

貯槽等で発生した爆発・火災における 被害・周辺影響についての検討†

佐藤嘉彦*1 八島正明*1

貯槽等の化学設備で発生した爆発・火災災害に着目し、災害で生じた現象と被害状況を文献により調査し、関係の有無を検討した。また、粉じん爆発については、爆発の激しさ K_{St} と危険等級 St クラスに対する爆発の影響について、爆発火災データベースや過去の災害調査をもとに調査し、爆発拡大の要因を検討した。その結果、暴走反応等の意図しない反応による爆発で死傷者数が最も多かった一方、可燃物が原因となる爆発では被害範囲が装置内・周辺にとどまっても死傷者数が増える事例が見られた。粉じん爆発については、粉体の危険等級 St クラスが大きいと、事例 1 件当たりの死傷者数、死亡者数が大きかった一方、危険等級が小さい粉体による爆発でも、死傷者数が多い事例が見られた。また、半数の爆発が集じんに関する装置で発生していた。粉じん爆発による影響は、可燃物が同量の場合、ガス爆発による影響より小さくなると推測されるが、実験室の容器サイズで調べられた爆発の激しさよりも、実規模では激しくなる場合があると考えられる。

キーワード: 爆発・火災, 物性, 被害・周辺影響, K_{St} , St クラス。

1. はじめに

化学物質を貯蔵している貯槽等の設備では、貯蔵した化学物質が発熱することで、異常な温度上昇や煙の発生などのトラブルが発生することがある。それらのトラブルに対して作業員等が緊急排出や消火などのトラブル対処作業を行っている際に、爆発・火災が発生し、被災した事例がある¹⁾。例えば、平成 15 年に発生したごみ固形燃料発電所におけるごみ固形燃料貯蔵サイロの爆発・火災では、サイロの火災を消火作業中にサイロが爆発し、2 名が死亡、1 名が負傷した。これは、サイロ内でくすぶり続けたごみ固形燃料から CO と可燃性ガスが発生し、かき出し作業等で流入した空気と混ざって形成した爆発性混合気が滞留した箇所、サイロ壁のガス溶断を行ったことによって溶断の炎あるいは火花が着火源となったことによるものであった²⁾。また、堆積している物質が粉体である場合、その粉体による粉じん爆発の可能性もある。粉じん爆発は、爆発・火災災害全体に対する件数の割合は小さいものの、発生すると、爆風で堆積していた粉体を舞い上げることで二次爆発が発生したり、火災に拡大したりして、被害を拡大する可能性がある。例えば、平成 16 年に発生したパーティクルボード製造工場における爆発・火災では、爆発下限濃度を超える濃度であったダクト内の粉じんに、金属等の異物が送風ファンと衝突して生じた衝撃火花あるいは摩擦火花により着火し、火災が伝播することでその先にある分級装置ではじめに爆発し、破裂に伴う爆風で大量に堆積していた粉じんが舞い上がり、少し時間を経て建屋内の大きな爆発となった³⁾。

このような事例を防止するには、対処するトラブルの事象進展を的確に予測し、対処することが必要である。トラブル対処中の事例では、不用意に作業員が集まったことにより多くの被害者が発生したのものもあることから、トラブルによって引き起こされる事象の影響範囲を知ることが重要である。これまでに、可燃性ガス等による爆発や火災による影響、具体的には火災による放射熱の及ぶ範囲や、爆発により発生する衝撃波による圧力の伝ば挙動などを解析する手法が開発されている⁴⁾。しかし、それらの解析には原因となる物質の詳細な物性や、詳細なプラントレイアウト、気象条件等に関する情報が必要となる。また、粉じん爆発に関する影響の定量的な解析は、可燃性ガス等に関する影響の解析と比べて、あまり進んでいない。そのため、事前に詳細な解析を行っていない箇所トラブルが発生すると、その影響範囲を予測することができず、トラブル対処の戦略を適切に策定できない恐れがある。

