

マイクロガスタービンを用いた 消化ガスコージェネレーション システムに関する研究

1. 背景と目的

平成14年12月「バイオマス・ニッポン総合戦略」が閣議決定された。これは持続的に発展可能な社会の構築（地球温暖化防止、循環型社会形成等）のために再生可能な生物由来の有機性資源（バイオマス）の利用を促進しようとするものである。

また京都議定書の発効（平成17年2月16日）にともない、地球温暖化に向けてバイオマス有効利用の重要性は、ますます高まっていくものと考えられる。

生物由来のバイオマスである下水汚泥は、長年にわたりその利用に関する研究が行われ、特に消化ガスに関しては利用手法に関する知見が蓄積されている。しかしながら、費用対効果等の課題により消化ガスの利用状況は十分とは言えない状況である。

大規模・集約型から小規模・分散型へと発電技術が移行しつつある中、消化ガスによるコージェネレーションが可能なマイクロガスタービンは、処理場におけるバイオマスの利活用と分散型発電を実現する技術のひとつとして期待されている。

本研究は、マイクロガスタービンの構造・原理・特徴等を紹介するとともに、導入に必要となるガス量や性状などの条件を示し、施設の計画から設計・維持管理を円滑かつ適切に行うための事項についてまとめることを目的とする。

2. 研究体制

本研究は、財団法人 下水道新技術推進機構と(株)荏原製作所、三機工業(株)、JFEエンジニアリング(株)、(株)タクマ、月島機械(株)、日立プラント建設(株)との6社の共同で実施した。

3. 研究期間

研究は、平成15年4月～平成17年3月までの2カ年で実施した。

4. 研究内容

マイクロガスタービン（以下 MGT）を用いた消化ガスコージェネレーションシステムについて、以下の項目について研究を実施した。

1. MGT 適用範囲

- (1) MGT のガス消費量
- (2) 下水処理量と消化ガス発生量の関係
- (3) MGT の適用規模

2. 微量物質除去（シロキサン）除去について

3. 実証実験結果と予想性能

4. 導入効果

- (1) コスト評価
- (2) 環境負荷評価

①温室効果ガス（CO₂）削減量

5. 構造・形状・特徴

タービンは開放型の内燃機関である。図 - 1 にガスタービンの構造を示す。

タービンにおける吸気→圧縮→膨張（燃焼）→排気の各行程は、個々の役割を担う独立した場所で連続的に行われる。この行程により、燃料の熱エネルギーは軸の回転として運動エネルギーに変換され、発電機を駆動することで電力を発生させる。

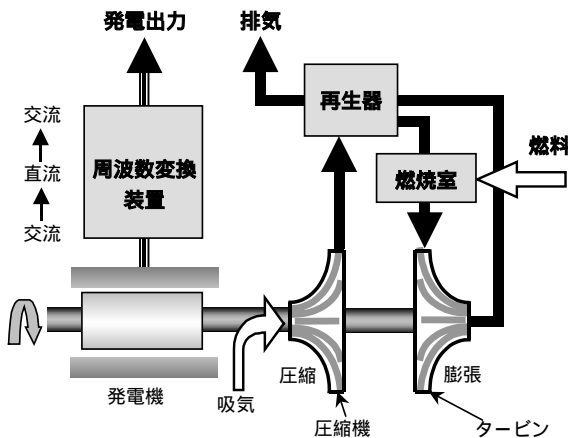


図 - 1 MGT 構造概要

本研究で対象となる MGT を表 - 1 に示す。形式は、発電機とタービンの配列、再生器の有無により大別される。たとえば再生器を備え、発電機とタービンが同軸上に配列されたものは一軸再生式と呼ばれる。また軸受は油潤滑式のほか、軸受と軸が非接触の空気軸受がある。

表 - 1 研究対象 MGT

	A 型	B 型
発電出力 (kW)	30	80
形式	一軸再生式	一軸再生式
軸受	空気	油潤滑

図 - 2 に MGT を消化ガスに適用する場合のフローを示す。消化ガスは、ガスコンプレッサで所定の圧力まで昇圧し、前処理装置を経て MGT に供給される。MGT への消化ガス供給必要圧力は、約 0.4～0.6MPa であり、別途ガスコンプレッサを設置して消化ガスを昇圧する必要がある。中圧ガスホルダなどにより消化ガスの取出し圧力が十分確保できる場

