

つばさによる地上用太陽電池の耐放射線性の宇宙実証

今泉 充、住田泰史、川北史朗、安沢 修、青山和広、松田純夫、桑島三郎（宇宙航空研究開発機構）

Results of Flight Demonstration of Terrestrial Solar Cells by MDS-1 “Tsubasa” in GTO
Mitsuru Imaizumi, Taishi Sumita, Shirou Kawakita, Osamu Anzawa, Kazuhiro Aoyama,
Sumio Matsuda and Saburo Kuwajima (Japan Aerospace Exploration Agency)

Key Words: Tsubasa, MDS-1, TSC, Solar Cell, Terrestrial, Radiation, Degradation, NIEL, Dd

Abstract

Demonstration results of radiation resistance of six types of solar cells developed for terrestrial use in space by MDS-1 “Tsubasa” satellite are shown. The satellite has flown in the geostationary transfer orbit where radiation environment is quite severe. Monitored open-circuit voltage and short-circuit current values of the cells for duration of about 600 days after launch are analyzed. Super radiation tolerance of CuInGaSe₂ solar cell is firstly demonstrated in actual space. Also, most of the cells are recognized to have capability or applicability for space use. Comparison of degradation trend of the flight data with that of ground irradiation test results using the displacement damage dose method reveals good agreement, indicating sufficient validity of ground test technique and accuracy of end-of-life prediction.

1. はじめに

民生部品・コンポーネント実証衛星「つばさ」(MDS-1)は、2002年2月4日、種子島宇宙センターからH2Aロケット2号機によって打上げられた。この衛星のミッションのひとつに、民生用半導体部品の耐放射線性を明らかにすることにより、それらの宇宙応用の潜在性能ないし可能性を探ることがあった。

民生用半導体部品の耐放射線性を効率よく観測するという目的のため、「つばさ」はバンアレン帯の内帯、外帯を通過する、より放射線環境の厳しい静止遷移軌道上を周回した。この耐放射線性を評価する半導体部品のひとつとして、住宅用太陽光発電システムへの応用のために開発された太陽電池が搭載された。これらの太陽電池は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のプログラムの下、高効率化あるいは低コスト化を目指して研究・開発されたものである。

2. 放射線劣化の観測

「つばさ」では、地上用太陽電池の中から6種類を選択し、地上用太陽電池実験装置(TSC)上に取り付けて耐放射線性の観測・評価を実施した。TSCに装着されている太陽電池は、これら6種類の地上用太陽電池と比較用の3種類の宇宙用太陽電池の計9種類である。図1にその外観を、また表1にその

内訳を示す。このうちGaAs太陽電池と300 μ mのカバーガラスに組み合わせは、「つばさ」の太陽電池パドルに使用された太陽電池と同一の組み合わせである。TSCは衛星構体の上部面に取りつけられ、軌道上では太陽方向に対して約10°(打上げ後約20日まで)ないし30°(同日以降)傾いた方向を指向するように制御された。

軌道上では、端子間開放、短絡、および14種類の抵抗器を用いて、各太陽電池の電流-電圧曲線上の16点の電圧、電流値を測定した。このうち両端は、開放電圧(Voc)および短絡電流(Isc)となる。

TSCでは、中心および4隅に装着した5箇所のセンサーで温度をモニタした。実測温度は、蝕の期間を

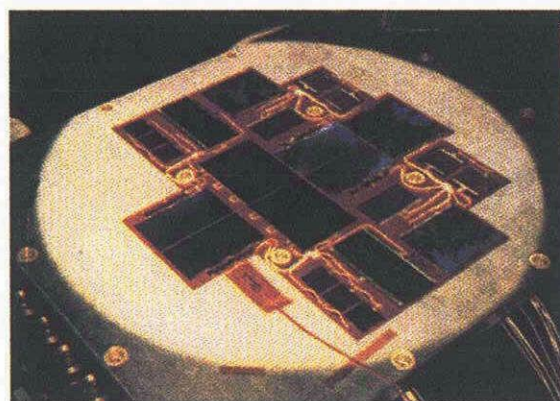


図1. 地上用太陽電池実験装置(TSC)の外観

除き 60℃～70℃の間で安定しており、またボード内の温度分布は太陽電池の出力に影響(バラツキ)を与えない程度に十分小さいことが確認されている。

電流、電圧値のデータ処理・評価にあたっては、温度(温度係数を用いて 28℃における値に換算)、角度(太陽方向に対する傾斜角に対し三角関数を用いて正対=0°の光入射量に換算)、太陽光強度(地球-太陽間の距離より近日点における強度に換算)、および測定回路系に由来する電圧シフトの4項目について補正を行った。また、明らかな異常値は除去した。

