

PSB (Process Safety Beacon) 2024年2月号 の内容に対応	SCE・Net の 安全談話室 (No.212) https://sce-net.jp/main/group/anzen/	化学工学会 SCE・Net 安全研究会作成 (編集担当: 林 和弘)
--	--	---

真空がプロセス機器をペシャンコにする！

(PSB 翻訳担当: 山本 一己)

司会 : 今月号の Beacon では、可燃性物質を含むプロセスが真空下で稼働中に、突然入り口ダクトが損壊した事象を通じて、真空が装置に及ぼす危険性が紹介されました。プロセスの中で発生する真空の原因や影響に焦点を当て、その真空が引き起こすトラブルや事故の可能性を紹介しています。真空発生のプロセス内の空気不足が崩壊や爆発を引き起こす可能性を示唆して、真空が引き起こす危険性と対策の重要性を強調、ハザードレビューで真空状態が持つ危険性や適切な対応方法を漏れなく検討するよう求めています。

水蒸気の凝縮による貨車の崩壊についても紹介されていますが、これらの事故事例について、もう少し説明して頂けますか。

山本 : 過去の Beacon で真空が引き起こすトラブルや事故を話題にしたものを検索してみますと 5 件ほどありました。今回の貨車崩壊(図 2)は、2002 年 2 月号の Beacon でも取り上げられています。事故については、貨車内部のチーム洗浄時、空気の大部分は追い出されおり、その日の作業が終了し、すべてのバルブは閉止された状態で貨車が冷え、水蒸気が凝縮することで、真空が発生し、貨車が破壊される原因となったと説明があります。また、液体を保有するだけの一般の容器は真空に耐えられる十分な強度をもっていないが、ASME 規格で圧力クラスが 50 psig(0.34 MPaG) (またはそれ以上)の容器は概ね高真空に耐えることができるとの記述もあります。結構な圧力だと思います。なお、2007 年 2 月号の Beacon では、タックの大気開放のベントを薄いプラスチックシートで覆ったまま、内容物をポンプで抜き出したためにタンクが簡単に潰れた事例が述べられています。ところで、安全は継続的な活動ですので、忘れた頃や定期的に同じテーマで、今回のように内容や視点を変えたり、情報を最新にしたりして紹介するのは重要だと思います。

司会 : これらの事故の事例について皆様の感想、ご意見を含め、真空に関わる同様な事故の事例のご経験や知見などありましたらご紹介ください。

頼 : Beacon の事例と同じ様なトラブルは何度も経験しております。その中から温水タンク崩壊事故を背景事情も含め紹介します。酵母エキス分離プラント(200 m³ 発酵槽)への温水供給タンクで水蒸気洗浄後、温水受入れ作業中に冷水が入りタンクを崩壊させた事例です。発酵槽は菌の混入を嫌いますので温水タンクは定期的な蒸気滅菌が必要で、また外部空気受入れライン(均圧ライン)にはフィルターが設置されていました(空気受入れラインの設計は発酵槽への温水供給量見合い)。温水はボイラーから工場内共有ラインで受け入れていました。温水タンクの蒸気滅菌後に運転員が温水バルブを開けた所、生暖かい温水が出てきたがいつもの事なので(配管滞留中に冷えるので最初は生暖かい温水が出る)そのまま温水受入を継続、持ち場を離れ暫くして戻った所タンクが完全に潰れていたと言う事例です。当日は発電ボイラーが定修中で、当日に限り補助ボイラーからの温水受入中で丁度温水タンクへの受入れのタイミングで補助ボイラーにトラブルが発生し、温水供給が一時的に中断し冷水供給となっていた事が原因でした(通常は温水供給設備が 2 基あり中断する事はなかった)。温水のユーザーは工場内で多岐にわたり、動力側と発酵槽供給温水の重要性の共有出来ていなかった事が根本原因にありました。運転員の後からの反省は“温水配管から熱水が出るまで確認すべきだった”ですが、事故が起きるのはこの様に偶発の積み重ねである事の教訓の様な事例でした。貨車崩壊の事例も多くの特殊条件が重なった結果だろうと思います。貨車の設計者は真空の危険性を認識していたでしょう。ただ操作を行った運転員がどの程度リスクを認識していたかの疑問があります。結局運転員が何処まで自分に厳しく臨めるかの問題だと思います(“妥協は事故の源”)

