

粉体プラントにおける 粉じん爆発とその対策

那須 貴司*

1. はじめに

プラスチック、食品、化粧品、薬品、染料などの工業製品を製造する多くの工場、研究所では可燃性粉じんによる火災や爆発（燃焼）の可能性が常に存在する。これらの場所での人命にかかわるような事故の防止、またプラント機械・装置の損傷による操業停止、事業機会および利益損失の防止は責任ある企業が真剣に考えなければならない課題の一つであり、適切な安全管理が求められる。爆発防護はその中でも最も重要な課題である。

爆発が発生した場合に想定される被害

- ・人命損失、負傷者の発生
- ・技術と経験の損失
- ・プラント機械・装置の破壊
- ・事故調査に要する時間
- ・ビジネスおよび利益の損失
（事業からの撤退も考えられる）
- ・信用・評判の喪失
- ・周辺プラントの二次災害
- ・周辺家屋・人身への災害

過去の事例から、一次爆発による被害は大きくなくても、二次、三次

* Taka shi NASU ; BS&B セイフティ・システムズ(株)
営業部エクスペディション・プロテクション部長

〒221-0022 横浜市神奈川区守屋町 3-11SG リアルティ横浜

TEL : 045-450-1272

FAX : 045-451-3061

E-mail : nasu@bsb-systems.co.jp

と連鎖的に爆発が拡大し大惨事に至るケースが多い。これは爆発圧力と爆風で周辺の粉じんを爆発連鎖に導くことによるもので、一次爆発を封じ込めたり、瞬時に爆発を大気開放または消火・抑制すれば、この連鎖を断ち切ることができる。殊に、医薬、食品プラントのように屋内に設置されるプラントは、連鎖を断ち切り建屋内全体に拡大しないようにすることが重要である。

2. 法令による安全装置の必要性

爆発のリスクアセスメントと安全措置の法体系はドイツの鉱山業とスイスの製薬業界から発展してきており、欧州と米国におのおの爆発防護の法令がある。

欧州（EU）では 20 年ほど前から ATEX などの規制・法整備が進み、事業主はリスクの分析と、相応した爆発放散、抑制、シャ断等の安全措置の設置義務がある。

米国は 2007 年夏に NFPA（全米防火協会）の指針（Guideline）が基準（Standard）になり、安全措置の設置が義務化された。また、OSHA（米国労働省 労働安全衛生局）は NFPA との迎合性をとるために National Emphasis Program を発表し、新設または既設のプラント機器・装置への遡及規制に大きな影響が出ている。

アジア太平洋では、中国、オーストラリア、ニュージーランドで同様の規制があり、その他の地域でも ATEX、NFPA の考えを取り入れた独自基準制定の動きがあり、海外に建設するプラントを設計する場合、

どの安全規格を適用するか注意が必要である。

日本では、「爆発」は厚生労働省の管轄で、従来、乾燥設備への爆発放散設備の設置が義務づけられているが、2006 年（平成 18 年）の改正で、労働安全衛生法 第 28 条の 2「爆発リスクアセスメントの努力義務」が新設された。さらに、2014 年（平成 26 年）には「特定の化学物質（640 種）のリスクアセスメントが義務」化された。欧米のような爆発防護に関するプログラムは今後の議論を待つことになる。

以下は各国の主要な指針・基準である。

〈欧州（EU）〉

- ・ATEX directive 94/9/EC（防爆指令）
ATEX100a または事業主指令と呼ばれ、定義されたゾーンに対して機器の条件を課している。
- ・ATEX directive 99/92/EC（大気中の爆発物に関する指令）
ATEX137 または USE 指令と呼ばれ、事業主に爆発に関する潜在的な危険を調査させ、その危険性に対処する適当な措置を講ずることを義務としている。
- ・EN 14491（2006）：（爆発放散）
粉じん爆発放散口の設計基準として VDI3673 から発展してきた。

〈米国〉

- ・NFPA68（2013）：爆発放散
- ・NFPA69（2014）：爆発抑制
爆発抑制・爆発シャ断・スパーク検知を含む
- ・NFPA654（2013）：化学薬品、

