

限定なし



絶 縁 設 計 標 準

2021年 9月16日 B改訂
平成 24年 5月10日 A改訂
(平成 20年 9月 3日 初版制定)

宇 宙 航 空 研 究 開 発 機 構

免責条項

ここに含まれる情報は、一般的な情報提供のみを目的としています。JAXA は、かかる情報の正確性、有用性又は適時性を含め、明示又は黙示に何ら保証するものではありません。また、JAXA は、かかる情報の利用に関連する損害について、何ら責任を負いません。

Disclaimer

The information contained herein is for general informational purposes only. JAXA makes no warranty, express or implied, including as to the accuracy, usefulness or timeliness of any information herein. JAXA will not be liable for any losses relating to the use of the information.

発行

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

宇宙航空研究開発機構 安全・信頼性推進部

JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)

目 次

1 適用範囲.....	1
1.1 目的.....	1
1.2 適用範囲.....	1
2 参考文書.....	1
3 用語.....	1
4 一般要求事項.....	2
5 設計要求と設計手段.....	3
5.1 絶縁設計.....	3
5.1.1 気体誘電体による絶縁設計.....	3
5.1.2 固体誘電体による絶縁設計.....	4
5.1.3 沿面絶縁設計.....	6
5.2 二重絶縁による対策.....	7
5.2.1 二重絶縁の定義.....	7
5.2.1.1 空間絶縁（導電物間の距離）.....	8
5.2.1.2 固体絶縁.....	8
5.2.2 二重絶縁適用箇所.....	9
6. 付録.....	11
付録 I 絶縁破壊のメカニズム.....	11
I.1 絶縁破壊のメカニズム[1-3].....	11
I.1.1 固体の電気伝導.....	11
I.1.2 固体の絶縁破壊機構.....	12
I.1.2.1 電子的破壊過程.....	13
I.1.2.2 熱的破壊過程（thermal breakdown）.....	16
I.1.2.3 電気機械的破壊（electromechanical breakdown）.....	18
I.1.2.4 部分放電.....	20
I.1.2.5 トリーイング.....	24
I.1.2.6 トラッキング.....	24
I.1.3 沿面放電機構.....	25
I.1.3.1 気相中の沿面放電現象.....	25

II.3.2 真空中の沿面放電[4,5].....	26
I 1.3.3 界面の放電.....	29
II.3.4 破壊に対する帯電の影響.....	30
付録II 電界の集中と電極材による電子放出の影響.....	33
III 電極形状と電界の関係[1].....	33
II2 電極材料と電子放出.....	35
II3 金属の仕事関数の影響.....	37
II 4 電極の表面処理.....	37
付録III 中性分子の放電への影響.....	39
III1 気体中の Paschen 則[1,3].....	39
III2 ホットロンチ時の課題と対策.....	41
付録IV 沿面距離と放電電圧.....	43
IV1 沿面距離と放電電圧[1].....	43
IV2 沿面放電防止に対する考え方.....	45

1 適用範囲

1.1 目的

絶縁設計標準（以下「本標準」という）は、宇宙航空研究開発機構（以下「JAXA」という。）が開発する宇宙機の電源系絶縁設計に関する基本的な要求事項を規定するものである。

絶縁破壊要因の解説及び本標準を活用する上で必要となる知見等については付録にまとめた。

1.2 適用範囲

本標準は、JAXAが開発する宇宙機の公称100Vまでの電源系絶縁設計に関する設計標準として適用される。

尚、本標準においては、本標準に拠り難い箇所があると判断された場合、その理由を明確にした上で該当箇所をプロジェクト個別に規定することを前提としている。

2 参考文献

本標準で参考とした文書を以下に示す。

(1) 宇宙航空研究開発機構文書

JERG-0-042C プリント配線板と組立品の設計標準

(2) IEC文書

IEC-J60950 情報技術機器の安全性

(3) 日本工業規格

JIS C 0704 制御機器の絶縁距離・絶縁抵抗及び耐電圧

JIS C 2110 固体電気絶縁材料の絶縁耐力の試験方法

3 用語

(1) 一次電源

宇宙機の電力系（太陽電池パドル系、電源系）で生成／制御され、宇宙機内の各負荷機器に共通に分配される電源。

(2) 一次電源バスライン

一次電源を分配・供給するラインで、負荷機器における一次電源入力部の同電位とみ

なせる範囲までを対象とする。

(3) 沿面放電

異なる誘電体の境界面に沿って生じる放電現象。

(4) コンディショニング

電極構造製作において、電極上の突起や電極付着物、微小粒子を除去する工程であり、その手法として電流コンディショニング、グロー放電コンディショニング、スパークコンディショニングがある。

(5) パッシェン (Paschen) 則

平等電界において火花放電が生ずる電圧 (V_s : Spark Voltage) は、気体の温度が一定の下では、ガス圧 (p) とギャップ長 (d) の積 pd の関数となる。この関係を Paschen が実験的に発見したため、Paschen の法則と呼ばれている。

4 一般要求事項

宇宙機の電子機器・部品には各種の絶縁材料が使用され、過酷な宇宙環境で宇宙機の信頼性維持に大きく貢献している。一方、絶縁材料に破壊が生じた場合は、宇宙機に重大な損傷を与える可能性があるため、絶縁材料の絶縁特性や破壊現象を把握して絶縁設計を行なう必要がある。

- (1) 導体間距離は、地上、打上げ及び軌道上の動作環境において絶縁破壊が発生しない大きさとする。特に打上げ時は、大きな気圧変化に晒され導体間の中性ガス粒子密度が小さくなるので Paschen 法則による絶縁破壊に注意した設計が必要である。
- (2) 導体間距離は、導体間で発生する最大動作電圧で絶縁破壊しないような値を選定すること。
- (3) 加工及び組立のクリアランスによっても規定の導体間距離が確保でき、地上、打上げ及び軌道上の動作環境において変動・変形しないこと、又は変動・変形した場合でも必要な距離を確保するように設計すること。
- (4) 絶縁材料に大きな圧力を加えて実装する機会が多いので、傷、割れ等が発生しないように実装すること。
- (5) 放電電圧 (絶縁破壊電圧) は、導体形状によって異なるので、導体端部の曲率半径を出来るだけ大きくし、導体表面に鋭利な突起を出来るだけ作らないこと。
- (6) 固体誘電体は、使用条件によって絶縁破壊電圧が低下する場合がある。よって、材料特性、使用条件に応じたディレーティングを十分に考慮して固体誘電体の厚さを設定すること。

- (7) 宇宙空間で発生したガスによる絶縁破壊電圧の低下を防ぐために、ベントホールを設ける等で導体間に閉じた空間を極力作らない実装設計とすること。樹脂等を硬化させて絶縁材として使用する場合は、材料の泡、ガス等は十分に抜き、ボイドの発生を抑制すること。
- (8) 沿面放電による絶縁破壊を防止するため、極力、固体誘電体表面に凹凸等のバリアを設けること。

5 設計要求と設計手段

5.1 絶縁設計

100V(公称)以下のバス電圧を有する宇宙機の電源ラインについて、絶縁設計の基本的な要求事項を示す。

なお、印刷配線板の絶縁設計に関しては、JERG-0-042C「プリント配線板と組立品の設計標準」によることとし、本設計標準の対象外とする。

5.1.1 気体誘電体による絶縁設計

気体誘電体を使用した絶縁設計において、導体間距離に対する要求は表 5.1.1.-1 による。

なお、表 5.1.1.-1 に示す値を確保できない場合は、他の絶縁手段を取るか、解析又は評価により宇宙機プロジェクト毎に設計の妥当性を判断する。

表 5.1.1.-1 気体誘電体（注 1）における導体間距離

最大動作電圧(V)（注 2） （ピーク又は直流）	導体間距離(mm)	備考
210V	1.0 以上	<ul style="list-style-type: none"> ・ 塵埃及び湿気がコントロールされた環境で使用する機器 ・ 2重絶縁が要求される場合は他の絶縁手段を付加する。

注 1. 空气中又は真空中を想定している。

注 2. 機器が動作しているときに電極間に加わる直流電圧又はパルス状の電圧の最大値。

表 5.1.1.-1 の解説：

表 5.1.1.-1 に示す値は下記に示す考え方及び資料を参考にするとともに過去の設計及

び軌道上実績を考慮して設定した。

- (1) 気体の絶縁破壊は、打上げフェーズの減圧時にクリティカルであるが、主要構成ガス体である空気、窒素の絶縁破壊電圧は 250V 以上であることから、210V 以下での導体間距離を決定する場合は、制約とならない。
- (2) 下記の公的規格を参考とした。
 - ・ IEC J60950 「情報技術機器の安全性基準：2.10.3 項、表 2H」
 - ・ JIS C 0704 「制御機器の絶縁距離・絶縁抵抗及び耐電圧：4.2 項、表 6」
- (3) 導電性の屑が導体間に入り、屑が導体間に持続的に滞って致命的な絶縁破壊を生じることを低減する導体間距離を確保することとした。（一般的に導体屑のサイズは 1mm 以下と想定した）。

5.1.2 固体誘電体による絶縁設計

現状の電気設計においては、網羅的宇宙環境下における慣習的耐電圧データが使用されている。これに対し宇宙環境を、温度・周波数・材料厚み・電子線・紫外線・課電などの要素に分解し、それぞれの効果によるディレーティング率を個別に設定し、それらの積により最終的な耐電圧を求める考え方を示す。これにより、現在常用されている材料特性値の内訳が明瞭になり、特定の項目事項が緩和される、または特に厳しくなるなどの特殊用途に対する感度評価の指標にできる。将来的には過剰な設計マージンを放出できる可能性がある。

$$V_{EMP} < V_{EFF} = V_0 \times R_{temp} \times R_{freq} \times R_{thick} \times R_e \times R_{UV} \times R_{time}$$

V_{EMP} :	経験的耐電圧
V_{EFF} :	実効耐電圧
V_0 :	ノミナル絶縁破壊電圧の平均値
R_{temp} :	温度に関するディレーティング率
R_{freq} :	周波数に関するディレーティング率
R_{thick} :	厚みに関するディレーティング率
R_e :	電子線に関するディレーティング率
R_{UV} :	紫外線に関するディレーティング率
R_{time} :	課電に関するディレーティング率

注：この算定方式は、個々の効果は線形的に寄与して、複合効果は考慮していないことを特記する。工学的なアプローチに主眼を置いたものであり、材料科学として証明されたものではない。材料特性や理論においては、個別の効果に関しては統一的解釈が成されるものもあるが、複合効果をも包含した理論構築は未だ完成されていない。

注：ノミナル絶縁破壊電圧 V_0 とは、履歴の掛かっていない材料に関し、室温にて AC 50 Hz に対する短時間（20 秒以内）での絶縁破壊電圧を意味する。

耐電圧低下要因として、温度・周波数・材料厚み・電子線・紫外線・課電を掲げる。衛星材料として一般的な 19 種の材料に対して表 5.1.2.-1 の結果を得た。

現行の衛星100Vバスに適合する電気設計では、ピーク電圧300V程度に耐える絶縁材料が使用されている。本試験に供されたほとんどの材料に関し、この経緯を追認する実効耐電圧 V_{EFF} を得た。

表 5.1.2-1 固体誘電体の絶縁破壊強度

材料名	厚み	V_{EFF}	V_0	備考
PTFEテープ	50 μ m	2.5kV	6.3kV	
KAPTON®テープ	25 μ m	1.2kV	5.5kV	
CHOTHERM®	0.38mm	7.7kV	12.0kV	200Hz
SOLITHANE	0.20mm	2.9kV	12.8kV	
PARYLENE	20 μ m	170V	3.2kV	100kHz
マイカ	75 μ m	1.4kV	8.0kV	
URALANE®	1.0mm	8.2kV	27.0kV	200Hz
LUMIRROR®	50 μ m	2.1kV	6.5kV	
熱収縮チューブ	0.18mm	340V	9.5kV	100kHz
ガラスエポキシ	0.2mm	2.7kV	11.7kV	
RTV (S-691)	1.0mm	9.9kV	29kV	200Hz
ETFE電線	0.15mm	2.4kV	9.2kV	200Hz
diXC	20 μ m	250V	2.8kV	
BTレジン	0.1mm	1.1kV	5.0kV	
A r a t h a n e	0.2mm	2.1kV	10.8kV	
RTV566	0.2mm	440V	4.2kV	
RTV142	0.2mm	2.7kV	7.7kV	
ポリイミド電線	0.16mm	1.0kV	14.3kV	
STYCAST®2850FTJ	0.06mm	580V	1.2kV	50Hz

注： V_{EFF} の算定条件

温度：100°C、周波数：200kHz（但し、200kHzでの絶縁耐力値が取得されていない材料は、備考に記載した周波数で算出した）

厚み：各試料のノミナル厚さ（上記参照、テープの厚さは粘着剤の厚さを除く）

電子線フルエンス： $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ （静止衛星の表面上で約1年分の被曝量に相当。但し、PTFEテープは $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ では、機械的強度が著しく低下するため $1 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ で算出した。）

紫外線照射：波長帯域200~400nmで800ESD（KaptonとETFE電線のみ適用）

課電時間：10万時間（約11年相当）

考え方

従前の絶縁設計の考え方は以下である（図 5.1-1 参照）。対象とする絶縁材料・部品・機器に定義された「最大許容電圧」に対して、出荷時または常用時に耐電圧試験（withstand voltage test）、絶縁耐力試験（dielectric strength test）、Hi-Pot 試験（high-potential test）を行い、合格する必要がある。「耐圧試験電圧」は、構成部品・材料の「絶縁破壊電圧」より十分に低く、「最大許容電圧」より十分高めに設定される。例えばトランスの場合、「最高使用電圧100V以下に対して300V」等とされている。これらは経験則(Rule of thumb：親指ルール)に基づくものであり、定

