

RPF 焚き循環流動層ボイラの計画と 運転実績

Design and Operational Performance of RPF Fired Circulating Fluidized Bed Boiler

荒川 善久^{*1}
Yoshihisa Arakawa

横式 龍夫^{*2}
Tatsuo Yokoshiki

坂井 俊之^{*3}
Toshiyuki Sakai

山田 一二^{*4}
Hitoji Yamada

國領 繁光^{*5}
Shigeharu Kokuryo

鳥居 功^{*6}
Isao Torii



近年、自家用発電ボイラでは資源の有効利用促進と燃料コストを削減する目的で、クリーンな新エネルギーとして注目されている RPF などのリサイクル燃料を適用する傾向が増加している。当社は、平成 16 年に王子板紙(株)大分工場向けに蒸発量 200 t/h の RPF 焚き循環流動層ボイラを納入した。本ボイラは、RPF に含まれる金属アルミニウムがサイクロン内に付着する事象を回避するために、コンバスタ差圧を最適化して設計された。ボイラ運用においてはサイクロン内への灰付着もなく、排ガス特性 (CO, NOx, SOx, ダイオキシン類) に関しても良好な結果を得た。

1. はじめに

我が国においては、1990 年代から循環型社会の実現を目指した環境基本法などの法体系が整備され、3R (Reduce, Reuse, Recycle) を基本理念とした環境負荷低減への取り組みが進められている。自家用発電ボイラ用の燃料についても、従来までは重油、石炭が主流であったのに対し、近年ではリサイクル燃料である RPF (Refuse Paper and Plastic Fuel) が市場に流通している。RPF は石炭と比較して安価であることから、ボイラ操業における燃料転換のコストメリットも見込める。

当社はこれまでに多数の石炭焚き循環流動層 (Circulating Fluidized Bed: 以下 CFB) ボイラの実績納入実績がある⁽¹⁾⁽²⁾。今回は新たに RPF の CFB ボイラにおける燃焼方法を開発し、王子板紙(株)大分工場向けに蒸発量 200 t/h の CFB ボイラを納入した。本報では、開発試験の状況とボイラ運転実績を紹介する。

2. 燃 焼 試 験

2.1 試 験 目 的

RPF 燃料を CFB ボイラに適用する場合、燃料中金属アルミニウムのサイクロン等への付着が懸念される。そこで金属アルミニウムの付着特性及び RPF 燃

焼特性の検証の観点からコンバスタ運用条件を最適化することを目的として、コンバスタ差圧、RPF 中の金属アルミニウム濃度を变化させて燃焼試験を実施した。

2.2 試験装置及び燃料

試験装置の外観写真を図 1 に示す。コンバスタサイズは断面積 0.4 m × 0.4 m、高さ 21 m である。入熱量は 0.6 MWth である。供試燃料である RPF はホッパからスクリーフィーダで切り出され、重力落下でコンバスタ内に供給される。流動材として平均粒子径 190 μm のけい砂を使用した。

RPF の外観写真を図 2 に示す。形状は、直径 8 mm 程度、長さ 10 ~ 15 mm 程度の円筒形である。RPF 燃料の分析結果を表 1 に示す。金属アルミニウム濃度は、酸可溶性アルミニウム濃度と水溶性アルミニウムの差で表示している。

2.3 試 験 方 法

試験条件を表 2 に示す。条件 1 では、ベース条件としてコンバスタ差圧 14 kPa、コンバスタ温度 850 °C を選定した。条件 2 では RPF 中金属アルミニウム濃度変化試験を実施した。条件 3 では、条件 2 からコンバスタ差圧を 7 kPa に低減した試験、条件 4 でコンバスタ差圧を低減したままで RPF 中金属アルミニウム濃度を 0.9 % と低減した試験を実施した。

