

研究紹介

# 下水処理施設で稼働する バイオガスコージェネレーション システムの最適構成法

北見工業大学 工学部 機械工学科 教授 山田 貴延

キーワード：バイオマス、コージェネレーション、消化ガス発電、下水処理、メタン発酵、排熱利用

## 1. はじめに

2011年突然の大災害に見舞われた我が国にとって、効率高くエネルギーを生み出ししかも永続的にこれを利用していくことは、将来を担う次の世代に残すべき大

きな責務の1つである。そんな中、世界の中で極めて限られたエネルギー事情を抱えた我が国では、再生可能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。2010年公表されたバイオマス活用推進基本計画<sup>(1)</sup>には、図1のとおり、各種別年間発生量では廃棄物系および未利用系バイオマスの年間発

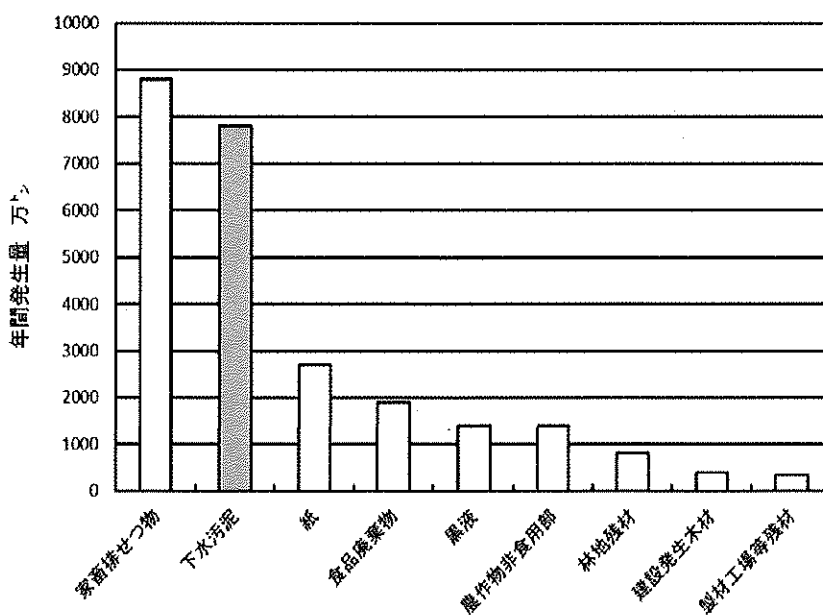


図1 バイオマス活用推進基本計画で示されている各種別年間発生量 (2010年)<sup>(1)</sup>

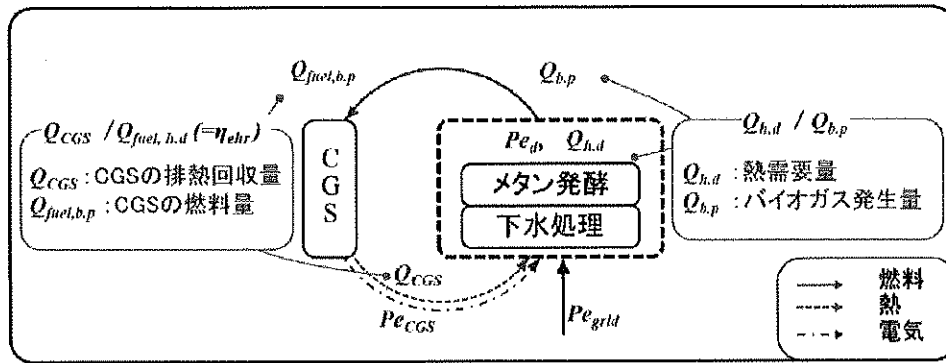


図2 下水処理施設での主なエネルギーの流れ

生量の内、家畜排せつ物について下水汚泥が7800万トンと多くを占めていることが示されている。このとき、大量の汚泥を処理する下水処理施設にあっては、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多くの所要電力の確保が重要となる。中でも国内で冬期間の下水汚泥消化温度を中温または高温条件で維持しなければならない寒冷地においては、とくに電力の確保だけでなく消化槽加温のためにより多くの熱エネルギーを割かねばならない気温条件等への配慮<sup>(2)(3)</sup>が必要になってくる。

