

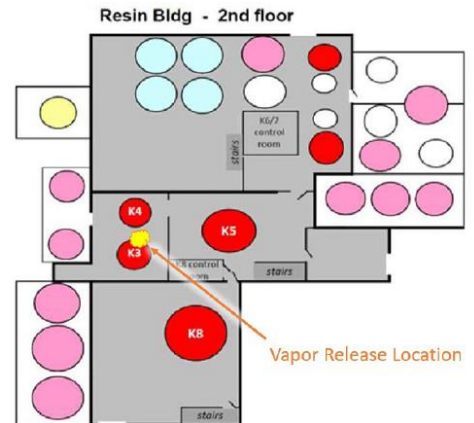
マンホールは、しっかり締めておこう

(PSB 翻訳担当: 松井 悦郎)

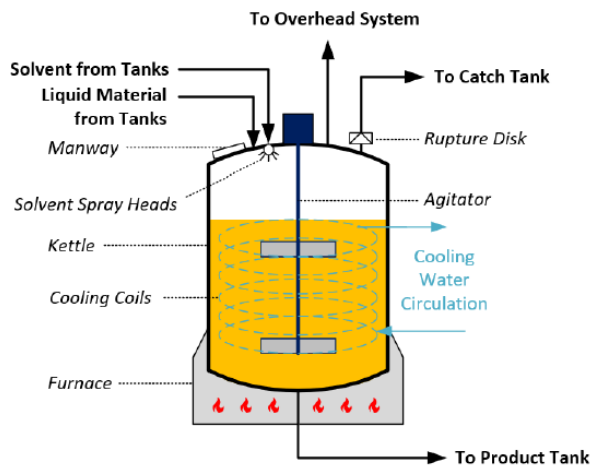
司会 : 今月号は、運転中の反応器のマンホールからナフサ蒸気が大量に放出され、火災・爆発により従業員 1 名が死亡し、他の 8 名が負傷した事故を取り上げています。この記事につき事故概要の説明と感想お聞かせ下さい。

竹内 : この事故は 2021 年 4 月 8 日にオハイオ州コロンバスの Yenkin-Majestic Paint Corporation という会社の OPC Polymers という部署の樹脂製造プラントで発生しました。反応釜での樹脂生産工程が終了した時点で、加熱を止めて冷却コイルに水を流し、攪拌しながら温度を下げ、所定の濃度にする為にナフサを加えるプロセスでした。ナフサの添加は冷却効果もありました。事故の時、攪拌機が止まった状態でナフサを添加してしまい、釜の下部に高温の樹脂が存在し、上部にナフサが溜まった状態を作り出してしまいました。オペレーターが、攪拌機が停止していることに気づき、攪拌機の起動ボタンを押してしまいました。そこで、大量の高温樹脂とナフサが急激に混ざり合い、ナフサが一気に蒸発してマンホールから高温の樹脂を伴って大量のナフサ蒸気が噴出したことが引き金となって火災・爆発に至ったものです。攪拌機停止の問題は来月の Beacon の題材となる予定ですので、今回はその他のポイントに焦点を当てて議論して頂ければと思います。

頼 : 事故の起きた反応釜の状況はお分かり頂けたと思います。この事故では当時工場にいた 15 人の従業員の中から 9 人の犠牲者が出ており、設備管理だけでなく運転管理体制も気になりますので当時の工場の設備配置状況と反応釜の概念図を紹介します。(事故中間報告書より転記) 工場では下図に示す様な反応釜が 6 基、右図の様なレイアウト (赤が反応釜) で配置され 120 品目の製品をバッチ生産していました。各反応釜を 1 人の運転員が担当 (1F 加熱器、2F 反応器、3F 分析室) していました。反応釜へは液体 (溶剤 & 原料) はタンクからパイプで、固体原料と添加剤はホッパー又は袋からマンホールを通して 供給されていました。反応釜には攪拌機と冷却コイルがついており反応の進行に応じ運転員は前段では原料投入と組成分析 &



