

平成26年度経済産業省委託

高圧ガス保安対策事業
(事故調査解析)
高圧ガス事故の類型化調査報告書

平成27年3月

高圧ガス保安協会

1. 事業の目的

国から提供された事故の中から、過去数年間にわたり、同様な設備、部位、操作、ガス種等で繰り返し発生している事故や設備が異なるが同じ原因と考えられる事故を抽出・類型化し、その中から高圧ガス関係者に対し注意喚起をすべき事故3件を選択し、各事故ごとに調査・検討を行い報告書を作成する。

2. 実施した事業の内容

2.1 類型化対象

過去に発生した高圧ガス事故の中から、過去数年間にわたり、同様な設備、部位、操作、ガス種等で繰り返し発生している事故や設備が異なるが同じ原因と考えられる事故を抽出・類型化し、その中から高圧ガス関係者に対し注意喚起をすべき事故3件を選択し、事故ごとに調査・検討を行い報告書を作成した。

選択した3件は以下の通りである。

①酸素などの断熱圧縮と摩擦熱による高圧ガス事故の注意事項について

②軸封装置の事故の注意事項について

③水素スタンドにおける高圧ガス事故の注意事項について

報告書については、別添参照。

2.2 情報発信

調査結果については、ウェブサイトに掲載し、高圧ガス事業に従事する関係者宛てに、電子メールによる情報発信（メール配信者：約1,300件）を行い、注意喚起を実施した。

酸素などの断熱圧縮と摩擦熱による 高圧ガス事故の注意事項について

高圧ガス保安協会

1. 目的

高圧ガス事故（喪失、盗難を除く災害）の統計と解析の結果、高圧ガス事故の90%が漏えい事象であり、8%が漏えいの先行なしの爆発、火災、破裂・破損事象（以下「爆発、火災事象など」という）である¹⁾。なかでも、酸素、支燃性ガスの場合に、主にバルブを急に開く操作（以下「急開き操作」という）に起因する断熱圧縮と摩擦熱により圧力調整器、バルブなどの爆発、火災事象などが発生している。酸素、支燃性ガスは、具体的に溶接・溶断用酸素、工業用酸素、医療用酸素、高圧空気、三フッ化窒素など（以下「酸素など」という）である。なかでも、医療用酸素の事故は、家庭、病院などの身近な場所で発生している。

高圧ガス保安協会（KHK）発行の保安管理技術テキストでは、断熱圧縮による事故防止のため、バルブは徐々に操作することなどが示されている。一方、酸素などでは、断熱圧縮以外に摩擦熱による爆発、火災事象などが発生している。しかし、摩擦熱による事故防止について具体的な注意事項などは示されていない。このため、KHKの事故調査解析委員会において、過去に発生した酸素などの断熱圧縮と摩擦熱による高圧ガス事故の内容を改めて精査し、事故の未然防止に向けた注意事項について検討することとした。

この資料は、酸素などの断熱圧縮と摩擦熱による事故について、高圧ガス事故データベースを用いて抽出し、事故を解析して、事故防止のための注意事項を示すことを目的とする。

2. 事故の抽出

(1) 事故の抽出方法

高圧ガス事故データベースを用いて、昭和40年から平成25年までの高圧ガス事故のうち、「断熱」、「圧縮熱」、「摩擦」をキーワードとして検索し、高圧ガス容器、圧力調整器、バルブ、配管、安全弁などで発生した酸素などの爆発、火災事象などを対象とした。この結果、断熱圧縮と摩擦熱をキーワードとする事故は、37件を抽出した。

さらに、断熱圧縮と摩擦熱による事故として「温度上昇」をキーワードとして検索し、爆発、火災事象などの38件を抽出した。

なお、摩擦熱による事故としては、流体の流動摩擦に伴い発生する熱による事故と、固体同士の動摩擦によって発生する熱による事故がある。ただし、この資料では、ポンプ、圧縮機などの動機器は対象外で、後者の摩擦熱による事故は除いた。

断熱圧縮、摩擦熱および温度上昇の事故件数の推移を図1に示す。

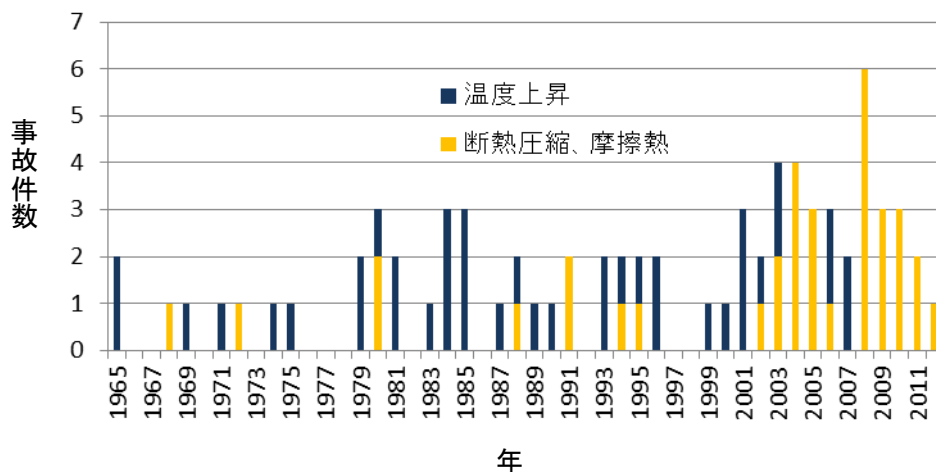


図1 断熱圧縮、摩擦熱および温度上昇の事故件数の推移

断熱圧縮と摩擦熱をキーワードとする事故（37件）と、温度上昇をキーワードとする事故（38件）に分類して、以下に示す。

(2) 断熱圧縮と摩擦熱をキーワードとして抽出した事故

- ① 事象ごとの事故件数を、表1に示す。37件の事故のうち、8件が爆発事象、22件が火災事象、7件が破裂・破損事象である。ただし、漏えい事象はなかった。
- ② 物質ごとの事故件数を、表2に示す。31件が酸素、2件がそれぞれ空気と三フッ化窒素、残り2件が水素またはフルオロカーボンに酸素が混入した事故である。
- ③ 設備区分ごとの事故件数を、表3に示す。圧力調整器、バルブ、ホース、配管、ストレーナーなどで事故が発生している。
- ④ 圧力調整器とバルブの事故の合計は18件であり、事故全体（37件）に占める比率は49%である。また、ホースの事故も、6件と多い。
- ⑤ 上記の事故は、断熱圧縮と摩擦熱により酸素などの温度が上昇し、可燃物が発火温度以上となり、爆発、火災事象などが発生したと考えられる。

表1 事象ごとの事故件数
(断熱圧縮と摩擦熱)

事象	事故件数
爆発	8
火災	22
破裂・破損など	7
合計	37

表2 物質ごとの事故件数
(断熱圧縮と摩擦熱)

物質	事故件数
酸素	31
空気	2
三フッ化窒素	2
酸素、水素	1
酸素、フルオロカーボン	1
合計	37

表 3 設備区分ごとの事故件数
(断熱圧縮と摩擦熱)

設備区分	事故件数
バルブ	10
圧力調整器	8
ホース	6
配管	4
ストレーナー	2
容器	1
アキュムレーター	1
空調設備	1
圧力計	1
ストレーナー、加温器	1
集合装置連結管	1
安全弁、放出管	1
合計	37

表 4 事象ごとの事故件数
(温度上昇)

事象	事故件数
爆発	2
火災	28
破裂・破損など	8
合計	38

表 5 物質ごとの事故件数
(温度上昇)

物質	事故件数
酸素	38
合計	38

表 6 設備区分ごとの事故件数
(温度上昇)

設備区分	事故件数
圧力調整器	19
バルブ	12
圧力計	2
流量設定器	1
容器、充てん枝管	1
充てん枝管	1
LPガス配管	1
安全弁	1
合計	38

(3) 温度上昇をキーワードとして抽出した事故

- ① 事象ごとの事故件数を、表 4 に示す。38 件の事故のうち、2 件が爆発事象、28 件が火災事象、8 件が破裂・破損事象である。ただし、漏えい事象はなかった。
- ② 物質ごとの事故件数を、表 5 に示す。すべて酸素である。
- ③ 設備区分ごとの事故件数を、表 6 に示す。圧力調整器、バルブ、圧力

計、配管などで事故が発生している。20 件が圧力調整器（流量設定器を含む）の事故で、事故全体（38 件）に占める比率は 53%である。

- ④ 圧力調整器（流量設定器を含む）とバルブの事故の合計は 32 件で、事故全体（38 件）に占める比率は 84%である。
- ⑤ 上記の事故は、断熱圧縮と摩擦熱により酸素の温度が上昇し、可燃物が発火温度以上となり、爆発、火災事象などが発生したと考えられる。

3. 事故の解析

断熱圧縮、摩擦熱および温度上昇をキーワードとして抽出した事故は、いずれも断熱圧縮と摩擦熱（主に流動摩擦に伴う熱）により酸素などの温度が上昇し、可燃物が発火温度以上となり、爆発、火災事象などが発生したと考えられる。ただし、温度上昇は断熱圧縮と摩擦熱の結果であるが、断熱圧縮と摩擦熱の寄与は明確に区別することはできなかった。一般的に、可燃物は、空气中に比較して高濃度の酸素中では、発火温度が低下する。

