

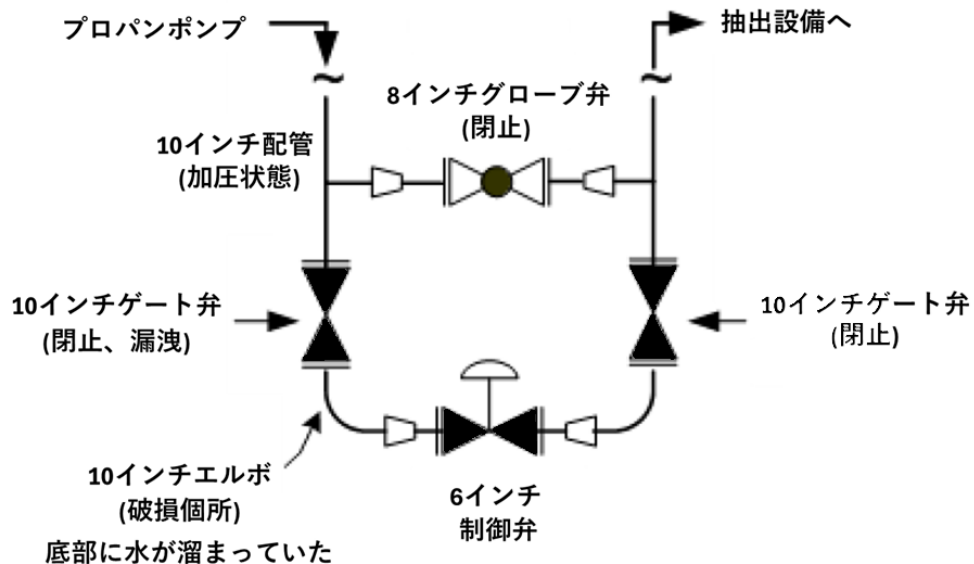
|                                                                       |                                                                                                                                                                                                                       |                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| PSB<br>(Process Safety Beacon)<br><b>2025 年 8 月号</b><br><b>の内容に対応</b> | <div style="text-align: center;"> <b>SCE・Net の</b><br/> <b>安全談話室 (No.230)</b> </div> <div style="text-align: center;"> <a href="https://sce-net.jp/main/group/anzen/">https://sce-net.jp/main/group/anzen/</a> </div> | 化学工学会<br>SCE・Net<br><b>安全研究会作成</b><br>(編集担当: 今出 善久) |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|

膨張は高温でも低温でも起こり得る！  
(PSB 翻訳担当: 牛山 啓)

司会： 今月号では、プロセス配管内の流体の凍結や熱による膨張によって配管が破損し、流体（プロパン、イソブテン）が漏洩した結果、爆発に至り死傷者を出した2件の事故が報告されています。それぞれの事例について状況や経緯などの補足がありましたらお願いします。

竹内： 2019年の事故は2024年5月と7月の Beacon でも取り上げられた事故です。米国テキサス州の KMCO 社のプラントで発生した事故で、KMCO 社の従業員1名が死亡、2名が重症、その他協力会社を含めて少なくとも28名が負傷したと報告されています。この事故で KMCO 社は連邦破産法の適用を申請し、施設は Altivia 社に売却されたとのことです。もう一つの2007年の事故ですが、これは米国テキサス州にある Valero 社の McKee 製油所で発生した事故です。大量の液化プロパンが漏洩して大規模な火災になり、従業員3名と協力会社の1名が負傷したとのことです。設備の直接的な損失は5,000万ドルを超えると報告されています。

KMCO 社の事故は2024年5月の Beacon では、破損したストレナの材質が配管仕様に合っていなかったことが、2024年7月号には図面に反映されていなかった為に PHA で検討対象にされなかったことが問題として挙げられていました。今回は配管系が締め切られた状態で直射日光が当たったことにより封入された液体イソブテンが熱膨張してストレナが破損したことを題材にしています。McKee 製油所の事故は15年間もゲート弁だけでプロセスと隔離されていた配管部分に水が入り込んで、外気温の低下により凍結膨張して配管が破損したことが事故の始まりでした。



McKee製油所の事故発生箇所

林： 今回の Beacon では液封と凍結に焦点が当てられていますが、CSB 報告書を調べたところ、KMCO 社は事故後、安全対策の不備や訓練不足が指摘され、Altivia 社はその取得後に事故防止策と安全文化の構築など、以下のような安全対策の強化に取り組んでいます。