各条件ともに、炉内脱硫用の石灰石は無供給とした。

*1 原動機事業本部ボイラ技術部次長

*2 原動機事業本部ボイラ技術部ボイラ技術二課長

*3 原動機事業本部ボイラ技術部ボイラ技術二課

*4 長崎造船所火力プラント設計部陸用ボイラ設計課主席

*5 長崎造船所火力プラント設計部陸用ボイラ設計課

*6 技術本部長崎研究所火力プラント研究推進室

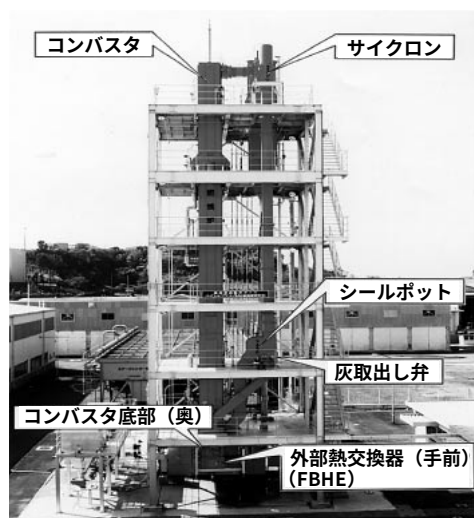


図1 試験装置 火炉サイズは断面積 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 、高さ 21 m 、入熱量は 0.6 MWth である。

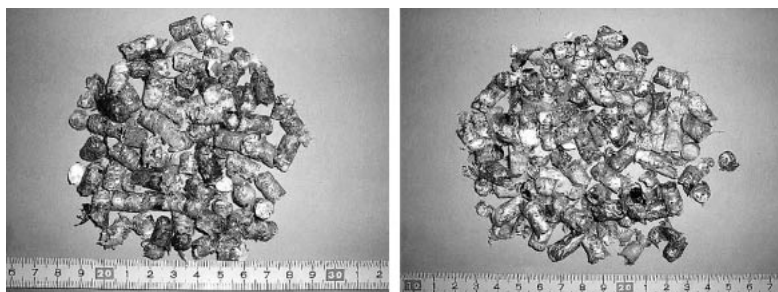


図2 RPF外観 (金属Al:左0.9%, 右3.0%) 直径8 mm程度、長さ10～15 mm程度の円筒形である。

表2 試験条件一覧

試験条件	条件1	条件2	条件3	条件4
変化条件	ベース条件	金属Al濃度	コンバスタ差圧	コンバスタ差圧, 金属Al濃度
火炉差圧 (kPa)	14.0	14.0	7.0	7.0
火炉温度 (°C)	850	850	850	850
RPF中金属Al (%)	1.9	3.0	3.0	0.9
試験時間 (h)	20	20	20	20

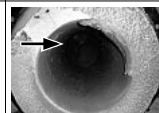
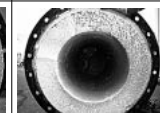
表1 RPF分析結果

		条件1	条件2	条件3	条件4
工業分析	水分 (%)	3.3	2.5	2.3	7.0
	灰分 (%)	10.4	9.7	7.2	7.1
	揮発分 (%)	79.0	81.6	85.2	78.6
	固定炭素 (%)	7.3	6.3	5.2	7.3
元素分析 (無水)	C (%)	51.4	56.6	64.3	57.9
	H (%)	7.3	7.9	9.2	8.0
	O (%)	30.2	25.2	18.4	25.7
	N (%)	0.24	0.37	0.6	0.39
	T-S (%)	0.02	0.05	0.0	0.07
	V-S (%)	<0.01	<0.01	<0.01	0.03
	T-Cl (mg/kg)	1200	1300	1381	3540
	V-Cl (mg/kg)	1100	1200	1319	3410
	T-Ca (%)	1.8	1.3	0.5	1.1
	T-Na (mg/kg)	390	322	232	470
	T-K (mg/kg)	162	122	91	760
	金属Al (%)	1.9	3.0	3.0	0.9
	高位発熱量 (Kcal/kg)	5520	6240	7271	5620
	低位発熱量 (Kcal/kg)	4920	5710	6772	5180
	着火温度 (°C)	232	228	232	235

表3 サイクロン出口排ガス性状

試験条件		条件1	条件2	条件3	条件4
CO (12% O ₂ 換算値) (ppm)		56	83	23	56
NO _x (6% O ₂ 換算値) (ppm)		67	75	82	77
SO _x (6% O ₂ 換算値) (ppm)		13	12	21	30

表4 サイクロン内筒の状況

試験条件	条件1, 2 (連続試験)	条件3	条件4
コンバスタ差圧	14 kPa	7 kPa	7 kPa
RPF中の金属Al濃度	1.9%, 3.0%	3.0%	0.9%
状況写真 (内筒内面)			
	付着無し	矢印部に衝突付着	付着無し

