

環境観測技術衛星(ADEOS-II)「みどり II」の運用異常の 原因究明に係る試験の実施状況について(その3)

平成 16 年 1 月 27 日
独立行政法人
宇宙航空研究開発機構

1. はじめに

「みどり II」の運用異常について、故障の木解析を行い、複数の発生シナリオを推定している(参考1)。発生シナリオのひとつである仮説2-1及び2-2について、実施している解析／試験(参考2)のうち、次の試験について中間結果を報告する。

- | | | |
|------------------|---|--------------------------------|
| ①ブーム／ハーネス熱サイクル試験 | } | (平成 16 年第 1 回調査部会で
中間結果を報告) |
| ②帯電／放電に係る試験 | | |
| ③電線クリープ試験 | | |

2. ブーム／ハーネス熱サイクル試験

平成16年第1回の調査部会においては、200サイクルまでの試験状況を説明した。その後、計画通り300サイクルまでの試験を終了し、供試体を取り出し外観検査を実施した結果、特段の異常は認められなかった。

図1に、ハーネス絶縁抵抗のトレンドを示す。

図2に、ハーネス温度のトレンドを示す。

図3に、ハーネスの最高温度部位を示す。

図4に、300サイクル終了後の外観写真を示す。

付録1に、試験の目的／供試体／試験概要／試験条件を示す。

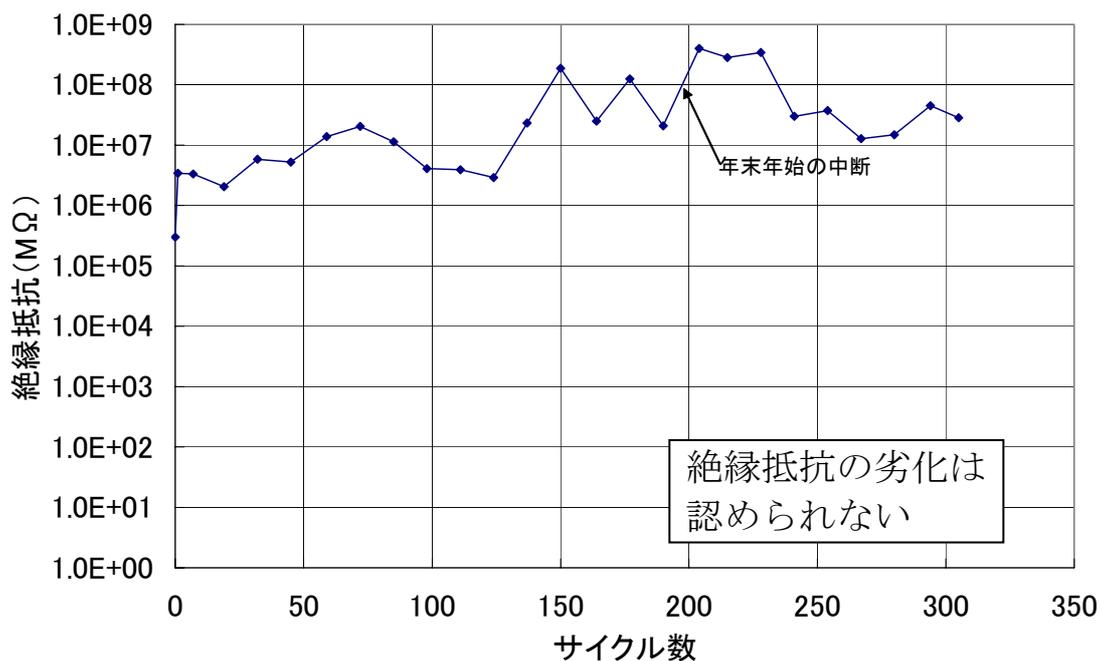


図1 ハーネス絶縁抵抗のトレンド

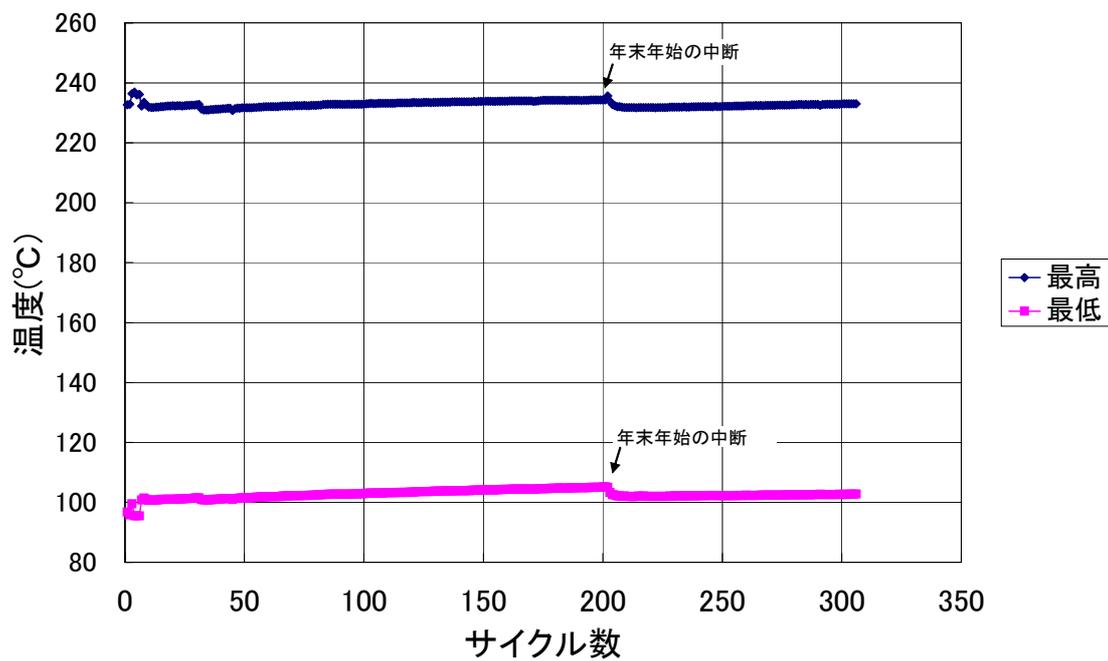


図2 ハーネス温度のトレンド

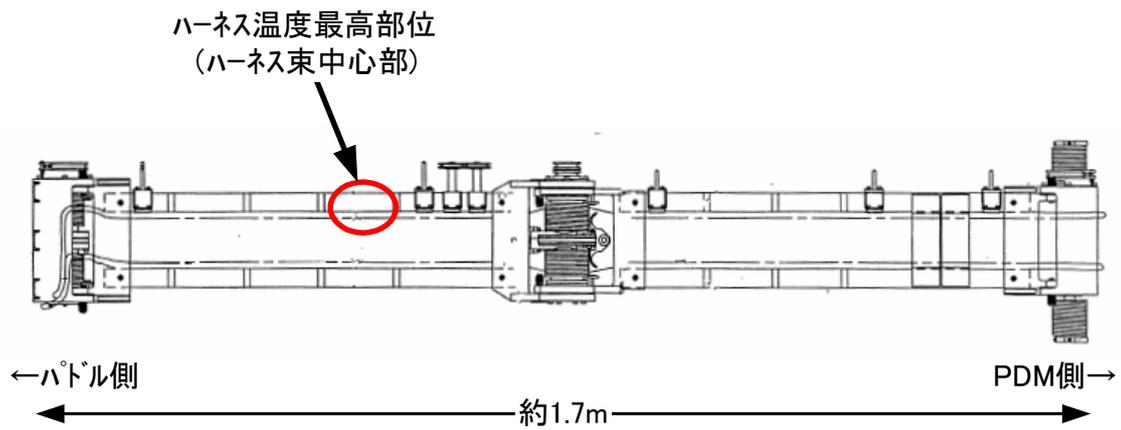


図3 ハーネスの最高温度部位

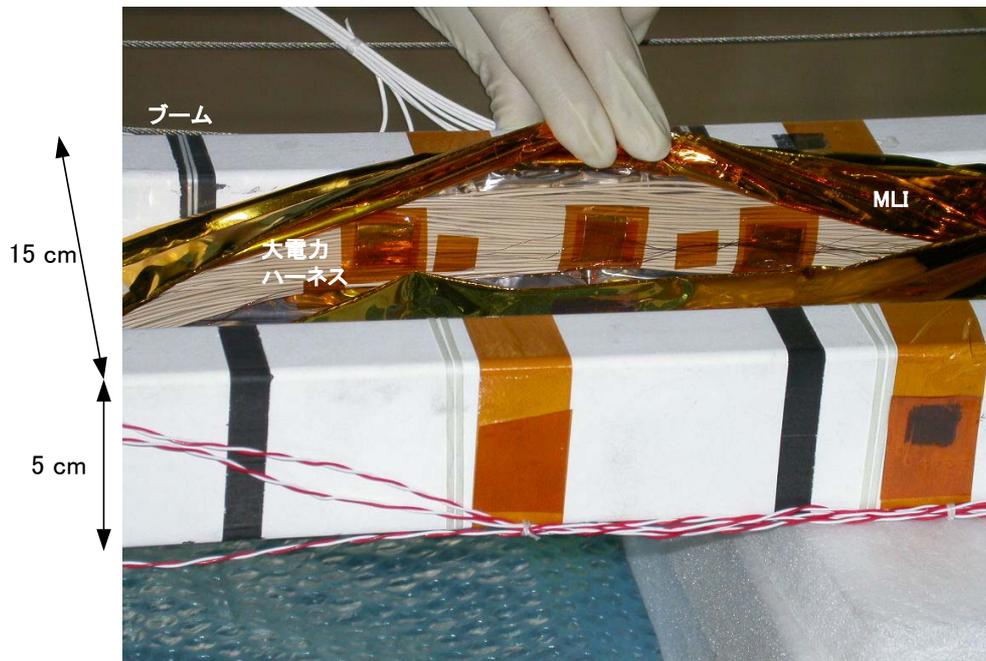


図4 300サイクル終了後の外観写真
 (高温クリープ試験に比べて変色の度合いが小さく、かつ柔軟性も損なわれていない)

3. 電線クリープ試験

平成16年第1回の調査部会においては、電線クリープ試験の試験結果として、270℃/30時間さらした電線被覆が褐色に変色し柔軟性が失われていたが電線としては問題ないことを報告した。その後、念のためにヒンジ部角が接触していた部分も断面観察を実施したが、特に芯線の露出につながるような兆候は確認されなかった。

