

a-Si太陽電池の耐放射線性の評価

佐々木 進^{*}・後川 昭雄^{**}・森田 洋右^{***}

Radiation Resistance of a-Si Solar Cells Evaluated for SPS Use

By

Susumu SASAKI^{*}, Akio USHIROKAWA^{**} and Yosuke MORITA^{***}

Abstract : SPS 2000 is a study model of 10 MWatt solar power satellite in a 1,100 km equatorial orbit. For the power generator of SPS 2000, amorphous silicon(a-Si) solar cell, a thin film type developed for ground use, has been selected as a potential candidate. Since the a-Si solar cell is relatively newborn, its operational data in space are not sufficiently available. We have made radiation experiments for the a-Si solar cell by the electron and proton beam accelerators of the Japan Atomic Energy Research Institute. The effect of 0.15 ~ 3.0 MeV electron irradiation was studied up to the fluence of 1×10^{16} electrons/cm². For proton irradiation, the effect of the energy at 3 ~ 10 MeV was studied up to 2.5×10^{14} protons/cm². According to the experimental results, the performance of the a-Si solar cell will be maintained more than 90% of the initial performance during 10 years for the orbit of SPS 2000. It is concluded that the a-Si solar cell is potentially promising for the SPS use.

概 要

SPS 2000 は赤道軌道高度 1,100 km, 出力 10 MWの太陽発電衛星モデルである。SPS 2000用の太陽電池としてはa-Siの薄膜太陽電池が候補とされている。a-Siの太陽電池は比較的新しいタイプの太陽電池なので、宇宙環境特に宇宙放射線に対する耐性のデータはこれまで充分には得られていない。私たちは原子力研究所の電子及びプロトンの加速器を用いて民生用のa-Si太陽電池に対し照射実験を行い、その放射線耐性を調べる実験を行った。電子については0.15 ~ 3.0 MeVのエネルギーで 1×10^{16} electrons/cm²までの照射、プロトンについては3 ~ 10 MeVのエネルギーで 2.5×10^{14} protons/cm²までの照射を行った。一連の照射実験の結果、私たち

^{*}宇宙科学研究所

^{**}東京工科大学

^{***}原子力研究所高崎研究所

の試験したa-Siの太陽電池は、SPS 2000の軌道で10年間の運用に対し90%以上の発電性能を維持することが分かった。

重要語：SPS 2000，宇宙発電，アモルファスシリコン太陽電池，耐放射線性

1. 序論

太陽発電衛星モデルSPS 2000 [1]の軌道は、米国のリファレンスシステムの静止衛星軌道と異なり低高度赤道軌道である。低高度軌道では夜と昼が地上と同様に訪れるという欠点があるが、ロケットによる輸送コストは静止衛星軌道の場合と比較し数分の一で済む。送受電アンテナの大きさと太陽電池やマイクロ波半導体アンブに対する宇宙放射線の影響の観点からはできるだけ低い軌道が望ましいが、余り低い軌道では空力により短期間で落下してしまう。宇宙ごみ(デブリ)が比較的少ないという点も考慮して、SPS 2000では軌道高度1,100 kmが選定されている。

太陽電池セルとしては、大量生産が可能で近未来に低コストが期待でき、宇宙への輸送と展開に有利な薄膜フレキシブルアモルファスシリコン太陽電池が有力候補である。アモルファスシリコン太陽電池は現在我が国で年間10 MW程度しか生産されていないが、結晶系シリコン太陽電池の次の世代の太陽電池として近い将来100 MW規模の生産が期待されている。アモルファスシリコン太陽電池の効率は現在のところ未だ10%弱であるが、将来的には15%前後が期待されている。SPS 2000の概念設計では効率15%、重量比出力1 kW/kgを仮定している。

宇宙で使用する太陽電池は地上と異なり宇宙放射線に対する高い耐性が必要である。SPS 2000では太陽電池の劣化は10年間に10%以下と要求されている。本研究では太陽発電衛星用として有望なアモルファスシリコン太陽電池がSPS 2000の軌道条件でどの程度の耐放射線性を持つか調べることを目的として、入手可能なアモルファスシリコン太陽電池について電子とプロトンの照射実験を行った。本研究は宇宙科学研究所、東京工科大学、原子力研究所高崎研究所、三洋電機(株)の共同研究として行われた。

