

フレキシブルコンテナに関連した労働災害と規格の動向[†]山 隈 瑞 樹^{*1}

フレキシブルコンテナ (FIBC) は、粉体の貯蔵・輸送・投入等に広く使用されている。一方で、内容物と容器壁との摩擦によって静電気が発生するため、内容物または周囲に爆発性混合物が存在する場合、静電気放電による爆発・火災が発生するおそれがある。本稿では、まず、FIBC に関連した災害の典型的な発生機構を静電気放電の着火性という観点から解説し、国内での災害事例を紹介する。次に、静電気災害防止対策用 FIBC の国際規格 (IEC 61340-4-4:2012) の要点を紹介するとともに、これを元に現在作成中の国内規格 (JIS) について、特に、IEC 規格との相違点を中心に解説する。

キーワード: IEC 規格, JIS, フレキシブルコンテナ, 静電気, 爆発・火災

1 はじめに

フレキシブルコンテナ (Flexible intermediate bulk container. 以下、FIBC という。) は、織布や樹脂シートで作られた柔軟な袋状の容器であり、粉体の貯蔵、輸送、投入 (仕込み) 等に広く用いられている。しかし、便利な反面、特に粉体を排出する際に粉体と容器壁の摩擦によって静電気が発生し、着火危険性のある静電気放電が発生することがある。このとき、可燃性物質 (ガス・蒸気または粉じん) が空気と適当な濃度で混合して爆発性混合気が形成されていると、これに着火して爆発・火災となる。

産業現場において FIBC の静電気帯電に起因すると考えられる災害事例は数多くあり、従前から国内に限らず、海外、特に欧米では安全上の重要な課題であると認識されており、既に多くの研究報告がなされている¹⁻³⁾。さらに、このような国際的な関心の高まりを受けて、2005 年には、初の国際規格 (IEC 61340-4-4:2005)⁴⁾ が制定された。これは、国内では 2009 年に整合化規格 (JIS C 61340-4-4:2009 (IDT))⁵⁾ として制定・公表された。ただし、これらの規格は、FIBC の基本的な構造と試験方法を示しただけであり、製品化および内袋を含めた正しい使用方法についての言及がなかったために、必ずしも実用的なものではなかった。この反省をふまえ、国際規格の改正作業が行われ、2012 年、第 2 版 (IEC 61340-4-4:2012)⁶⁾ が成立・公表された。この規格では、欧州電気標準化委員会技術報告書 CENELEC CLC/TR 50404⁷⁾ を踏襲して FIBC をタイプ A, B, C および D の四つに分類し、それぞれの構造上および性能上の要求事項を定めるとともに、内袋も L1, L2 及び L3 の三つを規定し、使用条件に対応した可能な組み合わせを取り決めている。その他にも正しい使用方法に関する情報が追加されるなど、製造者および使用者の双方にとって実用性が大きく向上している。しかし、この中で、タイプ C

については、その性能上の要求事項について、国内では受け入れがたい内容があるため、現在、JIS 化にあたって修正を検討中である。もちろん、修正に当たっては、科学的な裏付けが必要であり、後述するように、筆者らが実験的な根拠を提示した。

本稿では、FIBC に関連した静電気危険性を事例と理論的・実験的観点から解説するとともに、静電気対策用 FIBC に関する規格の要点と動向を述べる。

2 FIBC に関連した災害事例と災害発生機構

1) 災害事例

表 1 に 1982 ~ 2012 年に国内で発生した災害事例を示す。この例では、全てが容器 (化学反応容器、貯槽、混合機等) に向かって粉体を排出しているときに発生している。爆発または燃焼した物質は溶剤の蒸気又は粉体である。いずれの事例も着火源は明白ではないが、全ての事例において、次のような FIBC または内袋の不適切な使用があったことが判明している。

- (a) 静電気対策品でない FIBC を使用していた。
- (b) 導電性 FIBC を使用していたが、排出中に非接地状態となっていた。
- (c) FIBC と内袋の組み合わせが不適切であった (導電性 FIBC に非導電性内袋を使用、またはその逆)。

いずれの条件においても、FIBC または内袋に静電気が蓄積したと推定され、これに起因する静電気放電が着火源となった可能性が高い。

なお、次に述べるように、粉体を充填するときも着火危険性があることに注意しなければならない。

2) 災害発生機構

図 1(a) および (b) に、静電気による爆発・火災が発生するときの典型的な作業状況を示す。図 1 (a) は、粉体を充填した FIBC から反応容器等に向かって投入する場合である。この場合、静電気は、主として粉体と FIBC (または内袋) との摩擦によって発生する。静電気放電は、FIBC から直接または近傍の非接地導体から間接的に生じる。考慮すべき着火性放電は、火花放電、ブラシ放電、沿面放電の三種類である。排出される粉体も電荷をもつので、粉体を受ける容器およびその近傍での放電現象にも注意が必要である。一方、図 1 (b) は、粉体を FIBC に

[†] 原稿受付 2014年07月24日

[†] 原稿受理 2014年09月03日

J-STAGE Advance published date: September 19, 2014

*1 (独)労働安全衛生総合研究所 国際情報・研究振興センター
連絡先: 〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6

(独)労働安全衛生総合研究所 国際情報・研究振興センター

山隈瑞樹^{*1}

E-mail: yamaguma@s.jniosh.go.jp

表 1 FIBC に関連した爆発・火災事例 (1982-2012)

発生年	可燃物の状態	人的被害	容器の内容物	FIBC の内容物	FIBC の材質	内袋の材質
1982	ガス	傷 1	ポリスチレン (ブタン含)	ポリスチレン	ゴム引き布	ポリエチレン
1987	粉じん	死 1	なし	ステアリン酸鉛	ポリプロピレン	ポリエチレン
1988	粉じん	死 1, 傷 1	なし	パラニトロフェノキシアセトン	ポリプロピレン	ポリエチレン
1994	溶剤蒸気	死 1, 傷 1	メタノール他	ベンゾクアナミン	導電ゴム引き布 (接地不良)	使用なし
1997	溶剤蒸気	傷 1	メタノール他	ベンゾクアナミン	塩化ビニル	使用なし
2001	溶剤蒸気	傷 2	1,4-ジオキサン	GOH(C ₂₉ H ₂₈ N ₂ O ₅ S)	ポリプロピレン	ポリエチレン
2004	ハイブリッド混合物	死 1	なし	ビスクロヘキサノール + トルエン	ポリプロピレン	ポリエチレン
2005	粉じん	傷 1	なし	トナー	ポリプロピレン	導電ポリエチレン
2012	粉じん	傷 3	なし	ビスフェノール A	ポリプロピレン	ポリエチレン

