

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* (年間平均気温の異なる地域での性能解析)

Firdaus BASRAWI*¹, 山田 貴延*², 中西 喜美雄*²

Performance Evaluation of Micro Gas Turbine Cogeneration System at Sewage Treatment Plant (Performance Analysis under Various Regions with Different Annual Average Temperature)

Firdaus BASRAWI, Takanobu YAMADA*³ and Kimio NAKANISHI

*³ Department of Mechanical Engineering, Kitami Institute of Technology,
165 Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido, 090-8507 Japan

This study shows an impact and a basic performance analysis of micro gas turbine (MGT) cogeneration system (CGS) in the sewage treatment facility under various temperature conditions. The results show that, in either temperature condition, by only using biogas produced from the facility as a fuel and methane hydrate storage method as solution for the unbalance of biogas produced, MGT-CGS is sufficiently capable to cover all the total heat demand of the facility. On the biogas utilization and economic point of views, MGT-CGS is effective in either temperature conditions but the effectiveness is decreasing when the ambient temperature condition is increasing. It is most effective in cold temperature condition with almost 100% of the biogas is utilized, whereas in high temperature condition due to low heat demand, comparing to the conventional system approximately only 42~79% of unutilized biogas is decreased. While adopting an actual data as a part of the calculation procedure, results of the impact and performance analysis are shown in the paper.

Key Words: Energy Saving, Energy Storage, Biomass Energy, Cogeneration, Micro Gas Turbine, Methane Hydrate

1. 緒言

省エネルギー化が求められている昨今、化石燃料枯渇等の問題から下水処理施設においても未利用エネルギーの有効利用が急がれている。その一手段として、バイオガスを燃料とするコジェネレーションシステム(CGS)の導入が進みつつある^{(1)~(6)}。しかし、国内約1900箇所の下水処理施設の内、消化タンクを有する下水処理施設は300箇所程度にとどまっており、しかもバイオガスをCGSで利用できる下水処理施設は30箇所にもみたくない^{(1)~(2)}。その原因の一つとして、バイオガス発生量が比較的少なく、また、季節の変化に応じて発生量が著しく変動する下水処理施設では、バイオガス自体の発熱量がメタンガス単体に比べて低いことから、現在一般に普及している数百キロワット以上の発電能力を持つ原動機の使用が困難になるためである。一方、これ以下の出力範囲の原動機では、低公害で維持管理コスト等の低減が図られるマイク

ログスタービン(MGT)が注目されているが、現段階ではバイオガスを燃料とするMGT-CGSシステムとしての実例の報告は少なく、その性能および省エネルギー効果がまだ十分に明らかにされているとは言えない。

そこで、本研究では、国内における下水処理施設へのCGSの普及を一層促進することを目指し、様々な温度条件下におけるMGT-CGSの性能について検討し、その特性把握を試みるとともに、使用地域ごとの有効性について明らかにした。特に、年間の平均気温が大きく変動する地域では、施設内の熱需要量も同時に変化するため、バイオガス生成量の過不足が生じやすく、そのため本研究ではその対策として、省エネルギー化が可能なメタンハイドレート(MH)貯蔵法⁽⁷⁾の導入も想定している。そのため、ここでは典型的な下水処理施設の解析モデルを設定して様々な温度条件下における熱需要を算出した上で、各温度条件下における複数台のMGTからなるCGSを構成し、かつMH貯蔵をシステム中に配備すると想定して、システム全体の性能および従来のシステムとの効果の比較について計算推定を行った。

* 原稿受付 2009年10月7日。

*¹ 学生員, 北見工業大学大学院機械システム工学専攻(〒090-8507 北見市公園町165)。

*² 正員, 北見工業大学工学部機械工学科。
E-mail: yama@mail.kitami-it.ac.jp

2. 記号

- A_n : 表面積 [m²]
- C_w : 汚泥比熱 [kJ/(kgK)]
- c_{pc} : 温水定圧比熱 [kJ/(kgK)]
- c_{ph} : 排ガス定圧比熱 [kJ/(kgK)]
- h_{ci} : 圧縮機入口の比エンタルピ [kJ/kg]
- h_{exe} : 排ガスの比エンタルピ [kJ/kg]
- m_{sld} : 流入汚泥流量 [kg/s]
- m_c : 温水流量 [kg/s]
- m_{air} : MGT 内の空気流量 [kg/s]
- m_h : 排ガス流量 [kg/s]
- $m_{b,p}$: バイオガス発生量 [m³/s]
- P_e : 発電出力 [kW]
- P_{cgs} : MGT 全台数からの発電量 [kW]
- P_{gc} : ガス圧縮の所要動力 [kW]
- P_{gs} : ガス貯蔵の所要動力 [kW]
- P_{ic} : 砕氷の所要動力 [kW]
- P_{if} : 製氷の所要動力 [kW]
- P_{MH} : メタンハイドレートの所要動力 [kW]
- Q_{bb} : 残留バイオガス熱量 [kW]
- $Q_{b,hd}$: 残りの熱需要量 [kW]
- Q_{bp} : バイオガス発生量の熱量 [kW]
- Q_{cgs} : MGT 全台数から回収した熱量 [kW]
- Q_{exe} : 排熱量 [kW]
- Q_{chr} : 排熱回収量 [kW]
- Q_{th} : 発酵熱量 [kW]
- Q_{fuel} : 燃料熱量 [kW]
- Q_{hd} : 熱需要量 [kW]
- Q_n : 放熱量 [kW]
- Q_{ub} : 使用し切れない余剰バイオガス熱量 [kW]
- t_a : 発酵温度, 管理棟内温度 [K]
- t_{amb} : 大気温度 [K]
- t_f : 発酵温度 [K]
- t_{sld} : 投入汚泥温度 [K]
- t_{ci} : 温水入口温度 [K]
- t_{co} : 温水出口温度 [K]
- t_{hi} : 排ガス入口温度 [K]
- t_{ho} : 排ガス出口温度 [K]
- U_n : 総括伝熱係数 [kW/(m²K)]
- Unit : 台数
- η_b : ボイラ効率 (0.85 一定と仮定⁹⁾)

