

令和元年6月14日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00644

研究課題名(和文) エネルギー循環型バイオガス下水処理場への潜熱蓄熱システム導入の試み

研究課題名(英文) High-performance formation for biogas energy circulation in a sewage treatment plant equipped with latent heat storage system

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：世界的に化石燃料は枯渇の危機に瀕しており、これにかわる新たな燃料源がどの領域においても求められている。本研究は、再生可能エネルギーの中で身近に存在する下水処理施設の消化污泥から排出されるバイオガスの中で、可燃成分となるメタンを施設内エネルギーとして高効率で有効利用するためのシステム構築法を計算解析で明らかにしたものである。そのため、課題となっていた通年での発生バイオガス余剰量のアンバランスをハイドレート化貯蔵技術とコジェネレーション排熱の回収・再利用のための潜熱蓄熱技術の導入によって解消し、システム全体の大幅な性能向上を図るための性能予測を試みたものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、人々が一般的な社会生活を送る上で不可欠な存在となっている下水処理施設に焦点を当て、今まで見過ごされてきた下水処理過程で発生するメタン燃料の有効活用を地産地消の観点から促進するための具体的な導入システム例を提案するものである。これによって今後新たに下水処理施設内設備の導入を図る際の重要な指針を与えることが期待できる。また、その際、導入するコジェネレーションの機器構成法は、高効率化の上で未だ学術的にも確立された具体例に乏しく、系統的な解析方法を提示する上で今後大きな基礎的知見を与えるものである。

研究成果の概要(英文)：Fossil fuels are tending to decrease year by year in the world and alternative energy is urgently expecting in every field. This study shows the methodology of most effective CGS (cogeneration system) configuration in a sewage treatment plant, to use methane of produced biogas as one of the sustainable energy resources. More advanced technologies were assumed in the analysis to solve the unbalanced problem of the biogas formation and consumption through the year. They were hydrate storage for the residual biogas and heat storage exhausted from the end stage of CGS and their performance in the system was discussed.

研究分野：熱エネルギー工学

キーワード：下水処理施設 バイオガス メタンハイドレート コジェネレーション 再生可能エネルギー

1. 研究開始当初の背景

世界的に持続可能なエネルギー源の開発が急務とされている中、我が国においては2011年の未曾有の大震災をきっかけに、再生可能エネルギーへの見直しと新たな開発の加速化が望まれている。そのような現状において、本研究では、日常の社会生活を営む中で不可欠な下水処理施設で発生するバイオガスの有効利用に着目した。本研究がそのデータの基礎としている、人口10万人程度の都市では、年間1600万 m^3 の下水処理に、600万 kWh ほどの電力と30TJの熱を共に要している。前者は処理過程には必須の電力量であり、また、後者については下水汚泥から可燃成分を含むバイオガス発生に必要な大半の熱量を指し示している。一般に、各地域から集約される下水は単なる廃棄物の位置づけではなく、適切な処理を施すことによってバイオガスといった貴重なエネルギー源としての側面も有することから、これを無駄なく使用することが昨今の省エネルギー対策の立場からは重要な意義を持つ。

2. 研究の目的

本研究では、とくに寒冷地域でのモデルを基本として下水処理施設におけるコージェネレーションシステムの有効活用法の案出を最終目的として、年間でのエネルギー過不足を解消するシステム構成について提案を試みるものである。そのため、過去から行ってきた本研究のベースデータを基に、通年では不可避となる余剰バイオガスの新たな貯蔵方法としてのガスハイドレート化の可能性について、計算解析による推定を実施するものである。併せて、コージェネレーションシステム最終端のおよそ 100°C 以下となる低温のシステム排熱を一時的に貯蔵する方法に潜熱蓄熱材の利用を想定した。解析では、予想される課題解消のために新たなモデル実験を試みた実用化への検証を並行させながら、エネルギープラントとしての総合効率の向上のために、最終的にはコージェネレーションシステム稼働率の平準化を目指した。

