バイオマスの2段階ガス化装置におけるチャーガス化挙動

Behaviors of Char Gasification Based on Two-stage Gasifier of Biomass

谷口美希*・笹内謙一*・安 鐵朱**
伊東佑輔**・林 俊成**・赤松史光**

Miki TANIGUCHI, Kenichi SASAUCHI, Chulju AHN,
Yusuke ITO, Toshiaki HAYASHI and Fumiteru AKAMATSU

(Received December 19, 2008)

In order to develop a small-scale gasifier in which biomass can be converted to energy with high efficiency, we planned a gasification process that consists of two parts: pyrolysis part (rotary kiln) and gasification part (downdraft gasifier). We performed fundamental experiments on gasification part and discussed the appropriate conditions such as air supply location, air ratio, air temperature and hearth load. The following results was found: 1) the air supply into the char bed is more effective than that into the gas phase, 2) we can have the maximum cold gas efficiency of 80% on the following conditions: air supply location: char layer, air temperature: 20°C, air ratio: 0.2. 3) As air temperature is higher, the cold gas efficiency is larger. As for the hearth load, the cold gas efficiency becomes higher and reaches the constant level. It is expected from the results that high temperature in the char layer is effective on the char gasification.

Key Words: Biomass, Two-stage gasifier, Char gasification

1. 緒 言

近年、二酸化炭素による地球温暖化が懸念されており、その一方でエネルギー需要は増加し続けている。このような状況の中、再生可能エネルギーであるバイオマスが注目されている。

日本は国土の約 67% を森林が占める森林資源の豊富な国でありながら、地形が急峻で収集運搬が難しいことや、外国材の輸入による木材価格の低下、労働者の高齢化などで林業が衰退し、その資源が有効利用されていないのが現状である。また、それらの資源は広範囲に少量が分布しており、地産地消できる小規模分散型での利用が望ましい。我々はこのような日本の木質系バイオマスの事情に適したエネルギー利用方法の一つとして、バイオマスの熱化学的変換による小型ガス化発電システムの開発を進めている¹⁾。本発電システムの研究開発においては、製材廃材であるバークや端材などの現状では有効利用されていない木質バイオマスを発生場所で利用することにより約 50kW の発電量を目標としている。

本小型ガス化発電システムの概要を Fig. 1 に示す。システムは大きく分けて、ガス化装置、ガス精製・冷却装置、

ガスエンジンで構成される。本システムのガス化部分では 2 段階ガス化方式を採用している。2 段階ガス化にも様々な方式があり、熱分解炉からガスを分離してガス中のタールを高温改質する方式²⁾、1 つのガス化炉内で 2 段階に酸化剤を供給してガス化する方式³⁾、熱分解した後に酸化剤を供給してガス化する方式⁴⁾などがある。本システムは 3 つ目にあげた熱分解後に酸化剤を供給する方式であり、前段のロータリーキルンでまず原料を熱分解し、後段のダウンド

Fig. 1 Biomass gasification and power generation system

* 中外炉工業株式会社 堺事業所 (〒 592-8331 堺市西区築港新町 2-4)

Chugai-Ro Co. LTD., Sakai Works (2-4, Chikko-shinmachi, nishi-ku, Sakai-city, Osaka, 592-8331 JAPAN)

** 大阪大学大学院工学研究科 機械工学専攻 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)

Department of Mechanical Engineering, Osaka University (2-1, Yamadaoka, Suita-city, Osaka, 565-0871 JAPAN)

ラフト炉で熱分解により生成したタールを含んだガスおよびチャーを空気吹き込みにより部分燃焼し、タール分解とチャーガス化を行なっている。前段のロータリーキルンは、原料の性状に対して比較的受け入れ範囲が広く、原料性状が変動しても炉内滞留時間が長いために生成ガスの発生量や組成の変動が小さくなる。一方、後段のダウンドラフト炉は非常にコンパクトであり、ガス中のタール発生量が少ない。本2段階ガス化システムはこれら2つの形式の炉を組み合わせることによって、両者の特長を生かしたガス化を実現するものである。一方、ガスエンジンには自動車用エンジンを利用し、生成ガスの発生量や組成変化に合わせて最適制御を行なうことにより、高効率運転を可能とする発電システムの開発を進めている⁵⁾。

