

SPS 2000 高電圧太陽電池アレイのアーキ放電防止技術について

趙 孟 佑*

Mitigation Methods against Arcing on SPS2000 High Voltage Solar Array

By

Mengu CHO*

Abstract : A large space platform such as SPS2000 must be operated at high voltage higher than 1000V, in order to minimise the cable mass and transmission loss. It is known that arcing occurs on solar array surface whose potential is negative to the surrounding plasma by typically more than 200V. An arc occurs due to charging of dielectric material near the interconnector, such as coverglass or adhesive. Several mitigation methods are discussed and experimental results on ion-charging shield by transparent roof on solar cells are reported. Placing a transparent film not only lowers the arc rate but also the scale of arcing.

概 要

SPS 2000 のような大型宇宙構造物では、ケーブル質量と電力損失を小さくするため 1000 V 以上の高電圧を使用する必要がある。ところが、周辺プラズマに対しマイナス 200 V 以上の電圧では太陽電池表面にアーキ放電が発生する。アーキ放電はインターコネクタ付近のカバーガラスや接着剤等の絶縁物付近で発生する。本論文では放電防止のためのいくつかの方法と、太陽電池上に透明なイオン帯電シールドを装着した場合の実験結果について報告する。帯電シールドはアーキ放電の頻度を下げるだけでなく、放電の規模も小さくする効果があることが分かった。

重要語 : 高電圧太陽電池アレイ, アーク放電, 放電防止法

*九州工業大学 工学部

1. はじめに

太陽発電衛星のような規模の超大型宇宙機では、使用電力はMWを超え、ケーブル質量軽減や配電中のジュール損失低減のために、高電圧で電力を発生・運用させることが必須である。総発電電力に占める配電損失の割合は、発電電力とケーブル抵抗に比例し、配電電圧の二乗に反比例する。そのため、電力需要の増大と共に発電・送電電圧を増加させる必要があり、これは地上の電力伝送が高電圧で行われているのと全く同じ理由である。現在の宇宙機における最高電圧は国際宇宙ステーションの160V発電・120ボルト配電であり、2000年末に太陽電池アレイが取り付けられて低地球軌道で初の100ボルトを超えた発電を行うことになる。国際宇宙ステーションの電力が100kWであることを考えると、10MWで運用されるSPS 2000の場合、発電・配電電圧を10倍の1000Vにしなければならない。

しかしながら、太陽電池アレイの電位が周辺プラズマに対して200V程度の負電位を持つと、太陽電池アレイ表面でアーク放電が発生することが知られている。プラズマ中に浮かんだ宇宙機の電位は閉鎖系である宇宙機がプラズマから集める電子電流とイオン電流が均衡するように決められ、電子とイオンの移動度の差から太陽電池アレイの発電電圧の殆どがプラズマに対して負に沈むことになる。国際宇宙ステーションの160Vという電圧は先の200Vという数字が元になって決定された。1000V発電を想定したSPS 2000の場合、アーク放電の問題は避けて通れないものであり、太陽発電衛星のみならずMW級の次世代の大型宇宙プラットホーム実現に向けて近い将来の内に克服すべき技術課題である。本研究の目的は、アーク放電を防止する技術を開発することにある。

2. 放電のメカニズム

放電の発生は、図1に示すように、空間に露出したカバーガラス等の絶縁体、インタコネクタ等の導電体、プラズマの3者が接する点(トリプルジャンクション)での電界が、絶縁体が周辺プラズマによって帯電するために局所的に増加することに起因する(文献1)。放電発生と同時にインタコネクタ部分で発光が起きることから、放電発生箇所を特定することが可能である。放電は繰り返し発生し、放電の頻度はプラズマに対する電位、プラズマ密度、表面温度、インタコネクタ材質等に依存する。これは絶縁体表面の帯電・放電の繰り返しによるものであり、図2に示すようなプロセスを繰り返す。実際に非線形光学結晶のポッケルス効果を利用して、放電前後の絶縁体表面の帯電状態の変化を観測したものを図3に示す(文献2)。これは太陽電池アレイを模擬した模擬電極を用いて観測したものであるが、厚さ1mmの絶縁体を-1000Vにバイアスした電極の上においてプラズマ中に曝した時に、絶縁体表面の電位を測ったものである。放電発生前は絶縁体に電荷が十分に蓄えられて表面の電位はほぼゼロになっているが、放電発生と同時に電荷がなくなって電位が低下しているのがわかる。その後数msをかけて表面の帯電状態は元に戻り、次の放電が発生するというプロセスを繰り返す。(図1, 図2, 図3)

