

PSB (Process Safety Beacon) 2018年10月号 の内容に対応	SCE・Net の 安全談話室 (No.148)	化学工学会 SCE・Net 安全研究会作成 (編集担当: 山本一己)
	http://www.sce-net.jp/anzen.html	

今月のテーマ: エネルギーの危険性!

(PSB 翻訳担: 金原 聖、山本一己)

- 司会: 今回の事故事例は CFM インターナショナルが製造したジェットエンジン(CFM56-7B)のファンブレードが金属疲労で破損したことが原因の事故です。詳細な原因は調査中ですが、多くの人命を預かる航空機では絶対にあってはならない事故です。まず初めに、この事故についてのコメントをお願いします。
- 山本: ジェットエンジンのファンブレードは蟻継(ほぞ)で固定する部分とファンブレードとの一体成形で、事故は蟻継部分から続くファンブレードの根元が破損したものです。金属疲労は残った蟻継部分の破断面を走査型顕微鏡で観察し、低サイクル疲労による傷が成長して破断に至った金属疲労とわかりました。
- 三平: 金属材料に繰り返して長時間の応力が加わると、降伏点より低い応力でも、応力が集中する局部に亀裂が生じ、それが進行して破壊に到ることがあります。その破壊面に独特の波紋が見られるのが特徴のようです。航空機の構造材などは振動や圧力変化により長時間の繰り返しの外力を受けているので、疲労破壊の危険性が高いと言えます。今回の事故例では金属疲労を引き起し易い構造だったのでしょう。金属疲労が避けられない条件だったとすれば、部材の寿命を把握して定期的に交換する必要があったと思います。
- 山岡: 金属疲労についての設計面、管理面で目安として使われているものに S-N 線図があります。S-N 線図は、金属材料がどれくらいの繰り返し応力に耐えられるか、どれくらいの応力・回数で破断するかを表すもので、縦軸に普通目盛の応力振幅、横軸に対数目盛の繰り返し回数のグラフで、カーブが左上から右下に傾斜します。破断に至らないためには、このカーブの下側になるように応力の大きさ、振幅、繰り返しの回数を管理する必要があります。
- 山本: 機械装置の不具合原因の約 70%は金属疲労が原因となっている統計もありますね。部品の品質管理と使用環境での繰り返し応力と寿命の関係を把握することが重要ですね。
- 牛山: 高速回転機器の検査では、色素や蛍光塗料を表面に塗り、紫外線をあてるなどして浸透探傷試験を行い、材料の開口した傷(クラック)を探し出すことができます。このジェットエンジンのファンブレードではどんな検査をしていたのでしょうか。
- 松井: ファンブレードはチタンできています。ジェットエンジンは繰り返し応力と変形を受けるので、フライトの経過時間により、蛍光浸透探傷検査などの検査が義務付けられていると思いますが。
- 山本: 事故報告書を読みましたが、メンテナンス記録によると最後にオーバーホールしたのが 2012 年 11 月(事故は 2018 年 4 月 17 日に発生)で、その時は蛍光塗料による浸透探傷試験を実施したとあります。飛行機は製造されてから累積で 32,000 エンジンサイクル以上になっており、メンテナンスしてから 10,712 エンジンサイクルが経過していました。事故後の調査では、超音波探傷試験を実施して、破損したファンブレード以外の全ファンブレードでは異常が無かったと報告されています。今回の事故機ではないですが、2016 年 8 月 27 日にも同様なジェットエンジンのファンブレードが破損する事故が起きています。それ以降は、オーバーホールの要件として、渦電流探傷試験を実施することが検査の要件に入ってきていますね。
- 司会: なるほど、設備の健全性をしっかりと保証できていなかった訳ですね。ところで、メーカー側は何かアクションを取ったのでしょうか。
- 山本: 事故直後、4 月 20 日に製造元である CFM インターナショナルは、累積で 20,000 エンジンサイクルを有する全てのジェットエンジンのファンブレードに対して超音波探傷試験を実施することと、試験の間隔は 3,000 エンジンサイクルを越えてはいけないという作業指示書を発行しました。それを受けて、米国連邦航空局はその作業指示書をベースに緊急の耐空性に関する指令を発行しました。指令では、発行から 20 日以内に CFM インターナショナルの作業指示書に従って超音波探傷試験をすることと、もしクラックの徴候が見つかったら直ちにファンブレードを取り除くことを要求しています。同日、欧州航空安全庁も同様な指令を発行しています。
- 竹内: 金属疲労が原因の事故は他にも色々あると思います。ネット上でも橋の崩壊、列車の脱線、ジェットコースターの脱線などの事故が紹介されていますね。昔は飛行機の開発で、試験飛行の際にフラッターで翼が取れてしまうことが少なくなかったと聞いたことがあります。
- 山本: 昨年 12 月 11 日に、運行中の博多発東京行き新幹線のぞみ 34 号(N700 系)の台車に破断寸前の亀裂が見つかりました。亀裂の長さが 14cmにも達し、あと 3cm で台車枠が破断するところでした。この場合は製

