

PSB (Process Safety Beacon) 2025年12月号 の内容に対応	SCE・Net の 安全談話室 (No.234) 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)
設備からの漏洩(LOPC)は事故の始まり (PSB 翻訳担当:濵谷 徹)		
司会: 今月号では、過去の3件のBeacon事例をもとに、化学プラントにおける多くの重大事故が、実は設備からの漏洩、すなわちLOPCから始まっていると指摘しています。LOPCは腐食や振動、誤操作、設備の不備などさまざまな要因で発生しますが、何らかの不備の兆候が見られ、予防が可能であるとしています。そこで、LOPCの兆候、原因、対応策などについて、皆様のご意見を伺っていきたいと思います。まず3件の事例を補足して戴き共有したいと思います。		
山本: Beaconの事例3件は、安全研究会で和訳したものがネットに掲載されていますので、各々の概要とそれらのURLを示しておきます。		
<ul style="list-style-type: none"> 2014年1月事例: 断熱材下腐食(CUI)のために外観から腐食を隠してしまい、内部で進行した腐食が配管を損傷し、内容物が漏洩し、LOPCが発生した。CUIは目視での検知が困難であり、水分の侵入が腐食を促進した。 		
https://sce-net.jp/main/wp-content/uploads/2016/03/2014-01-Beacon-Japanese.pdf		
<ul style="list-style-type: none"> 2021年10月事例: バルブを閉じてポンプを遮断したがロックアウト/タグアウト(LOTO)をせず、突然ポンプが自動的に起動し、硫化水素を含む水が放出された。硫化水素に曝された従業員と、続いて従業員を探しにきた妻も死亡した。ガス検知やアラームシステム、換気装置は設置されていたが、不作動で点検記録はなかった。 		
https://sce-net.jp/main/wp-content/uploads/2021/10/202110BeaconJapanese.pdf		
<ul style="list-style-type: none"> 2023年5月事例: プラントオペレータが硫酸ラインの施錠を外して、トラック運転手がホースを接続する前に現場を離れた。運転手は誤って近くの同形状の次亜塩素酸の接続口に硫酸ホースを接続した。その結果、次亜塩素酸ナトリウムタンクに硫酸が供給され、塩素ガスが大量に発生し制御不能となり、周辺住民を巻き込む事故に至った。接続箇所や配管にラベルなどの表示はなく、施錠など誤接続防止策や作業者間のコミュニケーションを含む荷下ろしの手順書も不備であった。 		
https://sce-net.jp/main/wp-content/uploads/2023/05/202305BeaconJapanese.pdf		
司会: さらに共有すべき事項があれば補足をお願いします。		
竹内: LOPCですが、馴染みのない方もおられると思いますので、少し補足したいと思います。LOPCはLoss Of Primary Containmentの頭文字をとったものです。Primary Containmentは一次容器などと訳されますが、単に容器だけを指しているのではなく、配管などその物質を閉じ込めてる領域です。従って、その物質を閉じ込めてる容器、機器、配管、その他付属品などから物質が漏洩・放出が発生した場合にLOPCが発生したと捉えます。尚、サンプリングなど作業の一環として一次封じ込め設備の外に取り扱い物質が出される場合はLOPCには該当しません。「一次封じ込め」の定義は"Process Safety Metrics – Guide for Selecting Leading and Lagging Indicators"の52ページに記されていて、その和訳は「プロセス安全メトリクス先行及び遅行指標の選定ガイド」が以下のURLに掲載されていますので、ご覧頂ければと思います。		
https://sce-net.jp/main/wp-content/uploads/2022/12/CCPS-Process-Safety-Metrics-V4.1-Japanese.pdf		
司会: 竹内さんよりLOPCの定義について補足がありました。LOPCという用語は、単なる「漏れ」ではなく、プロセス安全事故の根本的事象として体系化された概念のようです。そこで、LOPCという用語の理解を深めたいと思いますので、皆様のご意見を伺いたいと思います。		
濵谷: 「一次封じ込め」という言葉には、当初私自身違和感がありましたが、現在では現場の人々にも理解されるようになってきているのでしょうか。このPSBと談話室によりLOPCの概念が普及する一助になれば幸いです。		
竹内: メトリクスの翻訳では「一次封じ込めの失敗」と訳されていました。これは、一次バリアの破綻という意味を端的に表しており、プロセス安全指標の文脈では適切な表現であると考えられます。		
林: 丸善出版のCCPS翻訳書「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管理のポイント」では、「一次封じ込め(からの内容物)の損失」と訳されていましたので、括弧を外した表現が分かり易いと思いました。		
中田: AIにLOPCの定義を尋ねたところ、「一次封じ込めの喪失」とは、危険な物質を保持する最初の障壁(配管、容器、バルブなど)が破損し、物質が漏洩する事故を指すとの説明でした。これは火災、爆発、有毒ガス放出などの重大事故につながる可能性があります。LOPCは単に「漏洩、漏れ」という事象を示す言葉ではなく、それによる被害や影響の可能性を考慮することまで含めた、プロセス安全の世界で固有の表現と理解しました。LOPCには「漏洩事故」や「設備漏洩」といった訳語も文脈によっては適切だと思います。		
今出: LOPCという用語の背景をAIに尋ねたところ、2000年代以降、CCPSやAPIがプロセス安全指標を体系化する中で、LOPCが「プロセス安全事故の根本的事象(fundamental event)」として位置づけられたとのことです。API RP 754(2010年)で明確に定義され、以降、海外の石油・化学プラントで事故やヒヤリ・ハットをLOPCとして記録・評価するようになりました。LOPCは安全マネジメント上の分析単位として使われています。日本ではContainment		

