

バイオマスの熱分解ガス化発電 (2)

喜久里 政宏*1・石田 徹*2

概 要

高速道路の維持管理で発生する刈草・剪定枝を原料とする熱分解ガス化発電の実証実験を東北自動車道那須高原 SA（上り線）の隣地で行った。破砕機でチップ化した原料を特殊キルンの中に投入し、外熱によりガスとチャー（炭）に熱分解する。バイオマスの熱分解温度によるガスおよびチャーの発生量、並びに発生したガスの組成成分を測定、分析し、設計と比較検証した。

実証実験を通じて、本方式が刈草・剪定枝の熱分解ガス化システムとして有効であることを確認した。しかし、本格運用に当っては安定的な運転の継続と省力化のための運転制御が必要であり、その課題を整理した。

キーワード：バイオマス，熱分解ガス化発電，再生可能エネルギー

STUDY OF PYROLYTIC GASIFICATION FOR BIOMASS POWER GENERATION
USING PLANTS AND TREES AS FUEL (2)

Masahiro KIKUZATO, Tooru ISHIDA

Abstract

At a plant in the vicinity of the Nasu Kogen Service Area of the Tohoku Expressway, we conducted an experiment of power generation using pyrolytic gasification, using as fuel the shredded grass and wood created by expressway maintenance. The system consists of a special rotary kiln in which the raw material in the form of chips ground by a grinder is burned and decomposed thermally to be transformed into gas and char. We measured the volumes of the gas and char produced at biomass pyrolytic temperatures and at the same time, measured and analyzed the components of the gas so that they were validated by comparison with the design values.

Through the experiment, it was verified that the technique used is valid as a system of pyrolytic gasification of shredded grass and branches. However, in order to put it to practical use, it will be necessary to develop a control system for stabilized operation and labor saving. We will collect and arrange the issues to be solved.

Keywords: Biomass, Pyrolytic gasification, Recyclable energy

*1 Manager, New Business Promotion Group, Engineering Department, Civil Engineering Division

*2 New Business Promotion Group, Engineering Department, Civil Engineering Division

バイオマスの熱分解ガス化発電 (2)

喜久里 政宏*1・石田 徹*2

1. はじめに

高速道路の維持管理で発生する刈草・剪定枝は、東日本高速道路株式会社（以下、NEXCO 東日本）管内で年間約 12 万 m³に達し、その約 90%が堆肥やチップ材として道路建設工事でリサイクル利用されている¹⁾。しかし、新規の道路建設工事が縮小傾向にあり、それらの新たな有効活用方法を確立することが、NEXCO 東日本を始めとした高速道路各社に共通の課題である。

刈草・剪定枝は、いわゆるバイオマス（再生可能な生物由来の有機性資源で化石資源を除いたもの）であり、地球温暖化防止の観点から、再生エネルギーとして注目されている。さらに、平成 24 年 7 月の FIT 法（再生エネルギーによる電気の固定価格買い取り制度）の施行もあいまって、経済的、合理的な発電技術の開発が国内外で活発に行われている。

バイオマスのエネルギー変換には、熱化学的変換（燃焼、ガス化、炭化等）と生物化学的変換（メタン発酵、エタノール発酵等）がある。本実験が対象とするのはガス化であり、バイオマスを燃焼（酸化）ではなく高温の還元雰囲気中で熱分解して得られたガスを精製し、エンジン

発電機の燃料とするものである。熱分解ガス化炉として一般的なものに①固定床、②流動床、③噴流床および④ロータリーキルンがあり、その特性比較を表-1に示す。

欧米では 100kW 未満のものから MW 級のものまで、多様なガス化炉が開発され、10 年以上の運転実績を有するものもある。ただし、表-1に示すように原料の制約条件が厳しいものが多く、中にはわずかな草や葉、小枝、砂などの混入を許さないものもある。そのようなことから、刈草・剪定枝の混合物を破砕チップ化しただけのものを原料とするような熱分解ガス化発電技術は未だ確立されていない。

