

最新鋭低 NOx A-PM バーナ

Development of Pulverized Coal Fired Low NOx Advanced PM Burner

原動機事業本部 金子 祥三^{*1} 玄 後 義^{*2}
橋本 貴雄^{*3} 菱田 正志^{*4}
技術本部 徳田 君代^{*5}

当社の低 NOx 燃焼技術（旋回燃焼＋低 NOx バーナ＋炉内脱硝 MACT＋高微粉度 MRS ミル）を適用した石炭だきボイラは、既に 30 缶を超え顧客のニーズにこたえ高い評価を得ている。今回実用化の段階に至った微粉炭だき低 NOx バーナは、従来の PM バーナを原点に立戻ってあらゆる面で改善したバーナであり、より一層のクリーン燃焼（低 NOx）と高効率燃焼（低未燃分）を達成すると同時に配置・設備の合理化や操作性・メンテナンス性の向上を実現した。

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (MHI) achieved low NOx combustion by applying the circular corner firing combined with the PM burner, the in-furnace NOx removal system MACT (Mitsubishi Advanced Combustion Technology) and high fineness MRS pulverizer. We have already delivered about 30 coal-fired low NOx boilers and we have licensed this MHI's combustion technology to Europe, Asia and American Continent. Recently as the requirements for coal fired boilers has become more stringent, the combustion technologies to achieve the requirements become more important accordingly. The objective of this study is to provide advanced burner which achieve the low NOx, high burn out and at the same time allows a simple design of the burner.

1. ま え が き

我が国の電力需要は今後も増加基調で進むことが予想され、発電設備の増強、特に燃料の安定供給、経済性を考慮して石炭火力発電所の建設が多く計画されている。ところが、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 発生量が多く、優れた低 NOx 技術の適用が重要かつ不可欠である。

当社は 1976 年に低 NOx PM (Pollution Minimum) バーナを世界に先駆けて開発して以来、炉内脱硝法 (MACT)、回転式分級器付高微粉度 MRS ミルを開発し、実用化してきた。最近の国内石炭だきボイラにはこれらを組合せた総合低 NOx 技術を採用しており、1 000 MW ボイラを初めとしてこれまで 30 缶以上のボイラに適用している。また、これらの技術を欧米ボイラメーカーにも供与しており、技術供与先では 660 MW のボイラを含め多数のボイラに適用し、優れた低 NOx 技術が証明されている。

一方、最近では国内事業用ボイラに対して、エネルギー源の多様化や地球環境保全を初めとする従来ニーズに加え、配置の簡素化、工程短縮や保守の簡略化等の多面的な合理化が従来以上に求められている。この多様なニーズに対し、燃焼技術の果たす役割はますます重要となってきたが、当社ではこのようなニーズに対応するため、PM バーナを更に改善した A-PM (Advanced-PM) バーナを開発したので紹介する。

2. A-PM バーナの構想

2.1 微粉炭燃焼における低 NOx 化

NOx は、空気中の窒素に起因するサーマル NOx と燃料中の有機窒素に起因するフューエル NOx に分類される。有機窒素含有率の少ない油やガス等はサーマル NOx が支配的であり、火炎温度を下げて NOx を低減する。一方、含有窒素の多い油や石炭等は、フューエル NOx が支配的であり、火炎温度を下げる手法

ではなくフューエル NOx を下げる手法が重要となる。

また、微粉炭燃焼はバーナ近傍で放出されるガス状の揮発分が燃焼する揮発分燃焼と、揮発分放出後の固定炭素（チャー）が燃焼するチャー燃焼に分けられる。揮発分燃焼はガス燃焼であることから、バーナ単体の改良によるバーナ近傍の空気比の最適化によって、低 NOx 化を実現できる。しかし、チャー燃焼は固体燃焼で燃焼速度が遅く、NOx 発生は炉内全域にわたるため、バーナ単体のみならず、火炉全体を使って低 NOx 化を図る必要がある。AA (Additional Air) を用いた炉内脱硝法はこの対応策の一つであり、各火炎の混合・拡散が良好である旋回燃焼方式の場合、より効果的な組合せとなる。したがって、微粉炭バーナは、バーナ単体の性能向上にとどまらず炉内脱硝を有効活用できるバーナとする必要がある。

微粉炭の場合、NOx 発生は以下の 3 領域に分けられる。

(1) バーナ着火部

バーナから噴出した微粉炭流は周囲からの熱ふく射を受け、放出した揮発分が着火して火炎を形成する。この領域の発生 NOx は主に揮発分に起因するので、前述のとおりバーナ構造及び空気拡散条件によって大きく変わる。バーナ単体での低 NOx 化を狙うバーナは、この領域の低 NOx 化を図るものである。