試験時間は各条件で20時間である。条件1と条件2については、前半を条件1、後半を条件2とし、連続して実施した。

各条件で燃焼試験中に排ガス濃度の計測を実施し、試験終了後に炉内状況確認のため開放点検を行い灰付着の状況を調査した。

2.4 試験結果及び実缶への適用

表3に各条件におけるサイクロン出口の排ガス性状を示す。表4に各試験でのサイクロン点検結果を示す。

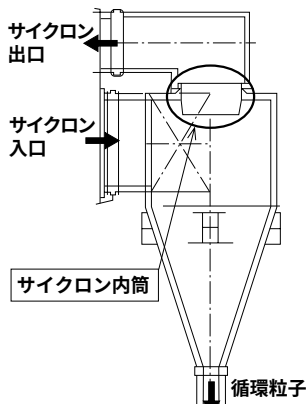
条件1並びに条件2では、コンバスタ差圧14 kPa、コンバスタ温度850 °Cの運用条件でRPF中の金属アルミニウム濃度を1.9 %及び3.0 %として試験を実施した。両条件でコンバスタ差圧分布並びにコンバスタ温度分布は健全な状態であり、運転状態は安定してい

た。試験後の開放点検では、サイクロン内部、後部煙道の水冷管に灰の付着はなく、炉底部においてもクリンカは見られなかった。

条件3においてはコンバスタ差圧の影響を把握するために条件の14 kPaから7 kPaに低減させて運用した。コンバスタ差圧が低い場合、コンバスタ底部で粒子濃度が小さくなるために、コンバスタ底部の温度が変動しやすい傾向が見られた。開放点検においては、表4に示すとおりサイクロン内筒に灰が衝突付着していた。一方、後部煙道の水冷管では灰の付着は見られず、ブローによる清掃で十分に除去可能であった。

条件3におけるサイクロン内筒付着灰の分析結果を表5に示す。主成分として金属アルミニウムが39.4 %含まれていることから、RPF中の金属アルミニウム

表5 サイクロン内筒付着灰の組成分析結果

試験条件			条件3	
火炉差圧			7 kPa	
火炉温度			850 °C	
燃料中金属 Al 濃度			3.0 %	
組成分析	SiO ₂	(%)	9.7	
	Fe ₂ O ₃	(%)	1.3	
	T-Al	(%)	64.9	
	金属 Al	(%)	39.4	
	T-Ca	(%)	0.4	
	T-Na	(%)	0.04	
	T-K	(%)	0.03	
	T-S	(%)	<0.1	
	T-Cl	(mg/kg)	146	

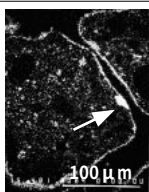
がコンバスタ内で溶融してサイクロン内筒に衝突付着したものと考えられる。本試験結果を条件1及び条件2と比較すると、コンバスタ差圧が14 kPaの高め設定の場合には、コンバスタ粒子濃度が高くなり、より攪拌混合が進むため、コンバスタ内でRPF中金属アルミニウムの微粒化が進行し、サイクロン内筒への衝突付着を回避する粒径まで微粒化するものと考えられる。

条件4では、コンバスタ差圧を7 kPaに低減した状態でRPF中の金属アルミニウム濃度の影響を把握するために、金属アルミニウム濃度を0.9 %に低減して試験を実施した。本試験では条件3と同様に、粒子濃度が小さいためにコンバスタ底部の温度が変動する傾向が見られた。試験後の開放点検では、サイクロン内部、後部煙道の水冷管に灰の付着はなく、炉底部においてもクリンカは見られなかった。

循環粒子中の金属アルミニウムの形態を調査する目的でEPMA分析 (Electron Probe Micro Analysis) を実施した。表6に条件2と条件3におけるアルミニウム元素の分析結果を示す。矢印で示すアルミニウム同定箇所にはO元素は同定されなかったことからAl₂O₃等の酸化物ではなく、金属アルミニウムの単体で存在していると考えられる。

コンバスタ差圧が7 kPaと低い場合には、RPF中の金属アルミニウムと流動材との衝突、微細化が不十分な状態で循環粒子中の濃度が高いため、サイクロン

表6 循環粒子中Al元素の分布

同定元素	条件2	条件3
アルミニウム元素 (白色部がアルミニウム) 元素の同定位置を示す		

内で付着すると考えられる。したがって、実缶への適用条件については、本試験で健全性が確認できたコンバスタ差圧を14 kPaとして実缶を計画した。

3. 王子板紙(株)向けボイラの概要

王子板紙(株)大分工場向け200t/hCFBボイラの概要を以下に述べる。

本ボイラは重油焚き並びに石炭焚きボイラの代替として新設されたRPF・石炭焚きCFBボイラで、発生蒸気は新設抽気復水タービンを経て、既設抽気背圧タービン及び製紙プラントに送気されており、すべての工場負荷を本ボイラがまかなっている。

