

高効率クリーン燃焼方式の開発実用化

Development and Practical Application of Mitsubishi Highly Efficient and Clean Combustion Technology

原動機事業本部 金子祥三*1 菱田正志*2
技術本部 橋本彰*3 一ノ瀬利光*4

近年、発電プラントには発電単価及びCO₂（二酸化炭素）排出量低減、あるいは環境保全の観点から、従来に優る高効率、クリーン燃焼技術が要求されている。当社ではこれらのニーズに対応するため、石炭、油及びガスだきボイラ用の新燃焼方式や新型バーナ等の高性能燃焼機器開発に取り組んでおり、石炭だき用 A-PM バーナ、低揮発分炭だき用 UD バーナ、重質油用低O₂燃焼対応丸型 PM バーナ、排気再燃用バーナ等々、既に実缶で数々の高成績を達成している。

It is required to reduce electrical energy generation cost and CO₂ emission in view of environmental protection. MHI has thus developed highly efficient and clean combustion systems for fuels, such as gas, oil, coal. This paper introduces our test results for these highly efficient and clean combustion technologies.

1. ま え が き

近年、発電プラントには発電単価及びCO₂（二酸化炭素）排出量低減、あるいは環境保全の観点から、従来に優る高効率、クリーン燃焼技術が要求されている。当社は1971年以来ガス、油及び石炭だき低NO_x PM (Pollution Minimum) バーナ、炉内脱硝 MACT (Mitsubishi Advanced Combustion Technology) 法、回転式分級機付き高微粉度 MRS (Mitsubishi Rotary Separator) ミルを世界に先駆けて開発実用化してきたが、これらを上回る高効率燃焼技術の開発と実用化が強く望まれているのが現状である。

この様なニーズに対応するため、当社では石炭、油及びガスだきボイラ用の新燃焼方式、新形バーナ及び新形ミル等の高効率、クリーン燃焼技術の開発と実用化に取り組み、既に実缶での高性能達成に成功している。

表1に、各種燃料に対する高効率、クリーン燃焼技術への近年の取組み状況を示す。石炭燃料では、低NO_x、低未燃分化のためにバーナ着火性向上と炉内脱硝（NO_x還元）の強化、また無煙炭、

石油コークス等の極低揮発分燃料の安定着火、高効率燃焼を達成している。油、重質油燃料ではSO₃発生量低減のために超低O₂燃焼、油、ガス燃料では発電所のリパワリングと発電効率向上のために、ガスタービン出口の低O₂排気を燃焼用空気とし安定着火、高効率燃焼を可能とした排気再燃バーナの開発を終了し、実用化を達成している。

本報では、これら技術の開発、実用化状況について紹介する。

2. 技術の変遷

低NO_x PM バーナは、燃焼火炎を高濃度炎と淡濃度炎に分けることにより、大幅な低NO_x化が達成できることに着目し、ガスだきを1971年、油だきを1972年、石炭だきを1976年から開発実用化し、これまで新設、改造合せて各々約30缶（約11500 MW）、約90缶（約20000 MW）、約90缶（約25000 MW）と多数の納入実績を持つ。さらに、バーナ部で発生したNO_xを火炉上部の還元域でN₂に転換する炉内脱硝 MACT 法の納入実績についても1980年に開発実用化後約75缶（約18000 MW）に及んでいる。また、石炭だきボイラの燃焼性向上のために開発した回転式分級機付き高微粉度 MRS ミルは、回転羽根を使った衝突分級により、粗粒子のない高微粉度を達成可能とし、1982年開発後、250基以上を納入、実用化している。

図1は、石炭だきボイラの低NO_x燃焼技術の変遷を示したものである。現在、石炭だきにおいて、A-PM バーナと新A-MACT、MRS-IIミルの採用により、世界最高レベルの性能であるNO_x値80ppm（6%O₂換算）、灰中未燃分2%（燃料比2、N分2%）を達成するに至っているが、更なる低NO_x化のため、次世代の高性能バーナを開発中である。

3. 新燃焼技術の開発と実用化

3.1 石炭だき燃焼技術

石炭だきボイラの低NO_x、低未燃分化は、①バーナ口での微粉炭着火をいかに早く安定に行うか、②バーナ主燃焼域でいかに燃焼促進させて、発生NO_xを抑えるか、③主燃焼域で発生したNO_xを火炉上部でいかに還元（N₂への転換）するか、④火炉上部の2段燃焼で未燃分をいかに完全に燃え切らせるか、による。

