

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12526

研究課題名（和文）スピン熱電素子の中性子照射特性とそれを利用した中性子検出器の開発

研究課題名（英文）Neutron irradiation effects on spin thermoelectric devices and development of neutron detector

研究代表者

岡安 悟（Okayasu, Satoru）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究員

研究者番号：50354824

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：耐放射線特性に優れると考えられているスピントロニクス技術を利用した熱電素子を原子力分野へ応用する研究開発を行った。これまでの研究でスピン熱電素子はガンマ線に対して高い耐性を持つことが示されていたが、中性子に対しては明らかになっていなかった。本研究の前半で中性子照射に対する耐性を検証した。この結果を踏まえ、後半は中性子とホウ素10の核反応熱をスピン熱電素子で検出する試みを行った。しかしながら現状では信号が小さくノイズに埋もれて検出できなかった。現在、素子の改良と検出方法の見直しを行い、信号検出を続けている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ごく狭義には、福島第一原発事故の作業現場での簡易な中性子線量測定に資するもので、廃炉作業への進展を促すものと考えている。また本技術を利用して高線量下でも熱電変換による電源確保が可能となり、原子炉の安全性の向上にも寄与すると期待している。

研究成果の概要（英文）：We conducted research and development on the application of thermoelectric elements using spintronics technology, which is thought to have excellent radiation resistance properties, to the nuclear field. Previous studies have shown that spin thermoelectric elements are highly resistant to gamma rays, but not neutrons. In the first half of this study, the resistance to neutron irradiation was verified. Based on these results, in the second half, we attempted to detect the nuclear reaction heat of neutrons and boron-10 with a spin thermoelectric element. However, at present, the signal was small and buried in noise and could not be detected. Currently, we are improving the element and reviewing the detection method, and continue to detect signals.

研究分野：ビーム応用

キーワード：スピントロニクス 中性子 熱電変換

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スピントロニクスは放射線に強い新しいエレクトロニクスデバイス技術として考えられており、申請者は放射性物質の崩壊熱をスピンゼーベック素子で熱電変換する原子力分野での応用を計画している。しかしながらスピンゼーベック素子の耐放射線特性については先行研究がほとんどないため系統的なデータが必要であった。

2. 研究の目的

放射性物質の崩壊熱をスピンゼーベック素子で熱電変換する原子力分野での応用を目指し、様々な粒子線(ガンマ線、中性子線、重イオン、電子線)について、照射量、照射エネルギーなどをパラメーターにスピンゼーベック素子の熱起電力がどのように変化するかを系統的に調べ、スピンゼーベック素子の耐放射線特性を明らかにする。その知見をもとに、スピンゼーベック素子の廃熱発電への適用を検討する。併せてプルトニウムを使用しない原子力電池や固体素子中性子検出器への応用も検討する。

3. 研究の方法

素子の耐照射特性として、スピンゼーベック電圧の変化を、各種照射粒子(ガンマ線、電子線、中性子、重イオンなど) エネルギー、照射量、照射温度などをパラメーターとして系統的に調べることで素子の耐照射特性を評価する。これまでの研究でガンマ線、重イオン、電子線に対する知見が得られたので、本研究では中性子に対する応答に注力する。使用するスピンゼーベック素子についても、最初は作製の容易な Pt/YIG 二層膜を用いるが、金属層(Pt, Au, Ni など)および磁性層(YIG, フェライト、磁性金属など)の拡張を行い、いくつかの組み合わせを用いて照射実験を行う。これにより「スピンゼーベック素子が放射線環境下で使用可能かどうか」を明らかにする。また放射線環境下での継続使用が困難であると結論づけられた場合は、何がその阻害要因となっているのかを併せて明らかにする。

4. 研究成果

これまでの研究でスピンゼーベック素子はその熱電特性がガンマ線に対して高い耐性を持つことが明らかになった。本研究では中性子に対するスピンゼーベック効果素子の耐放射線特性を調べた。スピンゼーベック起電力、磁化、電気抵抗といった物性特性の変化から、スピンゼーベック効果素子の放射線環境下での利用限界を明らかにした。放射線耐性については Pt/YIG 二層薄膜を作製し、スピン熱電特性を中性子照射前後で比較した。中性子照射には原子力機構の JRR-3 を用いた。図 1 にスピン熱電電圧の中性子照射量依存性を示す。照射量に対して出力電圧が徐々に減少しているが、その程度は緩やかである。照射量によってダメージが増えてき、ダメージ部分は熱電に寄与しなくなるという単純な Exponential モデルで外挿すると、データとのかかなり良い一致が得られ $\sim 2 \times 10^{18}$ で出力が消失するように見える。これは JRR-3 原子炉炉心で約 160 時間に相当する。福島第一原発事故現場の炉心部分でも 1 週間程度は使用が可能となる。

