

## 下水処理施設におけるマイクロガスタービン コジェネレーションシステムの性能評価\* (第2報, コジェネレーションシステム構成方法の最適化)

フィルダウス バスライ<sup>\*1</sup>, 山田貴延<sup>\*1</sup>, 中西喜美雄<sup>\*1</sup>

### Performance Evaluation of Micro Gas Turbine Cogeneration System at Sewage Treatment Facility (2nd Report, Optimized Configuration Method of Cogeneration System)

Firdaus BASRAWI, Takanobu YAMADA<sup>\*1</sup> and Kimio NAKANISHI

<sup>\*1</sup> Kitami Institute of Technology  
Koen-cho 165, Kitami, Hokkaido, 090-8507 Japan

This study shows an efficient configuration method of a multiple units of cogeneration system (CGS) fueled by biogas in a sewage treatment facility. The efficient configuration was clarified by classifying a relation between exhaust heat recovery efficiency ( $\eta_{ehr}$ ) of the CGS, and the ratio of yearly average heat demand to yearly average biogas production of the facility ( $Q_{h,d}/Q_{b,p}$ ). The CGS was assumed to be used under  $Q_{h,d}/Q_{b,p} < \eta_{ehr}$ ,  $Q_{h,d}/Q_{b,p} \approx \eta_{ehr}$ ,  $Q_{h,d}/Q_{b,p} > \eta_{ehr}$  conditions. Results shown that, although the CGS was sufficiently capable to cover the total heat demand of the facility by only using biogas produced, on the point of view of energy utilization efficiency, reduction of unutilized biogas efficiency and reduction of electrical demand efficiencies, the most efficient CGS was obtained under  $Q_{h,d}/Q_{b,p} \approx \eta_{ehr}$  condition. It was found that under  $Q_{h,d}/Q_{b,p} \approx \eta_{ehr}$  condition, energy utilization, reduction of unutilized biogas and reduction of electrical demand efficiencies were 0.64, 0.99, and 0.32, respectively. Whereas, under  $Q_{h,d}/Q_{b,p} < \eta_{ehr}$  and  $Q_{h,d}/Q_{b,p} > \eta_{ehr}$  conditions, energy utilization, reduction of unutilized biogas and reduction of electrical demand efficiencies were in a ranges of 0.56~0.64, 0.43~0.99, and 0.16~0.20, respectively. If a CGS with a lower  $\eta_{ehr}$  such as fuel cell is used under  $Q_{h,d}/Q_{b,p} < \eta_{ehr}$  condition, or a CGS with a higher  $\eta_{ehr}$  such as steam turbine is used under  $Q_{h,d}/Q_{b,p} > \eta_{ehr}$  condition, more efficient system can be obtained.

**Key Words** : Biomass Energy, Energy Conversion, Cogeneration, Micro Gas Turbine, Sewage Treatment Facility, Methane Hydrate

## 1. 緒 言

バイオガス製造法の一つとなるメタン発酵は古くから利用されているが, 化石燃料が安価で容易に入手可能であったことから, メタン発酵では下水処理施設における汚泥の減量化, 安定化, 無害化の手法にとどまり<sup>(1)-(3)</sup>, 得られたバイオガスが必ずしも広く利用されているとは言えなかった. しかし, 近年化石燃料の枯渇問題およびその使用による環境問題といった二つのエネルギーに関する問題がより深刻化する中で<sup>(4)</sup>, 省エネルギー技術であるコジェネレーションシステム (CGS) によるカーボンニュートラルで再生可能なバイオガスの利用が注目され, その導入が進んでいる<sup>(5)-(12)</sup>. しかし, CGS によるバイオガスの利用はその報告が未だ多いとは言えず, 特にメタン発酵から製造されたバイオガス全量を有効利用するための具体的な CGS 構成法等, まだ十分に明らかにされていないとは言えない.

\* 原稿受付 2010年9月1日

<sup>\*1</sup> 正員, 北見工業大学工学部 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

E-mail: yama@mail.kitami-it.ac.jp



そこで本研究では、メタン発酵技術が最も盛んに導入されている下水処理施設における CGS によるバイオガス利用に注目し、施設内の特性値と見なせる年間平均熱需要量  $Q_{h,d}$  と年間平均バイオガス発生量の熱量  $Q_{b,p}$  との比  $Q_{h,d}/Q_{b,p}$ 、および CGS の排熱性能の指標となる排熱回収効率  $\eta_{ehr}$  との関係に基づき、効率高くバイオガス全量を利用できる CGS について明らかにした。そのため、 $Q_{h,d}/Q_{b,p}$  値が前報<sup>(13)</sup>で用いたマイクロガスタービン(MGT)の  $\eta_{ehr}$  に対して、同程度( $Q_{h,d}/Q_{b,p} \approx \eta_{ehr}$ )、より大きい( $Q_{h,d}/Q_{b,p} > \eta_{ehr}$ )、およびより小さい( $Q_{h,d}/Q_{b,p} < \eta_{ehr}$ )条件となるような三つの場合での利用を想定し、それらの性能比較を行い最適な条件を明らかにした。

