



応用物理学会秋季学術講演会 注目講演プレスリリース

2023年 9月 11日

宇宙太陽電池放射線劣化予測モデル変位損傷線量法を応用した CIGS 太陽電池型線量計の放射線耐性の解明
Estimation of Radiation Tolerance of CIGS Solar Cell Dosimeters by Applying the Displacement Damage Dose Method of Radiation Degradation Prediction Model for Space Solar Cell

福島原発廃炉に欠かせない線量計 宇宙用太陽電池の技術を結集し、開発される

理研¹、産総研²、三条市大³、量研⁴、京大⁵、東北大⁶

○奥野泰希¹、上川由紀子²、今泉充³、牧野高紘⁴、佐藤信浩⁵、陣場優貴⁶、笠田竜太⁶

【発表概要】

- ・ 福島第一原子力発電所の廃炉作業で要求される放射線耐性「Co-60 γ 線 1 MGy」を達成する CIGS 太陽電池型線量計を開発
- ・ 宇宙太陽電池放射線劣化予測モデルである変位損傷線量（DDD）法を応用し、研究開発における放射線試験の必要時間を1000時間程度から1日程度へ短縮
- ・ 太陽電池型線量計の工業や放射線医療現場、危険な高線量作業現場などへの応用の道を拓いた

現在、福島第一原子力発電所の廃炉作業は、燃料デブリの取り出しに向けた新たなフェーズを迎えている。このフェーズにおいて、作業員の命を守り、燃料デブリの正確な位置と密度を推定する上で欠かせないのが、リアルタイムの線量測定だ。高放射線半導体素子のデバイス応用を手掛ける理化学研究所の奥野泰希氏らの研究グループは、福島第一原子力発電所の廃炉作業に特化した、非常に高い放射線耐性を有するCIGS太陽電池型線量計の研究開発を進めてきた。奥野氏は、1MGy以上のガンマ線（Co-60）への耐性を持つCIGS太陽電池型線量計の研究開発のために、宇宙用太陽電池で構築されてきた放射線劣化予測モデルである変位損傷線量（DDD）法を応用することで、理論上、1000時間かかる放射線試験を1日に短縮し、CIGS太陽電池型線量計が福島第一原子力発電所の廃炉作業に適応するための基準を満たしている放射線耐性を有していることを解明した。

【詳細】

「燃料デブリ」取り出しへと挑む、福島原発

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に関連して生じた津波によって、福島第一原子力発電所は未曾有の原子力事故に見舞われた。その後、懸命な廃炉作業が続けられ、2021年12月までに燃料デブリ（溶けた核燃料等が冷え、固まったもの）の取り出しのための準備が進められてきた。

現在は、実際に燃料デブリを取り出す新たなフェーズに移行中であり、作業は30年から40年という廃炉への長丁場へと挑むことになる。このフェーズにおいて必要不可欠になる技術が、放射線量の詳細かつリアルタイムの測定だ。福島第一原子力発電所の原子炉付近は、毎時数十グレイ（Gy※1）という、人が数時間作業すれば人体にとって非常に危険な放射線量だ。燃料デブリの取り出し作業自体はロボットアーム等によって行われるが、その作業によって強力な放射線を出す燃料デブリが移動し、刻一刻と作業現場の放射線分布が変化する。この変化を適切にとらえる放射線検出器が、燃料デブリの位置や密度の推定、および廃炉作業員の安全を確保するために重要だ。

高放射線半導体素子のデバイス応用を手掛ける理化学研究所の奥野泰希氏らの研究グループは、宇宙用太陽電池を福島第一原子力発電所の廃炉作業における放射線検出器として活用する研究開発を進めている。高い放射線耐性を持つ宇宙用太陽電池は、発電だけでなく、線量計としても応用ができるという。