本報においては、ガス化装置後段のダウンドラフト炉の設計指針となる知見を得るため、基礎実験装置を用いてガス化実験を行ない、生成ガスの組成、チャーガス化率、冷ガス効率といったチャーガス化挙動を調べ、適切な空気吹き込み条件や炉床負荷について検討した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

ガス化装置後段のダウンドラフト炉の基礎実験装置として、開発目標とする装置規模 (50 kW 発電相当) の 1/50 スケールの連続ガス化装置を製作した。本実験装置の概要図を Fig. 2 に示す。本装置は、ガス供給系、加熱炉、ガス化炉、ガス精製部、ポンプ、フレアスタックで構成されており、ガス、チャー、タール、水をそれぞれ連続供給できるようになっている。

前段のロータリーキルン炉から供給されるガスを模擬して、構成成分の純ガスをそれぞれガスボンベより供給し、マスフローコントローラ (KOFLOK 製, MODEL8300) で流量を調整した後、加熱炉および炉本体の電熱ヒータにて加熱した。ガス温度は 600 °C 熱分解処理時の熱分解炉出口温度が放熱により降下することを考慮して、チャー充填層入口 (TC3) で 550 ± 20 °C になるように制御した。水は定量ポンプ (名東化工機製, ME-30) で加熱炉に供給し、タールはシリンジポンプ (NIHON KOHDEN 製, CFV-3200) により定量で送り出し、ガス化炉内の上部に設けたステンレスバーに点滴供給した。チャーはスクリュウフィーダを用いて定量供給した。

ガス化炉本体は内径 100 mm で、炉内上部はステンレス管を電熱ヒータにて加熱できる構造としており、炉下部はかなりの高温になるため、内部断熱構造とした。チャー充填層の層高は、炭化物の導電性を利用したレベルセンサ (OMRON 製, 61F-NH) により検知し、チャー灰排出用スクリュウフィーダによる排出量を調整することにより一定に制御した。生成ガスは冷却してダスト除去した後、乾式ガスメータ (シナガワ製, DC-5) でガス量を測

Fig. 2 Experimental apparatus

Fig. 3 Air nozzle (supplying direction and shape of the nozzle head)

定し、ポンプ (イワキ製, BA-230TN) により吸引し、フレアスタックにて燃焼処理した。ガス化炉の炉圧はガス化炉の炉頂部の圧力がゼロになるようにポンプの1次側にあるバルブ開度を自動調整して制御した。空気はエアコンプレッサから供給し、マスフローコントローラ (KOFLOK 製, MODEL8300) で流量を調整した後、炉内に吹き込んだ。吹き込みノズルは、炉上部より挿入し炉中心から水平方向に吹込む方式 (Fig. 3(a)) と炉壁より3方向タンゼンシャルに吹込む方式 (Fig. 3(b)) を使い、空気温度を変える場合にはノズル1次側のスポットヒータ (竹綱製作所製, SH01) によってヒータ出口温度を所定温度条件に制御した。

炉高さ方向および炉出口には、熱電対孔とサンプリング孔を設け、各部の温度とガス組成を測定した。ガスサンプリングは、各サンプリング孔からガスをポンプで吸引し、サンプリングバッグに捕集したものを μ -GC (Varian 製,

