

# Solar Array Technology to Realize Space Solar Power System

Mengu Cho, Satoshi Hosoda (KIT) and Hideshi Kagawa (JAXA)

In order to realize space solar power system (SPS), we cannot avoid the use of high voltage to efficiently manage the gigantic power exceeding 1GW especially within power generation and distribution subsystems. Generally speaking, when power level increases by two orders of magnitude, operational voltage must increase by one order of magnitude. Otherwise the Joule loss within the distribution system is too large. Using the scaling law, we need to generate and deliver the power at 10kV for the power system of 1GW.

Unless we minimize the distribution length by using sandwich-type panel where the microwave emitter and solar cells are mounted at both sides, we need to develop high voltage power generation and distribution technologies. To do so, not only solar cells, but also transmission cables and power controlling devices must withstand the high voltage. Those elements of the power sub-systems must overcome charging and arcing phenomena associated with interaction with space environment.

In this paper we report three basic studies carried out for the high voltage solar array. The first is degradation of solar cell performance due to repeated arcing on solar array. The second is possibility of sustained arc between two adjacent cells with high voltage. The third is possibility of sustained arc induced by impacts of small space debris or meteoroids. Finally we propose a design of solar array that should be used for the high power systems such as SSPS.

# SSPS のための太陽電池アレイ技術の課題

趙孟佑(ちょうめんう)

九州工業大学 宇宙環境技術研究センター

北九州市戸畑区仙水町 1-1

香河英史 (かがわひでし)

JAXA

茨城県つくば市千現 2-1-1

## 1. 目的および背景

宇宙エネルギー利用システム(SSPS)を実現するためには、1GW を超える電力を効率よく運用するために衛星システム(とりわけ発電部分と衛星内配電部分)の高電圧化が避けられない。現在の宇宙システムにおいては、国際宇宙ステーションが 100kW 程度の電力を 160V で発電し、120V で配電しているのが最高である。一般的に、地上用宇宙用を問わずに電力規模が二桁増えると、作動電圧を一桁上げなければ配電部におけるジュール損失が重大なものとなる。そのスケール則を適用すると、1GW のシステムでは 10kV 程度の電圧で発電・送電を行う必要がある。

しかしながら、宇宙環境における高電圧の使用は放電の危険性に直結し、現在の 100V バスにおいてすら、多くの衛星が放電事故に伴う不具合に見舞われている。SSPS で高電圧の使用を回避する手段としては、マイクロ波送電パネルの裏側に太陽電池を分散配置して送電距離を劇的に減少させることが考えられるが、このようなシステムでは熱的な問題が未だ解決されていない。

高電圧での発電・送電が求められるもう一つの理由として、マイクロ波発振部にマグネトロンを使用するケースがある。マイクロ波発振としてマグネトロンが適しているか半導体が適しているかについては、未だに賛否両論分かれているが、マグネトロンの動作には 1kV を超える高電圧が要求される。負荷が高電圧を要求している時には、同等の電圧で発電・送電を行って電源系統から DC/DC コンバータをできるだけ排除することが、効率向上と軽量化の観点から望ましい。

発送電一体型パネルを使用して送電距離を最小に抑えない限り、SSPS を実現するためには高電圧発電・送電技術の開発が必須である。その為には、太陽電池のみならず、集配電ケーブルや電力制御素子の高耐圧化が望まれるが、宇宙環境との相互作用に伴う帯電・放電現象を克服する必要がある。

本稿では、太陽電池アレイの放電現象に関して懸念される 3つの項目について、基礎的検討を行った結果について報告する。1 点目は太陽電池アレイでの繰り返しの放電によって太陽電池の電気性能が劣化していく可能性についてである。2 点目は放電によって太陽電池アレイ上の異なる 2 点間を放電プラズマが短絡する持続放電の可能性についてである。3 点目は太陽電池アレイにデブリや微小隕石の衝突により持続放電が誘発される可能性についてである。以下、各項目について述べていく。

