

静電気の蓄積には警告サインがある！！  
 (PSB 翻訳担当: 山本 一己)

**司会** : 今月号は、2 件の静電気放電による火災事故をケーススタディとして取り上げています。2 件とも火災事故の発生前に静電気の蓄積を示す警告サインが発せられていました。Beacon では事故防止のためには、この警告サインを共有して、これを調査し是正することが重要であると述べています。また、今月号にあるように静電気による事故は 2008 年 12 月号および 2021 年 2 月号の Beacon でも取り上げています。今月号のケーススタディや過去の Beacon で取り上げた事故に関してのご感想やご指摘がありましたらお聞かせください。

**竹内** : 空気が乾燥しがちな冬は静電気を感じる事が少なくないです。静電気が着火源となって粉塵爆発の事故などが多く報告されていますが、静電気は見えないので予防が難しい危険源の一つだと言えます。多くの爆発事故で着火源が特定できなかった場合には、静電気が着火源と推測されるケースが多いようです。この季節に相応しい題材だと思います。

**塩谷** : ケーススタディの二つの事例はいずれも粉塵への着火事故ですが、幸いなことに一次的な着火・火災だけで済んだようです。粉塵爆発の怖い点は、爆発の連鎖があることです。一次的爆発の後に発生する爆風により近くの堆積粉体を巻き上げて粉塵雲を発生し、爆発火炎が伝播して二次爆発を起こし、大きな災害に至ることがあります。粉体プロセスでは周囲に粉体が堆積しているケースが多く、二次爆発に至る可能性が高くなりますので、特に静電気による粉塵爆発に注意しなければならないと思います。

**山本** : 一般的に静電気放電は、摩擦などで発生した静電気が絶縁された金属の導体に蓄積されたり、導体が帯電物質により静電誘導を受けたりして高電位となり、周囲に放電することです。絶縁された金属の導体は、「浮き導体」と呼ばれています。この考え方でケーススタディ1を解説すると、篩い分けられて帯電した粉末が絶縁された金属ドラム缶(浮き導体)に充填され、金属ドラムが粉末から静電誘導をうけて高電位となり、人間に放電するか周囲の金属に放電して、それが粉塵爆発の着火源になったと考えられます。金属ドラムをアース(接地)していれば放電は起こりません。静電誘導とは、導体を電荷または帯電した物質に近づけると、導体の電荷に近い側には電荷と反対符号の電荷が現れ、導体の電荷から遠い側には電荷と同符号の電荷が現れる現象です。

ケーススタディ2の粉末の反応器への投入作業は、事故事例が多くあります。厚生労働省の「職場のあんぜんサイト(事故事例: 酢酸エチルの入った反応釜への粉体の原料を投入する作業中に火災)」にも同様な事故事例が掲載されています。Beacon では反応器に何が入っていたのか記述はありませんが、よくある事故では、反応器に仕込まれていた引火性物質の蒸気に着火する例が多いと思います。

**竹内** : ガソリンスタンドでセルフ給油中、一旦運転席に戻った際に人体に静電気が蓄積して放電しないまま、ノズルに触れた際にガソリンに着火したビデオを見たことがあります。セルフスタンドには必ず人体の静電気を除電してから給油するようにアナウンスがあるのですが、除電後に車の中に戻ってしまうとまた静電気が蓄積されることがあるので注意が必要です。ネットで調べたらビデオが見つかりましたので、以下に記します。

<https://www.youtube.com/watch?v=FPKen4QwY7I&t=8s>

こちらのビデオでは、着火の瞬間は見られませんが給油中に社内に戻ってはいけないと解説しています。

[https://www.youtube.com/watch?v=grQYr507r\\_A&t=2s](https://www.youtube.com/watch?v=grQYr507r_A&t=2s)

**司会** : 今月号では静電気の蓄積はいろいろな警告サインを発することが述べられています。皆さんの中でこのような兆候の事例についてご経験がありましたらお聞かせください。

**塩谷** : 労働安全衛生総合研究所の「静電気安全指針 2007」によると、人体の帯電電位と電撃の強さには表 1 のような関係があるそうです。

表 1: 人体の帯電電位と電撃の強さ

帯電電位 (kV)	電撃の程度
1	全く感じない
2	指の外側に感じるが痛まない かすかな放電音の発生
3	針で刺された感じを受けちくりと痛む
4	針で深く刺された感じを受け指がかすかに痛む 放電の発光を見る
5	手のひらから前腕まで痛む 指先から放電発光が延びる