3. 解析方法

3・1 温度条件 下水処理施設への CGS の普及を一層促進するためには、国内における各地域の年間平均気温の変化に当てはまる温度条件を設定する必要がある。

- ◇ Kitami (Hokkaido area)
- Sendai (Tohoku area)
- Niigata (Hokuriku & Shin-etsu area)
- ◇ Tokyo (Metropolitan area)
- ◇ Nagoya (Tokai area)
- Osaka (Kinki area)
- Kochi (Shikoku area)
- Yamaguchi (Chugoku area)
- Fukuoka (Kyushu area)
- △ Naha (Okinawa area)

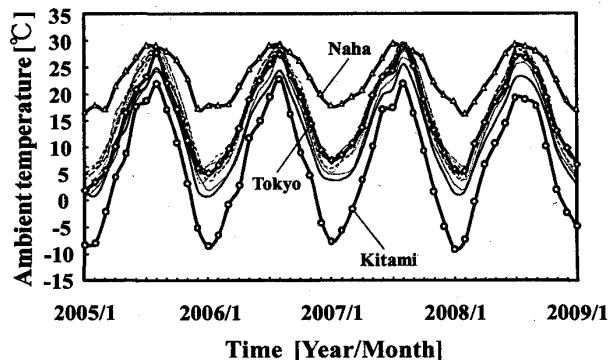


Fig. 1 Average ambient temperature change in each area

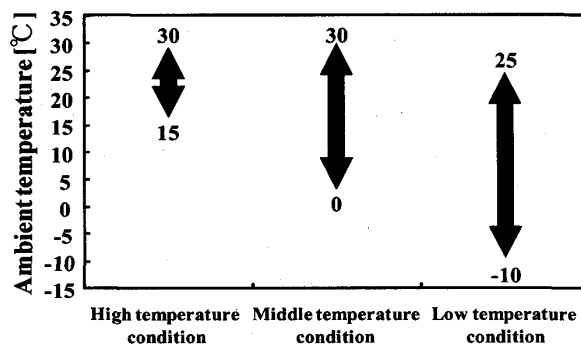


Fig. 2 Temperature ranges of assumed temperature condition

図 1 に、代表的な各地域別の 2005 年から 4 年間の平均気温の変化⁸⁾を示す。図より、この中で北海道東部地方の北見は通年で最低の平均気温を示す一方、沖縄地方の那覇が最高の平均気温を示している。その間の地域では、北から南にかけて次第に気温が上昇するが、東京以南にあっては年間の平均気温の変化が概ね一致していることが分かる。そのためここでは、夏季と冬季での平均気温差により計算対象とする温度条件を便宜的に北海道東部、東京、および那覇の気温域に対応する低温、中温、高温の 3 つに大別した。図 2 に、それら 3 つの温度範囲を示す。前図を基に高温条件では夏季と冬季の平均気温差が低く、30 ~ 15℃とした。また、中温条件は主に冬季の気温が 15℃より下回る場合を想定し、温度範囲が 30 ~ 0℃とし、低温条件では夏季と冬季の平均気温差が大きく、25 ~ -10℃と仮定した。

3・2 下水処理システムの概要 ここでは、いずれの温度条件においても基本的に同一のシステムを使用すると想定し、その解析モデルとした下水処理施設内のシステム概要図を図 3 に示す。施設内の主な熱需要先は、まず第 1 に消化タンク内汚泥の加温、そして次に管理棟

の暖房・給湯であり、これらの熱需要全量を賅うために、発生したバイオガスをCGSに燃料として供給すると仮定している。

なお、気温が低い温度条件では熱需要が高くなり、CGSのみで熱需要全量を賅うことが不可能になる場合、CGS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、夏季には、余剰バイオガスを一時的にMH化して貯蔵し、各所の加温燃料として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。本CGSの解析では、バイオガス発生量に応じた複数台のMGT稼働とこれらの排熱を回収する排熱回収ボイラの利用を前提としている。一方、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施設内の電力需要量を低減させる。

3・3 下水処理施設における熱需要 ここで熱需要の計算方法としては施設内各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てそれぞれ、①汚泥の発酵熱量、②消化タンクからの放熱量および管理棟の暖房・給湯熱量の二つに大別し、以下にその算出方法について説明する。なお、本解析では、日射や放射冷却等周囲大気間との入出熱量は考慮していない。また消化タンクとしては、国内に一般的に普及している円筒型とし、稼働方式は、2タンク2段消化式であり、その概要および基本仕様を、それぞれ図4と表1に示す。なお、ここでは流入汚泥の温度は流入する下水温度と同様と仮定し、その各地域での下水温度を参照した⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾。

① 汚泥の発酵熱量

下水汚泥を効率よく醗酵させるためには、利用する嫌気性メタン発酵菌群の最適温度の点から、30~37℃の中温発酵、または50~55℃の高温発酵の温度範囲を維持する必要がある⁽¹²⁾。ここでは、一般に国内施設で適用されている中温発酵を前提として、低温条件での消化タンク内汚泥温度を39℃一定に維持すると想定し⁽¹³⁾、それ以外の温度条件では37℃一定と仮定し、次式で投入汚泥に必要な発酵熱量 $Q_{f,h}$ を算出した。なお、汚泥の主成分としては水分がそのほとんどを占めているため、発酵熱量を算出する際の汚泥の比熱には水の値と同一と仮定した⁽¹⁴⁾。

