

2.4.7 帯電雲と接地突起部とのブラシ放電

2.4.6で述べたように、産業プロセスにおける条件では雷状放電が生じる可能性は非常に低い。仮に起きたとしても、その発生条件は帯電雲によって突起物から発生するブラシ放電のそれよりもかなり大きな空間電荷密度が必要となるので、帯電雲のリスクアセスメントとしてこのブラシ放電を考慮すれば十分である。ここでは、接地金属容器内に帯電雲が形成されたときの突起物からブラシ放電について考察する [31]。

なお、粉じん雰囲気でのブラシ放電による着火は許容可能リスクであるので(2.4.3)、ガス・蒸気可燃性雰囲気またはガス・蒸気が含まれる粉じんによるハイブリッド可燃性雰囲気形成される時に、ここに示す帯電雲と接地突起部とのブラシ放電のハザードを検討する。帯電雲としては帯電ミスト雲あるいはハイブリッド可燃性雰囲気下での帯電粉じん雲となる。

接地金属容器内の帯電雲による着火性ブラシ放電の生成条件を求めるため、内側(タンク上部の中心)に突起物(半径2-10 mm, 長さ2-10 cm)がある接地円筒タンク(半径 $a (= R)$, 高さ a , $2a$, $3a$, $a \leq 25$ m)において、最大電界(最大電界は突起物先端にある)が空気の絶縁破壊電界 $E_B = 3$ MV/mとなるために必要な空間電荷密度をポアソンの方程式に基づいて数値的に計算し、また、そのときのタンク側壁の最大電界を求めた。放電の着火性は突起物から平均電界が5 kV/cm以上(ストリーマ進展の条件)の領域が放電するとして、この領域の電荷をゼロとし、この放電前後の静電エネルギーの差が0.1 mJ以上のとき着火性ブラシ放電が発生するとした。

着火性となる突起物の曲率半径は5 mmを超えた場合であり、ブラシ放電の発生条件と一致している。ここで、曲率半径が5 mm以下では最大でも約0.03 mJであった。また、長さが短く、曲率半径が大きな(7 mm以上)突起物ではブラシ放電から雷状放電に移行したと考えられる放電エネルギーが計算されている。放電エネルギーが0.1 mJ以上となる側壁最大電界の最小値は3 kV/cm弱である。したがって、この最大値が1.5 kV/cm以下になるようにすれば、0.1 mJ以上の着火性ブラシ放電のリスクを低減できる。また、タンク内面上の突起物(曲率半径 > 5 mm, 長さ ≤ 5 cm)を排除することによっても着火性放電を防止できる。

このモデリング結果より、接地タンク内の帯電雲による放電の管理指標は次のとおりである。なお、以下に示す条件は1/2以上の安全マージンを確保したものである。近似的に得られた下記の式を満たすようにして帯電雲によるリスクを低減するとよい。

$$\begin{cases} \rho \leq 3.0 \times 10^{-6} R^{-1} & (0.1 \leq \text{MIE} < 0.5 \text{ mJ}) \\ \rho \leq 3.7 \times 10^{-6} R^{-1} & (0.5 \leq \text{MIE} < 1 \text{ mJ}) \\ \rho \leq 4.6 \times 10^{-6} R^{-1} & (\text{MIE} \geq 1 \text{ mJ}) \end{cases} \quad (2.18)$$

ただし、 ρ は帯電雲の空間電荷密度、 R はタンク半径である。具体的な管理指標としては次のようになる。

- (1) タンク側壁電界の最大値が1.5 kV/cm以下 ($0.1 \leq \text{MIE} < 0.5$ mJ), 2 kV/cm以下 ($0.5 \leq \text{MIE} < 1$ mJ), 3 kV/cm以下 ($\text{MIE} \geq 1$ mJ)となるようにして帯電雲による着火性放電を防止して管理する。また、側壁電界が3.8 kV/cmを超えると曲率半径の大きな突起物からのブラシ放電が大きなストリーマに進展して、放電エネルギーが大きくなるおそれがあることがこのモデリングにより導出されているので、着火エネルギーが1 mJ以上でもタンク側壁電界の最大値を3 kV/cm以下にする。
- (2) タンク直径を0.6 m以下 ($0.1 \leq \text{MIE} < 0.5$ mJ), 0.7 m以下 ($0.5 \leq \text{MIE} < 1$ mJ), 0.9 m以下 ($\text{MIE} \geq 1$ mJ)となるようにして帯電雲による着火性放電を防止して管理してもよい。ただし、式(2.18)で空間電荷密度 ρ を $10 \mu\text{C}/\text{m}^3$ として求めている。

- (3) 長さ 5 cm 以下で曲率半径 5 mm を超えるタンク内面上の突起物を排除することによっても帯電雲による着火性放電を防止できる。

雰囲気の着火エネルギーが低い場合は、帯電雲の管理よりも可燃性雰囲気形成防止が望ましい。したがって、Zone 0 または Zone 20 の危険箇所（危険場所）において、ここに挙げる帯電雲の管理指標を採用する場合は十分なリスクアセスメントが必要である。

第3章 静電気着火リスク分析

3.1 静電気着火リスク分析手法

ここでは図 3.1 に示すダイアグラムに沿って静電気着火リスクを分析する。大きく分けて、静電気着火ハザードの同定と静電気着火リスク見積もりによって構成される。

静電気着火のハザードは

- (1) 可燃性雰囲気形成
- (2) 帯電
- (3) 静電誘導¹
- (4) 静電気放電

について分析される。可燃性雰囲気でなければ着火は起こらないので、まず初めに、可燃性雰囲気形成のハザードについて調査・分析する。雰囲気形成のリスクがあるときのみ、静電気に関するリスク分析が必要となる。

次に帯電および静電誘導のハザードを同定する。この帯電・静電誘導ハザードをもとに着火性放電のハザードを同定する。放電タイプにより生起条件および着火性が異なるので、放電タイプごとにリスクを分析するようにしている。

適切に静電気対策が実施されている場合は、可燃性雰囲気が形成されたとしても着火する可能性は限りなく低い（リスクを十分許容できる）ので詳細なリスク分析は省略できる。したがって、詳細なリスク分析は静電気対策が困難な事象に対してのみに必要となる。それを許容できるリスクとするためにリスクアセスメントを実施するときの支援として本リスク分析手法を参照されたい。

