



展 TENBO 望

宇宙開発に貢献する放射線利用

—宇宙用太陽電池の放射線劣化とその予測—



今泉 充

Imaizumi Mitsuru

(独)宇宙航空研究開発機構

1 はじめに

近年、宇宙機の電力要求の高まりに伴い、光電変換効率が30%に迫る3接合太陽電池が開発され^{1,2)}、既に人工衛星などに使用されている。この太陽電池は、トップセル(受光表面側太陽電池)にInGaP, ミドルセル(中間太陽電池)にGaAs, そしてボトムセル(裏面側太陽電池)にGeを材料として用いた3種類の太陽電池が積層された構造となっている。これらの構成太陽電池をサブセルと呼ぶ。

人工衛星など宇宙機に用いられる太陽電池は、10年程度前までは変換効率が約17%の単結晶Si太陽電池が主流であった。この太陽電池はpn接合が1つ(単一接合太陽電池)であり、その放射線劣化における振舞いは比較的単純である。さらに、開発・実用になってから歴史があるため、放射線劣化もよく研究されている。したがって、実際の宇宙空間における劣化の予測方法は既に確立されている。一方、3接合太陽電池は開発され実用に供されたのが比較的最近で、かつその構造から放射線劣化の振舞いが複雑である。

ここでは、宇宙用太陽電池の要求性能から放射線劣化特性及び劣化予測法について、劣化データを交えながら紹介する。

2 宇宙用太陽電池

現在用いられている太陽電池パネルの断片の外観を図1に、またその典型的な断面構造の模式図を図2に示す。太陽電池の表面には放射線の遮蔽材として厚さ100~150 μm 程度のカバ

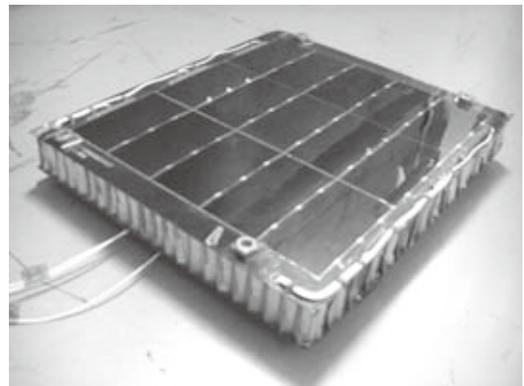


図1 太陽電池パネルの断片(試験用クーポンパネル)

ーガラスと呼ばれるガラス板がシリコン系の透明接着剤にて貼り付けられる。そしてこれが、アルミニウム薄板によるハニカム構造の表裏両面に強化炭素繊維（CFRP）の布を樹脂によって板状に成型したものを貼り付けたサブストレートと呼ばれるパネル（厚さ 10～25 mm）に、絶縁用のポリイミドフィルムを挟んで、熱伝導性の高い別の種類のシリコン系接着剤（赤色）によって接着されている。

宇宙空間には、広いエネルギー分布を持った放射線粒子が飛び交っている。そのほとんどはカバーガラスによって遮蔽されるため、太陽電池の劣化には寄与しない。宇宙放射線粒子の中で太陽電池に損傷を与えて出力を劣化させるのは、飛来数がほかの粒子と比較して桁違いに多くかつ透過力が大きい高エネルギーの電子及び陽子である。放射線による劣化前の状態（あるいはそのときの出力）すなわち初期状態（初期値）を BOL（Beginning of Life）と呼び、また放射線による劣化後の状態（あるいはそのときの出力）を EOL（End of Life）という。また、EOL における出力を BOL における出力で除した値を保存率という。よって、保存率が高いことが、耐放射線性が高いということ意味する。

BOL 出力と耐放射線性の両者が高いことが宇宙用太陽電池に要求される基本的な性能である。宇宙用太陽電池における効率は、EOL における効率が低いことが重要であって、BOL において効率が低いことはほとんど意味がない。当然ながら太陽電池パネルはその宇宙機のミッション期間中の予測放射線被ばく量から見積もられる劣化後すなわち EOL における発生電力で設計される。一方で、BOL からの劣化によって失われる電力分は基本的には余剰電力である。耐放射線性が低い太陽電池を使用する

