

下水処理施設で稼働するバイオガスコジェネレーションシステムの性能最適化*

Firdaus BASRAWI^{*1}, 山田貴延^{*2}, 中西喜美雄^{*2}

Optimization of System Performance on a Biogas Cogeneration in a Sewage Treatment Center

Firdaus BASRAWI, Takanobu YAMADA^{*2} and Kimio NAKANISHI^{*2} Kitami Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering

Koen-cho 165, Kitami, Hokkaido, 090-8507 Japan

An efficient configuration method of a biogas-fuelled cogeneration system (CGS) in a sewage treatment center was investigated. The efficient configuration was clarified by classifying a relationship between exhaust heat recovery efficiency (η_{ehr}) of a micro gas turbine CGS, and the ratio of average heat demand to biogas production of the facility ($Q_{h,d}/Q_{b,p}$). It was found that on the point of view of biogas energy recovery, reduction of unutilized biogas and electrical power demand efficiencies, the most efficient CGS was obtained under $Q_{h,d}/Q_{b,p} = \eta_{ehr}$ condition. If a CGS with lower η_{ehr} such as a fuel cell is used under $Q_{h,d}/Q_{b,p} < \eta_{ehr}$ condition, or a CGS with higher η_{ehr} such as a steam turbine is used under $Q_{h,d}/Q_{b,p} > \eta_{ehr}$ condition, more efficient system can be obtained. On the other hand, suggestion for more efficient system when η_{ehr} cannot be conformed to the $Q_{h,d}/Q_{b,p}$ value was also presented.

Key Words : Biomass, Biogas, Cogeneration System, Micro Gas Turbine, Sewage Treatment Center

1. 結 言

エネルギー資源枯渇および環境問題が叫ばれている昨今, 再生エネルギーとしてのバイオマスを効率高く利用する必要性に迫られている. 国内の廃棄物系および未利用系バイオマスの年間発生量の内, 家畜排せつ物の次に多い下水汚泥が 7500 万トンとなり, 全体発生量の約 35% を占めている⁽¹⁾. そのため, 大量の下水汚泥の効率的な有効利用法を検討する必要がある. 下水処理施設の場合, 一般にメタン発酵と管理棟の暖房・給湯の熱量および下水を処理するために電力確保が重要となる. 本研究では, 施設の熱および電力需要を賄いながら下水汚泥から発生したバイオガスを有効に利用できるシステムとして, 分散配置型コジェネレーションシステム(CGS)に注目し, とくに, 余剰なくバイオガス全量を効率高く利用可能な CGS 構成方法について検討した.

図 1 に, 下水処理施設で CGS を導入した場合の主なエネルギーの流れを示す. 下水処理施設では, 処理プロセスの中でポンプやコンプレッサ等種々の機器が使用され, 一般に熱需要より電力需要の方が高くなる. 仮に, メタン発酵および管理棟の熱需要 $Q_{h,d}$ および電力需要 P_{ed} はそれぞれ 45 および 100 とし, また, 発生したバイオガスの熱量 $Q_{b,p}$ を 100 とした場合, もし, CGS でバイオガス全量が消費され, そこで得られた熱量が施設の熱需要全量分を賄うことができれば, エネルギー利用上では損失なく最適なシステムが得られる. 本研究では, 施設内の特性値と見なせる年間平均熱需要量と年間平均バイオガス発生量の各熱量の比, $Q_{h,d}/Q_{b,p}$ および CGS の排熱性能の指標となる排熱回収効率 η_{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 について検討してみた. そのため, 施設の $Q_{h,d}/Q_{b,p}$ 値がマイクロガスタービンコジェネレーションシステム(MGT-CGS)の η_{ehr} に対して, 同程度($Q_{h,d}/Q_{b,p} = \eta_{ehr}$), より大きい($Q_{h,d}/Q_{b,p} > \eta_{ehr}$), およびより小さい($Q_{h,d}/Q_{b,p} < \eta_{ehr}$)条件となるような各場合での利用を想定し性能比較を行った.

* 原稿受付 2011 年 9 月 9 日

^{*1} 正員, Universiti Malaysia Pahang (Lebuhraya Tun Razak, 26300 Gambang, Kuantan Pahang, Malaysia)^{*2} 正員, 北見工業大学工学部 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

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



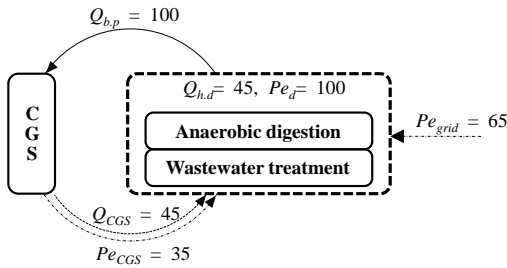


Fig. 1 Energy flow in the sewage treatment center.

