

石油化学プラント等における事故防止について

千葉ゼネラルサービス株式会社

平山 隆一

1. はじめに

近年、化学プラントの重大な事故が続いて発生し、社会的にも大きな問題として報じられてきた。事故の根幹には様々な要因があることが論じられており、その中には危険感受性の低下や技術・技能の伝承不足、非定常時の判断ミスなども取り上げられている。これらは個人の知識、経験だけの問題ではなく組織的な管理システムや運用上の問題も含まれており、関連する業界全体の課題として真摯に受け止め、地道にかつ早急に対策を講じていかなければならない。

ここでは、組織として化学プロセスの安全を確保するための手段としてのプロセス安全検討の仕組みと、プロセス安全検討を担う技術者に必要な保安技術教育の実施例について、石油化学産業の企業が行っている事故防止への取り組みの一端を紹介する。

2. 石油化学工業における保安防災管理

化学反応を伴う製造を行っている場合、設備の不具合、故障やヒューマンエラーを完全に防ぐことは実際的には不可能であり、設備上あるいはプロセス上何らかのトラブルが発生することを前提として考えなければならない。そこで事業所内の設備・機械、プロセス、化学物質に関して、設計や運転の意図から外れて、危険な状態、あるいは事故・災害（火災、爆発、漏洩）が発生することをできるだけ防止し、または万一のトラブル発生時の影響を小さくすることを目的として保安防災の管理を実施している。

石油化学プラントは化学反応を主体として複

合的なシステムで構成されており、以下のような特性がある。

- ・原料、添加剤、触媒、溶媒・溶剤、中間生成物、残渣物、製品など多種の化学物質を扱う。
- ・可燃性物質、不安定物質、酸化性物質、腐食性物質などを扱う。
- ・気体、液体、固体およびその混合といった様々な状態で扱う。
- ・反応（発熱、吸熱）、流動、伝熱、蒸発、蒸留、ガス吸収、抽出、乾燥、晶析、吸着、混合、攪拌、粉碎、ろ過、集じんなど多くの単位操作の組み合わせからなる。
- ・高温、高圧から低温、真空まで運転条件が広範囲に亘る。
- ・自動制御、インターロックシステム、緊急遮断装置、検知・警報設備など計装制御システムへの依存度が高く、またコンピューターによる最適制御を実施するなど、場合によってはブラックボックス化する。
- ・大量の危険物や可燃性の圧縮ガス、液化ガスを取扱い、保有しているため、膨大なエネルギーを有している。
- ・酸化、重合、縮合、分解などの化学反応を利用していることから、適正な条件を逸脱すると暴走反応に至るリスクがある。

図1は、消防庁特殊災害室が公表した平成24年中に石油コンビナート等で発生した事故（全248件）の原因別に割合を示したものである。事故の要因の区分では、人的要因によるものが98件（39.5%）、物的要因によるものが133件（53.6%）等となっている。また、発生件数では、人的要因のうち維持管理不十分によるものが31

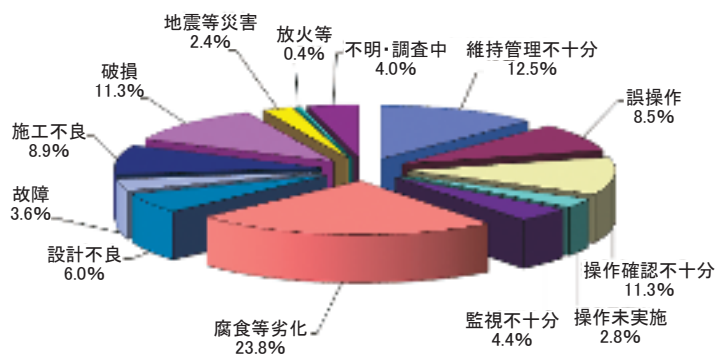


図1 石油コンビナート等の事業所事故の発生原因(*1)

件(12.5%)、物的要因のうち腐食等劣化によるものが59件(23.8%)となっている。

筆者が以前従事していた化学会社で発生した

プラント事故のうち、「失敗知識データベース」(*2)に記載されている3つの事例について内容を要約して紹介する。

1993年7月 エポキシ樹脂プラント爆発火災事故

事故概要

半導体封止用のエポキシ樹脂製造装置の溶剤ジメチルスルホキシド(DMSO)の回収槽からガスが漏れだした。内液の一部を取り出すなどの作業をしているうちに漏洩が激しくなり、ガスが爆発し、さらに回収槽内でも爆発し、周囲へ広がった。何らかの原因で異物が混入し混触反応が起こった。潜在的に反応性の高い物質を取り扱う場合、様々な可能性を考慮した上で十分な危険性の予測を行うことが重要である。