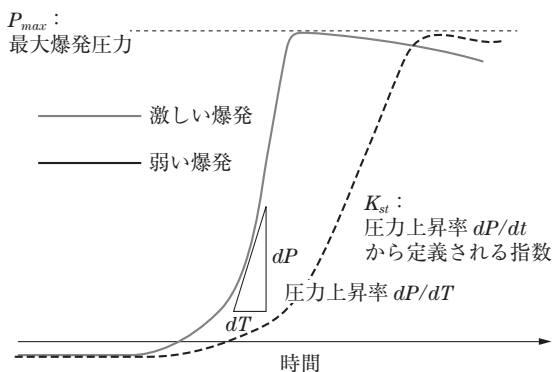


図1 最大爆発圧力 P_{max} と爆発指数 K_{st}

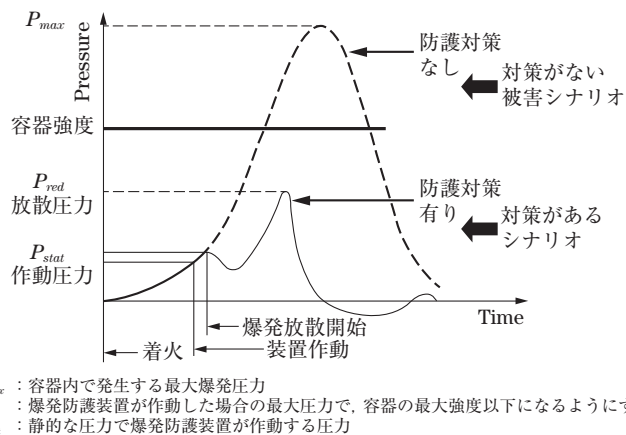


図2 爆発対策による爆発防護過程

染料、プラスチックの各産業における火災・粉じん爆発の防止

- ・ OSHA Directive CPL 03-00-006 (2007): Combustible Dust National Emphasis Program

〔日本〕

- ・ 労働安全衛生法：第28条の2：爆発リスクアセスメント（努力義務）
第57条の2：特定の化学物質（640物質）のリスクアセスメント（義務）
- ・ 労働安全衛生規則：第四章 294条4項
- ・ 爆発、火災を防止するため乾燥設備に爆発放散設備の設置（義務）
- ・ NIOSH-TR-No34 (2005)：爆発圧力放散設備技術指針（改訂版）
NFPA68：2002年版をベースにしている。（産業安全研究所）
- ・ JNIOH-TR-47 (2016)：耐爆発圧力衝撃形乾燥設備技術指針
EN14460：2006, NFPA69：2014年版をベースにしている。（労働安全衛生総合研究所）

3. リスクの定量化

3-1. 可燃性粉じんの爆発特性

爆発防護対策を検討するにはまず対象となる可燃性粉じん・ガスの爆発特性を把握しなければならない。以下は爆発のリスクを定量化する主要なデータであるが、防護対策を検討するのに特に重要なのは最大爆発圧力 P_{max} と、爆発指数 K_{st} （ガス・

蒸気の場合は K_g ）である（図1）。

- ・ 最大爆発圧力 P_{max}
- ・ 爆発指数 K_{st}
- ・ 最小着火温度 MIT
- ・ 最小着火エネルギー MIE

K_{st} と P_{max} は爆発の潜在的な威力を示す。 $K_{st} > 0$ は爆発のリスクが存在することを、 K_{st} が大きいと爆発の進行が速いことを意味する。 P_{max} は破壊力が大きいことを意味する。

このパラメータは多くの予防・防護技術の最適化に使用する。ただし、これらのデータは粉じんの粒径などによって変化するので、試料は対象となるプロセスの標準的な状態のものであることが求められる。

3-2. 爆発防護装置を設置すべき装置

粉じん爆発のリスクは粉体を取

り扱う以下の装置・容器に危険性がある。特に、粉碎、集じん、乾燥プロセスは統計的に可能性が高い。また、装置単体でリスク評価するのではなく、配管・ダクトで接続された隣接装置への爆発伝播の危険性も検討する必要がある。