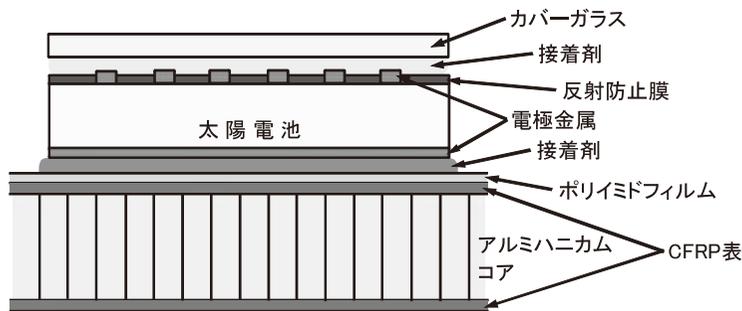


図2 模式的に示した太陽電池パネルの典型的な断面構造

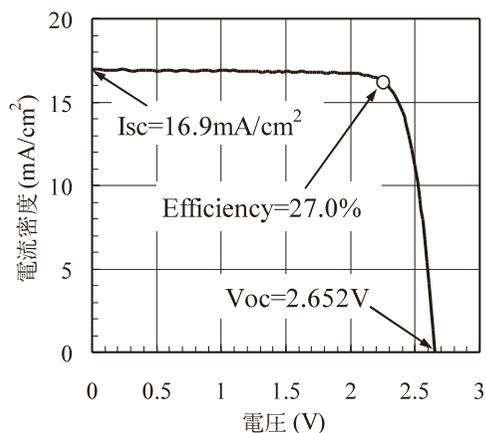


図3 宇宙空間の模擬太陽光（AM0）を照射したときの3接合太陽電池の代表的な電流-電圧特性

と太陽電池パネルのサイズが大きくなるばかりか、余剰電力の消費対策を施さなければならない。太陽電池の耐放射線性が高く（＝変化率が小さく）EOL 効率が高ければ、宇宙機の電力要求値に対し太陽電池パネルの必要面積を少なく、すなわち宇宙機を小さく、軽くすることができるという大きなメリットが出せる。

図3に示したのは、宇宙用3接合太陽電池に、宇宙空間の模擬太陽スペクトル光（AM0という）を照射したときの代表的な電流-電圧特性である。太陽電池の両端を開放したときの電圧出力（開放電圧：Voc）は約2.65 V、両端を短絡したときの電流出力（短絡電流：Isc、多くの場合単位面積当たりの値に規格化する）

は約 17 mA/cm^2 、そして電力（各点の電流と電圧の積）が最大を取る点（ P_{max} ）から求めた変換効率（ P_{max} を宇宙空間の太陽光強度 136.7 mW/cm^2 で除する）は 27% と極めて高い。

3 太陽電池の放射線劣化

宇宙環境において太陽電池が受ける放射線による主な損傷は、放射線によって太陽電池材料である単結晶半導体中の構成原子が、放射線粒子が与えるエネルギーによって格子点からはじき出されることによる（放射線粒子の非イオン化エネルギー損失）。この結果、格子欠陥である格子間原子及び原子空孔が形成される。この格子間原子と原子空孔の対はフレンケル対と呼ばれ、放射線損傷による 1 次欠陥として扱われる。このフレンケル対型の結晶欠陥が直接、ないしはその後幾段かの欠陥反応（ほかの型の結晶欠陥への変化）を経た後に形成される結晶欠陥（多くの場合複合欠陥）が少数キャリアの再結合中心を形成し、少数キャリア寿命が低下して結果的に出力が低下する。また多くの場合、欠陥には多数キャリア（正孔）捕獲準位として振舞うものも生成され、特に被ばく量が大きくなると p 型層すなわち光吸収層のキャリア濃度が低下して高抵抗化し、pn 接合が消滅して太陽電池として動作しなくなる³⁾。図 4 に、宇宙用 Si 太陽電池の、放射線照射前後での光照射下電流-電圧特性を示す。

前述のように、宇宙空間で太陽電池に損傷・劣化を与える放射粒子は電子と陽子である。これらには、太陽から飛来するもの（太陽風）、地球磁場に捉えられているもの（捕捉宇宙線）、ないしはその他の天体から飛来するもの（銀河宇宙線）の 3 種類があり、それらの単位時間当たりの飛来密度（フラックス）は、宇宙空間における位置、すなわち宇宙機の軌道によって異なる。その他の粒子（イオン）は、実際の宇宙空間ではそのフラックスが電子、陽子と比較すると極端に少ないこと、及びカバーガラスで遮

