

# 微粉炭火力の木質バイオマス高比率混焼技術の開発

## Development of Woody Biomass High Ratio Co-Firing Technology for Pulverized Coal Boiler Plants

田村 雅人	エネルギーセンターエンジニアリングセンター燃焼技術部 部長
大野 恵美	エネルギーセンターエンジニアリングセンター燃焼技術部 主査
糸数 龍之介	エネルギーセンターエンジニアリングセンター燃焼技術部
福島 仁	エネルギーセンターエンジニアリングセンターボイラエンジニアリング部 部長
河西 英一	エネルギーセンターエンジニアリングセンター開発部 主査

木質バイオマスを粉碎して高比率で微粉炭と炉内混焼するための新開発の木質バイオマスミルと専焼バーナの試験結果について報告する。石炭用のミルをそのまま木質バイオマス粉碎に適用した場合は、粉碎容量が石炭の場合の1/10まで減少するが、ミル胴内流速の増大とエアポートの改造によって、石炭を超える粉碎容量を得ることができた。その結果、1.5～3.0%/minの変化率での安定した負荷変化も実現した。このミル改造内容は、容易に元の石炭用ミルに戻すことが可能なものであり、新設に加え、既設設備の改造にも対応可能である。一方、バーナは、木質バイオマスと石炭をそれぞれ専焼させるバーナとして、安定燃焼を得たので、報告する。

Co-firing technology that achieves a very high woody biomass-to-coal ratio has been developed. This paper presents the results of experiments on newly developed biomass pulverizers and burners. When used for woody biomass, conventional coal pulverizers can achieve only one-tenth of their coal grinding capacity. Modifications to increase the interior up-flow velocity of pulverizers and to optimize the primary air channel have been carried out. As a result, the grinding capacity for woody biomass has exceeded the coal grinding capacity. A load changing ratio of 1.5 - 3.0%/min. has also been achieved. This modification to the pulverizer structure can be easily reversed, returning the pulverizer to its original configuration to allow coal grinding if required. The newly developed burners can burn both coal and woody biomass separately.

### 1. 緒言

燃料価格の安さと貯蔵量の豊富さで今後も、発電用燃料として欠かすことのできない石炭であるが、環境負荷が高いことからCO<sub>2</sub>削減策の適用、拡大が急務である。石炭を粉末状に粉碎して利用する微粉炭焚き火力からのCO<sub>2</sub>削減は、①高効率化による燃料消費の削減②発生したCO<sub>2</sub>の回収・貯留③再生可能燃料の代替による石炭消費量の削減、に大別される。高効率化は、蒸気温度の向上によるプラント効率の向上であり、現状最高の600℃級では送電端効率42%が、700℃級では46%に向上する<sup>(1)</sup>。日本では2008年から国家プロジェクトによる開発がスタートしているが、9年間にわたる長期開発であり、実用化までになお時間を要する<sup>(2)</sup>。CO<sub>2</sub>回収・貯留(CCS: Carbon Capture and Storage)は、燃焼排ガスからの化学吸収<sup>(3)</sup>や酸素燃焼などの技術開発が進められ、たとえば、オーストラリアで実施されているカライドプロジェクトでは、空気分離した酸素と循環CO<sub>2</sub>による微粉炭燃焼によって、排ガス中のCO<sub>2</sub>濃度を高め、回収を容易にする<sup>(4)</sup>、<sup>(5)</sup>。

本技術も実証段階となっているが、CO<sub>2</sub>貯留に関しては法整備と社会受容が求められる。一方、再生可能燃料のうち木質バイオマスは、もともと固体である石炭を燃料とする微粉炭焚き火力には受け入れられやすく、CO<sub>2</sub>削減に速効性のある対応技術として期待されている。そこで、数年前から微粉炭焚き火力で大容量の木質バイオマスを混焼する技術開発を進めてきた<sup>(6)</sup>、<sup>(7)</sup>。今回、木質ペレットを対象に50cal%混焼の見通しを得たので、報告する。

### 2. 混焼コンセプト

木質バイオマスの利用はすでに多くの微粉炭焚き火力で実施されている<sup>(8)</sup>、<sup>(9)</sup>。ほとんどの場合、微粉炭と木粉を混合状態で同じバーナから噴出させ、炉内で燃焼させている。木質バイオマスの粉碎については、国内電力会社で採用されている方法はほぼすべて混合粉碎であり、石炭と木質バイオマスを同時にミルに投入し粉碎する方法をとっている。この混合粉碎方式の場合、ミルの余裕と木質バイオマスの粉碎性から木質バイオマス混合率が熱量換算で1～5cal%に制限される。一方、専用のミルで木質バイ