図5に、ヒンジ部角が接触していた部分の断面観察を示す。
付録2に、試験の目的/供試体/試験概要/試験条件を示す。

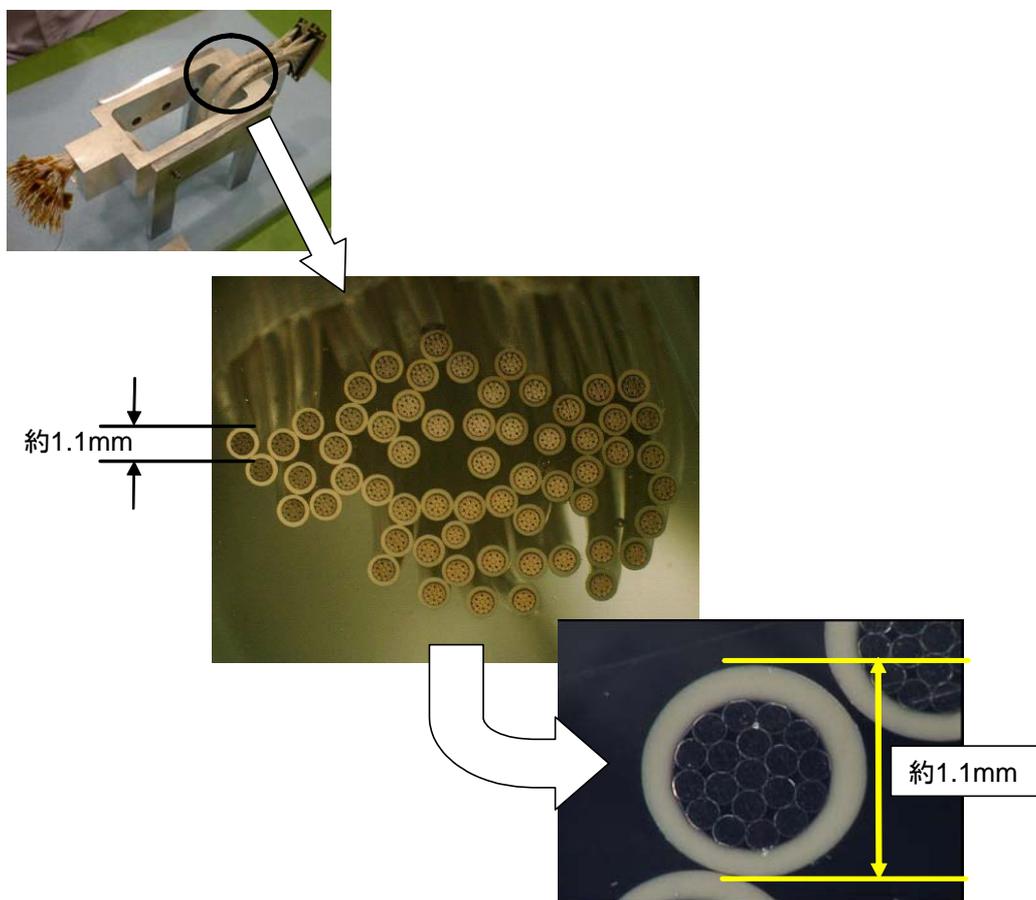


図5 ヒンジ部角に接触していたハーネス断面

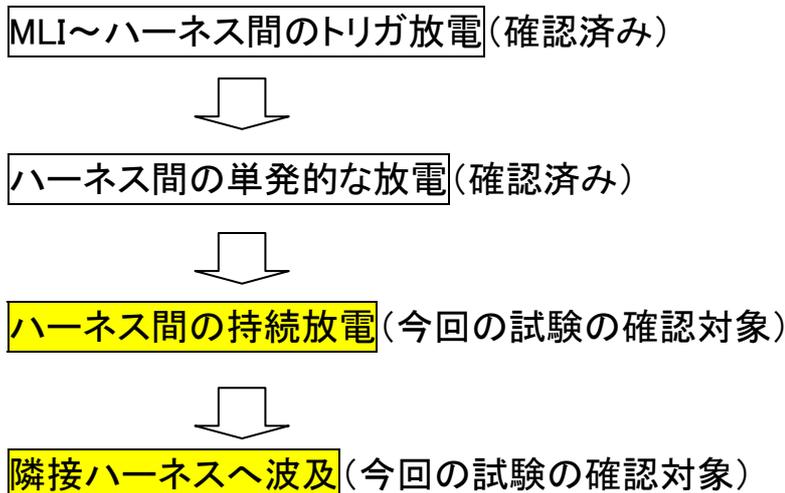
4. 電線高温放置試験

「3. 電線クリープ試験」を補足する試験として、軌道上10ヶ月の200℃を越える期間に相当する長時間(750時間)高温に曝し、電線被覆の加圧過熱変形により電線芯線が被覆から露出する可能性の有無を確認することを目的とした、電線高温放置試験を実施中である。

5. 帯電／放電に係る試験

(1) 試験の目的

仮説2-1[2-2]の中でこれまでに検証されていない、持続放電の発生及び隣接ハーネスへの波及を確認することを目的とする。



(2) 経緯

平成15年第6回調査部会では、筑波宇宙センターの試験設備を使用して実施した試験結果を報告した。ハーネス2本の被覆に故意に傷をつけた箇所において、ハーネス間の持続的な放電が発生し、隣接するハーネスも短絡したことが確認されたが、突入電流防止機能を有さない電源を使用したため、放電初期に過大な突入電流が流れたことにより持続放電に至った可能性も考えられた。

平成16年第1回調査部会では、九州工業大学の試験設備を使用して実施した試験結果を報告した。突入電流を防止することができるアレイ回路電圧模擬用電源を使用するとともに、バックグラウンド真空度、プラズマ密度をより軌道上の環境に近づけたコンフィギュレーションでの試験を実施した。ハーネスの温度を約250℃まで上昇させたケース、MLI に穴を開けてプラズマをハーネス近傍に導入したケースについても確認したが、ハーネス間の持続放電には至らなかった。参考に、このときの試験コンフィギュレーションを図6及び図7に示す。しかし、筑波宇宙センターでの試験で、持続放電が発生すれば隣接回路へ波及することが確認されており、今後は持続放電発生条件として、傷つきハーネスの本数、傷の形状、線間電圧等との関係を確認していくこととした。

今回、筑波宇宙センターの試験設備を使用して、傷の形状を変更して実施した試験について報告する。

(3) 供試体

「みどりII」実機と同等のハーネス及び MLI を使用した。

(4) 試験概要

筑波宇宙センターの試験設備を使用して試験を実施した。試験コンフィギュレーションを図8に示す。

ハーネス被覆2本(HOT/RTNの一組)に、予めカッターナイフでスリット状の傷をそれぞれ6箇所つけた。うち1箇所は対向させた(図9)。それらのハーネス2本に、突入電流防止機能を有するアレイ回路電圧模擬用電源(V1)を接続した。

また、傷つきハーネスに隣接して、2本のハーネス(傷なし、HOT/RTNの一組)を配置し、電源(V2)を接続した。

MLIには、ポテンシャル電位を印加する電源(Vb)と、MLIとハーネスの間の容量を模擬するコンデンサ(Cext)を接続した。

真空中(約0.5torr、プラズマなし)において、MLIポテンシャル電位を徐々に下げて行き、MLIとハーネス間の放電発生及びそれをトリガとするハーネス間の放電発生、さらに隣接ハーネスへの波及をモニタした。

(5) 試験条件

試験条件を表1に示す。前回(九州工業大学)及び前々回(筑波宇宙センター)の試験条件も併せて示す。

表 1 試験条件(1/2)

項目	今回(筑波)	前回(九工大)	前々回(筑波)	備考
(結果)	持続放電有	持続放電無	持続放電有	
ハーネスの傷の形状	スリット状	環状	環状	傷の形状は、前回、持続放電に至らなかった要因として今後検討することとしていた。微小なクラックを想定してスリット状の傷とした(図9参照)。
ハーネス同士の配置	密着	近接	密着	実機ハーネスのタイラップで束ねられている箇所はハーネス同士が密着していることを考慮し、前は離して配置したハーネスを、今回は密着して配置した(図9参照)。
真空度	約 0.5torr	約 10^{-4} torr	約 0.5torr	試験設備の能力による。約 0.5torrは軌道上より放電が発生しやすい環境であると考えられるため、高真空での再確認を検討する。なお、前回の試験で高真空下(約 10^{-4} torr)における単発的な放電は確認されている。
プラズマ密度	なし	約 $10^{12}m^{-3}$	なし	プラズマがないと軌道上より放電が発生しにくい環境であるが、前回の試験の結果から、プラズマの有無は MLI で巻かれたハーネス間においては放電の発生に大きく寄与しないことがわかっている。
MLI ポテンシャル電位	約-1.2kV 以下	約-1.7kV 以下	約 -1.2kV 以下	解析並びに試験により軌道上で-1.2kV 程度の電位発生はあり得ることが確認されている。なお、過去に DMSP(高度約 840km)で最大約-2000V、「みどり」で最大約-700Vの観測事例がある。

表 1 試験条件(2/2)

項目	今回(筑波)	前回(九工大)	前々回(筑波)	備考
ハーネス間 電位	約 120V、 60V(SAS*)	約 60V (SAS*)	約 60V (通常電源)	前回、持続放電に至らなかった要因として今後検討することとしたパラメータ。実機では通常約 60V であるが、回路が何らかの要因で開放故障していた場合、温度によって約 130V となる可能性がある。 前回同様、突入電流を防ぐため SAS*を使用した。(*:アレイ回路電圧模擬用電源)
軌道上環境 模擬用外部 コンデンサ 容量	Cext=10nF 及び Ccg=なし	Cext=50nF 及び Ccg=100 μ F	Cext=95nF 及び Ccg=なし	NOAA-17 が 10/24 に観測したオーロラ帯における高エネルギー粒子のフラックスデータを考慮して、MLI 最内層と電線間の容量をもとに Cext の値を算出した。設備の制約で前回試験時と完全に同じものではないが、電荷量のオーダーは同じ。Ccg(衛星構体 MLI の容量を模擬したコンデンサ)は用いないほうが、より放電が発生しにくい条件である。