そこで、外熱式ロータリーキルンをガス化炉として、刈草・剪定枝を原料とするバイオマスガス発電システムの実証実験を、東北自動車道（上り線）那須高原 SA の隣地で行った。

外熱式ロータリーキルンの大きな特長として、①熱分解により生成されたガス熱量が高い、②原料の制約条件が少ない、③複雑な運転制御を必要としない点があり、高速道路の刈草・剪定枝を原料とすることができるとともに、高効率の発電を低コストで運営することが可能になる。

一方、熱分解ガスに含まれるタール分の除去、

表-1 ガス化炉比較

炉形式	固定床		流動床 (バブリング式)	噴流床	ロータリーキルン (外熱式)
	ダウンドラフト式	アップドラフト式			
ガス化温度	700~1,200℃	700~900℃	500~700℃	800~1,000℃	600~850℃
生成ガス熱量	低	低	中	中	高
タール含有量	低い	非常に高い	中	非常に低い	中
残渣	多い(灰分)	多い(灰分・タール)	中(チャー・タール)	少ない(灰分)	中(チャー・タール)
制御性	良	非常に良い	中	複雑	良
原料の条件	制約が厳しい (含水量、大きさ・形状、 灰分含有量他)	制約あり (含水量、大きさ・形状、 灰分含有量他)	制約の少ないのが一般的 であるが、制約の厳しいもの もある。	制約が厳しい (含水量、大きさ・形状、 灰分含有量他)	制約少ない
備考	・欧米の設置数の約75% を占める。 ・発電出力500kW以下の 施設で多用されている。	・発電出力2MWの国内 施設あり。 ・タールの処理及び有効 活用が課題。	・欧州で発電出力200kW ~8MWの実績あるが、原 料の制約が非常に厳し い。	・小規模向けの開発がな されている。	・一般には発電出力数百 kW以下であるが、20MW 規模の開発が欧州で進 められている。

*1 土木本部 エンジニアリング部 新事業推進グループ グループリーダー

*2 土木本部 エンジニアリング部

並びに熱分解残渣であるチャーおよびタールの発生量抑制と有効活用が課題である。

2. 熱分解ガス化システム

2.1 プロセスフロー

プロセスフローの詳細は前報²⁾に記載したように、五つのプロセスからなる。

- ① 乾燥プロセス：高温の過熱水蒸気により原料を乾燥させる。
- ② 熱分解プロセス：乾燥原料を乾燥機からキルンに供給し、キルン内部でガスとチャー（炭化物）に熱分解する。
- ③ ガス精製プロセス：高温の熱分解ガスを常温にまで冷却する過程で、ガスに含まれるタール分等の不純物を除去する。
- ④ 発電プロセス：精製した熱分解ガス（乾ガス）と重油を燃料（デュアルフュエル）とするエンジン発電機で発電する。
- ⑤ 熱供給プロセス：重油および乾ガスを燃料として、加熱ガス発生炉で高温のガスを発生させ、熱分解キルンに熱を供給する。

2.2 熱分解ガス化

ガス化炉は特殊構造のロータリーキルン（Uターンキルン³⁾）で、**図-1**に示すように、内部に仕切壁とガイド板が取り付けられている。キルン中心に投入された原料は仕切壁の上に乗った後、さらに回転することによって手前側は入口側から後方へ、向う側は後方から入口側に移動して循環する。高温の加熱ガスがキルンの