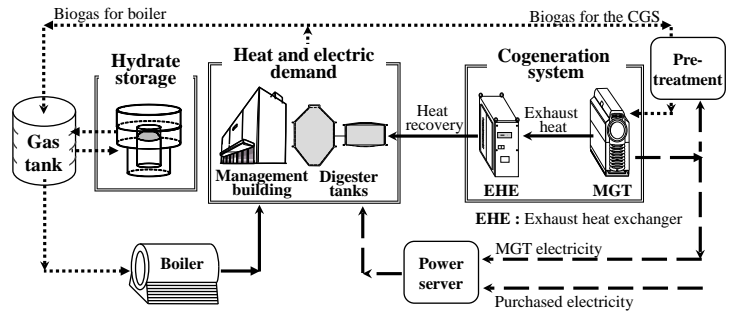


Fig. 2 Energy system configuration of the sewage treatment center.

2. 解析方法

2・1 下水処理施設内のシステムの概要

解析モデルとした下水処理施設内のシステムの概要を図2に示す. ここで想定した下水処理施設は, 都市人口10万人程度から排出される汚泥を処理して, 約51000m³/monthのバイオガスが発生できる規模のものとした. 上述したように施設内の主な熱需要先は, 消化タンク内汚泥の加温および管理棟の暖房・給湯であり, これらを賅うために燃料として発生バイオガスをCGSに供給すると仮定した. なお, 熱需要の用途が多い施設でCGSのみで熱需要全量を賅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すると仮定した. さらに, バイオガス生成量に過不足が生じる場合では, システム内にメタンハイドレート(MH)貯蔵の導入を想定し, 夏季の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^{(2)~(3)}. また, CGSから得られる電力で施設内の電力需要の一部を補い, 系統連系によって電力需要量を低減させるとした. ここでのMGT-CGSは, 30kW級のMGTと最大55kWの排熱を回収できる排熱回収ボイラを使用して, 複数台のMGT-CGSを消化タンクおよび管理棟に分散して配置する状態を想定した⁽⁴⁾. 施設の熱需要量を算出するためには以前の研究⁽⁵⁾で検討した施設内建造物の総括伝熱係数を使用し, 各所の最適施設温度と外気温度との温度差から熱需要量を算出した. $Q_{h,d}/Q_{b,p}$ 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. この際, $Q_{h,d}/Q_{b,p} > \eta_{ehr}$ の場合には北海道東部地域を, そして $Q_{h,d}/Q_{b,p} < \eta_{ehr}$ の場合には東京および沖縄での利用を想定した.

2・2 CGSの評価法

CGSの導入メリットを評価する値として, 未利用の余剰バイオガスの低減率 $\eta_{u,b,red}$ および電力需要の低減率 $\eta_{Pe,red}$ を以下の式(1)および(2)により計算した. ここで, 比較の基準としたのは, 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の場合とした.

$$\eta_{u,b,red} = \frac{Q_{fuel,CGS} + Q_{fuel,b}}{Q_{b,p}}, \quad (1)$$

$$\eta_{Pe,red} = \frac{Pe_{CGS} - Pe_{MH}}{Pe_d}, \quad (2)$$

ここで, Pe_{CGS} [kW], $Q_{fuel,CGS}$ [kW], $Q_{fuel,b}$ [kW] および Pe_{MH} [kW] は, それぞれCGSの発電量, 燃料消費量, ボイラの燃料消費量およびMH生成のための電力需要である. また, その他, 最終的に設置したエネルギー供給システムによりバイオガスエネルギーをどの程度回収できるかを検討するためにバイオガスエネルギー回収効率 $\eta_{b,e,r}$ を定義し, 式(3)により算出した. なお, Pe_{red} [kW], Q_{CGS} [kW], Q_b [kW] および $Q_{u,CGS}$ [kW] はそれぞれ電力需要低減量, CGSからの熱量, ボイラからの熱量, および利用できないCGSからの熱量を示す.

$$\eta_{b,e,r} = \frac{Pe_{red} + (Q_{CGS} + Q_b + Q_{u,CGS})}{Q_{b,p}}, \quad (3)$$