## 2. 記号

$Pe$	: CGS 一台当たりの発電量 [kW]
$Pe_{CGS}$	: CGS 全台数からの発電量 [kW]
$Pe_{CGS,used}$	: CGS から施設に使用される発電量 [kW]
$Pe_d$	: 施設の電力需要量 [kW]
$Pe_{grid}$	: 電力会社からの電力 [kW]
$Q_{b,b}$	: 残留バイオガス熱量 [kW]
$Q_{b,h,d}$	: 残りの熱需要量 [kW]
$Q_{b,p}$	: バイオガス発生量の熱量 [kW]
$Q_{CGS}$	: CGS 全台数からの排熱回収量 [kW]
$Q_{CGS,used}$	: CGS から施設に使用される排熱回収量[kW]
$Q_{ehr}$	: CGS 一台当たりの排熱回収量[kW]
$Q_{fuel}$	: CGS 一台当たりの消費燃料熱量 [kW]
$Q_{fuel,CGS}$	: CGS 全台数の消費燃料熱量 [kW]
$Q_{grid}$	: 施設外からの熱量[kW]
$Q_{h,d}$	: 施設の熱需要量 [kW]
$Q_{u,b}$	: 未利用の余剰バイオガス熱量 [kW]
$Unit$	: 台数 [-]
$\eta_b$	: ボイラ効率 [-]
$\eta_{ehr}$	: 排熱回収効率 [-]
$\eta_{EU}$	: エネルギー使用効率 [-]
$\eta_{Pe}$	: 発電効率 [-]
$\eta_{Pe,save}$	: 施設の電力需要の低減率 [-]
$\eta_{total}$	: 総合効率 [-]
$\eta_{u,b,save}$	: 未利用の余剰バイオガスの低減率 [-]

## 3. 解析方法

### 3・1 コジェネレーションシステムによるバイオガスの利用法

コジェネレーションシステム(CGS)によるバイオガスの利用法としては、バイオガスプラントの熱および電力の需要によって二つの場合が考えられ、バイオガスプラントの設置箇所周辺に熱と電力が必要となる施設がある場合とない場合である。一般に、メタン発酵で発生したバイオガスのエネルギーは、メタン発酵過程に必要なエネルギーよりも多い。そのため、バイオガスプラントの周辺に熱と電力が必要となる施設がない場合では、発生したバイオガスの一部だけを CGS に供給してメタン発酵過程の熱と電力需要を賄うことになる。また、余剰分のバイオガスの利用法としては、バイオガスを精製してから、天然ガス自動車<sup>(14)-(15)</sup>や都市ガス<sup>(15)-(16)</sup>に供給する方法等が考えられる。

一方、バイオガスプラントの周辺に熱と電力が必要となる施設がある場合では、その施設での熱と電力の需要量がバイオガスプラントの熱と電力の各需要量の一部に相当すると考えられる。この場合では、発生したバイオガス全量を CGS の燃料として損失なく熱と電力需要に賄うために、どのように CGS を構成すれば良いかを考え

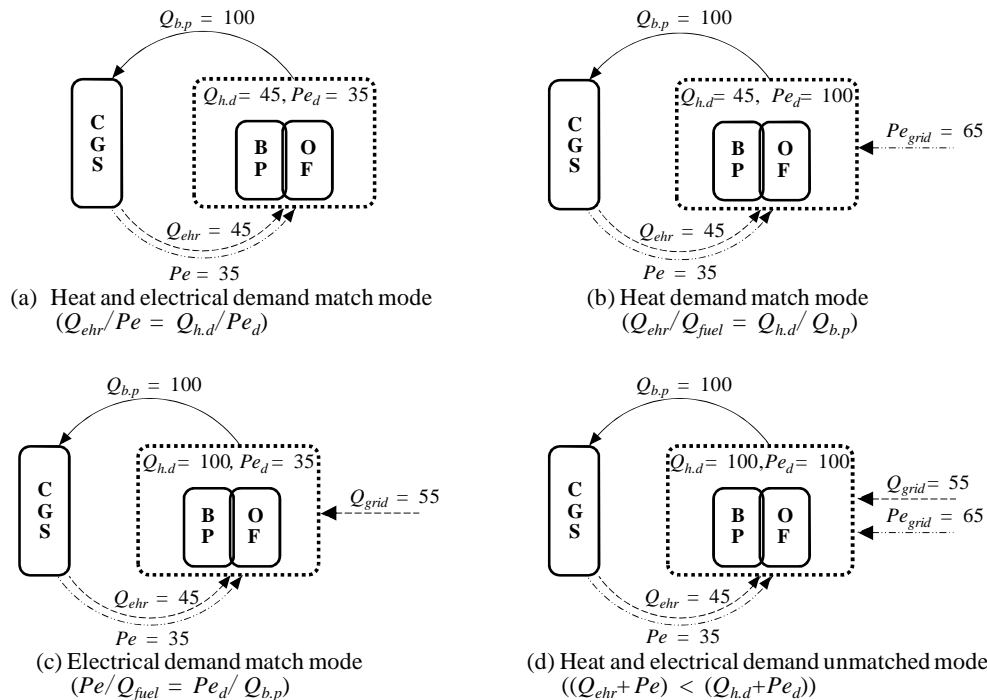


Fig. 1 Operation mode of the biogas fueled cogeneration system based on the heat and electrical demand of a facility

