

RDF焚き内部循環流動床ボイラ —構造改良・運転条件改善による長寿命化—

RDF-fired Internal Circulation Fluidized Bed Boiler — Longer Operating Life Achieved with Improved Structure and Operating Conditions



武藤 貞行① Sadayuki Mutoh
森 宏之② Hiroyuki Mori
清水 敬哲③ Hironori Shimizu
竹田 航哉④ Koya Takeda

当社が開発した廃棄物固形燃料（RDF）対応の流動床ボイラ（内部循環流動床ボイラ）は、高効率を実現するため収熱セルに高温高圧蒸気を生み出す層内管構造を採用している。層内管の腐食摩耗が寿命に大きく影響するが、今回2012年に韓国に納入したボイラにおいて層内管の配置変更による摩耗環境の改善と、燃料の改善による腐食環境の緩和を図ることで、層内管寿命を大幅に改善することができた。

Kawasaki's Internal Circulation Fluidized Bed Boiler that runs on refuse-derived fuel (RDF) has achieved high efficiency by adopting an embedded tube structure, which generates high-temperature, high-pressure steam in heat-recovering cells. The operating life of this boiler is largely affected by the corrosive abrasion of embedded tubes. In the boiler delivered to South Korea in 2012, Kawasaki significantly improved the operating life of embedded tubes by rearranging their layout to minimize abrasion, and optimizing the fuel to alleviate its corrosive properties.

まえがき

韓国国内においては、日本国内におけるRPS法（新エネルギー利用特別措置法）に準じて、リサイクル燃料による発電が国策として進められており、2012年より法律が施行された。また、化石燃料によるCO₂の排出量増加など、産業活動の結果が社会に与える影響が大きな問題となっており、安定化燃焼のためのごみの固形燃料化（RDF化）設備およびそれを燃料とした熱電併給設備の建設が進んでいる。

本ボイラでは、主燃料であるRDFを215t/d、従燃料として、石炭を65.5t/d（熱量比率で80：20）使用して、75t/h×6.37MPa×450℃の蒸気を発生し、発電端出力6.0MWの発電および隣接工場への蒸気を供給している。

本ボイラは、流動媒体と呼ばれる加熱された砂の中で燃料を燃焼させる方式により、同時に流動床の内部に熱交換器を設置して効率良く熱回収することが可能である。流動

表1 主要仕様
Table 1 Main specifications

	項目	計画値
燃料	RDF (t/d)	215 ^{*1}
	石炭 (t/d)	65.5 ^{*1}
ボイラ	形式	川崎-FB75U形 内部循環流動床ボイラ
	蒸発量 (t/h)	75
	蒸気条件	6.37MPa×450℃
環境規制値	NOx (ppm)	<70 ^{*2}
	SOx (ppm)	<30 ^{*2}
	HCl (ppm)	<20 ^{*2}
	ばいじん (g/Nm ³)	<0.02 ^{*2}
	ダイオキシン (ng-TEQ/Nm ³)	<0.1 ^{*2}
	CO (ppm)	<50 ^{*2}

*1) RDF, 石炭混焼時
*2) O₂=12%乾きガス換算

1 目的

当社が2012年に内部循環流動床ボイラを納入した韓国益山熱電併給公社は、韓国中部電力とエンジニアリングメーカーのHalla E&Eと産業銀行が出資して設立した「産業エネルギー(株)」という特別供給会社である。

本稿では、このRDF専焼ならびに石炭混焼可能な内部循環流動床ボイラの改良内容とその減肉抑制技術を紹介する。

2 ボイラ仕様

ボイラの主要仕様を表1に示す。

①③ プラント・環境カンパニー エネルギープラント総括部 ボイラ設計部
② プラント・環境カンパニー エネルギープラント総括部 ボイラプロジェクト部
④ プラント・環境カンパニー 環境プラント総括部 環境プラント部

