

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20105

研究課題名（和文）高耐放射線性CIS太陽電池を応用した原子力電池設計手法の開発

研究課題名（英文）Development of design method of nuclear battery applying CIS solar cell with high radiation tolerant

研究代表者

奥野 泰希 (Okuno, Yasuki)

京都大学・複合原子力科学研究所・助教

研究者番号：00805400

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000 円

研究成果の概要（和文）：原子力電池は、半導体素子上に放射性物質を設置することで放射線のエネルギーを電力として取り出す仕組みである。そして、半永久的な発電能力を有しており、ペースメーカーや宇宙探査用の電力源として期待されている。本研究では、CIS太陽電池を半導体素子およびNi-63を燃料として利用した場合の原子力電池に関する発電特性について解明を行った。原子力電池を設計する課題として放射性物質の取り扱いの難しさがあるため、本研究では、加速器放射線源を利用する新しい設計手法の開発にも取り組んだ。その結果、原子力電池の設計手法を考案し、その手法を用いることでCIS太陽電池—Ni-63原子力電池の発電能力を予測することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放射性物質を利用しない原子力電池の設計手法を構築したことは、これまでの放射性物質を利用した原子力電池の開発手法に比べて、研究開発の速度の向上や開発環境の構築の容易さに繋がったと考えられる。また、CIS太陽電池は現在実用化されていることから、原子力電池を実際に社会実装することを考えると、実現性が極めて高い研究成果であると言える。現実的に原子力電池を一般的に普及させるためには、放射性物質を取り扱うことになるため、設計認証済み放射性同位元素装備機器としての承認を得る必要があるが、その際の設計においても発電特性を予め計算することができるため、商品設計における有用性が高いと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Nuclear battery is a system that extracts radiation energy as electric power by installing radioactive materials on semiconductor devices. And it has semi-permanent power generation capability and is expected to be used as a power source for pacemakers and space exploration. In this study, the power generation characteristics of a nuclear battery using a CIS solar cell as a semiconductor device and Ni-63 as a fuel were investigated. Since one of the challenges in designing nuclear batteries is the difficulty of handling radioactive materials, this study also involved the development of a new design method using an accelerator radiation source. As a result, a nuclear battery design method was invented, and the power generation capability of the CIS solar cell-Ni-63 nuclear battery was predicted by using this method.

研究分野：加速器利用技術

キーワード：原子力電池 CIS太陽電池 加速器利用 放射線誘起電流 設計手法

1. 研究開始当初の背景

現在、アメリカ航空宇宙局(NASA)では、2024 年までに有人月面着陸および、2028 年までに月面基地建设を行うが説明されている。日本においても、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が、月面探索を行う計画がされている。そのため、近い未来、月面の隅々のデータ収集を行うことが現実になる。月の南極付近には内部に永遠に光が当たらない永久影のクレーターがある。このクレーターでは、少量の水が存在することが観測されており、観測機をクレーターへ送り、水の採取を行うことが計画されている。しかし、永久影のクレーターでは、宇宙環境での電力として従来使用される太陽光発電が利用できない。ケーブルなどの電気輸送では、光が当たるところから、クレーター内部まで、数百キロの輸送が必要であり、ロケットでの打ち上げコスト上、困難である。そのため、月面のクレーター探索では、新たな電力の安定的な供給方法を構築する必要がある。太陽光発電が使用できない宇宙環境の発電方法として、NASA やモスクワ物理技術研究所(MIPT)などでは、原子力電池が開発されている。主な、原子力電池の構造は、図 1 に示すように、薄膜半導体素子上に、放射性物質を 着けたものが実用化されている。しかし、薄膜半導体素子に、放射線が入射することにより、半導体素子が劣化するため、高い放射線耐性が求められている。MIPT では、高い放射線耐性を有するダイヤモンド素子や、ベータ線源のニッケル-63 などが、使用されているが、素子や放射線源のコストが非常に高価なことが大きな課題がある。また、日本で原子力電池を開発する場合、素子コストだけでなく、放射性物質の取り扱いに関しても大きなハードルとなる。そのため、本研究では、日本で可能な、放射性物質を用いない原子力燃料電池の開発方法を確立するとともに、低コストな素子として宇宙用太陽電池を用いた実現可能性の高い原子力電池の原理実証行う。

