

# 宇宙用高電圧太陽電池アレイの 放電抑制に関する実験的研究

○ 奥村哲平, 細田聡史, 金正浩, 趙孟佑 (九州工業大学)

Experimental development of high voltage solar array in LEO plasma environment  
Teppei Okumura, Satoshi Hosoda, Jeongho Kim, Mengu Cho (Kyusyu Institute of Technology)

Key Words: Solar array, Plasma, Arc, LEO

## Abstract

In the LEO environment, the arcing occurs on the solar array surface when solar array is operated at high voltage. We develop mitigation techniques against arcing for LEO satellite solar array.

We made some test coupons and tested arc mitigation ability. The tests were performed in a vacuum chamber which simulates LEO plasma environment. In this paper, we report the ability for arc mitigation in LEO plasma environment.

## 1. 研究背景

近年、人類の宇宙活動は長期化、大規模化の様相を呈してきている。それに伴い、宇宙機で必要とされる電力の需要も拡大の一途をたどっている。現在では数 kW 級の電力を必要とする人工衛星も増えており、現在建設中の国際宇宙ステーションでは 65kW にも達する。発電電力が上昇することによって生じる送電線の重量増加、及びジュール損失を抑えるために、バス電圧を高くすることが必要不可欠である。そのため、大電力が必要となる衛星では 100V 以上のバス電圧採用が増加している。国際宇宙ステーションにいたっては 160V で発電し、120V で送電する方式がとられている。将来、宇宙工場のような大規模宇宙プラットフォームの実現を可能にする場合、1 MW 程度の電力が必要とされており、その際の理想的な発電、送電電圧は 400V 程度となる。

一般的に人工衛星の太陽電池アレイの負極は人工衛星構造体に接続されている。低地球軌道(LEO)には密度が約  $10^{10} \sim 10^{12} \text{m}^{-3}$  からなる酸素プラズマが存在している。電子はイオンよりも移動度が大きいために人工衛星が周辺に存在するプラズマに対して負の電位を持つようになる。太陽電池アレイの正極側が周辺のプラズマとほぼ同じ電位を持った場合、負極と人工衛星の構体は正極に対して太陽電池アレイの発電電圧分だけ負の電位を持つ。発電電圧が上昇するにつれて、太陽電池アレイを含む人工衛星の大部分が周辺のプラズマに対して負に沈む。仮に太陽電池アレイを 400V で運用した場合、人工衛星の大部分は負に沈み、太陽電池ア

レイの負極部分では周辺のプラズマに対して -400V の電位を持つことになる。

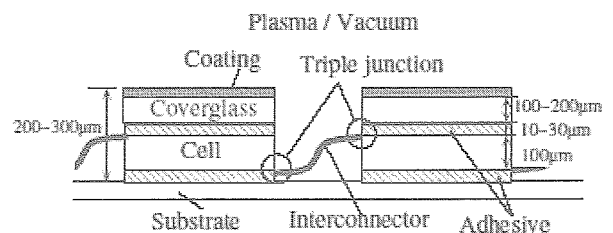


図1 太陽電池アレイの断面図

人工衛星が周辺プラズマに対して 100~200V の負電位を持つと、放電が発生することが確認されている<sup>[1]</sup>。放電は太陽電池の劣化<sup>[2]</sup>、電磁波による機器の誤動作、太陽電池アレイ回路の短絡事故<sup>[3]</sup>を引き起こす危険性がある。これらの事故の規模は発生する放電の頻度や規模によって異なる。図1に太陽電池アレイの断面図を示す。インターコネクタとは太陽電池セル同士を直列に接続するための電極である。人工衛星が周辺のプラズマに対して負の電位を持つと、太陽電池セルとインターコネクタも負の電位を持つ、そのため、太陽電池アレイに対してプラズマからイオンが流入しカバーガラスの上面に衝突する。カバーガラスの上面は正に帯電してカバーガラス内に電界が発生する。この電界は、インターコネクタ、カバーガラス、プラズマの三者からなるトリプルジャンクションで強められる。トリプルジャンクション付近では電界電子放出による電子が発生し、発生した電子はカバーガラス側面を帯電させトリプルジャンクションにかかる電界をさらに強くする。その結果、

