

超低 NO_x 石炭焚き M-PM バーナの開発と実機適用

Development and Operational Results of Ultra-low NO_x Coal Firing M-PM (Multiple Pollution Minimum) Burner



松本 啓吾*¹
Keigo Matsumoto

葛西 潤*²
Jun Kasai

佐伯 知則*³
Tomonori Saeki

竹井 康裕*⁴
Yasuhiro Takei

須藤 隆之*⁵
Takayuki Suto

石炭は豊富な埋蔵量、また埋蔵地域が偏在していないことから、今後とも重要なエネルギー資源として期待されている。一方で環境負荷低減のため更なる低 NO_x 化が求められていることから、石炭焚きボイラ向けに適用される超低 NO_x バーナ(M-PM バーナ)を開発・実用化した。バーナ改造のみ、あるいはバーナ+AA(Additional Air)ノズルを改造した発電用ボイラ4缶における実機検証(出力 350~700MW, 中燃料比炭, 灰分約 10%)の結果、世界最高レベルとなる 50~110ppm の超低 NO_x レベルが達成可能であることを検証し、運用費低減も可能となることを確認した。

1. はじめに

石炭は埋蔵量が多く、特定の地域に偏在しないエネルギー資源であり、発電用石炭焚きボイラの重要性は今後も変わらないと予想されている。一方、石炭はガスや油に比べて単位燃焼量当たりの CO₂ 排出量が多い上、燃料中のN分が多く NO_x 発生量も多いことから、高効率かつ低環境負荷運用が求められる。

更に CO₂ 削減と低 NO_x 燃焼の両立による運用費低減、バーナ長寿命化等による補修費の削減、低 NO_x 燃焼による脱硝装置用アンモニア消費量の低減も求められている。

三菱日立パワーシステムズ(株)(MHPS)ではこれらを満足する革新的低 NO_x 燃焼技術確立のために高精度 CFD 技術と大規模燃焼試験を組み合わせ、新バーナ(M-PM:Multiple Pollution Minimum バーナ)を開発・実用化し、世界最高レベルの低 NO_x 低未燃分を達成した。本報では石炭焚き低 NO_x 燃焼の新たなコンセプトの構築及びそれに基づき開発した新バーナの代表的な実機運転結果(数例)について報告する。

2. M-PM バーナのコンセプト

2.1 M-PM バーナのコンセプト立案

MHPS では、近年計算能力の向上が著しいシミュレーション解析技術を各種燃焼状態の模擬やバーナの開発へと適用範囲を広げてきた。特に計算精度向上のため、石炭分子構造を組み込んだ揮発分放出モデルや、揮発成分の反応速度を詳細に計算する着火モデル、反応経路に各種ラジカルを導入した NO_x モデル等の開発を行ってきた。

