

RCJS-TR-1 : 2024

静電気現象－原理と測定

春日電機株式会社 鈴木輝夫

1. 適用範囲

RCJS-TR-1は、技術報告であり、電荷発生、保持及び拡散、及び静電気放電を含んだ静電気現象の基礎原理を述べている。

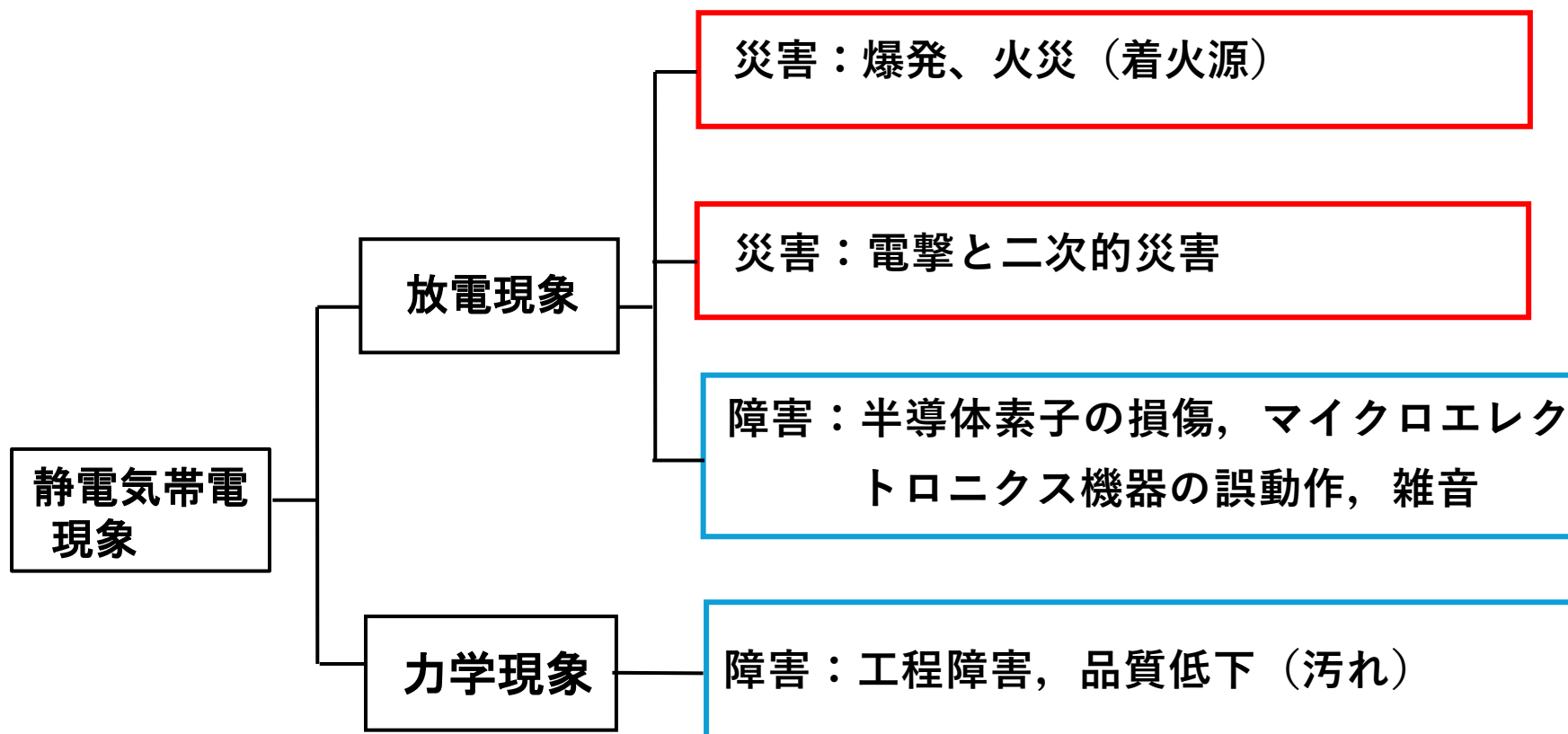
静電気現象及び関連する材料の性質を測定する方法を、一般論として述べている。

静電気現象に関連する危険と問題、及びそれらの管理方法の概要を述べている。

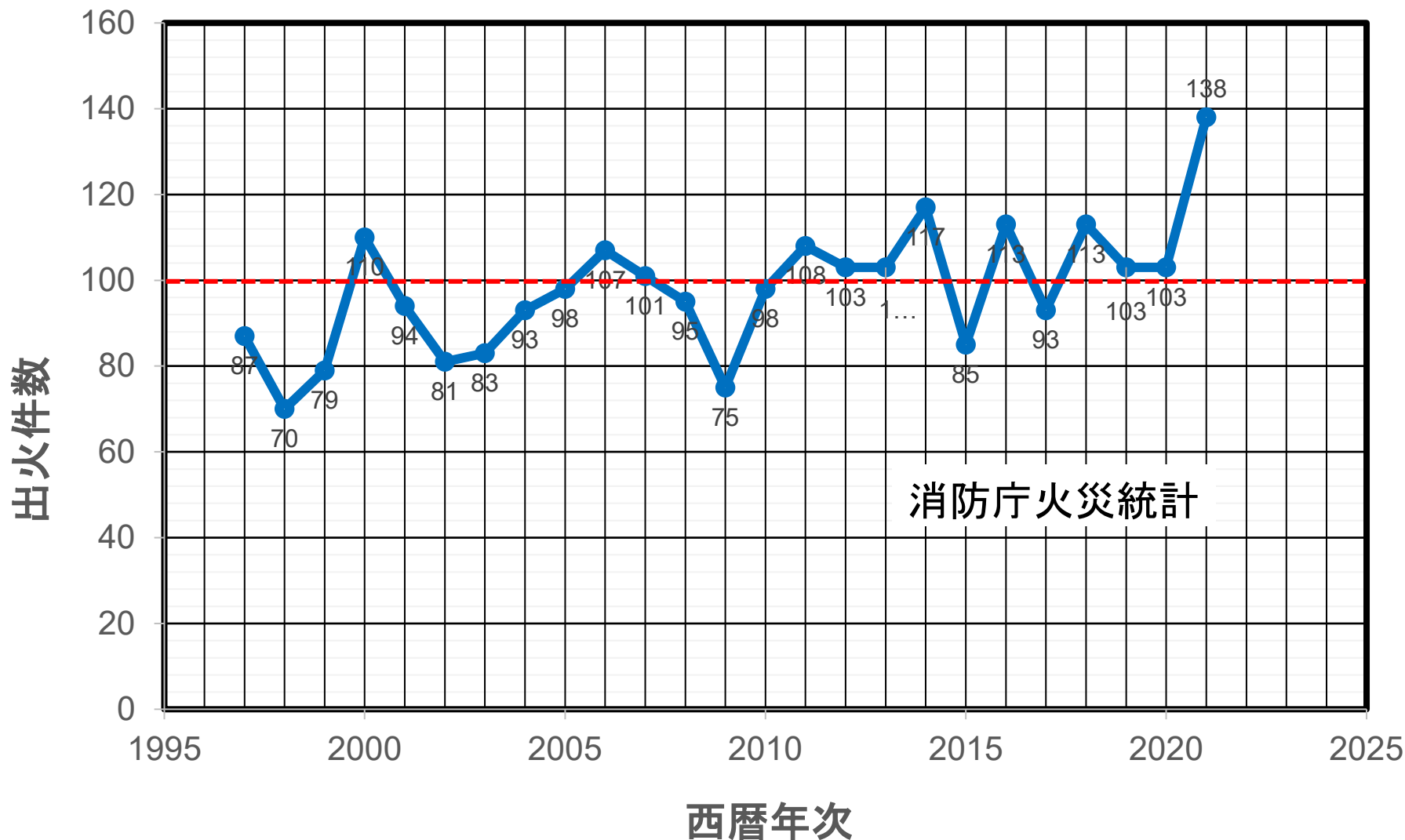
静電気効果の有用な応用についてまとめている。

この技術報告の目的は、静電気に関連する規格の開発のための参考として供し、及びこれらの規格のエンドユーザへのガイドラインを提供することにある。

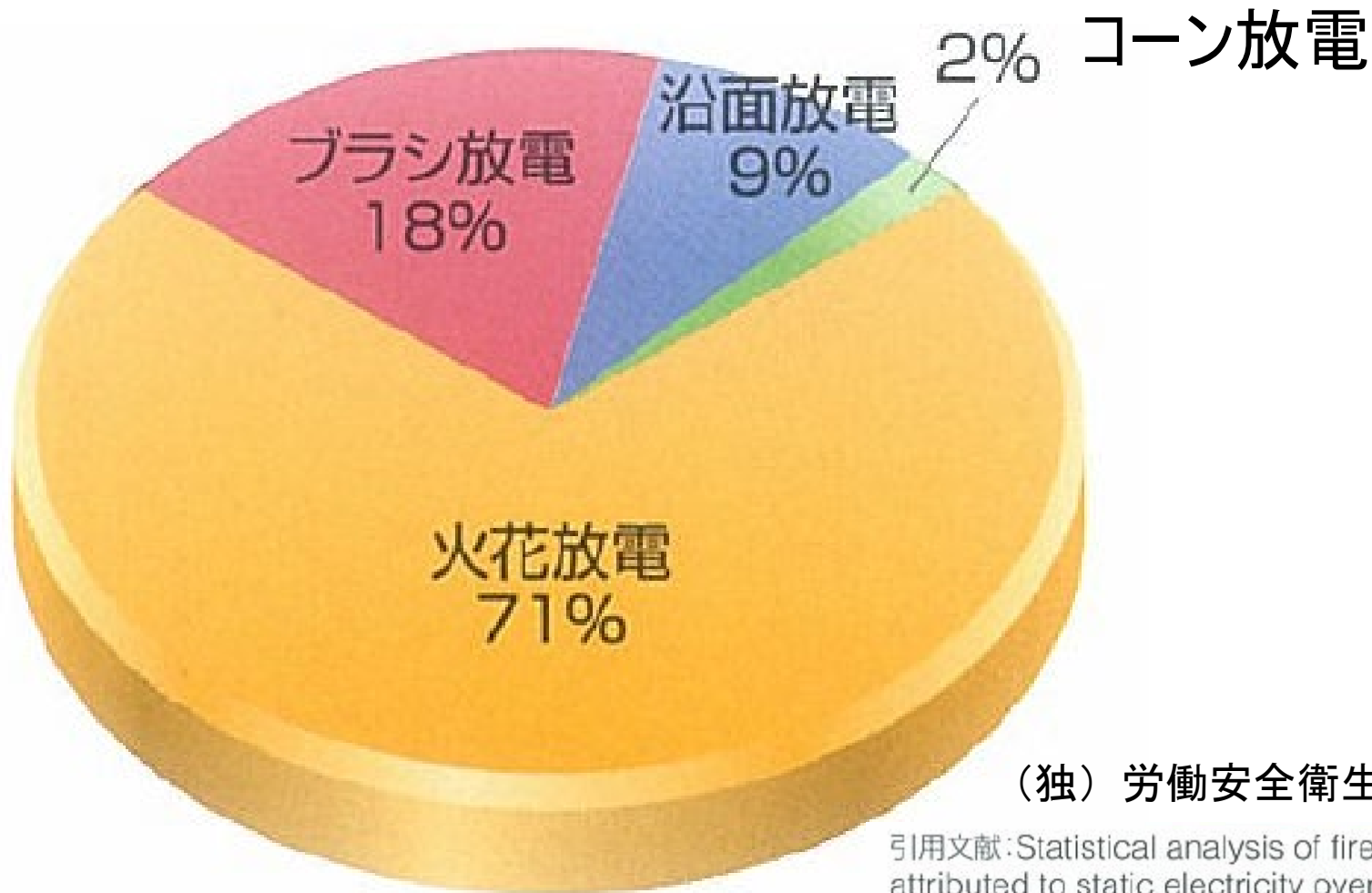
静電気現象によって発生する災害・障害



静電気火災発生件数の年次推移



静電気火災事故の着火源の70%以上が火花放電である！



参考資料

(独) 労働安全衛生総合研究所

引用文献: Statistical analysis of fires and explosions attributed to static electricity over the last 50 years in Japanese industry
A. Ohsawa, J. Phys.: Conf. Ser. 301(2011)012033

