

PSB (Process Safety Beacon) 2024年4月号 の内容に対応	SCE・Net の 安全談話室 (No.214) 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: 塩谷 寛)
--	--	---

避難したら戻るな！
 (PSB 翻訳担当: 今出 善久)

司会 : 今月号の Beacon は、浸漬式フリーザーのメンテナンス作業中に発生した液体窒素のオーバーフローによる窒息死事故を取り上げています。この事故は、適切な保護具を着用しないまま、作業員の救出のために窒素の充滿したフリーザー室内に入り、2名のメンテナンス作業員に加え救出に当たった作業員4名の計6名が窒息死し、その他4名が負傷するという重篤な結果となりました。Beacon ではガス検知とアラームシステムの設置の重要性、酸素欠乏の雰囲気下での救出活動の注意点、異常事態発生時の全従業員への適切な通報の重要性を強調しています。どなたか、この事故事例について、詳細を説明して頂けますか。

塩谷 : この事故は 2021 年 4 月号の Beacon でも取り上げています。その時は事故調査中であり、事故原因等は未確定の段階でした。2023 年 12 月に事故報告書が公表され、改めて液体窒素による酸素欠乏事故への警鐘を行ったものと考えます。この事故は浸漬式フリーザーのメンテナンス作業中に液体窒素の液レベル測定用のバブラーチューブが変形し正確なレベル測定ができなくなったことが発端となり、レベル計の誤指示により液体窒素の供給が継続され、ついに液体窒素がオーバーフローしました。液体窒素の放出により密閉された室内は酸素欠乏雰囲気となり、メンテナンス作業員 2 名が窒息死しました。事故対応にあたった従業員は保護具の着用なしに酸素欠乏雰囲気下のフリーザー室に入り、さらに 4 名が窒息死し、4 名が重傷となって、事故の被害がさらに拡大しました。液体窒素を取扱っているにもかかわらず、このフリーザー室には酸素濃度計が設置されておらず、液体窒素の放出があっても従業員は室内の酸素状態を把握することができない状況にありました。

竹内 : 今回は CSB から最終報告書が出ているので、詳細が明らかになっていますね。事故は Foundation Food Group(以下 FFG)という食品加工会社の事故として報告されていますが、窒素漏洩の原因となったフリーザーは Messer LLC(以下 Messer)という会社からリースされていたもので、設置当初から不具合があり、この日も Messer の従業員が不具合に対応して事故になりました。窒素は OSHA PSM の危険な化学物質として指定されていないので、両社とも PSM に対応する義務がなく、管理体制も不十分だったようです。因みに FFG が既に所有していたアンモニア式の冷凍機設備4基は取扱数量が OSHA PSM の規定数量に達していなかったため、これらも対象外でした。OSHA PSM は危険な化学物質を全て物質名で規定していて、そこに記載がないものは対象外になってしまうので、この点が弱点と思っています。

司会 : この事故について皆様の感想、ご意見等ありましたらお願いします。

竹内 : FFG と Messer は建設当初から共同でこの設備を計画していたとのことですので、両社に責任があるのですが、Messer の方の問題が大きかったように思います。FFG も PSM に則った安全管理をしていれば協力会社の管理をより確実に実施していた可能性もありますし、プロセスハザード分析でメンテナンス中の換気についても考慮できていたかもしれません。この施設では冷凍工程の次が食品からの窒素放出工程で、食品から出た窒素は屋外に放出できる設計になっていたため、冷凍工程の部屋の換気は設計に容易に反映できたと思われます。

頼 : 2022 年 9 月の CSB 中間報告書によると事故を起こしたプロセスは FFG と Messer の共同開発の様ですが、食品取扱専門の FFG には窒素の取扱経験が少ないはずで、竹内さんの御意見の様にフリーザーをリースした Messer 側の責任が重いと思います。プロセスを提供する会社は、機密情報を出さない傾向がありますが、その分だけ責任は取るべきだと思います。問題を起こしたラインは事故の約一月前に運転を開始し、その後もトラブル続きで事故の前日も両社で手直しをしていた様です。毎日のトラブル処理を通じ液体窒素に対する危険意識が両社とも薄れていたのかも知れません。それにしても液体窒素を密閉屋内でオープンな設備で取り扱うとはすごい事をしますね。酸素メーカーを子会社として管理していた者としては想像できません。通常、オーバーフロー配管(もしあれば)は屋外に出します。私は食品会社も酸素会社も経験しましたが、Messer は設計時に何を考えていたのか理解に苦しむ事故です。