2. 放射線照射実験

本研究で用いたアモルファスシリコン太陽電池の物理的特性を表1に示す。NASA JPLのSolar Cell Radiation Handbookにより求めた低軌道赤道軌道での1年間の等価損傷フルエンスを図1に示す。この高度ではプロトンの影響の方が電子の影響よりも大きい。高度1,100 kmの1年間の等価損傷フルエンスは1 MeVの電子で 6.4×10^{13} electrons/cm²である。

表1 放射線照射実験に使用した太陽電池セルの特性

電池タイプ	アモルファスシリコン
大きさ	113 × 120 × 0.25 mm
面積	135.6cm ²
重量	4.5 g
保護膜	PET (厚さ0.05 mm)
温度係数	Voc -0.4~-0.2 Isc +0.1~+0.2 Pmax -0.2~-0.03

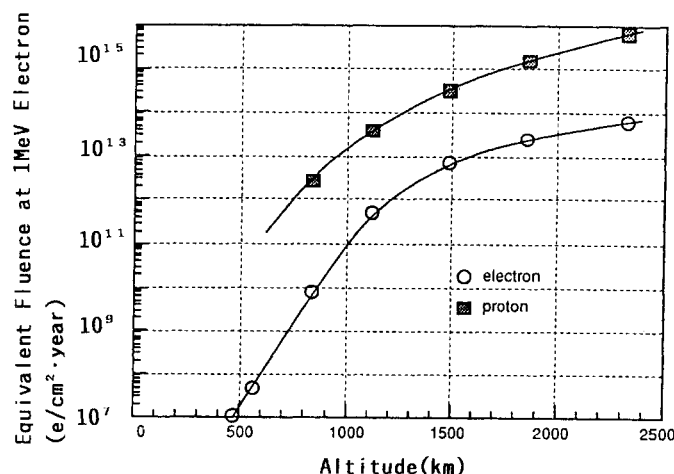


図1 低高度赤道軌道における電子とプロトンに対する等価損傷フルエンス

太陽電池への放射線の照射実験は原子力研究所高崎研究所の電子とプロトン加速器を用いて行った。電子については大気中で0.15 ~ 3.0 MeVのエネルギー範囲で 1×10^{16} electrons/cm²までの照射実験を行った。プロトンについては真空中で3 ~ 10 MeVのエネルギー範囲で 2.5×10^{14} protons/cm²までの照射実験を行った。照射前後の太陽電池の性能評価は、電子照射については宇宙科学研究所のパルスソーラーシミュレーターを用い、プロトン照射については原子力研究所と東京工科大のソーラーシミュレーターを用いて行った。太陽電池の正味の劣化を評価するため、太陽電池の保護膜 (PET; Polyethylene Terephthalate) の劣化についても、300 nmから1,100 nmの多チャンネル分光器で測定した。太陽電池の性能評価は照射直前と照射後1 ~ 2日以内に実施し、その後数日から数十日かけてアニーリングの効果を調べた。

3. 実験結果

3.1. 電子照射

0.5 MeVから3.0 MeVのエネルギーで、 1×10^{15} electrons/cm²の電子照射を行った場合の保護膜 (PET) の透過率の変化を図2に示す。図では300 nmから1,100 nmの範囲について照射後の透過率を照射前の値で規格化

