

木質バイオマスの半炭化物を使ったガス化発電の開発

多樹種の半炭化物を使った小型の木質バイオマスガス化発電

柳 博文

木質バイオマスガス化発電において、間伐材等を利活用するにあたり、過熱蒸気によって半炭化熱処理された木質チップ（以下「半炭化物」と呼ぶ）に着目した。針葉樹、広葉樹、流木及び早生樹などの過熱蒸気による半炭化は有効であることを確認し、反応塔の下部よりスクリーフィーダで半炭化物を粉碎しながら供給する方式のガス化装置を提案した。ガス化装置内部に充填されたチップ間の空隙を減少させ、反応温度の低下を抑制し、酸化・還元反応領域の温度を高温に維持、タールやチャーの熱分解ガス化の促進をもたらすことを確認した。現在、実物大のガス化装置を製作し、半炭化物を使ったガス化発電の実証実験を行っているところである。

キーワード：バイオマス，半炭化，ガス化，間伐材，発電，過熱蒸気，地産地消，防災拠点

1. はじめに

木質バイオマス発電のうち、ガス化発電方式は、バイオマス燃料を化学反応（熱分解や酸化還元）により可燃性のガスを発生させエンジンやガスタービンを回して発電するため、小規模な発電所でも効率的に発電でき、市町村単位や特定の場所での電力供給や非常時電源として活用が図られているところである。

従来、ガス化発電方式は、安定的にガスを発生させるためには、燃料となる木の部位や乾燥度合いの条件が限定されるため、良質なチップやペレットが利用されており、森林間伐材の大部分は使用が困難とされてきた。今回、このような間伐材や果樹剪定枝等、幅広い原料の活用のために、半炭化技術に着目し、東京工業大学との共同研究により、様々な木質系バイオマスを半炭化し、ガス化試験を行った。その結果、半炭化することにより安定的なガスを得られることが確認できたため、実用化に向けて、半炭化装置および定格出力 200 kW 規模のガス化発電装置を製作し、実証検証を開始した。

2. 木質バイオマスガス化発電システムの基本コンセプト

木質バイオマスガス化発電システムとしては、図—1 に示すような化石燃料を使わないガスエンジンによるガス組成の生成、小型で高効率、半炭化による多種

多様な原料に対応するシステムである。

このような技術を地域振興・地産地消・災害拠点などとして、小規模ながらも熱電併給も熱電併給が可能なシステムとして以下のようなところで活用していきたいと考えている。

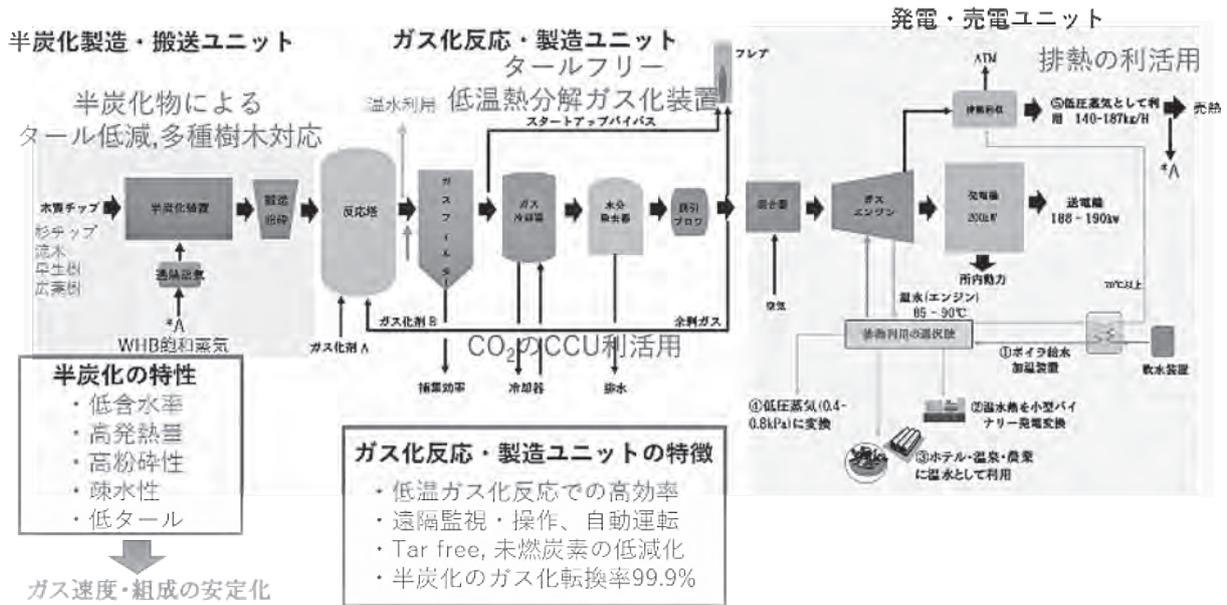
- ① 林業や農業などを地域で再生させることを目的に、間伐材などを原料とした小規模な熱電併給施設として市町村などの自治体と取り組む（地産地消・地域振興）
- ② 熱電併給施設を設置して、平常時だけでなく、災害時の避難場所としての役割を担う地域施設
- ③ 防災拠点としながらも、平常時も常に使用し、急な災害時にも即座に対応できる地域施設

