[Session 2] 化学プラントにおける静電気対策*

増 田 閃 一**

昭和 47 年 10 月 4 日 (水) 14:00~17:00

チェアマン 増田閃一 (東京大学工学部教授)

スピーカー 上田 実 (名古屋大学工学部教授)

増田閃一 (同上)

パネラー 木下次郎 (日本石油精製 (株) 根岸製油所公害保安課長)

炭谷不二男 (三菱石油 (株) 設備検査役)

はじめに

本セッションでは化学プラントにおける静電気対策について、とくに液体の帯電による事故対策の問題について、チェアマンよりまず問題を提起し、静電気の基礎理論について 2 人のスピーカーが解説を行ない、現場における事故の実態とその防止対策について 2 人のパネラーが報告を行なったあと、参加者との間に種々の真剣な討論が行なわれた。

1. チェアマンの問題提起 (増田)

絶縁性液体のパイプ輸送に伴う流動帯電、プラスチックをはじめとする電気抵抗の高い固体原材料の加工や処理に伴う接触帯電やまさつ帯電、粉体の空気輸送や噴出に伴う噴出帯電など、化学プラントではそれぞれの業種やプロセスに応じて種々の静電気問題があり、いずれも安全性や作業性の点で重大な難問となっている。すなわち上述の種々の帯電現象に伴って火花が発生し、これが着火源となって火災や爆発が起こったり、あるいは高電位にある蓄積電荷に人体がふれて感電ショックを受け、場合によりこれが原因で転倒などの二次的災害を受けることもある。また帯電に伴う電気力が原因で、プラスチックシートがロールにからみついたり、粉体が飛散したり、製品にごみが付着したりなど、種々の障害が起こって作業性が低下したり、品質が下ったりすることも少なくない。

これに対しては、帯電防止剤を製品に添加して電気抵抗を下げることにより静電気がたまらないようにすると、各種の除電装置で正負のイオンを供給して一旦発生した静電気を逃すとか、液体や物体の輸送速度・処理速

度を下げて静電気の発生割合を抑制するとか、種々の対策があるが、帯電防止剤の添加は品質上の理由で問題があって適用できない場合があり、除電装置は効果が局所的で、凡ゆる静電気の発生個所に取りつける必要があって経費や場所の点で問題があったり、また輸送速度、処理速度の低減はそのまま生産性の低下につながるなど、いずれの方法にも一長一短がある。また静電気の発生場所のプロセス、材質、発生状態に、業種や現場毎の特殊性があるため、一般的な対策では対処できず、ケース・バイ・ケースに工夫をこらして対策を講ずることが必要となる場合が大部分である。

このように現場のエンジニアがそれぞれの問題に応じた対策をみ出さねばならないという状況下にあっては、静電気現象の基礎を十分に把握しておくことがまず何よりも大切であって、これによってはじめて健全な対策の樹立が可能となる。と同時に同じような問題をかかえている技術者同志が相互の経験を交換し、互いに事故の原因やその正しい対策について討論し合うことにより自己流の考えや方法の誤りを訂正し、より適切な対策を打ち立てることが可能となるものといえよう。本セッションのシンポジウムの目的は、スピーカー、パネラー参加者が協力して、このような場をもつことにある。もっとも静電気現象は、固体・液体・粉体ときわめて多岐にわたっており、短い時間でそのすべてをカバーすることは到底不可能である。したがって本セッションではその重点を化学プラントでもっとも問題となる液体の静電気におくこととし、理論的解説ではこれに固体・粉体を加味してやや一般的な取扱いを行ない、実際的な問題は液体の場合にしばることとした。但し「帯電防止の理論と実際」について日本大学工学部九茂秀雄教授にお話しいただく予定であったが、同氏が九月二十二日突然他界されたので、この方面の権威である同氏のお話を伺うことが不可能となったのは誠に残念であった。ここに同氏の生前のこの分野に対する大きな御貢献をたたえとともに、心より御冥福をお祈りすることにしたい。