$$Q_{f,h} = m_{slid} \cdot C_w \cdot (t_f - t_{slid}) \quad (1)$$

② 消化タンクからの放熱量および管理棟の暖房・給湯熱量

汚泥の発酵熱量の他に、熱需要の大部分は消化タンクからの放熱量および管理棟内の暖房・給湯熱量である。

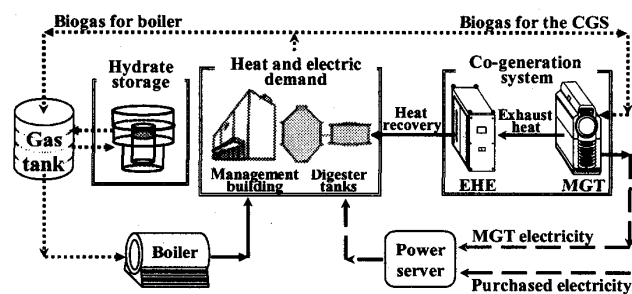


Fig.3 System configuration in the facility

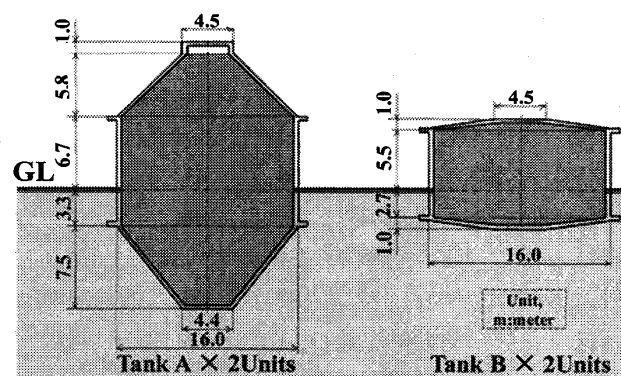


Fig.4 Schematic diagram of the model digester tank

Table 1 Standard specifications of the model digester tank

Population covered	[people]	100000		
		Minimum	Maximum	Average
Wastewater amount	[m ³ /day]	38947	75138	51224
Sludge amount	[m ³ /day]	185	316	246
Biogas production	[m ³ /day]	3414	4954	4257
Sludge inlet temperature				
Kitami	[°C]	9.3	18.6	14.2
Tokyo	[°C]	17.1	27.6	21.7
Naha	[°C]	23.2	29.8	26.8

Table 2 Parameters used to calculate heat demand of facilities

	Overall volume [m ³]	Overall wall area [m ²]	Heat transfer coe. of wall [W/(m ² K)]	Overall window area [m ²]	Heat transfer coe. of window [W/(m ² K)]
Digester tank A	3003	1115	2.47		
Digester tank B	1716	816	2.30		
Admin. building	2773	1998	4.11	82	3.61

これらの熱量は気温の変化に影響され、その値は壁面材料および壁面両端における空気、汚泥、地下の熱伝達に依存し、これらを以下の式(2)で算出した。ここで管理棟内の熱需要量 Q_n は便宜的に通年で23℃以上を維持するために必要な熱量とした。なお、総括伝熱係数 U_n は実在の建造物の材質および寸法から算出し、これらの基本的な値を表2に示す。

$$Q_n = U_n \cdot A_n \cdot (t_a - t_{amb}) \quad (2)$$

3・4 コジェネレーションシステム (CGS) CGS の原動機として MGT を使用することにより、バイオガス発生量が比較的少ない場合や時間経過とともに大きく変動する下水処理施設でも CGS を効率良く稼働することが可能になる。さらに、バイオガス発生量または熱需要量に応じて原動機の稼働台数を変化させるようなシステムも容易に構築でき、原動機の部分負荷時の発電効率低下の影響¹⁵⁾を最小限に抑えることも可能になる。

表3に、本研究で想定する CGS の基本的な仕様を示す。ここでは、ブレイトン開放サイクルを基に MGT の解析を行い、MGT 内の各温度、定圧比熱等の値を算出した。入力値には、実際に MGT を使用している環境条件下での気温データを使用した。ここで、MGT に流入する空気は、圧縮前に発電機を經由して温められるが、その温度上昇範囲は別に行った実験例を参考にして 10~12 °C とした。また、排気タービン通過後、燃焼ガスの温度は 866 K に達して熱交換効率 0.74³⁾の再生機を通過して機外に排出されるとして、その排熱量 Q_{exe} を次式(3)で算出した。

Table 3 Standard specifications of the CGS

Cogeneration system	
MGT	
Rated input fuel heat	126.9 kW
Rated output power	28±1 kW
Rated speed	96,000 rpm
Rated electrical efficiency	0.22 ±0.01
Rated air mass flow	0.31 kg/s
Pressure ratio	3.4
Turbine & compressor efficiency	0.76
Recuperator efficiency	0.74
Turbine exit temperature	866 K
Exhaust temperature	548 K
EHE	
Exhaust heat exchanger	1-Shell and 2-tube exchanger
Effectiveness of exhaust heat exchanger	0.85
Coolant fluid flow rate	0.076 m ³ /min
Coolant input-output temperature	80-90 °C
Heat recovery	54 kW

$$Q_{exe} = m_{air} (h_{exe} - h_{cit}) \quad (3)$$

なお、ガス温度 T が 223~673 K の範囲で、流動ガスが簡単のため空気に等しいと仮定した場合に、比エンタルピ h を以下の式(4)で算出できる¹⁶⁾。

$$h = 4.19 \times \left[-0.789 + 247.56 \left(\frac{T}{1000} \right) - 34.68 \left(\frac{T}{1000} \right)^2 + 55.01 \left(\frac{T}{1000} \right)^3 - 16.70 \left(\frac{T}{1000} \right)^4 \right] \quad (4)$$

なお、排熱回収においては、MGT の排熱量を最大 54 kW を回収できる排熱回収ボイラを使用し、流入温度 80 °C、

流量 0.076 m³/min の温水が得られるとした。その排熱回収量 Q_{chr} は高温流体側、または、低温流体側の温度差から算出し、次式を用いた。

$$Q_{chr} = m_c c_{pc} (t_{c,o} - t_{c,i}) = m_h c_{ph} (t_{h,i} - t_{h,o}) \quad (5)$$

ここで、入力値には MGT からの排ガス温度、流量および定圧比熱を使用し、解析から得られた結果を ϵ -NTU 法¹⁷⁾で評価した。今回の CGS は複数台数の排熱回収ボイラから構成されているため、全台数の排熱回収ボイラからの排熱回収量 Q_{cgs} は次式となる。

$$Q_{cgs} = Q_{chr} \cdot Unit \quad (6)$$

また、MGT では通常発電出力は吸気温度に強く依存して変化し、例えば吸気温度が上昇すると発電量が低下する。これは、吸気温度の上昇により、MGT 内に流入する空気の密度が低下するためであることから、発電出力は実験および仕様データを基に次式で算出した。

