〔納入製品・施設紹介〕

バイオマス発電設備－日本製紙㈱勿来工場ICFB－

塚本圭祐* 渡邉茂治* 石川栄司**

Biomass Power Plant
－ ICFB for Nakoso Mill, Nippon Paper Industries Co., Ltd. －

by Keisuke TSUKAMOTO, Shigeharu WATANABE, & Eiji ISHIKAWA

Ebara's biomass power plant, featuring an ICFB (Internal Circulation Fluidized-bed Boiler), is now operating in Nakoso Mill, Nippon Paper Industries Co., Ltd. The fuel used for the boiler is mainly wood waste produced at this plant. Construction began in April 2004 and completed within the set schedule in August 2004. This biomass power plant, highly reliable and capable of speedy compliance to load conditions, constitutes a single main boiler unit for supplying power for the entire mill as well as process steam. Prior to the introduction of this biomass power plant the power and steam used at this mill were supplied by a heavy fuel oil burning boiler and a diesel oil power generator. The annual heavy fuel oil consumption had been 34 000 k*l*. The biomass power plant is not only achieving a 98% saving in fuel but also a significant reduction in carbon dioxide emission deriving from fossil fuel combustion (about 10 thousand tons per year).

Keywords: Fluidized-bed boiler, Power plant, Biomass, Thermal recycle, Carbon dioxide reduction, Wood waste, Coal, Steam turbine, Nippon Paper Industries Co., Ltd.

1. まえがき

木屑を主燃料とした内部循環流動床ボイラ（ICFB）によるバイオマス発電設備を，日本製紙㈱勿来工場（福島県いわき市）に納入した。

本設備は1ユニットで工場全体の電力とプロセス蒸気を賄うメインボイラであり，そのために高い信頼性と迅速な負荷追従性が要求された。本工場の製造工程で使用される電力や蒸気は，従来は自家用の重油ボイラとディーゼル発電機から供給されていたが，本設備の稼動により これまで年間約34 000 k*l*消費されていた重油の約98％が削減され，それに伴い年間約10万トンの化石燃料に由来する二酸化炭素の削減が見込まれる。

ここに，本設備の概要と運転状況を報告する。

2. 内部循環流動床ボイラ（ICFB）の特長

ICFBは，火炉内部が燃焼室と左右の熱回収室に仕切られており，燃焼室内での激しい旋回流動の動きによって飛び出した砂の一部が熱回収室に入り，そこで砂は層内伝熱管によって熱交換され，下部に移動してディフレクタ下部から燃焼室へ戻る。

燃焼室内では砂は活発な旋回流動を行うことから，局部高温又は局部低温になることがなく多品種の燃料を混焼することが可能となり，また大きな不燃物も容易に排出することができる。

層内伝熱管が配置される熱回収室では，流動が緩やかなため伝熱管の磨耗が抑制され，また基本的に燃焼は行われないため腐食も抑制される。更に，層内伝熱管のU値（総括熱伝達係数）は熱回収室に送る空気（循環層空気）量によって制御できるため，迅速な負荷応答性をもつ。

3. 設備概要

3-1 設備仕様

表1に主要設備の仕様を，**図1**に全体系統を示す。

本設備は，最大連続蒸発量105 t/hのボイラであり，通常は発生蒸気の全量を蒸気タービンに供給して2段の抽気で中圧蒸気と低圧蒸気を工場に送気し，最大で15 000 kWの発電を行う設備である。

* 環境事業カンパニー 環境プラント事業部 プラント設計室 民需プロジェクトグループ
** 同 同 同 装置設計グループ

表1　主要設備仕様
Table 1　Specifications

設備 Facility	項目 Item		仕様 Specification	
燃料貯蔵設備 Fuel silo	木屑サイロ Wood waste silo		1500 m^3	
	石炭サイロ Coal silo		135 m^3	
ボイラ Boiler	型式 Type		エバラ内部循環流動床ボイラ Ebara internally circulating fluidized bed boiler	単胴水管式　自然/強制循環併用 One drum natural/forced circulation boiler
	蒸発量 Steam flow		最大連続　105 t/h 105 t/h at MCR	
	蒸気圧力 Steam pressure		定格6.4 MPa（過熱器出口），最高7.7 MPa Nor. 6.4 MPa (SH outlet) , Max. 7.7 MPa	
	蒸気温度 Steam temp.		定格460℃，480℃ Nor.460℃, Max.480℃	
	給水温度 Boiler feed water temp.		節炭器入口　143℃ 143℃ at economizer inlet	
	通風方式 Draft type		平衡通風 Balanced draft	
蒸気タービン Steam turbine	型式 Type		横型減速式多段衝動抽気復水タービン Horizontal speed reduced multistage extraction turbine	
	蒸気圧力/温度 Steam pressure/temp.		6.1 MPa/456℃	
	第1抽気圧力/流量 No.1 extracted steam pressure/flow		1.13 MPa/37700 kg/h	
	第2抽気圧力/流量 No.2 extracted steam pressure/flow		0.35 MPa/49200 kg/h	
	排気圧力 Outlet steam pressure		6.44 kPa（abs）	
発電機 Generator	型式 Type		横軸全閉空冷型三相交流同期発電機 Horizontal totally enclosed water-air-cooled three-phase synchronous generator	
	容量 Maximum generating power		17647 kVA	
	力率 Power factor	電圧 Voltage	85％遅れ 85％ delay	3150 V
	回転速度 Rotational speed		1500 min^{-1}	

