

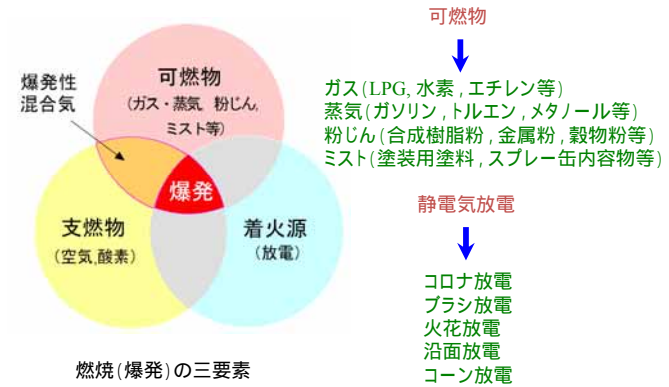
## 静電気による爆発・火災の現状と災害事例の解説

独立行政法人 労働安全衛生総合研究所  
上席研究員 山隈 瑞樹

1. 静電気災害の分析
2. 静電気災害発生機構
  - (1)可燃性雰囲気と着火性放電
  - (2)静電気の発生と緩和
  - (3)静電気放電の種類と放電エネルギー
3. 災害事例
  - (1)スプレー缶使用中の爆発・火災
  - (2)研磨器によるMg-Al合金研磨中の粉じん爆発
  - (3)原油タンク清掃中の火災
  - (4)アルミニウム粉投入中の粉じん爆発

## はじめに：静電気の危険性とは

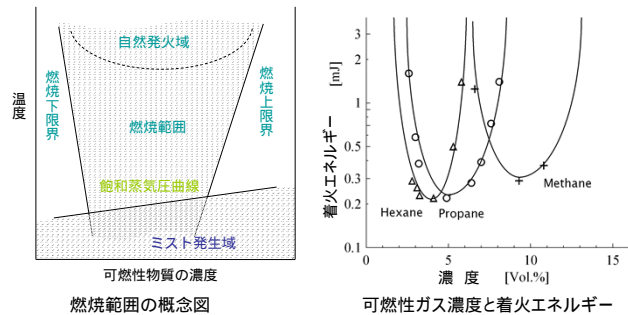
燃焼の三要素が同時に満たされたとき爆発が発生し、生命・財産を毀損する。



## 爆発の発生条件

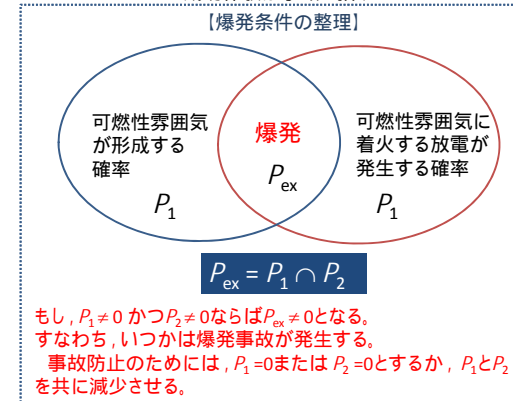
必要条件: 可燃性雰囲気と着火性放電が同時に存在すること

可燃性雰囲気とは  
可燃性物質が空気と混合し、燃焼 (爆発) 範囲の濃度にある状態  
着火性放電とは  
可燃性雰囲気を着火させるに必要なエネルギーを有する放電



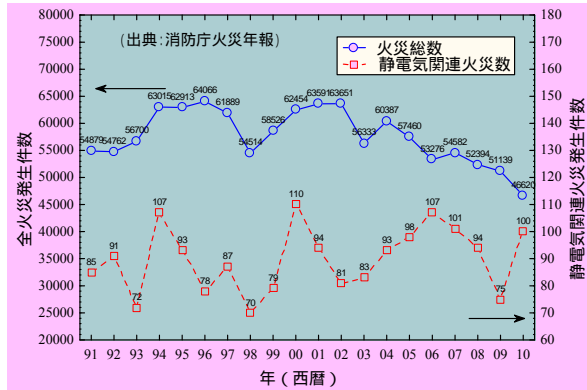
爆発性雰囲気と着火性放電が同時に存在していても、必ず爆発に至るわけではない。→確率現象

→ 成功体験が事故を招く



### 1. 静電気災害の分析

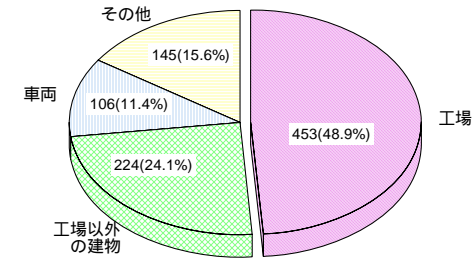
国内の火災件数の推移 (1991-2010) 消防庁: 火災年報



火災年報

静電スパークによる火災の発生場所 (2001-2010)