電子が雪崩的に増殖し、放電に至る。太陽電池アレイ上で発生する放電を防ぐためには、トリプルジャンクションを周辺プラズマから遮蔽する手法や、トリプルジャンクションにかかる電界強度を弱くする手法などが考えられる。趙らは透明フィルムを用いて太陽電池アレイ表面を覆うことにより、高い放電抑制効果を達成した<sup>[4]</sup>。これは前者の手法に属する。それに対して今回は主に後者の観点に立ち、放電抑制を狙った数種類の太陽電池アレイクーポンを試作した。今回の論文では放電抑制効果を調べる実験を行ったのでその結果を報告する。

## 2. 実験

### 2-1 試作型放電抑制太陽電池アレイクーポン

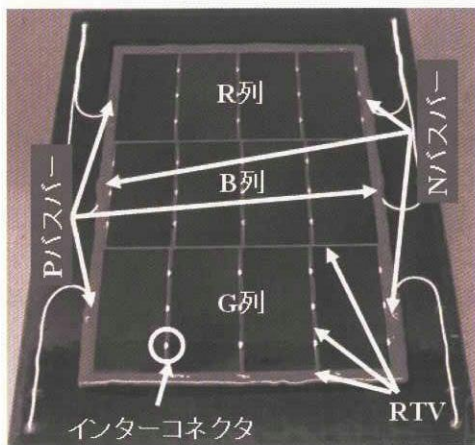


図2 厚塗り1倍厚クーポンの概観

図2に試作型放電抑制太陽電池アレイクーポンの基準となった太陽電池アレイクーポンを示す。現在の100Vバス衛星の標準的な太陽電池アレイデザインも、このクーポンとほぼ同様なデザインである。太陽電池としてはIBF付の単結晶シリコン太陽電池を用いた。クーポンには全部で12枚の太陽電池セルが配置され、4枚を1直列として、図のように上からR列、B列、G列と名付けた。太陽電池セル同士はインターコネクタという電極によって直列に接続されており、列両端にはバスバー電極と呼ばれる電極が存在する。このクーポンにおいてはインターコネクタ付近を除いたセル側面、バスバー電極の全てにRTVコーティングを施している。インターコネクタは設計上の都合からRTVコーティングを施していない。上記と同様の理由により、インターコネクタ近傍のセル側面へはRTVコーティングを施していない。なお、カバーガラスが従来の宇宙用太陽電池に使用されている物と厚さが同じであることから、我々は「厚

塗り1倍厚クーポン」と呼称している。

今回作成した試作型太陽電池アレイクーポンは、全てカバーガラスのデザインを変更することにより放電を抑制しようという試みの上に立っている。

①厚塗り3倍厚クーポン：厚塗り1倍厚クーポンの外観と同じだが、カバーガラスの厚さを3倍に変更。

②厚塗り5倍厚クーポン：厚塗り1倍厚クーポンの外観と同じだが、カバーガラスの厚さを5倍に変更。

③溝堀5倍厚クーポン：厚塗り1倍厚クーポンの外観と同じだが、カバーガラスの厚さを5倍に変更した。電界電子放出により発生した電子を捕捉するためにガラス側面に奥行き100 $\mu$ m程度の溝を形成。図3に断面の概観図を示す。

④薄張り5倍厚クーポン：カバーガラスの厚さを厚塗り1倍厚クーポンの5倍にした。また、太陽電池下面で発生する放電を防ぐために、図4の断面概観図に示すような奥行き100 $\mu$ m程度の溝を成形した。図5にクーポンの外観図を示す。

①から④までのクーポンはカバーガラスの厚さを厚くする事により、トリプルジャンクションへの電界集中を緩和する事を目的として製作した。

⑤図6に「継ぎ目付き大判カバーガラスクーポン」の模式図を示す。このクーポンには太陽電池セル6枚分の広さのカバーガラスを用いており、二枚のカバーガラスの隙間ではETFEフィルムを用いて、周辺プラズマからのイオン流入を防いでいる。このクーポンは周辺からのイオン流入を防ぐ事を主眼に設計した。

