貯槽等における爆発・火災の予測と防止 —トラブル対処作業に関連して—

八 島 正 明^{*1}

タンクやサイロなどの貯槽では、貯蔵した化学物質が発熱して発火、爆発したり、火災が発生したりする危険性がある。異常発生時には、現場作業員が緊急排出や消火等のトラブル対処作業を行う際に被災することもある。最悪の場合、小康状態が続き、大勢が集まった時に大きな爆発が発生することもある。内部が見えにくい貯槽等ではセンサーなどを使って状況を的確に把握し、爆発や火災に至る進展事象を予測し、避難のタイミングを計るなど、トラブルに適切に対処することが求められる。本稿では、貯槽等における爆発・火災の事例を挙げ、トラブル対処作業に関連して爆発と火災の予測と防止の方策を考察する。

キーワード：非定常作業、消火、粉じん爆発、粉体火災、ごみ固化燃料、化学工場、貯槽

1 はじめに

貯槽やサイロなどで異常な温度上昇や煙の発生などのトラブルが認められると、マニュアルなどに従ってすぐに緊急対応がとられる。トラブル対応とは保守・定期補修などの非定常作業の一つである。厚生労働省では、近年の化学工場の災害^{1,4)}を受けて、化学設備の非定常作業の安全衛生対策のガイドラインを見直している⁵⁾。また、事業場では、公設消防隊が到着までは自衛防災組織の隊員が適切に対処し、初期消火などを行わなければならない。最近、石油コンビナートの災害向けの教育テキストが消防庁より刊行されている⁶⁾。

本稿では、貯槽等における爆発・火災の事例、特に消火作業中に作業員が被災した事例を挙げ、トラブル対処作業に関連して爆発と火災の予測と防止の方策を考察する。

2 近年の化学工場での重大災害、非定常作業における労働災害

1) 大規模施設の貯槽等における爆発・火災

2011年11月13日15時すぎに発生した塩化ビニルモノマーの製造施設の火災¹⁾では、同日3時過ぎに2系列ある工程のA系の緊急放出弁が故障した後、工程A系のロードダウンに対応していたところ、鉄さび等を触媒とするエチレンジクロライド生成反応が暴走し、塩酸塔還流槽付近で爆発および火災が発生した。この火災では熟練技術者の不足が事故原因の一つに挙げられ、事故発生後の事象進展に関する想像力の不足も反省となった。

2012年4月22日に発生したレゾルシン製造施設での火災²⁾は、前日23時すぎに蒸気供給プラントのトラブルで緊急停止作業を行っていたところ、2時すぎに爆発、火災が発生し、約6時間後に2回目の爆発があった。直接の原因としては緊急停止作業中に、冷却の増強を目的

としてインターロックを解除して通常の循環水冷却に切り替えたが、そのことで窒素供給が停止し、酸化反応器内の液相のかくはんが停止した。それにより反応器上部にある過酸化物の冷却ができず温度が上昇し、暴走反応に至った。

以上の事例を要約すると、トラブル発生後の事象進展に的確に対処すれば、事故災害の拡大を未然に防げたと考えられる。

2) 主な非定常作業における労働災害

化学設備の事故災害の割合は定常作業が約40%、非定常作業が約60%で、非定常作業をさらに細かい作業に分けてみると、次のような割合になっている⁵⁾。

- ・保全的作業（非定常作業のうち57%）
- ・トラブル対処作業（同28%）
- ・移行作業（同5%）
- ・試行作業（同2%）
- ・その他の作業（同8%）

本稿で取り上げるトラブル対処作業について、運転や作業中の異常事象・緊急を要する事態の発生は、あらかじめ想定されるものであれば、決められた手順で対処すればよい。しかし、トラブル発生は予測が難しく、操業以来初めて経験する事態であったりすれば、その場での適切な判断で対処することは難しいといえる。次節以降で述べるが、本作業は、消火作業など現場に人が集まったときに被災するケースが最も多い作業である。

