

化学プラントの 静電気リスクアセスメント —火災、爆発の防止技術—



住友化学株式会社
生産安全基盤センター
太田 潔

Electrostatic Risk Assessment for Chemical Plants: Fire and Explosion Prevention

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

An electrostatic discharge is one of the most concerning ignition sources for combustible substances. In order to carry out appropriate safety measures to prevent from ignition, it is necessary to understand correct fundamental phenomena of charging and discharging and to master the technology by considerable training. And next step, application of a risk assessment technology of static electricity is desired. Sumitomo Chemical Co., Ltd. has developed one of these technologies. This paper introduces one practical case study from it.

はじめに

最近10年間（2008年～2017年）の消防白書によると、静電気放電は危険物施設の着火源の第1位となった年が7回（他の年はいずれも2位）にも及ぶ。他の着火源としては高温表面との接触や過熱、電気火花、裸火、溶接・溶断火花等があるが、静電気放電が着火源の筆頭に挙げられることが多いのは、静電気帯電と放電現象の理解が難しく、結果として安全対策に不備が生じやすいことが一因と思われる。このような状況を鑑みると、静電気災害防止技術を周知し普及させることが重要であるといえる。

筆者は2004年に当誌で化学プラントの静電気危険性と安全対策について紹介したが¹⁾、その後、国内では2007年に独立行政法人 労働安全衛生総合研究所（現 独立行政法人 労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所（以下、JNIOOSHと称す））の静電気安全指針²⁾が改訂され、2013年にはIEC（国際電気標準会議）から静電気安全に関わる技術指針^{3),4)}が新規公開されるなど、静電気安全に関する技術の進歩が広く享受される環境が整ってきている。それに伴い、静電気危険をリスクという形で評価する試みも始まっている。静電気危険をリスクという形で評価できるようになると、リスクの相対比較を行うことで安全対策の有用性や十分性を確認したり、安全対策の

優先順位付けを行うことができる、といったメリットが期待できる。しかし、火災や爆発のリスクアセスメント技術は機器の故障や誤作動等に基づく漏洩着火の分野では進んでいるが、着火源として静電気放電に着目した体系的なリスクアセスメント技術はこれまで知られていなかった。そこで当社では独自に静電気リスクアセスメント技術を開発し、2010年に当社およびグループ会社向けの静電気安全に関する技術指針を改定して静電気リスクアセスメント技術を盛り込み、運用を開始した。その後、国内ではJNIOOSHの大澤氏が静電気リスクアセスメント手法を開発（以下、大澤法と称す）、2011年にガイドライン⁵⁾が公開された。当社はその試験運用、ならびに普及活動に協力している。

本稿では静電気リスクアセスメント技術の海外動向について紹介した後、当社の静電気リスクアセスメント技術を実施例とともに紹介する。また、参考として同一事例を大澤法で解析した結果も紹介する。最後に本稿で紹介した静電気リスクアセスメントに必要な基礎知識として、導体の静電気対策と静電誘導、絶縁体の静電気対策、放電現象の解説を掲載した。さらに詳しく静電気帯電現象、放電現象、対策技術に関して体系的に理解されたい方は、本稿記載の参考文献²⁾⁻⁴⁾などを参照されたい。

海外の静電気リスクアセスメント技術に関する動向

欧州地域では、古くは英国が1980年と1983年に静電気安全に関する技術指針を公開している。これらは1991年に改定されたが、その後はCENELEC（欧州電気標準化委員会）に引き継がれ、CENELECからは2003年に技術指針が公開されている。その後、欧州地域は2013年にIECから新規公開された技術指針^{3,4)}とほぼ同じ内容を欧州標準として採用している。しかしながら、これらの技術指針には静電気放電による着火の起こりやすさを加味した具体的な静電気リスクアセスメント技術については述べられていない。欧州の静電気安全の著名な研究者が執筆した帯電現象、放電現象、安全対策技術に関する書籍類も同様に具体的な静電気リスクアセスメント技術について述べられたものはない。ドイツではVDI（ドイツ技術士協会）がVDI2263シリーズで着火の起こりやすさと被害の程度を考慮したマトリックス法を用いた粉じん爆発リスクアセスメントの実施例を紹介したガイドライン⁶⁻⁸⁾があるが、対象設備で想定される静電気以外の着火源も考慮した内容になっており、対象設備に特化した範囲では非常に参考になるが、網羅的に静電気リスクアセスメント技術を纏めたものではない。

米国ではNFPA（米国防火協会）が静電気安全対策の技術指針⁹⁾を発行しているが、欧州と同様、静電気リスクアセスメント技術について総合的に纏められた

ものは見当たらない。CCPS（Center for Chemical Process Safety）が2017年に発行した粉じん爆発のハザード解析に関する書籍¹⁰⁾には静電気リスクに関する体系的な解説はないが、いくつかの工程におけるリスクベースのアセスメント実施例が紹介されている。

静電気リスクアセスメント技術開発の要は、静電気放電による着火確率をどのように定めるか、である。定量的リスクアセスメントが進んでいる液化石油ガスの漏えい着火等の分野では、長年にわたりヒヤリハットや機器故障などの不具合、事故件数等の膨大な統計データをリスクアセスメント技術を開発する目的で計画的に収集しており、そのような分野においては、具体的に適用可能な不具合、失敗、着火確率等が数値として定められているものがある。しかしながら、静電気放電という着火源に着目して統計的なデータを長年にわたって膨大に取得した例は知られておらず、それが静電気の特化した定量的なリスクアセスメント技術の開発の遅れにつながっているものと考えられる。

住友化学株式会社の静電気リスクアセスメント

Fig. 1に静電気リスクアセスメントの実施フロー（ステップ1）を示す。ステップ1では、起こりやすさと影響度を加味したリスクアセスメントの実施要否を判断する。まず最初に物質の性状を特定し、次に特定した性状別

