

特集 「火災に強い都市をめざして」

工場・プラント施設における爆発・火災事故の予防対策技術

諏訪 好英 久保 啓治
(本社エンジニアリング本部)

Measures for Preventing Explosion and Fire Accidents at Plant Facilities in Factories

Yoshihide Suwa Keiji Kubo

Abstract

Inflammable or explosive gases and chemicals are used in a lot of factory plant facilities, and sometimes in high-pressure or high-temperature processes. As a result, small accidents in these facilities can lead to significant disasters such as fire accidents or explosion accidents. It is therefore important to remove possible causes of such accidents and to perform preventive measures and damage reduction measures. This paper describes countermeasures that can be implemented in these facilities.

概要

工場・プラント施設では、特殊なガスや薬剤を大量に扱う場合や、高温・高圧のプロセスが使用されることが多く、漏洩事故などが発生すると、爆発・火災事故などの大きな災害に発展する可能性がある。このため、事故の発生要因を極力排除するとともに、万が一何らかの事故が発生した場合に爆発・火災事故に発展しないよう、予防対策、被害削減対策を行うことが重要である。本報では、当社で実施してきた工場・プラント施設の爆発・火災事故対策について述べる。

1. はじめに

ある防災関係者から「危険性とはエネルギーポテンシャルの大きさである」という言葉を聞かされたことがある。位置エネルギーの無いものは落下したり倒壊したりしないし、反応のエネルギーポテンシャルが小さいものは燃えないというわけである。その意味では、特殊なガス、薬液、高温・高圧プロセス等を多量に使用する工場・プラント施設は大きなエネルギーポテンシャルを有しており、潜在的な危険性を持った施設であると言える。また、爆発・火災事故などの大きな事故を引き起こした場合、人命の損失、生産設備等の資産の損失、事業継続性の損失など直接的損害をもたらすのみならず、重大災害の発生は、周辺地域や社会におよぼす影響も大きく、企業イメージの悪化にもつながりかねない。工場・プラント施設の爆発・火災事故対策は、作業安全性の確保および健全な企業活動維持の双方にとって重要な課題である。

工場・プラント施設における安全対策は、施設の設計・施工者、設備メーカ、および事業運営者が相互に連携して取り組むべき問題であるが、当社では、主として施設の施工者としての立場から、工場・プラント施設の安全性を目的とした予防対策、被害削減対策技術の研究開発を実施してきた。本報では、当社で実施してきた工場・プラント施設の爆発・火災事故対策について述べる。

2. 爆発・火災事故の実態

2.1 爆発・火災事故対策の位置付け

工場施設等の労働災害として見た場合、爆発・火災事故による被害件数は決して多くはない。Fig. 1は製造業における死傷者事故の統計を示した一例¹⁾であるが、はさまれ、

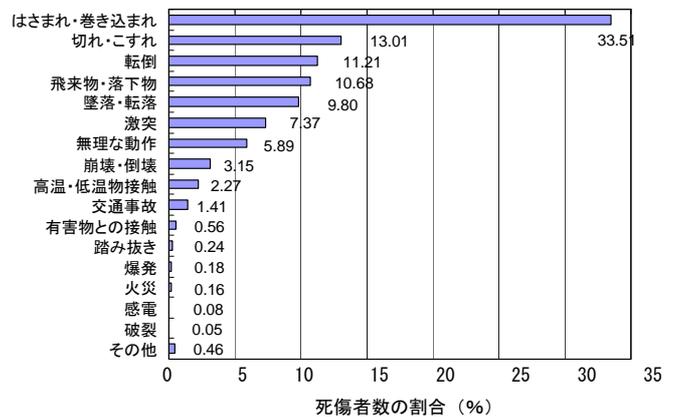


Fig. 1 製造業における死傷者事故の統計例
Statistics of the casualty accident in manufacturing

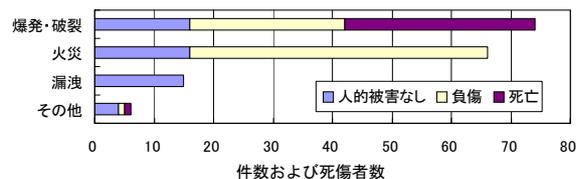


Fig. 2 水素関連施設の事件事例分析結果
Accident case analysis result at the hydrogen facilities

巻き込まれなど物理的要因による事故が大半を占めており、高温、低温、有害物質との接触（やけど、中毒）を含む化学災害の割合は全体の5%以下、爆発・破裂および火災事故についてはわずか0.38%しか発生していない。