Table 1 Compositions and amount of simulant gas, char and tar

Gas	Supply amount		kg/h	0.589
			m ³ N/h	0.546
	Content	H ₂	dryvol%	16
		CO	dryvol%	40
		CO ₂	dryvol%	20
		CH ₄	dryvol%	24
		Total	dryvol%	100
	HHV	MJ/m ³ N	16.7	
Char	Supply amount		kg/h	0.213
	Content	Volatile	drywt%	7.1
		Ash	drywt%	3.7
		C	drywt%	88.7
		H	drywt%	0.7
		N	drywt%	0.2
		HHV	MJ/kg	33
Tar	Supply amount		kg/h	0.048
	Content	C	drywt%	68.7
		H	drywt%	7.52
		N	drywt%	0.1
		HHV	MJ/kg	29.8
Water	Supply amount		kg/h	0.4
	Water content		wet%	20
Biomass supply amount			kg/h	1
Hearth load			kg-d.b./m ² h	127

Table 2 Experimental conditions

Air	Supply location		Gas phase
			Surface of char layer
			Char layer
	Air ratio	—	0.14~0.3
	Temperature	°C	20, 400
Hearth load		kg-d.b./m ² h	64, 127, 193

CP4900, Column : MS-5A/PorapakQ, Detector : TCD) で分析した。

2.2 実験条件

実験装置に供給するガス、チャーおよびタールの量は、ロータリーキルンにおける 600 °C 熱分解時の各熱分解生成物収率と平均ガス組成 (Table 1) にあわせて供給した。実験に供するチャーとして、木材チップ (杉間伐材チップで 20 mm 以下のもの) をロータリーキルン (中外炉工業製) で 600 °C、1 時間加熱処理したものを使用し、タールとして約 500 °C で木炭生成時に回収されたものを使用した。供試試料の性状および実験条件を Table 2 に示す。今回、実験条件として、空気吹き込み条件 (空気吹き込み位置、空気比、空気温度) と炉床負荷を変化させた。

空気吹き込み位置は、Fig. 4 で示すように気相、充填層表面、充填層の 3 通りで行ない、気相および充填層表面の場合には炉上部より挿入したノズル (Fig. 3 (a))、充填層へ吹き込む場合は炉壁面より 3 方向タンゼンシャルに吹き込むノズル (Fig. 3(b)) を用いた。空気比は炉に供給したガス、チャー、タールすべての理論燃焼空気量の総和に対する供給空気量の比とした。

Fig. 4 Air supply location

炉床負荷を変化させる場合には、Table 1 に示す量を 1 として、0.5 倍、1.5 倍と供給量を変化させた。Table 1 に示す値は、単位あたりの乾燥バイオマス供給量で表すと 1 kg-dry biomass/h (以下、dry biomass は d.b. と表す) に相当し、単位面積あたり、単位時間あたりの乾燥バイオマス供給量で表すと 127 kg-d.b./m²h となる。

3. 実験結果と考察

3.1 冷ガス効率、炭素転換率、チャーガス化率の定義

結果を示すにあたって、冷ガス効率、炭素転換率、チャーガス化率の定義を式 (1) ~ (3) に示す。冷ガス効率は式 (1) のように表され、供給したチャー、タール、ガスの高位発熱量の合計に対するガス化炉出口における生成ガスの高位発熱量の割合を示している。バイオマスの炭素転換率は供給したチャー、タール、ガスの炭素分の合計に対するガス化炉出口における生成ガスの炭素分の割合で式 (2) のように表される。また、チャー充填層の高さを一定に保ちながらガス化炉が定常運転できるかを判断するためにチャーガス化率を式 (3) のように定義して用いた。チャーガス化率は供給したチャーの炭素分に対するチャーのうちガス化された炭素分の割合を示している。ここで、式 (3) が複雑な形となっているのは、チャー灰の排出量の測定と採取・分析が困難であったため、測定可能な生成ガス量やガス組成から逆算する形をとったためである。

冷ガス効率：

$$\eta_{cold} = \frac{HHV_{out_gas}}{HHV_{char+in_gas+tar}} \quad (1)$$

炭素転換率：

$$\eta_c = \frac{C_{out_gas}}{C_{char+in_gas+tar}} \quad (2)$$

チャーガス化率：

$$\eta_{ch} = \frac{C_{char} - (C_{char+in_gas+tar} - C_{out_gas})}{C_{char}} \quad (3)$$

