

PSB (Process Safety Beacon) 2026年2月号 の内容に対応	<div style="text-align: center;"> <b>SCE・Net の</b>   <b>(No.236)</b> </div> <div style="text-align: center;"> <a href="https://sce-net.jp/main/group/anzen/">https://sce-net.jp/main/group/anzen/</a> </div>	化学工学会 SCE・Net 安全研究会作成 (編集担当:飯濱 慶)
本質安全化の原則 (PSB 翻訳担当:安喜)		
<p>司会 : 今月の Beacon はアルキル化工程のサンプリング作業を題材として、現状のプロセスまたは設備について「本質安全化」を考えてもらおうとするものです。また、題名にある「本質安全化(Inherently Safer)」および「本質安全設計(ISD, Inherently Safer Design)」という用語がたびたび出てきます。単に「本質安全」と書きますと、「ハザード(危険源)が全く無い状態」という意味合いが強くなり、現実には在りそうもない状態です。そこで、この用語になじみの無い方にもイメージして頂けるように、どなたか本質安全化の考え方や活動について具体的にご紹介頂けないでしょうか。</p>		
<p>竹内 : 本質安全化については CCPS の Dennis C. Hendershot が”Inherently Safer Design: The Fundamentals”に「ISD とは何か」の項で説明しています。化学プロセスの安全化の対策は、「本質安全化」、「受動的」、「能動的」、「手順化」に分類され、「本質安全化」は対象となるハザードを削除するか、大きく削減することであり、それは更に「最小化」、「代替」、「緩和」、「簡素化」に分類されます。「最小化」は危険な物質の量を減らしたり、高温や高圧などの危険な状態で運転する設備のサイズを小さくしたりすることです。「代替」は危険性の低い化学物質やプロセスを採用することです。「緩和」は希釈や冷却、より危険性の低い状態での運転などで、「簡素化」は不必要な複雑さを排除すること、としています。「若い技術者のためのプロセス安全入門」でもインド、ボパールの事例を挙げて有害な物質がタンクに無かった、もしくは極少量であったら悲劇は起こらなかった筈だと指摘しています。</p> <p><a href="https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20120140-1.pdf">https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20120140-1.pdf</a></p>		
<p>頼 : 本質安全設計の概念は最初に CCPS から発信され、現在では日本でも装置メーカー等で積極的に使われていると思います。本質安全で検索してみたところ</p> <p><a href="https://www.bing.com/search?q=%E6%9C%AC%E8%B3%AA%E5%AE%89%E5%85%A8%E8%A8%AD%E8%A8%88%E6%A1%88%E3%81%A8%E3%81%AF">https://www.bing.com/search?q=%E6%9C%AC%E8%B3%AA%E5%AE%89%E5%85%A8%E8%A8%AD%E8%A8%88%E6%A1%88%E3%81%A8%E3%81%AF</a></p> <p>本質安全設計とは、機械や設備が故障または操作ミスを起こしても安全に運用できるように設計されたシステムで、日本の装置メーカーでは本質安全設計を売りにしている所が多い様です。また厚生労働省も「本質的安全設計方策」を第1番に考えて対処するのが最も望ましい方法と述べています。基本思想は上記竹内さんの御説明内容に合致するものと認識しております。</p>		
<p>司会 : 竹内さん、分りやすいご説明ありがとうございました。それでは今月号の記事全体について、まずご感想を伺いたいのですが、いかがでしょうか。</p>		
<p>山岡 : 竹内さんから本質安全化について紹介がありましたが、「知っていますか」にその対象が具体的に例示されているので、実際に本質安全化を進める上でたいへん参考になるとの感想をもちました。設計だけでなく化学プロセスのライフサイクル全体に適用できるということで、PDCA サイクルを廻して改善しながらより良い設計、安全管理の推進に繋げていけると思いました。また、本質安全化は職場の皆さんの安全意識向上にも役立つと思います。</p>		
<p>頼 : 今月の Beacon の事例は、過去に何度か軽微な事故を起こしたサンプリング作業を、本質安全の考え方を適用して解析、サンプリング回数を2回/日から1回/週まで減少させた事例を挙げ、“危険は管理するより排除した方が良いと本質安全化の原則を紹介して居ります。Beacon の作業写真を見ると作業環境、作業姿勢、保護具等、気になる箇所が沢山あります。会社がリスク削減の為に回数を減らしてくれたら運転側は同時に作業方法の見直しをすべきと思いました。サンプリング回数が減ってもそれで運転員の緊張が緩めば真の安全対策にはならないと思います。</p>		
<p>上田 : 本事例では、統計的品質管理(SQC:Statistical Quality Control)を活用し、サンプリング回数の削減を通じて本質安全化に貢献する取り組みが紹介されました。近年では、DXの進展やデータ活用技術の発展により、温度や圧力といった連続的に取得可能なセンサーデータを用いて、品質管理対象の成分値をリアルタイム(例:1分周期)で推定する「ソフトセンサー技術」が普及しつつあります。導入初期には従来通りのサンプリング回数が維持されると推測されますが、技術の信頼性が確立されれば、サンプリング頻度を徐々に削減することが可能になります。こうした新技術の普及が、より安全で効率的なプラントオペレーションへの進化を後押ししてくれることを期待しています。</p>		
<p>今出 : 今月号の Beacon の「知っていますか」にもあるように、本質安全の概念はプロセスのライフサイクルの全ての段階で適用することが望まれます。特に、プロセスの計画や設計段階のような早い段階で取り入れることができれば、その後の段階のハザードは大きく削減されることが考えられます。ただ、最悪その計画を断念する選択肢も出てくるかもしれないのですが、その評価方法が定式化されていないので、やはり判断は難しいところかと思えます。</p>		
<p>司会 : サンプリング作業はどの工場、どのプロセスでも何等かの形で実施していると思いますが、皆様をご存知のサンプリング作業について、どのような手順、安全対策を講じておられたか、ご紹介いただければと思います。</p>		

