

<p>PSB (Process Safety Beacon) 2015年6月号 の内容に対応</p>	<p>SCE・Net の <b>安全談話室</b> (No.108) <a href="http://www.sce-net.jp/anzen.html">http://www.sce-net.jp/anzen.html</a></p>	<p>化学工学会 SCE・Net 安全研究会作成 (編集担当:山岡龍介)</p>
--	--	--

今月のテーマ: 運転の仕方(決められた通りに)

(PSB 翻訳担当: 澁谷 徹、山岡龍介、竹内 亮(纏め))

司会: まず、訳の検討の中で、いくつかの単語や文章について色々意見が出され、議論が展開しましたが、今月担当の澁谷さん、山岡さん、特記することがありましたらお願いします。

澁谷: 今月号の記事は、馴染みのある事例で、内容的には理解できるのですが、適切な日本語への訳が難しい部分がいくつかありました。例えば、タイトルの「conduct of operation」、特に conduct の訳です。これは「あなたにできること」にも出てきて、「実施」、「実践」、「指導」、などの意見が出され、全体の訳として「職務の遂行」なども出ましたが、いずれも本記事の内容にはしっくりきません。みなさんの議論から、このフレーズには「運転の中で、決められたことをその通り実行せよ」という思いが込められているということで、最終的に、付記を入れて「運転の仕方(決められた通りに)」になりました。

山岡: 「あなたにできることは」に出てくる「critical」も議論になりました。この単語は、私の現場でもそのまま「クリティカル」を使っていますが、言う人や置かれた状況によってその危険の程度(深刻さ)が違ってくるので、適切な日本語への訳は難しいですね。議論の結果「決定的な」となりましたが、もっと良い表現があるかもしれません。

司会: 今月号は、運転中に反応器の温度制御ができなくなって事故になった事例ですが、今回の記事全般についてのご意見や感想、疑問点などをお聞かせください。

長安: 「あなたにできることは」の最後の2行ですが、具体的に何を言おうとしているのでしょうか。1つ目は「安全指標が破られた場合」、2つ目は「安全指標が限度を超えた場合」の様に過去形にしたらわかり易いのですが。

竹内: 1つ目は、「手順を守ってやるべきことをやりなさい」、2つ目は「手順を守ってやったのに、超えてしまったことを報告、調査につなげなさい」ということを言いたかったのではないのでしょうか。訳の表現としては、全体の文脈から、1つ目は「安全指標が破らざるを得ない場合」という限定的な表現よりももっと広い意味で、「安全指標が破られるようなことがあれば・・・」が、2つ目は、「安全指標が限度を超えるようなら・・・」の方がよいかもしれません。

澁谷: 1つ目の「指標が破られる」のが許されるのは、初めからそれを想定して対策を講じていて、その手順を踏んで行っ場合に限られると思いますし、2つ目の「限界を超えそうになって管理者に伝える」ことが許されるのは、そのことが手順書に明記されていて手順書に従って行った上で、管理者に報告するようなケースだと思います。既に書かれているように、手順書に従い「常にその通りにすること!」です。

山岡: 製油所の水素化分解設備は、日本では高圧ガス保安法で特殊反応設備に指定されていて、警報器付内部反応監視装置や緊急停止装置などの設置が義務付けられています。米国ではこのような規制はないのでしょうか。また、一般に暴走あるいは異常反応の防止にどのような安全対策がなされているのでしょうか。

小林: “止める、冷やす、閉じ込める”は原子炉の話ですが、私の経験したポリオレフィンの反応は“冷やす、止める、逃がす”が暴走反応を防ぐ、あるいは事故を防ぐ鉄則でした。ここにあるように人によって防ぐ、あるいは防げるケースの方がこのことに限って言えば、珍しく感じます。“冷やす”という対策は反応系に大きな冷却システムを持たせることとその制御システムで対応しますが、この性格上限界はあります。“止める”は適当な反応停止剤が存在すればあり得ますが、これにも適用できるケースには制限があります。したがって、最後の砦は“逃がす”=“安全なところに放出する”ということになります。暴走反応は時間の余裕がありませんから破裂板のようなものも使われます。以上の対策は人が介在しないか、一部にしか介在しないことになります。ここで取り上げられた事故の場合、「逸脱の定常化」の防止だけで終わるのは本質安全を目指すという視点からは違和感があります。