る必要がある。そこで、CGSの構成方法としてバイオガス発生量と施設全体の電力と熱需要量との関係からいくつかの稼働モードを想定してみた。それらを図1に示す。なお、図ではバイオガスプラントを「BP」、バイオガスプラントの周辺の施設を「OF」と表記した。またこの例では、バイオガス発生熱量を仮に $Q_{b,p}=100\text{kW}$ として、排熱回収熱量 $Q_{ehr}=45\text{kW}$ およびMGT発電量 $Pe=35\text{kW}$ とした場合を基準として比較・検討してみる。図1において、(a)の熱と電力の各需要のマッチモードは、バイオガス発生量 $Q_{b,p}$ だけで熱需要量 $Q_{h,d}$ と電力需要量 $Pe_d$ を十分に賄える場合に対応する。この場合、CGSから発生した熱 $Q_{ehr}$ と電力量 $Pe$ が施設の熱と電力需要量に一致するように、すなわちCGSの熱電比 $Q_{ehr}/Pe$ を施設の熱と電力需要比 $Q_{h,d}/Pe_d$ に一致させるようにCGSを構成すれば良いと考えられる。(b)の熱需要のマッチモード、または(c)の電力需要のマッチモードは、各図に示すようにバイオガス発生量だけで熱と電力需要全量を賄えない場合に対応する。つまり(b)の熱需要のマッチモードの場合、CGSから回収した熱量が施設の熱需要量に一致するように、CGSの排熱回収効率 $\eta_{ehr}=Q_{ehr}/Q_{fuel}$ が、各施設固有の特性値と見なせる熱需要量 $Q_{h,d}$ とバイオガス発生量の熱量 $Q_{b,p}$ との比 $Q_{h,d}/Q_{b,p}$ に一致するようにCGSを構成すれば良いと考えられる。一方、(c)の電力需要マッチモードの場合、CGSの発電量が施設の電力需要量に一致するように、CGSの発電効率 $\eta_{pe}=Pe/Q_{fuel}$ が施設内の特性値と見なせる電力需要量 $Pe_d$ とバイオガス発生量の熱量 $Q_{b,p}$ との比 $Pe_d/Q_{b,p}$ に一致するようにCGSを構成すれば良いと考えられる。また、バイオガス発生量が施設の熱と電力需要全量より比較的少ない場合には、(d)の熱と電力需要のアンマッチモードが考えられ、発生したバイオガスでは熱と電力需要の一部だけ賄うことになる。

一般的な下水処理施設では、汚泥を原料としたバイオガスプラントが下水処理施設内にあるため、バイオガス全量をCGSで利用することができる。また、同施設では、下水処理過程のために様々なコンプレッサ、ポンプ類が使用され、それらを稼働させるために大量の電力が必要となるのが通例である。そのため、発生したバイオガスだけでは電力需要全量を賄えきれなく、CGSを構成するには(b)の熱需要マッチモードが最も適用可能なモードと考えられる。本研究ではこの構成方法の有効性を明らかにするために、典型的な下水処理施設および施設に付属すると仮定したマイクロガスタービン・コジェネレーションシステム(以下、MGT-CGSと略記)について調べることにした。そこで、MGT-CGSの排熱回収量が施設の熱需要量と一致する場合と一致しない場合でCGSの効果を比較するために、施設の熱需要を変化させ様々な地域の気温条件下における下水処理施設で運用するMGT-CGSを想定した。

### 3・2 下水処理システムの概要

下水処理施設内のシステムの概要を図2に、メタン発酵の基本的な仕様を表1に示す。また、施設の熱需要を算出するために使用した諸元値を表2に示す。施設の熱需要の計算方法としては前報<sup>(13)</sup>と同様に、施設内各場所に応じた最適温度をいずれも一定に維持するための熱需要量とし、気温との温度差から計算した。図2より、消化タンク内汚泥の加温および管理棟の暖房・給湯は施設内の主な熱需要先となり、これらを賄うために発生したバイオガスをCGSの燃料として供給すると仮定した。なお、熱需要量が多い施設では、CGSのみで熱需要全量を賄うことが不可能になる場合には、システム内に加温用ボイラも設置して同時稼働できると想定した。さらに、バイオガス発生量に過不足が生じる地域では、システム内に省エネルギー化が可能なメタンハイドレート (MH) 貯蔵法<sup>(17)-(18)</sup>の導入を想定し、熱需要が比較的低い夏季には余剰バイオガスを一時的にMH化して貯蔵し、バイオガスが不足する冬季にはこれを解離再生して利用するものとした。なお、MH貯蔵の計算方法は前報<sup>(13)</sup>と同様である。また、CGSから得られる電力は、施設内の電力需要の一部を補い、系統連系によって作動することで電力需要量を低減させる。

$Q_{hd}/Q_{bp}$  値が異なる施設の特性を得るために、解析モデルには年間平均気温の異なる地域で利用した場合を想定し、各地域での施設の熱需要を算出してみた。特に、 $Q_{hd}/Q_{bp} > \eta_{ehr}$  の場合には北海道東部地域を、 $Q_{hd}/Q_{bp} < \eta_{ehr}$  の場合には沖縄(那覇)での利用となる等の実際面での応用も想定した。そのため、熱需要が低い  $Q_{hd}/Q_{bp} < \eta_{ehr}$  の場合にはCGSのみ、 $Q_{hd}/Q_{bp} \approx \eta_{ehr}$  の場合にはCGSとMH貯蔵、熱需要が高い  $Q_{hd}/Q_{bp} > \eta_{ehr}$  の場合にはCGS、MH貯蔵およびボイラをそれぞれ稼働させると仮定した。

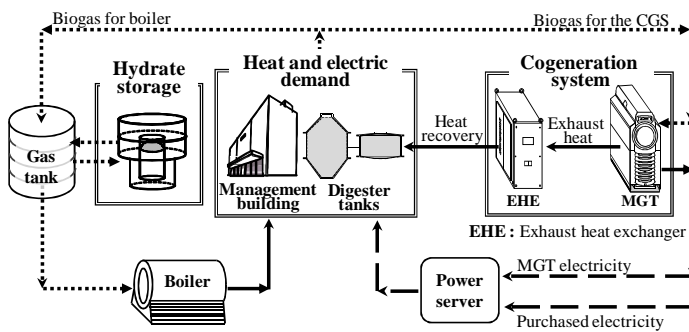


Fig.2 System configuration in the facility

Table 1 Standard specifications of the model digester tank

Population covered	[people]	100000		
		Minimum	Maximum	Average
Wastewater amount	[m <sup>3</sup> /day]	38 947	75 138	51 224
Sludge amount	[m <sup>3</sup> /day]	185	316	246
Biogas production	[m <sup>3</sup> /day]	3 414	4 954	4 257
Sludge inlet temperature				
East Hokkaido	[°C]	9.3	18.6	14.2
Naha	[°C]	23.2	29.8	26.8

