

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4)

平成 16 年 3 月 8 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」の運用異常について、故障の本解析を行い、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/試験のうち、次の試験について進捗状況を報告する(参考2)。

ハーネスの損傷に係る試験
ハーネス間の放電に係る試験
隣接ハーネスへの波及に係る試験
ハーネス高温過熱時のガス量・組成確認試験

2. ハーネスの損傷に係る試験

2.1 試験の目的

これまでの予備実験の結果から、2本のハーネスの相対する位置に、芯線まで到達する程度の被覆の損傷が存在しないと、仮説2 - 1、2 - 2で想定しているようなハーネス間の放電は発生しないことがわかっている。

そのため、軌道上での環境条件によって、そのようなハーネス被覆の損傷が発生する可能性を確認するため、一連の検証試験を進めている。

2.2 検証試験の進め方

ハーネス被覆劣化への影響因子の切り分けとその複合環境での影響を確認することを目的として、各検証試験を段階的に実施している。

図2 - 1に、各検証試験の流れを示す。

2.3 検証試験の進捗状況

表2 - 1に、ハーネスの損傷に係る各検証試験の進捗状況を示す。

(1) 電線クリーブ試験

270 の高温環境下に 30 時間電線を曝した結果、電線被覆が褐色に変色し柔軟性が失われていたものの、電線の断面観察においても特に問題は無く、芯線の露出につながるような異常は確認されなかった。

(平成 16 年第 1 回調査部会および第 3 回調査部会において報告済み)

(2) ブーム / ハーネス熱サイクル試験

100 -230 の温度変化を 300 サイクルまで実施した結果、電線被覆が変色したものの、絶縁抵抗値に変化は無く、芯線の露出につながるような異常は確認されなかった。

(平成 16 年第 1 回調査部会および第 3 回調査部会において報告済み)

(3) 電線高温放置試験

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)高温環境下(230)に曝した結果、芯線の露出につながるような異常は確認されなかった。現在、電線の機械的特性の評価を実施中である。

(4) 高温環境下電子線照射試験

温度と電子線照射量をパラメータとして、試験を実施中。

現在までのところ、次の表に示すとおり、温度 16 、100 における軌道上電子照射線量 10 ヶ月相当分、30 ヶ月相当分、100 ヶ月相当分のケースについては試験を終了している。試験後の目視による外観検査では、これらのすべてのケースについて、被覆の亀裂等の異常は確認されなかった。

高温環境下電子線照射試験の試験ケースと進捗状況

		電子線照射量			
		3 ヶ月相当	10 ヶ月相当	30 ヶ月相当	100 ヶ月相当
温度	16	-	試験終了	試験終了	試験終了
	100	-	試験終了	試験終了	試験終了
	230	計画中	計画中	計画中	計画中

2.4 今後の予定

- (1) 高温環境下電子線照射試験において、引き続き、温度 230 のケースを実施する。
- (2) 複合環境での影響を確認するため、次の組合せ試験を実施する。(2 月下旬～3 月上旬実施予定)

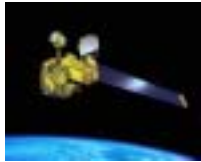
「電線高温放置試験」+「電線熱サイクル試験」

「高温環境下電子線照射試験」+「電線熱サイクル試験」

「高温環境下電子線照射試験」+「電線高温放置試験」+「電線熱サイクル試験」

- 軌道上における環境 -

軌道上10ヶ月間における「みどり」がおかれた軌道上環境を模擬し、ハーネス損傷の可能性の確認が必要



100 ~ 230 、10ヶ月間の熱サイクル(約4400サイクル)
1X10⁶ rad電子線被爆

- 地上における検証実験 -

ハーネス被覆の損傷可能性を確認するため、影響因子を確認しながら段階的に試験を実施

熱のみによる影響確認

電線クリープ試験

- 高温環境下(260 程度)に約30時間曝し、ブームハーネス湾曲部において、クリープ現象による電線芯線の露出が発生する可能性を確認する
- 試験結果は次のとおり
 - ・ 芯線露出なし
 - ・ 外観上の変色以外に変化無し
 - ・ 断面検査で被覆厚さは製造規格内

ブーム/ハーネス熱サイクル試験

- 軌道上での熱サイクルを模擬した実時間熱サイクルによりハーネス被覆が劣化する可能性を確認する。(300サイクル)
- 試験結果は次のとおり
 - ・ 外観上の変色以外に変化無し
 - ・ 絶縁抵抗値に変化無し

「高温」と「熱サイクル」と「電子線」による複合要因の影響確認

高温環境下電子線照射試験

- 230 等の高温環境下で、軌道上3ヶ月～100ヶ月に相当する電子線量を照射し、被覆劣化への影響を確認する

+

電線高温放置試験

- 230 の高温環境下に750時間(10ヶ月の200 以上となる累積時間相当)曝すことによる被覆劣化への影響を確認する

+

電線熱サイクル試験

- 電線高温放置試験および高温環境下電子線照射試験での供試体を用いて、熱サイクルの被覆劣化への影響を確認する

図2 - 1 ハーネスの損傷に関わる検証試験フロー

表2-1 ハーネスの損傷にかかわる検証試験の進捗状況

試験名	ブーム/ハーネス熱サイクル試験	電線クリープ試験	電線高温放置試験	高温環境下電子線照射試験	電線熱サイクル試験
目的	軌道上での熱サイクルによるハーネス被覆の劣化の可能性を確認する	ブームハーネスの湾曲部において、被覆のクリープ現象により電線芯線が露出する可能性を確認する	軌道上での高温環境による被覆劣化への影響を確認する	高温・電子被爆環境下において、被覆に亀裂が生じる可能性を確認する	高温放置環境/高温電子被爆環境にさらに熱サイクルが加わった場合の被覆劣化への影響を確認する
供試体	ブーム構造モデル(みどり)と「みどり」ハーネス同等品(レイケム55)+MLI	「みどり」ハーネス同等品(レイケム55)104本束	「みどり」ハーネス同等品(レイケム55)単線、4本より線、長さ60mm	「みどり」ハーネス同等品(レイケム55)単線を試料ホルダに設置(MLI無し)	電線高温放置試験/高温環境下電子照射試験後の供試体を使用
試験条件	- 温度サイクル:100 /50分 -230 /60分 - 雰囲気環境:真空(10-5torr以下) - サイクル数:300	- 温度:260 -270 - 雰囲気環境:GN2大気圧下 - 時間:約30時間	- 温度:230 - 雰囲気環境:真空(10-1 torr以下) - 時間:750時間(10ヶ月の200 以上となる累積時間に相当) - 負荷荷重:100gr - 300gr	- 温度:16 、100 、230 - 雰囲気環境:真空(10-1torr以下) - 電子線照射量: 軌道上 3ヶ月相当 10ヶ月相当 30ヶ月相当 100ヶ月相当 - 電子線エネルギー:120keV	- 温度サイクル:70 -200 - 雰囲気環境:真空(10-5torr以下) - サイクル数:4400
進捗状況及び試験結果	- 外観上の変色以外に変化なし - 絶縁抵抗値に変化なし	- 外観上、褐色に変色した以外に変化なし - 断面検査の結果、被覆厚さは、製造規格内であった。 - 絶縁抵抗値については計測できなかった。	(機械特性評価中)	- 温度16 、100 のケースについては、外観上の変色以外に変化なし - 温度230 のケースは準備中	(試験計画中)
ハーネス損傷の可能性	×	×	未	×(一部未)	未

3. ハーネス間の放電に係る試験

3.1 試験の目的

平成 16 年第 3 回調査部会で報告したとおり、これまでに MLI とハーネスの間のトリガ放電に起因するハーネス間持続放電の発生及び隣接する 1 回路 (HOT/RTN) への波及を試験により確認している。しかし、試験設備の制約から、0.5torr という比較的低真空下での試験であったことから、より高真空下での試験の必要性が指摘された。

今回は、

MLI 内の圧力がハーネスからのアウトガスにより背圧に比べて上昇することを確認する

高真空下におけるハーネス間の放電により炭化導電路(トラック)が形成されることを確認する*

ことを目的に試験を実施する。

*トラックが形成されれば持続放電に至ることはこれまでの試験で確認されている

3.2 試験方法

(1) 供試体

、 の試験とも、「みどりII」実機と同等のハーネス及び MLI を使用した。

(2) 試験概要

九州工業大学の試験設備を使用して試験を実施した。

MLI 内圧測定

試験コンフィギュレーションを図 3-1 に示す。

事前に 120 ～ 250 、7 時間/サイクルの条件で 40 サイクルを負荷したハーネス束を MLI で巻いた。MLI は実機と同じようにベルクロテープで貼り合わせ、両端はタイラップで縛った。

軌道上温度環境とするため、ハーネス束に電流を流すことによって温度を上昇させ、100 ～ 230 で MLI 内部の真空度を計測した。

高真空下の放電確認

試験コンフィギュレーションを図 3-2 に示す。

予め被覆に傷をつけたハーネス 2 本 (HOT/RTN の一組) 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 (SAS、V1) を接続した。被覆の傷を作る際にはサーマルワイヤストリッパを用い、芯線に傷がつかないように配慮した。

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

真空中(約 10^{-5} torr、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 とハーネス間のトリガ放電、ハーネス間の放電、ハーネス被覆のトラック形成をモニタした。

ハーネス温度は軌道上を模擬し、100 ～ 230 に制御して試験を実施した。

試験条件を表 3-1 に示す。

表 3-1 試験条件

項 目	条 件	備 考
ハーネスの傷の形状	環状	サーマルワイヤストリッパを用いて、芯線に傷がつかないようにした。
チャンバ背圧	10^{-5} torr	筑波宇宙センターの試験環境(約 0.5 torr)より放電が発生しにくい環境である。
プラズマ密度	なし	軌道上より放電が発生しにくい環境である。なお、これまでの試験の結果から、プラズマの有無は MLI で巻かれたハーネス間の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	-1.2kV(ノミナル)	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。
ハーネス間電位	約 60V(SAS*)	軌道上と同等。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	$C_{ext}=4.4\text{nF}$	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 最内層と電線の間の容量をもとに C_{ext} の値を算出した。

3.3 試験結果

MLI 内圧測定

図 3-3 にハーネス温度と MLI 内真空度との関係を示す。MLI 内圧はハーネス表面温度 100 で約 10^{-4} torr、200 で 10^{-3} torr となった。その間のチャンバ真空度は約 10^{-5} torr ~ 10^{-4} torr 台であった。

高真空下の放電確認

ハーネス温度 100、チャンバ真空度 10^{-5} torr 台の環境で、トリガ放電が発生することを確認した。

次に、ハーネス温度 230 でトリガ放電を継続させ、ハーネス間の放電発生ならびに被覆でのトラック形成、線間抵抗の低下(約 68Ω)を確認した(図 3-4、3-5、3-6)。

なお、MLI 内圧測定結果により、ハーネス温度 100 では、MLI 内真空度は 10^{-4} torr 程度、230 では、 10^{-3} torr 程度であると推定される。

3.4 考察及び今後の予定

ハーネスを軌道上温度として MLI 内真空度を測定し、 10^{-3} torr 台となる結果を得た。事前に 120 ~ 250、7 時間/サイクルの条件で 40 サイクルを負荷したハーネスを用いたが、打上げ 10 ヶ月後においてもアウトガスが発生し続けることを確認するため、別途高温に長時間曝したハーネスからのアウトガス量を測定することを検討する。

チャンバ背圧 10^{-5} torr 台でハーネスを軌道上温度とした条件で、放電発生及びハーネス被覆でのトラック形成を確認した。今後は、多数の隣接ハーネスへの波及試験を実施し、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。

なお、太陽電池ブランケット内のダミー銅ハーネスは、ブームハーネスに巻かれた MLI と同様に接地されていないことから、このダミー銅ハーネスの帯電/放電による影響について、試験及び評価を実施中である。