塩谷 : この事故では一つのレベル計の不具合により液体窒素の封じ込め喪失につながっています。このフリーザーは液体窒素のレベル制御のほかに高液レベルにて液体窒素の供給を遮断するインターロックシステムが設置されていました。しかし、一つのレベル計の信号をレベル制御用とインターロック用に共用していたため、このレベル計が故障するとレベル制御が不能となるだけでなく、一番重要なインターロックシステムも作動不能となってしまいました。大量の危険性化学物質を取り扱う化学プロセスでは、一つの計器の故障が致命的な事故につながらないように、堅牢に設計する必要があり、日本では重要な計器は二重化することが一般的です。例えば、通常制御用と警報やインターロック用の計器をそれぞれ別に設置することが行われています。もしこの設備においても計装の冗長化設計を行っていれば、液体窒素の放出は防ぐことができたと思われます。

牛山 : このレベル計は Bubbler Tube という形式で、チューブに窒素ガスを流し、液に浸漬したチューブ内の背圧で液面を計測する方式ですが、メンテナンス作業中に何らかの理由でチューブ先端が曲がったため、液化窒素に浸漬できず、液面が無いと判断して液化窒素を流し続けオーバーフローしたようです。この曲がった理由は特定できなかったようですが、液面の調整をしていたメンテナンス作業者が何故この曲がったことに気が付かなかったのか不思議です。また、Messer がフリーザーを設置したのであれば、液体窒素が室内に漏れることがないようにオーバーフロー管を設置して安全な場所までもっていき回収する等の設計を考慮すべきであったと思います。

山本 : 化学物質を扱う設備の安全が機械加工設備の安全と違うのは、化学物質を扱う設備は化学物質そのものが危険であるということです。化学物質を扱う設備の安全の基本は、まず化学物質の危険性を関係者が強く認識することだと思います。今回の Beacon を読むと、事故を起こした食品会社の従業員は窒素の危険性を全く知らなかったような印象を受けます。窒素の危険性は酸素欠乏になることで、2012 年 6 月の Beacon にも掲載されていますが、窒素の危険性を示すために酸素濃度と人体への影響(右図)を再び載せました。Beacon では、94% の窒素濃度(6%酸素濃度)では 2、3 回の呼吸で死に至ると述べています。したがって、この食品会社の管理者は従業員に対して、窒素の危険性を教育して漏洩時の対応などを訓練する機会を社内への窒素導入時や職場の集会時、新人教育時などに設けるべきであったと思います。

人体への酸素欠乏の影響 *	
酸素 %	影響
20.9	正常
19.5	人に対する法定最低濃度(US OSHA)
15 - 19.5	活動能力の減退;人の心臓、肺或いは循環器の問題の初期症状
12 - 15	脈拍数と呼吸回数の増加、判断力低下
10 - 12	一層の脈拍数と呼吸回数の増加、眩暈、判断力衰退、チアノーゼ
8 - 10	精神不全、吐き気、失神、嘔吐、意識喪失
6 - 8	8分で100%致死、6分で50%致死
6未満	40秒以内に昏睡、痙攣、呼吸停止、死亡

* P. Yanisko and D.Kroll, "Use Nitrogen Safely", Chemical Engineering Progress, March 2012, p.44 - 48.