本セッションは上に述べた趣旨にしたがい、まず 2 人のスピーカー (名大工学部 上田実教授、東大工学部 増田閃一教授) に帯電理論・測定法・帯電防止の基礎的問

* 昭和 47 年 10 月 12 日受理

** Sen-ichi Masuda 東京大学工学部 電気工学科

題を論じ、ついで2人のパネラー（日石精製 木下次郎氏、三菱石油 炭谷不二男氏）に静電気災害の実例ならびにその防止対策の実際を報告していただいて、パネルディスカッションに入ることにした。以下にそのハイライトを御紹介する。

2. 帯電理論と測定法（上田）

すべての物質中には本来正負の両電荷が存在するが、それが中和し合って外からは電氣的に中性に見える。

ところがこの正負電荷が以下に述べる種々の原因で分離した場合、いわゆる静帯電を発生する。つまりすべての静電気の発生は、正負電荷の分離によって起こるものであり、電荷分離を起こすすべての物理現象が静電気発生メカニズムとなる。

電荷分離を生ずる物理現象としては、まず接触帯電がある。これは二つの物質を接触させると、それぞれの内部の電子の仕事函数に差があるため、一方から他方に電子が移動する現象で、その結果電子を失った方の物体は正、受けとった方の物体は負に帯電して電子の移動を阻止する方向の電位差を生じ、遂にある電位差になって電子の移動が止む。この電位差はほぼ仕事函数の差に等しく、接触電位差とよばれる。この場合両者をまさつしたり、接触圧力を大きくしたりして、接触面積を増やすと電荷分離の量は著しく増加する。これが摩擦帯電とよばれる現象であるが、まさつの際には、これに加えて発熱、表面の変形、破断などもおこり、それぞれが複雑な二次的影響を及ぼす。たとえば両物体の比熱や熱伝導率に差があると発熱の際当然温度差を生じ、これが電子やイオンの一方から他方への移動を誘発して帯電量に影響する。また圧力によって電位障壁の高さが変わることにより、帯電量が変わるという説もあり、実験的な裏づけもなされている。さらに破断が起こると熱電、圧電、焦電効果に機械的な表面層の分離も加わる。これらの結果いわゆる帯電系列とはまったく別の帯電結果を生ずることも多い。接触帯電はまた電子の移動のみでなく、表面の吸着水分層に溶出した正負イオンの剝離に伴う電荷分離によってもおこる。液体と固体の接触界面では、液体中の正または負イオンのいずれかの過剰吸着が原因で電荷分離がおこり、吸着電荷と、液体中に残された異符号のイオン電荷とがいわゆる界面二重層を形成する。この状態で液体が上記イオン電荷をもったまま流動すると、いわゆる流動帯電を発生する。この場合液体は導電性をもつため、必ず逆方向の伝導電流がおこり、電荷の一部が失われる。液体中を固体や不溶性液体の粒子が沈降する際にも二重層電荷の剝離によって帯電がおこり、沈降帯電とよんでいる。気体と液体の界面でも電荷分離がおこ

るので気泡の上昇によっても激しい帯電がおこる。この他氷結や噴霧などに伴っても電荷分離が発生することが知られている。

電荷分離に伴って正負電荷の電位が上昇するが、発生電荷密度が大きすぎると火花が発生して電荷が中和する。すなわち火花発生の限界が限界電荷量を与え、これ以上の電荷密度は得られない。この値はパッシュンの法則で与えられ、大気中では約 $2.7 \times 10^{-9} [\text{coulomb/cm}^2]$ となる。このように種々のメカニズムで電荷分離が行なわれても、電位の上昇に伴って直ちに電荷の漏洩がおこる。したがってわれわれが測定するのは常に漏洩過程の電荷であることを忘れてはならず、測定場所の選定にもこの点を考慮しなくてはならない。つぎに静電気を問題とする際、常に問題となるのはアースの問題である。アースは電荷の蓄積を防ぎ、アースされた物体の電位上昇を防ぐ作用をもつ。一方貯油タンクでのサンプリング容器のロープにあっては、これを金属アースにすると、容器油が面に近づいた際火花を発生する。逆にロープを絶縁物にすると、容器をタンク壁までつり上げたときに、これとの間に火花を生ずるという困難な事態を生ずる。結局ロープに適度のわずかな導電性をもたせ、サンプリングの瞬間には容器が油面電位に等しくなるが、つり上げる過程で容器中の電荷が漏洩するようにすることが望ましい。