オマスを粉碎し、微粉炭管で混合することで混焼率を最大で 17 cal% に上げることを実現している事例もある<sup>(10)</sup>。

本開発では、木質バイオマス混焼率 30～50 cal% の高比率を早期に実機実用化することを視野に、燃焼技術開発とともに適合するボイラシステム構成、バイオマス燃料の供給システムに対しても併せて検討を実施している。そのうち本稿では、木質バイオマスを大容量で粉碎するミルとそれを専焼するバーナの開発について報告する。新設のみならず既設改造を考慮して、石炭用ミルの改造で木質バイオマス大容量粉碎を可能にすることと微粉炭と木質バイオマスを同一ポートでそれぞれ単独で専焼させるバーナを開発コンセプトとした。

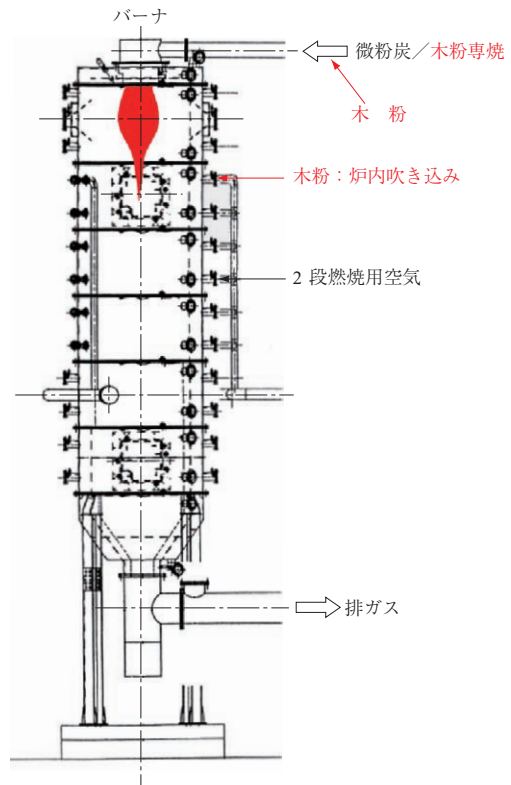
### 3. 試験設備

れき青炭燃焼量 150 kg/h の小型燃焼炉と同 1.6 t/h の大型燃焼試験設備を使用した。大型燃焼試験設備には、石炭標準粉碎容量 3 t/h のミルが設置されており、木質バイオマスの粉碎試験に供試した。

#### 3.1 小型燃焼炉

粉碎した木質バイオマスを炉内混焼させた場合の燃え切り性能を評価するために第 1 図に示す小型燃焼炉を使用した。第 2 図に装置システムを示す。

円筒縦置き炉体は、最大熱容量 1.2 MW、内径 1.3 m、炉長 7.5 m であり、内面に耐火材を打設した水冷ジャケット形式としている。微粉炭は定量供給機によって切り出し、一次通風機を介して炉頂部に設置したバーナに供給している。燃焼排ガスは、ガスクーラ、空気予熱器による熱交換後にバグフィルタでフライアッシュ（飛灰）が除去され、誘引通風機を通して煙突から排出される。炉体には、炉周方向および炉長方向に複数の観測窓を設置してあり、必要



第 1 図 小型燃焼炉

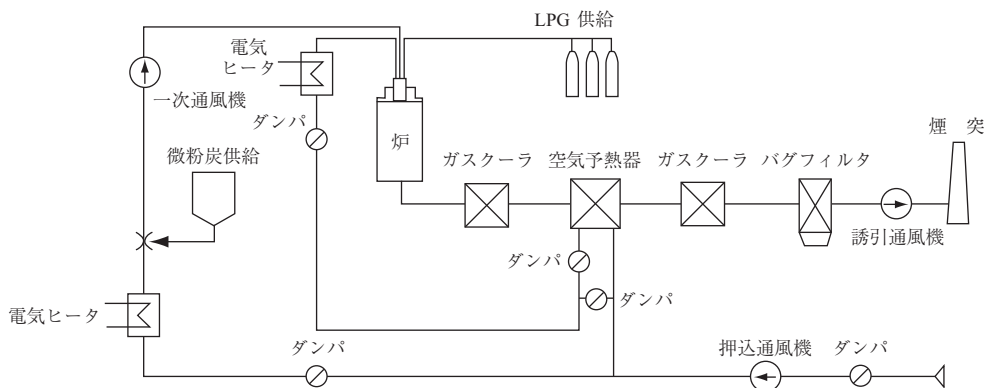
Fig. 1 Small-scale combustion test facility