しかしFig. 2の水素関連施設の事故事例分析結果²⁾に見るように、爆発・火災事故では、重傷、死亡事故等の重大災害に至る可能性が飛躍的に大きくなる。すなわち、爆発・火災事故の労働災害としての発生頻度は必ずしも大きくはないが、このような事故を一度発生してしまうと取り返しのつかない大きな損失につながる可能性があり、リスクマネジメントとして対策の重要性は大きい。

2.2 爆発・火災事故の種類

工場・プラント施設において発生が考えられる爆発・火災事故には以下のようなものがある。

2.2.1 漏洩ガスによる爆発・火災事故

可燃性、爆発性を有するガスを扱う施設では、これらのガスが供給ラインやユースポイントで漏洩し、何らかの原因でこれに着火した場合に爆発・火災事故を発生する。漏洩の発生原因には、配管部材等の劣化、腐食などによるもののほか、操作ミス、点検ミス、接続部の締結不良などヒューマンエラーに起因するものも多い²⁾。特に対象ガスが高圧で保管、供給されている場合には、破裂によっても重大災害を発生する。可燃性ガスには、それぞれ着火または爆発可能な濃度範囲があるため、漏洩をいち早く検知して緊急遮断や排気を促進し、漏洩ガスの濃度を燃焼・爆発可能範囲に到達させないことが重要である。

2.2.2 揮発性物質による爆発・火災事故

塗料、溶剤、接着剤、洗浄剤などに含まれる揮発性物質も、爆発・火災事故を生じる重要な要因である。工場・プラント施設で使用される主な揮発性物質の例をTable 1に示す。揮発性ガスの蒸散速度は雰囲気温度が高くなると大きくなり、また蒸散量は溶液が空気と触れる面積に比例する。夏場の温度上昇などを考慮して十分な換気量を確認し、雰囲気濃度を燃焼・爆発可能範囲に到達させないことが重要である。

2.2.3 粉塵爆発

一般に物質の表面では活性が高く、反応を生じやすい。石炭やプラスチック、金属等が浮遊粉塵として空気中に存在する場合、相対的な物質表面積が大きくなるため、これに着火すると急激な酸化反応を生じて爆発を生じる。粉塵爆発にも爆発可能な濃度範囲が存在し、予防策としては粉塵を巻き上げにくい工程設計と十分な換気量確保が挙げられる。粉塵は粒径分布を持つこと、重力沈降するため常に濃度に変化することなど、その挙動はガスの場合に比べて複雑であり、一般に現象予測が難しい。

なお粉塵爆発を含めた上記3種類の爆発事故は、着火によって生じるという点で共通している。Table 2に示すように、主な着火原因には電気火花や衝撃火花、裸火によるものなどがある。反応物質と酸素の濃度が化学量論比（ストイキ濃度）に近い場合には最も危険であり、スパナやハ

ンマーを落としただけで衝撃火花により爆発を生じた事例もある¹⁾。

2.2.4 水蒸気爆発

ここに示した他の現象とは異なり、燃焼反応を伴わない爆発現象である。溶融した高温の鉄などが冷却水中に漏れた際に、爆発的な水の蒸発によって生じる。大量の高温蒸気発生を伴う非常に危険な爆発であるが、その発生要因は生産プロセスに依存することが多く、建築的な対応としては後述する「被害削減のための対策」が主となる。

3. 爆発・火災事故の予防対策技術

これまで当社が設計、施工に携わってきた工場・プラント施設には、各種危険物を扱う施設が含まれている。以下に漏洩ガス、揮発性ガスの爆発・火災対策について当社開発技術を中心に紹介する。