表 1. TSC に取り付けられている太陽電池

No.	太陽電池	カバーガラス厚(μm)
01	Uバルク多結晶Si太陽電池	100
11		500
02	バルク多結晶Si太陽電池	100
12		500
03	n型ベース層単結晶Si太陽電池	100
13		500
04	InGaP/GaAsタンデム型2接合太陽電池	100
14		500
05	大面積Cu(InGa)Se太陽電池(化学成膜)	100
15		500
06	高効率CuInGaSe太陽電池(物理成膜)	100
16		500
07	宇宙用Si太陽電池(基板抵抗率=10Ωcm)	100
17		500
08	宇宙用Si太陽電池(基板抵抗率=2Ωcm)	100
18		500
09	宇宙用GaAs太陽電池(衛星パドルと同一)	300
19		

3. 放射線劣化フライトデータ

カバーガラスの厚さの異なる宇宙用 GaAs 太陽電池を除く8種類の太陽電池について、VocおよびIscの打上げからミッション終了までの約 600 日間における変化、すなわち放射線被曝による劣化(初期値を1としたときの相対値、すなわち保存率)を求めた。結果を図2に示す。ここで、初期値としては、打上げ後 2 日目に最初に軌道上で測定された値を用いている。また、各データ点は、その日 1 日間の平均値をプロットしている。

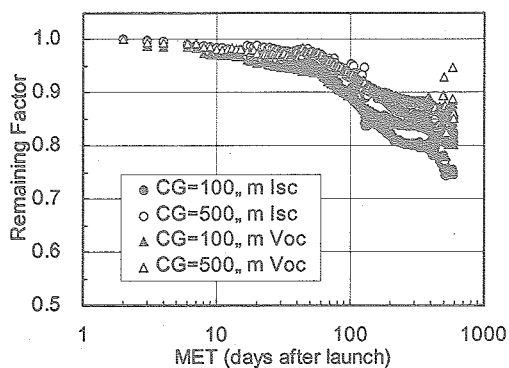
全体的な劣化の傾向は、基本的に打上げ後 100 日間のデータにて見られたもの[1]から変化していない。すなわち、宇宙用単結晶 Si 太陽電池にて、低抵抗率(2Ωcm)の太陽電池では Voc の保存率が比較的高いのにに対し、高抵抗率(10Ωcm)の太陽電池では Isc の保存率が比較的高い。多結晶 Si 太

陽電池では、保存率は宇宙用 Si と比較して遜色なく、特に Voc においては宇宙用よりも高い値が一部得られている。n型ベース Si 太陽電池では、TSC の全太陽電池の中で最も劣化が大きく、またカバーガラスの厚さによる差も最も大きい。InGaP/GaAs2接合タンデム太陽電池では、Voc, Isc ともに劣化が比較的小さく良好な耐放射線性を示している。これらについて考えられる理由は、既に他で述べたとおりと考える [1]。さらに、CuInGaSe₂太陽電池では、特に大面積型(化学成膜)の太陽電池において劣化が非常に小さく、極めて優れた耐放射線性が実証されている。このような優れた耐放射線性は、これ以前にも地上照射試験において実験結果が得られていた。しかし、この結果は、この耐放射線性を宇宙空間で初めて実証したものであり、価値がある。なお、このメカニズムについては、放射線損傷・劣化に対し、大きなアニール速度で回復することによるものであることを、我々は既の実験的に明らかにしている[2]。

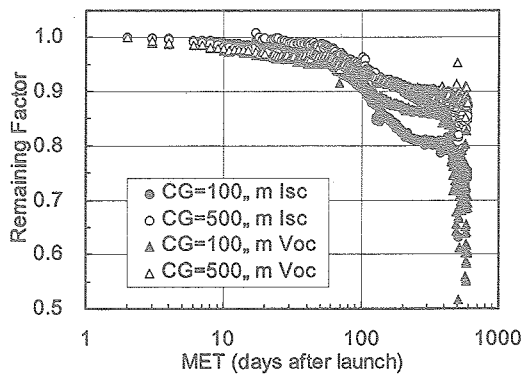
ここで、フライトデータ全体において、劣化の速度が打上げ後約 50 日で大きく、また 200 日で小さく、それぞれ変化している。これは、「つばさ」に搭載された宇宙環境計測装置(SEDA)のデータにおいて、同時期に対応して単位時間あたりの放射線量が増減していることから、この変化は被曝レートの変化によるものであることがわかっている。また、一部の太陽電池における打上げ後 500 日以降の急激劣化ないしその兆候は、高フルエンスの放射線被曝によるベース層領域のキャリア枯渇に起因する異常劣化・突然死[3]の現象と推測される。

