

# 多種燃料対応 CFB 燃焼制御システム

## CFB Combustion Control System for Multiple Fuels

中尾 展行 NAKAO Nobuyuki JFE エンジニアリング 制御技術センター 産機・発電制御部 経営スタッフ  
島本 拓幸 SHIMAMOTO Hiroyuki JFE スチール スチール研究所 計測制御研究部 主任研究員 (副課長)  
山本 晃司 YAMAMOTO Koji JFE エンジニアリング エコパワーシステム部 主幹

### 要旨

JFE エンジニアリングは JFE スチールの協力を得て、同社の循環流動層ボイラ (CFB) において、多様な廃棄物系燃料を混合して燃焼しても最適な安定燃焼状態が実現できる、新しい燃焼制御システムを開発した。本システムはルールベース型多目的制御などの高度な制御機能を備えており、これまでに炉内温度適正化制御、排出ガス濃度低位安定化制御、HCl 低減用消石灰吹込量制御などの機能を構築してきた。今回、近年 JFE エンジニアリングが製作・納入した 2 基の CFB ボイラにおいて、実機での適用試験を実施した。その結果、本システムの導入により炉内温度や排ガス性状の安定化や、燃焼空気量低減によるファン動力の削減などの効果が期待できることが確認された。

### Abstract:

JFE Engineering has developed a new combustion control system that is capable of achieving the stable combustion for various multi-waste-fuels in the circulating fluidized bed boiler (CFB). This system has advanced control functions with a rule-based type multipurpose control. This device is applied to furnace temperature control, exhaust gas stabilization control, and blowing control of slaked lime for the reduction of HCl. The application test was conducted in two CFB plants and the effect was confirmed that the furnace temperature and exhaust gas condition could be stabilized, and the fan driven power could be reduced by the reduction of combustion air.

## 1. はじめに

近年、CO<sub>2</sub> 排出量削減や資源保全の観点から、化石燃料に替えて木質バイオマスやプラスチック、RPF (Refuse Paper & Plastic Fuel)、廃タイヤ、スラッジなどの廃棄物系燃料を使用する高効率ボイラの需要が高まっている。循環流動層ボイラ (Circulating Fluidized Bed Boiler: CFB) はこれらの多様な廃棄物系燃料にも適応可能なボイラであり、これまで石油代替ボイラとして製紙会社をはじめとする多様な業界で採用されている。

JFE エンジニアリングはこれまで石炭専焼、プラスチック専焼、木質バイオマス専焼の CFB ボイラの納入実績を有しており、2008 年には製紙会社向けに 2 基の多種燃料混焼 CFB ボイラを納入した (写真 1)。

廃棄物系燃料の燃焼においては使用燃料の性状変動に起因する、燃焼位置変動や局所高温化、燃焼排ガス性状の不安定化などが発生する傾向にある。また、多種類の燃料を混

焼させた場合、燃焼状態の変化がさらに複雑化する。そこで、これらの多様な廃棄物系燃料を混焼しても最適な安定燃焼が実現できる燃焼制御システムを開発し、実機での適用試験を実施して効果を確認したので、その結果を報告する。

## 2. CFB ボイラプロセスの概要

CFB ボイラは燃料粒子を燃焼空気によって流動化する流動層燃焼ボイラの一種で、その流動化速度が比較的速く、燃焼室出口に飛散粒子の捕集循環回路を設けたことを特長としている。この燃焼方式は下記の特長を有している<sup>1,2)</sup>。

### (1) 燃料適応性が高い。

燃焼反応が燃焼室高さ方向全域で進行し、かつ流動粒子の循環回路があるので、燃焼反応時間が長く取れる。そのため、多様な燃料への適応性が高く、また多種燃料の混焼が容易である。さらに流動粒子の保有熱による乾燥能力が高く、高含水率の燃料も事前乾燥なしに直接供給が可能である。



写真 1 紀州製紙株式会社 CFBボイラ  
Photo 1 KISHU PAPER Co., Ltd. CFB Boiler

(2) 環境負荷が低い。

SOxについては燃焼室内に石灰石を直接投入することにより、乾式の炉内脱硫が可能である。また、NOxについては比較的燃焼温度が低いため(850～950℃)サーマルNOxの発生が抑制され、また燃焼空気が多段吹き込みによりフューエルNOxも低減される。

