マルチソリッド型循環流動層ボイラの概要と混相流問題について*

Multi Solid Fluidized Bed Boilers and Multiphase Flow Problems

児 島 康 夫 **

三 井 達 夫 **

KOJIMA Yasuo

MII Tatsuo

Abstract The first commercial Multi-Solid Fluidized Bed (MSFB) Boiler in Japan was constructed by Mitsui Engineering and Shipbuilding Co., Ltd. and has been operated as a captive power plant for Kuraray Co., Ltd., a chemical textiles manufacturer.

This paper describes the concept and features of MSFB, the operation data and the technical points which were established to have stable and reliable operating conditions in dense bed and solid circulating system, introducing a few examples of various and complicated behaviours in multiphase flow of MSFB system.

Keywords : Circulating Fluidized Bed Boiler, Multi Solid Fluidized Bed (MSFB)
Dense Bed, L-Valve, Multiphase Flow

1. まえがき

1970年代の2回の石油危機を契機として、電力業界ほか各種産業界で、燃料多様化の努力が払われ、現在では多くの固体燃料焚ボイラが稼動している。その中でも循環流動層ボイラは他の形式の微粉炭焚ボイラ、ストーカ焚ボイラ、或いはバブリング型流動床ボイラに比べ、燃料選択の巾が広く、低NO_x、低SO_xの達成が容易なことから、我が国のように燃料事情が悪く、しかも公害規制の進んだ国に最適のボイラであり、今後は産業用ボイラの主流となるものと目されており、欧米では既に新規発注ボイラの80%以上がこの形式であると言われている。

ここでは、三井造船(株)が我が国で初めて実用化した、三井循環流動層ボイラの原理、特徴、実績例およびその混相流問題について紹介する。

2. 原理および特徴

元来ボイラとは燃料を燃焼させて水を蒸気に変える装置であるが、従来のボイラにおいては燃料を燃焼させる火炉に水冷壁を設け、発生熱量の約半分を火炉内で直接水・蒸気に伝えるものであり、燃焼と伝熱を同時に行うところに使用燃料に対するフレキシビリティを少なくする原因があった。

本ボイラは、この燃焼・伝熱という2つのプロセスを別々のところで行わせるとともにそれ

* 1988.10.21 受付

** 三井造船(株)エネルギープラント本部技術部

〒706 岡山県玉野市玉原3-16-1 電話 0863-31-9617 FAX 0863-31-4046

それを正確に制御できるようにしたところに特徴がある。すなわち、コンバスタ（燃焼炉）では燃焼プロセスのみが行われ、どんな燃料を燃やしても一定のガスおよびソリッド温度となるように制御され、また水・蒸気への伝熱は別に設けられた外部熱交換器および対流伝熱部でのみ行われる。もちろん大型のボイラでは構造上の理由でコンバスタの一部に水冷壁を設けることがあるが、その受熱量はごくわずかである。

このような特徴を持つ本ボイラの流動層方式および粒子循環システムについて以下に説明する。

2. 1 マルチソリッド型流動層方式 (MSFB)

三井循環流動層ボイラは、マルチソリッド型循環流動層 (Multi Solid Fluidized Bed, MSFBと略す) の基本原理に基づくボイラである。^{1),2),3)}

マルチソリッド型流動層 (MSFB) は、コンバスタの下部に、比較的大径で粒子密度の高いアルミナボール等で、デンスベッド（濃厚層）と呼ばれる流動層を形成し、この流動層を通過させる形で、小径の粒子を循環させる方式である。上昇する循環粒子と落下するデンスベッド粒子が相互に影響し合っ、循環粒子の濃度の高い、攪拌、混合の活発な領域が、広範囲の運転条件にわたって、安定して形成されることを特徴としている。

このため、大粒径の燃料も、高い空塔速度 (6~9m/s) で流動化でき、50mm以下の塊状燃料も、乾燥、粗粉碎せずに供給できる。また、デンスベッドの保有熱量が大きい、着火性の悪い高燃料比燃料や、高水分、高灰分の低質燃料なども安定燃焼が可能である。

2. 2 粒子循環システム

外部熱交換器 (EHE) 内に、伝熱管を有し、粒子からの熱回収を行うコールドセルと、伝熱管がなく、高温のままの粒子を蓄えるホットセルの二種類を有し、各々のセルから別々にコンバスタへの循環量が調整出来るリサイクルラインを持っている。