表1 高効率、クリーン燃焼技術への取組み状況
Developments of highly efficient and clean combustion technologies

燃料	技術 (商品名)	技術のポイント	開発時期	実用化状況
石炭	A-PM バーナ	着火性向上、 シンプル構造	H 6年	1000 MW 実用化済み (H 10年)
	UD バーナ	低揮発分炭 着火性向上	H 7年	立型試験炉検証済み (H 7年)
	CUF	壁面バーナ配置、 着火性向上	H 4年	150 MW 実用化済み (H 4年) 700 MW 適用中
	MRS-II ミル	高微粉度、 粗粒カット	H 2年	1000 MW 実用化済み (H 10年)
	新 A-MACT	炉内脱硝強化	H 2年	1000 MW 実用化済み (H 7年)
油、 重質油	丸型 PM バーナ	超低O ₂ 燃焼	H 8年	150 MW 実用化済み 700 MW 適用中
	油だき排気 再燃バーナ	低O ₂ 安定着火、 炉内脱硝	H 6年	実規模検証済み
ガス	ガスだき排気 再燃バーナ	低O ₂ 安定着火、 炉内脱硝	H 6年	350 MW 実用化済み

A-PM: Advanced-PM UD: Ultra-Dense
CUF: Circular Ultra-Firing A-MACT: Advanced-MACT

*1 原動機技術センターボイラ技術部長

*2 原動機技術センター火力プロジェクト部プラント技術一課主務

*3 長崎研究所火力プラント研究推進室長

*4 長崎研究所火力プラント研究推進室主務

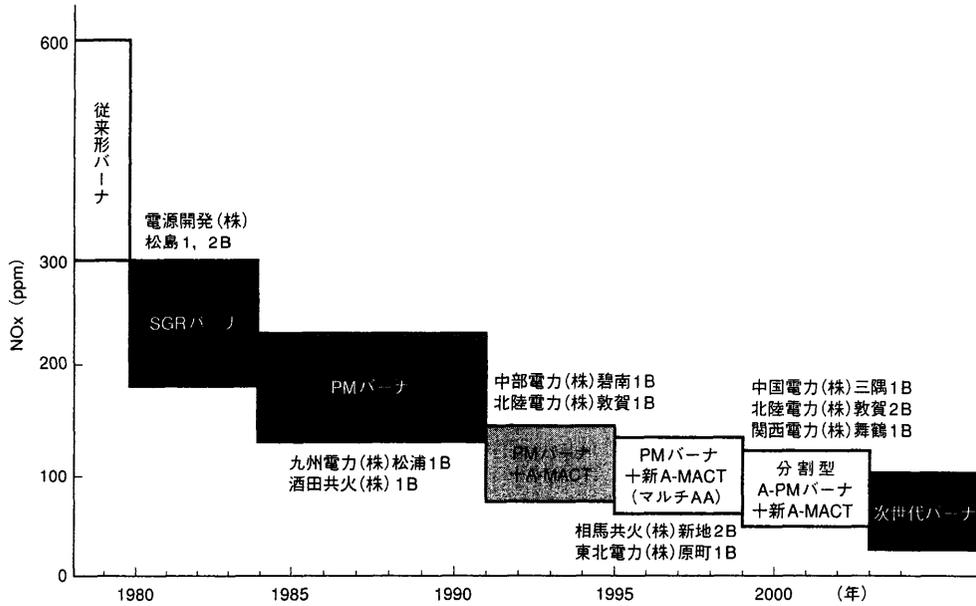


図1 石炭だきボイラの低NOx 燃焼技術の変遷
History of low NOx combustion technology for coal fired boiler