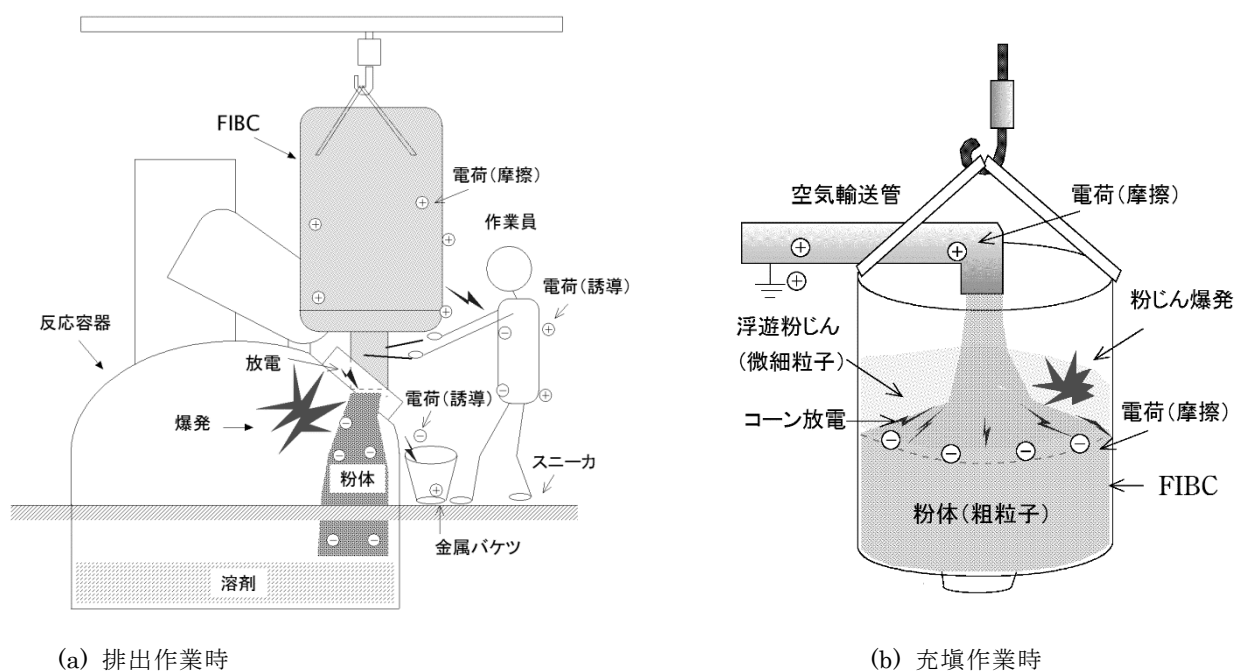


図 1 FIBC 作業中に生じる爆発・火災の典型例

充填する場合の着火機構を示すものである。この場合、静電気は粉体と輸送用配管との摩擦で生じる。特に、空気輸送の場合には電荷密度はかなり大きくなり、FIBC 内に堆積した粉体の表面でコーン放電が発生することがある⁸⁾。このとき、微細な粒子径 (100 μm 以下) の粉じんが浮遊していると、コーン放電で着火し、粉じん爆発を生じる可能性がある。

爆発・火災発生の基本条件は、爆発性雰囲気 (溶剤蒸気または粉じんと空気が爆発範囲の濃度で混合している状態) とその着火エネルギーを超えるエネルギーをもつ静電気放電が同時に発生することである。

これらの静電気放電の特徴は次のとおりである。また、表 2 に要点をまとめる。

(1) 火花放電

火花放電は、図 2(a) のように、非接地または接地不良状態の帯電導体と接地体との間で発生する放電であり、一般に着火性が高く、ガス・蒸気だけでなく粉じんも対象となる。

FIBC 作業中の発生条件は、図 1(a) を例にすると次のように推定される。

- ・粉体排出時、粉体と FIBC の摩擦により静電気が発生する。FIBC には電荷が蓄積し、高電位となる。
- ・作業員が接地不良 (例えば、ゴム底のスニーカーを履く) であると、静電誘導現象により作業員の電位も上昇する。FIBC の近傍にある金属製品 (バケツ、スコップなど) も同様に電位が上昇する。
- ・FIBC の抵抗が低い場合、反応容器との間で火花放電が発生する。さらに、人体又は金属製品からも火花放電が発生する。

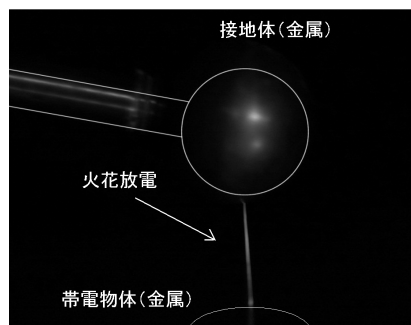
火花放電の対策は、FIBC および人体を含む導体の接地であり、これにより、作業中の電位が火花放電の発生限界である約 300 V 以下に保たれるようにする。

(2) ブラシ放電

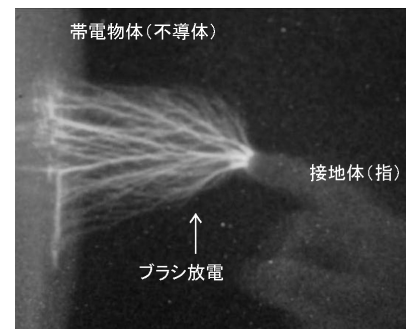
ブラシ放電は、図 2(b) のように、帯電した不導体から発生する放電であり、非導電性材料で作られた FIBC (タイプ A およびタイプ B) から発生する。着火エネルギー