量的根拠は乏しいが、十分に実効的である。

本項で示す考え方は以下である。材料の「絶縁破壊電圧」に対し、厚み等の形状効果、温度や周波数等の使用方法効果、紫外線・電子線等による宇宙環境効果、課電効果、さらに統計的ばらつきによる低減率が、各々独立に相乗的に作用するとし、「実効耐電圧」を与える。この値は、「最大許容電圧」より高くあるべきである。この考えにもと基づけば、経験則に定量的根拠を与えることができる。さらに特定の使用方法の場合、根拠を持ってある低減率を緩和して、「実効耐電圧」を設計値に用いることもできよう。ただし、現状では十分なデータベース化が未実施であり、使用実績に乏しいので、ここに踏み込むには時期尚早である。

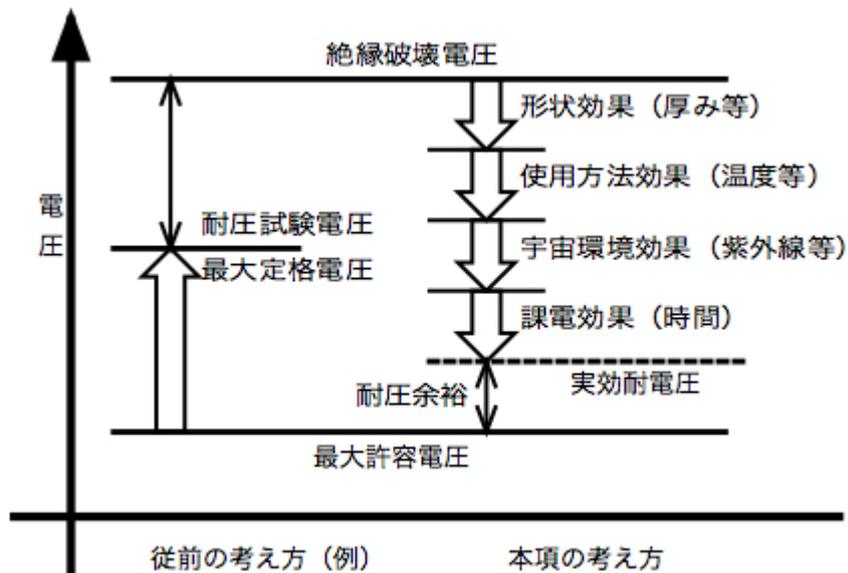


図 5.1-1 絶縁設計の考え方

5.1.3 沿面絶縁設計

固体誘電体の沿面距離に対する要求は、表 5.1.3.-1 による。

なお、表 5.1.3.-1 に示す値を確保できない場合は、他の絶縁手段を取るか、解析又は評価により宇宙機プロジェクト毎に設計の妥当性を判断する。また、部品で導体間の沿面距離が表 5.1.3.-1 に示す値以下のものについては、部品単体で認定試験等により性能が保証されていることと軌道上での使用実績を考慮して使用を許容するものとする。

表 5.1.3.-1 固体誘電体の沿面距離

最大動作電圧(V) (ピーク又は直流)	沿面距離(mm)	備考
210V 以下	1.0 以上	

表 5.1.3.-1 の解説

表 5.1.3.-1 に示す値は下記に示す考え方及び資料を参考にするとともに過去の設計及び軌道上実績を考慮して設定した。

(1)一般的な絶縁破壊特性上、210V 程度までの電圧では導体間距離(空隙)と沿面距離を同一としても絶縁破壊特性に大きな差異はない。

(2)下記の公的規格を参考とした。

- ・ IEC J60950 「情報技術機器の安全性基準：2.10.4 項、表 2L」
- ・ JIS C 0704 「制御機器の絶縁距離・絶縁抵抗及び耐電圧：4.3 項、表 8」

5.2 二重絶縁による対策

5.2.1 二重絶縁の定義

宇宙機は、1箇所故障による致命的な機能喪失を生じることがないように、冗長構成その他の対策が施されなければならない。このような観点から絶縁設計対策が必要な箇所として、一次電源バスライン、バッテリーライン（チャージアレイライン、火工品点火電源ライン等を含む）等の電源ラインが考えられる。これらの一次電源バスライン及びバッテリーラインの短絡が最も致命的な故障と考えられ、発生後の対策も不可能であることから、必要最小限の要求として二重絶縁による対策を一次電源バスライン及びバッテリーラインのみに絞り、本設計標準に規定する。

従って、短絡故障分離回路を含むそれより上流の一次電源バスライン、すなわち1箇所の短絡によって一次電源バスラインを短絡する場所及びバッテリーラインには、二重絶縁を適用する。但し、冗長化が図れる場合（冗長系があり過電流保護回路、カレントリミッタ等により故障系統の分離が可能な場合）には、この限りでない。また、IC、トランジスタ、ダイオード等の半導体部品、コネクタ、リレー、コンデンサ等の部品の内部（ハーメチックシール部含む）には二重絶縁を適用しない。

二重絶縁とは、下記 5.2.1.1 項及び 5.2.1.2 項の中から異なる 2 つの方法を使用して、一方が短絡した場合にその原因によってもう一方は短絡しないように絶縁する方法である。

電氣的、機械的、熱的、その他技術的な制約から、やむを得ず同一材料を使用せざるを得ない場合、フライト実績あるいは評価実績があり、且つ絶縁性、機械的強度、熱的耐性等に関するデータがあつて、十分な安全余裕が確保できる材料に限り同一材料で構成してもよいが、その場合も下記 5.2.1.2 項(2)の中から選択して使用すること。

なお、下記 5.2.1.2 項(3)のものは二重絶縁では絶縁物とはみなさない。

5.2.1.1 空間絶縁（導電物間の距離）

絶縁すべき場所において、その場所で発生しうる異物、変位などにより導電間が短絡されない距離を確保する。

1mm 以上の距離を有する場合は、1 つの絶縁物とみなす。2 つの裸の導電物間の距離が 1mm 以上あるとき、その間に絶縁物がない場合は一重絶縁、その間が絶縁物で満たされている場合は二重絶縁であるとする。

5.2.1.2 固体絶縁

以下のような固体絶縁物で絶縁する。

(1) 固体絶縁物

- (a) 樹脂板
- (b) 樹脂シート
- (c) 樹脂モールド
- (d) コーティング
- (e) マイカ板
- (f) ガラス繊維
- (g) ガラスハーメチックシール
- (h) セラミック板
- (i) セラミックハーメチックシール

- (2) 二重絶縁を同一材料構成としてよいもの
 - (a) 樹脂シート：BTレジン、ルミラーシート
 - (b) 樹脂板：GFRP、レキソライト
 - (c) テープ：ポリエステルテープ、カプトン®テープ
 - (d) 線材被覆：線材は宇宙機搭載用として認められているものとする。

- (3) 絶縁物とはみなされないもの
 - (a) プリント基板のソルダーレジスト
 - (b) 合金の表面処理
 - 処理の種類や、絶縁設計上の適用方法において絶縁が保証できる場合は除く。
 - (c) フェライト

5.2.2 二重絶縁適用箇所

二重絶縁は次に示す箇所に適用する。

(1) 一次電源バスライン

一次電源バスラインに発生電力を伝送する太陽電池パドル側において、1箇所の短絡により一次電源バスラインを短絡する箇所から、一次電源バスラインの分配・供給を受ける負荷側機器の短絡故障分離回路入力端まで。一次電源バスラインの例を図 5.2.2-1 に示す。

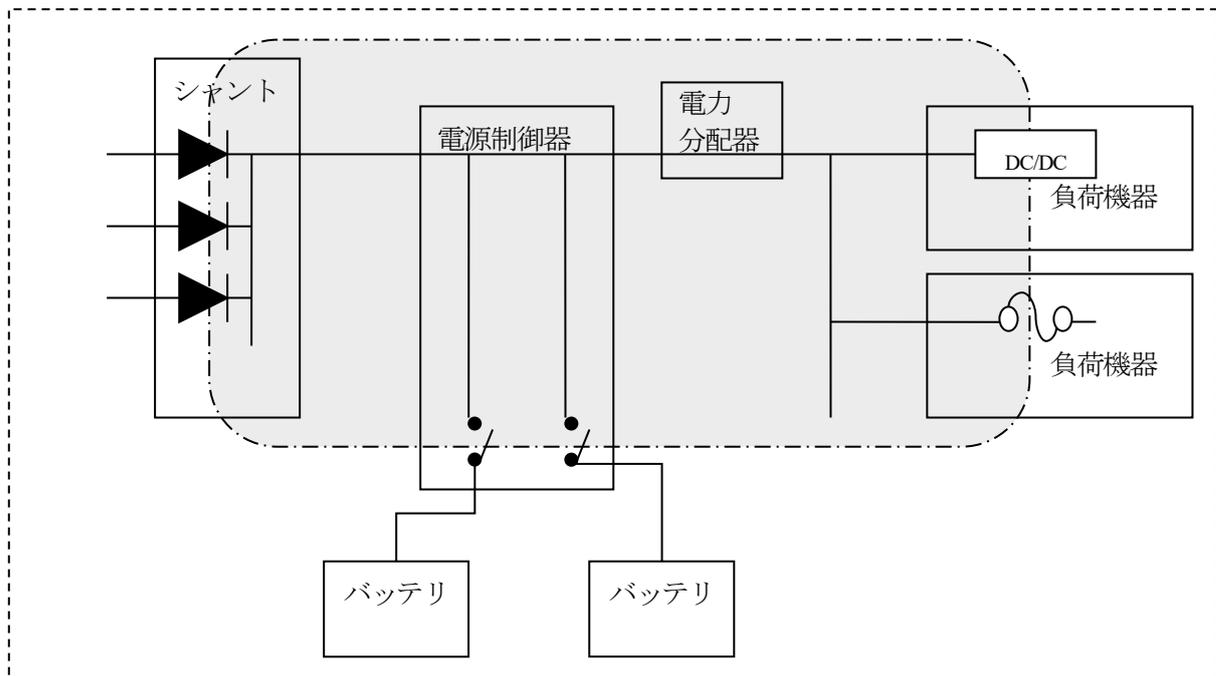


図 5.2.2-1 一次電源バスライン例

(2) バッテリライン

尚、バッテリーラインには、バッテリー出力ラインの他に、チャージアレイライン（チャージアレイ方式の場合）、バッテリー内部の電力ライン・セルケース・バッテリー筐体、火工品点火電源ラインを含むものとする。

6. 付録

付録 I 絶縁破壊のメカニズム

宇宙機には各種の材料が使用されており、その中で宇宙機の電気・電子機器・部品には各種の絶縁材料が使用され、苛酷な宇宙環境の中で宇宙機の信頼性維持に大きく貢献している。しかしながら、絶縁材料の破壊が時として宇宙機の大きな事故につながる可能性があり、絶縁材料の破壊現象や破壊特性を充分把握して材料の適用を図っていかなければならない。ここでは、その絶縁破壊現象や破壊メカニズム、また、その絶縁破壊に及ぼす種々の要因についてまとめることにする。なお、宇宙機に使用される絶縁材料は固体であり、固体自身の破壊現象、ならびに、固体と真空（あるいは気体）との界面に関わる沿面放電現象を中心に述べる。

I.1 絶縁破壊のメカニズム[1-3]

I.1.1 固体の電気伝導

電気絶縁構成の究極的な寿命を決めるのは絶縁破壊であるが、これらの前駆現象である電気伝導をよく理解することは、工学的応用だけでなく、電気物性の理論面でも重要な情報を提供することになる。

電流は、単位時間に、ある断面を通過する電気量として定義されている。したがって、電流密度 j [A/m²] は移動する電荷の密度 n [/m³] と、その移動速度 v_d [m/s] から、

$$\left. \begin{aligned} j &= qn v_d = qn \mu E \\ v_d &= \mu E \end{aligned} \right\} \dots (I.1)$$

となる。ここで、 E : 印加電界 [V/m]、 q : 電荷の持つ電荷量 [C]、 μ は移動度 [m²/V·s] である。

移動する電荷が m 種類あるとき、 j は、

$$j = E \sum_{i=1}^m q_i n_i \mu_i \dots (I.2)$$

で与えられる。また、電気伝導を記述する物理量の一つである導電率 σ [S/m] は、次のように定義される。

$$\sigma = \frac{j}{E} = qn \mu \quad \left(= \frac{1}{\rho} \right) \dots (I.3)$$

σ の逆数が体積抵抗率 ρ [Ωm] である。

誘電体の温度、試料厚さなどの条件を一定にしておいて、印加電圧を増加していくときの電圧－電流特性は、誘電体の電気絶縁性能を評価し、さらに、その電気伝導機構を定める上で極めて重要である。一般に、電流－電圧特性は、図 I.1 にモデル的に示すように変化するが、これらは次の3つの領域に分けられ、固体誘電体においては、気体や純粋液体に見られるような電流飽和領域はほとんど現れない。

領域 I は比較的低電界のところ、電流 I は電圧 V とともに直線的に上昇し、 $I \propto V$ の Ohm 則が成立する。

領域 II に入ると、電流は Ohm 則から外れて非直線的増大を示し、ついに絶縁破壊に移行する。この現象が電気絶縁破壊 (dielectric breakdown) である。このとき領域 III で示すように絶縁破壊に直結した破壊前駆電流が明瞭に区別されて観測される場合がある。Ohm 則の成立する領域を低電界領域、非直線領域を高電界領域という。

絶縁破壊は誘電体が絶縁性能を保持する限界を超えるもので、電気・電子機器の究極的な寿命を支配する重要な要因となる場合が多い。

I.1.2 固体の絶縁破壊機構

固体の絶縁破壊メカニズムとしては、表 I.1 に示す各種のメカニズムが提唱されており、大別すると短時間破壊と長時間破壊とになり、それぞれの絶縁破壊機構について以下に述べる。