事故の解析結果を、以下に示す。

(1) 物質

75 件の事故のうち、71 件が酸素である。ただし、高圧空気と三フッ化窒素という特殊な物質が、それぞれ 2 件ある。

(2) 設備区分

75 件の事故のうち、圧力調整器が 26 件、バルブが 22 件、ホースが 6 件、配管が 7 件で、これらの合計 61 件が全 75 件の 81%を占める。

(3) バルブ操作

- ① 75 件の事故のうち、74 件がバルブ操作、圧力調整器のハンドル操作で事故が発生している。バルブ操作は、圧力計、安全弁の元バルブの操作を含む。残り 1 件の取扱い状況は不明である。
- ② 主にバルブの急開き操作の直後に事故が発生している。ただし、バルブの急開き操作から時間を置いて発生している事故もある。
- ③ バルブを開操作した後、漏えいを確認したので、バルブを閉止した際に、事故が発生している。また、締結部の増し締め操作を行った際に、事故が発生している。

(4) 可燃物

- ① 油分、ごみ、金属粉などの可燃物の混入、付着が事故の要因となっている。75 件の事故のうち、60 件の事故で可燃物が特定されている。
- ② 圧力調整器の場合は、内部のフィルター、ストレーナーの油分、ごみ、金属粉、シールテープが可燃物となっている。

(5) 誤使用

- ① 水素、フルオロカーボン、窒素の設備に誤って酸素を使用して、4 件の事故が発生している。

- ② 窒素容器群に酸素容器が混在し、気密試験で誤って酸素容器を使用して、1 件の事故が発生している。
 - ③ 酸素用ではない圧力調整器、ホース、圧力計などを酸素容器に使用して、3 件の事故が発生している。また、締結部のシール材に生ゴム、ゴムテープ、ポリエチレン、キャップ材など、酸素用として不適切なパッキンの代用品を使用して、8 件の事故が発生している。
- (6) 断熱圧縮と摩擦熱

高圧ガス事故データベースに記載されている事故原因は、詳細な事故調査報告書の添付がなく、実験などで事故原因を特定している訳ではない。したがって、断熱圧縮か摩擦熱かという真の事故原因は、不明な場合が多い。

4. 事故のメカニズムの検討と課題

(1) 断熱圧縮

① 定義

外部から熱の供給がない状態（断熱状態）でガスを圧縮すると（断熱圧縮）、ガスの温度は上昇する。ガスを急激に圧縮すると、ガスの温度は急上昇する。この現象を、断熱圧縮という。

② 事故のメカニズム

断熱圧縮は、主にバルブの急開き操作に起因して、圧力調整器、バルブ、配管などの閉空間に酸素などの高圧ガスが急激に（瞬時に）流入し、ガスの圧力と同時にガスの温度が急上昇する。このとき、内部に油分、ごみ、金属粉、シール材などの可燃物があれば、容易に発火し、爆発、火災事象などが発生する。

(2) 摩擦熱

① 定義

摩擦によって発生する熱を、摩擦熱という。摩擦熱には、1) 流体の流動摩擦（flow-friction）に伴い発生する熱と、2) 固体同士の動摩擦による熱がある。

1) は、バルブ、調整器などの静機器で、高圧ガスの流動摩擦に伴い発生する熱である。2) は、ポンプ、圧縮機などの動機器で、回転、往復動に伴う動摩擦によって発生する熱である（この資料では、動機器の事故は対象外）。

② 事故のメカニズム

バルブの弁座と弁シート（シートパッキン）の間、調整器のフィルターなどの狭い空隙を酸素などの高圧ガスが流動すると、流動摩擦に伴い発生する熱によってガスの温度と空隙を形成する材料の温度が急上昇する。このとき、内部に可燃物があれば、容易に発火し、爆発、火

災害事象などが発生する。ただし、流動に伴う熱の発生、発火に至るメカニズムは、解明されている訳ではない。

(3) 可燃物

一般的に、可燃物は高濃度の酸素中で発火温度が低下するから、ガスの温度の急上昇により容易に発火する。可燃物は、油分、ごみ、金属粉、シール材などである。油分は酸化し、経年的に可燃性が高くなる。バルブの開閉部はねじ構造であり、開閉操作に伴うねじの摩耗により、金属粉（摩耗粉）が必ず生成する。酸素中では、潤滑油が使用できないので、金属粉の生成が助長される。金属粉の表面は新生面で酸化性が強く、表面積／体積の比が大きいので可燃性が高い。

(4) 事故のメカニズム

- ① 75 件の事故は、事故原因として断熱圧縮と摩擦熱を明確に区別することはできず、断熱圧縮と摩擦熱の複合効果と考えられる。いずれにしても、可燃物が爆発、火災事象などの必要条件となる。
- ② 断熱圧縮、摩擦熱に加えて、金属粉に注目する必要がある。ガス中に金属粉を含む場合、金属粉の流動と接触に伴い発生する熱によって金属粉が発火する。特に、酸素中の場合は、金属粉の蓄熱、赤熱という事象がある。
- ③ 高圧ガス容器、圧力調整器、バルブ、ホース、配管などを構成する金属材料（銅合金、ステンレス鋼など）は、火災によって溶融する。内部で爆発、火災事象などが発生した場合、金属材料の溶融によって外部への噴出口が拡大し、人的被害を伴う大規模火災事象となることがある。
- ④ 液滴、金属粉、ごみなどを含むガスは、流動摩擦に伴い発生する静電気の放電が可燃物の発火の原因とされることがある。このため、断熱圧縮と摩擦熱に静電気を加えた複合効果を考える必要があり、今後の課題である。

(5) 従来の研究結果

酸素の断熱圧縮の実験結果は、ガス事業者により公開されている。一方、酸素の摩擦熱は再現実験が難しく、実施されていない。ただし、数値解析により、断熱圧縮による熱で高温となったガスが、シートパッキングなどの狭い空隙を通過する際に、流動摩擦による熱が付加されてさらに温度が高くなり、シートパッキングなどの発火温度までに達するという結果が、事業者により公開されている。

5. 事故防止の注意事項

(1) バルブ操作

- ① 高圧ガス保安法では、バルブは静かに開閉することが定められている。

(一般高圧ガス保安規則第6条第2項第1号へ、第18条第1号ト、第60条第1項第1号、第62条第7号、他省略)

- ② KHK高圧ガス保安管理技術テキストでは、バルブは徐々に操作することが明記されている(バルブ操作)。また、バルブ取扱指針では、バルブの開閉はゆっくりと行い、振動、異常音、漏れなどのないことを確認しながら行うと記載されている(手動バルブの操作)。
- ③ ソフト対策として、酸素などを取扱う者は、断熱圧縮と摩擦熱による爆発、火災事象などの危険性を念頭に置いて、充てん容器などのバルブは徐々に(静かに、ゆっくり、段階的に)操作することを徹底する。
- ④ ハード対策として、酸素の充てん設備などの比較的大口径のバルブは、与圧ラインを設けて、圧力差を少なくしてから、主バルブを操作している。

(2) 維持管理

- ① バルブの取扱いとともに、容器、バルブ、調整器などの維持管理が重要である。可燃物(油分、ごみ、金属粉、シール材など)が事故の必要条件であることから、油分、ごみなどの混入防止と点検、清掃を心がける。酸素中での油分の使用は、厳禁である。さらに、酸素などに適合するパッキンの使用を厳守するとともに、古いパッキン、損傷パッキンの交換を図る。
- ② バルブの開閉部の摩耗防止を図り、金属粉(摩耗粉)の生成を軽減する。

(3) 締結管理

バルブと調整器の締結部からガスが漏えいして、その対応中に事故が発生している。漏えいしている状況では、直ちにバルブを閉止して、漏えいを止めることが最優先である。漏えい部位は、ガス通過による流動摩擦で温度が高くなっている可能性があり、締結部の増し締め、締め直しなどの対応は、ガスを止めてから実施する。この場合、落ちて、バルブの開閉方向を間違えることなく、確実に閉止する。

(4) その他

- ① 水素、フルオロカーボン、窒素の設備に誤って酸素を使用して、事故が発生している。酸素と可燃性ガス、酸素と油分が混合することがないように、ガス種を十分確認するとともに、気密試験は不活性ガスで行い、酸素は使用しない。
- ② 高圧空気は酸素分圧が高く、断熱圧縮と摩擦熱の事故が発生している。高圧空気は酸素などと同様と見なす必要がある。