原因

DMSO 回収槽にエピクロロヒドリンなどの異物が混入して、DMSO の反応暴走的な分解を引き起こした。異物混入の原因はエピクロロヒドリン、ジオキサンの貯槽タンクと DMSO 回収槽が連絡されており、その配管中の仕切りバルブの内漏れによるものと推定された。

背景

DMSO を取り扱うプロセスでは過去に種々の反応事故が発生しているが、そのことに関する情報が不足していた。さらに、バルブは漏れることがあるという意識が希薄だった。バルブの内漏れに注意が向いていなかったと推測される。

一番目の事例は、1993年7月に発生した、エポキシ樹脂プラントの爆発火災事故であるが、プロセス開発段階における物質の反応危険、特に混合危険についての知見、情報収集が不足していたこと、暴走反応の予測手法や被害影響範囲想定などの手法活用が不十分であったことな

ど、多くの反省点があった。

この事故の教訓を受け、新規プラントの開発、既存プラントの改造等におけるプロセス安全検討の内容充実化、手続きを明確化し、さらに既存プラントの安全確保の要件を網羅した「安全管理要領」を制定し運用を開始した。

1996年11月 農薬中間体プラント機器破裂事故

事例概要

新規農薬の新設装置の試運転中に、ポンプ故障のため、自己分解反応性のあるジメチルチオホスホアミド（DPAT）が高温のタンク内に滞留する状況となった。その後ポンプ修理は完了したが、次工程の進行の遅れもあり、ポンプの再稼働をしないでそのまま放置した。DPATが反応暴走に至りタンクの爆発火災を引き起こした。長時間滞留は危険との情報を得ていたが、全体の状況を把握して作業全体をコントロールすることができていなかった。

原因

1. 高温で長時間放置しておくと自己分解反応をおこす DPAT の濃縮液を、20号タンク内に高温下で長時間にわたって滞留させた。そのため、自己分解反応し爆発が起こった。
2. 運転担当の技術者は危険情報を受け取っていた。

背景

自己分解反応性のある DPAT を高温のタンク内に滞留させたままだったことが最大の事故原因である。その背後に以下に示す要因が考えられる。

試製造中であり、下流装置の故障で、次に進めなかった。試製造という不安定な状態であり、不具合を生じたときに何をすべきかを明解に記した指示と、運転をバックアップする体制が重要である。そこを怠ったか、そのバックアップをする役割の人間が一緒に右往左往したのではないかと推測する。一人ずつの役割分担を明確にすることが必要であろう。

二番目の事例は、1996年11月に発生した、農薬中間体プラントの機器破裂事故である。自己分解反応性のある物質を高温のタンクに滞留させたことが直接原因であるが、通常の運転管理体制と異なり、起業担当の技術者の指揮下で試運転を確立させていく過程で、新設装置の下流部の装置に不調が生じるという想定外の事象に

対して適切な判断を下せる人員体制が不足していたと考えられる。この事故の教訓をもとに、試運転前の安全審査の制度について、関係部署を含めた試運転時の運転体制、運転員への事前教育、設備不調時の状況判断等、より実質的な審査を行うことを規定した。

2000年12月 特殊ゴムプラント火災事故

事故概要

特殊ゴムの製造装置で、使用中のポンプ吐出フランジから漏洩と火災が起こった。原因はポンプの振動に起因してフランジがゆるみ、ヘキサシロ溶液が漏洩し、静電気火花により着火、火災となった。配管の振動を重大にとらえるべきであった。

原因

1. フランジがゆるみ漏洩が発生した原因

当該ポンプと吐出配管を共有するポンプを事故前に使用した時、想定外のキャビテーションに起因する振動が発生した。この振動により当該ポンプのフランジにゆるみが生じた。加えて配管壁面に生成する不溶性ポリマー塊がポンプを通過すると振動が生じることも振動の原因の一つになることも推定される。

さらに、ポンプ吐出3インチフランジがレデューサーにより6インチ配管に接続されている。振動の力が配管にかかった場合、当該フランジ部でのゆるみを加速させる可能性がある。