人体の帯電電位が 3kV 程度のとき、体感としては「ちくりとした痛み」程度の感覚ですが、人体の静電容量を 100  $\mu$ F と設定すると、このときの放電エネルギーは約 0.45mJ と計算できるそうです。主な引火性物質の最小着火エネルギーの目安を見ると、水素: 0.019mJ、プロパンガス: 0.25mJ、可燃性炭化水素系: 0.2mJ 程度ですので、人体からの放電によっても、可燃性のガス、蒸気、粉じんの爆発雰囲気中においては着火の危険性があるとしています。電撃の程度がそれ程大きくなくても、多くの引火性物質の着火に必要な

エネルギーを有していることに驚きました。

山本 : 私が元いた会社で起こったことです。試運転で用いたテンポラリストレーナを取り外すのを忘れて、それが配管内にそのまま残っていました。テンポラリストレーナはパッキンとフランジで挟まれており、絶縁されていました。スクリーンを通過する溶剤は多量の静電気を発生させるようで、溶剤が通過すると、摩擦で発生した静電気がテンポラリストレーナとフランジとの間で放電して、パチパチという大きな音が発生し、スパークが発生していたことがあります。周囲が可燃雰囲気ではなかったので着火はありませんでした。

安喜 : 物質を移動させる際の静電気の発生(帯電性)には、物質の抵抗率が影響します(表 2)。

表 2: 帯電性の指標

【帯電性の区分】	【体積抵抗率 Ω・m】
非帯電性物質	< 10 <sup>8</sup>
低帯電性物質	10 <sup>8</sup> ~ 10 <sup>10</sup>
帯電性物質	10 <sup>10</sup> ~ 10 <sup>12</sup>
高帯電性物質	> 10 <sup>12</sup>

特に高帯電性物質を移動させる時はアース(接地)による除電がされにくいため、帯電量を少なくするために流速や攪拌を遅くする等の対策が必要です。具体的な物質名は言えませんが、反応容器内で発光現象が見られたことがあります。

司会 : 今月号の事例や過去の Beacon に記載された類似事故やトラブル事例のご経験や知見がありましたらお聞かせください。

塩谷 : 消防庁が毎年発行する消防白書によると、令和元年から令和 5 年の 5 年間における危険物施設の火災発生件数は 1,061 件(平均 212 件/年)で、その着火原因のうち静電気によるものが 191 件(平均 38 件/年)と 18%を占め、着火原因の第一位となっています。この傾向は令和元年以前も同じようです。これは Beacon の 2021 年 2 月号にあるように『静電気は容易に発生するが、制御には苦労する』を実際に表した数字となっています。静電気は日常的な作業でも容易に発生し、火災事故につながるリスクが非常に高いことを再認識する必要があることを改めて感じました。

竹内 : 2015 年 3 月に安全研究会が CCPS と共同出版した「事例に学ぶ化学プロセス安全」には 125 ページから 134 ページに掛けて静電気に関する Beacon が 4 件掲載されていますので、参考になると思います。2008 年 12 月号の Beacon にはトートと呼ばれる金属製の容器に酢酸エチルを注入している際に爆発したことが記されています。引火性の液体を自由落下させるだけで静電気が発生して着火したようです。2007 年 12 月号ではスイッチローディングの危険性が指摘されています。2009 年 1 月号の解説で紹介されている NFPA 77, Recommended Practice on Static Electricity, には静電気事故防止の色々な手法が紹介されていて、不純物を含まない単層の液体は注入管が管径の二倍浸かるまでは 1m/sec., その後は 7m/sec. に上げて良いこと、不純物を含んだり二層流となったりしている場合は最後まで 1m/sec で送液する様に書かれています。スイッチローディングでも注意が必要です。異なる種類の可燃物物質を導入することにより、前に入っていた物質と新たに入れた物質との間で静電気が発生することがあります。