に応じて目視観察やサンプリングプローブの挿入を行っている。

燃焼試験では粉碎した木質バイオマスとして製材所からの木粉（おがくず）を用いて、燃料管混合、炉内吹き込み、単独燃焼の各ケースで、燃焼率を評価した。

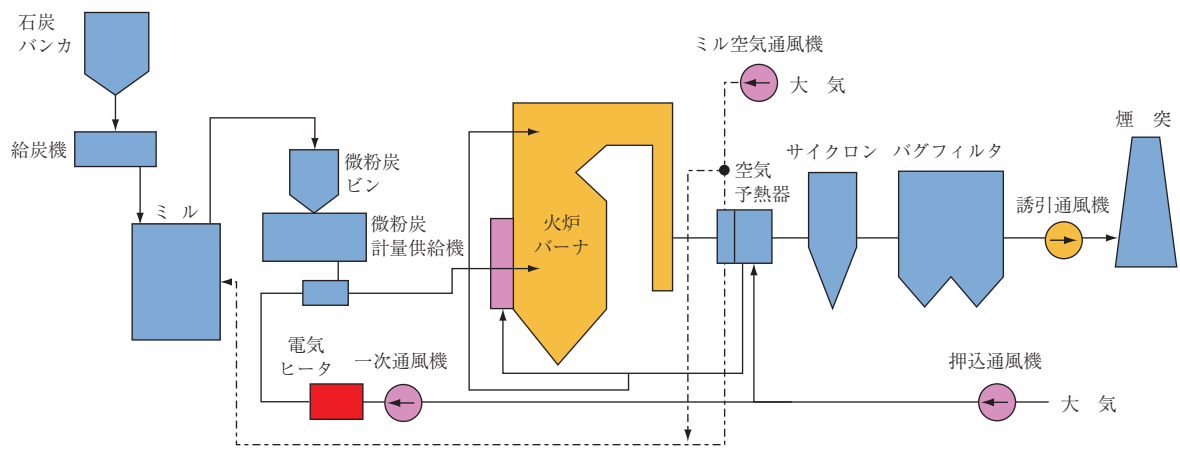
#### 3.2 大型燃焼試験設備

第 3 図に示す大型燃焼試験設備は、ミルと燃焼炉をもち、製造微粉炭をいったん、微粉炭ビンに貯める間接燃焼方式とミルから直接バーナに送る直接燃焼方式が選択可能である。木質バイオマスの粉碎・燃焼試験では、直接燃焼



第 2 図 試験装置系統

Fig. 2 Schematic diagram of combustion test facility



第3図 大型燃焼試験設備

Fig. 3 Large-scale combustion test facility

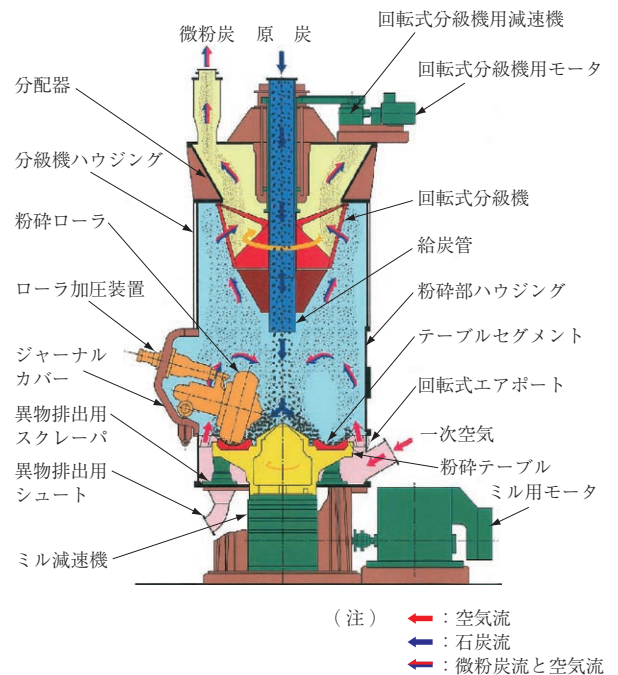
方式を選択した。ただし、バーナ開発のための燃焼試験の一部では、製材所からの木粉をそのままバーナに供給した燃焼試験も実施している。