- ① 設備の安全計装や緊急遮断のシステムの再設計と自動化、および腐食劣化した配管やバルブの全面交換
- ② HAZOP、LOPA を導入し OSHA (米国労働安全衛生局) PSM (プロセス安全管理) 規制に準拠した PSM 徹底
- ③ 従業員教育と安全文化の醸成で作業中止権限を全従業員に付与し訓練プログラムを刷新して訓練の徹底
- ④ 可燃性ガス検知器の増設と配置最適化と遠隔監視システム (SCADA) によるガス検知・監視システムの強化
- ⑤ 地域社会との連携で事故発生時のコミュニケーションと地元消防署や地域住民への情報提供と避難訓練実施

また Valero 社のプロパン事故では、以下の対策が CSB 報告書に記載されています。

- ① 配管の全面点検と交換
- ② ガス検知システムの強化
- ③ 緊急遮断弁の自動化と即時作動の整備
- ④ 作業員への安全教育と避難訓練の強化
- ⑤ 凍結関連の教訓と対策、特に凍結対策の教訓では、

- 1) 凍結リスクのあるデッドレッグの管理で、ヒーターや保温材による凍結防止、低温時の巡回点検と温度監視の強化、
  - 2) 使用停止時の変更管理(MOC)の徹底
  - 3) 設備設計の見直しで、高圧 LPG 配管の凍結リスク評価と凍結による破損を想定した設計(冗長性・隔離弁の配置)
- など大変参考になる対応策が記載されています。

司会： 今回の事例を通じての感想やご指摘などありましたらお聞かせください。

今出： McKee 製油所の液化プロパンの漏洩事故では液化プロパン中の水分の凍結が原因になっています。イメージがつかみにくいのですが、どのようなメカニズムだったのでしょうか。

竹内： 液化プロパンは天然資源であって水分を含んでいます。Beacon の図2を見ると破損した箇所はコントロール弁が最も低い位置にあり両サイドのゲート弁は閉じています。しかし、ゲート弁は完全に遮断することはできないので僅かな隙間があったと考えます。この様に殆ど流れがない状態ではプロパン中の水分は比重差により下に溜まっています。ゲート弁上部に溜まった水分がゲート弁の隙間から少しずつゲート弁下部に入っていくと考えられます。おそらく両サイドのゲート弁を閉じたときにはプロパンリッチな状態であったが、15年という長い年月の間に少しずつ水と入れ替わっていったものだと思います。

牛山： 何度もこの図を見ていながら今まで気にしていなかったのですが、この配管は上部から降りてきて最低部に制御弁が付いていますが、最低部にドレイン弁が付いていないのは何故だろうかと思いました。最低部は液だまりが出来るので、通常であればドレイン抜きの弁がついています。今回もし、ドレイン弁があれば前のゲート弁を閉めドレインを抜き出せるので、長期間に水が溜まっても下部から抜き出せ、事故が起らなかった可能性もあったと思います。

司会： 水の凍結による事故に関しての経験やご知見がありましたらご紹介ください。

竹内： 2010年の11月に米国ニューヨーク州バッファローのデュボンの工場で発生したタンクの爆発事故は、タンクとタンクの間を連結している配管の U 字トラップが凍結により破損していたことにより、可燃性蒸気が溶接作業を行おうとしていたタンクの空間に充満し、溶接の火により爆発したと記憶しています。(Beacon 2012年8月号) また、水の凍結ではありませんが、低温が招いた事故としては、2014年11月にデュボン社ラポルテのプラントで発生したメチルメルカプタン漏洩事故も低温による水和物の発生が引き金を引いた事故があります。(Beacon 2016年1月号) また、1986年1月のスペースシャトル・チャレンジャーの事故は外気温が低く O リングの使用範囲から外れていたにも拘わらず、打ち上げを強行したことで発生した事故でした。(Beacon 2018年3月号) 高温の場合はエネルギーが高くなるので警戒されることが多いですが、低温でも色々な事故の引き金を引いていることには注意が必要だと思います。

澁谷： 50年前に私が実際に経験したことです。この年の冬は猛烈に寒かったのですが、更に寒波の襲来が予想されるので工場全体に対策をとるようにとの指示が出されました。分担を決めてプラント内の機器の水抜きを指示しました。一夜明けた翌日は気温は低かったですが、晴天でした。昼頃になると他のプラント内に水漏れしだした箇所が見つかり出しました。吾がプラントは問題ないと思っていましたが、点検したら、間欠運転する堅型エアコンプレッサーのジャケットにクラックが見つかりました。水抜き用のコックは開いていたのですが、錆で詰まっていた水が抜けきれていなかった為でした。コックを開くだけでなく、水が抜けるのを確認していなかった為でした。水抜きコックを開いたら、水は抜けるものと思い込む常識を疑うことを学びました。

