

衛星搭載機器における高電圧の安全性確保ガイドライン

05/02/2014

内容

内容	2
1. はじめに.....	3
2. 基本事項.....	3
3. 設計に際してのチェック事項.....	5
4. 絶縁コーティングの作業ガイド	8
5. ポッティングの作業ガイド (TBW).....	11
6. 黒色化, 絶縁コーティングに際してのチェック事項.....	12
7. 組み上げ・基板製作に際してのチェック事項	13
8. 試験計画に関するチェック事項	14
9. 運用計画に関するチェック事項	15

1. はじめに

宇宙用高圧電源（ここでは100V以上とする）は、放電事故を起こして当該機器のみならず衛星全体に致命的な影響を与える可能性がある。そこで本文書では、高圧電源を搭載する際の注意点を列挙する。基板・構造の設計時、試験計画や運用計画の立案時には、本文書のチェック項目を満足していることが求められる。

なお、このガイドラインのスコープは直流の高電圧に限られている。高周波放電の場合にはマルチパクタ効果（電極間の電子走行時間とRFが同期／共鳴を起こす事象）などに注意が必要である。一般に高周波放電の場合、放電開始電圧が低くなるため、より注意が必要となる。

2. 基本事項

放電の基本法則は(1)空中放電、(2)絶縁体の耐圧限界、および(3)沿面放電によって異なる。空中放電の基本はパッシェンの法則である。この法則によれば、放電開始電圧はガス圧（ p ）と電極間隙（ d ）の積で決まり、放電開始電圧が最低になる pd が存在する（Paschen minimum という）。このことから、ある間隙を持つ電極間の放電開始電圧を高くするためには、できる限り圧力を高くする（高圧）あるいは低くする（高真空；アウトガスを少なくする）のがよいと言える。ただし、パッシェンの法則は理想的な平行平板電極に適用されるものであり、局所的な電界強度が強い場合（sharp edge 等による）には放電開始電圧が低くなることに注意を要する。なお、sharp edge の定義には要注意で、例えば、10kV を超える電圧の場合は機械加工の仕上げ方（表面粗さ）まで気にする必要がある。

次に、絶縁体の耐圧限界はそれぞれの物性で決まるが、実際には、物によるバラツキ（例えば、結晶の微細粒子構造、内部空隙の存在、不純物の存在等による）や経年変化（放射線劣化等による）、更には、宇宙線／高エネルギー粒子の注入による内部帯電の状況に依存する事に注意を要する。そのため、定格に対するマージンが必要であり、経験的には使用電圧の3倍の定格をとる事を推奨する。なお、気中放電を防止するためのコンフォーマルコーティングやポッティングの厚みに対しても同様な扱いになるが、更に、これらの製作には洗浄や真空脱泡など、ユーザによる特殊工程を伴うので、特別の注意が必要である。

沿面放電表面の場合、表面の汚れ／高分子有機物などの分極性によって大きく変わるので、これらの除去と付着防止が重要である。また、放電が起きた場合の被

害を最小にするための設計（例えば、放電電流の制限や電流経路の制御）への配慮も重要である。なお、高圧部分の処理には特殊工程（ハンダ、接着、洗浄、コーティング、ポッティング等）が必須なので、設計の妥当性を確認するための試験をパスしたからといってフライト品が大丈夫とは保証できない。後者の製造品質を保証するための試験は設計確認試験と区別して考える必要がある。完成品の健全性確認方法については後述する。