#### 4. ミル開発

以前から既設微粉炭焚き火力での木質バイオマスの利用は、その混合割合を低く抑えて実施されてきた(6)。(9)。1~5 cal%の混焼では、木質バイオマスは石炭とともにミルに導入され粉砕される。この方式では、混焼できる木質バイオマスの量は、既設ミルの粉砕能力の余裕に左右され、さらなる混焼率の拡大ニーズに対応できない。そこで、木質バイオマスを単独粉砕することで、炉内混焼率を50 cal%に引き上げることを目標に、ミル開発を進めた。

##### 4.1 ミル

木質バイオマスが石炭を代替する場合、当該容量分のミルが石炭を粉砕しないことになり、予備品の保持やミルのメンテナンスを考えた場合、石炭用ミルを木質バイオマス用に流用することが望ましい。したがって、本開発では、石炭用ミルを改造して木質バイオマス用に使用し、また、要すれば石炭用に戻せることを念頭に置いた。第4図に石炭用ミルを示す。石炭は中心部の給炭管から供給され、回転する粉砕テーブルの回転遠心力によって、テーブル外周部に移動する。その際に、粉砕ローラとテーブルの間で噛み込まれることで粉砕される。粉砕された石炭と給炭管からの石炭は、テーブル外周部のエアポートから噴き出している高温空気によって乾燥されつつ、ミル上方に吹き上げられる。ここで、粉砕の進んでいない大きな粒子は、上方への気流に乗ることができず、自重でテーブル上に落下して(一次分級と呼称)再び粉砕される。気流に乗った



(注)   
 ← 空気流   
 ← 石炭流   
 ← 微粉炭流と空気流

第4図 石炭用ミル(微粉炭機)

Fig. 4 Coal pulverizer

細かい粒子はミル上部に到達し、回転式分級機による旋回流で二次分級される。分級機を通過した微粉炭はそのまま微粉炭バーナに送られ、通過できなかった粗粉はミル内を降下して、テーブル上に落下する。

木質バイオマスの粉砕試験では、石炭の代わりに木質チップと木質ペレット(第5図)を給炭管に計量供給し、安定粉砕の限界を探った。ミル安定運転は、ミル差圧(ミル入口とミル内部の圧力差)で評価した。供給量に対して粉砕が追いついていない場合は、未粉砕や粉砕過程の木質バイオマスがミル内部を循環することから、ミル差圧が上昇し続ける。

(a) 木質チップ



(b) 木質ペレット



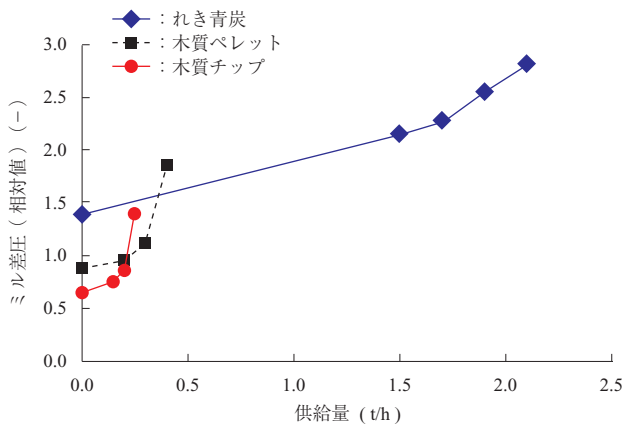
(注) ペン長さ: 140 mm

第 5 図 木質バイオマス  
Fig. 5 Woody biomass

## 4.2 粉碎試験結果

まずは石炭用ミルの粉碎能力評価のために、無改造のまま木質バイオマスを投入して粉碎限界を探った。その結果を第 6 図に示す。標準粉碎容量 3 t/h の試験ミルを用いて、HGI (ハードグローブ粉碎性指数) = 60 のれき青炭を粉碎した場合、2.1 t/h が安定粉碎限界であった。木質バイオマスでは、チップとペレットの安定粉碎限界がそれぞれ 250 kg/h, 300 kg/h であることを把握した。これは、石炭と木質バイオマスの粉碎性の違いによるもので、木質バイオマスは石炭に対して 1/10 近くまで粉碎容量が抑制される。