そこで本研究では、稼働システムの中でも投入エネルギー量に対して排熱量の割合が高くなるマイクロガスタービン (MGT) を主動力源とする分散配置型コージェネレーションシステム (CGS) に注目し、下水処理施設で発生したバイオガス全量を余剰なくかつ効率高く利用できるCGS構成法の要件について検討した。

## 2. 最適なCGS稼働要件の考え方

図2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多くの電力消費を伴うことから、一般に熱需要より電力需要を満たす方により多くの期待がかけられる。それとともに、メタン発酵過程に必要な消化タンクへの加温熱量は、所要の熱エネルギー全体の中で多くを占め、寒冷地域での適用ほど一層重要となる<sup>(4)(5)</sup>。いま仮に、CGSでバイオガス全量が消費でき、そこで得られた熱量が施設の熱需要全量分を満たすことが可能となれば、外部からのエネルギーの使用を最小限にする最適なシステム構成が得られるものと思われる。そこで、このときの最適条件について客観的な妥当性を数値で示すため、本研究では、施設内でコージェネレーションを導入する際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 (熱量換算値) $Q_{b,p}$ の比、 $Q_{h,d}/Q_{b,p}$ およびCGSの排熱性能を表しうる排熱回収効率 $\eta_{wh}$ との間の大小関係に着目し、効率高く施設内で発生したバイオガス全量を利用できるCGSの構成条件について検討した。すなわち、施設で発生するバイオガス全量が熱エネルギーに変換される際に余剰なく利用できる条件を見極めるとともに、さらに、これ以外のケースにあってはどのようにシステム構築す

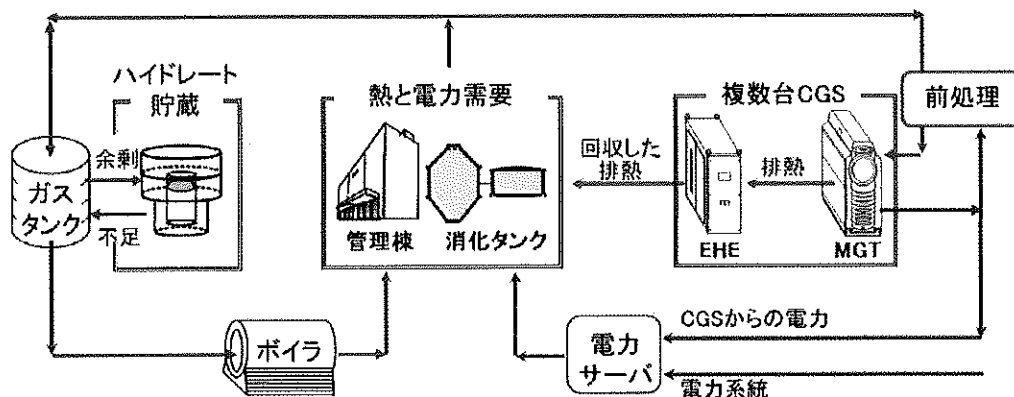


図3 解析を行う際の下水処理施設における構成機器の配置

表1 マイクロガスタービンの基本性能仕様

定格回転数	96,000 rpm
発電出力	28±2 kW
発電効率	26±2 %

表2 排熱回収機の基本性能仕様

熱交換形式	管胴形熱交換機
温度交換効率	80 %
温水流入温度	80~90 °C
排熱回収量	55 kW
排熱回収効率	0.48

表3 消化タンクの伝熱仕様 (2種)