3. 半炭化材料を用いた室内ガス化試験

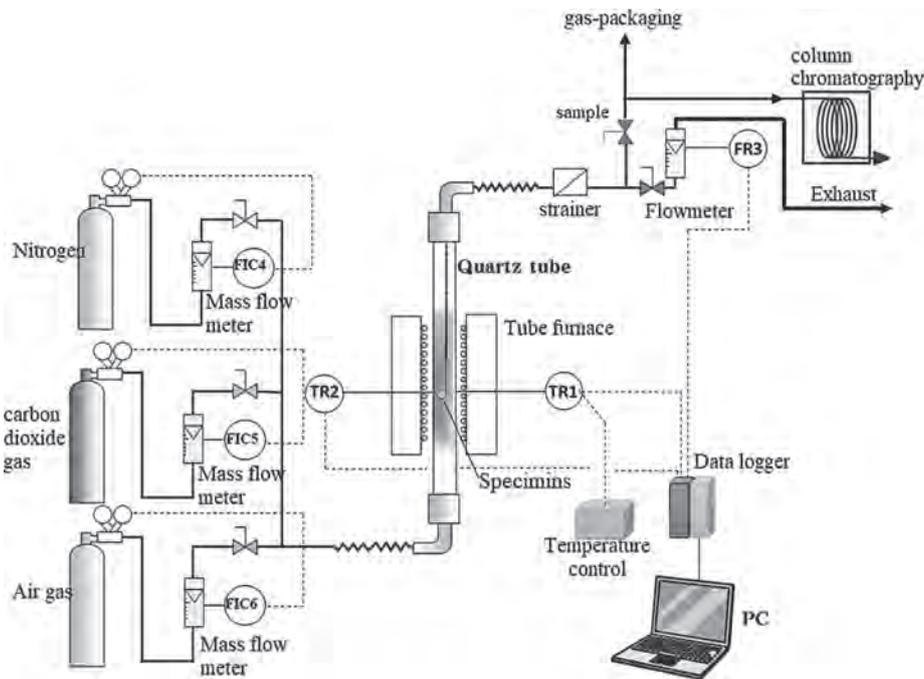
上記のようなコンセプトを基に、東京工業大学および DOWA サーモテック(株)と共同で研究開発を行ってきた。主に、ガス化装置システムの構築、過熱蒸気による半炭化熱処理の方法、多樹種の半炭化、ガス化などに関して試験を行ってきたが、その中からここでは、ガス化試験装置の概要、過熱蒸気による半炭化、多樹種に半炭化のガス化について述べる。