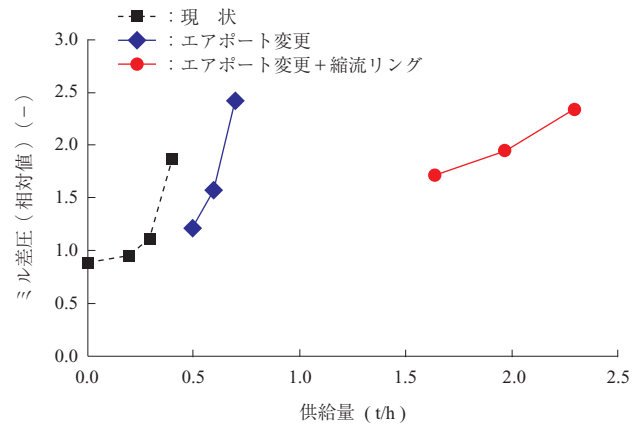
木質バイオマスは、揮発分が多く燃え切りも良好なことから、粒子径が 1 mm 以下であれば微粉炭と遜色ない燃焼性を示す<sup>(11)</sup> ため、木質バイオマスミルでの粉碎ターゲットは 1 mm 以下とした。木質チップでは、数 cm のチップを mm オーダまで粉碎または切断する必要があるため、ミル内で何度もローラに踏まれる必要があると想像できる。一方、ペレットはもともと数 mm オーダの木粉を押し固めたものであり、ローラで解砕することで燃焼に供試することができると考えられる。したがって、木質ペレットの場合、極力ミル内での滞留時間を短くする対応が



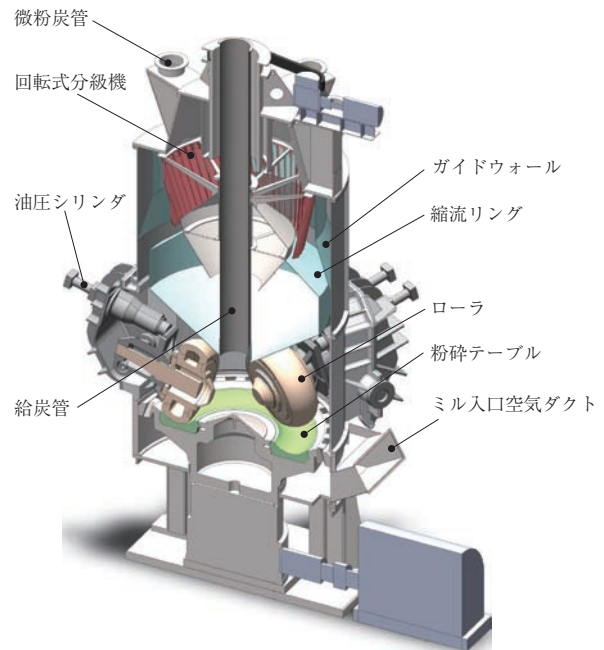
第 6 図 粉碎安定限界  
Fig. 6 Limit of grinding

有効と考え、ミル内部に上昇流路面積を制約する縮流リングの設置およびエアポート形状を変更した。これを段階的に実施することで、石炭と同じ流量以上の粉碎が可能となった(第 7 図)。この改造方針に基づく、木質ペレット単独粉碎ミルのイメージを第 8 図に示す。

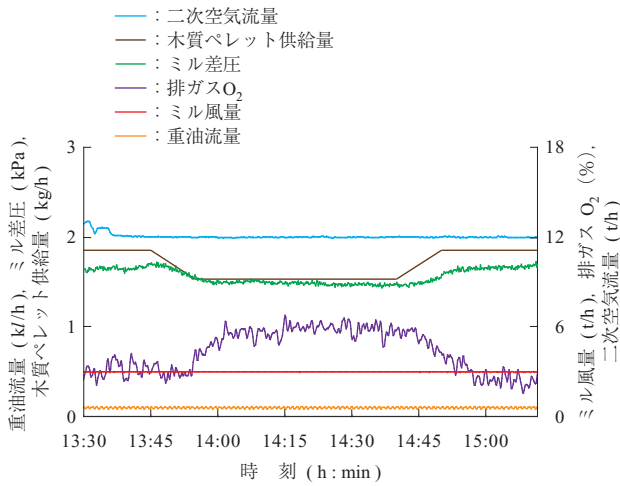
実際のプラントでの運用において、石炭と木質ペレットを炉内混焼する場合、プラントの負荷変化を石炭と木質ペレットのどちらを主に行うかを検討するために、木質ペレットの負荷変化試験を行った。本試験では、ミルからの木粉を直接バーナに供給し、かつ安全のために重油混焼状態とした。試験では、粉碎最大容量の 65 ~ 80% の範囲を、1.5 % /min の変化率で負荷変化させた。第 9 図に示すように、スムーズな排ガス O<sub>2</sub> およびミル差圧変化を示



