

PSB (Process Safety Beacon) 2023年11月号 の内容に対応	SCE・Net の 安全談話室 (No.209) 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: 今出 善久)
攪拌機が停止した！さあ、どうする?? (PSB 翻訳担当: 山岡 龍介)		
司会	: 先月号に引き続き、運転中の反応器のマンホールからナフサ蒸気が大量に放出され、火災・爆発により従業員が死傷した事故について、攪拌の危険性について取り上げています。事故概要については前回説明されていますが補足の情報などがありましたら聞かせ下さい。	
竹内	: 先月はマンホールがしっかりと閉まっていなかったことが問題視されていましたが、今回は攪拌機が止まっていた間に高温の樹脂の上に溶剤を入れてしまい、その上で攪拌機を回したので溶剤が一気に蒸発したという、攪拌機操作に着目した Beacon です。溶剤は VM&P NAPHTHA というもので、沸点から推測すると n-オクタンが主で色々混入しているものの様です。溶剤 300 ガロンを投入していたとのことですので、これが全て気化すると沸点において 600m ³ ほどになると推定しました。反応器の気相部の体積が分かりませんが、10m ³ あったとしても 60 気圧になるので反応器が密閉状態だったら爆発していた可能性があります。このプロセスの PHA (プロセスハザード分析) では、このようなシナリオも考慮して検討する必要があります。	
頼	: 攪拌機ストップから爆発迄の時間的経緯を見るとナフサ投入による冷却開始から爆発までの 90 分間、運転員は一度も反応器内の温度を確認していません。明らかに運転員のミスですがナフサ投入の目的とリスクを理解していたとは思えません。設備的対応も必要ですが、日本では何より運転員教育を重要視すると思います。管理職が運転員のプロセス理解度及び作業実態を何処まで把握していたのかも追求する必要があると思います。攪拌機の機能停止には色々な要因が考えられます。私の経験ではモーターは廻っていたが V ベルトが切断していたとか、軸は廻っていたが、翼がシャフトから脱落し攪拌出来て居なかったというケースもありました。考えられる全てに対策を取る事も大切ですが、前提として管理職が現場の実態、運転員の能力を把握する事が重要とこの事例を見て思いました。	
山本	: 今回のような物理的な操作にしろ、反応操作にしても、反応器の攪拌機が止まれば、正常な運転のときと比較して、温度の挙動が大きく異なってくると思います。この温度挙動を注意深く観察すれば、温度センサーにより攪拌機が停止していることに気づくことができるのではないかと考えます。したがって、運転員には、温度センサーにより異常を一早く検知して対応する、手順書の作成と訓練が必要だったと思います。	
司会	: この事故について皆様の感想、ご意見等ありましたらお願いします。	
竹内	: 今回の事故で蒸発した溶剤 VM&P NAPHTHA は気化することで体積が 500 倍程度に膨張するものですが、水が気化すると 1700 倍になると言われています。水は着火して爆発することはありませんが、水蒸気爆発の可能性があるため、油断はできません。	
三平	: このバッチ式反応器ではコート剤やペイントに使うポリエステルなどのベース化合物を縮合反応により製造していたのだと思いました。生成する水を除去して反応を完結させるためには高温が必要で、直火加熱が使われたのでしょう。反応終点時の内容物の保有熱量が大きいので、低沸点の溶剤を混合するには突沸防止のために攪拌しながら大量投入を避けて慎重に注入しなければなりません。設備的には攪拌機の停止で溶剤の注入弁が閉止するインターロックが必須だったと思います。	
牛山	: 攪拌機が停止すると冷却水が停止するようになっていたようなのですが、それは一般的なことなのでしょうか。冷却しているときには攪拌機が停止しても冷却は続けるものと考えていたのですが、どうして停止したのでしょうか。	
頼	: 冷却工程の開始ボタンを押すと、加熱炉が停止し冷却水が自動的に流れるようなシーケンスだった様ですが、攪拌機は運転していることが前提条件となっていたようです。攪拌機停止時には加熱工程にも冷却工程にも進めない様にしておくべきだったと思います。しかし今月号のテーマ“攪拌機が停止した！”とはズレますが、攪拌機が廻っていても、ナフサを一度に大量投入すれば同じ事が起きていたはずで、問題はプロセスリスクの理解 & 教育不足に有ったと思っています。	