飯濱 : 10%の酸素濃度では 1 回の呼吸で失神してしまいます。この状態ではもはや自力では動くことができず、その場で呼吸を続けやがて死に至ることになります。この酸素濃度域は非常に危険な領域といわれています。

三平 : 今回の事例はフリーザーから液体窒素の予想外な大量漏洩が起き、その建屋が密閉構造だったことから大勢の従業員が窒息するという大変痛ましい事故でした。食品工場は衛生面から建屋は密閉構造にするのが一般的だと思いますが、窒素の漏洩事故の可能性のある建屋には側壁の一部を外す等の開放構造が必要だと思います。外気による機器の汚染の問題が出て来ますが、技術的にクリアして欲しいです。1961 年に出身会社の PVC プラントの重合反応器で、オペレーターが反応器の番号を取り違えて底部の抜き出し弁を開放して、VC モノマーの大量放出による引火爆発事故を起こしました。バッチ式反応設備で現場作業が多かったために、反応器の建屋はスレート葺きの密閉構造で、気化したモノマーガスが外へ放散し難く、滞留したのが根本的な問題でした。事故後に建屋の側壁のスレートを取り払って、屋根だけの構造にし、その後の新設工場でも踏襲しました。

頼 : 最終報告書には記載がありませんが、2022 年 9 月の中間報告書によれば、事故の第一発見者は白煙が出て人が倒れているのを見て上司に通報し、上司は火災報知機を鳴らして建屋内の全員を避難させ、消防に通報しています。その間、一部の関係者が被災者の救助に向かい液体窒素がフリーザーからオーバーフローしているのに気づき、液体窒素送液ポンプを停止したのは発見の約 40 分後でした。その後現場に入ったレスキュー隊員も被災していますが、液体窒素漏洩の怖さに関する Messer からの教育と設計上の配慮が欠けていたと思います。最終報告書にはその事をプロダクトシュアードシッ不足 と指摘していますが、法体系の異なる日本でも特に大切だと思います。レイアウト的にも部屋は建屋の中央で外壁に接していませんので、三平さんのご指摘のとおりプラント設計上の問題だったと思います。