合には、ガスコンプレッサは不要である。

前処理装置であるが、除去対象となるのは硫化水素、水分のほか、シロキサンに代表される微量含有物質である。特にシロキサンについては燃焼系において SiO₂（シリカ）が生成・析出し、MGT の運転に悪影響を与えることが懸念される。

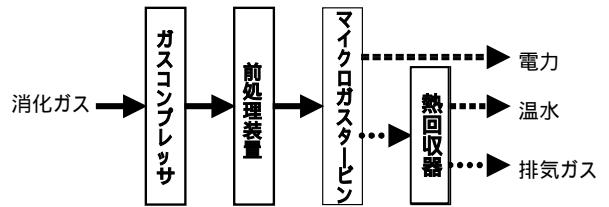


図 - 2 基本フロー

6. 研究内容

6.1 MGT の適用範囲

6.1.1 MGT の消化ガス消費量

MGT を 1 台定格運転するために必要なエネルギーは概算で、A 型 (30kW) で 120 kW (43 万 kJ/h)、B 型 (80kW) で 320kW (115 万 kJ/h) である。消化ガス量に換算すると、それぞれ約 17 万 Nm³/年、約 46 万 Nm³/年となる。

6.1.2 下水処理量と消化ガス発生量の関係

下水処理において発生する汚泥量は、流入下水量の 1～2% (含水率 98～99%) といわれる。この発生汚泥を消化すると、有機物 1 kg あたり 500～600NL の消化ガスが発生する。この関係を図 - 3 に示す。

発生する汚泥量を流入下水量の 1.5%、含水率を 98.5%、汚泥の有機分を 80% と仮定して試算すると、発生する消化ガスの体積は、流入下水量のおよそ 1/10 となる。

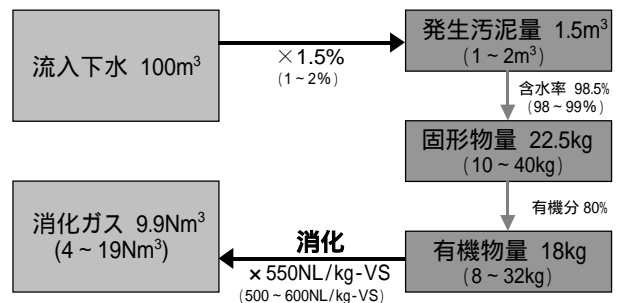


図 - 3 流入下水量からの消化ガス発生量試算

6.1.3 MGT 単位発電出力あたりの下水処理量

A型、B型の MGT とも、発電出力 1kW の能力を得るためには $16\text{Nm}^3/\text{日}$ の消化ガスを必要とする。

前項より消化ガス発生量は流入下水量のおよそ $1/10$ であることから、下水処理量で表現すると発電出力 1kW あたり $160\text{m}^3/\text{日}$ ということになる。

仮に、MGT 1 台分に相当する下水処理量は次のようになる。ただし発生した汚泥をすべて消化し、その消化ガスを全量 MGT に使用した場合の計算である。

$$\begin{aligned} \text{下水処理量 (A型定格運転必要量)} (\text{m}^3/\text{日}) &= 160\text{m}^3/\text{kW}\cdot\text{日} \times \text{MGT 発電出力} (\text{kW}) \\ &= 160\text{m}^3/\text{kW}\cdot\text{日} \times 30\text{kW} \\ &= 4,800\text{m}^3/\text{日} \cdots \text{A型 (30KW)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{下水処理量 (B型定格運転必要量)} (\text{m}^3/\text{日}) &= 160\text{m}^3/\text{kW}\cdot\text{日} \times 80\text{kW} \\ &= 12,800\text{m}^3/\text{日} \cdots \text{B型 (80KW)} \end{aligned}$$

余剰ガスを対象とする場合には、上式に消化ガス利用率を考慮すればおよその目安を得ることができる。

以上より、適用規模の目安を表 - 2、消化ガス発生量および流入下水量に対する MGT の適用台数を図 - 4 にまとめる。

表 - 2 MGT の適用規模 (目安)