1991年～1996年の期間の化学設備における非定常作業における労働災害の発生状況について調べられたものの⁷⁾によると、保全的作業は140件、トラブル対処が47件、保全とトラブル対処が19件、その他が7件であった。トラブル対処に関する爆発と火災は6件だけで、むしろ機械へのはさまれ・巻き込まれ、手の負傷の災害が多かった。しかし、事業場で爆発や火災が一度発生すると、重篤な災害になりやすく、経済活動や周辺地域に影響を及ぼし、社会的影響が大きくなりやすいことを理解しておく必要がある。特に、素材産業での爆発や火災の影響は深刻となる。

原稿受付 2018年11月27日 (Received date: November 27, 2018)

原稿受理 2019年1月22日 (Accepted date: January 22, 2019)

J-STAGE Advance published date: February 18, 2019

^{*1} 労働安全衛生総合研究所化学安全研究グループ

連絡先：〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6

労働安全衛生総合研究所化学安全研究グループ 八島正明

E-mail: yashima@s.jnioh.johas.go.jp

doi: 10.2486/josh.JOSH-2018-0017-SHI

3 消火作業中の災害事例⁸⁾

表1に厚生労働省のwebサイト「職場のあんぜんサイト」⁹⁾の労働災害事例で「消火作業」をキーワードに検索した一例を示す。現場作業員が消火を試みたところ粉じん爆発が発生したり、火傷、CO中毒、酸欠を負ったりしていること、着衣着火によって火傷から死亡に至る事例があることがわかる。

表2に労働安全衛生総合研究所のwebサイト「爆発火災データベース」¹⁰⁾で消火作業をキーワードに検索した結果の一例を示す。粉じん爆発では、消火作業中に事故が拡大することがしばしばみられる（番号1～3、6）。消火作業で水を使用したことによって水素が発生し、被害が拡大した事例もある（番号3と6）。

燃焼方式の乾燥設備、ボイラーでは失火の後の再点火の際にプレバージが不適切であったり、付帯設備に動作不良があったりすると再点火時に爆発が発生することがある（番号4）。

4 粉じん爆発・粉体火災と消火作業

1) 粉じん爆発

粉じん爆発とは、可燃性の粉体が浮遊し、空気中の粉じん濃度が燃焼範囲にあるとき、なんらかの着火源によって燃焼を開始し、火炎が伝ばする際の体積膨張、すなわち急激な圧力上昇や発熱によって周囲に被害を及ぼす現象のことをいう。粉じん爆発を生じる爆発下限濃度は粉の種類、大きさによって異なるが、50～200g/m³の範囲が多く、1mmだけ堆積した粉じんも舞い上がれば粉じん爆発を生じる原因になるといわれる。

金属（粉）の火災に注水は厳禁である。しかし、過去には消火のために注水を行った事例は多い。注水によって粉を舞い上げて粉じん爆発を生じたり、水の急激な蒸発により火炎が大きくなったり、また水素が発生したりする。水素は拡散しやすいので、開放空間では堆積粉から離れると水素の爆発の危険性は低下するが、閉じた空間が存在すると水素が滞留し、危険性は増す。

表1 消火作業中の主な労働災害事例（「職場のあんぜんサイト」より）

整理番号	表 題
1077	フェノール樹脂の合成反応工程で、異常反応の非常処置作業中に未反応の高濃度フェノール液が皮膚に接触して化学火傷
100137	木粉で製造する合板の工場での粉じん爆発
100546	フェロマンガンの乾燥工程において、異常が発生したため停電中、乾燥機内で粉じん爆発
101121	塗装工場が発生した火災の消火作業中に焼死
101147	自動車部品製造工場が発生した火災の消火活動で一酸化炭素（CO）中毒になる
101225	マグネシウム成形機で発生した火災の消火活動中、煙を吸い込む
101274	船倉内で鉱石の搬出作業中に、作業員1人及び救助に向かった2人の作業員が酸素欠乏症で死亡

