一般廃棄物及びバイオマスを用いた小型ガス化発電に関する研究*

孫 永 一^{*1}, 矢尾板 大介^{*1}
波岡 知昭^{*2}, 吉川 邦夫^{*2}A Study on Small-scale Gasification and Power Generation
from Municipal Solid Wastes and Biomass FuelsYoung-il SON^{*3}, Daisuke YAOITA,
Tomoaki NAMIOKA and Kunio YOSHIKAWA^{*3} Department of Environmental Science and Technology, Tokyo Institute of Technology,
4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 226-8502 Japan

We have been developing small-scale gasification and power generation systems utilizing solid wastes. Based on the R & D achievements, a local town in Japan has built a 1 t/h scale slagging MSW (Municipal Solid Waste) gasifier combined with 900 kW dual-fueled diesel engines. This town will receive meat-and-bone meals to mix with MSW and feeds them into the plant as biomass fuels. It is expected that this plant will utilize 0.5 t/h MSW and 0.5 t/h meat- and-bone meals as fuels to generate 900 kW electric power. This paper describes the outline of this plant and discusses about effects of fuel composition and gasification air ratio on gasification performance as well as power generation results.

Key Words: Gasification, Power Generation, Municipal Solid Waste, Biomass Fuel

1. 緒 言

廃棄物の焼却処理による排水・排ガスのダイオキシン類による汚染および化石燃料の枯渇等の問題を解決する為の手段として国は、廃棄物処理の大規模化・広域化を進め、併せて、廃棄物発電を推進している。しかし、大型廃棄物処理施設に対する住民の反対や、離島などの広域処理が困難な地方自治体があることを考えると、廃棄物処理の広域化だけでは、上記の問題は解決出来ない。廃棄物発電の技術は、処理量 200 トン/日以上一般廃棄物処理施設において普及しつつあるが、産業廃棄物処理施設および処理量 100 トン/日以下の小規模施設では所内率が高く、送電端効率が低く、売電収入も少なく、経済性もあまりよくないため 100t/d 規模で発電を行っている施設は非常に少ないのが現状である。そこで、中小規模でも高効率な発電が可能な、ガス化電

技術が注目されている。一般廃棄物を対象とするガス化発電については、わが国では、JFE グループのサーモセレクト方式の 150 トン/日規模のプラントが唯一の商用運転の事例であり⁽¹⁾、小規模な一般廃棄物処理施設では、効率や経済性の問題等から、廃棄物発電は導入されていない。主にバイオマスを対象とする小規模のガス化発電システムについては、木質系バイオマス燃料における報告が多数されている⁽²⁾。こうした背景から、本研究室では、STAR-MEET (STeam/Air Reforming Type Multi-staged Enthalpy Extraction Technology) と呼ばれるガス化発電システムについて、研究を行ってきた。STAR-MEET システムの特徴としては、1) 高温の水蒸気/空気混合気を熱分解ガスと直接接触させる改質法により、酸素を使用せずに、タール分を H_2, CO, CH_4 等の軽質ガスに改質可能である 2) 熱分解・改質は、全て還元雰囲気での反応である為、ダイオキシン類の発生が少ない 3) 還元雰囲気での反応である為、廃棄物中の N は NH_3, HCN に変換され、改質ガス中には NO_x として存在しない 4) 廃棄物中の重金属は、その大半が熱

* 原稿受付 2006 年 1 月 19 日。

^{*1} 学生員、東京工業大学大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 横浜市長津田 4259 G 5-8)。^{*2} 正員、東京工業大学大学院総合理工学研究科。

E-mail: sonyi244@yk.depe.titech.ac.jp

その分析結果も併せて示す。一般廃棄物は含水率40%以上であり、近年の都市化によりプラスチックや紙の割合が高くなって、発熱量が増加する傾向があるが、降雨時は含水率が大幅に上昇したり、組成も変動するなど、表1に示した値からの発熱量の変動はかなり大きい。牛肉骨粉は乾燥されており発熱量は比較的高いが、骨を主成分とする灰分の割合が大きく、粉末状となっている。

