

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760727

研究課題名(和文)磁気熱量効果を用いた新規エクセルギー再生装置の基礎研究

研究課題名(英文)Fundamental research on an exergy recuperation device using magnetocaloric effect

研究代表者

甘蔗 寂樹(KANSHA, YASUKI)

東京大学・生産技術研究所・特任准教授

研究者番号：10544083

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：プロセス流体の熱エクセルギーを再生し、その熱をプロセス内で循環利用することで省エネルギーとなる自己熱再生技術を提案し、その自己熱再生技術を用いた自己熱再生型プロセスの設計を行ってきた。本研究ではこの自己熱再生技術の適用範囲を広げるために、磁気熱量効果を利用した新規エクセルギー再生装置の開発を目的とし、その基礎研究を行った。具体的には、実験とシミュレーションから磁気熱量効果に伴うエネルギー/エクセルギーの解析と磁界における熱伝達方法について検討を行い、その後、自己熱再生のための磁気熱量効果を用いたエクセルギー再生装置を設計した。

研究成果の概要(英文)：Self-heat recuperation technology, in which the latent heat as well as the sensible heat of the process stream can be circulated without any heat addition, has been developed. This technology leads to a reduction in the energy requirement of several chemical processes. In this research, we investigated for developing a new exergy recuperation device using magnetocaloric effect to propagate self-heat recuperation technology into industry. In particular, we analyzed energy/exergy associated with magnetocaloric effect and the way to transfer heat under magnetic field by experiment and simulation. Then, we designed an exergy recuperation device using magnetocaloric effect.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：エネルギー効率利用 省エネルギー エクセルギー

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 温暖化の抑制を目的として、産業のみならず民政においても省エネルギー化への関心が高まっている。申請者らは、化学プロセスの省エネルギー化を目的として、2009年にプロセス流体のもつ熱エクセルギーを再生し、プロセス外から熱を加えず、プロセス内で再生した熱を循環再利用することで、プロセスのエネルギー消費を大幅に削減する自己熱再生技術を提案した。これまでに本技術を種々の化学プロセスに適用し、各プロセスにおける熱移動に伴うエクセルギー損失を最小化し、定常時において大幅な省エネルギー化が達成できることをシミュレーションにて確認している。

(2) 自己熱再生技術は特に蒸留分離プロセスへの適用が進められている。シミュレーション上では従来の熱交換を行った蒸留分離プロセスに比べて、消費エネルギー量が1/7程度と報告されており、その省エネルギー効果は非常に大きい。実用化に向けて、自己熱再生型蒸留分離装置の運転方法の検討や、エンジニアリング会社によってバイオエタノールの濃縮分離装置に実際に適用され、定常時において消費エネルギー量が1/4以下になることが確認されている。

(3) 本技術の普及にはプロセス流体の熱のエクセルギーを再生するエクセルギー再生装置が不可欠であるが、エクセルギー再生装置として現状用いている圧縮機には流入する流体が高温の場合使用できない、非圧縮性流体のエクセルギーは再生できないといった制約がある。

### 2. 研究の目的

プロセスのエネルギー消費を大幅に削減する自己熱再生技術の適用範囲を拡げるために、圧縮機に替わる新規のエクセルギー再生装置を提案する。

磁気熱量効果は磁性体の断熱励磁により、磁気スピンのエントロピーが変化し、磁性体の温度が変化する物理化学現象である。具体的には、励磁時に磁力により磁性体のもつ磁気スピンの揃い、この影響で、格子が振動し、磁性体の温度が上昇する。

この物理化学現象である磁気熱量効果を利用し、プロセス流体のエクセルギーを効率よく再生する装置の開発に向けた基礎研究を行う。

### 3. 研究の方法

本研究では自己熱再生適用に向けて圧縮機に替わる磁気熱量効果を用いたエクセルギー再生装置を開発するための基礎研究を行う。本研究で提案される磁気熱量効果を用いたエクセルギー再生装置を自己熱再生型プロセスに導入し、課題の抽出と、その運転方法を構築したいと考えている。

