

## 5章 放電試験

### 5.1 試験環境

真空容器はステンレス製で内径 1m、長さ 1.2m の円筒形である。真空容器の外観を図 5.1 に示す。この真空容器に搭載されている ECR プラズマ源でキセノンプラズマを生成し LEO のプラズマ環境を模擬することができる。試験環境を表 5.1 に示す。



図 5.1 LEO チャンバー

Figure 5.1 LEO chamber

表 5.1 放電試験の環境

Table 5.1 Environment of discharge test

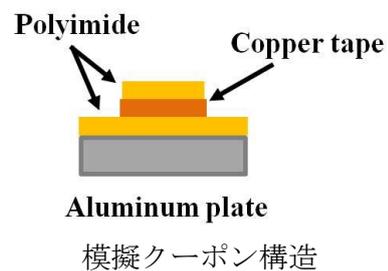
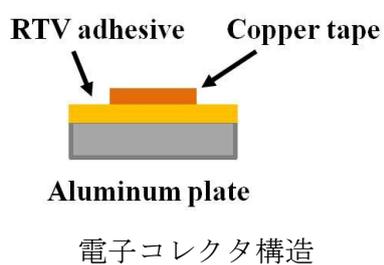
背圧	プラズマ密度	電子温度
$1 \times 10^{-3} [\text{Pa}]$	$1.3 \times 10^{12} [\text{m}^{-3}]$	1.0[eV]

### 5.2 放電予備試験

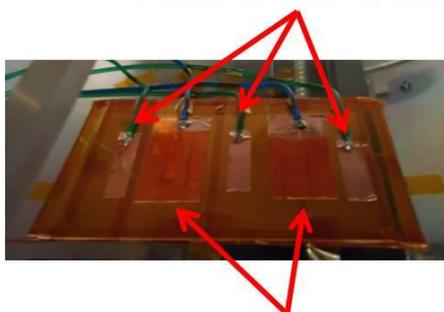
構体、300V基板を使用した放電試験を行う前に、鳳龍弐号で行われる放電試験において放電規模や放電電流経路など不明な点が多かったため、それらを明らかにするために放電予備試験を行った。(注意：放電予備試験②までは放電電流の検出を抵抗で行い、また光IV測定を行うことを前提として試験を行っている)

#### (a) 放電予備試験①

放電予備試験①では図5.2のような模擬クーポンを使用して、図5.3のような回路で放電試験を行った。ただし、回路系は鳳龍弐号で行われる放電試験を模擬するために絶縁トランスで浮かしている。放電電流の検出はDC電流センサを使用している。



### Electron collector



### Simulation coupon

図5.2 模擬クーポン

Figure 5.2 Simulation coupon

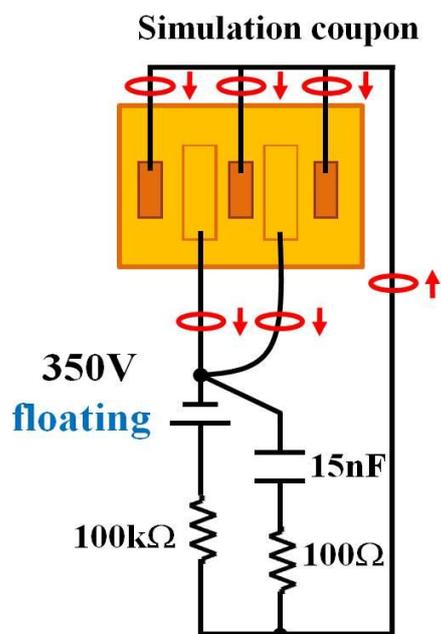


図5.3 試験回路(放電予備試験①)

Figure 5.3 Test circuit (Discharge pre-test 1)

試験を行ったところ電子コレクタ近傍で放電が発生した場合は、放電電流が観測されたが、電子コレクタで放電光が確認されているのに放電電流が観測されないことが多々見られたため、図5.4のように放電電流波形のピーク値をより大きくするために抵抗値を下げ、電流プローブのトリガレベルを下げて再試験を実施した。

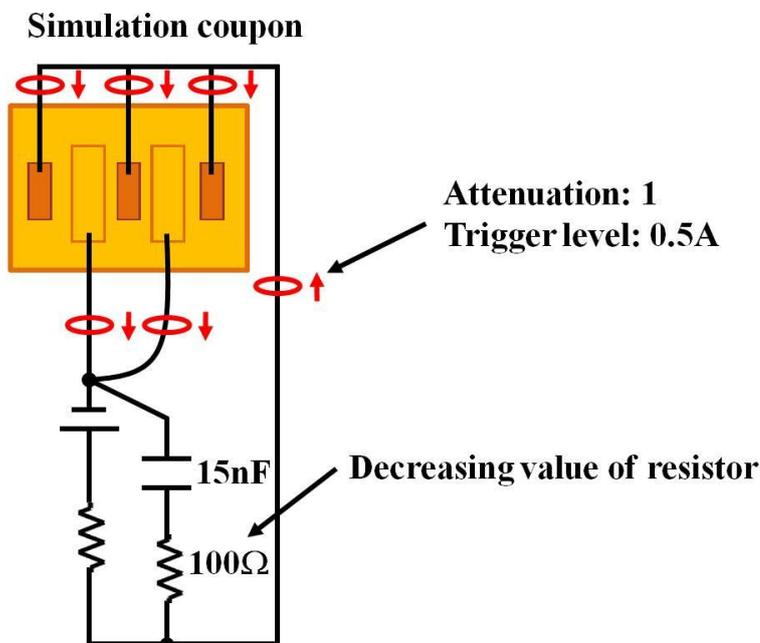


図5.4 再試験時の試験回路(放電予備試験①)  
Figure 5.4 Re-test circuit (Discharge pre-test 1)

図5.4のように回路と計測系を改善したところ、放電が発生した箇所が電子コレクタに近くなければ放電電流を観測することができない(図5.5)、という結果が得られた(クーポンと電子コレクタ間が約1cm程度以下でないとき電流は観測されない)。トリガレベルは0.1~0.5Aに設定したので、クーポンと電子コレクタ間の距離が1cm以上のときそれ以下の電流しか流れていないと考えられる。よって、TJアレイの真ん中部分(例えば、インターコネクタ部分)で放電が発生しても放電検出することができないと考えられる。また、電流経路としては、主にクーポンに最も近い電子コレクタにコンデンサに充電された電荷が流れ込むという結果になった。

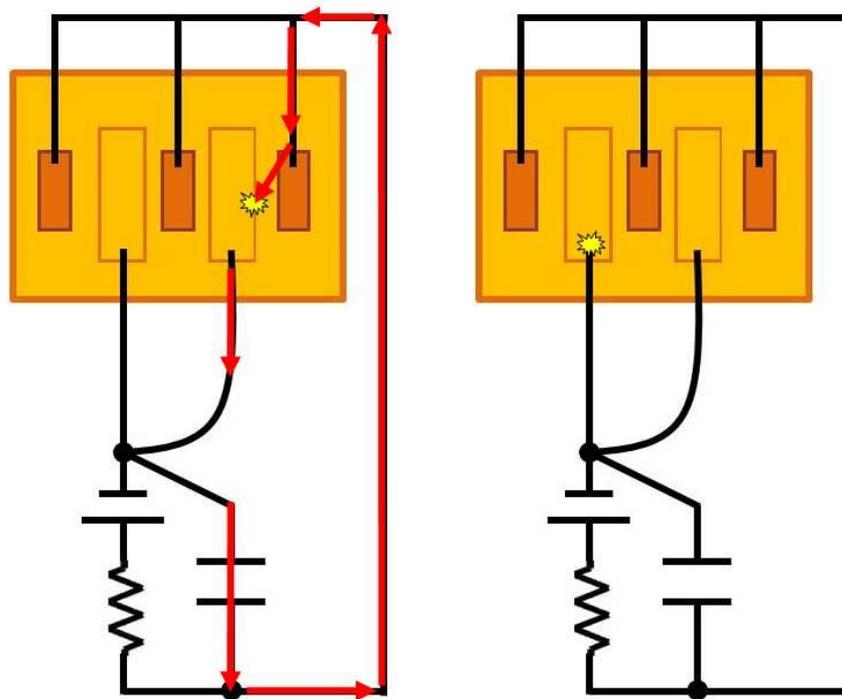
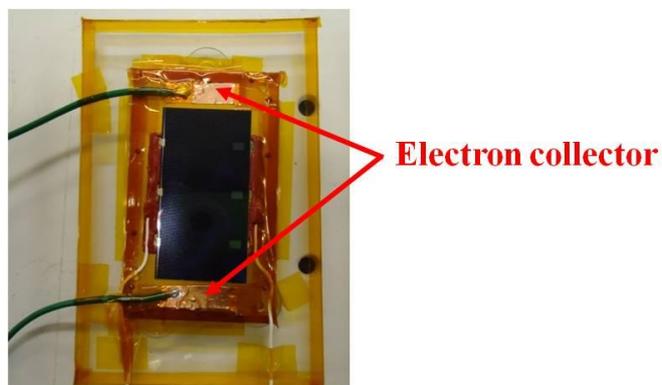


図5.5 試験結果(放電予備試験①)  
 Figure 5.5 Test results (Discharge pre-test 1)

(b) 放電予備試験②

放電予備試験②では放電予備試験①の試験と同様な回路でクーポンを太陽電池に変更して同様な結果になるか検証を行った。本試験では図5.6のような太陽電池クーポンを使用して、図5.7のような回路で放電試験を行った。放電電流の検出はDC電流センサを使用している。



**Distance from coupon to electron collector: 3 to 10mm**

図5.6 太陽電池クーポン(放電予備試験②)  
 Figure 5.6 Solar cell coupon (Discharge pre-test 2)

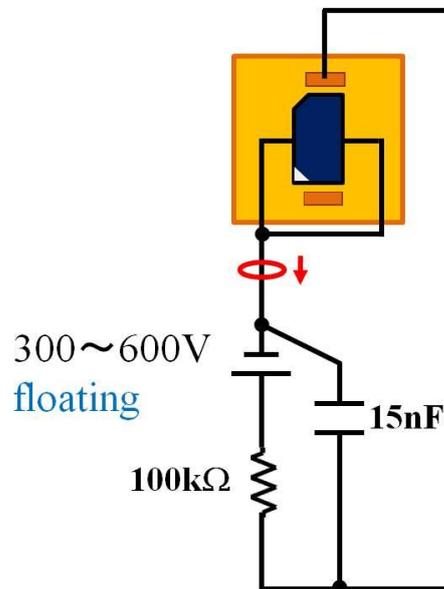


図5.7 試験回路(放電予備試験②)

Figure 5.7 Test circuit (Discharge pre-test 2)

結果としては放電予備試験①とほぼ同様な結果が得られ、電子コレクタ近傍で放電が発生しなければ大きな電流は観測できなかった(図5.8)。電子コレクタから遠い場所で放電が発生した場合の電流のピーク値は最大で0.1A程度であった。0.1Aの電流を検出しようとするすると誤ってノイズを検出してしまう恐れがあり、また太陽電池の放電による劣化実証に必要なエネルギーを太陽電池に与えることができないため大きな回路変更の必要があった。これと同時に光IV測定系によりTJアレイがバイアスされてしまうという欠陥が発覚した。

以上の結果を考慮して、太陽電池の放電による劣化実証をミッションから落し、放電電流の検出方法を他の方法に変更することにした。

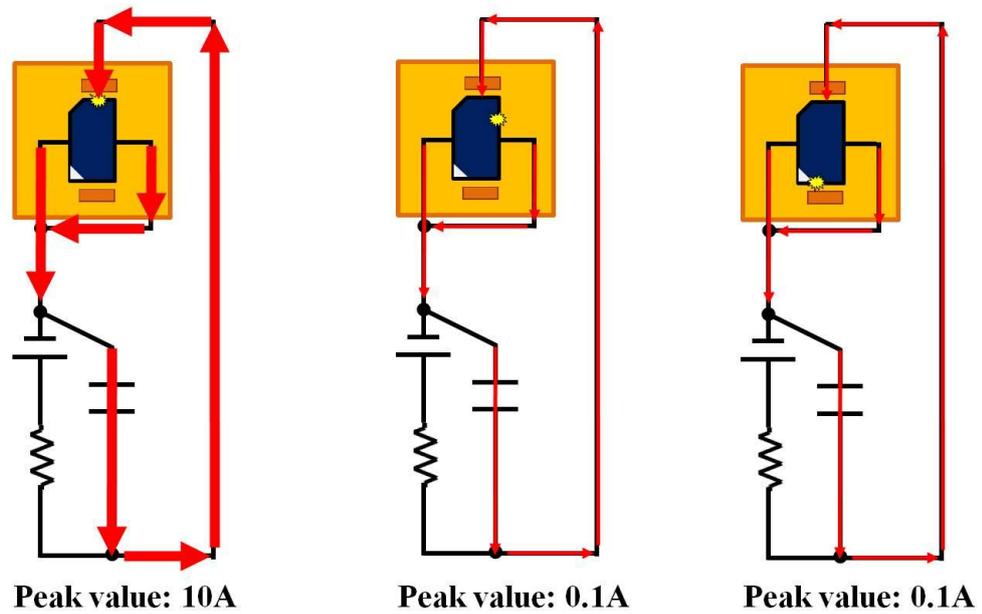
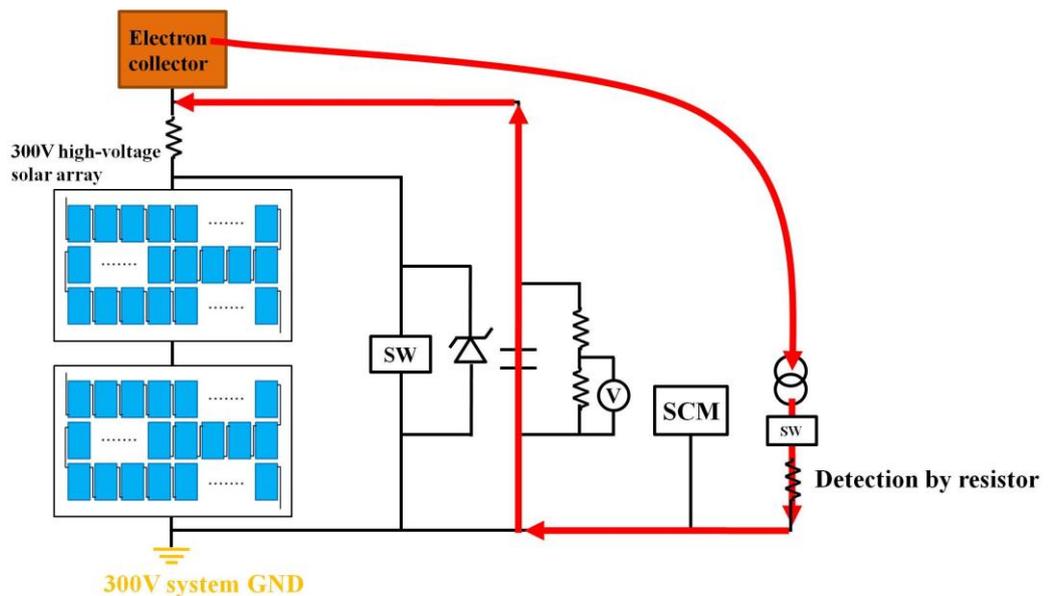


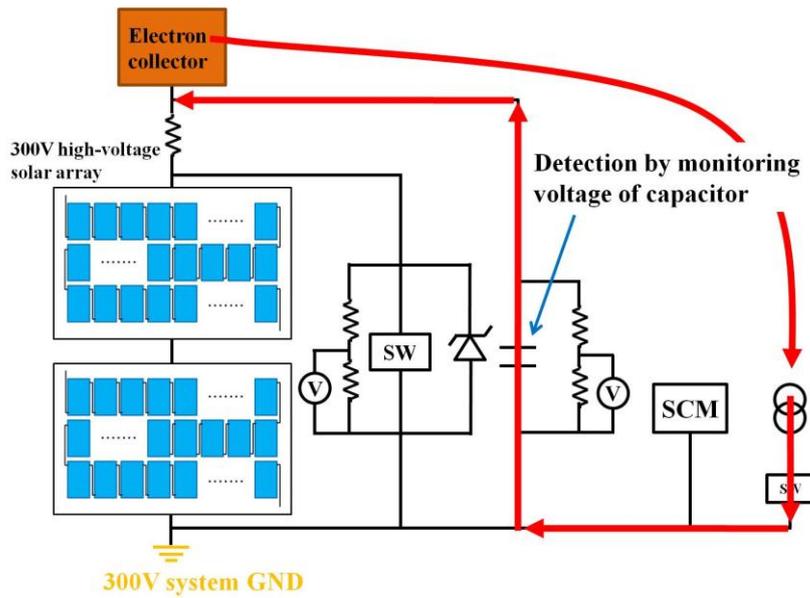
図5.8 試験結果(放電予備試験②)  
Figure 5.8 Test results (Discharge pre-test 2)

(c) 放電予備試験③

放電予備試験②において抵抗間の電圧をモニタリングすることによる放電検出は難しいという結果から放電予備試験③においては放電エネルギーを決定するコンデンサの容量をできるだけ小さく設定し、コンデンサの両端電圧の低下をモニタリングすることで放電検出を行うことにした。図5.9に再設計前後の300V系の全体回路図を示す。



再設計前



再設計後

図5.9 再設計前後の300V系回路図

Figure 5.9 Electronic circuit of 300V system before/after re-design

本試験で使用した回路図を図5.10に示す。また、電子コレクタを複数用意している。これは電子コレクタとクーポンとの距離や電子コレクタの面積の違いでコンデンサの低下に違いがないか検証をするためである。電子コレクタの面積やクーポンとの距離を示したものを表5.2に示す。

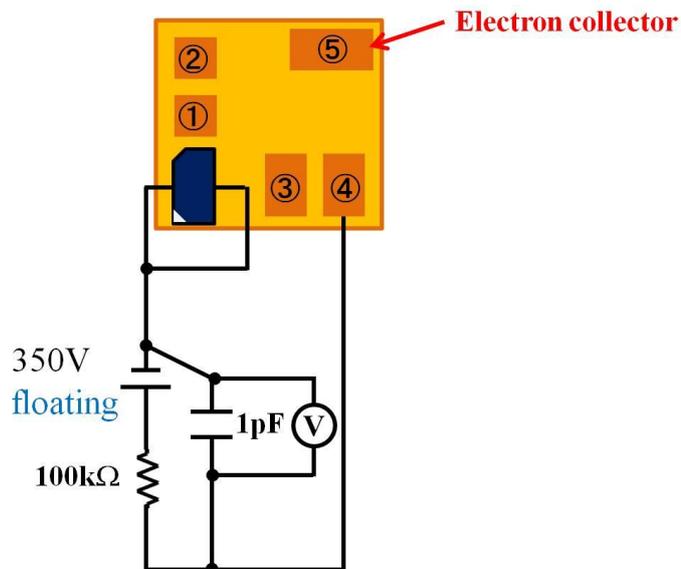


図5.10 試験回路(放電子備試験③)

Figure 5.10 Test circuit (Discharge pre-test 3)

表5.2 電子コレクタの面積とクーポンからの距離

Table 5.2 Area of electron collector and distance from coupon

	面積[cm <sup>2</sup> ]	クーポンとの距離[cm]
①	3x3	3
②	3x3	8
③	3x5	3
④	3x5	7
⑤	3x7	15

図5.11に示しているようにコンデンサ間の電圧波形が放電規模によってばらつきがあり、またコンデンサ間電圧の低下するレベルがノイズによるものと同程度である場合がことから放電閾値が設けにくいと考えられる。これはコンデンサの容量を小さくしても変化はなく(実際には配線の容量による影響で小さくしても意味がないと考えられる)、電子コレクタの面積や電子コレクタとクーポンの距離によっても変化しなかった。よって、コンデンサ間電圧の低下による放電検出は難しいと考えられる。

しかし、図5.11より放電の規模(コンデンサ間電圧の低下するレベル)によらず、低下する速度が同程度であることがわかる。よって、放電電流の流れる速度(電流の立ち上がる速度)も放電の規模によらず同程度であると推測できる。そのため、高周波でハイインピーダンスになるインダクタによって放電検出すれば良いと考えられる。

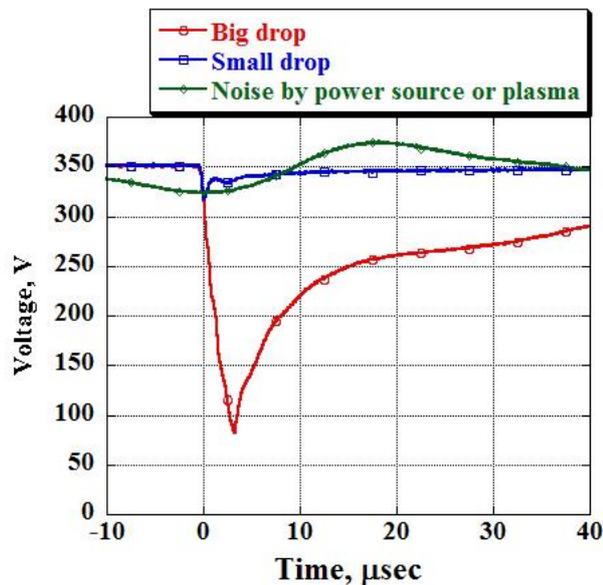


図5.11 コンデンサ間電圧波形

Figure 5.11 Voltage waveform across capacitor

(d) 放電予備試験④

放電予備試験③においてコンデンサ間電圧の低下をモニタリングすることによる放電検出は難しいという結果から、放電予備試験④においては放電電流をインダクタで検出することで放電検出を行うことにした。図5.12に再設計後の300V系の回路図を示す。また、本試験で使用した回路図を図5.13に示す。放電検出には100または200 $\mu$ Hのインダクタを使用している。

