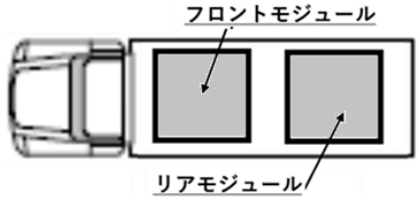


PSB (Process Safety Beacon) 2025 年 9 月号 の内容に対応	SCE・Net の 安全談話室 (No.231) https://sce-net.jp/main/group/anzen/	化学工学会 SCE・Net 安全研究会作成 (編集担当: 竹内 亮)
失敗が重なって水素漏れと火災に (PSB 翻訳担当: 安喜 稔) 司会: 今月号は、水素供給設備でいくつもの間違いが重なったことで水素が大量に漏洩し、それに着火して火災が発生したものでした。幸い、重傷者は出なかったとされています。水素供給設備の経験のある方は少ないかもしれませんが、水素を扱われたことのある方はおられると思います。今回は水素全般の観点で議論して行ければと思います。まず、Beacon の事例についてどなたか説明して頂けますか。 竹内: この事故は2019年6月1日にカリフォルニア州サンタクララのエアプロダクツ社が所有する水素供給設備で発生したものです。エアプロダクツ社に所属する運転手と OJT で学習中の新米の社員が CT-250 モジュール 2 基を搭載した CT-500 トレーラーに水素充填作業していた時の出来事でした。作業中に、新米社員が手動の遮断弁付近から水素ガスが漏れていることをトレーナーである運転手に報告したことから始まりました。運転手は新人にフロントモジュールへの充填を停止する様に指示しました。新人はフロントとリアの両モジュールへの充填を停止しましたが、トレーラーは充填システムの配管および制御装置から切り離されていませんでした。また、運転手はこの設備の修理作業の資格を持っておらず、おそらくそのため LOTO も実施せず、トレーラーは充填配管と接続されたままでした。運転手は漏洩箇所の修理をしようとしてラインを開放しましたが、新しいパッキンが必要なことに気づいて新人に水素供給系を停止するように指示しました。しかし、新人がその指示を誤解して「パージ/トレーラー作動」の制御ボタンを押したためガス充填プロセスが再開してしまいました。このため、解放された配管から水素が放出されて爆発が発生し、それに続いてジェット火災になりました。事故調査では、爆発の着火源は特定されていません。この事故でエアプロダクツの社員2名が軽傷を負い、トレーラー数台が損傷を受けたとのことで、水素供給設備の液体水素タンクは無事でした。  フロントモジュール リアモジュール モジュールは水素ボンベ25本のセット 頼: Beacon では作業者の手順に焦点を当てて居りこれは非常に大切な教訓ですが、私はこの事故のもう一つの教訓として竹内さんがコメントの最後に触れられた液体水素タンクが無事だった点に焦点を当てたいと思います。 1. 会社は設備レイアウト、トレーラーの構造検討で、火災リスクを深刻な検討項目と考えていなかったのでしょうか。水素を扱うという事は着火事故への対応を常に考えなければなりません。運転員の選定及び教育もそれを重点的に考えねばならないと思います。この辺りが事故報告書では厳しく追及されています。 2. 今回の水素漏洩事故の拡大要因として、①ボンベのラプチャーディスクの材質に問題がありトレーラーモジュール内部で水素が大量に漏洩した事②構造上漏れた水素がモジュール前面に吹き出し火災が拡大した事③他のトラックがすぐ傍にあった事が挙げられています 3. 風向き等の気象条件によってはその先に停められていた液体水素ローリーやその先の水素タンクの火災に繋がる可能性もあったと思います(Beacon 図2参照)。 たまたま重傷者もなく車両と積み荷の被害だけでしたが一つ間違えると大災害に繋がる可能性がありました。 司会: 今回の Beacon でこの事例が採用されたことについてご意見や感想などありましたらお聞かせください。 三平: 燃料電池車 FCV の普及などにより水素を特定のステーションへローリー車で輸送するようになっていますが、我々の化学プラントでの水素の扱いとかけ離れていて、コメントのし難さがあります。固定配管でも水素を慎重に扱っている化学プラントに比べて、ここでは水素が安易に扱われているように思いました。新人が漏れを発見して連絡した際に、運転手が状況を自分で確認せずに口頭で指示していて、作業頻度の多さから慣れによる油断があったのではないのでしょうか。充填ラインの着脱など作業そのものは比較的容易な内容と思いますが、誤操作による事故の重大性を考えると、取扱者である運転手の技量確認や継続的な安全教育が必須だと考えます。また新人への教育はブラザー制により作業内容を完全に習得するまで徹底させるべきだと思います。 林: 三平さんの言われる通りです。水素漏洩の異常を発見したら、すぐに関係者に連絡して指示を仰ぐのが当然だと思います。またトレーラーの運転手が社員であれば LOTO の教育を受けているはずでしょうし、ましてや学習中の新人とペアを組める社員なら知識は持っていたはずです。さらに新人が指示通りに操作を行い、結果が適切であるかの確認も抜けており、運転手の素養・技量に問題があると思います。そのような人物を放置している会社も問題です。 飯濱: この記事を読んでいて最初に思い出したのが、昨年 11 月号で木村さんからご紹介頂いた、KHK が纏めている最近の高圧ガス事故一覧表に、ほぼ毎月のように「水素スタンドにおける事故」が載っていたことでした。クリーンエネルギー普及のため日本でも米国カリフォルニア州でも、水素スタンドが急速に増えていて、事業者の安全管理や現場担当者への教育・訓練が立ち遅れているのではないかと懸念されます。		