(封じ込め)という用語はあまりなじみのない言葉ですが、原子力関係で原子炉からの放射線を閉じ込め(封じ込め)るための容器を格納容器(Containment vessel)といっているところからイメージしやすいかもしれません。

頼: LOPA(Layer of Protection Analysis:防護層解析)の翻訳を担当した際に、「封じ込め機能の喪失」と訳しました。LOC(Loss of Containment)では、安全弁やベントスタックへの放出も含まれますが、LOPCは一次バリアからの漏洩に限定されます。したがって訳語はその範囲の違いを意識して使い分ける必要があります。

藤村: 弊社では、漏洩や漏洩事故を LOC(Loss of Containment)と呼んでいます。HAZOPでは、ズレの結果として漏洩が発生する場合、consequence 欄に LOC と記載します。LOPC の「Primary」は、特に最初の障壁(配管、容器、バルブなど)を指し、Secondary(防液堤など)と対比される概念です。

牛山: LOPC という言葉が初めて登場したのは、2007年12月に CCPS が発行した“Process Safety Leading and Lagging Metrics”であると考えられます。当時、Beacon 2008年7・8月号の内容が難解で、翻訳チームで原典の全訳を行い、ようやく理解に至りました。訳語としては「一次防護施設からの内容物の損失」としていましたが、現在では「一次封じ込めの失敗」など複数の表現が使われています。使用目的に応じて柔軟に使い分けることが望ましいと思います。

三平: 私が化学プラント現場の第一線で仕事をした時期は 1960 年代後半から 80 年過ぎで、プラントでの事故や災害の原因として設備(元々の欠陥、腐食等による劣化)と人(誤操作)に分けて、対応を長年考えていましたので、LOPC という米国生れの専門用語を知った時は、多少の驚きと違和感を覚えました。しかし事故原因の事象を大きく把握する思考は、個別の原因への対応にばかり目を向けがちな従来の進め方と違って、学問的なアプローチの仕方で、これも有効な進め方の一つだと今は思っています。