したがって、コンバスタの燃焼温度は、空塔速度（空気比）や、一次、二次空気の配分を変更することなく制御可能であり、また、脱硫率などの調整のためのコンバスタ内粒子濃度もホットセルの非冷却粒子の循環量によりコンバスタ温度とは独立に制御できるため、微粉炭燃焼等の従来の燃焼方式はもちろんのこと、他形式の流動層ボイラと比較しても、より優れた燃料対応性と運転の自由度を有している。

3. 実績例

表1に、三井造船(株)が、岡山県の(株)クラレ玉島工場向に建設したボイラの主要目を示した。

本ボイラは、昭和62年12月に、広島通産局の使用前検査に合格し、以後高い信頼性を要求される一工場一缶一機の発電用ボイラとして順調に営業運転を続けている。図1にプロセスフローを、表2に主要燃料での運転データの一例を示した。

4. MSFB における混相流問題

前述のようにMSFBの粒子循環システムは固気混相流によるものであるが、一般の化学プロセス機器における流動化状態とは異なり、循環粒子の性状が多種多様に变化する所に難しさがある。

表3にはMSFBにおける循環粒子の性状とその運転条件を示したが、循環システムではその組成および条件が種々組合わされて、その場所、場所によって多種多様な混相流（流動化状態・挙動）が作り出されている。

表-1 ポイラ主要目

型 式	三井循環流動層ボイラ
蒸 発 量	70 T/H
最高使用圧力	102kg/cm ² G
最高使用温度	518℃
燃 焼 方 式	マルチソリッド型循環流動層燃焼方式 (Multi Solid Fluidized Bed Combustion)
通 風 方 式	平衡通風
燃 料	石炭（一般炭、無煙炭） 石油コークス、灯油および産業廃棄物
給 炭 方 式	粒径50 mm以下の燃料を、シュートよりデ ンスベッド上部へ重力投入
硫黄酸化物対策	石灰石による炉内脱硫
窒素酸化物対策	低温二段燃焼による生成抑制
ばいじん対策	バグフィルタ
ばい 煙 濃 度	
NO _x	150 ppm 以下(O ₂ : 6%)
SO ₂	130 ppm 以下
ばいじん	50 mg/Nm ³ 以下(O ₂ : 6%)

図1 三井循環流動層ボイラプロセスフロー

表-2 運転実績

燃 料	一 般 炭	無 煙 炭	石油コークス
工業分析			
発揮分 %	26.9	11.5	12.5
固定炭素 %	59.4	74.5	87.1
灰 分 %	13.7	14.0	0.4
硫黄分 %	0.5	1.5	2.2
発熱量 kcal/kg (無水高位ベース)	7030	6950	8600
運転結果			
蒸発量 t/h	71.3	71.8	71.7
蒸気圧力 kg/cm ² G	81.6	82.3	80.5
蒸気温度 ℃	500	500	500
燃 料 量 t/h	9.78	9.97	7.52
石灰石量 t/h	0.46	2.52	1.98
コンバスタ温度			
還元域 ℃	851	849	849
酸化域 ℃	831	825	830
SOx ppm	95.4	96.7	71.0
NOx ppm	52.9	63.6	42.3

表-3 MSFBにおける循環粒子の性状および運転条件

組 成	多成分系として次の材料が混合されている。 砂〔初期投入および補給〕 アルミナボール、砂利 石炭、石油コークス、産業廃棄物 他 石炭灰、未燃チャー 他 石灰石、石灰生成物 燃料に同伴される異物		
粒 径	最 大	50mmオーダーの石炭 他	
	平 均	200~300 μ mの循環粒子	
	最 小	サブミクロンの燃焼灰	
密 度	最 大	3.5 (アルミナボール) から	
	最 小	0.5 (燃焼灰など) まで	
運 転 条 件	圧 力	常圧 (+3000mmH ₂ O~-1000mmH ₂ O)	
	温 度	常温 (起動時) から900℃レベルまで	
	雰囲気	酸化域および還元域 (O ₂ 不足による強い還元域状態となる場合がある。)	
	共存気体	空気, O ₂ , N ₂ , CO ₂ , CO, SOx, NOx	
	空塔速度	0.2m/s~10m/s	

まさにMSFBは固気混相流の見本市と言っても過言ではない。すなわち、図1のフローシートに示したように、コンバスタ内は大径粒子の気泡流動層に共存する高速流動層ないし稀薄輸送層、サイクロンでは固気分離操作、EHEでは気泡流動層、リサイクルラインでは充填移動層および濃厚輸送操作等多岐にわたる固気混相流の流動様式がとられている。