'01-'10合計: 928件

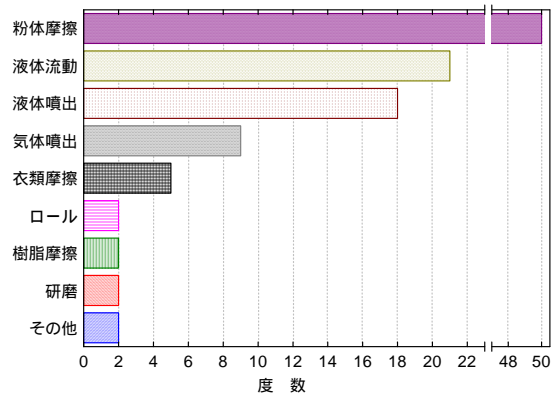


静電スパークによる火災の重要度 (比率)

- ・全数の0.15%
- ・建物火災の1.7%
- ・化学工場火災の16%

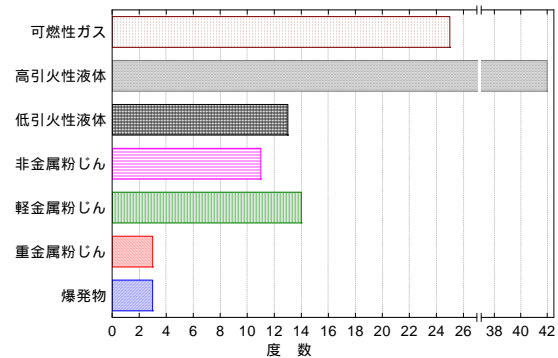
厚生労働省の災害調査資料 (1989-2004)に基づく分析

工程別発生件数

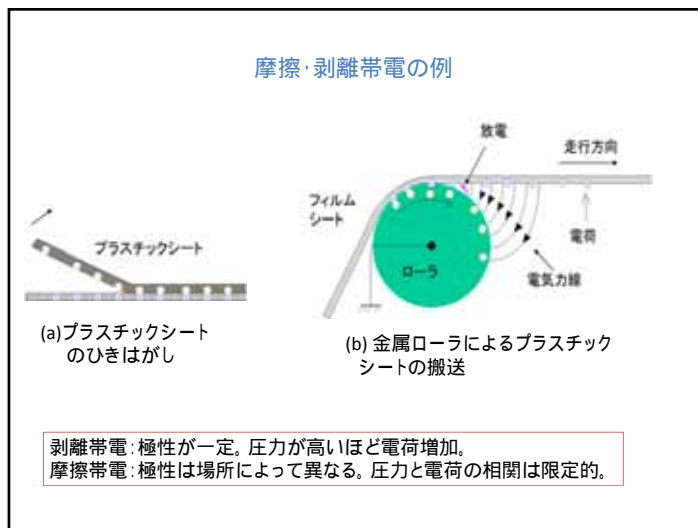
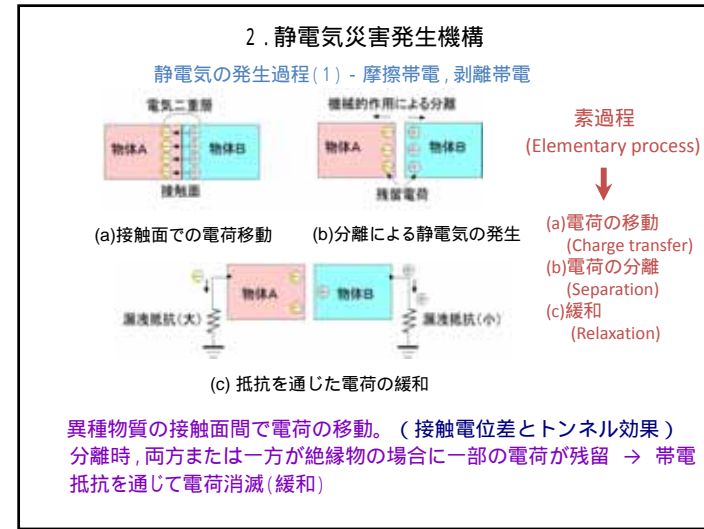
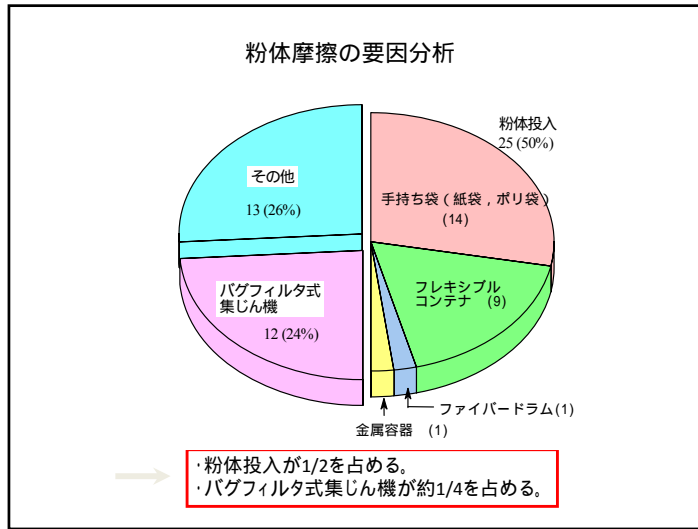