3. 解析結果

3.1 処理施設でのエネルギーバランス

本解析においては、 $Q_{h,d}/Q_{b,p}$ 値には $Q_{h,d}/Q_{b,p} = \eta_{ehr}$ の場合には寒冷地の基準値とした 0.48 に、一方、 $Q_{h,d}/Q_{b,p} < \eta_{ehr}$ の場合では 0.35 および 0.20 に、そして $Q_{h,d}/Q_{b,p} > \eta_{ehr}$ の場合では 0.60 の各例について以後の計算を行った。

図 3 は、 $Q_{h,d}/Q_{b,p} (=0.48) = \eta_{ehr}$ の場合のエネルギーバランスであり夏季の場合の結果を図 3(a) に、冬季の場合は図 3(b) に示す。図より、夏季ではバイオガスの大部分は CGS に消費され熱需要全量を賅えることが分かる。また、残りのバイオガスは MH 貯蔵され、冬季に持ち越している。一方で、図 3(b) より冬季では貯蔵したバイオガスを

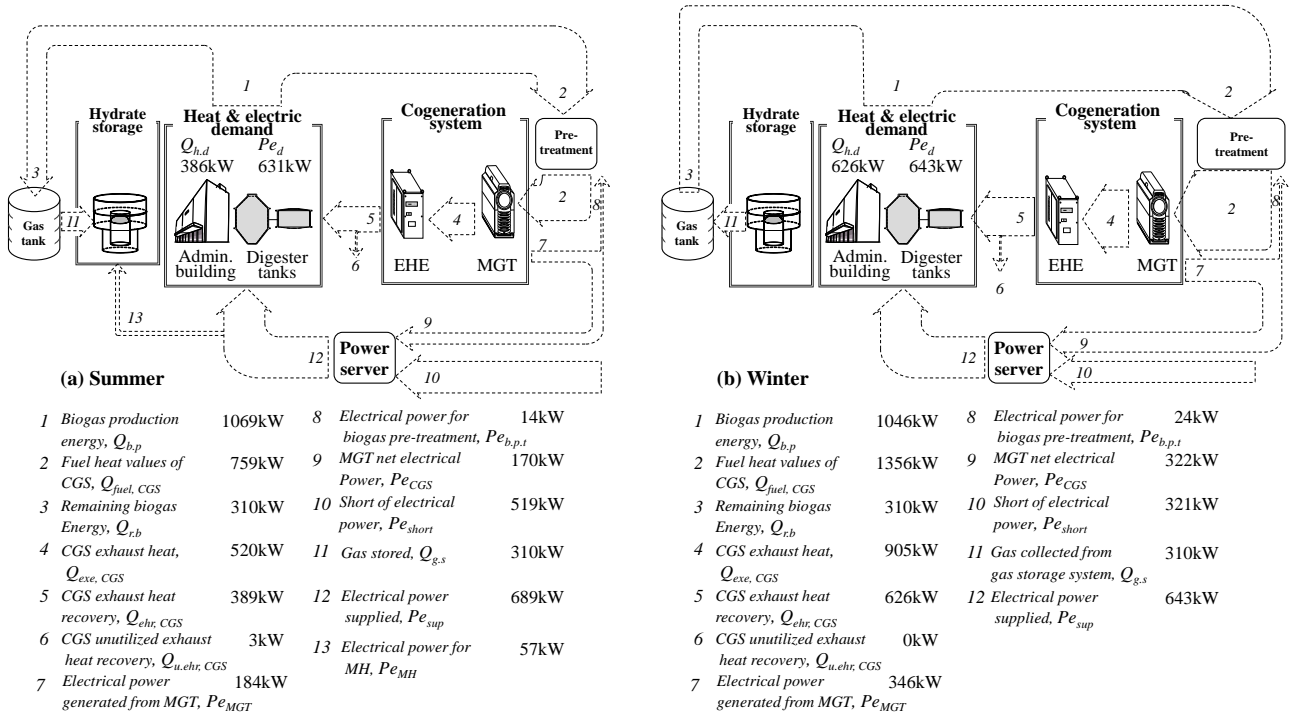


Fig. 3 Energy balance under the $Q_{h,d}/Q_{b,p} (=0.48) = \eta_{ehr}$ condition.

