

Carbonization Characteristics of Woody Biomass, Grindability and Combustibility for Carbonized Woody Biomass

Masami ASHIZAWA^{*1‡} Maromu OTAKA^{*1} Tetsuya SHOJI^{*1} Hiromi YAMAMOTO^{*2}

木質バイオマスの炭化特性と炭化物の粉碎性・燃焼性

芦澤 正美^{*1‡}

大高 円^{*1}

庄司 哲也^{*1}

山本 博巳^{*2}

Abstract

The purpose of this study is to propose the control parameters during the wood carbonization, and to provide that the grindability and combustibility of the carbonized woody biomass are suitable for co-firing at pulverized coal power station. In this study, the authors conducted experiments of wood carbonization and of pulverizing and combustion of carbonized wood and obtained the following results. (1) Carbonized wood characteristics (such as energy yield and calorific value per weight) have a relatively low correlation coefficient with the measured carbonization temperature and a high correlation coefficient with the fixed carbon and weight yields of the carbonized wood. The weight yield observed during carbonization process can be a practical operation control index of the carbonizer. (2) The carbonized wood could be pulverized using the roller mill of the coal-fired power plant without modification. In the pulverization process, the energy consumption of the carbonized wood is close to that of coal. After the pulverizing process, the particle size of the carbonized wood is larger than that of coal. However, particles of the carbonized wood were combusted well like coal and the combustion gas satisfied environmental qualities. Using carbonized wood, it is expected to increase co-firing rate of biomass and reduce CO₂ emissions in coal-fired power plants.

Keywords: Carbonization, Co-firing, Woody Biomass and Coal
キーワード：炭化，混焼，木質バイオマスと石炭

1. はじめに

石炭火力発電は、発電事業者による総発電電力量の約3割を占めており、日本の主力電源のひとつである¹⁾。この石炭火力発電において、国際的な低炭素化ニーズに応じていくためには、蒸気条件の高温・高圧化や石炭ガス化複合発電の採用など、高効率化^{2,3)}を進めるほか、CO₂回収技術の開発・適用⁴⁾などが考えられる。その一方で、バイオマスはカーボンニュートラルであることから、既存の微粉炭火力でバイオマスを混合燃焼（混焼）する方法もひとつの有効な手段である⁵⁻¹⁰⁾。しかし、バイオマスは、石炭に比べると発熱量や高密度が低いこと、輸送・貯蔵が非効率であるほか、繊維質であることから混合粉碎時に石炭の粉碎性を低下させるなど、微粉炭火力での混焼利用において

は、クリアしなければならない幾つかの課題がある。加えて、エネルギーとして利用できるバイオマスの供給力には限界があるため、既存の微粉炭火力でのバイオマス混焼率は、熱量基準で3%程度に留まっているケースが多い¹¹⁾。

木質バイオマスを炭化して高品位化できれば、効率的な輸送が可能となるほか、発熱量や粉碎性を改善でき、微粉炭火力での混焼率を大幅に高められる可能性がある。既往の研究においても、バイオマスを炭化処理（本研究では、200~300°C程度で熱分解させ燃料化するトレフアクションも含め、より高温の400°C程度までの温度域を対象とするため、炭化という言葉を用いることとした）することで、石炭と同等の性状に近づけられること¹²⁾や、粉碎性などのハンドリング性を改善できること¹³⁻¹⁵⁾、石炭と混焼した際の燃焼性や環境性の向上に基づく有効性などが数多く報告¹⁶⁻¹⁸⁾されている。これらの有効性に基づき、微粉炭火

*1 Energy Transformation Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry, 2-6-1 Nagasaka, Yokosuka-shi, Kanagawa 240-0196, Japan
‡e-mail: ashizawa@criepi.denken.or.jp

*2 Grid Innovation Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry

Received: May 21, 2021, Accepted: August 5, 2021

*1 電力中央研究所 エネルギートランスフォーメーション研究本部（〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1）
‡e-mail: ashizawa@criepi.denken.or.jp

*2 電力中央研究所 グリッドイノベーション研究本部

（原稿受付：2021年5月21日，受理日：2021年8月5日）

力発電所で実利用に供するためには、炭化温度等の製造条件を変化させた際の炭化物の性状を整理し、粉碎性や燃焼性に及ぼす影響を明らかにするとともに、所定の高位発熱量を有する炭化物を安定的に製造するための運転管理指標を定めておくことが重要となる。

本研究の目的は、炭化温度を 250°C から最高 600°C まで設定可能な実験設備を用いて、性状の異なる代表的な木質バイオマスを用いた炭化実験を行い、その特性を整理し、木質バイオマスを炭化する際の運転管理指標を示すことである。さらに、製造した炭化物を用いて、実際の微粉炭火力発電所と同じ方式の微粉碎機（ローラミル）とバーナを用いて、粉碎性、燃焼性、および燃焼排ガスの環境値の評価を行うことで、炭化物が既存の微粉炭火力発電の混焼燃料として適することを実証することである。