作時点で台車枠を削り過ぎて、強度不足からの金属疲労が原因でした。過酷な稼働率が要求される乗り物は、十分な設計強度を有し、製作時の厳しいチェックが必要で、稼働状況に応じたメンテナンス周期の設定と検査システムもしっかりと確立しないとイケないですね。

司会： 次に、高速回転機器について、ご自分の経験した破損とか事故などがあればお願いします。他の知っている事事例でも結構です。

竹内： ルーツブロワーの中に水が大量に入って壊れて止まったことがあります。ベルト駆動でしたが、軸が突然止まった為にプーリーが粉々に割れて遠心力で吹き飛ばしてしまいました。ベルトカバーが取り付けられていたので、飛散しないで済みましたが、回転確認用の蓋を開けてたまたま人が覗き込んでいたら大変なことになっていたところでした。

澤： 回転機器の本体には鋳鉄(鋳物)が用いられていることも多いと思いますが、鋳鉄は堅くてもろいので割れることがあります。衝撃には注意しないとイケないですね。

牛山： 気相酸化反応用の空気を昇圧供給していた GM ブロワー(歯車式増速式単段斜流ブロワー)でボルトが緩み、ブレードが吹き飛んだ経験があります。

三平： 1972年に和歌山県の火力発電所で、60万kW蒸気タービンの試運転中に、バランス調整の不良により、蒸気タービンの発電機が損壊し、タービン、発電機、励磁機が飛散するとともに、発電機から火災が発生した事故がありました。事故当日まで3,600rpmの定格速度のバランス調製試験が終了して、最大負荷の3,850~3,900rpmの振動状態を調べる実験の最中でした。飛んだ部品の飛距離は最大で380mでした。発電機には攪拌ロスを減らすために水素ガスを封入しており、火災はそれが引火して発生しました。定格運転でも軸受台の振動が大きくなっていましたが、何も対応せず試験が続行されたのも原因の一つです。

澤： 発電所の蒸気タービンのローターがバラバラに壊れる事故が1970年頃は多くありました。主な原因は、起動停止の回数や負荷変動の温度変化によるクリープ疲労、焼き戻し脆化、低サイクル熱疲労によるものですが、寿命の管理方法と予測技術の進歩や製鋼技術の進歩により少なくなってきましたね。

山本： どんな回転機器でもエネルギーが回転軸に正しく伝わらないと、ロスしたエネルギーが振動、音、熱などに変換されます。現場ではそれらの現象から異常を感知できる場合が少なくないと思います。先ほどの“のぞみ34号”ですが、停止して本格的に検査する3時間前に異臭や異音が車内で報告されていました。日常の現場でも、回転機器の振動とか音、熱などに対して感性を高めておくことが必要ですね。