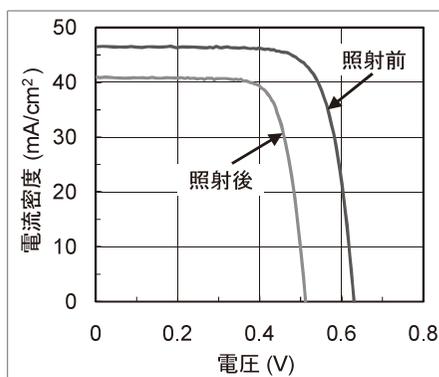


図 4 宇宙用 Si 太陽電池の放射線照射前後での光照射下電流-電圧特性

蔽されることから、通常は劣化要因として考慮しなくてよい。

宇宙用 Si 太陽電池の厚さが $100 \mu\text{m}$ ないし $50 \mu\text{m}$ と薄いのは、この放射線被ばくによる拡散長の低下の影響を小さくし、耐放射線性を高めるためである。薄くした結果、裏面側に光反射層を形成しても太陽光の吸収が不十分となるため、初期変換効率は地上用の単結晶 Si 太陽電池（20% 程度以上）と比較して低くなっている。一方、直接遷移型 III-V 族化合物は吸収係数が大きいので光吸収層の厚さが Si 太陽電池と比較して薄くてよく、拡散長の低下の影響が出にくい。加えて、劣化は生じるものの、それが室温程度でもある程度有意に回復し（その程度は材料による）その速度も劣化の進行と比較して十分早い。これが III-V 族化合物太陽電池が耐放射線性に優れる理由の 1 つである。

ある 3 接合太陽電池に対し、陽子線を照射量（フルエンス； ϕ ）一定（ $\phi = 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ）でエネルギーを変化させて照射すると、 V_{oc} 、 I_{sc} 、及び P_{max} の保存率は図 5 のようになった⁴⁾。陽子のエネルギーが 150 keV のとき各パラメータの保存率が最小となっている。モンテカルロシミュレーションによれば、このエネルギーの陽子は GaAs ミドルセル内で停止する。従って、この結果は 3 つのサブセルの中でミドルセルが最も耐放射線性が低いことを示してい

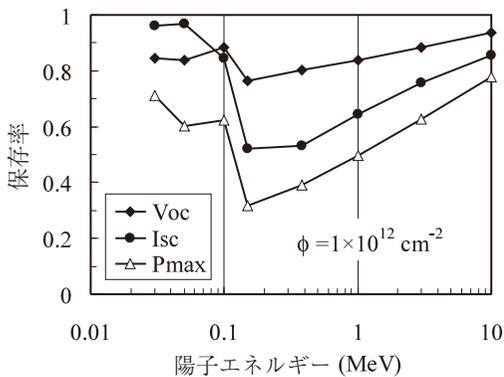


図5 照射量を一定 ($1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) としたときの太陽電池出力パラメータ保存率の陽子線エネルギー依存性

る⁵⁾。なお、この傾向はほぼ全ての3接合太陽電池においてみられる。

4 放射線劣化の予測

太陽電池パドルの電力出力はそのミッション期間中の予測放射線被ばく量から見積もられるEOLにおける発生電力で設計される。そのため、被ばく量の予測方法、そして被ばく量からの太陽電池劣化量の予測方法は宇宙機の設計において欠かせない重要な技術である。

宇宙空間に存在する電子、陽子のエネルギーは様々であり、そのフラックス（単位時間当たりの飛来数）とエネルギーの関係は、一般的には低エネルギーほど大きい、そのスペクトル形状は宇宙空間の位置に依存する。また、放射線粒子は様々な方向から飛来する。一方、劣化予測のための劣化データ取得は地上で加速器を用いて行うため、エネルギーは基本的に単一であり、また入射方向も1方向である。そのため劣化予測には補正が必要である。また、図2に示したように、実際には太陽電池には放射線遮蔽材としてカバーガラスが貼り付けられる。このガラス及び裏面側のサブストレートなどの遮蔽効果の考慮も必要である。加えて、宇宙空間では電子、陽子の飛来（太陽電池への入射）方