(6) 試験結果

【ハーネス間電位 120V】

軌道上で1回路が開放故障した場合、太陽電池の開放電圧として130V程度が当該ハーネス間に印加されることを考慮し、ハーネス間電位120Vの試験を実施した。

傷つきハーネス間の単発的な放電が発生してから約13分後に持続放電に至り、ほぼ同時に傷なしハーネスへの波及が確認された。最終的に、傷つきハーネス及び傷なしハーネスはそれぞれ線間抵抗約200[Ω]及び5[kΩ]に絶縁が低下した。

【ハーネス間電位60V】

軌道上における通常の状態を模擬して、ハーネス間電位60Vの試験を実施した。MLIのポテンシャル電位(Vb)約-500[V]でトリガ放電を開始した。このときのMLI帯電量は約5[μC]と計算され、軌道上の解析とほぼ一致している。試験の結果を表2のとおり時系列に整理する。

試験後のハーネスの外観を図10に示す。芯線が一部溶断している。

表2 試験結果

経過時間	傷つきハーネス	傷なしハーネス
0	HOT/RTN の対向傷間で単発的な放電開始 放電時間は約 10 μ sec	変化なし
0+3 分	単発的な放電の時間が徐々に延び始める 傷周辺の被覆に炭化が見られる 線間抵抗=約 4[MΩ]に低下 (正常時は 30[MΩ]以上:使用した計測器の測定限界)	変化なし
0+5 分	ハーネス間の持続放電開始	変化なし
0+5 分 30 秒	(この間、持続放電を継続、線間抵抗は不安定に変動)	ハーネス間の持続放電開始 線間抵抗=約 1[Ω]で短絡
0+21 分 30 秒	線間抵抗=約 1.4[Ω]で短絡	—

(注:経過時間はおおよそ)

(7) 考察及び今後の予定

今回、突入電流を防ぐ機能を有するアレイ回路電圧模擬用電源を用いて試験を行い、スリット状の傷の入った60V印加ハーネスが持続放電から短絡し、隣接して配置した傷なしハーネスが短絡したことを確認した。

今回の試験結果から推察される放電のメカニズムは次のとおり。

- ①帯電した MLI からのトリガ放電により傷つきハーネスの素材がガス化し、放電プラズマが発生
- ②放電プラズマを経路とし、太陽電池発生電力による傷つきハーネス (HOT/RTN) 間の単発的な放電が発生し、被覆が炭化
- ③傷つきハーネス (HOT/RTN) 間で炭化導電路が形成される(トラッキング)
- ④持続放電発生(アークトラッキング)
- ⑤持続放電による発熱で隣接回路の傷なしハーネスが短絡

ハーネス被覆が炭化して線間抵抗が低下したことが観察されたことから、ハーネス同士が密着していると HOT/RTN 間でトラッキングによる持続放電が発生しやすくなると考えられる。実機では、ハーネス束を約150mm 間隔でブームに固定している箇所でハーネス同士が密着している状態にある。

また、持続放電発生から約30秒後に隣接回路が短絡したことが確認されたが、これは今般の運用異常において最初の電力低下から約1分後に2回目の電力低下が発生していることと矛盾しない。

