

ADEOS-II ハーネス部におけるトリガ放電発生を検証

細田聡史、金正浩、趙孟佑（九工大）、豊田和弘（千葉大）

川北史朗、舩分宏昌、高橋真人、前島弘則（JAXA）、野崎幸重（NTSpace）

1. はじめに

宇宙機の帯電・放電は衛星の不具合の原因となることが知られており、特に GEO (Geostationary Earth Orbit) 衛星に関しては、Tempo-2 衛星の電力低下などの不具合が報告されており[1]、衛星を設計するにあたり放電を抑制するための研究が行われている[2][3]。Tempo-2 衛星の不具合解析時に提唱された放電メカニズムは持続放電現象と呼ばれる。これはトリガ放電と呼ばれる $\mu\text{sec.}$ の短い放電をきっかけにして電位差のある回路同士が放電により短絡する現象で、一時的な短絡を起こす放電を二次放電（二次アーク）、恒久的な起こす放電を持続放電と呼んでいる。いったん持続放電が発生すると回路間にはアークトラックと呼ばれる炭化した恒久的短絡路が形成されてしまい、負荷側に電力を取り出すことが不可能となる。このような放電は衛星の導体部や絶縁体表面が荷電粒子により帯電するために発生する。GEO では磁気圏嵐などにより比較的低エネルギーの電子が大量に発生し、衛星を大きく負に帯電させるため、これが放電の原因になる。LEO の場合は付近に存在するプラズマが電荷を中和するため、一般的には大きな電位差は生じにくい。しかし極軌道の衛星に関しては、オーロラ電子などによりしばしば衛星が大きく帯電することが報告されており[4]、放電によって太陽電池パドルにダメージを受けたと推測される衛星もある[5]。

2003 年 10 月 25 日、極軌道衛星である環境観測技術衛星「みどり II」(ADEOS-II)に異常が発生し、テレメトリデータの解析から太陽電池パドルの発生電力が 6kW から 1kW に低下していることが確認された。検討の結果、放電による電力線の損傷がこの異常の原因の一つであると考えられた[6]。本論文ではこの放電による電力損失のプロセスを実験的に検証した。以下、その結果について報告する。

2. ADEOS-II 衛星のパドルブーム部における電力損失プロセス

図 1 に ADEOS-II のパドルブーム部の概略図を示す。ADEOS-II の電力ハーネスはパドルブーム部で 2 束にまとめられて固定されている。その一束（104 本）が 5kW 分の電力を衛星本体へ送電する。もう一束（24 本）の電力ハーネスは信号線と一緒にまとめられ、1kW の電力を送電している。今回の電力損失はちょうどこの 104 本の電力ハーネス束の送電分に相当する。このハーネス束はサーマルブランケット (MLI: Multi Layer Insulator) にくるまれており、内部の温度変化を防いでいる。この MLI は 12 層のアルミが蒸着された絶縁体フィルムからなり、衛星に対して電氣的に絶縁されている。すなわちこの MLI の内面は外部から侵入したオーロラ電子などによって大きく負に帯電する可能性がある[7]。この場合、唯一の導体であるハーネスの芯線との間には大きな電位差が生じ、もし何らかの原因でハーネスの被覆に傷がついていた場合、負に帯電した MLI とハーネスの芯線の間でトリガ放電が発生し、これが持続放電に発展すると考えられる。そこで、我々は以下の仮説を立てた。

- ① 通電によるハーネスの発熱よりハーネス被覆からガスが発生し MLI 内部の圧力が上昇した。
- ② これにより MLI 内部は低真空状態となり、MLI 内部と傷つきハーネス間でトリガ放電発生の閾値電圧が低下した（パッシェンの法則）

- ③ トリガ放電により傷つきハーネス間に二次放電が誘発され、線間の被覆にトラッキング（炭化導電路）が形成され線同士の持続放電に至る。
- ④ 持続放電が別の電力線の被覆を溶かしながら波及し、最終的にほぼすべての電力線が開放または短絡する。