- 木村： KHK の高圧ガス事故情報は下記の Web site に掲出されています。内容としては、高圧ガス事故事例、高圧ガス事故集計資料等、高圧ガス事故に係る注意喚起、冷凍空調施設の事故、事故事例データベース、に加えて視聴覚資料で構成されています。https://www.khk.or.jp/public_information/incident_investigation/hpg_incident/
- 頼： 水素の大量輸送時代の始まりを象徴する事故だと思いました。今迄は水素プラントから同じ敷地内、又は近接敷地のユーザーに配管輸送で水素を供給、小口ユーザーへのみボンベ充填・輸送を考えていました。(これまでの私の経験では、大口ユーザーには隣接地に水素プラントを建設する事が前提でした)。これからは燃料消費の増加を考えると原料立地の大型水素プラントから大型タンカーで液体水素を輸入、それを大口ユーザーに陸上輸送する時代がすぐそばまで来ていると感じました。日本でも大型タンカーによる水素輸送のトライアルが新聞記事に出っていますが、受入基地から大口ユーザーへの輸送方法の検討も緊急課題になりつつあると思いました。(石油化学用の大口ユーザーはタンカーが着岸する臨海立地としても、燃料用の大口消費は内陸輸送が必要か?)ガス状水素をボンベで安価に大量輸送しようとする今回の事例の様な方法も考えられます。この先は物流業者任せにせず、水素の怖さを良く知っている、化学品製造事業者の視点で国内の輸送方法や充填設備、レイアウト、充填方法&ユーザーでの使用方法を考える必要が有ると思いました。物流は製造に比べ取扱い温度・圧力も一定でリスクははるかに少ないですが、それでも水素は怖いものです。化学品の様な取扱いに特別な配慮が必要な物については(取扱い注意事項が工場・設備毎に異なるので)積込・荷降ろし作業は設備所管会社の社員が実施(運転手は補助作業のみ)すべきと考えます。運転手は車両運転のプロで、化学品取扱のプロではない事が多いです。
- 司会： では、少し具体的な内容に移りたいと思います。今回の事例では水素が危険源すなわちハザードとなっていますが、水素に関するご経験やご知見がありましたらご紹介ください。
- 山岡： 「知っていますか」にも記されていますが、水素の特徴として、粒子が小さいので漏れやすく、最小発火エネルギーが小さく爆発範囲が広い(4~75%)、ので発火しやすく、特に高圧になるとその傾向は強くなるので注意が必要です。以前にも紹介しましたが、エチレンプラント内の水添装置のフランジから水素が漏れる火災を経験しました。定修入りのため装置を 350℃・2.8MPa から降温降圧中にボルトの締付け力のわずかな緩みで漏れ出たもので、着火源はガスに含まれた夾雑物による静電気と結論づけられた事故です。漏れやすく着火しやすい水素の特徴が出た事例だと思いました。
- 牛山： 私も水添脱硫設備などで、水素を取り扱った経験がありますが、山岡さんご指摘のように、水素はフランジなどから洩れやすく、洩れるとすぐ着火します。しかし、炎は青白色ですぐ火を確認するのが難しいのですが、多くの場合保温材が赤熱して気が付きました。火をすぐ消すのは返って危険なため、内圧を下げながら窒素に置換して消火するようにしていました。