(2) バーナ部～AA 間

揮発分燃焼後、AA に到達するまでの領域は、チャー燃焼となる。この領域は AA を用いて空気比 $\lambda < 1$ の NOx 還元域となるが、より効果的な還元反応を行うために λ の適正化が必要であり、拡散混合に大きな影響を与える炉内ガス流動が重要となる。

(3) AA 後流部

AA の投入により λ が 1 以上となる未燃燃料の燃焼完結域であり、NOx 発生は避けられない。したがって、発生 NOx を最小限にする AA 投入法が必要となる。

*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 ボイラ技術部ボイラサービス技術課長

*3 原動機技術センター ボイラ技術部ボイラ技術一課長

*4 原動機技術センター ボイラ技術部主務

*5 長崎研究所火力プラント推進研究室長

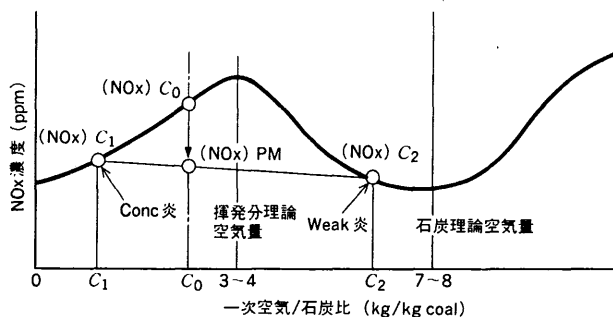
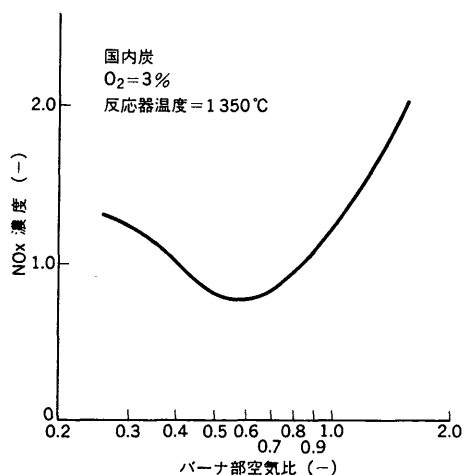
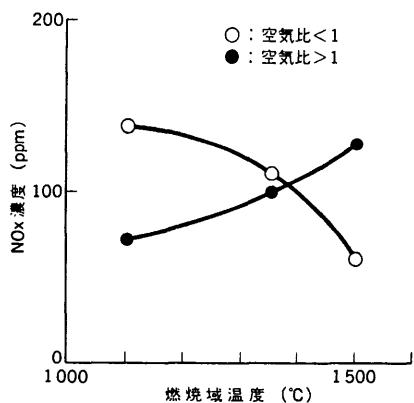


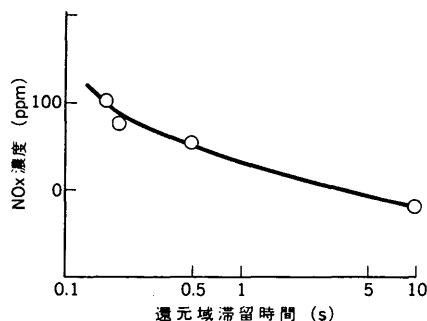
図1 微粉炭だき PM バーナの低 NOx 原理図
Concept of pulverized coal fired low NOx PM burner



(a) バーナ部空気比との関係



(b) バーナ部燃焼域温度との関係



(c) 還元域滞留時間との関係

図2 NOx 発生量とバーナ部空気比及び燃焼温度、並びに還元域滞留時間の関係
NOx formation vs excess air ratio at burner zone, gas temperature at main burner combustion zone and residence time at NOx reducing zone

表1 低 NOx 化の基本構想
Concept of low NOx A-PM burner

基本構想	各部の対応	
	従来型 PM バーナ	A-PM バーナ
空気比<1での高温化・滞留時間増による NOx 低減 空気比>1での低温化、低 O ₂ による NOx 低減	①バーナ着火部 石炭濃混合気炎 (コンク炎)による良好な着火性確保 ↓ 高温化	①バーナ着火部 石炭流外周濃混合気及びぬれ縁拡大による受熱面積拡大 ↓ さらなる高温化
①バーナ着火部 (λ<1)の高温化・着火性向上・受熱面積拡大	②バーナ部～AA間 AAの最適配置	短炎化による実質滞留時間の増大
②バーナ部～AA間 (λ<1)の滞留時間増 ③AA後流部の低 O ₂ 化 (λ>1)	③AA後流部 2段AA投入法による O ₂ 拡散の均一化 ↓ 低 O ₂ 化	同左

