

# バイオマスの熱分解ガス化発電システム

天野 寿二

バイオマスとは「動植物に由来する有機物であってエネルギー源として利用できるもの」として定義され、木材、パルプ、繊維、食料、飼料などの有機物や、またこれらを消費したあとに残る廃棄物が含まれる。バイオマスは化石燃料と異なり、再生可能な資源であり、バイオマスの燃焼などにより発生するCO<sub>2</sub>は生物が光合成により大気中から吸収したものであるため、自然の循環系の中でCO<sub>2</sub>を増加させない。そのため、バイオマスによる化石燃料代替が進めば、CO<sub>2</sub>の排出量が削減でき、地球温暖化抑制に貢献できる。東京ガス（以下、当社）ではバイオマス利用技術の一つである部分燃焼熱分解ガス化方式の検討を行い、熱分解ガスを利用したガスエンジン発電システムの開発を行っている。本報文では、当社におけるバイオマス部分燃焼熱分解ガス化発電システムの開発に向けた取組みを紹介する。

キーワード：バイオマス、下水汚泥、熱分解、ガス化、コージェネレーション、発電

## 1. はじめに

バイオマスをエネルギーとして効率的に利用するには、集約してエネルギー転換を行う必要がある。また、バイオマスは固形物として存在するものが多く、そのままでは燃料としての用途が限られるため、用途の広い燃料形態に高効率で変換して利用する必要がある。

表-1に種々のバイオマスのエネルギー変換技術を示す。技術の種類としては熱化学変換技術と生物化学的変換技術に大別される。一般的に、含水率が小さいバイオマスについては熱化学変換が有利とされている。この中でも特にガス化技術については、発生したガス化ガスを従来の化石燃料の代替として用いることができ、またガスエンジンやガスタービンによる直接発電も可能となる。そこで東京ガス株式会社（以下、当社）

表-1 バイオマスのエネルギー変換技術

技術の種類	技術名	燃料形態
熱化学変換技術	直接燃焼	熱、蒸気
	ガス化 (熱分解・部分燃焼)	ガス燃料
	油化 (ガス化経由)	メタノール、 ジメチルエーテル、 ガソリン
	油化 (植物油エステル化)	ディーゼル燃料
	炭化	固形燃料
生物化学的変換技術	エタノール発酵	エタノール
	メタン発酵	メタン

では、バイオマスの部分燃焼ガス化発電システムの開発に向けて、様々な検討を行っている。

## 2. バイオマスの部分燃焼ガス化試験

### (1) 部分燃焼ガス化方式について

図-1に流動床式ガス化炉における部分酸化法によるバイオマス原料の熱分解、ガス化プロセスを示す。

高温のガス化炉に投入されたバイオマス原料は、炉底部において水分が蒸発し、その後チャー分と揮発分、灰分に分解される。チャー分はさらにCO、CO<sub>2</sub>、炭化水素、固体C分へと分解される。固体C分は炉底から吹込まれた空気により部分酸化されCOとCO<sub>2</sub>

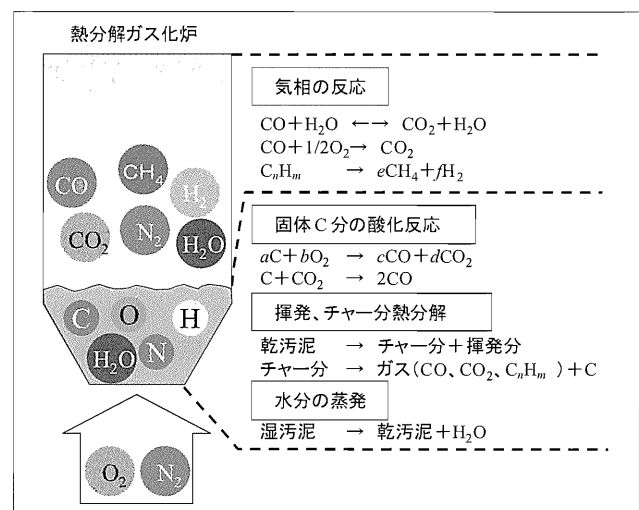


図-1 バイオマス原料の部分燃焼ガス化プロセス

を生成し、炉内温度は高温に維持される。その後、気相で CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, 炭化水素が反応することで、可燃性ガスである CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 等が生成する。

