

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02675

研究課題名(和文)CO₂ハイドレート熱サイクルによる低温排熱の電気エネルギー変換研究課題名(英文)Electrical energy conversion of the low-temperature exhaust heat by CO₂ hydrate heat cycle

研究代表者

小原 伸哉 (Obara, Shin'ya)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：10342437

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：(1)提案システムによるガスハイドレート生成過程と膨張機での損失を改善して、ガスハイドレート生成過程の効率を9%、膨張機での損失を9%低減させることができた。この結果、電力出力は9.2%から18.7%に増加させることができた。
(2)ガスハイドレートの生成と解離について、熱交換器の伝熱面上の3相界面(水(液体)、CO₂(ガス)、ハイドレート(固体)・伝熱面(固体)・カーボン繊維担持触媒(固体))での、熱・物質移動の構造を、試験データに基づいて調査した。上の(1)と(2)に加えて、ガスハイドレートの生成・解離時の温度・圧力条件の最適化から、総合効率54%のシステムを開発できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国内の1次エネルギー消費量のおよそ7割が、低温排熱(概ね200℃以下)として最終的に放出されている。この低温排熱を動力や電力に変換できたなら、温室効果ガス排出の大幅な抑制となる。本研究では高温側の熱源として上で述べた低温排熱、低温側の熱源として外気を用いて、これら2つの熱源の温度差から実用的な効率で電力を得られるかが社会的意義である。

研究成果の概要(英文)：(1) The losses in the gas hydrate production process and in the expander by the proposed system could be improved, reducing the efficiency of the gas hydrate production process by 9% and the losses in the expander by 9%. As a result, the energy flow was as shown in Fig. 6 and the electricity output could be increased from 9.2% to 18.7%.

(2) The formation and dissociation of gas hydrates were investigated on the basis of test data on the structure of heat and mass transfer at the three-phase interface (water (liquid), CO₂ (gas), hydrate (solid), heat transfer surface (solid) and carbon fibre supported catalyst (solid)) on the heat transfer surface of a heat exchanger.

In addition to (1) and (2) above, from the optimisation of the temperature and pressure conditions during the formation and dissociation of gas hydrates, a system with an overall efficiency of 54% could be developed.

研究分野：熱工学、電力工学

キーワード：ガスハイドレート 蓄電池 物理電池 低温廃熱 小温度差発電 未利用エネルギー 再生可能エネルギー 廃熱回収

1. 研究開始当初の背景

国内の1次エネルギー消費のおよそ7割は、最終的に概ね200℃以下の低温排熱として大気などへ放出されている。図1は、CO₂ガスハイドレートの生成及びガス解離の状態図(温度と圧力の関係)で、図1の例では-5℃の低温側熱源と15℃の高温側熱源により、4.5MPa-1.5MPa≒3MPaの圧力差が得られる。図2は、図1の状態変化から得たCO₂ガスハイドレートの熱サイクル実験の結果である(S. Obara et al. Energy, vol. 74, pp. 810-828, 2014)。図1の状態図と図2の熱サイクルに基づき図3のCO₂ガスハイドレート熱サイクルが構成できるが、これまでに効率42.5%を得ている。しかしながら、図3の熱サイクルから膨張機(アクチュエータ)を介して得られる発電効率は9.2%にとどまっている。本研究の核心をなす学術的な問いは、クリーンなガスハイドレート熱サイクルから実用的な電力変換の効率を得られるかどうかというものである。

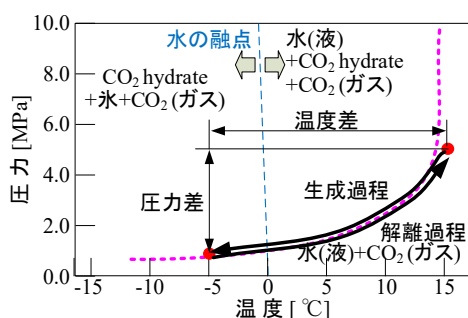


図1 CO₂ハイドレートの状態図(温度-圧力線図)