Table 2 Parameter used to calculate heat demand of facility

		Admin. building	Digester tank A	Digester tank B
Overall volume	[m <sup>3</sup> ]	2 773	3 003	1 716
Overall wall area	[m <sup>2</sup> ]	1 998	1 115	816
Heat transfer coe. of wall	[W/(m <sup>2</sup> K)]	4.11	2.47	2.30
Overall window area	[m <sup>2</sup> ]	82	—	—
Heat transfer coe. of window	[W/(m <sup>2</sup> K)]	3.61	—	—

### 3・3 想定したコジェネレーションシステム (CGS)

本研究で想定したCGSの基本的な仕様を表3<sup>(13)</sup>に示す。1台当たりのCGSからはそれぞれ最大で29 kW, 54 kW

Table 3 Standard specifications of the CGS

Cogeneration system		
Micro gas turbine (MGT)	Exhaust heat exchanger (EHE)	
Rated input fuel heat	126.9 kW	Heat exchanger type
Rated output power	28±1 kW	Effectiveness of exhaust heat exchanger
Rated speed	96,000 rpm	Coolant fluid flow rate
Rated electrical efficiency	0.22 ±0.01	Coolant input-output temperature
Rated air mass flow	0.31kg/s	Heat recovery
Pressure ratio	3.4	
Turbine & compressor efficiency	0.76	
Recuperator efficiency	0.74	
Turbine exit temperature	866 K	
Exhaust temperature	548 K	

の発電出力と排熱回収量が得られ、その発電効率  $\eta_{pe}$ 、排熱回収効率  $\eta_{ehr}$ 、総合効率  $\eta_{total}$  はそれぞれ 0.22, 0.42, 0.64 である。ここでは、できるだけ損失なく排熱を利用するために施設の熱需要量に応じて CGS の台数を変化させた。

### 3・4 施設内での熱エネルギー利用

熱エネルギー利用の計算方法では、前報<sup>(13)</sup>と同様に施設の熱エネルギーバランスを調べるために、施設側のバイオガス発生量の熱量および熱需要量と CGS 側のバイオガス消費量と排熱回収量との関係を算出した。

熱需要が高い場合では、CGS だけで施設の熱需要が賅えないため、CGS の稼働台数を少なくして残留バイオガスをボイラの燃料とし、残りの熱需要を賅うと仮定した。ここで、残りの熱需要量  $Q_{b,h,d}$  および残留バイオガス熱量  $Q_{b,b}$  を以下の式(1), (2)で算出した。

$$Q_{b,h,d} = Q_{h,d} - Q_{CGS} \quad (1)$$

$$Q_{b,b} = Q_{b,p} - Q_{fuel} \cdot Unit \quad (2)$$

また、システムにボイラを併用する場合、2004年01月～2008年01月、過去4年間の解析期間を通して、月毎 ( $i=1\sim 48$ ) に残留バイオガス量で残りの熱需要分を十分に賅っているか確認を行った。次式(3)で得られた値が0以上になれば、その値は最終的に未利用となる余剰バイオガスに相当する熱量  $Q_{u,b}$  と仮定した。

$$Q_{u,b} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n Q_{b,b_i} \times \eta_b - Q_{b,h,d_i} \quad (3)$$

### 3・5 CGS の評価方法

ここでは、設置したシステムにおいてどの程度の性能が得られるかを評価するために、各場合での CGS 導入効果を検討した。CGS 導入により、どの程度未利用の余剰バイオガスおよび電力需要を低減できるかを以下の式(4)と(5)で計算した。なお、比較対象として MGT-CGS を導入しない場合で熱供給のためにボイラしか使用しない従来システムとした。

$$\eta_{Pe,save} = \frac{Pe_d - Pe_{CGS}}{Pe_d} \quad (4)$$

$$\eta_{u,b,save} = \frac{Q_{b,p} - Q_{u,b}}{Q_{b,p}} \quad (5)$$

また、その他に CGS で発生した電力および熱を損失なく施設に使用可能かどうかを確認するために、エネルギー使用効率  $\eta_{EU}$  を定義し、その式を以下の式(6)に示す。ここで  $\eta_{EU}$  は、CGS に供給される燃料熱量  $Q_{fuel}$  に対する施設で使用される熱および電力量の  $Q_{CGS,used}$  および  $Pe_{CGS,used}$  の合計量との割合を表す。

$$\eta_{EU} = \frac{Pe_{CGS,used} + Q_{CGS,used}}{Q_{fuel}} \quad (6)$$

## 4. 解析結果

### 4・1 $Q_{h,d} / Q_{b,p}$ 値と CGS の $\eta_{ehr}$ の関係

図3に、ここで想定した施設についての  $Q_{h,d} / Q_{b,p}$  値の計算結果と MGT-CGS の  $\eta_{ehr}$  との関係を示す。なお、本研究では前報の解析結果<sup>(13)</sup>をふまえ、 $Q_{h,d} / Q_{b,p} \approx \eta_{ehr}$  の場合には 0.42 に、一方、 $Q_{h,d} / Q_{b,p} < \eta_{ehr}$  の場合として 0.20、 $Q_{h,d} / Q_{b,p} > \eta_{ehr}$  の場合としては 0.61 をそれぞれ仮定して以後の計算を行った。

