

37751
K1

博士學位論文

水素スタンドのリスクアセスメントに関する研究

(Risk assessment for Hydrogen Fueling Stations)

国立大学法人 横浜国立大学大学院

環境情報学府

菊川重紀

2009年3月

横浜国立大学附属図書館



12201192

論文要旨

近年、地域的、地球的規模の環境保護を求める消費者は、有害な排気ガスを排出しない自動車を求めている。その回答のひとつとして、燃料電池自動車や水素エンジン自動車の普及が期待されている。しかし、本格的な普及には技術面やコスト面で課題がある。なかでも水素を充てんする水素スタンドの整備は大きな課題のひとつである。

本研究の目的は、水素スタンドの普及に向けて、安全な水素スタンドを実現するための安全対策案を策定し、規制見直しのドラフト作成に資する情報を提供することである。検討手法は、安全性に関する検討手法としてその有効性が広く認められているリスクアセスメント手法を採用し、安全と普及の両立を考慮して提案したリスクマトリクスを使って評価した。

研究対象は、圧縮水素スタンド（35MPa 充てん対応）および液体水素スタンドである。近年、燃料電池自動車の航続距離をガソリン自動車並みの 500km 以上にするため、燃料タンクの圧力を 70MPa にすることが検討されている。同時に水素スタンドは、圧力 70MPa で水素を充てんできなければならない。しかし、70MPa に対応する水素スタンドの法規制が未整備である。そこで、70MPa 充てん対応水素スタンドも研究対象に加え、設備の圧力上昇とリスクの変化の関係について評価を行った。

研究対象となる水素スタンドは、ガソリンスタンドと同様に安全でなければならない。また、燃料電池自動車が十分普及した時点で必要と想定される規模の水素スタンドである。こうした商用ベースの水素スタンドは現時点では実在しない上、使用される機器に関する実績データも十分とは言えない状況である。そこで本研究においては、安全に関わる検討手法としてその有効性が広く認められているリスクアセスメント手法を採用し、新しく提案したリスクマトリクスを使ってリスクアセスメントを実施した。リスクアセスメント手法による研究のフローを図1に示す。

まず、将来の水素スタンドの需要想定をふまえて今後普及すると予想される水素スタンドモデルを定義する。本研究では 35MPa 充てん対応水素スタンド、70MPa 充てん対応水素スタンド、液体水素スタンドの 3 種類を対象とした。

次にその水素スタンドモデルにおいて発生することが想定される事故を可能な限り抽出し、事故シナリオのリストを作成する。このとき事故シナリオを漏れなく抽出することがポイントである。

事故シナリオの抽出手法は、リスク源の抽出手法として広くその有効性が認められている HAZOP (Hazard and Operability Studies) と FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) の二つの手法を用いた。さらに関連する事故データベースを参照することで、想定漏れの事故シナリオを補完して事故シナリオの網羅性を高めた。

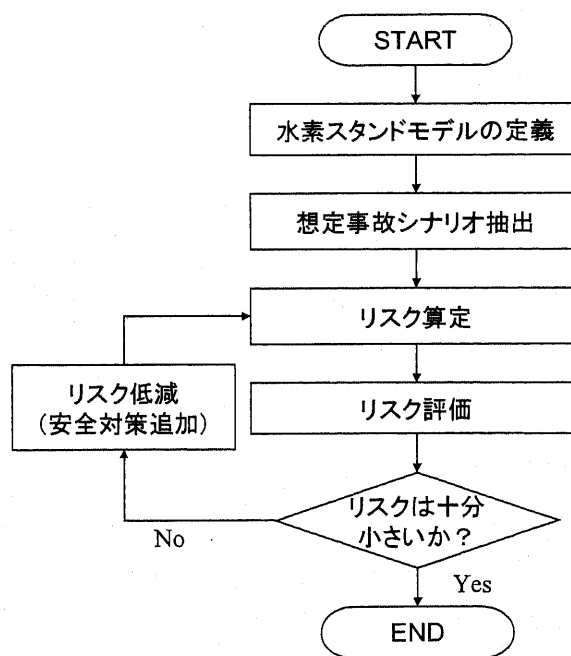


図1 リスクアセスメント手法による研究フロー

そして、リストアップされた事故シナリオの1件1件に対してリスクの大きさを算定する。リスク算定では、実験や文献データを使ってできるだけ定量的なデータを使用することに努めた。しかし、圧力70MPaの水素に関する実験データは極めて少ない。そこで本検討では、圧力40MPaを超える水素の爆風圧と火炎の到達距離は、40MPa以下の場合と連続的に一致すると仮定して、簡易的に外挿で求めることとした。もちろん、今後実験を行い正確なデータに更新する必要がある。

リスク算定において事故シナリオごとに影響度レベルと可能性レベルを評価後、その結果をリスクマトリクス(図2)に照らしてリスク評価を行う。このとき、リスクが十分に小さいと評価されれば当該事故シナリオに対する検討は終了する。そうでない場合は、リスクを低減する安全対策を付加した上で再度リスク評価を行い、リスクが十分に小さいと評価されるまでその事故シナリオに対する検討を行なう。すべての事故シナリオに対してこうした検討を実施することで、水素スタンドのリスクを十分に低減させ、安全性を確保する安全対策を得ることが出来る。

一方、水素スタンドのリスクアセスメントを行なう上で、水素が漏えいした場合の水素ガスの振る舞いを正確に把握する必要がある。周知の通り、水素は可燃濃度範囲が広く爆発の危険性が高いため、漏えい時の振る舞いを検証するためには屋外で実験する必要がある。しかし、屋外実験は気象の影響を受けることや水素センサーには応答遅れがあるため、正確な濃度分布を計測することは難しい。そこで、水素スタンドにおいて予想される水素漏えいについて、コンピュータによる流体解析(Computational Fluid Dynamics)を使って水素の濃度分布を計算した。得られた解析結果はリスクアセスメントへ反映した。

影響度		可能性			
		A: ほとんど起こりえない	B: 起こりにくい	C: 可能性がある	D: 十分起こりえる
I	極めて重大な災害	H	H	H	H
II	重大な災害	M	H	H	H
III	中規模災害	M	M	H	H
IV	小規模災害	L	L	M	H
V	軽微な災害	L	L	L	M

図2 リスクマトリクス

研究の結果、35MPa 充てん対応水素スタンドと液体水素スタンドに対しては、それぞれ 87 件と 67 件の安全対策案を提案した。これらは水素スタンドに必要な安全対策である。言い換えると、得られた安全対策を正しく適用した水素スタンドは、リスクを可能な限り低減しており、高い安全性を有していると言える。

特に 35MPa 充てん対応水素スタンドに対する安全対策は、水素安全の専門家に認められて高圧保安法、消防法、建築基準法に反映された。液体水素スタンドの安全対策については、規制見直し案を取りまとめることができた。ここで 70MPa 充てん対応水素スタンドについては、フィールド実験が未実施であることから、リスクアセスメントの結果を確定させるには至らなかった。しかし、本研究によって新たな安全対策を提案し、安全性の高い水素スタンドを実現するための具体的な課題が明らかになった。

今後、燃料電池自動車と水素スタンドの普及に向けて、本研究で提案した安全対策が規制へ反映され周知徹底されることによって安全性の高い水素スタンドが建設され普及が促進されることを念じてやまない。

Abstract

In recent years, consumers calling for protection of environment on regional or global scale are demanding the use of vehicles that do not emit harmful exhaust. The widespread use of fuel cell vehicles (FCVs) and hydrogen internal combustion engine vehicles is anticipated as one response to this demand. Some issues remain however, such as technology or cost, that need to be resolved before FCVs become practical for consumers. Especially preparation of hydrogen stations to refuel FCVs is one of the biggest problems.

The main subject of this study is to propose the safety measures which ensure safety of hydrogen fueling stations and to assist in the drafting of new regulations for hydrogen fueling stations. Risk assessment method which is a widely-acknowledged method for ascertaining an object to be safe was used. The risk of hydrogen fueling stations was evaluated using proposed risk matrix in which both the safety and the popularization of hydrogen station are considered.

Compressed hydrogen fueling station for 35MPa FCVs and liquid hydrogen fueling station were selected for the purpose of this study. Nowadays automobile manufactures are focusing their efforts on developing new hydrogen fuel tanks that will raise the pressure to 70MPa from the current 35MPa to ensure a driving range as long as 500km, a mileage comparable to today's gasoline-fueled vehicles. Hydrogen stations will have to be able to provide 70MPa compressed hydrogen gas to service these improved FCVs. However, Japanese regulations are inadequate for 70MPa hydrogen fueling stations. The compressed hydrogen fueling station for 70MPa FCVs was added to this study and the relationship between the pressure increase of hydrogen facility and changes of risk level was studied.

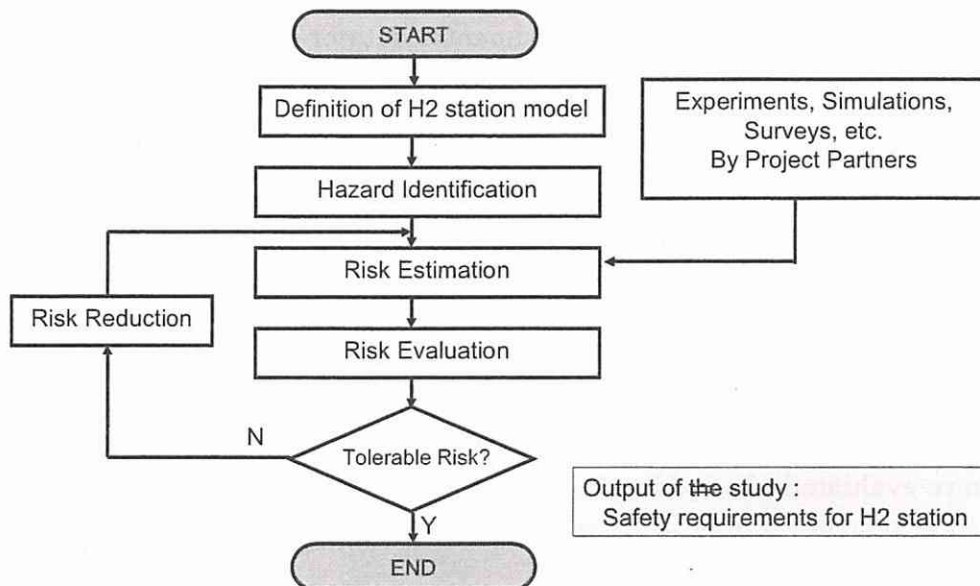


Fig.1 Sequence of verification procedures in the risk assessment.

The hydrogen fueling stations considered in this study needs to be as safe as conventional gas stations. And they must have enough capacity for refuel hydrogen to FCVs. There are no large scales existing hydrogen stations however, comparable to those envisaged to be prevailing in the future. Additionally, performance data on the equipment used in hydrogen stations are not

sufficiently available. Thus, the safety verification in this study was done by means of risk assessment approach, which is widely known to be effective in determining safety. The sequence of the verification procedures undertaken in the risk assessment is shown in Fig. 1.

First, a hydrogen station model in the future was defined, based on the estimated demand for hydrogen stations, and on the presumed type of station. Hydrogen fueling station for 35MPa FCVs, for 70MPa FCVs and liquid hydrogen station were selected in this study.

Next, probable scenarios of failures at the station model were enumerated and summarized on a list. In this step, referred to as “hazard identification,” identifying as many scenarios as possible is critical. In identifying failure scenarios, two widely-acknowledged methods for ascertaining risk factors, namely HAZOP (Hazard and Operability Studies) and FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) were used. Existing accident databases were also used for detecting any oversights and ensuring an exhaustive list of scenarios.

		Probability Level			
		A	B	C	D
Consequence Severity Level		Improbable	Remote	Occasional	Probable
1	Extremely Severe Damage	H	H	H	H
2	Severe Damage	M	H	H	H
3	Damage	M	M	H	H
4	Limited Damage	L	L	M	H
5	Minor Damage	L	L	L	M

Fig.2 Risk matrix

The scale of risk is estimated for each of the scenarios on list. In this step, the author tried to refer to quantitative data such as field experimental data or hydrogen literature. However for 70MPa hydrogen, there are very few field experimental data. The author made an assumption that the relationship between blast pressure and distance over 40MPa hydrogen leakage coincides with the one under 40MPa continuously, and applied extrapolations in this study. Nevertheless, it is necessary to conduct field experiments, and replace existing predictions by collecting accurate blast pressure data at 80MPa.

For each probable scenario of failures, after the consequence severity level and the probability level are estimated, the risks estimated were evaluated on a risk matrix (Fig.2). The risks determined to be so small as to be insignificant are not examined any further. The remaining risks are then re-evaluated after adding safety measures for mitigating those risks. This process is repeated until all risks on the list are determined to be insignificant. The author believe that the safety verification applied to all failure scenarios resulted in desirable safety measures that would sufficiently reduce possible risks and ensure safety at hydrogen stations in the future.

On the other hand, it is necessary to understand the behavior of hydrogen gas leaking from the stations to carry out the risk assessment for hydrogen fueling stations. It is well known that hydrogen is a highly explosive gas, being combustible over a wide range of concentrations. Due to this property of hydrogen, tests for verifying its behavior must be done outdoors. In open air, however, tests are affected by weather conditions and hydrogen sensors' responses delay which

makes it difficult to observe accurate distribution of hydrogen concentrations. Therefore, with respect to assumed cases of hydrogen leakage, concentration distribution of hydrogen gas was obtained by means of computational fluid dynamics (CFD). The analysis results were used for verifying safety of hydrogen stations.

As the results of this study, 87 safety measures were proposed to compressed hydrogen fueling stations for 35MPa FCVs and 67 safety measures were proposed to liquid hydrogen stations. They are considered necessary for hydrogen fueling stations. In other words, the safety measures that were accurately applied at hydrogen fueling stations reduce the risk as much as possible and provide a high level of safety.

Especially the safety measures of hydrogen fueling stations for 35MPa FCVs were taken into the regulations, which were the high pressure gas safety law, the fire distinguish law and the building standards law. The author had made the draft of the deregulation for liquid hydrogen stations based on these safety measures. Unfortunately the result of risk assessment for 70MPa hydrogen fueling stations couldn't be fixed because of lack of hydrogen field experimental data. But some safety measures were provided by this study. Furthermore, the study also clarified specific issues which need to be resolved to realize the safety of hydrogen fueling stations for 70MPa FCVs.

I hope the results of this study will be used to making a draft of regulation for hydrogen fueling stations and keeping each other well informed, so that the high safety hydrogen stations will be built in the future.

目 次

第 1 章 序論	1
1.1. 研究の背景	3
1.1.1. 地球温暖化と二酸化炭素の排出	3
1.1.2. 日本のエネルギー事情	7
1.1.3. 燃料電池	7
1.1.4. 燃料電池自動車	10
1.1.5. 水素スタンド	13
1.2. リスクアセスメント	16
1.2.1. リスクの概念	16
1.2.2. リスクアセスメントとは	17
1.2.3. リスクアセスメントの手順	17
1.2.4. 国際安全規格に見るリスクアセスメント	19
1.3. 研究の目的と法規制	21
1.3.1. 研究の目的	21
1.3.2. 水素スタンドの関する規制の見直し状況と本研究の関係	21
1.3.3. 水素スタンドに関する現行規制の概要と規制見直しの方向性	23
1.3.4. 国際標準化との整合	27
1.4. 本論文の構成と概要	28
1.4.1. 水素スタンドのリスクアセスメントの概要	28
1.4.2. 水素スタンドモデルの定義	29
1.4.3. 事故シナリオの抽出	30
1.4.4. リスク算定とリスク評価	30
1.4.5. 水素スタンドに対する安全対策	31
1.4.6. 安全対策検討における CFD の利用	31
1.4.7. リスクアセスメントの結果と考察	31
References	32
第 2 章 水素スタンドモデルの定義	33
2.1. 基本的な考え方	35
2.1.1. 基本的な考え方	35
2.1.2. 水素スタンドの種類	35
2.2. 圧縮水素スタンドモデル (35MPa 充てん対応水素スタンド)	39
2.2.1. 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル (オンサイト型)	39
2.2.2. 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル (オフサイト型)	46
2.3. 圧縮水素スタンドモデル (70MPa 充てん対応水素スタンド)	52
2.3.1. 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル (新設モデル)	52
2.3.2. 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル (改造モデル)	59
2.3.3. 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル (プレクール設備モデル)	70

2.4. 液体水素スタンドモデル	77
References	85
第3章 事故シナリオの抽出	87
3.1. 基本的な考え方	89
3.2. 事故シナリオの抽出方法	91
3.2.1. HAZOP について	91
3.2.2. FMEA について	94
3.2.3. 網羅性を高めるために	95
3.3. 事故シナリオの分類・整理	97
3.4. 事故シナリオの分析とパターン化	97
3.4.1. トリガー現象	97
3.4.2. 開口径パターンと放出パターン	98
3.5. 事故シナリオの抽出 (35MPa 充てん対応水素スタンド)	102
3.5.1. 事故シナリオの抽出結果	102
3.6. 事故シナリオの抽出 (70MPa 充てん対応水素スタンド)	103
3.6.1. 圧縮機から蓄圧器への蓄圧工程 (蓄圧モード) における事故シナリオ抽出	103
3.6.2. 事故シナリオの抽出結果	104
3.7. 事故シナリオの抽出 (液体水素スタンド)	105
3.7.1. 一重管の事故ステップ	105
3.7.2. 二重管の事故ステップ	106
3.7.3. 液体水素貯槽の事故ステップ	108
3.7.4. バイオネット継手の事故ステップ	109
3.7.5. 漏えいプロセスパターンを使った事故シナリオのパターン化	110
3.7.6. 事故シナリオの抽出結果	117
References	117
第4章 リスク算定とリスク評価	119
4.1. 基本的な考え方	121
4.2. リスクマトリクス	121
4.3. 影響度レベルと可能性レベル	123
4.3.1. 影響度レベル	123
4.3.2. 可能性レベル	125
4.4. リスク算定における影響度評価	126
4.4.1. 影響度評価における考え方	126
4.4.2. 爆風圧の影響度評価 (圧縮水素)	130
4.4.3. 噴出火炎の影響度評価 (圧縮水素)	132
4.4.4. 爆風圧の影響度評価 (液体水素)	133
4.4.5. 噴出火炎の影響度評価 (液体水素)	134
4.4.6. 圧縮水素と液体水素の影響度の比較、考察	134

4.4.7. 凍傷、酸欠などの影響度（液体水素）	134
4.5. リスク算定における可能性評価	136
4.6 他のリスクマトリクスとの比較、考察	141
4.6.1. リスクマトリクス法	141
4.6.2. WE-NETにおけるリスクマトリクス（日本）	144
4.6.3. DOEにおけるリスクマトリクス（アメリカ）	145
4.6.4. EHIPにおけるリスクマトリクス（欧州）	146
References	149
第5章 水素スタンドに対する安全対策	151
5.1. 安全対策に対する基本的な考え方	153
5.2. 主な安全対策（35MPa 充てん対応水素スタンド）	154
5.2.1. 水素スタンド全般	154
5.2.2. 蓄圧器周辺	158
5.2.3. 圧縮機周辺	162
5.2.4. ディスペンサー周辺	163
5.3. 主な安全対策（70MPa 充てん対応水素スタンド）	166
5.3.1. 水素スタンド全般	166
5.3.2. 蓄圧器周辺	167
5.3.3. 圧縮機周辺	168
5.3.4. ディスペンサー周辺	170
5.4. 主な安全対策（液体水素スタンド）	171
5.4.1. 液体水素スタンド全般	171
5.4.2. 液体水素貯槽周辺	175
5.4.3. 液体水素ディスペンサー周辺	176
5.4.4. ベントライン	178
References	180
第6章 安全対策検討における CFD の利用	181
6.1. 概要	183
6.2. 障壁による敷地境界距離と火気離隔距離の短縮	183
6.2.1. 敷地境界距離と火気離隔距離	183
6.2.2. 障壁の利用	184
6.2.3. 開口径と水素漏えい/拡散実験	184
6.2.4. 障壁による水素拡散への影響検討	185
6.2.5. ケーススタディーと解析結果	188
6.3. 隣接するキャノピーへ水素が噴出した場合の水素漏えい拡散の検討	189
6.3.1. 噴出条件の検討	189
6.3.2. キャノピー下部での水素対流の検討	191
6.4. 併設型水素スタンドモデルの検討	192

6.5. 蓄圧器の地下設置モデルの検討	194
6.5.1. 検討の目的	194
6.5.2. 類似スタンドの現状調査	194
6.5.3. 実現のイメージ	195
6.5.4. 敷地境界に対し 6m 以上の距離を有することと同等の措置（例示基準 56）の利用	196
6.5.5. 蓄圧器の地下設置モデルの定義	197
6.5.6. 事故シナリオの抽出	198
6.5.7. 安全対策検討	201
6.5.8. CFD を使った安全対策検討	203
6.5.9. まとめ	211
6.6. メンテナンス性を考慮した蓄圧器室モデルの検討	212
6.7. 圧縮機の地下設置の適応可能性の検討・評価	213
6.8. 液体水素（二重管）の漏えい解析	214
6.8.1. 概要	214
6.8.2. アプローチ	214
6.8.3. 境界条件および物性値	215
6.8.4. ピンホールからの液体水素漏洩の影響	216
6.8.5. 結果	217
6.9. 70MPa 水素充てんノズル、充てんホース内の熱伝導解析	221
6.9.1. 背景と目的	221
6.9.2. 水素充てんノズル、充てんホースの形状	221
6.9.3. 解析条件などの設定	224
6.9.4. メッシュ分割	226
6.9.5. 解析結果と考察	227
References	236
第 7 章 リスクアセスメントの結果と考察	239
7.1. 水素スタンドモデルの定義に関する考察	241
7.1.1. 35MPa 充てん水素スタンドモデルと 70MPa 充てん水素スタンドモデルの違い	241
7.2.2. 圧縮水素スタンドモデルと液体水素スタンドモデルの違い	241
7.2. 事故シナリオの抽出に関する考察	242
7.2.1. 35MPa 充てん対応水素スタンドの事故シナリオ抽出	242
7.2.2. 70MPa 充てん対応水素スタンドの事故シナリオ抽出	242
7.2.3. 液体水素スタンドの事故シナリオ抽出	243
7.3. 安全対策検討に関する考察	244
7.4. リスクアセスメントの結果と考察	246
7.4.1. 35MPa 充てん対応水素スタンドのリスクアセスメント結果と考察	246
7.4.2. 70MPa 充てん対応水素スタンドのリスクアセスメント結果と考察	247
7.4.3. 液体水素スタンドのリスクアセスメント結果と考察	249
References	251

第8章 結論	253
8.1. 結論	255
8.2. 法令への反映	258
8.3. 今後の課題	259

Appendix

1. 事故シナリオとリスクアセスメント結果一覧表
 - 1-1 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル（オンサイト型） HAZOP 表、FMEA 表
 - 1-2 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル（オフサイト型） HAZOP 表、FMEA 表
 - 1-3 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（新設モデル） HAZOP 表、FMEA 表
 - 1-4 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（改造モデル） HAZOP 表、FMEA 表
 - 1-5 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（蓄圧モード検討） FMEA 表
 - 1-6 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（プレクール設備モデル） HAZOP 表、FMEA 表
 - 1-7 液体水素スタンドモデル HAZOP 表、FMEA 表

2. 蓄圧モードの検討
 - 2-1 蓄圧モード工程概略図
 - 2-2 蓄圧モード工程作動不良組合せ表

3. 安全対策リスト
 - 3-1 35MPa 充てん対応水素スタンドの安全対策一覧表
 - 3-2 70MPa 充てん対応水素スタンドの安全対策一覧表（未確定）
 - 3-3 液体水素スタンドの安全対策一覧表

4. 掲載論文リスト

謝 辞

第 1 章

序 論

第1章 序論

1.1. 研究の背景

1.1.1. 地球温暖化と二酸化炭素の排出

気候システムの温暖化には疑う余地がない。このことは、大気や海洋の世界平均温度の上昇、雪氷の広範囲にわたる融解、世界平均海面水位の上昇が観測されていることから今や明白である。気候変動に関する政府間パネル第4次評価報告書統合報告書[1]はこんな断定的な文章から始まっている。

最近12年（1995年～2006年）のうちの11年の世界の地上気温は、測器による記録が存在する中（1850年以降）で最も温暖な12年の中に入る（図1上段）。過去100年間（1906年～2005年）の線形の昇温傾向は100年当たり0.74℃であり、第3次評価報告書で示された0.6℃（1901年～2000年）の傾向と比べてさらに上昇している。

海面水位の上昇は温暖化と整合性があるように見受けられる（図1.1.1-1中段）。世界平均海面水位は、熱膨張、氷河や氷帽の融解、北極および南極地域の氷床の融解により、1961年以降、年平均1.8mmの速度で上昇し、1993年以降については、年当たり3.1mmの速度で上昇した。ただし、1993年から2003年にかけての海面水位上昇率の増加が十年規模の変動あるいは、より長期的な上昇傾向を反映しているのかは不明である。また、アルキメデスの法則より水面上に浮いている氷が解けても水面は上昇しないことや、平均海面水位の上昇幅は干潮、満潮時の差よりも十分に小さいことから、温暖化と海面水位上昇を直接原因にすることは注意が必要である。

また、温暖化に伴い、雪氷面積が縮小している（図1.1.1-1下段）。1978年以降の衛星観測のデータによれば、北極の年平均海氷面積は、10年当たり2.7%縮小した。特に夏季の縮小は10年当たり7.4%と大きい。南北両半球において、山岳氷河と積雪面積は平均すると縮小している。

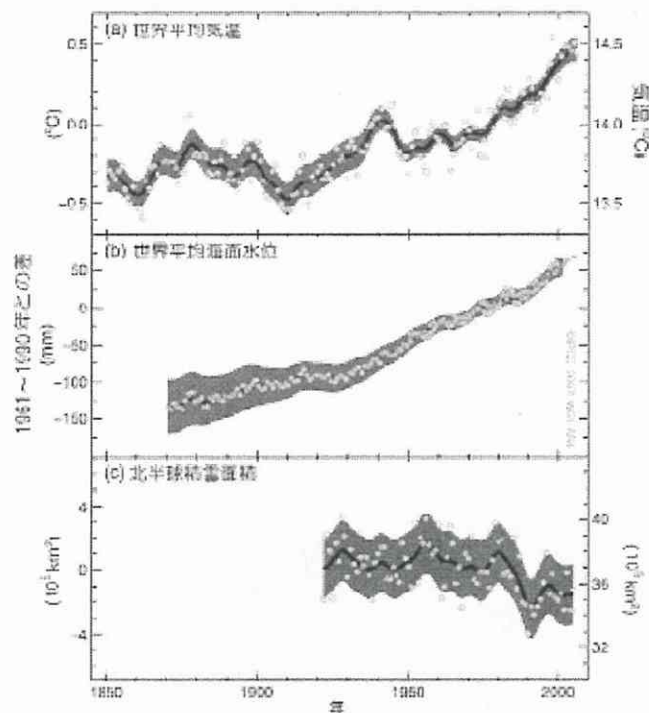


図 1.1.1-1 気温、海面水位及び北半球の積雪面積の変化[1]

(a)世界平均地上気温；(b)潮位計（青）と衛星（赤）データによる世界平均海面水位；(c)3～4月における北半球の積雪面積、それぞれの変化。すべての変化は、1961年～1990年の平均からの差である。滑らかな曲線は10年平均値、丸印は各年の値をそれぞれ示す。陰影部は(a、b)

既知の不確実性の包括的な分析から推定された不確実性の幅、(c) 時系列から得られた不確実性の幅

これらのデータは地球温暖化が進行していることを示す重要なデータであることを示している。そしてその地球温暖化の原因は、温室効果ガスの増大であることも明白である。特に産業革命以降、石油や石炭などの化石燃料を大量に消費するようになり、大気中の二酸化炭素濃度は上昇の一途をたどっている(図 1.1.1-2)。

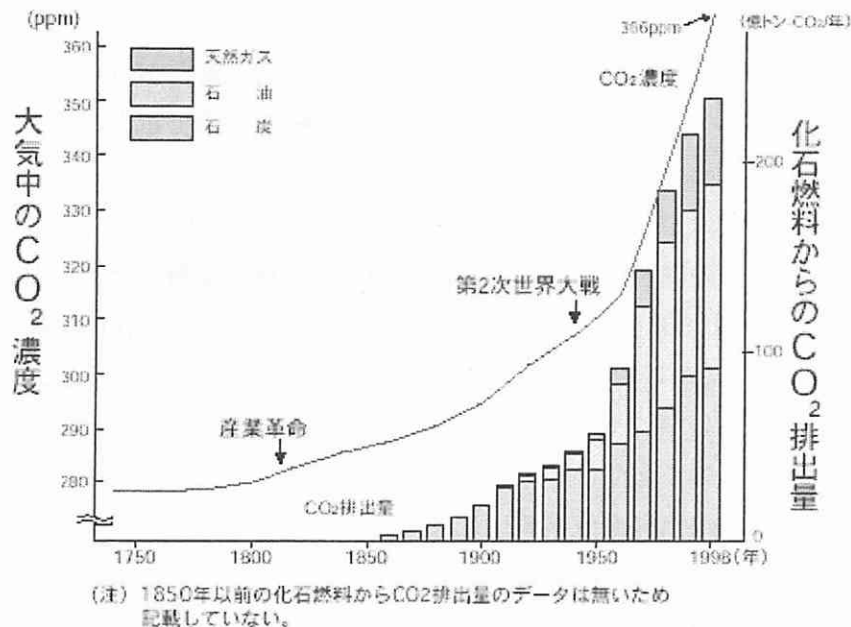


図 1.1.1-2 化石燃料の消費に基づく大気中二酸化炭素濃度の増加[2]

地球温暖化のメカニズムは、以下である。太陽光が地面や大気を暖め、暖められることによって地面から放出される赤外線は宇宙へ向かうが、大気中にはこの赤外線を吸収する温室効果ガスが適量存在し、地球の温度を一定に保ってきた。しかし、温室効果ガスの濃度が増大しすぎると地球から放出されるべき赤外線が吸収され、再び大気や地表面を暖めることによって地球が温暖化する。

ここで、二酸化炭素はフロンなどのハロカーボンやメタンに比べて単体での温室効果は低い、人類の経済・生産活動に伴い化石燃料を燃焼することで大量に排出されるため、他の温室効果ガスに比べて排出量が圧倒的に多く、結果的に大気の温室効果にもっとも寄与していることが知られている(図 1.1.1-3)。

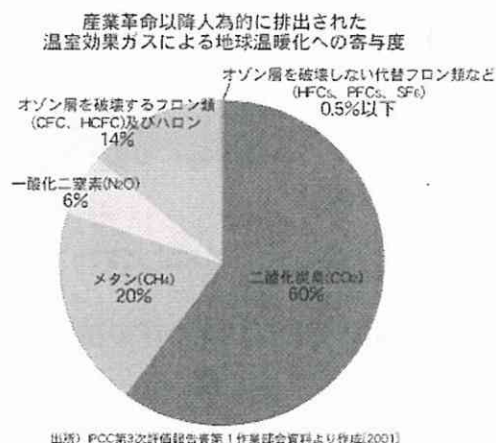


図 1.1.1-3 温室効果ガスの温暖化寄与度[3]

地球温暖化防止、二酸化炭素削減問題は、世界的な課題である。とりわけ日本は、世界でも4番目に、二酸化炭素排出をしている国のひとつである。二酸化炭素など地球温暖化にかかわる温室効果ガスを出さないようにしていかなければならない。この世界を救うために、日本が率先して地球温暖化に対する対策を行っていくことが求められている。

日本における2005年度のエネルギー起源二酸化炭素排出量は、12億600万トンであり、前年度比0.8%増加、1990年比では13.9%増加している。産業別の二酸化炭素排出量を見ると、1990年比で産業部門が▲3.2%、運輸部門が+18.1%、業務その他部門が+42.2%、家庭部門が+37.4%となっている。産業部門においては、産業構造の高度化やエネルギー利用効率化努力等によって排出量をほぼ横ばいに止めている。しかし、運輸部門においては、自動車登録台数の増加やトラック輸送の割合の増加に伴って二酸化炭素排出量が増加している。業務その他、家庭部門においては、オフィスビルや商業施設等の床面積の増大、世帯数の増加や家庭における家電製品の使用の増加等の理由により、二酸化炭素排出量が著しく増加している。(図 1.1.1-4)

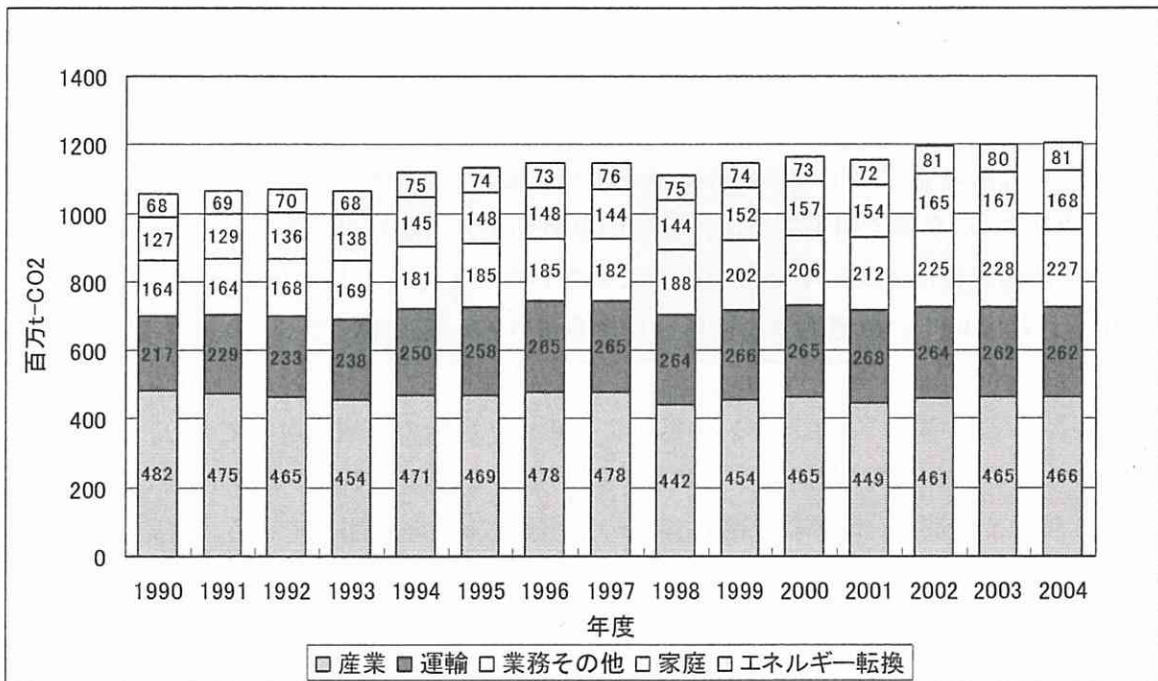


図 1.1.1-4 日本におけるエネルギー起源の二酸化炭素部門別排出量[4]

このように、交通運輸分野における排出量の増加は、日本全体の排出量増加の主要因の1つとなっており、その輸送機関別の内訳については、自動車からの排出がほぼ9割を占めている(図 1.1.1-5)。したがって、日本の運輸分野における二酸化炭素排出の削減にあたっては、特に自動車からの二酸化炭素の排出をハード面(自動車単体対策)及びソフト面(公共交通機関への誘導、モーダルシフトの推進等)の両面から抑制する対策を講じることが重要といえる。

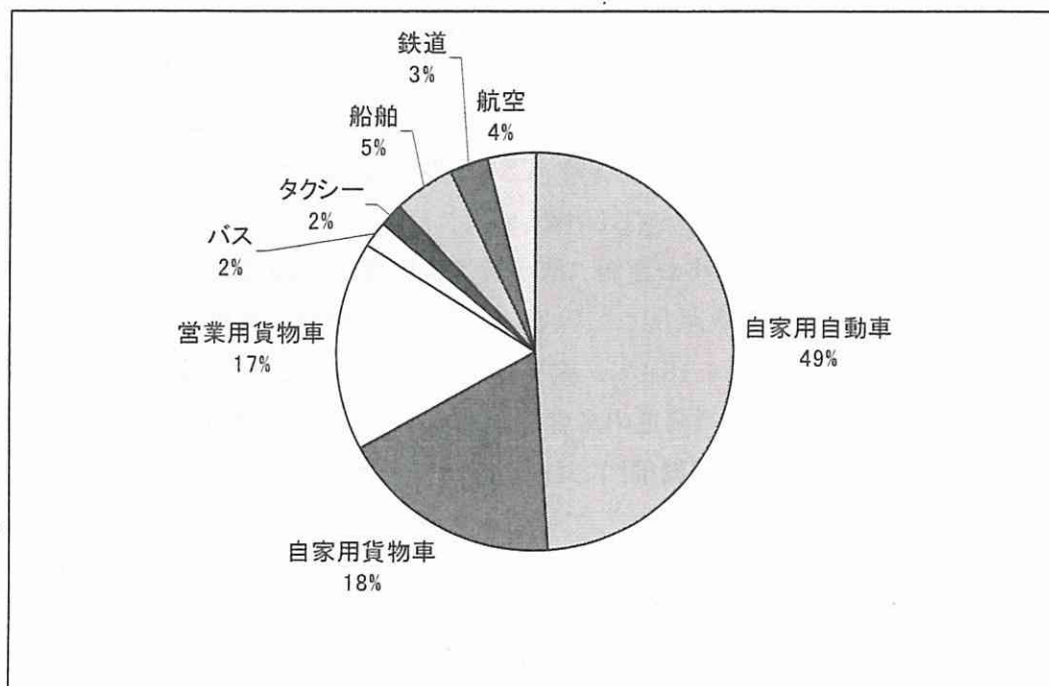


図 1.1.1-5 輸送機関別 CO₂ 排出量割合[5]

このように増え続ける二酸化炭素の排出量を削減するため、1997年に第3回気候変動枠組条約締結国会議（COP3）が京都で開催され、先進国の温室効果ガス削減目標を明記した京都議定書が合意に至った。京都議定書は2005年2月16日に発効したことから、日本は第一約束期間である2008年から2012年において、温室効果ガスの総排出量を1990年基準比で6%削減する必要がある（表1.1.1-1）。

日本の場合、温室効果ガス排出の約80%がエネルギー起源の二酸化炭素であり、政府は、これを2010年度において1990年度と同程度の水準に抑制することとしている。しかしながら、1990年に比べて2005年までの間に、すでに二酸化炭素の排出量は約8%増加している。結局、今後14%以上の削減目標を達成する必要がある。

表 1.1.1-1 京都議定書における温室効果ガス削減目標の例

国	削減目標
日本	6%
アメリカ	7%
EU	8%
(先進国全体)	少なくとも5%

1.1.2. 日本のエネルギー事情

日本における一次エネルギーの供給構造は、ここ30年間で大きく変化した。かつては一次エネルギーの80%近くを石油に頼っていたが、二度のオイルショックを経験し、エネルギー消費の石油依存度の低下が大きな政策課題とされ、原子力や天然ガスの利用が推進されてきた。その結果、2004年には50%を下回るまでになった(図1.1.2-1)。

エネルギーの種類についても二酸化炭素排出量の少ない原子力や天然ガスが増え、わずかではあるがクリーンな新エネルギーの導入が進みつつあるのも事実である。しかしながら、日本のエネルギー供給は30年前と比べて増え続けており、また安価な石炭の供給が増えていることもあって1970年以降二酸化炭素の排出量は増え続けているのが実情である。

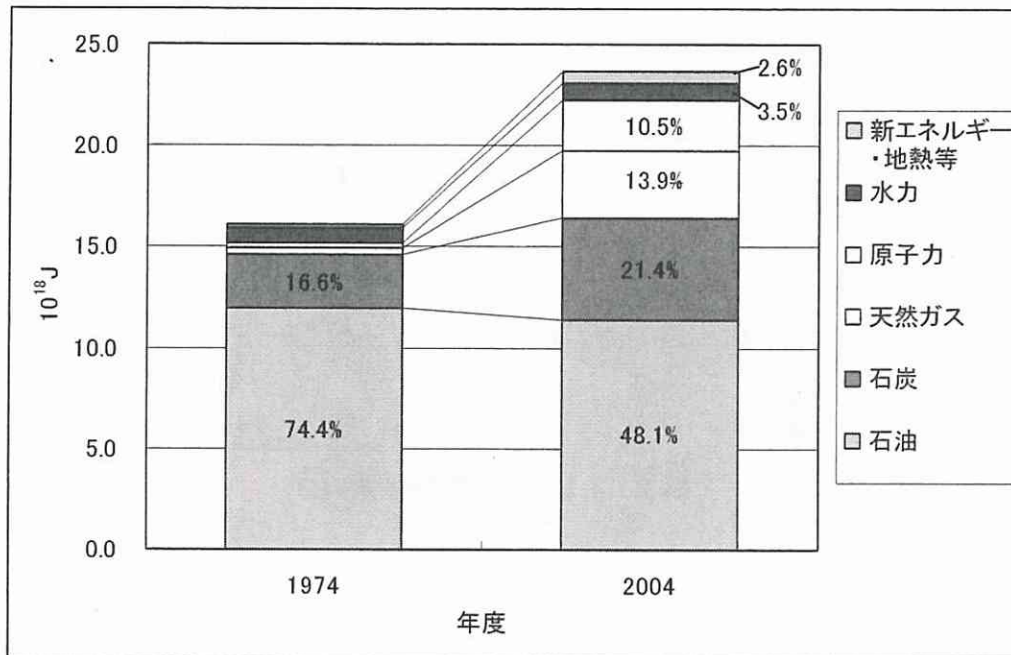


図 1.1.2-1 日本のエネルギー供給の推移[6]

このように二酸化炭素の排出量を削減することは、喫緊の課題である。加えて、エネルギー資源を持たない日本にとって、エネルギーの安定供給やリスクの分散などのエネルギーセキュリティ向上が見込める新エネルギーへの期待が高まっている。新エネルギーとは、現在の石油に替わりえるエネルギーのうち、再生可能なエネルギーであって実用段階に来ているが、経済性などに制約があるため十分に普及していないものを言う。代表的な新エネルギーとしては、太陽光、風力、バイオマスが挙げられる。

さらに、究極のエネルギーとして燃焼しても二酸化炭素や有害な排気を出さない水素エネルギーの利用が注目されている。水素は二次エネルギーであるため、何らかのエネルギーを使って水素を製造しなければならないが、クリーンな新エネルギーを使って水素を製造することはとても意義である。そして、これら新エネルギーと水素エネルギーを効率的に利用する技術のひとつとして燃料電池がある。

1.1.3. 燃料電池

燃料電池は、「電池」と呼ばれているが、「発電装置」と言う方がふさわしいといえる。乾電池と違うのは、使い捨てではないことである。燃料電池は、水素(H₂)と酸素(O₂)があれば電気を作り続け

ることができる。燃料電池は、水の電気分解と逆の原理で発電する。水の電気分解は、水に外部から電気を通して水素と酸素に分解するが、燃料電池はその逆で水素と酸素を電気化学反応させて電気を作る。図 1.1.3-1 に水の電気分解とその逆の反応である燃料電池のイメージを示す。

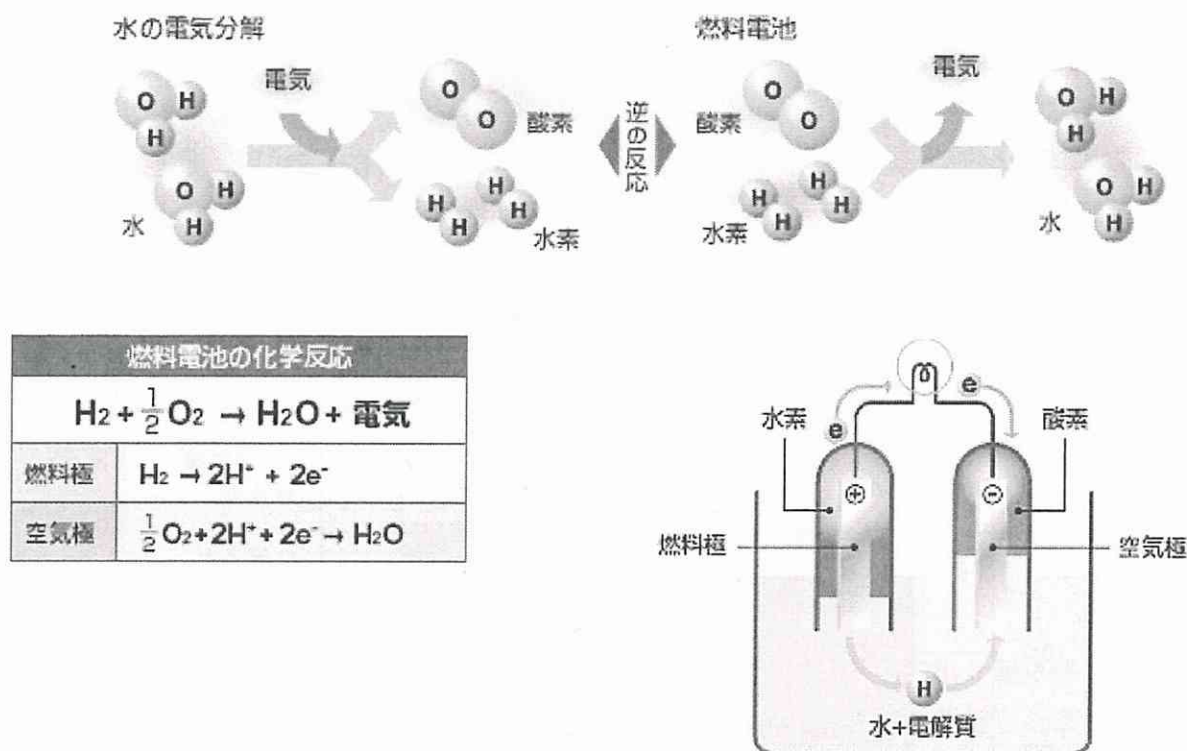


図 1.1.3-1 水の電気分解[7]

燃料電池は水素と酸素から電気化学反応によって直接電気と熱を取り出す。この原理は共通であるが、水素イオンの通路である電解質の種類によっていくつかに分類されている。現在、これらの中で特に精力的に開発が進められているのは、リン酸形 (PAFC)、熔融炭酸塩形 (MCFC)、固体酸化物形 (SOFC)、固体高分子形 (PEFC あるいは PEMFC)、アルカリ形 (AFC)、直接メタノール形 (DMFC) の燃料電池である。これらはその種類によって作動温度が大きく異なっていて、それによって出力規模や利用分野、予想されるユーザーがお互いに異なっている (表 1.1.3-1)。

表 1.1.3-1 各種燃料電池の比較[8]

	リン酸形 PAFC	熔融炭酸塩形 MCFC	固体酸化物形 SOFC	固体高分子形 PEFC	アルカリ形 AFC
電解質	H ₃ PO ₄	熔融炭酸塩	セラミックス	高分子膜	KOH/H ₂ O
作動温度 (°C)	200	650	800-1000	80	60-80
燃料	H ₂ /改質ガス	H ₂ /CO/改質ガス	H ₂ /CO/CH ₄ /改質ガス	H ₂ /改質ガス	H ₂
改質方式	外部	外部/内部	外部/内部	外部	
酸化剤	O ₂ /空気	CO ₂ /O ₂ /空気	O ₂ /空気	O ₂ /空気	O ₂ /空気
発電効率 (% LHV)	36-45	45-55	45-50	32-40	50-60

燃料電池が注目を集めている最大の理由は、発電効率が高いことである。ディーゼル発電機や火力

発電所は、石油や天然ガスのような化石燃料から電気を取り出すシステムである。化石燃料の持つ化学エネルギーを電気エネルギーに変換する。ただ、ディーゼル発電機や火力発電所は、燃料をボイラーで燃焼させて蒸気（熱エネルギー）を発生させ、その蒸気（熱エネルギー）によってタービン等の熱機関を回転させ（運動エネルギー）これで発電機を回して電気エネルギーを作り出している。すなわち、何段階ものエネルギー変換プロセスを経て電気を生み出しているため、それぞれの段階で損失が生じ、効率的に発電することが難しい。

これに対して燃料電池は、電気化学反応によって化学エネルギーから直接電気を取り出している。図 1.1.3-2 に示すように、極めて短いパスで発電できるため、高い効率が期待できる。さらに、電気化学反応によって熱エネルギーが発生する。この熱をコージェネレーションとして利用することにより、より高効率な発電システムを実現することが可能である。

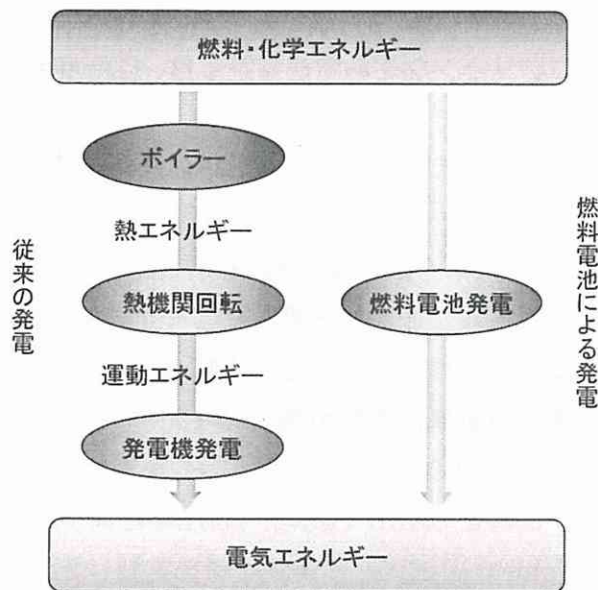


図 1.1.3-2 燃料電池発電と従来の発電プロセスの比較

燃料電池の特徴として「エネルギー効率が低い」ことを述べたが、「環境負荷が少ない」ことも重要である。反応性生物は原理的に水のみで、硫黄酸化物（SO_x）、窒素酸化物（NO_x）、粒子状物質（PM）などを含んだ有害な排気ガスを排出しない。ただし、燃料改質プロセスを持つ燃料電池システムでは少量発生するが、その排出量は極めて少ない。また、熱機関のように高速で作動するコンポーネント持たないため、振動や騒音が無く静かである。天然ガスや化石燃料を改質して水素を製造する過程で二酸化炭素の排出は避けられないが、これは費用を無視すれば回収することができる。

さらに、水素で動作する燃料電池は、水素を作り出す原料として、天然ガスやガソリン、ナフサ、灯油などの化石燃料、バイオマスによるメタノール、原子力や風力、地熱を使った電気など色々な方法が考えられるため「エネルギー源の多様化」が可能になる。エネルギー資源をほとんど持たない日本にとっては、エネルギーセキュリティの向上が見込めることから、政府が大いに注目している特長である。

そして、燃料電池を小さな発電所として使うことにより、工場やビルや家庭での地域密着型の発電が出来、「エネルギーの分散が可能」となる。燃料電池による分散電源は電気エネルギーの送電ロスが極めて小さいメリットに加え、発電時の熱エネルギーと組み合わせることによってさらに効率のよいシステムが期待できる。

1.1.4. 燃料電池自動車

こうした特長を有する燃料電池は、定置型発電システムとしての利用方法と乗用車へ搭載して燃料電池自動車として利用する方法が積極的に検討されている。

燃料電池自動車の開発は、1990年代から始められた。ダイムラークライスラー社がバンタイプの自動車にPEFCを搭載したのが最初といわれている。PEFCの性能向上と小型化が進むにつれ、1996年以降、トヨタ、日産、ホンダ、三菱、スズキ、GMなど各自動車メーカーが開発にしのぎを削っている。

自動車会社が燃料電池自動車の開発に巨額の開発費を投じる理由は何だろうか。その背景として、地球温暖化問題によるところが大きい。従来のガソリン車やディーゼル車では、どんなに効率化を進めても、化石燃料の燃焼・爆発→二酸化炭素、窒素酸化物、硫黄酸化物等の排出→大気汚染、地球温暖化のサイクルから逃れることができない。特に二酸化炭素排出量の削減が命題となりつつある現在、二酸化炭素を排出しないクリーンな燃料電池自動車は、自動車会社にとって環境対応の切り札と言える。

一方、カリフォルニアの大気汚染状況を改善するために定められた「カリフォルニア低排出車両法」の主要プログラムとして、カリフォルニア州大気資源局（California Air Resources board : CARB）は、1990年にゼロ排出ガス車（Zero Emission Vehicle : ZEV）プログラムを採択した。これは、各自動車メーカーに対し、各社が販売する自動車の一定の割合はZero Emission Vehicle（汚染物質を排出しない車）にすることを要求している。当時のZEVプログラムは、バッテリー式の電気自動車を想定していたが、電気自動車は走行距離（50-100マイル）の短さ、高速道路走行に十分な最高速度、狭い室内空間、充電時間の長さ（数時間）、充電スタンド不足などの問題によって、期待したほどの市場が無かった。これをCARBも認め、2001年に同プログラムはハイブリッド車を含む低排出車（Low Emission Vehicle : LEV）の規制緩和を実施した。その後、自動車メーカーは、カリフォルニア州は連邦規制に反する燃費基準を定めようとしていると主張して、カリフォルニア州を提訴するなど迷走している。

カリフォルニア州を例にあげたが、自動車の排出ガスに関連する日米欧の規制は強化される方向にあり、さらには通常の内燃機関では到達できないレベルの基準値や目標値が設定される可能性がある。各自動車メーカーは、近い将来これに対応する必要があるとして燃料電池自動車の開発に取り組んでいる。図1.1.4-1に最近の燃料電池自動車の例を示す。





図 1.1.4-1 最近の燃料電池自動車の例[9]

燃料電池自動車は、基本的に「水素燃料タンク」「燃料電池（スタック）」「制御装置」「モーター」二次電池等の「補助電源」「コンプレッサー」等の6つの部分で構成されている。（図 1.1.4-2）

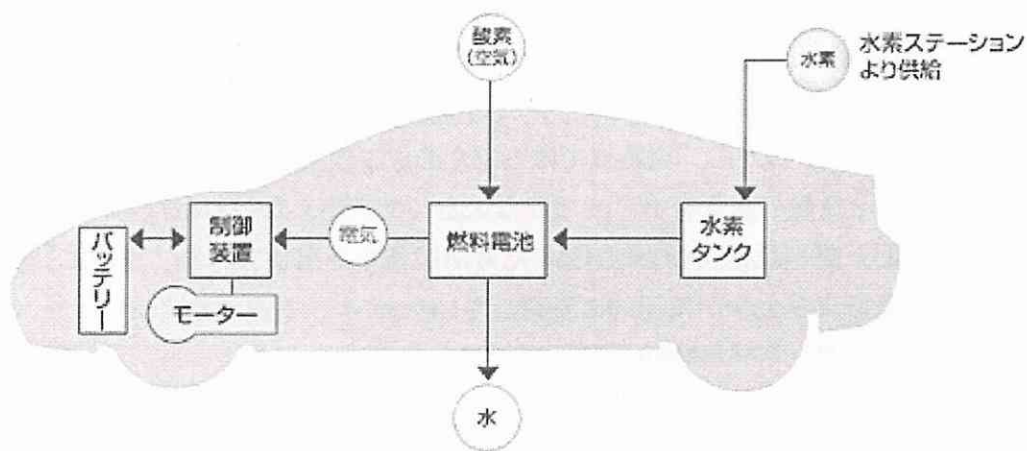


図 1.1.4-2 燃料電池自動車の構造[10]

水素燃料タンクは、現在 35MPa の高圧水素タンクが一般的に利用されている。心臓部である燃料電池はスタックと呼ばれ、水素と空気中の酸素で発電する。燃料電池自動車の走行に必要な電力を得るために、コンプレッサーを使って十分な量の空気（酸素）を燃料電池スタックへ供給する。制御装置は、発電した電気の直流/交流変換や電圧変換、出力調整などを行なう。制御装置を介した電気はモーターへ伝えられ燃料電池自動車の駆動源となる。補助電源には二次電池やキャパシタが用いられる。補助電源には一定量の電力が蓄えられていて、急発進、急加速時に燃料電池からの起電力の不足分を補う。また、ブレーキによる制動時に運動エネルギーを電気エネルギーとして回収し蓄電することで電気を効率的に利用する。

燃料電池自動車の燃料となる水素は、純水素を搭載する方法が一般的である。数年前は圧縮天然ガス自動車とほぼ同じ圧力 25MPa の水素タンクでスタートしたが、現時点では 35MPa のタンクを搭載する方式がもっとも多い。さらに、燃料電池自動車の航続距離をガソリン車並の 500km にするために、水素燃料タンクの高圧化（70MPa）が検討されている（図 1.1.4-3）。しかし、水素を 70MPa にしても圧縮率の関係で 35MPa タンクの 2 倍の水素を搭載できるわけではなく、昇圧にコストがかかることや安全性の問題も未検討であることから、最終的な水素燃料タンクの圧力は 35MPa と 70MPa の間ではないかともいわれている。また、高圧水素と水素吸蔵合金を組み合わせることでより多くの水素を貯蔵しようとする研究も盛んに行なわれている。

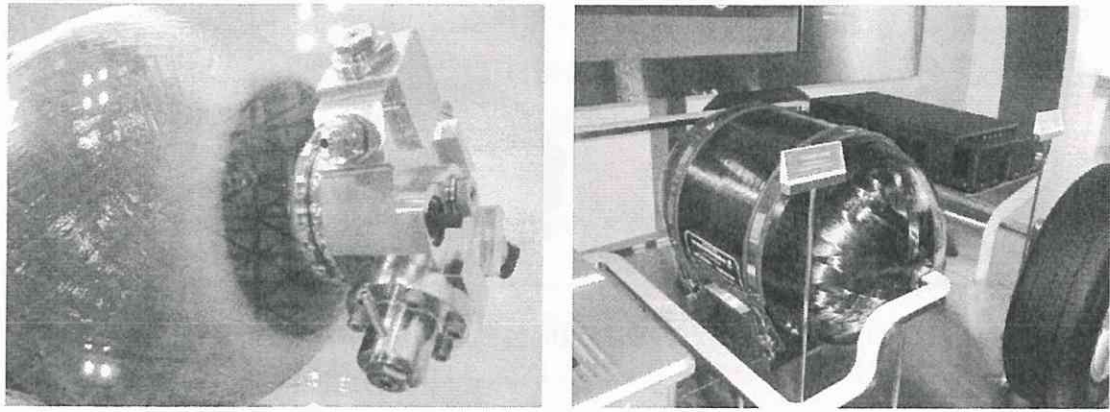


図 1.1.4-3 燃料電池自動車搭載用 70MPa 水素容器

左：トヨタ、右：日産 2005 年東京モーターショーにて撮影

一方、より多くの水素を搭載するために液体水素を燃料電池自動車へ搭載することが検討されている。液体水素はマイナス 253°C 程度の極低温で保持しなければならないため、タンクを特殊な二重構造にしている（図 1.1.4-4）。しかし、現時点では外部からタンクへ進入する熱を完全に遮断することが出来ないため、常に一定量の水素をボイルオフガスとして放出しなければならない問題がある。液体水素タンクを搭載した燃料電池自動車は GM だけが試作車を出している。水素エンジン自動車を含めれば、BMW や武蔵工業大学が積極的に研究している。

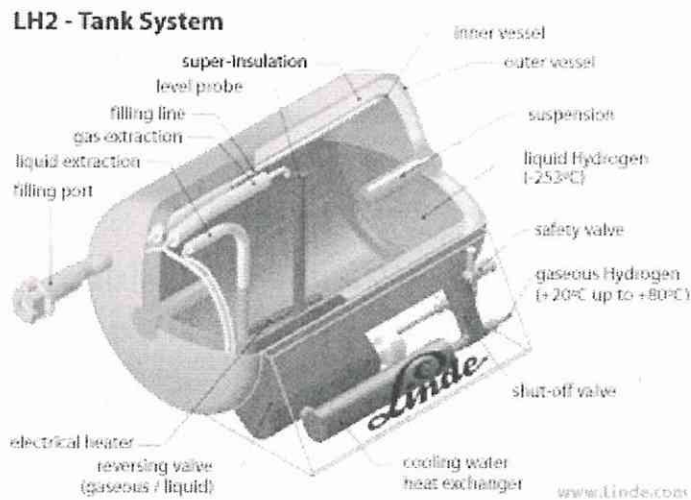


図 1.1.4-4 液体水素タンクの例[11]

純水素を搭載する以外の方法として、石油等の燃料タンクと水素製造装置を自動車の上に搭載する車上改質方式がある。これは、既存の燃料を利用するため既存のインフラを活用できるメリットがあるものの、起動時間、安全性などのハードルが高いため、現在自動車会社は試作車を公道に出していない。

1.1.5. 水素スタンド

本論文では、燃料電池自動車へ水素を充てんする設備を「水素スタンド」と呼ぶことにする。既存のガソリンスタンドに準じた。ちなみに、高圧ガス保安法においては、常用圧力 40MPa 以下の水素スタンドを「特定圧縮水素スタンド」という。経済産業省が実施している「水素・燃料電池実証プロジェクト」Japan Hydrogen & Fuel Cell demonstration project (JHFC) では、「水素ステーション」という。また、水素充てん設備に加えて水素供給用のパイプラインや自家発電用の定置型燃料電池などを含み、大きな概念として「水素インフラ」と呼ぶこともある。

水素スタンドは、燃料電池自動車の燃料搭載方法に対応した形式が必要である。圧縮水素を利用する場合、水素スタンドは燃料電池自動車の車載タンクとの差圧で水素を充てんするのが一般的である。このため水素スタンドは燃料電池自動車よりも高い圧力で大量の水素を保持している。現在、35MPa の車載タンクを搭載する燃料電池自動車に対して、水素スタンドは常用圧力 40MPa の機器で対応している。しかし、前述のように燃料電池自動車の航続距離を延長する目的で燃料電池自動車に圧力 70MPa のタンクを搭載する検討が進められている。水素スタンドもこの動きに応じて機器の開発を進めている。しかし、水素スタンド側の常用圧力が決定していない。おそらく 80MPa になると予想されるが、ここでは 70MPa 充てん対応水素スタンドと呼ぶ。

一方、現時点で水素スタンドの設置数が少ないため、地方で燃料電池自動車のイベントなどに対応することが難しい。そこで水素充てん設備をトラックに搭載した移動式水素スタンドが活躍している。その他水素スタンドの形式に関する名称は統一されていないが、本論文では表 1.1.5-1 のように呼ぶこととする。

表 1.1.5-1 水素スタンドの名称と対応する燃料電池自動車

水素スタンド名称	特徴	対応する燃料電池自動車 (タンク圧力)
圧縮水素スタンド又は 35MPa 充てん対応水素スタンド	圧縮水素 常用圧力 40MPa	圧縮水素 (～35MPa)
圧縮水素スタンド又は 70MPa 充てん対応水素スタンド	圧縮水素 常用圧力 80MPa (未定)	圧縮水素 (～70MPa)
液体水素スタンド	液体水素 (-253℃) 常用圧力 0.35MPa	液体水素 (～0.3MPa)
移動式水素スタンド	圧縮水素 常用圧力 40～約 80MPa	圧縮水素 (～70MPa)

圧縮水素スタンド (35MPa 充てん対応水素スタンド、70MPa 充てん対応水素スタンド) ならびに液体水素スタンドのおもな設備を図 1.1.5-1 に示す。

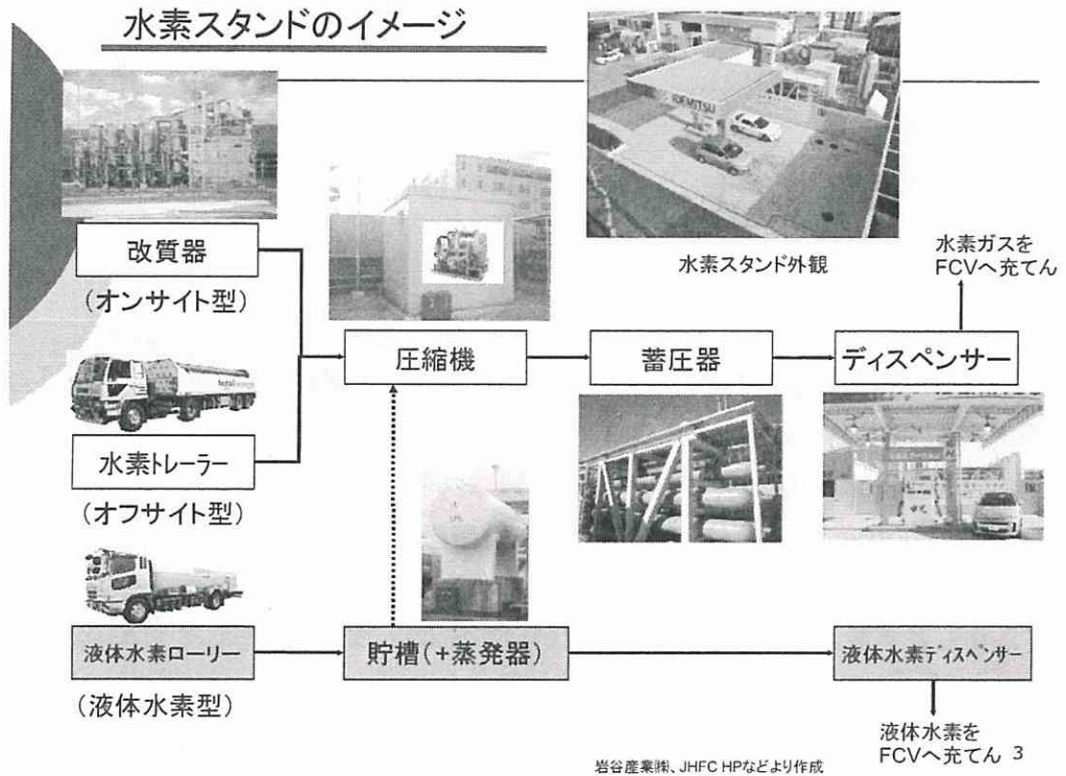


図 1.1.5-1 水素スタンドのおもな設備

(1) 圧縮水素スタンド

圧縮水素スタンドには、オンサイト型とオフサイト型の2つのタイプがある。図 1.1.5-2 にその写真を示す。

a) オンサイト型

水素スタンドの敷地内で水素を製造し燃料電池自動車へ水素を充てんする水素スタンドのこと。水素製造装置として天然ガスや化石燃料を原燃料とした改質器または水の電気分解による水電解装置などを設置している。製造された水素は圧縮機で必要な圧力まで昇圧され、蓄圧器と呼ばれる貯槽(容器)に蓄えられる。燃料電池自動車へ水素を充てんする場合は、ディスペンサーから充てんを行なう。

b) オフサイト型

水素製造工場など水素スタンドの外部で製造された水素を、水素トレーラーなどを使って水素スタンドへ搬入し、昇圧、貯蔵、充てんを行なう水素スタンドのこと。オンサイト型との違いは水素製造装置を持たない点である。オフサイト型水素スタンドでは、水素トレーラーを二台以上駐車できるスペースを持ち、一台は必ず水素スタンドに停車させておいて蓄圧器の一部(低圧バンク)として利用することが多い。



図 1.1.5-2 圧縮水素を利用した水素スタンドの例
右：オンサイト型（横浜・大黒水素ステーション）、
左：オフサイト型（愛・地球博水素ステーション/瀬戸北） [9]

上記の 2 タイプにおいて、使用する設備はほぼ同じである。以下に簡単な解説を行なう。

- ①水素製造装置（改質器）：天然ガスや化石燃料（ナフサ、ガソリン、灯油など）を原燃料として水蒸気改質方法によって水素を発生させる改質器や水の電気分解による水電解装置がこれに当たる。一般に水素製造装置は、高圧ガス保安法の規制を受けないように 1MPa 未満で設計/運転されることが多い。
- ②圧縮機：電力又は空気圧で作動し、水素ガスの圧力を常用圧力まで昇圧させる。圧縮機内部の水素量は小さいが、往復運動や回転運動する部分を持つため事故時の飛散物防止措置が必要。蓄圧器を省略して圧縮機から昇圧した水素を直接燃料電池自動車の車載タンクへ充てんする方式もある。圧縮機からの直接充てんの場合は、蓄圧器容量を小さく出来るためスタンドの危険性が低くなるメリットがある反面、圧縮機出口のガスクーラーが故障した場合は、圧縮機で昇圧されて高温になった水素ガスが直接燃料電池自動車へ充てんされ、車載タンクを損傷させる可能性がある。
- ③蓄圧器：水素スタンドで大量の水素を貯蔵する貯槽のこと。高圧ガス保安法では、移動できるポンペを容器と呼び、地盤面に固定したタンクを貯槽という。蓄圧器は水素スタンドの貯槽。一般に燃料電池自動車への充てんは、蓄圧器と車載タンクの圧力差を使って圧力の高い水素スタンドから圧力の低い燃料電池自動車へ充てんする。
- ④ディスペンサー：燃料電池自動車へ水素を充てんする装置。充てんノズル、ホース、流量計、遮断弁などガソリンスタンドの給油機とほぼ同じ機能を持つ。

（2）液体水素スタンド

液体水素スタンドは、液体水素を搭載する燃料電池自動車などに液体水素を充てんする方式と、水素製造工場から液体水素で輸送し水素スタンドで貯蔵までを行ない、蒸発器で蒸発させて水素ガスとし、これを圧縮水素スタンドと同様に圧縮機で昇圧、蓄圧器へ貯蔵、ディスペンサーへ充てんする方式の二種類がある。液体水素は専用の液体水素ローリーを使って輸送される。液体水素スタンドでは、外槽と内槽を二重構造とし、その間を真空にして断熱効率を高めた断熱二重貯槽で液体水素を貯蔵する。液体水素が通過する配管も断熱のために二重構造になっている。圧縮水素を利用する水素スタンドと比較して、設備上や運転上における違いが大きいため、十分なりスクアセスメントが必要である。図 1.1.5-3 に液体水素スタンドの例を示す。

図 1.1.5-3 に示した有明水素ステーションは、2008 年現在日本で唯一液体水素を車載タンクへ充てんする液体水素スタンドである。しかし、液体水素の蒸発ロスをなくすことや取り扱いの難しさを

どの理由から液体水素タンクを搭載するFCVや水素エンジン自動車の台数は減少傾向である。さらに敷地契約の理由などにより有明水素ステーションは2008年末に閉鎖される方向である。しかし、液体水素は圧縮水素に比べて輸送効率に優れているなどのメリットがあることから、工場で大量に製造した水素を液体水素の状態の水素ステーションへ輸送、貯蔵し、必要に応じて気化させて利用する形式が有望である。JHFC 関西空港水素ステーションはこの形式を採用している。

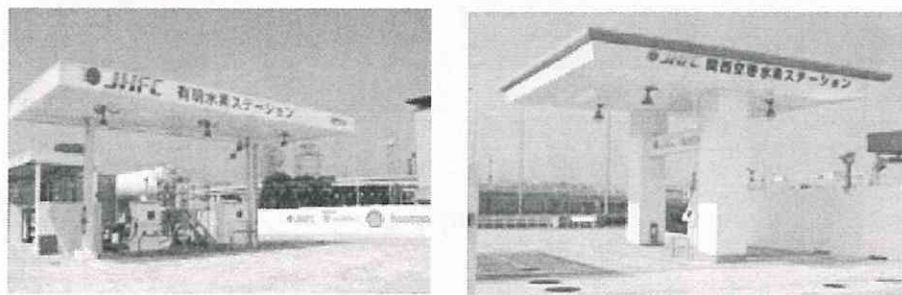


図 1.1.5-3 液体水素スタンドの例

左：JHFC 有明水素ステーション、右：JHFC 関西空港水素ステーション[9]

1.2. リスクアセスメント

1.2.1. リスクの概念

近年、我が国において「リスク」という概念が極めて重要なものとなりつつある。日本でリスクという言葉は、安全ではなくむしろ危険をイメージするものとして使われてきた。しかし、国際的には標準的な指標として幅広く認知されており、企業活動の広い範囲でマネジメント等に活用されている。日本においても、社会情勢が大きく変化しつつあり、もはや「リスク」という概念抜きにしては、合理的な企業活動のマネジメントが困難になってきている。その例として、戦後の高度成長期に整備した多くの社会的インフラが更新時期を迎えつつあるものの、新規設備への投資が困難であるなどの事情から、経年構造物を適切な管理のもとに使用する必要性が高まっていることがあげられる。これは安全を担保したうえで法定検査や設備投資の費用を低減する規制緩和の動向とともに、保全に関する自己責任が欧米並みに強く求められてきていることも一因と言える。また、企業が工場などを立地するにあたっては、地域社会や投資家に対して、製造設備の安全性、安全管理に対する説明責任が企業に対して強く求められるようになってきていることも背景にある。

このような要求にこたえるためには、機械設備の安全性を明確な手順のもとに定量的に表現したうえで、結果を表現する合理的な指標が求められる。この要求を満足するものとして注目を集めるようになったのが「リスク」という概念の導入である[12]。

リスクの定義にはさまざまあるが、大きく二つに分けられる。投機のリスクのように儲かることもあるリスク（ポジティブリスクともいう）と災害や機械で怪我をするような損失や損害のみを考えたリスク（ネガティブリスクともいう）である。ポジティブリスクには、広く経営リスク、政治リスク、革新リスク等を含めることもある。一方、ネガティブリスクは通常、人的損害（傷害、健康障害）や物的損害（財産の損失）、および環境破壊などが対象になる。近年、厳密な数学的定義がなされ、デリバティブ（金融派生商品）などで取扱われるリスクは前者のリスクに含まれる。本研究で対象とする水素スタンドの安全におけるリスクはもちろん後者のリスクである。

現在の国際安全規格ではリスクについて、規格へ安全に関する事項を取り入れる場合の考え方を示しているガイドラインとして、ISO/IEC Guide 51 [13]に示されている。そこでは、リスク（Risk）：

「危害 (harm) の発生確率と危害のひどさ (Severity) の組合せ」と定義されている。ここでいう危害とは「人の受ける物理的傷害若しくは健康障害又は財産若しくは環境の受ける害」と定義されている。一般に機械安全や労働安全における危害は、特に前半の「人の受ける物理的傷害若しくは健康障害」のことを意味している。事実、機械類の安全性に関する国際規格の中で、最も基本となる ISO12100 (機械類の安全性—基本概念、設計のための一般原則) という規格では、危害を「身体的傷害または健康障害」と狭く定義したうえで、リスクを定義している。つまりリスクとは、「人体に傷害や障害を与えるような事故の起きる確率と起きた時のその事故のひどさの組合せ」すなわち両者を一緒に考えるということである。

1.2.2. リスクアセスメントとは

リスクアセスメントとは、リスクの事前評価のことである。機械や装置を安全に利用するために、危険なところを前もって見つけておいて、事前にそれがどのくらい危ないものであるかを評価し、その評価の大きさに従ってきちんと安全対策を講じておくというのがリスクアセスメントの意味である。日本語では、事前に調査して大きさを決めておくということから、「査定」という用語を使うこともある。リスクアセスメントは、事故の未然防止というのが最も大切な考え方のポイントである。

従来日本の安全は、事故が起きて初めて本当に危ないということが分かり、後から安全装置をつける傾向にある。逆に、事故が起きるまで手を打たない傾向があるということもできる。事故の発生が大前提で、事故が起きない限り事故防止に関する投資は行わないという考え方である。それに対してこのリスクアセスメントの考え方は、前もって危険なところを見つけて手を打っておくという未然防止の考え方である。

ひと昔前の日本の安全は、前述したような考え方が多かったが、最近ではほとんどの国でリスクアセスメントが標準の考え方になってきている。リスクアセスメントはグローバルな考え方になりつつある。残念ながら、日本ではやっとリスクアセスメントの考え方が導入されつつある段階で、メーカーもユーザーもまだ慣れていないとは言い難い。なかでもリスクアセスメントは、システムチェック (組織的、体系的) に文書化し、常に見直す形を導入し、積み重ねが可能で、誰に対しても説明が可能な形 (システム) を求めている点において不慣れである。しかし、これまで日本の安全は怪しかったのかというとそうではない。実際には現場レベルから危険なところを見直していこうとする KYT (危険予知訓練) 活動や小集団活動などが行われてきた。これはまさしくリスクアセスメントに相当する取り組みのひとつと言える。我が国の、特に大手の製造業においては、世界でも最も安全な国のひとつであることは間違いないと思う。今後、日本においてリスクアセスメントの導入と普及が徐々に進むであろう[14]。

1.2.3. リスクアセスメントの手順

対象となる装置やシステムのリスクを解析、評価し、管理するリスクマネジメントは、事故や災害など、事業活動におけるリスクをコントロールしたり、影響を可能な限り小さくしたりする手法の一つである。ISO/IEC Guide 73 [15]によれば、リスクマネジメントとは「リスクに関して組織を指揮し、制御する活動」と定義されており、その構成と手順は図 1.2.3-1 のように表わされる。ここでは事象の洗い出し (発見) に始まり、対象システムの特徴に基づいてハザードの想定 (特定) を行う。これがシナリオとなる。次に、想定したシナリオに従ってリスクの算定、評価を行いその結果があらかじめ設定された基準と比較して許容可能かどうかの判定を実施し、許容可能な場合には対策の実

施・維持、さらにはリスクの回避と局限化の検討を行う。一方、リスク評価の結果が許容できないと判断された場合には、当該リスクを低減する手段を可能な限り検討して妥当な対策を採用し、対策実施後に許容可能なレベルとなるまでリスク算定からの手順を繰り返す。

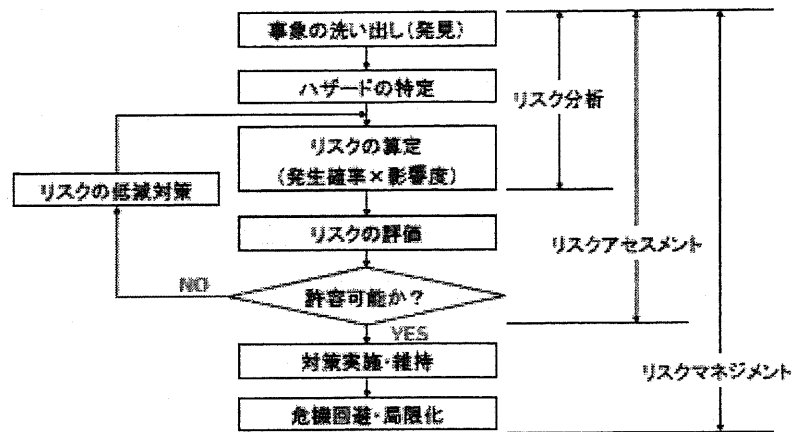


図 1.2.3-1 リスクマネジメントの手順

産業災害のリスク (R) は、特定の条件下 (すなわち特定のシナリオ) において発生しうる有害な事象の予測される発生確率 (または頻度) とその影響の大きさとして定義され、一般に下記のように表現される。

$$R_i = (P_i \times C_i)$$

ここで、P (probability) はトラブルや故障、事故の発生確率または頻度を示し、C (consequence) はそれによる影響度 (影響の大きさ)、添え字の i は i 番目のシナリオを表す。ここでシナリオとは、たとえば、爆発、火災、化学物質漏洩等が該当しそれぞれのシナリオごとに該当するリスクがある。一方、リスクと混同しがちな用語としてハザード (hazard) があるが、こちらはある状況下で人、物、環境に不利益な影響を起こしうるシステムに固有の性質と定義され、リスクとは明確に区別する。リスクアセスメントの手順を図 1.2.3-2 に示す。

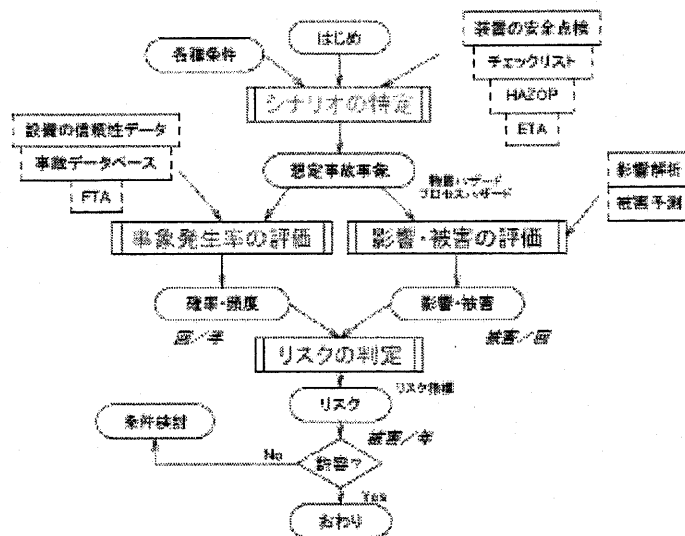


図 1.2.3-2 リスクアセスメントの手順

1.2.4. 国際安全規格に見るリスクアセスメント

リスクアセスメントはグローバルスタンダード化しつつある。実際に、現在の国際安全規格のなかでは、リスクアセスメントを実施することが大前提になっている。ISO(*)やIEC(**)で安全の規格を作るためのガイドラインとして、前述のISO/IEC Guide 51（安全面を規格に導入するためのガイドライン）が発行されている。そこには最初にリスクアセスメントを実施しなければならないことが明記されている。