本ガス化発電施設のフローを図1に示す。粗破碎された一般廃棄物と牛肉骨粉は受入供給設備において混合され、固定床シャフト型のガス化炉において熱分解ガス化される。熱分解後の炭素分を含んだ残渣は、溶融炉へ移送後、高温燃焼され、排出される高温不活性燃焼ガスは、ガス化炉における熱分解の熱源として利用される。ガス化炉で発生した熱分解ガス中に含まれるタール分は、改質炉において高温水蒸気/空気混合気により改質される。得られた改質ガスは、廃熱ボイラにおいて熱回収され、200℃まで降温され、回収された熱は、改質炉において必要な水蒸気を生成するための熱源として利用される。改質ガス中のダストはバグフィルタで除去された後に、ガス冷却精製塔において約40℃以下まで冷却・精製され、混焼ディーゼルエンジン発電機での発電用を使用される他、一部はNo.1及びNo.2熱風炉において改質用空気/水蒸気及びガス化用空気の加熱に用いられる。改質用の高温水蒸気/空気混合気は、回転蓄熱式熱交換器によって、上記のNo.2熱風炉で生成される燃焼ガスとの熱交換によって加熱される。混焼ディーゼルエンジン発電機は、発熱量3.8MJ/m³N程度以上の燃料ガスで動作し、熱量換算で70%の燃料ガスと30%の軽油をベースとした補助燃料を混焼させる事により発電出力を得る。本設備では、発電出力150kWの混焼ディーゼルエンジン発電機が6台設置されている。

表2には、本ガス化発電施設の主要機器の仕様を示す。図2にガス化炉の構造を示す。ガス化炉は、固定床シャフト型で、正圧にて運転され、空気の漏れ込み、ガス漏れが起きないようにシールされている。ガス化炉上部では、熱分解ガスがサイクロンへと流れ出る煙道があり、ガス化炉下部では、溶融炉からの高温燃焼ガスを吹き込む煙道、ガス化炉底部では、溶融炉へ炭化物を送り出す炭化物搬出コンベアが連結されている。炉体は炭化物排出口に向けて下降傾斜した構造をしているため、炉体内部の廃棄物、炭化物は、炭化物排出口に向け、流動性する。さらに、炉体の傾斜に沿って廃棄物、炭化物を押し出す油圧のプッシャ機構が設けられており、

廃棄物、炭化物の流動性が確保される仕組みになっている。

Table 2 Specification of main components

Device Name	Device Type	Specifications
Pyrolyzer	Fixed bed-type	1.8m ² ×6.6m
Melting Furnace	Water cooled wall	1.2m ² ×2.5m
Reformer	Ceramic pebble	1.1m ² ×6.4m
Boiler	Wasted heat boiler	Steam:1300Kg/hr
Dust filter	Glass fiber filter	Inlet temp.:200℃
Gas cooling	Water scrubber	Outlet temp.:40℃
No.1 furnace	LPG/low-BTU gas	Temp.:1000℃
Heat Exchanger	Rotating ceramic	Temp.:900℃
No.2 furnace	LPG/low-BTU gas	Temp.:800℃
Air Pre-heater	Metallic type	Temp.:500℃
Engine Power Generator	Low-BTU gas and BDF co-firing diesel engine	Output:900kWe (150kWe×6 units)

Fig.2 Structure of the gasifier

Fig.3 Structure of the reformer

図3に改質炉の構造を示す。改質炉は、空気の洩れ込み、ガス漏れが起きないようにシールされており、改質炉上部には、改質に用いられる高温水蒸気/空気の供給管、改質炉昇温、温度維持用のバーナが備え付けられている。また、改質炉中央部には、直径50mmのセラミックボールが高さ500mmほど充填されており、熱エネルギーを蓄えるバッファおよび熱分解ガスと高温水蒸気/空気混合気との混合促進材として用いられ、熱分解ガスの供給量や発熱量に変動がある場合でも、ある程度許容されるような構造になっている。

