



化学工場における事故防止

元石油化学工業協会 技術部長
岩間 啓一

東京都調布市にある消防大学校では、幹部養成のための総合教育、専門的な教育を行う専科教育、実務能力を養う実務演習などの教育が行われており、毎年約2,000名の卒業生を送り出している。筆者は、化学産業での40余年にわたる経験をもとに専科教育の危険物科で講義を行っており、本稿では本年度に行った講義をもとに化学工場で行っている事故防止活動についてご紹介する。

1. 私たちの生活と化学産業

化学のルーツは、古代エジプトやアラビア、中世ヨーロッパにおける冶金術、錬金術などといわれている。物質や化学反応への理解も哲学、神秘主義、冶金術などが互いに影響しあう科学以前の状態が長らく続いていたが、18世紀後半にラバオジエによって質量保存の法則が発見されたことを契機に、サイエンスとしての化学に変貌を遂げた。その後、産業革命の進展に伴って酸やアルカリの需要が増加し、欧米を中心に様々な化学製品の工業的規模での生産が開始されて、近代化学工業の基盤が成立した。

一方、産業革命以降、世界の人口は急速に増え続け、食糧の効率的な生産が課題となった。特に農業では、窒素肥料の大量生産が急がれていた。人工的に窒素肥料を生産するには空気中の窒素の固定を行う必要があるが、それまでの火花放電や石灰窒素法では、いずれも大量の電力を必要としたことから、ドイツのハーバー氏が研究を重ね、1909年に電力消費量の少ない、水素と空気中の窒素からアンモニアを直接合成する方法を発明した。さらにBASFの技術者であったボッシュ氏が高温、高圧に耐えることのできる反応器を開発し、1913年、ドイツのBASF社オッパウ工場において水と石炭と空気からアンモニアを工業的に製造することに成功した。アンモニアの工業的製造の成功をきっかけにして化学技術は飛躍的に発展した。その後、合成樹脂や合成繊維などの石油化学が興隆し化学工業は高度成長を遂げている。

現在の私たちの身の回りを見渡すと、食卓の小物、電気製品、衣服、カーペットなどに始まり、水族館の水槽の樹脂ガラスなど様々な化学製品が使われている。自動車でも重量比で10%、容量比で30%の合成樹脂が使われており、金属よりも軽いことから車の軽量化を通じて二酸化炭素の排出抑制に貢献している。医療分野でも合成樹脂製の使い切り注射器、輸液バッグなどに加えて、表面の性質が温度によって変化する樹脂を利用して再生医療用の細胞シート培養の基盤などに幅広く使われている。

化学製品は、各種の産業界に素材として幅広く提供され、現代の私たちになくてはならない様々な製品に加工されるとともに、先日のノーベル化学賞を受賞なさった吉野氏のリチウム電池のように新たな機能を持つ素材として世界を変革している。

2. 化学産業と事故

ドイツのBASF社オッパウ工場では完成したばかりのアンモニア製造技術を用いて化学肥料である硝酸アンモニウム(硝安)の大量生産を始めた。硝安は空気中の水分を吸収して固まる性質があるため、オッパウの工場では固まった硝安の山をダイナマイトで発破をかけて崩していた。アンモニアの製造技術が完成した8年後の1921年9月、すでに3万回以上も何事もなくダイナマイトでの発破を行っていたが、発破の際に突然、硝安の山が大爆発し、死者509名、行方不明者160名、負傷者1,952名となる大事故が起きた。

硝安の事故はその後も繰り返し起きており(表1)、2015年8月の中国天津港の

表1 硝酸アンモニウムの事故

発生年	発生場所	概要
1921年9月	ドイツ	化学工場で硝安と硫酸の混成肥料の固化したものを4,500tをダイナマイトで爆破したところ爆発。死者・行方不明者669名、負傷者1,952名
1947年4月	アメリカ	貨物船倉で火災が発生し積荷の肥料用硝安 2,300 t が爆発。死者・行方不明者576名。消火水による硝安の吸湿・劣化をおそれて消火活動を躊躇が被害拡大の原因?
2001年9月	フランス トゥールーズ	肥料工場で300 t の硝安が倉庫で爆発。死者31名
2013年4月	アメリカ	肥料倉庫で爆発 死者15名
2015年8月	中国天津	港湾コンテナ倉庫群で爆発。硝酸セルロースが自然発火し、近くにあった硝酸アンモニウムなどの化学品に延焼、爆発 死者165名、負傷者798名
2017年6月	日本	エアバッグのインフレーター(硝酸アンモニウム)の異常破裂により、世界で死者16人、負傷者180人(News Week 2017年6月号)。1億台を超えるエアバッグ交換リコール、2017年6月メーカーであるタカタが経営破たん