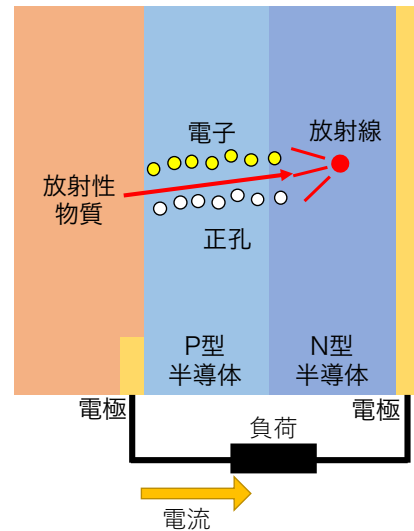


図 1 原子力電池の概要図

2. 研究の目的

原子力電池において、高い放射線耐性を有する半導体素子を使用することが重要である。CIGS(CIS) 太陽電池は、高い発電効率および、高い放射線耐性であることから、次世代の宇宙用太陽電池としても注目されている太陽電池である。特に、放射線耐性の高さは、地上照射試験だけでなく、宇宙環境実証実験においても、次世代宇宙太陽電池の中で最も高いことが証明されている。また、日本では、CIS 太陽電池は、ソーラフロンティアにより製品化されており、シリコン太陽電池に続く低コストな太陽電池である。そのため、原子力燃料電池の高放射線耐性・低コストな薄膜素子として CIS 太陽電池は有用である。そのため、本研究 では、CIS 太陽電池を原子力燃料電池の素子として選定した。MIPT では、原子力燃料のβ線源としてニッケル-63 が利用されている。β線放出核種のβ線は、低い素子ダメージで、高い線エネルギー付与であるため、燃料としての利点がある。特に、β線の飛程は、数μm であり、薄膜素子の作製が、高い電力を発電するために重要である。しかし、ソーラフロンティアが製造・販売している CIS 太陽電池の素子の構造は、約 2μm の薄膜であり、新しく薄膜素子を開発することなく、β線原子力電池を開発することが可能となる。そのため、将来的にも低コストで現実的な原子力電池の開発が見込まれる。本研究が達成された暁には、原子力電池の加速器ベースによる設計手法の構築を行い、低コスト、高い放射線耐性、最適な素子膜圧の CIGS 太陽電池を利用した原子力燃料電池の性能を解明を行うことが期待できる。

3. 研究の方法

本研究では、CIS 太陽電池の上に、β線源を蒸着したような構造を想定している。しかし、放射性物質を非密封線源として蒸着することは、IR の購入、装着装置の整備、および、管理区域での手続きなど、大きなハードルがある。そのため、電子線加速器により、電子線を照射することによりβ線模擬線を模擬した照射場において CIGS 太陽電池の発電挙動に関して解明を行う。CIS 太陽電池型原子力電池の発電効率算出のためには、

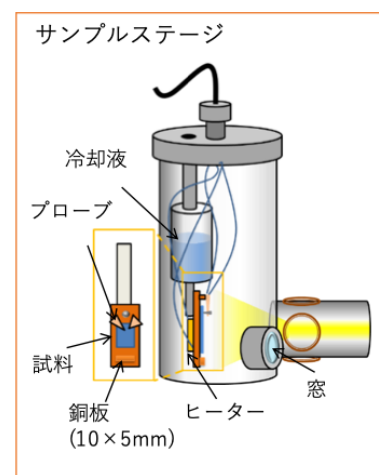


図 2 照射チャンバーの概要図

太陽電池の取得した発電挙動を解明し、発電量のシミュレーションを可能にすることが必要である。先行研究において、太陽電池の放射線発電挙動は、「1、エネルギーの付与」、「2、キャリアの生成」、および「3、外部回路への電流取り出し」の3つの過程で説明される。電子線照射試験では、照射した電子線の素性は明らかであることからシミュレーションにより、電子線から素子に付与されるエネルギーを見積もることができる。また、照射中に出力される電流量からキャリア生成挙動を解析することができる。外部回路への取り出しに関しては、可視光を用いて太陽電池特性の照度依存性から見積もることができる。そのため、本研究では、CIS 太陽電池の電子線照射試験および可視光の照射試験から得られる、放射線誘起電流挙動および可視光の発電特性から原子力電池としての特性を予測する方法について明らかにする。電子線加速器については、大阪府立大学(現：大阪公立大学)コッククロフトウォルトン型電子線加速器を利用した。電子線エネルギーは、200 および 400 keV に調整された。図 2 に示すように、電子線は真空配管を輸送された後に、コイルからの磁場にてスキャンされ、試料へ照射された。試料は、試料台上に設置しているプローブにより電氣的に外部回路へ接続した。照射中の試料台温度は、冷却液とヒータにより 25℃に設定した。電子線照射中の誘起電流は、ソース・メジャー・ユニット(SUM) (B2901A, Keysight 社製)により測定した。