向は全球面に分布している。劣化予測では当然これらの効果を考慮した計算を行うが、ここでは説明を単純化するためにそれら補正に関しては触れない。

(1) 劣化予測の準備

劣化予測に必要なデータは大きく分けて2つ、①電子、陽子それぞれに対する劣化量のエネルギー依存性と②電子と陽子の劣化の比である。これらの求め方を以下に説明する。

耐放射線性を求める基本は保存率のフルエンス依存性である。これを一般的に劣化曲線と呼んでいる。まずこの劣化曲線を、陽子ないし電子のエネルギーをパラメータとして地上照射試験を実施して取得する。宇宙空間には広いエネルギー範囲の電子、陽子が存在するが、実験で取得するのは実際に太陽電池の劣化に寄与する数10 keV～10 MeV程度の範囲である。各エネルギーで得られた実験点から次式で示す経験式を用いてフィッティング曲線を得る。

$$X/X_0 = 1 - A \log(1 + \phi/\phi_0) \quad (1)$$

ここで、 X ：劣化後の太陽電池特性値（VocやIscなど）、 X_0 ：劣化前の太陽電池特性値、 ϕ ：フルエンス、 A 、 ϕ_0 ：フィッティング係数である。

このデータ及びフィッティング曲線から、一定の劣化（保存率）を与えるフルエンスを各エネルギーにおいて求める。このフルエンスのうち、陽子の場合は10 MeV、電子の場合は1 MeVの値を基準として各エネルギーにおける値で除する。この値を相対損傷係数；RDC（Relative Damage Coefficient）と呼び、基準エネルギー粒子（1 MeV電子、10 MeV陽子）に対して太陽電池特性値に損傷を与える度合いの指標として扱う。例えばRDCが10のとき、そのエネルギーの電子/陽子は1 MeV電子/10 MeV陽子の10倍の損傷を与える能力がある（10分の1の照射量で同じ劣化を与える）という意味である。

次に、図6において10 MeV陽子と1 MeV

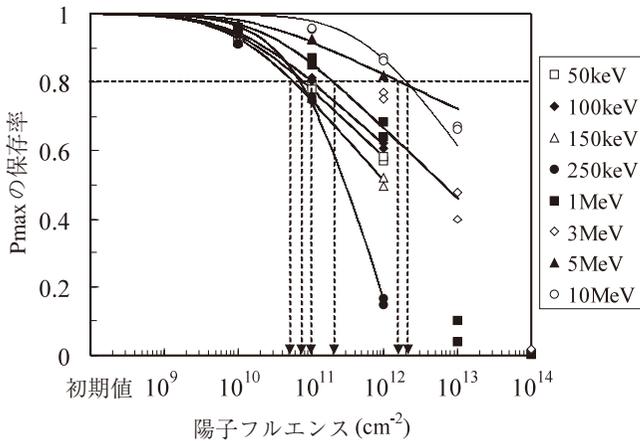


図6 放射粒子のエネルギーを変えて求めた3接合太陽電池の劣化曲線（陽子線，最大電力Pmaxの例）

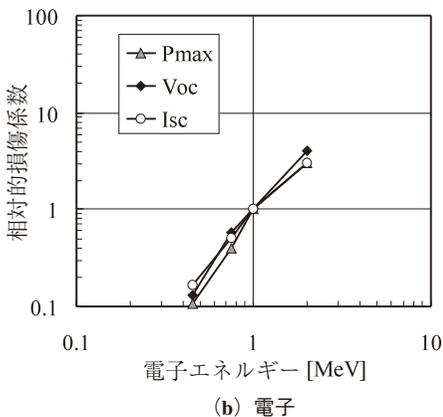
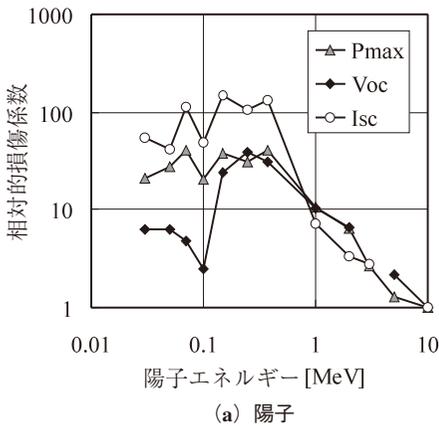


図7 3接合太陽電池の陽子と電子に対する相対損傷係数

電子の劣化曲線から、先の相対損傷係数を求めたときに用いた保存率を与えるフルエンスの比を求める。言い換えれば、10 MeV 陽子の 1 MeV 電子に対する RDC を求める。この値には特別な名称がないが、ここでは変換係数と呼ぶことにする。