今後、隣接ハーネスの本数を増やして試験を実施し、テレメトリで確認されている電力低下事象との整合性を検討する。

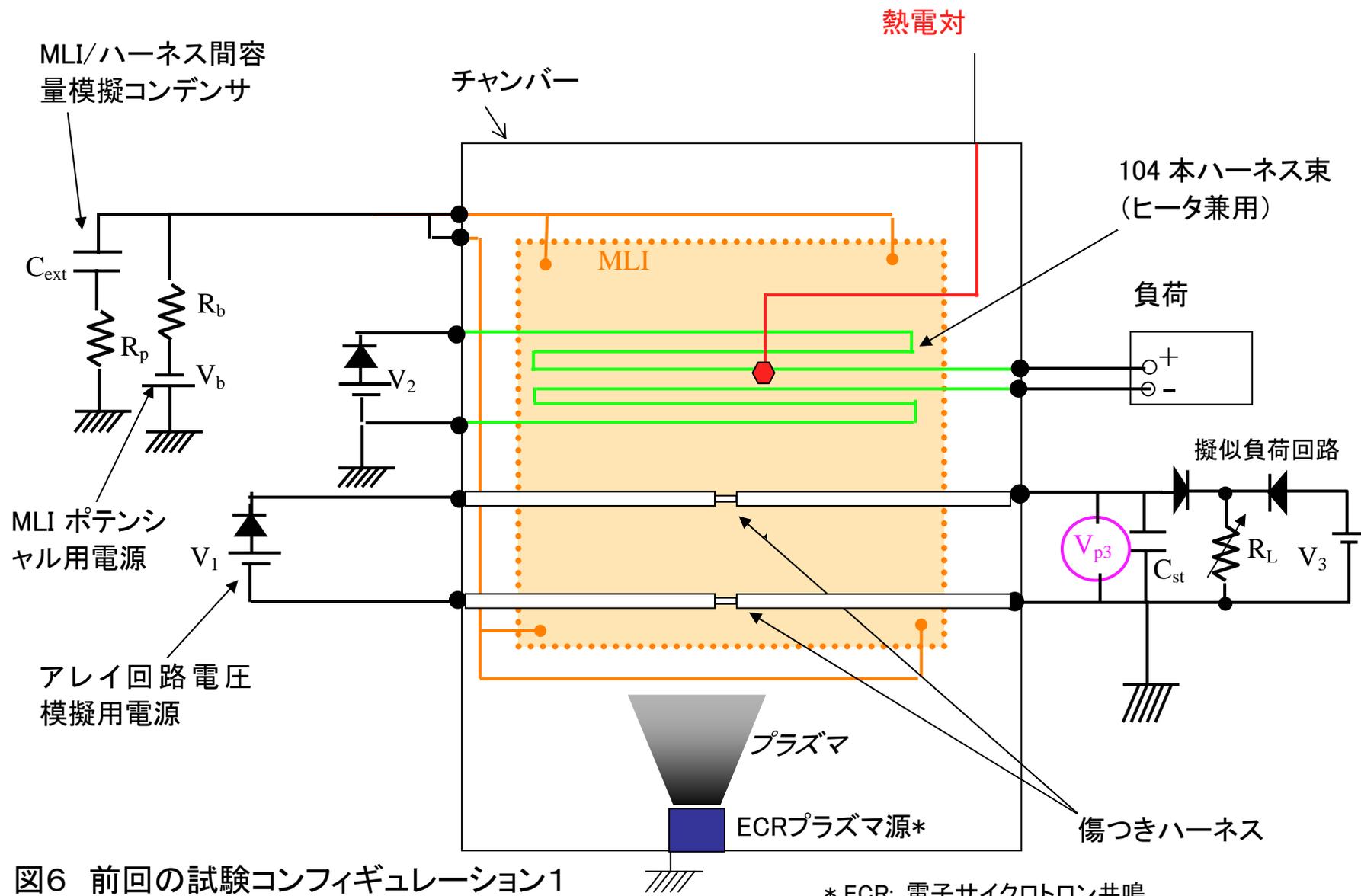
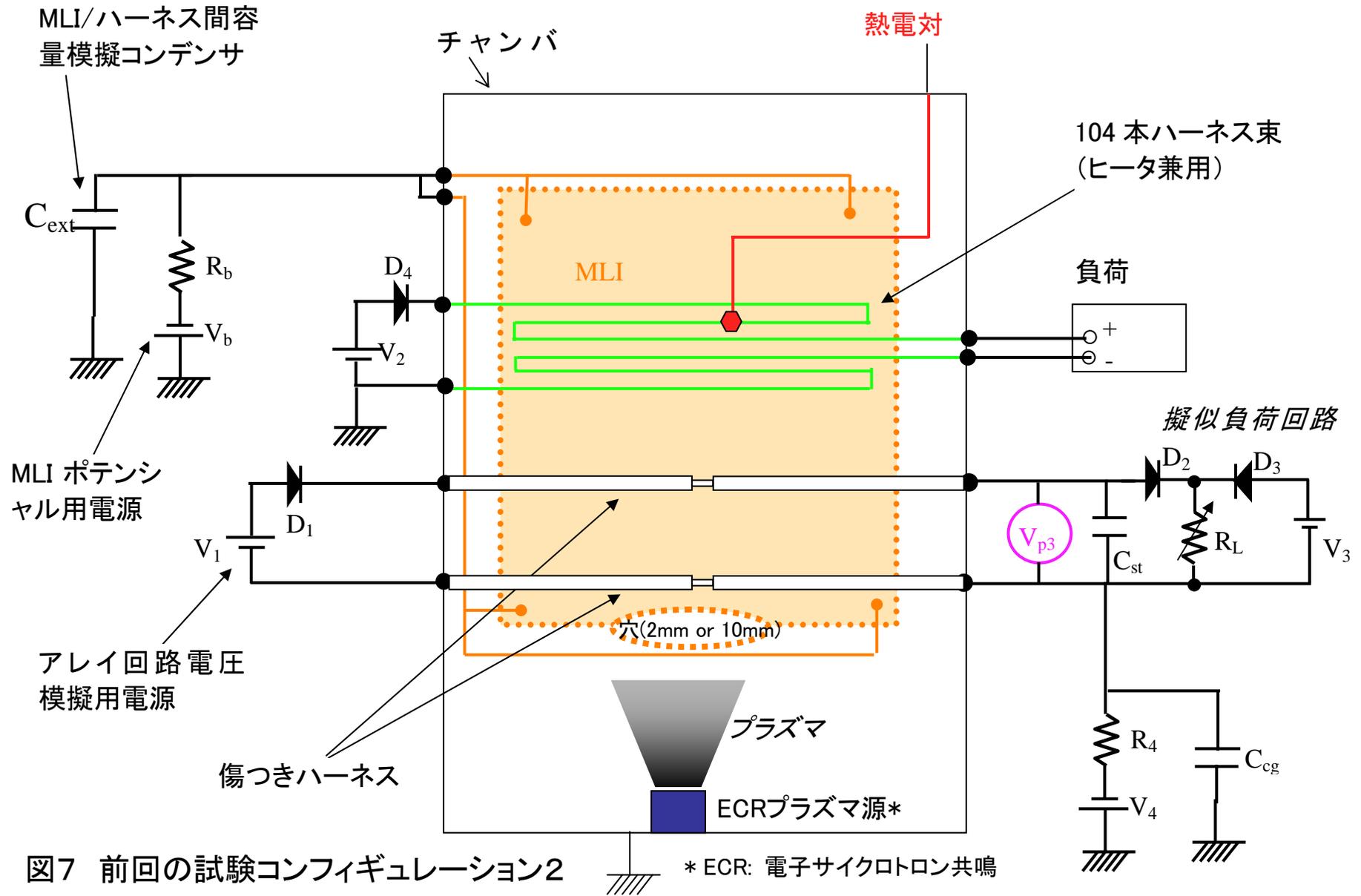


