

第 2 回検討会における指摘事項に対する回答

1 資料 2-1-2 水素と天然ガス（CNG）との物性の比較について

【指摘事項 1】シミュレーションの計算モデル、当時の設定条件及びデータ等を確認すること

「燃料電池自動車用水素スタンドを給油取扱所に併設する場合の安全性に関する調査検討報告書」（平成 16 年 3 月 危険物保安技術協会）における水素と CNG（メタン）の火災・爆発を想定した比較シミュレーションでは、米国 SAFER 社の TRACE を使用している。

（1）TRACE の概要

TRACE は、大気放出のアルゴリズムによる有害化学物質の影響、火災・爆発アルゴリズムによる放射熱及び爆風圧の影響等のシミュレーションを実施するソフトウェアである。

（2）条件の設定方法

第 2 回検討会で示した水素と CNG（メタン）の火災・爆発を想定した比較シミュレーションでは、TRACE を用いて、表 1 の条件を設定してシミュレーションを実施したことが確認できたが、その条件の設定方法については、委託業者等に確認しても分からなかった。

表 1 シミュレーションの条件（再掲）

項目	条件
日照	800W/m ²
気温	40℃
湿度	70%
放出箇所	地表面上
放出流量	0.1,0.5,1,5,10,50,100Nm ³ /min
放出時間	10min
着火時間	放出終了後 10 分経過した時点
火災形態	フラッシュ火災
爆発形態	漏えい物質の化学量論的な蒸気雲爆発
天然ガス成分	主成分であるメタンに置き換え

【指摘事項 2】物性に関する最新の文献等あれば確認すること

水素と CNG（メタン）の拡散挙動等の差異を示す文献等については、燃料電池実用化推進協議会や（一般財団法人）石油エネルギー技術センター、（一般社団法人）水素供給利用技術協会等に確認したが、参考になる新たな資料はなかった。そのため、第 2 回検討会で提示した「水素と天然ガス（CNG）との物性の比較について」は“参考”とさせていただく。

また、水素と CNG（メタン）の物性については、「燃料電池自動車用水素スタンドを給油取扱所に併設する場合の安全性に関する調査検討報告書」（危険物保安技術協会 平成 16 年 3 月）において、表 2 のとおり比較されている。

表2 水素とCNG（メタン）の物性比較表

物 性	単 位	水 素	メタン	備 考
化学式	—	H ₂	CH ₄	
分子量	—	2.0158	16.043	
比重	空気=1	0.0695	0.55	※CNGのガス比重は0.56~0.68
ガス密度(常圧、20℃)	kg/m ³	0.0838	0.651	
液密度	kg/m ³	71	423	
臨界温度	℃	-239.9	-82.6	
臨界圧力	MPa	1.298	4.596	
臨界密度	kg/m ³	30.1	162.8	
沸点	℃	-252.9	-161.5	
三重点	℃	-252.2	-182.5	
蒸発潜熱(沸点)	kJ/kg	446	510	
融解潜熱(三重点)	kJ/kg	58.2	58.5	
定圧比熱(C _p) (常圧、25℃)	kJ/kg・℃	14.4	2.31	
定容比熱(C _v) (常圧、25℃)	kJ/kg・℃	10.2	1.72	
粘度(常圧、20℃)	Pa・s	8.8×10 ⁻⁶	10.8×10 ⁻⁶	
熱伝導率(常圧、20℃)	W/m・K	0.182	0.084	
総発熱量(GCV) 〔高発熱量(HHV)〕	MJ/m ³ MJ/kg	12.8 142	40.0 55.9	25℃の単位量の燃料を乾燥空気中で完全燃焼させた燃焼ガスを、もとの25℃まで冷却する時に計測される熱量を発熱量と言うが、この時、生成水蒸気の凝縮潜熱を含めた熱量を総発熱量(高発熱量)と言い、発電効率や都市ガスの基準に採用されている。
真発熱量(NCV) 〔低発熱量(LHV)〕	MJ/m ³ MJ/kg	10.8 120.0	35.9 50.1	上記、生成水蒸気の凝縮潜熱を含めない熱量を真発熱量(低発熱量)と言い、民生用ボイラーの効率やガスタービンの発電効率の基準に採用されている。
発火温度(点)	℃	空気中：572 酸素中：450	空気中：580	爆鳴気が自ら燃焼を開始(自然発火)する発火温度は約400℃であるが、白金、パラジウム、ニッケル等の触媒存在下では常温でも容易に反応する。
爆発範囲	Vol%	空気中：4.0~75.0 酸素中：4.5~94.0	空気中：5.0~15.0 酸素中：5.0~60.0	水素の爆発範囲はアセチレンに次いで広い。特に水素の場合、酸素1容水素2容の割合の混合物は燃焼量が最大となるので爆鳴気と呼ばれている。
爆轟範囲	Vol%	空気中：18.3~59.0 酸素中：15.0~90.0	空気中：6.5~12.0	可燃ガスの濃度が完全燃焼の組成に近い場合、燃焼時の火炎伝播速度が音速を超える場合がある。この状態を爆轟(デトネーション)と呼ぶ。爆轟は発生圧力が初圧の40倍以上となり衝撃波の発生を伴う。
拡散係数(常圧、20℃、空気中)	m ² /s	6.1×10 ⁻⁵	1.6×10 ⁻⁵	
音速(0.101MPa、25℃)	m/s	1308	449	
最小着火エネルギー	mJ	0.02	0.28	高圧水素ガスが容器から配管から噴出する場合、静電気等の小さなエネルギーで着火する危険性がある。ただし、噴出が純粋な水素ガスのみの場合、静電気は貯まり難いが、錆び、ダスト、水分ミスト等が混じると着火に及ぶ危険性が高い。
爆発時のエネルギー	MJ/m ³	9.3	32.3	
理論混合比(空気中)	Vol%	29.53	9.48	
火炎温度	℃	空気中：2045 酸素中：2660	空気中：1875	
最大燃焼速度(0.1MPa)	m/s	空気中：2.65 酸素中：14.36	空気中：0.4 酸素中：3.9	
水への溶解度(常圧、20℃)	ML(g/L)/L	18.2	33.0	