なお、静電気対策については静電気安全指針 2007 [4] を参照されたい。

これらの4つのハザードによるリスクを総合的に分析して

- (1) 可燃性雰囲気のリスク：可燃性雰囲気の着火性と形成頻度
- (2) 着火性放電のリスク：各放電タイプの生起確率と着火性（可燃性雰囲気の着火性と比較）により、放電タイプごとに着火の可能性を調査する
- (3) 危害のひどさ：実施者に依存

により静電気着火リスクを見積もる。具体的には、“可燃性雰囲気のリスク”×“着火性放電のリスク”によって静電気着火リスクの程度が見積もられる。乗算は可燃性雰囲気でない、または、着火性放電が発生しない（静電気対策が適切になされている）場合は静電気着火リスクが許容できるほど低いことを考慮している。なお、静電気着火による危害のひどさは実施対象によって異なるので、それぞれ適切に加味されたい。

¹事故事例分析（付録 C）により絶縁体からの火花放電が原因となった割合が著しく高いため、静電誘導ハザードを設けている。

可燃性雰囲気のリスクは可燃性雰囲気形成ハザードの同定で得られた可燃性雰囲気の着火性とその形成頻度によって見積もる。

着火性放電リスクは各タイプの放電の可能性とその着火性により見積もる。帯電ハザード同定によって帯電の程度とその場所が把握できているので、放電の可能性（確率）とその場所を特定する準備が整っているはずである。この帯電ハザードをもとに、着火性放電タイプ別に、火花、ブラシ、沿面およびコーン放電の生起ハザードをそれぞれに発生しうる場所も含めて同定する。放電が生起しうる場所の帯電の状況から、放電の着火性を推定して、これらを総合的に考慮したハザードレベルを着火性放電リスクとして決定論的に求める。

また、帯電ハザードとして同定できた帯電物体周辺の絶縁導体は、静電誘導ハザード同定によって抽出されて、適切な処置を施して火花放電を防止しているはずであるので、火花放電ハザードは無視してよい。このためにも絶縁導体に抜けがないようにしなければならない。

3.1.1 把握しなければならない事項

静電気着火リスクを分析するに把握しなければならない事項を以下に示す。これらの項目は、次章以降でハザードを抽出するために用いられる重要な事項をまとめたものである。

(1) 取扱物質に関する事項

- (a) 沸点・引火点等
- (b) 取扱条件と爆発限界の関係
- (c) 抵抗率・導電率
- (d) 誘電率
- (e) 帯電量
- (f) 着火エネルギー
- (g) 液体の不溶成分（水、固体粒子など）の有無

(2) 静電気に関する事項

- (a) 接地・ボンディング（漏洩抵抗・ボンディング抵抗）
- (b) 絶縁物の有無とその帯電性
- (c) 放電の可能性とその着火性
- (d) 作業者の静電気に関する危険要因

(3) プロセスに関する事項

- (a) 操作・取扱条件等（速度、温度、圧力、取扱量、可燃物・支燃物の濃度²等）の範囲とその変化
- (b) プロセスの進展に伴う帯電量の変化
- (c) 帯電の促進要因（たとえば、輸送速度、スプラッシュローディング、二相流体（不溶成分を含む液体・固体粒子を含む気体流など）、フィルタ、絶縁性材料の利用）

²可燃物・支燃物の濃度は、可燃性雰囲気が空気中で形成されるとは限らないことから、燃焼範囲による可燃性雰囲気ハザード同定の参考までに設けた項目である。参考までにというのは、現状では静電気放電ハザードの知識が、火花放電（酸素+可燃性ガス中）を除いて、空気中で可燃性雰囲気が形成されたときしかないからである。

- (d) 緊急遮断・非常停止の波及効果
- (e) 異常時における危険要因
- (f) トラブル対応時の危険要因
- (g) 作業者の介在の有無と誤操作の可能性とその影響
- (h) 非定常作業に関する危険要因
- (i) スタートアップに関する危険要因
- (j) シャットダウンに関する危険要因

(4) 設備に関する事項

- (a) 設備の立地・配置・位置に関する危険要因
- (b) 危険度の高い設備が周辺（他の設備，環境，住民など）に及ぼす影響
- (c) 設備操作のための通路・空間に存在する危険要因
- (d) 点検時に発生する危険要因
- (e) 故障時に発生する危険要因
- (f) 設備の耐久性（配管・ダクトの耐圧，腐食，振動によるボルトの緩み等）に関する危険要因
- (g) 設備の信頼性（計器の誤指示，設計ミス等）に関する危険要因
- (h) 安全設備（破裂板，爆発放散口・ダクトの設計ミス等）に関する危険要因

3.1.2 災害事例にみる静電気着火ハザード

事故事例に学ぶことは重要で、ハザード同定にも役立つであろう。以下に示した項目の他に過去50年間の災害事例を統計分析した結果も付録Cに示しているので参照されたい。

(1) 次の帯電や静電誘導は過去に災害の原因となった事例である。

- (a) 高速で走行するフィルム・紙・布などの帯電
- (b) 液体，粉体などを収納する絶縁された金属製容器・金属部分の帯電や静電誘導
- (c) 絶縁性パイプ・ホースの一部に取り付けられた金属物体の帯電や静電誘導
- (d) バグフィルタ，シュートなど繊維製品の帯電
- (e) ノズル，ホース，パイプなどから噴出した絶縁性液体の帯電
- (f) 絶縁性履物または絶縁性床によって絶縁された作業者の帯電や静電誘導
- (g) タンク，大型容器などに充填された絶縁性液体の帯電
- (h) 混合・攪拌されている液体の帯電

