PSB
(Process Safety Beacon)
2024 年 3 月号
の内容に対応

SCE・Net の 安全談話室 (No.213)

http://sce-net.jp/main/group/anzen/

化学工学会
SCE・Net
安全研究会作成
（編集担当：牛山　啓）

プロセス異常には集中して対応せよ

（PSB 翻訳担当：頼　昭一郎）

司会 ： 今月号は、具体的な事例に関するものではありませんが、何らかの原因でプロセスがシャットダウンした時や再スタート時の対応について取り上げています。何か事例があった方が理解しやすいと思いますので、非定常シャットダウン時や再スタート時に事故となった、皆様のご経験や事例をお話いただけますか。

塩谷 ： 緊急シャットダウンに関連する事故事例では T 社の爆発事故があります。これは上流工程である反応工程が緊急シャットダウンしたため、下流の精製工程の蒸留塔はフル運転から大幅な緊急ロードダウンを実施せざるを得なくなり、蒸留塔の適切な温度制御に失敗し、通常運転では塔頂側には存在しない塩ビモノマーを大量に追い上げてしまったことが事故につながっています。温度制御の失敗の要因としては、大幅なロードダウンのほかに、反応工程の緊急シャットダウンにより蒸留塔へのフィード組成が通常より大幅に変化したこと、トラブル対応中で係全体が多忙を極め、蒸留塔の操作は一人のオペレーターに委ねられ他の人の監視が行き届かなかったことが挙げられると思います。このように連続プラントでは上流工程のプロセス異常は下流工程の運転に大きな影響を与えるため、その影響を特定しこれを緊急時対応マニュアルに反映して教育訓練を行うことが重要ではないでしょうか。またこの事故では、蒸留塔を担当したオペレーターは蒸留塔の中段温度にばかり注目したため、塔頂と塔底の温度は全く無視され管理基準から大きくて外れていました。今月号の Beacon の「あなたにできること」には、プロセスの安全運転範囲を理解することとの記載がありますが、この事故ではそれができていませんでした。加えてなぜその運転範囲でなければいけないのかという「Know-why」を理解することも非常に重要です。

山岡 ： エチレンプラントの操業開始3年後に起きた事故事例ですが、この事故はその後の事業所全体の保安・防災管理推進の基礎になった事故でもあります。事故の発端は事業所の用役センター内の電気設備工事の作業中、高圧送電線の接触による短絡で事業所全体が一斉停電し、エチレンプラントも停電して自動停止したことです。運転者がプラントの全系を安全に停止する措置を進めていたところ、突然復電したため急遽運転再開の作業に切り替え、15 基あるナフサ分解炉の内7基で運転を再開したところ、炉のドラフトファンが停止のままだったため、その 7 基を炉の燃焼熱で溶損させてしまい、復帰まで1か月以上掛かって製品の供給先に多大な迷惑をかけたという事故です。原因として用役センターとエチレンプラントの連携が不十分で用役センターの対応が把握できなかったこと、緊急停止後の全系の停止作業中に突然通電したため、運転班長は運転再開を決断しましたが現場が混乱して冷静さを失い、運転班長も分解炉の燃焼排ガスを強制排出するドラフトファンを手動で作動させることを失念したことなどが挙げられました。再発防止策として、炉内温度 VH で燃料遮断のインターロック設置などの計装設備の改善、用役センターとエチレンプラントの緊急連絡用直通電話の設置、定期的な緊急時対応訓練の実施などを進めました。

竹内 ： デュポンの La Porte プラントで発生したメチルメルカプタンの漏洩事故もその例です。水和物による配管の詰まりが解消したものと思い込んでプラントを再起動させようとした際に、思わぬところに水和物の詰まりが残っていて、またベントラインへのバルブが開いていた為にベントラインにメチルメルカプタンが流入し、更にその状態を把握せずにベントラインのバルブを開けてしまった為に室内に大量のメチルメルカプタンが放出された事故でした。通常の作業として圧力が上がるとベントラインの弁を開けて対応していたため、この時も同じ状況と思い込んで弁を開けてしまったようです。