$t_{amb} \leq 18^\circ\text{C}$ のとき、

$$P_e = 29 \quad (\text{constant}) \quad (7a)$$

$t_{amb} > 18^\circ\text{C}$ のとき、

$$P_e = -0.2903 \times t_{amb} + 34.52 \quad (7b)$$

したがって、全稼働台数(Unit)からの発電出力は以下の式で得られる。

$$P_{cgs} = P_e \cdot Unit \quad (8)$$

本研究では、複数台の MGT で構成する CGS を前提としていることから、特に MGT の稼働方式として、熱需要量に応じて必要な熱量分だけ排熱回収ボイラから回収できるように MGT の稼働台数を変化させる稼働方式(以下、「台数変化」および、*Change*、と略記)、および各効率を一定に保ちながら必ずしも熱需要には対応させないで稼働台数をほぼ一定にする方式(以下、「一定台数」および、*Constant*、と略記)の二つの稼働方式を使用すると想定し、各温度条件下におけるそれらの効果の違いについても検討した。

3・5 施設内での熱エネルギー利用 施設のバイオガス発生量を熱量に換算して次式(9)で示す。なお、ここでバイオガスの低発熱量 LHV は、バイオガスの 60 vol% を占めるメタンの発熱量に相当する 21.5 MJ/m^3 と仮定した。

$$Q_{b,p} = m_{b,p} \cdot LHV \quad (9)$$

CGS と共にボイラ燃焼を併用するような熱需要が多い地域では、発生したバイオガスの一部は CGS に供給し、また、CGS に供給しない残留のバイオガスについてはボイラで燃焼する。それぞれのバイオガス量に対応する熱需要量 $Q_{b,h,d}$ および残留バイオガス熱量 $Q_{b,b}$ を以下の式(10), (11)で算出した。

$$Q_{b,h,d} = Q_{h,d} - Q_{cgs} \quad (10)$$

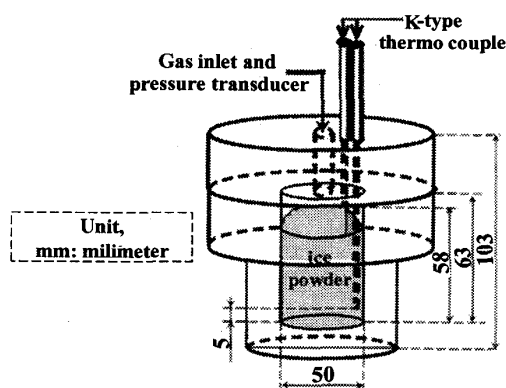
$$Q_{b,b} = Q_{b,p} - Q_{fuel} \cdot Unit \quad (11)$$

また、このシステムではボイラを使用する場合、過去4年間の解析期間を通して、その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、または、残留バイオガスの全量を使い切れるかを確認するために以下の計算を行った。なお、その際、バイオガス全量を使用することを目指し、その値をできるだけ0になるようにMGT稼働台数を変更し、値が0以上になればその分はこのシステムで使用し切れない余剰バイオガス分であることを意味する。ここでは、解析対象とした4年間における月毎のボイラから発生した熱量と残りの熱需要量の差を合計して、年間の差を算出した。ここで、使用し切れなかったバイオガスに相当する熱量 $Q_{u,b}$ は以下の式(12)で表される。

$$Q_{u,b} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n Q_{b,b_i} \times \eta_b - Q_{b,h,d_i} \quad (12)$$

3・6 メタンハイドレート (MH) による貯蔵法の導入

本研究では、夏季に生じたバイオガスの余剰分を冬季へ持越すために、MH 貯蔵法を導入すると想定した。しかし、一般にはバイオガス中のメタンに関して、最短時間で生成される MH の生成速度はほとんど不明のままであるため、本研究では、図5に示す小型の MH 生成用圧力容器を試作して MH を実際に生成してこれ以降の計算に必要な MH 生成時の基礎データ集収を試みることにした。MH 生成のために使用した圧力容器は、SUS316 製で



Experiment

Storage ambient temperature	[°C]	0
Gas composition		Methane
Mean diameter of ice particle	[mm]	1.0~2.0
Ice density	[kg/m ³]	690
Absorption methane volume	[cm ³ -gas/25g-ice] [m ³ /kg]	3646 (0.147)

Fig. 5 Figure regarding experiment and simulation of methane hydrate

Table 4 Production equipments for methane hydrate formation(assumed)

Specification		
Ice crusher		Company A
Power consumption	[kW]	13.6
Ice-crushing capacity	[t/day]	10.0
Ice maker		Company B
Power consumption	[kW]	22.5
Ice-making capacity	[t/day]	4.3
Compressor		Company C
Power consumption	[kW]	7.5
Max output pressure	[MPa]	8.2
Max flow	[m ³ /h]	20.0
Refrigerator		Company D
Room temperature range	[°C]	-5~15
Cooling capacity	[kW]	12.6
Power consumption	[kW]	6.9
COP		1.8

内容積 142 cm^3 を有し、これには圧力計のほかシースタイプの K 型熱電対が 2 本装着されており、ガスと碎水の各温度がリアルタイムに測定できるようにしている。実験では、碎水粒子径 $1.0 \sim 2.0 \text{ mm}$ の碎水 25 g を用意し、これを $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 一定に保持した本圧力容器に入れた後にメタンガスを 6 MPa になるまで封入して低温恒温器内に設置した。これ以降内部のガス圧力および温度、碎水温度の各変化から MH の生成完了時間を判断し、生成速度を計算

した。また、施設でMH貯蔵を行うことから、夏季ではMHを生成し、実験結果を基に貯蔵を行う際に、解離が起らないように温度を0℃、圧力を2.55MPa以上で維持する。一方、冬季ではメタンガスを回収する際にMHを大気圧で取り出し、MHの解離が行われ、再ガス化できると考えられる。ここでは実験結果から、表4に示される実在の製氷機、砕氷機、圧縮機、冷凍機の各所要動力値 P_{if} 、 P_{ic} 、 P_{gc} 、 P_{gs} を基に、MH生成および貯蔵する際に必要な全所要動力 P_{MH} を次式で算出した。

$$P_{MH} = P_{if} + P_{ic} + P_{gc} + P_{gs} \quad (13)$$

4. 解析結果

4.1 稼働方式の違いによる稼働台数変化の比較

図6に各温度条件における一定台数および台数変化の稼働方式のMGT台数を解析期間2004年1月～2008年1月までの4年間の月ごとに示す。なお、(a)低温、(b)中温および(c)高温の各温度条件の結果をそれぞれ図の左側、中央、右側に示している。図より、いずれの温度条件でも概ね一定台数を示す一定台数稼働方式(*Constant*)に対し、台数変化稼働方式(*Change*)の場合には夏季に台数が低下する一方で、冬季に増加する。また、中温条件の場合には、高温条件に比べて、どちらの稼働方式でも稼働するMGTの台数が多い。これは、中温条件の場合に、高温条件より賄うべき熱需要量が多いためである。一方、低温条件の場合には、中温条件に比べて、どちらの稼働方式でも稼働可能なMGTの台数は少ない。これは、低温条件の場合に、中温条件よりも賄うべき熱需要量が増えるがCGSのみでは賄い切れないため、MGTに供給するバイオガス燃料を減らすこととなり、MGTと共にボイラも同時稼働させる必要があるためである。

