

Durability Evaluation of IMM triple-junction solar cells in Deep Space Mission Environments

Takanobu Shimada ¹, Hiroyuki Toyota ¹, Mitsuru Imaizumi ²

¹ Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) / JAXA,
3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan

² Aerospace Research and Development Directorate (ARD) / JAXA,
2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505 Japan

Abstract:

This paper presents the experimental results for the durability of inverted metamorphic (IMM) triple-junction solar cells in deep space environments. Recently, the IMM solar cells have been enthusiastically developed because it is possible to contribute to a reduction in the weight of solar array paddles due to their high efficiency and thin-film structure. In near future, the IMM solar cells are expected to be mounted on spacecraft in place of conventional rigid solar cells. On the other hand, ISAS/JAXA is planning to widespread planetary exploration missions. However, planetary probe will be exposed to various environments that are different from Earth orbiting satellites; for example, high solar intensity and high temperature (HIHT) for inner planets missions and low solar intensity and low temperature (LILT) for outer planet missions. Therefore, to apply the IMM solar cells to these deep space missions, it is necessary to evaluate the durability of the IMM solar cell under the simulated environments.

In this study, continuous sunlight exposure tests to the IMM cells were conducted under the LILT and HIHT conditions (i) to examine a deterioration prediction method for optimal design of solar array paddles and (ii) to clarify the dependence of temperature and solar intensity on the degradation of the cell performance. 2 cm × 2 cm bare IMM cells were subjected to the LILT condition at -90°C under 0.2 suns for 2468 hours while the HIHT conditions for 1000 hours which combine the temperature of 220, 150 and 100°C and the solar intensity of 5 and 2 suns.

The results of the LILT exposure test indicate slight degradation in I_{sc} and P_{max} of 2%, and thus demonstrate the utility to outer planetary exploration. On the other hand, in the HIHT environments, the dependence of temperature and solar intensity on the cell degradation could be obtained systematically, but a large degradation was observed especially in V_{oc} . Therefore, the identification of this degradation cause should be preferentially studied. In addition, the results of the HIHT continuous exposure tests also suggest that the degradation is attributed to the increasing in leak current due to the deterioration in the cell shunt resistance, that the cell performance is gradually decreasing but suddenly, and that there is a dependency of both sunlight intensity and temperature on the cell degradation. As a factor of the leak occurrence, mechanical stress to the cell is suspected from the inspection of the sample appearance after the tests. As future works, we continue to consider these concerns of the IMM cell degradation caused by the HIHT continuous exposure.

Presented at the 33rd ISAS Space Energy Symposium, 14th February, 2014

IMM3 接合太陽電池セルの深宇宙環境下における耐性評価

嶋田 貴信¹、豊田 裕之¹、今泉 充²

(¹JAXA 宇宙科学研究所、²JAXA 研究開発本部)

1. 研究背景および目的

これまで JAXA では、宇宙科学プログラムの中で様々な深宇宙探査ミッションを遂行し、また将来に向けた様々なミッションを計画している。深宇宙空間では、直接外部へ露出される太陽電池にとって非常に広範囲に渡る環境が待ち受けている。つまり、内惑星では高光強度高温 (High Intensity High Temperature、以降 HIHT) 環境に、外惑星であれば低光強度低温 (Low Intensity Low Temperature、以降 LILT) 環境に晒されることになる。例えば、今後打上げを予定している水星磁気圏探査機 MMO は、太陽距離が 0.31-0.47 AU の水星周回軌道上を航行するため、太陽光強度が 5-11 sun と変動し、太陽電池セル温度は最大で 240°C に達する見込みである。一方、木星探査では、5 AU となるため、0.04 sun、-130°C 以下になることが予測される。この様に、地球から遠く離れた深宇宙環境では、地球周回衛星とは異なる太陽電池セルの設計、評価が必要になる。