- ・ 集じん機
- ・ 乾燥機
- ・ ミル、粉碎機
- ・ バケットエレベータ
- ・ サイロ、ビン、ホッパ
- ・ 混合機
- ・ オープン
- ・ フィルター、ふるい
- ・ コンベア
- ・ 送風機

4. 爆発防護対策の作動原理（爆発過程の分解）

万一爆発が発生すると図2に示すような容器の強度を超える最大爆発

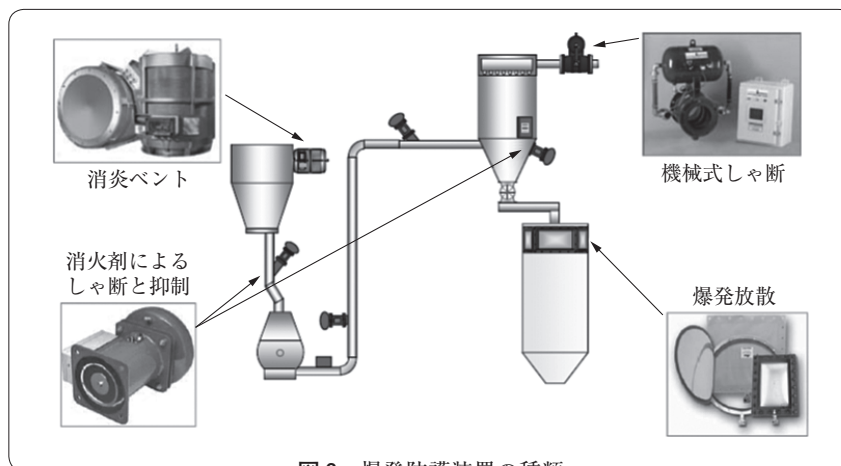


図3 爆発防護装置の種類

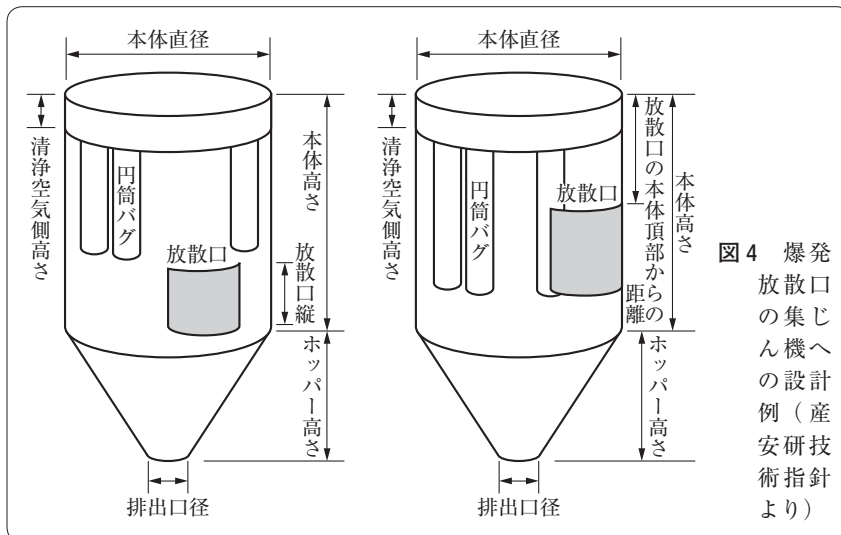


図4 爆発放散口の集じん機への設計例（産安研技術指針より）

圧力（ $P_{\max}$ ）が発生する。その前に何らかの防護装置を爆発の初期段階で作動（ P_{stat} ）させ、圧力の上昇を容器の強度以下に制御・抑制（ P_{red} ）し、容器を破壊から防護する。爆発の被害を防護・低減化する安全措置は以下のような技術を単独または組み合わせることで実現できる。

