

水素スタンドにおける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・燃料電池戦略ロードマップ(平成 26 年 6 月 23 日策定、平成 28 年 3 月 22 日改定)」にて 2020 年度までに 160 か所程度、2025 年度までに 320 か所程度の設置を目標としている。

しかしながら、水素スタンドは、これまで経験したことのない常用圧力 82MPa の超高圧水素を用い、市街地に設置されることが想定されており、これまで設置されてきた液化石油ガススタンド(常用圧力約 2MPa)および圧縮天然ガススタンド(常用圧力約 25MPa)と比べても圧力が著しく高く、ひとたび災害が発生した場合には、周囲に著しい災害を及ぼす恐れがある。また、水素は、分子が小さく、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。

このために、水素スタンドにおける高圧ガス事故の統計と解析の結果を示し、水素スタンドにおける高圧ガス事故の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とりまとめた。

2. 事故の抽出

高圧ガス事故データベース¹⁾を用いて、高圧ガス保安法事故措置マニュアルが改定された平成 23 年から平成 29 年までの 7 年間で発生した喪失、盗難を除いた高圧ガス事故(以下、「事故」という。)(3,242 件)のうち、圧縮水素スタンド(以下、「水素スタンド」という。)に係る事故を抽出した。水素スタンドにおける事故の統計を表 1 に示す(89 件)。表 1 には比較のために、水素スタンドの設置数(その年までの増減累積数)の推移も示す(水素スタンドは一般公開されていない研究用設備等も含む。)。水素スタンド設置数は、第一種製造者にあつては許可を受けた年の件数、第二種製造者にあつては届出を受けた年の件数を前の年の件数に加算し、廃止の届出を受けた年の件数を翌年の件数から減算した。

表 1 の縦軸の分野は、高圧ガス事故データベースの事故区分の分類である。製造事業所はさらに、一般高圧ガス保安規則適用(以下、「一般則」という。)、コンビナート等保安規則適用(以下、「コンビ則」という。)に細分化している。

水素スタンドは、平成 14 年に実証用としての利用が開始、平成 26 年 7 月には商用化が開始され、現在国内では、商用および非商用の水素スタンドを合わせ、100 か所を超える水素スタンドが設置されている。水素スタンドの設置数の増加に伴い、水素スタンドにおける事故も増加し、平成 23 以前の 10 件も含めて平成 29 年までに 91 件の事故が報告されている。水素スタンドの商用化および平成 26 年 12 月の燃料電池自動車の一般販売が開始された翌年の平成 27 年より事故件数が急増し、水素スタンドにおける全事故件数(91 件)の 7 割以上(64 件)が、平成 27 年から平成 29 年の 3 年間に発生している。このために、平成 27 年から平成 29 年の 3 年間に着目し、水素スタンドにおける事故を抽出した。

表 1 水素スタンドにおける事故の統計(平成 23 年～平成 29 年の 7 年間)

(件)

分野	平成 23 年	平成 24 年	平成 25 年	平成 26 年	平成 27 年	平成 28 年	平成 29 年	合計
製造事業所(一般則)	1	6	5	4	12	30	22	80
製造事業所(コンビ則)	0	0	1	0	0	0	0	1
合計	1	6	6	4	12	30	22	81
水素スタンド設置数 (累積数)	27	27	32	48	100	136	141※	

※平成 29 年の水素スタンド設置数は 5 月時点での数値

3. 事故の統計と解析

3.1 事象の内訳

平成 27 年から平成 29 年までの 3 年間の水素スタンドにおける事故 64 件について、事象ごとに分類した結果を図 1 に示す。全 64 件のうちで、漏えい事象が事故件数の 100% を占める。

漏えい事象の内訳は、漏えい②(86%)が大半を占め、漏えい①(11%)と漏えい③(3%)がこれに次ぐ。なお、これらの事故はすべて、1 次事象が漏えいのみで終了しており、2 次事象として爆発、火災、破裂・破損に至った事故はない。