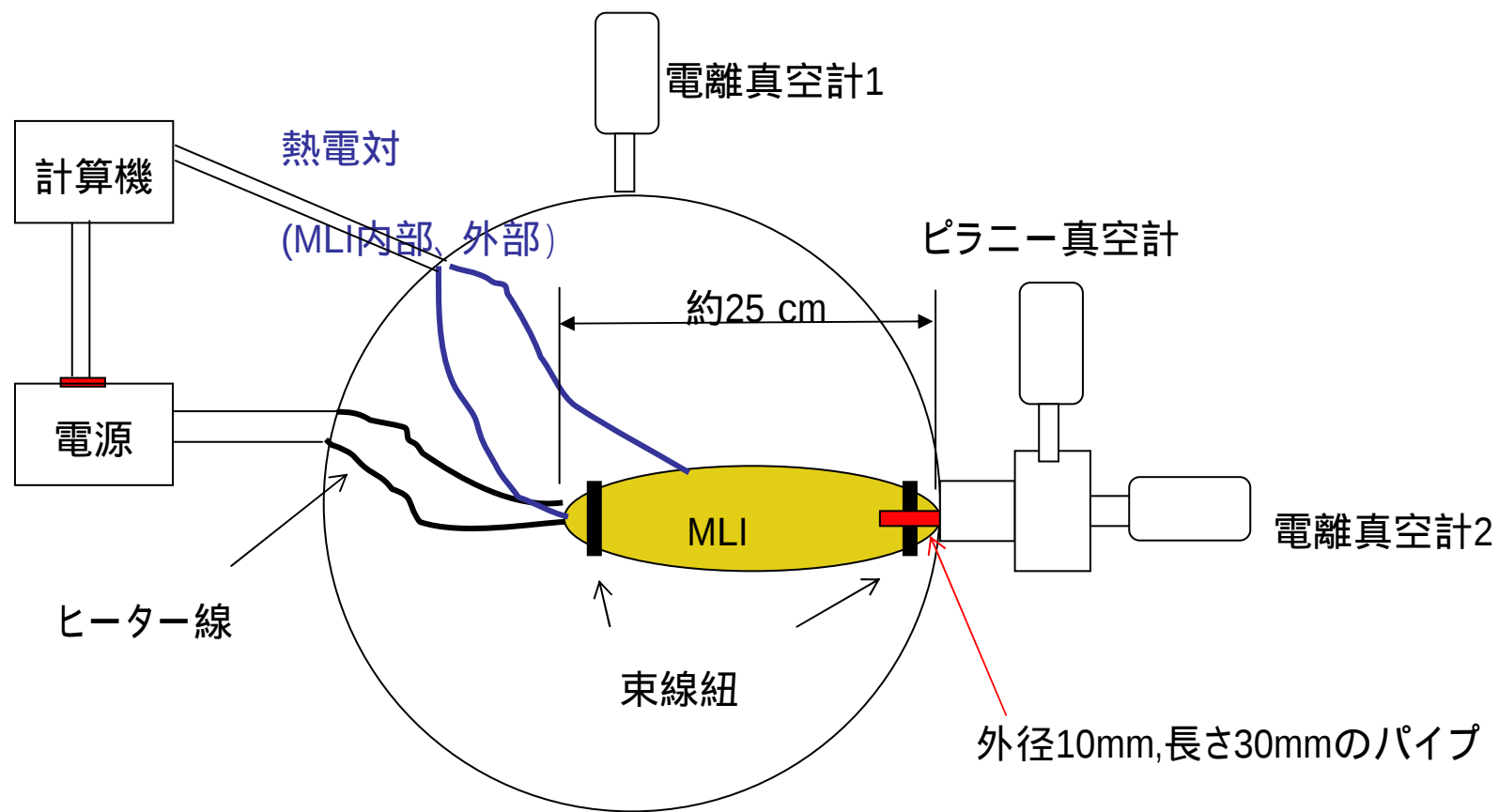


図 3-1 MLI 内圧確認コンフィギュレーション

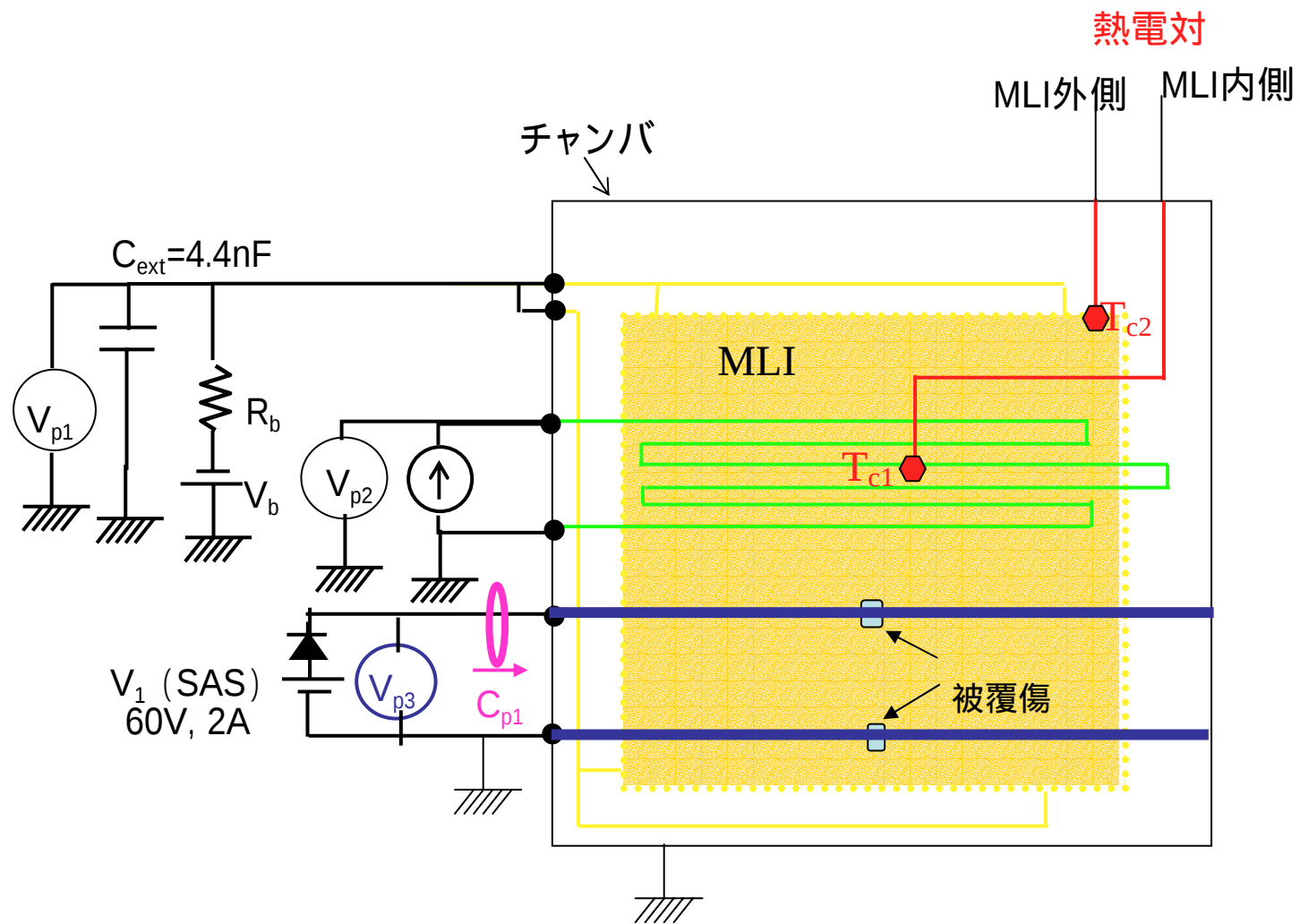


図 3-2 高真空下放電確認コンフィギュレーション

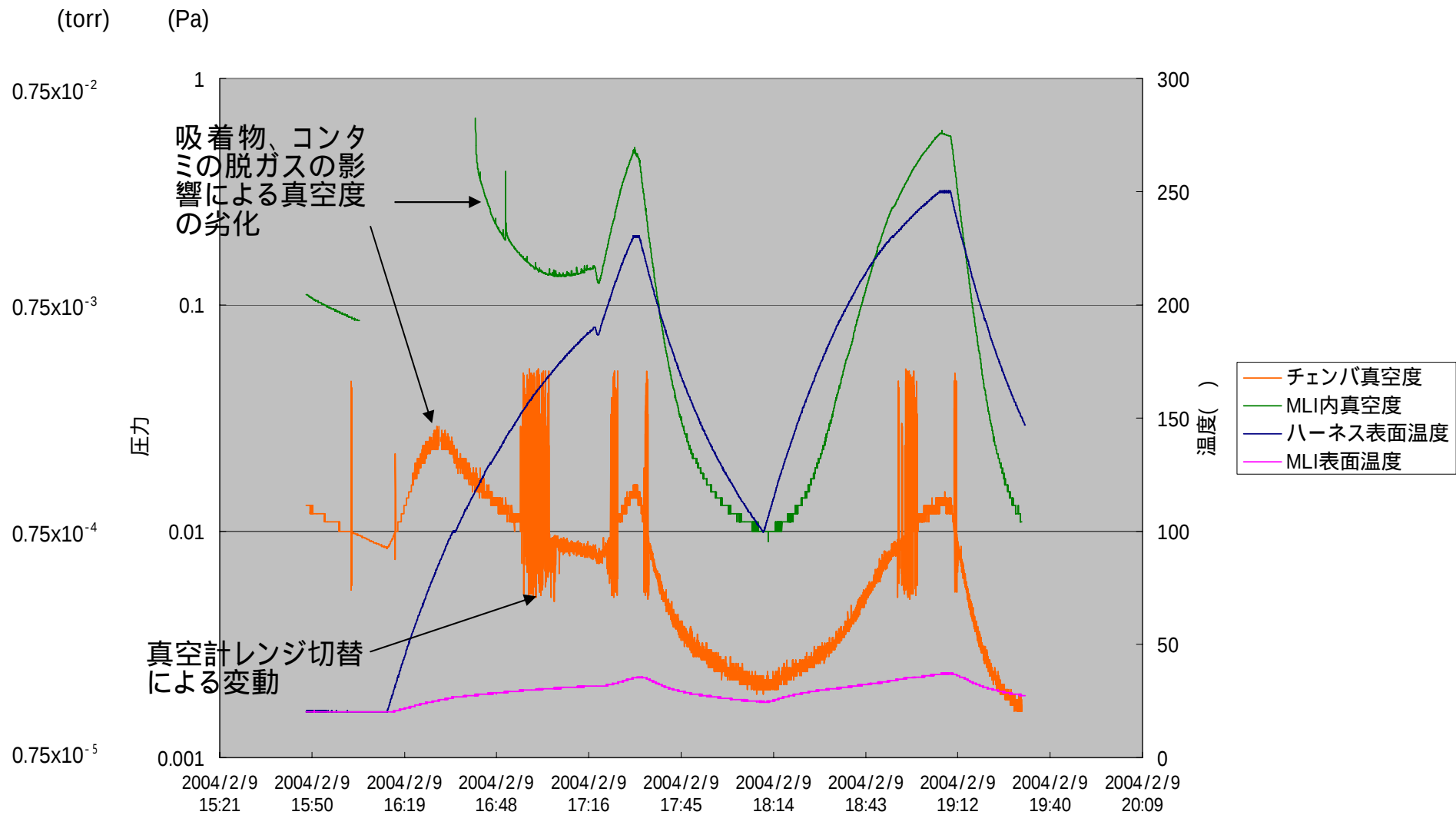


図 3-3 MLI 内圧確認結果

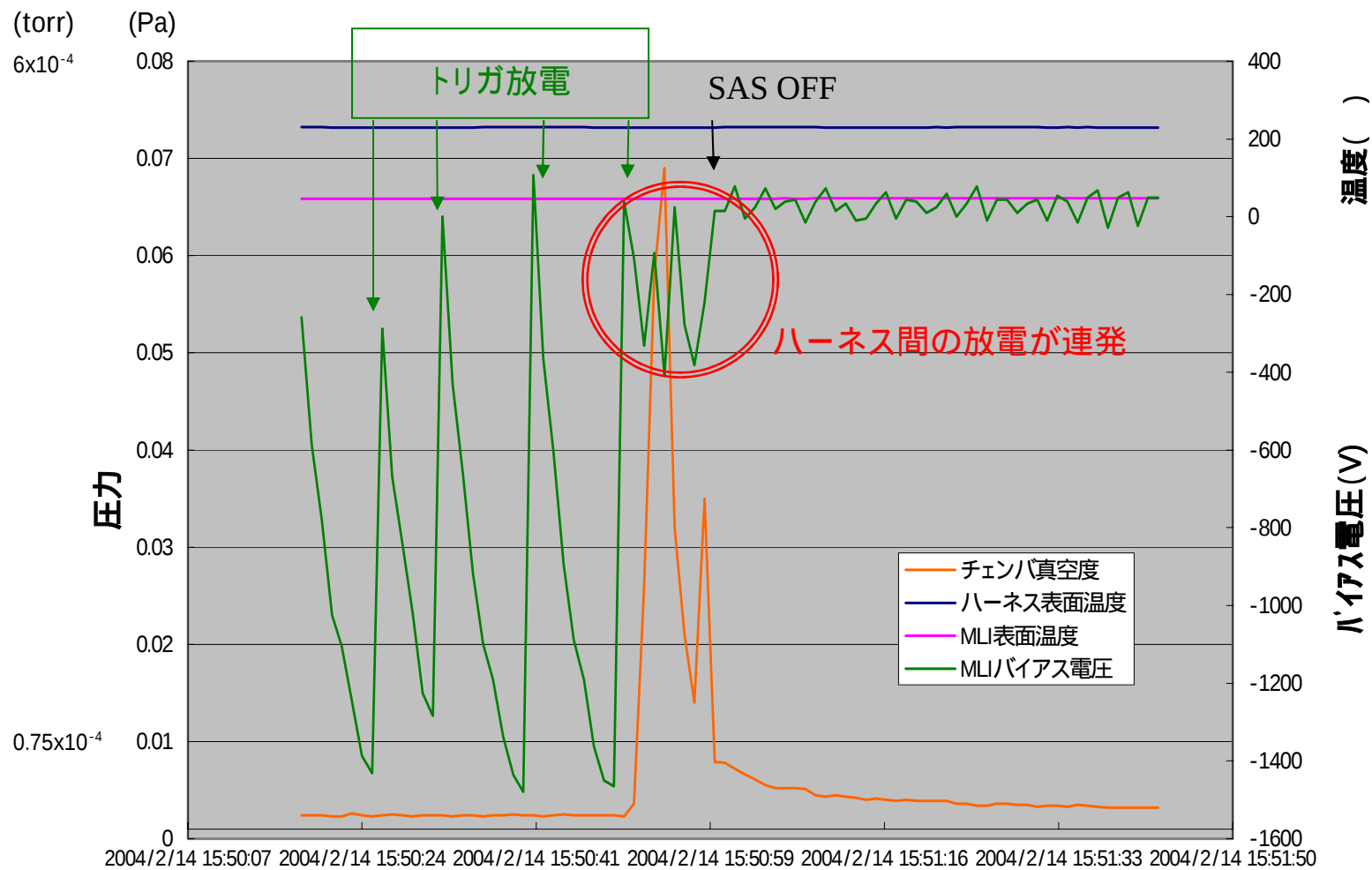


図 3-4 高真空下放電確認結果 トリガ放電波形 (ハーネス温度 230)

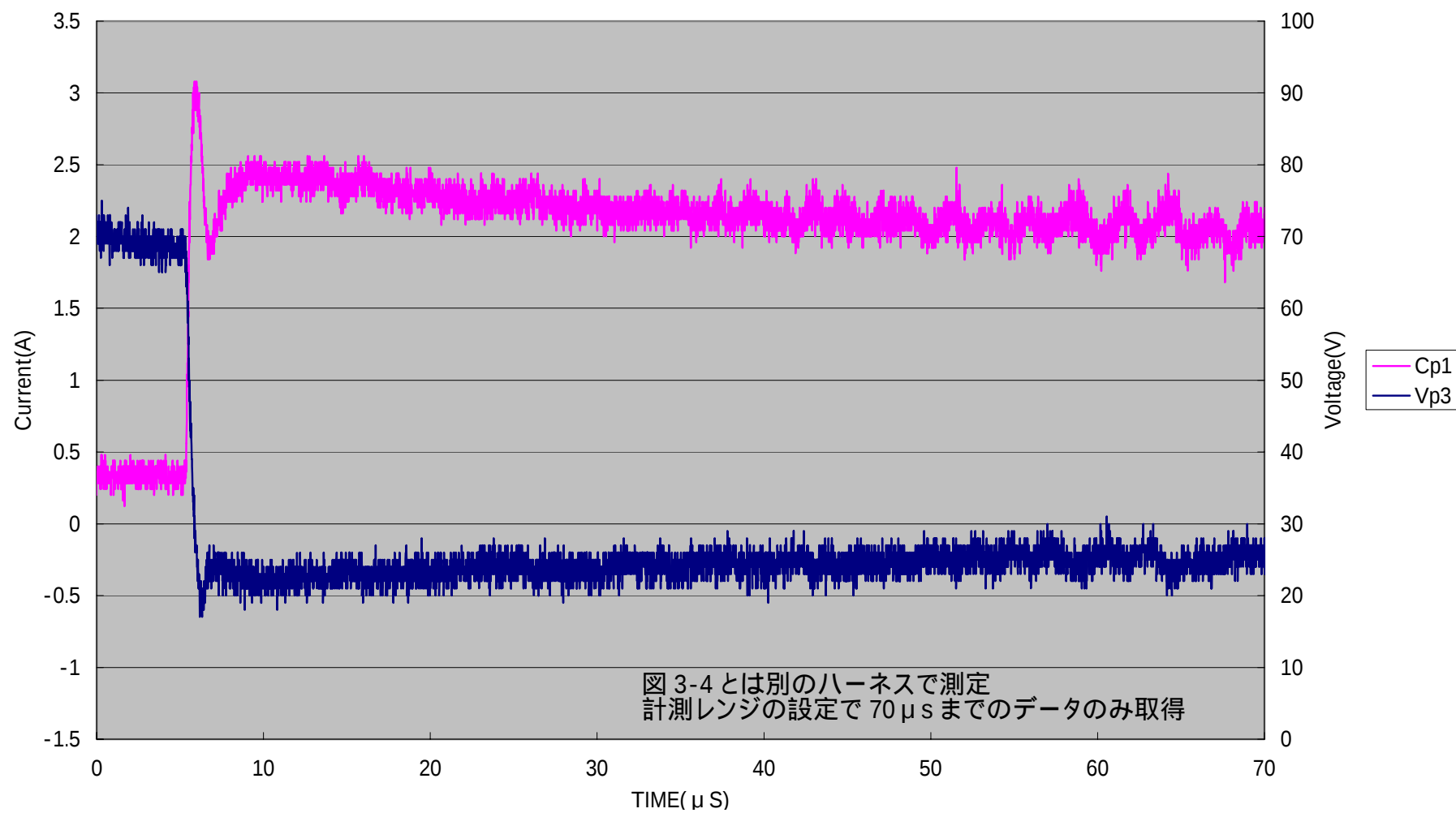
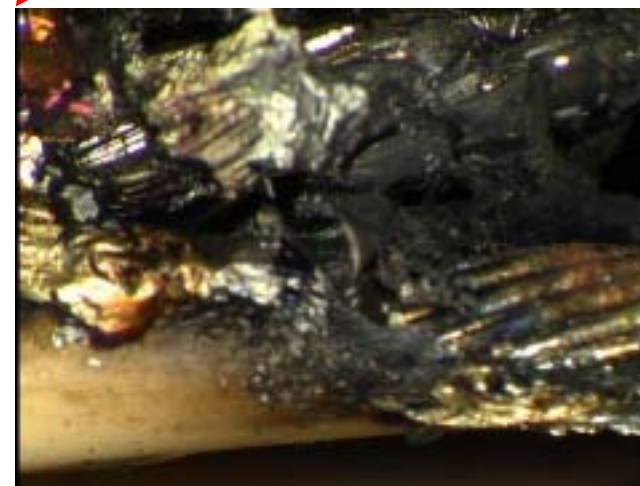
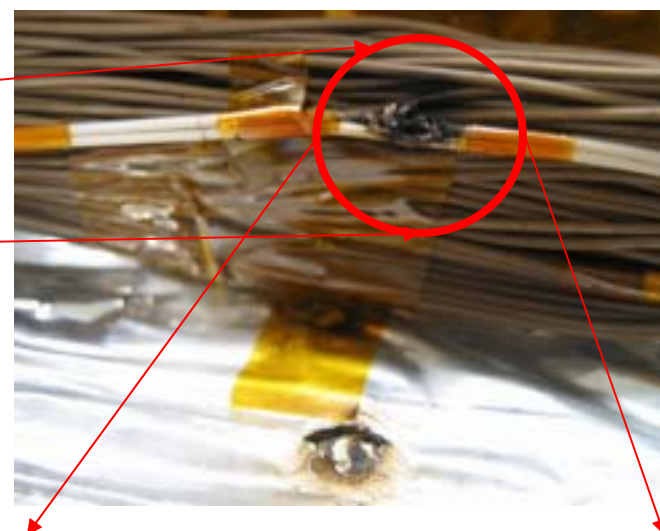


図 3-5 高真空下放電確認結果 ハーネス間放電波形



試験前



1mm

ハーネストリガー放電試験後放電発生箇所
上;全景 下;クローズアップ

図 3-6 高真空下放電確認結果 写真

4. 隣接ハーネスへの波及に係る試験

4.1 多数回路波及確認試験

4.1.1 試験の目的