(3) 低空気比燃焼が可能である。

高速流動化のため燃料粒子と燃焼空気間の相対速度が大きく、固気反応が良好なので、過剰空気率を低く設定できる。

(4) 設備の経済性が高い。

環境負荷が低く特別な排ガス処理設備が不要なので、設備の機器構成が簡素化され、設備費の経済性が向上

している。

CFB ボイラ設備のフローを図1に示す。

燃焼室はメンブレン式の水冷壁で構成されており、高い気密性の確保と放散による熱損失の低減を図っている。燃焼室底部の空気ノズルから一次燃焼空気が供給されて粒子を流動化している。燃料は燃焼室下部へ直接供給され、この一次燃焼空気によって燃焼室内の流動粒子と速やかに攪拌混合される。低NOx燃焼のため中段から二次燃焼空気を吹き込み、これより下の空間ではいわゆる還元燃焼帯を形成している。

燃焼室上部出口には流動粒子や未燃分を捕集するための捕集部(サイクロン)、および捕集した流動粒子などを燃焼室に戻す戻し管を備えている。サイクロンではそれらを排ガスと流動粒子や比較的粒径の大きな灰などに分離する。捕集部で分離した排ガスは、比較的粒径の小さな灰などを同伴して対流伝熱部へと送られ、バグフィルタにて除塵後に煙突から外部へと放出される。また、サイクロンで回収した流動粒子や比較的粒径の大きな灰などは、流動粒子として、シール部および戻し管を介して燃焼室下部へと戻して循環させるとともに、未燃分の再燃焼が行われる。

### 3. CFB ボイラにおける制御の特長

JFEのCFBボイラにおいては、通常のボイラ制御に加え以下のような制御方式を採用し、制御の高度化を図ってきた。

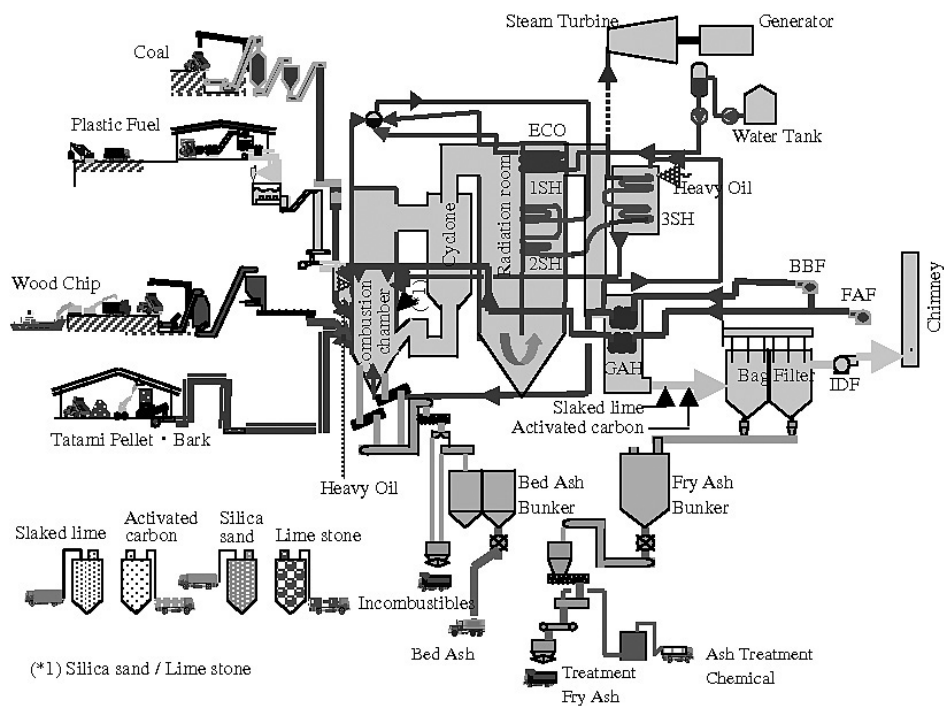


図1 CFBボイラ設備フロー図(紀州製紙株式会社紀州工場)  
Fig. 1 Schematic flow of CFB boiler (KISHU PAPER Co., Ltd.)