3.1 漏洩ガスの検知

3.1.1 漏洩ガスの流路制御計画

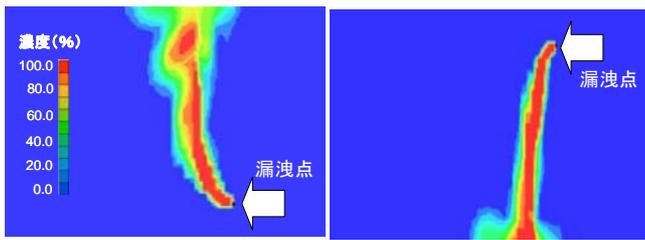
工場内で使用されるガスには、さまざまな比重のものがある。Fig. 3は、配管のピンホールから漏洩した軽いガス（水素ガス：比重0.07）および重いガス（セレン化水素：同2.80）の拡散状況をシミュレーションした結果である。ガスの拡散状況は初期圧力や漏洩の状況によって大きく変化するが、比重差による影響は意外に大きく、現象を支配する要因のひとつとなっている。浮力あるいは沈降力を有する漏洩ガスは等方的には拡散せず、すぐに上昇流や下降流を形成してしまうため、単純に濃度センサを配置してもすぐには漏洩検知できず、逃げ場がない場合には高濃度のよどみ領域を形成してしまうことも予測される。そこで、

Table 1 工場・プラント施設で発生する主なガス
Volatile chemicals used in plant facilities

発生源	発生ガス
塗料、接着剤、シンナー等	各種有機性ガス
石油、石炭、ピッチ、タール等	芳香族ガス
洗浄剤等	塩素化合物
排水、汚水等	メタン、硫化水素
精錬工場など	水素
その他	アルコール類等

Table 2 爆発・火災事故の主な着火原因
Ignition causes of the explosion and the fire accident

現象	着火原因
裸火	溶接、切断のバーナー、たばこ、マッチ
電気火花	電球・電気配線の破損、スイッチの作動
衝撃火花	金属の粉碎、衝突、タガネ・ハンマーの使用
摩擦	ガスの急速挿入、軸受け・モーターの加熱
静電気	装置・床・衣類の帯電、アース不良
その他	作業ミス、直射日光、化学反応



a) 軽いガスの場合(水素ガス) b) 重いガスの場合(セレン化水素)

Fig.3 ピンホール漏洩したガスの拡散状況

Distribution of leaked gas from a pinhole (simulated)



Photo 1 漏洩ガスの流路制御用フード設置事例
(大同工業大学燃料電池研究センター)

An example of flow hood, which leads leaked gas toward the sensor

漏洩ガスの流路を制御し、センサ近傍にこれを導くことで、迅速な漏洩検知を可能とする設計法を開発した³⁾。Photo1に示す水素ガス関連施設の事例では、漏洩が想定される装置の上部に換気システムとは別にフードを設け、浮力上昇する漏洩ガスをセンサに導く方式を採用した。一般的な天井設置センサによる漏洩検知が漏洩開始から数十秒を要するのに対し、本方式では3～5秒以内に漏洩検知が可能となり、緊急遮断等の措置を迅速に行うことができる。一方、比重の大きなガスを対象とする場合には上下方向を逆転し、ピット等を利用して漏洩検知する方式が有効である。

3.1.2 漏洩検知用配管

過去の事件事例調査から、ガスの供給系において最も漏洩事故発生の可能性が高いのは、バルブ、フランジなどの配管締結部であることがわかった²⁾。Photo 2は、フランジからの漏洩検知を行うための二重構造のジョイントカバーである。カバーからの配管をガスセンサに接続することで迅速かつ確実な漏洩検知が可能となるほか、複数箇所のカバーからの配管を集約してセンサに接続すると、ひとつのセンサで複数箇所の漏洩をモニタすることが可能となる。

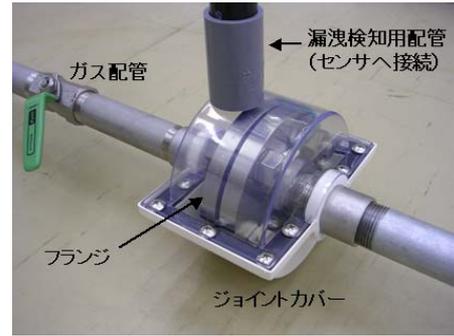


Photo 2 フランジからの漏洩検知を行うための二重構造
An example of joint cover which enables quick and reliable leak detection

3.2 揮発性ガス濃度の予測・評価

揮発性ガスの濃度制御を行うには、溶剤などの液面からのガスの揮発速度を薬液ごとに評価することが必要となる。さまざまな薬液からのガスの揮発速度を評価するため簡易な測定評価法を開発した。Fig.4に示すような水平気流中に液面を設置すると、濃度境界層が形成され、液面からのガスの揮発量と境界層外部への拡散による損失量との釣り合いから、揮発ガスの蒸発量 N_A [kg/s・m²] について次式が成り立つ。

$$N_A = 0.332 \frac{\rho D}{x} (\omega_L - \omega_\infty) Sc^{1/3} Re^{1/2} \quad (1)$$