三平： 高速回転の機器ブロワーで軸受を交換後の起動時に、大音響がしたため直ぐ停止したことがあります。高い吐出圧が得られるように、回転数が高くなる2ポールのモータを採用していました。原因はメンテナンス業者がメンテナンス作業用の工具をブロワーの中に置き忘れたため、ブロワーの起動後に中で翼と接触したためでした。軸の芯出し用の工具などがバラバラになっていました。幸いにブロワーケーシングの内部に傷が出来ただけで済みましたが、高速回転物の接触時の怖さを実感しました。

山本： 回転機器には潤滑剤の管理も重要です。攪拌装置を製作して納入しましたが、組立工程でベアリング(円筒コロ)の軸受部にグリスを入れ忘れ、そのまま運転されていました。1カ月ほど経って攪拌機が故障して停止しました。攪拌軸には上(スラスト荷重受)と下(ラジアル荷重受)に2つのベアリングを使用していますが、分解して見ると、それらのベアリングがぐちゃぐちゃに破壊されていました。金属どうしが直接接触して摺動すると、摩擦で金属表面はすぐにボロボロになりますね。この攪拌機は80(回転数/min)の低速の部類でしたが、高速機器だとベアリングが壊れる以外にも被害を受けるかもしれませんね。

金原： グリス注入を構造や基本を知らない人にやらせると入れ方が悪く、肝心の箇所に届かずに不足する場合があります。定期修理などでは数が多いので人手が足りないこともあります。安易に考えると痛い目に会うので、注意が必要です。

牛山： 回転機器の潤滑油管理は非常に重要ですが、航空機や高圧用の回転機器などでは潤滑油の劣化状況を把握し交換することが大切で、潤滑油中の鉄分量などを定期的に計測チェックするフェログラフィーという方法で潤滑管理が行われている場合があります。

竹内： 回転機器の運動エネルギーではないですが、流体の運動エネルギーも注意しなくてはなりません。たとえば、流体中の固形物が配管に衝突して配管が破壊されたとか、流体を急激に流してウォーターハンマーを起した事例もあります。

山本： 高速で流れる流体中に温度計センサーを長く垂直に挿入して設置し、流体の運動エネルギーによりカルマン渦を発生して、温度計が振動を起し、金属疲労で根元から折れた話を聞いたことがあります。

司会： 今回のBeaconに、「高いエネルギーを持つ機器に対し、適切な設計、製作、検査、保全を確実に行うシステムを取り入れることが必要」とありますが、このようなシステムを取り入れた例があればお願いします。

金原： 高速回転の機器の振動によるトラブルは、最近では、材料の進歩やセンサーの連続測定などの管理技術が進歩しており、大きなトラブルは減ってきているのではないかと思います。粉体製品をスラリーで取り扱う

プラントでは、かつて回転機器のトラブルにより異物が混入して品質規格外れが発生することがありましたが、先ほど述べた進歩に加えて、芯出しなどの保全技術の向上したことによって規格外れが減少し、さらに品位も上がってきました。

今出： だいぶ以前、押出機(エクストルーダー)のギアボックスが長年の疲労により突然大きな音を立てて壊れたことがあります。定期的には振動を測定していましたが、予見できなかったようです。それ以来、振動の周波数分析と傾向管理を始めることになりました。

山本： 発電所の異常監視、保安全管理の強化、保安力の向上などに IoT とビッグデータの活用がされていて、劣化パラメータの積算管理が可能になったので、設備の寿命診断が出来るようになってきているそうです。

司会： 今回の Beacon では、危険性をエネルギーの視点で捉えています。高速回転機器による運動エネルギーの他に、危険性の高いエネルギーの例として、電気エネルギー、高い圧力、高い温度、重力による位置エネルギーをあげています。これらについて具体的に危険な経験とか知見をお持ちならコメントをお願いします。まず、電気エネルギーについてはどうでしょうか。

今出： 高圧ブレーカーを入り切りしていて、アーク放電によって爆発事故に至ったケースをビデオなどで見たことがあります。

竹内： 以前、雑誌にも写真が紹介されたことがありますが、デュポンでは高電圧の盤を操作する際にアーク放電に対する防護服(宇宙服のような服)を着て作業を行うようにしています。

