

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05126

研究課題名(和文) スピンゼーベック素子の耐放射線特性

研究課題名(英文) radiation-resistant properties of spin Seebeck devices

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・研究主幹

研究者番号：50354824

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：スピンゼーベック効果(SSE)素子の耐放射線特性について、重イオン、 $\gamma$ 線、電子線に対して調べた。SSE起電力や磁化、電気抵抗といった物性評価の結果から、それぞれの放射線に対するSSE素子の耐放射線限界について明らかにした。この結果からSSE素子は優れた耐放射線特性を有することが示され、これを利用した熱電発電が放射線環境下でのスピントロニクス応用として有効であると明らかにした。これを踏まえ、SSE素子を用いた原子力分野での応用を提案し、「原子力電池、原子力電池システム、特願2019-215282」及び「熱電変換システム、熱電変換方法、特願2019-215283」という2つの特許として出願した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究において、スピンゼーベック効果を用いた熱電発電が様々な放射線環境下でも有効に機能することを示した。それによってスピントロニクスの原子力分野への応用展開の道筋を示した。具体的には「放射性核種を限定しない原子力電池」や「使用済み燃料保管庫での熱電発電」といった新しい原子力応用である。前者は深宇宙探索や深海探索への利用が期待でき、後者は非常時の緊急用電源の確保に利用可能で原子力のより安全な利用に資するものである。

研究成果の概要(英文)：tolerance property of spin Seebeck effect (SSE) devices for various radiations, such as high energy heavy ion, gamma ray, electron beam, is investigated. From the measurements of physical properties, SSE voltage, magnetization, and resistance, the margin of the usage of the SSE devices under radioactive circumstances is characterized. We made suggestions for applications of the SSE devices in atomic energy, and applied two patents for "atomic battery" and "thermoelectric generation system".

研究分野：超伝導、照射効果、スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス スピンゼーベック効果 照射効果 原子力電池

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (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

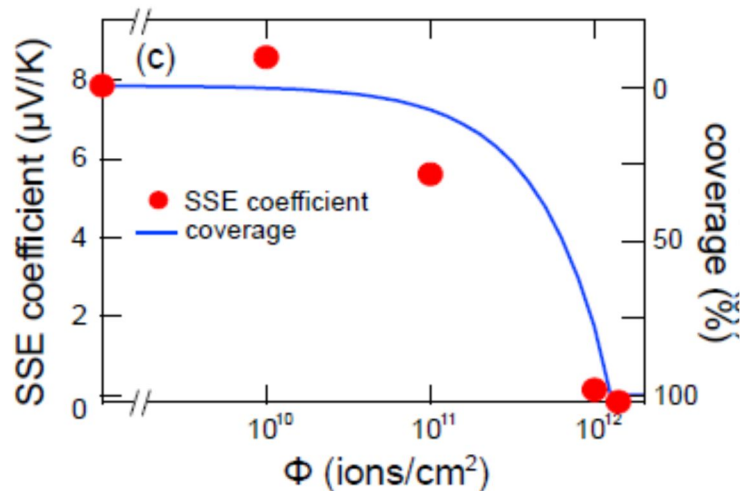
素子の耐照射特性として、スピンゼーベック電圧の変化を、各種照射粒子(ガンマ線、電子線、中性子、重イオンなど) エネルギー、照射量、照射温度などをパラメーターとして系統的に調べることで素子の耐照射特性を評価する。使用するスピンゼーベック素子についても、最初は作製の容易な Pt/YIG 二層膜を用いるが、金属層(Pt, Au, Ni など)および磁性層(YIG, フェライト、磁性金属など)の拡張を行い、いくつかの組み合わせを用いて照射実験を行う。これにより「スピンゼーベック素子が放射線環境下で使用可能かどうか」を明らかにする。また放射線環境下での継続使用が困難であると結論づけられた場合は、何がその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