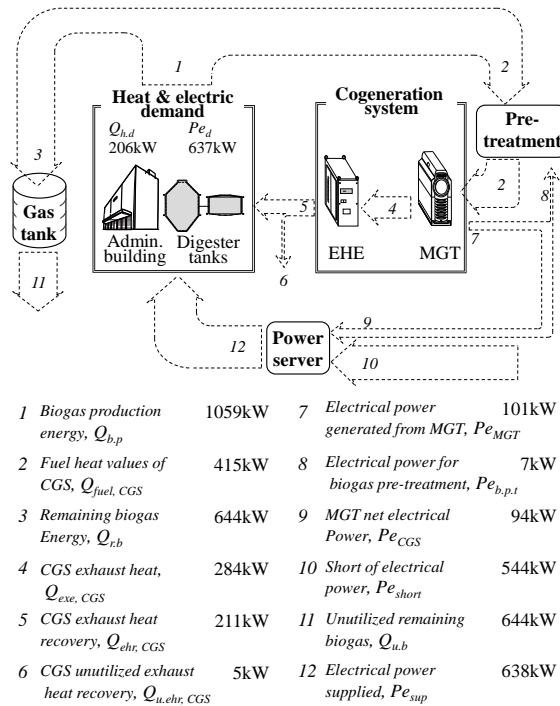


Fig. 4 Annual energy balance under the $Q_{h,d}/Q_{b,p} (=0.20) < \eta_{ehr}$ condition.

含めて、バイオガス全量をCGSにより消費されることで熱需要全量を賄えることが分かる。したがって、この場合では、年間を通してバイオガス全量を有効利用できることが分かる。 $Q_{h,d}/Q_{b,p}(=0.20, 0.35) < \eta_{ehr}$ の場合のエネルギーバランスの結果は同様な傾向であることを確認できたため、ここでは $Q_{h,d}/Q_{b,p}(=0.20) < \eta_{ehr}$ の結果のみを図4に示す。この場合では、年間での夏季および冬季の結果があまり変わらなかったため、図に書かれている値は年間平均値を示す。図より、発生したバイオガスで熱需要全量を賄えることが分かる。しかし、バイオガス発生量1059kWの61%にも達する量664kWは未利用のままである。したがって、この場合では、バイオガス全量を利用できないため、余剰分の利用法を別に考える必要がある。図5は $Q_{h,d}/Q_{b,p}(=0.60) > \eta_{ehr}$ の条件におけるエネルギーバランスであり、夏季の場合の結果を図5(a)に、また、冬季の場合の結果を図5(b)にそれぞれ示す。この条件では熱需要が高いため、夏季および冬季においてもCGSと共にボイラを同時稼働する必要がある。また、冬季での熱需要が夏季より高いため、夏季のバイオガスの一部を貯蔵して冬季に再活用する必要がある。

