

第10章 リスク低減策

10.1 静電気対策の5つの原則

静電気対策は次の5つの原則に基づいた技術である。これのほかにに何も無いことを強調したい。

- (1) すべての導体の接地・ボンディング
- (2) 人体の接地：靴と床による人体の接地
- (3) 導電材料の利用およびその接地による帯電防止
- (4) 帯電の抑制：低速処理
- (5) 可燃性雰囲気防止

個別の詳細な静電気対策は11-13章および静電気安全指針2007を参照されたい。

まずは、静電気対策(1)-(4)を実施して着火性放電のリスクを低減する。適切にこれらの静電気対策が実施されれば十分にリスクを低減できる。

やむを得ず、これらの静電気対策が困難な場合は(5)の可燃性雰囲気防止を実施する。まずは、通風・換気で可燃性雰囲気を形成しないようにする。通風・換気が困難な場合はイナートにより可燃性雰囲気の形成を防止して着火リスクを低減する。

10.2 安全管理と教育

的確に組織化された安全管理体制のもとに実施されるリスクアセスメントをベースとしてリスク低減策（静電気対策）がなされなければならない。また、実施されたリスク低減策（静電気対策）はこの組織化された安全管理体制のもとに管理されなければならない。

組織化された安全管理には、的確な安全教育とリスクの伝達（リスクコミュニケーション）が含まれる。このとき、何を防止するためにどのように対策しているのか、工程・作業にはどのようなハザードとリスクがあるのかといった、リスク低減策（静電気対策）の根拠・意味と作業に伴うリスクを作業者に教育・周知することが必要である。

第11章 固体のリスクアセスメント

11.1 導電性・電荷消散性固体

[ハザード] 導電性・電荷消散性固体、いわゆる、導体のハザードは、これが電氣的に絶縁されて起こる火花放電による着火である。

- (1) 導電性・電荷消散性物体が電氣的に絶縁されると、静電誘導、荷電粒子の蓄積または物体の接触分離（電荷分離）により高い電位を持ち、近傍の接地導体と火花放電が発生する。
- (2) 絶縁物に付随する導体・電荷消散性物体は絶縁導体となる。
- (3) 断線やボンディング線の外れなどの接地不良は火花放電ハザードとなる。接地はメンテナンスが重要である。
- (4) 静電気事事故例から着火原因の70%強は絶縁導体からの火花放電である。
- (5) 可搬物体を接地・ボンディングしない事故（付録C）が多い。

[リスク見積] 導電性・電荷消散性固体は、基本的に接地・ボンディングされなければならない。接地・ボンディングにより火花放電を防止することができる。したがって、ここで示すリスク見積は、事故原因究明などに適用されたい。

- (1) 導電性・電荷消散性固体が絶縁されても、近くに高い電位の物体がないかぎり静電誘導リスクがない。
- (2) 導電性・電荷消散性固体が絶縁されても、放電ギャップを形成するための導体が近くにかぎり火花放電は生起しない。
- (3) 導電性・電荷消散性固体からの火花放電のエネルギー W は、その静電容量 C と電位 V から $W = 1/2CV^2$ から計算できる。詳細は2.4.1を参照されたい。
- (4) 接地不良等により漏洩抵抗 R が高くなったときに起きる火花放電のリスクは式(2.4)と式(2.11)に基づいて見積もることができる。
- (5) この放電エネルギーが可燃性雰囲気的最小着火エネルギーを超えると着火リスクが高くなる。

[リスク低減策] リスク低減策には導体の接地・ボンディングのみしかないので、導体の接地・ボンディングが確実になされているか確認する。

- (1) 導電性・電荷消散性物体の接地・ボンディング
- (2) 必要な漏洩抵抗(2.4.1.3)が確保されているか確認する。

11.1.1 接地が必要な導電性・電荷消散性物体

すべての導体（導電性・電荷消散性物体）に接地が必要というわけではない。火花放電のエネルギーは導体の静電容量に依存するので、可燃性雰囲気中の最小着火エネルギーによって、小さな静電容量の導体の接地は必ずしも必要でなくなる。

帯電を著しく促進する要因、たとえば、静電噴霧・塗装のように大きく帯電する要素がないかぎり、火花放電の防止のための導体の接地は可燃性雰囲気と静電容量によってクラス分けできる。危険場所で絶縁導体の許容できる最大静電容量は以下のとおりである。

(1) IIC, Zone 0: 0 pF

(a) Zone 0 IIC の危険場所では、すべての導体から着火性火花放電のハザードがある。

(2) IIC, Zone 1, 2: 3 pF

(a) IIC の可燃性雰囲気中で Zone 1, 2 となる危険場所では、導体の電位が危険な帯電レベルにならないかぎり、静電容量が 3 pF 以下の絶縁導体から着火性火花放電が生成するリスクは低い。

(3) IIA, IIB, Zone 0: 3 pF

(a) IIA または IIB の可燃性雰囲気中で Zone 1, 2 となる危険場所では導体の電位が危険な帯電レベルにならないかぎり、静電容量が 3 pF 以下の絶縁導体から着火性火花放電が生成するリスクは低い。

(4) IIA, IIB, Zone 1, 2: 10 pF

(a) IIA または IIB の可燃性雰囲気中で Zone 1, 2 となる危険場所では、導体の電位が危険な帯電レベルとなる工程・作業がないかぎり静電容量が 10 pF までの絶縁導体から着火性火花放電が生成するリスクは低い。

(5) Zone 20, 21, 22（激しく帯電する過程がない、または、最小着火エネルギーが 10 mJ 以上の粉体）： 10 pF

(a) Zone 20, 21 および 22 では、激しく帯電する過程がない、または、最小着火エネルギーが 10 mJ 以上の粉体を取り扱う作業・工程において、静電容量が 10 pF 以下の絶縁導体から着火性火花放電が生成するリスクは低い。