粉体に関連した災害約半数を占める。

発火物別発生件数



- ・常温で引火性のある物質(可燃性ガス, 高引火性液体)で過半数。
- ・低引火性液体(高温時, ミスト状態で引火性となる)も多い。
- ・粉じんのなかでは, 軽金属粉じんが多い。



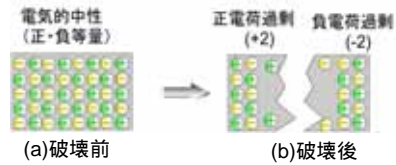
### 帯電列 (物質間の摩擦帯電傾向)

相対的に上に位置するものが正に帯電  
相互の距離が離れているほど帯電量大

金属	繊維	天然物質	合成樹脂
鉛	羊毛 ナイロン レーヨン 絹 木綿 麻	アスベスト 人毛・毛皮 ガラス 雲母	
亜鉛	ガラス繊維 アセナート	綿 木材 人の皮膚	
アルミニウム		紙	
クロム		ゴム	エポナイト
鉄	ビニロン		ポリスチレン
ニッケル	ポリエステル アクリル		ポリプロピレン
白金	ポリ塩化ビニリ アム	セルロイド セロファン	ポリエチレン
			塩化ビニル テフロン (PTFE)

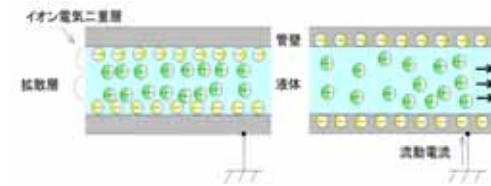
静電気の発生過程(2) - 粉碎帯電

物体の破壊による静電気の発生



破壊後の破片毎に電荷のアンバランスが生じる。  
 (電荷の場所的・時間的分布のゆらぎに基づく)  
 破壊前後で電荷の総量は変わらない。  
 細くなるほど、単位重量当たりの電荷が増加する。  
 粉体の空気輸送、粉碎器等での帯電原因となる。

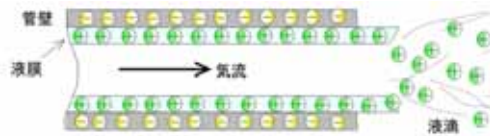
静電気の発生過程(3) - 流動帯電



(a) 選択的吸着によるイオン電気二重層の形成 (b) 流動に伴う電荷分離

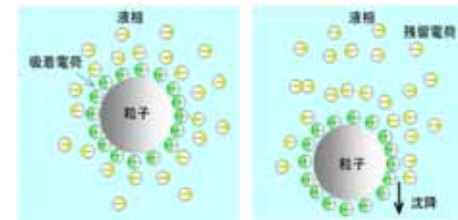
液中のイオンの選択的吸着に基づく電荷の分布による電荷の発生。  
 イオン濃度が高すぎても(導電率大)、低くすぎても(導電率小)帯電しにくい。導電率  $10^{-11} \sim 10^{-13}$  S/m (石油, 有機溶媒等) が最も流動帯電を起こしやすい。  
 流路にマイクロフィルタがあると極めて強力で帯電する100倍以上)。

静電気の発生過程(4) - 噴霧帯電



空気による液滴の絶縁 液滴中の電荷が緩和されない  
 イオン濃度が高い(高導電率)液体(アルコール, 塩水等)がより帯電しやすい。  
 スプレー作業(塗装, 洗浄, 非破壊検査など)での着火源となる。

静電気の発生過程(5) - 沈降帯電, 攪拌帯電

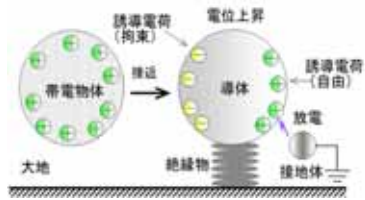


(a) 電気二重層の形成 (b) 沈降による電荷のはく離

液中に、気体、液体、または固体の分散層が形成されると、攪拌などの物理的操作に伴う相対運動により電荷の偏りができる。  
 液相(連続相)の導電率が $10^{-9}$  S/mより小さくなると顕著となる。  
 グラスライニング攪拌槽におけるピンホール破壊の原因となる。

静電気の発生過程(6) - 静電誘導

静電誘導による非接地導体の帯電



非接地導体に帯電物体が接近すると ...  
 導体内部で電荷が移動する。電位が上昇する。  
 ただし、内部の総電荷量には変化はない。  
 人体、道具類等の帯電要因となる。  
 導電性液体が液滴となるときも、そばに帯電物体があると  
 静電誘導によって帯電する。