※CNGはメタンを81~99.6%含むため、CNGの主成分としてメタンと水素を比較する。

(出典)「水素の物性と安全ガイドブック」(新エネルギー・産業技術総合開発機構 平成15年2月)

「CNG自動車用燃料供給施設を給油取扱所に併設等する場合の安全性に関する調査検討報告書」(危険物保安技術協会 平成7年3月)

2 資料2-1-3 圧縮水素スタンドと圧縮天然ガススタンドの高圧ガス保安法令上の差異及び水素スタンドの近年の事故事例の考察について

【指摘事項3】水素に対応した防爆構造、水素スタンドの防爆範囲等の基準を確認すること

(1) 圧縮水素スタンドに係る高圧ガス保安法令等の位置付け

圧縮水素スタンドに係る技術基準については、一般高圧ガス保安規則（昭和41年通商産業省令第53号）第7条の3及びコンビナート等保安規則（昭和61年通商産業省令第88号）第7条の3に規定されている。

技術基準の詳細は、業界団体の自主基準等により補完して運用されており、ディスペンサー周辺の危険箇所の区分や範囲等については、「ディスペンサー周辺の防爆基準」（JPEC-S 0004）に示されている。

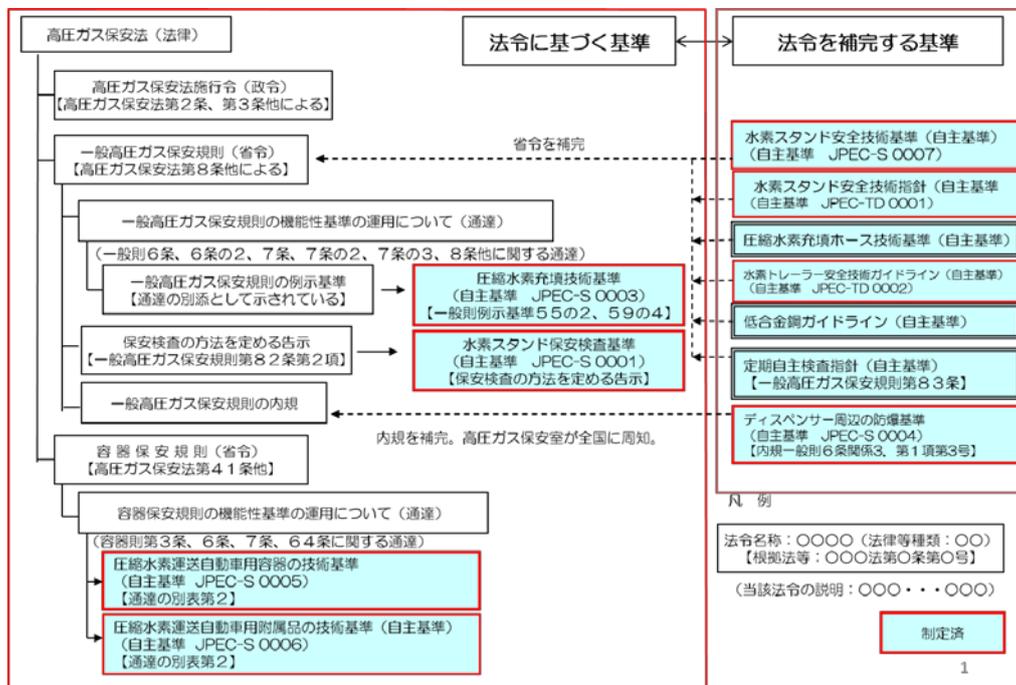


図1 圧縮水素スタンドに係る高圧ガス保安法令等の位置付け

(2) 危険箇所の区分の分類

我が国では、防爆電気機器に関する規格として「電気機器防爆構造規格」（昭和44年労働省告示第16号。以下「構造規格」という。）がある。構造規格における危険箇所は、爆発性雰囲気が存在する時間と頻度に応じて分類することになっており、特別危険箇所、第一類危険箇所、第二類危険箇所の三つの区分に分類される。

