小特集 火力発電新技術

# 微粉炭新低NOx燃焼技術 Low NOx Combustion Technology for Pulverized Coal Fuel

石炭燃焼ボイラに関し日立グループでは厳しい環境規制に対応するために,低 NOx燃焼技術開発を精力的に推進してきている。

低NOx燃焼技術開発に際し,(1)新低NOx燃焼の概念を確立し,(2)解析手段であ る各種シミュレータを開発するとともに,(3)火炎の流動現象,(4)火炎形状とNOxの 関係を明らかにした。更に,(5)日立グループ試験炉及び実缶に適用した結果などに ついて述べる。周知のように石炭性状は千差万別であるために,基準炭として太平 洋炭を選定し,その他の各種石炭についても比較燃焼試験を実施している。NOxレ ベルは,基準炭ベースで日立グループの単一バーナをもつ横形円筒炉で92ppm,マ ルチバーナをもつ大形炉で45ppm(いずれも6%O2換算値)を達成している。以下, 日立グループの低NOx燃焼技術の概要について紹介する。

政井忠久*	Tadahisa Masai Keizô Ôtsuka		
大塚馨象**			
秋山 厳***	Iwao Akiyama		
東 敏彦****	Toshihiko Higashi		
栗原伸夫**	Nobuo Kurihara		

### □ 緒 言

火力発電用燃料として近年石炭燃焼化の傾向が強まりつつ ある。周知のように石炭は他の化石燃料に比較して埋蔵量が 多く、かつ地域的に偏ることなく地球上に分布しており、長 期的に安定供給が可能である。しかし、石炭はその産地によ り性状が異なるばかりでなく、燃料中に含有する窒素分も比 較的多く燃焼の際に生じるNOx(窒素酸化物)の発生量は他 の化石燃料に比べ増加する傾向がある。日立グループでは以 前から石炭燃焼化に対処し、低NOx燃焼法の開発を進めて実 用に供してきたが、最近の燃焼反応解析により、NOx生成に 関する素反応が明らかにされ、これらの成果を基に新しい低 NOx燃焼技術の開発が進められた。本論文は、日立グループ 内での最近の石炭燃焼技術について述べる。

サーマル ノックスの割合は,石炭性状,燃焼方法により異なるが,大略80:20程度である。したがって,微粉炭燃焼での低NOx化は,燃料中の窒素分をN<sub>2</sub>に変換するために火炎の一

### 2 新燃焼方式の概念

石炭や重油のように燃料中に窒素を含んでいる場合,燃焼 に際して燃料中の窒素分が酸化されたNOx(フューエル ノ ックス)と燃焼反応により空気中の窒素が酸化されたNOx (サーマル ノックス)が生成される。このために,ガス燃焼 (CH<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>など)に比較してフューエル ノックスが付加さ れるためにNOxレベルが高くなる。フューエル ノックスと



部に還元領域を形成することがポイントとなる。図1に,新 低NOx燃焼方式の概念図を示す。まずA領域で微粉炭中の揮 発分が蒸発し燃焼を開始する。B領域では燃焼中間生成物,す なわち還元剤を発生させ,D領域ではA,C領域で生成した NOxと反応してN<sub>2</sub>となり,C領域で完全燃焼させる。これら の各領域での主な素反応を示せば次のようになる。

A領域: Volatile N+O<sub>2</sub>→Volatile NO………(1) B領域: 前駆物質の生成反応

Char C+NO $\longrightarrow \frac{1}{2}N_2$ +CO .....(9)

これらの素反応を短時間で完結するためには、B領域での 効果的な還元剤の発生とC領域での高温化が必要となり、こ れが低NOx化の技術的ポイントとなる<sup>1)</sup>。