HHV：高位発熱量 C：炭素質量

3.2 空気吹き込み条件

空気吹き込み条件として、吹き込み位置、空気比、空気温度を変えて実験を行なった。各吹き込み位置において、空気比を変化させた場合の生成ガスの高位発熱量、チャーガス化率、炭素転換率および冷ガス効率の変化を Fig. 5 に示す。空気比が高くなるにつれて、ガスの高位発熱量は低下し、吹き込み位置が充填層、充填層表面、気相の順でその値は低くなるが、空気比の変化に対する発熱量の変化は、どの吹き込み位置の場合にも違いが見られない。また、チャーガス化率および炭素転換率は、どの空気吹き込み位置の場合にも増加するが、気相に吹き込んだ場合と、充填層表面もしくは充填層に吹き込んだ場合とでは、その上昇率が明らかに異なっていることが分かる。一方、冷ガス効率の変化を見ると、気相に吹き込んだ場合には減少し、充填層表面もしくは充填層に吹き込んだ場合には増加している。

チャーガス化率は前述の通り、供給したチャーの炭素分に対するチャーのうちガス化された炭素分の割合を表している。今回の結果を見ると、充填層に空気を吹き込んだ場合、空気比が0.2以上になるとチャーガス化率が100%を超えている。これは、炉内のチャー充填層の層高が一定に保持できず、連続運転が不可能であることを意味している。よって、ガス化炉が連続運転できることを前提とした場合、充填層に空気比0.2で吹き込んだ場合の冷ガス効率である約80%が、本実験条件において得られる最大の冷ガス効率であると言える。

次に、各空気吹き込み位置における、生成ガス組成、生成ガスの高位発熱量、チャーガス化率、炭素転換率、および冷ガス効率を Table 3 に示す。吹き込み位置が気相、充填層表面、充填層の順に、ガス中のCO、CH₄は増加し、CO₂は減少している。また、ガス高位発熱量は高くなり、チャーガス化率、炭素転換率、冷ガス効率の全ての値が増加している。

チャーガス化炉には、式(4)、(5)のように吹き込んだ空気とガス、タール、チャーが燃焼(酸化)してガスが発生する領域と、式(6)、(7)のように燃焼反応で発生したCO₂やH₂Oがチャー充填層においてチャー中の炭素により還元され、チャー中の炭素分がガス化されるとともにCO₂がCOに、H₂OがH₂に変換される領域が形成されると考えられる。

Fig. 5 Various quantities in functions of air ratio
(Air temp.: 20 °C, Hearth load: 127 kg-d.b./((m²·h))

Table 3 Effect of air supply location
(Air ratio: 0.2, Air temp.: 20 °C, Hearth load: 127 kg-d.b./((m²·h))

Air supply location			Gas phase	Surface of char layer	Char layer	
Content of product gas	H ₂	dryvol%	12.0	11.9	11.7	
	CO	dryvol%	19.6	28.1	35.2	
	CO ₂	dryvol%	16.3	12.1	8.1	
	CH ₄	dryvol%	2.8	3.4	7.3	
	N ₂	dryvol%	46.7	42.9	37.7	
	Others	dryvol%	2.5	1.6	0.0	
	Total	dryvol%	100	100	100	
	HHV	MJ/m ³ N	6.9	7.5	8.8	
Char gasification rate			%	36.2	58.1	107.8
Carbon conversion rate			%	73.9	82.5	103.2
Cold gas efficiency			%	54.4	62.9	87.3

空気を気相に吹き込んだ場合には、ガスと空気が燃焼反応し、チャー充填層では既に酸素が消費され、チャーが燃焼しないためにチャーガス化率が低下することは容易に想

Fig. 6 Temperature distribution in gasifier
(Air ratio: 0.2, Air temp.: 20 °C, Hearth load: 127 kg-d.b./ (m²·h))