静電気火災事故の着火源

3. 用語及び定義

3.13

爆発グループ (explosion groups)

可燃性ガスの雰囲気は、その燃焼性に基づき**I**、**IIA**、**IIB**及び**IIC**（の爆発グループ）に細分される。

注記1：最も敏感な爆発グループはグループ**IIC**である。

注記2：分類方法の定義については、[9]（参考文献）を参照されたい。

- [9] ISO/IEC 80079-20-1 Explosive atmospheres
-Part 20-1:Material characteristics for gas and vapour classification- Test methods and data
⇒ **IEC 60079-20-1** Explosive atmospheres
-Part 20-1:Material characteristics for gas and vapour classification- Test methods and data

爆発グループの説明

爆発グループは、防爆設計において爆発性ガスの危険度に基づく分類を指す。また、このグループは、可燃性ガスの種類とその危険性に応じて決定される。具体的には以下のように分類される。

* グループⅠ：**爆発性坑内ガス**（メタンガス）

* グループⅡ：鉱山用途以外の工業用途での爆発性のガスまたは蒸気、
グループⅡは、さらに以下のサブグループに細分される。

ⅡA：比較的低い危険度（ $MIE > 0.25\text{mJ}$ ）のガス（例：アセトン、酢酸、アンモニア）

ⅡB：中程度の危険度（ $0.017 \leq MIE \leq 0.25\text{mJ}$ ）のガス（例：エチレン、硫化水素）

ⅡC：比較的高い危険度（ $MIE < 0.016\text{mJ}$ ）のガス（例：水素、二硫化炭素）

* MIE: 最小着火エネルギー

* グループⅢ：**爆発性の粉塵**

グループⅢは、非導電性粉塵（ⅢB）、導電性粉塵（ⅢC）、
可燃性浮遊物（ⅢA）に分類される。

可燃性ガス・蒸気、粉じんの爆発グループ

区分	詳細	
I	鉱山爆発性ガス（メタン）	
II	鉱山用途以外の工業用途での下記の爆発性ガス	
	A	通常の着火性をもつガス・蒸気（プロパン，ヘキサン，アセトン等）
	B	着火性の高いガス・蒸気（エチレン，ジエチルエーテル，シクロペンタン等）
	C	極めて着火性の高いガス・蒸気（水素，アセチレン，二硫化炭素等）
III	鉱山用途以外の工業用途での下記の粉じん	
	A	可燃性飛散物
	B	非導電性粉じん
	C	導電性粉じん

各爆発グループの可燃性ガス・蒸気の例

IIA	メタン，ブタン，アセトン，ペンタン，ベンゼン，トルエン，プロパン，Nブチルアセテート，メチルクロロエチレン，ヘキサン，シクロヘキサン，ヘプタン，メチルアルコールなど
IIB	1，3ブタジエン，一酸化炭素，メチルエチルケトン，ジエチルエーテル，エチレン，アクリロニトリル，テトラヒドロフランなど
IIC	アセチレン，水素，二硫化炭素など

3.16

危険領域 (hazardous area)

着火に対する特別な予防措置を必要とする量の可燃性物質が存在する，又は存在すると予想される領域 = 危険場所とも言う。

－（着火・爆発の）危険領域とは、可燃性物質が空気と特定の比率で混合した時に、爆発性の雰囲気を生成する区域を指す。この領域内では、可燃性ガスや蒸気、粉じんが存在し、着火源となる電気火花や高温部と共存することで、爆発や火災のリスクが高まる。

危険領域（危険場所）の分類（防爆指針やJIS参照）

危険領域は、爆発性雰囲気生成頻度および持続時間により、以下のように分類する。

- **特別危険箇所（0種場所、Zone 0）**：爆発性雰囲気が通常の状態連続して、または長時間にわたって、もしくは頻繁に存在する場所
- **第一類危険箇所（1種場所、Zone 1）**：通常状態で爆発性雰囲気をしばしば生成するおそれがある場所
- **第二類危険箇所（2種場所、Zone 2）**：通常状態で爆発性雰囲気を生成するおそれが少ない、または生成した場合でも短時間しか持続しない場所

参考：JIS C 60079-10：2008，爆発性雰囲気を使用する電気機械器具-第10部-危険区域の分類

注記：この規格のIEC 60079-10：2002が2015年に下記2つの規格に分割された。

IEC 60079-10-1, Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres

IEC 60079-10-2, Explosive atmospheres - Part 10-2: Classification of areas – Combustible dust atmospheres

ガス・蒸気危険場所の区分 (IEC 60079-10-1)

区分	定義
ゾーン0	ガス、蒸気又はミストの形態による可燃性物質の空気との混合気から成る爆発性雰囲気、連続して又は長時間にわたって、若しくは頻繁に存在する場所 API PR505の目安：爆発性雰囲気の生成時間が1000Hr/年を超える場所
ゾーン1	ガス、蒸気又はミストの形態による可燃性物質の空気との混合気から成る爆発性雰囲気が、通常操作中に、しばしば発生する可能性のある場所 API PR505の目安：爆発性雰囲気の生成時間→10Hr～1000Hr/年の場所
ゾーン2	ガス、蒸気又はミストの形態による可燃性物質の空気との混合気から成る爆発性雰囲気が、通常操作中に発生しそうにないか、発生した場合でも、短時間しか持続しない場所 API PR505の目安：爆発性雰囲気の生成時間→1Hr～10Hr/年の場所

API : American Petroleum Institute (米国石油学会)

粉じん危険場所の区分 (IEC 60079-10-2)

分類	定義
ゾーン20	<u>空気中に粉じんが雲状に存在</u> し、爆発性雰囲気が、連続して又は長時間にわたって、若しくは頻繁に存在する場所
ゾーン21	<u>空気中に粉じんが雲状に存在</u> し、爆発性雰囲気が、通常操作中に、しばしば発生する可能性のある場所
ゾーン22	<u>空気中に粉じんが雲状に存在</u> し、爆発性雰囲気が、通常操作中に発生しそうにないか、発生した場合でも、短時間しか持続しない場所

3. 18

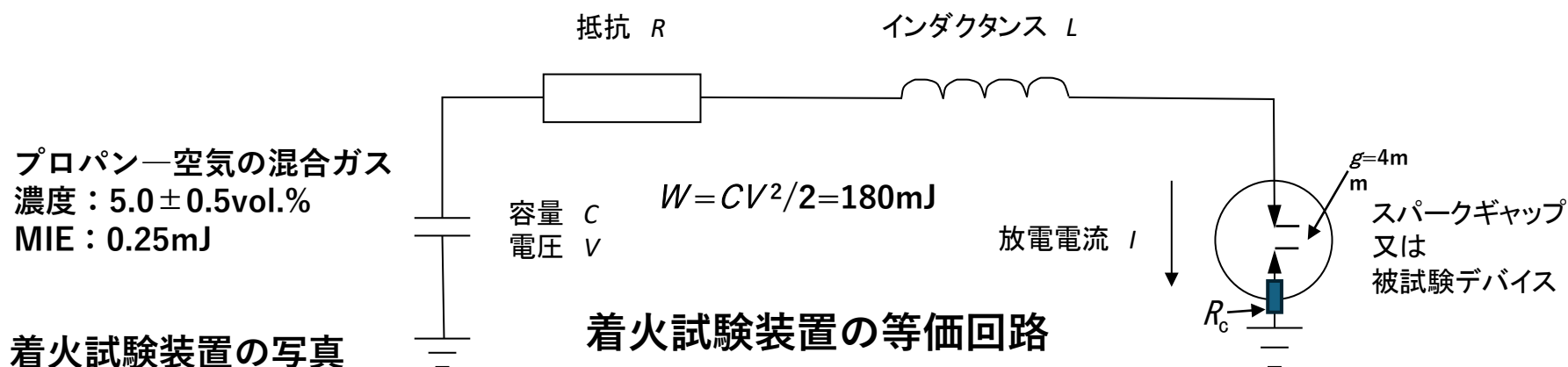
最小着火エネルギー (minimum ignition energy)

MIE

規定の手順に従った場合、空気又は酸素で構成する規定された可燃性材料の混合物を発火させることが可能な容量性電気スパークで放出されるエネルギーの最小量(値)