(1) ガス化試験装置の概要¹⁾

実験装置の概略図を図—2 に示す。図—3 に示すように実験用熱分解炉（(株)アサヒ理化製作所 ARF-



図一 木質バイオマスガス化発電システムの概要



図二 大学内に設置した試験装置概略図

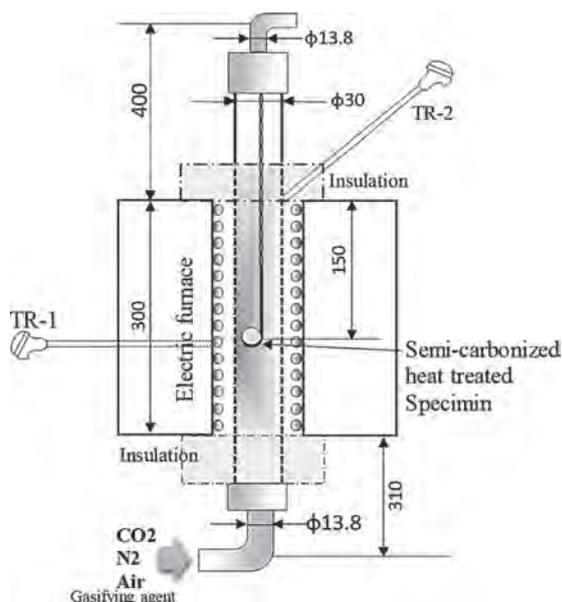
30KC, 内径 30 mm, 高さ 300 mm, 最高限界温度: 1,200℃) の石英チューブ内に, 供試材 100 mg ± 10 mg が充填された計量器を吊るした状態としている。また, 計量器の直近には熱電対 (TR-1) が設置されている。ガス化剤を熱分解炉底部から供給し, 第 1 反応ならびに第 2 反応熱分解ガス化を促進させるために, 石英チューブ上部で発生ガスの滞留時間が 1 秒程度になるように石英チューブ出口管径 (OD Φ13.8) を小さくし炭酸ガス供給流量を制御した。本研究では, 木質バイオマスガス化反応塔からの生産余剰ガス (フレアー) 及びガスエンジ排ガスの CO₂ を循環再利用

(Carbon dioxide Capture Utilization) することで素反応の促進を検討するために, ガス化剤として CO₂ を用いた。実験中の外観目視観察では, 石英チューブ内の熱電対 TR-2 の取付位置近傍から旋回流の発生ガスが観察され, さらに滞留時間も 1 秒程 ~ 2 秒程度が保持されることも確認した。

(2) 多樹種の半炭化物のガス化¹⁾

(a) 4 種類のチップの半炭化

4 種類の木質チップの過熱蒸気による半炭化熱処理を行った。供試材は, 針葉樹 (供試材 No. A; 300℃,



図一三 実験用熱分解炉の概略

No.B ; 350℃), 広葉樹 (供試材 No.D ; 300℃, No.E ; 350℃), 流木 (供試材 No.F ; 300℃, No.G ; 350℃) 及び早生樹 (供試材 No.H ; 300℃, No.I ; 350℃) と、樹種と過熱蒸気の半炭化熱処理温度の組合せを示している (表一)。また、比較検討として針葉樹を過熱蒸気の供給なし (以下、「非過熱蒸気」と呼ぶ) に熱処理した半炭化材 (供試材 No.C) と早生樹「桐」の生チップ (供試材 No.J) を用いた。半炭化の製造は、木質生チップをトレイに乗せて過熱蒸気を温度 (300~350℃) で噴射し、保持時間 (7 min~16 min) に制御、搬送移動し半炭化にした。