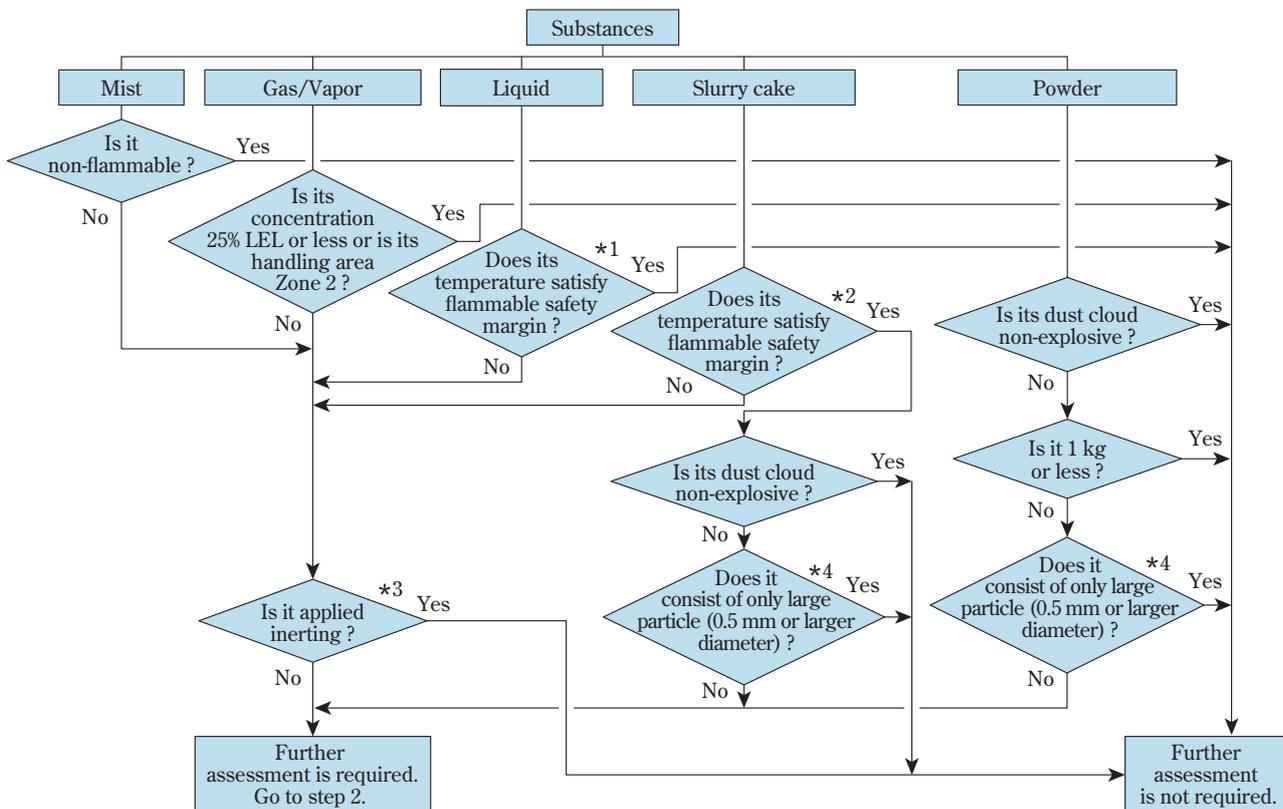


Fig. 1 Flow diagram for electrostatic risk assessment (Step 1)

に燃焼や爆発を起こし得るかどうかを判断していく。

Fig. 1の「*1」は、引火性液体の飽和蒸気圧が爆発可能な濃度になっているかを判断するためのものであるが、一般に知られている引火点と真の引火点との誤差¹¹⁾を加味し、当社では5℃～30℃範囲で4段階の安全率を設定している。「*2」では引火性液体スラリーケーキそのものの引火点データが無い場合には、引火性液体単独の引火点データで判断する。「*3」では米国防火協会（NFPA）の酸素濃度管理基準¹²⁾が判断基準として活用できる。「*4」は爆発可能な可燃性粉じん-空気混合気が形成される可能性を判断するためのものである。一般に、直径0.5mm以上の粒子しか存在しない場合はYesと判断できるが、疑わしい場合は粒度分布や吸引法りによる実測結果から判断することも可能である。

Fig. 1のフローを適用した結果、更なる詳細評価が必要と判断された場合には、Fig. 2に示すフローに従って静電気リスクアセスメントを実施する。当社の静電気リスクアセスメントでは、後述（Table 6）のとおり、最終リスクを危険なものから順にA, B, C, Dの4ランクに分類する。リスクがCまたはDランクに低減できなかった場合は安全対策を加味して再度リスクアセスメントを実施する。それでもリスクがCまたはDにならなかった場合は再度安全対策を加味してリスクアセスメントを繰り返す。最終的にリスクがCまたはDにならなかった場合は社内の静電気安全の専門家に相談し、相談を受けた専門家は物質の特性や取扱い条件から想定される帯電と放電の具体的懸念と放電エネルギーの大きさや有効かつ実施可能な安全対策を総合的に判断してリスクを再評価し、安全対策を提言する。このように、当社の静電気リスク管理の最大の特徴は、静電気リスクアセスメントが工場・研究部門の技術スタッフと静電気安全の専門家が実施する2段構えになっていることである。



Fig. 2 Flow diagram for electrostatic risk assessment (Step 2)

1. 起こり易さの評価

静電気災害の起こり易さは、Fig. 3に示す燃焼の3要素において着火源を静電気に限定した上で、燃焼の3要素が同時に同じ場所に存在する可能性について検討すればよい。当社の静電気リスクアセスメントでは、まずは燃焼の3要素のうち可燃物と支燃物の存在可能性を同時に考えることによって爆発雰囲気形成される可能性（これを爆発雰囲気形成可能性と呼んでいる）を評価する。

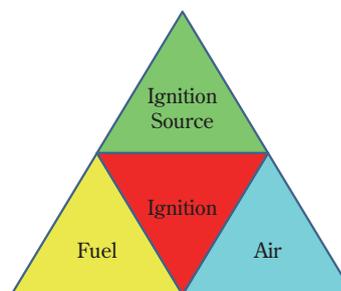


Fig. 3 The Fire Triangle

当社で採用している爆発雰囲気形成可能性の判断基準の例をTable 1に示す。ZoneとはIEC（国際電気標準会議）が定めた爆発雰囲気の種類基準である^{13),14)}。Zone 0とは連続して、または長期間にわたり、もしくは頻繁にガス・蒸気爆発性雰囲気となる場所であり、引火性液体が入った密閉容器の内部が例としてあげられる。Zone 1とは通常作業においてガス・蒸気爆発性雰囲気となる可能性が時折ある場所であり、引火性液体が入っている蓋が無い容器の上部開口部近傍が例として挙げられる。Zone 2は通常作業においてガス・蒸気爆発性雰囲気となる可能性が低いか、なったとしても短い期間のみである場所であり、Zone 1よりもガス・蒸気発生源から更に離れた場所である。Zone 20、Zone 21、Zone 22は粉じん爆発雰囲気を意味し、形成可能の考え方は、それぞれZone 0、Zone 1、Zone 2に準じる。当社では爆発雰囲気形成可能性をTable 1に示した方法以外にも、ガス、蒸気、浮遊粉じん濃度と爆発下限界濃度との関係から爆発雰囲気形成可能性を大中小の3ランクに分類する判断基準を設けている。