表2 消火作業中の事故災害の例（労働安全衛生総合研究所の「爆発火災データベース（第5次）」より）

番号	事故の概要
1	とうもろこし外皮の乾燥設備の内部から出火、炭酸ガス消火器を手動で全開操作したところ、火炎が外に吹き出して、消火活動中の作業員ら計11名が火災により被災した。（死傷11人、うち死亡0人）
2	オガ炭工場において、釜の煙突から排出された火の粉が平常運転中の同工場トタン屋根上の堆積木粉に着火して火災となった。消火作業中に消火器の噴射で燃え上がって爆燃したため、消火作業中の被災者が火傷を負った。（死傷4人、うち死亡1人）
3	アルミニウム屑よりアルミニウム粉を製造している工場、グラインダーの火花が飛んで床上のアルミニウム粉に火がついて火災となった。消火しようと水をかけたところ、堆積していたアルミニウム粉が飛散し、粉じん爆発と一部はアルミニウムの水との反応で発生した水素の爆発が起こった。（死傷4人、うち死亡2人）
4	A重油を使用するボイラーを自動制御によって消火工程を実施した。しかし、何らかの原因で燃料系統の電磁弁配線が電磁弁キャップに接触し、通電状態のままとなったため、電磁弁が開き燃料噴射ポンプが稼働してA重油がボイラーの炉内に送られて気化してしまい、点火用パイロットバーナーにより爆発した。（死傷0人、うち死亡0人）
5	精米施設の精米用ホッパー脇において、積み置きした空の紙袋の火災をたまたま発見し、2名が消火作業中、近くに積んであった玄米の袋に飛び火して玄米のはいが崩壊し、下敷きになった1名が火災で火傷を負い約3週間後に死亡した。火災の出火原因は不明。（死傷1人、うち死亡1人）
6	金属粉砕工場において、マンガンの湿式粉砕設備で火災があり、設備を停止して消火した。集じんダクトを点検したところ温熱を感じたので火災と考え、注水のため点検孔を開放する直前、乾燥機が爆発し点検孔付近にいた2名が死亡した。原因は、乾燥機内の湿ったフェロマンガンの粉から発生した水素が集じん機を止めていたので滞留し、湿潤状態のフェロマンガンの粉が自然発熱して自然発火、水素の燃焼により乾燥機内の粉じんが舞い上げられ粉じん爆発を起こしたとみられる。（死傷2人、うち死亡2人）

2) 粉体火災

粉が堆積した状態で舞い上がらずとも、何らかの原因で着火した場合には燃え広がりが見られる。燃え広がりには着火した位置の違いによって層表面に沿って燃え広がる場合と堆積層内で燃え広がる場合がある。貯槽やサイロなどでは堆積層の内部で自然発火によって燃え広がりが生じることが多い（図1）。このときの燃焼の形態としては、無炎燃焼を呈するくん焼となる。農産物、飼料、木粉（おがくず）、プラスチック（高分子）などの有機物のくん焼状態における燃焼温度は550から750℃程度で、燃え広がり速度は0.1 mm/min程度である。ただし、粉体の径が大きい場合やペレット形状（直径10～20 mm、長さ20～50 mm）の場合は、その速度は一桁大きくなる。燃え広がり速度は粉体の大きさ、堆積層の熱伝達特性、堆積層内の空隙、通気性、酸素濃度などに依存する。層内が密閉に近い状態であれば、酸素が無くなりいずれ燃焼反応が停止する。しかし、開口部があって新鮮な空気の流入がある状態であったり、堆積層が崩落して空隙が増加したりすると、無炎から有炎に変化し、速く燃え広がるようになる。可燃性の熱分解ガスが局所的に滞留していると、爆発の可能性もある。このほか、粉体火災の特徴などを以下に示す。

図1 堆積層内部の燃え広がり様子
（内部で発火した場合）

- ・層内で蓄熱から発火した場合は、火災が発見されるまで時間を要する場合が多い。火災の発見は、ほとんどの場合、煙や臭いの発生による。COセンサーを設けているサイロもある。
- ・着火源としては発熱を伴う反応、高温熱面、飛び火（燃焼粒子）が代表例である。
- ・粉体火災では爆発に比べ、有害性ガス、可燃性の熱分解ガスを多く発生する。このときの煙は、すすや水蒸気だけではなく、可燃性の熱分解ガス（蒸気）であることも多く、滞留によってガス爆発が発生する危険性がある。
- ・燃焼の過程が変化しやすい。火災→爆発へ、爆発→火災へ遷移
- ・粉体サイロ内でのくん焼の消火には長時間要する場合