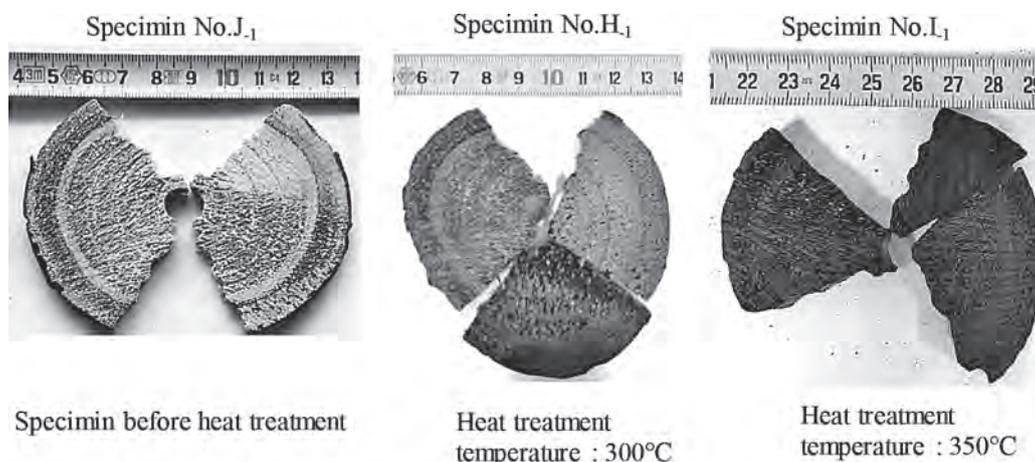
写真一は、木質チップの早生樹における半炭化物の過熱蒸気 300℃ と 350℃ での熱処理による表面の色彩変化を示している。熱処理前は白色系の色彩であるが、半炭化温度が高くなるにしたがって褐色から黒色に色彩が変化していることがわかる。

表一 多樹種の過熱蒸気温度、熱処理時間及び熱処理前後における質量減少率

Category	Semi-carbonization heat treatment temperature (°C)	Average heat treatment time (min)	Mass reduction rate (%)	Sample No.	Number of samples
Softwood	300 ^{*1}	10.0	25 - 35	A-1~3	3
	350 ^{*1}	10.0	45 - 50	B-1	1
	350 ^{*1} or more	12.0	67.6 - 90	C-1,2	2
Hardwood (Fruit trees including)	300 ^{*2}	9.0	25.4	D-1-4	4
	350 ^{*2}	8.0	31.0	E-1,2	2
Driftwood	300 ^{*2}	7.0	28.9	F-1	1
	350 ^{*2}	7.0	28.9	G-1	1
Fast growing tree	300 ^{*1}	8.0	14.3	H-1,2	2
	350 ^{*1}	7.0	46.2	I-1,2	2
	-	-	-	J-1	1