以下、それぞれのプロセス毎に実証試験を行った。

3. MLI 内部の圧力上昇検証（プロセス①）

図 2 に試験サンプルの外観図を示す。このサンプルはブーム部のハーネス束の構造を模擬しており、104 本の電力線を模擬するワイヤーハーネスとその温度測定のための熱電対を MLI で包み、実機と同じようにベルクロテープで貼り合わせ両端を結束バンドで縛ってある。使用したワイヤーハーネスは 2 種類ある。1 つはハーネス被覆に傷がつけられた 2 本のハーネスで（以降、傷つきハーネスと呼ぶ）、これはハーネス束中の任意の HOT/RTN のペアに何らかの原因（熱サイクル、デブリなど）でハーネス被覆に傷がついたものを模擬している。ハーネスの傷はサーマルストリッパーによって被覆を 0.5mm 程度環状に剥いた状態になるようにつけられた。傷は一本あたり 3 箇所、計 6 か所つけられ、互いの線の傷同士が接近させた状態でハーネスをカプトンテープで固定した。もう一つの折りたたまれたハーネスは残りの 102 本のハーネス束を模擬しており、本実験における MLI 内部のヒーターの役割を果たす。これに適当な電流を流すことで内部の温度をコントロールする。この温度はハーネスの表面に取り付けられた熱電対によりモニターされる。このハーネスはあらかじめ 120℃～250℃、7 時間/サイクルの条件で 40 サイクルを負荷したものであり、このためハーネス表面が茶色く変色している。外部を包んでいる MLI の大きさは 250mm×100mm 角で、最内面には電圧を印加するための端子が取り付けられている。また MLI の最外層にも温度モニターのための熱電対が取り付けられている。

試験装置の概要を図 3 に示す。試験は直径 30cm の小型チェンバで行った。このチェンバーはロータリーポンプとターボ分子ポンプを装備しており、最高到達真空度は 2×10^{-5} Pa である。MLI の内圧測定には真空計を取り付けた特殊なジグを用いた（図 4）。このジグは真空フランジと一体になっており、チェンバ内側にはサンプルに挿入する管が、大気側には測定用の真空計用のフランジがそれぞれ取り付けられている。サンプルに挿入する管は直径 10mm 長さ 30mm の金属のチューブであり、これを図 2 のサンプルの結束バンドより内側まで挿入して内部のガスをモニターする。真空計は測定に応じてピラニー真空計、電離真空計および四重極質量分析器（QMASS）を装着した。各真空計及び熱電対の出力は全て PC に取り付けられた DAQ ボードを介して保存される。またこの PC により、ヒーター用ハーネスの直流電源の出力を制御することでハーネスの温度を任意にコントロールした。詳細な熱解析の結果、MLI 内部のハーネス束の温度は 100℃から 230℃程度まで変化することがわかった[6]。これを鑑みて、以下の手順で試験を行った。

- i) 一旦ハーネスを 250℃まで加熱し、ハーネスの吸着ガスをサンプル外へ放出する。
- ii) その後、温度を 100℃まで上昇させ、MLI 内部の圧力と QMASS による成分測定を行う。
- iii) 温度を徐々に変化させながら MLI 内外の圧力を測定する。途中 230℃の時に QMASS 測定を行う。
- iv) 250℃まで温度を上昇させ圧力と QMASS 測定を行う。

図 5 にハーネスの温度に対する MLI 内外の圧力変化の測定結果を示す。温度を増加させるに従い MLI 内外の圧力は共に増加傾向を示したが、MLI 内部は雰囲気に対して常に高い圧力にな

ることがわかった。これは MLI 両側面が外部に対して低コンダクタンスな状態であることを意味している。内外の圧力差は温度が 200℃を超えたあたりからより顕著になり、250℃では 100 倍程度の差となった。

