

(技術資料)

下水汚泥消化ガスコージェネレーションシステム

Gas Engine Combined Heat & Power System Using Sewage Gas

伴 浩之*
Hiroiyuki Ban宮本博司*
Hiroshi Miyamoto立石雅孝**
Masataka Tateishi佐々木理**
Osamu Sasaki岡田和人*** (工博)
Dr. Kazuto Okada古谷敦志****
Atsushi Furuya

A combined heat & power (CHP) system using sewage gas, generated through digesting sewage sludge, was recently proposed as a useful renewable energy system. However, the siloxanes in sewage gas damages internal combustion gas engines. Consequently, CHP systems utilizing sewage gas have not been widely applied. This paper introduces a sewage gas pretreatment unit developed by Kobe Steel which promise the long-term stable operation based on a 45 kW gas engine CHP system.

まえばき = 1997年の気候変動枠組条約第3回締約国会議 (COP3) にて京都議定書が採択され、先進国及び市場経済移行国の温室効果ガス排出量の削減目標が定められた。我が国ではこの削減目標を達成するため、コージェネレーション導入促進、省エネ、風力・太陽光発電に代表される新エネルギーの導入など、様々な施策が推進されている。

その中のひとつとして、下水汚泥消化ガスの有効利用がある。下水汚泥消化ガスは、下水処理の工程で発生する汚泥を嫌気処理(消化)する際に発生するガスであり、比較的高い熱量を有するためにコージェネレーションなどの燃料ガスとしての利用が可能である。例えば、流入水量 100 000m³ 規模(人口 250 000 人相当)の下水処理場の場合、発生する消化ガスをガスエンジンコージェネレーションにて利用すれば 400kW 前後の電力が回収できる。しかしながら、消化ガスは汚泥の性状・供給量の変動に伴い発生量及び熱量が変動するとともに、それに含まれる微量成分によりガスエンジンなどの機器寿命が短くなるため、経済性が厳しく、本格的な普及には至っていないのが実情である。

そこで、当社では特にガスエンジンを用いたコージェネレーションについて消化ガスによる長期安定運転を目指し、消化ガス中微量元素を除去するための消化ガス精製装置を開発するとともに、実ガスによるコージェネレーションの実証運転を実施したので報告する。

1. 有機性廃棄物の消化技術及び消化ガス利用技術

下水汚泥、工場廃水あるいは畜産糞尿などの有機性廃棄物の処理方法のひとつとして、古くから嫌気発酵処理(消化あるいはメタン発酵ともいう)が知られている。これは嫌気状態でメタン生成菌により有機物質を分解するもので、副産物として消化ガス(あるいはバイオガス)

と呼ばれる可燃性ガスが得られる。消化ガスは主としてメタンガスと二酸化炭素(以下 CO₂) から成り、その含有比率は有機物質の種類により変化するが、一般的にはメタンガス 60vol %, CO₂ 40vol % 程度の比率となっており、その熱量(LHV)は 21.5MJ/Nm³ 程度である。消化ガスは上記のように比較的高い熱量を有するものの、これまでは発生ガスの一部が投入有機物質の加温のためのボイラ燃料として利用されるのみで、余剰ガスは焼却処理されるのが一般的であった。しかし、近年はガスエンジン・燃料電池などによるコージェネレーションシステムにより電力と熱を回収し、発生ガスを最大限に利用することが試みられている。周知のとおりコージェネレーションは電力・熱の総合効率が 75 ~ 80% 以上と非常に高く、また、発生した電力・熱は下水処理場内で利用できる上、消化ガスは生物起原でありカーボンニュートラルという特性を有することから、消化ガスコージェネレーションは温室効果ガスである CO₂ 削減のための有効な手段であると考えられる。

しかしながら、消化ガスは、有機物質の種類や投入量によりその発生量とメタン含有量(したがって、熱量)が変動することに加え、特に下水汚泥が原料の場合には、ガス中に微量成分として含まれる有機けい酸(シロキサン)ガスによりコージェネレーション機器の損傷・劣化が引き起こされることが報告されている¹⁾²⁾。