(2) 次の工程は過去に災害の原因となった事例である。

- (a) 可燃性液体が入っている容器に粉体などを投入する工程
- (b) 接着剤，塗料，インキ，溶剤などを塗布・印刷する工程

- (c) 溶剤を含む粉体を流動乾燥させる工程
 - (d) 溶剤・塗料などを吹き付け・塗装する工程，および溶剤を使用して洗浄する工程
 - (e) 可燃性液体を採取・検尺・検温する工程
 - (f) プラスチック成型品を型から取り外す工程
 - (g) フィルム，紙，布などを巻き取り・巻きもどす工程
 - (h) 多量の粉体類を袋詰め・流動させる工程
 - (i) 接着剤を使用して張り付け・張り合わせる工程
 - (j) 可燃性液体をタンク，容器などに移し替え・充填する工程
 - (k) 粉体の空気輸送，集じんなどで，微細粉じんが発生する工程
 - (l) 樹脂を発泡し，成型する工程
 - (m) 異種の粉体を高速混合する工程
- (3) 次の放電は過去に災害の原因となった事例である。
- (a) 帯電した，または，静電誘導を受けた金属物体からの放電：火花，ブラシ
 - (b) 接着したものを剥離するときに発生する放電：ブラシ
 - (c) バグフィルタ，シュートなどに付着した粉体が剥離するときの放電：ブラシ，沿面
 - (d) プラスチック成型品を型から取り外すときに発生する放電：ブラシ
 - (e) 帯電した，または，静電誘導を受けた作業員からの放電：火花，ブラシ
 - (f) 作業服などの脱衣時に発生する放電：ブラシ
 - (g) 試料を採取した金属容器からの放電：火花，ブラシ
 - (h) 絶縁物に取り付けられた（置かれた）金属部分からの放電：火花，ブラシ
 - (i) 除電器の動作不良または使用方法の誤りによって発生する放電：火花，ブラシ
- (4) 次の状態・条件は過去に災害の原因となった事例である。
- (a) 施設，装置，機器などを初めて運転したとき，または改修後に運転を再開したとき
 - (b) 運転条件を変更したとき
 - (c) 相対湿度が極端に低下したとき
 - (d) 施設，装置，機器などが故障して作動状態が急変したとき
 - (e) 材料，原料などに異物が混入したとき
 - (f) 作業基準の変更が適切に行われなかったとき
 - (g) 除電器の保守が十分でなかったとき
 - (h) 装置，機器などの操作を誤ったとき

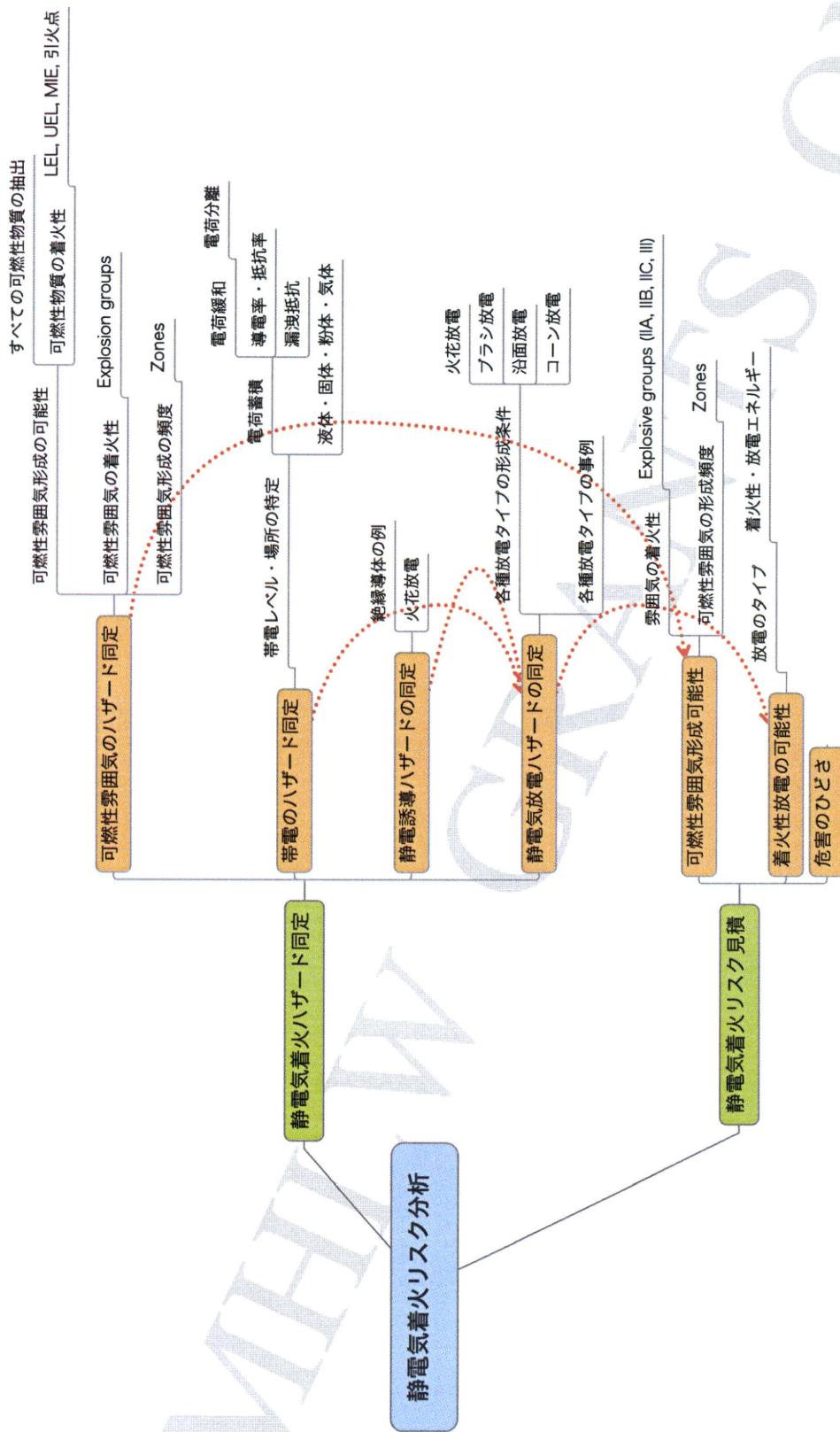


図 3.1: 静電気着火のリスク分析

第4章 静電気着火ハザードの同定

4.1 工程・作業のレビュー

可燃性物質を取り扱うプロセス・工程・作業は数え切れないほど多種多様であるので、ハザードを生起する条件もプロセス、工程条件、工程・作業の手順および環境などに依存して、多種多様となる。まずは、リスクアセスメントの対象となる工程・作業のプロセス、工程条件、工程・作業の手順および環境を調査する必要がある。

4.2 静電気着火ハザードの同定法

評価するリスクは静電気着火であるので、可燃性雰囲気形成するハザードと帯電(ハザード)によって発生する着火性の静電気放電ハザードを洗い出すことがハザード同定となる。したがって、図4.1に示すように静電気着火に至る過程の流れに沿って、可燃性雰囲気形成、帯電および着火性静電気放電の発生ハザードを抽出していくのが合理的と考える。主なハザード同定の流れは以下に示したリストのようになる。図3.1参照