### 3.1 ボイラマスタと燃料投入量制御

通常、タービン発電機は発電量（または送電量）指令値による発電量（送電量）制御を行っており、ボイラマスタは主蒸気圧力の PID 制御（比例積分微分制御）を行っている。このボイラマスタからの出力を燃料投入熱量指令値とし、あらかじめ設定された各燃料の投入熱量比率に割り振った後、燃料ごとの単位熱量から各燃料の投入量を決定する方式を採用している。また、各燃料投入系について、ボイラマスタによる圧力制御に参加するかどうかを選択し、参加しない系は投入熱量一定制御を行う。この方式により、各燃料の投入熱量比率変更時やいずれかの燃料投入系が不調になり、他の燃料でバックアップする際にも、合計投入熱量を一定に保ちボイラ出力の変動を抑制することが可能となっている。

また、燃料の単位熱量変化によるボイラマスタ出力と燃焼空気量とのズレなどを解消するため、運転中の燃料投入量から求めた予測主蒸気流量と実際的主蒸気流量との比から求めた補正值によりボイラマスタ出力を補正する、熱量補正制御を行っている。

### 3.2 ボイラ運転の自動化

JFE の CFB ボイラにおいては、ボイラ（タービン発電設備を備える場合はそれも含めて）の運転は、補機の起動停止を含めて自動化シーケンスにより各工程がワンボタンで行えるよう自動化されている。

- ・ 起動シーケンス（補機起動、点火・昇圧、主燃料切替、タービン通気、発電機併入、負荷上昇）
- ・ 停止シーケンス（負荷降下、発電機解列、タービン停止、ボイラ停止、補機停止）

通常運転中のプラント制御についても、そのほとんどが自動化されており、JFE エンジニアリングが納入した運転中の CFB プラントでは夜間は 2 名体制で運転を行っている。

## 4. CFB ボイラ制御における課題と対応

CFB ボイラの燃料が石炭などの性状のバラツキが小さい

燃料から、性状のバラツキが大きい多種多様な廃棄物系の燃料に替わるにつれ、ボイラの燃焼において、使用燃料の性状変動に起因する燃焼位置・燃焼状態の変動や局所高温化、燃焼排ガス性状の不安定化などが発生してきた。また、多種類の燃料を混焼させた場合、燃焼状態の変化がさらに複雑化する。

これらの問題に対応し、より最適で安定した燃焼状態を得ることを目的として、ルールベース型多目的制御などの機能を備えた新しい燃焼制御装置を開発し、従来の PID 制御を主体とした制御系を補完する形で、以下に述べる各制御系の適正化、高度化を図った。

### 4.1 炉内温度適正化制御

従来の燃焼空気量制御においては、一次空気 2ヶ所、二次空気 2ヶ所の各空気量設定はその時々燃料投入熱量の関数として与えている。この場合、燃料の投入比率や性状、ボイラ負荷の変化により、燃焼速度・浮遊位置・主燃焼位置・燃切り位置などが変化し、燃焼室温度の偏りや局所の上昇が生じることがある。一方、サーマル NOx 抑制のために燃焼室温度は一定範囲内に収める必要がある。また、クリンカ発生防止のため、燃焼室各部の温度が 1000℃を超えないようにすることが必要である。またサイクロン出口温度など下流部温度の過度な上昇の抑制も、バグフィルタなどの設備保護の観点から重要となる。

そこで、燃焼制御装置を用いて、燃料投入比率や過去の温度実績から燃焼室内各部の目標温度を設定し、その目標に追従するように 4ヶ所の空気吹込口からの燃焼空気量のバランスをルールベース制御により調整する制御系を開発した。