Fig. 7 Distribution of CO and CO₂ concentration in gasifier
(Air ratio: 0.2, Air temp.: 20 °C, Hearth load: 127 kg-d.b./ (m²·h))

像できるが、冷ガス効率を向上させるためには、燃焼により発生したCO₂やH₂Oを還元して、COやH₂として取り出すことが重要である。式(6)は700℃以上でCO生成の方向に反応が進行する⁶⁾と言われており、また、式(7)は一般的に水性ガス化反応と呼ばれており、石炭のガス化などに用いられるが、通常900℃以上の温度が必要であると言われており⁶⁾。どちらの反応も吸熱反応であり、炉内温度の影響が大きいと考えられる。そこで、空気比0.2の場合の炉内温度分布をFig. 6に、CO、CO₂濃度分布をFig. 7に示す。グラフ中の着色した領域はチャー充填層内であることを表している。空気を気相に吹き込む場合と、充填層表面もしくは充填層に吹き込む場合とでは、吹き込み部での温度に差があることが分かる。また、充填層表面に吹き込んだ場合と充填層に吹き込んだ場合では、吹き込み部の温度がどちらも1100～1200℃まで上昇しているが、充填層内の温度に違いがあり、この温度差が冷ガス効率に影響していると考えられる。また、空気を充填層表面に吹き込んだ場合と充填層に吹き込んだ場合では、COおよびCO₂の分布が異なっており、このことはCO₂がCOに変換される割合が充填層内の温度に依存しているためであると考えられる。つまり、充填層表面もしくは充填層に空気を吹き

Table 4 Effect of air temperature
(Air ratio: 0.2, Hearth load: 127 kg-d.b./ (m²·h))

(a) Gas phase			
Air Supply Temperature °C		20	400
Content of product gas	H ₂	dryvol%	8.0
	CO	dryvol%	22.5
	CO ₂	dryvol%	18.6
	CH ₄	dryvol%	7.6
	N ₂	dryvol%	43.3
	Others	dryvol%	0.0
	Total	dryvol%	100
HHV		MJ/m ³ N	6.9
Cold gas efficiency		%	67.6
Temperature of air supply location		°C	962

(b) Char layer			
Air Supply Temperature °C		20	400
Content of product gas	H ₂	dryvol%	11.7
	CO	dryvol%	35.2
	CO ₂	dryvol%	8.1
	CH ₄	dryvol%	7.3
	N ₂	dryvol%	37.7
	Others	dryvol%	0.0
	Total	dryvol%	100
HHV		MJ/m ³ N	8.8
Cold gas efficiency		%	87.3
Temperature of air supply location		°C	1,047

込んだ場合の冷ガス効率の向上には、チャー充填層の温度が重要であると考えられる。すなわち、単にチャー表面での酸素濃度が高いことでチャーのガス化(酸化・燃焼)が促進されるだけでなく、チャーの燃焼による熱発生が多くなることに加えて、チャー充填層が空気の拡散を妨げ、局部的に反応することとなり、さらに温度が高くなった結果、チャー充填層において上記のような還元反応が促進されるという相乗効果によるところが大きいと考えられる。

次に、充填層への吹き込みにおいて空気温度を変えた場合の出口ガス組成、ガス高位発熱量、冷ガス効率および吹き込み部温度をTable 4に示す。

空気温度が20℃の場合と400℃の場合を比べると、気相に吹き込んだ場合にはほとんど変化が見られないが、充填層に吹き込んだ場合にはガス組成が変化し、冷ガス効率も増加している。これらの結果は、上記の考察の通り、チャー充填層の温度上昇による効果と言える。しかし、COおよびCO₂濃度については、上記の考察の内容とは異なるようである。上記の考察によると、チャー充填層温度の上昇に伴って還元反応が促進されればCO濃度が増加するということになるが、空気温度を上げた場合には充填層温度が高くなるにもかかわらず、CO濃度は低下している。この理由については、後で議論することとする。