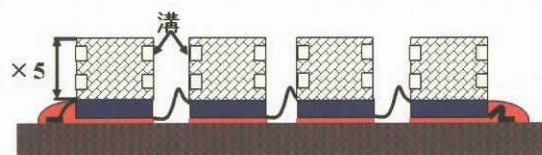


図3 溝堀5倍厚クーポンの断面図

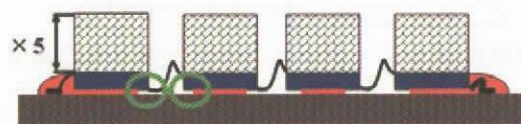


図4 薄張り5倍厚クーポンの断面図

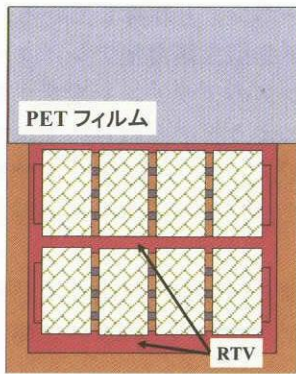


図5 薄張り5倍厚クーポンの概観図

図6 継ぎ目付き大判カバーガラス  
クーポンの断面図

## 2-2 実験システム

図7にこの実験で用いた実験システムの概念図を示す。実験に用いたチャンバーは長さ1m、直径1.2mである。チャンバーの最高到達圧力は $5 \times 10^{-6}$ Torr程度であり、実験中は $1.2 \times 10^{-4}$ Torr程度の圧力となる。チャンバー内のプラズマ環境はECRプラズマ源によって生成される。このプラズマ源は作動ガスとしてキセノンを用いており、実験の際はキセノンの流量を0.3sccmとしてプラズマを生成した。このプラズマ源によって生成されるプラズマの密度はクーポンの近傍で約 $3 \times 10^{12} \text{m}^{-3}$ 程度となり、電子温度は1~2eVとなっている<sup>[5]</sup>。実験中は軌道上の太陽電池アレイの温度を模擬するために、赤外線ランプを用いてクーポンの温度を40°Cに保った。

クーポン上での放電による発光位置は放電位置特定システムによって測定される。実験中にビデオカメラによって撮影している映像をPCに保存し、実験後にコンピュータによる画像解析を行うことにより、放電発生箇所を特定する<sup>[6]</sup>。

試験前後でクーポン表面の顕微鏡写真を撮影することにより、試験中の放電によって発生した放電痕を観察することができる<sup>[7]</sup>。

実験中に発生した全ての放電の放電電圧、電流波形は高速データ取得システムによって計測される。このシステムはPCに市販の高速データ取得ボード(National Instruments社、NI5102)を取り付け、

LabViewで作成したプログラムにより、30ms程度の時間間隔で波形を記録することができる。また、リアルタイムで放電電流波形のピーク値、電荷量、パルス幅を表示及び記録できる<sup>[8]</sup>。

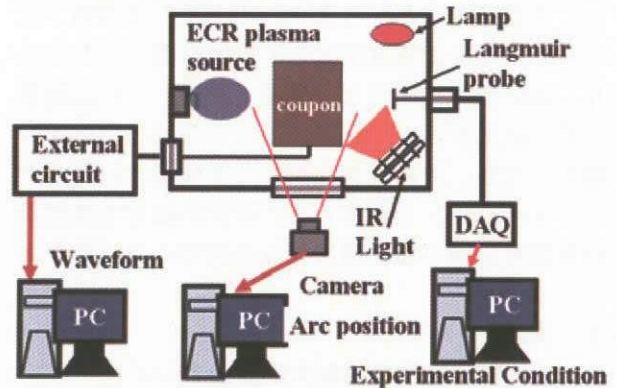


図7 試験システム

## 2-3 実験方法

試験電圧は-100Vから-800Vまで-100V刻みで変化させた。各電圧の印加時間は低地球軌道での周回時間を考慮して90分とした。試験の前後で、放電による太陽電池電気性能への影響を調べる目的で太陽電池の電気性能特性を計測した。試験に用いた外部回路を図8と図9に示す。

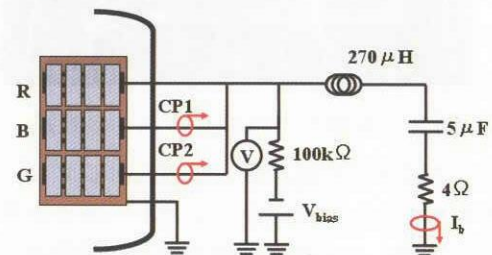


図8 外部回路

(試験電圧-100~-400V)

