

PSB (Process Safety Beacon) 2022年9月号 の内容に対応	SCE・Net の 安全談話室 (No.195) http://sce-net.jp/main/group/anzen/	化学工学会 SCE・Net 安全研究会作成 (編集担当:塩谷 寛)
--	--	--

落雷だ ワー!!

(PSB 翻訳担当:木村 雄二)

- 司会 : 今月号は、落雷によるタンクの爆発事故を取り上げています。最初にどなたかこの事故の内容をもう少しご説明いただき、合わせて事故に対する感想やご意見をいただけますか。
- 塩谷 : ペンシルベニア州ブリストルにあるダウ・ケミカルのアクリルポリマー工場の製品タンクヤードに雷雨による落雷があり、数秒以内にアクリル酸エチルタンクが、数分後にアクリル酸ブチルタンクが爆発する事故が発生しました。タンクヤードの設備が損傷を受け、長期にわたる工場の操業停止となりました。爆発した2基のタンクは通気システムを介して他のタンクと接続されていましたが、火炎伝播防止装置が機能し、被害の拡大を防ぐことができました。これらのタンクは、NFPA(米国防火協会)やAPI(米国石油協会)が規定する落雷対策を実施しており、爆発の正確なメカニズムを確定することはできませんでした。しかし、アクリル酸エチルタンクの気相部での着火は、電位差を持った内部の部品間で発生した火花放電により起こったというシナリオが最も可能性が高いとしています。事故調査では、「この種のメカニズムは、現在業界ガイダンスで採用されている“ファラデーケージの仮説”を無効化する可能性があり、まだ業界で十分に認識されていないハザードを表しているかもしれない」としています。
- 竹内 : この事故はAICHe ACADEMYのGCPS Joint Session: Case Histories Iのセッションでも扱われています。“ファラデーケージの仮説”を無効化の可能性に関する記述があるのですが、火災鎮火後の写真ではファラデーケージがあった様には見えません。Beaconには業界基準通りに接地されていたとありますが、実際にどうしていたのか分かりません。NFPA 780はタイトルがStandard for the Installation of Lightning Protection Systemsとなっていて、避雷針の設置やボンディングなどについて詳しく記されています。アクリル酸エチルは引火性なので、NFPA 780 Chapter7に規定されます。引火性物質のタンクは雷の直撃を受けないことなどを求めています。このタンクにどのような落雷対策を実施していたのかはつきりませんが、接地だけであったならば事故防止の効果は限定的だと思います。
- 木村 : 最近「キューバで石油タンクに雷が落下 大規模な火災を引き起こす 現在も鎮火には至らず」というニュースが流れていますが、この事例の原因究明にも今回の話題の議論が生かされそうですね。また、2021年4月23日にAICHe ACADEMYのGCPS Joint Session: Case Histories Iのセッションで今回対象となる事例が扱われていることも、普遍的な課題であるという点で意味がありそうですね。
- 竹内 : キューバの事故はBeacon9月号が配布された後、ある国のチームから関係各国に事故情報が提供されました。この事故は8月5日に落雷により石油タンクの爆発事故が起こり、翌日に鎮火したようです。多数のけが人の発生と十数名の消防士が行方不明になり、1名の死亡が確認されています。落雷事故を取り上げた9月号のBeaconを準備しているそのタイミングでこの落雷事故の情報が入ってきました。
- 塩谷 : 少なくとも日本の化学業界では“ファラデーケージ”という言葉はあまり使用されていないと思います。ウィキペディアによると、「ファラデーケージとは導体に囲まれた空間、またはそのような空間を作り出すために用いられる導体制の籠や器そのものを指し、導体に囲まれた内部には電気力線が侵入できないため、外部の電場が遮られ、内部の電位は全て等しくなる」とあります。タンクの屋根、側板そのものがファラデーケージとなっており、タンク内の電位差は等しくなっているということでしょうか。
- 今出 : タンクが完全に接地・ボンディングされていればその壁面は同電位になっているということですが、この事故の状況はよくわからず、同電位電でなかった部分があり、その場所から着火に至ったということだと思います。
- 林 : 高圧ガス保安技術では建築基準法による避雷対策が記載され、建築基準法では、“JIS A4201 建築物等の雷保護”の外部雷保護システムに適合する構造が規定され、これは受雷部システム、引下げ導線システム及び接地システムの3つからなります。受雷部として突針部、棟上げ導体の避雷設備や独立避雷針、独立架空地線そしてケージが記載されています。このケージはメッシュ法による避雷対策です。鉄筋やRC構造物などファラデーケージに対応する内容がIEC62305-3(JIS Z 9290-3: 雷保護)に規定されているようです。