コンテナ倉庫で起きた事故はまだ記憶に新しいと思う。常に湿らせておく必要のあるニトロセルロースが8月の暑さの中で乾燥・自然発火し、近くにあった硝安などに延焼して165名が死亡、798名が負傷、8名が行方不明となる大事故が起きた。この事故で亡くなった165名のうち消防団員、警察官が110名を占め、消火活動に際して多くの犠牲者が出た。

日本でも56年前の第18回東京オリンピックを3か月後に控えた1964年7月の品川勝島倉庫で、天津港の事故と同様に、野積みになっていたドラム缶入りニトロセルロースが乾燥し、自然発火・火災が発生、近くに無許可で保管されていた過酸化物が爆発して消防関係者19名が亡くなる事故が起きている。

これらの悲惨な事故から多くを学び、技術力の向上、規制の強化などによって化学産業は発展を続け、私たちの生活を便利で快適にするだけでなく、輸送機械に次ぐ基幹産業の一つとなっている。現在では化学産業における大きな事故は少なくなっているが、しかし残念ながらしばしば事故が起きているのも事実である。

化学産業は、輸送機械などの他の産業に比べていくつかの特徴を持っているがとりわけ、

- プロセス：可燃物、危険物、高圧ガス状態などの化学物質の反応を扱う
- 設備：密閉容器中で化学物質を取り扱い、外からは内部の状態が見えない
- 作業（人的要素）：通常は自動運転であるが調節、停止・スタートには人が関与

などが他と異なる点であろう。

これらの特徴から、化学工場では、何らかの原因で設備から内容物が漏れると引火・着火して火災爆発が起き、大規模な事故となる場合がある。一方、通常は自動的に運転されているため、薬傷、挟まれ、墜落事故などの労働災害は比較的少ない。勿論、火災爆発に人が巻き込まれれば同時に人災ともなる。化学工場が正常に運転されていれば内容物が漏れることは起きないが、化学工場の三つの特徴、プロセス関係、設備関係、作業(人的要素)が適切に管理されていないと事故の原因となる。

2.1 プロセス関係の事故

硝安が爆発したオツパウの事故も、化学物質の反応性が原因する事故であるが、2011年11月から翌12年9月までの間に起きた、それぞれ1名が亡くなる3件の事故も化学物質の反応が暴走したために起きた爆発事故である。これらの事故ではいずれも内容物の冷却が止まったため発熱反応が暴走し、機器の内部で温度、圧力が設計以上に上昇して機器が破裂、その後、着火したものであり、通常の事故のように内容物が漏れて火災となるのとは異なる特異なものであった(表2)。

発熱反応は物質の全体で進むため3次元で反応熱が発生する。一方、冷却は表面からであるから冷却熱量は2次元であり、発熱の3次元には敵わないことになる。また重合反応では重合が進むと内容物の粘度が上がり流動性がなくなることから熱伝導も悪くなるとともに、反応を止めるために重合禁止剤を投入しても混ざらず、反応を抑制するのは極めて困難になる。重合反応では制御を失うと対応が極めて難しくなる。

化学反応は、10℃温度が上がると反応速度が2倍になるといわれている。たかが2倍と思うかもしれないが、100℃上がると約1,000倍の反応速度となり、1,000倍の反応熱が発生することになる。反応熱によってますます温度が上がり、温度が上がるとますます発熱が進み、指数関数的に反応が進むことになる。

2017年12月には富士市で粉塵爆発が起き2名の従業員が亡くなった。粉塵爆発は可燃性の粉体に着火して爆発的な燃焼が生じることで起きるが、最初に小規模な爆発が起きて周囲の粉塵を巻き上げて中規模な爆発が続き、広範囲に巻き上げられた粉塵に着火して大爆発になるといわれている。