司会: いろいろな観点からのコメントを戴き、LOPC という用語は、プロセス安全の概念を現場に根付かせるための重要なキーワードであることが分かりました。さて、ここでは CUI、LOTO 不備、誤操作の3つの事例が示されていますので、各々予兆となる事象にはどのようなものがあるか、またその予兆を発見する活動としてどのようなものがあるか、皆様のご経験や知見をお聞かせください。

林: CUI の予兆として、外装の破損や剥がれの他、外装のシール材の劣化なども目視で水の侵入が予想できる「外観」の劣化があります。保冷材などでは夏場に水滴が滴り落ちたり、上面が耐候性の問題でひび割れたりしているのも劣化の予兆で、オペレータによる日常のパトロールや専門部門による PIP(Plant Inspection Patrol)などで対応していました。LOTO 不備の予兆は工事中に行う安全パトロールなどで手続き上の不備を含めて確認していました。誤操作では、ヒヤリ・ハット活動で予兆を抽出して対応することが防止策になっていたと思います。

竹内: Beacon の事例は代表的なものですが、LOPC は様々な起因事象により発生しています。CCPS が LOPC を重視しているのは、多くのプロセス事故が LOPC から派生していることです。すべての LOPC に予兆があるかは分かりませんが、腐食など老朽化はきちんと管理すれば予兆を把握して未然防止が可能だと思います。その管理方法は CCPS の書籍”Dealing with Aging Process Facilities and Infrastructure”を安全研究会で翻訳した「化学プラントの老朽化」が参考になると思いますので、活用して頂きたいと思います。

瀧谷: 事故にはならずに済んだ CUI の事例です。微量酸素でも混入すると爆発する物質の精製で、常時酸素の検出計を装備した、圧力は高くないのですが氷点下で運転している蒸留塔の事例です。夏場の定修作業が終わり、一昼夜の加圧気密テストを終え、一昼夜の減圧気密テストで系内に酸素の増加が認められました。改めて塔全体を点検すると、レベル計の下部の断熱材に異常が見つかりました。レベル計取り付けノズルの建設時の塗装が悪く、外食によるピンホールが見つかりました。その後、40 年近く経ちますが、事故なく稼働しています。

木村: CUI については以前に SCE・Net 安全談話室(No.91)のテーマ: 保温材下腐食(CUI)として取り上げられ、また、エンジニアリング協会で、平成 21 年度石油精製業保安対策事業(被覆配管等の運転中検査技術に関する調査研究)報告書として取りまとめられました。同時に、別冊として石油精製業及び石油化学工業における保温材下配管外面腐食(CUI)維持管理ガイドライン(案)も作成され、平成 24 年 2 月にはエンジニアリング協会から正式に刊行されました。その後、韓国・台湾・シンガポールの CUI への対応状況についても現地調査を行いました。LOTO については、新潟県の自主保安高度化事業者の S 工場において、危険源排除ルールの厳格化の一環で OSHA の規定を活用しながら丁寧に対応している状況の説明が多少詳細過ぎるくらいになされたことを 2025 年 2 月に経験しました。

司会: その他の要因を含めて、過去に、これは危ないかもと感じた小さな兆候が、後に大きな問題に発展したご経験や活動に繋がったご経験があれば教えてください。

林: 定期修理中に協力会社の方々に「作業周囲を見ておかしいと感じたら社員に連絡」をお願いしたところ、腐った手摺や床、放置された発錆配管、ボルトの抜け落ち、フランジ部やバルブからの漏洩痕などさまざまな兆候を連絡戴き、80 件以上の表彰をしたことがあります。LOPC に至る可能性のある案件を事前に潰せたと思っています。

司会: LOTO 作業において、うっかりが致命的になることがあります。作業手順の見直しや、ダブルチェックの工夫など、現場での皆様の工夫のご知見を教えてください。

竹内: LOTO は日本でもかなり定着してきていると思いますが、どうも厳密な運用がされていない様に思います。本当は作業者全員が危険源遮断の為のロックアウト(施錠)をするのですが、誰か代表者が施錠しているだけの LOTO が