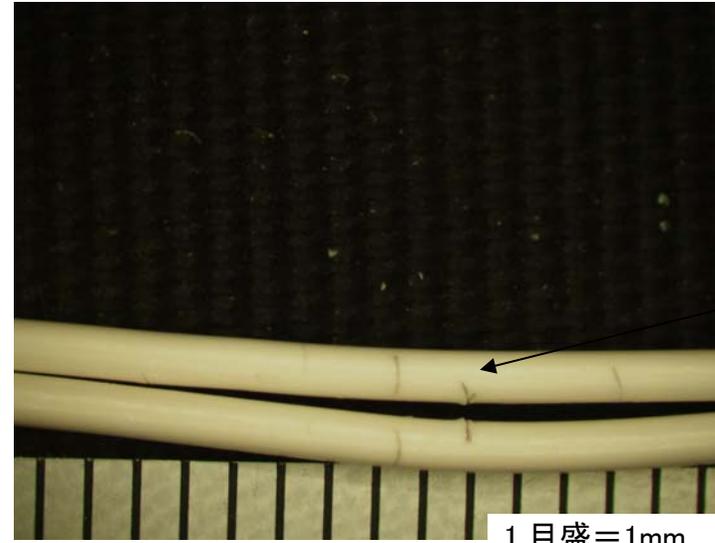
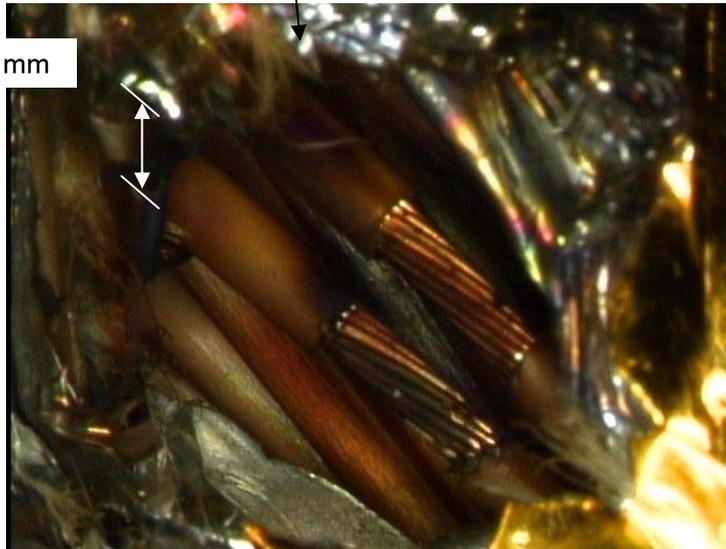
図6 前回の試験コンフィギュレーション1