2. 着火の原因

漏洩したヘキサン溶液は帯電性が高く、フランジからの噴出時に静電気が放電して、漏洩し酸化したヘキサンに引火したと推定される。

背景

ポンプ振動によりフランジがゆるんだことが基本要因だが、なぜキャビテーションを起こしたか、フランジがゆるむほどの振動を放置したか、など理解に苦しむところがある。

三番目の事例は、通常運転時に起こったポンプ吐出フランジ継手からの危険物漏洩に起因する火災事故で、プロセスの変動と配管構造の機械的設計不具合が複合してフランジ部に過大な繰り返し荷重がかかったと推定された事例である。機器の振動をできるだけ抑制できるような設計上の配慮と日常点検における過大な機器振動のチェックをそれぞれチェックリスト等に反映した。

3. 事故防止の基本的考え方

プラントの機器や配管などの設備は何らかの影響で故障したり、不具合を生じたりすることは避けられない。また、人がミスを犯すことも避けられないものであり、さらに設計段階では予測していなかった事象が生じることもある。従って、化学プラントは小さな不具合をトラブルに発展させない、事故を生じても拡大させないため、ハード面では多重の防御対策とソフト面では臨機応変な処置ができることが求められている。

事故発生要因の予防対策としては、

- ・技術的対策（プロセス・設備の安全設計、保全検査）
- ・管理的対策（安全管理体制、運転・保全体制

等）

- ・ソフト対策（基準書整備、教育・訓練、安全活動等）

事故の拡大防止対策としては、

- ・技術的対策（検知設備、防消火設備、流出防止等）
- ・管理的対策（緊急処置訓練、避難経路、広報等）

等が挙げられ、これらは相互に補完し合い、かつ独立して機能することが必要である。

化学プラントの不具合が事故に進展するには、引き金事象が生じた後、防御措置が機能しない、他の不具合が生じるなどの悪条件が重なることが多い。先の事故事例を引き金事象、進展要因、防御要因の欠如、最終事象（事故）として整理すると表1のように表すことができる。

化学プラントに生じる不具合やそれらが事故に進展する技術的要因（引き金事象あるいは進展要因）を筆者の経験等に基づき、以下のように整理してみた。これらは後述するプロセス安全検討における検討項目となる。

- (1) 機械・設備の破損等によるもの

1) 機械の故障、損傷

- ・ポンプ、攪拌機等回転機器の軸受け部から

表1 事故進展へのシナリオ

	事故事例1	事故事例2	事故事例3
プロセス ハザード 進展シナリオ	反応性流体の貯蔵	反応中間物	不溶性重合物を含む可燃性溶剤
引き金事象	仕切弁の弁座漏れで他の流体混入	下流工程のトラブルにより中間タンクに滞留（冷却設備なし）	ポンプのキャビテーションによるフランジへの過大な力
進展要因	混触反応開始 → 温度上昇	反応の継続 → 中間タンク温度上昇	不溶性ポリマー通過時のポンプ振動、配管構造など
防御要因の欠如	冷却設備なし（外部から冷却操作） 混触反応知識なし	温度計なし & 監視不足（他のトラブルで忙殺）	振動対策の不備 振動の見逃し（危険感受性不足）
最終事象	ブリーザー弁からガス噴出 → 着火・火災 → 貯槽爆発	暴走反応により機器破裂 → 周辺設備損壊	内容物の噴出 → 静電気着火（推定） → 火災拡大

