

RDF 発電用内部循環流動床ボイラの動特性解析と制御

栗林 榮一*、松岡 賢治*、安河内 剛*

宮本 裕一**、村上 昭二**、森 芳信**、小谷野 薫**

*川崎重工業(株) 環境装置制御システム部

神戸市中央区東川崎町1丁目1番3号(神戸クリスタルタワー)

**川崎重工業(株) 電子・制御技術開発センター 開発部

明石市川崎町1-1(明石工場)

概要

近年、ごみ焼却施設は、①廃棄物をエネルギー源として有効利用する、②ごみの広域化への対応、③ダイオキシン抑制、④高効率発電システムの確立、等様々な角度から注目を浴びている。

本報では、このような状況で求められている高効率 RDF 発電用内部循環流動床ボイラの概要と実証炉運転により得たプラント運転特性について紹介する。さらに、内部循環流動床ボイラの動特性シミュレーションモデルによる制御システム検討例と運転実績を紹介する。

キーワード

高効率発電、内部循環流動床ボイラ、動特性解析

1. はじめに

近年、廃棄物をエネルギー源として、高効率発電の研究・開発が行われている。特にごみ焼却のダイオキシン問題を機に、RDF を利用した高効率発電システムが注目されている¹⁾。

当社では、RDF を利用した高効率発電システムである内部循環流動床ボイラを開発し、廃棄物処理センター内に建設した実証試験設備にて運転特性の把握、制御システム構築を推進している。また熱プラントの運転特性把握、制御システム構築を目的に、従来より計算機技術を駆使して各種のプラントに適した制御・監視・支援システムの研究開発を推進している²⁾。

本報では、まず高効率 RDF 発電用内部循環流動床ボイラの概要と実証炉運転により得たプラント運転特性について紹介する。さらに、内部循環流動床ボイラの運転特性把握、効率のかつ効果的な制御システム構築目的とした動特性シミュレーションモデルによる制御システム検討例と運転実績を紹介する。

2 高効率 RDF 発電用内部循環流動床ボイラの概要

(1) 内部循環流動床ボイラ

当社では、高効率発電に必要な高温・高圧蒸気による熱回収が可能となる流動床燃焼ボイラとして、内部循環流動床ボイラを開発した。図1に内部循環流動床ボイラの構造の一例を示す。流動床部分を仕切壁で燃焼セルと収熱セルに分離し、燃焼セルにのみ RDF を投入し燃焼させる。燃焼熱により高温となった流動媒体は、仕切壁の上部隙間を通して、燃焼セルから収熱セルに流入し、収熱セル内に設置した伝熱管で熱回収を行う。

熱回収により冷却された低温の流動媒体は仕切壁の下部から燃焼セルに戻り、高温の流動媒体と拡散・混合して燃焼セル層温度を所定内の温度に保っている。

この仕切壁構造により、収熱セル内伝熱管の腐食を大幅に抑制することが可能となり、収熱セル内に最終過熱器を配置することができるため、従来の廃棄物発電用ボイラと比較してより高温・高圧蒸気による熱回収が可能となる。また収熱セルの流動空気量により層内伝熱管の収熱量を変えられるため、蒸発量、蒸気温度を迅速に制御することができる。

(2) 実証試験設備

廃棄物処理センターに内部循環流動床ボイラ実証試験設備を建設し、プラント仕様は以下の通りである。

処理能力	: 24 [t/d]	ごみ発熱量 (低位)	: 3,350 [kcal/kg]
蒸気条件	: 85 [ata] × 504 [°C]	蒸発量	: 2,000 [kg/h]

RDF はスクリーフィーダ、ロータリバルブを介して、流動層上方から燃焼セルに供給される。炉出口ガスは冷却、集じん、湿式洗煙処理を施されて大気へ放出される。ボイラ系統はボイラドラムから層内蒸発管および水冷壁管に分配され、発生蒸気は蒸気ドラムに回収された後、層内過熱器管に通気される。主蒸気は減温減圧された後、復水器にて給水タンクへ戻される。