図 6 に QMASS による成分測定の結果を示す。図の横軸は分子量を表し、縦軸は測定した MLI 内部のガスのスペクトルを室温時のスペクトルで規格化した値をあらわしている。図より、100℃の状態では室温時の成分と大差はないが、230℃の状態になると 10～100 倍程度の規則的なピークを持つスペクトルが見られた。この規則的なピークはエチレン (CH_2) 系の高分子のものであり、加熱によりハーネスの被覆の材料である ETFE (Ethylene Tetrafluoroethylene Copolymer: 分子式 $-\text{[CH}_2-\text{CH}_2\text{]}_m-\text{[CF}_2-\text{CF}_2\text{]}_n-$) の主鎖が脱離した物と推測される。すなわちハーネスの被覆が気化して劣化したことを示している。したがって、発電によって大量の電力線加熱された状態では、ブーム部の MLI の内部はハーネス被覆の気化と外部に対する低いコンダクタンスのため、放電が起こりやすい低真空状態となっていたことを意味している。

4. トリガ放電発生検証 (プロセス②)

次に MLI 内部と傷つきハーネス間でトリガ放電の発生について述べる。

図 7 に試験のセッティングを示す。この試験では高電圧電源によって MLI 内面を負にバイアスする。この点が前述の圧力測定と異なっている。MLI 内面及びコンデンサー (C_{ext}) は 56Ω の制限抵抗 (R_0) を介して高電圧電源により徐々に充電される。この C_{ext} は MLI 表面とハーネスの芯線間の被覆の容量から計算したものであり、ここに蓄えられる電荷量がトリガ放電が発生した際に MLI 表面から取り込める電荷、すなわちトリガ放電のエネルギーを模擬する。計算の結果、 C_{ext} は 4.4nF であった。MLI の電位測定は高電圧用の回路に接続した銅板の電位を表面電位計 (V_{p2}) によって非接触で測定した。これは $M\Omega$ 程度の入力インピーダンスを持つ電圧計では高電圧電源から電流が流れ込んでしまうため高電圧を印加し続けられない為である。表面電位計ならば測定装置の入力インピーダンスを限りなく大きく出来るためである。またこの試験の間は傷つきハーネスに接続した電源は共にオフにしてある。

試験は以下の手順で行われた。1) 温度を設定する。2) 高電圧電源を $-2\sim-3\text{kV}$ に設定し、バイアスする。3) 徐々に電圧が上昇し、トリガ放電が発生した場合はその時の印加電圧、MLI 内圧を記録する。4) 1) へ戻って別の温度に設定する。試験結果を以下に示す。図 8 はハーネスの温度に対するトリガ放電発生時の電圧および内圧を示したものである。図よりトリガ放電の発生閾値は温度の増加に伴い低下することが分かった。230℃の状態ではトリガ放電の閾値は $-1.0\sim-1.5\text{kV}$ であった。確認のため、傷のないハーネスについても同様の試験を行ったが、放電の発生は確認されなかった。よってハーネスの傷はトリガ放電が発生する必要条件であると言える。

5. 持続放電発生検証 (プロセス③)

次に、トリガ放電による傷つきハーネス間の持続放電の誘発の検証を行った。

試験回路は前述の図 7 と同じであるが、この試験では傷つきハーネスに接続された回路を作動させ、電力を供給しながら試験を行う。この回路によって実際の太陽電池アレイの作動を模擬することができる。以下、回路について詳細に説明する。

この回路はブロッキングダイオード ($D_1\sim D_3$)、CC/CV 電源 (V_1 、 V_2)、可変抵抗 (R_L)、コンデンサー (C_{st} 、 C_p)、および電流・電圧プローブ ($C_{p1}\sim C_{p2}$ 、 V_{p1}) から構成されている。 D_1 は太陽電池の

