

⑥

太陽電池素子技術を応用した 1F 廃炉用センサの開発

京都大学 複合原子力科学研究所
助教 奥野 泰希

京都大学中赤外自由電子レーザー装置は、常伝導高周波電子リニアックを用いた共振器型自由電子レーザー装置であり、発振波長3.4～26 μm で、この型では世界最高のレーザーの引き出し効率を記録している。これまで、共同利用・共同研究拠点活動により海外を含む学内外のユーザーに広く開放しており、光物性から生物・化学に渡る広範囲な共同研究に使用されてきている。講演では本施設の概要と利用研究の紹介と今後について発表を行う。

太陽電池素子技術を応用した 1F 廃炉用センサの開発

京都大学 複合原子力科学研究所

奥野泰希

1. はじめに

シリコン系をはじめ、III-V族およびII-VI族化合物太陽電池の社会実装も進んでおり、成熟された領域となってきた。日本における太陽電池素子の研究開発は、世界的にリードしたものであり、高性能、高安定性および、大面積の半導体素子作製技術が確立されてきている。また、人工衛星などの電力源としての宇宙用にも応用研究が行われており、放射線環境中での動作に関する先行研究では、放射線耐性や劣化メカニズムなどの解明が進められている。本報告では、高品質な半導体素子作製技術による太陽電池素子の特徴や、放射線耐性の評価手法による宇宙応用に関して紹介するとともに、太陽電池素子を放射線検出器として応用した場合における特性や、1F 応用の可能性について議論する。

2. 太陽電池の動作原理と効率評価方法

太陽電池は半導体であり、光電効果の一種である光起電力効果を応用して太陽光のエネルギーを直接電気エネルギーに変える。一般的な構造としては、p型半導体とn型半導体を接続したp-n接合を有している。p-n接合を有する半導体の電流電圧特性の関係は、太陽電池の暗電流(I_d)の特性であり、次の整流方程式で表される[1]。

$$I_d = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV_b}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

I_0	飽和電流密度
q	素電荷
V_b	バイアス電圧
n	ダイオード因子
k	ボルツマン定数
T	絶対温度

V_b は順方向電圧のとき正であり、 n は通常のダイオードであれば、1から2の間である。ダイオード因子は、p-n接合界面の結晶性などの品質で影響を受ける数値であり、理想では1、結晶性が悪く間接再結合が支配的になると2に近い数値をとる。この数値を抽出することによって、p-n接合の品質の良し悪しを評価することができる。

光照射下においては、太陽電池に光電流(I_{ph})が順方向の電流と反対方向に流れるため、太陽電池の光電流電圧特性は、(1)式より、以下のように表される。

$$I = I_d - I_{ph} \quad (2)$$

$$= I_0 \left(\exp\left(\frac{qV_b}{nkT}\right) - 1 \right) - I_{ph} \quad (3)$$

実際の太陽電池においては、p-n接合界面の不整合などにより増加する漏れ電流 I_{sh} を考慮する必要があり、 I_{sh} は、バイアス電圧 V_b および、並列抵抗 R_{sh} を用いて次式で表される。

$$I_{sh} = \frac{V_b}{R_{sh}} \quad (4)$$

この漏れ電流を考慮した太陽電池の光照射時の出力電流は以下ようになる。

$$I = I_d - I_{ph} - I_{sh} \quad (5)$$

また太陽電池の出力電圧 V は、バイアス電圧から、直列抵抗の消費量を引いたものになるため以下の式で表される。

$$V = V_b - IR_s \quad (6)$$

上式を用いて、(6)式を書き直すと、太陽電池の等価回路で示される光電流電圧特性の式が以下のように表される。

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{q(V - R_s I)}{nkT}\right) - 1 \right) + \frac{V - R_s I}{R_{sh}} - I_{ph} \quad (7)$$

この式は、等価回路内の R_s は開放端電圧には殆ど影響を与えないが、短絡電流への影響は強く、また R_{sh} は短絡電流には影響を与えず、開放端電圧には強く影響を及ぼす事を示している。

