

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：50101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26889061

研究課題名(和文) ガスタービンでの冷熱回収によるCO<sub>2</sub>ハイドレート発電機の運用条件拡大に関する研究研究課題名(英文) A study on expanding operation conditions of a CO<sub>2</sub> hydrate power generator by cold heat recovery in a gas turbine

研究代表者

川合 政人 (KAWAI, Masahito)

函館工業高等専門学校・生産システム工学科・助教

研究者番号：70511278

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：CO<sub>2</sub>ハイドレートは常温付近でのわずかな温度差によって生成及び解離し、多量のCO<sub>2</sub>ガスを吸収および放出するという特異な特性を持っている。そこでこの特性に着目し、放出される高圧のCO<sub>2</sub>ガスによってガスタービンを駆動し発電を行う、自然エネルギーを熱源とする発電装置(以下、CO<sub>2</sub>-H発電機とする)の開発を行う。本研究では、CO<sub>2</sub>ハイドレートの生成と解離の実験と小型発電システムによる冷熱回収の検討を行った。これらの検討結果をもとにCO<sub>2</sub>-H発電機の数値解析を行い、熱源温度と単位水量当たりの発電量の関係を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：CO<sub>2</sub> hydrate is formed and dissociated by a slight temperature difference in the ambient temperature, it has the unique property of absorbing and releasing large amounts of CO<sub>2</sub>. Therefore focusing on this characteristic, for power generation by driving the gas turbine by CO<sub>2</sub> gas pressure released, the attempted development of a power generator (CO<sub>2</sub>-H generator) that uses natural energy as a heat source. In this study, experiments of formation and dissociation of CO<sub>2</sub> hydrate were carried out. Then the feasibility of the cold heat recovery by small power generation system were investigated. Based on the results of these studies, numerical analyses of the CO<sub>2</sub>-H generator were carried out. As a result, the relationship between the amount of electrical energy, which was stored in 1 m<sup>3</sup> water, and heat source temperature was revealed.

研究分野：熱工学

キーワード：ガスハイドレート 未利用エネルギー回収 発電技術

## 1. 研究開始当初の背景

温室効果ガスの排出による気候変動の懸念から、化石燃料の代替エネルギーの開発が急がれている。その一方で、寒冷地の冬期には、外気の冷熱や暖房器具から排出される排熱などの未利用エネルギーが豊富に存在する。CO<sub>2</sub>ハイドレートはメタンハイドレートをはじめとするガスハイドレートの一種で、ガスハイドレートの生成と解離では、常温付近の小さな温度差を与えることで圧力が大きく変化するという特異な状態変化を示す。したがって、CO<sub>2</sub>ハイドレートの特異な状態変化による熱サイクルを、戸建て住宅の暖房器具からの低温排熱や昼夜の温度差などの未利用エネルギーによって駆動させることで、非常にクリーンな発電システムを構築できる可能性がある。

## 2. 研究の目的

CO<sub>2</sub>ハイドレートは常温付近でのわずかな温度差によって生成及び解離し、多量のCO<sub>2</sub>を吸収および放出するという特異な特性を持っている。そこでこの特性に着目し、放出されるCO<sub>2</sub>によってガスタービンを駆動し発電を行う、自然エネルギーを熱源とする発電装置(以下、**CO<sub>2</sub>-H発電機**とする)の開発を行う。本研究では特に、ガスタービン(膨張機)で生じる冷熱をCO<sub>2</sub>ガスハイドレートの生成に利用することによって、本装置の運転可能条件の拡大を試みる。

## 3. 研究の方法

(1) CO<sub>2</sub>ハイドレート生成と解離によるCO<sub>2</sub>ガスの吸収・放出特性の把握

10 MPa 級耐圧反応容器を設計・製作し、ハイドレートの生成および解離反応を行うための実験システムを構築した。構築した実験システムを用いて、本研究で想定する圧力・温度条件での生成と解離反応速度を調査した。反応容器は恒温水槽(LTBi-550)内に設置して温調を行った。反応容器の容積は100 cm<sup>3</sup>で、その中に50 cm<sup>3</sup>の純水を入れた。CO<sub>2</sub>の水への溶解を十分に行うため、反応容器内にCO<sub>2</sub>ガスを供給してハイドレート生成の初期圧力である3 MPaに保持した。溶解による反応容器内の圧力低下が観察されなくなったことを確認した後に、系を冷却しCO<sub>2</sub>ハイドレートを生成させた。結果に示す一つ目の実験では、ハイドレートの生成による圧力の低下を確認するため、60時間冷却を続けた。これを長時間実験と呼ぶ。二つ目の実験では、生成と解離による熱サイクルを確認するため、冷却と加熱を交互に繰り返す。これを短時間サイクル実験と呼ぶ。温度はボアードスルー継手を介して反応容器内に導入したK型熱電対(MSND1.0-150)で、圧力はダイヤフラム式圧力計(FP101-ES)で計測した。

