

(c) カッター：カッター周辺の導体（構造物など）および袋との放電ギャップが考えられる。

### (3) 漏洩抵抗

(a) マンホールに取り付けた状態でのシュートの漏洩抵抗（測定値）は  $10^{13} \Omega$  程度である。

(b) 作業者は管理された帯電防止靴を着用、床は金属製で導電性塗料が施されているが、飛散した粉体が蓄積されたとき場所によっては作業者人体の漏洩抵抗が  $10^{12} \Omega$  程度まで増大した。

(c) カッターを取り扱う導電性床面では粉体が堆積することは偶発的な事象であり、ほとんどないとしてよいであろう。手袋をつけてカッターを握ったときのカッターと人体間の抵抗は  $8 \times 10^9 \Omega$ （測定最大値）である<sup>6</sup>。このときカッターは接地されているのと同等と解釈できる。

### (4) 静電容量

(a) マンホールに取り付けた状態でのシュートの静電容量（測定値）は約 100 pF である。

(b) 作業者人体の静電容量は 200 pF とした。

(c) 接地との距離に依存するが、カッターの静電容量は 5 pF とした。

Explosion group に対応した絶縁導体の静電容量の許容値は 11.1.1 を参照

### (5) 接地

(a) シュートの位置は、可燃性雰囲気 IIA hybrid, Zone 0 と同定した。この雰囲気では、シュートの静電容量が最大許容容量を超える。接地しないと事故事例からも着火の可能性が高いので、攪拌槽に端子を設けてボンディングにより接地することにした。このとき、作業終了後シュートを取り外して導電性床に置くまではボンディングを確保できる長さのリード線を用い、投入前から終了後までシュートを接地するようにした。

(b) 作業者の位置によって可燃性雰囲気が異なるが、静電容量が高いのでどこにしようとも、最大許容容量を超える。粉体が導電性床に堆積する（人体の漏洩抵抗が高くなる）おそれがある投入口付近に作業者がいるとき、作業者人体が静電誘導ハザードとなる。堆積防止の対策が必要である。

(c) カッターを取り扱う場所の可燃性雰囲気と静電容量の関係から接地は不要である。さらに、手袋の漏洩抵抗からカッターは持つことによって接地される。

(6) ハザードレベル シュート：0，作業者人体：4，カッター：0

ハザード同定シートは表 16.1 のとおり。

## 16.1.5 放電ハザード同定

### (1) 放電可能性と着火性

#### (a) 攪拌槽気相内

<sup>6</sup>カッターを握ったときカッターの金属部に触れるため抵抗が小さくなっている。帯電ハザード同定で用いた金属缶での測定よりも小さい抵抗となるのは、握り方による電氣的接触の状態が異なると考えられる。また、金属部を避けるようにして持つと、この抵抗は  $10^{11} \Omega$  程度まで増加するが、通常の持ち方でこのような状況はほとんどないと考えられる。

- (i) 気相内はすべて絶縁物で覆われた状態となっている。火花放電の可能性はない。
  - (ii) 気相内で起こりうるブラシ放電は絶縁物同士の放電<sup>7</sup>となるので、着火性放電とはならない。
  - (iii) 低速での攪拌であるので、ライニング表面の帯電は（着火性の）沿面放電を生起するほど高くないと同定できる。
  - (iv) 攪拌しているのに、液面に粉体が浮いて堆積することがないので、コーン放電の可能性はない。
  - (v) 気相内の帯電雲からの放電の可能性はない。
  - (vi) 攪拌槽気相内では着火性放電の可能性は極めて低い。攪拌槽気相での放電ハザードはないとした。
- (b) マンホール周辺
- (i) これまでのハザード同定により、シュートを接地することにしたので、シュートからの火花放電ハザードはない。
  - (ii) 作業者が粉体が堆積した導電性床にいて、人体が接地されない状態になると火花放電ハザードとなる。
  - (iii) 可燃性雰囲気はIIA hybridであるので、袋からのブラシ放電はハザードとなる。紙袋（内面 pp コートでも）であるので、通常では着火性の放電は起きにくいので、ブラシ放電はハザードとならない。しかしながら、ここでは、残った粉を振って出しているのに、これがブラシ放電ハザードとなる可能性がある。また、袋が水分などの導電性液体で局所的に濡れることがあると火花放電となる可能性があるが、ここでは濡れるようなことはないのでこの火花放電を除外した。
  - (iv) 粉体量、袋の抵抗、シュートの接地および帯電促進要因がないことから、袋での沿面放電ハザードはない。
- (c) 攪拌槽周辺
- (i) 作業者人体が接地されない状態になると攪拌槽との火花放電の可能性はある
- (d) 攪拌槽から離れた位置
- (i) 投入作業の場所から少し離れれば粉体が堆積していないので、導電性床で作業者人体が接地されて火花放電ハザードとならない。
- (e) 袋一時置き場所
- (i) 紙袋の帯電性から接地されれば、ブラシ放電ハザードはない。
  - (ii) 静電誘導ハザード同定の結果からカッターからの火花放電ハザードはない。

(2) ハザードレベル

着火性放電となりうるものは、マンホール周辺の袋からのブラシ放電、マンホール周辺および攪拌槽周辺の作業者人体からの火花放電の3つである。他の放電ハザードレベルは0である。

- (a) マンホール周辺の袋からのブラシ放電: 6 (放電可能性: 2, 放電タイプの重み: 3)
- (b) マンホール周辺の作業者人体からの火花放電: 10 (放電可能性: 2, 放電タイプの重み: 5)
- (c) 攪拌槽周辺の作業者人体からの火花放電: 10 (放電可能性: 2, 放電タイプの重み: 5)