3. 設計に際してのチェック事項

内容	チェック結果
<p>高電圧の印加される各パーツに対して、シャープエッジを避けるための面取り処理や表面研磨を行うこと。基板上の高電圧が印加されるパターンについても同様である（特にチップ部品のパッドの角を取ることを推奨する）。</p>	
<p>ネジ止め用のタップやネジ先はシャープエッジとして扱い、高圧部周辺で露出を避ける。鍋ネジや皿ネジのネジ頭も潜在的なシャープエッジとし、高圧部周辺で使用する場合はエッジが無いことを確認する。</p>	
<p>電位差のある箇所には十分な距離をとること。空中では 1mm/kV 以上、沿面では 2mm/kV 以上を確保すること。（高電圧の場合には、肉眼では見えない表面の凸凹などによって放電が誘発されるため、この制限にとどまらずできるだけ広い距離を確保するか、コーティングあるいは注意深い表面研磨（機械加工時のバフ研磨、加工後の電解研磨、化学研磨、手作業による研磨など）を行う必要がある。）</p>	
<p>回路素子やケーブルの耐圧については 3 倍のディレーティングを設けること（印加される電圧は素子・ケーブルの定格（最高耐圧）の 1/3 以下とする）を推奨する。</p>	
<p>気体がたまる構造を作らないこと。たとえば柱状のパーツを上下からねじ留めする場合には、そのパーツあるいはねじに、換気孔をあけること。閉空間のユニットがある場合にも一部に換気孔をあけること。</p>	
<p>十分に良い換気を保証できない場合には、コンフォーマルコーティングなどの対策を行うこと。ただし、中に気泡が生じないようにすること。</p>	
<p>高圧ケーブルの中の残留空気にも注意を要する。例えば高圧ケーブルの両端をコーティングや固着剤などで固めた場合、内部の空気が残存して真空中で膨張、放電するあるいは真空宇宙でゆっくりと脱ガスをするなどの問題が発生するため、少なくとも片側は解放しておく必要がある。</p>	
<p>アウトガスの発生する材料は使わないこと。TML<1%, CVCM<0.1%が標準的な条件である。</p>	
<p>高電圧が印加される基板ではシルク印刷やレジストを避ける事。</p>	

<p>高圧電源の基板レイアウトの際には、高圧部と低圧部は分離し、両者の間にシールドを設ける。両面基板の場合、高圧と低圧を裏表に配置する事は厳禁である。</p>	
<p>両面基板、多層基板の場合には、中間層、表—裏の間など高圧印加する部品間の距離が短いにもかかわらず見落とす場合があるので注意すること。</p>	
<p>放電が起こった際に、放電電流が直接高圧電源の高圧グラウンドに戻るような低インピーダンスのパスを設けること。機器に損傷を与え得るパスに対して十分低いインピーダンスであることが原則である。例えば、放電先が機器筐体であり、高圧電源基板と他基板の COM-2 が接続されている場合、原則として高圧電源基板以外では機器筐体に接地しないこと。高圧にケースを取り付ける場合も考え方は同様。高圧の制御低圧回路側を放電電流が流れないようにケースのグラウンドポイントを注意する。</p>	
<p>高圧放電が起こった場合に電源電圧の瞬間的な逆転でラッチアップが想定される部品については、できるだけ大きい値のラッチアップ防止抵抗を部品の電源に挿入して部品の永久故障を防止する。</p>	
<p>放電の起こりうる部分に、金などの溶けやすい金属は極力使用しない事。仮に真空中で放電が発生した場合、その金属が周囲に飛び散ることがあるためである。一旦周囲に金属が飛び散ると、次回高圧を印加した際に放電パスとなり、2度と回復しない。</p>	
<p>ネジ止めの際は金属くずが発生するので、ネジ止め後に金属くずの除去が可能な構造にする。不可能な構造の場合は、タップを貫通穴にしないほうが望ましい。</p>	
<p>絶縁物で高圧部を保持する機構を設計する際は3重点の存在に注意する。具体的には、金属平面に絶縁物を置くような場合は、絶縁物設置面の面取りを行う。あるいは絶縁物を金属に埋め込む構造にする。同じ理由で、誘電率の事なる絶縁物に対して高圧を印加する際は要注意である。</p>	
<p>何処にも接続しない浮いた導体を高圧周りに残してはいけない(基板上の使用しないパッドなども同様)。何処にも接続しない浮いた導体の近くに高圧の印加点があると、その浮いた導体の電位は不定であるため、その導体を介した、あるいはその導体自身からの放電が発生する危険がある。</p>	