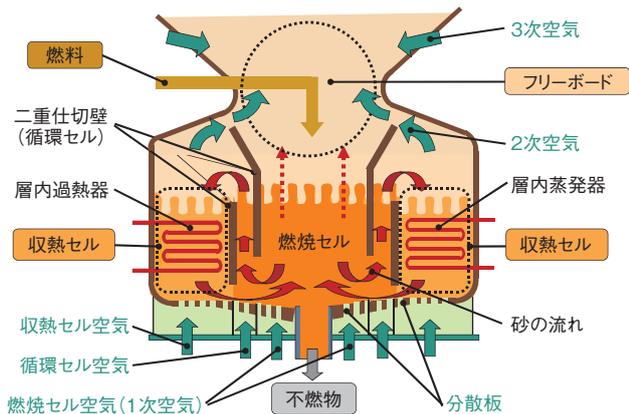


図1 内部循環流動床概念図
Fig. 1 Conceptual diagram of Internal Circulation Fluidized Bed Boiler

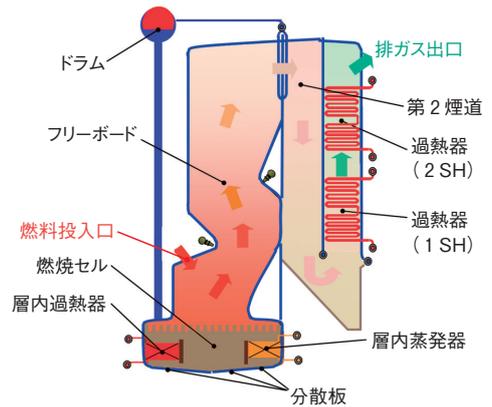


図2 内部循環流動床ボイラ全体図
Fig. 2 Overall view of Internal Circulation Fluidized Bed Boiler

床炉は、図1のように燃料が燃焼するゾーンと熱回収するゾーンを二重仕切壁で仕切り、収熱セルへのHClなど腐食性ガスの侵入を抑制することにより、熱交換器にかかる負荷を低減させる構造になっている。この流動床炉内の燃焼ゾーン（燃焼セル）と熱回収ゾーン（収熱セル）との間で砂の循環（熱の移動）が行われるため「内部循環流動床ボイラ」と呼んでいる。

内部循環流動床ボイラ全体図を図2に示す。

3 層内管の減肉対策

本ボイラは、通常ごみに由来するRDFと石炭とを混焼する運転を行っているが、RDFを専焼することも可能である。このため、当社が大牟田リサイクル発電所に納入したRDF専焼流動床ボイラの実績を生かした腐食対策を実施している。しかし、ごみ焼却特有の腐食環境は厳しく、さらなるボイラ水管の減肉抑制対策が必要である。そこで、今回ボイラ水管の内、特に延命化要求の高い層内管について、さらなる研究開発と試験により減肉抑制対策を検討した。図3は炉底の流動床内の収熱セルに配置した層内管を見たものである。

(1) 層内管の管群ピッチ

従来から、摩耗量は管群中のガス流速に比例するものとして考えており、層内管の摩耗減肉対策としては、伝熱効率にも配慮した管群ピッチを採用してきた。内部循環流動床ボイラの層内管は、本来流動層としての熱伝達が可能な範囲でガス流速を極力低くした設計であり（空塔速度比*： $Ut/U_{mf}=2.0\sim 3.0$ ）、摩耗に対する減肉速度を従来の流動床ボイラより低減する思想となっている。

しかし、新たな摩耗試験および管群中の気泡挙動の解析（図4）の結果、層内管群中の流速よりも、気泡の上昇速度と強い相関があること、さらに気泡の上昇速度が気泡粒径に比例して増加することがわかった。このように摩擦減