3. 研究の方法

(1) ガスハイドレート化貯蔵を行うための最短生成時間を求める基礎実験

バイオガスはおよそ60 $\text{v}\%$ の CH_4 、40 $\text{v}\%$ の CO_2 で構成されており、始めに本研究では CH_4 、 CO_2 両ガスのハイドレート生成特性の把握を実験で確認することにした。このとき実験では、ホスト物質として雪氷を模擬した砕氷を、ゲストガスには CH_4 、 CO_2 を用いてハイドレートを生成した。図1に、メタン用の実験装置を概略的に示す。なお CO_2 の場合も同様である。実験に際しては、各ガスに応じて粒子径、質量を揃えた砕氷を内容積120mlのSUS316L製の生成容器に封入した後、ゲストガスを所定の圧力まで封入した。砕氷、ガス圧力の条件を表1に示す。実験は低温恒温器内で行い、測定時間24時間で熱電対によりガス温度と砕氷温度を、また、圧力計により容器内ガス圧力を測定し記録した。さらに、実験開始時における砕氷状態が生成へ及ぼす影響を調べるため生成容器を 0°C に冷却して行う条件の他、予め -18°C に冷却した後 0°C の周囲温度で行う条件での2種類の実験を実施した。このとき、それぞれの生成容器にはガス封入時の砕氷温度(以下初期砕氷温度)が $-4\sim-0.5^\circ\text{C}$ および $-12\sim-4^\circ\text{C}$ となる砕氷を充填し、それぞれを実験Aおよび実験Bと呼んで区別した。生成時間の短縮と安定性確保のため、実験A、Bそれぞれの容器内に -18°C に冷却したビーズを砕氷層の上面に配置する実験C、Dも試みた。ビーズ粒子径は3mmとし、ガラス製、ステンレス製のものを使用して混合量は容器の内容積の1~7%の範囲で変化させた。各実験条件を表2に示す。

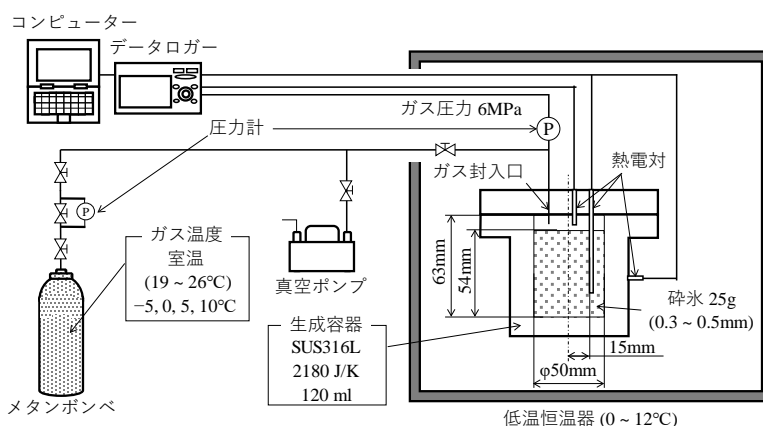


図1 MH生成用実験装置の概略図

表1 CO₂, CH₄における砕氷とガスの条件

封入ガス	砕氷粒子径 [mm]	砕氷質量 [g]	封入ガス圧力 [MPa]
CO ₂	0.5~1.0	20	3
CH ₄	0.3~0.5	25	6

表2 基本とする生成時の温度条件

実験条件	生成容器温度 [°C]	初期砕氷温度 [°C]	ビーズ温度 [°C]
A 通常	0	-4 ~ -0.5	-
B 容器冷却	-18	-12 ~ -4	-
C 容器・ビーズ冷却	-18	-12 ~ -4	-18
D ビーズ冷却	0	-4 ~ -0.5	-18