(6) 適用上の注意

(a) 静電容量は周辺の接地および導体との位置関係に依存するので、固定された導体に適用されたい。

(b) 静電容量は接地導体に近づくとき高くなるので、導体の位置によっては上記の静電容量の条件を満たさなくなることがある。したがって、可搬の導体や作業員が取り扱う導体は、上記に関係なく接地・ボンディングが必要である。

11.2 絶縁性固体

11.2.1 絶縁性固体のハザード

絶縁性物体のハザードは帯電して起こるブラシ放電および沿面放電による着火と静電誘導の原因となることである。

- (1) 絶縁性固体は配管、容器、シート、コート、袋、ライナーなどに用いられ、電荷緩和が著しく小さいため電荷を蓄積しやすい。
- (2) 絶縁性固体のハザードは帯電して起こるブラシ放電および沿面放電である。放電により着火ハザードとなる。
- (3) 絶縁性固体の帯電は近傍に絶縁導体があると静電誘導ハザードを生起させる。
- (4) 層状の絶縁性固体（シートやコート）の表裏に逆極性の高密度の電荷が帯電すると沿面放電のハザードとなる。
 - (a) 通常、液体を取り扱う工程では沿面放電の生起は困難¹であるが、空気輸送など帯電量が比較的に大きい粉体の工程に多い。

11.3 接地導体表面の絶縁性コート

接地導体表面の絶縁層および絶縁性コートはブラシ放電または沿面放電のハザードがある。

11.3.1 ブラシ放電

実践的な経験から、次の条件のすべてが満たされるとき、接地導体表面の絶縁層および絶縁性コートから着火性のブラシ放電は生起しにくいので、特別な対策は不要となる。

- (1) 連続充てん・排出など高帯電となる工程・作業ではない。
- (2) 絶縁層はテフロンなどのフッ素樹脂ではない（ポリエチレンなど）。
- (3) IIA および IIB の可燃性雰囲気では絶縁層の厚さが 2 mm 以下である。IIC の可燃性雰囲気では 0.2 mm 以下である。粉じん雰囲気では厚さの制限はない。ただし、条件 (1) を満たさないような激しく帯電する過程があると沿面放電ハザードとなる可能性がある。

11.3.2 沿面放電

絶縁性シートおよび接地導体表面の絶縁性コートなどの絶縁層で連続的に高く帯電する過程があると沿面放電のハザードとなる。帯電が比較的に高くなる粉体（高抵抗率の粉体）の工程に起こりやすい放電である。このような絶縁層で沿面放電を防止するためには次の少なくともひとつの対策がなされているか確認する。

¹ただし、内面絶縁性コートの二相液体（スラリーなど）の攪拌など強く帯電する限られた工程を除く。この場合、着火性沿面放電は、電界が高くなる液体、コート、気相の3つが交わる境界のコート面で起こることが多い。

- (1) 薄いほど絶縁層の表裏に逆極性の電荷が帯電しやすいので（表裏の電荷を打ち消しやすい）、沿面放電は薄い絶縁層ほど起きやすい。絶縁層の厚さを厚くする。一般に、10 mm 以上では起きない。ただし、ブラシ放電のハザードが生起するので、粉じんの可燃性雰囲気のみに対応できる対策である。
- (2) 絶縁層の表面抵抗率または体積抵抗率を電荷消散性のレベルまで下げて接地する。このレベルは漏洩抵抗が $10^{11} \Omega$ 以下となるまでに下げると十分である。
- (3) 絶縁層の絶縁破壊電圧が 4 kV 以下となる材料を用いる。絶縁層が織物の場合は破壊電圧を 6 kV 以下とする。
- (4) 粉体の空気輸送など絶縁層に高い帯電電位が誘引される作業・工程の方法を避ける。

11.4 絶縁物への導電性・電荷消散性コート

[ハザード] 絶縁物への導電性・電荷消散性コートは次のようなハザードが付加されるので、絶縁物よりも使用を制限されるべきである。

- (1) 接地されないと絶縁導体となり火花放電のハザードとなる。
- (2) 均一にコートされなく、孤立したコートは火花放電のハザードとなる。
- (3) シートまたは袋状の絶縁物に片面だけコートすると沿面放電のハザードとなる。

[確認事項] 次の絶縁性物体の使用制限の事項を確認して、絶縁性物体の使用のリスクを見積もる。

- (1) 危険場所では、工程・作業により、以下に示すように絶縁物表面が危険な帯電レベルにならないときのみを使用すべきである。
 - (a) 帯電によってその可燃性雰囲気着火させるブラシ放電および沿面放電が生起しない帯電レベル
 - (b) 粉じんのみの可燃性雰囲気では、ブラシ放電のハザードを除外できるので、着火性の沿面放電が生起しない帯電レベル
 - (c) 絶縁物表面の帯電の静電誘導によって絶縁導体から火花放電が着火性とならない帯電レベル。あるいは、すべての導体の接地が保証できるとき

さらに、次の絶縁性固体の取扱いにおける一般的な静電気対策がなされているか確認する。

- (2) 絶縁物に付随するまたは周辺の導体の接地・ボンディング
- (3) 可能であれば材料の変更：絶縁性物体の排除（導電性材料・帯電防止剤の使用と接地）
- (4) 絶縁性物体の静電気対策（帯電性の低い材料の選定、加湿、除電器、静電遮へい（帯電面積の制限））

表 11.1: 着火性ブラシ放電を防止するための絶縁性物体面積・幅の制限 [21]