林： 勤務していた事業所で、気温3℃で凍結対策を実施するよう気象警報が発令されていました。0℃以上でも風が吹くと気化熱による冷却や風による熱伝導の促進などで凍結の可能性が生じることにあります。また作業用の堅型空気圧縮機で普段使用しておらず、シリンダー冷却用のジャケットの水抜きができてなく、冬に凍結して鋳物製ジャケットを破損させたトラブルを経験しています。普段使われていない設備は、凍結対策として水抜きをしておくか、通水しサイトグラスなどで流水を確認するかなど対策が抜けがちです。

三平： 計装空気の製造用圧縮機の後段に設置されていたドレイン抜き容器の排出トラップで、冬場に氷結が起きて排出が出来ず、ドレインが計装空気に混入しかけたトラブルがありました。PVC 単独の製造工場、窒素はラインで購入した低圧のものを圧縮し、計装空気も工場内で圧縮して作っていました。比較的温暖な地域なので、目立った氷結トラブルは起きていませんでしたが、ある時異常な冷え込みがあってこのトラブルが起きました。夜勤のオペレータが朝方のパトロールで、トラップからドレインが排出されていないのに気付いて直ぐ交替作業長に連絡しました。丁度朝に出勤してきた日勤の保全担当者とトラップを外し、解体修復させて事なきを得ました。ドレイン抜き容器の後段に圧縮空気のドライヤーが2基あり、使用中のものにドレインが流入した可能性があったので、直ぐに切り替えを行って後段の計装空気タンクへのドレインの流入を防ぎました。

飯濱： 事故という程の出来事ではないのですが、外気温がマイナス5℃以下に下がった夜の翌朝にスプリンクラーヘッドから工場の数十箇所で漏水して、従業員総出で拭き掃除をしたことがありました。ケガ人も設備損傷も無かったのは良いのですが、労働時間はロスしました。私が勤務していた会社の技術基準では、スプリンクラーはヘッド直前まで水を満たしておく“湿式”を標準としていたので、このような出来事になってしまいました。寒冷地の工場では“乾式”スプリンクラーにする方が、このような出来事を避けられるのですが、それぞれ一長一短があるので選択に悩むところです。

竹内： 乾式のスプリンクラーを採用した経験があります。宇都宮のプラントで初めて自動倉庫を導入することになった時、可燃性の固体を保管するためにスプリンクラーの設置が必要でした。自動倉庫はスタッカークレーンが棚の間を走るタイプのもので、かなりの高さの棚に荷を出し入れできるものでした。従って、人のアクセスは厳しく制限せざるを得ませんでした。宇都宮は冬場は氷点下になることが多いので、湿式のスプリンクラーでは凍結することが目に見えていましたので、消防と相談して乾式のスプリンクラーを採用しました。

司会： 配管の温度上昇による類似の事故についての経験やご知見がありましたらご紹介ください。

竹内： 今回の Beacon で紹介された事故は、ストレーナの材質が配管スペックに合致していなかったところへ、ポンプの前後のバルブが締め切られていた状態でポンプを回し続けたことで、運動エネルギーが熱に変換されたものでした。これと類似した事故が2013年8月号の Beacon で紹介されています。和訳のタイトルは「水ポンプでも爆発するか?」です。その事故は吸込側と吐出側の両方のバルブが閉じられたまま水のポンプを回し続けたことで温度が上昇して破損したのですが、液体の温度が沸点を超えていたためにプレビー(沸騰液体膨張蒸気爆発)が発生した事例です。今回の Beacon の事例は放出されたイソブテン蒸気に着火して爆発になったようですが、水でも爆発することを考えると液体配管が締め切られると危険であることを実感します。

司会： 今回の凍結による事故では、プロセス配管ラインに、使用されていない配管ラインが繋がっていたこと、またバルブが漏れていたことが原因となっています。プロセスで未使用の配管ラインや機器をどのように管理されていたか、またすべきかについてご経験や知見がありましたらお聞かせ下さい。