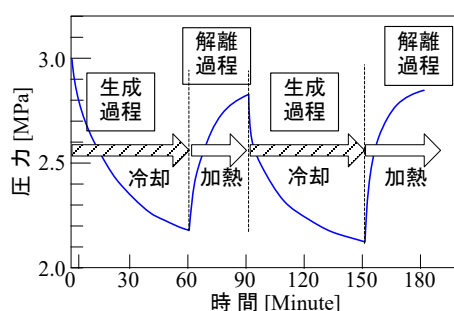


図2 CO₂ハイドレートの熱サイクル試験例

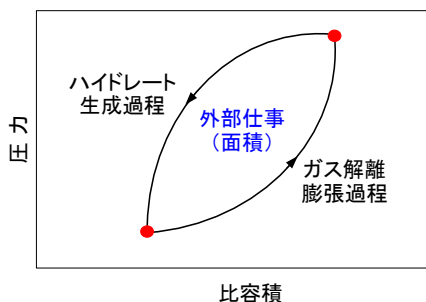


図3 ガスハイドレート熱サイクルの外部仕事

2. 研究の目的

国内の1次エネルギー消費の大きな課題である、200℃以下の低温排熱の回収・利用について、国内外で例のないガスハイドレートの特異な解離膨張特性を用いた熱サイクルによるエネルギー変換を利用して、効率20%以上で高品位エネルギーである電力に変換して利用することが本研究の最終的な目的である。

3. 研究の方法

本研究では200℃以下の低温排熱による高温側熱源と、外気による低温側熱源の温度差でCO₂ハイドレート熱サイクルを運転した際に、熱サイクルから得られる仕事を用いて発電効率20%以上のエネルギー変換の方法を明らかにする。図4(a)は提案システムの現在のエネルギーフローで、これまでの研究により提案システムの発電効率は9.2%を達成している。図4(b)は本研究課題を明らかにすることで予想されるフローである。図4(a)より、提案システムではガスハイドレート生成過程と膨張機での損失が大きく、本研究により図4(b)に示すように、ガスハイドレ

ト生成過程の効率を 11.5%、膨張機での損失を 8.5%低減させることを目的とする。

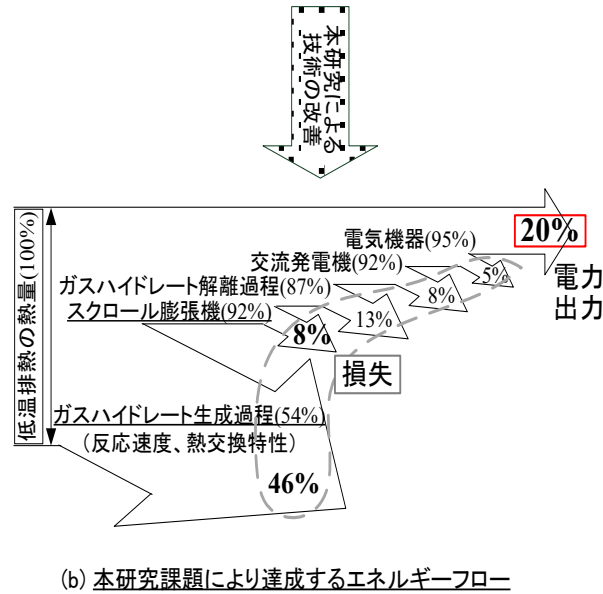
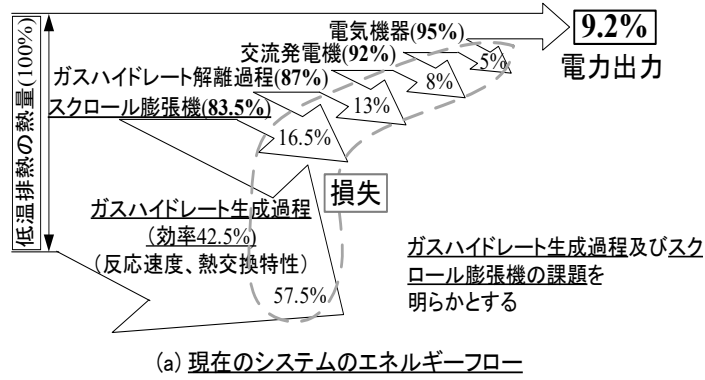


図4 低温排熱と外気によるガスハイドレート熱サイクルを用いた発電システムのエネルギーフロー

そこで本研究では、以下の課題に取り組む。

(1) 図 5 は CO₂ ハイドレートの状態 (温度、圧力) と生成効率の結果例である。CO₂ ハイドレートの状態変化に関する詳細な実験から、ガスハイドレートの状態と生成効率の関係をモデル化する。このモデルから、ガスハイドレート熱サイクル (図 2) の適切な動作点を明らかにする。

また、ガスハイドレート生成・解離用熱交換器について、熱交換器内の 3 相界面 (水 (液体)、CO₂ (ガス)、ハイドレート (固体)・伝熱面 (固体)・カーボン繊維担持触媒 (固体)) での熱・物質移動の構造の観察及び試験データの解析を行う。これにより、CO₂ ハイドレートの生成・解離に適切な熱交換器の構造を明らかにする。