-可燃性の蒸気、ガス、または粉じん雲を点火するために必要なエネルギーの最小量(値)を指す。この概念は、静電気放電などによって引き起こされる着火の際に重要である。

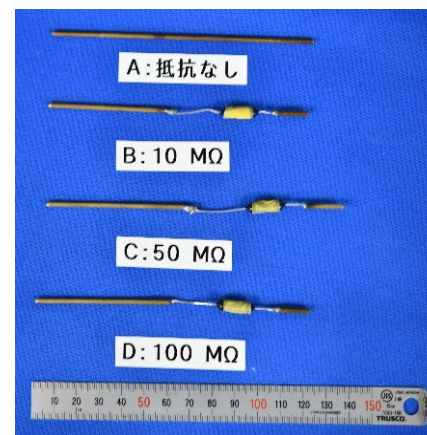
着火試験装置の概要



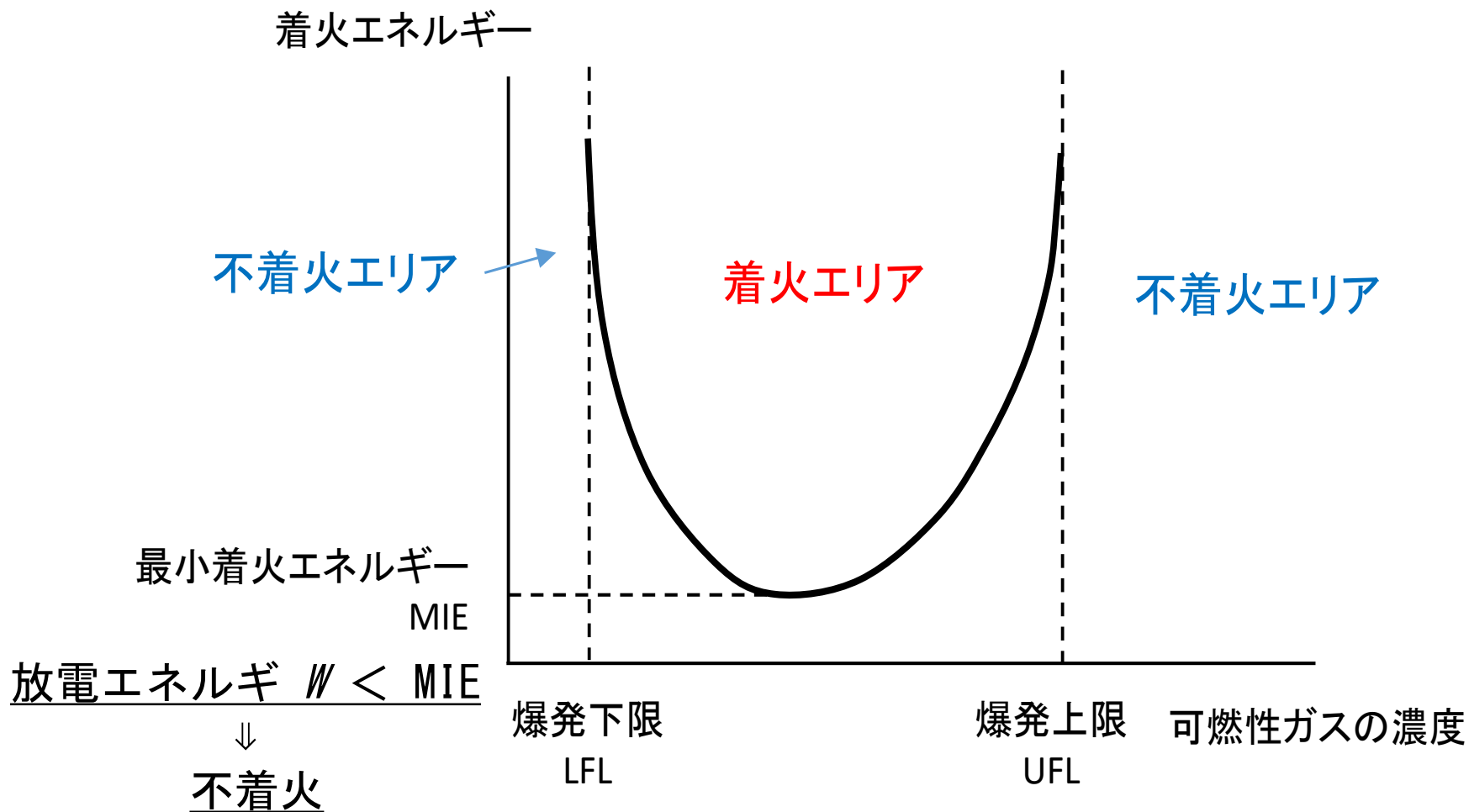
着火試験装置の写真



接触電極の種類



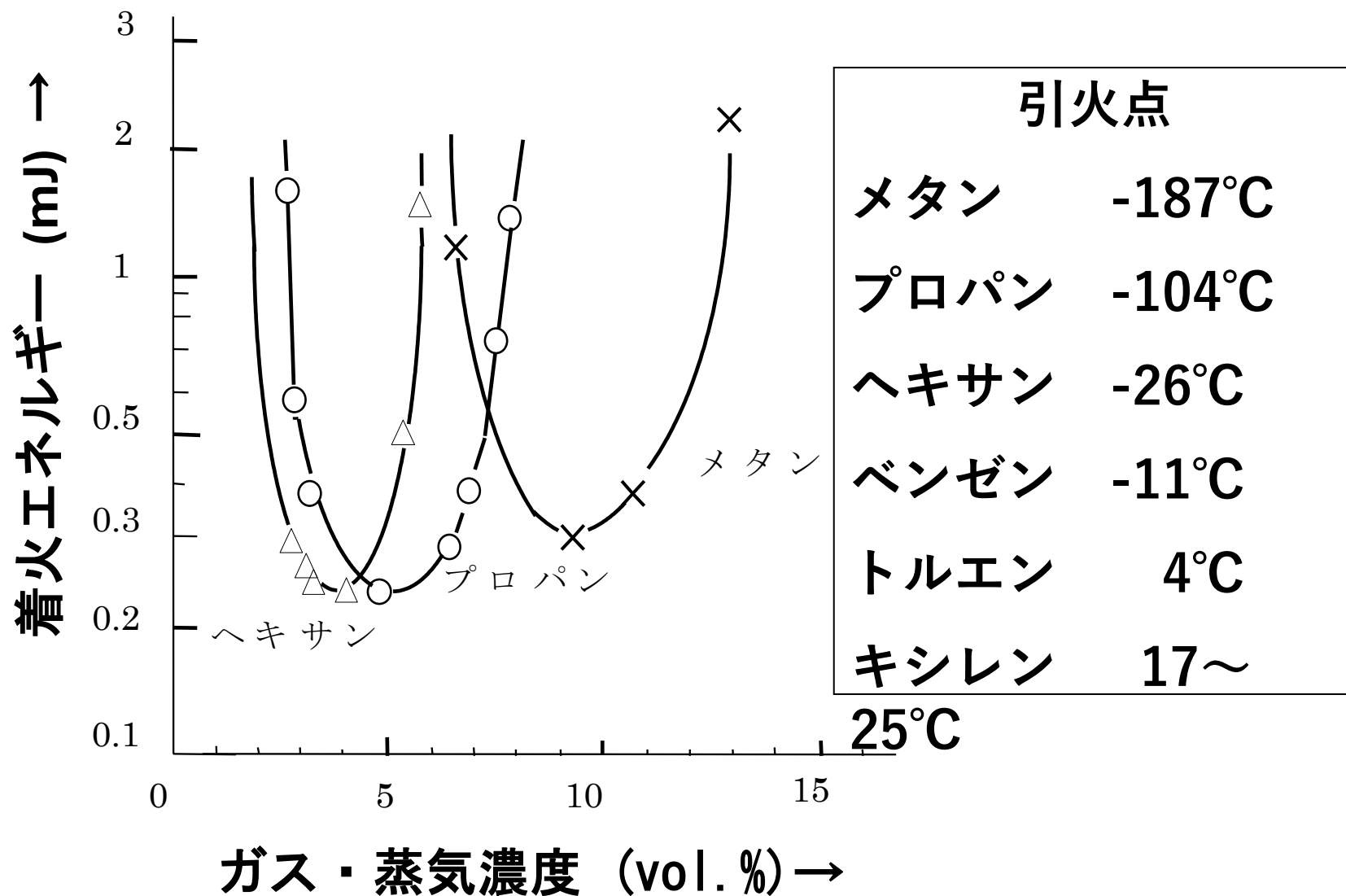
出典：RCJS-TR-1



図J.1 ガス・蒸気の濃度と最小着火エネルギーの関係

注記J：最小着火エネルギー

ガス・蒸気の濃度と最小着火エネルギー



表J.1 代表的なガス・蒸気の着火危険性に関するデータ例

物質名	爆発限界 (vol%)		引火点 (°C)	最小着火エネルギー (mJ)
	下限界	上限界		
メタン	5.0	15.0	-187	0.28
エタン	3.0	15.5	-130	0.25
プロパン	2.1	9.5	-104	0.25
n-ブタン	1.5	8.5	-72	0.25
n-ヘキサン	1.1	7.5	-26	0.24
ベンゼン	1.2	8.0	-11	0.20
水素	4.0	75.6	—	0.019
アセチレン	1.5	82	—	0.019
二硫化炭素	1.0	60	< -30	0.009
メタノール	5.5	44	11	0.14

注) 引火点は、炎（点火源）を近づけたときに着火して燃焼する最低の液温のことで、可燃性蒸気が爆発下限値の濃度に達する液温のこと。
すなわち、引火点と爆発下限値の温度は同じになる。

4. 静電気の基礎

4.1 一般

一般に、材料、製品又は物体上の静電気は次のようなプロセスの結果として発生する。

- ・ **静電界下の誘導**：静電誘導現象⇒誘導帯電
- ・ **分極効果**：物質が電界中に置かれると、物質の中の原子に電界が作用して、正極と負極に原子が分かれること。
 - －電場中に置かれた誘電体内の原子や分子が、外部電場の影響で正と負の電荷が相反する方向にわずかにシフトして、電気双極子モーメントが生じる現象を指す。
- ・ **光電効果**：物質に光を照射したときに、電子が放出したり、電流が流れたりする現象のこと。
- ・ **焦電効果**：温度変化によって誘電体の分極（表面電荷）が変化する現象のこと
- ・ **圧電効果**：物質（特に 水晶や特定の セラミックス ）に圧力（力）を加えると、圧力に比例した分極（表面電荷）が現れる現象のこと。
- ・ **電気化学的プロセス**：物質間で電子の移動が起こる反応を指す。この反応は、酸化還元反応とも呼ばれ、電子が物質から物質へ移動する。

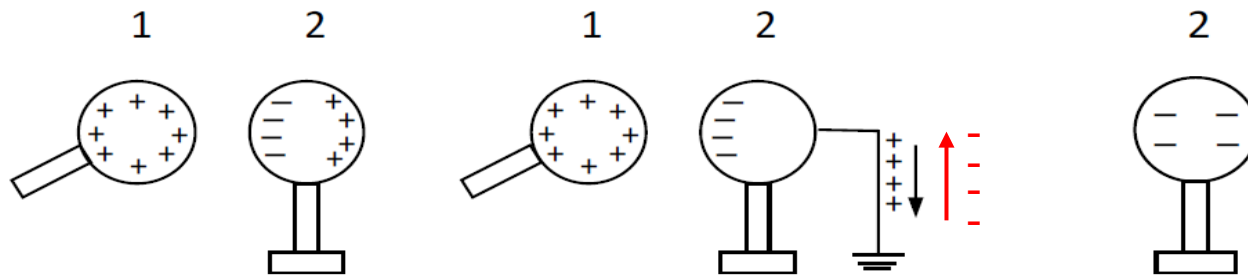
4.3 誘導による帯電

a) あらゆる帯電した物体の周りに電界が存在する。この電界の中に持ち込まれた導体や拡散性材料は、その近傍において電位分布の変化が起こり、同時に電界の影響の基に材料内の電荷の再配置が起こる（図1a）。

b) その材料が接地から絶縁されている場合、導体に電界中の位置に依存して電位が発生する。この電位の影響により、材料は静電気放電を引き起こす能力を持つようになる。その材料が電界の中にある状態で、材料が瞬間的に接地された場合、電位はゼロに減少する（1回目の放電が起こる）。しかし、電荷の不均衡はその中に残存する（図1b）。

誘導帯電 ⇒ 導体内の自由電子の移動

c) 材料を接地から切り離すと、電荷が残存する（図1c）。



a) 帯電物体(1)の非帯電物体(2)への接近。非帯電物体(2)内で、電荷の再配置が起こる。

b) 非帯電物体(2)を瞬間的に接地。非帯電物体が帯電する。但し、電位は接地電位である。

c) 接地を解除と帯電物体(1)の除去。導体(2)の帯電は残る（この場合は負に帯電）

図1 誘導帯電

4.5 電荷の保持

導体の初期帯電電位からの減衰

導体の帯電電位の時間変化

$$V = V_0 \times \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) + I \times R \times \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)\right)$$

時定数時定数

ここで、

V : 導体の電位 (単位はV)

V_0 : 初期電位 (単位はV)

I : 静電気帯電電流 (単位はA)

R : 接地への抵抗 (単位は Ω)

t : 帯電開始からの時間 (単位はs)

C : 静電容量 (単位はF)