(2) 高効率の蓄熱システム構築のために必要な潜熱蓄熱材作成とその基本特性の実験

蓄熱システム構築を考える場合にもっとも重要な調査項目は、選定した蓄熱材の受・放熱にともなう状態変化およびその際の蓄放熱量の基礎的データの収集と解析である。本研究が対象としている受熱時の温度条件としては、システムからの2次排熱を便宜的に70°C一定として、以後の実験を進めることとした。さらに、本研究では熱交換効率の最良化を目指して、アルミニウム製小型密閉容器(内容積100mL)を選択し、これに潜熱蓄熱材として潜熱量の大きさや安全・安定性の面から、酢酸ナトリウム三水和物(生成熱264kJ/kg)を選択し封入した。今回用いた蓄放熱装置および可視化各実験装置の概要を図2に示す。この実験によって、熱交換槽における最大可能な蓄熱保持量の見積と取扱い上の安定性の確保を明らかにしてシステム性能における熱エネルギーバランス推計の基礎資料とした。

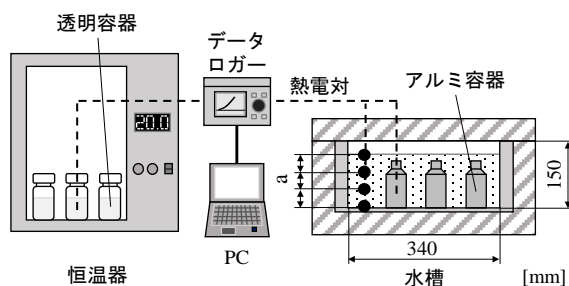


図2 蓄放熱実験および可視化実験各装置の外観

(3) 解析対象とする高効率のコージェネレーション (CGS) システム構築に関する計算推定法

消化処理で生成したバイオガスの余剰分はメタンハイドレート化貯蔵で、また、コージェネレーションシステム排気端からの余剰排熱は潜熱蓄熱材による蓄熱システムで貯蔵するシステムを同時に備えたシステム概要を図3に示す。コージェネレーションシステム (CGS) はマイクロガスタービン (MGT) と排熱回収ボイラ (EHE) で構成されており、このCGSの排熱回収分とボイラからの入熱量で施設の熱需要全量を賄い、MGTの発電量で電力需要の一部を賄うものとした。ここで、蓄熱システムを導入する場合はEHE通過後の低温排熱とCGSを構成しないモノジェネレーションシステム (MGT mono) からの排熱を蓄熱し、施設の熱需要の一部を賄う一方、MH貯蔵を導入する場合は余剰バイオガスを一時的に貯蔵し、必要な時に燃料として利用するものとした。本研究で稼働を想定した機器の仕様を表3に、本解析で仮定した4つのモデルは表4に示す。下水処理施設でMGT CGS 2台、MGT mono 4台の基準モデルOに対して、モデルIではMH貯蔵のみを導入し、5~10月にバイオガス余剰分を貯蔵し11~4月にこれを利用すると想定した。モデルIIでは蓄熱システムのみを導入し、通年排熱を蓄熱して放熱するとした。また、蓄熱システムとMH貯蔵を併用稼働するシステムをモデルIIIとした。