Zone	Group IIA		Group IIB		Group IIC	
	最大面積 cm ²	最大幅 cm	最大面積 cm ²	最大幅 cm	最大面積 cm ²	最大幅 cm
0	50	0.3	25	0.3	4	0.1
1	100	3.0	100	3.0	20	2.0
2	制限なし	制限なし	制限なし	制限なし	制限なし	制限なし

ただし、幅は細管やケーブルの被覆など狭い幅（直径）を持つ絶縁性物体に適用

11.5 絶縁性固体物体の静電気対策

11.5.1 電荷発生抑制

- (1) 帯電は絶縁性固体と他の物体（固体、液体および粉体）との接触・分離によって起こるので、以下に示す対策の他に、液体および粉体の静電気対策により帯電を極力抑制させる必要がある。
- (2) 絶縁性固体表面を連続的にこするなどの摩擦は避ける。

11.5.2 絶縁性物体の排除

- (1) 絶縁性物体は帯電によるブラシ放電および沿面放電のハザードがあるので、導電性または電荷消散性の材料に代えて極力使用は避けるべきである。
- (2) 代えた導電性・電荷消散性物体の接地・ボンディング
- (3) 導電性・電荷消散性材料の添加
 - (a) コート、床などにある対策で、添加濃度が十分であるか、漏洩抵抗で確認が必要である。
 - (b) 表面のみコートする場合は、汚れや清掃で効果が維持できなくなるので、メンテナンスによる管理が必要である。

11.5.3 面積・幅の制限による着火性ブラシ放電の防止

- (1) 可燃性ガス・蒸気およびハイブリッドの危険場所で絶縁性物体を使用する必要がある場合は、表 11.1 に示すようにその面積・幅を制限することによって、着火性ブラシ放電を防止して許容レベルまでリスクを低減できるので、これを確認する。
- (2) 絶縁性物体の表面が接地された金属メッシュ（または金属枠）が接触して囲まれている（静電遮へい）場合、表 11.1 の制限値を 4 倍にしてもよい。

11.5.4 静電遮へい

危険場所で絶縁性物体を使用する必要があるとき、そのハザードを静電遮へいによって抑制できる。

- (1) 静電遮へい（シールド）は静電気の帯電が危険となる絶縁性物体を接地した導体あるいは導電性材料で覆い、または区画化して静電気の危険性を抑制する方法である。帯電物体が接地導体で覆われるので、接地導体の外側では帯電電荷による影響がなくなり、静電気放電などの危険性を抑制できる。
- (2) 遮へい材料は金属板、金属細線または目が数 cm 角の金網等が望ましい。金属製または導電性のテープ、導電性のフィルムまたはシート、導電性繊維入りの布製品などでも良い。
- (3) 遮へいの方法
 - (a) 金属細線を使用する場合は、金属細線を数 cm の間隔で巻き付ける。
 - (b) 金属以外のものを使用する場合は、遮へい材の一部にこれと十分密着する金属を設け、それを確実に接地する。
 - (c) シートなどは片面のみの遮へいはしてはならない。反対面で沿面放電の原因となる。
 - (d) 導電性コートによるシールドは、部分的に絶縁された導体とならないように表面に均一にコートされていることを確認する。
 - (e) シールドの断線は絶縁導体となり、火花放電のハザードとなるので、接地に留意する。
 - (f) 金属細線の利用はコロナ放電による帯電および着火性放電の抑制効果もある

11.5.5 加湿

- (1) 絶縁物表面の抵抗は加湿（相対湿度 65%以上）により、電荷消散性のレベルまで低減できることがある。これに、接地までの電気伝導の経路が確保できると電荷の蓄積を抑制できる。
- (2) ガラスなど水分を吸着しやすいものには効果があるが、効果がない物質（たとえば、ポリテトラフルオロエチレン（テフロン）、ポリエチレンなど）もあるので注意する。
- (3) Zone 0 となる危険場所では、加湿のみで対策はしない。

11.5.6 除電

- (1) 空気を何らかの方法により電離させて、生成したイオンの電荷により帯電した絶縁性物体の電荷を中和して除電する方法である。巨視的に見れば、空気の導電率がイオンにより高くなり、これにより電荷緩和しているのと同じである。
- (2) 絶縁性物体の帯電を抑制する静電気対策のひとつであるが、危険場所では除電器のみでの静電気対策はしない。あくまでもほかの対策との併用が原則である。

[ハザード] 静電気対策である除電器も着火源となることがある。

- (1) 除電器の安全性を評価する実験 [11] で確かめられているように除電器が着火源になりうるので、危険場所で除電器を利用する場合は十分なリスクアセスメントが必要である。
- (2) 危険場所で除電器を用いる場合は、防爆型の除電器²を用いるか、通気・換気などにより可燃性雰囲気防止対策が必要である。

²現在のところ Zone 0, Zone 20, 21, 22 に適合した防爆型除電器はない。

- (3) 除電器の利用に当たっては、維持管理も含めて専門家のアドバイスを薦める。
- (a) 除電器はタイプおよび機種により性能が異なるので、対象の帯電物体に除電効果があるかの調査が必要である。
 - (b) 除電器の設置位置により、除電効果が異なるので、これに注意する。
 - (c) 沿面放電のハザードとなるので、薄いシート状の絶縁物（袋、シートなど）の除電に用いる場合は帯電している面を除電するようにする³。
 - (d) 除電器の設置位置の誤りや電極の汚れによるなどの除電効果の低下および異常放電による事故もある。