ρ : 揮発ガスの密度[kg/m³], D : 揮発ガスの拡散係数[m²/s],

x : 境界層端部からの距離[m], Sc : シュミット数[-],

Re : レイノルズ数[-], ω_∞ : 境界層外部の蒸気質量分率[-],

ω_L : 揮発ガスの飽和蒸気質量分率[-]

簡易風洞による水平気流により濃度境界層から外部への拡散損失量を制御し、複数の風速条件で薬液の質量変化を測定することで、単位面積あたりの揮発ガス蒸発量を求めることができる。雰囲気温度による揮発速度の変化は、拡散係数の温度依存性から温度 T [K] の場合について以下のように補正できる。すなわち、

$$D \propto (T/273)^{1.75} \quad (2)$$

本手法をベンゼンに適用した例をFig.5に示す。

3.3 屋内の濃度制御

3.3.1 換気・排気制御

漏洩事故が想定される屋内施設では、漏洩事故を検知した時点で供給系を緊急遮断するとともに緊急用の換気・排気システムを起動して、希釈または排気運転モードに切り替え、漏洩ガスの濃度を爆発限界に到達させないよう濃度制御する必要がある。一方、揮発性ガスの危険性が想定される屋内では、常時ガス濃度のモニタリングを行い、ガス濃度を規定値以上に上昇させないよう換気量制御を行う。対象領域内のガス濃度 C と換気風量 Q との関係は次式で

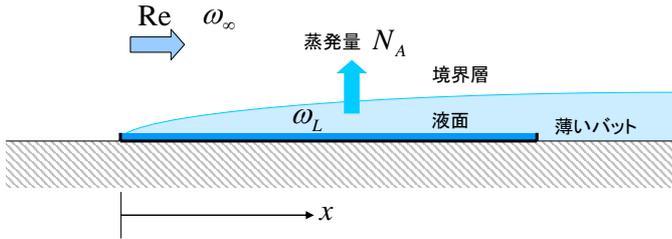


Fig. 4 揮発ガス蒸発速度の簡易測定評価法
Measurement of volatile gas evaporation rate

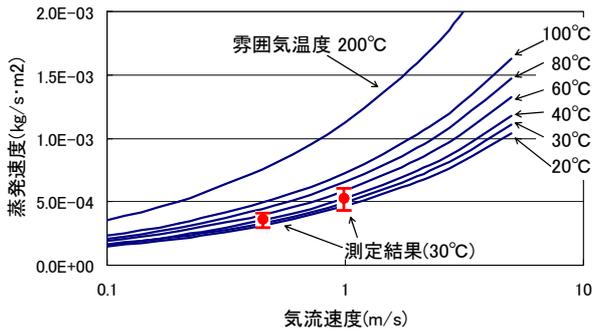


Fig.5 ベンゼンの蒸発特性の試算例
An example of characteristic of benzene's evaporation

表される。

$$V \frac{dC}{dt} = M - Q(1-\gamma)(C - C_o) \quad (3)$$

- V : 対象領域の容積[m³], t : 時間[t],
- γ : 換気風量中のレターン風量の割合[-],
- C_o : 外気中の対象ガス濃度[kg/m³]
- M : 単位時間あたりのガス発生量[kg/s]

揮発性ガスの場合、薬液の表面積 A として $M = A \cdot N_A$ である。

換気・排気システムに使用するファンはすべて防爆仕様とし、可能な限り屋外設置とすることが望ましい。Photo 3 に緊急排気システム用ファンの屋外設置例を示す。

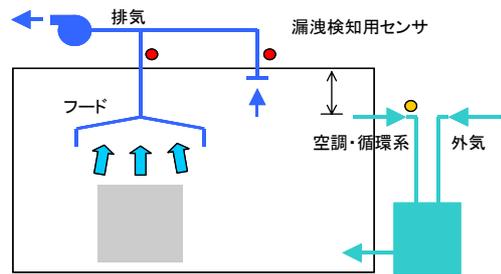
3.3.2 吹出し口、吸込み口の配置計画

爆発性のあるガスが屋内に漏洩した場合、高濃度のよどみ領域が形成されると爆発の危険性が高くなる。また漏洩ガスと空気とが過度に攪拌されると、かえって燃焼しやすい混合状態を形成してしまう可能性もある。先述した漏洩検知システムの工夫などにより、可能な限り早い段階で緊急動作や希釈・排気運転モードに切り替えることと同時に、漏洩ガスと空気との比重差を考慮して漏洩ガスの対流方向と換気方向とを一致させるよう、吹出し、吸込み口配置を適正化することが重要である。