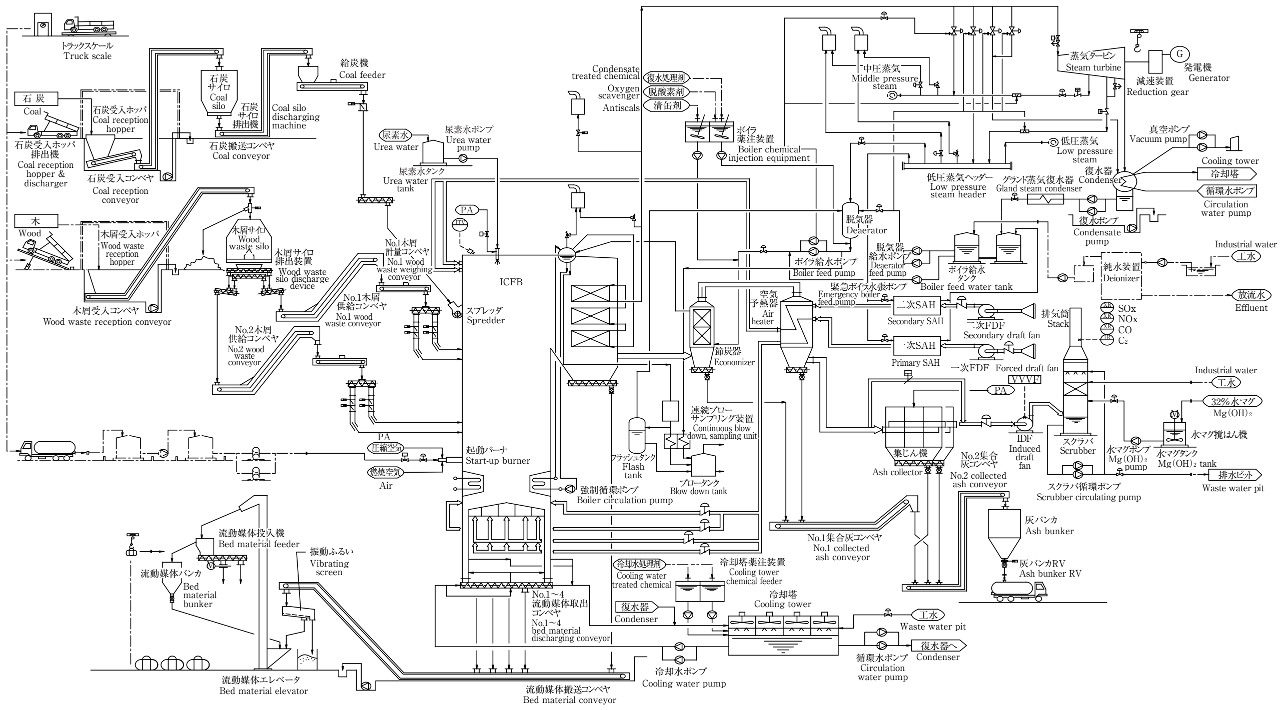

図1　全体系統図
Fig. 1　Flow sheet

表2　燃料性状（分析値）
Table 2　Fuel properties (Design value)

	水分 (WB%) Moisture	可燃分 (DB%) Combustible	灰分 (DB%) Non-combustible	到着ベース低位発熱量 kJ/kg {kcal/kg} Calorific value	可燃分組成（%） Elemental analysis					
					C	H	O	N	S	Cl
木屑 Wood waste	16.9	81.7	1.4	15 100 {3 617}	50.36	5.45	42.99	0.96	0.06	0.18
石炭 Coal	9.6	86.5	3.9	24 164 {5 773}	78.44	6.80	12.78	1.62	0.36	0.00