山岡 : 冒頭の司会の発言にもありました 2021 年 2 月号の Beacon でも触れましたが、エチレンプラントで、ナフサを熱分解して得られる芳香族抽出用の原料となるガソリン留分中のオレフィン類を水素添加する設備で、シャットダウンの操作中その反応器の上部フランジから高温の水素が漏洩して火災となる事故を起こしました。水素の着火だったので火炎の色も着火時の音も弱かったのですが、シャットダウンの作業中だったので近くにいた作業者がすぐ気づき、すぐ操作室に連絡し消防にも通知はしましたが大事に至らず消防が来る前に消し止めました。操作内容や付近に明確な着火源がなかったことから発火の原因がわからなかったのですが、その後行われた事故調査委員会で水素が漏出したときの静電気放電が原因と判定しました。通常、気体では静電気は発生しませんが、水素流体の中に何か夾雑物が含まれていて、それが静電気を発生・帯電させ漏えいの際に放電し着火したと推定されました。漏えいの原因として、フランジ面の調査でフランジに若干の片締めがあったこと、それまでの定修ストップ・スタートの温度変化でボルトに若干の緩みがあったことが挙げられ、更に高温高圧の水素のため発火エネルギーが極めて小さかったことが着火を容易にしたようです。このケースでは静電気の発生を抑制するのは難しいので、漏えいを防止する対策として類似の運転条件やフランジの大きさを持つ設備のフランジの締め付けにトルク管理を導入し締め付け力を定量化しました。

塩谷 : 気体による帯電は気体中に含まれるミスト、凝縮物、粉体などの液体や固体の粒子によるものと言われております。非破壊検査時のスプレー缶使用時に静電気火災が発生した事例も報告されています。その他の事例として、溶剤を使用したクロマト精製の実験中に静電気による着火事故を経験しました。事故後、接地とボンディング及び溶剤注入速度の規定などの対策を行うとともに、クロマト精製の実験を行うスペースでは湿度 60%程度に維持するようスチーム加湿を行うようにしました。静電気は、湿度が 30%~40%以下になると急激に発生しやすくなるといわれているためです。

司会 : 今月号の『知っていますか』では静電気が発生し、放電する可能性がある作業として空気輸送やふるい分け等を挙げています。皆様のご経験で、静電気発生の可能性のある作業例とその放電防止対策について知見をお聞かせください。

山岡 : 私の居たプラントでは多くの引火性液体を扱い、各機器や配管での移送、船での荷役が頻繁に行われ、いずれも静電気が帯電する可能性があり、放電すると火災の危険がある設備ばかりでした。放電防止の対策として各機器や配管の接地とボンディング、移送速度の 1m/sec. 以下、作業者の静電靴、静電作業衣の着用、棧橋上では予め身体を除電装置で除電して作業に入ることを徹底していました。また、2 か月に 1 回 5 万 KL の輸入ナフサ

船が入港し6万KLのタンクに荷揚げしていた際に、タンク内のナフサに静電気が発生・帯電するので電位を下げるために半日～1日静置していた記憶があります。

竹内 : プラスチックの空気輸送の経験があります。空気輸送のラインは配管とプラスチックが激しく擦れあうため、静電気が発生します。そのため、接地とボンディングには非常に気を使っていました。また、粉体の手投入時には静電気による着火事故が数多く発生しています。

山本 : 集塵機のバグフィルターは静電気放電が着火源となり、粉塵爆発を起こす危険がある装置です。そのため、一般的に、粉塵爆発を起こした時の爆風を逃がす大きな爆発扉を設置します。注意しなくてはいけないのは、爆発が起きたときに、爆発扉から圧力や爆風を逃がす方向や位置を安全な場所にすることです。爆風を開放する場所には障壁がない場所にするのも重要です。静電気対策では、帯電防止のろ布を使用して、ろ布や止金具(金属バンドなど)、リテーナ(ろ布の固定用金属枠)などの全ての導体をボンディングと接地することです。定期検査やメンテナンスもしっかりすることも必要です。一般の粉塵については、これらの対策でバグフィルターの粉塵爆発の事故は減ってきていますが、アルミニウム合金の加工などから発生する金属粉塵などは可燃性物質で、大きな静電気を蓄積して着火エネルギーが非常に小さいことから、更に特別の対策が必要のようです。

司会 : 今月号の『知っていますか』と『あなたにできること』では接地とボンディングの重要性についても述べられています。接地とボンディングについて注意すべき点などの知見がございましたらお聞かせください。

山本 : 配管やダクトなどは接地とボンディングをしますが、流体機器に用いられている小さな金属などは見逃される場合があります。例えば、ボール弁については、帯電防止用の仕様でなければ、ボール弁の中に用いられている金属のボールが浮き導体となり、静電気を蓄積して放電する可能性があるため注意が必要です。酢酸エチルの小分け作業時に使用するボール弁が帯電防止の仕様ではなかったため、金属のボールと本体間で放電が起こり小火騒ぎとなった経験があります。可燃性物質に使用するボール弁は、仕様書に帯電防止をはっきりと謳って購入する必要があります。