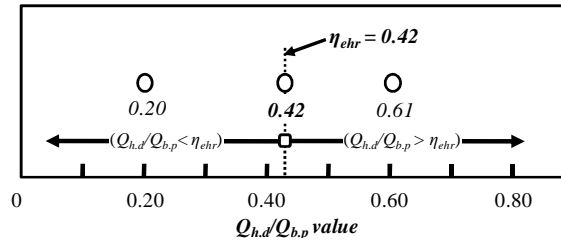


Fig. 3  $Q_{h,d} / Q_{b,p}$  value for every assumed condition and  $\eta_{ehr}$  value of the CGS

#### 4・2 施設内での熱エネルギーバランス

各場合のCGSの稼働状況、および熱エネルギーバランスの結果を図4に示す。 $Q_{h,d} / Q_{b,p} \approx \eta_{ehr}$ 、 $Q_{h,d} / Q_{b,p} > \eta_{ehr}$ および $Q_{h,d} / Q_{b,p} < \eta_{ehr}$ の場合の結果は、それぞれ図の(a), (b), (c)に対応している。なお、これら各図では、図の上段に、熱需要量とCGSからの排熱回収量との関係を、また、図の中段に、それら両者の差となる残りの熱需要量と残留バイオガス熱量との関係を示す。したがって図中、“deficiency”および“excess”と表記した領域は、それ

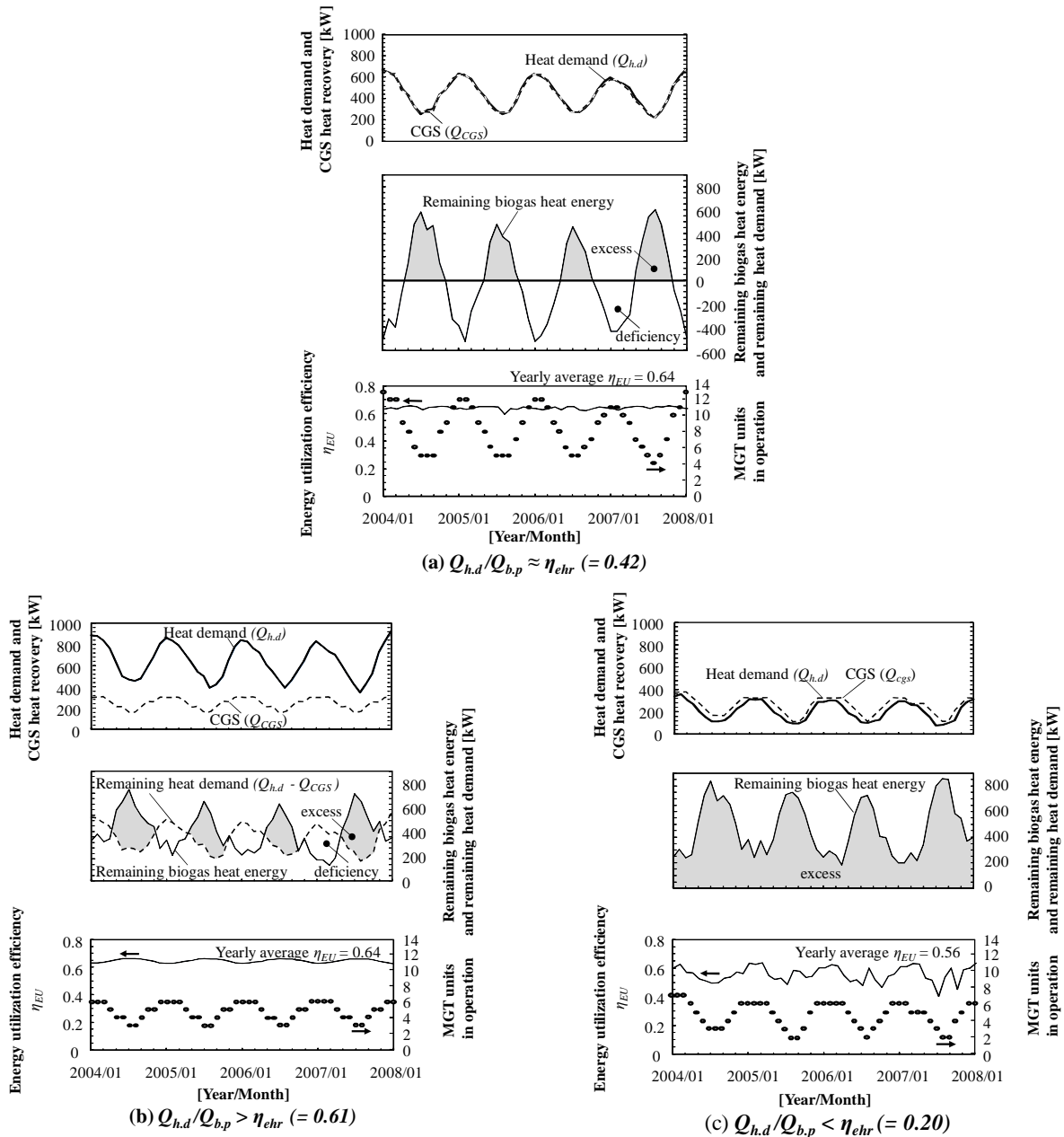


Fig. 4 Heat energy balance and CGS operation condition in the facility for the all assumed conditions