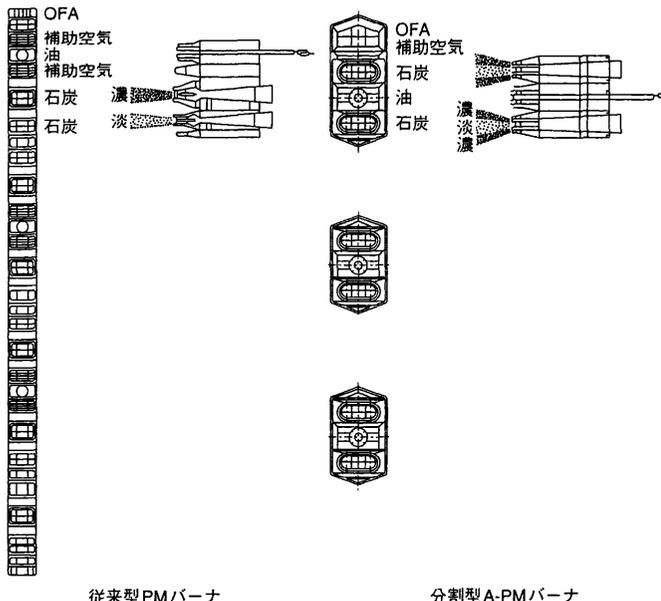


図2 A-PMバーナ構造図 従来型PMバーナとA-PMバーナの構造比較を示す。
Configuration of A-PM burner and PM burner

当社ではこれらの高性能化への課題を追求し種々新燃焼技術を生み出している。

①, ②の着火安定, 発生NOx抑制のために, 一般炭用としてA-PMバーナ⁽¹⁾(図2参照), 無煙炭, 石油コークス等極低揮発分燃料用にはUDバーナ⁽²⁾(図3参照)を開発した。

A-PMバーナは, 従来PMバーナの低NOx濃淡(Conc/Weak)火炎を一つのノズルで達成するコンパクト, 高信頼性のバーナで, 外周のぬれ縁の長い高濃度微粉炭流が炉内の高ふく射熱を受けることから着火性に優れている。火炉主燃焼域での燃焼促進とNOx発生抑制が可能であり, 1000MWボイラで実用化し, 従来型PMバーナを上回る高性能を確認済みである。

UDバーナは, 極低揮発分(5~6wt%以下)燃料の高効率(低未燃分)燃焼用に開発したコンパクトサイクロン方式のバーナである。

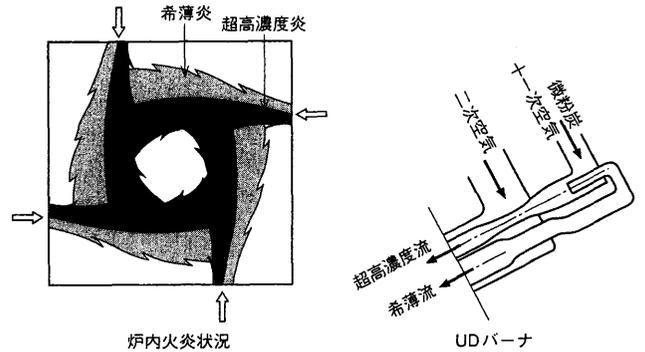


図3 UDバーナ構造図 バーナ前で超高濃度微粉炭流を形成する。
Configuration of UD burner

技術のポイントは, 低揮発分故の難燃性に対処するためバーナ噴出口で, 着火に最も有利な微粉炭濃度を設定したことにある。しかも, このバーナを火炉壁の熱負荷の高い位置に配置し, 超高濃度火炎は火炉中央, 希薄炎はその外周で燃焼させることにより低未燃分, 低スラッキング燃焼の同時達成が可能である。当社長崎研究所の立型試験炉で揮発分4.5%の無煙炭の低未燃分燃焼及び最低負荷30%までの安定燃焼を確認し, 実用化のめどを得ている。

A-PM, UDバーナ共, バーナから噴出する微粉炭濃度を着火に有利となるようバーナ構造の面から工夫したのものであるのに対し, 火炉内の熱負荷分布を考慮し最も着火に有利なバーナ配置としたCUF方式⁽³⁾⁽⁴⁾も開発している。CUF(図4参照)は, 微粉炭の着火に最も有利な火炉内でもふく射強度が高い火炉壁中央寄りにバーナを配置したもので, コーナ部に配置した従来型に比べ, バーナ部のふく射強度は1.5倍以上であり, 特に低揮発分炭だきボイラ用に適している。

既に国内産業用に数缶の納入実績を有しており, 着火性改善による大幅な低NOx, 低未燃分化を達成している。

また, 着火, 燃焼促進のために, 従来の回転式分級機付きMRSミルより更に高微粉度域での一層の安定運転可能としたMRS-IIミルを開発した。MRS-IIミルは, 微粉炭の高微粉度化に伴うミル内過粉碎を改善したもので, 分級機は固定式と回転式を組合せた