表2 FIBCで発生する放電の種類と特徴

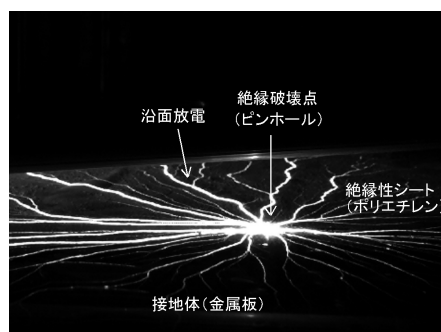
放電の種類	発生場所	最大放電エネルギー	着火対象物	備考
火花放電	非接地導体	100 mJ 以上	ガス・蒸気、ハイブリッド混合物、粉じん	FIBC 近傍の人体、金属製品でも生じる。
ブラシ放電	非導電性物体	3 mJ 程度	ガス・蒸気、ハイブリッド混合物	作業員への電撃を生じる。
沿面放電	接地導体と薄い不導体シート	1000 mJ 以上	ガス・蒸気、ハイブリッド混合物、粉じん	ポリ製内袋で発生しやすい。
コーン放電	粗い粒子径の粉体層	100 mJ 以上	ガス・蒸気、ハイブリッド混合物、粉じん	粉体の充填中に発生しやすい。



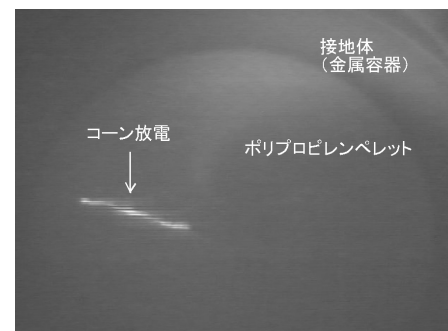
(a) 火花放電



(b) ブラシ放電



(c) 沿面放電



(d) コーン放電

図2 FIBCで発生する主な静電気放電

は3～4 mJ 以下であり⁹⁾、ガス・蒸気の着火源となるが、放電エネルギーが空間的・時間的に分散していることから粉じんには着火しないとみなされている^{10, 11)}。FIBCの電位がおよそ40 kV 以上になると作業員に激しい電撃を与えることがある。シート状の絶縁物が接地体に密着している場合、厚さ700 μm 以下であれば、ブラシ放電には着火性がないことが知られている¹²⁾。

(3) 沿面放電

沿面放電は、薄い絶縁層の表裏が互いに逆極性に帯電し、かつ、電荷密度が極めて大きく(2.5×10^{-4} C/m² 以上)となったときに接地体の接近又は絶縁破壊をきっかけとして生じる。現実には、図2(c)のように、薄い絶縁性シートが接地体と密着している場合に生じやすい。これは、接地体に静電誘導によってシートと逆極性の電荷が生じるためである。シートが薄いほど、かつ、絶縁破壊電圧が大きいほど放電エネルギーは大きくなり、ガス・蒸気

はもちろん、粉じんの着火源ともなる。沿面放電は、ポリエチレン製内袋などのシート状物体の絶縁破壊をきっかけとして発生するので、対向電極を必要としない¹¹⁾。このような理由から、FIBC 作業において最も注意すべき放電形態である。沿面放電の対策として、絶縁シートの絶縁破壊電圧を4 kV または6 kV 以下^{註1)}とすることが有効であることが知られており¹³⁾、後述の規格にも採用されている。

(4) コーン放電

コーン放電は、図1(b)に示すように、比較的粗い粒子径(1 mm 以上)の粉体を高速充填するときに発生しやすい⁷⁾。粉体層の表面電位が十分大きい場合、接地体がなくとも表面だけで放電を生じることもあるが、通常は図2(d)に示すように接地体に向かって放電することが多

註1 沿面放電の発生限界は、厳密には4 kV 以上であるが、FIBC のようにある程度の厚みがある場合、発生限界は高くなるので、規格上は6 kV に規定している。

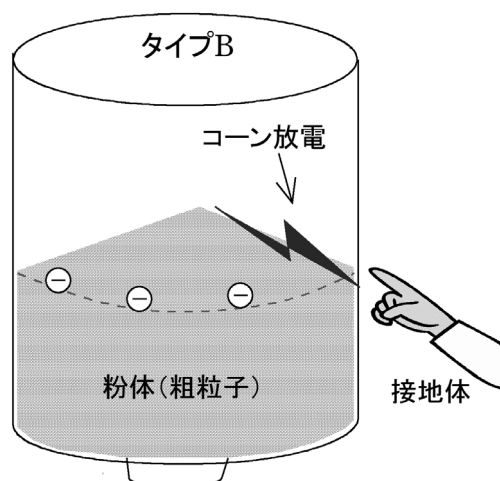


図3 非導電性 FIBC におけるコーン放電の発生例

い。したがって、導電性材料で作られた FIBC（タイプ C）では頻繁に発生しやすい。ただし、不導体材料で作られた FIBC（タイプ A または B）でも、図3に示すように、粉面付近に接地体（人体の一部でもよい）が接近するとこれに向かってコーン放電が発生し、この場合の放電エネルギーはタイプ C よりも大きいことが知られている⁶⁾。

3 FIBCに関する規格

1) 国際規格 (IEC 61340-4-4:2012) の要点

IEC 61340-4-4:2012 では、静電気対策の観点から、FIBC を4タイプに分類し、それぞれの構造上および性能上の要求事項を定めている。また、内袋についても3タイプに分類し、それぞれの要求事項を定めるとともに、使用条件に応じて適用可能な FIBC と内袋の組み合わせを規定している。以下、その要点を解説する。

(1) FIBC のタイプ

FIBC は、A、B、C および D の4タイプに分類される。このうち、タイプ A は、B、C または D に含まれないものであり、一切の静電気対策を講じていないものとみなす。タイプ B～D の特徴を次に示す。また、表3にポイントをまとめる。

(a) タイプ B

不導体のシートまたは織布を材料とする FIBC であり、材料の絶縁破壊電圧は6 kV 未満でなければならない。これは、2. 2). (3) で述べたように、沿面放電の発生を防止