- 三平： 水素は高級アルコールの製造プラントで大量に使っていましたが、自身ではオペレーションや直接的な設備管理の経験はなく、製造部門の管理職や設備拡張工事のマネージャーとして水素の取り扱いについて注意を払っていました。製造現場で水素は危険度の特に高い取り扱い物質の一つで、運転関係者は特に注意していました。出身会社では早い時期からアンモニア合成やアルデヒドへの水素添加などで水素を大量に使っていて、私が増設工事で関わった水素使用プラントの技術は完成度が高く、先輩たちが安全対策を含めて苦労して作り上げて来たものだと思います。私の在任期間に水素によるトラブルや事故の経験はありませんでした。
- 林： 水素の常温・大気圧下での最小発火エネルギー値は空気中で 0.02mJ であり、静電気が容易に発火源となります。また水素原子は最小の原子であり、鉄鋼中に容易に入り込み拡散・透過します。さらに微量の水素原子の侵入でも鉄鋼は脆化しますが、面心立方格子のオーステナイト状態の合金では脆化が生じ難いです。200℃以上の高温水素は原子の動きが活発になり、冷却する際に侵入水素が鉄鋼中に取り残され、集積し分子化して高圧になり、マイクロ割れを引き起こす場合がありますが、これも含めて水素脆化といわれます。高温水素を取り扱う容器の材質選定では、水素浸食を含めて Nelson Chart が有名です。比較的低温でも差圧式伝送器のダイヤフラムを透過した水素原子が低压側で分子化し、正しい値を示さない故障を発生させることがあり、透過防止に金メッキのダイヤフラムが適用されます。
- 安喜： 労働安全衛生総合研究所発行の静電気安全指針 JNIOOSH-TR-N0.42 (2007)では、「MIE: Minimum Ignition Energy=最小着火エネルギー」と記載されています。他方、高圧ガス関連では「最小発火エネルギー」となっているそうです。Ignition の訳は、発火・点火・着火となっていますので、どちらも同じ意味で、静電気から見ると物質を着火するエネルギーなので着火エネルギー、物質から見ると発火するエネルギーなので発火エネルギーになるのでしょうか。
- 竹内： 2010 年 4 月 2 日に米国ワシントン州のテソロ石油アナコルテス製油所で熱交換器が破裂して 500℃(930°F)の水素とナフサが放出されて着火し、7 人が死亡する事故が発生しています。この破裂は高温水素侵食(HTHA: High Temperature Hydrogen Attack)と呼ばれる現象によるものでした。炭素鋼の Nelson Curve では使用可能領域であったにも拘わらず、炭素鋼製の熱交換器が HTHA を受けて脆くなり、破損したのです。この事故を調査した CSB は炭素鋼の Nelson Curve が不正確であると結論付けました。これを受けて、API は 2008 年に発行済みの高温水素侵食に関する推奨手法 API RP 941 に対して、2011 年に注意喚起を行っています。”API RP 941”はネット上で 2016 年版の入手が可能です。溶接後熱処理(PWHT)を行うか否かの影響もあるようです。
- 飯濱： 担当した現場で水素を直接扱ったことは無いのですが、ガスケット製造と関連する技術サービスを行っていたことがあり、分子サイズの小さい水素とヘリウムは大部分の合成ゴム系のガスケットや O リングではガス透過率が