表2 プロセス：化学反応

事故	事故概要	間接原因
1999年 10月29日	首都高速走行中のタンクローリーが爆発、過酸化水素タンク解体時の残液を積んで川崎から千葉へ走行中。23名負傷、車両損傷多数 積み込み時に洗浄するも前荷の銅廃水が触媒	① 化学反応の知識欠如。銅イオンが過酸化水素の分解に対して遅延触媒
2011年 11月13日	塩ビモノマー爆発火災 緊急停止した後に、還流ドラムの中に混入した化学物質が副反応(発熱反応)をおこして暴走(1名死亡)	① 副反応の業界情報を生かせず ② 重要設備(弁)の管理不適切 ③ 運転Know-Why不足、運転情報提供の不備
2012年 4月22日	レゾルシン爆発火災 誤操作(認識)によって攪拌停止、冷却不十分で不安定物質の分解反応が暴走(1名死亡、25名負傷)	① 冷却システム・装置設計の不適切 ② 緊急システムの設計・運用の不備 ③ 中間体(過酸化物)の大量取り扱い
2012年 9月29日	アクリル酸タンク爆発火災 発熱反応であるアクリル酸重合反応の暴走(1名死亡、36名負傷)	① 化学物質の知識欠如 ② タンク及び付属設備の不備 ③ 同種事故情報を生かせず
2017年 12月1日	印刷インキ用樹脂で火災、粉塵爆発。2名死亡、13名負傷(うち2名重傷)	① 粉塵の危険性(着火しやすく、爆発の激しさ)について理解不足 ② 粉塵がたまった状態で放置 ③ 過去の同個所の発火事例を誤評価

これらのプロセスに関係する事故では、

- (1) 取り扱い物質に関する、引火点、発火温度、分解温度などの知識不足
 - (2) 反応性、触媒作用、発熱反応などの化学反応についての知識不足
- が共通する原因としてあげられる。

2.2 設備関係の事故

化学工場では、設備の工事時、設備管理の不具合が原因で大きな事故が起きている。2007年には、エチレンプラントの分解炉での仕切り板の入れ替え工事中に自動弁が突然あきオイルが流出、火災となって、周囲で作業を行っていた4名の方が亡くなった。2011年3月の東日本大震災時に起きたLPGタンクの爆発では、比重0.6の内容物で設計されている球形タンクが工事後のガス置換のために満水としてあったため、地震に耐えきれず倒壊、タンクヤード内の17基のLPGタンクがすべて火災、爆発を起こし、3月21日の鎮火まで10日間火災が続いた。

2017年には、ガス中に不純物として含まれる硫化水素、アンモニアなどによる局部腐食が進み配管に穴が開いて水素ガスが噴出、火災となって、潤滑油製造装置1系列が全焼する事故も起きている。

設備関係の事故では、

- (1) 施工時の安全管理の欠如などの不適切な工事管理
 - (2) 腐食への対応不足など設備管理の不具合
- が共通する原因としてあげられる。

2.3 作業(人的要素)の事故

最近ではリサイクル工場での火災事故が目立つが、なかでも廃油再生工場では、様々な廃油を原料としているために、人的なミスが重大事故の原因となりやすい。工場ではないが、2013年の福知山の花火大会で起きた携行ガソリンタンクの事故では、タンクのふたを開ける前にガス抜きを行わなかったために、ふたを開けた時にガソリンが噴出し3名が亡くなり53名の負傷者が出た。

最近では、スプレー缶のガス抜き時に大きな爆発事故が起きており、大阪の事故では3名が亡くなっている。

表3 設備関係

事故	事故概要	間接原因
2007年 12月21日	エチレンプラント火災 仕切り板の入れ替え工事中に自動弁が開き、クエンチオイルが流出、火災(4名死亡)	①自動弁駆動用空気の元バルブ閉止が明文化されず ②狭い場所での上下作業 ③既設の分解炉と異なる設計、仕様
2011年 3月11日	球形タンク倒壊・爆発 球形タンク解放点検後のガス置換作業における満水状態(耐震強度不足)時に地震に襲われ倒壊、付近の配管を破損させて、ガス流出、タンクヤード全体が火災・爆発、隣接企業従業員6名負傷(内重傷者1名)	①設計荷重条件を無視 ②緊急遮断弁の機能無視 ③ブレースの設計不備、強度不足
2014年 1月9日	熱交換器爆発 熱交換器開放作業時の爆発により5名が死亡	①不安定物質の存在に対する知識欠如 ②作業方法の不備
2017年 1月22日	潤滑油製造設備火災 潤滑油製造設備の水添精製装置で水流化アンモニウム腐食により配管から漏れ・火災、住民避難。従業員、住民とも負傷者なし	①原料組成の変化で腐食成分が増加していたことに気付かず ②定期的な配管肉厚測定の対象外