この光電流電圧 (Light current voltage : LIV) 曲線によって、図1に示すような短絡電流 (I_{sc})、開放端電圧 (V_{oc})、最大出力 (P_{MAX})、 P_{MAX} 時の電流 (I_{MP})、 P_{MAX} 時の電圧 (V_{MP})、曲線因子 (FF)、変換効率 (η)、並列抵抗 (R_{sh}) および直列抵抗 (R_s) が求められる。 I_{sc} は低インピーダンスで短絡状態にある電流で、電圧がゼロのときの出力象限における最大電流値である。理想の太陽電池の場合、この最大電流値は光による励起で太陽電池に生じる全電流に相当する。 V_{oc} は電池を流れる電流がゼロになったときに生じる出力象限内の順バイアススイープにおける電池全体の最大電圧差である。太陽電池の出力 $P(W)$ は、光電流 $I(A)$ と $I(A)$ 時の $E(V)$ の積で表される。

$$I(A) \times E(V) = P(W) \quad (8)$$

I_{sc} と V_{oc} の時 $P(W)$ はゼロであるが、これらの2点間に太陽電池の出力が最大となる P_{MAX} がある。この P_{MAX} における電圧と電流をそれぞれ V_{MP} および I_{MP} で表す。

FF は太陽電池における品質の目安となるものであり、以下の式で表される。

$$FF = \frac{P_{MAX}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (9)$$

P_{MAX} を I_{sc} と V_{oc} の積に相当する理論出力と比較して算出する。太陽電池は直角に近い LIV 曲線が最も良いとされており、FF は大きいほどよい。代表的な FF は 0.5 から 0.82 の範囲になり普通百分率で表される。変換効率 (η) は、太陽電池への太陽エネルギーの入力 P_{in} に対する電気出力 P_{out} の比率である。太陽電池は最大効率を得るためその最大出力まで使用できるので、 P_{out} は P_{MAX} と置き換えることが可能である。そのため η は以下の式で表される。

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{MAX}}{P_{in}} \quad (10)$$

P_{in} は、ソーラーシミュレータまたは自然光の輝度であり単位は W/m^2 と表される。一般的には地上光 (AM1.5, $1000 W/m^2$) を試料に照射するので、1000

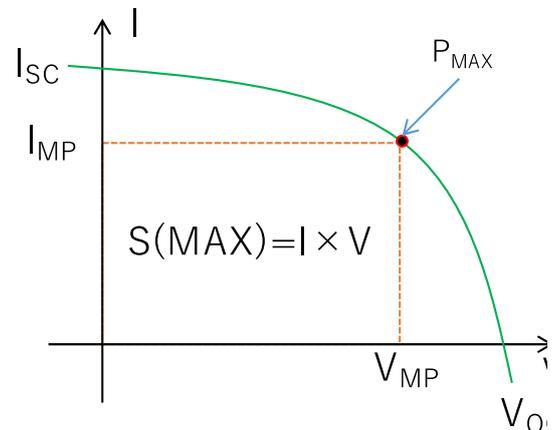


図 1 太陽電池の LIV 曲線

W/m²である。

3. 太陽電池の種類と変換効率

太陽電池の基本原理の発見は1839年、フランスの物理学者 Alexandre Edmond Becquerel による光電効果の実験的発見から始まる。彼は、電解液に浸した1対の金属板電極の一方に光を当てると、金属板間に電圧が発生する現象を発見した。この1839年から1904年を太陽電池の Discovery Years と呼び、主に光起電力の実験的理解が進められた。1877年には金属セレンに光を照射し、電気が発生する現象が W.G. Adams および R.E. Day によって発見された。この応用技術としてセレンや亜酸化銅を用いた太陽電池が Charles Fritts や Wilhelm Hallwachs によって開発され、照度計などに使われた。ただし、変換効率は、1 - 2%程度で、電力用としては実用にならないレベルであった。次に1905年から1950年までは、理論的理解と結晶成長技術の向上が行われてきた。1905年、歴史的に有名な光電効果の理論的解明が Albert Einstein によって行われた。この光電効果の理論的解明は太陽電池の理解にとって重要である。1918年には、Jan Czochralski によって、金属の単結晶成長技術が確立され、この技術をもとに1948年に Gordon Teal および John Little によって単結晶シリコン (silicon : Si) の製造が行われた。1928年には、F. Bloch によって単結晶周期格子のバンド理論の構築が行われ、1931年の A. H. Wilson によって高純度半導体理論へと発展した。この50年によってシリコン太陽電池の基礎となる高純度単結晶 Si の製造技術の確立および光電効果および半導体の理論的解釈の発展が行われた。1954年、ベル研究所によって単結晶 Si を用いた p-n 接合型太陽電池が発表された。この発見には、1952年の Calvin S. Fuller によるガス拡散法を使った Si の p-n 接合を作成技術の確立、1953年の Gerald Person による p-n 接合 Si の光電効果の発見、および1953年の Daryl M. Chapin による Si 太陽電池の変換効率の算出法の確立という3つの背景がある。以後、彼らは改良を加えて Si 太陽電池は1953年、4%の変換効率を達成、そして1954年に、6%に達し、ベル研究所はこのデバイスを Solar Battery と名づけて発表したのである。