第 7 図 木質ペレット粉碎容量の増大  
Fig. 7 Increasing wood pellet grinding capacity



第 8 図 木質ペレット単独粉碎ミル  
Fig. 8 Wood pellet pulverizer



第 9 図 負荷変化時の運転トレンド  
Fig. 9 Operational trends for load changing experiment

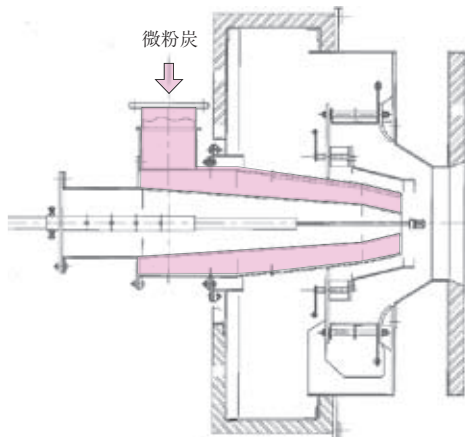
し、木質ペレットでの負荷変化が可能であることを示した。なお、3 %/min においてもスムーズな負荷変化を確認した。本試験でのバーナには、微粉炭用の IHI-DF バーナ (第 10 図) を用いた。

## 5. バーナ開発

木粉は揮発分が多く燃え切りも良好であることが既往の研究<sup>(11)</sup>で分かっているが、石炭と木質バイオマスでミルの使い分けを志向する場合、微粉炭バーナでの木粉の燃焼特性を把握することが重要である。本稿では、微粉炭燃焼量 150 kg/h の小型燃焼炉と同 1.6 t/h の大型燃焼試験設備を用いて、木粉の燃焼試験を行い、木質バイオマスバーナの開発を進めた。

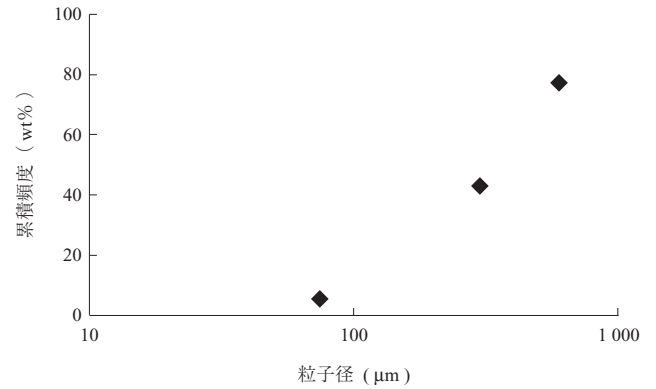
### 5.1 木粉の燃焼特性

粉碎した木質バイオマスを炉内混焼させた場合の燃え切り性能を小型燃焼炉によって評価した。混焼相手は燃

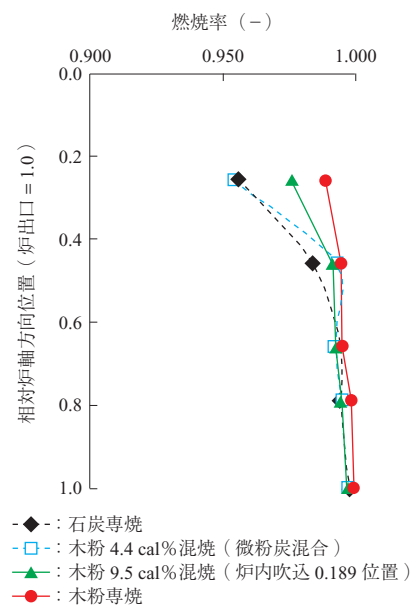


第 10 図 微粉炭バーナ (IHI-DF バーナ)  
Fig. 10 Pulverized coal burner (IHI-DF burner)

料比 (固定炭素分と揮発分の比) 1.69 のれき青炭とし、2 段燃焼率 (総燃焼用空気量に対する 2 段燃焼用空気の割合) は 20% とした。粉碎した木質バイオマスとしては製材所からの木粉 (第 11 図) を用いて、燃料管混合、炉内吹き込み、単独燃焼の各ケースで、燃焼率と排ガス性状を評価した。燃料管混合は 4.4 cal% の木粉をバーナ前の燃料管に混合しバーナから供給した。炉内吹き込みでは 9.5 cal% の木粉を、バーナと 2 段燃焼用空気ポートの間で吹き込んだ。実際の燃焼場では、炉幅方向にも分布があるが、ここでは炉軸中心の粒子サンプリングを行い、灰分をトレーサに、燃焼率を算出した。炉軸方向の燃焼率の比較を第 12 図に示す。バーナ近傍で差異はあるものの、炉長中央部から出口部にかけて優位差はなく、粒子の燃え切りは微粉炭と同等であることが分かった。