着火性放電となりうる3つの放電ハザードの同定シートは表 16.1 のとおり。

<sup>7</sup>着火性ブラシ放電は主に帯電した絶縁性物体と導体との間に発生する

### 16.1.6 静電気着火リスク見積・評価

- (1) 危害のひどさは人的被害，設備被害および経済的損害の予測から A である。
- (2) 静電気着火ハザードレベル（可燃性雰囲気形成，帯電・静電誘導および放電ハザードレベルの積）と危害のひどさの組み合わせから静電気着火リスクは以下のように見積もられた。
  - (a) マンホール周辺の袋からのブラシ放電ハザードによる着火リスク：60A（可燃性雰囲気：10，帯電・誘導：1，放電：6）
  - (b) マンホール周辺の作業員人体からの火花放電ハザードによる着火リスク：400A（可燃性雰囲気：10，帯電・誘導：4，放電：10）
  - (c) 攪拌槽周辺の作業員人体からの火花放電ハザードによる着火リスク：240A（可燃性雰囲気：6，帯電・誘導：4，放電：10）
- (3) リスク低減策
  - (a) 粉体の床面堆積防止の対策として，大きめのホッパーに代えた。堆積防止の効果がみられ人体の漏洩抵抗が規定値以内になることが確認された。これにより作業員人体からの火花放電は許容できるリスクとなる。
  - (b) 残った粉をマンホール上，振って出さないことによる損害と他の場所（可燃性蒸気の存在しない場所）で回収した場合のコストを見積もることにした。
- (4) 対策後のリスクレベル
  - (a) マンホール周辺の袋からのブラシ放電ハザードによる着火リスク：60A
  - (b) マンホール周辺の作業員人体からの火花放電ハザードによる着火リスク：0
  - (c) 攪拌槽周辺の作業員人体からの火花放電ハザードによる着火リスク：0
- (5) 残存リスク
  - (a) マンホール周辺の袋からのブラシ放電ハザードによる着火リスク
  - (b) このブラシ放電は，紙袋および電荷消散性といえる手袋を使用していることから，放電が着火性となる可能性は低い。したがって，袋を振らないことにすれば許容できるリスクとなる。なお，不確実性をなくすためにも，手袋は導電性または電荷消散性の静電気対策品に代えた方がよい。
  - (c) シュートは，接地を忘れると，火花放電ハザードによる着火リスクが生起する。このリスクはマンホール周辺の作業員人体からの火花放電ハザードによる着火リスクと同様に400Aとなる。

表 16.1: リスクアセスメント実施例：液体への粉体投入

工程・作業等の名称		引火性液体への粉体投入									
可燃性雰囲気形成ハザード同定											
可燃性物質	液体 A, 粉体 B										
放出源の特定	液体 A	粉体 B									
場所 (所在)	攪拌槽内液面				袋内						
放出範囲	攪拌槽気相部からマンホール開放部・攪拌槽周辺まで				投入中の袋内部・周辺とマンホール周辺および攪拌槽内部まで						
着火性の調査	液体 A	粉体 B									
LEL	1.0%	-									
UEL	7.0%	-									
MIE	0.3 mJ	30 mJ									
引火点および液温	-20°C, 25°C	na									
Explosion group	IIA	III									
可燃性雰囲気の場所	攪拌槽気相部	シュート内部	マンホール周辺	マンホール上の袋内部	攪拌槽周辺	攪拌槽から離れた位置	袋一時置き場所				
Explosion group	IIA hybrid	IIA hybrid	IIA hybrid	IIA hybrid	IIA hybrid	IIA	IIA				
Zone	Zone 0	Zone 0	Zone 0	Zone 0	Zone 1	Zone 1	Zone 2				
ハザードレベル	10	10	10	10	6	6	2				
帯電ハザード同定											
導電率・抵抗率・漏洩抵抗	液体導電率 $5 \times 10^{-2}$ pS/m	粉体抵抗率 $5 \times 10^{14}$ Ω·m	袋表面抵抗率 表約 $10^{12}$ Ω裏約 $10^{13}$ Ω	粉体が堆積した床漏洩抵抗約 $10^{10}$ Ω	シュート漏洩抵抗約 $10^{12}$ Ω	手袋 $6.9 \times 10^9$ Ω					
帯電物体	投入前の槽内液体	投入後の槽内液体+粉体	ライニングガラス	投入粉体	作業者人体	シュート (シュート非接地)	シュート (シュート接地)	袋 (シュート非接地)	袋 (シュート接地)	一時置き場所の袋	
可燃性雰囲気との照合による除外	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	
静電気対策の適合	n	n	n	n	n	n	y	n	y	y	
帯電レベル	高	高	高	高	低	低	y低	n中	y中	y中	
電荷漏洩の有無	無	無	無	無	無	無	有	無	有	有	
帯電促進要因の有無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	
ハザードレベル	3	3	3	3	4	4	0	3	1	1	
静電誘導ハザード同定											
絶縁導体	シュート			作業者人体			カッター				
放電ギャップ	攪拌槽金属部, 作業者人体, 袋			攪拌槽金属部, シュート, 袋			袋, カッター周辺導体				
漏洩抵抗	約 $10^{13}$ Ω マンホールに置く			約 $10^{12}$ Ω 粉堆積床上			< $10^{10}$ Ω 手に持ったとき				
静電容量	約 100 pF			約 200 pF			約 5 pF				
接地の要否	要			要			不要				
接地の実施	接地			床面の粉堆積防止が現状では困難			不要				
ハザードレベル	0			4			0				
放電ハザード同定											
放電	マンホール周辺の袋からのブラシ放電			マンホール周辺の作業者人体からの火花放電			攪拌槽周辺の作業者人体からの火花放電				
ハザードレベル	6			10			10				
静電気漏洩リスク見積・評価											
危害のひどさ	A										
静電気着火ハザード	マンホール周辺の袋からのブラシ放電			マンホール周辺の作業者人体からの火花放電			攪拌槽周辺の作業者人体からの火花放電				
リスクレベル	60A			400A			240A				
対策後のリスクレベル	60A			0			0				
対策後の残存リスク	マンホール周辺の袋からのブラシ放電：袋を振って残った粉を出すことを止めればリスクは許容できる										

## 付録A 可燃性雰囲気の見積

### A.1 可燃混合ガス・蒸気のLELおよびUELの推算

いくつかの可燃ガス・蒸気が混合されたときのLELおよびUELが必要となることがしばしばあるが、多くの炭化水素の場合にLe Chatelierの経験式[41,42]により求めることができる。

$$LEL_{mix} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{LEL_i}} \quad (A.1)$$

$$UEL_{mix} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{UEL_i}} \quad (A.2)$$

ここで、 $LEL_i$ 、 $UEL_i$ は空気との混合気の成分*i*の燃焼（爆発）下限および上限（vol.%）、 $y_i$ は成分*i*のモル比、 $n$ は混合ガス・蒸気を構成する可燃性ガス・蒸気種の数である。

### A.2 LELおよびUELの見積

データがない場合は実験によって燃焼限界（LELおよびUEL）を測定する必要があるが、状況によっては見積もる必要があることもあるであろう。多くの炭化水素蒸気は可燃物の化学量論濃度（Stoichiometric concentration）から

$$LEL = 0.55C_{st} \quad (A.3)$$

$$UEL = 3.50C_{st} \quad (A.4)$$

により見積もることができる[42,43]。ただし、 $C_{st}$ は空気（酸素21%）との混合気での化学量論濃度（vol%）である。この化学量論濃度は有機物の燃焼反応