4. 地上での放射線照射試験との比較

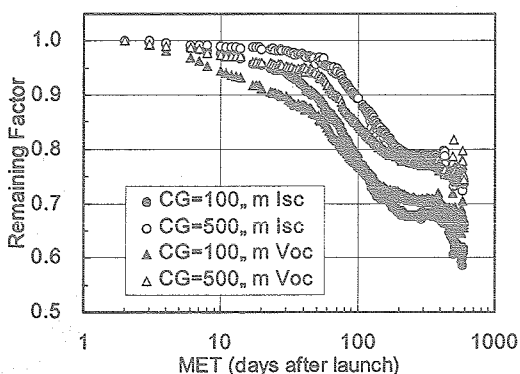
図2に示した宇宙実証による劣化と、打ち上げ前に原子力研究所高崎研究所にて実施した各太陽電池の放射線照射試験における劣化[4]との比較を行った。地上試験は単一エネルギーの放射線照射であるのに対し、宇宙環境ではさまざまなエネルギーの放射線が飛翔し太陽電池に当たっている。これを同一軸上で比較するため、地上試験、宇宙環境での被曝量を非イオン化エネルギー損失(NIEL)の値を用い、変位損傷総量(Dd)で規格化した[5]。多結晶 Si、n型ベース単結晶、InGaP/GaAs タンデム、および大面積 CIGS 太陽電池についての結果を図3に示す。なお、宇宙実証データは打上げ後 400 日までのものを用いている。