- 三平： 1 ページの制約の中で連続式とバッチ式の 2 件の爆発事故が取り上げられていますが、掲げたタイトルに合わせて執筆者が半ば強引にまとめたためか、事故内容の説明を削ぎ落とし過ぎていて、的確なコメントを出しにくくしています。アラームやインターロックの設計が具体的にどうなっていたかも分らず、全般にオペレーターの運転操作の自由度が大きすぎると思いました。従って記載内容についての細かい議論はそこそこにして、同種の事故について各人の経験や防止策に焦点を当てて、意見を出し合うべきだと思います。
- 牛山： 確かにこの事故は Beacon だけではよく分かりにくい点もありますので、EPA および CSB のレポートを調べてみると、参考に示したように共に設計上の問題や安全管理上の多くの問題を持っていて、いずれも起こるべくして起こった事故ということが言えます。Beacon は運転側の管理を主題に取り上げてはありますが、特にマネジメント側の安全姿勢が根本問題にあるのが伺えます。
- 長安： 私も同感です。Beacon の事故例と解説を読むと、“逸脱の定常化”にいたったことが最大の問題のように受け取れますが、大事なものは何故そうなったのかだと思います。1 例目の事故では基準を超えたら“システムは停止されることになっていた”(was supposed to be shut down)と書かれていますが、もっと根本的な追求が必要だと思います。基準を超えたら停止しなければならぬと手順書に明記されていたか、明記されていなかったとしたらそれは何故か、明記されていたのに手順が守られなかったとしたらそれは何故か、を追求して再発防止策を明確にすべきだと思います。
- 山崎： 取り上げられた二つの事故例では、危険な状態を経験しながらも設計上の問題を放置したまま運転を継続したことが事故の背景にあると思います。事故のレポートを読むと、運転の仕方(決められた通りに)というのとは分かりますが、幾度か暴走反応のヒヤリハットを経験しながら、なぜプラントの改善に結び付けられなかったかも反省すべきでしょう。日本でも 1973 年に山口県徳山市の化学工場のエチレン装置のアセチレン水添塔で、計装用空気バルブの誤操作を発端に、水素注入量の制御ミスがあり、過剰の水素が注入されてエチレンの接触分解の発熱反応が加速されて暴走反応を起こし、高温のため配管が破裂し、大量に漏れたガスに引火し、爆発・大火災になりました。火事は近くの幾つかの蒸留塔、熱交換器を破壊し、直径 60m の大きなファイアボールを発生させました。
- 司会： 反応器での暴走反応や異常反応による事故は日本でもよく起きていますが、ヒヤリ事例も含めてご経験や知見がありましたらお聞かせください。
- 澁谷： 以前にも話したかと思いますが、研究所でフッ素樹脂の実験をしていたときのことで。100CC 程度のステンレス製超高耐圧容器に四フッ化エチレンモノマーを入れ、線照射をしました。モノマーの発熱を伴う不均化反応により高圧となり、容器の一部が破損したため、容器は弾丸のように飛んで防護壁に当たりました。もし飛んだ方向が悪く、線源に当たっていたら大変なことになっていたと、今思ってもゾットします。放射線重合の初期実験で、十分な検討をせずに実験を行ったと反省しました。
- 渡辺： 定期修理からのスタートではなく、生産調整での運転停止後の重合スタート時に暴走反応を経験しました。長時間窒素置換していた釜での反応スタートですが、反応が非常に弱いため、開始剤を少量ずつ追加チャージしましたが、突然、反応が暴走しました。一週間ほどの運転停止後からのスタートのため、定修からのスタートのように釜の中身の反応挙動、技術スタッフの立ち合いなど十分なスタート体制をとっていなかったのが問題でした。この対策として、スタート時の体制の見直しを行い、また、開始剤の量と様子見時間、分割チャージ回数などの反応スタート手順を決め、反応しない場合はブロウダウンするようにしました。
- 小林： 暴走反応の例は、発熱反応や発熱分解反応が典型的だと思います。私自身もオレフィンやスチレンの重合をやっていたから、いくつかの経験もあります。それらは発熱反応であり、加えてラジカル反応のケースもあります。高密度ポリエチレンの OTSS(ワン・タッチ・ストップ・システム)の構築は入社してごく初期の仕事で、計器類が完全には電子化されていない時であったような気がします。
- 竹内： 修士論文の為に固定床流通式反応器の気相発熱反応における暴走を研究しました。反応器に供給される原料の温度が急に下がると、反応器内部の最高温度がどんどん上昇しながら出口側に移動していく Temperature Excursions と呼ばれる暴走反応です。「温度を下げれば安心」という常識とは逆の現象ですので、この様な反応器の運転には事前の知識が必要だと思います。
- 三平： 私が長く関わった PVC の製造では大型のバッチ操作式反応器が使われています。数十トンの VCM を仕込んで重合反応を行うので、潜在するエネルギーが極めて大きく、異常反応や暴走反応が起きた時の危険性は連続操作式反応器に比べてずっと大きいです。水中に VCM を分散する懸濁重合法に拠っているので、異