林 : 水蒸気蒸留を行っている蒸留分離塔の頭頂部から凝縮器までの大口径のオーバーヘッド配管と呼ばれる部分が真空設計されておらず、記録的な大雨の際に内部蒸気の凝縮による急激な減圧で、最も弱い下降管部を損壊させてしまったトラブルの経験があります。強め輪の設置や減圧の際に窒素が導入されるシステムなどで対応しま

した。また勤務していた事業所で、消防法適用の屋外タンクのノズルの変更申請に伴う満水テスト実施後に、通気管部の仕切り板を抜かずに水抜きをしてしまい、タンク側板を陥没させてしまった事例もあります。

山本 : 生産設備ではありませんが、研究用の 5 リットルぐらいのフラスコを真空にして破壊したのを見ました。ガラス機器でも容量が小さいものはそれなりに真空に耐えると思いますが、5 リットルぐらいのフラスコでは容積に対して板厚が薄く、真空に耐えません。真空での破壊は、破片がフラスコの中心向きに飛ぶと思いますが、顔に向かって飛ぶこともあると思いますので危険な作業でした。実験をする前にメーカーに耐真空性を確認すれば良かったと思います。ベテランの技術者による作業でしたが、うっかりミスで発生するので真空には注意が必要です。

竹内 : 昔のテレビのブラウン管は真空でしたが、古い廃棄予定のテレビにたまたま固い物が当たり破損したのですが、その時は破片が中に引き込まれ飛散しませんでした。ところで、Beacon の貨車が潰れた写真を検索したところ、興味深いネット記事を見つけました。同じ事故の写真の他に、動画が含まれています。写真の貨車と同様のタンク貨車の上にコンクリートのブロック(200 ポンド)を高所から落下させてタンクがいかにか頑丈かを示した後、タンク内部を真空ポンプで引いて潰れる様子を見せています。タンク貨車は脱線なども想定してかなり頑丈に設計されているのに、真空には耐えられなかったのです。

<https://industrialscenery.blogspot.com/2019/09/that-sucks-tank-car-vacuum-implosion.html>

三平 : バッチ方式の PVC の製造では VC モノマーを水中に懸濁して重合を進めますが、水中に酸素があると反応を阻害し、製品品質も劣化させます。用役部門から純水をタンクに受け入れて、気相部は窒素シールをして使っていました。ある時窒素シール用ブリーザー弁の元弁が閉止された状態で、反応器へ水を仕込んだために純水タンクの上部をひどく凹ませました。バッチ式では操作時間を極力短縮するために、出来るだけ大型のポンプを使って仕込みや払い出しを行うので、純水タンクの液面が急速に低下して気相部に真空が掛かったのです。設備の短期停止を利用して窒素ラインの工事をした後、弁の開閉点検を怠ったために起きました。タンクを満水にしてポンプで加圧して形状を戻しましたが、細部には一見して分かる傷が残りました。