まず、短時間破壊について説明する。

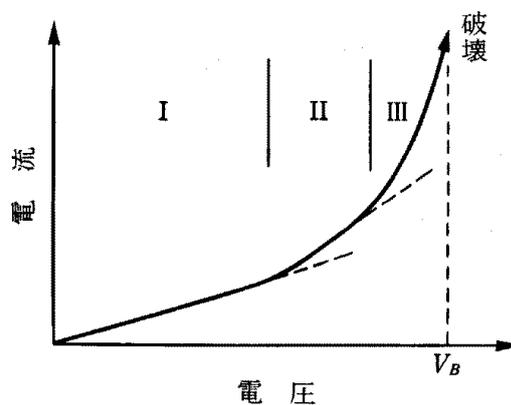
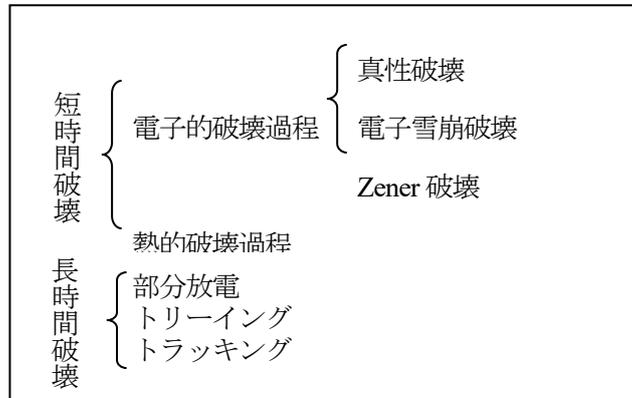


図 I.1 固体誘電体の電圧 (電界)－電流特性

表 I.1 固体の絶縁破壊メカニズム



I.1.2.1 電子的破壊過程

(a) 真性破壊 (intrinsic breakdown)

固体誘電体内には、わずかであるが伝導電子が存在する。この伝導電子が電界 E から得るエネルギー A と格子原子に与えるエネルギー B の平衡が崩れるときの電界が、真性破壊の破壊強度である。

いま、固体中の電子が全て同一のエネルギー W を持つと仮定すると、 A は次のように求まる。電子が格子と衝突しながら電界 E の作用で z 方向に運動しているとする。電子の運動量を p_z とすると、

$$\left(\frac{dp_z}{dt}\right)_{\text{電界}} = -eE \quad \dots (I.4)$$

ただし、 e は電子の電荷量 ($=1.6 \times 10^{-19} \text{C}$)。格子との衝突に対しては、

$$\left(\frac{dp_z}{dt}\right)_{\text{格子}} = -\frac{p_z}{\tau(W, T_0)} \quad \dots (I.5)$$

ただし、 $\tau(W, T_0)$ は運動量緩和時間で、 W と格子温度 T_0 に依存する。定常状態では p_z は一定であるので、

$$\left(\frac{dp_z}{dt}\right)_{\text{電界}} + \left(\frac{dp_z}{dt}\right)_{\text{格子}} = 0 \quad \dots (I.6)$$

したがって、電子の z 方向の移動速度 v_{ez} は、

$$v_{ez} = \frac{p_z}{m} = -\frac{e}{m} \tau(W, T_0) E \quad \dots (I.7)$$

ただし、 m は電子の質量 ($=9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$) である。電流密度を j とすれば、 $A=jE$ であり、1 個の電子による電流は、(I.1)式より、 $j=-ev_{ez}$ であるので、

$$A(E, W, T_0) = jE = -ev_{ez}E = \left(\frac{e^2}{m}\right)\tau(W, T_0)E^2 \quad \dots (I.8)$$

となる。また、単位時間に衝突によってエネルギーを失う割合 B は、 W と T_0 に依存するので、 $B(W, T_0)$ と置く。図 I.2 に、 A と B の W 依存性の概念図を示す。

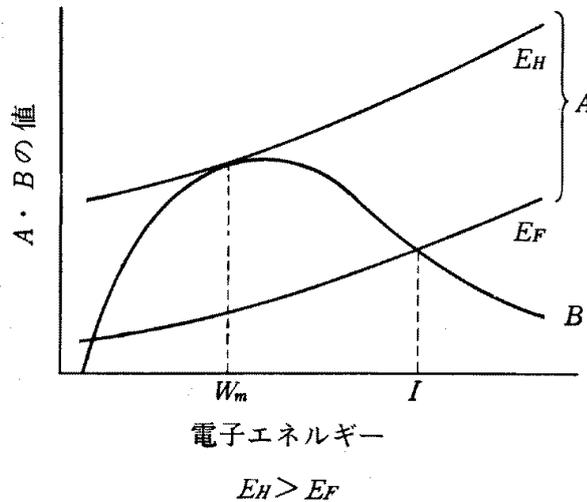


図 I.2 A、B と電子エネルギー W の関係

ヒッペル (von Hippel) は、図 I.2 で、 $E > E_H$ ならばあらゆる W に対して $A > B$ となり、電子のエネルギーは無限大に増大して平衡点が無くなるとして、 E_H を破壊強度とした。 E_H をヒッペルの低エネルギー基準という。

一方 $E < E_H$ でも、例えば電子エネルギーが誘電体の価電子帯から伝導帯へ電子を励起するのに必要なエネルギー I 程度になると電子の増殖が起こり得る。フレーリッヒ (Fröhlich) は、 I に対応する電界 E_F を破壊強度とした。これをフレーリッヒの高エネルギー基準という。

(b) 電子雪崩破壊 (electron avalanche breakdown)

気体の破壊を真似たもので、電界によって加速された電子が衝突電離を繰り返して、電子数が増加し、雪崩に成長したときに破壊するという機構で、破壊条件は次式で表される。

$$\alpha d = h_c \quad \dots (I.9)$$

α は衝突電離係数で単位距離あたりの衝突回数 [1/m]、 d は誘電体の厚さ [m]、 h_c は定数で、経験的に約 40 の値がよく使われる (Seitz の 40 世代理論)。固体中の衝突電離係数 α は、1 個の電子が

単位時間に電離する回数を w [1/s] とすると、

$$\alpha = \frac{w}{v_e} = \frac{w}{\mu_e E} \quad \dots (I.10)$$

で与えられる。ただし、 v_e は電子の移動速度 [m/s] である。ところで、 w は次のようにして求まる。平均エネルギー W_{av} を持つ電子が電界の中を運動するとき、電離エネルギー I に達するのに必要な時間 t_I と、その間の電界方向に移動する距離 l_I は、それぞれ、

$$t_I = \frac{\sqrt{2m}(\sqrt{I} - \sqrt{W_{av}})}{eE} \quad \dots (I.11)$$

および

$$l_I = \frac{I - W_{av}}{eE} \quad \dots (I.12)$$

ところで、電子はエネルギー I を得る以前にも衝突し得る。いま、 $p(t_I)$ を t_I 時間内に電子が原子と衝突しない確率、すなわち I 以上のエネルギーを得る確率とし、 $\tau(W_{av})$ を衝突緩和時間（衝突から次の衝突を起こすまでの時間）とすると、

$$w = \frac{p(t_I)}{\tau(W_{av})} \quad \dots (I.13)$$

となる。

式 (I.10) と式 (I.13) を式 (I.9) に代入して E について解くと、これが雪崩破壊時の破壊強度 E_B となる。すなわち、

$$E_B = \frac{p(t_I)d}{\tau(W_{av})\mu_e(W_{av})h_c} \quad \dots (I.14)$$

$p(t_I)$ は、

$$p(t_I) = \exp\left(-\int_0^{t_I} \frac{dt}{\tau(W_{av})}\right) \quad \dots (I.15)$$

と表される。電界中で自由運動している電子の運動方程式は、

$$\frac{dW}{dt} = mv_e \frac{dv_e}{dt} = (2mW)^{1/2} \frac{eE}{m} \quad \dots (I.16)$$

であるので、式 (I.15) は次のように書き換えられる。

$$p(t_I) = \exp(-E/H) \quad \dots (I.17)$$

ただし、

$$H = \frac{1}{e} \left(\frac{m}{2}\right)^{1/2} \int_{W_{av}}^I \frac{dW}{W^{1/2} \tau(W)} \quad \dots (I.18)$$

故に、 E_B は、

$$E_B = \frac{H}{\ln\left\{\frac{d}{E_e \mu_e (W_{av}) \tau(W_{av}) h_c}\right\}} \quad \dots (I.19)$$

となる。 E_B はギャップ長 d の関数となる。厚さの薄い試料では雪崩破壊になりやすい。図 I.3 は、塩化ナトリウム NaCl に対してなされた破壊強度の実験と電子雪崩破壊理論の比較である。

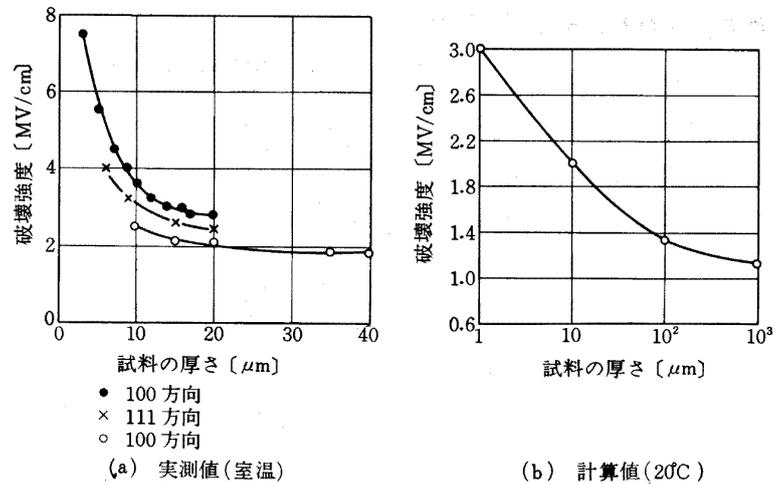


図 I.3 NaCl の絶縁破壊強度の実験値と雪崩破壊理論に基づいた計算値の比較

(c) Zener 破壊

高電界下のトンネル効果 (tunnel effect) により、伝導帯の電子が急増し、その電子電流による発熱が臨界温度を超えたときに破壊するとするものである。伝導帯と価電子帯との間のバンドギャップが狭く、薄い試料に対するモデルとして提案された。例えば、Ge の p-n 接合の逆バイアス時などにおける絶縁破壊が対象となる。破壊電界強度は 10MV/cm のオーダーである。

I 1.2.2 熱的破壊過程 (thermal breakdown)

固体絶縁物に電界を印加するとジュール熱が発生し、この熱は固体の温度上昇と周囲への拡散によって失われる。この放熱と発熱の関係を概念的に示すと、図 I.4 のようになる。周囲温度 T_0 で電界 E_1 を印加すると、初めは発熱量が放熱量を上回るので次第に温度上昇し、図中の T_1 で平衡に達する。電界が E_{Tc} になると、平衡点は T_{0c} になり、それ以上の電界では常に発熱量が放熱量

を上回るので温度上昇が継続し、平衡点は存在しない。

一般に、固体絶縁物が熱破壊を起こす温度 T_{0c}' は、図 I.4 の T_{0c} より大であるが、定常状態では E_{Tc} 以上の電界が印加されると、常に T_{0c}' の温度は達成されるので、 E_{Tc} が固体絶縁の熱破壊強度になる。しかし、パルス電圧印加のときは、例えば T_{0c}' まで温度上昇するのに必要な時間がパルス電圧幅より長ければ、 E_{Tc} 以上の電界になっても破壊しないので、破壊強度は電圧印加から破壊までの時間の関数になる。

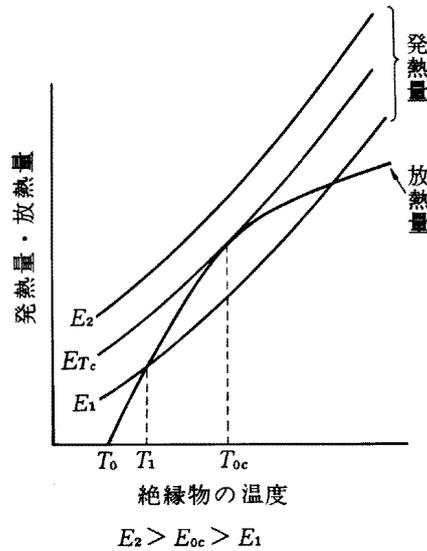


図 I.4 固体における発熱量と放熱量の概念図

固体中の熱伝導の基本式は、固体内の単位体積あたりの熱平衡条件

$$\text{発熱量} = (\text{固体の温度上昇の熱}) + (\text{熱伝導による周囲への熱放射})$$

より

$$\sigma E^2 = C_v \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(K \text{grad} T) \quad \dots (I.20)$$

となる。ただし、 T : 固体の温度 [K]、 C_v : 固体の比熱 [J/kg·K]、 K : 固体の熱伝導率 [W/m·K]、導電率 [S/m] である。

一般に、簡単な境界条件の場合も式 (I.20) を解析的に解くのは困難であるが、ここでは一つの極限、すなわち直流電圧を印加した場合を考える。

直流電圧を印加した場合、式 (I.20) の右辺第 1 項は無視でき、

$$-\text{div}(K \text{grad} T) = \sigma E^2 \quad \dots (I.21)$$

となる。図 I.5 のような厚さ d の無限平板の均質、等方な固体絶縁物が平行平板電極内に置かれ、 z 方向にのみ熱の流れがあるとする。このとき、式 (I.21) は、

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \sigma \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 = 0 \quad \dots (I.22)$$

となる。ただし、 V は固体内の電位 [V]、また、

$$\sigma E = -\sigma \frac{\partial V}{\partial z} = j \quad \dots (I.23)$$

が成立する。

式 (I.23) を式 (I.22) に代入して積分すると、

$$jV = \int_0^z \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz = K \frac{\partial T}{\partial z} \quad \dots (I.24)$$