写真 圧力調整器の事故例（事業所提供）

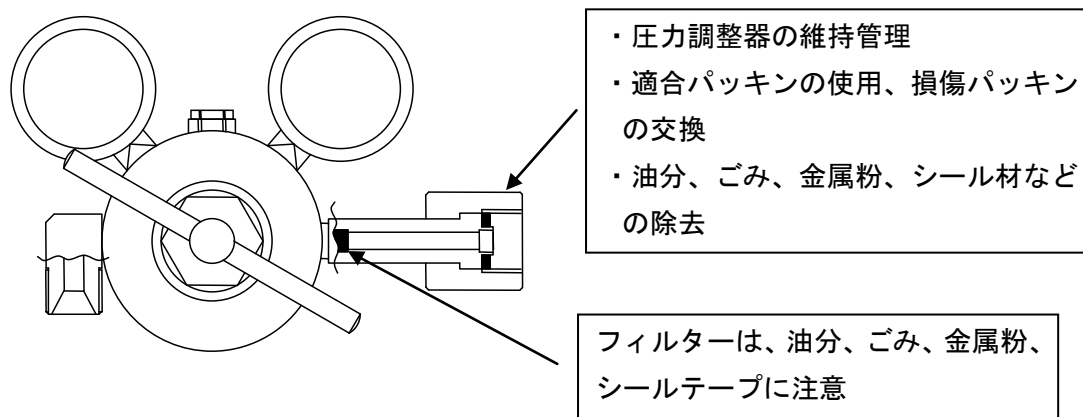


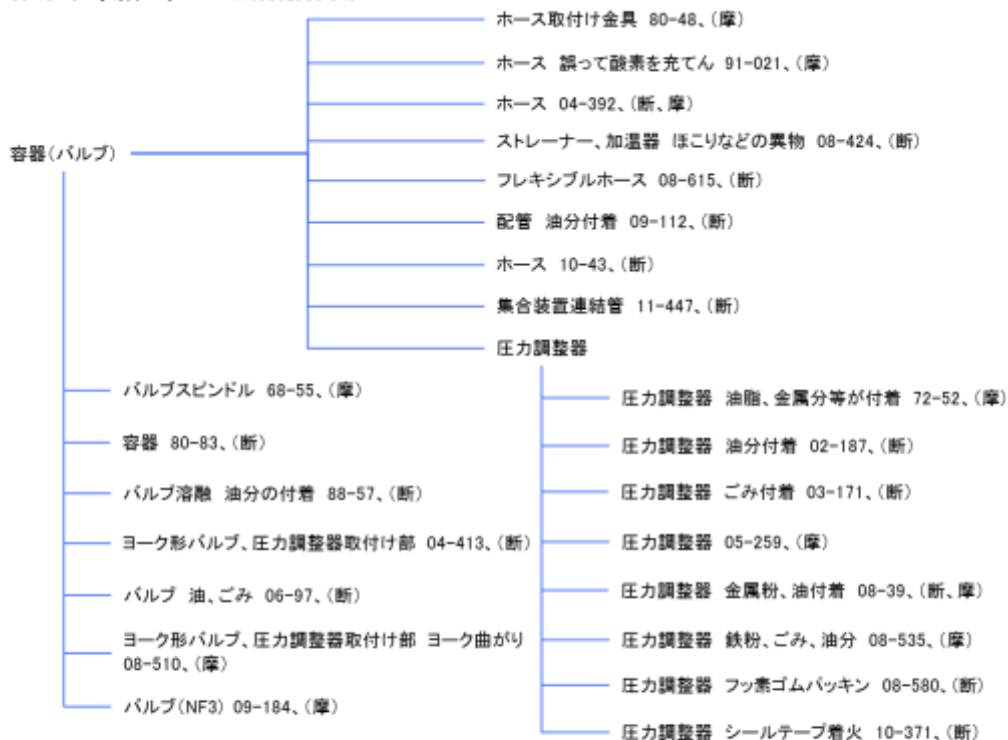
図 圧力調整器の維持管理（図は KHK 作成）

文献 1) 小林英男編著、“高圧ガス事故の統計と解析”、高圧ガス保安協会（2014年2月）

注

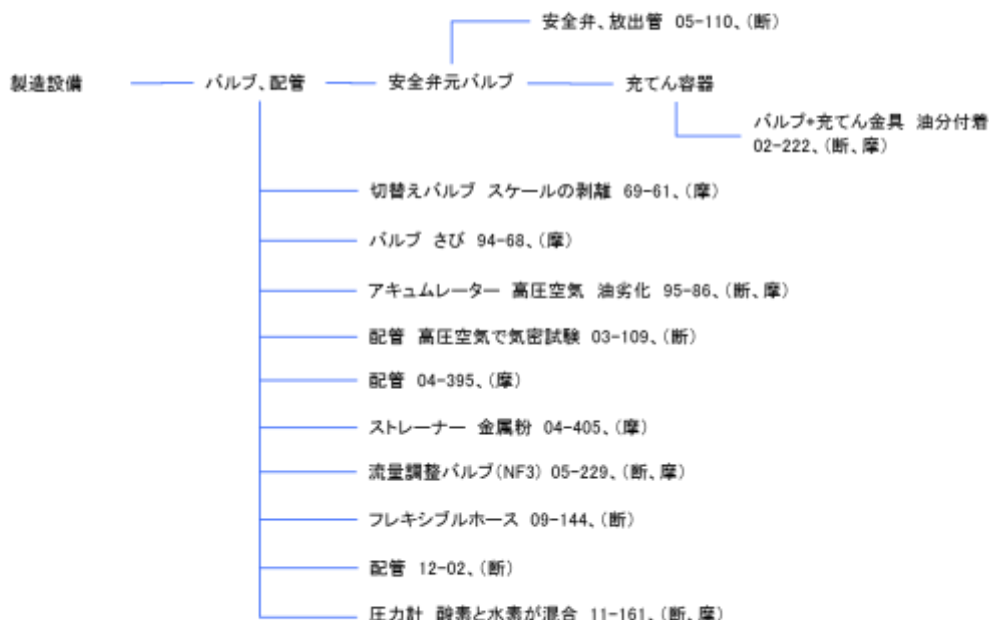
(断):断熱圧縮、(摩):摩擦熱

80-48 → 事故データベースcode1980-048



空調設備

酸素で濡れ確認 潤滑油存在 91-08、(断)



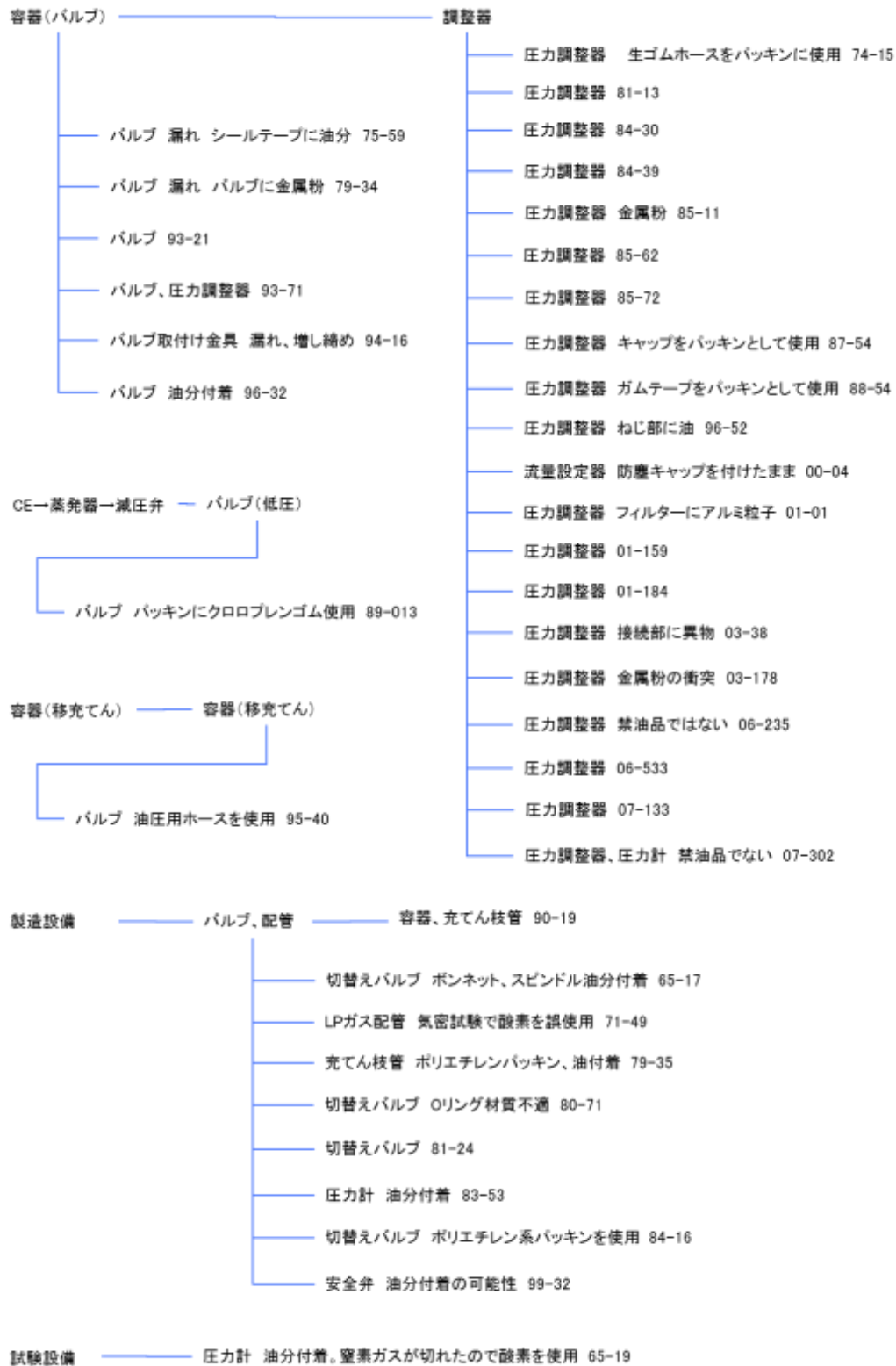
消費設備

流量調整弁、配管 ストレーナー 鉄粉等 10-39、(摩)