<p>高圧コネクタ，高圧線の中継接続は可能な限り避けること。</p>	
<p>高圧コネクタの使用時は宇宙用規格の Reynolds 製品を使用し，耐圧に対するマージンを十分にとる（少なくとも3倍以上）。</p> <p>このコネクタには venting hole が設けられており、高真空環境における使用を前提としていることに注意する。</p>	
<p>高圧線が観測装置外部にさらされる場合にはグラウンドシールドを付加すること。</p>	
<p>絶縁物に紫外線や高エネルギーの粒子が直接当たらないように電極設計に配慮するのが望ましい。</p>	
<p>電位勾配の大きいところをシミュレーションなどで推定し，問題ない事を確認しておくことよい。</p>	

4. 絶縁コーティングの作業ガイド

ここでは、標準的なパリレンコーティングの手順を記す。

パリレンはパラキシリレン系ポリマーの一般名である。コーティングは日本パリレン（八王子市石川町）で実施可能である。小さいサンプルに対する試験研究コーティング用に「ラボコーター」というコーティング装置が購入可能ではあるが、太陽系科学研究系プラズマグループでは装置維持の手間やマンパワーを考慮して装置の購入はせず、日本パリレンへ対象物を持ち込んでコーティングを行っている。

パリレンポリマーは化学蒸着によって 0.1Torr 程度の真空下で蒸着が行われる。従ってコーティング対象物は真空中に入れる事ができる物に限られる他、マスキングを依頼しない場合には、マスキング材の選択に注意が必要である（使用予定のマスキング材が使用可能かどうか、事前に日本パリレンとよく相談する必要がある）。

現在コーティング可能なパリレンは、パリレン N, C, D, HT がある。この中で絶縁特性や誘電損失の観点からはパリレン N が最も優れているが、膜の成長速度が遅いため、厚い膜を要求する場合には長時間の蒸着が必要となる。パリレン HT は最近利用可能となったもので、高温、耐紫外線性能に優れており誘電率も低く、浸透性が高い。ただし絶縁特性はパリレン C に少し劣る。パリレン D はパリレン C よりも高温での使用が可能であるが、それ以外の特性はパリレン C に劣る。パリレン HT が利用可能になる以前は、蒸着のし易さ（日本パリレンに依頼した場合のコーティング成功率に効く）と、特性との折り合いをつけてパリレン C を使用して来た（成功率ほぼ 100%：それ以前にパリレン N を使用使用としていた時期には成功率は低かったらしい）が、今後はパリレン HT の使用が増える可能性がある。

日本パリレンにコーティングを依頼する場合には以下の手順で行う。

- 1) コーティング対象物の洗浄
- 2) コーティング対象物のマスキング
- 3) 日本パリレンへの送付

コーティングの際には、パリレンの種類と厚さを指定する。

日本パリレンは、マスキング、プライマー処理、コーティング、マスキング剥離を実施する。

- 4) 日本パリレンからの受け取り
- 5) マスキングの剥離（自分でマスキングした場合）

以下に、いくつかの注意点を記す。

<洗浄>

通常のアナライザー部品の洗浄と同様のアセトン、アルコールによる超音波洗浄が望ましいが、超音波洗浄ができない場合にはアルコールによる拭き取りやアルコールに浸すだけの洗浄でも有効である。

<マスキング>

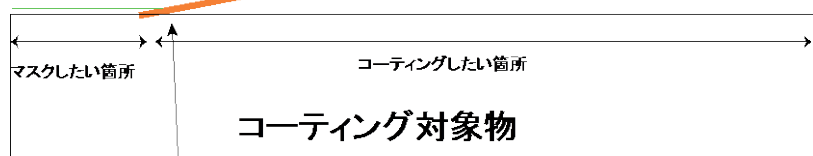
日本パリレンにコーティングを依頼する場合マスキングもあわせて依頼することができるが、複雑なマスキングの場合には、自分でマスキングをするのが適当な場合もある。逆に、回路基板上のピンのマスキングなどは、マスキングを依頼した方が良い結果が得られる場合もある。