一方で、逆積み格子不整合型 (Inverted Metamorphic、以降 IMM) 3 接合太陽電池セルは、ボトムセルに格子不整合材料である InGaAs を用いた構造とすることで、30% 以上の高い変換効率が可能であり、また薄膜セルであるためパドルの軽量化・省スペース化に寄与できることから、近年開発が盛んに進められている。本セルは、従来の太陽電池セルに取って代わり、将来の様々な宇宙機への搭載が期待されている。しかし、IMM3 接合太陽電池セルを深宇宙探査ミッションへ適用するためには、事前に模擬環境下で評価することが必要不可欠となる。そこで本研究では、惑星探査機が宇宙空間で曝される LILT および HIHT 環境下において連続照射試験を行うことで出力および劣化特性を評価し、研究目的①：その結果を基に性能予測手法を確立しパドルの設計最適化への寄与、また、研究目的②：性能低下に対する温度および光強度の依存性・劣化メカニズムの解明を目指す。

2. 実験概要

InGaP/GaAs/InGaAs IMM3 接合太陽電池ベアセルに対し、深宇宙模擬環境下における連続光照射試験を実施した。図 1 に、サンプルの外観を示す。セル有効面積は 2 cm × 2 cm で、薄膜であるため取り扱いのしやすさを考慮し、シリコン基板上に実装されている。

表 1 に、LILT および HIHT 環境を模擬した連続照射試験条件を示す。LILT について、木星到達までのクルージング期間の平均を想定し、セル温度 -90°C、太陽光強度 0.2 sun の条件ひとつとした。照射期間について、性能の変化が見られなくなるまで試験を継続した。

一方、HIHT については、セル温度 (220、150、100°C) と太陽光強度 (5、2 sun) を組み合わせて計 5 つの条件を設定した。照射期間はいずれの試験も 1000 時間とした。HIHT #1 では MMO の水星周回軌道上環境 (5-11 sun、最大 240°C) を、HIHT #4 では「あかつき」の金星周回軌道上環境 (2 sun、最大 165°C) それぞれを模擬した試験条件とした。同時に、セルの劣化に対する温度および光強度の依存性を取得するため条件である HIHT #2 および HIHT #3 も加えた。

表 1 で示した各試験は、2 種類の太陽光シミュレータ (一台は 6.5 kW キセノンランプ 1 灯式で最大 10 sun で定電流制御、もう一台は 1.0 kW キセノンランプ 1 灯式で最大 2 sun で定電流/定照度制御機能付シミュレータ) と、2 種類の照射用石英窓付きチャンバ (一台は最大 300°C まで昇温可能なヒータ付、もう一台は -130°C まで冷却可能な冷凍機付チャンバ) を組み合わせて用いることにより実施した。

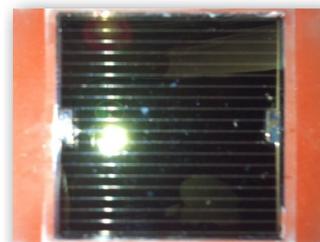


図 1 IMM3 接合太陽電池セル外観

表 1 LILT および HIHT 模擬環境下での連続光照射試験条件

Test ID	セル温度	太陽光強度	照射期間	サンプル数
LILT #1	-90°C	0.2 sun	2468 時間	2 枚
HIHT #1	220°C	5 sun	1000 時間	2 枚
HIHT #2	220°C	2 sun	1000 時間	2 枚
HIHT #3	150°C	5 sun	1000 時間	1 枚
HIHT #4	150°C	2 sun	1000 時間	1 枚
HIHT #5	100°C	5 sun	1000 時間	1 枚

3. 実験結果

3.1 LILT 連続照射試験

-90°C、0.2 sun の LILT 環境下において、合計で 2468 時間の連続照射試験を実施した。図 2 ならびに図 3 に、照射前後における AM0-1 sun、25°C 条件下での電流-電圧 (I-V) 特性、および分光感度特性をそれぞれ示す。図 2 から、2468 時間の照射後では初期と比べ I_{sc} にわずかな低下が確認された。これは、分光感度特性の結果から、電流律速セルであるトップセルの量子効率の低下によるものと推測している。

図 4 に、LILT 環境から取り出し、AM0-1sun、25°C で測定した電気性能の保存率推移を示す。2468 時間の照射後では、 I_{sc} および P_{max} に 2% 前後の劣化が見られた。期間の途中、 P_{max} の保存率に増減が見られるが、FF の変化と一致した変動であることから、計測時のプローブとの接触抵抗によるものと考えている。また、照射後 1200 時間以降では I_{sc} の保存率低下の飽和、つまり劣化の下げ止まりが確認できる。本結果から、LILT 環境においてはわずかな性能低下に留まることから、IMM セルの外惑星探査への適用の有用性が示唆された。