4.2 各温度条件における施設内での熱エネルギーバランス 次に、前図と同じ解析期間で(a)低温、(b)中温お

よび(c)高温の各温度条件で得られる施設内の熱需要量とバイオガス量(熱量換算値)との関係について調べてみた。その結果を図7に示す。

4.2.1 低温条件の場合 この条件では、夏季と冬季の気温が大幅に変化するため、MH貯蔵を行わない条件では、いずれの稼働方式でも発生したバイオガスの一部を燃料としてCGSに供給し、その際の熱需要の不足分は、残りのバイオガスをボイラで燃焼することで賄っていると想定した。

図7(a)では、上図に熱需要量とCGSから得られる排熱回収量を、また、下図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。したがってこの場合、*short*および*extra*と表記した領域はそれぞれ、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、図の左側の列は一定台数の稼働方式の場合を、一方、右側の列は台数変化の稼働方式を行う場合の結果をそれぞれ示す。

まず、一定台数の稼働方式を行う場合の結果(左図)については、CGSからは通年で250kW程度の排熱量が回収でき、これは施設内の年間平均熱需要量の4割程度を占めることが分かる。また、残留バイオガス熱量と残りの熱需要量との関係を見てみると、季節の変化に応じて施設内では、夏季には残りの熱需要量より残留バイオガス熱量が多く、一方冬季にはその逆の傾向を示し、バイオガスの過不足が生じることが分かる。本解析の結果から、余剰バイオガス量は夏季でのバイオガス発生量の29%を占めることが分かった。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賄えることが予想される。次に、台数変化の稼働方式を行う場合(右図)、CGSからは通年で160～300kW程度の排熱量が回収でき、熱需要に応じて回収できる排熱量が変化していることが分かる。しかし、年間平均ではその値