## 2. 繰り返し放電による電気性能劣化

SSPS が静止軌道上で運用されると、サブストーム時の高エネルギー電子の急増によって、カバーガラス等の絶縁面が帯電して、太陽電池の縁などのいわゆるトリプルジャンクションで放電が発生する。この放電は絶縁面に蓄えられた静電エネルギーをエネルギー源とし、後述する持続放電にならない限り、有限のパルス幅をもった一過性の放電である。この放電は、一次放電またはトリガ放電と呼ばれている。

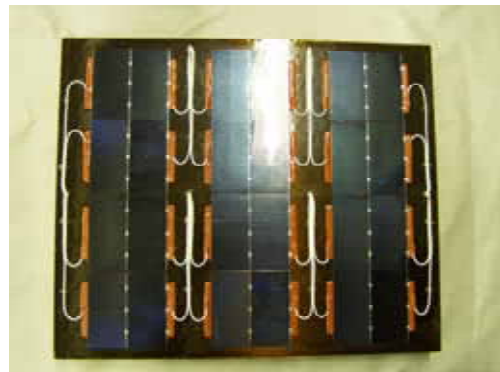


図 1: トリガ放電による電気性能劣化と持続放電のしきい値測定に用いた供試体

太陽電池での放電は、インタコネクタやセル電極とカバーガラス・接着剤の境界で発生し、放電電流が微小な放電発生点に集中して、目視で確認できるほどの電極の溶融痕を残す。この放電の最大のエネルギー供給源は、太陽電池アレイ表面の絶縁層である。放電が発生すると、放電プラズマが沿面放電のようにして太陽電池アレイ面上を進展していき、途中のカバーガラス等に蓄えられた電荷を吸収して、放電発生点にエネルギーを供給する。SSPSのような巨大システムでは、表面の絶縁層の静電容量は巨大なものとなる。放電プラズマが太陽電池アレイ上をどの程度の距離進展するかについては、未だ諸説あるが、地上試験においては1mの太陽電池アレイ供試体全てにわたって進展した例が報告されており[1]、最悪の場合、全面積にわたって進展する可能性がある。そのような場合、単発のトリガ放電であっても、セルの一点に過大な放電電流が流入するために、セルのPN接合を熱的に破壊して電気性能を低下または喪失させる可能性がある。

トリガ放電は、トリプルジャンクションがプラズマに露出され、サブストームによる絶縁面の帯電が避けられない限り、プラズマ環境の自然変動に応じて繰り返し発生する。数10年の運用期間中にトリガ放電回数が積み重なると、例え一回の放電で一個の電池が損傷されるだけでも、最終的には大きな損失になりかねない。

トリガ放電のエネルギーがどの程度になるとセルの電気性能が失われるかを調べるために、図1で示すような供試体を使って実験を行った。供試体はアルミハニカム/CFRP基板の上に貼ったバイパスダイオード付きの7cmx3.5cmのシリコン太陽電池で構成されている。2個のセルを直列につないだ回路が一枚の供試体あたり12回路ある。実験の詳細は文献[2]にあるが、図2に示すようなシステムで行った。直径1m、長さ1.2mの真空チャンバーでECRプラズマ源により、背圧を $1.2 \times 10^{-4}$ Torrに保ったまま、 $10^{12} \text{m}^{-3}$ 、1~3eV程度のXeプラズマを生成できる。このプラズマ密度はほぼ低軌道プラズマ環境に相当している。静止軌道環境に近い環境ではなく、低軌道プラズマに近い環境を選んだ理由は(1)実証衛星に備えた基礎データを取得する(2)トリガ放電を起こしやすい、の2点で