頼 : 工程分析なしが best ですが、プロセスの状態を監視するために工程分析はどうしても必要と思います。プラント内でのサンプリングなし(サンプリング配管を分析室まで引きブースの中で試料採取&分析)が次善の策(本質安全)ですが、プラントから離れた分析室までサンプル配管を引いて経済的に信頼性の高い分析結果が得られるのは一部のガスサンプルに限られました。他はプラント内のサンプルポイント近傍に分析前処理も出来る分析装置を設置することが必要でした。現実的には Beacon 事例の様にサンプリング容器に試料採取して分析室で分析するケースが多いです(サンプリングは避けられない危険作業と認識)。サンプリングはプロセス内の状態を知ることが目的ですので、プロセスの内部で状態を代表する箇所から採取することが原則です。分析目的と作業の安全性の両方を考慮して運転管理者がサンプリング場所と手順を決め作業手順書に落とし込んでいました。

竹内 : Beacon の写真の例ではボトルに直接サンプル採取をしていますが、反応器の上部にサンプリング用ノズルがあって、そこに小さな柄杓状の器具を突っ込んでサンプルを取ってボトルに移す、のような方法を実施している事例を顧客の現場で見たことがあります。この様な方式ですと、器具の外部にもプロセス物質が付着するので危険な物質を扱っている場合は被液のリスクが高くなります。

頼 : サンプリング目的は上述の様にプロセス内部物性(含む組成)の現状を確認、プロセス安全を確保する為の情報を得ることにありますので、ある程度危険を覚悟して採取することもありました。サンプリング目的の達成と作業安全を確保するために運転管理者はプロセス技術者と相談しながら、サンプリング作業及び頻度を常に見守っていく必要があると思います。しかし時間の経過に伴い異常を異常と感じない慣れが生じますので、竹内さん御指摘のような外部目線チェックは非常に大切だと思います。不安全作業は作業者を危険に晒すと共にサンプル資料の信頼性にも影響を及ぼします。Beacon の事例はそのような努力の成果だと認識して居ります。また、プロセスの異常が発生した時、原因究明のために何処から、どのようにしてサンプルを取るかも大変悩ましい問題でした。