きくて、有効にシールできません。シール材のメーカー各社も様々な工夫をしてシール製品を開発・製造しておりますので、水素やヘリウムのラインのシール部品選定には十分に注意が必要です。

竹内： 水素に有効なガスケットはどのようなものが開発されているのでしょうか。

林： 経験では配管サービスクラスにおける水素ガスのガスケットには、1MPa 未満、100℃程度までは PTFE 系のテフロンその他、石綿ジョイントシートも使われていましたが、2006 年 9 月 1 日施行の改正労働安全衛生法施行令により、すべての石綿製品は原則として製造、使用等が禁止されました。代替として、試用テストで OK となる仕様が確認されるまで、金属フープとフィラー材（PTFE または膨張黒鉛）を使用するうず巻形ガスケットを使用していました。膨張黒鉛は、高温水素ガスで微量酸素による酸化の促進が懸念され、酸化抑制剤充填など検討が必要です。ただ高温・高圧域（略 300℃≤や 5MPa≤）では、金属製（軟鉄・ステンレス・アルミニウム・銅など）ソリッドやリングジョイントを使用していましたが、ガスケット締め付け力や接触部の表面粗さに注意を払っていました。他に弾力性のある中芯材を金属薄板で被覆したメタルジャケット形ガスケットなども使用していました。またテフロンシートでは非粘着性をカバーするペースト状のテフロンシール剤を薄く塗布していましたが、その選定には無油性・非可燃性の他、プロセスの汚染などにも気を付けていました。うず巻形ガスケットの使用では、JIS10K 規格品のフランジ強度がガスケット必要締め付け力を満足せず、個別に仕様検討していました。

飯濱： 一般的には 100℃以上の高温になると、テフロンなどの樹脂系のガスケットは強度が落ちてしまって使い物にならないので、ガラス繊維を混ぜて機械強度を上げたものが使われていました。特にテフロンは、ご存じの方も多いと思いますが、コールドフローと言って、常温でも長時間（> 数か月）応力を加え続けると変形がとめどなく進行する現象があり、長期間のシールには不向きです。水素用途、とくに今月の事故事例のような水素充てん施設でのシールとなると、圧力も大きい上に、おそらく温度の範囲も氷点下から 100℃位まで相当に広いので、単純な合成ゴム系パッキンでは長期間にわたって高い信頼性でシールするのは困難だろうと想像しています。最新の研究状況は不案内なので確実なことは言えませんが、金属フープと弾性素材を組み合わせたシール部品にしないと長期間性能を維持できないのではと推測しています。

塩谷： 水素は漏れやすいと同時に、爆発によって発生した火災も非常にわずかなすき間を通して外部に伝播します。この現象は爆発等級として表され、一般的な炭化水素類は爆発等級 1 ですが、水素は爆発等級 3 となっています。一般的な炭化水素類の火災が伝播できないようなすき間でも水素の火災は伝播し、より危険度が高くなります。このことから、水素が存在する可能性がある場所での電気機器の防爆仕様は一般的な炭化水素類のものよりも、よりシビアな仕様にする必要があります。

司会： この事故の要因はタイトルにもあるように複数存在しています。まず、ベテラン社員であり、新人のトレーナーをするような人物が、資格のない修理事業を初めてしまったことです。会社の管理体制に問題はなかったでしょうか。ご意見をお願いします。