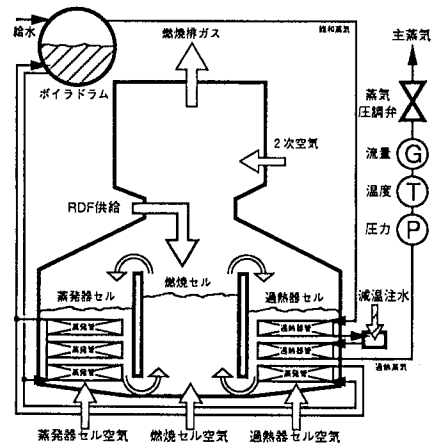


図1 内部循環流動床ボイラ(実証試験設備)

3 内部循環流動床ボイラの動特性解析

(1) 実証試験設備による開ループ動特性試験

内部循環流動床ボイラの運転特性把握を目的に、

- ① RDF 供給量変化試験
- ② 燃焼セル空気量変化試験
- ③ 蒸発器セル空気量変化試験
- ④ 過熱器セル空気量変化試験
- ⑤ 減温注水量変化試験

の開ループ動特性試験を実施した。

図2に開ループ動特性試験結果の一例を示す。過熱器セル空気量ステップ変化に主蒸気温度が追従しており、過熱器セル空気量操作が主蒸気温度制御に有効であることが分かる。

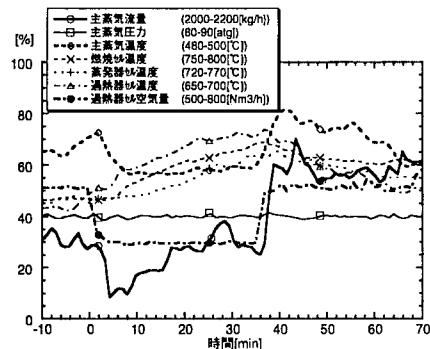


図2 開ループ動特性試験結果(過熱器セル空気量変化)

(2) 動特性シミュレーションモデル

上記試験により得た各操作量の操作性(時定数)・操作範囲(感度)等の開ループ特性に関する知見を活用し、動特性シミュレーションモデルを開発した。石炭焚き流動床ボイラおよび流動床ごみ焼却炉開発時に作成した数式モデル³⁾を基本とし、層物質循環など内部循環流動床ボイラ特有の現象を考慮して数式モデルを作成した。以下に主な仮定と代表式を示す。

【仮定】

- ・ 燃焼炉内を燃焼セル、蒸発器セル、過熱器セル、フリーボード部に分け、エネルギーバランス、マスバランスを考える。

- ・層物質の燃焼セルから収熱セル（蒸発器セル，過熱器セル）への移動は、燃焼セル空塔速度によるポイド率、すなわち空気流量と層温度の関数にて代表する。
- ・炉内の燃焼は完全燃焼とし、層内燃焼率（炉内に供給されRDFが層内で燃焼する割合）は燃焼セル空気比と層温度の関数にて代表する。
- ・蒸発管および過熱器管における収熱量は層内ガス重量流量に比例する。なお、エネルギーバランス式における熱交換器温度は蒸気側出口温度で代表する。
- ・数式中の関数・係数は、当社要素試験設備および実証プラントにおける運転実績より得た。

【数式】 $C_b W_{bc} \frac{dT_{bc}}{dt} = Q_{rb} + Q_{ac} - Q_{be} - Q_{bs}$... (1)

$C_b W_{be} \frac{dT_{be}}{dt} = Q_{ae} - Q_{ge} - Q_{be} - Q_{te1}$... (2)

$C_b W_{bs} \frac{dT_{bs}}{dt} = Q_{as} - Q_{gs} + Q_{bs} - Q_{te2} - Q_{s1} - Q_{s2}$... (3)

$Q_{rb} = H_{ur} G_r \eta_{rb}$... (4)