そこで循環流動層ボイラにおける混相流問題についてその事例を紹介し、この分野における混相流問題の研究開発に対する話題を提供したい。

4. 1 デンスベッド流動特性²⁾

MSFBにおけるデンスベッド中の粒子は図2に示したように石炭、デンスベッド材としての

図2 MSFBの概念図

砂利またはアルミナボール、脱硫材としての石灰石、リサイクルされた循環粒子等から構成され、粒径・組成とも種々雑多な固体の混合体として800～900℃の温度範囲、最大9 m/sの空塔速度で、また還元雰囲気の中で攪拌・混合されているが、実際はEHEを経てリサイクルする小径の粒子循環量を増加すると通常粒子終末速度 U_t からは起り得ないと思われる空塔速度で大粒径のデンスベッド材の飛び出し現象が見られ、デンスベッドが維持できなくなる。そのため、操作条件を十分見極めた上でデンスベッド材の材質、粒径を選択しなければならない。

一方、通常の円筒形のデンスベッド形状では大粒子と小粒子が偏析し易く、デンスベッド内の循環粒子のトラップが不十分となり、粒子の滞留時間が短くなるとともにデンスベッド内の温度分布が不均一となり易いことが判明した。

ところが、図3に示すようにデンスベッド形状をテーパードトム型に変更することにより、デンスベッド壁際に下降流、中央部に上昇流となる内部循環流が形成され、またコンバスタ上部からのダウンフローがデンスベッド内で激しく攪拌・混合することが確認され、デンスベッドの着火安定性と燃焼性能を向上させることが可能となった。

図3 テーパーボトム型デンスベッド

4.2 循環粒子流量制御^{4), 5)}

MSFBでは外部熱交換器(EHE)からコンバスタへリサイクルさせる循環粒子の循環量を調整することによりコンバスタの燃焼温度および粒子濃度を制御している。

この制御のためには通常L-バルブと呼ばれる固気搬送方式の流量制御方法が使用されている。その原理図⁷⁾を図4に示した。L-バルブの流動特性はコールドセルとホットセルにおける循環粒子の温度の差、循環粒子中の未燃チャーやCa成分比率等により変動することが判明した。

図4 L-バルブの原理図(流量の大小によるフローパターンを示す)

また、L-バルブの制御用空気量と循環流量の関係はL-バルブのスタンドパイプ内の固気混相流の挙動、水平ラインの流動層抵抗等が相互に関連して、条件によっては自励振動による不安定現象やフリーフロー現象が発生することも確認されている。

それ故、L-バルブまわりの構造、特にコーナー部の空気ノズルの配置等を種々工夫し、流量制御の安定化を計っている。

高温域では、L-バルブの代りにメカニカルバルブを採用し、フリーフロー現象に対処する等、循環システムの場所に応じて、最適な流量制御方式を適用することが重要である。

5. あとがき

循環流動層ボイラに関連する混相流技術の重要な課題で、ここで説明しなかったものとしては、

1) コンバスタ内での流動化特性の解明

(内部循環量の把握)

2) スケールアップ技術の確立

があるが、すべて総合的な固気混相流に関する研究開発の展開^{8),9),10)}に依存する所が大きく、今後ともこの分野に関する研究開発の成果に期待する。

なお、三井循環流動層ボイラの2号機である出光興産(株)千葉製油所向け300t/hボイラは世界最大級の循環流動層ボイラであり、現在試運転中であるが、今後とも実機での運転実績を積み重ね、混相流技術応用分野の発展に役立てて行きたい。

参考文献

- (1) 竹林 保、忍田豊樹：化学装置 Vol.28, No.6, 109-113 (1986) .
- (2) 友保純直 他：循環流動層に関するシンポジウム論文集，東京、化学工学協会，56-59 (1987) .
- (3) Kojima, Y. et al : The 2nd International Conference on CFB, Compiègne France, Université de Technologie de Compiègne, (1988) .
- (4) 友保純直、石沢正芳、阿部 剛：化学工学協会53年会論文集，仙台，C-312 (1988) .
- (5) Mii, T. et al : The 2nd SCEJ Symposium on CFB, Tokyo (1988) .
- (6) Tomoyasu, Y. et al : The 3rd China-Japan Symposium on Fluidization, Beijing, China (1988) .
- (7) Knowlton, T.M. : Gas Fluidization Technology, John Wiley & Sons, New York (1986) .
- (8) 堀尾正毅：燃料協会誌 Vol.65, No.4, 235-246 (1986) .
- (9) 古沢健彦、清水忠明、楊貴林：燃料協会誌 Vol.66, No.5, 322-337 (1987) .
- (10) 森 滋勝：第7回混相流シンポジウム'88, 東京，日本混相流学会 (1988) .