(1) 磁気熱量効果に伴うエネルギーの流れを、磁性体としてガドリニウムを用いて解析

し、仕事と熱に分けて、実験にて各エネルギー/エクセルギー量を導出する。

(2) 磁石による磁界内における物質間での熱移動を系外と断熱的に行う方法を提案する。また、その時の熱伝達速度を解明し、磁場の強さの影響を実験にて調べる。

(3) 磁気熱量効果を用いたエクセルギー再生装置を自己熱再生型プロセスへ導入し、その課題を抽出する。同時に、プロセス全体の定常時におけるエネルギー消費量を定常プロセスシミュレーターと実験結果に基づいて算出する。他の磁性体を用いたエクセルギー再生装置のエネルギー消費量も算定する。

(4) 非定常時における磁気熱量効果を用いたエクセルギー再生装置及びそのエクセルギー再生装置を用いた自己熱再生型プロセスの動特性を解析し、非定常時においても省エネルギーとなる運転システムの設計を行う。特に、動特性が非線形と予測され、非線形制御システムの構築を行う。

### 4. 研究成果

実験とシミュレーションによって、磁気熱量効果に伴うエネルギーの解析と磁界内での熱の伝達方法と影響を調べ、そのデータを元に磁気熱量効果を用いたエクセルギー再生装置の自己熱再生への導入と運転システムの設計を行った。

(1) 磁気熱量効果に伴うエネルギーの解析と磁界における熱伝達方法の解明

磁気熱量効果に伴うエネルギーの流れを、解析するために、図1に示す実験装置にて、ガドリニウムの消磁・励磁時の温度変化とそれに伴う仕事量を計測し、仕事と熱に分けて、各エネルギー/エクセルギー量を導出した。

提案する装置が安全かつ汎用であるためには、熱を再生させる流体と間接的に熱移動ができ、磁石による磁界内における物質間での熱移動を系外と断熱的に行う必要があるそのため、ガドリニウムを円管内に充填し、その温度変化を計測した。その例を図2に示す。

実験で測定した温度変化より、ガドリニウムの温度・エントロピー線図を描き、理論必要仕事量を算定した。系外から与えるエネルギー量と比較・検討し、熱損失、ヒステリシスの影響について調べた。

また、その時の熱伝達速度を解明し、磁場の強さの影響を実験にて調べた。

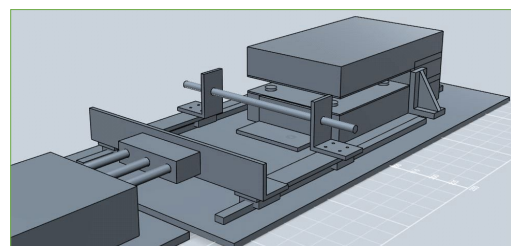


図1. 磁気熱量効果による仕事量測定装置

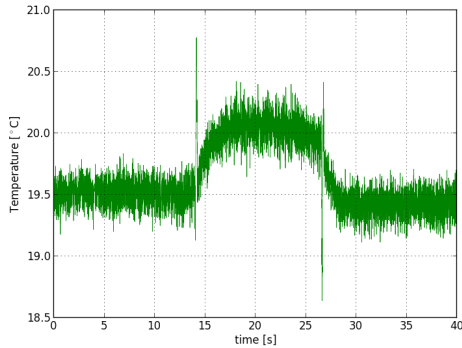


図 2 . ガドリニウムの温度

ガドリニウムとプロセス流体が断熱的に熱の移動ができる方法として、ガドリニウム充填層内を流体が移動する方法の提案を行った。このように設計することで熱を再生させる流体がガドリニウムと直接接触するが、系外と断熱して熱移動を行える。(図 3) この装置における熱伝達速度を測定し、温度差と流体の速度について検討を行った。