から求める。これから

$$z = m + x/4 - y/2 \quad (A.6)$$

を得る。したがって、

$$\begin{aligned} C_{st} &= \frac{\text{moles fuel}}{\text{moles fuel} + \text{moles air}} \times 100 \\ &= \frac{100}{1 + \frac{\text{moles air}}{\text{moles fuel}}} = \frac{100}{1 + \frac{\text{moles } O_2}{0.21 \times \text{moles fuel}}} \\ &= \frac{100}{1 + \frac{z}{0.21}} = \frac{100}{4.76m + 1.19x - 2.38y + 1} \end{aligned} \quad (A.7)$$

この  $C_{st}$  を式 (A.3) および (A.4) に代入して

$$LEL = \frac{0.55 \times 100}{4.76m + 1.19x - 2.38y + 1} \quad (\text{A.8})$$

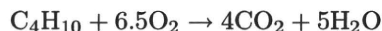
$$UEL = \frac{3.50 \times 100}{4.76m + 1.19x - 2.38y + 1} \quad (\text{A.9})$$

### A.3 限界酸素濃度の見積

LELは空気中が基本であるが、酸素、すなわち、火炎進展に必要な最小酸素濃度 (MOC: Minimum oxygen concentration) も可燃性雰囲気形成の重要な要素となる。この最小酸素濃度は限界酸素濃度 (LOC: Limiting oxygen concentration) と呼ぶことが多い。酸素をこの濃度以下にすると、反応によって、混合気が十分に加熱されるエネルギーを与えることができなくなり、火炎は進展しない。つまり、窒素などを添加して、酸素濃度をこれ以下にすれば爆発・火災を防止できることから、不活性化 (イナート) として利用されている。

可燃物、酸素および窒素の濃度で燃焼範囲を示した燃焼三角図 (Flammability triangle diagram) の利用も可視化されるので便利である。

実験データが利用できない場合は、多くの炭化水素で、化学量論 (stoichiometry) の燃焼反応と LFL から見積もることができる [42]。例としてブタン ( $C_4H_{10}$ ) の LOC の見積を示す。ブタンの化学量論の燃焼反応は



ブタンの LEL は 1.6% である。

$$LOC = \left( \frac{\text{moles fuel}}{\text{moles fuel} + \text{moles air}} \right) \left( \frac{\text{moles oxygen}}{\text{moles fuel}} \right) = LEL \left( \frac{\text{moles oxygen}}{\text{moles fuel}} \right) \quad (\text{A.10})$$

これに値を代入して

$$LOC = 1.6 \times \frac{6.5}{1.0} = 10.4\%$$

### A.4 危険場所のクラス分けの例

Zone (危険場所 (箇所, 区域)) のクラス分けは 5.4.2 の調査によって評価される。ここでは、参考に例を示す。

- Zone 0

- 大気開放ベントをもつタンク内の可燃性液体表面とその周辺
- 連続的または長時間に大気に開放される可燃性液体または可燃性液体湿潤物の表面とその周辺
  - \* 事故事例からサンプリング, 充てん, 移し替え, 清掃など多くの作業では周辺に連続的に可燃性雰囲気が形成されている可能性が高い

- Zone 1

- Zone 0 の周辺

- 通常運転・作業中に可燃性物質が大気中に放出することが予測できる箇所の周辺
  - \* たとえば、ポンプ、コンプレッサなどの加圧部のシール部、サンプル抽出部、放出弁・ベント等の開口部などの周辺
- Zone 2
  - Zone 1 の周辺
  - 通常運転・作業中に可燃性物質が大気中に放出しないと予測できる箇所の周辺
    - \* たとえば、ポンプ、コンプレッサなどの加圧部のシール部、フランジ等配管接続部、サンプル抽出部、放出弁・ベント等の開口部などの周辺
- Zone 20
  - 粉じんが内在する場所：ホッパー、サイロ、サイクロン、フィルタ、FIBC、袋、粉砕器、乾燥器、混合器など
  - 作業により粉じん爆発雰囲気が連続的に形成される場所
- Zone 21
  - Zone 20 の周辺
  - 粉じん雲が形成しうる容器等の内
  - 工程・作業によって粉じん雲を形成しうる粉じん層がある場所
  - 粉じん雲が形成されている容器等の開放部周辺：たとえば充てん・排出等の場
- Zone 22
  - 不測の事態で粉じん爆発雰囲気を形成しうると予測できる場合、Zone 20 および 21 以外の粉じん取扱場所は Zone 22 とする
  - Zone 20 または 21 となる場所に適切な対策を施した場所

## A.5 危険場所の範囲の例

### A.5.1 プロセス容器の可燃性雰囲気

液体が入った屋内プロセス容器で上部の開放部が空いている場合の例を図 A.1 に示す [33]。ただし、液体は容器配管を通して容器に導入、また容器から排出される。液温は引火点よりも高く、蒸気密度は空気よりも大きいとする。ここで、

### A.5.2 屋外液体タンクの可燃性雰囲気

液体が入った屋外タンクで上部の開放部が空いている場合の例を図 A.2 に示す [33]。ただし、液体は容器配管を通して容器に導入、また容器から排出される。液温は引火点よりも高く、蒸気密度は空気よりも大きいとする。ここで、