特別危険箇所：爆発性雰囲気が通常の状態において、連続して又は長時間にわたって、若しくは頻繁に存在する場所をいう。

第一類危険箇所：通常の状態において、爆発性雰囲気をしばしば生成する可能性がある場所をいう。

第二類危険箇所：通常の状態において、爆発性雰囲気を生成する可能性が少なく、また生成した場合でも短時間しか持続しない場所をいう。

(3) 水素ディスペンサー周辺の危険箇所の区分と範囲

「ディスペンサー周辺の防爆基準」(JPEC-S 0004)によると、圧縮水素スタンドにおけるディスペンサー周辺の危険箇所の区分と範囲については、JIS C 60079-10:2008 (爆発性雰囲気中使用する電気機械器具 第10部:危険区域の分類)により算出することになっている。表3の「ディスペンサーの設定条件」に示す放出源の総数と放出量の場合は、ア、イ及びウのとおりとなっている。

なお、表3の条件に合致しない場合も、個別に計算することにより、危険箇所の区分と範囲を設定することができる。

表3 ディスペンサーの設定条件

常用の圧力	82MPa 以下
放出源 1 箇所当たりの放出量	54.38 ml/min 以下
放出源の総数	234箇所 以下
放出源	弁類のグランドシール及び配管等のねじ接合継手

(出典)「ディスペンサー周辺の防爆基準 JPEC-S 0004 (2014)」(一般財団法人石油エネルギー技術センター 平成26年4月3日改正)

ア ディスペンサー内部の危険箇所

ディスペンサー内部は、構造規格に定める第一類危険箇所とする。その例図を図2に示す。

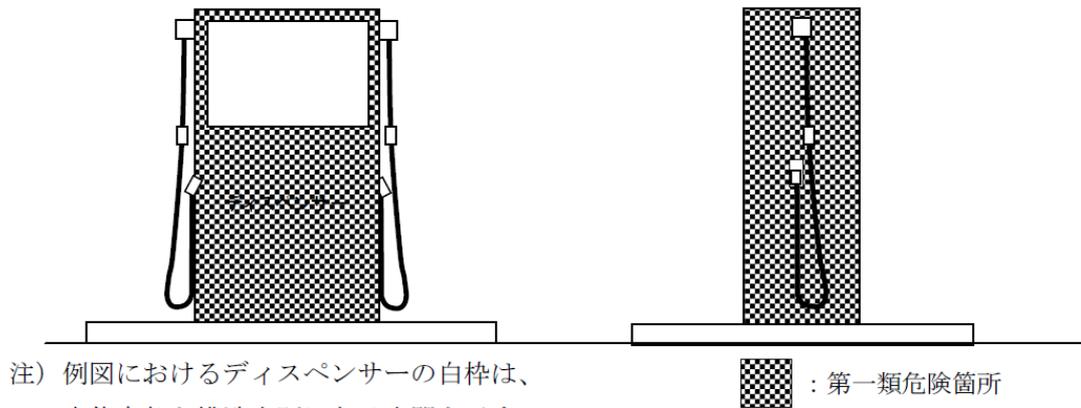
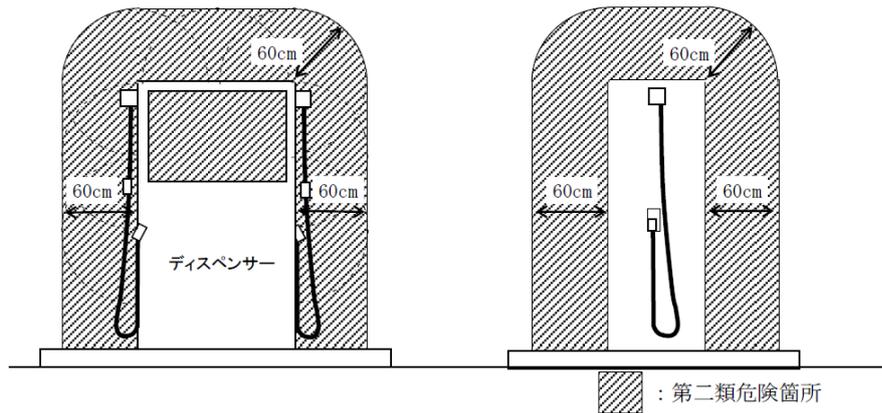