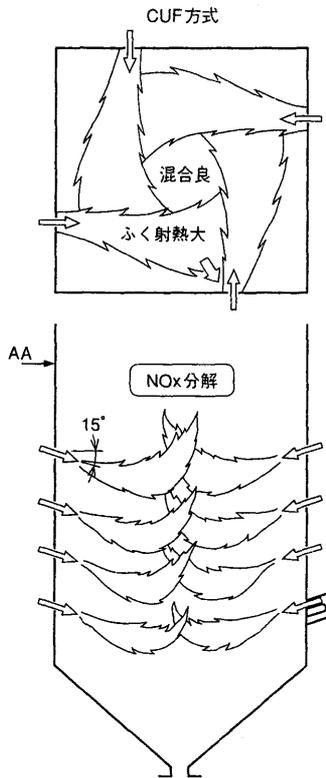


図4 CUF方式のバーナ配置
CUF方式は主燃焼域における
ふく射強度を十分確保できる。
Burner arrangement of CUF

2段分級方式で、特に高微粉度域でスリップを起しやすい石炭に有効である。その結果、動力は従来MRSミル並で、200メッシュパス量90~100%、100メッシュ残量0%の高微粉度域での安定運転を可能としている。既に十数基の納入実績を持ち順調に稼働している。

また、③、④のNOx還元強化、未燃分の完全燃焼のために、火炉上部のAA(Additional Air)投入方法の改善を図った、新A-MACT方式を開発した。滞留時間が支配するAA投入前流でのNOx還元と、AA投入後流での完全燃焼を、限られた火炉空間で両立させるため、新A-MACTでは両者を最大限の高性能とするよう、AAの投入位置、投入方法の最適化を図っている。AA投入方法は、炉内への均一拡散を目指し従来の1段投入から、上下段投入位置を最適化した2段投入方式とした。これにより、より多くの空気をAAから投入し、バーナ~AA間のNOx還元域での空気比を下げ、NOx低減を行うとともに、下方からの燃焼ガス中にAAが均一に拡散、混合しNOx低減とともに未燃分の完全燃焼を図ることができる。

これら新燃焼技術は、既に多くの実機納入実績を持ち高成績を取っている。図5は事業用ボイラにA-PMバーナ、新A-MACT、MRS-II技術を取込んだ最新鋭1000MW石炭だきボイラのNOx、灰中未燃分特性を示す。図5中矢印で示すように当社従来実績を大幅に上回る高性能を達成している。

3.2 油、重質油だき燃焼技術

近年の油、重質油だきボイラ用燃料は、燃料中硫黄(S)分、窒素(N)分、残留炭素(CCR)分の増加及び高粘性化傾向にあり、これらを高効率燃焼させるために種々課題を克服した新形バーナを開発した。S分は腐食や閉そくの原因となるSO₃ガスを発生させるため、これを抑制すべく超低O₂燃焼が必要であり、バーナ部で

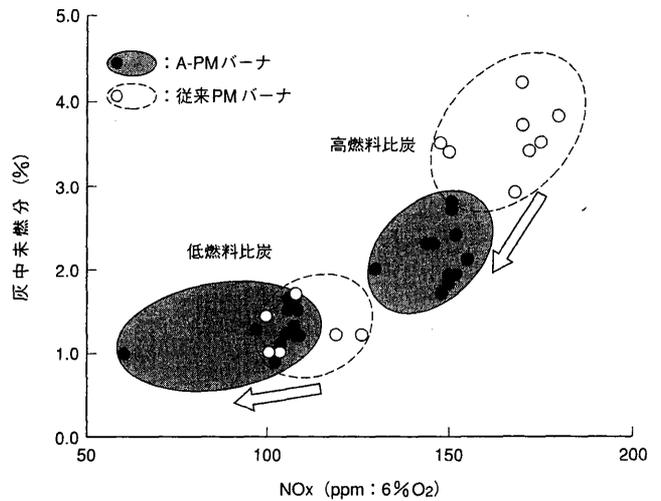


図5 A-PMバーナ採用ボイラの実績 A-PMバーナは従来型PMバーナに比べて低NOx、低未燃分性能が向上する。
Operation results of A-PM burner

の安定着火、燃焼が必要となる。SO₃対策としての低O₂燃焼研究についてはこれまでも数多く実施してきたが、近年ではこれに加え、低公害、高効率の点から低NOx、低ばいじんをも同時に満足する燃焼技術の確立が要求されている。