ぞれバイオガスの不足分および余剰分が生じる熱量範囲を示すことになる。また、図の下段に、エネルギー使用効率  $\eta_{EU}$  および MGT 稼働台数を示す。

#### 4・2・1 $Q_{h,d} / Q_{b,p} \approx \eta_{ehr}$ (=0.42) の場合

まず、図 4(a)のバイオガス全量を効率高く使用できると仮定した  $Q_{h,d}/Q_{b,p} \approx \eta_{ehr}$  の場合の解析結果について説明する。この条件では、MGT 稼働台数はそれぞれ、4~13 台とした。まず、CGS からの排熱回収量と熱需要量との関係を見てみると、通年で変化する熱需要全量を賅っていることが分かる。また、残りの熱需要量と残留バイオガス熱量を示す図の中段を見てみると残りの熱需要量が生じないが、バイオガスの過不足が生じていることが分かる。これは、夏季では熱需要が低いため、CGS で消費されるバイオガスがバイオガス発生量より少なくなる一方、冬季では熱需要が高いため、CGS で消費されるバイオガスがバイオガス発生量より多くなるためである。もし、CGS に MH 貯蔵法を組込むならば、夏季での余剰バイオガスを冬季に持越すことができ、バイオガス全量で施設の熱需要全量を十分に賅えることが予想される。また、エネルギー使用効率  $\eta_{EU}$  を見てみると、CGS からの排熱回収量全量を使用できるため、年間を通して高い値を維持できることが分かる。

#### 4・2・2 $Q_{h,d} / Q_{b,p} > \eta_{ehr}$ (=0.61) の場合

この条件では、図 4(b)に示すように MGT 稼働台数は 3~6 台とした。この場合では、排熱回収量だけでは熱需要全量を賅えないことが分かる。ここでも、バイオガスの過不足が生じることが分かる。もし、CGS に MH 貯蔵法を組込むならば、バイオガス全量で施設の熱需要全量を十分に賅えることが予想される。また、エネルギー使用効率  $\eta_{EU}$  を見てみると、この場合でも CGS からの排熱回収量全量を使用できるため、年間を通して高い値を維持できることが分かる。

#### 4・2・3 $Q_{h,d} / Q_{b,p} < \eta_{ehr}$ (=0.20) の場合

この条件では、図 4(c)に示すように MGT 稼働台数は 2~7 台とした。この場合では、排熱回収量だけで熱需要全量を賅えることが分かる。また、通年で余剰バイオガスが発生してバイオガス量に過不足が生じないため、MH 貯蔵法を組込む必要性はないことが分かる。また、エネルギー使用効率  $\eta_{EU}$  を見てみると、熱需要量より排熱回収量がやや多くなり、エネルギー使用効率  $\eta_{EU}$  が他の場合に比べて低下することが分かる。

以上のことから、CGS の設置場所の温度条件にかかわらず、発生したバイオガスだけで下水処理施設の熱需要全量を賅えること、また、エネルギー使用効率  $\eta_{EU}$  の変化より、排熱回収量を有効に使用できることが分かった。

### 4・3 施設の $Q_{h,d} / Q_{b,p}$ 値と原動機の $\eta_{ehr}$ との関係と稼働方式

図 5 に、前項各条件でのエネルギー使用効率  $\eta_{EU}$ 、電力需要の低減率  $\eta_{Pe,save}$  および未利用の余剰バイオガスの低減率  $\eta_{u,b,save}$  のバランスを示す。図 5(a)の  $Q_{h,d}/Q_{b,p} \approx \eta_{ehr}$  の場合、他の場合に比べてエネルギー使用効率、電力需要の低減率および未利用の余剰バイオガスの低減率がそれぞれ最大に近くなる傾向が見られることから、効果的な CGS が得られることが明らかである。この場合、 $\eta_{EU}=0.64$  のエネルギー使用効率の最高値を維持でき、未利用の余剰バイオガスおよび電力需要低減効果がそれぞれ  $\eta_{u,b,save}=0.99$  および  $\eta_{Pe,save}=0.32$  にも達することが分かる。

一方、図 5b の  $Q_{h,d}/Q_{b,p} > \eta_{ehr}$  の場合、 $\eta_{EU}=0.64$ 、 $\eta_{u,b,save}=0.99$  となり、 $Q_{h,d}/Q_{b,p} \approx \eta_{ehr}$  の場合と同程度の性能を示す。しかし、 $\eta_{Pe,save}=0.16$  となり、 $Q_{h,d}/Q_{b,p} \approx \eta_{ehr}$  の場合よりも電力需要の低減効果は低い。これは、施設の熱需要量が CGS の排熱回収量より多くなるため、ボイラの同時稼働により CGS の発電量が少なくなることに基づく。

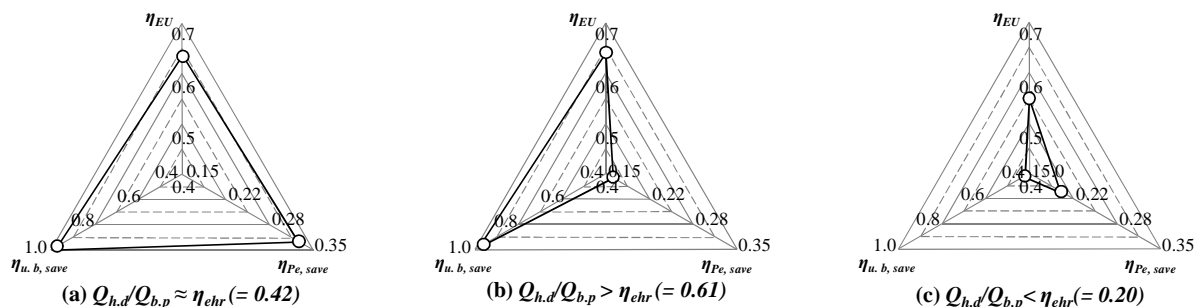


Fig. 5 Balance of energy utilization, electrical demand reduction and unused biogas reduction efficiency for the all assumed condition