この燃焼空気バランス制御は 4ヶ所から炉内に吹き込む空気のバランスを変更することで、投入された燃料をできるだけ炉全体でバランス良く燃焼させ、炉内各部の温度を平準化する制御である。たとえば、保有熱量が高く、燃焼速度が速い燃料の比率が多くなり、燃焼室中部温度が上昇した場合には、一次空気比率を増加させて主燃焼位置を下流側へ移動させるように制御を行う。

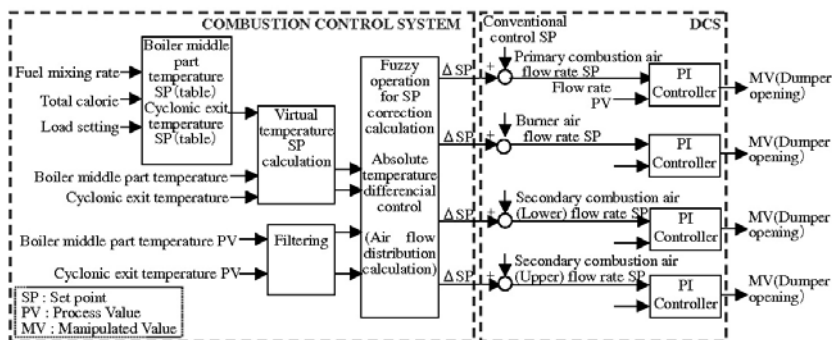


図 2 燃焼空気バランス制御 フロー図  
Fig. 2 Conversion air balance control flow diagram

具体的な制御手順を以下に記す (図 2)。

(1) 目標温度の決定

燃料投入比率・燃料合計保有熱量・ボイラ負荷を入力として、テーブルにより燃焼室中部温度、およびサイクロン出口温度の目標温度を決定する。

(2) 仮想目標温度計算

本制御は各々の温度を目標温度に一致させるのではなく、複数の制約条件を満足しつつ各部温度を目標温度に近づけてゆき、あるバランスした安定状態を得ることを目的としているので、現状の温度と目標温度の間に仮想目標温度を設定して、その温度に追従させるように制御している。各条件の重み付けはパラメータにより調整可能である。

(3) 空気配分バランス演算

現状の燃焼室各部温度と仮想目標温度との差により、4ヶ所の燃焼空気量の補正値をルールベースにより決定する。

4.2 排出ガス濃度低位安定化制御

排出ガス成分の中でも特に問題となる NOx を低減するためには、基本的に燃焼室出口の O<sub>2</sub> 濃度を低く設定するとよいが、大きく下げると未燃ガス・未燃固定炭素の増加により CO 濃度が上昇する。また、O<sub>2</sub> 濃度を増減させると SOx 濃度や燃焼室各部の温度にも影響する。

そこで、NOx と CO の相反関係を考慮し、さらに SOx や炉内温度についての制約条件など、操業の各指標を総合的に考慮したルールベース型多目的制御系を開発した。

本制御では炉内操業指標・制約に応じてルールベースにより燃焼状態を総合的に判断し、O<sub>2</sub> 濃度目標を変更している。

具体的な目標値変更方法は以下のとおりである (図 3)。

- (1) 現在のボイラ負荷に基づき O<sub>2</sub> 濃度基準値を設定する。
- (2) 燃焼室中部温度により基準値を補正する。
- (3) サイクロン出口温度により基準値を補正する。
- (4) CO, NOx, SOx 濃度により補正値をルールベースにより決定する。

これらすべての条件を満たすように現状の最適値を決定し、O<sub>2</sub> 濃度補正値としている。

4.3 HCl 低減用消石灰吹込量制御

HCl 低減用の消石灰吹込量制御は、分析計の測定遅れ・化学的反応遅れ、バグフィルタ消石灰付着分効果などによる計測・制御上のむだ時間が大きく、かつむだ時間が変動するため、フィードバック制御の適用が困難である。そのため、ボイラ負荷の関数により吹込量を設定している。また、HCl 発生量にバラツキがあるので規制値超過のリスクを考慮して設定量は多めとなっている。