牛山 ： 一説には石油精製の事故の 50%はシャットダウンやスタートアップ中、あるいは異常事態の中で起こっているということです。米国 CSB はスタートアップおよびシャットダウン中の事故調査に関する Safety Digest（CSB Investigations of Incidents during Startups and Shutdowns）を発行（時期不明）しており、この中には以下の 3 社の事例が紹介されています。

・BP Amoco 社（米国ジョージア州）：2001 年 3 月、ポリマー工場のスタートアップ時、反応器下流側の設備故障のため、反応液をポリマーキャッチタンクに排出したところ、そのタンクが爆発、3 名死亡。タンク内容物の分解でガ

スが発生、発泡し、ベント配管を閉塞したため内圧が上昇し破壊したもの。

・First Chemical Corp（米国ミシシッピ州）：2002 年 10 月、シャットダウン中の蒸留塔（高さ約 44m）が爆発 3 名負傷。蒸留塔内には約 4. 5m^3 のモノニトロトルエンが入っており、スチームの手動弁が洩れていたため加熱分解し、暴走反応を起こしたもの。

・Bayer Crop Science（米国ウェストヴァージニア州）：2008 年 8 月、メチルイソシアネートを原料として Methomyl を製造する殺虫剤プロセスで計装設備を DCS 化し残渣処理容器（圧力容器）を更新した後、再スタート中にその容器が爆発、2 名死亡。スタート前の安全審査を実施していなかったほか、新システムへの運転員の訓練も不十分だった。計装のキャリブレーション未実施で容器もテストしていなかった。

米国 EPA も Enforcement Alert（2021 年 2 月発行）にプロセススタートアップ中の化学品事故リスク（Risk of Chemical Accidents During Process Startup）に関して報告しており、この中では法的な要求事項と共に以下の 4 つの事例を整理しています。

・Phillips 66（米国テキサス州）：2019 年 2 月 Wood River 製油所の第 2 蒸留設備の定修後スタートアップ中に熱交部から引火性炭化水素約 23tが放出され火災となり、1 名負傷。この熱交は本来バイパスすべきものであったが、運転員が間違って弁を開けたため、熱交配管開放部から炭化水素が放出されたもの。

・Kuraray America(米国テキサス州)：2018 年 5 月、EVAL プラントで定修後の再開準備中火災が発生、21 名負傷。スタート前の反応器加圧テスト中、異常過圧状態になり、安全弁から約 1tのエチレンが噴出着火したもの。

・Dupont（米国テキサス州）：2014 年 11 月、殺虫剤工場のスタートアップ中、ベント配管から約 11tのメチルメルカプタンが放出され、4 名死亡。詳細は前記竹内氏の説明参照。

・Williams Olefins（米国ルイジアナ州）：2013 年 6 月、バトンルージュの南約 30kmにある Geismar のオレフィンプラントスタートアップ中に、プロピレン精製塔リボイラーが破裂、約 13tの炭化水素油が放出され着火爆発、2 名死亡、167 名が負傷した。リボイラーは 2 基あり、運転中のリボイラーの水側（加熱側）がファウリングしているとみて運転員は予備器に切り替えるため通水を開始した。しばらくして切り替え準備中のリボイラーが破裂したもの。予備器の炭化水素側は弁が閉まっていたが、炭化水素が漏れ込んでいたようで、それが加熱され圧力上昇したらしい。（注：蒸留塔には安全弁が付いていたが各リボイラーには安全弁がなく、このような弁を取付けたリボイラーには圧力容器として安全弁を必ず付けるように、日本の労働安全衛生法では規定されている。）