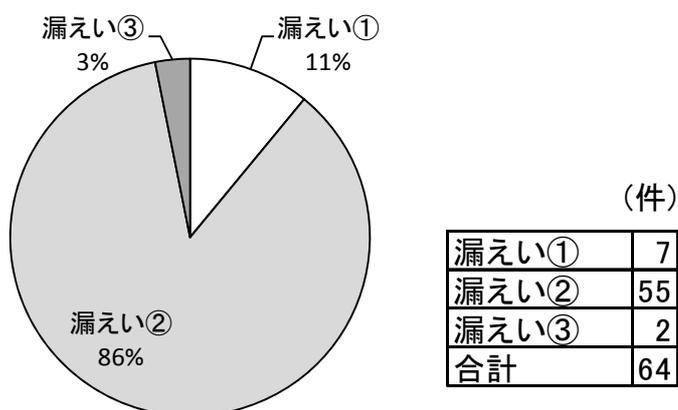


図 1 水素スタンドにおける事故の事象ごとの分類(平成 27 年～平成 29 年の 3 年間)

3.2 設備区分の内訳

水素スタンドにおける事故の内訳を、設備区分で分類して表 2 に示す。全 64 件のうちで、設備区分はディスペンサー(25/64)が最も多く、充てんホース(14/64)、圧縮機(12/64)、蓄圧器、カードル(11/64)がこれに次ぐ。

漏えい①(全 7 件)はすべて平成 29 年に発生しており、すべてが疲労である。内訳は圧力が繰り返される樹脂製充てんホースで最も多い 5 件、移動式水素スタンドの走行中に振動が発生するディスペンサー内の配管で 1 件、カードルに接続され、曲げ応力が繰り返される金属製フレキシブルチューブで 1 件である。

漏えい②(全 55 件)は、すべての設備区分で発生しており、ディスペンサー(24 件)が最も多く、次に圧縮機(12 件)が多い。

漏えい③(全2件)は、放出流量調整用手動弁の調整不備により、ディスペンサー回りの遠隔自動脱圧作業において、急激に水素が放出ラインに流入し、ディスペンサーおよび蓄圧器の安全弁が作動して水素が漏えいした事故と、充てんホース交換作業において、充てんノズルと放出管をつなぐ治具部からの放出音を伴う漏えいという原因不明の事故である。

表2 水素スタンドにおける事故の設備区分で分類した統計(平成27年～平成29年の3年間)
(件)

設備区分	漏えい①	漏えい②	漏えい③	合計
ディスペンサー(ホース継手を除く。)	1	24	0	25
充てんホース(ホース継手、緊急離脱カプラ、充填ノズルを含む。)	5	8	1	14
圧縮機(クーラ、吸入・吐出部の継手などを含む。)	0	12	0	12
蓄圧器、カードル(蓄圧器付近の継手、フレキシブルチューブなどを含む。)	1	10	0	11
安全弁(安全弁付近の継手などを含む。)	0	1	1	2
合計	7	55	2	64

3.3 漏えいの部位の内訳

水素スタンドにおける事故の内訳を、漏えいの部位で分類して表3に示す。全64件のうちで、漏えいの部位は漏えい②の締結部(32/64)が最も多く、漏えい②の開閉部(22/64)、充てんホース(6/64)がこれに次ぐ。また、締結部(32件)の大半がねじ込み式継手(25/32)、開閉部(23件)のすべてがバルブ(23/23)である。

また、漏えいの部位ごとの事故原因を表4に示す。漏えいの部位ごとの事故原因のうち、締結部の締結管理不良(37%)が最も多く、開閉部のシール管理不良(23%)、締結部のシール管理不良(12%)、開閉部の締結管理不良(12%)がこれに続く。

表3 水素スタンドにおける事故の漏えいの部位で分類した統計
(平成27年～平成29年の3年間)

漏えいの部位	漏えい①	漏えい②	漏えい③	件数
締結部	0	32	0	32
開閉部	0	23	0	23
充てんホース	5	0	1	6
フレキシブルチューブ	1	0	0	1
配管	1	0	0	1
安全弁	0	0	1	1
合計	7	55	2	64

表4 漏えいの部位ごとの事故原因(平成27年～平成29年の3年間)
(件)

漏えいの部位	事故原因					合計
	締結管理 不良	シール 管理不良	組織運営 不良	設計 不良	その他	
締結部	24(37)	8(12)	0	0	0	32(49)
開閉部	8(12)	15(23)	0	0	0	23(35)
充てんホース	0	0	0	5(8)	1(2)	6(10)
フレキシブルチューブ	0	0	0	1(2)	0	1(2)
配管	0	0	0	1(2)	0	1(2)
安全弁	0	0	1(2)	0	0	1(2)
合計	32(49)	23(35)	1(2)	7(12)	1(2)	64(100)

