流動層石炭燃焼ボイラの動特性*

森 滋勝^{*1}, 成川 公史^{*2}, 三井 達夫^{*3}
友保 純直^{*3}, 竹林 臣友樹^{*3}

Dynamic Model of Circulating Fluidized Bed Coal-Fired Boiler

Shigekatsu MORI, Kimihito NARUKAWA, Tatsuo MII,
Yoshitada TOMOYASU and Shigeyuki TAKEBAYASHI

To establish an advanced control system for a multi solid circulating fluidized bed boiler (MSFB), a simplified dynamic model of the 70 t/h MSFB unit was developed. Equations of material balance and enthalpy balance were obtained for six regions in the unit: dense bed zone, reducing zone and oxidizing zone in the combustor, cyclone, hot solid reservoir and external heat exchanger. The solid circulating rate inside the combustor was determined to predict the observed temperature profile in the combustor of the 70 t/h unit. It was shown that calculated results of gas components, char conversion and temperature profile were able to describe steady-state operation data considerably well. The solid circulating rate strongly affected the temperature profile in the combustor. It was also found from calculated results for unsteady-state operations that slower responses followed after the sharp responses accompanied with load change and that the char reactivity and the external solid circulating rate affected the peak temperature and the settling time of the responses.

Key Words: Combustion, Dynamic Model, Circulating Fluidized Bed, Gas Component, Char Conversion, Temperature Profile

1. 緒 言

石炭をはじめ各種の固体燃料を効率よくクリーンに燃焼するための新しい燃焼プロセスとして1980年代に登場した循環流動層燃焼装置(CFBC)は中規模用ボイラとしてヨーロッパにおいてその実用化に大成功を収め、その後、米国やアジアにおいても主に産業用ボイラとして急速に導入されている。

わが国でも、すでに十数基のボイラが産業用ボイラとして良好に稼動しており、新しいボイラの建設も進められている。これらの循環流動層燃焼ボイラでは以下のような利点が認められている。

- (1) 広範囲の運転条件において低 NO_x かつ低 SO_x が保たれる
- (2) 優れた燃料対応性
- (3) 負荷変化時における良好な操作性

一方、このような循環流動層燃焼ボイラの産業分野への急速な導入にもかかわらず、合理的なCFBC操作に関する定量的知見はきわめて不十分であり、

CFBCボイラに最適な制御システムを確立するために負荷変化時の挙動を説明できる数学的モデルの開発が急務となっている。しかし、数学的モデルに関してはWeissら⁽¹⁾とBernardiら⁽²⁾の研究が報告されているだけである。Weissら⁽¹⁾によって提出されたルルギ形パイロットプラントに関する報告では、モデルの詳細が不明であり、Bernardiら⁽²⁾によって提出されたモデルについては計算結果に対する評価がなされていない。

本研究では、外部熱交換器を有するマルチソリッド形循環流動層石炭燃焼ボイラの特性を明らかにし、合理的な制御システムを確立するためのモデルを導出するとともに、蒸発量70 t/hの三井循環流動層ボイラ⁽³⁾の操作特性について検討を行う。

なお、本70 t/hボイラは昭和63年度の日本機械学会技術賞を受賞している。

主 な 記 号

A : 伝熱面積
 c_p : 比熱
 C_k : 濃度
 d_{ch} : チャー粒子径
 e : エンタルピー

* 原稿受付 平成4年1月29日。

^{*1} 正員, 名古屋工業大学工学部 (〒466 名古屋市昭和区御器町)。^{*2} 学生員, 名古屋工業大学大学院。^{*3} 三井造船(株) (〒706 玉野市玉原3-16-1)。

- j : 領域番号
 k_{fi} : 物質移動係数
 k_i : 総括反応速度定数
 k'_i : 反応速度定数
 N_{ch} : 粒子の総数
 P : 固体流量
 Pr : プラントル数
 Re : レイノルズ数
 q : 熱量
 Q : ガス流量
 r_k : 反応速度
 T : 温度
 U : 伝熱係数
 V_T : 容積
 W : 滞留量
 α : 外部循環流量比
 β : 内部循環量と外部循環量の比
 γ : 反応率
 ε : 空間率
 θ : 時間

添 字

- C : カーボン
 I : 不活性粒子
 k : ガス反応
 V : 揮発分

2. モ デ ル

循環流動層燃焼ボイラプロセスの負荷変動特性を明らかにするために、粒子循環と外部熱交換器を含む燃焼システムのシミュレーションモデルを燃焼と伝熱の二つの過程を考慮して展開する。