爆発・火災災害において、その威力は系に存在する原因物質(存在量, 性状, 保持状況)や生じた現象(爆発, 火災, 破裂)等と関係がある。また、粉じん爆発については、爆発に関与する粉体の爆発の激しさ (K_{St}) 及び危険等級 (St クラス) と関係がある。それらの情報と作業員等の被災の状況との関係を調査し、その関係を示すことは、爆発・火災災害につながる異常時のトラブル対処作業の戦略を策定する際の一助になると思われる。そこで、貯槽等の化学設備で発生した爆発・火災災害に着目し、災害で生じた現象と被害状況を文献により調査し、関係の有無を検討した。また、粉じん爆発については、 K_{St} と St クラスに対する爆発の影響について、爆発・火災データベースや過去の災害調査をもとに調査し、爆発拡大の要因を検討した。

2. 爆発・火災災害の被害状況の調査

1) 被害状況の調査方法

爆発・火災災害事例は、死傷者数や被害が及んだ距離

† 本報の一部は、第 52 回安全工学研究発表会講演予稿集, pp. 3-4, 187-190, 2019, 第 53 回安全工学研究発表会講演予稿集, pp. 139-140, 2020 の記述の一部を加筆修正し、まとめ直したものである。

*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 佐藤嘉彦
E-mail: sato-yoshihiko@s.jniosh.johas.go.jp

に関する記載がある Web で公開されている事故調査報告書及び事件事例集⁵⁻⁷⁾により調査した。それらに掲載されている事例から、災害で生じた現象、死傷者数および被害が及んだ範囲についての記載がある事例を抽出した。被害が及んだ範囲については、爆発・火災が生じた箇所・装置内及びその箇所から 10 m 程度（以下、装置内・周辺）の範囲、その箇所から 100 m までの範囲、1 km までの範囲、1 km 以上の範囲に分けて事例を整理した。爆発・火災の原因には、可燃性物質の燃焼（以下、可燃物）によるものがある。一方、暴走反応・混合反応・反応性物質の爆発といった意図しない反応（以下、異常反応）によるものもある。そのため、それらの原因毎に分類した。上記で整理した情報を基に、災害の原因（可燃物、異常反応）と事例件数、死傷者数との関係を調べた。なお、死傷者数が極端に多かったメキシコシティでのガスタンク爆発事故⁸⁾、ボパールの化学工場の毒ガス漏えい⁹⁾およびセブソの化学工場での有害物質の漏えい¹⁰⁾については集計に含めなかった。

2) 粉じん爆発に関する調査方法

前述したように、粉じん爆発は、爆発・火災災害全体に対する件数の割合が小さいため、Web で公開されている事故調査報告書及び刊行されている事件事例集では十分な件数が見られなかった。そのため、粉じん爆発・火災については、爆発のみに着目して、粉じんの爆発の K_{St} 及び St クラスに対する爆発の影響を調べた。事例については、労働安全衛生総合研究所の爆発火災データベース⁸⁾の 1980 年から 2007 年の期間の粉じん爆発を調べた。それらの事例から、原因となった物質、死傷者数及び爆発発生装置を調査した。また、周辺への影響については、過去の災害調査での影響を参考とした。St クラスは K_{St} あるいは K_{max} に対して 4 段階に分けたもので、 $K_{St}=0$:St=0（不爆）、 $K_{St}\leq 200$:St1（弱い爆発）、 $201<K_{St}\leq 300$:St2（強い爆発）、 $301<K_{St}$:St3（激しい爆発）とするものである⁹⁾。ここでは、St3 に該当する粉体としてアルミニウム粉とマグネシウム粉、St2 に該当する粉体としてセルロース粉と ABS 樹脂粉、St1 に該当する粉体はそれ以外の粉体とした。St2 については該当する粉体の種類が少なく、この期間の災害件数も少ないため、算出から除外した。木粉やコーンスターチ粉を St2 とする文献もみられるが、筆者の経験上 St1 に相当すると考