※()は全事故件数(64件)に対する比率(%)を示す。

4. 平成29年の事故の概要

平成29年の水素スタンドにおける事故22件について、事象ごとに分類した結果を図2に示す。全22件のうちで、漏えい事象が事故件数の100%を占める。

漏えい事象の内訳は、漏えい②が約2/3、漏えい①が約1/3を占める。なお、漏えい③は発生していない。平成29年の事象ごとの分類では漏えい①の比率が高く(平成27年と平成28年は漏えい①の事象はない)、図1を参照して平成27年と平成28年の事故の事象ごとの分類の比率とは異なる。

平成29年の漏えい①(7件)の事故は、すべて疲労に起因する事故であり、水素スタンドの商用化および燃料電池自動車の販売が開始され、充てんホースの使用がこれまでの実証段階よりも増加したが、開発品の実証が不十分であったと推定される。

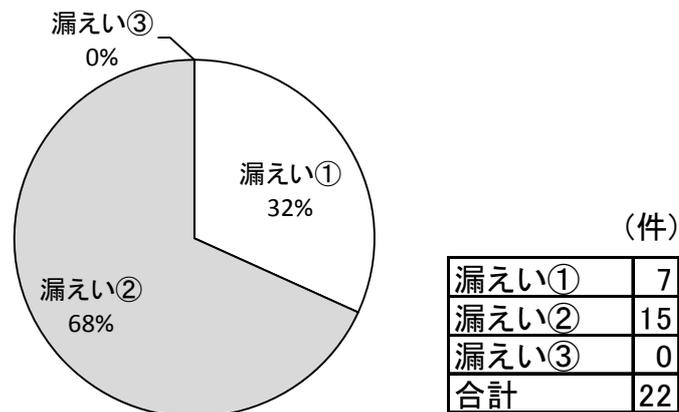


図2 水素スタンドにおける事故の事象ごとの分類(平成29年)

5. 抽出のまとめ

平成27年から平成29年までの3年間の水素スタンドにおける事故を抽出し、統計と解析の結果を示した。結果をまとめて、以下に示す。

- ① 水素スタンドにおける事故(全64件)のうちで、漏えい事象が事故件数の100%を占める。
- ② 設備区分はディスペンサー(39%)が最も多く、充てんホース(22%)、圧縮機(19%)、蓄

圧器、カードル(17%)がこれに次ぐ。

- ③ 漏えいの部位は、締結部(50%)が最も多く、開閉部(36%)、充てんホース(9%)がこれに次ぐ。
- ④ 漏えいの部位の事故原因は、締結部の締結管理不良(38%)が最も多く、開閉部のシール管理不良(23%)がこれに次ぐ。
- ⑤ 平成29年の水素スタンドにおける事故(全22件)のうちで、漏えい②が約2/3、漏えい①が約1/3を占める。漏えい①(7件)は、すべて疲労に起因する事故である。

6. 注意事項

平成27年から平成29年までの3年間の水素スタンドにおける高圧ガス事故について、漏えい①と漏えい②に区分して注意事項をまとめた。

6.1 漏えい①の事故

漏えい①(7件)の事故は、すべて疲労に起因している。疲労の事故の設備区分の内訳は、ディスペンサーが1件、充てんホースが5件、カードルが1件である。

ディスペンサーからの漏えい(1件)は、移動式水素スタンドのディスペンサーにおいて、プレクター出口直近のサンプルラインのレデューサーの疲労き裂からの漏えいである。レデューサーの外表面には軸方向と垂直な方向に複数のき裂があり、き裂の破面にはストライエーションが確認された。遮断弁の交換を行った際、レデューサーの再取付時に振りと引張りの応力が付加された状態となり、車両走行時の上下動、加減速などの振動により疲労き裂が発生し、進展して漏えいに至ったと考えられる。配管に引張り、曲げ、振りなどの平均応力が負荷された状態で振動すると、振動の応力振幅が小さくても容易に疲労する。移動式水素スタンドでは、定置式水素スタンドと異なり、車両の走行に伴う振動への対策が必要である。

充てんホースからの漏えい(5件)は、樹脂製充てんホースの疲労き裂からの漏えいである。充てんホースは低温高圧水素の充てんの繰返しにより、内層にホース長手方向のき裂が発生し、半楕円形状で進展して、外層を貫通する。水素スタンドに使用される充てんホースは、充てん回数および使用期間の条件がホースメーカーにより推奨されている。しかし、漏えい事故が多発している。なお、ホースメーカーより詳細な事故報告がなされていないために、有効な対策が図られているか否かは不明である。