	発電出力	適用規模		発電出力 1kW あたり	
		消化ガス量	下水処理量*	消化ガス量	下水処理量*
A型	30kW	480 $\text{Nm}^3/\text{日}$	4,800 $\text{m}^3/\text{日}$	16 $\text{Nm}^3/\text{日}$	160 $\text{m}^3/\text{日}$
B型	80kW	1,280 $\text{Nm}^3/\text{日}$	12,800 $\text{m}^3/\text{日}$		

※発生した汚泥をすべて消化して全量MGTに投入する場合

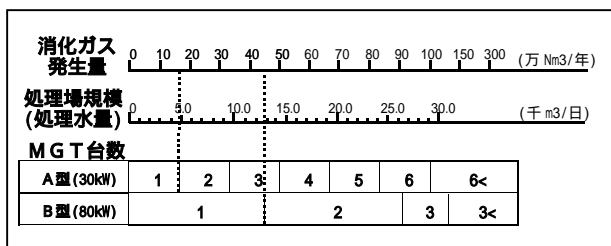


図 - 4 消化ガス・流入水量に対する MGT 台数

6.2 シロキサンについて

6.2.1 シロキサンとは

消化ガス中には無機物や有機物の微量物質が含まれている。特にシロキサンは、燃焼系における種々

のトラブルの原因となっている。シロキサンは、リンスや化粧品などに添加されているシリコンに起因すると考えられており、消化ガスには主に環状シロキサンが気体状で含まれている。表記はDのあとに数値を記入するし (D4等)、Dは、鎖状または環状シリコン構造の中間のシリコン分子に2つのメチル基が付着している状態を表し、数字は分子構造において存在する D の数を表す。一例として図 - 5 に D4の分子構造を示す。

シロキサンは燃焼によって粉体状の SiO_2 (シリカ) に酸化されることが知られており、ガスエンジンにおいては、燃焼室内での付着による摩耗などによって、メンテナンスインターバルを縮める原因となっている。MGT においても、燃焼室内もしくは熱交換器への付着、高温部材の摩耗などが予想されるため、除去装置を設置することを原則とする。

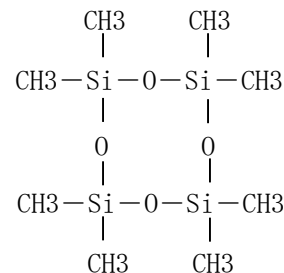


図 - 5 環状シロキサンの分子構造 (D4)

6.2.2 微量物質除去装置 (シロキサン除去装置)

① 微量物質除去装置容量

シロキサンの除去方法としては、現状吸着剤を用いた吸着除去が多いが、吸着除去を行う場合には、吸着剤にシロキサン以外の微量物質が吸着され、吸着剤の交換サイクルに影響するため、導入前には各処理場のシロキサン等微量物質濃度を測定し、変動を把握しておくことが必要である。

MGT 導入後は、定期的にシロキサン等微量物質を測定し、除去性能を確認することが望ましい。

一般的に吸着除去塔の容量は次式で算出される。

$$V = \frac{(\text{Cin} - \text{Cout}) \times Q}{A \times \rho} \times T \div 1000$$

記号	名称	単位	内容
V	吸着剤容量	m^3	
Cin	微量物質入口濃度	mg/Nm^3	各処理場での最大値
Cout	微量物質出口濃度	mg/Nm^3	定量限界以下
Q	消化ガス消費量	$\text{Nm}^3/\text{日}$	
A	破過吸着量	mg/g -吸着剤	吸着剤の種類による
ρ	充填密度	g/L	各メーカーの設定値
T	吸着剤交換サイクル	日	

本式で、吸着除去塔について試算した場合 (吸着

剤:活性炭, $C_{in} \approx 110 \text{mg}/\text{Nm}^3$, $C_{out} = 0 \text{mg}/\text{Nm}^3$, $Q = 480 (\text{Nm}^3/\text{日})$, $A \approx 40 \text{mg}/\text{g-AC}$, $\rho = 500 \text{g}/\text{L}$, $T = 365 \text{日}$ 値は全て参考値であり今後変更される可能性あり) 吸着除去塔容量は 1.0m^3 程度となる。