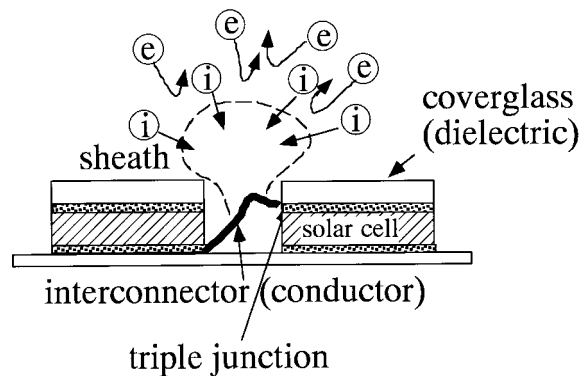


図1 太陽電池アレイインタコネクタ周辺部の詳細

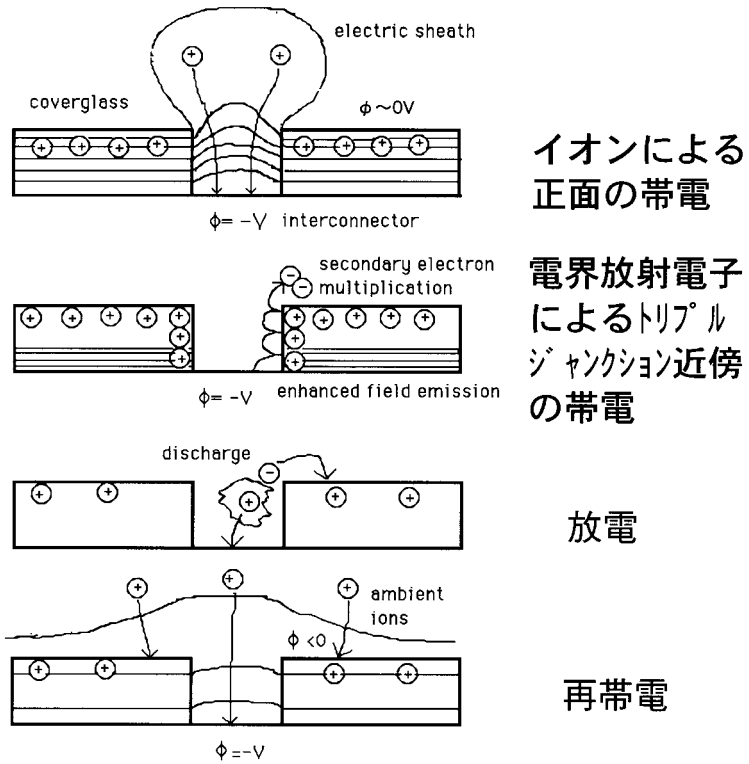


図2 帯電・放電過程のモデル

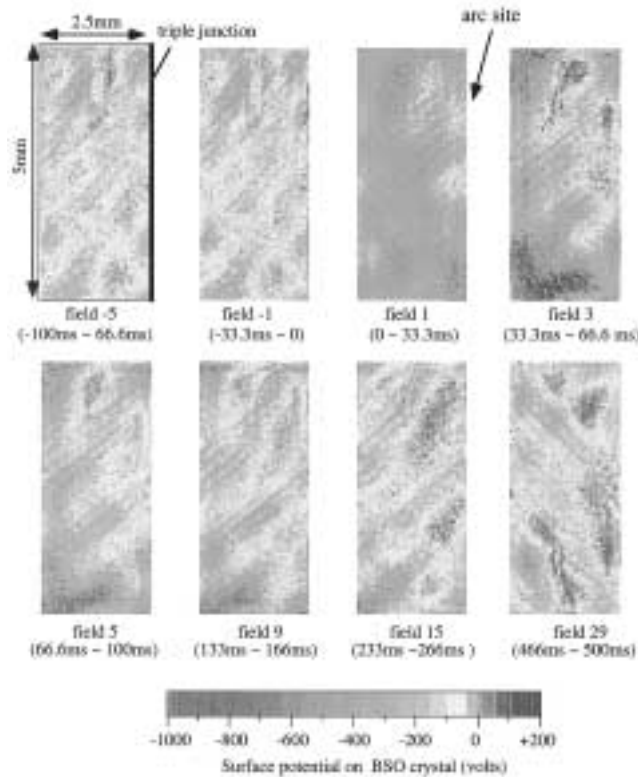


図3 放電発生前後での絶縁体表面の帯電電位の時間変化

3. 放電防止法

アーク放電を防止する方法として様々な案があるが、宇宙ステーションのようにプラズマコンタクターを使用して太陽電池アレイの負極とプラズマの電位差を無理やり数10V程度に抑えるという方法もある。しかしながらSPS 2000の場合、1000Vを持った正極付近での異常電子収集(スナップオーバー)により、プラズマコンタクターで多大な電流を放出する必要がある。もう一つの方法として、-1000Vの電位を持っていても放電を起こさないように太陽電池アレイの形状を工夫することが考えられる。低軌道にあるSPS 2000の場合、絶縁体の帯電に要する時間を45分以上にしていれば、図2に示した帯電・放電過程の途中で日陰に入るので、放電発生を抑制することができる。また放電が発生したとしても、その効果を抑制できるような措置を施して、放電に対してロバストなシステムを作ることも対策として考えられる。このような観点から本研究では帯電しにくい太陽電池アレイのデザインを検討すると共に、放電の規模を抑える手法についても検討を加えた。

3.1. デザイン