(2) ガスタービンでの冷熱回収特性の把握  
ガスタービンとして使用するペーン型エ

アモータ(MMF-0700)と発電機として使用する直流モータ(SS40E2)を接続して小型の発電システムを構築した。ガスタービンと発電機の回転軸を直接接続しているため、軸トルクの計測は行わなかった。軸トルクは使用したガスタービンの仕様(回転数-軸トルク曲線)をもとに、供給圧力による補正を行い、回転数の関数として計算して推定した。回転数は磁電式回転検出器(MP-981)によって計測した。上で述べた軸トルクと回転数から軸出力を計算した。発電出力は、発電機に接続した抵抗負荷の抵抗値と電圧の計測値から計算した。また、供給ガスからガスタービンに供給される動力は、ガスタービン入口での圧力、ガスタービン出口でのガスの流量の計測値から計算した。また、ガスタービンの出入口での温度と圧力の計測値からポリロープ指数を計算した。

なお、この実験では、ガスハイドレートの解離による高圧ガスをコンプレッサから供給する圧縮空気によって模擬した。測定項目は、ガスタービン入口でのガスの圧力、タービン出口でのガスの流量、発電機の回転数と出力電圧、ガスタービン入口と出口での空気の温度である。測定方法としては、まずコンプレッサを起動し容器内の空気が最大まで充填された状態とする。その後供給バルブを開き、圧縮空気が流れ始めたと同時にストップウォッチをスタートさせ、ガスタービンが駆動しなくなるかコンプレッサ内の空気が無くなるまで測定を行う。電力負荷の抵抗値を変化させて複数回測定した。

## (3) CO<sub>2</sub>-H発電機的设计指針の構築

実施内容(1)において、生成反応(CO<sub>2</sub>ガスの吸収)は解離反応(CO<sub>2</sub>ガスの放出)に比べて反応速度が小さいことが示唆されたため、解離反応と生成反応を非同期的に生じさせるバッチ運転方式について検討を行った。

## 4. 研究成果

(1) CO<sub>2</sub>ハイドレート生成と解離によるCO<sub>2</sub>ガスの吸収・放出特性の把握

### ・長時間生成実験

図1に生成実験の結果を示す。横軸は冷却開始からの時間、縦軸は反応容器内の圧力と温度、熱媒体の温度である。反応容器内の初期圧力は3 MPa、熱媒体の初期温度は281 K、冷却時の温度は269 Kである。冷却開始からの4時間までの間の圧力低下が大きい。その後も徐々に圧力が低下し、48時間が経過した時点での圧力は1.8 MPaとなり、熱媒体の温度差12 Kに対して、生成反応の開始時と終了時での圧力差は1.2 MPaとなった。CO<sub>2</sub>ハイドレートの相平衡圧力曲線から計算される圧力差約3 MPaと比較すると、本実験で得られた圧力差は4割にとどまっている。この原因は、本実験では反応容器内の攪拌を行っていないために、生成反応が固相拡

散律速となったことや、生成反応の駆動力となる反応容器内の圧力が低下したことなどが考えられる。生成させる際に攪拌のための動力を消費することは、正味の発電量を低下させるため、攪拌など動力を消費しない生成反応促進の方法を検討する必要がある。

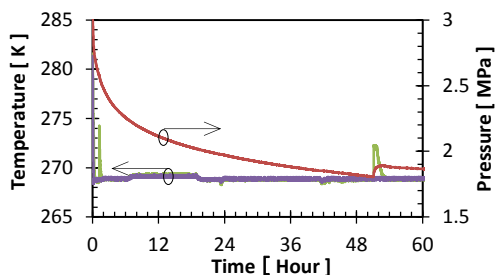


Fig. 1 長時間生成実験の結果.

赤：反応容器内圧力，緑：反応容器内温度，  
紫：熱媒体温度.