全表面積	1115, 816 m <sup>2</sup>
総括熱伝達率	2.47, 2.30 W/m <sup>2</sup> K
発酵温度条件	37 °C

表4 施設管理棟の伝熱仕様

全表面積	1998 m <sup>2</sup>
総括熱伝達率	4.11 W/m <sup>2</sup> K

るべきかを探った。

### 3. 下水処理施設内のシステム概要と解析方法

解析対象とした下水処理施設内のコジェネレーションシステムの概要について図3に示す。また、その中心的役割を担うマイクロガスタービン発電機 (MGT) および排熱回収機 (EHE) の各基本性能を表1および表2に示す。このときのそれぞれの稼働台数は、発生したバイオガス量に応じて複数台の台数制御で変化させるとした。なお、解析では、都市人口10万人程度の地域から下水処理を施して、月平均14万m<sup>3</sup>程度のバイオガスが発生する実際例を基に計算を進めた。この基準によると、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、これらを補うために発生バイオガスをそのままCGSに供給すると仮定した。それぞれの基本的な伝熱計算初期値を表3および表4に示す。実際には、過去5年分のMGT-CGS実測データを用いて、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。ただし、想定したCGSのみで熱需要全量を満たせない場合には、加温用ボイラの利用も想定した。さらに、バイオガス生成量に過不足が生じる場合には、本解析ではシステム内にメタンハイドレート (MH) 貯蔵設備の導入を新規に想定し、夏期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期にこれを解離再生して利用できるものとした<sup>(9)(10)</sup>。CGSから得られる電力によっては、基本的に施設内の電力需要の一部を補う系統連系によって電力需要量を低減させるとした。 $Q_{hd}/Q_{hp}$ 値が異なる施設の特長を得るために、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。ここで1つの目安として、 $Q_{hd}/Q_{hp} > \eta_{chr}$ の場合には北海道東部の寒冷地域での利用を、また

$Q_{hd}/Q_{hp} < \eta_{chr}$ の場合にはおよそ東京以南の温暖地域での利用を想定した。

### 4. 解析結果

#### 4.1 各条件で異なる処理施設でのエネルギーバランス

本解析においては、 $Q_{hd}/Q_{hp}$ 値について使用した排熱回収機の排熱回収効率として実測データから算出した $\eta_{chr}=0.48$ を基準とする $Q_{hd}/Q_{hp}=\eta_{chr}$ の場合のほか、 $Q_{hd}/Q_{hp} < \eta_{chr}$ の場合では0.20および0.35の条件に、そして $Q_{hd}/Q_{hp} > \eta_{chr}$ の場合では0.60の条件に値を変化させ、各場合について施設内でのエネルギー入出力のバランスを調べた。

図4は、バイオガス発生熱量に対する熱需要がちょうど排熱回収効率に等しくなる場合、すなわち $Q_{hd}/Q_{hp} (=0.48) = \eta_{chr}$ の場合のエネルギーバランス結果である。夏期および冬期の場合の結果をそれぞれ図4(a)および図4(b)に示す。図より、夏期ではバイオガスの大部分はCGSで消費され熱需要全量を賄えることがわかる。また、残りのバイオガスはMH貯蔵され、冬期に持ち越して結果的に通年で過不足なく利用できることがわかる。

一方で、図4(b)の冬期では貯蔵した分を含めて、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に充当できることが分かる。したがって、夏期の余剰バイオガスをそのまま貯蔵し持ち越して冬期に改めて利用するならば、年間を通してバランスよくバイオガス全量を有効利用できることが分かる。また、通年で一連のエネルギー循環経路中にボイラ稼働による熱供給を一切要しないことが特徴である。

つぎに、 $Q_{hd}/Q_{hp}$ 値が排熱回収効率 $\eta_{chr}=0.48$ を下回る $Q_{hd}/Q_{hp}=0.20, 0.35$ の場合について解析を進めたところ、夏期・冬期にかかわらず、いずれの場合であっても加温用ボイラやハイドレート貯蔵の各機器が不要