えられたため、St1 と分類した。また、現在製造されているトナーは St2 に該当するものもあるが、ここでは St1 に分類した。

3. 調査結果

1) 爆発・火災の原因と事例件数・死傷者数との関係

爆発・火災の原因として、可燃性物質の燃焼によるものと異常反応によるものがあるが、その原因別の事例件数及び死傷者数を表 1 に示す。事例件数は可燃物による火災が最も多かった。一方、異常反応による火災は最も少なかった。

死傷者数、死亡者数及び負傷者数では、異常反応による爆発が最も多く、異常反応による火災は最も少なかった。しかし、事例 1 件当たりの死傷者数及び負傷者数と比較すると、異常反応による爆発が最も多く、可燃物による火災が最も少なかった。また、事例 1 件当たりの死亡者数では、異常反応による火災が最も多く、可燃物による火災が最も少なかった。なお、異常反応による火災で事例 1 件当たりの死亡者数が最も多くなったのは、多数の死傷者が発生した、英国で発生したニトロトルエン蒸留残渣の火災事故⁸⁾が含まれているためであった。

爆発・火災の原因別の被害範囲毎の事例件数を図 1 に示す。火災の事例では、被害範囲はほとんどが 100 m までにとどまっていたが、爆発の事例では、被害範囲が 1 km 以上に至るものも多く見られた。火災の場合、周囲に影響を与えるのは専ら火炎による放射熱であるのに対し、爆発の場合は火炎による放射熱の他、爆発時に生じた爆風圧や飛散物も周囲に影響を与える。火災の場合は火炎が目視できることが多く、火災に対する対策ができることも多いが、爆発の場合は周囲に影響を与える現象が多岐にわたる上に、突然発生するため対策を講じる間もなく爆発に巻き込まれることも多い。そのため、爆発による死傷者数が多く、火災による死傷者数が少ない傾向となったと考えられる。また、基本的には被害範囲が小さいほど事例件数が多く、被害範囲が広がるほど事例件数が少なくなっていた。しかし、異常反応による爆発では、被害範囲が 100 m までの事例件数が最も多かった。このことは、異常反応による爆発が発生する際には放出されるエネルギーが大きくなる傾向があることを示していると考えられる。このことから、異常反応による

表 1 爆発・火災及びその原因別の事例件数及び死傷者数

現象	原因	事例件数	死傷者数 ^{*1}	死亡者数 ^{*1}	負傷者数 ^{*1}
爆発	可燃物 ^{*2}	44	352 (8.0)	35 (0.80)	312 (7.1)
爆発	異常反応 ^{*3}	36	527 (15)	39 (1.1)	488 (14)
火災	可燃物 ^{*2}	72	95 (1.3)	15 (0.21)	80 (1.1)
火災	異常反応 ^{*3}	4	29 (7.3)	7 (1.8)	22 (5.5)