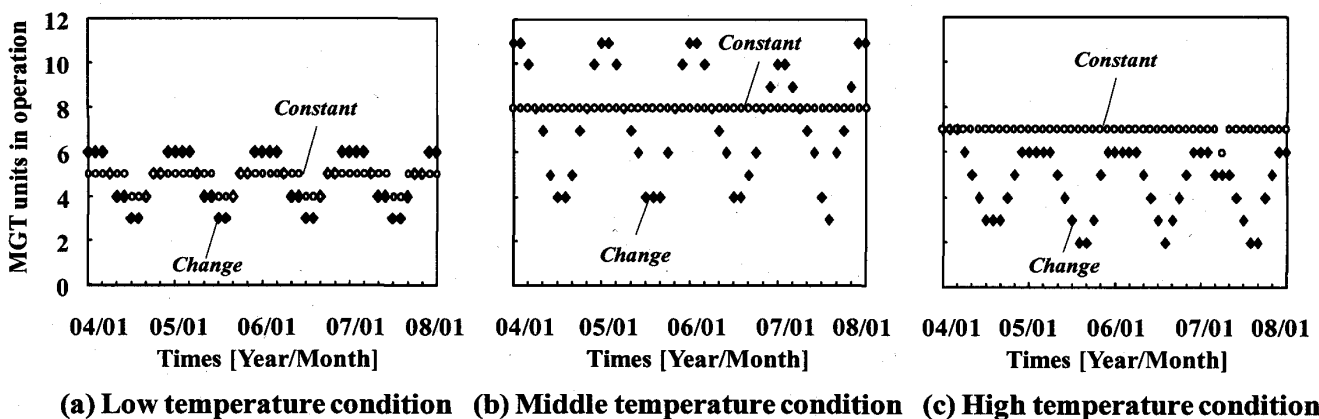


Fig. 6 Monthly operation units of MGT for every temperature condition

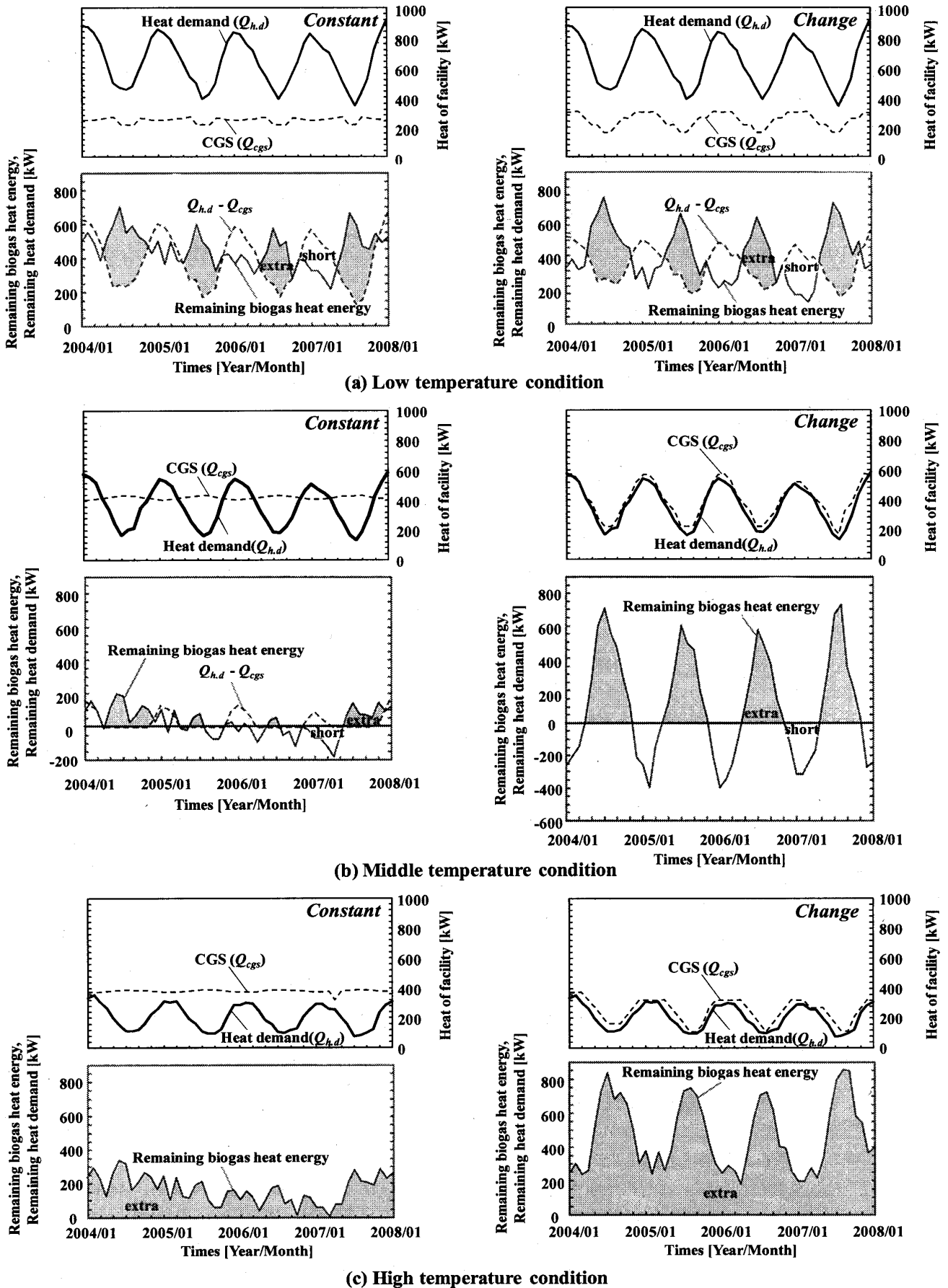


Fig. 7 Relation of heat demand, recovered heat from CGS and biogas heat energy in the facility for every temperature condition

は一定の稼働方式と同様に250kW程度となる。また、一定稼働方式と同様に季節の変化に応じてバイオガスの過不足が生じるがその程度は大きく、本解析では、余剰バイオガス量は夏季でのバイオガス発生量の34%も占めることが分かった。したがって、この稼働方式の場合でも、バイオガス全量で施設の熱需要全量を十分に賄うことが可能なため、CGSにMH貯蔵法を組込む必要がある。このように、低温条件では熱需要が多く、また、気温変化に伴ってその程度も大きく変化するため、どちらの稼働方式でもCGSと共に、ボイラおよびMH貯蔵を施設内に設置することによってバイオガス全量を有効に利用でき、熱需要全体を十分に賄えることが分かる。

4・2・2 中温条件の場合 いずれの稼働方式でも低温条件と同様にMH貯蔵を行わない条件で、発生したバイオガスを燃料としてCGSに供給し、その熱需要の不足分は、残留バイオガスをボイラで燃焼することで賄っていると想定して計算した結果を図7(b)に示す。

まず、一定台数の稼働方式を行う場合の結果(左図)について、CGSからは年間平均430kW程度の排熱量が回収でき、計算の結果、これは施設内の年間平均熱需要量より15%程度増えていることが分かった。夏季ではCGSから回収した熱量は熱需要量より多く、一方、冬季ではCGSから回収した熱量のみでは、熱需要全量を賄えないことが分かる。残りの熱需要量と残留バイオガス熱量を示す下図を見てみると、その値の符号が正または負になっていることが分かる。負の場合は、その月でMGTを稼働するための燃料熱量は発生したバイオガス熱量より少ないため、バイオガスが不足していることを示す。その際、不足分のバイオガス熱量は、残りの熱需要量およびMGTを稼働するために不足する燃料熱量の合計値と等しい。そこで、バイオガスの過不足分を見てみると、その量は少なく、本解析によれば余剰バイオガス量は夏季でのバイオガス発生量の7%を占めることになり、バイオガス全量で施設の熱需要全量を賄うためにはCGSにMH貯蔵システムを組込む必要があると言える。

次に、台数変化の稼働方式を行う場合では、上の図より、CGSからは通年220~570kW程度の排熱量が回収でき、熱需要に応じて回収できる排熱量が変化し、通年における熱需要全量を賄っていることが分かる。また、下の図より、熱需要全量をCGSから回収した熱量のみで賄ったため残りの熱需要がないが、残留バイオガスが正または負の値になっている。これは、MGT稼働台数の変化が大きく、MGTを稼働するためのバイオガス量が夏季にはバイオガス発生量より少なく、一方、冬季にはバイオガス発生量より多く必要になるためである。このように、台数変化の稼働方式の場合でも季節の変化に応じて、施

設ではバイオガスの過不足が生じることが分かる。解析では、余剰バイオガス量は一定の稼働方式より多く、夏季でのバイオガス発生量の46%にも達する。したがって、台数変化の稼働方式でも、バイオガス全量で施設の熱需要全量を十分に賄うためにはCGSにMH貯蔵を組込む必要がある。

このように、低温および中温条件では、CGSと共にMH貯蔵を施設内に設置することによって、バイオガスを有効に利用でき、熱需要全量を賄えることが可能である。

4・2・3 高温条件の場合 次に、年間の気温が高く、夏季と冬季の気温差が少ない高温条件下での解析結果について示す。ここでは、MH貯蔵を行わない条件でいずれの稼働方式でも、発生したバイオガスを燃料としてCGSのみに供給すると想定し、計算した結果を図7(c)に示す。

まず、一定台数の稼働方式の場合(左図)について、CGSからは年間平均380kW程度の排熱量が回収できることが分かり、その内の56%が施設内の熱需要を賄うために使用され、通年では回収できる熱量が熱需要量を上回ることになる。また、熱需要全量をCGSで賄ったため残りの熱需要が生じず、通年で余剰バイオガスが発生することとなり、この値は年間平均のバイオガス発生量の内の16%を占めるに至る。