(2) ガスハイドレート生成・解離用熱交換器について、熱交換器内の 3 相界面 (水 (液体)、CO₂ (ガス)、ハイドレート (固体)・伝熱面 (固体)・カーボン繊維担持触媒 (固体)) での熱・物質移動の構造の観察及び試験データの解析を行う。これにより、CO₂ ハイドレートの生成・解離に適切な熱交換器の構造を明らかにする。(1)と(2)によりガスハイドレート生成効率を 54%以上にする (現在 42.5%)。

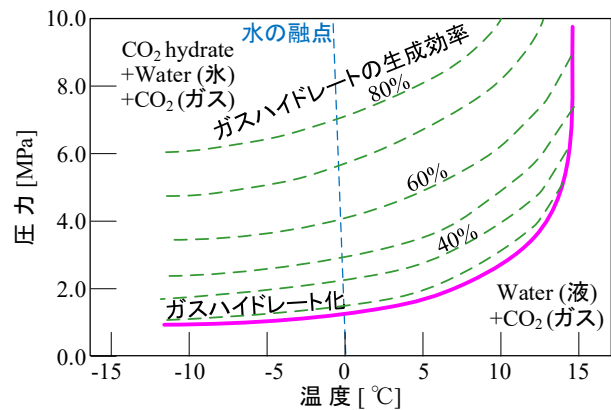


図5 CO₂ハイドレートの状態と生成効率の実験結果例

4. 研究成果

(1) 提案システムによるガスハイドレート生成過程と膨張機での損失を改善して、ガスハイドレート生成過程の効率を9%、膨張機での損失を9%低減させることができた。この結果、図6のようなエネルギーフローとなり、電力出力は9.2%から18.7%に増加させることができた。

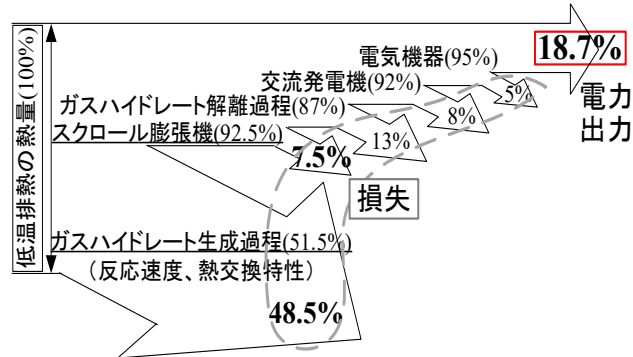


図6 ガスハイドレート熱サイクルを用いた発電システムのエネルギーフロー結果

(2) ガスハイドレートの生成と解離について、熱交換器の伝熱面上の3相界面（水（液体）、CO₂（ガス）、ハイドレート（固体）・伝熱面（固体）・カーボン繊維担持触媒（固体））での熱・物質移動の構造を、試験データに基づいて調査した。この結果から、CO₂ハイドレートの生成・解離に適切な熱交換器構造を開発するよりも、酸化鉄系の反応触媒及びシクロペンタン促進剤の添加が高い効果を示すことが知れた。

上の(1)と(2)に加えて、ガスハイドレートの生成・解離時の温度・圧力条件の最適化から、総合効率54%のシステムを開発できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shin'ya Obara	4. 巻 179
2. 論文標題 Energy storage device based on a hybrid system of a CO2 heat pump cycle and a CO2 hydrate heat cycle	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Renewable and Sustainable Energy Reviews	6. 最初と最後の頁 113290
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.rser.2023.113290	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Shin'ya Obara	4. 巻 292
2. 論文標題 Waste heat recovery system of nuclear and combined cycle power plant by gas hydrate heat cycle	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Energy	6. 最初と最後の頁 116667
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.apenergy.2021.116667	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Daiki Tongu, Hiromu Takaki, Sin'ya Obara
2. 発表標題 Development of storage battery using CO2 gas hydrate thermal cycle
3. 学会等名 2022 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon2022)（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Daiki Tongu, Sin'ya Obara, Masato Kawai
2. 発表標題 Development of a small temperature difference power generation system using CO2 hydrate heat cycle
3. 学会等名 2022 The 4th International Conference on Clean Energy and Electrical Systems（国際学会）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	村田 美樹 (Murata Miki) (40271754)	北見工業大学・工学部・教授 (10106)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------