

静電気現象と災害・障害の発生機構

深田工業株式会社顧問 松原美之(y-matsubara@fukada-kogyo.co.jp)

講義の構成

1. はじめに
2. 静電気による火災の発生状況
3. いくつかの火災事例の分析
4. 静電気現象の基礎
5. 静電気火災を防止する対策

1 はじめに

静電気を原因とする火災爆発事故として、世界的に、最も深く検証のための研究が実施されたと思われる事例は、1980年12月に連続して3件発生した原油輸送用スーパータンカーの爆発沈没事故¹⁾で、この事故の原因は、図1に示すように可燃性蒸気が残留している貯槽を高圧海水ジェットで洗浄することによって発生する水滴の静電気帯電であったとされている^{2,3)}。

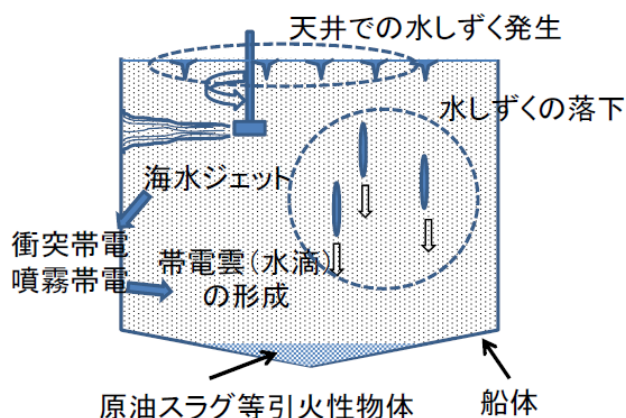


図1 タンカー洗浄時の帯電のイメージ図

我が国で発生した静電気を原因とする火災で忘れることが出来ない事例には、2003年に北海道苫小牧市で地震後に発生したナフサタンク全面火災がある。この火災では、消火泡薬剤から生成された水滴の沈降する際に発生した静電気帯電が原因として疑われている⁴⁾。

この両者に共通しているのは、危険物である石油（前者の場合はナフサ、後者の場合は原油）の貯蔵取扱いに関して発生した火災であることと、水の帯電が着火原因となったことである。事故が発生した後でふり返ってみれば、静電気が事故原因となったことが理解

できるが、発生する前にその危険に気づかなかったという点でも共通している。

爆発火災の原因としての静電気の危険性を理解するためには、実際に発生している事例を眺め、どのような場所で、どのような条件の時に爆発火災に至っているかを理解することがまず必要で、事例の分析からスタートすることとなる。しかし、実際の事例を分析する場合に注意を要する点がある。小規模な爆発火災は件数が多く、統計的な傾向を求めるのに有益であるが、それぞれの事例についての事故発生に至る経緯が詳細な分析・検証を受けていないのが一般的であるのに対し、大規模な爆発火災では事故の発生経緯等についてはより詳細な情報が得られるものの、件数の少なさや事例の特殊性などの為に一般的な傾向の抽出には適さないという違いが存在することである。従って、実際の事例に学ぶときには、それぞれの事例の持つ特性に留意し、事例からのみでは不足する情報については、静電気現象の基礎的な特徴を加味した考察を加えることが不可欠である。

本講義では、事例の分析を行たうえで、静電気の基礎及び対策について概観する。

2 静電気による火災の発生状況

- ◇ 危険物の取扱い場所では静電気は着火源として大きな比率(10%以上)を占める。
- ◇ 移替え・噴出・仕込等の作業中に発生している
- ◇ 「絶縁物が帯電」し、「非接地導体から放電」して、「可燃性蒸気に着火」することが多い。
- ◇ 冬だけが危険とは限らない。

1. 1 静電気による火災が発生する危険性が高い場所

全火災、工場・作業場、危険物施設の3種類の火災発生場所区分ごとの「静電気が原因とされる火災」が占める割合を比較した結果を図2に示す。静電気を原因とする火災の発生危険は危険物の存在と不可分で、可燃性蒸気が存在する工程では静電気危険は無視できない着火原因となってくる。