- 司会 : 液体窒素を始めとする低温液化ガスに関係する類似の酸欠事故は日本でも数多く発生しています。類似の事例と再発防止のための安全対策等をご紹介してください。
- 牛山 : 液化窒素による事故は結構日本でも起こっていますが、CSB の報告書には 2008 年～2023 年の間に起こった 7 件の酸欠事故が紹介されています。そのうち 3 件が食品製造業で、普段から安全対策をあまり十分にしていなかったことが伺えます。
- 飯濱 : 私が勤務していた工場でも液体窒素のコールドエバポレーター (CE) がありまして、CE 自体は高圧ガス保安法の規定により定期検査と日常点検を行っていました。さらに会社の安全基準により、建設設計段階からガス検知器の設置を準備して、液体窒素及び窒素ガスに関する従業員への繰り返し教育も実施しておりました。利用状況としては、窒素の大部分はガスとして使用し、一部を液体として使用していたので、両方に対応する作業手順書を英語原本から翻訳して、工場設備の運転開始前に従業員に教育した覚えがあります。
- 牛山 : 窒素は通常比重が 0.96 くらいで空気よりも軽いですが、液化窒素は沸点が -196°C と低温ですので、その蒸気は空気よりも重くなります。今回も洩れたガスは床から 1.2m 位に溜まっていたとありますから、もし、漏れに気が付いてすぐ立ち上がっていたら、あるいは助かったかもという気がします。いずれにしても、このような閉所作業には必ず監視人を付けておく必要があります。
- 頼 : 今回の事故では液体窒素が漏洩した部屋の下部は実質的に 100%に近い窒素雰囲気だったろうと思います。レスキュー隊員が機器の緊急停止ボタンを押した時の床の温度は -73°C でこの温度の窒素ガスの比重は酸素より遥かに重いです。私の 100%の窒素雰囲気下での工事管理経験を紹介します。アンモニアの合成には還元状態の鉄が触媒として使われますが、一度内部に触媒を残した状態で、合成炉内の熱交換器の仕様変更工事をしたことがあります。海外では複数の実績があるとのこと(日本では初めて)で、工事作業員及び立会者は宇宙服のような防護服を着て、複数の空気ラインを付け作業をしてもらいました。当時は部長でしたが、熱交変更工事の許可の判を押した時は手が震えました。人間には皮膚呼吸もあるので、今回の救助活動の様なエアラインマスクでは皮膚呼吸に対する配慮がなく消防隊員が一人入院したのも頷けます。
- 塩谷 : 液体窒素は大気に触れすぎると大気中の酸素(窒素より沸点が高い -183°C)が液面で冷却、液化し、やがて液体窒素が液体酸素に置換されることがあります。あるセラミックス工場でベンゼンを含んだセラミックス基盤を液体窒素で凍結していたところ、突然爆発して 2 名が死亡する事故がありました。原因は冷却に用いた液体窒素中に時間経過とともに空気中の酸素が凝縮して入り込み、ベンゼンなどの有機物と混合して爆発性物質をつくったものと考えられています。液体酸素は淡青色のため、青みがかった液体窒素は絶対に使用しないことが重要です。
- 竹内 : 窒素ではありませんが、冷媒としてアンモニアが使用されていた空調設備での事故が 2009 年 3 月に福岡県で発生しています。制御ソフトの点検でシーケンサーを操作していた際にスイッチを切り替えたことでユニット内にアンモニアガスが噴き出し、ユニット内で他の保守作業をしていた作業員数名が被災し、一名が死亡した事故がありました。LOTO をしっかりと実施していれば起こらなかった事故だと思っています。
- 司会 : この事例のように最初に被災した作業員の救助のために酸欠や毒性ガス雰囲気下にあるエリアに無防備に立ち入り、救助者を含め全員が被災してしまう事故が繰り返し発生しています。このような事故を防ぐために注意しなければならないことは何でしょうか。
- 竹内 : 酸欠の可能性のある作業は作業安全分析(JSA)を行ってから行うべきです。事前に酸欠の可能性を把握して酸素濃度計を設置し、酸素濃度を監視しながら作業を行っていれば、作業者は早期に危険に気付いたでしょうし、室内の酸素濃度が危険なレベルにあることが分かっていたら、不用意に救助に入ることもなかったと思います。
- 山岡 : 酸欠や毒性ガスの雰囲気下に立ち入る場合、窒息性ガス・毒性ガスに共通して言えるのは空気呼吸器の装着です。更に、漏えいしたガスの種類によって酸素濃度計や毒性ガス濃度計の所持、ガスに適合した防護服、ゴム手袋などの防護品を所持して立ち入ることが必要です。貯槽などに入槽中の作業員を救助するケースでは必ず酸素濃度を測定し 18～22%、毒性ガスの場合は許容濃度以下を確認する必要があります。
- 今出 : 最近では各種のガスを検知できる携帯可能な小型のガス検知器があるので有効に活用することが必要です。
- 安喜 : 空気呼吸器(呼吸用保護具)の使用者についても健康管理が必要になってきているようです。厚生労働省基発 0525 第 3 号に「呼吸用保護具着用による心肺機能への影響」「閉所恐怖症」「面体との接触による皮膚炎」「腰痛等の筋骨格系障害等を生じる可能性」を産業医に確認することとなっています。

牛山 : 今回の現場のように、通常立ち入りが制限されているような場所は、運転時の状況を把握するためにもサーベイランスカメラを設置することが必要ではないかと思います。今回もメンテナンス作業員の連絡がなく現場を確認に行って 2 次災害を起こしていますが、もしカメラがあったら少なくとも後の 4 名の方は被害に遭わなかったのではないのでしょうか。

竹内 : 閉所空間での作業も同様ですが、酸欠の可能性のある作業では、万一に備えて救助体制も事前に考慮しておく必要があります。この Beacon の事例の様に、たまたま他の人が内部で倒れている人を発見したのでは遅すぎるので、監視役が必要です。また、救助者が被災しない様に呼吸器など適切な保護具を事前に準備しておかなければ間に合いません。