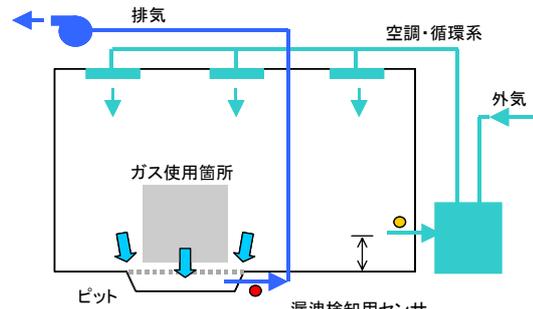
循環型空調システムでは、レターン排気口の設置高さも重要である。浮力上昇または重力沈降する比重差のあるガスに対し、排気口を天井または床からある程度以上離して設置すると、希釈・排気運転モード切り替えまでの数分間



Photo 3 屋外設置した緊急排気システム用ファン
Fans for the urgent exhaust system installed outside



a) 空気より軽いガスの場合



b) 空気より重いガスの場合

Fig.6 緊急用換気・排気システムと吹出し口、吸込み口配置例
Examples of urgent ventilation system and the layouts of supply and exhaust openings

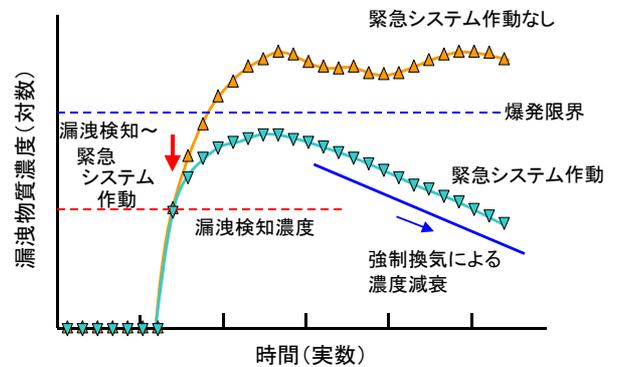


Fig.7 緊急システム作動時の領域内ガス濃度の時間変化
Time-history of gas concentration in the case of urgent system operation

についてレターン側へのガスの混入を抑制できる。

空調・排気システムのき出し口、吸込み口の適正な配置位置は、対象室の床面積、天井高さや、制御対象とすべきガスの種類によってそれぞれ異なる (Fig. 6)。筆者らは、漏洩ガスの浮力効果を考慮した数値シミュレーション技術を立上げ、安全設計を目的とした気流状態適正化の検討を実施している。

緊急用換気・排気システムや吹出し口、吸込み口配置等について最適設計した領域で漏洩事故を生じた場合を想定し、濃度変化をシミュレーションした結果をFig. 7に示す。漏洩事故を迅速に検知し、適正な緊急動作に切り替えることで、漏洩ガスの濃度は爆発限界に至らないことがわかる。

3.4 静電気防止

Table 2に示したように、爆発・火災事故の着火原因のひとつに静電着火がある。静電気の原因はTable 3に示す剥離帯電や摩擦帯電であるが、帯電した絶縁体に人体などの誘電体が近づくと放電を生じて着火する。以下に示すように、静電気の対策は対象物が導体の場合と絶縁物の場合で異なる。

3.4.1 接地対策

金属など対象物が導体の場合には、接地が最も確実な静電気対策である。燃焼性、爆発性のあるガス、粉塵を扱う施設では、制御ボックス、手すり、配管系などの金属部材には接地線、接地端子を設け、すべてグラウンドに接地する。配管系は繋がっているように見えても、フランジなどの継ぎ手部分にパッキンが介在するため、電気的にはフローティングとなっている場合が多い。このような場合、ボンディングワイヤ (Photo 4) などで明示的に接地処理を行い、グラウンドからユースポイントまでのすべての接地抵抗を確認するようにしている。