澁谷 ： 50 年近く前の事例ですが、私としては一大事の事例です。私は先ず研究所に勤務となり、フッ素樹脂開発チームの所属となりました。会社としてはフッ素樹脂どころか高分子の事業も全く行っておらず、フッ素関連の事業計画として始められた新しいテーマでした。チームで只一人の化学工学出身だということで、先ずは四フッ化エチレン（TFE）モノマーの反応器その後の蒸留精製・重合反応槽・ポリマーの後処理など全てのプロセスを任されました。9 年後 E・TFE 共重合樹脂の開発に成功し、工場建設を行いました。君が設計したのだから運転もしてくれとなり、工場勤務となりました。重合の自動緊急停止は最初のバッチで起こりました。開始剤を投入して計画の半分程度の時に、突如反応温度が乱れて反応停止となりました。重合槽を開けると、挿入している温度計の保護鞘が折れていました。反応は溶液重合ですが、ポリマーが成長してくると析出してくるので撹拌によるスラリーの流動に耐えられず折れたのだと推理して、鞘の形状と挿入長さを変えて解決できました。スラリー濃度の変化に伴う流動状態を把握できないので、安全を見積もったつもりでしたが、私の設計ミスでした。更に反応が進んで、違った原因での、第 2 の反応停止が発生しました。80%くらいまで重合した際、回転動力負荷がかかりすぎ停止してしまいました。その後ポリマー収量を少なくしてバッチを重ねる内に、次第に負荷もあげられるようになりました。どうやらギアボックスのギアが馴染んで負荷があまりかからなくなったためのようで、これは初期トラブルといっても良いのでしょう。

牛山 ： ギアはスタートアップ前の慣らし運転はしてあったのですか。

澁谷 ： 一応してありましたが、スラリー濃度が上がらないと大きな負荷がかからないため、完全な馴染みができていなかったものと思われます。一応想定していたのですが、これ以上大きな動力は付けられないということでスタートに踏切ったものです。

三平 ： 私の経験ではプロセスの大規模な非定常シャットダウンは、停電を主とするユーティリティの停止が原因になって引き起こされています。停電は落雷、自家発電設備や売電先の電力会社での事故でたびたび起きていて、過去の事例を元にプロセスの安全なシャットダウン方法がマニュアル化され、オペレーターには定期的な訓練がなさ

れて、発生時にはしっかり対応できています。国内各社のどこもこれらをしっかりと行っているのではないでしょうか。ユーティリティ起因以外では、コンビナート内の他社から供給を受けている原料ガスの不時停止や反応器など単体機器の故障停止がありますが、これらも対応法が検討され、マニュアル化がなされています。

牛山 ： 停止した後の再スタートまでにどんな点に特に注意されたのでしょうか。

三平 ： 有機液体製品プラントの反応器のみが停止した場合、後続の精留装置が生きている時はそれらの分離液を反応粗液タンクへ戻すリサイクル運転に切り替えていました。精留塔 2 塔で低沸、製品、高沸の三成分に分けて通常は専用タンクへ送っているのを、この時は反応器の後にある粗液タンクへ戻していました。トラブルが回復して反応器がスタートすると、ラインを本来の形に戻します。精留塔を単独で全還流させて、高濃縮によるトラブルや事故を引き起こした例が過去の PSB 記事に載っています。

司会 ： Beacon では設備が非定常シャットダウンした際の安全上の対応が必要と述べていますが、具体的に皆様はどのような点に配慮されていたかお話いただけませんか。