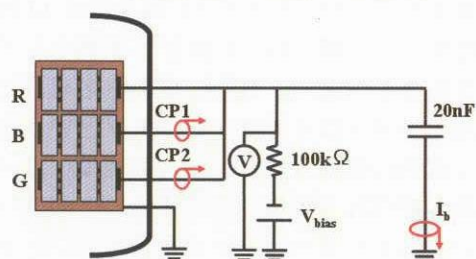


図9 外部回路

(試験電圧-500~-800V)

図8に示した回路は試験電圧が-100Vから-400Vまでの範囲で使用した。この回路は実際の低地球軌道環境で放電が発生した場合の放電電流波形を模擬することができる<sup>[8]</sup>。図9に示した回路

は試験電圧が-500Vから-800Vの範囲で使用したものである。試験電圧が-500Vを超えた場合、図8の回路を用いると放電エネルギーが過大となり、クーポンに悪影響を与える。そのため、キャパシタンスを20nFとし、抵抗とインダクタンスは除いた。

両回路において放電電流 $I_b$ は電流プローブ(Hioki 9274 DC~10MHz)、各列を流れる電流CP1, CP2は電流プローブ(Hioki 3274 DC~10MHz)を用いて測定した。

### 3. 実験結果と考察

各クーポンにおける放電発生回数と印加電圧の関係を図10と図11に示す。

図10と11の結果より、継ぎ目付き大判カバーガラスクーポンでは放電閾値が最も高く-400Vであった。また、放電閾値以上の印加電圧でも放電は頻発しなかった。よって継ぎ目付きカバーガラスクーポンは最も高い抑制効果を持ったクーポンであると言える。このクーポンで試験中に発生した全ての放電を図12に示す。図12より放電はフィルムの縁とバスバー電極、セル側面の距離が近いところで発生している。これらの放電はフィルムの縁からバスバー及びセル側面までの距離を増やし、バスバーをRTVでコーティングすることによって防げる事が分かっている<sup>[4]</sup>。

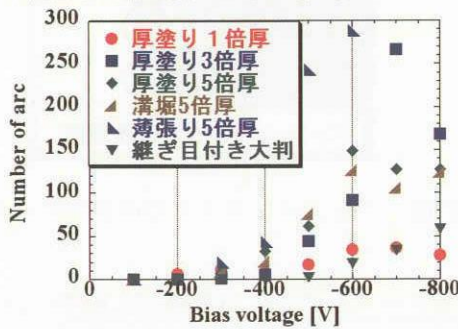


図10 各クーポンにおける試験電圧ごとの放電発生回数

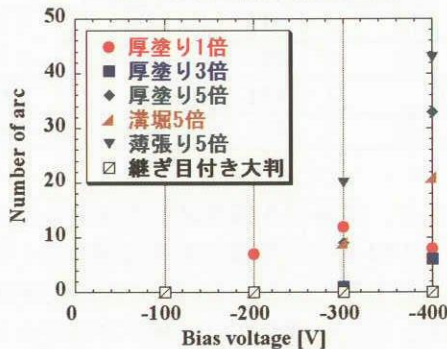


図11 各クーポンにおける試験電圧ごとの放電発生回数(-100~-400V 試験時)

図11より従来のカバーガラスよりも厚さが増したクーポンに関しては、放電発生閾値が-300Vになっていた。しかしながら、図10と図11より、印加電圧の上昇と共に放電発生回数は上昇しており、カバーガラスの厚さを増した事による優位性は失われている事がわかる。厚塗り3倍厚、5倍厚、溝堀5倍厚、薄張り5倍厚カバーガラスクーポンの全放電発生箇所を図13から17までに示す。

図13から図17までの放電発生箇所の図から、今回試験を行った全てのクーポンにおける放電発生箇所は全てRTVによるコーティングを施していない箇所が発生しているのが分かる。薄張り5倍厚クーポンの場合、太陽電池セル下面で発生する放電を抑制する目的で設計したが抑制効果は全く確認できなかった。



図12 継ぎ目付き大判カバーガラスクーポンの放電発生箇所(-500~-800V)

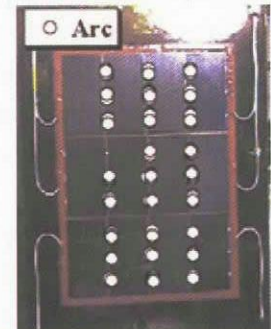
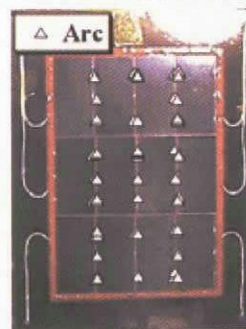