静電気の発生源

RCJS-TR-1 : 12

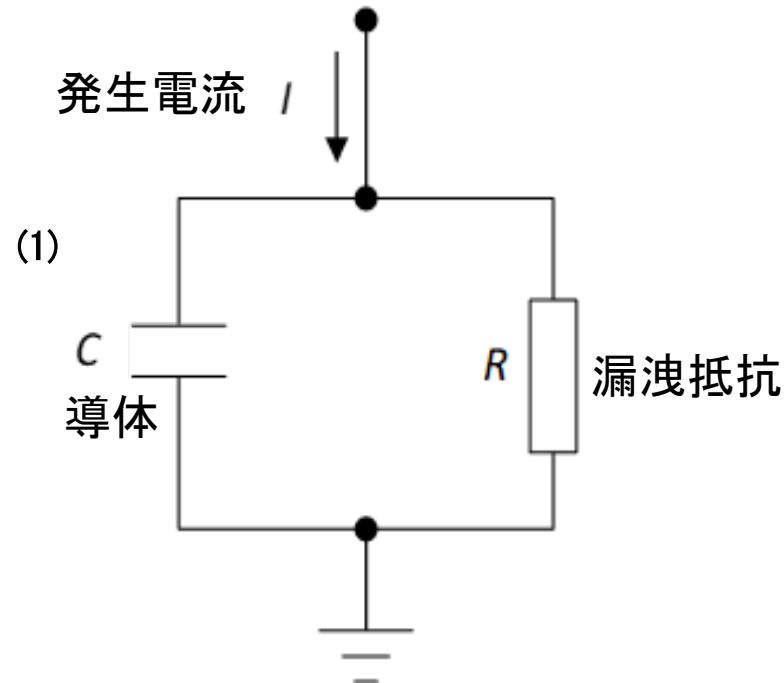


図3 静電的に帯電した導体の等価電気回路

であり、

最大の電位 V_{\max} は、 $t \gg RC$ の場合に到達し、

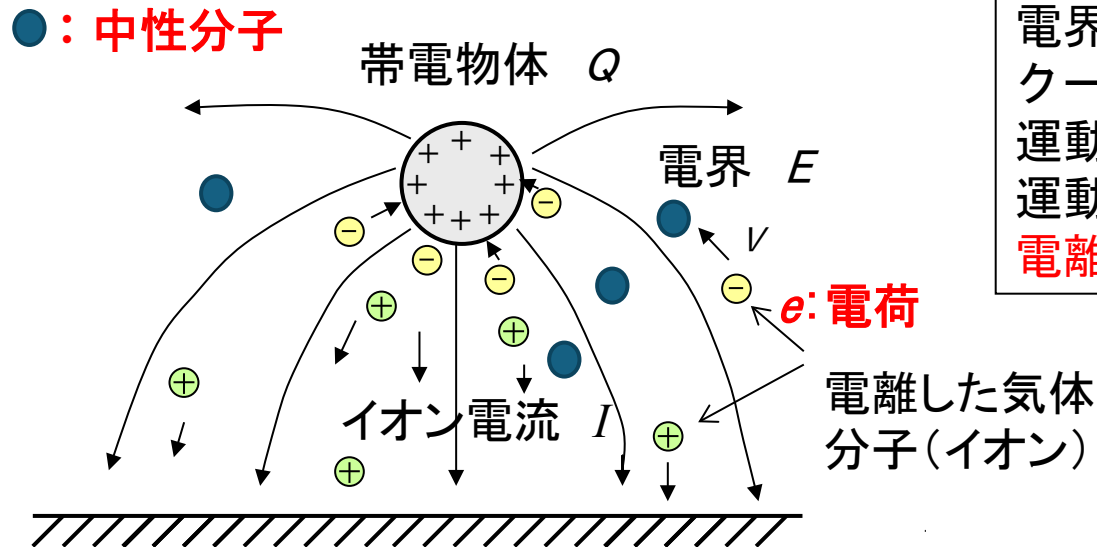
$$V_{\max} = I \times R \quad (2)$$

である。

4.7 静電気放電

4.7.1 一般

静電気放電—気体の絶縁破壊



電界強度	$E \propto Q$
クーロン力	$F = eE$
運動方程式	$F = m\alpha$
運動エネルギー	$W = (1/2) m v^2$
電離エネルギー	$W_i < W \Rightarrow \text{電離}$

静電気放電は、電界が雰囲気ガス、通常は空気の絶縁破壊電界強度：3 MV/m (30 kV/cm) を超えると発生する。帯電物体の表面近傍の電界強度 E が 30 kV/cm 以上になると、電子の運動エネルギー W が気体の電離エネルギー W_i より大きくなり、放電（電子雪崩）が開始する。

4.7.1 一般

静電気放電の種類と特徴

放電の種類	発生条件	着火性	主な対策
火花放電	帯電した導体からの放電	着火源になりやすい	接地
コロナ放電	突起物（針、導電性繊維）からの放電 除電器、帯電防止繊維製品の放電	水素、アセチレン等 には着火	不導体の使用回避
ブラシ放電	帯電した不導体（固体、粉体、液体） からの放電	MIEが4mJ以下の気体、 粉体に着火	不導体の電位を10kV 以下に抑制
沿面放電	電気二重層をもつ薄い絶縁層の放電 ガラスライニング・テフロンパイプ・ 絶縁内袋の放電、剥離放電	気体、粉体に着火	抵抗・絶縁破壊電圧 の低下 電荷密度の抑制
空間電荷放電	空間電荷雲（ミスト、粉じん）の放電 突起物へのブラシ放電。規模が大きくなると雷状放電	気体、粉体に着火	規模・濃度の制限 電荷密度・電界の 抑制
コーン放電	帯電した堆積粉体表面での放電 サイロ内（特にペレット）の放電	気体、粉体に着火	流量・規模の制限 粒径の選定

4.7.2 スパーク（火花）放電（導体-導体間でしか発生しない放電）

$$W = \frac{1}{2} \times Q \times V = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \tag{3}$$

RCJS-TR-1 : 14

ここで、
W : 消費されるエネルギー (J) =放電エネルギー
Q : 導体の電荷量 (C)
V : その電位 (V)
C : 接地に対する容量 (F)
である。

表2 代表的な電氣的な静電容量

物体	静電容量 (×10 ⁻¹² F)
非常に小さい金属アイテム (ねじ, 釘)	1 から 10
小さい金属アイテム (さじ, ホースのノズル)	10 から 20
小さい容器 (バケツ, 50 リットルドラム)	10 から 100
中型容器 (250 リットルから 500 リットル)	50 から 300
人体	100 から 300
周辺を接地された構造物に囲まれた主な工場アイテム (反応容器)	100 から 1000
自動車	800 から 1200

4.7.2 スパーク（火花）放電

- ・ スパーク放電は、異なる電位にある2つの導体間の放電である。
- ・ 一発の発光を伴うパルス的な放電であり、瞬時にほぼ全電荷が放電する。⇒（3）式で放電エネルギーの計算が可能であるが、不導体からの放電には適用できない。
- ・ 空気中では、導体間の電位差が**327V以下**ではスパーク放電は起こらない。
- ・ 着火性が高く、可燃性ガス・蒸気及び粉体の着火源となり得る。

4.7.3 コロナ放電

- ・ 放電の発光が針状電極の先端部のみで起こる放電で、火花放電のように電極間が発光で繋がらない。電離が発生する領域が発光している針先端近傍に限られる。
- ・ 微小なエネルギーのパルス状放電が間欠的に連続して発生するので、着火能力が小さく（0.1mJ以下）、着火源になり難い。
- ・ 空気をイオン化できるので除電や帯電に利用される。

- ・ ブラシ放電は、導体と絶縁体間で発生する放電である。
- ・ 先端の曲率が少し大きな電極から発生し、ブラシ状のストリーマが電極間を進展する放電になる。
- ・ 放電が空間に広がることになるので電流密度が比較的低くなり、デバイスの破壊や劣化に直接寄与することはない。
- ・ 最小着火エネルギー（MIE）が、4mJ以下の可燃性ガス・蒸気、粉体の着火源となり得る。

4.7.5 沿面放電（propagating brush discharges）

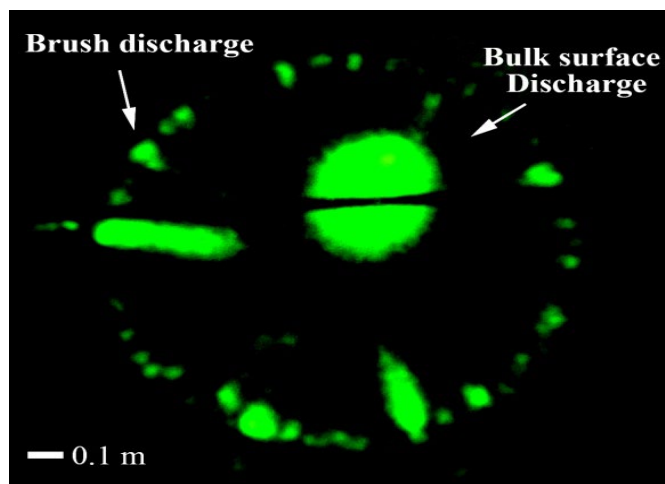
- ・ 絶縁層の表面が連続的に帯電するとき、背面導体との間で電気二重層が形成されて、表面電荷密度が $250 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 以上になると、表面に接地球などが接近すると沿面放電が起こる。
比較：二重層を形成しない場合は最大電荷密度は $27 \mu\text{C}/\text{m}^2$
- ・ 接地球が無くても絶縁層の絶縁破壊電界に達すると絶縁破壊（ピンホール）に伴って沿面放電が起こる。
- ・ 着火性が高く粉体の着火源となり得る。

注記J : 沿面放電の発生条件

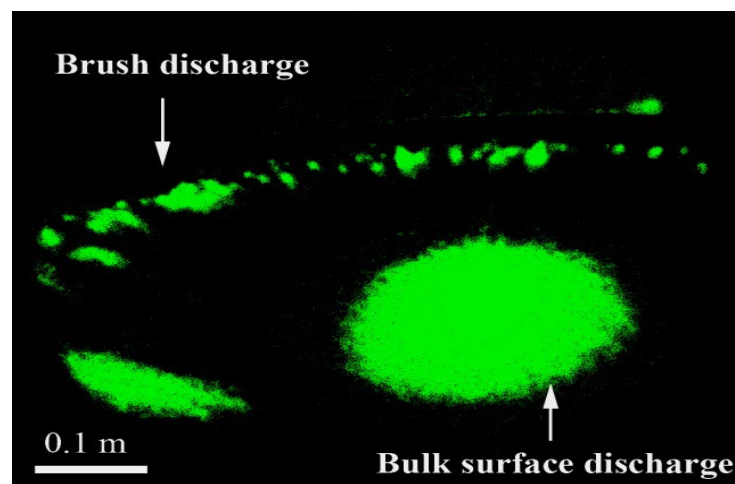
- ・ 沿面放電の発生条件は、図J. 7に示すように、絶縁層の厚さと絶縁層間の電圧との関係によって示される。
- ・ 図J. 7における厚さと電圧がそれぞれ(10 μm ・4 kV)、(200 μm ・8kV)の2点を結ぶ直線より電圧が高いと、沿面放電が発生する。
一方、絶縁層厚さが8mm以上、又は絶縁層間電圧が4kV未満では、沿面放電は発生しない。
- ・ 背面導体がなくても電気二重層ができる条件では沿面放電が発生する。
- ・ 沿面放電が発生する物体の例 : グラスライニング、金属蒸着フィルム、樹脂溶着内壁、少なくとも内面が絶縁性のパイプ、PE内袋等

- ・ コーン放電は、抵抗率が高く、粗目のペレット等(1~10mm)で多く発生する。 → 粉体が混在するサイロでの粉塵爆発の主たる着火源
- ・ 粉体のみでも、大流量輸送ではコーン放電が発生する。

参考資料

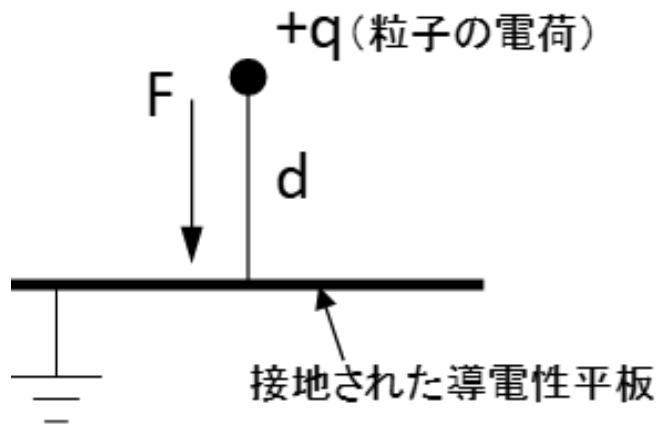


(a) top
view

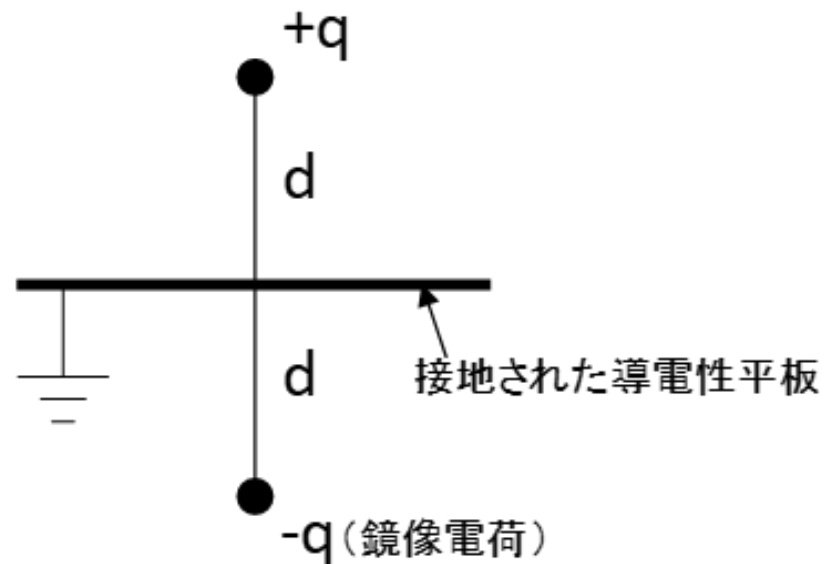


(b) side
view

サイロ内で観測されたコーン放電例 (露出: 2 s)



