

論文の内容の要旨

論文題目 ボイラー用微粉炭焼き低 NO_x バーナーの開発とその応用に関する研究

氏 名 徳 田 君 代

1. 緒 言

本研究は、微粉炭焼きボイラーから発生する窒素酸化物 (NO_x) の排出量を、燃焼過程の制御によって低減する技術、すなわち低 NO_x 燃焼技術を対象としている。著者らは窒素酸化物が問題化した 1970 年代に、低減が容易で当時ニーズが大きかった油焼きおよびガス焼きボイラーから発生する窒素酸化物の低減手法の開発に着手し、予混合燃焼方式による NO_x 低減燃焼技術を確立している。この予混合燃焼方式による NO_x 低減燃焼技術とは、それまでの主流であった拡散燃焼方式から発想を変えて、燃料濃度の濃い予混合炎と薄い予混合炎を組み合わせる方式である。予混合炎の NO_x 発生量を調べると、空気比 (実際空気量の理論燃焼空気量に対する比) が 1 の近傍で NO_x 発生量が最も多く、空気比が 1 より低い燃料過濃度火炎と 1 より大きい燃料淡濃度火炎では、NO_x 発生量が著しく低下する。そこで、燃料全体を過濃度火炎側と淡濃度火炎側に分けて別々に供給して 2 種類の火炎を形成させ、火炎後部で過濃度火炎側の余剰燃料を淡濃度火炎側の余剰空気中で燃焼させることにより、全体としては空気比が 1 に近い条件で燃焼させても、低 NO_x 燃焼を達成できる。この予混合燃焼方式のバーナーは、PM 型 (Pollution Minimum) バーナーの名称で、国内外の多くの実機ボイラーに適用されている。しかし、1973 年以降の数次に亘る石油ショックを契機に、石油資源の節減が世界のエネルギー政策となり、ボイラー燃料の石炭転換が進められることになった。ただ、石炭は油・ガス燃料に比べ 10 倍程度の有機窒素を含有し、微粉炭燃焼で発生する NO_x は、油・ガス燃焼時に比べてはるかに多い。このため、石炭への転換には優れた NO_x 低減技術の導入が不可欠である。このような社会のニーズに鑑み、著者らは油・ガス焼き低 NO_x バーナー開発で得られた知見を活用しながら、微粉炭焼き低 NO_x バーナーの開発並びに実機ボイラーへの応用に関する研究に着手した。

2. 微粉炭の NO_x 発生特性試験と微粉炭焚き低 NO_x バーナーの構想および構造

石炭は 20%ないし 40%の揮発分を含有し、固定炭素と灰分を主成分とするチャーが、残りの大部分を占める。また、それぞれに窒素分が 1~2%含まれている。石炭を平均粒径が 15~30 μm 程度の微粉状にして、1 次空気で炉内へ搬送して燃焼させた微粉炭の燃焼過程は、図 1 の右側に示すように、主に揮発分が燃焼する 1 次燃焼域と主にチャーの燃焼が行われる 2 次燃焼域に分けられる。本研究ではこの点に留意して、まず図 1 の左側に示す微粉炭燃焼の NO_x 発生特性に関する基礎試験、次いで燃焼試験炉による実用サイズバーナーを用いた NO_x 特性検証試験を行った。これらの試験の結果を纏めて整理したのが図 2 である。

図 2 でまず、(A) の 1 次燃焼域で発生する NO_x について調べると、微粉炭を搬送する 1 次空気と石炭の質量流量比がほぼ石炭中の揮発分の理論空気量に相当する値 (3~4 kg/kg-coal, 空気比換算で 0.4~0.5) で NO_x 発生量が極大となり、それ以下の領域では揮発分の燃焼は酸素不足となり、揮発分中の窒素分の NO_x への転換は少なくなる。一方、1 次空気と石炭の質量流量比が揮発分の理論空気量に相当する値を超え、石炭自体の理論空気量に相当する値 (7~8 kg/kg-coal, 空気比換算で 1.0) までの間にある領域は、石炭中の固定炭素の酸素不足状態での燃焼が始まる領域である。この領域では 1 次空気/石炭比が増大するにつれて揮発分中窒素分の NO_x 転換は増大するが、固定炭素から発生する還元物質 (炭化水素, NH₃, HCN など) の作用により NO_x の還元も増加するため、1 次燃焼域出口の NO_x は 1 次空気/石炭比が増大すると共に低下する。さらに、1 次空気と石炭の質量流量比が石炭自体の理論空気量に相当する値以上では、燃焼場そのものが酸素過剰となり、石炭中有機窒素分の NO_x への転換が増大し、NO_x 発生量は 1 次空気/石炭比の増大と共に急激に増大する。また、図中 (B) の 2 次燃焼域では、1 次燃焼域で燃え残ったチャーが燃焼し、1 次空気/石炭比が増大すると共に 2 次燃焼域での燃焼割合が減少し、NO_x 発生量は減少する。1 次燃焼域と 2 次燃焼域で発生した NO_x の合計が、図中の (C) である。このような基礎的研究結果にもとづく低 NO_x バーナーの構想を、図 3 に示す。すなわち、石炭の 1 次燃焼域からの NO_x 低減には、揮発分の理論燃焼空気量に相当する値に近い 1 次空気/石炭比 (図中 C₀) を、燃料過濃度混合気 (図中 C₁) と燃料淡濃度混合気 (図中 C₂) に分けて燃焼させることで達成される。