ここで、現在の国際安全規格の体系について概観する[16][17]。ISO および IEC 等で検討、実施されている現在の機械安全に関する国際標準規格は、極めて高い理念に基づき、広い範囲を対象としたものとして体系化されつつある。その第一の特徴は、図 1.2.4-1 に示すように規格を三段階に階層化していることである。

- A 規格：すべての規格類で共通に利用できる基本概念や一般技術原則を扱う基本安全規格
- B 規格：広範囲の機械類で利用できるように安全規格や安全装置を扱うグループ安全規格
- C 規格：特定の機械に対する詳細な安全規格を扱う個別機械安全規格

下位規格は上位規格に準拠するという統一的な規格体系になっている。三層構造になっている理由は、膨大な数の規格類に統一的な整合性をもたせるためだけでなく、安全技術や機械技術の進歩に柔軟に対応すること、さらに個別の機械に対しては機械ごとの、国ごとの独自性を認めるためである。

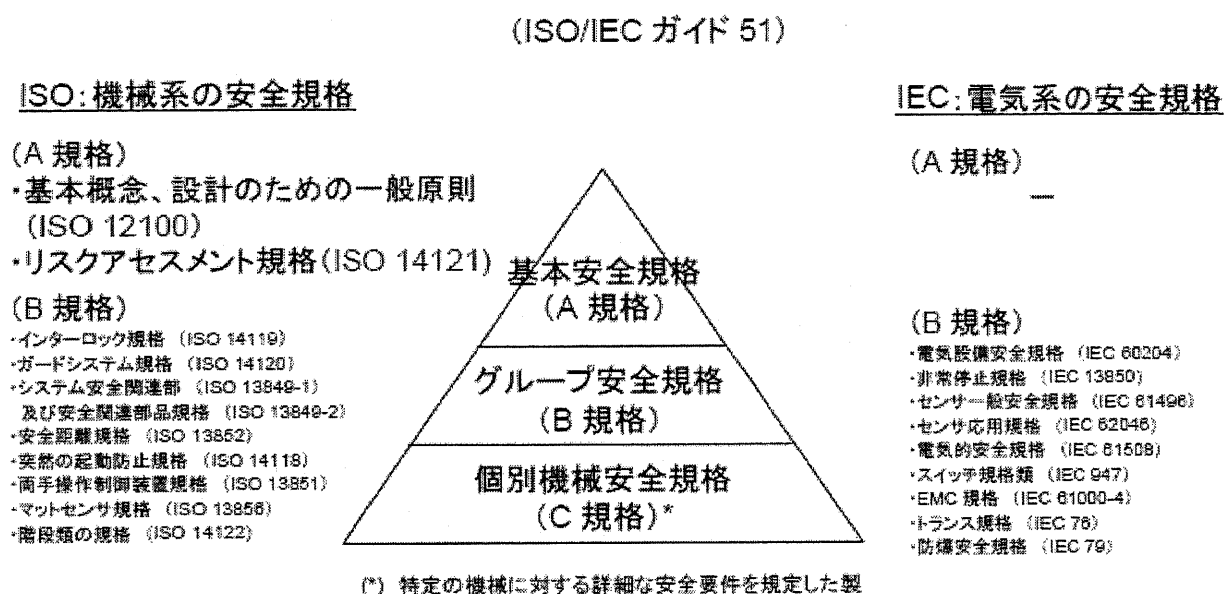


図 1.2.4-1 国際安全規格の階層化構成

第二の特徴は、基本的にリスクに基づく安全評価であって、リスクアセスメントの実施を大前提としていることである。機械に依存する危険源ごとにリスクを見積り、大きなリスクを有する危険源からそれに見合ったランク付けされた安全対策を採用することを要請している。

第三の特徴は、安全を実現するには順番があり、設計で安全を確保する本質安全設計が第一であって、作業者の訓練で安全を確保するのは順番として最後であるという安全の階層的実現方法を主張していることである。

このように、現在の国際安全規格の中で、リスクアセスメントの位置づけは一番大事な考え方になっている。現実にこれに従って B 規格としてリスクアセスメントに基づいた各種の共通安全規格が

出来上がっており、C 規格である個別機械安全規格はリスクアセスメントを行なう大前提のもとに構成されている。

以上の考え方に従って、世界各国で国際安全規格が出来上がりつつある。例えばアメリカでは、ロボットの規格、半導体装置の規格などすべて大前提としてリスクアセスメントが入っている。今後、日本においてもリスクアセスメントの実施が求められる理由がここにある。

ISO(*) : International Organization for Standardization は国際標準化機構と呼ばれ、機械などの（電気や通信以外の）国際標準を検討・作成している民間団体。

IEC(**) : International Electro technical Commission は国際電気標準会議と呼ばれる電気関係の国際標準を検討・作成している民間団体。

1.3. 研究の目的と法規制

1.3.1. 研究の目的

1.1節で述べたように、究極のエネルギーとして水素エネルギーの利用が世界中で注目されている。中でも燃料電池自動車は日本や欧米をはじめとした多くの国々で走り始めていて、これに伴い燃料電池自動車に水素を供給するための水素スタンドの建設が始まりつつある。燃料電池自動車とともに水素スタンドを普及させるためには、水素スタンドを利用者が利用しやすい場所へ設置する必要がある。しかし、これまでの規制は一般の人々による高圧水素の利用を想定していなかったため、市街地に水素スタンドを設置することが非常に難しい規制になっていた。そこで、水素スタンドの安全を確保しつつ市街地に設置できるように規制を見直す必要があった。

一方、水素スタンドで使用される機器は、基本的には従来技術の延長で対応できると考えられているものの、350気圧や700気圧を超える圧力の水素環境下で長期間の使用実績が無く、故障や事故に関する統計データも無いことから、これまでのような実績の積み上げによる安全性検討が難しい状況であった。

こうした背景のもと、本論文では、水素スタンドの規制見直しに資する安全対策案の策定を目的に、国際安全規格として認められつつあるリスクの概念を用いて水素スタンドのリスクアセスメントに関する研究を行なった。対象とする水素スタンドは、圧縮水素を利用した35MPa充てん対応水素スタンドと70MPa充てん対応水素スタンド、および液体水素スタンドの3つである。水素スタンドの安全性を評価するためのリスクマトリクスの提案を行ない、これを使ってリスクアセスメントを実施し、水素スタンドに必要な安全対策案を策定する。これによってリスクアセスメントは水素スタンドに対する有効な安全対策検討手法であることを示す。

1.3.2. 水素スタンドに関する規制の見直し状況と本研究の関係

燃料電池は、発電効率が高く有害な排出物を出さないうえ、環境負荷の低減に寄与すること、エネルギーセキュリティの確保にも貢献できること、日本の産業の競争力強化も期待できることなどから、実用化・普及が強く期待されている。しかし、燃料電池とそのエネルギー源である水素は、爆発性のある気体であるため、一般消費者を含む不特定多数の人々が取り扱うことを考慮して、安全性を確保しつつその実用化・普及を進めていくことが重要である。2002年当時の諸規制は、燃料電池と水素に対し一般の人々が利用することを想定した体系になっていなかったため、燃料電池に係る規制について、安全性の確保を前提とした規制の見直しが必要であった。

燃料電池の実用化に関して小泉元総理大臣は、2002年2月の施政方針演説において、自動車の動力や家庭の電源として三年以内の実用化を目指すと明言した。その後、2002年4月26日の閣僚懇談会において、試験的な市販が想定される燃料電池自動車の第一号車を含め数台を政府として率先導入することを表明した。また、関係閣僚に対して、率先導入に必要な措置を2002年中に講じるとともに、初期段階の普及を想定し、2005年を目途に、安全性の確保を前提としつつ、包括的な規制の再点検を進めるよう指示を行なった。

上記の指示を受け、2002年5月、安全性の確保を前提とした燃料電池に係る包括的な規制の再点検等について、関係省庁の綿密な連携を図るため、内閣官房に内閣府及び関係省庁の局長等で構成される「燃料電池実用化に関する関係省庁連絡会議」が設置された。また、連絡会議に併せて設置された、内閣府及び関係省庁の課長等で構成される連絡会幹事会において、事業者団体から規制再点検に係る要望項目のヒアリングを実施するとともに、規制再点検に必要なデータ等の明確化、規制項目ご

との官民の役割分担の明確化、規制再点検の手順・スケジュールの明確化等について、精力的な検討が行なわれた。その結果、燃料電池の実用化に向けて 2005 年までに 6 法律 28 項目の規制の見直しが必要であることが示された。表 1.3.2-1 にその規制見直し項目の一覧を示す。

表 1.3.2-1 6 法律 28 項目の規制見直し項目

NO	種別	法令	規制の再点検項目
1	燃料電池自動車	道路運送車両法	FCVの公道走行認定
2	燃料電池自動車	道路法	FCVの水底トンネル通行規制
3	燃料電池自動車	消防法	FCVの地下駐車場等への進入制限
4	燃料電池自動車	高圧ガス法	輸入FCV車載容器の取り外し検査
5	水素スタンド	高圧ガス法	移動式水素スタンドの保安統括者常駐義務
6	燃料電池自動車	道路法	水底トンネル通過時の積載水素量
7	燃料電池自動車	高圧ガス法	FCV車載容器検査の形式
8	燃料電池自動車	高圧ガス法	FCV車載容器用バルブ試験基準
9	燃料電池自動車	高圧ガス法	FCV車載容器に関する複合容器基準
10	燃料電池自動車	高圧ガス法	FCV車載容器の再検査基準
11	燃料電池自動車	道路運送車両法	FCVの型式認定制度
12	燃料電池自動車	消防法	FCV地下駐車場等への進入制限と消火設備
13	水素スタンド	高圧ガス法	水素スタンドの保安距離
14	水素スタンド	高圧ガス法	水素スタンドの保安統括者の選任、常駐義務
15	水素スタンド	高圧ガス法	水素スタンドにおけるガス漏れ検知手段
16	水素スタンド	高圧ガス法	移動式水素スタンドにおける充填場所制限
17	水素スタンド	高圧ガス法	移動式水素スタンドにおけるプラスチック複合容器基準
18	水素スタンド	高圧ガス法	液体水素ローリーの充填率向上
19	水素スタンド	高圧ガス法	水素スタンドの検査周期延長
20	水素スタンド	建築基準法	市街地における水素スタンドの建設規制
21	水素スタンド	建築基準法	市街地における水素スタンドの水素保有量の制限
22	水素スタンド	道路法	完成FCV輸送車両(トレーラー)の水底トンネル通行規制
23	水素スタンド	消防法	ガソリンスタンドとの併設
24	定置型FC	電気事業法	電気主任技術者の選任の不要化
25	定置型FC	電気事業法	窒素ページの不要化
26	定置型FC	消防法	発電設備の設置届出の不要化
27	定置型FC	消防法	発電設備と建築物の離隔距離縮小
28	定置型FC	消防法	家庭用改質器の逆火防止設備の不要化

FCV:燃料電池自動車

こうした政府の動きを受けて、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下「NEDO」という。）は、1993 年から取り組んでいた水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術(WE-NET)を 1 年前倒しで 2002 年に終了させ、新たなプロジェクトである「水素安全利用等基盤技術開発」を立ち上げた。この技術開発プロジェクトは、燃料電池ならびに水素エネルギー利用分野における日本の産業競争力強化、中長期的なエネルギー基盤技術の確立、エネルギー安定供給確保に資するとともに、エネルギーの使用に由来する温室効果ガスの排出削減や PM や NO_x 等の有害排出物の抑制など環境問題の解決に資することを目的とし、「安全技術」と「実用化技術」の二つの柱で構成されていた。

財団法人石油産業活性化センター（以下「PEC」という。）は、燃料電池自動車と水素スタンドの普及促進を図る主旨に賛同し、「水素安全利用等基盤技術開発」の一部である「水素インフラに関わる安全技術の研究開発」を受託し、水素スタンドの規制見直しに資する安全性検証に取り組むこととなった。本研究は、この水素インフラに関わる安全技術研究をベースにしている。

本研究は、水素スタンド（35MPa 充てん対応水素スタンド）に対しリスクアセスメント手法を用いて安全性を評価し安全対策を検討した。その結果、約 90 件の安全対策案を作成した。これについて水素スタンドと水素安全の専門家からなる「水素インフラに関する安全技術検討委員会」（横浜国立大学 田村昌三教授）にて承認を得た後、高圧ガス保安協会が主催する「燃料電池システム技術基準調査委員会」（横浜国立大学 小林英男教授）にて技術的な承認を得た。そして、この案をベースに経済産業省原子力安全・保安院保安課にて省令作成が行なわれ、2005 年 4 月から特定圧縮水素ス

スタンド（40MPa）に関する規制として高圧ガス保安法の一般高圧ガス保安規則（以下、一般則）第7条の3が施行された。つまり本研究の一部は既に規制へ反映されている。

しかし、規制を作るだけでは不十分で、常にメンテナンスをする必要がある。水素スタンドに関しては、液体水素を搭載するFCVまたは水素エンジン自動車用に液体水素を充てんするタイプの水素スタンドに関する見直しが必要である。また、圧縮水素ガスタンクを搭載するFCVについても航続距離をガソリン車並の500kmに伸ばすため、車載タンク圧力を35MPaから70MPaに引き上げられることが検討されている。こうしたFCVに対応するため、70MPa充てん対応水素スタンドの規制が必要である。2008年2月現在、前述の特定圧縮水素スタンドに関する規制では70MPa充てん対応水素スタンドをカバーすることができないことから、圧力に関する上限がなく、一般的な高圧ガス設備に対する基準である一般則第6条を適用せざるを得ないという矛盾点が生じている。こうした状況を踏まえ、本研究では水素スタンドにリスクアセスメントを行い、安全性評価を行なうことで規制見直しに資する安全対策案を提案する。図1.3.2-1に本研究とその成果を規制へ反映するイメージを示す。

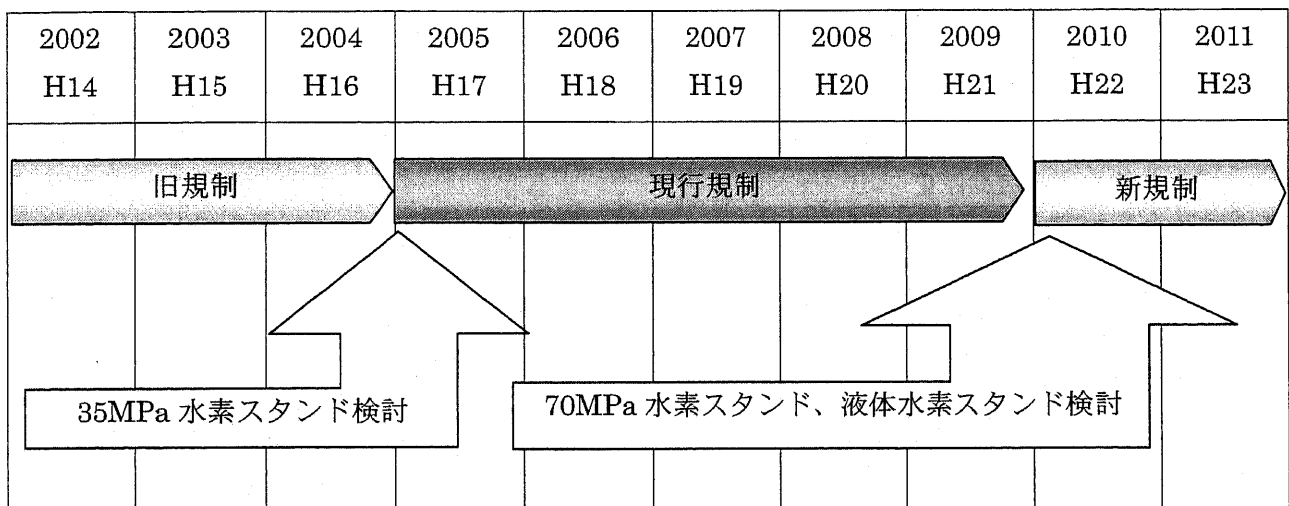


図 1.3.2-1 本研究と規制への反映イメージ

1.3.3. 水素スタンドに関する現行規制の概要と規制見直しの方向性

(1) 高圧ガス保安法

(a) 現行規制の概要

日本で圧縮水素ガスまたは液体水素を取扱う水素スタンドを建設する場合、「高圧ガス保安法」に従わなければならない。高圧ガス保安法は、高圧ガスの有する危険性による災害を未然に防止するための法律である。この法律は1MPa以上の高圧ガスを扱う施設の位置、構造、設備の技術上の基準を定めている。この高圧ガス保安法は、保安の確保を目的として、目的を満足するために必要な性能が規定されている。この性能を満足するための具体的な基準の例は「例示基準」と呼ばれ、高圧ガス保安協会が発行している。

水素スタンドに関する規制は、一般則第7条の3に規定されている。ここで言う特定圧縮水素スタンドは、圧縮水素ガスを利用し、常用圧力が40MPa以下の水素スタンドである。スタンド側が40MPaである理由は、水素スタンドで35MPaのタンクを搭載するFCVへ水素を充てんする場合、スタンド側とFCVとの差圧を使って水素の充てんを行なうことから、水素スタンド側は約10%高い圧力で水素ガスを保持しておく必要があるためである。

また第7条の3は、2種類の特定圧縮水素スタンドを規定している。第1項が郊外に設置する場合を想定した「保安距離確保型」の圧縮水素スタンドで、第2項が市街地へ設置することを想定した「保安距離短縮型」の圧縮水素スタンドである。第1項の水素スタンドに比べて第2項のスタンドは、いくつかの安全対策を追加することによって安全を確保し距離を短縮することができる。それぞれが規定するおもな項目を表1.3.3-1に示す。

表 1.3.3-1 一般高圧ガス保安規則第7条の3（特定圧縮水素スタンドに係る技術上の基準）

	第1項 (保安距離確保型)	第2項 (保安距離短縮型)
設備から他の建築物までの距離	11.3m 以上	6m
ディスペンサーから道路までの距離	11.3m 以上	6m
火気施設までの距離	6m	6m
スタンド周囲の防火壁	—	必要
蓄圧器出口に取り付ける遮断装置	1個	2個
過流防止弁	—	必要
蓄圧器と遮断装置は同一フレーム内設置	—	必要
安全弁	必要	必要
漏洩検知+運転自動停止	必要	必要
火災検知器（ディスペンサー、蓄圧器）	—	必要
蓄圧器上部にスプリンクラー設置	—	必要
圧縮機と蓄圧器間に障壁設置	—	必要
過充填防止措置	必要	必要

なお、水素スタンドに関する「例示基準」については、諸事情により発行が遅れている。（2008年12月現在）

(b) 規制見直しの方向性

高圧ガス保安法に関する見直しの方向性としては、まずFCVが70MPaのタンクを搭載することに対応するため、水素スタンド（80MPa）の規制を作成しなければならない。この規制見直しに資するリスクアセスメントと安全対策の策定を行なうことが本研究の目的のひとつである。

一方、水素スタンド（40MPa）については2005年に規制の見直しがなされたが、水素スタンドを運営する側からすると不十分である。国土の狭い日本においては、特に距離に関する見直しが必要との要望が強い。今後は水素スタンドを安全にコンパクト化するため、蓄圧器や圧縮機などの高圧ガス設備を事務所やキャノピーの上に設置することや、地下室に設置することを検討すべきである。これと並行してコストダウンと耐久性向上の開発を進め、その成果を規制へ反映したいものである。たとえば水素スタンドで使用できる金属材料は、現時点ではステンレス鋼のSUS316L（配管及び蓄圧器）と炭素鋼のSCM435（蓄圧器）に限定されている。これは、金属材料の安全性を示すデータが揃っていないことが原因であることから、今後はいち事業者だけでなく複数の事業者や産官学が連携して安全性を示すデータを規制当局へ示し、安価で安全な材料の認可を求めていく必要がある。

さらに液体水素スタンドについては、本研究においてリスクアセスメントと安全対策の策定が終了

している。しかし、従前の見込みとは異なり液体水素を搭載する FCV もしくは水素エンジン自動車の台数が増えてきていない。現時点で FCV は圧縮水素を搭載する方式が有力であるため、液体水素を充てんする液体水素スタンドの需要は小さい。しかし、液体水素は高密度であるため、水素製造工場から水素スタンドまでの輸送手段としての利用方法が有望である。こうした点も考慮しつつ規制見直しにつなげていきたい。

(2) 建築基準法

(a) 現行規制の概要

日本では、建築基準法で地域ごとに建築できる建物の種類が決められている。たとえば、住宅は住宅の建設できる地域に建設することが許されている。2005 年の規制見直し以前は、水素スタンドは工業専用地域だけに設置が限定されていたが、規制の見直し後、第一種住居地域、第二種住居地域、準住居地域、近隣商業地域、商業地域及び準工業地域に設置が可能になり、設置場所の自由度が広がった。

<関係する法令>

建築基準法第 48 条（用途地域）

建築基準法 別表第二 用途地域内の建築物の制限（第 27 条、第 48 条関係）

建築基準法施行令第 130 条の 9 の 4（準工業地域内で営むことができる特殊の方法による事業）

一方、この用途地域ごとに水素を貯蔵できる量が定められている。住宅地域にはおもに住宅が、工場地域にはおもに工場が建設されているため、水素やガソリンなど高いエネルギーを持つ物質は地域ごとに貯蔵できる量に違いがあるべきとの考えである。表 1.3.3-2 に用途地域別の水素貯蔵量を示す。ここで許可されている量以上の水素をその地域に貯蔵したい場合は、近隣住民へ説明会を実施して了解を得なければならない。

<関係する法令>

建築基準法施行令第 116 条（危険物の数量）

建築基準法施行令第 139 条の 9（危険物の貯蔵又は処理に供する建築物）

表 1.3.3-2 許可されている水素貯蔵量

地域	貯蔵量	貯蔵量
	圧縮ガス (Nm ³)	液体水素 (トン)
工業地域	無制限	無制限
準工業地域	3500	35
商業地域	700	7
準住居地域	350	3.5

(b) 規制見直しの方向性

建築基準法に関しては、水素貯蔵量の見直しが必要である。表 3 に示したように、圧縮水素ガスを蓄圧器で貯蔵するタイプの水素スタンドは、商業ベースを想定した場合、商業地域と準住居地域における水素貯蔵量が少ないため、スタンド経営が成り立たないといえる。法的には近隣住民への説明会を行い、了解を得ることによって貯蔵量オーバーできることになっているが、実際にこの住民説明会は極めてハードルが高い。つまり、現行規制では実質的に準工業地域または工業地域にしか水素ス

スタンドを建築することができないといえる。本件の対応案としては、商業地域や準住居地域のすべてにおいて貯蔵量の上限を緩和することは難しいことから、既存のガソリンスタンドが設置されている場所のように通りに面したアクセスの良い場所に限って水素貯蔵量を緩和し、安全対策を実施した水素スタンドが建築できるように規制を見直していかなければならない。

(3) 消防法

(a) 現行規制の概要

ガソリンや軽油など液体の燃料は、消防法上の「危険物」と呼ばれ、消防法の規制を受ける。したがってガソリンスタンドは消防法で規制されている。一方、水素は気体のガスのため、水素スタンドは前述のように高圧ガス保安法の規制を受ける。水素ガスは消防法上では「危険物」ではないのである。

燃料電池自動車と水素スタンドを普及させるためには、既存のインフラであるガソリンスタンドを有効に活用したい。従来、消防法ではガソリンスタンドの敷地内に水素スタンドを設置することは不可能であった。そこで前述の 28 項目の規制見直しの 1 項目として見直しに取り組み、2005 年から併設が可能になった。

ここで消防法において規定されているガソリンスタンドにはいくつかのタイプがある。2005 年に水素スタンドとの併設が認められたガソリンスタンドのタイプはそれらのうちのごく一部であった。そこで消防庁は 2006 年、「水素供給施設の安全対策に関する調査検討会」（横浜国立大学 大谷英雄教授）を設置し検討を行なった。PEC はこれに参画し、ガソリンスタンドと水素スタンドを併設した時のハザードの抽出、安全対策検討などを行なった。なかでも併設スタンドにおいて万一水素が漏えいした場合、ガソリンスタンドのディスペンサー上部に設置された屋根（キャノピー）の下部へ水素が滞留する可能性の検討については、本研究の成果である流体解析を使ったシミュレーション結果をベースに安全性が確認された。こうして 2007 年にまとめられた報告書[18]において、水素スタンドを併設できるガソリンスタンドのタイプが拡大された。現時点で報告書の内容は全て消防法に反映されているわけではないが、水素スタンド併設のガソリンスタンドについて事業者から申請があった場合には、安全性を示した当該報告書に基づいて認可される予定である。水素スタンドを併設できるガソリンスタンドのタイプを表 1.3.3-3 に示す。

表 1.3.3-3 水素スタンドを併設できるガソリンスタンドのタイプ

併設するガソリンスタンドタイプ	水素スタンド (40MPa)	併設可能か?
屋外型 (キャノピーが小さい場合)	圧縮水素	YES
屋内型 (キャノピーが大きい場合) ①上階利用する場合 (ビルの1階にあるガソリンスタンド等)	圧縮水素	NO
屋内型 (キャノピーが大きい場合) ②上階利用しない場合	圧縮水素	YES
フルサービスのガソリンスタンド	圧縮水素	YES
セルフサービスのガソリンスタンド	圧縮水素 (水素充填はセル フでない)	YES

(b) 規制見直しの方向性

消防法に関する規制の見直しとしては、水素スタンドの 80MPa 化に伴って併設できる水素スタンドの圧力を 40MPa から 80MPa に変更することである。これまでの議論では、ガソリンスタンドまたは水素スタンドで発災した場合に、他方へ影響を及ぼさないことが重要視されてきた。この考え方をベースに併設できる水素スタンドの圧力を見直すべきである。

また、ガソリンスタンド機器と水素スタンド機器との距離を短くする必要がある。現在、ガソリンスタンドの規制にはガソリンを給油する場所（給油空地：最低 6m×10m）内に設置できるものは、給油機、消火器、伝票発行用の POS システム、ゴミ箱などに限定されている。ここへ水素ディスペンサーを追加することによってガソリンの給油機と水素ディスペンサーを隣り合わせに設置できるようにすべきである。こうすることによってガソリンスタンドはガソリン、軽油、灯油、水素ならびに天然ガスなど自動車用燃料を扱う総合エネルギーステーションにしたいと考える。

1.3.4. 国際標準化との整合

(1) TBT 協定

TBT 協定とは、1979 年 4 月に国際協定として合意された GATT スタandardコードが 1994 年 5 月に TBT 協定として改訂合意され、1995 年 1 月に WTO 協定に包含されたものである。TBT 協定は WTO 一括協定となっており、WTO 加盟国全部に適用されている。

TBT 協定は、工業製品等の各国の規格及び規格への適合性評価手続き（規格・基準認証制度）が不必要な貿易障害とならないよう、国際規格を基礎とした国内規格策定の原則、規格作成の透明性の確保を規定している。

(2) 基本的構造

加盟国に対して、強制規格、任意規格、適合性評価手続きについて、その運用に関しては内国民待遇・最恵国待遇の付与、制定については国際規格やガイドを基礎として制定すること及び必要な公告手続きを行い、他の加盟国等の意見を受け付けること等を義務づけている。また、強制規格及び適合性評価手続きの結果については、他国のものが自国のものと異なる場合においても、それらが同等であると認められる場合において受入れることについて規定している。他方、発展途上国については、技術援助、例外措置を広範に許容している（図 1.3.4-1）。

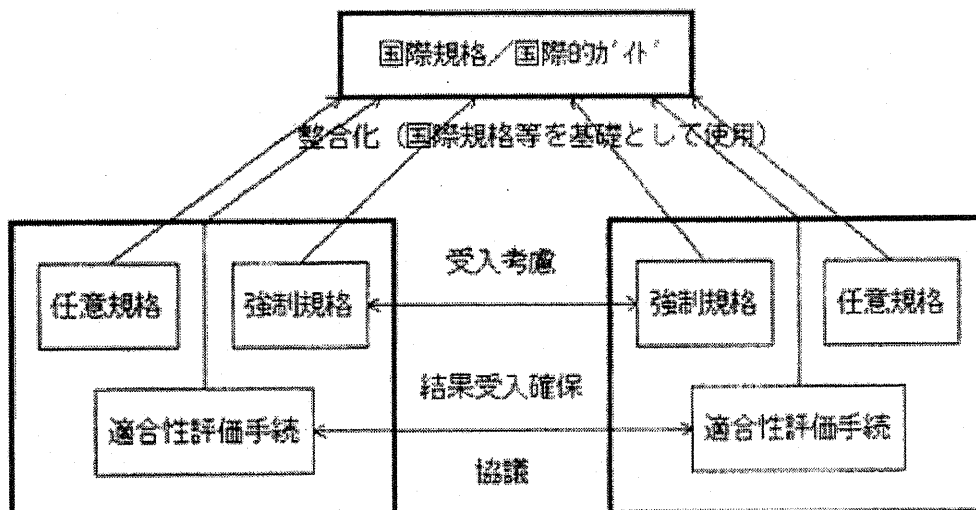


図 1.3.4-1 TBT 協定の基本構造[19]

(3) 懸案事項

本研究の目的と成果の反映先が水素スタンドの規制の見直しであることから、研究の成果を規制へ反映する活動を行なう必要がある。この場合には TBT 協定に基づき、国際標準化との整合性をとらなければならない。国際的な商品である FCV とは異なり水素スタンドは、国内に設置するため国際標準化に対してあまり配慮していなかった。しかし、今後、水素スタンド機器の輸出や輸入が想定されることや、国際標準規格の議論において日本が不利になるような規格が制定されないとも限らない。こうしたことを念頭に置き国内規制の見直しだけでなく、水素スタンドを取り巻く規制の国際戦略を踏まえ、国際標準化への提言活動が必要である。

1.4. 本論文の構成と概要

本論文では、水素スタンドにリスクアセスメント手法を適用し必要な安全対策案を求めた。水素スタンドモデルの定義、事故シナリオの抽出、リスク算定、リスク評価、安全対策検討など、リスクアセスメントを実施する段階ごとに前提条件や検討方法など必要な事項を各章で述べ、第7章で考察を加える。また、本研究ではひとつのクライテリア（評価尺度）を使って異なるタイプの水素スタンドを評価していることから、水素の状態や水素圧力の違いが水素スタンドのリスクと安全対策案にどのように影響するかを考察する。

1.4.1. 水素スタンドのリスクアセスメントの概要

研究対象となる水素スタンドは、燃料電池自動車が十分普及した時点で必要とされる規模の水素スタンドである。こうした商用ベースの水素スタンドは現時点では実在しない上、使用される機器に関する実績データも十分とは言えない状況である。そこで本研究においては、安全に関わる検討手法としてその有効性が広く認められているリスクアセスメント手法[13]を採用し、新しく提案したリスクマトリクスを使ってリスクアセスメントを実施した。リスクアセスメント手法による研究フローを図 4.1.1-1 に示す。

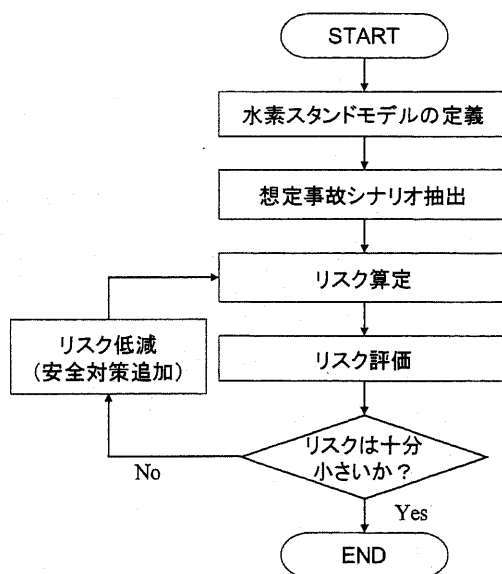


図 4.1.1-1 リスクアセスメント手法による研究フロー

まず、将来の水素スタンドの需要想定をふまえ今後普及すると予想される水素スタンドモデルを定

義する。次にその水素スタンドモデルにおいて発生することが想定される事故を可能な限り抽出し、事故シナリオのリストを作成する。このとき事故シナリオを漏れなく抽出することがポイントである。そして、リストアップされた事故シナリオの1件1件に対してリスクの大きさを算定し、その結果をリスクマトリクスに照らしてリスク評価を行う。このとき、リスクが十分に小さいと評価されれば当該事故シナリオに対する検討は終了する。そうでない場合は、リスクを低減する安全対策を付加した上で再度リスク評価を行い、リスクが十分に小さいと評価されるまでその事故シナリオに対する検討を行なう。すべての想定事故シナリオに対してこうした検討を実施することで、水素スタンドのリスクを十分に低減させ、安全性を確保する安全対策を得ることが出来る。

本研究は、水素スタンドモデルを定義し、想定される事故シナリオを網羅的に抽出、それぞれの事故シナリオについてリスクの大きさを算定後、リスクマトリクスにあてはめてリスクの大きさを評価（リスク評価）する。ここでリスクが十分小さくない場合は、リスクを低減するための安全対策を検討し追加する。こうして水素スタンドに必要な安全対策を得るための検討を行う。これらの検討の全体を「リスクアセスメント」と呼び、「リスク評価」はリスクの大きさをリスクマトリクスに当てはめて評価する段階として区別して説明する。

1.4.2. 水素スタンドモデルの定義

検討対象となる水素スタンドモデルは、将来広く一般に普及すると予想される形式で、かつ実際に建設されうる能力と機器構成を有するものと定義した。具体的な能力と仕様は、World Energy NETwork (WE-NET) [20]など水素スタンドに関するこれまでの検討結果を参考に、燃料電池自動車普及期の需要想定に基づくものとした。

水素スタンドは、扱う水素の状態によって、高圧気体の水素ガスを扱う「圧縮水素スタンド」と液体水素を扱う「液体水素スタンド」に分けられる。この二種類の水素スタンドは、水素の状態、その圧力、水素を取り扱う機器構成や水素の配管など全く異なっている。また、水素スタンドは水素を製造する場所によってオンサイト型（水素を水素スタンド内で製造するタイプ）とオフサイト型（水素を外部の工場等で製造し、水素スタンドへ搬入するタイプ）に分けることができる。圧縮水素スタンドの場合、オンサイト型とオフサイト型は原料供給部分が異なるが、圧縮機より下流側の機器構成はほとんど同じである。一方、液体水素スタンドはすべてオフサイト型であるためオンサイト型とオフサイト型を区別しない。

さらに本論文では、水素スタンドを燃料電池自動車へ充てん可能な水素圧力によって「35MPa 充てん対応水素スタンド」と「70MPa 充てん対応水素スタンド」に分けることとする。これは、従来型のFCVは圧力35MPaの車載タンクを搭載しているのに対し、新型のFCVは航続距離をガソリン車並にするため70MPaの車載タンクを搭載しており、水素スタンド側でもこれに対応する必要があるからである。2008年11月現在、70MPa 充てん対応水素スタンドは日本に1ヶ所（JHFC千住ステーション）しか無い。さらに法令上では高圧ガス保安法一般則[16]において、「特定圧縮水素スタンド」は「常用の圧力が40MPa以下の圧縮水素を燃料として使用する車両に固定した燃料装置用容器に当該圧縮水素を充てんするための処理設備を有する定置式製造設備」と定義されていて、常用の圧力が40MPaを超える水素スタンドについての規定が無い。そこで本研究はこの70MPa 充てん対応水素スタンドの規制見直しに資する安全対策案等を提案することを目的にしている。水素スタンドモデルの定義については、第2章で詳しく述べる。

1.4.3. 事故シナリオの抽出

リスクアセスメントではモデルに対する事故シナリオを漏れなく抽出することが極めて重要であり、検討対象について詳細に吟味して把握することが求められる。事故シナリオの抽出手法は、リスク源の抽出手法として広くその有効性が認められている HAZOP(Hazard and Operability Studies) と FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)の2つの手法を用いた。さらに関連する事故データベース[21][22]を参照することで、想定漏れのシナリオを補完して事故シナリオの網羅性を高めた。

抽出作業は、検討対象をいくつかのセクションに分割し、数名のチームがセクションのひとつひとつについて議論を繰り返した。抽出にあたりその可能性の大小は考慮せず、発生が否定できないと思われる事故シナリオはすべてリストアップして検討の対象とした。また、水素スタンドモデルには、安全弁、緊急遮断弁等の安全機器が記載されているが、これらの安全機器は機能しないものと考えて事故シナリオの抽出を行なった。なぜならば、安全機器が機能すると事故に発展せずその事象は終息してしまい、事故シナリオとして抽出されないからである。

こうしてリストアップした事故シナリオに対して重複を削除するなどの整理を行ない、モデルごとの事故シナリオの抽出を行なった。事故シナリオの抽出に関し、詳細は第3章で述べる。

1.4.4. リスク算定とリスク評価

本研究では、水素スタンドの普及（適切な安全対策と適正なコスト）ならびに利用者や周辺住民に対する高い安全性の確保の両立が求められている。しかも水素スタンド機器は、従来の技術をベースにしているが、高圧の水素ガス環境下で使用された経験が少なく、現時点で故障や事故の確率に関する詳細なデータの蓄積が十分とは言えない状況である。こうしたなか事故シナリオの抽出を徹底的に行い、事故シナリオ毎のリスクを評価し、かつ安全対策の十分性を判断できるリスクマトリクスが必要である。そこで、類似するリスクマトリクスを比較検討の上、本検討の目的に添ったリスクマトリクス（5×4）を提案した。図1.4.4-1にそのリスクマトリクスを示す。

リスク算定においては、三菱重工業株式会社にて実施した圧縮水素と液体水素の漏えい/着火/爆発試験のデータをはじめ、エネルギー総合工学研究所が実施した水素の予混合爆発実験データ、およびその他文献データを使って定量的に影響度レベルを算定した。ただし、70MPa 充てん対応水素スタンドにおける水素の漏えい/着火/爆発試験は未実施であるため、35MPa 充てん対応水素スタンド検討時のデータをベースに外挿によって算定した。これらの外挿データは順次実験データに置き換えていく。一方、事故シナリオごとの可能性レベルについては、事故発生頻度に関するデータが不足していることから定性的な算定にとどめた。

すべての事故シナリオに対してリスクを算定し、提案したリスクマトリクスを使ってリスクの大きさを評価した。これを1回目のリスク評価という。1回目のリスク評価でリスクが大きいと評価された事故シナリオに対しては、後述する安全対策を施した後、2回目のリスク評価を行ないリスクが十分小さくなったところでリスク評価を終了する。リスク算定とリスク評価に関する詳細は第4章で述べる。

		可能性			
		A: ほとんど起こりえない	B: 起こりにくい	C: 可能性がある	D: 十分起こりえる
影響度					
I	極めて重大な災害	H	H	H	H
II	重大な災害	M	H	H	H
III	中規模災害	M	M	H	H
IV	小規模災害	L	L	M	H
V	軽微な災害	L	L	L	M

図 1.4.4-1 本検討のリスクマトリクス

1.4.5. 水素スタンドに対する安全対策

前述のように、水素スタンドモデルに対し想定できる事故シナリオを出来る限り漏れなく抽出し、抽出された事故シナリオのすべてに対しその事故シナリオが起こってしまった場合のリスクを評価する。このリスクが高い場合は、リスクを低減するための安全対策を検討し、安全対策を付加した状態で再度リスクを評価した。この評価を繰返し、リスクが十分小さくなるまで安全対策を付加し続けた。すべての事故シナリオに対してリスク評価と安全対策検討を行なった結果、水素スタンドモデルごとに多くの安全対策が得られた。これらは水素スタンドに必要な安全対策であり、これらの安全対策を正しく適用した水素スタンドは安全性が非常に高いといえる。そこで得られた安全対策を案として取りまとめた。水素スタンドに適用すべき安全対策に関する考え方は、第5章で述べる。

1.4.6. 安全対策検討における CFD の利用

水素スタンドの安全性を評価する上で、水素漏えい時の水素の挙動を正確に把握する必要がある。水素は爆発性の気体であり容易に実験を行うことができないことや、爆発下限界濃度（4%）またはそれ以下の低濃度における正確な濃度分布について、水素センサーを使って連続的に測定することは困難であることから、コンピュータによる流体解析（Computational Fluid Dynamics 以下 CFD という）を用いて解析を行った。CFD を利用することで正確で直感的に理解できるデータの入手が可能になった。いくつかの事故シナリオに対して CFD を利用した検討を行ったが、中でも代表的な例を第6章で紹介する。

1.4.7. リスクアセスメントの結果と考察

本研究では、タイプの異なる3種類の水素スタンドモデルに対し、想定される事故シナリオをできるだけ漏れなく抽出し、それぞれに必要な安全対策を施してリスクを低減させた。これらの安全対策を正しく設置した水素スタンドは、安全性が高いと言える。本研究で実施した水素スタンドに対するリスクアセスメントの結果と考察については、第7章で述べる。

References

- [1] 気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change) 第4次評価報告書統合報告書 (平成19年11月30日付 文部科学省・経済産業省・気象庁・環境省仮訳)
- [2] 環境省資料、気象庁資料、エネルギー・経済統計要覧 2001年版
- [3] IPCC 第3次評価報告書第1作業部会資料(2001年)
- [4] 平成18年度 エネルギーに関する年次報告書 (エネルギー白書)
- [5] 環境省 温室効果ガス排出・吸収目録
- [6] 資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」
- [7] 東京ガスホームページ
- [8] Dr. J. Brouwer, November 18, 2002, Palm Springs
- [9] Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project HP
- [10] 伊藤忠エネクス(株) HP
- [11] Linde HP
- [12] 技術分野におけるリスクアセスメント、Mark G. Stewart and Robert E. Melchers 原著、酒井信介監訳、森北出版(株)
- [13] ISO/IEC Guide 51 Safety Aspects – Guidelines for their inclusion in standards, Second edition 1999
- [14] よくわかるリスクアセスメントー事故未然防止の技術ー、向井殿政男著、中災防新書
- [15] ISO/IEC Guide 73, Risk management – Vocabulary – Guidelines for use in standards (2002)
- [16] 向井殿政男監、(社)日本機械工業連合会編「ISO「機械安全」国際規格、日刊工業新聞社、1991-1
- [17] 向井殿政男「機械システムの安全性ー国際安全規格と日本の現状ー」安全工学、安全工学協会、Vol.41, No.1, pp.1-9, 2002-2
- [18] 新素材・新技術の活用等に対応した安全対策の確保に係る調査検討報告書 (水素供給施設の安全対策に関する調査検討報告書) 2007年3月、総務省消防庁
- [19] 日本工業標準調査会 HP
- [20] 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) 第2期研究開発タスク1「システム評価に関する調査・研究」、4, 2002
- [21] 一般高圧ガス保安規則第2条第1項第25号 (用語の定義)
- [22] 危険物保安技術協会、危険物等事故関連技術情報データベース,2005
- [23] 高圧ガス保安協会、事故事例データベース

第2章

水素スタンドモデルの定義

第2章 水素スタンドモデルの定義

2.1. 基本的な考え方

2.1.1. 基本的な考え方

リスクアセスメントを実施するにあたり、検討対象を正しく定義することはとても重要である。リスクアセスメントは、検討対象のモデルに対して行なうのであって、モデルに含まれない機器や設備に関しては、事故シナリオが抽出されずリスクアセスメントの想定外になってしまうためである。本研究の目的は、水素スタンドに関する規制見直しに資する情報の提供であることから、将来普及すると思われる水素スタンドを正しくモデル化しなければならない。そこで、水素スタンドモデルの作成にあたっては、以下の点に留意した。

(1) モデルの一般性確保

研究対象となる水素スタンドは、ある特殊な水素スタンドではなく、広く一般的に普及すると予想されるものである。または、一般的に普及する設備を網羅するモデルでなければならない。そこで日本の水素・燃料電池自動車実証プロジェクトである JHFC[1]の水素ステーションの機器構成、レイアウト等の情報をベースに、スタンド建設・運営事業者の意見をヒアリングし、さらに海外の水素スタンドに関する情報を参考にして、最もオーソドックスと考えられる水素スタンドの機器構成及び仕様とした。

(2) モデルの将来性確保

本検討結果は、既存の水素スタンドに加え、将来的に建設される水素スタンドに対しても十分適用可能でなければならない。そうでなければ規制見直しに資する情報提供とはいえないと考えた。FCVの台数が現在のガソリン車並に普及した場合を想定すると、必要となる水素スタンドの能力は現行のガソリンスタンド並みの能力が必要である。将来の水素スタンドの具体的な需要想定については、従前に行われた WE-NET[2]の報告書に詳しく述べられている。この報告書において、水素導入シナリオ検討のなか予想される水素スタンドの規模として、100Nm³/h、300Nm³/h、500Nm³/hの3種類が示されている。本研究では、35MPa 充てん対応水素スタンドの能力は中位の300Nm³/hを採用し、70MPa 充てん対応水素スタンドの能力は500Nm³/hを採用した。これは、FCVの車載タンクが高圧化されることに伴い1回あたりの充てんに多くの水素を要すると考えたからである。

2.1.2. 水素スタンドの種類

水素スタンドのタイプを大まかに分類すると、水素ガスを扱う「圧縮水素スタンド」と液体水素を扱う「液体水素スタンド」に分けることができる。水素スタンドは、水素を製造する場所によってオンサイト型（水素を水素スタンド内で製造）とオフサイト型（水素を外部の工場等で製造し、水素スタンドへ搬入）に分けることができる。液体水素スタンドはすべてオフサイト型であるため特にオンサイト/オフサイトを区別しない。圧縮水素スタンド（オンサイト型/オフサイト型）、液体水素スタンドのシンプルフローをそれぞれ図 2.1.2-1、図 2.1.2-2、図 2.1.2-3 に示す。

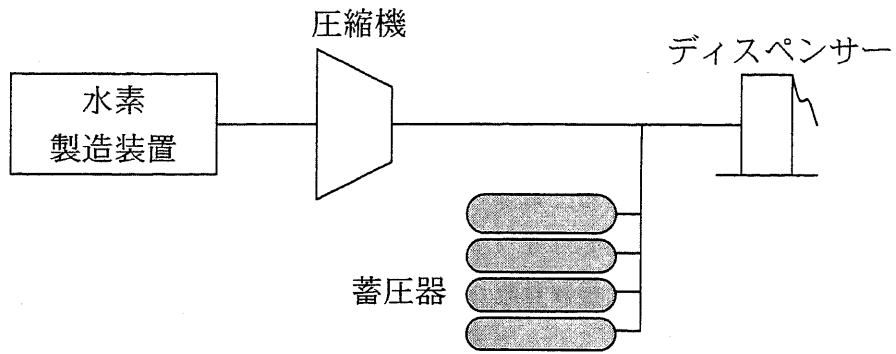


図 2.1.2-1 圧縮水素スタンド（オンサイト型）のシンプルフロー図

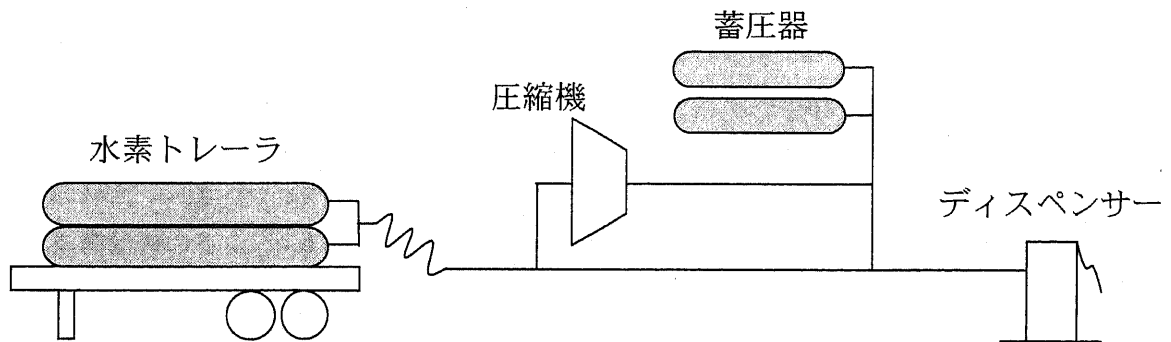


図 2.1.2-2 圧縮水素スタンド（オフサイト型）のシンプルフロー図

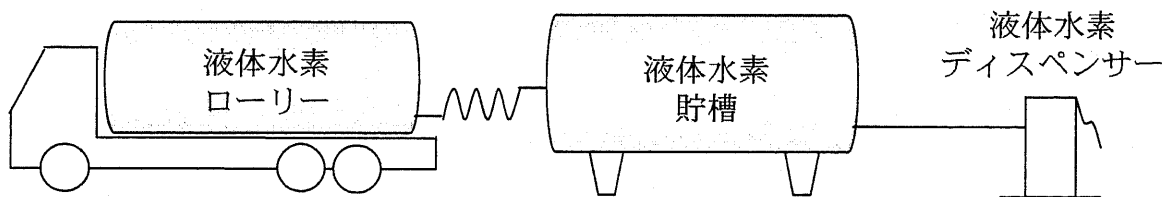


図 2.1.2-3 液体水素スタンドのシンプルフロー図

本論文では、燃料電池自動車へ充てん可能な水素圧力によって圧縮水素スタンドを「35MPa 充てん対応水素スタンド」と「70MPa 充てん対応水素スタンド」に分けることとする。これは、前述のように現行の法規制の制約による。

圧縮水素スタンドにおいてFCVへ水素ガスを充てんする方法は、大きく分けて2種類ある。Cascade storage systemとBooster systemである。Cascade storage systemは、水素スタンドにFCVの車載タンクよりも高い圧力で水素ガスを蓄えておき、水素スタンドと車載タンクの圧力差によって水素を充てんする。Booster systemは、水素スタンドに車載タンクよりも低い圧力で水素ガスを蓄えておき、ブースター（圧縮機）を使って水素の圧力を高めながら車載タンクに充てんする。Cascade storage systemとBooster systemを図2.1.2-4に示す。

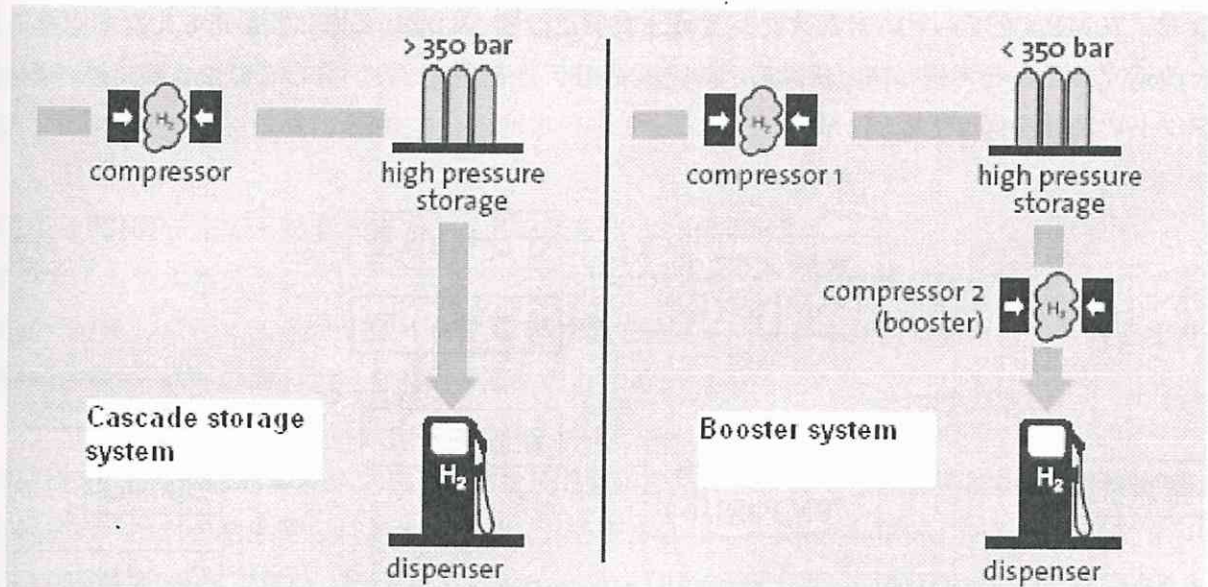


図 2.1.2-4 Cascade storage system と Booster system[5]

従来の FCV の車載タンクの圧力は 35MPa であるため、Cascade storage type 圧力は、
 (水素スタンドの圧力) = (車載タンク圧力: 35MPa) × 1.1 倍 + α = 40MPa とした。
 この圧力は水素スタンドの常用圧力と呼ばれ、これ以上の圧力になってしまった場合は、安全弁など
 を使って圧力を開放し直ちに常用圧力以下にする仕組みになっている。日本の高圧ガス保安法では、
 水素スタンド（高圧ガス保安法一般則では、特定圧縮水素スタンドという）の圧力は 40MPa 以下に
 規定されている。

一方、圧力 70MPa の車載タンクへ水素を充てんする水素スタンドについては、現在、常用圧力は
 おろか適当な省令が存在しない。そこで本論文では前述のように

(水素スタンドの圧力) = (車載タンク圧力: 70MPa) × 1.1 倍 + α = 80MPa と定義した。

つまり、FCV の車載タンクが 35MPa から 70MPa に高圧化されるのに伴い、水素スタンドの常用
 圧力は 40MPa から 80MPa になる。したがって、圧縮水素スタンドで水素が漏えいする事故シナリ
 オ(第 4 章)において、漏えいする水素の最大の圧力は 35MPa 充てん対応水素スタンドでは 40MPa、
 70MPa 充てん対応水素スタンドでは 80MPa として検討した。FCV 車載タンクと水素スタンドの圧
 力関係を表 2.1.2-1 に示す。

表 2.1.2-1 FCV 車載タンクと圧縮水素スタンドの圧力

	現在	将来
名称	35MPa 充てん対応 水素スタンド	70MPa 充てん対応 水素スタンド
FCV 車載タンク圧力	35MPa	70MPa
圧縮水素スタンド常用圧力	40MPa	80MPa
水素スタンドの法規制	あり	なし (2008 年 10 月現在)

なお、70MPa 充てん対応水素スタンドは、すでに設置されている 35MPa 充てん対応水素スタンドを改造することを考慮して、新設モデルと改造モデルを想定した。詳しくは 2.3 節で述べる。水素スタンドの種類を図 2.1.2-5 に示す。

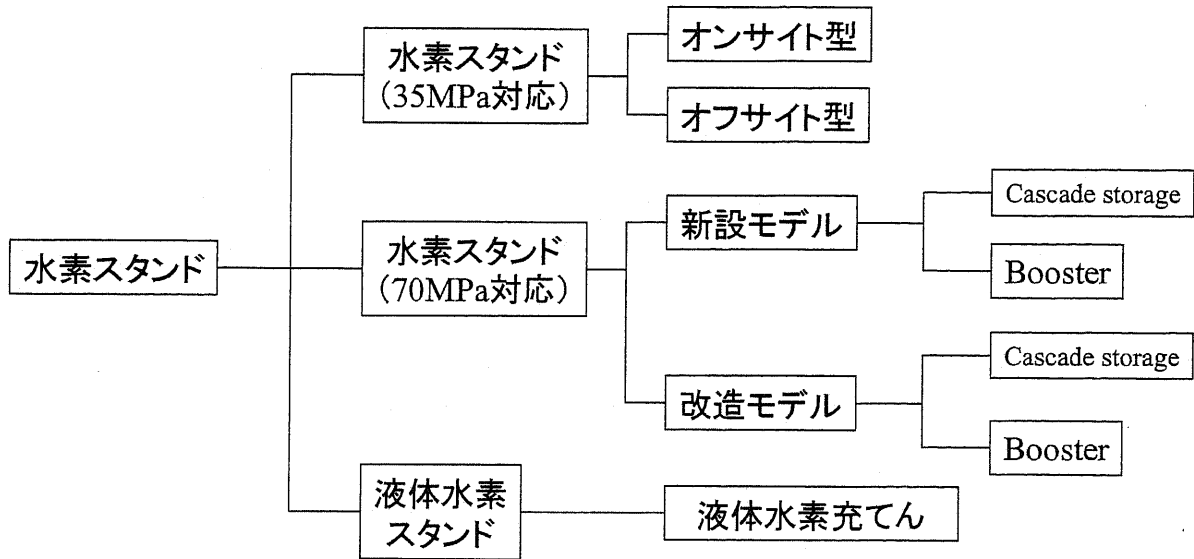


図 2.1.2-5 水素スタンドの種類

2.2. 圧縮水素スタンドモデル（35MPa 充てん対応水素スタンド）

35MPa 充てん対応水素スタンドモデルは、水素の製造する場所に着目しオンサイト型とオフサイト型についてモデルを作成した[6]。

2.2.1.1. 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル（オンサイト型）

オンサイト型水素スタンドは、水素スタンド内で水素を製造し、圧縮機（コンプレッサー）で圧縮、蓄圧器で貯蔵し、ディスペンサーから FCV へ水素を充てんする。水素製造装置の水素製造能力と圧縮機の能力は、前述の需要想定を満足するものとする。

35MPa 充てん対応水素スタンド（オンサイト型）の水素スタンドモデルの能力と機器構成を以下に定義する。検討の結果得られた水素スタンドモデルとして、Process Flow Diagram（以下、PFD という）を図 2.2.1-1 に示し、Pipe and Instruments Diagram（以下、P&ID という）を図 2.2.1-2、図 2.2.1-3 に示す。

（1）スタンド能力

スタンド能力は、将来の水素需要想定に基づき、一定数の水素スタンドが現行のガソリンスタンドと置き換わるとのとして想定している。詳細な数値は、WE-NET[2]等従前の検討結果を参考にした。表 2.2.1-1 にスタンド能力の概要を示す。

表 2.2.1-1 35MPa 充てん対応水素スタンドモデルの能力

項目	仕様
平均充填車両台数	10 台/h
ピーク時充填台数	20 台/h
ピーク時間帯継続時間	1h
車両 1 台当り充填量 *	30Nm ³ /台
平均充填ガス量	300Nm ³ /h (=10 台/h×30Nm ³ /台)

* 車両 1 台あたりの充填量に関しては、以下のように考えた。現状の燃料電池自動車のタンク容量は約 150L であり最大で約 50Nm³の圧縮水素を保有することができる。そこで、60%の燃料水素を消費した時点で燃料補給すると仮定し、1 回あたりの充填量を 30Nm³と設定した。

（2）水素製造装置

需要想定 of 充填ガス量（300Nm³/h）と等しく、300Nm³/h の水素製造能力とする。水素製造時の圧力は、現時点で一般的な 1MPa 未満とする。これは高圧ガス保安法の制約による。なお、圧力 1MPa 以上の水素製造装置のリスクアセスメントについては、今後の課題とした。

表 2.2.1-2 水素製造装置の能力

項目	仕様
水素製造能力	300 Nm ³ /h
圧力	1MPa 未満

(3) 圧縮機

水素製造能力と等しく、300Nm³/h の能力とする。

表 2.2.1-3 圧縮機の能力

項目	仕様
型式	2段ピストン+2段プランジャー
容量	300Nm ³ /h
圧力	吸込み 0.8/吐出 40MPa

(4) 蓄圧器

蓄圧器容量は、圧縮天然ガススタンド安全技術指針[3]に示されている「蓄ガス容器容量算出方法」を使って算出した。モデルの蓄圧器は、車両への水素充てんを効率的に行うため 3 バンクのシステムとした。バンクとは、同じ圧力で区分された 1 つ又は複数のポンベ群をさす。このシステムは、車載タンクの圧力が低い時は低圧バンクの水素で充てんし、低圧バンクと車載タンクの圧力が等しくなった（充てんできなくなった）時点で高圧バンクに切り替えて所定の圧力まで充てんする。車載タンクと蓄圧器（バンク）の差圧を小さくすることで効率的な充てんが可能になる。基本仕様は下記の通りとする。

表 2.2.1-4 蓄圧器の能力

項目	仕様	
#1 バンク (高圧)	ポンベ幾何容量	250L×2 本=500L
	蓄ガス量	200 Nm ³
	常用圧力	40MPa
	最終払出し圧力	36MPa
#2 バンク (中圧)	ポンベ幾何容量	250L×4 本=1000L
	蓄ガス量	400 Nm ³
	常用圧力	40MPa
	最終払出し圧力	32MPa
#3 バンク (低圧)	ポンベ幾何容量	250L×8 本=2000L
	蓄ガス量	800 Nm ³
	常用圧力	40MPa
	最終払出し圧力	26MPa
#1~#3 バンク 合計	ポンベ幾何容量	250L×14 本=3500L
	蓄ガス量	1400 Nm ³

(5) ディスペンサー

ディスペンサー1台に1口の充てん口（ノズル）を持つディスペンサーを2台備えるものとする。車載タンクの温度上昇を防止するため、流量調節弁の開度を変化させ流量を一定に制御する構造とする。車両側圧力があらかじめ設定した圧力に達すれば、自動的に充填を停止させる機能を持つ。

なお本研究では、日本の FCV メーカーの意向を踏まえ車両との通信機能は設けないものとする。

表 2.2.1-5 ディスペンサーの能力

項目	仕様
ディスペンサー台数	2台
ノズル数	ディスペンサー1台に2口
充填圧力*	35MPa
最高充てん流量	900 Nm ³ /h

*既設のJHFCスタンドにおいては、35MPaに加え25MPa充填にも対応した設備となっている。しかし、FCVの車載タンク圧力は35MPaから70MPaへ高圧化される方向である。また、25MPaは35MPaよりも事故時の影響度が低いと考えられ、35MPa充てん対応水素スタンドの研究に包含できると考えることができる。したがって、25MPa充てんに対応したスタンドモデルは作成しないこととした。

<補足>

A 蓄圧器（蓄ガス）容量の設定[3]

- ① 1時間当りの平均充填ガス量 = 車両台数(台/h) × 充填量 (Nm³/台)

$$= 10 \text{ (台/h)} \times 30 \text{ (Nm}^3\text{/台)} = 300 \text{ Nm}^3\text{/h}$$
- ② 圧縮機の必要能力=300 Nm³/h
- ③ 必要有効蓄ガス量=ピーク時間帯の充填ガス量-圧縮機能力×ピーク時間

$$= 20 \text{ (台/h)} \times 30 \text{ (Nm}^3\text{/台)} - 300 \text{ (Nm}^3\text{/h)} \times 1 \text{ (h)}$$

$$= 600 - 300 = 300 \text{ Nm}^3$$
- ④ 必要蓄ガス量=必要有効蓄ガス量 ÷ {(蓄ガス器圧力-車両充填圧力) / 蓄ガス器圧力}

$$= 300 \text{ Nm}^3 \div \{(40\text{MPa} - 35\text{MPa}) / 40\text{MPa}\}$$

$$= 300 \times 8 = 2,400 \text{ (Nm}^3\text{)}$$

3段カスケードの効果を考慮して、
 必要蓄ガス量 = 2400 / 1.8 = 1333 (Nm³)
- ⑤ 必要幾何容積 = 必要有効蓄ガス量 ÷ 400 (kg/cm²)

$$= 1333 \text{ (Nm}^3\text{)} \div 400 = 3333 \text{ (L)}$$
- ⑥ ポンベの単器容量を250(L)とし、14本のポンベを持つものとする。

$$250\text{(L)} \times 14\text{(本)} = 3500\text{(L)}$$

B バンク構成の設定

有効蓄圧量をより多く確保するために3バンク構成とする。各バンクの最終払出し圧力は以下のように設定する。

表 2.2.1-6 水素スタンドモデル蓄圧器のバンク構成

バンク	最終払出し圧力
#1バンク (高圧)	36MPa
#2バンク (中圧)	32MPa
#3バンク (低圧)	26MPa

車両充填時の車両ポンベ圧力は16MPaとする。(車載ポンベ容量を160Lとし、充填時に30 Nm³

の水素ガスが充填される前提)

車両充填時に各バンクより車両1台に対して払い出される水素ガス量は、圧力差に比例するので、

#1バンク払出しガス量 : #2バンク払出しガス量 : #3バンク払出しガス量

= (車両充填圧 - #2最終払出し圧) : (#2最終払出し圧 - #3最終払出し圧) : (#3最終払出し圧 - 充填前の車両ポンベ圧)

= (35 - 32) : (32 - 26) : (26 - 16) = 3 : 6 : 10 = 1 : 2 : 3.3

各バンクの容量の構成比は、各バンク払出しガス量の比率に近づくように設定した。

ポンベ本数は14本であるので、

#1バンク本数 : #2バンク本数 : #3バンク本数 = 2本 : 4本 : 8本 = 1 : 2 : 4 と設定した。

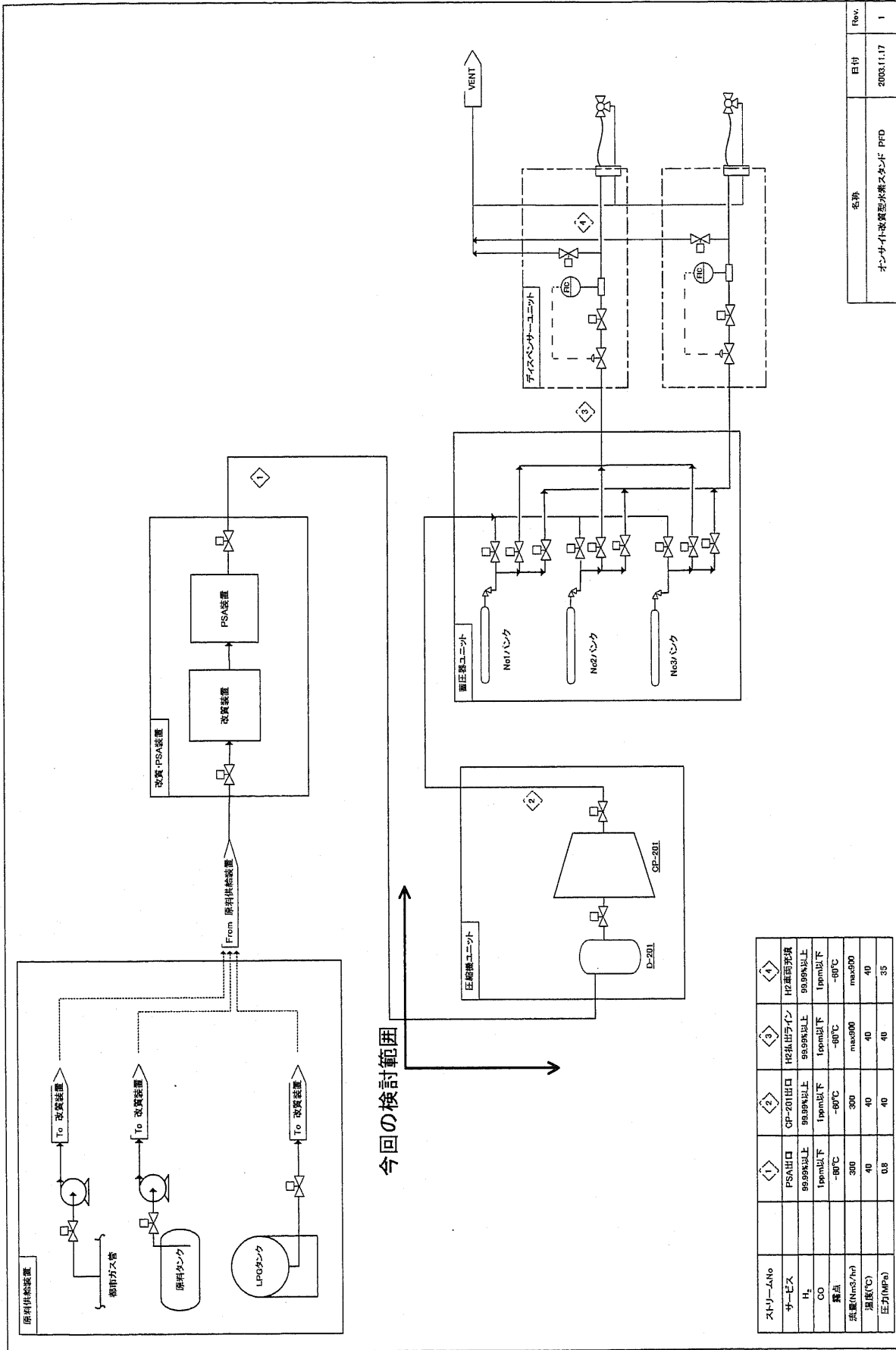


図 2.2.1-1 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル (オンサイト型) の PFD

Rev.	日付	名称
1	2003.11.17	オンサイト-改良型水素スタンド PFD

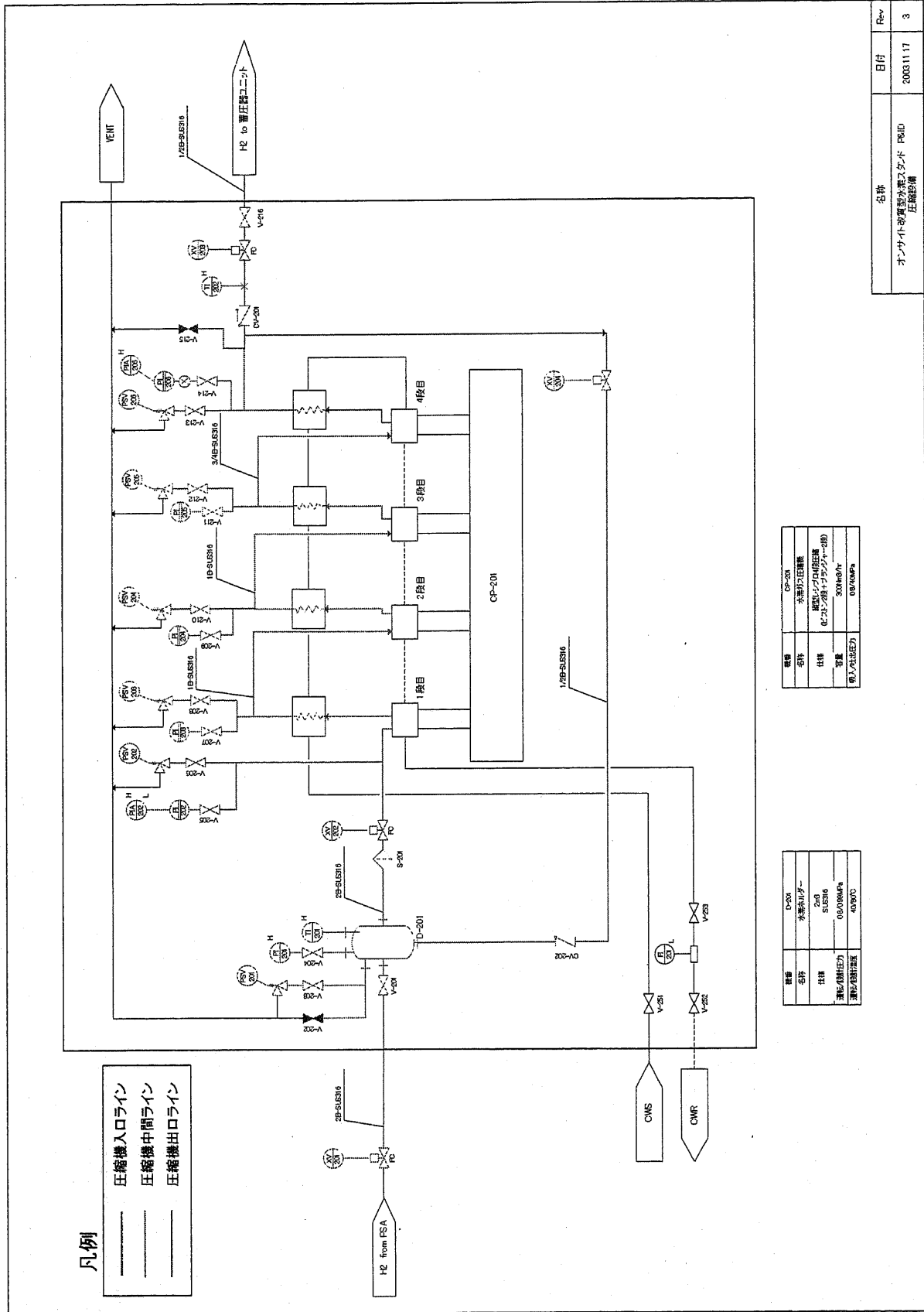


図 2.2.1-2 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル (オンサイト型) の P&ID - 圧縮設備

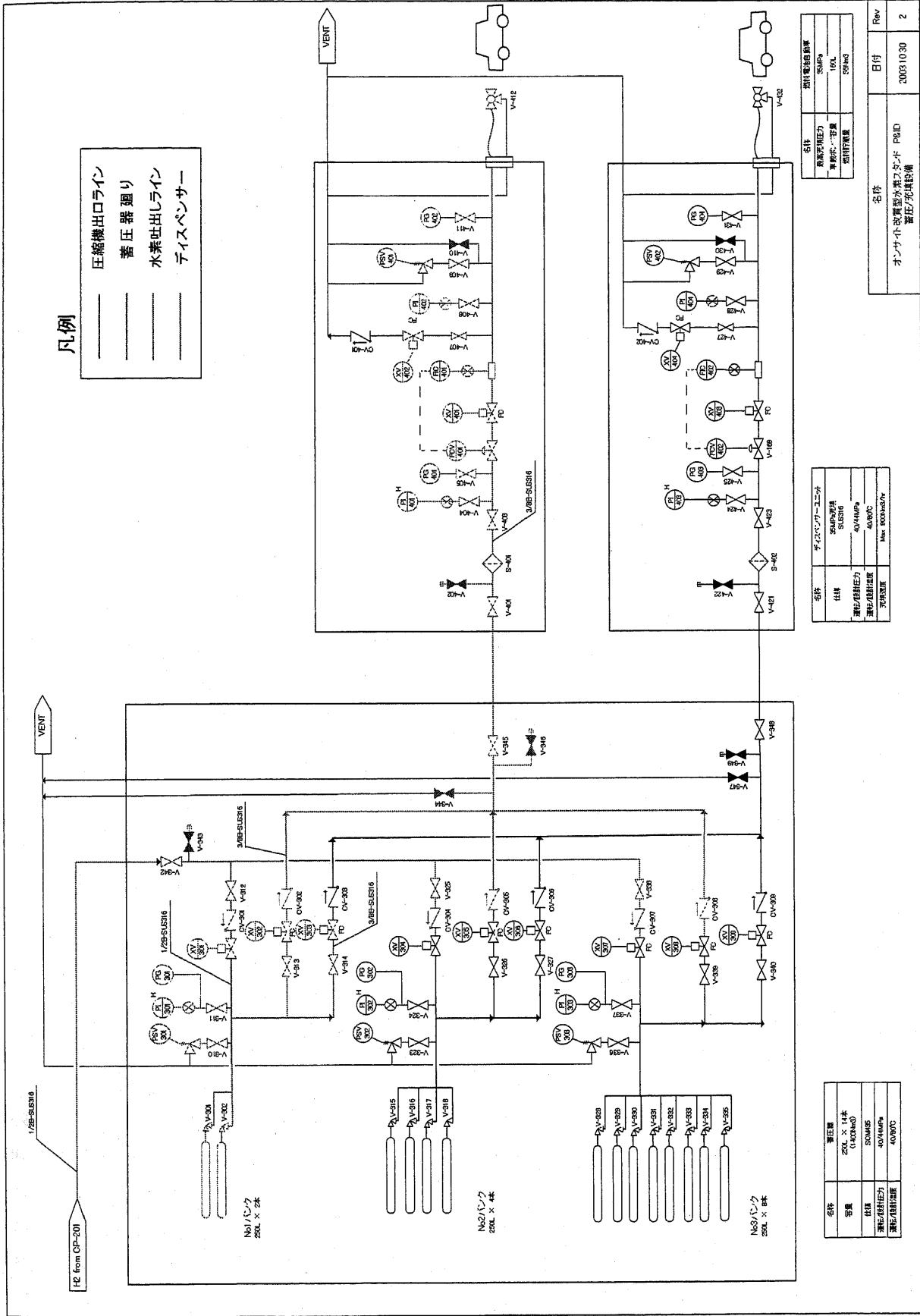


図 2.2.1-3 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル (オンサイト型) の P&ID—蓄圧—蓄圧/充てん設備

2.2.2. 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル（オフサイト型）

オフサイト型水素スタンドモデルは、オンサイト型に比べて水素を運搬、貯蔵（蓄圧器）する部分の設備や仕様が異なる。需要想定と需要に対応した設備能力、圧縮機、ディスペンサーについては基本的にオンサイト型と同じである。

オンサイト型に比べたオフサイト型の主な相違点を以下に示す。

- ・ 水素の製造は水素製造工場で行い、現在一般に使用されている水素トレーラー（19.6MPa）を用いて水素製造工場から水素スタンドへ水素の輸送を行うものとした。
- ・ 水素スタンド内における水素の貯蔵において、水素トレーラーのボンベを低圧バンクとして使用する。ただし、水素トレーラーのボンベと水素スタンドに設置された蓄圧器をあわせた水素スタンド全体の水素貯蔵量は、オンサイト型と同じとした。
- ・ 圧縮機バイパス配管を設置した。

35MPa 充てん対応水素スタンド（オフサイト型）の水素スタンドモデルの能力と機器構成を以下に定義する。検討の結果得られた水素スタンドモデルとして、PFD を図 2.2.2-1 に示し、P&ID を図 2.2.2-2、図 2.2.2-3、図 2.2.2-4 に示す。

（1）スタンド能力

オフサイトスタンドの能力は、オンサイト型水素スタンドと同様の需要想定とする。すなわち、WE-NET[2]等従前の検討結果を参考にした。表 2.2.2-1 にスタンド能力の概要を示す。

表 2.2.2-1 35MPa 充てん対応水素スタンドモデルの能力

項 目	仕 様
平均充填車両台数	10 台/h
ピーク時充填台数	20 台/h
ピーク時間帯継続時間	1h
車両 1 台当り充填量 *	30Nm ³ /台
平均充填ガス量	300 Nm ³ /h (=10 台/h×30N m ³ /台)
スタンド営業時間*	10hs/day

* 水素を工場から輸送する関係上、1日のスタンド営業時間を10時間と設定した。

（2）水素トレーラー

オフサイト型水素スタンドでは、水素製造装置の代わりに水素トレーラーを使って水素スタンドへ水素を搬入する。水素スタンドモデルの水素トレーラーは、現在一般に使用されている最大クラスのトレーラー（3000 Nm³クラス）を使用するものとする。この場合、水素スタンドの1日当りの水素払出し量（車両充填ガス量）は3000 Nm³/日なので、トレーラー1台分の水素が毎日消費されることとなる。なお、トレーラー入れ替え時の作業を考慮して、水素スタンドにはトレーラー2台分の接続口とトレーラー設置スペースを置く。表 2.2.2-2 にモデルの水素トレーラーの能力を示し、図 2.2.2-5 に水素トレーラーの図を示す。

表 2.2.2-2 モデル水素トレーラーの能力

項目	仕様
充填ガス量	3,000N m ³
充填圧力	19.6MPa
容器本数	21 本
容器内容積	715L×21 本=15,015L
全高	2.91m
全幅	2.49m
全長 (トレーラー含む)	13.08m