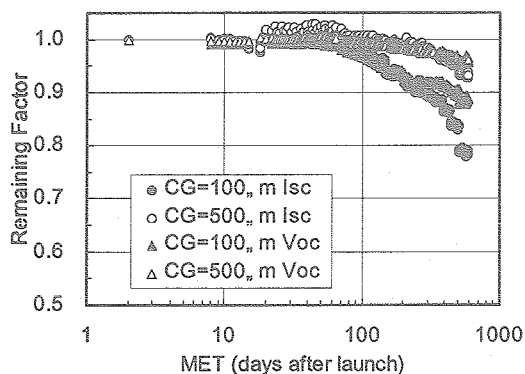
(a) Uバルク多結晶 Si 太陽電池



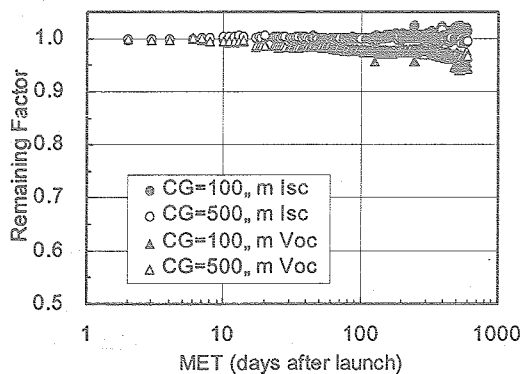
(b) バルク多結晶 Si 太陽電池



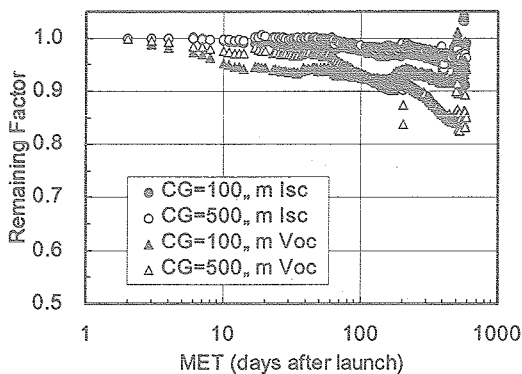
(c) n型ベース層単結晶 Si 太陽電池



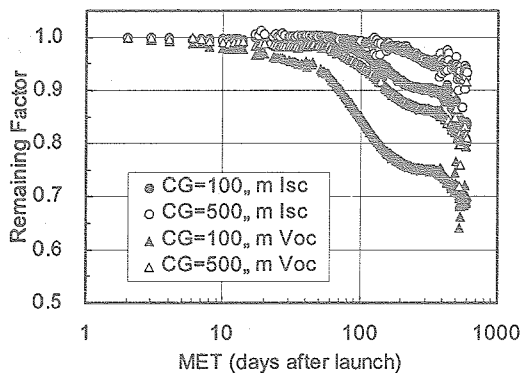
(d) InGaP/GaAs タンデム2 接合太陽電池



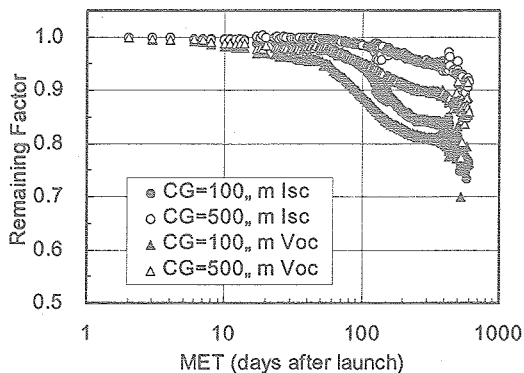
(e) 大面積 Cu(InGa)Se 太陽電池



(f) 高効率 Cu(InGa)Se 太陽電池

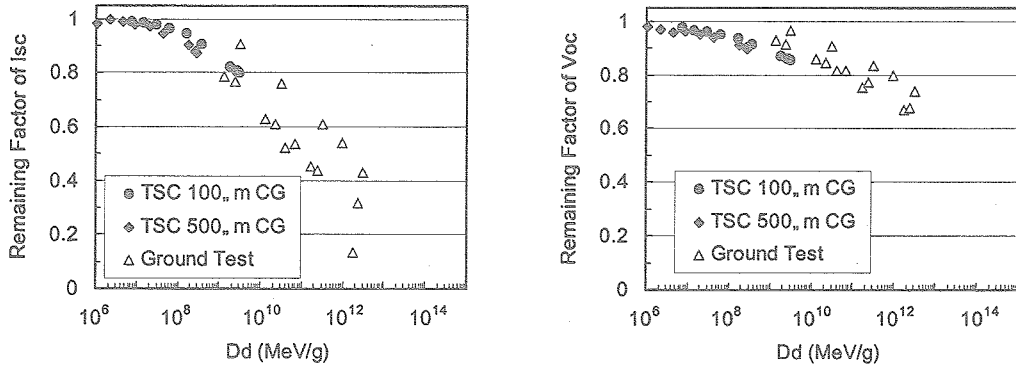


(g) 宇宙用単結晶 Si 太陽電池 (10 Ω cm)

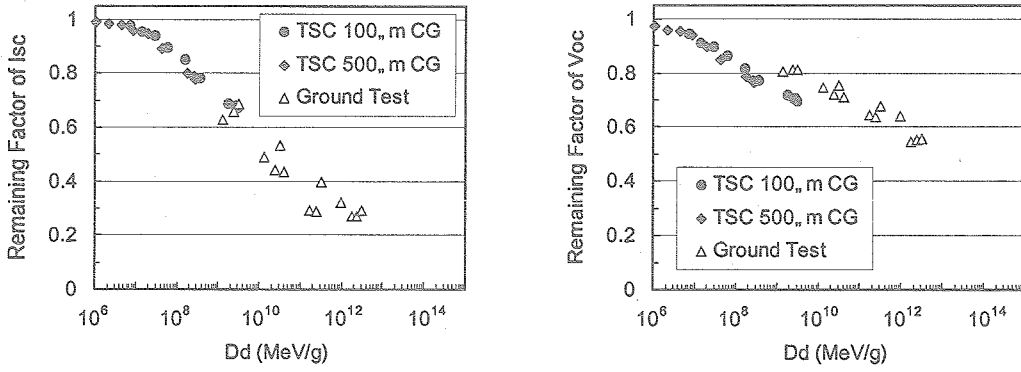


(h) 宇宙用単結晶 Si 太陽電池 (2 Ω cm)

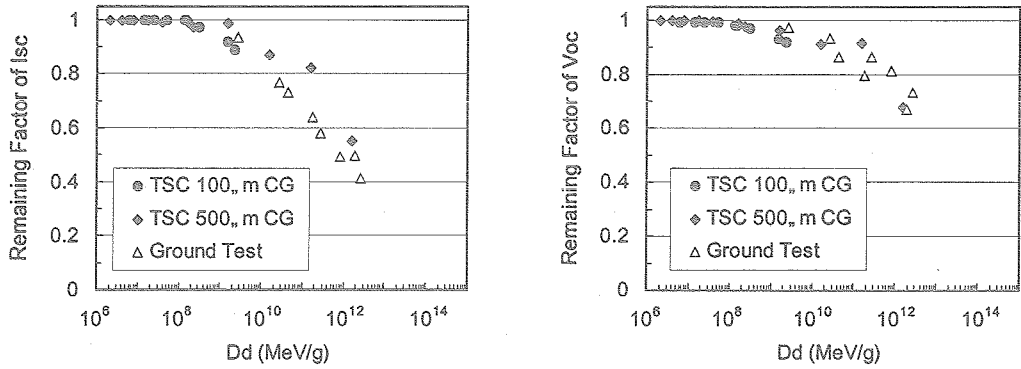
図2. TSCに取り付けられている太陽電池の打上げ後約600日までの開放電圧(Voc)、短絡電流(Isc)の劣化データ