左図：粒子の電荷を $+q$ が、平板から距離 d にあると想定する。



右図：平板を鏡と見なし、電荷 $+q$ の対象の位置に、逆極性の電荷 $-q$ （鏡像電荷）を置くことにより、接地された平面を電位0とすることができる。

電荷 $+q$ が平板から受ける力は、距離 $2d$ 離れた $+q$ と $-q$ の電荷が引き合う力となるので、クーロン則より、 $F = \frac{q^2}{4 \times \pi \times \epsilon_r \times \epsilon_0 (2d)^2} = \frac{q^2}{16 \times \pi \times \epsilon_r \times \epsilon_0 \times d^2}$
 F は右式から求められる。
 力の方向は、平板の表面に向かって垂直方向である。

図J.9 鏡像電荷

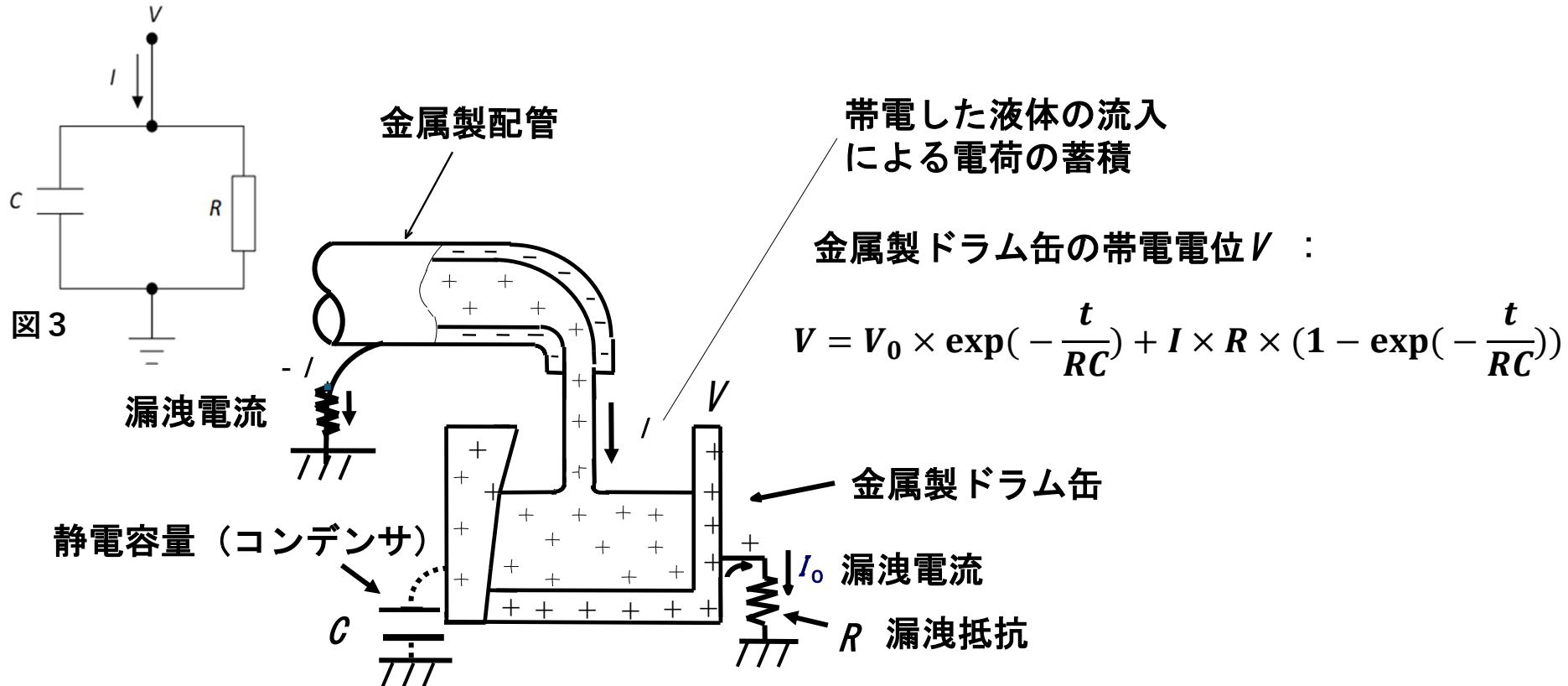
5. 静電気問題と障害

5.3 静電気着火障害

5.3.2 導体からのスパーク放電

注記J：帯電特性

帯電特性を図3の「静電的に帯電した導体の等価電気回路」の具体的なイメージ ⇒
 下記の「金属製配管からの帯電した絶縁性液体の金属製ドラム缶への充填」を用いて、考えてみる。

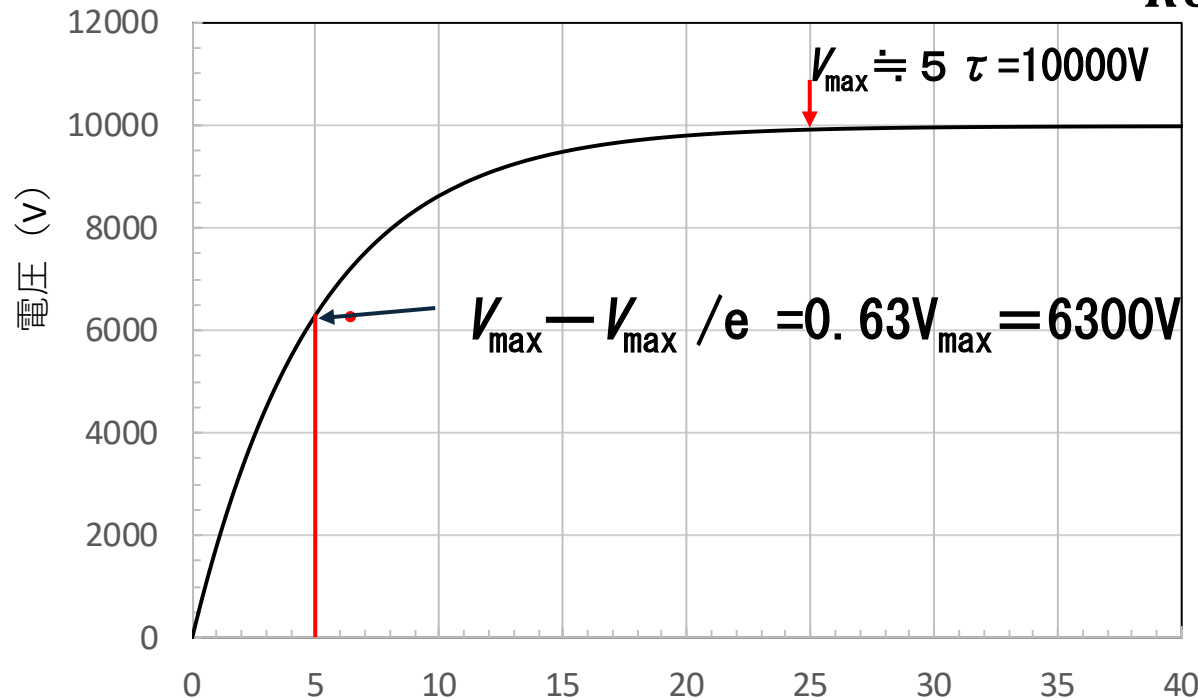


5.3 静電気着火障害

5.3.2 導体からのスパーク放電

$$V = I \times R \times (1 - \exp(-\frac{t}{RC}))$$

導体 ⇒ 金属製ドラム缶の
帯電電位変化



金属ドラム缶の初期帯電無しの状態から帯電が始まるので、(1)式は、下記のようになり、

$$V = I \times R \times (1 - \exp(-\frac{t}{RC}))$$

上式に $I = 10^{-7}A$ 、 $R = 10^{11}\Omega$ 、 $C = 50 \text{ pF}$ を代入し、 t が 5τ になると、金属製ドラム缶の帯電電位は、左図に示すように時間で変化し、

$$V_{\max} = I \times R = 10000V$$

まで高くなり、飽和する。

時定数 : $\tau = R \times C = 5\text{秒}$ 時間 (s)

図J. 10 (金属製ドラム缶の) 帯電特性 ($I = 10^{-7}A$, $R = 10^{11}\Omega$, $C = 50 \text{ pF}$)

5.3.7 静電気放電の着火力

RCJS-TR-1 : 26

5.3.7.1 一般

静電気放電の着火性

MIE (mJ)	<0.1	0.1~4	>4
コロナ放電	○	×	×
ブラシ放電	○	○	×
火花放電	○	○	○
沿面放電	○	○	○
空間電荷放電	○	○	○
コーン放電	○	○	○
○:着火性あり, ×:着火性なし			

空間電荷放電：帯電した粉じん雲やミスト雲で発生する雷のような放電

5.3.7.4 ブラシ放電

様々な爆発グループのガスおよび蒸気を着火させるブラシ放電の最小放電電荷量は、IEC TS 60079-32-1 : 2013の表4から次のようになり、この放電電荷量値をゾーン1および2で許容される最大値として規定している。

許容放電電荷量は、

- ・ <60 nC : 爆発グループIまたはIIA
- ・ <25 nC : 爆発グループIIB
- ・ <10 nC : 爆発グループIIC

放電電荷量は、[RCJS-TR-1](#)の「8.12 静電気放電により移送される電荷」の「8.12.1 一般」の「図6 静電気放電による電荷移送測定の基本構成」に示された測定装置で測定できる。

5.3.7 静電気放電の着火力

5.3.7.6 コーン放電

注記J：コーン放電の等価エネルギー

- ・ 等価エネルギーの計算式：

$$W = 5.22 D^{3.36} d^{1.462} \quad (\text{mJ})$$

- ・ 計算式の適用範囲：サイロ径 $D(\text{m})$: 0.5~3m、
粒径 $d(\text{mm})$: 0.1~3mm
- ・ 計算例： $D=2.1\text{m}$ 、 $d=0.1\sim0.2\text{mm}$ の場合
- ・ 等価エネルギーの計算結果： $W=2\sim6\text{mJ}$

となり、コーン放電が、微粉体が混在するサイロでの粉塵爆発の主たる着火源である。

表3 人体容量200 pFの放電に対する人体の認識レベルと物理的反応

放電エネルギー (mJ)	反応	人体電位 (V)
0.1	認識可能	1,000
0.9	確実に感じる	3,000
6.4	不快なショック	8,000

注記J：電撃の閾値

帯電した人体と接地導体間の放電、又は帯電物体と人体間の放電によってもたらされる電撃の強さは放電電荷量と相関関係があり、一般に放電電荷量が $2 \sim 3 \times 10^{-7} \text{C}$ 以上になると電撃を受ける。
(静電気安全指針1988年)