これまでの試験を通じ、MLI とハーネス間のトリガ放電からハーネス間の持続放電が発生し、隣接する1回路(HOT/RTN)のハーネスが焼損・短絡することは確認されている。本試験では、隣接する多数回路への波及を確認することを目的とする。

4.1.2 試験概要

(1) 供試体

「みどりII」実機と同等のハーネス

(2) 試験方法

試験コンフィギュレーションを図4 - 1に示す。

筑波宇宙センターの真空チャンバを使用する。1組の傷つきハーネスに9組の無傷のハーネスを隣接して配置し、MLIで囲む。それぞれのハーネスのHOT/RTN間には60Vを印加する。MLIに負バイアスをかけてMLIと傷つきハーネス間のトリガ放電が発生させ、それに起因する傷つきハーネス間の持続放電が隣接するハーネスへ波及していく過程を、各ハーネスのHOT/RTN間電圧を測定することにより観察する。

18本のハーネス(9回路)を隣接させ、傷つきハーネスに接しないハーネスへも波及することを確認する。その際、各回路へ波及するまでの時間を計測し、大電力ハーネス約52回路への波及過程について類推する。

(3) 試験条件

背圧: 10^{-2} torr 以下

プラズマ: なし

傷つきハーネス HOT/RTN 間電位: 60V (SAS *)

隣接ハーネス HOT/RTN 間電位: 60V (SAS × 3、通常電源 × 6)

* SAS: アレイ回路電圧模擬用電源

4.1.3 試験結果(速報)