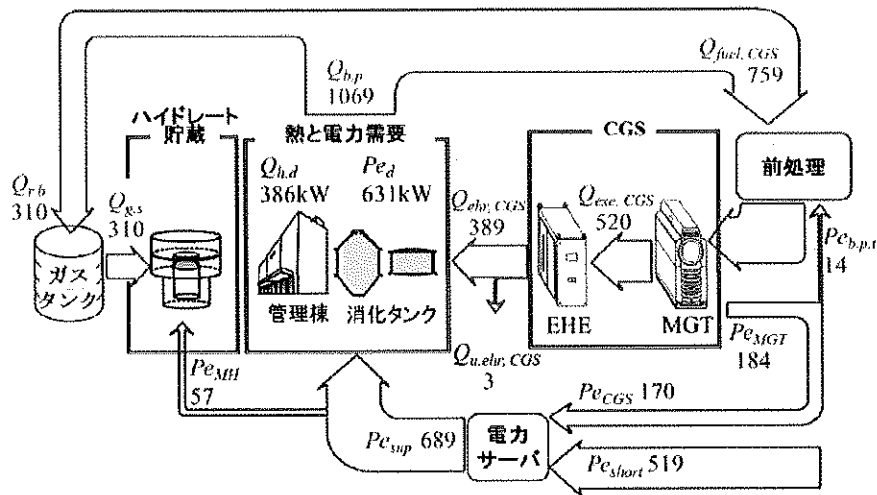


図 4 (a)  $Q_{h,d}/Q_{b,p} (=0.48) = \eta_{ehr}$  で夏期を想定した場合

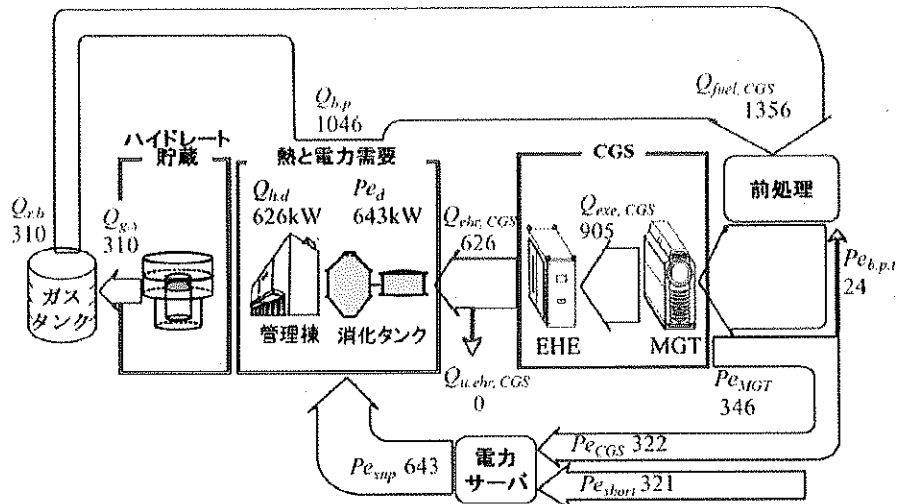


図 4 (b)  $Q_{h,d}/Q_{b,p} (=0.48) = \eta_{ehr}$  で冬期を想定した場合

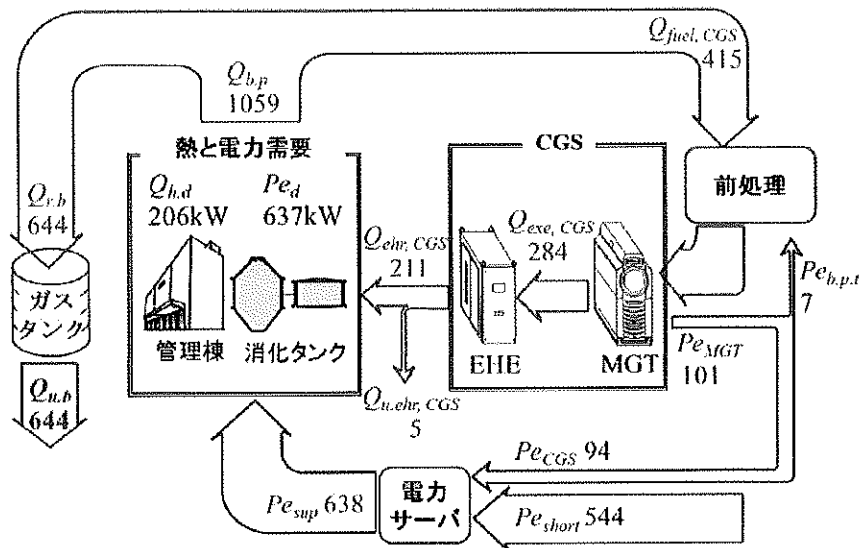


図 5  $Q_{h,d}/Q_{b,p} (=0.20) < \eta_{ehr}$  で通年を想定した場合

であることが明らかとなった。そこで、本稿では  $Q_{h,d}/Q_{b,p} = 0.20$  の場合を例に挙げて説明することにする。図5にその結果を示す。図中の値は、夏期・冬期を通じての年間平均値として結果を示しており、発生したバイオガスで熱需要全量を賅えることが分かる。しかし、これと引き替えに、むしろ施設内では使い切れないバイオガスが生じることとなり、バイオガス発生量1059kWの61%にも達する量644kWは未利用のまま保持し続けるか外部へと排出されることになる。つまり、この場合、バイオガス全量は施設内の需要量の範囲では消費しきれないため、この余剰分の活用法を別に考える必要がある。

その一方で、 $Q_{h,d}/Q_{b,p}$  値が  $\eta_{ehr}$  を上回る条件ではその結果は大きく異なる。図6は、地域的には極寒冷地で

の運用に相当する  $Q_{h,d}/Q_{b,p} (=0.60) > \eta_{ehr}$  の条件におけるエネルギーバランスの解析結果の一例であり、夏期・冬期それぞれの場合の結果を図6(a) および図6(b) に示す。これらの場合には施設全体での熱需要が大きいため、夏期および冬期においてもCGSと共にボイラを同時稼働させる必要がある。さらに、冬期での熱需要がかなり大きくなるため、夏期のバイオガスの余剰分は単純焼却することなく、可能な限り貯蔵して冬期まで持ち越してから再利用する必要がある。したがって、この条件の場合にあつては、極力、バイオガス利用上の無駄を省きその通年での平準化使用を実現するため、効率の良いガス貯蔵手段をシステム内に組み込む必要があり、ハイドレート化貯蔵法もその一つと考えられる。

