

平成 30 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14544

研究課題名(和文)磁気モーメントの変化を用いた新規環境発電技術実現に向けた基礎研究

研究課題名(英文)Power generation from low temperature waste heat using magnetic phase transition

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、振動や電波、排熱などから電気を取り出す環境発電が注目されている。これらのエネルギー源の中でも熱の量は非常に多くまとまって取り出せることから、熱電変換を利用することが、環境発電の代表例として注目されており、その研究開発が進められている。しかしながら、熱電変換の発電効率は非常に低いことが知られている。そこで、本研究では、冷凍機などから排出される低温排熱からの発電を対象として、磁性体の転移と誘導起電力を利用した新規環境発電技術の提案とそのシステム設計について実験と理論解析により基礎研究を行った。

研究成果の概要(英文)：In this research, an innovative power generation system from a low temperature heat has been proposed. In the proposed system, magnetic phase transition is integrated with Faraday's law of induction, electric power is generated without any additional energy conversion, leading to achieving efficient power generation. Magnetic phase transition is a famous phenomenon that a paramagnetic material absorbs low temperature (< Curie temperature) heat and isothermally transforms to a ferromagnetic material at the Curie temperature. Furthermore, the power generation performance of the proposed system has been thermodynamically evaluated by experiments and simulations.

研究分野：プロセス設計

キーワード：エネルギーの高効率化 エネルギー変換 環境発電

1. 研究開始当初の背景

情報通信技術の発展に伴い、各種の情報を取得するセンサや、信号の送・受信のために、近年、振動や電波、排熱などから電気を取り出す環境発電が注目されている。

これらのエネルギー源の中でも家庭や工場から廃棄される熱の量は非常に多くまとまって取り出せることから、熱電変換(ゼーベック効果・ペルチェ効果)を利用することが、環境発電の代表例として注目されており、その研究開発が進められている。

熱を受け取り発電する熱機関の場合、カルノーサイクルが有するカルノー効率(理論最高)の発電効率となる。カルノーサイクルは、断熱下にて温度を上昇・下降させる断熱変化と、等温にて熱を吸熱・放熱する等温変化からなり、実際に本サイクルを構築することはできない。

カルノー効率は、吸熱・放熱の二つの等温変化時の温度に大きく依存する。環境発電で用いる排熱は比較的環境温度に近い温度の熱であることから、カルノーサイクルを用いて発電したとしても発電効率は決して高いとはいえない。

一般的な熱電変換では、吸熱面と放熱面は固体で出来ていることから吸熱・放熱すると吸熱・放熱の各面を構成する物質の温度が変化する。また、吸熱面と放熱面が別の物質にてつながっていることから、システム内を伝熱し、さらに発電効率が低下することが分かっている。

2. 研究の目的

本研究では排熱を用いた環境発電技術の高効率化を図り、将来の環境発電技術の社会への導入・普及を目指す。

具体的には、冷凍機や冷却水などの低温排熱からの発電を対象として、熱電変換に代わる磁性体の転移と誘導起電力を利用した新規環境発電技術の提案とそのシステム設計について基礎研究を行った。

3. 研究の方法

外部からの熱により磁性体の温度変化に伴って強磁性体から常磁性体へと転移することが知られている。この転移温度(キュリー温度)が19℃と環境温度付近であるガドリニウムでは、磁化の温度に対する減少分布が小さい。また、キュリー温度付近において磁性体に断熱状態で磁場を加えると、温度が上昇し、逆に磁場を減らすと温度が低下する。これを磁気熱量効果と呼び、この物理化学現象をヒートポンプ的に用い、冷凍または加熱する技術が提案されている。

提案する環境発電システムはこの磁性体の転移によるエントロピー変化を潜熱として利用するとともに、磁性体が強磁性体時に作り出す自身の磁場を熱により変化させ、電磁誘導にて直接的に発電するシステムである。本研究では、主に次の各研究項目につい