このような背景の下に、低NOx、低ばいじん超低O₂燃焼可能な丸形PMバーナ⁽⁵⁾を開発した。低NOx、低ばいじんこれまでにも多くの実績を持つ従来のPMバーナをベースにシンプル、コンパクトな構造としている。改良点は、(1)超低O₂という少ない空気を燃料に早期拡散混合させる一次、二次空気投入法、(2)燃料の微粒化を効果的に行い、空気と早期混合しやすい噴霧チップ形状、(3)安定着火を維持する保炎器形状、等であり前節で述べた2段燃焼A-MACT方式と組合せて超低O₂運転での低NOx、低ばいじん燃焼が達成できる。

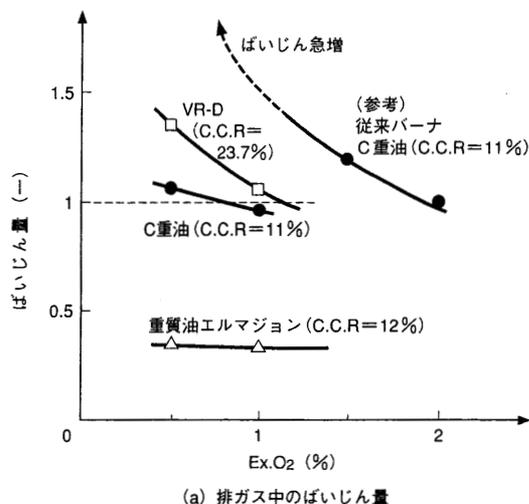
図6はNOx、ばいじん発生量特性を示している。Ex. O₂が1%を切るとばいじんが急増する従来バーナに比べ、新形バーナでは、Ex. O₂=0.5%においても高性能燃焼が達成できる。なお、石油残渣油、重質油エマルジョンの発生NOxがC重油に比べ高いのは燃料中の含有N分が多いため、石油残渣油のばいじん発生量が多いのはCCR分が多いためである。重質油エマルジョンのばいじん発生量は沸騰微粒化(噴霧油滴のバーナ噴出口での再微粒化現象)の効果から非常に低い値となっている。

3.3 油、ガスだき排気再燃技術

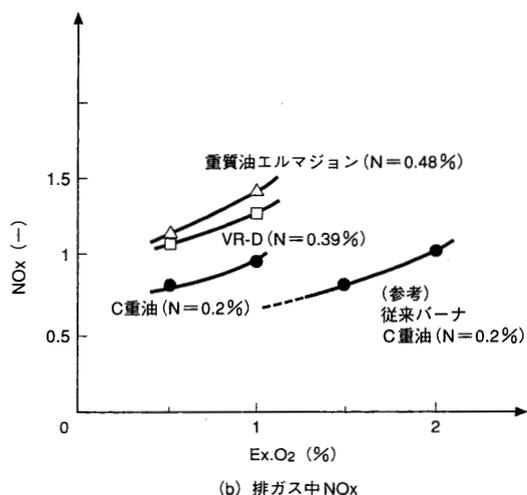
既存の油だきあるいはガスだきのボイラの前流にガスタービンを設置し、ガスタービンの排気(O₂濃度は12~15%)を燃焼用空気として、油あるいはガスだき燃焼を行う排気再燃コンバインドシステムは、既設発電所の出力増加、高効率化、CO₂発生量低減及び省スペース化を可能とするため、今後の既設火力発電のリバリング用として有望である。

当社ではこれらのニーズに対応するため、油だき用及びガスだき用排気再燃バーナの開発を終了しており、ガスだき排気再燃バーナについては既に実機適用済みである⁽⁶⁾。

排気再燃バーナ開発のポイントは、(1)低O₂濃度(12~15%)の燃焼用空気中で油、ガス燃料の安定着火、燃焼を行うこと、(2)ガスタービン不使用時のボイラ単独運転時にも、バーナ逆火、メタル焼損等問題のないバーナ選定であること、(3)ガスタービンからの持込みNOxを効率良く還元(N₂への転換)できること、であ



(a) 排ガス中のばいじん量



(b) 排ガス中NOx

図6 排ガス中NOx及びばいじん発生量特性 超低過剰空気条件でも、低NOx、低ばいじん燃焼を達成可能である。
Characteristic of combustion

りこれらを満足する新形のバーナを開発した。

図7は、バーナの着火安定/不安定領域をガスタービン排ガス中O₂濃度と温度で整理したものである。油だきに比べてガスだき排気再燃バーナの方が低O₂領域での安定着火を達成している。