5. 爆発防護装置の特徴と導入事例

粉じん爆発を防護する安全措置は図3のような技術を単独または組み合わせることで実現できる。

- (1) 爆発放散(Explosion Venting)
爆発圧力を放散し装置の破裂を防止する設計
- (2) 爆発抑制
(Explosion Suppression)
爆発を初期段階で消火・抑制する設計
- (3) 爆発しゃ断
(Explosion Isolation)
爆発放散と組み合わせ、機械的または化学的に爆発の伝播を断ち切る設計
- (4) 耐爆発圧力衝撃構造
(Containment)
装置の耐圧を上げ爆発を内部に封じ込める設計
- (5) 火花検知・消火 (Spark Detection & Extinguishing)
粉じん粒子の発火（赤熱）やくすぶりを検知し、火災や爆

発を予防する設計。

5-1. 爆発放散；Explosion Venting

爆発放散口は、爆発が発生する恐れのある装置、ダクトなどに意図的に弱い部分を設け、爆発が生じたときに圧力や高温の燃焼生成物を安全に大気中に放散させ、装置を破壊から護る爆発防護設計である。爆発放散の場合、粉じん爆発は最後まで進行し、火炎、圧力、および可燃物を大気中に放出することに注意が必用である。

爆発放散した場合の圧力（ P_{red} ）は適用したベントの面積に応じて変化する。 P_{red} と容器の強度の関係は以下の2つのオプションがある。

- a. $P_{\text{red}} \leq$ 許容最大強度：装置は清掃後、再運用が可能
- b. $P_{\text{red}} \leq$ 破壊強度の2/3：装置は損傷を受け変形して、おそらく再運用は不可

5-1-1. 爆発放散口の設計

爆発放散口の設置には米国のNFPA68（2013）、欧州のEN14491（2006）の基準、日本の産業安全研究所の技術指針（2005）など最新年度の基準・指針による正しい設計が必要である。

以下に必要な検討事項と手順について述べる。

(1) 爆発放散口を設ける装置の設置場所

爆発放散口は大気中（屋外）に直接放散することが必要である。建物

や装置類が密集した場所に向けて放散を行うと、意図したように内部圧力を低下させられない場合がある。

装置が屋内に設置され、大気中（屋外）に直接放散できない場合は、放散される火炎によって二次火災・爆発が誘起される。二次爆発は着火エネルギーが大きいため一次爆発より大規模になり易く、絶対に避けなければならない。そのため、安全な場所（屋外）に爆発を放散できる放散用ダクトの設置が必要である。または、後で述べる消炎装置付（フレームレス）爆発放散口の使用が必要である。

(2) 爆発放散先の周辺の防護

爆発放散によって放出される火炎の到達距離は最大60mに及ぶので、取り付け位置および放散方向の選定はこの点を十分考慮することが必要である。同時に、爆風を受けることにより作業員の死傷や、周辺の装置の破損が発生しないよう注意が必要である。

(3) 作動した場合の注意点

爆発放散によって生じる開口部から未燃の可燃物が大気中に放出され二次爆発が生じないように可燃物の供給を停止する必要がある。配管等によって接続された装置に爆発伝播しないよう機械的、化学的な爆発しゃ断をすることが必要である。

(4) 装置の強度と放散圧力

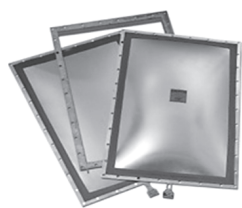
爆発放散口を設ける装置の最低強度（耐圧力）は10kPa以上必要である。この強度は変形圧力か、破壊圧力なのか明確にされなければならない。

爆発放散口は、爆発放散した場合に装置内部に加わる圧力（放散圧力： P_{red} ）が、装置の強度を超えないよう設計する。

5-1-2. 爆発放散口の設計手順

（集じん機への設置例）¹⁾

集じん機の場合、図4に示す位置に爆発放散口を配置する。爆発放散口の面積は以下の設計パラメータを用いて産安研指針またはNFPA68、EN14491の計算式から求める。



バキューム・パルス圧対応
(VSP-ST)



サニタリー対応
(VSP-A)



コンポジット（複合）型
(EXP/DV)



建物（ビルディング）用
(VSB)