(3) 静電気放電の種類と放電エネルギー

放電は、電界が空気の絶縁破壊電界強度 $E_0$ を超えたときに発生する。

$$E_0 = 3 \text{ MV/m (30 kV/cm)}$$

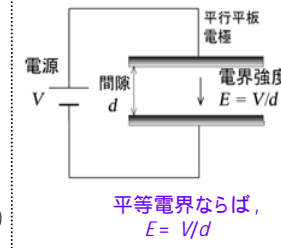
帯電電位が約300V以下では放電は発生しない。

重要な静電気放電の種類

- (1) 火花放電
- (2) コロナ放電
- (3) ブラシ放電
- (4) 沿面放電
- (5) バルク表面放電(コーン放電)
- (6) 雷状放電

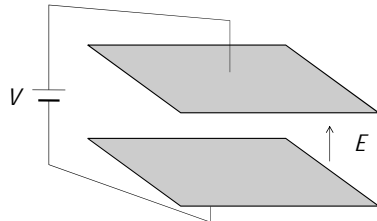
電界 $E$ と電位 $V$ の関係

$$E = -\text{grad } V$$



空間に蓄えられる静電エネルギーの最大値

静電エネルギーは空間の電界中に蓄えられる。

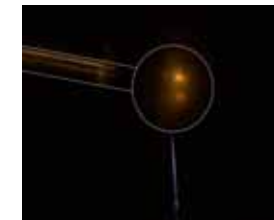
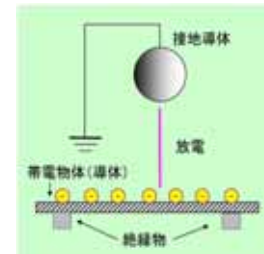


空気における最大エネルギー密度

$$w = \frac{1}{2} \epsilon E^2 = 40 \text{ J/m}^3$$

例: 10cm x 10cmの平行平板電極には、最大4 mJが蓄えられる。

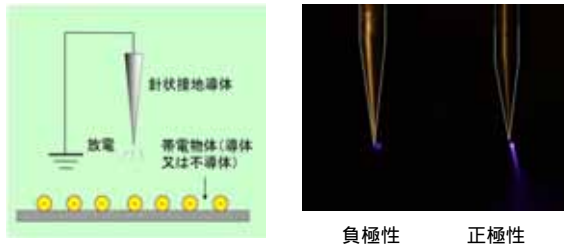
火花放電 (Spark Discharge)



火花放電の例

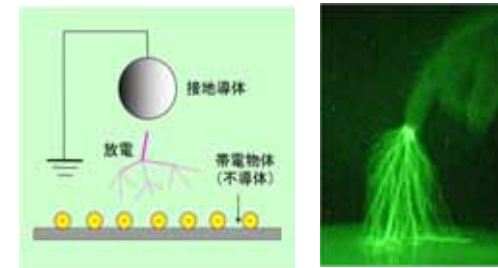
一発のパルスの放電であり、ほぼ全電荷が放出される。  
 着火危険性が高く、ほとんどの可燃性ガス・蒸気及び粉じんの着火源となり得る。  
 放電エネルギーは  $W=1/2CV^2$  で計算できる。

コロナ放電 (Corona Discharge)



微小なエネルギーのパルス状放電が連続的に発生する。  
 着火危険性は小さい( $W < 0.1 \text{ mJ}$ )。  
 (水素, アセチレン等以外の着火源にならない。)  
 イオンを豊富に発生するので除電器の原理ともなる。

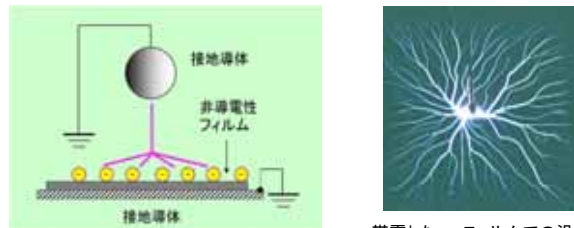
ブラシ放電 (Brush Discharge)



(指先から帯電物体へのブラシ放電)

放電に関与する領域が狭い。  
 着火危険性は帯電電位と放電電極の大きさに依存する。  
 可燃性ガス・蒸気の着火源となり得る( $W < 4 \text{ mJ}$ )。  
 帯電電荷雲と球状導体間でも発生する。

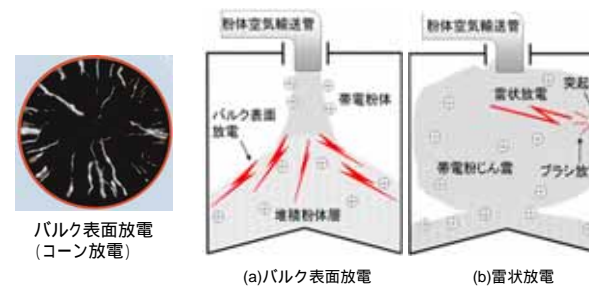
沿面放電 (Propagating Brush Discharge)



帯電したPETフィルムでの沿面放電

絶縁フィルムがキャパシタの役目をするので大量の電荷が蓄積される。  
 一発のパルスの放電であり、放電に関与する領域が広い。  
 着火危険性が高く、ほとんどの可燃性ガス・蒸気及び粉じんの着火源となり得る。  
 ( $W > 1,000 \text{ mJ}$  となることもある)  
 放電時に物理的な破壊 (ピンホール等) を起こすことがある。

バルク表面放電 (Bulking Brush Discharge)と雷状放電 (Lightning-like Discharge)