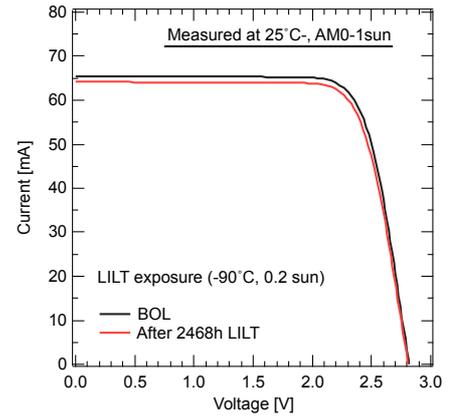


図 2 LILT 連続照射前後での電流-電圧特性 (AM0-1sun、25°C で測定)

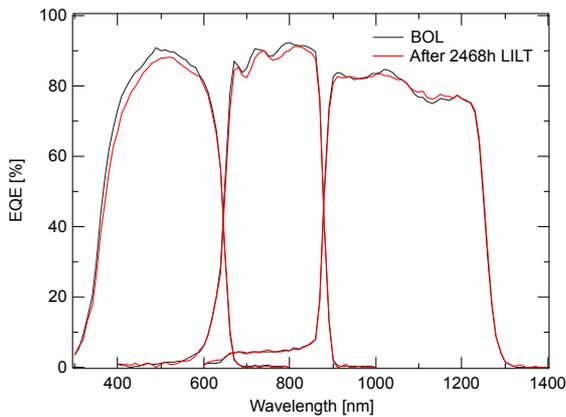


図 3 LILT 連続照射前後での分光感度特性

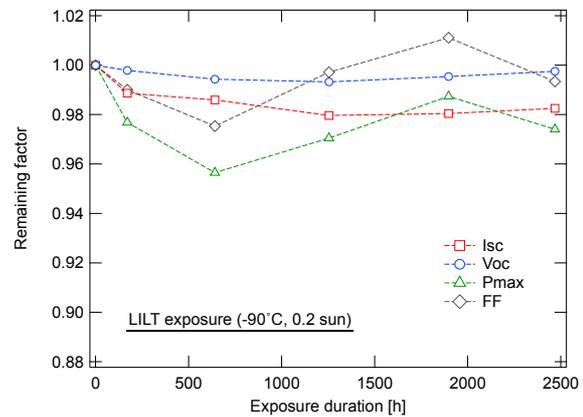


図 4 LILT 照射中の保存率推移

3.2 HIHT 連続照射試験

図 5 ならびに図 6 に、光強度 5 sun におけるセル温度 220°C (HIHT #1) および 150°C (HIHT #3) での照射前後の AM0-1sun、25°C での I-V 特性を示す。両条件ともに、電流に比べ電圧のほうが大きく劣化していることが分かる。本結果から、太陽電池セルのシャント抵抗低下によるリーク電流の増大が、電圧低下の要因であると推測している。さらに、150°C よりも 220°C のほうが劣化量は大きいことも判明し、セルの性能劣化に対し温度依存性を持つことが判明した。

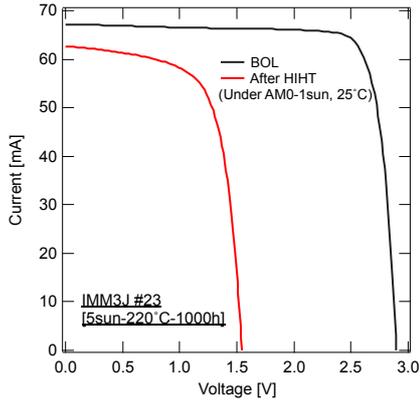


図5 HIHT (5 sun-220°C-1000 時間) 連続照射前後での電流-電圧特性 (AM0-1sun、25°C条件下)