表4 人(行動)関係

事故	事故概要	間接原因
1983年 7月29日	大阪府廃油再生工場で各種廃油を原料に濾過蒸留して再生油とする工場においてガソリンが混入していたため、火災・爆発(4名負傷)	①危険物としての意識の欠如 様々な廃油の混合物 ②大量の廃油入りのドラム缶の存在
2013年 8月15日	福知山花火大会の露店で携帯用発電機へのガソリン補給時に、容器のガス抜きを行わずに蓋を開けたために内容物が噴出、火災・爆発(3名死亡、53名負傷)	①携帯ガソリンタンクの取扱い知識欠如 ②ガソリンの危険性認識欠如
2013年 11月15日	千葉県廃油回収工場でガソリン混入の廃油により爆発火災事故(2名死亡、22名(社外13名含む)負傷)	①ガソリンなどが混入した廃油を取り扱ってはならない事の不徹底 ②実質的な安全管理者の不在
2018年 12月16日	室内でジメチルエーテルとエタノールを含んだ未使用の除菌消臭スプレー120本のガス抜きを行った後、瞬間湯沸かし器に火をつけたところ爆発。重軽傷者52名	①室内で可燃性ガスを放出
2019年 7月19日	廃棄物処理倉庫で3000本の機械部品のクリーナー(スプレー缶)のガス抜き作業中に爆発。3名死亡、1名重症	①室内で可燃性ガスを放出

作業(人的要素)の事故では、

- (1)化学物質に対する知識不足
- (2)原理原則への無理解
- (3)設備・取り扱いに関する知識欠如

が共通している

3. 事故防止への取り組み

化学工場では危険性に応じて事故の予防、異常の検知・対応、労働安全などの安全マネージメントでPDCAを回して、事故の未然防止、拡大防止に努めている。化学工場に特有な化学物質の取り扱いの観点からは、事故の原因である人(作業)、設備、プロセスの要素(図1)の中でも人の役目が大事である。工事時の事故でも工事の管理を行うのは人であるし、プロセスにおいても化学物質の特性を知らなかったための事故が起きている。

これらのことから人材育成は化学工場にとって最も重要な事故

防止のための取り組みであり、取り扱い物質、設備、化学工学、腐食・防食、制御などに関する技術的知識、危険物などに関する法令の知識は仕事をするための基礎である。

また、化学工場は本来危険な物質を技術力で安全に取り扱っているが技術、設備の綻び、人のミスがあると事故となる。このためリスクアセスメントを通じて、常にリスクを把握しリスクの低減に務めて事故の未然防止を図っている。

リスクアセスメントを行うためにはハザードに気づくための知識、感性も重要である。このため設計部門、運転部門、設備部門などの有識者が参加してリスクアセスメントを行うほか、他社、過去の事例から教訓を学ぶことも行われている。

3.1 人材育成

化学工場では化学物質、反応、設備を取り扱うことから、従業員に対して化学、化学工学、機械設備の構造・設備管理、プロセス制御、腐食・防食などの技術教育、危険物、高圧ガス、労働安全衛生法などの法令に関する定期的な教育が行われている。また、危険物の取扱には資格が必要なことから、危険物取扱者試験の受験料を会社が負担するなどの施策も行われている。化学物質の性質や消火方法の知識などは化学工場の従業員のみならず消防関係者にも必要であろう。

最近の化学工場の従業員は実際の事故を身近で経験したことがなく、事故の恐ろしさを知らない。このため実験室での爆発実験、挟まれ体験機で挟まれる痛さの経験、高所からヘルメットの上に工具を落としヘルメットを簡単に貫通することを経験するなどの体感教育が行われている。また、化学工場は本来危険な物質を技術力で安全に取り扱っているが、安全な状態が続くと、危険を危険と感じる感性が麻痺してしまう。事故を未然に防ぐためには、知識に加え体感教育を通じて、リスクに気づく感性を持った人材を育てることが大事である。

これらの教育は、自社で行うだけでなくコンビナート地区で展開されている山陽人材育成講座(山陽技術振興会)、京葉臨海コンビナート人材育成講座(千葉県産業振興センター)なども利用されている。また、保安のわかる将来の会社幹部、工場幹部を育成するために2012年に東京で始まった産業安全塾も現在では四日市、岡山にも展開されており、各社・各工場で利用されている。