ダイオードとしての性質を模擬するもので電源への電流の逆流を防いでいる。 D_2 、 D_3 がシャント回路に含まれるダイオードであり、これが回路中で高速のスイッチの役割を果たす。 V_1 および V_2 はそれぞれ 1 列分の太陽電池を模擬しており、本試験では太陽電池アレイシミュレータ (SAS: Solar Array Simulator) と呼ばれる高速の電源を使用した。この電源が衛星負荷 (R_L) と電力制御器 (PCU) に電力を供給する。 V_1 は太陽電池一列あたりの発電状態を模擬するため 60V、2.0A に設定してある。ダイオードとハーネスによる電圧降下のため、負荷に印加される電圧は 57.5V となる。また負荷には V_2 から電流が供給する。この時、 V_1 側と V_2 側の回路の R_L に印可される電圧を等しくする必要がある。これが異なると D_2 又は D_3 に逆電圧がかかりどちらかの電流が供給されなくなる。このため R_L を調節し、 V_2 の電圧を 57.5V に保てる電流を探した結果、 R_L に計 2.9A の電流が流れた。この状態で線間で二次放電が発生すると、アーク抵抗によって線間の電圧が降下する。これにより D_2 に逆電圧がかかり、このダイオードを介して電流の供給が不可能となる。その結果、 V_1 の全ての電流が速やかに二次放電に供給される。 C_{st} は傷つきハーネスの同士の静電容量を模擬しており、ハーネス被覆の持つ容量となる。この値は 120nF である。 C_p は PCU の容量を模擬しており、値は 18,000 μ F である。

以下、試験の結果について述べる。トリガ放電の試験と同様に、バイアスを -2kV 程度まで徐々に印加しながら温度を上昇させた結果、160℃の時点で二次放電の発生が確認された。図 9 に測定されたセンサの波形を示す。図の横軸はトリガ放電発生からの経過時間を表し、縦軸はそれぞれ MLI の表面電位、傷つきハーネス間の電位差および放電電流を表している。まず 50A 程度のトリガ放電が非常に短い時間 ($\ll 0.1$ ms) で発生した。その直後にハーネス間に印加された電圧が 20V 程度まで急降下し、ハーネス間に 2A の放電電流が流れ続けたことが確認された。この二次放電が発生していた時間は 1.5ms 以上であり、トリガ放電に対して十分に長い時間放電していたことが分かる。試験前後の傷つきハーネスの様子を図 10 に示す。図よりハーネスの被覆上に黒い変色が見られた。これが放電により形成されたトラッキングであり、試験後のハーネス間の電気抵抗を測定した結果、約 20M Ω の抵抗が確認された。またこのトラッキングは接触した近傍の傷同士の場所で観察され、線の被覆同士が離れた場所では観察されなかった。この傷近傍の被覆の接触がトラッキングが形成される必要条件であると言える。

さらに温度を上げて 230℃で試験したところ、二次放電が頻発することが確認された。図 11 はこの試験のチェンバー真空度の変化を示したものである。図中の緑色の線がチェンバー背圧を表し、赤い線は MLI の表面電位を表す。4 回のトリガ放電発生の後、二次放電が電源を切るまで 8 秒間にわたり頻発した。この結果 MLI 内部で発生したガスがチェンバーに噴き出したため背圧が約 10 倍に急上昇したことが確認された。

ところで、二次放電は図 7 の回路の傷から右側の回路を取り外した状態でも同様に発生したことから、次節の波及試験では簡単のためにこのセッティングを用いて試験を行った。

6. 持続放電の波及による全電力の損失検証 (プロセス④)

次に、傷つきハーネスによって発生した持続放電が別の電力線に与える影響について調べた。その結果を以下に示す。

この試験では 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を発生させ、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した。図 12 に使用した実験装置の回路図を示す。1 組 2 本の傷つきハーネスに 9 組 18 本の無傷のハーネスを隣接して配置し、前述の試験と同様に加熱用のハーネスと共に MLI で包んだ。それぞれのハーネスの HOT/RTN 間には個別の CC/CV 電源によって 60V の電圧を印加した。傷つきハーネスは前述の試験と同様に 0.5mm 程度の傷がつけられたものを使用した。サンプルは絶縁のためチェンバ内に紐で宙吊りの状態で設置されている。試験時のチェンバの真空度は 5Pa 以下であった。