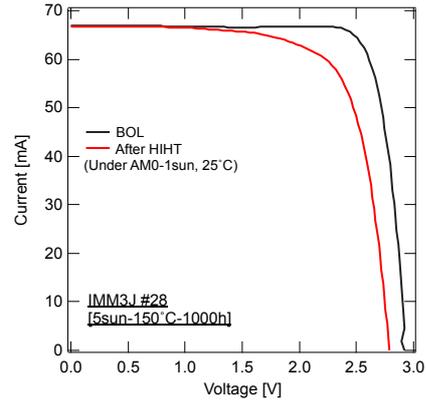


図6 HIHT (5 sun-150°C-1000 時間) 連続照射前後での電流-電圧特性 (AM0-1sun、25°C条件下)

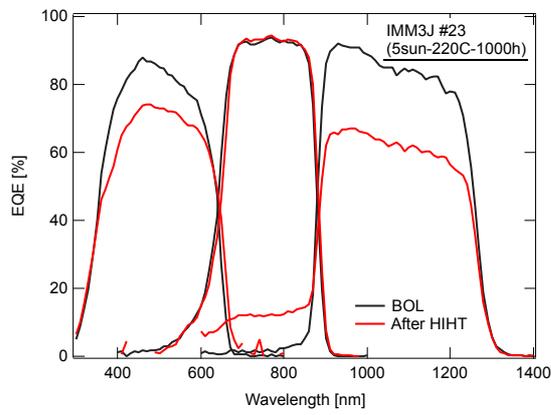


図7 HIHT (5 sun-220°C-1000 時間) 連続照射前後での分光感度特性

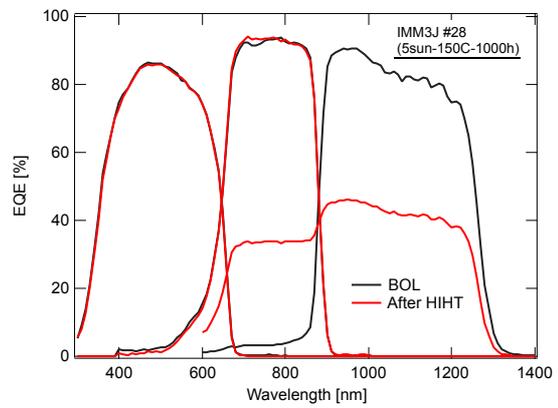


図8 HIHT (5 sun-150°C-1000 時間) 連続照射前後での分光感度特性

図7および図8に、光強度5 sunにおけるセル温度220°Cおよび150°Cでの照射前後の分光感度特性を示す。220°Cではトップセルとボトムセルで、150°Cではボトムセルのみに外部量子効率の低下が見られた。これらサブセルの劣化が、図5および6で示したIMM3接合セルの性能低下に相当していると考えている。また、本結果から、温度上昇に伴いInGaAsトップセル、InGaPボトムセルの順序で劣化することも考えられるが、あくまでも推測の域を出ないため今後の検討課題としたい。

図9に、5 sun、220°C (HIHT #1)における1000時間連続照射中の電気性能の保存率推移を示す。本試験条件で用いた太陽光シミュレータ装置では定照度制御が設定できないため、Iscに比較的大きな変動が生じている。照射中は、短時間に急激な低下は見られず、指数関数的な劣化の進行が観測された。従って、劣化のモードとして、トータルドーズ的な効果に起因していることが推測される。

光強度2 sunにおける220°C (HIHT #2)と150°C (HIHT #4)での照射前後の電気性能の結果について、I-V特性については5 sunのときと同様な劣化傾向が示されたが、電圧の劣化量は2 sunの条件の方が小さかった。一方、分光感度特性では、両温度ともにボトムセルに劣化が見られず、5 sunにおける外部量子効率の劣化とは異なる挙動を示す結果となった。この点