(2) 部分燃焼ガス化試験装置概要

部分燃焼ガス化に適用可能なバイオマスは、木質系、食品残渣系、污泥系等、多く存在する。これら種々のバイオマスのガス化特性を簡便に評価する目的で、小型部分燃焼ガス化試験装置を用いたガス化試験を行った。試験装置の概要を図-2 に示す。

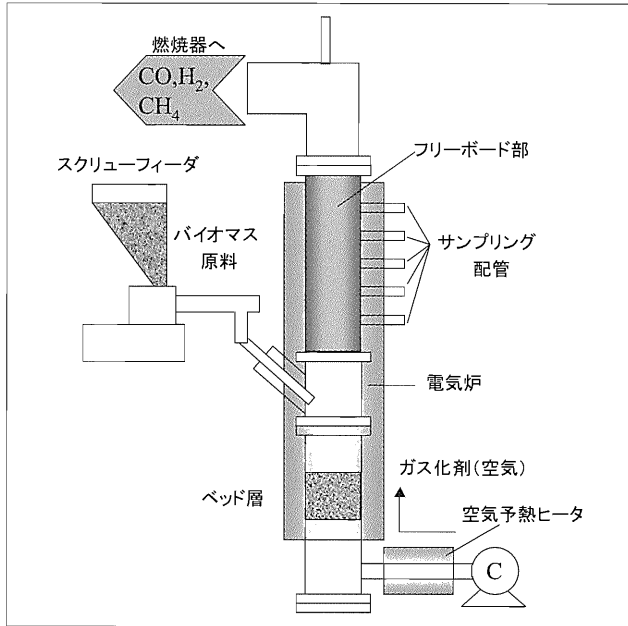


図-2 バイオマス小型部分燃焼ガス化試験装置概略図

流動床式のガス化炉で、流動砂にはドロマイトを用いている。小型の装置であり放熱による熱ロスが大きいため、電気炉によりフリーボード部を一定温度に保てるようになっている。ガス化ガスの分析はガスクロマトグラフ (GC) を用い、N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> の測定を行った。残りのガスは燃焼器へ導かれ完全燃焼して排出される。本ガス化試験設備の仕様を表-2 に示す。

表-2 小型部分燃焼ガス化試験設備の仕様

炉型式	流動床式ガス化炉
燃料投入量	0.30~0.55 kg/h
ベッド剤	ドロマイト
炉内条件 (圧力/温度)	大気圧/800~900°C
炉構造	ステンレス製 (電気加熱式)
ガス分析	ガスクロマトグラフ (Agilent3000 Agilent Technologies 社製)

(3) 部分燃焼ガス化試験結果

いくつかのバイオマス原料について、部分燃焼ガス化試験を行った。その一例として、表-3 に供試原料の分析結果を示す。

表-3 供試原料の分析結果

組成・発熱量	コーヒー屑	木屑 (桜チップ)	トウモロコシ穂
C (dry %)	51.6	47.0	43.5
H (dry %)	7.6	6.4	6.4
N (dry %)	2.00	0.01	0.00
O (dry %)	37.7	46.3	48.8
S (dry %)	0.12	0.01	0.00
灰分 (dry %)	1.0	0.3	1.4
水分 (%)	4.3	9.2	7.7
総発熱量(高位) (kcal/kg-dry)	5,289	4,550	4,710
低位発熱量 (kcal/kg-wet)	4,831	3,731	3,492

図-3 には 820°C において種々の空気比で部分燃焼ガス化を行った際の冷ガス効率 (= [ガス低位発熱量 (MJ/m<sup>3</sup>N) × ガス量 (m<sup>3</sup>N/h)] / [原料の低位発熱量 (MJ/h) × 原料供給量 (kg/h)]) を示した。50~70% 程度の高い冷ガス効率が得られた。空気比が小さいほど冷ガス効率は高くなるが、タールの生成が多くなり、炭素転換率が低下してしまう。一方空気比が大きいは原料の燃焼分が増大し、燃料として取出せる可燃性ガス量が減少し、結果冷ガス効率は低下してしまう。

