

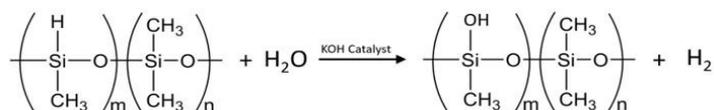
<p>PSB (Process Safety Beacon) 2022年5月号 の内容に対応</p>	<p>SCE・Net の 安全談話室(No.191) http://sce-net.jp/main/group/anzen/</p>	<p>化学工学会 SCE・Net 安全研究会作成 (編集担当: 竹内 亮)</p>
--	---	---

「もし～したらどうなるか？」ハザードレビューのための重要な質問

(PSB 翻訳担当: 頼 昭一郎)

司会 : 今回の Beacon の事例は、混合禁忌物質を混入させた為に想定外の化学反応が発生して水素が発生し、それに引火して爆発が発生し、4人が犠牲になった事故です。まず、この事故についてもう少し説明して頂ける方はいますか？

竹内 : この事故は 2019 年 5 月 3 日、米国イリノイ州のウォキーガン(Waukegan)にある AB Specialty Silicones 社(以下 AB 社)の工場 で Andisil®EM652 という商品名で市販されているエマルジョンを製造中に発生したものです。AB 社は国内外に向けシリコン製品を手広く生産販売している会社です。このプロセスでは TD 6/12 Blend という界面活性剤が入ったタンクに XL10 というポリマーを加える手順になっていました。事故はバッチプロセスの2バッチ目で発生しました。1バッチ目は品質検査で規格を外れたために水酸化カリウム(KOH)の 10%水溶液で調整していました。2バッチ目の投入作業を始めた時に、XL10 と KOH の容器が良く似ていた為、1バッチ目の調整で使い残した KOH を XL10 と間違えて XL10 ポリマーの入っていたタンクに投入した為にタンク内で以下の反応が起こり、水素が発生したものです。



金原 : 本事故の最終報告書を読みました(*)。規格外れというのがpHであり、その調整にKOHを使っているとのことでした。また、使い残しの液が入ったドラム缶が残っており、それが他のドラムと類似していた結果、原料・添加剤と間違えて入れてしまったとのこと。残液が入ったドラム缶を区分するという手順が明確でなかったことも問題であったことです。 (*)<https://www.csb.gov/ab-specialty-silicones-llc/>

上田 : この KOH は反応式には Catalyst と書いてありますが、触媒として使っていたのでしょうか。

竹内 : 報告書には、AB 社は製品の pH 値が低い場合に、pH 値を上げるために KOH を使用していたと書いてありますので、この反応式では KOH が触媒の働きをしたという意味だと思います。製品に KOH を入れても問題はないが、原料に KOH を入れたために反応してしまったということだと思います。

司会 : ありがとうございます。それでは、この事故について皆さんのご意見を頂きたいと思います。

竹内 : CSB の報告書によると、この会社は 2019 年 3 月にも形状の似たドラム缶に入った化学物質を間違えてプロセスに投入するというニアミスを起こしています。この時に、似た容器による間違いに対する対策をしっかりと講ずるべきだったと思います。ニアミスでも事故調査を行うことの重要性はそこにあると思います。

金原 : このニアミスに対して報告書では、この会社は手順の見直しと再教育にとどまっており、それが問題であって本質的な改善を行わないと不十分であると言っています。また OSHA や RMP(Risk Management Program)に対しても、この製品の製造は基準を満足していないと記述されています。化学工学会 SCE・Net で「プロセス安全講習会」が予定されていますが、その事前講義の中で、プロセス安全確保のためには、より本質安全に近い改善・改造をしないとイケない、手順改善というのは簡単に安価にできるので、往々にしてそちらに頼ってしまうが、それでは表面的な改善にとどまる、と言っています。この事故の最終報告書にも同様の説明がされています。良い教訓です。