太陽電池アレイのデザイン変更によって放電を防止する方法としては以下のようなものが考えられる。

- (a) プラズマ中のイオンによるカバーガラス表面の帯電を防ぐため、太陽電池アレイに透明な屋根をつける(例、集光型太陽電池アレイ)
- (b) カバーガラスにITOなどの透明導電性コーティングを施して、カバーガラス電位をインタコネクタと同じにする。
- (c) インタコネクタをプラズマから隠す(例、宇宙ステーション用Wrap-through型太陽電池アレイ)
- (d) トリプルジャンクション近傍での電子による帯電を防ぐため、カバーガラスをせりださせたり、インタコネクタの材料を高仕事関数のものに変える。または2次電子放出係数の低い材質をカバーガラス、接着剤に用いる。
- (e) トリプルジャンクションにかかる電界を弱めるため、接着剤の誘電率をガラスより高める。

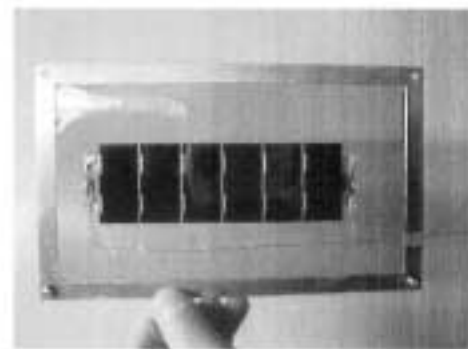
この内、本報告では(a)のプラズマに帯電防止用の屋根をつけたものについて実験により検討した結果を報告する。

3.2. 実験

実験に使用した真空チャンパーシステムは直径1m、長さ1.2mのステンレス製である。ロータリーポンプとターボポンプにより排気を行い、口径3cmのカウフマン型直流プラズマ源によって、プラズマ密度にして 10^{12}m^{-3} 、温度にして1eV程度のアルゴンプラズマ状態を作り出している。尚プラズマ源作動時の背圧は $6 \times 10^{-4} \text{Torr}$ 程度に保たれている。