マルチソリッド形循環流動層ボイラのモデルの概要を図1に示す。燃焼部は底部のデンスベッド域(D域)、デンスベッド域と二次空気吹込点との間の還元域(R域)、上部の酸化域(O域)の三つの領域に分けられる。マルチソリッド形循環流動層では供給された塊状の石炭を粉砕し層内の粒子濃度を高く保つために、燃焼部の下部に比較的大粒径で粒子密度の高いアルミナ粒子を投入して、デンスベッドと呼ばれる流動層を形成する。還元域と酸化域は粒子の希薄な層である。これらの三つの領域内でガスと粒子はともに完全混合であると仮定し、各領域で粒子の上昇および下降流を考慮する。

燃焼部から出た未燃チャーを含む飛出し粒子の大部分はサイクロンで燃焼ガスと分離されホットリザーバ(以下HRと略記)に送られる。全流入チャー粒子に対する捕集チャー粒子の割合はサイクロン効率 η によって規定される。

HR内の粒子の一部はデンスベッド域に再循環される。また、残りの粒子は外部熱交換器(以下EHEと略記)で顕熱を回収した後、燃焼部へ再循環される。

このEHEからの二つの粒子循環ラインの一方は酸化域へのリフトラインで、他方はデンスベッド域へのコールドリサイクルラインである。HRとEHEの流動化空気は酸化域に流入する。

サイクロン、HRおよびEHE内のガスは粒子とともに完全混合であると仮定する。

石炭中の揮発分の燃焼はデンスベッド域で瞬時に行われ、またチャーの燃焼は次の反応機構によって行われると仮定する。

式(1)～(3)のチャーの反応に関して、以下の反応速度の計算式を用いた。

$$\text{反応1: } R_1 = -C_{O_2} \frac{N_{ch}}{V_T} \pi d_{ch}^2 k_1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{反応2: } R_2 = -\varepsilon k_2 C_{CO} C_{O_2}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{反応3: } R_3 = -C_{CO_2} \frac{N_{ch}}{V_T} \pi d_{ch}^2 k_3 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 k_i は反応 i の総括反応速度定数でそれぞれ

図1 モデル概要

の反応に対して、以下の式より計算した。

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{k_{f1}} + \frac{1}{k_1}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$k_3 = \frac{1}{\frac{1}{k_{f3}} + \frac{1}{k_3}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、各反応の反応速度定数は以下のとおりである。

$$k_1' = \exp\{\ln(71.9RT) - 1.49 \times 10^8 / RT\} \quad \dots\dots (9)$$

$$k_2 = \exp\{\ln(1.3 \times 10^{11}) - 1.26 \times 10^8 / RT\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$k_3 = \exp\{\ln(4.1 \times 10^9) - 2.48 \times 10^8 / RT\} \quad \dots\dots (11)$$

また、 k_{fi} は反応 i の物質移動係数で、それぞれの反応に対して以下の式より計算した。

$$k_{f1} = Sh \times 1.867 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.6561} / d_{ch} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$k_{f3} = Sh \times 1.42 \left(\frac{T}{1000} \right)^{1.6561} / d_{ch} \quad \dots\dots\dots (13)$$

Sh はシャーウッド数で以下の式より計算した。

$$Sh = 2.0 + 0.6 Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad \dots\dots\dots (14)$$

なお、本モデルでは石灰石による脱硫や NO_x の生成および除去などの反応は考慮しない。

燃焼部内における粒子滞留量についてのデータとしては実機で測定された軸方向圧力分布のデータから推算した値を採用する。負荷変化時の粒子滞留量は、初期定常状態と最終定常状態の間でボイラの負荷に対応して直線的に変化すると仮定する。粒子循環ラインでの粒子流量の時間遅れは無視できるものとする。

循環粒子はすべて球であり、各領域内のチャー粒子径は均一であるとする。

なお、実機では粒子循環量を制御することによって、燃焼部内の温度制御が行われているが、ここでは循環流動層ボイラの基本的な動特性を検討するために制御装置を考慮しないモデルを展開する。

2.1 基礎方程式 マルチソリッド形循環流動層ボイラの動特性を記述する基礎方程式が燃焼部の三つの領域とサイクロン、ホットリザーバおよび外部熱交換器に対して得られる⁽⁴⁾。

これらの基礎式をまとめると式(15)～(19)となる。

不活性粒子（灰および石灰石）の物質収支：

$$\sum P_i(j) = 0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

全ガスの物質収支：

$$\sum Q(j) = 0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

各ガス成分の物質収支：

$$\sum Q(j) C_k(j) = W_c(j) r_{jk} \quad \dots\dots\dots (17)$$

カーボンの物質収支：

$$W_c(j) \frac{dX(j)}{d\theta} = \sum P_c(j) \{1 - X(j)\} - W_c(j) r_{jc} \quad \dots\dots\dots (18)$$

