

1. 目的

近年、燃料電池自動車の燃料として注目されている水素は、産業ガスとして既に種々の分野で利用されている。しかし、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。

このため、水素に着目し、水素の高圧ガス事故(以下、「水素の高圧ガス事故」という)の統計と解析の結果を示し、水素における高圧ガス事故の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。

2. 事故の抽出

2.1 事故の抽出方法

高圧ガス事故データベースを用いて、平成23年から平成26年までの4年間で発生した高圧ガス事故(1672件)のうち、物質名から水素の事故を検索し、水素の高圧ガス事故(喪失、盗難除く)を抽出した。水素の高圧ガス事故の統計を表1に示す。4年間で大きな変動はなく、水素の高圧ガス事故の4年間の合計は69件であった。以下では、4年間の合計を対象として、統計と解析の結果を示す。

表1の縦軸の分野(製造事業所、移動、消費)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」)、コンビナート等保安規則適用(以下、「コンビ」という)に細分化している。

水素の高圧ガス事故(69件)に占める分野の比率は、製造事業所(コンビ)と製造事業所(一般)が大半を占め(57%、33%)、消費(9%)と移動(1%)は少ない。また、4年間で発生した水素の高圧ガス事故(69件)に占める水素スタンドの事故件数の比率は25%となっている。

表1 4年間の水素の高圧ガス事故の統計(平成23年～平成26年)

分野	平成23年	平成24年	平成25年	平成26年	合計
製造事業所 (一般)	7 (1)	14 (6)	13 (5)	5 (4)	39 (16)
製造事業所 (コンビ)	11 (0)	5 (0)	2 (1)	5 (0)	23 (1)
消費	1	3	1	1	6
移動	0	0	0	1	1
合計	19 (1)	22 (6)	16 (6)	12 (4)	69 (17)

()内は水素スタンドの事故件数

2.2 事象の内訳

水素の高圧ガス事故の内訳を、事象と分野で分類して表2に示す。

水素の高圧ガス事故(69件)のうち、漏えい事象が事故件数の97%を占める。漏えいの

先行なしの1次事象としての爆発事象、火災事象、破裂・破損事象(以下、「爆発など」という)が事故件数に占める比率は低い。一方、漏えい後の2次事象としての爆発などは事故件数の9%を占め、1事象の爆発などの3倍となっている。漏えい事象(97%)の内訳は、漏えい②(52%)が大半を占め、漏えい①(35%)がこれに続き、漏えい③(10%)は少ない。

水素の高圧ガス事故(69件)に占める、水素スタンドの事故の比率は25%である。

表2 事象と分野で分類した水素の高圧ガス事故の統計(平成23年～平成26年)

分野	件数	漏えい			火災	破裂・破損	漏えい →爆発	漏えい →火災	
		漏えい①	漏えい②	漏えい③					
製造事業所 (一般)	39 (16)	38 (16)	12 (3)	23 (11)	3 (2)	0	1	2 (0)	1 (1)
製造事業所 (コンビ)	23 (1)	22 (1)	12	8	2 (1)	1	0	0	2
消費	6	6	0	5	1	0	0	0	0
移動	1	1	0	0	1	0	0	0	1
合計	69 (17)	67 (17)	24 (3)	36 (11)	7 (3)	1	1	2 (0)	4 (1)

()内は水素スタンドの事故件数

2.3 取扱状態の内訳

水素の高圧ガス事故の内訳を、取扱状態で分類して表3に示す。

発生した水素の高圧ガス事故(69件)のうち、運転中(42%)が最も多く、消費中(13%)、検査・点検(10%)、貯蔵中(10%)がこれに続く。

表3 取扱い状態で分類した水素の高圧ガス事故の統計(平成23年～平成26年)

取扱状態	件数	(%)
運転中	29	42
消費中	9	13
検査・点検中	7	10
貯蔵中	7	10
休止中	5	7
スタートアップ	4	6
容器交換作業中	3	4
工事中	2	3
シャットダウン	1	1
緊急シャットダウン	1	1
移動中	1	1

3. 事故の統計と解析

水素の高圧ガス事故の統計と解析の結果を以下に示す。

3.1 漏えい事象

水素の高圧ガス事故では、漏えい事象(67件)が事故全数(69件)の97%を占める。漏えい事象(100%)の詳細は、漏えい①が36%、漏えい②が54%、漏えい③が10%であり、漏えい②が大半を占める。なお、水素スタンドの漏えい事象の事故件数(17件)を除けば、漏えい

い事象(100%)の詳細は、漏えい①が 42%、漏えい②が 50%、漏えい③が 8%となる。一方、水素スタンドの漏えい事象(100%)の詳細は、漏えい①が 18%、漏えい②が 64%、漏えい③が 18%となる。