ところで、加熱空気を供給することは外部から熱を与え

ていることとなるため、本来であれば冷ガス効率を計算する際に加熱空気の熱量を考慮する必要があるが、今回は考慮していない。ちなみに、空気比 0.2、空気温度 400℃ の場合、加熱空気の持つ熱量は投入熱量の約 2% となる。

以上、空気吹き込み条件について検討したが、空気吹き込み位置においては、前述の通り、吹き込み位置だけでなくノズル形状や吹き込み方法も異なっており、その影響が全くないとは言いきれない。しかし、空気の吹き込み位置による違いが極めて大きいため、ガス組成変化や各効率の変化については、概ねその傾向を把握できたと考えられる。

ところで、異なる 2 つの空気吹き込み用ノズルを用いた理由として、ノズルの溶損がある。今回、充填層へは炉壁から炉内に向けて吹き込むことにしたが、気相や充填層表面に吹き込んだ場合のように、炉の中心から外側に向けて吹き込む方法ではノズル自体の温度が上昇し、溶損して実験が継続できなかった。ちなみに、炉壁から吹き込む構造では、ノズルの溶損は起こらなかったが、炉壁の磨耗によりノズル先端が炉内に突出するようになった場合には、クリンカと思われる付着物が発生することがあった。

また、今までに温度分布や吹き込み部の温度を示したが、充填層に吹き込んだ場合には $\pm 50^\circ\text{C}$ 程度の温度変動が見られた。チャー充填層の層高のレベルセンサと温度の動きを観察してみると、吹き込み部とその下部の温度は通常 1000℃ 以上の非常に高い温度を示しているが、あるとき急に温度が降下し、それとともにチャーレベルも下がってしまうという現象が頻繁に見られた。この一連の現象は、空気を充填層に吹き込んだ場合には、吹き込み位置近傍でチャーと空気が局所的に反応して高温部を形成するとともにその反応部分が空隙となっており、徐々にそれが成長すると空隙の上に堆積しているチャーの重量によって空隙部分が押しつぶされてチャーが落下し、チャー充填層の層高の急激な低下に至るものであり、運転時にはこの現象が繰り返し起こっていると推測される。また別の現象として、チャー吹き込み部より上部でチャーが流動化しているように見えることがあった。同じ条件で運転しても、流動化する場合としない場合があり、流動化する条件を明確に把握することはできなかったが、流動化した場合には炉内温度分布が一定となり、冷ガス効率が若干低下することを確認している。

これまでの結果から、空気を充填層に吹き込むことにより、チャーの燃焼が促進されるとともにチャー充填層温度が高くなり還元反応が促進され、高い冷ガス効率でガス化を行なえることが分かったが、その一方で、炉内がかなり高温環境に達するので不安定になるために運転操作が難しくなり、クリンカなどのトラブル発生の懸念が生じることを示唆した。したがって、炉内に均一に適切な温度の反応場を形成することが必要であり、ノズル配置などを工夫する必要がある。

3.3 チャー充填層高さ

チャー充填層の層高は、空気を供給することによって発生した CO_2 や H_2O などが還元されるために必要な滞留時間とタールが分解されるために必要な滞留時間で決定されるが、ガス化発電システム全体として考えた場合、チャー充填層の層高が高いほど圧力損失も大きくなり、誘引ブロワの消費動力が増加する、つまり設備内消費電力の増加につながることになるため、できるだけチャー充填層の層高を低くすることが望ましい。

今回の実験では、実際に炉内のチャー充填層の層高を変えた実験を行なったのではなく、層高は一定として実験をおこなっており、空気吹き込み位置から各サンプリング孔までの距離をそのチャー充填層の層高とした。