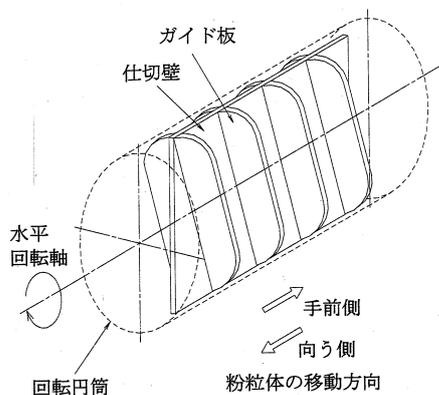


図-1 Uターンキルンの内部構造

内筒と外筒の隙間を流れ、原料は外熱により熱分解される。有機物質である原料は温度上昇とともに液体状態を経て気体、固体となるが、Uターンキルンでは連続投入された原料の分散、混合がよく、新しく投入された原料が速やかに温度上昇して熱分解ガス化するので、液状物質は固塊化することがなく、キルン内壁に付着することもない。

熱分解残渣であるチャーはキルン底部に溜まり、定量を超えたものがキルンから排出される。

3. プラント建設

プラントの全景を**写真-1**に示す。プラントの設計仕様は次のようである。

- ・原料水分含有量：43.8%
- ・処理能力：200kg/h（5t/日未満 湿潤原料）
- ・発電出力：100kW
- ・熱分解温度：600～800℃

プラントの建設には、設計と製作・組立にそれぞれ1年を要した。



写真-1 プラント全景

4. 実験結果

4.1 実験ケース

熱分解温度、キルンの回転速度をパラメータとして、熱分解ガスおよび残渣の発生量、並びに発電効率に関する実験を行った。**表-2**に実験ケースを示す。原料は、木のみの調達ができなかったことから、実験は木草混合の原料でのみ実施した。

表-2 実験ケース

Case	原料	熱分解温度 °C	回転数 rpm
1	木草混合	800	5.0
2	木草混合	800	2.5
3	木草混合	700	5.0
4	木草混合	700	2.5
5	木草混合	600	5.0
6	木草混合	600	2.5

4. 2 実験結果

4. 2. 1 ガス発生量およびチャー発生量

(1) 熱分解温度

キルン回転数 5.0rpm で、熱分解温度が 800°C, 700°C, 600°C の Case-1, Case-3, Case-5 の熱分解ガス発生量を図-2 に示す。熱分解温度が高いほどガス発生量が多くなる。

(2) キルン回転数

熱分解温度が 800°C で回転数 5.0rpm の Case-1 (No.8~No.14) と回転数 2.5rpm の Case-2(No.1~No.8) のガス発生量の比較を図-3 に示す。Case-1 の No.1 を除き、ガス発生量はいずれも 40~60Nm³/h 程度であり、キルンの回転数によるガス発生量の違いはほとんど

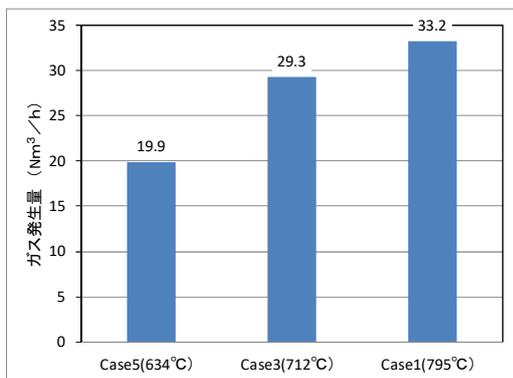


図-2 熱分解温度とガス発生量

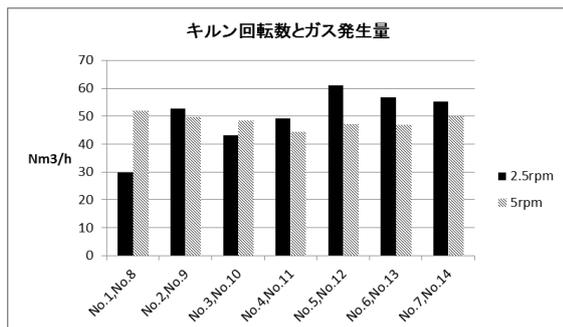


図-3 キルン回転数とガス発生量

みられない。ガス発生量に及ぼす影響は、原料の水分含有量や原料供給速度の方が大きいと思われる。

(3) 原料の水分含有量

熱分解時の原料の水分含有量と、水分を除いた原料 1g 当たりの熱分解ガス発生量を表すガス発生原単位および水分を除いた原料 1g 当りのチャー発生量を表すチャー発生原単位を、表-2, 図-4 および図-5 に示す。