### 3 燃焼解析手法

日立グループは、かねてから微粉炭燃焼技術開発の一環と して、燃焼解析手法の開発を進めてきた。ボイラでの燃焼を 解明するために、(1)解析計算、(2)コールドモデル実験及び(3) 燃焼実験を各々実施している。これらの状況を図2に示す。 同図からボイラ火炉周りの解析計算手法は、燃焼、伝熱及び 流動であり、四つの計算プログラムから成り立っている。燃 焼では、シミュレーションプログラムとして単一バーナに対 してSPACE(Simulation Program for Advanced Coal Combustion Evaluation)、複数パーナに対してHICCS<sup>2</sup>)(Hitachi Innovative Coal Combustion Simulator)が開発されており、

11

\* バブコック日立株式会社呉工場 \*\* 日立製作所日立研究所 \*\*\* バブコック日立株式会社呉研究所 \*\*\*\* 日立製作所大みか工場





図3 火炉内伝熱計算例 ボイラ火炉内を展開した熱流束分布及びス ラグによる影響を示す。

ている。以下,これらの代表的な計算結果について紹介する。 図3に、MONFURによる火炉内の伝熱計算の一例を示す。 同図はボイラ火炉を展開したもので,火炉水壁の熱流束分布 を示している。缶前と缶後で特にバーナ取付部近傍の熱流束 が大きいことが分かる。また、 微粉炭燃焼では火炉水壁へス ラグが付着し熱流束を減少させる問題がある。スラグは石炭 の性状により付着形態が変化し,熱的特性も変わるなど現象 的にも複雑であるが,熱伝導率を考慮して計算により熱流束 へ及ぼす影響も把握することができる。同図にスラグ厚さ0 mm, 10mmについての計算結果を示す。縦軸に矢印でバーナ の位置を示した。スラグ厚さにより熱流束が大幅に変化する ことが分かる。 図4に、FLAPFによる2次元の計算結果例を示す。計算は 有限要素法により行なっており,計算出力として速度ベクト ル及び流線を表示できる。ボイラ火炉内の速度ベクトルから 明らかなように、火炉中心部のガス流速が高く火炉壁近傍で はガス流速が低いことが分かる。一方,火炉内での流線は上 段バーナほど噴流の湾曲が大きいことや、ホッパ部に生じる 渦流が示されている。これらの計算結果は,火炉の最適形状 の検討や前記MONFURによる火炉内の伝熱計算に用いられ ている。

### 注:略語説明

HICCS(Hitachi Innovative Coal Combustion Simulator) SPACE(Simulation Program for Advanced Coal Combustion Evaluation) MONFUR(Monte Carlo Method for Furnace Simulation Program) FLAPF(Flow Analysis Program for Furnace) AAP(After Air Port)

図2 ボイラ燃焼の検討項目 大形ボイラでの検討項目を解析計算手法, コールドモデル実験及び燃焼実験に分類して示す。

燃焼性能を計算により把握することができる。

また火炉内の燃焼状態に対応して、熱流束を計算する MONFUR<sup>3)</sup>(Monte Carlo Method for Furnace Simulation Program)や火炉内での3次元までのガス流動計算ができる FLAPF(Flow Analysis Program for Furnace)が開発され



### 4 炉内流動

前章に示した計算手法とともに、水や空気を用いたコール ドモデル実験により火炉内での複雑な流動現象が把握でき る。コールドモデル試験では、火炉内での浮力の影響を除け ばかなり詳細なデータが得られる。

図5は、流線を可視化した写真及び流線解析の結果から炉 内の流動状況を示したものである。火炉設計に必要なバーナ の滞留時間の算出,アフタエア流入による最上段バーナとア フタエアポート間のよどみ,ホッパ部への再循環ガス流入に よるホッパ部の偏流の度合いなどを求めることができる。同 様に,バーナ近傍の流れやアフタエアポートの流れを検討す ることもでき、バーナやアフタエアポートの最適設計に反映 している。