※1 グレイ 吸収線量。1Gyは物質1kgあたり、1ジュールのエネルギー吸収があることを示す。

廃炉に最適な太陽電池型線量計

「太陽電池型線量計のメリットは、太陽電池が一般的に販売されるまでに完成されたデバイスであるということです。シリコンを始めとして、今では様々な化合物半導体で作製される太陽電池は、高い発電効率を有しているにも関わらず非常に安価です。また、この高い効率は放射線が照射されたときにも重要であり、出力される放射線誘起電流も高効率に取り出すことができます。喜ばしいことに、日本の太陽電池の研究開発は世界トップクラスであり、高品質な素子が調達できる環境です。さらに、太陽電池は、人工衛星の電源として開発されたきたデバイスです。その研究開発においては、宇宙環境中に存在する放射線による素子の損傷の理解を進めてきました。そのため、放射線耐性が高い素子開発も進んでいる分野です」（奥野氏）

候補となる放射線検出器には、放射線と反応したときに光を生じる物質を使って検出する「シンチレーション検出器」や、放射線による気体の電離生成によって生じたイオンの分量を測定することで放射線を検出する「電離箱」などがある。シンチレーション検出器は、太陽電池と同様に複数種の放射線を検出できるが、コスト面で課題があった。また、1000ボルトもの高電圧をセン

サ一部にかかる必要のある電離箱は、作業のリスクとなる可能性があった。線量のモニタリング室は原子炉から離れた場所にあるため、高電圧を通す電離箱の長いケーブルは破損した際に事故を招く可能性がある。

一方の太陽電池型線量計は、非常にシンプルな構造だ。素子は内部電界駆動であるため、信号取り出しに電圧印加が不要だ。すなわちケーブルとセンサー部だけで機能する。ケーブルを長く（100メートル）伸ばしても信号は減衰しない。また、炉内での線量分布は、1点では不十分であり、数十～数百の点を測定する必要がある。そのため、複数素子の信号計測をする必要があるが、太陽電池型線量計は、素子の高速な回路切替・信号測定にも対応可能である。安価であり、電源が不要である太陽電池は、まさに福島第一原子力発電所の廃炉作業にとって最適な特性と機能を持ち合わせていたのだ。

高放射線耐性を持つ次世代宇宙用太陽電池「CIGS太陽電池」

廃炉で使用される放射線検出器には細かい仕様規定がある。たとえば使用できる距離だ。燃料デブリを取り出すロボットアームに放射線検出器が搭載されるが、原子炉内部で移動するためには信号を送信するためのケーブルに100メートルの長さが必要となる。また、水圧耐性、ロボットアームでの運搬ができること、疑わしい信号が検出されたときに検出器の校正ができることなどが仕様規定に含まれる。そして、これらの仕様規定の中でもっとも基本となるものが放射線耐性であり、1MGy以上のガンマ線（Co-60）への耐性、交換頻度を1年に1回程度に抑えることが求められている。

「開発は、放射線への耐性を確保することから始まりました」と奥野氏は振り返る。「シリコンの太陽電池は、放射線の検出感度が良い反面、照射線量率1kGy/hという福島第一原子力発電所でもっとも強いところと同じ線量を照射するとたちまち劣化し、照射後12時間程度で電流は約94%まで劣化してしまいました。これでは放射線検出器として不安定です」（奥野）

放射線への耐性を確保すべくさまざまな宇宙用太陽電池を調べた中で、奥野氏らは「CIGS太陽電池」（※2・図1）に着目した。放射線でほとんど劣化しないことが特徴であり、次世代の宇宙用太陽電池として現在、開発が進められている。

「研究開発における一番の問題は、放射線試験でした」と奥野氏。「開発では、太陽電池がどの程度劣化するかを放射線試験で調べることが不可欠です。1MGyのガンマ線（Co-60）耐性を持つ必要がありますが、国内の研究用ガンマ線照射施設では1kGy/h程度のガンマ線照射が限界です。これでは実験だけで1000時間程度かかってしまう計算です」（奥野）

このペースでは照射試験が開発の妨げになり、廃炉作業のさらなる遅れにつながる可能性がある。そこで奥野氏らは、人工衛星の設計で使われる「宇宙太陽電池の劣化予測モデル」を用い

た、耐性評価法の確立を進めた。つまり宇宙用太陽電池の開発の際に使われる劣化シミュレーションによって、開発を加速しようという作戦である。

※2 CIGS太陽電池 Cu（銅）、In（インジウム）、Ga（ガリウム）、Se（セレン）の4つの元素からなる太陽電池。薄く、高性能であることから、実用化が進められている。