この消石灰使用量の適正化のため、今回、操業データを用いて予測した将来発生 HCl 量に基づいて、ルールベース制御により消石灰吹込量を決定する制御系を開発した。

本制御系はむだ時間を考慮して、5～15 min 程度の長周期での制御を行っている。具体的な制御方法は以下のとおりである。

(1) 将来 HCl 濃度予測 (図 4)

今回サンプリングした HCl 濃度値と前回サンプリングした濃度値の傾き、前回の消石灰吹込量実績などから HCl 濃度の予測基準値を求める。その後、今回サンプリングから次回サンプリングの間で燃料投入比率やボイラ負荷の変更があった場合には、それを考慮して予測値を補正する。

(2) ルールベース制御による操作量決定 (図 5)

目標偏差の値と将来予測値の変化方向によりルールベースで制御ゲインを決定し、それを将来予測値の目標偏差に乗じて補正量を決定している。ルールベース

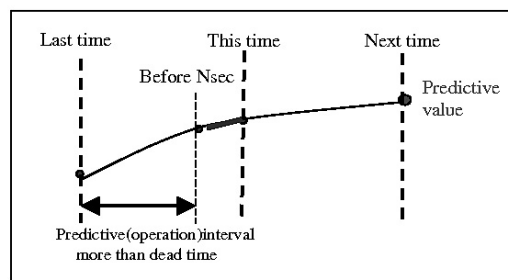


図 4 将来 HCl 予測概念図

Fig. 4 Concept of future HCl density estimate

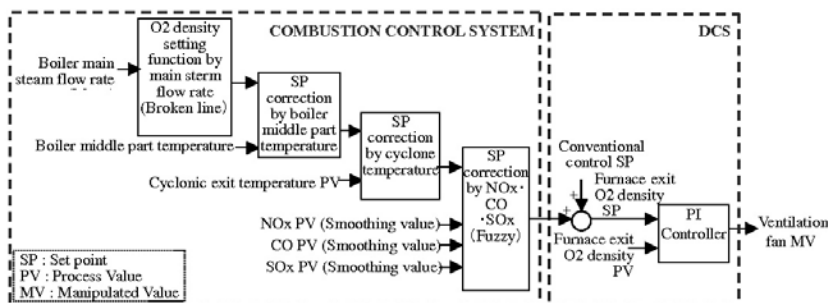


図 3 排出ガス濃度安定化制御フロー図

Fig. 3 Exhaust gas stabilization control flow diagram

		Direction of change in the future		
		Decrease	Keep	Increase
Deviation of object	Negative largeness	Decrease	Small decrease	Keep
	Negative smallness	Small decrease	Keep	Small Increase
	0	Keep	Keep	Increase
	Positive smallness	Keep	Small Increase	Increase
	Positive largeness	Keep	Small Increase	Large increase

図5 ゲイン決定ルールテーブル  
Fig. 5 Gain decision rule table

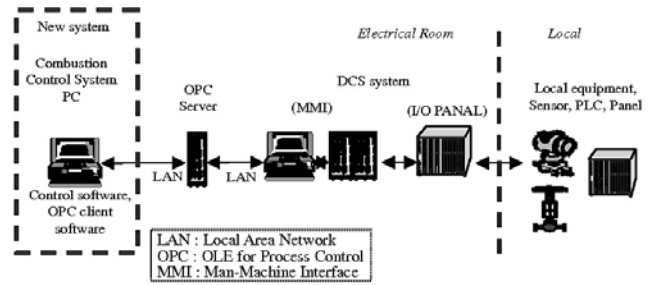


図6 制御システム概要  
Fig. 6 Outline of control system

でゲインを決定するのは、将来の目標偏差状態に応じた適切な非線形なゲインの設定を行うためである。

## 5. 実機適用試験の結果

### 5.1 試験概要

2006年度よりの3年間で本燃焼制御装置の試験機の開発および実機適用試験を実施した。試験はJFEエンジニアリングが納入した株式会社岩国ウッドパワー岩国発電所殿(2005年竣工)、および紀州製紙株式会社紀州工場殿(2008年竣工)のCFBボイラに試験機を設置して実施した。岩国発電所は生木と建築廃材の混焼、紀州工場は木質チップ、プラスチック、石炭、バークまたは畳ペレットの混焼にて試験を実施した。