また、図 5(c)の  $Q_{h,d}/Q_{b,p} < \eta_{ehr}$  の場合、 $\eta_{EU}=0.56$ ,  $\eta_{u,b,save}=0.43$ ,  $\eta_{Pe,save}=0.20$  となり、いずれの点からみても  $Q_{h,d}/Q_{b,p} \approx \eta_{ehr}$  の場合よりも各効果が低いことが分かった。この場合では、熱需要量が少ないため、CGS によるバイオガスの利用が少なくなるため、未利用の余剰バイオガスおよび電力需要の低減効果が少ない。仮に、 $Q_{h,d}/Q_{b,p}$  が  $\eta_{ehr}$  に一致しない場合においても MGT 以外の原動機を使用し、CGS の  $\eta_{ehr}$  を施設の  $Q_{h,d}/Q_{b,p}$  に等しく設定できるならば、 $Q_{h,d}/Q_{b,p} \approx \eta_{ehr}$  の場合のように効率高くバイオガス全量を効果的に使用できると考えられる。

図 6 に、原動機の典型的な仕様<sup>(19)-(24)</sup>から推定した CGS の排熱回収効率  $\eta_{ehr}$  を示す。なお、大規模な CGS には蒸気タービン(ST)、ガスタービン(GT)、コンバインドサイクル(CC)を、また、中小規模の CGS にはスターリングエンジン(SE)、ガスエンジン(GE)、燃料電池(FC)、MGT をそれぞれ例に挙げそれらの  $\eta_{ehr}$  の範囲をおおよそ示す。

前図 5(a)の  $Q_{h,d}/Q_{b,p} \approx \eta_{ehr}(=0.42)$  の場合では、MGT だけではなく、他の原動機の  $\eta_{ehr}$  もこの範囲に入るため、排熱回収効率が同程度であれば、他の原動機を使用しても同程度の結果が得られると考えられる。一方、前図 5(b)の  $Q_{h,d}/Q_{b,p} > \eta_{ehr}$  の場合では、取りうる  $\eta_{ehr}$  の値は大規模な CGS の値の範囲に限られているが、もし CGS の原動機として MGT の代わりに蒸気タービン(ST)が使用可能であれば、より高い効果が期待できる。また前図 5(c)の  $Q_{h,d}/Q_{b,p} < \eta_{ehr}$  の場合、CGS の原動機に MGT の代わりに燃料電池(FC)を使用する仮定すると、バイオガス全量を CGS で効率高く利用できることが期待できる。しかし、逆に FC を使用できない場合には、3.1 節で述べたようにバイオガスを精製し天然ガス自動車、都市ガスへの供給といった手段が一考に値する。

以上のことから、下水処理施設に CGS を構成する際、CGS の  $\eta_{ehr}$  を施設固有の  $Q_{h,d}/Q_{b,p}$  値に一致させるように原動機、補機類を構成できれば、エネルギー利用上、有効な CGS が得られることが明らかとなった。

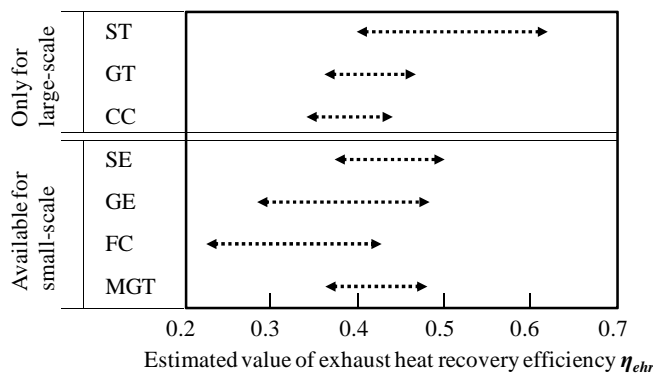


Fig. 6 Estimated value of exhaust heat recovery efficiency of a various prime movers

## 7. 結 語

- (1) バイオガスプラントの周辺に熱と電力が必要となる他の施設がある場合、それらの熱と電力需要全量によって CGS の構成方法が種々考えられ、特に下水処理施設では熱需要マッチモードが適用可能である。
- (2) CGS の排熱回収効率  $\eta_{ehr}$  を施設内の特性値と見なせる年間平均熱需要量  $Q_{h,d}$  と年間平均バイオガス発生量の熱量  $Q_{b,p}$  との比  $Q_{h,d}/Q_{b,p}$  値に一致しなかった条件  $Q_{h,d}/Q_{b,p} < \eta_{ehr}(=0.20)$  および  $Q_{h,d}/Q_{b,p} > \eta_{ehr}(=0.61)$  では、エネルギー使用効率、未利用の余剰バイオガスおよび電力需要の低減効果はそれぞれ 0.56~0.64, 0.43~0.99, 0.16~0.20 となり、 $Q_{h,d}/Q_{b,p} \approx \eta_{ehr}(=0.42)$  の場合より低い値が得られる。
- (3) CGS の排熱回収効率  $\eta_{ehr}$  を施設の  $Q_{h,d}/Q_{b,p}$  値に一致した条件の  $Q_{h,d}/Q_{b,p} \approx \eta_{ehr}(=0.42)$  の場合では、エネルギー使用効率、未利用の余剰バイオガスおよび電力需要の低減効果はそれぞれ 0.64, 0.99, 0.32 にも達し、最も有効な CGS が得られる条件となる。したがって、下水処理施設に CGS を構成する際、CGS の  $\eta_{ehr}$  を施設固有の  $Q_{h,d}/Q_{b,p}$  値に一致させるように原動機、補機類を構成できれば、エネルギーを効果的に利用する上で、有効な CGS が得られる。
- (4)  $Q_{h,d}/Q_{b,p} > \eta_{ehr}$  の場合は、大規模な CGS に限定されるが、ここで CGS の原動機として MGT の代わりに蒸気タービンを使用するとより一層高い効果が得られる。一方、 $Q_{h,d}/Q_{b,p} < \eta_{ehr}$  の場合、もし CGS の原動機に燃料電池を使用すると、バイオガス全量を CGS で効率高く利用できることが期待できる。