竹内 : ボールバルブの帯電防止仕様については、変更管理の時に注意しなければならないアイテムであると思います。化学プロセスで使用するボールバルブは帯電防止仕様となっているかを確認する必要があります。

山本 : 現場には帯電防止仕様ではないボール弁が数多く存在していたため、アース線にてボールと本体をハンダにて接続しましたが、しばしばアース線が外れる場合があるので注意をしていました。新規に導入するバルブは帯電防止仕様になりました。

塩谷 : 近年、化学プラントにはDCSを始めとする電子機器類が数多く導入されるようになりました。これらの電子機器類の定期点検時には静電気の放電による故障を防ぐために、作業者は静電作業服と静電靴を着用し、静電マットやリストストラップなどで人体をアースして作業を実施していました。DCSメーカーから派遣される協力会社はこれらの作業管理が適正に行われており、安心して作業を任せることができました。

竹内 : 静電気は爆発や火災以外にも、人間が帯電したまま基板に触れるとIC等を壊してしまう可能性があり、注意が必要です。電子機器類に関する作業では作業者はリストストラップで人体をアースすることは普通に行われています。

塩谷 : 接地線は地表部に配線されていることから、踏みつけられたり、蹴られたりすることがあり、時に断線しかかっているような場合もありました。やはり、接地抵抗の測定などの定期的な点検によりその健全性を確認することが必要です。また、製造現場にはアース用クランプの接触部や、作業員の除電のための塗装をはがしたアースバーを兼用した金属製手すりが数多く存在します。協力会社によるエリア内の塗装作業を実施した際、これらの接地用の非塗装部まで塗装を実施してしまったことがありました。塗装作業前に協力会社に塗装を行ってはいけない箇所を具体的に指示することと、作業終了後には接地、除電個所が塗装されていないことを確認することも必要です。

山岡 : プラント内、及びその周辺には引火性液体が入っている装置や流れている配管が数多くありましたので、各装置には単独で接地し、配管にはボンディングをしてました。注意していたことは、接地では接地接続線、ボンディングで両配管の接続に使用する電線、金属板の保守、点検です。日常の巡回点検の際に断線や破損がないか、腐食がないか、また、繋いでいる端子に異常がないかなどのチェックをしていました。

司会 : 皆さんの会社では静電気事故防止への取り組みとして、どのようなことを行っていたのでしょうか。実施していた取り組みがございましたらお聞かせください。

飯濱 : 私が勤務していた工場では、主原料が引火性液体(消防法危険物、第四類、第一石油類)でしたので、設備面および入場者の作業服と作業靴について厳しい管理、ならびに従業員への繰り返し教育を行っていました。塩谷さんが述べておられましたが、作業服は帯電防止かつ防災繊維の特注作業服を全員に支給し、同様に作業靴も帯電防止靴で、工場内に立ち入る従業員は、毎日始業時に入口横に設置された静電検査機で合格しないと、安全靴を新品に交換するという規則にしていました。工場長として赴任した私も、勤務初日に安全環境課長から「この規則は率先して、必ず守ってください」と念押しされたのを覚えています。

山本 : 私が元いた会社でも引火性の液体を取り扱っており、過去には、静電気放電が着火源となった小火がたびたび発生していました。その対策として、社内に静電気対策委員会を設置して活動したことがあります。その活動では、産業安全技術の協会などから静電気の専門家をお呼びして、工場内の設備や作業を見てもらい、静電気の発生や放電の危険性ある場所に対策をしたり、静電気対策の社内規定を作成したりしました。また、社内で静電