多い様に思います。「自分の命は自分で守る」ための方策ですから、本当に危険性の高い作業の場合は厳密に運用して頂きたいと思います。

飯濱：竹内さんとやや異なる意見ですが、私は日本国内の LOTO の普及面では楽観していません。いわゆる大手有名企業では20年前に比べればある程度 LOTO は知られており、まあまあの基準策定と遵守状況ですが、中小の企業では知られてもいませんし、本来の LOTO 手順は無いのも同然です。現実の問題として、LOTO を厳格に実施しようとすると日本国内で流通している電気設備や機械設備はそのままではほとんど使えません。そのため、かなり努力している事業所でも設備や LOTO 器具は妥協的なものに留まっています。

それから、LOTO 実施が必須であり前提条件となる危険作業が幾つかあります。例えばライン開放作業や閉所酸欠霧囲気場所進入作業です。この種の作業を計画し許可する社員には特別教育と技量認定が必要ですし、他の事業所から転勤してきた管理職社員にも例外なく特別教育と技量認定を行う必要があります。

さらに運用面のことを言いますと、例え設備と LOTO 実施基準等が完備していても、社員・協力会社従業員に必ず守ってもらうには相当の教育を行い、ルール順守誓約をもらっておく必要があります。私が勤務していた会社では、LOTO を行うべき作業で社員がそれを怠りますと原則的に懲戒解雇処分になります。いわゆる一発レッドカードになる訳で、このことも毎年繰り返し教育を行っていました。

藤村：私の勤務するプラントの MCC(モーター・コントロール・センター)は 30 年以上前のものでロック用の穴が一つしかありませんので、右のようなハスプを利用して複数の作業者が同時にロックアウトしています。悩ましいのは飯濱さんご指摘の通りライン開放作業時で、複数の種類、サイズのバルブをロックする治具が必要ですし、それをどの範囲のどの箇所に適用するかを作業計画時に取り決め、計画通りにロックアウトし、それをチェックする必要があります。



今出：紹介戴いたように作業者が個別箇所をそれぞれロックする方法はパーソナルロックと呼ばれています。この方法が最も確実と言われていますが、ライン開放作業、品種切替作業などで多数のロック場所があると多くの治具が必要になるのであまり現実的ではありません。このような場合、資格者が各箇所をロックし、そのキーをボックスに收め、そのボックスを各作業者がロックするようにしていました。OSHA ではグループロックと呼んでいます。

司会：誤操作の異なる物質の混合による事故は、ヒューマンエラーの典型です。誤操作や誤投入を防ぐために、有効な識別や確認の仕組みなど、皆様のご経験や知見をお聞かせください。

三平：入社後長期間携わった PVC プラントは、多数の反応器を使うバッチ方式による大量生産で、複雑な作業形態から当時は手動操作が主体でした。誤操作によるトラブルや事故も多く、設備の大型化の進展の過程で、反応器のバルブ開閉や攪拌機起動の誤操作により大きな災害を出しました。製品抜き出しの際に重合反応器の器番を間違えて、隣接の反応中の底部抜き出し弁を誤開放して、反応液を大量放出して火災・爆発による死傷事故を起こしています。これは 1961 年の事故でしたが、初期に起きた攪拌機の誤起動への対策と合わせて、その後反応器群全体を対象にしっかりと鎖錠によるインターロックシステムが組まれていました。VC モノマーの仕込みや製品抜き出しの元弁、攪拌機の電源函への施錠には、開放時に鍵と錠が離れない特殊なものを探して使っていました。攪拌機の誤起動はプラントスタート後間もなくの戦中に起きており、詳細な記録はなく言い伝えによるものです。反応器内のクリーニングは製品の品質維持のために、近年の技術革新で不要になるまで必須でしたので、器内に入る作業員の安全対策は最重要で、攪拌機電源のインターロックは操作回路ではなく、元電源側スイッチの遮断とその操作部の施錠で行っていました。このシステムは後に設備の自動化が完成して不要になるまで使われ、事故や災害を出しませんでした。それでも誤認識や誤判断で器番の違う反応器に手を出した経験から、誤操作防止のための設備の自動化は必須と思い、後日挑戦して成し遂げました。