の内容物漏洩

（原因例）シール機構の損傷（異物噛み込み、磨耗、繰返し振動など）

- ・弁グランド部からの内容物漏洩

（原因例）磨耗、劣化、材質不適合

- ・フランジ継手部からの内容物漏洩

（原因例）材質不適合、締付け不良（温度変化、片締め）、繰返し振動

2）設備の材質の劣化・損傷

- ・内部流体による腐食、応力腐食割れ、などによる内容物漏洩

（原因例）材質不適合、適用温度範囲の逸脱、腐食性物質の濃縮、流体混合による腐食性物質生成

- ・内部流体によるエロージョン（浸食）による内容物漏洩

（原因例）液滴衝突部、気泡流動部、粒状物質含有流体の流速増大部等

- ・材料強度の低下（亀裂、開孔）による内容物漏洩

（原因例）低温脆化、高温クリープ、水素脆化、アルカリ脆化、疲労（振動など）

- ・外面腐食による内部流体漏洩

（原因例）断熱材内部への雨水侵入、架台等接触部位の湿潤、防食不備

3）過大な応力による設備の破損に伴う内容物漏洩

- ・液封状態：弁開閉設定のミス

- ・液撃作用（ウォーターハンマー）：弁の急激な開閉、気液の存在

- ・熱応力：熱膨張（収縮）の逃がし不備

- ・地震動、風圧等の外力

- ・内部流体の凍結

(2) プロセスや物質の特性によるもの

1）系内の温度・圧力上昇 → 設備破損 → 火災・爆発

- ・異常反応（暴走反応）の発生、抑制不調

（原因例）原料過剰供給、触媒過多、触媒活性、攪拌不良（部分過熱）、温度制御不調、圧力放出不調、反応失活剤機能不良

- ・想定外の反応発生

（原因例）不純物混入（触媒作用、相互反応）、反応物長時間放置、空気混入（酸化反応発生）、混触反応（混入、残渣物）

- ・不安定物質（ニトロ化合物、過酸化物など）の生成 → 分解爆発

（原因例）微量不純物、空気・酸化剤などの混入、生成条件の成立

- ・設備内部での可燃性混合気の生成と着火源の存在 → 爆発

(原因例)不活性ガスシール喪失、減圧設備内
への空気吸い込み

着火源：静電気放電、摩擦火花、
溶接火花

高圧空気、酸素設備内への可燃物混入
着火源：断熱圧縮、静電気放電

2) 粉塵爆発

・可燃性粉塵雲の発生と着火源の存在

(原因例)微粉の生成、空気（酸素）の存在、
静電気除電の不備

3) プロセス設備外部での燃焼

・保温材への可燃性物質の染込み→自然発火

(原因例)取扱い不良（漏れ、こぼし）

・設備から取出した重合物質、スラッジ、廃
油などの自然発火

(原因例)物性把握不足、取扱い不良

・自然発火性物質、禁水性物質の発火

(原因例)物性把握不足、取扱い不良

・電気設備（変電室等）での短絡、地絡など

4) 毒性ガスの漏出

・除害設備の機能不良

(原因例)電源喪失、除害液濃度低下、流量過
大（設備能力不足）

4. プラントの安全操業を継続するために

化学プラントにおける火災・爆発等の事故を未然に防止するためには、化学プロセスの特性に基づいた安全設計思想が必要であることは言うまでもなく、その設計思想を化学プラントのライフサイクル（研究開発、設計・建設、運転、設備維持）にわたる管理として正しく技術伝承すると共に、増改造などプロセスや設備の変更時のリスクアセスメントにも反映しなければならない。（図2³⁾参照）

プロセス開発から運転に至る一連の流れを図3に示すが、このようなライフサイクル管理を確実に行うためには、経営方針、資源の投入といった経営の姿勢をベースに、技術者や運転員の育成システム、安全検討のためのルール作りとその順守徹底、意識、意欲の醸成、情報共有、水平展開、技術伝承、さらにシステムやパフォーマンスに対する評価や監査など総合的なマネジメントシステムの運用が必要である。

化学プラントのライフサイクルにわたる管理として、筆者が以前従事していた会社で制度化しているプロセス安全検討会議は、図4に示すように研究開発の中間段階をレベル1、試運転