乾燥後の水分含有量 20%前後のデータを得ることはできなかったが、乾燥後（キルン投入前）の水分含有量が数%である絶乾状態に近い No.1 および No.2 はガス発生原単位が高くなる結果が得られた。

また、乾燥後、キルン投入前の水分含有量が 30%程度の原料でも熱分解ガス化され、原料の

表-3 ガス発生原単位及びチャー発生原単位

No.	平均熱分解温度 °C	水分含有量		ガス発生原単位 Nm ³ /kgDS	チャー発生原単位 kg/h
		乾燥前 %	乾燥後 %		
1	840	22.5	2.9	2.71	1.79
2	735	2.8	0.8	1.29	1.25
3	693	16.4	12.5	0.73	4.27
4	729	28.2	7.6	0.40	1.53
5	760	41.2	28.7	0.42	16.92
6	771	32.5	28.5	0.81	13.66
7	744	42.5	34.2	0.72	16.44

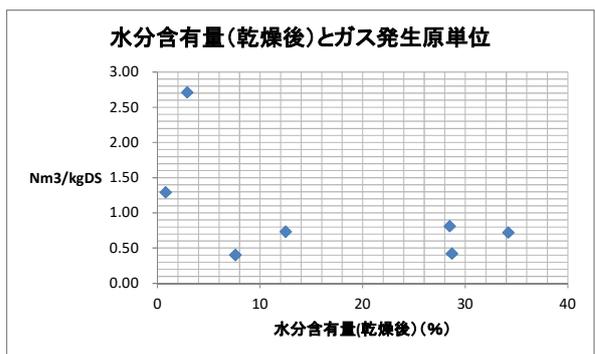


図-4 水分含有量とガス発生原単位

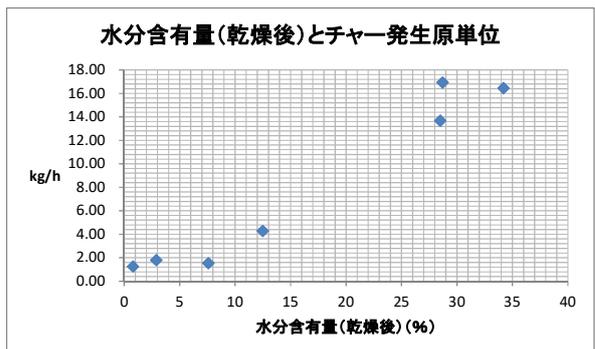


図-5 水分含有量とチャー発生原単位

水分含有量が多いほど、チャー発生原単位が高くなる傾向がみられた。

4. 2. 2 ガスの組成成分

実験時に採取した熱分解ガスの分析結果を國井らの実験結果⁴⁾とともに示す。

國井らが実験で用いたガス化炉は流動床方式のパイロットプラントで、熱帯産のラワン材および落花生の殻を原料として用いている。國井らの実験は熱分解温度を 400℃から 100℃きざみで 1,000℃まで変化させている。熱分解ガスの発生は熱分解温度が高くなるほど多くなるが、得られたガスの高位発熱量は 900℃の 3,870kcal/Nm³ が最高で、1,000℃では 3,250kcal/Nm³に減少している。

國井らの実験の熱分解ガスの可燃分の主成分が一酸化炭素であるのに対し、U-ターンキルンでは水素の割合が多く、一酸化炭素と同程度となっている。また、熱量の高いメタンの割合はU-ターンキルンの方が多い。