*1: 括弧内の数字は事例 1 件当たりの人数を示す。

*2: 可燃性物質の燃焼を示す。

*3: 暴走反応・混合反応・反応性物質の爆発といった意図しない反応を示す。

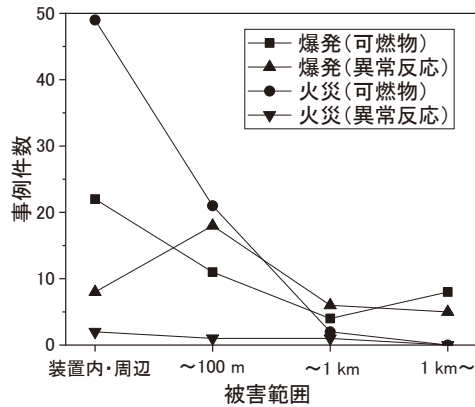


図1 爆発・火災の原因別の被害範囲毎の事例件数

爆発での事例1件当たりの死傷者数及び負傷者数が多くなったものと考えられる。

また、爆発・火災の原因別の被害範囲毎の死傷者数を図2に示す。可燃物による爆発では、被害範囲が大きくなるとともに死傷者数が増える傾向があるが、装置内・周辺に被害範囲がとどまるような、被害範囲が小さくても、多くの死傷者数が発生する事例が見られた。異常反応による爆発では、可燃物による爆発と同様に、被害範囲が大きくなるとともに死傷者数が増える傾向が見られた。一方、可燃物による爆発の場合と異なり、装置内・周辺に被害範囲がとどまるような、被害範囲が小さい場合は、多数の死傷者が発生する事例は見られなかった。可燃物による火災、異常反応による火災では、被害範囲と死傷者数との間に明確な関係は見られなかった。ただし、可燃物による火災においては、死傷者が発生しなかった事例が、半数以上の43件あったことは注目すべきである。このことが、表1で示した1事例当たりの死傷者数が、他の事象と比べて最も小さくなった原因である。また、異常反応による火災は、既に表1に示したように4件の事例のみであったため、関係を得るまでに至らなかった。

以上から、可燃物による爆発と異常反応による爆発の被害範囲と死傷者数との関係はそれぞれ特徴があり、可燃物による爆発では被害範囲が装置内・周辺にとどまっても死傷者数が多い事例があったのに対し、異常反応による爆発では被害範囲が広がるとともに死傷者数が増える傾向を示した。これは、可燃物による爆発では火災や有毒ガスが生じ、その火災・有毒ガスによる被災が装置周辺で生じるのに対し、異常反応による爆発では火災が生じないことが一定数存在し、容器の破裂等による爆風等による被災が多くあることによると考えられる。そのため、トラブル対処の観点からは、可燃物による爆発が生じる可能性がある場合は、火災や有毒ガスへの対策をより重視する必要があるが、異常反応による爆発が生じる可能性がある場合は、圧力逃し装置の設置等の防護対策や、爆風や飛散物等への対策をより重視する必要があると考えられる。

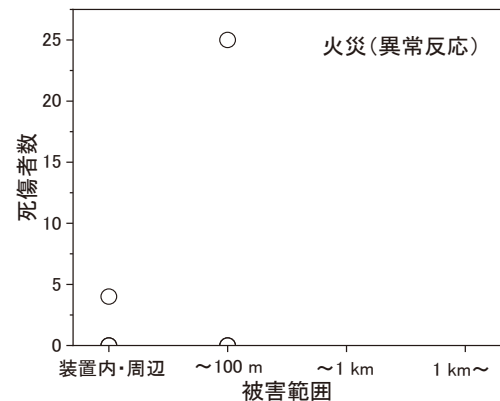
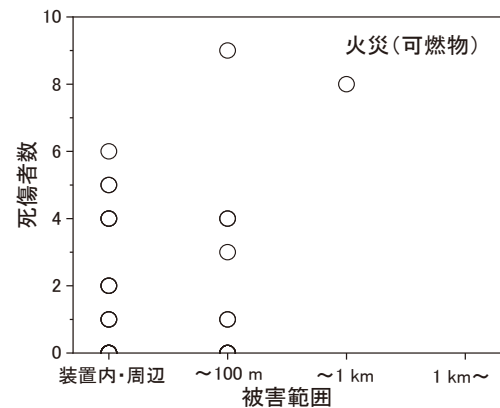
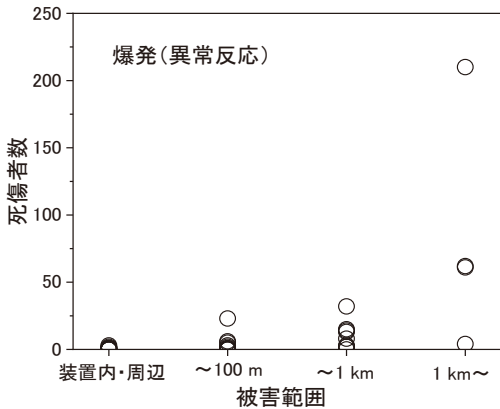
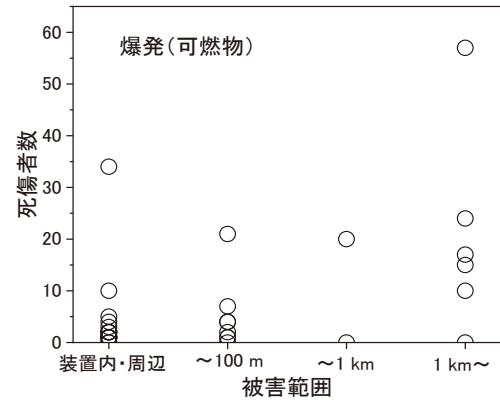