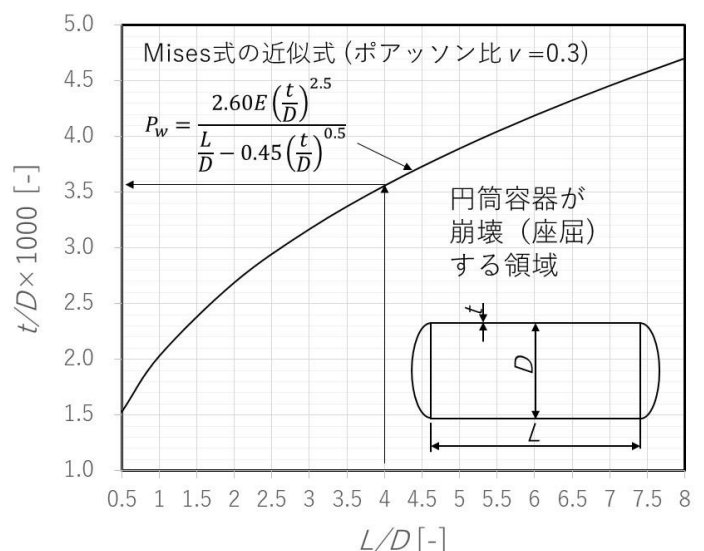
牛山 : 入社してすぐの新人の頃、常時は使用していなかった 700 m³ の予備コーンルーフタンクから原料油をプラントにポンプで送液してしばらくした時、タンク上部が凹んでいると連絡を受け現場へいくと、確かに見事に上部側板が凹んでいました。調べて見ると、屋根についていた無弁通気管の金網に鳥の巣があり閉塞していました。常圧窒素の封入はしていましたが、抜き出し流量が多く間に合わなかったようです。若干の圧をタンクにかけることで、凹みは元に戻りましたが、恒久的には無弁通気管の他にブリーザー弁を付け、封入窒素量も増やすことで対応しました。

司会 : 真空装置の設計における真空耐性の要領やヒューマンエラーを含めた安全基準に関わる知見をお持ちであればお話しください。

山本 : 2007 年 2 月の Beacon でも真空(減圧)事故を話題にしていますが、その時の安全談話室では、外圧を受ける円筒容器の座屈について Mises 式の近似式(図中)を紹介しています。今回も、その式を用いて円筒容器内をフルバキュームにしたときに崩壊(座屈)する限界の板厚みを計算して図にしてみました。図がそうですが、外圧を $P_w = 0.1013 \times 10^6 \text{ Pa} (=760 \text{ mmHg})$ として、ヤング率は鋼材で $E = 205 \times 10^9 \text{ Pa}$ で計算しています。ここで、 D : 円筒容器の直径[m]、 L : 円筒容器の直胴部長[m]、 t : 円筒容器の厚み[m]です。

この図を用いた計算例を示すと次のようになります。 $D=1.5\text{m}$ 、 $L=6.0\text{m}$ ($L/D=4$) の

とき、図 1 より、 $t/D \times 1000 = 3.6$ なので、円筒容器の板厚が $t=0.0054\text{m}=5.4\text{mm}$ のように得られます。これは、真空



真空度が-760mmHg (= -0.1013MPaG)における円筒容器の強度

度-760mmHg のとき、円筒容器の厚みが 5.4mm 以下で崩壊(座屈)の可能性があることを意味します。現状のタンクで、真空への耐性を推定するのに便利な式だと思います。(参考文献:本間康之,"外圧を受ける円筒の胴板座屈について",造船協会論文集 vol117(1965),p195-p204)

牛山 :法による圧力容器の外圧を受ける円筒胴の計算式と提示式は同じものですか。

林 :提示式は外圧を真空度-760[mm Hg]に設定した近似式ですので、圧力容器構造規格にある種々の外圧に適用する式とは異なります。Mises 理論は弾性領域から降伏領域への移行、すなわち弾塑性変形領域を考慮し、降伏の発生には剪断ひずみの蓄積が必要とする剪断ひずみエネルギー説に基づいています。一般的に圧力容器の設計では、外圧により発生する剪断応力が材料の強度を超えないように設計する最大剪断応力説を採用しています。剪断応力が一定の条件を超えた瞬間に降伏が発生すると考えるので Mises の条件より単純で、設計の際に適用がしやすいのです。延性、脆性、引張強さの材質、ねじりや曲げ、圧縮、せん断の応力、降伏による塑性変形の可否などの設計条件で、算定手法を選択します。圧力容器構造規格(設計便覧)の炭素鋼の同条件での計算では 5.5mm を得ましたので、ご提示の近似式は実用に有効と思います。