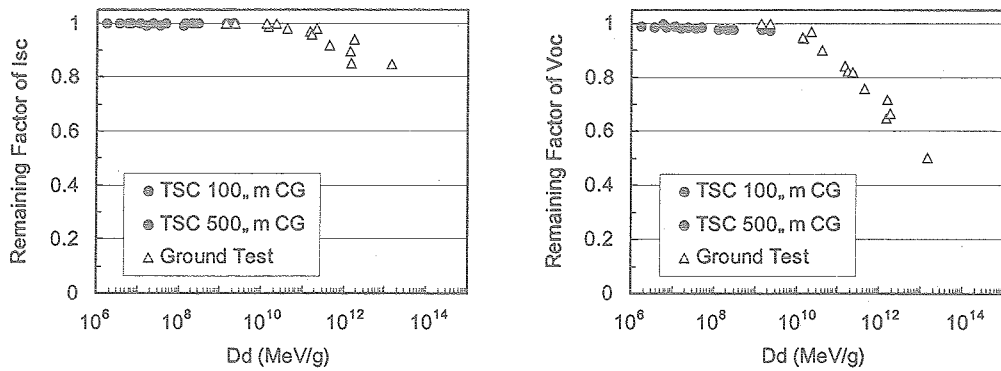
(a) バルク多結晶 Si 太陽電池



(b) n 型ベース層単結晶 Si 太陽電池



(c) InGaP/GaAs タンデム 2 接合太陽電池



(d) 大面積 CuInGaSe₂ 太陽電池

図3. 変位損傷総量(Dd)を用いた、打上げ後約 400 日までの宇宙実証データと地上試験データの比較

いずれの太陽電池においても、Isc、Voc とともに地上試験データと宇宙実証データはほぼひとつの曲線に沿っており、劣化の傾向は良い一致を示しているといえる。これは、現在行われている地上放射試験の方法、および地上試験結果に基づく宇宙用太陽電池の寿命・劣化予測法の妥当性を示している。

一方で、この結果を利用してこれら地上用太陽電池の宇宙空間(静止遷移軌道)における寿命が推定可能である。例えば大面積 CIGS 太陽電池(カバーガラス 100 μ m)について、図3(d)より 10%劣化(保存率 90%)の時間を外装すると、驚くことにここでのフライト期間である 400 日の約 650 倍、つまり約 700 年後(!)である。

5. まとめ

「つばさ」に搭載された地上用太陽電池評価装置にて、住宅向電力システム用に開発された6種類の太陽電池の放射線劣化特性を観測した。その結果、CuInGaSe₂ 多結晶薄膜太陽電池が耐放射線性に極めて優れ、ほとんど劣化しないことが宇宙で始めて実証された。将来の宇宙用軽量・フレキシブル太陽電池として非常に期待される。また、他の太陽電池についても十分な耐放射線性があることが確認され、用途によっては宇宙応用の可能性を示した。さらに、変位損傷総量をパラメータとしたフライトデータと地上試験の結果の比較から、地上での放射線照射試験および劣化予測法の妥当性が示された。

謝辞

本地上用太陽電池の耐放射線性評価に関する研究に多大なご協力を頂いた、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)および製造メーカーの関係各位に深い感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 今泉 充, 川北史朗, 住田泰史, 青山和広, 松田純夫, 五家建夫, 谷岡憲隆, 第 46 回宇宙科学技術連合講演会講演集, p.1087.
- [2] S. Kawakita, M. Imaizumi, M. Yamaguchi, K. Kushiya, T. Ohshima, H. Ito, and S. Matsuda, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41 (2002), p. L797
- [3] M. Yamaguchi, S. J. Taylor, S. Matsuda and O. Kawasaki, *Appl. Phys. Lett.*, 68 (1996), p. 3141
- [4] T. Aburaya, T. Hisamatsu, and S. Matsuda, *Proc. 2nd World Conf. and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion* (Vienna, Austria, 1998), p. 3568.

- [5] T. Sumita, M. Imaizumi, S. Kawakita, S. Matsuda and S. Kuwajima, *Workshop Rec.2003 IEEE Radiation Effects Data Workshop*, (Monterey, California, 2003), p. 11.