## 文 献

- (1) Y. Chen, J. J. Cheng, K. S. Creamer, "Inhibition of Anaerobic Digestion Process: A Review", *Bioresource technology*, Vol. 99, No. 10 (2008), pp. 4044-4064.
- (2) 有限会社ブッカーズ, バイオマスからの気体燃料製造とそのエネルギー利用, (2007), p. 14, 170, NTS 株式会社.
- (3) 塚原健一郎, 柳下立夫, 澤山茂樹, "我が国におけるバイオガス発電の現状と課題", 日本エネルギー学会誌, Vol. 84, No. 7 (2005), pp. 537-543.
- (4) International Energy Agency, *World Energy Outlook* (2006), pp. 37.
- (5) 資源のみち委員会, "下水汚泥資源利用の現状と課題", (2006), 国土交通省, <http://www.mlit.go.jp/crd/sewage/shingikai-iinkai/shigen/sigen1st.html> (参照日 2010 年 08 月 23 日)
- (6) Bruno, J.C., Victor, O.L., Coronas, A., "Integration of Absorption Cooling Systems into Micro Gas Turbine Trigeneration Systems Using Biogas", *Applied Energy*, Vol. 86, No. 6 (2009), pp. 837-847.
- (7) Naing, S., Yamada, T., Nakanishi, K., "Applied Performance Research of a Cogeneration Arrangement with Proposed Efficiency Well-Balance Method", *Journal of Power and Energy System*, Vol.1, No.3 (2007), pp.199-210.
- (8) Naing, S., Yamada, T., Nakanishi, K., "Renewable Fuel Utilization in a Cogeneration Arrangement with Hydrate Storage Method", *Journal of Power and Energy System*, Vol.1, No.3 (2007), pp. 239-250.
- (9) 片岡匡史, 中島照幸, 中川貴博, 湯浅三郎, "消化ガスの燃焼特性とマイクロタービン消化ガスコージェネレーションシステムへの適用", エバラ時報, No.218 (2008), pp. 8-15.
- (10) 下水道機構, "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", 研究成果年報, (2004), <http://www.jiwet.jp/result/annual/sludgeprocessing/2004a1-2-3-15m.htm> (参照日 2010 年 08 月 23 日)
- (11) J., B., Holm-Nielsen, T., Al Seadi, P., Oleskowicz-Popiel, "The Future of Anaerobic Digestion and Biogas Utilization", *Bioresource Technology*, Vol. 100, No. 22 (2009), pp. 5478-5484.
- (12) R., J., Spiegel, J., L., Preston, "Test Result for Fuel Cell Operation on Anaerobic Digester Gas", *Journal of Power Sources*, Vol. 86, No. 1-2 (2000), pp. 283-288.
- (13) フィルダウス バスライ, 山田貴延, 中西喜美雄, "下水処理施設におけるマイクロガスタービンコージェネレーションシステムの性能評価(年間平均気温の異なる地域での性能解析)", 日本機械学会論文集, 076 巻 770 号 B 編(2010), pp. 207-216.
- (14) 日本ガス協会, "バイオマスエネルギー利用", <http://www.gas.or.jp/default.html> (参照日 2010 年 08 月 23 日)
- (15) European Biomass Association, "A biogas Roadmap for Europe", pp.8-9.
- (16) バイオエナジー株式会社, "バイオガスの都市ガス導管への注入について" [http://www.bio-energy.co.jp/news/bio\\_gas.php](http://www.bio-energy.co.jp/news/bio_gas.php) (参照日 2010 年 08 月 23 日)
- (17) フィルダウス バスライ, 山田貴延, 中西喜美雄, "寒冷条件下における下水処理施設でのマイクロガスタービンコージェネレーションシステムの性能解析", 2009 年度日本機械学会年次大会, Vol. 3, No. 09-1 (2009), pp.153-154.
- (18) E., D., Sloan, C., A., Koh, "Clathrate Hydrates of Natural Gases", Third Edition (2007), p. 21, CRC Press.
- (19) 日本コージェネレーションセンター, "コージェネレーションシステム総合マニュアル新版", (2003), p. 30-31, 通産資料出版会.
- (20) U.S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership, "Catalog of CHP Technologies", (2008), p. 7.
- (21) EDUCOGEN, "An Educational Tool for Cogeneration", (2001), p. 57.
- (22) Midwest CHP Application Center and Avalon Consulting, Inc., "Combined Heat & Power (CHP) Resource Guide", Second Edition, (2005), pp. 3-4.
- (23) International Energy Agency, "Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets", (2002), p. 3.
- (24) Energy Solution Center, "The Energy Solutions Center DG Applications Guide", 2004, pp. 35, 47, 54, 68.