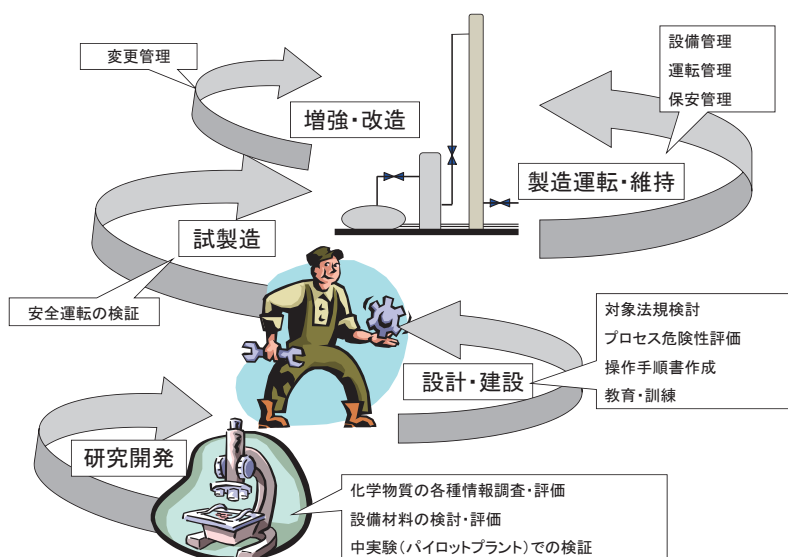


図2 化学プラントのライフサイクルにわたる管理³⁾

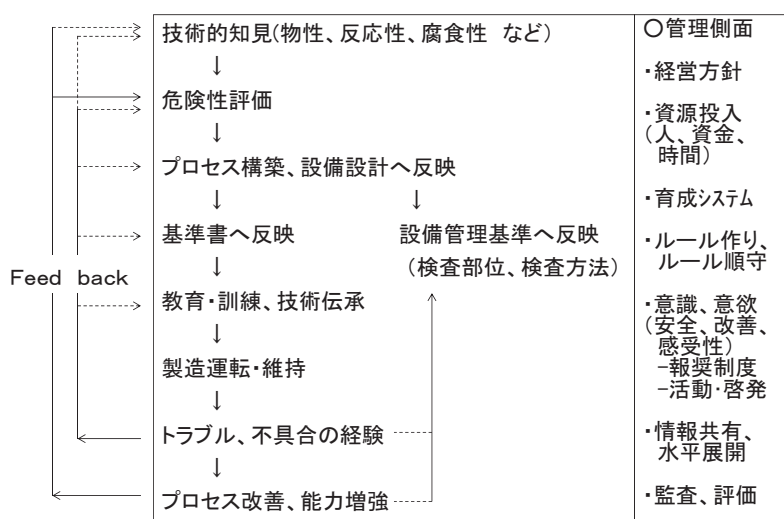


図3 プロセス開発から運転に至る一連の流れ

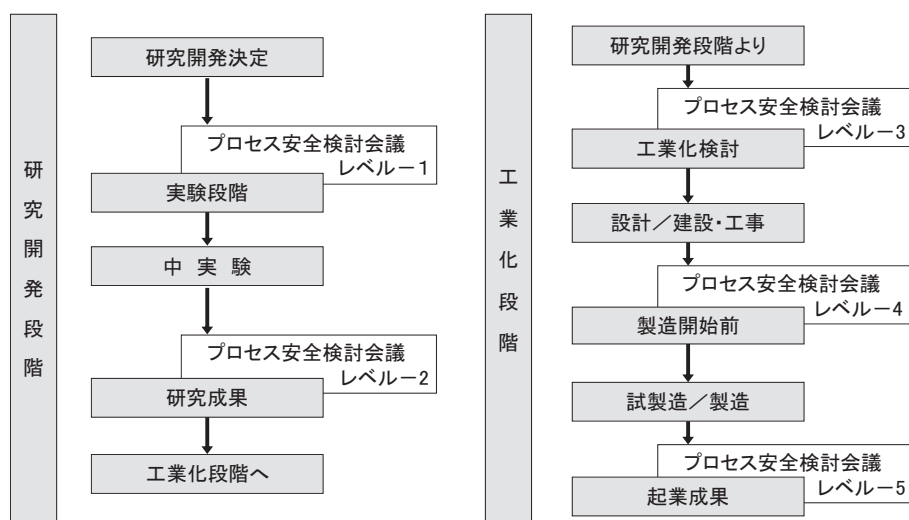


図4 プロセス安全検討会議の実施段階

後の確認会議をレベル5として、全部で5段階の区分を設けている。

1) 研究開発段階におけるプロセス安全検討会議

研究開発段階におけるプロセス安全検討会議(レベル1、レベル2)は研究担当部署の主催で、主として物質の性質、化学反応、混合危険に関する情報、プロセス条件設定と設備材料等基本的な事項について検討した内容と取り扱う物質(原料、触媒、添加物、中間体、製品等)や反応に関わる事故事例の調査検討結果について、保

安管理部門、製造部門や設計部門の実務担当者が評価・確認を行う。

この段階ではプロセス設計や設備設計、安全制御システム等を検討するために必要な情報が網羅されているかが議論となり、例えば運転管理範囲外における暴走反応試験等による物性情報の追加、腐食性に関する材質試験の追加等を要求することもある。