表J.2 人体帯電電位と電撃の強さの関係

人体電位 (kV)	放電電荷量 (μC)	放電エネルギー (mJ)	電撃の強さ
1	0.10	0.05	全く感じない
2	0.20	0.20	指の外側に感じるが痛まない
2.5	0.25	0.31	針に触れた感じを受け、ぴくりとを感じるが痛まない
3	0.30	0.45	針で刺された感じを受け、ちくりと痛む
4	0.40	0.80	針で深く刺された感じを受け、指がかすかに痛む
5	0.50	1.25	手のひらから前腕まで痛む
6	0.60	1.80	指が強く痛み、後腕が重く感じる
7	0.70	2.45	指、手のひらに強い痛みとしびれた感じを受ける
8	0.80	3.20	手のひらから前腕までしびれた感じを受ける
9	0.90	4.05	手首が強く痛み、手がしびれた重みを受ける
10	1.00	5.00	手全体に痛みと電気が流れた感じを受ける
11	1.10	6.05	指が強くしびれ、手全体に強い電撃を受ける
12	1.20	7.20	手全体を強打された感じを受ける

注) ・放電電荷量と放電エネルギーは、人体の静電容量を100 pFとして計算した。
・人体は導体であるので、接地された導体に触れるとスパーク放電が発生する。

5.5 静電気放電のシミュレーション

5.5.1 一般

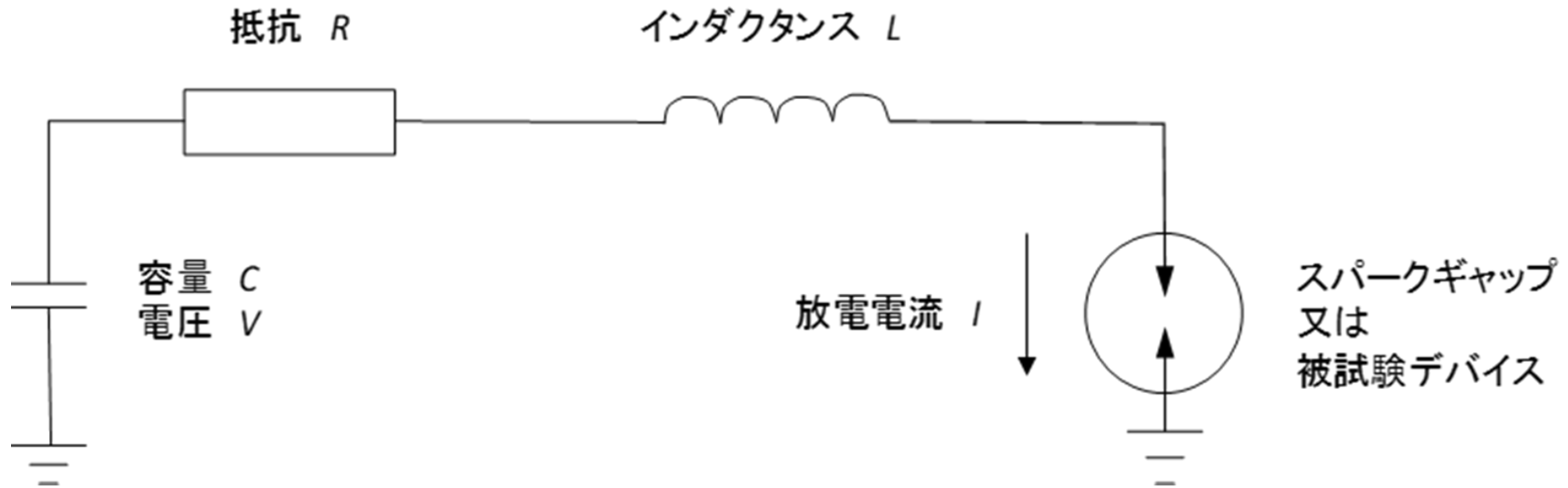


図5 静電気放電のシミュレーション回路

5.5.2 着火エネルギー測定のための容量性の放電

容量性放電回路は、可燃性雰囲気中の着火エネルギー測定に用いられる。代表的な回路では、コンデンサの静電容量 C が、蓄積エネルギーを決定するために調整される。また、回路抵抗 R とインダクタンス L は、通常は小さい“寄生”値に保たれる。

表4 ESDシミュレーションモデルに使用する代表値

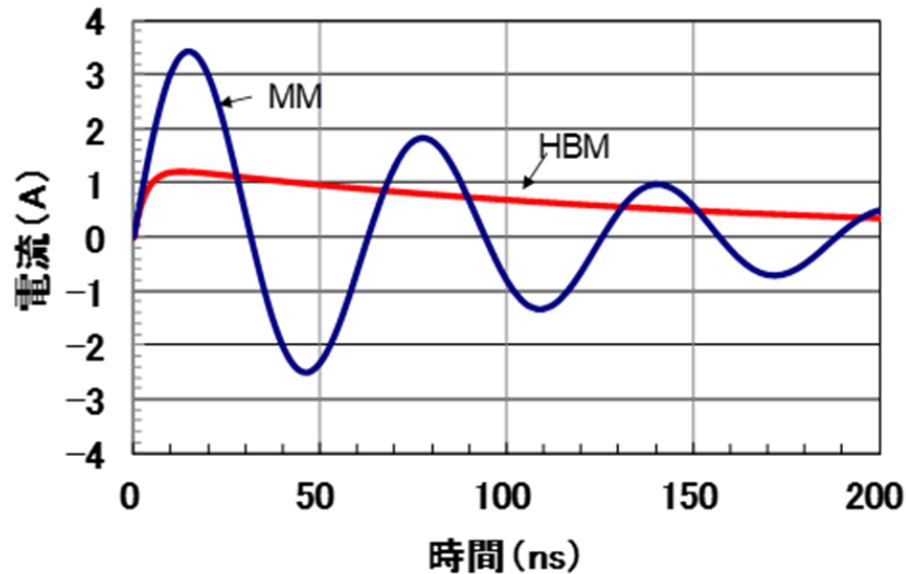
モデル	応用	R (Ω)	C (pF)	L (nH)
着火エネルギー測定	粉塵雲の着火 敏感性評価試験	寄生	5 - 1000	寄生又は 1 mH
	ガス・蒸気の着火 敏感性評価試験	寄生	5 - 1000	寄生
人体モデル (HBM)	電子デバイス試験	1,000 - 3,000	100 - 300	寄生
マシンモデル (MM)	電子デバイス試験	8.5 (代表値)	200	0.5 (代表値)
デバイス帯電モデル (CDM)	電子デバイス試験	<10 (代表値)	3 - 30 (代表値)	<10 (代表値)

注記J : HBM, MM, CDMの放電電流波形シミュレーション

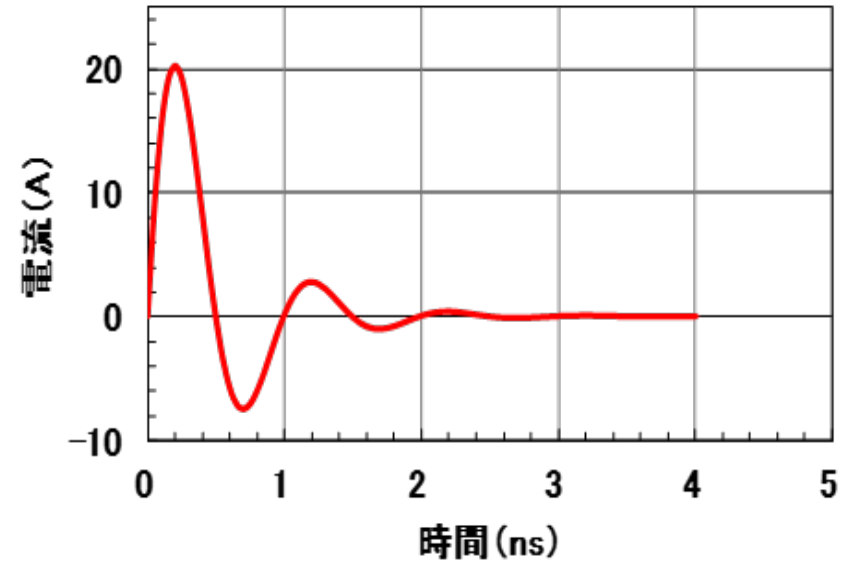
表J.3 放電波形モデルのモデルパラメータ

モデルパラメータ	HBM	MM	CDM
C (pF)	100	200	10
L (μ H)	7.5	0.75	0.0025 (2.5nH)
R (Ω)	1,500	8.5	10
帯電電圧 V (V)	2,000	200	500

注記J : HBM, MM, CDMの放電電流波形シミュレーション



(a) HBM, MM



(b) CDM

図J.11 放電電流波形シミュレーション

- ・ HBM放電は、一般的に10～20 nsの立ち上がり時間で、数100 nsの持続時間を持つ。
- ・ MM放電は、振動波形で一周期数10 nsである。
- ・ CDM放電電流が高速で振動し、放電中は正／負の極性どちらも数100 p秒の立ち上がり時間を持つ電流振動である。

6. 問題と障害に対する一般的な解

6.1 一般

「静電気敏感性デバイスの取り扱い」については、IEC 61340-5-1 (RCJS-5-1) と IEC TR 61340-5-2 (RCJS-TR-5-2) を、「静電気による障害の防止」については、IEC TS 60079-32-1 を、「医療環境における静電気の危険性」については、IEC 61340-6-1 を参考にする。

6.2 一般的アプローチ

- ・高絶縁性材料の使用を避け、全ての導電性材料又は金属製アイテムを接地することである。⇒接地対策
- ・コロナによるイオン化は、絶縁性材料の好ましくない表面電荷を減少させる非常に有効な手段である。⇒イオナイザの使用対策
- ・リクスと照らし合わせて、可能な限り空気の湿度を高く保つことである。⇒加湿対策
- ・絶縁性材料の接地への電荷減衰速度の向上は、帯電防止性添加物の添加により達成される。⇒帯電防止剤の使用対策

8. 測定の一般的側面

8.1 一般

- 静電気測定は、電界、電荷量、表面及び体積電荷密度、電気抵抗、静電容量、電流、静電エネルギーなどがある。また、より実用的な測定には、帯電性能、電荷減衰、接地ボンディング抵抗、シールド性能がある。
- 静電気測定は、静電気現象の理解を手助けし、問題を分析し解決策を導き、及び静電気プロセスに基づくシステム及びデバイスを設計及び開発するために用いられる。

8.2 電界の測定

電界の測定には、誘導プローブとフィールドミルの 2種類の電界計を用いて行うことができ、表面電位、表面電荷密度、又は体積電荷密度、又は局所的電位の大きさと極性の測定に使用できる。

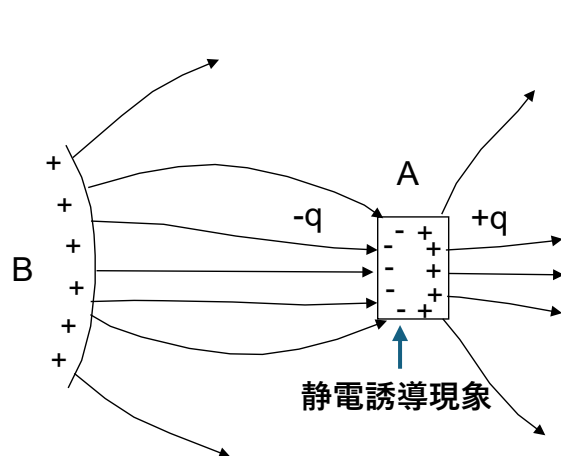
- ・ 誘導プローブは、直流増幅方式の測定器で、電界を検出する電極（検出電極）と高入力インピーダンスの直流増幅器から構成され、検出電極に誘導される電荷（誘導電荷）によって電界を測定する。
- ・ フィールドミルは、交流増幅方式の測定器で、検出電極に入る電界を変調するための接地された回転シャッター、又は振動電極を用いた測定器で、誘導プローブのゼロ点安定性の限界を克服したものである。この測定器には、ヌルモード（零位法）で動作する物もある。