$Q_{te1} = K_{te1} G_{ae}^n (T_{be} - T_{sd})$... (5)

$Q_{te2} = K_{te2} G_{as}^n (T_{bs} - T_{sd})$... (6)

$Q_{s1} = K_{s1} G_{as}^n (T_{bs} - T_{ss1})$... (7)

$Q_{s2} = K_{s2} G_{as}^n (T_{bs} - T_{ss2})$... (8)

$Q_{be} = F_{be} (G_{ac}, T_{bc}) \times C_b (T_{bc} - T_{be})$... (9)

$Q_{bs} = F_{bs} (G_{ac}, T_{bc}) \times C_b (T_{bc} - T_{bs})$... (10)

$\eta_{rb} = F_{rb} (\lambda_{bc}, T_{bc})$... (11)

【記号】
 Q_r : 燃焼発熱量 [kcal/h]
 Q_c : 層物質循環熱量 [kcal/h]
 Q : ボイラ収熱量 [kcal/h]
 Q_g : ガス顕熱量 [kcal/h]
 Q_a : 空気顕熱量 [kcal/h]
 H_{ur} : 燃料低位発熱量 [kcal/kg]
 G_r : RDF供給量 [kg/h]
 G_a : 空気流量 [Nm³/h]
 T_b : 層温度 [°C]
 T_g : 蒸気温度 [°C]
 W_b : 層物質重量 [kg]
 C_b : 層物質比熱 [kcal/kg°C]
 λ_b : 空気比 [-]
 η_{rb} : 層内燃焼率 [-]
 K : 伝熱係数 [kcal/(Nm²)h¹⁻ⁿ°C]
 n : 伝熱流量係数 [-] F: 関数
 【添字】
 b: 流動層 f: フリーボード
 c: 燃焼セル e: 蒸発器セル
 s: 過熱器セル d: ボイラドラム
 e1: 蒸発器セル内蒸発管
 e2: 過熱器セル内蒸発管
 s1: 第1過熱器管
 s2: 第2(最終)過熱器管
 sp: 過熱低減器

(3) 実証試験設備運転データによる数式モデル検証

上記数式モデルを用いてRDF供給量、各セル空気量、減温注水量などの制御操作に対するプラント挙動の動特性シミュレーションを実施した。ここで、シミュレーション結果の一例として、図3に蒸発器セル空気量をステップ変化させた場合のシミュレーション出力例を示す。図中破線はシミュレーション出力、実線は実証炉運転データに対応している。シミュレーション出力は実証炉運転データと良好な一致を得られており、提案した数式モデルにより内部循環流動床ボイラの動特性解析を行えることが確認できた。

4 内部循環流動床ボイラの制御検討

(1) 基本制御系統

最近の事業用火力発電では、負荷変化速度等に対する優れた制御特性が要求されている。そこで内部循環流動床ボ

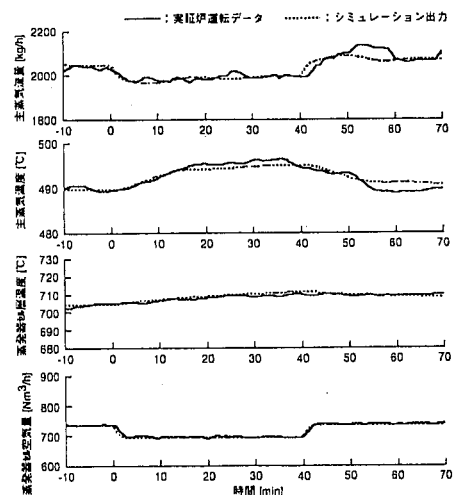


図3 蒸発器セル空気量変化に対する応答

イラの制御目標を微粉炭ボイラと同程度の負荷変化率 4 [%/min]とし、基本制御システムを構築した。実証試験設備では主蒸気圧力マスターモードと主蒸気流量マスターモードの両モードを適宜切り替えて使用可能であるが、今回の実証試験では主蒸気流量マスターモードにて運転した。