図2は、図1の冷却開始から2時間の横軸を拡大して示したものである。冷却が始まると熱媒体の温度が直線的に低下して設定値に達し、次いで反応容器内の温度が低下する。反応容器内の圧力は開始から0.2時間程度まで直線的に低下した後に傾きが変化している。この変化点までが温度低下によるCO<sub>2</sub>ガスの圧力低下で、変化点以降はCO<sub>2</sub>が水に溶解したことによる圧力低下であると考えられる。その後、図2の赤い矢印で示した1.2時間付近で、反応容器内の温度がステップ状に上昇しており、この際の反応容器内の温度は274 Kである。図3に示すような、272 K付近で一定値を保つ傾向とは異なることから、これはハイドレートの生成反応が開始した際に生じた潜熱によるものと考えられる。図3に51時間から53時間の期間を拡大した結果を示す。既に述べたように、51.2時間付近から反応容器内の温度が上昇しており、上昇した温度が1時間程度継続している。反応容器内の温度の上昇と同時に反応容器内の圧力が徐々に上昇していることから、この温度の上昇は反応容器内に充填した純水が凍結して体積が増したことによるものと考えられる。

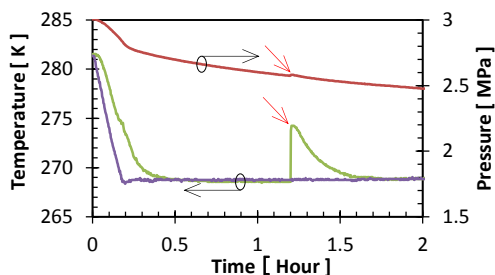


Fig. 2 図1の開始から2時間の拡大図

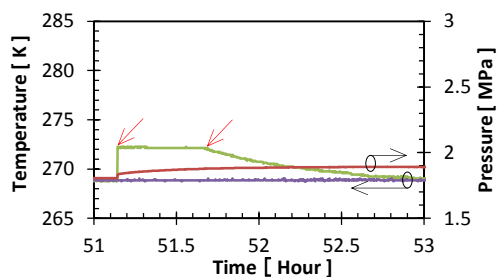


Fig. 3 図1の51時間から53時間の拡大図

#### ・短時間サイクル実験

図4は、CO<sub>2</sub>ハイドレートの生成、解離反応による熱サイクルの実験結果である。熱媒体の温度の設定値は、生成反応時では273 K、解離反応時では281 Kとした。なお、上に述べた長時間生成実験で反応容器内での凍結が推定されたため、生成反応時の熱媒体の温度の設定値を長時間生成実験での値よりも高めた。また、熱媒体の設定温度の変更による冷却と加熱の継続時間は、それぞれ1.5時間と0.5時間とした。図4より3サイクル目以降で安定した圧力変化が繰り返されていることが分かる。また、図5に示すように、生成反応による圧力低下に比べて、解離反応による圧力上昇の方が短時間に完了することが分かる。この結果から、CO<sub>2</sub>-H発電機を実用化するためには生成反応速度の向上が重要であることが示唆される。なお、図5に短時間サイクル実験の1サイクルを拡大して示しているが、長時間生成実験で確認された、ハイドレートの生成開始による反応容器内温度の上昇は確認されなかった。

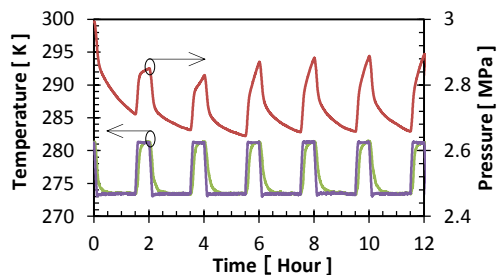


Fig. 4 短時間サイクル実験の結果.

赤：反応容器内圧力，緑：反応容器内温度，  
紫：熱媒体温度.

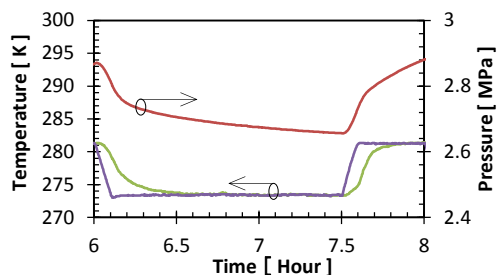


Fig. 5 図4の1サイクルの拡大図

(2) ガスタービンでの冷熱回収特性の把握  
 図6は小型の発電システムによる、発電実験の計測結果であり、横軸はタービン入口での作動流体（圧縮空気）の圧力、縦軸は機械効率である。各プロットは電力負荷の抵抗値である。図より、機械効率は作動流体の圧力が低い場合に高い値となった。