また、U-ターンキルンの熱分解ガスは非可燃分である二酸化炭素の割合も少なく、結果として流動床ガス化炉よりも発熱量の高いガスが得られている。流動床炉では、炉内に送入される空気中で熱分解ガスが希釈されるのに対し、U-ターンキルンは炉内に空気を入れないので高い熱量の熱分解ガスが得られる。

4. 2. 3 実験時のプロセスフローダイアグラム (PFD)

プラントを構成する一連の機器（反応装置）では、装置に流入する物質は別の物質となって装置から流出するが、その物質の重さは反応の前後で変わらない（質料保存の法則）。また、各

装置に出入りする物質は質量を持ち、同時にエネルギーを持っている。装置の“入”と“出”で物質の質量が変わらないと同様に、エネルギーの総量も変わらない（エネルギー保存の法則）。前者が物質収支、後者が熱収支で、両者を組み合わせることで、各装置の設計条件を決めることができるとともに、実験時の原料の変化（固体・液体・気体）とその量を計算することができる。物質収支および熱収支をもとに作成するのがプロセスフローダイアグラム（PFD）である。

本プラントの PFD は、原料供給ホッパー内でブリッジングが度々発生し、キルンへの原料供給量が一定しないので、乾燥機、熱分解キルン等の各装置回りの物質収支と熱収支を計算し、プラント全体として成立つ数値を逆解析して求めた。

第1回目の昼夜連続運転時のデータをもとにした PFD が図-6 および表-5 であり、キルンへの原料投入量（乾燥前）は 120kg/h と算出された。設計に比べて 60%の処理速度である。これをもとにして、第1回目および第2回目の昼夜連続運転時の実験におけるガス化効率およびチャー発生比率を算出したものが表-6 である。

なお、ガス化効率は、発生したガスの総熱量を投入した原料乾物の総発熱量で除した値(%) であり、チャー発生比率、発生したチャーの重量を投入した原料乾物の重量で除した値 (%) である。

ガス化効率は 40.2%および 51.7%で、設計値の 47%に近い値が算出された。また、チャーの発生比率も 18.1%および 23.8%で、設計値の 21%に近い値が算出された。

4. 3 実験結果のまとめ

本実験により得られた結果を以下に示す。

- (1) 國井らの流動床ガス化炉を用いた実験と同様に、熱分解温度が高いほど熱分解ガスの発生量は増加する。

表-4 ガスの組成成分

測定日	H25.3.14	H25.9.4	國井らの実験		
平均温度	789℃	771℃	600℃	700℃	800℃
成分比率	%	%	%	%	%
水素	24.4	32.4	5.3	11.1	12.7
一酸化炭素	30.8	26.8	49.2	44.2	41.6
メタン	16.5	15.2	9.8	11.3	11.6
エチレン	3.9	2.7	2.0	2.8	2.9
エタン	1.0	0.6	---	---	---
二酸化炭素	23.4	22.3	33.3	30.4	30.7
高位発熱量 kcal/Nm ³	4,004	3,748	2,890	3,170	3,200