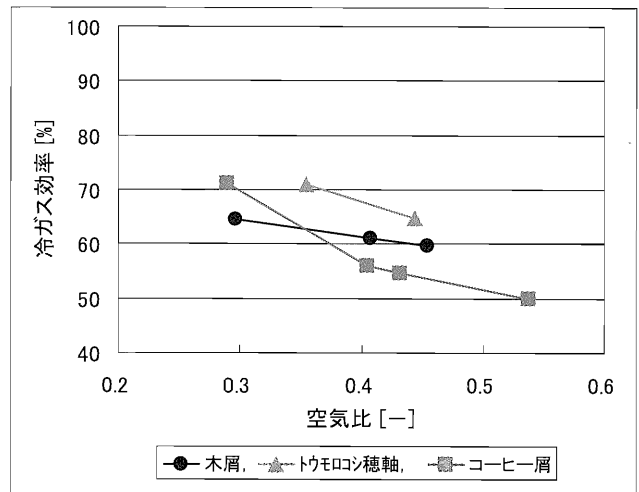


図-3 種々のバイオマス原料のガス化効率

(4) 部分燃焼ガス化ガス性状の解析

表-4 には一例としてコーヒー屑を空気比 0.41, 820°C で部分燃焼ガス化したときのガス性状、発熱量の実験結果と化学平衡計算を用いた理論予測結果の比較を示す。表-4 より、実験により得られたガス組成は理論予測の結果と比べて CO, H<sub>2</sub> 濃度は低く、炭化水素 (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) 濃度が高い。冷ガス効率は 58.5% であり、平衡計算結果の 65.5% に対して 9 割程度の達成率となっている。

また、炭素転換率 (= [ガス中の総炭素量] / [原料中の総炭素量]) は 96% 程度であり、理論予測結果の 90% とほぼ等しい値を示している。

表一4 ガス化ガス性状の実験値と計算値の比較

ガス化条件		実験結果	平衡計算結果
ガス化炉内温度	(°C)	820	820
コーヒー屑発熱量	(MJ/kg-dry)	22.13	22.13
コーヒー屑含水率	(%)	4.3	4.3
コーヒー屑投入量	(kg/h)	0.312	0.312
空気量	(L/h)	10.8	10.8
空気比	—	0.405	0.405
ガス化ガス組成			
N <sub>2</sub>	(vol%-dry)	61.5	54.1
O <sub>2</sub>	(vol%-dry)	0.75	0.00
CO <sub>2</sub>	(vol%-dry)	15.6	9.7
CO	(vol%-dry)	11.2	17.6
H <sub>2</sub>	(vol%-dry)	7.26	18.6
CH <sub>4</sub>	(vol%-dry)	2.70	0.00
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	(vol%-dry)	1.65	0.00
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	(vol%-dry)	0.14	0.00
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	(vol%-dry)	0.00	0.00
冷ガス効率			
ガス化ガス発熱量 (LHV)	(MJ/m <sup>3</sup> -dry)	4.233	4.231
ガス化ガス量	(m <sup>3</sup> -dry/h)	0.840	0.940
ガス化ガス 冷ガス熱量	(MJ/h)	3.555	3.978
燃料による投入熱量	(MJ/h)	6.073	6.073
冷ガス効率	(%)	58.5	65.5
炭素転換率			
ガス中C分総量	(kg/h)	0.149	0.138
投入コーヒー屑中C分総量	(kg/h)	0.154	0.154
炭素変換率	(%)	96.5	89.4

### 3. 下水汚泥ガス化発電システムの検討

バイオマスエネルギーとして効率的に利用するには、集約してエネルギー転換を行う必要がある。日本は地形上あるいは産業構造上の問題から、現状で集約が比較的容易なものは、ごみや汚泥、建築廃材といった廃棄物系バイオマスに限られる。ところが汚泥や建築廃材は焼却処理されるものが多く、現状で十分なエネルギー利用がなされているとは言い難い。特に汚泥に関しては、建設資材や緑農地利用が進んできているものの、含水率が高いといった理由から、消化ガス利用以外でエネルギーの有効利用は確立していない。

そこで、われわれは未利用バイオマスである下水汚泥からガス化により高効率でエネルギー転換し、生成したガスと天然ガスを混焼してより効率の高いシステムを構築することを目的として、下水汚泥ガス化発電システムの開発を行った。2002年に2.5 t/day（脱水ケーキ：水分約80%）処理規模のパイロットスケールプラントを建設、試験を開始し、2003年度までに試験を完了した<sup>1)</sup>。2004年7月には15 t/day（脱水ケーキ：水分約80%）規模の実証試験事業（（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）との共同研究）を開始しており、これまでに下水汚泥の部分燃焼ガス化ガスによる専焼発電および都市ガスとの混合