これまでに使用実績のあるマスキング材は、カプトンシート、カプトンテープ、リンレイ換気扇リパック、であるが、複雑な形状のマスキングの場合には、液体の「リンレイ換気扇リパック」が便利である。

パリレン膜は固いのでマスキングをはがす場合には、カッターナイフでマスキング材の周りを切ってからのはがすことになる。超高電圧を用いる場合は、このカッターナイフで切る作業で、コーティング対象物を傷つける可能性があり、それが致命的になる場合がある。そこで、パリレン膜は非常に狭い隙間には入り込みにくい（非常に狭い隙間の場合には膜厚が薄くなるはず）という考察の下、下記のマスキング法を考案した。

カプトンテープ・
リンレイ換気扇リパック

カプトンシート



境目の膜厚が薄くなるため、カッターナイフを用いなくてもカプトンシートをテープ側の上方向に引っ張るだけできれいにマスキングを剥離できる。

この方法は、Kaguya MAP-PACE-IMAの質量分析器の心臓部であるセラミック電極やASIC搭載型アノードのコーティングの際に使用して、極めて良好な結果を得ている。これまでのマスキングの失敗例としては、ASIC搭載型アノードのアノード基板上的の信号接続用ピンのマスキングにリンレイ換気扇リパックを用いた際に、マスキングの剥離に失敗してピンを破損してしまった例が挙げられる（カッターナイフでピンの周りのカプトンを切るのが大変なため、そのままマスキングをはがそうと試みた所、ピンごと外れてしまった）。このようなピンのマスキングについては日本パリレンが慣れ

ているため、この失敗以降はピン部分については日本パリレンにマスキングを依頼している。

<依頼時の注意点>

- ・ 最近の日本パリレンは、クリーン度の管理が良くなったため失敗例はないが、以前（現在の場所に日本パリレンが移動する前）はホコリの付着がみられた。コーティング前にホコリが付着するとホコリもきれにコーティングされてしまう。高圧の場合には、これが放電のもとになるので注意が必要である。
- ・ 以前は、コーティング直前にホコリをブローなどで飛ばしてもらうように念を押ししていたが、最近はその必要は無い。
- ・ 洗浄（ホコリの付着防止、半田フラックスや油脂成分の除去のため）、マスキングの後、ブラックライト、強カライトを用いて十分ホコリが無い事を確認する必要がある。その後、ホコリが付かないように梱包して日本パリレンへ引き渡す。

5. ポットティングの作業ガイド (TBW)

6. 黒色化，絶縁コーティングに際してのチェック事項

内容	チェック結果
持ち込み前にはブラックライト・強カライトや顕微鏡で表面に埃が無いことを確認する。セレーション加工した金属表面には繊維状のものが強固に付着していることが多く、ピンセットなどで引き剥がす必要がある。特に部品の洗浄時に繊維を含むワイパーを使用する場合には、繊維が残らないような細心の注意が必要であるため、ワイパーの使用は可能な限り避ける事を推奨する。	
持ち込みの際は、処理の直前にエアスプレーを全体に掛けることと、ブラックライト・強カライトによる目視を依頼する。必要に応じてエアスプレーやブラックライト・強カライトを貸与する。	
処理後の物品についても持ち込み前同様のブラックライト・強カライト等を用いて表面に埃が取り込まれていないことを確認する。	
コンフォーマルコーティングの際には、必要な部品の固定を忘れずに行う事。（コンフォーマルコーティングによる結果的な部品の固定に頼ってはいけない）。	
コーティングの種類とコーティングをするものの種類によって、コーティングがよく付く材質と付かない材質があるため、フライト品のコーティングを行う前に、同等部品（同一ロット）を用いたコーティングの密着性確認試験を実施する事。	