添付図1 事故発生状況(キーワード:断熱圧縮、摩擦熱 合計37件)

注

75-59 → 事故データベースcode1975-059



添付図2 事故発生状況(キーワード:温度上昇 合計38件)

軸封装置の事故の注意事項について

高圧ガス保安協会

1. 目的

高圧ガス設備において、動機器は高圧ガスを加圧、移送する重要な機器である。動機器の漏えい防止装置として軸封装置がある。軸封装置の事故は、平成19年から平成25年の7年間で83件が継続的に発生している。このため、軸封装置の事故の再発防止、未然防止に向けて問題点を抽出し、今後の対策を図るための注意事項をまとめた。

2. 軸封装置と事故の抽出方法

(1) 軸封装置

動機器には、往復式圧縮機、遠心式圧縮機、往復式ポンプ、遠心式ポンプがある。往復式圧縮機の軸封装置にはピストンロッドパッキン及びラビリンスシール、遠心式圧縮機の軸封装置にはラビリンスシール、カーボンリングシール、メカニカルシール及びドライガスシール、往復式ポンプの軸封装置にはピストンロッドパッキン(グランドパッキンあり)及びラビリンスシール、遠心式ポンプの軸封装置にはグランドパッキン及びメカニカルシールがある¹⁾。

メカニカルシールの原理を、図1に示す。

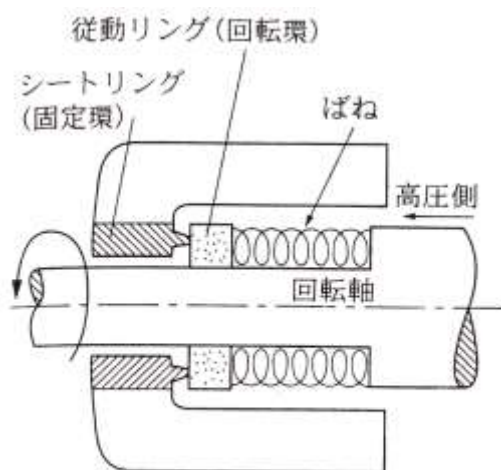


図1 メカニカルシールの原理

メカニカルシールとは、端面密封方式で軸に直角にセットされている精密な部品で、漏えいをほぼ完全に止めることができ、可燃性、毒性の流体に使用される。しかし、振動に弱いため、取扱いは慎重に行い、漏れ出したら止めることはできないので、運転管理、設備管理には十分な注意が必要である。

(2) 事故の抽出方法

軸封装置の事故の抽出方法は、高圧ガス事故データベースの設備区分を「圧縮機、ポンプ」で検索し、事故概要から「メカニカルシール、軸封」をキーワードとして93件を抽出し、更に内容を見て精査し83件に絞り込んだ。

3. 事故の解析

平成 19 年から平成 25 年の 7 年間の高圧ガス設備における動機器の軸封装置の事故（以下、「軸封事故」という）について、事故件数の推移を図 2 に示す。軸封事故は、平成 20 年から平成 23 年が年間 15 件以上の高い水準で発生しており、特に平成 21 年には 19 件のピークを示している。

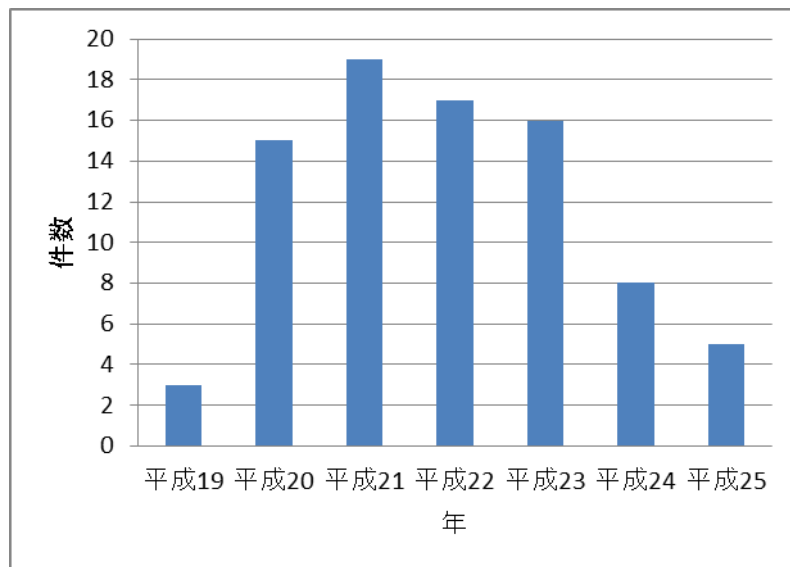


図 2 軸封事故の事故件数の推移

分野ごとでは、製造事業所が 100%で、消費と移動は発生していなかった。

製造事業所分類の内訳では、コンビナート等保安規則適用製造事業所（以下、「製造（コンビ）」という）が 67%、冷凍保安規則適用製造事業所（以下、「製造（冷凍）」という）が 29%、一般高圧ガス保安規則適用製造事業所（以下、「製造（一般）」という）が 3%、液化石油ガス保安規則適用製造事業所（以下、「製造（LP）」という）が 1%であった。

物質ごとに見ると総数 83 件のうちで、液化石油ガスが 32 件（39%）、炭化水素が 20 件（25%）、アンモニアが 14 件（17%）、フルオロカーボンが 11 件（13%）、以下順に、キシレン、酸素、天然ガス、原油が 2 件以下（2%以下）であった。

軸封事故の総数 83 件のすべて（100%）が、漏えい事象である。そのうちで、漏えいから火災に至った事象は 3 件で、漏えいから爆発、破裂・破損に至った事象はなかった。

そもそも軸封事故は、漏えい事象のうちで、「漏えい②」（フランジなどの締結部、バルブなどの開閉部と取付部、可動シール部からの漏えい）に分類されている²⁾。軸封事故の事象分類の結果を、図 3 に示す。図 3 において、事故件数、漏えい事象の件数、「漏えい②」の件数は等しく、そのうちで 3 件（4%）が火災に至った事象である。

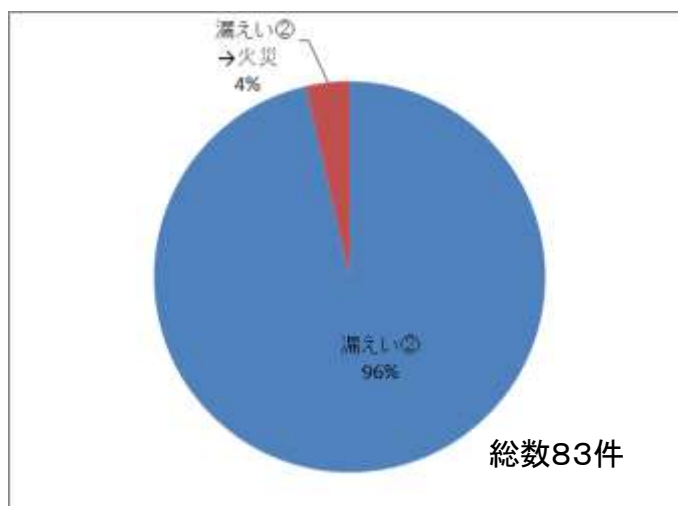


図 3 軸封事故の事象分類

軸封事故の原因分類を図 4 に示す。従来、軸封事故の原因の多くは「シール管理不良」と判断してきたが³⁾、詳細に検討してみると「シール管理不良」以外の原因がある。その分類は、「シール管理不良」が 82%、「誤操作、誤判断、認知確認ミス(以下、誤操作などという)」が 7%、「設計不良」および「自然災害」がそれぞれ 1%、その他が 9%となっている。

「シール管理不良」では、締め付け不良、シールのための給油不足、シール材料の寿命による漏えいが多く、点検などで発見している。起動時の漏えいもあり、増し締め、予備機への切り替えなどの早期処置をしている場合が多い。また、少量漏えいの場合が多いため、シール材料の劣化とだけ記載しており、原因分類が不明な場合が多い。「シール管理不良」(100%)の製造事業所分類の比率は、「製造(コンビ)」が 78%、「製造(冷凍)」が 20%、「製造(一般)」および「製造(LP)」がそれぞれ 1%である。