5 火炎画像処理技術

微粉炭火炎の形状から発生するNOxレベルや燃焼状態を

把握することによって, 高効率燃焼への指針を与えることが できれば、運用上有力な手段となる。日立グループでは燃焼 技術と並行して燃焼診断システムの開発を進めている。この システムの構成を図6に示したが、次の機能をもっている。 (1) 燃焼火炎形状とNOxとの相関に着目して、コンピュータ により燃焼火炎信号を数値処理してその特徴を抽出し,燃焼 火炎内での脱硝効果を評価することによりNOx量などを推 定する機能。

(2) 上記の推定値と従来から計測している火炉出口NOx量, O2過剰率などの信号を加えることにより、高効率、低NOx燃 焼状態を実現するための空燃比,一次/二次/三次空気比など の操作量を決定し,操作するための機能。

ここでは機能(1)について説明する。微粉炭燃焼火炎の細部 を観測するため、ボイラ火炉に水冷却方式のイメージガイド を挿入し, 撮影用ITV(工業用テレビジョン)カメラを経由し てコンピュータへ送り,ここで火炎の画像処理により高輝度 領域を抽出し、その大きさと位置関係により燃焼火炎形状と



アフタエア流入によるよどみ部の大きさ

ホッパGR(Gas Recirculation)の偏り





(b) NOx インデックスとNOx との 相関

図7 火炎形状パラメータとNOxの相関 火炎の形状により発生す るNOxレベルとの間に、良い相関を示すNOxインデックスを見いだした。



図5 流線解析結果例 3次元水流モデルによる流線の可視化結果と, 流線の解析結果例を示す。

> 図 6 微粉炭燃焼診断シ ステム構成図 火炎の画 像処理及び操作ガイドを考慮し たシステム構成を示す。

> > 13

106 日立評論 VOL. 67 No. 2 (1985-2)



図8 火炎画像処理例図6のシステム構成で火炎形状を画像処理した一例を示す。

NOxとの相関を求める。図7にその一例を示す。前述のよう に低NOx燃焼と火炎外周の酸化炎の形状とは密接な関係が あるので、同図の $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ を用いて次のようなNOxイン デックス $I_{NOx}$ を求めた。なお、 $S_F$ ,  $I_F$ は高輝度領域の面積と周 囲長である。



図 9 大形炉の全景 バブコック日立株式会社呉工場での大形炉の全景 を示す。



kg/hが,いりれの実験でも良い相関が得られている。とうな 50kg/h炉の微粉炭火炎について画像処理した写真を示した ものである。このような画像処理技術は,実缶運用に際して 高効率燃焼や低NOx燃焼など貴重なデータを提供すること ができる。なおシステム開発時には汎用制御用コンピュータ H-80Eを用いたが,画像認識専用計算機HIDIC-IPを用いて 製品化を計画中である。

### 6 大型試験炉による結果

14

これまでの検討結果を基に微粉炭用新低NOxバーナの構造を決め、大形炉による燃焼試験を行なった。燃焼試験は当初50kg/hの立形の単一バーナ炉での試験、大容量の横形円筒炉による単一バーナ試験、及び最終的に3列3段対向の18本のバーナをもつ大形炉による試験を行なっている。

図9は最終の試験に用いた大形炉の全景を示すものである。この試験炉は水冷壁構造を採用しており,バーナの配列は3列3段対向となっている。バーナの上部には2段のアフタエアポートを配置している。

図10に、微粉炭用として開発した新低NOxバーナの概略図 を示す。従来の低NOxバーナであるPGデュアル レジスタ バーナに比べ異なる点を挙げれば次のようになる。