岩谷産業(株)カタログより

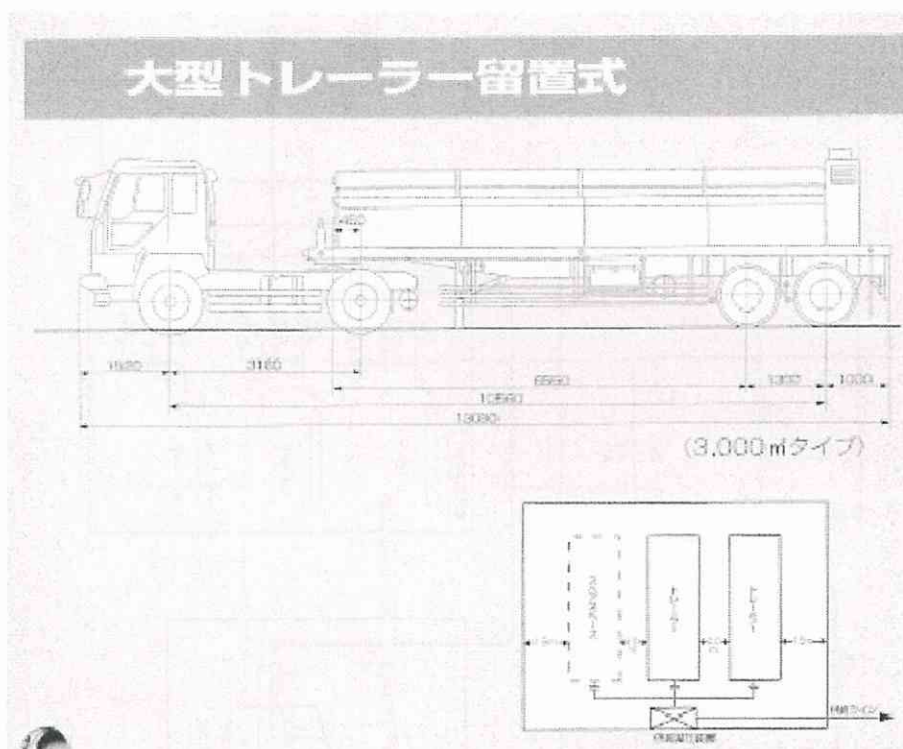


図 2.2.2-5 水素トレーラー図

(3) 圧縮機

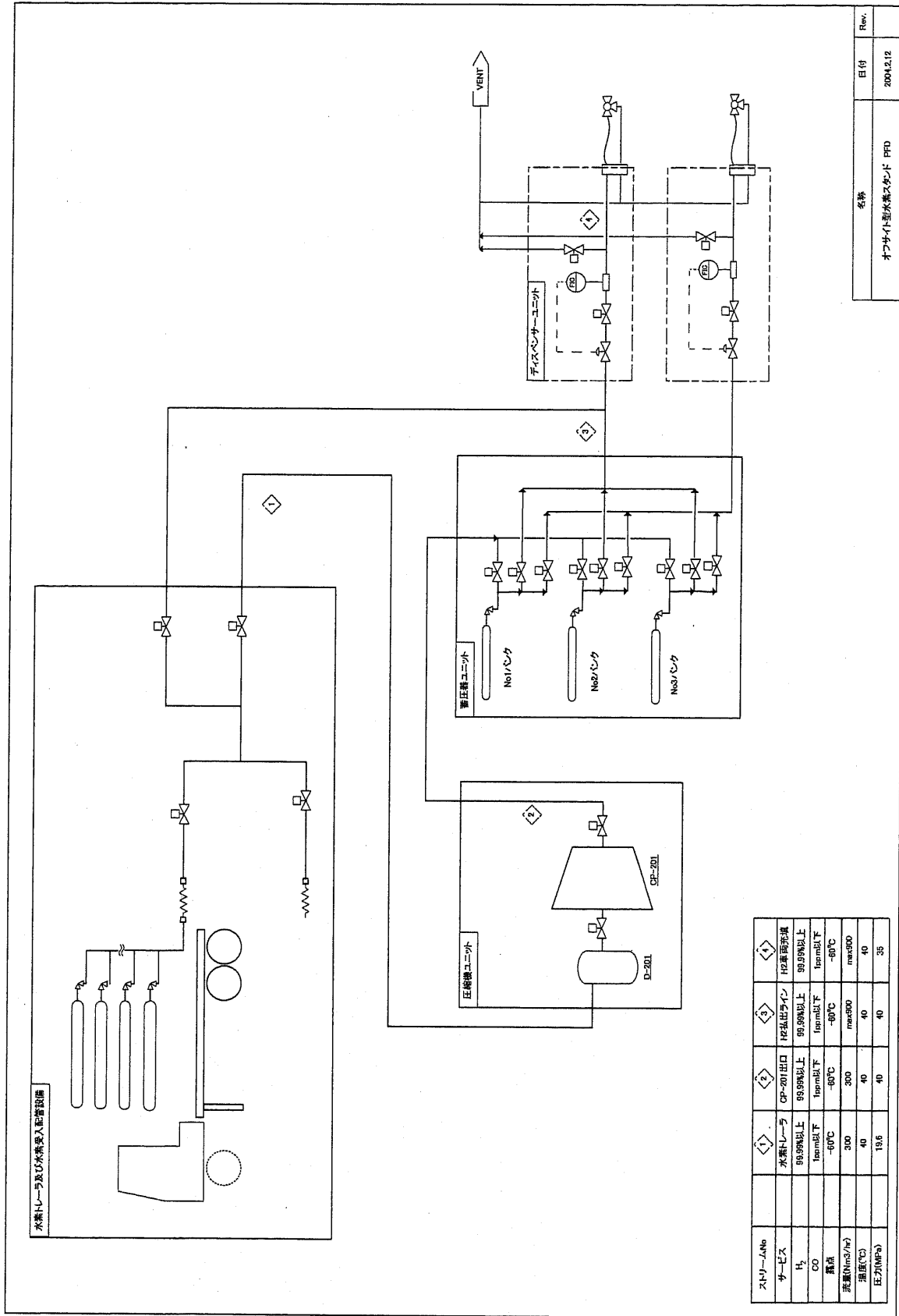
平均充てんガス量と等しく 300 Nm³/h の能力とし、オンサイト型水素スタンドの圧縮機と同じ仕様とした。表 2.2.1-3 圧縮機の能力参照。

(4) 蓄圧器

オンサイト型水素スタンドの蓄圧器と同じ仕様とした。表 2.2.1-4 蓄圧器の能力参照。

(5) ディスペンサー

オンサイト型スタンドのディスペンサーと同じ仕様とした。表 2.2.1-5 ディスペンサーの能力参照。



ストリークNo	①	②	③	④
水素トレーラー	CP-201 出口	H2 出口	H2 出口	H2 出口
H ₂	99.99%以上	99.99%以上	99.99%以上	99.99%以上
CO	1ppm以下	1ppm以下	1ppm以下	1ppm以下
露点	-60°C	-60°C	-60°C	-60°C
流量(Nm ³ /hr)	300	300	max300	max300
温度(°C)	40	40	40	40
圧力(MPa)	19.6	40	40	36

名称	日付	Rev.
オフサイト型水素スタンド PFD	2004.2.12	

図 2.2.2-1 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル (オフサイト型) の PFD

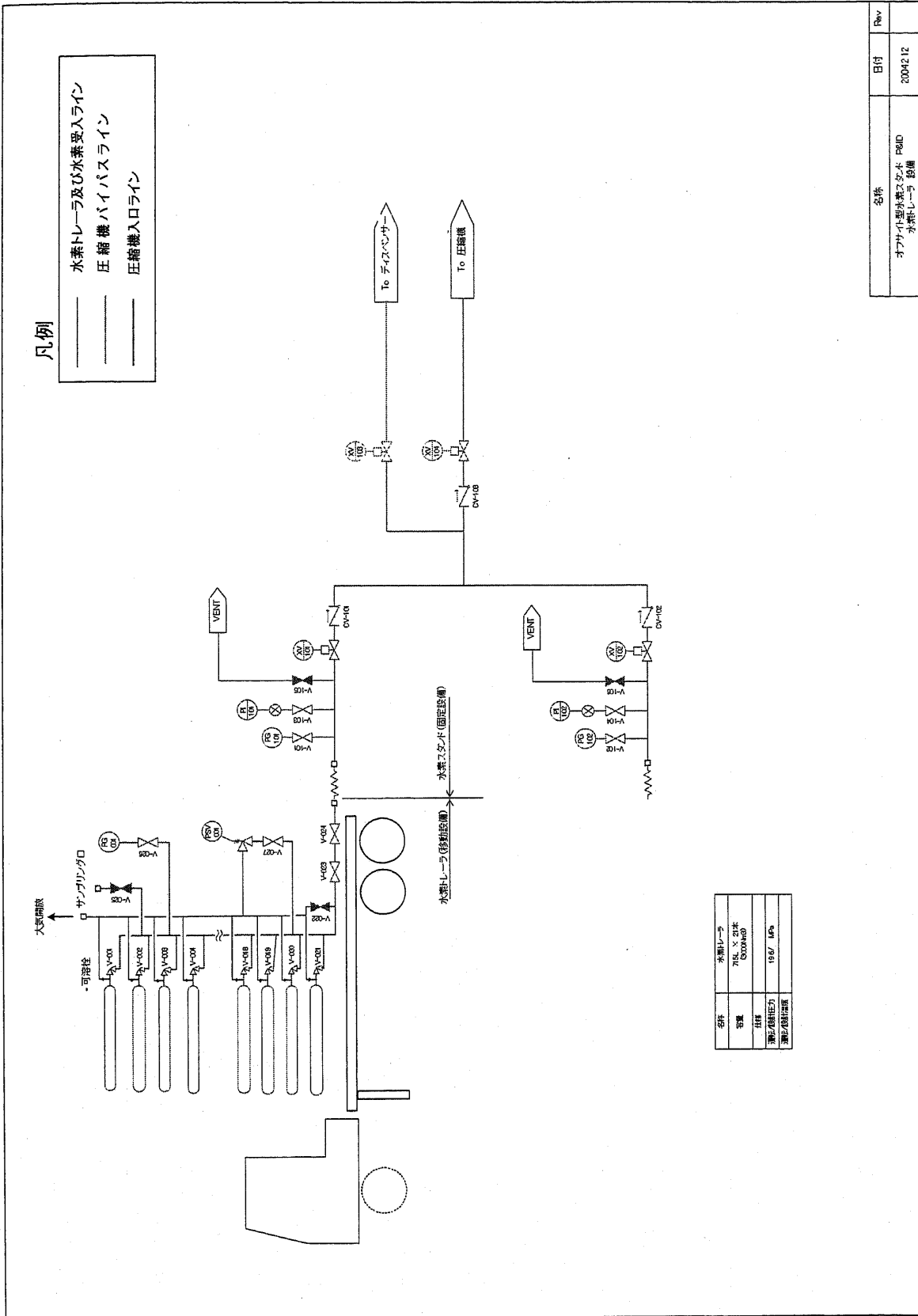


図 2.2.2-2 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル (オフサイト型) の P&ID-水素トレーラ設備

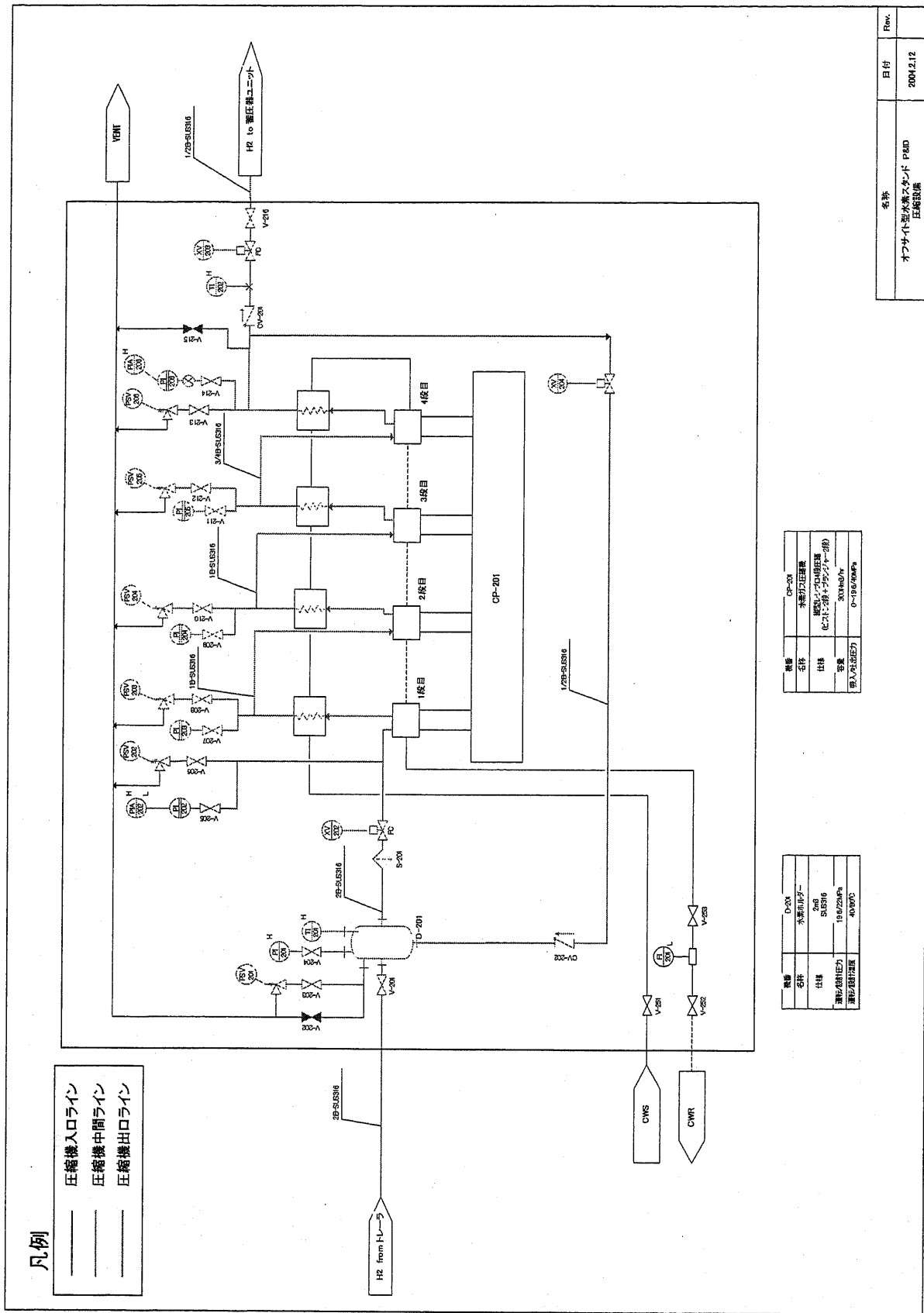


図 2.2.2-3 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル (オフサイト型) の P&ID-圧縮設備

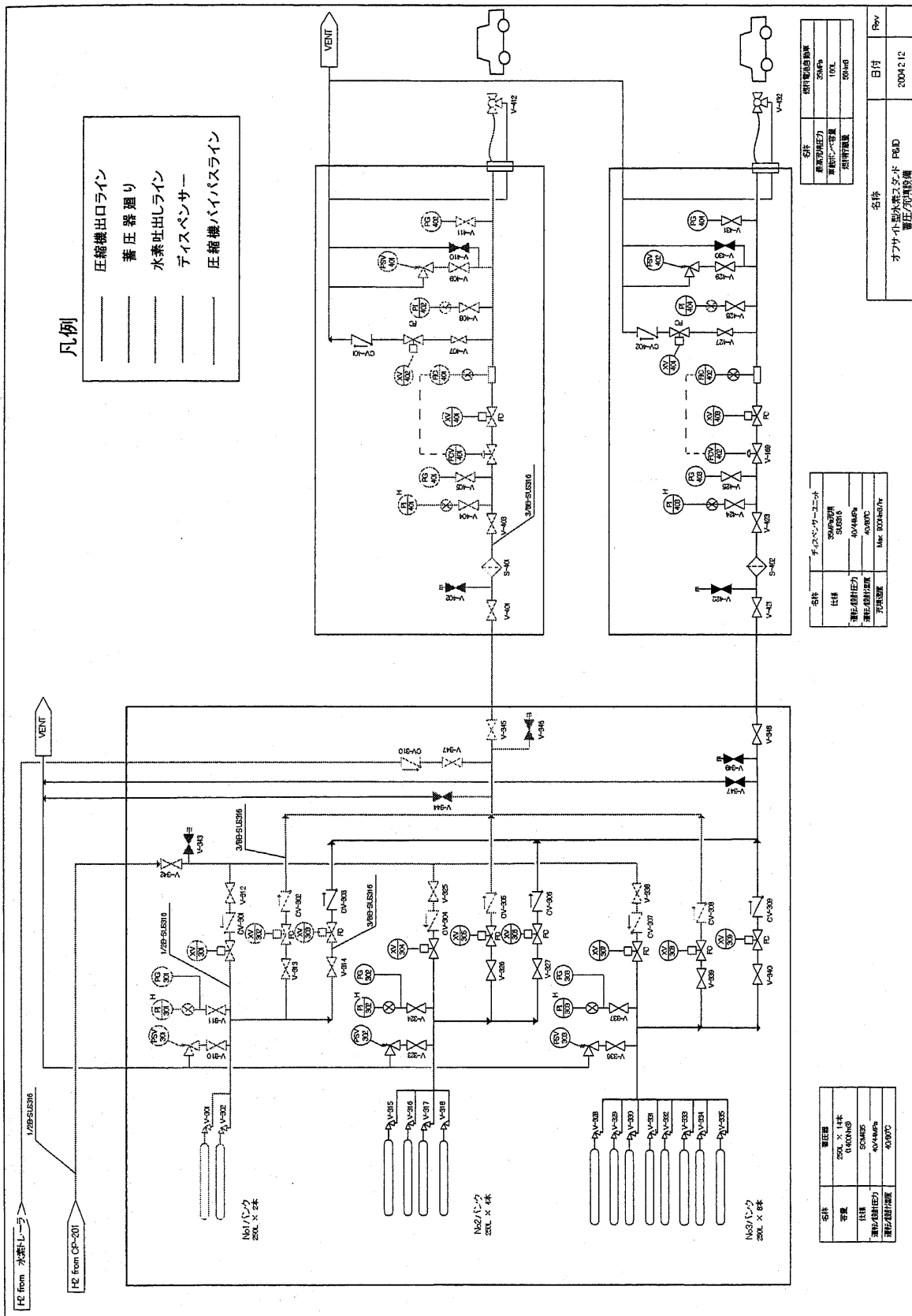


図 2.2.2-4 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル (オフサイト型) の P&ID-圧縮/充てん設備

2.3. 圧縮水素スタンドモデル（70MPa 充てん対応水素スタンド）

FCV の航続距離をガソリン車並にするため、FCV の車載タンクの圧力を 70MPa に高圧化する研究が進められている。水素インフラとしての水素スタンドも当然これに対応しなければならない。しかし、圧力 70MPa の水素ガスは一部の工業的な利用を除き、ほとんど利用された例はない。今後 70MPa の水素を一般の利用者が常時利用する移動体のエネルギー源として認知されていくためには、高い安全性と安心感を与えるエネルギーでなくてはならない。そうした観点から FCV と水素スタンドの安全には特段の配慮が必要である。

70MPa 充てん対応水素スタンドのモデル作成においては、リスク評価上大きな差が無かったことから、比較的複雑なオンサイト型水素スタンドをベースにした。

70MPa 充てん対応水素スタンドモデルのタイプは、2 種類想定した。ひとつは、水素スタンドで使用する機器や配管等のすべてを 70MPa 充てん対応として一から設計を行う新設時の水素スタンドである。これを「新設モデル」という。一方、現在水素スタンドは計画中也含めて世界中に 200 ヶ所程度[4]ある。これらのうち、圧縮水素スタンドは、ほとんど 35MPa 充てん対応である。FCV の車載タンクが 70MPa 化されると仮定した場合、普及初期はコストや設置場所の制約などから、既設の 35MPa 充てん対応水素スタンドを改造することが予想される。このとき配管や蓄圧器のすべてを 70MPa 対応に変更する場合と、既存の水素スタンド（35MPa）の配管や蓄圧器をそのまま利用し、高圧部分（70MPa）だけを増設する場合が考えられる。改造する場合は、新設する場合に比べて安全上で劣る可能性があるため、十分なリスクアセスメントが必要と考えたためである。これを「改造モデル」という。つまり、70MPa 充てん対応水素スタンドのモデルは、70MPa を前提に新たに設計し建設される「新設モデル」と、既存の 35MPa 充てん対応水素スタンドをベースに改造する「改造モデル」を想定した[7]。

蓄圧器と圧縮機の組み合わせによる充てんシステムは、前述の Cascade storage system と Booster system の二種類を想定した。

70MPa 充てん対応水素スタンドモデルの能力は、500Nm³/h とした。これは将来 FCV が普及した時に水素スタンドで必要とされる能力である[2]。また、ディスプレイについては、将来 70MPa の車載タンクが普及したとしても 35MPa 車載タンクを搭載した FCV が一定台数走行している可能性があることを考慮し、35MPa、70MPa の両方の充てんノズルを用意した。このことはモデルが複雑になるが、事故シナリオを漏れなく抽出する観点からは効果が期待できる。さらに、新設モデルについては急速充てんによる温度上昇を防ぐため、充てんする水素の冷却設備（以下「プレクール設備」という）を設置したケースも想定した。

2.3.1 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（新設モデル）

本モデルは、既存の 35MPa 充てん対応水素スタンドの既存設備を利用せず、70MPa 充てん対応水素スタンドを新しく建設したものである。概略フロー図を図 2.3.1-1 に示す。新設モデルの PFD、P&ID をそれぞれ図 2.3.1-2、図 2.3.1-3 に示す。

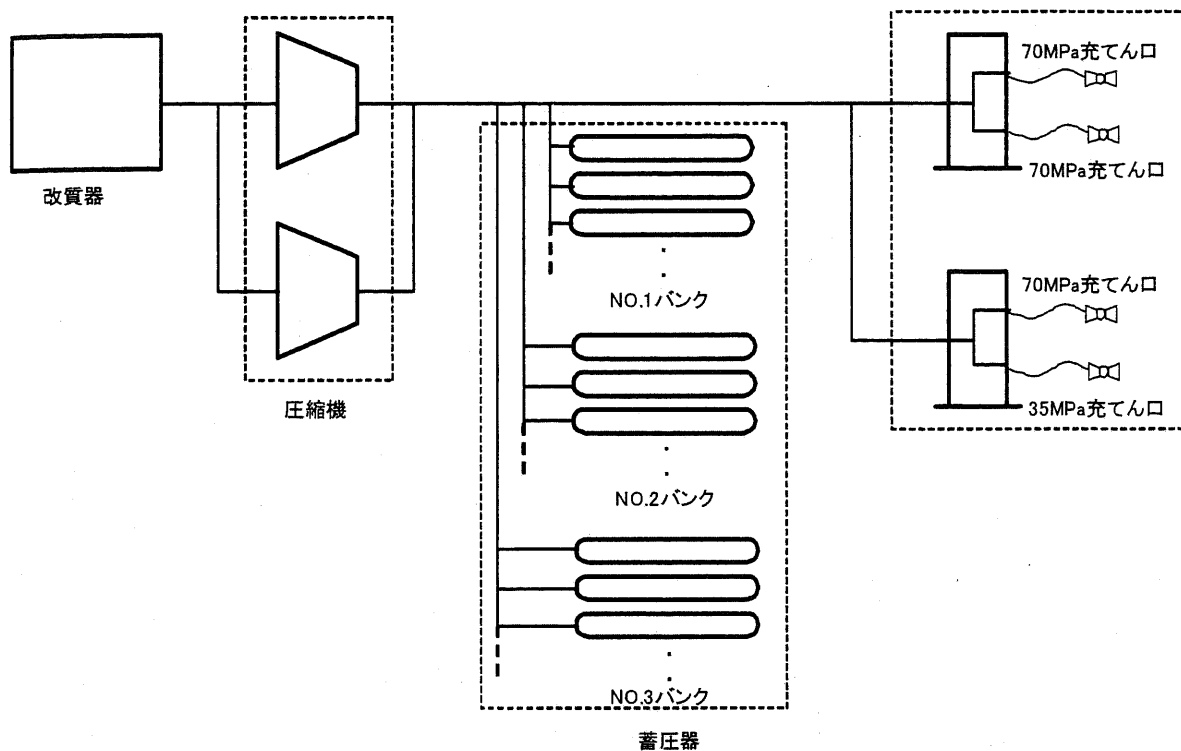


図 2.3.1-1 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（新設モデル）概略フロー図

(1) スタンド能力

70MPa 充てん対応水素スタンド（新設モデル）の能力は、オンサイト型水素スタンドと同様に WE-NET[2]等従前の検討結果を参考にした。ただし、水素スタンド能力を大きくするなど 70MPa 充てん対応に相当する仕様とした。表 2.3.1-1 にスタンド能力の概要を示す。

表 2.3.1-1 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（新設モデル）の能力

項目	仕様
平均充填車両台数	7 台/h
ピーク時充填台数	14 台/h
ピーク時間帯継続時間	1h
車両 1 台当たり充填量 *	45 Nm ³ /台（普通車）
平均充填ガス量	500 Nm ³ /h
スタンド営業時間*	10h/day

70MPa 充てん対応水素スタンドの検討では、35MPa 充てん対応の検討よりもより詳細に車両の割合を定義した。

①来所する FCV 台数の割合

70MPa の FCV 普及時でも 35MPa の FCV は一定台数走行していると考えて以下の割合とする。

表 2.3.1-2 FCV 台数の割合

FCV の車載タンク種類	割合
35MPa 車載タンク搭載車の台数	20%
70MPa 車載タンク搭載者の台数	80%

②普通車と大型車（バス）の充てん量の割合

FCVのうち、普通車に加えて大型車（バス等）の来所を想定した。

表 2.3.1-3 普通車と大型車の充てん量割合

種 類	時間当たり充てん量割合
FCV（普通車）	50%
FCV（大型車）	50%

これらを整理して、表 2.3.1-4 のように定義した。

表 2.3.1-4 FCV（普通車、大型車）と充てん量

	FCV（普通車）		FCV（大型車）	
	35MPa	70MPa	35MPa	70MPa
平均水素充てん量 (Nm ³ /h)	50	200	50	200
車両 1 台当り充てん量 (Nm ³ /台)	30	45	200	300
平均充てん車両台数 (台/h)	1.67	4.44	0.25	0.67
ピーク時充てん車両台数 (台/h)	3.33	8.89	0.5	1.33
ピーク時時間帯継続時間	1			

(注) 充てん対象車両とスタンド来場頻度のデータは、社団法人日本自動車工業会から入手

(2) 水素製造装置

需要想定 of 充填ガス量 (500 Nm³/h) と等しく、500 Nm³/h の水素製造能力とする。水素製造時の圧力は、現時点で一般的な 1MPa 未満とする。これは高圧ガス保安法の制約による。なお、圧力 1MPa 以上の水素製造装置のリスクアセスメントについては、今後の課題とした。

表 2.3.1-3 水素製造装置の能力

項 目	仕 様
水素製造能力	500 Nm ³ /h
圧力	1MPa 未満

(3) 圧縮機

水素製造能力と等しく必要な能力は 500Nm³/h とする。メンテナンスや故障時に 1 台で運用されることを考慮して 250Nm³/h×2 台設置とした。

表 2.3.1-4 圧縮機の能力

項 目	仕 様
型式	無給油式往復動圧縮機 レシプロ式 5 段
容量	250Nm ³ /h×2 台
圧力	吸込み 0.5MPa / 吐出 80MPa

(4) 蓄圧器

モデルの蓄圧器は、車両への水素充てんを効率的に行うため 3 バンクのシステムとした。また、既設の蓄圧器を使用することも考慮し、NO1 バンクのみ蓄圧器を設計圧力 44MPa とし、その他のバンクの蓄圧器の設計圧力を 90MPa とした。FCV への充てんは NO1 バンク⇒NO2 バンク⇒NO3 バンクと遮断弁を順次切替ることにより行う。表 2.3.1-5 に各バンクの容量と圧力を示す。

表 2.3.1-5 蓄圧器の能力

項目	仕様	
NO1 バンク (低圧バンク)	ボンベ容量	300L×24 本=7,200L
	必要蓄ガス量	2,000Nm ³
	常用圧力	40MPa
	払い出し終了時圧力	35MPa
NO2 バンク (高圧バンク)	ボンベ容量	100L×15 本=1,500L
	必要蓄ガス量	714.4Nm ³
	常用圧力	80MPa
	払い出し終了時圧力	60MPa
NO3 バンク (高圧バンク)	ボンベ容量	100L×12 本=1,200L
	必要蓄ガス量	571.2Nm ³
	常用圧力	80MPa
	払い出し終了時圧力	70MPa
NO1～3 バンク合計	必要蓄ガス量	3285.6Nm ³

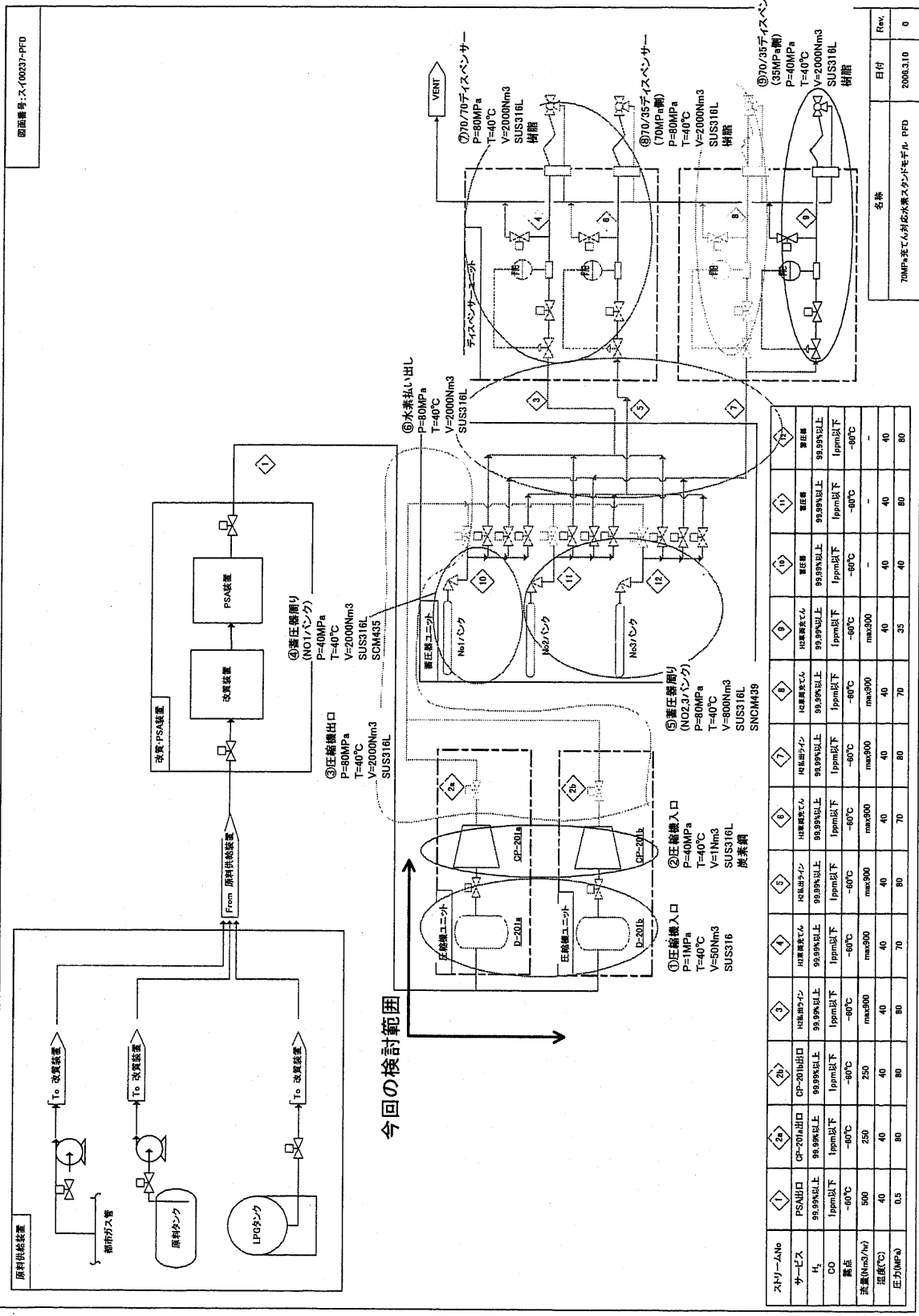
(5) ディスペンサー

前提の FCV 台数へ水素を充てんするためには、ピーク時において充てんノズルが 70MPa では 2 口、35MPa では 1 口必要となるため、ディスペンサーは、70MPa ノズル 2 口装備したものと、70MPa および 35MPa ノズルを各々 1 口装備したものを想定した。また、70/70MPa ディスペンサーは同時に使用可能としたが、35/70MPa ディスペンサーはどちらか一方だけが使用できる仕様とした（図 2.3.1-1 概略フロー参照）。

表 2.3.1-6 ディスペンサーの能力

項目	仕様
ディスペンサー台数	2 台
ノズル数	ディスペンサー 1 台に 2 口
充てん圧力	35MPa×1 口
	70MPa×3 口
充てん流量	900Nm ³ /h

図面番号: スイ00237-PFD

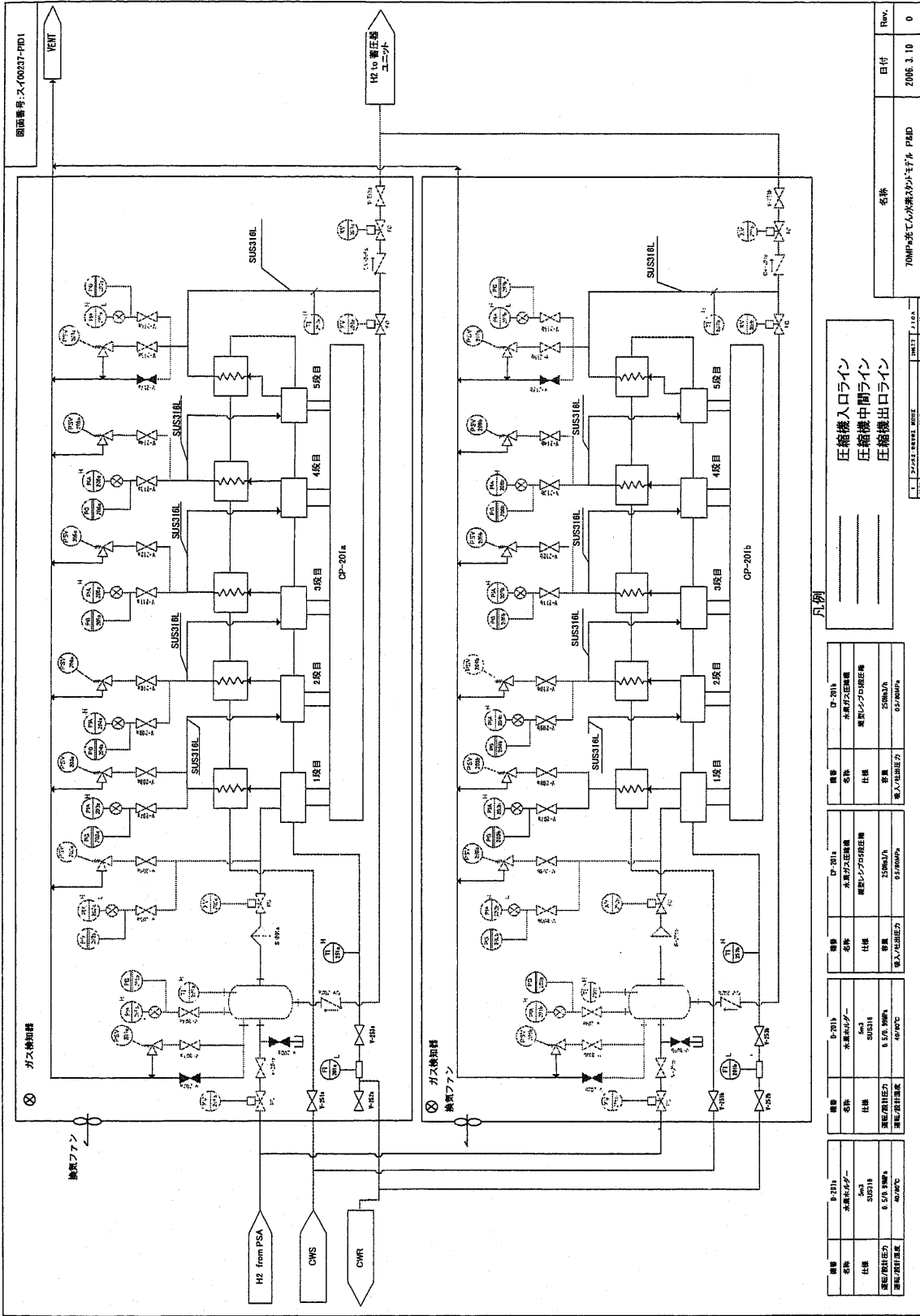


今回の検討範囲

ストリームNo	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
PSA出口	99.99%以上	99.99%以上	99.99%以上	99.99%以上	99.99%以上	99.99%以上	99.99%以上	99.99%以上	99.99%以上	99.99%以上	99.99%以上	99.99%以上
CP-20L出口	1ppm以下	1ppm以下	1ppm以下	1ppm以下	1ppm以下	1ppm以下	1ppm以下	1ppm以下	1ppm以下	1ppm以下	1ppm以下	1ppm以下
CO	-40℃	-80℃	-80℃	-80℃	-80℃	-80℃	-80℃	-80℃	-80℃	-80℃	-80℃	-80℃
流量(m³/h)	500	250	250	40	40	40	40	40	40	40	40	40
温度(℃)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
圧力(MPa)	0.5	80	80	80	80	70	70	70	70	35	40	80

図 2.3.1-2 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル (新設モデル) PFD

名称	日付	Rev.
70MPa充てん対応水素スタンドモデル PFD	2008.3.10	0



凡例

機種	0-201a	CP-201a	CP-201b	CP-201c
名称	水素ガス圧縮機	水素ガス圧縮機	水素ガス圧縮機	水素ガス圧縮機
仕様	SUS316	硬質ステンレス圧縮機	硬質ステンレス圧縮機	硬質ステンレス圧縮機
運転/設計圧力	0.5/0.39MPa	25MPa/3	25MPa/3	25MPa/3
運転/設計温度	40/30°C	85/60MPa	85/60MPa	85/60MPa

機種	0-201b	CP-201b	CP-201c
名称	水素ガス圧縮機	水素ガス圧縮機	水素ガス圧縮機
仕様	SUS316	硬質ステンレス圧縮機	硬質ステンレス圧縮機
運転/設計圧力	0.5/0.39MPa	25MPa/3	25MPa/3
運転/設計温度	40/30°C	85/60MPa	85/60MPa

機種	0-201c	CP-201c	CP-201d
名称	水素ガス圧縮機	水素ガス圧縮機	水素ガス圧縮機
仕様	SUS316	硬質ステンレス圧縮機	硬質ステンレス圧縮機
運転/設計圧力	0.5/0.39MPa	25MPa/3	25MPa/3
運転/設計温度	40/30°C	85/60MPa	85/60MPa

図 2.3.1-2 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル (新設モデル) P&ID-1

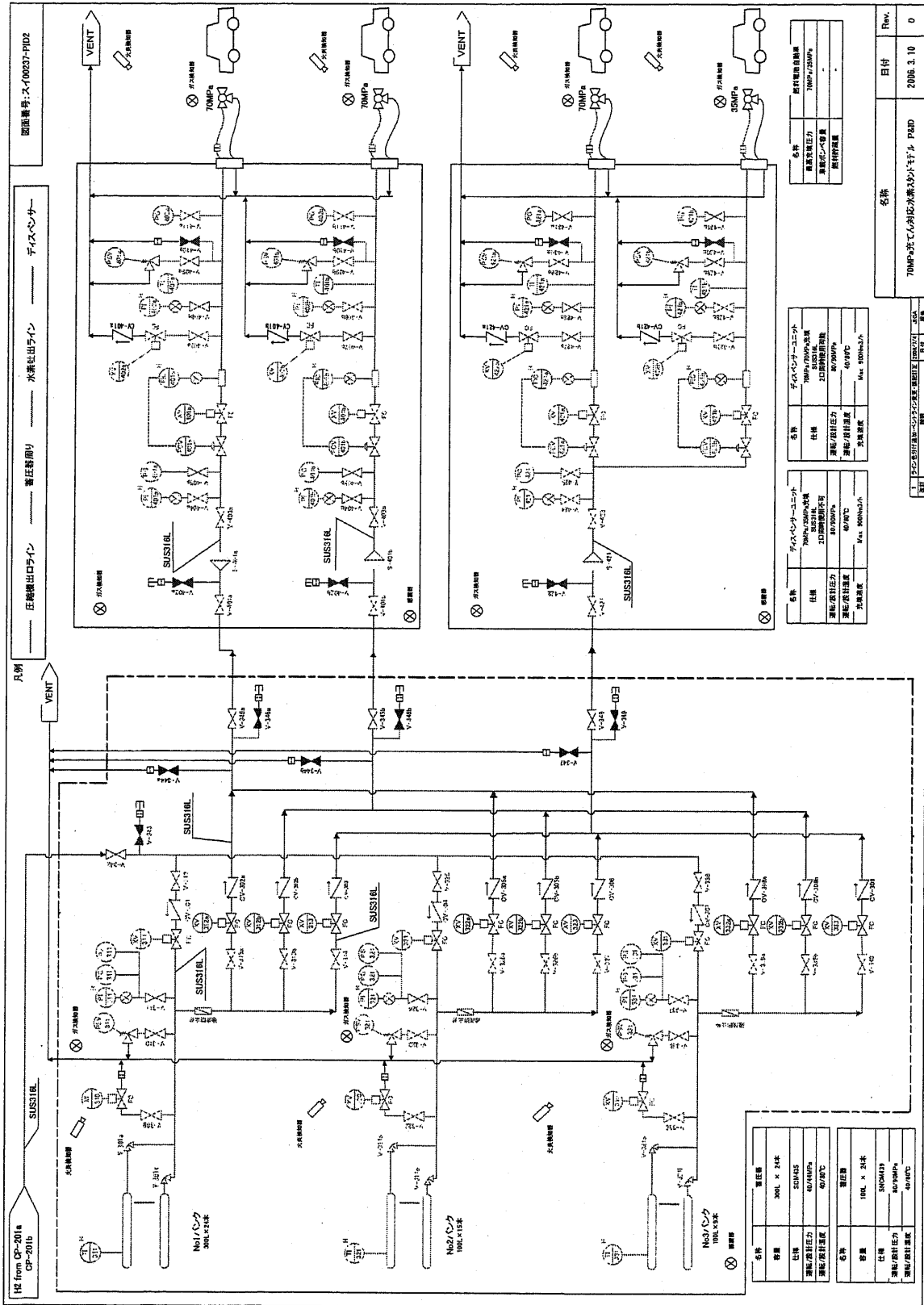


図 2.3.1-3 70MPa 充てん対応水素スタンモデル (新設モデル) P&ID-2

名称	70MPa充てん対応水素スタンモデル P&ID	日付	2006.3.10
Rev.			0

名称	70MPa/250MPa充てん対応水素スタン
最大充填圧力	70MPa/250MPa
最大充填容量	
最大貯留容量	

名称	70MPa/250MPa充てん対応水素スタン
会社	
製造/設計圧力	40/70MPa
製造/設計温度	40/70°C
充填速度	Max. 500Nm ³ /h

名称	70MPa/250MPa充てん対応水素スタン
会社	
製造/設計圧力	40/70MPa
製造/設計温度	40/70°C
充填速度	Max. 500Nm ³ /h

名称	70MPa/250MPa充てん対応水素スタン
容量	200L x 24本
仕様	SDMS
製造/設計圧力	40/70MPa
製造/設計温度	40/70°C

名称	100L x 15本
容量	100L x 15本
仕様	SDMS
製造/設計圧力	40/70MPa
製造/設計温度	40/70°C

2.3.2 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（改造モデル）

改造モデルは、既存の 35MPa 充てん対応水素スタンドの機器をベースとして利用し、70MPa 充てん対応水素スタンドに改造したものを想定している。したがって、改造モデルのスタンド能力は、ベースとなる 35MPa 充てん対応水素スタンドモデルの水素製造装置等を流用しているため、新設モデルとは異なり 300Nm³とした。

水素スタンドを改造するといっても、ベースとなる 35MPa 充てん対応水素スタンドのそれぞれの特徴を生かして改造することが予想される。35MPa 充てん対応機器のどの部分を残しどの部分を 70MPa に改造するかについては、多くのケースが想定されるためケーススタディーを行って考え方を整理した。これを改造パターンと呼ぶことにした。改造パターンの考え方は、(6) 改造パターンの選定にて記述する。ケーススタディーの中から最終的に改造モデルとして選択した改造パターンは、No.8 および No.9 である。これらの P&ID をそれぞれ図 2.3.2-2、図 2.3.2-3 に示す。

(1) スタンド能力

70MPa 充てん対応水素スタンド（改造モデル）の能力は、35MPa 充てん対応水素スタンドをベースに改造することから、35MPa の能力をベースにして 300Nm³/h とした。表 2.3.2-1 にスタンド能力の概要を示す。なお、FCV の普通車と大型車の割合および、35MPa、70MPa の割合は新設モデルと同じとした。表 2.3.1-2 FCV（普通車、大型車）と充てん量参照。

表 2.3.2-1 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（改造モデル）の能力

項目	仕様
平均充填車両台数	7 台/h
ピーク時充填台数	14 台/h
ピーク時間帯継続時間	1h
車両 1 台当り充填量 *	45N m ³ /台（普通車）
平均充填ガス量	300N m ³ /h
スタンド営業時間 *	10h/day

(2) 水素製造装置

需要想定 of 充填ガス量（300Nm³/h）と等しく、300Nm³/h の水素製造能力とする。他の圧縮水素スタンドモデルと同様に水素製造時の圧力は、現時点で一般的な 1MPa 未満とする。これは高压ガス保安法の制約による。

表 2.3.2-1 水素製造装置の能力

項目	仕様
水素製造能力	300 Nm ³ /h
圧力	1MPa 未満

(3) 圧縮機

改造モデルでは Cascade storage system と Booster system の二種類を想定した。それぞれの圧縮機の仕様を以下に示す。

表 2.3.2-2 改造モデル圧縮機の能力

項目	仕様	
	Cascade storage system	Booster system
型式	無給油式往復動圧縮機 1 段	油圧駆動ブースター式
容量	240Nm ³ /h×1 台	900Nm ³ /h×2 台
圧力	吸込み 30MPa / 吐出 80MPa	吸込み 30MPa / 吐出 80MPa

(4) 蓄圧器

改造モデル (Cascade storage system) は、既存の 35MPa 充てん対応水素スタンドの蓄圧器を低圧バンクとし、中圧 (NO4 バンク) と高圧バンク (NO5 バンク) を新しく設置する 3 バンクのシステムとした。表 2.3.2-3 に追加した NO4, 5 バンクの能力を示す。低圧バンクは表 2.3.1-5 と同じ。

改造モデル (Booster system) は、圧縮機を使って水素スタンドの充てんノズルから車載タンクへ水素を直接押し込む形式である。ここでは既存の蓄圧器 (40MPa) を低圧バンクとして利用し中、高圧バンクは設置しない設計とした。

表 2.3.2-3 改造モデル蓄圧器の能力

項目	仕様	
NO 4 バンク (中圧バンク)	ボンベ容量	100L×9 本=900L
	必要蓄ガス量	472Nm ³
	常用圧力	80MPa
	払い出し終了時圧力	60MPa
NO 5 バンク (高圧バンク)	ボンベ容量	100L×6 本=600L
	必要蓄ガス量	315Nm ³
	常用圧力	80MPa
	払い出し終了時圧力	70MPa

(5) ディスペンサー

ディスペンサーの能力は、改造モデル (新設モデル) と同様とした。表 2.3.1-6 参照。

(6) 改造パターンを選定

35MPa 充てん対応水素スタンドのどの部分をどのように改造するかを整理してパターン化を行った。これを改造パターンと呼ぶことにする。水素スタンドにおいて蓄圧器と圧縮機からなる充てんシステムは、2 種類に大別される。ひとつは、蓄圧器の水素圧力と FCV 車載タンクの圧力の差圧で充てんする Cascade storage system で、もうひとつは FCV タンクよりも低圧の蓄圧器から圧縮機を使って水素を直接押し込む Booster system である。

Cascade storage system は、以下に示す条件の組み合わせによって 8 パターンが考えられる。

- ・ 70MPa 対応圧縮機の設置位置 (35MPa 対応圧縮機と並列設置、又は、直列設置)
- ・ FCV タンクへの 35MPa までの充てんに使用するバンク (35MPa スタンドの既設バンク使用、又は、70MPa 化改造新設のバンク使用)
- ・ 水素ホルダーの増設 (70MPa 化用に新たに増設、又は 35MPa スタンドのホルダー又は蓄圧

器を使用)。尚、上記水素ホルダーの機能は、35MPa 充てん対応水素スタンドモデル、70MPa 充てん対応水素スタンドモデルと同様に、圧縮機起動時の圧力低下、圧縮機停止時に吐出ガスが吸入側へ戻り急激な圧力上昇を抑制するためものとした。

一方、Booster system は蓄圧器の下流に圧縮機を設置する1つのパターンだけが想定できる。こうして Cascade storage system の8パターンと Booster system の1パターンを加えて全部で9パターンを想定した。改造パターンの一覧を表 2.3.2-4 に示す。

この9パターンの中からリスク評価を行う改造モデルとして最適なパターンを検討した。9パターンの概略図を図 2.3.2-1 に示し、それぞれのパターンの改造条件を表 2.3.2-5 に示す。

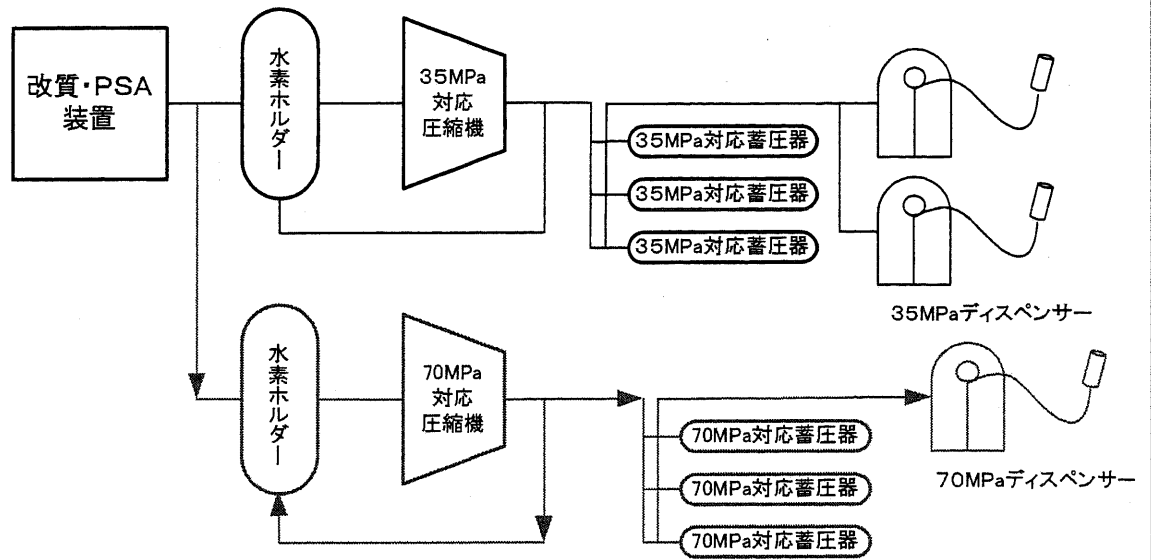
9種類の改造パターンを整理し検討の結果、リスクアセスメントに利用する「改造モデル」は、想定される他の改造パターンの特性を網羅しているパターン 8 を選定し、改造モデル A(Cascade storage system)とした。また、Booster system については、パターン 9 を改造モデル B (Booster system) として選定した。

表 2.3.2-4 改造パターンの一覧

パターン NO	70MPa 対応圧縮機の設置位置	低压充てんに 35MPa スタンドの既設バンク使用	水素ホルダーの増設 (70MPa 用に増設)
1	35MPa 対応圧縮機と並列 (70MPa 対応圧縮機の吸入 圧力≒0.8MPa)	× 新設バンク使用	○ 増設
2		× 新設バンク使用	× なし
3		○ 35MPa を使用する	○ 増設
4		○ 35MPa を使用する	× なし
5	35MPa 対応圧縮機と直列 (70MPa 対応圧縮機の吸入 圧力≒35MPa)	× 新設バンク使用	○ 増設
6		× 新設バンク使用	× 注記 1
7		○ 35MPa を使用する	○ 増設
8		○ 35MPa を使用する	× 注記 1
9		○ 35MPa を使用する	× 注記 1

注記 1 吸入バッファーとして、35MPa 水素スタンドのバンクを使用する。

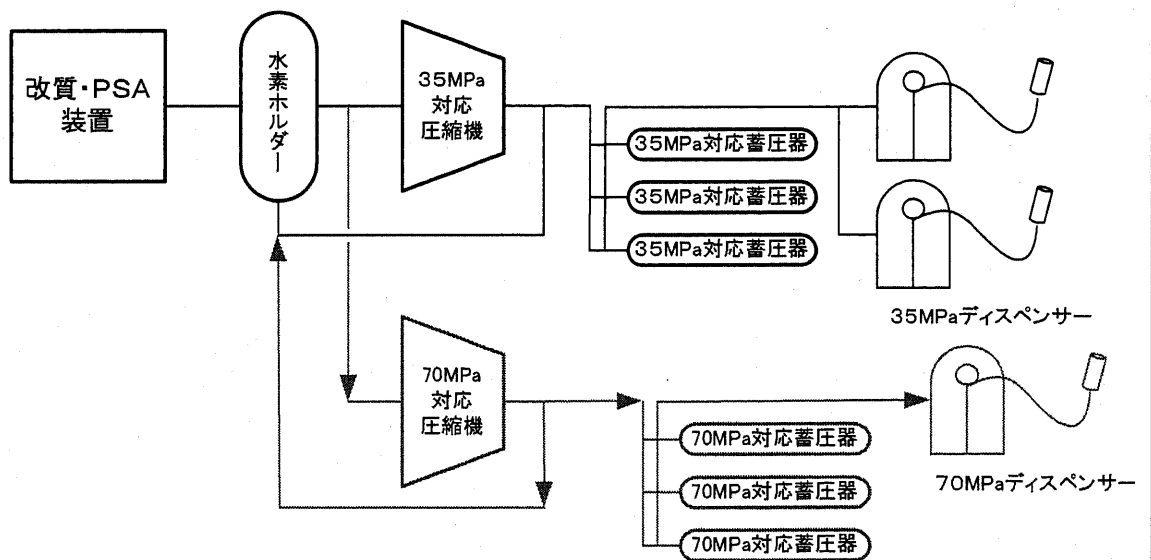
【パターン1】



概要

ガス源のみを共有する。
圧縮機は 35MPa と並列。

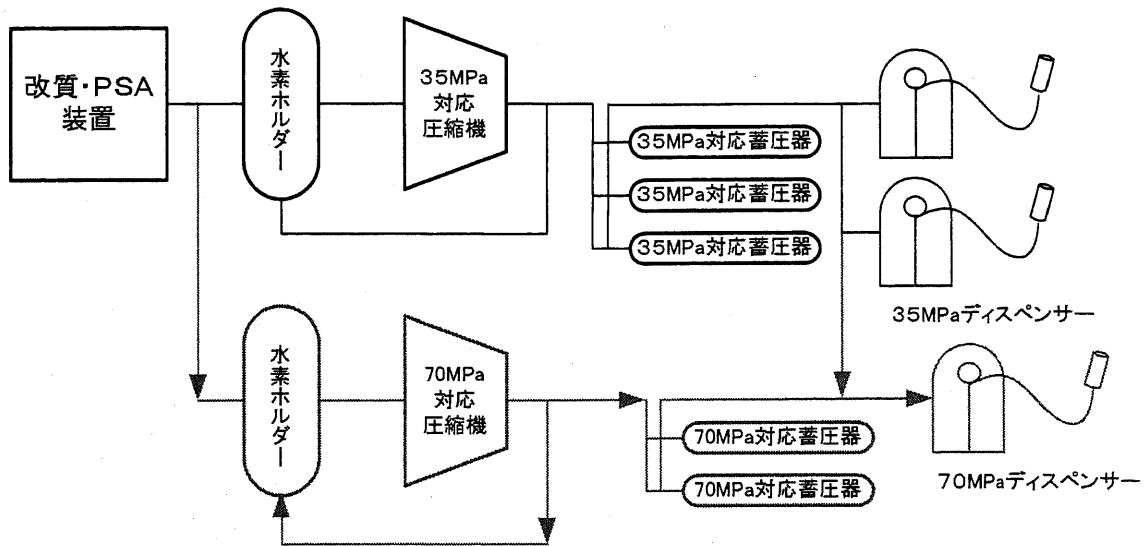
【パターン2】



概要

ガス源、水素ホルダーを共有する。
圧縮機は 35MPa 対応用と並列。

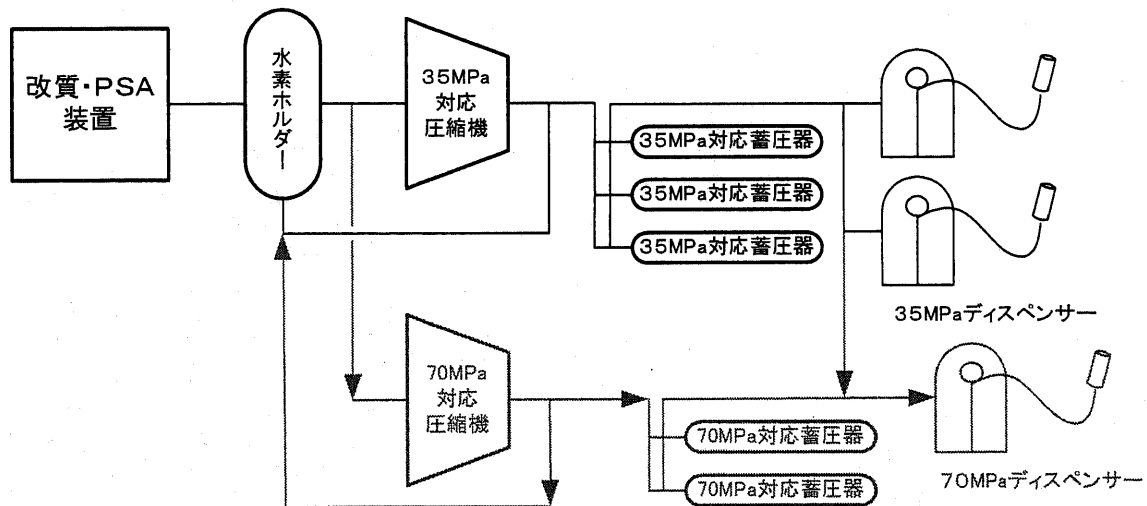
【パターン3】



概要

ガス源を共有し、35MPa迄の充てんは、35MPa スタンドのバンクを使用。
圧縮機は 35MPa 対応用と並列。

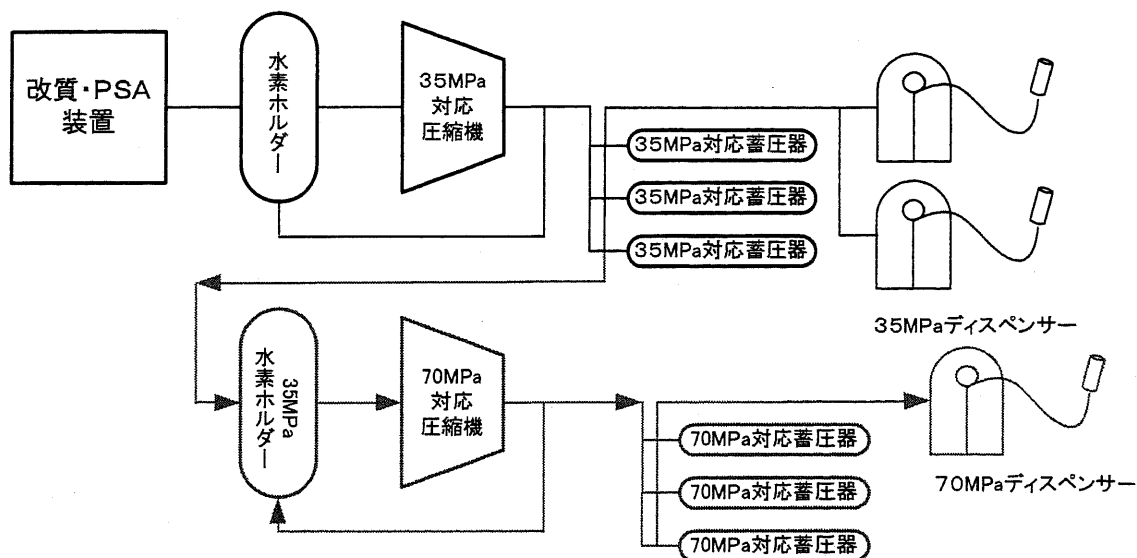
【パターン4】



概要

ガス源、水素ホルダーを共有し、35MPa迄の充てんは、35MPa スタンドのバンクを使用
圧縮機は 35MPa 対応用と並列。

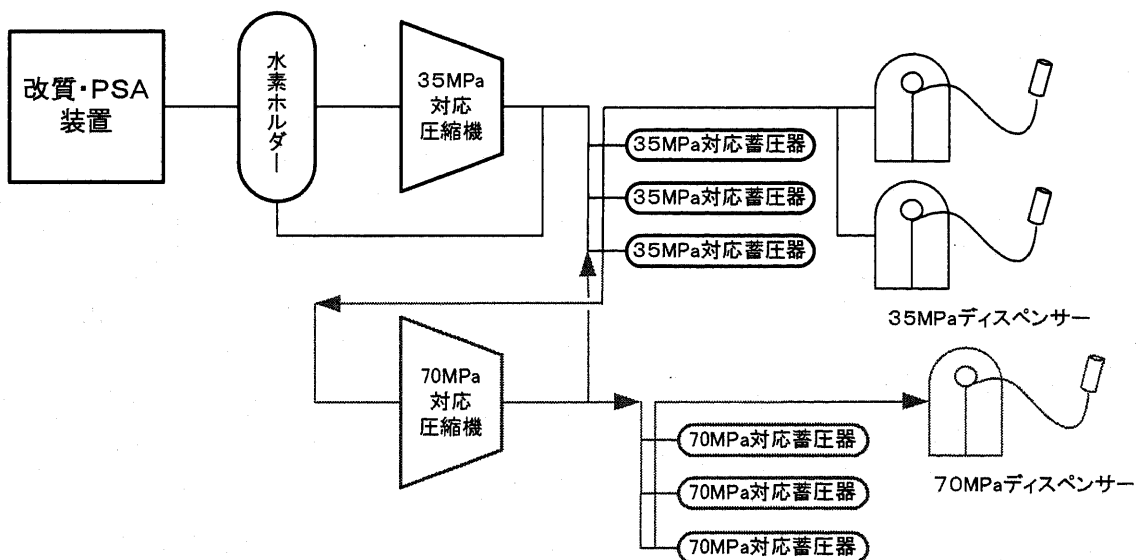
【パターン5】



概要

圧縮機は 35MPa 対応と直列。(ガス源 35MPa 対応蓄圧器)

【パターン6】

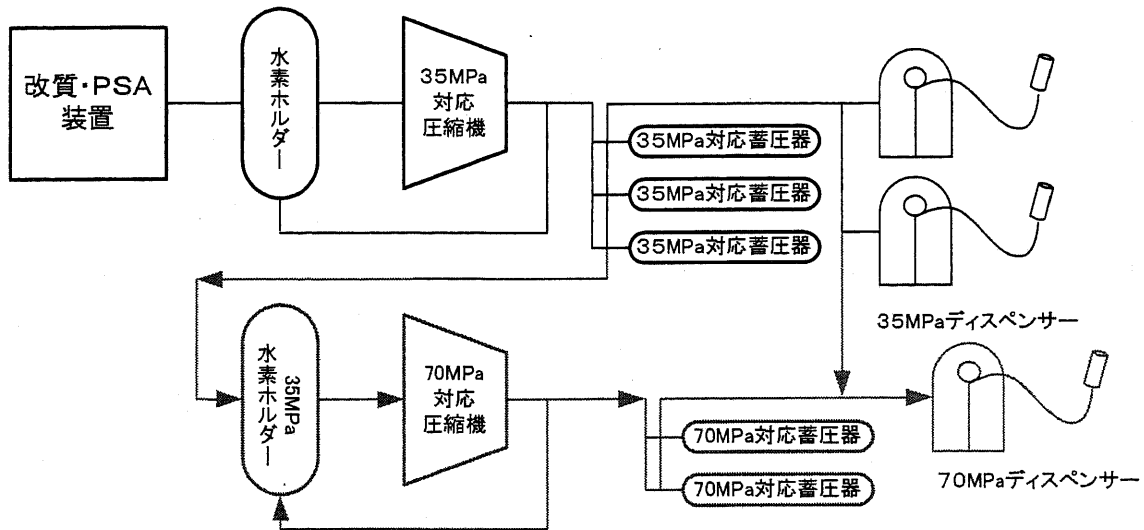


概要

圧縮機は 35MPa 対応と直列。(ガス源 35MPa 対応蓄圧器)

吸入バッファとして 35MPa 対応蓄圧器を使用する。

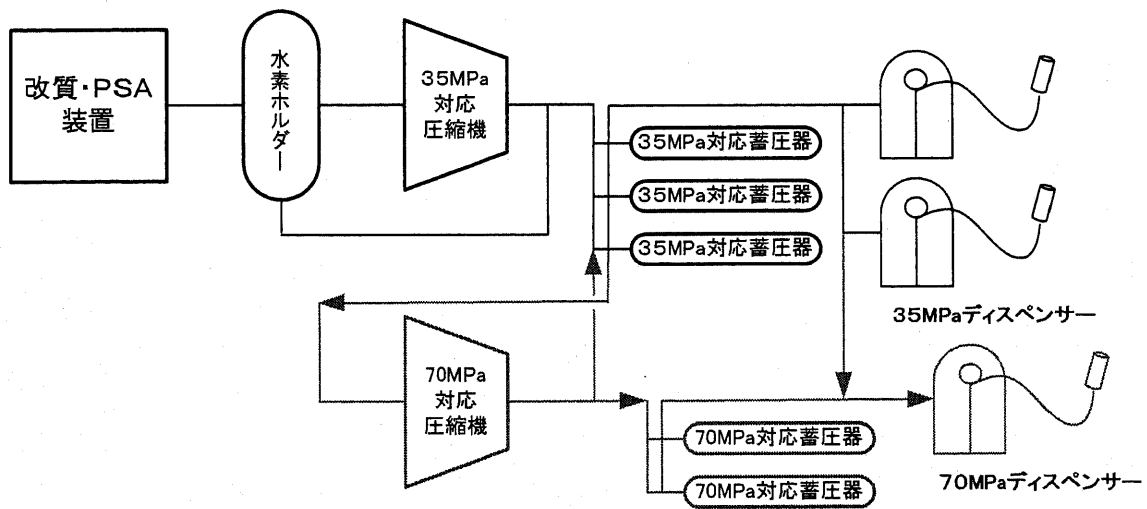
【パターン7】



概要

圧縮機は 35MPa 対応と直列。(ガス源 35MPa 対応蓄圧器)
 35MPa 迄の充てんは、35MPa スタンドのバンクを使用。

【パターン8】⇒ 改造モデルA



概要

圧縮機は 35MPa 対応と直列。(ガス源 35MPa 対応蓄圧器)
 吸入バッファとして 35MPa 対応蓄圧器を使用する。
 35MPa 迄の充てんは、35MPa スタンドのバンクを使用。

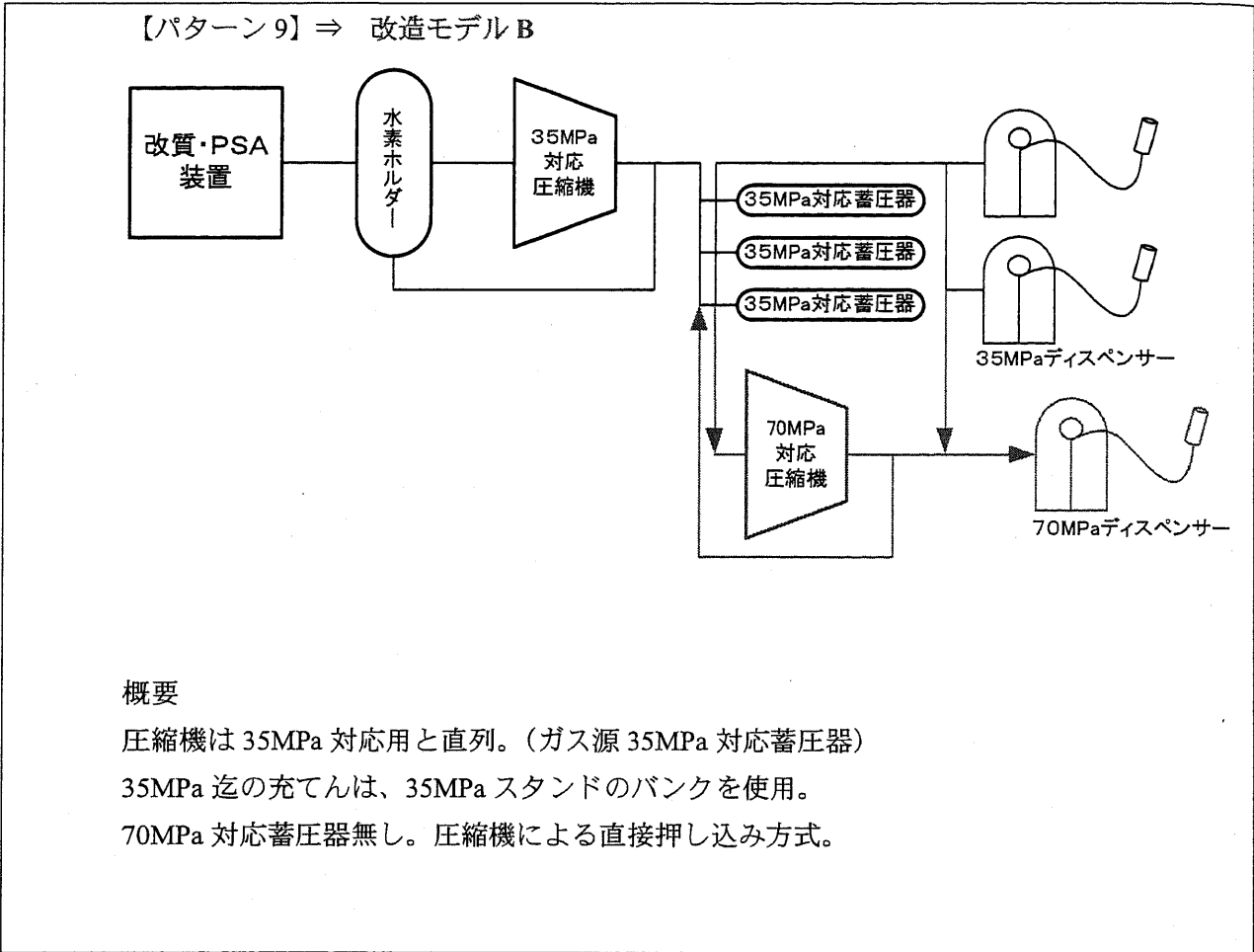


図 3.3.2-1 改造パターンの概略図

表 2.3.2-5 改造パターンの改造条件とモデル選定の検討結果

パターン NO	70MPa 対応圧縮機の設置位置	低圧充てんに35MPa スタンドの既設バンク使用	水素ホルダーの増設 (70MPa 用に増設)	安全性検証の改造モデルとしての検討結果
1	35MPa 対応圧縮機と並列	×	○	35MPa 水素スタンドに 70MPa 水素スタンドを併設するパターンであり、70MPa 水素スタンドを新設する場合と同様である。このことから、昨年度作成した 70MPa 水素スタンドモデルの安全性検証が検討できる。 ⇒【新設モデルで対応】 パターン 1,2 に 35MPa 設備から 70MPa 設備にバイパスラインが設置されたパターンである。パターン 1,2 との違いは、バイパスラインが付いたことによる想定事故である。しかし、想定事故については、パターン 7,8 においても同様に抽出できる。⇒【パターン 7,8 で対応】 パターン 5 は、バイパスラインが付けられたパターン 7 に想定事故抽出において包含される。⇒【パターン 7 で対応】 パターン 6 は、バイパスラインが付けられているパターン 8 に想定事故抽出において包含される。⇒【パターン 8 で対応】 パターン 7 は、パターン 8 に水素ホルダーが付いているパターンである。水素ホルダーの無い場合の方が操作・制御面で複雑となることから、パターン 8 に包含される。⇒【パターン 8 で対応】 パターン 3~7 による想定事故抽出を包含する。⇒【改造モデル A とする】 70MPa 充てん圧縮機での直接押込み方式である。本方式はヨーロッパで実例がある。⇒【改造モデル B とする】
2	(70MPa 対応圧縮機の吸入)	×	×	
3	圧力≒0.8MPa)	○	○	
4		○	×	
5	35MPa 対応圧縮機と直列	×	○	
6	(70MPa 対応圧縮機の吸入)	×	× 注記 1	
7	圧力≒35MPa)	○	○	
8		○	× 注記 1	
9		○	× 注記 1	

注記 1 吸入バッファアークとして、35MPa 水素スタンドのバンクを使用する。

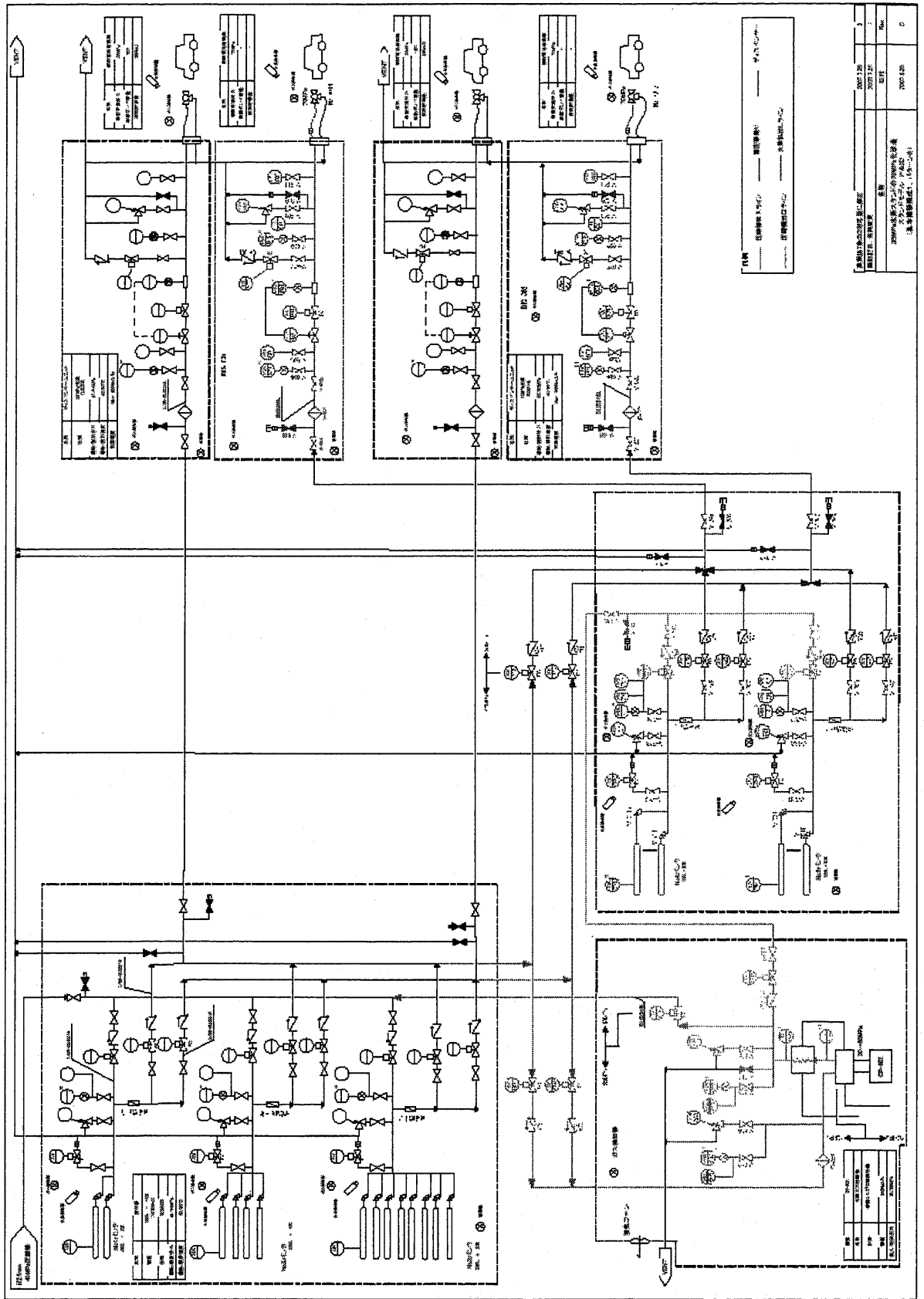


図 3.3.2-2 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル A) P&ID

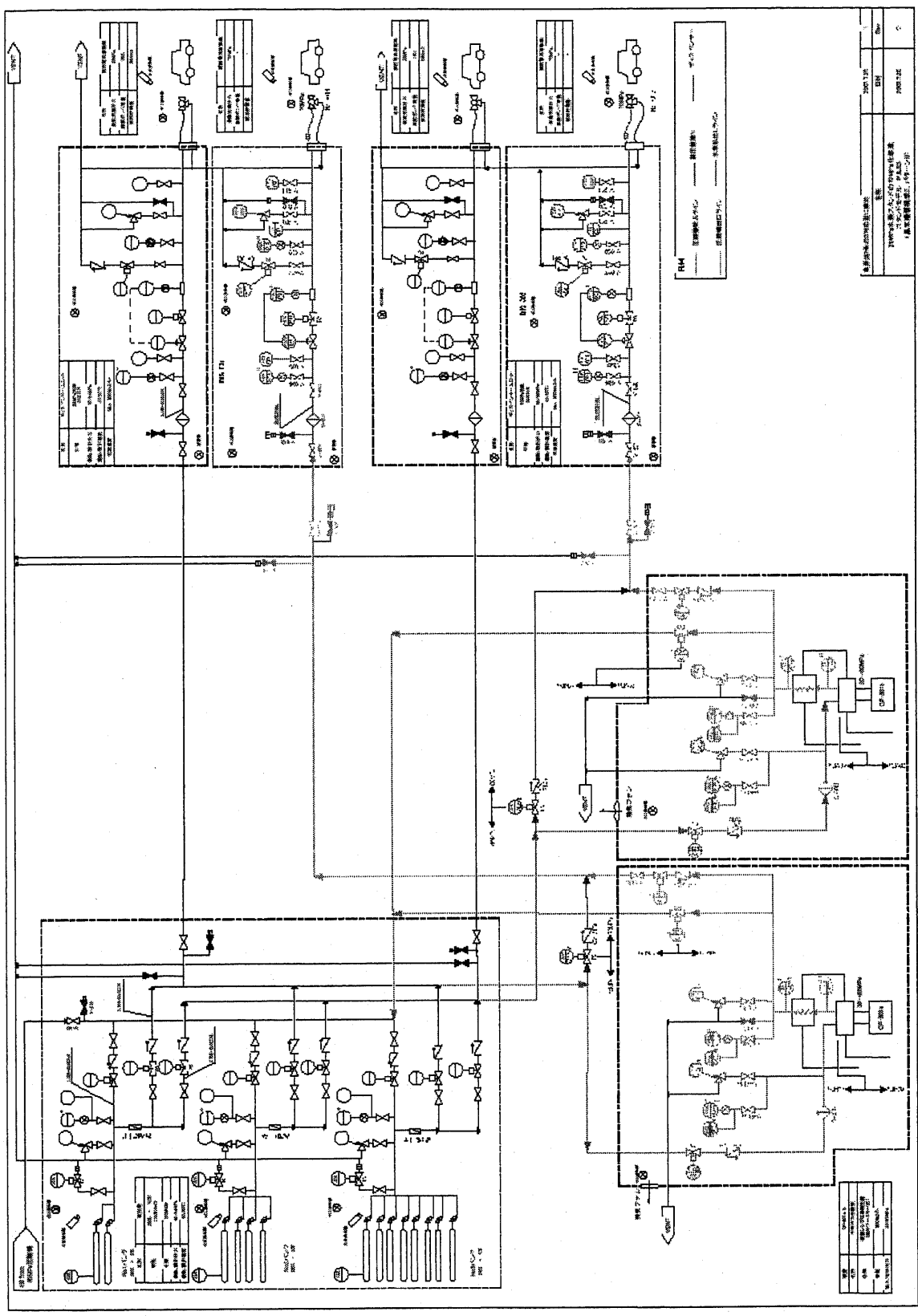


図 3.3.2-3 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル (改造モデルB) P&ID

2.3.3. 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（プレクール設備モデル）

ガソリン自動車に代わる次世代の自動車として、燃料電池自動車（FCV）と電気自動車（EV）が注目されている。EV のメリットは電気を使うためインフラ整備のための社会的なコストが低いことであるが、バッテリーの制約により航続距離が短い。一方、FCV のメリットは長い航続距離と早い充てん時間であり、課題はインフラ整備と言われている。FCV の航続距離をさらに延長し、ガソリン自動車並にするため、車載タンクの圧力を 70MPa にする検討がなされている。