ここで、メンテナンス等の不備は静電気リスクアセスメントの範疇に入らないので、メンテナンスは十分になされていることを仮定して、ハザードを同定する手法を示す。ただし、メンテナンス不備が静電気着火の原因となった事故事例があるので、適切なメンテナンスが重要であることはいうまでもない。

静電気安全指針2007 [4] もハザード同定に活用できる。静電気対策は静電気着火リスクがあるので必要であるので、静電気安全指針で対象になっている事項が静電気着火ハザードでもある。

(1) 可燃性雰囲気形成ハザードの同定

- 使用する条件での可燃性物質の燃焼範囲、最小着火エネルギー等により物質の可燃性を求めて、工程空間・作業現場に適合させた雰囲気の可燃性を調査する
- さらに、Zone の概念を用いて工程・作業場所における可燃性雰囲気形成の頻度を調査して、可燃性雰囲気形成ハザードを同定する
- 可燃性雰囲気が形成されないと判断された場合は着火リスクはない

(2) 帯電ハザードの同定

- 電荷発生と電荷緩和に関する項目を調査して帯電ハザードを抽出する

(3) 静電誘導ハザードの同定

- 絶縁導体(人体も含む)の有無を調査して静電誘導ハザードを抽出する

(4) 静電気放電ハザードの同定

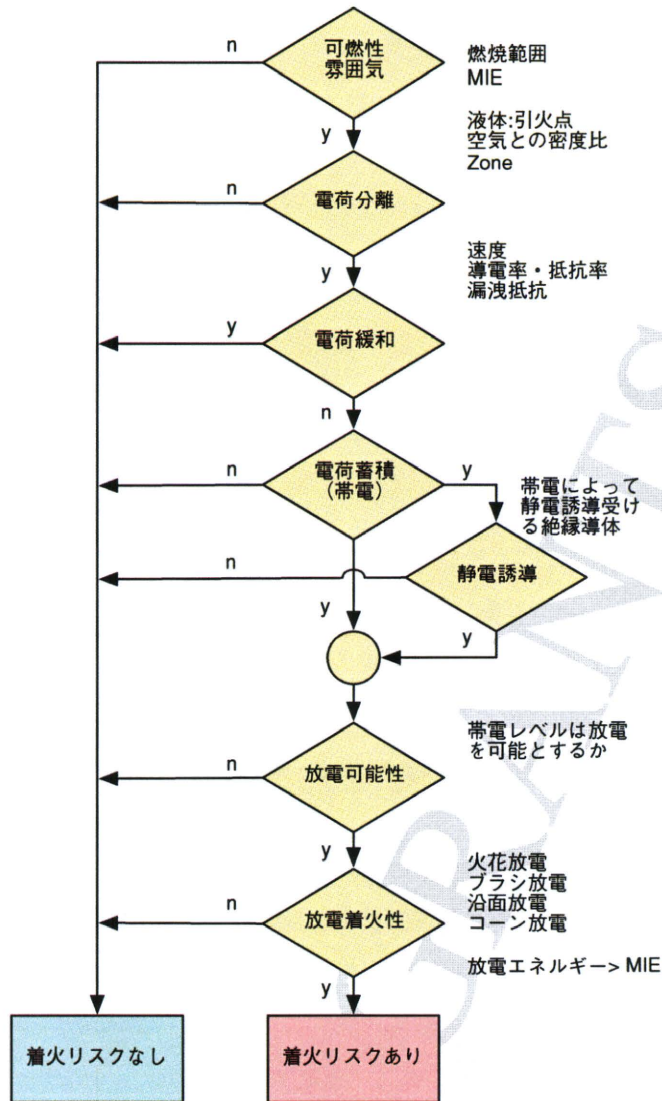


図 4.1: 静電気着火のフローによるハザード同定

- (2), (3) をもとに帯電レベルの推定により, 起こりうる放電のタイプと着火性放電の可能性を調査する
- 放電タイプごとに (1) をもとに可燃性雰囲気の諸特性により静電気着火ハザードを抽出して, 着火リスク見積・評価に適用する

各ハザードの同定の詳細は次章以降に示す。

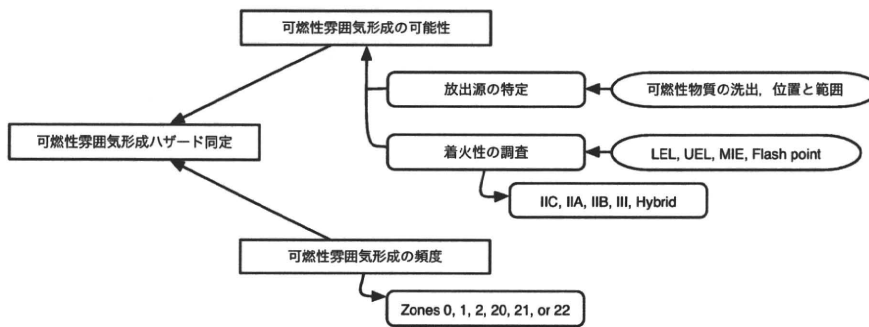


図 5.1: 可燃性雰囲気形成ハザード同定の流れ

可燃性雰囲気形成の放出源となりうる可燃性物質はプラントおよび工程・作業場所で使用している可燃性物質である。

静電気着火事故の可燃物はガス (9.8%), 蒸気 (66.7%), 粉じん (16.3%), ハイブリッド: ガス・蒸気+粉じん (7.2%) であり, 圧倒的に液体の蒸気が多い。

放出源の場所は可燃性物質が相当量ある場所であるので, 可燃性物質が内在したタンク, ポンプ, 配管, 容器, 袋などがこれに相当する。粉じんの場合は, 粉じん雲を形成している場所あるいは粉じん雲を形成しうる粉じん層が存在する場所がこれに相当する。また, 小さな粒子を多く含む粒径分布の粉体は粉じん雲を形成しやすい。

事故事例からみて漏洩による可燃性雰囲気形成は無視できない (静電気着火事故の 25% は漏洩が原因である) ので, 漏洩による可燃性雰囲気形成についても考慮して調査する。

作業時のみ開放する作業 (サンプリング, 充てん, 投入, 排出など) のときにも可燃性雰囲気が形成されて静電気着火が多発しているため, このような作業を実施するときの可燃性雰囲気形成のハザード同定は入念にされたい。なお, サンプリングでは, 高流速や噴出を避けるためにサンプリングバルブの前に制限オリフィス等 (ボンディングによる接地を確実にする) を設けることを薦める。