M-PM バーナのコンセプトを立案するため、本解析技術を用いて従来低 NO_x バーナにおける

*1 三菱重工業(株)技術統括本部総合研究所燃焼研究部

*2 三菱日立パワーシステムズ(株)ボイラ技術本部ボイラ技術部

*3 三菱日立パワーシステムズ(株)ボイラ技術本部ボイラ技術部 主席技師

*4 三菱日立パワーシステムズ(株)ボイラ技術本部ボイラ開発部 主席技師

*5 三菱日立パワーシステムズ(株)ボイラ技術本部ボイラ技術部 課長

NO_x 発生箇所を特定した。4t/h 単一バーナ炉における従来低 NO_x A-PM バーナ^{(1),(2)} 燃焼試験の解析結果を図1に示す。

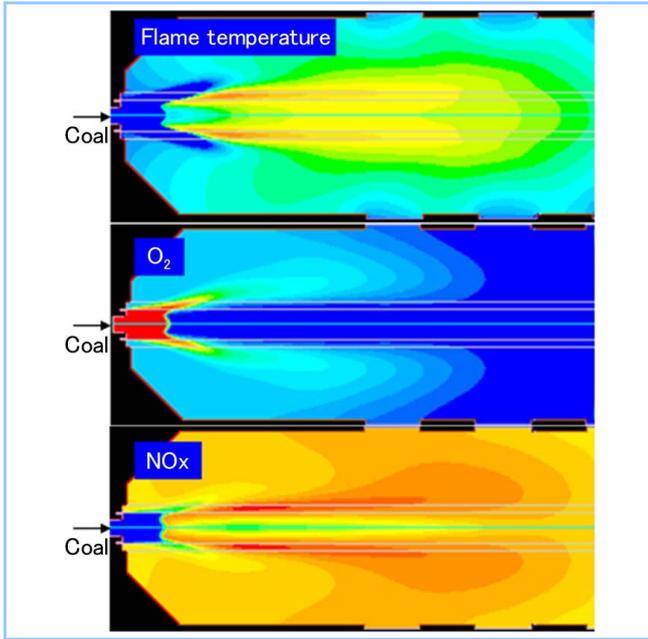


図1 従来低 NO_x A-PM バーナ解析結果

従来低 NO_x A-PM バーナは、ノズル外周と内周間で微粉炭を濃淡分離することにより低 NO_x 燃焼を実現、また、2次空気ノズルに保炎板を設け炉内輻射を効率的に利用し安定した着火を実現した。図1では左側にバーナが設置されており、右に向かって火炎が形成されている。また、火炎下流側には AA (Additional Air) ノズルが設置されている。本解析結果より、バーナ部の空気比が1未満でも安定着火することが確認された。一方、火炎外周に存在する高温領域に2次空気が供給されて形成される高温高酸素領域で NO_x が発生することが確認されたので、このような条件を抑制するバーナを開発することで更なる NO_x 低減が可能になると考えた。

2.2 低 NO_x 燃焼コンセプト

従来低 NO_x A-PM バーナの解析結果に基づき、更なる低 NO_x 燃焼コンセプトを立案し検証した(図2)。旋回燃焼方式における空気の供給は1次空気微粉炭火炎に対し、2次空気、Aux 空気(3次空気に相当)の順で供給される。2段燃焼では、AA が更に後流から投入され、着火部、還元燃焼域と燃焼完結域に大別される。

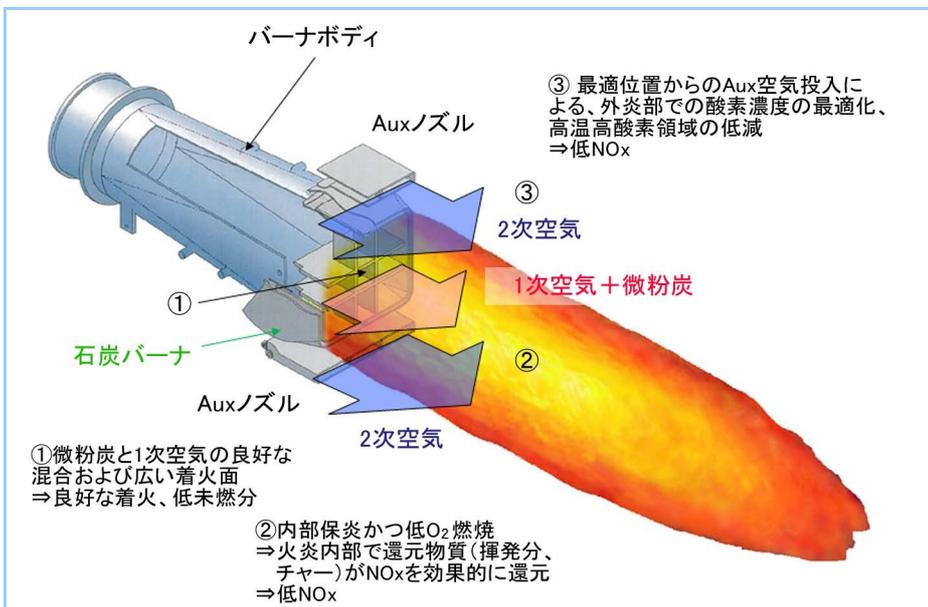


図2 M-PM バーナコンセプト

(1) 内部保炎燃焼

これまで、安定着火を重視し微粉炭流外周側での着火を促進するバーナの開発が行われ、結果として、局所的な高温高酸素領域形成の要因となっていた。そこで、これらの保炎器を微粉炭流の内部(ノズル前部断面の内側)に設置するとともに、周囲の2次空気を直進流として、外周に着火遅れをもたせることとした。着火部では空気の供給は1次空気のみであり、低酸素領域において燃焼が開始するため、火炎内部で有効に NO_x を還元させることが可能である。また、微粉炭流内部から外周への火炎の進展に合わせて、石炭バーナの周囲の2次空気、Aux 空気が混合されるため、火炎外周の高温高酸素領域が低減され、バーナ周囲での NO_x 低減も可能となる。また、内部から広い着火面で着火させることで、燃え残りが懸念される火炎内部においても燃焼温度が高温に維持されるため、火炎内部でのチャー燃焼が従来より促進され、未燃分低減を図ることができると考えられる。