となり、これに式 (I.23) を代入して積分すると、

$$V_0^2 = 2 \int_{T_0}^{T_m} \frac{K}{\sigma} dT \quad \dots (I.25)$$

となる。ただし、 V_0 : 印加電圧 [V]、 T_0 : 周囲温度 [K]、 T_m : 物体中心の温度 [K] であると、 $T_m = T_{0c}$ のとき破壊するので、破壊電圧 V_B は次のようになる。すなわち上式で $T_m = T_{0c}$ 、 $T = T_0$ 、 $V_B = V_0/2$ ($\because z=0$ に対して温度分布が対称であるので、半分だけを考える) と置き、

$$V_B = 8 \int_{T_0}^{T_{0c}} \frac{K}{\sigma} dT \quad \dots (I.26)$$

となる。 $\sigma(T) = \sigma_0 \exp(-\phi/kT)$ 、 $K(T) = K_0$ と置ける場合は、

$$V_B \cong \left(\frac{8kT_0^2 K_0}{\sigma_0 \phi} \right)^{1/2} \exp(\phi/2kT_0) \quad \dots (I.27)$$

となる。ここで、 k : Boltzmann 定数 ($=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$)、 ϕ : 仕事関数、である。

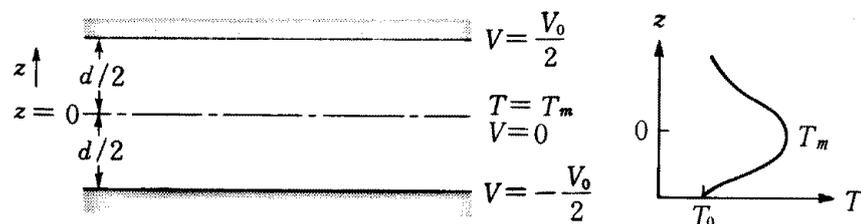


図 I.5 均質・等方な無限平板試料

I 1.2.3 電気機械的破壊 (electromechanical breakdown)

印加電界による Maxwell 応力が試料の機械的応力よりも大きくなったとき、試料がまず機械的に押しつぶされ、次に電氣的に破壊する。このときの破壊強度は次のように導かれる。

固体絶縁物に電界 E を印加すると、

$$F_e = \frac{\varepsilon}{2} E^2 \quad \dots (I.28)$$

の Maxwell 応力を生じる。ただし、 ε : 試料の誘電率、である。

一方、Young 率 Y の試料が厚さ d_0 から d に縮小するときの内部応力は、Young 率の定義から、

$$F_m = \int_d^{d_0} Y \frac{dl}{l} = Y \ln \frac{d_0}{d} \quad \dots (I.29)$$

となる。平板試料に電圧 V を印加して厚さ d で F_e と F_m が平衡したとすると $F_e = F_m$ 、 $V = Ed$ と置いて、

$$V^2 = \frac{2d^2 Y}{\varepsilon} \ln \frac{d_0}{d} \quad \dots (I.30)$$

を得ることができる。 d を変化して V が最大になるのは、 $dV/dd=0$ より $d/d_0 = \exp(-1/2) \approx 0.6$ のときである。すなわち、試料を機械的に押し潰すことなく印加できる最大の電圧 V_B は、 $d=0.6d_0$ のときで、破壊電界 E_B は、

$$E_B = \frac{V_B}{d} = 0.6 \left(\frac{Y}{\varepsilon} \right)^{1/2} \quad \dots (I.31)$$

となる。

図 I.6 は、ポリエチレンとポリイソブチレンの破壊強度の実測値と電気機械的強度の計算値の比較で、 80°C と -40°C 付近における E_B の急激な低下をよく説明している。

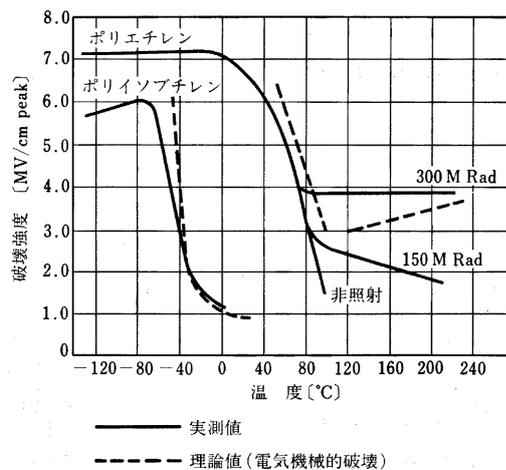


図 I.6 ポリエチレンとポリイソブチレンの破壊強度の温度依存

I 1.2.4 部分放電

次に、長時間破壊過程について述べる。固体絶縁物が長時間の電圧印加により破壊することがある。その要因として、部分放電、トリッキング、トラッキングの三つが考えられており、実用的な観点から、これらの破壊過程を理解しておくことは重要である。

まず、部分放電による長時間絶縁破壊について説明する。図 I.7 のように固体絶縁物 (厚さ d) 内部に厚さ t 、断面積 A の板状気泡 (ポイド) が存在すると、等価回路は同図 (b) のようになる。

図で、 $t \ll d$ で、固体の比誘電率を ϵ_r 、ポイド中の電界を E_c 、固体中の電界を E_a とすると、

$$E_c = \epsilon_r E_a \quad \dots (I.32)$$

となり、ポイド中の電界は固体中の ϵ_r 倍になる。また、図で

$$C_b = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d-t}, \quad C_c = \frac{\epsilon_0 A}{t} \quad \dots (I.33)$$

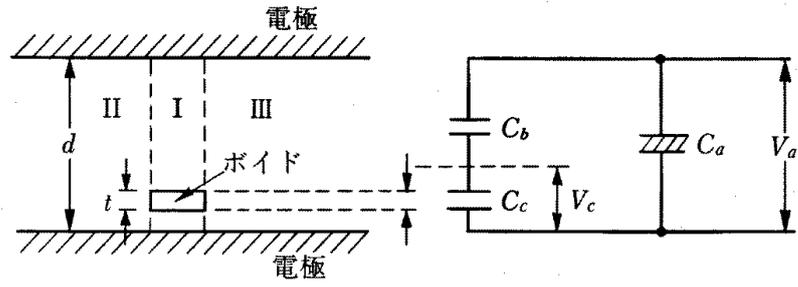
であるので、電極間電位差が V_a のとき、ポイドにかかる電圧 V_c は、

$$V_c = \frac{C_b}{C_c + C_b} V_a = \frac{V_a}{1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left(\frac{d}{t} - 1 \right)} \quad \dots (I.34)$$

となる。それゆえ、ポイド中の気体の破壊強度が E_B であるとき、ポイド中で破壊を起こす電極間電圧 V_{ao} は、

$$V_{ao} = E_B t \left\{ 1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left(\frac{d}{t} - 1 \right) \right\} \quad \dots (I.35)$$

となる。ポイド中の放電を部分放電 (partial discharge) またはポイド放電 (void discharge) と呼び、 V_{ao} を部分放電開始電圧 (partial discharge onset voltage) という。



(a) 試料中のボイド (b) (a)の等価回路

- C_c : ボイドの静電容量
- C_b : ボイドに直列の I の部分の静電容量
- C_a : 残りの部分 (II, III) の静電容量

図 I.7 ボイドを含む絶縁物と等価回路

図 I.8 は、図 I.7 の V_a が正弦波交流の場合の各部の電圧変化を示す。ボイド内の電位差 V_c が $V_c = E_{Bt} = V^+$ に達して C_c にいったん放電が始まると、 V_c は V_r まで ΔV だけ急激に低下する。 V_r を残留電圧 (residual voltage) と呼ぶ。これは、図 I.9(b) に示すように、部分放電によってボイド内の絶縁物表面に反対符号の電荷が蓄積され、その蓄積電荷による電界 E_s が外部電界 E_a をキャンセルするように働くために生じる。 V_c が ΔV だけ低下するのに要する時間は、放電の継続時間によって決まるが、 10^{-8} s 程度と極めて短く、この間に電源から電荷の供給はないので、 C_a にかかる電圧も

$$\delta V = \Delta V \frac{C_b}{C_a + C_b} \ll \Delta V \quad \dots (I.36)$$

だけ下がる。放電後も V_a の上昇が続くと、図 I.9(c) のように、外部電界に比例して E_c も大きくなるが、蓄積電荷による電界 E_s が存在するので、ボイド内の実質的な電界 ($E_c + E_s$) が大きくなって V_c も上昇し V^+ に達すると再び部分放電が生じる。 V_a が下降する場合も同様なことが生じ、 V_c の変化は図 I.8 のようになる。なお、ボイド内で放電する真電荷 Q は、

$$Q = \Delta V \left(C_c + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \right) \cong \Delta V (C_b + C_c) \quad \dots (I.37)$$

となり、電極間の見かけの放電電荷量 Q' は次式で与えられる。

$$Q' = \delta V C_a \cong \Delta V C_b \quad \dots (I.38)$$

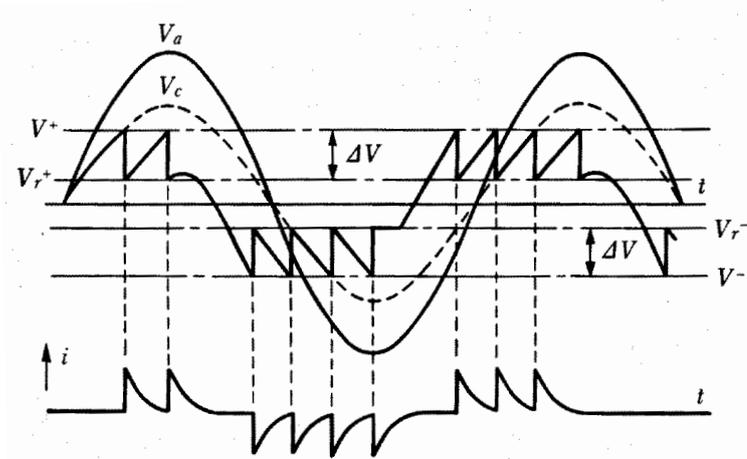


図 I.8 交流電圧印加時のボイド放電電流

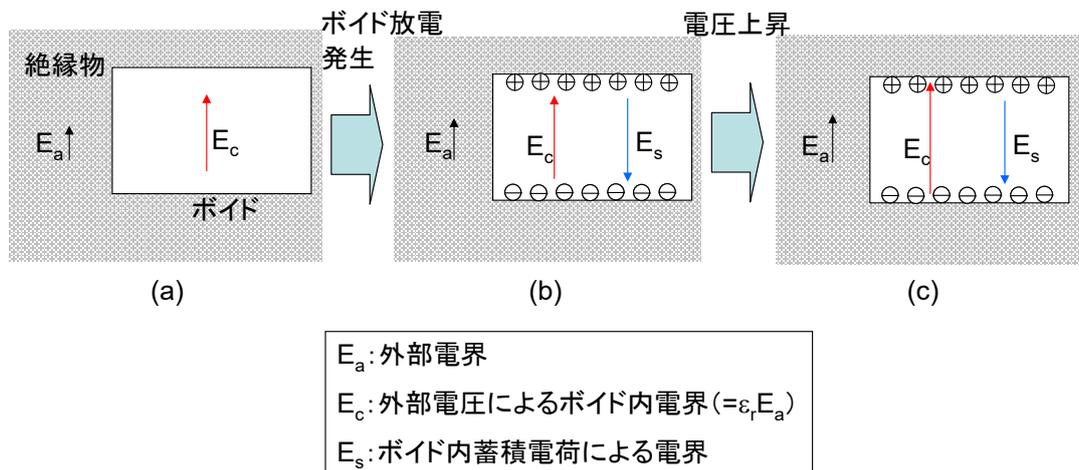


図 I.9 ボイド内の電界変化

次に、直流電圧印加の場合の部分放電について説明する。図 I.10 に示すように、電圧の立ち上がり時は、交流電圧印加の場合のように外部電界 E_a に応じてボイド内電界 E_c が上昇し、 E_B に達すると部分放電が発生する。その放電により発生した電荷がボイド内壁に付着すると、内部電界が低くなり、その後電圧の上昇が停止すると、ボイド内部電界は蓄積電荷の影響で低いまま維持される。しかしながら、この状態が長く続くと、内部に蓄積した電荷が外部電界 E_a の影響を受け対向電極に向かって漏洩していくので、内壁蓄積電荷が減少し、蓄積電荷による電界 E_s が低下してボイド内電界が徐々に高くなる。この電界上昇が続き E_B に到達すると、再度部分放電が発生することになる。このように、直流電圧の場合の部分放電発生は電荷の漏洩に律速されることになる。この漏洩の時定数は、絶縁物の誘電率 ϵ と体積抵抗率 ρ の積 $\epsilon\rho$ で決まり、通常絶縁物の体積抵