隣接する 9 回路すべてに波及したことを確認した。

図 4 - 2 に試験後のハーネスの外観を示す。被覆は炭化し、ハーネス同士が溶着していた。また、すべての回路の HOT ラインは断線していた。

図 4 - 3 に隣接回路への波及の経過をグラフ化した。

約 30 秒間ですべての回路が焼損した。また、データ取得間隔(0.5 秒)以内に複数の回路が焼損したことも確認した。

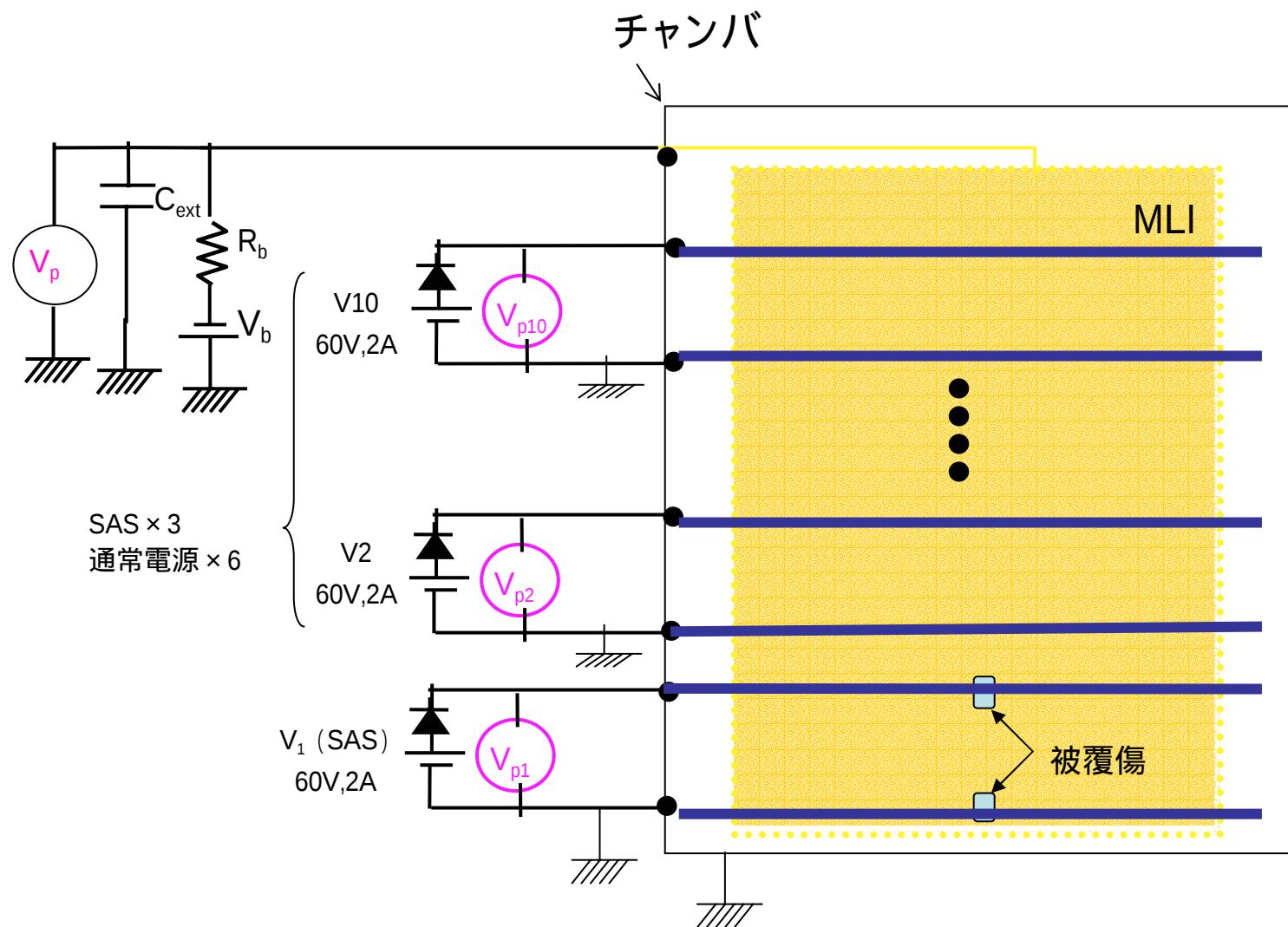


図4 - 1 多数回路波及確認試験コンフィギュレーション

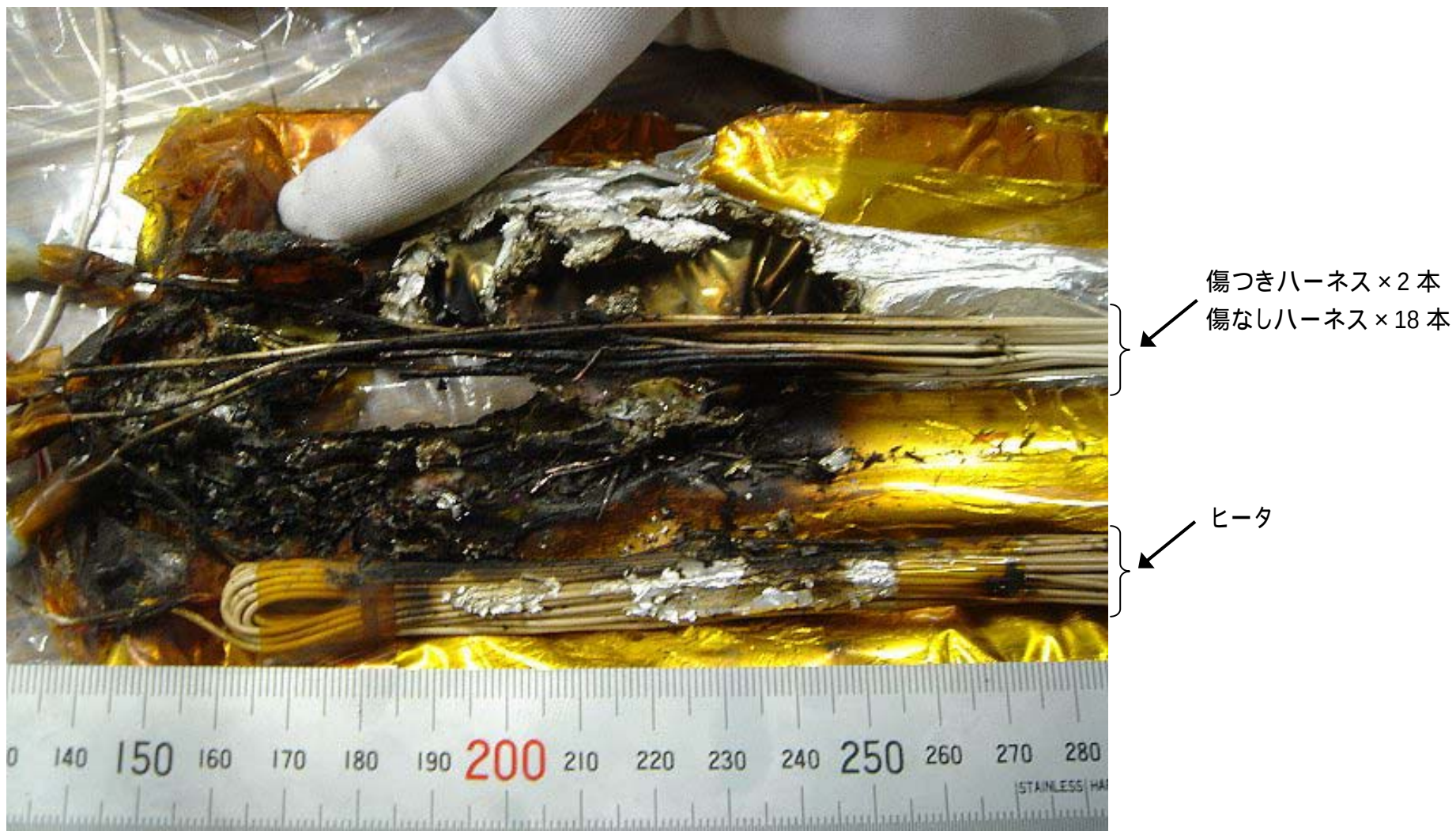


図4 - 2 試験後のハーネス外観

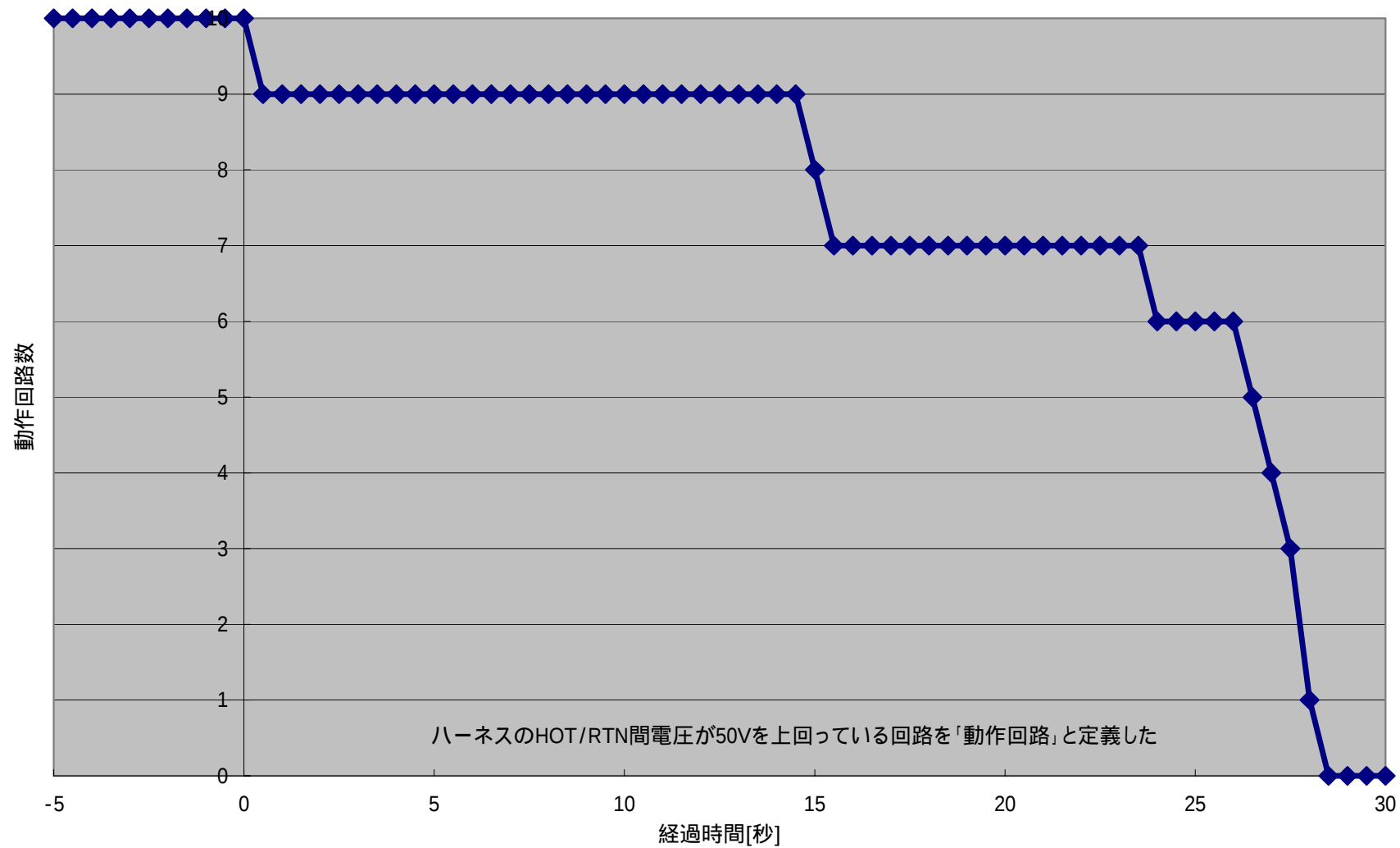


図4 - 3 隣接回路への波及の経過

4.2 太陽電池パドル・ブームハーネスの布線手順の確認

「みどり」太陽電池パドル・ブームハーネスを製作し、太陽電池パドルに布線する手順は、大きく分けると表4 - 1に示すステップに分類される。

図4 - 4に、「みどり」太陽電池パドル・ブームハーネスの製作・布線手順のフローを示す。

表4 - 1 「みどり」太陽電池パドル・ブームハーネスの製作・布線手順

No.	作業ステップ	備 考
手順 1	<u>ハーネス組立(1)[太陽電池側コネクタ取付け](注1)</u> 線材の切り出し、端末処理、太陽電池側コネクタの取付けを行う。	1系用、2系用にそれぞれコネクタ3系統ずつ組立。
手順 2	<u>「みどり」太陽電池パドル実機への取付け(1)(注2)</u> 1) ハーネスに取り付けられた太陽電池側コネクタを、太陽電池パドルのコネクタと嵌合させる。 2) コンテナベースへ、ハーネスを仮固定する。 3) マスト伸展機構へ、ハーネスを仮固定する。	1系用、2系用の各3系統のハーネスについて、No.2～3の作業を繰り返して、6系統のハーネスの仮固定を行う。
手順 3	<u>「みどり」太陽電池パドル実機への取付け(2)(注2)</u> 1) 大電力ハーネスと小電力ハーネスの電線を分岐する。 2) 分岐した大電力ハーネスと小電力ハーネスを、それぞれブーム部へ仮固定する。	
手順 4	<u>「みどり」太陽電池パドル実機への取付け(3)(注3)</u> 1) ブーム上に取り付けられている6系統の仮固定されたハーネスを1つの束にまとめて、成形する。 2) 構造コーナー部に接触する部分は、ハーネス保護のため、ガラスクロステープをハーネスに巻く。 3) コンテナベース及びマスト伸展機構にハーネスを本固定。 4) ハーネスに MLI を巻き、MLI の上から束線作業を行い、ハーネスをブームに固定する。	大電力ハーネス、小電力ハーネスのそれぞれに対して本作業を行う。
手順 5	<u>ハーネス組立(2)[PDM 側コネクタ取付け]</u> PDM 側各コネクタへの線材の分岐作業、ハーネス線材の端末処理、PDM 側コネクタの取付けを行う。	大電力ハーネス、小電力ハーネスのそれぞれに対して本作業を行う。

- (注1) 線材は、作業台上でリールから送り出して必要な長さに切り、コネクタ取付けに先立ち、端末処理を行う。
1系用コネクタ3個、2系用コネクタ3個にそれぞれ線材を取付け、完成したハーネスは保管・取扱いの為、それぞれ円状に巻いておく。
- (注2) ハーネスの仮固定時は取扱いに留意し、円状に巻かれたハーネスを1名の作業者が手で持ち、巻いたハーネスを解きながら、他の作業者達が仮固定を行っていく。
- (注3) ブーム上に仮固定したハーネスを、マスト伸展機構側から順にブームから仮固定を解除し、複数の作業者がハーネスを手で支えて最終固定作業を行う。

