

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25340118

研究課題名(和文) バイオガスハイドレートによるエネルギー循環型下水処理場へのCGS導入効果

研究課題名(英文) Effective introduction of biogas hydrate storage method to CGS (co-generation system) operated in a sewage treatment plant for energy recirculation

研究代表者

山田 貴延 (YAMADA, Takanobu)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：90174721

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：近年、化石燃料に代わる再生可能エネルギーへの移行が急務となり、とくにバイオマスエネルギーの有効活用が注目されている。本研究では、実在する下水処理場での収集データを元にした省エネルギー対策として、通年で変化するバイオガス利用量の平準化を目指すことで高効率のコジェネレーションシステムを構築する方法を検討した。そのため、システム内へのハイドレート化貯蔵法の導入を提案し、より実用的なメタンハイドレート生成方法について模索し、併せてシステム中にこれを組み込んだ場合の効果について明らかにした。

研究成果の概要(英文)： It becomes seriously urgent problem to change fossil fuels to biomass fuels as renewable energy in recent years, and the effective use is largely expected. Since the amount of biogas released from digesters in the sewage treatment plant commonly varies every season in a year, some levelling operations are needed for the energy saving methods. In this study numerical simulation was achieved, based on the experimental data which were collected in the existent plant, to build highly efficient co-generation system. The hydrate storage method was analytically proposed for its practical formation technologies, and it was clarified the performance efficiency could be highly obtained in the simulated operation of CGS.

研究分野：熱エネルギー工学

キーワード：ハイドレート化貯蔵 バイオガス コジェネレーションシステム メタンハイドレート

1. 研究開始当初の背景

2011年の大災害以降、これまで必ずしも十分には省みられてこなかった未利用エネルギー源の開拓が加速され、たとえば太陽エネルギーや風力・潮力あるいは地熱に至るまで、あらゆる自然エネルギーの開発利用が一層盛んに叫ばれるようになった。本研究では、とくに日本国内に限ってもおよそ1900箇所ほど存在する下水処理施設において、日々処理されている下水汚泥から発生するバイオガスの有効利用法について検討した。一般には気象条件によって変化を受けないバイオガスを再生可能エネルギーとして効率高く地域ごとに分散化利用するための具体的な指針を得ることは重要である。しかし、周囲温度等環境条件による影響はあまり受けないはずの下水処理施設にあっても、夏季には高温ゆえに需要量以上のガスが余剰化する一方で、寒冷地あるいは通年内で低温条件となる冬季には暖房・加温等の用途で熱需要そのものが増える結果、エネルギー供給体制の上で自立稼働を目指すエネルギープラントとして施設を見なした場合には明らかなエネルギー不足が生じ、通年でしかも効率高くバイオガスを利用することが大きな課題となっており、地域ごとに下水処理施設の地産地消型のエネルギープラント化がなかなか進まないのがこれまでの通例であった。

そこで、下水および尿から得られる発酵メタンガスの有効利用技術の開発を前提として、主エネルギー変換機器にマイクロガスタービンの導入を想定し、併せてコジェネレーションシステム構築への補助手段としてハイドレート化貯蔵の導入の有効性を検討した。

2. 研究の目的

本研究は、全国に広がる下水処理施設の役割を単なる汚泥処理だけにとどめることなく、メタン発酵プロセスによって発生する貴重な再生可能エネルギー発生源としてこれを有効利用するためのシステム構築法について明らかにすることを目的としている。そのため、バイオガスハイドレート貯蔵システムを新たに下水処理施設内のコジェネレーションシステムに組み入れることを提案し、通年でのメタン発生量の平準化利用による総合効率向上の可能性について明らかにするため、実測データに基づいた計算解析を行った。