抗率は極めて大きいので時定数は長い。よって、直流の場合は、交流の場合に比べ放電頻度は小さいといえる。

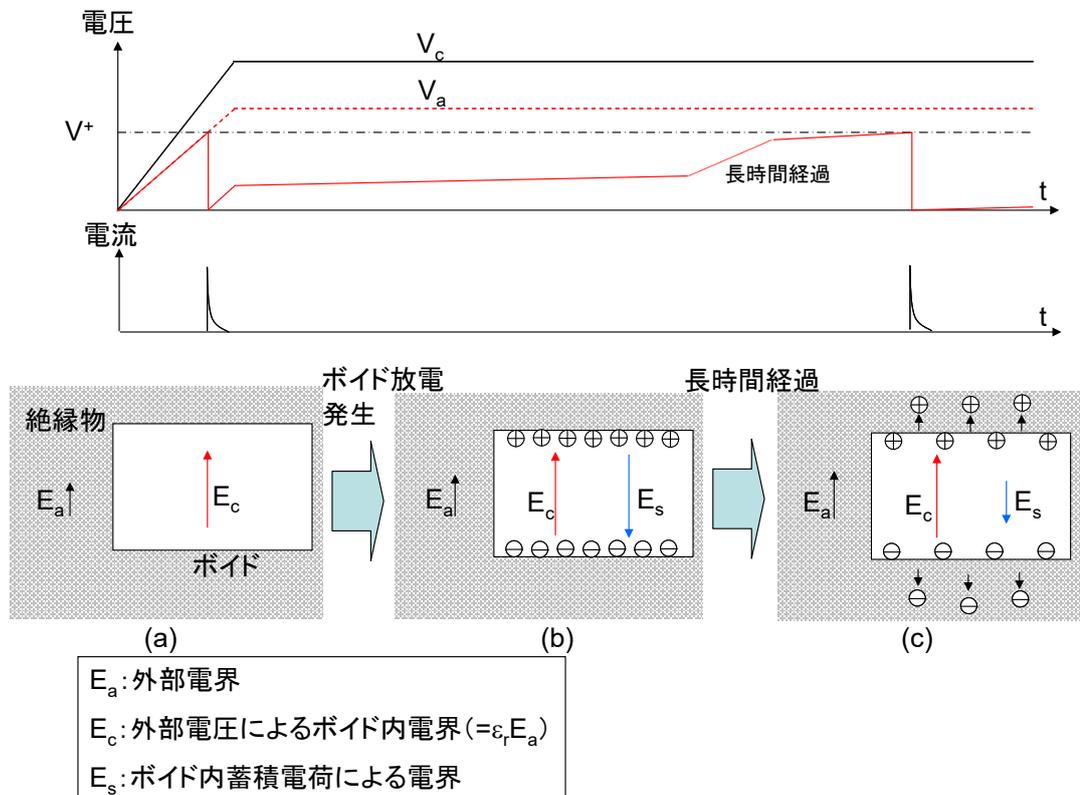


図 I.10 直流電圧印加時の部分放電

上述のように固体絶縁物にボイドが存在すると、ボイド内の電界が高くなって部分放電を生じる。部分放電は絶縁物内でのエネルギー損の原因になるので見掛けの誘電正接 $\tan\delta$ が大きくなると同時に、これが長時間生じると次のような機構で絶縁劣化を起し、短時間電圧を印加する時の数分の一の電圧で全路破壊を起す。

劣化の機構には、次の三つがある。

- 1) 荷電粒子の絶縁物への衝突による分子構造の切断、架橋や酸化などの化学的反応
- 2) 荷電粒子の衝突による局所的な温度上昇から生じる熱的劣化
- 3) 放電生成物の O_3 、 NO 、 NO_2 による酸化作用

図 I.11 に、代表的な絶縁材料であるエポキシ樹脂の交流電圧印加時の長時間破壊電圧—寿命時間特性 ($V-t$ 特性) を示す。このような $V-t$ 特性においては、印加電圧 (電界) と寿命時間との間

に経験的に逆 n 乗則

$$t = kV^{-n} \quad \dots (I.39)$$

が成り立つことが知られており、 n の大小によって寿命が評価される。また、ポイドが存在するときの n 値は、図 I.12 に示すように、小さくなり、寿命が短くなる。

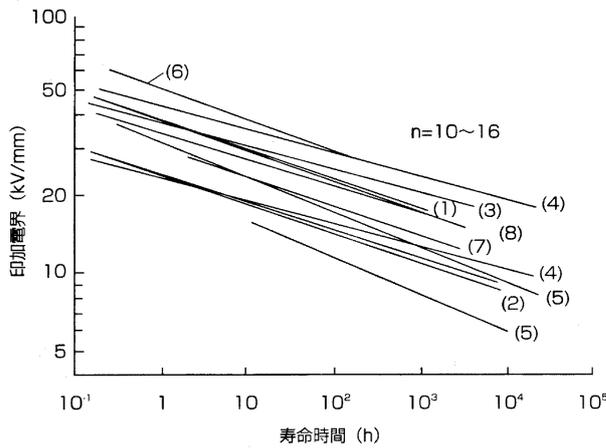


図 I.11 エポキシ樹脂の交流電圧 V-t 特性

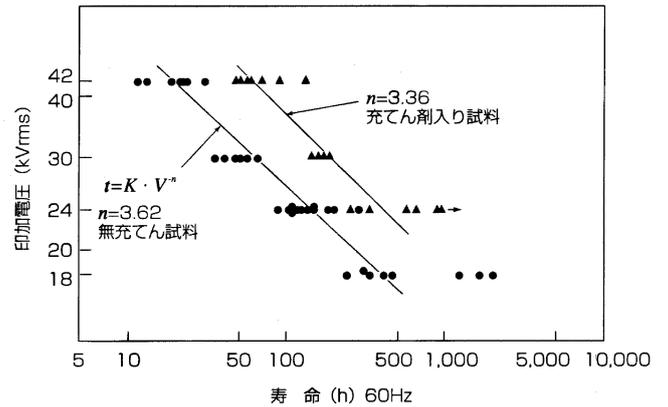


図 I.12 エポキシ樹脂の交流電圧 V-t 特性

I 1.2.5 トリーイング

固体絶縁物中に電極上の突起などのような局部的高電界部分が存在すると、細い管からなる樹枝状の放電路（トリー：tree）が発生し、これが電極間を橋絡すると全路破壊を起こす。樹枝状の放電路をトリーイング（treeing）という。厚肉の試料中で電極上の針状突起、導電性繊維、水分などが存在するときに起こりやすい。トリーは材料の真性破壊電圧よりもはるかに低い電圧で出現し、完全破壊をもたらす。

I 1.2.6 トラッキング

絶縁物表面に沿面方向の電界が存在するところに、塩分、塵埃、湿分などが付着すると徐々に導電性通路（トラック：track）が形成され、これがもとで低い電圧で沿面フラッシュオーバを引き起こすことがある。このように、絶縁物表面にトラックができる現象をトラッキング（tracking）という。有機絶縁物の表面に、アーク放電の熱による炭化や、アーク放電による導電性生成物（電極金属の蒸着など）によって低抵抗の導電路が形成される現象をアークトラッキングと称している。アーク放電の熱による炭化に関しては、炭素含有量の多い材料はこの現象が起きやすいが、アミノ樹脂、ポリアミド樹脂のように炭素主鎖の途中に N、O 等が結合している材料は炭化しに

くく、一般に耐アーク性がよい。逆に、フェノール樹脂やPBTなどのように分子内に芳香族環のある材料は、耐アーク性が悪い。一方、アーク放電による導電性生成物の付着に基づくものに関しては、電極材料、放電エネルギー、放電回数などによりトラッキング発生までの時間が変化する。

I 1.3 沿面放電機構

沿面放電は、異なる誘電体の境界面に沿って生じる放電現象である。したがって、気体中における固体表面、真空中における固体表面、液体中における固体表面、気体と液体との境界面における放電に分けられる。ここでは、宇宙機器を対象としているので、気相中の固体表面、真空中の固体表面、それに異種固体間界面の放電に関して述べることとする。

I 1.3.1 気相中の沿面放電現象

沿面放電は、図 I.13 (a) に示すように電気力線が固体誘電体表面に対して垂直になるような構成と、同図 (b) のように平行になるような構成に大別される。沿面放電は必ずしも高電圧側の電極から始まるのではなく、接地側の電極近傍の電界が強ければそれから放電が始まる。沿面放電が電極間を短絡すると閃光を伴った沿面フラッシュオーバー (flashover) となる。

(a) 電気力線垂直型沿面放電

電極先端の電界が強いため、低電圧から沿面放電が発生・進展を始め、しかも、非常に良く伸びる性質がある。ブッシングやケーブルの端末がこのような構造になっている。

(b) 電気力線平行型沿面放電

電界の強さがどの位置でもほぼ同じなので、ある点で放電が開始すると、一気にフラッシュオーバーに至る。放電は、誘電体と電極の接触部 (トリプルジャンクション) や誘電体表面に付着した金属片など電界歪の大きな点から開始する。高電圧導体を保持する碍子やスペーサの構造である。

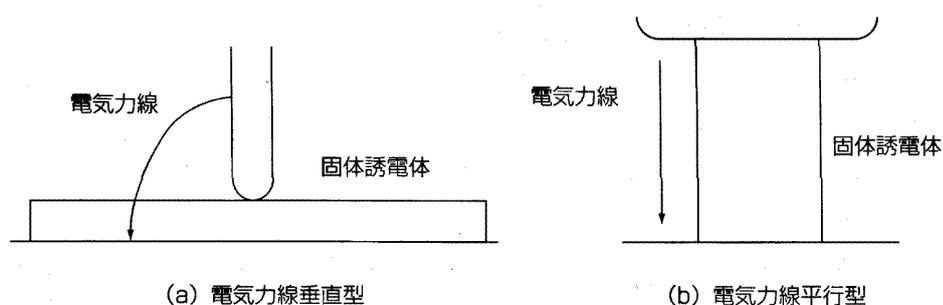


図 I.13 沿面放電の典型的な電極構成

沿面放電が進展しているときの機構は図 I.14 に示すようになっている。最先端には盛んに電離している領域（電子雪崩）、その後方にプラズマ状態の幹が存在する。この両者を合わせて沿面ストリーマ（streamer）という。さらに、放電が長く延びるとストリーマの後方に導電性のいいリーダ（leader）が形成される。沿面放電の特徴は固体誘電体に接しながら伸びること、および大きな充電電流が流れることである。なお、充電電流が流れ込む電極を背後電極（back electrode）という。

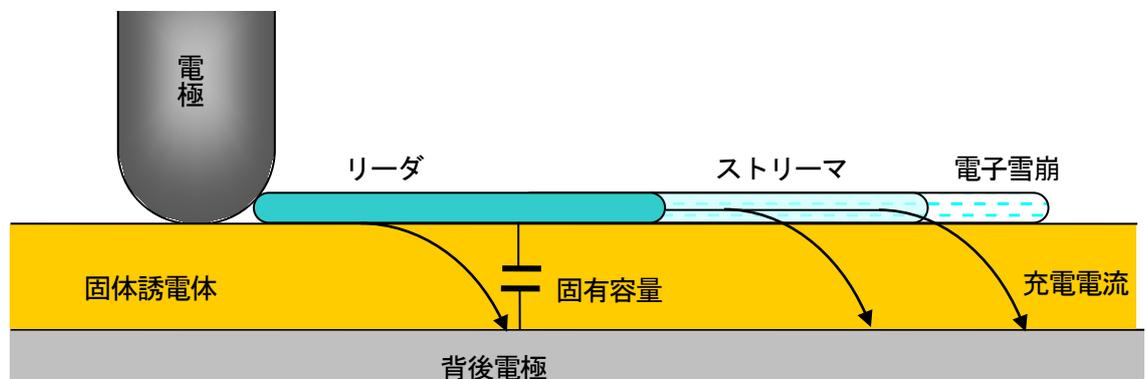


図 I.14 沿面放電進展時の機構

I 1.3.2 真空中の沿面放電[4,5]

真空中で高電圧部を保持するために固体絶縁物が使用される。真空中の固体絶縁物の高電圧保持能力は同じ寸法の真空ギャップよりも低く、放電の起きやすいのは絶縁物の沿面である。現在までに提案された種々の真空中の沿面放電機構は、次の三つの段階で議論されてきた。

- (1) 初期段階 (2) 成長段階 (3) 最終段階

(1) 沿面放電初期段階

図 I.15 に示した沿面放電の初期段階の概念図のように、真空中に置かれた絶縁物の沿面放電を引き起こすのはトリプルジャンクション（絶縁物／陰極金属／真空の接触部）からの電子放出である。接触部では電界の集中が起こり、電子が電界放出される。

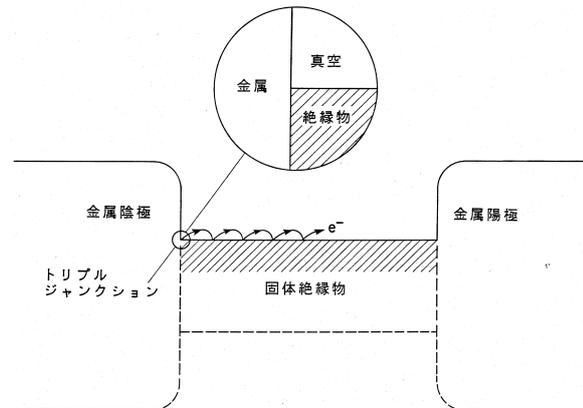


図 I.15 真空沿面放電初期段階

(2) 沿面放電成長段階

トリプルジャンクションから放出された電子はその後どのように放電へと成長するかについては、2次電子放出雪崩、固体中の電子増倍、電子衝突などに基づく種々のメカニズムが考えられているが、ここでは最も一般に受け入れられている二次電子放出雪崩 (Secondary Electron Emission Avalanche : SEEA) について述べることにする。

トリプルジャンクションから放出された電子が絶縁物表面に衝突し、そのとき発生する二次電子が再度絶縁物表面に衝突して二次電子が増倍され、雪崩を形成していく (図 I.16)。一般に、絶縁物表面の二次電子放出係数は、図 I.17 に示すような一次電子 (入射電子) のエネルギー依存性を持つので、衝突する電子のエネルギーが 1 より大きい放出係数の領域にあるならば (通常 10eV~keV)、絶縁物に入射した電子の数よりも多くの電子を放出することになり、二次電子放出が生じた部分は正に帯電することになる。

Anderson ら[6]は、SEEA が完全な破壊に至らせるモデルを考案した。真空中の絶縁物、特に、セラミックスの表面は、通常数層の吸着ガス層で覆われている。SEEA 電子が絶縁物表面に衝突したとき、吸着ガスが放出され、SEEA 中の電子によって部分的に電離したガス雲を形成する。残留した正イオンはトリプルジャンクションの電界を増強する。その結果、トリプルジャンクションから放出される電子が増加し、絶縁物表面に沿った電流が増大する。このようなプロセスが絶縁物の沿面放電を生じさせる。