(1)漏えい①

漏えい①の内訳を表4に示す。漏えい①では、腐食(10件)と疲労(5件)が大半を占める。腐食の内訳は、配管(4件)、継手(1件)およびフレキシブルホース(1件)の外面腐食6件と、配管(3件)および熱交換器チューブシート(1件)の内面腐食が4件であった。原因は、腐食への対処が不十分な腐食管理不良である。疲労の内訳は、充てんホースの内圧変動による疲労2件、水素カードルへの取り付け作業に伴う曲げ疲労2件、バルブの開閉作動に伴う振動疲労1件である。いずれも短い使用期間で疲労が発生しており、設計時に圧力変動、曲げ、振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、水素特有の損傷である水素誘起割れ(水素脆化)が、クロムモリブデン鋼(SNCM439)製の蓄圧器とステンレス鋼(SUS630)製の圧力計のダイヤフラムで発生している。水素誘起割れを防止するために、水素環境に適合する材料選定を行うとともに、耐圧部の表面粗さ(応力集中)の軽減を図ることが必要である。

表4 漏えい①(24件)の内訳

漏えい①内訳	件数	(%)	事故原因				
			腐食管理不良	設計不良	施工管理不良	製作不良	その他
腐食	10	42	10				
疲労	5	21		5			
応力腐食割れ	2	8	1		1		
その他(水素脆化)	2	8		1		1	
その他(溶接不良)	2	8				2	
エロージョン・コロージョン	1	4	1				
その他(不明)	2	9					2
合計	24	100	12	6	1	3	2

(2)漏えい②

漏えい②の内訳を表5に示す。漏えい②では、締結部(26件)とバルブ(10件)からの漏えいがすべてである。締結部(26件)の詳細は、ねじ込み式継手(17件)、フランジ式継手(6件)、その他(3件)であり、事故原因は締結管理不良が17件、シール管理不良が6件、製作不良、検査不良および不明が各1件となっている。バルブ(10件)の事故原因は、シール管理不良が5件、検査管理不良が2件、締結管理不良、点検不良および操作基準等の不備が各1件となっている。

漏えい②全体(36件)の事故原因は、締結管理不良50%とシール管理不良31%が大半を占める。締結管理では、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、温度変動などによる運転中の締結力低下が想定される。このため、締結力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。シール管理では、材質変更、交換周期の見直しおよび点検周期の見直しが重要である。

表5 漏えい②(36件)の内訳

漏えい②内訳	件数	(%)	事故原因						
			締結管理不良	シール管理不良	検査管理不良	製作不良	操作基準等の不備	点検不良	その他
締結部(ねじ込み式継ぎ手)	17	47	11	4	1				1
締結部(フランジ式継ぎ手)	6	17	4	1		1			
締結部(その他)	3	8	2	1					
開閉部(バルブ)	10	28	1	5	2		1	1	
合計	36	100	18	11	3	1	1	1	1

(3)漏えい③

漏えい③の内訳を表6に示す。漏えい③では、誤開閉(締結部およびベント管)が3件、液封、外部衝撃などによる破裂・破損、変形が2件、開閉忘れが1件、火災による安全弁作動が1件である。漏えい③の事故原因は、誤操作など(誤操作、誤判断、認知確認ミス)3件、自然災害(地震)2件、操作基準等の不備およびその他(火災)が各1件となっている。誤操作などを防ぐためには、水素の特性を理解し、明確な操作基準を定め、確実に実施することが重要である。また、水素は漏えい後に爆発、火災が発生しやすいことを考慮し、地震、火災などの災害に際しても、設備から水素を漏えいさせない対策が必要である。なお、放出弁で水素を放出する場合には、二次災害を避けるため、安全装置を設置し、事故対応(被害拡大防止、訓練)も事前に定めることが重要である。

表6 漏えい③(7件)の内訳

漏えい③内訳	件数	(%)	事故原因			
			誤操作、誤判断、 認知確認ミス	操作基準等の不備	地震	火災
誤開閉	3	43	2	1		
液封、外部衝撃等	2	29			2	
開閉忘れ	1	14	1			
安全弁作動	1	14				1
合計	7	100	3	1	2	1

3.2 爆発事象など

漏えいの先行なしの1次事象としては、工事中の火災と運転中の破損が各1件発生している。一方、漏えい後の2次事象としては、爆発が2件、火災が4件発生している。上記の6件のうち4件が、検査・点検の2次事象である。表3を参照して、検査・点検中の漏えい事象(7件)は、爆発、火災に至る可能性が高いことがわかる。