3. 研究の方法

(1)ハイドレート化貯蔵をシステムに組み込む前提の場合、もっとも基本となる生成圧力容器内の温度・圧力条件の影響について実験室内での基礎実験によってこれを重点的に

調べた。その際、研究段階の初めに想定していた、攪拌バー入りの圧力容器での実験はさほど大きな生成効果が得られないことをあらかじめ確認したことから、以後は主に小型圧力容器を用いた静止タイプの実験を進めることとした。主な圧力容器には、SUS316製で内容積142.2cm³(配管含)の円筒形状のものを使用し、これに圧力計およびシースタイプの熱電対プローブを装着した。実験では、まずスライサーで粗削りした氷、ふるいにかけて粒子径を各条件に揃えた砕氷を用意した。これを0°Cに冷却した圧力容器に入れて密閉し、一度容器内を真空状態にした後にメタンガスを実験条件の圧力となるまで封入した。この容器を低温恒温器に入れて生成実験を開始し、生成中の周囲温度をMHの平衡曲線付近の条件で維持させるために、容器に封入したガスの圧力に合わせて低温恒温器の温度を任意に変化させた。実験開始後、MH生成中の容器内ガス圧力と温度、および砕氷温度の各経時変化を測定した。なお、基本とする測定時間は24時間とした。メタンハイドレート(以後MH)の生成状態を評価するにあたり、ガス圧力およびガス温度から気体の状態式を用いて算出されたハイドレート化出来たメタン量と理論的に与えられた量との比を取って生成率と定義し、この生成率を用いて評価した。そこで、本研究では小型静止容器を実験装置の中心に据えて使用することとした。この実験で必要とするパラメータには生成速度、すなわち、生成時間と単位量のハイドレート生成に必要な所要エネルギー量である。

(2)メタンハイドレート(MH)の生成および保存時の所要エネルギー量の算出を行い、ハイドレート生成装置を実際のコジェネレーションシステムに組み込んだ際の性能推定および評価を行った。分散型電源としての稼働を想定しているコジェネレーションの中で、排ガス温度が比較的高く寒冷地における排熱利用の点でメリットが大きなマイクロガスタービンの利用では、発電効率はガスエンジンに比べて多少劣るが、吸入空気温度をできるだけ低下させることが正味熱効率の向上に大きく寄与することはよく知られている。この特性を考慮しながら、複数台のマイクロガスタービンの稼働方法およびボイラによる補助加温設備との入熱バランスについて検討し、バイオガスハイドレート貯蔵による総合効率向上効果を確認した。

(3)メタンハイドレート(MH)の生成速度の算出にあたっては、一般に、MH貯蔵ではその生成速度の違いが貯蔵に要する動力の推定に直接的に影響するが、現時点ではその値がほ

とんど明らかにされていない。そのため、本研究では先述の MH 生成用圧力容器を用いて MH を実際に生成して生成速度の基礎データ集収を試みた。なお、実験ではそれ以外の成分となる炭酸ガスについても確認を進めた。以上の手順を経て、MH の生成完了時間を判断し、生成速度を計算した。さらに、その結果から、実在の製氷機、砕氷機、冷凍機、コンプレッサの各仕様を基に MH 貯蔵する際に必要な所要動力を算出してコージェネレーションシステム性能への影響を評価した。

(4) 図 1 に、今回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、また表 1 に導入を想定した CGS の基本仕様をそれぞれ示す。施設内の主な熱需要先は、建造物内の暖房・給湯および消化タンク内汚泥の加温用途であり、ここで発生したバイオガスを CGS およびボイラに燃料として供給すると仮定している。なお、夏季には、余剰バイオガスを一時的に MH 化して貯蔵する一方で、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、CGS では 5 台までの MGT の稼働とこれらの排熱を回収する熱交換器の利用を考慮した。