3.4.2 仕上げ材の静電気対策

絶縁体では単純に接地を行っても電荷の移動は起こらないので、対象物の導電化が必要となる。このため、静電気対策品として導体粉や導電性繊維などを混入させたさまざまな部材が開発されている。工場等の屋内施設では導電化処理を施した床仕上げ材を使用する機会が多いが、抵抗値としては $10^8 \sim 10^{10} \Omega/m$ 程度のものを採用している。安全対策としての材料選定は静電気対策が主な目的であり、作業者が常に接触する床面には、高電圧に接触した場合の電撃防止のためある程度の抵抗値が必要と考えている。

静電気対策については、精密電子産業における静電破壊対策、半導体産業における汚染防止対策に関連してすでに多くの検討が行われており、ESD規格⁴⁾、IEC規格⁵⁾等で材料やその性能評価法などが規定されている。

4. 被害削減のための対策

さまざまな予防対策にもかかわらず、爆発・火災事故に至ってしまった場合についても、被害を最小限にとどめる

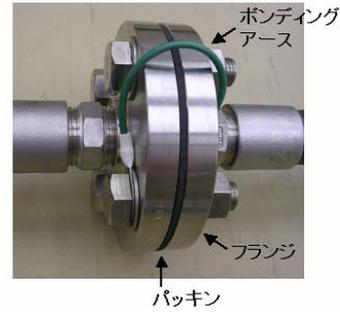


Photo 4 フランジのボンディングワイヤ処理
Bonding wire, which grounds the pipe line

Table 3 主な静電気発生原因
Causes of static charge

剥離帯電	物体が離れる際に電荷が偏り発生する
摩擦帯電	絶縁物などの摩擦により生じる
導体の誘導	帯電物の接近等で導体が誘電して帯電する
その他	化学反応などによる帯電

ための対策を行っておくことが重要である。爆発・火災事故に対する被害削減対策では、事故を発生した当事者はもとより、施設の周辺に被害を拡大させないことが主な課題となる。

4.1 離隔距離と障壁

爆発事故による周辺への影響を低減するため、高圧ガス保安法等では離隔距離と障壁構造に関する規定がある⁶⁾。爆発に伴い発生する爆風圧は一般に距離の二乗に反比例して減衰するため、離隔距離の設定は重要である。

また障壁の設置により、周辺に到達する爆風圧をさらに低減できる。障壁高さや設置方法と爆風圧低減効果についての検討結果は別稿⁷⁾で細述しているのでここでは省略する。ただし既報⁸⁾に述べた爆発実験等の結果から、爆風圧による構造物の損傷には高次の変形モードが関係する場合もあることが指摘されており、障壁の設計には、障壁そのものの倒壊や崩落による被害を生じないように十分考慮する必要がある。

4.2 放爆構造

閉鎖空間内での爆発では、静圧の急激な増加により開放空間の場合よりも大きな被害が生じる。適正に設計された放爆構造を採用すると、多少なりとも爆風圧を緩和させることができる⁹⁾。爆発に伴い各物質の燃焼熱相当の熱量が瞬時に領域内に開放されるものとする、最大圧力は以下のように表される。