恒久的な原子力電池の発電に伴い、CIS 太陽電池は、放射線にさらされるため、その放射線劣化挙動について理解する必要がある。原子力電池としての耐久年数を評価する指標として 400 keV 電子線照射中の誘起電流の劣化挙動を取得した。

出力電力のキャリア生成量依存性を解明するため、635 nm のレーザー光源を用いた照射試験を実施した。レーザー輝度は、可変アッテネータを用いて調整した。出力電力の評価方法については、太陽電池評価方の一つである光電流電圧特性を取得した。

4. 研究成果

図 3 に、電子線照射時の CIS 太陽電池に発生する誘起電流を計測した結果を示す。フラックスの増加に伴い、誘起電流が増加していることがわかる。また、200 および 400 keV 電子線照射時の挙動を比較すると、エネルギーが高い場合、フラックスに対して電流発生量が低下することが明らかになった。この要因を明らかにするために、素子に対する付与エネルギーを放射線挙動解析ソフト PHITS により計算した結果を表 1 に示す。200 keV 電子は、400 keV 電子に対して 1 電子あたりの付与エネルギー量が多い。これは、低エネルギー電子の場合、線エネルギー付与が高いことが考えられる。また、図 3 の照射中のフラックスから付与エネルギーに変換した横軸を関数にした電子線誘起電流の結果を図 4 に示す。この結果より、それぞれのエネルギーにおける誘起電流はおおよそ同一直線上に乗っている事がわかる。このことより、電子線照射により発生した CIS 太陽電池の電流は、素子の付与エネルギーに依存していることが明らかとなった。

原子力電池の設計においては、単位面積あたりのキャリア生成量に限りがあることから、発生キャリア量に依存した取り出し電力量に関するデータを取得する必要がある。図 5 にレーザー光源によりキャリアを発生させて短絡電流が pA～μA オーダにおける最大出力電力量を光電流電圧特性から見積もった結果を示す。太陽電池としての発電特性は、低照度側において効率が低下する傾向が見られる。数百 nA 程度以上の短絡電流が出力するような条件では、出力が安定している。そのため、原子力電池の放射線誘起電

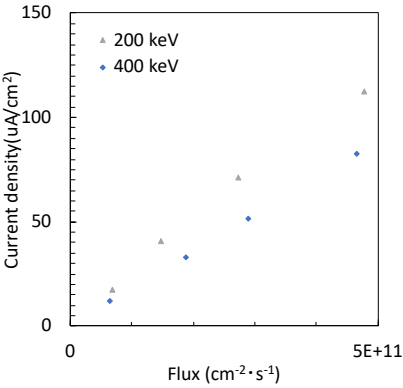


図 3 CIS 太陽電池の電子線誘起電流のフラックス依存性

表 1 200 および 400 keV 電子線により CIS 太陽電池中に付与されるエネルギー

Electron energy (keV)	Deposition energy (keV/electron)
200	3.32
400	2.03

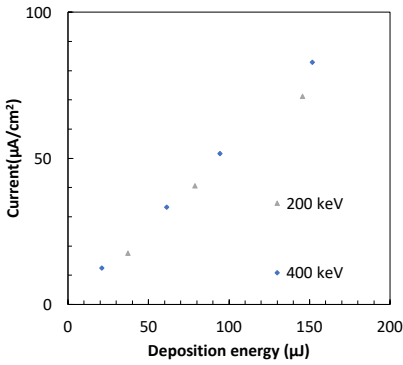


図 4 CIS 太陽電池の電子線誘起電流の付与エネルギー依存性

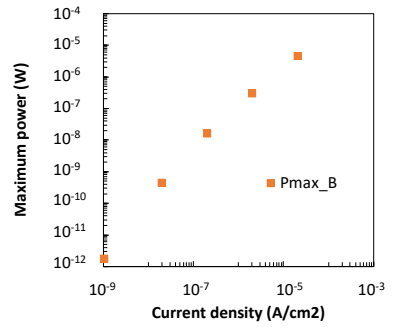


図 5 短絡電流を関数とした CIS 太陽電池の最大電力量挙動

流の発生量は、数百 nA 程度以上で設計するほうが望ましいと考えられる。

上記、実験結果から原子力電池の設計手順について、整理を行う。ここでは、8つの工程にて発電効率を決定できる手法を提案する。

① 原子力電池の構造の決定

本研究では、フレキシブル CIS 太陽電池をモデルとした原子力電池の構造を考える。図6には、(a)原子力電池の基本的な構造と(b)フレキシブル CIS 太陽電池の構造を示す。原子力電池は、発電素子となる CIS 太陽電池と燃料となる Ni-63 が多層構造に重なった構造を仮定する。太陽電池はフレキシブル CIS 太陽電池としてポリイミド基板上に成膜された構造を仮定する。Ni-63 から放出される β 線が CIS 太陽電池の表面から入射することで発電すると考えられる。