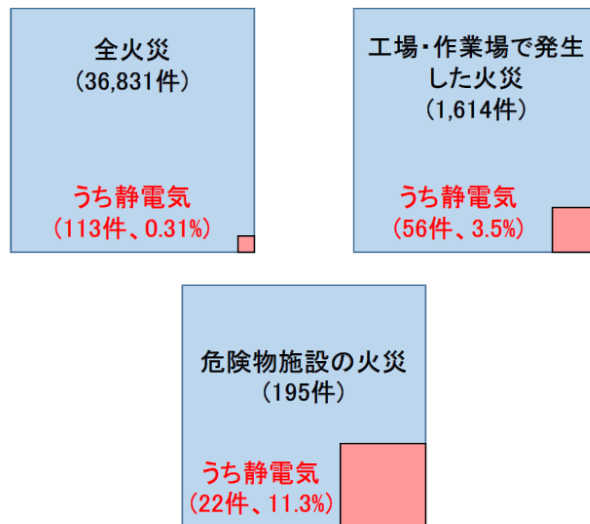


図 2 火災発生場所ごとの「静電気が原因とされる火災」が占める割合(2016 年)

1. 2 静電気による火災が発生する危険性が高い工程・作業

危険物施設で発生した静電気が原因となったと考えられる火災について、火災発生時に行われていた工程・作業に着目して整理すると、静電気による火災危険性が高い作業として「移し替え」、「噴出」、「仕込み」、「吹き付け」、「攪拌」、「洗浄」が浮かび上がる。「検尺・サンプリング」は件数的には少ないものの、出火時には大量の可燃性物質が貯蔵されたタンクなどでの火災となるので、発生した場合の被害拡大の危険性は大きいと考えられる。

表 1 出火時の作業別火災発生状況(1973～1982)

移し替え	82
噴出	16
仕込み	11
吹き付け	9
攪拌	5
洗浄	4
検尺・サンプリング	1
不明・その他	13

1. 3 静電気による危険物施設での火災での帯電物

静電気が着火源となる殆どの火災では、帯電する絶縁物と容易に着火する可燃性蒸気の組み合わせが存在する。

危険物施設で発生した静電気が原因とされる32件の火災について、着火物、作業の概要、帯電に関係した物質を整理したものが表1である。この表は、「水素などの3件を除く29件の事例で着火物が引火性の液体であったこと」、「帯電に関係した物質が粉体を含む絶縁性固体、人体、あるいは絶縁性液体であったこと」を示している。すなわち、危険物施設で静電気を原因として発生する火災における、着火質と着火原因(帯電する物質)の組み合わせとしては「引火性液体と人体」、「引火性液体と絶縁性固体」の発生率が高く、「引火性液体のみ(帯電物も引火性液体であるもの)」がそれに次ぐことがわかる。

表 2 危険物施設で発生した静電気による火災の着火物、作業概要、帯電物の概要

着火物	作業などの概要	帯電物
トルエン ガソリン ヘキサン ヘプタン トルエン トルエン・キシレン DIP(4石) インキ(1石) 離型剤 ペンタン ガソリン 水素 ガソリン ジオキサン キシレン 4石とメタノール ガソリン メタノール トルエン 炭油 ベンゼン 高圧ガス インキ(1石) トルエン トルエン・キシレン ガソリン 酢酸エチル 酢酸エチル ガソリン・灯油	遠心濾過・取り出し中 タンクへの注油中に漏洩 塗布 薬剤乾燥 容器への充填中 攪拌槽の洗浄作業 異常圧による液噴出 樹脂コーティング ウレタンフォームガス抜き 樹脂の押し出し工程 ガソリン飛散で避難中 亀裂よりの噴出 金属漏斗でポリ容器へ 攪拌槽よりのサンプリング 反応槽への投入粉体投入 車載金属容器への注油 漏れ噴出 反応異常による噴出 袋よりの粉体の投入 コーティングローラの洗浄 給油中 袋入り苛性ソーダ投入 ゴムの攪拌機への投入 異常圧による液噴出 袋よりの粉体の投入 スチーム放出 印刷フィルム送り 地下タンクへの注油 反応槽へのゴム投入 タンク計量作業 金属製容器への小分け ステンレス容器に移換中 タンクローリーへの注油	ポリエチレン袋 人体 ローラ 投入中間製品 トルエン 噴出液 コーティング紙 ウレタンフォーム 樹脂 車・人体 噴出水素 金属漏斗 攪拌スラリー ポリ袋 給油ノズル 噴出油蒸気 噴出粉体 紙基材 袋 投入ゴム 噴出炭油 投入粉体 スチーム 塩ビフィルム トルエン 攪拌物 人体 酢酸エチル ステンレス容器 灯油