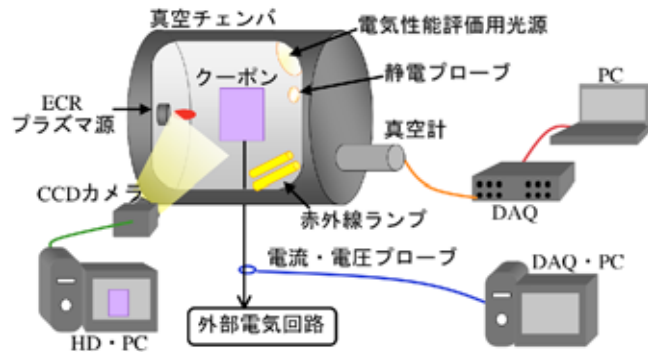


図2：トリガ放電による電気性能劣化を調べた実験システム

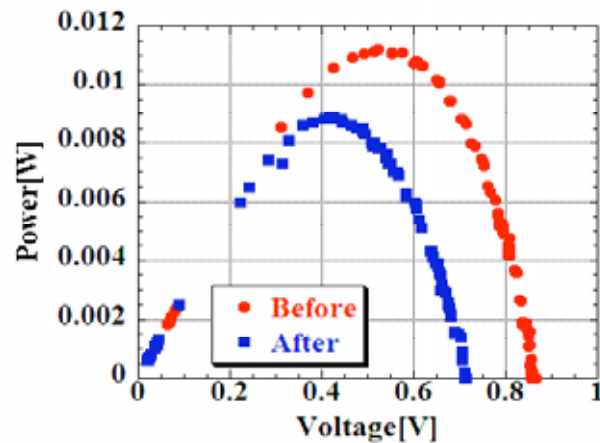


図3:トリガ放電による太陽電池電気出力性能の劣化の一例



図4：PN接合短絡箇所で見られる放電痕の写真（斜め30度から撮影）

ある。この環境下で図1の供試体に負の電圧を印加して、放電を発生させた。トリガ放電のエネルギーは、外部電気回路に挿入したキャパシタンスの値を変えることで調節した。

図3にトリガ放電による電気性能の劣化の例を示す。図4がそのような劣化を起こした箇所で確認される放電痕の写真である。図3の例では、2個の直列のシリコン太陽電池で一個のセルの開放電圧が低下し、結果的に最大電力も低下していることを示している。開放電圧の低下以外にも短絡電流の低下など、様々な劣化形態が存在するが、これらの劣化が単発の放電によっても発生することが実験により分かっている。図3に示した例では、セルのPN接合と並列に漏れ抵抗が挿入された（すなわち短絡）のと等価である。暗室において、PN接合の逆方向（発電時と同じ方向）に電圧を印加すると、電流が流れている箇所の発熱を赤外線で検知できるが、バイパスダイオードと同様に、図4の写真のように上部のN電極に到達する熔融電極の放電痕がある箇所で本来流れるはずのない電流が流れていることを確認している。

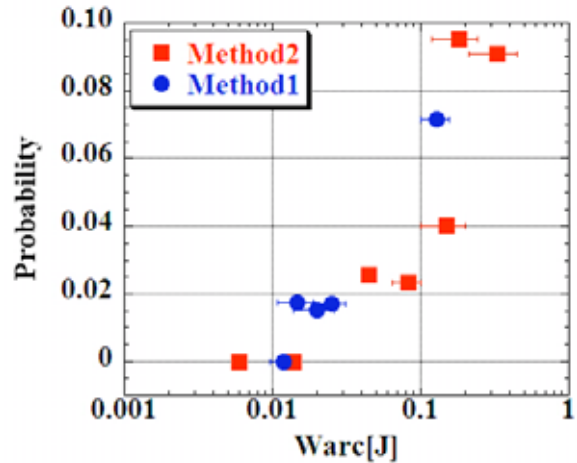


図5：トリガ放電のエネルギーに対するセル単体の故障確率

図5にトリガ放電が発生した時に、どれくらいのエネルギーでセルが劣化するかを示す。図5の確率とは、セルの縁などでトリガ放電が発生した時に、セル単体の開放電圧がゼロとなる短絡故障を起こす確率である。100V発電の場合は、シリコンセルであれば200個、化合物系であれば40個のセルを直列に並べるが、それらの内の何割かのセルが短絡すれば、送電に必要な電圧を確保できなくなり、回路全体からの出力が失われてしまうことになる。