塩谷：混合危険物質の混合による事故で真っ先に思い浮かべるのは、ボパール事故です。これは誤った配管洗浄の施工法により、メチルイソシアネートの貯蔵タンクに水が混入した結果、異常反応が起り、タンクが高温、高圧状態となって、重篤な LOPC 事故に拡大してしまいました。施設内で取り扱う化学物質の反応性を理解しておくことは非常に重要です。化学物質同士の反応性はもちろんですが、水、空気(酸素)、鉄さび(化学反応の触媒となり得る)は至るところに存在するため、水、酸素等との反応性にも注意が必要です。特に保全作業では水、空気との接触が容易に起こり得るので、水、酸素等と反応性を有する物質に関係する作業では、事前に作業方法を十分に検討し、この作業方法を遵守するよう細心の注意を払う必要があります。

混合危険のテーマからは外れますが、バッチ式の合成反応では反応熱の制御が非常に重要になります。反応器の除熱能力以下に反応熱の発生量を制御する必要があり、このために原料の投入速度が厳密に規定されている場合があります。しかし、この規定を守らずに原料を一気に投入してしまうと、除熱能力を超える反応熱が発生して暴走反応を起こすことがあります。その結果、異常な温度上昇や圧力上昇の事象を引き起こし LOPC 事故となることがしばしば発生しています。なぜ原料の投入速度が規定されているのか、この理由を正しく理解して規定された作業方法を遵守することが必要です。

司会：現場での気づきと行動を再確認したいと思います。LOPC の兆候に気づいたとき、報告や対応が遅れる原因とそれを乗り越える施策について、皆様のご経験や知見を教えてください。

飯濱：勤務していた工場では、想定ヒヤリ・ハットを全く不要として、その代わり「プロセス物質の漏れ・こぼれを含む実ヒヤリ」を即座に口頭で職長に報告するようにしていました。パソコン・データベース(ひと昔前は紙の様式)に入力して報告するのは職長の仕事です。悩ましい事象は「漏洩検知センサーは働かないものの臭いがする」という場合で、ごく微量(にじみ漏れ程度)の漏れの場合、人間の嗅覚では感じますが、センサーでは検知限界以下になることが多くありました。過去の経験から

林：事故・トラブルの防止には、従業員一人一人の安全に対する意識向上が必要であり、勤務していた事業所では安全感性の向上を目的に、3種の神器として、KY(危険予知)、SS(指差称呼)、HH(ヒヤリ・ハット)を推進していました。気づき感性の向上が異常兆候(LOPCの予兆)の早期発見に繋がると思います。

高橋：私も林さんと同じ事業所に勤務していました。最近、22年前の変更管理の不備により腐食が進行し毒性ガスが漏洩したLOPC事故が発生しました。幸いにも発見及びその後の対応が早く大事には至りませんでした。早期発見には、やはり林さんの述べた地道な活動が必要だと思います。この事故の詳細については、KHK(高圧ガス保安協会)が視聴覚資料を作成して一般に公開しています。この約10分の動画では、事故の概要、原因、再発防止対策、及び教訓が簡潔にまとめられています。是非下記urlからご視聴いただければと思います。