表中、消防法の危険物品名の第1石油類を「1石」、第3石油類を「3石」、第4石油類を「4石」とそれぞれ略記した。

1. 3 静電気による火災の発生危険の高い季節

日常生活での静電気による不快感は冬場に多く感じられることから、静電気による火災等事故についても冬にその発生が多いと考えられがちである。しかし、液体の帯電現象は固体表面の電気抵抗が関係した現象とは異なり必ずしも冬に発生が多くなるとは言えず、また、可燃性液体の着火に関しては、その液体の引火点により、どの季節に着火し易いかが異なってくる。少し古いデータであるが、図3に1973年から1982年の10年間の危険物施設における火災等事故を発生月別に集計し、月ごとの総火災件数、静電気による火災件数とその比率を示す。

この図から危険物施設の総火災件数は、7・8月が多くなっており、静電気による火災件数は4月及び9月が多くなっているものの、全体的にみた場合には季節による違いはあまり現われていない。また、各月毎の総火災件数に占める割合を見ると、この数字も、冬場に静

電気による火災の割合が特に多くなるとは言えない。

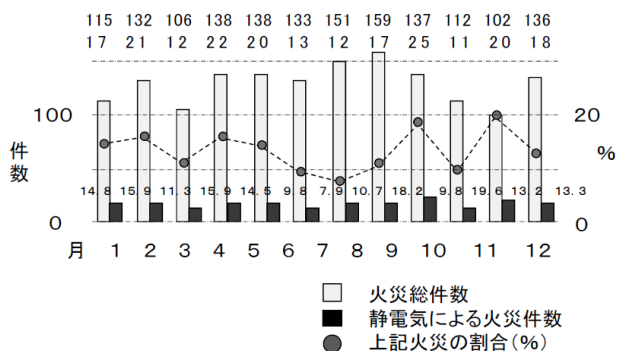


図3 危険物施設における月別の静電気による火災件数と割合(%) (1973年～1982年の10年間)

静電気の発生メカニズム、漏洩メカニズムの中には、石油類の流動帯電のように雰囲気湿度に影響されない現象があること、製造工程では湿度制御が行われていることなど、種々の理由が考えられるが、静電気対策は冬にだけ考えれば良いというわけでは無いことに留意する必要がある。

3 いくつかの火災事例の分析

3.1 屋内貯蔵所における洗浄作業中の出火⁵⁾

低引火点の溶剤をプラスチック容器に注ぎ、容器内の金属製品を洗浄する作業中に火災が発生した。洗浄作業は、プラスチック容器の底部に洗浄対象の金属製品を置き、上方より金属製品が浸る程度に溶剤を注ぎ入れた後、手で製品をつかんで動かしたり、プラスチック容器を両手で持って揺するというものであった。洗浄作業に先立ち、プラスチック容器内面をウェスで拭き清掃する。また、溶剤はノズル付の金属容器に入っていたものを自然流下でプラスチック容器に注ぎ込むというものであった。