司会 :ハザードレビューの実施が求められていますが、考慮すべき視点について、真空発生の可能な原因、プロセスでの真空発生が崩壊や爆発を招くリスク、可燃性物質が関与する際の真空と発火・爆発のリスク、真空による材料の予期せぬ沸騰や発泡、容器や配管の蒸気洗浄や排液作業時の真空のリスク、真空による逆流や材料の移動に伴うリスク、プロセス内の真空漏れ(空気の浸入)などが紹介されています。その他にお気づきの視点や安全対策上の注意点などご意見がありましたらお願いします。

竹内 :Beacon ではベントが塞がれた状態でタンクの排液をすると負圧になるとの指摘ですが、液体のみでなく粉粒体でも急激な拔出で上の気相部が負圧に成り得るので、粉粒体のサイロやタンクでもブリーザー弁の設置などの対策が必要です。また、粉じん爆発の危険がある場合は、ブリーザー弁を通して窒素が入るような工夫も求められることがあります。

安喜 :生産現場では液面等の目で見えることを確認する意識は高いですが、目に見えない気相部(真空=負圧)を確認する意識はどうしても低くなってしまいます。事前にハザードレビューをして必要な設備(圧力計、流量計等)や手順(点検等)が重要と思います。

山本 :気相部が可燃性雰囲気となるような反応缶などの真空ブレークですが、空気ではなく不活性ガスを用いてブレークしないと大変危険です。自分の経験ですが、真空下でポリエステルを製造していた反応缶で、途中で攪拌機を止めて、空気で真空をブレークしました。次に、マンホールを開けて反応途中のポリエステルをサンプリングしました。そして、マンホールを閉めて真空に引きながら攪拌機を起動したとたんに関係缶内で発火をさせたことがあります。着火源は反応缶のポリエステルと攪拌翼との摩擦で発生した静電気の放電と考えています。ゴォーという音がして、サイトグラスから見た反応缶内が急に明るくなりました。真空だったためか、発火はしばむように収まりました。真空をブレークするには不活性ガスを使用することと、製造中に反応缶のマンホールを開けて操作するような作業はしてはいけないと思います。

牛山 :私にも似たような経験があります。高沸点可燃性物質のバッチ式の減圧蒸留塔でしたが、真空ブレークを当初空気でしていました。運転開始から1年くらい経過した頃、蒸留開始時に突然塔内で大きな異音が出たため、直ちに停止後塔内点検を行ったところ、トレイがすべて下部に変形して脱落し、塔内部が黒変していました。調査の結果、可燃物蒸気が酸素と反応してできた過酸化物が次第に蓄積し、爆発したものと判明しました。その後窒素による真空ブレークに改め、以後事故は起こらなくなりました。

安喜 :可燃性物質の真空と発火・爆発のリスクについてですが、安全工学協会出版の「ガスおよび蒸気の爆発限界(柳生昭三著)」によると減圧下においては、いずれの物質も爆発下限界は上昇し、上限界は低下する傾向を示して爆発範囲は狭くなり、100 mm Hg(13.3 kPa)以下のところで火炎が伝搬しなくなるとの記載が有ります。例を見ると水素で 50 mm Hg(6.6 kPa)、メタンで 30 mm Hg(4 kPa)、メチルアルコールで 26 mm Hg(3.5 kPa)と 100 mm Hg よりも低いものもありますが運転時の参考にできるのではないのでしょうか。

山本 :真空機器へ液体を定量的に供給するときによく失敗するのが、ポンプの吐出側に背圧弁を設置しないことです。プランジャーポンプやダイヤフラムポンプでは吐出側のボールチャッキで逆流を防いでいますが、吐出方向へは液が自由に流れます。したがって、それらのポンプでは機器が真空だと液が一気に機器へ流れ込みます。それを