2. 実験

2.1 供試燃料

実験に供試した木質バイオマスの燃料性状を Table 1 に示す。海外産として、北米産の樹皮（BK-A1）、製材残材（LR-A1, A2）、林地残材（FR-A1）を選定した。供試燃料は、海外産も含めて、全て針葉樹であり、国内の製材工場

から入手した。なお、バイオマス貯蔵容量や実験期間・回数などの制約などから、炭化、粉碎、燃焼の各実験で同一のバイオマスを用いることが困難であったため、Table 1 には各実験に用いたバイオマス種を明示した。また、粉碎実験と燃焼実験の比較用として、日本の微粉炭火力発電所で使われている代表的な石炭として、豪州産の瀝青炭 2 種類（Coal LD, NL）とインドネシア産の亜瀝青炭 1 種類（Coal AD）を選定し、これらの燃料性状についても Table 1 に示した。

2.2 実験設備と方法

2.2.1 炭化実験

炭化実験設備^{19, 20)}の概要を Fig. 1 に示す。実験設備は、炭化機の昇温と温度維持のための熱風発生炉、炭化機本体、熱分解ガスを処理する焼却炉、炭化物の冷却器などから構成されている。炭化機本体は、ロータリーキルンを採用しており、熱風発生炉の排気ガスを投入し温度を維持するための外筒と、間接熱でバイオマスを炭化する回転式の内筒から構成されている。また、外筒に取り付けられた放射温度計により、内筒表面のメタル温度を軸方向に 4 カ所計測できる。炭化機の温度を最高 600°C まで加熱できるように、内筒の材質は耐熱性の高い、Special Metals Company の INCOLOY (800H) を採用している。本実験では、炭化機の

Table 1 Properties of biomass and coal used in the experiments

Fuel	BK-A1	LR-A1	CF-J1	LR-A2	FR-A1	Coal LD	Coal NL	Coal AD
	Bark	Lumber Residue	Conifer	Lumber Residue	Forest Residue	Bituminous		Subbituminous
Producing Area	North America	North America	Japan	North America	North America	Australia	Australia	Indonesia
Carbonization	○	○	○	○	○			
Carbonizing Test	○	○			○			
Grindability Test			○	○	○	○		○
Combustibility Test	○	○					○	
Moisture(*1) (wt% as received basis)	46.3	59.5	28.5	45.0	29.2	5.2	9.6	27.8
Proximate Analysis(*1) (wt% dry basis)								
Ash	4.1	0.1	0.2	1.0	2.9	12.5	14.2	3.2
Volitile Matter	78.9	87.7	87.2	85.6	83.2	35.1	28.8	52.5
Fixed Carbon	17.0	12.2	12.6	13.4	13.9	52.4	57.0	44.3
Fuel Ratio (ash-free basis)	0.22	0.14	0.14	0.16	0.17	1.49	1.98	0.84
Ultimate Analysis (wt% dry ash-free basis)								
C	51.3	50.3	50.6	50.0	48.8	73.8	73.3	70.2
H (*2)	6.65	6.64	6.45	6.62	6.39	4.95	4.33	5.23
N	0.23	0.05	0.06	0.14	0.36	1.82	1.53	1.04
O (*3)	37.70	42.90	42.70	42.20	41.50	6.5	6.4	20.3
S	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.49	0.30	0.13
Calorific Value(*4)								
HHV	21.09	19.80	20.90	21.22	20.63	28.75	29.93	27.87
LHV	19.59	18.3	19.44	19.73	19.18	28.64	28.95	26.69
(MJ/kg dry basis)								

*1 : According to JIS M 8812, *2 : JIS M 8819, *3 : JIS M 8813, *4 : JIS M 8814

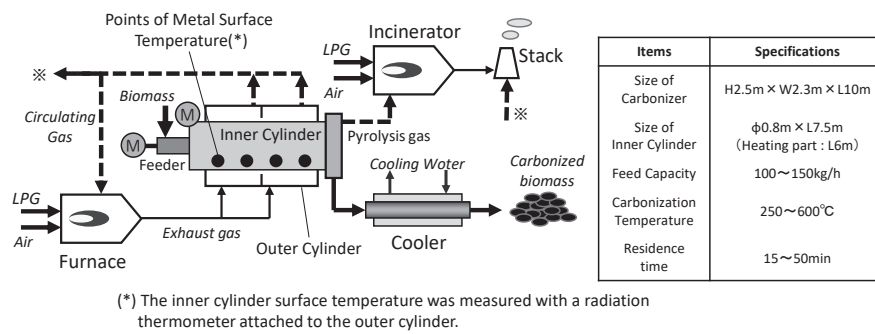


Fig. 1 Outline of carbonizing test facility

運転温度範囲は、内筒メタル温度の平均値（以下、炭化温度）で、概ね 290°C~400°C、炭化機内筒の回転数は 3 rpm、原料供給量は 100~150 kg/h の範囲で行った。炭化時間は約 40 分、得られた炭化物の量は概ね 50~80 kg/h の範囲であった。なお、炭化温度は、熱風発生炉への LPG 供給量を制御し、排ガス温度を操作することで変化させた。製造した炭化物は、自然発熱の危険があるため、窒素封入したドラム缶にて保管し、温度管理も行った。なお、炭化特性を評価するため、炭化物の重量収率（炭化物収率） η_{cb} （%）、エネルギー収率 η_{rh} （%）、炭化熱効率 η_{ce} （%）を式(1)~(3)の通り定義した。