て基礎検討を実施した。

- 1) キュリー温度が約19℃と環境温度に近いことから、対象とする磁性体をガドリニウムと定め、ガドリニウムの物理・化学的特徴を実験にて把握した
- 2) 物理・化学基礎実験で得られたデータから提案するシステムが有する熱力学サイクルを把握し、どの程度の発電ポテンシャルを有するか確認した
- 3) 提案システムの設計を行うとともに、実現に向けた課題の抽出を行った

4. 研究成果

1) ガドリニウムの物理・化学的特性

ガドリニウムが磁気熱量効果により変化するときのヒステリシスによる損失は非常に小さく、磁場の変化での断熱効率は90%以上となることを確認した。

実際、冷蔵庫にて強磁性体を維持するように2.7gのガドリニウム塊を冷却し、そのガドリニウム塊が作り出すガドリニウム塊近傍の磁束密度をガウスメーターにて測定したところ30mT程度となることを確認している。

また、文献調査の結果、磁場が存在しない点から1Tの磁束密度を有する磁場中にガドリニウムを配することで、磁気熱量効果による変化が最大となるキュリー温度付近で2~3.5Kの温度変化が生じることが分かった。

ガドリニウムの化学的特性として、水にゆっくりと溶解すること、金属であることから酸化しやすいことが知られており、市販品はオイル中で保存されているが、実際に空気中で実験を行ってもそれほど急激な変化があらわれないことを確認した。

2) 発電システムと発電量

1)で得たガドリニウムの特徴から、図1に示す実験装置を使い、発電量を測定する実験を行った。1)で用いた2.7gのガドリニウム塊を冷蔵庫内で冷やし、強磁性体として、中心にモーター(回転速度:250度/s)を配した35mmの腕の先に取り付け、ソレノイド近傍を移動する。最も近い点でガドリニウムがソレノイドに与える磁束密度は25mT程度である。同時に、ガドリニウムから最も遠いソレノイドの逆端には永久磁石を取り付け、磁界が形成されるようにしている。この永久磁石の近傍で磁束密度は260mTであることをガウスメーターにて測定している。

誘導起電力量は次の式(1)で表されるように、ソレノイドの巻き数(500巻き)と、磁束密度の変化速度に依存することから、

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

図1のようにソレノイド近傍をガドリニウムが移動することで、ガドリニウムが作る磁束密度が変化する。その際に、誘導起電力がソレノイドに発生し、電流が流れる。このとき、

抵抗 (4.7Ω) と電圧計を用いて発電量を計測した。観測されたデータの一例を図2に示す。この図をみると0.6~0.7秒のところで、起電力量が大きく変化していることが分かる。

発電量を見るためには、ガドリニウムを19℃以上の常温にさらし、消磁した常磁性体時での起電力量と電流量との差分を見る必要があり、これら二つの結果から、0.1 nW の出力があることが確認できた。変化の速度は0.1秒と非常に小さいことから、1サイクルで得られる発電量は0.1 nJであることが分かる。

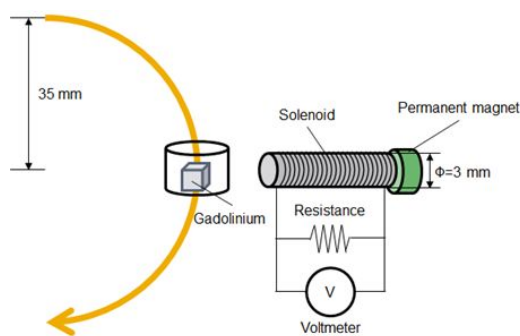


図1 実験装置

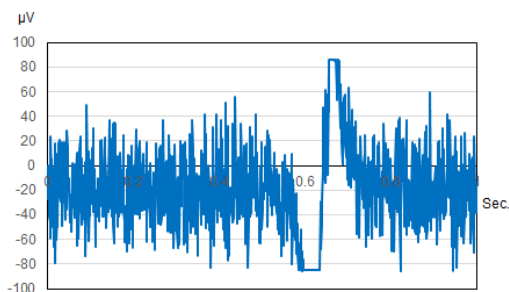


図2 起電力の変化

このように、発電量は非常に小さいが、本発電システムにより起電力を取り出せることを確認した。発電量は起電力と電流量に依存することから、起電力を大きくするには、式(1)より磁束密度の変化の絶対値を大きくするか、ソレノイドの巻き数を多くする必要がある。現状として、ガドリニウムが作り出す磁束密度の変化が25 mTと非常に小さい。これは、ガドリニウムは強磁性体となっているが、スピンの向きが揃っていないことに起因していると考えられ、外部磁場によりスピンの向きを揃える必要があると考えられる。外部磁場にガドリニウムを晒すと、外部磁場の磁界によりガドリニウムが引っ張られることから、この際に別途仕事が必要となる。