図2 ディスペンサー内部の危険箇所 (例図)

(出典)「ディスペンサー周辺の防爆基準 JPEC-S 0004 (2014)」(一般財団法人石油エネルギー技術センター 平成26年4月3日改正) (以下図3・4も同じ。)

イ ディスペンサー外部の危険箇所

ディスペンサー外部の危険箇所は、本体の外表面から周囲60cmの範囲を構造規格に定める第二類危険箇所とする。その例図を図3に示す。

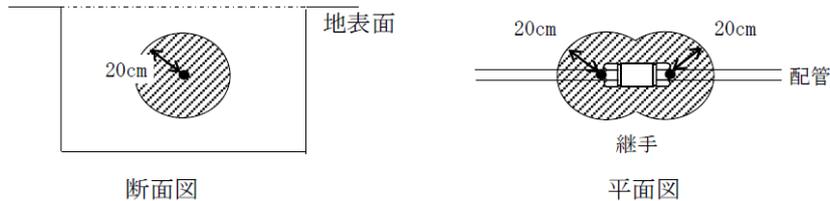


※ディスペンサーの防爆範囲にホースは含まない。

図3 ディスペンサー外部の危険箇所（例図）

ウ 接続配管の危険箇所

接続配管の危険箇所は、ねじ接合継手等の放出源の周囲 20cm の範囲を構造規格に定める第二類危険箇所とする。その例図を図4に示す。



●：放出源（ねじ接合継手）

図4 接続配管の危険箇所（例図）

(4) 防爆構造の選定

各危険箇所所で求められる電気機器の防爆構造については、表4のとおり、危険箇所の種別によって異なり、危険箇所に対応した防爆構造を選定する必要がある。

表4 電気機器の防爆構造の選定の原則

電気機器の防爆構造の種類と記号			使用に適した危険箇所の種別			電気機器の防爆構造の種類と記号			使用に適した危険箇所の種別		
指針名称	防爆構造の名称	記号	特別危険箇所	第一類危険箇所	第二類危険箇所	指針名称	防爆構造の名称	記号	特別危険箇所	第一類危険箇所	第二類危険箇所
工場電気設備防備指針 (ガス蒸気防爆指針1979)	本質安全防爆構造	i	○	○	○	技術的基準	本質安全防爆構造	ia	○	○	○
	耐圧防爆構造	d	×	○	○		ib	×	○	○	
	内圧防爆構造	f	×	○ ^{M2}	○		d	×	○	○	
	安全増防爆構造	e	×	×	○		p	×	○ ^{M2}	○	
	油入防爆構造	o	×	○ ^{M1}	○		e	×	○	○	
	特殊防爆構造	s	—	—	—		o	×	○	○	
工場電気設備防備指針 (ガス蒸気防爆指針2006)	本質安全防爆構造	ia	○	○	○	国際整合防爆指針	本質安全防爆構造	ia	○	○	○
		ib	×	○	○		ib	×	○	○	
	耐圧防爆構造	d	×	○	○		d	×	○	○	
	内圧防爆構造	f	×	○ ^{M2}	○		px, py	×	○ ^{M2}	○	
	安全増防爆構造	e	×	×	○		e	×	○	○	
	油入防爆構造	o	×	○ ^{M1}	○		o	×	○	○	
	非点火防爆構造	nA, nC, nR, nL	×	×	○		非点火防爆構造	nA, nB, nR, nL	×	×	×
	樹脂充填防爆構造	ma	○	○	○		樹脂充填防爆構造	ma	○	○	○
	mb	×	○	○	mb	×	○	○			
	s	—	—	○	特殊防爆構造	s	—	—	—		