<https://youtu.be/N1W3hczfRKI>

司会：同じ場所で繰り返す漏洩があった場合、それは何を意味していると考え、どう対応すべきか皆様のご意見をお聞かせください。

竹内：漏洩は事故と捉えて事故調査をしなければならないと考えています。つまり、同じ場所で漏洩が繰り返されていると言うことは、PSMの事故調査エレメントが実施されていないか、事故調査のプロセスで根本原因を把握して対処することに失敗していると考えます。日本では事故原因の究明に「なぜなぜ分析」が使用されることが多いですが、より厳密に分析するにはFTA(Fault Tree Analysis)という手法を用いることをお勧めいたします。ANDやORの記号を使用して論理的に分析するので、見落としが少なくなります。但し、FTAでも見落としは発生する可能性があるので、絶対に大丈夫と言えるものではありません。

司会：手順書を指導する際に、手順の背景や意味を伝える機会を設けることが、単なる遵守ではなく、納得して守る文化を育てることに繋がると思いますが、伝達方法を含め対応されていた皆様のご経験をお聞かせください。

竹内：実は今、CCPSの"CCPS Golden Rules & Key Principles"の"Key Principles of Process Safety for: Operating Procedures"の和訳に取組んでいます。近い内にCCPSのホームページとSCE・Netの安全研究会のホームページに公開されると思います。手順書は簡潔に何故その手順で行うかを記述する場合と、そのような説明は付録に記して手順の記述には入れない様にすることが勧められています。それは、手順書は「何をするべきか」を早く、正確に伝えるべきものだからです。しかし、作業者がその背景を理解して作業を進めることは重要ですから、手順書に関するトレーニングの際には、「何故」そうするかを丁寧に説明して理解させることが必須です。

司会：これまでの設問に関わらず、補足すべき事項や伝えるべきことがあれば教えてください。

高橋：最近KHK(高圧ガス保安協会)は、安全弁(破裂板を含む)が作動した高圧ガス事故の情報を整理し、安全弁(破裂板を含む)に求められる機能と作動した場合の事故届の必要性、未然防止、再発防止など注意事項について、まとめて注意喚起をしています。

https://www.khk.or.jp/Portals/0/khk/hpg/accident/2022/2022_anzenben.pdf

背景として、2023年頃に安全弁の大気放出事故が頻発したことがあります。安全弁は防護設備だから噴出してもよいという認識ではなく、きちんと整備し、機能を理解して噴き出しを起こさせないことが、まず第一であり、安全弁があるから大丈夫という考えを改めるものです。頻繁に起こることはプロセスの管理ができていないと捉えられます。

竹内：Metricsでも安全弁の噴出は、大きな事故が起こらなくてもTier3の「防護層(対策)へのチャレンジ(作動要求)」のIncidentとみているので、それが頻繁に繰り返されるということは、それよりも深刻なTier2事故の先行指標(Leading metrics)になると見なします。但し、米国では行政機関への報告はTier2以上となっていて、Tier3事故の報告は求められていません。

司会：本日の討議を通じて、LOPCは突然起こるものではなく、予兆があるものであることを再認識しました。CUI、LOTO不備、誤操作といった事例から学べるのは、どれも気づきと行動が事故を防ぐ鍵であるということです。できることは、①小さな異常を見逃さない、②報告をためらわない、③手順を守るだけでなく、なぜ守るのかを理解する、という3つの行動です。またLOPCという用語の定義や経緯についても、現場での理解と教育が重要であると共有されました。「危険な物質はあるべき場所だけに保つこと」、LOPCを防ぐのは、私たち一人ひとりの意識と行動です。

キーワード LOC、LOPC、LOPCの予兆、一次封じ込め、CUI、LOTO不備、誤投入、誤操作、プロセス安全指標、API RP 754、メトリクス(Metrics)、LOPA(防護層解析)、鎖錠システム、ヒヤリ・ハット、安全弁、大気放出

【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、濱谷 徹、高橋 和成、竹内 亮、
中田 吉彦、林 和弘、春山 豊、藤村雅也、松井 悅郎、南川忠男、三平 忠宏、山岡 龍介、山本 一己、頼 昭一郎