出展 : CSB report No. 2021-04-I-OH



出展 : CSB report No. 2021-04-I-OH

加熱・攪拌を管理、後段で製品の冷却・攪拌を管理していました。今回事故を起こした反応器は K3 で、後段の冷却にはナフサも利用していました。事故原因は前段反応終了間際に、攪拌機停止アラームが作動したのに運転員が気づかず分析値で反応完了を確認後、後段の製品の冷却・攪拌工程に入り、攪拌なしで多量のナフサを投入してしまった事にあります。その結果反応器下部に高温の樹脂、上部にナフサが溜まった状態が出来てしまいました。運転員はナフサ供給が終了した後、マンホールのサイトグラスで攪拌機が停止している事に気づき慌てて攪拌機を起動させてしまい、その直後にマンホールより大量のガスが噴出したと述べています。(ガスの噴出状況は Beacon の写真を参照。) 運転員は噴出したガスに阻まれ緊急停止、緊急通報も出来ずに逃げ出さざるを得なかった様です。右上のレイアウト図を見ると (V3 が事故を起こした反応器ですが) 他の反応器と壁で仕切られており、他の反応器の担当者には V3 で起こった異常現象が見えなかったと思います。V3 担当運転員は V4 担当運転員に促され脱出出来ました

レイアウト図を見ると (V3 が事故を起こした反応器ですが) 他の反応器と壁で仕切られており、他の反応器の担当者には V3 で起こった異常現象が見えなかったと思います。V3 担当運転員は V4 担当運転員に促され脱出出来ました

が、仲間への緊急通報をしていないので、2F,3Fに居た他の運転員が異常に気付き逃げるのは大変だったと思います。これも大惨事になった大きな原因だと思います。運転員が攪拌機停止アラームに気付かなかった事が引き金ですが、運転員は常時反応器周りにいる訳ではなく、1Fでのファーンエス管理、3Fでの分析と動き回っており、それに対するアラームの伝達手段が適切であったのかも気になりました。マンホールの締め付けトルクが不十分だった問題については、今後皆様と討議したいと考えて居ります。

牛山：このマンホールからの漏れは過去には無かったのですか？

頼：牛山さんが懸念されている通り、この様な管理では過去にも色々のトラブルがあったのではと気になります。この反応器は約60年前製作された機器の転用品で(初期の設計圧40psig)、マンホールは事故の8ヶ月前に改造設置されたものです。この半年間のマンホールからの漏れは事故報告書には書かれて居りませんが、一般的に保安安全管理が杜撰な会社との印象を受けます。マンホール改造時の設計仕様は最高使用圧12psig、ラプチャーディスク作動圧13.5~15psig、設備設計圧力16psigです。それに対し樹脂製造時の運転条件はHPA:2psig、HPT:4psig(ファーンエス&クーラーストップ)でした。運転員が日常的なマンホール開閉作業時に設備設計圧力を何処まで認識していたのが気になりました。事故報告書にはラプチャーディスク作動前に9psig程度でマンホールからガスが大量に噴出したとあります。

司会：事故概要の説明をありがとうございます。この事故に関し皆様の感想、その他ご意見等御座いましたらお願いします。

三平：Beaconの事故概要では事故の内容は分らなかったのですが、事故報告書を読んだ感想です。6基の反応器を保有する複雑な化学工場なのに、夜勤の15人のシフトオペレーターをまとめるフォアマンがいなかったのに驚かされました。通常は日勤の管理者から各シフトの部署毎の担当者へ直接運転指示が出されていたのでしょうか。攪拌機停止の発見時やナフサ蒸気の噴出時に、相談相手や指示をもらう人がいなかったために、担当オペレーターが一人で処置せざるを得ず、大きな災害になったのだと思いました。想像ですが、諸原料を混合してコート剤やペイントを製造する塗料メーカーが原料樹脂の購入を止めて、自社製造にしたのだと思いました。機器の追加によるプラント配置・拡張の様子やオペレーターの作業状況から、諸材料を単に混合・加工する塗料や樹脂コンパウンドメーカーの製造・運転管理の方式を、化学反応設備を有する工場にそのまま取り入れたのだと思いました。これは無理があるように思います。規制当局は設置時に指摘しなかったのでしょうか。