シャンプー・リンスなどにはシリコン系化合物が添加されている場合が多いが、これが下水を介して汚泥中に混入し、一部が嫌気発酵過程にてシロキサンとして消化ガス中に放出される。消化ガス中に含まれるシロキサンは主として重合度 4 ~ 6 の環状物質であり、図 1 に示すような分子構造を有しているが、これがガスエンジンなどの内燃機関にて燃焼すると二酸化けい素(シリカ; SiO₂) が生成される。これが内燃機関や排ガス脱硝触媒

*都市環境・エンジニアリングカンパニー 環境エネルギー技術開発部 **都市環境・エンジニアリングカンパニー エネルギーエンジニアリングセンター 技術部
技術開発本部 機械研究所 *技術開発本部 化学環境研究所

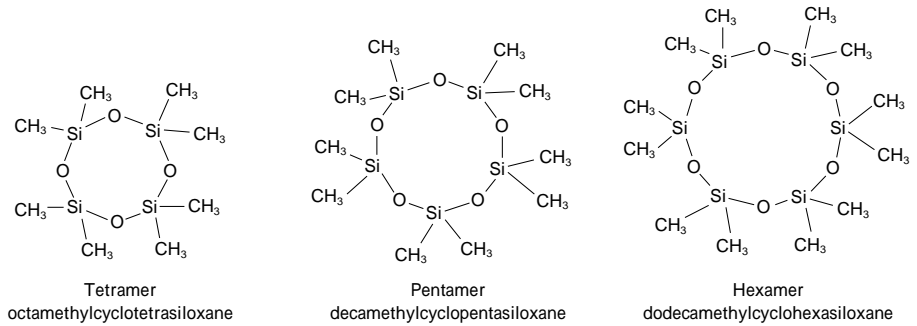


図1 シロキサンの構造式
Fig. 1 Structural formula of siloxane

の内部に堆積することにより機器の損傷・劣化を引起し、その結果、設備の安定運転と経済性が損なわれるため、消化ガスを利用したコージェネレーションは本格的に導入されるには至っていない。

このように、消化ガスコージェネレーションは温室効果ガスの削減に非常に有効であるが、その普及のためには消化ガス中の微量成分であるシロキサンによる機器の損傷・劣化を防止し、設備の安定運転と長寿命化をはかることが不可欠である。

2. 消化ガスによるガスエンジンコージェネレーション実証運転

2.1 実証運転の目的

消化ガス中のシロキサンの除去を目的に消化ガス精製装置を開発し、ガスエンジンコージェネレーションと合わせて、国内下水処理場（西日本）において実ガスによる連続運転実験を実施した。実証運転の目的は以下の二つである。

消化ガス精製装置のシロキサン除去性能を確認する。

実ガスによりガスエンジンコージェネレーションを長期間安定に運転できることを確認する。

2.2 実験設備

図2に実証実験設備のフローシートを示す。実験設備を設置した処理場では、発生した消化ガスを湿式脱硫したのちに一旦ガスタンクに貯留し、その一部をボイラ燃料として利用するとともに余剰ガスは余剰ガス燃焼装置にて処理している。本実験では、この脱硫後の余剰ガスを本設消化ガス配管から分岐し、昇圧ブロウ、汽水分離

器を経たのち消化ガス精製装置にてシロキサンを除去したうえで、神鋼造機(株)製 45kW ガスエンジンコージェネレーションユニットに供給した。ガスエンジンコージェネレーションにて発生した電力は電気抵抗式負荷にて、また熱はラジエータにて放散した。

ガスエンジンコージェネレーションは無人数にて24時間連続運転を行い、発電出力、コージェネレーションユニット内各部温度、消化ガス組成などを連続測定しデータロガーに収集した。