人材育成は各社に共通する課題であり、今後はこのような地区ごとに教育設備や人材を提供しあって効率的な教育を行う方向と考えられる。

3.2 リスクアセスメント

事故防止のために、一つ一つの問題に関する影響度と起きる頻度の積からリスクを評価し、マトリックスにて対応の可否を判断するリスクアセスメントが行なわれている(図2)。マトリックスにて許容不可の位置づけとなる案件については、設備的な対策を行うなど、理解納得・許容可に収まるようにリスクを下げなければならない(図3)。

このリスクアセスメントには様々な手法が用いられているが、化学業界ではHAZOP、What-ifなどがよく使われている(表

図1 事故の要素



5).また、抜けのない検討のために、通常はプロセス、設備、作業（人）の三つの観点からリスクアセスメントを行う(表 6)。

図2 事故防止への取り組み

事故防止のためのリスク評価・対策の仕組み

リスクアセスメント

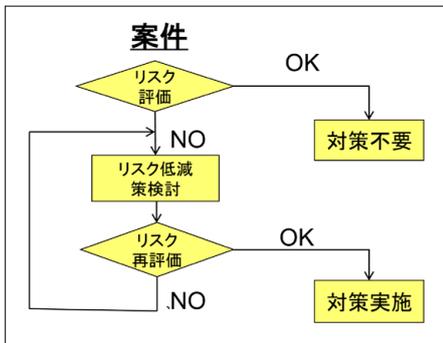


図3 リスク評価のマトリックス

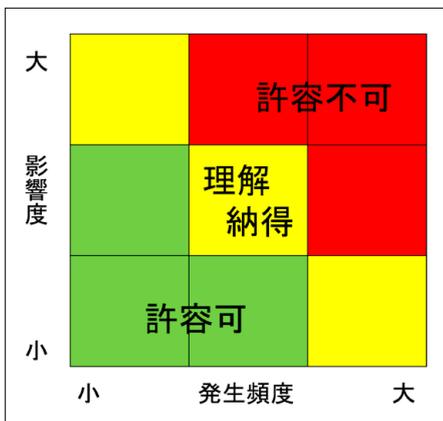


表5 リスクアセスメント手法

高圧ガス保安協会 H27年6月改訂版リスクアセスメント・ガイドライン (Ver.1)

手法	概要	
HAZOP (Hazard and Operability)	連続系HAZOP (定常系)	連続プロセスの定常運転を対象。正常状態からのズレの想定を起点としハザードを特定
	バッチ系HAZOP (非定常系)	バッチ反応プロセス、連続プロセスのスタート操作などを対象。標準操作からのズレを使ってハザードを特定
What-if	「もし…であるならば」を繰り返してハザードを特定	
FTA (Fault tree analysis)	対象とするシステムの危険事象を頂上事象として設定し、その原因を機器、部品レベルまで掘り下げ、原因と結果を論理的に解析してハザードを特定	
ETA (Event tree analysis)	可燃性流体の流出などの引き金事象の拡大過程を解析しハザードを特定	
FMEA (Failure mode and effects analysis)	システムを構成する機器において考えられる故障モードおよびその影響からハザードを特定	
Dow方式	取り扱う物質の危険性、温度・圧力などの操作条件の危険性、装置固有の危険性などから危険指数を導き出し、ハザードの潜在的大きさを評価	
チェックリスト方式	あらかじめ用意されたチェックリストで安全面の確認を行い、リスク低減策の実施状況を確認	

表6 リスクアセスメント

リスクを評価し顕在化しないように対応

リスクアセスメント取り組み事例

	プロセス	設備	作業
定義	各製造工程における取扱い物質、運転条件、運転方法、設備設計条件等の保安・安全に係る危険源	設備の劣化要因への対応不備における、保安・環境に係る危険源	運転員が実施する、運転、起動停止、工事に伴う安全養生など全ての作業についての保安・安全に係る危険源
特定方法	危険要因（火災・爆発、毒性ガスの漏洩、機器破損）を織り込んだリスクマトリックスにより抽出したリスクの大きさを評価し、危険源を特定する	設備の機能喪失が保安・環境に及ぼす影響度と故障発生確率（信頼度）からリスクを評価し、危険源を特定する	中災防のリスクアセスメント手法をベースに作業ごとにリスクの大きさを評価し危険源を特定する
対応	リスクレベルが大きいものから低減対策の検討と対策実施	リスクに応じた適切な設備管理がなされているか、管理部位の劣化要因ごとに設備管理方法を確認、検証	リスクレベルが大きいものから低減対策の検討と対策実施