3-2　使用燃料

表2に使用燃料の分析値を示す。

木屑は，主に建築廃材を破砕選別し異物を除去したものである。

石炭は補助燃料として必要に応じて使用される。

表3　公害防止基準及び排ガス分析結果（スクラバ出口）
Table 3　Pollution prevention standard and analysis of exhaust gas (Scrubber outlet)

	単位 Unit	公害防止基準 Pollution prevention standard	排ガス分析結果 Analysis of exhaust gas	備考 Remarks
ばいじん Dust	g/m^3 (NTP)	0.1以下	0.002	(O_2 6%換算) (O_2 6% conversion)
硫黄酸化物 SOx	m^3/h (NTP)	10以下	0.1	－
窒素酸化物 NOx	ppm	150以下	123	(O_2 6%換算) (O_2 6% conversion)
一酸化炭素 CO	ppm	100以下	24	(O_2 12%換算) (O_2 12% conversion)
ダイオキシン類 Dioxins	ng-TEQ/m^3 (NTP) (WHO-TEF)	0.1以下	0.025	(O_2 12%換算) (O_2 12% conversion)

3-3　公害防止基準

表3に公害防止基準を示す。

3-4　本設備の特長

3-4-1　受入供給設備

木屑は大型のトラックで搬入されるためトラックダンパで木屑受入ホッパにダンプされる。木屑サイロにはアトラスサイロを採用し，サイロ以降の供給系は2系統として1系統を予備とした。木屑はエプロンコンベヤで定量搬送され，計量した後に二重ダンパでシールしながらボイラの側壁から投入される。

石炭はダンプトラックから受入ホッパにダンプされ，石炭サイロで貯蔵される。石炭サイロからはエバラエクストロマートにより安定して排出され，給炭機で定量供給されスプレッダで缶前から火炉内へ撒布される。

3-4-2　ボイラ本体：内部循環流動床ボイラ（ICFB）

ボイラの構造図を**図2**に示す。

ボイラは第2項で述べたICFBであり，主燃焼室の両側に層内管が入った熱回収室をもつ。層内管は合計で8

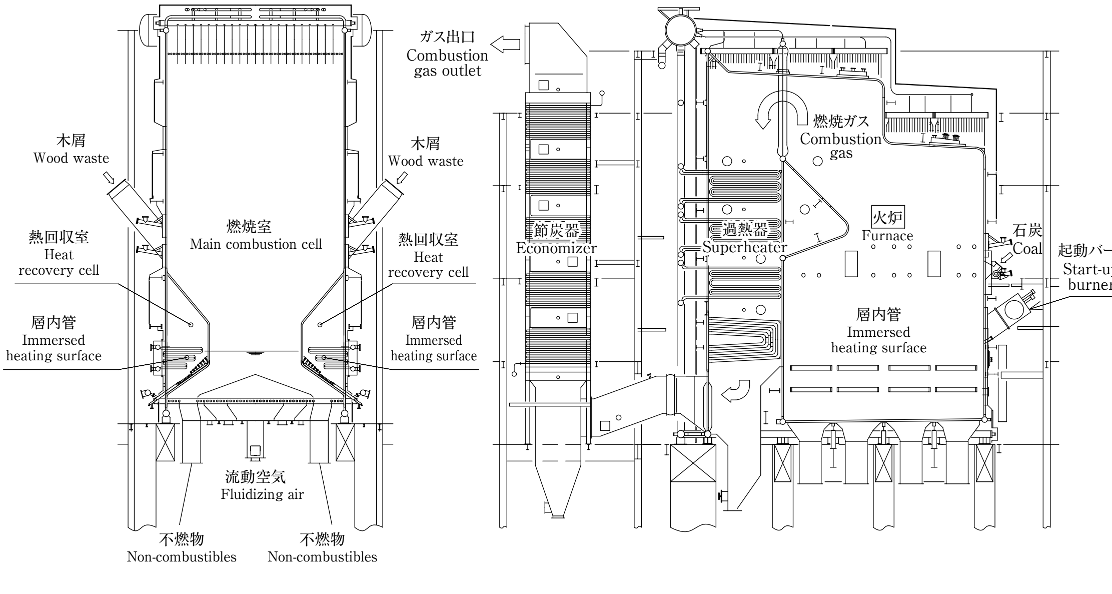

図2　ICFB構造図
Fig. 2　Structure of ICFB

ブロックに分かれている。木屑の投入口は両側壁に計4箇所，石炭の投入口が前壁に1箇所あり，起動バーナも前壁に設置されている。不燃物の排出シュートは燃焼室の両側に4箇所ずつ計8箇所設けられている。