(2) 基本制御システム検証および実証試験

動特性シミュレーションモデルを用いて基本制御システムの妥当性検証を実施し、制御調整試験の効率化を図った。図4は動特性シミュレーションにより主蒸気流量・温度制御ロジックを検証した一例であり、蒸発器セルおよび過熱器セル空気量操作により主蒸気流量・温度制御ともに良好な制御性が得られている。動特性シミュレーションによる検討結果を踏まえ実証試験設備にて制御特性試験を実施した。図5は実証試験設備にて実施した負荷追従試験の一例である。負荷変化率±4 [%/min]にて主蒸気流量偏差±2 [%]以内、主蒸気温度偏差±3 [°C]以内と良好な制御特性結果が得られており、実証試験設備にて採用した制御方式が妥当であることが確認できた。

今後、制御ロジックの妥当性検証や制御調整試験効率化に加えて、制御操作間の相互干渉に対応する非干渉制御手法、部分負荷時の特性変化の影響に対応する適応制御手法、負荷追従特性向上のための予測制御手法等のアドバンスド制御手法の開発・導入に動特性シミュレーションを活用する予定である。

5 あとがき

本報では高効率 RDF 発電用内部循環流動床ボイラの概要と実証炉運転により得たプラント運転特性について紹介した。さらに運転特性把握、制御システム構築を効率的かつ効果的に実施するために開発した動特性シミュレーションモデルによる制御システム検討例と運転実績を紹介した。

最後に、当社では 315 [t/d] ,20,900 [kW] の高効率 RDF 発電用内部循環流動床ボイラの詳細設計を終えており、実証試験設備での運転実績および今回開発した動特性シミュレーションモデルによる動特性解析技術を高効率 RDF 発電技術実現に活用していく予定である。

【参考文献】

- 1) 山本幸司：“RDF エネルギー利用システム”，配管技術 [’98 増刊号] (’98) pp. 48-52
- 2) 宮本裕一，林正人，小谷野薫，横山賢一：“知識工学を活用した焼却炉の燃焼状態診断と運転支援装置”，計装 [41-7] (Jul. ’98) pp. 43-47
- 3) 黒崎泰充，大久保直臣，八木栄一，宮本裕一，館林尚，清水達二郎：“流動床ボイラの動特性と制御”，火力原子力発電 [34-1] (Jan. ’83) pp. 67-75

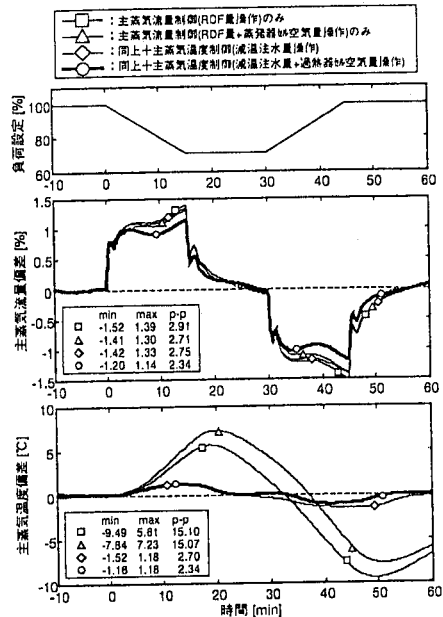


図4 主蒸気流量・温度制御検討例

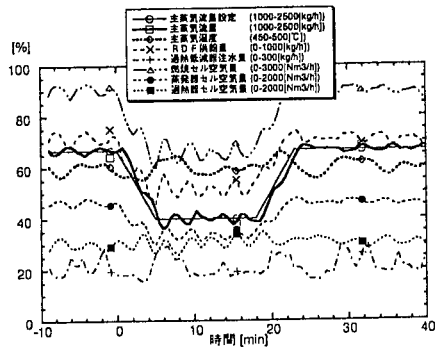


図5 制御特性試験結果(負荷追従試験)