本ガイドは清掃・メンテナンスなど安全管理の基本がなされていることを前提にしているが, 管理不足によって生ずる床面の液体・粉じん層なども放出源となるので管理には注意されたい。

5.3 着火性の調査

5.2 で特定された工程・作業等で取り扱う可燃性物質・製品について以下の燃焼特性の事項を調査して, 物質・製品の静電気による着火可能性を調査する

チェック項目 3 爆発 (燃焼) 限界 (下・上限界: LEL, UEL) 濃度の調査

チェック項目 4 最小着火エネルギー (MIE) の調査

チェック項目 5 引火点の調査

おもなガス・蒸気の爆発範囲, 最小着火エネルギーおよび引火点は静電気安全指針 2007 [4] を参照されたい。これには粉じんについても記載されているが, 粉じんの着火性は粒径に大きく依存するので参考程度にして現物をもって測定すること。

表 5.1: ガス・蒸気グループの分類

グループ	代表的ガス	最大安全間隙	最小点火電流比*	最小着火エネルギー
IIA	プロパン	> 0.9 mm	> 0.8	> 0.25 mJ
IIB	エチレン	0.5–0.9 mm	0.45–0.8	0.07–0.25 mJ
IIC	水素	< 0.5 mm	< 0.45	< 0.07 mJ

* メタンの最小点火電流を 1 とした比

混合ガス・蒸気の LEL および UEL は付録 A によって見積もることができる。また、LEL および UEL のデータがないときは実験で求めることを薦めるが、経験式により爆発限界を見積もることができる。

一般に、LEL および UEL は空気中のデータが示されているので、酸素中など異なる場合は、測定または限界酸素濃度で可燃性雰囲気形成ハザードを同定する。限界酸素濃度の見積もりを付録 A に示す。データは静電気安全指針 2007 [4] にも示している。

粉じんの場合、可燃性雰囲気がハイブリッド（ガス・蒸気を含むもの）であると、粉じんのみにきよりも着火エネルギーを低くするので注意する。ガス・蒸気の濃度がガス・蒸気の LEL を超える雰囲気ではガス・蒸気の最小着火エネルギーでリスク分析を実施する。

引火点は、液面で可燃性雰囲気を形成するために必要な液体温度の最小値を示しているといってもよい。可燃性液体蒸気・空気の平衡混合気では、引火点の 10–20°C 以上で最も着火しやすい条件となる。適用する引火点はできるだけ取扱条件に合った測定法（開放または密閉式）を用いたものにする。管理された条件下で液体温度が、純粋液体では引火点の少なくとも 5°C 以下、また、混合液体では引火点の少なくとも 15°C 以下であれば可燃性雰囲気形成ハザードは出現しないとしてよい。ただし、液体が噴霧・噴出される場合は、最小着火エネルギーの 10 倍程度以上のエネルギーを要するが、引火点以下でも着火するので判断には注意を要する。

後にリスク見積りに用いるので、ガス・蒸気の場合、着火エネルギーは Explosion Group のガス・蒸気グループで IIA, IIB, または IIC のいずれかに分類する。粉じんは Explosion Group の III に分類し、ガス・蒸気とのハイブリッド可燃性雰囲気では危険側となるガス・蒸気で分類する。

調査のため最小着火エネルギーを測定する場合は熟練を要するのでエキスパートによって測定されなければならない。また、粉じんの最小着火エネルギーを測定する場合は、静電気リスクを評価する試験法¹に準じて測定されなければならない。通常のまま測定すると静電気着火性を過大評価することになる。

この段階で可燃性雰囲気形成が不可能と判断できた場合は静電気による着火リスクはなしとなる。これは、図 4.1 の第 1 番目の if ダイアグラムの no の矢印に相当する。

5.3.1 液体蒸気による可燃性雰囲気形成

事件事例（付録 C）から静電気着火の 65% 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。

¹ 粉じんの着火性を調査するときの最小着火エネルギー測定は、下記の標準・試験法に準じてインダクタンスを静電気放電に適合するようにして試験する。あらゆる静電気放電は容量性放電（等価的に静電容量に蓄えられた電荷の放電とおける）である。

- IEC 61241-2-3 (1994) Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust – Part 2: Test methods - Section 3: Method for determining minimum ignition energy of dust/air mixtures (25 μH 以下で測定)
- MIKE 3 Manual minimum ignition energy 3.2h (1999) Adolf Kühner AG (インダクタンスなしで測定)

なお、IEC 60079-20-2: Explosive atmospheres - Part 20-2: Material characteristics - Combustible dusts test methods は作成中である。

表 5.2: 可燃性液体のクラス分け [32]

Class	引火点 °C	沸点 °C	例
IA	$FP < 22.8$	$BP < 37.8$	エチルエーテル, ペンタン
IB	$FP < 22.8$	$BP > 37.8$	アセトン, ガソリン
IC	$22.8 \leq FP < 37.8$	-	ナフサ, キシレン
II	$37.8 \leq FP < 60$	-	燃料オイル, 灯油
IIIA	$60 \leq FP < 93$	-	エチレングリコール
IIIB	$FP \geq 93$	-	アスファルト, 変圧器絶縁油

可燃性液体は必ずしも可燃性雰囲気形成しない。その液温で液面上で十分な蒸気により、可燃性雰囲気を形成できるかが重要であり、この温度の目安が引火点である。液体蒸気による可燃性雰囲気の形成ハザードは液温と引火点との比較で同定できる。ここでは用いないが、液体の引火性ハザードを引火点と沸点で分類する NFPA のクラス分け [32] を表 5.2 に参考として示しておく。

最小着火エネルギーおよび引火点から液体蒸気による可燃性雰囲気のハザードは次の順に高い

- (1) 二硫化炭素
- (2) ジエチルエーテル
- (3) ガソリン, ベンゼン
- (4) 炭化水素
- (5) エステル類
- (6) ケトン類, アルコール類
- (7) 塩素化炭化水素

取扱温度または気温に関連して可燃性雰囲気形成ハザードとなるものを次に示す

- ガソリン：寒冷の時期を除いてガソリン蒸気は、とくに、液面近傍で爆発上限以上である
- 灯油：通常は十分に爆発下限以下であるが、暑い時期になると可燃性雰囲気なることもある
- ガソリン+中間留出物（たとえば、灯油, 軽油）：可燃性雰囲気になるので、スイッチローディングなどは可燃性雰囲気形成のハザードとなる