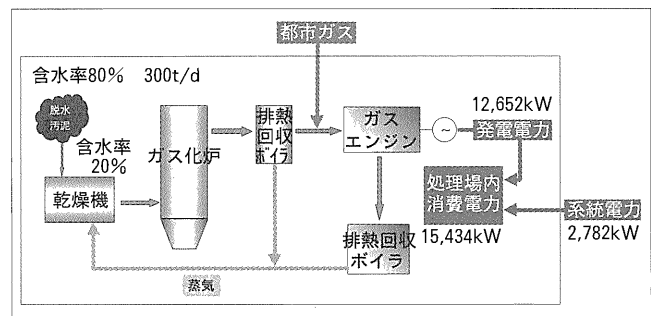
による混焼発電に成功している。

これらの知見を踏まえて、実際の下水処理場の規模において下水汚泥ガス化発電システムの解析を行った。下水処理場から発生する含水率80%の脱水汚泥ケーキは乾燥機にて含水率20%にまで乾燥され、全量ガス化炉に投入される。本解析において下水汚泥ガス化炉で処理される脱水汚泥ケーキ量（含水率80%）は300 t/dayとした。発電電力は処理場内で自家消費することとし、処理場内の消費電力は約15,000 kWとした。また、実機での冷ガス効率を68%とし、ガスエンジンの発電効率を40%と仮定した。

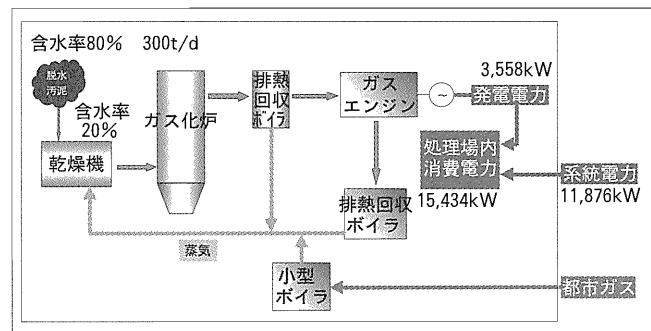
システム解析は、

- 下水汚泥ガス化ガスと都市ガスを混焼して発電するケース（CASE 1）
- 下水汚泥ガス化ガスのみで発電するケース（CASE 2）
- 通常の焼却処理を行うケース（CASE 3）