なお、「みどり」実機における太陽電池パドル・ブームハーネスの製作・布線作業(表4-1)に当たっては、注意事項を手順書に規定し、作業ステップ毎の点検・検査を実施している。(表4-2)

表4-2 「みどり」実機における太陽電池パドル・ブームハーネスの
製作・布線作業時の注意事項、点検・検査内容

作業項目	注意事項、点検・検査内容
線材の取扱い時	線材を傷つけないよう、取扱いに注意することを指示。
電線被覆除去作業時	電線末端の加工状態(芯線、被覆)を7倍の拡大鏡で検査。 (上記点検で判定が難しい場合は、実体顕微鏡で倍率を上げて検査。)
ハーネス布線後点検 (線材外観の点検)	ごみの付着、きず、変色等の異常がないことを確認。
ハーネス布線後点検 (コネクタ外観の点検)	コンタクトに熱収縮チューブが挿入され、破れがないこと。 インシュレータにきず、よごれのないこと。
接続点検	絶縁耐圧(1000V _{AC})測定。 絶縁抵抗(500V _{DC})測定。

「みどり」のハーネス組立、実装後は、ハーネス単体がブームから取り外されて扱われることはなかった。

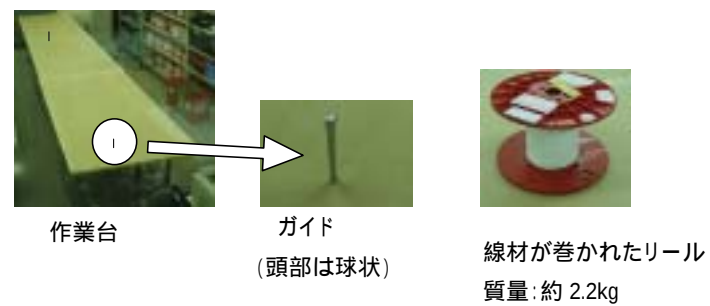
太陽電池パドル・ブームハーネスの製作・布線作業手順

(写真は非フライト品、図の尺度はノンスケール)

手順1:ハーネス組立(1)[太陽電池側コネクタ取付け]

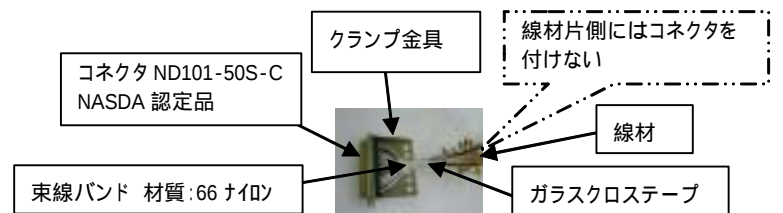
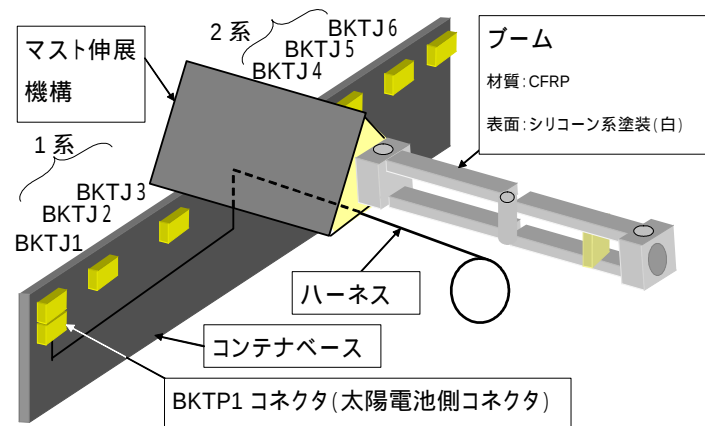
1-1:線材の切り出し、末端処理、太陽電池側コネクタの取付け。(注1)

(注1) 線材は、作業台上でリールから送り出して必要な長さに切り、コネクタ取付けに先立ち、末端処理を行う。
1系用コネクタ3個、2系用コネクタ3個にそれぞれ線材を取付け、完成したハーネスは保管・取扱いの為、それぞれ円状に巻いておく。



手順2:太陽電池パドル実機への取付け(1)(注2)

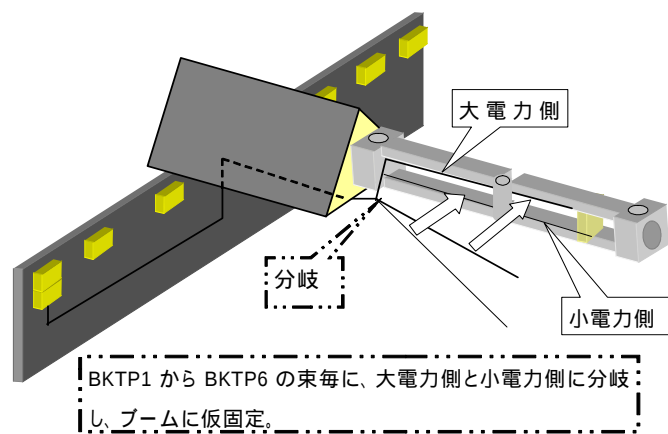
2-1: ハーネスに取り付けられた太陽電池側コネクタを、太陽電池パドルのコネクタと嵌合。
2-2: コンテナベースへ、ハーネスを仮固定。
2-3: マスト伸展機構へ、ハーネスを仮固定。



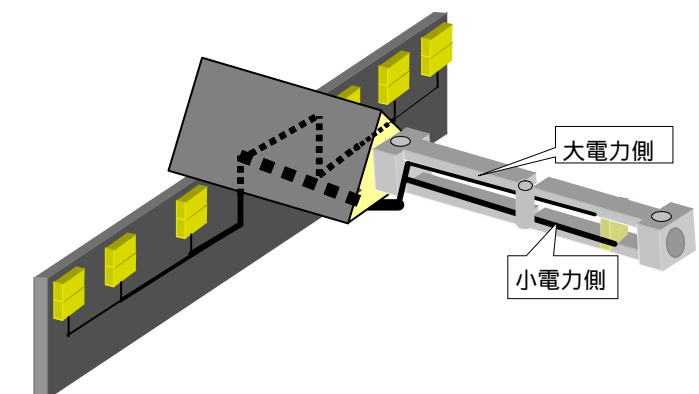
- 1系用、2系用の各3系統のハーネスについて、手順2、3の作業を繰り返して、6系統のハーネスの仮固定を行う。
- 電力線分布状況確認試験では、手順2 - 3のマスト伸展機構の仮固定から、手順4までの作業を繰り返して行い、各試行での電力線の分布状況を計数・調査した。
- その結果、ハーネス束外周上及びハーネス束内部で、1系 HOT ライン、2系 HOT ライン、RTN ラインはそれぞれ同一線種で大きく偏ることなく、ほぼ一様にばらついて分布していることが確認できた。

手順3:太陽電池パドル実機への取付け(2)(注2)

3-1: 大電力ハーネスと小電力ハーネスの電線を分岐。
3-2: 分岐した電線を仮に束ねてブーム部へ仮固定。



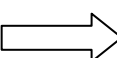
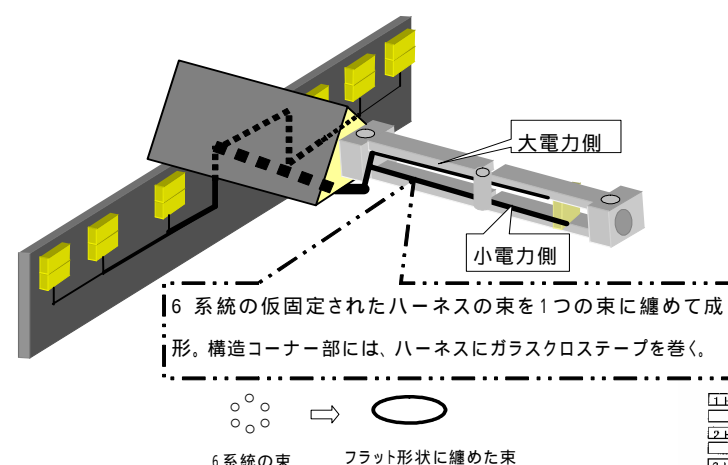
BKTJ1からのハーネス1系統を仮固定した図



BKTJ1からBKTJ6までのハーネス6系統を仮固定した図

手順4:太陽電池パドル実機への取付け(3)(注3)

4-1: ブーム上6系統の仮固定されたハーネスを1つの束にまとめて成形。
4-2: 構造コーナー部に接触する部分は、ハーネス保護のため、ガラスクロステープをハーネスに巻く。
4-3: コンテナベースおよびマスト伸展機構にハーネスを本固定。
4-4: ハーネスに MLI を巻き、MLI の上から束線作業を行い、ハーネスをブームに固定。