* 実証試験データによる。

** 平成15年度下水道研究発表会「消化ガス吸着貯蔵技術に関する性能評価研究」

6.2.3 分析手法

シロキサン分析手法はJISなどで定まっていな。一般的に、捕集方法としては、吸収瓶法という吸収液にシロキサンを溶解させ捕集する方法や、常温吸着法という活性炭や高分子物質を含ませた試料にシロキサンを吸着させ捕集する方法、またサンプリングバックなどで直接ガスを捕集する方法がある。

分析方法としては、一般的にガスクロマトグラフ質量分析法などが用いられており、今回の実証実験でもこの方法を用いた。

6.2.4 測定対象

海外事例においては、D3~D6を測定するケースが多いが、シロキサン成分のなかでD4~D5が主であるので、D4~D5のみを測定としている事例もある。

実証実験においても、D3~D6又はD4~D5の範囲を測定対象としている。(表 - 3 参照)

シロキサンの測定対象は、D3~D6を推奨する。消化ガスの燃焼利用では、シロキサンそのものではなく酸化された SiO_2 (シリカ) が問題となる。測定対象を環状シロキサンだけとするか、また環状シロキサンのうちどの重合体を対象とするか、鎖状シロキサンまで対象とするのかなど、微量物質ゆえに扱いが難しい。

表 - 3 シロキサン測定の実証実験結果

実証メーカー	処理場名	シロキサン濃度	測定対象
A社	X処理場	70~106mg/Nm ³	D3~D6
B社	Y処理場	30~87mg/Nm ³	D3~D6
C社	Z処理場	1~78mg/Nm ³	D4・D5

(下水汚泥の消化ガスを測定)

6.2.5 今後の課題

シロキサンがMGTに与える影響及び濃度については、現在のところ国内では、長期運転実績がなく、知見が少ない。今後MGTの採用が増加しデータが蓄積された後、シロキサンの影響について整理し、

シロキサン濃度の基準値を確立する必要がある。

6.3 吸気温度と発電出力及び発電効率

MGTの吸気温度と発電出力・発電効率の関係について、予想性能と実証実験値の比較検証を行った。

6.3.1 予想発電出力と予想発電効率

A型(30kW)、B型(80kW)の予想性能は以下のようになる。

A型のMGTの発電出力は、0~15℃までは定格出力30kW一定であるが、吸気温度が15℃以上では徐々に低下する。また、発電効率は、0℃で最も高くなり15℃で効率約25%となる。吸気温度の上昇に従い効率も徐々に低下していく。

B型のMGTの発電出力は、0~25℃までは定格出力80kW一定であるが、吸気温度が25℃以上に上昇すると徐々に低下する。また、発電効率は、0~25℃まで効率約25%でほぼ横ばいに推移し、25℃以上になると吸気温度の上昇に従い効率も徐々に低下していく。

6.3.2 予想性能と実証実験結果との比較検証

A型、B型のMGTの発電出力について、予想性能と実証実験結果の比較検証を行った。図 - 6にA型、B型の予想性能に実証実験結果を比較した結果を示す。A型、B型とも実証実験で得られたデータは、予想性能とほぼ同等であることがわかる。

A型の実証実験データについて、吸気温度17℃以下で、予想発電出力を下回るものがある。これは、シロキサン除去装置を設置せずに実験を行ったため、シロキサンの影響により発電出力が落ちたためである。

B型の実証実験データについて、実証実験場所の設置環境により、18℃~30℃の範囲になっているが、25℃以下のデータについては18℃まではほぼ予想発電出力と同等であることから、0~18℃までの発電出力も、ほぼ予想発電出力と同等となることが推察できる。一方、25℃~30℃においては、25℃を超えると予想発電出力が下がることに対し、実証実験データはほぼ横ばいである。30℃~40℃間で急激に発電出力が落ちることは考えにくく、予想発電出力を満足するものと推察できる。