「誤操作など」では、操作を誤って漏えいを発生または拡大させた例が多く、冷媒の入れ過ぎによる油膜切れ、停止中の油膜切れ、暖機運転不足がある。

その他は、調査中と原因不明である。

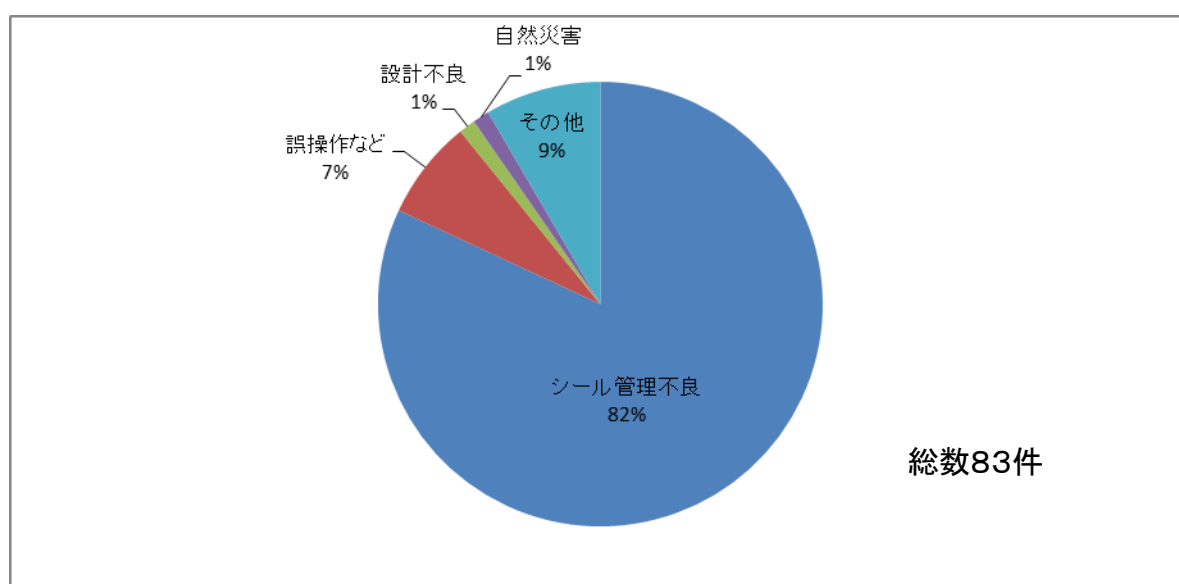


図 4 軸封事故の原因分類

軸封事故の動機器の種類分類を、図 5 に示す。動機器の種類分類は、ポンプが 70%、圧縮機が 29%、攪拌機が 1% である。ポンプ(100%)の 93%が「製造(コンビ)」であることと、圧縮機(100%)の 92%が「製造(冷凍)」であることは、注目する必要がある。

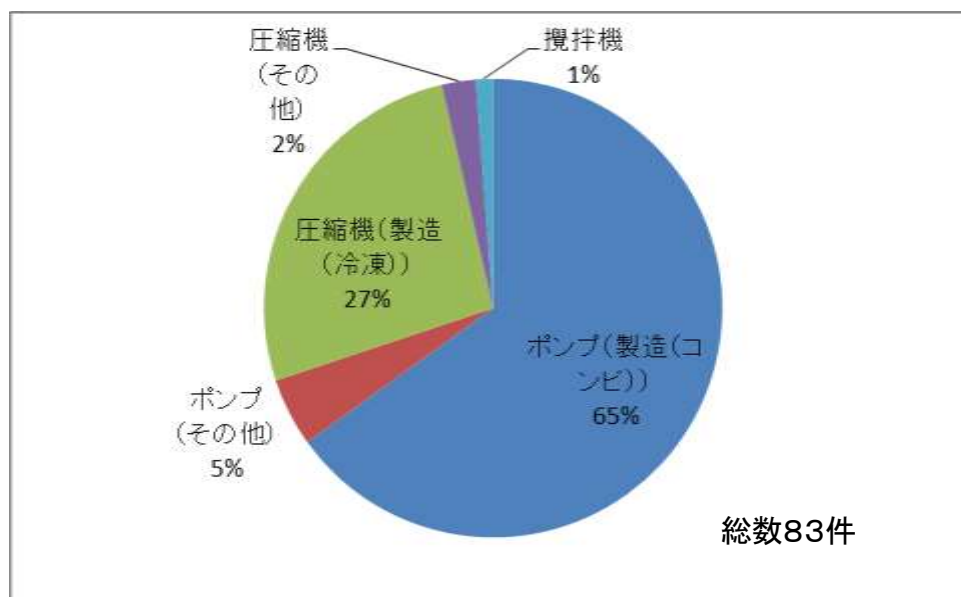


図 5 軸封事故の動機器の種類分類

軸封事故の総数 83 件の発見状況としては、運転中で点検時の発見が 48%、運転中で漏えい警報による発見が 27%、切り替え時の発見が 12%、起動時の発見が 8%、停止時の発見が 7% である。起動時、切り替え時は運転員が付いており、早期に処置ができる場合が多い。また、点検時も少量漏えいを早期発見している場合が多い。

なお、例えば 50kg 以上漏えいしたのは 15 件で、製造事業所分類では、「製造(冷凍)」が 12 件、「製造(コンビ)」が 2 件、「製造(一般)」が 1 件、「製造(LP)」はなかった。また、運転分類では、起動時が 2 件、点検時が 2 件、停止時が 1 件で、残りの 10 件は運転中に発生し、放置していた例が多い。

4. 事故防止の注意事項

動機器の軸封事故防止の注意事項を以下に示す。

(1) 維持管理

- ① 高圧ガス保安法では、製造する高圧ガスの種類、製造設備の態様に応じ、一日に一回以上当該設備の属する製造施設の異常の有無を点検し(冷凍保安規則第9条第2項、他省略)、と定められている。軸封装置は、装置に適した周期(直ごと、毎日など)で点検し、早期漏えい発見に全力を尽くす。点検においては、少量漏えい、異常な圧力、異音、発熱、振動、臭気、冷却水の温度、油量、油流などをよく確認する。停止後の漏えいも発生しているので、停止後の漏えい防止にも気を配る。
- ② 軸封装置には寿命があるので、交換周期を適正に管理し、交換する。また、機器の特性によっては寿命が短くなることがあるので、状況を把握する。
- ③ 検査内容について、パッキンの接触面の摩耗と傷、シャフトとスリーブの嵌合い、機器寸法の精度が許容値内であることを確認する。

(2)装置

- ①重要な機器の軸封装置の周辺にはガス検知器を設置するなど、早期漏えい発見に努める。
- ②軸封装置の採用に当たっては、危険性(毒性ガス、可燃性ガス)による軸封方式の選定(例:ダブルメカニカル方式、ノンシールポンプ)、シール材質の選定などについて、十分検討する。

(3)知識

高圧ガス設備、特に「製造(冷凍)」を維持管理する者は、軸封装置について十分な知識を事前に修得する。

5. 提言

- ①漏えい②の場合、継手とバルブについては事故扱いしない微量漏えいが明確に定義されている。軸封装置については、この定義がない。
- ②しかし、軸封装置は微量漏えいすることを前提として、漏えい防止機能を維持している。
- ③現状の事故件数は多くないけれども(7年間で83件)、微量漏えいの定義の解釈次第で、事故件数は増加する。
- ④現状の事故も、大半は漏えいのみに留まり、漏えいから火災に至る事故は少なく(4%)、漏えいから爆発、破裂に至る事故はない。
- ⑤したがって、軸封装置の微量漏えいについて、定義を明確にし、条件を具体的に設定することが望ましい。一例を、以下に示す。
 - ・微量漏えいの検知方法と定義の明確化
(例えば、可燃性ガスの場合、ガス検知器による爆発下限界濃度の1/4以下を微量漏えいとする。)
 - ・ダブルメカニカル方式などの内部少量漏えいは、微量漏えいとみなす。
 - ・予備系統への早期切り替えによる少量漏えいは、微量漏えいとみなす。
- ⑥なお、微量漏えいが結果として多量漏えい、漏えいの継続、火災、人身災害となった場合は、事故扱いとする。
- ⑦毒性ガスの微量漏えいを含む漏えいは、事故扱いとする。

[参考文献]

- 1) 高圧ガス保安協会編、高圧ガス保安技術、I 学識、11 高圧設備、11. 6 流体の漏えい防止、pp.326～333、高圧ガス保安協会、平成 25 年
- 2) 小林英男編著、高圧ガス事故の統計と解析、2章高圧ガス事故の分類と基礎知識、3. 2 漏えい②、pp.23～27、高圧ガス保安協会、2014 年
- 3) 小林英男編著、高圧ガス事故の統計と解析、2章高圧ガス事故の分類と基礎知識、3. 2 漏えい②、(3) 可動シール部、pp.25～27、高圧ガス保安協会、2014 年

水素スタンドにおける高圧ガス事故の注意事項について

高圧ガス保安協会

1. 目的

圧縮水素スタンド（以下「水素スタンド」という）は、水素を燃料とする自動車に水素を供給することを目的として設置されている。平成 26 年 4 月に閣議決定された第 4 次のエネルギー基本計画には、四大都市圏を中心に平成 27 年以内に 100 箇所程度の水素スタンドを整備することが目標とされている。また、平成 26 年 12 月には、国内において燃料電池自動車の市販が開始された。以上のことから、国内において水素スタンドの増設が要望されている。