コネクタ番号 PADJ1
コネクタ型番 ND101-50P-C

1 HOT	6 HOT	11 HOT
2 HOT	7 HOT	12 HOT
3 HOT	8 HOT	13 HOT
4 HOT	9 HOT	14 HOT
5 HOT	10 HOT	15 HOT
1 RTN	6 RTN	11 RTN
2 RTN	7 RTN	12 RTN
3 RTN	8 RTN	13 RTN
4 RTN	9 RTN	14 RTN
5 RTN	10 RTN	15 RTN

* 空白ピンはコンタクトのみ挿入

PDM 側コネクタ ピン配置図

手順5:ハーネス組立(2)[PDM 側コネクタ取付け]

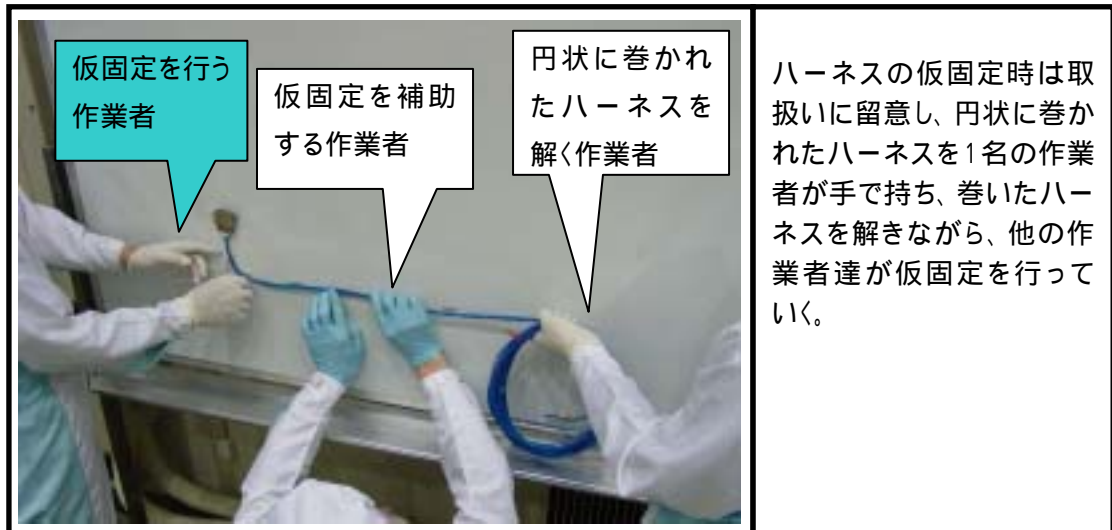
5-1: PDM 側各コネクタへの線材の分岐作業。
5-2: ハーネス線材の末端処理(手順1と同じ)
5-3: PDM 側コネクタをコネクタブラケットへ取付け。

- (注2) ハーネスの仮固定時は取扱いに留意し、円状に巻かれたハーネスを1名の作業者が手で持ち、巻いたハーネスを解きながら、他の作業員達が仮固定を行っていく。
- (注3) ブーム上に仮固定したハーネスを、マスト伸展機構側から順にブームから仮固定を解除し、複数の作業員がハーネスを手で支えて作業を行う。

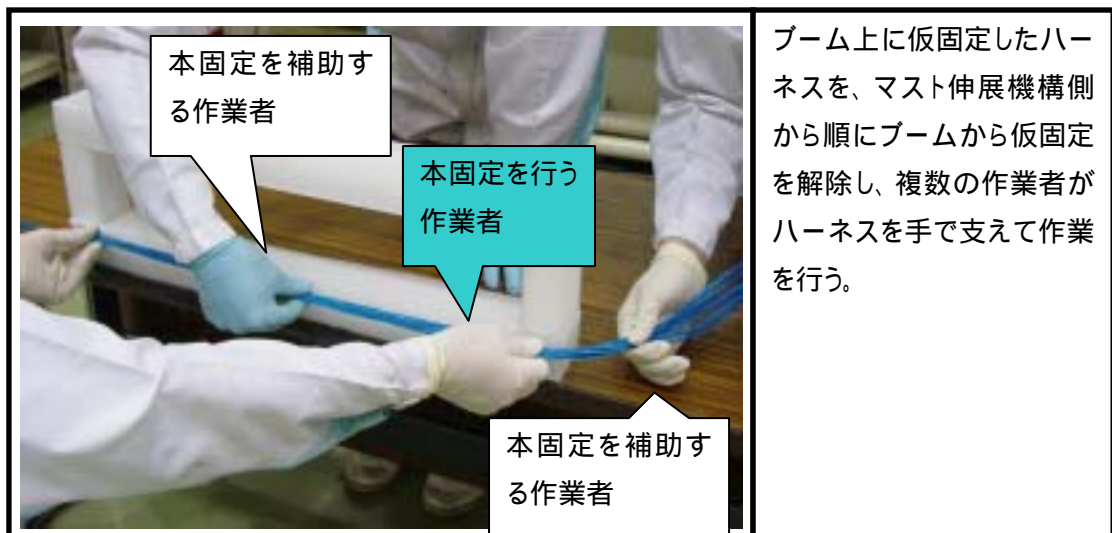
(図4 - 5)

ハーネス布線作業のイメージ

仮固定時の作業イメージ



本固定時の作業イメージ



【注】 実際の線材は白色

4.3 ハーネス束における電力線分布状況の確認

「多層断熱材 (MLI) とハーネス間の放電をトリガとするハーネス間の短絡」が発生するには、ハーネス束外周上で1系 HOT、2系 HOT、RTN が、それぞれ異なる線種と隣接して存在することが必要条件となる。また、6kWから1kWへの電力低下時において、1系と2系の電力の下がり方に大きな差異はないことから、ハーネス束内部に1系と2系の電力線が大きく偏ることなく、ほぼ一様に分布していたものと考えられる。(下図参照)

これらを確認するために、「みどり」熱構造モデル (STM) を用いて、表4 - 1の No. 2のマスト伸展機構へのハーネスの仮固定からNo. 4までの作業を繰り返して行い、各試行での電力線の分布状況を計数・調査した。その結果、ハーネス束外周上及びハーネス束内部で、1系 HOT ライン、2系 HOT ライン、RTN ラインはそれぞれ同一線種で大きく偏ることなく、ほぼ一様にばらついて分布していることが確認できた。

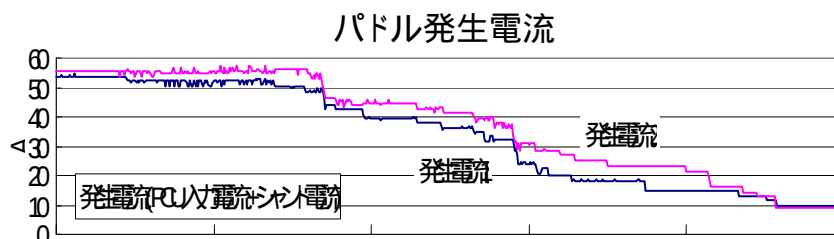
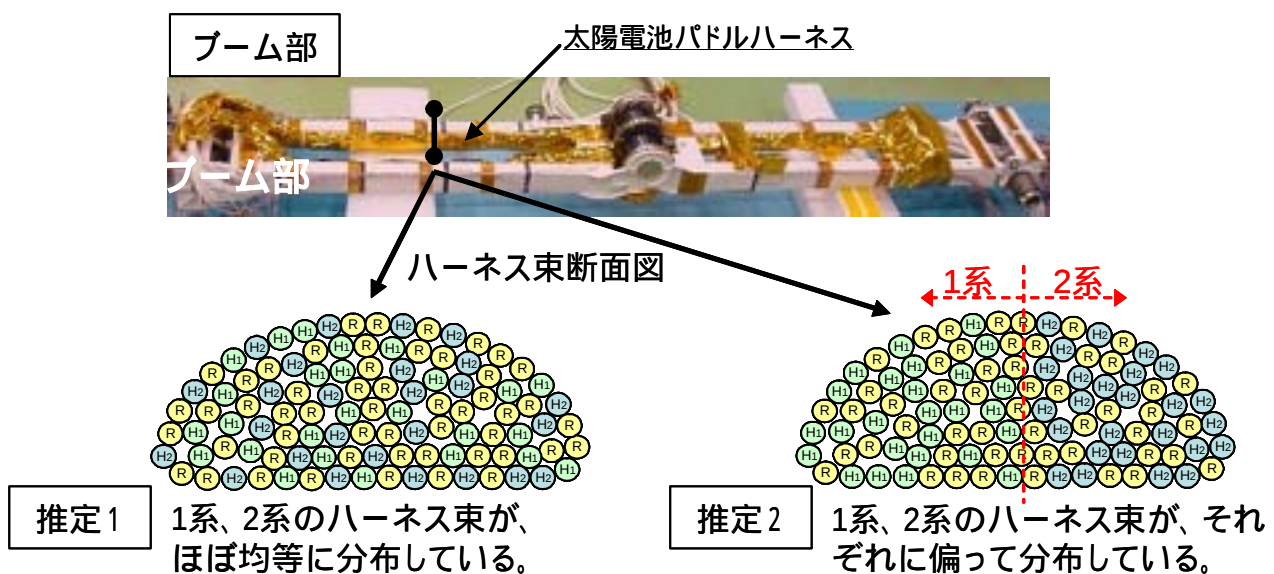


図4 - 4 ハーネス束の分布 (概念図)

5. ハーネス高温過熱時の発生ガス量・組成確認試験

5.1 試験の目的

発生電力低下時に衛星の軌道変化や姿勢変動(事象B)が観測されており、この原因として太陽電池パドルのブーム部のハーネスが何らかの要因により過熱し、被覆がガス化して MLI の隙間、穴等から噴出した可能性が考えられる。ハーネス被覆がガス化 / 噴出することにより衛星に力が作用したというシナリオの妥当性を確認することを目的として、ハーネス高温過熱時の発生ガス量・組成確認試験を実施する。

5.2 試験後の評価手順

試験後の評価手順を図5.1に示す。試験の結果、得られた平均分子量(推定値)、質量減少率を用いて、ガス化した被覆の長さを推定し、その妥当性を評価する。但し、本評価の精度は解析モデル及びパラメータの誤差を考慮すると、オーダーを評価する程度であると考ええる。

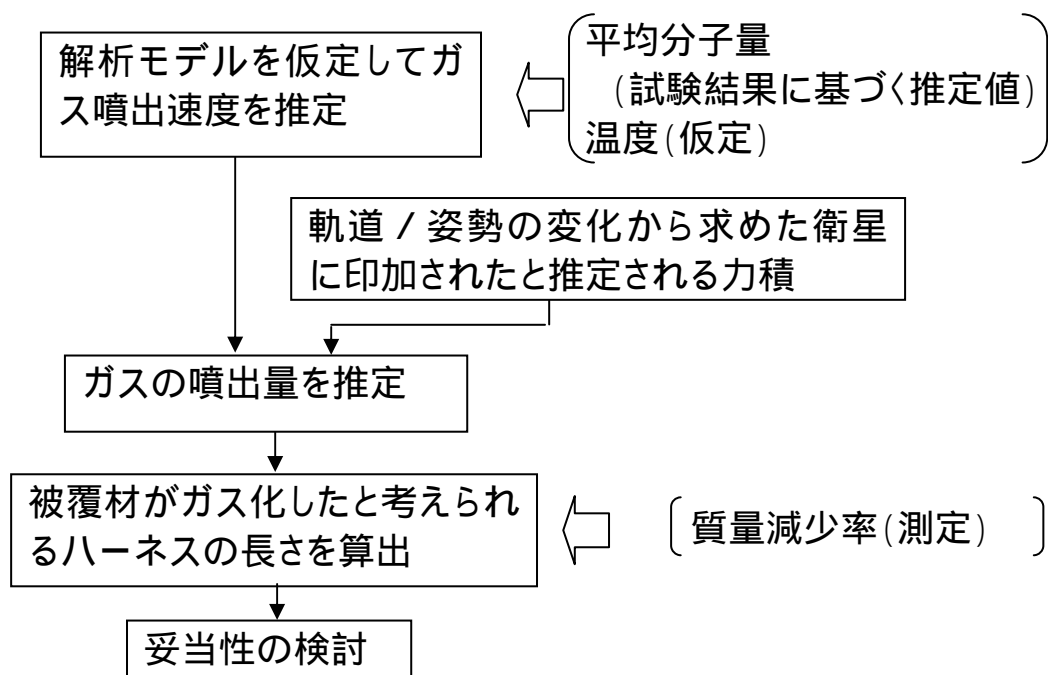


図5.1 ガス噴出シナリオ評価手順

なお、ここでは衛星の姿勢テレメトリに変化が観測されている発生電力低下開始直後からの約4分間について、ハーネス被覆ガス化/噴出シナリオの評価を行った。それ以降のガスの発生については、姿勢テレメトリに変化が見られないことから不明である。