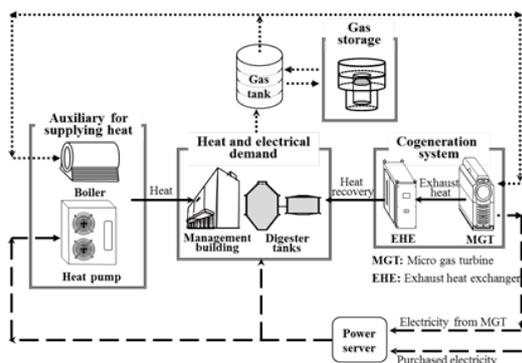


図 1 下水処理施設におけるシステム概要

表 1 コージェネレーションシステム仕様

MGT		Exhaust heat exchanger	
Ambient pressure	101.3 kPa	Effectiveness	0.80
Turbine outlet temperature	593 °C	Cold water inlet temperature	80 °C
Compressor & turbine efficiency	0.76	Cold water mass flowrate	1.616 kg/s
Combustion efficiency	0.99	Capacity ratio	0.054 ~ 0.063
Recuperator efficiency	0.74	Rated heat recovery	55 kW
Mechanical efficiency	0.97		
Rated revolution speed	96,300 rpm		
Rated electrical power output	28 ± 2 kW		
Electrical efficiency	26 ± 2 %		
Pressure ratio	3.4		
NOx emission	<9 ppmV @ 15 %O ₂		
		Rated speed of biogas compressor	450 ~ 1200 rpm
		Biogas inlet outlet pressure	0.02 ~ 6 bar
		Flowrate	~ 30 Nm ³ /h

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、汚泥の発酵熱量、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、以降の計算を進めた。なお、解析対象の消化タンクでは人口 10 万人規模の都市からの下水量として日平均 50,000 [m³/day] を処理できる能力を持つと仮定した。汚泥の発酵熱量については、中温発酵を前提として消化タンク内汚泥温度を 39°C 一定と仮定し、投入汚泥に必要な発酵熱量を算出した。また、消

化タンクからの放熱量および管理施設内の暖房・給湯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することが予備計算でわかった。

4. 研究成果

(1) メタンハイドレート (MH) の生成試験結果について (図 2)、初期圧力 6MPa、砕氷粒子径 $dp=0.3\text{mm}$ 以下の条件において、周囲温度を 0°C 一定に維持させた場合 (図中 Constant) と MH 生成中の容器内ガス圧力の平衡温度へ砕氷温度を近づけるために、MH の平衡曲線に合わせて適時変化させた場合 (図中 Altered) の容器内ガス圧力と砕氷温度の推移 (左図) および容器内ガス圧力と砕氷温度の推移を MH の平衡曲線と比較した結果 (右図) を示す。左図より、温度一定の場合では、実験開始 9 時間後に砕氷温度が 3°C に達した後に、圧力が急激に低下している。これに対して、温度変化の場合、実験開始 3 時間後に砕氷温度が 8°C 付近に達した後に急激な圧力低下が見られる。この事を右図で比較すると、この 2 つの時期は平衡曲線付近の条件を維持している時とわかる。これにより砕氷温度と容器内ガス圧力の値が MH の平衡曲線に近づくほど MH の生成反応が活発になる事がわかった。また、温度一定と変化において、最終的な MH 生成終了時期に 5 時間ほどの差が出来ており、MH の生成反応が活発な時期を早め、維持させる事で生成時間を短縮出来る事がわかった。

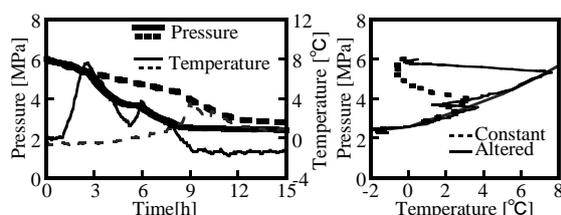


図 2 容器内ガス圧力と砕氷温度の推移 (左) および圧力-温度条件と MH の平行曲線の比較 (右)

(2) 初期圧力 6MPa、砕氷粒子径 $dp=0.3\text{mm}$ 以下、 $0.3\sim 0.5\text{mm}$ 、 $0.5\sim 1.0\text{mm}$ の各々の条件において、周囲温度を 0°C 一定に維持させた場合と適時温度変化させた場合における容器内ガス圧力の推移を図 3 に示す。図より、各砕氷粒子径において、温度一定の場合に対して温度変化の場合には、生成時間が 5 時間以上短縮されている。 $dp=0.5\sim 1.0\text{mm}$ においては、温度一定では圧力低下が見込めなかったのに対して、温度変化の場合には実験時間内で 3MPa 以下まで低下している。これにより、平衡曲線付近を維持させる事で生成が促進され、これまでの周囲温度一定では、それ以上

の生成反応の向上が望めなかった砕氷粒子径においても十分な効果が得られる事がわかった。以上の結果から、平衡曲線付近を維持する事で得られる生成促進効果はさらに大きな砕氷においても同様の効果が十分期待出来る事が明らかになった。