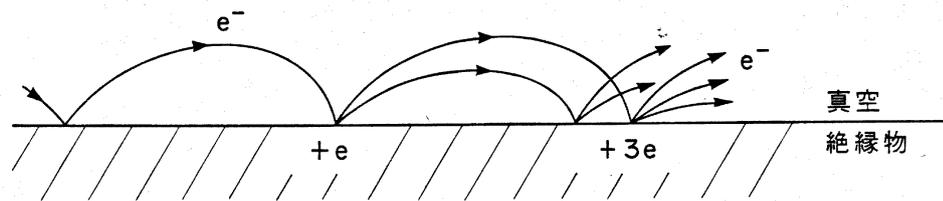


図 I.16 SEEA 電子による電子増倍

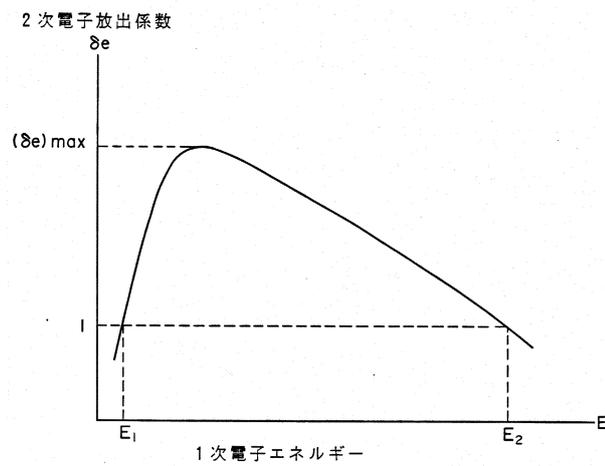


図 I.17 絶縁物の二次電子放出特性

(3) 沿面放電最終段階

沿面放電の最終段階は絶縁物表面から放出されたガス内での放電であると、一般に受け入れられている。

図 I.18 に、代表的な材料、テフロン®およびマコールの沿面放電電圧の電極間隔依存性を示す。電極間隔とともに放電電圧は高くなるが、次第に飽和する傾向を示す。また、材料によって放電電圧が異なるということも示している。

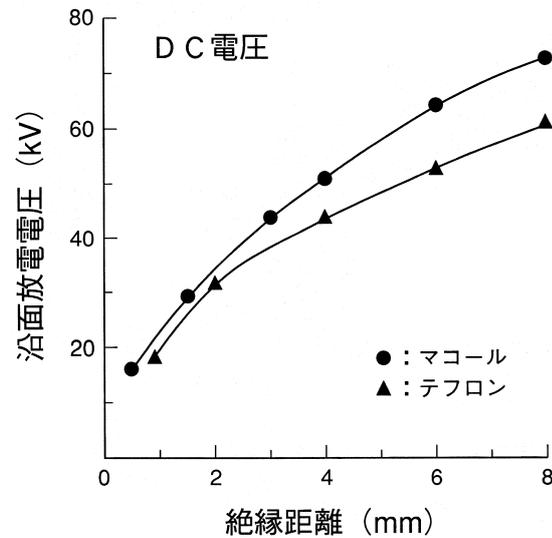


図 I.18 真空中沿面放電電圧の電極間隔依存性

I 1.3.3 界面の放電

絶縁構成においては、図 I.19 に示すように、異種材料との接着界面が存在することがある。このような界面では、接着時空気層が介在したり、あるいは接着後の熱履歴などで剥離が生じやすく、この界面で放電が起きる可能性がある。図 I.20 は、小型巻線用に使用されるボビン材料であるノリル樹脂とシリカ充填エポキシ樹脂との接着界面での破壊特性を示したものである。このように、異種材料接着界面の破壊電圧は低く、しかもヒートショック等の熱履歴を受けると界面が剥離して空気の破壊電界 (3kV/mm) に近づく。また、背後電極が形成されている場合には、これらの界面での破壊電圧はさらに低くなる傾向を示す。

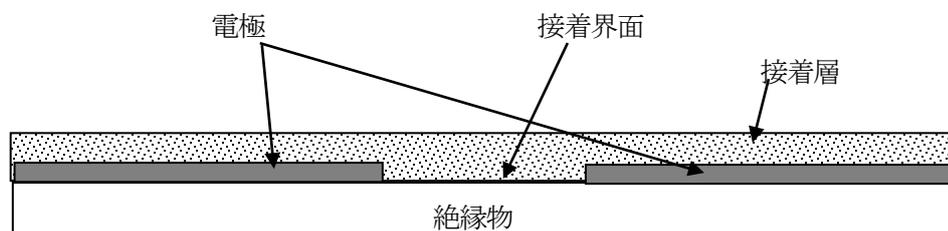


図 I.19 絶縁物界面の存在する複合絶縁構成

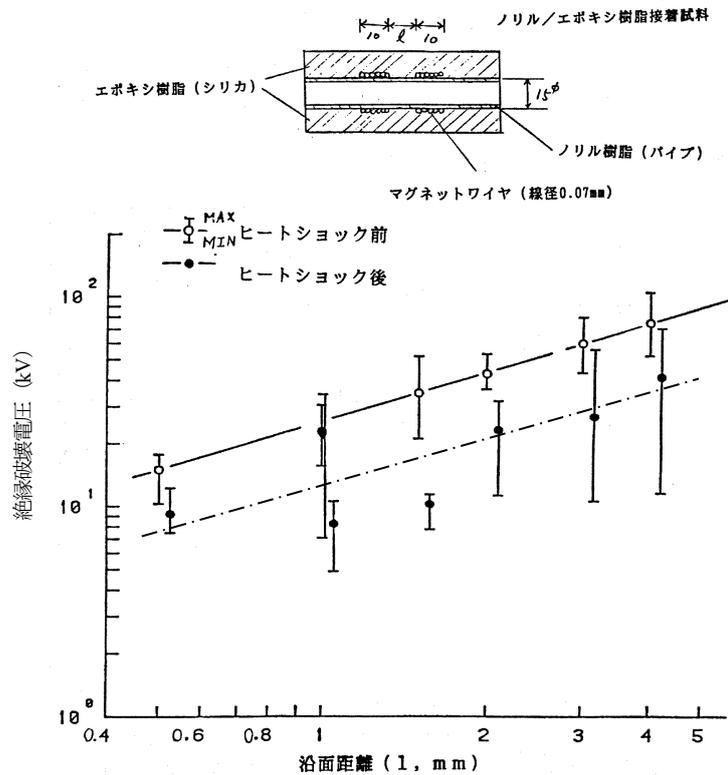


図 I.20 接着界面での絶縁破壊特性

I 1.3.4 破壊に対する帯電の影響

宇宙機においては、宇宙空間に存在する高エネルギー荷電粒子が本体内部に侵入し、搭載機器の固体絶縁物に帯電し、それが固体絶縁物の破壊現象に影響を及ぼす可能性がある。しかしながら、この視点からの絶縁研究は、宇宙機が高電圧を対象としないため、殆ど行なわれていない。一部、真空中の沿面放電電圧特性に及ぼす電子ビーム照射の影響が議論されている程度である。それを図 I.21 に示す[7]。真空中のガラス沿面放電電圧が、電子ビーム照射により低下することが示唆されている。これは、ガラス沿面に電子ビームが照射されると沿面電界が変歪し、放電をトリガしやすくするためと考えられる。

ただし、固体の絶縁破壊に及ぼす 2 次的因子としての固体内部の空間電荷効果 (space charge effect) に関しては、種々検討が行なわれている。絶縁物に高電界が印加され、空間電荷が内部に形成されると、内部電界が変歪され、破壊様相は大きく変化を受ける。空間電荷の形成は正・負電荷の偏在に基づくもので、電荷は電極 (注入) および固体内部より供給される。空間電荷効果は不平等電界において問題になることが多く、特に直流電界で著しく現れる。

形成された空間電荷が電極電圧極性と同符号のときをホモ電荷 (homo-charge、主に電極から注

入された電荷)、異符号のときをヘテロ電荷 (hetero-charge、主に電荷の固体内移動) という。ホモ電荷は電極前面電界を緩和し、このままの状態は破壊の発生を防ぐ方向に働くが、直流送電に見られるように、電圧の極性反転が行なわれると前面に高電界を誘発し、破壊の発生を助長する。また、針電極に負電界を印加し空間電荷が形成された状態で、これを短絡すると局部破壊が発生することもある。

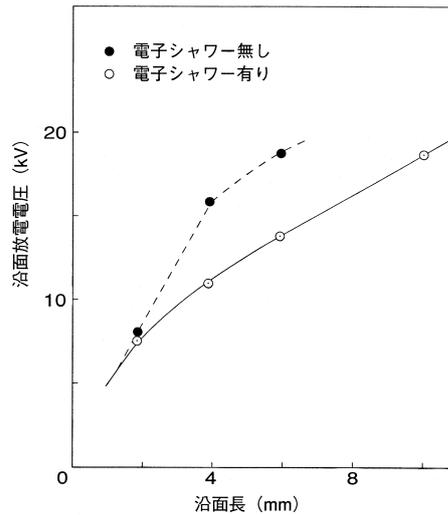


図 I.21 ガラスの真空中沿面放電電圧特性に及ぼす電子線照射の影響

参 考 文 献

- [1]電気学会放電ハンドブック出版委員会編、「放電ハンドブック」、(オーム社) (2003)
- [2]犬石・中島・川辺・家田、「誘電体現象論」、(電気学会) (1973)
- [3]原・秋山、「高電圧パルスパワー工学」、(森北出版) (1991)
- [4] R.V.Latham, "High Voltage Vacuum Insulation: The physical Basis", (Academic Press, Inc.) (1981)
- [5]H.C.Miller, IEEE Trans. Electrical Insulation, Vol.24 (1989) p.765
- [6] R.A.Anderson and J.P.Brainard, J. Applied Physics, Vol.51 (1980) p.1414
- [7]藤井・廣、電気学会論文誌、Vol.119-A (1999) p.177

(余白)

付録Ⅱ 電界の集中と電極材による電子放出の影響

Ⅱ.1 電極形状と電界の関係[1]

電極とその間の空間からなる図Ⅱ.1 のような系を考える。この空間における任意の点 $p(x,y,z)$ における電位を $\phi=\phi(x,y,z)$ とすると、 ϕ は空間電荷密度が ρ の場合、次の Poisson 式を満足する。

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad}\phi) = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad \dots (Ⅱ.1)$$

ただし、 ε は空間の誘電率である。空間電荷がない場合 $\rho=0$ と置いて、次の Laplace 式となる。

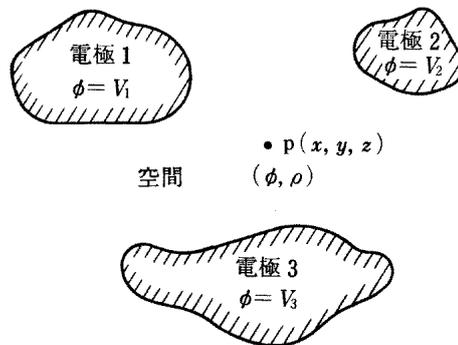
$$\operatorname{div}(\operatorname{grad}\phi) = 0 \quad \dots (Ⅱ.2)$$

したがって、空間の電界分布を求めるには、電極表面における次の境界条件下で、式 (Ⅱ.1) または (Ⅱ.2) を解けばよい。

$$\phi = V_i \quad (i : \text{電極の番号}) \quad \dots (Ⅱ.3)$$

表Ⅱ.1 には、高電圧現象の取り扱いにおいてよく出てくる電極配置における電界の解析解を載せている。

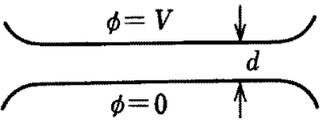
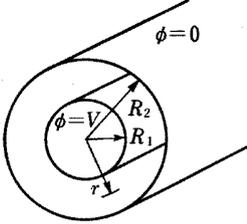
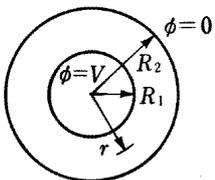
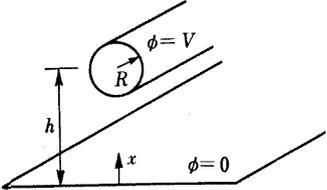
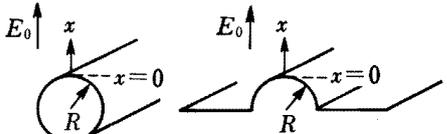
電極形状や空間の媒質の境界形状が複雑なときの電界は、もっぱら数値計算によって求められる。数値計算法には、差分法、有限要素法、電荷重畳法、表面電荷法がある。

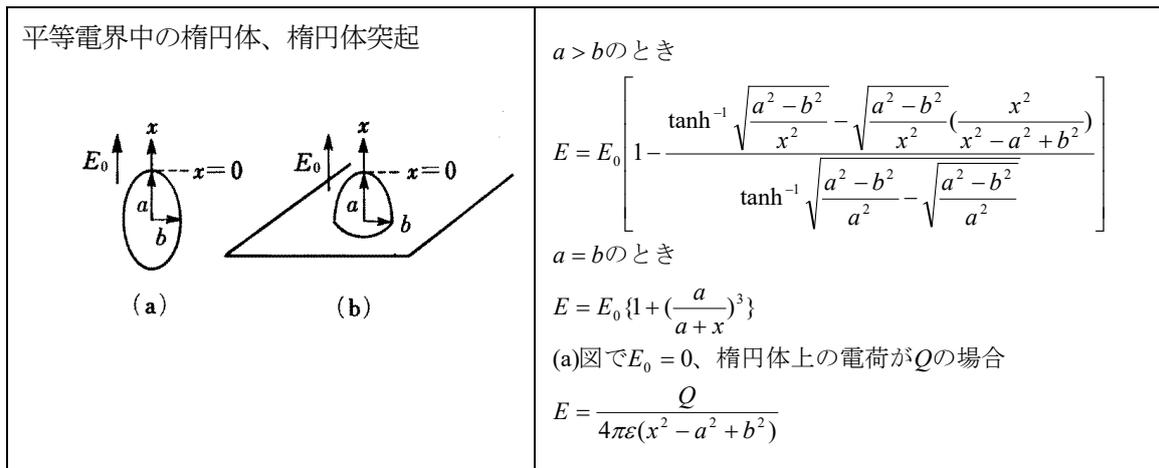


図Ⅱ.1 電極間の空間における電位

表 II.1 基本的電極配置の電界

(電界集中係数 $f = E_{\max} / E_{\text{av}}$ 、ただし、 E_{\max} : 最大電界、 E_{av} : 平均電界)