現在、大規模ソーラ発電用素子として社会実装がされている太陽電池の最高効率としては、シリコン系太陽電池が26.7%、CdTe 太陽電池が22.1%、CIGS 太陽電池が23.4%である。宇宙用や航空機用として社会実装がされている太陽電池の最高効率としては、GaAs 太陽電池が27.8%、3接合 IMM 太陽電池が39.5%である。研究用として最高効率を有する太陽電池は、4つの太陽電池を積層した4接合太陽電池が、太陽エネルギーのおよそ半分の47.1%のエネルギー変換効率を有している。また近年、ノーベル賞候補として挙げられている塗布による簡易な成膜法で作製可能なペロブスカイト太陽電池では、25.7%の効率が達成されている。これらの最高効率は、年度毎にまとめられたウェブページ[2]があるため、世界的な研究の動向を容易に把握することが可能である。今後、太陽電池の利用は、脱炭素化に向けた大きな取り組みとして、電気自動車のルーフやドローンなどに搭載することにより、モビリティの動力源として活用が期待されている。しかし、それらへのパネルの搭載面積が限られていることから、効率が30%を超えることが実用化の1つの指標とされており、社会実装に向けた低コストかつ高効率な太陽電池の世界的な開発が加速している。

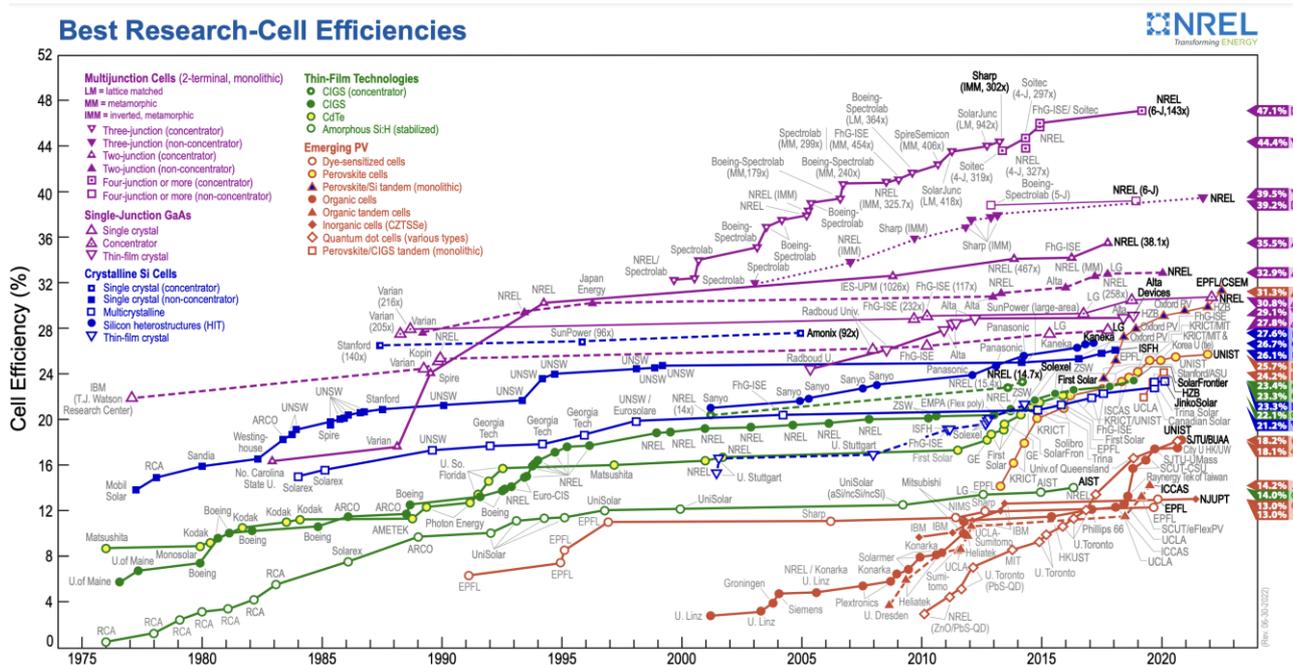


図 2 NREL で集計された世界における太陽電池各種の最高効率

4. 放射線検出器応用と福島第一原子力発電所への適応

福島第一原子力発電所(1F)の原子炉格納容器(PCV)から燃料デブリを取り出し、1Fの廃炉を効率的に進めるためには、PCV内の放射線源および線量率の分布を知り、適切な除染や放射線遮蔽措置を行って、作業者の安全性を確保するとともに、廃炉に使用する装置類の耐放射線性等の最適化をする必要がある。またデブリ移動に伴う不測の再臨界が生じる可能性も懸念されており、ガンマ線だけでなく、アルファ線や、中性子線の検出も重要視されている。これまで、東京電力ホールディングスや国際廃炉研究開発機構により、遠隔操作ロボット等を用いたPCV内部調査が各号機に対して行われ、これらに搭載した放射線センサー等により、線量率分布の実測がなされてきた。PCVへのアクセスは長距離の移動、水環境、高レベル放射線環境のため主にロボットや、アクセスポートを用いて行われる。しかし、線量計には小型化・軽量化・省電力化が求められており、使用できる線量計には限りがあるため、放射線分布の情報は、時間的にも空間的にも断片的である。