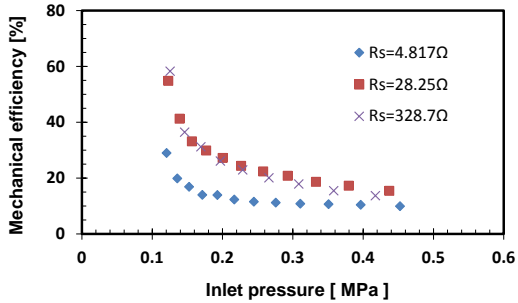


Fig. 6 タービン入口圧力と機械効率の関係

図7, 図8は発電機効率の計算結果であり、プロットは図6と同様である。図7の横軸はタービン入口での作動流体（圧縮空気）の圧力、図8の横軸は発電機の回転速度である。各図より、抵抗値が適切な場合の発電機効率は60%程度を示すことが分かる。抵抗値が適切ではない場合には、発電電流が過大または過少となって、発電機の効率が低い値を示す回転速度領域を逸脱するため、いずれも発電機効率は低い値を示した。

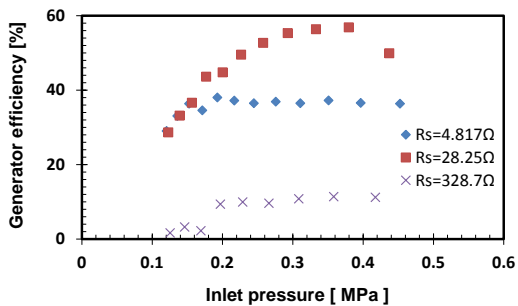


Fig. 7 入口圧力と発電機効率の関係

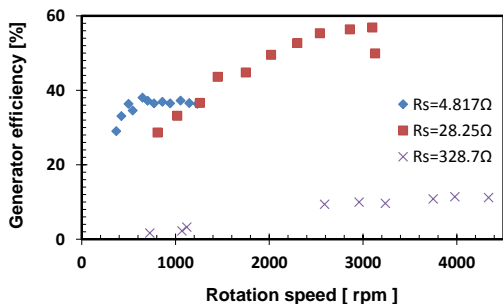


Fig. 8 回転速度と発電機効率の関係

また、タービン出入口で作動流体の温度と圧力から計算したポリトロップ指数は約1となり、タービン内での状態変化が等温膨張となっていることが推定された。これは、本研

究で当初想定していた、タービンでの冷熱回収が行えないことを示唆するものであったため、以降は冷熱回収は考慮しない基本的な発電システムの検討を行った。

### (3) CO<sub>2</sub>-H 発電機の設計指針の構築

図9と図10は基本的なCO<sub>2</sub>-H発電機の概念図であり、図9は発電運転時、図10はハイドレートの生成によるエネルギー貯蔵時を示している。図11は図9と図10に示したCO<sub>2</sub>-H発電機の動的モデルを構築して数値解析を行った結果である。詳細は「雑誌論文①」に記載しているが、高温熱源と低温熱源の温度がそれぞれ、313 K と 253 K の場合、水 1 m<sup>3</sup> に CO<sub>2</sub> ハイドレートを生成・解離反応を生じさせると、図12(下)の赤・破線で示すように、正味の発電電力量が 1.4 kWh となることが明らかになった。

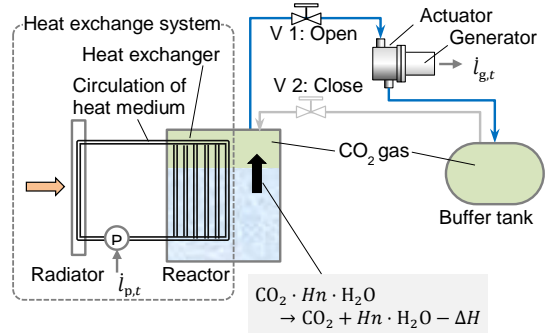


Fig. 9 CO<sub>2</sub>-H 発電機 の概念図 (発電運転時)

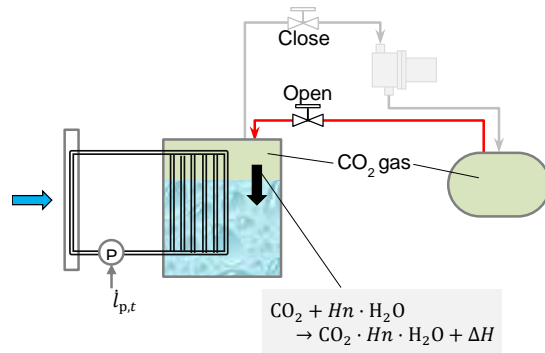


Fig. 10 CO<sub>2</sub>-H 発電機 の概念図 (エネルギー貯蔵時)