司会 : 攪拌機の停止や再起動でこのような事故が起こる可能性のあるのはどのようなプロセスが考えられるのでしょうか。ご経験や知見がありましたらお聞かせください。

三平 : 攪拌機の停止により反応器が危険な状態になる例として、反応最盛期のバッチ式反応器で停電等により攪拌が止まり、冷却ジャケットやコイルとの熱交換能力が大幅に低下して、器内の温度や圧力が危険域に上がることがあります。高温でも反応が終了している今回の事例と違って、反応が継続しているために止めるための緊急的な手段が必要になります。この種のバッチ反応器の使用は多いので、トラブルや事故も多いはずで。

山本 : 重合反応で発熱中に攪拌が止まると冷却ができないので、反応器内の内容物の温度がどんどん高くなっていき、反応速度も上昇して暴走反応が起こります。これは停電時の事故が多いので、バックアップ電源を準備しておくことが必要です。また、セミバッチ反応器では、反応物質の一方を反応器に仕込んでおいて、もう一方の反応物質を少しずつ反応器に供給する反応操作をします。この場合、攪拌機が停止すると反応が進まないで、供給した物質が未反応物質として反応器内に蓄積されます。この状態で攪拌機を再起動すると、反応が一気に進みますので、発熱反応であれば反応器内で蒸気が発生して過剰圧力上昇になり、安全弁から大量の危険物質が放出したりします。この例は過去の Beacon(2018.8)にも記載されています。

URL : <https://sce-net.jp/main/wp-content/uploads/2018/08/2018-08-Beacon-Japanese.pdf>

牛山 : 攪拌機の停止による事故事例は数多くあり、修理の際の事故を除くと大きく分けて、攪拌機が停止したままにしていて事故が起こる場合と再起動したことによる事故に大別できるかと思えます。前者の例としては、古くは 1976 年イタリアのセベソの事故、1982 年堺市ダイセル社の事故や、近年では 2012 年三井化学社レゾルシン工場の事故など多々ありますが、一般には放置することにより、反応液が発熱反応して最終的には暴走反応するケースが多い様です。今回の事例は後者の例ですが、山本さんが話された Beacon の事例の他、日本でも 1970 年大阪の 5-t-ブチルメタキシレンニトロ化反応中の事故(失敗知識データベース:5-t-ブチルメタキシレンのニトロ化反応中の攪拌機の再起動による爆発)が報告されています。攪拌機の停止後、原材料や溶剤の挿入などの操作後、あるいは長時間経ってから再起動するなど、状態が変化してから攪拌機を再起動することは極めて危険であると思われ、反応物質の性状などを良く理解した上で、再起動するかどうか判断する必要があります。

竹内 : 日本触媒のアクリロニトリルタンクの爆発事故も天板リサイクルによる攪拌がされていなかったため、タンク上部に溜まったアクリロニトリルで二量化反応が進み、徐々に発熱して最終的に爆発してしまった事例ですね。

山岡 : 確かに攪拌機に係わる事故は、不適切な操作をしたために起こるにせよ、攪拌機の停止や再起動の際に起こるケースが多いですね。類似した事例を2件紹介します。一つは、反応器に攪拌機を止めたまま、フェノールと苛性ソーダ水溶液を仕込んだところ比重差によって2相に分かれ、その状態で攪拌機を起動させたため、激しく反応して内容物が噴出し作業員が負傷したという事故、二つ目は、硫酸アルミニウム製造設備の反応器で、濃硫酸を仕込んだ反応器に水酸化アルミニウムスラッジを投入する作業をしていた。その途中で投入を中止し攪拌機をも止めて休憩していたところ、反応熱と硫酸の水による希釈熱で局部的に高温部が生じ、その部分の圧力が上昇して反応器から高温の反応液が噴出、従業員が火傷を負ったという事故です。

三平 : PVC の製造ではパウダー製品の品質維持のために、大規模なプラントでもバッチ式の重合反応器が使われています。大容量の重合反応中に攪拌機が停止すると、冷却能力の大幅な低下により短時間のうちに圧力と温度が上昇して危険な状況になります。後工程の脱水・乾燥は連続操作で、その処理能力に合わせて複数の反応器をサイクル時間から決めた間隔で稼働させています。モーターや減速機は設置から保全まで十分に留意されていたので、これらのトラブルで攪拌機が停止した経験はありません。停電による攪拌停止を数回経験して怖い思いをしました。私が運転に関与していた頃は反応時間が長く、反応器の数が多かったので、停電時には複数の反応器から建屋外へ緊急のガス放出をしていました。VC モノマーに塩素を含むので、フレアスタックは使えませんでした。現在は反応中に攪拌機停止が起きると早期にポイズンを反応器に投入して重合反応が止まるようにしています。ポイズンの混合に攪拌が必要で、エアーモーターなどを併設している例があります。