図4に示すような6枚の単結晶シリコン太陽電池をつないだものを、真空チャンパー内でプラズマ環境に曝した。出力端を短絡して直流電源につなぎ負にバイアスした。バイアス電圧が-200V位から放電が発生し始める。太陽電池間は1mmの間隔をもち、インタコネクタで結ばれているが、放電発生時にはインタコネクタでの発光を観測した。外部回路でモニタしている放電電流が大きくなると、発光強度も強くなった。

放電防止法の一つとして、太陽電池アレイの前に透明なフィルムのシールドをつけてカバーガラス表面にやってくる正イオンを物理的に阻止することを考えた。図5にシールドを付けたところを横から見た図を示す。実験に使用した太陽電池アレイは図4に示された6枚接続のものである。太陽電池アレイの周りのアルミフレームの穴にアクリル製のネジを通し、アクリル製のナットを使ってシールド材(厚さ100 μm のPETフィルム)と太陽



シリコン太陽電池 2 cm × 4 cm
カバーガラス 150 μm
太陽電池間距離 = 800 μm

図4 実験に使用した太陽電池アレイの写真

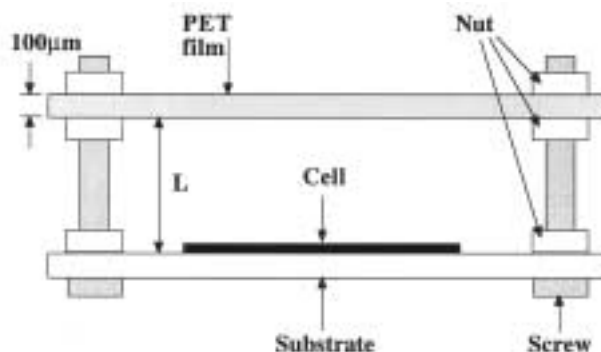


図5 イオン帯電シールドを張った状態を横から見た図

電池アレイとの間の間隔 L を調整した．このようにシールドをつけた太陽電池アレイと，シールドがない以外は全く同じ構成の太陽電池アレイの2枚をプラズマ中で同時にバイアスして，どちらで放電が起きるかを比較した．(図4，図5)

3.3. 実験結果

図6に実験結果を示す．実験では各バイアス電圧を20分間印加して，その間に起きる放電回数を数えた．放電が起きたかどうかの判定はオシロスコープで計測した電流波形による．太陽電池から3mm離れたところに厚さ $100\mu\text{m}$ のPETフィルムのシールドを置いたものでは450ボルト以下の電圧で完全に放電発生を抑制することができた．シールドと太陽電池アレイの間隔が広がると，プラズマがそのすき間から侵入してカバーガラスを帯電させる．そのため間隔が広がると放電の抑制効果がうすれていく．このすき間をなくすために，図7に示すように厚さ $7.5\mu\text{m}$ のポリイミドフィルムで太陽電池アレイ全体をくるんでしまった場合について実験を行ったが， -300V を90分間印加して，同時にバイアスした通常のアレイで372回放電が起きたのに対して，フィルムで覆ったものでは一度も放電が発生しなかった．

シールドをつけた場合，例え放電が発生しても放電電流ピーク値並びに放電電荷量はシールドを付けないものに比べて低下することがわかった．図8に典型的な放電電流波形を示す．放電が発生したとしても，放電電流を供給するのは放電発生部と離れた所にあるキャパシタンスであり，放電発生部とはプラズマを介してつながるこ