$$\eta_{cb} = M_c / M_i \times 100 \quad (1)$$

$$\eta_{rh} = (Q_c \times M_c) / (Q_b \times M_i) \times 100 \quad (2)$$

$$\eta_{ce} = (Q_c \times M_c) / ((Q_b \times M_i) + (Q_l \times M_l)) \times 100 \quad (3)$$

ここで、式(1)~(3)の記号は下記の通りである。

- M_c : 炭化物製造量 (kg/h)
- M_i : バイオマス供給量 (kg/h)
- M_l : LPG 投入量 (Nm³/h)
- Q_c : 炭化物高位発熱量 (MJ/kg)
- Q_b : バイオマス高位発熱量 (MJ/kg)
- Q_l : LPG 高位発熱量 (kcal/Nm³)

2.2.2 粉砕実験

炭化物の粉砕実験を行った実験装置¹⁸⁾の概要を Fig. 2 に示す。微粉炭火力発電所における粉砕特性を模擬するため、発電所と同一方式のローラミル（宇部興産機械（株）の堅型ローラミル UM2.6S）を用いた。実験装置では、燃料供給量のほか、ローラ圧力やミルテーブル回転数、分級機回転数などが可変である。実験条件としては、石炭の粉砕実験の経験に基づき、粉砕試料の粒径分布が実機とほぼ同等となるよう、ローラ圧力を約 5.0 MPa、分級機回転数を約 450 rpm、ミルテーブル回転数を約 60 rpm とした。ミルに供給する炭化物は、実際の輸送や貯蔵工程を模擬するため、C. F. Nielsen 社の Briquetting Machine BP3200 を用いて、長さ 40 mm 以下のブリケットに圧縮成形し、これを直径約 10 mm 以下の粒径まで粗粉砕した試料を用いた。粉砕特性は、発電所の運用に合わせて、熱量基準（入熱管理）で評価するものとし、粗粉砕した試料の供給量は、入熱量が 2.3 MW に一定となるよう試料の低位発熱量に応じて、CF-J1 は約 339 kg/h、LR-A2 は約 350 kg/h、FR-A1 は約 355 kg/h、Coal LD は約 289 kg/h、Coal AD は約 310 kg/h とした。