タンクローリーおよびタンク車での引火点が高い液体（たとえば、ガソリン）が前に入っていたタンクに引火点が高い液体（たとえば、軽油）をスイッチローディングする際に、残留していた前の液体蒸気によって可燃性雰囲気が形成され事故が起きている事例があるので注意する。

5.3.2 ハイブリッド可燃性雰囲気

粉じん可燃性雰囲気に可燃性ガス・蒸気が含まれるとその着火性を著しく高める。このような可燃性雰囲気をハイブリッド可燃性雰囲気という。ハイブリッド可燃性雰囲気とならない条件は次の通りである。

- ガス・蒸気濃度がガス・蒸気の LEL の 20% 以下である。
- 通常、乾燥工程後の粉体に含まれるガス・溶剤濃度が 0.5% 以下のとき上の条件を満たす。ただし、乾燥後に、ガス・蒸気濃度が増加しないように、粉体が分裂される工程および温度上昇がないことが必要である。

5.4 可燃性雰囲気形成の可能性(場所・範囲の特定)

チェック項目 6 爆発範囲の濃度となる可燃性雰囲気が工程・作業空間に形成されるか

チェック項目 7 その可燃性雰囲気が及ぶ範囲は：可燃性雰囲気の場所と範囲の特定

5.3で調査した可燃性物質を放出源として爆発範囲となる、特にLEL以上の濃度の可燃性雰囲気が工程・作業空間に形成される可能性を調査して、可燃性雰囲気となりうる危険区域を決定する。可燃性雰囲気の形成とその範囲を決定するファクタとして以下の事項を調査する。

(1) 爆発下限界濃度 LEL

(2) 放出源の特定

- 放出源の位置
- 放出源の形状（開放部の面積）
- 放出源の保有量（可燃性雰囲気の継続時間）
- 放出源が液体の場合：液温，沸点，蒸気圧，引火点
- 粉じんの場合：粒径分布（粒径が小さく軽いほど粉じん雰囲気が形成しやすい）

(3) 放出の範囲の決定

- 放出源の濃度と放出速度（可燃性雰囲気の範囲）
- 空気との密度比（空気より重いか軽いか）
- 換気（自然換気，強制換気）

この調査で、可燃性雰囲気形成が不可能と判断できた場合は静電気着火リスクなしとなる。

5.4.1 放出源の特定

可燃性雰囲気の形成には空気（酸素）と可燃性物質を必要とするので、5.2で洗い出された放出源をソースとして、工程・作業場所に空気（酸素）と混合して爆発範囲になりうるか判断することが必要である。

5.4.2 放出の範囲

この可燃性雰囲気形成の同定はその場所での濃度測定がベストである。工程・作業場所での事前のサンプリング測定で行うのがよいであろう。蒸気の場合は温度に、また、測定場所が室外の場合は空気流（風）の影響を受けるので同定にはこれらを考慮する。なお、測定が着火源にならないように測定のためのリスクアセスメントも必要である。さらに、可燃性物質または酸素の濃度の常時モニタリングはリスク低減策となる。

工程・作業の設計段階での空間濃度の見積もりには市販のソフトウェアの利用など数値解析も有効である。

また、放出の次元と境界を単純化したモデル解析例を付録Aに示す。

表 5.3: 危険場所のクラス分け [33-35]

Zone	定義
Zone 0	連続して、または長期間にわたり、もしくは頻繁にガス・蒸気可燃性雰囲気となる場所
Zone 1	通常作業においてガス・蒸気可燃性雰囲気となる可能性が時折ある場所
Zone 2	通常作業においてガス・蒸気可燃性雰囲気となる可能性が低い、なっただとしても短い期間のみである場所
Zone 20	常時あるいは長期間にわたり粉じん可燃性雰囲気となる、あるいは粉じん雲になりうる粉体層がある場所
Zone 21	通常作業において粉じん可燃性雰囲気となる可能性がある場所、あるいは粉じん雲になりうる粉体層が形成されている可能性がある場所
Zone 22	通常作業において粉じん可燃性雰囲気とならない、あるいはなっただとしても短い時間である場所、あるいは粉体層が存在しないが、形成しうる場所

5.5 可燃性雰囲気形成の頻度：Zone

チェック項目 8 放出の頻度と持続時間から、可燃性雰囲気が Zone (表 5.3) のどれにあたるか

5.4 までの調査により、静電気着火可能な物質により可燃性雰囲気が形成されるハザードが同定されたので、IEC 60079 に使用される危険場所 (危険箇所²) の Zone (危険度区域, 表 5.3) [33,34] を適用して、この可燃性雰囲気が形成される確率 (頻度) を評価する。なお、この Zone は可燃性雰囲気形成のリスクレベルを見積るために用いる。

作業前に作業場所の濃度測定可能であれば、測定によって Zone を判定してもよい。特に、タンクまたはサンプリングバルブの開放での作業のときに有効である。

参考に Zone のクラス分けの例を A.4 に示す。

なお、設計、運転または作業手順によって、Zone 0 または 1 となる区域を時空間的に最小限になるようにされたい。

ここで、密閉空間で窒素パージなどにより可燃性雰囲気の形成を制御している場合でも、これを開放して実施する作業、たとえば溶剤への粉体投入などでは空気が混入して、これが破れることもあるので Zone 判定にあたり留意する。

5.6 可燃性雰囲気形成ハザード同定結果のまとめ

可燃性物質の場所 (所在) と放出範囲から可燃性雰囲気が形成されうる場所 (箇所) が特定できている。つぎに、可燃性物質の着火性調査から可燃性雰囲気が形成されると判断された場合、リスク見積のため以下の項目を特定された場所ごとに決定する。

(1) 着火性

- IIC, IIA, IIB, または, III (粉じん) の Explosion group のいずれかで着火性のハザードレベルを決定する。ただし、ガス・蒸気と粉じんのハイブリッド可燃性雰囲気ではガス・蒸気グループ (IIC, IIA, IIB) で決定する。

²電気機械器具防爆構造規格 (厚生労働省) および労働安全衛生総合研究所技術指針「工場電気設備防爆指針 (国際規格に整合した技術指針 2008) JNOSH-TR-NO.43 (2008)」では、危険場所 (Hazardous area) を危険箇所という用語に置き換えられている。また、Zone 0 を特別危険箇所、Zone 1 を第 1 類危険箇所、Zone 2 を第 2 類危険箇所の用語を用いている。