図3 層内管
Fig. 3 Embedded tubes

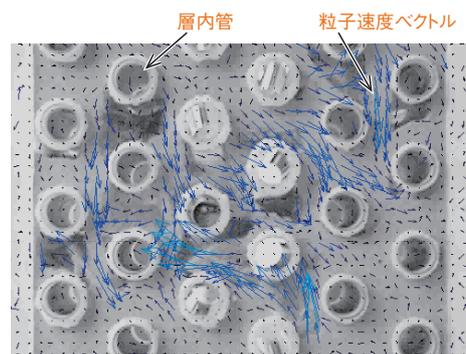


図4 管群中気泡速度解析
Fig. 4 Velocity analysis of bubbles inside the tube bank

肉速度は、管群中の気泡粒径の影響を大きく受ける。ここで、気泡粒径を大きくしないための対策として、次の手法が有効と考えた。

- ① 気泡を分断しやすい構造…気泡を細分する
- ② 気泡を合体しにくくする構造…気泡を細分する
- ③ 気泡を成長しにくくする構造…ピッチを狭くする
- ④ 供給空気量を減らす…空塔速度を低下させる

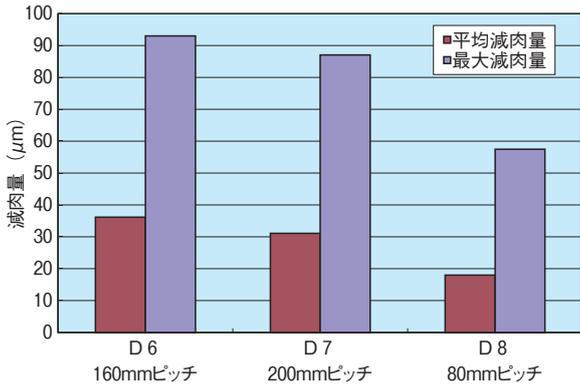


図5 層内管幅寸法と減肉量の関係
Fig. 5 Relationship between furnace width pitch of embedded tubes and tube wall thinning

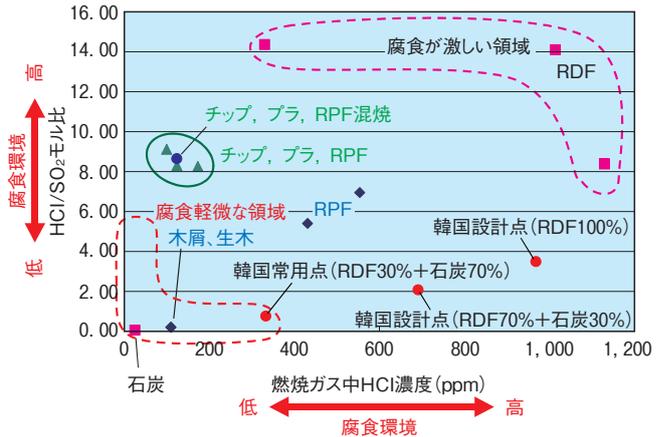


図7 燃焼ガス中HCl/SO₂ガス比の腐食に対する影響
Fig. 7 Impact of HCl/SO₂ ratio in combustion gas on corrosion

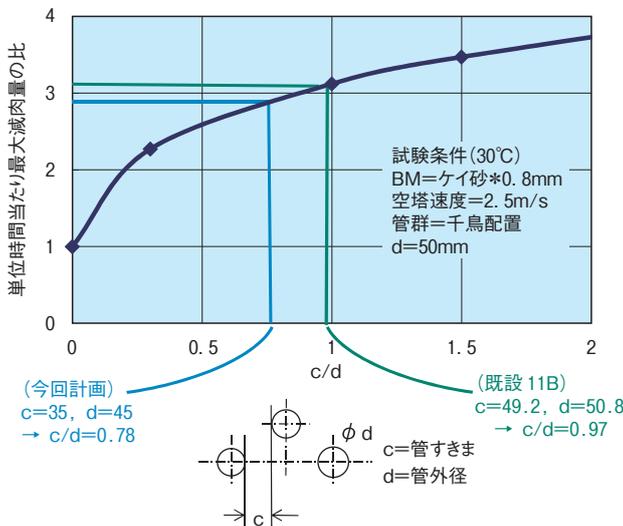


図6 層内管水平方向幅寸法と摩耗による減肉量の関係
Fig. 6 Relationship between horizontal embedded tubes and thinning due to abrasion