南川 : 米国の会社が設計したプラントを千葉工場で若い時に運転していて、分析室のドラフトチャンバーに細い配管で延々と現場からサンプル液を供給する設備がありました。現場でサンプリングせず、分析室のドラフトチャンバー内でサンプリングして分析するものでした。常時供給タンクに戻すので、数分の遅れはあるが新鮮な工程液でした。操業時から使用していなかったが、省力化投資の時に配管を整備して初めて使用開始しました。雨の日でも外でのサンプリングでないで、サンプル瓶に水滴が入らないし、ドラフト内なので有害ガスを吸わないし、本質安全設計だなと思いました。

司会 : ここで本質安全化または本質安全設計(ISD)について具体的なお話を伺いたいと思います。この種の活動や管理制度に携わったことがありましたら、お話し頂けないでしょうか。

高橋 : 私のいた事業所では、既存プラントの安全性を再点検する活動(Safety Review)を長年行ってきました。リスクが許容されない場合には、安全対策の立案まで検討します。実際に検討を担当する生産管理の技術者や設計技術者には、CCPS の「Guidelines for Design Solutions for Process Equipment Failures」を参照するように指導してきました。このガイドラインは、リスクにもとづき設計解を決定する方法とともに、容器、蒸留塔、反応器、加熱炉などの設備ごとに、リスクシナリオの安全対策を本質的により安全/受動的、能動的、手続き的というカテゴリーごとに安全対策の案を提案しています。

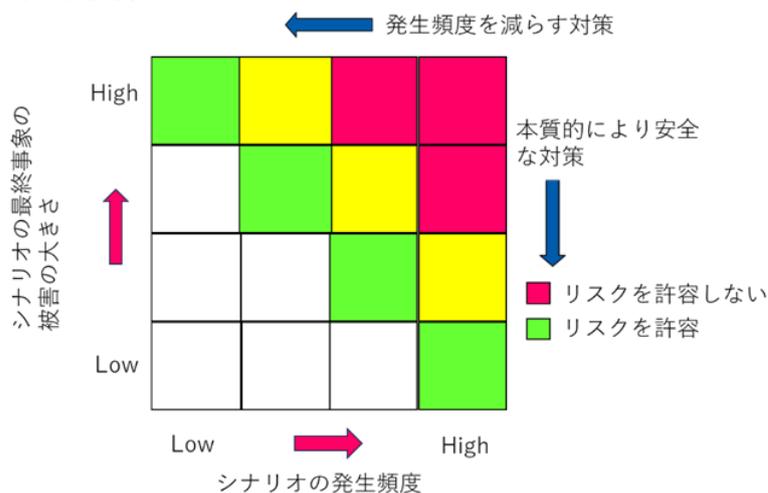
例えば、容器が何等かの原因で、圧力が上昇するようなシナリオの安全対策としては以下のような設計解を提案しています。

安全対策の戦略	①本質的により安全/受動的	②能動的	③手続き的
安全対策案	<ul style="list-style-type: none"> <li>・最大供給圧力に適應するベッセルの設計</li> <li>・開放したベント或はオーバフローラインを使用する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緊急放出装置</li> <li>・過充填を防止するための液面インターロック</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・移送中は液面を監視するという指示</li> <li>・移送の前にタンクに十分な空間があることを確認する。</li> <li>・過充填を防止するために対応することを指示するハイレベルアラーム</li> </ul>

CCPS Guidelines for Design Solutions for Process Equipment Failures の第 3 章ベッセルの Table3 を参考に作成