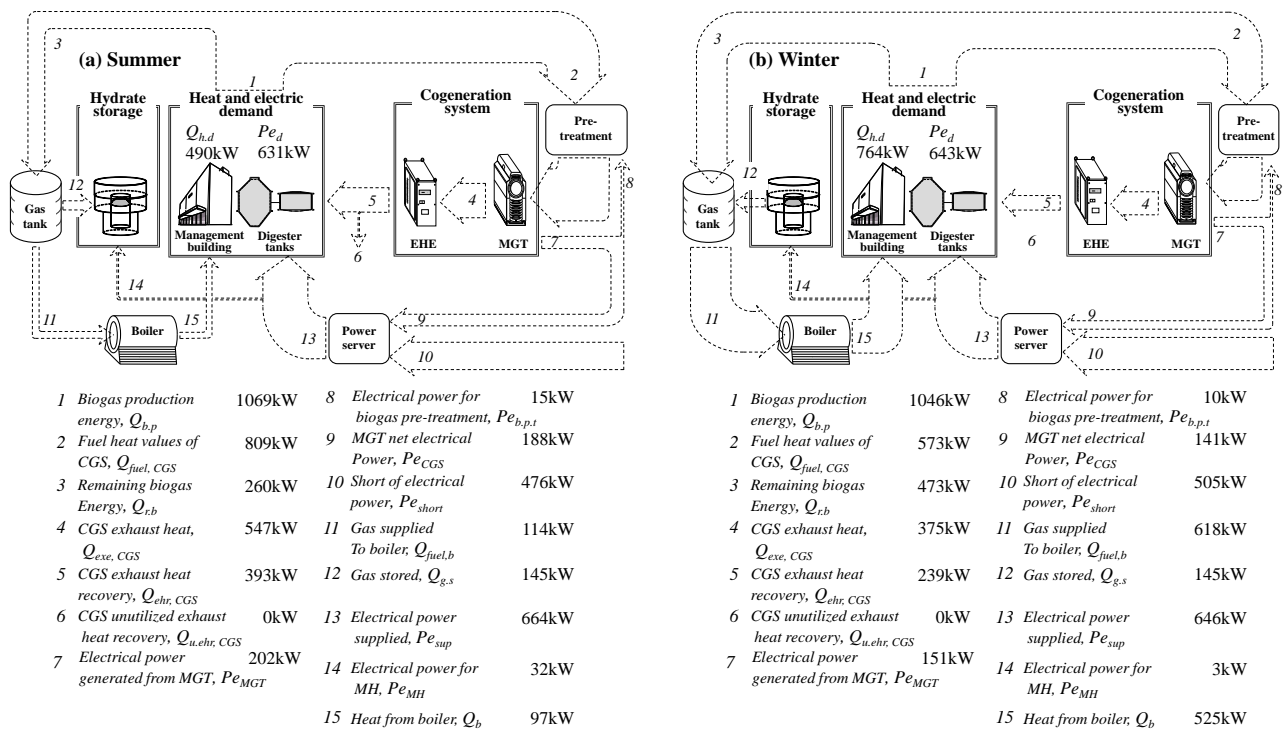


Fig. 5 Energy balance under the $Q_{h,d}/Q_{b,p}(=0.60) > \eta_{ehr}$ condition.

3・2 処理施設の $Q_{h,d}/Q_{b,p}$ 値と原動機の η_{ehr} との関係

図6に、各場合における未利用の余剰バイオガスの低減率 $\eta_{u,b,red}$ 、電力需要の低減率 $\eta_{Pe,red}$ およびバイオガスエネルギー回収効率 $\eta_{b,e,r}$ のバランスを示す。図より、 $Q_{h,d}/Q_{b,p}(=0.48) = \eta_{ehr}$ の場合、他の場合に比べて余剰バイオガスの低減率、電力需要の低減率およびバイオガスエネルギー回収効率の面から、最も効果的なCGS構成が得られることが明らかである。この場合、 $\eta_{u,b,red}=0.99$ 、 $\eta_{b,e,r}=0.69$ となり最大の電力需要低減効果 $\eta_{Pe,red}=0.34$ に達する。

一方、 $Q_{h,d}/Q_{b,p} > \eta_{ehr}$ の場合、 $\eta_{u,b,red}=0.99$ 、 $\eta_{b,e,r}=0.74$ となり、 $Q_{h,d}/Q_{b,p} = \eta_{ehr}$ の場合と同程度の性能を示す。しかし、 $\eta_{Pe,red}=0.16$ となり、 $Q_{h,d}/Q_{b,p} = \eta_{ehr}$ 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。

また、 $Q_{h,d}/Q_{b,p}(=0.20, 0.35) < \eta_{ehr}$ の場合、それぞれ $\eta_{u,b,red}=0.39$ および 0.73 、 $\eta_{b,e,r}=0.28$ および 0.52 、 $\eta_{Pe,red}=0.15$ および 0.27 となり、いずれの点からみても $Q_{h,d}/Q_{b,p}(=0.48) = \eta_{ehr}$ の場合よりも各効果が低いことが分かる。この条件では、熱需要量が少ないことでCGSによるバイオガスの利用が抑えられるため、未利用の余剰バイオガスおよび電力需要の低減効果が低くなる。したがって、仮に $Q_{h,d}/Q_{b,p}$ 値が η_{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 η_{ehr} を施設の $Q_{h,d}/Q_{b,p}$ 値にできるだけ等しく設定できるならば、 $Q_{h,d}/Q_{b,p} = \eta_{ehr}$ 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。そこで次に、 $Q_{h,d}/Q_{b,p}$ 値に応じてどのようなシステム構成が望ましいか検討してみた。

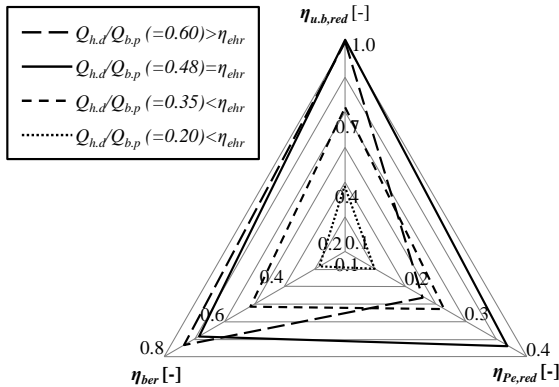


Fig. 6 Effectiveness of the CGS for all assumed conditions.