表 5.4: 可燃性雰囲気形成のハザードレベル

	IIC/IIC hybrid	IIB/IIB hybrid	IIA/IIA hybrid	III
Zone 0/20	20	15	10	5
Zone 1/21	12	9	6	3
Zone 2/22	4	3	2	1
形成なし	0	0	0	0

表 5.5: 可燃性雰囲気形成ハザード同定シート

工程・作業等の名称 実施日・実施者 承認日・承認者 可燃性物質のリスト	
可燃性物質#1 () 放出源の特定	
場所(所在) 放出範囲 着火性の調査	
LEL UEL MIE 引火点・液温(液体の場合) Explosion group	
可燃性雰囲気の場合 Explosion group 可燃性雰囲気の種類(Zone) ハザードレベル 備考	

- (2) 可燃性雰囲気形成の種類指標である Zone を決定する。なお、可燃性雰囲気が形成されないと判断された場合は可燃性雰囲気形成のハザードがないとする。

5.6.1 可燃性雰囲気形成のハザードレベル

可燃性雰囲気形成のハザードレベルは、表 5.4 に示すように可燃性雰囲気の着火性のクラス IIC, IIA, IIB, III またはハイブリッド IIA/B/C+III と可燃性雰囲気形成の種類 Zone 0, 1, 2, 20, 21 または 22 の組み合わせによって見積もる。

5.6.2 可燃性雰囲気形成ハザード同定シート

可燃性雰囲気形成のハザード同定のためのチェックシートの例を表 5.5 に示す。この表は、ここに示した可燃性雰囲気形成ハザード同定の手続きをまとめたものである。放出源の場所と範囲は図示してもよいであろう。可燃性物質が複数ある場合は#1以降を追加する。備考欄には使用した測

定法，参考文献，データベース，ソフトウェアなどリスクコミュニケーションのために必要な事項を記載するとよい。

MHLW GRANTS ONLY

第6章 帯電ハザードの同定

6.1 はじめに

帯電ハザードは液体、固体、粉体または気体によって微妙に異なってくるので、それぞれに分けて11-14章に詳述する。ここでは、帯電ハザード同定の一般論を述べる。帯電ハザードは図6.1に示すように電荷分離、電荷緩和の程度および帯電促進要因を調査して、帯電物体の所在とその帯電レベルを特定することにより同定する。帯電レベルは、導電率または抵抗率、接地（電荷漏洩）の状況および帯電促進要因から決定される。

6.2 帯電ハザードの洗い出し

チェック項目 9 電荷分離が起きていて、電荷緩和が小さい場所の洗い出し

チェック項目 10 帯電したものが相当量蓄積されている場所の洗い出し

異種の物質でできた物体が接触・分離すると一方が正に他方が負に電荷分離する。この物体に電荷が蓄積されるが、電荷緩和が大きいとこの電荷緩和で発生した電荷の多くが消滅するので、物体が大きく帯電することはない。多くの産業工程にみられる帯電は接触、摩擦、衝突、はく離、流動、攪拌、混合、噴霧・噴出、沈降・浮上、粉碎、滴下（しずく）など接触・分離の際に起こるので、2.2を参照して場所を特定するとよい。

6.2.1 帯電ハザードとなる帯電物体とその場所の特定

チェック項目 11 チェック項目9, 10より、帯電しうる物体とこれがある場所を特定する

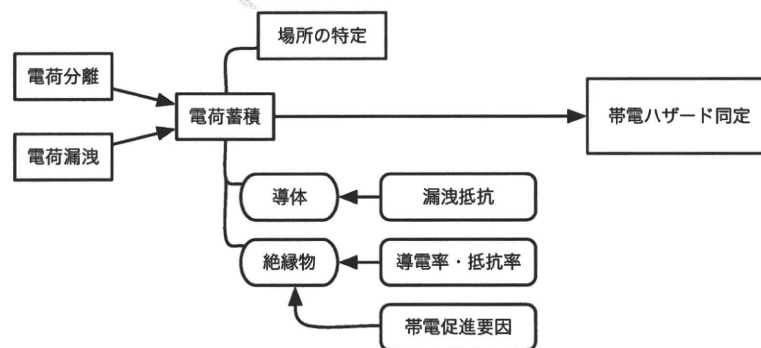


図 6.1: 帯電ハザード同定

電荷分離が起きていて、電荷緩和が小さい物体と箇所（たとえば、低導電率液体の接地金属配管輸送、高導電率液体の絶縁性配管輸送、低抵抗率粉体の空気輸送など）、また、電荷蓄積した物体が相当量集まっており電荷緩和が小さい箇所（充てん直後の容器・袋類内の絶縁性物質など）を、工程・作業に照合させて探すことが帯電ハザードの同定の第1段階である。帯電物体は、この2つのタイプの箇所から自ずと特定される。

電荷分離が起きている箇所は異種の物質が接触・分離する場所であるので、液体、固体、粉体が流動、噴出・噴霧、はく離、衝突、摩擦している場所である。また、蓄積される電荷は接触面積と速度に依存する。

電荷緩和が小さいということは、蓄積された電荷が接地（大地）へと漏洩される電流が小さくなることである。このとき、漏洩抵抗が高くなっていることを意味しており、これにより電荷緩和が抑制される。具体的には、導体が規定漏洩抵抗(6.4.1.2) [4] で接地されていない、または、接地されていても物質自体の抵抗率が高い（導電率が低い）ということであり、前者は導体の漏洩抵抗によって、後者は使用しているものが静電的に絶縁性物体（低導電率または高抵抗率物体）であるかによって帯電ハザードを抽出できる。

また、タンク、サイロ、ホッパー、ドラム、バグ、袋などの容器・袋類で帯電した物体が相当量蓄積される場所も帯電ハザードとなる可能性が高いのでその場所も特定する必要がある。

6.3 帯電ハザードの絞り込み

6.3.1 可燃性雰囲気形成ハザードとの照合

チェック項目 12 可燃性雰囲気形成ハザードと合致する場所はないか

6.2で洗い出された帯電ハザードのうち、可燃性雰囲気でない場所は着火リスクはないので除外する。この除外は記録に残す。なお、新規の設備、工程・作業のリスクアセスメントは、除外しないで帯電ハザードを同定する。