頼：私も運転管理体制の不備が当日の作業員15人中9人の犠牲者を出した大きな要因と思います。マンホールの締付不良だけでなく、事業計画作成時の「プロセス設計」・「プラント設計」・「危機管理」に対する配慮に問題があったのではと考えます。経営トップが事業構想を提示した時、それを安全に実行する為の具体案が描ける技術経営者、技術管理者、実務部隊の連携が十分に機能していなかったと思います(最終責任はトップにあるが)。

三平：設備面では、攪拌機が止まっている時に当該溶剤のバルブが開かないように、インターロックを組んであれば、この災害は防げたと思います。

山本：反応器の過加熱にファーンエス(直火)を使用するのは、可燃物を加熱するので危険過ぎると思います。このようなファーンエスでの加熱は昔にあったと聞いていますが、現在の日本では一基もないと思います。今では、外部の離れたボイラー室に熱媒体を貫流する熱媒ボイラーを設置して、高温の熱媒体を反応器のジャケットに流して加熱するのが一般的です。そうすれば、今回のように樹脂も高温にはならなかったかもしれません。

三平：反応温度が200度以上と高いために、通常のスチームボイラーは使えず、直火が使われたのだと思いました。山本さんが言われるように熱媒ボイラーを使うべきだと思います。

竹内：この反応器は転用品でファーンエスと反応器がセット(一体設備)だったのをそのまま転用したものと思われる。本来は熱媒で加熱するべきものだと思います。BPテキサスの事故も軽質油の蒸留塔にファーンエス過熱の蒸留塔を転用した為、イレギュラーな運転を余儀なくされ、蒸留塔のトップより可燃性液体が大量に流出し火災・爆発した事故になった事故です。このPSBの事例は2021年の事故ですので、PSMが法制化されていたのにも係わらずリスクアセスメントが正しく出来ていなかったものと考えられます。プロセスハザード分析をキチンとしていれば危険性に気付き、三平さんの言われる様に攪拌機の停止に対してインターロックを掛けていた筈です。

塩谷：事故を起こした反応器は古い設備であり、反応器のすぐ横に制御盤が設置され運転制御・監視が行われていたようです。事故発生時、マンホールからの可燃性蒸気の放出が激しかったため、制御盤に近づけず緊急停止ボ

タンを押すことができなかつたようです。機器からの漏洩は十分に想定できるリスクであり、遠隔にて安全に緊急停止できる対策を講ずる必要があつたのではないかと思ひました。

三平：報告書には集中制御室などの詳細な記載がなく、全工場的なリモートの緊急処置は取れなかつたのだと思ひました。おそらく各反応器の脇に制御盤があり、トラブルが起きたときの処置に限られ、危なくなれば逃げるしかないプラントだつたと思ひました。本来は緊急停止ボタンを押せば、フルで冷却するとともに緊急脱圧させて建屋の外へ放出させる設備を持つべきですが、そのようにしてなかつたと推測します。

司会：次に容器の蓋等からの危険物流出の知見等(事例又は防止対策)があればご紹介下さい。

山岡：エチレンプラントでの事故ですが、原料ナフサを熱分解して得られる芳香族類を含む留分から芳香族製品を溶剤抽出する前段階の水素添加反応器で、定修入りのため原料の供給を停止し水素を供給しつつ降温・降圧の操作中に、反応器上部マンホールフランジから水素リッチガスが漏えいして火災が発生した事例です。当該マンホールの直径は34インチ、ボルト・ナットの本数は36本、ナットの直径は2インチで、漏えいした時点の圧力は1.3MPaG、温度は150°C(通常運転中の圧力は4.0MPaG、温度は350°C)でした。漏えいの原因として、高圧下、昇温・降温操作の繰り返しにより一部のボルトの締め付け力が低下し隙間が生じた、締め付け力にばらつきが生じフランジ面に片締めがあつた、スタート時のボルト締め付けのチェックが不十分であつた、等が挙げられました。この事故の後、類似の運転条件やマンホールフランジの大きさを持つ設備の締め付にトルク管理を導入して締め付け力を定量化し、昇温・降温時のチェック体制の強化を図りました。