防ぐには、ポンプの吐出側へ背圧弁を設置して、真空に負けないようにポンプに逆圧を掛ける必要があります。失敗の経験がない人がたまに起こすトラブルですので注意が必要です。背圧弁は逆止弁と異なり、ばねで押しつけ逆圧をかけ、ばね力以上の吐出圧で吐出しされる構造です。

竹内 : 昨年11月末に丸善から発行された「化学プロセスの事故から学ぶリスクに基づくプロセス安全の管理ポイント」の事故事例に無水アンモニアの放出事が紹介されています。冷凍装置の霜取りモードで装置が停止してしまった後、通常運転を開始したため霜取りモードの際に配管中に詰まっていたアンモニア蒸気が、局所的に冷たいアンモニア液に囲まれる領域ができました。その領域で蒸気が一気に凝縮した衝撃で、配管が破損してアンモニアが放出した事故です。全体的な真空ではなく局所的な真空の形成で設備が破壊された珍しい事故です。

司会 : 「知っていますか」、「あなたにできること」に記載されている事項の他、さらに追加すべき事項などあればお話しください。

塩谷 : 負圧や加圧からタンクの変形を守るために、コーンルーフタンクに加圧側シールポットと負圧側シールポットを組み合わせたものを設置していました。タンクが加圧され大気圧+加圧側シール深さ以上となると、タンク内のガスは大気側に放出されます。タンクが負圧となり、大気圧-負圧側シール深さ以下となると、まず低圧窒素が導入され、それでも負圧が進むと大気が導入されるような構造となっていました。シンプルな構造ですがシール深さが正しく維持されていないと正しく機能しないため、現場巡回時にはシールポットに水が注水されオーバーフローしていることをチェックしていました。また、シール水にタンク内の有機物が溶け込んで、藻などが繁殖し配管を閉塞することがあるのでこの点も注意してチェックしていました。

山岡 : 真空=負圧による貯槽や容器のへこみなどの損傷は、事故に至らないものを含めると多くの事例が見られます。これらはほとんどが負圧の危険性の認知不足、運転操作上の不注意、確認ミスなどの人的要因で起こっています。常圧で使用する貯槽や容器は負圧に弱く、とくに円筒の形状のものはわずかな負圧でもへこんだりして損傷し易いです。負圧になる要因の代表的な例が今月号の本文に記載されていますので、これを参考にして、運転操作や作業時に負圧状態にならないような方策を施し、十分確認した上で操作や作業をすることが肝要です。

頼 : 真空はエジェクターや真空ポンプ以外でも発生する事に注意が必要です。遠心分離機で分離結晶をエタノール洗浄していた時に起きた爆発事故を紹介します。前工程で出来た物質をエタノール水溶液中で晶析し、遠心分離機で分離している際に遠心分離機が爆発、分離機建屋も崩壊しました。たまたま建屋の中に人が居なかったのが人的災害はありませんでした。遠心分離機メーカーは過去の知見より分離機に窒素投入用のノズルを設置していましたが、この工場では分離機内への空気吸引のリスクを認識できず、分離された結晶を高濃度のエタノールでリンスしていました。着火源は特定できませんでしたが(洗浄ノズルとローターの接触か樹脂製のケーキ排出シュートでの静電気か等)、分離機内に吸引された空気とエタノールの爆発混合気が出る事は事故後、全ての遠心分離機で確認されています。機器メーカーは事故に繋がる危険性の知見を沢山持っていますが、利用する側が興味を示さないと(事故前も他の遠心分離機/メタノール洗浄無し、に窒素は投入していない)メーカーの知見が活かされない事に注意をする必要がある事例でもあります。

