

化学プラントの 静電気危険性の評価と対策

住友化学(株) 生産技術センター
太田 潔

Evaluation and Prevention of Electrostatic Hazards in Chemical Plants

Sumitomo Chemical Co., Ltd.
Process & Production Technology Center
Kiyoshi Ota

Nowadays, electrostatic theories are usefully applied to various industries. On the other hand static electricity cause ESD (electrostatic discharge) problem in high technology industries or fire and explosion in chemical industries. In order to prevent incidents caused by electrostatic discharge, it is important that operators or staffs working in chemical plants find electrostatic potential hazards and have consultations with safety experts. Electrostatic charge and discharge phenomena, countermeasures against static electricity and some methods for evaluating electrostatic hazards are described in this paper.

はじめに

静電気現象は近年の目覚ましい研究成果によって複写機、集じん機等、産業上の有効活用が図られるに至っているが、一方ではESD (Electrostatic Discharge) と呼ばれることが多いエレクトロニクス分野の静電気放電による障害問題や化学産業における火災や爆発トラブルといった静電気災害が今もなお後を絶たない。静電気災害防止のためには専門的な知識もさることながら、工場で実際に生産に携わるオペレーターやスタッフが静電気安全に関する正しい知識を身に付け、静電的な潜在危険要因を発見し、保安防災の専門家に相談することが何よりも重要である。本稿では対象を静電気による火災・爆発防止に限定し、静電気災害防止に関して工場生産現場に携わる人が知っておくべき静電気帯電ならびに放電現象について紹介するとともに、災害防止技術と当社で実施している静電気危険性評価手法について紹介する。

静電気用語解説

ここでは、本稿に関係する静電気に関する用語について簡単に解説する。

1) 体積抵抗率

単位 $\Omega \cdot m$ 。物質の単位断面積、単位長さの抵抗値である。静電気漏洩のし易さの目安になる。導電率 (単位 S/m) と体積抵抗率には逆数の関係がある。

2) 導体と絶縁体

体積抵抗率によって Fig.1 に示すように分類される¹⁾。導体は接地が静電気対策として有効であるのに対し、絶縁体の接地効果は全くないが、殆ど期待できない。なお、接地されていない導体を「浮き導体」と呼び、静電的には大変危険な状態である。人体も浮き導体となることがある。

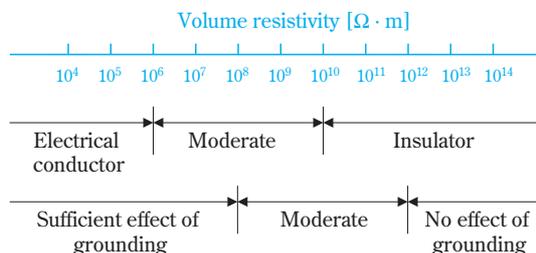


Fig. 1 Volume resistivity and effectiveness of grounding

3) 漏洩抵抗²⁾

漏洩抵抗は、物体自身の抵抗、電極などの接触抵

抗、接地抵抗等をすべて総合した、物体と大地間の抵抗であり、導体の帯電の大きさは一般に漏洩抵抗に依存する。

4) 電位

単位V。静電気帯電の大きさの間接的な目安になる。

5) 帯電量

単位C/g。単位質量当たりの静電気帯電の大きさを表す。

6) 静電容量

単位F。帯電している導体の電荷がQ[C]、電位がV[V]のとき、静電容量C[F]は $C = Q/V$ で与えられる。また、その時導体に蓄えられるエネルギーU[J]は、 $U = 1/2 \cdot C \cdot V^2$ で与えられ³⁾、可燃物の最小発火エネルギーと比較することによって着火危険の評価ができる。

7) 電界強度

単位V/m。任意の2点についてそれぞれの電位が与えられると、電界強度は電位差を2点間の距離で除することによって得られる。放電が発生する可能性があるかどうかの指標として重要である。

8) 誘電率

単位F/m。電気変位Dと電場Eとの関係 $D = \epsilon E$ を与える ϵ をいう。本稿で紹介する電界計算に必要な物性である。

9) 静電誘導

Fig.3(j)に示したように、帯電物体の近くに絶縁された導体があると、帯電物体から静電誘導を受けて導体の表面で電荷分離が起こる。これを静電誘導という。

10) 接地とボンディング

接地は大地と電氣的に接続することであり、ボンディングとは大地と電氣的に接続された導体に電氣的に接続することである。どちらも静電気的安全対策として非常に重要である。接地された導体にボンディングされた導体は接地されたと見なすことができる。漏洩抵抗が $10^6 \Omega$ 以下の導体は静電氣的に接地の状態であると見なすことができる。