この各領域に対する、低 NOx 化の基本構想を構築するに当たり、裏付けとなる基礎データを以下に示す。

図1は、PM バーナの NOx 発生量特性カーブを示す。PM バーナの濃微炭燃焼は、濃微粉炭火炎が形成する酸素不足の低 NOx 揮発分燃焼と発生する未燃ガスによるチャー燃焼域での NOx 還元、及び淡微粉炭火炎が形成する酸素不足のチャー燃焼域での NOx 還元によって NOx を低減する。図2(a)にバーナ部空気比と NOx の関係を示す。バーナ部～AA 間では NOx を最小とする最適空気比が存在し、空気比1以上では急激に NOx 値が増大している。

図2(b)に燃焼域温度と NOx 量、図2(c)に還元域滞留時間と NOx 量の関係を示す。λ<1 の場合は燃焼域温度が高いほど NOx 還元が効果的となり NOx が低く、λ>1 の場合は逆に温度が低いほど NOx は低い。また、滞留時間を確保するほど NOx 還元が効果的となり NOx は低い。

2.2 低 NOx 化の基本構想

表1に PM バーナのより一層の低 NOx 化を図る上での基本構想をまとめた。方針は次のとおりである。

(1) バーナ着火部

この領域では、前述のとおり低空気比と高温化が低 NOx 化のために必要である。濃微炭燃焼を行う 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。A-PM バーナは、PM バーナでは上下に完全に分離されていた濃微粉炭流を、濃微粉炭流を外側に配置する形で一つにまとめ、さらにバーナ形状を幅広として、周囲からのふく射熱の受熱面積を増大させた。この結果、濃微粉炭バーナを主体に着火の向上を図る PM バーナに対し、A-PM バーナでは火炎を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 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。局所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催促し、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、巡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、今回さらにバーナ風箱を分割することにより火炉高さ方向の空気噴流を分断し、炉内流動の最適化、及び NOx 還元域の拡大を実現した。

(3) AA 後流部

AA 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となるため、特に均一な炉内空気比低減が必要である。既に開発済である AA の均一炉内拡散法は、図 3 に示すように AA を 2 段化し、下段をコーナ部に上段を火炉壁中央部に配置することによって NOx、CO 共低減するものであり、A-PM バーナと組合せて採用する。

2. 3 低 NOx A-PM バーナの構造

今回 A-PM バーナを計画するに当たり、燃焼性能にとどまら

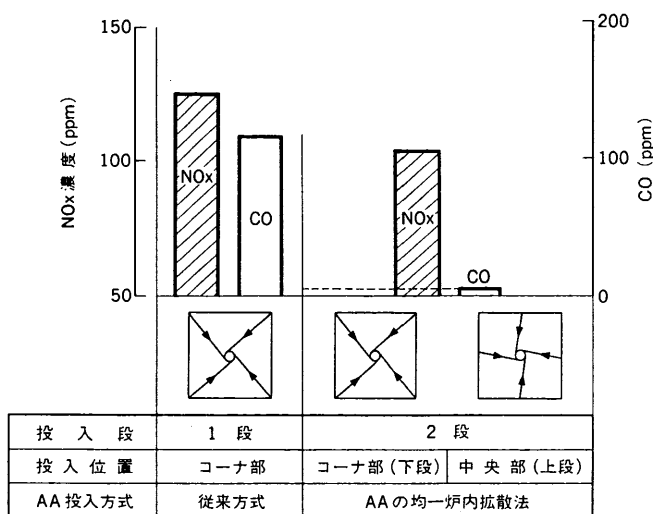


図 3 AA の均一炉内拡散法による NOx・CO の変化
NOx・CO reduction by uniform distribution of AA

ず簡素化、操作性、耐久性等の面からも検討を加えた。図 4 に示す 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の分布を形成した。
- (2) 幅広バーナとした。
- (3) 分割型バーナ風箱とした。(従来は一体形バーナ風箱)
- (4) バーナノズル数を低減した。

3. A-PM バーナと濃淡分離器の最適化

A-PM バーナの形状最適化に当たり、当社の 500 kg/h 試験炉を用いて、単一バーナでの燃焼試験を実施した。試験炉本体は、内径 2.3 m、長さ 10 m の横置円筒炉で、炉前面にバーナを取付けてある。