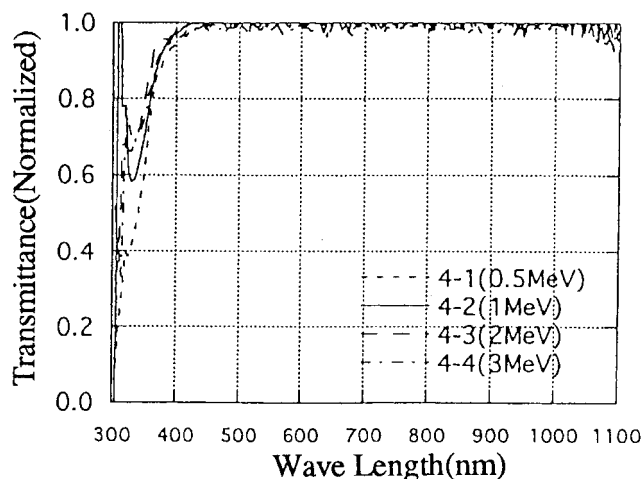


図2 電子照射 (0.5 MeV ~ 3.0 MeV) に対するPETの透過率の変化

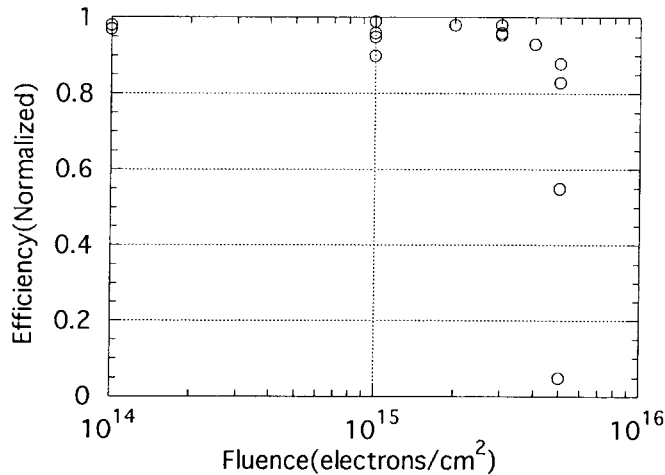


図3 電子照射 (1.0 MeV)によるアモルファスシリコン太陽電池の劣化の様子

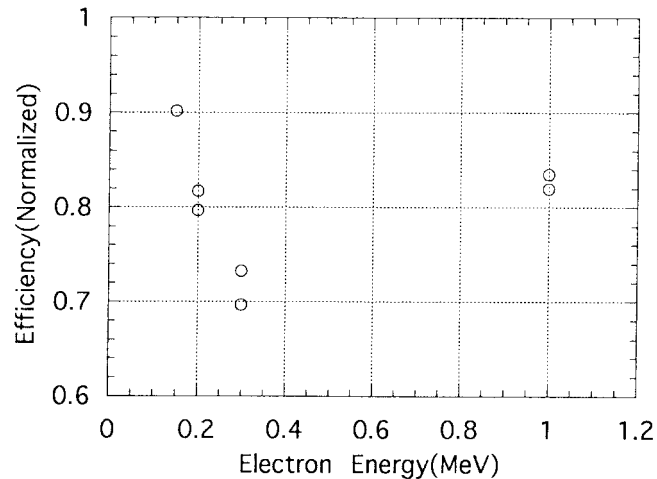


図4 電子のエネルギーに対する効率の依存性

して表示している。透過率の劣化は特に 400 nm以下で顕著である。太陽電池の感度は 400 nm以下では相対的に低いので、太陽電池の劣化を評価するに当たって保護膜の劣化の影響は小さい。

1 MeV電子の照射に対する太陽電池の劣化を図3に示す。合計6サンプルの太陽電池に対し 5×10^{15} electrons/cm²までの照射を行った。太陽電池は 4×10^{15} electrons/cm²までの照射に対してはいずれも照射前の効率の90%の性能を維持した。ただし 5×10^{15} electrons/cm²の照射で太陽電池の効率は強い劣化を示した。劣化の程度は個々の太陽電池で大きくばらつき、照射後の効率は5%から88%まで変化している。この照射実験の結果を高度1,100 kmのSPS 2000に適用した場合は、1 MeVの等価損傷は 6.4×10^{13} electrons/cm²・yearなので、10年間での劣化は10%以下と計算される。

3×10^{15} electrons/cm²の照射の場合について、電子のエネルギー(0.15から1.0 MeV)に対する劣化の依存性を図4に示す。全部で7枚の太陽電池について実験を行った。0.3 MeV以下のエネルギーではエネルギーが高くなるとともに劣化は増大するが、1.0 MeVでは劣化は逆に小さくなった。このことは最大の劣化をもたらすクリティカルなエネルギーは0.3と1.0 MeVの間に存在することを示唆している。このような劣化のエネルギー依存性がなぜ現れるのかは明確になっていないが、高エネルギー電子のa-Si層への到達の深さが関連している可能性