水素スタンドは、ディスペンサー、蓄圧器、圧縮機、プレクーラなどの高圧ガス設備を保有しており、高圧ガス保安法の適用を受ける液化石油ガススタンド（以下「LPG スタンド」という）および圧縮天然ガススタンド（以下「CNG スタンド」という）と比較すると、設備の運転条件（圧力、温度）が厳しく、漏えい事故が起こりやすいことが懸念される¹⁾。また、水素は、すべてのガスの中で密度が最も小さく、外部へ漏えいしやすい特徴がある。さらに、水素は、空気中の爆発範囲（4vol%～75vol%）が広く、最小発火エネルギー（0.02mJ 程度）も低いので、他のガスと比較して漏えい後に爆発、火災が発生しやすいことが懸念される（表 1 参照）。このため、水素スタンドにおける高圧ガス事故の再発防止、未然防止に向け問題点を抽出し、今後の対策を図るための注意事項をとりまとめた。

表 1 スタンドで使用されるガスの物性²⁾

	水素	液化石油ガス		天然ガス	
分子式	H ₂	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	CH ₄	C ₂ H ₆
密度* (kg/m ³)	0.09	1.97	2.59	0.72	1.34
爆発範囲** (Vol%)	4～75	2.1～9.5	1.8～8.4	5～15	3～12.5
最小発火エネルギー (mJ)	0.02	0.24	0.26	0.28	0.24

* 0°C、0.1013MPa（絶対）

** 空气中

2. スタンドにおける事故統計

(1) 事故件数の推移

平成 25 年度高圧ガス事故事例データベース³⁾から、LPG スタンドにおいては昭和 40 年から平成 25 年までに、水素スタンドおよび CNG スタンドにおいては普及開始から平成 25 年までに、発生した高圧ガス事故件数の推移を図 1～図 3 に示す。図 1～図 3 には比較のために、それぞれのスタンドの設置数（その年までの増減累積数）の推移^{4)～6)}も示す（水素スタンドは一般公開されていない研究用設備も含む。）。また、図 2 の LPG スタンドにおいては、負傷者数の推移も示す。なお、水素スタンドおよび CNG スタンドにおいては、平成 25 年までに人的被害は発生していない。以下の①～③に詳細を示す。

① 水素スタンド

図 1 を参照して、水素スタンドは、平成 14 年に大阪で初のスタンドが設置され、設置数は平成 22 年から毎年 20 程度で推移している。事故件数は、スタンド数の増加に伴い増加傾

向を示している。

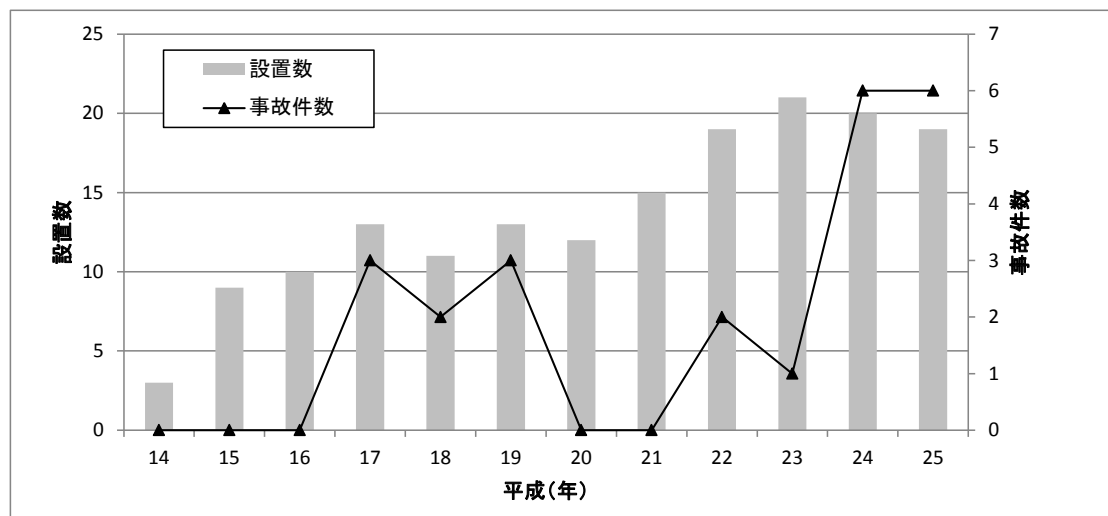


図1 水素スタンドにおける設置数と事故件数の推移

② LPG スタンド

図2を参照して、LPGスタンドは、昭和37年に大阪で初のスタンドが設置され、昭和60年以降、設置数は毎年1,900程度で推移している。事故件数は、スタンド普及当初は多かったが、設置数の増加に伴い一度減少傾向を示した。しかし、平成15年からは、事故件数は再び増加傾向を示している。また、負傷者数はスタンド普及当初に多く、その後は減少したが、突発的に続いている。

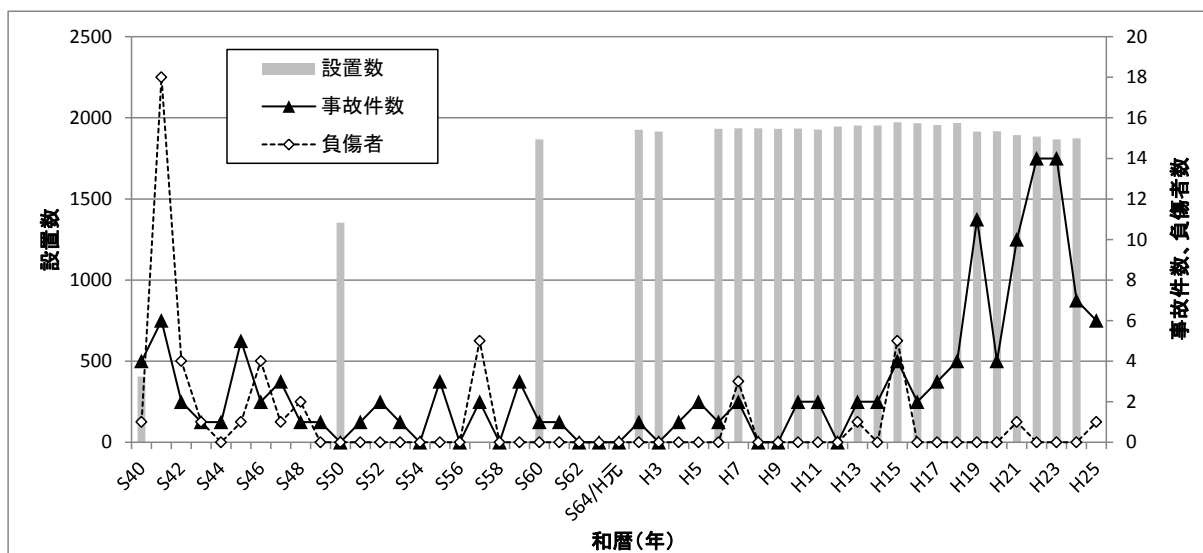


図2 LPGスタンドにおける設置数と事故件数の推移

③ CNG スタンド

図3を参照して、CNGスタンドは、平成2年に千住(東京)で初のスタンドが設置され、平成17年以降、設置数は毎年300程度で推移している。事故はスタンド普及当初には、発生していない。しかし、平成18年から事故件数が増加し、平成22年に35件のピークを示し

た後に減少している。

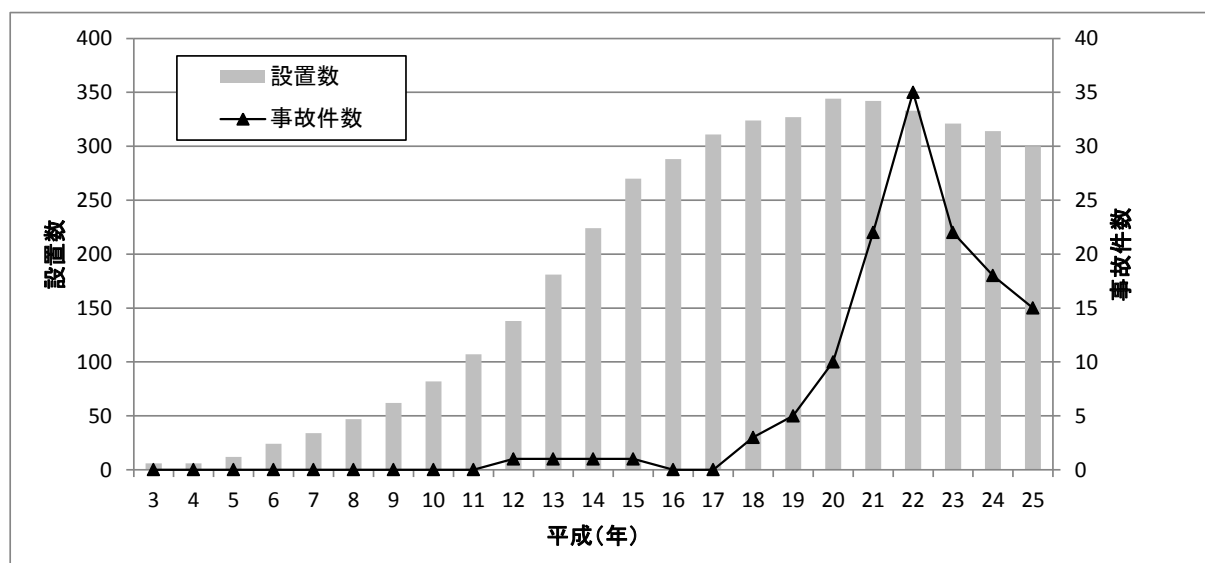


図3 CNGスタンドにおける設置数と事故件数の推移

(2) スタンドの比較

LPG スタンドおよび CNG スタンドにおいては、設置数が増加した後に事故件数が増加している。このため、水素スタンドにおいても、設置数が増加した後に事故件数が増加することが懸念される。