するための措置である。ブラシ放電の発生は防止できないが、IEC では、ブラシ放電は粉じんへの着火性をもたないとの立場であり、使用環境にガス・蒸気または最小着火エネルギー（以下、MIE という。）3 mJ 以下の粉じんが存在しない場合に限り、使用できる。

ここで、“ブラシ放電は粉じんへの着火性をもたない”のに、MIE が3 mJ を超える粉じんだけに使用を限定するのは一見矛盾であるが、これは規格初版 (IEC 61340-4-4:2005) において同じ制限が設けられていたこと、および、コーン放電による着火危険性が高いことを考慮したものである。筆者の私見であるが、3 mJ 未満の粉体取扱い中に粉じん爆発を生じた事例は多く、かつ、必ずしも原因は明らかではないことから、前述の理由がなくとも、この制限は“転ばぬ先の杖”として妥当なものとする。

タイプ B では、タイプ A と同様に電位は高くなる。したがって、作業中は、作業員や金属製品（バックル、D 環などを含む）などの導体は全て接地しなければならない。

なお、溶剤を含む粉体（ハイブリッド混合物）は、ブラシ放電でも着火する可能性があることから、タイプ B で取り扱ってはならない。

(b) タイプ C

タイプ C は構造的には二種類に分類される。一つは、図4(a)に示すように、不導体（例えば、ポリプロピレン）の織布に導電性テープまたは糸を格子状または縞状に織り込みまたは縫い込んだものであり、これを国内ではクロスタイプとよぶ¹⁴⁾。導電性のテープまたは糸は電氣的に相互接続し、かつ、接地のための端子（これを、接地可能接続点という。）を FIBC 本体上に1箇所以上設ける。もう一つは、図4(b)に示すように、布生地に導電性ゴム引きをしたもの、または、導電性プラスチックシートを材料とした FIBC であり、これを国内ではランニングタイプとよぶ¹⁴⁾。これも1箇所以上の接地可能接続点を設ける。なお、導電面は内側、外側のいずれか片方であってもよいが、外側だけを導電面とした場合、沿面放電を防止するため、その材料の絶縁破壊電圧は6 kV 未満としなければならない。

クロスタイプとランニングタイプのいずれであっても、接地可能接続点と本体の導電性部分との間の抵抗は1.0×

表3 FIBC のタイプとその要求事項および使用条件

タイプ	構造上の要求事項（材料）	性能上の要求事項	使用可能な雰囲気	備考
B	不導体シート又は織布	絶縁破壊電圧が6 kV 未満	MIE > 3 mJ の粉じんだけが存在	接地は不要。ゾーン 20 では使用不可。
C	不導体織布に導電性糸を縫い込む 導電性シート	接地可能接続点（接地用端子）までの抵抗が $1.0 \times 10^7 \Omega$ 未満	ガスグループ IIA 若しくは IIB、又は粉じんが存在	接地は必要。ゾーン 0 又はゾーン 20 では使用不可。
D	制限なし	着火試験において着火しないこと	ガスグループ IIA 若しくは IIB (MIE > 0.14 mJ)、又は粉じんが存在	接地は不要。ゾーン 0 又はゾーン 20 では使用不可。

注：タイプ A は、タイプ B、C または D のいずれにも該当しないものであり、何ら静電気対策がなされていないので、爆発・火災のおそれがある条件では使用してはならない。

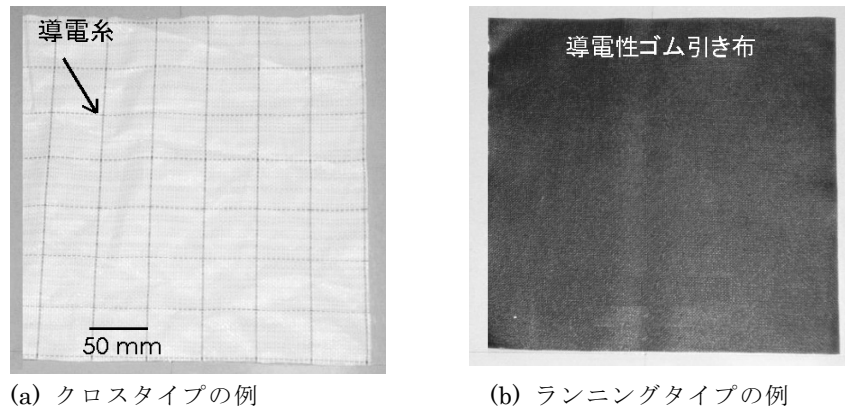


図4 タイプCの材料

$10^7 \Omega$ 未満でなければならない。この数値は、初版（IEC 61340-4-4:2005）においては $1.0 \times 10^8 \Omega$ 未満とされていたものであり、第2版では上限値が1桁小さくなった。この理由は、次の二つである。

①初版においては、MIEが0.14 mJ以上のガス・蒸気（ガスグループIIA全てとIIBの一部を含む）に使用を限定していたが、第2版では、ガスグループIIBも全て含めることとしたため、放電エネルギーをより制限する必要があること。

②初版においては、静電気の発生電流の上限を $3 \mu\text{A}$ としていたが、この制限を撤廃したこと。これにより、 $30 \mu\text{A}$ の電流が発生しても、理論上、最大電位は300 V以下となり、火花放電が発生しないことが保証される。

ただし、この抵抗値の変更については、タイプCの製造上および強度上の重要な観点が見落とされており、また、安全上の観点からも十分な検討がなされたとは言えないことから、後述のように、JIS規格作成に当たっては日本で独自に検討を行い、数値の変更を提案している。

(c) タイプD

タイプDは、充填・排出作業中に接地をすることなく、ガス・蒸気または粉じんへの着火性放電を防止する機能を有するものである。着火性放電防止の原理は任意であるが、絶縁性材料に導電性繊維を粗くまぶすことによって着火性のないコロナ放電を発生させる方法が一般的である¹⁵⁾。タイプDは、これから発生する放電に着火性がないことを、規格に定める着火試験によって証明しな