線量情報が取得できない主要な要因として、炉内での電源供給の不足、アクセスできる形状や重量の制限、広範囲なダイナミックレンジの線量率および、高線量環境下での損傷などが挙げられる。また、線量分布を把握することは、取り出し作業前の燃料デブリ位置や汚染箇所把握だけでなく、取り出し作業中の構造物の移動やデブリの反応による線量分布の変化に伴う被ばく事故および運用中の装置の放射線障害を防止するために重要である。そのため、今後、20-30年以上続く廃炉措置を安全に遂行するため、ロボットなどへ装着するリアルタイム線量測定だけでなく、長期間の定点観測型マッピング線量測定の需要が強く求められている。本研究では、PCV内のリアルタイム・マッピング測定を目的として高放射線耐性の低照度用太陽電池を利用した長期運用型の多接続ガンマ線・中性子線線量場観測システムの開発を実施している。

太陽電池型線量計は、宇宙用太陽電池として開発されてきた高放射線耐性を有する半導体素子を利用した自立駆動形の省電力・小型センサーとして開発を進めてきた[3]。東京電力福

島第一原子力発電所(1F)の事故により、その廃炉においては解体作業に応じて放射線場が刻一刻と変化する。そのため作業員の被爆事故やロボットの損傷を防止するため、リアルタイムな放射線場のマッピングが必要になる。しかし、炉内適応可能な線量計には、高い放射線レベルで長時間安定的に動作できるシステムが求められる。そのため、我々が、着目した技術は、人工衛星の電源用に研究開発されてきた宇宙用太陽電池である。宇宙用太陽電池は、宇宙環境における放射線に耐えうる特性を持った素子が利用される。太陽電池としてよく知られており、地上で利用されている代表的なものは、シリコン太陽電池が利用されるが、この太陽電池は、放射線耐性が低い。現在開発されている宇宙用太陽電池は、化合物太陽電池と呼ばれるもので、周期表の3と5族を使用したGaAs太陽電池や、2から6族を使用したCIGS太陽電池などがある。これらの太陽電池は、Si太陽電池に比べて放射線耐性が非常に高く宇宙ミッションでは10倍以上の寿命をもつ[4]。

CIGS太陽電池は、特に放射線耐性が高く、我々の研究結果では、1F炉心の非常に高い放射線環境で10年以上も使用できることが明らかになってきた。さらにこの太陽電池の世界一の効率をもつ素子作製技術は、日本が有していることから、高い放射線センシングが可能な素子を国内で入手可能である。そのため、我々は、この素子作製技術を用いた廃炉に向けた放射線センシングシステムを開発している。図3に開発中のCIGS太陽電池を応用した放射線検出器の試作システムを示す。CIGS素子は、およそ15mm×6mmと非常に小さな形状に加工し、センサー内部に設置した。システムとしては、センサーが放射線環境で出力する微少な電流をピコアンメータにより測定し、その信号を解析することで炉内の放射線を計測することができる。今後は、実際に廃炉への適応を目指して1Fサイトでのシステム構築に向けた準備を進めている。