* ECR: 電子サイクロトロン共鳴



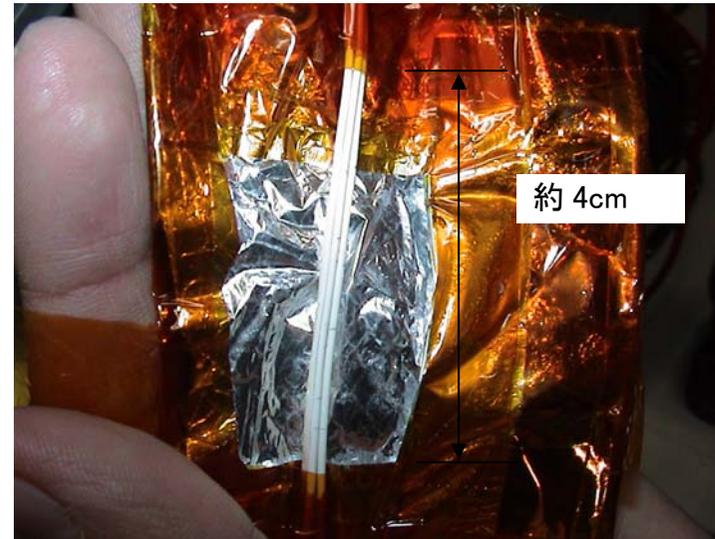
ハーネス同士が密着していなかった

約 1.1mm



対向傷

1 目盛=1mm



約 4cm

図9 ハーネスの傷の形状と配置(左:前回、右:今回)

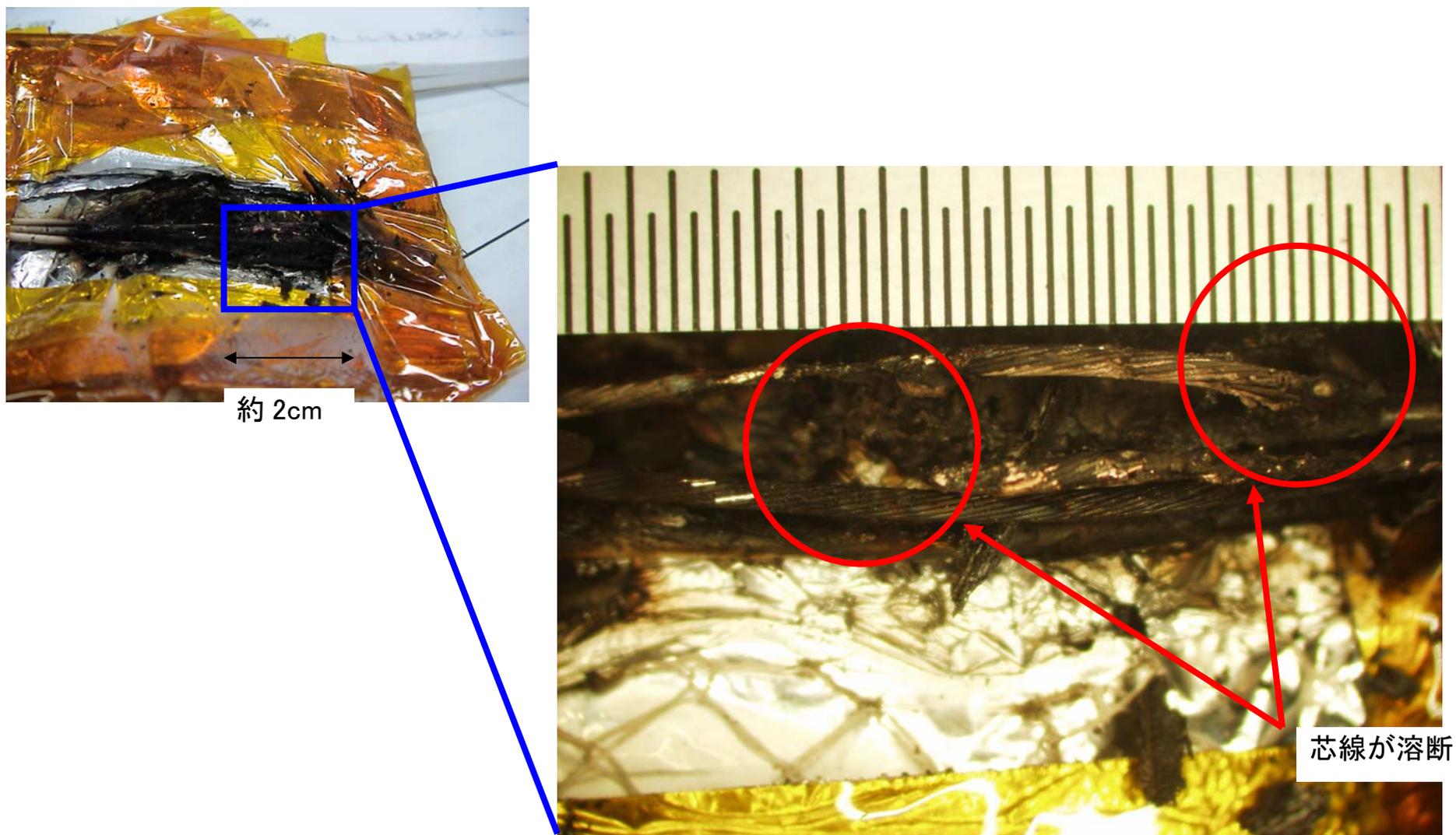


図10 試験後のハーネス外観 (1目盛=0.5mm)

付録1

ブーム／ハーネス熱サイクル試験の概要 (平成16年 第1回調査部会 報告事項)

(1) 試験の目的

実機を模擬したブーム／ハーネスに対して、軌道上で遭遇した可能性のある熱サイクルを印加し、試験前後のハーネス束の特性変化を評価する。なお、本試験の準備段階としてハーネス温度150℃以上の熱平衡試験も合わせて実施し、熱数学モデルの最終確認を実施する。