3. 運転結果と考察

本ガス化発電システムの基本的な特性を把握するために実施した、一般廃棄物(45%)と牛肉骨粉(55%)を混合させた運転(RUN1)、一般廃棄物(60%)、肉骨粉(30%)及び木屑(10%)を混合させた運転(RUN2)、一般廃棄物(30%)、肉骨粉(30%)及び木屑(40%)を混合させた運転(RUN3)について、運転結果を示す。表3に各運転の平均的な運転条件を示す。予備的な運転の為、廃棄物の投入量は設計値の50%程度となっている。また、本運転では、溶融炉においては、炭化物の燃焼は行わず、溶融炉からガス化炉へ空気を吹き込む事によって、ガス化炉底部で炭化物の燃焼反応を起こさせ、生成される焼却灰を溶融炉に送って搬出するという運転方式をとった。運転時にガスホルダ出口でサンプリングした燃料ガス(改質ガス)については、不純物や水分を10℃以下に冷却された水により除去した後、マイクロガスクロマトグラフで組成を測定し、その組成から計算により発熱量を求めた。

Table 3 Operational conditions of each RUN

Run No.	RUN1	RUN2	RUN3
Feed material	MSW(45%) Meat&bone(55%)	MSW(60%) Meat&bone(30%) Wood Chip(10%)	MSW(30%) Meat&bone(30%) Wood Chip(40%)
Feed rate	440~570 kg/h	360~390 kg/h	350~470 kg/h
Gasification air ratio	0.39~0.54	0.25~0.40	0.11~0.29
Reforming air ratio	0.08~0.17	0.13~0.23	0.07~0.14
Reforming steam ratio	0.38~0.47	0.49~0.75	0.43~0.71
Reform air&steam	640~700℃	580~640℃	640~690℃
Fuel gas flow	1160~1460 m ³ /h	820~990 m ³ /h	940~1220 m ³ /h

3・1 燃料種がガス化・改質特性に与える影響

図4に、一般廃棄物と牛肉骨粉の混合物を燃料とする運転(RUN1)における、改質後の燃料ガスの低位発熱量(LHV)とガス化炉内温度の経時変化の一例を示す。

ガス化炉は底部から上部にかけて900℃程度的高温から、300℃程度の低温まで徐々に温度が低下する温度勾配を持たせなければならないが、図4より、RUN1では、燃料ガスの低位発熱量は0.8~3.3MJ/m³の間で大きく変動しており、4MJ/m³という所定の発熱量が得られなかったことが分かる。そこで、ガス化炉内の温度に注目すると、ガス化炉底部温度は400~1000℃の間で大きく変動し、ガス化炉中部温度は250~500℃、ガス化炉上部温度は、約600℃で推移しており、一般廃棄物と牛肉骨粉だけの運転では炉内温度が低く、底部から上部にかけて温度が低下するという本来の温度勾配が形成されていないことがわかる。それは、運転中に吹き抜けと呼ばれる現象が起きているからであると考えられる。吹き抜け現象が起これば、廃棄物の充填層中を均一に高温燃焼ガスが流れず、偏流を起こして炉内の廃棄物の一部分のみが熱分解ガス化され、安定した反応が得られなくなる。加えて、ガス化炉上部温度が高い場合は、ガス化炉壁面からの放熱熱損失が大きくなる為、熱効率が悪くなっていると考えられる。

Fig.4 Historical trend of the fuel gas LHV and temperatures in the gasifier during 9 hours of RUN1

そこで、これまでの研究開発で得られた知見から、木屑を混合させるとガス化炉において吹き抜けが生じにくくなり、燃料ガス低位発熱量が向上する事が分かっていることから、木屑を廃棄物に混合させた。図5に木屑を混合させた運転(RUN2 および 3)の燃料ガスの低位発熱量(LHV)とガス化炉内温度の経時変化の一例を示す。木屑混合率が10%のRUN2では、ガス化炉底部温度は、600~750℃、ガス化炉中部温度は、400~600℃、ガス化炉上部温度は約200℃で推移しており、燃料ガスの低位発熱量には、RUN1ほどではないが、やはり変動が見られた。これは、ガス化炉底部温度が低いために熱分解ガス化反応がまだ安定的に生じていないためと、依然として吹き抜け現象が解消していないからであると