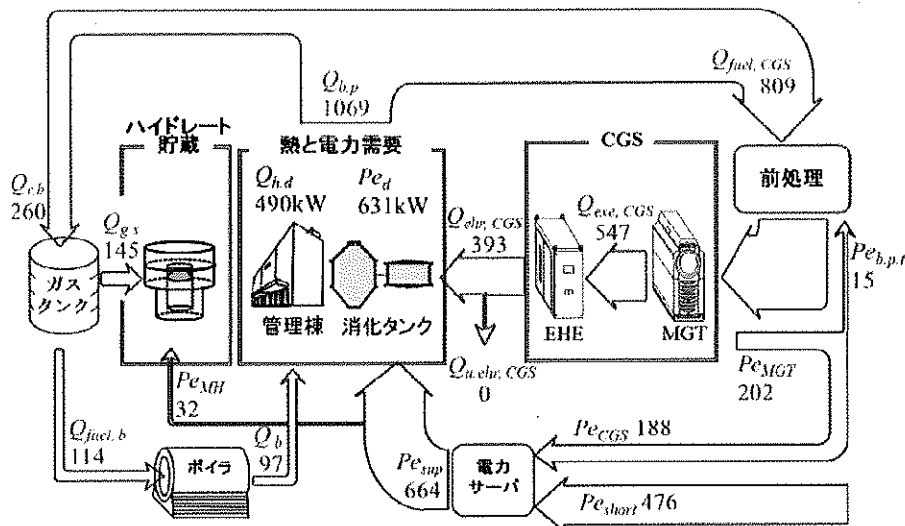


図6(a)  $Q_{h,d}/Q_{b,p} (=0.60) > \eta_{ehr}$  で夏期を想定した場合

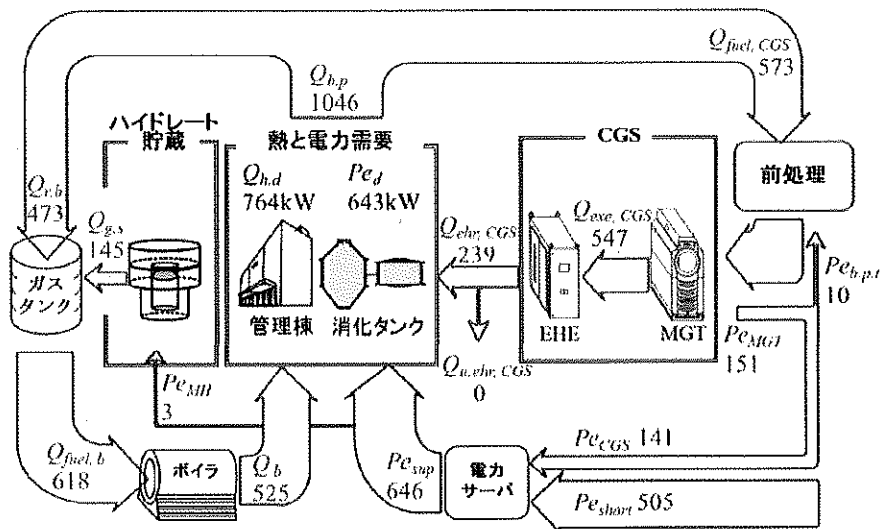


図6(b)  $Q_{h,d}/Q_{b,p} (=0.60) > \eta_{ehr}$  で冬期を想定した場合

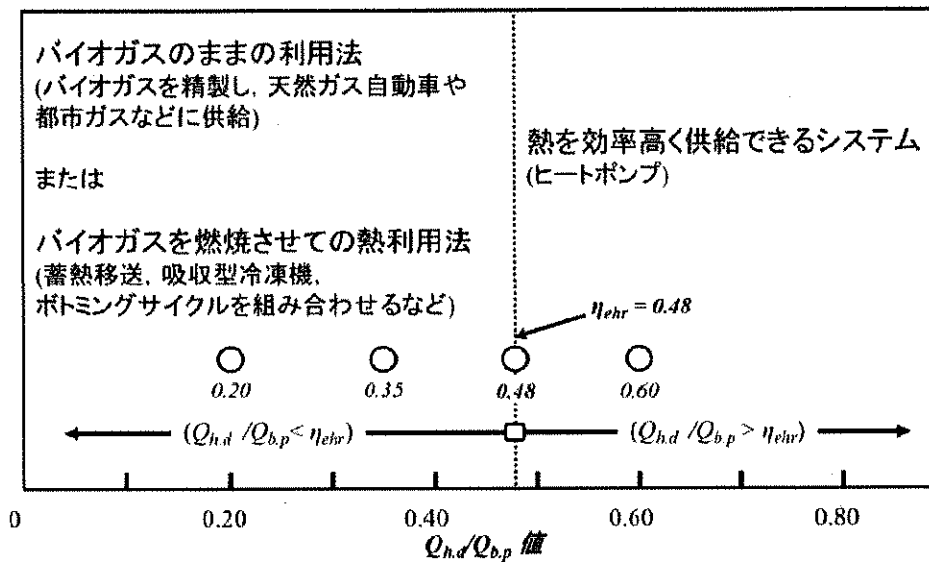


図7  $Q_{h,d}/Q_{b,p}$ 値によって分類できるシステムの最適利用法 (○印は今回計算を行った条件)