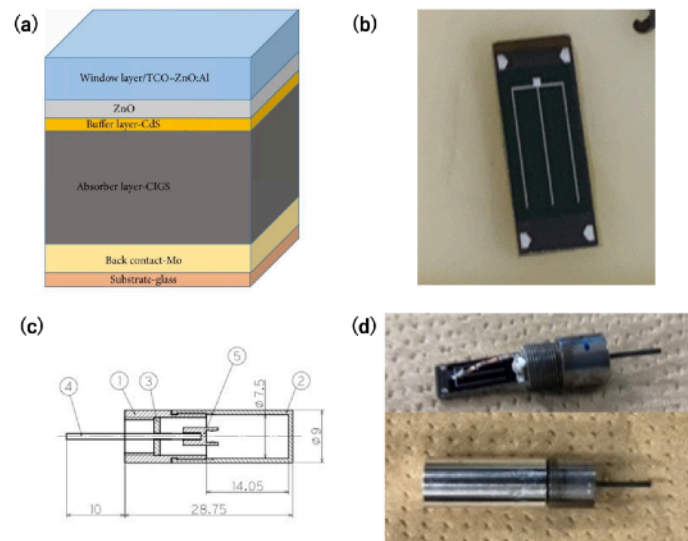


図1 (a) CIGS素子の断面図。グレーの部分のCIGS層によって放射線が吸収され、電力として取り出される。(b) CIGSの素子。横5mm、縦10mmのサイズ (c) CIGS 太陽電池型線量計の試作機における内部構造 (d) CIGS 太陽電池型線量計の試作機

1000時間かかる放射線試験を1日に短縮

太陽電池は半導体できており、薄いn型とp型の半導体が重ねられた形をしている。これらの半導体の持つ働きによって、価電子帯の電子に光ないし放射線のエネルギーを吸収することで、発電をするという仕組みだ。太陽電池に吸収された放射線のエネルギーによって、半導体内部に電子（動きやすい電子。伝導電子）と正孔（電子の足りない正に帯電した空間）が発生する。発生した電子がn型半導体から表面電極に、正孔がp型半導体から裏面電極に移動し続けることで、電流が生じる。

放射線による太陽電池の劣化メカニズムはすでに人工衛星の先行研究で明らかになっており、「格子欠陥」が劣化における主要パラメータになる。格子欠陥は、放射線が太陽電池にあたるとつくられる原子配列の乱れのことだ。格子欠陥は、太陽電池内部の電子の移動を妨げ、そして正孔と再結合させてしまう。これによって発電量が低下することが、劣化である。

この格子欠陥の密度と太陽電池の劣化は相関関係があることが知られている。太陽電池の発電量は、電流（短絡電流）と電圧（開放端電圧）のかけあわせの最大値で示される。放射線の照射量

に応じて太陽電池に生成される欠陥量は増加するため、発電量が下がり、取り出される電流と電圧も下がっていく。

この相関関係を応用した、宇宙用太陽電池の放射線劣化の予測において運用されている予測モデルが「変位損傷線量（DDD）法」だ。奥野氏は、変位損傷線量（DDD）法を応用し、太陽電池型線量計の劣化予測方法を構築。短時間の電子線照射による劣化挙動データから、CIGS太陽電池型線量計のCo-60γ線環境中での放射線耐性を明らかにした（図2）。

ガンマ線は、光のため直接電子を弾き出すことはできないため、ガンマ線が生成する電子を介して欠陥を作る。生成された電子は、高エネルギーなものも存在しており、格子欠陥を生成する。そのため、太陽電池が1MGyのガンマ線（Co-60）と電子線により生成される欠陥量を合わせることで、短時間の電子線照射試験により素子劣化を評価することができる。シミュレーションにより変位損傷線量を見積もった結果、1MeVの電子線を 2×10^{16} 個/cm²照射した場合、Co-60のガンマ線1MGy相当の値であることが明らかになった。