今出 : おっしゃる通り、手順の改善だけではヒューマンエラーもあるのでリスクは充分に下がらないと考えられます。特に危険性の高いリスクに対しては管理的対策だけでは不十分です。本質安全や工学的な対策も必要です。

竹内 : そうですね。OSHA PSM でもリスクレベルが高い場合の対策は人の行動に頼る管理的対策だけではダメだとされていたと思います。

塩谷 : Beacon によると、原料投入時に二人作業でダブルチェックすることになっていたが、効果が無かったということですね。ダブルチェックによる方法は形骸化し易いことも事実だと思います。日本の工場では省人化が進んでいま

すので、二人作業でのダブルチェックは負担が大きく、形骸化を促進する要因になっています。やはり、工学的対策が必要だったと思います。

金原 : 報告書で知りたかったのは、何故pH 調整に KOH を使っていたのか、その使用に対してどのような処置基準があったのか、またその危険性についてどこまで調査し、周知させていたのか、なのですが、見た範囲では記述がなかったです。また僅かでも KOH を添加してpH 調整するのであれば、水素が発生すると思いますが、それに対し、機器類のシールは不十分であったとのこと、排ガス処理ラインが万全でなかったこと、さらに上記のニアミスでもガス検知が機能しなかったのにしっかりと対応しなかったなど、管理面で問題が指摘されています。

上田 : CSB 最終報告書では、2 つのガス検知器が設置されていたが、事故のあったプロセスから生成された水素を検出する目的ではなく、違う場所に設置されていたため、水素放出開始から発火まで気が付かず、従業員が生産棟に留まり、被害が拡大したと報告されています。

今出 : 水素が発生することを認識されていたかどうかはどの様に報告されていたのでしょうか。認識されていなければ、対策も取っていなかったでしょうね。

頼 : 反応工程で酸・アルカリが混ざると水素が発生するので注意せよとの社員教育はされていた様ですが、何処まで浸透していたのか分かりません。実際に起こるとは考えてもいなかったというのが実態ではないでしょうか。

竹内 : Beacon には SDS に水素発生危険性は書いてあったのに、認識していなかったとありますので、オペレーター達は SDS をちゃんと読んでいなかったのだらうと思いました。

頼 : どういう誤操作をすると水素が発生するか、その為にどういふ対応が必要かまで議論されていないことが問題です。つまり、プロセスハザード分析(PHA)をやっていないということです。Beacon にある様に TSR(テクニカルサービスリクエスト)で済ませていたことが問題だと報告書は指摘しています。

山岡 : 今回の事例に係わる運転操作についての PHA をどのように行ったのかわかりませんが、例えば、金原さんが指摘された何故pH 調整に KOH を使ったのか、とともに、pH 調整をする理由(規格はずれを起こした理由)とその可能性を把握していたか、KOH 水溶液は Si-H 結合のある化合物に対して反応性が高く、反応して水素が発生することを共有していたか、このことを考慮したか、過去に KOH による pH 調整をしたかどうかをチェックしたか、などを議論したのでしょうか。

金原 : pH 調整が定常的に発生するものか、異常値に対応する為の操作なのか、さらに言えば製品をアルカリサイドにする為か、中性領域におさめる為なのか不明ですが、そのような調整作業を他の原料と同じ大きさのドラムで行うことがおかしいことであって、小型容器で少量ずつ行うべき操作であると考えます。やはりニアミスへの対応が甘すぎた結果と考えますね。本質原因が何か、までをきちっとやればこのようなことにならなかったと考えます。

司会 : この Beacon の「知っていますか」では化学物質の容器が似ていることによる間違いを防止する為に、容器のラベルの重要性が指摘されています。皆さんの所ではどのような工夫をされていましたか。

金原 : これはプロセス安全管理上の問題のみならず品質管理上でもしっかりと対応しなければいけないポイントであり、ISO9000 で手順を決め、守るようにしています。識(色)別管理のほか、区分線や看板を立てて混合使用することがないようにしていると考えます。可能であれば、ドラム缶の色や形は見分けがつくようにすべきでしょうね。