図13 厚塗り1倍厚クーポン 図14 厚塗り3倍厚クーポン

放電発生箇所

放電発生箇所

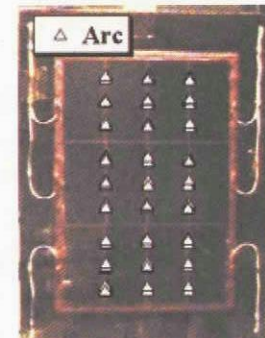
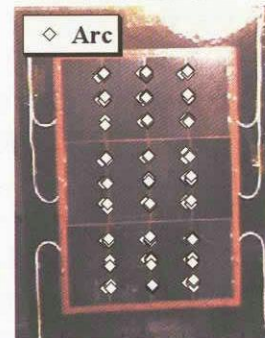


図15 厚塗り5倍厚クーポン

図16 溝堀5倍厚クーポン

放電発生箇所

放電発生箇所

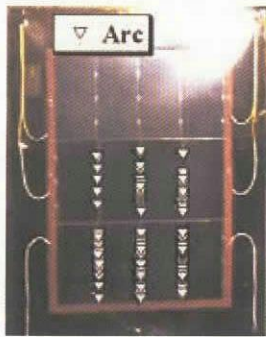


図17 薄張り5倍厚クーポン  
放電発生箇所

今回、カバーガラスデザインの変更による放電抑制効果を狙ったが、放電試験の結果から従来のものに対する優位性は見られなかった。その原因を以下で考察する。太陽電池アレイ上のトリプルジャンクションはカバーガラスのみによって形成されるわけではない。他にトリプルジャンクション形成の原因となる誘電体としてカプトンや接着剤も存在する。このトリプルジャンクションは主に太陽電池セル下面に形成される。カプトンや接着剤に起因したトリプルジャンクションにおける電界集中はカバーガラスの厚みが増加しても変化することはない。よって、カバーガラスの厚み増加と共にカプトンや接着剤に起因したトリプルジャンクションでは相対的に放電が発生しやすくなるということである。そこで、トリプルジャンクションを構成する誘電体別に放電発生箇所の分類を行った。カプトンや接着剤に起因したトリプルジャンクションで発生する放電により生じる典型的な放電痕を図18に示す。

図18中の枠内に放電痕が存在する。基板上に付いた半円形状の染みは銀である。銀は太陽電池セルの電極材として用いられている。カプトンや接着剤に起因したトリプルジャンクションで放電が発生した場合、太陽電池裏面の電極材が溶解、蒸発することから図18のような放電痕が発生すると考えられる。次にインターコネクタで発生した放電による典型的な放電痕を図19に示す。図19から分かるようにインターコネクタで発生した放電による放電痕は判別するのが困難である。

以上の事実から、インターコネクタにはカバーガラス、カプトン、接着剤のいずれに起因するトリプルジャンクションも存在するが、分類が不可能である。そのため、放電の全発生数からセル側面で発生した放電数を減算したものをインターコ

ネクタで発生した放電と考えた。また、仮定としてインターコネクタ上ではカプトン及び接着剤に起因するトリプルジャンクションとカバーガラスに起因するトリプルジャンクションで発生する放電の回数は等しいと考える。厚塗り1倍厚、厚塗り3倍厚、厚塗り5倍厚、溝堀5倍厚クーポン、薄張り5倍厚クーポンにおける放電発生箇所の分類を表1に示す。表中でインターコネクタ周辺のトリプルジャンクションで発生した放電についてはIC-TJ、カプトンや接着剤に起因したトリプルジャンクションで発生した放電をAd-TJとして表記した。また、総放電回数に対するAd-TJでの放電回数の割合も示した。