写真1 爆発放散口の種類

- (1) K_{st} [Kg]：可燃物の爆発指数
- (2) P_{max} ：装置内で発生する最大爆発圧力
- (3) V ：爆発放散口を設置する装置の容積
- (4) アスペクト比 L/D ：装置の長ささと直径の比
- (5) P_{red} ：爆発放散口が作動した場合の最大圧力。
容器の最大強度以下になるようにする
- (6) P_{stat} ：静的な圧力で爆発放散口が作動する圧力。爆発放散口の作動圧力
- (7) 放散ダクトの長さ L_v ：爆発放散口が直接外気に面していない場合に、圧力を外気に放散させるためのダクトの長さ

以下の場合、面積の補正が必要である。

- (1) アスペクト比 (L/D) が2を超える
- (2) 爆発の初期圧力が 20kPa を超える
- (3) 屋外への爆発放散ダクトを使用する

特定の装置（スプレードライヤ、集じん機）の内容積は、個別の考え方ができる。

5-1-3. 破裂板式爆発放散口の種類（写真1）

爆発放散口には、(1) 破裂板式、(2) 蝶番ドア式、(3) 離脱パネル式がある。ここでは破裂板式について述べる。

以下は代表的な破裂板式爆発放散口である。設置場所に応じた適切な型式を選定する必要がある。

- (1) バキューム、パルス圧対応型 (VSP-ST)：ドーム型単板、耐負圧、耐脈動構造集じん機など
- (2) サニタリー型 (VSP-A)：ドーム型単板、耐負圧、耐脈動構造、FDA 承認ガスケット使用食品、医薬品プロセスなど
- (3) フラット型 (VSE)：フラット型単板構造、大気圧、脈動のないプロセスサイロ、貯蔵ビンなど
- (4) コンポジット（複合）型

(EXP/DV)：円形ドーム型複合構造、バキュームサポート付き耐真空、耐脈動構造脈動、高温のある機械など建物（ビルディング用）(VSB)：建物（低強度の構造物）用アルミフレーム、ポリカーボネートパネル

5-1-4. 蝶番ドア式および離脱パネル式爆発放散口の危険性と注意点

爆発は瞬間的に進行するので動的な特性が非常に重要である。蝶番ドア式および離脱パネル式の爆発放散口の質量は 12.2kg/m² を超えないこととされているので安易に使用すべきではない。