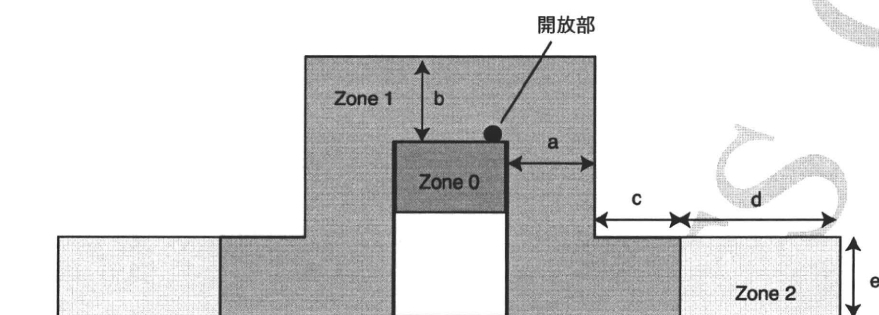


図 A.1: プロセス容器の可燃性雰囲気範囲の例  $a = b = c = e = 1 \text{ m}$ ,  $d = 2 \text{ m}$

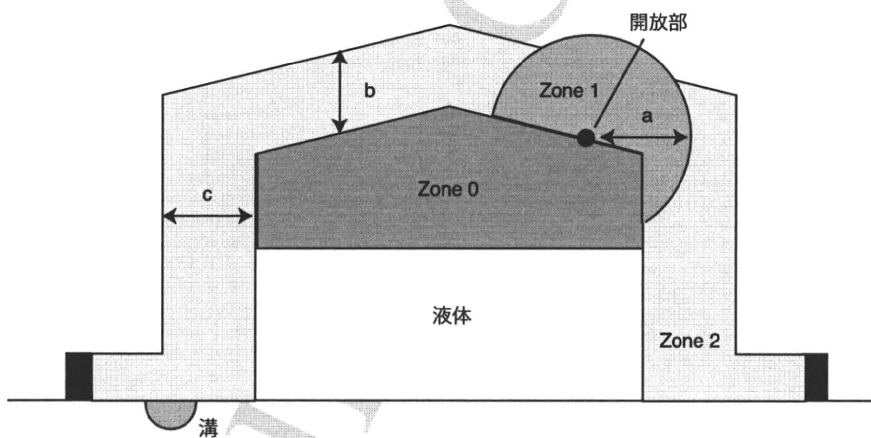


図 A.2: 屋外液体タンクの可燃性雰囲気範囲の例  $a = b = c = 3 \text{ m}$ ,  $d = 2 \text{ m}$



## 付録B Fault tree analysis: FTA

### B.1 FTA

頂上事象を“静電気着火”とした Fault tree analysis (FTA) を検討した。その結果を図 B.1 に示す。

ここに示しているボトム事象は事故事例分析によっても確認されたものである。ただし、これらの事象は上位事象の要因を示すものであり、必ずしも Fault 事象ではないことに注意されたい。

オレンジ色で示したボトム事象は静電気対策の不備に相当しているものであり、これに対応する静電気対策が施されればトップ事象に至らないことを示している。これは静電気対策の妥当性を証明しており、この FTA の論理の妥当性を示すものでもある。

この図のなかの“絶縁性物体の使用”は最も対策が困難である。通常は導電性を付加して（導電性添加剤，電荷消滅性の対策品を用いる）対策するが，生産している製品自体が絶縁性物体であれば絶縁性物体を使用せざるを得ない。しかしながら，帯電は処理速度に依存するので，これにより帯電レベルを抑えることができる。これに対応する静電気対策が速度制限による帯電抑制である。

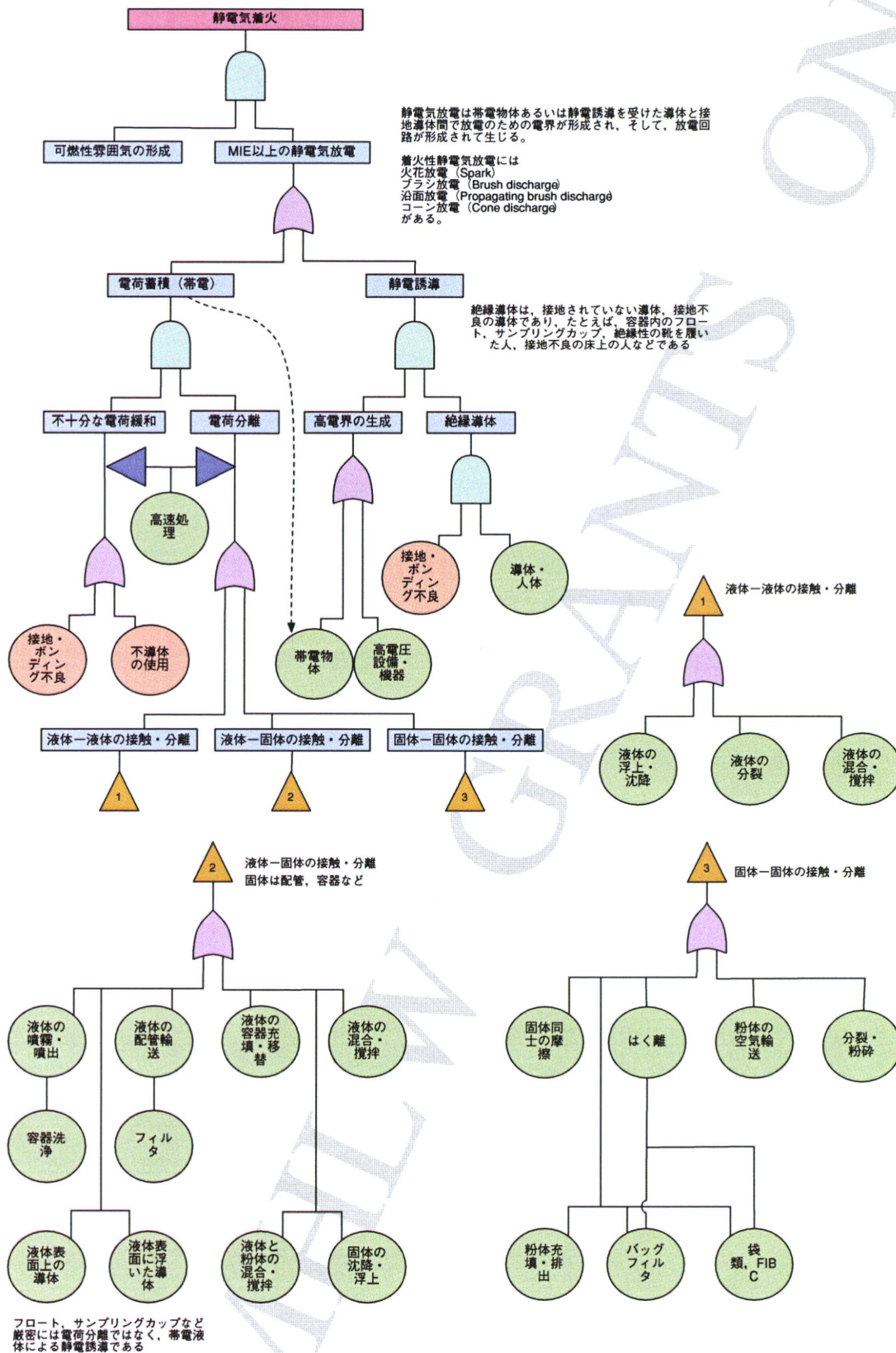


図 B.1: 静電気着火の FTA

## 付 録 C 静電気事故の統計的分析

### C.1 はじめに

静電気が原因の事故は、静電気対策を実施しているといっているところ（結果的に対策が不十分であった）でさえも、未だに起きている。これらの事故は軽微なものもあるが、設備の損害や死亡も含めた被災者が伴う重大な災害となることも残念ながら少なくない。