MLI 内面は高電圧電源により -1~-2kV に負バイアスした。試験開始後、MLI に印加された電圧が -1kV を超えた時、MLI と傷つきハーネス間でトリガ放電が発生しはじめ、その後数回の放電の後に持続放電が発生した。図 13 に持続放電発生時のチェンバ内のサンプルの様子を示す。図中の青白い発光は持続放電によって MLI に空いた穴から噴出したプラズマである。試験前後のサンプル内部の写真を図 14 に示す。図より、MLI もハーネスも持続放電により甚大な損傷を受けている様子が見て取れる。ハーネスの被覆は炭化し、ハーネス同士が溶着していた。また、全回路の HOT 側のラインは断線しており、電気抵抗を測定した結果、すべてのハーネスが開放状態か他のハーネスと短絡状態になっていたことが確認された。図 15 に隣接回路への波及の経過をグラフ化した。横軸は持続放電発生からの経過時間を表しており、縦軸は正常に作動している回路の数を表している。ここで正常に作動している回路とは、ハーネス間に 50V 以上の電圧が印加されている状態と定義した。持続放電が波及して回路が短絡した場合、線間の電圧は降下する。図より持続放電発生から約 30 秒間で 10 回路すべてが焼損した。また、データのサンプリング (0.5 秒) 以内で複数の回路が焼損したことも確認された。すなわち、いったん 1 回路で持続放電が発生してしまうと、隣接する他の回路すべてに持続放電が波及してしまうことが証明された。また図 15 の時間変化は ADEOS-II において観測された電力低下の時間変化 (3 分間で 50 回路分が損失) の様子とよく一致している。

以上より、ADEOS-II における電力損失が本論文で提唱されたプロセスに沿って発生したと言える。

7. まとめ

一連の実験によって放電による電力損失のプロセスを実験的に検証することができた。このプロセスが進行するためには、以下の 3 つの条件がそろうことが必要である。

1. MLI が衛星に対して絶縁されており、オーロラなどの電子によって最内面が帯電する。
2. 高温になったハーネス被覆から発生したガスが MLI 内部にとどまり圧力を上昇させる。
3. 一対の HOT/RTN ハーネスの接触した被覆のごく近傍に傷が発生している。

以上の条件が軌道上の ADEOS-II の 5kW 送電側のハーネス束で満たされ、その結果が持続放電現象によって 52 回路全てが焼失したと推測される。

参考文献

- [1] Katz, I., Davis, V. A. and Snyder, D. B., "Mechanism for Spacecraft Charging Initiated Destruction of Solar Arrays in GEO", AIAA paper 98-1002, 36th Aerospace Sci. Meeting, 1998.
- [2] Crofton, M. W., Francis, R. W., "Electrostatic Discharge Measurements on Solar Cell Coupons in a Simulated GEO Environment", AIAA-99-01-2634, 1999.
- [3] Takahashi, M., Nishimoto, H., Kawakita, S., Cho, M., Nozaki, Y., Fujii, H., Murakami, Y., Ozaki, T., Onodera, N., "ETS-VIII Solar PDL Plasma Interaction Problem Approach", 7th

Spacecraft Charging Technology Conference, April. 23-27, 2001, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands

[4] Cooke, D. L., "Simulation of an Auroral Charging Anomaly on the DMSP Satellite", AIAA-98-0385, 36th Aerospace Science Meeting & Exhibit, January 12-15, 1998, Reno, NV

[5] Davis, S., Stillwell, R., Andiaro, W., Snyder, D., Katz, I., "EOS-AM Solar Array Arc Mitigation Design", AIAA-99-01-2582, 1999

[6] Maejima, H., Kawakita, S., Kusawake, H., Takahashi, M., Nakamura, M., Goka, T., Kurosaki, T., Cho, M., Toyoda, K., Nozaki, Y., Okada, K., "Investigation of Power System Failure of a LEO Satellite", 2nd International Energy Conversion Engineering Conference, August 16-19, 2004, Rhode Island, RI.

[7] Anderson, P. C., Koons, H. C., "Spacecraft Charging Anomaly on a Low-Altitude Satellite in an Aurora", *J. Spacecraft and Rockets*, Vol. 33, No. 5, 1996, pp. 734, 738.