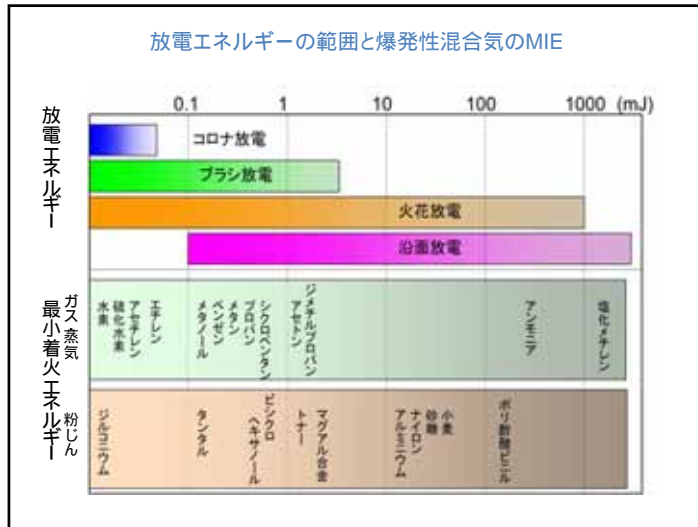
バルク表面放電 (コーン放電)

(a)バルク表面放電

(b)雷状放電

バルク表面放電は、抵抗率が高く、粗目の粉体( $>100 \mu\text{m}$ )で発生する。  
 →サイロでの粉じん爆発の主たる着火源と考えられる。  
 雷状放電は、通常の産業プロセスでは現認されることがないが、特に大きなサイロでは注意すること望ましい。

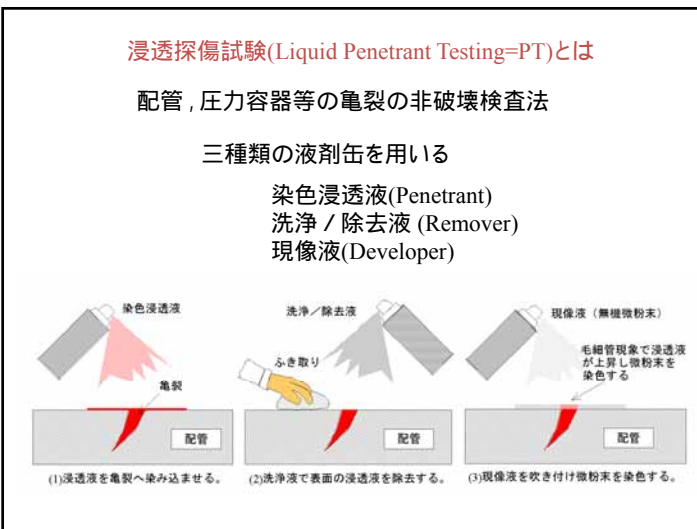




### 3.災害事例

最近発生した教訓的災害事例4例を紹介する。

- (1)スプレー缶使用中の爆発・火災  
非破壊検査(カラーチェック)による配管等の亀裂検査に関連し、試験用液剤を含有するスプレー缶の使用中に発生した爆発・火災
- (2)研磨器によるMg-Al合金研磨中の粉じん爆発  
携帯電話のケースのバリ取り中に発生した研磨粉じんの粉じん爆発
- (3)原油タンク清掃中の火災  
大型原油タンク内でスラッジの清掃中、清掃用具の帯電が原因で発生したと考えられる火災。
- (4)アルミニウム粉投入中の粉じん爆発  
アルミニウムを原料とする火工品製造工場において、アルミニウム粉投入中に発生した粉じん爆発。

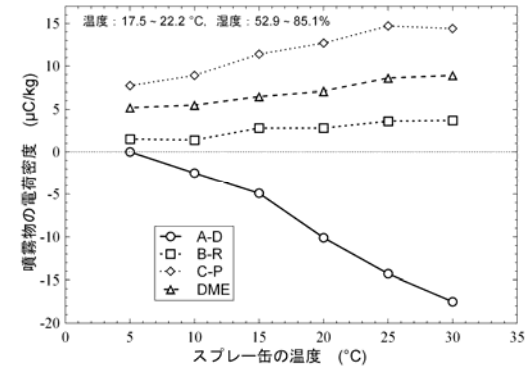


PTと災害

1. PTは、圧力容器等の密閉空間内で作業することが多い。
2. 液剤はスプレー缶で供給される。
3. 液剤の噴霧に伴いスプレー缶の内容物に含まれる可燃性ガスが密閉空間に充満し爆発性混合気を形成する。

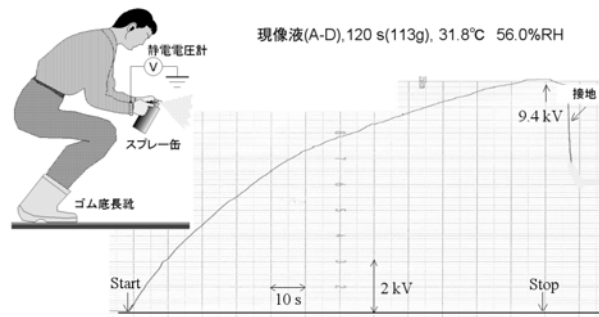
被災者数	作業内容・被災状況	環境条件
負傷8	大型攪拌容器完成後の浸透探傷検査。8人で一斉に噴霧中に爆発。	密閉空間 高温・多湿
死亡3	大型LNGタンク完成後の浸透探傷検査。宙吊りゴンドラ上で作業中火災となり墜落。	外気に比べかなり 高温
死亡1 負傷1	ゴミ焼却施設のボイラの溶接箇所を浸透探傷検査中に爆発。	密閉空間 高温・多湿
負傷2	浸透探傷検査終了後、屋内でスプレー缶の廃棄処分のためポリ袋に放出中、袋から発火・炎上。	室温29 湿度10%