図5から15mJ程度のエネルギーをもったトリガ放電が発生すると、セル単体故障の可能性があることがわかる。しきい値である15mJのエネルギーとは、厚さ100 $\mu$ mのカバーガラスが10m<sup>2</sup>の面積で100Vに帯電した時に蓄えられる。300Vの帯電では、僅かに1m<sup>2</sup>である。トリガ放電発生時にこれくらいの帯電エネルギーを取り込むことは十分に考えられ、SSPSにおいては、トリガ放電の抑制について真剣に検討する必要がある。ここに示した結果はシリコン太陽電池の場合であるが、薄膜太陽電池や多接合太陽電池においても同様の劣化は確認しており、各種太陽電池において劣化に要するしきい値エネルギーについてのデータ取得と、トリガ放電抑制または放電エネルギーをしきい値以下に抑える技術の開発が望まれる。

### 3. 持続放電による回路破壊

前項で述べたのは、一発のトリガ放電により一個の太陽電池が破壊されるといふ電力低下モードであるが、持続放電においては、一回路全て、最悪の場合は全回路、の電力を喪失する。持続放電とは図6に示すように、トリガ放電プラズマが太陽電池出力電力に結合し、直流電力が放電プラズマに供給され続けて真空アーク状態になることをいう。局所的に高温状態が続くために、周辺の絶縁物が熱的に破壊されて絶縁破壊に至り、衛星の負荷に電力を取り出せない状態になる。持続放電が発生すると、セルと導電性サ

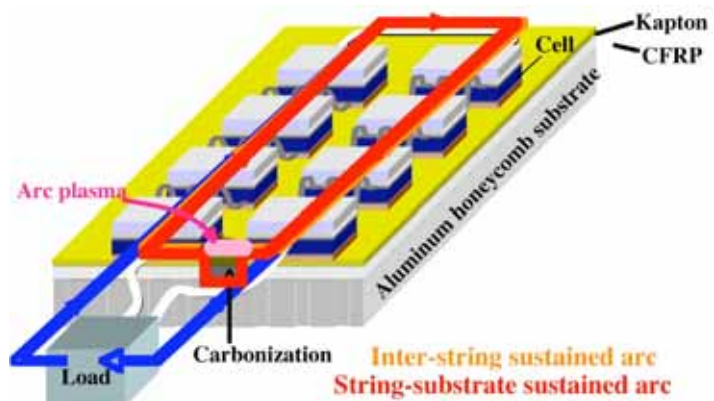


図6:持続放電の模式図

ブストレートを絶縁するカプトンシートが破壊され、太陽電池と基板間の抵抗が大きく低下する。こうなると、太陽電池アレイ回路は、CFRP/アルミハニカムに地絡したことになり、その回路の電力は失われる。

持続放電は、太陽電池アレイ上の電位差をもったセルとセルの間（通常はセルの短辺と短辺の間）でトリガ放電が発生した時に起きやすい。トリガ放電が持続放電に至るかどうかは、発生箇所の電位差と太陽電池アレイ回路が供給できる電流量が大きく影響する。これらの値が小さければトリガ放電はトリガ放電のまま終わるか、あるいは一次的に短絡を起こしたとしてもアークを維持できずに消滅する。後者の場合は、トリガ放電や持続放電と区別して二次放電（二次アーク）と呼ばれることが多い。

図 1 に示した供試体の 2 列の太陽電池回路と負荷を模擬した抵抗からなる回路に発電電流相当の電流  $I_s$  を流して、列と列の間に電圧  $V$  が印加されるようにした。この状態で列間でトリガ放電を起こさせて、二次アークまたは持続放電になるかを調べた。その結果を図 7 に示す。実験の詳細は文献[3]にある。列間でトリガ放電(primary arc)が発生した時に、過渡的な短絡状態になって直流電流  $I_s$  (図 7 の縦軸) が流れる現象を二次アーク(Non-permanent sustained arc)と定義し、強制的に電源を遮断するまで放電電流が流れつづける状態を持続放電(Permanent sustained arc)と定義した。二次アーク・持続放電の発生は、アークプラズマへの注入電力によって決まることが図 8 より明らかである。

### 3. デブリ・微小隕石衝突による持続放電誘発

SPSS のような大面積のシステムを長期間運用すれば、表面へのデブリや微小隕石の衝突は不可避である。特に微小隕石は衝突速度が早く、それらが発電面に衝突すると、高密度プラズマを発生させて太陽電池セル間、または太陽電池セルとセル下の導電性基板の間で持続放電が誘発する可能性がある。その可能性を検証するために、簡単な基礎実験を行った。