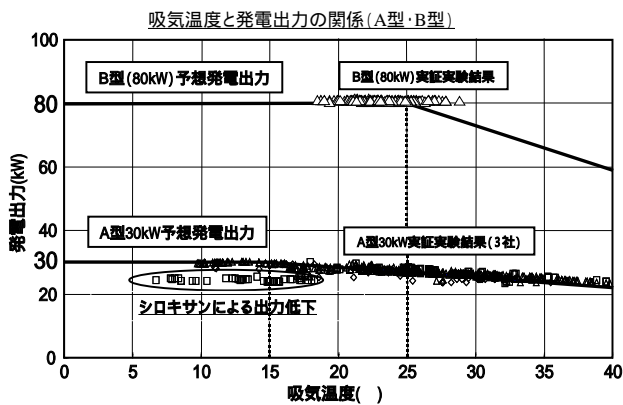


図 - 6 比較結果（発電出力 A型・B型）

発電効率について、A型の比較結果を図 - 7、B型の比較結果を図 - 8に示す。発電効率についても実証実験のデータは予想性能とほぼ同等であり、発電出力同様、予想性能を満足することが推察できる。

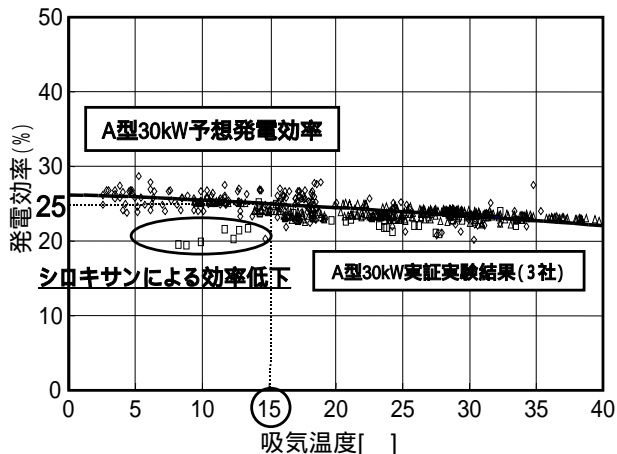


図 - 7 比較結果（発電効率 A型）

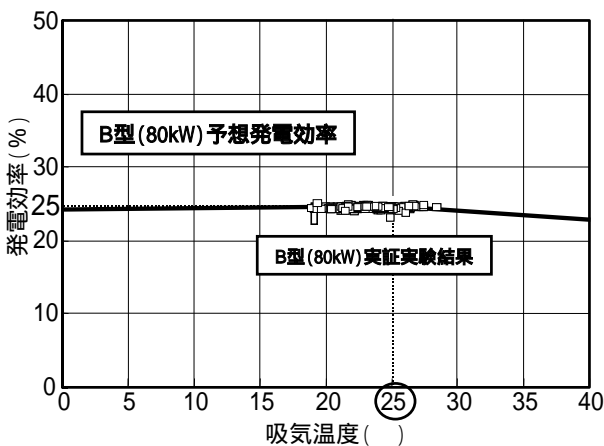


図 - 8 比較結果（発電効率 B型）

6.4 導入効果

6.4.1 導入効果（コスト評価）

現状 MGT の下水分野における採用数が少なく、

イニシャルコスト・ランニングコストが確定できないため、コスト評価は行えなかった。

6.4.2 環境負荷評価：温室効果ガス削減

MGT を消化設備の加温に使用した場合の温室効果ガス（CO₂排出削減量）を算出した結果、A型で1台当たり年間約235 t - CO₂/台、B型で624 t - CO₂/台のCO₂削減効果が見込まれる。

6.4.3 環境負荷評価：エネルギーペイバックタイム（以下EPT）

① EPTとは

環境負荷評価方法のひとつで、発電システムのライフサイクルを通して投入されるエネルギー（材料・加工・運搬・据付・運転（潤滑油・消耗品等）廃棄に使用されるエネルギー）が、発電されるエネルギー及び有効利用される熱エネルギーにより回収される時間。