PT缶噴霧物電荷密度への温度の影響



噴霧作業と人体帯電

噴霧に伴い発生する電流が人体に蓄積することによって、人体の電位が上昇する。



静電気対策

スプレー缶作業は静電気の発生を伴うという認識が必要！

- (1)床  
絶縁物で養生しない。  
導通がない場合は導電性  
マットを敷く。
- (2)帯電防止作業靴  
JIS-T8103適合品
- (3)帯電防止作業服  
JIS-T8118適合品
- (4)手袋  
素手、軍手、導電性手袋
- (5)被検査物の接地

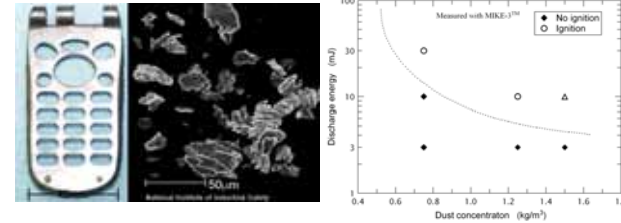


(2) 研磨器によるMg-Al合金研磨中の粉じん爆発



携帯電話ケースの研磨工場において、研磨粉を集じん機へ輸送する配管内に粉じんが堆積しており、これが何らかの火種によって着火し、粉じん爆発となった。配管を逆流した熱風によって作業員6名が負傷。

研磨粉じんの性質

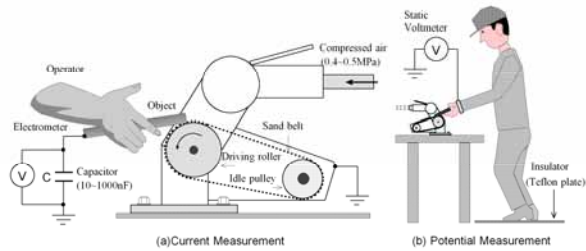


平均粒径 40 μm

AZ91D:  
(Mg 90%, Al 9%, Zn, etc.1%)

最小着火エネルギー  
 浮遊粉じん < 10 mJ  
 堆積粉じん < 12 mJ  
 堆積粉じん (湿潤) < 1.8 mJ

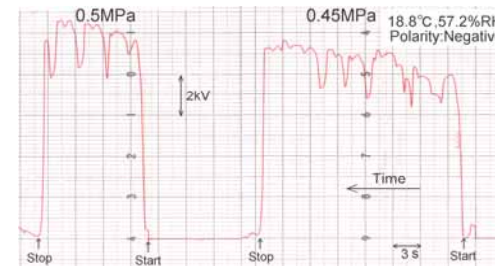
帯電量の測定



ベルトの種類: 標準, 平織布, ナイロン裏布あり, ナイロン  
 駆動ローラの材質: 天然ゴム(NR), 導電性ゴム(CR)\*  
 アイドルプリーの材質: ポリエチレン(PP), 金属(MP),  
 ジュラコン(DP)