今出 : 職場はバッチプロセスで原料の梱包形態はコンテナ、段ボールボックス、紙袋、プラスチックドラム、ペーパードラムなどでした。外見がよく似たものも多かったと思います。梱包にはバーコードラベルを付け、予定されていない原料をスキャンすると投入できないような仕組みにしていました。完全ではないにしても投入ミスリスクは少なくなっていると思っています。

塩谷 : 睡眠剤混入事故を起こした小林化工の事故報告書を読むと、小林化工でもハンディターミナルを用いたバーコード管理システムを運用し、秤量時にハンディターミナルで原料容器上のバーコードを読み取った上で、手入力で投入量を入力していたようです。しかしこのシステムは承認された製造指図書に記載の工程にのみ適用され、裏マニュアルに記載の未承認の工程には適用されていませんでした。誤投入はまさにこの未承認工程で発生しました。未承認工程の運転記録が電子的に記録されることを避けたのかもしれませんが。もしハンディターミナルを全ての工程で活用していたならば、今出さんのコメントにあるように小林化工の事故は防止できていたかもしれません。大変残念です。

永嶋 : 化学物質の製造メーカーと協議をしたこともありました。製造メーカー側は自社の管理のために、その識(色)別管理を行っているわけですが、たまたま他のメーカーの別の化学品の梱包形態と色や形が似ていることもあり、

その場合には受け入れ側の私の会社で混乱が生じることが何度かありました。こういった場合には、ヒューマンエラーを防止するために、資材課を通して製造メーカーと協議をすることも有効でした。具体的には、その製造メーカーに、私の会社に出荷する製品だけ、別の色のカバーを付けてもらいました。製造メーカー側の手順書を変更してもらうことが必要になりますので、きちんと資材課を通して協議することが必要になったわけです。

竹内： サプライヤーとの間の取り決めも重要ですね。特別なことをして貰うと、先方にも負担になりますね。

永嶋： ええ、一部の費用は当社の方で負担することもありました。

金原： 入れ間違いもあり得ることでありますが、受け入れ規格を外れた原料が入ってきて、それを使ってしまい、品質面や工程面でトラブルが発生したことがあります。受入検査をすべて行う訳にはいかないのが難しい問題ですが、統計学的な頻度で抜き打ち検査をして、異常を見出すことも大切です。

司会： この事例の様に、ヒューマンエラーが原因で事故になってしまった、若しくは事故になりそうになった経験や事例をご存知の方、お話をお聞かせください。

金原： 単純なバルブの操作ミス、指示の読み取りミスによる操作違い、原理原則を知らずに逆操作を行ったなど、数多くのニアミスがあります。その中で原理原則を知らなかった例を紹介します。NO(一酸化窒素)とNO₂(二酸化窒素)を1対1の割合で吸収塔に送り、吸収液で両者を吸収する設備があります。NO₂は濃度が高くなると黄色味を帯び、さらに濃度が高くなるとオレンジ色になります。その為、排ガスはややNOリッチで管理していました。ところが、入社1、2年後のある日、排ガス出口から真っ赤なガスが出ていました。中央操作室に飛んで行って状況を確認すると、NOリッチが行き過ぎて高濃度のNOが排出され、空気と接触してNO₂になっていることが分かりました。皆はNO₂リッチと思い込み、何とかNOを過剰にしようとしていたため、やればやる程悪くなっていたのです。直ちに逆操作することを提案しました。最初彼らは信じなかったのですが、まずはやってみて下さい、と言ってその操作をしてもらいました。するとスーッと色が消えたのです。その後、蒸留塔や反応の操作で逆操作をしている例に出くわし、原理原則でモノを考えること、またその中身を良く教えることの大切を知った次第です。