Table 1 Likelihood of formation of explosive atmospheres based on the Zone Classification

likelihood for formation of explosive atmosphere	Zone ^{13),14)}
High	Zone 0/Zone 20
Moderate	Zone 1/Zone 21
Low	Zone 2/Zone 22

Table 2 Likelihood of occurring incendive discharge (gas/vapor)

Types of discharges (maximum energy ranges)	Likelihood of occurring incendive discharges		
	High	Moderate	Low
Corona discharge (0.1mJ)	H ₂ , C ₂ H ₂	—	General gases/vapors
Brush discharge (5mJ)	General gases/vapors		
Cone discharge (hundreds of mJ)	Some gases/vapors		
Spark discharge (thousands of mJ)	Almost all of gases/vapors	—	—
Propagating brush discharge (tens of thousands of mJ)	—	—	—

Table 3 Likelihood of occurring incendive discharge (dust cloud)

Types of discharges (maximum energy ranges)	Likelihood of occurring incendive discharges		
	High	Moderate	Low
Corona discharge (0.1mJ)	—	—	All
Brush discharge (5mJ)	MIE ≤ 3mJ	3mJ < MIE ≤ 10mJ	10mJ < MIE
Cone discharge (hundreds of mJ)	MIE ≤ 100mJ	100mJ < MIE ≤ 1000mJ	1000mJ < MIE
Spark discharge (thousands of mJ)	—	—	—
Propagating brush discharge (tens of thousands of mJ)	All	—	—

次に、着火能力のある静電気放電が発生する可能性（以下、着火性放電発生可能性と呼ぶ）であるが、これは想定される静電気放電の最大エネルギーを推定し、これを可燃物の最小発火エネルギー（以下、MIEと称す）と比較することによって判断する。放電エネルギーの推定を行わない簡便な方法としては、静電気放電の種類を特定すれば放電エネルギーの最大値が概ね分かるので、これと最小着火エネルギーを比較しても良い。具体的には、ガスや蒸気についてはTable 2、粉じん雲やミスト雲についてはTable 3などを参考に着火性放電発生可能性を決定する。

着火性放電発生可能性は、上記以外にも粉じん雲とミスト雲に対して最小着火エネルギー値に応じた帯電雲の直径の制限を独自に設けている。この制限はJNIOSHの帯電雲の管理指標²⁾を参考にしている。

上述した爆発雰囲気形成可能性と着火性放電発生可能性を考慮することによって燃焼の3要素が満たされる可能性、すなわち静電気災害発生可能性を見積もることができる。当社ではTable 4に示す表から静電気災害発生可能性を決定している。

2. 影響度の評価

影響度の大きさは人的被害、物的被害、経済的被害

Table 4 Likelihood of occurring electrostatic accident

	Likelihood of occurring incendive discharge (obtained from Table 2/3)	likelihood for formation of explosive atmosphere (obtained from Table 1)		
		Low	Moderate	High
	Low	c	c	c
	Moderate	c	b	b
	High	c	b	a

Table 5 Severity of damages

	Severity	Criteria for judgment		
		Personnel	Facilities	Monetary
	Low	no damage	small	small
	Moderate	slight	moderate	maderate
	High	heavy	large	large

害等を予想して判断する。当社では静電気リスクに関わる影響度はTable 5で判断している。

3. 静電気災害リスク

Table 4とTable 5の結果をもとに、静電気による災害リスクをTable 6より決定している。評価結果は

Table 6 Fire/Explosion risk caused by electrostatic discharge

		Likelihood of occurring electrostatic accident (obtained from Table 4)		
		c	b	a
Severity (obtained from Table 5)	Low	D	C	B
	Moderate/High	C	B	A

Fig. 2に従い、リスクがCまたはDにならなかった場合は再度安全対策を加味してリスクアセスメントを繰り返す。最終的にリスクがCまたはDにならなかった場合は社内の静電気安全の専門家に相談する。

JNIOSHの静電気リスクアセスメント (大澤法)

大澤法⁵⁾は2008年から2011年にかけて開発され、2011年9月にガイドラインが公開された。

Table 7に住友化学法と大澤法の差異を示す。まず、最終リスクの判定法であるが、当社法はマトリックス法を採用しているのに対し、大澤法では静電気放電による着火の起こり易さの評価に主眼を置いていることから、起こり易さと被害の程度は組み合わせずにそのままとしている。例えば、Table 6で紹介したように、一般的なマトリックス法では起こり易さが違ってても被害の大きさの程度により同じリスクに分類される場合があるが、大澤法では別物として認識される。

大澤法では、起こり易さの評価法は、可燃性雰囲気形成ハザードレベル、帯電ハザードレベルまたは静電誘導ハザードレベル、静電気放電ハザードレベルの3つの値を乗算することによって求める。この値を静電気着火ハザードレベルと呼ぶ。これは当社の「静電気災害発生可能性」に相当する。このうち、可燃性雰囲気形成ハザードレベルの決定方法については当社法と大澤法に大差はない。帯電ハザードレベ

ルまたは静電誘導ハザードレベルと静電気放電ハザードレベルを乗算したものが当社法の着火性放電発生可能性に相当する。大澤法では静電気災害の起こりやすさが種々の数値として与えられるので、a, b, c, dの4段階で静電気災害発生可能性を評価する当社法と比較すると詳細な相対比較が可能になっている。これは、住友化学株式会社で運用している静電気リスクアセスメントはスクリーニングツールとしての位置付けであり、アセスメント結果に応じて次ステップとして静電気安全の社内専門家によるサポートを受ける体制が整っているのに対して (Fig. 2参照)、大澤法ではこの手法を正確に運用することによって詳細検討とし、問題解決を目指すといった考え方の違いによるものと解釈することができる。

1. 起こり易さの評価 (大澤法)