以上が劣化予測のために必要な準備である。

(2) 劣化予測

ある人工衛星による宇宙ミッションを計画すると、その実現に必要な宇宙空間での軌道が決まる。一方で、宇宙空間のある位置における放射線環境は、人工衛星などによる過去の測定データに基づいた環境計算プログラムによって求めることができる。このプログラムを用いてその軌道における電子、陽子のフラックスのエネルギー分布スペクトルを得る。通常そのスペクトルは時刻によって変動するので、計画されているミッション期間の積分値を求めなければいけない。さらに、太陽フレアなどの“異常”環境も確率によって考慮に入れる。こうして、その人工衛星がミッション期間中に浴びる電子、陽子の総数のエネルギー分布を得る。

次に、この分布図に対し、電子、陽子それぞれの RDC を乗ずる。これを全エネルギー範囲にわたって積分すれば、その軌道とミッション期間の電子ならば 1 MeV 相当のフルエンス、陽子ならば 10 MeV 相当のフルエンスが得られる。これを等価フルエンスと呼ぶ。さらに、換算係数を用いて等価 10 MeV 陽子フルエンスを 1 MeV 電子のフルエンスに変換し、電子の等価 1 MeV 電子フルエンスに加える。こうして、その人工衛星の総等価 1 MeV 電子フルエンスが得られる。今度は 1 MeV 電子による太陽電池の劣化曲線に対して、この総等価 1 MeV 電子フルエンスを横軸に当てはめてそのときの保存率を求める。こうして得られたのが目的の、その人工衛星の太陽電池がミッション期間中に

劣化するであろう量/率の予測値である。

(3) 新しい予測法

以上述べた方法は米国のジェット推進研究所において開発・確立された方法である⁶⁾。しかし、この方法では電子、陽子のエネルギーを変えて数多くの放射線照射試験を実施しなければならない。そこで米国海軍研究所を中心として開発されたのが変位損傷入射量；DDD (Displacement Damage Dose) 法である。紙面の制限により詳細な説明はほかの機会に譲るとするが、この方法ではあらかじめ太陽電池の半導体材料の種類に応じて各エネルギーの電子、陽子が与える損傷の度合いを表す値である NIEL (Non Ionized Energy Loss) 値を求めておき、実際の太陽電池に対する照射試験は電子、陽子でそれぞれ最低 1 種類 (実際には確認のため 2 種類程度) のエネルギーにて行う。この結果を元に横軸に NIEL 値とフルエンスの積 (=DDD) を、縦軸に保存率を取り劣化曲線を得る。実際の劣化予測では、前述したミッション期間中の各エネルギーの電子、陽子の総飛来数 (フルエンス) と、それらの NIEL 値から総 DDD 値を求め、劣化曲線に当てはめて劣化量を予測する。現在、この方法を 3 接合太陽電池に適用すべく、研究を進めている (図 7)。

5 まとめ

宇宙用太陽電池である、高効率 3 接合太陽電池について、その要求性能と特性を説明した。また、宇宙用太陽電池の放射線劣化とその予測技術について、放射線劣化データを示しながら解説した。今後、新たな高性能・高機能太陽電池が開発されると、それに合わせてまた新たな劣化予測手法や技術、さらにはここでは触れなかったが、劣化メカニズムの解明のための研究が必要になるであろう。それには、放射線利用技術の更なる進展が期待される。

参考文献

- 1) Stan, M.A., *et al.*, "The Production of >28% Efficient Triple-Junction Space Solar Cells at Emcore Photovoltaics", *Proc. 1st World Conf. Photovoltaic Energy Conversion*, CD: 3P-B5-03 (2003)
- 2) Granata, J.E., *et al.*, "Next Generation GaInP₂/GaAs/Ge Solar Cells: Cell Design and Qualification Status", *Proc. 1st World Conf. Photovoltaic Energy Conversion*, CD: 3P-B5-01 (2003)
- 3) Yamaguchi, M., *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **70**(12), 1566-1568 (1997)
- 4) Imaizumi, M., *et al.*, *Proc. 29th IEEE Photovol. Specialists Conf.*, pp.990-993 (2002)
- 5) Imaizumi, M., *et al.*, *Proc. 1st World Conf. Photovol. Ener. Conv.*, CD: 3P-B5-03 (2003)
- 6) Anspaugh, B.E., *et al.*, "Solar Cell Radiation Handbook", *JPL Publication* 82-69, Chap.4.