	<p>気についての講演もしてもらい、静電気について関係者の皆で教育を受けました。その結果、静電気が原因の発火などはほとんどなくなりましたが、この経験が引き継がれることが重要だと思います。</p> <p>安喜 : 飯濱さんのコメントの追加なのですが、人体の静電気対策には作業靴と作業床の帯電防止がセットでなければ効果がありません。化学プラントでは老朽化や腐食性物質等により元々アース(接地)が出来ていた金属製の床面が錆びることで帯電防止機能が喪失する場合や錆び防止のために塗った塗料が帯電防止では無いことがありました。幸い事故にはならなかったのですが、作業する床を全て洗い出し帯電防止が必要な床面には、「帯電防止床シール」を貼ってリスクの見える化をするとともに作業床の定期点検(接地抵抗測定)を実施することにしました。</p> <p>塩谷 : 先ほど山本さんより「浮き導体」の危険性について解説していただきました。「浮き導体」が原因となった静電気着火事故が数多く報告されています。私が元いた会社では、この「浮き導体」をキーワードに職場の点検を実施したことがあります。接地を行っていないテンポラリーに使用する容器やゴムホースの先端の金属口などを特定して、対策を行うことができました。</p> <p>司会 : その他、今月の事故に関連した事例で補足する事項などございましたらお願いします。</p> <p>牛山 : 全米防火協会から出されている指針に、静電気に関する取り扱い、安全対策等が NFPA77 にまとめられています(NFPA はオンラインで簡単にフリー会員登録でき、容易にオンライン閲覧が可能です)。しかしこの指針があっても静電気に拠る事故が絶えないということで、英国ロンドンキングスカレッジから静電気事故のレビューが出され、2021年7月までの89件の事故について発生原因等が解析されています。NFPA77の指針があっても教育訓練されていないなどその適用不備で静電気事故が22.5%も発生したと指摘されており、静電気事故を防ぐことの難しさを痛感します。その他の原因別では、コストカットや流速規制の無視などによる安全対策無視(Negligence)が22.5%、原因不明事故が19.1%、保全不備が14.6%などで、他には危険物の不適切な取り扱い、粉体の不適切取り扱い、など各5%弱となっています。この論文によるためかどうかは分かりませんが、2024年にNFPA77が改訂されたようです。尚、日本では労働安全衛生総合研究所から静電気安全指針(JNIOOSH TR No.42)が出されており、内容はNFPA77とほぼ同様と思われます。</p> <p>山本 : 労働安全衛生総合研究所の静電気安全指針は、静電気の教科書として、よく活用させて頂きました。静電気安全指針については、次の労働安全衛生総合研究所のホームページからダウンロードできます。 (<a href="https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/tr.html">https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/tr.html</a>)</p> <p>山岡 : インターネットの情報で、本年12月迄「静電気リスクアセスメント研究委員会」が設置されていますが、その目的に次の文言が記されています。『静電気対策は接地、作業者の対策など個々の対策自体は決して難しいものではないが、静電気による障害・災害は技術の進展とともにその様相を変えながら未だに起きている。障災害の原因はこの技術進歩もひとつとして挙げられるが、静電気が危険であるという認識不足か、あるいはその危険性を十分に把握して静電気対策を施しているが、その対策あるいは管理が不十分であることにある。また、経験則が重要視され、理論的なアプローチが欠如していることも問題解決を遅延させている。』 また、高圧ガス保安協会編の「定期自主検査指針」に、可燃性ガスの製造設備に設けられた静電気除去措置(接地極、配管や塔槽類の接地ピース、避雷針、ボンディング用接続線等及びそこに接続する接地線など)について目視検査と接地抵抗値測定を1年に1回以上行い、目視検査では外観に腐食、破損、変形その他の異常がないことを確認し、接地抵抗値の測定では接地抵抗測定器具を用いた測定により確認するという指針があります。私のいた工場ではこの指針を参考に保守管理していました。</p> <p>司会 : 今月号は静電気の危険性について皆様から色々な経験や知見をお話していただきました。静電気はその現象が目に見えないことから、管理を難しくしています。セルフガソリンスタンドの普及など、家庭においても静電気に注意しなければならない環境は拡大しています。また、危険物施設の火災発生原因の多くは静電気であることは憂慮すべきことです。日本においても、静電気の安全対策に活用できるガイドラインが発行されていますので、読者の皆様も是非このガイドラインや今月号の安全談話室を参考に、職場の静電気安全対策を推進していただきたいと思います。</p>
キーワード	<p>粉塵爆発、浮き導体、セルフガソリンスタンド、帯電電位、電撃、最小着火エネルギー、接地、ボンディング、帯電防止仕様ボールバルブ、リストラップ、静電靴、静電作業服、静電塗装、移送速度、NFPA77、静電気安全指針 2007</p>
<p>【談話室メンバー】</p> <p>安喜 稔、飯濱 慶、今出 善久、上田 健夫、牛山 啓、木村 雄二、塩谷 寛、澁谷 徹、竹内 亮、中田 吉彦、林 和弘、春山 豊、松井 悦郎、三平 忠宏、山岡 龍介、山本 一己、頼 昭一郎</p>	