$$P(t) = kP_0 S_u^3 t^3 / V \quad (4)$$

$$k = (3/4)\pi(n_2/n_1)^2(T_2/T_1)^2(n_2T_2/n_1T_1 - 1)\beta$$

$$P_{MAX} = (n_2/n_1)(T_2/T_1) \cdot P_0 \quad (5)$$

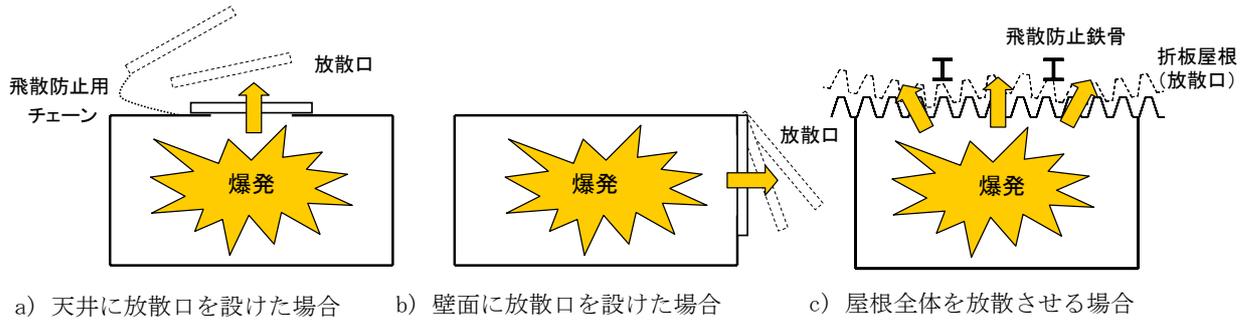


Fig.8 さまざまな爆発放散口の例
Examples of explosion venting

$P(t)$: 時刻 t における圧力 [Pa], P_0 : 初期圧力 [Pa],
 P_{MAX} : 最大圧力 [Pa], S_u : 燃焼速度 [m/s],
 β : 比熱比 [-], n_1 : 燃焼前のガスのモル数 [mol],
 T_1 : 初期温度 [K], n_2 : 燃焼後のガスのモル数 [mol],
 T_2 : 到達温度 [K]

ここで、ストイキ濃度相当の各物質の燃焼熱が、作業場領域内に瞬時に開放されるものと仮定すると、到達最高温度 T_{MAX} は以下のようなものである。

$$T_{MAX} = C_S \cdot I / (\rho \cdot c_p) \quad (6)$$

C_S : ストイキ濃度, I : 燃焼熱, ρ : ガスの密度,
 c_p : 定圧比熱

到達最高温度 T_{MAX} を T_2 として (5) 式に適用すると、爆発事故を発生した場合の最大圧力を見積ることができ、以下の圧力関係式から爆風放散口を設計できる。すなわち、

$$P_{RED} \leq (2/3)P_{FAIL} \quad (7)$$

P_{FAIL} : 破壊圧力 [Pa], P_{RED} : 放散圧力 [Pa]

爆風放散口としては、天井や壁面の一部を放散させる構造が一般的であるが、必要放散面積が大きい場合には屋根全面で放散させる構造も考えられる (Fig.8)。屋根全面で放散させる場合には、経験的に破壊圧力と放散圧力との間に3倍程度の違いが必要と考えられる。すなわち、

$$P_{RED} \leq (1/3)P_{FAIL} \quad (7')$$

また、放散板が飛散して周辺に被害を与えないようチェーン等で繋ぐか締結部を工夫するようにし、万が一飛散した場合を考え、できるだけ軽量な材料とする。屋根で放散させる場合には、屋根の外側に飛散防止用鉄骨フレーム等を設置する。

4.3 避難経路の確保

避難経路についても十分な検討が必要である。火災への対応と同様に二方向避難が基本であるが、爆発事故の場合には避難経路付近が損壊してしまう可能性も考えられるので、十分な間口を設け、避難経路確保の妨げにならない

よう配慮しなければならない。また、危険領域からの迅速な脱出を考慮し、避難経路となるすべての扉を外開きにするなどの配慮も重要である。

5. まとめ

工場・プラント施設の爆発・火災事故対策について、これまで実施してきた技術的取り組みについて示した。工場・プラント施設の安全対策は、対象とする事業所の内容、目的によって大きく異なるため、その都度新たな技術開発が求められることも多く、各現場と設計、エンジニアリング、研究所など各部所が綿密に連携して対応していく必要がある。技術の蓄積、共有化を推進し、より安全な工場、より安全なプラント施設を目指した技術開発を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 奥田: 事故から学ぶ化学災害の防止対策, 日刊工業新聞社, 2000.
- 2) 三小田, 他: 水素ガスの爆発事故対策に関する研究—第4報: 水素ガス事故事例の分析と要因の体系化, 大林組技術研究所報, No.69, 2005.
- 3) 諏訪, 他: 迅速な水素漏洩検知を目的とした流路制御システム, 安全工学協会 / 第37回安全工学研究発表会, pp.119-122, 2004 11.
- 4) ESD STM7, 1-2001: Standard for protection of electrostatic discharge susceptible items - Floor materials - Resistive characterization of materials, 2001.
- 5) IEC 61340-4-1: International standard - Standard test methods for specific applications - Electrostatic behavior of floor coverings and installed floor, 1995.
- 6) 経済産業省資源エネルギー庁: 一般高圧ガス保安規則の機能性基準の運用について—例示基準22障壁, 平13.
- 7) 小野, 他: 水素爆風圧の伝播特性に関する数値シミュレーション, 大林組技術研究所報, No.70, 2006.
- 8) 米澤, 他: 水素爆風圧を受けるRC壁の応答性状に関する実験的研究, 大林組技術研究所報, No.69, 2005.
- 9) NIIS-TR-No.34: 爆発圧力放散設備技術指針, 産業安全研究所, 1998.