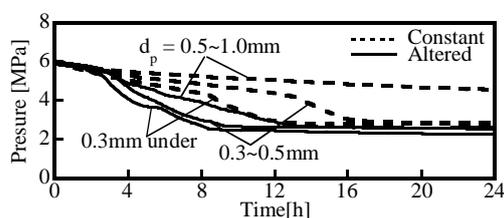


図3 砕氷粒子径の各割合における 24 時間後の生成率比較

(3) 周囲温度を適時変化させる事によって、生成率向上および時間短縮, MH 生成可能な砕氷粒子径の拡大が出来る事がわかった。そこで次に、周囲温度変化によって、どの程度までの砕氷粒子径ならば MH 生成が可能か調べてみた。図4は、初期圧力 6MPa、周囲温度を 8°C から平衡曲線に合わせて変化させた条件において、砕氷粒子径を $d_p = 0.5 \sim 4.0\text{mm}$ の範囲で変化させた場合の容器内ガス圧力の推移を比較して示す。

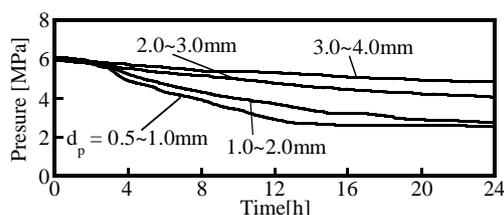


図4 各粒子径における容器内ガス圧力の推移

図より、温度一定の場合ではあまり圧力低下が見られなかった $d_p = 0.5 \sim 1.0\text{mm}$ の場合でも温度変化により実験開始後 12 時間で 3MPa を下回っている。さらに $d_p = 1.0 \sim 2.0\text{mm}$ においても実験開始から徐々に圧力低下が起こり、24 時間後には 3MPa を下回り、十分な生成がなされた事がわかる。しかし、 $d_p = 2.0\text{mm}$ 以上の場合においては、実験開始から圧力低下が継続されているが、その減少幅は $d_p = 1.0 \sim 2.0\text{mm}$ のものに比べて小さく、実験時間内では MH の生成反応が終わらなかった。この砕氷粒子径によって、圧力低下量に差が生じる原因として、メタンガスと接触する砕氷の表面積の違いが考えられる。MH の生成反応は、メタンガスと砕氷表面に溶出した融解水との接触で起こると考えられるが、この融解水が砕氷粒子径が大きくなるほど減少していき、実験時間内で MH 生成が終了するだけの十分な量に至らなかったためと考えられる。以上の結果から、MH の平衡曲線に合わせて周囲温度を変化させた場合には、砕氷粒

子径 d_p が 2mm 以下までならば十分な MH 生成効果が得られる事がわかった。

(4) 下水処理施設におけるコジェネレーションシステムへの応用について、まず、本研究で想定した下水処理施設を共通の計算モデルとして、平均気温が異なる様々な地域での下水処理施設における熱需要量の違いを比較してみた。ここで寒冷地域である北海道東部、亜熱帯地域の沖縄およびこれら中間の地域として東京の 3 箇所について、4 年間の平均気温と下水処理施設の熱需要量の関係を調べた。その結果、どの地域でも熱需要量は夏季に低下し、冬季に増すと言えるが、特に北海道東部では、夏季と冬季の大きな気温差から年間を通して熱需要量が大幅に変化することが分かる。したがって、消化タンクのメタン発酵量に基づくバイオガス生成量の過不足に対する対策は寒冷地域ほど急務と言えることがわかった。

(5) まず、MH 貯蔵を行わない条件で、寒冷地における施設でバイオガス生成量の過不足がどの程度生じるかを検討してみた。ここでは、発生したバイオガスを燃料として MGT に供給し、その排熱を回収し、施設の熱需要の一部を賄っている。また、そ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。過去 4 年間における熱需要量、CGS からの排熱回収量、および CGS とボイラから回収した熱量について調べたところ、CGS からは通年 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わかった。また、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明らかとなり、このままでは夏季においてバイオガスの余剰分熱量に相当する量のバイオガスがそのまま焼却され、解析ではその量は 131,000[m³]に及び、夏季でのバイオガス発生量の約 30%にまで達することが新たにわかった。一方で、冬季になると燃料として消化タンクの発酵温度維持のためにバイオガス供給が不足するため、特に寒冷地では、夏季の余剰分を冬季に持越すためにバイオガス貯蔵手段を CGS 内に組込む必要があることが明らかとなった。

