石炭利用発電の低 NO_x 燃焼技術

Low NO_x Combustion Technology in Coal Fired Thermal Plant

佐藤 幹夫

Mikio SATO

◎1950年3月生まれ

◎1975年早稲田大学理工学研究科修士課程修了。1975年(財)電力中央研究所入所。1990年同横須賀研究所エネルギー部燃焼技術研究室長。1995年発電システム部長。石炭および新種燃料等を用いる

火力発電技術の研究に取り組んでいる。研究・専門テーマは石炭ガスのガスタービン燃焼技術

◎正員、(財)電力中央研究所 横須賀研究所(〒240-01 横須賀市長坂2-6-1)

1. はじめに

石炭は我が国の電気事業においても、原子力と共に将来の有力なエネルギー資源のひとつとして位置づけられている。1994年度末における我が国の石炭火力の全発電設備容量は約1740万kWであったが、10年後の2004年には3900万kWを越えると予想されている。その結果として、石炭消費量は3690万t(推定実績)から7250万tまで拡大し、総発電電力量に占める割合も、1994年の12%から2004年には20%まで増加する。

しかしながら、石炭の利用拡大に当たっては、単位発電量当たりのCO₂排出量が石油や天然ガスと比較して多く、燃料中の窒素分、硫黄分および灰分も多い石炭を高効率でクリーンに利用する技術の確立が不可欠である。

石炭火力については、2000年頃までは超々臨界(USC)圧などの微粉炭火力発電のいっそうの高度化が、さらに将来的には、「加圧流動床燃焼複合発電(PFBC)」や「石炭ガス化複合発電(IGCC)」などの実用化が期待されている。

本稿では、石炭利用における環境保全技術として、大形発電用微粉炭ボイラと石炭ガス化複合発電における低NO_x燃焼技術の開発動向を紹介する。

2. 微粉炭火力における低 NO_x 燃焼技術

燃焼反応に伴い生成されるNO_xは、空気中の

窒素の高温酸化によるサーマルNO_xと燃料中の窒素化合物に起因するフュエルNO_xがある。

火力発電用に用いられる^{れきせいたん}瀝青炭では通常1~2%程度の窒素分が含まれ、燃焼の過程でフュエルNO_xに変換される。空気過剰率や火炎温度の上昇と共にサーマルNO_xは増加するが、通常の微粉炭燃焼条件では、フュエルNO_xが支配的であると考えられている。また、微粉炭燃焼で生成されるフュエルNO_xは石炭の熱分解過程で発生するガス状の揮発分中の窒素化合物の気相反応により生成されるVolatile-NO_xと、揮発分放出後に固定炭素中の窒素分が固気反応過程でNO_xとなるChar-NO_xに分けられる。

そのため、微粉炭ボイラにおける低NO_x燃焼技術としては、揮発分燃焼に伴う初期生成NO_xの抑制と火炉内でのNO_x抑制の観点からバーナ開発および火炉設計が行われている。

燃料中窒素化合物からNO_xへの変換率は、燃料過濃な燃焼条件下では低下することが知られている。また、温度依存性はサーマルNO_xのように強くなく、火炎温度を低下させる方法是有効でない。そこで、一般的にフュエルNO_xの低減燃焼技術としては、二段燃焼法(リッチ・リーン燃焼法)が採用される。これは、バーナ近傍の1次燃焼領域を燃料過濃条件としてNO_xの生成を抑制し、2次燃焼領域で未燃分の完全燃焼を図る方法である。

大形発電用微粉炭ボイラで採用されている低NO_x燃焼技術は基本的にはこの考え方を基に、低NO_xバーナと炉内脱硝法を組み合わせている。

る。

2・1 低 NO_x バーナ 図1, 2および図3は発電用ボイラで採用されている低 NO_x バーナの構造概略を示す⁽¹⁾。図1では1次空気/石炭量比が、石炭中揮発分の理論空気量に相当する値を境にして、それより微粉炭濃度が濃い側でも薄い側でも NO_x 発生量が減少する特性を利用している。構造としては、微粉炭濃度の濃いノズルと薄いノズルおよび空気ノズルが縦方向に交互に配置されており、濃微粉炭火炎が形成する酸素不足の低 NO_x 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 NO_x 還元、およ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 NO_x 還元によって低 NO_x 化を達成している。