2.2.3 燃焼実験

炭化物の燃焼実験を行った石炭燃焼実験設備¹⁸⁾を Fig. 3 に示す。BK-A1、LR-A1 の炭化物専焼実験、および豪州産

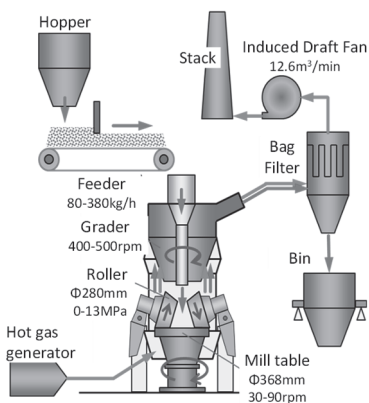


Fig. 2 Roller mill test facility

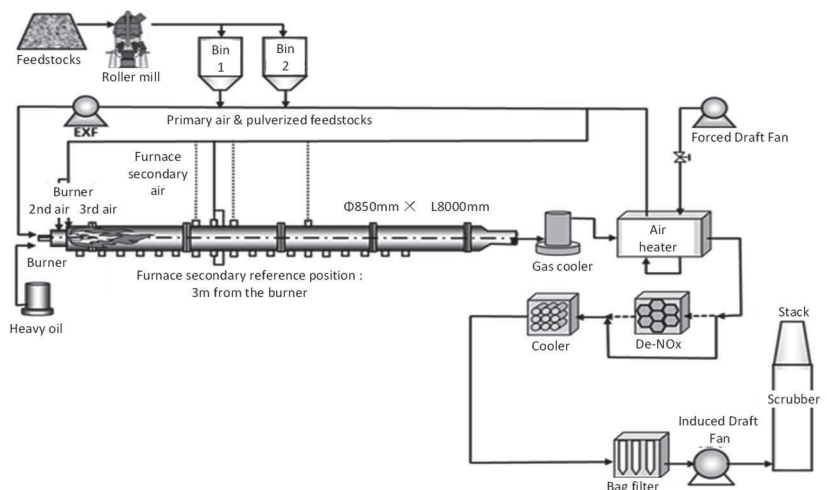


Fig. 3 Single burner combustion test facility

瀝青炭 Coal NL に BK-A1 を熱量基準で 30% 混合した混焼実験を行った。石炭専焼時の定格燃料投入量は 100 kg/h (設計に用いた基準炭の場合) である。また、実機の石炭ボイラにおける燃焼火炎を模擬するため、バーナから約 3 m の位置から 2 段燃焼用の空気を投入できる。主要な計測項目としては、NO_x、SO₂、灰中未燃分などを計測可能である。また、灰分量の影響を除き、燃料が実際に燃焼された割合を評価するため、式(4)の燃焼率 BR (%) を定義し評価に用いた。

$$BR = 100 - 100 \times \frac{Uc}{(100-Uc)} \times \frac{As}{(100-As)} \quad (4)$$

ここで、Uc は灰中未燃分(wt%)、As は燃料中灰分(wt%)を示す。燃焼実験の条件としては、発電所の運用に合わせて、熱量基準で評価するものとし、入熱が定格値 (760 kW (dry basis, LHV)) 一定となるよう、燃料供給量を 98~130 kg/h で変化させた。また、火炉出口の O₂ 濃度は 4vol%、二段燃焼率 (二段燃焼用空気量/燃焼用全空気量) は 30% とした。

3. 結果と考察

3.1 炭化特性

炭化実験設備で製造した炭化物の代表的な性状分析結果を Table 2 に示す。Table 1 に示した原料のバイオマス性状と比較すると、20wt% 以上あった水分含有量は、0.1wt% 以下となり、熱分解により揮発分は平均 85wt% から平均 62wt% まで減少した。固定炭素と揮発分 (JIS M 8812 で規定される石炭類およびコークス類の工業分析) の比である

燃料比 (Fuel Ratio) を炭化の前後で比較すると、0.14~0.22 から 0.35~0.78 へと約 1.5~5 倍程度の増加がみられた。これは炭化により、揮発分が減少し固定炭素が増加したことによる。また、熱分解により脱酸素化も進み、炭化物の高位発熱量は、20~22 MJ/kg から 22~27 MJ/kg へ増加した。

式(1)から(3)で定義した、炭化物収率 η_{cb} 、エネルギー収率 η_{th} 、炭化熱効率 η_{ce} の炭化特性と炭化物の重量あたりの高位発熱量について、炭化温度で整理した結果を Fig. 4 に示す。炭化温度を高めるほど、これらの炭化特性は低下する傾向にあり、逆に高位発熱量は高まる傾向にあった。ただし、ここで用いている炭化温度は、炭化機の内筒表面の平均メタル温度であって、炭化物自体の温度ではないため、装置固有の特性を含んでいる。炭化温度と炭化特性の相関係数 R² は概ね 0.394~0.610、高位発熱量との R² は 0.470 にとどまる。

一方、炭化物の物性のひとつである固定炭素で、炭化特性と高位発熱量を同様に整理した結果を Fig. 5 に示す。このときの相関係数 R² は、0.784 以上であり、バイオマスの種類や炭化条件によらず、固定炭素と炭化特性の間には強い相関性のあることがわかる。特に、Fig. 5(d)は、炭化物の物性である高位発熱量と固定炭素の関係を示しているため、装置固有の特性や実験による計測値のバラツキが含まれず、より強い相関関係 (相関係数 R²=0.986) が得られた。この傾向は、既往の研究結果と一致する^{15, 18, 20-22)}。したがって、従来からの知見の通り、固定炭素は炭化特性や炭化物の性状を整理するのに適した分析値であり、目標とする高位発熱量の炭化物を製造する際の指標となり得る。

しかし、固定炭素は、炭化後の試料を工業分析して得られる数値であるため、炭化物製造中の運転管理指標として

Table 2 Typical Properties of carbonized woody biomass

Biomass	BK-A1	LR-A1	CF-J1	LR-A2	FR-A1
Moisture(*1) (wt%)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Proximate Analysis(*1) (wt% dry basis)					
Ash	8.00	0.63	0.60	2.30	5.80
Volatile Matter	68.40	55.77	61.20	64.90	60.70
Fixed Carbon	23.60	43.60	38.20	32.80	33.50
Fuel Ratio (ash-free basis)	0.35	0.78	0.62	0.51	0.55
Ultimate Analysis (wt% dry ash-free basis)					
C	55.84	68.68	63.00	62.60	60.50
H (*2)	5.91	5.30	5.58	5.57	5.36
N	0.34	0.09	0.11	0.22	0.54
O (*3)	29.88	25.30	30.70	29.30	27.80
S	0.03	<0.01	0.01	0.01	0.02
Calorific Value(*4)					
HHV	22.17	27.35	25.67	24.99	24.52
LHV	20.84	26.16	24.41	23.73	23.31
(MJ/kg dry basis)					