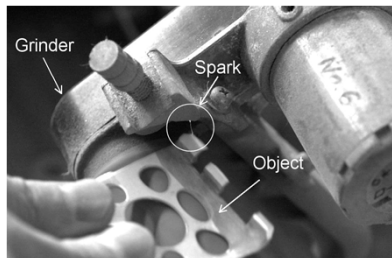
\*静電気対策用試作品

研磨中の人体電位と放電



瞬間的に人体の電位は10kV以上に達する。

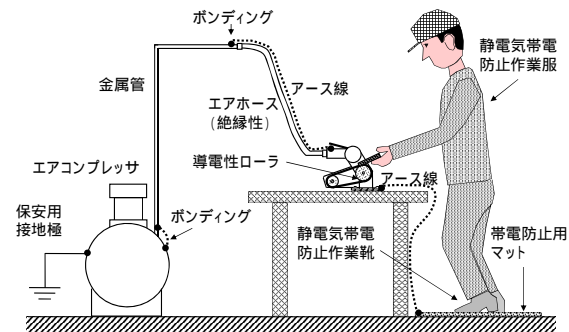
研磨中の放電



研磨器の接地条件によって二つのモードがある。  
 研磨器を接地：単発の大パルス放電  
 研磨器の接地不良：複数の連続的小パルス

対策

1. 人体の帯電防止 → 帯電防止靴, 導電性床
2. 機械類の帯電防止 → 接地(ただし, 作業性に配慮)
3. 粉じんの除去 → 配管の風量, 掃除

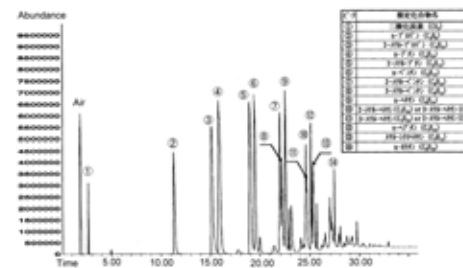


(3)原油タンク清掃中の火災



原油タンク(10万kL)の内部で清掃作業(スラッジの掻き取り)を実施中,  
 火災が発生し, 5名が焼死し, 2名が負傷した。

原油スラッジの成分分析と着火性

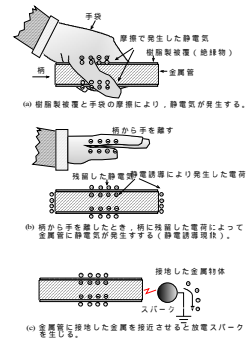


ブタン, ペンタン, ヘキサン等の引火性液体を含む。

引火点: -6  
 発火点: 343  
 最小着火エネルギー: 0.8 mJ (13 )

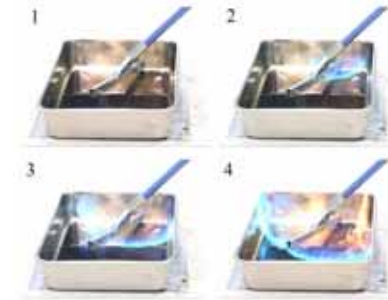
気流のシミュレーション解析の結果, 作業箇所では流れがよどんでおり  
 爆発性混合気が形成されていた可能性が高い。

清掃用具(ワイパー)への静電気帯電



ワイパーのハンドルには、ポリプロピレンの被覆があり、これを把持することによって静電気が発生し、心棒(金属)が誘導帯電する。(最大 6kV, 静電容量60pF, 静電エネルギー 1.1 mJ)

着火実験

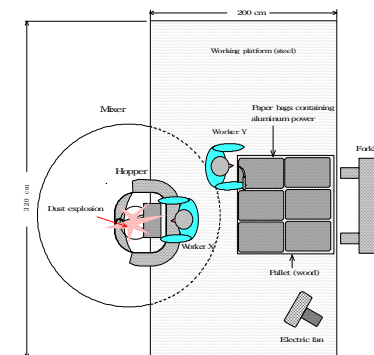


トレイに原油を入れ、帯電させたワイパーからの放電で着火することを確認した。

静電気対策

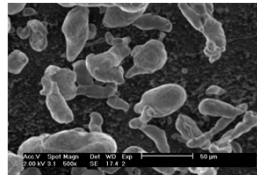
- (1) 爆発性混合気の形成を防止するため、十分な換気装置を取付けるとともに、可燃性ガス・蒸気の濃度が爆発下限界の1/4以下であることを確認した後、入槽し作業する。濃度の測定は、タンクの底部、ピット等、可燃性ガス・蒸気が滞留しやすい場所を優先的に行う。
- (2) 清掃用具の帯電を防止するため、絶縁性被覆のあるものは使用しない。
- (3) 人体の帯電防止はもちろんであるが、帯電防止作業服は、難燃性または不燃性の生地のものを選択する。(本件では、易燃性の帯電防止服を着用していたため焼死したと推定される遺体があった。)

(4)アルミニウム粉投入中の粉じん爆発



粉体混合機に原料であるアルミニウム粉を投入中に粉じん爆発が発生し、作業員2名が負傷した。

アルミニウム粉じんの爆発特性

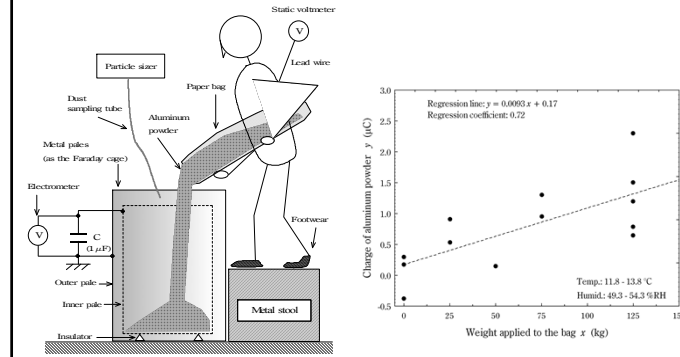


粉じんのSEM画像  
(中央径=61μm)

Median diameter (μm)	Minimum ignition energy (MIE) (mJ)	Lower explosion limit (g/m <sup>3</sup> )	Max. explosion pressure P <sub>st</sub> (× 100kPa)	dp/dt <sub>max</sub> (× 100kPa/s)	Explosion index K <sub>st</sub> (× 100kPa·m/s)
94	> 1000	NA	NA	NA	NA
61	300 < MIE < 1000	310	6.8	203	63
39	100 < MIE < 300	NA	NA	NA	NA
24	30 < MIE < 100	100	8.6	589	185
9.2	10 < MIE < 30	100	10.2	3025	940