カードルからの漏えい(1件)は、カードルに接続されている金属製フレキシブルチューブ(スパイラルチューブ)の疲労き裂からの漏えいである。フレキシブルチューブは常に曲げの状態であり、バルブの開閉に伴いガスの流れに脈動(振動)が発生する。この場合も、平均応力が負荷された状態での振動による疲労である。フレキシブルチューブは、伸縮継手(ベローズ)の機能をもつ配管ではない。疲労が想定される場合には使用できないし、使用する場合には疲労解析が必要である。

6.2 漏えい②の事故

漏えい②の事故(55件)の漏えいの部位の内訳は、締結部が32件、開閉部が23件である。締結部の事故の詳細は、ねじ込み式継手が23件と大半を占め、ホースの締結部が8件、その他の締結部が1件である。ねじ込み式継手の事故の設備区分の内訳は、ディスペンサーが7件、圧縮機が11件、蓄圧器が4件、安全弁が1件である。開閉部の事故の詳細は、バルブの23件がすべてである。バルブの事故の設備区分の内訳は、ディスペンサーが17件、蓄圧器が6件である。

ねじ込み式継手の漏えい(23件)は、締め付け不良、不適切なトルク管理、振動、温度変動による緩みに起因する漏えいであり、締結管理不良とシール管理不良が原因である。締め付け不良、不適切なトルク管理に起因する事故としては、メンテナンス中に別の継手を増し締めしたときに発生した緩み、コーン&スレッド継手の片当たりによる緩みにより漏えいした。温度変動に起因する事故としては、ディスペンサーにおける低温水素による当たり面の接触応力の低下、圧縮機における銅製ガスケットとステンレス鋼製継手の熱膨張の速度の違いにより漏えいした。振動に起因する事故としては、圧縮機の振動、移動式水素スタンドにおける移動中の振動により漏えいした。また、圧縮機では、Oリングの損傷を伴う漏えいが3件報告されているが、いずれも原因不明である。再発防止対策としては、合いマークによる緩みの可視化、気密試験による漏えい個所の早期発見、締結管理を踏まえた配管レイアウトの見直し、振動と温度変化を想定したトルク値の設定と定期的なトルク管理、Oリングの定期的な交換が有効である。

ホース締結部からの漏えい(8件)の内訳は、ホース継手が3件、緊急離脱カプラが3件、充てんノズルと燃料電池自動車の充てん口とのレセプタクルが1件、充てんホースとノズルの接続部が1件である。ホース継手の漏えい(3件)の原因は、低温と常温、昇圧と脱圧、車両への着脱の繰り返しおよびディスペンサーへの不適切なホースの締結などが考えられる。再発防止対策としては、ディスペンサーへホースを締結する際は、芯出しを確実にを行い、シール面が正しく接触するように締結を行い、運転中は、合いマークによる日常的な緩みの確認と定期的なトルク管理が有効である。緊急離脱カプラ(3件)の漏えいの部位は、Oリングが2件、継手が1件である。Oリングからの漏えいについては、いずれもOリングの損傷による漏えいであるが、Oリングの損傷の原因については特定に至っていない。再発防止対策については、緊急離脱カプラにOリングを組み込む際にOリングに傷がつかないように配慮するとともに、製品の出荷前にホースの使用条件を考慮した気密試験によりOリングの傷の有無を確認することが望まれる。また、使用中のホースの伸縮によって、Oリング溝と接触面に発生する隙間にOリングが入り込むことも懸念されるために、隙間が発生しない緊急離脱カプラの設計と充てん時の充てんホースの伸縮を緩和する車両停車位置などのレイアウトへの配慮の検討が必要である。緊急離脱カプラの継手からの漏えいについては、芯出しを確実にを行い、シール面が正しく接触するように締結を行い、運転中は、合いマークによる日常的な緩みの確認と定期的なトルク管理が有効である。充てんホースとノズルの接続部からの漏えいは、充てん時の昇圧に伴うねじれによる緩みが原因と考えられる。再発防止対策として、ノズルの取り付け角度を調整し、充てん時に生じるねじれを低減させることが重要である。レセプタクルからの漏えいは、レセプタクル規格の改定に伴いシール機構が変更され、ノズル側は新規格のシール機構、車両側は旧規格のシール機構となっていたことが原因である。