*1 : According to JIS M 8812, *2 : JIS M 8819, *3 : JIS M 8813, *4 : JIS M 8814

は即時性や利便性に欠ける。そこで、運転中に短時間で簡単に計測可能な管理指標として、炭化物収率 η_{cb} に着目し、炭化特性と高位発熱量の関係を整理した (Fig. 6)。その結果、両者の相関係数 R^2 は 0.907 以上と高く、特に高位発熱量との相関係数 R^2 は 0.928 であった。この相関係数は、固定炭素との相関係数 $R^2=0.986$ より低いが、先の炭化温度との相関係数に比べて高い。この傾向は既往の研究^{23, 24)}とも一致しており、炭化物製造中の運転管理指標としては、炭化温度よりも炭化物収率 η_{cb} が有効であると考えられる。例えば、25 MJ/kg の高位発熱量を有する炭化物を製造するためには、約 53% の炭化物収率 η_{cb} を得るように運転操作すればよい。炭化物収率 η_{cb} は、バイオマスの投入量と炭化物製造量から求められるため、運転中に比較的容易に計測できる。このことから、炭化物収率 η_{cb} は、目標とする高位発熱量の炭化物を安定的に製造するための実用性の高い運転管理指標として活用できる。

3.2 粉砕特性

粉砕実験は石炭との比較が行えるよう、豪州産の瀝青炭 Coal LD およびインドネシア産の垂瀝青炭 Coal AD についても実施した。粉砕動力 (テーブル回転動力と回転分級機動力の和)、処理熱量当たりの粉砕動力に関する実験結果を Fig. 7 に示す。粉砕実験は熱量基準 (2.3 MW) で燃料を投入しているため、重量基準でみれば燃料毎に投入量が異

なるものの、粉砕動力はいずれの燃料も概ね一定の値であった。この粉砕動力を熱量基準の燃料供給量で除した、処理熱量当たりの粉砕動力は、LR-A2 がやや高めであったが、全種類ともに 0.4~0.6 kWh/GJ の範囲内であった。

粉砕物の粒径分布を測定した結果を Fig. 8 に示す。瀝青炭 Coal LD の 200 mesh パス率 (対象物の微粉砕において、200 メッシュのふるいを通す粉砕物 (粒子径 75 μm 以下に相当) の重量割合) は 86% であったのに対し、バイオマス炭化物のそれは 40~50% 程度であった。一方、60 mesh パス率 (粒子径 250 μm 未満) は、90% 以上であった。炭化バイオマスの粒径は石炭に比べて大きくなるものの、炭化処理を行うことで、石炭用のローラミルに特別な改造を加えることなく、石炭と同等の量 (熱量基準) を同等の動力で粉砕処理できることがわかった。

瀝青炭を扱う微粉炭火力発電所では、200 mesh パス率が概ね 80% 以上で運用されている。これは、優れた燃焼性を得るためであり、同等の燃焼性が得られるのであれば、粒子径が大きくても問題はない。バイオマスの炭化物は、石炭に比べて揮発分が多いため、高い燃焼性が期待でき、粒径の大きさをカバーできる可能性がある。これを検証するため、次に燃焼実験を行った。