図2のバーナでは、まず微粉炭を急速に着火させて高温の燃料過濃火炎を作り、その火炎内の酸素濃度を急激に減少させている。つぎに、微粉炭粒子から揮発した窒素分より生成された NO_x を、燃料過濃な高温火炎内に存在する炭化水素系中間生成物との反応により分解させることにより、 NO_x を低減させている。バーナ構造として

図1 低 NO_x 微粉炭燃焼バーナ (PM バーナ)

図2 低 NO_x 微粉炭燃焼バーナ (NR バーナ)

は、微粉炭ノズルはバーナ中心に配置され、その外周の同心円周上に筒状の内周燃焼空気投入ノズルを設け、さらに、その外周に外周燃焼空気を調整する燃焼空気旋回器を設けている。

図3のバーナでは、燃焼用空気はアウトパーンを通して供給され、フローディバイダで内側と外側に分割される。内側の空気はインナパーンに導かれる。これら調節可能な二つのパーンを用いて生成される旋回流により、バーナ中心軸近傍に炉内からバーナに向かう循環流が形成される。この高温の還元雰囲気下で安定した着火を確保することにより NO_x の低減を図ろうとするものである。

2・2 炉内脱硝法 いずれの場合も低 NO_x バーナの採用と共に、二段燃焼用空気の導入に工夫を施した、火炉全体での炉内脱硝法が併せて用いられている。さらに、炉内での NO_x 還元領域を十分に確保すると共に、灰中未燃分の増大抑制を図った方法も採用されている。これは、1次燃焼領域のすぐ下流の高温雰囲気中に空気を適量供給し、また主な二段燃焼用空気をバーナからの滞留時間を十分にとった位置から供給する方法であり、いわば空気多段供給法と言える。 NO_x 低減を図ると共に、灰中未燃分の増大を抑制しようとするものである。

図3 低 NO_x 微粉炭燃焼バーナ (DF バーナ)

3. 石炭ガス化複合発電における 低 NO_x 燃焼技術

空気吹き石炭ガス化燃料は不活性ガスを多量に含む低カロリー燃料であるため、ガスタービン燃焼器においてリッチ・リーン燃焼を行うためには、1次燃焼域の燃焼安定性に留意しなければならない。また、 CH_4 濃度等の燃料組成を考慮した上で、1次燃焼域の燃料過濃条件の最適化を図ることも重要である。

以下に、空気吹き石炭ガス化燃料用として設計、試作した 1300°C 、150 MW 級ガスタービン低 NO_x 燃焼器の燃焼試験結果を示す⁽²⁾。

図4は燃焼器の構造を示す。本燃焼器は、副燃焼室、1次燃焼室、2次燃焼室の3室からなる。燃料中の NH_3 に起因するフュエル NO_x 低減燃焼技術として、1次燃焼域を燃料過濃条件とするリッチ・リーン燃焼法が有効であることから、本燃焼器では1次燃焼器域を燃料過濃条件とした上で、主燃焼室の中央部にくびれ部を設け、1次燃焼域と2次燃焼域を明確に区分している。また、1次燃焼域の燃料過濃条件を強化したときや、低負荷時の燃焼安定性を確保するために副燃焼室が設けられている。全供給燃料量に対して15%

(容積割合)が副燃焼室に供給され、副燃焼室からの高温燃焼ガスにより燃焼安定性の向上が図られている。また、2次燃焼用空気の供給法が2次燃焼域での NO_x 生成抑制に重要であることも知られている⁽³⁾。

空気吹き噴流床石炭ガス化低カロリー燃料の最高火炎温度は、約 1700°C と天然ガスと比較すると約 400°C も低い。そのため、燃焼器出口ガス温度を 1300°C とする定格負荷時(総当量比 ϕ_t は 0.49)においても、サーマル NO_x 排出濃度はわずか 2~3 ppm (実測濃度) 程度である。