(1) 微粉炭用インペラの代わりに一次スリーブ先端に保炎リングを設置している。

(2) 二次スリーブ先端を開き,酸化炎の保炎性を高めるとともに三次空気を火炎の後流に供給する。

(3) 一次ガス供給孔を設けず,保炎リング上での火炎の安定性を向上させている。

(4) 二次空気及び三次空気に強力な旋回を与えられるように

図10 微粉炭用新低NOxバーナ構造 今回開発した微粉炭用新低NOx バーナの構造概略を示す。

示す。横軸にバーナ空気比をとり、縦軸にNOx及び灰中未燃 分を示している。まずNOxは空気比1.2近傍でサーキュラ形 バーナが500~550ppm, PGデュアル形バーナが300~350ppm に対し、新低NOxバーナでは100ppm前後であり、大幅な低 NOx化を達成している。更に、バーナ空気比を低下させるに つれて低NOx化傾向となり、二段燃焼による効果も大きいこ とが分かる。一方、灰中未燃分は、サーキュラ形バーナで1.0% 以下となっているが、PGデュアル形バーナと新低NOxバー ナではほとんど同一であることが分かる。この結果から、同 一空気比でのNOxレベルは、PGデュアル形に比べて約号程 度まで低減させることができた。

図12に、大形炉による試験結果を示す。空気比1.20一定とし二段燃焼の割合を変化させ、NOxと灰中未燃分の関係を示した。従来のPGデュアルバーナでのNOxレベルの限界値は、

表 I 供試炭の性状 微粉炭用新低NOxバーナの開発に際し,基準炭とし

特殊なエアレジスタを採用している。				
(5) 二次空気と三次空気との流量比を適性化し,酸化炎の空				
気比の最適化を図っている。				
試験に用いた石炭は前述のように太平洋炭であり, その性状				
を表1に示す。微粉炭粒子は200メッシュ(74µ)通過75~85%				
の範囲のものを用いている。図11に、微粉炭流量500kg/hと				
し、日立グループ横形円筒炉による単一バーナの試験結果を				

て用いた供試炭の性状である。

元 素	分 析	工業	分 析
С	65.6%	揮発分	45.7%
Н	5.4%	固定炭素	38.8%
N	1.0%	灰分	15.5%
0	12.5%		_

### 微粉炭新低NOx燃焼技術 107





注: EP灰(電気式集塵装置によって補集された灰)

図13 保炎リング実缶適用例 石炭燃焼ボイラの一部に保炎リングを 取り付けた結果の一例について示す。

設けられている。保炎リングは最下段6本のバーナに設け, 他は従来のデュアル形バーナである。燃料は太平洋炭と幌内 炭50:50の混炭とし、微粉粒度は200メッシュ通過70%であ る。図13は保炎リング取付前後でのEP灰(電気式集塵装置で 捕集された灰)未燃分について示した。各負荷帯にわたって保 炎改善による著しい効果が得られた。保炎リングのメタル温 度は400~800℃と低く、また保炎リング上へのスラッギング も起こらず,長期使用に十分耐えることが分かった。微粉炭 が直接衝突する内側の部分はセラミック化し, 摩耗性向上を 図っている。

図|| 横形円筒炉による燃焼試験結果例 日立グループの横形円筒 炉を用い、微粉炭流量500kg/hで試験した結果の一例を示す。



図12 大形炉による燃焼試験結果例(多段燃焼の特性) 本試験は 大形炉を用い, 微粉炭流量約1,500kg/h, バーナ配置3列×3段×対向の18本の バーナで行なった試験結果の一例を示す。

灰中未燃分5%以下とすると70~75ppmが限界となる。今回の 新低NOxバーナでは、38~45ppm程度までNOxを低減できる

火炎の安定性を向上させて未燃分を低減する目的で,石炭

#### 今後の展開 8

微粉炭燃焼ボイラは,我が国の燃料事情,埋蔵量から見て 今後の火力発電の主燃料となることは間違いない。この意味 で今回開発した新低NOxバーナにより画期的な低NOx化が 可能であり、同時に高効率燃焼ができる。現在、新低NOxバ ーナの実缶試験を精力的に進めている段階であり, ボイラ火 炉設計に与える効果についての試算も併せて実施している。 今後,積極的に実用化を図るとともに、いっそうの低NOx化 を推進する予定である。