があり、海外の消火の好事例では、小麦ふすま（小麦の表皮）ペレットのサイロ火災において、窒素を底部から、二酸化炭素を頂部から投入し3週間かけて鎮火した例がある¹¹⁾。燃え広がりはずっと進行するので、消火に拙速は禁物である。

5 予測・退避距離

1) 暴走反応の予測

貯槽内の温度変化について、十分な性能を有する温度計を適切な位置に設置していれば、モニタリングによって暴走反応開始までの時間は予測できる可能性がある。そのためには貯蔵する物質の融点、沸点、熱伝達特性、比熱などの物性値のほか、発熱開始温度、発熱量、最大加熱発熱速度などを予め把握し、起こりえる暴走反応をモデル化している必要がある。しかし、温度を正しく測定できなかったこと、冷却装置の不備や方法の不適切さ、扱っている物質・反応の危険・有害性の情報の不足など諸々の原因により、トラブルに適切に対処できなかった事例は多い。取り扱う物質に関する情報がSDSに全て記載されているわけではないため、文献を調査したり、実測してデータを収集したりしなければならない。さらに、混合危険性などはSDSでの情報は不十分であることが多く、タンク内で副生しうる物質や、構造物、混入物（さび等）との反応も考慮し、実測する必要がある。

2) 退避距離

法令では可燃物の保管量によって、保安距離、離隔距離などが定められているが、これらは周辺施設の被災防止や火災予防の観点から定められているものであり、作業員の被災などは考慮されていない。防災アセスメント指針¹²⁾によると、算定条件を定めることで影響距離が求められる。米国の危険物輸送における緊急対応ガイドブック¹³⁾によると、火災時の影響や有毒物による影響を考慮して、危険・有害物の特性によって退避距離がリスト化されている。近隣住民等にはもちろんのこと、緊急時に対応する作業員等が身を守る行動をとる際、そのような情報があると参考になるはずである。

大規模な化学工場を除くと、危険・有害性の物質を扱う立地としては十分な距離を確保できない事例も多い。数100m離れ保安距離が十分あっても、爆風によって付近のガラス窓が割れること¹⁴⁾で被災する可能性もあるので、避難する場所はよく検討しておく。

6 燃焼ガスの有害性・消火確認

1) 燃焼ガス

火災時には有害な燃焼ガスが発生しやすい。一般建物による火災実大実験において、CO、CO₂、O₂濃度など分析結果によると、次のことが明らかになっている¹⁵⁾。

- ・燃焼に伴い、O₂濃度が低下し、CO、CO₂濃度、温度、煙濃度が増加すること。
- ・COに対するCO₂の生成量は、閉窓時よりも開窓時のほうが非常に大きいこと。
- ・火災室またはその付近では、人間にとって非常に厳し

い状況にあり、COは5%以上、CO₂は15%にもなり、O₂濃度は2～3%にまで低下すること。このときの火災室内の温度は700～800℃に達すること。

- ・火災室からかなり離れ、火の熱の影響をほとんど受けない場所で、有害ガス、例えば、COの濃度が高くなること。

ここで理解しなければならないのは、火災の発生場所から離れていてもCO中毒の危険性があるということである。例えばポリエチレン、ポリウレタンなどの高分子の燃焼¹⁶⁾では、有害なCO（可燃性ガスでもある）が大量に発生する。

2) 消火確認、残火処理など⁸⁾

工場の爆発や火災では取り扱う原料や製品の可燃物だけでなく、設備も燃えるため、燃焼生成物は多岐にわたるはずである。規模が大きくなると不完全燃焼も生じやすい。もちろん燃焼によって周囲の酸素が消費されるので、付近は酸素が少ない状況となる。消火の確認のために装置内部に侵入する際には、酸欠や一酸化炭素などの有害ガスによる中毒に注意が必要である。また、装置の扉を開けたことで、新鮮な空気の流入で再燃したり、粉が舞い上がって粉じん爆発が生じたりする可能性がある。残り火の確認にはガス検知警報器を携行し、必要な保護具を身に付けて慎重に構えて入り、不用意に装置の扉を開かないほうがよい。