リスクアセスメントが誕生した経緯にみられるように、事故を教訓として、事故に学ぶことは重要である。このときに実施する事故分析が新しい知識・対策・ルールを導き、より信頼性の高い安全を提供するものでなくてはならない。さらに、事故事例を調査し、その原因を究明して得られた結果を公開することは再発防止につながる説得力のある新しい知識となる。1件の事故調査だけでも十分に再発防止に役立っていることは確かであるが、本報告のように多数の静電気事故を包括・系統的に統計分析・調査して、事故の傾向を数量的に示したものはないのであろう。このような調査は、タスクとなっているリスクアセスメント、特にハザード同定に重要な情報を与えることであらう。

ここでは、静電気が原因とされている310件（1960-2010年）の事故のうち、静電気が原因であると推定できた153件の事故の分析調査結果を報告する。なお、ほかの157件については、情報不足、あるいは、静電気以外の着火原因の方が確からしいと考えられるものであるので除外しているが、静電気を原因とするならば、着火に至る過程（シナリオ）は同様な傾向が得られている。

この調査は、静電気リスクアセスメント手法を確立する研究の一部として実施されたものであり、目的は事故傾向の把握および開発中のハザード同定法に活用すべく静電気ハザードを洗い出すことであった。

海外でも静電気事故事例を紹介している書籍 [3, 44, 45] があるが、それらの事故は類似したものばかりであり、ここで得られた結果は日本に特有なものではなく、国際的に共有できるものと考ええる。換言すれば、類似の事故が繰り返し起こっているということである。事故事例分析の公開の重要性がここでも現れている。

### C.2 静電気着火ハザード

#### C.2.1 可燃性雰囲気形成

可燃性雰囲気が形成されない限り着火源があったとしても着火することはない。どのような可燃性雰囲気が形成されていたかを統計的に調査することは再発防止だけではなく、特にハザードレベルの見積りに重要と考える。静電気着火では液体蒸気によって可燃性雰囲気が形成されて着火する場合が多いことが示された（図 C.1）。

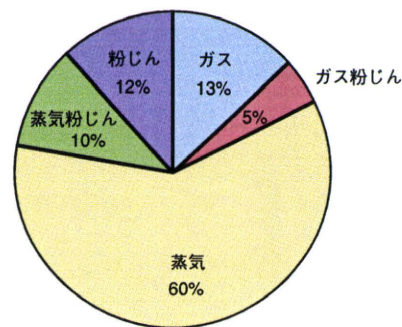


図 C.1: 可燃性雰囲気を形成した可燃性物質

### C.2.1.1 気体による可燃性雰囲気の形成

形成されていた可燃性雰囲気が気体である場合は全体の 13.1% であった。このうち水素が含まれている場合が 14 件 (70%) であり、気体によって可燃性雰囲気を形成されて静電気着火するケースは可燃性気体が水素であることが極めて多い。このとき、水素が直接に用いられている場合だけではなく、塩酸、過酸化水素、硫化水素などから反応によって水素が生成されていることも少なくないので、このようなハザードはハザード同定のチェック項目に含められるべき事項である。他に可燃性雰囲気を形成した気体としては、エチレン (4 件) および LP ガス (2 件) である。

気体による可燃性雰囲気の形成の要因は漏洩によることが多いことを付記しておく。この場合、気体のみが漏洩するほかに、液体も同時に噴出して帯電を促進している事例もある。

後に示す粉じんとハイブリッド可燃性雰囲気では、ポリエチレンおよびポリプロピレンの脱ガス不足を原因とするエチレンまたはプロピレンが可燃性雰囲気を形成している。実際は、ハイブリッドというよりもこれらの気体が可燃性雰囲気を形成していたと考えた方がよいであろう。

### C.2.1.2 液体蒸気による可燃性雰囲気の形成

形成されていた可燃性雰囲気が液体蒸気である場合は全体の 60.1% であった。後に示す粉じんとハイブリッドを含めれば 70.6% であり、ほとんどの可燃性雰囲気の形成は液体蒸気によるものである。液体蒸気の種類はトルエン (20 件)、ガソリン (11 件)、ヘキサン (9 件)、ベンゼン (7 件)、酢酸エチル (6 件)、シンナー (4 件)、エタノール (4 件)、キシレン (3 件)、メタノール (3 件)、アセトン (2 件)、ナフサ (2 件)、スチレン (2 件)、軽油 (2 件)、重油、ジオキサン、廃油類などであった。

これらの液体から、液体蒸気による可燃性雰囲気形成のハザードレベルは液体の引火点と液温の関係をを用いると良いことを示している。なお、軽油についてはガソリンが前荷のタンクローリーのタンクに軽油を充てんするスイッチローディングであったことを付記しておく。通常、ガソリンの入ったタンク内の空気との混合気はガソリン蒸気が over-rich で着火することはなく、また、軽油は low-lean となり着火することはないが、ガソリンから軽油へのスイッチローディングでは可燃性雰囲気が形成される。

### C.2.1.3 粉じんによる可燃性雰囲気形成

形成されていた可燃性雰囲気が粉じんである場合は全体の 11.8% であった。粉じんの種類はアルミニウム粉 (3 件), ポリエチレン (2 件), ポバール, デカボラン, パラオクチルフェノール, ビスフェノール, アントラセン, 硫黄粉などであった。

絶縁導体 (移し替え, 袋詰めなどで使用した道具 (バッグフィルタの金属部, 絶縁容器の金属部, ふるいわけのふるいなど) による火花放電と FIBC などの袋類および絶縁性配管で起きたと推定される沿面放電が着火原因である。

### C.2.1.4 ハイブリッド可燃性雰囲気形成

気体または液体蒸気と粉じんにより可燃性雰囲気が形成されるハイブリッド可燃性雰囲気は 15.0% であった。

このうち, 気体によるハイブリッド可燃性雰囲気は 4.6% で, ポリエチレン+エチレン (4 件) およびポリプロピレン+プロピレン (3 件) であった。乾燥工程でのガス抜き不足によるものである。

また, 液体蒸気とのハイブリッド可燃性雰囲気 (10.5%) は, 液体への粉体注入, 容器の溶剤洗浄後の粉体充てん, 粉体ドラム充てん作業付近でのドラム溶剤洗浄およびフィルタ清掃の際に使用された液体, たとえば, スチレン, ヘプタン, アルコール類, ケトン類などの溶剤または材料によって形成されることが多い。このときの粉じんはポリプロピレン, ポリスチレン, ポリビニルアルコール, 無水マレイン酸, アルミニウムイソプロオキシド, ゴム粉, ヒドラジン, 塗料粉, 医薬品などであった。