牛山： MCC(モーターコントロールセンター)の作業をするときには、資格を持った専門家が防護服を着て行うようにしています。

澤： プラント内敷地の掘削工事で高圧電流ケーブルを引っかけて事故を起こした例も多くあります。

牛山： 敷地内での埋設電気ケーブルですが、敷設目印はあるものの、その通りに配線できてなく、図面にも反映されていない場合が多くありました。上司からプラントの下は何が埋めてあるか分からないので、ケーブルの埋設を禁止されたことがあります。このときは、ケーブルを上敷設しました。

竹内： 埋設物(ケーブル、配管など)は図面に描いて残しますが、図面は直線なのに実際は曲がっている場合が少なくありません。掘ってみたらケーブルらしいものが出てきて、良く調べて見たら残材だったこともありました。

山岡： コンビナートの用役センターで高圧電気系の受配電設備の補修工事中に工事器具が高圧電線に接触して全設備が停電したことがありました。用役センターと直結しているエチレンプラントも停電により緊急停止しました。数分後復電したのでスタートアップの操作に入りましたが、その作業中に電気・計装系の操作ミスによるトラブルが発生して、分解炉のコイルが焼損してしまい、長期にわたって操業が停止し大被害を受けました。電気エネルギーは見えないので怖いです。

司会： 静電エネルギーも製造設備内で発生するエネルギーですが、静電エネルギーについての危険性についてはどうでしょうか。

金原： 粉体を取扱う系、例えば最終工程で乾燥機を使う場合、シューターなどの静電気は除去できますが、フレコンバッグに入った時に発生する静電気の除去は難しいです。静電気が蓄積しないような対策を施さなくてはなりません。もう一つの事例として、排気系のフィルターで発生する静電気をアースで逃がしていましたが、アースに繋がっているフィルターの留め具が緩んだ為、フィルターに静電気が蓄積し、スパークにより爆発したことがあります。静電気除去対策があるからと安心せずに定期的にチェックすることが必要です。

牛山： 排気系のバグフィルターで粉体を捕集する際、静電気によく着火したことがありました。導電性のバグを使用して、バグとそれを支持するリテーナにはアースを取るようになればいいですね。

今出： 排気系のダクトとか機器に粉塵が堆積していることが多く、その粉塵が舞うと粉塵爆発が起こりうる濃度になることがあります。

山岡： 定修入りのため反応器の高温作業中に、フランジの片締めと過去の昇温・降温の繰り返しで原因で反応器のフランジから高温・高圧の水素が噴出して、着火したことがあります。着火の原因は、周囲に着火源がなかったため、水素の噴出帯電の放電によるものとなりました。高温の水素は着火エネルギーが極めて小さくなるので危険性が高くなります。

澤： ポリカーボネートを製造している会社で、フレコンから容器に粉体を投入しているときに、ドカーンと火災と爆発が起こったことがあります。投入をスタートするときには、容器に窒素パージをしなくてはいいませんが、窒素パージができていなくて、しかも、粉体 1ton を 10 秒ぐらいの速度でフレコンから投入していました。

司会： 次に、高い圧力につての危険性については何かコメントはありますか。

牛山： 定期修理のメンテナンス後のスタートアップの際、20～30K の高圧スチーム配管で、高圧用が低圧用のパッキンと似ていたため、間違えて低圧用のパッキンを設置していたのを気付かず、パッキンが破損してスチー

ムが噴出することが良くありました。

山本： ある工場で聞いた話ですが、やはりメンテナンスで一番多いのはパッキンの種類を間違えることのようにです。その工場では、パッキンの種類を間違えないように、パッキンを設置する場所に、正しいパッキンのサンプルを吊り下げて置くようにしてと言っていました。作業者がその実物を見ながら、正しいパッキンを設置することができ、間違いが激減したと聞いています。