3. 帯電防止の理論と実際（液体の帯電を中心として）（増田）

液体の流動帯電は、層流と乱流の二つの場合でその理論的取扱いが異なり、化学プラントでもっとも問題となるのは後者の場合である。この場合には管路中を流動する液体には渦動による乱流拡散がおこり、分子拡散を前提とした壁面での二重層電荷分布は完全に崩れて、イオンの選択吸着による電荷分離は流動面全体にわたっておこり、これに対応して壁面全体から液体中に荷電電流が流入して液体が帯電する。流入電荷は乱流拡散により断面全体にただちに均一に分布し、液体の流動に伴って移動することにより対流電流（流動電流）を発生するとともに、空間電荷電界を形成、これによって管壁に向かう漏洩電流（伝導電流）を生ずる。そして管の入口より進行方向へと液体中の電荷が増大し、それに伴って流動電流が増大する。このような物理的モデルのもとに流動電流を求めると、入口から $Z[\text{m}]$ のところで

$$I(z) = I_{\infty}(1 - e^{-z/\lambda})[A] \quad (1)$$

となる。ただし、管壁からの荷電電流密度を $i_a[A/\text{m}^2]$ 、液体の誘電率を $\epsilon = \epsilon_s \cdot \epsilon_0$ (ϵ_s は比誘電率、 ϵ_0 は真空の誘電率 $= 1/36\pi \times 10^9$)、導電率を $\kappa[V/\text{m}]$ 、液体の平均流速を $\bar{v}[\text{m/s}]$ 、管の内半径を $R[\text{m}]$ とすると

$$I_{\infty}=2\pi R \cdot Z_e \cdot i_a [A], Z_e=(\varepsilon/\kappa) \cdot \bar{v}=\tau \cdot \bar{v} [m] \quad (2)$$

で与えられ、 I_{∞} は飽和電流、 Z_e は緩和長、 τ は緩和時間とよばれる。さらに実験によれば I_{∞} はガソリンやケロシンなどでは導電率には関係せず、レイノルズ数のみに依存し、

$$I_{\infty}=\beta(\bar{v}R)^n [A] \quad (3)$$

で与えられる。ただし $\beta=1.5 \times 10^{-13}$ 、 $n=1.8 \sim 2.0$ ($\bar{v}$ は [cm/s]、 R は [cm] で表わした時)である。いま $n=2$ とすると、(3) 式より $i_a=(\beta \bar{v} R / 2 \pi \varepsilon) \cdot \kappa$ となって荷電電流密度 i_a は導電率 κ に比例することがわかる。(1) 式から $Z \geq 3 Z_e$ で I は飽和値 I_{∞} に達することがわかる。さて管からタンク内に流入した液体中の電荷は、もし Z_e が小さければ直ちに緩和し、逆に Z_e が大きければなかなか緩和しない。 Z_e の大小の基準となる特性長としては普通管半径 R をとる。1) $Z_e \gg R$ の例: $\kappa=10^{-11} \Omega/\text{m}$ 、 $\varepsilon=10^{-11} \text{C/Vm}$ 、 $\bar{v}=1 \text{m/s}$ 、 $R=0.05 \text{m}$ とすると、 $Z_e=1 \text{m}$ となって $Z_e \gg R$ となる。このときは液体の荷電はほぼ全量がタンク内に持ち込まれる。このようなときには流速 $\bar{v}$ を下げるか、帯電防止剤などを用いて導電率 κ を上げ、 Z_e を十分に下げてやらないと油面で放電がおこり、着火爆発の危険性がある。2) $Z_e \ll R$ の例: $\kappa=10^{-7} \Omega/\text{m}$ 、 $\varepsilon=10^{-11} \text{C/Vm}$ 、 $\bar{v}=1 \text{m/s}$ 、 $R=0.05 \text{m}$ の場合 $Z_e=10^{-4} \text{m}$ となり $Z_e \ll R$ となる。この場合には吐出口のごく近くで電荷は緩和し、危険性はない。すなわち危険性をさけるには Z_e を R に対して少なくとも 1 桁下げてやる必要がある。