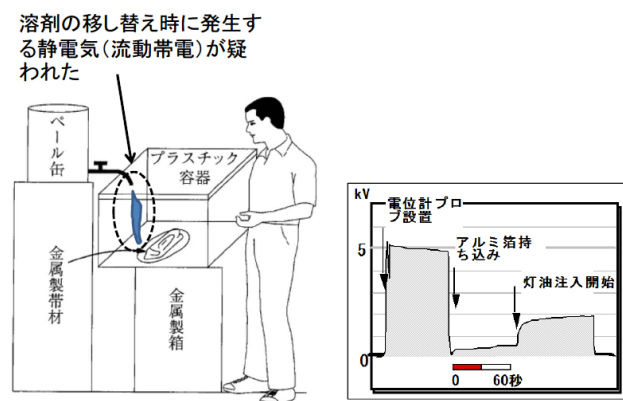


図5 出火時の作業状況と実験で観測された電位変化⁵⁾

他に着火源が見あたらないことから静電気放電が原因でないかとの疑いが持たれた。そこで、洗浄作業中に発生する静電気帯電を計測する実験を実施した。その結果、帯電したプラスチック容器内に置かれた金属の電位は、いったん接地された時点では零となるが、非接地状態のまま石油を注ぐことにより、再び電位が上昇する現象が見いだされた。この現象により観測される金属の電位は、当初に帯電した固体絶縁物が有していた電位の30～83%に達し、石油の可燃性蒸気への着火源となる危険性があることが明らかにされた^{5, 6)}。

後でも再度説明するように、非接地状態にある金属と帯電した絶縁物の組み合わせが静電気の着火危険の面からは最も危険であることは従来より広く受け入れられているが、一旦は接地され電位が零となった金属が、溶剤に浸されることにより再び高電位になる場合があることには注意を要する。この現象は、「帯電しやすい」プラスチックと「放電危険性の高い」金属物体、さらに「ある程度の導電性を有する」溶剤という組み合わせのもとで、静電誘導が原因となって溶剤が電荷授受の媒体として働くことにより発生すると考えられ、類似の作業形態のもとで、静電気対策上注意を払う必要がある現象である。着火原因となった静電気現象を整理すると以下の様になる。

- ✓ 「プラスチック容器が帯電」
- ✓ 「金属部品から放電」
- ✓ 「洗浄に用いたホワイトガソリンに引火」

3.2 ポリエチレン缶による移替え作業中の発火事故



図6 ポリエチレン缶による移し替え作業中の火災

- ✓ 「ポリエチレン缶が帯電」
- ✓ 「金属ローから放電」
- ✓ 「ガソリンに引火」

3.3 ベンゼンタンカーへの積み込み中の爆発事故

バースにて陸上の製油所タンクからベンゼンを積み

込み中の内航タンカー(約 500 トン)の左舷一番タンクが突然爆発炎上し、他タンクにも延焼し、同船が大破した。本タンカー油面計が絶縁状態の金属製フロートを用いた特殊なタイプであったことから、帯電したベンゼンによって電圧が上昇したフロートからの火花放電が着火原因ではないかと疑われた。

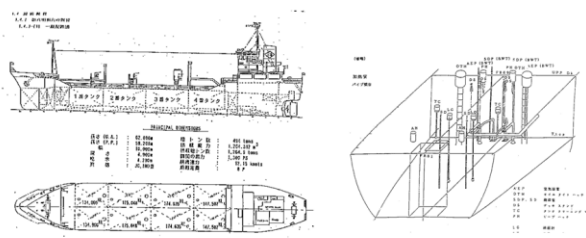


図 7 発災タンカーとそのタンク室

火災原因を調査するにあたっては、まず発災時のベンゼン流速を元に経験式を用いて配管中での流動帯電量を計算し、その帯電量に基づいて、タンク内部の油の電荷密度を計算した。タンク内の電荷密度とタンクの形状が与えられた時に、タンク内部に形成される静電場をコンピュータモデルによって計算し、フロートの電圧を求めた。その結果、の金属製フロートの電位が着火原因とはなるほどには上昇しないことが明らかとなり、金属フロートからの静電気放電は着火原因として否定された。

3. 4 その他の事例

- 粉体材料の容器への投入
- 高圧水による洗浄
- 二酸化炭素消火器の使用
- セルフガソリンスタンドでの給油時の火災 (米国)⁸⁾

4 静電気の現象の基礎

- ◇ 静電気は種々の工程で発生する
- ◇ 電気抵抗が大きなほど、静電気がたまりやすい。
- ◇ 金属(導体)からの放電が着火危険性大
- ◇ 誘導帯電が多く事故の原因として関与