(2) 最適位置からの2次空気投入

2次空気は、図2のノズル外周から投入される2次空気(Coal 2次空気)と、隣接する空気ノズルから投入される2次空気(Aux 空気:補助空気)に大別される。ここで、石炭燃焼において、揮発分の燃焼は瞬時で完結するが、チャー燃焼はある程度の時間を要する。混合に要する時間を鑑みると、比較的低流速で1次空気にもっと近い Coal 2次空気は揮発分燃焼に寄与し、比較的高流速で1次空気と一定の距離がある Aux 空気はチャー燃焼に寄与する。2次空気が不足すると揮発分燃焼が中断し、チャー燃焼が阻害される。一方、過剰となると酸素が残存する場合は、NO_x 還元を阻害する。このため、Coal 2次空気や Aux 空気の配分を調整することで、NO_x、未燃分の最適化を図る燃焼が可能となる。

(3) AA 部での NO_x 低減

AA 投入後は酸化雰囲気となるため、チャー中に残存した N や気相中 N が高い転換率で NO_x となる。バーナ部空気比が下がると、AA 前までに放出される N 分が減り、AA で酸化されるチャーNが増加する。また、AA 率の増加は AA 部での燃焼を促進し、Thermal NO_x の発生も増加する。このため、バーナ部空気比を高めると、AA 部での NO_x 発生量は低減する。

一般には、AA 率増加でバーナ部での還元雰囲気が強まり NO_x 低減が図られるものの、前述の内部保炎及び高温高酸素領域の低減を実現すれば、バーナ部空気比を増加しても火炎内の還元雰囲気が維持されるようになり、AA 部での発生 NO_x が低減でき、AA 率を低減(バーナ部空気比を増加)しても、同等の NO_x レベルが維持可能になるもと考えられる。

3. 4t/h 単一バーナ試験炉による試験結果

前述の低 NO_x 燃焼コンセプトを基にしたバーナを試設計し、微粉炭供給量で 100kg/h、500kg/h 単一バーナ燃焼試験炉を用いてスクリーニングを行った後、選定されたバーナを用いて、4t/h 単一バーナ試験炉により最終確認を行った。保炎器は1次空気ノズルに設置し、流れを整流しながら、安定的で強力な保炎力を持つ形状、配置を選定し、内部から効果的な着火が起こるようにした。

4t/h 炉は、ほぼ実機スケールのバーナにて試験を実施可能であり、実機を想定した着火状況、NO_x、未燃分、火炎温度等のデータを取得可能である。

(1) 燃焼状況

4t/h 炉における燃焼状況を図3に示す。M-PM バーナではノズル前面に広く均一な着火面が形成され、従来低 NO_x A-PM バーナと同等以上の良好な着火が得られたことを確認した。

(2) NO_x/未燃分特性

開発した M-PM バーナについて、中燃料比炭で試験を実施した際の NO_x 比較を図4(a)に、未燃分の比較を図4(b)に示す。中燃料比炭において、同一未燃分で NO_x が 20~40%低減したことを確認した。また、未燃分についても、同一 NO_x で未燃分が 25~50%低減したことを確