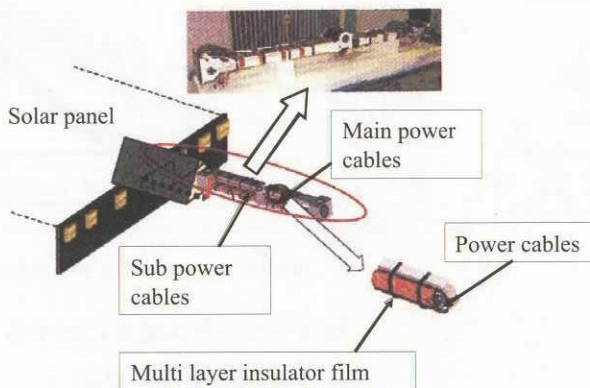


図1 ADEOS-II 衛星の太陽電池パドルブーム部の概略図

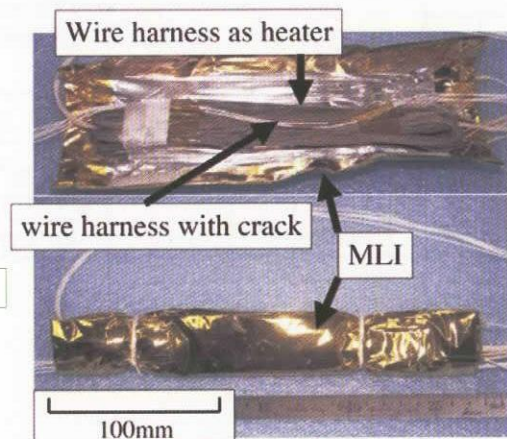


図2 試験サンプルの外観
(上) MLI 展開状態
(下) バンドによる結束後

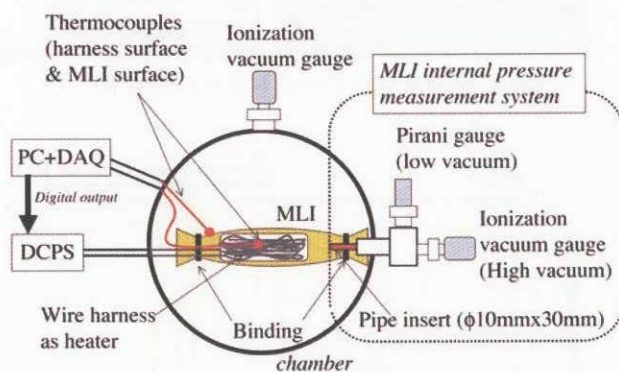


図3 MLI 内圧測定装置概略図



図4 MLI 内圧測定用ジグ

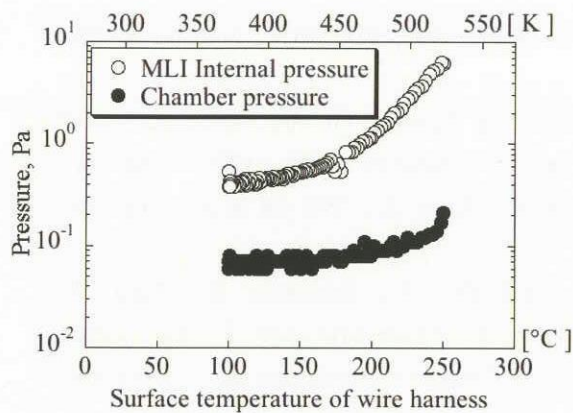


図5 ハーネスの表面温度に対する
MLI 内外の圧力変化

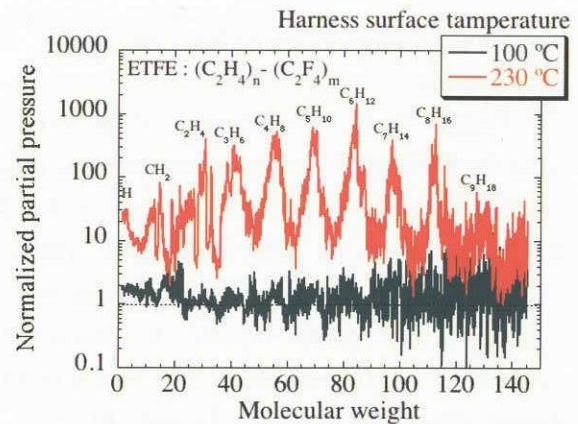