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たっては、従来の濃淡分離器性能を維持しつつ分離器の簡素化・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及び、基礎試験の手順で検討を進めた。最終的には、PM バーナの特長である濃淡燃焼の特性を発揮するために必要な分離性能を確保している分離器であることを、1 000 MW ボイラ用バーナを模擬した 1/10 サイズの基礎試験装置を用いて確認した。なお、今回実施した一連の試験ではすべて豪州産ブレアソール炭を用いた。

4. 大型炉での検証

単一バーナ炉で最適化を図った A-PM バーナの火炉全体での燃焼特性を検証する目的で、1.5 t/h コーナー炉を用いたマルチバーナの試験を実施した。1 000 MW 実機と同じく各コーナに 6 段構成のバーナを配置し、火炉全体としての燃焼特性を検証した。

図 5 は、炉壁到達熱流束分布及び炉内中央部のガス温度分布を示す。空気拡散向上による短炎化効果により、従来型に比べて熱

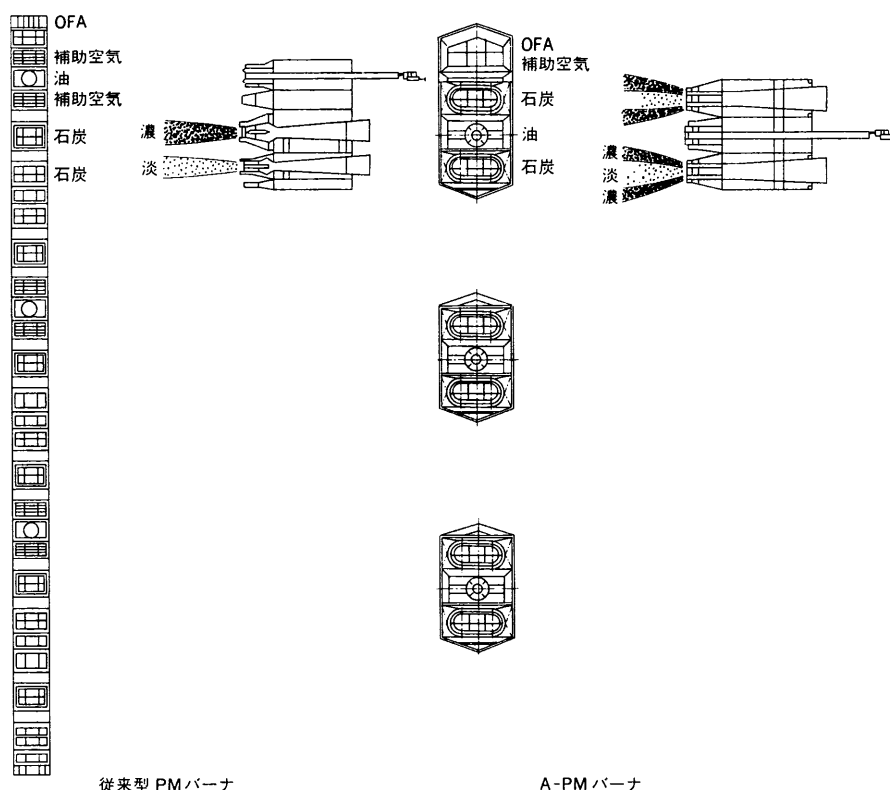


図 4 A-PM バーナ構造図
Configuration of A-PM burner and PM burner

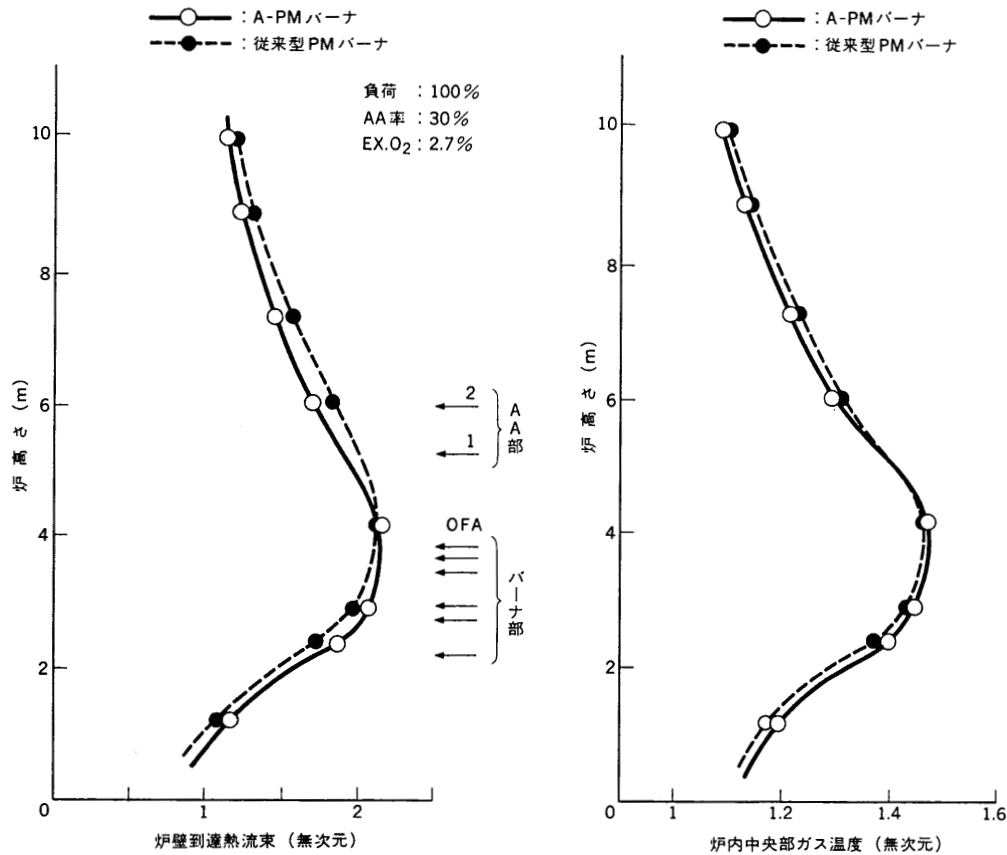


図5 炉内熱流束とガス温度分布
Distribution of heat flux and gas temperature in furnace

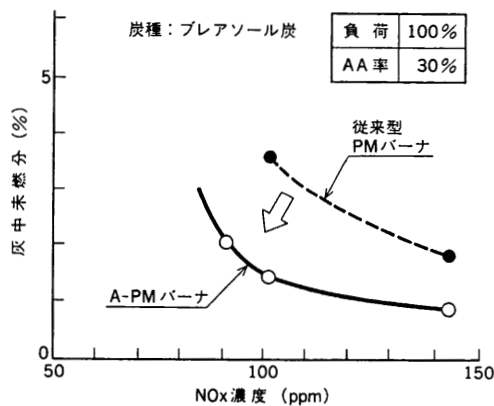