今回新設したプラントの全体鳥瞰図を図3に示す。

3.1 ボイラ計画仕様

表7にボイラ主要仕様を示す。計画燃料は、RPFと石炭であり、各専焼及び混焼が可能である。表8及び表9に計画燃料の性状を示す。

図4にボイラ計画図を示す。

ボイラは単胴放射型自然循環であり、風室・炉底・周壁及び天井はメンブレンウォールの水冷壁で構成し、コンバスタ・対流伝熱部及びFBHE (流動床式外部熱交換器) をコンパクトにまとめた一体構造となっている。

コンバスタ底部及びFBHE底部には、空気ノズルが均等に多数配置されている。FBHE内には、層内蒸発器及び三次過熱器が設置されている。一方、後部煙道には、一次過熱器、四次過熱器、二次過熱器及び節炭器が設置されている。

3.2 蒸気・給水系統

給水は、対流伝熱部である後部煙道内に設置された節炭器で予熱され蒸気ドラムに入る。ボイラ水はコンバスタ周壁・FBHE内の蒸発器及びその周壁、後部煙道部周壁で蒸発し、蒸気ドラムで水と蒸気に分離される。

蒸気は、後部煙道内に設置された一次過熱器及び二次過熱器を通り、FBHE内に設置された三次過熱器を経てさらに後部煙道内四次過熱器で規定の温度に昇温され主蒸気管へ送られる。

二次過熱器と三次過熱器の間に、蒸気温度制御のために過熱低減器が設置されている。

3.3 循環粒子系統

粒子循環は二つの系統により構成されている。一つは、コンバスタから飛び出した粒子がサイクロンで捕集され、サイクロン下のシールポットを経てコンバスタへ戻される系統であり、もう一つは、シールポット部側面にある灰取出調節弁の働きによってFBHEへ

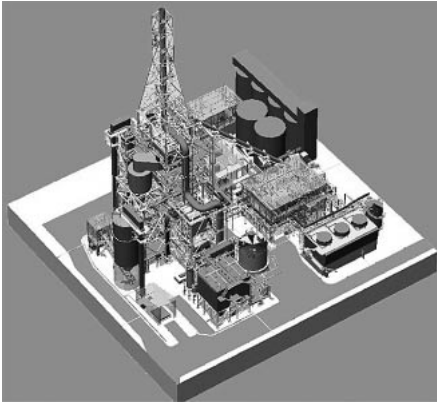


図3 プラント全体鳥かん図 新設ボイラ(中央), タービン及び冷却塔(右側)等で構成される。

表7 ボイラ主要仕様

形式	三菱循環流動層ボイラ
蒸気発生量	200t/h
蒸気圧力	11.9MPag
蒸気温度	541℃
燃焼方式	循環流動層燃焼
通風方式	平衡通風
燃料	RPF, 石炭

表8 計画燃料性状 (RPF)

燃料種	RPF
発熱量(使用時高位) (MJ/kg)	25.1
元素分析 (無水基準)	
炭素 (%)	58.3
水素 (%)	8.0
酸素 (%)	27.2
窒素 (%)	0.3
硫黄 (%)	<1.0
塩素 (%)	<0.2
灰分 (%)	5.0
金属アルミニウム (%)	<1.0

表9 計画燃料性状 (石炭)

燃料種	石炭
発熱量(恒湿高位) (MJ/kg)	26.9
工業分析 (恒湿基準)	
固定炭素 (%)	7.9
揮発分 (%)	46.1
灰分 (%)	37.5
全硫黄 (%)	8.5
元素分析 (無水基準)	
炭素 (%)	69.6
水素 (%)	4.8
酸素 (%)	14.7
窒素 (%)	1.35
硫黄 (%)	0.36