電極配置	電界
平行平板 	$E = \frac{V}{d}$ $f = 1$
同軸円筒 	$E = \frac{V}{r \ln(R_2 / R_1)}$ $f = \frac{R_2 / R_1 - 1}{\ln(R_2 / R_1)}$
同心球 	$E = \frac{R_1 R_2}{r^2 (R_2 - R_1)} V$ $f = \frac{R_2}{R_1}$
円筒対平板 	$E = \frac{2\sqrt{h^2 - R^2}}{(h^2 - R^2 - x^2) \ln\left(\frac{h + \sqrt{h^2 - R^2}}{R}\right)} V$ $f = \frac{\sqrt{h^2 - R^2}}{R \ln\left(\frac{h + \sqrt{h^2 - R^2}}{R}\right)}$
平等電界中の円筒、半円筒状突起 	$E = \left\{ 1 + \frac{R^2}{(R + x)^2} \right\} E_0$



II 2 電極材料と電子放出

真空中に置かれた電極間に電圧を印加すると、図 II.2 に示すような電流－電圧特性が得られる。絶縁破壊が発生するような高電界の電圧が印加されると、トンネル効果 (tunnel effect) により陰極から電子が電界放出 (field emission) される。電界放出電流 I_e は、電極材料の仕事関数 ϕ と電界 E とで決まる安定な電流で、Fowler-Nordheim (F-N) の式で表される。しかし、ある程度以上の面積を有する電極間の I_e を実測すると、一般に理論値よりもかなり大きくなる。陰極表面の電界が局部的にマクロな電界 E よりも 100 倍程度大きくなっていると考えることによって、実測された I_e を説明することができる。ここに電界増倍係数 (field enhancement factor) β という概念が導入され、 I_e は次式で表される。

$$I_e = \frac{1.54 \times 10^{-6} (\beta E)^2 A_e}{\phi} \cdot \exp \left| \frac{-6.83 \times 10^7 \phi^{3/2}}{\beta E} \right| \quad [\text{A}] \quad \dots (\text{II.4})$$

ここで、 A_e は電界放出面積である。

β が生ずる原因としては、一般に微小な μm 程度の突起 (protrusion, whisker, projection, irregularity) と考えられ、突起の存在は種々の条件下で観測されている。突起が形成される原因としては、アーク放電による電極の溶融、微粒子の衝突による溶融、イオンエッチング、静電界または電界放出に伴う成長、不純物粒子の脱離等が考えられる。

実測された破壊前駆電流が電界放出電流であることは、F-N プロットが直線になることで検証される (図 II.3 に、F-N プロットの例を示す)。この直線の傾きから β の値が決定される。

一般に、ある程度の面積を有する陰極は、電界放出源すなわち突起が複数個存在する。この場合でも I_e のプロットはほぼ直線になることが、実験および理論の両面から確認されている。F-N プロットからは、実効的・平均的な係数として、実効電界増倍係数 (effective field enhancement factor)

と実効電界放出面積が定まる。突起の形状が一定であっても、 β は電極間隔 d によって変化する。 d が小さくなると平等電界に近づくため β は小さくなり、 $d=0$ の極限では突起の形状に関わらず $\beta=1$ となる。図 II.4 に $d-\beta$ 特性の例を示す。

突起先端のマイクロな電界 βE が $5 \times 10^7 \text{V/cm}$ 程度に達すると、電界放出電子による空間電荷効果により電界放出が抑制されることが報告されている。この場合の F-N プロットは図 II.3 に示したように、高電界領域で直線からずれる。

10^{-9} Torr 台の超高真空でも電極表面のガス吸着分子を完全に除去することはできず、電界放出は放出源のガス吸着により影響を受ける。ガス吸着の効果としては、

- 1) 仕事関数 ϕ および実効電界放出面積の変化による I_e の変化
- 2) I_e に重畳したノイズ発生

が考えられる。

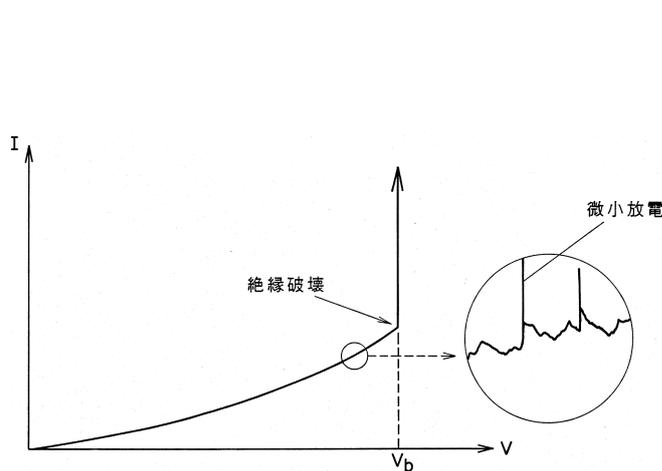


図 II.2 真空中電極間の電圧-電流特性

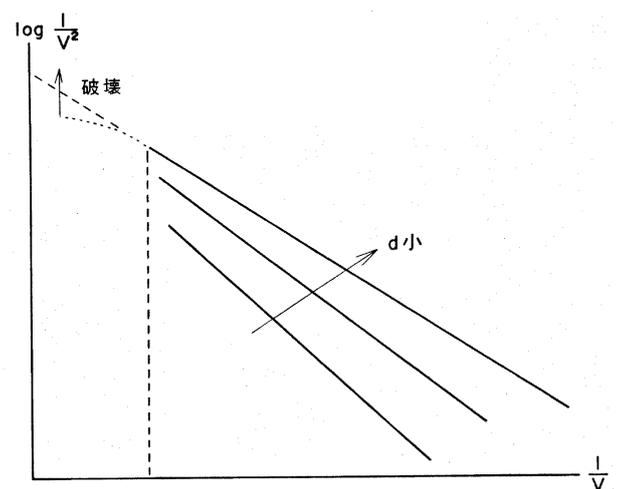
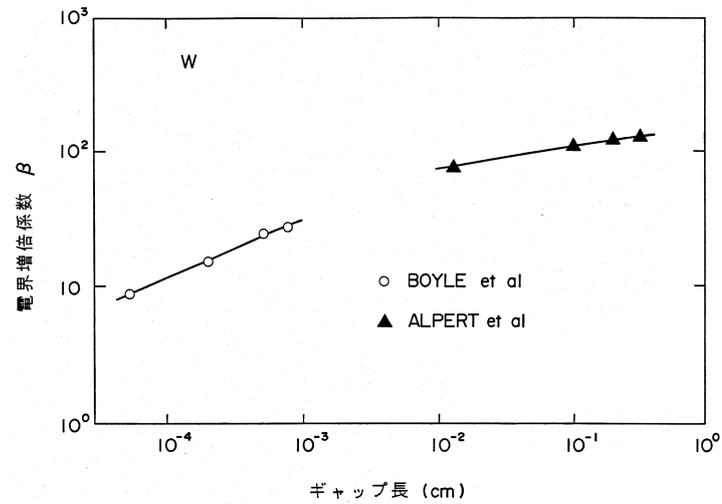


図 II.3 真空ギャップの F-N プロット



図Ⅱ.4 真空中のギャップ長と電界増倍係数

Ⅱ.3 金属の仕事関数の影響

電界放出電流 I_e は、式 (Ⅱ.4) から明らかなように、仕事関数 ϕ の影響を受ける。仕事関数 ϕ が大きくなると I_e は小さくなる。表Ⅱ.2 に、一般的な金属の仕事関数を示している。

表Ⅱ.2 金属の仕事関数

金属	仕事関数 ϕ (eV)	融点 (K)
C	4.34	3800
Co	4.41	1490
Cs	1.38	302
Fe	4.21	1540
Mo	4.20	2630
Ni	4.01	1725
Pt	5.32	2047
Ta	4.10	3123
W	4.52	3655

Ⅱ.4 電極の表面処理

放電電圧 (絶縁破壊電圧) は電極表面状態によっても変化するので電極構造製作において、特に高電界になることが予想され、特に真空条件下で使用される電極に対しては、次のような処理が有効である。

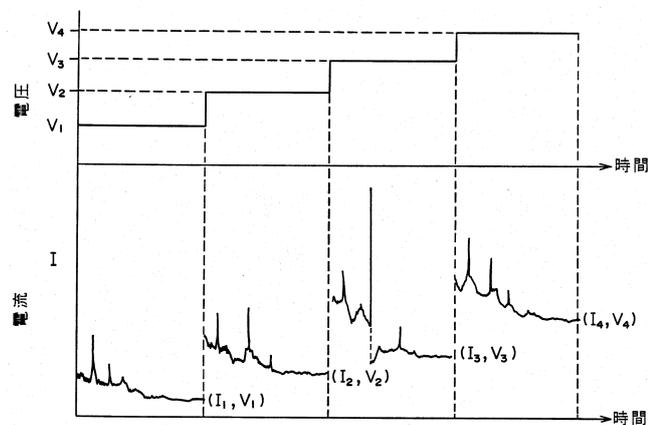
(1) 表面処理を施す。

- ・ 溶剤洗浄
- ・ 化学的エッチング
- ・ 放電洗浄
- ・ 無機被膜コーティング

(2) コンディショニングを施す。

- ・ 電流コンディショニング
- ・ グロー放電コンディショニング
- ・ スパークコンディショニング

図II.5に電流コンディショニングの例を示す。真空中の電極間に、予想される絶縁破壊電圧よりも低い電圧を印加し、電極間を流れる電流が安定状態になるのを待って、ステップ的に電圧を上昇させていく。電圧印加中に前駆電流は次第に低下し、電流スパイクや微小放電による電流パルス発生頻度も次第に小さくなる。この手法により、電極上の突起や電極付着物、微小粒子の除去を行なう。



図II.5 電流コンディショニング

参 考 文 献

- [1]原・秋山、「高電圧パルスパワー工学」、(森北出版) (1991)

付録Ⅲ 中性分子の放電への影響

Ⅲ1 気体中の Paschen 則[1,3]

平等電界において火花放電が生ずる電圧を、火花電圧 (spark voltage) と呼ぶ。火花電圧 V_s は、気体の温度が一定の下では、次のように、ガス圧 p とギャップ長 d の積 pd の関数になる。このことを Paschen が実験的に発見したため、Paschen の法則と呼ばれている。

$$V_s = B \frac{pd}{\ln\left\{\frac{Apd}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}\right\}} = B \frac{pd}{\text{const.} + \ln(pd)} \quad \dots (Ⅲ.1)$$

ここで、 A 、 B は定数である。

図Ⅲ.1 に、代表的な気体の火花電圧を pd の関数として示す。ギャップ長を一定として圧力を下げていくと火花電圧は次第に低下する。これは、平均自由行程 (気体中の電子が相次ぐ 2 回の衝突間に自由に飛行する距離の平均値) が長くなるため電子の電界による加速が大きくなり、衝突電離が盛んになるためである。火花電圧はある pd のところで最小値を示し、それ以下の圧力では急激に高くなる。これは平均自由行程が長くなりすぎるために、電子が電極間で行なう衝突回数が減るので、衝突電離が再び不活発になるためである。

式 (Ⅲ.1) を pd で微分することによって、最小火花電圧 $(V_s)_{\min}$ (Paschen ミニマム) は、

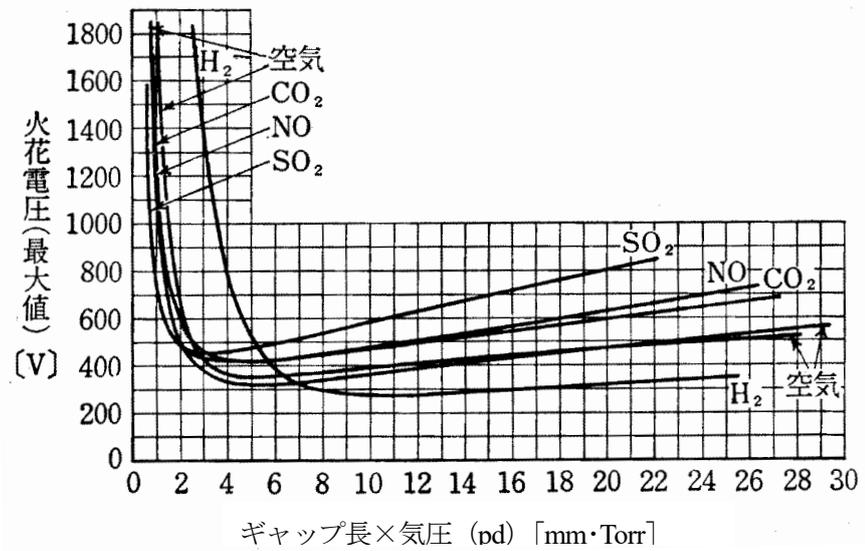
$$(V_s)_{\min} = 2.718 \frac{B}{A} \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad \dots (Ⅲ.2)$$

と求められる。最小火花電圧 $(V_s)_{\min}$ を与える pd を $(pd)_c$ とすれば、

$$(pd)_c = \frac{2.718 \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}{A} \quad \dots (Ⅲ.3)$$