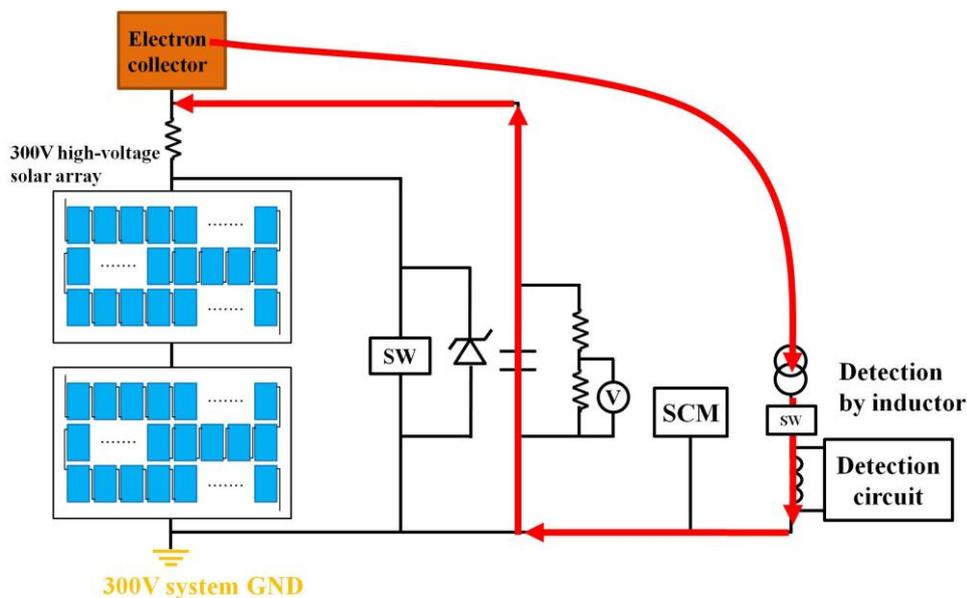


図5.12 再設計後の300V系回路図

Figure 5.12 Electronic circuit of 300V system after re-design

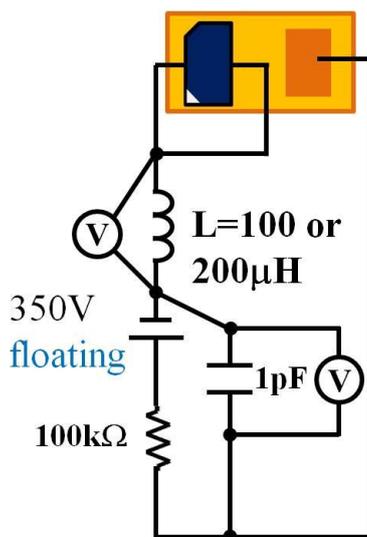


図5.13 試験回路(放電予備試験④)

Figure 5.13 Test circuit (Discharge pre-test 4)

図5.14は $L=100\mu\text{H}$ のときのインダクタ電圧波形(放電電流波形)である。同時にコンデンサ間電圧波形も取得しているが、コンデンサ間の電圧の低下する大きさに関係なく確実に放電電流を取得できていることがわかる。ただし、開発している放電検出回路のトリガレベルは $2.5\text{V}$ であるので、 $2.5\text{V}$ 以上のものが放電としてみなされる。 $L=100\mu\text{H}$ では放電の取り逃しがあると考え、 $200\mu\text{H}$ でも試験を行ったが、放電検出回数が増大した。つまり、 $L=100\mu\text{H}$ では取り逃しがあったと考えられる。さらにインダクタを大きくすると放電検出回数が増大することが予測されるが $200\mu\text{H}$ で既に放電検出回数が1秒当たり複数回起きている。開発している放電検出回路のサンプリングは1秒間に1回であるので全ての放電を検出することは不可能であるという結論に至った。ただし、放電の有無は確かめることができるので放電抑制試験は可能である。

全ての放電を検出する必要がなければ、抵抗による放電検出でも、コンデンサ間電圧の低下による放電検出でも、インダクタによる放電検出のいずれでも良いと考えられるが、以下のように抵抗による放電検出とコンデンサ間電圧の低下による放電検出には欠点があるためインダクタによる放電検出に設計変更することに決定した。

#### 【欠点】

- ・抵抗による放電検出においては、ある程度大きな電流が必要となり放電エネルギーを決めるコンデンサの容量を大きくする必要がある。コンデンサの容量を大きくすると放電ノイズが大きくなってしまいバス系統や $300\text{V}$ 系CPUに与える影響が大きい。また、放電が発生しても放電を検出できるだけの電荷がコンデンサから抜けられない可能性がある。
- ・コンデンサ間電圧の低下による放電検出は大きな回路変更が必要である。

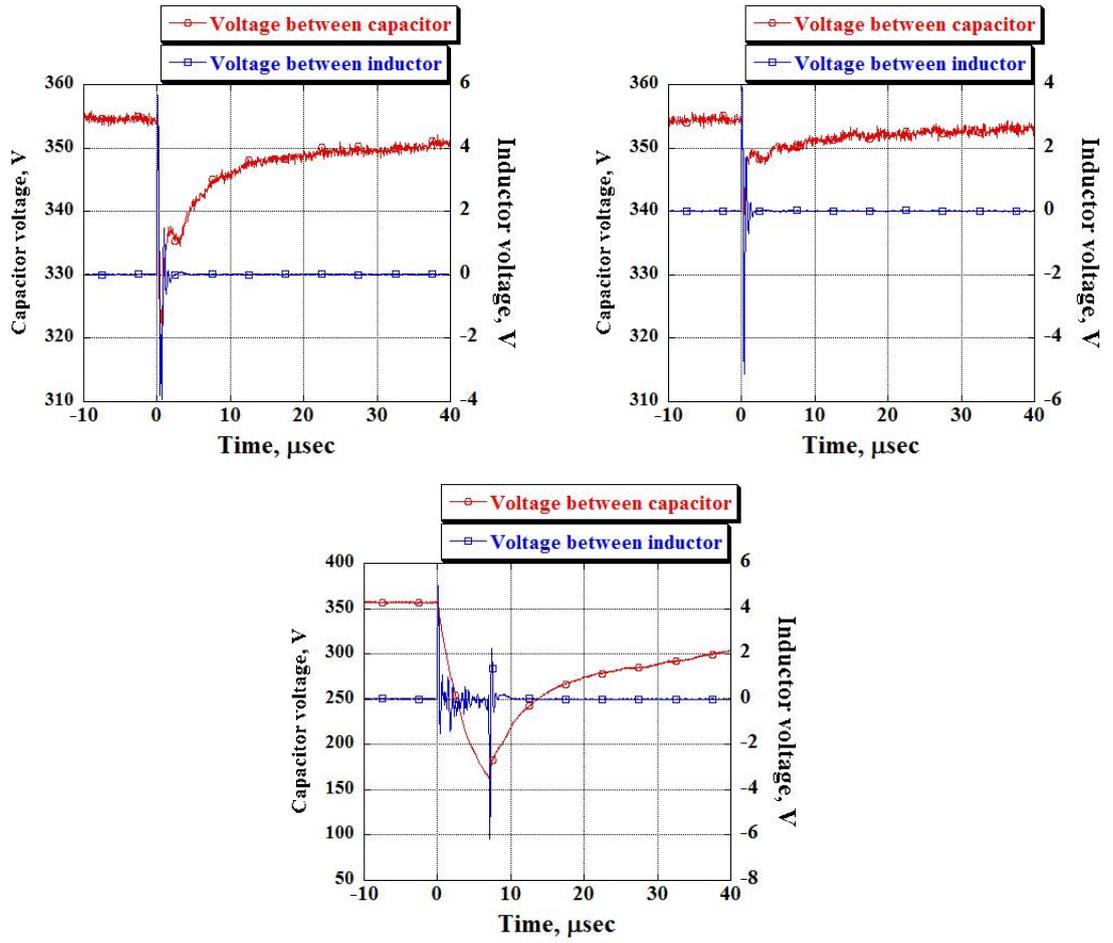


図5.14 インダクタ電圧波形(L=100μH、放電予備試験④)

Figure 5.14 Voltage waveform across inductor (L=100μH, Discharge pre-test 4)

(e) 放電予備試験⑤

インダクタによる放電検出においては、微小電流の変化でもインダクタ間電圧が放電検出回路のトリガレベル2.5Vを越えてしまう可能性がある。放電予備試験⑤ではクーポンを2つ用意し、両方のクーポンに接続されているインダクタ間電圧の波形を取得し片方で放電が発生した場合、もう一方でもインダクタに電圧が誘起されないか確認を行った。本試験で使用した回路図を図5.15に示す。

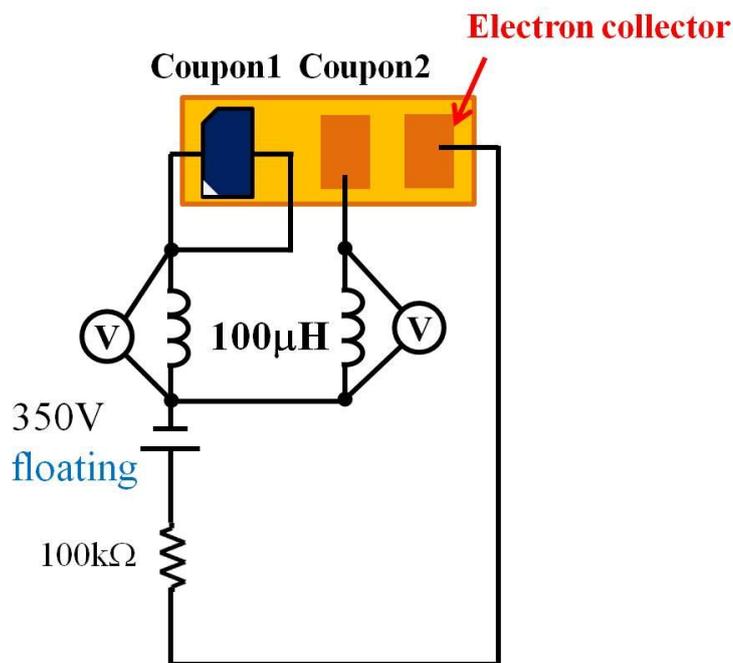


図5.15 試験回路(放電予備試験⑤)

Figure 5.15 Test circuit (Discharge pre-test 5)

図5.16の左図はCoupon1に接続されているインダクタの誘起電圧であり、このグラフからCoupon1で放電が発生しており、またCoupon2にも微小電流が流れてインダクタに誘起電圧が発生したと考えられる。また、右図のようにCoupon2で放電が発生した際にも、Coupon1に接続されたインダクタで放電検出回路のトリガレベル2.5Vを越える電圧が観測された。この結果は、300V発電太陽電池で放電が発生したのか、TJアレイで放電が発生したのか区別をすることができないため、TJアレイでの放電抑制試験ができないことを意味している。ただし、300V発電太陽電池において放電が発生しないように設計し、軌道上でTJセルをバイアスせずに300V発電太陽電池にて放電が発生していないことが実証されれば、TJアレイでの放電抑制試験を行うことが可能となる。

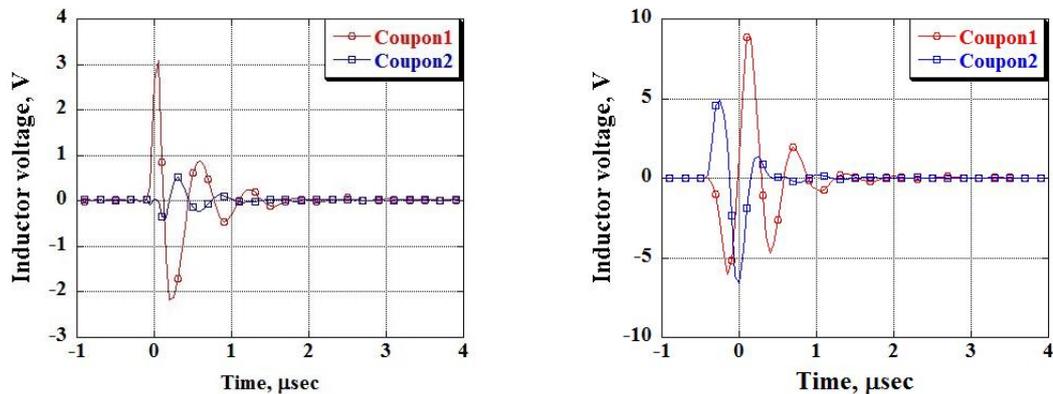


図5.16 インダクタ電圧波形(L=100 $\mu$ H、放電予備試験④)

Figure 5.16 Voltage waveform across inductor (L=100 $\mu$ H, Discharge pre-test 4)

(f) 放電予備試験⑥

放電予備試験⑥ではTJアレイをバイアスするために用いているフォトモスの評価を行う放電試験を行った。

バイアス用のフォトモスは、OFF時は開放状態のため、TJアレイはバイアスされないが、半導体スイッチであるために高抵抗ではあるがバイアスされる可能性がある。そのため、OFF時に放電が発生しないこと、ON時に放電が発生することを確認する試験を行った。

また、バイアス用フォトモスの耐電圧は400V程度である。フォトモスがOFF時にはTJアレイは300V系に対して浮いている状態なので、例えばオーロラ帯の高エネルギー電子により300V系とTJアレイの間に400V以上の大きな電位差ができてしまうとフォトモスが壊れてしまう可能性がある(オーロラ帯では数kV程度負に沈む可能性があるため400V以上電位差がでることはあり得る)。そのためフォトモスと並列にツェナーダイオード( $V_z=400V$ )を接続することでその対策を取っている。ただし、ツェナーダイオードの動作が不明であるために、クーポンと300V系との電位差が400V以下ではクーポンと300V系が開放状態であるために放電が発生しないこと、電位差が400Vになったらツェナーによって電位差が飽和し、放電が発生することの確認を行った。ただし、電位差は高電圧電源で800V程度バイアスすることで発生させた。本試験で使用した回路図を図5.17に示す。

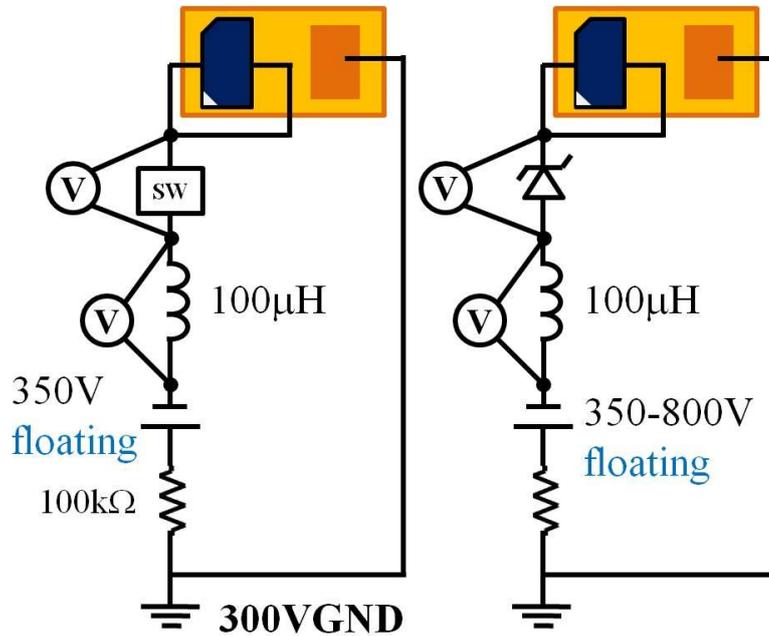


図5.17 試験回路(放電予備試験⑥)  
Figure 5.17 Test circuit (Discharge pre-test 6)

図5.17左図の試験回路で試験を行った結果、半導体スイッチ(フォトモス)がOFF時は放電が発生せず、ON時は図5.18左図の波形のように放電が観測された。

図5.17右図の試験回路で試験を行った結果、クーポンと300V系との電位差が400V以下の場合には放電が発生せずに、400V程度になると図5.18右図の波形のように電位差が飽和し放電が発生することが確認できた。

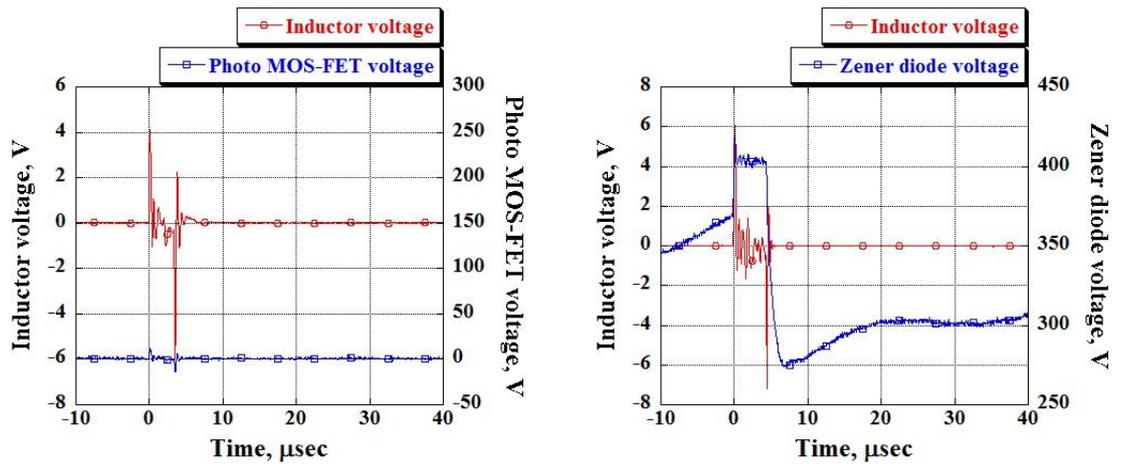


図5.18 インダクタとフォトモスの電圧波形  
Figure 5.18 Voltage waveform across inductor and Photo MOS

ツェナー接続時の放電が発生メカニズムを以下に示す(図5.19)。高電圧電源が800V程度で300V系がプラズマ電位に対して700V程度負に沈むと仮定すると、ツェナーダイオードによりクーポンと300V系との間には400Vの電位差が生じるために、クーポンは300V程度負に沈む。このようにしてクーポンが負バイアスされ放電が発生する。

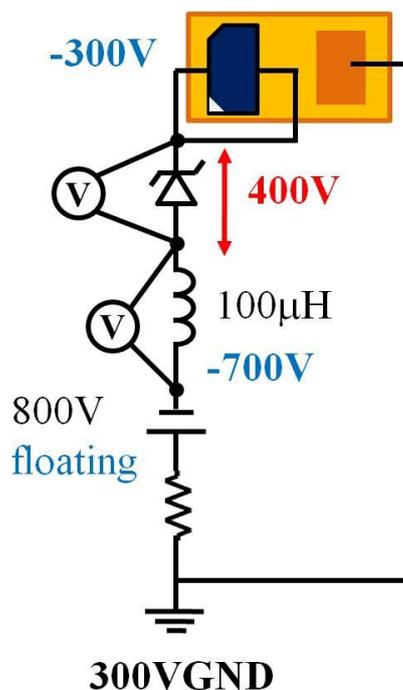


図5.19 ツェナー接続時(図5.17右図)の放電メカニズム

Figure 5.19 Discharge mechanism when zener diode is connected (Figure5.17 right)

(g) 放電予備試験⑦

放電予備試験⑦では300V系のEM基板を接続して放電検出回路が正常に動作するかの検証を行った。本試験で使用した回路図を図5.20に示す。

本試験では、放電をKeyence Osc(絶縁オシロスコープ)及び300V系CPUで検出している。Keyence Oscのトリガレベルに関しては2.0~2.5Vまで変化させて試験を行った。この放電試験時はコンパレータに電源電圧5Vを抵抗で分圧した値を入力されていたため放電検出回路のトリガレベルは約2.5Vに設定されていた。また、300V系CPUのモニタリングはPCで行うが、有線で接続するとPCも数百V負に沈み、また放電発生時にノイズも入ってくる可能性があり危険であるので光絶縁型RS232を用いてモニタリングを行っている。

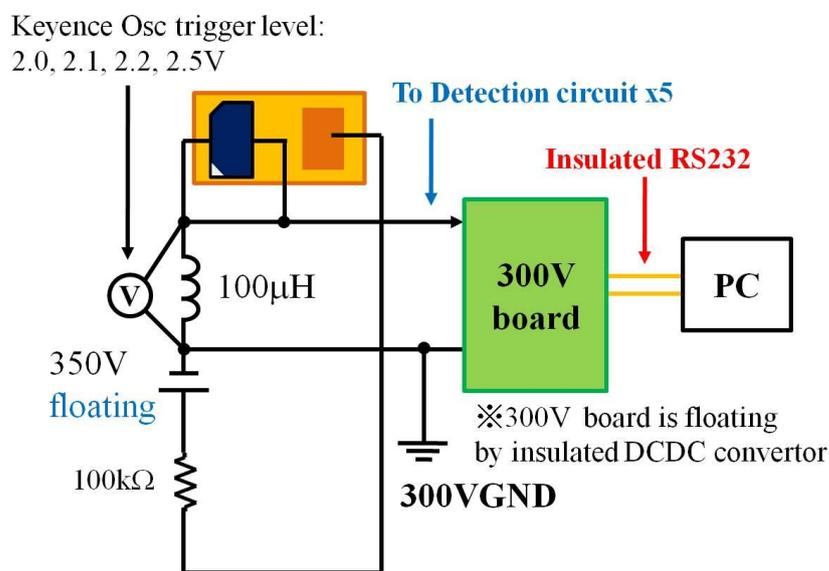


図5.20 試験回路(放電予備試験⑦)

Figure 5.20 Test circuit (Discharge pre-test 7)