充填層吹き込み時における充填層高さで生成ガス中の主要成分の濃度、ガス高位発熱量、および冷ガス効率の変化を Fig. 8 に示す。空気吹き込み位置から 150 mm までは急激に変化するが、それ以降は緩やかに変化している。したがって、チャー充填層内での還元反応がほぼ 150 mm 付近で完了していると考えられ、Fig. 8 に示した空気吹き込み条件では、チャー充填層の層高が 150 mm で十分であると言える。必要な層高は、当然ながら、空気比や空気温度によっても異なると考えられる。そこで、空気温度を 400℃

Fig. 8 Distribution of various quantities in char layer (air temperature is 20°C)
 (Air ratio: 0.2, Air supply location: Char layer Hearth load: 127 kg/(m²·h))

Fig. 9 Distribution of various quantities in char layer (air temperature is 400 °C)
(Air ratio: 0.2, Air supply location: Char layer Hearth load: 127 kg-d.b.(m²·h))

とした場合の結果を **Fig. 9** に示す。その結果を見ると同様に、ほぼ 150 mm までで反応が完了しているように見える。一方、ガス組成を見てみると、**Fig. 8** の結果と比べて吹き込み部から近いところで CO 濃度が上昇しており、空気とチャーもしくは生成ガスがすばやく反応していることが分かる。また、CO が急激に増加した後、CO₂ や H₂、CH₄ の増加が見られるが、同じ現象が **Fig. 8** の結果の 150 mm 以降でも見られる。これらの現象は、空気とチャーが反応する高温域では、式 (6) や式 (7) で示したような還元反応による CO の増加が起こるが、温度が低下するとともにその逆反応が起こって CO₂ が増加すると考えられ、また、H₂、CH₄ の増加は温度の低下とともに発熱反応である式 (8) や (9) の反応が起こるためであると推測される。

3.4 炉床負荷

炉床負荷は、ガス化炉をなるべくコンパクトに設計するうえで重要な設計要素である。炉床負荷は、単位時間、単位面積あたりに供給した乾燥バイオマス供給量相当で表した。充填層吹き込みにおいて、炉床負荷を変化させた場合

Table 5 Effect of hearth load

(Air ratio: 0.2, Air temp.: 20 °C Air supply location: Char layer)

Hearth load		kg-d.b./ (m²·h)	64	127	191
Content of product gas	H ₂	dryvol%	17.5	15.5	11.9
	CO	dryvol%	35.9	37.8	33.1
	CO ₂	dryvol%	3.6	3.1	8.0
	CH ₄	dryvol%	2.2	3.8	7.2
	N ₂	dryvol%	40.8	39.7	39.6
	Others	dryvol%	0.0	0.1	0.2
	Total	dryvol%	100.0	100.0	100.0
HHV		dryvol%	7.7	8.3	8.7
Char gasification rate		%	67.8	81.4	95.8
Cold gas efficiency		%	62.3	76.3	78.7

Fig. 10 Distribution of residence time and temperature in char layer
(Air ratio: 0.2, Air temp.: 20 °C Air supply location: Char layer)

の出口ガス組成、チャーガス化率、および冷ガス効率を **Table 5** に示す。

炉床負荷が大きくなるにつれて、CH₄、CO₂ が増加し、H₂、CO が減少する傾向にある。また、生成ガスの高位発熱量やチャーガス化率も増加するが、冷ガス効率は炉床負荷が 127 kg/m²h を超えたところで約 80 % となり、炉床負荷が 191 kg/m²h の場合でも大きく変わらない。これらの結果がガス滞留時間や炉内温度の違いによるものではないかと考え、各炉床負荷における滞留時間、炉内温度を測定した結果を **Fig. 10** に示す。ここで、滞留時間の計算においては、測定した 2 点の温度を平均してその区間がその平均温度であるし、また、チャー充填層の空隙率は 0.5 で一定であると仮定した。滞留時間は 2.0 秒以下と短い滞留時間であり、反応は平衡には達していないと考えられる。滞留時間の違いから考えると、吹き込み部直後に急激に増加した CO は、炉床負荷と空気温度が高いほど滞留時間が短くなるため、CO₂ に変化しないまま炉出口に排出されることになり、CO 濃度が高くなると思われたが、実際の結果では逆に CO が減少し、CO₂ が増加している。これは、式 (8) や (9) により CO₂ が発生したと H₂ や CH₄ の増加に伴って相対的に CO が減少したためであると考えられるが、温度とこれらの反応の速度との関係に大きく影響を受けており、総じてチャー充填層の温度が高い条件の方が後段の反応が進行し