となる。 $(V_s)_{\min}$ と $(pd)_c$ の実測例を表Ⅲ.1 に示す。

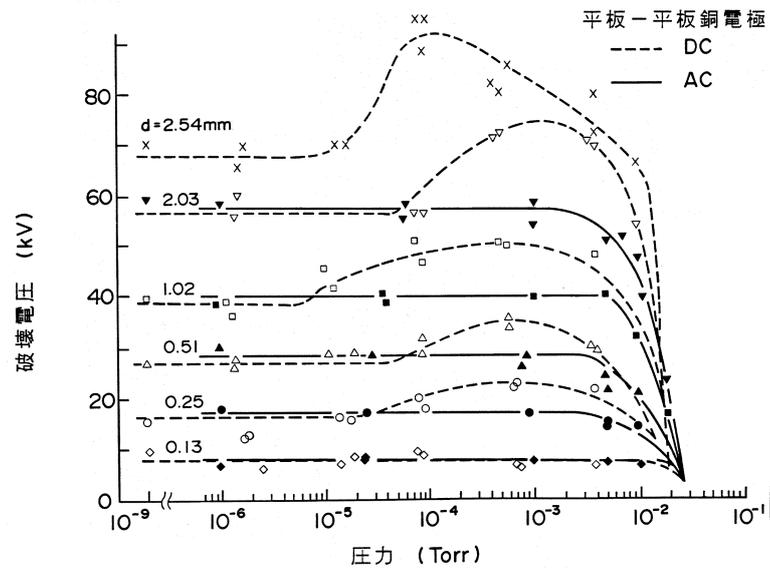
Paschen ミニマムよりも圧力が低下すると、放電電圧は急激に高くなる。図Ⅲ.2 に平行平板電極系での放電電圧の高真空での圧力依存性を示す。



図III.1 Paschen カーブの例

表III.1 最小火花電圧 ((V_s)_{min}) とそれを与える pd ((pd)_c)

気体	(V _s) _{min} (V)	(pd) _c (mm·Torr)
空気	330	5.67
H ₂	270	11.5
O ₂	450	7.0
N ₂	250	6.7
He	約 156	約 40
Ar	233	7.6
Ne	186	3.0
Na 蒸気	335	0.4
CO ₂	420	5.4



図Ⅲ.2 真空中電極間の放電電圧の圧力依存性[2]

Ⅲ2 ホットロンチ時の課題と対策

宇宙機打ち上げ時において、本体内部の圧力は大気圧（約 760Torr）から急激に低下していく。このような状況において、本体内部搭載電源をオンにすることは、Paschen の法則から、電圧の大きさにおいては放電発生の可能性がある。通常本体内部の気体は空気であると考えられるので、表Ⅲ.1 から 330V 以上の電圧が発生する状況が生じないようにすべきである。

参 考 文 献

- [1]電気学会放電ハンドブック出版委員会編、「放電ハンドブック」、(オーム社) (2003)
- [2] R.V.Latham, "High Voltage Vacuum Insulation: The physical Basis", (Academic Press, Inc.) (1981)
- [3]鳳・関口・河野、「電離気体論」、(電気学会) (1969)

(余白)

付録IV 沿面距離と放電電圧

IV1 沿面距離と放電電圧[1]

沿面放電は電極配置によって著しい影響を受けるので、誘電体に背後電極が存在する場合と、存在しない場合に大別される。

(1) 背後電極が存在しない場合

大気中においては、一般に空気中の金属電極間の放電特性と同様のフラッシュオーバー特性を示すことが多いので、これより沿面フラッシュオーバー電圧を推定し、あるいは逆に沿面距離を求めることができる。しかし、誘電体の存在によって電界の歪が著しい場合や、表面状態によっては複雑な様相を呈する。一般に、商用周波電圧および直流に対して、誘電体表面の汚損あるいは湿潤状態によっては沿面フラッシュオーバー電圧が著しく低下することが多いので、裕度をとる必要がある。

(2) 背後電極が存在する場合

極めて複雑であるため、予想外の距離をフラッシュオーバーすることがあり、設計にあたっては、特に注意する必要がある。立ち上がりの急峻なインパルス電圧印加の場合のフラッシュオーバー電圧は相当広範囲にわたって、次の2式のいずれかによってかなりよく近似される。すなわち、沿面フラッシュオーバー電圧を V [V]、固有容量を C_0 [F/m] ($C_0 = \epsilon/d$ 、 ϵ : 誘電体の誘電率、 d : 誘電体の厚さ)、沿面距離を l [m]、電圧の波頭急峻度を dV/dt [V/s] とすれば、

$$V = \frac{K_b}{\sqrt[8]{C_0^3}} \cdot \sqrt[5]{l} \quad \dots (IV.1)$$

ここに、 K_b は正極性インパルス電圧に対して 73.6、負極性に対して 74.25 である。

$$V = \frac{K_d}{\sqrt[5]{C_0} \sqrt[20]{\frac{dV}{dt}}} \cdot \sqrt[5]{l} \quad \dots (IV.2)$$

ここに、 K_d は正極性インパルス電圧に対して 135.5、負極性インパルスに対して 139.5 である。

(a) 沿面距離の影響

図IV.1、図IV.2 に示すように、沿面距離を大きくしても沿面フラッシュオーバー電圧はあまり上昇しない。図において、実線は式 (IV.1)、破線は式 (IV.1) による計算値で、丸印は実験値である。

(b) 誘電率の影響

図IV.1 のように、誘電率が大きいほど沿面フラッシュオーバー電圧は低下する。

(c) 誘電体厚さの影響

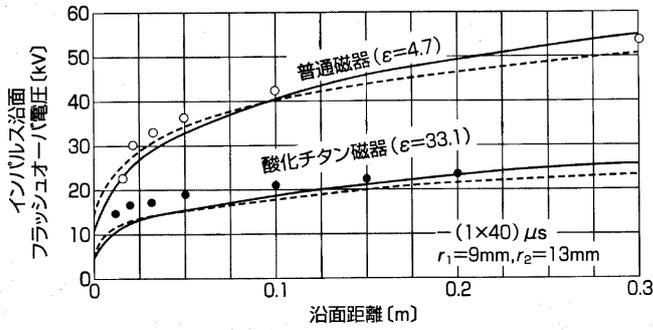
図IV.2 に見られるように、厚さを増すことは沿面フラッシュオーバー電圧を上昇させるのに有効である。

(d) 固有容量の影響

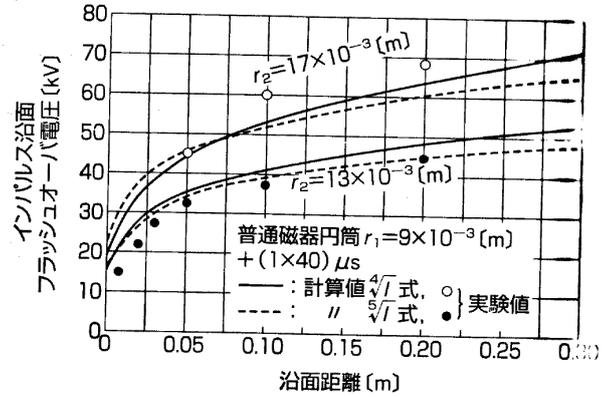
図IV.3 は、インパルス沿面フラッシュオーバー電圧と固有容量の関係を示す。この直線の傾斜から前述の計算式の固有容量 C_0 の指数を求めると -0.4 になる。なお、図IV.3 のガラスは繊維質のものである。

(e) 空気中と真空中の沿面放電特性の比較

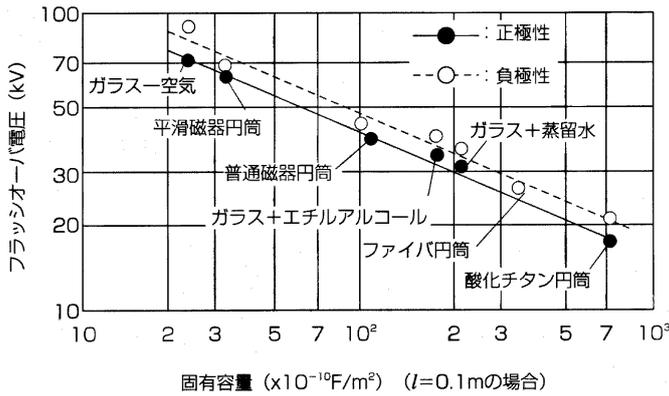
表IV.1 に、各種スペーサにおける沿面フラッシュオーバー電圧を示している。図IV.4 には、沿面放電図形から求めたストリーマ長の圧力依存性を示している。ストリーマ長は気圧の逆数に比例することがわかる。また、同じ電圧ならば、気圧が低くなれば沿面ストリーマ進展速度も大になる。



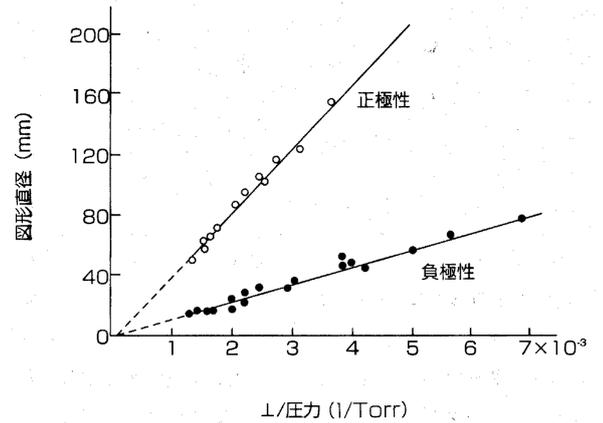
図IV.1 誘電体の誘電率の影響 (r₁: 内径, r₂: 外径)



図IV.2 誘電体厚さの影響 (r₁: 内径, r₂: 外径)



図IV.3 沿面フラッシュオーバー電圧と固有容量の関係



図IV.4 圧力とストリーマ長 (直径/2) の関係

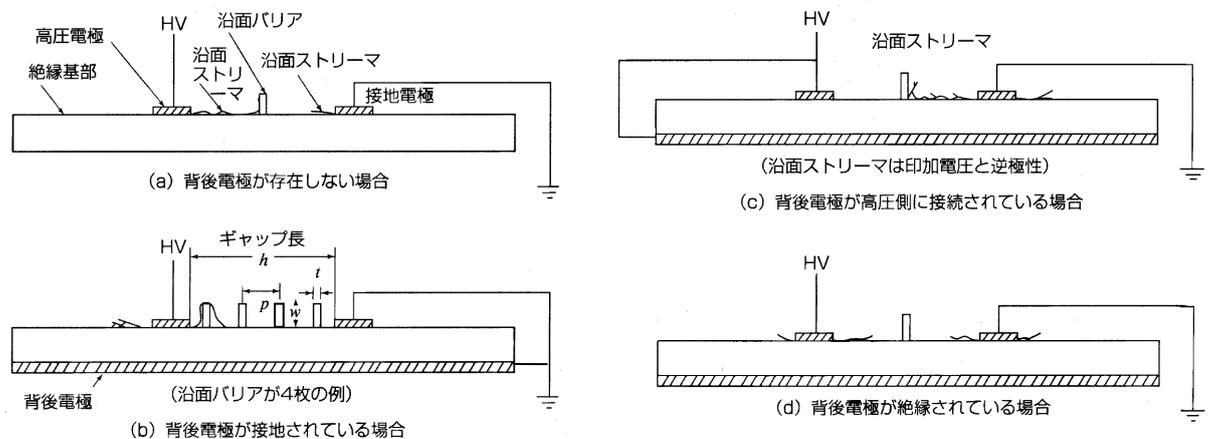
表IV.1 真空中と空気中の沿面放電特性 (電極: ステンレス SUS)

絶縁材料	比誘電率 ϵ_r	スペーサ長 (mm)	スペーサ径 (mm)	真空中 (10^{-6} Pa) の破壊電界 (kV/mm)			空気中 (10^5 Pa) の破壊電界 (kV/mm)		
				直流	インパルス 1.2/50 μ s	交流 (ピーク値)	直流	インパルス 1.2/50 μ s	交流 (ピーク値)
テフロン	2.1	2.0	7.0	16.0	15.1	12.8	2.75	2.80	2.80
		4.0	7.0	10.9	10.3	8.5	2.45	2.50	2.45
プラスチック ガラス	3.2	4.0	7.0	12.0	12.3	9.9	2.25	2.37	2.55
石英	3.8	5.0	9.5	8.6	8.6	7.8	2.9	2.9	2.7
		6.5	9.5	8.2	8.3	7.1	2.7	2.7	2.7
パイレックス ガラス	4.6	2.0	6.35	16.5	15.5	14.0	3.75	3.75	3.75
		4.0	6.35	11.5	11.1	9.9	2.36	2.45	2.63
磁器	5.8	2.0	7.0	16.6	16.2	14.25	2.50	2.50	2.75
		4.0	7.0	12.6	12.5	10.25	2.50	2.45	2.63
サファイア	12.0	3.1	12.55	9.0	8.4	7.3	1.81	1.87	1.94

IV2 沿面放電防止に対する考え方

沿面放電を防止するために沿面バリアが一般的である。沿面バリアの構成としては、図IV.5のように、本来沿面放電が進展していく表面を有する絶縁物である絶縁基部と、それに直交に近い形で設けられた“かさ”や“ひだ”と呼ばれる沿面バリアからなる。絶縁基部は実用的には支持碍子やブッシングの“胴”や“胴部”に相当している。それに対する電極の取り付けにより、絶縁基部の片面を覆う形で配置されるものを背後電極という。支持碍子には背後電極はなく、ブッシングは中心電極がこれに相当する。一般に、背後電極のある構成においては沿面放電が伸びやすく、実用絶縁面から見ると沿面方向の距離を増やしても放電電圧が低下してしまうという特徴を有している。

また、沿面電極構成全体をコーティングにより覆うことも有効であるが、空気層の咬みこみや、熱履歴によるクラック発生等に充分配慮しなければならない。



図IV.5 バリア絶縁構成の例

参 考 文 献

- [1]電気学会放電ハンドブック出版委員会編、「放電ハンドブック」、(オーム社) (2003)