永嶋： 原料の粉末を溶剤に溶解させるバッチ設備があり、溶剤を0℃以下に冷却してから手動で粉末を供給する運転手順になっていました。あるとき溶剤が0℃になる前に、オペレーターがうっかりして手動で粉末を供給してしまい、タンクの中に未溶解の粉末が残留して掃除が大変だった経験があります。しかし、このときの上司が「如何にしてヒューマンエラーを防止するか」ではなく、「ミスをしたオペレーターを如何にこっぴどく叱りつけるか」ということに重点を置いて対処するのを見て驚きました。つまり、ミスをしたオペレーターを徹底的に叱りつける、あるいはオペレーターに懲罰を与えるという恐怖政治を行うことでヒューマンエラーを減らそうという考え方だったわけです。当然、ヒューマンエラーをシステムチックに防止する対策やもし起こってしまったらどうするかといったことは配慮されていませんでした。この事例は私がまだ会社に入社したての頃だったのですが、いまだにこのような考え方をする人が一部にいるように思います。『人間はミスをする』という前提に立って、システムチックに対処方法を構築する必要性を痛感しています。

竹内： JR西日本福知山線の脱線事故は正にこれでしたね。

山本： 医療事故で、患者の人工呼吸器に滅菌蒸留水をセットすべきところを、類似の容器に入っていた消毒用エタノールを滅菌蒸留水と思い込み、誤ってセットして患者が死亡するということがありました。直接の要因はラベルの確認という基本的な注意義務を怠ったためです。指導と教育を充分行うことが対策として重要ですが、一方では、容器の形状を変えとか、保管場所での区別をしっかりと行うとか、ヒューマンエラーを誘発しないような物理的な対策も必要であったかと思えます。

金原： 私が生産課長の時代に年に一度、シフト各組と個別に懇親会をやりました。その時に各組から必ず出た意見は、仕事を終えて帰宅しても「確かあの操作をした後にあのバルブを閉めたはずだったがどうだったかな」とか「あの操作手順は間違いなかったけど、どうだったかな」といったことが心配になって、会社に電話することが多々ある、と言っていました。「それだけに年に一回でもこのような会を開いてもらい、上司に自分の不安や悩みを聞いてもらえることは大変心が癒される」と言っていました。皆さん、強い責任感を持って仕事をされています。ベテランになると往々にして何気なくやってしまうルーチン作業であっても、後から振り返ってみると不安になるようです。責任感と緊張感を持って、そしてそれが評価される作業する風土作りも大切かと思えます。

永嶋： 指示伝達におけるヒューマンエラーを防止するために、安全環境室が各部署の指導者に徹底した話があります。それは、N人の部下に指示を伝える際には、その指示を、手を変え、品を変えて√N回繰り返す必要があるという

ことです。たとえば、10人の部下がいたら、伝達方法を工夫して変えながら3回指示を繰り返すということです。余談ですが、微細粒子がブラウン運動をすることは良く知られていますが、熱力学的には N 個の粒子がある場合には、そのうち \sqrt{N} 個の粒子は必ず全体と異なった動きをするそうです。人間もブラウン運動をする粒子と同じだという訳ですね。このため、プラント運転でも N 回操作すると、 \sqrt{N} 回は不安を感じるようになります。先ほど金原さんのお話にあった「確かあのバルブを閉めたはずだったがどうだったかな」といった不安なども \sqrt{N} 回に含まれる自然な反応なので、金原さんのお話にあるように躊躇せず発信する風土作りが大切ですね。

三平 : 入社以降長く関わったPVCプラントの反応装置は、大規模で典型的なバッチ方式で、稀に副原料の投入ミスが起きました。懸濁分散用の水を仕込んだ後に重合開始剤と分散剤をマンホールから投入し、閉止後に VC モノマーを仕込む手順で、計量済みの指定された容器とは違うものを誤って入れてしまったのです。製品グレードが切り替わるタイミングで次のグレードのものを投入するケースが多かったです。間違えないように日勤の計量班がいろいろと工夫していましたが、シフトのオペレーターの見誤りや思い込みなど諸々の原因で完全には防げず、後に自動計量、投入が出来るようになってなくなりました。誤投入による被害はほとんど品質トラブルで済みましたが、稀に異常反応を起こして VC モノマーの全回収を行ったこともあります。