対策としては、この表の番号の順番で検討することを推奨していました。

また、リスクの評価は、以下の図のようにリスクマトリクスでシナリオの発生頻度を下げるのではなく、被害の大きさを下げることも推奨していました。



竹内 : 事故調査で再発防止を考えるとときには、対策内容に本質安全化を考慮することが第一のオプションです。色々な事故調査に係ってきましたが、「代替」による本質安全化、つまり扱っている物質を変えることは変更によるリスクの方が大きくて実現が困難でした。「最小化」で取扱数量を減らすことは比較的容易ですが、容器のサイズを変更するまでのことは経験がありません。実際には「本質安全化」を狙った「手順化」になってしまうこともありました。取扱数量を減らす場合、制限数量以上に物質が入れられないように設備的な工夫を施すことが推奨されます。

司会 : 続きまして、Beacon の「知っていますか」の節で、最小化、代替、緩和、簡素化等が説明されています。皆様の実際の活動の中でいずれかに当てはまる実例がありましたら、差し支えない範囲でご紹介頂ければと思います。

塩谷 : 以前勤めていた会社では、アセトアルデヒドから酢酸エチルを合成する際の触媒に用いるアルミニウムエトキシドを製造する装置がありました。この触媒の製造は金属アルミニウムとエタノールを反応させるのですが、かつては金属アルミニウムとして粉末アルミニウムを用いていました。粉末アルミニウムはそのハンドリングの全ての工程において粉塵爆発の危険があるため、非常に注意を払って運転をしていました。そこで、安全に取扱いができる代替の金属アルミニウム原料がないかと検討した結果、アルミホイルの小片を1~2mmの粒径に丸めたものを原料として入手できることが判りました。実際のプロセスに導入した結果、一般の粉体と同じように取扱いができる上、粉塵の発生が全くなく安全に取扱いができることが確認でき、また、エタノールとの反応性も全く問題がなかったため、アルミ原料の代替を実施しました。

飯濱 : 合成ゴム事業部時代に先輩から聞いた事例ですが、60年程前に主力製品のの一つを製造していた米国工場で複数の死亡者を出す大事故があり、事故調査から再発防止対策の一連の活動を通して、主原料の「代替」策を実行することが決まり、試験製造から設備改造まで約10年を費やしてプロセス変更を実施したとのことでした。竹内さんのご指摘にもありましたが、現有設備にたいして本質安全化対策を実施するのは非常に困難です。今から考えますと、合成ゴム事業が世界的にまだ成長途上で、製造設備を作り直すような大規模な本質安全化対策を実施しても長期的に収益が得られると経営陣が判断したのだらうと思います。私が実際に見てきたのはその対策後の工場で、その製品は現在もある程度の収益を上げているそうです。

安喜 : 我々の工場で合成工程の中和のため塩酸を使っていたのですが、35%濃度塩酸が漏れた場合には塩化水素ガスが発生して大きな被害が想定されるということで、塩酸の濃度を下げて塩化水素ガス発生量を少なくする方法や、コストはかかるのですが、硫酸で代替してみようということも経験しました。

飯濱 : 硫酸はまた別の問題がありそうですが、どうなさいました？

安喜 : はい、そうです。ここは難しいところで、硫酸が漏洩して水と混じるとか、雨水に曝されると激しい発熱を伴い硫酸ミストが発生する問題が想定されましたので、タンクは屋内に設置して防液堤と廃水経路を個別にした上で専用ピットを設置することを検討しました。

竹内 : 昔、高密度ポリエチレン設備の設計に携わったことがあるのですが、当時はアルキルアルミニウムという危険性の高い液体の触媒を使っていました。アルキルアルミニウムは水や空気と反応するので取り扱いが厄介で、万一の漏洩事故に備えて厳重な対策を施していました。そのライセンサーから、「液体のアルキルアルミを固体化する技術が完成したので、今後は扱いやすくなる」という話を聞きました。ニトログリセリンを珪藻土に含浸させてダイナマイトにすることにより安全化を図ったことと同じではないかと思いますが、詳細は不明です。