一方、層内管幅寸法と摩耗減肉量の関係（図5）により、従来の缶の管ピッチよりさらに小さくすること、また分散板**から噴出される気泡の集合による大型化を抑制することで、摩耗が低減することがわかった。さらに、層内管水平方向幅寸法と摩耗減肉量の関係を調べた結果（図6）、管すきま（c）と管外径（φd）の比（c/d）を小さくすることで摩耗減肉量が小さくなることがわかったため、管群中の水平ピッチを小さくし、そのすきまを約70%に低減する構造を採用した。

* 空塔速度比：流動砂が最初に流動し始める流動速度（Umf）と実際の運転中の流動砂の流動速度（Ut）の比
** 分散板：流動砂を流動させるための空気を流動床内に均一に供給する装置

焚き流動床ボイラに対してRDF*やRPF**といった腐食性燃料焚き流動床ボイラとでは腐食環境が大きく異なる。減肉に対する影響は、圧倒的に腐食性燃料焚きボイラの方が減肉傾向が大きく、これは腐食と摩耗の相乗効果によるものである。流動床燃焼であるため、ある程度の摩耗減肉は発生するが、腐食による影響を抑制するためには、腐食環境を緩和させる必要がある。

そこで、過去の文献から、二酸化硫黄（SO₂）が塩基物を腐食に関して安定的な硫酸塩に変化させる現象、例えば $2(K, Na)Cl + SO_2 + O_2 \rightarrow (K, Na)_2SO_4 + Cl_2$ という現象があり、ボイラ炉内における腐食性ガスである塩化水素（HCl）とSO₂についても、SO₂の濃度が、HClの濃度の同等あるいは倍以上存在すると、塩化物が安定的な硫酸塩に変化し、腐食環境が緩和されることがわかった。

また、HClとSO₂のモル比と、過去の流動床ボイラの燃料と排ガス性状との関係を図7に示す。HCl/SO₂モル比の小さいグラフ左下においては腐食が軽微な領域であり、逆にHCl/SO₂モル比の大きい右上の辺りは腐食が大きいという傾向があることがわかる。このことは、通常のボイラと同様に流動床ボイラにおいても、硫酸塩と塩化物塩では硫酸塩による腐食の方が腐食速度を抑制できることを示している。

これより、腐食性燃料に対して、硫黄分を含む燃料を混合させることにより、減肉量を低減させることが可能であり、中でも燃料としては一般的な石炭を混焼することが有効であると捉えた。

* RDF：Refuse Derived Fuel
** RPF：Refuse Paper and Plastic Fuel

(2) 腐食環境の影響調査

腐食環境は、燃料の種類、管の蒸気温度・圧力、燃焼状態に影響を受けるため、過去の実績を基に流動層内環境と減肉の関係を調査した。燃料による環境については、石炭

4 RDF石炭混焼ボイラの層内管減肉実績

今回、前項の対策を実施して、韓国益山向けボイラの層内管減肉量について調査した（図8）。

2012年1月から商用運転を開始し、2013年9月末および

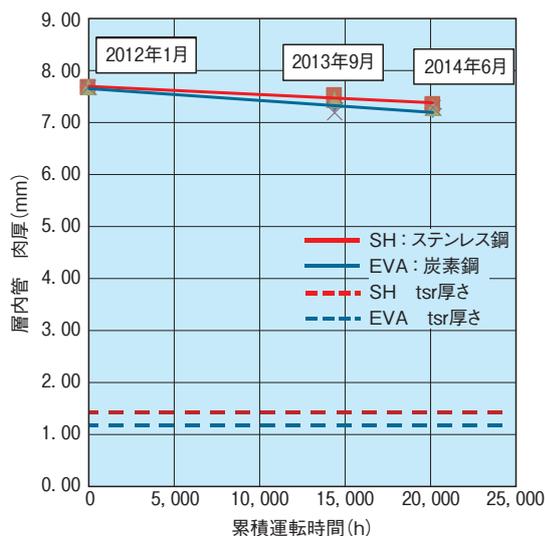


図8 韓国向け累積運転時間と層内管減肉量実績
Fig. 8 Cumulative operating time and embedded tube thinning in Internal Circulation Fluidized Bed Boiler for South Korea