竹内 : 私の所では、夜勤は人間の生理的な問題のために間違いを起こしやすいので、日勤者が投入原料を計量して準備しておいてあげるということをしていました。

牛山 : ヒューマンエラーはなかなか防止が難しいことですが、一つは視覚的にすぐ違いが分かるように可視化することが大事だと思います。今回の事例であれば、例えば KOH のドラムには黄色のテープを貼っておいたら原料ドラムと異なることがすぐ分ったのではないのでしょうか。以前、似たようなラベルの化学物質を受け入れる際、間違ったタンクに接続し、硫化水素発生による死亡事故を起こした事例がありました(Beacon2012年4月号)。絶対に間違ったラインに接続できないように、物質ごとに異なる専用のカップリングにするというような対策も有効でしょう。

司会 : 今回の Beacon はハザードレビューの際に「もし～したらどうなるか」の問いが重要だと説明しています。皆さんは、どの様なことに気を付けてハザードレビューを実施しておられましたでしょうか。

金原 : 製造部長の時代、異常処置基準書に「その異常を放置したら」を書かせていました。例えば温度が上限になった時、その処置方法も書かせますが、その処置基準の下に「異常を放置したら: $○○^{\circ}\text{C}$ になると暴走反応が開始する」などできるだけ定量的に具体的に書かせるようにしました。対処方法を教える場合も原理原則に基づいて説明する必要がありますが、放置した場合についても原理原則に基づいて説明することが大切です。

竹内 : これは何度になると暴走反応が起こるかとか、手に負えなくなるとかのデータを持っていないと教えられるんですね。この様なデータをプロセス安全情報として持っていることが重要だと思います。

金原 : このあたりは教育資料に記載されていることですし、教育を行っていますが、それを基準書に落とし込むことによって、「知っている筈、分かっている筈」を防止させる狙いがあります。

今出 : 「もし～したらどうなる」という問いは、そのプロセスの知識や経験がないとなかなか出にくいと思います。ハザードレビューにはプロセスエンジニアリング、電気計装、運転、保全部門などからそのプロセスをよく知っている人員及び運転員、保全員などの現場で作業されている人員にできるだけ参加してもらうようにしています。また、レビューをするときにはファシリテータのスキルが重要になりますね。

竹内 : プロセスハザード分析(PHA)に運転員、保全員などの人たちを参加させるのは、どの様なプロセスのリスクがどこにあるかを知って貰うという教育的な面でも重要です。

頼 : 最終報告書を読むと、この会社では 2014 年にもドラムの爆発事故を起こしています。原因は異物の混入により発生した水素と会社は認識していた様です。反応器に異物が投入されるのを避ける為“原材料投入前の二人確認ルール”が 2014 年に制定され、更に 2019 年 3 月のヒヤリを受け“手順化”されています。その時にそれでもミスが起きる可能性を考えたハード面の対策を取らなかった会社の責任は重いと思います。取り扱い物質が OSHA PSM の対象になっていなかったのも、PHA をやっていなかったのも、法的に実施が求められていない化学物質でも、リスクアセスメントを実施する事の重要性を再認識した事故ではないかと思っています。

竹内 : ドラム缶の爆発と言えば、可燃物の入っていた空のドラム缶が爆発した事例もあります。そういう意味では、空容器をどの様に扱うべきかまで含めて、PHA で検討する必要があると思います。