しかしながら、燃料中に NH_3 が含まれる場合の、 NH_3 から NO_x への変換率は極めて高く、低 NO_x 燃焼法を採用していない燃焼器では、燃料中 NH_3 が 1 000 ppm の場合の定格負荷時の NH_3 から NO_x への変換率は約 70% で、実測 NO_x 濃度は約 300 ppm と非常に高いレベルである。

図5はフュエル NO_x 低減燃焼法として、リッチ・リーン燃焼法を採用した燃焼器について ϕ_t と燃料中 NH_3 から NO_x への変換率を示す。1次燃焼域の当量比 ϕ_p は、燃焼器出口ガス温度を 1300°C とする定格時において 1.69 と燃料過濃条件に設定されており、定格時の変換率は約 40% まで低下し、また、当量比の小さくなる部分負荷

図4 IGCC用 1300°C 級ガスタービン燃焼器

図 5 リッチ・リーン燃焼における総当量比と変換率の関係（一次当量比 1.69 の場合）

時の変換率も低く抑えられている。

4. おわりに

微粉炭火力は 100 万 kW の時代を迎え、効率も USC の採用により 42% が得られようとしている。また、ガスタービン技術の進歩も著しく、

LNG だき複合発電では 1 300℃ 級ガスタービンを用いることにより、47% の効率が達成され、1 500℃ 級では 50% を越えることはもはや夢ではなくなった。IGCC 用ガスタービンについても 1 300℃ 級に続いて 1 500℃ 級燃焼器開発も開始されており、石炭利用発電の高効率化は着実に進展している。今後ともいっそう、高効率でクリーンな石炭利用発電システムの高度化が図られることを期待したい。

文 献

- (1) 橋本・ほか 3 名, 低 NO_x 燃焼技術と脱硝技術, 火力原子力発電, 44-10 (1993), 31-53.
- (2) 例えば, 佐藤・ほか 5 名, 石炭ガス化用 1 300℃ 級ガスタービン燃焼器の開発, 日本機械学会論文集, 57-535, B (1991), 803-810.
- (3) 中田・ほか 2 名, 石炭ガス用ガスタービン燃焼器の燃料 NO_x 生成特性, 日本機械学会論文集, 59-564, B (1993), 2568-2575.

(原稿受付 1996 年 1 月 10 日)

石炭燃焼での窒素酸化物の低減限界はどこに？

窒素酸化物は燃焼技術でどこまで下げられるのであろうか？ これは、燃焼技術者や燃料供給者がいつも考えている（気にしている？）ことではあるものの、なかなか答えが見いだされない難題でもある。窒素酸化物の生成・抑制に関する研究が始まってすでに 20 年以上経過しているにもかかわらず、だれもこの難題に答えを与えていない。燃焼器の種類、装置規模や使用燃料が多岐にわたっており、定量評価の難しいことが大きな要因であろう。特に、石炭についてはその燃焼反応性が窒素酸化物の生成、分解に大きく影響を与えることで問題をより複雑にしている。石炭は燃料中に含まれる窒素（N）分が他燃料に比べてはるかに多く、そのため窒素酸化物の排出が多いものと考えてしまう。ボイラを例にとって、燃料中の N 分と NO_x の関係を見ると図 1 のようになる。石炭は微粉炭燃焼で代表し、液体燃料の噴霧燃焼と比較した。N 分の高い石炭の方が一見 NO_x は高くなるように見える。しかし、最低の NO_x 排出レベルをみると、石炭の方が液体燃料のそれよりも低くなっていることに気づく。実

図 1 燃料中の窒素分と発生 NO_x 濃度

際、燃焼反応性が良い^{あれきせいたん}亜瀝青炭では比較的容易に低 NO_x 燃焼が実現できることがある。燃料中の N 分の形態にもよるのであろうが、NO_x 分解側にも強い要因があるのではないかと想定している。いずれにしても、窒素酸化物の低減限界が見えないことや画一的な現象を見せないことが、我々のような燃焼技術者に技術開発意欲をかきたたさせる。何事においても、技術の発展、進歩には、限界が見えないこともまた良いことなのかもしれない。（宮前茂広）