(出典)「ディスペンサー周辺の防爆基準 JPEC-S 0004 (2014)」(一般財団法人石油エネルギー技術センター 平成26年4月3日改正)

(5) 可燃性ガスの危険特性について

構造規格では、防爆電気機器の対象とする可燃性ガスを表5のとおり、その火炎逸走限界の値によって1、2及び3の3段階の「爆発等級」に分類し、更に表6のとおり、その発火温度の値によって、G1、G2、G3、G4及びG5の5段階の「発火度」に分類している。構造規格による防爆電気機器における爆発等級及び発火度の記号は、当該電気機器が使用できるガス雰囲気を示すものであり、その記号より小さい数値の爆発等級及び発火度の可燃性ガス蒸気内の使用も含め防爆性能が保証されていることを示している。

表5 可燃性ガスの爆発等級の分類

爆発等級	火炎逸走限界の値 (25mmの奥行において火炎逸走を生じる時の最小値)	ガスの例*
1	0.6mmを超えるもの	ガソリン・メタン
2	0.4mmを超え、0.6mm以下のもの	プロパン
3	0.4mm以下	3a 水性ガス・水素
		3b 二酸化炭素
		3c アセチレン
		3n 爆発等級3のすべてのガス

表6 可燃性ガスの発火度の分類

発火温度(°C)	発火度	電気機器の許容温度(°C)
450を超えるもの	G1	360
300を超え450以下のもの	G2	240
200を超え300以下のもの	G3	160
135を超え200以下のもの	G4	110
100を超え135以下のもの	G5	80

備考：電気機器の許容温度は周囲温度40°Cを含む

表7 代表的な可燃性ガスの爆発等級、発火度

物質名	爆発等級	発火度	発火温度 (°C)	引火点 (°C)	爆発限界		蒸気密度 (空気=1)
					下限vol%	上限vol%	
水素	3	G1	500	ガス	4.0	75	0.07
ガソリン	1	G3	~260	<-20	1.0	7	3~4
メタン	1	G1	537	ガス	5.0	15	0.55
プロパン	1	G2	432	ガス	2.1	9.5	1.56

※CNGはメタン、エタン、プロパン等から成るガスであり、メタンを主成分(81~99.6%)としている。

(出典)「ディスプレイ周辺の防爆基準 JPEC-S 0004 (2014)」(一般財団法人石油エネルギー技術センター 平成26年4月3日改正)

【参考】「工場電気設備防爆指針(国際規格に整合した技術指針2008)」

独立行政法人労働安全衛生総合研究所発行の技術指針「工場電気設備防爆指針(国際規格に整合した技術指針2008)」(以下「技術指針」という。)は、平成22年8月24日厚生労働省通達(基発0824第2号)において、構造規格に適合するものと同様以上の防爆性能を有することを確認するための基準として認められている。

技術指針では、爆発性ガスを直接分類することはせず、工場・事業場用の防爆電気機器をグループIIと分類し(グループIは鉱山内で使用する防爆電気機器)、さらに、耐圧防爆構造及び本質安全防爆構造の電気機器を、対応する爆発性ガスの爆発特性を考慮して、IIA、IIB、IICに分類している(表8、表9)。また、すべての電気機器について、対応する可燃性ガスの発火温度を考慮して、T1、T2、T3、T4、T5及びT6の6段階の温度等級に分類している(表10)。

表 8 最大安全すきまに対応する防爆機器の分類

耐圧防爆構造の 電気機器のグループ	最大安全すきま (mm)
IIA	0.9 以上
IIB	0.5 を超え 0.9 未満
IIC	0.5 以下

表 9 最小点火電流に対応する防爆電気機器の分類

本質安全防爆構造の 電気機器のグループ	最小点火電流比(メタン=1)
IIA	0.8 を超えるもの
IIB	0.45 以上 0.8 以下
IIC	0.45 未満

表 10 電気機器の温度等級に対応する可燃性ガス蒸気の分類

電気機器の最高表面温度 (°C)	温度等級	可燃性ガス蒸気の発火温度の値 (°C)
450 以下	T1	450 を超えるもの
300 以下	T2	300 を超え 450 以下
200 以下	T3	200 を超え 300 以下
135 以下	T4	135 を超え 200 以下
100 以下	T5	100 を超え 135 以下
85 以下	T6	85 を超え 100 以下