大澤法では、静電気着火ハザードレベルをTable 8、Table 9、Table 10から得られる3つの値を乗算することによって求める。

Table 8から決定される値は、可燃性雰囲気形成ハザードレベルである。これはTable 1で既出の爆発雰囲気形成のZone概念とExplosion Groupから決定される。Table 8中、ハイブリッドとは可燃性ガス・蒸気雰囲気と粉じん雲が共存する雰囲気を意味する。

Table 9から決定される値は、帯電ハザードレベルまたは静電誘導ハザードレベルである。Table 9で4の値となる物品は非接地導体である。非接地導体は接地されることによって除電されるので値は0になる。絶縁物は帯電しても移動できる電荷が非接地導体と比較すると少ないため、電荷漏洩の有無によって値は2又は3に分類される。これとは別に機械的動力による強摩擦等、強帯電させるような操作を行う場合には上述の値を2倍する。

Table 10から決定される値は、静電気放電ハザードレベルである。表中、静電気放電ハザードレベルの値の差は、手法開発に協力した会社から提供され

Table 7 Outline of each method

Sumitomo Chemical Method		OHSAWA Method
Risk determination	Matrix method (Likelihood and Severity are taken into account in combination)	Severity and likelihood are not considered in combination.
Likelihood determination	Matrix method	Multiplication method
Parameters for likelihood determination	1) Likelihood for formation of explosive atmosphere (3 ranks)	1) Hazard level of explosion atmosphere (12 kinds of numerical values)
	2) Likelihood of occurring incendive discharge (3 ranks)	2) Hazard level of electrification and electrostatic induction (7 kinds of numerical values)
		3) Hazard Level of electrostatic discharge (4 kinds of numerical values)

Table 8 Hazard level of explosion atmosphere⁵⁾

	IIC/IIC hybrid	IIB/IIB hybrid	IIA/IIA hybrid	III
Zone 0/Zone 20	20	15	10	5
Zone 1/Zone 21	12	9	6	3
Zone 2/Zone 22	4	3	2	1
No formation	0	0	0	0

Table 9 Hazard level of electrification and electrostatic induction⁵⁾

Charging level based on conductivity/resistivity	With charge leakage	Without charge leakage	With charge promotion
High	2	3	×2
Moderate	1	3	×2
Low	0	4	×2

Table 10 Hazard level of electrostatic discharge

Types of discharge	Hazard level for electrostatic discharge
Spark discharge	5
Brush discharge	3
Propagating brush discharge	3
Cone discharge	2
Corona discharge (IIC)	1

た静電気による着火トラブル情報を着火源別に解析して事故発生頻度が高い放電順に重み付けを行った結果に基づいている。

2. 影響度 (大澤法)

人的被害または経済的被害を甚大なものから、A, B, Cの順に3ランクに分類することを例示として紹介している。

3. 静電気着火リスク (大澤法)

静電気着火リスクは静電気着火ハザードレベルの数値に被害の大きさのアルファベットを添える。例

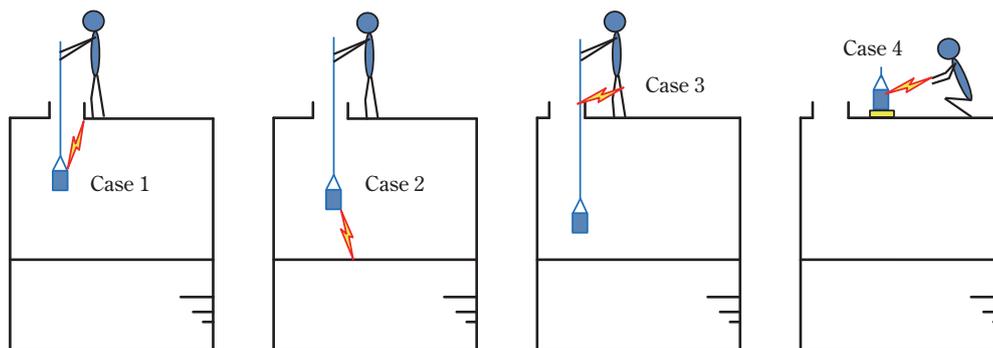


Fig. 5 Cases of each geometry where electrostatic discharge is concerned

えば、60B, 360Aのように表される。

静電気リスクアセスメント実施例

実施例としてトルエンを主成分とする液体が入った大型タンクの天板上からハッチを開けて内容液をFig. 4で示す方法でサンプリングする作業のリスクアセスメントについて紹介する。

Fig. 4に示す作業を実施した場合に想定される静電気放電懸念場所をFig. 5に示した。

1. リスクアセスメント結果 (住友化学法)

Table 11にFig. 4に示したサンプリング作業のリスクアセスメント結果を示す。以下、Table 11の記載内容について詳細に説明する。

(1) ケース1

① 爆発雰囲気形成可能性

1-1, 1-2, 1-4 : 放電懸念場所がタンク内部の為、「大」と判断した。

1-3 : 安全対策として窒素を吹き込むケースであるが、放電懸念場所が開いたサンプリング口近傍であることから窒素吹き込み効果が十分でないおそれがあると考え、「中」と判断した。

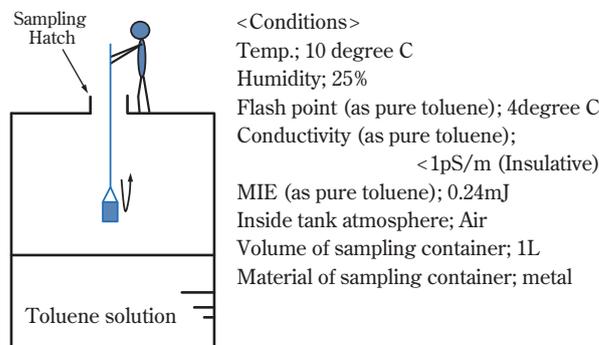


Fig. 4 Illustration of sampling from top of a tank containing flammable liquid

② 着火性放電発生可能性

1-1, 1-3：非接地のサンプリング容器はトルエンとの摩擦や容器に入った帯電しているトルエンからの静電誘導で電位上昇している可能性があり、タンク内部の金属部分との間で着火性火花放電が発生する可能性があるため、「大」とした。

1-4：トルエンが十分除電されたケースであるが、これは、Case2の放電による着火を防止する対策であり、Case1の放電を防止できる保証はない。従い、1-1, 1-3と同様に「大」とした。