図 8 に実験システムを示すが、超高速微小粒子衝突を模擬するために、出力 40 から 130mJ の YAG パルスレーザーを用いた。これにより直径 0.2mm、速度 20km/s 程度の粒子衝突を模擬できる。

アルミパネルにカプトンテープを貼り、その上にシリコン太陽電池を貼った供試体(図

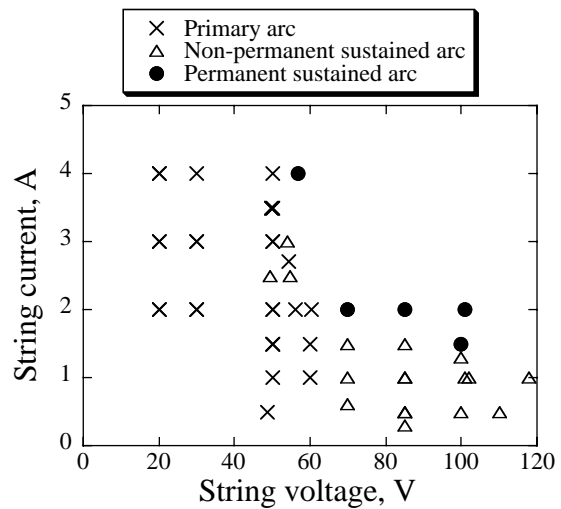


図 7: 二次アーク、持続放電発生条件

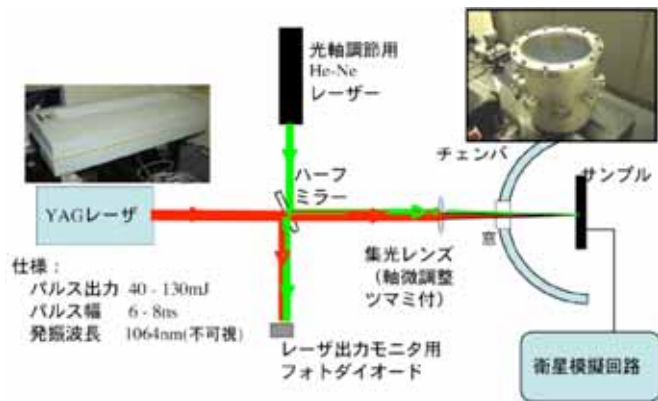


図 8: パルスレーザーによる超高速衝突模擬の実験装置

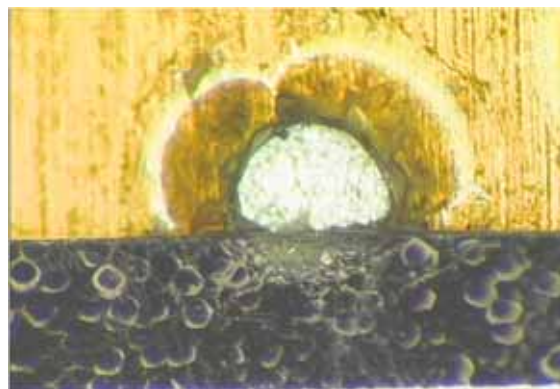


図 9: レーザ照射によりセル近傍のカプトンテープにあいた穴の写真(1.14x1.53mm)

1のものとは異なる)にパルスレーザを照射した。図9にレーザ照射によって太陽電池近傍のカプトンテープ(厚さ $25\mu\text{m}$ )に空いた穴の写真を示す。太陽電池には発電状態を模擬した電流を流しておき、太陽電池と基板間にはバス電圧に相当する電圧を印加した。電流を $1.3\text{A}$ と $2.6\text{A}$ 、電圧を $60\text{V}$ 、 $110\text{V}$ と変えて、レーザ照射により二次アーク・持続放電が発生するかを検証した。表1に実験結果を示す。 $60\text{V}$ では二次アークは発生していないが、 $110\text{V}$ では全てのレーザ照射で二次アークが発生している。持続放電は発生していないものの、電流値が上昇すれば、持続放電発生は不可避であると考えられる。

| Case | 電圧 [V] | 電流 [A] | レーザ照射回数 [回] | 二次アーク放電発生回数 [回] |
|------|--------|--------|-------------|-----------------|
| 1    | 60     | 1.3    | 8           | 0               |
| 2    |        | 2.6    | 8           | 0               |
| 3    | 110    | 1.3    | 8           | 8               |
| 4    |        | 2.6    | 6           | 6               |