※ ガソリン：防爆機器の分類→IIA、温度等級→T3

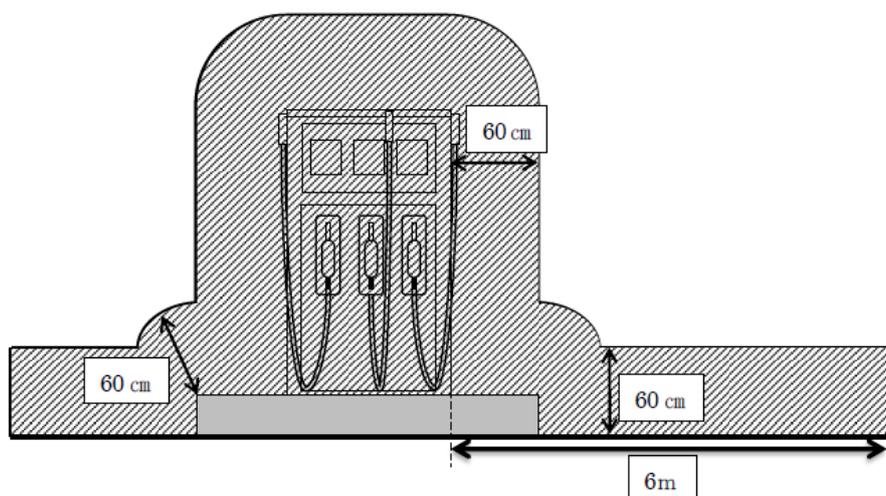
水素：防爆機器の分類→IIC、温度等級→T1

(出典)「労働安全衛生総合研究所技術指針 ユーザーのための工場防爆設備ガイド」(労働衛生総合研究所 平成 24 年 11 月 1 日)

【参考】給油取扱所における可燃性蒸気の滞留範囲について

「給油取扱所に電気自動車用急速充電設備を設置する場合における技術上の基準の運用について」(平成 24 年 3 月 16 日付け消防危第 77 号)において、給油取扱所内におけるガソリン等の可燃性蒸気が滞留するおそれのある範囲を以下のとおり示している。

- (1) 懸垂式以外の固定給油設備にあっては、固定給油設備の端面から水平方向 6 m までで、基礎又は地盤面からの高さ 60cm までの範囲、かつ固定給油設備の周囲 60cm までの範囲 (図 5)



※斜線部分は可燃性蒸気滞留範囲

図 5 固定給油設備 (エアギャップがない場合) の周囲の可燃性蒸気滞留範囲

(2) 通気管の先端の中心から地盤面に下ろした垂線の水平方向及び周囲 1.5m までの範囲 (図 6)