静電気発生機構と帯電列

1) 発生機構

静電気帯電はFig.2に示すように、異種物質同士

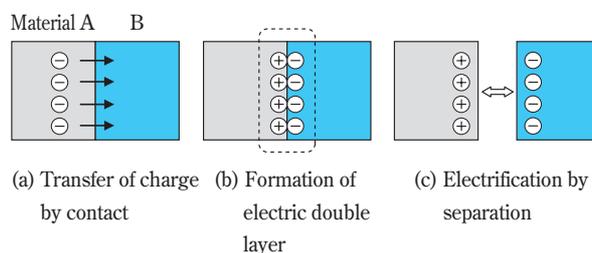


Fig. 2 Mechanism of electrostatic charge

が接触した際に境界面で電荷移動が起こって電気2重層を形成し、次いで両物質を分離すると電荷分離が起こり、両者に等量かつ異符号の電荷の過不足が生じることによって起こる。帯電は実際の取り扱いに応じてFig.3に示すように帯電形態を分類することができる。図中、(a)の摩擦帯電では、フィルムに有機溶媒が含まれている場合や近くで有機溶媒を取り扱う場合には引火の恐れがあるので注意が必要である。その他の摩擦帯電としては、粉体を気流輸送したり、シュートから排出する際の帯電が挙げられる。(b)の流動帯電は配管輸送などで生じるが、帯電が生じる配管内部で引火爆発が生じる可能性は一般には低く、液体移送先のタンク等の気相部での爆発が問題となることが多い。攪拌槽などでも流動帯電は生じるが、攪拌槽でスラリーや液液2層系などを攪拌した場合は、攪拌時の流動帯電よりも後述する攪拌が停止した際の沈降帯電の方が帯電が遥かに大きくなる可能性があるので注意が必要である。(c)の噴出帯電はシャワーボールによる槽内部洗浄、水や海水によるジェット洗浄、スチームの噴出、ベンチュリースクラバーからの液滴あるいはヒュームを含む高速気流噴出、高圧配管のフランジ部からの漏れなどが実例として挙げられるが、電気を通し易く静電氣的に安全と思われがちな水やスチームでも危険性がある点に留意する必要がある。(g)の沈降あるいは浮上による帯電については、Fig.3に図示した例以外には、スラリーや液-液混合層を攪拌中に攪拌が停止した場合、固形分の沈降あるいは液液分離が生じて帯電する危険性がある。平成15年十勝沖地震による北海道製油所のナフサタンク火災は、総務省消防庁の発表によると、泡消火剤の泡が時間の経過とともに消え、水に戻る時に生成した水滴がナフサ中を沈降して生じた沈降帯電が原因である可能性が高いと考えられている⁴⁾。(j)の誘導帯電については、サンプリングノズルからサンプルを受ける金属容器や、強帯電したフレキシブルコンテナ周辺の工具や人体などが非接地の場合に静電誘導を受けて強く帯電することがある。いずれも、周辺に可燃性溶媒やガスが存在する場合には容易に着火源になるので注意が必要である。

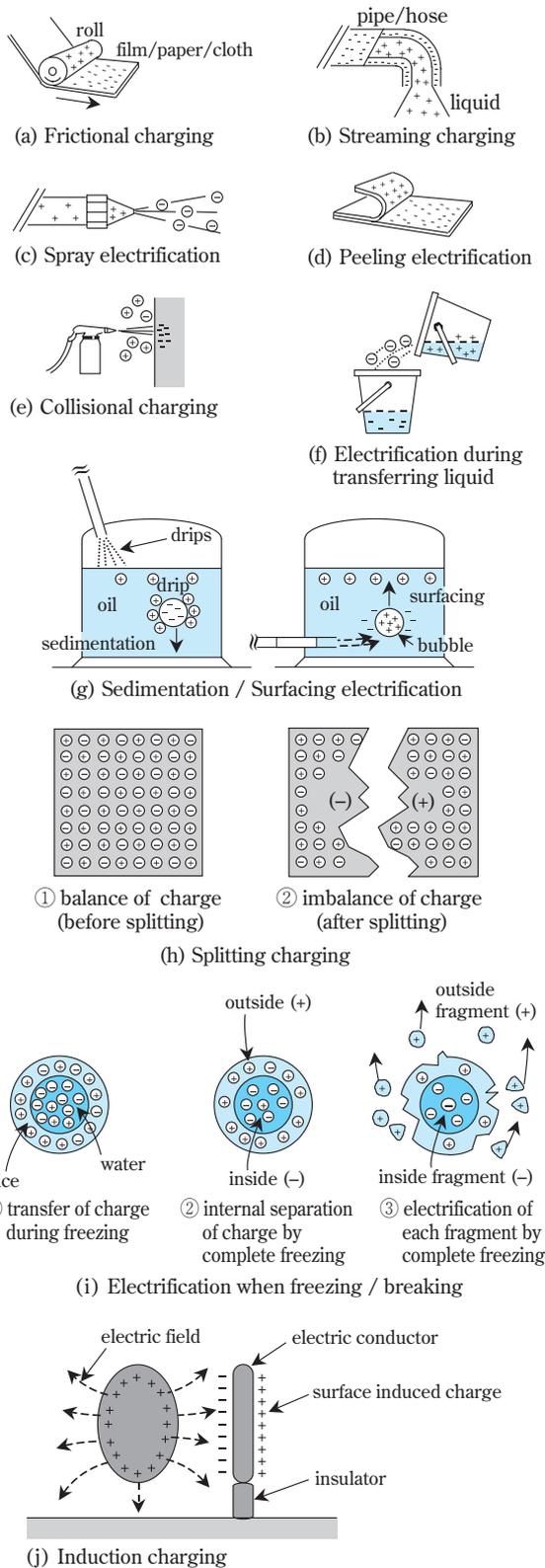


Fig. 3 Example of electrostatic charge

2) 帯電列

静電気帯電は異種物質の接触分離によって発生することは既に述べたが、帯電の大きさには接触する物質同士のいわば相性のようなものがあり、これは帯電列としてまとめられる。Fig.4 に帯電列の例を示し

metal (+)	fiber (+)	native material (+)	synthetic resin (+)
		asbestos	
		hair/fur	
		glass	
		mica	
	wool		
	nylon		
	rayon		
Pb			
	silk		
	cotton	raw cotton	
	hemp		
		wood	
		human skin	
	glass fiber		
Zn	acetate fiber		
Al			
		paper	
Cr			ebonite
Fe			
Cu			
Ni			
Au		rubber	polystyrene
	vinylon		
Pt			polypropylene
	polyester		
	acrylic fiber		
			polyethylene
	polyvinylidene chloride	celluloid	
		cellophane	
			vinyl chloride
			polytetrafluoroethylene
(-)	(-)	(-)	(-)