#### 言 9 結

日立グループでの微粉炭燃焼技術に関し, 幾つかの確立し た技術について述べた。これらをまとめると,

(1) 従来の低NOxバーナに比較し,NOxレベルを大幅に低減 できる新低NOxバーナの開発に成功した。

(2) 燃焼解析を進める上で必要な各種計算プログラムを開発 し、今後の実缶設計を容易にした。

(3) バーナ、アフタエアポート及び火炉内の流動状況と燃焼 に及ぼす影響を把握することができた。

(4) 新技術として画像処理技術を確立し、火炎形状とNOxレ ベルとの間の相関関係を明らかにした。

本新低NOxバーナは既に実缶に適用中であり、未燃分低 減,火炎の安定性及び火炉内のスラッギングに対し,極めて 効果的であることが立証されつつある。

ことが分かる。

### 実缶適用へのステップ 7

参考文献

D.W.Pershing, et al. : Influence of Coal Composition on the 1) Fate of Volatile and Char Nitrogen During Combustion, Nineteeth Symposium (International) on Combustion, pp.  $1271 \sim 1280$  (1982)

15

燃焼ボイラに新低NOxバーナ用に開発された保炎リングだ 政井,外:微粉炭燃焼ボイラにおける未燃分予測技法,火力発 2)けを適用した例について述べる。このボイラは缶前3段,缶 電, Vol. 34, No. 12, 1401 (1983) 後2段のバーナを配置しており、各段ごとに6本のバーナが 3) 金田,外:第20回日本伝熱シンポジウム,昭和58年6月



7 次特性の能動素子を用いた多自由度発振器の解析 京都大学 倉光正己・日立製作所 高瀬冬人 電子通信学会論文誌 J67—A, 845~846(昭59-8)

本論文は、コイル、コンデンサ及びトン で表わされる硬発振特性の場合、これが生 ネルダイオードなどの2端子能動素子(負 性抵抗素子)から成る多自由度発振器に生 じる多重モード振動の解析を行なってい る。

多くの振動モードがある発振器を多自由 度発振器と呼ぶ。多自由度発振器の動作状 態には,単一モード振動と多重モード振動 がある。単一モード振動は、一つの周波数 成分(モード)が励起されている状態で、出 力はほぼ正弦波となる。多重モード振動は, 複数個の周波数成分が同時に励起されてい る状態で、出力は「うなり」を伴う非周期波 形となる。

このいずれの発振状態をとるかは,能動 素子の特性によることが知られている。す 均を、平均ポテンシャルと名付ける。する なわち、能動素子の特性が、3次式と、安定な振動は、平均ポテンシャルが極

じる。しかし、その違いの生じる理由は明 らかにされていない。

さて、これらの振動の解析方法として、 正弦波の重ね合せで振動解を近似する平均 法が古くから用いられている。しかし、平 均法は、非線形振動系の汎用の解析手法で あるため,多自由度発振器に対しては物理 的意味をつかみにくい。したがって、例え ば「ある振動モードを出す能動素子の特性 は?」という設計問題に対して,簡単な設計 指針を与えることが困難である。

筆者らは、多自由度発振器の新しい解析 法として,平均ポテンシャル法を提案した。 回路内の抵抗や負性抵抗の損失分の時間平  $i = -g_1 v + g_3 v^3(g_1, g_3 > 0) \dots (1)$  小となる振幅・位相で生じることが示せる。 したがって, 平均ポテンシャルを作り, そ の極小点を探すことにより、発振器の安定 状態を知ることができる。

ここで,能動素子の特性と,生じる振動 の関係の物理的解釈により,素子特性の設 計指針が得られる。

発振器に生じさせたい振動電圧を確率変 数とみなし、その出現頻度の高いところで 能動素子の瞬時的な損失分が最小になるよ うに素子特性を定める。すると、損失分の 時間平均である平均ポテンシャルは極小と なり, 振動は安定になる。