表5.3は絶縁オシロスコープ及び放電検出回路での放電取得回数を示したものである。この結果から放電検出回路は正常に放電を取得できており、またトリガレベルは予想よりも若干低く2.0程度であることが分かった。放電検出回路のトリガレベルが予想と異なったのは、電源電圧+5Vの抵抗分圧で設定しており、負荷によって変動するためであると考えられる。このトリガレベルはあまり変動しない方が良いのでFM基板作成時にはリファレンスICを用いて変動しないような設計に変更する必要がある。

図5.21は本試験で得られたインダクタに誘起された電圧波形である。この波形は放電予備試験⑤で得られた放電は系とは異なり振動が少なく、負電圧の方には振動していないことが分かる。これは放電検出回路に過電圧が印加されないようにツェナーダイオードを接続しているためである。よってこの波形は妥当であると考えられる。

表5.3 オシロスコープと放電検出回路の放電回数

Table 5.3 Discharge number acquired by insulated oscilloscope and arc detection circuit

トリガ レベル	Oscの 取得回数	Detection1 の取得回数	Detection2 の取得回数	Detection3 の取得回数	Detection4 の取得回数	Detection5 の取得回数
2.5	48	66	-	-	-	-
2.0	44	44	42	42	42	42
2.2	38	41	41	41	41	41
2.1	43	46	44	44	44	44

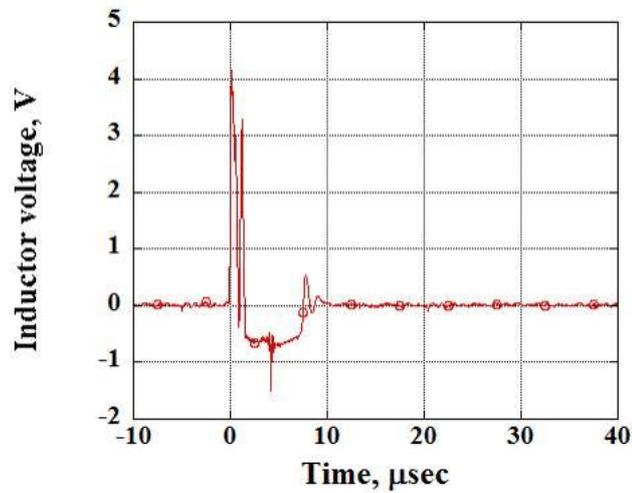


図5.21 インダクタ電圧波形(L=100μH、放電予備試験⑦)

Figure 5.21 Voltage waveform across inductor (L=100μH, Discharge pre-test 7)

### 5.3 300V 発電太陽電池放電試験(EM)

#### (a) 300V 発電太陽電池放電試験①

放電予備試験では特にTJアレイで放電が発生した場合、放電が検出できることを確認したが、300V発電太陽電池で放電が発生した場合は放電検出できることを検証しておらず、また放電電流経路も不明であるために、実際の300V発電回路に放電検出回路を接続して300V発電太陽電池で放電が発生した場合放電検出ができることを確認した。本試験で使用した回路図を図5.22に示す。また、試験では高電圧電源を用いずに300V発電太陽電池を用いチャンバー外からハロゲンランプで光を入れ高電圧発電をしている。発電電圧は約430V程度である。また、太陽電池クーポンに接続されている模擬クーポンを、スイッチをONにすることでバイアスし、放電環境になっていることを確認してから試験を行った。300V発電太陽電池で放電が発生しやすいように太陽電池アレイの裏面のトリプルジャンクションをむき出しにした状態で放電試験は行っている。

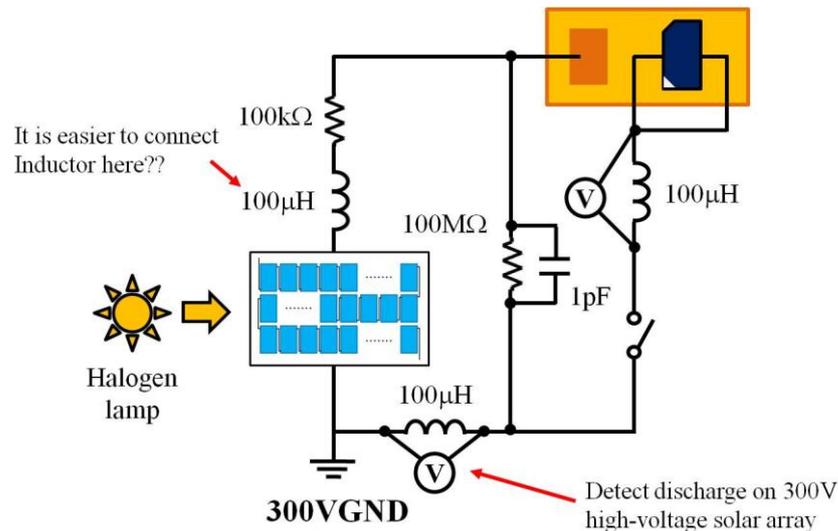


図5.22 試験回路(300V発電太陽電池放電試験、EM)

Figure 5.22 Test circuit (Discharge test on 300V high-voltage solar array, EM)

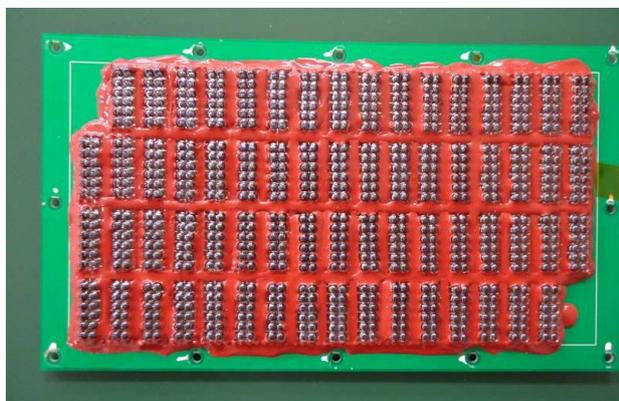
放電が発生する箇所を300V発電太陽電池にのみ限定(模擬クーポンをバイアスしない)して放電試験を行った結果、放電が発生した時には図5.16のような放電波形が得られ、300V発電太陽電池でも放電検出が可能であることが分かった。

※300V発電太陽電池のアノードに接続されている100μHのインダクタがあった方が、300V発電太陽電池で放電が発生した時より放電検出しやすかった

#### (b) 300V 発電太陽電池放電試験②

300V発電太陽電池放電試験①では、300V発電太陽電池で放電が発生した場合放電検出できることを確認したが、実際は300V発電太陽電池で放電を発生しないようにして

打ち上げる必要がある。そのため300V発電太陽電池は図5.23上図のようにRTV接着剤により金属露出部分を覆って放電対策を行っている。太陽電池の裏面に関しては図5.23下図のようにポリイミドテープで覆って放電が発生しないように対策を行っている。本試験で使用した回路図は図5.22と同様である。



表面



裏面

図5.23 300V発電太陽電池の放電対策

Figure 5.23 Discharge measure of 300V high-voltage solar array

300V発電太陽電池放電試験①と異なる点は図5.23下図のように太陽電池をポリイミドテープで覆って放電対策をとっている点のみである。

試験結果としては発電電圧430Vで、3時間で程度放電試験を行ったが放電は1度も観測されなかった。また、この試験で使用した300V発電太陽電池は、外板熱サイクル試験、EM熱真空試験、EM振動衝撃試験後のものを使用しておりRTVによる放電対策が打ち上げ時の振動衝撃、軌道上での熱サイクル環境に耐えるものであることが実証できた。

## 5.4 EM 放電試験

EM放電試験では、基板(OBC、電源、底面、300V系のEM基板)をSTM構体の中に入れて試験を行った。構体の外観を図5.24に示す。本試験ではTJアレイは使用せずに模擬クーポンを使用してどのクーポンでも放電が発生すれば放電が検出できることを確認することになっている。また、プラズマが構体内部に入って内部放電が発生しないように穴はできるだけアルミテープまたはポリイミドテープで覆って試験を行った。

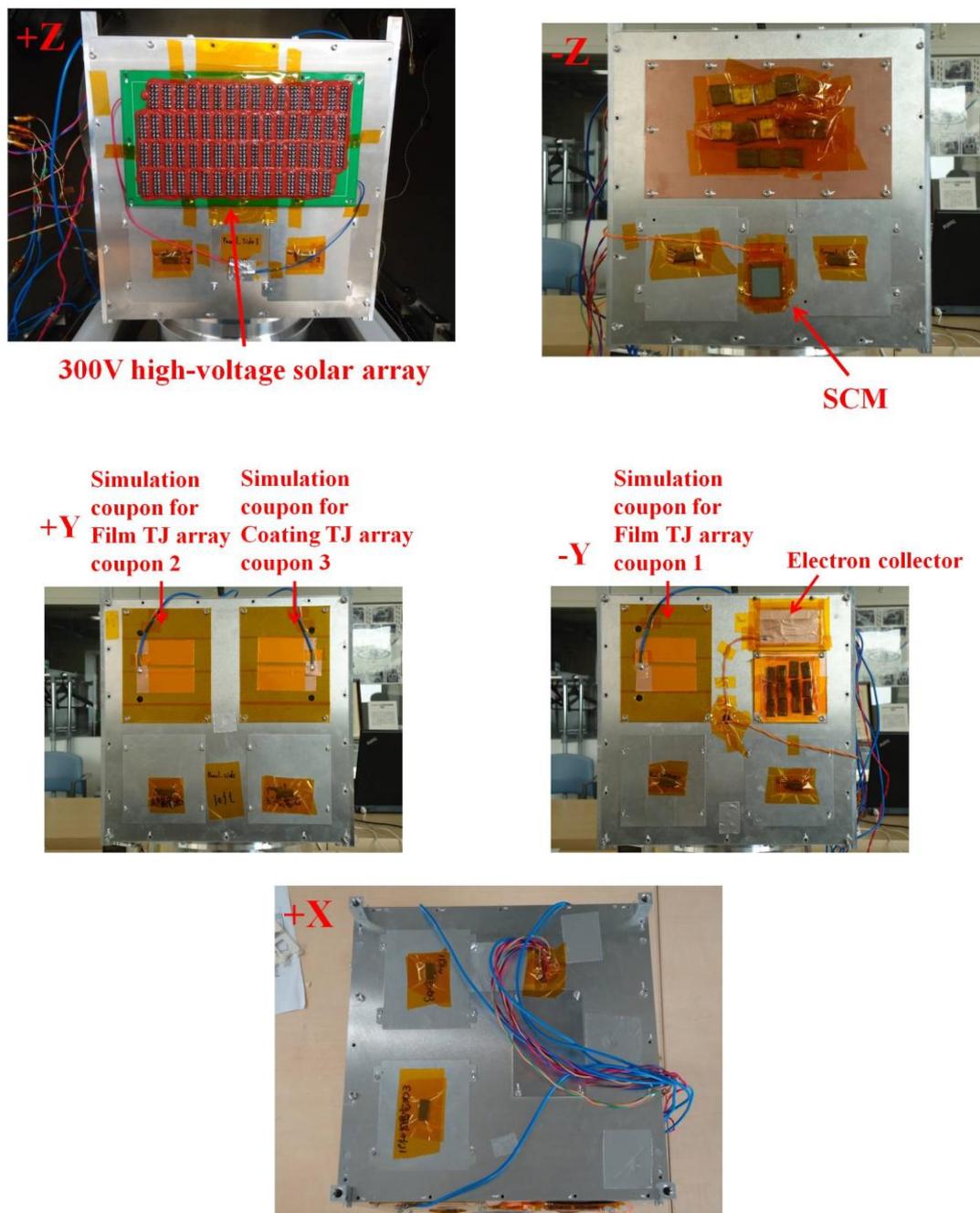


図5.24 EM放電試験時の構体の外観

Figure 5.24 Overview of structure in EM discharge test

本試験で使用した回路図を図5.25に示す。本試験では高電圧電源を用いずに300V発電太陽電池を用いチャンバー外からハロゲンランプで光を入れ高電圧発電をしている。発電電圧は最大でも約350V程度であり、ツェナーダイオードにより制限される。回路系は全て絶縁トランスにより浮いた状態で放電試験を行っている。また、OBCのMain-H8と300V系CPUのモニタリングを、光絶縁型RS232を介して行っている。放電の検出は放電検出回路x3を介して300V系PICのモニタリングによって確認することができるが、外部に模擬クーポンの配線を出して絶縁オシロスコープでも確認できるようにしている。300V系基板に搭載されている検出素子は抵抗が搭載されているので、外部に検出用インダクタ100 $\mu$ Hを用意して検出を行った。

300V系CPUのプログラム内容は1秒サンプリングで放電回数を表示するプログラムになっており、Main-H8については”Hello Horyu!!”が1秒間隔で表示される簡単なプログラムになっている。

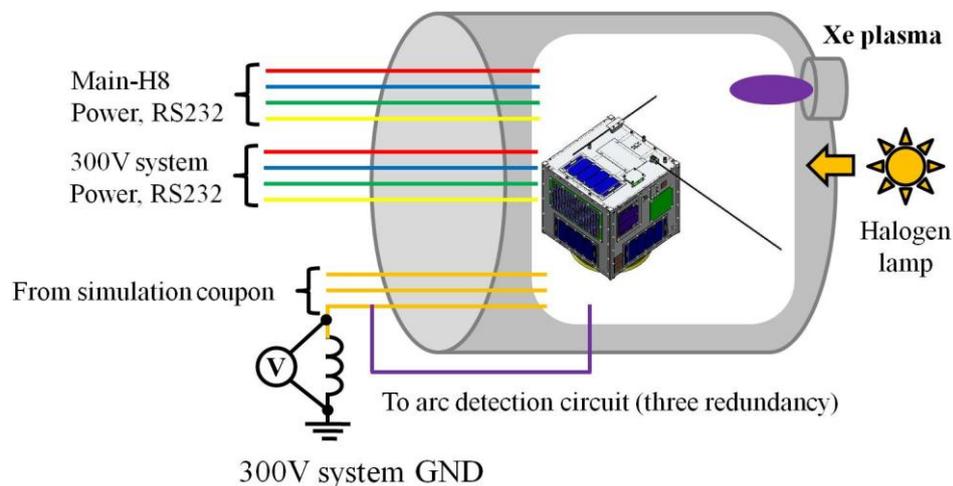


図5.25 試験回路(EM放電試験)

Figure 5.25 Test circuit (EM discharge test)

本試験では300V発電太陽電池にて350Vの発電を行って試験を行った。SCMによって測定した電位は約330V程度であり、300V系が発電電圧程度負に沈み、放電環境になっていることが確認できた。

今回は3つの模擬クーポンを使用してそれぞれのクーポンをバイアスし、放電検出できることを確認したが、問題なく検出できた。検出回路での取得数に関しては1秒間に複数回放電が起きる場合が多々見られ絶縁オシロスコープによる取得数よりも少ない数になっている(表5.4)。

試験は最大で30minを予定していたが、規模の大きな放電が発生すると300V系CPUが暴走する現象が見られた。ただし、バスシステムのMain-H8が暴走したり、誤動作したりす

ることはなかったなのでバス系統への影響はないと考えられる。

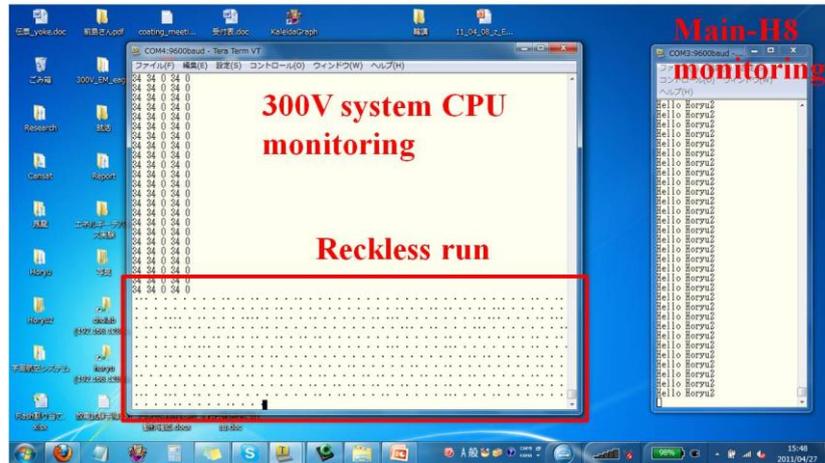
表5.4 EM放電試験結果

Table 5.4 EM discharge test results

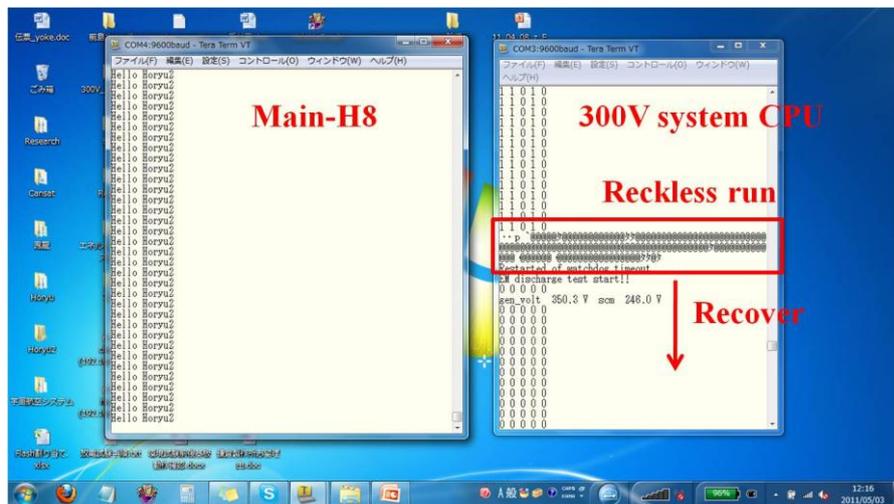
試験時間[min]	Coupon	Main-H8	300V系CPU	Osc取得数	検出回路取得数
30	1	○	○	34	54
10	1	○	×	9	10
7	1	○	×	31	69
1	1	○	×	4	6
1	2	○	×	49	46
2	3	○	×	16	18

※Main-H8及び300V系CPUの欄は○が正常動作、×が暴走を意味している

比較的大きな規模の放電が発生したら300V系CPUが暴走することが観測された(図5.26上図)が、CPUにWDT(暴走検知)を実装すれば暴走しても復帰できると考え、WDTを実装して再度放電試験を行って検証した。結果としては、図5.26下図のように暴走しても数秒後には復帰できることが確認できた。また、消費電流は正常時は300mAであり、暴走時450mAであるが、WDTにより復帰した後は正常時の300mAになったことから正常に復帰できていることが消費電流からも分かる。



暴走



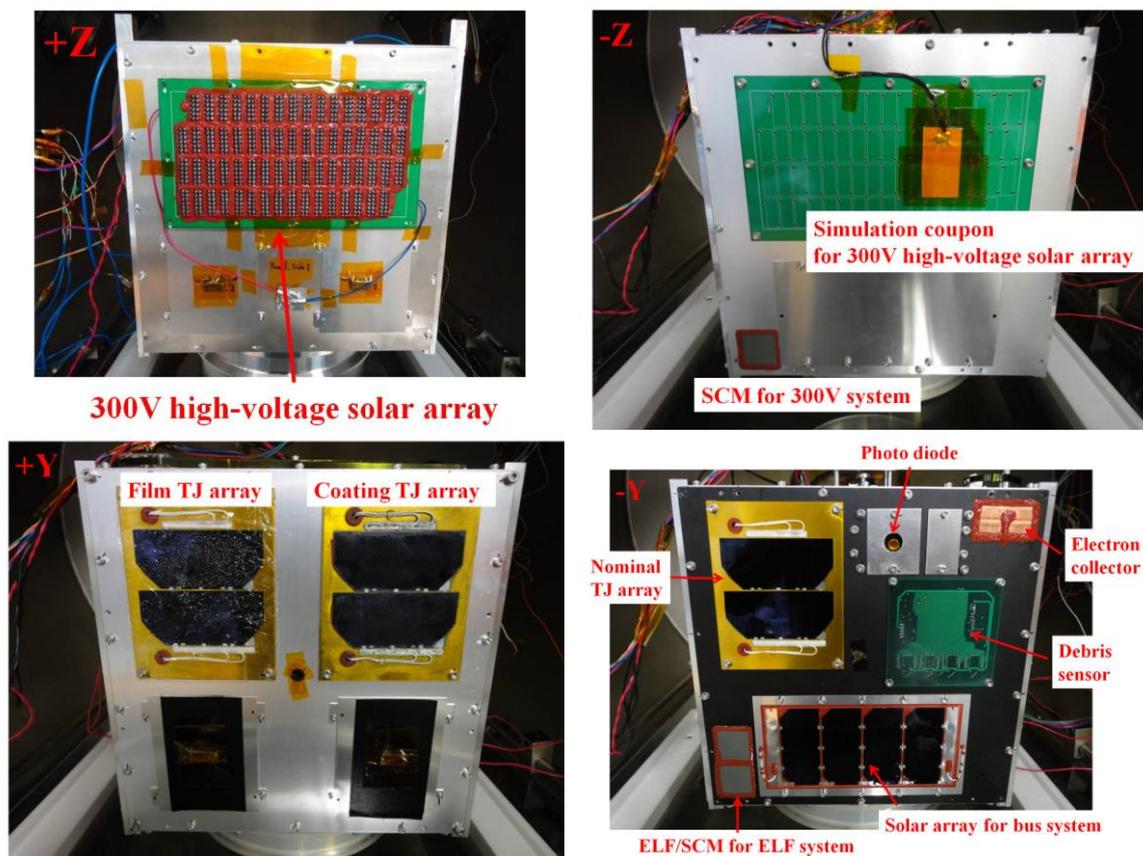
WDTによる復帰

図5.26 300V系CPUの暴走とWDTによる復帰

Figure 5.26 Malfunction due to discharge of 300V CPU and recover by WDT

## 5.5 EM 放電試験 (2回目)

本試験は今まで開発してきたペイロードで、正常に軌道上で放電試験を行うことができることを評価する試験である。本試験では、基板(バス系はEM\_v3、300V系はEM\_v2)をEM構体の中に入れて試験を行った。300V発電太陽電池に及びTJアレイに関してはEMを使用している。構体の外観を図5.27に示す。本試験では、300V発電太陽電池にて放電が発生した場合、放電を正常に検出できることを確認しなければならないが、300V発電太陽電池では放電が起こらないように金属露出部分をRTV接着剤で覆っているため正常動作の確認ができない。そのため、図5.28のように模擬クーポンを接続して、300V発電太陽電池での放電発生を模擬して放電検出回路の正常動作を確認した。また、プラズマが構体内部に入って内部放電が発生しないように穴はできるだけポリイミドテープで覆って試験を行った。