ハイブリッド可燃性雰囲気は単体の場合よりも着火エネルギーを低くすることが多いので, 十分なリスクアセスメントが必要である。

## C.2.2 帯電の原因

帯電は, 図 4.1 および B.1 に示すように異種の物質の界面での接触・分離による電荷分離によって発生する電荷が, 電荷緩和が不十分なときに, 蓄積されることによって起こる。事故事例から主な帯電の要因は液体-固体界面での液体の流動, 攪拌, 噴霧・噴出などによる電荷分離, 固体-固体界面での粉体が関連する摩擦・衝突およびローラとフィルム, ドラムと内袋など固体物同士の摩擦・はく離による電荷分離である。

これをまとめると図 C.2 のようになり, 液体の流動および攪拌 (主に液体と粉体の攪拌) が 36.8% と最も多く, 次いで摩擦・衝突 (主に粉体) が 26.5%, 漏洩・噴出が 20.6%, はく離が 9.7%, 噴霧が 6.5% の帯電の原因となっている。

### C.2.2.1 流動・攪拌

液体の流動による帯電は, 液体が流動する工程・作業に付随する現象である。たとえば, 配管輸送による充てん・移し替え, タンク液抜き, ポンプドレイン抜き, バルブからのサンプリングなどである。

高流速, スプラッシュローディング, フィルターおよび二相液体 (液体に混ざらない液体・固体が含まれる場合) など帯電を促進させる事例もあった。絶縁性ホース・配管および容器を使用した

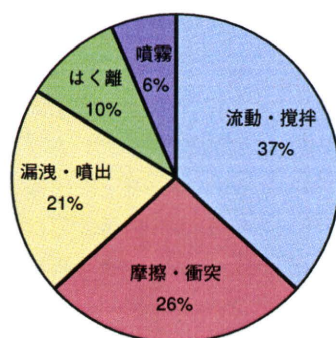


図 C.2: 帯電の原因

事例も少なくない。電荷緩和がなくなるので、このような絶縁性配管・容器は使用すべきではない。やむをえず使用する場合は流速制限をするなど細心の対策が必要である。

パイプ先端にフィルタを取り付けた充てんは、必要な緩和長が確保できないので、充てん容器直近ではフィルタを使用してはならない。この事例では絶縁性ホースにフィルタを取り付けた金属留め具が絶縁されていたため火花放電が発生したと推定された。

攪拌による帯電は液体と不溶液体、粉体などを混合する工程で見られる事例で、液体と不溶液体または固体の界面での電荷分離によるものである。攪拌翼・容器壁でも当然に電荷分離は発生している。

### C.2.2.2 摩擦・衝突

摩擦・衝突による帯電は粉体に関連するものが多い。主に粉体輸送（空気輸送も含む）による充てん・移し替えおよび容器への仕込みの際の粉体と固体との電荷分離である。

最も多い事例は液体への粉体投入（摩擦・衝突の42%）であり、粉体と袋、ドラム、ひしゃく、スコップ、シュートおよびホッパーなどとの電荷分離である。クラフト袋のライナーが粉体とともに抜き出て着火した事例もあるので、袋の構造の対策も必要であろう。液体の入ったタンクが窒素シールされていても、タンクマンホールが開放された上に粉体とともに空気がタンク内に進入して可燃性雰囲気容易に形成されるので、静電気安全指針2007 [4] に示しているようにホッパーおよびロータリーバルブ等を使用してこれを個別に窒素シールする必要がある。粉体のみではブラシ放電で着火することはないが、可燃性液体蒸気が含まれるとブラシ放電でも着火可能となるので、液体への粉体投入は容器充てんあるいは粉体に関する最も危険な工程といえる。

ほかの摩擦・衝突による帯電は、清掃時のふく、こするという摩擦およびローラによるフィルム等の搬送などの事例があった。

### C.2.2.3 漏洩・噴出

噴出は漏洩によるもので、おもな漏洩箇所はフランジやバルブである。多くはメンテナンス不良（ガスケット取付および締め付け）およびバルブ操作ミスが原因で噴出している。このほかに、経年腐食による配管からの噴出とラプチャーディスク作動の衝撃またはポンプキャビテーション発生時の振動が原因によるフランジからの噴出という事例もある。ほかに、排気（液体も混在）および液抜きの際に高圧または開放しすぎなどで噴出した事例もある。

噴出で形成される帯電雲と接地物との間で起きる放電は、帯電雲の規模や発生しうる空間電荷密度から考えて、着火性放電を生起させることは極めて困難である [31]。ただし、着火エネルギーが極めて低くなる可燃性雰囲気（たとえば、酸素リッチ雰囲気または水素-空気雰囲気）では帯電雲と接地物とのブラシ放電によっても着火する可能性はあるであろう [31]。水素を含有して液体が噴出して可燃性雰囲気を形成した事例が後者に相当するであろうが、多くは周辺の絶縁導体による火花放電が原因と考えられる。フランジおよびバルブ周辺に絶縁導体となりうるものを置かないことである。これらの周辺において現場でよく見かける絶縁導体は、清掃道具、金属小容器、台車および計量器など可搬できるものである。これらの保管場所を再検討されるか接地・ボンディングが必要である。また、小容器など多数の可搬導体のカスケード接続のボンディングによる接地を見かけることがあるが、途中で取り外すと多くの導体が接地されないことになるので可搬導体ではカスケードボンディングを避ける。本調査外であるが、ニアミス事例がある。

ここで、気体のみが噴出した場合、気体は帯電しないので<sup>1</sup>、液体または固体粒子（粉体、さび・鉄粉など）が同時に噴出されることが必須である。また、液体のみではなく、固体粒子が含まれて噴出すると帯電を促進させる因子となる。このような二相流体の漏洩・噴出の事例として水素と灯油、キシレンと無水フタル酸またはテレフタル酸などがあった。

#### C.2.2.4 はく離

摩擦・衝突によって帯電した粉がホッパー、シュート、袋、バッグフィルタなどに付着して、これが剥がれるとき、粉体投入の際に袋をホッパーなどから離すとき、または、ドラム内袋を引き抜くときなどに起こる電荷分離である。着火した可燃性雰囲気は粉体と液体蒸気のハイブリット雰囲気の場合がほとんどである。

#### C.2.2.5 噴霧

噴霧帯電は、溶剤噴霧、スチーム噴霧、スプレー塗装、静電塗装およびタンク洗浄の際の噴霧による帯電である。噴霧帯電で着火した事例のほとんどはその周辺に絶縁導体があり、これによる火花放電である。スチーム噴霧はトラブル対応またはメンテナンス時に可燃性雰囲気の形成防止に使用されたものであるが、帯電しやすいのでこのような用途では使用しないほうがよい。スプレー塗装はゴム底靴の作業者により塗装作業、静電塗装は被塗装物のフックが塗装により絶縁されたことが原因である。タンク洗浄は2件であるが、両方とも水素除去不足で水素が可燃性雰囲気を形成していた。一方はテフロンライニング容器の洗浄で、また、他方はビニールホースを使用して帯電を促進させる要因があった。