② 今回の評価手法

本研究では、簡便的な手法として、以下の評価手法により検討を行った。

- ・インフラ建設エネルギーを年間発電量で除しEPTとする。排熱回収エネルギーはカウントしない。
- ・インフラ建設エネルギーは原単位を乗じて算出し、これに廃棄のためのエネルギーとして10%上乗せする。
- ・使用する基本原単位を表 - 4 以下に示す。

表 - 4 材料の基本原単位および

製作から設置に必要な総エネルギー（A型）

素材	質量(kg)	基本原単位(MJ / t)	エネルギー小計(MJ)
① 圧延鋼材	1,593	21,157	33,703
② ステンレス鋼	77	38,214	2,942
③ 銅系	164	48,947	8,027
④ アルミ系	34	140,776	4,786
⑤ グラスウール	6		
⑥ ロックウール	12		
⑦ ウレタン	2		
⑧ ゴム系	3	239,847	720
⑨ 樹脂系	21	80,283	1,686
⑩ メラミン塗装	0.15	37,141	6
⑪ 絶縁紙	5		
⑫ 耐熱グラスロッド	25		
加工	1,950	7,200	13,983
運搬	1,950	563	1,093
据付	1,950	123	239
建設エネルギー			67,185
廃棄エネルギー（建設エネルギー×0.1）			6,719
エネルギー合計			73,904

（空欄は基本原単位が不明な部分。微量につき今回は0として積算した）

③ 年間発電量

MGT (A型) の発電出力は吸気温度 (雰囲気温度) により影響を受け、吸気温度が高いと発電出力は低下する。実証実験結果から、各吸気温度における発電出力の最低値は約24kW であったためこの値を採用した。

$$24\text{kW} \times 8,760\text{h} / \text{年} = 210,240\text{kWh} / \text{年} \\ = 756,864\text{MJ} / \text{年}$$

④ EPT 算出結果

製作から設置までに必要な総エネルギーと発電出力より、EPT は0.1年となる。

$$\frac{73,904\text{MJ}}{756,864\text{MJ} / \text{年}} \doteq 0.1\text{年}$$

この結果を他の発電システムと比較した場合、大型風力発電：8～10年、ソーラーシステム：4～6年、太陽熱温水器：数ヶ月に比べかなり低い値となっており、環境負荷が少ないシステムといえる。

第2節 計画手順

第3節 施設の計画

第4節 導入効果の検証

第5章 設計上の基本事項

第1節 設計手順

第2節 設備の検討

第3節 関連法規

第6章 維持管理

第1節 維持管理

資料編

1. 実証確認試験結果

2. 検討例

3. 製品紹介

4. 機器外形図

5. 資料の問合せ先

7. 技術マニュアル構成

目次

第1章 総則

第1節 目的

第2節 適用範囲

第3節 用語の定義

第2章 現状調査

第1節 消化ガスの現状

第2節 マイクロガスタービンの現状

第3節 コージェネレーションの現状

第3章 消化ガスコージェネレーションシステム

第1節 消化ガス対応マイクロガスタービン

第2節 消化ガスコージェネレーション

第3節 消化ガスへの適用

第4節 導入効果

第4章 計画

第1節 計画方針

8. まとめ

本研究では、MGT を使用し下水処理場から排出される消化ガスを燃料とするコージェネレーションシステムについて、システムの適用規模、適用方法、留意事項および導入効果について検討し技術資料として取りまとめた。

今回の検討により、MGT が環境負荷の削減に大きな効果があることが確認できた。現状下水分野で使用されている例は少なく、導入効果等で明確にできない部分があったが、これらに関しては今後採用が増加し多条件のデータが得られれば明確になることと思われる。

MGT は発電効率が25%程度とそれほど高くないため、コージェネレーションによる排熱の利用が採用のポイントとなる。

今後本システムの採用が増加し、バイオマスの有効利用および温室効果ガスの排出量削減に寄与できることを期待する。

この研究を行ったのは

研究第二部長

研究第二部総括主任研究員

研究第二部主任研究員

研究第二部研究員

高橋 隆一

桐原 隆

永田 壽也

中村 浩

この研究に関するお問い合わせは

研究第二部長

研究第二部総括主任研究員

研究第二部主任研究員

研究第二部研究員

高橋 隆一

桐原 隆

永田 壽也

中村 浩