常反応は分散不良によって引き起こされます。一部の VCM が反応器内で塊状重合を起こし、発熱量が増して圧力・温度が上昇して来ます。本来 9 割程度の重合率で行う残 VCM のガス化回収を早く行うことで、ガス化による潜熱冷却と攪拌補助の効果で安全な方向へ持っていきます。停電による反応器の攪拌力喪失ではずっと厳しい状況になるので、今はポイズン(重合停止剤)を投入して短時間に反応を停止させます。この方法が開発される前は器内の VCM をガス化、大気へ放出して反応を止めていました。反応器の数も多く、危険な操作でした。

バッチ反応の冷却装置は最大発熱量(PVC では終盤に発生)に余裕度を加えて設計していました。後のバッチ反応器の爆発事象例では詳しいデータがありませんが、冷却装置に余裕がなかったことが原因の一つではないかと思いました。バッチ反応では加熱により目標の反応温度へ持って行き、反応熱発生後冷却に切り替えます。この切り替え操作は重要で、冷却が遅れると温度が目標値より上がりすぎて異常反応の引き金になります。このオーバーシュートを起こさないために昇温から冷却への切り替えを PVC では自動制御化しています。事象例ではこれをマニュアル操作で行っていたと理解し、本来は冷却装置や温度制御系の設計の問題として取り上げられるべきだと思いました。

牛山: 反応器ではないですが、異常反応の例がありました。高温のバッチ常圧蒸留塔で蒸留停止時に窒素シールするのですが不完全で、微量の空気が入ってしまうようで、何年間か運転した後、蒸留中に塔内で爆発が起こり、内部のトレイやダウンカマーがすべて破損脱落したことがありました。調べてみると、微量酸素が高温で化合物と反応し、過酸化物を形成したもので、長時間蓄積して爆発したためです。正常時には存在しないものが、状況が変化したり、反応物が蓄積して異常反応を起こすことがあることの怖さを知らされました。

司会: 「逸脱の定常化」と言う言葉が出てきます。危険に対する感性が落ちると、陥りやすい保安上の盲点です。この言葉はPSBの2012年12月号にも出てきて2回目ですが、逸脱の定常化にならないための方策などについてご意見をお聞かせください。

山岡: 工場で保安管理の仕事をしていたとき、安全教育でよく取り上げていました。当時は「逸脱の定常化」という言葉は使われておらず、私も知りませんでした。言っていることは同じと思いました。<正常でないにもかかわらず危険度が小さいため、見過ごしたり、対応を後廻しにしても何も起こらず、正常でない状態が普通になり、そのうちそれが正常状態と思ひこむ>ことにならないよう、異常を見つけたら危険性が小さくても適切に対応するよう、教育していました。