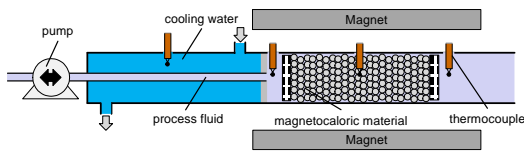


図 3 . ガドリニウム充填層の構造

( 2 ) 自己熱再生のための磁気熱量効果を用いたエクセルギー再生装置の開発  
磁気熱量効果に伴うエネルギーの解析と磁界における熱伝達方法の解明における実験装置 ( 図 4 ) と温度熱量線図を用い、磁気熱量効果を用いたエクセルギー再生装置のエネルギーの流れと消費量を測定し、得られたデータをモデル化し、シミュレータに反映した。エクセルギー再生装置の自己熱再生への導入とエネルギー消費量の算出、プロセスの運転システムの設計を行った。

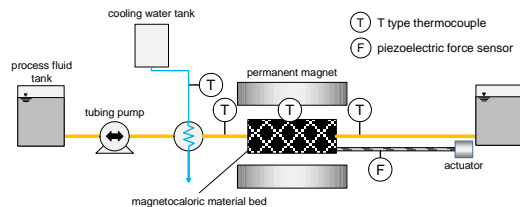


図 4 . エクセルギー再生装置概観

自己熱再生型プロセスへの導入とそのエネルギー消費量の算出を行った。図 4 のように装置を設計することでガドリニウムを充填した円管を磁石 ( 磁場 ) の中に挿入する力と磁石の中から取り出すためのエネルギーが必要仕事となる。同時に、円管内を流体が移動するための圧力損失に相当するポンプ動

力が必要となる。系外と断熱的に熱が移動すると、熱は全て流体に移動し、流体へ移動した熱量が確認できる。これらの量を、温度変化 ( 図 5 ) と圧電素子によるフォースセンサーを用いて力を計測し ( 図 6 ) これらのデータから算出した。

得られた結果と文献値からモデル化を行い、シミュレーションを行い、自己熱再生プロセス全体のエネルギー消費量とエクセルギー損失を求めた。

一つの結果として、17.5 から 24.0 の間で 8.70 J の熱のエクセルギーを再生し、循環するのに 0.16 J 必要であるという結果が得られている。

この結果は従来から用いられている圧縮式エクセルギー再生装置と比較しても同等以上の値を得ている。

また、これらの設計と構築したシミュレーションモデルを通して、プロセスの動特性も考慮した新規エクセルギー再生装置を用いた自己熱再生型プロセスの運転システムの設計を行った。

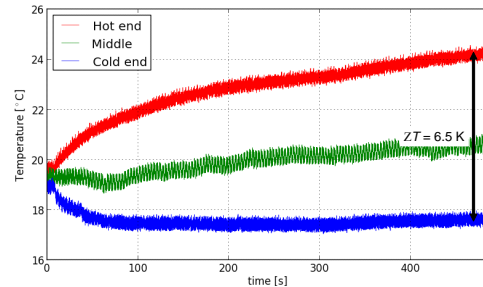


図 5 . ガドリニウム充填層の温度変化

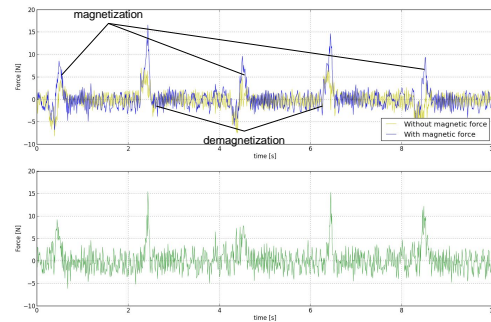


図 6 . フォースセンサーによる力の变化の計測結果

## 5 . 主な発表論文等

[ 雑誌論文 ] ( 計 4 件 )

Yui Kotani、Yasuki Kansha、Masanori Ishizuka、Atsushi Tsutsumi、Experimental investigation of an active magnetic regenerative heat circulator applied to self-heat recuperative technology、Applied Thermal Engineering、査読有、2014、印刷中、DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.04.015

Yui Kotani、Yasuki Kansha、Atsushi Tsutsumi、Conceptual design of an active

magnetic regenerative heat circulator based on self-heat recuperative technology, Energy, 査読有, Vol. 55, 2013, pp. 127-133, DOI: 10.1016/j.energy.2013.03.014