林：以下のような部位は締め付け管理の適用を検討しました。① ホットボルトイングやその他の増し締めを対象とする部位、② 昇降温など温度変化(100°C程度)を伴う部位、③ 扱う流体が水素ガスなど漏洩の懸念がある部位、④ 狭所でフランジ締め付けの作業性が悪い部位、⑤ 履歴から締め付け管理をするべき部位 などの部位は、さらにトルク管理(±30%)、軸力管理(±10%)の精度も考慮して、締め付け管理の適用を検討しました、また締め付け方法も従来の対角締めから現在では3周の周回締めでの締め付けを行うことや、ガスケット仕様の間違いや挿入ミスを防止するために作業主任を認定制度で定めていました。軸力管理では所定の軸力が得られる軸の伸びを測定する超音波軸力計による管理の他、油圧式ボルトテンショナーや商品名でロータボルトなどを採用しました。トルク管理も軸力管理も一ヶ所ごとの締め付けでは制御が難しいので、出来るだけ一度に多数ヶ所の締め付けが可能な方式を採用していました。

司会：他にマンホール締め付け管理に対するアドバイスはありますか。

林：締め付け管理が難しいガスケットとしてテフロン包みのガスケットがあります。内面の形状がコの字型と挟み込み型がありますが、マンホールのような大口径では締め付け管理をした方がよい仕様です。内面にずれ落ちたり、挟み込み部が裂けたりして漏洩に繋がった経験があります。

山本：事故調査報告書の写真を見ますと、マンホールはクランプボルト4か所で締めるような設計になっています。マンホールの大きさが20inch(500A)で、設計圧力が16psig(1.1kg/cm<sup>2</sup>G=0.11MPaG)ですので、たとえば、JIS5Kフランジを参考にすると、ボルトの本数として20本ぐらひは必要ではなかつたかと思ひます。マンホールのボルトは得てして、原料や添加物の投入口として使用する場合がありますので、取り外しの手間からボルトの本数を減らしたがるのは分かりますが、しっかりと必要なボルト数を設計して、全てのボルトを開閉の都度、締めるようにしなければ、今回のような事故が起こると思ひます。

司会：その他マンホールの開閉頻度の多いバッチ反応器等での漏洩防止策の御苦労談、事故事例等御座いましたらご紹介下さい。

三平：歴史の古いPVCの重合では、加工製品のフィッシュアイ(ポリマー表面に観察される円形の欠陥・異常)の問題のためにずっとバッチ方式が採用されています。1バッチ反応後の重合反応器の内部壁にはフィルム状の重合物が付着し、その剥離部にはPVC粒子が入り込んでいました。従つて1バッチ終える毎に器内を換気して、作業員が入つて壁面の重合物を除去していたのです。壁面に重合防止剤を塗布する手法を各社で競ひましたが、困難を極めて20世紀の終わりになって外国で確立しました。今は年に数回開放して点検すればよいと聞いています。私は入社後直ぐにPVC製造設備に配属され、シフトのオペレーターや後にフォアマンを務めました。反応器の上鏡板と胴の下部にマンホールがあり、その開閉がきつい作業でした。口径が500mm程度、ボルトは径が30mm以上あつて20本掛けになっていました。耐圧面で必要なスペックよりもかなり上げた設計にしてあつたようで、

二つの工場で 30 基近い反応器の同型マンホールで、漏洩等の事故は起きていません。その後エンジニアへ転進して新プラントを建設することになり、反応器内に入らずにフィルムを除去することとマンホール開閉作業の軽減が命題になりました。前者は器内での高圧水の噴射による付着物の剥離が成功しましたが、マンホールの数が増えてしまいました。マンホールをボルト締めせず、クラッチドア式を採用することでオペレーターの開閉作業はかなり楽になりました。

竹内 : マンホールではありませんが、配管の開放部に設置したブラインドフランジの固定がいい加減だった為に大量のオイルが流出して火災・爆発を起こして、大惨事になったのがパイパアルファの事故です。スタンフォード大学の M. Elisabeth PatC-Cornell の報告書 ”Learning from the Piper Alpha Accident: A Postmortem Analysis of Technical and Organizational Factors” によれば、ブラインドフランジのボルト・ナットは手で締めただけだったとのこと。この事故は、保全工事のために予備ポンプのリリーフ弁が配管から外され、ブラインドフランジで仮止めされていました。メインポンプがトラブルで停止した為、オペレーターが工事中とは知らずに予備ポンプ側にラインを切り替えたのですが、ブラインドフランジがしっかりと閉められていなかった為に大量漏洩になった事例でした。