6.3.2 静電気対策の適合

チェック項目 13 静電気安全指針 2007 [4] に示す静電気対策（のための既定値）を満たしているものはないか

静電気安全指針 [4] に示す静電気対策およびこのための既定値は十分な安全マージンを考慮したものであるので、6.3.1 までで抽出された帯電ハザードのうち、これを満たしているものは、着火リスクを十分に許容できるほど帯電レベルが小さくなっている¹。したがって、6.2で洗い出された帯電ハザードのうち、静電気対策が適切になれているものは着火リスクはないので除外する。なお、この除外は記録に残す。

逆に静電気対策を満たしていないものは帯電ハザードの可能性が高い。固体、液体、固体、粉体および気体（11-14章）に分けて示した確認事項およびリスク低減策を参考に静電気対策との隔たりの有無からも帯電ハザードを特定できる。

¹たとえば、接地配管を用いた流速制限以下の液体輸送の液体帯電など

6.4 電荷緩和による帯電ハザード同定

帯電は電荷緩和によって抑制されるので、電荷緩和によって帯電ハザードを同定する。この電荷緩和は漏洩抵抗に依存する。設備、容器、道具、人体などの導体や静電気対策品の接地が規定抵抗以内になっているか、また、使用している物質の抵抗率、または導電率を調査して帯電ハザードを同定する。

6.4.1 導体の帯電（静電誘導）ハザード

6.4.1.1 接地・ボンディング

導体を接地しないと帯電した物体の誘導により電位が生じて帯電ハザードと同様な状態となり、火花放電のハザードとなる。接地・ボンディングは静電気対策の基本であるが、70%超の静電気事故の原因は導体・人体の非接地である。

また、導電性容器が接地されないと、容器内の物体の電荷も緩和されない。

6.4.1.2 導体および人体の漏洩抵抗

チェック項目 14 漏洩抵抗が $10^6 \Omega$ 以上の導体はないか

チェック項目 15 人体の漏洩抵抗が $10^8 \Omega$ 以上になっていないか

静電誘導ハザード同定の詳細は7章に譲る。

6.4.1.3 静電気対策品の接地

チェック項目 16 接地が必要な静電気対策品の接地が確実になされているか

接地が必要な静電気対策品（粉体用の用品に多くみられる。たとえば、FIBC、バグフィルタなど）は接地されていないと電荷緩和の機能が働かないので、帯電ハザードとなる。

この場合も導体接地の漏洩抵抗（ $10^6 \Omega$ 以下）の条件を満たしているかを調査する。

6.4.2 固体絶縁物の帯電ハザード

6.4.2.1 抵抗率による絶縁性物体の抽出

チェック項目 17 帯電ハザードとなる絶縁性物体の抽出

物体の抵抗率が高いほど電荷緩和は抑制されるので、抵抗率によって帯電ハザードのレベルを同定する。表6.2の絶縁性物体は接地しても無駄である。絶縁性物体の使用は電荷蓄積の要因となり、帯電ハザードとなるので、利用している絶縁性物体を抽出する。

絶縁性物体は、絶縁性材料できた物であり、たとえば、容器類（タンク、ドラム、ペールなど）、ホース・配管類、シート、板、道具類などである。

固体の詳細なリスクアセスメントは11章を参照する。

表 6.1: 固体の帯電性

帯電性の区分	体積抵抗率 ($\Omega \cdot m$)	表面抵抗率 (Ω)	帯電レベル
非帯電性物体	$< 10^8$	$< 10^{10}$	-
低帯電性物体	$10^8 - 10^{10}$	$10^{10} - 10^{12}$	低
中帯電性物体	$10^{10} - 10^{12}$	$10^{12} - 10^{14}$	中
高帯電性物体	$> 10^{12}$	$> 10^{14}$	高

表 6.2: 抵抗率による物体の静電気特性

	体積抵抗率 ρ_v ($\Omega \cdot m$)	表面抵抗率 ρ_s (Ω)
導体・導電性	$\rho_v < 10^5$	$\rho_s < 10^5$
電荷消散性*	$10^5 \leq \rho_v < 10^9$	$10^5 \leq \rho_s < 10^{12}$
絶縁性物体・絶縁性	$\rho_v \geq 10^9$	$\rho_s \geq 10^{12}$

これらの値は相対湿度 25±5 vol%における値である。

*Dissipative の和訳，電荷拡散性と訳されていることもあるが，このような材料の電荷消滅のメカニズムは電荷拡散によるものだけではない。

6.4.2.2 固体の帯電性

固体の帯電性は体積抵抗率と表面抵抗率に依存する（表 6.1）。

6.4.3 液体の帯電ハザード

6.4.3.1 液体の導電率と電荷緩和

チェック項目 18 導電率による液体の帯電性調査

液体の配管輸送，攪拌など液体が異種の物質（液体，固体）と接触している場所では電荷分離により液体が帯電している。この電荷分離は，液体中の正・負どちらかのイオンが選択的に界面に集まることによって起こる。液体が接地した導体に接触しているとき，この発生電荷は電荷緩和により消滅していく。この電荷緩和は液体の導電率に依存（導電率が高いほど電荷緩和は大きくなる）するので，この導電率のクラス（表 6.3）によって帯電ハザードのレベルを同定する。導電率が低いほど帯電ハザードは高くなる。

種々の液体の導電率は静電気安全指針 2007 [4] を参照されたい。

この電荷緩和を利用した対策が流速制限および静置時間である。

高導電性液体は，接地した導体と接触しているとき（たとえば接地タンク・配管での液体輸送），帯電ハザードから除外できる。

例外として高導電率の液体でも，帯電ハザードとなるときがある。液体が接地された導体に接触していないと，たとえば，絶縁性ホース，容器を用いていると，電荷緩和はないので，導電率が高い液体でも，帯電ハザードのレベルは高くなる。また，放電が起きたとき，導体同士の放電（火花放電）と同様になり，放電エネルギーが高くなるので，低導電率液体を絶縁性ホース，容器で取り扱っているときよりも，放電の着火性が高くなる。したがって，液体が容器等で絶縁される場合は，固体（容器）の抵抗率により帯電ハザードを同定する。

静電気対策が適切になされている場合は，帯電ハザードはなしとする。また，高導電率の液体が接地された容器，配管などで電荷漏洩され，電荷蓄積がない場合も帯電ハザードはない。ただし，噴霧などの帯電促進要因がある工程はこれに当てはまらないので注意されたい。

液体の詳細なリスクアセスメントは 12 章を参照する。