図6 各温度における MLI 内のガス成分

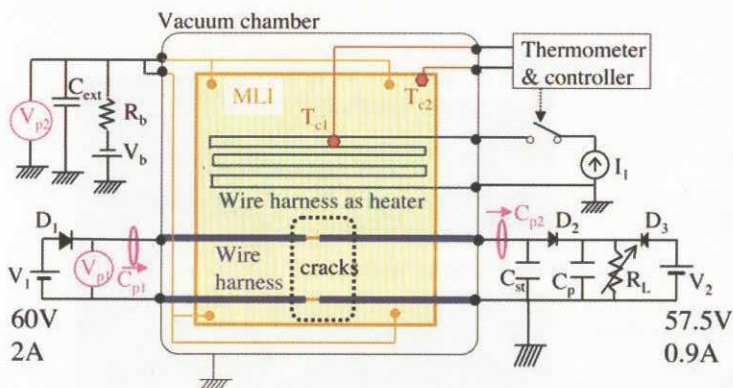


図7 放電試験のセッティング図

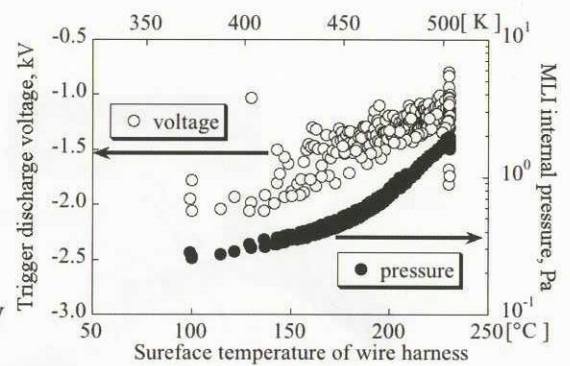


図8 ハーネス温度に対する
トリガ放電閾値の変化

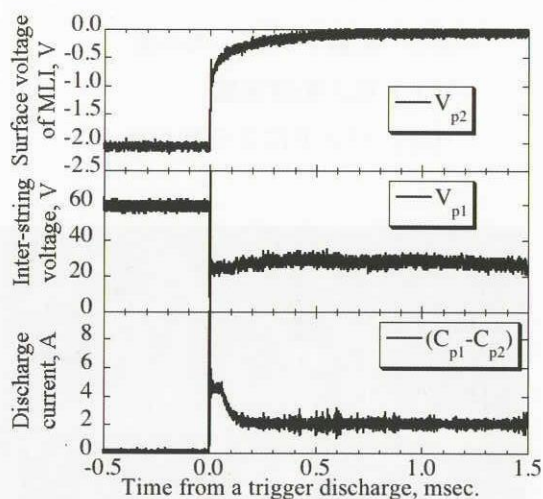


図9 測定された二次放電の波形
(上) MLI の表面電圧
(中) 傷つきハーネス間の電圧
(下) 放電電流

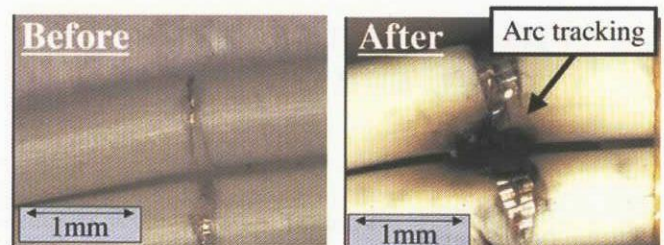


図10 形成されたアークトラックの様子

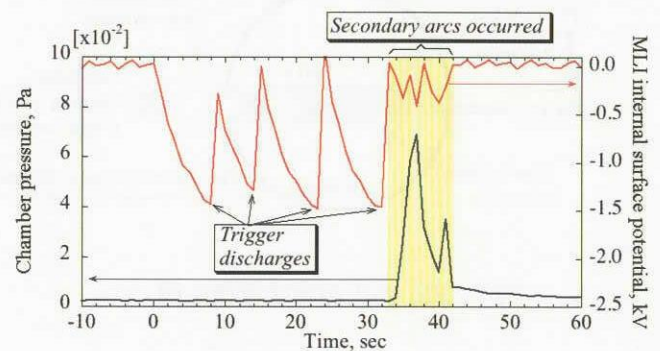