11.5.6.1 自己放電式コロナ除電器

- (1) 接地した尖った金属・細線（金属針、導電性細線（ファイバ・ブラシ）など）を配置して、コロナ放電を発生させて帯電物体の電荷を除電する方法である。
- (2) このコロナ放電は尖った金属・細線の近傍に空気を絶縁破壊させるほどに高い電界が帯電物体によって形成されているときにのみ起こる。したがって、この除電器は適用範囲が限られるので除電効果について調査する必要がある。

[ハザード] 自己放電式除電器が着火源となるリスクは極めて低いが、次のようなハザードがあるので、利用に際しては確認する。

- (1) 比較的太い金属はコロナ放電よりも着火性が高いブラシ放電となるので、これを避ける。また、このような金属の接地不良は火花放電の原因ともなる。
- (2) 沿面放電ハザードとなるので、シート状の帯電物体は帯電面を除電するようにする。
- (3) コロナ放電はIICの可燃性雰囲気着火する能力があるので、IICの可燃性雰囲気のZone 0、1の危険場所での使用は避ける。
- (4) 帯電物体の電位が負に数十kV程度以上では、コロナ放電が正極性コロナ放電となりブラシ放電が生成するおそれがあるので注意する。IIA、IIBの可燃性雰囲気でも、Zone 0の危険場所では、負に大きく帯電した物体の存在とこれによるブラシ放電の可能性を調査する。
- (5) 粉じんの危険場所では、ブラシ放電でも着火することがないので自己放電式除電器による着火リスクは十分に低い。

11.5.6.2 電圧印加式コロナ除電器

- (1) ひとつまたはいくつかの放電針（または細線）に5-10kV程度の直流（正・負の放電針）または交流電圧を印加して生成したコロナ放電を用いて除電する装置である。

³ 反対面からの除電は、この絶縁性物体が強く帯電しているとき、除電する面に反極性の電荷を蓄積させて沿面放電の生起条件を生起させるハザードとなる。ロール工程などに適用する場合は、ローラとの接触面で電荷分離で帯電するので、シートがローラと接触した面を除電するようにする。

[ハザード]

- (1) 過電流によるコロナ放電の異常が着火源となった事例がある。この異常放電を防止するために、放電回路に電流制限のための直列の高抵抗またはキャパシタ（交流の場合）が挿入されている除電器を用いる。
- (2) 正・負イオンのバランスの大きなずれは帯電の原因となるので注意する。
- (3) 除電器には高電圧を利用しているため、危険場所では防爆型の除電器を用いるか、通気・換気などにより可燃性雰囲気防止対策が必要である。
- (4) コロナ放電は IIC の可燃性雰囲気着火能力があるので、IIC, Zone 0, 1 の危険場所では電圧印加式コロナ除電器を使用しない。
- (5) Zone 0 の危険場所では除電器のみの対策をしない。

11.5.6.3 放射線式除電器

- (1) 放射性同位元素の電離作用によって除電のためのイオンを生成する除電器である。Polonium-210 の α 線を用いたものが主流である。

[ハザード]

- (1) この除電器はそれ自身が着火源になることはないが、放射線源を保有しているため法規に従い、取り扱いに注意する。
- (2) 除電能力はそれほど高くないので効果について調査が必要である。
- (3) Zone 0, 1 の危険場所では除電器のみで対策をしない。

11.5.6.4 軟 X 線式除電器

- (1) 軟 X 線は X 線 (0.001–10 nm の電磁波) のなかでも比較的長波長 (0.1–10 nm) で透過力の弱い X 線である。この軟 X 線の光子が分子（空気）と衝突したとき、分子から電子が飛び出し、分子は正イオンになる。この電子はほかの分子に付着して、負イオンを形成する。これらのイオンを用いて除電が行われる。

[ハザード]

- (1) 軟 X 線源を保有しているため法規に従い、取り扱いに注意する。
- (2) 除電能力はそれほど高くないので効果について調査が必要である。
- (3) 危険場所では使用を避けるか、防爆型の除電器を使用するなど、除電器が着火源とならないようにする。

11.6 プラスチック等の練り・剥離・研磨

[ハザード] 以下に示すような工程は静電気の発生が大きく、その防止が困難であるので、可燃性雰囲気形成されないような対策を実施する。

- (1) ゴム，プラスチックの練り
 - (a) 練りの作業よりも材料の投入・取り出し時に着火する事例が多い。原因は作業者または絶縁体からの火花放電である。
- (2) 成型品，フィルム等の剥離，成型品の型外し
- (3) 成型品，フィルム等の切断・研磨・から拭き
- (4) 製品が絶縁物であるときはブラシ放電のハザードがある。
- (5) 練りの作業では，高導電率の溶剤の使用または導電性粉体の添加などにより製品が導電性となるときは，火花放電ハザードとなる。

[リスク低減策]

- (1) すべての導体の接地・ボンディング
- (2) 靴と床により作業者人体の接地
- (3) Zone 0, 1 の危険場所は通風・換気により可燃性雰囲気が形成されないようにする。

11.7 ベルト

[ハザード] 粉体用コンベアやロール工程などのベルト駆動はエンドレスベルトとローラーまたはプリーアの接触面で連続的な電荷分離があるので帯電ハザードがある。帯電量はベルトやロールの速度，張り，接触面積の増加とともに大きくなる。

11.7.1 コンベアベルト

[リスク低減策] コンベアベルトには，次のような静電気対策があるので実施されているかを確認する。

- (1) 接地ローラーでの電荷緩和による帯電抑制：電荷消散性コンベアベルト⁴を使用する。
- (2) Zone 0; Zone 1(IIC) の危険場所：ベルト速度を 0.5 m/s 以下にする。
- (3) Zone 1(IIA, IIB); Zone 20; Zone 21 の危険場所：コンベアベルト速度は 5 m/s を超えないようにする。