4. 爆発事故などの実例

水素の高圧ガス事故のうちで、爆発事故、火災事故、破裂事故(以下、「爆発事故など」という)の実例を、以下に示す。

(1)漏えいの先行なしの爆発事故など

漏えいの先行なしの1次事象としては、工事中の火災と運転中の破損が各1件発生している。以下に、実例を示す。なお、末尾の()内は、事故が発生した県名と業種を示す。

- ①熱交換器の開放時に火災が発生した。仕切板を挿入するため熱交換器の出口側配管フランジを開放したところ、配管内のスケール(主成分:硫化鉄)が排出されて自然発火し、水素に引火した。開放前には窒素パージにより系内の可燃性ガス(水素および炭化水素)の排出を行っていたが、閉止していたバルブにシート漏れがあり、系外から水素が流入していた。事故原因は、開放する部分の前後のバルブの閉止が完全に行われていなかった誤操作などである。(北海道、石油精製)
- ②貯槽の真空二重殻断熱層の安全装置である破裂板が作動した。なお、破裂板が作動した原因は特定できていない。(栃木県、自動車)

(2)漏えい後の爆発事故など

漏えい後の2次事象としては、爆発が2件、火災が4件発生している。上記の6件のうち4件が、検査・点検中の事故である。以下に、実例を示す。なお、末尾の()内は、事故が発生した県名、業種および事象を示す。

- ①屋上に設置していた水素の圧縮機ユニットの感震装置が地震により作動し、バッファタンクから付近配管までが供給停止した。同時に、圧縮機ユニットのフレキシブル管、出口配管が地震により破損し、水素が漏えいした。圧縮機ユニットは密閉された防音ケース内に置かれており、ケース内に漏えいした水素が滞留し、何らかの原因で着火して爆発した。(栃木県、自動車、漏えい③→爆発)
- ②試験設備に設置されている複数の水素ガスのバルブを閉止し、窒素ガスでパージした後、点火装置の点検を開始した。複数のバルブのうちの最終段のバルブに異物がはさまり、水素が漏えいし、点火装置を作動させたところ、着火し、大音響を発生した。なお、作業員が耳に不調を訴えた。(宮城県、研究所、漏えい②→爆発)
- ③水素圧縮機の配管の補修中に、グラインダーから発生した火花がドレン弁から排出、水素に着火した。他施設のパージを行った際に、パージ配管の縁切りが不十分であり、水素がドレン弁まで逆流したことが原因と推定される。(茨城県、一般化学、漏えい②→火災)
- ④保安検査のために、水素ホルダーから水素の放出を行ったところ、緊急放出管開口部で着火した。緊急放出弁開操作時に開度を上げた状態で緊急放出起動ボタンを押したために、水素が急激に放出したことが原因と推定される。(茨城県、一般化学、漏えい③→火災)
- ⑤圧縮水素容器を運搬中の車両でタイヤバーストによる火災が発生し、容器が炙られたために溶栓弁が作動した。(神奈川県、運送、漏えい③→火災)
- ⑥蓄圧器内の異物を除去するために掃除機で吸引作業を行ったところ、使用していた掃除機が爆発し、作業員1名が軽傷(火傷)を負った。作業前には、窒素置換により蓄圧器内の水素を排出し、検知器で蓄圧器内には水素がないことを確認している。しかし、蓄圧器と水素製造装置にベントラインが連結されており、蓄圧器とベントラインの間の弁が開となっていた。掃除機で蓄圧器内のガスを吸引したことにより、水素製造装置からベントガス(水素)が蓄圧器内に流入し、掃除機内で着火したことが原因と推定される。(大阪府、スタンド、漏えい③→火災)

5. 事故に関連する法規、基準

水素の高圧ガス事故(69件)のうち、漏えい後の爆発などに伴う人身事故が2件発生し

ている。いずれの人身事故も、設備の点検を行う際に縁切りを確実に実施していなかったために、他の設備から水素が流入し、滞留した水素に着火して爆発、火災に至っている。

高圧ガス保安法では、第一製造者および第二種製造者は経済産業省に定める技術上の基準に従って高圧ガスの製造をしなければならないと定めている(法第11条第2項、法第12条第2項)。ガス設備の開放についても製造行為に該当するため、経済産業省に定める技術上の基準に従うこととなっている。具体的な経済産業省に定める技術上の基準(一般高圧ガス保安規則)および機能性基準の運用(一般高圧ガス保安規則関係例示基準)を以下に示す。