*1 The shape of the wood chip was 50mm x 50mm x 5mm

*2 Hardwood twigs had an average outer diameter of 16 mm and a length of 50 mm



写真一 早生樹 (桐) における半炭化物の過熱蒸気 300℃ と 350℃ での熱処理による表面の色彩変化

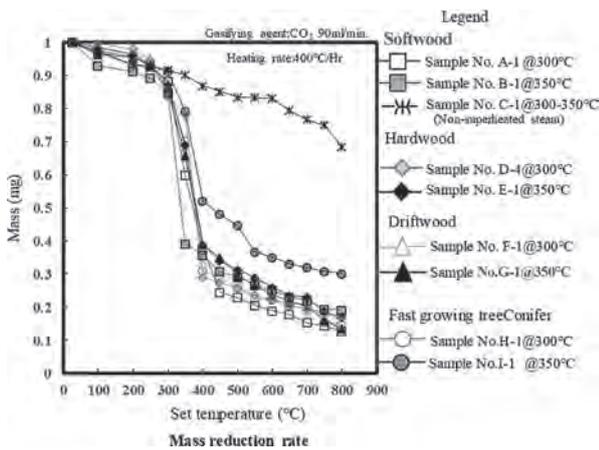
(b) 熱分解ガス化挙動

図一4は、針葉樹、広葉樹、流木及び早生樹の半炭化300℃と半炭化350℃の質量減少曲線^{2)~5)}の比較を示す。また、参考比較として非過熱蒸気による半炭化の質量減少曲線とガス化熱分解速度^{2)~5)}も示されている。針葉樹、広葉樹、早生樹及び流木ともに質量減少曲線のガス領域におけるガス化率は、半炭化300℃の方が高い挙動が見られた。さらに、アレニウスプロット²⁾より推算されるガス化熱分解速度も半炭化300℃の方が大きいことがわかった。なお、木質チップを非過熱蒸気での熱処理した場合は、質量減少率・ガス化熱分解速度ともに使用サンプル間のばらつきが大きく、非過熱蒸気による半炭化熱処理材の利用はガス化装置の安定的な運用に難しいという知見も得られた。

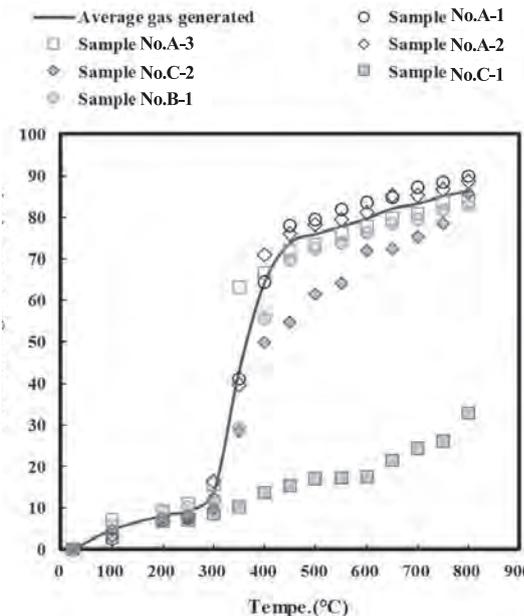
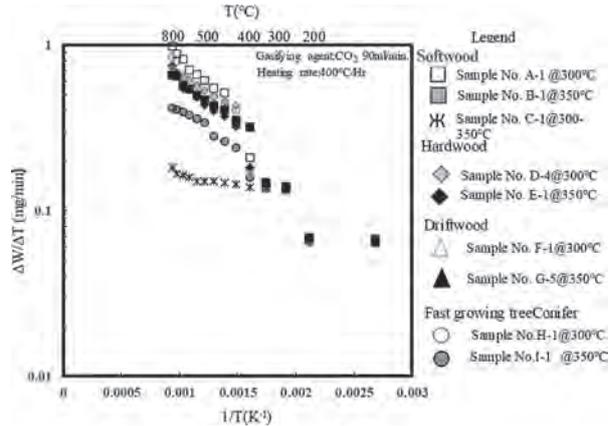
図一5~8に、針葉樹、広葉樹、流木及び早生樹を半炭化300℃または半炭化350℃で熱処理された供試材について、昇温速度400℃/H、設定温度800℃の条件下

で生成したガス量を比較した図を示す。発生ガス量が、セルロースの熱分解が始まる温度である300℃付近から急激に増加する挙動が見られた。図一6に示す広葉樹が最も生成ガス量が多い傾向を示し、熱分解温度300℃における熱分解ガス化反応初期のガス発生量は生成ガスの合計流量の19%に達している。そのほか、針葉樹(図一5)は17%、早生樹(図一8)は16%、最も生成ガス流量が小さいのは流木(図一7)の13%であった。さらに、広葉樹は合計生成ガス量約100mlと最も多く、初期ガス発生量が多い半炭化物は、合計生成ガス量も多く、未燃炭素の残渣も少ない傾向が見られた。