また、磁束密度の変化速度を速めることでも、起電力の増加につながる。しかしながら、本研究では発電効率の高効率化を目指していることから、起電力が小さくても発電時間が長い場合は大きな問題とならない。実際、

エネルギーの観点から速度を速めることは別途エネルギーを加えることにつながるため、望ましくない。本実験では、モーターを用いて、ガドリニウムを移動させているが、理想的にはガドリニウムを移動させるのではなく、ガドリニウムへ環境熱を伝熱することにより、ガドリニウムが消磁していき、それに伴い磁束密度が変化するのが、最も発電効率を高めることにつながる。そのため、本システムの高効率化には伝熱が鍵となる。

3) 熱力学サイクルと提案システムの利用可能性

これらの結果から、本環境発電システムの一連の操作とその際の熱力学サイクル(図3)について考察した。

低温排熱を吸収させ、キュリー温度以下にする(ガドリニウムは強磁性体化する) ガドリニウムを磁場に晒し、スピンの向きを整える

ガドリニウムをソレノイドに近づける
ガドリニウムを環境温度で加熱する(ガドリニウムは常磁性体化する)

この間にソレノイドに誘導起電力が発生する

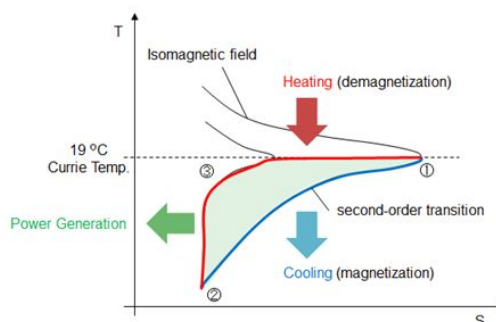


図3 熱力学サイクル線図

図3を見てわかる通り、等磁場線はキュリー温度付近において、二次に転移することから直線的ではないがサイクルに囲まれた部分は下側を斜辺とする直角三角形を描いている。これは顕熱から動力を回収する際に効率が良いとされ、現在検討が進められているトリラテラルサイクルの形状である。そのため、本システムは顕熱である冷排熱からの環境発電において大きな力を発揮すると考えられる。実際、熱交換機出口や冷凍機の出口の冷排熱は基本的に顕熱であることから、提案システムの利用可能性は非常に高いと考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

Y. Kansha, M. Ishizuka: Efficient Power Generation from Low Temperature Heat Source, Chem. Eng. Trans., Vol. 56 (2017) pp. 1519-1524

〔学会発表〕(計 3件)

Y. Kansha, M. Ishizuka: Efficient Power Generation from Low Temperature Heat Source, The 9th Regional Conference on Chemical Engineering (RCChE2016), Nov. 21-22, Kuala Lumpur, Malaysia (2016)

菅 蔗 寂 樹, 石 束 真 典: 磁気モーメントの変化によるトリラテラル環境発電の可能性, 第 27 回日本エネルギー学会大会, 8 月 8 日-9 日, 東京 (2018)

Y. Kansha, M. Ishizuka: Power Generation from Low Temperature Waste Heat Using Magnetic Phase Transition, 21st Conference Process Integration, Modeling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES2018), Aug. 25-29, Prague (2018)

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 : 1 0 5 4 4 0 8 3

(2) 研究分担者

石 束 真 典 (ISHIZUKA, Masanori)
東京大学 生産技術研究所 特任研究員
研究者番号 : 1 0 3 8 6 7 1 6