Fig. 4 Examples of series of frictional electrification

た²⁾。帯電列中の二つの物質を接触分離させたとき、上の物質が正 (+) に帯電し、下の物質は負 (-) に帯電する。帯電量は帯電列の上下位置が離れているほど大きくなる。帯電列の上下関係は物質の種類を超えて有効である。ここで特筆すべきはポリテトラフロロエチレン (テフロン) が帯電列中、負極性の最大に位置付けられることである。粉体を扱う化学プラントではホッパーやシュートの排出性を良くするために内面にテフロン内張りを施すことがあるが、静電的には危険な場合が多々あるため、採用にあたっては粉じん爆発等のおそれがないか、十分検討が必要である。

放電の種類と発生限界

静電気による火災爆発は静電気による放電現象が可

Table 1 Classifications of electrostatic discharge

Types of discharge	Characteristics	Hazards of ignition	Condition for discharge
Corona discharge	It can occur when an electrode with radius of curvature less than 5mm experiences a strong electric field.	not sufficiently energetic to ignite almost materials except several materials which has very small minimum ignition energy such as H ₂ , CS ₂ .	potential : more than several kilovolt
Brush discharge	It can occur between a conductor with radius of curvature in the range 5 to 50mm and either another conductor or a charged insulating surface.	sufficiently energetic to ignite gases and vapors and some dust cloud which has low minimum ignition energy (less than several mJ)	potential : more than dozens of kilovolt average of electric field : more than 1×10 ⁵ V/m
Cone discharge	It can occur along the conical surface of the powder heap during filling of a large silo with powder which has low conductivity.	sufficiently energetic to ignite gases and vapors and some dust cloud which has low minimum ignition energy (less than around 10 mJ)	diameter of powder : around 1-10mm
Lightning-like discharge	It can occur in a large container and a long spark jumps from the cloud to the grounded container wall.	sufficiently energetic to ignite gases and vapors and dust cloud	average of electric field : more than 2.7×10 ⁵ V/m
Spark discharge	transitional discharge phenomenon which lead to arc or glow discharge.	sufficiently energetic to ignite gases and vapors and dust cloud	electric field : more than 3×10 ⁶ V/m
Surface discharge	It can occur along the surface of thin insulating layer backed by a conductor.	sufficiently energetic to ignite gases and vapors and dust cloud	thickness of insulator : less than 8mm surface charge : more than 250μC/m ²

燃性物質の着火源となる。放電には幾つかの形態があり、それらの特徴を理解することは静電気による火災爆発を防止する上で重要である。Table 1 に放電の種類と特徴、着火危険についてまとめた^{1) 5)~8)}。

静電気災害の種類と対策

災害が発生した時の損害は時として甚大なものとなる。人命に関わることは勿論、設備損傷による損害、生産活動停止に伴う損害だけでなく、供給責任問題、工場周辺への影響問題など、企業の社会的信用をも失うことになるため、なんとしても防止しなければならない。火災爆発は酸化燃焼反応であり、燃焼の3要素である①可燃物②支燃物（空気あるいは酸素など）③着火源の3つの条件が満たされた時に発生する可能性がある。どれか一つでも条件が欠ければ火災爆発は起らない。従って安全対策ではこれらの条件を除去することを考えることになる。以下、災害の種類別に現象の説明と①可燃物除去と②支燃物除去の観点から安全対策について紹介し、最後に③着火源除去の観点から対策について紹介する。

1) 可燃性ガス・蒸気の爆発

可燃性蒸気やガスの最小発火エネルギーは0.2mJ前後のものが多く、ブラシ放電で容易に着火するので、接地などの着火源対策を講じるだけでは不十分であり、安全工学的には着火源がいつ存在してもおかし

くないと考えるべきである。従って、可燃物と支燃物の濃度を制御（典型的な例は窒素シール）して爆発範囲に入るのを回避する必要がある。爆発範囲は三角図で表されることが多い。Fig.5 に例としてメタン - 酸素 - 窒素系の爆発範囲の三角線図を示す⁹⁾。点Aはメタン100%であり、点Bはメタン20%、酸素30%、窒素50%である。この図から爆発下限界濃度は酸素と窒素の濃度によらずほぼ一定（メタンでは約5%）であるが、爆発上限界濃度は酸素・窒