5.3 試験概要

本試験は、太陽電池パドルハーネスが高温になった時に、その被覆材から放出されるガスの種類と濃度(最終的には平均分子量)、および温度に対する質量減少率のデータを取得することものである。以下に試験概要を述べる。

(1) 供試体

「みどりⅡ」実機と同等のハーネスの被覆のみを測定に供した。

(2) 測定概要

使用した JAXA の設備のコンフィギュレーションを図5.2に示す。概略の測定手順は以下の通りである。

- (a) 試料の質量を測定する。
- (b) 試料を加熱炉の中へ設置する。
- (c) 加熱炉に不活性ガスを導入し、中の空気を置換する。
- (d) 試料を設定温度まで加熱し、所定の時間維持する。
- (e) サンプルング容器を真空に引いておく。
- (f) 所定の加熱時間が終わったらサンプルング容器に加熱炉内のガスを取り込む。
- (g) ガス検知管で加熱炉内のガスを吸入し、ガスクロマトグラフィー^{*1}(以下、GC)で検知できないガスの濃度を測定する。今回はフッ化水素用の検知管を使用した。(加熱はここまで継続する)
- (h) サンプルングしたガスを GC 及びガスクロマトグラフ質量分析計^{*2}(以下 GCMS)に導入して成分分析を実施する。
- (i) 加熱後の試料の質量を測定する。

*1【ガスクロマトグラフィー】

700 までの沸点をもつ揮発性物質(気体・液体)の分離・同定に適する分離分析法

*2【ガスクロマトグラフ質量分析計】

物質を構成している個々の化合物の質量を正確に測定し、化合物名と含有量を解析する装置

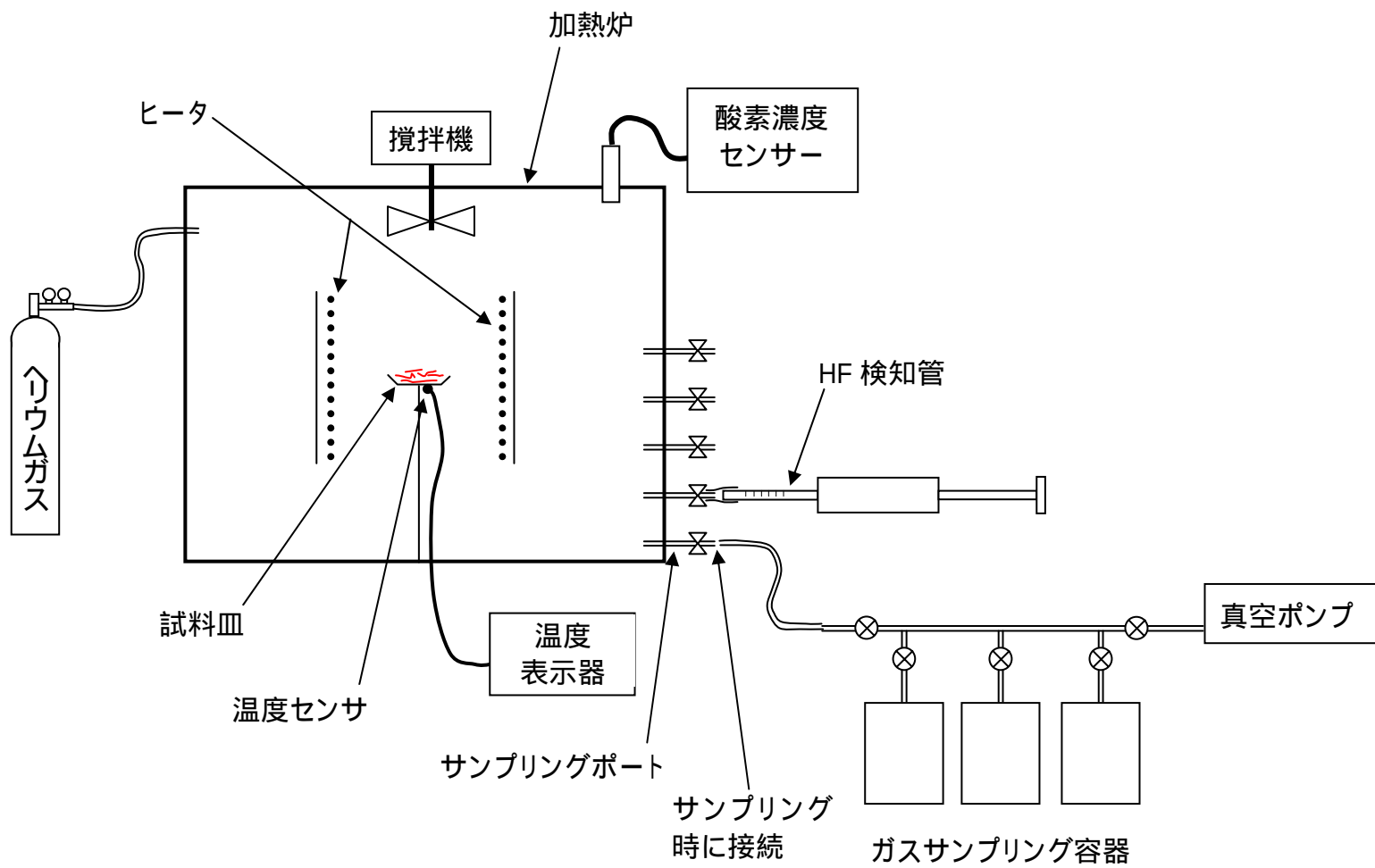


図5.2 アウトガス測定コンフィギュレーション (JAXA)

(3)測定条件

測定条件は次のとおりである。

項 目	条件	備 考
温度維持時間	約4分間	姿勢変動(事象B)から推定した外乱発生時間に合わせた。 なお、設備の都合で500まであげるのに約15分、サンプリングに約10分必要。
設定温度	400、500、 600、800	測定結果を見て必要であれば見直す。
加熱炉内のガス	ヘリウム	酸素1%以下(目標)

5.4 試験の中間結果

500、600、600(*1)、400、500(*2)、800 の順に加熱を実施し、現在までに500、600 の成分分析まで終了している。分析結果を以下に示す。

■ 質量減少率

[500 のケース] 76.6%

[600 のケース] 96.0%^{*1}

*1: 質量減少率確認のために実施した2回目の600 のケース(成分分析は省略)では77.2%だった。

*2: 再現性確認のため500 のケースを追加した。

■ 発生ガスの成分

[500 のケース]

フッ化水素	: 37ppm	一酸化炭素	: 4.4ppm
エチルアルコール	: 1.1ppm	エチレン	: 0.9ppm
アセトアルデヒド	: 0.7ppm	その他	: 0.5ppm

【平均分子量 : 22.6】

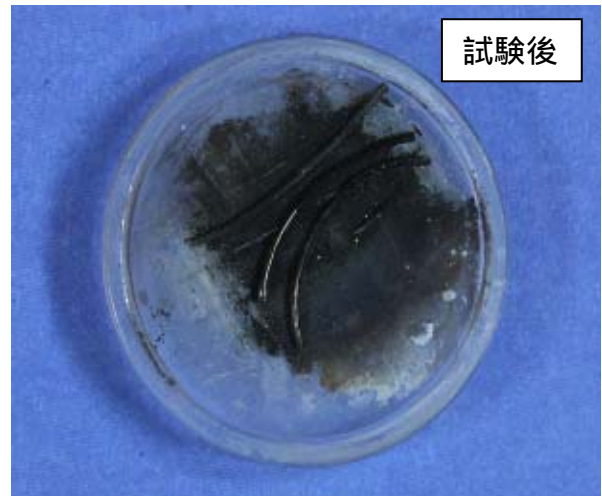
[600 のケース]

フッ化水素	: 6.8ppm	一酸化炭素	: 1.34ppm
-------	----------	-------	-----------

【平均分子量 : 20.0】

■ 加熱後の試料の様子

[500 のケース]

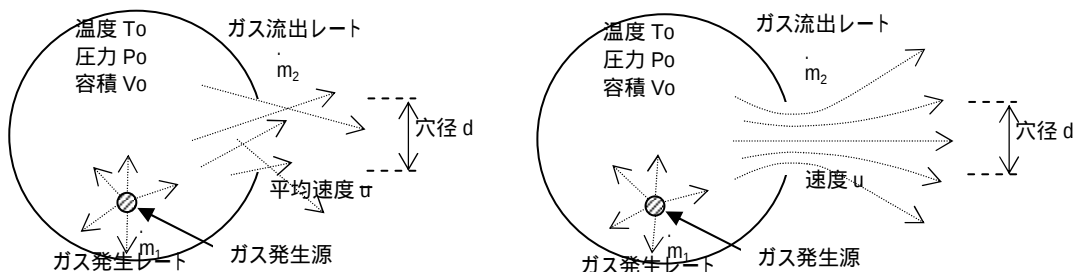


5.5 ガス化したハーネス被覆の長さの推定

5.4項の結果から、濃度と加熱炉の容積から求めたガス質量と、質量減少率から求めたガス質量を比較すると、前者は后者の約 3% ~ 12% 程度である。現時点では、平均分子量を求めるのに十分な精度が得られていない状況ではあるが、参考として、5.4項で得られた平均分子量の値を用いて、ガス化したハーネス被覆の長さを推定する。

(ガスのモデル)

MLI の内部で発生したガスは、圧力が高い場合は連続的な流体、圧力が低い場合はそれぞれの分子を粒子として扱う分子運動論に従い、それぞれの挙動を示す式は多少異なる。それぞれの流れのイメージを図 5.3 に示す。どちらになるかは、平均自由行程(分子同士が衝突する前に移動する距離)と考えている対象の代表長さの比(=クヌーセン数)により判断する。



(a) 分子流モデル

(b) 連続流モデル

図 5.3 MLI から噴出するガスの流れのモデル

ガス温度に対するクヌーセン数の計算結果を図5.4に示す。図5.4の結果から、MLI 内部のガスの流れは、連続流と分子流の中間領域になるため、被覆がガス化したと考えられるハーネスの長さについては、この2つのモデルを考慮した方法で求め、その中間の値を採る必要がある。

(ガス化したハーネス被覆長さの推定)

図5.5の解析フローに従い、ガス温度に対するガス化したハーネス被覆の長さを算出した(図5.6、図5.7参照)。次に、JAXAで実施したアウトガス測定(500)の結果を使用し、ガス化したハーネス被覆の長さの推定を行う。推定に用いた主要前提条件を以下に示す。