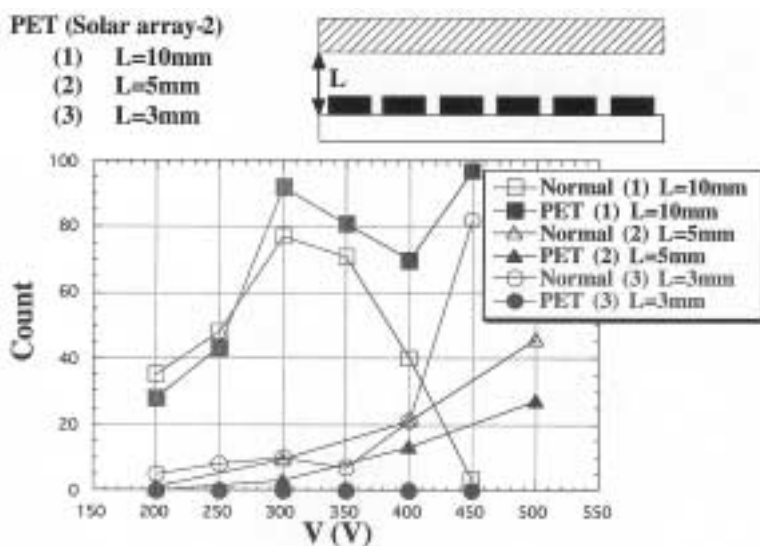


図6 帯電シールドをつけた太陽電池アレイ (Normal) とつけていない太陽電池アレイ (PET) の放電頻度．負のバイアス電圧を20分間印加した時の放電発生回数

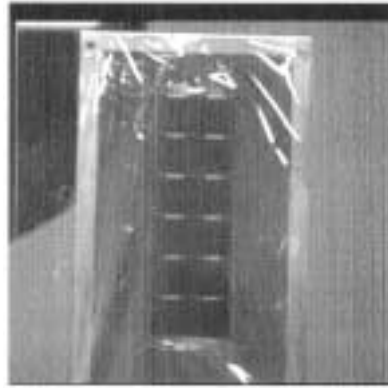


図7 太陽電池アレイを厚さ7.5 μmポリイミドフィルムで完全に覆った時の写真

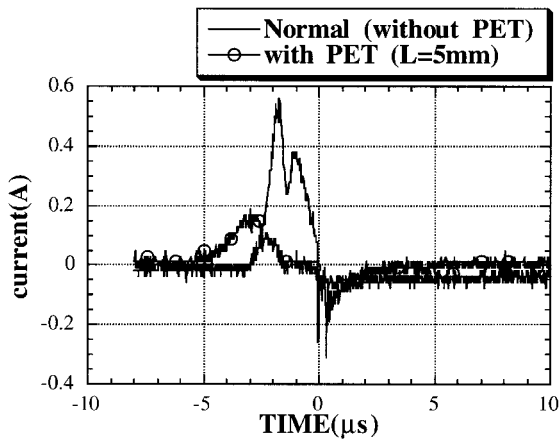


図8 シールドをつけた時(with PET)とつけていない時(Normal)の放電電流の違い。シールドはL = 5 mmの高さで貼った。

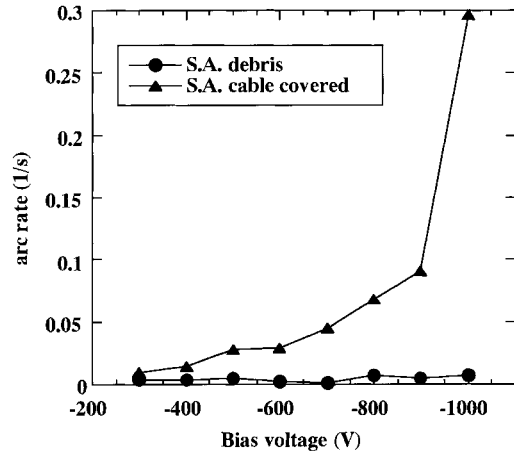


図9 図9に示したアレイの各バイアス電圧における放電頻度。- 300 Vと - 400 Vのバイアス電圧は10分間、- 500 Vから - 1000 Vは20分間印加した。