牛山： 今回の事例のように水素容器など高圧水素を扱う場合、日本では 3,000kg 以上の高圧ガス積載車両の運転をする際は高圧ガス移動監視者の資格が必要ですが、今回積載量が約 1,100kg ですので資格は不要かもしれませんが、しかし、配管取り外しなど設備も取り扱っていますので、高圧ガス保安責任者（甲種（化学・機械）、乙種（化学・機械）、丙種化学など）の事前許可が必要です。また、水素のタンクと積込み場所が近すぎる感じがしますが、日本の高圧ガス保安法でも、水素ガス積込み用の液化水素タンクと積込み用車両の間の保安距離についての規定がないようです。事故報告書によると、タンクへの散水冷却により延焼を食い止めたとありますので、実質的にはタンクと積込場所を十分に離しておく方が良いのではと思います。

司会： 次に、コミュニケーションの問題です。トレーナーが新人に指示したことを正しく理解できず、指示されていないこと、即ち「充てん作業開始のボタンを押してしまった」ことについて、皆様のご意見を伺いたと思います。

山岡： 作業の際に「エラーによる誤操作はつきもの」とよく言われ、特に二人以上で作業する場合はコミュニケーションミスによる事故が多いです。今回のトレーナーと新人など上下関係のコミュニケーションでは、上位者の指示命令の伝達が的確になされるため日ごろから職場内で良好なコミュニケーションの環境にあることがだいじです。また、誤操作防止のために予め作業内容とその潜在リスクを相互に確認する、誤解や錯覚、思い込みで作業に入ること防ぐために指示事項を復唱により確認する、などがだいじだと思います。

塩谷： 先ほどの三平さんからブラザー制度のお話がありましたが、この制度はコミュニケーションの面でも有効であり、新人オペレーターの OJT にブラザー制度を導入する会社が多くなっています。かつては OJT の指導担当者には年の離れたベテランオペレーターを指名していましたが、ブラザー制度では、入社 3 年程度の新人と年齢の近いオペレーターを指導役として指名し、新人 1 人について先輩指導役一人を専属とします。年齢が近いこと、常に一緒に業務を行うことなどから、新人と指導役間の双方向のコミュニケーションが容易になります。ベテラン指導者の場合と異なり、先輩からの指示を鵜呑みすることなく、疑問点があれば無理なく再確認を行なうことができるなど色々な効果があるようです。

司会： 水素に限らず、プロセスの漏洩を発見した場合、皆様の会社ではどのように対処することになっていますか。

林： 異常を見つけたらすぐに近くの社員に連絡するよう協力会社を含め入場者に指導していました。連絡を受けた社員は予め定められた連絡経路に従い対応しますが、これらは常日頃から班・課・部・事業所の各レベルで、訓練されていました。基本的にプロセス漏洩は事故扱いでの対応となりますが、ポンプのメカニカルシールや軸封部のパッ

キングなど状況に応じて連絡経路で判断できる要領を定めていました。被害拡大の防止措置を最優先に、漏洩部は稼働中の修理は原則として行わず、部分停止を含め停止しての対応策をとることとしていました。

司会： 今回の「あなたにできること」では LOTO への言及はありましたが、ラインブレイクのルールの話が出てきていません。この事例ではこの辺りも重要だと思いますが、如何でしょうか。

藤村： そうですね、この会社に LOTO の基準があり運用されていれば、事故を防ぐことができた可能性は大きいですね。LOTO は、「危険エネルギーを完全に遮断し、それを作業が終わるまで再投入できないようにする」ものですので、配管の一部を取り外す前に、どこで遮断してロックするかタグ(表示)するかを計画しなければなりません。その設備を管理している製造や出荷などの担当部署がこれを実施し、遮断するため、運転手が一人で修理をするといったことは起こり得ません。また、ロックは関係者全員がそれぞれ鍵をかけるため、一人が操作を間違えたために漏洩するということも起こりにくくなっています。