なければならない。この試験では、最小着火エネルギー0.14 mJ相当の混合ガスを用いるので、適用可能なガスグループは、IIAおよびIIBのうち、最小着火エネルギーが0.14 mJ以上のものに制限される。粉じんについては、タイプCと同様に制限はない。

タイプDは、日本国内ではあまりなじみがないが、欧米ではよく使用されているものであり、タイプCにありがちな接地忘れによる火花放電の発生がないことから、ヒューマンエラーによるリスクが低減される。ただし、使用中、FIBCの電位はタイプAまたはBと同様に高くなるので、タイプBと同じく、近傍の導体は必ず接地しなければならない。

(2) 内袋のタイプとFIBCとの組み合わせ

内袋は、内容物の汚損防止、漏れ防止等の目的で使用するものである。通常、ポリエチレンなどの高分子材料で作られるため、条件によっては抵抗率が非常に高くなり、静電気帯電しやすくなる。特に、沿面放電の発生条件を構成しやすくなるため、FIBC単体での使用よりも危険性が増す¹⁶⁾。

規格第2版では、内袋に対する性能上の要求事項を定めている。これは、表面抵抗率、絶縁破壊電圧および厚さによって、タイプL1内袋、L2内袋およびL3内袋の三つに分類しており、その要点は、表4に示すとおりである。なお、原文では内袋は、例えば、“type L1 inner liner”と表記しているが、本稿では“タイプL1内袋”のように、タイプ名の後に“内袋”を付けることによって、FIBCのタイプとの混同を避ける。^{注2)}

表4 内袋のタイプとその要求事項およびFIBCとの組み合わせ

タイプ	内面の表面抵抗率	外面の表面抵抗率	絶縁破壊電圧	厚さ	組み合わせ可能なFIBC
L1	$1.0 \times 10^7 \Omega$ 以下	$1.0 \times 10^7 \Omega$ 以下	測定不要	制限なし	C
	$1.0 \times 10^{12} \Omega$ 超	$1.0 \times 10^7 \Omega$ 以下	4 kV 未満	700 μm 未満	
L2	$1.0 \times 10^9 \Omega$ 以上 $1.0 \times 10^{12} \Omega$ 以下	$1.0 \times 10^9 \Omega$ 以上 $1.0 \times 10^{12} \Omega$ 以下	測定不要	制限なし	B, C, D
	$1.0 \times 10^{12} \Omega$ 超	$1.0 \times 10^9 \Omega$ 以上 $1.0 \times 10^{12} \Omega$ 以下	4 kV 未満	700 μm 未満	
L3	$1.0 \times 10^{12} \Omega$ 超	$1.0 \times 10^{12} \Omega$ 超	4 kV 未満	制限なし	B

注：表面抵抗率 $1.0 \times 10^7 \Omega$ 超 $1.0 \times 10^9 \Omega$ 未満のものは、静電気対策が困難であるため除外されている。

(a) タイプ L1 内袋

タイプ L1 内袋は、少なくとも片面の表面抵抗率が $1.0 \times 10^7 \Omega$ 以下という導電性の高い内袋である。作業中、これを接地することによって電位は 300 V 以下となり、火花放電を生じないことが保証される。一方で、接地不良であると容易に火花放電を生じるため、取扱いには注意が必要である。タイプ L1 内袋は、タイプ C とだけ組み合わせることができる。

(b) タイプ L2 内袋

タイプ L2 内袋は、少なくとも片面の表面抵抗率が $1.0 \times 10^9 \Omega$ 以上 $1.0 \times 10^{12} \Omega$ 以下の範囲をもつ内袋である。このタイプは、接地して使用することが原則ではあるが、たとえ接地不良となっても着火性放電を生じにくいという特長がある。L2 内袋は、タイプ B、C および D と組み合わせ使用でき、前述の特長も相まって最も汎用性のある内袋である。

(c) タイプ L3 内袋

タイプ L3 内袋は、両面の表面抵抗率が $1.0 \times 10^{12} \Omega$ 超という絶縁性の内袋である。ただし、絶縁破壊電圧は 4 kV 未満としている。この内袋は、沿面放電を生じることはないがブラシ放電を防止することはできない。したがって、組み合わせ可能な FIBC はタイプ B だけである。

ここで、絶縁破壊電圧がタイプ B では 6 kV 未満、タイプ L3 内袋では 4 kV 未満であり、それぞれ独立に測定する。これらを単純に足し合わせれば約 10 kV となり、沿面放電の発生条件を満たすが、現実には、FIBC、内袋ともに場所によって絶縁破壊電圧にばらつきがあることから、両者を組み合わせても 6 kV を超える場所はごくわずかであるので無視してよく、安全上問題は無い。

なお、通常のポリエチレンでは、絶縁破壊電圧を 4 kV 未満とすると極めて薄くしなければならないため、材料としての強度が低くなることに留意する。

3) JIS 規格 (JIS C 61340-4-4 第 2 版) での変更点

上述の国際規格第 2 版の発行を受けて、これを JIS 規格とするための委員会 (JIS 原案作成委員会、一般財団法人日本電子部品信頼性センター) が設けられ、原案が作成された^{注3}。前述のように、国際規格におけるタイプ C の抵抗値については製造上、強度上および安全上の懸念が呈せられたため、筆者等が安全上の観点から検証実験を行った¹⁷⁾。その結果、クロスタイプは $1.0 \times 10^7 \Omega$ 未満、また、ランニングタイプは $1.0 \times 10^8 \Omega$ 未満とすることが適切との結論に至った。以下、その根拠を解説する。

(a) 通常使用時の放電波形

図 5 に示すように、試験用のタイプ C をつり上げ、これに $30 \mu\text{A}$ の電流を流して本体各部分の電位および放電電流を測定した。この試験には抵抗を調整した特製のクロスタイプ (接地可能接続点までの抵抗は最大 $6.6 \times 10^7 \Omega$) およびランニングタイプ (同 $2.0 \times 10^8 \Omega$) を用いた。なお、 $30 \mu\text{A}$ は、FIBC の使用中に通常発生する最大級の電流 (3