竹内: 設計者の立場からは危険が想定される場合には、安全サイドの設計をしようします。しかし、それが度を過ぎると運転者にとっては迷惑なことになり、そんなものは守ってられないという感情が湧いてきます。インターロックなどの設定値は運転側の事情も把握して慎重に決める必要があります。重要部品の交換アラームを出す頻度をシステム更新の時に従来よりも短く設定したため、誰かがアラームを解除してしまい事故になったというケースがあります。

小林: おっしゃるように、インターロックやアラームの不用意な解除はよくあり、これが「逸脱の定常化」になってしまえば事故につながった例がありました。また、非定常作業が必要な場合、解除なしには作業ができないこともあり得ます。インターロックやアラームの解除は原則として禁止すべきことですし、やむを得ない場合には、手順や、解除権限の制限が必要になります。決して「逸脱の定常化」に陥らない文化まで醸成することが必要です。

中村: 設備新設の場合、反応に係る決定的安全指標は、プロセスの基本的問題なので、プロセス条件を決めるプロセスオーナー(化学会社又はライセンサー)にて決められました。安全運転のためのエンジニアリング業務では、インターロックのやり方、冷却能力/速度、や温度・圧力の測定場所等について、プロセスオーナー及び化学会社(プロセスオーナーでなくても参加する)のプロセス担当技術者と十分に協議して決めました。実運転で逸脱の定常化があったかどうかは分かりませんが、小生の経験の範囲内では、特に問題が起こったという情報はなかったです

渡辺: 逸脱とは異常状態であるので、工程を安定化し、異常を起こさないことが基本です。それにはまず正常とはどのような状態なのかを、監視作業、パトロールなど仕事の中で、また、教育訓練で、徹底して認識させることが第一で、正常でないもの、即ち、異常であることに対して感受性を高めることです。そして異常を見つけたら報告書、ヒヤリハットを提出させ公にして再発防止を打ち、工程の安定化を図り異常をなくすことが大道で

す。例えば警報ですが、一日あたりの警報の数を削減するという活動をやったことがありました。既存の警報は一つ一つ吟味し重要度でランク付けされていないため、この部分を設計、技術G、現場とで重要ランクを決め、その過程で不要な警報を削除し、警報の音、表示の色などをランクごとに区別しました。次いで、ランクの高い警報について、発生したらその事由の報告書を提出させ、課として対策をとるといったことを実施しました。結果、工程が安定し警報は非常に少なくなったという経験があります。「オオカミ少年」のような状態が続くと「逸脱の定常化」に陥ってしまいますね。

三平：「逸脱の定常化」の言葉は知りませんでした、「慣れへの戒め」の一つとして温度、圧力等の運転指標を定められた値から安易に動かすことはやらないように指導していました。例えば温度過上昇のアラーム等の設定ではH、HH、インターロックの三段にしてあり、注意報に相当するHはオペレーターによる変更はOKとし、HHの警報とインターロックは安易に変えないようにしていました。変える時は理由を含め全員に周知するようにしており、この関係は渡辺さんが言われるように教育が大事です。

司会：多岐にわたるたくさんのご意見、ありがとうございました。反応器の異常反応や、暴走反応は爆発事故につながり易い危険な事象です。設計面や運転管理面で十分な配慮が必要ですね。特に、運転管理面で「逸脱の定常化」にならないよう、管理者も運転者も危険に対する感性を高め、小さなことでも異常を感知したらすぐ対応することの大切さを改めて感じました。

なお、今月号で紹介されている2つの事故事例の詳細について、牛山さんから情報提供がありましたので、添付します。参考にしてください。

(キーワード)