静電気と火災に関連して、静電気災害を専門としない方々への講演時、冒頭で「水は帯電しますか？」という質問をすることになっている。自然界の大規模な静電気現象である、雷が、水・氷の帯電によって引き起こされている例を見るまでもなく水は静電気を発生しやすい物質である。

しかし、通常条件ではその導電性のせいで発生した電荷が早期に漏洩し、蓄積されないため、水は帯電しないという誤解を与えている。静電気が着火原因となる過程を図8に模式的に示した。静電気の発生と漏洩、電荷蓄積、電位の上昇、放電の各過程の総体として着火危険が発生する。

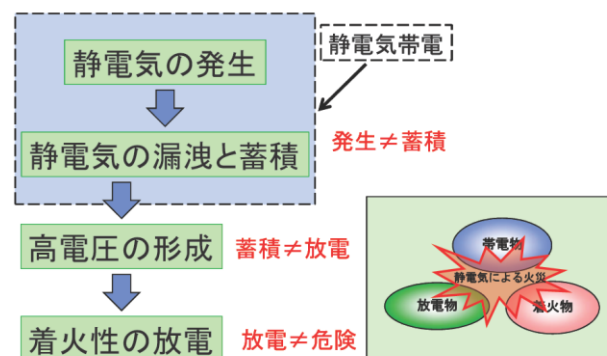


図 8 静電気が着火原因となる過程

本稿冒頭で紹介した2つの重大な火災は、静電気の発生にも、着火性の放電の発生にも、いずれも水が関与したと考えられている。

北海道苫小牧市のナフサタンク全面火災では、消火泡が還元した水がナフサ中を沈降する際に発生した静電荷が、絶縁物であるナフサに蓄積され、ナフサ油面の電位を上昇させ、油面上に浮遊した、主成分が水で導体である泡が静電誘導で帯電、高電位となり放電し、ナフサを着火した可能性があるとされている。

スーパータンカーの爆発沈没事故では、タンク内洗浄の為に高圧で吹き付けた海水が、噴出により帯電しタンク内の空間に高電界が形成され、その高電界中を天井からしたたり落ちた棒状の水滴通過する際に火花放電が、水滴とタンク内金属構造物との間で発生し、原油蒸気に着火したとされている。

静電気発生と着火性の放電発生のいずれにも、水が関与しているという、共通点をもった火災事例である。

静電気の発生と漏えい、電荷蓄積、高電圧の発生と着火性の放電等の、火災原因となる静電気現象のそれぞれを正しく理解することが不可欠であることが痛感される。

図9に、静電気帯電を整理して掲げたが、この図で分かるように、種々の過程で静電気が発生する。

	固体の帯電	液体の帯電
接触分離に起因するもの	・摩擦帯電 ・剥離帯電 ・転がり帯電	・流動帯電 ・沈降帯電 ・気泡帯電 ・攪拌帯電
電荷分布の揺らぎに起因するもの	・破碎帯電 ・凍結帯電	・分裂帯電 ・飛沫帯電 ・噴出(噴霧)帯電
静電誘導等その他に起因するもの	・誘導帯電	・激突帯電 ・誘導帯電

図9 静電気発生過程

4. 1 帯電するとは

すべての物質は原子という微小な粒子(直径が10-10m[百億分の1メートル]程度の大きさ)が集まって出来ています。原子は、正の電荷を持った重い原子核を中心にして、その周囲に負の電荷を持った電子が分布するという構造をしている。このように、微小な原子の世界に着目するとすべての物質は正負両方の電荷を持っている。ところが、物質中に存在する正の電荷の量と負の電荷の総和は通常の状態では等しくなっているため、正負の電荷がそれぞれを打ち消し、全体としては電荷が存在しないように見える。この正の電荷と負の電荷のバランスがなんらかの理由でくずれ、いずれか一方が多い状態になると、その物質は全体として電荷を持っている状態になり、これが帯電した状態である(図10)。