上田 : マンホールからの漏洩に関する過去の事故事例をネットで検索した所以下の様な4事例が出てきました。

皆様にて加筆又はコメント出来る事はありませんか

【事例 1.】球形タンク火災(1967.02.25) :

保安検査準備中(球形タンクの内部検査)、内抜きし&ガス回収(内圧ゼロ確認)後、下部 MH を開放、その後上部 MH を開放した時に、下部 MH より内部のガス漏洩 付近に居た車に着火・火災発生

【事例 2.】安水製造貯蔵タンク上部 MH からアンモニア漏洩(1998.07.30) :

安水製造中、安水濃度が安定する前に自動運転に切り替えた為、アンモニアガスと注水のバランスが崩れ 内部圧力上昇が MH よりアンモニア漏洩

【事例 3.】反応器マンホール締結部よりブタジエン漏洩(2017.03.16) :

運転中に反応器の MH 締結部よりブタジエンの漏洩発見、ボルト増し締めするも漏洩止まらず。  
ブタジエン回収の為公設消防に通報

【事例 4.】常圧蒸留装置の火災(R2.05.26) : [http://www.khk-](http://www.khk-syoubou.or.jp/pdf/magazine/196/kikenbutsu_jikokanren_info.pdf)

[syoubou.or.jp/pdf/magazine/196/kikenbutsu\\_jikokanren\\_info.pdf](http://www.khk-syoubou.or.jp/pdf/magazine/196/kikenbutsu_jikokanren_info.pdf)

頼 : 【事例 1.】球形タンクは色々扱いました。主に液体アンモニア、LPG 用でしたが、解放検査時には必ず内部を一度窒素置換してガス濃度を確認し、その後空気置換してからマンホールは解放していました。

【事例 2.】安水製造時のアンモニア漏れは、昔(60 年代、70 年代)は沢山ありました。アンモニアは微量の漏れでも鼻で感じるので管理が甘かったかもしれません。事故事例もその流れにあるのかもしれませんが。

牛山 : LNG の漏れや流出は、2022 年 7 月の米国テキサス州 Freemont LNG 社の爆発事故のように大きな影響があります。2重殻製の LNG タンク容量は 10 万m<sup>3</sup> 以上のものが多く、マンホールの漏れから大事故になる恐れもあり、その設計には大変気を遣いました。万一漏れた際の、-162℃の極低温流体による低温脆化を防止するため、ボルトやフランジカバーも含めオーステナイトステンレス鋼材(9%Ni 綱など)を使用する必要があります。またマンホールカバーが飛んで炭素鋼製の外殻を毀損しないよう、カバーのヒンジ取り付け、冷熱対策などの工夫もしました。

司会 : 次にナフサを冷媒として使用したプロセス事例(失敗事例も含む)及びプロセス設計の問題点につき知見のある方は紹介下さい。

頼 : 医薬や農薬の原体製造過程では反応液の冷却にエタノールやメタノールの蒸発熱を利用する事は良くありました。過剰のアルコール添加を避ける為気化したアルコールを反応器に上乗せしたコンデンサーで回収し、反応器に直接戻すという事をしていました。反応器には回収アルコールしか戻って来ないので、今回の様な事故は防げていたと思います。コンデンサーには安全弁も付いていました。今回は蒸発ナフサを外部で回収しタンク・ポンプを通し循環していたことが事故に繋がったと考えます。しかし反応器出口のガス回収配管に反応器の RD とは別に SV が付いていれば運転管理圧力以上の圧力上昇を防ぐのに役に立ったのではと思います。今回の様なナフサの突沸事象には役に立たないと思いますが設計時の配慮としては必要だったと考えます。

司会 : Beacon で取り上げている問題点は以上 2 点ですが、皆様方も旧式設備の使用継続、改造利用等多数ご経験御有りかと存じますが皆様の御経験と御感想を聞かせ下さい。