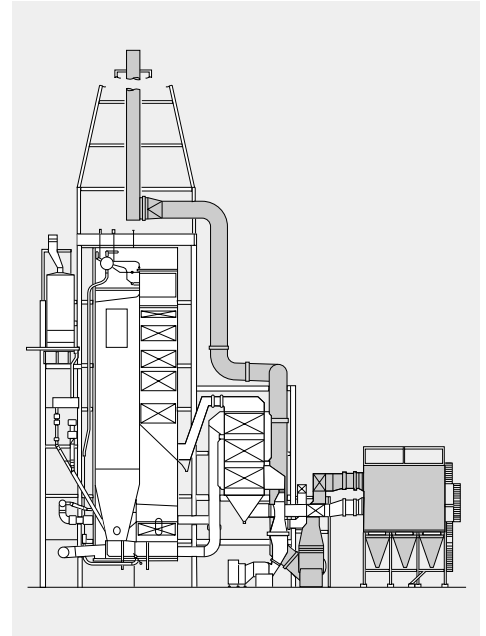


図4 ボイラ計画図 ボイラ上部に排気塔, 右側にAH, ファン及びバグフィルタが配置される。

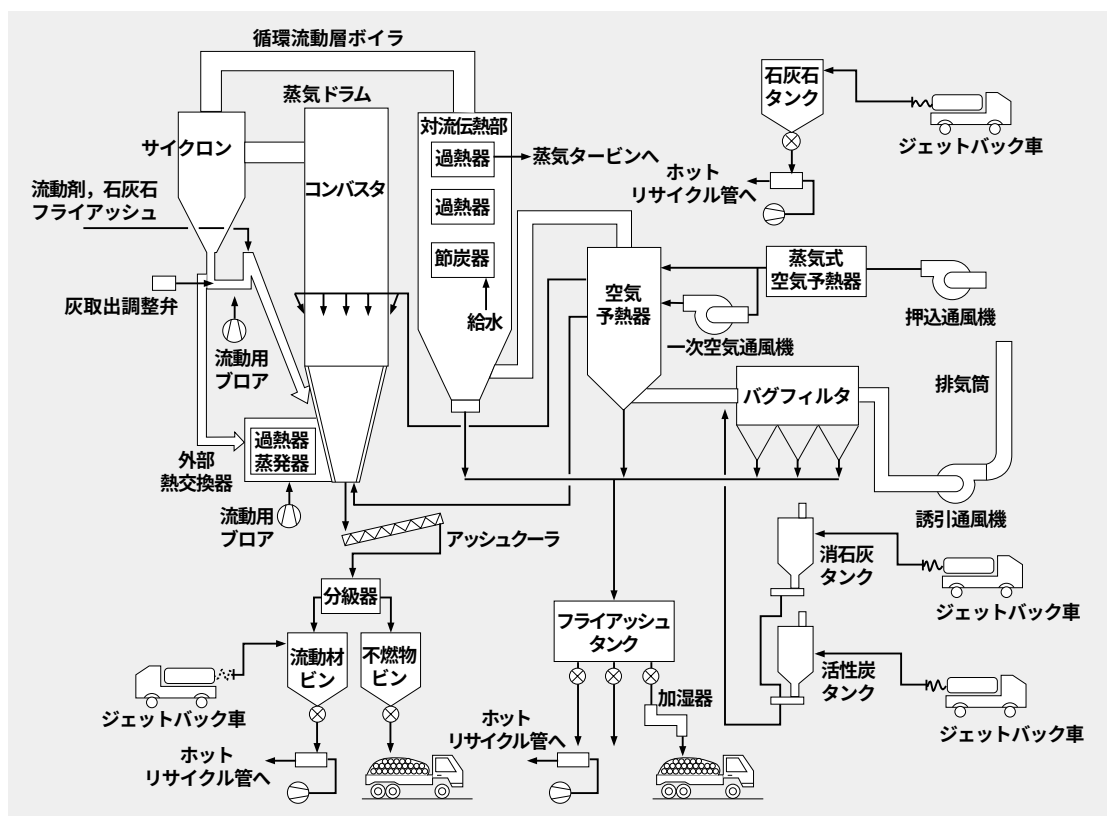


図5 ボイラプラント系統図 ボイラ構成機器, 空気・排ガス系統が示される。

流れる粒子量を調節し, FBHEで粒子が冷却されてコンバスタへ戻り再循環する系統である。

3.4 空気・排ガス系統

図5にボイラプラントの系統図を示す。通風方式は平行通風方式である。

一次空気は, 押込通風機, 一次空気通風機によって昇圧され空気予熱器で予熱された後, コンバスタ底部の風箱へ送られる。一方, 二次空気は, 空気予熱器で予熱された後, コンバスタ下部に設置された二次空気ノズルからコンバスタ内へ投入される。