4. 静電気災害の実例(木下)

本年1月8日に某社石油精製工場のベンゾールタンク(1万kl、コーンルーフ型)で発生した事故例を報告し、これから教訓を引き出したい。本例ではPM2:20にベンゼン230klを上記タンクに送油し、満タンとした後PM3:15頃2名のインスペクターがゲージハッチからサンプル容器により3回の採油を行なったが、第3回目に容器を引き上げ終る瞬間、大音響とともに異常燃焼がおこり、溶接部分が数箇所亀裂して出火するとともに、インスペクター2名は火傷を負った。この原因は横浜消防局により静電気による引火爆発と推定されているが、ロープが絶縁性の場合[2]節で述べたように容器中の電荷が逃げず、引き上げ終わる時点で容器とハッチとの間にスパークが飛んだものと予想される。この事故から上記タンク(直径33m)にあっては約1時間の静置時間においても電荷が緩和していなかったことがわかる(緩和時間は直径の大きいものほど長く、実測によれば、ローリー1分、タンク車2分、バージ4分)。今後タンクがさらに大型化すればより長い静置時間が要求されよう。とともにこのような事故を防止するため、1) 人体

帯電の防止(綿製衣類、 $10^6 \Omega$ 以下の安全靴、放電用接地リングなどに着意)、2) 流速の制限(米国APIの安全速度: 3 ft/sec 以下、ドイツの安全速度: パイプ直径1 inch~24 inch に対して8~1 m/s 以下)、3) サンプリング容器および方法の工夫(ゲージハッチより底板まで穴のあいたパイプで直結、その中を綿ロープの芯にアース銅線を入れたもので容器を下降され採油するとともに、この際銅線は頂部手すりに連結して、火花発生の危険性を防ぐなど)を行なう必要がある。これらの方法でもなおかつ危険性が防げぬときは窒素シールを行なう。

5. 災害防止対策の実例(炭谷)

静電気による着火災害を防止するための実際現場における対策を述べ、かつ関係法規の解説を行なう。

原則的には災害対策は、1) 可燃物体(ガス・液体・粉体)を密閉し断して危険域に出さぬようにするか、もしくは、これをすみやかに危険域から拡散除去すること。2) 着火源となる静電気の対策(発生の抑制・電荷の中和・同電位化・除電・接地あるいはこれらの組み合わせ)の2種類に大別できる。これを具体的に実施するためにはさらにa) 安全性、b) 技術性、c) 作業性、d) 経済性などの要素も総合的に勘案せねばならない。その具体例としては、イ) 構築物(プラント、タンクなど)の接地、ハ) 充てん口(棧橋・タンク車・ローリー車・容器など)の接地、ホ) 検尺方法の制限、ニ) サンプル採取方法の工夫、ホ) 汙過機の接地、ヘ) 流速制限、ト) イオン化による中和、チ) 添加剤による除電、リ) 人体帯電の防止(導電性作業衣、導電性靴、接地棒、安全教育)などがある。

静電気災害を防止するための関係法則には、1) 労働安全衛生規則(第139条の4)、液化石油ガス保安規則(第12条4のヘ)、一般高圧ガス保安規則(第13条6のヘ)、危険物の規則に関する政令(第9条の18、19、第10条の14、第11条の14、第15条の14、16、第17条の7、第27条の6の3のニ、ホ)および危険場所の規則に関する規則(第40条の4、5)がある。