次に、台数変化の稼働方式を適用する場合(右図)では、CGSからは通年で110~375kW程度の排熱量が回収でき、熱需要に応じて回収できる排熱量が変化し、通年での熱需要全量を賄っていることが分かる。また、一定台数での結果と同様に、通年で余剰バイオガスが発生するが、その量が大きく変化し、冬季ではバイオガス発生量の30%に、また、夏季では66%にまでそれぞれ達する。

このように、高温条件下では低温、中温条件下より熱需要量が少ないため、いずれの稼働方式でも熱需要の全量を賄うことができるが、熱利用への要求度が低い分、使用するバイオガス量も少なくなるため、どちらの稼働方式でも通年で余剰バイオガスが発生することになる。また、年間でバイオガス量に過不足が生じる問題も起きないため、高温条件下ではMH貯蔵法を含む何らかの貯蔵設備をCGSに組込む必要性はないことが分かる。

4・3 MGT-CGSによる性能向上の効果

4・3・1 CGS有無の比較 次に、MGT-CGSを導入することによって、導入しない場合に比べてどの程度の性能向上の効果が得られるかを検討してみた。図8に、MGT-CGSを導入する場合に、各温度条件下における年間の余剰バイオガス量および電力需要量をそれぞれ図の上側および下側に示す。なお、比較のためにCGS導入無し、

すなわち熱供給にボイラしか使用しない従来のシステム (Conventional と表記) の結果も併記した。なお、電力需要は MH 貯蔵を行うための電力量も考慮している。

全体的には、いずれの温度条件下でも従来のシステムに比べて、MGT-CGS を導入することによって、使用し切れない余剰バイオガス量が 42% 以上減少することが分かる。ただし、温度条件が高くなるほどその効果は少なくなることが分かる。このように、いずれの稼働方式でも、MGT-CGS を導入するならば、バイオガスを有効に使用できると言えるが、年間では使用し切れない余剰バイオガスが生じることを考えると、温度条件が高くなるほどその有効性は低下することになる。したがって、余剰バイオガスが生じる温度条件では、MGT-CGS 用燃料とは別に、バイオガス自体の新たな用途を案出するか、MGT より熱電比が低い燃料電池などの複合システムに置き換えるなどの対策を考える必要がある。なお、余剰バイオガスの新たな用途としては、たとえば二酸化炭素の分離・精製を一層進めて地域の都市ガスへの混合も想定し得る。

一方、電力需要の点について見るといずれの温度条件においても、従来のシステムに比べて、MGT-CGS の導入によって、明らかに 16~34% 程度の電力需要の低減効果が得られることが分かる。この内、中温条件では比較的高い性能向上効果を示す。これは、低温条件の場合、中温条件より熱需要への要求度が高く、バイオガスがより少ない割合で CGS に供給されるため、発電量が低くなる一方で、高温条件の場合には、中温の場合よりも熱需要そ

のものが少なく、CGS に供給されるバイオガスも少なくなるため、中温条件より発電量が少なくなる。このように、年間の電力需要の低減量を考えると、いずれの稼働方式でも、MGT-CGS を導入することによって自ら賄うべき電力需要が低減できる点で有効なシステムと言え、温度条件の違いによってその差はより明確に生じることが分かる。

4.3.2 MGT 台数稼働方式の違い 一方、同図 8 で、稼働方式の違いによる使用し切れない余剰バイオガスおよび電力需要の低減効果について見てみると、低温条件では同程度の効果が得られるが、温度条件が高くなるほど稼働方式による効果の違いの差が大きくなり、台数変化より一定台数の稼働方式の方が効果が高い。たとえば高温条件の場合、一定台数の方が使用し切れないバイオガスでさらに 30% 以上低減でき、また、電力需要に対しては 10% 程度までさらに多く賄うことができることが分かる。これは、一定台数の稼働方式を行うことにより、熱需要の必要量以上のバイオガスが CGS に供給されるため、その分使用し切れない余剰バイオガスが少なくなると共に発電量も多くなるためである。また、前節 4.2 で述べたように、一定台数の稼働方式では台数変化に比べて、夏季と冬季におけるバイオガスの過不足量が少ないことから、貯蔵するバイオガス量も少なくなる結果、MH 貯蔵を行うための動力が低減できるためである。