飯濱 : 私が勤務した会社では、閉所侵入作業のための安全基準があります。その内容は、事業所内の酸欠や毒性ガスを吸引する可能性のある場所や出入りが困難な閉所を全てピックアップし、どのような出入り口になっているか等を調査して一覧表にまとめておく必要がありました。また、一定の従業員に対して、エアラインマスクやハーネス等の保護具の装着訓練を実施します。閉所作業は事前に作業許可証が必要ですし、万一の事故に備えて 1 名の立合人を配置することは当然ですが、訓練を受けた救助隊員 2 名も近くに待機させておく決まりになっています。意識のない人を人力だけで救出することは非常に難しいため、閉所で倒れた作業員の背中にフックをかけて救助するためのチェーンブロックを準備してから作業に着手しなければならないというとても周到なルールを適用していました。このような手順を順守することはどういう意義があるのか、何が重要なのかというのは、安全基準の書類を読んだだけではなかなかわかりませんが、今から 10 年ほど前に消火用水槽を久しぶりに点検する作業があった時に、実際に作業に適用して初めて明確になりました。

竹内 : DuPont 社では誤って窒素を供給してしまわないように窒素配管は黄色に塗装していました。ホースコネクションは窒素と空気では異なる形状のものを使用して物理的に間違えて接続できないようにしていました。

司会 : Beacon ではガス検知とアラームシステムの設置の重要性を強調しています。ガス検知とアラームシステムの設置の際の注意点、知見等ございましたらご紹介ください。

塩谷 : 屋外の定置式可燃性ガス検知器に、低濃度域での感度が高い半導体式のガス検知器を導入していました。しかし、この方式は湿度の影響を受けやすく、特に雨天の場合には誤作動によりアラームが多発するため、オペレーターはアラームを切ったままにする不適切な対応を繰り返し、ガス検知器を全く信用していませんでした。そこで、使用環境の温度や湿度の影響はほとんど受けない接触燃焼式のへの更新を行い、それに合わせて、アラームの設定も過度に低濃度にするのではなく、爆発下限界の 1/4 を少し下回る程度としました。この対応によりガス検知器の誤作動はなくなり、アラームの作動回数も格段に減少しました。対応後は、アラーム作動時にはプラントの監視強化や現場パトロールの実施などの本来のアラーム対応活動を確実に実施できるようになりました。この話題は 30 年以上前のことであり、現在の半導体式ガス検知器は技術進歩により改善されているかもしれません。

竹内 : ガス検知器の設置場所は発生源の近くにしなければなりません。工業者に「この部屋に設置して下さい」などと、曖昧な指示をすると取付けやすい場所に設置してしまう可能性があります。また、ガスの性質で上に行くのか下に行くのかも注意が必要です。

今出 : アラームが作動した場合は、室内の酸素濃度の確認や空気呼吸器などの保護具を着用など必要な教育訓練を受けた人員のみが入室するよう準備しておく必要がありますね。不用意に漏洩場所に入室しないようにしないように室外にもアラームが必要です。酸素濃度に関しては、OSHA の基準ではアラーム設定値は 19.5% としています。日本の基準は 18% ですね。OSHA の思想は、酸素濃度が 20% を切るということは何らかの異常な現象が発生している可能性が考えられるので、早めにアラームを発するべきであるということにあると思います。

飯濱 : 危険源となる物質の危険性や性状、ガス検知器の有効性と限界を従業員が十分理解することが必要です。一部のエンジニア又はメンテナンススタッフだけが理解しているのでは異常事態に安全に対応できないんです。そのため自主的な点検と校正については、工場開設 1 年目は私が実施しましたが、2 年目以降に点検マニュアルを準備して、従業員に輪番で自主的な点検と校正をしてもらっていました。

司会 : 今回の事例では請負業者も含めた全従業員に対する異常事態発生時の情報伝達に問題があったようです。この点についての注意すべき事項や効果的な情報伝達において工夫した点がございましたらお話しください。

塩谷 : 毎月 1 回の工場内一斉の通報訓練を実施していました。防災センターから各職場への通報はもとより、現場作業を行う従業員や請負業者への通報も適切に行われるように、現場設置のスピーカーからの通報の音質と音量の確認を行っていました。各職場から防災センターへの通報訓練は職場ごと順番を決めて実施していました。通報に不具合がある場合は防災センターに連絡し、防災センターが主導して修理等を行っていました。