6. パネル・ディスカッション

以上の解説および報告に対して参加者の質問を中心としてパネルディスカッションが行なわれた。その主なものを記すと次のとおりである。

1) ベントスタックからの排出ガスが、雷電の近接により着火する可能性があるか: 実例が報告されている。これは雷雲に対してスタック先端より強烈なコロナ放電(エルモの火)が発生し、これが着火能力をもっているからであると思われる。

- 2) 粉粒体の流動乾燥時に帯電することがありうるか。
またその測定方法は： ありうる。似た例としては生石灰や石灰石の乾季における粉碎時、顔料のミキサーによる混合時に強烈な静帯電を発生する例がある。もっとも簡単な測定法は、出口ダクト中に絶縁した針電極を挿入し、これを静電電圧計につなぐ方法である。指示値が数百V以下なら問題ないが数千Vをこえると明らかに何等かの異常がおこる。
- 3) 湿度と静電気対策との関係は： 相対湿度が50%を下まわると警報を出して散水し、30%を下まわるとすべての作業を停止している例がある。
- 4) タンクに絶縁性液体をフラッシュしてもよいか：
絶対に不可である。少なくとも送入パイプの先端が油面にディップするまではガスぬきのゆっくりと送油してフラッシュをさけ、そのあとではじめて送油速度を上げるべきである。

- 5) 静電気を漏洩させるための停滞区間はどのようなときに設けるべきか。またその長さのとり方は： 流速を $V[\text{m/s}]$ 、管内径を $d[\text{m}]$ とするとき

$$V^2 d \leq 0.64 [\text{m}^3/\text{s}^2]$$

とするべきである。もしこの条件がとれないときは停滞区間を設けるべきである。その長さは

$$l \geq 3 V$$

にとる必要がある。

おわりに

以上のほかにも多数の質疑応答が行なわれたが、紙数の都合で割愛した。なおスピーカーの1人(増田)は粉体の噴出帯電についてふれ、詳細は高圧ガスの噴出帯電(高圧ガス, Vol. 6, No. 5, pp. 313~336 (1969))を参考にされんことを希望した。

[Session 3] 化学プラントの現場腐食試験*

中 島 敏**・遅沢浩一郎***

昭和47年10月5日(木)9:30~13:00

チェアマン 中 島 敏(綜研化学(株)社長)

スピーカー 遅沢浩一郎(日本冶金工業(株))

川崎製造所研究部)

鈴木 紹夫(味の素(株)中央研究所

第3研究部)

パネラー 鈴木 顕脩(日本石油(株)工務部)

熊田 誠(三井造船(株)玉野研究所

材料研究室)

下 郡 一 利((株)神戸製鋼所

中央研究所第6研究室)

化学プラントの装置材料の選定および保全においても重要視されるべき問題の一つは材料の耐食性である。化学プラントにおける腐食環境の種類は千差万別であり、また環境中で腐食に影響する因子はきわめて多いため、一般に材料の耐食性を実験室試験で再現することは困難なので現場における腐食試験が必要となる。しかしただ漠然と装置内に試験片を装入しただけでは労多くして益少ない結果になりかねない。そこに起こり得べき

腐食現象を適確に把握するためには、試験片、測定法、結果の評価法などについて個々の試験目的および腐食形態に適したものを選ぶ必要がある。

ここでは現場において再現の比較的困難な局部腐食試験、今後普及すると考えられる現場における電気化学的腐食試験、現場腐食試験の実例と問題点、現場試験と実験室試験の相関などに関して、スピーカーおよびパネラーから下記のような話題提供があり、引続いてそれらの話題に関連した質疑応答が行なわれた。

表 1 オーステナイト・ステンレス鋼の湿食事例の腐食形態*

腐 食 形 態	件 数	%
全 面 腐 食	10	5.4
粒 界 腐 食	12	6.4
孔食(すき間腐食を含む)	42	22.6
粒界性応力腐食割れ	21	11.3
貫粒性応力腐食割れ	92	49.5
腐食疲れ	9	4.8
計	186	100.0

* 日本冶金工業資料(過去5年間)による

* 昭和48年1月18日受理

** Satoshi Nakajima 綜研化学(株)

*** Koichiro Osozawa 日本冶金工業(株)