(1) 一般高圧ガス保安規則 第6条第2項第5号

ガス設備の修理又は清掃(以下この号において「修理等」という。)及びその後の製造は、次に掲げる基準によることにより保安上支障のない状態で行うこと。

- イ 修理等をするときは、あらかじめ、修理等の作業計画及び当該作業の責任者を定め、修理等は、当該作業計画に従い、かつ、当該責任者の監視の下に行うこと又は異常があつたときに直ちにその旨を当該責任者に通報するための措置を講じて行うこと。
- ロ 可燃性ガス、毒性ガス又は酸素のガス設備の修理等をするときは、危険を防止するための措置を講ずること。
- ハ 修理等のため作業員がガス設備を開放し、又はガス設備内に入るときは、危険を防止するための措置を講ずること。
- ニ ガス設備を開放して修理等をするときは、当該ガス設備のうち開放する部分に他の部分からガスが漏えいすることを防止するための措置を講ずること。
- ホ 修理等が終了したときは、当該ガス設備が正常に作動することを確認した後でなければ製造をしないこと。

(2) 一般高圧ガス保安規則関係例示基準 50. 設備の修理又は清掃 「別紙」参照。

6. 注意事項

6.1 漏えい事象

(1) 漏えい①

漏えい①(24件)では、腐食(10件)と疲労(5件)が大半を占める。腐食(10件)の内訳は、外面腐食6件と内面腐食4件であり、いずれも原因は腐食への対処が不十分な腐食管理不良である。疲労(5件)は、いずれも短い使用期間で発生しており、設計時に圧力変動、曲げ、振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、水素特有の損傷である水素誘起割れが2件発生している。水素誘起割れを防止するために、水素環境に適合する材料選定を行うとともに、耐圧部の表面粗(応力集中)の軽減を図ることが必要である。

(2) 漏えい②

漏えい②(36件)では、締結部(26件)とバルブ(10件)からの漏えいがすべてである。

漏えい②(36件)の事故原因は、締結管理不良 50%とシール管理不良 31%が大半を占める。締結管理では、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、温度変動などによる運転中の締結力低下が想定される。このため、締結力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。シール管理では、材質変更、交換周期の見直しおよび点検周期の見直しが重要である。

(3)漏えい③

漏えい③(7件)では、誤操作など(3件)と自然災害(地震)およびその他(火災)(3件)が事故原因の大半を占める。誤操作などを防ぐためには、水素の特性を理解し、明確な操作基準を定め、確実に実施することが重要である。また、水素は漏えい後に爆発、火災が発生しやすいことを考慮し、地震、火災などの災害に際しても、設備から水素を漏えいさせない対策が必要である。

なお、放出弁で水素を放出する場合には、二次災害を避けるため、安全装置を設置し、事故対応(被害拡大防止、訓練)も事前に定めることが重要である。

6.2 爆発事象など

水素の爆発事象、火災事象は合計7件(爆発2件、火災5件)発生している。爆発、火災は、1次事象(火災1件)よりも、水素の漏えい後の2次事象(爆発2件、火災4件)として多く発生している。水素の最少発火エネルギーが小さいことを考慮すると、水素の爆発事象などの未然防止には、先行する漏えい事象への対処が有効である。可燃性ガスの高圧ガス設備の検査・点検中または工事中に爆発、火災が多数発生している。水素の高圧ガス設備についても、以下の点について注意が必要である。

(1)検査・点検中または工事中

大半の爆発、火災が検査・点検中または工事中に発生している。不活性ガスによる置換が不十分な場合、他の部分からの漏えいを防止するための措置が適切に実施されていない場合には、高圧ガス設備の開放により水素が漏えいし、点火確認、グラインダーなどの火気の取扱い、または流動摩擦、静電気などが着火源となり、爆発、火災に至る恐れがある。高圧ガス設備を開放し、作業を行う場合には、作業前に検知器により作業場所の水素濃度が1%(10,000ppm)以下であることを確認するとともに、開放部分の前後のバルブをダブルブロック(バルブを2重に設けて閉止)するか、または配管の継手に仕切り板を挿入することが重要である。

(2)検知器使用時

水素濃度を測定する検知器には種々の検知原理方式があるので、検知場所の雰囲気想定し、適切な検知器を使用する。例えば、接触燃焼式は空気(酸素)がないと正常燃焼できなくなり、水素濃度が低く検知される場合がある。