エンタルピー収支：

$$\begin{aligned} C_P(j) W(j) \frac{dT(j)}{d\theta} &= \sum \{C_P P(j) + eQ(j)\} T(j) \\ &= \sum q_c P_c(j) \{1 - X(j)\} + \sum q_v P_{\text{coal}} X_v - UA \Delta T \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (19)$$

これらの連立微分方程式を Runge-Kutta-Gill 法によって数値積分することによって、各領域内のガス組成、チャー反応率および温度の時間変化を計算することができる。

なお、式(19)中の右辺4項はデンスベッド部だけで考慮し、右辺5項の ΔT は外部熱交換器内の蒸気温度と循環粒子の温度差を用いた。

また、本モデルで定常計算を行う場合、操作条件と温度などの初期値を入力して計算を行い、チャー反応率が一定になったときの状態をその操作条件での定常状態としており、非定常計算については定常計算で得られた温度などを初期値として計算を行っている。

図2 内部循環量による温度分布への影響

図3 固体収支（高負荷）

3. 計算結果

3・1 定常状態での計算結果 本モデルでは3個の操作変数（チャー捕集効率： η ，チャー反応性： $r_c/r_{c0}=\gamma$ ，外部循環流量，すなわち，HRと熱交換器から燃焼部に戻された粒子流量： $P_i/P_{i0}=\alpha$ ）と1個の未知数パラメータ（燃焼部内での内部循環量比，すなわち，燃焼部内での下降流量と外部循環流量との比： $P_i/P_{i0}=\beta$ ）を含む。ここでは，外部循環量と内部循環量も不活性粒子流量で表した。パラメータの値は実機の定常状態における炉内温度分布と計算値との比較により決定した。高負荷（蒸発量：60 t/h）時と中負荷（蒸発量：45 t/h）時における内部循環量の変化が温度分布の計算値に対する影響を図2に示す。これらの図は内部循環量を外部循環量の0～10倍の間で変化させたときの計算結果であり，内部循環量が高いほど，（D）域および還元域での温度が高くなり，燃焼部内の温度分布は一樣になるが10倍以上に変化させてもほとんど変化しなくなる。本論文では，実装置の運転経験に基づいて内部循環量と外部循環量の比の値として10倍を採用して計算を行った。

高負荷時での固体収支の推算結果を図3に示す。ここで， P_c はチャー粒子流量， P_i は不活性粒子流量， W_c はチャー粒子滞留量， W_i は不活性粒子滞留量である。この図3から各領域で不活性粒子がチャー粒子に比べかなり多く，また，外部循環量が供給量の約76倍，さらに内部循環量が外部循環量の約10倍となっていることがわかる。さらに燃焼部に供給されるチャー粒子が1.42 kg/s，EHEからの分の循環量が0.26 kg/s，HRからのそれが0.31 kg/s，リフトからの分が0.37 kg/sであり，燃焼部から流出したチャー粒子のサイクロンにおける未捕集排出分が0.019 kg/s，再循環分が0.94 kg/sとなっており，1 cycleで約59%のチャーが燃焼していることがわかる。

中負荷時での固体収支を図4に示す。この図4においても高負荷時と同様に不活性粒子がチャー粒子に比べてかなり多く，また，外部循環量が供給量の約76倍，内部循環量が外部循環量の約10倍であり，全流入チャー粒子が2.05 kg/s，全流出チャー粒子が1.02 kg/sであるので，1 cycleで約50%のチャーが燃焼していることがわかる。

チャー捕集効率，チャー反応性および外部循環量の3個の操作変数を変えたときの高負荷時および中負荷時での温度分布への影響を図5～7に示す。図5はチャー捕集効率を0.9～0.98で変化させたときの影響を示したものであり，捕集効率が高くなると若干温度が上

図4 固体収支（中負荷）

図5 チャー捕集効率による温度分布への影響

図6 チャー反応性による温度分布への影響

図7 外部循環量による温度分布への影響

昇することがわかる。図6はチャーの反応性を0.5~1.5で変化させたときの影響を示したものであるが、チャーの反応性が大きくなるとわずかに温度が上昇することがわかる。図7は外部循環量を0.6~2.0で変化させたときの影響を示したものであるが、外部循環量が大きくなると温度が大きく低下することがわかる。図5~7よりチャー捕集効率とチャー反応性は温度分布に顕著な影響を与えないが、外部循環量は温度分布に大きく影響を与えることがわかる。