- 竹内 : JIS は 1994 年から国際的整合化を進めているようで、JIS A4201:2003 は IEC 61024-1:1990 に準拠しています。
- 山岡 : 高圧ガスのコンビナート等保安規則でも建築基準法に従って避雷対策を行うこととの記載があり、工場ではそれに従って対策を実施していました。エチレンプラントでは、避雷針をタンク以外の別の場所に設置し、避雷針が雷を受けた際のエネルギーを素早く地下に流すように雷専用の接地(雷接地)を設けていたように記憶しています。
- 金原 : 避雷対策をしっかりとやることは大切です。ただ避雷針などで落雷の衝撃を回避するようにしても、落雷の大きさによっては避雷針で完全に受け取ることができず、雷サージという形で侵入するとされています。そのエネルギー量が最小着火エネルギーの有機化合物一般の 0.2mV 以上かどうかは存じませんが、いずれにしてもその対策を完璧にすることは難しいのではないかと思います。やはり、引火点が 9°C という 1 石に相当するアクリル酸エチルを保管しているのですから、窒素シールなど燃焼の三原則の一つを押さえることが大切かと思えます。SDS によればアクリル酸エチル、アクリル酸ブチルともに酸素濃度を 5~8% に管理した窒素混合ガスを使うことになっています。初めに塩谷さんが言われた、通気を正しく行われていたならこのような事故が起きなかったかもしれません。また温度も 30°C 以下のできるだけ低い温度と記載されています。このあたりの管理がどうであったか疑問です。
- 塩谷 : 日本触媒の事故調査報告書によると、アクリル酸をタンク貯蔵する際は、重合防止と火災・爆発防止の観点から、タンク気相部の酸素濃度は 5~8% 程度となるように厳格に管理しているとのことでした。アクリル酸エチルもアクリル酸と同様な厳格な管理が必要ではなかったのでしょうか。なぜ、タンク気相部に可燃性蒸気を形成するような状況になったのか疑問です。
- 金原 : アクリル酸は引火点が 68°C です。エステル類は引火点がより低いので、混合ガスの濃度管理はよりしっかりと行う必要があると考えます。
- 三平 : アクリル酸やそのエステル類は重合反応性が高いので、タンクに貯蔵する際には重合反応の防止効果のある酸素を燃焼範囲から避ける低い濃度で、気相部に注入しているのが一般的だと思います。この事故では数秒でアクリル酸エチルに着火しているので、気相部の酸素濃度が燃焼範囲に入っていたはずですが、何らかの事情で重合防止の管理濃度から逸脱して酸素が高濃度になっていたのだと想像します。
- 山本 : 追加の情報ですが、これらの物質には(MEHG: ハイドロキノンモノエチルエーテル)などの重合禁止剤、が少量(10 オーダーから数 100ppm の濃度)入っており、これが正しく働くためには少量の酸素の存在が必要です。アクリル酸エステル工業会からはアクリル酸エステル類の安全な取り扱いについての注意事項「取扱安全指針」が公表されています。EBAM(European Basic Acrylic Monomer Group)からも「SAFE HANDLING AND STORAGE OF ACRYLIC ESTERS(アクリル酸エステルの安全な取扱いと保管)」が公表されており、参考になります。
- 山岡 : この事故は確かに落雷による火災ですが、なぜ規定や基準通りの落雷対策をしていたのに着火したか、タンクの接地が適切に働いていたのかどうか、落雷時の電荷が想定以上に大きくその放電エネルギーがアクリル酸エチルの最小着火エネルギーを超えていたためなのか、なぜ気相部が可燃性混合気体になっていたのか、など着火の原因について色々疑問があります。このように原因がはっきりしていない事例では、原因について皆で色々議論し災害防止を図ることができるので、職場の安全管理上良い教材になると思えました。「電位差を持った内部の部品間で発生した火花放電」なら落雷とは無関係ではないか、という疑問ももちます。
- 牛山 : 山本さんが以前の安全談話室で指摘したように接地していない内部の浮き導体のようなものがあれば、そこに電位差が生じますので、その隙間にスパークが起こることはあり得ることと思います。
- 塩谷 : ファラデーケージの仮説に関わらず、浮き導体が存在することは非常に危険です。部品-タンク本体間のボンディングは必須と考えます。
- 金原 : あくまでも JIS ですが、JIS では被雷設備は年に 1 回以上の点検を行ってその規格に適合していることを確かめなければならないと定めています。米国も同様の基準があると考えますが、それが確実に行われていたのなら、今回の事例のような事故は起きなかったかもしれません。
- 林 : 日本の場合、保安検査上 1 年に 1 回必ず確認する必要があります。ボンディングの目視点検、接地抵抗測定などを行っています。
- 竹内 : IEC と JIS は整合しているため、JIS に記載している点検の内容も IEC に規定されているものと思われ、海外においても日本と同じように点検を行うことが求められているものと思います。実際に外資系の化学企業では年次点検を行っていました。