ディスペンサーの開閉部からの漏えい(17件)は、すべて遮断弁であり、ほとんどがプレクーラー出口直近の遮断弁である(16件)。遮断弁の概略図を図3に示す。遮断弁の漏えい部位は、メンテナンス用プラグが9件、グランド部が8件、である。メンテナンス用プラグの漏えい(9件)は、Oリングからの漏えいである。Oリングは低温高圧水素環境において、添加している可塑剤の成分が抜け出し、性能が劣化した(弾性が失われ元の形状に戻らなくなった)ためと推定される。再発防止対策として、バルブメーカーは低温高圧水素環境に適合するOリングを入手できなかったために、メンテナンス用プラグ部分をなくした遮断弁を提供することとした。また、メンテナンス用プラグを残し、Oリングの代わりに金属ガスケットを使用する遮断弁の開発も進行している。グランド部からの漏えい(8件)は、グランドパッキンからの漏えい(7件)とメンテナンスにおいて発生したステムの縦傷からの漏えい(1件)である。グランドパッキンからの漏えい(7件)は、低

温においてグランドパッキンを抑えるねじの締結力が低かったこと、およびグランドパッキンの間に水素が入り込み締結管理を阻害したことが原因と推定される。再発防止対策として、低温におけるグランドパッキンを抑えるねじの締結力の低下を考慮し、室温よりも高めの締結力を設定するとともに、期間を定めた定期的な締結管理が行われている。一般に、締結管理はトルク管理で行う。トルク管理の際は、グランドパッキンの中に入り込んだ水素の圧抜き手順を定めて実施している。なお、グランドパッキンからの漏えいは、グランドパッキンと低温高圧水素の流路が近い場合に発生する傾向にある。バルブメーカーにおいて、グランドパッキンと低温高圧水素の流路を離れた設計が試みられている。

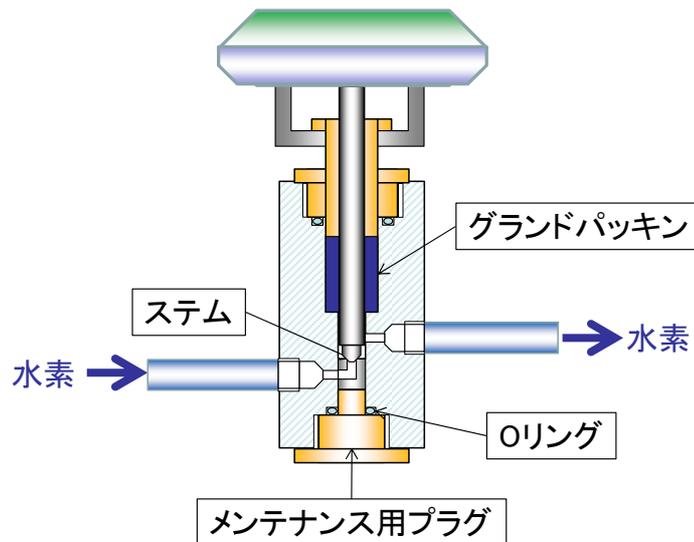


図3 遮断弁の概略図

蓄圧器の開閉部からの漏えい(6件)の内訳は、遮断弁(2件)、減圧弁(2件)、自動弁(1件)、過流防止弁(1件)である。遮断弁(2件)からの漏えいは、メンテナンス用プラグのOリング、2次側のOリングから各1件である。メンテナンス用プラグのOリングからの漏えいは、6.1ディスペンサー内の遮断弁と同じ再発防止対策が有効である。2次側のOリングからの漏えいは、Oリング溝の設計に誤りがあり、Oリングが適切なシール位置に移動できなかったことが原因である。減圧弁(2件)からの漏えいは、組立時に異物が混入しOリングに付着したことが原因である。自動弁(1件)からの漏えいは、グランドパッキンの継続使用によるシール性能低下が原因と推定される。再発防止対策として、定期的なトルク管理を行っている。過流防止弁(1件)からの漏えいは、硬度の低いOリングの誤使用が原因である。再発防止対策としては、品質管理および作業管理の徹底が必要である。

蓄圧器、圧縮機等の他の水素スタンドの機器と比較して、ディスペンサーおよびホース回りには従業員、運転者等の人が近づく設備であるため、漏えい等の事故発生を未然に防ぐことが重要である。

参考文献

- 1) 平成29年度高圧ガス事故事例データベース