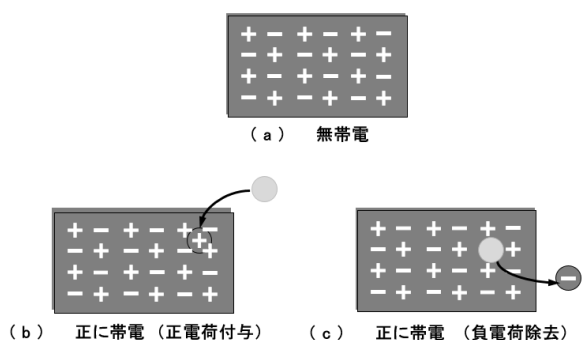


図10 電荷のバランスと帯電状態の関係

物質が帯電する時には、電荷が新たに発生するのではなく、物質中に最初から存在していた電荷うちのいくつかは他の物質に移動するなどして、正負の電荷のバランスがくずれ、多い方の電荷を帯びていると見え

るようになる。

4. 2 静電気の単位

静電気の基本的な単位をあげると、電荷の単位であるクーロン(表記法: C、以下の括弧内同様。)、電圧の単位であるボルト(V)、静電容量の単位であるファラッド(F)、電気抵抗の単位であるオーム(Ω)、電流の単位であるアンペア(A)、エネルギーの単位であるジュール(J)がある。これらを見ると電荷の単位であるクーロンをのぞき、いずれも電気の領域で一般的に使用されている単位です。このことが、静電気と一般の電気との混同が生じるひとつの大きな原因となる。静電気と一般の電気の際を、極端に極端に単純化して表現すると、静電気=「100V は安全、1A は巨大、100M Ω は導通」、通常の電気=「100V は危険、1A は通常、100 M Ω は絶縁」ということになる。

4. 3 放電の危険性

同じ電圧に帯電している物体であっても、その物体が絶縁物であるか導体であるかで、放電した時の危険性が大きく異なってくる。帯電物体がプラスティックのような絶縁物の場合、蓄積エネルギーは、瞬間的には解放されず、図11に模式的に示すように放電で移動する電荷も放電する電極近傍のみに限定されるため、危険性の低い放電となる。

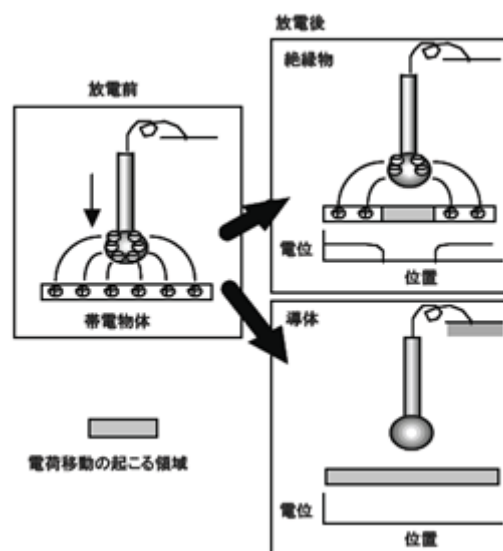


図11 絶縁物からの放電と金属(導体)からの放電の比較

帯電した絶縁物の近傍に、非接地状態の導体が配置される時、図12に示すように、静電誘導により導体上に電荷が現れ、導体の電位が上昇することになるが、こうした条件で導体と接地導体との間で発生する放電は、導体からの放電となるため危険性が高いものとな

る。静電気による火災を防止するために導体の接地を求めるのは、導体からの危険性の高い放電を防止することが目的である。

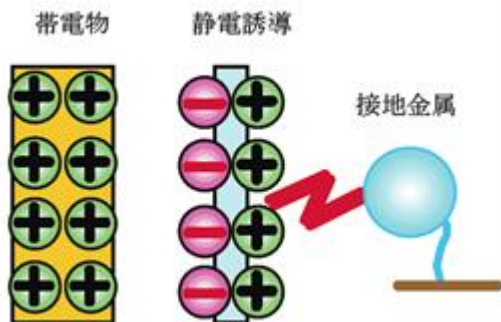


図12 静電誘導による帯電

5 静電気火災の対策

事故の発生は、発災事業所などで適切な静電気火災の防止対策がとられていなかったことに起因することが多い。静電気の対策は、概ね以下のように整理できる。

- ◇ 静電気発生抑制
- ◇ 人体帯電の防止
- ◇ 導電性向上による帯電防止
- ◇ 除電器の使用による積極的除電
- ◇ 電荷緩和までの静置時間の確保
- ◇ 導体の接地・ボンディング
- ◇ 静電遮蔽