3.3 燃焼特性

同一の熱量基準で粉砕処理したバイオマス炭化物につ

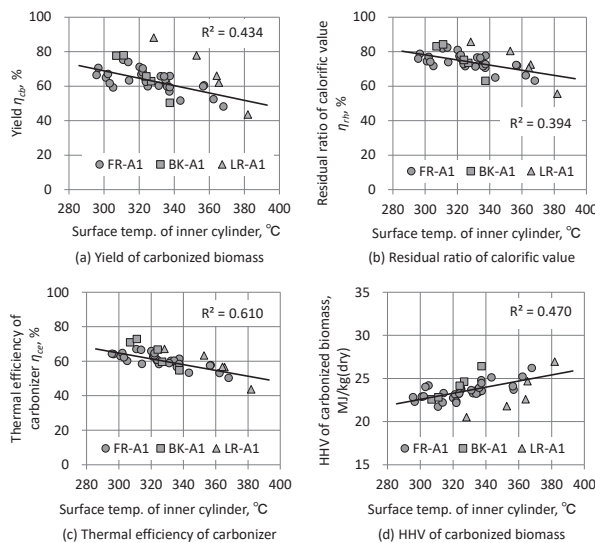


Fig. 4 Carbonizing temperature affects carbonization characteristics

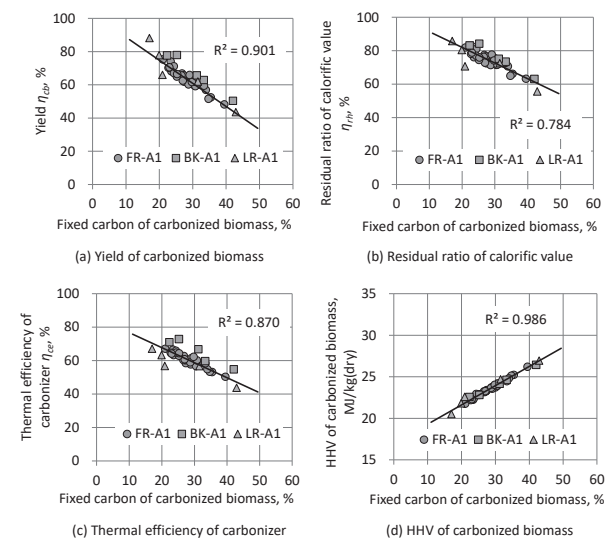


Fig. 5 Carbonization characteristics and fixed carbon of carbonized woody biomass

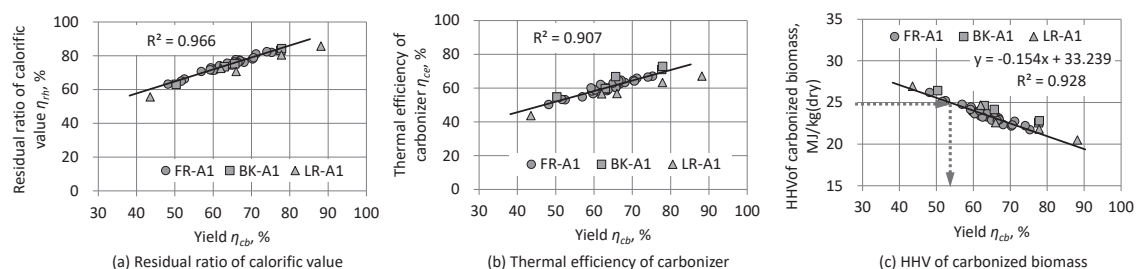


Fig. 6 Carbonization characteristics and weight yield η_{cb}

いて、Fig. 3の実験設備を用いて燃焼実験を行った。バイオマス炭化物専焼時の火炎の様子をFig. 9に示す。燃焼不良時に確認される黒煙は観察されず、高輝度の良好な火炎が形成されることが確認できた。

燃焼炉出口部における排ガスの環境値として、O₂6%換算のNO_xおよびSO₂濃度をFig. 10に示す。いずれもCoal NL単体の値より低く、特に炭化物専焼の場合、NO_x濃度

は100ppm以下、SO₂濃度は20ppm以下であり、優れた排ガスの環境値が得られた。これはTable 1と2に示した通り、石炭に比べバイオマス炭化物中のN分、S分が低いことに起因する。また、燃焼性能を評価するため、燃焼炉後流のバグフィルターで捕集した燃焼灰の未燃炭素濃度を分析した。その結果をFig. 11(a)に示す。炭化物の灰中未燃炭素濃度は、もとの燃料中の灰分量が少ないため、相対