考えられる。それに対し、木屑混合率が40%のRUN3では、ガス化炉底部温度が900~1000℃まで上昇しており、底部から上部にかけて予定通りの温度勾配が形成されているため、吹き抜け現象が抑制され、低位発熱量3.8 MJ/m³N程度の燃料ガスが安定的に生成されていることが分かる。このように、吹き抜け現象を抑制させた要因の1つとして、燃料の高密度が影響していると考えられる。これまでの研究開発の成果から、固定床ガス化炉の場合、微粉状よりもペレット化された燃料のほうが安定的な熱分解・ガス化反応が起こる事が判明している⁹⁾。投入した木屑は燃料として適した粒径であり、偏流が抑制されたと考えられる。それに対して、一般廃棄物は破砕機にて破砕後も木屑と比較して粒径が大きく、炉内において高密度が小さい為、高温燃焼ガスの偏流が起き易いと考えられる。また、牛肉骨粉は微粉状であり、これも偏流を起こし易い燃料形状である。

Fig.5 Historical trend of the fuel gas LHV and temperatures in the gasifier during 9 hours of RUN2 and 3

3・2 ガス化空気比がガス化・改質特性に与える影響

3・1より吹き抜けの抑制策の1つとして、ガス化炉底部の温度を1000℃程度まで上昇させることが重要であることを示した。そこで、ガス化空気比を変化させた時のガス化炉底部温度の変化を図6に示す。ここで、ガス化空気比は下式で定義される値である。ガス化空気比の増加に伴い、いずれのRUNにおいてもガス化炉底部

の温度上昇が見られた。これは、ガス化炉への空気投入量の増加により、チャーの燃焼反応が促進され、それによってガス化炉底部温度が上昇したものと考えられる。しかし、RUN1では、空気投入量を増加させても、RUN3と比較し、1000℃程度まで、ガス化炉底部温度を上昇させることはできなかった。それは、前述のように、吹き抜けが生じ、ガス化炉内に充填されている廃棄物の中をガス化剤が均一に流れないからであると考えられる。

Fig.6 Relationship between gasification air ratio and temperature at the bottom part in the gasifier

図7にガス化空気比と燃料ガスの低位発熱量の関係を示す。RUN3では、ガス化空気比0.1~0.3で燃料ガス低位発熱量が約4.0 MJ/m³Nで安定していることが分かる。それに対し、RUN1,2では、ガス化空気比の増加により、燃料ガスの低位発熱量の増加が見られたが、RUN1の場合、ガス化空気比0.5以上でも燃料ガスの低位発熱量が約3.0 MJ/m³N止まりであり、RUN2の場合、RUN3と比較し、同程度の燃料ガス低位発熱量を得るためには、ガス化剤の不均一な流れに起因して、より多くのガス化空気を投入する必要があることが分かる。

Fig.7 Relationship between LHV of the fuel gas and gasification air ratio

3・3 改質空気比がガス化・改質特性に与える影響

前述のように、ガス化炉に偏流が生ずると、ガス化炉出口の熱分解ガスの性状も不安定となり、相当変動することが予想される。そのため、改質用の空気量が一定であると、熱分解ガスの変動に応じて、改質炉温度も変動し、熱分解ガス中のタールの改質が十分に行えなくなる恐れがある。そこで、実際の運転では、改質炉の温度が 850℃～950℃の範囲に収まるように、改質空気の流れを制御している。すなわち、次式で定義される改質空気比が、制御パラメータとなる。ここで、改質炉に供給する水蒸気量は、100kg/h のほぼ一定値に保持した。

$$\text{改質空気比} = \frac{\text{改質炉へ供給する空気中の酸素量 (mol)}}{\text{燃料の完全燃焼に要する酸素量 (mol)}}$$