制電遮蔽は接地された金属で空間を囲み、検尺棒など放電危険性のある物体からの放電を防止する方法である(図13)。

静電気対策では接地が重要だと認識されている。しかし、接地の効果は「静電気を逃がすため」であると誤解すると、接地により静電気の危険性を除去できないばかりか、むしろ、危険性を増大させることになる場合があるので注意が必要である。接地の効果は、高電圧の発生を防止し、導体からの放電を防止するもので、帯電が抑制される(電荷の蓄積がなくなる)ものではない。図14は、粉体取扱い時の静電気危険性が、誤った接地の為に増大する例を示している。絶縁性の高い粉体を取り扱う場合、粉体が帯電し、着火原因となることが知られており、特に、粉体を投入する工程で危険性が高い。その対策としては、粉体を格納する容器(図中のフレコンパック)に導電性を持たせ、接地を取ることが求められている。接地することで静電気が逃げ、安全な状態になったと誤解し、接地線を外した後、粉

体を投入する場合に発生する現象を示している。

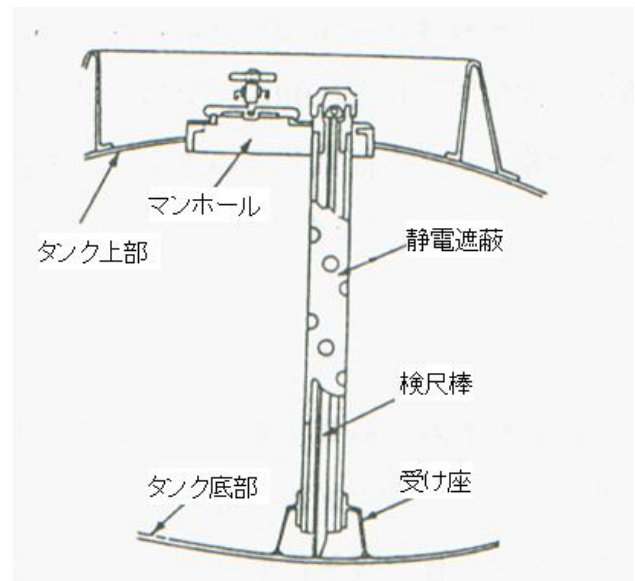


図13 静電気対策(制電遮蔽)の例【ローリーの計量時の静電気災害を防止するための装置】

導電性フレコンパックを接地することで、フレコンパック(及び付属している金属部品など)には、内部の粉体が保有するのと反対符号で同量の電荷が、大地から供給され、その結果、フレコンパックの電位が零になる。ここで留意しなければならないのは、零になるのは導体の電位であって、帯電量が零になるのではない点である。内部の粉体は絶縁性が高いため、収納容器のフレコンパックを接地しても静電気が逃げることは無く、逆にフレコンパック(及び付属の金属部品)が、静電誘導で帯電することになる。しかし、静電気測定器等でフレコンパックの電圧を測定すると、内部の粉体の電荷と、フレコンパックに誘導された電荷が相互にキャンセルして、電位ゼロ(あるいは、極めて低い電位)のみが現れる。