(株)岩国ウッドパワー岩国発電所および紀州製紙(株)紀州工場のCFBボイラの設備概要を表1に示す。

### 5.2 制御システム構成

制御システムの構成概要を図6に示す。

DCS (Distributed control system) による既存制御系はそのまま使用し、燃焼制御装置PCはDCSとは別に設置して並行して補正演算を行い、その結果をDCSの既存制御系の

表1 CFBボイラの設備仕様((株)岩国ウッドパワー岩国発電所, 紀州製紙(株)紀州工場)

Table 1 Plant data of CFB boiler (Iwakuni Wood Power Company, Ltd. and KISHU PAPER Co., Ltd.)

	Iwakuni Wood Power Company Ltd.	KISHU PAPER Co., Ltd KISHU WORKS
Boiler type	Natural Circuration, single Drum Type	Natural Circuration, single Drum Type
Generating stern	45 t/h	130 t/h
Steam pressure	5.7 MPa	10.3 MPa
Steam temprature	453℃	533℃
Fuel	Raw wood chip/ Constructive scrap wood chip	Plastic/Wood chip/ Coal/Bark/Mat pellet
Commissioned date	Dec. 2005	Aug. 2008

補正量として与えることで、より最適な運転状態を得ることを基本思想とした。

そのため、既設DCSにはデータ授受用のタグ、および燃焼制御装置からの補正値を加算するロジックを追加した。燃焼制御装置と既設DCSとのデータ授受は、新設したOPCサーバを介して行っている。

### 5.3 試験結果および考察

#### (1) 炉内温度適正化制御

(株)岩国ウッドパワー岩国発電所での試験結果の一例を図7に示す。

この場合、生木:建廃=30:70と45:55の二とおりについて、燃焼制御装置使用時と従来制御のみの時とで比較を行っており、建廃比率が高く燃焼速度が速い場合(生木:建廃=30:70)に、燃焼室中部温度の低減効果が明確に現れた。

その他の条件においても燃焼室温度の平準化、および健全化(<950℃)の効果を確認した。

#### (2) 排出ガス濃度低位安定化制御

紀州製紙(株)紀州工場での試験結果を図8に示す。燃焼制御装置の適用によりECO出口O<sub>2</sub>濃度が低い、すなわち総燃焼空気量が少ない操業となっているが、