蝶番ドア式のように爆発放散後に再び開口部が閉じる方式では、爆発後に装置内のガスが冷却されることで生じる負圧で装置が損傷しないよう注意が必要である。

5-1-5. 爆発放散口の列置例

以下に爆発放散口の設置例（産安研指針より）を示す（写真2～4）¹⁾。

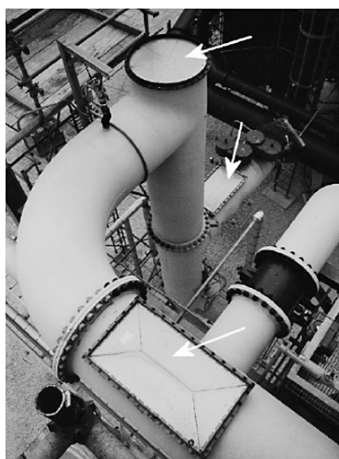


写真2（左）集じん機への設置例

写真3（中）ダクトへの設置例

写真4（右）サイロへの設置例



写真5 フレームレス爆発放散口



写真6 フレームレス爆発放散口のサイクロンへの設置例

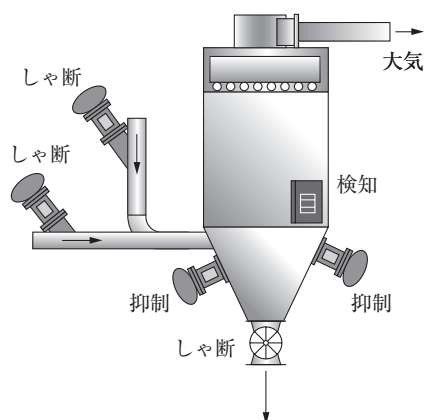


図7 爆発抑制システムの設計例



従来の爆発放散
1,500℃の火炎、圧力波、粉塵が放散



IQRフレームレス爆発放散口による放散
直後の表面温度は100℃以下
水蒸気、煙、最小限の圧力波が放散

図5 消炎のプロセス

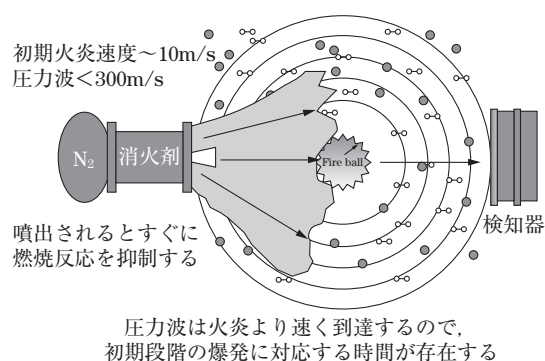


図6 爆発抑制の原理



写真7 ピンチ
バルブ式
しゃ断弁

5-2. フレームレス爆発放散口 (屋外への爆発放散)

前述のとおり爆発放散時の火炎は最大 60m に及ぶ。フレームレス（消炎型）爆発放散口（写真5）は、立地上火炎放出が許されない場合や、屋外に爆発放散する放散用ダクトが長くなる場合、ダクト設置スペースが取れない場合、または屋外にアクセスできない場合等の制約下で爆発放散を可能にする。

フレームレス爆発放散口（消炎ベントともいう）は、破裂板式爆発放散口に消炎素子（ステンレス製の精細なメッシュの三次元フレームアレ

スター）を組み合わせている（図5）。消炎素子は、放散口を通過して粉じん（燃焼・未燃焼を問わず）を飛散させない、爆発の火炎を放出しない、および高温ガスを内部に封じ込め外に出さないように設計されている。三次元メッシュは爆発によって生じる圧力波と粉じんを吸収するだけでなく、爆発連鎖を阻止するヒートシンクの働きをする。また、センサーによるプロセスのシャットダウン機能を有している。

米国保険会社の研究機関である Factory Mutual (FM) が性能試験を行い、粉じん飛散がない、火炎放出がない、 P_{red} （放散時の最大圧力）

を保証しており選定の参考にできる。

写真6 にフレームレス爆発放散口のサイクロンへの設置例を示す。

5-3. 爆発抑制； Explosion Suppression

装置内で発生した爆発の圧力波を初期段階で検知し、粉末状の消火・抑制剤を高速で噴霧して燃焼を抑制し爆発の進行を阻止する技術である。

図6のように、爆発の圧力波は音速（約 300m/s）で進行する。一方、火炎は 10m/s 以下で進行しており、初期段階の爆発を消火剤で消火・抑制する時間が存在する。

爆発抑制システムは、爆発を検知



図8 フロート式しゃ断弁

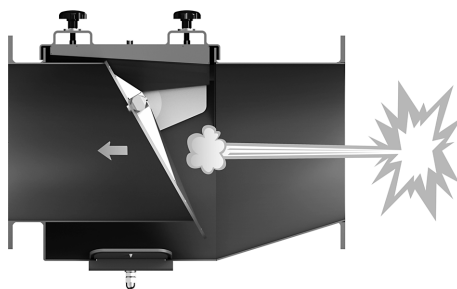
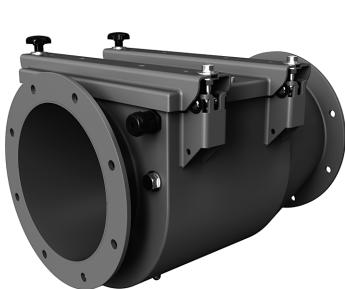