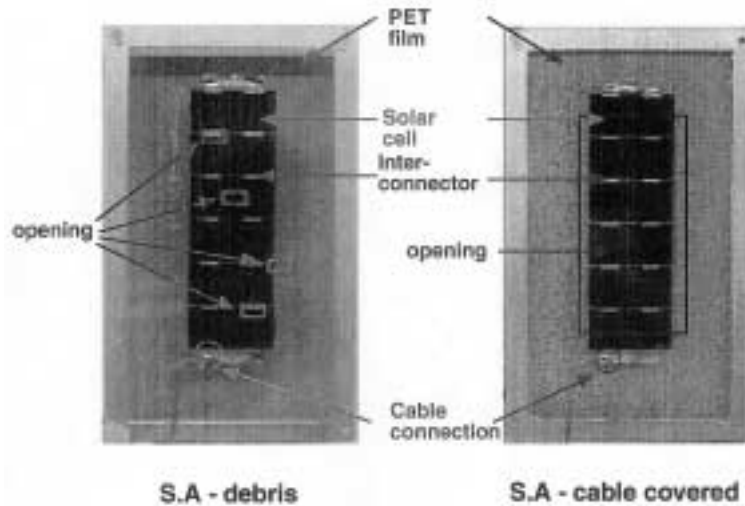


図9 シールド各部にデブリ衝突を模擬した穴をあけたアレイ(左)とインコネクタ部を全て露出させたアレイ(右)

とになる(文献3)。シールドがあると放電発生部からのプラズマの拡がりを抑えて電流を流しにくくしているために、このような効果があらわれたのだと思われる。

シールドをつけた場合、軌道上の長期間運用中にはデブリ衝突等によって穴があいてしまい、シールドの効果が薄れることが予想される。そこで図9に示すように、意図的にシールドの各所に穴をあけたもの(S.A. debris)と、インタコネクタ部を全てプラズマに曝したもの(S.A. Cable covered)の比較を行った。その結果を図10に示すが、放電頻度は明らかにシールドをつけたものが小さい。放電は空間中に露出されるトリプルジャンクションの長さが長い程起こりやすく、少しの部分が露出したところで放電頻度が飛躍的に増えるわけではない。しかしながら、図9のようにトリプルジャンクション部が空間に曝されていると、放電プラズマの拡がりを抑制することはできない。放電電荷量を比較すると図9に示された両者に差はなく、長期間のデブリ衝突によって放電頻度抑制の効果はそれほど低下しないが、一回あたりの放電規模抑制効果はなくなると思われる。(図6, 7, 8, 9, 10)

4. まとめ

太陽発電衛星に用いるような1000V級の高電圧太陽電池アレイを開発するための様々な案を紹介したが、これらを実験によって検証することで1000V級太陽電池アレイを開発することは十分可能であると考えられる。しかしながらそのためには、各案に対して放電発生電圧・発生箇所・発生間隔等の基礎データの取得や繰り返し放電が太陽電池アレイの性能劣化に与える影響等の評価がかかせない。また放電による電磁障害や表面劣化を正しく評価することが必要であり、そのためには軌道上で放電が発生したときに果たしてどれくらいの電流が流れるのかといった点を明らかにする必要がある。また各デザインの太陽電池アレイが宇宙空間での長期間運用に耐えられる強固な耐宇宙環境性(デブリ、紫外線、酸素原子、スパッタリング等々)をもっているかどうかも重要である。これらのことを研究するうえで、詳細な計測を伴う地上実験及び技術検証のための宇宙実験が必要である。

参 考 文 献

- [1] The Arcing Rate for a High Voltage Solar Array: Theory, Experiment and Predictions, Daniel E. Hastings, Mengu Cho, and Hitoshi Kuninaka, (J. Spacecraft and Rockets, Vol. 29, No. 4, pp. 538-554.1992)
- [2] Effects of Arcing on Insulator Surface Potential in Plasma : Image Observation, Mengu Cho, N. Miyata, and M. Hikita (Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 37, No.1, pp.150-152, 2000)
- [3] Discharge over Insulator Surface of Spacecraft in Low Earth Orbit Plasma Environment, Mengu Cho, N. Miyata, M. Hikita, and S. Sasaki (IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, pp. 501-506, 1999)