竹内 : 私は以前、米国の親会社の工場を見学した時に、100年前の反応器が現役で稼働しているのを見たことがあります。老朽化の問題は、何年経ったのかではなく、供用適性(FFS: Fitness for service)が保たれているかどうかだと思います。安全研究会で翻訳した「化学プラントの老朽化」(丸善出版 2021 年)でも供用適性の重要性が説明されています。

頼 : 頼が最初に課長として赴任した製造課は海外からの技術導入で新設した操業間際の工場と会社の創業時(50 年前)以来運転を継続してきた工場の二つを担当しました。創業 50 年の工場には未だ創業時に設置した機器(熱交換器や圧縮機含む関係配管)も残って居り管理に苦労しました。保全に材質のチェックをしてもらい懸念される機器・配管は別件の合理化工事に合わせて更新した記憶があります。古い設備は全て駄目と言う訳ではなく情報が適切に整理・活用されていない事が問題で古くても小回りが利き便利な点もありました。当時は PSM という様な手法は開発されていませんでしたが、PSM をしっかりやれば懸念は解消されると思います。特に今回の様に設備仕様を変更する際にはしっかりした PSM が必要だと改めて感じました。

竹内 : 水のポンプに転用でオーバースペックのポンプが使われた為にコントロールバルブの開度が小さくなりすぎて、バルブの下流でキャビテーションを起こした例を見たことがあります。設備投資額を節約しようとして、遊休機器を使ったものと思いますが、大は小を兼ねるとは限らないです。

司会 : 最初に事故報告書を読んで一番気になったのが危機管理体制です。

今回事故の当事者は多量のナフサ蒸気に囲まれてその場から逃げ出すのが精一杯だったと思いますが、3名逃げ遅れて1名の死者を出している事実は会社の危機管理体制(緊急通報、緊急避難体制)に問題があったと言わざるを得ないと思います。この問題につき何方か御意見をお聞かせ下さい。

竹内 : PSM がしっかりと出来ていない事が緊急時対応計画の不備に繋がったと思います。火災や爆発が予想される場合は、万一を考えて緊急時対応計画をしっかり作り行うことが大切です。PHA で、このような事故が起きない様な設備対策も大切ですが、緊急時の行動に従業員に教育することも大切です。

山岡 : 確かに、特に突発的に異常事態が発生した時にパニックに陥ることなく適切に対応するために防災訓練を行うことは大切ですね。私のところのエチレンプラントでは半年に一回テーマを決めて防災訓練を実施していましたが、実際に、突然の停電時の対応、大型の冷却水ポンプの短絡による緊急停止時の措置、定修時の塔の洗浄中に発熱して高温ガスがマンホールから噴出した時の対応(一旦退避して窒素を噴射)が訓練通りにできたという実績があります。

頼 : 事故に対する感想の冒頭で三平さんが述べられている通り、この会社の安全管理に対する感性不足が危機管理不備の根底に有ると思います。顧客満足度向上と同時に、従業員・地域社会の安全が保てて始めて会社の発展が有ると言う事業経営の基本認識がこの会社には欠けていたと思います。事故原因を設備管理・プロセス管理・転用品管理・危機管理と分けて議論してきましたが、それ以前に工場の保安安全を経営者・管理者・運転員がそれぞれの立場で真剣に考える風土(教育)がこの会社には無かったことが事故の本質原因でないかと思って居ります。最終的にはトップの自覚の欠如が原因だと思います。トップは全てに亘り細部までを知る必要はないが、リスクの有無を見抜く責務は有ると思います。その為には第三者(例えば監査役等)を活用する事も必要でしょう。

司会 : 多目的プラントの設計&仕様変更、運転管理につき、ご意見、知見をいただきましてありがとうございました。多目的バッチプラントでの運転&設備管理につき関係者の皆さんに大いに参考になるとと思います。

キーワード: マンホール、締め付けトルク、マンホール締め付圧力、反応釜、ナフサ、漏洩、放出、火災、爆発、ホットボルトテイング、緊急時対応計画

【談話室メンバー】

今出善久、上田 健夫、牛山 啓、木村雄二、塩谷 寛、澁谷 徹、竹内 亮、  
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、