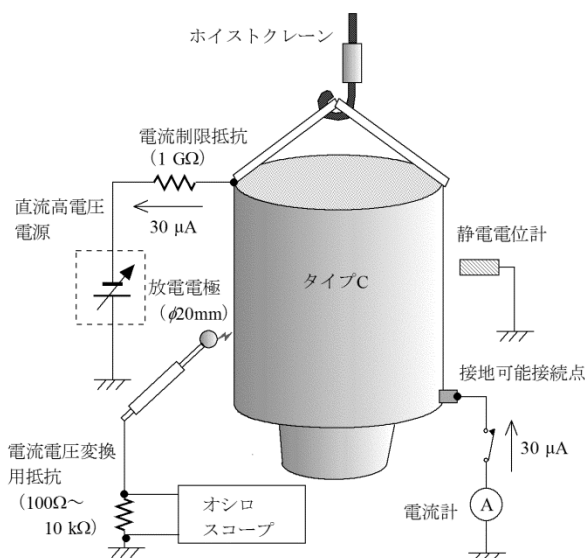


図 5 タイプ C からの火花放電測定システム

～ $4 \mu\text{A}$) ¹⁸⁾ よりもかなり大きな値であるので、十分な安全率を加味した実験である。

まず、抵抗約 $1.0 \times 10^8 \Omega$ の箇所を給電点として $30 \mu\text{A}$ を流したところ、その近傍の電位は、約 3,000 V に達した。そのときの放電電流波形は、図 6 (a) および (b) に示すように、クロスタイプではピーク値が 100 mA を超える単発の大きなパルス状となり、また、ランニングタイプでは約 $10 \mu\text{A}$ のピークをもつ小さなパルスが連続的に発生するものであった。これは、クロスタイプでは、単位長当たりの抵抗が小さい導電性糸を使用しているため、抵抗による電力消費が小さいこと、また、ランニングタイプでは、逆に抵抗率が大きいために、ほとんどのエネルギーが抵抗で消費されていること意味している。体感的にも、指で触れたとき、クロスタイプでは強い電撃を感じたのに対し、ランニングタイプではほとんど感じなかった。

(b) 着火実験

上記の試験用 FIBC を任意の電位に帯電させ、図 7 に示すような着火プローブを用いて⁹⁾、FIBC からの放電でエチレン相当 (MIE = 0.09 mJ) およびメタノール相当 (MIE = 0.14 mJ) の混合ガスに着火するか実験を行った。その結果、クロスタイプ (約 $6 \times 10^7 \Omega$) では、エチレン相当ガスおよびメタノール相当ガスにそれぞれ 2.5 kV および 4.0 kV で着火した。着火のようすを図 8 に示す。一方、ランニングタイプは、表 5 に示すように、抵抗が大きくなるほど着火に必要な電位は上昇し、特に、 $1.0 \times 10^8 \Omega$ では、エチレン相当ガスでも 15 kV 以上にならないと着火しないという結果が得られた。したがって、ランニングタイプでは $1.0 \times 10^8 \Omega$ にできるだけ近い方が、接地忘れというヒューマンエラーを考慮した場合、望ましいと結論できる。一方、クロスタイプは、2.5 kV でも着火性放電が発生することから、着火防止のため極力電位を下げるのが重要であり、 $1.0 \times 10^7 \Omega$ 未満とすることが妥当である。ただし、クロスタイプの接地忘れは、爆発・

^{注2} 現在改正中の JIS C 61340-4-4 においても同様の表現が用いられる予定である。

^{注3} 2014 年 9 月末現在、JIS C 61340-4-4 第 2 版は未発行。

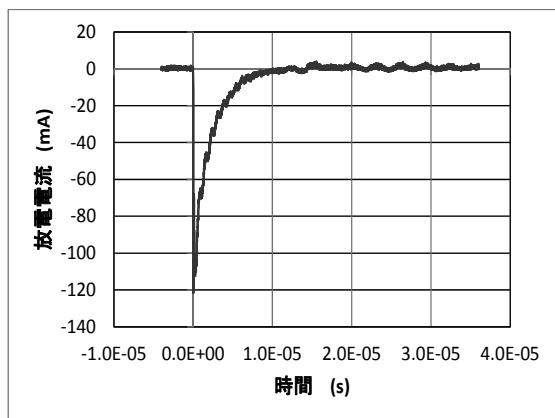
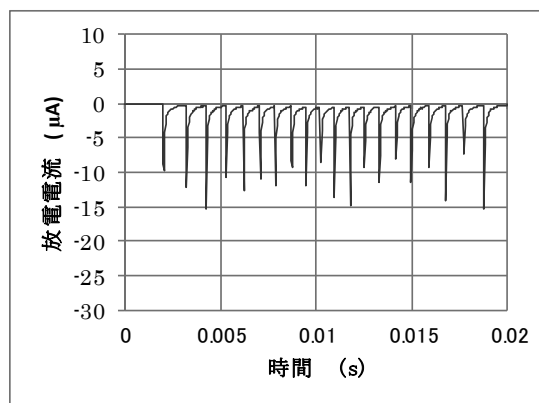
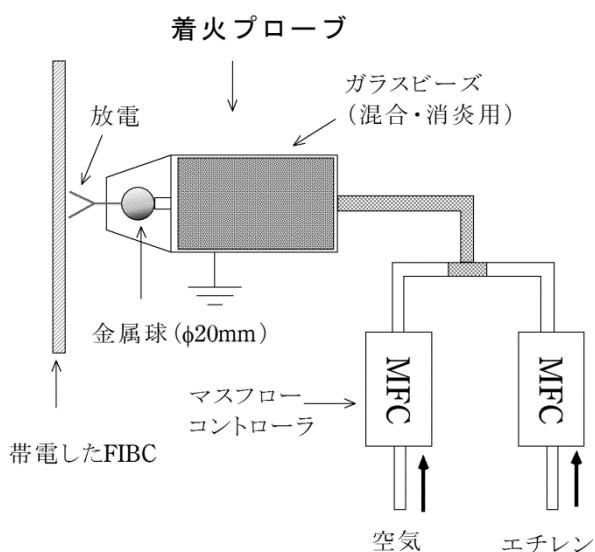
(a) クロスタイプ ($6.6 \times 10^7 \Omega$)(b) ランニングタイプ ($2.0 \times 10^8 \Omega$)図6 タイプCに電流 $30 \mu\text{A}$ を流したときの放電波形