3・2 非定常状態での計算結果 高負荷から中負荷へ給炭量と供給空気量をランプ状に5%/minの速度で変化させた場合について、循環量だけを直線的に変化させ、他の温度制御運転を行わないとして計算した結果を図8および図9に示す。図8(a)は下から順にデンスベッド域、還元域、酸化域、サイクロンでの温度応答を示す。図8から、負荷を下げると温度は一度上昇し、すぐ下がりをはじめ、再びゆっくりと上昇することがわかる。図8(b)には外部熱交換器およびホットリザーバの温度応答を示すが、この図8(b)から外部熱交換器では温度が単調にすばやく下がった後ゆっくりと上昇し、ホットリザーバでは外部熱交換器の場合よりやや遅れて同様の傾向を示すことがわかる。

中負荷から高負荷へ負荷を変化させたときの温度応答の計算結果を図9に示す。この場合には、図9(a)に示すように負荷を上げると燃焼部内の温度は逆に一度下がった後すぐ上昇しはじめ、再びゆっくりと低下する。一方、図9(b)に示したように、外部熱交換器では単調にすばやく温度が上昇した後ゆっくりと低下しており、ホットリザーバではやや遅れて外部熱交換器の応答と同様の傾向を示す。次に、他の条件は図8と同一に保ち、チャー捕集効率、チャー反応性および外

図8 温度応答 (60 t/h → 45 t/h : 5%/min)

図9 温度応答 (45 t/h → 60 t/h : 5%/min)

部循環量だけをそれぞれ独立に変化させたときの温度応答の変化を図10~12に示す。なお、この場合には、条件変化にともなって定常温度も変化する点に注意する必要がある。

チャー捕集効率の値が温度応答に与える影響を図10に示すが、チャーの捕集効率の値を0.9~0.98に変化させても温度応答にあまり大きい影響を与えないことがわかる。

チャー反応性が温度応答へ与える影響を検討するた

図10 チャー捕集効率による温度応答への影響

図11 チャー反応性による温度応答への影響

図 12 外部循環量による温度応答への影響

めにチャー反応性を 0.5~1.5 の間で変化させたときの応答を図 11 に示す。反応性が低いときの応答は、鋭いピークを示し静定時間が長くなるが、反応性が高くなるにつれて、ピークが小さくなり静定時間も短くなることがわかる。

図 12 には外部循環量を 0.6~2.0 の範囲で変化させたときの温度応答の変化を示すが、循環量が小さいときには燃焼部およびサイクロンで鋭いピークがみられ、静定時間は短い。循環量が大きくなるとピークが緩やかになり静定時間は大きくなり、さらに循環量が

大きくなると明確なピークがみられなくなり、再び静定時間が小さくなることがわかる。

4. 結 論

循環流動層燃焼ボイラの特性を明らかにし、合理的な制御システムを確立するためのモデルを導出して、定常運転時と負荷変化時のガス組成、チャー反応率および温度の特性を検討した結果、以下の点が明らかとなった。

(1) 定常特性 燃焼炉内部における粒子循環量の値は燃焼炉の温度分布に大きく影響を与え、燃焼炉内部での推定粒子循環量は外部循環量の約 10 倍であり、外部循環量もまた温度分布に大きな影響を与える。

(2) 非定常特性 負荷を下げると燃焼炉内部の温度は鋭く上昇した後すぐに下がりはじめ、再びゆっくりと上昇する。負荷を上げた場合には、下げた場合と逆の応答がみられる。チャー反応性と外部循環量は温度応答の静定時間とピークに大きな影響を与える。

文 献

- (1) Weiss, V., Scholer, J. and Fett, F. N., (Basu, P. and Large, J. F., eds.) Mathematical Modeling of Coal Combustion in a Circulating Fluidized Bed Reactor, *Circulating Fluidized Bed Technology*, II (1988), 289-298, Pergamon Press.
- (2) Bernardi, I., De Marco, A., Prandoni, W. and Radice, A. (Basu, P., Horio, M. and Hasatani, M., eds.), Modeling and Simulation of a Power Plant Equipped with a Circulating Fluidized Bed Boiler, *Circulating Fluidized Bed Technology*, III (1990), 539-544, Pergamon Press.
- (3) 児島・三井・西岡・友保・河野, マルチソリッド型流動層ボイラの開発, 機誌, 92-846 (1989), 390-391.
- (4) Mori, S., Narukawa, K., Yamada, I., Takebayashi, T., Tanii, H., Tomoyasu, Y. and Mii, T., Dynamic Model of a Circulating Fluidized Bed Coal Fired Boiler, *Proc. 11th Int. Conf. Fluidiz. Bed Combust.*, (1991), 1261-1266.