藤村： 弊社の場合、変更管理(MOC)のチェックリストに、「熱膨張」や「不要設備の撤去、または管理」といった項目があります。MOC 会議では、このチェックリストを用いて、使用しなくなる機器や配管にどんなリスクがあるか、どのタイミングで撤去するのか、撤去しない場合はどんな管理が必要か、といったことが検討され、対策が決定されます。MOC 会議は、全ての MOC に対して開催が義務付けられています。会議参加メンバーは、MOC コーディネーターが MOC の内容に応じて判断し、招集します。リスクの小さな変更の場合は関係部署のみ、大きな変更の場合は複数の部署が招集対象になります。実はこのメンバー選定や(HAZOP リーダーにも似た)潜在リスクを引き出す司会進行が重要なため、製造、設備、安全を熟知したマネージャークラスが MOC コーディネーターに任命されます。会議の結果は議事録ですべてのマネージャーに共有するとともに、対策等のアクションプランは安全データベースシステムで進捗管理されます。

木村： I 社H製油所では、2002年4月15日に重油直接脱硫装置高压セクション付近で火災が発生しましたが、その事故原因は脱硫装置バイパス配管の腐食による水素ガスの漏えいであるとしています。同事故に関連して原子力安全・保安院は翌年3月7日、前述の事業所の重油直接脱硫装置火災事故に関連して、事故があった装置と同タイプの重油直接脱硫装置を設置している全ての事業者から、「行き止まり配管の腐食に異常はない」との報告を受けていること、また、同製油所に対し実施した立入検査で、同製油所が重油火災事故の再発防止策を適切に実施し、高压ガス保安法の「認定完成・保安検査実施者」の基準に適合していることを確認したと発表しています。また、原子力安全・保安院では再発防止のため、今後事故発生箇所と同じ構造になっている行き止まり配管を保安検査の肉厚測定の対象にすることを決定し、都道府県高压ガス担当部長、重油直接脱硫装置を所有する認定保安検査実施者、石油連盟に通知する方針を示しました。

竹内： 短期的に使用が見込まれない設備は、仕切り板などでプロセスからきちんと隔離する必要があります。また使う見込みがない場合は撤去します。不要な設備を撤去することは資産償却の観点からも大切です。将来、使う可能性の高い高価な設備については、モスボーリングと言って、プロセスから外してクリーニングし、劣化しない様に梱包して保管する、といった正式なプロセスを踏むことが求められていました。この時、その機器がどのような使われ方をしていたのか、摩耗や劣化の状態などのデータを採って次回使用する際の判断基準となる記録も残さなければなりませんでした。

木村： 最近では多くの事業所では使わなくなった設備の隔離や撤去すること徹底していると思いますし、それを推奨する記事も見られます\*）。

\*）使わなくなった設備の廃棄も適切に【設備老朽化の心得と管理 第6回】

<https://chematels.com/article/cl7b5nvco962r0b16z26dcyb6>

竹内： エンジニアリング会社に勤務していたころ、多品種少量生産のプラントの設計を担当していたことがあります。請負生産をしている設備では顧客の要望に応じて様々な機能を追加することが少なくありません。そのようなプラントでは、何時使うかわからない配管や設備をそのままにしているケースもよく見かけました。そのようなバッチ式反応器はノズルがたくさん付いていましたので「花魁のかんざし」と呼ばれていました。

司会： 一方温度上昇による事故は、本来の規格でない鑄鉄製のストレーナを使用や取り付け方をしていたことが直接の原因となっています。このような材料、使用条件、取り付け方法などの間違いを防ぐための手順や取組についてのご経験や知見がありましたらお聞かせ下さい。

三平： この鑄鉄製のストレーナは最初に建設された設備に取り付けられ、その後プラントオーナーが代わった後も是正されることなく使われていました。このような配管内の小型機器では誤ったものが取り付けられると、長期間に渡って気付かれることなく、使用されてしまうのでしょう。やはり最初に設置する時に絶対に間違わないようにする必要があります。日本では配管スペックやバルブスペックなどのエンジニアリングスタンダードが、各化学会社で確立さ

れていて、新設する設備の設計、施工の段階で、それらをしっかり適用しているので、このような規格外の配管部品が取り付けられる可能性はほとんどないと思います。仮に仕様の間違ったものが取り付けられた場合には、オペレータが気付くのは難しいのではないのでしょうか。彼らはオペレーションに集中していて、配管内にある個々の小型機器の細かい仕様に注意を払う余裕がないと思われ、それだけに最初が肝心なのです。