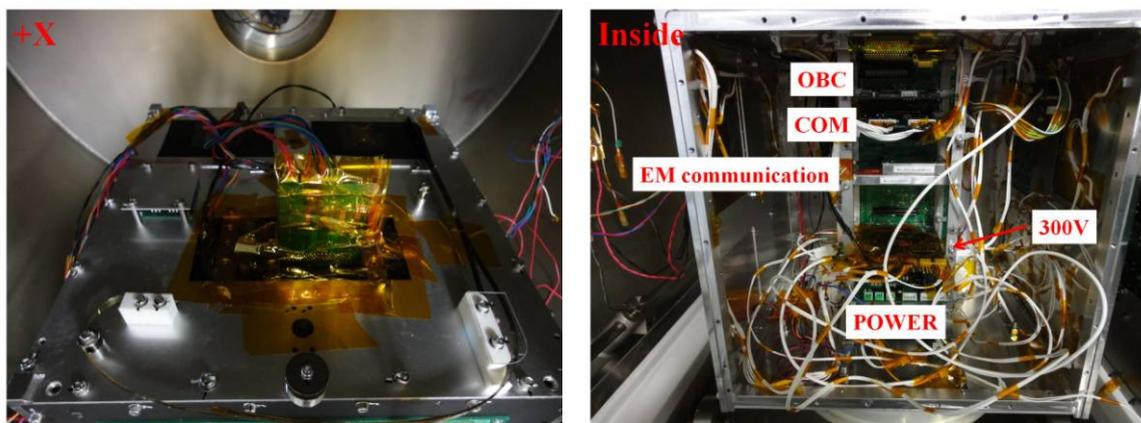


図5.27 EM放電試験(2回目)の構体の外観

Figure 5.27 Overview of structure in EM discharge test 2

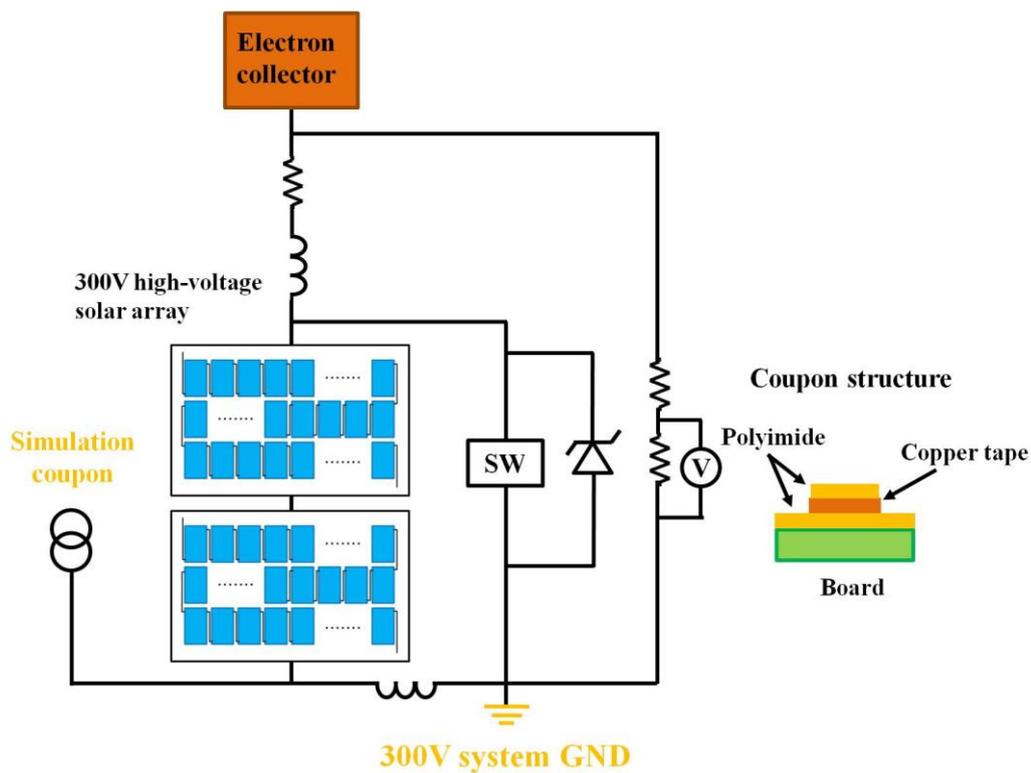


図5.28 300V発電太陽電池用模擬クーポンの接続と構造

Figure 5.28 Connection and structure of simulation coupon for 300V high-voltage solar array

衛星構体の向きとハロゲンランプ及びプラズマ源の位置を図5.29に示す。この図はチャンバーを上から見た図である。

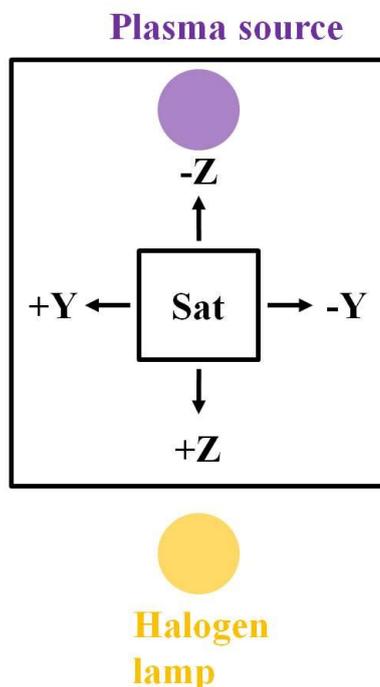


図5.29 衛星の向きとハロゲンランプとプラズマ源の位置

Figure 5.29 Attitude of satellite and place of halogen lamp and plasma source

本試験で使用した回路図を図5.30に示す。本試験では高電圧電源を用いずに300V発電太陽電池を用いチャンバー外からハロゲンランプで光を入れ高電圧発電をしている。発電電圧は最大でも約350V程度であり、ツェナーダイオードにより制限される。回路系は全て絶縁トランスにより浮いた状態で放電試験を行っている。また、OBCのMain-H8、COM-H8はRS232でモニタリング、300V系CPUは光絶縁型RS232を介してモニタリング、CWはトランシーバでモニタリングしている。放電の検出は放電検出回路を介して300V系CPUのモニタリングによって確認することができるが、外部にTJアレイ端子の配線を出して絶縁オシロスコープでも確認できるようにしている。

ソフトウェアに関して、COM-H8及びCOM-PICはほぼ同様のソフトウェアを使用しており、Main-H8は300V系CPUとのソフトウェアインターフェースをフライトソフトウェアと同様のソフトウェアを使用している。また300V系CPUに関しては、CPUの瞬停に対する対策を施していないソフトウェアで試験が開始された。その他のソフトウェアはフライトとほぼ同様なものである。

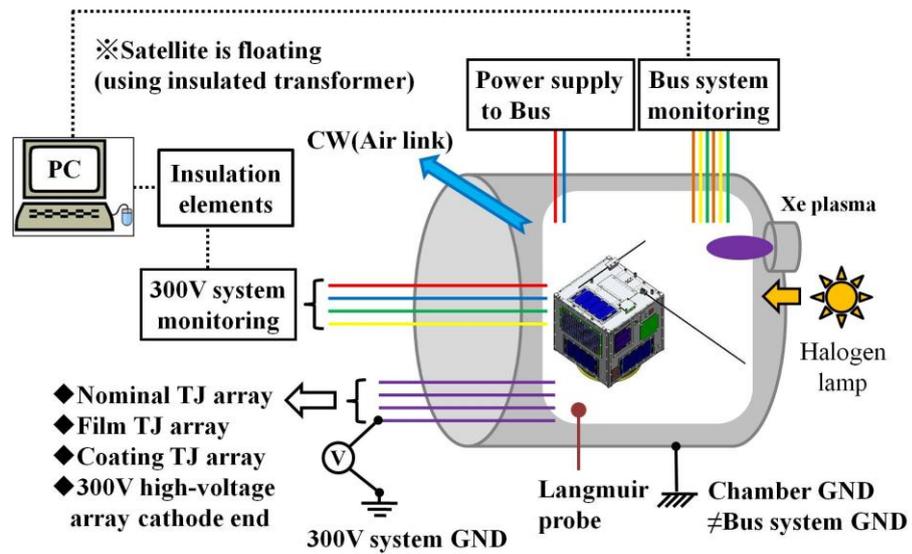


図5.30 試験回路(EM放電試験2回目)  
Figure 5.30 Test circuit (EM discharge test 2)

(a) 真空試験①

プラズマ試験及び放電試験を行う前に、バス系及び300系が長期間正常動作することを確認する試験を真空で行った。結果としては、バス系に関しては全て正常に動作していたが、300V系の放電検出回路に不具合が確認された。

不具合は放電環境になっていないにもかかわらず放電検出回路が動作している点である。300V系CPUをモニタリングして得られた結果を図5.31に示す。1000～1500secの間に2回放電検出回路が動作していることが確認できる。これは放電検出にインダクタを用いているためである。微小電流ノイズでも、ある程度高周波であればインダクタにトリガレベルである3.0V以上の電圧が出てもおかしくない。この試験ではインダクタは100 $\mu$ Hを使用している。

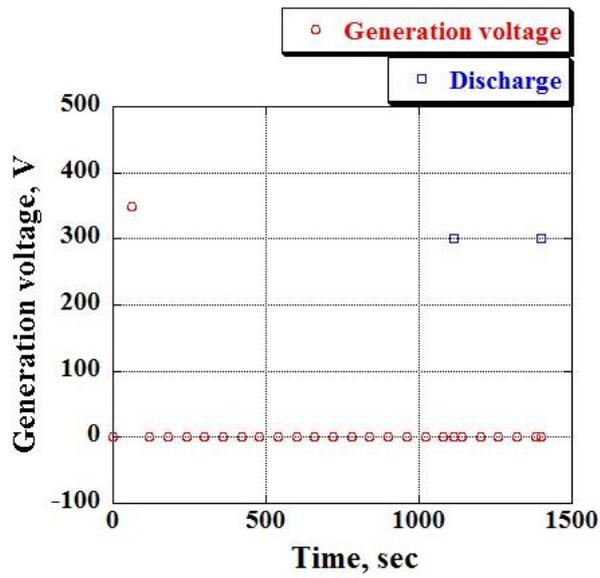


図5.31 放電検出回路の不具合

Figure 5.31 Malfunction of arc detection circuit

(b) 真空試験②

真空試験①において放電検出回路の不具合が見られたので、対策として放電検出用インダクタを100 $\mu$ Hから22 $\mu$ Hに変更して再度真空試験を行った。試験結果を図5.32に示す。

結果としてはノイズによる放電検出回路の動作は確認されなくなった。この試験をこの後、6回(1回当たり60min)行ったが、不具合は確認されなかった。

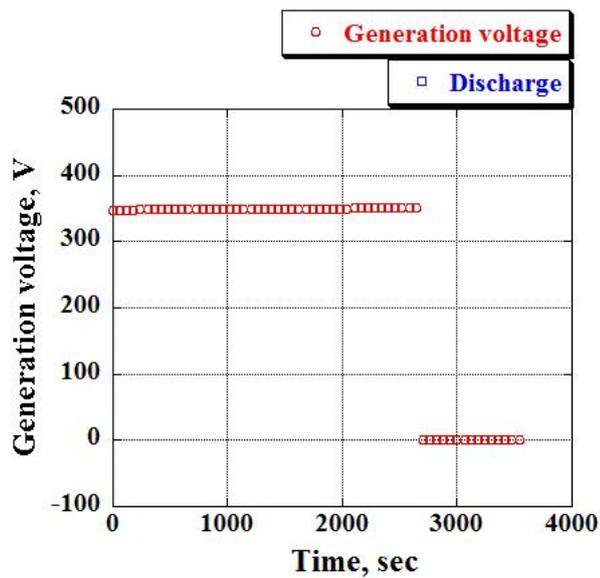


図5.23 真空試験結果

Figure 5.23 Vacuum test result

放電検出回路が動作する原因として、300V発電太陽電池の急激な発電も考えられるが、ハロゲンランプで光を急に照射する試験を数十回行ったが、これにより放電検出回路が動作することは確認されなかった。

(c) プラズマ試験

放電試験を行う前に、バス系及び300V系がプラズマ環境において正常に動作することを確認する試験を行った。この試験ではプラズマを投入しているため300V系では放電環境にならないように発電は行っていない。試験結果を図5.33に示す。結果としては試験を6回(1回当たり60min)行ったが、バス系、300V系共に正常動作していることを確認できた。真空試験で発生した放電検出回路の不具合も確認されなかった。

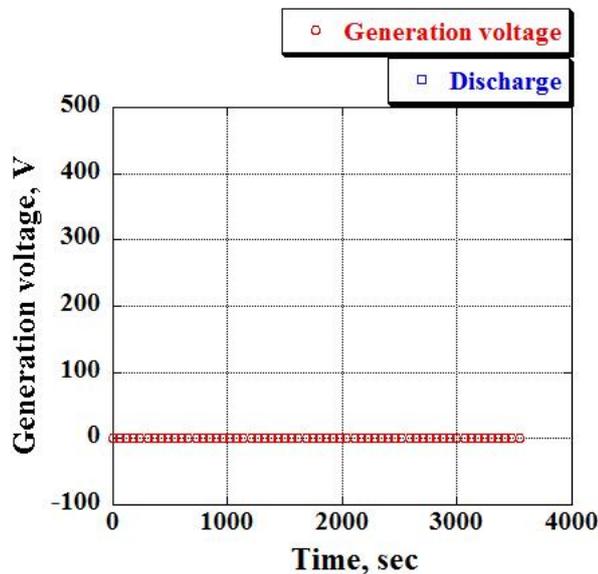


図5.33 プラズマ試験結果

Figure 5.33 Plasma test result

(d) 放電試験(300V発電モード)①

300V発電モードで放電試験を行った。300V発電モードは300V発電太陽電池にて高電圧発電を行い、300V発電太陽電池を放電環境にするモードである。TJアレイはいずれもバイアスせず300V系に対して浮いている状態でプラズマ電位程度であるので放電環境にはなっていない。

300V発電太陽電池または模擬クーポンにて放電が発生したことを絶縁オシロスコープで確認したと同時に300V系CPUでも放電検出が行われた。このことから300V発電太陽電池の放電検出回路は正常に動作していることが確認された。しかし、放電検出開始直後に不具合が確認された。300V系CPUのモニタリングを以下に示す。

//モニタリング開始

Discharge test on 300V generation cell

0,0,0,108,36,0,0

1,0,0,109,105,70,0

1,14,1,109,106,75,0

1,16,1,109,106,75,0

1,35,1,110,107,75,0

2,0,0,110,107,76,0

300V Flight Model

Discharge test on 300V generation cell //300V系CPUの瞬停

0,0,0,110,77,69,0

1,0,0,111,106,73,0

1,23,1,111,103,72,0

2,0,0,111,106,72,0

300V Flight Model

Discharge test on 300V generation cell /300V系CPUの瞬停

0,0,0,111,76,68,0

//モニタリング終了

放電試験開始直後は” Discharge test on 300V generation cell”が表示されて、その後発電電圧や電位の計測などが行われ、表示される。また、PICが放電により暴走した時は” Restarted of watchdog timeout”が表示され、その後に” Discharge test on 300V generation cell”が表示されるようなプログラムになっている。しかし、今回の試験では” Restarted of watchdog timeout”が表示されずに、” Discharge test on 300V generation cell”のみが表示されている。これは暴走による電源ONではなく、電源がOFFになり再度電源ONになったためである。

この現象はEM放電試験(1回目)時には発生しなかった。理由としては、EM放電試験時には図2.3に示しているような電力供給ラインのスイッチを使用せずに、直接電力を供給していたからである。このスイッチは過電流防止回路を備えたスイッチなので放電により過電流が発生したか、あるいは過電流を検知するラインに放電によるノイズが乗ったことでスイッチが一瞬OFFになったと考えられる。

このようなCPUの瞬停が発生するとフラッシュの保存先アドレスはCPUのRAMに保存されるためリセットされ、前に保存したデータを上書き保存することになる。フラッ

シュの仕様上、上書き保存すると前のデータとの論理和が保存されてしまうためにデータが壊れてしまう。この問題を解決するために、通常ON時、瞬停、WDTによる再起動のいずれの場合においてもフラッシュデータからONになる前の状態を読み取りどこまでデータを保存したかを検索してから試験を開始するプログラムに変更した。

(e) 放電試験(TJアレイモード)②

放電試験(300V発電モード)①において、簡易的ではあるが300V発電太陽電池にて放電が発生した場合、放電検出回路にて放電検出できることを確認できたので、300V発電太陽電池用の模擬クーポンをポリイミドで覆い、放電が発生しないような条件に変更して放電試験を行った。今回の放電試験はノミナルTJアレイをバイアスするモードで放電試験を行った。

太陽電池のトリプルジャンクションは全て覆ってあるので、この試験条件下では放電が発生しないはずだが、放電が数多く確認された。原因として考えられるのは、300V発電太陽電池のRTV接着剤が剥がれ、金属が露出していること、その他金属露出部があること(例えばフランジ、300V系のラインをフランジに接続しているため)、プラズマが衛星構体内部に入ってきて内部放電が発生していることが挙げられる。

1つ目の原因として挙げた300V発電太陽電池での放電であるが、これは絶縁オシロスコープによる放電波形のモニタリングにより排除することができる(図8)。なぜなら、300V発電太陽電池にて放電が発生すれば300V発電太陽電池用インダクタの電圧は立ち上がり、同時にTJセル用のインダクタの電圧は立ち下がり逆位相になるはずであるが、今回得られた波形は同位相波形であるためである。

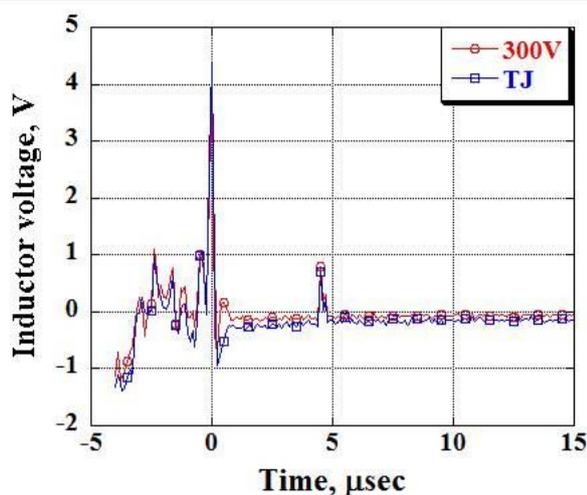


図5.34 不具合発生時の放電波形

Figure 5.34 Discharge waveform when malfunction occurs

2つ目の原因として挙げたその他の金属露出部分であるが、衛星表面を見渡しても、フランジ部分を見ても300V系で金属が露出している部分は確認されなかった。

3つ目の原因として挙げている内部放電であるが、この対策として衛星パネルに開けられている比較的大きな穴にはポリイミドテープを貼ってプラズマが衛星構体内に入らないようにしたが、この対策では問題は解消されなかった。さらに、対策として内部の300V系基板(照度計基板を含む)をポリイミドテープで覆ったところ、放電検出回路が誤動作しなくなった。原因としては現在のところ300V系基板の放電(内部放電)と考えているが、詳細な原因究明の必要がある。フライト品を納入するまでに放電試験をする時間がないために、フライト用の基板はポリイミドフィルムで覆ってから搭載することに決定した

(f) 放電試験(300V発電モード)③

今回の放電試験のコンフィグレーションは300V発電太陽電池用模擬クーポンを覆った場合と覆ってない場合の2つ条件で試験を行った。試験モードは300V発電モードで、内部の300V基板はポリイミドテープで覆っている。

図5.35, 37は300V系CPUをモニタリングして得られた結果であり、図5.36, 38は試験後にフラッシュを読み取り解析して得られた結果である。

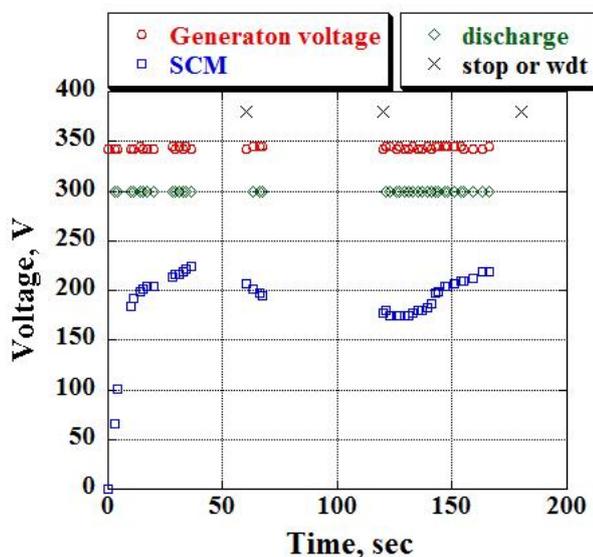


図5.35 モニタリング(模擬クーポンをポリイミドで覆っていない場合)  
Figure 5.35 Monitoring result (simulation coupon is not covered with polyimide)