2) 設計・建設段階におけるプロセス安全検討会議

起業化決定後の設計・建設段階では、研究開発段階で得られた安全に関する各種情報に基づいてプロセスの安全技術、安全対策が順次具体化され、確立されていく。技術ライセンスを受けた導入プロセスの場合も同様に、技術導入先から提供された各種の安全情報に基づき、安全対策が確立されていく。

この段階におけるプロセス安全検討会議（レベル3、レベル4、レベル5）は保安管理部門が主宰し、起業担当部署（主に製造部門）におけるリスクアセスメント（プロセス危険性評価及び安全対策検討）が適切に行われていることを、技術的に且つ多面的に評価・確認するために、起業担当部署、設計部門、関係部門（上・下流の製造部門、動力用役部門等）と各事業所で任命されたプロセス保安専門委員が参加して実施される。

3) 既存プラントのプロセス危険性評価

既存プラントの能力増強、省エネルギー等の合理化改造、安全システムの改良等の変更を行う際には、変更管理の手順に従ってプロセス危険性評価を実施し、変更の規模やリスクの大きさに応じてレベル3またはレベル4からプロセス安全検討会議を行い、プロセス原理（設計思想）からの逸脱がないことの確認を含め、多面的な評価・確認を行う。

また、特に変更がない場合においても、以下のような場合、必要に応じてレベル4相当のプロセス安全検討会議を開催する。

- ① 社内外事故事例の教訓に基づく類似事故防止の安全対策検討
- ② 定期的なHAZOP（Hazard and Operability Study）等によるプロセス危険性評価と安全対策案検討

4) プロセス安全検討会議の確認事項

プロセス安全検討会議の所掌範囲としては、プラント安全基盤情報、安全設計・安全技術、運転（SOP全般）、緊急時対応、リスクアセスメ

ント、変更管理、教育の各項目であり、さらに保全情報（設備材料特性、腐食データ、検査周期等）も確認の対象となる。

安全設計・安全技術では、物質の有害危険性の情報に基づくプロセス条件設定が適切になされているか、管理範囲逸脱時にどのような状態になるのか、電力や蒸気、冷却水等のユーティリティ停止時を想定したプロセス挙動を把握しているかという視点で確認・評価を行う。そして、得られた情報を機器の設計条件に反映しているか、プラント緊急停止条件、トラブル拡大防止に至るまで必要な検討が抜けなくなされているか、安全対策案が適切であることを確認する。

安全システムに関しては、外乱や制御系の不調等によるプロセスの変動、運転管理範囲からの逸脱を早期に且つ確実に検知し、安全な状態に戻す、或いは安全に停止させるため、緊急脱圧、緊急冷却や緊急停止システム等のインターロックシステムを構築するが多い。プロセス安全検討会議では、このインターロックのトリガー条件と出力対象の組み合わせや、複数の出力対象同士が相互に干渉を起こさないこと、さらにインターロック解除の条件に至るまで、ロジックが適切であることを確認する。

安全設備に関しては、安全弁、破裂板、圧力放散口等の必要性和その能力、可燃性あるいは毒性ガス検知器、各種火災検知装置（煙、熱等）といった検知装置や消火設備、冷却散水設備、さらに框（かまち）や防油堤等の流出防止設備の設置等を含め、必要な検討が抜けなくなされているか、対策が適切であることを確認する。

機器、配管類などの機械設備についても、内部流体による腐食対策はもちろんのこと、機器の振動対策が施されているか、配管熱応力の逃がしは適切であるか、外面腐食やエロージョンに対する配慮がなされているのか、などもチェックの対象となる。

5) プロセス安全検討会議結果の活用と技術伝承

プロセス安全検討会議の結果は、開発工業化の各段階における重要会議に報告され、次段階のプロセス安全検討会議での検討事項についての指示を受ける。また一連のプロセス安全検討会議を経て、プロセスの安全設計・安全技術が確立した段階で、製造現場の製造標準、技術資料に反映させ、技術伝承できるようにすると共に、運転実務の関係者に対し、特に Know-why（なぜそうするのか、してはならないのか）に重点をおいた教育を実施する。

さらに、設計部門、保全部門に対しても、当該プロセスにおける安全設計・安全技術の原理原則と各種の検討の過程で得られた必要な情報を共有し、設備保全データとして一元管理するとともに、各プロセスに共通する技術的知見や情報については設計基準や保全基準に反映させる。