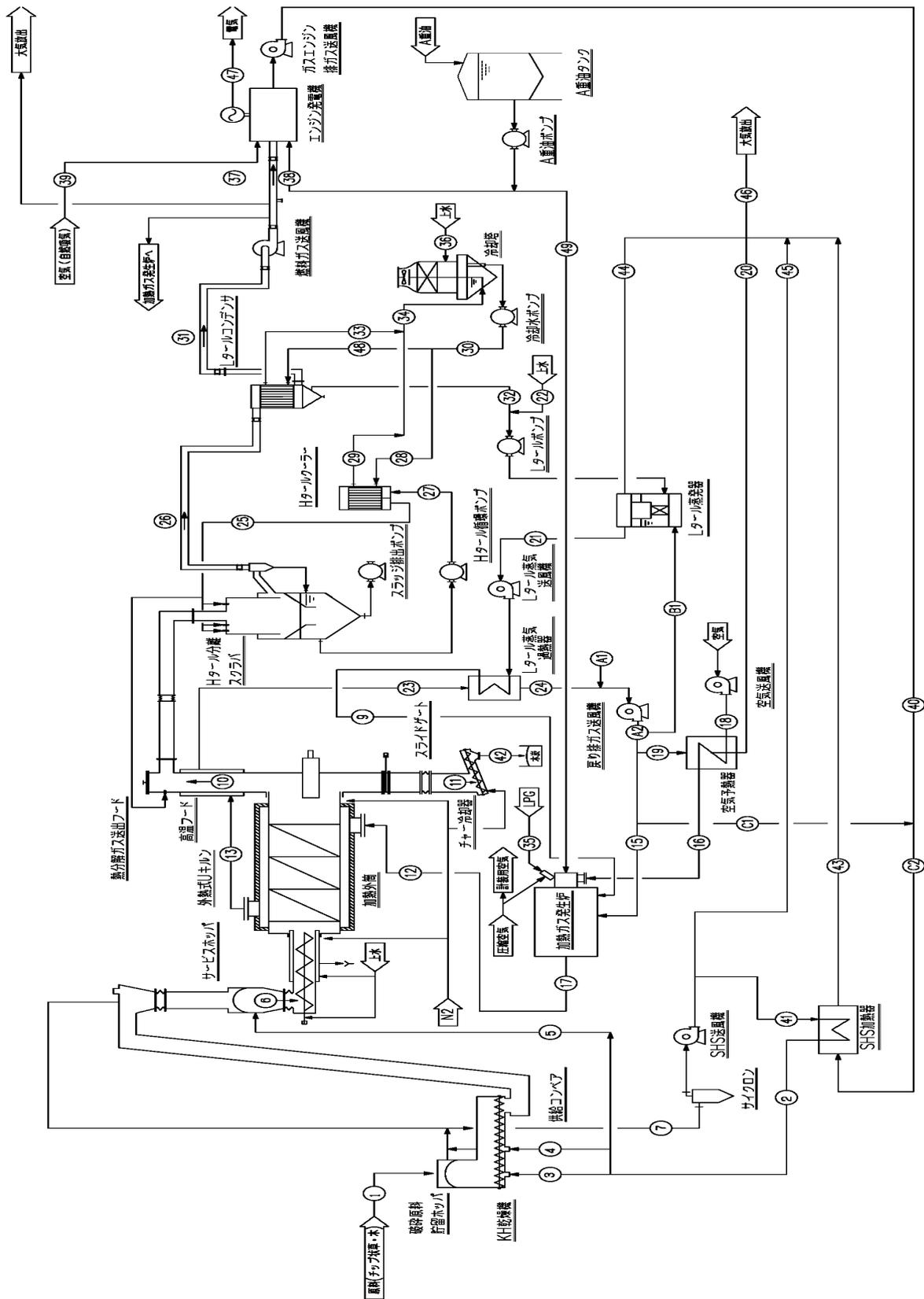


図-6 プロセスフロー図

表-5 実験時PFD

項目 \ No.		1	2	3	4	5	6	7	8
流体名	-	破碎原料	SHS	SHS	SHS	SHS	乾燥原料	SHS	生成Hタール
温度	℃	20	150	150	150	150	40	120	-
圧力	kPa	0	1.2	0.8	0.8	0.8	0	0	-
流量	Nm ³ /h	120 kg/h	1,082	22	877	183	111 kg/h	1,093	-
備考		水分含有量: 36.5%	SHS加熱器出	貯留ホツバ	スクリュウ	供給ホツバ	水分含有量: 31.4%	乾燥出口	-
項目 \ No.		9	10	11	12	13	14	15	16
流体名	-	過熱Lタールガス	熱分解ガス	チャー	加熱ガス	加熱排ガス	-	循環加熱排ガス	予熱空気
温度	℃	400	800	800	950	520	-	470	180
圧力	kPa	0.5	0	0	0.3	-0.3	-	1.0	3.0
流量	Nm ³ /h	5	40	15.1 kg/h	443	443	-	235	200
備考		-	-	-	-	-	-	-	バーナ入
項目 \ No.		17	18	19	20	21	22	23	24
流体名	-	加熱ガス	空気	加熱排ガス	加熱排ガス	Lタール蒸気	補給水	加熱排ガス	加熱排ガス
温度	℃	950	20	470	272	150	-	497	470
圧力	kPa	0.5	3.5	3.3	0.1	0.5	-	-0.3	-0.3
流量	Nm ³ /h	443	200	176	176	5	-	443	443
備考		-	空気予熱器入	空気予熱器入	空気予熱器出	-	-	Lタール加熱器入	Lタール加熱器出
項目 \ No.		25	26	27	28	29	30	31	32
流体名	-	循環Hタール	Hタール分解ガス	循環Hタール	冷却水	冷却水	冷却水	乾ガス	Lタール
温度	℃	60	70	70	20	25	20	25	50