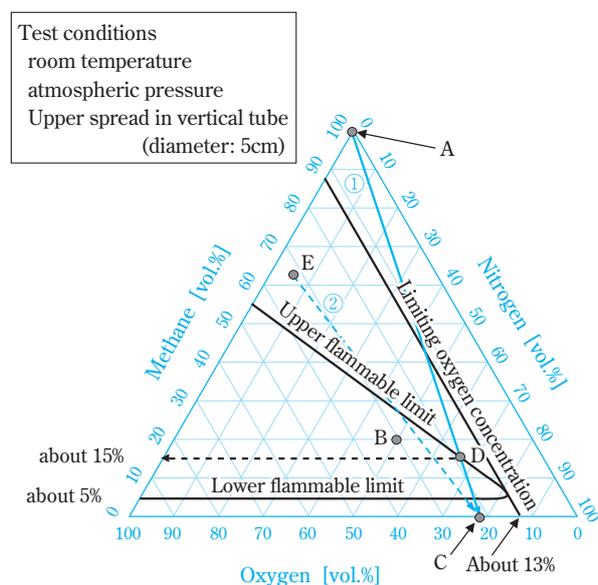


Fig. 5 Flammable limits of methane

素比によって大きく異なることがわかる。これは一般的な多くのガスについて当てはまる。線①は矢印方向にメタンを空気で希釈していった線であり、点Cは空気そのものを意味する。線①と爆発上限界線の交点Dのメタン濃度が空気中におけるメタンの爆発上限界濃度であり、約15%である。限界酸素濃度線は爆発範囲線に接する酸素濃度の線であり、メタンの限界酸素濃度は約13%であることが分かる。酸素濃度が13%よりも小さくなればメタン濃度がどのように変化しようとも爆発範囲に入ることはなく、メタン濃度が約5%未満であれば酸素濃度がたとえ増加したとしても爆発範囲に入ることはない。なお、可燃性ガス濃度管理、酸素濃度管理にはいずれも安全代が必要である。可燃性ガスについては爆発下限界濃度の1/4以下での管理が推奨される。酸素濃度についてNFPA(米国防火協会)の基準をTable 2に示した¹⁰⁾。点Eはメタン濃度が爆発上限界濃度以上であり、爆発範囲に入らないが、装置内部に空気が漏れこんだ場合あるいは点Eの組成に相当するガスが大気中に漏洩した場合は空気で希釈されることになり、三角線図上の経路は線②上を矢印方向に進むことになり、爆発範囲に入ってしまうことになる。爆発上限界濃度以上での管理にはこのような危険を常に伴う。なお、爆発範囲は温度や圧力の影響を受けるのでデータの取り扱いに注意が必要である。

Table 2 Safety margin of oxygen concentration

in case of continually monitoring of oxygen concentration	in case of non-continually monitoring of oxygen concentration
LOC ≥ 5% : LOC - 2%	LOC ≥ 5% : LOC × 0.6%
LOC < 5% : LOC × 0.6%	LOC < 5% : LOC × 0.4%

LOC : Limiting oxygen concentration

2) 可燃性液体の引火火災

可燃性液体の燃焼は液体表面が直接燃焼するのではなく、蒸発した液体と雰囲気(通常は空気)との混合ガスが爆発範囲に入って液体表面近傍の気相部が燃焼し、その燃焼熱によって新たに液体の蒸発が促進されて爆発雰囲気を形成して燃焼することが繰り返されることによって燃焼が継続していくと考えられている。従って、可燃性液体の最小発火エネルギーは可燃性ガスと同等であり、静電気による着火源はいつ存在していてもおかしくないと考える。しかし、可燃性液体の蒸気の場合、メタンなどの通常気体状態であるガスとは違い、蒸気圧が爆発下限界濃度に相当する温度を安全管理上のひとつの指標とすることができる。可燃性液体の蒸気圧が爆発下限界濃度に相当する温度を下部引火点、爆発上限界濃度に相当する

温度を上部引火点と定義する。下部引火点よりも低い温度では通常は気相部の蒸気濃度が爆発下限界濃度未満なので引火の恐れはない。なお、比較的強力な着火源が存在する場合は、液温が引火点未満であっても局部的に温度が上昇して引火火災を引き起こす恐れがあるので注意が必要である。また、消防法の危険物第4類判定でも使用されるJISで定められた引火点測定方法は理想的な気液平衡が達成された条件での測定ではないので、真の下部引火点とは誤差がある点に注意が必要である。JISによって得られた引火点をここではJIS引火点と呼ぶことにする。Fig.6は下部引火点とJIS密閉式引火点との差を示したものである¹¹⁾。この図から、JIS引火点20程度の物質は5程度、80の物質は10程度の安全代をとる必要があることが分かる。尚、温度を上部引火点よりも高い温度に保つことは本質的な安全対策とは言い難い。例えば、自動車のガソリンの蒸気圧は爆発上限界濃度よりも高いのでガソリンタンク内は爆発範囲には入っていないと思われるが、給油時にはガソリン蒸気が拡散して付近に爆発性混合気が形成され、人体からの放電によって着火する可能性があるため注意が必要である。なお、灯油の引火点は40程度であり、蒸気圧が爆発下限界濃度を下回っているため、一般生活における移し変え等の作業が可能となっている。なお、可燃性粉じんが共存する場合は爆発性が増大し、蒸気・粉じんそれぞれ単独では爆発下限界濃度未満であっても爆発性を有することがあるので注意が必要である。引火点よりも低い温度に保たれた有機溶媒中に粉体を投入する操作などはこの点に配慮が必要である¹²⁾。