(2) 供試体

- ・「みどり」のブーム熱構造モデル(STM)
 - ・「みどりⅡ」実機と同じ作業者が新規製作したハーネス
- 注： いずれも、「みどりⅡ」と同等品

(3) 試験概要

供試体を真空チャンバ内に設置し、軌道上平均熱入力相当の熱量を供試体外部から与えた状態において、軌道1周回を模擬したサイクル通電による熱サイクル試験を実施する。

(4) 試験条件

真空度	1×10^{-5} torr以下
シュラウド温度	-180℃以下

(5) 温度条件

熱サイクル試験の温度条件としては、熱平衡試験により最終確認された熱数学モデルの軌道上最高予測温度(230℃;ハーネス束中心部)に合わせるように、以下の条件を設定した。

	計画時	実施時
通電電流／時間	1.78A／67分 0A／33分	1.805A／60分 0A／50分

付録2

電線クリープ試験の概要 (平成16年 第1回調査部会 報告事項)

(1) 試験の目的

ブームヒンジ部のハーネスが曲がっているところにおいて、高温下で電線被覆に発生するクリープ現象により、電線芯線が電線の中立軸から移動して被覆から露出する可能性の有無を確認する。

(2) 供試体

「みどりII」実機と同等のハーネス及びブームヒンジ部を模擬した治具

(3) 試験概要

NEC 東芝スペースシステム(株)の試験設備を使用する。104本束の電線を、ブームヒンジ部を模擬した治具に取り付け、加熱炉で高温に曝した後、電線の外観及び断面を確認する。

(4) 試験条件

試験条件は次のとおり。

温度 : 260°C~270°C

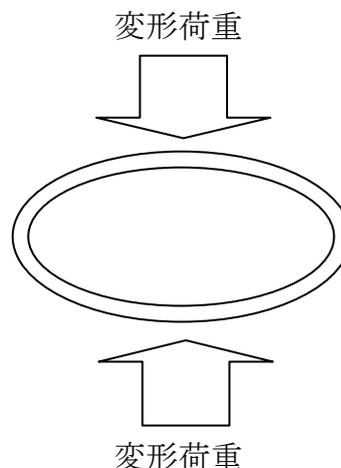
気圧 : 大気圧

雰囲気 : 乾燥窒素ガス雰囲気

高温維持時間 : 約 30 時間

高温維持時間の算出根拠

試験に先立ち、円形に巻いた電線を曲げ R=10 程度(ヒンジ部の最小 R 相当)になるように変形荷重を加えた状態で雰囲気温度 250°C に放置したところ、約 10 時間で変形荷重がほぼ 0 になった。この時点でクリープを起こさせる力は消失すると考えられる。試験では余裕を見て 3 倍の時間とした。



FTAから導出される発生シナリオ

(太陽電池パドルハーネスの故障)

参考1

故障の木解析(FTA)による故障部位の抽出

推定する故障モード

推定する故障要因(シナリオ)

太陽電池パドル電カラインの故障(△)
太陽電池パドルハーネスの故障(△)
太陽電池パドルの指向方向変動(×)
アレイ回路の機能劣化(×)
パドル駆動機構電カラインの故障(×)
パドル駆動機構接続ハーネスの故障(×)
シャント回路の故障(×)
シャント電力制御回路間ハーネスの故障(×)
電力制御回路の故障(×)
バッテリー制御回路の故障(×)

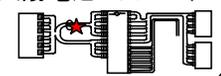
帯電/放電によるハーネスの損傷

《帯電/放電をトリガとするハーネスの焼損》

- ①MLIが帯電する
- ②MLIとハーネス間でトリガ放電が発生。
- ③隣接する2本のハーネス(ホット/リターン)間が放電し、その後、持続放電に発展。
- ④③の持続放電による発熱が隣接するハーネスへ波及し、芯線間が短絡。
- ⑤④の短絡による発熱により、さらに隣接するハーネスへ波及し、約3分間でハーネス束全体に波及。

仮説2-1
仮説2-2

仮説2-1,2-2
太陽電池パドルハーネス



機械的要因によるハーネスの損傷

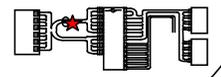
《デブリ等によるハーネスの破断》
ハーネス束にデブリ等による機械的応力が加わり、ハーネスが約3分間かけて破断

《ハーネス許容温度超過に起因するハーネスの損傷》

- ①許容温度を越えた温度サイクルがハーネスに印加され、ハーネス被覆が劣化し、隣接する2本のハーネス(ホット/リターン)間が露出し、接触して短絡。
- ⑤①の短絡による発熱により、さらに隣接するハーネスが溶融、短絡し、約3分間でハーネス束全体に波及。

仮説2-3
仮説2-4

仮説2-3,2-4
太陽電池パドルハーネス



その他の機械的要因

ハーネス端部(ミニブランケット部)の半田溶融

ハーネスの温度が半田に伝導し、溶融

仮説2-5

仮説2-5
ミニブランケットとの接続
半田部



FTAを用いた解析の結果、10月24日の約6KWから約1KWへの電力低下は、下記の何れかの部位の故障により発生した可能性が高い。

- ①太陽電池パドル電カライン
- ②太陽電池パドルハーネス

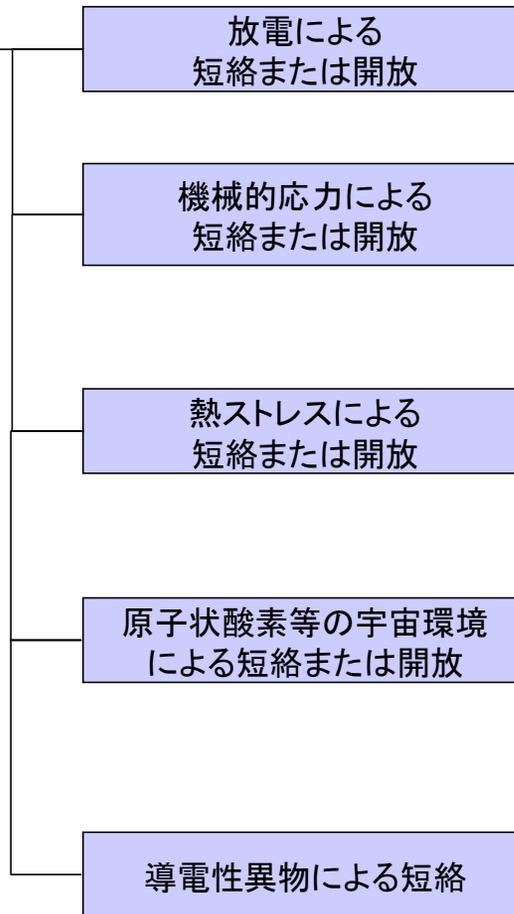
FTAから導出される発生シナリオ

(太陽電池パドル電カラインの故障)