水素化分解装置、反応器、暴走反応、温度制御、逸脱の定常化、安全管理限界、安全指標

参考

2015年6月 Beacon の事故情報

#### 1. 米国カリフォルニア州の事故

- 1) 事故の内容: 1997年1月、米国カリフォルニア州マルチネス市(サンフランシスコ湾地域)にある Tosco Avon 社製油所の水素化分解装置で起こった事故で、第2ステージ第3反応塔下部の反応ガス出口配管が破裂、引火性液体・ガスが噴出爆発し、死者1名、負傷者 名の大惨事となり、近隣の住民は一時的に避難した。
- 2) 直接的な原因は第3反応塔第4触媒層が長年のコークス析出等による流体の偏流などでホットスポットが生じ、暴走反応が起こって温度が急上昇し、第5触媒槽に波及し760℃以上になり、出口配管の耐力がなく破裂したものとみられる。過去にも温度暴走はしばしば見られたようであるが、現場の意見をマネジメントが無視していた管理不足、保全の不徹底、教育訓練不足等が間接(根本)原因に挙げられている。
- 3) 温度暴走の対策として、クエンチ水素が触媒槽毎に自動的に入るようになっていたが、直前の温度上昇に対応した水素流量増による温度低下でボードマンが反応低下を懸念し一時的なクエンチ水素のマニュアル停止をしたほか、温度指示で760℃以上になるとO表示が出るのを知らず、温度表示が信頼性なしと判断していた。また前年に反応温度詳細を現場パネル設置してみられるようになっていたが、計器室には表示されず、クリティカルな温度状況は現場パネルで確認せざるを得なかった。また、警報は一つが鳴るとその状況が解除されないとほかの警報が鳴らず、緊急時の警報が確認できないなど種々の原因で対応の遅れにつながった。更に、生産維持を要請されており原料油遮断措置が遅れ、温度暴走により425℃以上になった場合緊急脱圧をして装置停止するように手順書では示されていたが、1986年設備設置後緊急脱圧は1、2回しか経験がなく、それまでは緊急脱圧をせずに対応ができていたこともあり、脱圧による他の影響を恐れオンライン脱圧は避けていたようだ。(コンプレッサー緊急停止で脱圧放散した際、放出口近辺に蒸気雲が発生したとのトラブルあり)
- 4) 配管材質は11/4-0.5%Cr-Mo 鋼(国内ではボイラー圧力容器用合金鋼 STBA23)で、許容引張り応力は400℃までは103N/mm、525℃で半減、625℃以上ではほとんど0である。このため、流体温度が760℃以上を継続すれば当然破壊が起きる。

#### 2. 米国ニュージャージー州の事故

- 1) 事故の内容: 1998年4月、米国ニュージャージー州パターソン市(マンハッタン北部ジョージワシントン橋から西へ約30km)にあるモートンインターナショナル社(現ルーム&ハウス)染料工場で起こった事故。7.5m<sup>3</sup>反応器で染料(イエロー96)合成反応中に暴走反応で反応物が噴出し、着火爆発・火災により建屋プラントが焼損、9名が負傷した。反応物が近隣地区に流出した。
- 2) 直接の原因は、反応スタート時の温度が通常より高く、スタート時に使用した加熱スチームがいつもより長く使用しすぎ、冷却水への切り替えが遅れた等が挙げられる。背後要因としては以下のような管理側の要因のほか教育訓練がなされていなかった。
  - ① ラボから本設備にスケールアップする際、2エチルヘキシルアミンを全量投入後、反応剤(o-ニトロクロロベンゼン)を少量ずつ添加していたものを全量一度に添加するように変更したが、変更管理無し。
  - ② 1996年に反応器容量を倍にしたことで、反応物単位量に対する冷却伝熱面積が10%減少し、温度暴走頻度が増えた。(変更前20%→50%)。この変更に対して変更管理を未実施。
  - ③ ラボから要請された暴走反応に対する緊急冷却設備や緊急シャットダウンシステムは設置しておらず、圧力上昇に対するラプチャーの放出能力が小さ過ぎた。
  - ④ 温度が通常反応温度150℃~153℃で暴走しやすい温度域に近く、195℃を超えると反応生成物が分解を起こし、急速に発熱する。この点はラボから伝えられていたが、運転側は知らなかった。
  - ⑤ 運転手順書には暴走反応時の安全対応策について記載されていなかった。また、管理側も暴走を起こした反応の解析による対応策をとっていなかった。

【談話室メンバー】

井内謙輔、牛山 啓、加治久継、小谷卓也、小林浩之、齋藤興司、澁谷 徹、竹内 亮、中村喜久男、長安敏夫、日置 敬、三平忠宏、山岡龍介、山崎 博、渡辺紘一