図7 着火プローブシステム

表5 ランニングタイプの着火試験結果

抵抗 (Ω)	電位 (kV)	着火の有無	
		メタノール相当 (MIE=0.14 mJ)	エチレン相当 (MIE=0.09 mJ)
6×10^4	8	有り	-
	7	有り	-
	6	有り	有り
	5	無し	無し
1.6×10^6	10	有り	有り
	9	有り	有り
	8	無し	無し
1×10^8	20	有り	-
	19	有り	-
	18	無し	-
	15	無し	有り
	14	無し	無し
	12	無し	無し



図8 着火プローブによるエチレン相当ガスの着火実験

火災を引き起こす可能性が極めて高いことに留意しなければならない。

4 リスクアセスメントの盲点

表3に示すように、爆発・火災の危険性（存在するガス・蒸気または粉じんのグループおよびゾーンによって

分類)^{19, 20)}に応じて適切な FIBC（必要な場合、組み合わせ可能な内袋を使用）を選択したとしても、慎重なリスクアセスメントを行うべきである。例えば、次のような点は盲点となりやすいので注意する。

1) 導電性粉体

導電性粉体、特に金属粉は、図9に示すように、帯電すると火花放電を発生する²¹⁾。したがって、可燃性ガス・蒸気が存在する場合には FIBC による充填・投入作業は行うべきではない。可燃性ガス・蒸気が存在しない場合であっても、導電性粉体が可燃性であるときは、FIBC での取扱いは避けることが望ましい。どうしても FIBC の使用が避けられない場合、タイプ C とし、かつ、内面を導電面としたランニングタイプとする。内袋は、タイプ L1 内袋とし、FIBC との電氣的接触（ボンディング）を確実にを行う。

2) トナー

トナーは、近年、印刷品質の向上を目的として粒子径がますます小さくなっている。これに伴って最小着火エネルギーも小さくなってきており、3 mJ 未満のものもめ

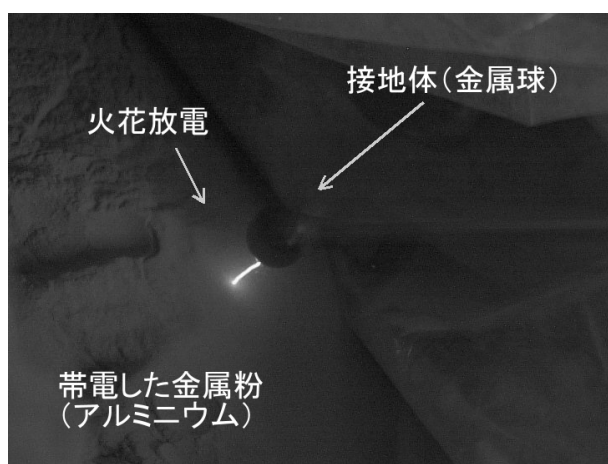


図9 帯電した金属粉からの火花放電

ずらしくはない。さらに、抵抗率が極めて大きいので、いったん帯電すると電荷が緩和しにくいという性質をもつ。このことは、FIBC からトナーを大量に排出する場合、粉面の電位が極めて高くなることを意味しており、周囲に接地不良導体があると静電誘導によって電位が上昇し、火花放電を生じるおそれがある。トナーの静電気危険性に関しては未だ不明の点もあることから、トナーの MIE が 3 mJ を超える場合であっても、タイプ B とはせず、タイプ C または D を用いることが望ましい。また、周囲に接地不良導体が生じないように入念に対策を行う。

なお、トナーは吸湿性が低く、かつ、空間での分散性がよい（凝集しにくい）という性質があるので、季節に関係なく爆発性雰囲気を形成しやすいこともリスクアセスメントの際には考慮すべきである。

3) ハイブリッド混合物

可燃性粉体と可燃性ガス・蒸気が同時に存在する場合、これをハイブリッド混合物 (hybrid mixture) という。ハイブリッド混合物においては、可燃性粉体または可燃性ガス・蒸気の濃度がそれぞれ単独では爆発下限界に達しなくても、総合して爆発範囲内となることがある。特に、引火点が室温以下の可燃性溶剤を 0.2 wt% 以上含む粉体は容易に爆発性混合気を形成するので特別な注意が必要であり、充填・排出中、爆発性雰囲気を形成しないように十分な換気または送風を行う。さらに、このような粉体を排出した後であっても、FIBC の内部には可燃性ガス・蒸気が残留している可能性があるので、通風のよい場所で自然乾燥することが望ましい。ハイブリッド混合物はブラシ放電でも着火するので¹⁰⁾、タイプ C または D を使用する。

5 まとめ—今後の動向

FIBC は、産業現場で多用される用品であるが、筆者の見るところ、静電気に対する関心・注意が末端まで行き届いているとは言い難い。静電気対策品は市場に出回っているが、一般品に比べれば高価であることから、コスト的な面で二の足を踏んでいるのかもしれない。しかし、本稿で紹介したように、形成される爆発性雰囲気に合わ

せて適切に選択することによって、費用対効果の向上も期待できる。例えば、粉体だけしか存在しない場合、最小着火エネルギー 3 mJ 未満のものがなければ、安価なタイプ B で十分である。タイプ C を使用する場合であっても、ランニングタイプであれば何度でも繰り返し使用することができるので、長期的には費用を低減できる。

国際規格第 2 版は、大幅に改正され、実用性が大きく向上したとはいえ、まだ、次のように、いくつかの積み残しがあり、今後慎重かつ迅速に解決すべきと思われる。

1) タイプ C の抵抗値基準の変更

3.3) に概説したように、タイプ C においてはクロスタイプとランニングタイプの抵抗上限値は異なるべきであり、次の国際規格改正において日本側から提案する予定である。