- 塩谷 :たとえ、毎年接地抵抗の測定を実施していても、認識されていない浮き導体が存在すれば、この事故のようになんらかの原因によりタンクとの間で電位差が生じ、放電が発生することはあり得るのではないのでしょうか。
- 竹内 :そうですね。インターナルに浮き導体が存在しても、それに気づくのは難しいと思います。
- 塩谷 :API から、NFPA 準拠の石油タンクの落雷対策に対して警告が出されていました。NFPA 780 では、浮屋根式タンクの側板と浮屋根とをボンディングするために、外周 3m 以内毎に規定の寸法のシャント(Shunt)を設置することとしています。シャントとは、浮屋根外周部に設置した板バネ状のメタルプレートで側板側に押し付けられ、浮屋根の上下動に伴い側板に摺動接触しているものです。このシャントについては、従来から問題点(①重質油では、側板内壁に絶縁性被膜が生成する。②側板内壁に、酸化皮膜が生成し、電気抵抗が増加する。③タンク内壁を塗装すると、電気絶縁される。④大型タンクでは、屋根が偏心し、シャントと側板の間に隙間が生じる場合がある。)が指摘されています。API 545 のタスクグループは、落雷時にシャントと側板間で火花が発生し、シール部に漏洩した引火性気体に着火する危険性を実験によって確認し、シールの点検とメンテナンスを強化するとともに、落雷の危険性のある場合にはタンクへ近寄ることを規制するよう警告を発しています。この内容は 2008 年の API 推奨規格の改定の際に反映されるとしています。規格に則った対策を実施することは必須のこととして、その機能を維持管理することはそれと同等に重要であると思います。
- 竹内 :NFPA でシャントの設置を推奨しているのは開放型の浮屋根式タンクですね。最近、API ではシャントの代わりに RGA (retractable ground assembly) という商品を推奨している様です。写真を見ると墜落防止用のセーフティーブロックの様な形をしているので、ボンディングワイヤーを巻き上げて浮屋根の上下移動に対応している構造だと思います。上下に動く物体をボンディングするには良いかもしれません。
- 牛山 :日本ではシャント方式はほとんどなく、日本での落雷によるタンク事故の発生は少ないようです。海外では API の基準に従っているため、シャント方式のタンクが多いのではないのでしょうか。海外の落雷によるタンク火災は 2020 年に 7 件、2021 年に 3 件発生しています。その点からすると、日本の場合はより適正に雷対策がとられているのではないかと思います。
- 司会 :今月の事故事例の原因は複合的でその確定は困難だったようですが、落雷が引き金となったことは確かです。そこで落雷に関係する事故事例及び落雷対策について、皆様のご経験ご意見を紹介してください。
- 金原 :私の所では経験ありませんし、国内でもあまり事例はないのですが古い事例で一つありました。1987 年に川崎市の塩化ビニルモノマーを製造する装置のポンプ吐出配管が落雷時に破損し、火災事故になりました。経年劣化による配管腐食、バルブの絞りによる乱流によるエロージョンに起因する局部的減肉があったそうです。そこに、製造施設近くへの落雷の衝撃が加わり配管が折損したとのこと。経年劣化の原因は腐食性雰囲気にもかかわらずメンテナンスが不足していたとされています。レアなケースですが、こんなところにも落雷の影響があったのかと驚かされます。
- 山本 :1987 年に自衛隊の北海道千歳基地で、覆土式のジェット燃料タンクに設置してあった4つの液面計の1つに、空中に出ている部分に落雷があり、爆発と炎上が起きました。落雷があったと考えられる液面計は接地抵抗が大きく放電痕もあり、タンク内で放電して可燃性蒸気に着火したようです。他の3つの液面計の突き出し部分は全て本体タンクに溶接され、電気抵抗も小さく、放電した痕もなかったようです。接地抵抗は 10Ω 以下で設計されましたが、放電痕があった液面計だけが溶接されてなく、接地抵抗が大きかったようです。この事故でタンク本体をファラデーケージとすれば、液面計の上端部分はケージに包まれておらず突出した状態であったため、落雷の危険性があったと思います。(出典:失敗知識データベース)
- 牛山 :工場にある 40m の蒸留塔に落雷して、計器室の中の電子式計器が逆走電流により故障してしまったことがありました。現在の計器では逆走電流対策が施されていると思います。私の経験からも Beacon に記載されているように、落雷場所とは離れた所で被害が発生することはあり得ることです。
- 今出 :雷サージに対する電源系統の対策はアレスター(避雷器)を設置していました。信号系統のノイズ対策は難しいようです。
- 木村 :15 年ほど前の I 社の雷対策では、外部雷保護として、タンクの雷対策、浮屋根式タンクのボンディング、工場構内の保護角法による避雷、送電線の過電圧保護を、内部雷保護として、計測機器への雷サージの侵入防止、人への雷被害の防止を実施していたようです。計測機器の電子化による雷に対する脆弱化、機器間の回線の複雑