### C.2.3 静電気放電のタイプと原因

着火原因と放電のタイプは火花放電、ブラシ放電、沿面放電およびコーン放電であった。その割合は、図 C.3 に示すように、火花放電が圧倒的に多いことが示された。

<sup>1</sup>気体が帯電するという事は、電離しているということである。このためには気体原子・分子に電離エネルギー以上（十数 eV 程度）のエネルギーが与えられなければならない。

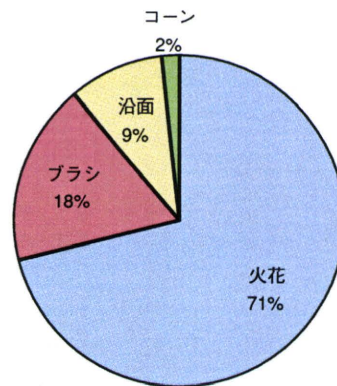


図 C.3: 着火源となった静電気放電のタイプ

### C.2.3.1 火花放電

静電気放電が発生するおもな原因は絶縁導体（作業者も含む）による火花放電であり、その割合は71.1%であった。この絶縁導体と接地導体とのごく短い間隙で空気の絶縁破壊電界以上の電界が形成されて火花放電は発生している。絶縁導体となった危険源としては、

- 掃除道具の金属部
- 金属容器
- 計量器
- バッグフィルタの金属部
- 金属棒
- ひしゃく
- 仕切り板
- 台車
- 液面フロート
- 金属へら
- ホッパー
- 金属漏斗
- ふるい
- 金属スコップ
- 踏み台
- 絶縁性ホース・配管の接続部および終端の金属部
- 作業者（絶縁性靴・床）
- 部分的に導電性ゴム引き布を用いた FIBC

などであった。すべてが可搬の導体か人体である。つまり、すべてが作業者がかかわる作業であったといえる。70%強の事故は静電気対策の基礎である接地・ボンディングをしていれば防止できていたということを強調したい。

上記に示した金属容器はバケツ、ペール、ビーカー、ドラムおよび可動タンクなどである。また、海外事例 [44] にもあるようにバケツの絶縁性取手をバルブ等に引っかけて実施するサンプリングまたはドレイン抜きの際の事故（3件）が意外と多い。

ホッパーがガラスライニング容器マンホールに置いただけで接地されていなかった事例がある。同様に絶縁性容器に置いた金属漏斗も絶縁導体に多い事例である。

接地した床等に置くことによって接地する方法は、その接触面の汚れで接地されない事例があるので、確実な結線による接地が必要である。

絶縁性の手袋で導体を取り扱うことによって、または、取手が絶縁物の導体が絶縁される事例もある。

底部が絶縁物の踏み台は踏み台だけではなく、その上に乗った作業者も絶縁される。

仕切り板は配管清掃のために用いたフランジに挿入する金属板である。清掃中の漏洩・噴出が可燃性雰囲気形成と帯電の原因である。この事例も配管フランジでの漏洩のハザードを示唆するもの



である。

液面フロートは設計ミスによる絶縁である。

高導電性の液体を絶縁性容器で取り扱っていると液体が絶縁導体となり、ブラシ放電ではなく、火花放電となったと推定できる事例もある。

漏洩・噴出時の絶縁導体による火花放電も多く、無視できないので、配管フランジなど漏洩・噴出の危険性のある場所の周辺には絶縁導体となる道具を置かないようにする必要がある。絶縁性靴を履いた作業者がタンク配管フランジからの噴出ガソリンをあびて、この作業者からの火花放電が着火源と推定できた事例もある。

### C.2.3.2 ブラシ放電

ブラシ放電は帯電した物体と接地導体（作業者も含む）との放電である。粉体や液体などの製品あるいはその容器や袋などが帯電して接地導体が近づくあるいは帯電物体に接触していた接地導体そこから離れるときに起きている。

たとえば、

- 液体充てんに用いる絶縁性ホース・漏斗などと接地導体（容器、作業者の指先など）との放電
- 接地ディップパイプの挿入不良
- 液体蒸気とのハイブリット雰囲気での粉体用袋と周辺接地物（作業者も含む）との放電、特に、粉体投入時の内袋の抜け出しおよびドラムからのポリエチレンライナーの引き抜きなどPP袋と接地導体（ホッパー、タンク・容器、作業者など）との放電という袋関連の事例も多い
- 液体とのハイブリット雰囲気でのブラシ放電にはバッグフィルタの粉体払い落としの事例も多い

### C.2.3.3 沿面放電

沿面放電は袋類からのものが多い。主に帯電した粉体が絶縁性袋・FIBCあるいはフィルタなどからはく離して排出するときに起きていたと思われる放電である。粉体塗装の排気用塩ビ配管での沿面放電と推定できた事例も1件ある。

沿面放電のハザードとなる絶縁性配管および袋類は避けることである。FIBCなど袋類は沿面放電に対応した適切な袋が用意されているのでそれらを使用することである。

### C.2.3.4 コーン放電

コーン放電と思われるものは3件であった。高分子ペレットの空気輸送サイロ充てんであったが、ガス抜き不足が着火エネルギーを低くしていたのが原因であった。

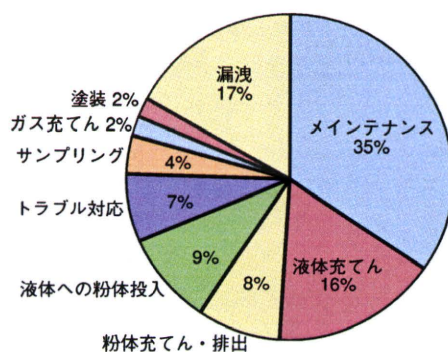


図 C.4: 工程・作業

### C.2.4 工程・作業

作業・工程のハザードレベルを把握するため、静電気着火が起きたとき何をしていたかをここに示す（図 C.4）。

94.1%は作業者が直接に従事していた工程・作業である。残りは定常運転中の噴出、ポンプキャビテーションによる異常噴霧、フィルタ金属部および液面計の絶縁である。原因はメンテナンスミス、操作ミス（希釈なし原料注入）の異常反応によるものおよびタンカー液面計の設計ミスによるものである。