しかし、水素ガスを速い速度で車載タンクへ充てんすると、車載タンクの温度が上昇する。ゆっくり充てんすれば温度上昇が少なくて済むが、FCV の 70MPa の車載タンク（水素の重量 6kg 程度）へ 3 分程度で充てんするような急速充てんを想定すると車載タンクの温度上昇がはなはだしい。本件は、35MPa の車載タンクでは大きな問題にはならなかったが、車載タンクの高圧化によって顕在化してきた。車載タンクは、内面がアルミまたはプラスチック製の容器に炭素繊維（カーボンファイバー）を巻きつけて強化した複合容器を利用している。車載タンクの温度が上昇し複合容器の設計温度（85℃）を超えると、カーボンファイバーを固定する接着剤が軟化するため強度を保証できなくなり、最悪のシナリオとして車載タンクの爆発が想定される。

こうした事故シナリオを回避するため、自動車業界は水素スタンドにプレクール設備を設置するよう求めている。プレクール設備は FCV へ充てんする水素を十分に冷却して供給することで、車載タンク内で温度上昇が起っても設計温度に到達しないようにするものである。図 2.3.3-1 にプレクール設備の効果イメージを示す。当然、水素を冷却するためにエネルギーが必要であり、冷却に必要なエネルギーと FCV の航続距離や急速充てんなどの利便性との相殺について議論する必要がある。ここではプレクール設備の冷却コストや必要性の議論は他へ譲り、安全性の観点から水素スタンドで必要と思われるプレクール設備モデルを作成し、リスクアセスメントに関する議論を行う。本研究では、70MPa 充てん対応水素スタンドのモデルを複数想定しているが、ここではプレクール設備に注目するため、「新設モデルにプレクール設備を設置した水素スタンドモデル」を想定する。以下の前提条件を踏まえて想定したプレクール設備モデルの PFD を P&ID を図 2.3.3-4 と図 2.3.3-5 に示す。

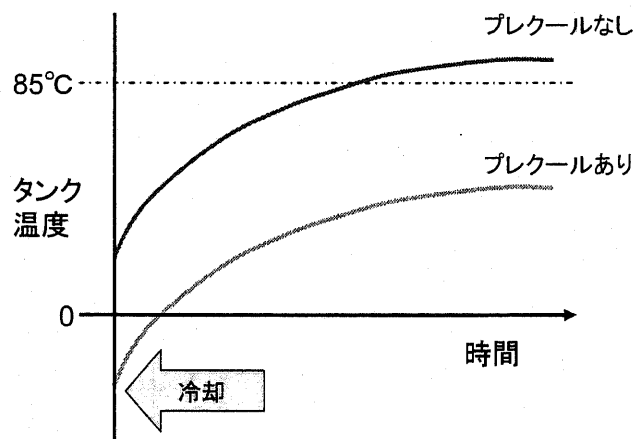


図 2.3.3-1 プレクール設備の効果イメージ

(1) スタンド能力

「プレクール設備モデル」の能力は、70MPa 充てん対応水素スタンドの「新設モデル」と同じとする。新設モデルの能力は、表 2.3.1-1 を参照のこと。

(2) プレクール設備

将来において一般的に利用されるプレクール設備の概要はまだ明らかになっていないことから、本研究では現時点で知りうる情報をベースにプレクール設備モデルを定義した。表 2.3.3-1 にその概要を示す。

表 2.3.3-1 プレクール設備の仕様

項目	仕様
設計圧力	90MPa
常用圧力	80MPa
充てん流量	900Nm ³ /h
冷却後の水素温度	-30℃
設置条件	70MPa ノズルのみ冷却

プレクール設備において水素を冷却する方式はいくつか想定できるが、本研究では-30℃前後の温度域で利用でき、かつ水素スタンドで扱う水素量で効率的に使用できると考えられる以下の 2 種類を想定した。

- ①機械式冷凍機方式 : 冷凍機で冷媒を冷却し熱交換器で冷媒と水素の熱交換を行うタイプ
- ②液体窒素浸漬方式 : 液体水素などの冷媒に直接浸して冷却するタイプ

(3) 機械式冷凍機方式

冷凍機使用タイプの概略フローを図 2.3.3-2 に示し、熱交換器と冷凍機の仕様をそれぞれ表 2.3.3-2、表 2.3.3-3 に示す。

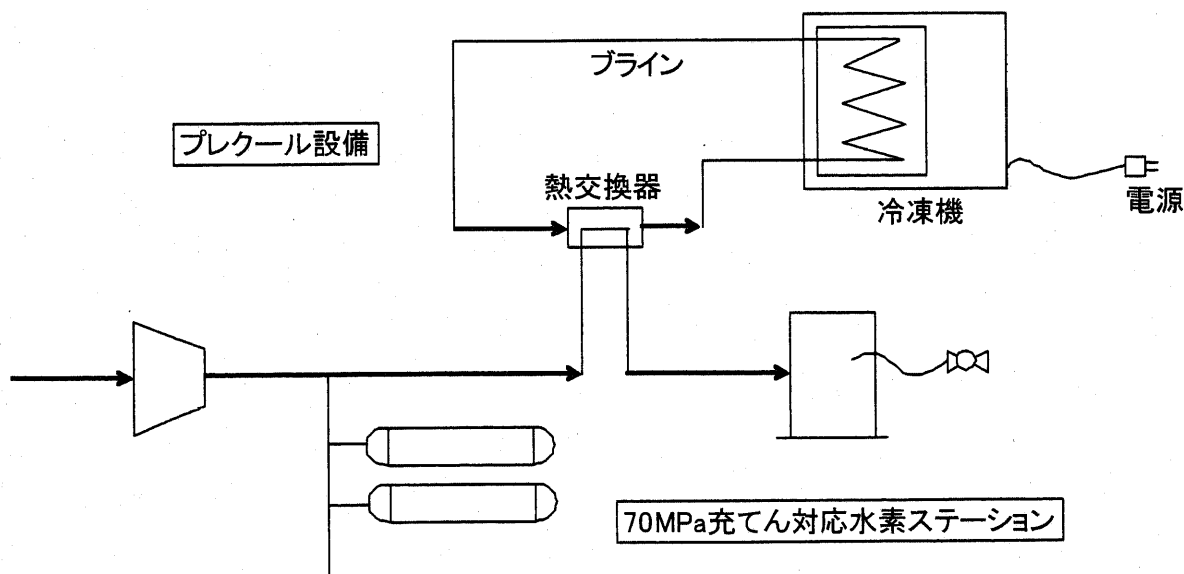


図 2.3.3-2 プレクール設備の概略フロー（機械式冷凍機方式）

表 2.3.3-2 機械式冷凍機方式の熱交換器仕様

項目		仕様
熱交換器		二重管
流体	冷媒 (外)	ブライン
	プロセス (内)	水素
サイズ・材質	外管	φ 60.5mm、SUS304
	内管	φ 14.3mm×t5.3mm×L22,000mm,SUS316L
	全体	W2,000mm×D600mm×H1,400mm

表 2.3.3-3 機械式冷凍機方式の冷凍機仕様

項目	仕様
冷凍機能力	23kW/台×3 台=約 70kW
大きさ (1 台)	W6,000mm×D1,800mm×H2,600mm

<運転制御方法について>

水素ガスの温度制御は、主にブラインの温度制御で行い、微調整は充てん流量制御によって行う。充填される水素ガス温度が規定温度より上昇した場合は、充填ラインの流量調整弁を絞り込むことによって、充填水素ガスの流量を抑え一時的に規定温度まで下げる制御を行うものとする。それでも制御できない場合は、直ちに FCV へ水素の充てんを停止する。

冷凍機の運転方法について、燃料電池自動車の普及初期段階では水素スタンドに来所する FCV が少ないため、省エネの観点から来所時または来所予定時だけ冷凍機を稼働させる運転方法が想定できる。しかし、本研究では FCV 普及期を想定していることから、冷凍機・循環ポンプは常時連続運転し、常に冷却された水素を充てんできる状態にしている運転を基本とする。但し、休日、夜間は運転コストを抑える為、間欠運転や、タイマー運転などを併用すると想定した。

(4) 液体窒素浸漬方式

液体窒素浸漬タイプの概略フローを図 2.3.3-3 に示し、熱交換器と液体窒素貯槽（コールドエバポレーター）の仕様をそれぞれ表 2.3.3-4、表 2.3.3-5 に示す。

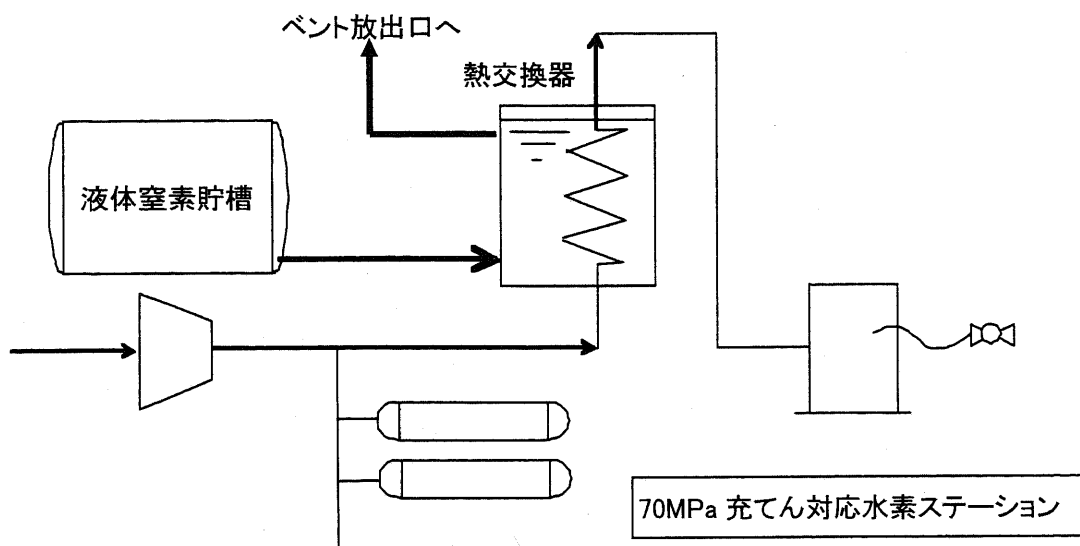


図 2.3.3-3 プレクール設備の概略フロー（液体窒素浸漬方式）

表 2.3.3-4 液体窒素浸漬方式の熱交換器仕様

項目		仕様
熱交換器		浸漬型
流体	冷媒（外）	液体窒素
	プロセス（内）	水素
サイズ・材質	外管	真空断熱容器
	内管	φ 14.3mm×t5.3mm×L1,660mm,SUS316L
	全体	φ 1,000mm×H1,000mm

表 2.3.3-5 液体窒素浸漬方式の液体窒素貯槽

項目	仕様
液体窒素貯蔵量	約 15t/日、毎日ローリーによる補給が必要

<運転制御方法について>

水素の温度調整について、熱交換器ラインとは別に熱交換器バイパスラインを設け、熱交換器出口とバイパスラインの合流後の水素温度を測定する。この温度で流量コントロール弁の開度調整を行い、充填水素温度を調整する。例えば、充填する水素ガス温度が設定温度よりも高かった場合、熱交換器側へ水素を供給するように、バイパスラインのコントロール弁を絞る。また、逆に水素温度が設定温度よりも低くなりすぎた場合には、バイパスラインのコントロール弁を開にすることによって温度調節を行う。

熱交換器内の液体窒素レベルの制御は、熱交換器内に液体窒素液面計を取り付け、この信号が L（液面低）の場合に液体窒素を供給し、H（液面高）の場合は供給を止める ON/OFF 制御方法とする。ここで熱交換器のから液体窒素がオーバーフローすることを防止するため、液体窒素の規定液面に窒素ガス放散用の配管の一端を取り付け、液体窒素がオーバーフローした場合、配管→ベントラインへ安全に放散できる仕組みとする。

熱交換器内で水素と熱交換してガス化した窒素ガスは、ベントラインに設置された空温式蒸発器によって常温に昇温した後、大気に放散することとする。

(5) プレクール設備モデルの選定について

本研究では、前述の機械式冷凍機方式と液体窒素浸漬方式の2つのケースについて比較検討し、表 2.3.3-6 にまとめた。

表 2.3.3-6 プレクール設備の方式による比較検討

項目	機械式冷凍機方式		液体窒素浸漬方式	
温度制御	比較的細かい温度設定・制御が可能。	○	低流量域で設計温度以下となる可能性有り。温度制御は困難。	×
定常運転までの時間	冷凍機でラインを規定温度まで冷却するために時間がかかる。	×	比較的短時間で熱交換器への液体窒素導入が可能。	○
冷却装置設置場所	冷凍機ユニットは非防爆エリアに設置する必要有り。	△	防爆エリア内の設置も可能。液体窒素補給用ローリー車停車位置を確保する必要あり。	×
熱交換器	液体窒素方式より若干大きくなるが、形状に自由度がある。	○	設置スペースは小さくなるが、形状に自由度がない。低温脆性の影響が未検討。	×
メンテナンス	機械的なメンテナンスが必要	△	高圧ガス保安法に則った検査・メンテナンスが必要。回転機等の稼働部品が無い場合故障は少ないと思われる。	△
総合判断	○		×	

プレクール設備の方式による比較検討から、機械式冷凍機方式と液体窒素浸漬方式はそれぞれに一長一短があるが、本研究では 70MPa 充てん対応水素スタンドモデルのプレクール設備モデルには、「機械式冷凍機方式」を採用することとした。その理由は以下のとおり。

液体窒素浸漬方式の問題点

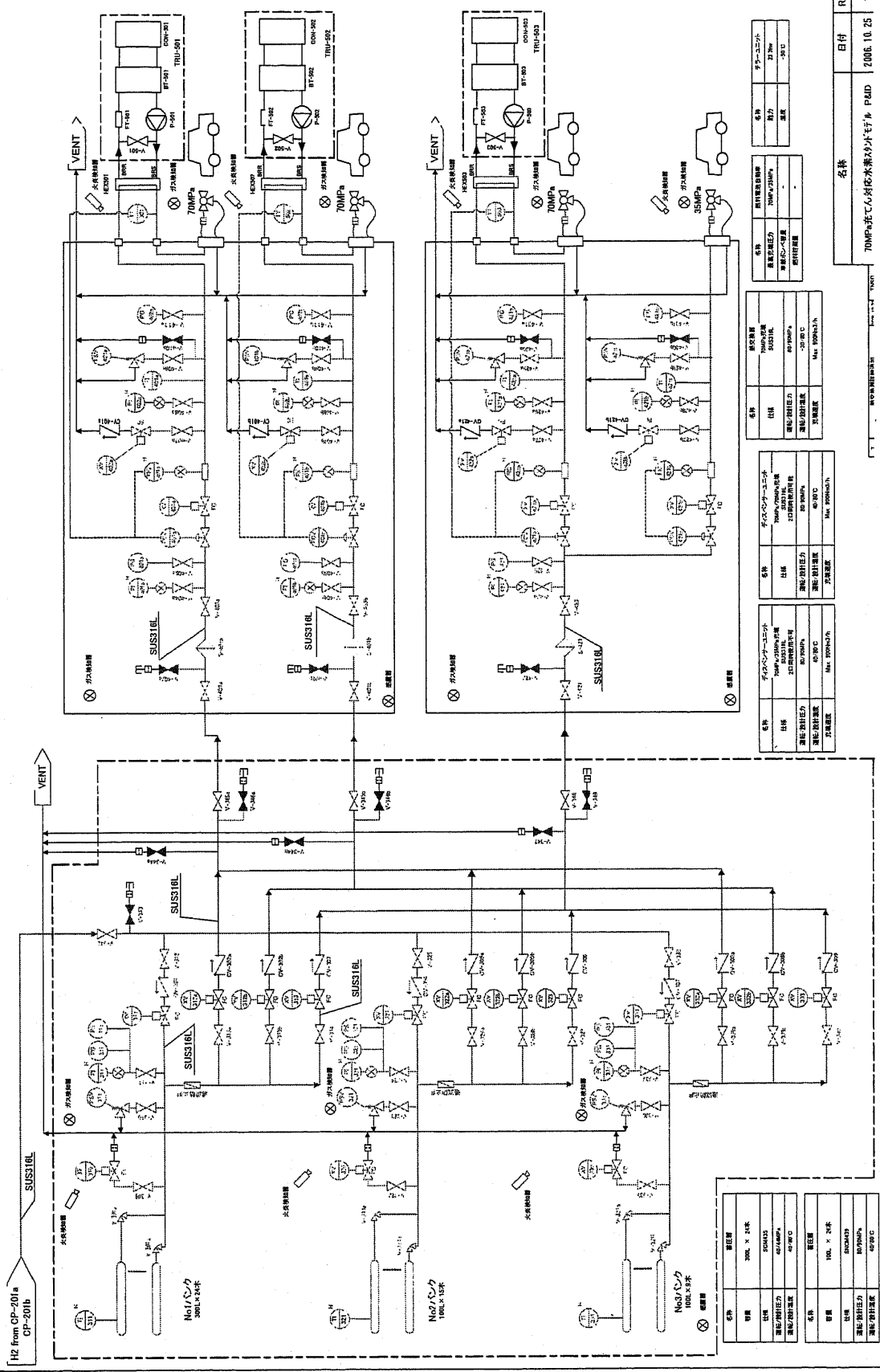
①水素ガスの温度制御が困難

充填流量が少ない充填初期段階に -30°C 以下の水素ガスが系内に流れることが考えられるため、バルブやノズルのOリングやシール材の強度が保証できなくなる。

液体窒素の液面を制御するに当たり、防爆品を使用すると、差圧式液面計の使用が考えられる。しかし配管等の氷結による誤作動が考えられる。

②低温脆性の影響

水素脆性を考慮すると SUS316L を使用することが望ましいが、ステンレス材でも液体窒素温度下では靱性が低下する。



名称	冷凍機
仕様	70MPa冷凍機
運転圧力	70MPa
運転温度	-50~0°C
最大吐出量	Max. 1000m³/h

名称	冷凍機
仕様	50MPa冷凍機
運転圧力	50MPa
運転温度	-50~0°C
最大吐出量	Max. 1000m³/h

名称	冷凍機
仕様	70MPa冷凍機
運転圧力	70MPa
運転温度	-50~0°C
最大吐出量	Max. 1000m³/h

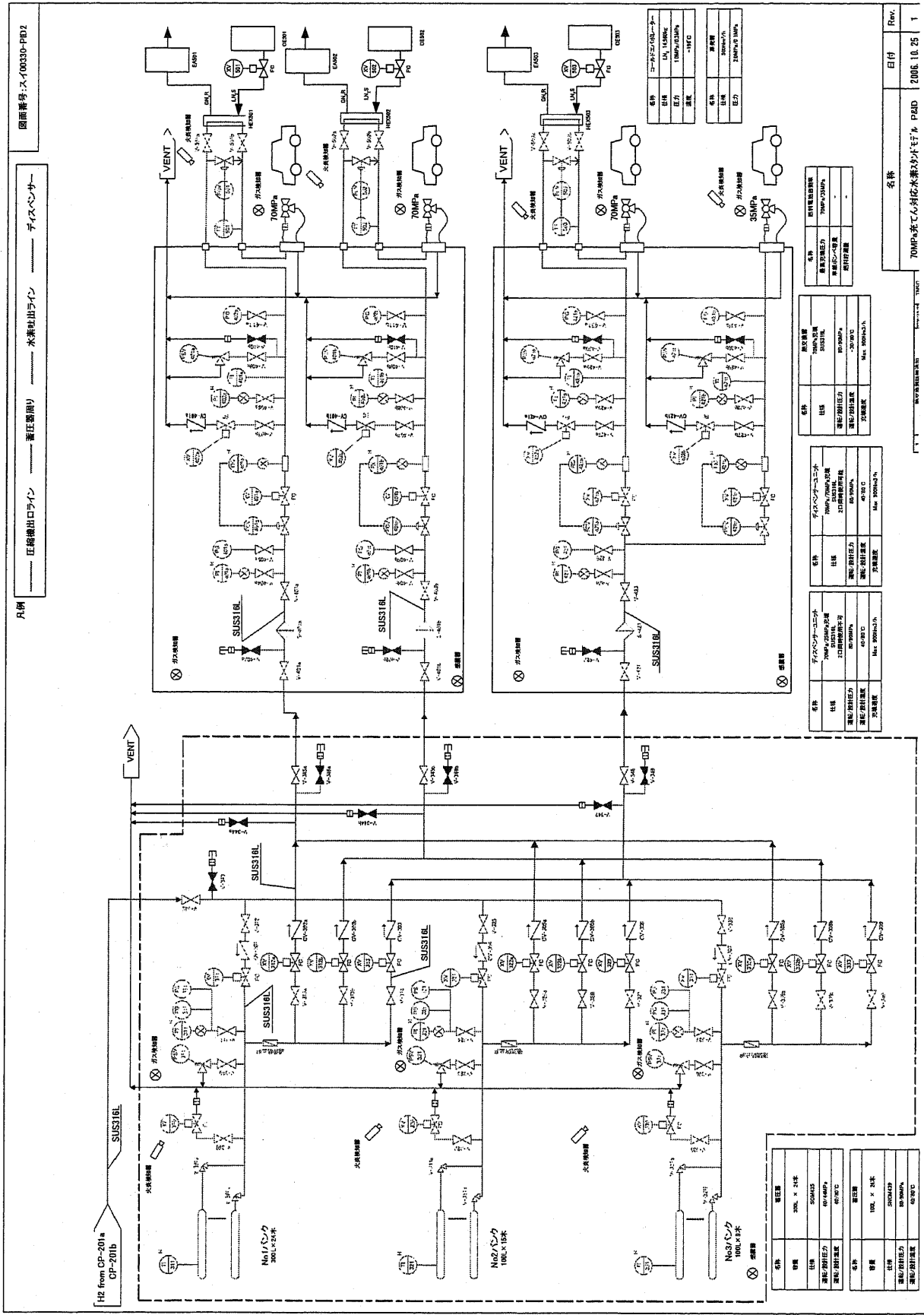
名称	冷凍機
仕様	50MPa冷凍機
運転圧力	50MPa
運転温度	-50~0°C
最大吐出量	Max. 1000m³/h

名称	冷凍機
仕様	70MPa冷凍機
運転圧力	70MPa
運転温度	-50~0°C
最大吐出量	Max. 1000m³/h

名称	冷凍機
仕様	50MPa冷凍機
運転圧力	50MPa
運転温度	-50~0°C
最大吐出量	Max. 1000m³/h

名称	冷凍機	日付	2006.10.25
仕様	70MPa冷凍機	Rev.	1

図 3.3.3-4 プレクール設備モデルP&I (機械式冷凍機方式)



図面番号: スイ00330-PID2

凡例
 圧縮輸出口ライン 高圧配管 水素吐出ライン ナイロスチール

名称	300L x 2台
仕様	SS316L
最大許容圧力	70MPa
最高作動温度	60°C
最低作動温度	0°C

名称	100L x 3台
仕様	SS316L
最大許容圧力	70MPa
最高作動温度	60°C
最低作動温度	0°C

名称	200L x 2台
仕様	SS316L
最大許容圧力	70MPa
最高作動温度	60°C
最低作動温度	0°C

名称	70MPa
仕様	SS316L
最大許容圧力	70MPa
最高作動温度	60°C
最低作動温度	0°C

名称	35MPa
仕様	SS316L
最大許容圧力	35MPa
最高作動温度	60°C
最低作動温度	0°C

名称	70MPa水素対応水素ボンベ
仕様	SS316L
最大許容圧力	70MPa
最高作動温度	60°C
最低作動温度	0°C

図 3.3.3-5 プレクール設備モデル P&I (液体窒素浸漬方式)

2.4. 液体水素スタンドモデル

液体水素を扱う水素スタンドでは、水素製造工場で水素を製造・液化後、液体水素スタンドへ輸送し液体水素の状態での貯蔵する。これを燃料電池自動車 (FCV) などの車載タンクへ液体水素として充てんする場合と、液体水素を蒸発器でガス化して圧縮機で昇圧し、FCV 等へ圧縮水素ガスとして充てんする場合の両タイプを考慮する必要がある。(図 2.4-1)

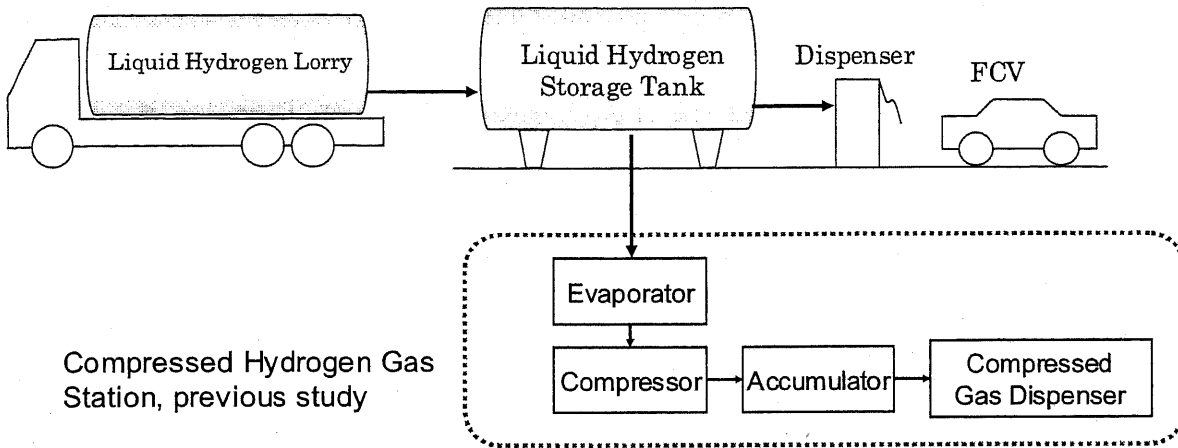


図 2.4-1 液体水素スタンド内での圧縮水素ガスの扱い例

現時点では、FCV の車載タンクにおける液体水素と圧縮水素の比率が分からない。そこで液体水素スタンドモデルでは、両タイプの充てん設備を装備し、需要想定は液体水素充てん 10 台/h×13h、圧縮水素充てん 10 台/h×13h とした。すなわち当該液体水素スタンドモデルは、圧縮水素スタンドモデル+同量の液体水素を充てんするスタンドモデルの能力を持っている。こうすることで液体水素だけを充てんするスタンドを考えた場合、能力不足によるリスク要因の抽出漏れを防いでいる。液体水素スタンドのリスクアセスメントは、液体水素充てん設備を中心に実施し、蒸発器より下流の圧縮水素充てん設備部分は、圧縮水素スタンドのリスク評価結果を適用すれば足りるため本節の対象外とした[8]。液体水素スタンドモデルの想定範囲を図 2.4-2 に示す。

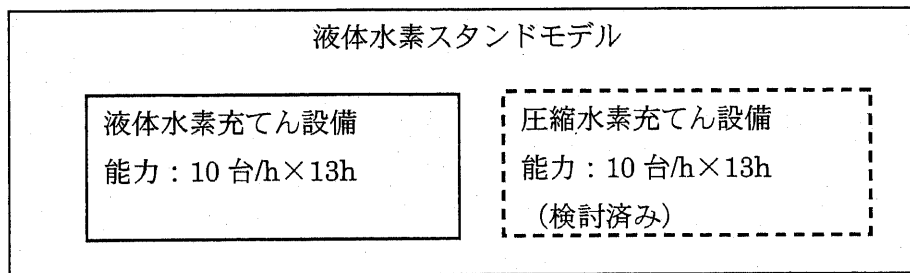


図 2.4-2 液体水素スタンドモデルの想定範囲

(1) スタンド能力

検討対象となる液体水素スタンドモデルは、将来広く一般に普及すると予想される形式で、かつ実際に建設されうる能力と機器構成を有するものと定義した。具体的な能力と仕様は、World Energy NETwork (WE-NET) [2]など液体水素スタンドに関するこれまでの検討結果を参考に、燃料電池自動車普及期の需要想定に基づくものとした。中でも液体水素貯槽は、現在利用されている貯槽のなかでも比較的大型のものを設定した。これは、液体水素での充電と気化させた圧縮水素での充電の両方を想定し、さらに蒸発ロス分を加えたためである。

液体水素充電設備における車両 1 台あたりの液体水素充電量は、以下のように考えた。現状の液体水素充電タイプの燃料電池自動車のタンク容量は約 70L である。充電率を考慮すると最大で約 63L の液体水素を充電することができる。FCV ユーザーは、平均的に 60% の液体水素を消費した時点で燃料補給すると仮定し、1 回あたりの充電量を 38.1L と設定した。

一方、圧縮水素充電設備における水素ガス充電量は、圧縮水素スタンドモデルの能力と同等にした。液体水素スタンド能力の概要を表 2.4-1 と表 2.4-2 に示す。

表 2.4-1 液体水素スタンドにおける液体水素充電能力

項目	仕様
平均充電車両台数	10 台/h
ピーク時充電台数	20 台/h
ピーク時間帯継続時間	1h
車両 1 台当たり充電量	38.1L/台(30Nm ³ /台)
平均充電液体水素量	381L/h(300 Nm ³ /h) (=10 台/h×38.1L/台)
スタンド営業時間	13h
液体水素充電量 (1 日)	4,953L/day

表 2.4-2 液体水素スタンドにおける圧縮水素充電能力

項目	仕様
平均充電車両台数	10 台/h
ピーク時充電台数	20 台/h
ピーク時間帯継続時間	1h
車両 1 台当たり充電量 *	30 Nm ³ /台
平均てん填ガス量	300 Nm ³ /h (=10 台/h×30Nm ³ /台)
スタンド営業時間	13h
圧縮水素充電量 (1 日)	3,900 Nm ³ /day

(2) 貯槽

液体水素貯槽は、1日分の液体水素充てん量に取扱いロスや充てん率を考慮した販売に必要な容量(6,000L)と、圧縮水素2日分の販売に必要な容量(11,000L)を合計した容量として17,000Lに設定した。

表 2.4-3 貯槽の能力

項目	仕様
液体水素充てん量 (1日)	4,953L/日
貯蔵に必要な容量	5,448L (=110%×4,953L)
液体水素販売に必要な容量	6,000L
圧縮水素充てん量 (2日)	9,906L (=3,900 Nm ³ ×2/0.7874)
貯蔵に必要な容量	10,896L (=110%×9,906L)
圧縮水素販売に必要な容量	11,000L
貯槽容量 (合計)	17,000L

(3) 蒸発器

蒸発器の能力は平均充てんガス量と同等とした。

表 2.4-4 蒸発器の能力

項目	仕様
型式	フィン付蒸発器
容量	300 Nm ³ /h
圧力	0.35MPa

(4) 圧縮機

圧縮機はオンサイト型水素スタンドのそれと同様に、平均充てんガス量と等しく、300 Nm³/hの能力とした。

表 2.4-5 圧縮機の能力

項目	仕様
型式	2段ピストン+2段プランジャー
容量	300 Nm ³ /h
圧力	吸込み 0.35MPa / 吐出 40MPa

(5) 蓄圧器

蓄圧器能力は、オンサイト型水素スタンドと同様とした。表 2.2.1-4 参照。

(6) ディスペンサー

①液体水素充てんのディスペンサー

ディスペンサー1台あたり1口の充てん口を持つ液体水素ディスペンサーを2台備えるものとした。現時点では、液体水素の流量を正確に測定する流量計が未開発であるため、ディスペンサー側に流量計を備えることを想定できない。したがって、車載タンクに充てんされた液体水素の充てん量をスタ

ンド側で認知するために、車両タンクの液レベルや充てん終了に関する信号をスタンドと車両間で通信することを前提とする。このため車両およびスタンドに通信機能を設けるものとした。

表 2.4-6 液体水素ディスペンサーの能力

項目	仕様
ディスペンサー台数	2台
ノズル数	ディスペンサー1台に2口
充填圧力	0.35MPa

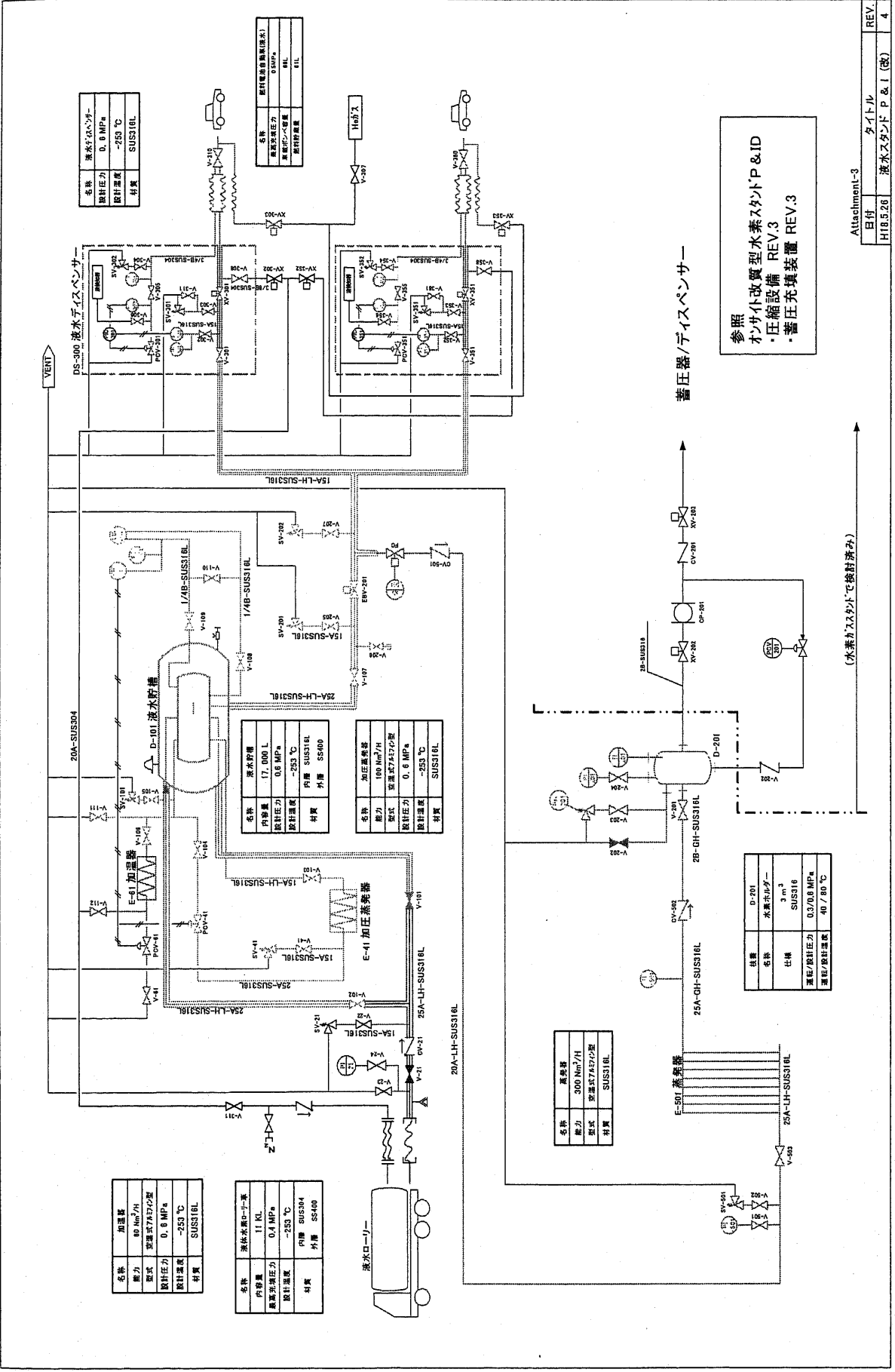
②圧縮水素ガス充てんのディスペンサー

液体水素スタンドに設置する水素ガス充てん用ディスペンサーは、オンサイト型水素スタンドと同様にディスペンサー1台あたり1口の充てん口を持つディスペンサーを2台備えるものとした。車載タンクの温度上昇を防止するため、流量調節弁の開度を変化させ流量を一定に制御する構造とする。車両側圧力があらかじめ設定した圧力に達すれば、自動的に充てんを停止させる機能を持つ。ただし、昨今の ISO の検討の動向を踏まえ、車両との通信機能は設けないものとする。

表 2.4-7 圧縮水素ディスペンサーの能力

項目	仕様
ディスペンサー台数	2台
ノズル数	ディスペンサー1台に2口
充填圧力*	35MPa
最高充てん流量	900 Nm ³ /h

液体水素スタンドモデルとして定義した P&ID を図 2.4-3 に示す。液体水素スタンドに液体水素を運搬する一般的な液体水素ローリーの P&ID を図 2.4-4 に示す。液体水素スタンドで使用する典型的な機器である液水配管(二重管)、液水貯槽、液水充てんホース、バイオネット継手をそれぞれ図 2.4-5 から図 2.4-8 に示す。



加圧器	
名称	加圧器
能力	80 Nm ² /h
型式	空温式7A372型
設計圧力	0.8 MPa
設計温度	-253 °C
材質	SUS316L

液体水素貯蔵タンク	
名称	液体水素貯蔵タンク
内容積	11 L
最高充圧圧力	0.4 MPa
設計温度	-253 °C
材質	内層 SUS304 外層 SS400

加水装置	
名称	加水装置
内容積	17,000 L
設計圧力	0.6 MPa
設計温度	-253 °C
材質	内層 SUS316L 外層 SS400

加圧装置	
名称	加圧装置
能力	100 Nm ² /h
型式	空温式7A372型
設計圧力	0.8 MPa
設計温度	-253 °C
材質	SUS316L

蒸発器	
名称	蒸発器
能力	300 Nm ² /h
型式	空温式7A372型
材質	SUS316L

加圧器	
名称	加圧器
内容積	3 m ³
設計圧力	0.3/0.6 MPa
運転/設計温度	40 / 80 °C

液体水素貯蔵タンク	
名称	液体水素貯蔵タンク
設計圧力	0.8 MPa
設計温度	-253 °C
材質	SUS316L

加圧器	
名称	加圧器
最高充圧圧力	0.5 MPa
設計温度	-253 °C
材質	SUS316L

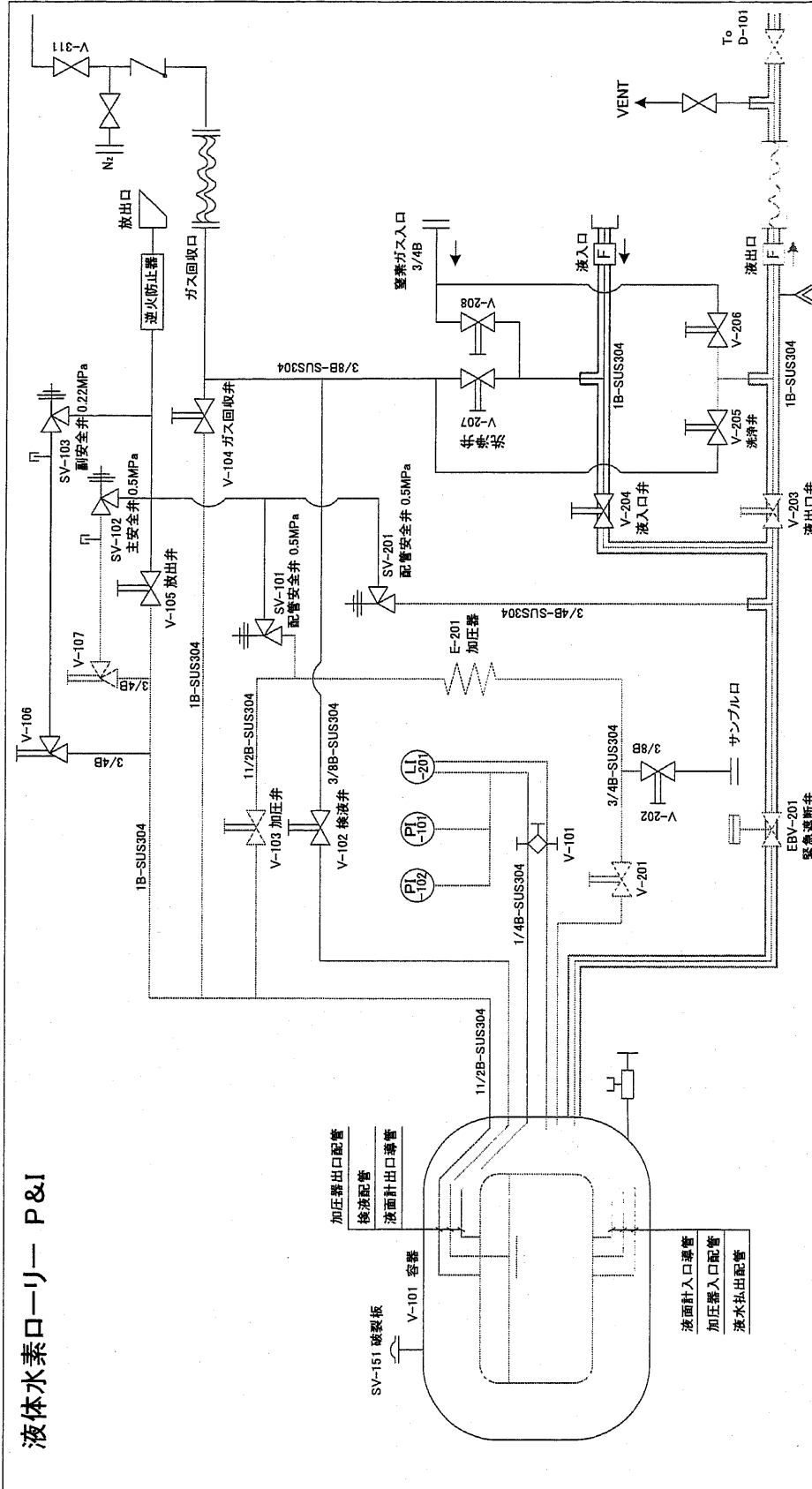
参照
オンサイト改質型水素スタンドP&ID
・圧縮設備 REV.3
・蓄圧充填装置 REV.3

Attachment-3

日付	タイトル	REV.
H18.5.26	液体水素スタンド P & I (改)	4

図 3.4-3 液体水素スタンドモデルP&ID

液体水素ローリー P&I



△	長軸玉形弁	◇	液面計元弁	◀	真空封切弁
▽	長軸玉形弁(アングル)	⊠	緊急遮断弁	▷	パージポート
∨∨	加圧器	⊖	真空弁	⊔	破裂板
⊕	安全弁(アングル)	⊙	圧力計	⊞	フィルター

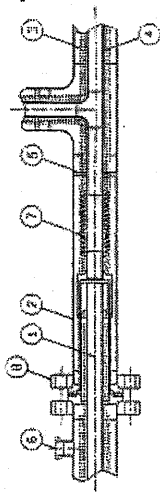
—	水素ガス 0.4MPa
---	液体水素 0.4MPa

名称	容器
内容量	11,000 L
最高充填圧力	0.4 MPa
設計温度	-253 °C
材質	内槽: SUS304 外槽: SS400

図 3.4-4 液体水素ローリーの P&ID

日付	タイトル	REV
H17.1.27	液体水素ローリー P&I (液体水素抽出時)	3

液水配管(二重管)



⑤ 真空井詳細

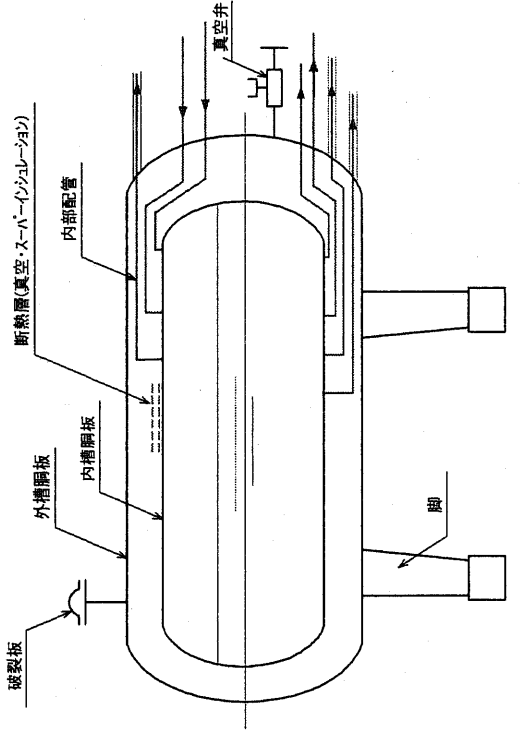


番号	名称
1	内管
2	外管
3	断熱材
4	吸着剤
5	スペーサー
6	真空井
7	伸縮継手
8	真空井のインレット/アウト

主な事故想定	例	対応策
1	断熱材の劣化による漏洩	204
2	真空井の取付け不良による漏洩	10
3	真空井のコーキング不足による漏洩	217
4	真空井の取付け不良による漏洩	217-2

日付	タイトル	REV.
H17.03	液水配管(二重管)	0

図 2.4-5 液体水素配管(二重管)



主な事故想定	例	対応策
1	内槽胴板の水素脆化による亀裂	235
2	外槽胴板の腐食によるピンホール開口	239
3	地震による液水貯槽接続配管の破断	18-2

日付	タイトル	REV.
H17.22	液水貯槽	2

図 2.4-6 液体水素貯槽

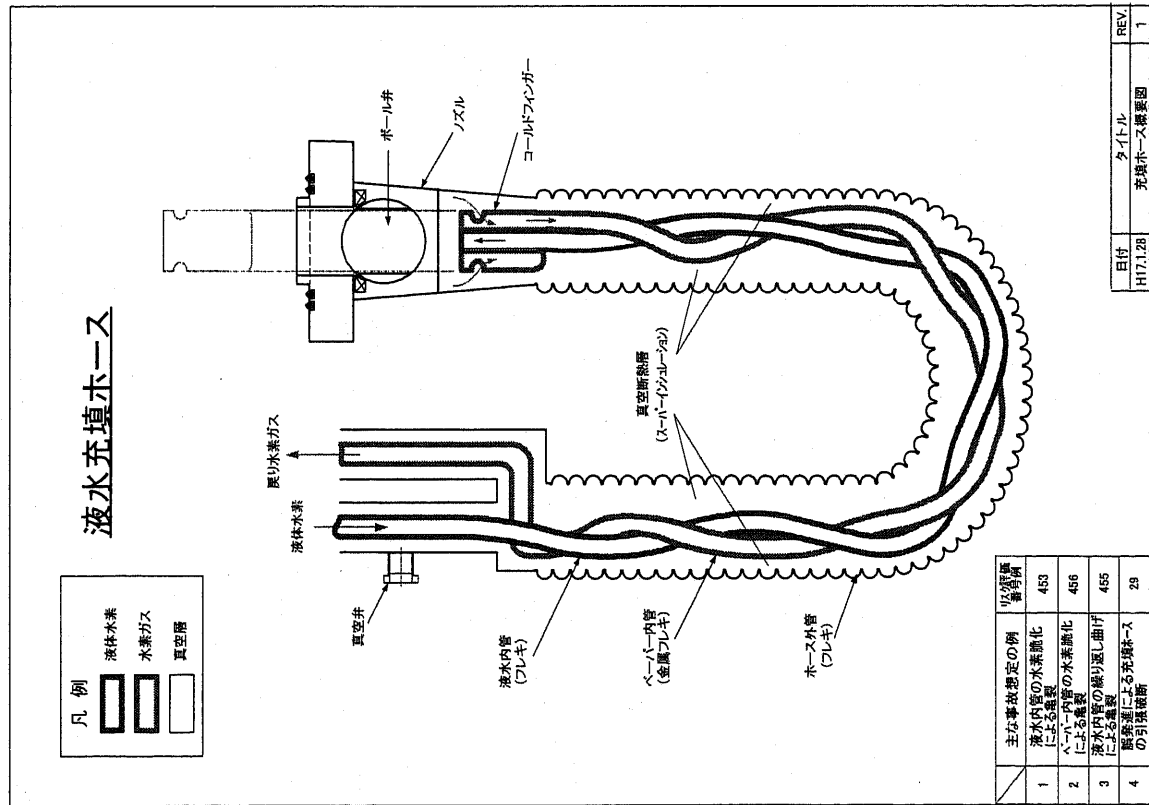


図 2.4-7 液体水素充填ホース

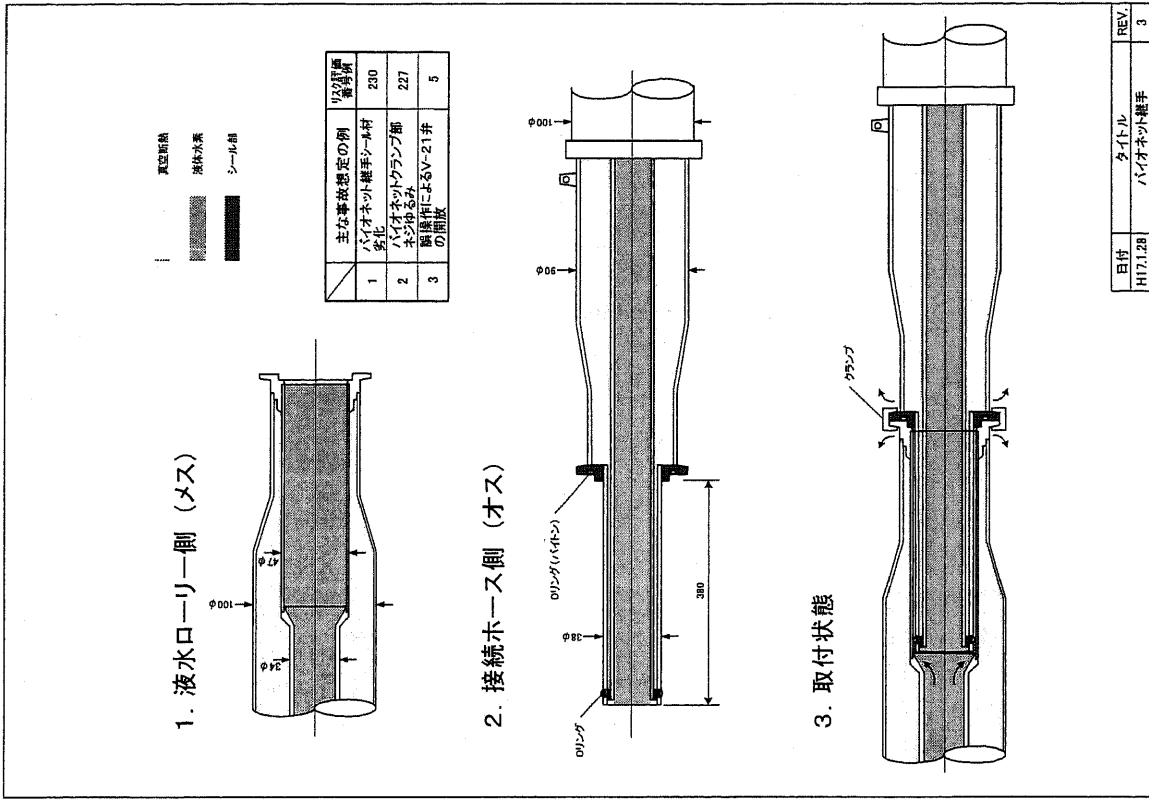


図 2.4-8 ハイオネット継手

References

- [1] JHFC ホームページ <http://www.jhfc.jp/>
- [2] 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) 第 2 期研究開発タスク 1 「システム評価に関する調査・研究」、4, 2002
- [3] 圧縮天然ガススタンド安全技術指針 (JGA 指-NGV03-02、日本ガス協会)
- [4] Worldwide Hydrogen Fueling Stations, Fuel Cells 2000 ホームページ
<http://www.fuelcells.org/info/charts/h2fuelingstations.pdf>
- [5] HyFLEET:CUTE ホームページより一部修正
<http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/Technology/HydrogenRefuelling>
- [6] 菊川重紀, 小森雅浩, 尾上清明, 吉田剛, 水素スタンドのリスクアセスメント, 第 6 回構造物の安全性及び信頼性に関する国内シンポジウム, 6, 613-618 (2007)
- [7] S.Kikukawa, F.Yamaga, H.Mitsubishi, Risk assessment of hydrogen fueling stations for 70MPa FCVs, International Journal of Hydrogen Energy
- [8] S.Kikukawa, H.Mitsubishi and A.Miyake, Risk assessment for liquid hydrogen supply stations, International Journal of Hydrogen Energy

第3章

事故シナリオの抽出

第3章 事故シナリオの抽出

3.1. 基本的な考え方

事故シナリオの抽出においては、水素スタンドモデルに対し発生する可能性が否定できない事故シナリオをすべて抽出した。事故シナリオ抽出に当たっては、以下の諸点に留意した。

(1) 網羅性の確保と事故シナリオの範囲

水素スタンドにおいて懸念される事故シナリオを漏れなく抽出すること、すなわち網羅性の確保が重要であると考えた。そこで事故シナリオ抽出にあたっては、その可能性の大小は考慮せず、発生が否定できないと思われる事故シナリオをすべてリストアップして検討の土俵に載せるという方針で作業を行った。機器故障・劣化以外にも天災（地震、強風）、ヒューマンエラー等の関してもできる限りの抽出を行った。

ただし戦争やテロなど、どのような事故シナリオ（破壊工作）が想定されるのか予想のつかないもの、および設計不良・施工不良など正規のルールに従うことが前提であるが、どのような不正を行なうのか予想もつかないものについては、事故シナリオ抽出の抽出を断念した。仮に事故シナリオ（破壊工作シナリオまたは、不正シナリオ）として抽出したとしても、これらについて安全対策を立てることができない場合がほとんどである。表 3.1-1 に事故シナリオの要因の想定範囲をまとめた。

(2) 安全機器は機能しないものとする

事故シナリオの抽出においては、安全弁や緊急遮断インターロックのように「異常時に始めて必要となる安全機器の機能」については、（それがモデル P&ID に表記されている場合でも）機能しないものと考えて事故シナリオを組み立てた。以下に例を示す。

A：遮断弁（XV-×××）動作不良→配管内圧上昇→（安全弁不作動）→継ぎ手部から水素漏洩→漏洩水素に着火→爆発

B：遮断弁（XV-×××）動作不良→配管内圧上昇→安全弁作動→事故に至らず

例 B のように安全弁が機能するものとする、事故に発展せずに事象は終息することとなり、事故シナリオとして抽出されない。こうした事故シナリオの抽出漏れを防ぐため、A のように安全弁は機能しないものとして、事故シナリオを組み立てた。

また、安全対策の十分性評価（上記の例で、遮断弁（XV-×××）動作不良→配管内圧上昇に対する安全対策として安全弁設置が十分な対策と言えるか？の判断）は、「リスク評価」の段階で行うべき作業である。事故シナリオ抽出の段階で「安全弁があるから十分に安全」であるとは判断できないことから、安全機器の機能は機能しないものとして事故シナリオ抽出を行なった。

(3) トリガー現象から最終事象までを明確にする

個々の事故シナリオにおいては、トリガー現象（事故要因）、中間事象、最終事象を時系列的に並べて記述し矢印でつなぐことにより、「何をきっかけにして、何が起こり、最終的にどうなる」ということを明確にした。

表 3.1-1 事故シナリオ抽出における事故要因の想定範囲

I.水素スタンド外部に起因する要因			
戦争・テロ	△	意図的な破壊行為	
航空機の墜落・落下物	○		
重機（クレーン）等の転倒	○		
近接する建物の倒壊（地震等による）	○	地震と同意	
放火、いたずら	○	バルブ、計器等の意図的な操作	
車両の敷地内突入（交通事故）	○		
近接する建物の火災	○		
停電	○		
II.天災			
地震	○		
落雷	○		
地盤沈下	○		
強風（飛来物の衝突）	○		
異常気象	豪雪、豪雨、異常低温	○	温度変化による圧力変動等で「設備の劣化、故障」と同意
	異常高温	○	
	竜巻	○	強風（飛来物の衝突）と同意
洪水・高潮	○	機器の転倒などで「地震」と同意	
陥没・地すべり	○		
III.設備的要因（ハード）			
設計上の問題	△	意図的なルール違反	
施工上の問題（施工不良）	△		
設備の劣化、故障	○		
IV.人の行動に関わる要因（ヒューマンファクター）			
スタンド運営者の装置運転・操作上の要因	○		
ドライバーの行動上の要因	○		
メンテナンス作業上の要因	○		

○想定範囲内で事故シナリオ抽出済み

△想定範囲内ながら事故シナリオの抽出困難

3.2. 事故シナリオの抽出方法

リスク評価の実施においては、モデルとなる水素スタンドに対する事故シナリオをできるだけ漏れのないように高い網羅性をもって抽出することが肝要である。今回、危険源抽出方法として広くその有効性が認められている Hazard and Operability Study（以下、HAZOP という）と Failure Mode and Effects Analysis（以下、FMEA という）を用いて事故シナリオを抽出し、さらに圧縮水素スタンドの事故シナリオや、実在する高圧ガス設備やガソリンスタンドの事故を参考にして幅広く事故シナリオを検討した。

水素スタンドの事故発生時には、その事故要因に関わらず圧力や温度といったプロセスパラメータに変化が見られる。そこで、パラメータの正常状態からのずれに着目した HAZOP により、事故シナリオの抽出を試みた。ここで、各機器の故障・劣化に起因する事故シナリオについて HAZOP ではその原因を大まかに記述した。一方、個々の機器に着目し、故障、劣化に起因する事故シナリオを FMEA の手法を使って抽出した。HAZOP と FMEA の関係を図 3.2-1 に示す。

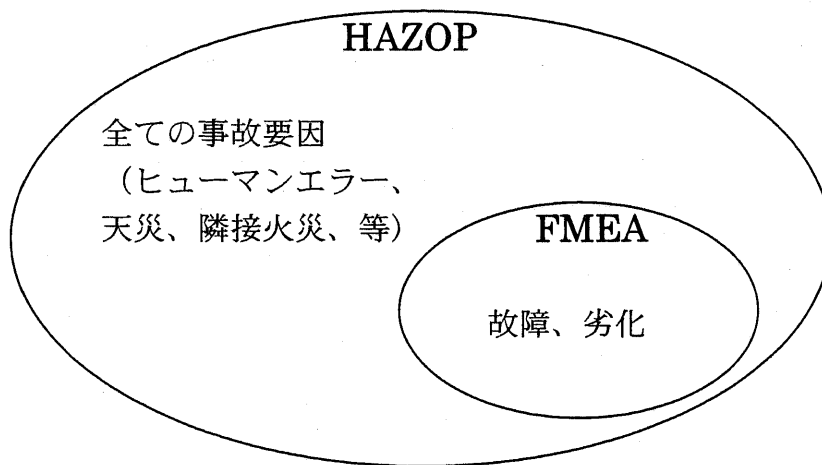


図 3.2-1 HAZOP と FMEA の関係

3.2.1. HAZOP について

HAZOP は、あらかじめ定められたガイドワードと圧力、温度、流量などのプロセスパラメータを組み合わせ、設計意図からの“ずれ” = “偏差”を想定し、偏差の原因の洗い出し、偏差発生時の影響の検討、偏差の発生防止や偏差が発生した際のシステムへの影響を軽減するための安全対策検討実施の手順をとる。ここでは HAZOP の手法を用いて偏差の原因の洗い出しすなわち事故シナリオ作成までを行なうこととする。

【HAZOP の実施手順】

HAZOP の実施手順フローを図 3.2.1-1 に示し、主な項目を以下に説明する。

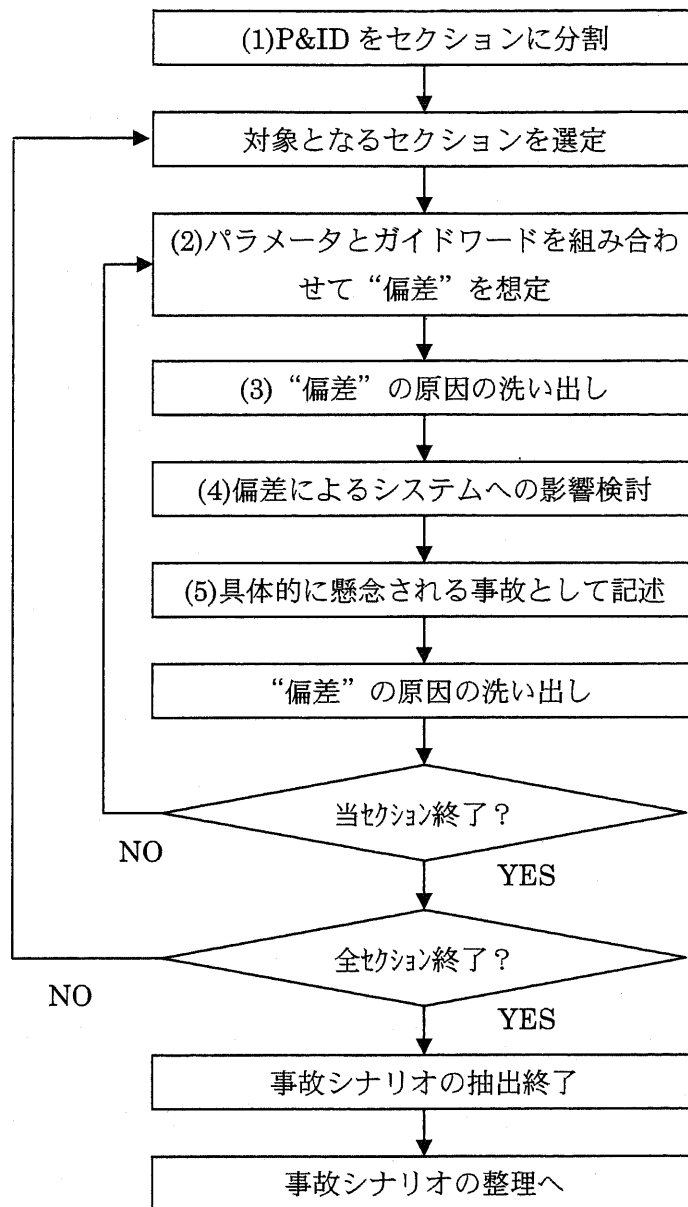


図 3.2.1-1 HAZOP の実施手順フロー

(1) P&ID をセクションに分割

P&ID に示されている主要なラインをプロセス条件やシステムの機能を考慮して分割する。分割するセクション（単位）に決まりはないが、圧縮水素スタンドモデルでは、圧力と容量に配慮して分割し、液体水素スタンドモデルでは、水素の温度、圧力、相（気相、液相）が同じ部分をひとつのセクションとして分割した。

(2) パラメータとガイドワードを組み合わせて“偏差”を想定

セクションごとにパラメータとガイドワードを組み合わせて偏差を想定する。圧縮水素スタンドモ

デルの場合、パラメータは「圧力」「温度」「流量」「組成」の4つである。液体水素スタンドの検討においてはパラメータに「真空度」を追加した。これは、液水貯槽と配管が二重構造になっており、その真空度の変化が事故につながるためである。ガイドワードの定義を表 3.2.2-1 に示し、パラメータとガイドワードを組み合わせた“偏差”を表 3.2.2-2 以下に示す。

表 3.2.2-1 ガイドワードの定義

ガイドワード	定義	解説
More	量的増加	設計で意図した最大値を超える事象がおこる
Less	量的減少	設計で意図した最小値を下回る事象がおこる
None	変化なし	設計で意図した事象がまったくおこらない
Reverse	逆転	設計で意図したことと反対の事象がおこる

表 3.2.2-2 パラメータとガイドワードの組み合わせによる“偏差”の例

パラメータ	ガイドワード	偏差	備考
圧力	More	圧力上昇	
	Less	圧力低下	
	None	圧力変化なし	今回は想定なし
	Reverse	圧力逆転	圧力低下に含めて検討
温度	More	温度上昇	
	Less	温度低下	
	None	温度変化なし	今回は想定なし
	Reverse	温度逆転	温度低下に含めて検討
流量	More	流量増加	
	Less	流量減少	
	None	流量なし	誤操作等による閉鎖など
	Reverse	逆流	流量逆転
組成	More	組成要素増加	不純物混入
	Less	組成要素減少	今回は想定なし
	None	組成変化なし	今回は想定なし
真空度	More	真空度上昇	二重管真空部の微小残留ガスが、冷却により凝固する事象だけを想定（事故に至らず）
	Less	真空度低下	
	None	真空破壊	真空が短時間で破壊されてゼロになることを想定。Less Less と同意

(3) “偏差”の原因の洗い出し

上記の“偏差”が発生する原因を洗い出す。設計で意図した偏差が発生する原因として、機器の故障（劣化）、ヒューマンエラー（誤操作）、天災、隣接火災、その他外乱などが想定できる。ここで、複数の機器の同時故障は同時誤操作を想定するとその組み合わせが膨大な数になるため基本的には

想定しないこととした。しかし、バルブが隣接しており同時に操作する可能性が高い場合や、過去に事例がある場合、メンバーの経験から想定すべきと考えられる場合などは取り上げることにした。

一方、機器の故障・劣化については前述のように FMEA で機器ごとに検討するため、HAZOP では大まかな記述にとどめた。

(4) 偏差によるシステムへの影響検討

ある原因によってシステムパラメータに偏差が発生した場合、プロセスにどのような影響が発生するかを検討した。ここでは水素が漏えいするまでを定義し、漏えいした水素に着火・爆発した場合の影響度は別途定量的に評価する。

(5) 具体的に懸念される事故として記述

ある原因によって発生した事象が事故に至る過程をできるだけわかり易く記述することに努めた。

3.2.2. FMEA について

FMEA においては、水素スタンドを構成する個別機器に着目し、それらの故障・劣化を原因として発生する事故を抽出した。機器毎に、故障モード、原因を特定し、それにより発生することが懸念される事故シナリオを抽出した。

(1) 機器と機能の整理

各セクションにおける機器毎にその機能を整理する。FMEA では「異常時に始めて必要となる安全機能を持つ機器」も含め、モデルの P&ID に記載されている全ての機器を対象とする。新設モデルと改造モデル A 及び B の機器数を表 3.6.2-1 に示す。

表 3.2.2-1 各モデルの機器数

新設モデル	改造モデル A	改造モデル B
272	155	103

(2) 故障モードの検討

前項(1)で整理した機能毎に故障モードを検討する。ただし、安全に係る機能(例:安全弁の圧力リリーフ機能、温度計の温度異常警報機能)については、懸念される事故を記さないこととした。これは、当該機能が働くのは異常が発生したときであり、当該機能の故障がトリガー(起点)となって事故が発生することはないと考えたためである。なお、上記の例にある安全弁などは、圧力をリリーフする安全機能の他に圧力を保持する耐圧気密機能を有している。この耐圧気密機能については故障モードの検討を行った。

(3) 原因、影響および懸念される事故の検討

故障モードに対する原因、その故障モードによる影響、懸念される事故を検討し、想定事故シナリオを作成する。

【FMEAの実施手順】

(1) 機器と機能の整理

各セクションにおける機器毎にその機能を整理した。FMEAでは、「異常時に始めて必要となる安全機能を持つ機器」も含めてモデル P&ID に記載されている全ての機器を対象とした。

(2) 故障モードの検討

前項(1)で整理した機能毎に故障モードを検討した。

安全に係る機能(例:安全弁の圧力リリーフ機能、温度計の温度異常警報機能)については、懸念される事故を記していない。これは当該機能が働くのは異常発生時であり、当該機能の故障を起点として事故が発生することは無いためである。ただし、当該機能の故障に対する検討は、次検討ステップの「リスク評価」にて実施することとした。

なお、上記の例にある安全弁は圧力をリリーフする安全機能の他に、圧力を保持する耐圧気密機能を有している。この耐圧気密機能については、FMEAにて故障モードの検討時に事故シナリオが抽出される。

(3) 原因、影響および懸念される事故の検討

故障モードに対する原因、その故障モードによる影響、懸念される事故を検討し、事故シナリオを作成した。

3.2.3. 網羅性を高めるために

リスクアセスメントでは、事故シナリオの抽出において、すべての事故シナリオを漏れなく抽出することが求められる。網羅性の高い事故シナリオの抽出を実現するために、HAZOP、FMEAを使った事故シナリオの抽出後、以下の視点で再検討を実施した。再検討することによって、新たに事故シナリオを追加することができた。

(1) 運転モード別検討

すべてのセクション、すべての機器に対して運転モード(運転状態)を考慮した事故シナリオの抽出を行なっているかを再検討した。検討の結果、HAZOPの偏差の原因を洗い出す段階ですべての運転モードを想定できている場合とそうでない場合があることが分かった。そこで運転モードを考慮して再検討することとした。特に70MPa 充てん対応水素スタンドモデルにおいては、蓄圧器のボンベへどのように水素を充てんするかを明らかにした蓄圧モードについて再検討を行った。

(2) 作業内容の調査

実際の水素スタンドで実施する作業を洗い出し、作業ごとの誤操作や想定される事故を検討した。例えば液体水素スタンドにおいては、配管の予冷に液体水素を利用し、気化した水素ガスをベントに放出する作業や液水貯槽の圧力放出作業において、一定量の水素ガスをベントラインから放出する。そこで作業時間と放出量を詳しく調査し、事故シナリオに反映した。

(3) 誤操作といたずら

すべてのバルブに対して誤操作といたずらを想定して再検討した。ただし、前述のように「いたずら」はバルブ、計器、操作盤等の意図的な操作とし、工具・器具等を用いた機器の破壊は「テロ」と考え、安全対策の検討から除外した。

(4) ユーティリティー異常

水素スタンド機器のうち、水素を扱わないユーティリティー機器については検討がおろそかになる可能性があるため、ユーティリティー異常による事故が正しく想定されているか再確認した。

(5) 二次災害的な事故シナリオ

液体水素が漏えいした場合、着火確率は設定せずに必ず着火・爆発することを想定している。しかし、以下の二次災害的な事故シナリオも想定した。これらの事故シナリオについても別途影響度を評価した。

- ・ 真空弁が飛散し、人にあたっ怪我をする
- ・ 飛散した液体水素が人にかかって凍傷する
- ・ 飛散した液体水素が気化し、人が酸欠する
- ・ 液体水素により凍結した配管に人が触って凍傷となる
- ・ 配管が冷却され、まわりの空気が支燃性の液体空気となって滴下し、火災に至る

3.3. 事故シナリオの分類・整理

HAZOP、FMEA 実施時に想定される事故シナリオをすべて抽出した。このため抽出結果には、類似の想定事故シナリオが多数含まれていた。そこで、これらを以下の手順で分類、整理して水素スタンドモデルごとの事故シナリオ総数を確定した。

(1) HAZOP, FMEA の重複整理

HAZOP 実施時に一定の大きさのセクションに分割したが、より詳細に検討を進めていくと機器単位の検討に近づく。機器単位の検討は別途行った FMEA による事故シナリオ抽出と類似したシナリオが抽出された。そこで事故シナリオの重複を避けるため、類似のシナリオは FMEA から抽出されたものを残して HAZOP の事故シナリオを削除した。このため、FMEA よりも HAZOP の事故シナリオの方が少ない。

(2) 類似の事故想定の整理

HAZOP と FMEA による事故シナリオの抽出において、水素スタンドモデルをセクションに分割したためシナリオの重複が発生した。例えば、配管の外部から腐食によって開口するという事故シナリオは、セクションごとに抽出されていた。そこで類似する事故シナリオの見直し整理を行った。但し、漏洩後の環境及び状況が異なるシナリオについては、そのまま残した。

(3) 事故ステップの整理

圧縮水素スタンドでは配管や蓄圧器に一重管が用いられているため、開口→水素漏洩であり事故ステップがイメージしやすい。これに対して液体水素スタンドでは、液体水素の保温（断熱）のため配管は二重管（一部一重管）、貯槽は二重貯槽を利用していることから、事故ステップが圧縮水素のそれとは異なる。そこで、想定される事故ステップを整理し、事故想定に反映した。

事故ステップの整理については、3.7.節事故シナリオの抽出（液体水素スタンド）で詳しく述べる。

3.4. 事故シナリオの分析とパターン化

水素スタンドモデルに対して事故シナリオの抽出を行った結果、多くの事故シナリオが抽出された。ここで抽出された事故シナリオ 1 件 1 件に対して、リスク算定、リスク評価を実施せねばならないが、事故シナリオ数が多いことが作業効率上で問題である。一方、抽出された事故シナリオには類似のものが多数含まれていることから、事故シナリオを分析整理し、類似の特徴を抽出しパターン化を行なった。

3.4.1. トリガー現象

水素が漏えいし、着火、爆発すると問題となる事象が事故として認識される。一般に事故に至る前の水素が漏えいするまでに何段階かのステップが存在する。こうした事故を引き起こす直接的な原因である事象を「トリガー現象」と呼ぶこととする。トリガー現象は、想定した事故シナリオを時系列的にステップ展開した時の最初のステップに当たる事象である。本研究では、これらのトリガー現象の発生する可能性（可能性ランク）が、当該事故シナリオの発生する可能性と等価であると仮定して可能性評価を行なうこととした。詳しくは 4.5.節リスク算定における可能性評価で述べる。

トリガー現象 → 亀裂などが表面に達する → 開口する → 水素漏えい → 着火爆発
(事故原因)

また、トリガー現象が発生した時の開口径は、トリガー現象ごとに同じであると仮定して影響度を評価した。つまり、本研究においてはトリガー現象が事故シナリオの発生可能性を評価する際の単位として用いることとした。圧縮水素スタンドのトリガー現象の一部を表 3.4.1-1 に示す。(トリガー現象の全リストは 4.5.節参照)

表 3.4.1-1 圧縮水素スタンドのトリガー現象 (一部)

分類	コード	トリガー現象	
劣化・故障	全般	G11-1	水素脆化 (SUS)
		G11-2	水素脆化 (SCM)
		G12	塩化物 SCC
		G13-1	外面腐食 (炭素鋼)
		G13-2	腐食 (SUS)
		G13-3	外面腐食 (SCM)
		G13-4	内面腐食 (炭素鋼)
		G14	疲労 (配管振動)
		G15-1	ネジ緩み (静置部)
		G15-2	ネジ緩み (振動部)
		G16	溶接欠陥 (ピンホール)
		G20	固着

3.4.2. 開口径パターンと放出パターン

(1) 圧縮水素スタンドの開口径パターン

水素スタンドの事故シナリオに対し、漏洩時の開口部に着目して分析を行った。その結果、想定される事故シナリオの開口部の大きさは、表 3.4.2-1 に示すような 4 通りに分類できることが明らかになった。この開口部の大きさの分類を開口径パターンと呼ぶこととする。

漏洩水素の爆発・噴出火炎の影響を評価するためには、それに大きな影響を与える開口径の大きさを決定せねばならない。そこで、以下のように考えた。

「開口径パターンA：極めて大きな開口」については、その発生時には「極めて重大な災害」に至ると考え、代表開口径は設定しなかった。

「開口径パターンB：大きな開口」は、これは配管やホース破断に対応するパターンであることから、水素スタンドモデルの配管サイズを考慮して 10mmφの円形開口部をもって代表させることとした。なお、水素スタンドモデルにおいて設定している配管は 3/8B (内径 5.17mm) であるが、国内の水素スタンドの中には 9/16B (内径 7.92mm) を使用している例もあり、安全サイドに立ち 10mmφとした。

「開口径パターンC：小さな開口」は、種々の要因から生じる開口部のグループであり、その開口径を設定することは難しい。また、これらは劣化初期においては微小な開口部が劣化の進展と共に徐々に拡大していき、いずれかの時点で着火し爆発・噴出火炎にいたると考えられる。また、これら

開口部の形状は不規則である。前記のような困難さがある中で、十分に安全サイドに立った設定として1mmφの円形開口部をもって代表させることとした。

「開口径パターンD：微小な開口」は、グランド漏れ、シートリーク、溶接欠陥によるピンホールなどの微小な開口を想定した。

ここでこの微小な開口時の開口径については、CNGスタンドやLPGスタンドに関するこれまでの検討を参考にした。文献[1]では、ピンホール等の微小な開口時の開口径の設定は難しいとしつつ、PLガス容器の腐食に起因する事故事例からピンホールの径の具体値として0.03mm程度をベースとし、溶接欠陥など他の条件を勘案して0.2mmを設定し、これをもとに一般則第7条（圧縮天然ガススタンドに係る技術上の基準）を策定した経緯にある。

本検討では、火気離隔距離の検討では開口径0.2mmφを使用し、爆風圧、噴出火炎の検討においては1.0mmφを使用した。この理由は、火気離隔距離の検討では、過去の経緯に従い、水素ガスの爆発下限界濃度（LEL）4%に安全率（1/4）を乗じて水素濃度1%到達距離以上の距離が必要としているためである。一方、爆風圧と火炎長についても安全率を考慮する必要があるが、結果的に小さい値である爆風圧と火炎長に安全率を乗じるよりも、開口径（0.2mmφ）に対し直径で5倍、水素漏えい量で25倍の安全率を考慮して開口径1mmφで評価する方が正確で安全性が高いと考えた。なお、ここでいう安全率1/4や5などは、日本国内法規における歴史的なコンセンサスである。

表 3.4.2-1 開口径パターン

開口径パターン	代表開口径	説明
A：極めて大きな開口	—	容器の破壊により生じた開口。大量の水素ガスが瞬時に放出され、着火すると爆発することが懸念される。
B：大きな開口	10mmφ	配管、ホースの破断により生じた開口。開口直後に大量の水素ガスが放出され、系内水素の圧力が低下するに従って放出速度も低下する。着火した場合に爆発又は噴出火炎が生じることが懸念される。
C：小さな開口	1mmφ	各種のトリガー現象により生じるクラック状の開口部。ネジ部の緩み、シール劣化により生じる開口部もこのパターンに分類される。定常的な漏洩と考えることができ、着火した場合には爆発又は噴出火炎が生じることが懸念される。
D：微小な開口	0.2mmφ	グランド漏れ、充填ホースからの水素透過のような極少量の漏洩を発生させる微小な開口。

(2) 液体水素スタンドの開口径パターンと放出パターン

水素スタンドに比べて液体水素スタンドの事故シナリオでは、開口部と水素放出口が必ずしも一致しないケースが数多く見られた。例えば、二重配管の外管にピンホールが開口した場合、その開口部から水素が漏えいするのではなく、ベント放出口から水素が放出される。こうした事故シナリオは圧縮水素ガススタンドにはなく、断熱構造を有する液体水素スタンド特有な現象である。開口部と実際に水素が漏えい・放出される部分が異なることから、開口部の大きさの分類を「開口径パターン」と呼び、開口の結果、水素が放出される水素放出口の大きさの分類を「放出口パターン」と呼んで整理した。表 3.4.2-2 に開口径パターンを、表 3.4.2-3 に放出口パターンを示す。

表 3.4.2-2 開口径パターン

開口径パターン	代表開口径	説明
A: 極めて大きな開口	14mm φ 以上	貯槽の破壊により生じた開口を想定。
B: 大きな開口	14mm φ	配管、ホースの破断により生じた開口を想定。 弁誤操作による大気開放も想定。
C: 小さな開口	1mm φ	クラック状の開口部やネジ部の緩み、シール劣化により生じる開口を想定。
D: 微小な開口	0.2mm φ	グランド漏れ、シートリーク、溶接欠陥によるピンホールのような微小な開口を想定。
0: 開口無し	0mm φ	断熱用充てん剤の劣化（脱ガス）、弁誤操作による弁閉止、パージ不良など開口がない場合。

表 3.4.2-3 放出口パターン

放出口パターン	代表開口径	説明
A: 極めて大きな開口	14mm φ 以上	貯槽の破壊により生じた開口部からの放出を想定。
B: 大きな開口	14mm φ	配管、ホースの破断部、真空弁離脱部、弁誤操作による大気開放部からの放出を想定。
C: 小さな開口	1mm φ	クラック状の開口部やネジ部の緩み、シール劣化により生じる開口部、真空弁周辺部からの放出を想定。
D: 微小な開口	0.2mm φ	グランド漏れ、シートリーク、溶接欠陥によるピンホールのような微小な開口部からの放出を想定。
E: 放出管	100mm φ	ベント放出管からの放出を想定