コンバスタを出た燃焼ガスは、サイクロンで流動材が分離され、後部煙道に入り過熱器及び節炭器で熱交換をし、さらに空気予熱器で熱交換をした後にボイラを出る。ボイラを出た燃焼ガスはバグフィルタにより除じんされ、誘引通風機にてボイラ上部に設置された排気筒へ導かれる。

3.5 燃料供給系統

図6に燃料供給系統図を示す。RPF及び石炭の各燃料での専焼が可能な燃料供給系統となっている。RPFは既設貯蔵タンクからコンベアでRPFバンカへ送られる。RPFバンカ以降の系統は2系統同じ機器が設置されている。RPFバンカからは計量機を経て石炭と同様にRPF専用シュートにて重力落下で投入されるが、シール性を確保するためにロータリーフィーダは2台直列に設置されている。

石炭は受入ホッパからコンベアにより石炭貯蔵タンクへ貯えられ、クラッシャを経て適当な粒径に調整された後、石炭バンカへ送られる。石炭バンカからは計量給炭機、分配機を経て2本の石炭専用シュートに分配される。以後、ロータリーフィーダを経て重力落下で火炉へ投入される。

3.6 石灰石・灰処理系統

所定の粒径の石灰石はジェットパック車で搬入され、石灰石タンクに貯えられる。石灰石はコンバスタ内での脱硫のために連続的にコンバスタへ供給される。

コンバスタ底部にはベッドアッシュ排出設備が設けられている。ベッドアッシュは、ベッドアッシュクーラで冷却された後、分級器にて不燃物を取り除かれ、ベッドアッシュタンクに貯蔵される。このベッドアッシュは流動材不足時に圧送によりコンバスタへ投入さ

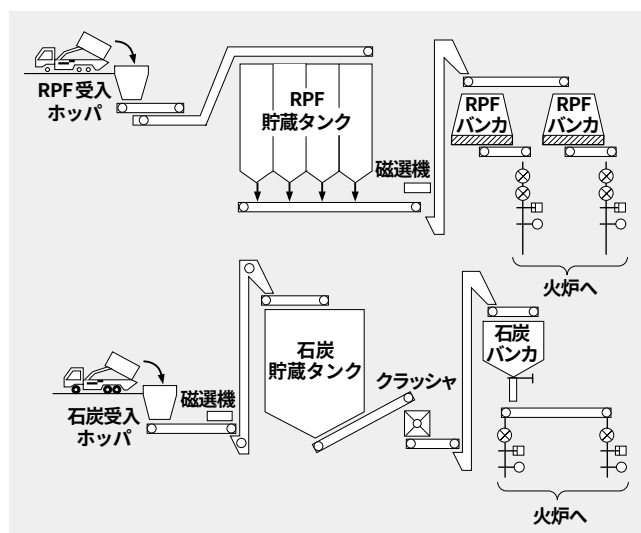


図6 燃料供給系統図 供給系統はRPF、石炭ともに、各2系統あり、各燃料で専焼可能である。

れ再使用される。取り除かれた不燃物は不燃物タンクに貯えられ、トラックにより搬出される。

バグフィルタによって捕集されたフライアッシュや、節炭器下ホッパあるいは空気予熱器下ホッパに落下したフライアッシュは圧送によりフライアッシュタンクに搬送され、一部はコンバスタに再循環される。貯えられたフライアッシュは加湿器を経て加湿された状態でトラックにより搬出される。

4. 王子板紙(株)向けボイラの運転結果

4.1 性能確認試験結果

表10にボイラの計画値を示す。図7に性能確認試験時の時間トレンドを示す。

表10 王子板紙(株)向けボイラの計画値

	計画値
蒸発量 (t/h)	200
蒸気温度 (°C)	541
ボイラ効率 (%)	91.4/92.3*
NOx濃度 (O ₂ 6%) (ppm)	150
SOx濃度 (O ₂ 6%) (ppm)	50
ばいじん濃度 (O ₂ 6%) (mg/m ³ _N)	30
HCl濃度 (O ₂ 12%) (mg/m ³ _N)	250
CO濃度 (O ₂ 12%) (ppm)	100
ダイオキシン類	
排ガス中濃度 (O ₂ 12%) (ngTEQ/m ³ _N)	0.1
フライアッシュ中濃度 (ngTEQ/g)	3.0

