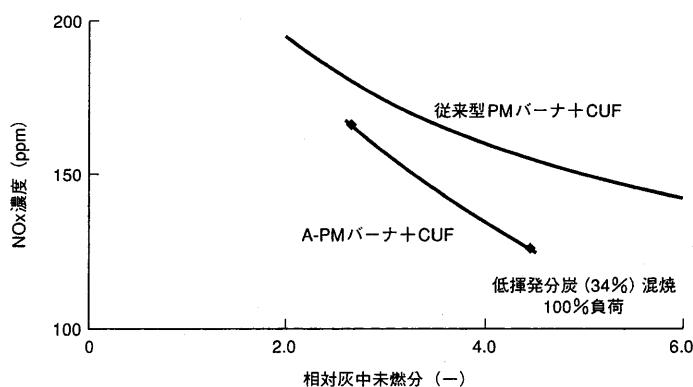


図6 低揮発分炭混焼時のPMバーナ型式によるNOx、未燃分特性 低揮発分炭混焼時においても、A-PMバーナは従来型PMバーナを上回るNOx、未燃分低減効果が得られる。
NOx emission vs. unburned carbon in fly ash for type PM burner at law-volatile matter coal mixed firing

主バーナ燃焼域が還元域となっても全く燃焼性は問題なかった。この特性は、れき青炭専焼時のみならず低揮発分炭とれき青炭の混焼時でも確認できた。

図4にれき青炭専焼時及び低揮発分炭とれき青炭の混焼時の節炭器出口O₂とNOx濃度の関係を示す。着火、燃焼性に劣る低揮発分炭混焼時においてもEx.O₂を2%以下に絞ることが可能であった。また、れき青炭専焼時にはボイラ出口NOx濃度が89ppmと同規模の微粉炭だきボイラとしては世界最高レベルの低NOxを達成した。

次に、れき青炭専焼時のNOx発生特性を図5に示す。同規模の従来型PM+CUFボイラとのNOx濃度の比較では、約1~2割のNOx低減効果が確認された。また、低揮発分炭とれき青炭の混焼時のNOx発生特性を図6に示す。この場合においても、同規模の従来型PM+CUFボイラの予想特性と比較しても良好なNOx低減効果が確認された。

CUF方式の特長である低空気比運転での燃焼安定性に加え、従来型PMを上回るA-PMのNOx低減効果、高効率燃焼を裏付ける結果が得られた。

4.2.2 ふく射強度特性

図7にバーナレベルにおける、炉幅方向のふく射強度分布を示す。CUF方式では水平方向の分布が平坦になっている。これから、バーナがふく射強度が低下するコーナに設置されているCCF方式よりも着火が安定し、火炉全体が有効に利用されていること

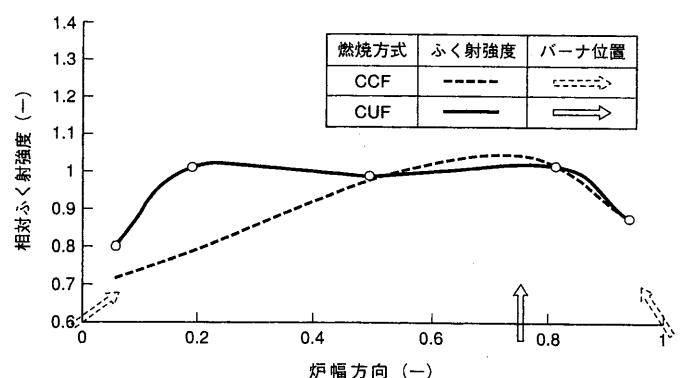


図7 炉幅方向のふく射強度分布 炉幅方向全体にわたってふく射強度はほぼ平坦であり、安定した燃焼性が得られる。
Distribution of horizontal heat flux

が分かる。

5. むすび

本ボイラに採用したCUF方式により、低空気比や低揮発分炭混焼時においても燃焼安定性や炉内輝度は良好であった。また、A-PMバーナの採用により、シンプルで操作性、保守性に優れ、かつ従来型PMを上回る燃焼特性を得ることができ、同規模の微粉炭だきボイラとしては世界最高レベルの低NOx、高効率燃焼が達成できた。

本ボイラは、当初の期待どおりの高い性能を確認し、類似設計のボイラがIPP向けに現在製作中である。

終りに、本ボイラの計画、運転において御協力、御支援頂いた(株)神戸製鋼所加古川製鉄所の関係者に厚く感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 徳田ほか、自家発用無煙炭だきCUFボイラの開発、三菱重工技報 Vol.31 No.1 (1994-1)
- (2) 金子ほか、最新鋭低NOx A-PMバーナ、三菱重工技報 Vol.32 No.1 (1995-1)
- (3) 徳田ほか、低NOx・高効率石炭だき新形CUFボイラの開発と運転実績、三菱重工技報 Vol.33 No.1 (1996-1)
- (4) 中村ほか、145MW微粉炭だき発電設備、三菱重工技報 Vol.34 No.1 (1997-1)
- (5) 中村ほか、145MW微粉炭だき発電設備の概要と特徴、火力原子力発電 Vol.48 No.4 (1997-4)