Yui Kotani, Yasuki Kansha, Atsushi Tsutsumi, Active magnetic regenerative heat circulator for energy saving in thermal process, Chemical Engineering Transactions, 査読有, Vol. 35, 2013, pp. 229-234, DOI: 10.3303/CET1335038

Yui Kotani, Yasuki Kansha, Atsushi Tsutsumi, Self-heat recuperation using magnetocaloric effect, Chemical Engineering Transactions, 査読有, Vol. 29, 2012, pp. 373-378, DOI: 10.3303/CET1229063

〔学会発表〕(計12件)

Yui Kotani, Yasuki Kansha, Masanori Ishizuka, Atsushi Tsutsumi, Magnetocaloric self-heat recuperation cycle for energy saving in thermal processes, 6th IIR/IIF International Conference on Magnetic Refrigeration (THERMAG VI), 2014, 9月7日-10日, Victoria, Canada

Yui Kotani, Yasuki Kansha, Masanori Ishizuka, Atsushi Tsutsumi, Experimental investigation of self-heat recuperation using magnetocaloric effect, 17th International Conference on Process Integration, Modeling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES 2014), 2014, 8月23日-27日, Prague, Czech Republic

小谷 唯, 菅 蔗 寂 樹, 石 束 真 典, 堤 敦 司, 磁気熱量効果を用いた熱循環システムの実験研究, 日本エネルギー学会第20回年次大会, 2014, 7月19日-20日, 福岡

Yui Kotani, Yasuki Kansha, Masanori Ishizuka, Atsushi Tsutsumi, Simulation and experimental evaluation of self-heat recuperation using magnetocaloric effect, International Symposium on EcoTopia Science 2013, 2013, 12月13日-15日, 名古屋

Yui Kotani, Yasuki Kansha, Masanori Ishizuka, Atsushi Tsutsumi, Experimental investigation of self-heat recuperation using magnetocaloric effect for energy saving in thermal process, 2013 American Institute of Chemical Engineers Annual Meeting, 2013, 11月3日-8日, San Francisco, USA

Yui Kotani, Yasuki Kansha, Atsushi Tsutsumi, Active magnetic regenerative heat circulator for energy saving in thermal process, 16th International Conference on Process Integration, Modeling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES 2013), 2013, 9月29日-10月2日, Rodos, Greece

小谷 唯, 菅 蔗 寂 樹, 石 束 真 典, 堤 敦 司, 磁気熱量効果を適用した自己熱再生システムの実験研究, 化学工学会第45回秋季大会, 2013, 9月16日-18日, 岡山

Yasuki Kansha, Masanori Ishizuka, Yui Kotani, Atsushi Tsutsumi, Exergy loss minimization for chemical processes, International Conference on Green Energy and Technology, 2013, 8月24日-26日, 北九州

Yasuki Kansha, Masanori Ishizuka, Yui Kotani, Atsushi Tsutsumi, Evaluation of exergy loss in heat exchangers, 9<sup>th</sup> World Congress of Chemical Engineering, 15<sup>th</sup> Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress, 2013, 8月18日-23日, Seoul, Korea

Yui Kotani, Yasuki Kansha, Atsushi Tsutsumi, Proposition of active regenerative heat circulator for self-heat recuperation in thermal processes, Postgraduate Colloquium for Environmental Research 2013, 2013, 6月28日-29日, Genting, Malaysia

小谷 唯, 菅 蔗 寂 樹, 堤 敦 司, 自己熱再生に基づいた AMR ヒートサーキュレーターの概念設計, 化学工学会第78年会, 2013, 3月17日-19日, 大阪

Yui Kotani, Yasuki Kansha, Atsushi Tsutsumi, Self-heat recuperation using magnetocaloric effect, 15th International Conference on Process Integration, Modeling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES 2012), 2012, 8月25日-29日, Prague, Czech Republic

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.energy.iis.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅 蔗 寂 樹 (KANSHA, Yasuki)

東京大学 生産技術研究所 特任准教授

研究者番号: 10544083