認した。これらの低減率は、運転条件やボイラ体格で変動するものの、ほぼ実機スケールのバーナで NOx, 未燃分が低減できることが確認された。

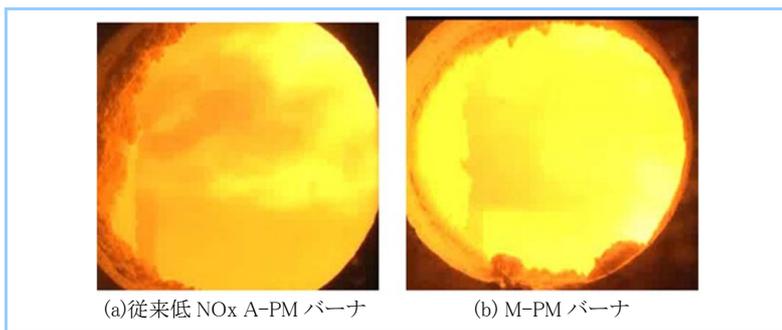


図3 4t/h 炉単一バーナ試験炉での燃焼状況

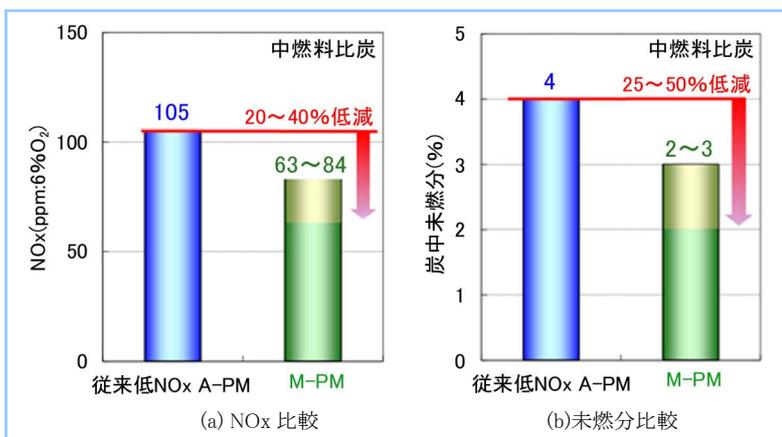


図4 4t/h 炉単一バーナ試験炉での NOx, 未燃分比較

4. 実機における運転結果

三菱重工業(株)総合研究所内に設置の試験炉にて検証した M-PM バーナは、2012 年 11 月から順次、国内・海外8ユニットで運用を開始しており、全ユニットにて保証性能を満足し、ノズルへのクリンカ付着・焼損等の不適合もなく、順調に運用されている。本報では実機運転代表例として、海外ユニット Z2 (700MW), 国内ユニット H5 (600MW) の運転結果を紹介する。運用炭は両ユニット共に中燃料比炭、灰分 10~15% 程度の瀝青炭であり、海外ユニットは中国炭で N 分が約 1%, 国内ユニットは豪州炭で約 1.8% である。

4.1 運用状況(海外ユニット Z2)

改造仕様を表1にまとめる。また、図5に示す燃焼状況は、50%負荷、石炭焼きバーナ3段運用時に撮影したものであり、非常に安定した燃焼を確認した。また、石炭焼きバーナのメタル温度も十分に低く保たれた。改造前後の NOx, 灰中未燃分特性の比較結果を図6に示す。M-PM バーナ改造及び AA 追設により、灰中未燃分を改造前と同等以下に保ったまま、従来バーナに対して NOx を 170→53ppm と約 1/3 に低減することができ、非常に良好な結果が得られた。

表1 ユニット Z2 改造内容

項目	仕様
ボイラ出力	700MW
バーナ段数	6段
ボイラ型式	強制循環ボイラ
燃焼方式	4コーナ, 旋回燃焼
改造内容	(1) バーナノズルの交換 従来型バーナ⇒M-PM バーナ (2) AA の追設



図5 ユニット Z2 燃焼状況

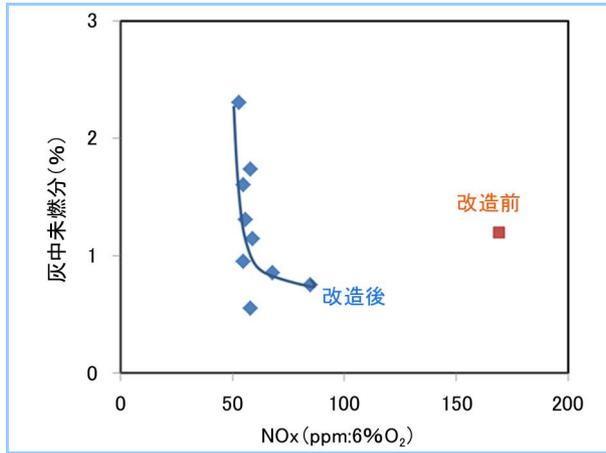


図6 ユニット Z2 改造前後性能比較

4.2 運用状況(国内ユニット H5)