⁴ベルトの両面で表面抵抗が $3 \times 10^8 \Omega$ 以下，異なる材料の層からなる場合は，ベルトの表裏の抵抗が $10^9 \Omega$ 以下であるとき電荷消散性コンベアベルトと定義する。

11.7.2 ベルト駆動

[リスク低減策] ベルト（フラットベルト、Vベルト）駆動には、次のような静電気対策があるので実施されているかを確認する。

- (1) 電荷消散性ベルト⁵の使用により帯電を抑制する。このとき、プーリーを通してベルトを接地する。
- (2) 両方のプーリーの接地が原則であるが、片方のプーリーが接地されていて、他方のプーリーをベルトによって接地する場合は、電荷消散性ベルトを用いる。
- (3) Zone 0; Zone 1 (IIC); Zone 20（粉じん最小着火エネルギー 10 mJ 以下）の危険場所：電荷消散性ベルトであっても、ベルト駆動は使用せず、ダイレクトドライブにする。
- (4) Zone 1 (IIA, IIB); Zone 20（粉じん最小着火エネルギー 10 mJ 超）；Zone 21 の危険場所
 - (a) ベルト速度は 30 m/s 以下にする。
 - (b) 電荷消散性ベルトを使用する。
 - (c) プーリーを通してベルトを接地する。

11.8 ロール工程

[リスク低減策] 紙、プラスチックフィルム、布等の巻取り・巻戻し、塗工、印刷等のロール工程においては、次によって帯電を抑制するとともに、可燃性雰囲気となるおそれがある場合は、通気・換気などによって可燃性雰囲気の形成を防止する対策を実施する。

- (1) ローラは金属、または導電性としてシャフトを介して接地する。
- (2) 可能であれば、静電気の発生しにくい材料を選定する。
- (3) 走行速度を低くし、急な速度変化を避ける。
- (4) ロール圧力および張力を低く、均一に保つ。
- (5) 加湿（効果は材料に依存する）、除電器の使用などにより帯電防止対策を実施する。除電器の位置はローラから 100–175 mm 離れた場所で、ロールから 6–25 mm 離して設置すると効果的である（図 11.1）。なお、危険場所で除電器を使用する場合は、除電器が着火源とならないよう防爆型のもを使用し、除電効果、管理など十分なリスクアセスメントが必要である（11.5.6 参照）。

⁵ISO 9563 [36] および ISO 1813 [37] に従い、 $RB/L \leq 6.0 \times 10^5 \Omega$ のとき電荷消散性ベルトと定義する。ただし、 R : ベルトを取り付けた状態で両側のプーリーの中心の位置のベルトと接地（プーリー）間の抵抗、 B : フラットベルトの幅、または V ベルトの側面の幅の 2 倍、 L : プーリーと電極（グラファイト、銀ペーストまたは金属電極）の距離、ただし、この電極の幅は B に等しい。また、ベルトの表裏の抵抗が $10^9 \Omega$ 以下であるとき電荷消散性ベルトと定義する。

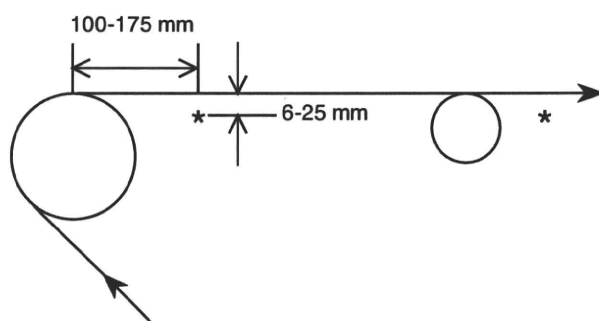


図 11.1: 除電器の設置位置の典型例 *は除電器の位置を示す。

11.9 火工品の取り扱い

[リスク低減策] 鋭感な火工品（最小着火エネルギー 1 mJ 以下）でも、通常の静電気対策で十分であるが、火工品の点火エネルギー以上の静電気放電を防止するため以下に注意事項を示す。

- (1) 可搬・移動導体も接地することを忘れないこと。
- (2) 絶縁性物体は確実に排除する。
- (3) 導電性床・靴により人体の接地
- (4) 着席時にはリストストラップによる人体の接地
- (5) 作業前の帯電防止靴・導電性靴の性能点検
- (6) 絶縁性生地作業服は着用しない。
- (7) 衣服の着脱をしない。
- (8) 導電性の道具、ワイヤなどの小さな金属物体も火花放電の原因となるのでボンディング・接地する。
- (9) 相対湿度を 65%以上（常温の場合）にする。

第12章 液体のリスクアセスメント

12.1 液体取扱の一般的なハザード

12.1.1 液体蒸気による可燃性雰囲気形成ハザード

チェック項目 31 液体蒸気によって可燃性雰囲気が形成されるか

[ハザード]

- (1) 事件事例から静電気着火の70%以上は液体蒸気によって可燃性雰囲気が形成されていたので、可燃性液体の取扱工程および作業の静電気着火ハザードは高い。
- (2) 次の事項は可燃性雰囲気形成のハザードとなる
 - (a) 空気に接触した液面
 - (b) タンク・配管系内の気相部への空気混入
 - (c) スイッチローディング
 - (d) 洗浄など揮発性液体取扱作業およびこの直後の作業

[確認事項]

- (1) 可燃性雰囲気の調査
 - (a) 引火点と液温, LEL, UEL, 最小着火エネルギー
- (2) 可燃性雰囲気を防止するために液温を純粋液体では少なくとも引火点の5°C以下に、また、混合液体では少なくとも引火点の15°C以下にする。