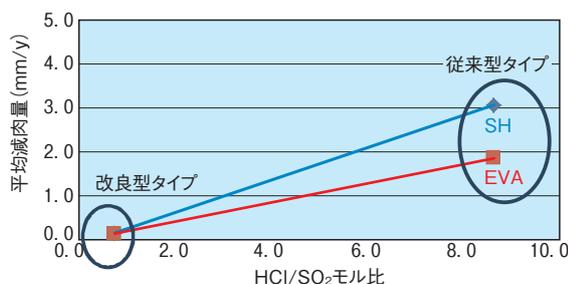


図9 HCl/SO₂ガス比と層内管年間腐食量の実績比較
Fig. 9 Comparison between HCl/SO₂ gas ratio and annual embedded tube corrosion amount

2014年6月初めに層内管の肉厚測定を実施した。それぞれの計測時点での累積運転時間は2013年9月末で約14,400時間、2014年6月初めで約20,160時間であった。同一箇所での減肉量を見ると、層内過熱器管（SH：ステンレス鋼）の平均減肉量は、0.42mm/20,160時間となり、年間8,000時間で0.17mm/8,000時間となった。最大減肉量では、2.4mm/20,160時間であった。また、最大減肉箇所は常に同一箇所が発生していることはなく、分散していた。

一方、層内蒸発器管（EVA：炭素鋼）については、0.40mm/20,160時間となり、平均減肉量0.16mm/8,000時間、最大減肉量2.9mm/20,160時間となった。これを従来の実績値における平均減肉量とあわせてHCl/SO₂ガスモル比で整理すると図9に示す数値となり、従来型タイプである某社向けの層内過熱器管（SH：ステンレス鋼）および層内蒸発器管（EVA：炭素鋼）の年間平均減肉量の実績と、改良型タイプである今回の実績値を比較すると、環境条件を改善することで、平均減肉量がおおよそ90%低減した。

なお、既設ボイラと今回納入したボイラでは、層内管の表面温度の違いがあり、特に層内蒸発器管については、約

30℃低く、これも今回の減肉速度の低減に影響を与えている。

5 まとめ

今回の実績データから、層内管の減肉抑制には3つの方法が有効であることを実機にて確認することができた。

- ① 管群ピッチの狭小化
 - ② SO₂ガスによる塩化物塩の硫酸塩化の促進
 - ・ HCl/SO₂モル比率を下げる。内部循環流動床ボイラにおいては石炭を一時的に混焼することでも効果がある。
 - ③ メタル温度の低減
 - また、今回実施した抑制技術で、延命化を図ることができたが、他条件（燃料循環や蒸気条件）にも対応するためには、さらに次の内容について検討する必要がある。
- ① 腐食環境を緩和するため、石炭の代替となる硫黄（S）分を含む補助燃料（製紙スラッジなど）あるいは混合する添加材の使用
 - ② さらに気泡の細分化方法
 - ・ 分散板空気ノズルの噴射状態の改善
 - ・ 流動化空気層内でのさらなる分散化
 - ③ 流動速度の低減化
 - ・ さらに空塔速度比を低減した場合の熱伝達への影響

あとがき

今回のボイラのようなRDFまたはバイオマス+石炭混焼ボイラの需要は、新興国においても都市化によるごみの増加、あるいは各種植物系プラントからの余剰バイオマスと安価な石炭を混焼した発電プラントの増加とともにますます採用されていくと予想される。今後も、今回の実績を利用して上記需要を狙い、さらなる寿命の延命化、コスト低減化を継続していく所存である。

なお、韓国向けRDF焚き内部循環流動床ボイラは、益山向けの実績が評価され、別プロジェクト2件を受注、建設中である。

参考文献

- 1) 末光, 武藤, 田端, 原田: “バイオマス焚き内部循環流動床ボイラ”, 川崎重工技報, No. 149, pp. 30-33 (2007)



武藤 貞行 森 宏之 清水 敬哲 竹田 航哉