司会： それでは、高い温度についての危険性ではどうでしょうか。

三平： ある製油所のメンテナンス後のスタートアップで、空気追い出し用スチームがドレンとなって装置内に溜まっていて、そこに高温の熱油が仕込まれた時に、水蒸気の急激な膨張で加圧状態になり、装置が破壊され、放出された油で大火災が発生しました(2017年 Beacon 4月号)。

牛山： 高炉では溶銑と鉍滓(ノロ)を分けて排出し、鉍滓は水により急冷し水滓としてセメント原料にするのですが、鉍滓に溶銑が混ざることがたまにあり、水冷の際水蒸気爆発を起こす事故例が結構多くあります。

竹内： 私の知人の体験談ですが、車のエンジンがオーバーヒートして高温になり、このとき早く温度を下げようとしてラジエーターのキャップを開けてしまって、熱湯が噴出して顔にやけどをした事故の例もあります。

牛山： 高温で使用する金属材料も気を付けないといけませんね。オーステナイト系ステンレス鋼でも650℃以上ではシグマ相の析出による耐力低下が起こり、使用中に脆性破壊を起こすことがあります。定期的な材質チェックをしておく必要があります。

司会： 位置エネルギーの危険性については、高い所にある物体が落下して運動エネルギーとなり、その衝撃が危険ということでしょう。位置エネルギーについては何かありますか。

竹内： 事前にどんな危険性があるかを想定できるので、設計段階で対策ができるのではないかと思います。プロセスでは位置エネルギー(ヘッド差)を利用して、流体を流すことがありますが、バルブの閉止がしっかりと機能していないと想定外の流入が発生するなどの危険もあります。2012年に笹子トンネルで天井崩落事故が発生しましたが、PSMでも位置エネルギーのハザードを認識する必要があると思います。

司会： 話は拡大しますが、プラント設備の外からの自然エネルギーは膨大ですね。最近日本で、台風とか地震とか自然災害が多くなっていますが、こういった自然エネルギーに対して、化学プラントで対策を検討しているとかの話はないですか。地震についてはどうでしょうか。

澤： ダウケミカルの設計のスタンダードでは、貯蔵タンクからの抜き出しラインにはフレキシブル配管は使用してはいけないことになっています。タンクの元弁は近くのガス検知器で漏洩を検知したら緊急遮断弁を閉めることになっています。ガラス製のSG(サイトグラス)や液面計も使用しません。脆弱な機器を使わずに、全ての面において頑丈に設備を建設することになっています。それで、ハリケーンなどの自然災害の恐れがあると皆で逃げることになっています。日本では消防法の地震対策で、フレキシブル配管を設置しなければなりません。国によって考え方が異なりますね。

山岡： 先日の北海道胆振東部地震(2018.9.6)では、北海道の広域に電力をカバーしていた苫東厚真発電所が強い揺れのため回転機やスチームタービンが損傷したことにより、運転停止して停電となり、送電線で繋がっていた他の発電所も全てストップし、北海道全域で長い時間停電しました。

竹内： 北海道はメインの苫東厚真発電所に頼り過ぎていましたね。LOPA(防護層解析)にも通じることですが、一つの事象で大打撃を受けない様に機能を分散することも大切だと思います。

山岡： 熱のエネルギーによる災害で思い出すのは、東日本大震災時に千葉のコンビナートにある製油所で、LPGタンクが地震の揺れにより倒壊し、LPGが漏洩して火災となった事例があります。最初のタンク火災の火災によりタンクヤードにある周囲のタンクが加熱されて全て焼け落ち、BLEVE(プレビー)という爆発事故も起こりました。

金原： 液状化対策の中の特定屋外タンク貯蔵所については、1994年に消防法で技術基準と実施期限が定められており、以前にいた会社では、危険性の高い貯蔵品を優先して、消防庁から推奨された鋼矢板リング工法などを用いて期限内に終わりました。一方、建物の地震対策については、2006年に耐震改修促進法が改定され、耐震診断を行って報告するということが努力義務となっています。工場は3階かつ1000m²以上が対象(危険物の貯蔵場は除く)になっています。評価指標として用いられるのがIS値です。以前にいた会社では、自主的な管理として人命に関わる建屋を優先してIS値(0.6)を目指して耐震改良工事を推進しています。