12.1.2 帯電ハザード

チェック項目 32 電荷発生を促進させる要因はないか

チェック項目 33 電荷緩和を抑制させる要因はないか

[ハザード] 帯電の促進は電荷発生の促進と電荷緩和の抑制によるので、それぞれを調査する

- (1) 接地と絶縁導体
 - (a) 金属タンク・配管などの大きな導体から作業者が用いる道具などの小さな導体まで、これらが電氣的に絶縁されると火花放電のハザードがある。したがって、これらは適切に接地されなければならない。

(b) タンク内の導体（特に、液面に浮いたもの）、可搬導体（容器、計量器、台車、踏台など）および作業者が取扱う道具などが絶縁されることによる事故事例が多い。

(2) 電荷発生を促進させる要因

(a) 配管輸送、充てん、混合、攪拌、噴霧、洗浄など液体の流動が伴う現象は電荷分離が起きるので、帯電のハザードとなる。帯電を抑制させる静電気対策が必要となる。

(b) 電荷発生を促進する要因として、たとえば、フィルタ、スプラッシュローディング、二相液体（不溶成分を含む液体）、噴霧などがある。

(3) 電荷緩和を抑制させる要因

(a) 液体の電荷緩和は導電率に依存するので、導電率が低くなると帯電電荷を長い時間維持する。

(b) 液体が接地に電氣的に（接地した導体に）接触していないと電荷緩和はないので、液体の帯電は維持されるか促進する。絶縁性コート¹および絶縁性容器などがこの要因となる。

[確認事項]

(1) 導電率 (6.4.3.1)

(a) 液体が接地した導体と接触していると、電荷緩和によって帯電が抑制される。

(b) 電荷緩和は導電率が高いほど大きくなり、帯電ハザードは低くなる。

(c) 帯電のリスクレベルは導電率のクラス分けで見積もることができる。

(2) 帯電促進要因

(a) 電荷発生促進および電荷緩和抑制要因の調査

(3) 可能であれば帯電電荷または発生電流の測定調査

測定方法は静電気安全指針 2007 [4] を参照

12.1.3 放電ハザード

チェック項目 34 可能性のある着火性放電のタイプは何か

[ハザード]

(1) 液体取扱作業・工程では火花放電、ブラシ放電および沿面放電による着火ハザードがある。

(2) 事故事例から絶縁導体（作業者も含む）による火花放電が最も多い。

(3) 接地導体によるブラシ放電によって炭化水素系の蒸気に着火するためには 58 kV 以上の帯電が必要である。

(4) 液体作業・工程では沿面放電の可能性は低いが、内面が絶縁コートされた金属容器での液体-粉体の混合攪拌ではコートが大きく帯電すると沿面放電の可能性がある。

¹以下、コートはライニングも含む

[確認事項]

- (1) 接地・ボンディング
 - (a) 絶縁導体がないか確認する。
- (2) 着火性ブラシ放電が可能な帯電電位レベルになっているか調査する。
 - (a) 接地導体によるブラシ放電によって炭化水素系の蒸気に着火するためには 58 kV 以上の帯電が必要である。
 - (b) 2.4.3.2 および図 8.1 参照

12.2 液体の帯電

液体の帯電現象は、2.2.1 で説明した電荷分離によるものであり、液体-固体、液体-液体、液体-気体の界面で電気二重層が形成されている。この二重層は正・負どちらかの荷電粒子が選択的に界面に吸着することによって形成され、この荷電粒子はイオンである。

産業レベルの観測できる液体の電荷密度の最大は $1000 \mu\text{C}/\text{m}^3$ のオーダーである。電子の電荷（素電荷） e は $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ であるので、この電荷密度は電子密度として $6.25 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ と等価である。代表的な液体中の分子密度は 10^{28} m^{-3} 程度であり、たとえば、この液体の比重を 1、分子量を 100 とすると、分子密度は $6.02 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$ となり、液体中のイオンの濃度は 10^{-12} の割合程度でごくわずかである。どんなに純度の高い絶縁性液体でも、この程度のイオン（不純物による）が含まれていることは、導電率

$$\sigma = eN\mu$$

が数 pS/m という値を持つことからわかる。ただし、 N はイオン密度、 μ はイオンの移動度である。導電率を 1 pS/m、移動度を $10^{-11} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ とすると、イオン密度は $N = 6.25 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ となる。

液体の帯電は導電率に依存するので、ハザード同定には導電率の調査 (6.4.3.1) が必要である。

12.3 液体の流動

12.2 で述べたように液体の帯電も電荷分離によって生じているが、この液体が流動していると、界面に残された電荷の反極性の電荷が液体とともに流れることになり、ほとんどの液体に関する工程および作業では、この電荷が蓄積されて静電気放電を発生させる要因となっている。

12.4 液体帯電ハザードとなる種々の工程・作業

チェック項目 35 工程・作業は液体の帯電ハザードとなるか

液体の帯電は異種の物質が接触する界面で、正・負どちらかのイオンが選択的に集まることから起こる電荷分離によるものである。たとえば、液体が流動することによって容器や配管で電荷分離して帯電する。また、二相流体、たとえば、液体に混ざらない液体、液体と粉体などもそれぞれで電荷分離して帯電する。液体を取り扱う以下のような工程・作業またはそれに伴う現象は帯電ハザードとなる。

- 配管輸送
- 排出
- 異種の液体との混合
- 粉体との攪拌
- フィルタリング
- 洗浄・清掃
- 容器充てん
- 混合
- 粉体との混合
- 重い物質の沈降
- サンプリング
- 噴霧・噴出
- 移し替え
- 攪拌
- 異種の液体との攪拌
- 導電性液体の結晶化
- 検尺
- 絶縁性容器・配管の利用