第 11 図 供試木粉の粒子径  
Fig. 11 Particle size distribution of wood powder

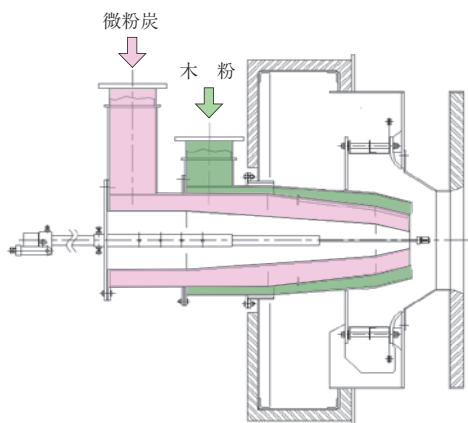


第 12 図 炉軸方向の燃焼率比較 (小型燃焼炉)  
Fig. 12 Combustion efficiency at center line of furnace axis

## 5.2 木粉専焼バーナ

木粉を炉内混焼するケースとして、石炭での100%負荷と木質バイオマス高比率混焼を両立させ、かつバーナ本数を増加させないため、同一スロートにおいて微粉炭と木粉をそれぞれ専焼させることができるバーナを開発した。第13図に微粉炭と木粉をそれぞれ専燃させるバーナを示す。微粉炭ノズルの外周に木粉ノズルを配置し、微粉炭と木粉は同時混焼はせず、微粉炭使用時と木粉使用時でノズルを使い分けることとした。

このバーナと第10図に示したIHI-DFバーナを用いて、微粉炭と木粉の専焼試験を行い、火炎安定性の確認と炉出口での環境性能を比較した。第1表に、使用した石炭と木粉の燃料性状の比較を示す。木粉は、スギ100%から成り、石炭と比較して灰分が極めて少なく、発熱量は石炭のおよそ70%である。燃焼試験では、火炉への入熱を石炭と木質バイオマスの場合で同一としたため、木粉



第13図 木粉・微粉炭専焼バーナ  
Fig. 13 Burner for wood powder and pulverized coal

第1表 燃料性状  
Table 1 Fuel properties

項目	単位	燃料種		
		木粉	石炭	
発熱量 (HHV)	MJ/kg	21.17	29.40	
工業分析	wt%	気乾水分	5.2	2.02
		灰分	0.4	12.02
		揮発分	82.2	34.59
		固定炭素	17.4	53.39
燃料比	-	0.21	1.54	
全水分	wt%	22.3	6.31	
元素分析	wt% *1	C	50.8	69.8
		H	5.81	4.90
		N	0.15	1.34
		S	0.07	0.53
		燃焼性 S	0.03	0.49
		不燃性 S	0.04	0.04
		O	42.77	11.41

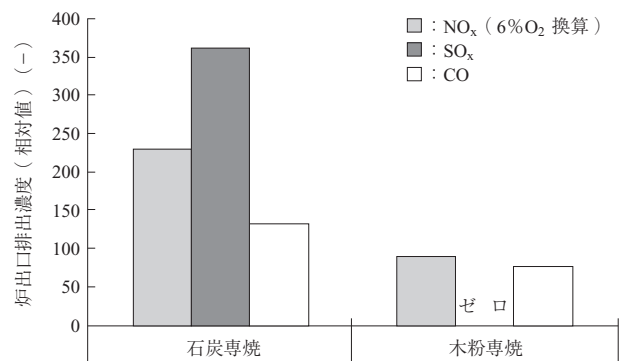
(注) \*1: 無水

燃焼重量は石炭の4割増しとしている。本試験では、調達した木粉をそのままバーナに供給した。N(窒素)分とS(硫黄)分についても石炭に比べて低含有であり、NO<sub>x</sub>低減のための2段燃焼率を低く設定した。燃焼試験条件を第2表に示す。

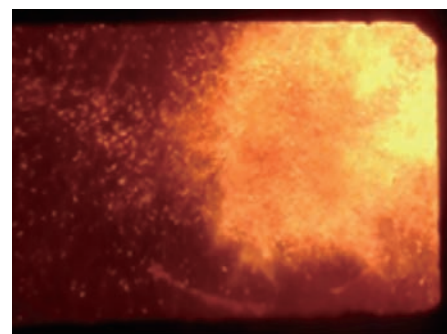
試験設備の問題から排ガスO<sub>2</sub>レベルが合っていないため、追試験を計画中であるが、木粉専燃時の燃焼率は第12図の小型試験炉の結果のとおり、高い値を示している。一方、排ガス性状を第14図に示すが、燃料性状のとおりNO<sub>x</sub>排出量は1/2以下であり、SO<sub>x</sub>については検出されていない。第15図に、火炎後流から見た木粉専焼火炎を示す。スロート口での火炎安定性は良好であった。