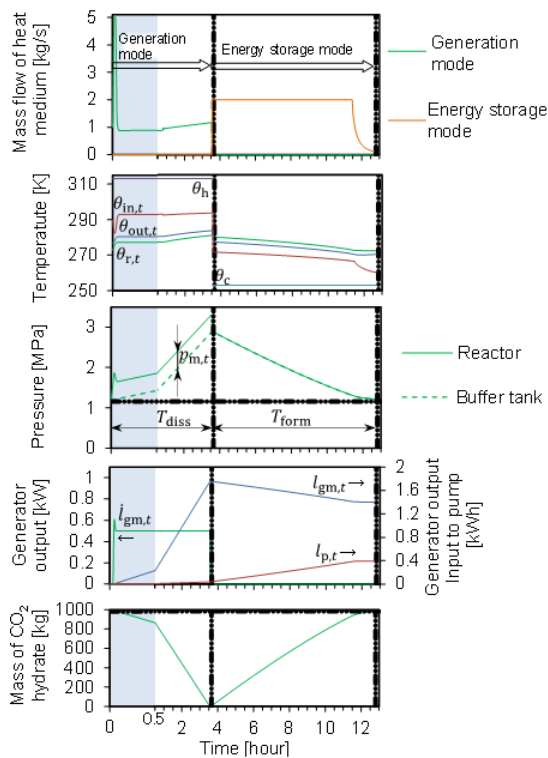


Fig. 11 CO<sub>2</sub>-H 発電機の動作の解析結果

上から順に、熱媒体の質量流量（緑：発電運転、橙：エネルギー貯蔵）、温度（茶：熱媒体（入口）、青：熱媒体（出口）、緑：反応容器内）、圧力（実線：タービン入口、破線：タービン出口）、電力・電力量（緑：発電電力、青：発電電力量、茶：熱媒体循環電力量）、ハイドレートの質量。横軸は発電運転開始からの時間。

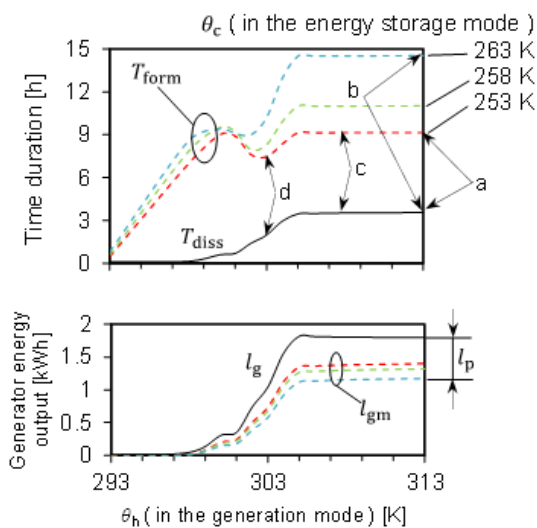


Fig. 12 熱源温度と発電電力量の関係。

黒：発電運転の継続時間（上）と発電運転終了時の発電電力量（下）。

破線：エネルギー貯蔵の継続時間（上）とエネルギー貯蔵終了時の正味の発電電力量（下）、  
赤：低温度熱源の温度が 253 K、  
緑：低温度熱源の温度が 258 K、  
青：低温度熱源の温度が 263 K。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

①川合政人, 小原伸哉, 奥田学, 清水良平, 菊地祥庸, 石川恭介, 三河大祐, 高島正光, 川合僚, CO<sub>2</sub> ハイドレート発電機の動的モデルによる出力制御方法に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol. 82, No. 835 (2016), pp. 1-14, DOI: 10.1299/transjsme.15-00555.

〔学会発表〕（計 2 件）

①川合政人, 小原伸哉, 奥田学, 清水良平, 菊池祥庸, 石川恭介, 川合僚, 高島正光, 三河大祐, CO<sub>2</sub> ハイドレート発電機のエネルギー貯蔵特性, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 日本機械学会 2015 年度年次大会講演論文集 (2015), J0530101, 2015. 9. 16, 北海道大学 (北海道・札幌市)。

②川合政人, 小原伸哉, 奥田学, 清水良平, 菊池祥庸, 石川恭介, 川合僚, 高島正光, 三河大祐, 電力負荷変動に対する CO<sub>2</sub> ハイドレート発電機の応答特性, 平成 27 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 電気・情報関係学会北海道支部連合大会講演論文集 (2015), Vol. 2015, pp. ROMBUN NO. 72, 2015. 11. 7, 北見工業大学 (北海道・北見市)。

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

川合 政人 (KAWAI, Masahito)

函館工業高等専門学校・生産システム工学科・助教

研究者番号：70511278