1-2：接地されたサンプリング容器とタンク内部の金属部分は共に電位が0[V]と見なされ、放電のおそれが無いため「小」と判断した。

③ 静電気災害発生可能性

Table 4より、1-1から順に、a, c, b, aとなる。

④ 影響度

タンク内部での着火はタンク天板上部の作業員に甚大な影響を及ぼす恐れがあると考え、「大」と判断した（安全対策の有効性は考えずに判断する）。

⑤ リスク

Table 6より、1-1から順にA, C, B, Aとなる。

以上より、ケース1については、追加の安全対策無しではリスクは容認できないが、金属製サンプリング容器を接地することによってリスクは容認範囲まで軽減できる結果となった。なお、ケース1-3の解析結果は、ケース1に示した放電によるリスクが金属製容器の接地と作業員の静電気対策をなおざりにして不活性化対策のみ採用した場合には容認範囲まで軽減できないことを示している。

(2) ケース2

① 爆発雰囲気形成可能性

2-1, 2-2, 2-4：ケース1と同様、放電懸念場所がタンク内部の為、「大」と判断した。

2-3：安全対策として窒素を吹き込むケースであるが、窒素吹き込み効果がケース1よりも得られやすいと考え、「小」と判断した。

② 着火性放電発生可能性

2-1, 2-2, 2-3：絶縁物であるトルエンと導体であるサンプリング容器との間の放電であるため、着火性ブラシ放電の発生が懸念される。したがって、「大」と判断した。なお、2-1については、サンプリング容器が

Table 11 Risk analysis result (Sumitomo Chemical Method)

Case	Sub No.	Safety measures	Likelihood			Severity (personnel) H: High M: Moderate	risk	Risk reduction level by taking countermeasures
			formation of combustible atmosphere H: High M: Moderate L: Low	Incendive discharge H: High M: Moderate L: Low	Fire or explosion caused by static discharge			
1	1-1	None	H(Zone 0)	H(Spark)	a	H	A	-
	1-2	Grounding (personnel/container)	H(Zone 0)	L(No discharge)	c	H	C	Effective
	1-3	Inerting with nitrogen	M(Zone 1)	H(Spark)	b	H	B	Effective but insufficient
	1-4	Charge relaxation (toluene)	H(Zone 0)	H(Spark)	a	H	A	None
2	2-1	None	H(Zone 0)	H(Brush)	a	H	A	-
	2-2	Grounding (personnel/container)	H(Zone 0)	H(Brush)	a	H	A	None
	2-3	Inerting with nitrogen	L(Zone 2)	H(Brush)	c	H	C	Effective
	2-4	Charge relaxation (toluene)	H(Zone 0)	L(No incendive discharge)	c	H	C	Effective
3	3-1	None	M(Zone 1)	H(Spark)	b	H	B	-
	3-2	Grounding (personnel)	M(Zone 1)	L(No discharge)	c	H	C	Effective
	3-3	Inerting with nitrogen	M(Zone 1)	H(Spark)	b	H	B	None
	3-4	Charge relaxation (toluene)	M(Zone 1)	H(Spark)	b	H	B	None
4	4-1	None	M(Zone 1)	H(Spark)	b	M-H	B	-
	4-2	Grounding (personnel/container)	M(Zone 1)	L(No discharge)	c	M-H	C	Effective
	4-3	Inerting with nitrogen	M(Zone 1)	H(Spark)	b	M-H	B	None
	4-4	Charge relaxation (toluene)	M(Zone 1)	H(Spark)	b	M-H	B	None

非接地のため、帯電したトルエンからの静電誘導をうけて電位上昇してトルエンとの電位差が小さくなって放電エネルギーが2-2よりも小さくなる可能性があるが、当社法ではスクリーニングツールとして位置付けているため、この差は考慮しない。

2-4：安全対策としてトルエンが安全なレベルまで除電されている想定であり、ブラシ放電が発生したとしても着火性は無いとして、「小」と判断した。

③ 静電気災害発生可能性

Table 4より、2-1から順に、a, a, c, cとなる。

④ 影響度

ケース1と同様、「大」と判断した。

⑤ リスク

Table 6より、2-1から順にA, A, C, Cとなる。

以上より、ケース2については、追加の安全対策無しではリスクは容認できないが、窒素の吹き込みまたはトルエンの除電によってリスクは容認範囲まで軽減できる結果となった。なお、ケース2-2の解析結果は、ケース2に示した放電によるリスクが、窒素による不活性化またはトルエンの十分な除電（緩和時間の確保）対策をなおざりにして金属製サンプリング容器の接地対策のみ採用した場合には、容認範囲まで軽減できないことを示している。

(3) ケース3

① 爆発雰囲気形成可能性

3-1, 3-2, 3-4：放電懸念場所がサンプリング口開口部近傍のタンク外部のため、Zone 1とみなして「中」と判断した。

3-3：安全対策として窒素を吹き込むケースであるが、窒素吹き込みによる酸素濃度低減の効果はタンク内部に限定されているとみなし、他同様、「中」と判断した。

② 着火性放電発生可能性

3-1, 3-3, 3-4：人体の静電気対策に不備があるケースであり（例えば、静電気帯電防止靴非着用、足場であるタンク上部に絶縁性のペンキが塗布されていて漏洩抵抗が不十分、帯電防止作業着非着用など）、人体の電位が上昇してサンプリングハッチ等の付近の接地導体との間で着火性火花放電が発生する可能性があるため「大」と判断した。

3-2：安全対策として人体の静電気対策を講じたケースであり、人体、付近の接地導体ともに電位は共に0[V]と見なされるため、着火性火花放電発生の恐れは無くなる。したがって、「小」と判断した。

③ 静電気災害発生可能性

Table 4より、3-1から順に、b, c, b, bとなる。

④ 影響度

着火場所はタンク外部とはいえ開口したサンプリング口近傍であり、着火した時に火炎がタンク内に逆火する恐れがあるため、タンク内での着火を想定したケース1, 2と同様に「大」と判断した。