このように、MGT-CGS の稼働方式として、低温条件の場合ならば、いずれの稼働方式でも効果的であると言え

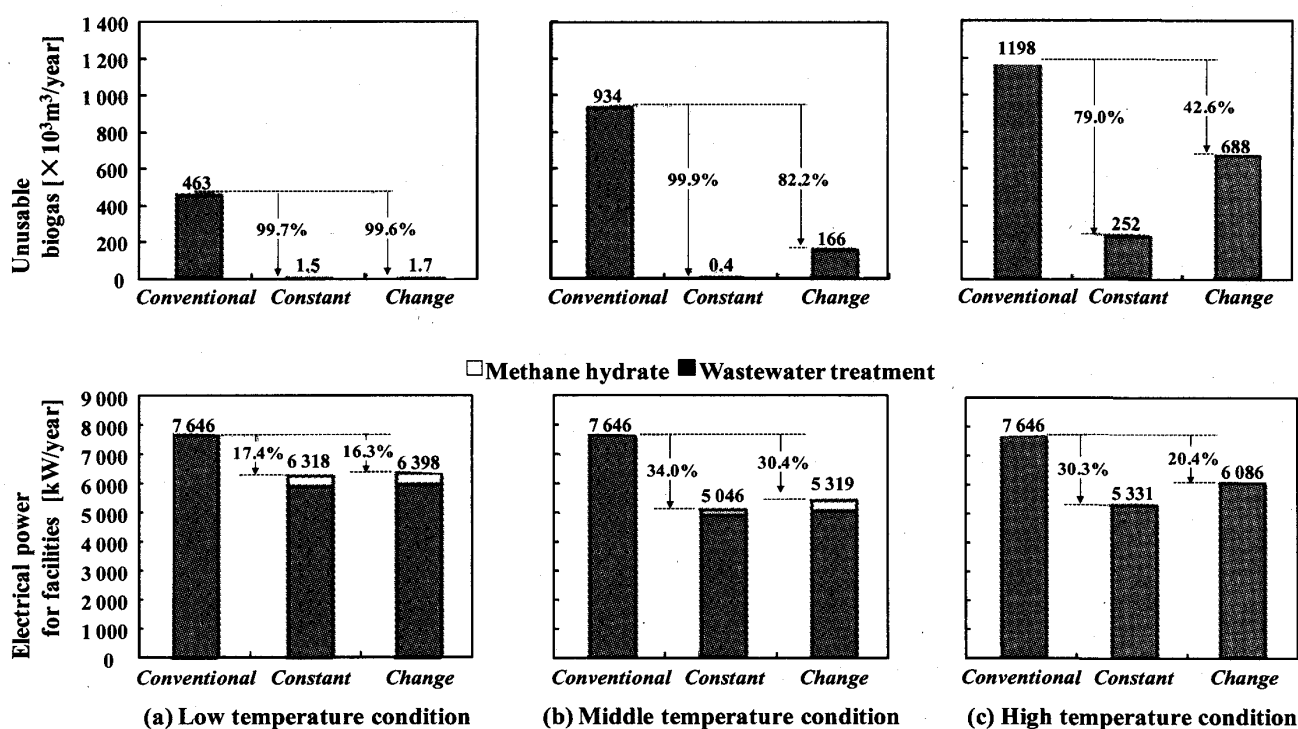


Fig. 8 Impact of MGT-CGS to the facility for every temperature condition

るが、温度条件が高い中温および高温条件では、一定台数の方が有効な稼働方式と言える。

5. 結論

- (1) 低温および中温の各温度条件下では、夏季でのバイオガス発生量の29-34%および7-46%も余剰として生じるため、この分のバイオガスをメタンハイドレート生成・貯蔵することで、バイオガスが不足する冬季に再ガス化して使用しMGT-CGSやボイラ用の各燃料として有効活用できる。
- (2) 下水処理施設でMGT-CGSシステムを導入する場合、バイオガス発生量に応じて稼働できる台数のMGTから得られる加温用排熱回収量で施設の熱需要量全量を賅うことができる。
- (3) MGT-CGSを設置することによって、42%以上の使用し切れない余剰バイオガスおよび16-34%の電力需要の各低減効果が得られ、導入に伴う有効性が明らかである。しかし、温度条件が高くなるほど、使用し切れない余剰バイオガスが多くなり、その低減率は42%程度にまで達する。
- (4) 高温条件では、MGT-CGSの有効性をさらに高めるため、バイオガス自体の新たな用途を案出する必要がある。たとえば地域の都市ガスへの混合も想定できる。
- (5) 低温度条件の場合、稼働方式による効果の違いがあまり見られない一方で、中温および高温条件では、台数変化の稼働方式より一定台数で稼働する方が有効な稼働方式と言える。たとえば、高温条件では一定台数の稼働方式の方が台数変化の方式に比べて、30%以上のバイオガス量の有効利用が可能となり、さらに10%程度より多くの電力需要を賅える。
- (3) 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, JSME International Journal*, Vol.1, No.3, (2007), pp.199-210.
- (4) Bruno, J.C., Victor, O.L., Coronas, A., Integration of Absorption Cooling Systems into Micro Gas Turbine Trigenation Systems Using Biogas, *Applied Energy, Science Direct Journal*, 86, (2009), pp. 837-847.
- (5) Kataoka, T., Nakajima, T., Nakagawa, T., Yuasa, S., Combustion Characteristics of CO₂ Mixture Methane & A Microturbine Cogeneration System Utilizing Sewage Digester Gas, *Ebara Engineering Review Journal*, No.218, (2008), pp. 8-15.
- (6) Japan Institute of Wastewater Engineering Technology, The Study of Digester Gas Cogeneration System Using Micro Gas Turbine, (2004), <http://www.jiwet.jp/>
- (7) Firdaus, B., Yamada, T., Nakanishi, K., Performance analysis of Cogeneration System at Sewage Treatment Plant of Cold Region, *Proceedings of JSME Annual Conference*, Vol. 3, No. 09-1, (2009), pp.153-154.
- (8) Japan Meteorological Agency, Meteorological statistic information, <http://www.jma.go.jp/>
- (9) Kitami City Sewerage Management Office, Annual Report of Sewer Maintenance, (2004-2008).
- (10) Y., Nakayama, M., Kanda, T., Kinouchi, Research regarding water and heat transfer in urban sewage system based on water temperature observation in the sewage treatment facility, *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources*, Vol.1, No.20, (2007), pp.25-33.
- (11) Okinawa prefecture Sewerage Management Office, Annual Report of Sewer Maintenance, (2007), <http://www.pref.okinawa.jp/gekan/>
- (12) Environmental technology society, Guide book for treatment of sewage, industrial liquid waste & sludge, (1979), p. 500.
- (13) Naing, S., Yamada, T., Nakanishi, K., Renewable Fuel Utilization in a Cogeneration Arrangement with Hydrate Storage Method, *Journal of Power and Energy System, JSME International Journal*, Vol.1, No.3, (2007), pp. 239-250.
- (14) Metcalf & Eddy, Inc, Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, Fourth Edition, McGraw-Hill, (2003), p. 1525.
- (15) N., Zhang, R., Cai., Analytical Solutions and Typical Characteristics of Part Load Performances of Single Shaft Gas Turbine and Its Cogeneration, *Energy Conversion & Management, Science Direct Journal*, 43, (2002), pp. 1323-1337.
- (16) Sunobe, K., Fujie, K., Gas Turbine, Kyoritsu Publishing Co. Ltd, (1967), p. 27.
- (17) Frank, P., I., David, P., D., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Fifth Edition, John Wiley & Sons, Inc, (2002), pp. 659-668.

文献

- (1) The Way of Source Committee, Utilization of Sewage Sludge, Current Situation and Challenges of Utilizing Sewage Sludge Sources, *Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism*, (2006), <http://www.mlit.go.jp/>
- (2) Kenichiro, T., Yagishita, T., Sawayama, S., Current Status of Biogas Plants in Japan, *Journal of The Japan Institute of Energy*, 84, (2005), pp. 537-543.