② 燃料放射線から素子への付与エネルギー計算

仮定した構造をもとに、PHITS などの放射線挙動解析ソフトにて、CIS 太陽電池への付与エネルギーについて計算を行う。計算した結果、Ni-63 の β 線が CIS 太陽電池に付与する平均エネルギーは、 1.83×10^{-17} J/source であることが明らかとなった。

③ 燃料の放射能の計算

β 線などの飛程の短い放射線では、放射性物質中の飛程より深い位置で発生した場合、遮蔽されて表面から取り出せない。Ni-63 の β 線の最大飛程は、およそ $20 \mu\text{m}$ であることから、原子力電池の設計においても $20 \mu\text{m}$ の Ni-63 とした。設計した Ni-63 から放出される β 線強度は、半減期から決定され、およそ 3.74×10^{10} Bq であることが明らかになった。

④ 単位時間あたりの素子付与エネルギーの計算

②および③から決定された CIS 太陽電池に付与される Ni-63 の単位 β 線からの平均付与エネルギーと強度から、単位時間あたりに CIS 太陽電池に付与されるエネルギーは、 6.83×10^{-7} J/s と計算された。

⑤ 放射線エネルギー変換係数による電流予測

図4に示す電子線照射試験の結果から付与エネルギーに対する電流発生量の関係は、 $5.42 \times 10^5 \mu\text{A/J}$ であることを見積もることができる。そのため、④で計算した単位時間あたりの付与エネルギーを用いて、原子力電池から出力される短絡電流密度を計算すると $3.64 \times 10^{-1} \mu\text{A/cm}^2$ となる。

⑥ 微小光源による取り出し電力の見積もり

図5の最大電力量の短絡電流密度依存性の結果を用いて⑤で見積もった CIS 太陽電池の β 線による短絡電流密度から単位面積あたりの発電量を計算した結果、 $4.17 \times 10^{-8} \text{ W/cm}^2$ であることがわかる。

⑦ 単位体積あたりの発電量の計算

図6(a)に示す原子力電池としては、放射性物質を挟むようにして、CIS 太陽電池を設置したような構造を仮定している。つまり、2つの CIS 太陽電池を用いて Ni-63 膜の表面と裏面から放出される β 線をエネルギーに変換する構造である。CIS 太陽電池の膜厚が基板を含め $53 \mu\text{m}$ とすると、この構造を単位構造として単位体積あたりの発電量を計算した結果、 $6.63 \times 10^{-6} \text{ W/cm}^3$ となる。

⑧ 目標出力に対する大きさや配線の決定

例えば、1W 級の発電量が必要なモジュールを設計する場合、⑦の単位体積あたりの最大電力量から 0.15 m^3 と計算することができる。この原子力電池の設計において、CIS 太陽電池から出力される電位は 70 mV 程度であることが想定される。太陽電池素子をソーラーパネルとして設計する場合、素子の並列および直列接続の枚数を変更することで電圧と電流を調整することができる。そのため、 5 V に設定する場合、およそ 70 素子を直列に接続する構造が最適であると考えられる。