4・2  $Q_{h,d}/Q_{b,p}$ 値に対応する理想的なシステム構成と対応機器の選定

本解析で導入した $Q_{h,d}/Q_{b,p}$ 値が、コジェネレーションシステム等を中心として構成したシステムからの排熱回収効率  $\eta_{ehr}$  よりも大きくなる $Q_{h,d}/Q_{b,p} > \eta_{ehr}$ の場合には、大規模な下水処理施設の範囲に限定されるかもしれないが、たとえば原動機としてMGTの代わりに熱電比が一層高くなるボイラ+蒸気タービンでの使用等が可能であれば、より高いエネルギー利用効果が期待できる。一方、 $Q_{h,d}/Q_{b,p} < \eta_{ehr}$ の場合、CGSの原動機にMGTよりも一般に熱電比が低くなる燃料電池等の使用を行えば、電力補給に重点を置いたCGSで効率高く利用することが期待できる。

また、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についてのアイデアを図7に挙げてみた。図中、熱需要が高い $Q_{h,d}/Q_{b,p} > \eta_{ehr}$ の場合には、熱を効率高く供給できるシステムが必要となるため、ボイラの代わりにCGSが生み出す電力の一部を利用したヒートポンプとの連動も視野に入ってくる。一方で、先述したように $Q_{h,d}/Q_{b,p} < \eta_{ehr}$ の場合には利用しきれないバイオガス量が増すため、施設内で発生したバイオガスを施設外でも燃料として利用する等何らかのガス余剰対策を考える必要がある。その場合の一例として、たとえば都市ガスや天然ガス車用燃料への転用が考えられる。他にも、バイオガス全量で発電を行い、余剰となった熱を蓄熱体に吸収させるなどの措置<sup>(6)</sup>を施し、施設外に移送して他の熱需要先で冷暖房に使用することや、ボトミング

サイクルと組み合わせて熱エネルギーの有効利用を積極的に図ること<sup>(7)</sup>も考えられる。

5. おわりに

下水処理施設は本来、自治体単位での運営・管理が一般的な現状にあっても、その場で生み出される未利用エネルギーの数々は、最終的には元資源としての下水を日常的に提供してくれる住民に広く還元せねばならない。もちろん、各戸毎への直接的なエネルギー還元は不可能だが、下水処理の施設運営に必要なエネルギーを地産地消、すなわち極力『自賄い』することで、その目的は間接的に達成できるのではないと思われる。

現在、再生可能エネルギーとしてのバイオガス利用は国策的な推進機運の只中であって、一層加速すべきエネルギー開拓分野である。しかし、それにも増して、下水処理施設にはまだ眠ったままになっている未利用エネルギーが隠れている気がしてならない。そもそも取り扱っている豊富な水資源の存在自体がその1つであり、また、設置されている地域によっては広大な敷地面積も、さらには降雪地に位置するのであれば莫大な量の積雪も大きなエネルギー資源として施設のエネルギー循環経路内に取り込み、その潜在的なエネルギープラントとしての能力を一層発揮していけるのではないと思われる。

参考文献

- (1) 農林水産省HP、[http://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b\\_kihonho/pdf/keikaku.pdf](http://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b_kihonho/pdf/keikaku.pdf) (参照日2013年07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)、p.153.
- (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)、p.1661.
- (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), p.1058.
- (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), p.512.
- (6) 小枝遼平、山田貴延、中西喜美雄、“寒冷地における潜熱蓄熱材の廃熱輸送に関する基礎的研究”、寒地技術論文・報告集2012、No.12-II-049 (2012)、p.376.
- (7) 柏木孝夫ほか、“サーマルマネジメントー余熱・排熱の制御と有効利用”、NTS、(2013)、p.482.