化によって、雷被害の影響は広範囲に及ぶ可能性があるとしています。

山岡 : 私が安全管理に関与したエチレンプラントは、高圧ガス保安法・コンビ則の適用を受けており、同規則に「可燃性ガスの製造設備には当該設備に生ずる静電気を除去する措置を講ずること」と規定していますので、これに従って接地、ボンディング、避雷針の設置、雷接地などの対策をとって管理していました。

金原 : 設備内の配管のボンディング箇所は無数にあります。この点検はどのように行っていましたか。点検箇所が無数にあるため、どのように点検するかを決めるのは難しいように思います。

山岡 : フランジ接続していればボンディングは不要との考えもありますが、エチレンプラントでは安全を優先して全ての可燃性物質の配管はボンディングを設置しました。点検の規定はありませんでしたが、パトロール時に目視点検を行いました。

金原 : 直撃雷だけでなく側撃雷や誘導雷などがあるので、導電体物質を接地しておくなどの対策も必要です。

上田 : 落雷に関して、高圧ガス法や消防法での事故事例は少ないのですが、電気事業法での事故件数は 23 件 (@ 2020 年) 報告されています。落雷による過電流やノイズにより電気回路や制御回路に被害が発生し事故に至った例が多いようです。参照リンク: <https://www.nite.go.jp/gcet/tso/shohopub/search>

また、風力発電設備における故障・事故において、落雷は最も大きいリスク要因となっています。

参照リンク: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jwea/43/3/43_369/_pdf

上田 : 落雷対策として従来の避雷針とは異なる、消イオン容量型避雷針と呼ばれる方式の実績も増えているようです。この方式の避雷針上部は負電極となるため、落雷が抑制されるとのことです。

参照リンク: <https://www.rakurai-yokusei.jp/>

竹内 : 宇都宮は雷の発生が多く、送電線鉄塔への落雷による停電を経験しました。大きな被害はなかったものの、ファックスのアース線からの逆走電流によりこれが故障したことがありました。

司会 : 落雷の影響として、瞬時電圧降下や停電は比較的発生確率の高い事象で、化学プラントの安定運転にとっては大きな問題です。瞬低や停電対策における皆さんの経験や事例をご紹介してください。

金原 : 落雷の少ない愛知県西部にあったことと自家発電比率が高かったこともあって、瞬時電圧降下の経験はなかったです。一方で、北陸の石川県にある工場は、冬から春にかけて激しい雷に襲われて瞬時電圧降下が発生していました。高度で極細の糸を引いていたので、僅かな回転数低下で糸切れが生じ、大変であったと聞いています。

山岡 : 瞬時電圧降下を含む停電対策として、緊急安全装置や運転管理上重要な制御装置には無停電電源設備 (UPS) を備えました。停電が長引く場合は設備を停止する必要がありますので、UPS の能力は設備を安全に停止する時間 (1 時間程度) としていました。電源系統は自家発と買電の 2 系統あり、どちらかの系統が停電して電力量に制限が生じた場合は、工場内のプラントごとに優先順位を設け、優先順位の低い順にプラントを停止し、重要なプラントは最後まで運転を継続できるようにしていました。

塩谷 : 瞬時電圧降下に敏感な重要な機器があり、他の機器は運転継続しているのに、この機器だけが停止し、結果、プロセス全体が緊急停止となってしまうケースがしばしば発生しました。対策として、この機器に瞬低再始動リレーを付け、リレーのタイマーを 20~30ms 程度に設定して運用しました。瞬時電圧降下が発生してもこの設定時間内であれば、自己保持回路が形成され、電圧が正常復帰後に運転を再開することができるようになりました。