この考え方により,多重モード振動を生 じさせるためには, 能動素子は硬発振でな ければならないことが分かる。更に、対称 な発振器で,非対称な振幅の多重モード振 動を生じさせるためには,特性曲線を高次 式にすればよいことが予想される。

本論文では、能動素子の特性が7次式  $i = -g_1 v + g_3 v^3 - g_5 v^5 + g_7 v^7 \dots (3)$ で表わされる対称な多自由度発振器で,不 等振幅の二重モード振動が生じることを示 し、これらの考え方を検証している。

で表わされる軟発振特性の場合には多重モ ード振動は生じないが、5次式  $i = g_1 v - g_3 v^3 + g_5 v^5 (g_1, g_3, g_5 > 0) \cdots (2)$ 

## 最近の油圧技術の動向 – 革新する油圧技術 –

### 日立製作所 一柳 健

### 機械学会誌 87-790, 996~1002 (昭59-9)

最近のLSIを中心としたマイクロエレク トロニクスの進展, FA, ロボットの高度 グ形のサーボ弁が多く用いられる。従来, 化,省エネルギー,環境保全といった種々 のインパクトを受けて油圧技術も変化、進 展しつつある。

マイクロコンピュータなどの普及により, 油圧制御のディジタル化の動きが加速され、 電磁弁のパルス幅変調、更にはパルスコー ド変調を取り入れ安価な制御要素をディジ タル化して、うまく使ってゆこうとする傾 向が顕著である。それに伴って、 電磁弁の 高速化の研究が盛んになってきた。油圧制 御系は,一般に非線形性が強く動的制御が 難しい。これを現代制御論を使用してアダ プティブ制御しようとする試みが各所でな されている。しかし,油圧制御系は伝達特 性が複雑なため、パラメータの同定に問題

航空機、ミサイルなどの制御では、アナロ この分野ではノズルフラッパ、ジェットパ イプが主体であったが、新しくフォースモ ータがマグネット,耐熱線の進歩により登 場してきた。その高応答性, 耐環境性の特 長から油圧圧下装置に採用され、以後振動 シミュレータなどの分野に利用され始めた。 今後とも新しい分野に発展してゆくものと 期待される。

油圧技術の一つの中心は高圧ポンプであ り、アキシアルポンプがその代表である。 徐々に高圧化に向かっており,建設機械分 野では275→350気圧,航空機分野では350→ 560気圧のフィジビリティスタディがなされ、 小形・高密度化への傾向が強まっている。

アキシアル形でも将来1,000気圧程度の実

省エネルギーの観点から、ポンプの可変 容量制御法の開発とその応用が盛んである。 通常の油圧システムはOne-Pump-Multi-Actuatorsであるが, 航空機分野では, 信頼 性の立場からOne Pump-One Actuatorの 高集積油圧パッケージの開発が行なわれ, 試験飛行によって評価されている。将来特 殊な分野から産業機械に応用されるべき技 術である。

油圧システムでの最近の特長的傾向は, HWBF(高含水水成形流体)の積極的な開発 である。このモーティブ フォースは、省石 油,環境保全,クリーンといった要求から でている。

HWBFは基本的に水であるから、キャビ テーション壊食,腐食,摩耗防止といった 克服すべき技術課題が多い。70~140気圧ま

があり、今後に問題を残している。 用機が出現する可能性がある。小形化につ ではほぼ実用に近づいているが、210気圧以 一方, 高応答と高精度を要求される分野, いては40度傾転の斜軸ポンプが出現し、斜 上の高圧実現はこれからの課題である。 例えば振動シミュレータ,油圧ロボット, 板ポンプについても幾多の改良がなされて 圧延機油圧圧下装置,火力・原子力ガバナ, いる。 16