それぞれのスタンドの使用条件、設置数および事故件数をまとめて表2に示す。事故件数の合計は、水素スタンドが23件、LPGスタンドが133件、CNGスタンドが132件となっており、LPGスタンドおよびCNGスタンドにおいては、水素スタンドの5倍以上の事故件数を経験している。ただし、それぞれのスタンドの設置数は、大幅に異なる。そこで、最近10年間のそれぞれのスタンドの設置数に対する事故件数の比率を、図4に示す。水素スタンドにおいては、事故件数の比率が他のスタンドよりも高く、平成25年は30%を超えている。また、CNGスタンドにおける事故件数の比率は、LPGスタンドにおける事故件数の比率と比較して高い。これは、CNGスタンドにおいては、設備の運転条件(圧力、温度)が厳しいためと考えられる。水素スタンドにおいては、LPGスタンドおよびCNGスタンドよりも設備の運転条件(圧力、温度)が厳しいため、今後の事故件数の増加が懸念される。上記の結果から、水素スタンドだけでなく、LPGスタンドおよびCNGスタンドも対象として、事故の再発防止、未然防止に向け問題点を抽出した。

表2 スタンドの使用条件、設置数および事故件数 ^{1),3)~6)}

	水素 スタンド	LPG スタンド	CNG スタンド
圧力(MPa)	82	1.6	25
温度(°C)	180	35	140
スタンド設置数*	19	1874	300
事故件数**(件)	23	133	132

* 水素スタンドは平成 25 年 12 月時点、CNG スタンドは平成 25 年 3 月時点、
LPG スタンドは平成 24 年 3 月時点

** 平成 25 年度高圧ガス事故事例データベースから抽出した累積事故件数

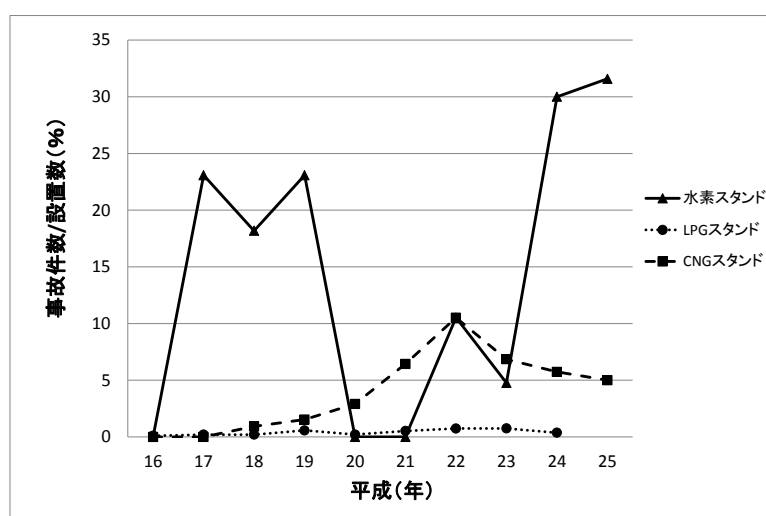


図4 それぞれのスタンドの設置数に対する事故件数の比率

3. スタンドにおける事故の問題点の抽出

(1)水素スタンド

平成 25 年までに発生した水素スタンドにおける事故 23 件について、事象ごとに分類した結果を、図 5 に示す。水素スタンドの事故件数に占める漏えい事象の比率は 91%(21/23)となる。漏えい以外の事象は、爆発、破裂・破損がそれぞれ 1 件となっている。

漏えい事象(100%)の詳細は、漏えい①が 19%(4 件)、漏えい②が 71%(15 件)、漏えい③が 10%(2 件)であり、漏えい②が大半を占める。

漏えい①では、フレキシブルチューブの曲げ疲労、圧縮機の吐出配管継手の振動疲労、充てんホースの内圧変動による疲労があり、4 件中 3 件が疲労であった。いずれも短い使用期間で疲労が発生しており、設計時に曲げ、振動、圧力変動の使用条件の検討が不十分な設計不良が原因である。また、疲労以外の漏えい①では、クロムモリブデン鋼(SNCM439)製の蓄圧器において、製作時の焼き割れの残置が起点となり、水素誘起割れが発生した事故が 1 件ある ⁷⁾。

漏えい②では、15 件中 12 件が締結部のねじ込み式継手からの漏えい事象であり、事故原因は締結管理不良が 6 件、シール管理不良が 5 件、製作不良が 1 件となっている。ねじ込み式継手以外の漏えい②では、バルブと自動車側充てん口のシール管理不良が 2 件、

フランジ式継手の製作不良が1件ある。

漏えい③では、地震と誤開閉による締結部からの漏えいが2件ある。

漏えい以外の事象2件は、電解セルの異常反応を発端とする高圧縮水素発生エネルギー装置の爆発と^{8)、9)}、低温における曲げ疲労に起因する充てんホースの破裂である。いずれも設計不良が原因である。

なお、水素スタンドにおいては、車両の誤発進による充てんホースの引張り事故(漏えいなし)が発生していないため、LPG スタンドおよび CNG スタンドの事故と比較して漏えい事象の比率が高くなっている。

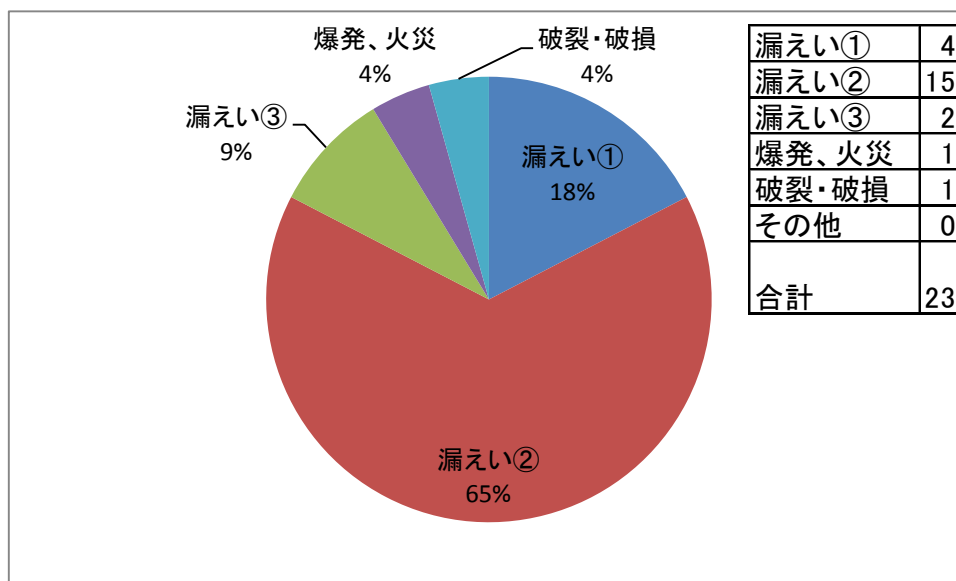


図5 水素スタンドにおける事故(23件)の事象ごとの分類
(平成25年まで)

(2) LPG スタンド

平成20年から平成23年までに発生したLPGスタンドにおける事故42件について、事象ごとに分類した結果を、図6に示す¹⁾。事故件数に占める漏えい事象の比率は、62%(26/42)となる。LPGスタンドにおいては、車両の誤発進による充てんホースの引張り事故(漏えいなし6件)に加え、車両の運転ミスなどに起因するディスペンサーの破損事故(6件)も発生しているため、漏えい事象の比率は最も低くなっている。