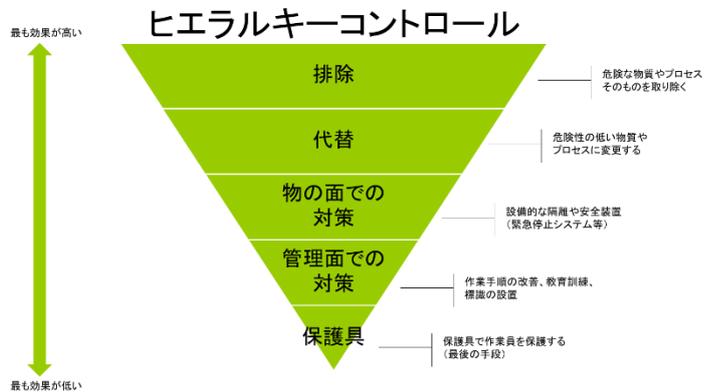
高橋 : 私が担当していた事業は全て自社技術でして、従来のアセチレンを原料にした、いわゆるレップ合成からより安全性の高いブタジエンを原料に変更して1,4ブタンジオールを、また、毒性の高いベンゼンをブタンに変更した無水マレイン酸の製造プロセスなど、原料の変換をずってやってきました。これは本質安全化の代替というアプローチになります。それ以外では、均一錯体触媒の触媒回収技術を開発して、反応圧力を半減させるとか、プロセス

合成によって4本あったアミン製造プロセスの蒸留塔を2本に簡素化する等の開発を実施し、実機化を行ってきました。これらは各々緩和、及び簡素化の事例です。

司会 : 「あなたにできること」の中で、ハザードと防護策(安全対策)を同定する活動について各種触れられています。これについてご経験がありましたら、お話しいただけますでしょうか。

竹内 : ハザードと防護策(安全対策)を同定する活動といえば、プロセスハザード分析(RBPS では HIRA)ですので、何度も経験しています。また、変更管理や事故分析でも必ず小規模なプロセスハザード分析が含まれます。Beacon の事例も事故分析をする上で気づいた例ですね。サンプリングの他、プロセス設備の清掃や解体作業などでは、人がプロセス物質に接触する可能性が増えるので、特に注意を払うようにしていました。

藤村 : 本質安全化は最も効果的な対策ですが、技術面や費用面の問題があるなどで、全ての事象に適用できるわけではありません。このため弊社では、ヒエラルキーコントロールを軸に、リスク低減対策を検討しています。上段ほど効果が高く、優先的に実施すべきという考え方で、やはり、排除(と最小化)、代替といった本質安全化の効果が高く、設備対策、管理対策と続きます。それでも十分でない場合には保護具で対応すべきであり、安易に管理や保護具で対策が完了したかのような勘違いを戒めています。



飯濱 : 私も竹内さんと同じ会社に勤務していて、自分が勤務する高危険性工場にとっては、会社のプロセス安全管理基準によりプロセスハザード分析(Process Hazard Analysis=PHA)は義務活動でしたし、またコンサルタントとして数社の他社さんにもプロセス安全の普及指導もしていたので、延べ10年近く寝ても覚めても「次のPHAをどう実施するか」等を考えていました。

少し話は脱線しますが、忘れられない経験としては、ASEANのお客さんにPHA活動支援を行う仕事で、最初の会合を実施する前に「これとこれの図面、使用している原料・化学物質について種類と保有量の一覧表、知っている範囲の危険性、等々」を準備しておくよう依頼したのですが、「当日になってもほとんど揃っていない、どこにあるか・誰のパソコンに収納されているかも分からない」という惨憺たる状況でした。この時ほど、PHAの前提となるプロセス技術情報の整備と共有の重要性を感じたことはありませんでした。その後、その顧客にはまずプロセス技術情報の整備と共有から実施してもらって、半年後にかろうじてリスク評価まで漕ぎつけましたが、防護対策(本質安全化うんぬん)までは行けなかったです。