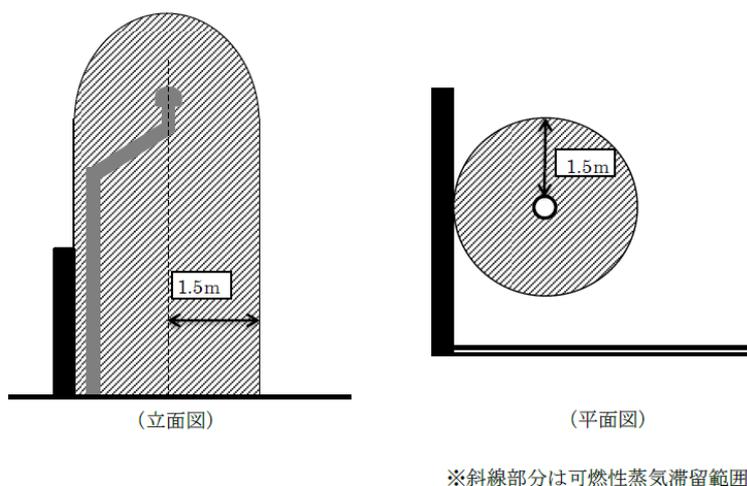


図 6 通気管の周囲の可燃性蒸気滞留範囲

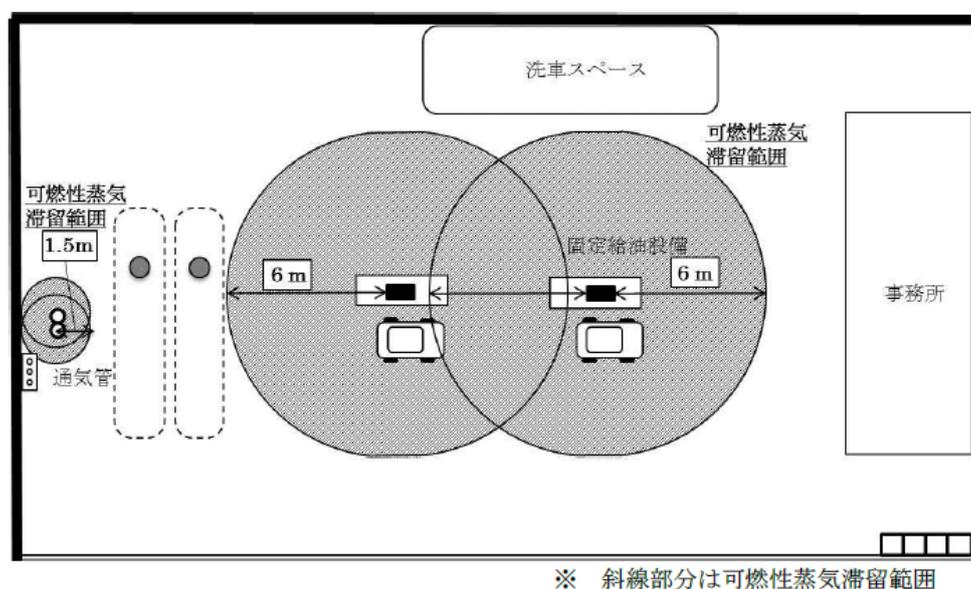


図 7 給油取扱所の可燃性蒸気滞留範囲 (平面図)

【指摘事項 4】平成 23 年、24 年の経済産業省の検討での、70MPa でガス配管のピンホールによる火炎が噴出した場合の火炎長のシミュレーション実験について追記すること

70MPa 水素スタンドにおけるピンホールによる火炎の影響については、「70MPa 水素スタンド技術基準検討委員会報告書 (高圧ガス保安協会 (平成 23 年度))」において実験・シミュレーションを用いた検証を行っており、以下にその結果を示す。

(1) 想定した火災

ピンホールから漏洩した水素ガスに着火させた際に発生する拡散爆発及び噴出火炎を想定し、爆風圧、火炎長、輻射熱について、実験・シミュレーションを行っている。

ピンホールの口径は 1.0mm (40MPa 水素スタンド時の実験・シミュレーションと同条件) に設定し、噴出圧力 80MPa (82MPa) 時の影響を確認している。

(2) 実験シミュレーション結果

70MPa 水素スタンドにおけるピンホール火災の実験・シミュレーション結果については、以下のとおり。

表 11 70MPa と 35MPa 水素スタンドの実験・シミュレーション結果の比較

		35MPa 水素スタンドの 実験・シミュレーション結果	70MPa 水素スタンドの 実験・シミュレーション結果
拡散爆発	爆風圧	6m 地点で 0.2kPa (2m 地点で 1kPa 未満)	6m 地点で、0.4kPa (4m 地点で 1kPa)
噴出火災	火炎長	2.5m	80MPa の時、3.34m (82MPa の時、3.39m)
	輻射熱	3.7m 地点で、 1,080kcal/m ² hr	約 5m 地点で、 1,080kcal/m ² hr

上記の高圧ガス保安協会による 70MPa 水素スタンドの検証結果を踏まえ、消防庁では、「圧縮水素充てん設備設置給油取扱所の安全対策に係る検討報告書（消防庁危険物保安室（平成 23 年度）」）をとりまとめ、70MPa 水素スタンドを併設する給油取扱所について、以下の検討結果が得られている。

「70MPa の水素充てん設備等については、高圧ガス保安法令に基づき性能規定的に充てん圧力に応じた安全対策が講じられることから、従来の 35MPa の場合と同等の安全性が確保されると考えられる。このことから、給油取扱所に 70MPa の圧縮水素充てん設備を設置することについては、消防法令における付加的な安全対策を講ずる必要はなく、現行の消防法令に規定される技術基準及び高圧ガス保安法令上の技術基準に適合することにより、安全性は確保されるため、可能とすることが適当である。」