司会 : 日本でも緊急事態発生時の公共の消防部門への通報の遅れが問題となってきました。迅速な通報のために取り組んだ事例がありましたら合わせてご紹介ください。

塩谷 : 石油コンビナート等災害防止法の特定事業所における平成 21 年度の通報の実態調査では、異常現象の発見から 10 分未満に通報が行われた割合は 32%、10 分以上経過後に通報が行われた割合は 68%となっています。その内、30 分以上の長時間経過後の通報は 34%と高い割合です。異常現象の内容別では、火災・爆発の場合は 10 分未満と 10 分から 20 分未満の割合が高く、通報が速い傾向にあります。半面、漏洩その他については 30 分から 60 分未満及び 60 分以上の割合が高く、通報が遅い傾向にあります。漏洩ではその量により、企業側が異常現象に該当するか否かを判断してしまうために通報に時間を要する結果になっていると考えられるため、平成 24 年の消防庁からの通達では、可燃性液体類にあつては数リットル程度の漏洩は異常現象から除外するとして異常現象の判断基準を具体化しています。また、通報された異常現象は、内容にかかわらず一律に報告を求めものではないとして、監督官庁側も企業側の通報に対するハードルを下げて、異常現象の速やかな通報を促しています。

木村 : 高圧ガス保安協会に経済産業省から委託され高圧ガス事故全般に関する「事故調査解析委員会」での検討を経て、毒性ガスを除き締結部、開閉部、可動シール部の微量漏えいを高圧ガス事故から除外してもよいとの検討結果が示されました。(https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/koatsu_gas/pdf/013_02_02.pdf)
その理由として、事故定義の1つである「噴出・漏えい事故」のうち、締結部や開閉部等からの微量(カニ泡程度)の可燃性ガスの漏えいでは、適正な保安管理体制下においては保安上の危険性が低く、火災、爆発に至らないこと、及び、人身事故が発生していないことが過去の事故報告情報を精査し明らかになっているからです。

司会 : 今回の事例に関連して、その他ご意見があればお願いします。

竹内 : 今回の事例は OSHA PSM に該当しない工場でも PSM を実施することが大切だと気付かせてくれる事故の一つだと思います。日本では、化学産業や石油精製の分野ではプロセス安全に注意が向けられていますが、食品などその他の産業でも PSM を参考に安全管理をして頂けたら、悲惨な事故はもっと減ると思います。

飯濱 : 安全コンサルタントの仕事で日本国内の数社の食品会社の工場を視察したことがあります。化学工場と比べて食品会社の工場は取扱商品の衛生面については設備管理と教育を厳しく行っていますが、プロセス安全及び従業員の安全面への配慮が不足する傾向があると感じます。また、工場従業員の大多数が所謂パートさんで平均勤務期間が短いという点でも、安全教育が不十分となる大きな要因だと思います。食品会社は消毒・滅菌用として毒物を扱うこともあり、閉所作業も頻繁に行われます。食品会社では安全管理体制を今以上に強化する必要があるのではないかと感じています。

山岡 : 被災した作業員の救護に接したことはありませんが、防災訓練の一環として、被災した作業員の救助のための訓練を実施したことがあります。その際、作業長が作業員の正面で「〇〇装着・ヨシ!」、「〇〇所持・ヨシ!」などの声を発して確認して現場に行かせました。

司会 : 今日は液体窒素に関する事故事例と安全対策について、皆様のご経験や、貴重なご意見と知見をお話頂きありがとうございました。安全談話室を通して、改めて液体窒素等の持つ危険性を認識することができました。

キーワード: 液体窒素、オーバーフロー、窒息死、酸素欠乏、OSHA PSM、コールドエバポレーター、LOTO、空気呼吸器
作業安全分析(JSA)、監視人・立会人、閉所空間、閉所侵入作業、酸素濃度計、ガス検知器、アラーム

【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、林 和弘、春山 豊、松井 悦郎、三平 忠宏、山岡 龍介、山本 一己、頼 昭一郎