2) タイプ B に関する新たな試験基準の導入

タイプ B における沿面放電の発生有無の判定基準は、現規格では、材料の絶縁破壊電圧 (6 kV 未満) によっているが、実験的に沿面放電の発生の有無を判定する方法の導入が求められている。これによって、FIBC 設計上の自由度が大きく向上すると見込まれる。

3) 電撃への配慮

爆発危険性がない作業環境においては、必ずしも静電気対策品を使用する必要はないが、粉体の充填・排出時における静電気の発生は避けることができないものであり、これによる作業員への電撃は大変不快なもので、作業性を著しく低下させるのみならず、転倒などの二次的災害を起こす懸念もある。タイプ C はこの問題にも対応できるが、さらに簡便かつ安価な方法があれば労働環境の改善に大いに役立つであろう。

4) 着火メカニズムに対する実験的知見の蓄積

静電気災害一般にも当てはまることであるが、FIBC 作業中に発生した爆発・火災は、着火源をある程度推定できても特定までには至らないことが多い。それは、災害発生後に FIBC そのものが大きく損傷するため、確たる証拠が残されていないことが主たる要因である。現在、FIBC においては、着火性放電として、火花放電、ブラシ放電、沿面放電およびコーン放電が挙げられているが、過去の災害事例をみると、必ずしもこれらの放電に帰結できない例もある。例えば、粉体塊と内袋との剥離に伴う放電、FIBC 内面において、粉体との摩擦帯電で高電位となった部分で局所的に面状に生じる放電等は、未だ証明はされていないものの着火源の候補と考えられている。これらの解明は実用上も学術上大いに価値がある。

文 献

- 1) Ebadat V and Mulligan J. Test results: Comparing FIBC fabrics for use in flammable atmosphere. Chilworth Technology, Inc.; 1995.
- 2) Kodama T, Yamaguma S, Tabata Y, and Kamachi S. Safety evaluation of anti-static flexible intermediate bulk container having non-conductive inner bag. J. of Electrostat. 1997; 40-41: 541-546.

- 3) 児玉勉, 山隈瑞樹, 蒲池正之介. フレキシブルコンテナの静電気帯電測定. 産業安全研究所特別研究報告. 1999; NIIS-TR-No.17: 35-41.
- 4) IEC 61340-4-4:2005, Electrostatics - Part 4-4: Standard test methods for specific applications - Electrostatic classification of flexible intermediate bulk containers (FIBC) (2005).
- 5) JIS C 61340-4-4:2009 (IEC 61340-4-4:2005), 静電気 - 第4-4 部: 特定応用のための標準的試験方法 - フレキシブルコンテナの静電的分類, 日本規格協会 (2009).
- 6) IEC 61340-4-4:2012, Electrostatics - Part 4-4: Standard test methods for specific applications - Electrostatic classification of flexible intermediate bulk containers (FIBC) (2012).
- 7) CENELEC PD CLC/TR 50404, Electrostatics - code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity (2003).
- 8) Glor M and Schwenzfeuer K. Occurrence of cone discharges in production silos. J. of Electrostat. 1997; 40-41: 511-516.
- 9) Glor M. Ignition of gas/air mixtures by discharges between electrostatically charged plastic surfaces and metallic electrodes. J. of Electrostat. 1981; 10: 327-332.
- 10) Glor M and Schwenzfeuer K. Direct ignition tests with brush discharges. J. of Electrostat. 2005; 63: 463-468.
- 11) 山隈瑞樹. 不導体からの静電気放電による着火性の検討. 労働安全衛生総合研究所特別研究報告. 2013; JNIOOSH-SRR-No.43: 25-30.
- 12) Ackroyd G and Puttic S. An investigation of the electrostatic ignition risks associated with plastic coated metal. Inst. Phys. Conf. Ser. No. 178, Section 1; 2003; 25.
- 13) Heidelberg E. Proceedings of 1st Int. Conf. Static Electricity, Vienna, Austria. 1970; 351.
- 14) JIS Z 1651:2008 非危険物用フレキシブルコンテナ (2008).
- 15) 山隈瑞樹, 児玉勉. バグフィルタでの粉じんの剥離帯電特性. 静電気学会誌. 2004; 28: 65-70.
- 16) Yamaguma M and Kodama T. Observation of Propagating Brush Discharge on Insulating Film with Grounded Antistatic Materials. IEEE Trans. on Industry Applications. 2004; 40: 451-456.
- 17) Yamaguma M, Goto K, Kokubun A. A study of resistance of anti-electrostatic flexible intermediate bulk containers. 5th World Conference of Safety of Oil and Gas Industry, Okayama; 2014.
- 18) 児玉勉, 山隈瑞樹. フレキシブルコンテナによる静電気災害およびその防止対策. 静電気学会誌. 2012; 36: 122-127.
- 19) IEC 60079-10-1:2008, Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres (2008).
- 20) IEC 60079-10-2:2009, Explosive atmospheres - Part 10-2: Classification of areas - Combustible dust atmospheres (2009).
- 21) 山隈瑞樹, 八島正明. アルミニウム粉投入中の粉じん爆発原因に関する実験的考察. 安全工学. 2011; 50: 302-310.

Labor Accidents and Standards in Association with Flexible Intermediate Bulk Containers (FIBC)

by

Mizuki YAMAGUMA,^{*1}

Flexible intermediate bulk containers (FIBC) are widely used for the storage, transportation, and handling of powder. However, a large amount of electrostatic charge can be generated in an FIBC when electrified powder is fed into it or when an FIBC that contains powder is emptied. In such cases, a non-treated FIBC can become highly electrified to the point whereby incendiary electrostatic discharges take place, sometimes resulting in explosions and fires if the powder is combustible or if an explosive atmosphere exists in the vicinity of the FIBC. In this paper, recent cases of accidents in Japan are introduced and the typical mechanisms of explosions and fires are explained in detail. The international standard (IEC 61340-4-4:2012) and the future Japanese standard (JIS C 61340-4-4) for anti-electrostatic FIBC are described together with their differences.

Key Words: Explosion and fire, FIBC, IEC standards, JIS, Static electricity

^{*1} International Center for Research Promotion and Informatics, National Institute of Occupational Safety and Health, Japan