なお、ガス配管からのピンホール火災について、危険物の規制に関する規則第 27 条の 5 第 5 項第 3 号ト（3）にて「液化水素配管又はガス配管から火災が発生した場合に給油空地等及び専用タンク等の注入口への延焼を防止するための措置を講ずること。」とされており、平成 17 年 3 月 24 日付け消防危第 62 号「圧縮水素充てん設備設置給油取扱所の技術上の基準に係る運用上の指針について」において、ガス配管の周囲に防熱板を設置すること等の安全対策が示されており、70MPa 水素スタンドとの併設においても、同様の安全対策が求められている。

3 資料 2-1-4 固定給油設備に関する事故事例を踏まえた安全対策の検討について

【指摘事項 5】水素自動車と天然ガス自動車の安全弁作動時の状況について、それぞれの充填圧を確認し、70MPa のデータもあれば、提示すること

資料に示した水素自動車と天然ガス自動車の比較実験については、「圧縮水素容器搭載自動車の火災安全性—ガソリンおよび、天然ガス車との比較—」(平成 22 年度日本火災学会研究発表会概要集(2010))からの出典であり、水素自動車と天然ガス自動車のそれぞれの充填圧は表 12 のとおり、水素自動車については約 35MPa、天然ガス自動車については約 21MPa である。

表 12 PRD 作動時間、容器内圧力、PRD 近傍の温度のデータ

	Tes11 水素ガス下方放出		Tes12 CNG 下方放出	
	前側容器	後側容器	前側容器	後側容器
充填圧力 (MPa)	35.2	34.9	21.1	21.4
PRD作動までの時間 (sec)	15分31秒	17分4秒	16分27秒	15分53秒
容器内最大ガス圧力 (MPa)	40.97	39.18	29.2	27.0
圧力上昇比	1.16	1.12	1.38	1.26
平均圧力上昇率 (MPa/min)	0.372	0.271	0.526	0.362
PRD作動時の近傍PRD温度 (℃)	131	181	148	140

(出典)「圧縮水素容器搭載自動車の火災安全性—ガソリンおよび CNG 車との比較—」(平成 22 年度日本火災学会研究発表会概要集(2010))

なお、70MPa の水素自動車で確認したデータはないが、70MPa の水素自動車の安全弁は、35MPa の水素自動車の安全弁と構造上同じものが一般的に設置されており、約 110℃で作動することは変わらない。

【指摘事項 6】水素自動車と天然ガス自動車の燃焼状況について、炎の明るさが違うので、自動車自体の素材を確認すること

出典元の「圧縮水素容器搭載自動車の火災安全性—ガソリンおよび、天然ガス車との比較—」(平成 22 年度日本火災学会研究発表会概要集(2010))より、「供試車両には 1992—1995 年製のガソリン車 (排気量 1600 cc、セダンタイプ) を用いた。供試車両では、既存のガソリントークを取外し、トランクルーム内にガス容器を設置した。」との記載があり、素材については具体的に言及されていないが、同じ条件下で試験されたものである。

【指摘事項7】安全対策（フェーズ4）について、火炎が見えにくい等の水素特有の課題もあるので、もう一度整理すること

【指摘事項8】「火災危険性に差異がない」という表記、文言や表現（リスク・危険性等の使い方）について整理すること

水素火炎の視認の困難性等、水素特有の課題については、「水素ステーションにおける事故・災害発生時等の対応に関する調査研究報告書」（2017年3月全国危険物安全協会）において、消防活動の観点から、燃料電池自動車（FCV）に係る水素ガス漏洩事故・対応要領（例）が示され、当該要領（例）では、消防隊員が水素の炎に気づかず、活動中に炎にさらされ、受傷する可能性があることから、それらを考慮し活動することが示されている。

停車スペースの共用化の検討においては、自動車が延焼媒体となり、併設される水素スタンドに延焼する危険性を考慮する必要がある。このことについては、天然ガス自動車の停車スペース共用化に関する検討においても同様の危険性を考慮し、天然ガス自動車の下部にガソリンが流れ込まないための安全対策を講ずることとされている。天然ガス自動車と燃料電池自動車の構造を比較した際、①充填容器は自動車下部に設置されていることが多いこと、②充填容器の安全弁は約110℃で作動することという点については共通していると考えられ、ガソリンが自動車下部に流れ込み、火災となった場合の自動車への延焼シナリオは同様と考えられる（延焼後においては、天然ガスと水素ガスでは、火炎の見えにくさ等の違いはあると考えられる）。このことから、天然ガス自動車の停車スペース共用化を検討した際の事故進展フェーズ及び各フェーズに対応した安全対策の考え方を参考にすることができると考えられる。