「主要前提条件」

平均分子量	: 22.6 * 1 (500 の JAXA 測定結果からの推定)
質量減少率	: 77 % * 1 (500 の JAXA 測定結果による)
ガス温度	: 500 (仮定)
衛星に加わった力積	: 4.91 Nms(軌道/姿勢の変化から算出)
流出穴サイズ	: 0.1 mm × 150 mm (MLI の隙間を想定)
流れの代表長さ	: MLI の隙間の幅 (= 0.1 mm)

*1: 500 の JAXA 測定結果(ガス捕捉率 12%) から求めた値であり、今後の測定で見直す必要がある。

推定した結果を図5.6、図5.7に併せて示す。その結果、ガス化した被覆の長さは、約3～7 cmという値が得られた。ただし、推定に用いた平均分子量はガス化した物質の大部分を特定できていない状況での値であるため、さらなる精度の向上が必要である。

5.6 考察及び今後の予定

JAXA 設備を使用したハーネス高温過熱時の発生ガス量・組成確認試験を実施したが、現時点においては、平均分子量を求めるのに十分な精度が得られていない状況である。分析できていない部分は加熱炉やサンプリング経路の内部に付着してしまったか、今回用意した分析装置では検出出来ないガスが発生した可能性もある。精度改善の為に JAXA の試験設備の大規模な改修が必要なことから、現在、外部の分析業者へハーネス被覆材のアウトガス測定を依頼中であり、今後、平均分子量などについて妥当なデータが得られた時に再度本検討を行う。

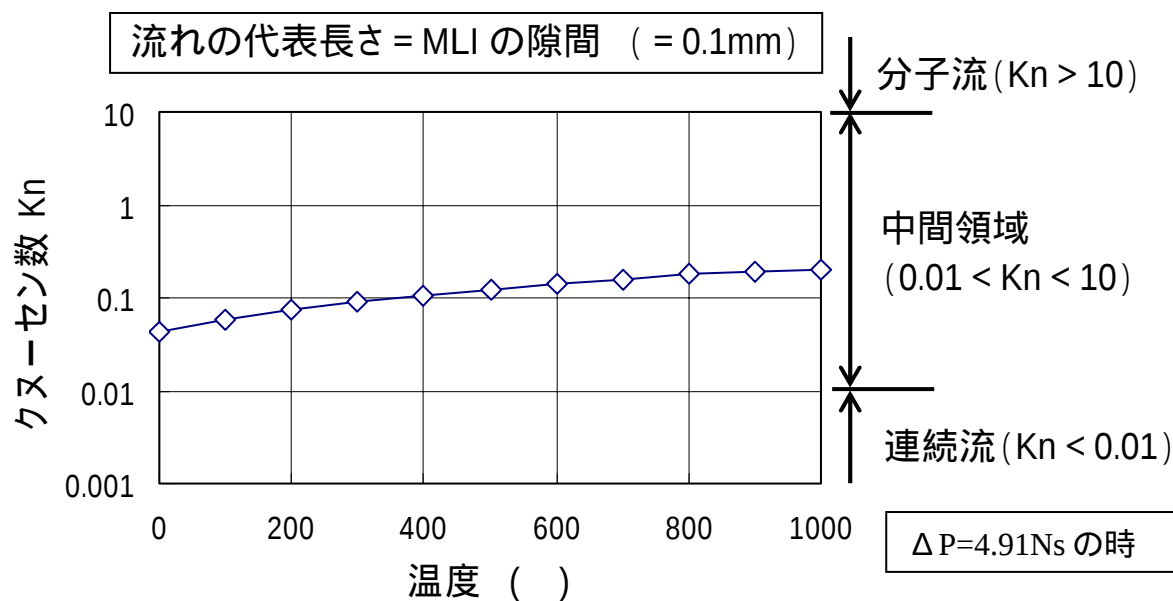


図5.4 定常状態での MLI 内のクヌーセン数(暫定)

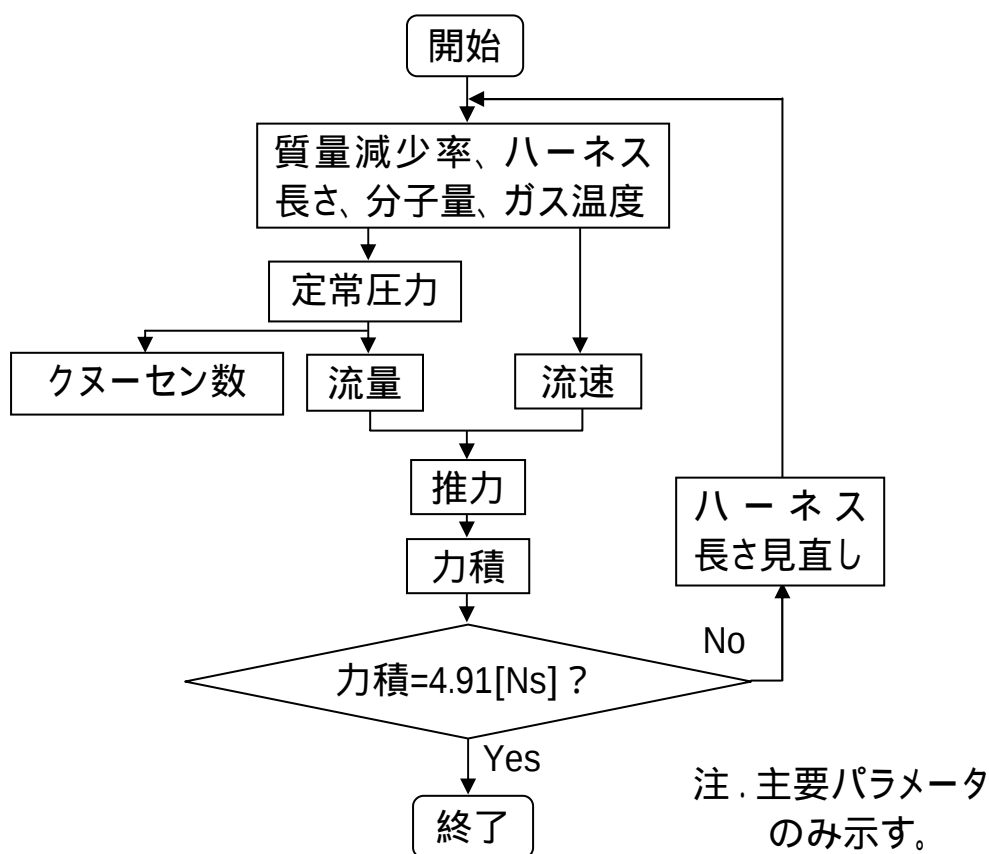
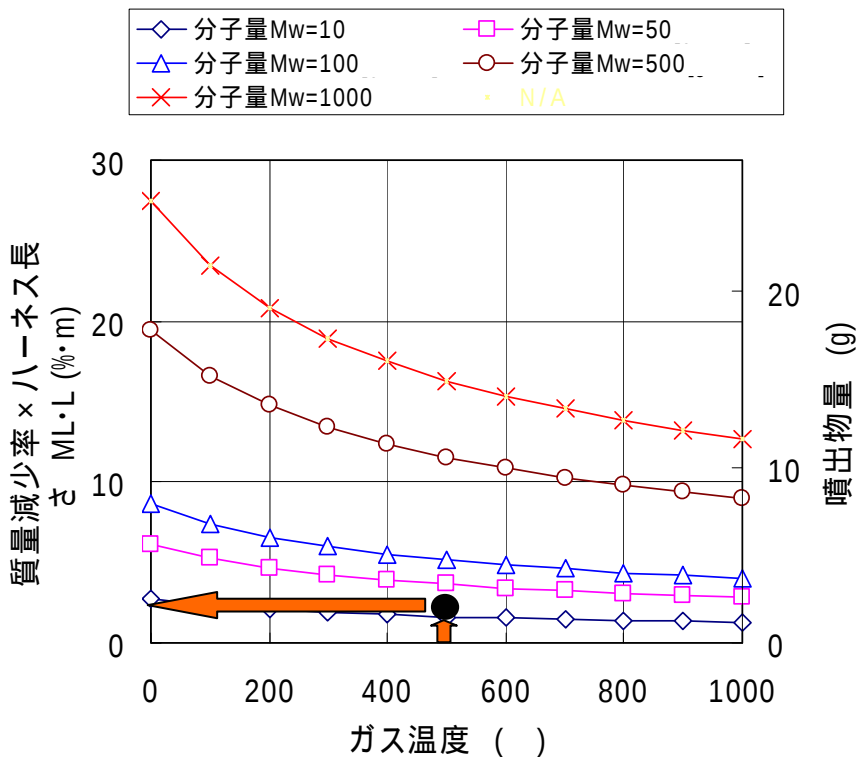


図5.5 解析フロー



[算出例]

仮にアウトガス測定1回目のデータを使用すると、

温度: 500[°C]

分子量: 22.6

質量減少率: 77[%]

このとき

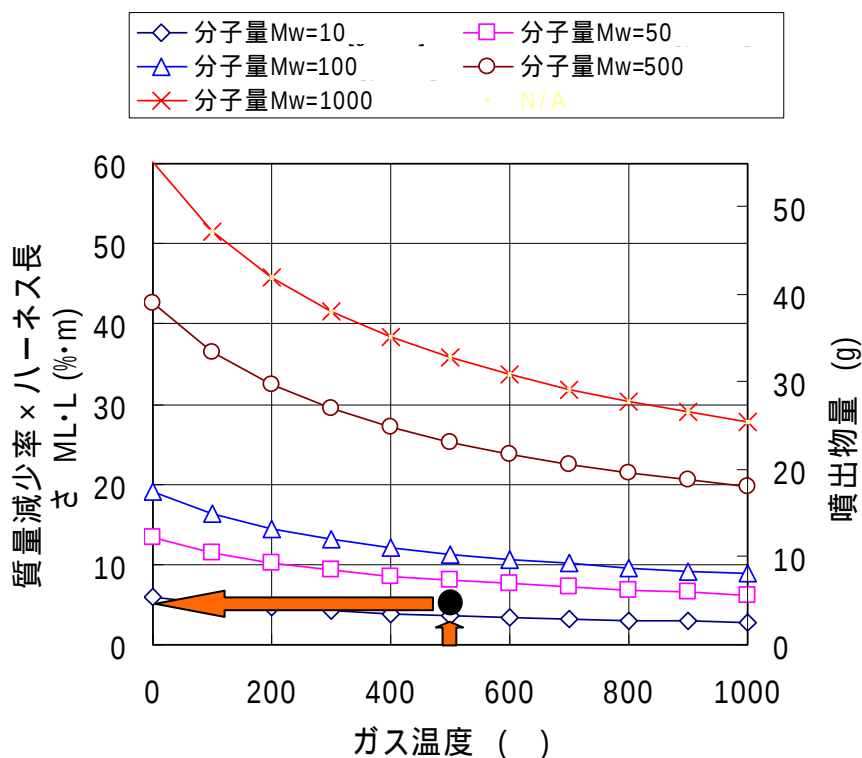
質量減少率 × ハーネス長さはグラフから、
約 2.5[%・m]

よって被覆がガス化したハーネス長さは、

$2.5 \div 77 = 0.03[\text{m}]$

(暫定値)

図5.6 力積=4.91[Ns]相当の噴出物量(分子流モデル)(暫定)



[算出例]

仮にアウトガス測定1回目のデータを使用すると、

温度: 500[°C]

分子量: 22.6

質量減少率: 77[%]

このとき

質量減少率 × ハーネス長さはグラフから、
約 5[%・m]

よって被覆がガス化したハーネス長さは、

$5 \div 77 = 0.07[\text{m}]$

(暫定値)

図5.7 力積=4.91[Ns]相当の噴出物量(連続流モデル)(暫定)

6. まとめ

現在実施している試験の中間結果について報告した。引き続き、試験及び取得データの評価を行う。