図11 二次放電頻発時のチェンバ圧の変化

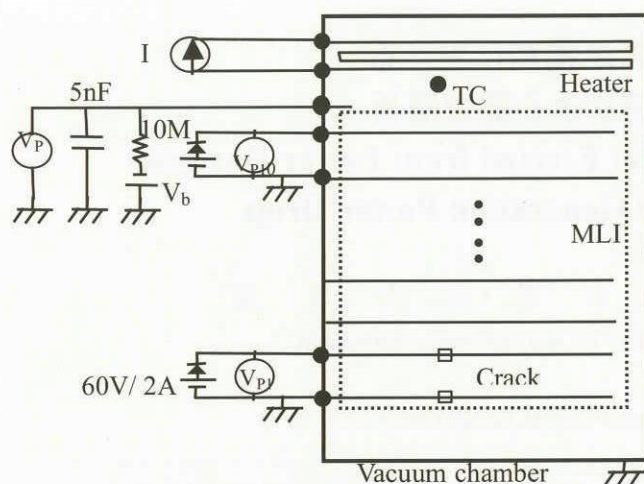


図12 持続放電波及試験のセッティング図

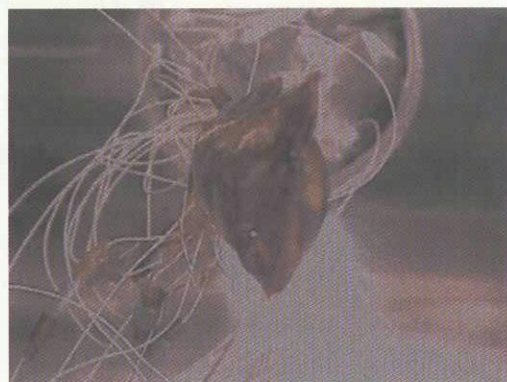
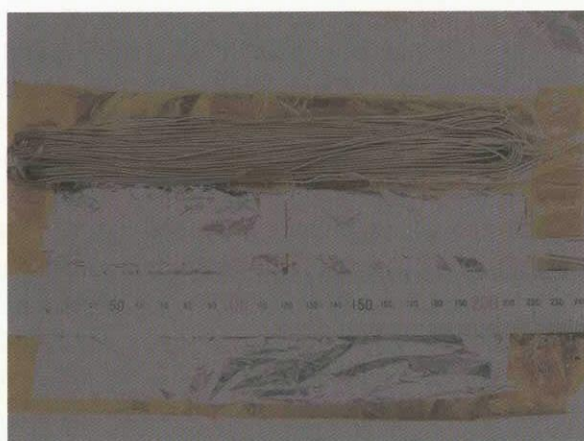


図13 持続放電によってMLIから噴き出したプラズマの様子



(試験前)



(試験後)

図14 試験前後のサンプル内部の様子 (左) 試験前 (右) 10回路焼失後

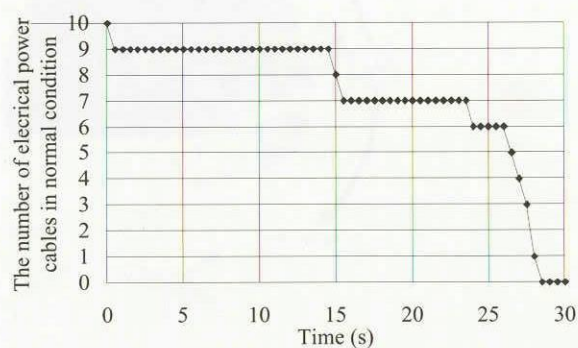


図15 持続放電発生からの時間経過に対する電力損失した隣接回路数