5. 保安防災技術に関する研修

プロセス安全検討の主体を担う管理者層、技術スタッフや運転実務を担当する監督者層を対象とした保安防災教育をカリキュラムとして定め、安全防災理論に関する座学、安全管理システムに関する e-ラーニング、そして混合危険や静電気着火、粉じん爆発等を実験装置を用いて実体感する火災・爆発体感研修等を組み合わせることで、実務に役立つ教育を効果的に行うことができる。筆者が以前従事していた会社の例を以下に示す。

1) 安全・防災理論

本講義で取り扱う教育項目は非常に幅広く、以下に示すように化学物質自体や化学反応が有する潜在危険性の評価手法や影響度評価、リスク評価及び各種の安全対策技術に関する基本的な内容を網羅したものとなっている。

- ① 概論および安全工学紹介
- ② ガス爆発・粉じん爆発
- ③ 熱安定性・自己反応性
- ④ 反応危険性

- ⑤ 静電気危険
- ⑥ その他危険性（自然発火性、着火燃焼性、感度威力、漏洩）
- ⑦ 消防法危険物判定試験
- ⑧ 防災アセスメント手法

講義資料には、各種試験装置の紹介や試験結果に基づく具体的な危険性評価例及び安全対策の実施例を多数盛り込んでいる。また、防災アセスメントについては、実際に社内で運用している評価ツールを用いた演習を行っており、プロセスの安全検討に即座に役立つことを目指した講義内容となるよう心掛けています。

2) FE（火災・爆発）体感研修

FE（火災・爆発）体感研修は、以下の3段階から構成される。

- ① 社内の保安防災指針の事前学習・テストによる理解度到達チェック
- ② 研修施設での集合研修（体感実験・座学）
- ③ 研修後レポート

項目②の体感実験に際しては、社内で実際に行われている作業（装置、器具、取り扱い物質）を想定して制作した教材を使用し、且つ、受講生が自ら実験操作を行うことで、危険性をより身近なものとして認識できるように工夫している。（表2³⁾、図5³⁾）

研修後は自職場で研修により得られた知識、経験を生かすため、管理者によるフォローや安全工学グループとのコミュニケーションを図るよう指導している。

6. おわりに

以上、石油化学プラントの事故防止に向けた取り組みの一端を紹介したが、これまでの教訓などから以下のようにまとめた。

- ・事業活動にはリスクは必ずある。
- ・リスクを正しく把握（解析）し、許容されるレベルに低減させるよう、技術的、管理的、ソフト的対策を講じる。

表2 FE（火災・爆発）体感研修の内容

項目	主な体感内容	ねらい
混合危険	混合危険	混合危険の評価方法の理解、取り扱い物質の混合危険の体感
静電気・ガス爆発	可燃性液体・粉体の移し替え時の静電気危険、人体帯電、各種放電	各種静電気現象の理解、静電気による帯電および着火体感により、静電気危険の事前発券能力、安全対策を実施できる能力を養う
着火・燃焼性	有機溶剤の引火の危険 可燃性固体の着火・燃焼性	取り扱い温度と引火点の関係や着火の起こりやすさなどの体感により、引火性液体や可燃性固体取り扱い時の危険感受性と安全対策を実施できる能力を養う
粉じん爆発	粉じん爆発危険	粉じん爆発の理解、粉じん爆発の体感により粉体取り扱い時の危険感受性と安全対策を実施できる能力を養う
熱安定性	冷却系故障による熱暴走	冷却システムの重要性和安全対策の理解。実際の熱暴走（ビデオ）体感により、安全対策を実施できる能力を養う



図5 FE（火災・爆発）体感研修の実施風景（粉じん爆発実験）

- ・過去の事故事例の教訓、本質的課題に学び、自プラントの弱点を補強する。
- ・人はミスを犯す、機械は壊れることを前提に設計段階で多重の防御措置を講じる。
- ・小さなトラブルを大きな事故に拡大させない。事故への進展ルートを断つ。
- ・設計者は様々な異常を想定しプロセス設計に反映するとともに、運転担当者はその設計思想（know-why）を理解し、伝承することが重要。

参考文献

- 1) 消防庁特殊災害室「石油コンビナート等特別防災区域の特定事業所における事故概要（平成24年中）、【図7 主原因別の事故発生状況（構成比）】」
- 2) 失敗知識データベース web site、<http://www.sozogaku.com/fkd/>
- 3) 平山隆一、安全工学、Vol.51、No.6、pp.380-385（2012）