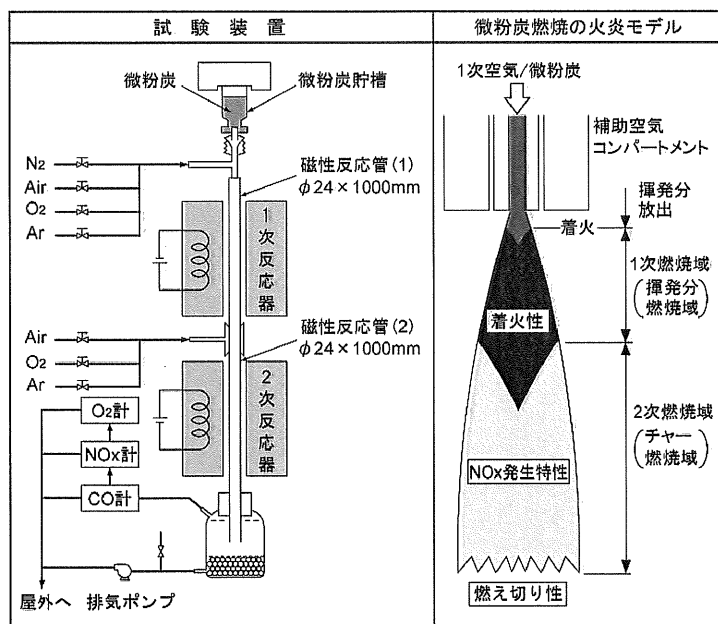


図1 試験装置の概要

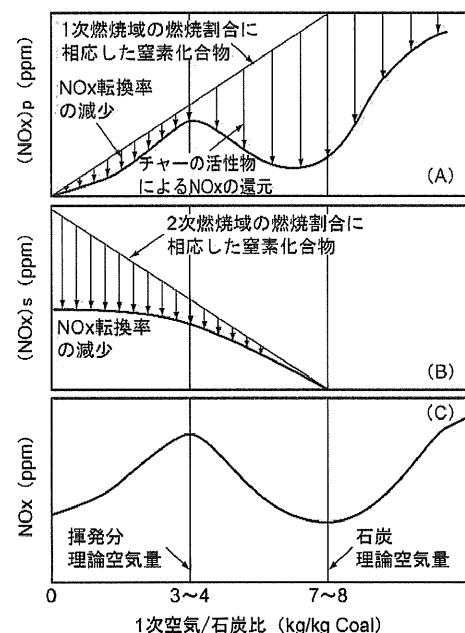


図2 NO_x発生量と1次空気/石炭比との関係

また、チャーの燃焼が主体の2次燃焼域では、2次空気を酸素不足領域に保つことで低NO_x化が達成される。ただし、燃焼を完結させるためには大部分の燃焼が終わった領域にさらに追加の燃焼用空気(OFAやAAと呼ばれる)を供給する必要がある。これら構想に基づいた微粉炭焼きPM型低NO_xバーナーの構造を図4に示す。微粉炭/1次空気の混合流を、遠心力を利用した分配器で、燃料過濃度混合気(図中 Conc)と燃料淡濃度混合気(図中 Weak)に分けて炉内へ供給し、燃焼させるように工夫してある。