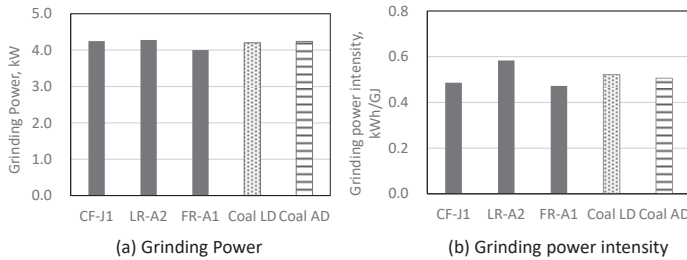


Fig. 7 Grindability of carbonized woody biomass and coal

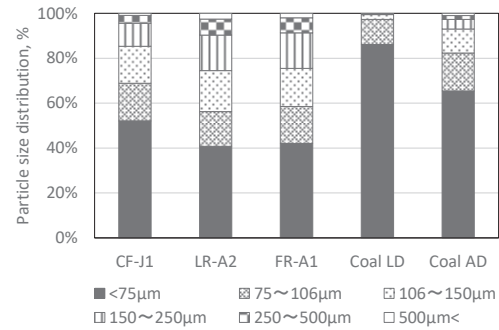


Fig. 8 Particle size distribution of carbonized woody biomass and coal

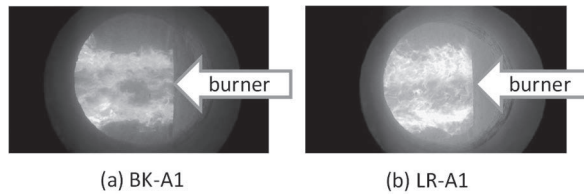


Fig. 9 Picture of burner flame

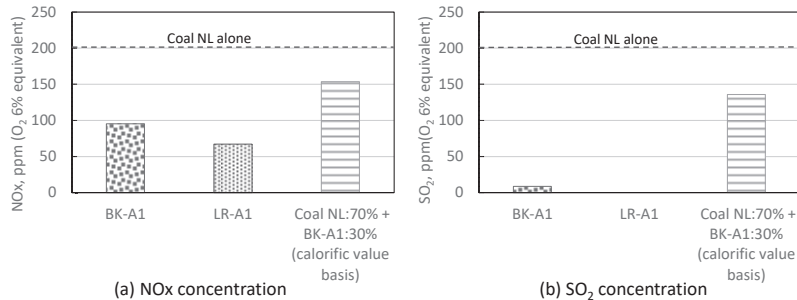


Fig. 10 NO_x and SO₂ concentrations

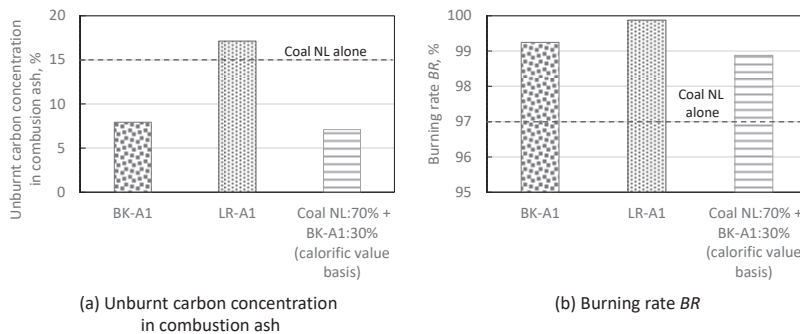


Fig. 11 Combustibility

的に Coal NL+BK-A1 に比べ高めの値を示す。そこで、式(4)で定義した燃焼率 BR で整理した結果を Fig. 11(b)に示す。いずれの燃料も 98%以上と高い値であることがわかった。

以上の結果から、前節で述べた通り、バイオマス炭化物を石炭用のローラミルで粉碎した場合、粒径は大きめとなるが、燃焼時には、石炭と同レベル以上の優れた環境性と燃焼性が得られることがわかった。

4. まとめ

石炭火力発電所の CO_2 削減対策として、木質バイオマス炭化物を微粉炭火力発電所で大量かつ安定的に使用するためには、木質バイオマスの炭化特性と炭化物の粉碎性や燃焼性などの特性を明らかにする必要がある。本研究では、代表的な木質バイオマスの炭化特性と炭化物の粉碎性と燃焼性を明らかにするため、炭化、粉碎、燃焼性に関する実験を行い、以下の結果を得た。

- (1) 炭化物の重量収率（炭化物収率） η_{cb} 、エネルギー収率 η_{rh} 、炭化熱効率 η_{ce} などの炭化特性は、炭化温度（炭化機の内筒表面の平均温度）との相関係数は低く、炭化物の固定炭素および炭化物収率 η_{cb} との相関係数が高い。炭化物製造工程における実用的な運転管理指標としては、炭化物の重量収率である炭化物収率 η_{cb} が有効である。
- (2) 本研究で製造した炭化物は、概ね 290~400°Cの温度で炭化した。この条件においては、微粉炭火力発電所用のローラミルに特別な改造を加えることなく、石炭と同等の動力で粉碎処理できる。
- (3) 炭化物を粉碎すると、石炭に比べて大きめの粒径となる。しかし、石炭燃焼実験設備による燃焼実験により、大きめの粒径であっても、石炭と同等以上の環境性と燃焼性が得られる。これは、バイオマス炭化物の揮発分が石炭に比べて多く、反応性が高いことなどに起因するものと考えられる。

本成果は、微粉炭火力発電所における木質バイオマスの大量利用と CO_2 排出量の削減を促進するものと期待される。

謝辞

本成果は、環境省委託事業「 CO_2 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」として実施した 2013 年度および 2014 年度「石炭火力における混焼率 30%を実現する木質バイオマスの改質プロセスの実用化開発」、ならびに 2015 年度~2017 年度「バイオ改質炭普及拡大に向けたエネルギー自立型製造プロセスの構築並びに微粉炭ボイラでの 100%専焼技術の開発」の一環として得られたものであり、委託元の環境省、主実施者の三菱重工環境・化学エンジニアリング株式会社の関係各位に謝意を表す。また、本