(3)ダブルブロックまたは仕切り板の使用時

高圧ガス設備の内部で発生した異物(反応副生成物、腐食生成物など)がはさまり、バルブまたは仕切り板による閉止を妨げる場合がある。バルブまたは仕切り板も、必

要に応じて自主的に検査し、異物を除去することが必要である。

(4)水素火炎の検知

水素が単独で燃焼する場合は、火炎が無色で目視では検知できない。水素火炎には、紫外線を利用する検知装置の設置が有効である。

6.3 水素スタンドの普及に向け

水素スタンドではこれまでに腐食による漏えいは報告されていない。これは、設置年数がまだ短いことと保温材がほとんど使用されていないためと推測される。しかし、今後設置年数の経過により腐食の発生が予想されるため、水素スタンドにおいても適切な腐食管理が必要である。

また、今後の水素スタンドの増設に伴い、水素スタンドの点検、検査および工事による火気の持ち込みの増加も予想される。水素スタンドは水素を大量に保有する高圧ガス設備であることから、爆発、火災に配慮した作業が求められる。なお、水素スタンドでは、一般高圧ガス保安規則関係例示基準「59の2. 火炎を検知するための措置」において、紫外線を検知する方法により、常時、水素火炎の発生を監視することが規定されている。

一般高圧ガス保安規則関係例示基準 50. 設備の修理又は清掃【抜粋】

2. 可燃性ガス、毒性ガス又は酸素のガス設備等の修理等を行う場合は危険を防止するために、次の各号の基準によりあらかじめ、その内部のガスを窒素ガス又は水等の当該ガスと反応しにくいガス又は液体で置換するものとする。
 - 2.1 可燃性ガスのガス設備等の場合
 - (1) ガス設備等の内部のガスをその圧力がほぼ大気圧近くなるまで他の貯槽等に回収した後、残留したガスを徐々に大気中に安全に放出し、又は燃焼装置に導き燃焼させること等により大気圧になるまで放出すること。
 - (2) (1)の処理をした後、残留ガスを窒素ガス又は水若しくはスチーム等の当該ガスと反応しにくいガス又は液体で徐々に置換すること。この場合、ガスの放出方法は、(1)の方法によること。
 - (3) (1)及び(2)の残留ガスを大気中に放出する場合にあっては、放出したガスの着地濃度が当該可燃性ガスの爆発下限界の1/4以下の値になるよう放出管から徐々に放出させる方法により行うこと。この確認は、ガス検知器その他それぞれのガスに適合するガス分析方法(以下「ガス検知器等」という。)で雰囲気进行分析することにより行うこと。
 - (4) 置換の結果をガス検知器等により測定し、当該可燃性ガスの濃度がそのガスの爆発下限界の1/4以下の値になったことを確認するまで置換を行うこと。
4. ガス設備等を開放して修理等を行う場合、他の部分からのガスの漏えいを防止するための措置は、その作業の内容等に応じ次の4.1又は4.2及び4.3の基準により行うものとする。
 - 4.1 2. の措置(不活性ガスの場合にあっては、これに準じて行う措置。以下4.1において同じ。)が完了した後(当該開放する部分に設けた回収用配管等から直接ガスを回収する場合にあっては、2. の措置を行う前)に、開放する部分の前後のバルブを確実に閉止し、かつ、開放する部分におけるバルブ又は配管の継手に仕切板を挿入すること。ただし、2.4に規定する場合にあっては、仕切板の挿入を省略することができる。
 - 4.2 設備の機能上又は作業上、しばしば開放する必要がある設備に対する作業(2.4に規定する場合のものに限る。)については、4.1の基準又は次の(1)若しくは(2)の基準によるものとする。(1)若しくは(2)の基準による場合は、当該作業の基準を危害予防規程(消費施設にあっては作業基準)に明確に規定しておくこと。
 - (1) 開放する設備に接続する配管の出入口は、バルブをそれぞれ二重に設け、その中間の回収用配管等からガスを回収又は放出できる構造とし、その回収用配管等からガスを回収又は放出(毒性ガスに係る設備にあっては回収に限る。)して、開放する部分にガスの漏えいがないことを確認すること。この場合、大気圧以下のガスは回収又は放出しないことができる。
 - (2) 開放する部分及びその前後の部分の常用の圧力がほぼ大気圧に近い圧力の設備(毒性ガス以外のガスに係るものであって、圧力計を設けた設備に限る。)にあっては、当該設備に接続する配管のバルブを確実に閉止し、当該部分にガスの漏えいがないことを確認すること。

- 4.3 4.1又は4.2の措置を講じたときは、バルブ（操作ボタン等により当該バルブを又はコックを開閉する場合にあつては当該操作ボタン等）の閉止箇所又は仕切板の挿入箇所に操作又は取外しの禁止を明示する標示を施すとともに、施錠、封印又は監視員を配置する等の措置を講ずること。

この場合、計器盤等に設けた操作ボタン及びハンドル等にも同様の措置を講ずること。