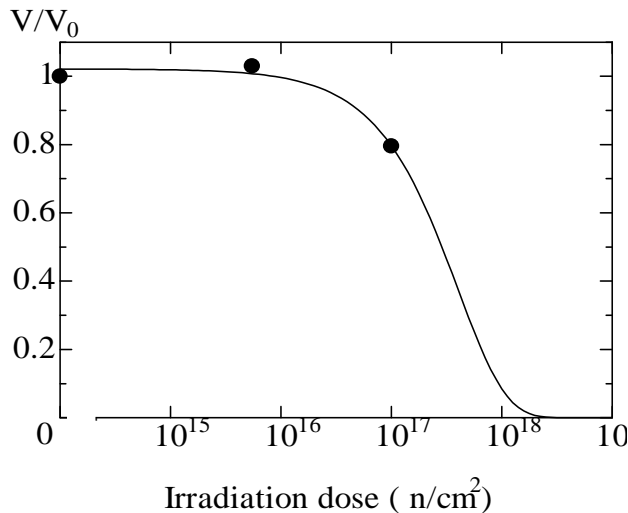


図1
 スピン熱電素子の熱電電圧の中性子照射量依存性。出力電圧は未照射の値で規格化している

次にスピンゼーベック素子にホウ素を塗布し、(n, γ)反応による熱を検出する試みを行った。ただ残念ながら現状では信号の検出は確認されず、出力信号を増大させるための素子の改良(ホウ素10の含有量を増やす等)や交流磁場を用いたロックイン検出方法等の改善を現在も続けている。

また、スピンゼーベック素子以外の材料も検討を始め、ハイエントロピー合金などの特性を測定している。図2に $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Co}_{20}\text{Cu}_{1-x}\text{Pd}_x$ の組成からなるハイエントロピー合金の照射前の熱電

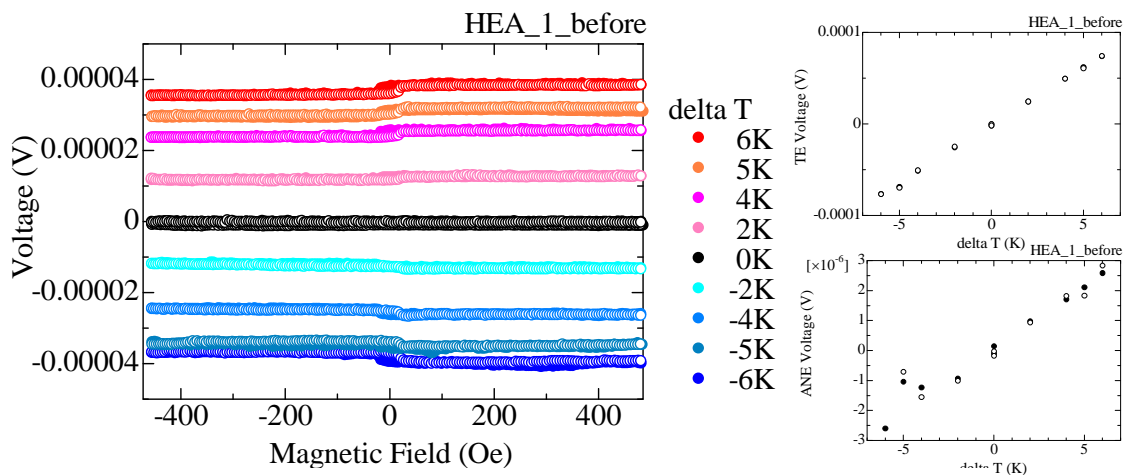


図2 ハイエントロピー合金 $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Co}_{20}\text{Cu}_{1-x}\text{Pd}_x$ の未照射熱電特性

- a)異常ネルンスト効果 ANE 測定での出力電圧の温度・磁場依存性
- b) ベース部分の温度依存性
- c)ANE 電圧の温度依存性

特性を示す。磁場や温度差の配置はスピン熱電素子と同じで異常ネルンスト効果 (ANE) を測定した。ANE はスピン熱電と同程度であるが、何故かベースの温度変化が大きい。こちらを利用できる可能性もあり、現在、検討を行っている。

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 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Wenjie Li, Sunseng Pyon, Satoru Okayasu and Tsuyoshi Tamegai	4. 巻 2323
2. 論文標題 Peak Effects in 2H-NbSe ₂ Single Crystals Introduced with Artificial Defects by Particle Irradiation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012017-012022
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1975/1/012003	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 該当する

1. 著者名 Ieda Jun'ichi, Okayasu Satoru, Harii Kazuya, Kobata Masaaki, Yoshii Kenji, Fukuda Tatsuo, Ishida Masahiko, Saitoh Eiji	4. 巻 31
2. 論文標題 The damage analysis for irradiation tolerant spin-driven thermoelectric device based on single-crystalline Y ₃ Fe ₅ O ₁₂ /Pt heterostructures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2022.3145888	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Yuhang Zu, Tong Ren, Sunseng Pyon, Satoru Okayasu, and Tsuyoshi Tamegai
2. 発表標題 Anomalous peak effect in (Ba,A)Fe ₂ As ₂ (A: Rb, K) single crystals with splayed columnar defects
3. 学会等名 第77回日本物理学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡安 悟, 針井一哉, 家田淳一, 小野正雄, 小島雅明, 福田竜生, 吉井賢資, 石田真彦, 齊藤英治
2. 発表標題 スピンゼーベック効果素子の高エネルギー重イオン照射耐性
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 針井 一哉, 岡安 悟, 埋田 真樹, 佐藤 奈々, 有沢 洋希, 日置 友智, 家田 淳一
2. 発表標題 高エネルギー重イオン照射によるLuIGの磁気特性変化
3. 学会等名 日本応用物理学会 2021年秋
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡安 悟, 武山昭憲, 大島武, 針井一哉, 家田淳一, 石田真彦, 齊藤英治
2. 発表標題 スピン熱電素子の耐ガンマ線照射耐性
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------