Fig. 8 Relationship between reforming air ratio and temperature in the reformer

Fig. 9 Relationship between LHV of the fuel gas and reforming air ratio

図8に、改質炉温度を一定に保持するために、各 RUN で、どの程度改質空気比を変化させたかを示す。この図から分かるように、いずれの RUN についても、改質空気比の調整で、改質炉内全体をほぼ一定の温度に保つことが可能であることが分かる。RUN3 と比較し、RUN1,2 については改質炉温度を維持するためにより広範に改質空気比を変化させる必要であり、それだけ、熱分解ガスの変動が大きいことが分かる。しかし、図9に示すように、いずれの RUN についても改質ガスの低位発熱量は、改質空気比の増加に伴い減少している。改質炉内温度を維持するために、改質空気比を増加させると、タールおよび可燃性ガスの一部が燃焼され、その分、改質ガスの低位発熱量が減少したものと考えられる。また、改質空気比の増加に伴う窒素希釈量の増大も、燃料ガスの低位発熱量を減少させた要因の一つであるものと考えられる。したがって、改質空気比はあまり大きくしないことが望ましく、RUN3 のように、安定にガス化させて、小さめの改質空気比でも必要な改質炉温度が維持できるようにすることが重要である。

なお、改質ガス中の残留タール量については、ガスホルダ出口にて、冷却した水を入れた捕集ビン中をガスを通して、タール分を水で捕獲し、定量的な分析を試みたが、定量化限界以下の濃度であった。

3・4 発電特性

表5に、使用されている混焼ディーゼルエンジンの仕様を示す。エンジンの手前にはフィルターが設けられており、管内の不純物などを除去する。ガスの供給方法は空気と混合され過給機を経てからシリンダーに供給される。つまり、軽油噴射量を一定にして、固定出力を得るための回転数制御は、ガス投入弁の開度の自動調整による制御になっている。発電運転時は、一般廃棄物、肉骨粉、木屑の混合物を使用した RUN3 で実施した。

その時の平均的な改質ガス組成を表6に示す。また、表7に、混焼率（発電機への総入熱量に対するガス化ガスからの入熱量の割合）を60%と70%で固定して発電運転を行った時のデータを示す。いずれの場合も、燃料ガスの発熱量が変動しても、燃料ガス投入流量の調整で混焼率を一定に保つ運転が可能であることがこの運転で確認できた。スモーク濃度は混焼率が60%と70%両方ともボッシュユニットで1以下を示しており、NOx濃度は約200 ppm以下の数値を示している事が分かった。この低NOx排出は、文献(4,8)に記されているように、混焼ディーゼルエンジンが持つ大きな特性の一つである。

Table 5 Specification of the dual-fueled diesel engine

Generator	Output	kWe	150
	Type	-	Brushless three-phase AC Synchronous Generator
	Cycle	-	60
	Voltage	V	6600
	Power Factor	%	80
Engine	Output	PS	220
	Type	-	Water cooled T/C 4 stroke engine
	Combustion system	-	Gas co-firing diesel engine
	Cyl. No., B×S	-	6, φ 130×150 (11.95L)
	Engine speed	rpm	1800
	Fuel	-	Liquid:JIS 1-2, Gas:Syngas
	Fuel consumption	L/h	45.9 (at 100% diesel)
Engine oil		-	JIS API-CD
Weight(dry)		kg	7300

Table 6 Average gas composition and low heating value of the reformed gas during RUN3

Item	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	LHV [MJ/m ³]
Gas composition(dry vol%)	6.44	14.14	2.18	0.92	0.01	0.15	3.95

Table 7 Power generation tests during RUN3

Low Heating Value of the Fuel gas (LHV)	Smoke	Mixture rate of the Fuel gas (LHV) and Light oil	
		[BSU]	[%]
[MJ/Nm ³]	[BSU]	[%]	
3.76	0.66	57	
3.78	0.6	57	
3.80	0.66	60	
4.17	0.44	57	
4.20	0.44	59	
4.49	<1	72	
4.60	<1	70	
4.66	<1	70	
4.95	<1	72	