司会 : 今回の事故報告書では攪拌機が停止していた原因については明記されていませんが、どのような要因が考えられるでしょうか。経験や知見がありましたらご紹介ください。

山本 : 攪拌速度の設定を可変とする方法として、攪拌機の駆動にインバータモーターと減速機を組み合わせて行う方法と、

バイエル・サイクロ減速機などのように機械式の変速装置で行う方法があります。前者は一般的には定トルク特性で、後者は定動力特性となります。インバータモータと減速機の方がコスト的に有利なので、最近はこの方式が多いと思います。この方式では、プロセスに対してモーター容量などの選定が適切でなかった場合には、攪拌速度を大きくしたり、攪拌液の粘度などが上昇したりすると、攪拌トルクがインバータモータの定格トルクを越えて負荷がかかり、攪拌が停止することがあります。そのようなことが起こらないように、プロセス側の消費動力の計算からトルクを求め、インバータモータの定格トルクと比較して、モーター容量を決定します。機械式の変速機ではそのようなことは起こりません。補足ですが、インバータは電子機器で電源の周波数を変えるもので、使用している基板の電解コンデンサーなどが劣化していきますので寿命があります。私がいた会社では、基板を2枚用意しておいて、一定期間を経るとメーカーに電解コンデンサーを新しいものに交換してもらっていたと思います。メンテナンスについてはメーカーとよく相談するとよいでしょう。

牛山 : 攪拌機の停止の原因として軸受けベアリングの故障が考えられます。私の経験では、攪拌機下部についている軸受けが故障すると、緊急に反応器内の樹脂を抜き出すような危険な作業が必要となりました。

山本 : 反応器の容量が大きくなると、下部軸受けを取り付ける場合が多いと思います。下部軸受けは、攪拌軸を円筒状のスリーブ(ベアリング)で軸ブレを押さえています。攪拌軸とスリーブとの摺動部の潤滑油は内容液そのものです。そのため、攪拌軸とスリーブの隙間に固い固形物が少しでも入り込むと摩擦により攪拌機の振動を誘発します。そのようなプロセス液では下部軸受けを付けない設計とします。一方、攪拌機の塔上部にもスラスト荷重(自重の荷重)とラジアル荷重(横の荷重)を受けるベアリングが二箇所あります。会社にいた頃の話ですが、攪拌機を納入したときに、このベアリング室に潤滑油のグリースが注入されておらず、運転から1か月余りで攪拌機が停止したことがあります。分解するとベアリングのボールがぐちゃぐちゃに壊れていました。反応中だと大変なことになっていたと思います。攪拌機の機械的な摺動部の潤滑油には特別に注意をする必要があります。

司会 : このような事故が起こらないようするためには、攪拌機の停止時などの安全インターロックの設計についてどのような注意が必要でしょうか。ご経験や知見がありましたらお聞かせください。

今出 : OSHA の PSM では安全な運転限界およびその限界を逸脱した場合に生じる結果に対応する作業手順を作成することを求めています。温度、圧力などのプロセスパラメーターに対して、機器の設計限界とプロセスの動特性に基づいて設定することになります。今回のような攪拌機の異常な停止とその後の再起動時にハザードが考えられる場合も含まれます。通常、攪拌機の停止時におけるインターロックや対応手順は検討されると思うのですが、再起動時の危険性についても評価して、そのリスクに応じた対応方法を手順書に反映することが重要です。ピーコンの事例やその他の事故事例のデータベースを事前に調査して PHA を実施するがよいと思います。

頼 : 今回は事前の兆候なしに突然攪拌機が停止し、停止アラームに運転員が長時間気付かなかった事が原因です。インターロックは異常事象が発生しそれを運転員が検知 & 対処出来なかった場合の措置として非常に有効です。何を何処までインターロック設計に組み込むかは管理職のレベル、運転員のレベル、予想被害の大きさ、頻度によりそれぞれの会社が判断する事になると思います。その為には HAZOP 等で「不具合の組合せ」から予想されるトラブルを抽出する事が大切で、過去の大事故の多くはそれが出来て居なかった事に原因が有ると思います。しかし予想される全てのリスクをインターロックに組み込むことは経済的に不可能なので投資を判断する管理職がトラブル発生確率(作業者の実力と設備の信頼性等を考慮し)と被害の大きさから判断する事になると思います。人間はミスもするものと妥協し、運転員を鍛えないで設備的対応に多くを委ねるのは如何か。運転員の教育と実力把握がインターロック設計の前提と思います。異常事象には前兆がある事が多い、運転員が気付かず処置がとれない時の為にインターロックが有ると私は思っています。この考えは、欧米と日本では少し異なるのではないのでしょうか。