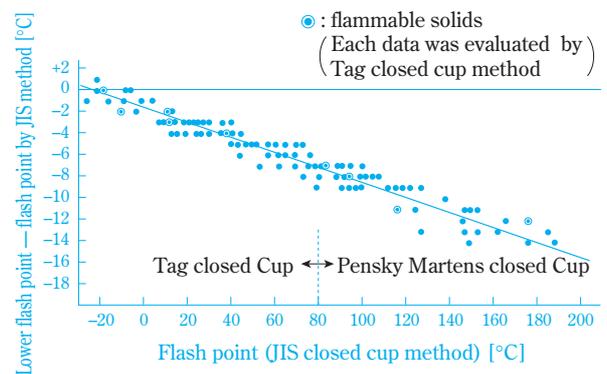


Fig. 6 Relations between flash point determined by the JIS closed cup and lower flash point

3) 粉じん爆発

一般的な粉じんの最小発火エネルギーは数10mJ以上のオーダーであり、一般的な可燃性ガス・蒸気の最小発火エネルギー(0.2mJ程度)よりも一桁以上

大きい。したがって、接地などの静電気対策を講じれば空気中で取り扱うことができる場合がある。粉体を空気中で扱えるかどうかの指標として最小発火エネルギーが重要である。粉じん爆発の最小発火エネルギーの求め方はFig.7に示すように、粉じん濃度を固定して点火エネルギーを種々変更し、粉じん爆発を起こすエネルギーと起こさないエネルギーの境界を求める作業を少なくとも3種類の濃度で行い、爆、不爆の境界を結んで下に凸の曲線を描いた時の極小値のエネルギーとして求める。なお、粉じん爆発性は粒子の大きさの影響を多大に受けるため、微粉で評価を行う必要がある。これまで、200メッシュ（目開き75 μm ）の篩でふるった粉体を用いてデータを取得することが広く行われているが、JIS Z8818の可燃性粉じんの爆発下限濃度測定方法やISO6184の粉じん爆発の爆発指数の測定方法には63 μm の篩でふるった粉体を用いるように規定されている^{13) 14)}。なお、粉じん爆発性は粒子形状にも影響するので、製造法変更（例えば晶析操作の変更）によって、粒子形状が変わった場合には、最小発火エネルギーの再評価が必要かどうか検討すべきである。微粉を捕集するバグフィルターや比較的大きなホッパーやサイロ等では万に備えて爆発放散口を設置することが多い¹⁵⁾。

なお、空気輸送などでは粉じん濃度を爆発下限濃度未満に制御することも場合によっては有効であるが、手作業による粉体投入等では粉じん濃度の制御は一般に困難である。酸素濃度の制御については可燃性ガス・蒸気と同様、Table 2の酸素濃度の指標をそのまま適用できる。

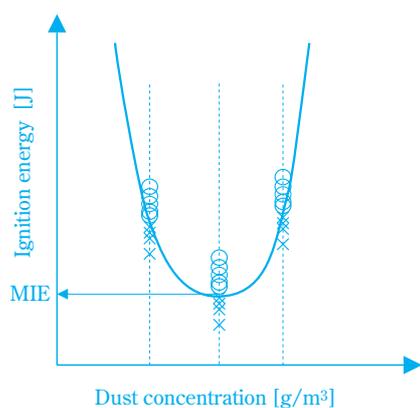


Fig. 7 Estimating method of minimum ignition energy

4) ミスト爆発^{1) 16)}

ミスト爆発では、ミスト濃度の制御は困難な場合が多いので、酸素濃度の管理が最も容易かつ確実な安全対策となる。ミストの最小発火エネルギーは、

安全工学的には可燃性ガス・蒸気なみと考えて、静電気による着火源はいつ存在してもおかしくないと考えるべきである。ミストはFig.3(c)のように、その生成時に静電気が発生する。ミストの周りは空気等の絶縁性の高いガスに阻まれているため、電荷の逸散速度は遅い。従って、体積抵抗率が $10^8 \Omega \cdot \text{m}$ よりも小さい水やメタノールなどでも強く帯電することがある。スプレー洗浄ではむしろ、トルエンやヘキサンなどの絶縁性が高い液体よりも純水の方が強帯電する。従って、残留溶媒を水でスプレー洗浄する場合にも帯電した水のミストからの放電によって残留溶媒蒸気に着火する可能性がある。

可燃性液体のミスト爆発の危険性は引火点とは無関係である。ミストの燃焼が伝播するしくみは粉じん爆発と同様であると考えられる。放電によってミストにエネルギーが与えられると局部的に温度が上昇して蒸発または熱分解による分解ガス発生が促進されて局部的に爆発性混合気を形成し、燃焼する。燃焼によって放出される熱が隣接するミストを加熱して新たに爆発性混合気が形成されて燃焼し、それが次々に伝播していく。ミスト間の距離が離れすぎていると（すなわち、ミスト濃度が薄い）、伝播のサイクルが遮断されるため、ミスト爆発は起こらなくなる。この境界のミスト濃度をミスト爆発下限濃度と呼ぶことにする。Fig.8は当社にて開発したミスト爆発試験装置の概要である¹⁷⁾。ミスト爆発の評価は爆発しやすいミスト雲を如何にして形成させるかがポイントとなり、2流体ノズルがその点で優れている。ミスト濃度の測定はノズルからの噴霧停止後、重力落下するミストを捕集してその質量を測定し、浮遊空間の体積で除することによって求めることができる。ミスト爆発は槽内のスプレー洗浄やミストセパレータ内部、配管で移送した液が液跳ねする時などに発生する可能性があるが、その危険性は粉じんやガス、蒸気の爆発、引火性液