「誘導プローブ電界計の構成図」を図J. 16に、
「回転シャッター付きフィールドミル電界計の構成図」を図J. 17に、
零位法の 「フィードバック型電界計の構成図」を図J. 18に示す。

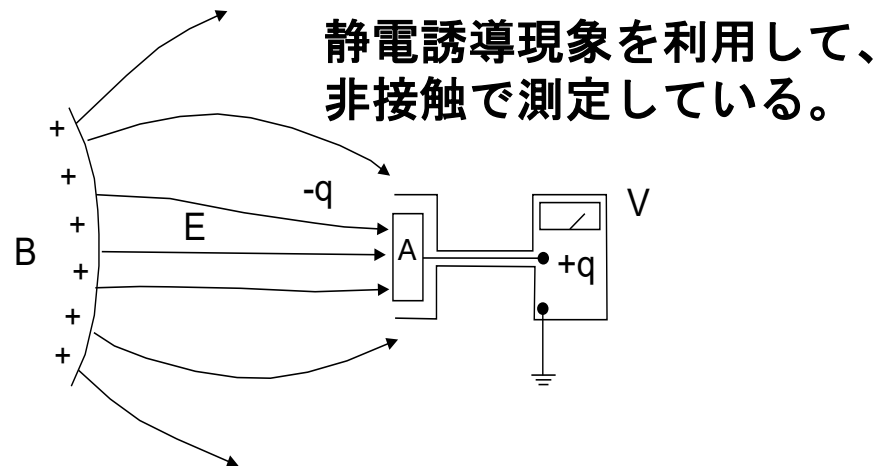
注記J： 電界計の種類

(1) 誘導プローブ電界計

RCJS-TR-1 : 38



図J. 14 帯電物体Bにより絶縁された導体Aに電荷が誘導される模式図



図J. 15 導体Aを、全入力容量 C を持つエレクトロメータに接続されたシールド付きディスクと想定する。

静電界は、電界内に配置された絶縁された導体に誘導される電位を測定することにより求められる。

図J. 14に示すように、絶縁された導体Aが、正に帯電した物体Bにより形成された電界中に置かれていると想定する。Bに対向するAの表面に誘導された負電荷 ($-q$) は、Aの表面電界を E とし、 E に対向するAの表面積を S とすると、ガウスの法則より、

$$E = \frac{q}{S\epsilon_0}$$

となる。

また、図J. 14の導体Aがシールドされ、入力全容量 C のエレクトロメータに接続されていると想定する (図J. 15参照)。帯電物体に比べ導体Aの裏面側に誘導された電荷 ($+q$) は、 $q = C V$ であるので、次式のように、エレクトロメータに電圧 V を発生させる。

$$E = \frac{C}{S\epsilon_0} \cdot V$$

従って、プローブ (誘導プローブ) に誘導された電界は、エレクトロメータに表示される電圧 V により、測定できる。

8.3 電位測定

8.3.1 一般

帯電した物体の電位は、帯電物体の表面上、または空間電荷を含む体積内で発生する。物体の電位は、静電電位計を用いて測定できる。

8.3.2 表面電位

- ・ 零位法の電圧フォロワープローブを用いた微小エリアでの測定では、プローブを測定対象物の表面の近くに取り付けて、測定箇所の近傍にある他の静電荷の影響を受けないようにするのが望ましい。
- ・ 接地に接続された電界計は、電位計として使用でき、高い帯電電位の測定対象物でも容易に表面電位の測定ができる。測定する距離が小さい場合は、電界計が測定する電位を下げることで、また、帯電した表面と接地された電界計の間の静電気放電の発生を防ぐために、測定距離には十分に留意が必要となる。

8.3.3 空間電位

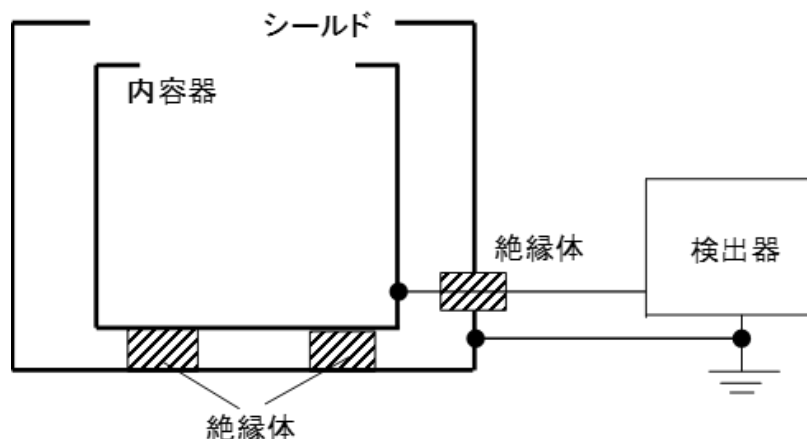
局所的な空間電位は、接地された電界計で測定できる。接地された電界計は、実効的な電界計の直径に依存するある量だけ電位分布が乱される。電界（ E （V/m））は、電界計の直径が d （m）の場合、局所的な空間電位 V （ボルト）と次の関係がある。

$$E = f \times (V / d) \quad (9)$$

ここで、 f は1に近い定数である。

8.4 電荷

製品上の正味の静電荷又は材料の電荷量は、図J. 19に示すファラデーケージの絶縁された金属性チャンバー内に製品を収容し、このチャンバーに誘導した電荷量をエレクトロメータにより測定し、チャンバーの静電容量との掛け算することにより得られる。エレクトロメータの代替として、チャンバーの電位を静電界計又は電圧フォロワープローブを用いて測定することもある。また、チャンバーから接地への流れる電流を積分することでも電荷量を測定できる。



図J. 19

信頼のある電荷量測定に必要な注意事項

- ・ 測定前にファラデーケージなどの測定系の絶縁性をチェックすること！
⇒帯電物体を投入して、電荷が減衰しないことを確認する。
- ・ 測定者の静電気対策の実施
- ・ 測定対象の大きさは？→ファラデーケージの深さの半分以下に収まる大きさとする。
- ・ 必ず、測定は数回行い、再現性があるデータを採用すること！
- ・ 測定環境の温度・湿度を測定すること。

8.5 電荷密度

8.5.1 表面電荷密度

表面電荷密度を求める方法を、図J.20の「接地した導電性支持台の上に置いた帯電した絶縁性シートの電界」を用いて説明する

電界計を用いて、帯電した絶縁性シートの帯電電位 V を測定する。
この時の測定距離を d とすると、シート表面からの電界 E は、

$$V = E \times d \Rightarrow E = V / d$$

となる。

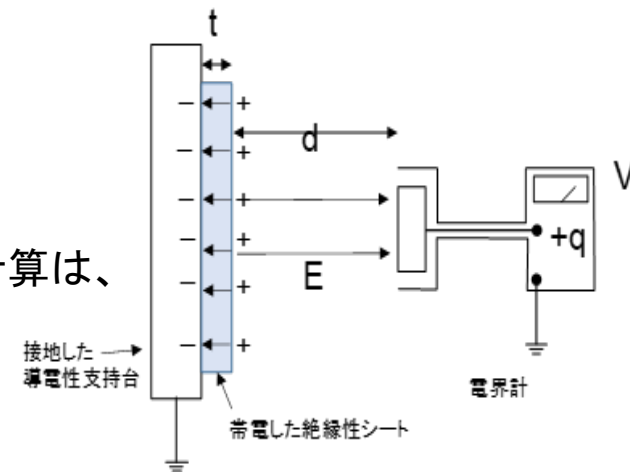
次に、シートが均一に帯電している場合の表面電荷密度 q の計算は、
ガウスの法則を絶縁性シート表面に適用して、

$$S \times E = Q / \varepsilon_0 \Rightarrow Q = S \times \varepsilon_0 E$$

$$q = Q / S = \varepsilon_0 E$$

となり、帯電したシートの表面電荷密度 q が求まる。

ここで、 S は帯電したシートの表面積、 Q は表面積 S の帯電したシートの電荷量で、 q はシートの表面電荷密度、 V は電界計が測定した帯電電位、 d は電界計の測定距離、 ε_0 は真空の誘電率 ($8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$) である。



図J.20

8.5.2 体積電荷密度

注記J：球内に一様に電荷が分布する場合の球表面での電界と電位

図J. 21に示す球状の空間電荷雲の球表面で電界と電位の求め方については、TR-1の46-47ページに記載されているので、ここでは電界計で測定した電界 E から、体積電荷密度 ρ を求める方法について説明する。体積電荷密度 ρ を求めるには、

球の半径を a 、表面積を S 、球内の体積電荷密度 ρ （均一分布）、球の全電荷量 Q として、この球表面にガウスの法則を適用すると求めることができる。

球の表面積 S は、 $S = 4\pi a^2$

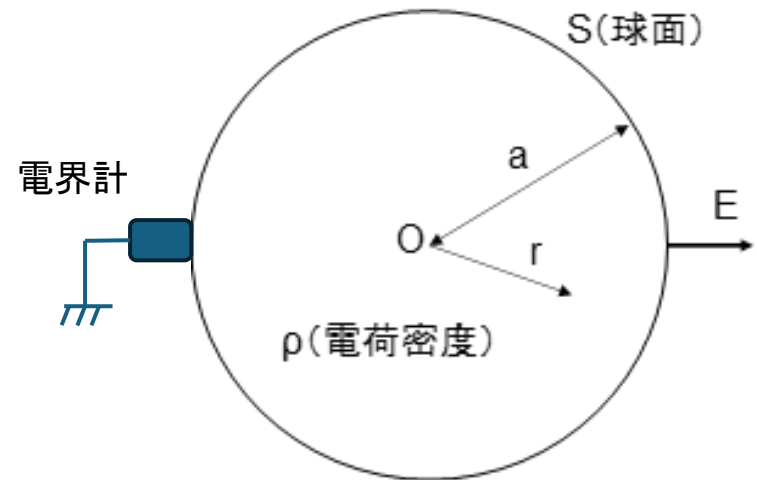
球の体積 V は、 $V = 4\pi a^3/3$

球の全電荷量 Q は、 $Q = \rho \times 4\pi a^3/3$ であるので、ガウスの法則に適用すると、

$$E \times S = Q / \varepsilon_0 \Rightarrow E \times 4\pi a^2 = \rho \times 4\pi a^3/3 \varepsilon_0$$

$$\therefore \rho = E \times 4\pi a^2 \times 3 \varepsilon_0 / 4\pi a^3 = E \times 3 \varepsilon_0 / a$$