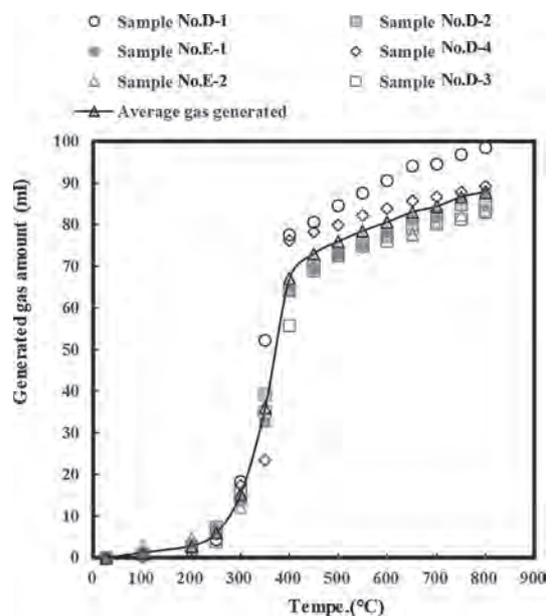
多樹種の半炭化燃料材利用における揮発分の熱分解反応モデル^{2)~5)}を使って、頻度因子と活性化エネルギーを用いた揮発分の全生成ガス量の推算を行った。図一9に、実験温度と揮発分の全生成ガス量との関係を示す。流木を除けば全揮発分の生成ガス量についての計算結果と実験結果との間に比較的に良好な一致



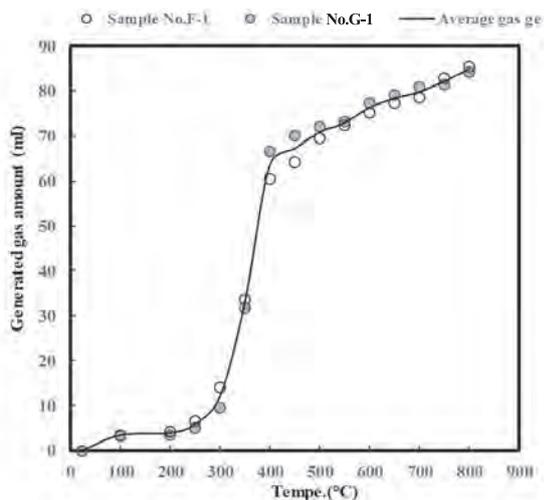
図一4 針葉樹、広葉樹、流木及び早生樹の半炭化300℃と半炭化350℃の質量減少曲線