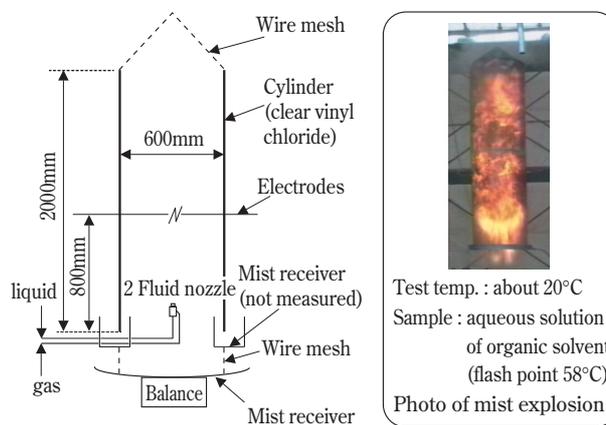


Fig. 8 Example of mist explosion and test apparatus

体の引火火災事故と比較すると発生頻度の低さから見逃されることが多い。

5) 堆積粉じんの火災

火薬類等の自己反応性物質、マグネシウム、アルミニウム、タンタル、ジルコニウムなどの金属粉は電気火花に対する感度が高いものが多く、堆積した粉塵でも静電気放電によって着火する可能性がある。火薬類等の自己反応性物質は窒素シール等による不活性化は効果がないことがある。堆積金属粉じんの中には最小発火エネルギーが極めて小さいものがあるが、酸化燃焼するため窒素による不活性化が有効である。堆積粉じんの火災危険性についての詳細は文献¹⁾を参照されたい。

着火源除去対策

着火源除去対策は種類が非常に多く、状況に応じて使い分ける必要がある。また対策の仕方を誤ると効果が得ることが出来なかったり、かえって逆効果となる場合があるので、出来るだけ静電気の専門家に相談した上で安全対策を決定することが望まれる。以下、紙面の都合上簡単に紹介するに留めるが、詳細は本稿最後に紹介した文献、指針を参照願いたい^{1) 2) 8) 10) 18)}。

1) 電撃防止

電撃は受けた時のショックによって墜落あるいは転倒して重大災害になる可能性があるだけでなく、ガスや粉じん等の可燃性混合気が存在するところで電撃を受けるとそれが着火源となって火災・爆発が発生する可能性がある。人体は導体であるため、人体からの放電はほぼ全ての電荷が放電されると見なされる。例えば静電容量100pFの人体が2kVに帯電したとすると、蓄えられるエネルギーは0.2mJとなり、これは一般的な可燃性ガス・蒸気の最小発火エネルギーに達している。人体の静電気対策が不十分であればこの程度の帯電は容易に生じ得る。人体帯電は、歩行時に床面と靴との摩擦帯電によって絶縁性の靴裏が帯電し、その静電誘導を受けて人体が帯電するケースや絶縁性のフレキシブルコンテナへの粉体出し入れ作業時にフレキシブルコンテナが強帯電し、その静電誘導を受けて人体が帯電するケース等を挙げることが出来る。対策は床の導電率管理、静電靴、静電作業着の着用が挙げられる。別途、人体帯電の評価事例を紹介する。なお、人体の静電気対策が万全であっても、他に帯電した導体や絶縁体があればそれらから電撃を受けるので注意が必要である。化学工場内部で僅かでも電撃を受ける場所や作業があるならば、その原因を追求し適切な対策を講じる必要がある。

2) 金属の帯電防止

接地あるいはボンディングを行う。ボンディングは電氣的に接地された導体に行わないと効果がない点に注意が必要である。

3) 絶縁素材の帯電防止

困難であるため化学プラントでは極力採用しない方が賢明である。やむを得ず採用する場合は専門家に評価を依頼するか、窒素シールを採用する。

4) 配管送液時の液体の帯電防止

初期流速制限(1m/sec以下) 定常状態での流速制限を守る²⁾。必要に応じて緩和パイプを設ける。

5) 手作業による引火性液体のハンドリング

人体の静電気対策を講じる。容器移送後は静置時間を置く。金属容器は接地とボンディングを作業開始前から作業終了まで行う。ドラムポーターなどの可動具が浮き導体になっていないか注意する。絶縁性の高い布などは開放系では使わないようにする。導電率が 10^8S/m 以下の引火性液体のハンドリングについては絶縁性の漏斗やポンプ等は使用しない。その他、作業に合った作業具を正しく使用する。

6) 手作業による粉体仕込み¹⁸⁾

容器や袋に付着した粉体を払い落とす際の静電気帯電に注意する。引火性液体中に粉体を投入する場合は専門家の了解が得られない限り、不活性化対策を採用する。仕込み順序の変更(粉体先仕込み)の可能性も検討する。

7) 帯電防止剤の使用

絶縁素材に対しては練りこむものと、塗布するものがある。液体に対してppmオーダーの添加で効力を発揮する帯電防止剤がある。ただし、製品の品質問題についての検討が必要である。

8) 除電器の使用

専門家に相談し、除電器自体が着火源になる可能性がないか、十分検討した上で採用可否を決定する。

評価事例

1) 電界シミュレーションによる粉じん雲の静電気危険性評価例

粉じん雲やミスト雲からの自己放電によって着火する可能性は電界シミュレーションで評価することができる。電界計算ではFig.9に示す(1)式を解くことによって電位ならびにその勾配である電界強度を求め

Poisson's equation

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

Energy calculation

$$U = \frac{1}{2} \int \epsilon \cdot E^2 dV \quad (2)$$

ϕ : Potential [V] ρ : Space charge density [C/m³]
 ϵ : Dielectric constant [F/m] U : Energy [J]
 E : Electric field strength [V/m]