林： 経験では稼働中、停止中に関わらず、ラインブレイクが必要な際には、作業許可書の手続きが必要でした。この手続きの中で、作業安全分析・リスク評価と対策・LOTO・防護具・立会・圧抜き洗浄などが検討されます。製造部門・工部門・保安部門・協力会社などの関係者による作業安全打合せの実施も必要でした。

飯濱： LOTO は米国では 1980 年代末から法制化されているので、一つの重要な事故予防方法として記載されたのだらうと思います。一方で、ラインブレイクの安全手順は原則論をきちんと固めた上で、個別の案件に対してどのように対応するか、林さんが言われたように作業手順書を誰が作成して、誰が点検と承認を与えるか、を日頃の教育訓練を含めて、会社組織を上げて息長く活動できていないと、直ぐに事故に繋がります。LOTO を実行するだけではラインブレイクの手順欠落による事故は無くせないと思います。幸運にも勤務していた会社は全社基準と教育資料がしっかりできており、それに基づいて個別の事業所は固有のプロセスに対応したラインブレイク基準を作成し、現場を熟知した社員の中からラインブレイク管理責任者を選任して、教育訓練を受けさせて作業指示書の作成に当たらせる事となっていました。職制の製造課長は日本でも米国でも3-4年で交代するので、課長承認は必ずしも安全管理上有効とは言えません。私は担当した工場やアジアの顧客にラインブレイクの教育と作業指示書の様式作成を指導していたので、その仕事の大変さが身に染みて感じられました。

司会： Beacon にはプロセス機器の修理はトレーニングを受け、認定された人しか実行してはならない旨の記述があります。しかし、電池が切れたり、電球が切れたりした場合は、現場の皆さんが対応されていると思います。皆さんの会社では、これらを修理とどのように区別されていたか。

牛山： 私の経験では、室内の電球などは自分で取り換えていたと思います。しかし、電機品については電気の専門家が交換することになっていました。電池などでも制御機器についているもの場合は、計装工事の方に依頼して交換してもらっていました。また、天井の蛍光灯など高所にあるものの交換は高所作業になりますので、運転員が行うことはなかったです。

飯濱： 工場の中でも防爆管理区域と非防爆区域では、当然ですが電気機器の仕様も扱いも異なっていました。防爆管理区域の中の機器の交換は防爆を解除しなければならないので、定修中かそういう時でないといけません。また、非防爆区域であっても天井高さが6~7メートルあり、電球交換にも高所作業車が必要なので運転員が交換できるものではありませんでした。

司会： 最後に全体を通して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。

頼： 脱 CO2 でアンモニアや水素を燃料として大量に使用する時代が来るかもしれません。(原料国生産、国際物流、荷揚げ保管&充填、国内物流、ユーザーでの使用:全ての段階で未知数な事が多い)。過去の Beacon でアンモニアローリーの破裂事故による多数の死亡事故(セネガル)が紹介されましたが、あの国のアンモニアの取扱い思想は今回の事故事例に類似しています。これから水素・アンモニアがどの程度燃料として使われるかは未知数ですが、アンモニア・水素を含め化学物質の取り扱いに熟知した我々の知見が必要とされる時代に備えこの談話室で皆さんと切磋琢磨して参りたいと存じます。

司会： 皆様、色々なご意見やご経験談をありがとうございました。実務で水素を経験された方が多くて、具体的なお話を沢山伺うことが出来ました。また、LOTO やラインブレイクについても、お話を伺うことが出来て、全体としてとても有意義な議論がされたと思います。この議論が、読者の皆様に設備の設計や運用における安全に役立てて頂ければと思います。

キーワード 水素、水素供給設備、LOTO、ラインブレイク、運転手、トレーラー、水素ボンベ、最小発火エネルギー、Nelson Chart、高温水素侵食、HTHA、API RP 941、ガasket、ボルテックス、コミュニケーション、作業安全分析、防爆管理区域、アンモニア

【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