開口径パターンと放出口パターンにおける代表的な開口径の大きさは、以下のように考えた。

「パターンA: 極めて大きな開口」

液体水素配管や充てんホースの破断よりも大きな開口として、貯槽の破壊により生じた開口を想定した。その発生時には「極めて重大な災害」に至ると考え、代表開口径は 14mm 以上とした。

「パターンB: 大きな開口」

これは配管やホース破断、パージ弁等の誤操作による大気開放による開口を想定した。液体水素スタンドモデルの充てんホースのサイズを考慮して 14mm φ の円形開口部をもって代表させることとした。

液体水素スタンドモデルの配管には、14mm φ 以上のもものも使われていることから、リスク評価上、想定される最大の影響度で評価する基本的な考え方と異なっている。今回、14mm φ を採用した理由は、14mm φ の配管破断時の液体水素漏えい量が非常に大きく、爆風圧、噴出火炎の影響度がほぼ最大の影響度（影響度ランク 1 または 2）であると考えられること、地盤面上に固定された配管（14mm φ 以上）に比べ、液水充てんホース（14mm φ）の方が常に FCV との着脱を繰り返すことから破断の可能性が高いと考えられるためである。

一方、放出口パターンにおいては、真空弁離脱後の開口部から水素が漏えいする場合もこのパターンに含めた。真空弁設置口の直径が14mm程度であるため。

「パターンC：小さな開口」

種々の要因から生じる開口部のグループであり、その開口径を設定することは難しい。また、これらは劣化初期においては微小な開口部が劣化の進展と共に徐々に拡大していき、いずれかの時点で着火・爆発・噴出火炎にいたると考えられる。また、これら開口部の形状は不規則である。このような困難さがある中で、十分に安全サイドに立った設定として1mmφの円形開口部をもって代表させることとした。

放出口パターンにおいては、真空弁が固着等の理由により離脱しなかった場合、真空弁周辺部から水素が噴出すること想定した。この場合、実験等による正確な開口径を求めることが出来ないが、安全を考慮して開口パターンCとした。

「パターンD：微小な開口」

グランド漏れ、シートリーク、溶接欠陥によるピンホールなどの微小な開口を想定した。0.2mmの根拠は、前述の圧縮水素の開口径パターンDと同様である。

「パターンE：放出管」

放出口パターンのみ設定した。放出管からの水素放出を想定し、代表的な開口径は100mmφとした。放出管出口に雨よけのキャップがある場合と無い場合を想定し、CFDを使って水素の拡散の様子を比較して上空において最も滞留する条件を検討した。(本論文では詳細省略)

「パターン0：開口無し」

開口径パターンのみ設定した。貯槽の断熱用充てん剤の劣化(脱ガス)に伴う入熱の増加、弁誤操作による閉止、パージ不良など開口が無いのに事故につながる事故シナリオについて設定した。

3.5. 事故シナリオの抽出（35MPa 充てん対応水素スタンド）

3.5.1. 事故シナリオの抽出結果

前述した事故シナリオ抽出手順に従って抽出検討を行ない、事故シナリオの分析とパターン化を行なった結果、オンサイト型水素スタンドモデルに対して 233 件、オフサイト型水素スタンドモデルに対して 64 件（共通の事故シナリオはオンサイト型に含む）の事故シナリオを抽出した。このなかには、機器の劣化・故障に起因する事故シナリオに加えてヒューマンエラー、天災等を原因とする事故シナリオも含んでいる。

抽出した事故シナリオ件数のサマリーを表 3.5.1-1 に示し、事故シナリオ全件のリストを Appendix 1-1 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル（オンサイト型）HAZOP 表、FMEA 表、および Appendix 1-2 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル（オフサイト型）HAZOP 表、FMEA 表に示す。

表 3.5.1-1 事故シナリオ抽出結果サマリー（35MPa 充てん対応水素スタンド）

水素スタンドモデル	HAZOP	FMEA	合計（件）
オンサイト型	40	193	233
オフサイト型	8	56	64*

*共通の事故シナリオはオンサイト型に含む

3.6. 事故シナリオの抽出（70MPa 充てん対応水素スタンド）

70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（新設モデル、改造モデル A 及び B、プレクール設備モデル）に対する事故シナリオの抽出は、35MPa 充てん対応と同様に HAZOP と FMEA を使って前述の抽出手順に従って抽出検討を行なった。

3.6.1. 圧縮機から蓄圧器への蓄圧工程（蓄圧モード）における事故シナリオ抽出

JHFC 水素ステーションにおいて運転の方法を調査したところ、圧縮機から蓄圧器へ水素を蓄える蓄圧工程（以下、蓄圧モードという）に違いがあることが分かった。蓄圧モードを大別すると 2 ケースあり、圧縮機からの蓄圧器への蓄圧時に①低压バンクから順にバンク毎に切り替えて蓄圧する方法と②全バンク一斉に蓄圧する方法があった。これら 2 ケースのそれぞれに圧縮機の運転方法（起動/停止）や遮断弁の操作（開/閉）を考慮して表 3.6.1-1 に示す 7 ケースを想定した。

表 3.6.1-1 蓄圧モード

蓄圧モード	内 容
バンク毎 1	低压バンクへ蓄圧後、バンク切り替毎に圧縮機の停止起動を繰り返す場合
バンク毎 2	低压バンクへ蓄圧後、バンク切り替時に圧縮機は通常運転のまま、切り替えを行う両バンクの入口遮断弁が全開の状態になる場合
バンク毎 3	低压バンクへ蓄圧後、バンク切り替時に圧縮機は通常運転のまま、切り替えを行う両バンクの入口遮断弁が全閉の状態になる場合
バンク毎 4	低压バンクへ蓄圧後、バンク切り替毎に圧縮機をアンロード運転する場合
全バンク 1	バンク毎に入口遮断弁を開き充てんを開始し、最終的には全バンク入口遮断弁を開いた状態で充てんし、充てん完了後全入口遮断弁を閉止する場合
全バンク 2	全バンク入口遮断弁を全開し（逆止弁を信用して）、バンクのいずれかが設定値に達した時点で充てん完了とし、全入口遮断弁を閉止する場合
全バンク 3	全バンク入口遮断弁を全開し、バンク毎の設定値に達した時点でバンク毎の入口遮断弁を閉止する場合

蓄圧モードを含み水素スタンドの運転は、コンピュータシステムで実行されるが、決められたシーケンスまたはプログラム通りに圧縮機の起動/停止や遮断弁の開閉が行なわれなかった場合、大きな事故につながることを否定できない。こうしたシナリオは、事故シナリオの抽出漏れになる可能性が大きい。そこで、この蓄圧モードについて詳細な検討を行なった。

蓄圧モードを考慮した事故シナリオ抽出では、70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（新設モデル）を対象にした。そして蓄圧モード毎に、圧縮機から蓄圧器へ蓄圧時の正常な工程（圧縮機の起動停止、遮断弁の開閉）を明確にした。次に、工程ごとのすべてのタイミングでひとつひとつの機器が故障等によって期待した動作をしなかった場合の影響を検討した。

バンク毎 1 を例に蓄圧モードの工程を示すと以下となる。

①圧縮機入口遮断弁開 → ②圧縮機起動 → ③圧縮機出口遮断弁開 → ④蓄圧器入口遮断弁開
 → ⑤アンロード遮断弁閉 → (蓄圧完了) → ⑥アンロード遮断弁開 → ⑦圧縮機停止 → ⑧
 圧縮機出口遮断弁閉 → ⑨蓄圧器入口遮断弁閉

ここで、①の時に圧縮機入口遮断弁が開かなかった場合の影響はどのようになるのか、また、更に続けて②の時に圧縮機入口遮断弁が閉まった場合にはどのような影響となるのかを検討し、事故シナリオを抽出した。

蓄圧モード毎の工程のイメージ図を Appendix 2-1 蓄圧モード工程概略図に示し、各工程における機器の動作不良の組合せを Appendix 2-2 蓄圧モード工程作動不良組合せ表に示す。

蓄圧モードを考慮した上記検討の結果、27 件の事故シナリオを抽出した。事故シナリオ全件のリストを Appendix 1-5 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（蓄圧モード検討）に示す。

3.6.2. 事故シナリオの抽出結果

70MPa 充てん対応水素スタンドモデルとして定めた新設モデル、改造モデル A 及び B、プレクール設備モデルに対し、HAZOP、FMEA を使って事故シナリオを抽出した。特に新設モデルに対しては、別途蓄圧モードを考慮して事故シナリオの抽出を行なった。その結果、合計 769 件の事故シナリオを抽出することができた。内訳は、HAZOP より 194 件、FMEA より 575 件（蓄圧モード別の事故シナリオ抽出は、機器ごとの検討のため FMEA に含む）となった。70MPa 充てん対応水素スタンドのモデルごとの事故シナリオ件数と合計のサマリーを表 3.6.2-1 に示し、事故シナリオ全件のリストを Appendix 1.事故シナリオとリスクアセスメント結果一覧表に示す。

1-3 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（新設モデル） HAZOP 表、FMEA 表、

1-4 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（改造モデル） HAZOP 表、FMEA 表

1-5 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（蓄圧モード検討） FMEA 表

1-6 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（プレクール設備モデル）HAZOP 表、FMEA 表

表 3.6.2-1 事故シナリオ抽出結果サマリー（70MPa 充てん対応水素スタンドモデル）

水素スタンドモデル	HAZOP	FMEA	合計（件）
新設モデル	135	470	605
改造モデル A 及び B	41	48	89
新設モデル（蓄圧モード）	—	27	27
プレクール設備モデル	18	30	48
合計	194	575	769

*共通の事故シナリオは新設モデルに含む

3.7. 事故シナリオの抽出（液体水素スタンド）

圧縮水素スタンドでは配管や蓄圧器の外側は一重の構造であるため、開口すなわち水素漏洩であるため、事故シナリオがイメージしやすい。これに対して液体水素スタンドでは、液体水素の保温（断熱）のため配管は二重管（安全弁付近などの一部は一重管）が利用され、貯槽は二重貯槽が利用されていることから、液体水素スタンドの事故シナリオは圧縮水素スタンドのそれとは異なる。例えば、液体水素スタンドの二重管の内管から液体水素が漏えいした場合、液体水素は直接外部へ漏えいするわけではなく、まず真空層へ流出する。次に真空層の圧力が上昇し、真空層で最も内圧上昇に弱い真空弁から水素が漏えいすると想定できる。このように液体水素スタンド機器に対しては、想定できる事故を段階的に整理する必要がある。そこで、想定される事故シナリオを細かく段階的に分け、これを「事故ステップ」と呼んで整理することにした。

3.7.1. 一重管の事故ステップ

液体水素スタンドにおける安全弁取付け配管や蒸発器前後の配管は、保温の必要がないため一重管が用いられる。この一重管の事故ステップを図 3.7.1-1 のように整理した。

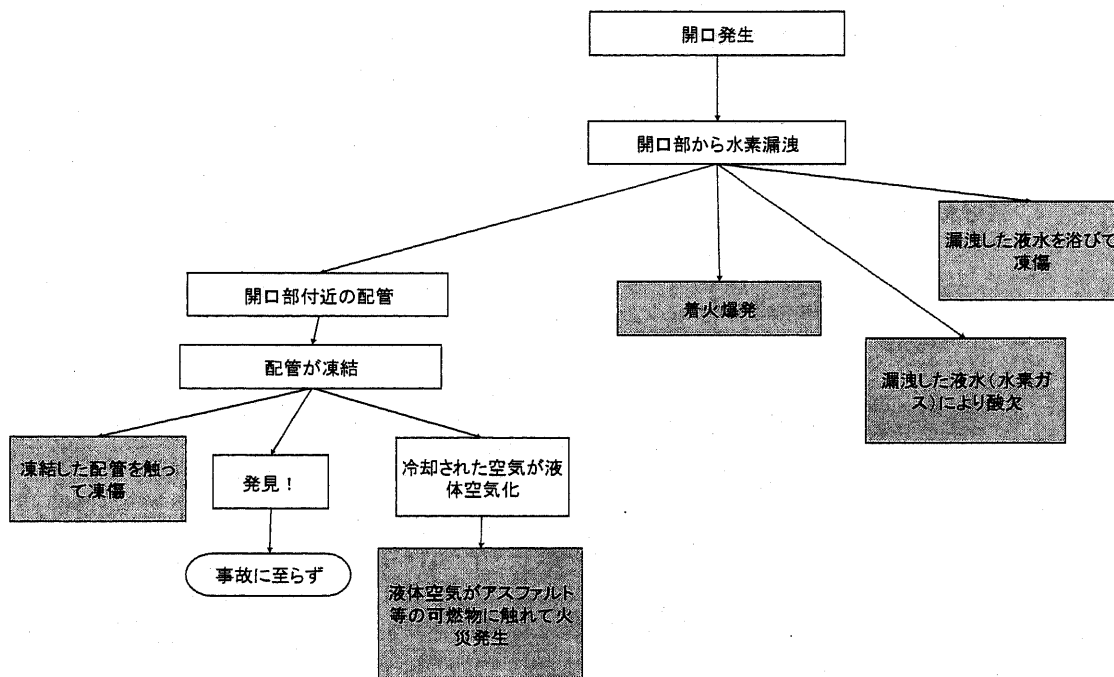


図 3.7.1-1 一重管の事故ステップ

3.7.2. 二重管の事故ステップ

液体水素用二重管（図 2.4-5 参照）ならびに液体水素充てんホース部（図 2.4-7 参照）において、外管開口時と内管開口時では事故ステップが異なるため、それぞれの場合について以下のように整理した。

(1) 二重管の外管開口時

二重管の外管開口時は直接液体水素が漏えいすることは無いが、真空断熱層が破壊されるため液体水素への入熱が大きくなり、ベント放出量が増大するなどの事故シナリオが想定できる。

外管開口時のイメージ

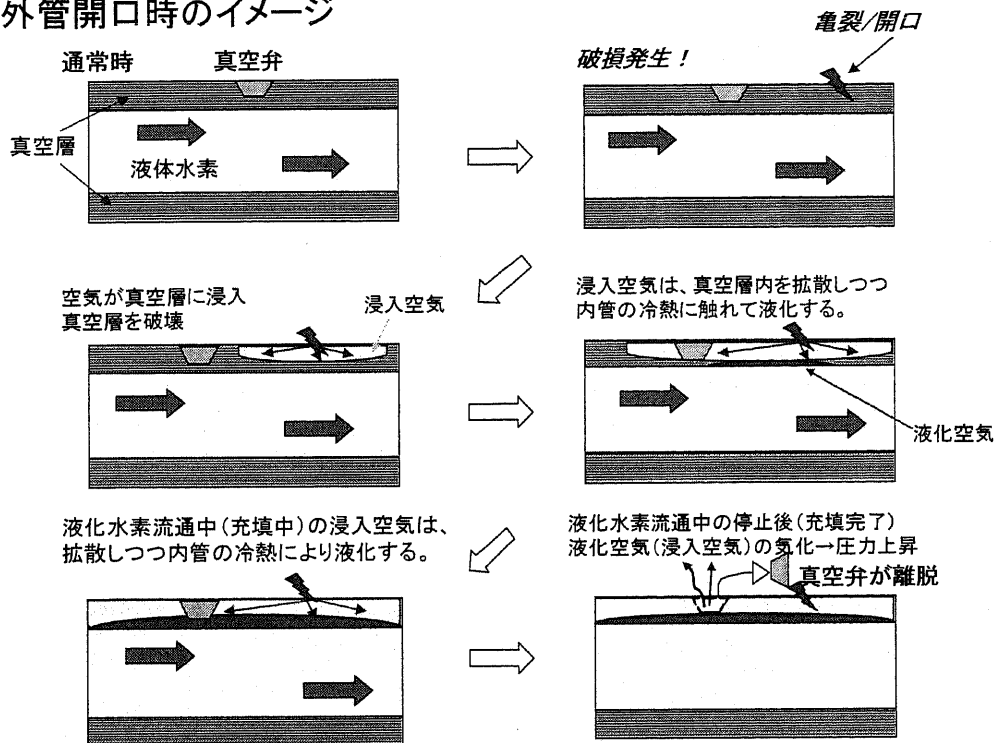


図 3.7.2-1 二重管の外管開口時のイメージ図

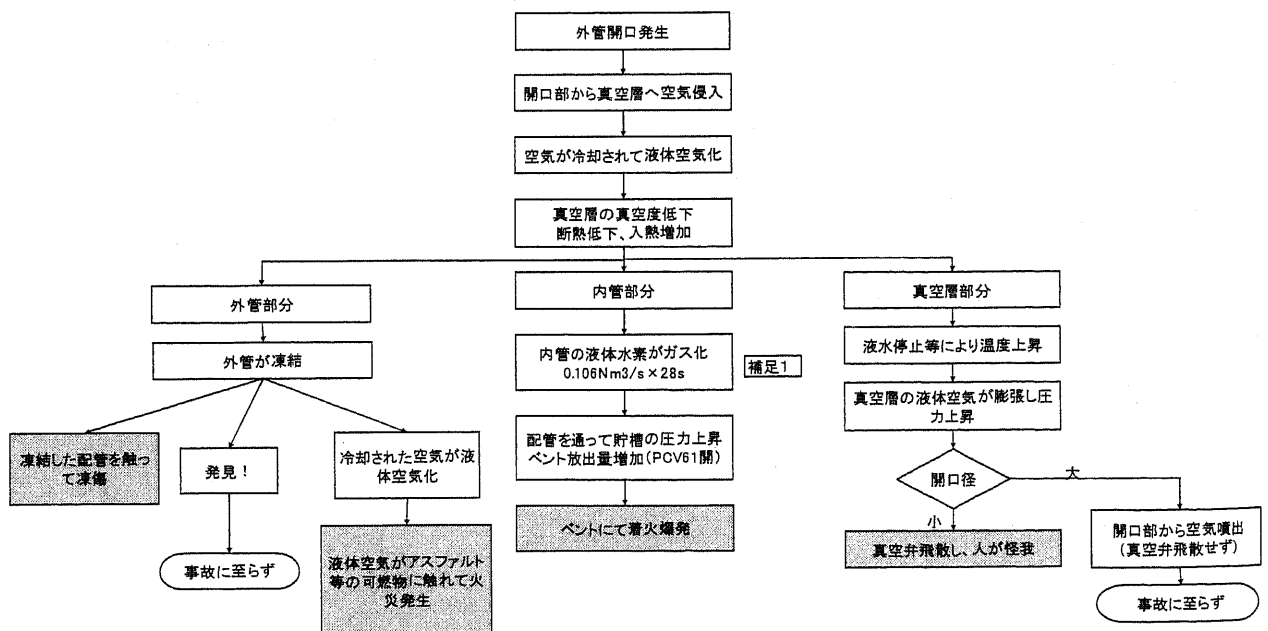


図 3.7.2-2 二重管の外管開口時の事故ステップ

(2) 二重管の内管開口時

二重管の内管開口時は液体水素が直接外部漏えいすることが想定でき、同時にベント放出量の増大も想定される。内管開口時の真空層内における水素ガスの振る舞いを視覚化するため、コンピュータを使った流体解析を実施した。詳細は 6.8 節 液体水素（二重管）の漏えい解析で述べる。

内管開口時のイメージ

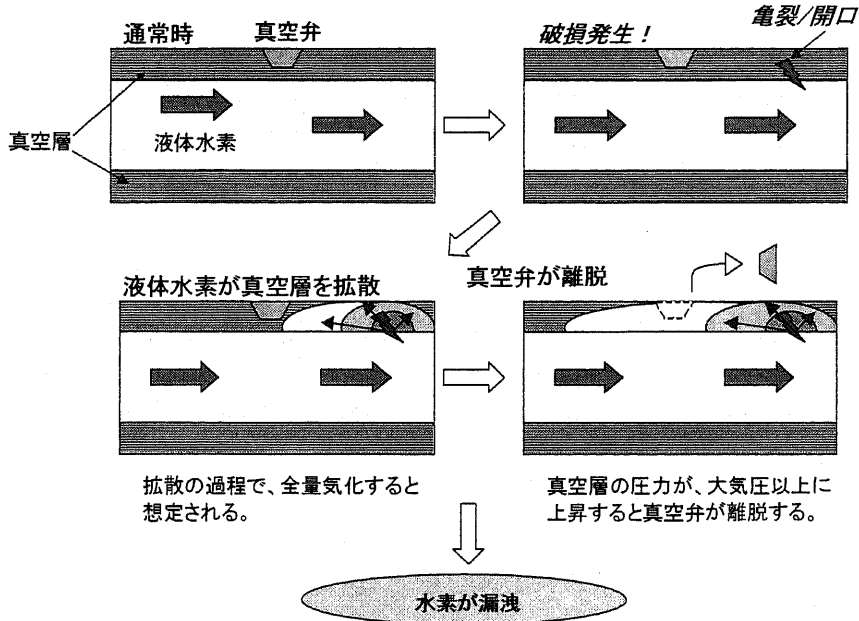


図 3.7.2-3 二重管の内管開口時のイメージ図

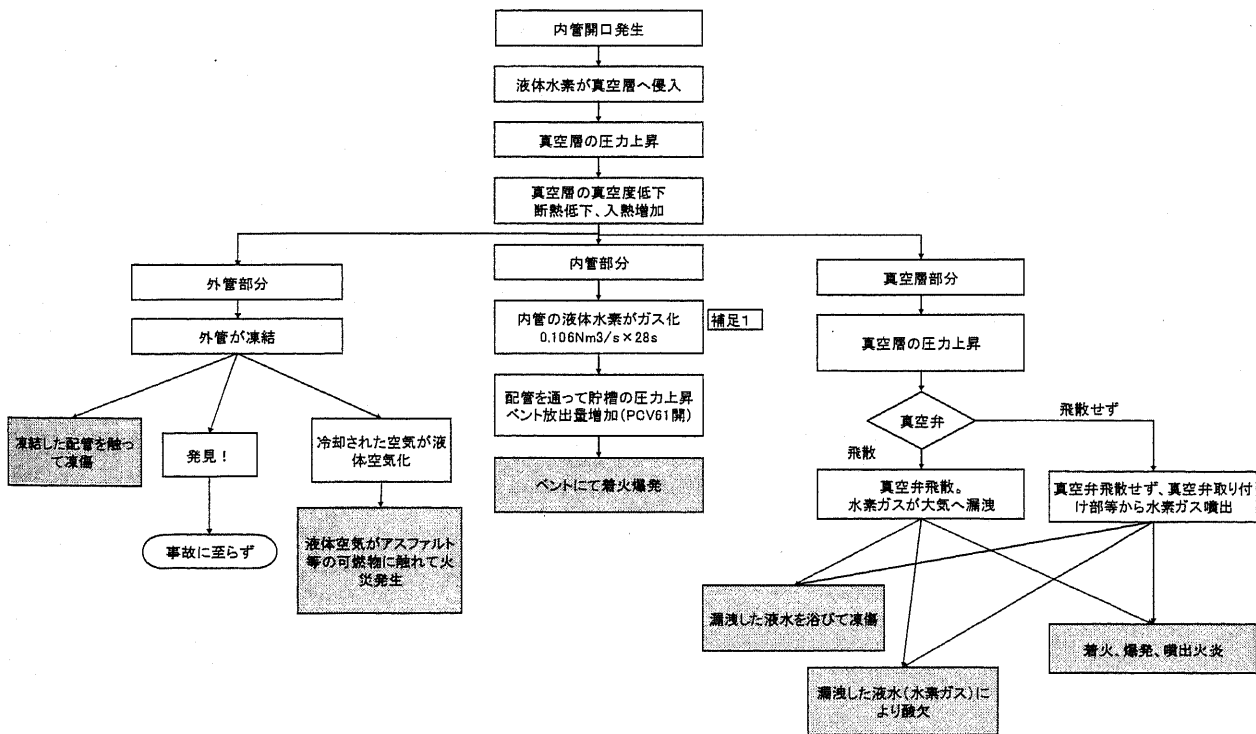


図 3.7.2-4 二重管の内管開口時の事故ステップ

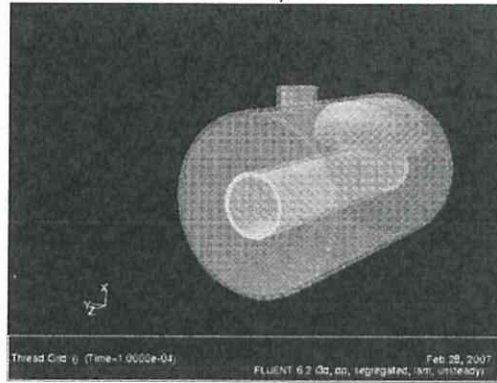


図 3.7.2-5 二重管の内管開口時の水素漏洩 CFD シミュレーション例 (6.8 節)

3.7.3. 液体水素貯槽の事故ステップ

液体水素貯槽 (図 2.4-6 参照) の外側を外槽、液体水素に接する内側を内槽、その間を真空層と呼ぶ。基本的な事故ステップは二重管と同じ考え方であるが、液体水素貯槽はインベントリー (容量) が非常に大きいことに留意した。なお、液体水素スタンドモデルの P&ID には貯槽に安全弁と破裂弁が設置されているが、これらは安全装置であるため安全対策前の事故想定ではこれらが作動しないものとして事故ステップを想定した。なお、破裂板のセット圧力は 0.33MPa とした。

(1) 貯槽の外槽開口時

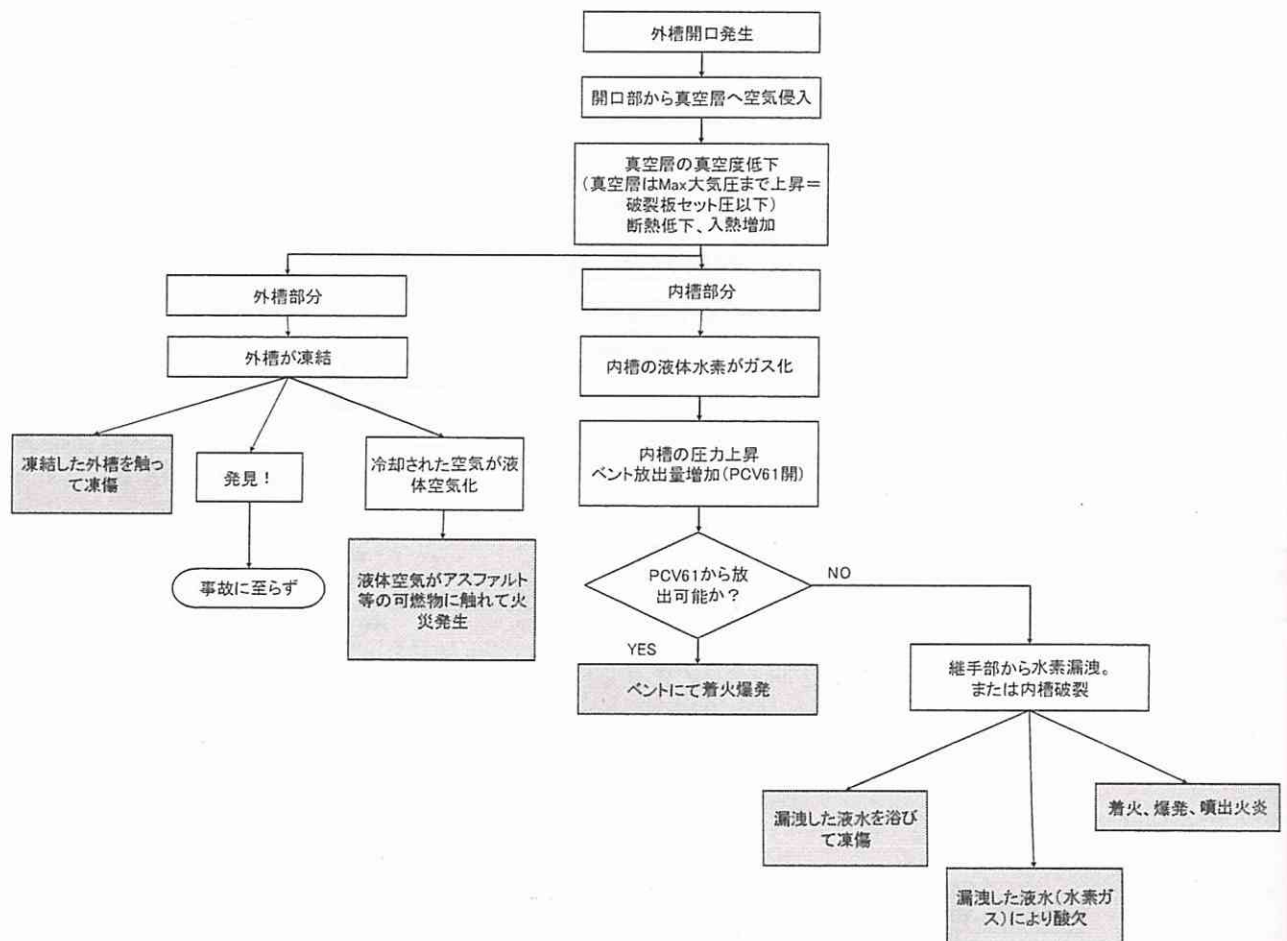


図 3.7.3-1 貯槽の外槽開口時の事故ステップ

(2) 貯槽の内槽開口時

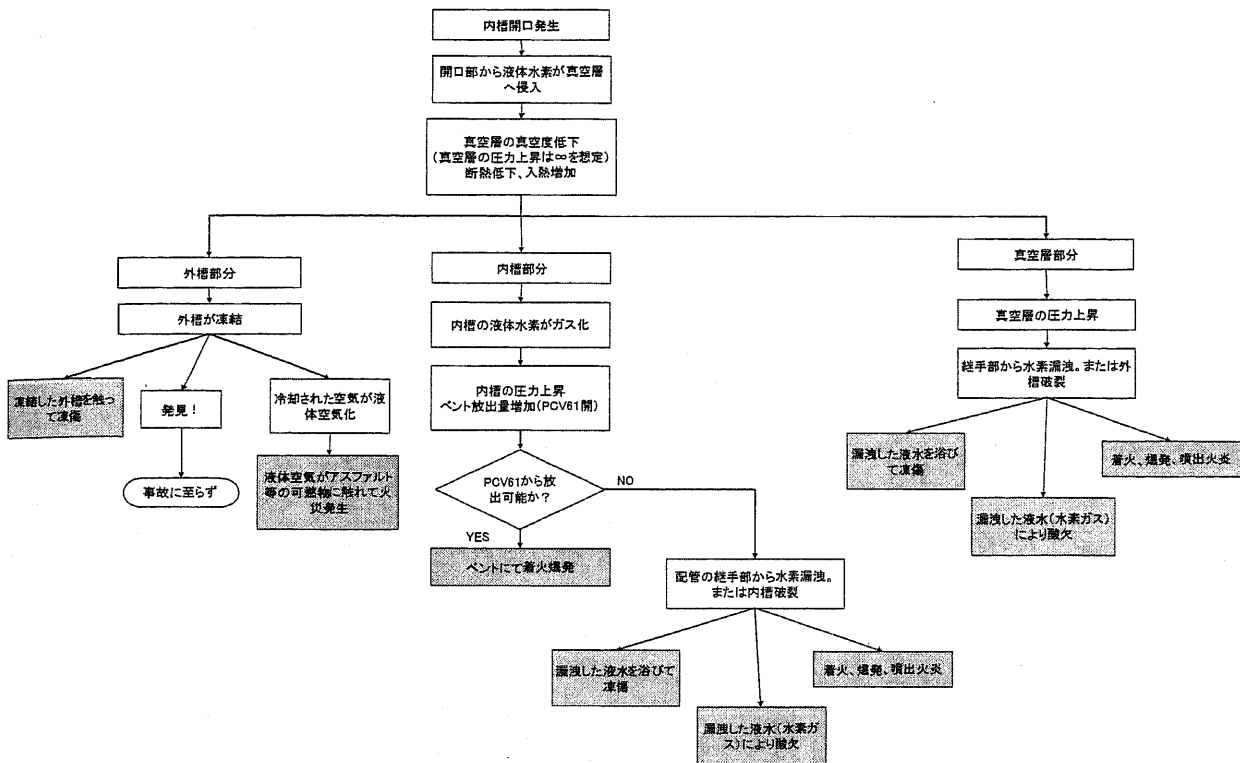


図 3.7.3-2 貯槽の内槽開口時の事故ステップ

3.7.4. バイオネット継手の事故ステップ

バイオネット継手（図 2.4-8 参照）は液体水素特有の機器で、配管の継手部分やローリーからの受け入れホース部の先端（ローリーと液体水素スタンドの接続部）に利用されている。二重管の継手部分においてオス側とメス側の配管が刀と鞘のように深く挿入されて、液外水素の漏えいと熱の進入がないように工夫されている。

バイオネット継手の事故ステップとして、トリガー現象は継手部（Oリング）のシール不良によるものや、クランプの取付け不良などを想定した。開口後の事故ステップは「一重管」の場合と同様に開口即水素漏洩とした。

部位による差異として、配管部のバイオネット継手は一度設置したらメンテナンス時を除いて取り外しを行わないが、受け入れホース部のそれは液体水素の受け入れ時毎に着脱が行われる点で着脱の頻度が高い。なお、液体水素充てんホース（充てんカプラ、図 2.4-7）先端部にもバイオネット継手と同じ構造のものが用いられているが、液体水素充てんカプラとして事故シナリオ作成を行った。

3.7.5. 漏えいプロセスパターンを使った事故シナリオのパターン化

液体水素スタンドモデルを対象に事故シナリオの抽出を行なったところ、開口部と水素放出口が必ずしも一致しないケースが多いことが分かった。そこで、前述のように開口部の穴の大きさを開口径パターンと放出口パターンを使って整理した。さらに液体水素スタンドでは、開口が発生した部位（例：二重管）と開口場所（例：内管 or 外管）によって水素漏えいに至るプロセスが異なる[2]ことを考慮して、開口部位、開口径パターン、放出口パターンを組み合わせた「漏えいプロセスパターン」を使って事故シナリオのパターン化を行なった。

付加的な効果として、部位×開口場所×開口径パターン×放出口パターンの組み合わせを確認することで事故シナリオに漏れがないことを再確認することが出来た。

漏えいプロセスパターンの略号を表 3.7.5-1 に、漏えいプロセスパターンの一覧を表 3.7.5-2 に、漏えいプロセスパターンのイメージ図を図 3.7.5-1 から図 3.7.5-5 に示す。

$$\boxed{\text{漏えいプロセスパターン}} = \boxed{\text{部位}} \times \boxed{\text{開口場所}} \times \boxed{\text{開口径パターン}} \times \boxed{\text{放出口パターン}}$$

例：漏えいプロセスパターン DICE

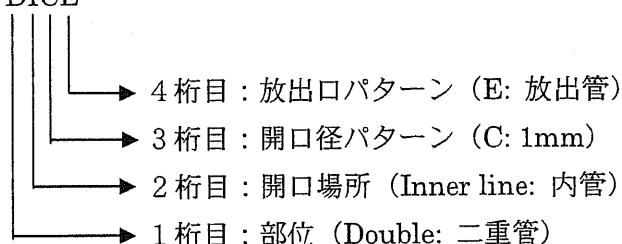


表 3.7.5-1 漏えいプロセスパターンの略号

1 桁目 部位		2 桁目 開口場所		3 桁目 開口パターン	4 桁目 放出口パターン
<u>Single</u>	一重管	—	(区分なし)		
<u>Double</u>	二重管	<u>Outer line</u>	外管開口	A: 14mm φ 以上 B: 14mm φ C: 1mm φ D: 0.2mm φ O: 開口なし	A: 14mm φ 以上 B: 14mm φ C: 1mm φ D: 0.2mm φ E: ベント放出
		<u>Inner line</u>	内管開口		
		—	内外管同時開口		
<u>Tank</u>	貯槽	<u>Outer tank</u>	外槽開口		
		<u>Inner tank</u>	内槽開口		
		—	内外槽同時開口		
<u>Valve</u>	弁	—	弁		
		<u>Safety</u>	安全弁		
<u>Others</u>	その他	<u>No hole</u>	開口無し		

表 3.7.5-2 漏えいプロセスパターンの一覧

漏洩プロセスパターン	開口位置		トリガー現象				水素放出現象		
	部位	開口場所	第一事象	解説	開口径パターン	開口径mm	水素が外気へ放出される部位	放出口パターン	開口径mm
S-AA	一重管	-	極めて大きな開口	想定なし	A	>14	開口部	A	>14
S-BB	一重管	-	大きな開口	パージ弁誤開放	B	14	開口部	B	14
S-CC	一重管	-	小さな開口	一重管の低温脆化	C	1	開口部	C	1
S-DD	一重管	-	微小な開口	ねじ緩み	D	0.2	開口部	D	0.2
S-OE	一重管	開口なし	火災による蒸発器のBOG		0	0	放出管	E	-
DOBE	二重管	外管開口	外管に大きな開口	想定なし	B	14	PCV61→放出管	E	-
DOCE	二重管	外管開口	外管に小さな開口	配管踏みつけ	C	1	PCV61→放出管	E	-
DODE	二重管	外管開口	外管に微小な開口	腐食、トレンチ蓋落とし	D	0.2	PCV61→放出管	E	-
DIBB	二重管	内管開口	内管に大きな開口	内管破断(水素脆化)	B	14	真空弁部	B	14
DIBC	二重管	内管開口	内管に小さな開口	内管破断(水素脆化)	B	14	真空弁周辺部	C	1
DIBE	二重管	内管開口	内管に大きな開口	内管破断	B	14	PCV61→放出管	E	-
DICB	二重管	内管開口	内管に小さな開口	内管の溶接欠陥(新)	C	1	真空弁部	B	14
DICC	二重管	内管開口	内管に小さな開口	内管の溶接欠陥(新)	C	1	真空弁周辺部	C	1
DICE	二重管	内管開口	内管に小さな開口	内管の溶接欠陥(新)	C	1	PCV61→放出管	E	-
DIDB	二重管	内管開口	内管に微小な開口	内管の溶接欠陥(旧)	D	0.2	真空弁部	B	14
DIDE	二重管	内管開口	内管に微小な開口	内管の溶接欠陥(旧)	D	0.2	PCV61→放出管	E	-
D-BB	二重管	同時開口	二重管破断	クランプ外れ、誤発進	B	14	開口部	B	14
D-CC	二重管	同時開口	小さな開口	想定なし	C	1	開口部	C	1
D-DD	二重管	同時開口	微小な開口	クランプ緩み	D	0.2	開口部	D	0.2
D-OE	二重管	開口なし	配管BOG、脱ガス、パージ		0	0	放出管	E	-
TOAC	貯槽	外槽開口	外槽に極めて大きな開口	想定なし	A	>14	継手部	C	1
TOAE	貯槽	外槽開口	外槽に極めて大きな開口	想定なし	A	>14	PCV61→放出管	E	-
TOBC	貯槽	外槽開口	外槽に大きな開口	想定なし	B	14	継手部	C	1
TOBE	貯槽	外槽開口	外槽に大きな開口	想定なし	B	14	PCV61→放出管	E	-
TOCC	貯槽	外槽開口	外槽に小さな開口	強風で飛散物直撃	C	1	継手部	C	1
TOCE	貯槽	外槽開口	外槽に小さな開口	強風で飛散物直撃	C	1	PCV61→放出管	E	-
TODC	貯槽	外槽開口	外槽に微小な開口	腐食	D	0.2	継手部	C	1
TODE	貯槽	外槽開口	外槽に微小な開口	腐食	D	0.2	PCV61→放出管	E	-
TIAA	貯槽	内槽開口	内槽に極めて大きな開口	内槽破裂	A	>14	外槽破裂	A	>14
TIAC	貯槽	内槽開口	内槽に極めて大きな開口	内槽破裂	A	>14	継手部	C	1
TIAE	貯槽	内槽開口	内槽に極めて大きな開口	内槽破裂	A	>14	PCV61→放出管	E	-
TIBC	貯槽	内槽開口	内槽に大きな開口	想定なし	B	14	継手部	C	1
TIBE	貯槽	内槽開口	内槽に大きな開口	想定なし	B	14	PCV61→放出管	E	-
TICC	貯槽	内槽開口	内槽に小さな開口	内槽の低温脆化	C	1	継手部	C	1
TICE	貯槽	内槽開口	内槽に小さな開口	内槽の低温脆化	C	1	PCV61→放出管	E	-
TIDC	貯槽	内槽開口	内槽に微小な開口	内槽の溶接欠陥	D	0.2	継手部	C	1
TIDE	貯槽	内槽開口	内槽に微小な開口	内槽の溶接欠陥	D	0.2	PCV61→放出管	E	-
T-AA	貯槽	同時開口	内外槽同時開口	ヘリコプター墜落	A	>14	開口部	A	>14
T-BB	貯槽	同時開口	内外槽同時開口	ライフル弾貫通	B	14	開口部	B	14
T-OC	貯槽	開口なし	過充てん、脱ガス、パージ不	速度大	0	0	継手部	C	1
T-OE	貯槽	開口なし	脱ガス、BOG、過充てん	速度小	0	0	放出管	E	-
V-BB	弁	誤開放	全開→大気漏えい	誤操作	B	14	開口部	B	14
V-BC	弁	誤開放	全開→圧力上昇→継手	誤操作	B	14	継手部	C	1
V-BE	弁	誤開放	全開→圧力上昇→放出管	誤操作(PEC61含む)	B	14	放出管	E	-
V-DD	弁	誤開放	微小な開口	グラウンド漏れ	D	0.2	開口部	D	0.2
V-OB	弁	誤閉止	液封による配管破裂		0	0	内外管破裂	B	14
V-OC	弁	誤閉止	誤閉止による圧力上昇	誤操作	0	0	継手部	C	1
VSAA	弁	破裂板	貯槽破裂板作動	放出管なし	A	>14	破裂板→大気	A	>14
VSAB	弁	安全弁	貯槽安全弁作動	放出管あり	A	>14	安全弁→放出管	E	-
VSBB	弁	安全弁	安全弁ボデー亀裂	亀裂、破壊	B	14	開口部	B	14
VSBE	弁	安全弁	安全弁作動	放出管あり	B	14	安全弁→放出管	E	-
VSCE	弁	安全弁	安全弁の小さな開口	放出管なし	C	1	開口部	C	1
VSDE	弁	安全弁	安全弁の小さな開口	放出管あり	C	1	安全弁→放出管	E	-
VSDD	弁	安全弁	微小な開口(シートリーク)	放出管なし	D	0.2	開口部	D	0.2
VSDE	弁	安全弁	微小な開口(シートリーク)	放出管あり	D	0.2	安全弁→放出管	E	-
ONOE	その他	開口なし	0.05m3/s、放出管6m		0	0	放出管	E	-
ONOE	その他	開口なし	0.17m3/s、放出管12m		0	0	放出管	E	-
-	-	-	-	-	0	0	-	0	0

* 想定なし：現実に起こりそうな事故シナリオを想定できなかったことを示す。

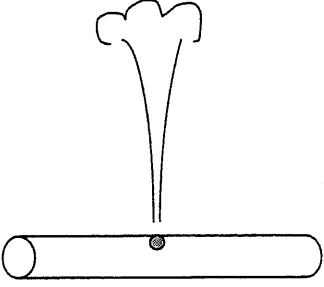
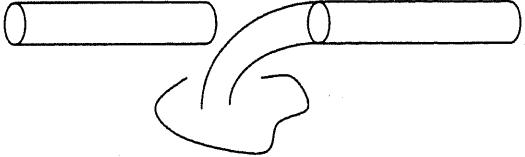
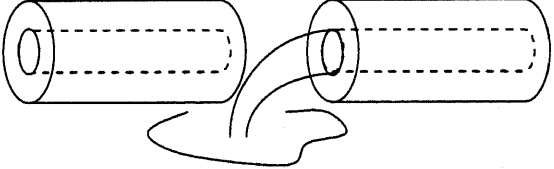
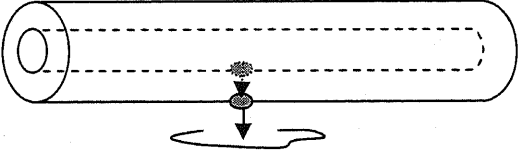
漏えい プロセスパターン	イメージ
一重管開口 S-CC S-DD	
S-BB	
二重管開口 D-BB	
D-CC	 <p data-bbox="847 1525 1145 1570">継手部等を想定</p>

図 3.7.5-1 漏えいプロセスパターンのイメージ図 (1)

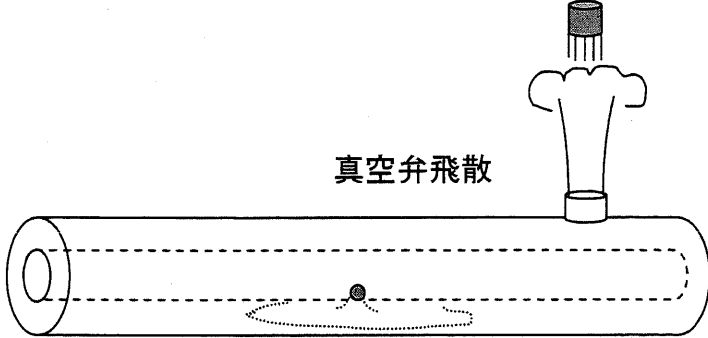
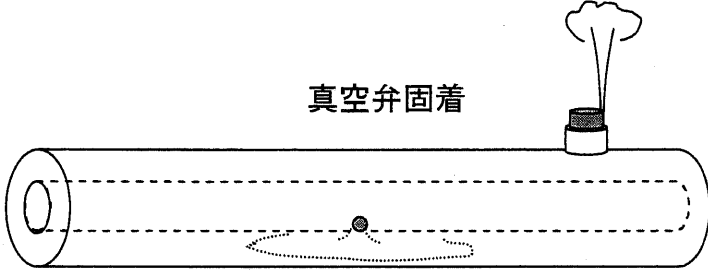
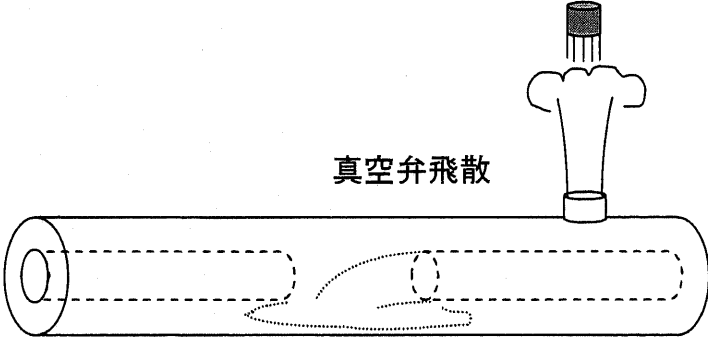
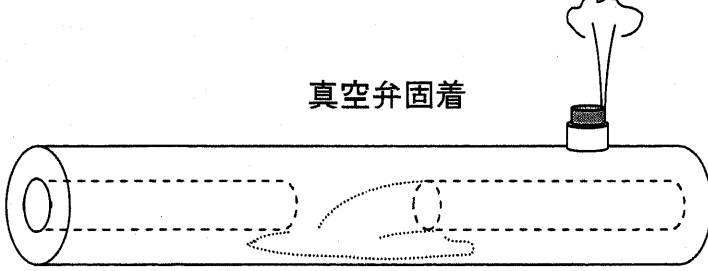
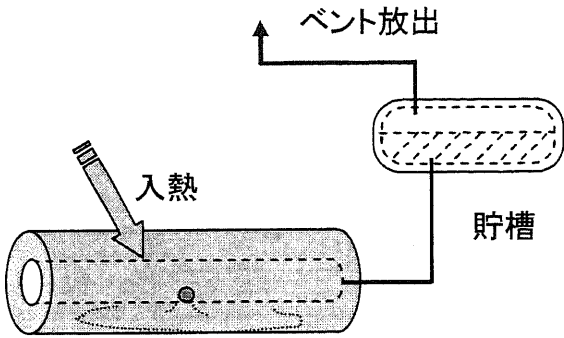
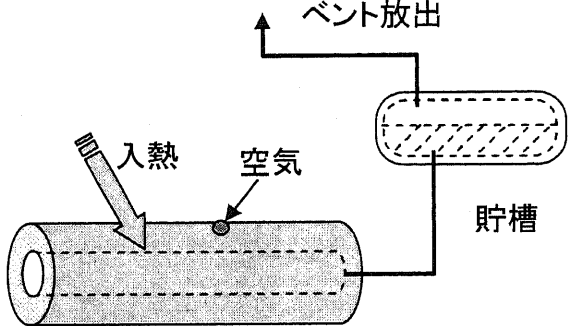
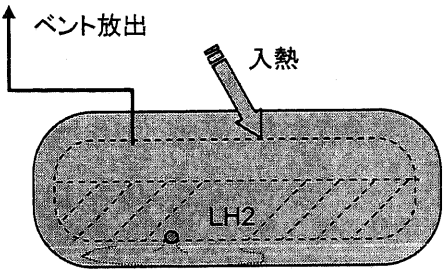
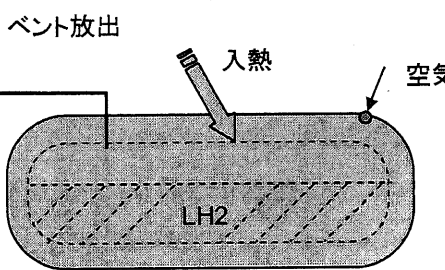
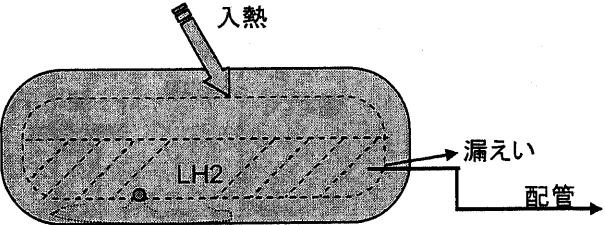
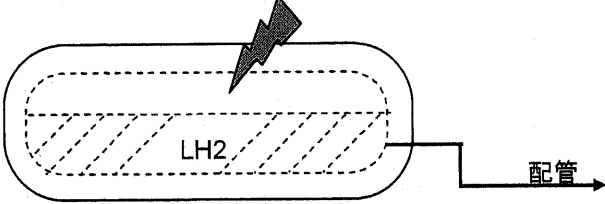
漏えい プロセスパターン	イメージ
二重管開口 DICB	<p style="text-align: center;">真空弁飛散</p> 
DICC	<p style="text-align: center;">真空弁固着</p> 
DIBB	<p style="text-align: center;">真空弁飛散</p> 
DIBC	<p style="text-align: center;">真空弁固着</p> 

図 3.7.5-2 漏えいプロセスパターンのイメージ図 (2)

漏えい プロセスパターン	イメージ
二重管開口 DICE	 <p data-bbox="726 689 1204 772">真空層破壊により入熱増加→配管内液体水素が蒸発→ベント放出</p>
DOCE	 <p data-bbox="718 1276 1197 1355">真空層破壊により入熱増加→配管内液体水素が蒸発→ベント放出</p>

* 網掛けは真空断熱層が破壊されていることを示す。

図 3.7.5-3 漏えいプロセスパターンのイメージ図 (3)

漏えい プロセスパターン	イメージ
貯槽の開口 TICE	 <p>真空層破壊により入熱増加→貯槽内 液体水素が蒸発→ベント放出量増大</p>
TOCE	 <p>真空層破壊により入熱増加→貯槽内 液体水素が蒸発→ベント放出量増大</p>
TICC	 <p>内槽開口→真空層破壊により入熱増加→ 液体水素が蒸発→継手部から漏えい</p>
T-AA	 <p>内槽・外槽同時開口→液体水素流出</p>

* 網掛けは真空断熱層が破壊されていることを示す。

図 3.7.5-4 漏えいプロセスパターンのイメージ図 (4)

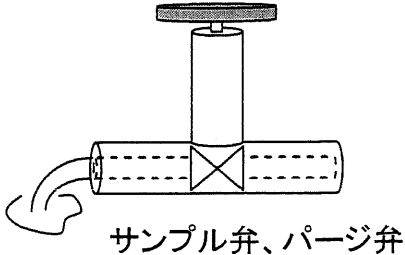
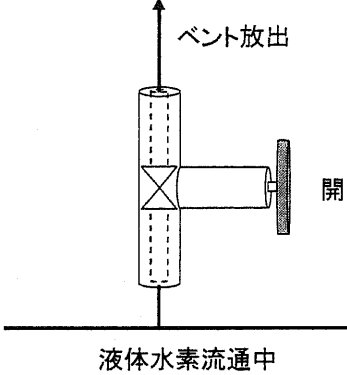
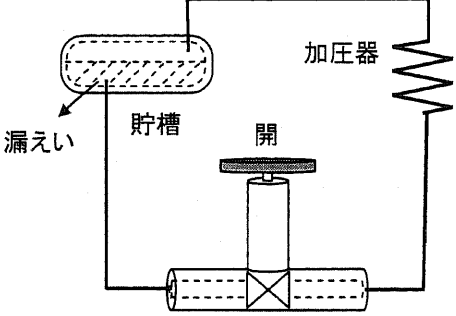
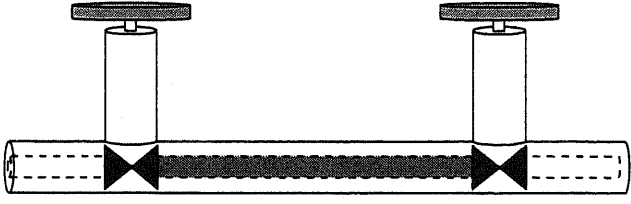
漏えい プロセスパターン	イメージ
弁の誤開放 V-BB	<p style="text-align: center;">開</p>  <p style="text-align: center;">サンプル弁、パージ弁</p>
V-BE	 <p style="text-align: center;">液体水素流通中</p>
V-BC	 <p style="text-align: center;">内圧上昇により継手部から漏えい。(内圧上昇予測不可。影響度最大で評価)</p>
弁の誤閉止 V-OB	<p style="text-align: center;">閉 閉</p>  <p style="text-align: center;">液封による配管破裂</p>

図 3.7.5-5 漏えいプロセスパターンのイメージ図 (5)

3.7.6. 事故シナリオの抽出結果

これまで述べてきたように液体水素スタンドでは、液体水素を保冷する必要がない部分には通常の一重管を使い、保冷する必要のある部分には真空断熱を施した二重管を使用している。事故シナリオの抽出において、一重管の部分は、開口部から直接液体水素または気化した水素ガスが漏洩することがイメージできる。しかし、二重管の部分は、開口部が外管の場合と内管の場合で水素の漏洩場所が異なる。例えば、二重管の外管にピンホールが開いた場合、開口部から空気が進入して二重管の真空度が低下する。これに伴い二重管へ入熱が増加し管内の液体水素が気化し、気化した水素ガスが液水貯槽の圧力を上昇させ、水素ガスがベントラインから放出される。一方、二重管の内管にピンホールが開いた場合、漏洩した液体水素は二重管の外管と内管の間の真空層で気化し、圧力を上昇させる。二重管には真空層の空気を抜くための真空弁が取り付けられているため、この部分から水素ガスが外部へ噴出する。または真空層の圧力上昇により内部の水素ガスと共に真空弁が飛散することが想定される。液体水素貯槽も二重構造であることから同様に開口部と水素放出口が異なるケースを想定した。さらに、液体水素が漏洩する事故シナリオにおいて、着火、爆発しなかった場合として、液体水素を浴びて凍傷になるケースや漏洩後気化した水素ガスで酸欠状態になるケースなども想定している。

こうして想定できる全ての事故シナリオをリストアップした後、重複を削除するなどの整理を行った結果、131件（HAZOP：51件、FMEA：80件）を抽出した。

液体水素スタンドにおける事故シナリオ抽出結果サマリーを表 3.7.6-1 に示し、事故シナリオの全リストを Appendix 1-7 液体水素スタンドモデル HAZOP 表、FMEA 表に示す。

表 3.7.6-1 事故シナリオ抽出結果サマリー（液体水素スタンド）

水素スタンドモデル	HAZOP	FMEA	合計（件）
液体水素スタンド	51	80	131

References

- [1] LP ガス・天然ガス自動車用燃料充てん設備等の高圧ガスに関する技術基準検討書、平成 8 年 5 月、社団法人日本ガス協会、LP ガス・天然ガス自動車用燃料充てん設備等の高圧ガスに関する技術基準研究会、P.54
- [2] Shigeki Kikukawa, Hirotsada Mitsuhashi and Atsumi Miyake, Risk assessment for liquid hydrogen supply stations, *International Journal of Hydrogen Energy*, **34**, 1135-1141 (2009)

第4章

リスク算定とリスク評価

第4章 リスク算定とリスク評価

4.1. 基本的な考え方

リスク算定は、事故シナリオ毎にその事故が起きてしまった場合の影響度の大きさを評価（影響度評価）する工程と、その事故シナリオが起きる可能性を評価（可能性評価）する工程の二段階からなる。リスク評価は、事故シナリオ毎に得られた影響度評価結果（影響度レベル）と可能性評価結果（可能性レベル）を評価の判断基準であるリスクマトリクスに照らしてリスクの大きさを評価し、安全対策が必要かどうかを判断する工程である。いずれの工程もリスクアセスメントの一部である。

リスク算定を行なうためのデータは、連名委託先の研究データや文献から入手しできるだけ実際の実験に基づく定量的なデータを利用した。ただし、70MPa 充てん対応水素スタンドのリスクアセスメントに必要な水素の実験データは極めて少ないため、35MPa 充てん対応水素スタンドを検討した時に取得したデータをベースに外挿によって求めたデータを利用することとした。本研究では、70MPa は外挿データを使って議論するが、実験データを入手次第正規のデータとして置き換えていく。

4.2. リスクマトリクス

本研究では、水素スタンドの普及と利用者や周辺住民に対する安全性の確保の両立が求められる。しかも使用する機器は従来の技術をベースにしているが、水素スタンドまたは液体水素スタンドの機器として使用された経験が少なく、現時点で故障や事故の確率に関する詳細なデータの蓄積が十分とは言えない。こうしたなか事故シナリオの抽出を徹底的に行い、事故シナリオ毎のリスクを評価し、かつ安全対策の十分性を判断しうるリスクマトリクスが必要である。そこで、水素スタンドを対象とした類似する研究を調査した。特に米国エネルギー省（U. S. Department of Energy）[1]、欧州水素プロジェクト（European Integrated Hydrogen Project）[2]、日本の WE-NET[3]のリスクマトリクスを参考に、本研究の目的に添ったリスクマトリクス（5×4）を提案した。本研究では水素スタンドのリスクを評価するためのクライテリアとして表 4.2-1 のマトリクスを定義したことから、このリスクマトリクスを使って 35MPa 充てん対応、70MPa 充てん対応水素スタンド及び液体水素スタンドのリスクアセスメントを行う。表 4.2-1 に作成したリスクマトリクスを示し、以下にその特徴を述べる。なお、欧米と WE-NET のリスクマトリクスについては、4.6 節で触れる。

表 4.2-1 本研究のリスクマトリクス

		可能性レベル			
		A：ほとんど起こりえない	B：起こりにくい	C：可能性がある	D：十分起こりえる
I	極めて重大な災害	H	H	H	H
II	重大な災害	M	H	H	H
III	中規模災害	M	M	H	H
IV	小規模災害	L	L	M	H
V	軽微な災害	L	L	L	M

リスクマトリクスは、リスクを評価する評価基準のひとつである。一般に基準を作る場合は、基準を利用する目的を明らかにしたうえで目的に合ったものを作る。本研究の目的は、前述のように明ら

かであるため、その目的に沿ったリスクマトリクスの作成に努めた。

水素スタンドに関する他のリスクアセスメントの事例を参考にリスクマトリクスは、影響度評価 5 段階、可能性評価 4 段階とした。その理由は、水素スタンドの安全性に対するインパクトが、可能性よりも影響度の方が大きいと考えたからである。また、水素スタンドとしての利用の歴史が浅い現時点では、事故シナリオの発生する可能性を正確に評価するに値する機器の故障データ等が不足しているため、可能性評価は定性的にならざるを得ない。そこで可能性評価は大まかに 4 段階とした。

リスクマトリクス内のリスクレベルは、想定事故シナリオに対するリスク算定を行った後、リスクを許容してリスクアセスメントを終了させるか、リスクを許容せずさらなる安全対策の追加を求めるかの「取るべき措置」を定義する。本検討の水素スタンドモデルは基本設計のみであることから詳細な定義を避け、大まかに H（高い）、M（中程度）、L（低い）の 3 段階にレベル分けし、取るべき措置を表 4.2-2 のように設定した。なかでもリスクレベル M の対応を「原則として許容できない。更なる安全対策が可能かどうかを検討し、現実的な対策が見つからない場合に限ってこれを許容する。」とした。一般に企業等が行なうリスクアセスメントでは「原則として許容する」場合が多いが、本検討の目的を鑑みて常に更なる安全対策を検討させるためにこのように決めた。

表 4.2-1 リスクレベルと対応

リスクレベル		取るべき措置
H (High)	高い	許容できない。更なる安全対策を講じなければならない。
M (Medium)	中程度	原則として許容できない。更なる安全対策が可能かどうかを検討し、現実的な対策が見つからない場合に限ってこれを許容する。
L (Low)	低い	許容できる。更なる安全対策は必ずしも必要でない。

比較したリスクマトリクスでは、使用する目的にあわせてそれぞれ異なったレベルが与えられている。なかでも可能性レベルが最小でかつ影響度レベルが最大の事象に対しては、Negligible から High まで様々なレベルが与えられている。本検討では、この部分のリスクレベルに「H」を設定したことが特徴である。水素スタンドにおいては、各種検知機、インターロックシステム、緊急遮断弁、安全弁、定期検査、従業員教育などの事故発生の可能性を低減する種々の安全対策が講じられ、実際それらは水素スタンドの安全性向上に大きく寄与している。しかし、本リスクマトリクスを用いた評価では、「極めて重大な災害」に該当する想定事故シナリオのリスクを許容できるレベルまで低減するためには、それら可能性を低減する安全対策のみでは不十分であり、影響度を低減する安全対策が不可欠となる。もっとも、水素スタンドのように装置内にハザード（高圧水素ガス）が内在するプロセス装置では、本リスクマトリクスを適用した上でリスクを許容できるレベルに低減することは極めて困難である。にもかかわらず、このようなリスクマトリクスとしたのは、万一発生すれば取返しのつかない極めて重大な災害に至る事故シナリオに対しては、そのリスクを「確定的」[4]に取り扱うことが望ましいと考えたからである。すなわち、本リスクマトリクスは、単に可能性低減策のみで満足するのではなく、事故要因排除および影響度低減によるリスクの低減策を（仮に実現可能な対策が結果として見つからないとしても）必ず検討せねばならないようにしむけている。

4.3. 影響度レベルと可能性レベル

4.3.1. 影響度レベル

影響度の評価対象としては、人的影響、設備的影響、環境影響、経済的影響などが考えられる。本検討においては、これらを以下のように取り扱うものとした。(表 4.3.1-1)

人的影響は、最も重要視すべき影響である。そこで、水素スタンド外の人的影響(周辺の住民・歩行者)に加え、水素スタンド内の人的影響(顧客・従業員)についても評価するものとした。一方、スタンド内の顧客・従業員は水素スタンドの受益者であるのに対して、スタンド外の周辺住民・歩行者は水素スタンドから直接の便益を受けていない。したがって、周辺住民・歩行者に対する安全性は、顧客・従業員に対するそれ以上に確保されるべきものと考え、必要に応じてスタンド内外の人的影響に対して差を付けることとした。ただし、人が死亡するという事態は、回復可能な怪我とは厳然たる区別をするべきであり、ひとりも複数人死亡も同様に許容できるものではないと考え、死亡人数によってレベルを分けないこととした。

設備的影響に関しては、水素スタンド外の隣接家屋等への影響を評価するものとした。水素スタンド内の設備に対する影響については、そのリスクは事業者が自らの責任で対応すべきものと考え、評価対象としなかった。

環境影響については、水素スタンドにおいて取り扱われる水素の特性を考慮して評価を行なわなかった。

経済的影響とは、破損設備の復旧費用、営業停止期間中の機会損失など、事故時に水素スタンド運営事業者が被る経済的損失影響である。これらのリスクについては事業者が自らの責任で対応すべきものと考え、本検討では評価の対象としなかった。

表 4.3.1-1 影響度レベルの定義

影響度レベル		人的影響	設備的影響
I	極めて 重大な災害	周辺住民, 歩行者の死亡災害 (「敷地外で死亡者」と同意)	敷地外の隣接建屋が全壊する程度の 極めて重大な災害
II	重大な災害	顧客, 従業員の死亡災害 (「敷地内で死亡者」と同意)	敷地外の隣接建屋が半壊する程度の 重大な災害
III	中規模災害	(周辺住民, 歩行者, 顧客, 従業員 を問わず,) 入院が必要な重傷災害	敷地外の隣接建屋の窓ガラスは大小に 関わらず壊れ, 窓枠にも被害が及ぶ程 度の中規模災害
IV	小規模災害	(周辺住民, 歩行者, 顧客, 従業員 を問わず,) 通院を伴う休業災害	敷地外の隣接建屋一部の窓ガラスが破 損する程度の小規模災害
V	軽微な災害	(周辺住民, 歩行者, 顧客, 従業員 を問わず,) 通院を伴わない軽微な 災害	敷地外の隣接建屋に影響なし

【影響度レベルと爆風圧、火炎長の関係】

事故シナリオにおける爆風圧と火炎長による影響度を評価するしきい値(ハームクライテリア)として、文献等を参考に表 4.3.1-2 に示す値を設定した。

爆風圧による設備的影響と人的影響については関係する文献[5,6]を参考にしきい値を決めた。ヒトに対する影響度を示すデータは少ないなか、ヒトひとりが死亡にいたることの重大さと水素スタ

ンドに求められる高い安全性を考慮して1%のヒトが肺水腫により死亡する爆風圧 100kPa 以上を「重大な災害」および「極めて重大な災害」に設定した。

火炎長による設備的影響については、火炎が隣接する建物に到達するかどうかの視点から敷地境界までの距離を使用した。火炎長による人的被害は、おもに敷地内にいる人間のやけどの程度を考慮して設定した。

表 4.3.1-2 影響度レベルと爆風圧、火炎長の関係

影響度レベル		人的影響		設備的影響	
		爆風圧 (kPa)	火炎長 (m)	爆風圧 (kPa)	火炎長 (m)
I	極めて重大な災害	100 以上	6 以上	34 以上	6 以上
II	重大な災害	100 以上	2~6	6.9~34	—
III	中規模災害	16~100	1~2	3.4~6.9	—
IV	小規模災害	2~16	0.3~1	1.0~3.4	—
V	軽微な災害	2 未満	0.3 未満	1 未満	6 未満

【Sandia National Laboratories の Harm Criteria】

ここで、参考のために米国 DOE のファンドを受けた Sandia National Laboratories が提案しているハームクライテリアと比較する。一般にヒトに対するハームクライテリアのデータが少ないなか、Sandia では（原爆投下後の）広島・長崎のデータを使っていると口頭で説明があった[7]。本研究のクライテリア（表 4.3.1-2）と比較すると数値に差があるものの、オーダーはよく一致している。SNL の考え方の要点と SNL のハームクライテリアを以下に示す。

- ・ 爆風圧の影響は、直接的・間接的にヒトに影響を与える。
- ・ 直接的影響でもっとも大きいものは、爆風圧による圧力上昇である。
- ・ 間接的影響は、爆発物と建造物からの飛散物とビルの倒壊を含む

表 4.3.1-3 Sandia National Laboratories のハームクライテリア

Peak Overpressure	Effects on Structures and People
70 – 200 psig (483 – 1380kPa)	Immediate blast fatalities 爆風圧による即死
30 – 35 psig (207 – 241.5kPa)	99% fatality from lung hemorrhage 肺の大量出血による死亡の可能性 99%
20 – 25 psig (138 – 172.5kPa)	50% fatality from lung hemorrhage 肺の大量出血による死亡の可能性 50%
12 – 15 psig (82.8 – 103.5kPa)	Complete structural collapse 構造物が完全に崩壊する Threshold of lung hemorrhage 肺の大量出血による死亡のしきい値
7 - 10 psig (48.3 – 69kPa)	100% fatality from flying objects 飛散物により死に至る可能性 100%
2.5 – 5 psig (17.25 – 34.5kPa)	Heavy damage to equipment and structures 設備や構造物に重大な損傷 50% probability of serious wounds from flying objects 飛散物による重傷の可能性 50%

	1% death from lung hemorrhage 肺の大量出血による死亡の可能性 1%
0.5 – 1 psig (3.45 – 6.9kPa)	Glass damage, injury from flying glass ガラスが割れる。飛散したガラスで怪我

1psig = 6894.76Pa = 6.9kPa

4.3.2. 可能性レベル

事故シナリオの発生可能性を定量的に評価するためには、材料や機器の故障率データベース等の値を使って1年あたりの事故発生確率を求める。しかし、現時点で水素スタンドに関するこれらのデータは質的にも量的にも不十分である。そこで本検討では、定性的な評価を行なうことを前提に表4.3.2-1に示す可能性レベルを設定した。

定性的な評価で人間が判断できる限界は、1E-2/year程度と考えられ1E-3/yearのレベルは「ゼロではないが限りなくゼロに近い」という程度の意味となる。定性的な評価を行なう場合、それ以下の可能性を評価しても意味がないため評価しないこととした。したがって、可能性はあるが「ほとんど起こりえない」可能性レベルを数千年に1回程度の可能性とし、以降10倍ずつ可能性を高めて4段階のレベルとした。

表 4.3.2-1 可能性レベルの定義

可能性レベル	説明
A ほとんど起こりえない	可能性はあるが、その可能性はきわめて小さい。 目安として、数千年に1回程度、若しくはそれ以下。
B 起こりにくい	設備の一生において起こりにくいと考えられる。 目安として数百年に1回程度。
C 可能性がある	設備の一生において1回程度は考えられる。 目安として数十年に1回程度
D 十分起こりえる	設備の一生において複数回考えられる。 目安として数年に1回程度、若しくはそれ以上。

4.4. リスク算定における影響度評価

事故シナリオごとのリスクの大きさを算定しリスクを評価するためには、事故シナリオごとの影響度の大きさと可能性の高さを定量的又は定性的に数値化する。ここでは影響度の大きさを算定することを影響度評価と呼び、以下の考え方で評価を行った。

4.4.1. 影響度評価における考え方

水素が漏えいした場合、着火して爆発するケースと噴出火炎になるケースが考えられる。水素スタンドの事故シナリオにおいて、着火の要因やタイミングによって爆発と火炎のどちらになるかは正確に決めることができない。そこで、爆発時の爆風圧による影響度と噴出火炎の影響度の両方のレベルを求めた。そして、影響度の大きい方（厳しい方）がその事故シナリオの影響度である定義した。

影響度評価においては、実験データや文献に記載されたデータを使用することを基本とした。しかし、それができない場合は、常に最悪を想定して保守的に評価することとした。

(1) 着火確率・ヒトと建物の存在確率・漏えい口からの距離

着火エネルギーが小さく静電気でも容易に着火する水素の特性を考慮して、水素漏えいが発生した場合は、必ず着火し爆発または噴出火炎を形成すると想定した。すなわち、着火確率は1として評価した。噴出火炎については、高圧水素の大きな運動量によって、着火源が吹き飛ばされて着火・保炎しないケースも想定できるが、保守的に考えて必ず着火し保炎するとした。

ある事故シナリオが発生して、爆発または噴出火炎が発生したとき、影響を受ける範囲内にヒトが存在する場合とそうでない場合では被害の大きさが異なる。影響度評価では、水素スタンド敷地内のどこで爆発が起こったとしても、ヒトと建物の存在確率を1とした。

影響度を算定する対象の位置は、敷地内と敷地外の二ヶ所とした。敷地内とは、水素漏えい部（開口部）から1mの距離とし、敷地外とは、水素漏えい部から6m離れた位置で評価することとした。6mとは類似した圧縮天然ガススタンド（CNGスタンド）や液化石油ガススタンド（LPGスタンド）の離隔距離を参考に定義した。リスクアセスメントにおいて安全対策を実施した後、安全が十分でない場合は、この6mを延長し、影響度を再評価する。ここで、敷地内の設備は水素スタンドオーナーの所有物であるため、事故発生時に影響を被る部分は自己責任と考え、事故による影響度を考慮せず、敷地外の設備のみ評価した。以上をまとめると表4.4.1-1となる。

表 4.4.1-1 事故シナリオごとに評価する影響度

	敷地内（1m ポイント）		敷地外（6m ポイント）	
	設備への影響	ヒトへの影響	設備への影響	ヒトへの影響
爆風圧（kPa）	×考慮せず	○評価	○評価	○評価
火炎長（m）	×考慮せず	○評価	○評価	○評価

水素漏えい時に着火する確率：1

水素漏えい時にヒトと建物が存在する確率：1

(2) 水素漏えい量（圧縮水素）

漏えいした水素による影響度を評価するためには、水素漏えい量を正しく見積もる必要がある。事故シナリオでは代表開口径を定めたが、実際の開口部はいびつな形状になるため抵抗や損失によって漏えい量は異なることが予想される。しかし、検討では想定できる最大の影響度をもって保守的な評

価を行なうために、開口部は円形で抵抗やノズル損失等がなく理論流量が漏えいすると仮定した。実際の実験においても水素漏えい量が理論流量とほぼ等しいことが確かめられている。ここで、理論流量は理想気体の等エントロピ過程に基づいて算出した[8]。

(3) 水素漏洩量 (液体水素)

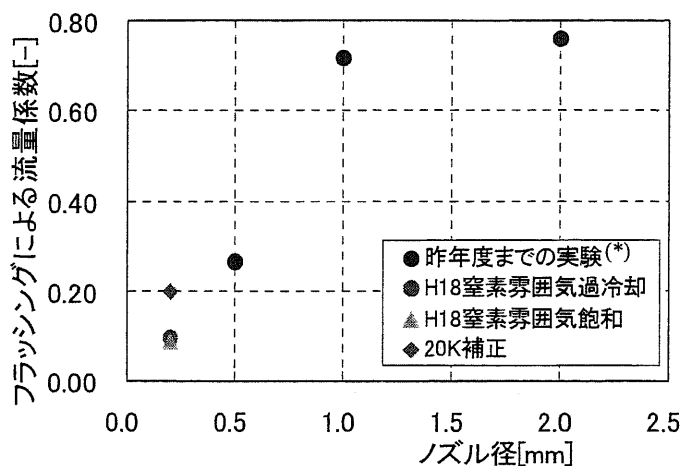
①液体水素の流量係数

圧縮水素スタンドの検討では、実験で求めた水素漏洩量が理論流量とほぼ等しいため、圧力低下等による損失がなく理論流量が漏えいすると仮定した。しかし、液体水素を開口部から漏洩させる実験の結果、開口径が小さい場合には、開口部周りの壁面などからの入熱の影響により、液体水素の流量が著しく低下することが確かめられた。つまり、開口部から液体水素が理論流量漏洩すると仮定することは、影響度評価が過度に安全側になる恐れがあることが分かった。

そこで、液体水素の漏洩量について検討した。開口部を通過する液体水素には、圧力低下による損失と、開口部で液体水素が蒸発して開口部を塞ぐ損失があると考えた。圧縮水素スタンドの検討では、圧力低下による損失はないものとしていることから、後者の液体水素が蒸発して開口部を塞ぐ損失だけを考慮する必要がある。表 4.4.1-2 に要素試験での圧損推定による流量予測値と、実測データを比較した。ここで、試験で用いたノズルにも圧力低下による損失があり、またノズル長さや径の関係から圧力低下による損失が一定ではないため、単に理論値と実測値を比較しただけでは液体水素の蒸発によって開口部を塞ぐ損失を分離できない。そこで、各試験において、(実測値) / (圧力低下による損失を考慮した予測値) の比を算出した。この値は近似的に圧力低下による損失が 0 となり、蒸発によって開口部を塞ぐ損失による流量係数と考える事ができる。これを「流量係数」と呼び、開口径に応じた理論流量に流量係数をかけたものを液体水素漏洩量とした。流量係数をノズル径に対してプロットしたグラフを図 4.4.1-1 に示す[9]。

表 4.4.1-2 流量予測値と実測結果

差圧[MPa]		0.1	0.2	0.3	平均
φ 0.5	予測値(q'/q_0)	0.71	0.71	0.71	0.71
	実測	0.11	0.21	0.19	0.17
	実測/予測(q/q_0)=流量係数	0.15	0.29	0.27	0.24
φ 1.0	予測値(q'/q_0)	0.78	0.78	0.78	0.78
	実測	0.51	0.52	0.55	0.53
	実測/予測(q/q_0)=流量係数	0.66	0.68	0.72	0.69
φ 2.0	予測値(q'/q_0)	0.80	0.80	0.80	0.80
	実測	0.57	—	0.61	0.59
	実測/予測(q/q_0)=流量係数	0.71	—	0.76	0.74



(*)過冷却:H17年度データ

図 4.4.1-1 ノズル径（開口径）に対する流量係数のグラフ

図 4.4.1-1 に示すように、三菱重工業(株)の実験では開口径 0.2mm に対する流量係数は 0.2 以下であるが、本研究では安全性を考慮して開口径 0.5mm のケースと同じ 0.25 を利用することとした。リスク評価で使用した流量係数を表 4.4.1-3 に示す。

表 4.4.1-3 リスク評価で使用した開口径と流量係数の表

開口径 (mmΦ)	0.2	0.5	1.0	2.0	12.3	14.0
流量係数	0.25	0.25	0.7	0.8	0.8	0.8

②液体水素のインベントリー

ある事故シナリオでは、トリガー現象がきっかけとなり、漏えいプロセスパターンに沿って放出口から水素が漏えいする。このとき、事故に対する対応が迅速であれば、漏えいする水素量が少なく、着火、爆発時の影響度も小さい。しかし対応が遅ればその逆となる。つまり、事故シナリオにおける水素漏えい量は漏えい時間に依存する。一方、昼間の事故であれば水素スタンドの係員による迅速な処置が期待できるが、夜間の漏えい事故を想定すると、係員による迅速な処置は期待できない。そこで、本研究においては、保守的に考えて、開口後水素漏えいする時間は無限大とし、漏えいが発生した場合には途中で停止作業がなされず、全量漏えいするものとした。ある事故シナリオによって漏えいする可能性のある最大の水素量をインベントリー（容積）とした。

なお、形の類似した貯槽や機器（蒸発器など）のインベントリーは大きい方のモデルで代表させた。例えば貯槽には液体水素貯槽（17,000L）と液体水素ローリーのタンク（11,000L）があるが、大きい方の液体水素貯槽の容積（17,000L）を貯槽のインベントリーとした。

③漏えい物の状態

液体水素は極低温で蒸発するため、開口部と水素放出口が異なる場合、開口部を通過する漏えい物の状態（温度、圧力、気体 or 液体）と水素放出口から漏えいする時の状態が異なる。さらに放出口通過時とその数秒後でも状態が異なる。ここでは、影響度を評価するための爆発・噴出火災に関係の深い放出口通過時の状態を「漏えい物の状態」とした。

例えば、安全弁取り付け部に開口が発生した場合（一重管部）、開口の大きさにも左右されるが開口発生時は水素ガスが漏えいする。しかし、長時間放置すると周りの配管が冷却されて最終的に液体

水素が噴出することも想定できる。水素ガスよりも液体水素の方が高密度であることから、漏えい時の影響度も大きい。したがって、液水とガスのどちらが漏えいするか分からない場合や液水が漏えいする可能性がすこしでもある場合は、安全面から保守的に考えて液体水素が漏えいするものとした。蒸発器出口配管や貯槽の高所につけられた配管など液水が漏えいする可能性のない部分は、水素ガスの状態で漏えいすると考えた。

(4) 爆風圧の影響度

漏えいした水素の爆発形態には、開口部から水素が噴出し大きな運動エネルギーを持ったまま周りの空気と混合しながら着火爆発する拡散爆発[10]と、滞留部などに水素が滞留し空気との予混合気を作った状態で着火爆発する予混合爆発[11, 12]が想定できる。事故シナリオごとの漏えい状況から、適当な爆発形態を選択し、それぞれの爆風圧を求めた後、影響度を評価した。圧縮水素漏えい時の爆風圧は 4.4.2 節、液体水素漏えい時の爆風圧は 4.4.4 節で詳しく述べる。

(5) 噴出火炎の影響度

水素の火炎は目に見えないため炎色反応によって可視化し、ビデオ撮影して火炎長を測定した。噴出火炎長は開口径と噴出圧力によって整理されている[10]。圧縮水素漏えい時の火炎長は 4.4.3 節、液体水素漏えい時の火炎長は 4.4.5 節で詳しく述べる。