司会： 地震による津波や台風と高波についてはどうでしょうか。

牛山： 東日本大震災では津波により多くのタンクが流され、石油が漏れて大火災にもなりました。化学プラントでも、津波がきて設備のタンクが浮きあがり、流される懸念もあり、特に小型の据え置き型タンクへの対策はされていないのではないかと心配です。

- 金原：伊勢湾台風(1959.9)の教訓を活かし、名古屋地区で新工場を建設するときは土地をかさ上げしていました。また、中央操作機能を2階以上に設置するようにしています。
- 竹内：地震や台風などの自然災害は立地する場所によって大きく異なってきますので、用地選定では注意が必要ですし、既に被災の可能性のある場所の場合は個別の対策が必要になってきますね。
- 山本：今年の台風 20 号では、淡路島にあった高さ 60m の風力発電用の風車が倒壊したのが印象的でした。土台部分の上下 2 段のコンクリートをつなぐ鉄筋が破断して倒れたものでした。設計では風速 60m/s まで耐えられる構造だということですが、気象庁の観測値では最大瞬間風速は 28.6m/s だったそうで、原因は調査中です。
- 金原：過去の台風を調査したことがありますが、例えば伊勢湾台風であれば、潮岬で最大風速 60m/s、名古屋で 37m/s(瞬間:45.7m/s)、第 2 室戸台風では、室戸岬で 66.7m/s、大阪で 33.3m/s(瞬間:50.6m/s)となっています。内陸にある工場地帯であれば、設計の風速は 60m/s あれば大丈夫のはずですが、今回の事例もあり、設計基準の再検討が必要なのかもしれません。
- 牛山：気圧の変化も恐ろしい。工場の建屋のガラスが気圧の変化でしなり、割れないように目張りをしたことがあります。
- 三平：1999 年に南九州に上陸した大型台風 18 号は、上陸時の気圧が 950hPa、最大瞬間風速は 66m/s でした。工場設備の被害は比較的軽微でしたが、自社の水力発電所からの送電鉄塔が吹き倒され、電力会社のものも同様な被害を受けたために、1 週間ほど工場が停止しました。先日の台風 24 号でも静岡県下で広範囲の停電が起きていて、電気設備が被害を受けると広範囲に大きな影響が出ますね。
- 澤：台風の場合は、コースとか風速とかが予め分かるので、工場のマネージャーが対策について明確な指示を出さなくてははいけませんね。

司会：最後に、雷にはついてはどうでしょうか。

松井：雷は避雷針など一番高い所だけに落ちるのではなく、途中の高さのエッジに落ちることがありますね。

今出：地面にも落ちることがあります。地面に落ちた場合は迷走電流がアースを逆流することがあるようです。私が出た工場でも、地面に落ちた雷がアースを通りコンピュータまで来て、コンピュータが壊れたことがありました。それ以後はそのコンピュータのアースをはずして使用していましたが、まもなく設備変更で使わなくなりました。

司会：エネルギーの視点で工場に潜む危険性を考えると、今まで気づかなかった危険性を発見できることもあると思います。今回は工場内に限らず、外部からのエネルギーとして自然エネルギーについてもコメント頂きました。自然エネルギーは膨大ですが、備えができていれば被害が低減できます。今回も色々貴重な意見、ありがとうございます。

キーワード： 金属疲労、浸透探傷試験、渦電流探傷試験、超音波探傷試験、蒸気タービン、クリープ疲労、焼き戻し脆化、低サイクル熱疲労、アーク放電、ウォーターハンマー、静電エネルギー、シグマ相、脆性破壊、鋼矢板リング工法、耐震改修促進法、IS 値

【談話室メンバー】

飯濱 慶、今出善久、牛山啓、金原聖、小谷卓也、齋藤興司、澤寛、澁谷徹、竹内亮、中村喜久男
松井悦郎、三平忠宏、山岡龍介、山本一己、頼昭一郎

以上