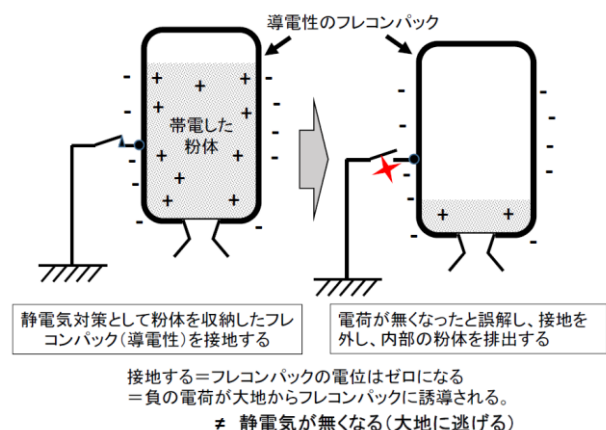


図 14 誤った接地が危険性を増大させる例

この状態で、接地線を外し、粉体を放出すると、フレコンパックは、粉体の帯電と逆の極性で高電位の状態になってしまう。高電位な導体が出現し、静電気的には極めて危険な状態となり、可燃性の粉じんや溶剤などが近くに存在する場合、フレコンパックからの放電で着火する危険性がある。

静電気の帯電が火災原因となる場合、帯電するのは絶縁物が多く、絶縁物は接地することで電荷を逃がすことは出来ない。接地の効果・目的は、導体が高い電圧になることを防止することであり、帯電した電荷を逃がすことでは無いことを理解することが重要である。接地と似た対策にボンディング(導体と導体を電氣的に接続する)があるが、ボンディングについても、その目的は、導体と導体の間の電位差の発生を防止することであり、静電気を逃がすことではない。

使われる単位や公式、測定装置などが一般の電気と類似していることから、一般の電気との類推から静電気に関して持たれる誤解のひとつには、電圧で帯電量の多寡を評価するというものがある。ところが、一般の電気と異なり静電気では電圧は一定に保たれることが少なく、帯電した電荷の量で議論する必要があることが多い。例えば、人体が帯電した場合、片足を持ちあげると、その動作だけで電圧が急上昇するのは、帯電電荷量は一定に保たれているが、人体の静電容量が小さくなるため、静電容量に反比例した電圧の上昇が生じるためである。

静電気現象はきわめて小さな電荷量および帯電容量、並びにきわめて大きな電気抵抗の組合せで現われてくる現象であるといえる。このことが、絶縁性の高い条件のもとでのみ静電気が問題になる理由であること、一般の電気とは異なる現象が存在することを、この静電気安全コースを受講された機会に頭に留め置いていただきたい。

参考文献

- 1) 森田豊: タンク清掃作業中の事故防止 その現状と動向, pp.6-13, 海と安全, Vol 5, No.7, 1971
- 2) 静電気学会編, 静電気ハンドブック, オーム社 (1981), pp.774-775, 1981
- 3) A.W.Bright, J.F.Hughes, Research On Electrostatic Hazards Associated With Tank Washing In Very Large Crude Carriers (Supertankers), J. Electrostatics, Vol 1, pp.37- 46, 1975
- 4) 危険物保安室, 特殊災害室, 防火安全室, 消防研究所: 出光興産(株)北海道製油所屋外タンク貯蔵所火災の火災原因調査結果, 消防の動き, 401 号, pp.10-11, 2004.
- 5) 東京消防庁, 新火災調査教本第 3 巻, pp.43-48, 東京防災救急協会, 2012
- 6) 松原美之: 石油に浸された金属の静電誘導による帯電, pp.149-152, 静電気学会講演論文集, 1997
- 7) 松原美之: 静電気による災害, 2018 年度静電気学会講習会資料, 静電気学会, 2018
- 8) 例えば,
<https://www.youtube.com/watch?v=deT4jsJnXNg>
- 9) 総務省消防庁危険物保安室, 消防庁セルフスタンドにおける給油時の安全確保に関する検討会報告書, 総務省消防庁, 2007 年

資料作成のもととなった情報が掲載されている文献

- ◇ 消防庁: 火災年報
- ◇ 消防庁: 危険物製造所等の事故事例集
- ◇ 静電気学会液体帯電現象研究委員会: 絶縁液体の帯電現象、静電気学会技術報告第2号(1990)
- ◇ 静電気学会編: 新版静電気ハンドブック(オーム社)
- ◇ 高分子学会編: 静電気ハンドブック(地人書館)
- ◇ 静電気学会編: コンパクト版静電気ハンドブック
- ◇ 松原美之: 静電気学会誌 12(1988)292
- ◇ 労働安全衛生総合研究所技術指針、静電気安全