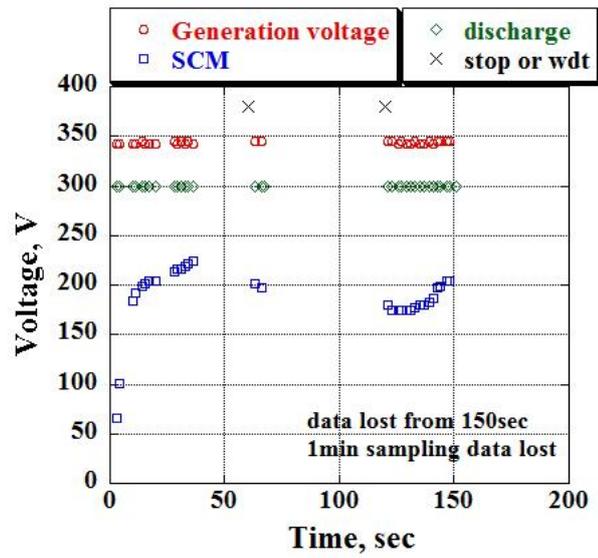


図5.36 フラッシュデータ(模擬クーポンをポリイミドで覆っていない場合)  
 Figure 5.36 Flash data result (simulation coupon is not covered with polyimide)

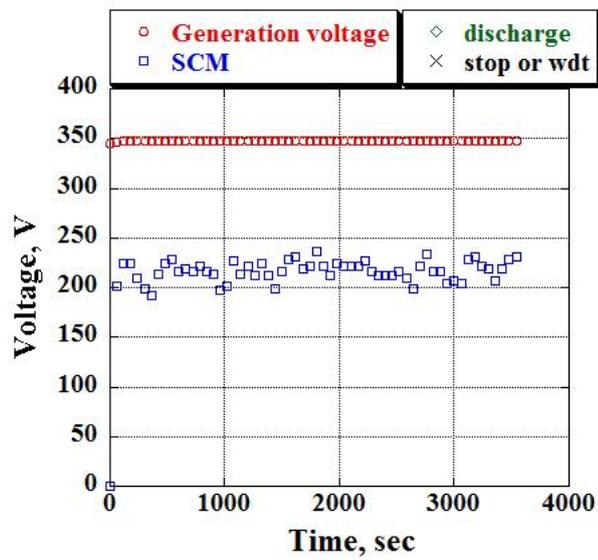


図5.37 モニタリング(模擬クーポンをポリイミドで覆っている場合)  
 Figure 5.37 Monitoring result (simulation coupon is covered with polyimide)

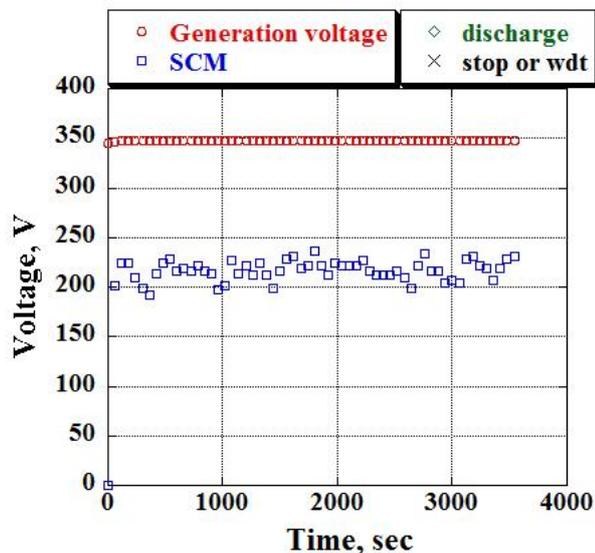


図5.38 フラッシュデータ(模擬クーポンをポリイミドで覆っている場合)  
 Figure 5.38 Flash data result (simulation coupon is covered with polyimide)

得られたデータ、モニタリングによるデータとフラッシュに保存されたデータを比べるとほぼ一致していることが確認できた。ただし、模擬クーポンをポリイミドで覆っていない場合ではフラッシュデータに一部破損が確認された。これはフラッシュ書き込み中に放電ノイズがSPI通信ラインに乗り、保存先アドレスが正常に伝わらなかったことが原因であると考えている。プログラムミスが原因の可能性もあるので、ソフトウェア検証試験(第7章参照)にて図5.35に示されている放電やCPUの瞬停、暴走を模擬してフラッシュデータを確認したところ不具合は観測されなかった。よって原因は放電ノイズと考えられる。また、保存先アドレスが正常に伝わらない可能性を考慮して上書き保存ができないような対策をプログラムで施した。

モニタリングデータ及びフラッシュデータからも分かるように、発電電圧や電位の測定も適切に行われていることが確認できた。また、放電発生時300V系CPUがたまに瞬停、暴走することがあるが、Main-H8やCOM-H8の誤動作やCWが停止することはなかった。よって、バス系統へ影響を与えることなく放電試験を行うことができると考えられる。

300V発電太陽電池の模擬クーポンにて発生した放電波形を図5.39に示す。この波形は1回目のEM放電試験で得られた波形と同様である。300V系CPUで放電検出が表示された際に、絶縁オシロスコープでも同時に放電波形を取得することができた。よって放電検出回路は正常に動作していることを確認できた。放電電流経路としては図2.2上図であると考えられる。

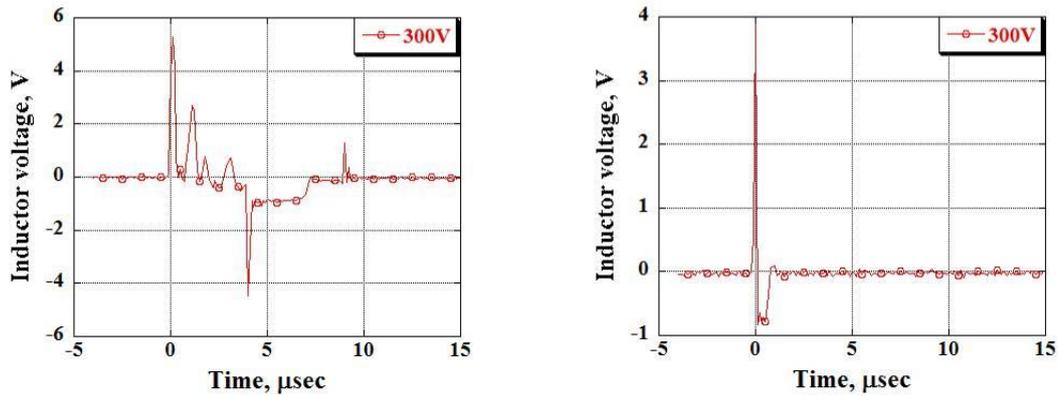


図5.39 300V発電太陽電池の模擬クーポンで放電が発生した時の放電波形

Figure 5.39 Discharge waveform when arc occurs on simulation coupon for high-voltage array

(g) 放電試験(TJセルモード)④及び放電抑制効果検証試験

今回の試験のコンフィギュレーションは300V発電太陽電池用の模擬クーポンをポリイミドテープで覆い、かつ内部の300V基板をポリイミドテープで覆って試験を行っている。試験モードはTJアレイをバイアスするモードで、ノミナルTJセル、フィルムTJアレイ、コーティングTJアレイの3つのTJアレイを個別にバイアスをして試験を行った。また、この試験ではフィルム及びコーティングによる放電抑制の効果を検証する試験も兼ねている。

300V系CPUをモニタリングして得られた結果と試験後にフラッシュを読み取り解析して得られた結果を以下に示す。

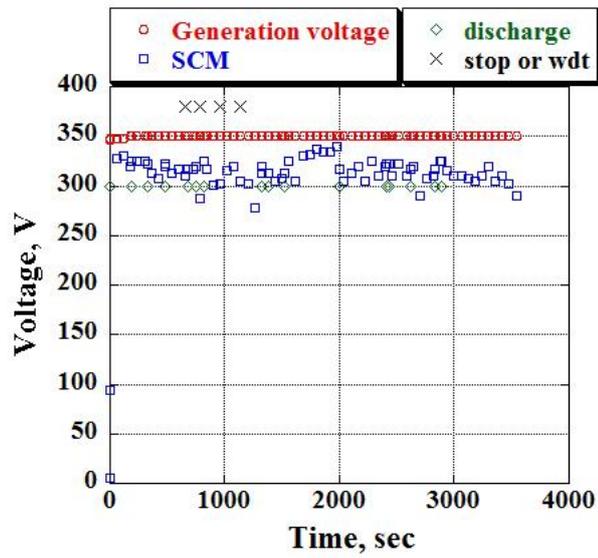


図5.40 モニタリング(ノミナルTJアレイ、1回目)  
 Figure 5.40 Monitoring result (Nominal TJ array 1)

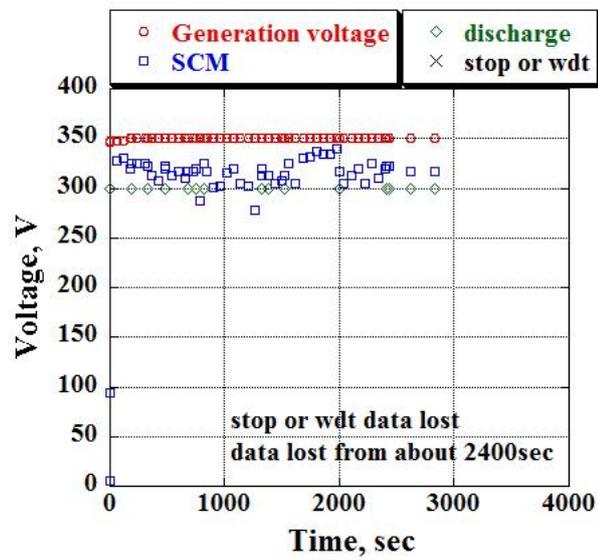


図5.41 フラッシュデータ(ノミナルTJアレイ、1回目)  
 Figure 5.41 Flash data result (Nominal TJ array 1)

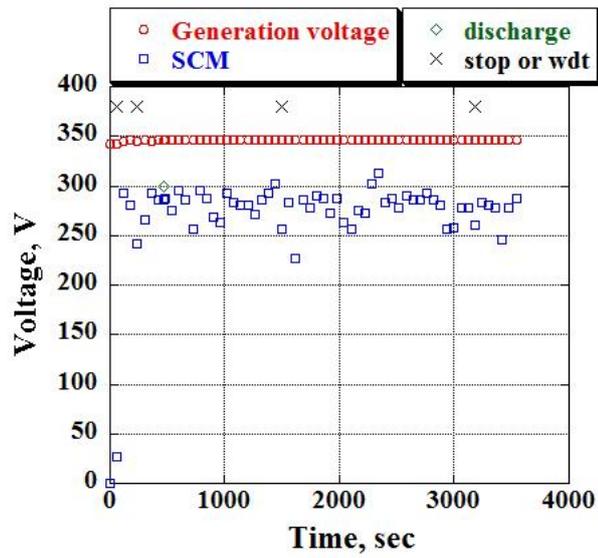


図5.42 モニタリング(ノミナルTJアレイ、2回目)  
 Figure 5.42 Monitoring result (Nominal TJ array 2)

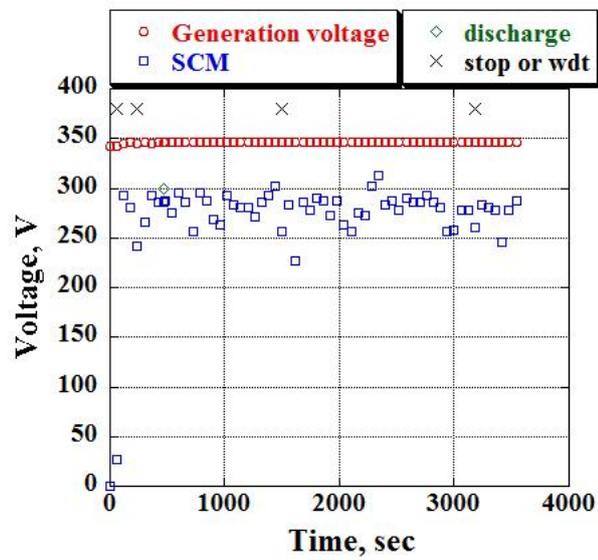


図5.43 フラッシュデータ(ノミナルTJアレイ、2回目)  
 Figure 5.43 Flash data result (Nominal TJ array 2)

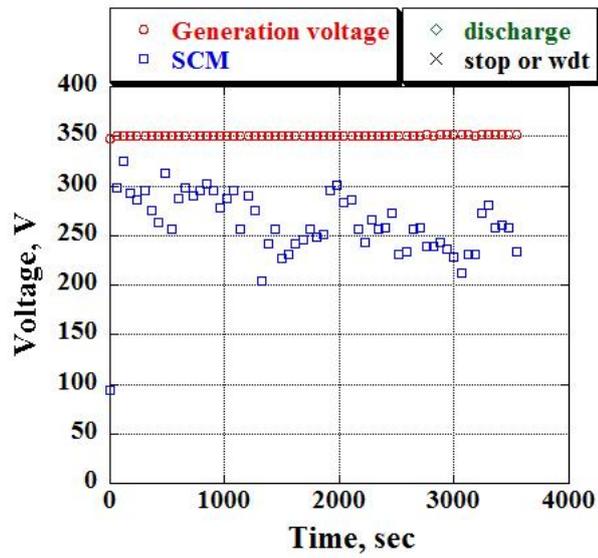


図5.44 モニタリング(フィルムTJアレイ、1回目)  
 Figure 5.44 Monitoring result (Film TJ array 1)

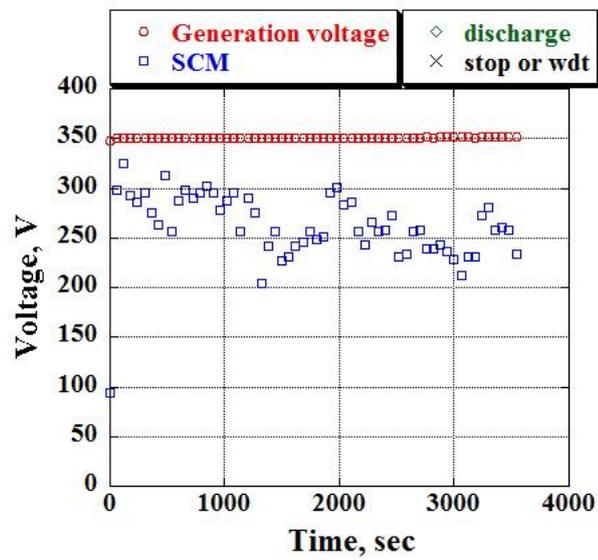


図5.45 フラッシュデータ(フィルムTJアレイ、1回目)  
 Figure 5.45 Flash data result (Film TJ array 1)

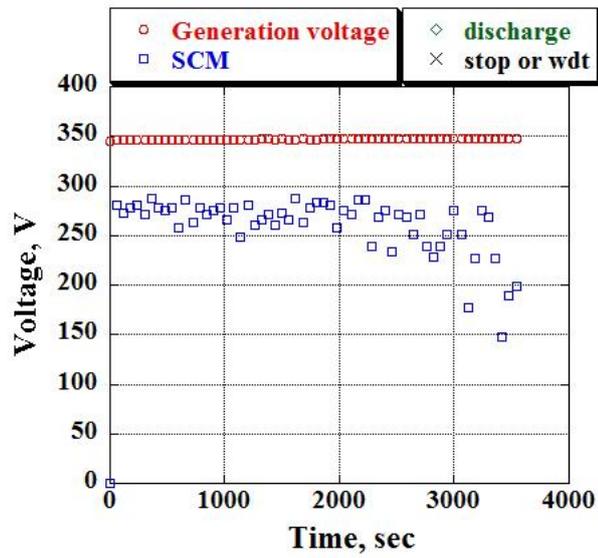


図5.46 モニタリング(フィルムTJアレイ、2回目)  
 Figure 5.46 Monitoring result (Film TJ array 2)

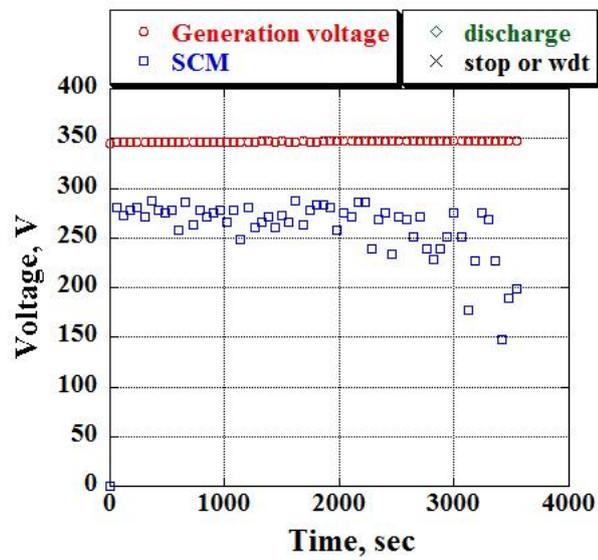


図5.47 フラッシュデータ(フィルムTJアレイ、2回目)  
 Figure 5.47 Flash data result (Film TJ array 2)

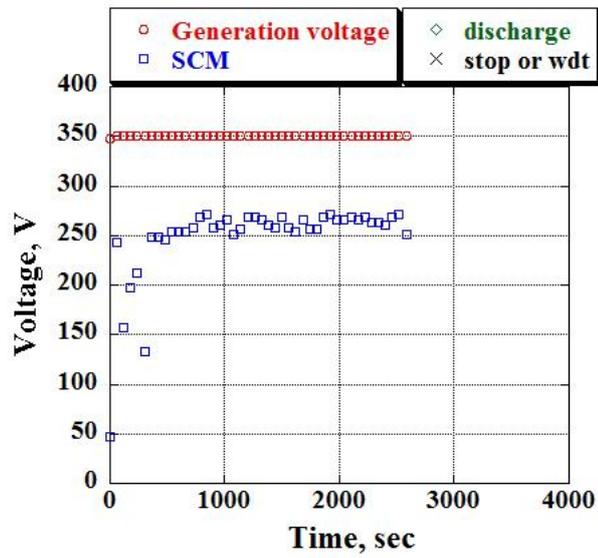


図5.48 モニタリング(コーティングTJアレイ、1回目)  
Figure 5.48 Monitoring result (Coating TJ array 1)

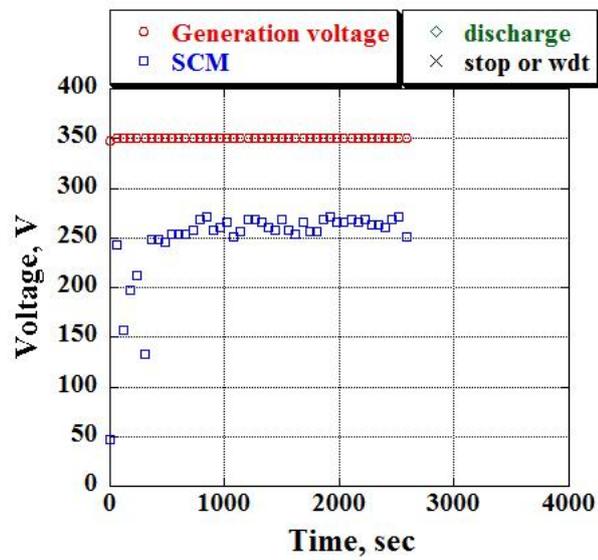


図5.49 フラッシュデータ(コーティングTJアレイ、1回目)  
Figure 5.49 Flash data result (Coating TJ array 1)

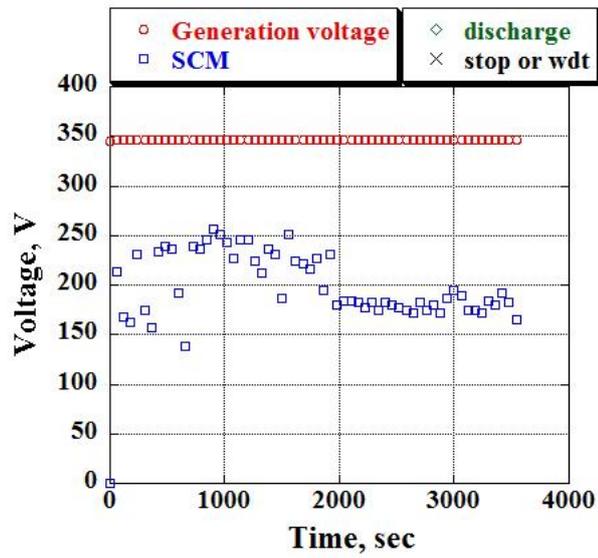


図5.50 モニタリング(コーティングTJアレイ、2回目)  
Figure 5.50 Monitoring result (Coating TJ array 2)

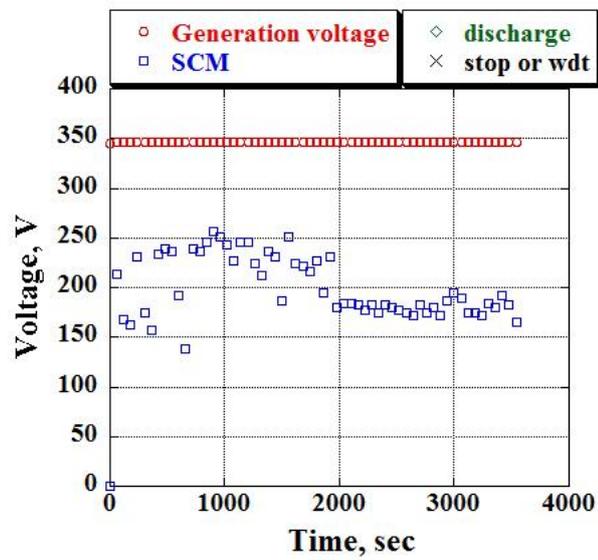


図5.51 フラッシュデータ(コーティングTJアレイ、2回目)  
Figure 5.51 Flash data result (Coating TJ array 2)