⑤ リスク

Table 6より、3-1から順にB, C, B, Bとなる。

以上より、ケース3については、追加の安全対策無しではリスクは容認できないが、作業員の静電気対策を講じることによってリスクは容認範囲まで軽減できる結果となった。

(4) ケース4

① 爆発雰囲気形成可能性

4-1, 4-2, 4-3, 4-4：放電懸念場所がトルエンが入った金属製サンプリング容器外部であるため、Zone 1とみなして「中」と判断した。

② 着火性放電発生可能性

4-1, 4-3, 4-4：人体または金属製容器のどちらか、または両方の静電気対策に不備があるケースである。人体の静電気対策に不備があると（例えば、静電気帯電防止靴非着用、足場であるタンク上部に絶縁性のペンキが塗布されていて漏洩抵抗が不十分、帯電防止作業着非着用など）、人体の電位が上昇して金属製サンプリング容器との間で着火性火花放電が発生する可能性があるため「大」と判断した。金属製サンプリング容器が接地されていない場合は、サンプリング容器内に入った帯電しているトルエンから静電誘導をうける等して金属容器の電位が上昇して人体との間で着火性火花放電が発生する可能性があるため、同様に「大」と判断した。

4-2：人体と金属製サンプリング容器の静電気対策を講じたケースであり、人体、金属製サンプリング容器ともに電位は0[V]と見なされるため、着火性放電発生の恐れは無くなる。したがって、「小」と判断した。

③ 静電気災害発生可能性

Table 4より、4-1から順に、b, c, b, bとなる。

④ 影響度

着火場所はタンク外部であるが、ケース3よりは開口したサンプリング口からの距離が遠い。したがって、着火は金属製サンプリング容器内のトルエン蒸気に限定されるケースと、火炎がタンク内に逆火するケースが想定されるとみなし「中～大」と判断した。

⑤ リスク

Table 6より、4-1から順にB, C, B, Bとなる。

以上より、ケース4については、追加の安全対策無しではリスクは容認できないが、金属製サンプリング

容器の接地と作業員の静電気対策を講じることによってリスクは容認範囲まで軽減できる結果となった。

以上、アセスメント実施例について考え方を含めて詳細に紹介したが、今回検討した対策である金属製サンプリング容器の接地、作業員の静電気対策、窒素吹き込みによる酸素濃度管理、トルエンの除電のうち、全てのケースの放電懸念箇所に対応できる単一の安全対策は無いことが分かる。今回紹介したように、対策を講じたケースと講じていないケースの両方のリスクアセスメントを実施して一覧表にして纏めることで、対策がどのような懸念に対して有効かが分かりやすくなるとともに、その対策に不備が生じた場合の危険性もイメージしやすくなる。これは作業標準書として活用したり、また教育資料としても活用できる。

2. リスクアセスメント結果（大澤法）

次に同じ事例を大澤法でアセスメントした結果をTable 12に示す。詳細は割愛するが、着火が懸念されるケースでは危険の程度に応じて静電気放電ハザ

ードは0～200の範囲で5通りに分類された。この事例では静電気着火ハザードが12以下のケースが住友化学法のリスクCまたはDランク（対策を強化したり、社内専門家に相談する必要がない基準）に相当する結果となった。

本稿で紹介した静電気リスクアセスメントに関する基礎知識

誌面の制約上、静電気リスクアセスメントを理解する上で必要な静電気帯電現象や静電気放電現象、種々の静電気対策等を網羅的に紹介することはできないので、ここでは本稿で紹介した静電気リスクアセスメント事例の理解に最低限必要な知識についてのみ紹介する。

1. 接地（アース）とボンディング

Fig. 6に示すように、接地線等を用いて金属や人体等の導電性物質を大地と電気的に接続して、電位（単位は[V]）を大地と同じ0[V]に保つことを接地またはアースと呼ぶ。ボンディングは導体と他の導体と

Table 12 Risk analysis result (OHSAWA Method)

Case	Sub No.	Safety measures	Hazard Level				Severity (personnel)	Risk	Risk (Sumitomo Chemical Method)
			Explosion atmosphere	Electrification and electrostatic induction	Electrostatic discharge	Ignition caused by electrostatic discharge			
1	1-1	None	10(Zone 0)	4(Container)	5(Spark)	200	A	200A	A
	1-2	Grounding (personnel/container)	10(Zone 0)	0(Container)	not expected	0	A	0A	C
	1-3	Inerting with nitrogen	6(Zone 1)	4(Container)	5(Spark)	120	A	120A	B
	1-4	Charge relaxation (toluene)	10(Zone 0)	4(Container)	5(Spark)	200	A	200A	A
2	2-1	None	10(Zone 0)	2(liquid)	3(Blush)	60	A	60A	A
	2-2	Grounding (personnel/container)	10(Zone 0)	2(liquid)	3(Blush)	60	A	60A	A
	2-3	Inerting with nitrogen	2(Zone 2)	2(liquid)	3(Blush)	12	A	12A	C
	2-4	Charge relaxation (toluene)	10(Zone 0)	0(liquid)	not expected	0	A	0A	C
3	3-1	None	6(Zone 1)	4(personnel)	5(Spark)	120	A	120A	B
	3-2	Grounding (personnel/container)	6(Zone 1)	0(personnel)	not expected	0	0	0A	C
	3-3	Inerting with nitrogen	6(Zone 1)	4(personnel)	5(Spark)	120	A	120A	B
	3-4	Charge relaxation (toluene)	6(Zone 1)	4(personnel)	5(Spark)	120	A	120A	B
4	4-1	None	6(Zone 1)	4(personnel/container)	5(Spark)	120	A ~ B	120A 120B	B
	4-2	Grounding (personnel/container)	6(Zone 1)	0(personnel/container)	not expected	0	A ~ B	0A 0B	C
	4-3	Inerting with nitrogen	6(Zone 1)	4(personnel/container)	5(Spark)	120	A ~ B	120A 120B	B
	4-4	Charge relaxation (toluene)	6(Zone 1)	4(personnel/container)	5(Spark)	120	A ~ B	120A 120B	B

を電氣的に接続して同電位にすることであり、ボンディングした先の導体が接地されていれば接地と同じ効果が得られる。原則、引火性・可燃性雰囲気中に存在する導体は、接地やボンディングで電位を0[V]に維持することが原則である。ただし、接地された導体であっても、他の帯電物とその導体に近づいた時には接地導体—帯電物間で着火性放電が発生する可能性があることに留意する。例外的に小さな金属類（ボルト等）の接地が不要なケースがIECの技術指針³⁾で紹介されているが、そのような基準を適用するには正しい評価と判断が必要になるので、静電気安全の専門家の指導の下で活用することが望ましい。