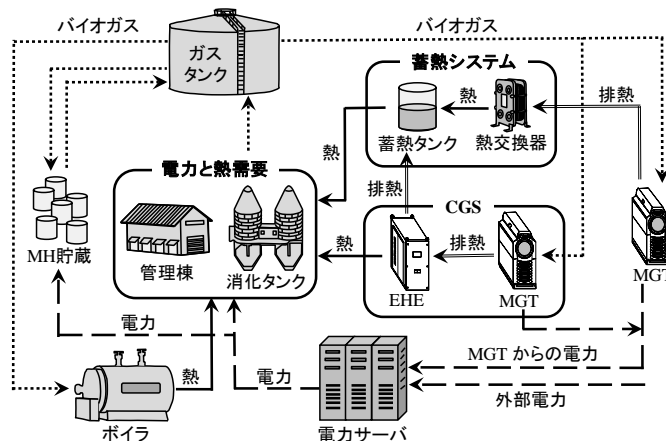


図3 蓄熱システムとMH貯蔵を導入したシステム概要

表3 利用するシステムおよび機器の基本的な仕様

マイクロガスタービン(MGT)			
定格回転数	96,300 rpm	発電出力	28 ± 2 kW
定格入熱量	115 kW	発電効率	25 ± 2 %
排熱温度	275 °C		
排熱回収ボイラ(EHE on MGT)			
熱交換形式	シェル&チューブ式	温水質量流量	1.22 kg/s
最大排熱回収量	55 kW	温度交換効率	80 %
低温側出入口温度	80 ~ 90 °C		
ボイラ(boiler)			
熱効率	85 %	発生熱量	2,594 kW
定格換算蒸発量	3,600 kg/h	最大蒸気圧力	10 kg/cm ²
蓄熱システム			
タンク容量	1300 ℓ	放熱効率	30 %
蓄熱材	酢酸ナトリウム三水和物	潜熱	4873.4 MJ
排熱交換機入口温度	160 °C 程度	最大熱容量	6782.9 MJ
排熱交換機出口温度	75 °C 程度	回収温度	50 ~ 80 °C

表4 計算解析モデル

モデル	5~10月		11~4月	
	蓄熱システム	MH貯蔵	蓄熱システム	MH貯蔵
O	—	—	—	—
I	—	貯蔵	—	再生
II	蓄熱 + 放熱	—	蓄熱 + 放熱	—
III	蓄熱 + 放熱	貯蔵	蓄熱 + 放熱	再生

4. 研究成果

(1) 図4に、実験条件 A, B および C において CO₂, CH₄ ハイドレート (以後、MH と表記) を生成した場合の初期砕氷温度と生成時間の関係を示す。CO₂ の場合には、実験 A に比べて実験 B では生成時間が 3~7 時間にまで短縮し、時間の変動幅も少ない。実験 C では実験 B と同様に生成時間が短縮しており、ビーズ追加により生成が促進して最短で 3 時間での生成完了が確認できることが分かる。CH₄ の場合も、実験 A に対して実験 B の方が全般に生成がより早くなり、最短で 7 時間になるなど初期砕氷温度が低いほど生成時間も短くなった。また砕氷温度が -7°C 以下のとき、さらに 7~11 時間の範囲で生成完了し、生成時間のバラつきが抑えられ、かつ生成状態が安定化していることが分かる。さらに実験 C では 6~10 時間の範囲に分布しており、初期砕氷温度によらず、全体的に生成が早くなる傾向が見られる。以上より、容器を冷却し、初期砕氷温度を CO₂ では -4°C 以下に、CH₄ では -7°C 以下に低下させることで生成時間のバラつきを抑えることができると言える。とくに、CH₄ では初期砕氷温度が低いほど生成時間は短縮する傾向にあり、CO₂, CH₄ 共にビーズを追加することで