(6) 開口径

水素の爆発と火炎による影響度の大きさは、開口部の大きさに依存する。開口部の大きさは、事故シナリオごとにピンホールから配管破断までさまざまである。3.4.2.節で述べたように、事故シナリオと開口径の大きさを整理し、パターン化を行なった。その結果、圧縮水素スタンドの開口径パターンは 10mm、1mm、0.2mm の 3 種類、液体水素スタンドの開口径パターンは 14mm、1mm、0.2mm、0mm に分類しこれらを使って影響度を評価することとした。

4.4.2. 爆風圧の影響度評価（圧縮水素）

爆風圧の影響度評価においては、前述のように拡散爆発と予混合爆発をベースに評価した。

(1) 拡散爆発

圧力 40MPa の水素が漏えいし拡散爆発が発生した場合の爆風圧は、岡林らが正確に測定している[13]。横軸に測定点、縦軸に爆風圧をプロットした図 4.4.2-1 から、40MPa、開口径 1mm の場合、1m ポイントで 600Pa、6m ポイントで 100Pa である。

実験は圧力センサへ噴流が衝突することを避けるため、噴流中心軸から約 15 度ずらした位置に設置した。これを計算で補正すると、噴流中心での圧力は実測値の約 1.5 倍となることから[14]、40MPa、開口径 1mm の場合、それぞれに安全を見込んで 1m ポイントで 1000Pa、6m ポイントで 200Pa とした。

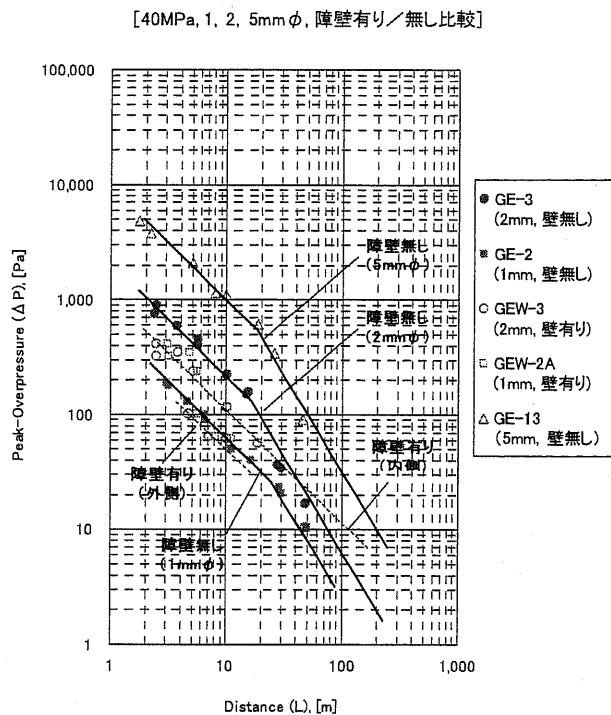


図 4.4.2-1 爆風圧と測定点との関係

圧力 80MPa の水素がピンホールから漏えいし、拡散爆発が発生した場合の実験データは、現時点で入手することができない。そこで、入手可能な圧力 40MPa の水素漏えい実験データを使って推定することとした。

爆風圧は、着火時における水素予混合気の量、着火タイミング、乱流の強さなどによって異なる。しかし、本検討では圧力 40MPa を超える水素の爆風圧は、40MPa 以下と連続的に一致すると仮定して簡易的に外挿する。もちろん、今後、実験を行い正確なデータに更新する必要がある。

岡林らは、着火時における水素噴出流量と最大過圧の関係について、広い実験条件にわたり整理した結果を図 4.4.2-2 のようにまとめている。この報告によると、着火時における水素流量と最大爆風圧は、グラフ上でほぼ比例の関係でよく整理できることが示されている。等エントロピ変化を仮定した理論流量は、圧力と断面積に比例する。開口径が同じ場合、圧力 80MPa の水素流量は、40MPa の 2 倍であることから、爆風圧も 2 倍大きくなると推定できる。したがって、80MPa、開口径 1mm の場合、1m ポイントで 2000Pa、6m ポイントで 400Pa であると算定した。

なお、実在ガスの場合は圧縮係数が 1.0 以下のため、実際の漏えい量は理論流量よりも少なくなり、爆風圧も小さくなると思われる。算定した爆風圧は、安全側の評価と考えている。

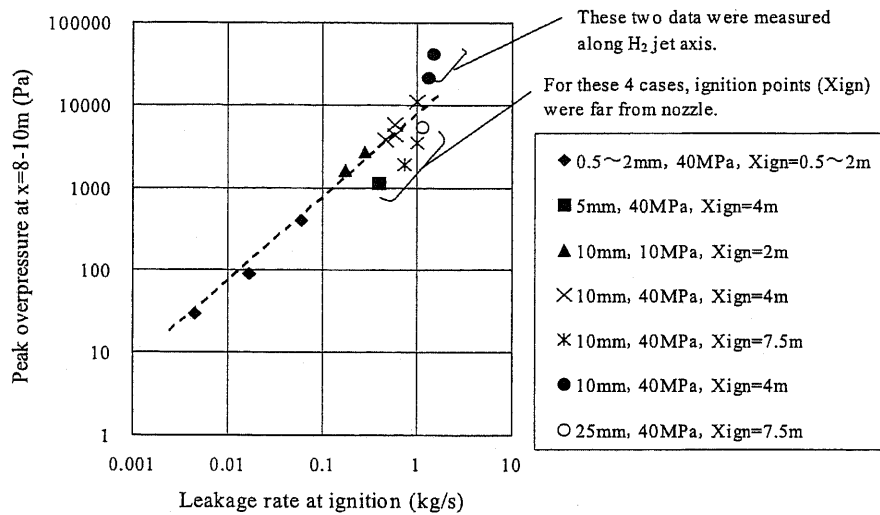


図 4.4.2-2 漏えい流量と爆風圧の関係

(2) 予混合爆発

漏えいした水素が空気と混合し、最も大きな爆発力を発生させる量論混合比（約 30%）で着火、爆発したと想定し、そのときの爆風圧を計算によって求めた。使用した実験式は以下のとおり[12]。

均一濃度 37m³（水素量 11.1m³）、開放空間の水素爆発で観測された爆風圧からの実験式

$$\frac{P}{P_0} = 0.28 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-0.95} \quad \text{式①}$$

均一濃度 300m³（水素量 90m³）、開放空間の水素爆発で観測された爆風圧からの実験式

$$\frac{P}{P_0} = 0.132 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-0.97} \quad \text{式②}$$

当該報告書では、混合気体積 5.2m³、37 m³、300 m³規模の 3 種類の実験と爆風圧データの整理が行なわれているが、上の 2 式の連続性については記述されていない。そこで、式①と式②を切り替えて用いることとした。切り替えのしきい値としては、安全を考慮して少ない水素量でも爆風圧が大きくなるように考えた。

均一濃度 66.7 m³（水素量 20 m³）未満は式①

均一濃度 66.7 m³（水素量 20 m³）以上は式② を利用して爆風圧を求めた。

ここで水素スタンドは、他の可燃性のガスを取り扱う事業所と同様に、安全対策として漏えいした水素が滞留しない構造とすることが法令で定められるべきである。つまり、漏えいした水素が水素スタンドのどこかに滞留し、空気と混合して量論混合比になり爆発するという事故シナリオは想定しにくく非現実的であるといえる。そこで、当予混合爆発の実験式は、事故シナリオが拡散爆発の条件にまったく当てはまらない場合および漏えい量が限定的な場合に限って使用することとした。

4.4.3. 噴出火炎の影響度評価（圧縮水素）

噴出火炎の影響度については、火炎の長さをベースに評価することとした。輻射熱の影響を考慮する方法も想定されたが、水素火炎と輻射熱の関係および輻射熱がヒトに及ぼす影響のデータが不十分であったため、火炎長さを採用した。

高圧水素が形成する火炎長さについては、三菱重工業㈱が精力的にデータを取得している。武野らは、開口径 0.12mm から 10mm の条件で、水平方向に噴出したガスの火炎長 L_f に関して実験データを整理した[15]。その結果を図 4.4.3-1 に示す。検討の結果求められた実験式は

$$L_f / d = 411.2P^{0.455}$$

$$r_{f\max} / d = 73.9P^{0.521} \quad P : [\text{MPa}]$$

チョーク条件を超えた圧力 $P > 0.3\text{MPa}$ では、火炎長 L_f は口径 d に比例し、また圧力のほぼ 0.5 条で増加する事が確かめられた。これにより火炎が形成された場合の火炎長を予測する事ができる。 L_f と $r_{f\max}$ は以下のように示されている。

$$L_f / d = 399.2P^{0.5}$$

$$r_{f\max} / d = 71.6P^{0.48} \quad P : [\text{MPa}]$$

火炎長も拡散爆発と同様に 80MPa の正確なデータが不足している。そこで、この式を使って、80MPa の水素が 1mm のピンホールから漏洩した場合の火炎長はを外挿する。すると、 $P = 80[\text{MPa}]$, $d = 1[\text{mm}]$ のとき、 $L_f = 3.6[\text{m}]$, $r_{f\max} = 0.59[\text{m}]$ を得た。

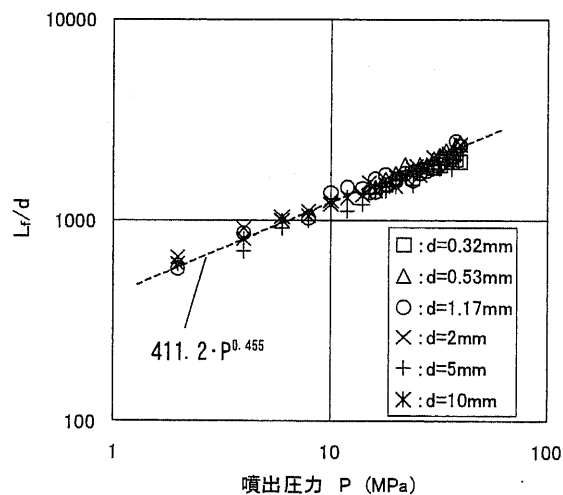


図 4.4.3-1 噴出圧力と火炎スケール（ノズル径で無次元化）の関係

4.4.4 爆風圧の影響度評価（液体水素）

液体水素の爆発形態も水素ガスと同様に拡散爆発と予混合爆発の2種類が想定できる。事故シナリオにある漏えい状況に最も近い爆発形態で影響度を評価することを基本とした。ただし、必ずしもすべての事故シナリオの条件に合う爆発データがそろっているわけではないことから、以下の考え方をベースに爆風圧を評価した。

(1) 拡散爆発

開口部から想定圧力（0.4MPa）で液体水素が噴出し、着火・爆発した場合の爆風圧を実験とシミュレーションから求めた。着火タイミングによって爆風圧が異なることが知られているが、爆風圧が最大となる漏えい直後の着火タイミングを採用した。図 4.4.4-1 に着火点からの距離における最大加圧の比較、図 4.4.4-2 に開口径 1mm の場合の着火点からの距離と爆風圧の関係を示す[9]。

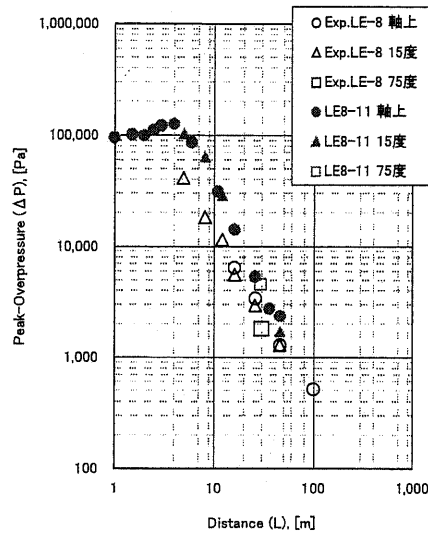


図 4.4.4-1 着火点からの距離における最大過圧の実験，解析比較
(着火点 $x=4\text{m}$, $z=1\text{m}$, $F_c=2.5$, $T_c=20$, $14\text{mm}\phi$, 0.4MPa , 非定常 5 秒間漏洩)

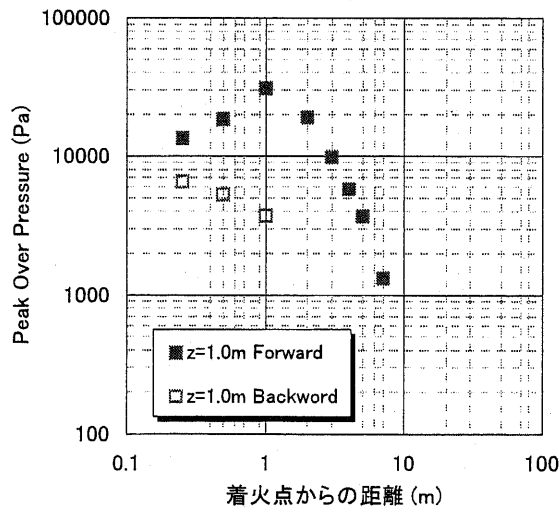


図 4.4.4-1 着火点からの距離と爆風圧の関係
($d=1\text{mm}$, $P=0.4\text{MPa}$, 連続漏洩)

4.4.5. 噴出火炎の影響度評価（液体水素）

水素の火炎は目に見えないため炎色反応によって可視化し、ビデオ撮影して火炎長を測定した。実験の結果、開口径 14mm の場合、噴出火炎長は 10m、開口径 1.0mm の場合、噴出火炎長は 1.7m、開口径 0.2mm の場合、噴出火炎は発生しないことが確かめられた。これは、開口径が小さい場合、漏えいする水素量が少ないため着火前に拡散してしまうためと考えられる[9]。

4.4.6. 圧縮水素と液体水素の影響度の比較、考察

同じ開口径の開口部を圧縮水素が通過する場合と液体水素が通過する場合、その密度差から液体水素の方が大量に通過すると予想される。しかし、液体水素は流量係数（開口径 1mmφ の場合 0.7）を考慮する上、低温の圧縮水素は密度が高い。同じ開口径の開口部を液体水素で通過する場合と開口部の直前で気化し、開口部を低温の水素ガスが通過する場合では通過量に大きな差がないのではないかと考えた。

検討の結果、流量係数を考慮した場合でも液体水素の方が圧縮水素よりも開口部の通過量が多いため、爆風圧、噴出火炎長が大きくなる。したがって、液体水素スタンドにおける影響度評価において、開口部を液体水素、圧縮水素のどちらかの状態で通過する可能性がある場合は、影響度が大きくなる液体水素の状態を開口部を通過すると仮定した。ただし、1%濃度到達距離は、大きな開口（14mmφ）の場合、低温水素ガスの方が長くなる。

具体的な爆風圧と噴出火炎長を表 4.4.5-1 にまとめる。

表 4.4.5-1 開口径と水素の状態による爆風圧、火炎長の比較

開口	口径(mm)	状態	圧力(MPa)	流量係数	爆風圧(kPa)@6m	火炎長(m)	1%濃度到達距離(m)
大きな開口	10	GH2	40	1	150	25	-
	14	GH2	0.4	1	3	3.5	122
	14	LH2	0.4	0.8	90	10	56
小さな開口	1.0	GH2	40	1	0.2	2.5	26.7
		GH2	0.4	1	~0	0.3	8.7
		LH2	0.4	0.7	2	1.7	20
微小な開口	0.2	GH2	40	1	0.05未満	0.5	5.3
		GH2	0.4	1	-	-	1.7
		LH2	0.4	0.25	-	-	7.8

4.4.7. 凍傷、酸欠などの影響度（液体水素）

液体水素スタンドの配管等で開口が発生した場合、開口部から水素が漏洩して①爆発または、②噴出火炎を形成することが想定される。しかし、着火しなかった場合も想定すると、漏洩と同時に③液体水素を浴びて凍傷、④凍結した配管を触って凍傷、⑤液体水素（水素ガス）により酸欠、⑥可燃性の液体空気が可燃物に触れて火災発生、⑦飛散した真空弁が当たって怪我（二重管の場合のみ）など二次災害的な事故の発生が想定できる。ここでは、これらの①から⑦の事故について、代表的なケースを想定して影響度評価を比較した。

検討の結果、どのケースにおいても①爆発、②噴出火炎の影響度が他の③～⑦の影響度よりも大きいか同等であることが分かった。したがって、事故シナリオごとの影響度評価は、①爆発、②噴出火炎の2ケースで評価することとする。

なお、影響度を評価するための影響度レベルについて、①爆発時の爆風圧、②噴出火炎時の火炎長

は、圧縮水素スタンドの場合の影響度レベルの定義（表 4.3.1-1 および表 4.3.1-2）を利用し、⑥可燃性の液体空気が可燃物に触れて火災発生時の影響度は、同じく火災長の設備的被害と同等に評価した。その他の凍傷と酸欠については、以下の通り定義した。

表 4.4.7-1 影響度レベルの定義【液体水素による凍傷】

影響度レベル		人的影響
I	極めて 重大な災害	周辺住民、歩行者の死亡災害 （「敷地外で死亡者」と同意）
II	重大な災害	顧客、従業員の死亡災害 （「敷地内で死亡者」と同意）
III	中規模災害	（周辺住民、歩行者、顧客、従業員を問わず） 入院が必要な重傷災害
IV	小規模災害	（周辺住民、歩行者、顧客、従業員を問わず） 通院を伴う休業災害
V	軽微な災害	（周辺住民、歩行者、顧客、従業員を問わず） 通院を伴わない軽微な災害

表 4.4.7-2 影響度レベルの定義【液体水素が蒸発した水素ガスによる酸欠】

影響度レベル		人的影響	
		症 状	酸素濃度
I	極めて 重大な災害	周辺住民、歩行者の死亡災害 （ほぼ瞬間的に呼吸停止、6～8分で心臓停止）	6%以下
II	重大な災害	顧客、従業員の死亡災害 （ほぼ瞬間的に呼吸停止、6～8分で心臓停止）	6%以下
III	中規模災害	入院が必要な重傷災害 （判断力低下、精神不安定、意識不明、痙攣等）	6～12%
IV	小規模災害	通院を伴う休業災害 （脈拍、呼吸数増加、頭痛等）	12～16%
V	軽微な災害	通院を伴わない軽微な災害 （息が苦しく感じる程度）	16～21%

4.5. リスク算定における可能性評価

想定事故シナリオの発生可能性を定量的に評価するためには、材料や機器の故障率データベース等の値を使って1年あたりの事故発生確率を求める。しかし、現時点で水素スタンドに関するこれらのデータは質的にも量的にも不十分である。そこで本検討では、定性的な評価とした。

4.4.1.トリガー現象で示したように、本研究ではトリガー現象の発生する可能性（可能性レベル）が、当該事故シナリオの発生する可能性と等価であると仮定して可能性評価を行なうこととした。また、トリガー現象が発生した時の開口径は、トリガー現象ごとに同じであると仮定して影響度を評価した。つまり、各事故シナリオについて、そのトリガー現象が発生する可能性が事故シナリオの可能性レベルであるとした。このレベルを決める評価方法を以下に示す。また、評価結果を表 4.5-1 圧縮水素スタンドのトリガー現象、表 4.5-2 液体水素スタンドのトリガー現象に示す。

（1）類似の事故データベースの利用

既存のガソリンスタンドや高圧ガスを扱う工場等で類似の事故がある場合は、その事故件数から発生する確率を推定した。例えば、燃料電池自動車へ水素充てん中の誤発進によって充てんホースが引っぱられて切断されることや、ディスプレイ自体が引き倒される等の事故シナリオに対しては、ガソリンスタンドにおける同様の事故件数[16]を利用した。

（2）実験による推定

実験によって推定可能な場合は、できるだけ実験を行いその結果を反映した。例えば、ディスプレイホースに対し、ホースの屈曲、疲労試験等[17]を行い、その結果を反映させた。

（3）その他の評価

実験を行なうこと自体が困難な場合やこれまでの実績データが十分でない場合は、専門家の判断による定性的な評価とした。

表 4.5-1 圧縮水素スタンドのトリガー現象と可能性評価結果

分類	コード	トリガー現象	可能性評価	
劣化・故障	全般	G11-1	水素脆化(SUS)	D
		G11-2	水素脆化(SCM)	D
		G11-3	水素脆化(SNCM)	D
		G12	塩化物 SCC	C
		G13-1	外面腐食(炭素鋼)	D
		G13-2	腐食(SUS)	A
		G13-3	外面腐食(クロムモリブデン鋼)	D
		G13-4	内面腐食(炭素鋼)	C
		G13-5	内面腐食(クロムモリブデン鋼)	C
		G14	疲労(配管振動)	D
		G14-1	疲労(ダイヤフラム)	A
		G14-2	疲労(ブルドン管)	A
		G14-3	疲労(保護管)	C
		G15-1	ネジ緩み(静置部)	C
		G15-2	ネジ緩み(振動部)	D
		G15-3	フランジボルト緩み	C
		G16	溶接欠陥(ピンホール)	A
		G17	低温脆化(クロムモリブデン鋼)	D
		G18	内在欠陥	D
		G20	固着	D
		G21	異物噛み込み(弁類)	D
		G22	熱衝撃	D
	シール材	G30	継ぎ手シール材劣化	D
		G31	レセプタクル又はノズル・シール材劣化	D
		G33	シール面損傷	C
		G34	Oリング劣化	D
	弁	G41	グラウンド漏れ	D
		G42	シートリーク	D
		G43	自動弁動作不良(開かない)	D
		G44	自動弁動作不良(開→閉に勝手に動作)	D
		G45	自動弁動作不良(閉まらない)	D
		G46	自動弁動作不良(閉→開に勝手に動作)	D
		G47	調節弁開度大	D
		G48	調節弁開度小	D
G49		調節弁開度ホールド	D	
G50		手動弁作動不良(開かない)	D	
G51		手動弁作動不良(閉まらない)	D	
G52	逆止弁作動不良(開かない)	D		
G53	過流防止弁作動不良(開かない)	D		
計器類	G60	圧力指示計指示過大	C	
	G61	圧力指示計指示過小	C	
	G62	圧力指示計指示ホールド	C	
	G63	流量計チューブ疲労	C	
	G64	流量計指示過小	C	
	G65	流量計指示ホールド	C	
	G66	流量計指示過大	C	
	G67	温度計指示過大	C	

		G68	温度計指示過小	C
		G69	温度計指示ホールド	C
	安全弁	G70	安全弁スプリングへたり	D
		G71	安全弁スピンドル折損	D
	フィルター	G75	フィルター詰り	D
		G76	フィルターメッシュ損傷	D
	ディスペンサー	G80	ホースからの水素透過	D
		G81	ホース疲労	C
		G82	ホース磨耗	D
		G83	ディスペンサーとホース接続部の緩み	C
		G84	充填ノズルとホース接続部の緩み	D
		G85	ノズル磨耗	C
		G86	ノズル接続部への異物噛み込み	D
		G87	緊急離脱カブラーとホース接続部の緩み	C
		G88	緊急離脱カブラー作動不良（勝手に離脱）	D
		G89	ホース劣化（硬化）	D
		G90	ノズルロック機構損傷	D
		G91	かしめ部抜け	D
		G92	水滴または氷によるエロージョン	D
		水素圧縮機	G101	熱交換器能力低下
	G102		圧縮機停止	D
	G103		圧縮機シリンダー弁不良	D
	G104		圧縮機シリンダーからクランクケース側への水素漏れ	D
	G105		停止しない	D
	G106		勝手に停止	D
	G107		勝手に起動	D
	G120		交換熱量減少	D
	G121		交換熱量増加	D
	G122		内部リーク	D
	改質装置	G130	スタンド配管圧力損失大	D
		G151	改質装置供給流量増加	C
G152		改質装置供給流量低下	C	
G153		改質装置供給圧力上昇	C	
G154		改質装置供給圧力低下	D	
G155		改質装置供給水素温度上昇	D	
G156		改質装置供給水素温度低下	D	
ヒューマンファクター	G157	水分量増加	A	
	G301	バルブ誤操作、いたづら操作	D	
	G304	オフサイトフレキチューブ取付け不良	D	
	G305	圧縮機誤起動	B	
	G306	圧縮機誤停止	B	
	G310	露出配管踏みつけ	D	
	G311	トレンチ蓋落とし	D	
	G320	暴走車両飛込み	A	
	G321	充填車両誤発進	A	
	G322	オフサイトローリー誤発進	A	
	G330	充填ホース折り曲げ（いたづら）	C	
G331	充填ホース傷つけ（いたづら）	C		

	G350	35と70MPa車両を同時に接続した	D
	G351	35MPa車両を70MPaノズルに接続した	A
	G360	プレクール設備による凍傷	D
	G361	プレクール設備熱交換器による過冷却	D
天災	G401	地震	C
	G402	外気温低下	D
	G403	強風	D
	G404	落雷	A
	G405	外気温上昇	D
その他	G501	火災(2次災害)	C
	G502	過充填	D
	G503	直射日光	D
	G504	水素スタンド設備の火災(漏洩水素の火災)	B
	G505	クレーン倒壊	A
	G506	ヘリ/航空機墜落	A
	G507	急速充電	A
改造モデル特有	G601	35MPa対応蓄圧器圧力上昇	D
	G602	35MPa対応蓄圧器圧力低下	D
	G603	35MPa対応蓄圧器温度上昇	D
	G604	圧力脈動	D
	G605	70MPa対応圧縮機運転中に35MPa車両へ充填	D

表 4.5-2 液体水素スタンドのトリガー現象と可能性評価結果

分類	コード	トリガー現象	可能性評価	
劣化・故障	全般	L11-2	低温脆化(20~120K、1MPa 以下)	C
		L11-3	水素脆化(150~250K、1MPa 以下)	D
		L12	塩化物 SCC	C
		L13-1	腐食(貯槽外槽/配管の外管)	C
		L13-2	腐食(貯槽内槽/配管の内管)	A
		L15-1	ネジ緩み(静置部)	C
		L15-3	フランジボルト緩み	C
		L16	溶接欠陥(ピンホール)	A
		L17	溶接部の低温脆化(溶接部)	C
	シール材	L30	継ぎ手シール材劣化	D
		L31	レセプタクル又はノズル・シール材劣化	D
		L32	バイオネット・シール材劣化	D
		L33	シール面損傷	C
	断熱用充てん材	L35	断熱用充てん材劣化(脱ガス)	D
	弁	L41	グランド漏れ	D
		L42	シートリーク	D
		L43	自動弁動作不良(開かない)	D
		L44	自動弁動作不良(開→閉に勝手に動作)	D
		L45	自動弁動作不良(閉まらない)	D
		L46	自動弁動作不良(閉→開に勝手に動作)	D
	計器	L60	圧力指示計指示過大	C
		L61	圧力指示計指示過小	C
		L62	圧力指示計指示ホールド	C
	安全弁	L70	安全弁スプリングへたり	D
		L71	安全弁スピンドル折損	D
	ディスペンサー	L81	ホース疲労	D
	ヒューマンファクター	L300	バルブ誤操作、いたずら操作(閉/開)	D
L302		継ぎ手クランプ取り付け不良、外れ	B	
L303		継ぎ手クランプ取り付け不良、漏えい	B	
L305		液水ローリーホースのパージ不良	C	
L310		露出配管踏みつけ	D	
L311		トレンチ蓋落とし	D	
L320		暴走車両飛込み	A	
L321		充填車両誤発進	A	
L322		液水ローリー誤発進	A	
L330		充填ホース折り曲げ(いたずら)	C	
L331		充填ホース傷つけ(いたずら)	C	
天災	L401	地震による配管破断	C	
	L402	地震による配管亀裂	C	
	L403	強風	D	
	L404	落雷	A	
	L405	外気温上昇	D	
その他	L501	火災(2次災害)	C	
	L502	過充填	D	
	L503	直射日光	D	
	L505	クレーン倒壊	A	
	L506	ヘリ/航空機墜落	A	

4.6 他のリスクマトリクスとの比較、考察

本研究で使用するリスクマトリクスは、4.2.節で示した。このリスクマトリクスを定義するにあたり、参考にしたリスクマトリクス法の概要ならびに他の研究機関が水素インフラに対してリスクアセスメントを行なう場合に使用したリスクマトリクスを比較検討する。

4.6.1. リスクマトリクス法

(1) リスク算定とリスク評価

研究対象である水素スタンドのリスクがどのくらいの大きさであるかを算出することを「リスクの算定」と定義した。また、事故シナリオの発生の可能性（起りやすさ）と発生した時の影響度（被害のひどさ）の組合せがリスクの定義である。つまり、危険な事故シナリオが起きる可能性と起きた時の影響度を見出し、その組合せからリスクの大きさを決めるのが「リスク算定」である。その結果、許容できるリスクか否か、安全対策を施すべきかどうかを判断することを「リスク評価」という。例えば保険会社などは被害の大きさを金額で算定し、発生の可能性との組合せは通常掛け算を用いる。すると影響度（被害額）と可能性（確率）の掛け算のためリスクは金額として定量的に評価できる。

しかし、安全の場面ではそう単純ではない。リスクの大きさは主観的に決める方法から、客観性を持たせるためにいろいろな計算方法が提案されている。また、可能性（確率）の数値は事故例というデータがないと議論することができない。今後普及が期待される水素スタンドの事故例の統計データは、現時点ではほとんどない。一方、影響度（被害の大きさ）も金額に直せばよいという考え方もあるが、実は人命を金額で評価することはできない。人によっても場面によっても異なる。さらに、事故の大きさと金額は必ずしも比例していない。したがって、事故の大きさは簡単に金額では評価できず、厳密な数値化は非常に難しいと言える。

(2) リスクマトリクス法

リスクを客観的に定量化、数量化することが望ましい。確率も被害の大きさも定量化でき、組合せも掛け算や足し算という演算で定義できれば、リスクを客観的に定量化できるはずである。しかし、前述のようにリスクの算定にはどうしてもあいまいさがつきまとう。

そこで現実的には、事故シナリオが発生する可能性と影響度をそれぞれいくつかのレベルに分けて、それぞれを縦軸と横軸にするマトリクスを作り、その各マス目に対応するリスクの大きさもいくつかのレベルに分けて評価する。これを「リスクマトリクス法」[18]と言う。リスクマトリクス法は、厳密には定量的ではないが、大きさの順番は理解できるといった半定量的、半定性的な手法と言える。以下にリスクマトリクス法の例を示す。

①加算法

縦軸と横軸の影響度レベルと可能性レベルの数値を加算して、その大きさからリスクの大きさを決める方法である。影響度レベルと可能性レベルの例を表 4.6.1-1 に、リスクレベルの例（1）を表 4.6.1-2 に示し、これらを使ったリスクマトリクス（1）を表 4.6.1-3 に示す。

このリスクマトリクス（1）は一見妥当性のある評価基準のように見える。しかし、表 4.6.1-4 に示したリスクレベルの例（2）を使って書き直すと、表 4.6.1-5 のリスクマトリクス（2）になる。つまり、代表的な加算法を使ったリスクマトリクスであっても容易に主観が入り込む余地があることに注意したい。

表 4.6.1-1 影響度レベルと可能性レベルの例 ()カッコ内数字は点数法で利用

レベル	数値	説明
影響度レベル	4 (100)	破局的な災害
	3 (30)	重大な災害
	2 (10)	軽微な災害
	1 (1)	無視可能な災害
可能性レベル	6 (80)	しばしば
	5 (50)	かなり
	4 (30)	ときどき
	3 (10)	あまり起らない
	2 (5)	起りそうにない
	1 (1)	信じられない

表 4.6.1-2 リスクレベルの例 (1)

レベル	数値	説明
リスクレベル	4	8~10
	3	7
	2	5~6
	1	4以下

表 4.6.1-3 加算法によるリスクマトリクス (1)

可能性 影響度	1 信じられない	2 起りそうにない	3 あまり起らない	4 ときどき	5 かなり	6 しばしば
4 破局的	2	2	3	4	4	4
3 重大	1	2	2	3	4	4
2 軽微	1	1	2	2	3	4
1 無視可	1	1	1	2	2	3

表 4.6.1-4 リスクレベルの例 (2)

レベル	数値	説明
リスクレベル	4	10
	3	7~9
	2	3~6
	1	2

表 4.6.1-5 加算法によるリスクマトリクス (2)

可能性 影響度	1 信じられない	2 起りそうにない	3 あまり起らない	4 ときどき	5 かなり	6 しばしば
4 破局的	2	2	3	3	3	4
3 重大	2	2	2	3	3	3
2 軽微	2	2	2	2	3	3
1 無視可	1	2	2	2	2	3

②乗算法

縦軸と横軸の影響度レベルと可能性レベルの数値を乗算して、その大きさからリスクの大きさを決める方法である。影響度レベルと可能性レベルの例は表 4.6.1-1、リスクレベルの例は表 4.6.1-6 を使用して作成した乗算法によるリスクマトリクスを表 4.6.1-7 に示す。

表 4.6.1-6 リスクレベルの例

レベル	数値	説明
リスクレベル	4	13~24
	3	7~12
	2	4~6
	1	3以下

表 4.6.1-7 乗算法によるリスクマトリクス

可能性 影響度	1 信じられない	2 起りそうにない	3 あまり起らない	4 ときどき	5 かなり	6 しばしば
4 破局的	2	3	3	4	4	4
3 重大	1	2	3	3	4	4
2 軽微	1	2	2	3	3	3
1 無視可	1	1	1	2	2	2

③点数法

影響度レベルと可能性レベルにそれぞれ点数をつけて、その点数を足し算（又は掛け算）することでマトリクスのマス目の点数を求める。その結果に基づいて何点から何点はこのリスクレベルであると言うように点数の大きさからリスクをレベル分けする方法。点数の間隔が一定ではなく重み付けしているところがポイントである。影響度レベルと可能性レベルの例は表 4.6.1-1、リスクレベルの例は表 4.6.1-8 を使用して作成した点数法によるリスクマトリクスを表 4.6.1-9 に示す。

表 4.6.1-8 リスクレベルの例

レベル	数値	説明
リスクレベル	4	101~180
	3	51~100
	2	31~50
	1	1~30

表 4.6.1-9 点数法によるリスクマトリクス

可能性 影響度	1 信じられない (1)	2 起りそうにない (5)	3 あまり起らない (10)	4 ときどき (30)	5 かなり (50)	6 しばしば (80)
4 破局的 (100)	4	4	4	4	4	4
3 重大 (30)	2	2	2	3	3	4
2 軽微 (10)	1	1	1	2	3	3
1 無視可 (1)	1	1	1	2	3	3

(3) リスクレベルの決め方の議論

リスクの大きさを示すリスクレベル（上記の 1~4、または H、M、L）をどのように決めるかというのは大きな問題である。合理的で、客観的でだれもが納得がいく方法を探すことが望まれるが、実際には難しい。前述の加算法、乗算法、重み付けを行なった点数法などの結果をベースに関係者が経験的に主観で決めたり、話し合いを行ってリスクレベルを決めるなどが行われている。

一方、リスクマトリクスの中には種類の異なるいくつかの不確かさが存在する。

- ①危険側事象の発生する確率や頻度のデータが不足していて正確に決まらないという不確かさ。
- ②各大きさのレベルの境界の不確かさやレベルにつけられた数値や言葉の意味の不確かさ。
- ③確率の値が決まっても実際に事故がいつ起きるか分からないという不確かさ。

こうした不確かさが存在しているため、正確に、誰もが納得できるリスクレベルを定義することは非常に難しい。

本研究では、上記の議論を踏まえて日・米・欧の類似した研究で使用しているリスクマトリクスを参考にして、本研究のリスクマトリクスを定義した。リスクマトリクス内のしきい値は、各種文献を元に提案し、最終的に専門家からなる委員会で説明、議論を行なった上で合意を得ている。従って、本研究で使用するリスクマトリクス（表 4.2-1）は一定の客観性を持ったクライテリアであると考えられる。

ただし、水素スタンドを受け入れる側の周辺住民の意見は、本リスクマトリクスに反映されていないことから、水素スタンドに関するリスク受容性の観点における議論の余地が残っている。

4.6.2. WE-NETにおけるリスクマトリクス（日本）

WE-NET[3]では、消防庁特殊防災課が取りまとめた「コンビナート防災策定指針（新）」で定義されたリスクマトリクスを利用している。リスクマトリクスと対策の優先度を表 4.6.2-1 に示す。

表 4.6.2-1 WE-NET のリスクマトリクスと対策の優先度

影響度						リスク	
極大		B	A	AA	AA	最優先	
大		C	B	A	A	優先度大	
中		D	C	B	B	優先度中	
小		D	D	C	C	優先度小	
					D	対策不要	
		極小	小	中	大		

表 4.6.2-2 影響度レベル

影響度	被害状況
極大	コンビナート外に重大な影響 (水素スタンド外に物的、人的被害が発生)
大	コンビナート外に多少の影響 (水素スタンド全体が破壊される(準全損)。ただし、スタンド内にその被害は限られる。)
中	コンビナート内に限る (水素スタンドの一部装置が破壊される)
小	災害発生施設周辺に限る (部品取替えレベルで復旧可能。メンテナンスレベル)

表 4.6.2-3 可能性レベル（頻度）

発生頻度	オーダー
大	10 ⁻⁴ /年のオーダー以上
中	10 ⁻⁵ /年のオーダー
小	10 ⁻⁶ /年のオーダー
極小	10 ⁻⁷ /年のオーダー以下

WE-NET の報告書では、API580 と消防庁のリスクマトリクスを比較して考察している。API のリスクマトリクスによるリスク評価手法は、可能性評価（発生頻度）の要因として 6 項目（機器の数量、損傷メカニズム、検査の適切さ、機器の状態、プロセスの状態、機器の設計）、ならびに影響度評価の項目として 6 項目（着火性、放出性、気化の可能性、拡大性、技術的な防護手段、損害の程度）を規定し、これらのチェックリストから求められる評価ポイントによって、発生頻度と影響度を特定するものである。検討対象となる水素スタンドは、災害の発生頻度、運転実績、検査データなどが不足しているため、API のチェックリストを完成させることができない。そこで、発生頻度及び影響度をポイント化せず、ある誤差を含む数値（数値に上限と下限をもたせる）を定性的な表現で

マトリクスに落とし込むことができる消防庁のリスクマトリクスを用いることにした。

影響度評価レベルにおいては、消防庁のリスクマトリクスは対象がコンビナートであるため、これを水素スタンドに読み替えている。このとき、一般的なコンビナートの敷地面積と水素スタンドの敷地面積ではコンビナートの方がはるかに大きいと考えられ、水素スタンドに対してかなり厳しい評価となるが、その点に関する考察は述べられていない。(表 4.6.2-2)

可能性評価レベルにおいては、オランダにおける個人リスクと社会リスクの考え方、ならびにアメリカ国防総省の空軍が使用するために開発された MIL-STD-882-C 評価手順法を引用し、ある事象が起らないと考えることのできる「据え切りレベル」は 10^{-6} ~ 10^{-7} 年程度であることがいえるとしている。さらに、消防庁のリスクマトリクスに示す「極小」(表 4.6.2-3) の発生頻度 10^{-7} 年は、「起りえない」という定義をあてはめると欧米諸国のその定義からも逸脱しない。水素スタンドのリスク評価においては、この数値を「許容限界値」と定義している。

4.6.3. DOE におけるリスクマトリクス (アメリカ)

DOE (U. S. Department of Energy) [1]では、水素、燃料電池、水素インフラテクノロジープログラムが "Guidance for Safety Aspects of Proposed Hydrogen Projects" を 2003 年 7 月に発表した。このドキュメントは、DOE から水素、燃料電池に関するプロジェクトに対して、安全対策の必要性を説明したものである。DOE はすべての水素に関するプロジェクトに対して、十分な安全対策を行うことを求めている。その概要は、以下の safety assessment を完了することを求めている。

1. Identification of Safety Vulnerabilities (ISV)
2. Brief example of a safety assessment
3. Detailed outline of the Risk mitigation Plan
4. Description of how safety performance will be measured and monitored
5. Detailed outline for the Communication plan

DOE が示したリスクマトリクス (Risk Binning Matrix) を表 4.6.3-1 に示す。

表 4.6.3-1 DOE のリスクマトリクス

	Beyond extremely unlikely	Extremely unlikely	Unlikely	Anticipated
High	10	7	4	1
Moderate		8	5	2
Low		9	6	3
Negligible	12	11		

High risk
Moderate risk
Low risk
Negligible risk

表 4.6.3-2 影響度レベル

影響度	住民への影響	資産/運営への影響
High	即死、重体—生命の危機、生涯身体障害	Damage > \$50 million 1週間以上の営業停止ロス
Moderate	重傷、一定期間身体障害、入院が必要	\$100,000 < damage < \$50 million 車両破壊、建物が崩壊、 1週間以下の営業停止ロス
Low	軽傷、入院不要	Damage =< \$100,000 修理可能な車両故障、長時間運転停止、 周囲へ軽微な影響
Negligible	無視できる程度の怪我	車両へ軽微な損傷、短時間運転停止、 周囲へ影響なし

表 4.6.3-3 可能性レベル

記号	説明	可能性レベル
A	可能性がある	$>10^{-2}$ /年
U	起こりそうもない	$10^{-4} < f < 10^{-2}$ /年
EU	ほとんど起こりそうにない	$10^{-6} < f < 10^{-4}$ /年
BEU	想像を超えるほど起こりそうにない	$=< 10^{-6}$ /年

リスクマトリクスは4×4でリスクレベルは4段階である。なかでも Negligible risk（無視できる程度のリスク）の範囲が広いことが特徴である。

影響度評価において Negligible の定義は、住民に対して無視できる程度の怪我、車両への軽微な損傷、短時間の運転停止となっている。住民に少なからず怪我をさせたり車両に傷を付けたとしても、“無視できる程度”に評価している点がアメリカ的と言える。日本の感覚では想像できない。また、ヒトに対する影響として、水素スタンド内の従業員や顧客、水素スタンド外部の住民、通行人などを区分けしていないところも特徴である。

可能性評価において BEU (Beyond Extremely Unlikely 想像を超えるほど起こりそうにない) のレベルは、 10^{-6} /年以下に定義している。

4.6.4. EHIP におけるリスクマトリクス（欧州）

EIHP (European Integrated Hydrogen Project) [2]では、導入初期段階における水素スタンドや水素設備を対象にして、リスクアセスメント手法やリスク許容クライテリアの検討が行われた。EIHP では、水素スタンドと燃料電池自動車の安全な開発、導入、そして安全な毎日の運転を目指している。そして、リスクベースアプローチを使って法規制との適合性について検討がなされている。

定量的リスク許容クライテリア (Quantitative risk acceptance criteria) は、企業リスクまたはセイフティーマネジメントシステムを作成する上で極めて重要である。そして定量的リスク解析 (Quantitative risk analysis; QRA) を実施する前にこのクライテリアは完成していなければならないとしている。

EIHP が示したリスクアクセプタンスカーブを図 4.6.4-1 に示す。EIHP ではこのラインで囲まれた範囲が ALARP (As Low As Reasonable Practical) であると定義した。もしコストベネフィットを考えて現実的であれば、リスクを下げるようにすべきである。この上のラインよりも上の事故シナ

リオについては、リスク低減対策を行わなければならないとしている。

すべての事故シナリオに対して定量的に影響度と可能性を評価することは非常に難しい。そこで、QRA の代わりに粗いマトリクスを使って簡易的にリスクアセスメントを行う方法が提案されていて、Rapid Risk Ranking (RRR)と呼ばれている。この RRR マトリクスは、図 4.6.4-1 の FN カーブをベースにしている。水素スタンドのリスク評価用に提案された RRR マトリクスを表 4.6.4-1 に示す。

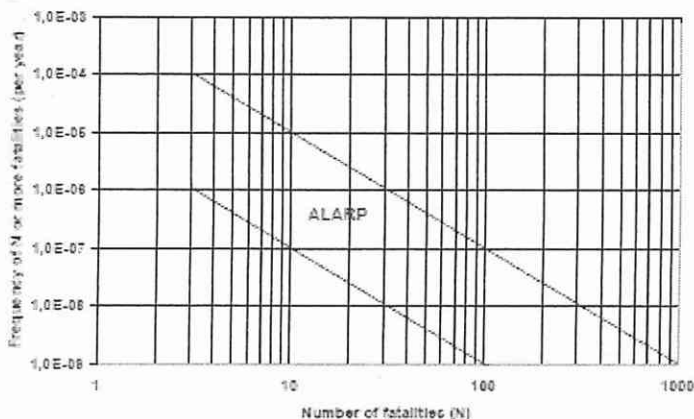


図 4.6.4-1 社会リスクカーブ、FN カーブと ALARP 範囲

表 4.6.4-1 EHIP のリスクマトリクス (RRR)

		Probability (per year)				
		A <0.001	B 0.01-0.001	C 0.1-0.01	D 1-0.1	E 10-1
Consequence severity	1 Catastrophic	H	H	H	H	H
	2 Severe loss	M	H	H	H	H
	3 Major damage	M	M	H	H	H
	4 Damage	L	L	M	M	H
	5 Minor damage	L	L	L	L	M

表 4.6.4-2 リスクレベルの説明 (RRR)

Level	Level Name	Description
H	High	High risk, not acceptable. Further analysis should be performed to give a better estimate of the risk. If this analysis still shows unacceptable or medium risk redesign or other changes should be introduced to reduce the criticality. リスクが高く受け入れることはできない。リスク低減のために更なる検討がなされるべきである。もし、この解析が受け入れ不可能を示す場合は、この重要項目のリスクを下げるためにミディアムリスクを再検討するか、他の変更を導入するべきである。
M	Medium	The risk may be acceptable but redesign or other changes should be considered if reasonably practical. Further analysis should be performed to give a better estimate of the risk. When assessing the need of remedial actions, the number of events falling into this risk level should be taken into consideration to assure that the risk is as low as reasonable practical (ALARP). リスクは受け入れられるかもしれない。しかし、もし現実的に可能であれば、再検討か他の変更が検討されるべきである。リスク低減のために更なる検討がなされるべきである。改善策の必要性の検討において、このリスクレベルになったイベントの数は、リスクが ALARP (現実的に受け入れ可能)であることが確実であることが斟酌されるべきである。
L	Low	The risk is low and further risk reducing measures are not necessary. リスクは低い。更なるリスク低減対策は、必ずしも必要でない。

表 4.6.4-3 影響度レベル (RRR)

Level	Description	Definition		
		People 人的影響	Environment 環境影響	Material 設備的影響
1	CATASTROPHIC 壊滅的な災害	Several fatalities 数名死亡	Time for restitution of ecological resource such as recreation areas, ground water > 5 years 土壌、地下水等の生態系の回復に5年以上必要	Total loss of station and major structural damages outside station area ステーション全壊および、ステーション外へ重大な設備的影響
2	SEVERE LOSS 過酷な損失	One fatality 一名死亡	Time for restitution of ecological resource 2-5 years 生態系の回復に2-5年必要	Loss of main part of station. Production interrupted for months ステーションの主要部分が損失し、運転を1ヶ月休止
3	MAJOR DAMAGE 重大な災害	Permanent disability Prolonged hospital treatment 永久的な身体障害 長期間の入院または通院	Time for restitution of ecological resource < 2 years 生態系の回復が2年以下	Considerable structural damage Production interrupted for weeks 構造物に少なからぬ損失があり、運転を数週間休止
4	DAMAGE 災害	Medical treatment Lost time injury 治療、通院傷害	Local environmental damage of short duration < 1 month 環境影響が局地的で短期間、回復に1ヶ月以下	Minor structural damage Minor production influence 構造物に軽微な損失があり、運転に軽微な影響がある
5	MINOR DAMAGE 軽微な災害	Minor injury Annoyance Disturbance 軽微な怪我、迷惑、困惑	Minor environmental damage 環境影響が軽微	Minor material damage 軽微な設備的損失

表 4.6.4-4 可能性レベル (RRR)

Level	Description	Definition	Frequency of event occurrence
A	IMPROBABLE 起りそうにない	Possible, but may not be heard of, or maybe experienced world wide. 可能性はある。しかし話に聞かないかもしれない。または世界中では経験があるかもしれない。	About once per 1000 years or less 数1000年に1回程度。若しくはそれ以下
B	REMOTE 非常に少ない	Unlikely to occur during lifetime/operation of one filling station 1ステーションの一生で起りそうにない	About once per 100 years or less 数100年に1回程度。若しくはそれ以下
C	OCCASIONAL ときどき	Likely to occur during lifetime/operation of one fueling station 1ステーションの一生で起りそうである	About once per 10 years or less 数10年に1回程度。若しくはそれ以下
D	PROBABLY おそらく	May occur several times at the filling station 1ステーションで数回起るかもしれない	About once per year 1年に1回程度。
E	FREQUENT たびたび	Will occur frequently at the filling station 1ステーションでたびたび発生する	About 10 times per year or more 1年に数10回程度。若しくはそれ以上

リスクマトリクスは5×5である。FNカーブに比べれば明らかに粗いマトリクスである。しかし、WE-NETやDOEのマトリクス(4×4)との比較においては、細かく定義されているといえる。可能性が最小でも影響度が最大のシナリオについては、リスクHになっている。これはFNカーブの値から定義されたと思われる。

リスクレベルの説明において、MはALARRPの考え方にもとづいて、条件付で「リスクは受け入れられるかもしれない」(The risk may be acceptable.)としている。これは筆者が行った研究におけるマトリクスの定義との最大の違いである。

影響度レベルは 5 段階に分かれていて、それぞれヒト、環境、構造物を対象に規定している。前述の 2 つのリスクマトリクスに比べると完成度が高い。一方、RRR は簡易的なリスクアセスメントを目指しているものの、詳細な検討が求められるといえる。

可能性レベルも 5 段階に分かれている。説明と事故シナリオの発生頻度が示されている。EIHP の報告書にも書かれているように、水素スタンドとその設備に関する故障データが少ないなかでこれらのレベルを正しく評価することは難しい。

References

- [1] Guidance for Safety Aspects of Proposed Projects, U.S. Department of Energy, July 2003
- [2] Risk Acceptance Criteria for Hydrogen Refueling Stations, EIHP, 2003
- [3] 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) タスク 2 (安全対策に関する調査・研究) 成果報告書、2002
- [4] 杉浦澄:「たかがリスク, されどリスク」～確率的リスクと確定的リスクの取り扱い、第 33 回安全工学シンポジウム講演予稿集、p.110-113, 2003
- [5] 石油コンビナート防災アセスメント策定指針, 1994
- [6] 産業安全工学ハンドブック, p.623, 1989
- [7] IEA HIA Task19 Hydrogen Safety Expert Meeting, Oslo Norway, September 10-12, 2008
- [8] 深野徹: わかりたい人の流体力学 (II) P.199
- [9] NEDO 中間報告書「水素社会構築共通基盤整備事業—水素インフラ等に係る規制再点検及び標準化のための研究開発—水素インフラに関する安全技術研究」、H17-19、三菱重工業(株)、pp.476
- [10] 岡林一木、武野計二、千歳敬子他、「水素インフラに関する安全技術研究」、平成 15 年度～平成 16 年度成果報告書, 2004
- [11] 水素の爆発関連研究進捗状況連絡会におけるエネルギー総合工学研究所成果報告書, 2003
- [12] 平成 15 年度～平成 16 年度成果報告書 水素安全利用等基盤技術開発 水素に関する共通基盤技術開発「水素基礎物性の研究 (その 1)」
- [13] Kazuki Okabayashi, et. al., Safety technology for a hydrogen supply infrastructure, Final report from 2004 to 2005, p.127
- [14] Kazuki Okabayashi, et. al., Characteristics of Dispersion for Leakage of High-pressurized Hydrogen Gas and Liquid Hydrogen, In: Proceedings of the JPEC's annual meeting for announcing the technology development results 2004
- [15] Keiji Takeno, et. al., Experimental Study on Open Jet Diffusion Flame and Unconfined Explosion for Leaked High-pressurized Hydrogen, Journal of Japan Society for Safety Engineering, 44 No.6(2005), p.401
- [16] 危険物保安技術協会、危険物等事故関連技術情報データベース, 2005
- [17] 山田晴久他、「水素インフラに関する安全技術研究」、平成 15 年度～平成 16 年度成果報告書, 2004
- [18] よくわかるリスクアセスメント、pp.117、向殿政男著 中災防新書

第5章

水素スタンドに対する安全対策

第5章 水素スタンドに対する安全対策

5.1. 安全対策に対する基本的な考え方

水素スタンドで想定される事故シナリオに対し、リスクを低減するための安全対策は一つとは限らない。安全対策の考え方としては、有効性のある安全対策のうち表 5.1-1 の優先順位でより有効な安全対策を付加することに努めた。

高圧ガス設備から離隔距離をとることは、事故シナリオが発生した場合の爆風圧と噴出火炎の影響を低減するのに有効な対策である。安全の立場からは離隔距離が長いほうが影響度を低減できるが、水素スタンドを普及させる目的からは離隔距離が短いほうが水素スタンドをコンパクトに設計できるため有利である。この相反する要求に答えることが本研究におけるリスクアセスメントと安全対策検討の目的のひとつである。本研究では、水素スタンドの離隔距離として圧縮天然ガススタンド並みの6mを仮置きし、リスク評価と安全対策実施によってリスクを許容できるレベルまで低減させることを試みた。

表 5.1-1 安全対策の優先順位

優先順位	対策	内容
1	本質的対策	本質的に事故の発生そのものを防止する対策。本質的対策をとることができれば、懸念している想定事故は発生しえず、リスクをゼロにすることができる。最も有効な安全対策である。
2	影響度を低減する対策	危険な事象の大きさを低減することにより、想定事故の影響度を下げる対策。液体水素スタンドにおいて最も有効な影響度低減対策は、蓄圧器の容量を小さくしたり、分割することによって水素貯蔵量をできるだけ少なくすることである。
3	可能性低減する対策	想定事故が発生する可能性を低減する対策を言い、漏えい検知とインターロックシステム、安全弁、定期検査、従業員教育などが該当する。

5.2. 主な安全対策（35MPa 充てん対応水素スタンド）

35MPa 充てん対応水素スタンドを対象にリスクアセスメントを実施した結果、87 件の安全対策案を得た。これらは水素スタンドの安全を確保するうえで必要な安全対策である。表 5.2-1 に主な安全対策を示し、以下にその内容を説明する。なお、87 件の安全対策のリストは、Appendix 3. 安全対策リストに示す。

表 5.2-1 35MPa 充てん対応水素スタンドの主な安全対策

場所	安全対策
全般	高圧ガス設備に使用する材料 ねじ接合継手 敷地境界距離、火気離隔距離 防火壁または障壁の設置 定期的な検査
蓄圧器周辺	高圧ガス設備に使用する材料 地震対策 大量漏えい防止策 圧力上昇防止策 温度上昇防止策
圧縮機周辺	圧縮機からの飛散物防止策 圧縮機室内の滞留防止策 圧縮機出口の温度監視
ディスペンサー周辺	水素漏えい検知器、火炎検知器の設置 充てん流量の制限 誤発進防止対策（緊急離脱カプラ） 車両の衝突防止対策 充てんホースの保護

5.2.1. 水素スタンド全般

(1) 高圧ガス設備に使用する材料

水素は金属原子の隙間に入り込み水素脆化などを引き起こし金属材料の機械的性質に悪影響を及ぼすことが知られている。そこで、水素脆化に起因する（トリガー現象とする）事故シナリオに対する安全対策として、水素スタンドで使用する材料は水素脆化の影響を受けにくい材料を使用する必要がある。

水素雰囲気下における金属材料の材料特性のデータ収集は、複数の研究機関が実施している。中でも高圧ガス保安技術協会の報告書[1]では、高圧水素中における引張試験、疲労試験、疲労き裂進展試験の結果から、オーステナイト系ステンレス鋼である SUS316L が水素脆化に対し感受性の低い材料であると評価している。また、SUS316L が耐水素脆性に優れていることは、独立行政法人産業技術総合研究所 水素材料先端科学研究センター 福山誠司氏らによる高圧水素脆化表（表 5.2.1-1）[2]でも明らかである。したがって、高圧ガスが通る配管は SUS316L を使用することとした。これにより水素脆化や腐食による配管破断が発生する可能性は極めて低いといえる。

しかし、SUS316L は比較的柔らかく高価な材料であるため、用途によっては高圧水素用機器の材

料として不向きであるとの指摘もある。今後、耐水素脆性があり安価で高張力な材料検討が必要である。

表 5.2.1-1 産総研高圧水素脆化表

Ver. 2007.2.20

HGE	Material	H2 (MPa)	RRA	破断 ステージ	破断 モード
			H2/Ar		
Heavy HGE	SOM440(Q)	70	0.00	I	GB+QC
	SNCM439(Q)	20	0.00	I	GB+QC
	18Ni-Maraging(300)	20	0.00	I	GB
	HastelloyB2	70	0.03	II	GB+(BTG)
	SUS630(H900)	70	0.04	II	*
	SUS630(H1150)	70	0.16	II	*
	28Cr-1Mo	39	0.16	II	QC+C
	SUS631(Wire)	70	0.16	III	QC+(GB)
	SFNCM980S(QT833K)	70	0.17	II	QC+GB
	SUS329J1(A)	39	0.21	II	QC+C
	SUS304(Sen)	105	0.23	II	GB+SM
	SFNCM980D(QT833K)	70	0.25	II	QC+GB
	Inconel 750	70	0.26	II	BTG
	S80C	70	0.27	II	QC+C
	SOM440(N)	70	0.28	II	QC+C
	HastelloyC22	70	0.29	II	GB+(BTG)
	SUH3	39	0.29	III	QC
Fe-30Cr Alloy(A)	39	0.29	III	QC+C	
Moderate HGE	S35C	70	0.30	II	QC+GB
	19Cr-1Mo	39	0.30	III	*
	SNCM630	70	0.32	III	QC
	S55C	70	0.35	III	QC+C
	SUS304L	45	0.37	II	*
	SUS304(Wire/T)	70	0.38	III	SM
	SUS304	105	0.38	II	SM
	Inconel 718	70	0.39	II	BTG
	SUS304	70	0.40	II	SM
	MarM247LCDS(//)	20	0.42	II	BTG
	SOM440(QT873K)	70	0.48	II	QC+C
	SUS316(Sen)	105	0.48	II	SM+GB
	S15C	70	0.50	III	QC+C
	Udimet720	20	0.50	II	BTG
	SUY	70	0.53	III	QC+C
	IN100	20	0.58	II	BTG
	SOM440(A)	70	0.59	II	QC+C
	SWP(Wire)	70	0.60	III	QC
	SUS405	39	0.65	III	QC
	Ni201	70	0.71	III	BTG
2.25Cr-1Mo(A)	39	0.71	III	QC	
SUS316	105	0.71	III	SM	
SUS316LN	105	0.71	III	SM	
SUS316LN(Sen)	105	0.74	III	SM+GB	
Light HGE	Inconel 600	70	0.80	III	BTG
	SUS316(Wire)	70	0.96	III	D+(SM)
	SUS316L	105	0.98	FS	D+(SM)
Undetectable HGE	SUS310S(Sen)	105	0.99	No	D
	A6061-T6	70	0.99	No	D
	Incoloy 800H	70	0.99	No	D
	SUS310S	105	0.99	No	D
	SUH660	70	1.01	No	D
C9771	70	1.06	No	*	

(HGE : Hydrogen Gas Embrittlement. * : 未実施)

(2) 水素スタンド設置現場での溶接の問題点とねじ接合継手の採用

一般に配管継手部などは溶接接合をすることが望ましい。このとき安全面及び品質面から専門の工場における自動溶接が推奨される。一方、現場での溶接は、金属材料の組成変化、残留応力の発生等が懸念されるため好ましくない。このため、現場で接合の施工をせざるを得ない場合、溶接に代わる処置用法としてねじ接合継手を安全対策案とした(図 5.2.1-1)。ねじ接合継手を使用する必要がある箇所は、蓄圧器配管集合部やディスペンサー内部で、安全弁、圧力計、圧力リリーフ弁、逆支弁、遮断弁などが集中しており、検査、補修等でしばしば取り外すことが多い部分である。

なお、水素配管の溶接部に対し高圧水素がどの程度影響を及ぼすかについては、明らかになっていない。溶接部の大きさ、溶接の方法、温度、作業者の熟練度などケースごとに異なり一般化が難しいためである。今後の研究が期待される。

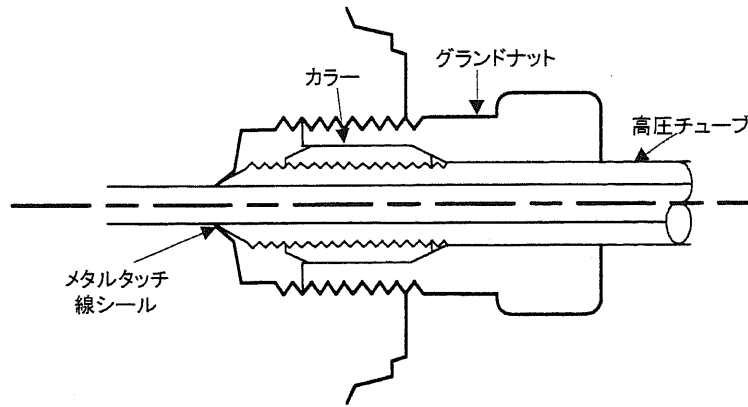


図 5.2.1-1 ねじ接合継手の例（コーン・スレッド形式）

（3）敷地境界距離と火気離隔距離

【敷地境界距離】高圧ガス保安法一般則第 7 条第 2 項第 2 号の規定で「高圧ガス設備は、その外面から当該事業所の敷地境界に対し 6m 以上の距離を有し、またはこれと同等以上の措置を講ずること。」とある。本論文では、この距離を敷地境界距離と呼ぶ。

5.1 節で述べたように、本研究では水素スタンドの敷地境界距離として圧縮天然ガススタンド並みの 6m を仮置きし、リスク評価をおこない安全対策を施すことによってリスクを低減した。つまり、リスクアセスメントの結果、敷地境界距離として 6m 以上の距離を確保することとした。図 5.2-2 に敷地境界距離の例を示す。6m という距離は他の一般的な高圧ガス設備の第一種保安距離（17m）よりも短い。設備を 40MPa 以下の水素スタンドに限定し、水素の特徴を考慮した上で必要な安全対策を実施しリスクを許容できる範囲まで低減している。具体的には、圧力 40MPa で 1mm の開口部から漏えいした水素に着火した場合、発生する爆風圧は 1kPa 未満、噴出火炎長は 2.5m であることから、6m の距離を有すれば敷地境界外で災害に至ることは無いと評価できる。なお、開口径を 1mm としたのは、前述したピンホールの代表的な開口径 0.2mm に対し、直径で 5 倍、水素漏えい量で 25 倍の安全率を考慮したためである。

【火気離隔距離】高圧ガス保安法一般則第 6 条第 1 項第 3 号の規定で「可燃性ガスの製造設備は、その外面から火気を取扱う施設に対し 8 メートル以上の距離を有し、又は当該製造設備から漏えいしたガスが当該火気を取り扱う施設に流動することを防止するための措置若しくは可燃性ガスが漏えいしたときに連動装置により直ちに使用中の火気を消すための措置を講ずること。」とある。本論文では、この距離を火気離隔距離と呼ぶ。

リスクアセスメントでは、事故シナリオが発生した場合の発生可能性と影響度の積としてリスクの大きさを求め、許容できるかどうかを判断し、必要に応じて安全対策を施す。逆に、発生した事故シナリオの影響度が十分小さければ、その事故シナリオは発生しても受け入れられるため、それ以上の安全対策は必要ないといえる。本研究では、水素スタンドにおける配管破断のような大規模な水素漏えいの事故シナリオに対しては、十分な安全対策を行い配管破断がほぼ起こりえないように安全対策を施した。しかし、配管継手部におけるピンホール漏えいやバルブのグランド漏れのような微小漏えいを完全になくすことは、技術的にも経済的にも非常に難しい上、影響度が小さいためリスクアセスメント上では受入れ可能である。

しかし、現在の高圧ガス保安法上では、微小漏えいした水素ガスに着火しないように火気離隔距離

を設定する必要がある。高圧ガス保安法では、漏えいによる着火を許容しないためである。したがって、火気離隔距離の検討はリスクアセスメントの研究とは本質的に異なるが、水素スタンドの安全性を議論するうえでは避けて通れないことから、本論文で取り上げることにする。

火気離隔距離の検討においては、開口径と漏えいした水素の濃度に着火するかどうかのポイントとなる。まず、開口径については、圧縮天然ガススタンドやLPGスタンドに関するこれまでの検討を参考に、ピンホールが開いた場合の代表的な開口径を0.2mmとした。詳しくは4.3.2節で述べた。次に、着火する範囲については、水素の爆発下限界濃度(4%)に安全率1/4をかけた水素1%濃度が到達する距離以上とした。すなわち従前の検討より漏えいした水素が拡散して濃度1%となる距離以上離すことによって、引火による災害を防いでいる。具体的には、開口部から40MPaの水素が漏えいした場合、水素の爆発下限界濃度(4%)に安全率1/4をかけた1%濃度の到達距離が5.3mであることを実験とシミュレーションで求めた[3]。これをベースに、火気を取扱う施設から6mの距離を確保すれば、水素に引火する心配はないと考えた。

リスクアセスメントの考え方を正とした場合、火気離隔距離を設定する必要はない。その上、火気離隔距離は水素の爆発下限界濃度に1/4の安全率をかけていることから、必要以上に安全増しの対策といえる。今後、水素スタンドの安全性と普及つまりリスクとベネフィットの観点から更なる議論が必要と考える。

(4) 防火壁または障壁の設置

水素スタンドには周囲(車両の出入口となる道路を除く)に高さ2m以上の防火壁と、敷地内部に障壁を設けている(図5.2.1-2)。周囲の防火壁は、水素スタンドが発災した場合に外部へ影響を及ぼすことを防止し、かつ近隣火災など外部からの影響を受けることを防いでいる。敷地内部の障壁は、水素スタンド内の圧縮機、蓄圧器の設置された設備エリアとディスペンサーが置かれた給ガスエリア間に設置するもので、万が一水素が漏えいした場合、敷地内にいるお客様への影響を最小限にするためである。なお、ここで言う防火壁と障壁は設置目的と強度等が異なる。

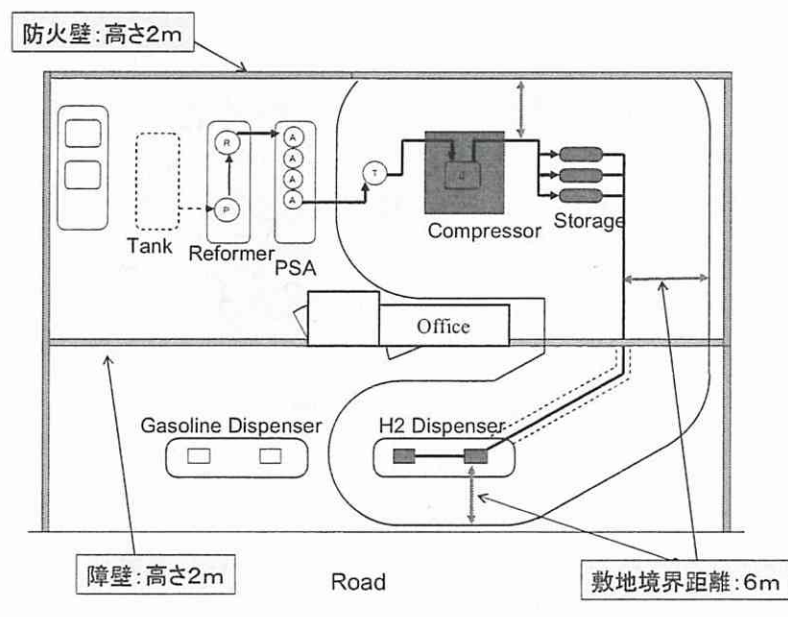


図 5.2.1-2 水素スタンドの敷地境界距離及び防火壁と障壁の例

(5) 定期的な検査

水素スタンド機器の安全性と健全性を担保するため、定期的な保安検査や自主検査を行なうことは、安全対策のひとつである。高圧ガス保安法では、1年に1度の保安検査と自主検査が規定されている。一般則第6条第2項第4号では「使用開始時及び使用終了時に当該製造設備の属する製造施設の異常の有無を点検するほか、一日に一回以上製造をする高圧ガスの種類及び製造設備の態様に応じ頻繁に製造設備の作動状況について点検し、異常のあるときは、当該設備の補修その他の危険を防止する措置を講じてすること。」と規定している。

さらに本研究では、毎朝、水素スタンドの営業開始前に使用する水素配管からの漏えいの有無を確認するため圧力保持試験を行なうことを提案した。これは、蓄圧器出口～配管～ディスペンサー内部配管～充てんホース間の圧力を上昇させて数分間保持し、その圧力変動によって漏えいを確認する試験を自動制御装置を使用して行なうこととした。この圧力保持試験によって微小な漏えいを早期に発見し、大量漏えいを未然に防ぐことが期待できる。

5.2.2. 蓄圧器周辺

水素スタンドでは、高圧ポンペ数本からなる蓄圧器を利用して水素を大量に保持している。蓄圧器に安全対策を施して水素を漏えいさせないことは当然であるが、万一漏えいしてしまったとしても、水素センサーや火炎検知器によって検知し、瞬時に遮断弁を閉止して水素の大量漏えいを防止する対策を行なっている。

(1) 蓄圧器に使用する材料

水素スタンドで使用する材料は、水素脆化の影響を受けにくい材料を使用する必要があることは先にも触れた。検討の結果、大量の水素を保持する蓄圧器は SUS316L 又は SCM435 を使用することとした。これにより水素脆化や腐食などによる蓄圧器からの水素の大量漏えいを防止している。

クロムモリブデン鋼の SCM435 は、ガスポンペの材料として一般的に利用されていて流通量も多い。低圧の水素ガス容器の材料として長年使用されている実績がある。しかし、SUS316L よりも水素脆化に対して感受性が高いことが知られている。そこで、高圧水素中における引張試験、疲労試験、疲労き裂進展試験、さらに遅れ破壊試験を実施した結果、SCM435 を使用した蓄圧器は、定期的な非破壊検査を行なうことによって健全性を確保できると評価された[4]。

なお、現時点で使用できる金属材料は上記の2種類にとどまっているが、これは他の金属材料の使用を否定しているのではなく、現時点で使用許可に値する十分なデータが揃っていないためである。今後、既存材料や新規材料について、必要なデータを収集し規制見直しに取り組むべきである。

参考のため、前述した高圧水素中の試験方法について簡単に説明する[5]。

①水素雰囲気下における引張試験及び疲労試験

水素雰囲気中で金属材料の引張試験を行なう。及び 20kN～50kN 程度の疲労試験機にオートクレーブ取り付けるか小型の圧力容器（ベローズ）を取り付けた試験片にて試験を実施する。（図 5.2.2-1）

②水素雰囲気下における疲労き裂進展試験

金属材料の強靭さを確認するため、金属ブロックに予き裂をつけた試験片により破壊靭性及び疲労き裂進展速度等の破壊靭性値を求める。（図 5.2.2-2）

③遅れ破壊試験

予めき裂をつけた金属ブロックにくさびを打ち込み、荷重を加えながら水素雰囲気中に長時間暴露させる。暴露後にき裂の進展長さを測定し、亀裂が進展しない荷重を算定する。(図 5.2.2-3)

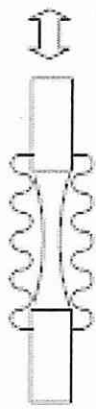


図 5.2.2-1 疲労試験

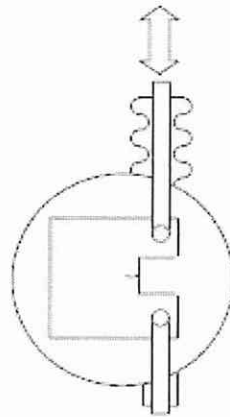


図 5.2.2-2 疲労き裂進展試験

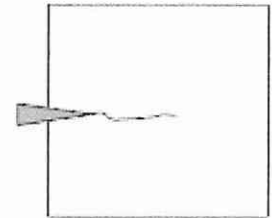
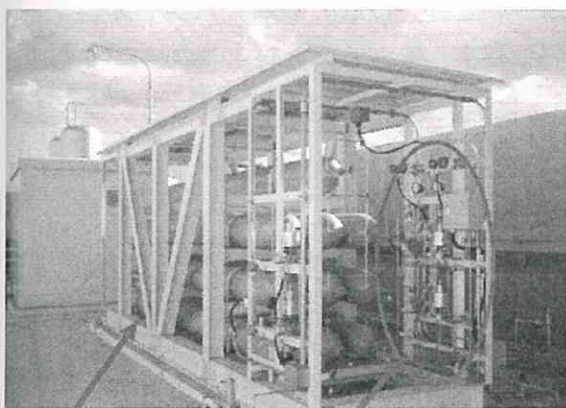


図 5.2.2-3 遅れ破壊試験

(2) 地震対策

欧米の一部の水素スタンドでは、地震がほとんど起こらないことから地震を想定していないものもあるが、日本において地震対策は避けて通ることが出来ない。そこでその対策として、蓄圧器は地盤調査を行なった強固な地盤面にアンカーボルトで固定することとした。また蓄圧器と遮断弁は同一のフレーム内に設置して、蓄圧器が傾くか仮に転倒した場合であっても確実に水素の漏えいを遮断できる構造にした。(図 5.2.2-4) さらに、地盤の振動を的確に検知する感振装置を取り付けて、地震発生時には水素スタンドの運転を自動的に停止する対策を行なった。



フレーム構造

緊急遮断弁、過流防止弁等の
同一フレーム内設置

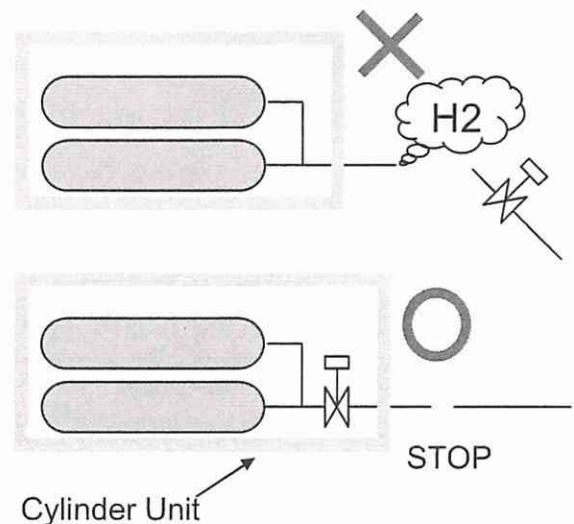


図 5.2.2-4 蓄圧器の地震対策 (左) と同一フレーム内設置効果イメージ (右)

(3) 大量漏えい防止策

蓄圧器から水素の大量漏えいを防止するため、蓄圧器出口には2以上の遮断弁を設置する。一つは検知システムで閉止する通常の遮断弁、もう一つは水素が漏えいした場合の圧力によって自動的に閉止する過流防止弁(図 5.2.2-5)とし、作動方式の異なる2種類の遮断弁を設置することで安全性を

より高めている。

また、蓄圧器入口やオフサイト型の場合の水素受入れラインに逆止弁を設置することで、逆流による水素の大量漏えいを防止している。

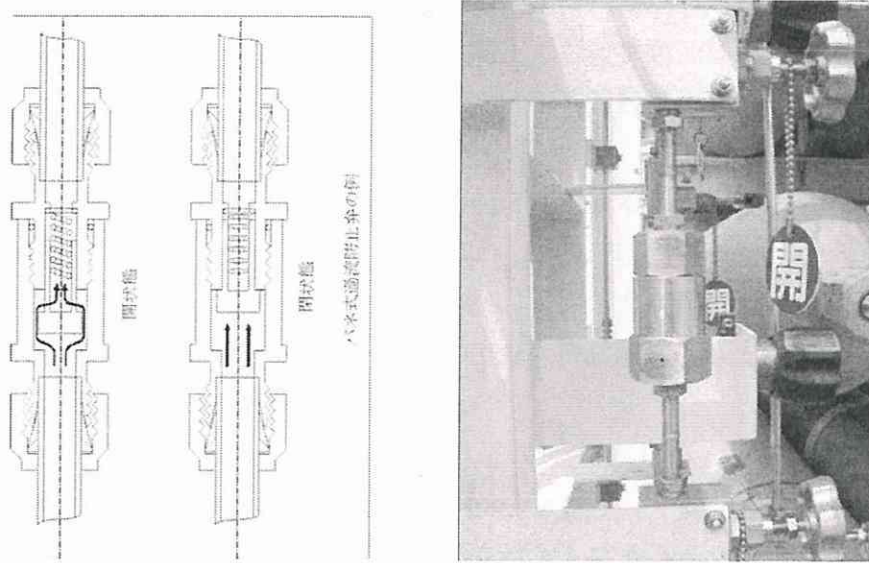


図 5.2.2-5 過流防止弁の構造図（左）と使用例（右）

過流防止弁を設置した場合、影響度がどの程度低減されるかについては岡林ら[6]が詳しく求めている。図 5.2.2-6 に三菱重工業株が実施した過流防止弁作動実験のイメージを示す。報告によると蓄圧器出口配管に過流防止弁を設置したケースで、過流防止弁よりも 15m 下流で配管破断が起った場合、過流防止弁の作動速度は数ミリ秒で確実に作動し、爆風圧は 15kPa 程度に低減される。(過流防止弁なしの場合 50kPa、@配管破断点から 6m の位置)。ここで、爆風圧の大きさは過流防止弁と配管破断が起った位置の間の配管内に残存する水素量に大きく依存する。つまり過流防止弁付近で配管破断が起った場合よりも、過流防止弁より下流側（ディスペンサー）付近で破断した場合の方が、配管内に存在する水素量が多いことから影響度が大きくなる。将来、極めて大きな水素スタンドができる場合は、配管破断対策を行うことに加えて、数十 m ごとに過流防止弁を設置することを検討する必要があるといえる。

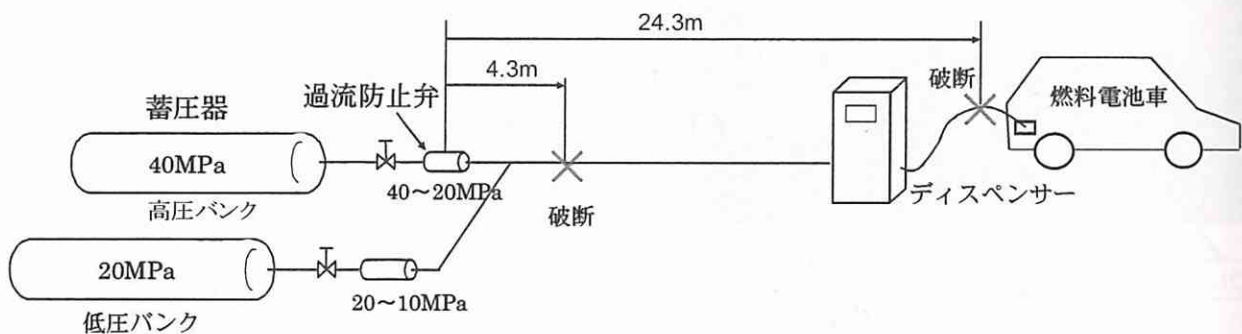


図 5.2.2-6 過流防止弁作動実験のイメージ

(4) 圧力上昇防止対策

水素スタンドの蓄圧器やその他の高圧ガス設備の圧力が想定した圧力（許容圧力）以上に上昇すると、継ぎ手部等の比較的弱い部分からの水素漏えいが想定される。さらに圧力が上昇した場合は、その機器本体が破壊してしまうかもしれない。こうした事故シナリオに対する安全対策として高圧ガス

設備には「経済産業大臣が定めるところにより圧力計を設け、かつ、当該設備内の圧力が許容圧力を超えた場合に直ちにその圧力を許容圧力以下に戻すことができる安全装置を設けること」とされ、安全弁の設置が義務付けられている。

さらに水素スタンドは市街地に設置されることを前提に、蓄圧器の圧力上昇時、安全弁が作動する前に自動的に圧力を低下させるための圧力リリーフ弁を設けた。これは安全弁が作動する時の条件によっては、大量の水素がベント放出口から放出されて水素の爆発下限界濃度範囲が水素スタンドの敷地境界を越える事故シナリオが想定されることから、安全弁が作動する前に安全な量の水素を放出し、蓄圧器の圧力を低下させるためである。