図6 NO_x-灰中未燃分特性
NO_x vs unburnt carbon in fly ash

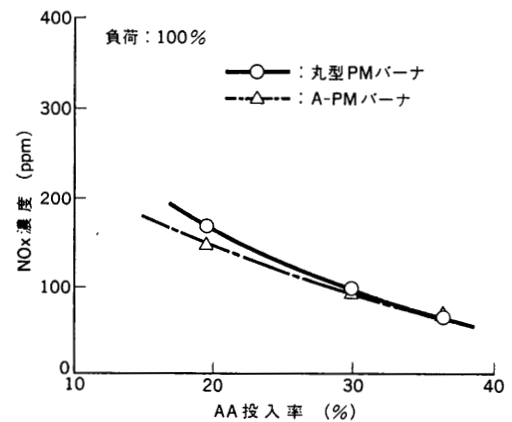


図7 丸型バーナのテスト結果
Test result of round type burner

流速のピーク位置が若干下方にずれており、これもバーナ着火を促進し NO_x を低減する。図6はマルチバーナ試験による NO_x-灰中未燃分特性を示す。従来型に比べて、約15%~約30%の NO_x 低減が達成できた。

次に、バーナ容量を実機規模にスケールアップし、4 t/h 横置円筒炉を用いた大型単一バーナ燃焼試験を実施した。試験の結果、安定した着火・燃焼性が確認でき、さらに NO_x、未燃分特性も先に実施したマルチバーナ炉の試験結果と同等の結果を得た。

5. む す び

A-PM バーナは、燃料と空気の拡散混合を改善し、約15%

～約30%の NO_x 低減が達成でき、未燃分量も少ない優れた燃焼性を示した。さらに構造面でも、分割型の採用により風箱ノズル数の低減やダクト構造・ダクトルートの簡素化を図り、ダンパ数の低減、鉄骨配置やバーナ部アクセスも改善した結果、シンプルで、操作性、メンテナンス性、信頼性、耐久性に富むバーナとなった。今回、本バーナを実用化する見通しを得たことから、今後の当社製石炭だきボイラに順次適用していく予定である。

なお、当社は海外の技術供与先の要望にこたえるため今回の A-PM バーナの燃焼原理を適用した丸型バーナを試験中であり、図7に示すように A-PM バーナと同等レベルの燃焼性を確認できた。この内容は改めて報告する予定である。