(6) 一方、MH 貯蔵法を導入した場合に、本施設でどの程度の必要動力が生じるか検討してみた。なお、比較のため従来の一般的なガス貯蔵法である高圧貯蔵法による計算結果も併せて検討したところ、MH 貯蔵法では高圧貯蔵法に比べ、所要動力および貯蔵体積が同程度であることが分かった。この内、MH 貯蔵の場合、製氷過程での所要動力が大部分を占めているので、積雪地域では、冬季の雪氷利

用が可能になるとその優位性はより大きくなると言える。しかも、現段階までは、MH生成時のガス吸収量が体積比で $101\text{m}^3\text{-CH}_4/\text{m}^3\text{-ice}$ 程度にとどまっているが、生成能力を目標とする $150\text{m}^3\text{-CH}_4/\text{m}^3\text{-ice}$ まで近づけられるならばさらに省エネルギー、省スペースな MH 貯蔵が可能になることが明らかとなった。

<引用文献>

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計8件)

- ① Firdaus Basrawi、Hassan Ibrahim、Takanobu Yamada、Optimal Unit Sizing of Biogas-Fuelled Micro Gas Turbine Cogeneration Systems in a Sewage Treatment Plant, Energy Procedia 75、(査読有)、2015、pp. 1052-1058
DOI:10.1016/j.energy.2015.12.117
- ②伊藤 凌、齋藤 哲也、山田 貴延、森田 慎一、中西 喜美雄、寒冷地の下水処理施設で並列稼働する FC-MGT CGS の性能予測、日本機械学会 2015 年度年次大会講演論文集、No.15-1、S0830103、(査読無)、2015、pp. 1-4
- ③内田 直人、五月女 文也、山田 貴延、中西 喜美雄、砕氷層を用いた CO2 ハイドレートに関する基礎的研究、日本機械学会 2015 年度年次大会講演論文集、No. 15-1、G0900206、(査読無)、2015、pp. 1-4
- ④山田 貴延、中西 喜美雄、寒冷地におけるマイクロ・ガスタービン・コジェネレーション・システムの構築と課題、日本ガスタービン学会誌、Vol. 42、No. 6、(査読有)、2014、pp. 19-24
- ⑤増山 拓樹、伊藤 凌、山田 貴延、中西 喜美雄、寒冷地におけるバイオガスコジェネレーションの MGT 構成法に関する検討、日本機械学会北海道支部講演概要集、No. 142-2、334、(査読無)、2014、pp. 91-92

[学会発表] (計5件)

- ①伊藤 凌、齋藤 哲也、山田 貴延、ほか 2 名、寒冷地の下水処理施設で並列稼働する FC-MGT CGS の性能予測、日本機械学会 2015 年度年次大会、2015 年 9 月 16 日、北海道大学 (北海道・札幌市)
- ②内田 直人、五月女 文也、山田 貴延、中西 喜美雄、砕氷層を用いた CO2 ハイドレートに関する基礎的研究、日本機械学会 2015 年度年次大会、2015 年 9 月 15 日、北

海道大学 (北海道・札幌市)

- ③齋藤 哲也、山田 貴延、中西 喜美雄、下水処理プラントにおける CGS の性能推定 (MGT と FC の並列稼働)、日本機械学会北海道学生会第 44 回発表講演会、2015 年 3 月 7 日、北海道科学大学 (北海道・札幌)
- ④五月女 文也、山田 貴延、中西 喜美雄、ガスハイドレートの生成・貯蔵特性 (CO2 ガスの場合)、日本機械学会北海道学生会第 44 回発表講演会、2015 年 3 月 7 日、北海道科学大学 (北海道・札幌)
- ⑤川原敬裕、山田 貴延、中西喜美雄、MGT で構成するバイオガスコジェネレーションの性能特性 (寒冷条件下での検討)、日本機械学会 2013 年度年次大会、2013 年 9 月 11 日、岡山大学(岡山県・岡山市)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 貴延 (YAMADA, Takanobu)
北見工業大学・工学部・教授
研究者番号：90174721