圧力リリーフ弁によって安全に放出できる水素量は、大気環境濃度の予測のためにしばしば利用される正規型ブルームモデルを使用して、敷地境界における水素濃度が爆発下限界の 1/4 である 1% となる放出量を求めた。さらに、この放出量を担保するため、等エントロピ流れを仮定した理論流量の式から流路の直径を求め、これと同等なオリフィスを設置することで安全な放出量を定めた。具体的には、ベント放出口と敷地境界までの距離が 6m の場合の放出量は $0.05\text{Nm}^3/\text{s}$ 、10m の場合は $0.123\text{Nm}^3/\text{s}$ である。圧力リリーフ弁の設置位置と写真を図 5.2.2-7 に示す。

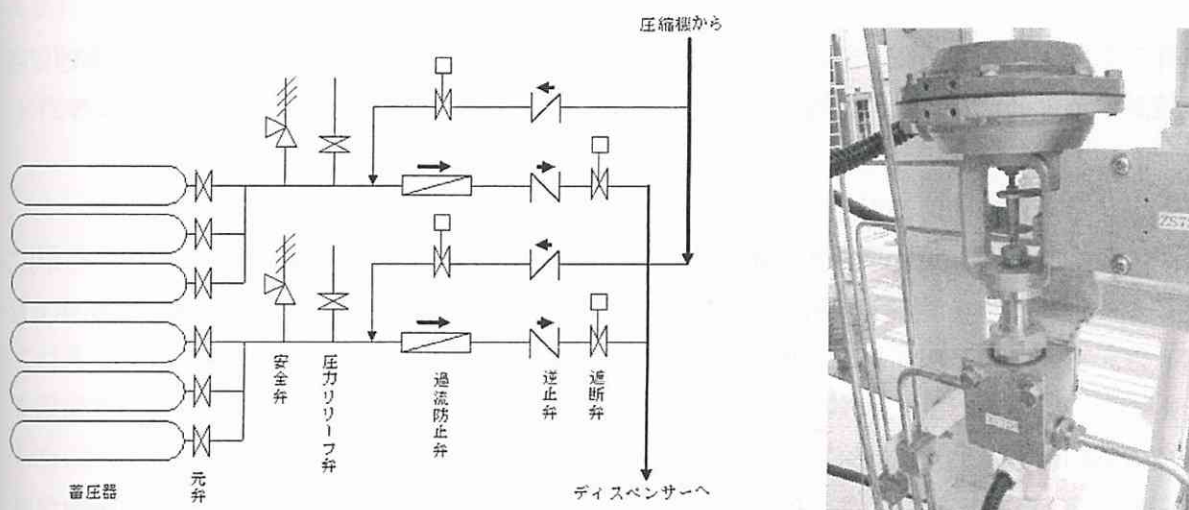


図 5.2.2-7 圧力リリーフ弁の設置位置と写真

(5) 温度上昇防止対策

火災や直射日光等によって蓄圧器本体の温度が上昇し、内部の水素圧力が上昇して漏えいにつながる事故シナリオが想定された。こうした事故シナリオに対する安全対策として以下を採用した。

水素スタンド近隣で火災が発生し、その輻射熱によって蓄圧器の温度が上昇する事故シナリオに対しては、「防火壁」で一定の温度上昇防止効果が見込める。さらに蓄圧器の表面の温度を常時監視し、輻射熱等による温度上昇を検知した場合は、水噴霧装置または散水装置により蓄圧器の「温度上昇を防止するための装置」を設置することとした。散水量はシミュレーションで求めた水量に加え、蓄圧器が横長であり散水のすべてが有効に噴霧されないケースも想定して安全サイドで設定した。また、オフサイト型水素スタンドの場合、蓄圧器にあたる水素トレーラーは移動するため、温度センサーを取り付けることが出来ない。そこで、オフサイト型の場合は、水素トレーラーの停止する位置に温度センサーと散水設備（図 5.2.2-8）を設置することとした。

直射日光による蓄圧器の温度と圧力上昇については、破裂や漏えいにつながる様な大規模な事故シ

ナリオではないものの、安全弁が作動することが想定できる。こうしたシナリオに対しては、蓄圧器に適切な日よけを設置することを推奨とした。ただし、日よけを設置した場合、別の原因で漏えいした水素ガスが滞留しない構造にしなければならない。

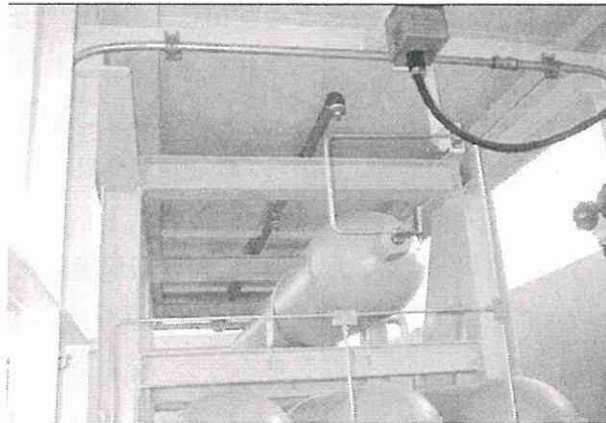


図 5.2.2-8 蓄圧器上部に取り付けられた散水ノズル

5.2.3. 圧縮機周辺

水素スタンドで水素を 40MPa まで高圧化する圧縮機は、内部の水素量は少ないものの、高速で回転や往復運動する部分があるため、爆発、漏えい、損傷等を防止するための措置を講じている。

(1) 圧縮機からの飛散物防止対策

圧縮機が故障した場合に可動部分が飛散することなどを想定し、圧縮機は鋼板製のケーシング内に設置することとした(図 5.2.3-1)。特に圧縮機からの飛散物が蓄圧器本体に衝突して開口部を作るなどの二次災害を防ぐため、圧縮機と蓄圧器の間の壁は頑丈な障壁を設置することとした。

(2) 圧縮機室内の滞留防止対策

圧縮機室内(ケーシング)内部に漏えいした水素が滞留することを防ぐため、換気装置を設置する。換気装置が停止した場合には、自動的に圧縮機が停止するインターロックの設置、さらにケーシング内に水素漏えい検知器を設置する(図 5.2.3-1)。

(3) 圧縮機出口の温度監視

圧縮機で水素を高圧に圧縮すると、水素自体が高温になる。これをガスクーラーで冷却してから蓄圧器へ充てんするのだが、ガスクーラーに異常があると高温の水素が蓄圧器へ流れ込み最悪の場合は蓄圧器の設計温度を超えて大事故となる事故シナリオが予想される。こうした事故シナリオが起らないように圧縮機出口の配管表面温度、ガスクーラー(熱交換器)の冷却水量、冷却水温度を監視し、設定値を超えた場合には圧縮機を停止するインターロックを設置している。

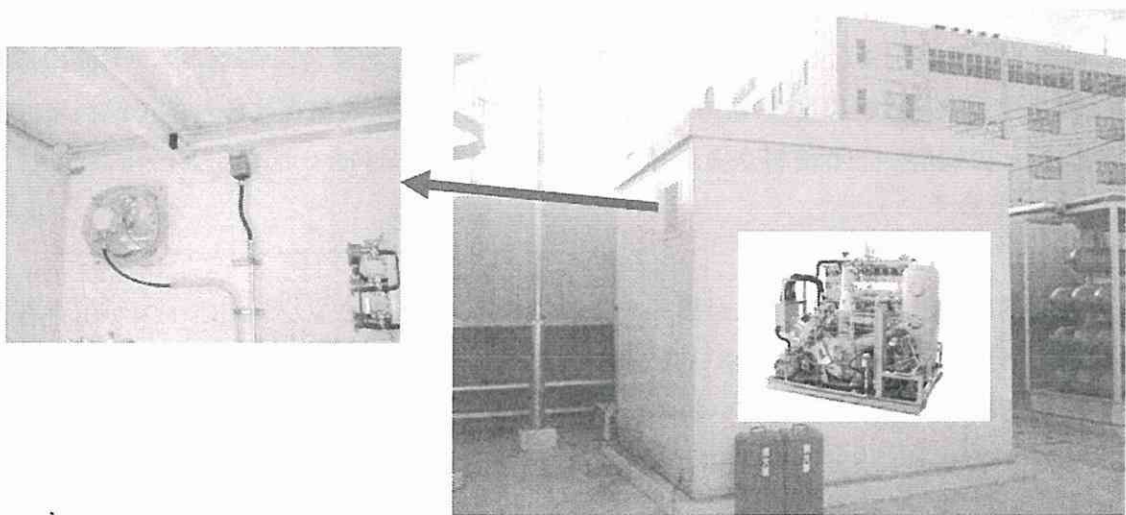


図 5.2.3-1 圧縮機の安全対策例

(左：換気装置と水素漏えい検知器、右：ケーシングと圧縮機イメージ)

5.2.4. ディスペンサー周辺

ディスペンサー付近には燃料電池自動車のドライバーや水素スタンドの従業員がいるため、高い安全性が求められている。

(1) 水素漏えい検知器及び、火炎検知器の設置

燃料電池自動車との接続部である充てんノズル部は、着脱を行なうため構造的に水素が漏えいしやすい。また、ディスペンサー本体は内部配管から漏えいした水素が滞留する可能性がある。そこで、これら二ヶ所に水素漏えい検知器を設置し、漏えい検知時は直ちに充てんを停止するインターロックを設置することとした。そもそも、現時点では燃料電池に悪影響を及ぼさない適当な付臭剤が見当たらないため、検知警報設備で付臭剤と同様の漏えいが検知できるようにしている。漏えい検知器の警報設定値については、天然ガスは0.1%の漏えいで検知できるように付臭剤を添加しているといわれていることから0.1%以下とした。

一方、水素火炎は目に見えないため、ディスペンサー付近に火炎検知器を設置し火炎を検知した場合は充てんを停止し遮断弁を閉止することとした(図 5.2.4-1)。ちなみに、現時点では水素炎から放射される紫外線(200nm)を検知する紫外線式火炎検知器が最も優れているといわれているが、太陽光や反射光による誤作動の可能性もあり、フードの取り付けや設置位置、方向の工夫が必要である。

(2) 充てん流量の制限

燃料電池自動車の車載タンクへ水素を充てんする際に、ガソリン車並みの充てん時間(約5分)を想定すると相応の流量で充てんする必要がある。一方、充てん流量が大きすぎると断熱圧縮の影響により水素の温度が上昇し、車載容器の許容温度を超えてしまう事故シナリオが想定される。財団法人自動車研究所ではこの点に着目し、水素の急速充てんと容器の温度上昇について精力的なデータ収集に取り組んでいる[7]。こうした検討状況を踏まえ、安全率を考慮して充てん流量の上限を設定した。

さらに、燃料電池自動車用燃料容器は金属ライナー製、複合材料製に加えてプラスチックライナー

製が開発されているため、それぞれの容器の特性に合った充てん流量の上限制御が必要である。近い将来、燃料電池自動車が異なる材質からなる燃料容器を搭載した場合、水素スタンド側は都度充てん流量の上限を変更しなければならない。このような場合は、安全を確保する目的で燃料電池自動車と水素スタンドとの通信による情報交換が必要になると考える。

(3) 誤発進防止対策

水素を充てん中に燃料電池自動車が誤って発進すると、ディスペンサーのホースが引きちぎられ水素の大量漏えいにつながる。また、ホースが切れない場合はディスペンサー自体を引き倒し、内部の配管を損傷する事故シナリオが想定される。ガソリンスタンドにおいて実際にこのような事故が起きているため[8]、ガソリンスタンドには消防法で緊急離脱カブラの設置が義務付けられている。水素スタンドもこれに習い「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を講ずること」すなわち緊急離脱カブラ（図 5.2.4-2）を設置することとした。

FCV へ水素を充てん中に FCV が誤発信しない／させないことが本質的な誤発信防止対策である。これを実現するためには、FCV が充てん中であることを認識し車両が動かないようにする装置を搭載することである。充てんノズルとレセプタクルが結合していることを検知して、FCV の電源が ON にならないようにすることや充てん中に通信を行い、充てん中はブレーキをかけておくなどの案はある。しかし、FCV 側へこうした装置を搭載することは、走行中にそれらの装置が誤作動する可能性があるとの理由で自動車メーカーに受け容れられていない。今後、FCV と水素スタンドが普及するに伴い、誤発信防止対策のあり方について自動車メーカーとインフラメーカーとの間で真剣な話し合いが必要になると考える。

(4) 車両の衝突防止対策

ディスペンサーへの暴走車両の衝突やアクセルとブレーキの踏み間違いによるディスペンサーへ衝突による水素漏えいの事故シナリオに対し、ディスペンサー周りに衝突防止柵を設置する安全対策を施した（図 5.2.4-1）。防護柵の強度は、普通車両（2ton）が 20km/h で衝突する力に耐えうることにした。また、ディスペンサーまわりのアイランドを嵩上げし、自動車が乗り上げることがないようにした。ディスペンサー周囲の配管はトレンチ内に埋め込み、車両が配管を踏みつけることによる損傷を防止する。ディスペンサー内部に感震装置を設置し、地震だけでなく自動車が衝突した場合も遮断弁を閉止し充てんを自動停止する対策を行なう。

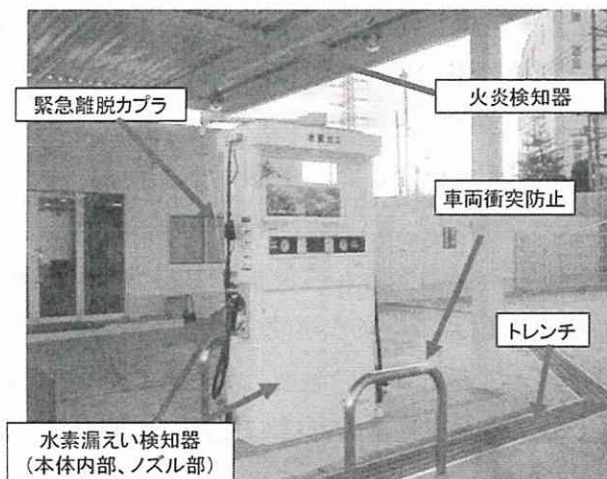


図 5.2.4-1 ディスペンサー周辺の安全対策



図 5.2.4-2 緊急離脱カブラ

(5) 充てんホースの保護

充てんホースの曲げ、ねじり、地面との接触による磨耗、損傷を原因とする事故シナリオを防止するため、充てんホース接地部の磨耗防止策（スパイラルガードの取り付け）とホースの定期的な交換を定めた。

5.3. 主な安全対策（70MPa 充てん対応水素スタンド）

70MPa 充てん対応水素スタンドについては、4.4 節で述べたように水素圧力 80MPa での漏えい、爆発、噴出火炎の実験データが不足しているため、40MPa の実験データをベースに外挿により影響度を評価している。また、安全対策の信頼性を示すデータも不足していることから、リスクアセスメントの結果は「仮評価」と位置づけている。したがって、ここではリスクアセスメントが仮評価であることを前提に、70MPa 充てん対応水素スタンドの主な安全対策について議論する。なお、現時点で得られた安全対策リストは、Appendix 3. 安全対策リストに示す。

70MPa 充てん対応水素スタンドは、扱う水素の圧力が高いため 35MPa 充てん対応に比べると事故シナリオ発生時の影響度が大きい。では、影響度が大きいだけかと言うとそうではなく、FCV への水素充てんの結果、車載タンクの温度上昇を引き起こすためプレクール設備が必要であることは圧力上昇により新しい安全対策が必要になった例と言える。こうした安全対策と課題を中心に述べる。

5.3.1. 水素スタンド全般

（1）高圧ガス設備に使用する材料

高圧水素が金属材料へ及ぼす影響については、現在、各研究機関において鋭意検討が進められているが、SUS316L よりも適当な金属材料が提案されるまでには至っていないようである。SUS316L は前述のように高い耐水素脆性を示すが、比較的柔らかい材料であるため、高圧ガス保安法に準拠して 4 倍耐圧の配管や部品を製造した場合、肉厚になり重量増、コスト増になる。今後、SUS316L に代わる材料の提案や、耐圧設計の安全率（4 倍）を安全に下げるなどの検討が必要である。

（2）敷地境界距離と火気離隔距離

【敷地境界距離】35MPa 充てん対応水素スタンドと同様に、高圧ガス設備の外側から当該事業所の敷地境界に対して 6m の距離をとることを仮置きし、影響度評価が仮評価で、かつ安全対策のデータが不十分であることを前提に、リスクアセスメントを行なった結果、ほとんどの事故シナリオは M または L に低減できることが分かった。これは、事故シナリオ抽出において徹底的に事故シナリオを抽出したこと、水素の大量漏えいリスクに対して安全対策を行なった事によって、大量漏えいはありえないといえるレベルまでリスクを低減しているためである。また、完全に防止することが難しい小規模なピンホール漏えいについても十分な安全対策を行なっていることも要因のひとつである。もし、ピンホール漏えいが起こってしまった場合でも、爆風圧は十分小さく、火炎長も敷地外へ影響を及ぼすレベルにはないことが分かった。つまり、本検討で得られた安全対策案を実施することで、70MPa 充てん対応水素スタンドの安全距離を 6m に設定すればよいことが示唆された。

【火気離隔距離】5.2.1 節でも述べたように、リスクアセスメント上では火気離隔距離を設定する必要は無い。しかし、従前の例に従って考察するならば、0.2mm のピンホールから圧力 80MPa で漏えいした水素の 1%濃度到達距離は、元圧 40MPa の場合のそれ（5.3m）よりも長くなるのが容易に想像できる。実際の実験結果を待つ必要があるが、火気離隔距離は 6m よりも長くなると考える。

一方、火気離隔距離の設定においては、水素の爆発下限界濃度に 1/4 の安全率を掛けているが、この 1/4 は歴史的なコンセンサスであるものの論理的な裏づけデータがほとんど無い。三菱重工業㈱では、この安全率（1/4）を安全に見直すことができるよう、「濃度変動による着火性及び火炎伝播の検討実験」取り組んでいる[9]。この安全率を例えば 1/2 などに見直すことができれば、火気離隔距離は大幅に短縮されると考える。

5.3.2. 蓄圧器周辺

(1) 蓄圧器に使用する材料

蓄圧器に使用する材料として求められる要件として水素脆化に強いことは言うまでもないが、市場に一般的に流通していること(コストが安いこと)や、内圧上昇に伴い高強度かつ高靱性であること、胴部が厚肉化するためポンペ製作時の焼入れ性が良いことなどが求められる。5.2.2 節で示した 35MPa 充てん対応水素スタンドの蓄圧器に使用する材料である SCM435 は、内圧 40MPa では要求を満足できるが、内圧 80MPa で設計すると胴部の厚みが増し、製作時に焼入れが十分できない可能性があることが分かった。一方、水素圧力 20MPa のポンペで実績のある SNCM439 は高強度であり、焼入れ性も良いことが知られているが、引張強さ(TS)が 950N/mm^2 を超える材料は特に水素感受性が顕著になると言われている。そこで、SNCM439 の強度を 950N/mm^2 以下に低減させた材料について(株)日本製鋼所にて「70MPa 充てん対応水素スタンド構成金属材料の評価」[10]が進められている。こうした材料を用いることにより、水素スタンドの安全性を確保しつつ、低コストな水素スタンドの設計につながるものとする。

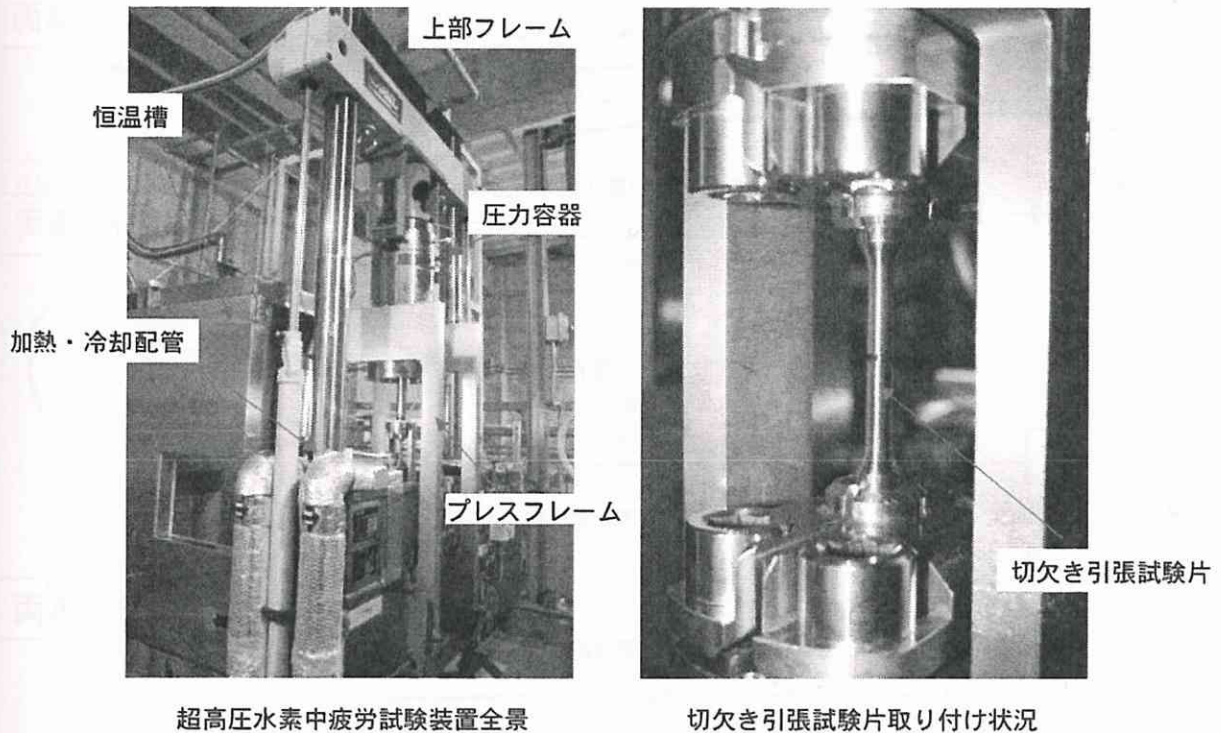


図 5.3.2-1 超高压水素疲労試験装置外観

(2) 適正なバイパス配管の設置

70MPa 充てん対応水素スタンドモデルの改造モデルでは、40MPa と 80MPa の蓄圧器(低压バンクと高压バンク)が混在するため、場合によっては 80MPa の水素が 40MPa の蓄圧器へ流入し 40MPa 蓄圧器の設計圧力を超える事故シナリオが想定できるため、安全対策が必要である。

事故シナリオとして、No.1,2,3 (低压) バンクより 35, 70MPa の FCV へ充てん中に No.4,5 (高压) バンク出口遮断弁が作動不良により開放し、かつ No.1 バンク出口逆止弁が効いた場合、35MPa 車載タンクへ 80MPa の水素が充てんされることが想定できる(図 5.3.2-2)。

この事故シナリオに対する安全対策として、バイパス配管や 80MPa 圧縮機への供給配管の取り合いを No.1,2,3 バンク出口遮断弁下流ではなく、No.3 バンク出口遮断弁の上流からとする。この位置

に接続することで、No.4バンクから80MPa水素が逆流した場合でもNo.3バンクがバッファタンクの役目を果たすため、35MPa車載タンクが破裂する圧力までは至らないと考えられる(図5.3.2-3)。

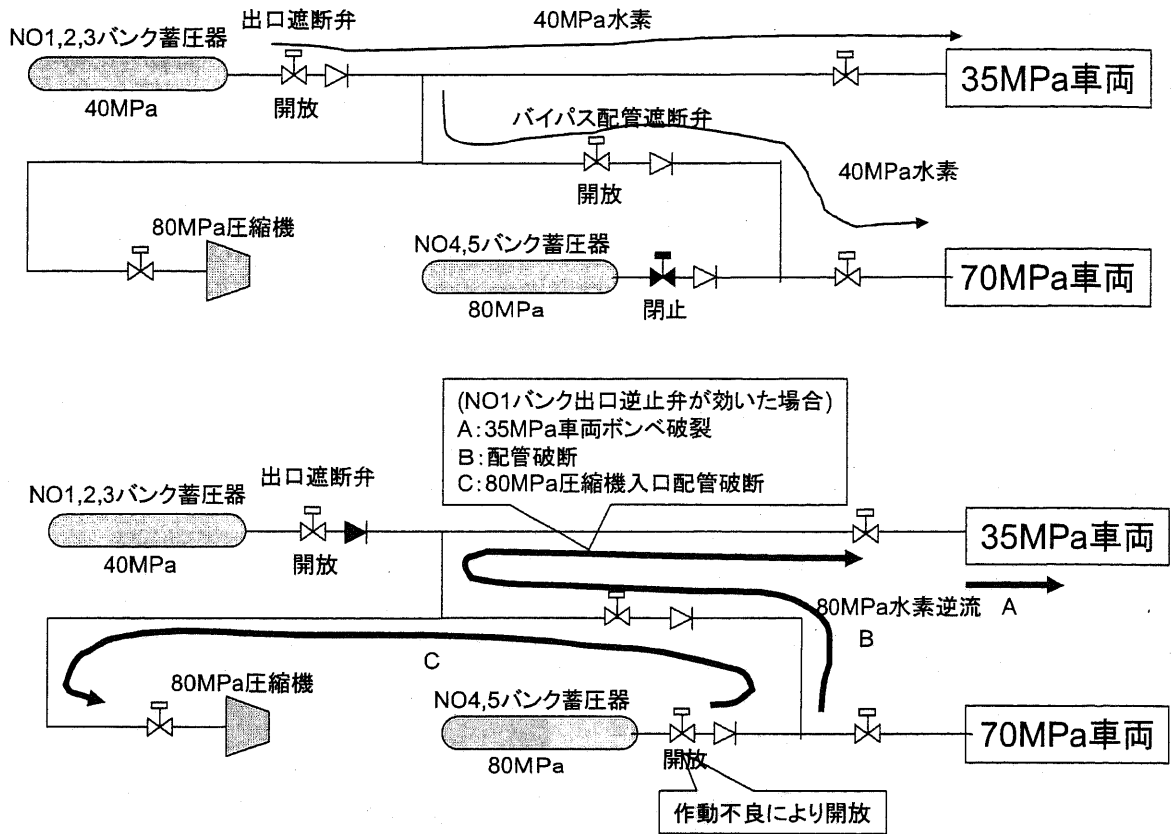


図 5.3.2-2 事故シナリオ

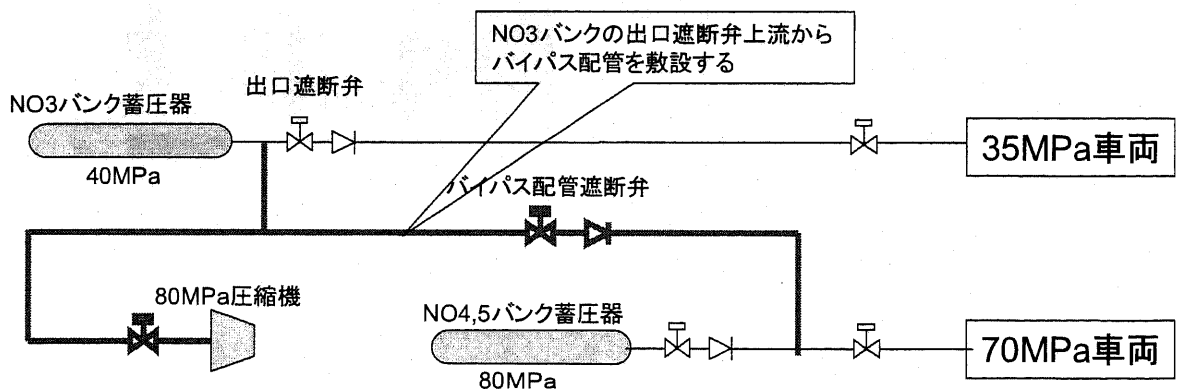


図 5.3.2-3 安全対策案 (適正なバイパス配管設置)

5.3.3. 圧縮機周辺

(1) 適正なアンロードライン設置

70MPa 充てん対応の圧縮機は、35MPa よりも慎重に事故シナリオを抽出した。35MPa にない事故シナリオとして、圧縮機の起動/停止時の作動不良や、運転の効率を上げるため圧縮機の起動/停止を極力少なくし、バイパスラインを使ったアンロード運転時の事故シナリオが抽出された。

この例として、改造モデルにおいて、圧縮機 2 台のアンロード運転時に 40MPa 蓄圧器 (No.1,2,3

バンク)の入口遮断弁が作動不良により閉止したため、充てん流量の増加による70MPa車載タンク破損が想定された(図5.3.2-4)。

この安全対策として、適正なアンロードラインを設置することとした。具体的にはNo.1バンク入口遮断弁と蓄圧器の間に接続する。これにより、バンク入口遮断弁が作動不良で閉止しても、アンロード運転が継続でき、片方の圧縮機から充てんを開始してももう片方の圧縮機の流量が合流することは無いため、非常に安全である(図5.3.2-5)。

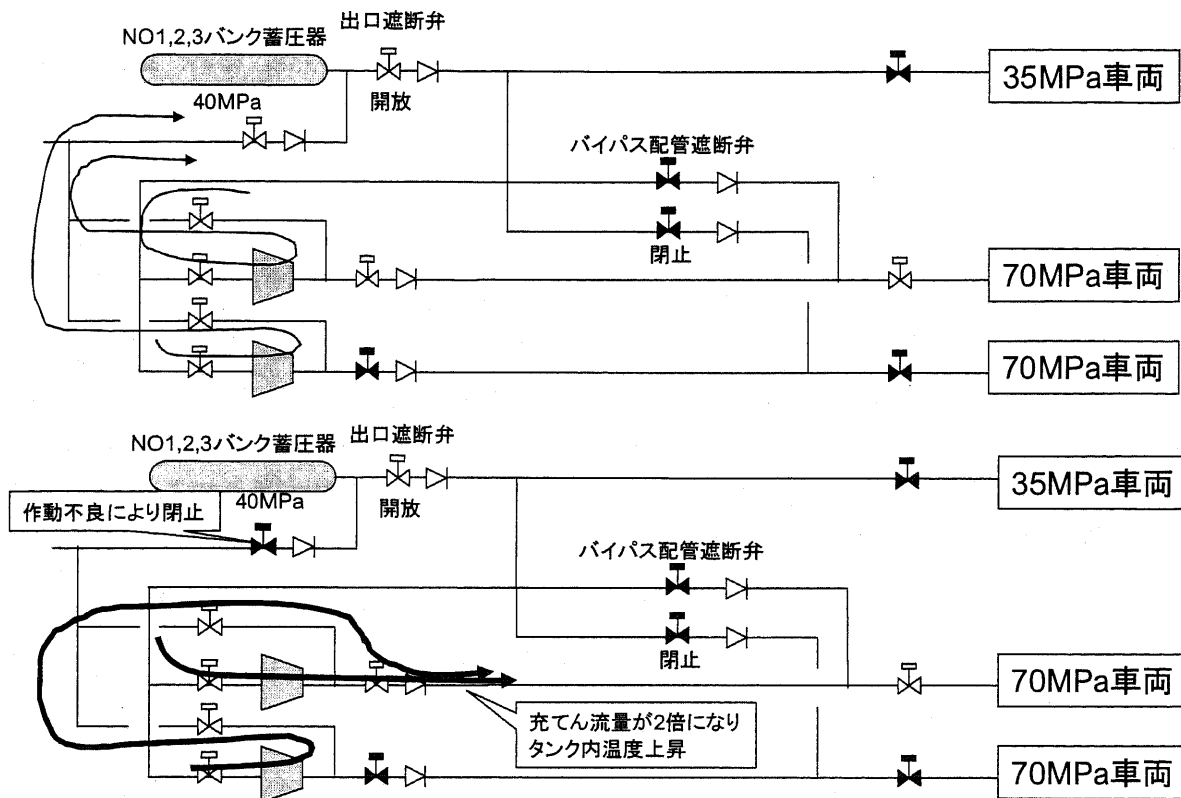


図 5.3.2-4 事故シナリオ

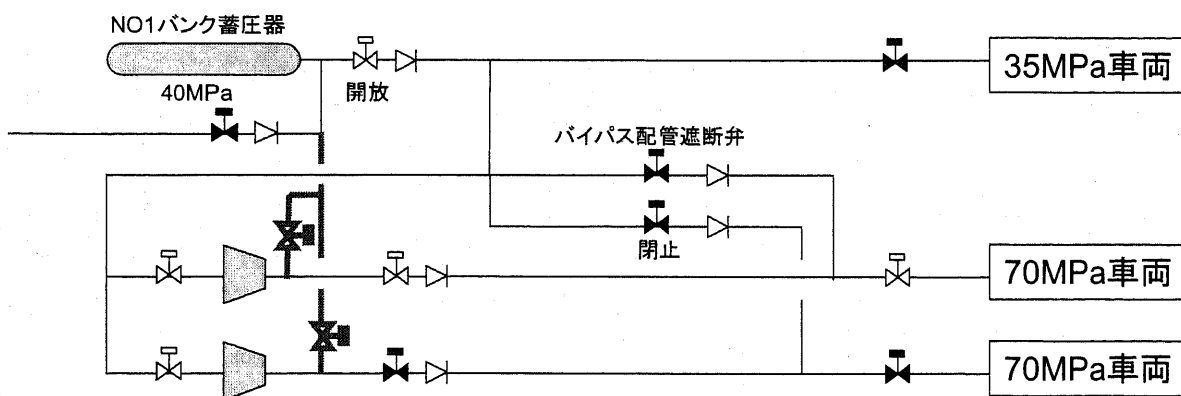


図 5.3.2-5 安全対策案 (適正なアンロードライン設置)

5.3.4. ディスペンサー周辺

(1) 35MPa と 70MPa 充てんノズルが供用できない構造

35MPa の車載タンクを搭載した FCV へ 70MPa の水素を充てんすることは大きな事故につながる恐れがある。こうした事故シナリオに対する安全対策として、35MPa と 70MPa 充てんノズルが供用できない構造にすることが必要である。本体策については既に ISO と SAE で議論が進められていて、35MPa 用のノズルとレセクタブル、及び 70MPa 用のノズルとレセクタブルの国際標準化が検討されている。35MPa のレセクタブル (FCV 側) は、35MPa のノズルとしか結合できないが、70MPa のレセクタブルは 35 と 70MPa のノズルと結合できる構造を検討している。なお、認識のあるなしに関わらず、FCV オーナーが車載タンクは 35MPa のままでレセクタブルだけを 70MPa 用に改造する可能性は否定できないことから、こうしたタンパリング (不法に手を加えること) に対しては通信によるタンク容量の確認などを検討する必要があると思われる。

(2) プレクーール設備

プレクーール設備は、水素充てん時に FCV 車載タンクの温度上昇に合わせて予め冷却した水素を供給する設備である。考えかたによっては、車載タンクの温度上昇のための安全対策といえる。しかし、プレクーール設備自体が複雑な熱交換器であることや、温度制御がエラーを起こした場合は大きな事故につながる恐れがあることから、プレクーール設備に対する十分な安全対策が重要である。本研究では、プレクーール設備について十分な検討するには至らなかったが、今後の大きな課題として認識している。

5.4. 主な安全対策（液体水素スタンド）

液体水素スタンドを対象にリスクアセスメントを実施した結果、67件の安全対策案を得た。これらは液体水素スタンドの安全を確保するうえで必要な安全対策である。表5.4-1に主な安全対策を示し、以下にその内容を説明する。なお、67件の安全対策のリストは、Appendix 3. 安全対策リストに示す。

表 5.2-1 液体水素スタンドの主な安全対策

場所	安全対策
全般	安全弁の設置 使用材料に関する対策（腐食、水素脆化、低温脆化対策） 敷地境界に防火壁を設置 配管のトレンチ内設置 地震対策1（液体水素設備の共通基礎設計） 定期的な検査と補修
液体水素貯槽	地震対策2（貯槽の耐震設計） 貯槽の真空断熱層の圧力監視
ディスペンサー	車両衝突防止ガードの設置 Break-away の設置（開発中） シェア弁の設置（開発中）
ベントライン	弁とライン手動弁の二次側に加温器とオリフィス設置 パージ弁のベントライン接続

5.4.1. 液体水素スタンド全般

（1）使用材料に関する安全対策

液体水素スタンドの貯槽や配管等は、屋外で使用されかつ内部は極低温の液体水素と接触することから、適切な安全対策がなされていない場合、外面は雨水等により金属材料が腐食して真空断熱層が破壊されることや、内面は水素環境脆化または低温脆化の影響を受けて亀裂や破断を引き起こし、大量の液体水素漏洩が発生する事故シナリオが想定される。

貯槽等の外面腐食に対しては外面塗装を行うことが有効な対策であるが、内面（内管または内槽）については水素環境脆化と低温脆化に対する安全対策が必要である。本件については（財）金属系材料研究開発センター（以下、JRCM という）の報告書[11][12]を参考にした。以下にその概要を示す。

【水素環境脆化対策】

大気中など不活性雰囲気中で優れた機械的性質を示すオーステナイト系（Ni系）ステンレス鋼の中には、水素ガス環境下で著しい延性低下を示す鋼種がある。延性低下の程度は、水素ガス中で行った引張試験で得られた絞り値をヘリウムガス中で得られた絞り値で除した「相対絞り」を指標として示すことができ、鋼種や試験温度に依存する（図5.4.1-1）。WE-NET 成果報告書（平成7年～14年、産総技術総合研究所）によると、オーステナイト安定度の高い（マルテンサイト変態しにくい）SUS310S(25Cr-21Ni)、316NG(12.6Ni-16.4Cr-2.6Mo-0.1N)などは、全温度範囲で延性低下は認められない。オーステナイト安定度が低くなるにつれ、延性低下が認められるようになり、SUS304(18Cr-8Ni)、SUS304L(18Cr-9Ni)、SUS316(17Cr-10Ni-2Mo)、SUS316L(17Cr-12Ni-2Mo)

は、いずれも程度に差はあるが低温水素ガス環境下で延性低下を示す。ただし、この中で SUS316L の延性低下代は極わずかである。また、水素環境脆化を示すステンレス鋼は、鋼種によらず、延性低下の程度は 200K(-70℃)付近で最大になり、それ以上の温度では温度の上昇とともに、延性は高くなる。また、それ以下の温度でも、延性は向上し、120K(-150℃)以下では、低温水素環境脆化は発生しなくなる。

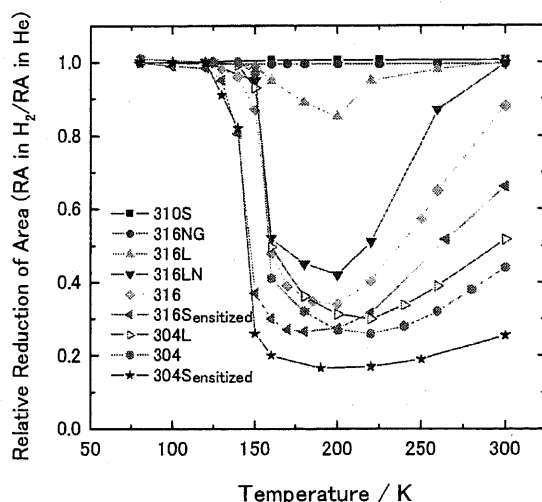


図 5.4.1-1 オーステナイト系ステンレス鋼の絞り面積の温度依存性

安全上の注意として、低温水素環境脆化は-70℃を中心とした限定温度領域において、低歪速度にて生じること、汎用ステンレス鋼 (SUS304, 304L, 316, 316L) では、ある程度の塑性変形後に生じることから、液体水素配管の場合、-70℃付近の水素ガスに長時間曝され、かつ塑性変形を伴うような荷重を受けるようなことがなければ、少なくとも上記汎用ステンレス鋼が使用中に脆化を起こすことは考えにくい。すなわち、許容応力が弾性域内であるような設計がなされていれば、通常の使用状態にて脆化することは考えにくい。また、ステンレス鋼は本来極めて高い破壊靱性を極低温～室温にかけて有しており、低温水素ガス環境下で疲労等により微小貫通亀裂が生じて、一気に大破壊(高歪速度)に至る可能性は低いとしている。したがって液体水素の水素環境脆化対策として SUS316L を使用することは「非常に有効」と評価した。

【低温脆化対策】

10年間使用された液体水素ローリーの材料解析[13]など、従前の研究からオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304, SUS304L, SUS316, SUS316L) は、母材、溶接金属とも液体水素中を含む極低温にて、高い強度、延性を有していることが知られている。すなわち、低温脆化しないと考えられている。しかし、厚肉材の溶接部に関しては、多パス溶接等を行った場合にσ相が生成し、低温靱性が著しく低下することが WE-NET 等の研究により報告されているため注意が必要である (図 5.4.1-2)。ただし、液体水素スタンド機器は 0.4MPa 程度の低圧で運転されるため、使用する材料は薄肉材である。薄肉材の場合、TIG 溶接も少数パスで溶接できるので、SUS316L 溶接部の低温靱性はほとんど低下しない。また、薄板の TIG、MIG 溶接継手の液体水素中における曲げ疲労特性は、0.2% 体力の 90% 程度の荷重を負荷しても、10⁶回まで破断しないことが前述の報告書で確かめられた。したがって、「非常に有効」と評価した。

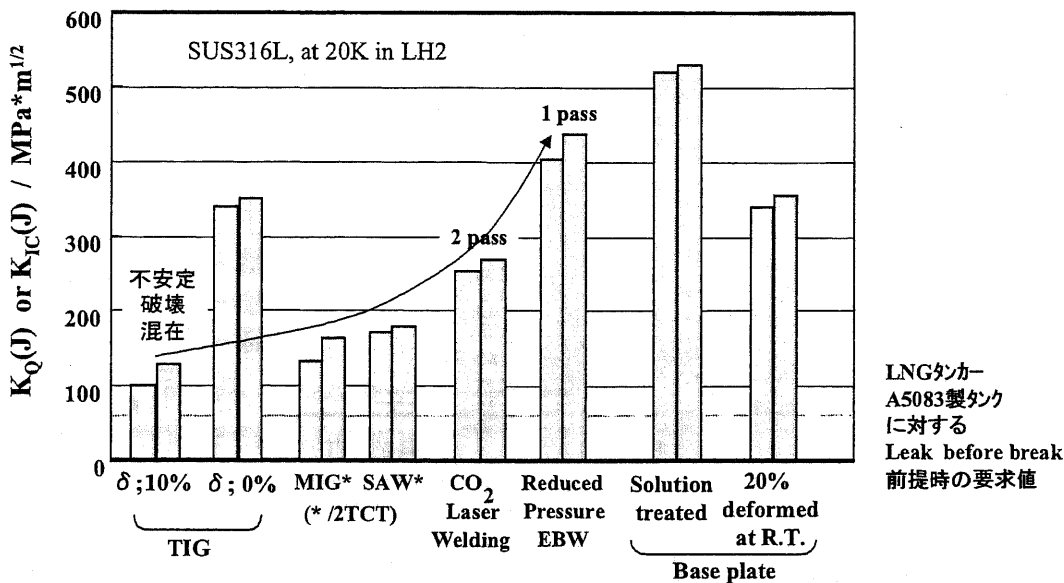


図 5.4.1-2 SUS316L 厚板の液体水素中における破壊靱性値

(2) 防火壁または障壁の設置

液体水素スタンドの周囲（車両の出入口となる道路を除く）に高さ 2m 以上の防火壁と、敷地内部に障壁を設けることとした（図 5.2.1-2 圧縮水素スタンドと同様）。周囲の防火壁は、液体水素スタンドが発災した場合に外部へ影響を及ぼすことを防止し、かつ近隣火災など外部からの影響を受けることを防いでいる。

(3) 配管のトレンチ内設置

液体水素貯槽からディスペンサーまでの配管を地中に埋設せず、トレンチ内に設置することとした。これにより車両が配管を踏みつけて損傷させることを防止し、配管の点検を容易にすることができる。

(4) 地震対策 1（液体水素設備の共通基礎設計）

液体水素スタンドは保冷のために二重配管を利用する。この二重配管は圧縮水素スタンドに使用される細い一重管に比べフレキシビリティがないため、地震によって液体水素スタンドに地割れが発生した場合、段差等により配管が破断する事故シナリオが想定される。そこで、液体水素スタンドの貯槽からディスペンサーまでを一枚の基礎の上に設置し、地震が起こった場合でも液体水素スタンド内に地割れや段差が起きないような構造とすることを安全対策とした。図 5.4.1-3 に共通基礎設計の例を示す。

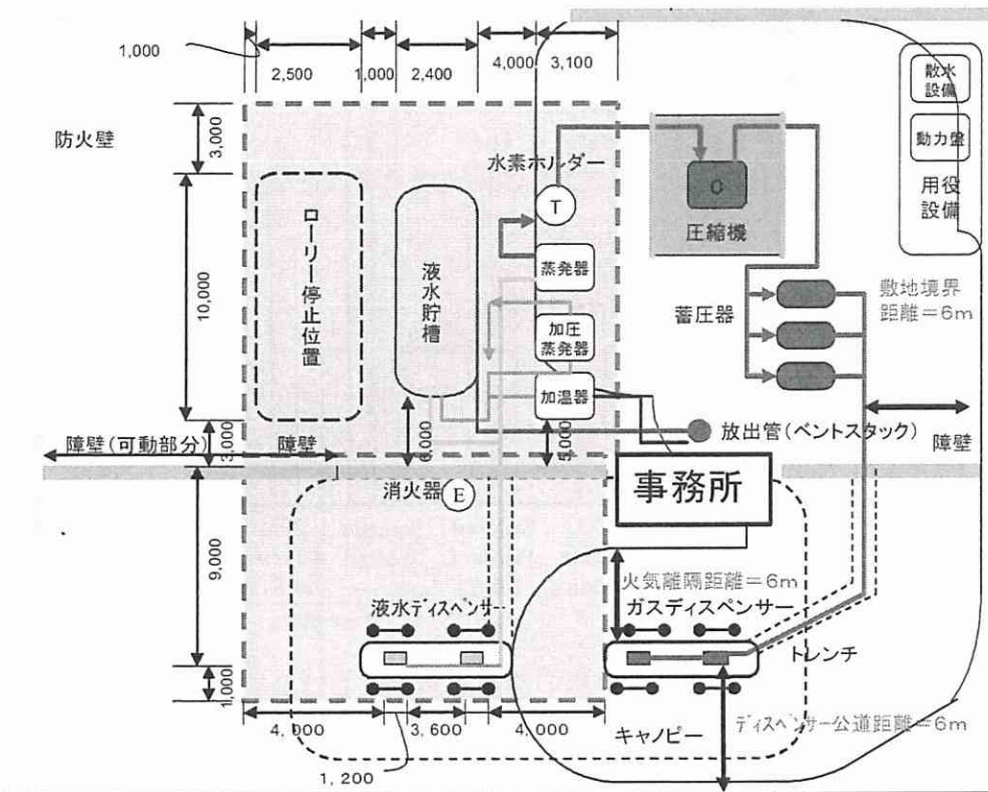


図 5.4.1-3 液体水素スタンドモデル共通基礎設計例（赤破線部分）

(5) 定期的な検査と補修

液体水素スタンド機器は、極低温と常温の間で約 200℃の温度変化がある。この温度差による熱膨張の影響が水素の漏洩の原因になる可能性がある。液体水素スタンドには、毎日の始業点検、定期的な検査と補修を義務付けて機器を健全な状態に保つこととした。

(6) 敷地境界距離と火気離隔距離

5.2.1 節でも述べたように、液体水素設備と人のいる場所との間に保安距離をとることは安全対策として有効である。しかし、この保安距離が大きければ大きいほど液体水素スタンド自体が大きくなり、液体水素スタンドの普及の妨げになってしまう。そこで本研究では従前の検討結果をベースに水素の特性を考慮した保安距離を提案することとした。

【敷地境界距離】特定圧縮水素スタンドや圧縮天然ガススタンドの保安距離を参考に、液体水素設備から敷地境界までの距離を 6m に仮置きし、前述した液体水素スタンドにおける事故シナリオのすべてに対し、リスク評価と安全対策検討を繰り返した結果、リスクランク H=13 件、M=45 件となった。リスクランク M の定義は「原則として許容できない。更なる安全対策が可能かどうかを検討し、現実的な対策が見つからない場合に限りこれを許容する。」である。距離に関してリスクランク M の想定事故は敷地内（漏えい箇所から 1m）の人に対する火炎長の影響度であり、敷地境界距離を長くしてもこれ以上の低減は望めなかった。一方、リスク H の 13 件については、7.3 節で詳しく記述するが、事故の発生確率を可能な限り低減していることや燃料電池自動車と水素スタンドの普及を鑑み、有識者からなる委員会にて保有せざるを得ないとの結論をえた。したがって圧縮水素スタンド同様に第 1 種、第 2 種設備距離は設定せず、敷地境界距離を 6m とした。

【火気離隔距離】火気離隔距離に関する考え方は、圧縮水素スタンドにおけるそれ（5.2.1 節）と同様とした。つまり、従前の圧縮天然ガススタンドや圧縮水素スタンドに関する検討を参考に、液体水

素が開口径 0.2mm のピンホールから漏洩した場合の実験を行い、水素ガス濃度 1% の範囲が到達する距離とした。三菱重工業(株)で実施した液体水素のピンホール漏えいの実験結果から、水素濃度 1% の到達距離は 7.8m であることが分かった。これをベースに火気離隔距離は 8m を提案する。

ただし、その後三菱重工業(株)の詳細な解析の結果、開口径 0.2mm のピンホールから液体水素が漏洩した場合、水素ガス濃度 1% の範囲が到達する距離は 1~4m と結論[14]つけられたことから、火気離隔距離は 6m 以下 (4m) に設定することも検討すべきである。

5.4.2. 液体水素貯槽周辺

(1) 地震対策 2 (貯槽の耐震設計)

日本では数年から数十年毎に大きな地震が発生し、各地に大きな被害を及ぼしている。液体水素スタンドの貯槽には大量の液体水素が貯蔵されているため、地震が発生しても液体水素が大量漏洩しない対策が必要である。そこで液体水素の貯槽は、耐震設計を行い、かつ地盤調査を行なった強固な地盤面に設置することとした。さらに地盤の振動を的確に検知する感振装置を取り付けて、地震発生時には水素スタンドの運転を自動的に停止することとした。なお、液体水素貯槽構造にはサドル構造、吊り構造、レグ構造の 3 タイプがある。それぞれの概要図と地震時に損傷することが想定される接合部の詳細を図 5.4.2-1~5.4.2-3 に示す

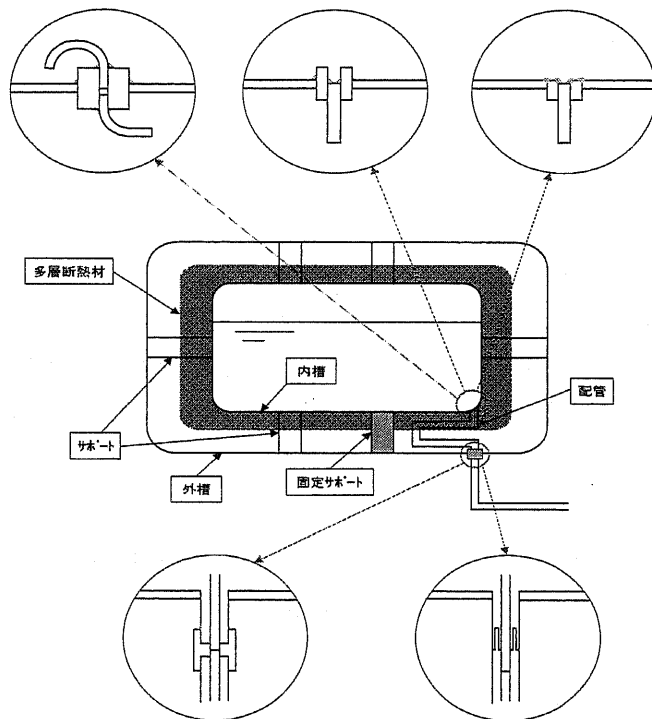


図 5.4.2-1 液体水素貯槽 (サドル構造)

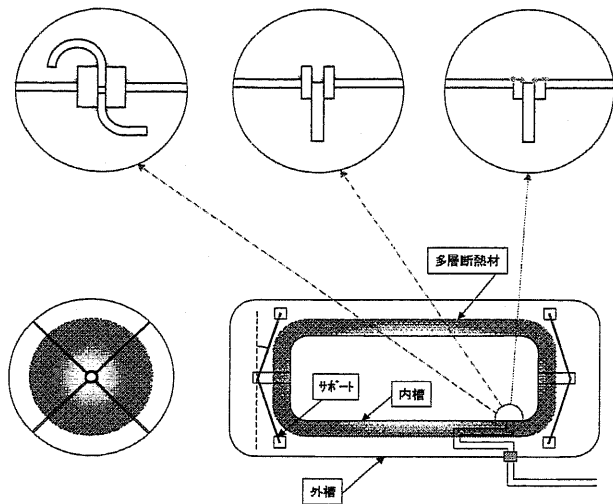


図 5.4.2-2 液体水素貯槽（吊り構造）

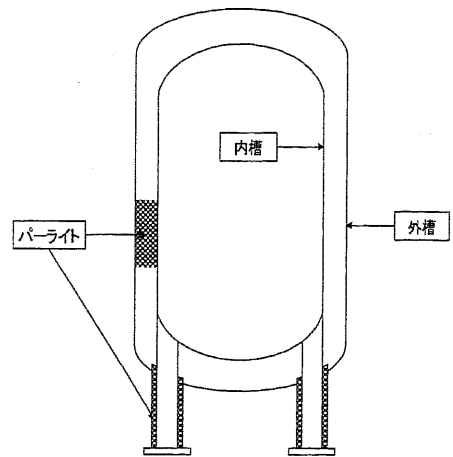


図 5.4.2-3 液体水素貯槽（レグ構造）

（2）貯槽の真空断熱層の圧力監視

液体水素の貯槽の外槽が強風時の飛来物の衝突や腐食等の原因で開口した場合、真空断熱層が破壊されて入熱が増加し、液体水素の蒸発量が増加し、ベントラインから放出する水素量が増加する。一定量以上の水素ガスをベントラインから放出することは、爆発下限界濃度範囲が敷地境界を越え、液体水素スタンド外部の火気から引火する事故シナリオが想定される。そこで安全対策として、真空断熱層に真空計を設置し真空度を常に監視し異常が起きた場合は警報を発し速やかに対応することとした。

5.4.3. 液体水素ディスペンサー周辺

（1）車両衝突防止ガードの設置

アクセルとブレーキの踏み間違えなど低速の車両がディスペンサーへ衝突することを防止するため、ディスペンサー周りに衝突防止柵を設置した。防護柵の強度は、普通車両（2ton）が 20km/h で衝突する力に耐えうることにした。考え方は圧縮水素スタンドのそれと同じである。

（2）シェア弁の設置（開発中）

大型で高速の暴走車両がディスペンサーへ衝突する事故は、前述の車両衝突防止ガードで防ぐことが出来ない。そこでディスペンサーに大きな外力が加わった場合、自動的に配管を切断し、かつ液体水素の漏洩を停止するシェア弁を設置することとした。ただし、液体水素用のシェア弁は開発中である。図 5.4.3-1 にシェア弁の設置例を示す。

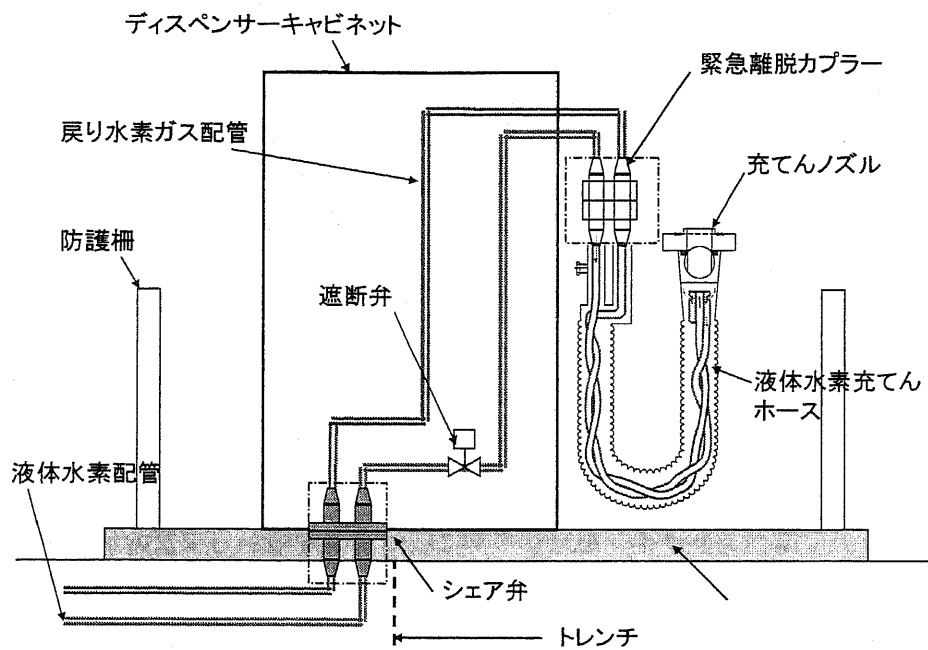


図 5.4.3-1 シエア弁の設置例

(3) 誤発進防止対策（開発中）

圧縮水素スタンドにおける水素充てん中の誤発進による事故シナリオと同様に、液体水素スタンドでも誤発進について安全対策を行わなければならない。前述したように、現時点では車両側に誤発進防止対策を搭載することが現実的でないことから、液体水素スタンド側で安全対策が必要である。

このリスクを低減するためには、液体水素用の緊急離脱カプラー（Breakaway 装置）を設置する必要がある。ただし、この装置はガソリンディスペンサーのホースや圧縮水素ガスのホースでは実用化されているものの、液体水素用は開発途中である。早急な商品化が望まれる。

緊急離脱カプラーが開発されるまでの代替案として、誤発進しないように車両を固定する装置の設置を検討した。

【車止め】液体水素の充てん中は、FCV のタイヤに台形の車止めを設け車両を固定する。車止めは、水素スタンド従業員がおこなうようにルール化する。現状の JHFC の水素スタンドで車止めが採用されているなど一定の効果が期待できるため、緊急離脱カプラーが開発されるまでは代替措置として採用する。しかし、車止めは必ず実施されるとは限らないことや車止めを取り外し忘れることが考えられ、充てん台数が多い場合は車止めによる別の事故が起きることも懸念されことからあくまで代替措置である。

【ロックプレートの設置】液体水素スタンドの停車位置へ有料駐車場等に利用されている昇降式ロックプレートを設置し、FCV を固定することを検討した。図 5.4.3-2 参照。液体水素の充てんは、ロックプレートの上昇後に行ない、充てん中はロックプレートが下降しないようにインターロック機構を設けるなど昇降と充てんタイミングのシステム化が必要である。しかし昇降式ロックプレートを設置したとしても設置方法によっては一定量の車の移動がおこることやタイヤの大きい大型燃料電池自動車の誤発進を完全に防ぐことは難しい。また逆に昇降機を下げきれない間に発進した場合は燃料電池自動車の破損のおそれがあることなど問題点もある。



図 5.4.3-2 昇降式ロックプレート利用例

5.4.4. ベントライン

液体水素スタンドではベントラインを通じて常に液体水素貯槽から少量の水素ガス（ボイルオフ）が放出される。また液体水素を受入のための降圧操作のとき、メンテナンスのための滞留している液体水素のパージするとき、ディスペンサーを冷却する際に使用された水素ガスをパージするときなど、液体水素スタンドを運転する上で一定量の水素ガスをベントへ放出する必要があることから、安全対策を検討した。

(1) ベントライン手動弁の二次側に加温器とオリフィス設置

液体水素スタンドでは、手動弁が多く利用されている。配管の冷却時に液体水素を利用するのであるが、気化した水素ガスを手動弁からベントラインへ放出する作業が行われる。このとき、作業員がヒューマンエラーで手動弁を全開にしてしまった場合、大量の液体水素が手動弁を通過してベントラインから放出されてしまう。このようなヒューマンエラーがあったとしても、安全に回避できるように、ベントラインに接続された手動弁の二次側に加温器とオリフィスを設置することで手動弁を通過してしまった液体水素を加温器で気化し、オリフィスで流量を制限してベントラインへ放出することとした。図 5.4.4-1 に簡易フローを示す。

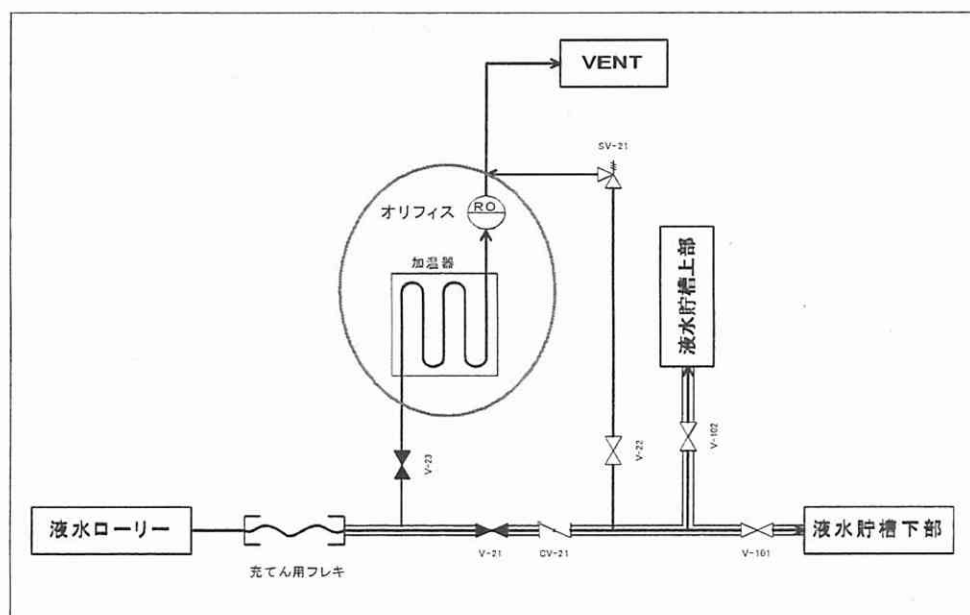


図 5.4.4-1 ベントライン手動弁の二次側に加温器とオリフィス設置の例

(2) パージ弁のベントライン接続

液体水素スタンドには遮断弁等のメンテナンス時に液体水素を配管の系外に排出する為のパージ弁（ドレン弁）が設置されている。液体水素スタンドの営業中にこの弁を誤って開放し、液体水素が漏えいする事故シナリオが想定される。パージ弁に対する一般的な安全対策としては、①教育・札の設置、②ロックワイヤ、エンドプラグの取り付けなどを行うが、人間系の安全対策であるため、誤操作を完全になくすことは難しい。そこで、もしパージ弁を誤操作等で全開しても、液体水素を直接大気に飛散させない安全対策として、パージ弁を必ずベントラインへ接続することとした。接続例を図 5.4.4-2 に示す。

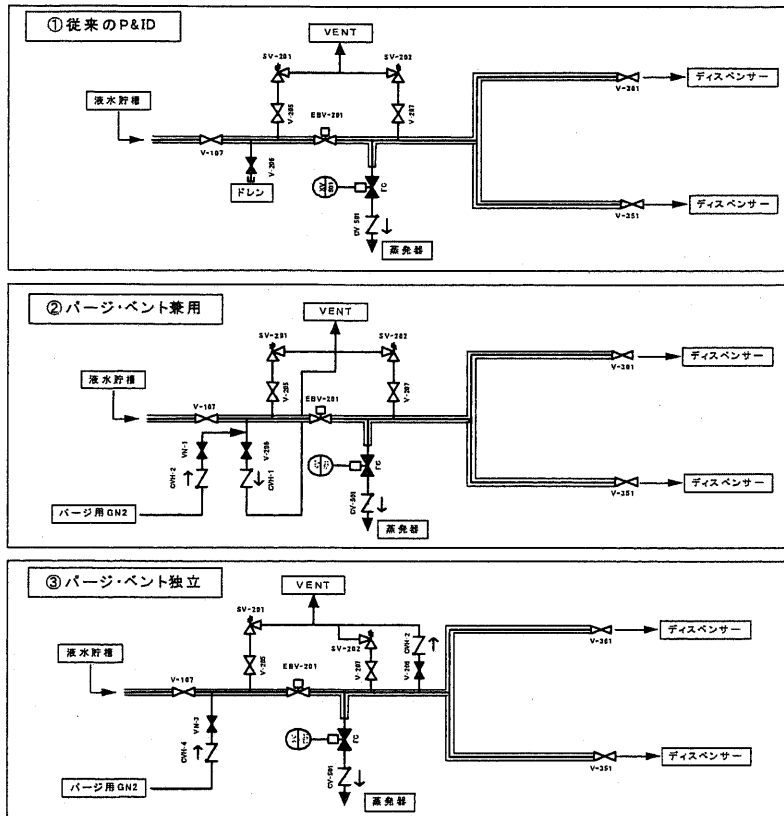


図 5.4.4-2 パージ弁のベントライン接続例

References

- [1] 燃料電池システム技術基準に関する技術調査報告書、平成 17 年 3 月、高圧ガス保安協会、P.258
- [2] 産総研 TODAY、Vol7、No.7
- [3] 岡林一木、武野計二、千歳敬子他、「水素インフラに関する安全技術研究」、NEDO 平成 15 年度～平成 16 年度成果報告書、92(2005)
- [4] 燃料電池システム技術基準に関する技術調査報告書(別冊)、平成 18 年 3 月、高圧ガス保安協会、P.145
- [5] 水素タススタンド基準に係る技術検討委員会/燃料電池用水素容器技術検討委員会報告書、平成 14 年 12 月、高圧ガス保安協会、P.18
- [6] NEDO 水素社会構築共通基盤整備事業、水素インフラ等に係る規制再点検及び標準化のための研究開発、水素インフラに関する安全技術研究、平成 17 年度～平成 19 年度成果報告書、三菱重工業(株)、P.125-128
- [7] 柿原清貴、押野幸一、鈴木仁治、渡辺正五、「高圧水素容器への急速水素充てん」自動車研究、26、295(2004)
- [8] 危険物保安技術協会、危険物等事故関連技術情報データベース(2005)
- [9] NEDO 水素社会構築共通基盤整備事業、水素インフラ等に係る規制再点検及び標準化のための研究開発、水素インフラに関する安全技術研究、平成 17 年度～平成 19 年度成果報告書、三菱重工業(株)、P.158
- [10] NEDO 水素社会構築共通基盤整備事業、水素インフラ等に係る規制再点検及び標準化のための研究開発、水素インフラに関する安全技術研究、平成 17 年度～平成 19 年度成果報告書、(株)日本製鋼所、P.296
- [11] 液体水素スタンドに関する金属材料評価について、平成 18 年 8 月 16 日
- [12] WE-NET 第二期研究開発、サブタスク 10 低温材料の開発、平成 11-14 年度報告書
- [13] WE-NET 第一期研究開発、サブタスク 6 低温材料技術の開発、平成 10 年度報告書
- [14] NEDO 水素社会構築共通基盤整備事業、水素インフラ等に係る規制再点検及び標準化のための研究開発、水素インフラに関する安全技術研究、平成 17 年度～平成 19 年度成果報告書、三菱重工業(株)、P.550

第6章

安全対策検討における CFD の利用

第6章 安全対策検討におけるCFDの利用

6.1. 概要

FCVの普及のために、安全な水素スタンドを利便性のよい市街地へ設置する必要がある。筆者らは、水素スタンドモデルに対して、リスクアセスメント手法を用いた安全性検証を行い、事故を防止するための安全対策を検討した[1]。水素スタンドの安全性検証においては、水素の爆発、火炎、漏えい拡散に関する定量的なデータが必要である。中でも水素スタンド内外にいるヒトに対する影響度を評価するために、水素の微小漏えいにおける爆風圧、火炎長、水素の着火可能範囲の広がりを知ることは重要である。

水素スタンドに関しては、水素の爆発・爆燃・爆ごう（産業技術総合研究所、エネルギー総合工学研究所）[2-4]に関する研究や噴出火炎（三菱重工、エネルギー総合工学研究所）[5-9]に関する研究が近年盛んに行われている。また水素スタンドにおける水素の漏えい拡散については、大量漏えいに関する研究（老川ら、大阪ガスによる実スケールの研究、トンネル内の水素漏えい）[10-15]が中心である。しかし、水素の微小漏えいに関する研究はほとんどみあたらない。これは、日本において水素の微小漏えいに関して議論される場合の水素濃度が、爆発下限界濃度（4%）に安全率（1/4）をかけた水素1%濃度付近であることから、水素センサーを使った濃度測定が難しいこと、野外実験では風速や風向の影響を受けるため再現性が低いことなどが原因と思われる。

そこで本研究では、水素スタンドの安全性評価に必要な水素の微小漏えいについて、水平噴出実験の結果をベースにして、コンピュータによる流体解析（Computational Fluid Dynamics；以下CFDという）を使って水素の漏えい拡散状況を明らかにし、安全対策検討に反映させる。

6.2. 障壁による敷地境界距離と火気離隔距離の短縮

6.2.1. 敷地境界距離と火気離隔距離

水素スタンドにおいて想定される事故シナリオのうち、水素が大量に漏えいする事故シナリオについては、被害の大きさがとても大きいことから、二重三重の安全対策を施してその事故シナリオの発生する確率を極めて低く抑えている。例えば、事故シナリオそのものが起こりえなくなるような本質的な安全対策などを実施している。一方、バルブのグランド漏れや接続部などに開口したピンホールからの微小な水素漏えいの事故シナリオに対しては、これらを完全になくすような対策は技術的、経済的にとても難しい。そこで微小漏えいによる影響度を正しく把握し、許容できるレベル以下にする安全対策を行なうことによってピンホール漏えいを克服することにした。

具体的に、水素スタンドの配管など高圧ガス設備にピンホールが開口し、水素が漏えいする事故シナリオの場合、静電気などで水素が自己着火するケースと、外部の火気から引火するケースが想定できる。開口部付近で自己着火するケースは、水素の爆発によって受ける爆風圧による影響の大きさと噴出火炎によるやけどや火炎の影響の大きさを評価して、開口部（高圧ガス機器）から一定の距離を取るという安全対策によって安全を確保する。これを保安距離または、敷地境界距離という。一方、ピンホールが開口しても着火しないケースは、水素スタンド敷地内外にある火気から引火する可能性を考える。この時、火気と水素漏えい部の間に必要な距離を取ることによって引火しないようにすることが有効な安全対策である。すなわち、水素の爆発下限界濃度4%に安全率（1/4）をかけた水素1%濃度の到達距離以上離せば、水素に引火することはないと言える。この距離は火気離隔距離と言

われている。

6.2.2. 障壁の利用

水素スタンドの安全性評価の結果、安全対策のひとつとして、水素スタンドの高圧ガス設備から敷地境界まで6m 離隔することとした（敷地境界距離ならびに火気離隔距離）。水素スタンドの安全性を確保する観点から必要な対策であるが、普及を促進する観点からさらに短縮することも必要である。そこで、水素スタンド周りの障壁に着目した。水素スタンドはガソリンスタンドと同様に車両が進入する面以外を防火壁で囲まれている上、図 6.2.2-1 に示すように高圧ガス設備とディスプレイ間を障壁（障壁は防火壁よりも頑丈）で区切っている。この障壁を有効に設置すれば敷地境界距離と火気離隔距離を短縮でき、普及に必要なコンパクトな水素スタンドに近づくと考えた。

事故シナリオがピンホール漏えいの場合、障壁は外部のヒトに対する爆風圧と噴出火炎の影響度を軽減するため、敷地境界距離を短縮しても影響度は大きくならず許容できる範囲に抑制することができる。したがって障壁により敷地境界距離と火気離隔距離を短縮するためには、漏えいした水素の1%濃度到達距離を検討すればよく、この検討にCFD を利用した。

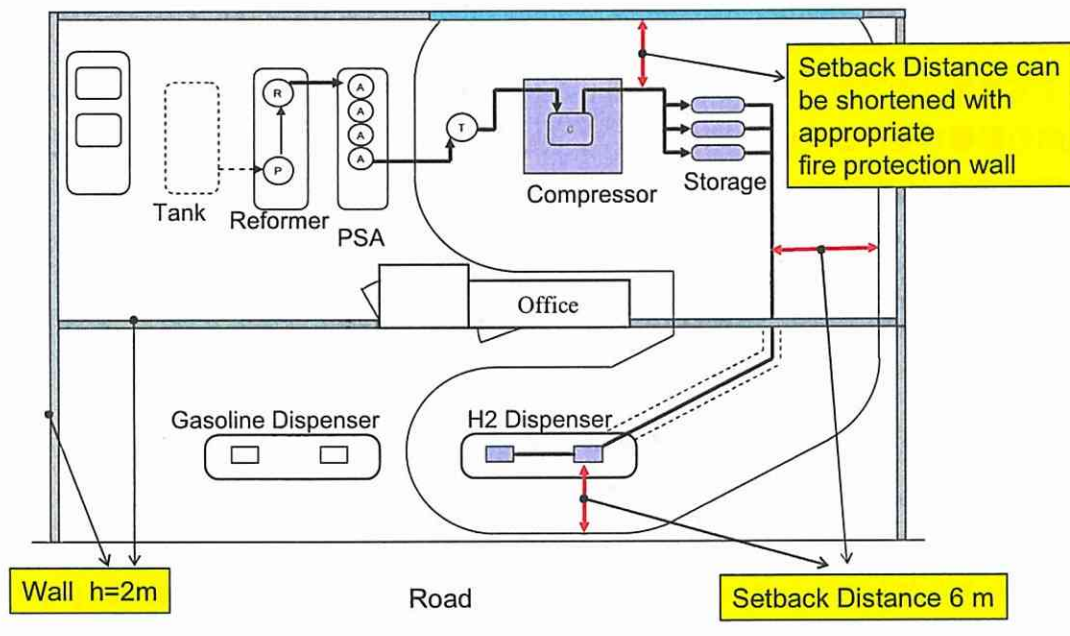


図 6.2.2-1 水素スタンド周りの障壁の略図

6.2.3. 開口径と水素漏えい/拡散実験

水素スタンドにおいて、想定されるピンホールなどの開口部の形状は、使用している材料、溶接の有無、部位、構造などによって様々な形状になり、一般化することは難しい。本研究では、水素スタンドの安全性確保のため保守的に考えて、開口部が同面積の場合最も抵抗が少なく大量の水素が漏えいする円形を採用した。

ピンホール部は、圧縮天然ガススタンド（以下、CNG スタンドと言う）における検討を参考に開口径 0.2mm とした[18]。これは過去に LPG 容器の腐食に起因するピンホールからの漏えい事故があり、このときのピンホール径の具体値として「径 0.03mm 程度」と定義された。一方、溶接欠陥によるピンホール径は示されていないが、腐食ピンホール（0.03mm）の場合の事故後の処置と溶接欠陥ピンホールの場合の事故後の処置を比較すると、漏えい量および開口径は 腐食ピンホール > 溶接欠陥ピンホール であったと推定できる。ここでは溶接欠陥ピンホール径は安全率を見込んで

0.1mm としている。これに加えてフランジから漏えいするケースも考慮し、さらに安全率（腐食ピンホールの 6.7 倍）を見込んで開口径 0.2mm で評価することとしている。

40MPa の水素を開口径 0.2mm のノズルから噴出させた場合の水素濃度分布について、岡林らは実験とシミュレーションを使って正確に求めている[19]。これによると、水素の爆発下限界濃度 4% の到達距離は 1.3m、爆発下限界濃度に安全率 1/4 を乗じた水素 1% 濃度到達距離は 5.3m である。この値をリファレンスデータとした。

6.2.4. 障壁による水素拡散への影響検討

数値解析は、流体解析コードとして実績のある FLUENT6.2 (ANSYS 社) を用い、水素濃度分布のうち特に 1% 濃度の到達部に着目して検討を行なった。

図 2 にピンホール漏えいを模擬した水素噴出ノズルと解析対象を示す。ノズルは全長 10mm、ノズル内直径 1.2mm、ノズル外直径 1.4mm の円筒型で開口部は 0.2mm とした。

解析領域は、幅 4m (中央断面に対象境界条件を適用したため、計算上は半分である) × 高さ 3m × 奥行き 10m の矩形とした。ノズルは底面から高さ 1m に設置し、噴出した水素が障壁に衝突した時の拡散状況を検討するため、ノズルから 1m ごと 3ヶ所にその有無を切り替える事の出来る障壁を設置した。図 6.2.4-1 水素噴出ノズルと解析対象を示す。

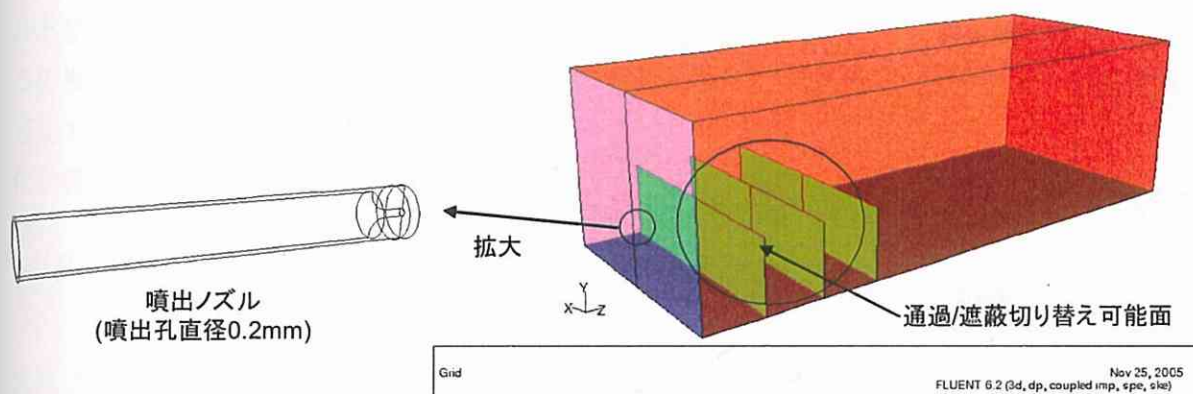


図 6.2.4-1 水素噴出ノズルと解析対象

解析条件は、定常圧縮性粘性流れを仮定し、理想気体の状態方程式を適用して Reynolds 平均 Navier-Stokes (RANS) 方程式を解いた。乱流モデルには円形噴流の予測に適している Realizable $k-\epsilon$ モデルを用いた[20]。以下に質量保存方程式 (連続の式) と Reynolds 平均 Navier-Stokes (RANS) 方程式を示す。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[u \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j})$$

$$u_i = \overline{u}_i + u'_i$$

Realizable k-ε モデルでは、k および ε に対するモデル化された輸送方程式は以下のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon + \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S \varepsilon$$

ここで

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

$$\mu t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\varepsilon}}$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}}$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k$$

$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k$$

$$A_0 = 4.04, \quad A_s = \sqrt{6} \cos \phi$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W), \quad W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

モデル定数は以下の通り

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_2 = 1.9, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.2$$

メッシュは、ノズル噴出口付近（図 6.2.4-2）でヘキサメッシュ、ノズル内部をプリズムメッシュとし、それ以外はテトラメッシュとした。ただし、ヘキサメッシュとテトラメッシュの間にはピラミッドメッシュが存在する。最小メッシュはノズル開口部の内部にあり、そのサイズは開口部直径の約 1/10 (=0.02mm) とした。また、領域内のメッシュサイズの上限は約 400mm とした。領域内のメッシュサイズはノズルや障壁周辺は細かく、離れるにしたがって大きくした。さらにノズルの噴流を精度よく解析するため、図 6.2.4-3 のようにノズル噴出方向の中心線上のメッシュサイズを細かくし、ノズルから離れるかまたは、中心線から離れるにしたがってメッシュサイズを大きくした。