頼 ： 非定常シャットダウンは火災・爆発・地震・原料ストップ等による全プラント緊急停止と特定工程で発生した運転異常への対処を分けて考えていました。問題発生工程だけの緊急シャットダウンでは他工程は中間タンクの保有量の範囲でロードダウン又は循環運転をし、運転課は安全なシャットダウン＆ロードダウンに注力、特に問題発生工程のシャットダウンによる他工程への影響を最小限にする事に注意を払いました。原因究明はプラント安定後、運転課長主導で行われていました。その為、原因検討にある程度時間が掛けられる様な設備的余裕（タンク）も重要でした。その間、関係者は資料（プロセス・機器メーカーの情報等）を集め、原因検討会議の際に運転課長の判断をサポートする様にしていました。これには日頃の情報収集が大切で特に他社の事故情報が一番参考になりました。一つの原因で安心せず徹底的に検証する事が求められました。原因究明には運転員からの状況聴取も欠かせません。日頃から運転員の安全意識向上に課長がどれだけ努めていたか、運転員との信頼関係がどれ程あるかも事故発生時に問われました。 最終決断は運転課長の仕事で、日頃の部下や関係先との良好な関係維持等、運転課長の人間力が問われました。 以上が私の時代の経験ですが、今は HAZOP・LOPA や PSM の情報が整備されているのでそれの情報の活用が大切と思います。安全に王道はない、日頃やるべき事をシッカリやっておく事に尽きるのではないでしょうか！

竹内 ： 以前 Beacon でも紹介したのですが、ミストを含むガスをルーツブロワで引っ張っているプロセスですが、ブロワにミストが入ると破損する可能性があるため、前にミストセパレータが付いていて、その捕集ミストを下部から U 字管トラップおよびチェッキ弁付の排液管で抜いていました。ある時、ミストセパレータの掃除をしようということになり、きれいに掃除をし、排液管の液も抜いて再スタートしました。チェッキ弁が働かなくなっているのに気が付かずスタートした為、液抜き管から空気を吸ってしまい、それをルーツブロワに引っ張ってしまいました。そのためミストの液抜きができずセパレータ上部に水が溜まって行き、ある時その水がブロワに一気に流れてルーツブロワが破損しました。これは単なる掃除で非定常シャットダウンという認識がなかったため起こった事故ですが、もし非定常シャットダウンと認識して PSA を行っていれば事故は起こらなかったかもしれないと今にして思う次第です。

頼 ： アンモニアプラントで起きたボイラー爆発事故事例を紹介します。6人重傷、一人死亡、他に軽傷者複数名出た事故です（私がエンジ会社への出向でイラクに駐在中の事故の為、直接関与はして居りませんが後から聞いた内容の紹介です）。 丁度事務所で、課長以下スタッフ全員で会議中に事務所に近接したプラント付属の高圧蒸気ボイラーより異音発生 （シューと言う音）し、ボイラーで材質テスト中だった為、担当スタッフを先頭に課長以下全員がボイラーに直行してしまいました。途中で課長が課長代理に“お前は計器室に行って緊急処置の指揮を取れ”と指示。課長代理が計器室に向かっている途中でボイラーが爆発、スタッフと駆け付けたボイラー担当運転員 2 名が被災。先頭を行った担当スタッフは死亡、課長代理は軽傷で済んだと言う事例です。教訓は『全員が異常発生現場に行ってはならない。（私も新規プラントのスタート時には異常が起きると何時も課長の後をついて回っていたが！）緊急停止時の役割分担が重要』ということです。運転員は緊急時の役割分担が明確だったが、管理職・スタッフの緊急時の役割分担は不明確でした。特にスタッフは OJT として課長に付いて事故現場に行く傾向がありました。

司会 ： 次に再スタート時に対応すべき事項、安全上の注意点なども挙げて頂けませんか。

竹内 ： 今回の Beacon ではシャットダウン後の再起動に重点が置かれた書き方になっていますが、プロセス異常を検知してもシャットダウンせずに定常状態に戻そうとすることの方が多いと思います。プロセスの状態を正しく把握できていない内に何らかのアクションを取ってしまったことで事故になったケースが多いです。プロセスの状態を把握できない場合は、初めに安全なシャットダウンの方法を考えるべきだと思います。私のいた会社では「慌ててアクションを起こさないように」という意味で"Take 2"という活動がありました。