司会 : 2016 年 7 月号の Beacon には、化学的適合性チャートを作成する CRW4 という無料のソフトウェアが紹介されて

いました。どなたか、このソフトウェアを使用して見た方はおられますか。

山本：元いた会社に紹介したことがあります。CRW は次のサイトからダウンロードすることができます。

<http://www.aiche.org/ccps/resources/chemical-reactivity-worksheet-40>

約 5,200 の一般的な物質のデータシートがあり、そこから仮想的に化学物質を選択して混合物(最大 100)を作成すると、自動的に禁忌物質のマトリックスが作成できます(表1を参照)。表のNが混合禁忌物質のペアで、Cが特別の条件下では注意すべきペアとなります。表にはYがありませんが、Yは混合して適合性がある(危険性がない)ペアです。

今出：現役時代は CRW4 のようなソフトウェアは使っていなかったのですが、プロセス安全情報の必須事項として化学物質反応マトリックスを作成することが求められていました。プラントで使用している配管材や容器材などを含む化学物質をマトリクスにしてどのような反応が起こり得るかを一覧できるようにしていました。SDS や国内外のデータベースなどを調査する必要があったので結構大変でした。最近 CWR4 のような無料のパッケージができていますので非常に楽にできるようになっていますね。

混合物の管理			混合物の報告		適合性チャート	
チャートの印刷			チャートデータの出力			
NFPA			化学物質のペア			
健康性	可燃性	反応性	家庭用化学製品 適合性チャート		アンモニア、溶液、 10%以上 多くて35%以下	次亜塩素酸 ナトリウム
3	1	0	アンモニア、溶液、 10%以上 多くて35%以下			
3	0	1	過酸化水素、水溶液、 少なくとも8%以上20%以下	N		
3	0	1	水酸化ナトリウム溶液	C	N	
			次亜塩素酸 ナトリウム	N	N	N

表1 CRW4の出力例
(出典：Beacon2016年7月)

司会：結局、この Beacon ではプロセスハザード分析(PHA)をしっかりやりなさいと言っていると思いますが、HAZOP の経験のある方はおられますか？

山本：HAZOP はプロセスを区間(ノード)に分けて、区間ごとにプロセスパラメータ(流量、温度、圧力など)の正常値からのずれ(ガイドワードで指定)が起こった時のプラントへの影響を検討して対策をするものですが、新規の設備導入時に行うことがありました。

竹内：HAZOP はガイドワードでハザードを探す方法を取っていますが、ガイドワードから外れたハザードを見つけにくいという弱点があります。一方、"What if"は PHA 参加者が思い付かなければ、ハザードとして認識できないという弱点がありますね。

木村：非定常のリスクアセスメントの議論の中では"what if"が出て来ることが多くて、認定の事業所に伺うとそういうことをやっているとおっしゃることが増えています。また、平成 28 年 2 月に KHK が制定したリスクアセスメント・ガイドライン(Ver.2)*においては参考資料 C として欧米におけるリスクアセスメント取組状況の解説がなされており、その中の「表 欧米におけるリスクアセスメント取組状況のまとめ」においても What-if の活用に事例が示されています。* https://www.khk.or.jp/public_information/public_introduction/raguideline/raguideline_ver2.html

竹内：非定常と言うとバッチプロセスを思い浮かべることが多いですが、連続プロセスでもスタートアップやシャットダウンも非定常ですから、どうしても非定常運転のリスクアセスメントは必要ですね。

今出：また、工事関係でも非定常作業が多いので、工事安全分析(JSA)でも"what if"の手法はよく使われますね。割合と簡単にできるという利点はあると思います。

司会：皆様、今日は沢山の意見や経験談をありがとうございます。Beacon の最後の標語は、『時には、「考えが及ばないことまで」考える必要がある』と締めくくられていましたが、ハザードレビューでは「想定外でした」では済まされないことを意味していたと思います。ハザードレビューに取り組まれる読者の皆様の参考になれば幸いです。

キーワード：混合禁忌、ヒューマンエラー、CRW4、ハザードレビュー、化学的適合性チャート、"What if"、RMP、√N、HAZOP、ガイドワード

【談話室メンバー】

今出善久、上田 健夫、牛山 啓、金原 聖、木村雄二、塩谷 寛、澁谷 徹、竹内 亮、永嶋良一、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、