7. 組み上げ・基板製作に際してのチェック事項

内容	チェック結果
組み上げ直前に、全ての部品に対して通常の見視及びブラックライト・強カライトを使った見視により、埃などが無いことを確認する。	
ネジ止め時には金属くずが発生するので、組み上げ時は適宜見視による確認を行う。また、タップ周辺のパキュームクリーナによる清掃を行う。特に高圧部周辺ではネジ回しやピンセットなどで金属表面に傷付けないことに注意する。ピンセットは非金属の柔らかい材質のものを使用することが望ましい。	
ネジ止めの際は排気ルートに留意し、タップが貫通式であること、あるいはネジに貫通穴が有ることを確認する。絶縁物を使用する場合も、換気孔が有ることを確認する。	
基板については、可能な限り、超音波洗浄を行う（部品によっては超音波洗浄不可）。特にチップ部品の下は見視で確認しにくいいため洗浄できていることを注意して確認する必要がある。半田のフラックスなどの汚れが残っていると、特に高温時に放電を誘発することがある。	
半田付けを行う場合には、高圧のかかる部分は丸盛りにする。シールド付き高圧ケーブルのシールド端末処理を必要とする場合も同様である。	
半田付けを行う場合には、高圧のかかる部分については部品のリードなどが丸盛り半田を突き抜けないように注意する。	
高圧ケーブルの被覆の穴などが無いように注意すること。	
組上げ時・基板製作時には手袋を装着して機器・部品の清浄度を保つ事。クリーンベンチ外の物品に触れた後は、その都度、必ず手袋を新しいものに取り換える事。高頻度の交換という観点からはラボメント手袋が推奨される。黒色塗装を施した部品などを扱う際には操作性の観点からニトリスト手袋なども推奨されるが、この場合も上記の手袋取り換えを徹底する事。	

8. 試験計画に関するチェック事項

内容	チェック結果
単体熱真空試験で最大動作電圧までの動作検証を行うこと。	
熱真空試験のサイクル開始前に脱ガスを行うこと。機器の保存温度にもよるが、 $1e-5$ Torr 以下で 50°C 以上、3 時間以上が目安である。	
高圧モジュールの熱真空試験では、動作温度の最高・最低の間で連続 20 サイクル（これには通常、1 週間以上かかる）以上を推奨する。なお単体試験とはいえ、できる限り、高圧電源単体だけでなく、高電圧が印加される箇所すべてを対象とすること。	
熱真空サイクルの温度は高温で終わるようにし、常温に戻した後、窒素ガスまたは乾燥空気で大気圧戻しをする事を推奨する。	
熱真空試験における健全性チェックは、高圧出力に重畳する微小パルスを検出可能な方式で行う事。検出限界の目安はパルス幅 $<1\mu\text{s}$ (できれば $<300\text{ns}$)、パルス高 $<$ 出力電圧の 2-3% 程度である。	
試験時、地上保管時には防塵、湿度管理を行う。湿度は 4% 以下を目安とする。	
試験及び運搬直前に、センサー表面、試験設備（チャンバー内部壁やチャンバー内で使用する治具及びケーブル）、運搬容器内部に対してブラックライト・強力ライトを用いて埃の無いことを確認する。	

9. 運用計画に関するチェック事項

内容	チェック結果
高圧電源 ON は真空が保証される時期に行う事。通常，科学衛星では打ち上げ後少なくとも 1 か月以降である（8kV 以上の高圧ではさらに長時間を要する）。	
高電圧は 1 回のミスコマンドでは出力されないようにすること。例えば，ENABLE コマンド，ON コマンド，OUTPUT コマンドの 3 段階（あるいはより冗長な形）での出力オペレーションなどが推奨される。急激な出力 OFF についても同様の注意が必要である。	
高電圧は独立の 2 手段（バス，観測機器）で OFF できること。観測機器では 2 種類の異なるコマンドで OFF またはゼロ出力にできること。	
昇圧，降圧は（非常時を除き）段階的（例えば，100V 刻み）に行うこと。非常時についても可能な限りゆっくりと高圧は変化させる。	
スラスタ運用時の高圧電源運用は行わないこと。（但しブルーム分布予測によって十分な真空が確保できる事が確実である場合にはこの限りではない。）	