三平 : PVC プラントの停電ではバッチ式重合反応器の攪拌が停止して、ジャケット冷却が効かなくなり、温度と圧力が上昇して危険な状態になります。反応中の重合器からガス化したモノマーを抜いて脱圧と降温を図りますが、常用のガスホルダーではとても足らず、私がオペレータの頃は各器の放出管から建屋の外へ直接放出していました。その後強力な重合停止剤の投入技術が開発され、今は停電や異常反応の際にリモートで迅速に投入して、反応を急停止させています。なお操作室側の制御装置や各所の照明はバックアップを設けています。

司会 : 「知っていますか」に記載の、避雷針、接地、ボンディングの点検について、何かご経験がございましたらご紹介してください。

金原 : 消防法では指定数量の 10 倍以上の製造所等には直撃雷対策として雷保護システムの設置が規定されていますが、それは JIS A4201 の 2003 に規定されています。2003 年に改正されて保護角が厳しくなったり、回転球体法で計算するなど、より保護レベルが向上しています。

牛山 : 以前の保護角は 45° でしたが、現在の規定ではどのようになっているのでしょうか。

金原 : JIS によると、保護レベルは 4 段階に分かれ、化学工場では保護レベルは I または II に設定する必要があります。保護角については高さにより異なり、高さ 20m の場合は 35°、30m の場合は 25° となっており、以前よりかなり厳しくなっています。

山岡 : 先ほどのコンビ則における静電気除去措置に係わる保安検査基準と KHK の定期自主検査指針で、1 年に 1 回以上の目視検査と接地抵抗値を測定することを定めていますので、これに基づいて、点検を実施しましたが、目視点検は適宜していました。

塩谷 : 消防法においても高圧ガスと同様に、年 1 回のアースの目視点検と接地抵抗測定が規定されています。

司会 : 同じく「知っていますか」に記載のある、雷雨が予想される際の屋外作業の安全管理について、どのような対策を実施してこられたかご経験や事例をご紹介します。

金原 : 最近では天気情報が充実しているので雷雲が接近している情報を掴むことは容易ですが、それでも時々グラウンドやゴルフ場で落雷により被害を受けたという情報があります。油断は禁物です。

竹内 : クレーン作業を実施中に雷雲が近づいてきたので作業を中断し、クレーンのブームを下ろして待機させたことがあります。実際に激しい雷雨が来ましたが、落雷事故にならずに済みました。

司会 : 今月号の「知っていますか」には静電気放電の防止、接地とボンディングについても注意喚起しています。この件は過去の Beacon でも何回か取り上げていますが、本件に関して留意すべき点を挙げていただけないでしょうか。

金原 : 労働安全衛生総合研究所技術指針(静電気安全指針 2007)では、以下の通り記載されています。

(1) 漏洩抵抗は、人以外の導体は接地によって形成される漏洩抵抗を $10^6 \Omega$ 以下にする。このためには接地抵抗は 1000Ω 以下にする。また漏洩抵抗には接地抵抗も含まれる。なお、大型のタンクなど固定された設備の接地抵抗は 10Ω 以下にする。

(2) ボンディングの抵抗は必要な漏洩抵抗を確保するためにボンディングの抵抗は 1000Ω 以下にする。

私がいた会社の防災技術基準は、本指針に基づき金属導体のボンディングに対し、以下のように定めています。

① 配管フランジ面と接続部のボンディングにあたっては、締付部の塗装や錆を取り除いたうえで、容易に外れないように確実に接続する

② 金属導体のボンディングは漏洩抵抗が 1000Ω 以下にする。通常、被覆導線などで行うとこれを満足する。ステンレスフランジ、ボルトとナットのように抵抗が 1000Ω 以下の電氣的接続がある場合は導線による接続は不要である

司会 : 今日は皆さんの貴重なご意見や知見をいただき、大変参考になりました。また避雷針や接地・ボンディング等の留意点を再確認することができました。気候変動の影響もあり今後ますます落雷のリスクは高まるものと思います。改めて落雷対策の重要性を認識しました。どうもありがとうございました。

キーワード: 避雷針、接地、ボンディング、ファラデーケージ、雷サージ、浮き導体、JIS A4201、接地抵抗、保護角、回転球体法、逆走電流、アレスター(避雷器)、KHK 定期自主点検指針、アクリル酸エステル類

【談話室メンバー】

今出善久、上田 健夫、牛山 啓、金原 聖、木村雄二、塩谷 寛、澁谷 徹、竹内 亮、永嶋良一、春山 豊、林 和弘、松井悦郎、三平忠宏、山岡龍介、山本一己、頼昭一郎、

以上