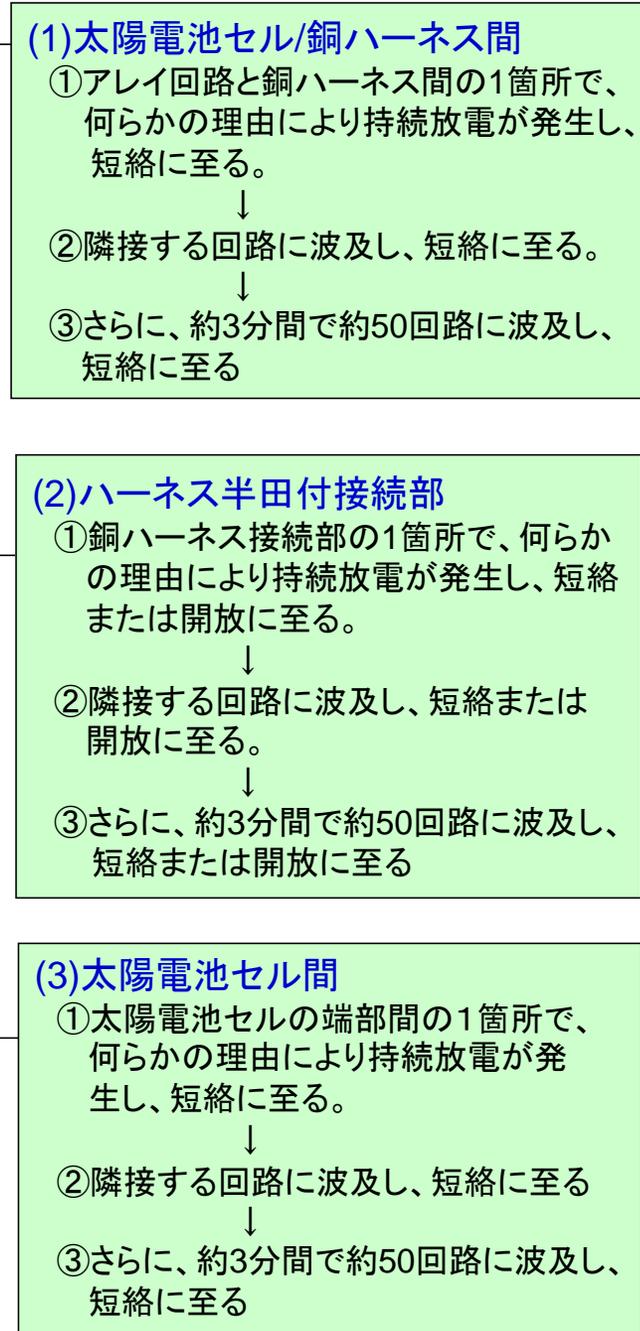
故障の木解析(FTA)による故障部位の抽出

太陽電池パドル電カラインの故障(△) (1)太陽電池セル/銅ハーネス間(短絡故障) (2)ハーネス半田付接続部(短絡または開放故障) (3)太陽電池セル間(短絡故障)
太陽電池パドルハーネスの故障(△)
太陽電池パドルの指向方向変動(×)
アレイ回路の機能劣化(×)
パドル駆動機構電カラインの故障(×)
パドル駆動機構接続ハーネスの故障(×)
シャント回路の故障(×)
シャント電力制御回路間ハーネスの故障(×)
電力制御回路の故障(×)
バッテリー制御回路の故障(×)

推定する故障モード



推定する故障要因(シナリオ)



仮説1-1

仮説1-1
太陽電池セル/銅ハーネス間



仮説1-2
仮説1-3

仮説1-2,1-3
銅ハーネス接続部



仮説1-4

仮説1-4
太陽電池セル間



FTAを用いた解析の結果、10月24日の約6KWから約1KWへの電力低下は、下記の何れかの部位の故障により発生した可能性が高い。

- ①太陽電池パドル電カライン
- ②太陽電池パドルハーネス

発生シナリオと検証事項

今回の報告事項

発生シナリオ (仮説2-1、2-2)	各事象を発生させる要因/条件	検証事項	
		解析・調査	試験
<p>太陽電池パドルハーネスで、MLIの帯電に起因する放電によりハーネスが開放・短絡</p> <p style="text-align: center;">MLIの帯電</p>	<p>○ MLI～ハーネス間のトリガ放電が発生するのに必要な帯電が「みどりII」で発生しうるかを確認する</p>	<p>オーロラ帯通過時の電子流入量 他衛星の帯電実績調査 MLI帯電電位解析</p>	<p>MLI帯電電位実証試験</p>
<p style="text-align: center;">ハーネスの損傷</p>	<p>○ 予備試験の結果、傷のないハーネスではトリガ放電が発生していないことから、傷を発生させる要因について試験による実証も含め検討を行っている</p> <ul style="list-style-type: none"> ・製造時の欠陥 ・軌道上環境に起因 <ul style="list-style-type: none"> — 熱的要因 — 放射線 — 原子状酸素 — デブリ — コールドフロー 	<p>ハーネス扱い方法の確認 — 原子状酸素による影響解析 デブリ衝突確率解析 —</p>	<p>ハーネス熱サイクル試験 電線クリープ試験 高温放置試験 高温環境下の電子線照射試験 試験検討中</p>
<p style="text-align: center;">MLI～ハーネス間のトリガ放電</p> <p style="text-align: center;">ハーネス間の単発的な放電</p>	<p>○ MLI～ハーネス間のトリガ放電及びハーネス間の単発的な放電が発生する条件を検討し、試験による実証を行っている</p> <ul style="list-style-type: none"> ・外部条件 <ul style="list-style-type: none"> — 地磁気 — プラズマ ・内部条件 <ul style="list-style-type: none"> — 傷つきハーネスの数 	<p>地磁気による起電力解析 プラズマ環境の調査 —</p>	<p>帯電/放電試験</p>
<p style="text-align: center;">ハーネス間の持続放電</p>	<p>○ ハーネス間の持続放電が発生する条件を検討し、試験による実証を行っている</p> <ul style="list-style-type: none"> ・内部条件 <ul style="list-style-type: none"> — 電圧 — ハーネス傷の大きさ — 傷つきハーネスの数 — MLIの穴の有無/サイズ 	<p>— — — —</p>	<p>帯電/放電試験 帯電/放電試験 帯電/放電試験 帯電/放電試験</p>
<p style="text-align: center;">隣接ハーネスへ波及</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">芯線の溶断(2-1) 芯線の短絡(2-2)</p>	<p>○ 隣接ハーネスへの波及が発生する要因を検討し、試験による実証を行っている</p> <ul style="list-style-type: none"> — 熱エネルギー — 絶縁性能の劣化 — ハーネスの分布 	<p>— — —</p>	<p>帯電/放電試験 高温絶縁耐性試験 高温環境下の電子線照射試験 ハーネス組立再現性試験</p>