得られたデータ、モニタリングによるデータとフラッシュに保存されたデータを比べるとほぼ一致していることが確認できた。ただし、ノミナル TJアレイの1回目の試験ではフラッシュデータに一部破損が確認された。これは(f)放電試験(300V発電モード)③で発生した不具合と同様である。

TJアレイにて発生した放電波形を図5.52に示す。300V系CPUで放電検出が表示された際に、絶縁オシロスコープでも同時に放電波形を取得することができた。この波形は1回目のEM放電試験で得られた波形と同様である。TJアレイで放電が発生しているため、TJアレイ用のインダクタの電圧が立ち上がり、300V発電太陽電池用インダクタの電圧が立ち下がっている。放電波形が逆位相になっているのは放電電流の経路が図2.2下図となっているためであると考えられる。

図5.52右図を詳細に見てみると、300V発電太陽電池用インダクタ電圧及びTJアレイ用インダクタ電圧が共に放電検出回路のトリガレベル3.0Vを越えていることが分かる。このような放電が発生すると300V発電太陽電池用及びTJアレイ用の放電検出回路が共に動作してしまうと考えられ、300V発電太陽電池で放電が発生したのか、TJセルで放電が発生したのか区別することができない。これはEM放電試験時には分かっていたことで、300V発電太陽電池で絶対に放電が発生しないように設計することで解決しているため問題ないと考えられる。

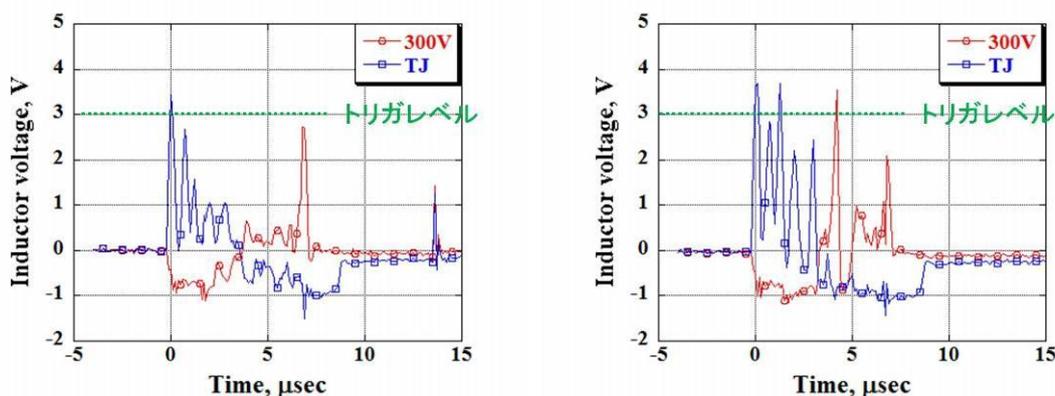


図5.52 ノミナルTJアレイで放電が発生した時の放電波形

Figure 5.52 Discharge waveform when arc occurs on Nominal TJ array

フィルム及びコーティングによる放電抑制効果を表5.5に示す。この結果から分かるようにLEOのプラズマ環境においてフィルム及びコーティングによる放電抑制効果はあると考えられる。ただし、コーティング TJアレイをバイアスした時の試験では電位が他の試験に比べて若干低い。原因についてはコーティングがイオンを収集しているからと考えているが、現在のところ確実な原因は不明である。よって、今後より多くの試験データを取っていく必要があると考えられる。

表5.5 フィルム及びコーティングによる放電抑制効果

Table 5.5 Discharge mitigation effectiveness by ETFE film and semi-conductive coating

	ノミナル TJアレイ	フィルムTJアレイ	コーティング TJアレイ
1回目	20	0	0
2回目	5	0	0

※数字は放電回数を示している(PICの瞬停、暴走を含む)

### 5.6 300V 発電太陽電池放電試験(FM)

300V発電太陽電池放電試験において使用した試験回路は図5.53に示している回路である。また、試験外観を図5.54に示す。

本試験では、300V発電太陽電池(FM)をバイアスし放電試験を行う前に、模擬クーポンをバイアスして放電環境になっていることを確認した。

300V発電太陽電池のコンフィグレーションとしては、太陽電池裏面は素子や半田面が露出しておりプラズマが回り込んできたら放電するので、図5.54のようにポリイミドで覆い裏面で放電が発生しないようにしている。300V発電太陽電池(FM)は2つ用意しており名前をそれぞれ300V\_a, bとした。

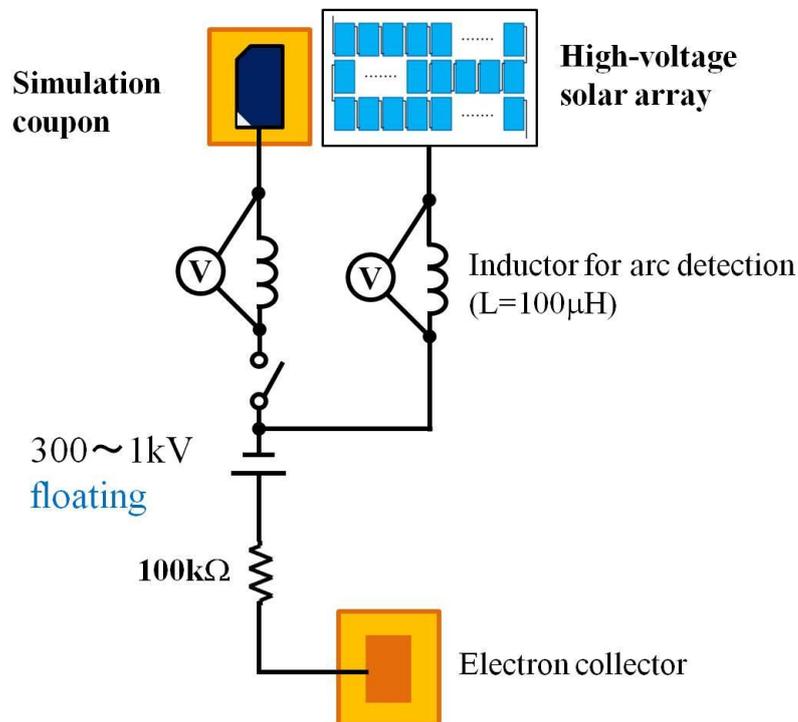
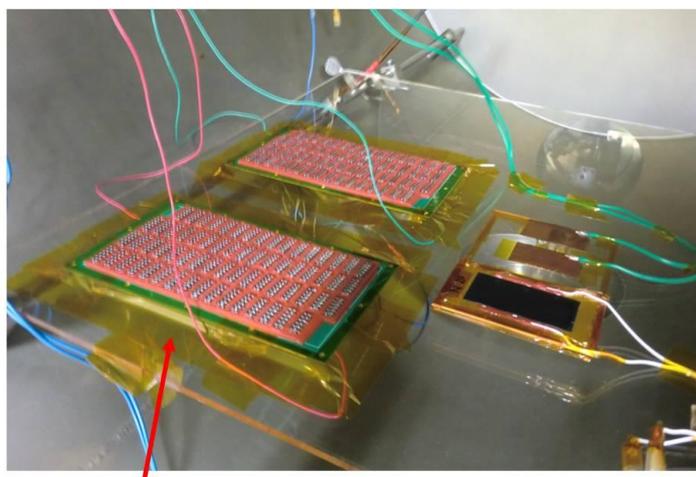
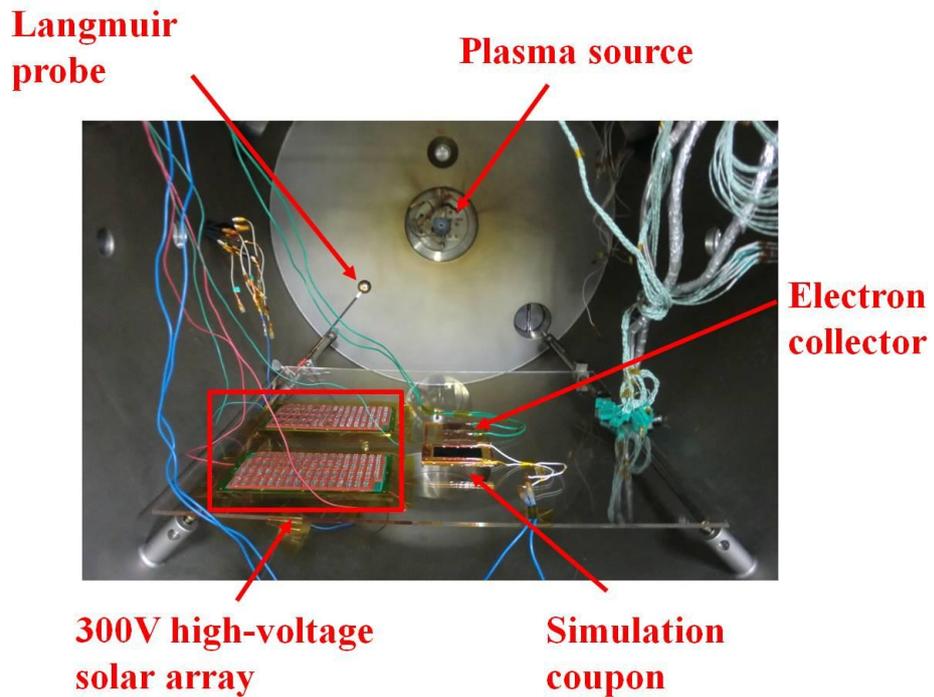


図5.53 試験回路(300V発電太陽電池放電試験、FM)

Figure 5.53 Test circuit (Discharge test on 300V high-voltage solar array, FM)



**Plasma do not flow into back of high-voltage solar array by covering with polyimide**

図5.54 試験外観(300V発電太陽電池放電試験、FM)

Figure 5.54 Test setup (Discharge test on 300V high-voltage solar array, FM)

### 1回目

表5.6に試験内容と試験結果を示す。この表は試験を行った順に上から並べられている。バイアス電圧が700V、500Vのときに太陽電池にて放電が確認されたことから太陽電池のどこかに金属露出部分があることが分かる。ただし、放電発生時に太陽電池に流れ込む放電エネルギーは非常に小さく放電光が見えないため場所の特定はできなかった

た。

バイアス電圧が400Vの時は合計で6時間試験を行ったが放電は確認されなかった。太陽電池の発電能力は350Vで制限されているので、バイアス電圧が400Vのときに長時間にわたって放電が確認されなかったことから十分に要求を満たしていると考えられる。さらに、実際の太陽電池はベーキングされ水分が飛ぶ、プラズマ密度は $10^{12}\text{m}^{-3}$ よりも薄い、放電試験時間が1時間、放電が発生する箇所の大部分は太陽電池の負極端付近なので正極端付近は放電がほとんど発生しない、ということを考慮すれば放電試験中に放電が発生することはほとんど起こり得ない。

以下の試験結果でも要求は十分に満たしているが、さらに信頼性を上げるためにうまく接着されていないと考えられる箇所にRTVを接着し再度放電試験を行った。

表5.6 300V発電太陽電池放電試験結果(1回目、FM)

Table 5.6 Test result of discharge test on 300V high-voltage solar array 1 (FM)

バイアスクーポン	バイアス電圧[V]	試験時間[hour]	放電回数
300V_a, b	700	1	7
300V_a, b	400	1	0
300V_a, b	500	1	2
300V_a, b	400	5	0

## 2回目

表5.7に試験内容と試験結果を示す。この表は試験を行った順に上から並べられている。この試験はクーポンa, b のどちらを負極端に置くかを定める試験も兼ねている(負極端は放電が起きやすいので、放電が発生しにくい方を負極端に置く)。

バイアス電圧を700V、500Vにしたときは1回目の試験よりも放電回数が少なくなっていることからRTVにより放電を抑制できていることを確認できた。しかし、放電が発生しているので金属露出部分はまだあると考えられる。

クーポンa, bを1つずつ700Vバイアスした試験では、300V\_aでは放電が発生されなかったが300\_bでは放電が多数確認された。これは300V\_aでは金属露出部分がなく、300V\_bでは金属露出部分があることを意味している。また、32回と多数の放電が確認されたので放電により金属露出部分が増え放電が起きやすくなったのではないかと考えている。ただし、その後行ったバイアス400Vの試験では6時間放電が発生しなかったので特に問題ないと考えている。

300V\_bは放電が起きやすくなってしまっているため、もう1度RTVで金属露出部分を多い再度放電試験を行った。

表5.7 300V発電太陽電池放電試験結果(2回目、FM)

Table 5.7 Test result of discharge test on 300V high-voltage solar array 2 (FM)

バイアスクーポン	バイアス電圧[V]	試験時間[hour]	放電回数
300V_a, b	700	1	4
300V_a, b	500	1	1
300V_a, b	400	12	0
300V_a	700	2	0
300V_b	700	1	32
300V_a, b	400	6	0

### 3回目

表5.8に試験内容と試験結果を示す。この表は試験を行った順に上から並べられている。300V\_bのみをバイアスした試験では放電が5回確認された。これは前回試験よりも少なくなっていることから放電が起きやすくなった箇所はRTVで覆われていると考えられる。ただし、300V\_bは金属露出部分が存在する。

全試験を通して、300V\_a, b を400Vでバイアスした試験では合計30時間放電が確認されなかったことから要求は十分に満たしている判断した。

表5.8 300V発電太陽電池放電試験結果(3回目、FM)

Table 5.8 Test result of discharge test on 300V high-voltage solar array 3 (FM)

バイアスクーポン	バイアス電圧[V]	試験時間[hour]	放電回数
300V_b	700	1	5
300V_a, b	400	6	0

### 300V発電太陽電池出力電圧測定試験

図5.55に300V発電太陽電池出力電圧測定試験の回路図を示す。光源はハロゲンランプを使用している。光源の照度測定及び太陽電池の温度測定はそれぞれに300V系に搭載されているフォトダイオード、温度センサを使用した。測定対象は放電試験後の300V発電太陽電池(FM)である。

評価基準としては、太陽電池の温度が高温でも1つ当たりの出力電圧が400V以上である、とした。これは太陽電池アレイ1つ当たりの最大出力電圧は約460V(常温)と計算でき、さらに高温では出力電圧がスフェラー太陽電池1個当たり1Vの低下を許容するというものである。試験は温度コントロールをしやすい約70degCで試験を行っている。実際、衛星外板は解析では±Z面は最高最悪の条件で約40degCとなっているが、これはあくまでもパネルの平均温度であり、断熱性能の高いガラエポに搭載されているスフェラーア

レイは局所的に温度が高くなる可能性がある。これを考慮すると、70degCを超える温度になる可能性がある。しかし、安全のために試験は行っていない。

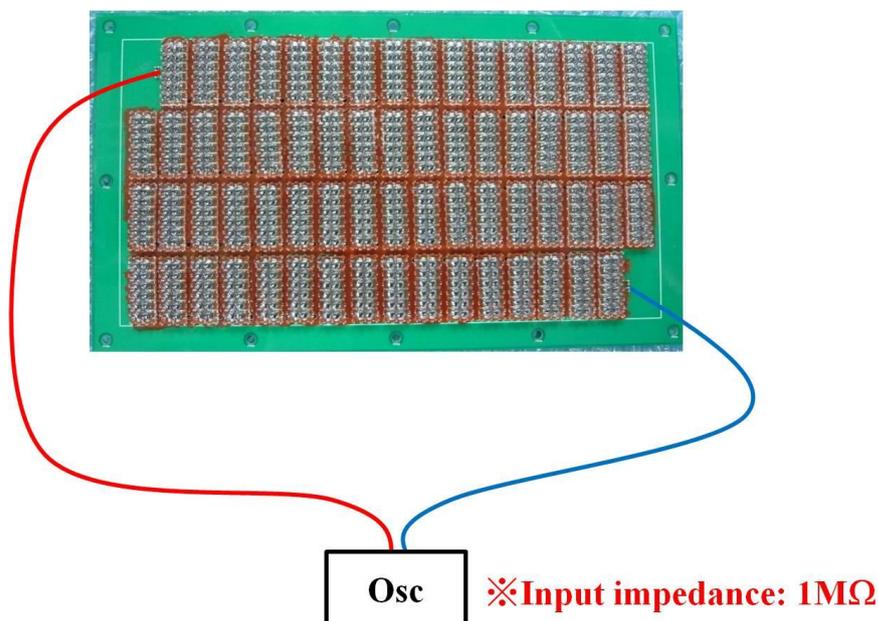


図5.55 300V発電電圧測定の実験回路

Figure 5.55 Test circuit of generation voltage measurement of high-voltage array

照度測定結果としては、出力電圧が1.68Vであった。照度校正試験結果(付録)より照度を見積もると0.6sunという結果であった。0.6sunという条件で要求を満たせば軌道上でも要求を満たすと考えられるので本試験ではこの条件下で試験を行っている。温度を70degCに設定し、約5分間程度太陽電池に光源を照射し温度が定常になるまで待ってから試験を行った。

試験結果を表5.9に示す。結果より、要求の400V以上を満たしていることから十分な設計が行われていると判断した。ただし、太陽電池に太陽光が直接当たると70degCより高い温度になることが予想され結果よりも低い電圧が出力される可能性もある。少なくとも300Vで発電することができればミッションを達成することができる(マージン：120V)ので、ミッション達成には支障はないと判断した。

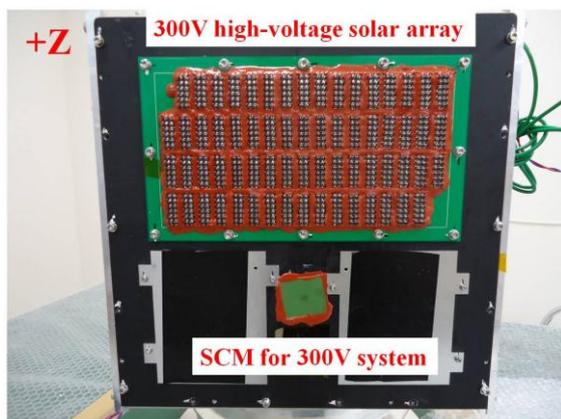
表5.9 300V発電太陽電池出力電圧測定試験結果

Table 5.9 Test result of generation voltage measurement of high-voltage array

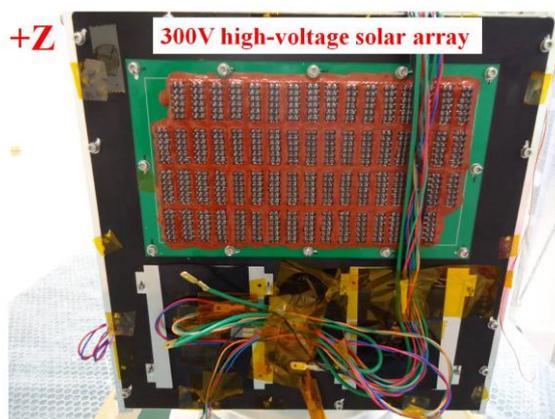
	出力電圧[V]
300V_a	422
300V_b	422

## 5.7 FM 放電試験

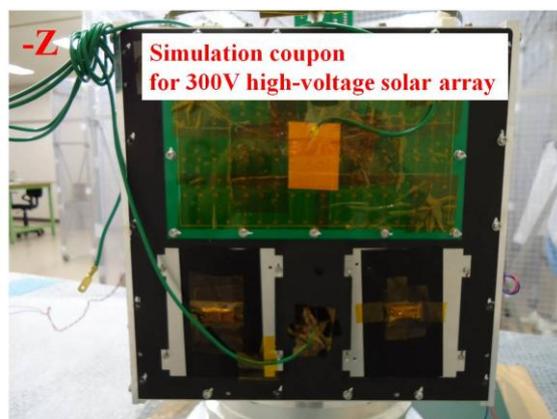
本試験の主な目的は、試験コマンドのアップリンクからペイロードデータのダウンリンク、取得データの解析までの一連の流れをリハーサルすることで、300V系CPU及びOBC、地上局のソフトウェアを検証すると共に、軌道上の放電試験で得られると予測されるデータを蓄積することである。副次的な目的としてEM放電試験(2回目)で発生した300V系基板での内部放電と思われる現象の原因究明を行う。基板(バス系はEM\_v3、300V系はFMのコピー)をEM構体の中に入れて試験を行った。300V発電太陽電池に及び放電抑制型TJアレイに関してはEMを使用し、ノミナルTJアレイには図5.2で示される模擬クーポンを使用している。ただし、コーティングTJアレイに関しては完全に放電が抑制されるようにはコーティングは塗布されていない。構体の外観を図5.56に示す。本試験では、300V発電太陽電池にて放電が発生した場合、放電を正常に検出できることを確認しなければならないが、300V発電太陽電池では放電が起これないように金属露出部分をRTV接着剤で覆っているため正常動作の確認ができない。そのため、図5.28のように模擬クーポンを接続して、300V発電太陽電池での放電発生を模擬して放電検出回路の正常動作を確認した。また、プラズマが構体内部に入って内部放電が発生しないように穴はできるだけポリイミドテープで覆って試験を行った。