図2 爆発・火災の原因別の被害範囲毎の死傷者数

2) 粉じん爆発による影響

(1) 発生件数と死傷者数

1980-2007年の期間の粉じん爆発による人的被害をSt1とSt3について表2に示す。統計的に全般的に見た

場合、粉じん爆発 1 件あたりの死傷者数は St3 の粉体のほうが St1 のその 1.7 倍、また死者数は 2.8 倍も多かった。ただし、St1 クラスの粉体でも死傷者数が多い事例があることに注意が必要である。1994 年に靴の合成ゴム底の研磨工場で発生した粉じん爆発では、26 人死傷、うち 5 人が死亡した。この爆発では集じんダクトに堆積したゴム粉が自然発火し、ダクト内から火が噴出し、その直後に集じん装置を中心として粉じん爆発が起きたため、多数の作業員が死傷した。

負傷については、熱傷がほとんどで、露出した顔面や上半身に熱風を受けた事例がもっとも多く、作業服に燃え移り、熱傷になった事例が続く。この他、爆風を受けて転倒し、打撲を負ったり、避難中に骨折や打撲、ねんざを負ったりといった災害事例がある。事例は少ないが、装置部品が外れて飛散し、そばにいた作業員に当たって負傷したというものもある。また、消火作業中に被災する事例も多々見られる。

上述は爆発という短時間の現象での負傷であるが、粉体火災となると、St クラスにかかわらず、燃焼によって発生する有害ガスの周囲への拡散に伴う人体への影響があることに留意する必要がある。

表 3 に St3 の粉体での爆発発生装置を示す。ただし、複数の装置が爆発に関係している場合は重複して件数を算出した。表 3 より、集じんに関する装置での爆発が 50% と大きいことがわかる。

粉じん爆発においては、爆風や飛散物が工場の敷地外、遠方まで影響したという事例は少なく、また国内では爆燃から爆ごうに転移したという事例はほとんどない。これは爆発が発生した装置が集じんダクトや集じん機という耐圧性がない装置箇所が生じているため、破壊で開口が生じる圧力が低いことによると考えられる。飛しょう物の初期速度は開口を生じる装置内圧に比例するため^{10,11)}、遠方に影響しないと考えられる。また、粉じんがガス状物質に比べて爆発前に広範囲に拡散すること

がないためとも考えられる。

しかし、過去に大きな被害があったパーティクルボード工場の粉じん爆発¹²⁾では、原料チップを粉砕した後の工程から製品置き場まで広い範囲で集じんダクトと移送装置が設置されていたことで、接続された装置間を通して火炎が伝ばし、爆発が工場内に拡大している。

(2) 粉じん爆発とガス爆発の影響の比較

爆発放散における火炎の(最大)到達距離 D_f は式(1)で示される¹³⁾。

$$D_f = 10V^{1/3} \quad (1)$$

ここで、 V は爆発放散口を設置した装置容積(m^3)とする。ただし、60 m よりも大きい D_f を考慮する必要はないとされる。計算例として、 $V=5 m^3$ の場合は $D_f=17 m$ となる。