ここでは、接地やボンディング対策を実施する際の注意点をいくつか紹介する。

- ① 接地やボンディングは導体でないと効果が得られない。一般的なプラスチック類は絶縁体であり、接地やボンディングは無意味なことが多い。
- ② 非接地導体の電位が上昇していると、クリップ等を用いて接地線を取り付ける時に着火性放電が発生する懸念がある。ゆえに、接地線を取り付ける作業は爆発雰囲気が形成されていない状態で行う必要がある。
- ③ 着脱式の接地は使用中に外れた際、慌てて再び取り付けると危険な場合がある（上述した理由②のため）。
- ④ 人体の静電気対策としては、床の導電性管理と、静電気帯電防止靴の着用、帯電防止作業服の着用などが挙げられるが、床と靴の同時対策が特に重要である。なぜなら、床と靴を介して大地と人体が電氣的に接続されることによって人体の電位を0[V]に維持することが可能になるからである。ゆえに、靴と床の対策が確実に講じられていれば、帯電防止作業着を着用していなくても爆発性雰囲気中で衣服を脱いだり着たりしない限り、危険度は容認範囲であることが多い。これとは逆に帯電防止作業着を着用していても、床または靴の対策に不備があれば、危険な状況になることが多い。

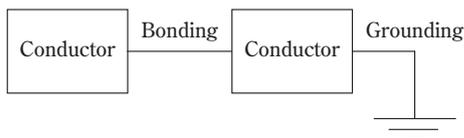


Fig. 6 Grounding and bonding

床の管理方法は、漏洩抵抗を測定して行う。導電性ではない塗料を塗布したり、油や粉体等で床面が汚染されたりすると、必要な漏洩抵抗が確保されなくなる恐れがある。

靴の管理は靴裏と掌の間の抵抗を測定するタイプの測定機器を使用すれば、靴の中敷きや靴下の抵抗を加味した管理が可能である。

2. 静電誘導

通常の静電気帯電現象では、接触、摩擦、分離プロセスを経て帯電（=電荷の過不足）が生じ、それに伴い電位上昇が生じることが多いが、接触、摩擦、分離を伴わない静電誘導についても理解しておく必要がある。

Fig. 7は静電誘導で電位上昇して放電による電撃を受ける人を電荷移動と電位上昇に着目して模式図として表したものである。この模式図は1stから8th迄のストーリーを持った8個のイラストからなり、負に強帯電したフレキシブルコンテナ（以下、FIBCと称す）と絶縁性の靴を着用しているために接地できていない人体と接地された金属板が描かれている。1stは何の帯電も電位上昇もない状態である。次に帯電したFIBCが人体の左方無限遠から近づいてきたのが2ndである。目には見えないが、人の体内にあるイオン

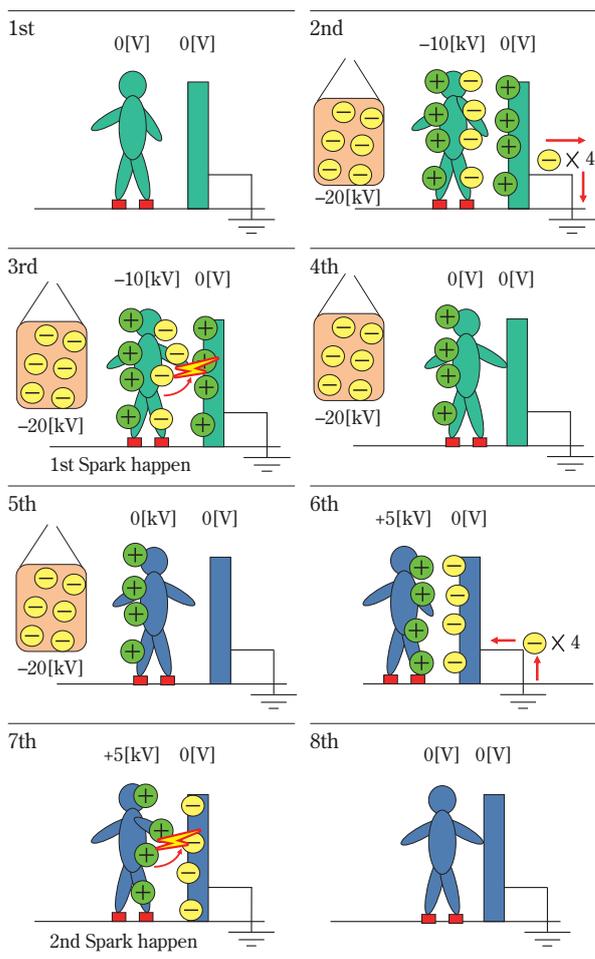


Fig. 7 An example of discharge shocks by electrostatic induction

等の電荷を持つもので正のものはFIBCに引き寄せられ、負のものは反発して遠ざかると思われる。結果として、人体の左方は正、右方は負の電荷が表れる。人体は接地された0Vの金属板と負に強帯電したFIBCに挟まれているので負の電位上昇が生じる。その影響で金属板の左方の自由電子は反発作用で大地に向けて移動し、金属板の左方表面には正の電荷が現れる。この時、人体の電荷に分布は生じているが、全体として人体の電荷の過不足は無いので、人体が帯電しているというのは不適切な表現であり、帯電していないが静電誘導によって電荷に分布が生じて電位上昇している、というのが妥当である。この状態で作業員が接地された金属板に触れようとした時、指先と接地金属板の間には電位差があり、単位距離あたりの電位差である電界強度が 3×10^6 [V/m]に達した時に空気の絶縁が破壊され静電気放電（指先から接地金属板に向けて電子が流れる）が生じる(3rd)。この放電が生じる距離は、一般的な人体活動においては数mm程度である。この放電では強い痛みを感じるだけでなく、放電場所に可燃性ガスや引火性液体蒸気、可燃性粉じん雲等が存在していると着火する恐れがある。放電直後の指先が金属板に触った状態が4thであり、人体と金属板はボンディングされ、金属板は接地されているので、結果として人体は接地された状態となり、人体電位は0[V]になる。この状態で指先を金属板から離れたのが5thであり、人体は正の電荷が過剰のため帯電したといえるが、電位は0[V]という状態になる。帯電したら電位が上昇するとは限らないことを示す良い例である。しかし、これは付近に負に帯電したFIBCが存在するからであり、FIBCが無限遠に遠ざかっていくにつれて正に帯電した人体の電位は本来の正の電位上昇を示すことになる(6th)。それから再度、金属板に触ろうとした時に放電し(7th)、触った状態で人体の電位は再び0[V]になる(8th)。この状態で手を放すと再び1stの状態に戻る。