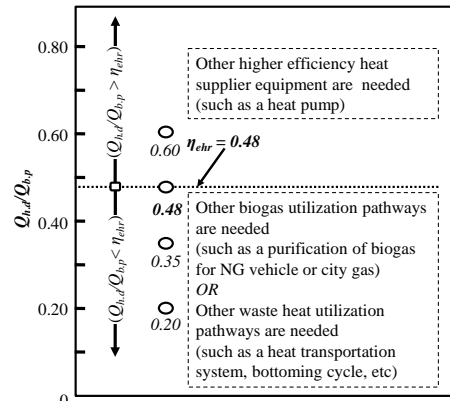


Fig. 7 Optimization methods of the CGS under $Q_{h,d}/Q_{b,p} < \eta_{ehr}$ and $Q_{h,d}/Q_{b,p} > \eta_{ehr}$ conditions.

3.3 $Q_{h,d}/Q_{b,p}$ 値に対応するシステム構成とその最適化

$Q_{h,d}/Q_{b,p} > \eta_{ehr}$ の場合、取りうる η_{ehr} の値は大規模な CGS の値の範囲に限られるが、たとえば CGS の原動機として MGT の代わりに熱電比が高くなる蒸気タービン等の使用が可能であれば、より高い効果が期待できる。また $Q_{h,d}/Q_{b,p} < \eta_{ehr}$ の場合、CGS の原動機に MGT の代わりに熱電比が低くなる燃料電池等の使用が可能であれば、バイオガス全量を CGS で効率高く利用することが期待できる。

一方、CGS を導入する際にコストや構成規模などの点から最適な原動機を選択してシステムを構成できない場合、どのような補助機器を CGS に組み込めば、より高効率なエネルギーシステムが得られるかを図 7 にまとめてみた。図中、 $Q_{h,d}/Q_{b,p} > \eta_{ehr}$ の場合には熱需要が高いため、熱を効率高く供給できるシステムが必要となる。たとえば、ボイラの代わりにヒートポンプの使用も可能である。一方で、 $Q_{h,d}/Q_{b,p} < \eta_{ehr}$ の場合には使用しきれないバイオガスが多いため、バイオガスそのままの利用か、またはこれを燃焼させてからの熱利用等を考える必要がある。その場合、たとえば都市ガスや天然ガス車用燃料への活用が考えられる。他にもバイオガス全量で発電を行い、余った熱を施設外に移送して冷暖房に使用するかボトムリングサイクルを組み合わせる等の対策も考えられる。

4. 結 語

様々な下水処理施設において発生したバイオガスを最大限有効利用するためには、CGS の排熱回収効率 η_{ehr} と施設内の特性値となる年間平均熱需要量と年間平均バイオガス発生量の熱量との比 $Q_{h,d}/Q_{b,p}$ 値との間の関係を調べる必要がある。また、施設で CGS を構成する際、CGS の η_{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できる CGS が得られる。その構成機器としては $Q_{h,d}/Q_{b,p} > \eta_{ehr}$ の場合には、MGT の代わりに熱電比がより高い原動機を、一方、 $Q_{h,d}/Q_{b,p} < \eta_{ehr}$ の場合には、逆に熱電比がより低い原動機を使用することで、バイオガス全量を効率高く利用することが期待できる。

文 献

- (1) 農林水産省, http://www.maff.go.jp/j/biomass/pdf/riyo_zyokyo.pdf (参照日 2011 年 08 月 23 日)
- (2) フィルダウス バスライ, 山田貴延, 中西喜美雄, “寒冷条件下の下水処理施設におけるコジェネレーションシステムの性能評価”, 2009 年度日本機械学会年次大会, Vol. 3, No. 09-1 (2009), pp. 153-154.
- (3) 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 B 編, Vol. 76, No. 770 (2010), pp. 1661-1670.
- (4) Basrawi, F., Yamada, T., Nakanishi, K., “Effect of ambient temperature on the performance of micro gas turbine with cogeneration system in cold region”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 6-7 (2010), pp.1058-1067.
- (5) Basrawi, F., Yamada, T., Nakanishi, K., “Analysis of the Performance of a Biogas Cogeneration System in a Sewage Treatment Plant in a Cold Region”, *Journal of Environment and Engineering*, Vol. 6, No. 3(2011), pp.512-526.