4. エネルギー 収支

図10にRUN3で実証されたシステム全体のエネルギー収支を示す。図中の(%)で示した値は、システムに供給した燃料（廃棄物、軽油、LPG）の総エネルギー量を100%とした時の相対的なエネルギー量である。計算の結果、炭素転換率は93.3%、冷ガス効率は53.9%、発電端効率は10.8%となった。また図11には、RUN3と同じ組成の廃棄物を定格量である1トン/時供給した時に予想されるエネルギー収支を示す。計算の結果、高温空気発生装置の熱効率が向上し、燃料ガスの所要量が削減されたことなどによって、発電用燃料として利用される燃料ガスの割合が増加し、システムの冷ガス効率が59.1%に、発電端効率が17.1%にそれぞれ向上することが期待されることがわかった。

Fig.10 Demonstrated energy balance in the present operation

Fig.11 Estimated energy balance in the rated operation

5. 結 語

一般廃棄物と肉骨粉を処理対象とする商用ガス化発電システムの運転結果を解析することにより、以下の結論を得た。

1. 一般廃棄物と肉骨粉のみを燃料とする場合には、ガス化炉内で吹き抜け現象が発生し、安定したガス化が行えないが、木屑を混合させることでガス化を安定化させることが可能であり、一般廃棄物(30%)肉骨粉(30%)木屑(40%)を混合させた運転の場合、定常的に低位発熱量 $3.8\text{MJ}/\text{m}^3\text{N}$ 前後の安定したガスが生成された。
2. 熱分解ガスに相当な変動があっても、改質炉に供給する高温空気量を調整することによって、改質炉温度をほぼ一定に維持でき、エンジン手前で計測した改質ガス中のタール濃度は検出限界以下であった。ただし、改質炉に供給する高温空気量を増やすと、改質ガスの低位発熱量は低下する。
3. 低位発熱量 $3.8\text{MJ}/\text{m}^3\text{N}$ 前後のガスで混焼ディーゼルエンジンを運転した結果から、発熱量の変動に対しても混焼率 60~70% で安定した発電が可能であり、排気ガス中のスモークは IBSU 以下、 NO_x は 200ppm 以下である事が分かった。
4. 定格の約半分の廃棄物供給量での運転で実証されたシステム全体のエネルギー収支に基づいて、定格量の廃棄物を供給する場合のエネルギー収支を予測した結果、冷ガス効率 59.1%、発電端効率 17.1% が得られることが期待される。

文 献

- (1) Sumio, Y. et al., Thermoselect Waste Gasification and Reforming Process, *JFE Engineering Report*, No.3 (2004. 3), pp.20-24
- (2) Kidoguchi, A., Development of a Gasifier for Biomass and Waste Materials, *Mitsui Shipbuilding & Engineering Reports*, No.185(2005. 6), pp.9-14
- (3) Hashimoto, Y. et al., R&D on Micro-gasifier for Power Generation from Biomass Fuels, *The 9th National Symposium on Power and Energy Systems*, No.04-2(2004.6), pp.193-194
- (4) T.J. Min. et al., A study on Dual-fueled Diesel Engine for waste Gasification and Power Generation, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.70, No.697(2004), pp.2468-2473
- (5) Abe, T. et al., Performance of Waste Gasification and Power Generation of a Small Scale Plant, *Proceedings of the 13th Annual Meeting of the Japan Institute of Energy*, (2004), pp.288-289
- (6) Sato, K. et al., Studies on pyrolysis/reforming gasification and power generation system for cow dung, *Proceedings of the 13th Annual Meeting of the Japan Institute of Energy*, (2004), pp.198-199
- (7) Hara, T. et al., Performance Demonstration of Gasification and Power Generation from Woody Biomass, *Journal of the Japan Institute of Energy*, Vol.83, No.10(2004), pp.815-820
- (8) T. J. Min. et al., Distributed gasification and power generation from solid wastes, *Journal of the Energy*, Vol. 30, (2005), pp.2219-2228
- (9) Hara, T., Yoshikawa, K., Gasification Performance of Various Solid Wastes Using a Pyrolysis/Reforming Gasification Process, *6th International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification*, (2005)