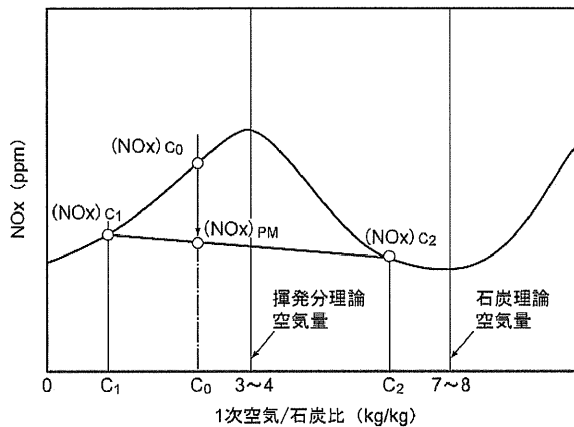


図3 微粉炭焼きPM型バーナーのNO_x低減構想

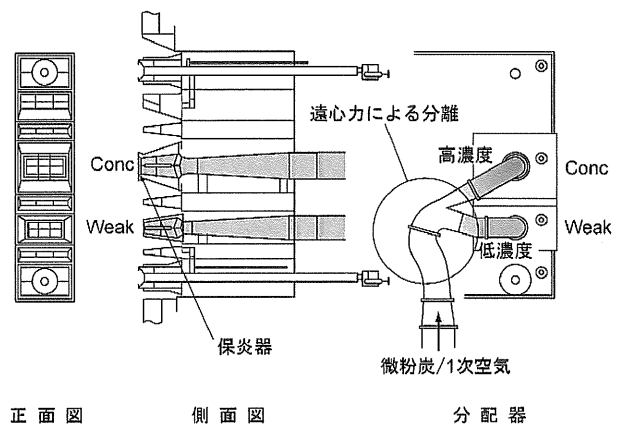


図4 微粉炭焼きPM型低NO_xバーナーの構造

3. 大型試験炉による微粉炭焼きPM型低NO_xバーナーの性能検証と実機ボイラーへの応用

大型試験炉による試作PM型バーナーの燃焼試験の結果は、図5に示すように、従来型バーナーのNO_x発生量の約1/3という画期的な低NO_x値を達成した。この成果を実機ボイラーへ適用するに当たっては、微粉炭バーナーのNO_x発生量を一致させるための相似則に関する考察、さらに火炉熱流動特性への影響評価が必要である。まず微粉炭燃焼の数学モデルから、小型バーナーと大型バーナーのNO_x発生相似則は基本的に、(1)形状が相似であること、(2)1次空気と2次空気の速度比が一定であること、(3)バーナーの代表寸法はバーナー燃焼量の1/3乗に比例させる

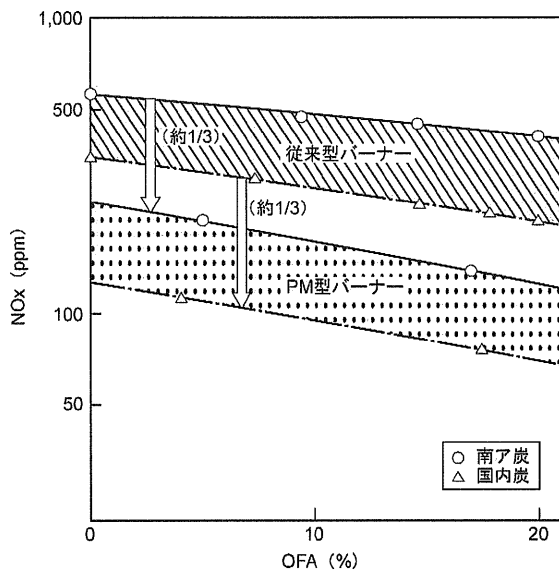


図5 4t/h試験炉によるPM型バーナーの燃焼試験結果

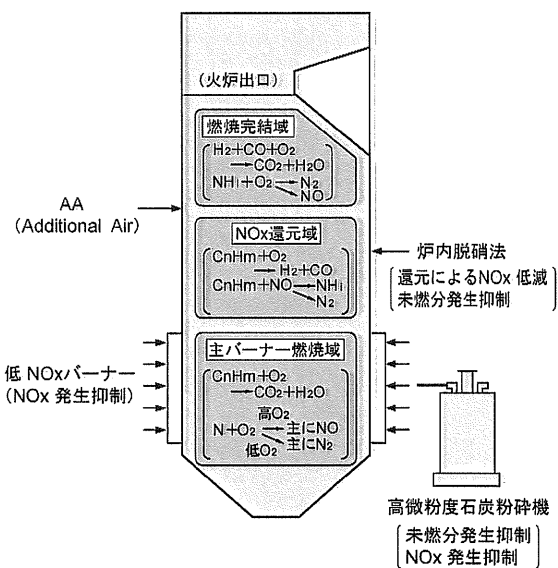


図6 微粉炭焼き低NO_x燃焼システム

ことによって達成できることを明らかにした。この相似則は、試験炉および実機ボイラーでのデータによって、実機へ適用可能なことが検証された。さらに、PM型バーナーの燃焼形態が従来方式のそれと異なることから、実機の火炉熱流動特性への影響をボイラー火炉シミュレーション計算によって調べ、PM型バーナーを採用する際の火炉設計の健全性を確認した。これらの成果を反映させた微粉炭焼きPM型低NO_xバーナーの初号機は、産業用ボイラー(蒸発量250t/h)に適用され、良好なボイラー性能と共に、目標通りの120ppmレベルの低NO_xを達成している。