着火源となった静電気放電の70%は可搬の絶縁導体または人体による火花放電であり（図 C.3）、さらに、ハイブリット雰囲気を含めれば70%強は液体蒸気によって可燃性雰囲気形成されていたので（図 C.1）、作業者がなんらかの導体を使用して、または、絶縁性床あるいは絶縁性靴を履いて液体を取り扱う作業が最もハザードとなる作業であるといえる。

#### C.2.4.1 メンテナンス作業

通常の生産工程・作業よりも清掃などメンテナンス作業中に事故が多いことが示された。メンテナンス作業の適切な安全管理の充実が必要である。

**ドレイン抜き サンプリング** (3件) も含めるとタンク洗浄、ポンプメンテナンス、および配管ブロー洗浄などに伴うバルブ・ノズルからの液体抽出の事故(17件)も意外と多い。これらは、すべて絶縁導体（主に受け容器）からの火花放電が原因である。

**バッグフィルタ** バッグフィルタの清掃作業時にも7件の事故が発生している。バッグフィルタのメンテナンス（取り付け）不良により非接地、棒でつつく、空気輸送中の払い落としなどが着火を誘引していた。

**洗浄・清掃** 洗浄・清掃のメンテナンスの事例は37件あり、洗浄・清掃作業での着火も多い。ただし、これには洗浄後のドレイン抜き作業も含まれる。

溶剤を用いたフィルタ、容器、塗装ノズル、清掃道具などの洗浄時にも多い。洗浄に用いる道具（金属へら、ホースノズル）、作業者などが絶縁導体となった火花放電が原因となることが多い。塗装ノズルの洗浄では循環される溶剤の容器が絶縁されていた事例もある。

タンク洗浄および清掃の際の着火（5件）もある。水素除去不足による洗浄，掃除道具の金属部または作業者が絶縁導体となったと推定できる事例などがある。

配管等の清掃，清掃後の撤去作業中・試運転中または運転開始時の漏洩という事例が比較的に多い。洗浄・清掃作業は作業中だけではなく，その後の作業についても，特に，漏洩防止に対して安全管理を充実させる必要がある。

#### C.2.4.2 液体充てん

液体の充てん・移し替えでは作業者を含めた絶縁導体からの火花放電か接地導体とのブラシ放電が原因である。タンク底部に近づけたディップパイプを用いてすべての導体の接地・ボンディングによる充てんが必要である。流速制限による帯電抑制も効果的である。

マイクロフィルタやスプラッシュローディングは帯電を促進するので，また，絶縁性の容器・配管の利用は電荷緩和がなくなるので十分なリスクアセスメントが必要である。フィルタを受け容器の直近につけることも緩和長がなくなるので避けなければならない。

スイッチローディングによる事例も2件ある。前荷物質の可燃性を把握して実施する必要がある。タンカー充てんで液面フロートが設計ミスにより絶縁されて着火した事例もある。

#### C.2.4.3 粉体充てん・排出

粉体の充てんの半分は空気輸送によるものであった。また，半分は脱ガス不足のペレットによるハイブリッド可燃性雰囲気形成されていた。ほかは，サイロ清掃に伴う排出と FIBC 充てん，FIBC 排出によるホッパー充てん，袋による手作業のタンク充てんおよびドラム充てん（PP 内袋）である。

液体蒸気とのハイブリッド可燃性雰囲気においては，ドラムから PP 内袋を引き抜くなど PP 袋に関する事例も少なくない。

#### C.2.4.4 液体への粉体の注入

蒸気によりハイブリッド可燃性雰囲気形成されて，ブラシ放電でも着火する危険性があるので，粉体を容器で取扱う工程のなかでも最も危険なものとなる。着火防止のためには，接地は当然であるが，直接投入はさけて，ロータリバルブ付きのホッパーを用いてこれを別に窒素パージする方法をとることを薦める。

#### C.2.4.5 トラブル対応

トラブル対応も無視できない。配管閉塞，停電による圧力上昇などの対応で，フランジ，バルブまたはノズルを開放して，気体（液体も含む）または液体（固体も含まれるが多い）を抽出する際に噴出して帯電して，可燃性雰囲気を形成させている。また，水素漏洩に対応して帯電しやすいスチームを噴霧するなどの事例である。原因は停電（1件）を除いてメンテナンス不足または不良によるものである。

起こりうるトラブルを予測して予防することとトラブル時および緊急時の適切な安全管理を充実させる必要がある。

スチーム噴霧など作業者は静電気対策としては誤った予測もできない行動をする事例もあるので，作業者の教育も重要な予防対策となる。

#### C.2.4.6 サンプルング

マンホールを開放してのサンプルングとタンクバルブからのサンプルングが半数ずつであった。いずれもサンプルング容器の絶縁が原因である。マンホールからのサンプルングはゲージウエルの設置が必要である。

#### C.2.4.7 ガス充てん

LP ガスまたは水素充てん中のホース接続の確認不足と高圧ホースをトラックが切断したための漏洩・噴出が原因である。ガスライター充てん中の作業者の絶縁が原因と推定できた事例もある。

#### C.2.4.8 粉体袋詰め

袋詰めに用いた金属製スコップの絶縁が原因であった。

#### C.2.4.9 塗装

粉体塗装の被塗装物フックの絶縁，局所排気塩ビダクト内での着火，絶縁靴を履いてのスプレー缶塗装などである。

#### C.2.4.10 通常工程・作業中の漏洩

配管の経年腐食，フランジのメンテナンスミス，デコンボ・異常反応による圧力上昇，ポンプキャビテーションの振動，操作ミスによる圧力上昇（希釈なし原料注入）による漏洩である。フランジからの漏洩が多い。

#### C.2.4.11 その他

ほかには、水素を用いたリークチェック中の漏洩，粉碎器のバッグフィルタの設置ミス・構造不良（金属留め具の絶縁），混合工程中の着火，ふるい分け作業中のふるいの絶縁による着火，結晶化工程中に棒でつつく，粉体排出・計量作業中にホッパーを棒でたたくなどである。

作業者は予想もしない行為をするかもしれないので，安全管理はこれにも対応しなければならないことを暗示している。

### C.3 まとめと対策

事故事例の統計分析によって得られた新しい知識は以下のとおりである

- (1) 最も興味深いことは、70%以上の事故は、絶縁導体からの火花放電が着火源となっていたことであり、これは、静電気対策の基本である導体の接地または靴と床による作業員人体の接地により、容易に防止できていたことである。この種の事故が絶えないのは知識や管理の不足によるものと考えられる。ハザード同定において静電誘導ハザードが確実になされるよう配慮することが必要である。