ボイラの接触伝熱部は1パス構造で，過熱器が3次・2次・1次の順で配置されており，過熱器出口で6.4 MPa×460℃の蒸気を得る。

ボイラの水循環は基本的には自然循環だが，層内管だけ強制循環としている。

3-4-3　不燃物排出設備

燃料に混入する不燃物は，ボイラ主燃焼室の両側計8箇所の排出シュートから流動媒体とともに取り出され，振動ふるいにより不燃物は系外に排出され，流動媒体は燃焼室に戻される。

3-4-4　排ガス処理設備

排ガス処理設備としては主に集じん機（バグフィルタ）とスクラバを備えており，前者でばいじんを除去し，後者では水酸化マグネシウムを用いた中和処理により脱硫を行う。

また脱硝については，尿素水噴霧による無触媒脱硝設備をテスト的に設置し，安定した効果が確認されたため本設備として採用することとした。

3-4-5　給水・缶水・蒸気系統

給水は脱気器給水ポンプ・脱気器・ボイラ給水ポンプ及び節炭器を経て汽水胴に送られる。

缶水は，降水管・水冷壁・連絡管などから成る自然循環系統と，強制循環ポンプで層内蒸発管へ送られる強制循環系統の2系統から構成される。

ボイラで発生した蒸気は蒸気タービンに送られて定格15000 kWの発電をするとともに，第1抽気は中圧蒸気系として全量工場送気され，第2抽気は低圧蒸気系の工場送気及び所内蒸気として使用される。

3-4-6　タービン発電設備

蒸気タービンは，減速式多段衝動抽気復水タービンで段数は10段である。第1抽気は外部圧力制御，第2抽気は低圧蒸気加減弁による内部圧力制御である。復水器は水冷式で，冷却水には冷却塔循環水を使用している。

4. 運転結果・実績

4-1　建設・試運転工程

表4に建設・試運転工程を示す。

工事・試運転とも，無事故で当初の工程通りに完了させることができた。

4-2　排ガス測定結果

表3に公害防止基準とともに性能試験における排ガス分析結果を示す。

いずれの項目についても良好な結果が得られた。

4-3　起動特性

図3にボイラ・タービンの冷缶時の起動曲線（例）を示す。

起動バーナで火炉を昇温し，炉床温度400℃で木屑供給を開始する。

表4　建設・試運転工程
Table 4　Construction progress

日付 Date	内容 Item
2003年6月 Jun. 2003	基礎工事開始 Foundation work starts.
2003年10月 Oct. 2003	プラント工事開始 Installation starts.
2004年1月 Jan. 2004	ドラム揚げ Drum installation
2004年3月 Mar. 2004	水圧試験，溶接検査 Hydraulic test, weld examination
2004年6月 Jun. 2004	乾燥焚き Heat drying of refractory
2004年7月 Jul. 2004	試運転開始 Trial run starts
2004年9月 Sep. 2004	営業運転開始 Business operation starts.

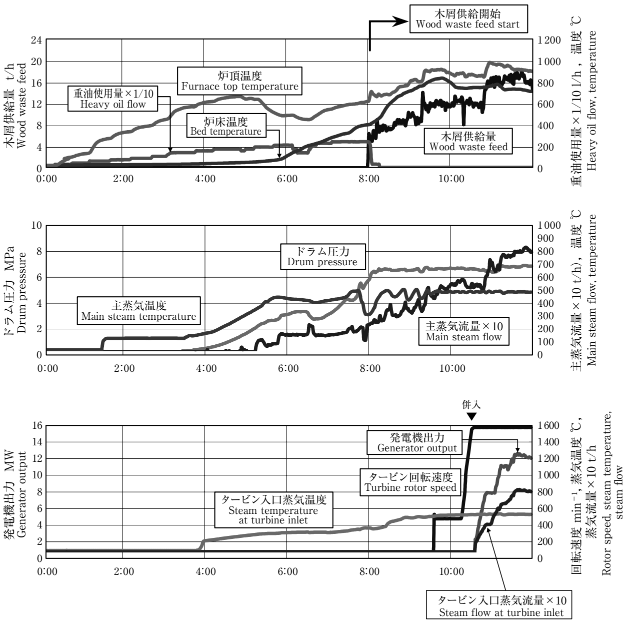

図3　起動曲線（例）
Fig. 3　Cold-start up characteristics (e. g.)