牛山： 消防法（危険物の規制に関する政令）では、危険物の配管材料として規定される物の中に鋳鉄配管は含まれませんので、鋳鉄製の配管材は日本では認められないことになります。実際、鋳鉄は衝撃に弱いので、水配管に使用される鋳鉄製弁を開める際、初心者は手加減が分らず、閉めすぎて弁体を割ってしまうことがよくありました。今回事故例のストレーナは、鋳鉄製の本体にステンレスフランジを溶接して取り付けていましたが、ストレーナ本体の強度をカバーできず、肝心の本体鋳鉄部分が破損してしまいました。

司会： 最後に全体を通しての補足事項や参考になることなどありましたらお願いします。

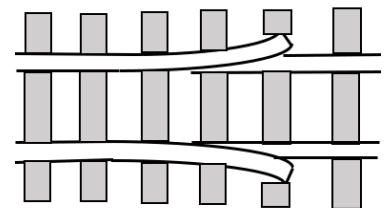
牛山： 今回の事故事例では水の凍結時に大きな圧力がかかることが問題となりましたが、一般の有機物の場合は逆に融解時に膨張するため圧力がかかることを考慮しておく必要があります。凝固点の高い液体を取り扱う場合、2重管として外管に加熱流体を通し加熱して使用していましたが、プロセスの停止時、配管から液体を除去するのが難しかったため、そのまま冷却して固化し、再開時に加熱溶解するようにしたのですが、ある時、間違えて配管両端の弁を閉めてしまいました。その弁が若干洩れていたため、液体が固化した際、配管内に過剰の液体が入り込み、再開加熱時に内圧が上がり、一番強度が弱いフランジとの配管溶接部が破損しました。運転手順にも問題あり、その修正を行いました。凝固点の高い液体配管は停止時、片側を開放端としておくか、ベントなど開放部を設ける必要があります。

竹内： そう言えば、6月号の Beacon ではスプリングハンガーが取り上げられていました。その時のスプリングハンガーは加熱炉のチューブが膨張するのに対応するための設備だったと思います。スプリングハンガーを使用した経験はありませんが、エンジニアリング会社でプロセス設計を行っていたころ、配管の熱膨張を意識してエキスパンションジョイントを採用したことは何度もありました。

安喜： 近年、地球温暖化による気候の変動が大きくなっています。特に偏西風の蛇行の影響を受けて普段は暖かい地域に寒気が流れ込んだり、逆に寒い地域に暖かい空気が流れ込むことより、猛暑や寒波などこれまでに経験したことのない異常気象に見舞われるおそれがあります。特に危険・有害性のある物質が流れる配管については気候変動の影響を考慮してリスクの見直しが必要だと思います。

竹内： ところで、飯濱さんは鉄道が趣味だったと思います。夏、直射日光が当たるとレールはかなり伸びると思いますがその対策はどのようにしているか、ご存じですか。

飯濱： 夏に気温が上がり、さらに直射日光が当たるとレールの温度はおそらく50℃以上になり、鋼材の線膨張により相当伸びます。近年には新幹線や大都市圏の主要路線ではロングレール（定義：1本が200m以上）に置き換わっている。レールの線膨張問題を解決するために、レールの接続方法は添付図のような特殊な構造にしてあり、レールの伸縮を外側に逃がしてある部分で吸収するようにしています。特に北海道地方は寒冷地であるため、夏冬の温度差が大きく、継ぎ目問題だけでなく、線路や路盤の保守がとても大変だと思います。また、ロングレール化される前には、レールは一本25mの定尺を使用していて、線膨張を吸収するため継ぎ目にはスキマを設けていました。列車に乗っていて「ガタン・ゴトン」という音が聞こえるのはその為でした。現在でもローカル線に乗るとその音が聞こえます。



ロングレール継ぎ目の模式図

司会： 今回は、低温でも高温でも膨張が起こることをテーマに、水の凍結による配管の破損や高温による流体の膨張による配管系の破損事故などについてさまざまなご経験をお話しいただきました。また不要配管／設備の管理方法も大変参考になりました。さらに、気候変動によって今まで経験したことのない熱暑、寒波、大雨、洪水等の極端な気象現象が起こることが考えられ、プロセスへのリスクの見直しをする必要性があることのご指摘もあり、今後の課題となっていると思われます。ありがとうございました。

キーワード 凍結、熱膨張、ストレーナ、U字トラップ、水抜き、ドレイン、スプリンクラー、プレビー、不要設備、変更管理、鋳鉄製配管材、高凝固点、エキスパンションジョイント、気候変動

#### 【談話室メンバー】

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、藤村雅也、松井 悦郎、三平 忠宏、山岡 龍介、山本 一己、頼 昭一郎