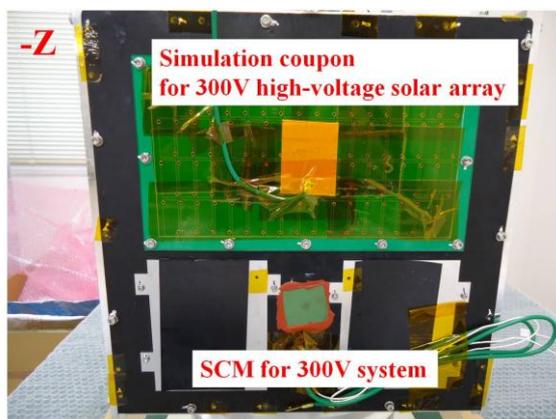
SCM不具合改善前



SCM不具合改善後



SCM不具合改善前



SCM不具合改善後

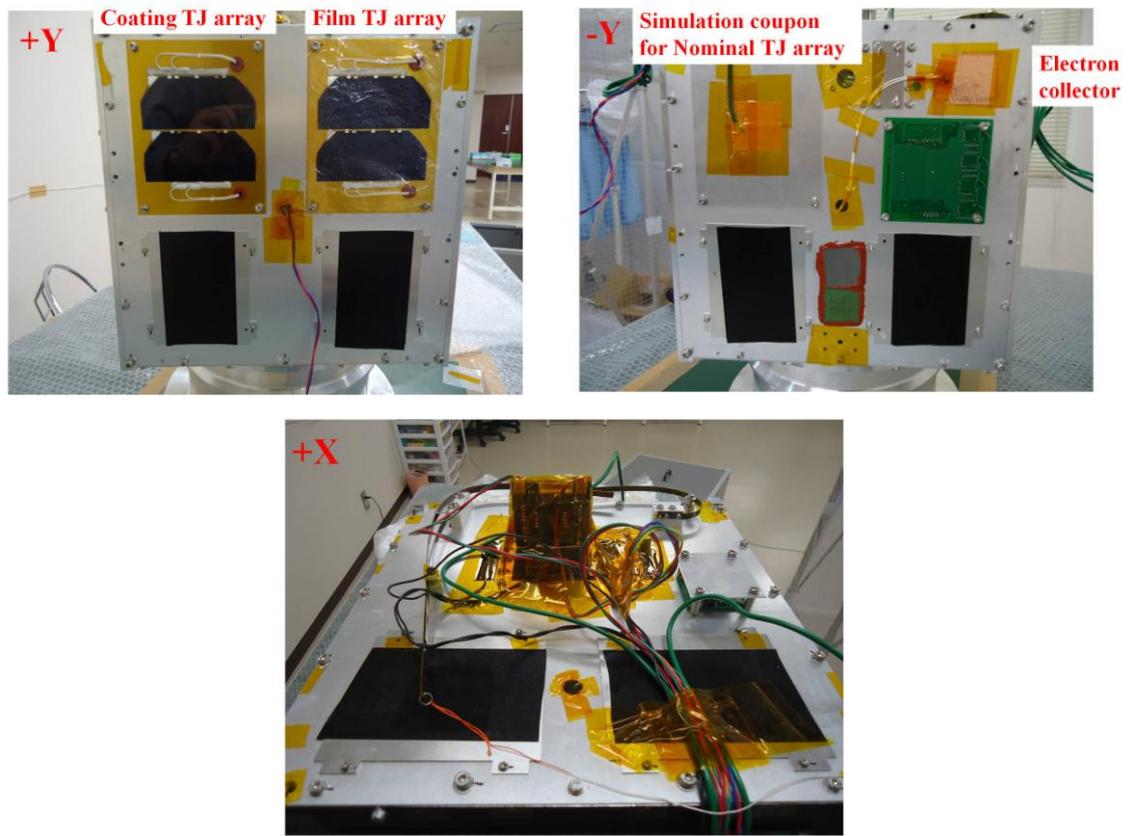


図5.56 FM放電試験の構体の外観

Figure 5.56 Overview of structure in FM discharge test

衛星構体の向きとハロゲンランプ及びプラズマ源の位置を図5.29に示す。この図はチャンバーを上から見た図である。最初の放電試験時に関しては300V系の電位を測定するためのSCMが図5.56のように+Z面に搭載されていたが、プラズマ源に対して裏側であったためSCM表面のフッ素樹脂はほとんど帯電しなかった。SCMの搭載位置を変更し、-Z面に搭載するとSCMは帯電した。この結果から軌道上でSCMがウェイクになってしまうと帯電しない可能性がある。

本試験で使用した回路図を図5.57に示す。本試験では300V発電太陽電池を用いチャンバー外からハロゲンランプで光を入れ高電圧発電をしている。発電電圧は最大でも約350V程度であり、ツェナーダイオードにより制限される。衛星の電力供給は衛星内部に搭載されているバッテリー(EM)により供給される。また、300V系CPUは光絶縁型RS232を介してPCでモニタリング、CWはトランシーバでモニタリングしている。EM放電試験(2回目)では試験開始や試験データの取得はMain-H8を介してPCからコマンドを送って行っていたが、今回の試験では地上局からのFMアップリンクにより試験コマンドを送信し試験が開始され、FMダウンリンクによりペイロードデータの取得が行われる。地上局のハードウェアに関しては本番とほぼ同様なものを使用している。

ソフトウェアに関して、衛星に搭載されている全てのCPUはフライト用のソフトウェアであり、地上局のソフトウェアも本番と同様のものを使用している。

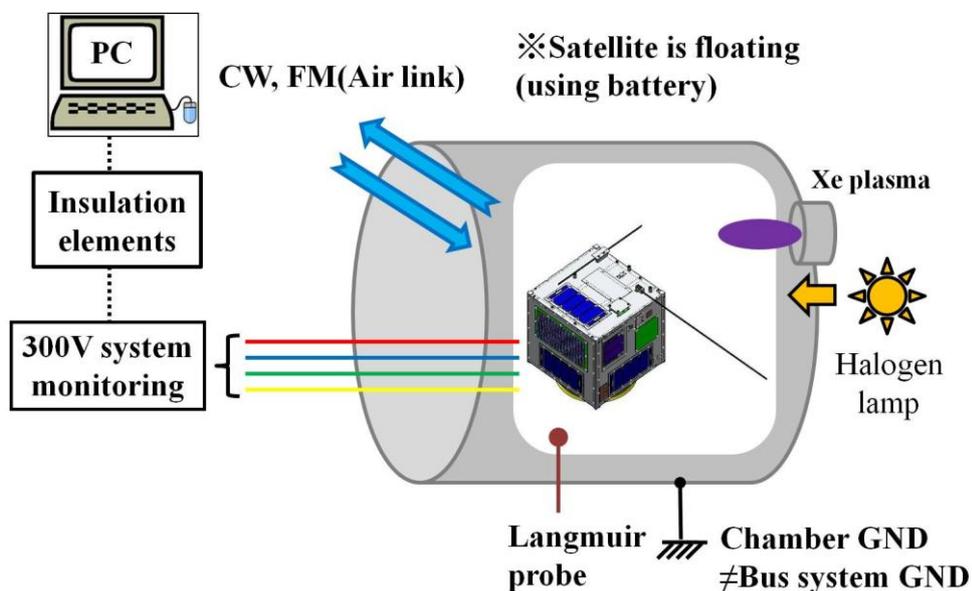


図5.57 試験回路(FM放電試験)

Figure 5.57 Test circuit (FM discharge test)

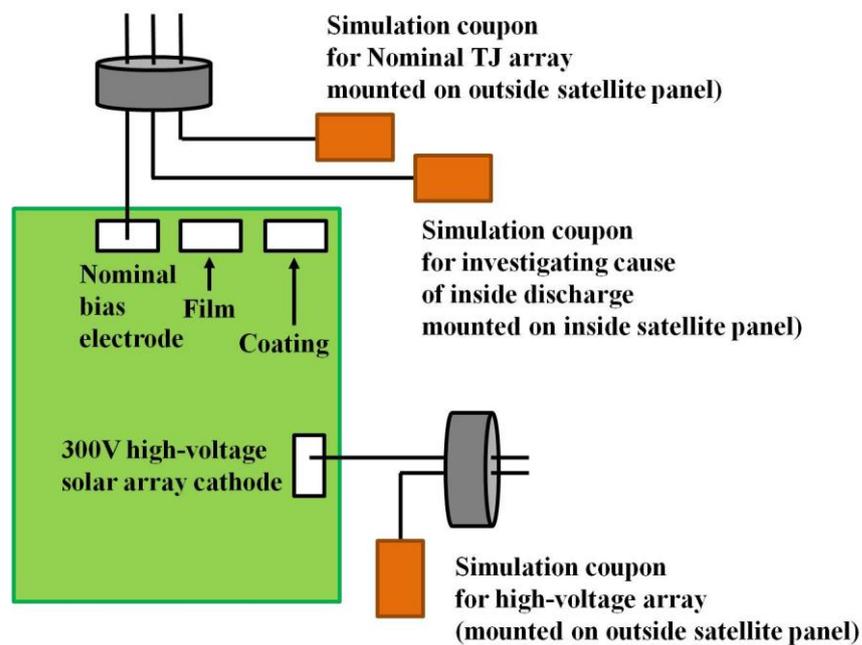


図5.58 フランジと模擬クーポンのセッティング

Figure 5.58 Setup of simulation coupon and flange

300V 発電太陽電池用の放電検出回路の動作を確認するための模擬クーポンのバイアスやノミナル TJ アレイ用の模擬クーポンのバイアスをチャンバーの外から制御するために図 5.58 のようにバイアス端子(300V 発電太陽電池用模擬クーポンの場合、バイアス端子は太陽電池のカソード端)及び模擬クーポンをフランジに接続している。また内部放電原因究明のために衛星パネル内面に模擬クーポンを搭載し、フランジに接続している。バイアス端子と模擬クーポンをケーブルで短絡することで希望の模擬クーポンをバイアスすることが可能である。

## **内部放電の原因究明**

### ***Configuration1***

300V 系が放電環境になっていないと、衛星内の 300V 系基板でも放電は起こりえないので、まず本コンフィグレーションにおいて放電環境になっていることを確かめる試験を行った。コンフィグレーションの詳細は以下の通りである。

- ① 300V 系基板の状態：ポリイミドで覆われている(基板で放電が起きない条件)
- ② 衛星パネル外面の模擬クーポン(300V 発電太陽用)をバイアス
- ③ 試験モード：300V mode
- ④ 真空引きの時間：24 時間

試験結果：300V 発電太陽電池用模擬クーポンで放電が発生したことから、300V 系が放電環境になっていることが確認できた。

### ***Configuration2***

本コンフィグレーションは衛星内部にプラズマが流入していないことを確かめる試験である。プラズマの流入を確かめるために衛星パネル内面に模擬クーポンを搭載し、そのクーポンがバイアスされた。コンフィグレーションの詳細は以下の通りである。

- ① 300V 系基板の状態：ポリイミドで覆われている(基板で放電が起きない条件)
- ② 衛星パネル内面の模擬クーポンをバイアス
- ③ 試験モード：300V mode
- ④ 真空引きの時間：Configuration1 に引き続き試験

試験結果：衛星パネル内面の模擬クーポンで放電が確認されなかったことから、衛星内部にプラズマは流入していないという結果が得られた。衛星にあいている穴は全てポリイミドテープで覆っているのでプラズマが入って当然と言えば当然であるので理論通りの結果が得られた。

### Configuration3

内部放電らしき現象が確認されたとき使用された 300V 系基板は EM\_v2 であったが、今回の試験では FM を使用している。そのため FM の基板上でも上記の現象が発生するか確認する試験を行った。コンフィグレーションの詳細は以下の通りである。

- ① 300V 系基板の状態：ポリイミドで覆われていない
- ② 模擬クーポンはバイアスしない
- ③ 試験モード：300V mode
- ④ 真空引きの時間：24 時間

試験結果：内部放電は確認されなかった。

### Configuration4

今までの試験は真空引きに 24 時間を要しており、衛星内部も十分に真空引きされているが、もし真空引きに時間をかけずにターボ分子ポンプを回してからすぐ放電試験を行った場合、衛星外部は十分に真空が引けていたとしても衛星内部も同様に十分に真空が引けているとは限らない。衛星内部が中途半端な真空度であれば図 5.59 のパッシェン曲線より低電圧環境下でも放電が発生してしまう。今回のコンフィグレーションではプラズマを投入して良い環境になったらすぐ放電試験を行った。

コンフィグレーションの詳細は以下の通りである。

- ① 300V 系基板の状態：ポリイミドで覆われている(基板で放電が起きない条件)
- ② 模擬クーポンはバイアスしない
- ③ 試験モード：300V mode
- ④ 真空引きの時間：30 分(ターボ分子ポンプを回してからの時間)

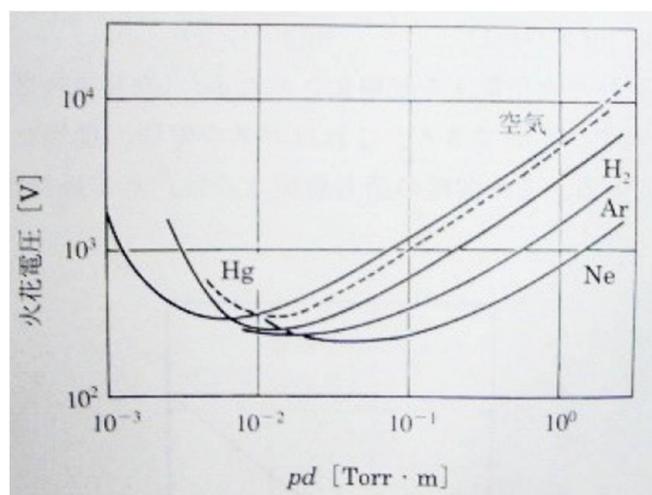


図5.59 パッシェン曲線

Figure 5.59 Paschen curve

試験結果：内部放電は確認されなかった。

### 内部放電の原因

Configuratio1～4の試験結果より EM\_v2 の基板の作りに問題があり、基板上で高電圧により絶縁破壊が発生したのではないかと考えた。EM\_v2 と FM 基板の違いは基本的に配線の経路変更や素子の値の変更、不用部品の除去である。この中でも経路変更や素子の値変更は絶縁破壊に影響はないと考えている。不用部品の除去に関しては図 5.60 に EM\_v2 と FM 基板の違いを示す。電力供給用ピンヘッダは 300V 系から十分に離れているので絶縁破壊の要因にはなりえないと考えられる。また配線修繕用ジャンパー線に関しては、300V 系側のジャンパー線がバス系側に飛び出していたり、逆にバス系側のジャンパー線が 300V 系側に飛び出していたりしているため、このジャンパー線で絶縁破壊が発生することが考えられる。以上より最もリーズナブルな内部放電の原因はジャンパー線ではないかと考えている。

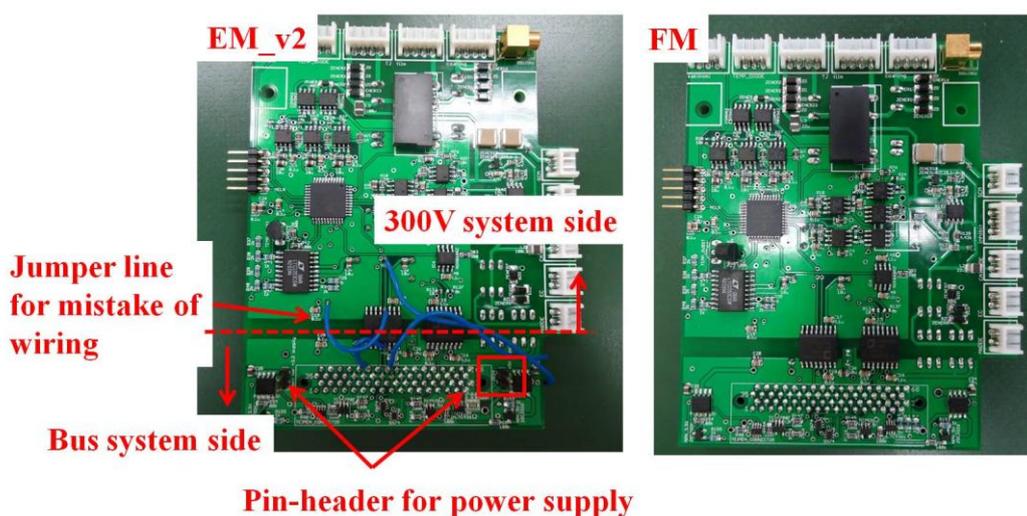


図5.60 EM\_v2とFM基板の違い

Figure 5.60 Difference between EM\_v2 and FM board

### リハーサルとデータ蓄積

以下にそれぞれの試験モードで得られた試験結果を示す。

#### **300V mode (bias simulation coupon for 300V high-voltage solar array) 1**

本試験モードでは 300V 発電太陽電池の模擬クーポンをバイアスしているため、そのクーポンで放電が発生していることが確認できる。放電電流の経路は図 2.2 に示しているような経路になるため放電箇所の誤認識が考えられるが、今回の試験では誤認識は見られなかった。よって、300V 発電太陽電池で放電が発生した場合の大部分は 300V 発電太陽電池で放電が発生したと認識されると考えられる。グラフより 0.5～1 分の間に 300V 系 CPU の誤動作が確認できるが、誤動作から正常にリカバリして放電試験を続行

できていることが確認できる。また、この試験は SCM の搭載箇所の問題があり 300V 系の電位測定が正常に行えなかった。もし SCM がウェイクであればこのようなデータがダウンリンクされる可能性も考えられる。

グラフの比較より本試験ではモニタリングによって得られたデータとダウンリンクによって得られたデータに違いは見られなかった。

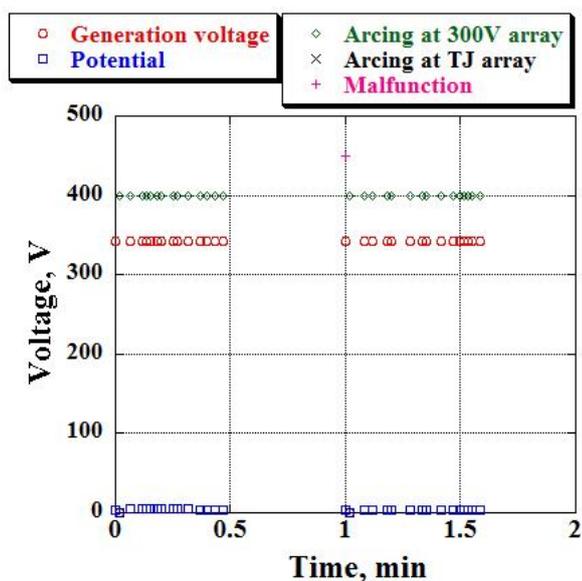


図5.61 モニタリングデータ(300V mode、模擬クーポンバイアス、1回目)  
Figure5.61 Monitoring data (300V mode bias simulation coupon 1)

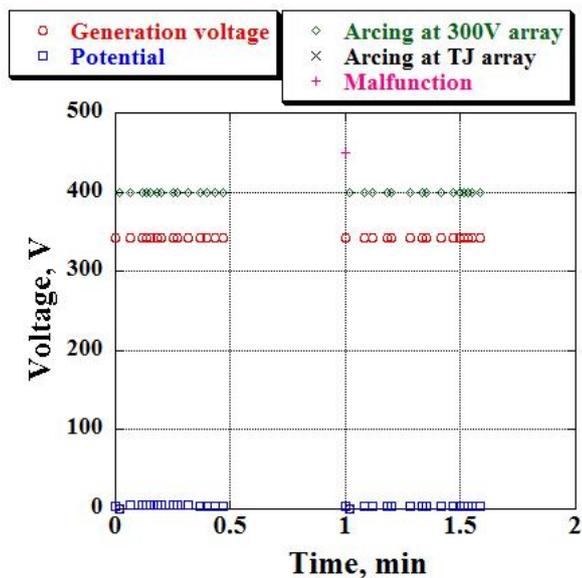


図5.62 ダウンリンクデータ(300V mode、模擬クーポンバイアス、1回目)  
Figure 5.62 Downlink data (300V mode bias simulation coupon 1)

**300V mode (bias simulation coupon for 300V high-voltage solar array) 2**

本試験は上記試験同様に放電箇所との誤認識はなく、また 300V 系 CPU が誤動作せず、電位測定も正常に行われた。グラフの比較より本試験ではモニタリングによって得られたデータとダウンリンクによって得られたデータに違いは見られなかった。

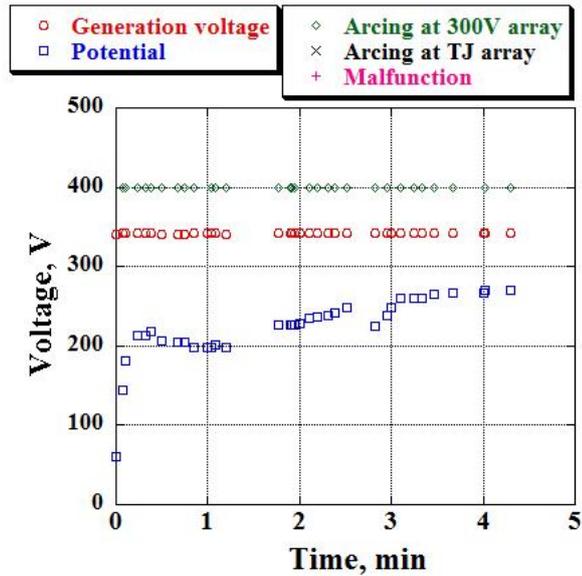


図5.63 モニタリングデータ(300V mode、模擬クーポンバイアス、2回目)

Figure 5.63 Monitoring data (300V mode bias simulation coupon 2)

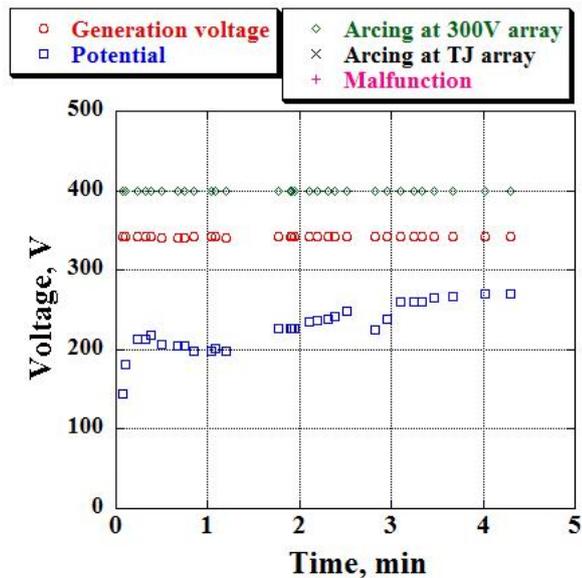


図5.64 ダウンリンクデータ(300V mode、模擬クーポンバイアス、2回目)