頼 : 工場には最近稼働したプラントと昔から運転しているプラントが混在していました。最近稼働したプラントはプロセス開発時及びプラント設計時にリスク分析が十分になされ、かつその根拠データも揃っていたので変更管理時にも必要なデータが直ぐに出てきましたが、気になったのは工場創業期頃から稼働している様な古いプラントでした。そのようなプラントでも生き残りの為には品質改善、プロセス合理化が必要ですが、検討の前提となる設計諸元が揃わず苦労した記憶があります。設備仕様のには余裕のある設計が多かったと記憶して居りますが、能力増強や品質改善に合わせ主要設備の更新をして時間をかけて技術情報を整備し、ハザード分析が出来るプラントにすることを目標にした記憶があります。(最終的にはハザード分析の出来ないプラントは停止するという前提で)

竹内 : エンジニアリング会社に勤務していた時の経験ですが、ある日本の顧客が「しばらくプラントを運転していて改造も何度も行ったが、P&IDをアップデートしていないので、プラント見てP&IDを描いてくれませんか」と依頼されたのですが、現場を見に行くとあまりに複雑な改造がされていて手に負えない状態だったので、お断りしたことがありました。その工場では工務部門と保全部門があって、工務部門がP&IDを管理しているのですが、保全部門が勝手にどんどん改造してしまうので、知らない内にプラントが変わっている、と工務部門の人から聞いたことがあります。

司会 : 同じく「あなたにできること」の中で、本質安全設計によるどの選択肢も変更管理手順により再点検しなさい、となっています。この点について皆様の知見をお聞かせ下さい。

竹内 : 本質安全化というのは何かを変えることになるので、必ず変更管理を伴います。私がコンサルタントをやっていた時に、顧客で実施していた改善活動の方法を聞いて怖いと感じたことがありました。ある中間管理職の人が「実現できそうにない改善案を出してくる人が多いので、実証済みの改善案を出させている」と言うのです。これでは、変更管理を行う前に試してみることを推奨していることになり、非常に危険です。このことを説明して、直ちに止めるようお願いしました。原因は会社が改善提案の提出件数を重視して従業員に無理に提案させていたことでした。従業員は件数を稼ぐために実現性のない提案も出すようになり、中間管理職がさばききれなくなって「実証済み」を求めるようになっていたのです。1999年に起きた東海村のJCO臨界事故も、作業員は改善するつもりが危険な状態を作り出してしまった事例です。

高橋 : 本質安全設計という観点から、制御弁の故障が発生して最大流量が流れた時に大きな被害にならないように、制御弁の内弁を変更して流量制限をすることをしばしば行います。リスクアセスメントに合格させるためにそういうこ

とをやっている一方で、運転上のフレキシビリティが制限されることも出てきて、変更管理の会議でよく議論していました。安全性と利便性というジレンマをどう扱うかという議論が何回もありました。

竹内 : これもエンジニアリング会社時代の経験ですが、プラントを設計する時には必ず安全サイドに余裕を持って設計する訳です。例えば、年間〇〇トン製造できるというプラントを設計する場合には、殆どの機器は10~20%余裕のある設計にします。それは、化工計算ではその程度の誤差があるからですが、アウトプットレートは保証しなければならない為です。海外の顧客に関する一般的な話ですが、「需要があればユーザーは最大限生産しようとするので、設計限界を超えて運転してしまうことがよくある」と耳にしておりました。設計する側は保証値以上に出ない様にすることに苦心していました。