図9 フラップ式しゃ断弁

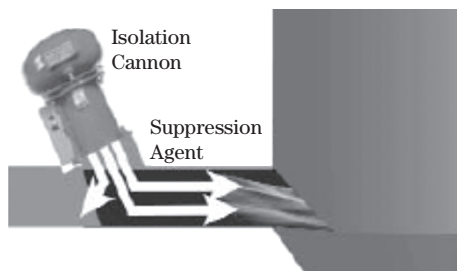


図10 直径900mmの配管に消火剤によるしゃ断バリア

写真8 スライドゲート式しゃ断弁

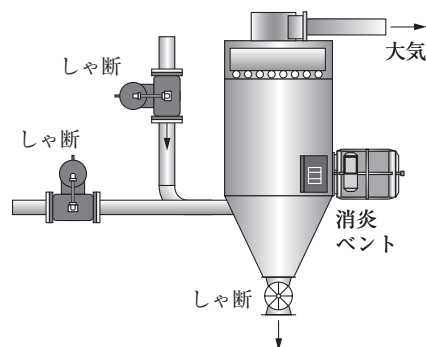


図11 集じん機に消炎ベントと配管に機械式しゃ断弁

するセンサー（通常は圧力）、消火・抑制剤を充填した抑制・しゃ断用キャノン、およびシステムを制御するモニターで構成される。図7に爆発抑制システムの設計例を示す。

集じん機本体は抑制キャノンで爆発を抑制し、配管上にしゃ断キャノンを設置して消火・抑制剤によるバリアを形成し、化学的なしゃ断弁として後述する機械式しゃ断弁と同様に爆発伝播を防止する。

5-4. 爆発しゃ断； Explosion Isolation

爆発しゃ断は、発生した爆発が配管やダクト内を伝播し接続された装置の破壊や人災を防止することにある。配管上に設置して機械的にしゃ断する方式と、消火・抑制剤を使用する化学的なしゃ断などさまざまな方式がある。

5-4-1. ピンチバルブ式しゃ断弁（機械式；写真7）

空気圧作動のインフレーターバリアとして、装置間をつなぐ配管上に設置し、爆発放散口や爆発抑制システムからの信号、または専用の圧力センサーにより起動し爆発伝播を阻止する。

爆発しゃ断ピンチバルブ（IVE）は常時オープンでセンサーからの信号を受けると、ゴム製スリーブが空気圧で瞬時（数ミリ秒）に閉鎖され、装置を連結する配管を通して爆発の伝播を阻止する。