高エネルギー重イオン、ガンマ線、電子線といった様々な放射線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。高エネルギー重イオン照射は照射環境としては特殊で現実世界ではあまり登場しないが、使用済み燃料キャスク等に貼り付けて使用する場合には考慮する必要がでてくる。実際の環境より遙かに高密度のフルエンスでスピンゼーベック効果素子への照射を行い、実際の環境下での耐放射線特性が優れていることを示した。図はスピンゼーベック効果素子へ 320MeV の金イオンを照射した場合のスピンゼーベック起電力の照射量依存性を調べたものである。照射量が  $10^{12}$  ions/cm<sup>2</sup> を超えるとスピンゼーベック起電力が消失していることがわかる。この金イオン照射では試料中の絶縁磁性体イットリウム鉄ガーネット(YIG)にはイオンの通過した部分に直径が 20nm のアモルファス領域(円柱状欠陥)が形成されることが知られている。図の右軸は照射量によって試料表面をアモルファス領域が覆う被覆率を示したものである。アモルファス領域は磁化を失っているので照射量が増えると YIG の磁化が減り、それによって金属層であるプラチナ層へのスピンの注入が減少すると考えられる。実際の使用済み燃料キャスクでは表面の核分裂片による高エネルギー重イオン密度は  $\sim 4 \times 10^8$  ions/cm<sup>2</sup>/年 程度であるので、スピンゼーベック効果素子の寿命は数百年に渡って保持されることがわかった。この結果については現在論文投稿中である。

ガンマ線については、先行研究よりさらに厳しい環境下(高温、高水蒸気)でのガンマ線照射を行い、利用可能限界について調べた。これにより、先行研究では観測されなかったスピンゼーベック起電力の特性劣化を起こすことができ、実用可能な限界を見積もることができた。

これらの結果からスピンゼーベック効果素子は優れた耐放射線特性を有することが示され、これを利用した熱電発電が放射線環境下でのスピントロニクス応用として有効であることが明らかとなった。この成果を踏まえ、スピンゼーベック効果素子を利用した2つの原子力分野への応用を提案した。ひとつめは「スピンゼーベック効果素子を用いた原子力電池(原子力電池、原子力電池システム、特願 2019-215282)」である。現在、原子力電池の熱源として利用される放



放射性元素がプルトニウムに限られているのは、プルトニウムが放出するのが遮蔽の容易なアルファ線のみだからである。それ以外の放射性元素を利用しようとする場合には通常の熱電変換素子(ゼーベック熱発電素子)をガンマ線から保護するための遮蔽が必須となる。スピンゼーベック効果素子が特に高いガンマ線耐性を示すことから、熱電変換素子への大掛かりな遮蔽が不要となる。熱源としての放射性元素をプルトニウムに限る必要がなくなり、深宇宙探査や深海探査などメンテナンスができない高信頼性を必要とする環境下で状況に応じて適切な放射性元素を熱源として用いることが可能となる。ふたつめは「スピンゼーベック効果素子を用いた熱電発電システム(熱電変換システム、熱電変換方法、特願 2019-215283)」である。高フラックス環境下でも特性劣化が少ないため、使用済み核燃料保管庫の保管キャスク等に取り付けて熱電発電が可能となる。発電した電力は蓄電池に保存すれば非常用電源として利用可能となる。この2つについてそれぞれ特許として出願した。

しかしながら、中性子線に対する耐放射線効果は、研究機関内で原子炉(JRR-3)が再稼働しなかったため、実施することが出来なかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岡安悟
2. 発表標題 SSE素子のガンマ線照射効果
3. 学会等名 第26回渦糸物理会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡安悟
2. 発表標題 スピンゼーベック素子の重イオン照射効果
3. 学会等名 第12回連携重点研究討論会および原子力機構・量研施設利用一般共同研究成果報告会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡安悟
2. 発表標題 スピンゼーベック素子の照射効果
3. 学会等名 第25回渦糸物理国内会議
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡安悟
2. 発表標題 高温超伝導体の重イオン照射による円柱状欠陥形成
3. 学会等名 ワークショップ「新規超伝導体・ナノ構造超伝導体における渦糸物理」（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡安悟
2. 発表標題 スピンゼーベック効果デバイスへの重イオン照射
3. 学会等名 東海・重イオン科学シンポジウム タンデム加速器成果報告会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 原子力電池、原子力電池システム	発明者 岡安悟、針井一哉、 家田淳一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2019-215282	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 熱電変換システム、熱電変換方法	発明者 岡安悟、針井一哉、 家田淳一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2019-215283	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究協力者	針井 一哉  (Harii Kazuya)		
研究協力者	武山 昭憲  (Takeyama Akinori)		
研究協力者	小野 正雄  (Ono Masao)		

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	大島 武  (Ohshima Takeshi)		