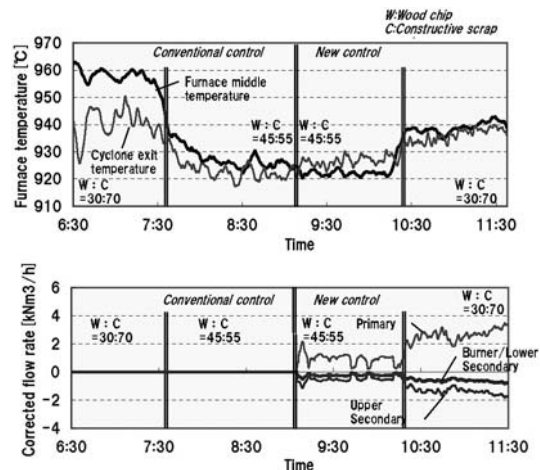


図7 炉内温度適正化制御試験結果  
Fig. 7 Result of the furnace temperature control

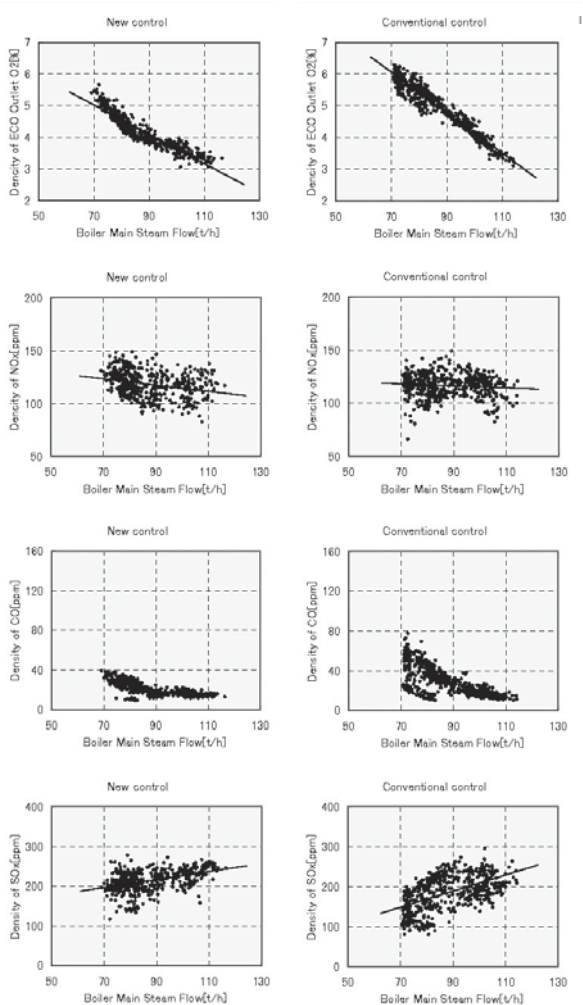


図 8 排出ガス濃度安定化制御試験結果

Fig. 8 Result of the exhaust gas stabilization control

その効果により高負荷領域においては制御装置適用時の方が NOx 濃度が抑制されている。また、低負荷領域では CO 濃度について特に顕著な濃度の低減効果が得られている。SOx 濃度は上昇傾向ではあるが管理値 (300 ppm) には至っておらず問題のないレベルである。

試験全般において NOx および CO 濃度の低減効果が得られ、その他の指標については問題ないレベルに抑えられていることが確認できた。また、本制御の適用により燃焼空気の総量が減少するため、ファン動力の削減効果が得られることも確認された。

(3) HCl 低減用消石灰吹込量制御

(株) 岩国ウッドパワー岩国発電所での試験結果を図 9 に示す。

HCl 濃度の管理値  $80 \text{ mg/Nm}^3$  に対して制御目標値を  $78 \text{ mg/Nm}^3$  として燃焼制御装置による制御を行った。

その結果、HCl 濃度の変動に対し離散的に消石灰投

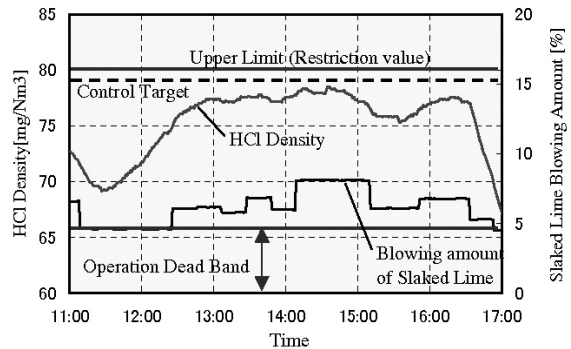


図 9 消石灰吹込量制御試験結果

Fig. 9 Result of the slaked lime blowing control

入量を変更する制御により、管理値を超えず目標値に追従しており、また HCl 濃度が低下した場合には、投入量を下限まで下げている。これにより、必要最低限の消石灰投入量で HCl を管理値以下に制御できることが確認された。

6. おわりに

今回、ルールベース型多目的制御などの機能を備えた CFB ボイラ用燃焼制御システムを開発し、実機での適用試験を実施して各制御系についての適正化効果を確認した。

今後は本燃焼制御システムを JFE エンジニアリングの CFB ボイラに標準装備するとともに、さらなる制御性能の向上を目指して開発に取り組んで行く予定である。

末筆ながら本制御システムの開発にあたり、実機適用試験に御協力いただいた株式会社岩国ウッドパワー殿、および紀州製紙株式会社殿に対し深く謝意を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 吉田則彦ほか. NKK-Steinmuller 高速内部循環流動層ボイラ. NKK 技報. 1991, no. 134, p. 61-68.
- 2) 山本晃司. 循環流動層ボイラによるバイオマス発電. NKK 技報. 2001, no. 174, p. 22-26.



中尾 展行



島本 拓幸



山本 晃司