携帯型のガス検知警報器のしきい値は、一般に爆発下限濃度の1/4に設定されることが多い。アラームが鳴ったときは、自身の動作で人体に帯電し、静電気が着火源となる危険性が高まることもある。なぜなら、空間のガス濃度は不均一で、局所的には爆発範囲内に達している可能性があるためである。固定型のガス検知警報器のアラームが鳴った場合は、まずは離れた場所で状況を確認し、不用意に現場に駆け付けけないほうがよい。

7 トラブル対処

1) 基本事項

貯槽等のトラブル対処には内部の異常を検知するための計測センサー、モニタリングが必要となる。そして、異常を検知し、適切にトラブルに対処するための、緊急対応マニュアルが必要となる。貯槽やサイロなどで異常な温度上昇や煙の発生などのトラブルが認められると、このマニュアルなどに記載された現場で行なうべき作業手順に従って、すぐに関係機関への連絡を始めとした緊急対応がとられる¹⁷⁻¹⁸⁾。

表3は貯槽等を含む化学設備等におけるトラブル対処に関する必要事項を示す。いずれも重要な項目であるが、本稿では、g)の事象を正確に把握すること、の重要性を取り上げた。これは、適切なトラブル対処を行うには、「事前に予測できていること」が必要と考えるためである。j)のタイムリーな意思決定については、広瀬の文献¹⁹⁾から引用する：「生命に対する危険の大きさが、行動の適否を決める。危険が小さい場合には、何もしないで様子見をしておいたほうが、あわてて何か大それたこ

とをするよりも安全な場合がある。(中略) 重要なのは、事態の危険性を客観的に評価するための知性と、危険度の評価から導かれた結論を、果敢に実行するための勇気である」。事前に予測できていれば、冷静に対処できる。

2) 現象進展の把握のために

貯槽を含む化学設備等では取り扱う化学物質の物性、危険性・有害性を把握し、機器・設備、プロセス全般を把握しておく必要がある。表4に貯槽等における爆発・火災の防止策を示す。取り扱う物質の反応性、発熱、爆発、火災などの特性を予め把握していれば、トラブル対処に適切に対応できるはずである。

表3 貯槽等を含む化学設備等におけるトラブル対処に関する必要事項

a) 異常事象の発端を正しく理解する。 アラームの洪水に対してランク付けを行う。
b) 計測機器の指示のずれを適切に理解する。 プロセスの特性の把握、運転条件の適切な調整、誤操作の防止、異常発生の判断
c) 緊急停止の操作手順を明確にする。 停止の判断の明確化、権限、誤操作の防止、制御盤の誤操作後の対応方法
d) 緊急停止させる設備とその影響を理解する。 安全装置の電源系統、制御系の分離、安全な場所での操作
e) 適切な保護具を準備する。 呼吸用保護具の選定、安全帯、手袋の使用
f) プロセス流体の緊急排出を行う際のバルブ操作、誤操作の防止
g) 事象を正確に把握する。 爆発、火災、漏えいなどの理解、進展事象の予測
h) 対処すべきチームを構成する。 リーダーの指揮統制、情報の共有、単独行動の防止、作業の指名
i) 想定外のトラブルにも対処する。 対応訓練の実施、訓練シミュレータ活用、問題と解決の反復学習、個々人の高い能力（知識、経験、日々の観察（五感）、洞察、機転、コミュニケーション、発声、体力、精神など）
j) タイムリーな意思決定を行う。

表4 貯槽等における爆発・火災の防止策

a) 取り扱う物質の物性、危険・有害性の把握
b) 発熱開始温度、発熱量、最大加熱発熱速度などを予め把握し、起こりえる暴走反応のモデル化
c) 取り扱う物質に関する情報がSDSに全て記載されているわけではないため、文献調査、実測によるデータ収集 混合危険性などはSDSでの情報は不十分であることが多く、タンク内で副生しうる物質や、構造物、混入物（さび等）との反応も考慮し、実測する
d) 反応、燃焼、爆発、火災、蒸気雲爆発、漏えいなどの事象の理解
e) 機器・設備の理解
f) プロセスの運転条件、作動環境の理解
g) 貯蔵量や漏えい量に対する影響度の評価
h) 安全な距離、退避までの時間
i) 抑制、防護、被害の局限化を図る措置