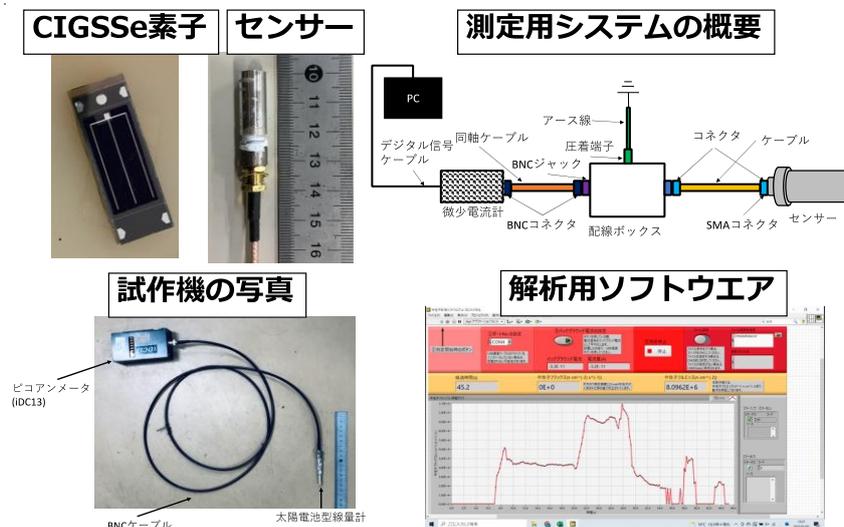


図 3 開発中の放射線検出器の試作システム

5. おわりに

研究開発の現場では、研究資金の流れが大きく変動しており、新たな研究環境整備のためには、医療、工業、農業といった複数の広い領域に複合的な市場を見据え、ベンチャーなどを通じて社会的に利益を生み出す研究が、研究者に求められている。研究から社会実装においては、予算や環境に応じて、萌芽・実証・実装と3つの段階と切り分けられる。2011年3月11日に、東日本大震災にて東京電力福島第一原子力発電所の事故により、日本社会は、大

きな転換を迫られ、これを機に、私は、次世代のエネルギー社会創造また、放射線の安全な利用および1F 廃炉措置の推進を研究したいと強く思うようになった。これまでの研究として、私は、人工衛星の太陽電池に関する放射線耐性の研究から高い放射線耐性を有する半導体を選出し、放射線デバイスへの応用を目指し、人工衛星電源の宇宙用太陽電池の宇宙環境放射線劣化モデルの研究開発および、医療・工業応用に向けた放射線検出素子の研究開発を行っており、今後のエネルギー社会的としての新しい選択肢になりうる発見をしていきたいと考えている。

参考文献・資料

- [1] 佐藤 勝昭, 「太陽電池」のキホン, SBクリエイティブ (2011) .
- [2] <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [3] Okuno, Y.; Okubo, N.; Imaizumi, M. *J. Nucl. Sci. Technol.* 56 (2019), 851.
- [4] Yamaguchi, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 68 (2001), 31.

講演者略歴



奥野 泰希 (おくの やすき)

所属 京都大学 複合原子力科学研究所 助教

住所 〒590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝代西2丁目1010

連絡先 TEL/FAX : 072-451-2364、E-mail: okuno.yasuki.7e@kyoto-u.ac.jp

学職歴 2017年 大阪府立大学大学院 工学研究科 量子放射線系専攻 修了
2017年 博士(工学)(大阪府立大学)「宇宙太陽電池の低エネルギー電子線照射影響に関する研究」

2017年 日本原子力研究開発機構 博士研究員

2020年 東北大学 金属材料研究所 助教

2022年 京都大学 複合原子力科学研究所 助教 現在に至る

研究・活動分野など 放射線が半導体に入射すると様々な現象が生じます。例えば、放射線は、原子や電子にエネルギーを与え、格子欠陥や、電子正孔対、イオンなどを生成します。私は、人工衛星に使われる高い放射線耐性をもつ宇宙用太陽電池に着目し、これらの物理現象の解明や新たなデバイスへの応用を目指して研究を進めています。