4. A-PM型低NO_xバーナーの開発と実機ボイラーへの応用

微粉炭焼きPM型低NO_xバーナーを装着したボイラーが増える中で、さらなる低NO_xのニーズと共に、ボイラー大型化に伴う配置の簡素化やバーナー保守管理の合理化などのニーズが強くなった。これらのニーズに応えるため図6に示したように、低NO_xバーナー技術によるNO_x低減効果と、燃焼過程で発生する炭化水素のNO_x還元効果を活用した炉内脱硝効果とを、相乗して発揮させるための新たなNO_x低減手法の開発に取り組んだ。これに採用されるバーナーは図7に示すように、有効な炉内脱硝空間を確保するための短炎化を図るとともに、微粉炭の濃淡分離器を内蔵して構造の単純化を行っている。このバーナーは微粉炭焼きA-PM型バーナーと名付けられ、1000MWe微粉炭焼きボイラーを含む多数のボイラーに適用された。その結果は図8に示すように、これまでのPM型バーナーを採用したボイラーのNO_x発生量に比べ、同一未燃分レベルでさらに約15~30%のNO_x低減を達成できることが確認された。

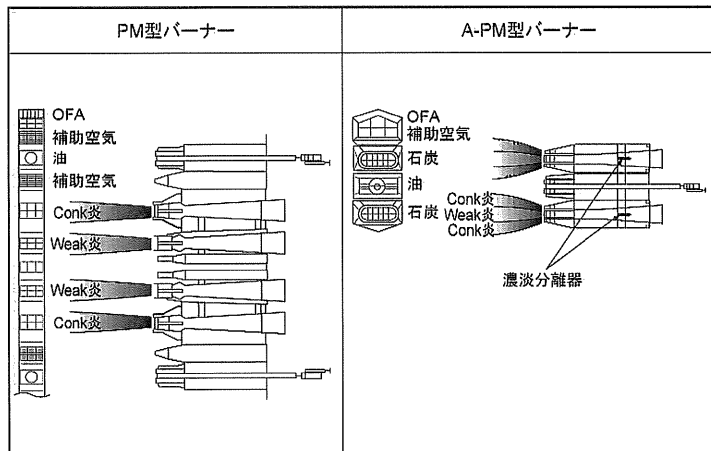


図7 PM型バーナーの構造とA-PM型バーナーの構造比較

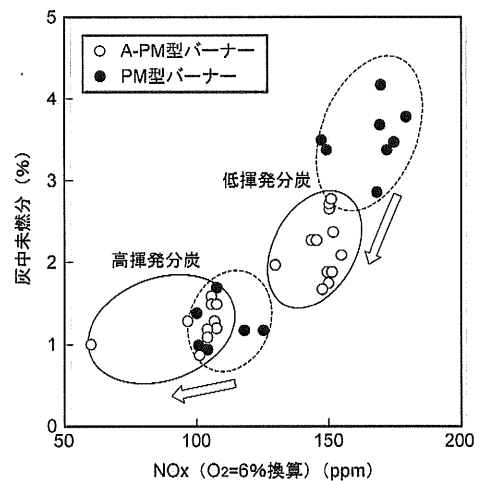


図8 実機ボイラーにおけるA-PM型バーナーの燃焼特性

5. 結 言

以上で述べたNO_x低減技術開発により、最新の微粉炭焼きボイラー出口のNO_x排出レベルは、従来に比し格段に減少し、約1/5となっている。これらのNO_x低減技術は特許登録されるとともに、国内での実用はもとより世界7ヶ国のボイラーメーカーに技術輸出され、世界各地の微粉炭焼き火力プラントに採用されて大気環境の改善に貢献している。また本バーナーは、安定着火と低未燃分燃焼にも優れており、石油コークスや半無煙炭などの難着火性燃料焼きボイラーへの適用や、将来の難燃性燃料を対象とした石炭ガス化炉用バーナー等にも適用が期待される。