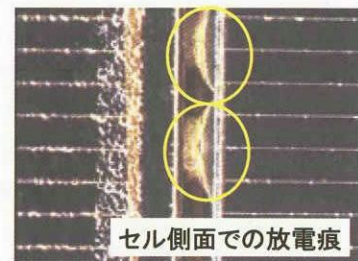


図18 セル側面の典型的な放電



図19 インターコネクタでの典型的な放電痕

表1 各クーポンにおける放電発生箇所の分類

クーポン	IC-TJ	Ad-TJ	Ad-TJ / All arcs
厚塗り1倍	140	4	2.7%
厚塗り3倍	531	48	8.2%
厚塗り5倍	492	16	3.1%
溝堀5倍	434	26	5.6%
薄張り5倍	125	469	78%

表1より、薄張り5倍厚クーポン以外のクーポンではAd-TJの全放電数に対する割合は、数%の変動があるのみである。今回おこなった評価から考えると、カバーガラスのデザインを変えた事による放電抑制効果への影響は見られない。ただし、これらのクーポンではほとんどの放電がIC-TJで

発生している。よって、カバーガラスの厚みもしくは溝の有無と放電抑制効果の関係は、インターコネクタ周辺での放電発生箇所を具体的に分類しない限り断定するのは難しいと考えられる。薄張り5倍厚クーポンに関しては全体の放電回数に対してAd-TJが八割近くに及び、期待された放電抑制効果が得られていない事がわかる。以上のことから、カバーガラスの厚み増加や溝の形成によって放電閾値を上昇させることはできたが、放電を完全に抑制するにはトリプルジャンクションを周辺プラズマから隠す事が確実である事がわかった。

#### 4. まとめ

太陽電池セルに取り付けられたカバーガラスデザインを変化させることにより、放電抑制を達成することを目的とした試作型放電抑制太陽電池アレイを数種類製作した。プラズマ環境中で放電抑制性能試験を行った結果、以下のことが分かった。

- ① カバーガラスの厚みを増やすことにより、放電閾値を上昇させることができた。
- ② カバーガラス継ぎ目をフィルムで保護する方法は放電発生を抑止できる
- ③ 今回の評価方法からはカバーガラスの厚み増加、溝の有無による放電抑制効果は確認できなかった。

#### 5. 謝辞

本研究は(財)日本宇宙フォーラムが推進している「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環として行ったものである。

#### 参考文献

- [1] Grier, N. T. , : Plasma Interaction Experiment II (PIX II): Laboratory and Flight Results, Spacecraft Environmental Interaction Technology-1983, NASA CP-2359, 1985, pp.333-347.
- [2] Okumura, T. Hosoda, S. Toyoda, K. Cho, M.: Degradation of High Voltage Solar Array due to Arcing in the LEO Plasma environment, 8<sup>th</sup> Spacecraft Charging Technology Conference, USA, 2003.
- [3] Katz, I., Davis, V. A. and Snyder, D. B.: Mechanism for Spacecraft Charging Initiated Destruction of Solar Arrays in GEO, AIAA paper 98-1002, 36<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting, Reno, 1998.
- [4] Hosoda, S. Okumura, T. Toyoda, K. Cho, M.: High Voltage Solar Array for 400V Operation in LEO Plasma Environment, 8<sup>th</sup> Spacecraft Charging

Technology Conference, USA, 2003.

[5] Hayashi, H., Saionji, A., Toyoda, K., Cho, M., and Kuninaka, H.: Development of Plasma Interaction Acceleration Test Facility for Study on Space Material Deterioration, 23<sup>rd</sup> Int. Symp. Space Tech. Sci. ISTS 2002-b-28, Matsue, Japan, 2002.

[6] Toyoda, K., Cho, M., and Hikita, M.: Development of Position Identification System of Arc Discharge on a Solar Array in Vacuum by Digital Processing of Video Images, Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol.51, No.589, (2003), pp. 82-84.

[7] Delu Qu, Teppei Okumura, Satoshi Hosoda, Mengu Cho: Development of Arc Induced Surface Degradation Evaluation System of Solar Array by an optical Microscope, 24<sup>th</sup> ISTS, Japan, May 30-june 6, 2004

[8] Saionji, A., Toyoda, K., and Cho, M.: Development of Automatic Data Recording and Analysis System for Laboratory Experiments on High Voltage Solar Array in Space Environment, Proceedings of ACED & K-J Symp. on ED and HVE, Seoul, 2002, pp.63-66.

[9] Cho, M., Miyata, N., Hikita, M., and Sasaki, S.,: Discharge over Spacecraft Insulator Surface in Low Earth Orbit Plasma Environment, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.6, No.4 (1999), pp. 501-506.