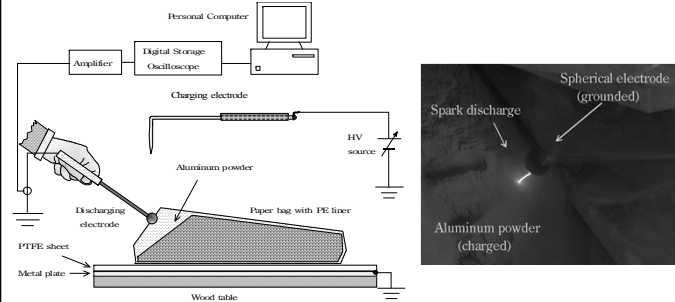
もともとの粉体は300 < MIE < 1000 mJであるが、浮遊粉じんは10 μmであり、30 mJ以下で着火する可能性がある。

投入時の電荷測定



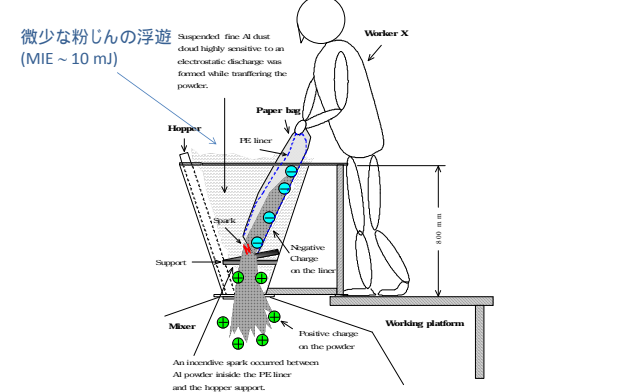
粉体の電荷は、袋に加えられた荷重に正の相関がある。したがって、積み重ねて保管していると、投入時の電荷が非常に大きくなる可能性がある。

放電実験

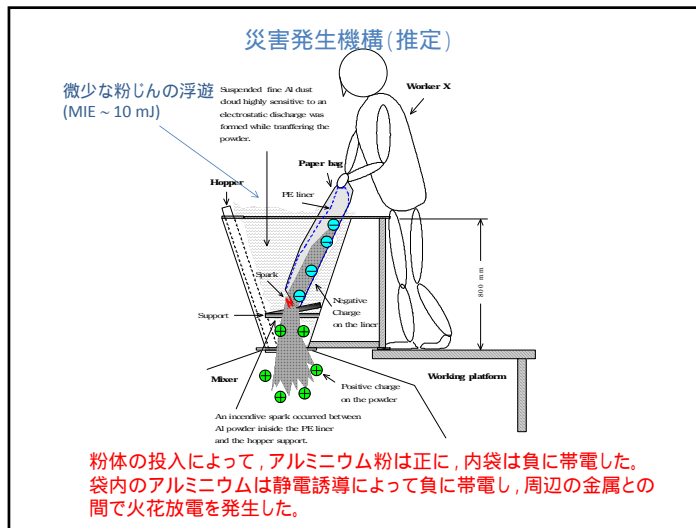


紙袋の内袋(ポリエチレン)によってアルミニウム粉の電荷緩和が阻害される。帯電したアルミニウム粉から火花放電が生じる。

災害発生機構(推定)



粉体の投入によって、アルミニウム粉は正に、内袋は負に帯電した。袋内のアルミニウムは静電誘導によって負に帯電し、周辺の金属との間で火花放電を発生した。



### 静電気対策

- (1) 紙袋の内袋は、電荷の発生および蓄積を防止するため、帯電防止加工(表面抵抗率 $10^9 \sim 10^{12} \Omega$ )を施したものを使用する。
- (2) 微小な粉じんの浮遊・滞留による爆発性雰囲気形成を抑制するため、局排装置等によって通気性を確保する。
- (3) 静電誘導による帯電を防止するために、周辺の導体はすべて接地する。

### 参考文献

災害事例の詳細は、次の論文を参照ください。

- (1) 山隈瑞樹: スプレー缶噴霧時の帯電危険性. 安全工学誌, 43 (2004) 229
- (2) 山隈瑞樹: 圧縮空気駆動式研磨器の帯電危険性. 安全工学誌, 44 (2005) 9
- (3) 山隈瑞樹, 水谷高彰, 島田行恭: 原油タンク清掃時の火災原因に関する一考察. 安全工学誌, 50 (2011) 101
- (4) 山隈瑞樹, 八島正明: アルミニウム粉投入中の粉じん爆発原因に関する実験的考察. 安全工学誌, 50 (2011) 302

### さらに深く学習したい方に

次のような研修・講習会が実施されています。

安全工学セミナー  
主催: 特定非営利活動法人 安全工学会  
<http://www.jsse.or.jp/>

粉じん爆発・火災安全研修【初級】、【中級】  
一般社団法人 日本粉体工業技術協会  
<http://www.appie.or.jp/>

安全衛生専門講座 静電気安全対策コース  
中央労働災害防止協会 東京教育センター  
<https://www.jisha.or.jp/tshec/>