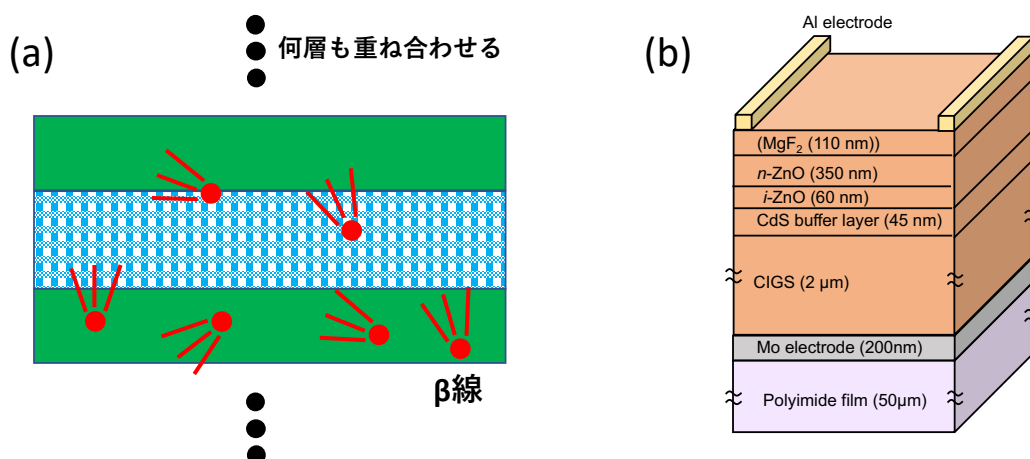


図6 (a)原子力電池の構造及び(b)フレキシブル CIS 太陽電池の構造

次に原子力電池の寿命として、太陽電池の放射線劣化挙動および燃料体の減弱挙動を理解する必要がある。図 7 (a) および (b) に、それぞれ CIS 太陽電池の 400 keV 電子線照射時の電子線誘起電流の劣化挙動および Ni-63 の β 線強度の減弱挙動を示す。CIS 太陽電池は、400 keV 電子線ではほとんど劣化していない。そのため、Ni-63 から放出される β 線による照射損傷により CIS 太陽電池はほとんど劣化しないと考えられる。Ni-63 の半減期は 101 年であることから、およそ 35 年で 80% の出力へ減弱する。仮に、最低電力が 1 W で、100 年間使用することを想定した場合、初期出力を 2 W で設計することが求められる。

今後の研究開発方針として、宇宙適応に向けては、小型・軽量化による運搬性能の向上と大電力化を考える必要がある。単位距離あたりの付与エネルギーが大きい線源、例えば α 線源、を用いた原子力電池は、 β 線を用いたものよりも単位体積あたりのエネルギー量が増加することが期待できる。手法としては、イオンビームを用いた発電挙動の解析を行うことで、本研究で提唱している設計手順に乗っ取り計算するとおよその発電量が理解できると考えられる。しかし、 β 線に比べて α 線は、素子への照射損傷も大きいため、Ni-63 と CIS 太陽電池を組み合わせた原子力電池よりも放射線劣化挙動についてさらなる解析が求められる。

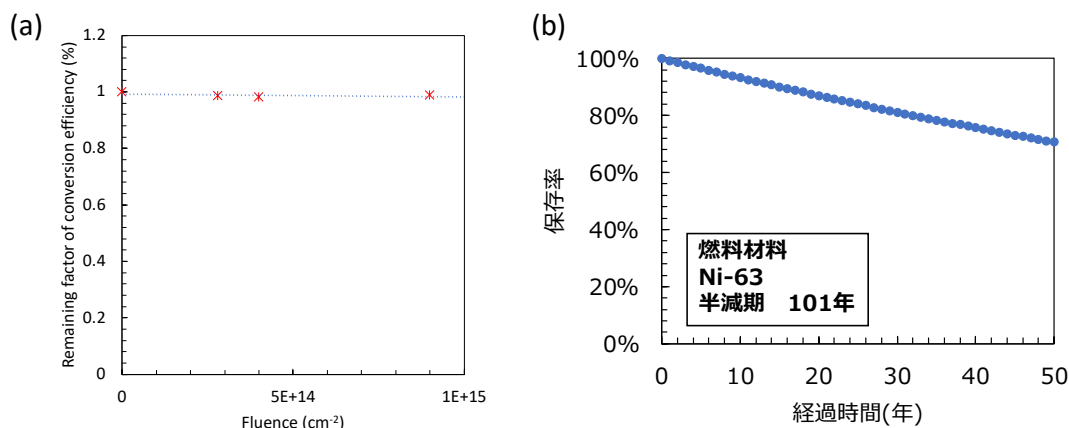


図 7 (a) CIS 太陽電池 400 keV 電子線照射時の誘起電流劣化挙動および (b) Ni-63 の放出 β 線の減弱挙動

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 奥野 泰希, 秋吉 優史, 今泉 充
2. 発表標題 原子力電池開発に向けたCIS素子の電子線発電挙動の解明
3. 学会等名 第18回日本加速器学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥野 泰希, 上川 由紀子, 秋吉 優史
2. 発表標題 CIGS太陽電池を応用した原子力電池の 放射性物質を用いない発電特性の解明
3. 学会等名 2022年第83回応用物理学会秋季学術講演会
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
研究協力者	秋吉 優史 (Akiyoshi Masafumi) (70378793)	大阪公立大学・工学研究科・准教授 (24405)	
研究協力者	上川 由紀子 (Kamikawa Yukiko) (40738043)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・多接合太陽電池研究チーム・主任研究員 (82626)	

6. 研究組織（つづき）

	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	今泉 充	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・第1研究ユニット・研究領域主幹	
	(Imaizumi Mitsuru)		
	(90421859)	(82645)	

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