山岡 ： 定修明けのスタートアップは全系が安定するまで気を遣います。マニュアル通り操作していても微妙なずれが生じ、いつもと違う状況が出ることがよくあります。ほとんどが小さな異常でしたが、ある定修明けのエチレンプラントのスタートアップ時、現場のパトロールをしていた時アセチレンコンバーター付近で異常な音がしたのですぐ計器室に連絡したら異常音が消えました。現場課長に確認したところ、コンバーターへの水素投入量を調整したところ正常になったとのことでした。他所でアセチレンコンバーターの暴走反応で大きな事故があったので怖かったです。スタートアップ時は特に多数の目と耳が必要で、異常を感じたらすぐ対応できる体制、現場と計器室の連携が重要です。

牛山 ： 日本ではスタートアップ時の安全対策など自主管理が主体で具体的な法的規制はあまり記憶にありませんが、前述の EPA の資料に記載された、米国の連邦規則 40CFRPart68 にはきちんとリスクマネージメントプログラムを実施することとされていて、一般的に以下の事項等が要求されています。

・事故の潜在的な影響、最悪ケースの評価などの実施。
・過去 5 年間の事故分析
・管理システムを改善・実施し、危険性評価を実施すること。
・安全対策、メンテナンス、監視システム、運転員訓練方法など事故防止プログラムの実施。
・地域の緊急防災グループとの対応、放出事故対応、ヘルスケア、運転員の訓練対応、公衆への通報、災害対応など事故発生時の緊急対応プログラムの実施。

飯濱 ： 今あげて頂いた CFR の内容は、私どもの会社では関連会社を含め、社内規定に取り込んでおり、全ての高危険性事業所では実施しなければならない事項になっております。ただ、これを確実に実施するには多大な労力を要し、5 年くらいのスケジュールを決め、工場管理職と製造課・技術課長のスタッフはそれに追いまくられているのが実情でした。この基準は元々デュポンがやっていた基準をベースとして連邦政府が規制化したものです。

牛山 ： 日本では大会社以外は、なかなかこの通りやるのは大変だろうと思いますね。

飯濱 ： そうですね。デュポンは日本に合弁会社がいくつかありますので、そのユニットではこの基準を取り入れているところもあります。ただ、その会社全社で実施しているかどうかはパートナーの意向によると思われます。

頼 ： 認定事業所で実施されているプログラムを、同じ事業内の関連会社や他の事業所（認定対象外事業所）にどの程度展開するか各社悩んでいる所と思います。認定事業所には必要な労力＆投資見合いのメリットが準備されていますが、"保安レベルの向上"という目標だけに人と金を掛けようと言う経営者がどれだけいるか、経営者を説得しようという保安担当役員がどれだけいるかの問題と思います。私も本社の部長時代にそれで悩みました。保安問題も品質問題も経営者が何処まで謙虚な気持ちで問題と正面から取り組めるかに掛かっていると思います。トップが品質問題、保安問題に謙虚に取組めば部下の悩みは無くなるのですが、トップが収益第一で、部下も遠慮して具申しないと事故が起きてから反省する事になります。

司会 ： Beacon には非定常シャットダウン時と定常シャットダウン時で別の手順書を準備している会社もあると記載されていますが、皆様の会社ではどうでしたか。

牛山 ： 私のところでは定常作業用と非定常(緊急)作業用の手順書は別になっておりました。非定常作業手順は、時間が無い中で正しい作業をする必要がありますので、定期的な訓練を実施していました。

頼 ： 私の所も別建てのシャットダウン手順書がありました。定常でも非定常でも手順書はプラント全体停止の流れと工程別停止の流れに分けて（例えば原料精製工程、合成・分解工程、製品精製工程、製品化工程、包装・在庫・出荷工程）作成していました。非定常シャットダウン用は停電や火災等の全工程同時停止用と個別工程停止用に分かれ、定常シャットダウン用は工程毎に作られていました。Beacon 事例のプロセス異常に対しても、私の所ではまず異常発生工程を緊急停止し、他の工程は負荷を落として緊急停止工程の回復を待つようにしていました。中間タンク等の保管量が少ないと原因究明が不十分なままの再スタートに繋がりかねないので、中間タンクの設