改造仕様を表2にまとめる。国内ユニットにおいても、海外ユニットと同様、非常に安定した燃焼を確認した。改造前後の性能(NOx, 未燃分特性)比較を図7に示す。同等の未燃分で NOx を30%低減(158→110ppm)したことを確認した。

本ユニットはMHPSの従来低NOx A-PMバーナからM-PMバーナへ改造したのみであり、本結果より、M-PMバーナのNOx低減効果が実証された。次に、NOx発生特性(NOxをバーナ部空気比で整理した結果)比較を図8に示す。バーナ部空気比はボイラ全体の空気量から、AAから供給される空気量を除いた空気比を示す。改造前の従来低NOx A-PMバーナと同一バーナ部空気比でNOxを30%低減できることを確認した。

また、バーナ部空気比を0.87まで増加しても、改造前のバーナ部空気比0.77と同等のNOxとなることが確認された。このことから、外周での高温高酸素領域の緩和により、バーナ部空気比を高めても、NOx還元領域を形成できることが確認された。未燃分についても、条件により4.6→3.0%まで低減が見られており、M-PMバーナへの改造により、NOx/未燃分特性が改善されることを確認した。

表2 ユニット H5 改造内容

項目	仕様
ボイラ出力	600MW
バーナ段数	6段
ボイラ型式	変圧運転貫流ボイラ
燃焼方式	4コーナ、旋回燃焼
改造内容	バーナノズルの交換 A-PMバーナ⇒M-PMバーナ

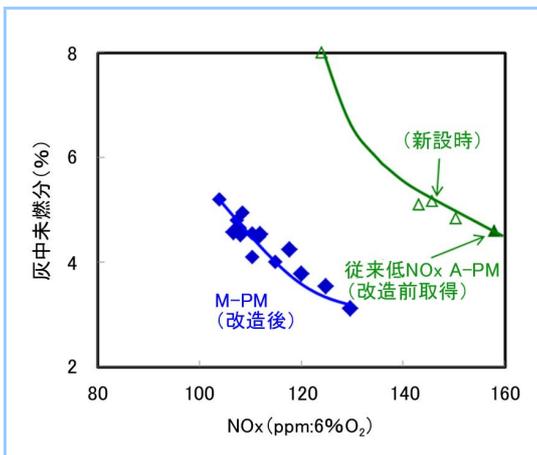


図7 ユニット H5 改造前後の性能比較

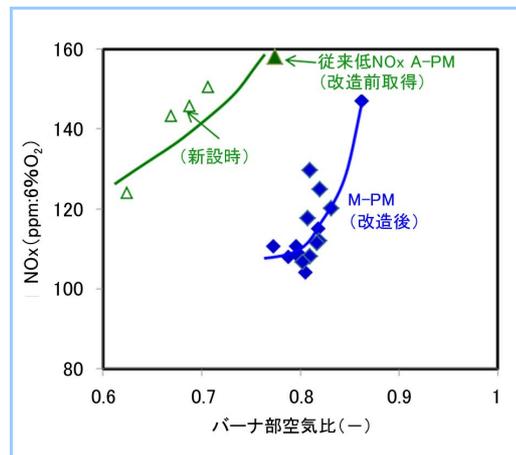


図8 ユニット H5 の NOx 発生特性比較

5. まとめ

次世代に向けた石炭燃焼システムの新たなコンセプトを基に M-PM バーナを開発、実用化した。M-PMバーナへ改造を実施した事業用ボイラにおける運転(中燃料比炭, 灰分:10~15%)の結果, 従来低 NO_x A-PM バーナと比べ NO_x 30%低減を確認し, 世界最高レベルの低 NO_x 低未燃分レベルを達成するとともに, 今後のランニングコスト低減対策に有用であることを実証した。また, バーナ部空気比が高くても低 NO_x 運転が確認できており, M-PM バーナの基本コンセプトが実機でも確認できた。更なる高性能化を目指し, 今後も継続して研究開発に取り組んでいく。

参考文献

- (1) Sato, S. et al., Retrofit Application of Mitsubishi Low NO_x System, POWER-GEN 2000 International November, 2000, Orange County Convention Center, Orlando, Florida
- (2) Takashima, R. et al., Application of The A-PM Burner for Low-combustibility Petroleum Coke, International Conference on Power Engineering-03 (ICOPE-03) November 9, 2003, Japan