成果のとりまとめに当たり、国立大学法人 東京農工大学大学院 工学研究院 秋澤 淳教授に研究指導を受けた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁 電力調査統計 結果概要【2019 年度分】、資料ダウンロード (accessed May 6 2021), https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/pdf/2019/0-2019.pdf
- 2) T. Nagai, S. Kajitani, Development of IGCC Demonstration Plant - from 200 t/d Pilot Plant to 250MW Demonstration Plant-, Journal of the Japan Institute of Energy, **86**(5), 315-320(2007).
- 3) K. Sakamoto, 2011 Gasification Technologies Conference: 2011 Conference: Session 4 - Project Updates, 発表資料ダウンロード (accessed July 24 2020), <https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/17SAKAMOTO.pdf>
- 4) T. Hirata, H. Nagayasu, T. Yonekawa, M. Inui, T. Kamijo, Y. Kubota, T. Tsujiuchi, D. Shimada, T. Wall, J. Thomas, Current Status of MHI CO_2 Capture Plant technology, 500 TPD CCS Demonstration of Test Results and Reliable Technologies Applied to Coal Fired Flue Gas, Energy Procedia, **63**, 6120-6123(2014).
- 5) Maria V. Gil, Fernando Rubiera, "5 - Coal and biomass cofiring: fundamentals and future trends", Editor(s): Isabel Suárez-Ruiz, Maria Antonia Diez, Fernando Rubiera, New Trends in Coal Conversion, Woodhead Publishing, 117-140(2019).
- 6) S. De, M. Assadi, Impact of cofiring biomass with coal in power plants - A techno-economic assessment, Biomass and Bioenergy, **33**(2), 283-293(2009).
- 7) K.V. Narayanan, E. Natarajan, Experimental studies on cofiring of coal and biomass blends in India, Renewable Energy, **32**(15), 2548-2558(2007).
- 8) A. Demirbaş, Sustainable cofiring of biomass with coal, Energy Conversion and Management, **44**(9), 1465-1479(2003).
- 9) M. L. Holtmeyer, B. M. Kumfer, R. L. Axelbaum, Effects of biomass particle size during cofiring under air-fired and oxyfuel conditions, Applied Energy, **93**, 606-613(2012).
- 10) D. Loeffler, N. Anderson, Emissions tradeoffs associated with cofiring forest biomass with coal: A case study in Colorado, USA, Applied Energy, **113**, 67-77(2014).
- 11) Mitsui & Co., Global Strategic Studies Institute Monthly Report, 資料ダウンロード (accessed May 3 2021), https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2018/01/12/170703m_unokikuchi_e.pdf
- 12) J. Xue, T. Chellappa, S. Ceylan, J. L. Goldfarb, Enhancing biomass + coal Co-firing scenarios via biomass torrefaction and carbonization: Case study of avocado pit biomass and Illinois No. 6 coal, Renewable Energy, **122**, 152-162(2018).
- 13) B. Arias, C. Pevida, J. Feroso, M.G. Plaza, F. Rubiera, J.J. Pis, Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody

- biomass, *Fuel Processing Technology*, **89**(2), 169-175(2008).
- 14) M. Phanphanich, S. Mani, Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass, *Bioresource Technology*, **102**(2), 1246-1253(2011).
- 15) M.J.C. van der Stelt, H. Gerhauser, J.H.A. Kiel, K.J. Ptasiński, Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review, *Biomass and Bioenergy*, **35**(9), 3748-3762(2011).
- 16) C. Ndibe, J. Maier, G. Scheffknecht, Combustion, cofiring and emissions characteristics of torrefied biomass in a drop tube reactor, *Biomass and Bioenergy*, **79**, 105-115(2015).
- 17) C-W. Huang, Y-H. Li, K-L. Xiao, J. Lasek, Cofiring characteristics of coal blended with torrefied *Miscanthus* biochar optimized with three Taguchi indexes, *Energy*, **172**, 566-579(2019).
- 18) T. Yoshida, Production and Evaluation Method of Heat-Treated Biomass Pellet Fuels, *Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics*, **19**(3), 175-181(2019).
- 19) Y. Endo, M. Otaka, Development of energy self-sustained production process of Bio Upgraded Coal TM (BUC) with high cofiring rate in Pulverized Coal boilers. In Proceedings of the 9th i-CIPEC, Kyoto, Japan, 20–23 September 2016.
- 20) T. Shoji, K. Sakuragi, M. Taki, M. Otaka, Evaluation of Effects of Operating Condition to Properties of Carbonized Fuel by using 4t/d Carbonization Facility, CRIEPI Report M14012, 5-9(2015).
- 21) N. Tagami, T. Nakadate, S. Mizuno, T. Ida, A Study for Torrefied Characteristics of Torrefied Green Tea Based on Index of the Coal, *Journal of the Japan Institute of Energy*, **97**, 1-7(2018).
- 22) J. Qi, J. Zhao, Y. Xu, Y. Wang, K. Han, Segmented heating carbonization of biomass: Yields, property and estimation of heating value of chars, *Energy*, **144**, 301-311(2018).
- 23) G. Almeida, J. O. Brito, P. Perré, Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: The potential of mass loss as a synthetic indicator, *Bioresource Technology*, **101**(24), 9778-9784(2010).
- 24) T. Yoshida, T. Sano, T. Nomura, H. Gensai, H. Watada, S. Ohara, Fundamental Study on the Production of “Hyper Wood Pellet” – Effect of Torrefaction Condition on Grinding and Pelletizing Properties, *Journal of Energy and Power Engineering*, **7**(4), 705-710(2013).