点火から約8時間で木屑供給，約10時間半で発電機の併入が行われる。

4-4　負荷追従性

主蒸気圧力を調節するボイラマスタ信号により，木屑供給量と循環層空気量が制御される。

図4に，負荷を60 t/hから80 t/h，80 t/hから60 t/hへとステップ変化させた際の主蒸気流量とドラム圧力の変化を示す。負荷変化率としては負荷増加時・減少時とも1分間当たりで見ると4～6%/minで，固体燃焼ボイラとしては迅速な負荷追従性を示した。その際，タービンバイパスに蒸気を逃すことなく，ドラム圧力の変動を±0.2 MPa程度と小さく抑えられることが確認できた。

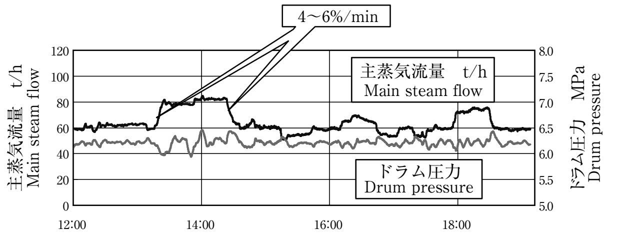

図4　ボイラ負荷追従特性
Fig. 4　Boiler load control characteristics

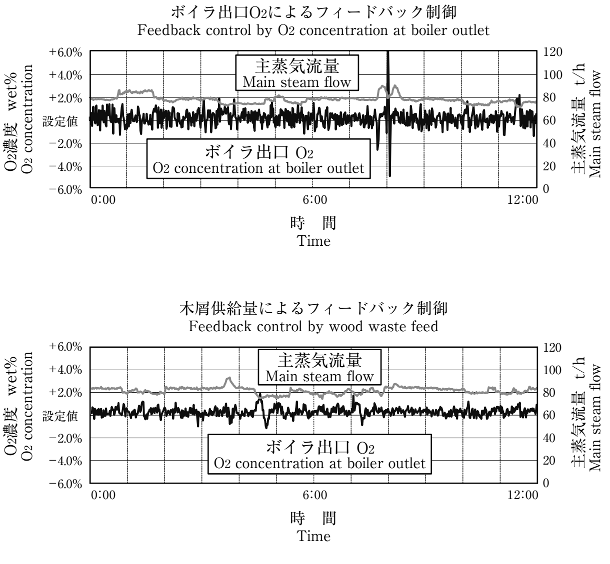

図5　ボイラ出口O_2濃度変動幅の比較
Fig. 5　Comparison at boiler outlet of oxygen concentration

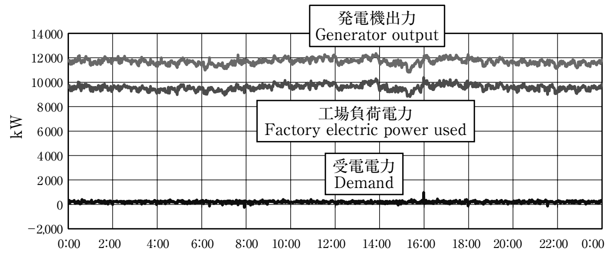

図6　受電電力一定制御の制御特性
Fig. 6　Operational characteristic by received electric power control

注)「発電機出力」+「受電電力」=「工場負荷電力」+「所内動力」

4-5　二次空気量制御

図5に，同様のボイラ負荷（約80 t/h）における，ボイラ出口O_2濃度のフィードバックによる二次空気量制御と，木屑供給量をフィードフォワード信号として取り込んだ制御（空燃比制御）によるボイラ出口O_2濃度の変動幅の比較を示す。前者の制御（図5の上段）では，木屑の燃焼速度が速く遅れが生じるため変動幅が±1%程度と大きかったのに対し，後者の制御（図5の下段）ではその変動幅を±0.5%以内に抑えることができ，木屑に対するその制御の有効性が確認できた。

4-6　受電電力一定制御

本設備による発電電力は，基本的にすべて工場内で使用し逆潮流しないようにする必要があるため，受電電力を設定値200 kW程度で一定とする制御を行っている。**図6**に発電機出力，工場負荷電力及び受電電力を示す。工場負荷電力の変動に合わせて発電機出力は11 000 kWから12 000 kWの範囲で変化しているが，受電電力は設定値の200 kWでほぼ一定に制御されている。

5. あ と が き

本設備は2004年8月末の竣工後，幾つかの不適合はあったもののおおむね順調に稼動しており，日本製紙㈱勿来工場のサーマルリサイクル及び環境負荷低減に貢献できているものと自負している。

今後はこの経験を踏まえ，より一層エネルギーの有効利活用及び地球環境保護に貢献していく所存である。最後に，本設備の設計・建設・試運転に当たり，多大な御指導と御協力を頂いた日本製紙株式会社をはじめとする多くの関係各位に感謝の意を表する。