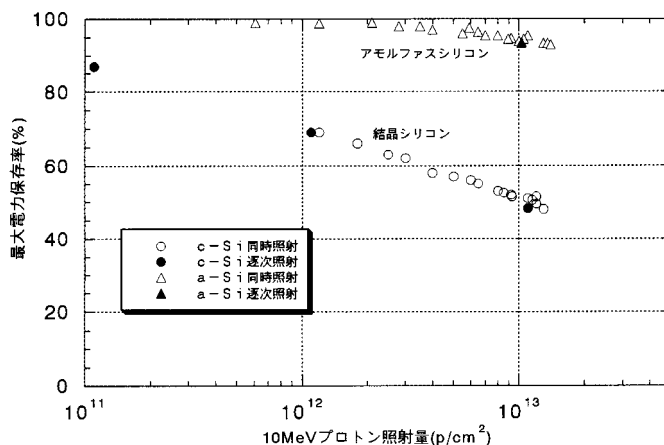


図5 プロトン照射 (10MeVプロトン) に対するアモルファスシリコン太陽電池と結晶シリコン太陽電池の劣化の比較

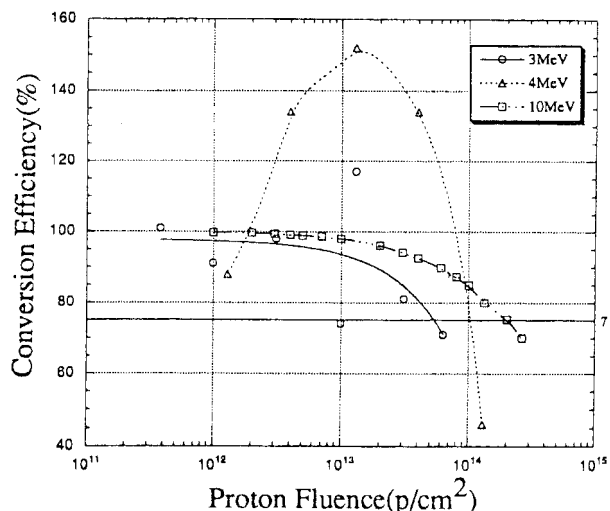


図6 プロトン照射 (3,4,10 MeV) に対する太陽電池の劣化

がある。

3.2. プロトン照射

PETの保護膜に対するプロトン照射の影響は電子照射の場合と殆ど同じである。透過率の劣化は400 nm以下で大きい。結晶シリコンとアモルファスシリコンの耐放射線性を比較するため、両電池に10 MeVのプロトンを同時照射した結果を図5に示す。アモルファスシリコンの太陽電池は結晶シリコンの太陽電池よりも耐放射線性が高い。これは、結晶シリコン太陽電池に比べアモルファス太陽電池の電池層の厚さがはるかに薄いためと考えられる。3, 4, 10 MeVのエネルギーのプロトンを照射した場合の太陽電池の劣化量を図6に示す。4 MeVのプロトンの場合 10^{13} protons/cm² の照射で太陽電池は150%近くまで効率が上がり、 10^{14} protons/cm² の照射で効率は50%以下になるという特異な特性となる。一方、10 MeVのプロトンの照射の場合は、太陽電池の効率は照射量とともに減少する。

図7はモンテカルロシミュレーションソフト (TRIM) で計算したa-Si太陽電池層でのプロトンのエネルギー損失を示す。太陽電池層内での損失率は3 MeVで4.2 eV/ , 4 MeVで1.9 eV/ , 10 MeVで0.7 eV/ である。図6での3 MeVと10 MeVのプロトンに対する劣化の比はこれらのエネルギーに対するエネルギー損失とほぼ合