ここで、BLEVE における火炎球(ファイヤボール)の大きさ D は式(2)で表される¹⁴⁾。

$$D = 3.77W^{0.325} \quad (2)$$

ここで、 W は可燃物(液化ガスや気化しやすい可燃性液体)の量である。例えば、式(2)に $W=1 kg$ を代入すると、 $D=3.77 m$ となる。このファイヤボールの体積は $28.0 m^3$ であるので、気相中の可燃物の濃度は $1000/28=35.6 g/m^3$ となる。粉じんの場合、1 kg でこの濃度は、粒径にもよるが一般的な粉じん爆発下限濃度の値としては小さすぎる。そこで、粉じんの量は 1 kg のままで、濃度を粉じん爆発下限濃度の一般的な値である $100 g/m^3$ と仮定すると、粉じん火炎のファイヤボールの体積は $9.97 m^3$ 、直径は 2.67 m と得られる。濃度を変えた同様の計算によると、1 kg、 $200 g/m^3$ ではファイヤボールの体積は $4.99 m^3$ 、直径は 2.12 m となる。このことから、可燃物の量を基準とすると、粉じんのファイヤボールは液化ガスのそれよりも小さい傾向となることが推測される。

爆発圧力放散に関する技術指針¹³⁾の放散面積より、ガス爆発と粉じん爆発で等しい放散面積 A_v を仮定した場合の K_g と K_{St} を比較する。仮にメタンの $K_g=55 \times 100 kPa \cdot m/s$ 、 $V=2 m^3$ 、 $P_{stat}=0.1 \times 100 kPa$ 、 $P_{red}=0.3 \times 100 kPa$ とすると、 $A_v=0.526 m^2$ が得られる。これに対して、粉じんについて、 $P_{max}=9.0 \times 100 kPa$ と仮定して、 A_v が上記と同じ値として K_{St} を求めると、 $550 \times 100 kPa \cdot m/s$ が得られる。すなわち、放散面積を基準とすると、 $K_{St}/K_g=550/55=10$ である。プロパンの $K_g=100 \times 100 kPa \cdot m/s$ と仮定すると、同様の計算で $K_{St}/K_g=660/100=6.6$ が得られる。 K_{St}/K_g の比が 1 より大きいということは、等しい放散面積を有するベントカバーが爆発で作動する場合、粉じん爆発の K_{St} の値がガス爆発の K_g のその 10 倍、6.6 倍大きいことを意味する。したがって爆発としては、粉じんよりもガスの方が激しいことが推測できる。

(3) K_{St} 、St クラスと被害の関係

K_{St} あるいは K_{max} に関する理論解析によると、 K_{max} と粉じんの燃焼速度との関係は式(3)で表される¹⁵⁾。

表 2 粉じん爆発の St クラスと人的被害

St クラス	件数	死傷者数/件数	死者数/件数
1	95	2.09	0.311
3	37	3.56	0.875

表 3 St3 の粉体での爆発発生装置等と件数

装置等	件数	割合 (%)
集じん機、集じんダクト	21	50.0
破碎機、粉砕機	7	16.7
乾燥設備、混合器、反応槽	5	11.9
移送装置(コンベアなど)、 輸送車両	2	4.8
研磨機	1	2.4
貯蔵容器など	3	7.1
室内	3	7.1
合計	46	100

$$K_{\max} = (dP/dt)_{\max} V^{1/3} \\ = (36\pi)^{1/3} (P_{\max} - P_i) (P_{\max}/P_i)^{1/\gamma} S_u \quad (3)$$

ここで、 P_{\max} は最大爆発圧力、 P_i は初期圧力、 γ は未燃焼混合気(物)の比熱比、 S_u は粉じんの燃焼速度である。式(3)より、 K_{\max} あるいは K_{St} が燃焼速度や火災の伝ば速度に強く依存していることがわかる。 K_{St} は容器の体積の1/3乗で規格化しているものの、 K_{St} の適用範囲は V が20 L以上で同一の条件で測定された場合に同等の粉じんの危険性を評価できる。しかし、 V によって K_{St} に違いがあることが知られている¹⁶⁾。 V の増大とともに乱流燃焼となり、火災伝ば速度が大きくなりやすい。すなわち、実験室の容器サイズで調べられた K_{St} が、実サイズでは大きくなる場合があることに留意しておく必要がある。