岩谷 : 以前、固定床式流通反応器のトルエン水素化反応のプロセス設計を行っていました。本反応は、強い発熱反応であるため、触媒は一樣に充填せず、触媒層の途中に不活性充填層を挟み込む形で段階的に配置していました。触媒層を物理的に分割することで反応を一度に進めず、入口部での反応集中によるホットスポット形成や暴走反応を抑えることを意図した設計です。この方法は単位体積当たりの反応エネルギーを低減し、反応を穏やかに進めるという点で、本質安全の考え方に沿った対策であったと考えています。また、水素は再生可能エネルギー由来の電力を用いた水電解で製造し、バッファータンクを設けずにそのまま水添反応へ供給していました。高圧水素を貯蔵しないことで、水素タンクに起因する大放出リスクを排除しており、これは本質安全設計そのものと考えます。当時はコストや運転安定性を主眼にした設計でしたが、振り返ると本質安全の基本に沿ったプロセスであったと感じています。

司会 : その他、今月の内容に関連して、補足するご意見やご感想などありましたらお願いします。

牛山 : 60年近く前会社に入った頃、本質安全という言葉は電気設備の防爆構造に対して聞いたのが最初でした。小生は不勉強でプロセスの本質安全とか本質安全設計という言葉を知ったのは、恥ずかしながら割合最近のことです。ただ、入社当初先輩からよく、フルプルーフな設備にしろと教えられて、設計の際に安全上一番気を付けていたのはそのことでした。今回の皆さんのお話を伺い、フルプルーフは、今で言う本質安全に繋がることであったかと思っています。

竹内 : 私がエンジニアリング会社に勤務していたのは、50年程も前のことですが、その頃も、フルプルーフやフェールセーフという言葉は使われていて、コントロールバルブの選定ではFO・FCを常に考慮していましたし、1回の間違いで重大な事故になりそうなものはインターロックなどで回避していました。但し、人が二重のミスを犯すことは想定しない設計でした。当時は、リスクの大きさに応じて対策を考えるということがされておらず、今から考えると怖い設計がまかり通っていたと思います。

飯濱 : 私は1986年に米国の化学会社に入社して、1989年から数年間事業所のプロセス安全小委員会メンバーとして活動していました。ボパールやチェルノブイリ原発の事故の話は出ていましたが、当時は本質安全化云々までは全社のプロセス安全基準上も特に強調されていなかったと思います。ノートパソコンもインターネットも無い時代でしたので、当時はCCPSなるものも知りませんでした。もちろん、牛山さんや竹内さんと同様に、フルプルーフとかフェールセーフという用語は1970年代から運輸業や製造業の大事故があるたびにマスコミや図書で広く使われていたという記憶はあります。会社で本質安全化が頻りに議論されるようになったのは21世紀初頭からだと思います。フルプルーフもフェールセーフも設備の故障またはヒューマンファクター関連のエラーの発生や発生後の事象の悪化を機器の設計面により止めるという意味が主でして、危険源自体を無くす・縮小する・代替するという意味は無く、本質安全化活動の一部(管理的対策)だと理解しています。

司会 : メンバーの皆様には長時間の議論ありがとうございました。本質安全化や本質安全設計というあまり聞きなれない用語の考え方も、皆様のご経験に基づく具体例を通じて読者の皆様に伝わったのではないかと思います。また、安全レベルを向上しようとする変更や改造が新たなハザードを生じさせる可能性があるため、変更管理手順による再点検も必要不可欠だと分かりました。

キーワード 本質安全(本質安全化、本質安全設計[ISD])、最小化、代替、緩和、簡素化、アルキル化、サンプリング、ハザード(危険源)、防護策(安全対策)、プロセスハザード分析(PHA、HIRA)、変更管理(MOC)、統計的品質管理(SQC: Statistical Quality Control)、フルプルーフ(フェールセーフ)

#### 【談話室メンバー】

安喜 稔、飯濱 慶、今出 善久、岩谷直樹、上田 健夫、牛山 啓、木村 雄二、塩谷 寛、澁谷 徹、高橋 和成、竹内 亮、中田 吉彦、林 和弘、春山 豊、藤村 雅也、松井 悦郎、南川 忠男、三平 忠宏、山岡 龍介、山本 一己、頼 昭一郎