司会 : 今回の事例に関連して、その他にご意見があればお願いします。

頼 : 最近他の業種で品質問題の不祥事が多発しており、日本の物造りの危機が叫ばれています。各社に共通するのは納期・コストと要求品質の狭間で悩む従業員の姿と私には思えました。今回のテーマについても冒頭の事例紹介で“妥協は事故の源”と述べましたが、品質問題と根っ子は一緒と思います。生産現場では自らの安全確保、生産量確保、品質確保、コスト削減等色々な制約の中で、設備の健全性確保に努めています。運転員にとっては労災撲滅と保安事故防止が最優先課題で、続いて生産&品質確保と続き、設備事故防止に眼を向ける余裕が少なくなっているのではと危惧しております。一方で現場経験の豊富な管理職が激減しており、こういった運転員の悩みを受け止め、運転員教育する余裕がなくなり、折角の設備部門のアドバイスが活かしきれないのが実情だと思います。皆さんの中で良い知恵があれば教えてください。

竹内 : 私もなかなか難しい問題だと思いますが、運転管理職に余裕がないとなると、これは経営者の問題だと思います。安全や品質に対して必要なリソースを割り当てることができていない証拠です。経営者が達成できないほど過酷なノルマを課したため従業員が不法行為を行ったというニュースなども、その類だと思います。真空からは少し

逸れた話題ですが、プロセス安全においては重要な問題で、「安全文化の醸成はトップダウンでなければならない」ことを思い起こすのに良い話題だと思います。安全文化の話題は、そのうち Beacon でも取り上げられるのではないのでしょうか。

頼 : 経営者の問題になりますが、事故が起きた時の原因探求を製造現場内に限らず広く関係先まで(本社の事業部から、原材料調達、商品開発、設備技術、品質保証まで含め)広げて反省すれば問題点は浮き上がって来ると思います。現実には余程大きな事故でない限り、製造現場内での原因解析に絞られていると思います。人間は手を抜きたがるもので手を抜く誘惑に勝てなかった結果だと思います。あの T 社でさえ止められなかった問題として“設計で決められた事をシッカリ守り、守らせる”為に運転員に寄った経営をお願いしたいです。経営者が指導するのは“社員が人間としての道を踏み外さない事”。その為には現場マンの悩みを代弁でき、一緒に考える事が出来る現場管理職が必要ですが、現状は上の意向を部下に押し付けるタイプの管理職も少なくない様です。(現場の実態を良く知らないので関連先に反論できないのかな?? 今回の品質問題で T 社会長の反省に”主権を現場に戻したい“と言う言葉が有りました。安全問題も根は一緒と思います)開発・研究・設計部門に専門技術者を配置し、現場実務はベテラン運転員に任せ、現場管理職の育成を怠ってきたつけが、部門によって出てきているのかもしれませんが。事故の最後の引き金を引くのは運転員です。真空と言うシンプルな事象でも、永年運転をしてきた運転員には今までのやり方で問題ないという意識が定着しています。現場管理職教育を徹底しその人が、新鮮な目線で現場に内在するリスクを洗い出し、事業部門を含めた関係部門との調整を図った上で、運転員を教育することが必要と今月の Beacom を読んで感じました。

司会 : 読者には、CCPS(Center for Chemical Process Safety)の RBPS(Risk Based Process Safety)がその対応を策定する一助になる筈と紹介しておきたいと思います。

さて、ここではバキュームを真空または負圧として使っていますが、バキュームという言葉の訳として、真空、負圧、減圧など使い分けはできていないようです。一般には負圧が使われているように思われますが、蒸留の場合には、減圧蒸留と言っています。高真空はフルバキューム(FV)として分けているように思われます。また絶対真空は実際に作成することは困難なものです。

真空を伴うプロセスやプロセスの中で起こり得る真空のリスクについて改めてその危険性について認識させられました。本日はみなさまの貴重なご意見やご経験をお話戴きありがとうございました。

キーワード: 遠心分離機、屋外タンク、外圧円筒胴、可燃性物質&真空プロセス、貨車、ガラス機器、高真空、コーンルーフタンク、真空設計、真空装置、真空耐性、真空度、真空ブレーク、水蒸気洗浄、弾塑性変形、背圧弁、爆発限界、負圧、減圧、ブリーザー弁、Mises 式

【談話室メンバー】

安喜 稔、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、