写真1に実験設備全景を、写真2にガスエンジンコージェネレーションユニットを示す。

2.3 消化ガス精製装置

既述のとおり、消化ガス中に含まれるシロキサンを除去し、ガスエンジン及び排ガス脱硝触媒の長寿命化をはかるため、消化ガス精製装置を開発した。消化ガス精製装置は活性炭による吸着方式を採用しており、実証実験



写真1 実験設備全景
Photo 1 Experimental facility

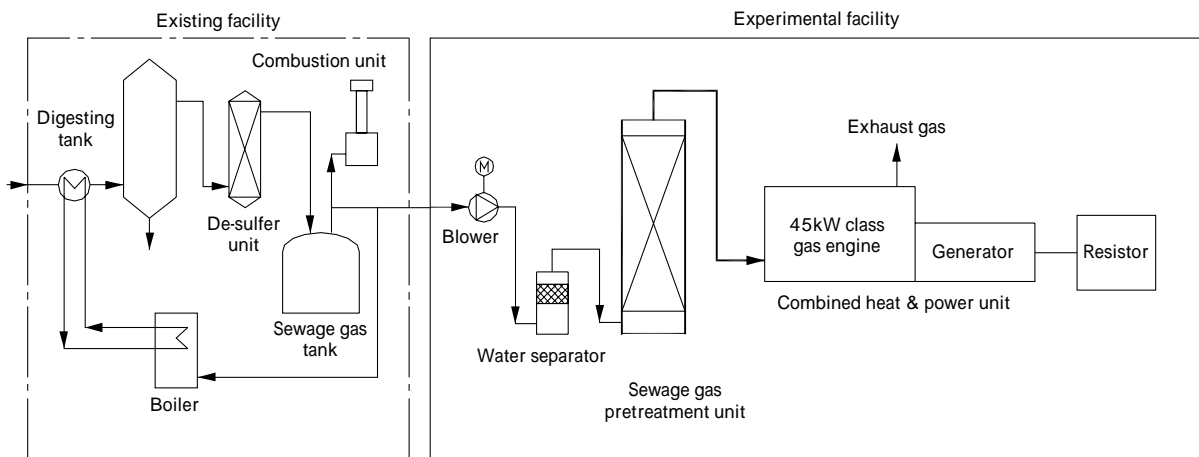


図2 実証実験設備フローシート
Fig. 2 Process flow sheet of experimental facility



写真2 ガスエンジンコージェネレーションユニット
Photo 2 Gas engine combined heat and power system

に先立ち小型カラムによる吸着実験を行い、特にシロキサン吸着能の高い炭種を新たに開発している。写真3に実証実験に供した消化ガス精製装置を示す。装置は予熱部と吸着部から構成されている。活性炭の吸着量の低下を防ぐため、飽和蒸気圧に近い高湿度で導入される消化ガスの相対湿度を調整したあと、活性炭を充填した吸着部でシロキサンの除去を行う。

2.4 運転結果

実証実験は、消化ガス精製装置の効果を確認するため、消化ガス精製装置有及び無の二つのシリーズに分けて実施した。最初は消化ガス精製装置を設置せずに約1カ月の運転を、続いて消化ガス精製装置を設置後7月～12月の約6カ月の運転を実施した。途中、所定のメンテナンス及びガスエンジンなどの開放点検のために運転を中断したことがあるが、2002年6月～2002年12月の実証実験期間を通じて、延べ4,430時間の運転時間を達成した。