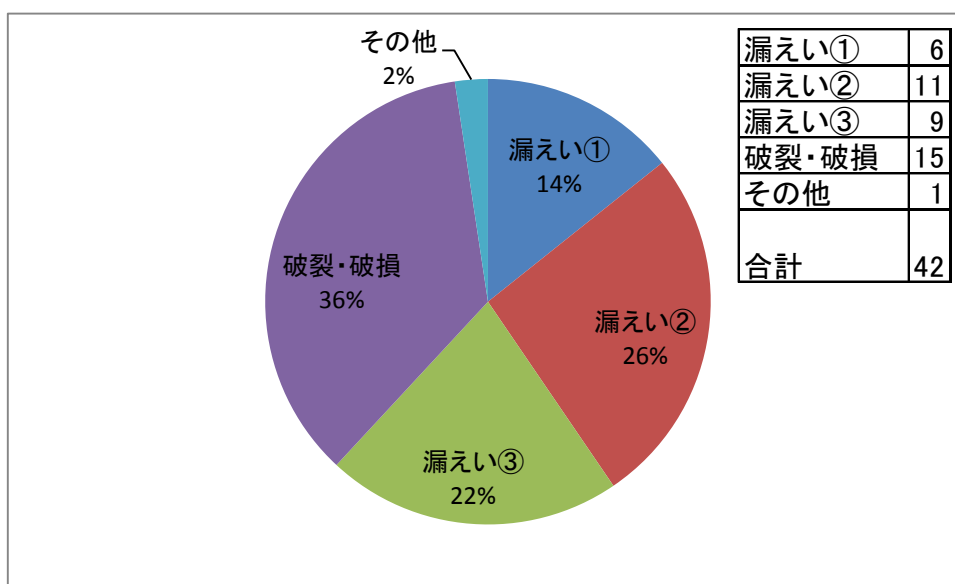


図 6 LPG スタンドにおける事故(42 件)の事象ごとの分類
(平成 20 年～平成 23 年まで)

(3)CNG スタンド

平成 20 年から平成 23 年までに発生した CNG スタンドにおける事故 86 件について、事象ごとに分類した結果を、図 7 に示す¹⁾。事故件数に占める漏えい事象の比率は、80% (69/86)となる。CNG スタンドにおいては、車両の誤発進による充てんホースの引張り事故(漏えいなし 5 件)が発生しているため、水素スタンドの事故と比較して漏えい事象の比率は低い。

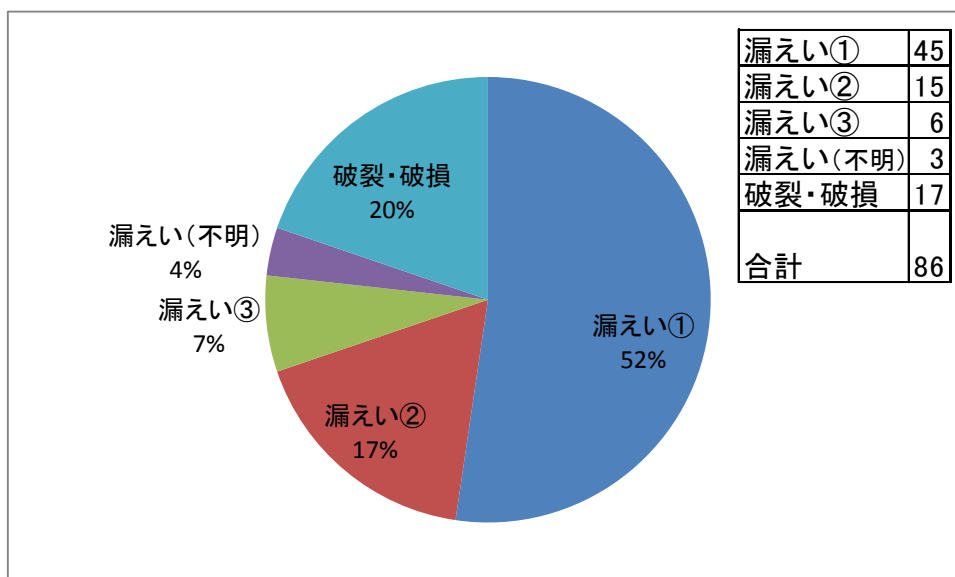


図 7 CNG スタンドにおける事故(86 件)の事象ごとの分類
(平成 20 年～平成 23 年まで)

(4) スタンドの比率

平成 20 年から平成 23 年までに発生した LPG スタンドおよび CNG スタンドにおける事故件数から、車両の誤発進および運転ミスに起因する破損事故件数を除くと、ほぼすべてが漏えい事象となる(LPG スタンド 95%(20/21)、CNG スタンド 98%(64/65))。したがって、水素スタンドを含めてスタンドの事故防止には、漏えい事象と、水素スタンドでは発生していないが車両の誤発進および運転ミスへの対策が重要となる。

4. 水素スタンドにおける事故防止の注意事項

(1) 漏えい②

水素スタンドにおける事故は漏えい②が最も多く(15 件)、漏えい②の原因はシール管理不良(7 件)と締結管理不良(6 件)が大半を占める。

① シール管理不良

締結部のパッキン(4 件)と O リング(3 件)の破損(5 件)、ねじれ(1 件)および取付けミス(1 件)が発生している。原因はシール管理不良である。再発防止対策としては、材質変更、交換周期の見直しおよび点検周期の見直しが挙げられる。

② 締結管理不良

締結部では、圧縮機の振動、パッキンと O リングの初期応力緩和、圧力変動、温度変動などによって運転中に締結力の低下が想定される。このため、締結力の低下を考慮して初期締結力を設定し、また運転中の締結力を確認することが重要である。運転中の締結管理には、合いマークによる緩みの可視化が有効である。水素スタンドにおいては、LPG スタンドおよび CNG スタンドにおける締結管理を参考に、漏えいしやすい水素の特性を踏まえた対応が必要である。

(2) 漏えい①

CNG スタンドと LPG スタンドにおける漏えい事象を比較すると、CNG スタンドでは漏えい①が多く、そのうちでも特に疲労が多くなっている¹⁾。これは、CNG スタンドは LPG スタンドに比較して、運転条件(圧力、温度)が厳しいためと考えられる。疲労が発生する原因は、設計時における運転条件に対する疲労への検討不足、すなわち設計不良である。

水素スタンドでは、CNG スタンドよりも運転条件が厳しくなるため、今後の水素スタンドの増加とともに疲労の事故も増加することが予想される。特に、温度が低くなるプレクーラ設備と設備周りの配管類、および温度が高くなる圧縮機と圧縮機周りの配管類は、水素環境に適合する材料選定が必要である。また、水素環境で使用する設備の製作時には、他のガス設備以上に表面粗さと応力集中の軽減を図ることが必要である。

(3) 車両の誤発進および運転ミス

LPG スタンドおよび CNG スタンドにおいては、スタンド特有の事故として、車両の誤発進および運転ミスに起因する破損事故が発生している。このため、一般高圧ガス保安法規則(以下「一般則」という)で、ガス設備は車両の衝突するおそれがない場所への設置、または車両の衝突を防止する対策が義務付けられている。また、水素スタンドおよび CNG スタンドにおいては、一般高圧ガス保安法規則関係例示基準(以下「一般則例示基準」という)で、車両の誤発進等によるホースの破損を防止するための措置(緊急離脱カプラー)の基

準が定められている。さらに、水素スタンドにおいては、一般則例示基準で、ディスペンサーへの車両衝突防止措置の基準が定められている。

現状では、本格的に燃料電池自動車の普及が進んでいないため、水素スタンドにおいてはこれまで車両の誤発進および運転ミスに起因する破損事故は報告されていない。しかし、今後の本格的普及を踏まえ、車両の誤発進および運転ミスの発生を念頭に置き、規定されている対策および作業手順を徹底することが重要である。

(4) 海外の事故情報と水素スタンド以外の事故情報

平成 24 年 5 月に米国エメリービル市の水素スタンドにおいて、漏えい後の火災事故が発生している¹⁰⁾。この事故は、蓄圧器のリリーフ弁の耐圧部材に水素環境に適さない材料(マルテンサイト系ステンレス鋼 440C)が使用されていたため、リリーフ弁が破損し、放出管に約 300 kgの水素が漏えいした。漏えいした水素が何らかの原因により着火し、放出管出口および隣接する屋根で火災が発生した。

また、国内においては、平成 26 年 10 月、水素スタンドへ水素を輸送するため走行中の水素トレーラ(35MPa 複合容器 20 本積載)が、タイヤから発生した火災により容器が炙られ、溶栓から水素が大気に放出された事故が発生している。

海外の水素スタンドの事故情報だけでなく、水素スタンド以外の水素関連の事故についても注目し、今後の水素スタンドにおける事故防止へ活用することが重要と考える。

参考文献

- 1) 上田洋平、小林英男、赤塚広隆、澁谷忠弘、笠井尚哉、“論文/圧縮天然ガススタンドおよび液化石油ガススタンドにおける事故の解析”、高圧ガス、Vol.50、No.7、pp.413-418 (2013)。
- 2) “高圧ガス保安管理技術(第12次改定)”、高圧ガス保安協会(2015)。
- 3) 平成 25 年度高圧ガス事故事例データベース
(http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/hipregas/detail/jikojireidb.html)
- 4) “LPガス資料年報”、株式会社石油化学新聞社
- 5) 一般社団法人 全国LPガス協会ホームページ
- 6) 一般社団法人日本ガス協会ホームページ
- 7) “水素ステーション事故調査報告書(第3報)要約版”、九州大学ホームページ
- 8) 高圧ガス事故概要報告(水素ステーション実証試験設備の爆発事故)
(http://www.khk.or.jp/activities/incident_investigation/hpg_incident/pdf/2005-415.pdf)
- 9) “水素充填設備(水素スタンド)における水素の漏えい事故に係る原因調査結果”、経済産業省ホームページ
- 10) Aaron P. Harris and Chris W. San Marchi, “Investigation of the Hydrogen Release Incident at the AC Transit Emeryville Facility (Revised)”, SAND2012-8642 (2012)。