「結果として、CIGS太陽電池は福島第一原子力発電所の廃炉作業で十分に使用できる事が分かりました。変位損傷線量（DDD）法によって、1000時間程度必要だった放射線試験は1日に短縮でき、研究開発を大幅に短縮できました」（奥野）

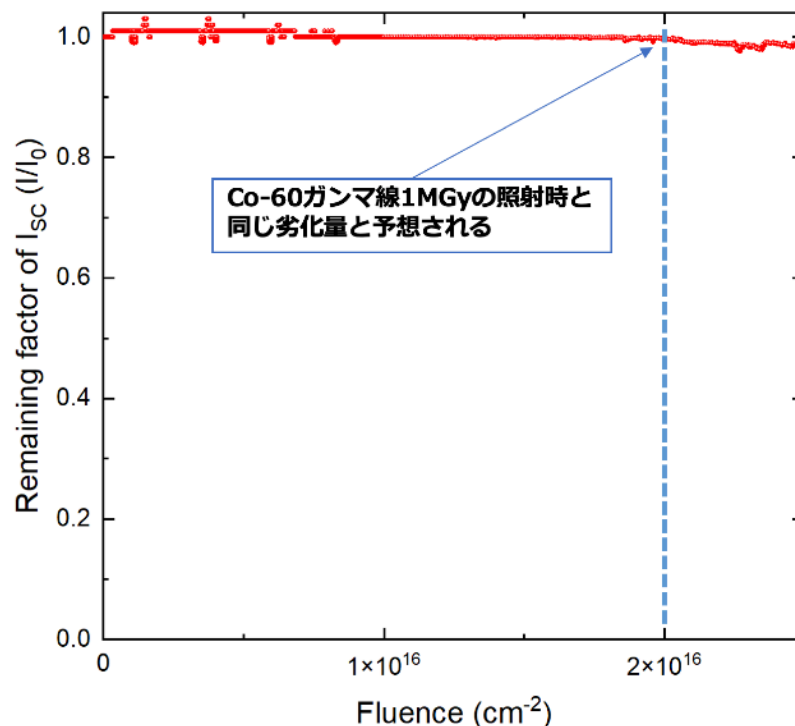


図2 高崎量子応用研究所で行われた放射線照射実験では、1号電子線加速器による1MeV電子線がCIGS太陽電池に照射された。図は、電子線照射中におけるCIGS太陽電池の電子線誘起電流のフルエンス依存性。測定中の放電などのノイズが見られるも、 3×10^{16} cm⁻² までほぼ電流の劣化が観測されなかったことを示している。

“放射線耐久性評価屋”が起こした異分野融合

今後は、福島第一原子力発電所の廃炉をより安全かつ加速的に進める研究開発や、太陽電池型線量計の応用を広げ、基礎科学としての劣化予測モデルの精度を上げていきたいと奥野氏は話す。

「劣化予測モデルの精度は、福島第一原子力発電所の廃炉作業だけでなく、宇宙探査など、科学の最先端を開拓するために必要な線量計の開発を実現します。その精度向上のためには加速器をつかった、実際の材料による放射線試験によってデータをとることが不可欠ですが、資金的な課題があること、そもそも加速器自体が少ないという現実があります。それゆえ、この分野の研究は、1980年代に完成している材料データを使ったものに限られています。今後はさまざまな応用を実現することで、放射線実験を進めて新しいデータを生み出していくことで、劣化予測モデルにおける基礎科学の発展を促していきたいと考えています」（奥野）

将来的には、ペロブスカイト太陽電池による線量計を実現したいと奥野氏は語る。ペロブスカイト太陽電池は放射線耐性が非常に高く、中性子検出ができ、過酷な環境下でも使用できる。工業はもちろん、放射線医療現場などへの応用が可能だ。フレキシブル化すれば、危険な環境で使用する特殊スーツなどへも応用できる可能性もあるという。

「この太陽電池型線量計は私のような“放射線耐久性評価屋”がつくったものです。私のキャリアだけを見ると門外漢かもしれませんが。しかし既存の技術の組み合わせの妙によって、廃炉、太陽電池、線量測定、それぞれの専門性を融合したものがつくりだせた。研究の面白さというのはまさにこういうところにあると私は信じています」（奥野）