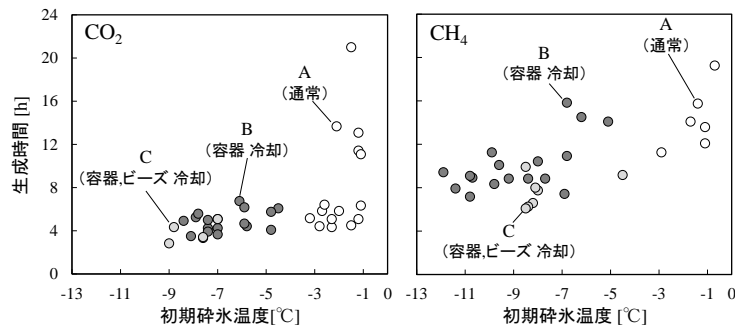


図4 初期砕氷温度と生成時間の関係

さらに生成時間を短くすることができることを明らかにした。ここでシステムにハイドレート生成装置を組み入れることを想定した場合、実際の圧力容器の周囲温度は冷凍機に供給するエネルギーを最小化する目的で、できるだけ高めに維持することが望ましい。そこで、つぎにバイオガス中のメタンを最小限のエネルギーでハイドレート化するため計算条件を見積もるため実験による検討を試みた。図5は、恒温器室内温度を様々に変化させて得た MH の生成時間と融解エンタルピー比 R_1 の関係を示すものである。ここで融解エンタルピー比 R_1 とは、砕氷融解または MH 貯蔵解離時の全熱エンタルピーに対する MH 生成熱量と砕氷への移動熱量との差の比を表す指標である。 R_1 値が -10 ~ 0% 付近で生成時間が最も短縮していることから、生成熱量と

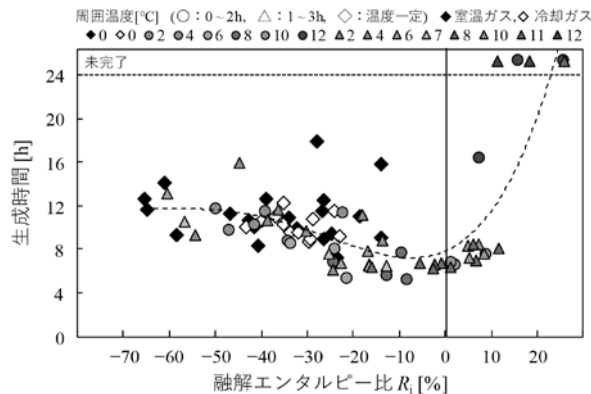


図5 砕氷温度最大の融解エンタルピー比と生成時間の関係

移動熱量がほぼ同量となることで生成促進の条件であることが明らかとなったため、その際の生成時間を以後の解析で使用した。

(2) つぎに、潜熱蓄熱材の蓄放熱性能を最大限確保できる潜熱蓄熱材自体の使用条件を明らかにすることを試みた。本研究では、この潜熱蓄熱材には凝固点以下に冷却されても潜熱放出の開始を示す凝固現象が起こらない、いわゆる過冷却現象がかなり高い確率で生じることが明らかとなった。そこで、過冷却防止剤を独自に開発する実験を重ねた結果、二リン酸類を用いて満足できるレベルでの防止効果を得ることができた。その他にも蓄熱量を大きく低下させる現象として無水物の生成があり、さらに潜熱蓄熱材の融解過程についてモデル実験を新たに立ち上げて詳細に調べた。その結果、この状態では蓄放熱サイクルを繰り返すたびに蓄熱量が低下することとなり、システム全体の中での蓄放熱量低下が想定される課題となった。本研究では、その対策となる無水物防止剤として糖アルコール類の増粘剤を新たに見だし、無水物をほぼ消失させることができた。これによって、可能な限り潜熱蓄熱量を保持できる条件とその効果を明らかにした上で、蓄熱システムを最大限効率よく作動させた状態を改めて全体システムの解析条件に組み入れ、最終的なコージェネレーションシステムの性能向上について検討することにした。

(3) 各モデルにおける通年の熱エネルギーバランスと稼働台数を図6に示す。基準モデルOでは冬季にMGTの稼働台数が大きく低下する。また、夏季にバイオガスの余剰が生じるだけでなく、部分負荷の条件ではMGTを稼働させないために冬季においても余剰が見られる。MH貯蔵のみを導入したモデルIでは、夏季のバイオガス余剰の有効利用ができるためMGTがより多く稼働できることが分かった。しかし、MH貯蔵を利用する場合には、バイオガスの余剰量に従って稼働台数が大幅に増加できない。蓄熱システムのみを導入したモデルIIでは、冬季に稼働台数が増加できるものの夏季のバイオガスの余剰がより多く生じている。これは、蓄熱によってボイラからの入熱量が抑えられて消費燃料量が減り、さらに夏季のバイオガス余剰分もあまり使用しないことでMGTの稼働台数が増加できたものと考えられる。一方、蓄熱システムの利用によって夏季にもボイラに投入する燃料量が抑えられ、バイオガスの余剰量がより増加すると考えられる。そして、この二つの方法を併用するモデルIIIでは通年6台まで一定に稼働できることが分かった。これは通年で蓄熱システムを利用することにより冬季の稼働台数が増加するだけでなく、夏季にバイオガス余剰分をMH貯蔵で有効利用したための結果と考えられる。以上より、CGSにおけるMH貯蔵と蓄熱システムの導入によって、部分負荷による性能低下の影響を極力避けながら、通年にわたるMGTの稼働台数の増加と平準化による主に発電量の増加を中心としたシステム性能の向上効果が期待できることが明らかとなった。