この様に球状の電荷雲の体積電荷密度 ρ が求まる。
ここで、 ε_0 は真空の誘電率である。



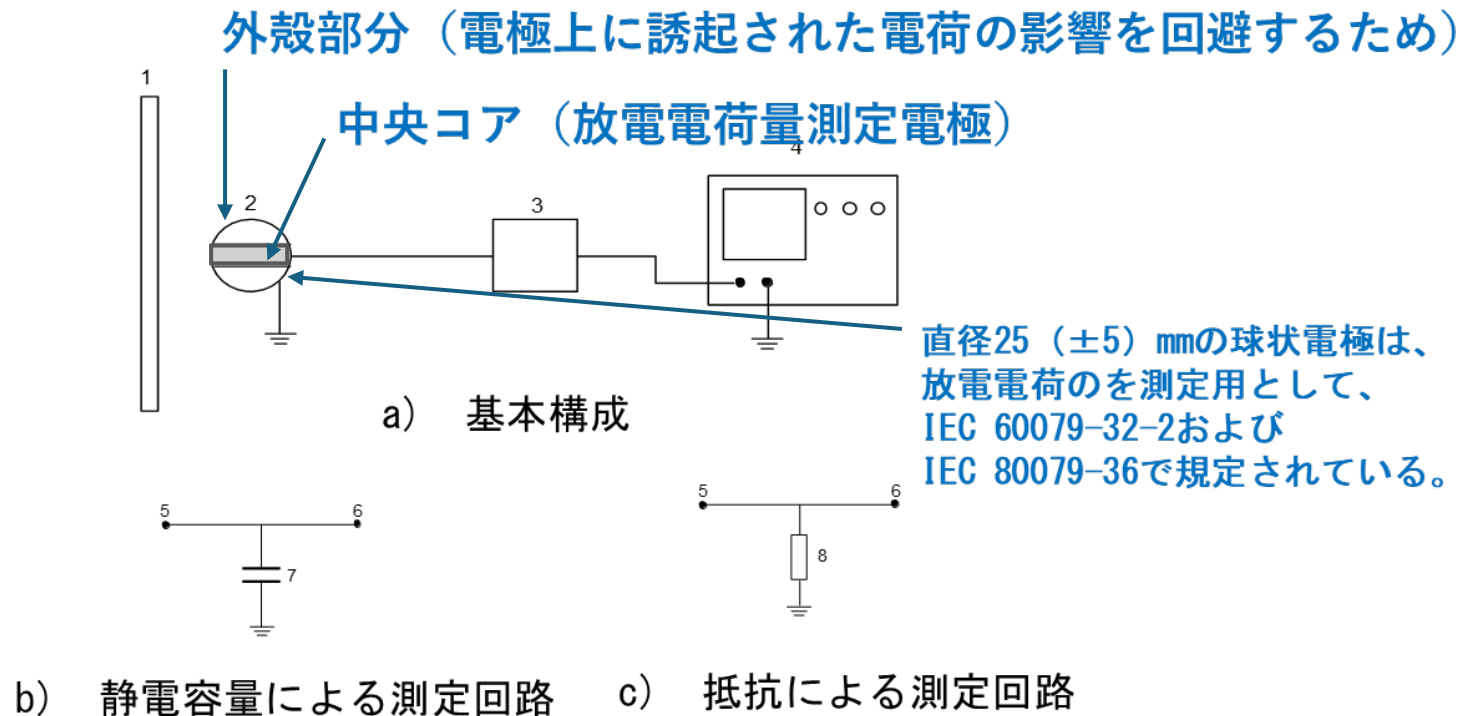
図J. 21 球内で、電荷均一分布の様子

8.11.2 等価エネルギー

火花放電以外の静電気放電が、火花放電により測定した最小着火エネルギーがX J の可燃性雰囲気着火させたときに、その静電気放電の等価(equivalent) エネルギーをX J であると定義する。着火エネルギーと対照して放電エネルギー（等価エネルギー）が実験的に求められているので、着火のリスク分析に便利である。火花放電以外の放電エネルギーは、この等価エネルギーであることに注意すること。最近では、その静電気放電がどのくらいの最小着火エネルギーもつ可燃性物質の着火に有効であるかということから、この等価エネルギーを有効(effective) エネルギーと呼ぶこともある。

8.12 静電気放電により移送される電荷

8.12.1 一般



記号

- 1 帯電物体又は表面 2 球形の、2つの部品構成の放電電極 ($D = 30\text{mm}$)
 3 測定回路 4 デジタルオシロスコープ (例：1 GHz帯域幅)
 5 電極への接続 6 オシロスコープへの接続
 7 静電容量 (例：20 nF) 8 抵抗 (例：0.25 Ω)

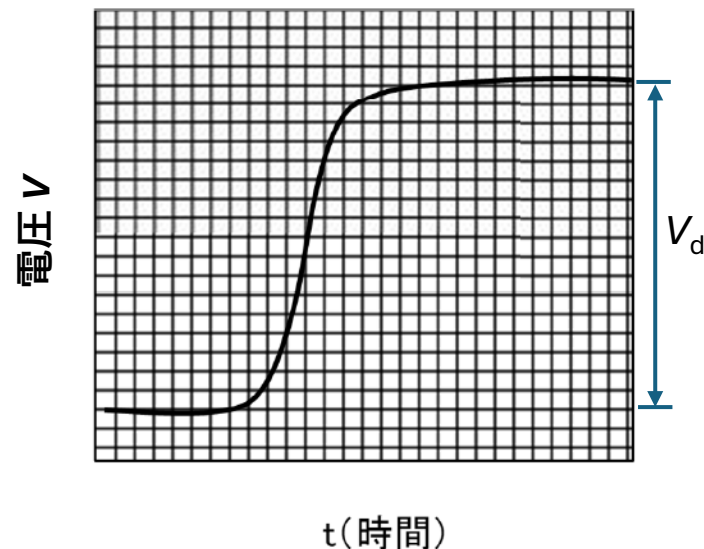
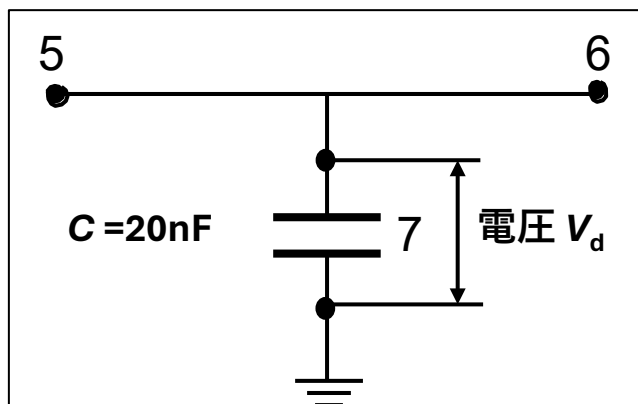
図6 静電気放電による電荷移送測定の基本構成

8.12 静電気放電により移送される電荷

RCJS-TR-1 : 53

8.12.1 一般

3 測定回路



a) 静電容量を用いた測定回路

コンデンサの端子間電圧 V の測定結果

放電電荷量 (Q_d) は、 $Q_d = C \times V_d$ から求める。

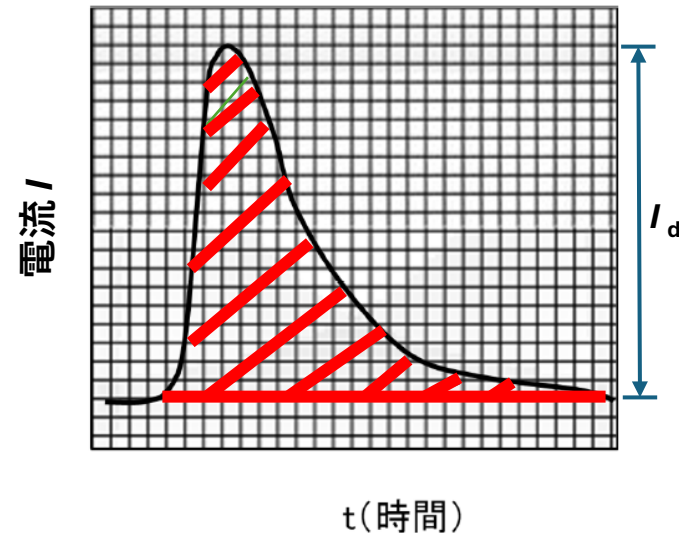
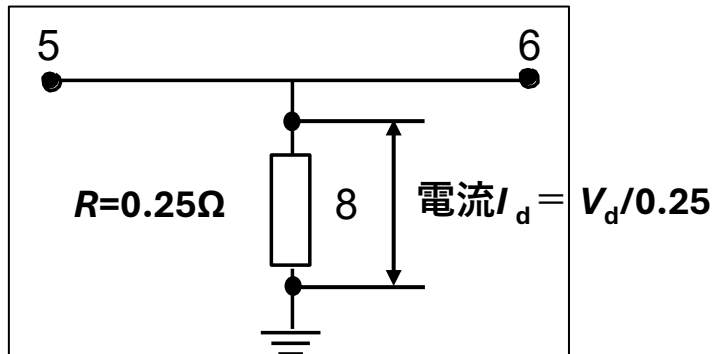
携帯クーロンメータと呼ばれる市販の装置が、放電電荷量を測定するために提供されている。

注) 測定値が、帯電物体からの誘導電荷の影響を受ける。

8.12 静電気放電により移送される電荷

8.12.1 一般

3 測定回路



放電電流 I の測定結果

b) 抵抗を用いた測定回路

放電電荷量 (Q_d) は、 $Q_d = \int I_d dt$ から求める。

ただし、 I_d は、 $I_d = V_d / R$ である。

* 放電電荷量を測定することで、ブラシ放電の着火危険性の評価ができる。

- ・ <60 nC : 爆発グループIまたはIIA
- ・ <25 nC : 爆発グループIIB
- ・ <10 nC : 爆発グループIIC

8.13 静電容量

注記J： 電荷分割方式による静電容量の測定方法

静電容量は、交流電圧のブリッジ測定器、又は電荷が既知と未知の静電容量で分割される際の電圧を測定することにより測定できる。ここでは、電荷分割方式について説明をする。

静電容量 C_1 は既知、静電容量 C_2 が未知とする。

既知の静電容量 C_1 に電圧 V_1 を印加し、静電容量 C_1 を帯電させる。未知の静電容量 C_2 に電圧 V_2 を印加し、静電容量 C_2 を帯電させる。この状態で、 C_1 と C_2 を接続して、均衡した電圧 V_3 を測定する。

C_1 に蓄えられている電荷 Q_1 は以下に等しい。

$$Q_1 = C_1 \times V_1$$

C_2 に蓄えられている電荷 Q_2 は以下に等しい。

$$Q_2 = C_2 \times V_2$$

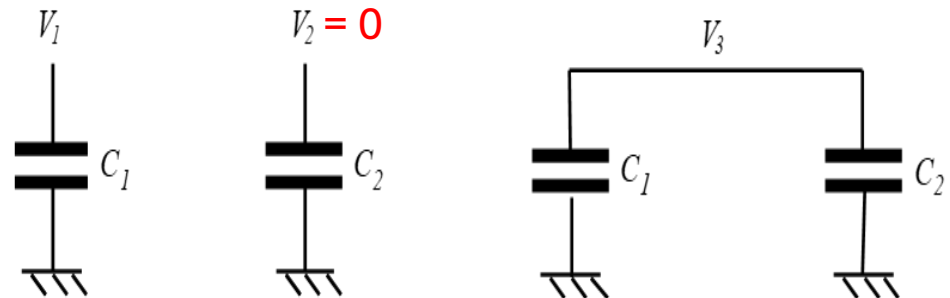
C_1 と C_2 を結合し、電圧が均衡して電圧 V_3 になったとすると、全電荷量は、以下のようになる。

$$Q = C_1 \times V_1 + C_2 \times V_2 = (C_1 + C_2) \times V_3$$

したがって、未知の（静電）容量 C_2 は、

$$C_2 = C_1 \times \frac{(V_1 - V_3)}{(V_3 - V_2)}$$

と求められる。



[情 報]

静電気安全に関する参考資料「2007 静電気安全指針」の入手方法

1. 独立行政法人労働安全衛生総合研究所のホームページ
(<https://www.jniosh.johas.go.jp>) を開き、「刊行物・報告書等」をクリックして下さい。
2. 「刊行物・報告書等」をクリックして、刊行物のNo. 4の「技術指針（TR）」をクリックします。
3. 労働安全衛生総合研究所技術指針（1955-）の「2007」をクリックすると、「静電気安全指針2007」のpdf版がありますので、全文の下の「PDF」をクリックすると、ダウンロードできます。