12.5 液体の配管輸送

チェック項目 36 液体流動の帯電性調査

液体が配管等を通るとき、液体と壁との境界には必ず電気二重層を形成して、一方の極性の電荷は液体とともに流れ、他方の電荷は壁に残る。この帯電量はパイプと液体の導電性のほかに、流速 v 、配管径 d などに依存する。接地した金属配管内の液体とともに流れる電流は

$$i = 3.7 \times 10^{-6} d^2 v^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{l}{v\tau}\right) \right] \quad (12.1)$$

なる関係 [38] が実験的に求められている。ここで、 l は配管の長さ、 τ は液体の電荷緩和時間 ϵ/σ (ϵ 、 σ : 液体の誘電率と導電率) である。導電率が低い液体、配管の長さが十分に長いなど ($l/v\tau = \infty$) で指数関数の項を無視できる場合、この式から電荷密度 q が流速に比例する式

$$q = 4.7 \times 10^{-6} v \quad (12.2)$$

を導くことができる。実際に静電気対策に用いられている流速 1–10 m/s は液体の電荷密度では約 5–50 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ の範囲にあることがわかる。また、 $l \geq 3v\tau$ の長さの配管は無限長の配管と同じと考える。

[ハザード] 次の事項は電荷分離を促進または電荷緩和を抑制するので帯電を促進してハザードとなる

- (1) 絶縁性配管の利用
- (2) 二相液体 (水滴、固体などの不溶成分の混在)
- (3) マイクロフィルタ → 対策として、フィルタの設置位置は排出口から長さ $3v\tau$ 以上の緩和長が必要
- (4) 高流速

12.5.1 液体の流速制限

チェック項目 37 液体流速の調査

[確認事項] 液体流動の帯電を抑制させるためその速度を制限する対策があるので、これを満たしているものは液体流動による帯電ハザードは低いとしてよい。ただし、以下の値は最大許容速度を示している。

- (1) 中・高導電率の液体の輸送の最大流速は 10 m/s
- (2) 低導電率の液体の輸送の最大流速は 7 m/s
- (3) 充填の初期最大流速は 1 m/s
- (4) 二相液体（水滴、固体などの不溶物質が混在した液体）の場合の最大流速は 1 m/s
- (5) 絶縁性配管・容器（ライニングも含む）を使用する場合の最大流速は 1 m/s。なお、低導電率液体には絶縁性パイプ・容器は使用しない。また、高導電性液体では液体が絶縁導体となり、火花放電のハザードとなる。

12.6 液体の充てん

チェック項目 38 流速制限は満たしているか

チェック項目 39 帯電を抑制する充てん方法（ディップパイプまたはボトムローディング）を採用しているか。

チェック項目 40 フィルタなど帯電促進する設備は緩和長を考慮した位置に設置されているか。

チェック項目 41 接地・ボンディング

チェック項目 42 絶縁導体はないか

チェック項目 43 液体の電荷緩和は確保できているか（液体が接地導体と接触しているか）。

チェック項目 44 絶縁性配管・容器を使用していないか。

12.6.1 液体充てんのハザード

液体充てんには、次のような帯電ハザードがある。これらは電荷分離を促進または電荷緩和を抑制するので帯電を促進する。

- (1) 低導電率液体を輸送する際のポンプ操作および配管での流動は電荷を発生する。
- (2) 高速充てん・排出は帯電を促進する。
- (3) 液体に溶けずに分離した物質が混在すると、たとえば、水、固体など、その界面で電荷を発生させ帯電ハザードとなる²。さらに、重い物質が沈降しても、電荷分離によって帯電を促進させる。³

²このような不溶物質が混在する液体では、流速を 1 m/s 以下にする

³このような不溶物質が混在する液体液体は静置時間として 30 分以上確保する。

表 12.1: タンク・容器サイズのクラス分け

大(型)	直径または対角線の長さが5 m 以上, 一般には容積が50 m ³ 以上
中(型)	直径または対角線の長さが5 m 以下, 目安として容積が1-50 m ³
小(型)	容積1 m ³ 以下の容器

- (4) スプラッシュローディングおよび液面より上のトップローディングは帯電を促進する。
- (5) フィルタなど帯電促進させるものが存在する⁴
- (6) 絶縁性配管・容器の利用
- (7) 不溶物質が混在する液体での絶縁性配管・容器の利用
- (8) 導電性液体を絶縁性配管・容器で取り扱うと火花放電ハザードとなる。

[確認事項] 液体充てんの帯電ハザード同定では最低でも次の事項を確認する。

- (1) すべての導体 ((電荷消散性の物体および作業も含む) の接地・ボンディングを確認する。
- (2) タンクからバケツまで, すべての大きさのタンクで 12.5.1 の配管流速制限が満たされているか確認する。さらに, これらの容器が金属で接地されていれば帯電ハザードレベルは低い。
- (3) デイップパイプあるいはボトムローディングなど帯電を抑制する適切な充てん方法が採用されているか確認する。
- (4) 帯電を促進するフィルタなどがある場合, 容器に流入する前に上流部で十分な緩和長が確保されているか確認する。

[事故事例] 小さな可搬導体 (サンプリング容器, 漏斗など) および作業からの火花放電が着火源となることが多い。これらを適切に接地する。作業者は靴と床により人体を接地する。

小型容器の充てん (移し替え) は事故事例から着火頻度の高い作業である。

12.6.2 タンクサイズのクラス分け

タンクのサイズによって静電気危険性と防止策も異なるので表 12.1 のようにクラス分けする。

12.6.3 固定タンク

12.6 の充てんのハザードを確認する。

⁴ タンクに流入するまでに金属接地配管で電荷を緩和させるため, 配管で 3τ 以上の滞在時間を確保できるような上流部 ($> 3\tau v$) にこれらを設置する。この長さが実現できないときは配管内の滞在時間を 30 秒以上とする。