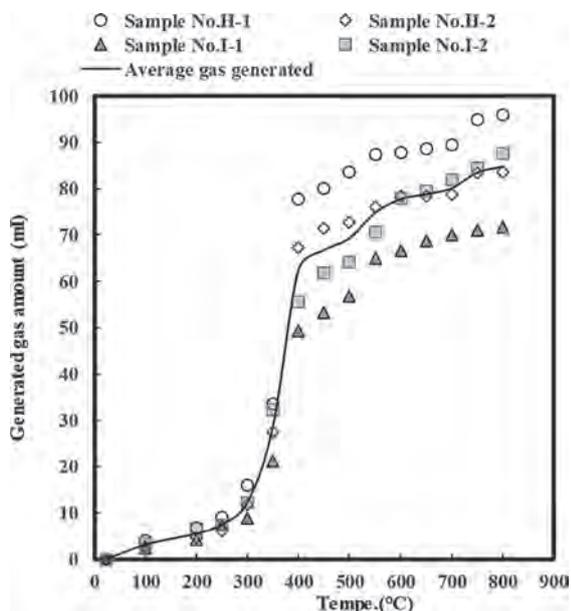
図一5 針葉樹の半炭化におけるガス生成量と温度の関係



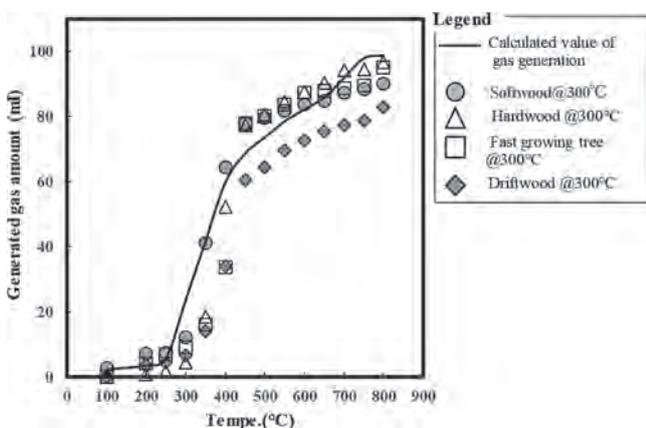
図一6 広葉樹の半炭化におけるガス生成量と温度の関係



図一七 流木の半炭化におけるガス生成量と温度の関係



図一八 早生樹の半炭化におけるガス生成量と温度の関係



図一九 実験温度と揮発分の全生成ガス量との関係

が見られた。つまり、樹木の種類の違いによる構成成分（セルロース、ヘミセルロース、リグニンなど）の含有比率と木質構造に相違があっても、過熱蒸気によ

る半炭化熱処理材にすることで、ガス化熱分解反応挙動の相違を小さくできることが今後期待される。

4. 実物大による実証実験

(1) 半炭化装置の実験仕様

半炭化の品質指標として、含水率10%以下、質量減少率20~35%以上を想定している。半炭化製造は、材料投入量160~180 kg/hに対し、128~144 kg/hの製造能力を見込んでおり、半炭化装置に投入される木質チップ条件は、投入チップ重量の80%以上が16~45 mmである。半炭化装置内の温度は、乾燥帯の過熱蒸気温度は、150~200°C、滞留時間10~15分、半炭化帯の過熱蒸気温度は300~350°C、滞留時間8~15分、冷却帯：100°C以下を考えている。図一10、写真一2に半炭化装置の概要を示す。今後、半炭化を製造していく中で、想定値を検証しながら指標としている品質を得られるよう改良していく予定である。

(2) ガス化ユニット・コンテナ式発電機の実験仕様

半炭化木質チップをスクリーンで反応塔内へ搬送し、反応塔内でバイオマス原料を熱分解・ガス化させる。さらに生成したガスを熱交換器で冷却し、ウェットスクラバー・熱交換器にて煤・灰分・凝縮水の回収を行う。不純物が除去された生成ガスは、送気ブロウによって発電ユニットに送り込まれる。写真一3、4にユニットの概要を示す。

今後、半炭化材を投入、ガス化、発電していく過程で、今回想定している発熱量に対して必要な半炭化量、ガス量を検証していく。その中で必要な改良は行っていく予定である。

5. おわりに

これまでの基礎実験、室内実験を通して、ガス化装置のシステム検証およびそれに伴う半炭化物に関する多くの知見を得てきた。今後、実物大による実証実験を通じて、稼働試験、連続運転等を行って、半炭化製造やガス化におけるエネルギー収支を明らかにし、システムの改良、改造を行っていく予定である。そして、発電システム全体、あるいは事業全体のシステム構築に活用していきたいと考えている。

これまでの開発に多大なるご協力をいただいた東京工業大学の松本秀行准教授、DOWAサーモテック(株)、鉄建建設(株)の鈴木茂雄氏には大変お世話になりました。ここに、謝意を表します。