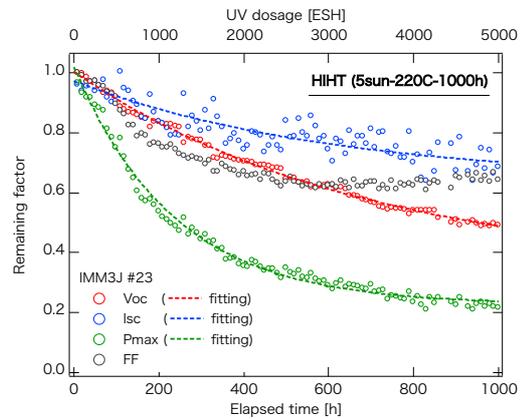


図9 HIHT (5 sun-220°C-1000 時間) 連続照射中の電気性能の保存率推移

については原因を突き止めてられてないため今後の検討課題としたい。

図 10 に、HIHT #1~#5 の 1000 時間連続照射後の電気性能の保存率をまとめる。温度が高いほど、劣化量は大きくなり、特に Voc (結果として Pmax) に大きく影響を及ぼしていることが分かる。従って、セルの性能劣化に対して温度依存性を有していることが示された。一方、光強度が強いほど劣化量は大きくなり、特に 220°C においては Voc と Isc とともに劣化は増大し、劣化に対し光強度依存性があることも示された。

過去の同種の試験結果と比較すると、MMO の太陽電池セルの開発の過程で、リジットタイプの 3 接合セルを用いて、220°C、7 sun の HIHT 環境下において 407 時間の連続照射試験を実施したが、この試験結果からは、照射前後で性能にほとんど変化が見られなかった[1]。ところが、IMM3 接合セルでは HIHT 連続照射により大きな性能劣化が観測されたが、構造的な観点で言えば、ボトムセルの厚さが大きく異なる点が挙げられる。照射後にサンプルの目視検査の結果から、セルの表面に数本のシワ状の線が確認された。どの段階で発生したかの特定までは至っていないが、セルは機械的ストレスを受けたためにこれまで述べてきた HIHT 環境下での劣化が生じたと推測できる。この発生要因として、サブセル間またはセルとシリコン基板間の熱膨張率の差異と考えられるが、詳細については引き続き検討を行う予定である。

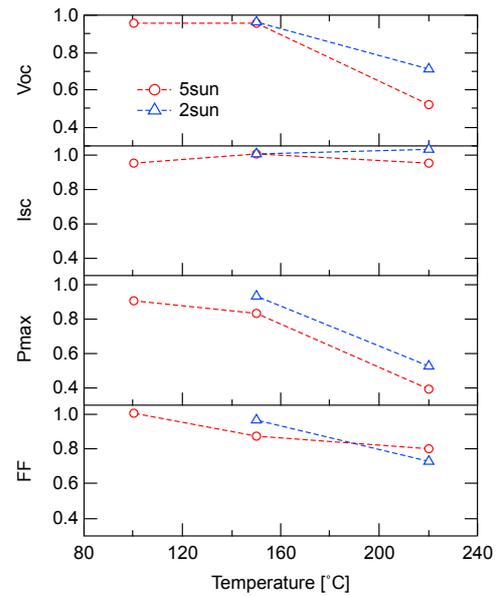


図 10 HIHT 連続照射後の電気性能保存率

4. まとめ

惑星探査機が深宇宙空間で曝される各種環境 (HIHT、LILT) 下において連続光照射試験を実施した。性能予測手法の確立・パドルの設計最適化への寄与 (研究目的①) について、LILT 環境下では、わずかな保存率の低下 (Isc、Pmax で 2%程度) に留まることが予測できるため、外惑星探査適用への有用性が示唆された。一方、HIHT 環境下においては、特に Voc の劣化が大きいため適用に際しては注意が必要であり、まずは劣化原因の特定を優先すべきである。また、性能低下に対する温度/光強度の依存性・劣化メカニズムの解明 (研究目的②) について、HIHT 環境下でセル温度および光強度の条件を変えて体系的・定量的に評価した結果、劣化に対しては温度および光強度の両方が影響することが分かった。さらに、各 HIHT 条件下での連続照射試験の結果から、シャント抵抗低下によるリークの発生が劣化の主要因であり、劣化は急激な変化ではなくトータルドーズ的に進行するものであることが示された。照射後サンプルの外観から、リーク発生の要因として、セルに対する機械的なストレスと推測された。今後は、本稿で明らかとなった HIHT 連続照射によって生じる劣化の要因について引き続き検討を行う計画である。

参考文献

- [1] T. Shimada, et al., "Durability Evaluation of InGaP/GaAs/Ge Triple-junction Solar Cells in HIHT Environments for Mercury Exploration Mission," The 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (2010).