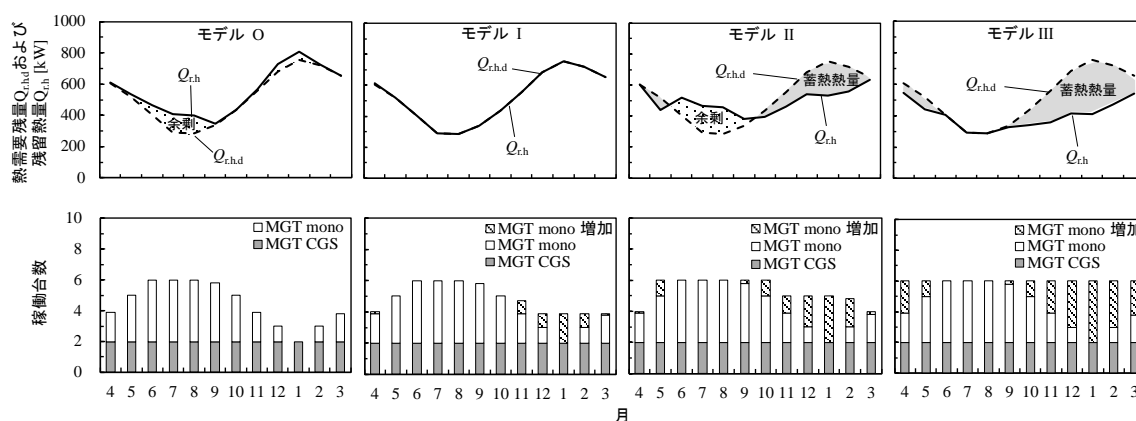


図6 各モデルの熱エネルギーバランスと稼働台数の予測

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計10件)

- ①松尾 雅人、山田 貴延、羽二生 稔大、中西 喜美雄、寒冷地の下水処理施設におけるバイオガスの最適利用法、日本機械学会北海道支部第56回講演会講演概要集、No. 182-2、(査読無)、2018、pp. 109-110
- ②瓶子 達也、高田 大慈、山田 貴延、羽二生 稔大、中西 喜美雄、蓄熱槽内に充填した潜熱蓄熱材の熱交換方法に関する基礎的研究、日本機械学会北海道支部第56回講演会講演概要集、No. 182-2、(査読無)、2018、pp. 113-114
- ③中垣 颯、秋山 和徳、山田 貴延、羽二生 稔大、中西 喜美雄、メタンハイドレートの生成促進と温度条件の関係、日本機械学会北海道支部第56回講演会講演概要集、No. 182-2、(査読無)、2018、pp. 115-116
- ④劉 言、山田 貴延、羽二生 稔大、中西 喜美雄、下水処理施設におけるコージェネレーションシステム機器構成法の効果、日本機械学会北海道支部第55回講演会講演概要集、No. 170-2、