やすくなり、滞留時間が短くても反応量としては多くなったために、結果的に CO₂ 濃度が増加したのではないかと推測される。

4. 結論

木質バイオマスの2段階ガス化装置の後段部であるダウンドラフト炉における設計指針となる知見を得るために、基礎実験装置を製作してガス化実験をおこない、空気吹き込み条件や炉床負荷を変化させた場合のチャーのガス化挙動を調べた。以下に得られた知見をまとめて示す。

- 1) 空気を気相に吹き込んだ場合と充填層表面および充填層に吹き込んだ場合を比較すると吹き込み部の温度に大きな違いがあり、充填層に吹き込む方が高い冷ガス効率が得られることが分かった。これは、空気を充填層に吹き込むことによって、チャーの燃焼が促進されるとともにチャー充填層の温度が高くなり還元反応が促進されるためである。
- 2) 空気温度 20℃、炉床負荷：127 kg/m²h、空気吹き込み位置が充填層の条件において、空気比が 0.2 を超えるとチャーガス化率が 100 % を超えることが分かった。よって、本実験条件では、連続運転可能であることを前提とした場合に得られる最大の冷ガス効率は、空気比が 0.2 の場合であり、そのとき冷ガス効率は約 80 % となった。
- 3) 空気温度を高くした場合や炉床負荷を増加させた場合には冷ガス効率が向上するが、炉床負荷を増加させた場合においては冷ガス効率が直線的に増加するわけではなく、ある炉床負荷以上では一定の値をとることが分かった。また、チャー充填層の層高についても同様に、冷ガ

ス効率が直線的に増加するわけではなく、ある層高以上では一定の値をとることが分かった。充填層に空気温度が 20℃、空気比 0.2 で吹き込んだ場合には、チャー充填層の層高は約 150 mm で十分であった。

また、チャー充填層に空気を吹き込んだ場合には冷ガス効率が向上するが、炉内温度が 1000℃ 以上を超えて、ノズルなどの金属部分の溶損やクリンカの発生などのトラブルが発生する可能性が高くなるため、ノズル配置などを十分に考慮する必要がある。

謝 辞

本研究開発は、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) のバイオマスエネルギー高効率転換技術開発 (転換要素技術開発) 「小型バイオマスガス化発電装置の研究開発」の助成を受けて実施したものである。ここに記して関係各位に謝意を表す。

引用文献

- 1) <http://www.nedo.go.jp/database/newlist/20080912.html>
- 2) Yin Wang, Kunio Yoshikawa, Tomoaki Namioka and Yoshirou Hashimoto: Fuel Processing Technology, 88(2007), 243-250.
- 3) S. C. Bhattacharya, Sun Shwe Hla and Hoang- Luang Pham: Biomass and Bioenergy, 21(2001), 445-460.
- 4) Ulrik Henriksen, Jesper Ahrenfeldt, Torben Kvist Jensen, Benny Gøbel, Jens Dall Bentsen, Claus Hindsgaul and Lasse Holst Sørensen: Energy, 31(2006), 1542-1553.
- 5) 山崎由大、金子成彦：日本燃焼学会誌、49-150(2007), 236-245.
- 6) 香坂要三郎：發生爐ガス及水性ガス、(1942), 東京：工業図書、73-107.