置につき本社との駆け引きも製造課長の重要な任務でした。緊急全工程シャットダウンは一番安全ですが、再スタートが大変（時間も手間も）なのでそれを避ける工夫が日本の製造業の特徴だと思います。

竹内 ： 中間タンクは、緊急時にリスクを考慮し、対策を検討する時間を確保する意味で必要ですね。

頼 ： 緊急時に必要な要員を集めるためにも中間タンクがあるのは助かりました。

司会 ： 今回の Beacon に運転準備完了チェックリストが記載されていますが、具体的にどのようなものかどなたかご説明いただけますか。

竹内 ： 工事後の安全確認は OSHA PSM では「運転前の安全レビュー」(PSSR)で規定されていますが、CCPS の RBPS では「運転準備」のエレメントでシャットダウン後の再起動の準備が規定されています。通常の清掃だけなど、設備の工事を伴わない場合は設備の状態、即ち機器や計装が運転モードになっているかのチェック、配管系ではバルブの開閉が運転開始状態にセットされているかをチェックリストで確認しています。ただ、先ほど掃除ということで始めたのが事故に繋がったものもありますので、それほど単純な話ではないかもしれません。工事を伴った場合は、PSSR に基づいて図面への反映、実機の安全性確認、手順書の修正とトレーニング、等の確認も必要になります。

飯濱 ： 私のいた工場で、清掃だけということで設備の点検はしない場合が続いていたのですが、ある時清掃だけといいながら分解・点検・再組み立てをする機器があり、その内のアジテーターのインペラーを付けないまま組み立てし、点検しないまま運転に入ったためアジテーターが機能せず問題となったことが起こりました。再組み立て時のミスは起こりやすいので必ず点検が必要で、どこまで点検し、どこは省略するか基準を決めておく必要があります。

竹内 ： おっしゃる通りで、前述の私の事例も清掃だけということだけだったのですが、実際には配管もばらしているのですから、その対応をしなければならなかったですね。

司会 ： その他今回の事例に関連していままで触れられていない点でもありましたら、お話ください。

山本 ： 今月の Beacon ではプロセス異常への対応では『集中』が必要とあります。当然のことですが重要なことだと思います。プロセス設備の設計に携わっていた頃ですが、建設後の試運転では種々の異常が発生します。その一つ一つを解決していくのが試運転の目的ですが、異常が発生したときに『集中』するということは、『理論的に考える』ことだと理解できます。この『理論的に考える』ことで、多くの場面で救われました。『あなたにできること』にあるように、『全ての起こりうる原因と結果を取り扱うこと』も理論的に考える例だと思います。原因から導き出された結果と、実際に直面している異常状態を対比して、あり得ない『原因』を排除して、本当の『原因』を絞っていったと思います。この時に重要なのは、常識ではあり得ない『原因』についても取り上げることです。試運転では、考えられない『原因』が特に多かったように思います。更に重要なことは、関係するメンバー全員が『集中』することです。ホワイトボードなどにメンバーの意見を書き出して、メンバーで確認しながら『原因』を追究していきました。

司会 ： 今日は、具体的な事例が取り上げられてなかったためお話しにくかったかもしれませんが、緊急シャットダウン時の対応は非常に重要ですので、それに関する皆さんのご経験や、貴重なご意見や知見をお話頂きありがとうございました。

キーワード： 緊急シャットダウン、再スタート、ロードダウン、定常シャットダウン手順書、緊急時対応マニュアル、工程別停止、中間タンク、連邦規則（CFR）、リスクマネージメントプログラム、運転準備完了チェックリスト、運転前安全レビュー（PSSR）、蒸留塔、エチレンプラント、アセチレンコンバーター、重合槽、ルーツブロワ、ミストセパレータ、ベント配管

【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、