圧力	kPa	400	-0.4	600	40	40	50	-0.7	10
流量	Nm ³ /h	3500 kg/h	40	3500 kg/h	6000 kg/h	6000 kg/h	6700 kg/h	40	4 kg/h
備考		Hタールクーラ出	Lタールコンデンサ入	Hタールクーラ入	Hタールクーラ入	Hタールクーラ出	-	-	-
項目 \ No.		33	34	35	36	37	38	39	40
流体名	-	冷却水	冷却水	LPG	冷却水メイクアップ	乾ガス	A重油	空気	エンジン排ガス
温度	℃	22	25	20	20	25	20	20	300
圧力	kPa	20	20	2.8	10	2.0	200	0	0.5
流量	Nm ³ /h	700 kg/h	6700 kg/h	0.26	75kg/h	25	11.1 kg/h	678	680
備考		Lタールコンデンサ出	-	-	-	発電用	定常時	発電用	-
項目 \ No.		41	42	43	44	45	46	47	48
流体名	-	SHS	チャー	エンジン排ガス	加熱排ガス	SHS	集合排ガス	電気	冷却水
温度	℃	100	200	199	210	100	210	-	20
圧力	kPa	1.7	0	0.2	0.3	0.3	0.3	-	20
流量	Nm ³ /h	1,082	15.1 kg/h	680	32	11	898	83.3kWh/h	700 kg/h
備考		循環SHS	製品	SHS加熱器出	Lタール蒸発器出	廃棄	-	-	Lタールコンデンサ入
項目 \ No.		49	A1	A2	B1	C1	C2	-	-
流体名	-	A重油	温度低下希釈空気	希釈加熱ガス	加熱排ガス	-	エンジン排ガス	-	-
温度	℃	20	0	470	470	0	300	-	-
圧力	kPa	200	0	1.9	0.3	0	0.5	-	-
流量	Nm ³ /h	10 kg/h	0	443	32	0	680	-	-
備考		-	-	送風機出	Lタール蒸発器入	-	SHS熱交換器入	-	-