司会 : また、運転手順書にはどのような記述が必要なのでしょう。

頼 : 会社により運転指示・運転手順の定義は異なると思いますので頼の経験を紹介します。

運転手順の指示には“①生産方針の説明”と“②具体的作業の進め方のモデル”の二つが必要と考えます。①を運転指示書と②を作業手順書と言っていました。①の生産方針には原料調達から製品納入までリスクの所在を明らかにし、異常時の対処方針が明示されているので運転員は生産方針の指示と作業手順書とを合わせ見なが

ら毎日の作業をする事になります。今回の事例では①生産方針で6ヶの反応器でどのようなスケジュールで何を作るのかが指示されます。そこで管理する立場で考えられる運転リスク(例えばナフサの酸化速度に注意せよ！等)を織り込んだ方針を出し、運転員が作業手順書に従って作業する際の注意点を明確にしてやる必要があったと思います。運転員が持つ個人的特性・能力に対する配慮も①には必要です。

②の作業手順書は上から目線ではなく、運転員目線で運転員が進んでやる気を出す様な書き方が大切だと思います。トラブルが発生した時に実際に対応するのは運転員ですから、スタッフが運転に伴うリスクを教え、後は運転員が自主的に運転のし易さを考え、標準操作モデルを作成している例が多い様ですが、最後は管理職が自分の言葉で特に注意して欲しい事を書き加える事が重要と居ます(管理職の人間味が現れる様な書き方で)

①②共、ベースに中長期の事業計画とその時に実施したリスクアセスメント等がありますが、管理職の仕事は都度その中の注意点や事故事例を思い起こし必要な注意を運転指示書で与える事にあると思います。

牛山 : 連続運転では処方や運転方法は既に決まっていることですが、その都度運転手順書を出すのでしょうか。

頼 : 私がいた頃は、リスク及び運転員のレベルに応じ、立合うか、指示書をだすかを管理職が都度判断していました。一番大切な事は指示を出す管理職が、プロセスを良く理解した上で実務をやる運転員の悩み及び実力を考慮し指示を出す事です。事業の拡大に伴い生産管理の範囲は原料調達から製品納入まで複雑さを増しているのに運転指示者が現場を見ずに本社ばかり気にしている様では困ります。技術情報の整備と共にプロセスを理解し、運転員の実態を把握した現場課長の育成が日本に於ける事故防止のキーと思って居ります。ルールを作ってもそれを守る人を育てなければルールは生きてこないと思って居ります。

竹内 : 不慮の事態で攪拌機が止まってしまった時に、安易に再稼働させてはいけないことを手順書に明記するべきですね。プロセスが本来あるべきでない状態の時、安易に元の状態に戻そうとして起こった事故は少なくないと思います。BP テキサスの事故でも、排出バルブが閉まっていることに気づいて不用意にバルブを開けてしまったことによって事故が起こっています。プロセスの状態を理解しないで操作すると危険な場合があります。

司会 : その他ご意見などありましたらお願いします。

山岡 : 化学反応が行われる容器内の攪拌は、反応物どうしの混合、溶質と溶媒の混合、冷却、加熱等、重要な役割もっていますが、攪拌機の操作を誤ると異常反応や異常発熱が起こり大きな事故になる恐れがあります。操作ミス以外にも怖いのは停電による攪拌停止です。攪拌機に係わる不適切な操作の防止には PHA や安全教育が主になるとと思いますが、突然の停電に備える対策として緊急用ディーゼル発電機の設置、発電機の定期点検、緊急時に即時、確実に対応できるよう訓練(緊急訓練)の実施が肝要と思います。

竹内 : PHA で何が危険であるかを把握しておかないと手順書にも反映できないので PHA をしっかりと行うことは重要ですね。今回のケースは高粘度の物質が下部にあり、上部に溶媒があったので、なかなか混ざってくれなかったのですね。また、比重が異なる物質を混ぜる場合にも攪拌機が止まっていると混ざらないので危険です。PHA でこの危険性を把握して対策を検討し、設計や手順書にも反映しておかないと今回のような事故が起こる可能性があります。

司会 : 本日は攪拌機の停止から再起動より起こった事故についての多くのご意見、知見をいただきましてありがとうございました。PHA の重要さや管理・監督者の役割など同様な事故の防止の参考としていただければ幸いです。

キーワード: PHA(プロセスハザード分析)、反応器、攪拌機の停止、再起動、二量化反応、インバータモータ、運転指示書、作業手順書

【談話室メンバー】

今出善久、上田 健夫、牛山 啓、木村雄二、塩谷 寛、澁谷 徹、竹内 亮、
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