また図8は、ガスタービンからの持込みNOxのボイラでの還元特性をOFA(Over Fire Air)率をパラメータに示したものである。ガスだきに比べて油だき排気再燃バーナの方が高いNOx還元率を示す。これは持込みNOxの還元剤である炭化水素が油燃料の方がバーナゾーンに多量に存在するためと考えられる。

なお、NOx還元率は次式で定義される。

$$\text{NOx 還元率} = \left[1 - \left(\frac{\text{炉出口発生 NOx}}{\text{持込み NOx}} - \frac{\text{持込み 0 時のベース NOx}}{\text{持込み NOx}} \right) \right] \times 100 (\%)$$

4. む す び

近年の発電プラントにおける高効率、クリーン燃焼技術開発のニーズにこたえるため、当社で取組み中の新技術開発実用化状況について紹介した。石炭、油、ガス燃料を対象とした各種新形バーナ、システムを開発、実用化済みであり、特にA-PMバーナ、

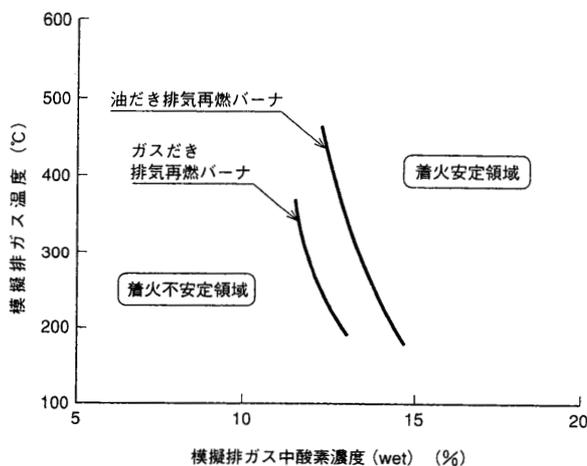


図7 排気再燃バーナの着火安定領域 排ガス温度増加により排ガス中酸素濃度を低減可能である。
Stable ignition region of gas and oil fired burner with gas turbine exhaust gas

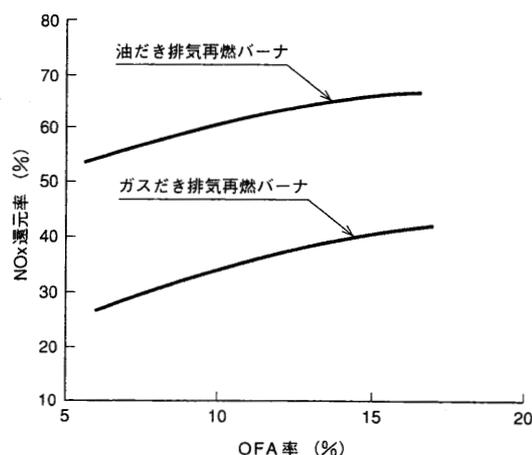


図8 排気再燃バーナのガスタービン持込みNOx還元率 OFA率の増加につれNOx還元率は増大する。
NOx reduction rate of gas and oil fired burner with gas turbine exhaust gas

A-MACT, MRS-IIを組合せた最新鋭石炭だき1000MWボイラでは世界最高級の性能を達成している。これらの開発経験を生かし、これまで培った新技術を適用しながら今後一層多様化するニーズに対応していくとともに、さらに新しいコンセプトの燃焼技術開発にまい進していく。

参 考 文 献

- (1) 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)
- (2) Tokuda, et al., Development of Mitsubishi Advanced Anthracite Fired Boiler, ICOPE-95, (1995) p.429-434
- (3) 徳田ほか, 三菱低揮発分炭だき新鋭NOx CUFボイラの開発と実用化, 三菱重工技報 Vol.35 No.1 (1998)
- (4) 徳田ほか, 三菱微粉炭だき新鋭NOx CUFボイラの開発と実用化, 三菱重工技報 Vol.30 No.1 (1993)
- (5) 一ノ瀬ほか, 重質油等燃焼技術と発電ボイラへの適用, 平成7年度精製講演会(石油学会) (1995) p.103-112
- (6) 中嶋ほか, 中部電力(株)知多1・2号リパワリングボイラの計画と運転実績, 三菱重工技報 Vol.33 No.2 (1996)