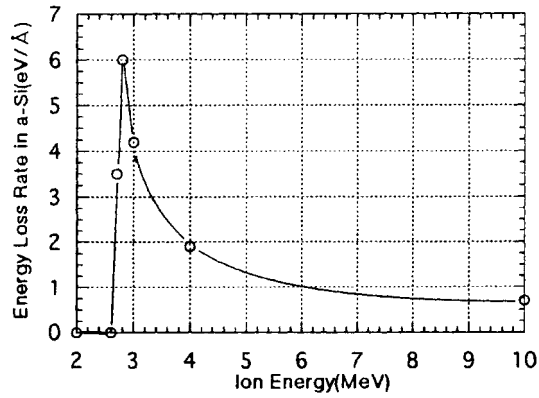


図7 プロトン (2~10 MeV)に対するシリコン中でのエネルギー損失の計算結果

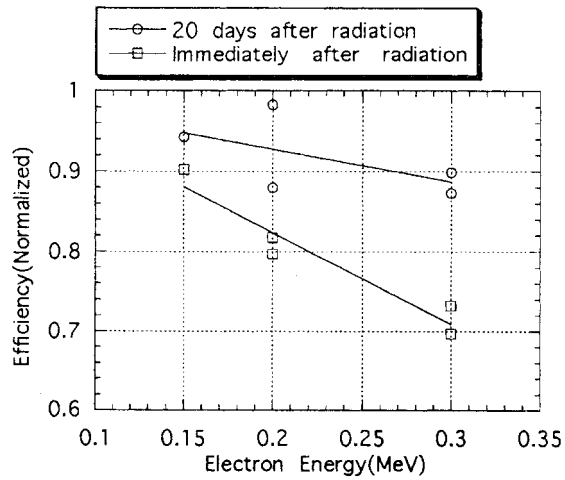


図8 大気中常温で保管した時のアニーリング効果

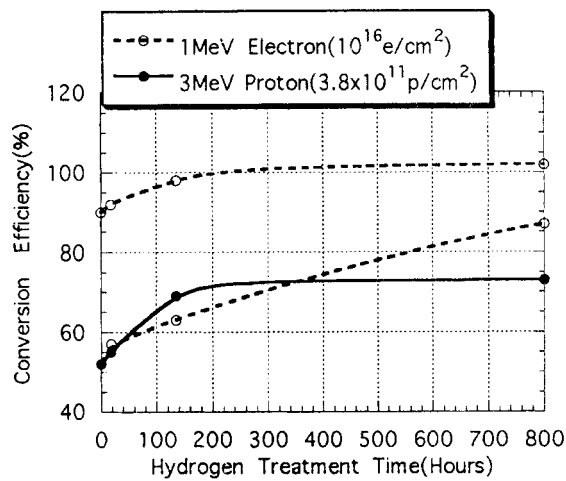


図9 放射線照射実験後、太陽電池を水素ガス中で保管した場合のアニーリング効果

致している。一方同じシミュレーションによると、a-Si層の後ろにあるPETフィルムの中で4 MeVのプロトンが最も多くエネルギーを失うことが示されている。高エネルギーの放射線照射は通常ポリマーの中に水素原子を生成することから、4 MeVでの太陽電池の効率の上昇はPETフィルム内に生成された水素原子の作用で説明できる可能性がある。

3.3. アニール効果

放射線照射後の太陽電池の効率が時間とともに回復する現象について調べた。太陽電池は室温で保管したにも拘わらず、アニール効果が明確に確認された。電子照射後の効率の回復を図8に示す。照射後20日で効率はほぼ50%回復している。アニール効果は照射時に生じた欠陥を除去する何らかのメカニズムが存在することを示している。Abdulaziz and Woodyardはアニール効果を説明するため、熱的に励起される分散輸送機構を提案している[2]。室温でのアニール効果を説明するメカニズムとして、太陽電池内での水素原子による再結合がある。この現象を検証するため、照射実験後太陽電池を水素ガス中で保管する実験を行った。その結果を図9に示す。水素ガス雰囲気中で変換効率が大きく回復していることがわかる。

4. まとめ

SPS 2000の太陽電池として有力な候補であるアモルファスシリコン太陽電池の耐放射線性を調べた。放射線の照射は0.15 ~ 3.0 MeVの電子については 1×10^{16} electrons/cm²まで、3.0 ~ 10 MeVのプロトンについては 2.5×10^{14} protons/cm²まで行った。電子照射実験では、アモルファスシリコン太陽電池の劣化が最大となるクリティカルなエネルギーが0.3 MeVと1.0 MeVの間に存在することがわかった。プロトン照射実験では4 MeVのエネルギー照射で変換効率が上昇する現象が見られた。電子及びプロトンの照射後に常温でもアニール効果が見られた。アニールの機構は未だ明確ではないが、太陽電池内の水素原子の再結合が重要な役割を果たしている可能性がある。今回得られた実験結果を適用すると、SPS 2000の軌道でアモルファスシリコン太陽電池を使用した場合は、10年間で初期性能の90%以上が維持されると予測される。アニール効果を考慮すれば、太陽電池の劣化は更に小さくなると予想される。本研究により、アモルファスシリコン太陽電池は耐放射線性の点から太陽発電衛星用の太陽電池として有望であることが結論できる。

5. あとがき

本報告は平成3年度から8年度にわたり宇宙科学研究所宇宙エネルギー工学部門に在籍した東京大学（長友研究室）と東京工科大学（後川研究室）の学生が主体となって行った研究成果をまとめたものである。

参考文献

- [1] M.Nagatomo, S.Sasaki, and Y.Naruo :Conceptual Study of a Solar Power Satellite SPS 2000, Proc. of the 19th International Symposium on Space Technology and Science, Yokohama, pp.469-476, 1994.
- [2] S.S.Abdulaziz and J.R.Woodyard: Annealing Characteristics of Amorphous Silicon Alloy Solar Cells Irradiated with 1.00 MeV Protons, NASA CP-3121, pp.43-1, Space Photovoltaic Research and Technology, 1991.