8 おわりに

本稿では、非定常作業における労働災害としてトラブル対処作業を取り上げた。

- ①トラブル対処作業での災害は爆発や火災よりも、はさまれ・巻き込まれ、墜落・転落の割合が高い。爆発や火災の割合は低いものの、一度発生すると、重篤な被害、経済活動や周辺地域に及ぼす影響など、社会へもたらす影響が大きくなりやすい。
- ②トラブル対処として、消火作業中に作業員が被災した事例を調べ、検討を加えた。
- ③貯槽に保管されることが多い粉体について、粉じん爆発と粉体火災について、消火の視点で概説した。
- ④火災が発生すると有害な燃焼ガスが発生すること、火災が起きている場所から離れていてもCOなどは高い濃度になる可能性を説明した。
- ⑤貯槽等における爆発・火災の防止策を示した。

化学工場に限らず産業現場の中には、適切に対処したことで大きな事故や災害にならずに済んだ、部外の者が知らないような好事例を有している事業場もあるかと思われる。労働安全衛生総合研究所では、爆発・火災・漏えい等の観点から事故対応マニュアル作成に役に立つ情報を収集していきたい。

文 献

- 1) 清弘光生. 東ソー株式会社南陽事業所において発生した火災. 火災. 2014 : 64 (3) : 2-7.
- 2) 黒元一夫. 三井化学株式会社岩国大竹工場において発生した火災. 火災. 2014 : 64 (3) : 8-13.
- 3) 塚原昌尚. 株式会社日本触媒姫路製造所において発生した火災. 火災. 2014 : 64 (3) : 14-19.
- 4) 中村順. 化学工場火災3例の発生原因. 火災. 2014 : 64 (3) : 14-19.
- 5) 化学設備の非定常作業における安全ー「化学設備の非定常作業における安全衛生対策のためのガイドライン」の見直しに関する調査研究報告書ー. 中央労働災害防止協会. 平成27 (2015) 年3月.
- 6) 自衛防災組織等の防災要員のための 標準的な教育テキスト. 自衛防災組織等の教育・研修のあり方調査検討会. 総務省消防庁. 平成30 (2018) 年3月.
- 7) 労働省安全衛生部安全課編. 化学設備の非定常作業の安全ガイドラインと解説. 中央労働災害防止協会. 52-67, 1998.
- 8) 八島正明. 粉を扱う工場で見られる爆発火災ー消火活動に関連してー. 火災. 2016 : 66 (5) : 25-30.
- 9) 職場のあんぜんサイト. 厚生労働省. <http://anzeninfo.mhlw.go.jp/>
- 10) 爆発火災データベースの公開 (第5次). 労働安全衛生総合研究所. https://www.jniosh.go.jp/publication/houkoku/houkoku_2018_02.html.
- 11) Eckhoff, R. K. .Dust Explosion in the Process Industries Third Ed.,Gulf Professional Publishing,2003:10.
- 12) 石油コンビナートの防災アセスメント指針. 消防庁. 2013. http://www.fdma.go.jp/neuter/about/shingi_kento/h2_4_sekiyu_eikyohyoka/houkokusho/houkokusho_assessment.pdf
- 13) Emergency Response Guidebook (ERG) 2016 .United States Department of Transportation (DOT). <https://www.phmsa.dot.gov/hazmat/erg/erg2016-english>.
- 14) TNO. Yellow Book : Methods for calculation of physical effects. CPR 14E: 2005.
- 15) 日本火災学会編. 火災便覧 (第4版). 共立出版. 2018 : 355-384.
- 16) 森本高克. 高分子の燃焼生成ガスの組成. 高分子. 1973: 22 (253) : 190-195.
- 17) 井上求. ごみ処理施設の火災と爆発事故対策 (その5) 消防機関, 初期消火及び連携. 廃棄物. 2012 : 38 (12) : pp.38-39.
- 18) 井上求. ごみ処理施設の火災と爆発事故対策 (その6) 事故対応マニュアルと訓練および対応手順の有効性評価. 廃棄物. 2013 : 39 (4) : 40-41.
- 19) 広瀬弘忠. 人はなぜ逃げ遅れるのか. 集英社新書. 2004 : 167-169.