このように、作業員は1歩も動かない状態でFIBCが近づき、遠ざかる過程において2回の静電気放電による電撃を受けることになる。粉体の充填工程や排出工程ではこのような静電誘導が原因の静電気放電で着火することがあるので注意が必要である。

人が歩いた時の帯電も静電誘導が原因であり、この時は靴裏が帯電して下半身と上半身で逆極性の電荷分布が生じて電位上昇する。ソファから立ち上がる際は衣服とソファとの接触摩擦分離で衣服が帯電して電位上昇し、それによる静電誘導によって人体の電位が上昇する。これらの知識はセルフサービスのガソリンスタンドにおける安全対策にも応用できる。

3. 絶縁性液体の除電対策としての静置時間

引火性液体にはトルエンのように電気絶縁性が高いものが多いが、接地された金属容器に入れた絶縁性液体はその導電率に応じて決められた静置時間を確保すれば、帯電が安全なレベルまで軽減される。

静置時間の注意点としては、静置時間の起点は電荷分離が発生する操作（状況）が終了した時点とするのが正しいが、液体に非溶解性の固体または液体の不純物が存在している場合、それらがゆっくり沈降または浮上することによって新たに帯電することがあり、この沈降または浮上による帯電によって、静置時間の確保が不十分になる恐れがあることが挙げられる。これら浮上帯電や沈降帯電が生じているかどうか確認することは一般には困難である。これらが静置時間という安全対策の信頼性、確実性に影響を与えることに留意する必要がある。

4. 放電の種類

ここでは火花放電とブラシ放電のみ紹介する。

火花放電はドアノブと指先の間で発生する放電のように、お互いに電気をよく通す二つの導体の間で生じる放電である。導体間で火花放電が発生するためには少なくともどちらか一方が非接地の状態になって電位上昇している必要がある。ドアノブを触って電撃を感じる時、非接地導体で電位上昇していたのはドアノブではなく人体であることが圧倒的に多い。非接地の導体では静電容量C（単位はF：ファラッド）が定義でき、電位Vが分かれば放電エネルギーW（単位はJ：ジュール）を $W = 0.5CV^2$ の関係式から計算することができ、可燃物の最小発火エネルギーと大小を比較することによって着火する可能性を論じることができる。

ブラシ放電は冬場、セーターを脱衣所で脱ぐときにぱちぱちという音とともに若干の痛みを感じることもある放電であり、帯電した絶縁体（電気を非常に通しにくい物体）に導体が近づいた時に絶縁体と導体との間で発生する。ブラシ放電の原因となる絶縁体は静電容量が決定できないため、導体のような簡単な式で放電エネルギーを見積もることはできない。ブラシ放電は、火花放電と比較すると可燃物を着火させる能力は小さいが、最小着火エネルギーが3mJ程度迄の可燃性ガスや引火性液体蒸気を着火させる能力があるといわれている。

おわりに

静電気放電による火災や爆発災害を防止するためには、危険に気づき、気付いた危険に対してそれを正しく理解・評価し、評価した結果を踏まえて適切な安全対策を立案実行することが求められる。当社

では静電気危険に気付き、正しく評価し、正しい対策を立案実行できるスキルを身に着けるために必要な座学と体験実験による各種教育を整備しているの
で、関心のある方は関連文献^{15),16)}を参照されたい。

静電気災害は現在でも危険物施設の火災原因の筆頭に挙げられる等、一定の頻度で発生し続けており、人手が介在する作業での発災は人的被害にも直結することから、個々の作業の具体的な静電気危険や安全対策の必要性を作業員に理解できる形で伝えることも重要である。本稿が静電気災害の撲滅に少しでもお役に立てれば幸いである。なお、本稿以外の静電気リスクアセスメント実施例については、関連文献^{17),18)}を参照されたい。

最後に、大澤法の実施例についてご指導頂いた独立行政法人 労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所の大澤 敦氏に、心より感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 太田 潔, 住友化学, **2004-II**, 55 (2004).
- 2) “JNOSH-TR-NO.42, 労働安全衛生総合研究所技術指針 静電気安全指針2007” (2007).
- 3) “IEC TS 60079-32-1 Explosive atmospheres – Part 32-1: Electrostatic hazards, guidance” (2013).
- 4) “IEC TS 60079-32-1 Amendment1, Explosive atmospheres – Part 32-1, Electrostatic hazards, guidance” (2017).
- 5) 大澤 敦, “2013年度 静電気災害防止シンポジウム—静電気リスクアセスメント予稿集”, 静電気学会 (2013), p.33.
- 6) “VDI 2263 Part 5.1 Dust fires and dust explosions – Hazards, assessment, protective measures –Explosion protection in fluid bed dryers – Hints and examples of operation” (2014).
- 7) “VDI 2263 Part 6.1 Dust fires and dust explosions – Hazards – assessment – protective measures –Dust fires and explosion protection in dust extracting installations; Examples” (2009).
- 8) “VDI 2263 Part 7.1 Dust fires and dust explosions – Hazards – assessment – protective measures –Fire and explosion protection in spraying and drying integrated equipment – Examples” (2013).
- 9) “NFPA77 Recommended Practice on Static Electricity” (2014).
- 10) CCPS, “Guidelines for Combustible Dust Hazard Analysis”, Wiley (2017).
- 11) 柳生 昭三, “産業安全研究所安全資料 RIIS-SD-86, 1986 引火温度と爆発限界の関係線図 (第1集)”, 労働省産業安全研究所 (1987).
- 12) “NFPA69 Standard on Explosion Prevention Systems” (2014).
- 13) “IEC 60079-10-1: Explosive atmospheres – Part 10-1: Classification of areas – Explosive gas atmospheres” (2015).
- 14) “IEC 60079-10-2: Explosive atmospheres – Part 10-2: Classification of areas – Explosive dust atmospheres” (2015).
- 15) 丸野 忍, 住友化学, **2008-II**, 57 (2008).
- 16) 田中 則章 ほか, 安全工学, **47**(6), 408 (2008).
- 17) 太田 潔・大澤 敦, 静電気学会誌, **38**, 218 (2014).
- 18) 太田 潔, “2013年度 静電気災害防止シンポジウム—静電気リスクアセスメント予稿集”, 静電気学会 (2013), p.77.

PROFILE



太田 潔
Kiyoshi Ota

住友化学株式会社
生産安全基盤センター
主席研究員