Fig. 9 Basic formula of electric fields

ることが出来、ブラシ放電や雷状放電が発生する可能性について検討することができる。また、(2)式からエネルギーを求めて最小発火エネルギーと比較することによって生じる放電が着火能力を有しているかどうかを推定することができる。(1)式中の空間電荷密度は粉じんの帯電電荷量と粉じん濃度の積から求められる。例としてFig.10の粉体乾燥機について考える。空間電荷密度は、Fig.11に詳細を示した吸引式ファラデーケージを用いることによって測定ポイントでの空間電荷密度を求めることができる¹⁹⁾。Fig.12は、カナダのInfolytica社のソフトウェアElecNet(代理店(株)アドバンステクノロジー)を用いてFig.10で示した乾燥機内部の電界強度を計算した結果の一例である。色が濃青から黄色を経て赤色になるにつれて電界強度が高くなっている。シミュレーションから、粉体を押出す役目を果たす回転羽根のエッジ部の電界強度が高くなっている様子が分かる。粉じん雲からの自己放電で粉じん雲自体に着火する可能性のある放電形態は雷状放電(Table 1 参照)であり、シミュレーションの結果、局部的に空気の絶縁破壊電界強度である 3×10^6 V/m 以上の領域を含む平均電界強度 2.7×10^5 V/m 以上の領域では雷状放電が発生する可能性がある判断すべきである。ミスト爆発の場合には最小発火エネルギーは可燃性ガス並であるため、ブラシ放電で着火の可能性があると考える。最新のコンピューターシミュレーションソフトを使用すれば、この電界強度が一定の閾値を上回る連続領域のエネルギーの総和を計算することが出来、最小発火エネルギーと比較することによって、実際に放電が生じた場合の着火可能性について検討することができる。この手法は、空間電荷密度の決定が比較的困難である、複雑な形状のモデリングには労力を有する、などの問題点があるが、重要な安全評価手法である。さらに静電界計算にとどまらず、帯電粒子群が形成する電場の動的シミュレーションに

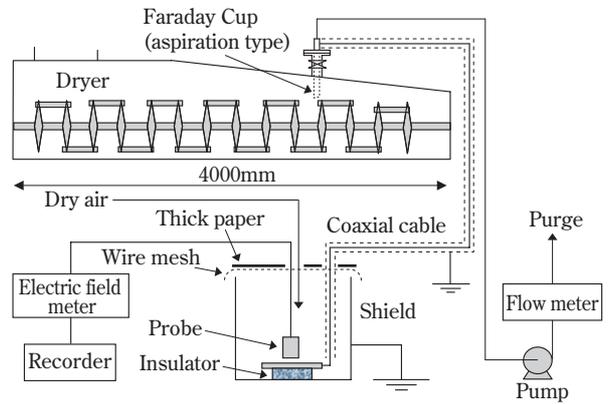


Fig. 10 Measurement of charged density of dust cloud

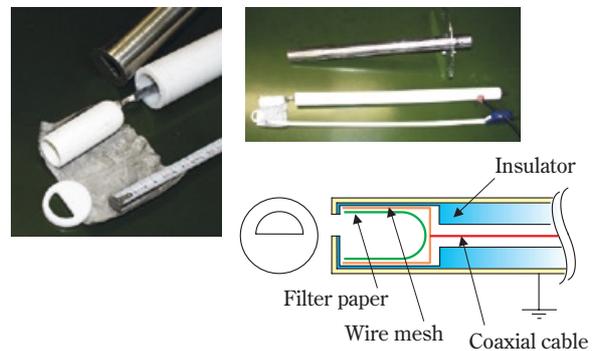


Fig. 11 Details of faraday cup (aspiration type)

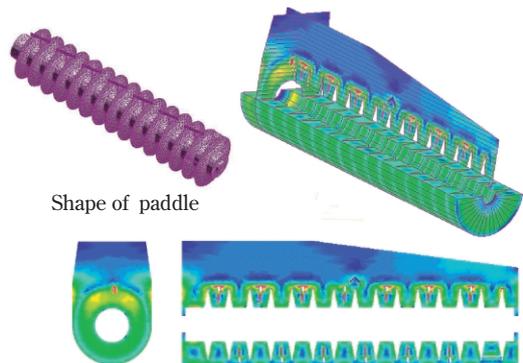


Fig. 12 Simulation results of electric field strength

関する研究も学会等で紹介されており、今後も技術の進歩が期待される分野である²⁰⁾。

2) 人体の静電気危険性評価事例

化学プラントでは人体帯電防止の一般的な対策として、① 取り扱い物質や作業環境に応じた床面の導電性確保、② 静電靴の着用、③ 静電作業着の着用、が採用されている。しかし、感作性の強い粉体の充填や投入作業など、取り扱い物質によっては暴露防止