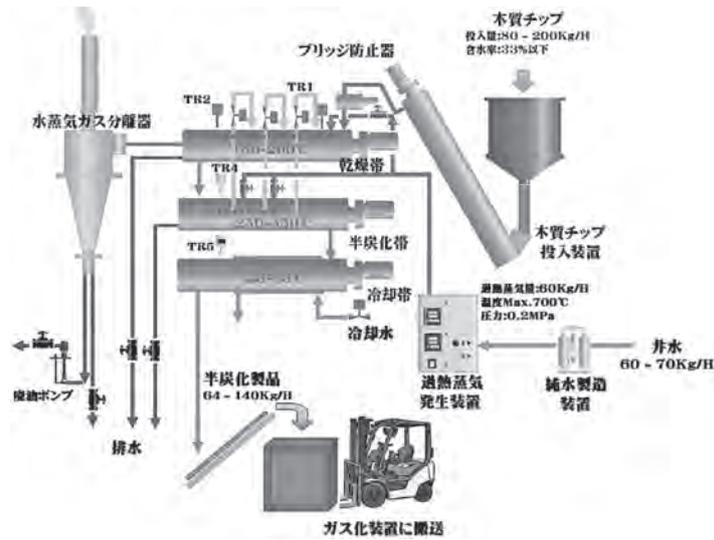


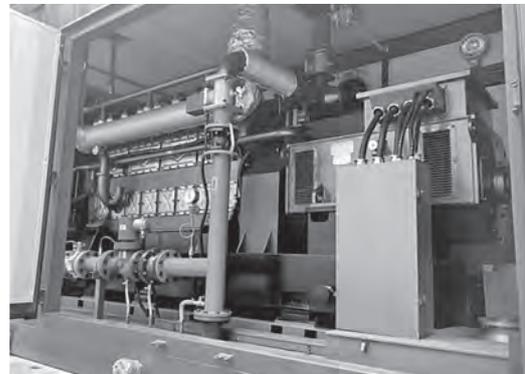
図-10 半炭化装置の概要



半炭化製造装置

- ・投入量：160～180 kg/h
- ・質量減少率：20～35%
- ・半炭化量：128～144 kg/h
- ・過熱蒸気温度：最大 650℃
- ・含水率：10%以下

写真-2 半炭化装置



コンテナ式ガス発電機

- ・発電出力：200 kW
- ・最大燃焼噴射量：350 m³N/h
- ・燃料発熱量：6,000 kJ/m³N
- ・設備発熱量：2,100,000 kJ/h
- ・ガス専焼
- ・ガス 100%
- ・設備効率 35%

写真-4 コンテナ式ガス発電機

JCMIA



用途：木質バイオマスの熱分解・ガス化

稼働形態：24時間連続稼働

対象原料：半炭化木質チップ（含水率 5～9%）

原料消費量：120～160 kg/h

生成ガス量：220～350 Nm³/hr

生成ガス発熱量：4.0～8.0 MJ/m³

本体寸法：2,990 mm (W)×5,300 mm (L)×4,042 mm (H)

写真-3 ガス化ユニット

《参考文献》

- 1) 鈴木茂雄, 松本秀行, 猪塚武志: 多樹種のバイオマス資源の過熱蒸気による半炭化熱処理材のガス化熱分解挙動の解析, 木質炭化学会誌, Vol.18, No.1, 13-21, 2022.4
- 2) 森田明宏: 木質バイオマスのガス化過程における基礎熱分解特性とその予測手法, 高温学会誌, Vol.35, No.2, 85-90, 2009
- 3) 水野諭, 森田明宏, 井田民男, 難波邦彦, 瀧端学, 澤井徹: 多様なバイオマス資源の組成・熱分解分析から抽出した特性とその相関, 高温学会誌, Vol.34, No.4, 153-159, 2008
- 4) Blasi D. C.; Modeling and Simulation of Combustion Processes of Charring and Non-Charring Solid Fuels, Prog. Energy Combust. Sci., Vol.19, 71-104, 1993
- 5) 梅本賢, 梶谷史郎: 石炭からの揮発分生成挙動を表す初期熱分解モデル, 日本燃焼学会誌, Vol.58, No.185, 145-152, 2016

【筆者紹介】

柳 博文 (やなぎ ひろふみ)

鉄建建設㈱

土木本部 エンジニアリング企画部