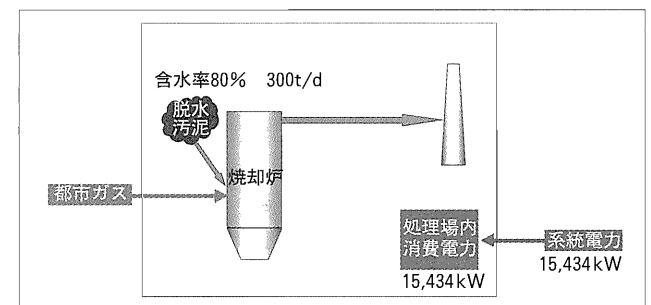
の3ケースにて行った。



図一4 ガス化ガス・都市ガス混焼発電システム解析モデル（CASE 1）



図一5 ガス化ガス専焼発電システム解析モデル（CASE 2）



図一6 下水汚泥焼却システム解析モデル（CASE 3）

表—5 システム解析結果

		CASE 1 ガス化ガス・ 都市ガス混焼 発電システム	CASE 2 ガス化ガス 専焼発電 システム	CASE 3 下水汚泥 焼シ ステム
境 界 条 件	(1) 処理場内消費電力 (kW)	1,5434	1,5434	1,5434
	(2) 下水汚泥量 (含水率 80%) (ton-wet/day)	300	300	300
	(3) 下水汚泥発熱量 (MJ/kg-dry)	18.8	18.8	—
	(4) 下水汚泥投入熱量 (kW)	13,056	13,056	—
乾 燥 機	(5) 蒸発水量 (ton/h)	9.375	9.375	—
	(6) 必要蒸気熱量 (kW)	6,885	6,885	—
ガ ス 化 炉	(7) 冷ガス効率 (%)	68%	68%	—
	(8) ガス化ガス熱量 (4)×(7) (kW)	8,895	8,895	—
ガス化炉排熱回収ボイラ	(9) 発生蒸気熱量 (kW)	1,667	1,667	—
発電機 (ガスエンジン)	(10) 混焼都市ガス熱量 (kW)	22,734	0	—
	(11) 混焼都市ガス量 (m <sup>3</sup> /h)	1,967	0	—
	(12) エンジン総入熱量 (8)+(10) kW	31,629	8,895	—
	(13) 発電効率 (%)	40.0	40.0	—
	(14) ガスエンジン発電量 (12)×(13) (kW)	12,652	3,558	—
	(15) 蒸気回収効率 (%)	16.5	16.5	—
都市ガスボイラ	(16) 回収蒸気熱量 (kW)	5,219	1,468	—
	(17) 必要蒸気熱量 (6)-(9)-(16) (kW)	0	3,750	—
助 燃 用 燃 料	(18) 都市ガス量 (m <sup>3</sup> /h)	—	400.9	—
	(19) 助燃用都市ガス量 (m <sup>3</sup> /h)	—	—	94.2
電 力	(20) 購入電力量 (1)-(14) (kW)	2,782	11,876	15,434
都 市 ガ ス	(21) 合計都市ガス使用量 (11)+(18) (m <sup>3</sup> /h)	1,967	400.9	94.2
CO <sub>2</sub> 発 生 量 (電力・都市ガス由来)	(23) 電力由来 CO <sub>2</sub> 量 (kg-CO <sub>2</sub> /h)	1,171	5,00	6,498
	(25) 都市ガス由来 CO <sub>2</sub> 量 (kg-CO <sub>2</sub> /h)	4,146	845	199
	(26) 合計 CO <sub>2</sub> 発生量 (23)+(25) (kg-CO <sub>2</sub> /h)	5,318	5,845	6,696
システム全体 CO <sub>2</sub> 原単位 (26)÷(1) (kg-CO <sub>2</sub> /kWh)		0.34	0.38	0.43

システムの効率性を示す指標としては、システムから発生する CO<sub>2</sub> 総量 (下水汚泥由来の CO<sub>2</sub> を除く) をシステムの発電量で除した、「CO<sub>2</sub> 原単位」で比較することとした。図—4、図—5 及び図—6 に CASE 1, CASE 2 及び CASE 3 のシステム解析モデル図を示す。

CASE 1 においては汚泥の乾燥に必要な熱量が足りるだけの混焼用都市ガスを混合することとした。全てのケースにおいて、不足した電力は系統電力からの買電で補うこととした。

表—5 にシステム解析結果を示す。これより都市ガス混焼発電システムの CO<sub>2</sub> 原単位が 0.34 kg-CO<sub>2</sub>/kWh と最も低くなることがわかる。これは脱水汚泥ケーキの含水率が 80% と高く、乾燥機にて 20% 程度まで乾燥するのに大量の熱を必要とするため、ガスエンジンの排熱が乾燥に必要な十分な量となる発電規模が最も効率が高くなることを示している。CASE 2 では発電量が小さいためガスエンジンからの排熱が不足し、ガス化ガスや都市ガス等の燃料を乾燥の熱源とする必要があるため、システム全体の効率が低下する。以上のことから、下水汚泥ガス化システムの運用方法としては、都市ガス混焼発電を行うことが、経済性および環境性の観点から適切であると考えられる。

#### 4. 終わりに

今後は下水汚泥 15 t/day の実証試験により、さらなる効率向上、耐久性の評価等を行い、実規模レベルに対する技術確立を行っていくと同時に、その他の種々のバイオマス原料について、引続き部分燃焼ガス化発電システムへの適用についての検討を行っていく予定である。

J|C|M|A

#### 【参考文献】

- 1) R. Takeya et al.: The Development of CFB Gasification System for Sewage Sludge (Part 2: System analysis of co-combustion power generation using sewage sludge gasification gas and natural gas), Proceedings of the 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 1039-1042 (2004).

#### 【筆者紹介】

天野 寿二 (あまの ことじ)  
東京瓦斯株式会社  
R&D 本部  
技術研究所  
課長