策を講じるために、通常は使用しない特別な作業着を着用する必要が生じる場合がある。この時、単に人体の安全衛生面のみで作業着を選定するのではなく、火災爆発防止面も考慮して作業着や作業方法を決定する必要がある。ここではポリプロピレン製のつなぎ服を例に挙げ、床面および人体の静電気対策の有無と静電気危険性の関係を調べた結果について紹介する。ポリプロピレン製のつなぎ作業着は実際に販売されているものであり、体積抵抗率は $1.2 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{m}$ 、表面抵抗率は $2.1 \times 10^{16} \Omega$ であり、絶縁性の高い素材からなる。湿度50%、気温20の実験室内で漏洩抵抗 $9 \times 10^7 \Omega$ のウレタン系床材の上に接地した導電プレートを敷き、その上に静電靴と静電服を着用して乗り、更にポリプロピレン製作業着を着用し、合成繊維製のベストを作業着の上から数回摩擦してポリプロピレン製作業着の表面電位を集電式電位測定器（春日電機KS-533）で測定した結果、ポリプロピレン製作業着表面の電位は約20kVとなった。これはTable 3に示した絶縁体の帯電指標²⁾に記された最大値である10kVを大きく上回る結果となった。また、同様に人体の電位をFUJIMARU製ELECTRO-STATIC VOLTMETER SR-111にて測定し、静電容量をHEWLETT PACKARD製LCR METER 4332Aにて測定して人体に蓄積されるエネルギーを計算した結果をTable 4に示した。ケース3からケース6については一般的な有機溶媒に着火する可能性のあるレベルのエネルギーが人体に蓄えられていることが判明した。ここで注目すべきはケース6が示すように、ポリ

プロピレン作業着を着用していなくても靴の素材が不適切であればたとえ静電服を着用していても安全が担保されないということである。なお、静電靴や作業着は製品によってその効果に大きな差があるので、採用にあたっては個々に性能を確認することが推奨される。

おわりに

静電気災害は、10数年無事故で操業を継続しているプラントや、人手による手作業を数千回無事故で行っている作業でもある日突然発生することがあり、過去の実績はあてにしてはならない。静電気安全指針²⁾や事故事例の学習などを通してどのような作業にどのような静電気危険が潜んでいるかを知り、化学工場で働く人それぞれが身の回りに潜む静電気危険を発見することが重要である。次に、発見した静電気危険を放置せず、指針やハンドブック等の文献を参照したり、必要に応じて専門家に対策を相談することによって危険性を軽減していくしかない。それが安全成績の向上に繋がっていくのである。本稿がその意味で少しでも読者のお役に立てば幸いである。

引用文献

- 1) 静電気学会：「新版静電気ハンドブック」，(1998)，オーム社
- 2) 労働省産業安全研究所：RIIS-TR-87-1「静電気安全指針」第3版，(1988)，社団法人産業安全技術協会
- 3) Heinz Haase Translated by M. Wald：Electrostatic Hazards Their Evaluation and control，(1977)，VERLAG CHEMIE
- 4) 産業と保安，第20巻 第24号(2004)
- 5) 増田：「最近の静電気工学」，高压ガス保安協会，(昭和49)
- 6) Jones T.B. and King J.L.：Powder Handling

Table 3 Recommendations (potential of insulator)

Minimum ignition energy [mJ]	Indices of potential [kV]
< 0.1	< 1
0.1 ~ 1	< 5
1 ~ 10	< 10
> 10	< 10

Table 4 Results (human charge)

Items	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Floor	polyurethane floor + conductive grounded plate	polyurethane floor	polyurethane floor + conductive grounded plate	polyurethane floor + conductive grounded plate	polyurethane floor	polyurethane floor
Shoes	antistatic shoes	antistatic shoes	antistatic shoes	slippers	slippers	slippers
Clothes	antistatic working wares	antistatic working wares	polypropylene working wares	polypropylene working wares	polypropylene working wares	antistatic working wares
Maximum potential [V]	70	420	940	6100	7420	7970
Electrostatic capacity of human body [pF]	120	98	120	64	60	60
Energy accumulated to human body [mJ]	2.9E-04	8.6E-03	0.1	1.2	1.7	1.9

- and Electrostatics : Understanding and Preventing Hazards, (1991), LEWIS
- 7)Glor M. : Electrostatic Hazards in Powder Handling, (1988), JOHN WILEY & SONS INC.
- 8)NFPA : NFPA77 Recommended Practice on Static Electricity, (2000)
- 9)柳生 : 「ガスおよび蒸気の爆発限界」, 安全工学協会, 50 (1977)
- 10)NFPA : NFPA69 Standard on Explosion Prevention Systems, 7 (1997)
- 11)柳生 : 「労働省産業安全研究所安全資料 RIIS-SD-86, 引火温度と爆発範囲の関係線図」, (1986)
- 12)Rolf K.Eckhoff: Dust Explosions in the Process Industries, second edition,(1997), BUTTERWORTH HEINEMANN
- 13)日本規格協会 : JIS Z 8818 可燃性粉じんの爆発

下限濃度測定方法, (2002)

- 14) ISO 6184/1 Explosion protection systems - Part1: Determination of explosion indices of combustible dusts in air, (1985)
- 15)John Barton : DUST EXPLOSION PREVENTION AND PROTECTION, (2002), IChemE
- 16)Daniel A. Crowl and Joseph F. Louvar : Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications, (1990), PRENTICE HALL
- 17)太田ら : 第34回安全工学研究発表会講演予稿集, 59 (2001)
- 18)労働省産業安全研究所 : RIIS-TR-85-3 「静電気安全指針 応用編追補」(1986), 社団法人産業安全技術協会
- 19)熊谷ら : 住友化学, 1990-II, 122 (1990)
- 20)Ohsawa A, Powder Tech. 135 - 136, 216 (2003)

PROFILE



太田 潔
Kiyoshi Ota
住友化学株式会社
生産技術センター
主任研究員