Figure 5.64 Downlink data (300V mode bias simulation coupon 2)

### 300V mode 1

本試験は 300V モードであり、模擬クーポンをバイアスしていないので放電が起こらない環境である。しかし、モニタリング結果から途中で誤動作が発生していることが確認でき、モニタリング用のシリアル信号にもずれが生じている。モニタリングの一部を以下に示す。この結果より、放電試験開始直後は動作が不安定である可能性を示唆している。

//モニタリング開始

♪ Flight Model

Start time 0 min //正常に電源 ON

Discharge number 0

0,0,0,0,0,1

2

々々 300 澤 Flight Model //誤動作発生

Start time 1 min

Discharge number 1

1,0,0,0,0,1

2

2,0,0,99,173,110,0 鉤 3 //シリアル通信のデータのずれが発生

3,0,0,100,173,112,0

誤動作が発生すると、その後一部のデータに破損が見られたが、フラッシュのページ番号が変わると正常にデータが保存されていた(図 5.56)。データの破損は EM 放電試験(2 回目)と同様で放電ノイズによって引き起こされたと考えられる。

**Page 6-9 has normal data** **Page 5 has wrong data**

E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
終了時間	13時間	23分	CRC_GS 8B	CRC_HR 8B	セクター 5	ページ 0	Ulint 0	処理 5	制限時間 3900	ミッション 2	正常終了 正常	バケット数 10
ページ	Ulint	処理	データ1	データ2	データ3	データ4	データ5	データ6	データ7	データ8	データ9	データ10
1	0	5	255	255	255	255	247	247	247	247	247	247
2	0	5	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247
3	0	5	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247
4	0	5	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247
5	0	5	255	255	255	255	247	247	247	247	247	247
6	0	5	0	106	174	99	28	0	0	106	174	111
7	0	5	174	140	36	0	0	106	174	139	37	0
8	0	5	44	0	0	106	174	129	45	0	0	106
9	0	5	0	106	174	140	53	0	0	106	174	137
10	0	5	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247
11	0	5	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247
12	0	5	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247
13	0	5	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247

Page 5-13: Periodical sampling data

図5.65 データロス(300V mode 1)

Figure 5.65 Data loss (300V mode 1)

もしこのようなデータがダウンリンクされたら、安易に 300V 発電太陽電池で放電が発生したとみなすのではなく、立ち上がりが不安定であることを考慮して再度試験を行うことが好ましい。

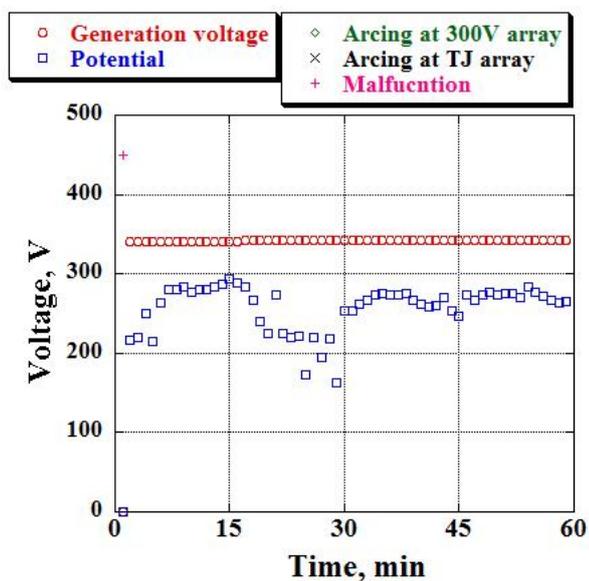


図5.66 モニタリングデータ(300V mode、1回目)

Figure 5.66 Monitoring data (300V mode 1)

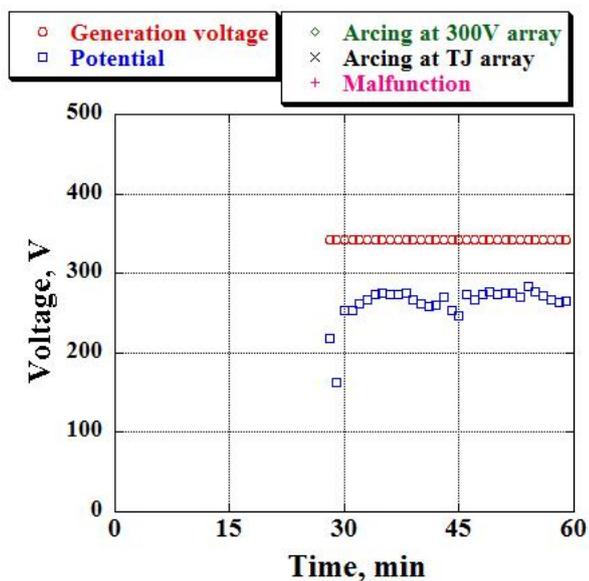


図5.67 ダウンリンクデータ(300V mode、1回目)

Figure 5.67 Downlink data (300V mode 1)

### 300V mode 2

本試験は 300V モードであり、模擬クーポンをバイアスしていないので放電が起こらない環境である。図 5.68-69 より 300V 発電太陽電池では放電は発生せず、また誤動作もすることなく正常に試験を終えていることが確認できる。グラフの比較より本試験ではモニタリングによって得られたデータとダウンリンクによって得られたデータに違いは見られなかった。

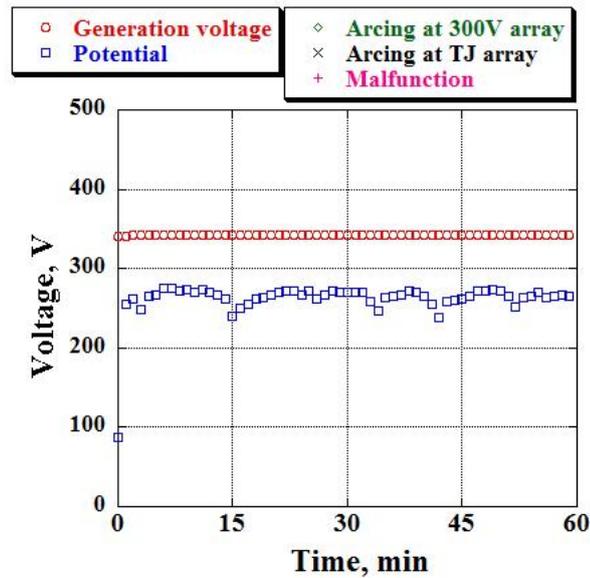


図5.68 モニタリングデータ(300V mode、2回目)

Figure 5.68 Monitoring data (300V mode 2)

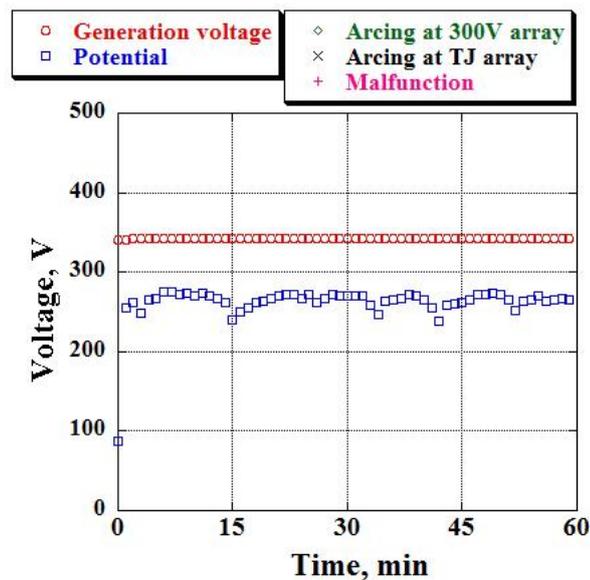


図5.69 ダウンリンクデータ(300V mode、2回目)

Figure 5.69 Downlink data (300V mode 2)

### ***Nominal TJ array mode***

本試験ではノミナル TJ アレイのバイアス端子に模擬クーポンを接続しバイアスしている。ただし、300V 発電太陽電池用の模擬クーポンはバイアスされていない。この条件ではノミナル TJ アレイ用の模擬クーポンで放電が発生するが、300V 発電太陽電池では放電が発生しない環境にある。

この試験では、どちらかの太陽電池で放電が発生した時、両方の検出インダクタに放電電流が流れることで誤認識する結果が得られた。しかし、図 2.2 に示しているようにどちらかの太陽電池で放電が発生したとしても、両方の放電検出用のインダクタにも放電電流が流れることはあるので誤動作ではない。

TJ アレイで放電が発生した場合、300V 発電太陽電池のみで電流検出、TJ アレイのみで電流検出、両方で電流検出の数を比較すると圧倒的に TJ アレイのみでの電流検出の数が多い傾向にあることが分かっている。また、TJ アレイで放電が発生した場合 300V 発電太陽電池のみでの電流検出数は極稀である。これは逆も然りであると考えられる。以上のことを考慮してデータ解析すると、図 5.70, 71 より TJ アレイで放電が発生したというデータが圧倒的に多いことから TJ アレイで放電が発生し、300V 発電太陽電池用の放電検出回路において TJ アレイで発生した際に流れた電流が検出されたと見なすことができる。

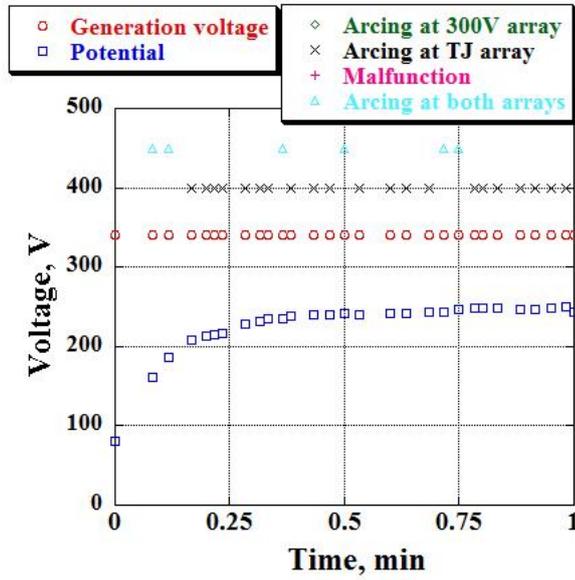


図5.70 モニタリングデータ(Nominal TJ array mode)  
 Figure 5.70 Monitoring data (Nominal TJ array mode)

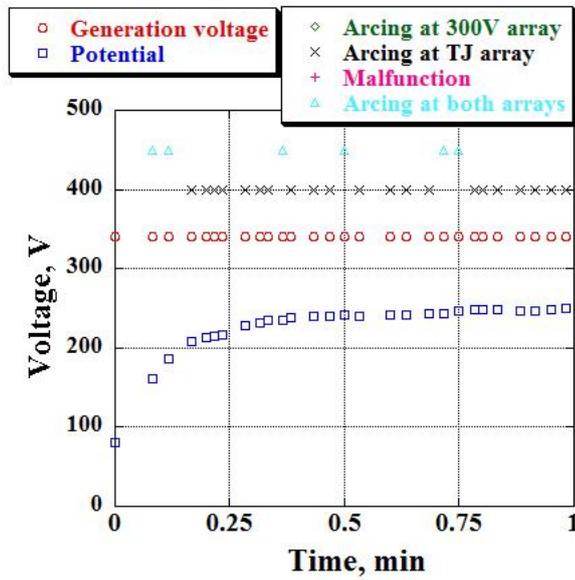


図5.71 ダウンリンクデータ(Nominal TJ array mode)  
 Figure 5.71 Downlink data (Nominal TJ array mode)

### Film TJ array mode

本試験ではフィルム TJ アレイがバイアスされた。フィルムはプラズマ環境下で放電を完全に遮断できるという結果が EM 放電試験(2 回目)で得られていたが、今回の試験でも同様の結果が得られた。グラフの比較より本試験ではモニタリングによって得られたデータとダウンリンクによって得られたデータに違いは見られなかった。

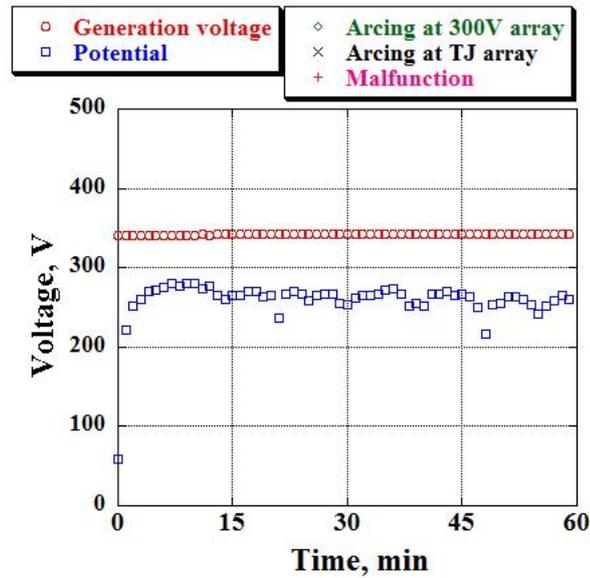


図5.72 モニタリングデータ (Film TJ array mode)

Figure 5.72 Monitoring data (Film TJ array mode)

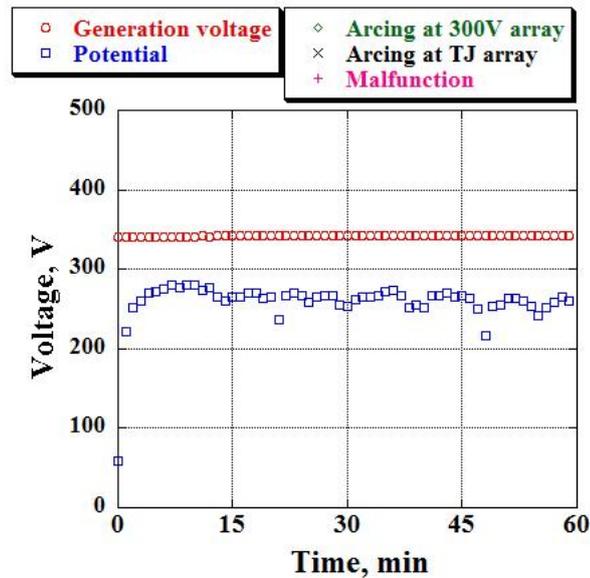


図5.73 ダウンリンクデータ (Film TJ array mode)

Figure 5.73 Downlink data (Film TJ array mode)

**Coating TJ array mode**

本試験ではコーティング TJ アレイがバイアスされた。半導電性コーティングはプラズマ環境下で放電を完全に遮断できるという結果が EM 放電試験(2 回目)で得られていたが、今回使用しているクーポンではコーティングが不十分であったため放電が確認された。今回の試験では CPU の誤動作や放電箇所の誤認識(300V 発電太陽電池での放電検知のこと)はなく正常に試験を終えていることが確認できた。

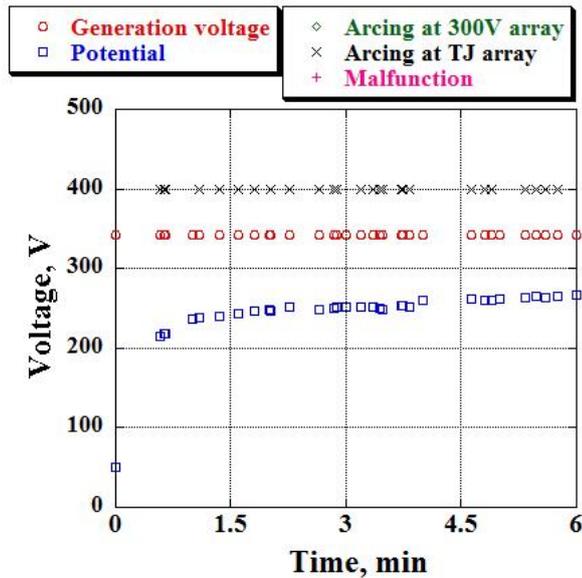


図5.74 モニタリングデータ (Coating TJ array mode)

Figure 5.74 Monitoring data (Coating TJ array mode)

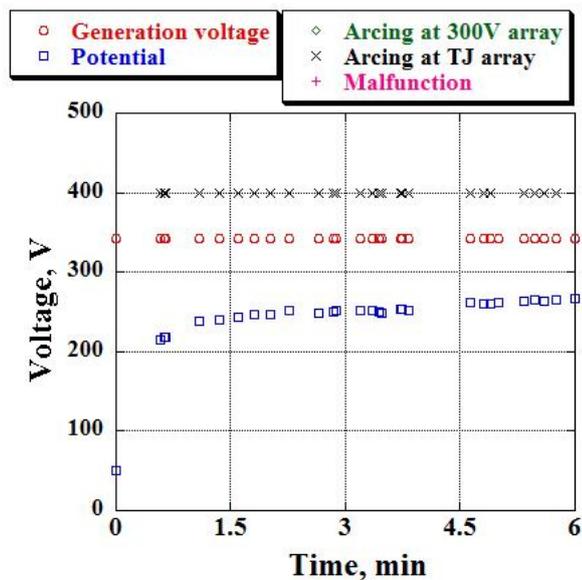


図5.75 ダウンリンクデータ (Coating TJ array mode)

Figure 5.75 Downlink data (Coating TJ array mode)

### 300V mode (bias simulation coupon for 300V high-voltage solar array) 3

本試験は0～50分までは300V発電太陽電池用の模擬クーポンはバイアスせず、50分からバイアスされた。図5.76-77より50分以降は300V発電太陽電池での放電が確認された。しかし、CPUの誤動作や放電個所の誤認識が確認された。注意したいのが、今までは誤認識の場合、両方の放電検出回路が放電電流を検出するような誤認識であったが、TJアレイのみで放電検出が行われる場合もあった。これは300V発電太陽電池で放電が発生したとしてもTJアレイで放電が発生したと誤認識する可能性があることを意味している。よって、このようなデータがダウンリンクされた場合、安易にTJアレイで放電発生したとみなすべきではない。

この試験では、放電ノイズによるデータ破損ではなく、地上局のソフトまたはハードウェアの不具合によりデータが狂ってしまう現象が見られた(図5.76)。これはデータをダウンリンクしているときに地上局のデコード装置であるTNCからPCへのシリアル信号がずれることがあり、また図5.77に示すソフトウェアのエラーがあったことから発覚した。このエラーはPCのOSが原因であると考えられ、Windows7ではなく、WindowsXPを使用する必要がある。この現象は地上局のソフトとハードを両方とも再起動することで改善できた。もしダウンリンクされたデータがおかしい場合は、放電ノイズによるデータのロスを疑うのではなく、地上局を再起動して再送を要求すべきだと考えられる。

E	F	G	H	I	J
ページ	Jint	処理	データ1	データ2	データ3
2	1	5	53	9	7
4	0	5	174	123	55
7	0	5	8	0	0
11	0	5	190	9	50
12	0	5	247	247	168

**Payload data is saved only in Page 1-13  
But data was saved in Page 22 in this test**

図5.76 地上局の不具合

Figure 5.76 Fault of Ground station



図5.77 地上局ソフトウェアのエラー

Figure 5.77 Error of Ground station software

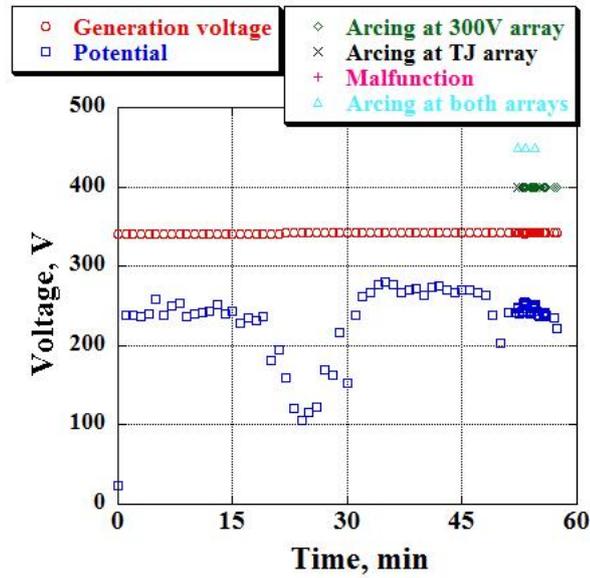


図5.77 モニタリングデータ(300V mode、模擬クーポンバイアス、3回目)

Figure 5.77 Monitoring data (300V mode bias simulation coupon 3)

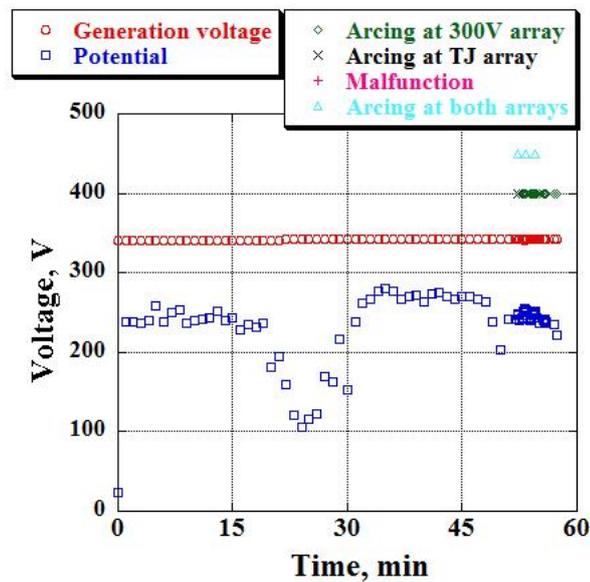


図5.78 ダウンリンクデータ(300V mode、模擬クーポンバイアス、3回目)

Figure 5.78 Downlink data (300V mode bias simulation coupon 3)