表1:レーザ照射時の2次アーク発生回数

デブリや微小隕石の衝突は軌道上では避けることはできない。前項と同じく大電流で発電を行うと、衝突時の発生プラズマによって、セルとセル下の導電性基板の間で持続放電が発生することは不可避である。このことから、SSPSにおいては、前述したような太陽電池アレイ回路の直線配列によって列間持続放電を防ぐだけでなく、フレキシブルパドルを採用してセル-基板間の持続放電を防がなければならない。

#### 4. まとめ

SSPS 実現に向けた高電圧バス技術の開発に関連して、太陽電池アレイと宇宙環境との相互作用に伴う帯電・放電現象の問題点について述べた。基礎研究の結果より、SSPSに適した太陽電池アレイの設計が見えてくる。図10に一案を示す。ポイントとしては、

- ・セル間の持続放電を防ぐために、太陽電池アレイ回路の折り返しをなくして直線的レイアウトにする。
- ・隣接セル間最大電位差はセル発生電圧程度(最大 $3\text{V}$ )
- ・セルと基板の間の持続放電防止のため、セルの下に導電体を置かない。
- ・セルの上に薄膜フィルムをおいて、トリガ放電発生を防ぐ

である。図10に示すような高電圧発電太陽電池アレイの開発は、SSPS以外の大電力宇宙プラットホーム実現にも大きく寄与することになり、早期の宇宙実証が望まれる。本稿で述べた事項以外でも、SSPSに付随した太陽電池アレイの帯電・放電に関しては、漏れマイクロ波と太陽電池アレイ表面の相互作用など、調べるべき課題は多い。近い将来、それらの研究成果についても発表していく予定である。また、太陽電池アレイ以外の高電圧化要素についても、研究の進展が望まれる。高電圧化の目標として、いきなり $10\text{kV}$ を目指す必要はなく、次世代大型宇宙プラットホームにも適用できる $300\text{V}$ または $400\text{V}$ バス技術の開発を目標として進めるのが堅実なステップであると思われる。

#### 参考文献

- [1] Amorim et al, "Electrostatic Discharges on a  $1\text{M}^2$  Solar Array Coupon - Influence of the Energy Stored on Coverglass on Flashover Current", Proceedings of 9<sup>th</sup> Spacecraft Charging Technology Conference, Tsukuba, Japan, 2005.
- [2] Okumura et al, "Degradation of Solar Cell Electric Performance Due to Arcing in LEO Plasma Environment", Proceedings of 9<sup>th</sup> Spacecraft Charging Technology Conference, Tsukuba, Japan, 2005.
- [3] Kim et al., "Threshold Conditions to Induce the Sustained Arc on the Solar Array Panel of LEO Satellite", Proceedings of 9<sup>th</sup> Spacecraft Charging Technology Conference, Tsukuba, Japan, 2005.

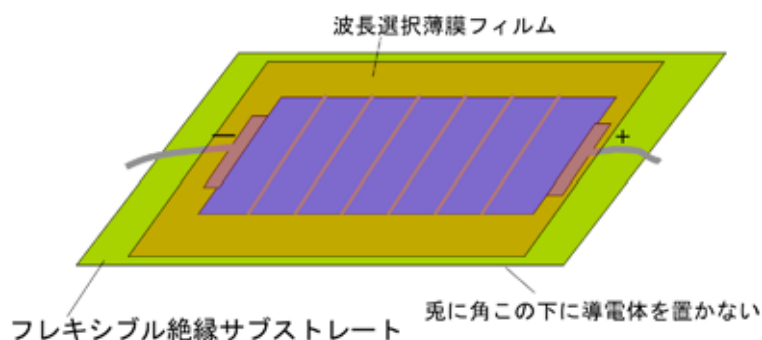


図10: SSPSに適した太陽電池アレイ回路の一案