2.4.1 消化ガス精製装置実証運転結果

本実証運転では、ガスエンジンの運転開始後、約1カ月にて消化ガス精製装置を設置し、その効果を確認した。

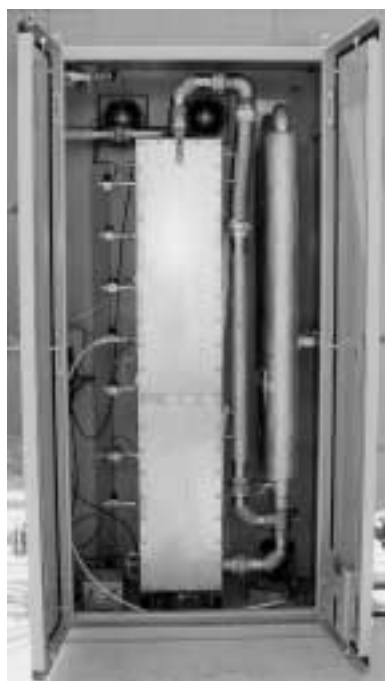


写真3 消化ガス精製装置
Photo 3 Sewage gas pretreatment unit

また、シロキサン除去性能の再現性を確認するため、吸着剤（活性炭）は1,800時間後に一度交換を実施し、本実証運転期間中に計2バッチの試験を実施した。

表1に各バッチにおける消化ガス精製装置前後での消化ガス中シロキサン濃度（4～6量体の濃度の総計）を示す。また、図3に消化ガス精製装置によるシロキサン除去率の経時変化を示す。シロキサン除去率は1,800時間後も良好な値を示しており、吸着剤の寿命（破過に至るまでの時間）はさらに長いものと考えられる。

写真4及び5に消化ガス精製装置設置前後でのガスエンジン・シリンダヘッド及び点火プラグの状況を示す。消化ガス精製装置設置前には、わずか570時間にてガス

表1 消化ガス精製装置のシロキサン除去性能

Table 1 Siloxane content at inlet and outlet of sewage gas pretreatment unit

Run No.	Operation time (h)	Siloxane content (mg/Nm ³)	
		Inlet	Outlet
1	24	29	<0.050
	1 839	14	<0.050
2	1 963	26	<0.050

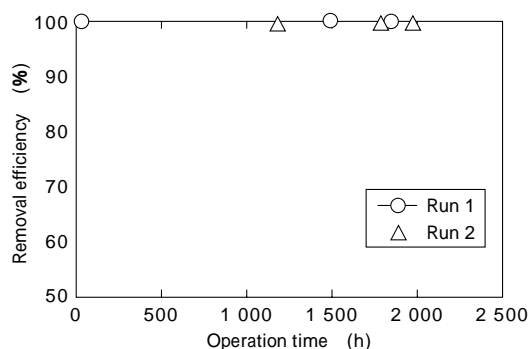


図3 消化ガス精製装置におけるシロキサン除去性能の経時変化
Fig. 3 Siloxane removal efficiency in sewage gas pretreatment unit

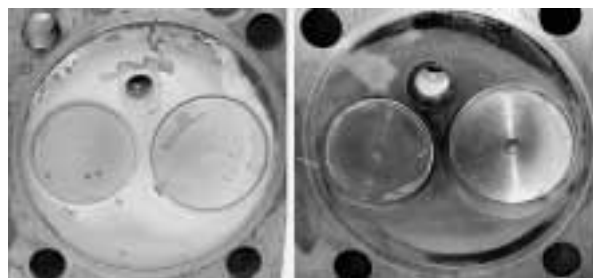
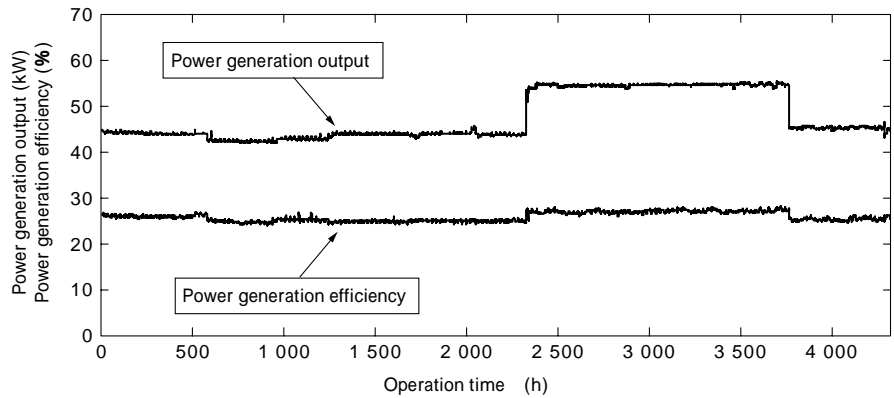