4. まとめ

貯槽等で発生した爆発・火災災害に着目し、災害で生じた現象及び被害状況を文献により調査し、相関の有無を検討した。その結果、暴走反応等の意図しない反応による爆発で死傷者数が最も多かった一方、可燃物が原因となる爆発では被害範囲が装置内・周辺にとどまっても死傷者数が増える事例が見られた。このことから、可燃物による爆発が生じる可能性がある場合は、火災や有毒ガスへの対策をより重視する必要がある、異常反応による爆発が生じる可能性がある場合は、圧力逃し装置の設置等の防護対策や、爆風や飛散物等への対策をより重視する必要があると考えられる。なお、よく使用される物質であるほど爆発・火災の事例も多くなることは容易に推定され、本検討で得られた傾向はその効果を含んでいる。そのため、全く未知の物質について得られた傾向が外挿できる保証はないことに留意する必要がある。しかし、同種災害を防止する観点からは、以上の傾向はトラブル対処の際に念頭に置いておくべきと考えられる。

粉じん爆発については、粉体の危険等級 St クラスが大きいと、事例1件当たりの死傷者数、死亡者数が大きかった一方、危険等級が小さい粉体による爆発でも、死傷者数が多い事例が見られた。また、半数の爆発が集じんに関する装置で発生していた。粉じん爆発による影響は、可燃物が同量の場合、ガス爆発による影響より小さくなると推測されるが、実験室の容器サイズで調べられた爆発の激しさよりも、実規模では激しくなる場合があると考えられる。粉じん爆発に関する影響度の定量的な評価は可燃性ガスや液体のそれらに比べてあまり進んでおらず、今後の検討課題である。

参 考 文 献

1) 八島正明. 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—. 労働安全衛生研究. 2019; 12: 67-71.

2) 八島正明. 三重県の発電所の RDF 貯蔵サイロでの火災と爆発—その 3 : 災害の原因—. 安全工学. 2011; 50: 319-324.

3) 八島正明. 粉を扱う工場で見られる爆発火災—消火活動に関連して—. 火災. 2016; 66: 25-30.

4) 安全工学会監修. 実践・安全工学シリーズ 2「プロセス安全の基礎」, 9. 事故影響解析. 化学工業日報社. 2012; 193-226.

5) 安全工学協会編. 火災爆発事故事例集. コロナ社. 2002.

6) 安全工学会. 事故・災害事例とその対策—再発防止のための処方箋—. 養賢堂. 2005.

7) 田村昌三編. 化学物質・プラント事故事例ハンドブック. 丸善. 2006.

8) 労働安全衛生総合研究所. 爆発火災データベースの公開 (第 6 次).
https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/houkoku/houkoku_2020_05.html [最終アクセス日 2022 年 6 月 24 日]

9) 産業安全技術総覧編集委員会編. 産業安全技術総覧. 丸善. 1999; 364-365.

10) 平野敏右. ガス爆発予防技術. 海文堂. 1983; 132-142.

11) TNO. Methods for the calculation of physical effects (Yellow book), Chap. 7 (Rupture of vessels). The Hague: Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek. 2005.

12) 消防防災博物館. 爆発火災粉じん爆発による出火事例, 火災原因調査シリーズ(36).
<https://www.bousaihaku.com/foffer/7321/> [最終アクセス日 2022 年 6 月 24 日]

13) 産業安全研究所. 爆発圧力放散設備技術指針 (改訂版). NIIS-TR-No.38. 2005.

14) 日本火災学会編. 火災便覧 (第 4 版). 共立出版. 2018; 434-435.

15) (一社) 日本粉体工業技術協会 粉じん爆発委員会編. 粉じん爆発・火災の安全対策. オーム社. 2019; 152.

16) Eckhoff, R.K. Dust Explosions in the Process Industries, 3rd Ed. Elsevier (Amsterdam). 2003; 340-341.