(査読無)、2017、pp. 57-58

- ⑤佐藤 佑樹、山田 貴延、羽二生 稔大、中西 喜美雄、小型密閉容器に封入した潜熱蓄熱材の蓄放熱挙動に関する基礎的研究、日本機械学会北海道支部第 55 回講演会講演概要集、No. 170-2、(査読無)、2017、pp. 79-80
- ⑥Techno-economic performance of biogas-fueled micro gas turbine cogeneration systems in sewage treatment plants: Effect of primemover generation capacity, Firdaus Basrawi, Thamir K. Ibrahim, Khairul Habib, Takanobu Yamada, D.M.Nafiz Daing Idris, Energy on Elsevir, 124、(査読有)、238-248
DOI:10.1016/j.energy.2017.02.066
- ⑦山田 貴延、胡 杰、中西 喜美雄、寒冷地域の下処理場におけるバイオガス・コジェネレーション・システムの性能解析、全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集、H-3、(査読無)、163-165
- ⑧齋藤 哲也、佐藤 佑樹、山田 貴延、胡 杰、中西 喜美雄、潜熱蓄熱材を用いた熱交換システムの基本特性、寒地技術論文・報告集、32 巻、(査読無)、217-220
- ⑨五月女 文也、高橋 伸克、山田 貴延、胡 杰、中西 喜美雄、メタンハイドレートの生成促進と安定化、寒地技術論文・報告集、32 巻、(査読無)、221-224
- ⑩劉 言、山田 貴延、胡 杰、中西 喜美雄、寒冷地の下水処理施設における MGT-FC CGS の性能推定、寒地技術論文・報告集、32 巻、(査読無)、225-228

[学会発表] (計 9 件)

- ①松尾 雅人、山田 貴延、羽二生 稔大、中西 喜美雄、寒冷地の下水処理施設におけるバイオガスの最適利用法、日本機械学会北海道支部第 56 回講演会、2018 年 10 月 13 日、北海道科学大学 (北海道・札幌市)
- ②瓶子 達也、高田 大慈、山田 貴延、羽二生 稔大、中西 喜美雄、蓄熱槽内に充填した潜熱蓄熱材の熱交換方法に関する基礎的研究、日本機械学会北海道支部第 56 回講演会、2018 年 10 月 13 日、北海道科学大学 (北海道・札幌市)
- ③中垣 颯、秋山 和徳、山田 貴延、羽二生 稔大、中西 喜美雄、メタンハイドレートの生成促進と温度条件の関係、日本機械学会北海道支部第 56 回講演会、2018 年 10 月 13 日、北海道科学大学 (北海道・札幌市)
- ④劉 言、山田 貴延、羽二生 稔大、中西 喜美雄、下水処理施設におけるコジェネレーションシステム機器構成法の効果、日本機械学会北海道支部第 55 回講演会、2017 年 9 月 23 日、釧路工業高等専門学校 (北海道・釧路市)
- ⑤佐藤 佑樹、山田 貴延、羽二生 稔大、中西 喜美雄、小型密閉容器に封入した潜熱蓄熱材の蓄放熱挙動に関する基礎的研究、日本機械学会北海道支部第 55 回講演会、2017 年 9 月 23 日、釧路工業高等専門学校 (北海道・釧路市)
- ⑥山田 貴延、胡 杰、中西 喜美雄、寒冷地域の下処理場におけるバイオガス・コジェネレーション・システムの性能解析、第 38 回全国都市清掃研究・事例発表会、2017 年 1 月 18 日、釧路市観光国際交流センター (北海道・釧路市)
- ⑦齋藤 哲也、佐藤 佑樹、山田 貴延、胡 杰、中西 喜美雄、潜熱蓄熱材を用いた熱交換システムの基本特性、第 32 回寒地技術シンポジウム、2016 年 11 月 18 日、コンベンションセンター (北海道・札幌市)
- ⑧五月女 文也、高橋 伸克、山田 貴延、胡 杰、中西 喜美雄、メタンハイドレートの生成促進と安定化、第 32 回寒地技術シンポジウム、2016 年 11 月 18 日、コンベンションセンター (北海道・札幌市)
- ⑨劉 言、山田 貴延、胡 杰、中西 喜美雄、寒冷地の下水処理施設における MGT-FC CGS の性能推定、第 32 回寒地技術シンポジウム、2016 年 11 月 18 日、コンベンションセンター (北海道・札幌市)

[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