3.3 事故事例からの教訓

事故を起こすと、個々人にとっても人生が奪われ、会社にとっても重大な損失を招くことになる。最近は技術の進歩、各種の法規制により事故も少なくなっており、工場勤務している間に何事もなく定年を迎える幸せな人も多い。化学工場では様々な化学物質を取り扱っており、危険を危険ではないように管理しているが、長年何事もなく過ごしていると感性が麻痺して安心が慢心に変質し、知識としては知っていても、判断できない、行動できない状況に陥る。

失敗学からの知見では、事故の95%は繰返し型であり、未知の原因による事故は5%に過ぎないといわれている。実際に事故が起きてみると、過去に同種の事故が起きていることに気づくことが多い。繰返しの事故が起きているのは過去の事例を学んでいないといっても過言ではない。

最近の日本の化学産業では行政、事業者の努力で大事故が少なくなった。しかしオッパウの大爆発を始め、過去には重大な事故が起きていたし、海外では現在でも様々な重大な事故が起きている。これらの他社、過去の事例から教訓を学び自工場のハザードに気づくことが大事である。18世紀のアイルランドの政治家であるエドムンド・バークは「歴史を知らない人はそれを繰り返す運命にある」と言っているが、化学産業においても同じである。

事故の未然防止のためには、リスクアセスメントが重要な手法であり、抜けなく行うためには、プロセス・設備の設計者、運転に携わる者、安全の専門家など衆知を集めて行う必要があるといわれている。それでも、知らないハザードに気づいてリスクを評価するのは簡単ではない。

事故が起きるとしばしば想定外という言葉が使われるが、実際に起きたことはこれからも起こりえることであり、過去の事例を学ぶことは、気づいていないハザードに気づく良い機会である。

最近、大きな事故があると外部の有識者も加わった事故調査委員会で、事故

に至った経緯、状況、原因、再発防止策などがまとめられ、報告書として公表されている。これらの報告書は貴重な情報であるが、事故の詳細がわからないから本当の原因がわからない、詳細がわかると、取り扱い物質が異なるから同じ事故は起きない、とそれ以上の検討を行わず、貴重な事例を活かすことができないことが多い。

これらの報告書を活かすためには、第三者として批評家のように読むのではなく、当事者になって仮想体験をし、なぜそのように考えたのか、行動せざるを得なかったのかを自ら考えることが大事である。同種の事故を起こさないためには、個別の対策に加えて、事故事例から教訓を導き出し、スイスチーズモデルで表される自工場の保安システムに照らし合わせて綻びがないことを確認することが大事である(図4)。

事故は、気づいていない「想定外」が大丈夫と考えていた防護層の穴を貫通して起きている。実際の事故を仮想体験することは、起きてしまった事故から「想定外」を想定の中に位置づける、リスクアセスメントにおける「気づいていない」ハザードに気づくための大事な手法である。

4. まとめ

機械は壊れ、人はミスをする。事故の防止のためには、人のレベルを維持、高めるための教育を行い、設備やプロセスが正常に機能するように適切に管理することが重要である。特に、化学工場では本来は危険である大量の危険物、高圧ガス、可燃物を技術の力で安全に取り扱っている。このためには技術の元となる教育が重要である。

事故防止のためにはリスクアセスメントを通じてリスクの低減を図ることが有効である。また、これらのリスクアセスメントはプロセス、設備、作業などに関する教育の場にもなっている。高圧ガスの認定工場では、定常状態に加えてスタート・ストップなどの非定常状態のリスクアセスメントにもHAZOPが用いられ、抜けのないリスク管理が行われているが、非認定の工場ではHAZOPの利用率は低いようである。今後の課題は、非認定の工場での抜けのないリスク管理であろう。

一方、事故の大部分は繰返し型といわれており、他社、過去の事故から教訓を学び、自工場のハザードに気づくことで大部分の事故は防ぐことができる。このためには事故調査報告書を第三者として批評家のように読むのではなく、当事者になって仮想体験をし、なぜそのように考えたのか、行動せざるを得なかったのかを自ら考え、自工場のリスクアセスメントに生かすことが大事である。

化学工場では事故防止のために様々な施策を行っているが、限られた時間の中で一度にすべてを行うのは要員のにも、資金的にも、時間的にも現実的ではない。対策を欲張りすぎると人も組織も疲弊してしまう。このため、自工場の弱みを分析し、弱みの補強に重点を置いて、様々な切り口から保安の向上に取り組んでいる。

図4 事故事例からの教訓を活用して自部門の仕組みを再点検