表-6 実験時のガス化効率及びチャー発生比率

項目	番号	単位	設計値	実験データ		備考	
				1回目昼夜運転時	2回目昼夜運転時		
原料投入量	①	チップ原料	kg/h	200.0	120.0	120.0	連続運転実験時PFD
	②	キルン投入前	kg/h	112.4	111.0	111.0	連続運転実験時PFD
原料水分含有量	③	チップ原料	%	43.80%	36.5%	42.5%	実測値:表-3-17
	④	キルン投入前	%	0%	31.4%	37.8%	④=1-⑤/②
原料乾物量	⑤		kgDS/h	112.4	76.2	69.0	⑤=①×(1-③)
熱分解時間	⑥		h	86.2	86.5	85.9	実測値:表-3-15(1),(2)
原料乾物総量	⑦		kgDS	9,689	6,591	5,927	⑦=⑤×⑥
A重油	⑧	計		1,453	2,429	2,196	⑧=⑨+⑩
	⑨	発電	ℓ	678	1,330	1,098	実測値:表-3-15(1),(2)
	⑩	加熱		775	1,098	1,098	実測値:表-3-15(1),(2)
乾ガス	⑪	計		5,813	3,339	3,866	⑪=⑫+⑬
	⑫	発電	Nm ³	5,813	2,165	2,599	実測値:表-3-15(1),(2)
	⑬	加熱		0	1,174	1,268	実測値:表-3-15(1),(2)
電気	⑭	計		8,623	7,205	7,155	⑭=⑮×⑯
	⑮	乾ガス	kWh	6,685	3,082	3,751	⑮=⑫-⑬
	⑯	A重油		1,938	4,124	3,405	⑯=⑨×⑰×⑱/⑲
A重油発熱量	⑰		kcal/ℓ	9,354	9,354	9,354	10,800kcal/kg×0.86kg/ℓ
乾ガス発熱量	⑱		kcal/Nm ³	3,562	3,562	3,562	ガス分析測定値
原料乾物発熱量	⑲		kcal/kgDS	4,490	4,490	4,490	国井・定方
発電効率	⑳		%	28.5%	28.5%	28.5%	発電機固有値
発電電力	㉑		kW	83.3	83.3	83.3	実験時設定値
熱量電気変換係数	㉒		kcal/kWh	860	860	860	物理定数
ガス化効率	㉓		%	47%	40.2%	51.7%	㉓=⑪×⑱/(⑦×⑲)
チャー発生量	㉔		kgDS	2,035	1,195	1,413	実測値:表-3-17
チャー発生比率	㉕		%	21%	18.1%	23.8%	㉕=㉔/⑦

(2) 原料の水分含有量が絶乾状態に近くなると、ガス発生原単位が高くなる。

また、原料の水分含有量が少なくなるほど、チャー発生原単位が小さくなる。

(3) 水分含有量が30%（設計値10%）を超える原料をU-ターンキルンに投入しても、熱分解ガスは発生し、そのガス化効率およびチャー発生比率はほぼ設計の数値に近い。

(4) キルン回転数が2.5rpmと5.0rpmで、熱分解ガスの発生量に差異はみられなかった。

(5) 熱分解ガスの組成は、水素および一酸化炭素がほぼ等しく、全体の約55%を占め、メタンが約16%、その他可燃ガスが数%で、非可燃ガスの二酸化炭素が23%程度であった。

ガスの高位発熱量は約4,000kcal/Nm³あり、国井らの流動床実験の値を25%程度上回った。

5. 本格運用に対する課題

那須高原SAの隣地における実証実験は前後

2回の昼夜連続運転実験をもって終了した。

実験により、これまでに実施例がない刈草・剪定枝を原料とするバイオマスガス発電が、外熱方式のU-ターンキルンをガス化炉とし、熱分解ガスと重油を燃料とするデュアル燃料発電機で発電が可能であることを確認した。

ただし、実用機として運用するには、以下の課題を解決する必要がある。

- (1) 乾燥機の通気性の向上
- (2) 定量原料の連続供給
- (3) タール分の処理
- (4) 発電機への乾ガスの安定供給

参考文献

- 1) 東日本高速道路株式会社：CSR Report 2009 「環境」
- 2) 喜久里政宏：バイオマスの熱分解ガス発電，鉄建技術研究報告 2013
- 3) 国井大蔵，地崎達：回転炉開発工学，株式会社チサキ，2005
- 4) Kunii et al：Gasification of Biomass in Fluidized Bed，The Chemical Engineering Journal，22(1981) 221-227