写真4 シリンダヘッド（左：精製装置設置前、右：精製装置設置後）
Photo 4 Cylinder head (Left : Before installation of gas pretreatment unit, Right : After installation of gas pretreatment unit)



写真5 点火プラグ（左：精製装置設置前、右：精製装置設置後）
Photo 5 Spark plug (Left : Before installation of gas pretreatment unit, Right : After installation of gas pretreatment unit)

図4 ガスエンジンコージェネレーションの発電出力及び発電効率の推移
 Fig. 4 Power generation output and power generation efficiency on gas engine combined heat & power system



エンジン・シリンダヘッドへのシリカの付着，点火プラグ電極の損耗，あるいは排ガス脱硝触媒の劣化が認められたが，同装置の設置後は，シリンダヘッドへのシリカの付着・堆積や点火プラグ電極の損耗は認められない。また，排ガス脱硝触媒についても，排ガス中の NO_x 濃度を定期的に測定し， NO_x 濃度の上昇がないこと，すなわち，脱硝触媒の劣化がないことを確認した。以上のとおり，消化ガス供給ラインに消化ガス精製装置を設置することにより，シロキサンに起因するガスエンジンの損傷・劣化を防止することが可能である。また，ガスエンジンのみならず，ガスタービンなどのほかの内燃機関においても同様の効果が期待できる。

2.4.2 ガスエンジンコージェネレーション連続運転結果

図4にガスエンジンコージェネレーションの発電出力及び発電効率の運転期間中の推移を示す。発電出力の違いによる効率の差を確認するため運転期間中に電気抵抗負荷の設定を変えており，発電出力にステップ状の変化が見られるのはこのためである。

発電効率は25～28%で推移しており，発電出力と関係があるものの，同一出力における発電効率の変動はなく，実証期間を通じて安定して運転されている。なお，発電効率はガス分析計による消化ガス組成測定値と消化ガス消費量から求めた投入熱量より計算している。消化ガスの主成分は湿ガススペースにおいて，メタン63～69vol%，二酸化炭素30vol%前後，窒素2～3vol%，酸素1vol%未満であり，低位発熱量(LHV)は実証運転期間の平均で24.1MJ/Nm³であった。なお，メタン濃度が高めの数値となっているのは，湿式脱硫塔にて二酸化炭素の一部が水に吸収され，相対的にメタン濃度が上がったためであ

る。

実験に使用したエンジンはストイキ燃焼型であり，三元触媒にて NO_x の除去を行っている。消化ガス精製装置の設置後は，三元触媒通過後の排ガス中 NO_x 濃度を定期的に確認したが， NO_x 濃度は運転期間中0～5ppmの範囲に収まっており，大気汚染防止法で定められた排出基準値(600ppm， O_2 0%換算値)を大きく下回るレベルであった。

むすび=下水汚泥消化ガス中に含まれるシロキサンを効率的に除去する消化ガス精製装置を開発し，ガスエンジンコージェネレーションと組合わせて実ガスによる実証運転を実施した。消化ガス精製装置によりシロキサン濃度が大幅に減少し，ガスエンジンの損傷・劣化を防止できることを確認した。本成果により消化ガスの有効利用促進，ひいては地球温暖化防止に少しでも貢献できれば幸いである。

なお，本実証試験の実施にあたり，神鋼造機㈱にご協力いただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 山田昭捷ほか：下水道協会誌，Vol.32，No.389(1995)，p.76.
- 2) G. R. Herdin et al.：ASME 2000 Spring technical conference, Solutions for Siloxane Problems in Gas Engines Utilizing Landfill and Sewage Gas (2000).