* RPF専焼時/RPF・石炭混焼時

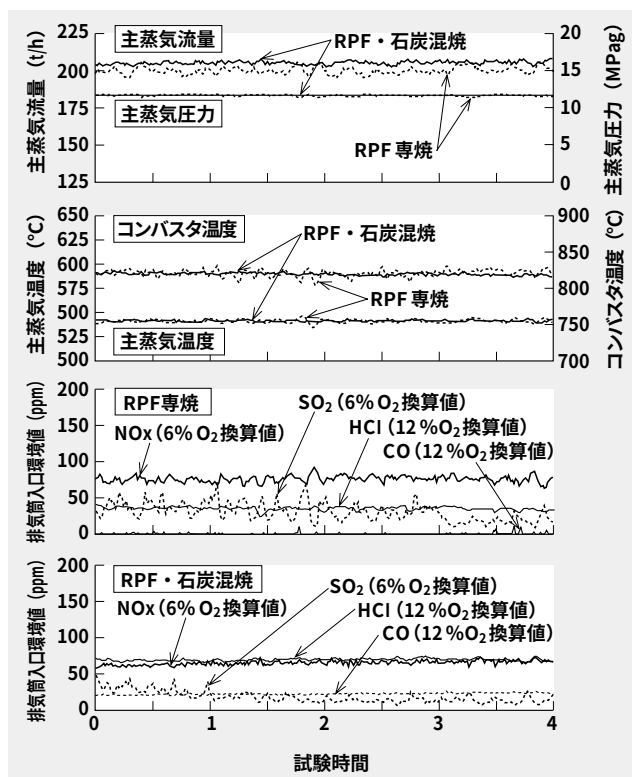


図7 性能確認試験時の時間トレンド 主蒸気流量及び圧力、環境値とともに十分に安定している。

ボイラ性能は、RPF 専焼と RPF・石炭の各 50 % 混焼の二種類の確認試験を実施した。

試験結果はすべて計画値を満足し、特に環境特性は、NOx 排出濃度、SOx 排出濃度、CO 排出濃度及び HCl 排出濃度ともに計画値を十分に達成する値を安定して示した。

ボイラマスターは、RPF 専焼時は RPF で、RPF・石炭混焼時は石炭でそれぞれ行った。いずれの場合にも、主蒸気圧力、主蒸気温度及び主蒸気流量ともに安定した運転が確認され、RPF を主燃料とした運用も十分可能であることが実証された。

コンバスタ温度は、FBHE への循環粒子の流量を灰取出調整弁によって調整することで制御されるが、RPF 専焼及び RPF・石炭混焼ともに、負荷変化を考慮して設定したコンバスタ温度、約 820 °C 前後に安定して制御されており、灰取出弁によるコンバスタ温度制御が効果的であることを示している。

また、ダイオキシン類については、800 °C 以上の安定したコンバスタ温度と十分な滞留時間により、排ガス中濃度及びフライアッシュ中濃度ともに計画値を十分に達成する結果となった。

4.2 開放点検結果

運開後から 3 ヶ月後と 6 ヶ月後に、サイクロン及び後部煙道伝熱管の健全性確認のために、開放点検を実施した。

点検の結果、サイクロン内、後部煙道伝熱管のいずれにも金属アルミニウムの付着は認められず、健全であることが確認された。なお、RPF 中の金属アルミニウムは、0.3～1.3 % 程度と幅があった。

5. ま と め

廃紙と廃プラの固形化燃料である RPF (Refuse Paper and Plastics Fuel) を循環流動層 (CFB) ボイラに適用し、ボイラ運用の健全性、排ガス (CO, NOX, SOX, ダイオキシン類) 及び灰中ダイオキシン類の排出規制に対して適応可能であることを検証した。

今後もボイラ燃料として RPF のニーズは高まる傾向であり、当社の流動層技術を最大限に活用してユーザーに御満足いただける設備を提供していきたい。

参 考 文 献

- (1) 長谷川考司ほか、三菱—ルルギ循環流動層ボイラの計画と運転実績、三菱重工技報 Vol.27 No.4 (1990)
- (2) 石原崇夫ほか、150t/h 循環流動層ボイラの計画と運転実績、三菱重工技報 Vol.25 No.3 (1991)



荒川善久



横式龍夫



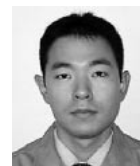
坂井俊之



山田一二



國領繁光



鳥居功