[確認事項] 低導電率液体の固定タンク充てんには次のような静電気対策が必要である。これを満たしているか確認する。

- (1) 充てんパイプの先端が液体で十分に満たされるまでの流速は1 m/s以下にする。
- (2) 先端が満たされた後は速度制限はない。
- (3) ただし、不溶物が混在する場合は、充てん終了まで1 m/s以下にする。
- (4) フィルタなど帯電促進させるものがある場合は十分な緩和長を確保する上流部にこれを設置する。
- (5) 浮き屋根の絶縁は火花放電ハザードとなる。
- (6) インナーフロートタンクのフロート上部の気相部は可燃性雰囲気形成する可能性がある。

不溶成分がない低導電率液体を固定タンクに充てん（ボトムローディングまたはディップパイプによるトップローディング）するとき、静電気対策として次のように流速および流量が制限されるので、これを確認する。

$$vd = \begin{cases} N \times 0.50 \text{ m}^2/\text{s} & (\text{ディップパイプトップローディングまたは中心に導体柱があるタンク}) \\ N \times 0.38 \text{ m}^2/\text{s} & (\text{ボトムローディングかつ中心に導体柱がないタンク}) \end{cases} \quad (12.3)$$

ただし、 v はパイプ内の流速、 d は上流側のパイプ径、ただし、パイプ径が異なる場合は最も小さなパイプ径を用いる。もし、この最小径部の長さが10 m以下であり、その断面積が次に小さな径の断面積の67%以上である場合は、最小径の次に小さな径を用いるとよい。

$$N = \begin{cases} 1 & (L < 2 \text{ m}) \\ \sqrt{L/2} & (2 \leq L \leq 4.6) \\ 1.5 & (L > 4.6) \end{cases}$$

L はタンク断面の対角線の長さ、ただし、タンクローリーのようにタンク内を完全に区画している場合はその区画の L を用いる。

この式を満たしていても $v = 7 \text{ m/s}$ は超えてはならない。

ボトムローディングは接地されたディップパイプがないためトップローディングに比べて表面電位が大きくなる。したがって、上式のように区別される。中心導体柱についても同様の考えである。

12.6.4 浮き屋根タンク

12.6の充てんのハザードを確認する。

[確認事項] 低導電率液体の浮き屋根タンク充てんには次のような静電気対策が必要である。これを満たしているか確認する。

- (1) 浮き屋根が十分に浮くまでの流速は1 m/s以下にする。
- (2) 先端が満たされた後の速度も7 m/sを超えないようにする。
- (3) ただし、不溶物が混在する場合は、充てん終了まで1 m/s以下にする。
- (4) フィルタなど帯電促進させるものがある場合は十分な緩和長($> 3\tau v$)を確保できる上流部にこれを設置する。

12.6.5 タンクローリー・タンク車

12.6の充てんのハザードを確認する。

[ハザード] 特に、タンクローリー・タンク車充てんでは、事故事例から次の事項がハザードとなるので確認する

- (1) 接地の忘れ（充てんまたは排出の開始前から終了後までの接地が必要）
- (2) スプラッシュローディングによる帯電促進
- (3) スイッチローディング（高引火点，低蒸気圧の液体の充てんでも，前の残存液により可燃性雰囲気形成される可能性がある。スイッチローディングが原因の事故がタンクローリー・タンク車充てんに多い）
- (4) サンプリング・検尺（対策として，ゲージウェルの設置または適切な静置時間の確保が必要）
- (5) 高流速充てんによる帯電促進

12.6.5.1 タンクローリー充てんの流速制限

一相（0.5%以上の不溶成分を含まない）の低導電率液体をタンクローリー充てんする場合，次に示す流速制限が満たされているか確認する。

- (1) 硫黄成分が50 ppm より高い石油系燃料液体（ガソリン，軽油，その他中間蒸留燃料）のとき

$$vd = \begin{cases} 0.5 \text{ m}^2/\text{s} & (\text{導電率 } \sigma > 10 \text{ pS/m}) \\ 0.38 \text{ m}^2/\text{s} & (\text{導電率 } \sigma \leq 10 \text{ pS/m} \text{ または不明}) \end{cases}$$

- (2) 硫黄成分が50 ppm 以下の石油系燃料液体（ガソリン，軽油）のとき

$$vd = \begin{cases} 0.5 \text{ m}^2/\text{s} & (\sigma > 50 \text{ pS/m}) \\ 0.38 \text{ m}^2/\text{s} & (10 < \sigma \leq 50 \text{ pS/m}) \\ 0.25 \text{ m}^2/\text{s} & (\sigma \leq 10 \text{ pS/m} \text{ または不明}) \end{cases}$$

- (3) これらの式を満たしていても $v = 7 \text{ m/s}$ を超えてはならない。

その他の液体は固定タンクの流速制限の式(12.3)に従う。

12.6.5.2 タンク車充てんの流速制限

次に示すタンク車充てんの流速制限が満たされているか確認する。

- (1) 一相（0.5%以上の不溶成分を含まない）の低導電率液体をタンク車に充てんする場合，

$$vd = \begin{cases} 0.53 \text{ m}^2/\text{s} & (\text{低硫黄分 } (< 50 \text{ ppm}) \text{ 石油系燃料液体}) \\ 0.75 \text{ m}^2/\text{s} & (\text{その他の液体}) \end{cases}$$

この式を満たしていても $v = 7 \text{ m/s}$ は超えてはならない。

- (2) (1) 以外の液体は固定タンクの流速制限の式(12.3)に従う。