第2表 燃焼試験条件と結果  
Table 2 Experimental conditions and results

項目	単位	燃料種	
		木粉	石炭
木粉燃焼量	t/h	1.8	0
木粉搬送空気量	t/h	2.55	0
微粉炭燃焼量	t/h	0	1.32
微粉炭搬送空気量	t/h	0	2.44
2次空気流量	t/h	11.0	12.0
2段燃焼率	%	6.5	19.4
排ガスO <sub>2</sub>	%	7.4	3.1
燃焼率	%	99.5	96.4



第14図 燃焼性能比較  
Fig. 14 Combustion performance comparison



第15図 木粉専焼火炎  
Fig. 15 Photos of flames from wood powder firing

## 6. ま と め

微粉炭焚きボイラで高比率の木質バイオマスを混焼させる技術開発を進めた。本稿ではミルとバーナについて述べた。ミルでは、木質ペレットを対象に、大容量の粉碎を可能にする石炭用ミルの改造を行い、ミル胴内流速の増大とエアポート形状の変更によってこれを実現した。本構造は、必要であれば変更前の石炭用ミルそのものに戻すことが可能であり、新設プラントのみならず、既設改造にも対応可能とした。バーナは、微粉炭と木粉を同一スロートでそれぞれ専焼させることが可能なバーナとし、木粉ノズルの噴出流速を最適化することで実現した。以下、研究成果を要約する。

- (1) 石炭用ミルに縮流リングを設置することで胴内流速を増大させ、エアポート形状を変更することで、木質ペレット粉碎容量を石炭と同等以上とした。
- (2) 木質ペレット単独粉碎ミルにおいて、負荷変化速度 1.5 ~ 3.0 % /min を実現した。
- (3) 木粉と微粉炭をそれぞれ専焼するバーナを開発した。

今後は、ボイラ火炉や脱硝装置、脱硫装置などの環境機器への影響評価を行い、システムの完成を目指す。

### — 謝 辞 —

本研究は、環境省「平成 23 年度地球温暖化対策技術開発等事業（競争的資金）」によって実施した内容に、自社研究成果を追加したものである。関係各位に謝意を表します。

### 参 考 文 献

- (1) 吉田敏明：発電用ボイラ発達の歴史 (4) 火力原子力発電 第 61 巻 第 4 号 2010 年 4 月 pp. 323 - 330
- (2) 高野伸一, 青木 裕, 久布白圭司, 富山信勝, 中

川博勝：700℃級先進超々臨界圧 (A-USC) ボイラ技術の開発 IHI 技報 第 49 巻 第 4 号 2009 年 2 月 pp. 185 - 191

- (3) 日本のクリーン・コール・テクノロジー 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 一般財団法人 石炭エネルギーセンター 2006 年 3 月
- (4) 山田敏彦：発電プラントのゼロエミッション化に向けて 石炭火力における酸素燃焼技術を用いた CO<sub>2</sub> 回収システム IHI 技報 第 52 巻 第 1 号 2012 年 3 月 pp. 24 - 27
- (5) Callide Oxyfuel Project (オンライン) 入手先 <[www.callideoxyfuel.com](http://www.callideoxyfuel.com)> (参照 2012-09-25)
- (6) 大野恵美, 氣駕尚志, 鈴木孝平：微粉炭焚きボイラでのバイオマス利用技術 石川島播磨技報 第 44 巻 第 6 号 2004 年 11 月 pp. 384 - 389
- (7) 田村雅人, 渡辺真次, 窪田悠祐, 駒場健一郎, 小竹直哉, 長谷川政裕：木質バイオマス粉碎特性の実験的評価 火力原子力発電 第 63 巻 第 2 号 2012 年 2 月 pp. 109 - 113
- (8) 中村孝洋, 中川賢剛, 田中 誠, 鈴木昭男, 金氏 武, 木本政義：第 6 章石炭とバイオマス混焼発電 火力原子力発電 第 57 巻 第 10 号 2006 年 10 月 pp. 839 - 858
- (9) 中川賀之, 大野恵美：木質バイオマスの石炭焚きボイラにおける混焼技術の開発 火力原子力発電 第 56 巻 第 2 号 2005 年 2 月 pp. 134 - 138
- (10) 坂田昌一, 霜出 潔：微粉炭焚きボイラにおける大規模バイオマス混焼実績 火力原子力発電 第 59 巻 第 4 号 2008 年 4 月 pp. 322 - 327
- (11) Masato Tamura and Willem van de Kamp : 6th International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment (2001)