5-4-2. スライドゲート式しゃ断弁（機械式；写真8）

スライドゲート型的高速しゃ断バルブで、接続配管上に設置し爆発伝播を阻止する。爆発放散口や爆発抑制システムからの信号、または専用の圧力センサーで起動する。

高速しゃ断弁は常時オープンでセ

ンサーからの信号を受けると、スライドゲートが瞬時に閉鎖され装置を連結する配管を通して爆発が伝播するのを阻止する。

5-4-3. フロート式しゃ断弁（機械式；図8）

インラインに設置したフロートが、爆発の圧力波や、スプリングまたは外部推進力で作動し管路をしゃ断する。

粉じん濃度が高い場合には不向きだが流動層乾燥機やフィルターの清浄空気側に使用できる。

5-4-4. フラップ式しゃ断弁（機械式；図9）

平常運転時はエアフローでフラップは開いていて、爆発で発生する背圧でバルブが閉まる。粉じん濃度が

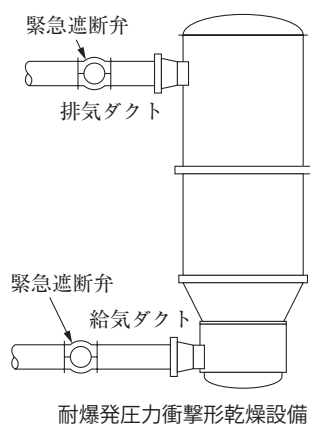


図 12 耐爆構造 +
しゃ断弁（技術指針より）
（SparkEx）

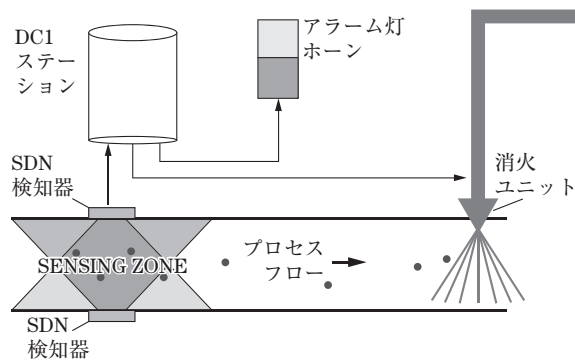


図 13 スパーク検知・消火システム（SparkEx）

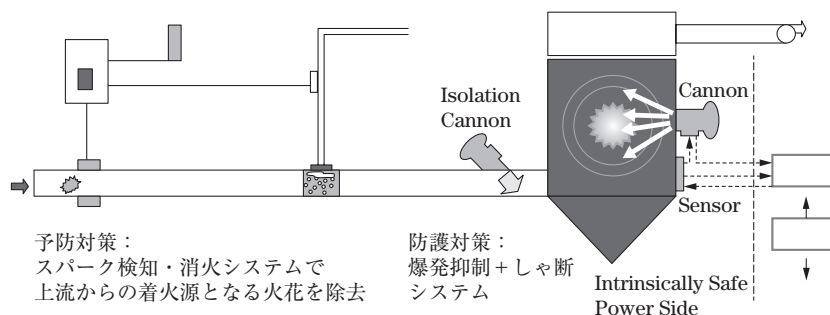


図 14 集じん機への設置例（爆発抑制との組み合わせ）

低い場合に適している。

5-4-5. 消火剤式しゃ断（化学式）

専用の圧力センサーや、爆発放散口のセンサーで起動させ、火災の消火・抑制剤を配管内に向けて噴出し火災の伝播を防止する。図 10 に直径 900mm の配管に消化剤噴出によるしゃ断バリア。

5-4-6. 爆発放散口としゃ断弁の組み合わせ

近年の事故事例で、一次爆発が次々に伝播して連鎖的に爆発しプロセス全体を破壊してしまう大事故に拡大したことがあった。このようなことを防護するにはしゃ断対策が重要である。

集じん機本体は消炎バント（フレームレス爆発放散口）で爆発を放散・消炎し、配管上にしゃ断弁を設置して爆発伝播を防止する。前述の化学式しゃ断との組み合わせも可能である（図 11）。

5-5. 耐爆発圧力衝撃構造； Containment

耐爆構造とは、大気中に放出でき

ない毒性・人体に悪影響を及ぼす高活性の粉じんやガスを取り扱う装置内で万一爆発が発生しても、大気中に放出しないように最大爆発圧力に耐えるよう計画・設計するものである。

機械装置本体の耐圧を上げるだけでなく、装置に接続された配管に機械式爆発しゃ断弁を設置し、火災・爆発圧力の伝播を防止する必要がある（図 12）。2016 年 3 月にこの技術に関する技術指針が発効され。最近注目されている技術である²⁾。

5-6. 火花検知・消火（スパーク検知・消火；図 13）

粉体空気搬送ダクトなどに設置した検知器により、熱または近赤外光を検知することで、粉じん爆発・火災の原因となる火花、燃えさし、高温粒子を検出し、検知器の下流側に設置した消火ユニットでこれらを消火・除去して、爆発や火災の発生を予防する技術である。前項までの爆発防護（被害軽減）対策と併用することで最大限の効果を発揮する。

図 14 に集じん機への設置例を示す。

6. おわりに

近年、世界的には粉じん爆発に対する理解度が深まり、それに対する研究ならびに対策も進んでおり、異なる技術を複合して対処することが日常化している。個々の状態は異なっており、注意深くプロセスを見極め、正常な状態と非正常な状態を理解することが肝要である。非正常な状態において、一般的に最も深刻な爆発事故のリスクが高いのは言うまでもない。

日本の法体系は欧米に比べ進んでいないが、法令にとらわれず欧米の技術を参考に安全への対策を自主的に検討することが重要である。

〈参考文献〉

- 1) 産業安全研究所技術指針 NIIS-TR-No.38 (2005)：爆発圧力放散設備技術基準（改訂版）
- 2) 労働安全衛生総合研究所技術指針 JNIOOSH-TR-47 (2016)：耐爆発圧力衝撃形乾燥設備技術指針