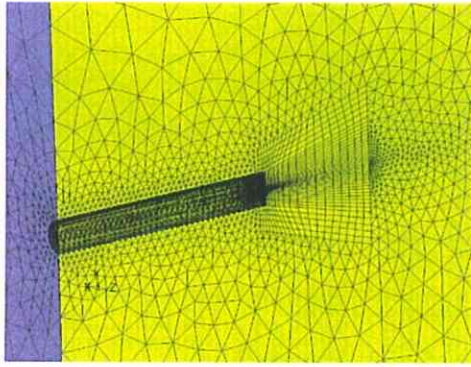


図 6.2.4-2 ノズル先端付近のメッシュ

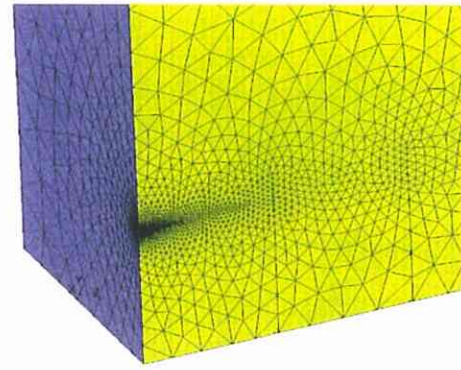


図 6.2.4-3 ノズル噴出方向の中心線上で微細化されたメッシュ

使用したソフトウェア FLUENT を含め、流体解析の技術には不完全な要因が多々ある。例えば、メッシュ依存性、乱流モデル、流動項の差分スキームと離散化スキーム、物性値の近似、境界条件の単純化などが挙げられる。このため、定量的な予測精度には限界があり、計算の誤差要因に注意して使用する必要がある。今回の検討では、化学種輸送方程式（下記参照）の拡散項に含まれる乱流シュミット数（ Sct ：乱れによる拡散は局所濃度勾配と分子拡散+乱流拡散で表され、シュミット数は乱流拡散に使用する定数である[21]）で数値誤差の要因を代表させることとした。FLUENT のデフォルト値 0.7 に対し、今回は 1.7 を採用することでリファレンスと同じ 1% 濃度到達距離 5.3m を得た。この操作は、汎用性は犠牲になるが、同一の計算手法を用いてのケーススタディーに展開することは可能である。

化学種の輸送方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i$$

乱流による質量拡散式

$$\vec{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sct}\right) \nabla Y_i$$

こうして漏えいした水素が障壁に衝突する場合を CFD で解析した。図 6.2.4-4 に水素 1% 濃度の領域表面を水平方向到達距離（ z 方向）で色付けして示す。この結果、漏えいした水素は障壁がない場合最も遠くへ到達し、障壁に衝突した場合は、拡散が促進されて到達距離が短くなることが分かった。

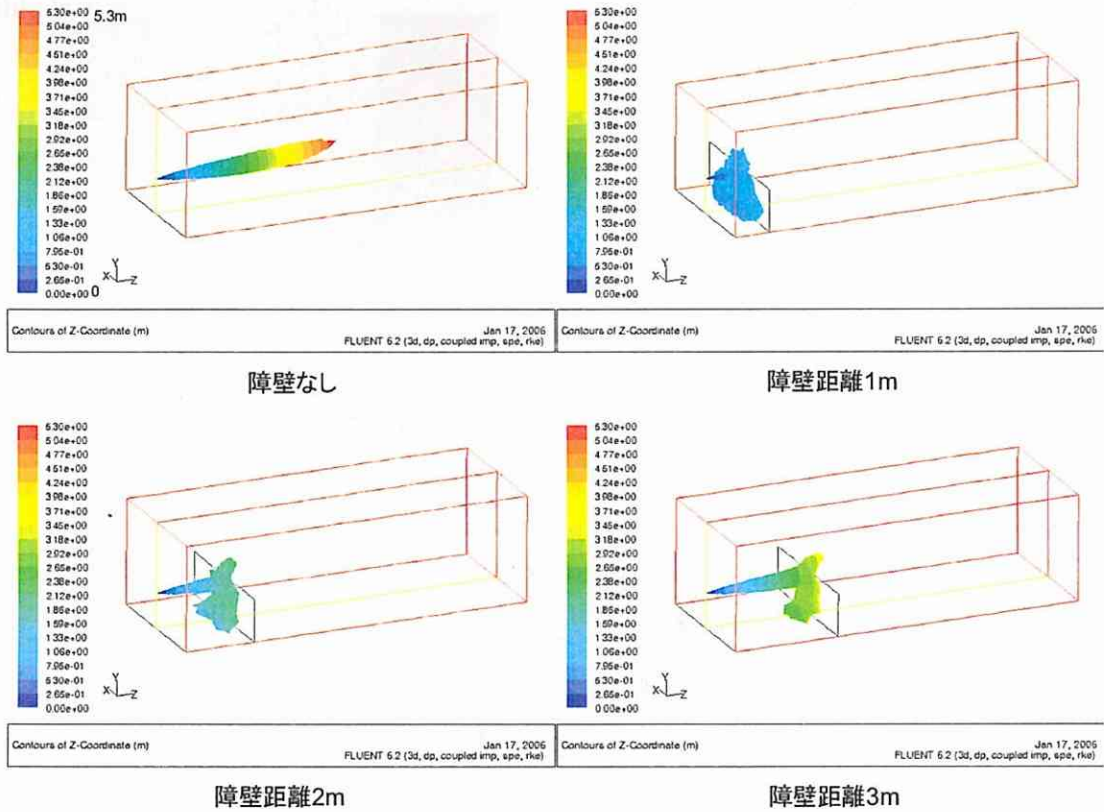


図 6.2.4-4 障壁あり/なしにおける水素 1%濃度到達距離

6.2.5. ケーススタディーと解析結果

漏えいした水素が障壁に衝突すると拡散が促進されて安全な方向に移行することから、最も不安全なケースは漏えいした水素が障壁の上端を乗り越えて敷地境界へ到達することである。図 6.2.5-1 に示すように、敷地境界に対して 6m 未満となる範囲を遮へいするための障壁高さ h と漏えい点（開口部）と障壁との距離 a の組み合わせは無限に存在するため、全てのケースについて実験を行う事は現実的でない。そこで、代表的な放出角度（ θ ：開口部からの水平方向と水素放出方向のなす角）と水素 1%濃度到達距離を CFD で求めた。

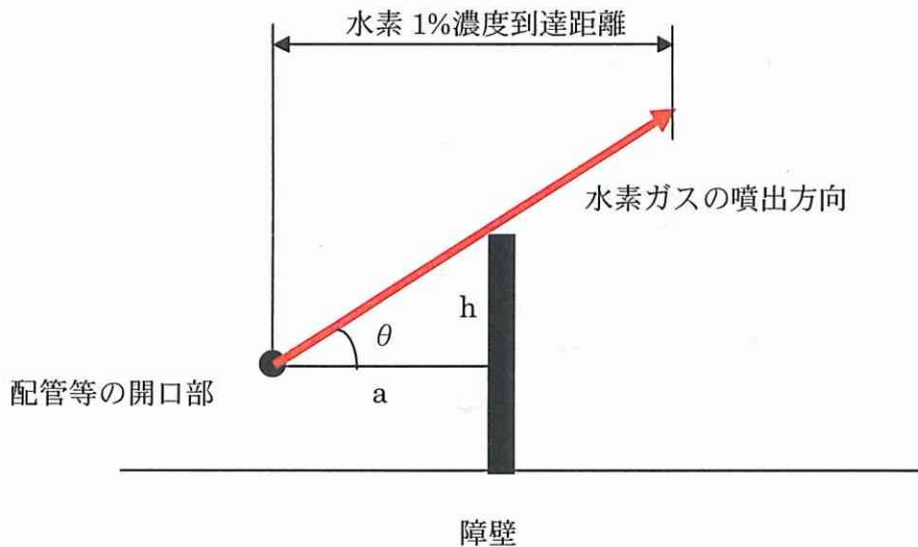


図 7.2.5-1 障壁と敷地境界の関係図

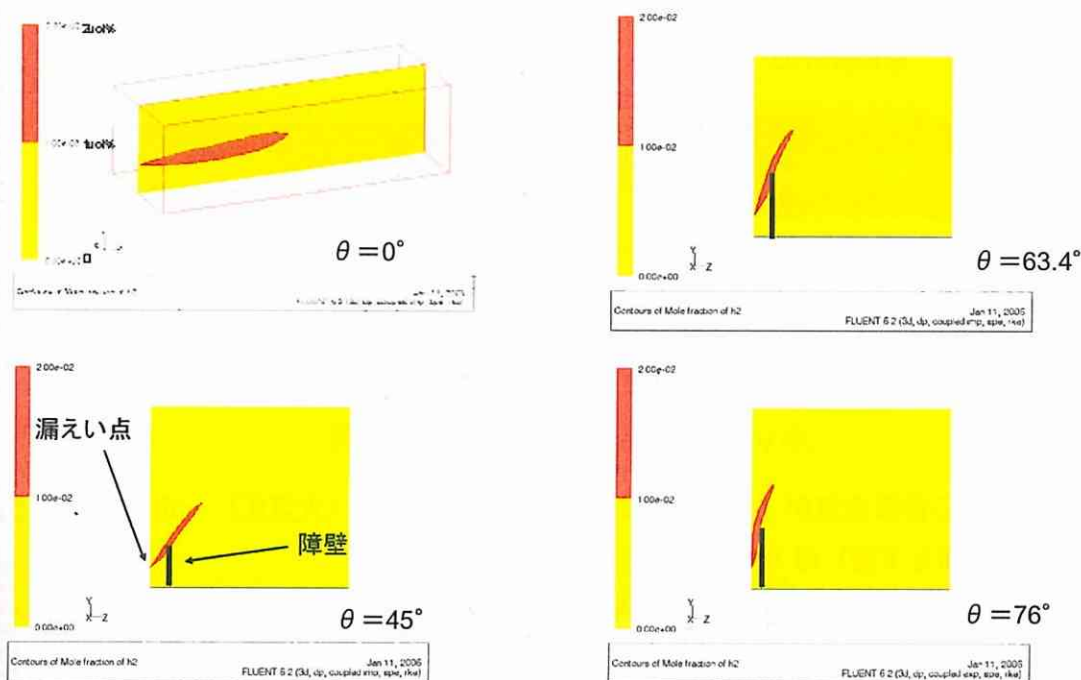


図 6.2.5-2 CFD によるケーススタディーの一部（水素 1% 濃度到達距離）

その結果、敷地境界に対して 6m 未満となる範囲が遮へいされていれば、水素 1% 濃度の水平方向の到達距離は常に $6\cos\theta$ (m) 以下になる。したがって、敷地境界距離を $6\cos\theta$ (m) に短縮しても敷地外部の火気から引火する可能性は極めて低いことを示すことができた。(図 6.2.5-2)

6.3. 隣接するキャノピーへ水素が噴出した場合の水素漏えい拡散の検討

水素スタンドをガソリンスタンドに併設した場合を考える。水素スタンド側にキャノピー（ディスプレイ上部の屋根）を設ける場合は、法に従って水素ガスがキャノピー下部に滞留しない構造にしなければならない。しかし、ガソリンの蒸気は空気より重いため、法ではガソリンスタンド側のキャノピーについて滞留防止の規定がない。したがって、漏えいした水素ガスがガソリンスタンド側のキャノピー下部に滞留してしまう可能性がある。そこで、水素スタンドをガソリンスタンドに併設した場合の最も厳しい条件として、漏えいした水素を滞留防止構造でないガソリンスタンド側のキャノピー下部へ向かって噴出させた場合のシミュレーションを実施してその安全性を検討した。

6.3.1. 噴出条件の検討

はじめに、水素濃度 1% 付近の精度を保ちつつ、メッシュ作成や計算時間の効率を上げるために水素噴出条件の検討を行なった。今回の検討では、噴出した水素が壁面に衝突することなく自由に流れることから、水素自由噴流の広がり方を正しく模擬できる噴出境界条件の採用が重要となる。そこで、前述の(a)ノズル構造を考慮した圧縮流れの解析手法の結果を基準として、(b)ノズル構造を無視した非圧縮流れ解析手法の妥当性を評価した。

(a) 圧縮流

解析領域は軸対称 2 次元とし、寸法は長さ 10m、直径 2m とした。(図 6.3.1-1 左)

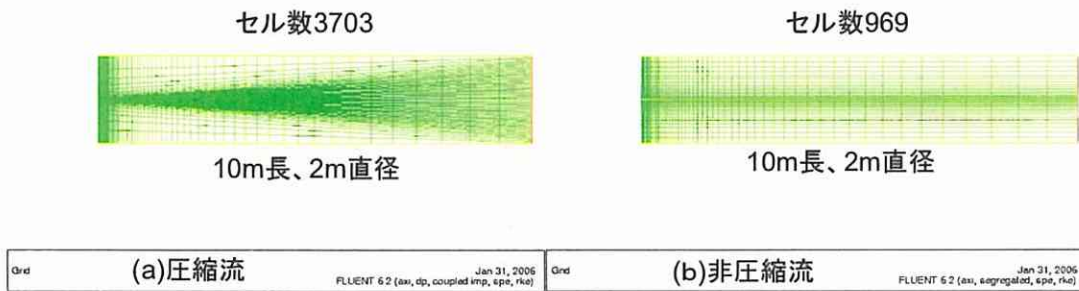


図 6.3.1-1 解析領域全体のメッシュ分割

図 6.3.1-1 の左側から常温空気が 1.0m/s で流入する。右側は圧力（大気圧）一定で流出する。外周部（図 6.3.1-1 の上面と下面）はせん断応力の無い境界とした。

解析領域の左端に設置した水素噴出ノズルを拡大して図 6.3.1-2 左に示す。

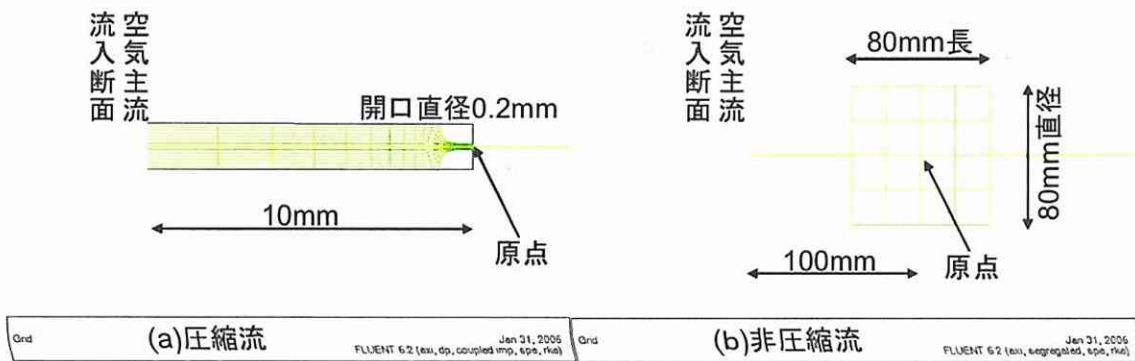


図 6.3.1-2 水素噴出部

図 6.3.1-2 左にノズル内部のメッシュ分割のみ示した。ノズル内部の左端は、40MPa、293K の水素入口断面であり、右側の 0.2mm 直径の開口部より、系内に噴出する。ノズル内部圧力と大気開放圧力の比が大きく、ノズル噴出部近傍では圧縮性の影響が大きい。しかし、ノズル噴出部以外の大部分の領域では、温度と圧力が一定であり非圧縮とみなせると考えた。

ここでは、圧縮性を考慮するために気体密度は理想気体方程式に従うとした。また、圧縮流解析に好適な FLUENT6.2 の連成ソルバを採用した。その他、乱流モデルと化学種輸送モデルを用いている。

(b)非圧縮流

解析領域を図 6.3.1-1 右に示す。寸法は(a)と等しくしているが、ノズルを省略できるためセル数は約 1/4 にすることができた。図 6.3.1-2 右に、水素湧き出し部である 80mm 長、80mm 直径の円筒領域を示す。この領域から、40MPa、293k に相当する質量と運動量を持った水素が湧き出すと仮定した。湧き出し量は圧縮性流体の等エントロピ流れの式を使った[22]。

解析結果を図 6.3.1-3 に示す。本検討で注目している水素濃度分布（1~2%）を比較すると異なる二つの条件での結果はほぼ等しいといえる。とりわけ水素噴流の広がり支配する渦粘度係数を図 6.3.1-4 に示す。(b)非圧縮流ではノズルから供給される乱れ (k と ϵ の湧き出し) を無視しているが、この条件では k と ϵ の湧き出しの影響は小さいことから、異なる二つの条件での結果はほぼ等しい。

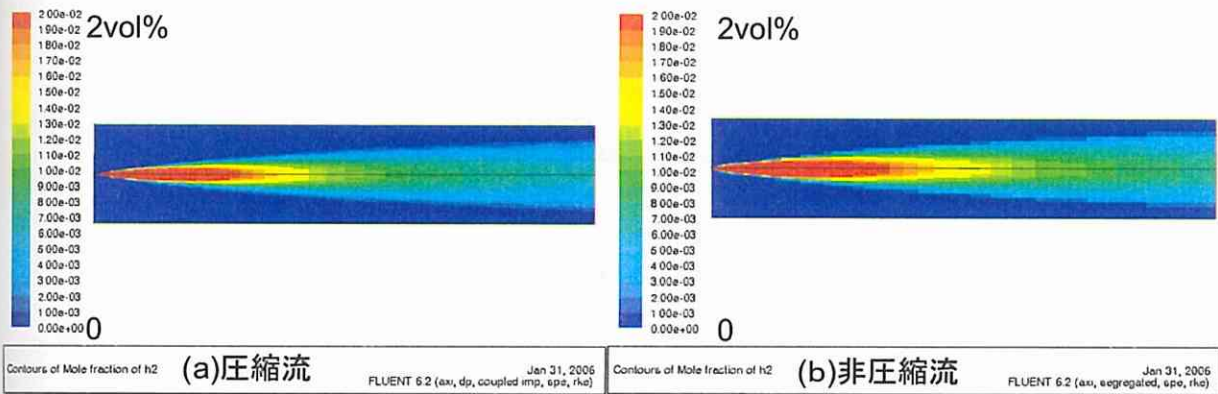


図 6.3.1-3 水素濃度分布 (体積分率)

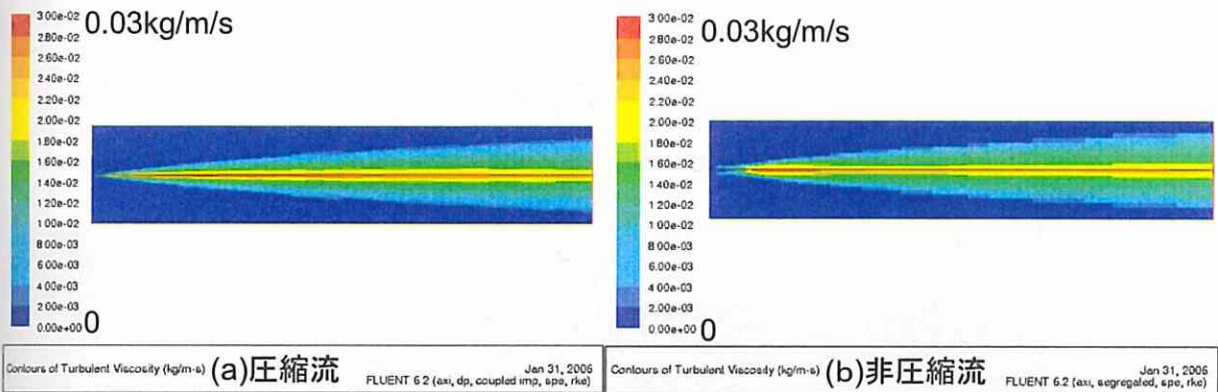


図 6.3.1-4 渦粘度係数

以上から、メッシュ作成と計算時間の効率化のため、詳細ノズル構造を無視して非圧縮流近似する場合、水素質量と運動量の湧き出しを考慮すれば、 k と ϵ の湧き出しを無視しても本検討で注目する水素濃度において水素噴流の広がりにはほとんど影響しない。計算時間については、(a)圧縮流は 1 時間程度、(b)非圧縮流は 10 秒程度であり(b)非圧縮近似を使うと非常に効率的であることがわかった。

6.3.2. キャノピー下部での水素滞留の検討

水素スタンドにおいてディスプレイ上部にキャノピーを設ける場合は、高圧ガス保安法により水素ガスが滞留しない構造にしなければならない。しかし、消防法では給油取扱所の上部に設けるキャノピーの滞留防止に関して特に規定がされていないことから、漏えいした水素ガスが滞留する構造になっている可能性がある。そこで、水素スタンドを給油取扱所に併設した場合のうち、水素ディスプレイと給油ディスプレイを想定可能な範囲で近接させ、かつ最も厳しい条件として漏えいした水素が滞留防止構造でない給油取扱所のキャノピー下部へ向かって噴出した場合のシミュレーションを実施した。

シミュレーションの結果、想定した温度、風速条件下では給油取扱所側キャノピー下部に到達する水素濃度は 1% 以下であることを示した。(図 6.3.2-2)

なお、本検討では定常近似を用いて解析したため、時間無限大の解析となり水素と空気が完全に混合した結果が得られているが、噴出開始直後の状況については非定常計算を実施して水素の滞留が起こっていないことを確認している。

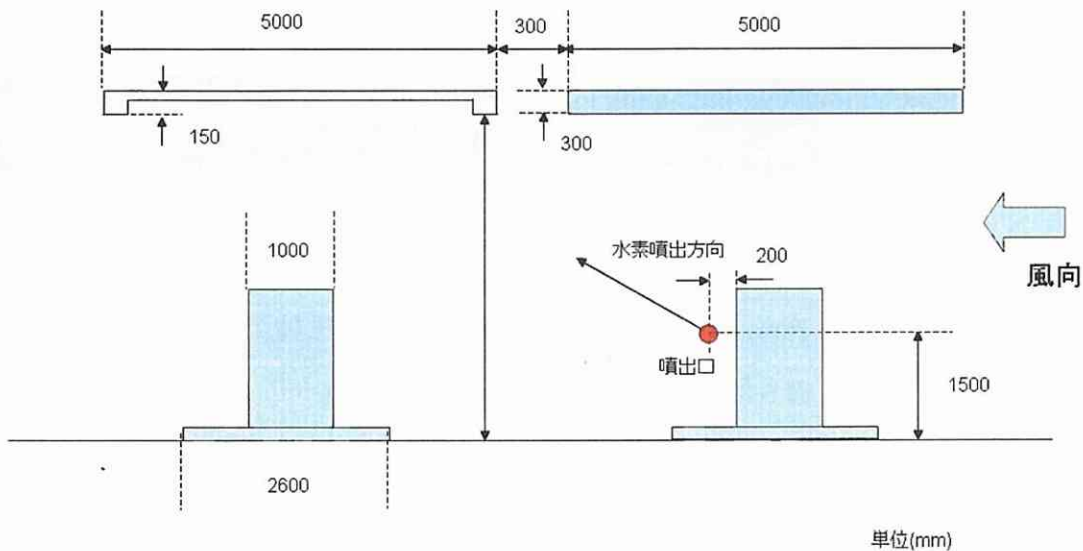


図 6.3.2-1 ディスペンサーとキャノピーの位置関係
 左：ガソリンディスペンサーとキャノピー（滞留防止構造でない）
 右：水素ディスペンサーとキャノピー（滞留防止構造）

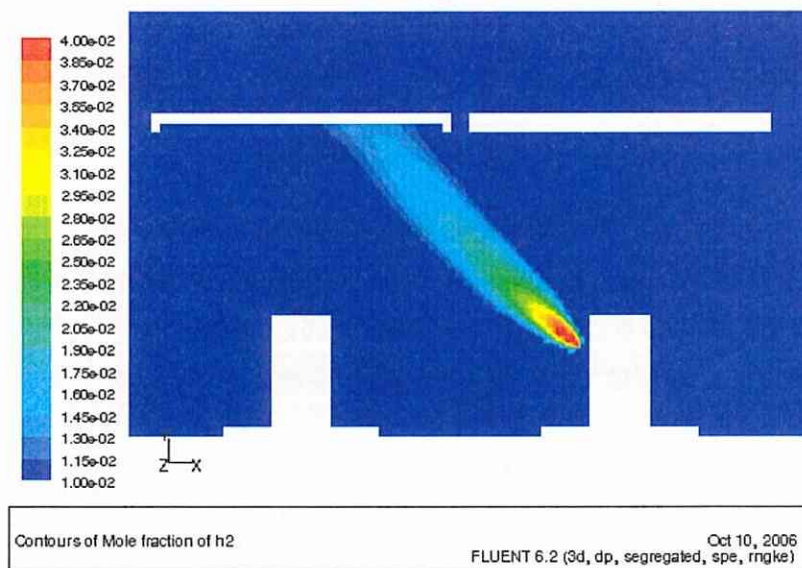


図 6.3.2-2 水素モル分率分布（無風状態）

6.4. 併設型スタンドモデルの検討

日本のガソリンスタンドには大きく3つのタイプがある。

- ①キャノピーの小さい屋外型ガソリンスタンド
- ②キャノピーが大きい屋内型ガソリンスタンド
- ③顧客が自ら給油を行うセルフガソリンスタンドである。

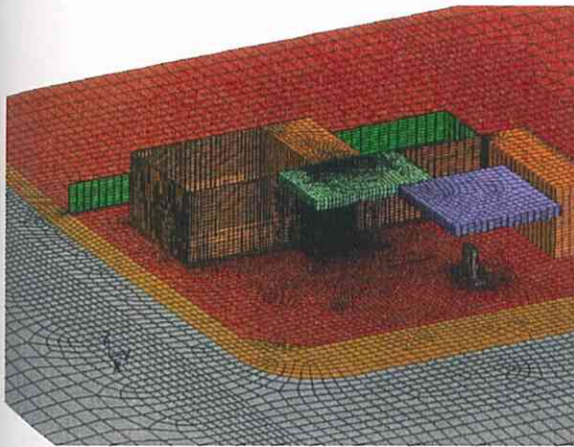
現時点で水素スタンドを併設する事が許されているのは①屋外型ガソリンスタンドだけで、その他は認められていない。①屋外型ガソリンスタンドと②屋内型ガソリンスタンドの違いは、キャノピーの大きさである。そこで、漏えいした水素の振る舞いを明らかにすることで②屋内型ガソリンスタン

ドにも水素スタンドを併設できるようにすることを考えた。

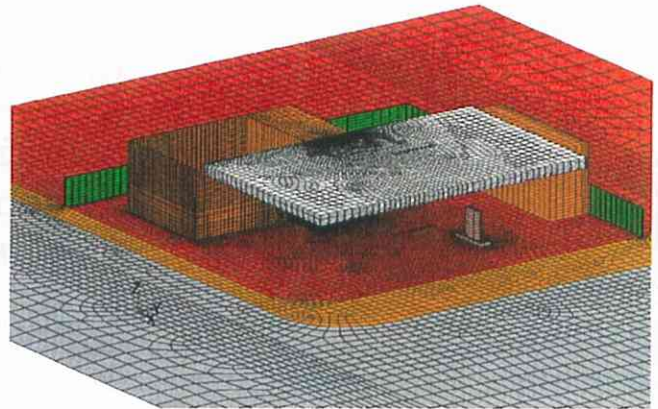
水素スタンドから水素が漏えいし、漏えい箇所の上にキャノピーがある場合、キャノピーの大きさによる水素の拡散の違いについてCFDを使って解析を行なった。解析条件は以下の通り。解析に用いたメッシュを図6.4-1に示す。

- ・キャノピー下部の水素ディスペンサーから水素漏えいを想定
- ・噴出圧力： 40MPa
- ・開口径： 0.2mm
- ・気温： 300K (27℃)
- ・風速： 0.3m/s、3m/s
- ・キャノピーの大きさ： 大 (屋内型ガソリンスタンドモデル)
小 (屋外型ガソリンスタンドモデル)

解析の結果、キャノピーの大きさは水素の滞留にほとんど影響が無いことが分かった (図6.4-2)。

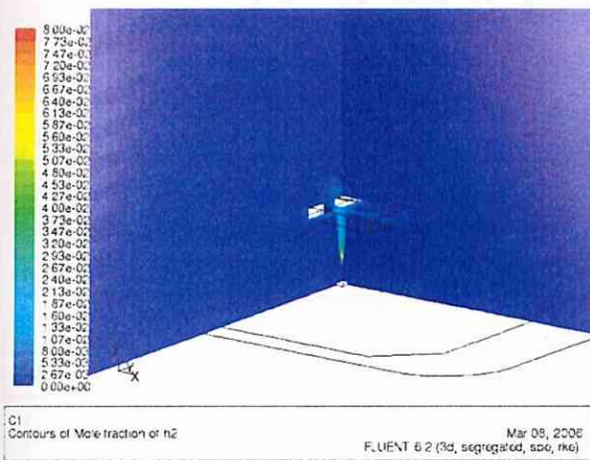


解析メッシュ・キャノピー小

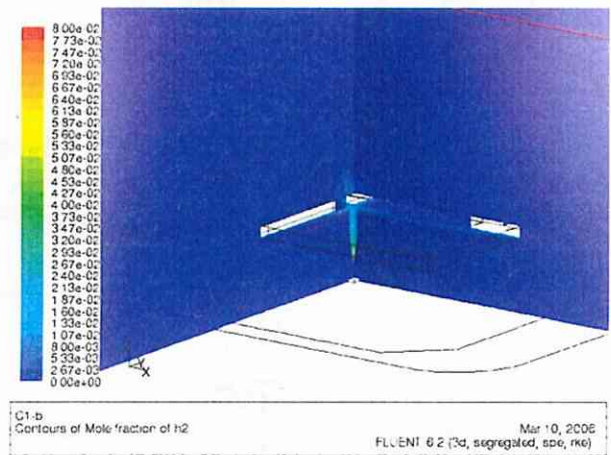


解析メッシュ・キャノピー大

図6.4-1 SS併設水素スタンドの解析メッシュ



水素濃度分布・キャノピー小
(風速 0.3m/s、開口径 0.2mm)



水素濃度分布・キャノピー大
(風速 0.3m/s、開口径 0.2mm)

図6.4-2 SS併設型水素スタンドの解析結果

6.5. 蓄圧器の地下設置モデルの検討

6.5.1. 検討の目的

水素スタンドの機器を立体的にレイアウトし敷地面積を有効に利用するため、高圧ガス設備のひとつである蓄圧器を地下室へ設置できるようにする安全対策案を作成する。今回は、その実現に向けてリスクアセスメントを行ない地下設置の安全性を検討する。

6.5.2. 類似スタンドの現状調査

圧縮天然ガススタンド（CNGスタンド）においては、高圧ガス設備の地下設置が認められているが、水素スタンドでは認められていない。

(1) 法令

高圧ガス保安法一般則第7条第2項第3号（CNGスタンド）

地盤面下に高圧ガス設備を設置する室の上部は、十分な強度を有し、かつ、当該室の構造に応じ漏えいしたガスの滞留を防止するための措置を講ずること。

(2) 実施例の調査



図 7.5.2-1 機械設備を地下に設置した例
平成町エコステーション（神奈川県横須賀市）
天然ガス自動車フォーラム HP より

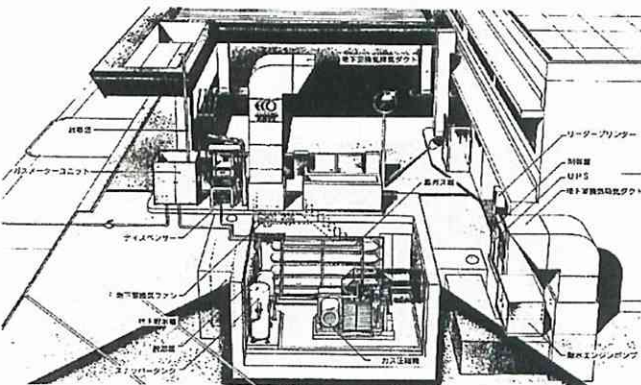


図 7.5.2-2 蓄圧器を地下に設置した例
(社) 日本ガス協会 HP より



図 7.5.2-3 キャノピーと地上の2系列の例(参考)
板橋エコステーション（東京都板橋区）

6.5.3. 実現のイメージ

蓄圧器を地下または屋上に設置した場合、水素スタンドの敷地をコンパクト化できる可能性について市原水素ステーションを例にそのイメージを示す。図 6.5.3-1 に現状を示す。図では蓄圧器を Accumulator としている。蓄圧器は高圧ガス設備であるため、周りに安全距離をとらなければならない。図 6.5.3-2 に見直し後を示す。蓄圧器を充電場や設備エリアの地下に設置したり、事務所上またはキャノピー上に屋上設置にすることによって、レイアウトに自由度が生まれ敷地のコンパクト化が期待できる。

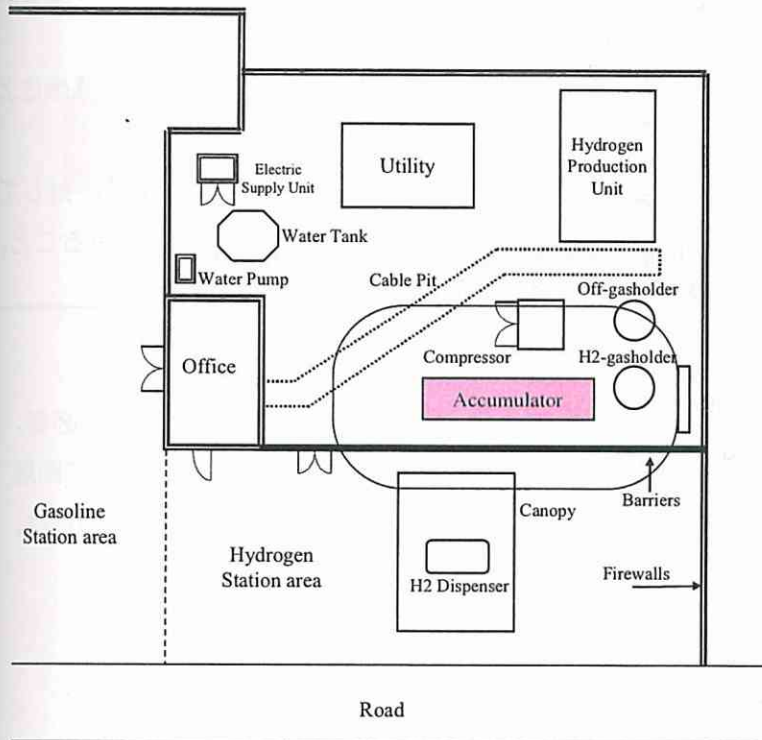


図 7.5.3-1 現状
(市原水素ステーションの例)

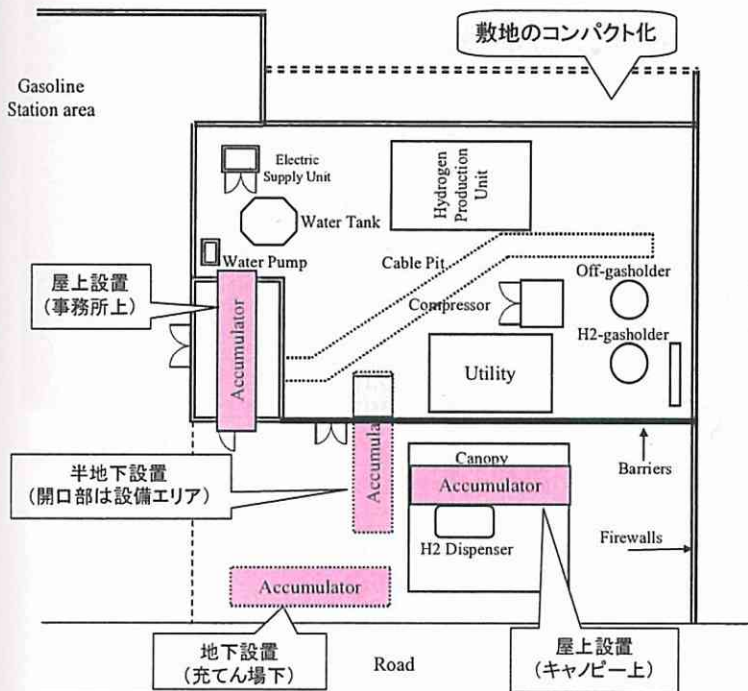


図 7.5.3-2 見直し後
(蓄圧器を地下または屋上に設置し、コンパクト化を目的にレイアウト変更を試みた)

6.5.4. 敷地境界に対し 6m 以上の距離を有することと同等の措置（例示基準 56）の利用

CNG スタンドで認められている既存の法令（例示基準 56）が水素スタンドにも適用できると仮定し、これと地下設置を組み合わせることによって、水素スタンドのコンパクト化が実現できる。

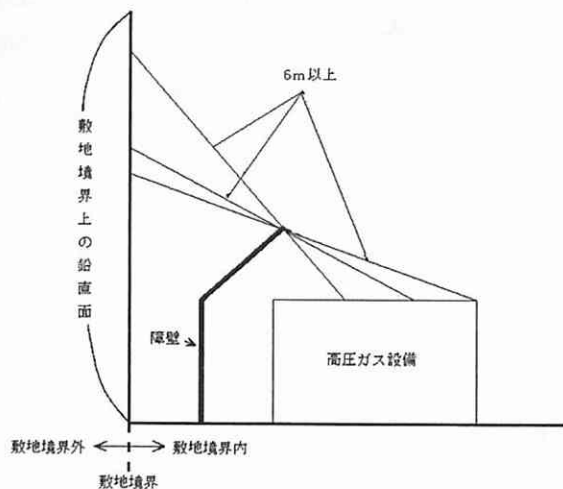


図 6.5.4-1 例示基準 56 の説明図

56. 敷地境界に対し 6m 以上の距離を有することと同等の措置

敷地境界に対し 6m 以上の距離を有することと同等以上の措置は、高压ガス設備と敷地境界との間に、次の各号に掲げる基準に適合する障壁を設置することをいう。

1. 本基準 22. 障壁中 1.1～1.3 に掲げる基準によるものであること。
2. 高压ガス設備の外表面から敷地境界に対して 6m 未満となる範囲が遮蔽されていること。
(図参照) 以下略

コンパクト化のイメージを図 6.5.4-2 に示す。左上：通常の地上設置では敷地境界まで 6m 必要。左下：防火壁または障壁を高くして距離を短縮した例。右上：上部を開口した半地下に設置して距離を短縮した例。右下：屋根つきの地下室に設置して距離を短縮した例。これらを実現するためには、安全性を検証した上で規制の見直しが必要である。

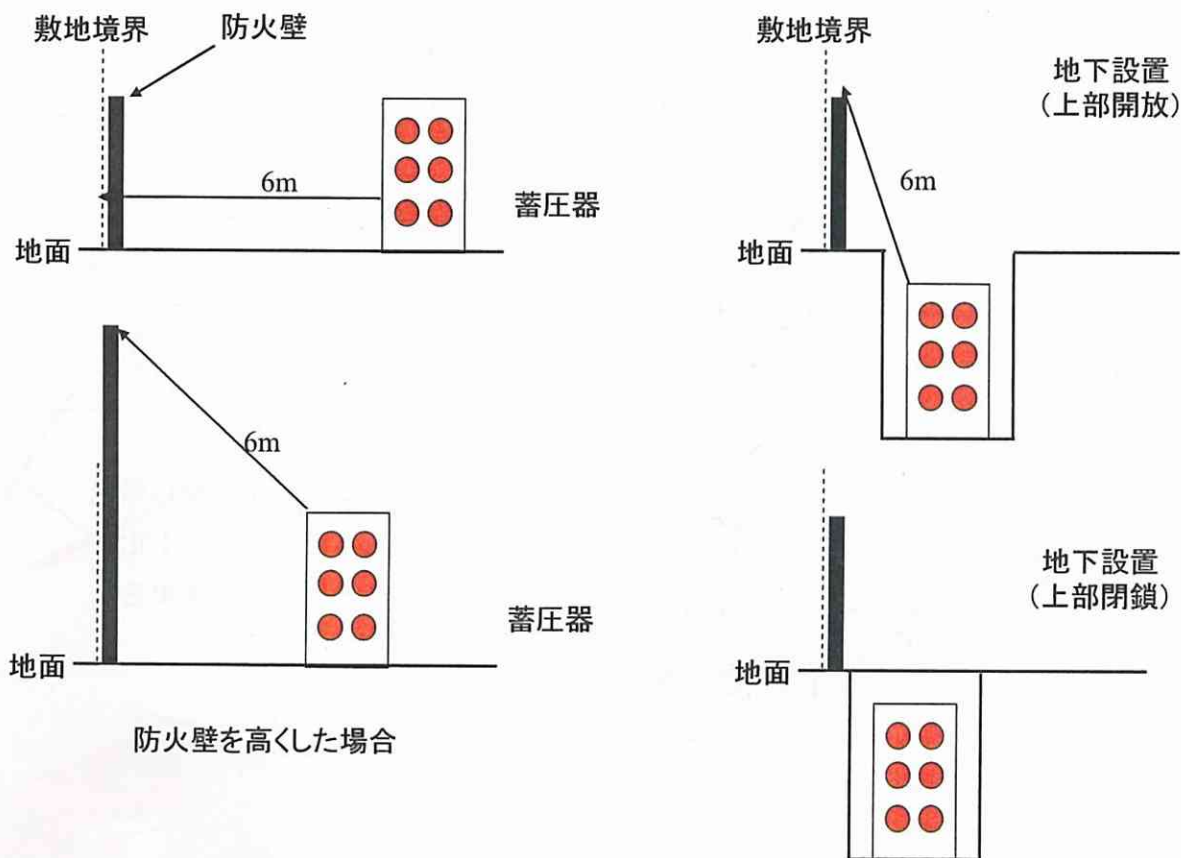


図 6.5.4-2 例示基準 56 を利用したコンパクト化のイメージ

6.5.5. 蓄圧器の地下設置モデルの定義

検討を行なうにあたり、蓄圧器の地下設置モデルを定義する。蓄圧器の容量は、将来燃料電池自動車普及した時期に必要な容量（3500L=1400Nm³）とした。これをラックに設置し、地下室に設置する場合を想定して蓄圧器室をモデル化した。以下に地下設置モデルを示す。

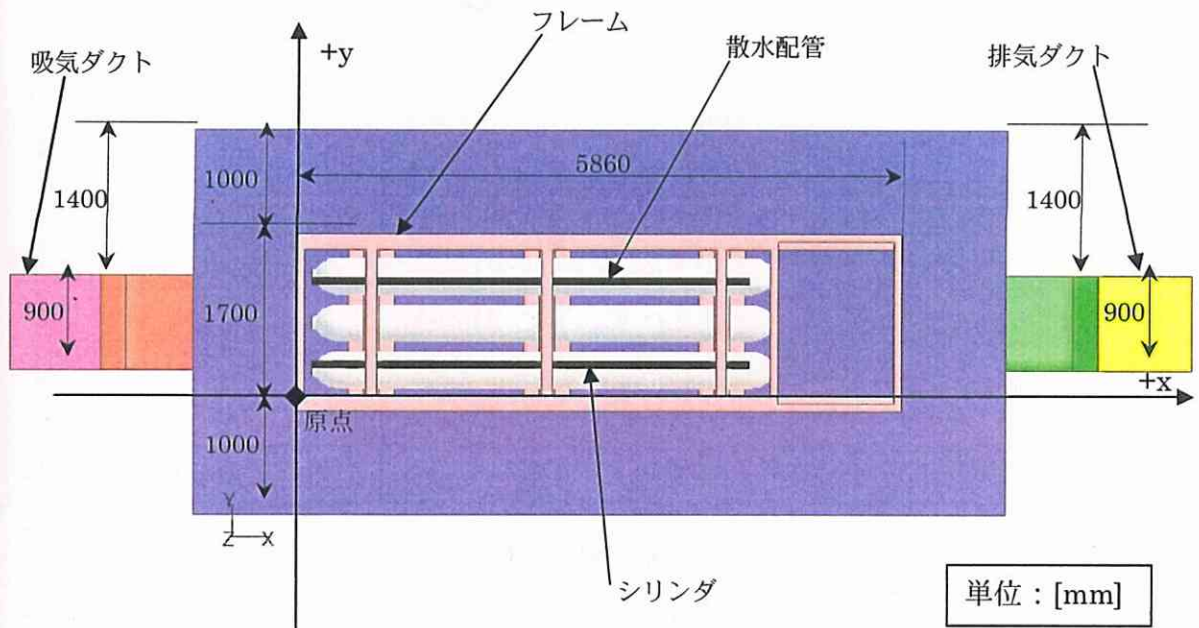


図 6.5.5-1 地下設置モデル（横置き、上面図）

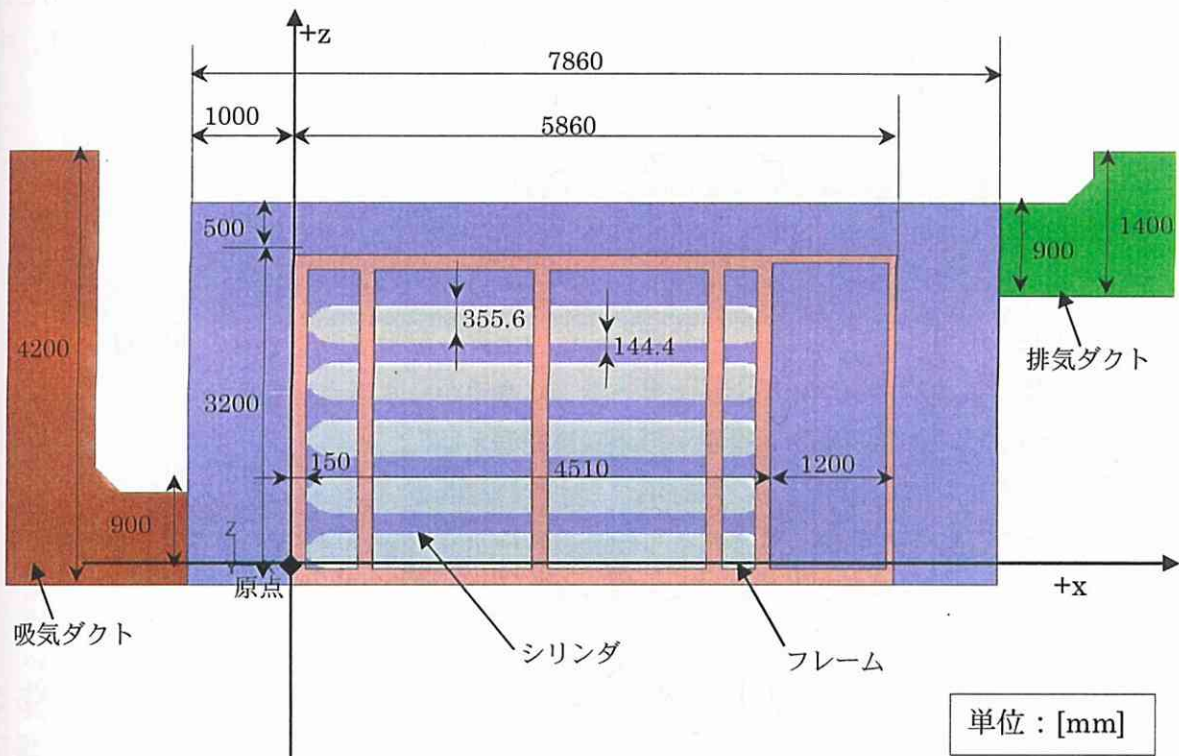


図 6.5.5-2 地下設置モデル（横置き、側面図）

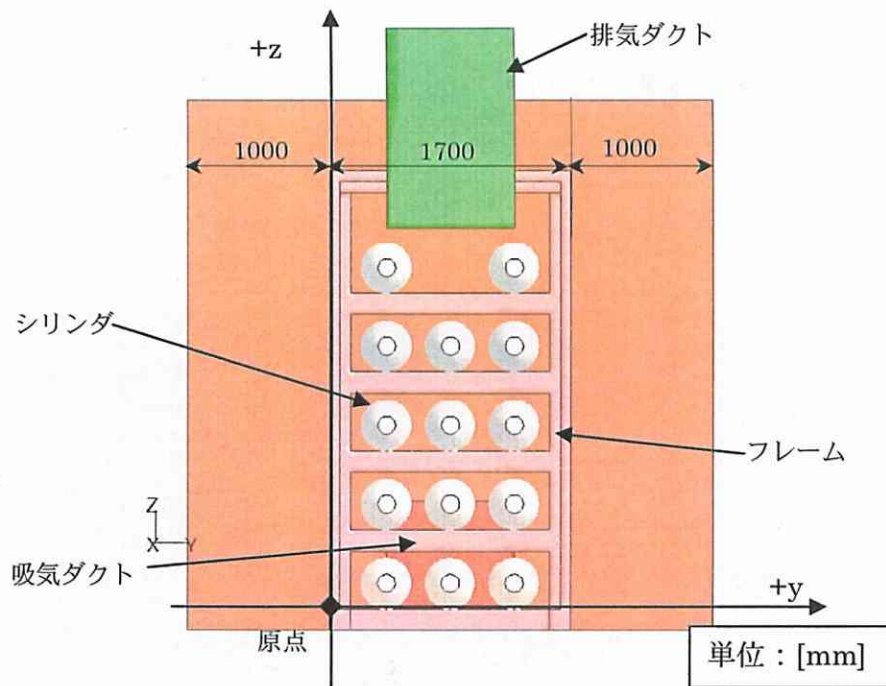


図 6.5.5-3 地下設置モデル (横置き、正面図)

6.5.6. 事故シナリオの抽出

リスクを同定するためには、そのベースとなる事故シナリオを徹底的に洗い出すことが必要である。本検討では、事故シナリオの抽出、リスクの同定に定評のある HAZOP と FMEA を用いて抽出を行った結果、38 件抽出することが出来た。事故シナリオの一覧を表 6.5.6-1、表 6.5.6-2 に示す。中でも代表的な事故シナリオを以下に示す。

- ①耐圧部材が水素脆化により亀裂発生→水素の連続漏えい
- ②腐食により配管にピンホール発生→水素の連続漏えい
- ③バルブのグランド部劣化→水素の連続漏えい
- ④自動弁の作動不良 (勝手に開または閉) →配管内の圧力上昇→配管破裂→水素の連続漏えい
- ⑤圧力指示計の誤指示によりポンベの圧力が上昇→ポンベ継手から水素連続漏えい
- ⑥直射日光によるポンベの加熱→ポンベ継手から水素連続漏えい
- ⑦火災の輻射熱によるポンベの加熱→ポンベ継手から水素連続漏えい
- ⑧地震により蓄圧器ユニットが転倒→外力により配管破断→水素の連続漏えい
- ⑨水素スタンドへヘリ墜落→外力による蓄圧器破壊→爆発

ここで、蓄圧器から水素が漏えいする事故シナリオは、蓄圧器を地上に設置した場合と同じであると考えた。異なるのは、水素漏えい後に蓄圧器室内に水素ガスが滞留し、滞留した水素に着火・爆発が発生することである。

表 6.5.6-2 蓄圧器廻りの事故シナリオ (HAZOP)

1-1 35MPa充てん対応水素スタンダムモデル (オンサイト型) H A Z O P 表

No	セクション名	パラメータ	ガイドワード	偏差	偏差の原因	偏差原因による影響	機軸コード	トリガー現象	基本ハザードシナリオ	76 異常ハザード		77 原因ハザード	78 異常ハザード	79 異常ハザード	80 異常ハザード	81 異常ハザード	82 異常ハザード	83 異常ハザード	84 異常ハザード	85 異常ハザード	86 異常ハザード	87 異常ハザード	88 異常ハザード	89 異常ハザード	90 異常ハザード		
										トリガー現象	トリガー現象																
216	蓄圧器廻り	圧力	More	圧力上昇	運転日次によるポンプ過熱	ポンプ、配管内上昇→緩急手等より水素の異常加熱	80	燃料日光	771	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走
217	蓄圧器廻り	圧力	More	圧力上昇	火災によるポンプ、配管の過熱	ポンプ、上昇管の過熱	80	火災(火災警報)	721	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走
218	蓄圧器廻り	圧力	Less	圧力急低下	【天災】地震	蓄圧器ユニット転倒→配管破断→水素の大漏洩	80	地震	731	外圧による配管破断	外圧による配管破断	外圧による配管破断	外圧による配管破断	外圧による配管破断	外圧による配管破断	外圧による配管破断	外圧による配管破断	外圧による配管破断	外圧による配管破断	外圧による配管破断	外圧による配管破断	外圧による配管破断	外圧による配管破断	外圧による配管破断	外圧による配管破断	外圧による配管破断	外圧による配管破断
219	蓄圧器廻り	組成(水分量)	More	水分量増加	原料水の中に含まれる水分の増加	冬季の凍結→凝縮→水素濃度低下	PL	水分量増加	724	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走
240	蓄圧器廻り	温度	More	温度上昇	漏洩水素の炎による蓄圧器ポンプへの過熱	貯蔵室の全水素濃度→蓄圧器ポンプへの過熱	80	水素スタンダム側の火災(漏洩)	723	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走	内圧上昇による暴走
242	蓄圧器廻り	圧力	Less	圧力低下	クレーン倒壊	水素スタンダムに隣接されたクレーンの前倒→クレーンが蓄圧器に衝突→ポンプへの過熱	80	クレーン倒壊	730	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走
243	蓄圧器廻り	圧力	Less	圧力低下	ヘリ/航空機墜落	水素スタンダムにヘリ/航空機が衝突→ポンプへの過熱	80	ヘリ/航空機墜落	730	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走	外圧による暴走

6.5.7. 安全対策検討

事故シナリオごとにリスクの算定、リスク評価を行ない、リスクが十分小さくなるように安全対策検討を行い、その安全対策を適用した。事故シナリオと対応する主な安全対策を以下の括弧内に示す。

- ①耐圧部材が水素脆化により亀裂発生→水素の連続漏えい
(水素脆化しない適切な材料を選定する：SUS316L)
- ②腐食により配管にピンホール発生→水素の連続漏えい
(腐食しない適切な材料を選定する：SUS316L)
- ③バルブのグランド部劣化→水素の連続漏えい
(定期的な検査を行なう。毎日始業点検を行なう)
- ④自動弁の作動不良（勝手に開または閉）→配管内の圧力上昇→配管破裂→水素の連続漏えい
(定期的な検査を行なう。毎日始業点検を行なう)
- ⑤圧力指示計の誤指示によりポンベの圧力が上昇→ポンベ継手から水素連続漏えい
(定期的な検査を行なう。毎日始業点検を行なう。圧力指示計を二系列にする)
- ⑥直射日光によるポンベの加熱→ポンベ継手から水素連続漏えい
(日よけ設置。ただし、水素が滞留しないこと。スプリンクラー等の温度上昇防止措置設置)
- ⑦火災の輻射熱によるポンベの加熱→ポンベ継手から水素連続漏えい
(敷地境界に防火壁を設置。スプリンクラー等の温度上昇防止措置の設置)
- ⑧地震により蓄圧器ユニットが転倒→外力により配管破断→水素の連続漏えい
(蓄圧器を地盤面に強固に固定する。蓄圧器と遮断弁をひとつのフレーム内に設置する)
- ⑨水素スタンドへヘリ墜落→外力による蓄圧器破壊→爆発
(対策なし。水素スタンドでは避けることができない)

さらに地下設置の場合は、漏えいするすべての事故シナリオに対して、すぐに着火せず水素が地下室内に滞留した後に着火・爆発する事故シナリオができる。いわゆる時間遅れ着火のシナリオである。そこで時間遅れの着火シナリオについては、以下の安全対策を考えた。

- ⑩漏えい検知器＋遮断弁閉止＋警報発令（地下室周辺から退避）
- ⑪換気設備の設置＋常時 ON
- ⑫地下室の強固な天井や壁（爆発時に外部へ影響を及ぼさないため）

38 件の事故シナリオの 1 件ごとに安全対策前と安全対策後でリスク評価を行なった結果、リスクランク H は 27 件→3 件、M は 11 件→21 件、L は 0 件→10 件、本質的な対策ができたもの 4 件となった。これらは蓄圧器を地上設置した場合の事故シナリオと同様であることから、詳細は第 8 章リスクアセスメント結果の考察で述べる。

地下設置では、上記の事故シナリオを元に漏えいした水素がすぐには着火せず、地下室内に滞留し、その後着火・爆発する時間遅れ着火のシナリオが想定される。この対策として前節の⑩⑪⑫を考えた。以下、⑩⑪⑫の検討概要を示す。

⑩漏えい検知器+遮断弁閉止+警報発令（地下室周辺から退避）

ピンホールから水素が漏えいし、地下室内の漏えい検知器が検知して遮断弁を閉止することができれば、水素の漏えいが停止し、漏えいした水素は換気設備から排出される。しかし、極めて可能性は低いと考えられるが、遮断弁よりも上流（蓄圧器側）で漏えいした場合は、遮断弁を閉止しても漏えいを止めることができない。漏えい検知ができれば、遠隔操作で蓄圧器の水素をベントラインから放出して空にすることができるが、地下室内で一定時間漏えいし続ける水素に引火しないとも限らない。地下室では漏えい検知器を確実に作動させ、漏えい検知時は警報発令し従業員等を地下室周辺から退避させることが必要である。また、こうした事態を考慮して、地下室は密閉ではなく一部開放することを検討すべきである。こうすることによって遮断弁よりも上流で開口した場合のリスクを下げることができる。

⑪換気設備の設置+常時 ON

ピンホールから水素が漏えいすることを想定し、換気設備を設置して常時運転する。このとき、換気設備の換気量はCNGスタンドにおける検討を参考に、代表的なピンホール径から漏えいする水素量の100倍を設定する。海外の水素スタンドの換気設備においては、水素漏えいの無い通常時は換気量を小さくして省エネ運転を行ない、センサーが水素漏えいを検知した場合は、大容量の換気を行なうように設定しているところもある。しかし、想定したピンホール径は安全率を見込み実際のそれよりも十分大きい値としているものの、それよりも大きな開口にならないということは言い切れない。想定よりも大きな開口が発生した場合は、換気設備の容量が追いつかず、大きな爆発に至る可能性がある。これに対しても地下室を一部開放にする対策を検討する必要がある。

一方、換気設備の常時 ON については、法令で規制することやインターロックを行なうことが可能である。しかし、換気設備が故障した場合の対応や換気設備の騒音などを気にするために意図的に換気設備を停止することなどを考慮すると、リスクアセスメント上では万全の対策とは言いがたい。

⑫地下室の強固な天井や壁（爆発時に外部へ影響を及ぼさないため）

地下設置の場合、安全対策としての換気設備が常時運転されていたとしても、水素漏洩時には漏洩口付近にいくらかの水素が存在する。この水素に着火・爆発した場合の爆風圧を測定し影響度を算定する必要がある。これを元に安全対策として換気量を増やしたり、爆風圧によって破壊されない地下室の強固な天井や壁の条件を検討する必要がある。

しかし、閉鎖空間において換気設備が稼働中に水素が漏えいした状態は、水素濃度が均一でなく、水素が流動する非定常な状態と考えられる。このような状態で着火、爆発した場合の爆風圧を正確に求めるためには、地下室内の水素濃度分布の時間的な推移を正確に把握した上で、爆風圧を測定しなければならない。非定常な水素濃度分布を測定するには、多くの濃度測定用センサーが必要であり、かつ、爆風圧測定時には圧力センサーが必要である。濃度分布測定時に着火した場合、濃度測定用センサーが破壊される問題もある。こうしたことから水素濃度が不均一な地下室内における爆風圧の測定はとても難しいことが分かった。さらに、爆風圧を数値シミュレーションで求める場合も、地下室内の水素濃度分布が必要であることから、当該安全対策の条件を検討するためのハードルは非常に高い。

6.5.8. CFD を使った安全対策検討

地下室天井を一部開放することは、水素漏えい、爆発時に爆風圧を効率よく放出できることや換気装置が停止している時に水素が漏えいした場合でも一定の水素を拡散させることができるメリットがある。そこでどの程度地下室の天井を開放すべきかを CFD を使って検討した。

(1) 解析の概要

本解析では蓄圧器の地下設置モデルにおいて、蓄圧器ヘッダー部（バルブ周辺）から水素が漏洩した際の蓄圧器室内の水素濃度をシミュレーションする。蓄圧器の内圧は 40MPa とし、蓄圧器ヘッダー部に 0.2mm のピンホールが生じた場合、この細孔から水素が噴出した状態を模擬する。解析は蓄圧器室の上部構造を 0%、25%、50%、100% 大気開放とした 4 ケースを実施し、上部構造の変化による蓄圧器室内の水素濃度がどのように変化するかを確認する。このとき、外部に風があると水素の拡散が促進されるため、最も厳しい条件として無風状態を選択した。なお、0% 開放の場合は、現行の CNG スタンドの地下室並みの換気を施した。解析対象は、6.5.5 節で示した蓄圧器の地下設置モデルを利用した。

(2) 水素噴出状況の近似

本解析では、高圧ガスが 0.2mm のピンホールから噴出する解析を行う。ピンホール径が計算空間と比べて非常に小さいため、ピンホール径を形状として模擬し解析を行うためには膨大なメッシュ数が必要になる。そこで本解析では以下の近似を用いた。

- ①ピンホールは形状として模擬せずに、計算空間のある場所から所定の運動量および質量を伴って噴出する。
- ②高圧ガスはピンホール部ではチョーク状態で噴出するため、断熱膨張仮定から噴出密度、噴出温度などを算出し漏洩量および漏洩に伴う運動量を算出する。

(3) 水素噴出量の算出

ここでは、蓄圧器ヘッダー部に生じたピンホールからのガス噴出の条件を算出する。高圧ガスがピンホールから噴出する際には、ピンホール部ではいわゆるチョーク状態(Mach数=1)でガスが噴出する。そこで高圧ガスが噴出する状態を、圧縮性流体の臨界状態でモデル化し漏洩状態を算出する。ポンペ内部はよどみ点状態、ピンホールではMach数=1で噴出すると仮定する。図6.5.8-1に高圧ガス噴出時の模式図を示す。また、添え字0はよどみ点状態、アスタリスク(*)は臨界状態を意味する。

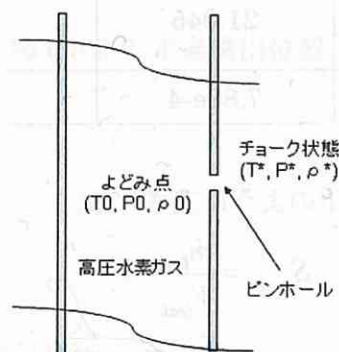


図 6.5.8-1 高圧ガス噴出時の模式図

このとき、臨界状態における温度 T^* 、圧力 P^* 、密度 ρ^* は、よどみ点状態の温度 T_0 、圧力 P_0 、密度 ρ_0 から以下の関係式で算出される。 $(\kappa$: 比熱比)

$$T^* = T_0 \frac{2}{(\kappa + 1)}$$

$$P^* = P_0 \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$$

$$\rho^* = \rho_0 \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{1}{\kappa - 1}}$$

また、臨界状態となっている噴出孔での速度 v^* は音速 a^* に等しいので、 $(R$: 気体定数)

$$v^* = a^* = \sqrt{\kappa R T^*}$$

さらに、噴出孔の断面積 A_{leak} を用いると、噴出気体の質量流量 \dot{m}_{leak} は、

$$\dot{m}_{leak} = \rho^* v^* A_{leak}$$

計算に用いた値は以下の通り。

表 6.5.8-1 計算に用いた定数

	水素	備考
ガス定数 [J/kg/K]	4124.6	
比熱比 [-]	1.41	
分子量 [kg/mol]	0.0020158	
T_0 [K]	293.15	=20[°C]
T^* [K]	243.28	
P_0 [Pa]	40,101,325	=40[MPa] (ゲージ圧)
P^* [Pa]	21,117,489	
ρ_0 [kg/m ³]	33.166	
ρ^* [kg/m ³]	21.045	
漏洩量[kg/s]	7.86e-4	

漏洩水素量および漏洩運動量は、以下のように表される。

$$S_{mass} = \frac{\dot{m}_{leak}}{V_{leak}}$$

$$S_{momentum} = \frac{\dot{m}_{leak} \times v^*}{V_{leak}}$$

噴出流体領域	流体領域	質量ソース：2.1211 [kg/m ³ -s] 運動量ソース(x方向)：2522.9 [n/m ³] H2ソース：2.1211 [kg/m ³ -s]
--------	------	--

実際の現象では、高圧ガスは断熱膨張しながら空間中に噴出するため、ガスの圧縮性は無視できない。しかしながら、ガスの圧縮性の影響はピンホール近傍のみと考えられる。そのため本解析ではガスの圧縮性を考慮した上述の仮定で噴出条件を算出したが、実際の解析では非圧縮性流体として解析を行った。

(4) 漏洩口の模擬

本解析ではピンホールを形状として模擬せずに、計算領域中から水素ガスが一定の運動量を伴って噴出する条件を与えた（特定の計算セルに質量の湧き出しと運動量を与えた）。水素噴出位置を図6.5.8-2に示す。実際の水素噴出位置（ヘッダー部）には配管やバルブが存在するが、周りの空間に比べてそれらが占める割合が少なく、解析に影響がするまいと考えられるためモデル化を省略した。

噴出方向は-Z方向（下向き）に噴出する条件とした。これは、別途行なった蓄圧器室（0%開放）の漏えい解析において、下向き方向がもっとも滞留量が多い（条件的に厳しい）結論が得られたためである。なお重力も-Z方向で考慮している。

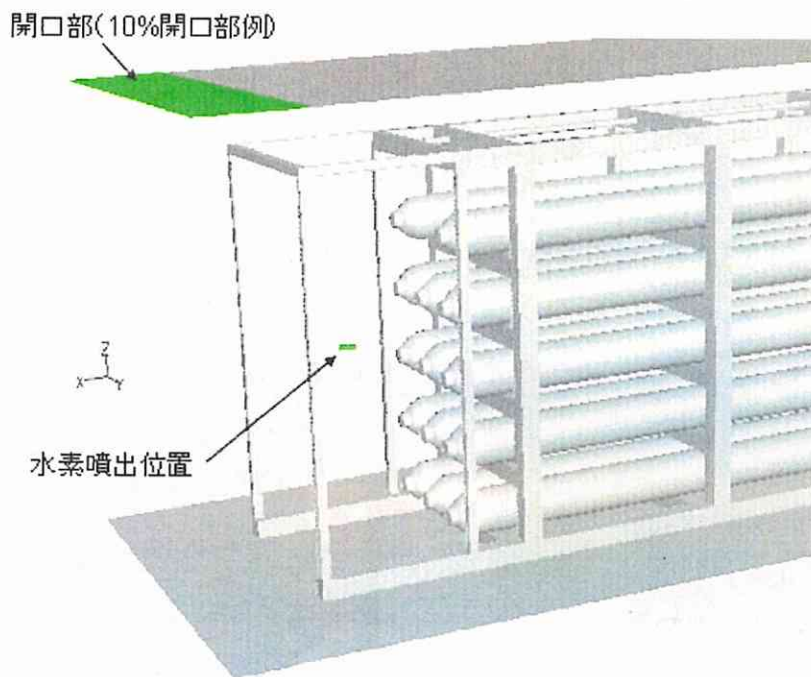


図 6.5.8-2 水素噴出位置

(5) 物性値

解析に用いた物性値は以下の通り。

空気密度：1.2042 [kg/m³]

水素密度：0.0838 [kg/m³]

混合流体（空気と水素の混合気体）

密度：(Volume-Weighted-Mixing-Law)

空気：1.2042 [kg/m³]

水素：0.0838 [kg/m³]

粘度：1.72e-5 [kg/m·s]

拡散係数：2.88e-5 [m²/s]

上記粘度および拡散係数は本来であれば局所モル分率依存で与えるべきだが、本解析がケーススタディーのため上記定数で代表させた。

(6) 解析メッシュ

大気開放空間のうち、解析対象空間は図6.5.8-3の上部に示す半球状で模擬した。また、図6.5.8-3は蓄圧器室の上部を10%開放している図を記載している。同図中の緑色、青色および灰色部はそれぞれ25%、50%、100%開放部を示している。本解析では上部構造を開放状態に応じて4ケース実施するが、形状およびメッシュはすべて同一である。なお形状がY方向に対して対称形状のため、1/2モデルで解析を行った。図6.5.8-、図6.5.8-に作成した形状およびメッシュを示す。

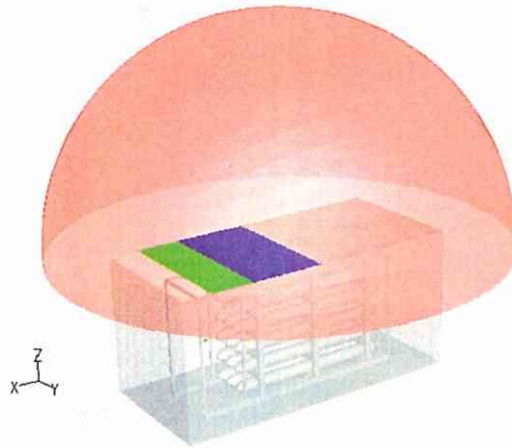


図 6.5.8-3 解析対象空間と蓄圧器室上部の開放範囲

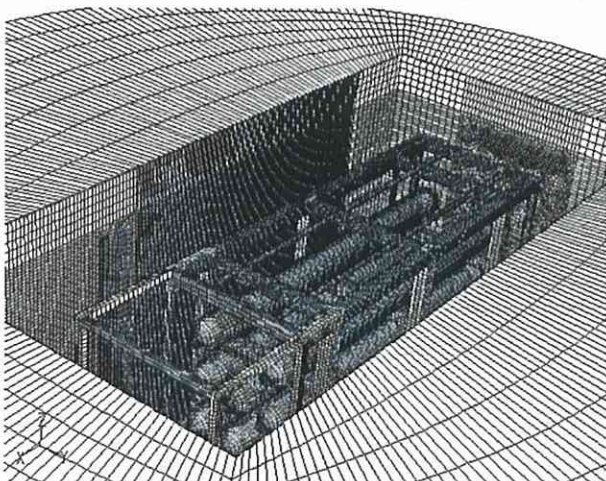


図6.5.8-4 蓄圧器室上部のメッシュ

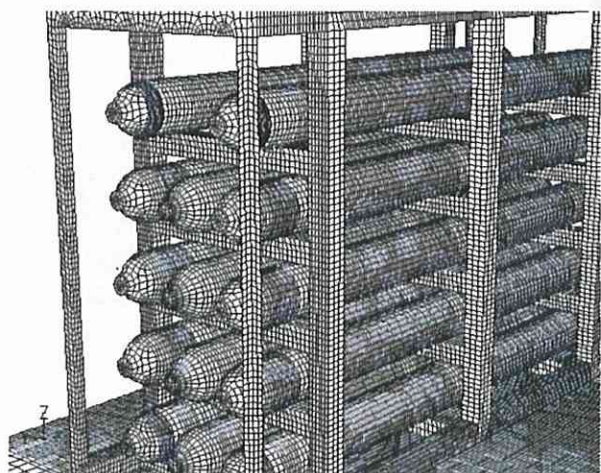
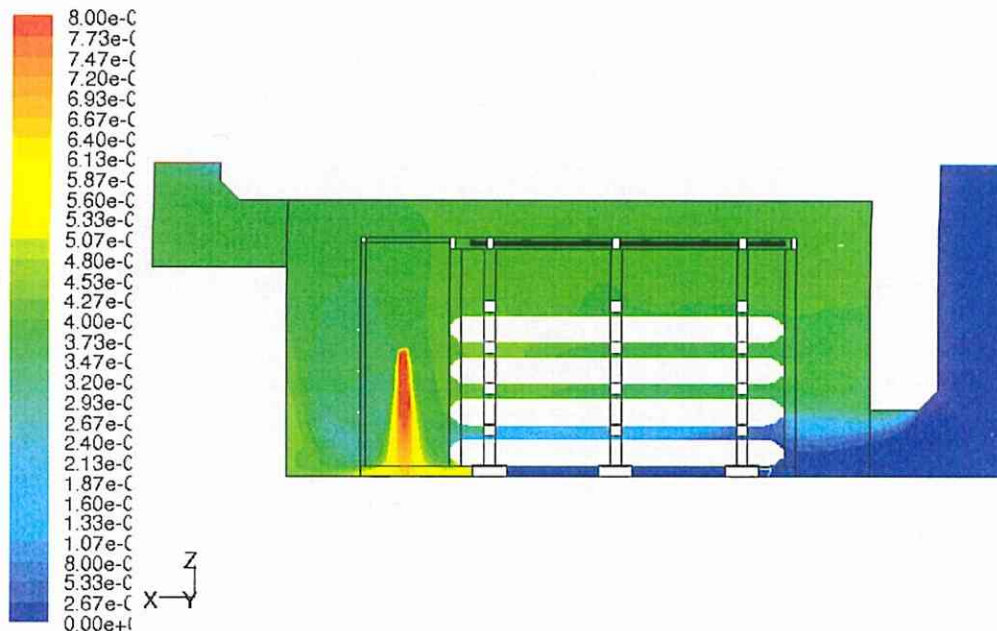


図6.5.8-5 蓄圧器周辺のメッシュ

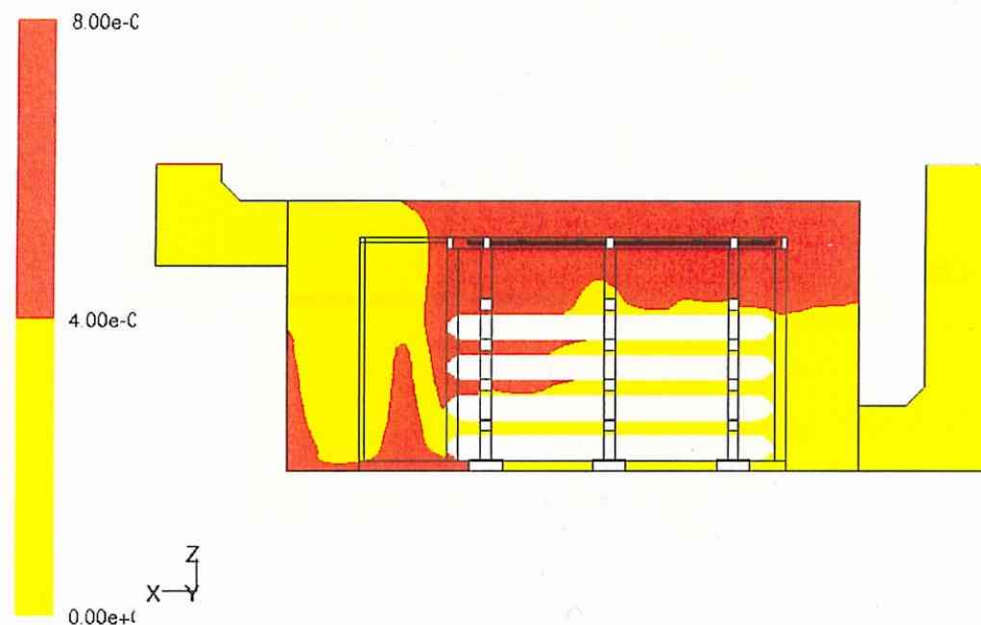
(7) 解析結果

図 6.5.8-6 に 0%開放、換気あり（換気量：873m³/h 現行の CNG 規準）の解析結果を示す。最も厳しい下向き方向の噴出である。換気量がやや少ないため、水素濃度 4%以上の部分が上部に出現している。しかし、この濃度は 4~5%である。



b4_duct
Contours of Mole fraction of h2

Dec 28, 2005
FLUENT 6.2 (3d, segregated, spe, rke)



b4_duct
Contours of Mole fraction of h2

Dec 28, 2005
FLUENT 6.2 (3d, segregated, spe, rke)

図 6.5.8-6 0%開放、換気あり（換気量：873m³/h 現行の CNG 規準）

図 6.5.8-7 に 25%開放（換気なし）の解析結果を示す。黒線は天井部を示す。水素濃度 4%以上の範囲は漏洩口付近に限られていることが分かる。天井部分の水素濃度は 4%以下であるが少量の水素が残っている。

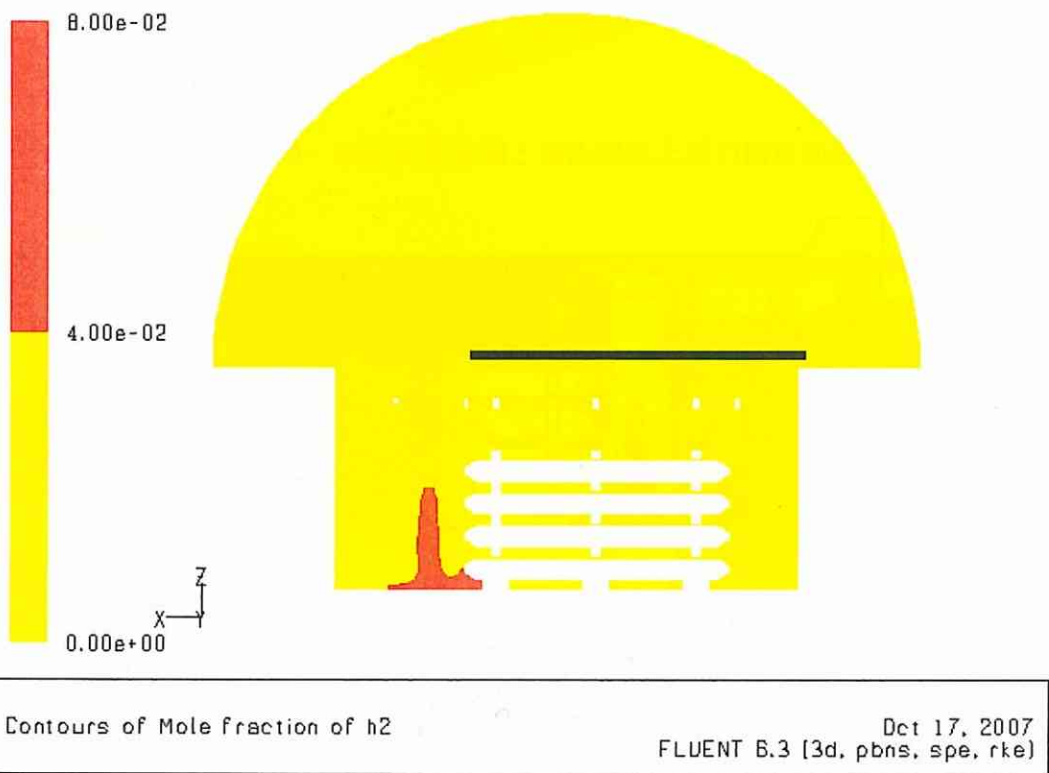
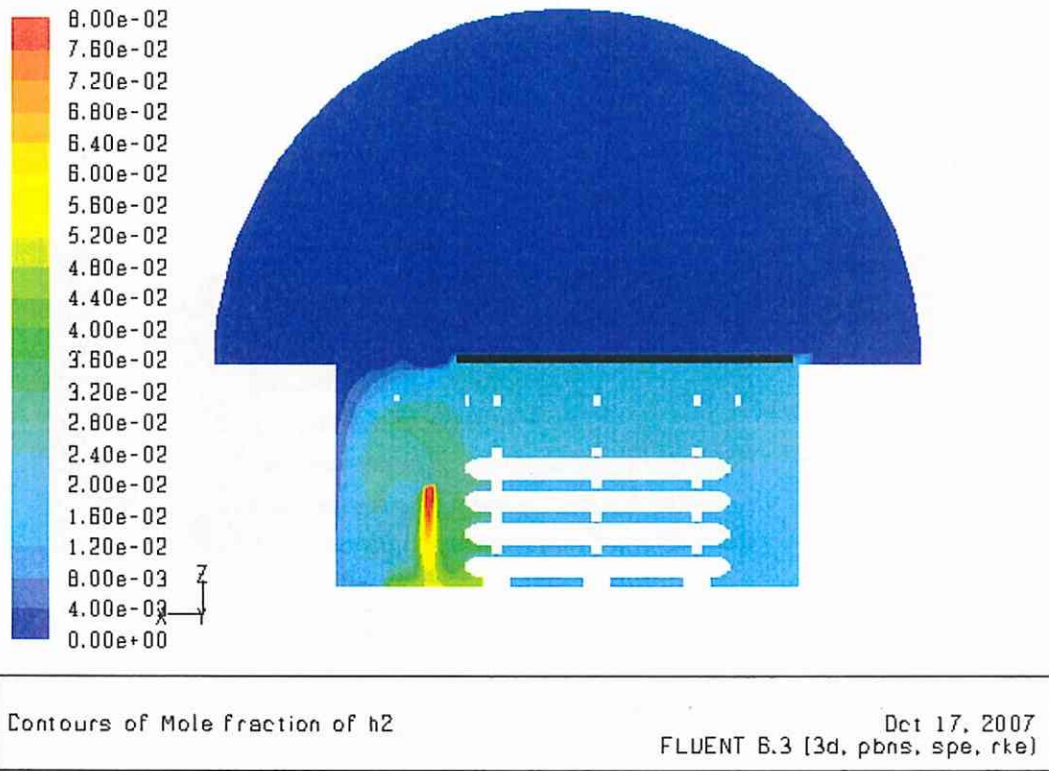


図 6.5.8-7 25%開放（換気なし）

図 6.5.8-8 に 50%開放（換気なし）の解析結果を示す。水素濃度 4%以上の範囲は漏洩口付近に限られていることが分かる。天井部分に水素の滞留はなく、外部へ拡散していることがわかる。

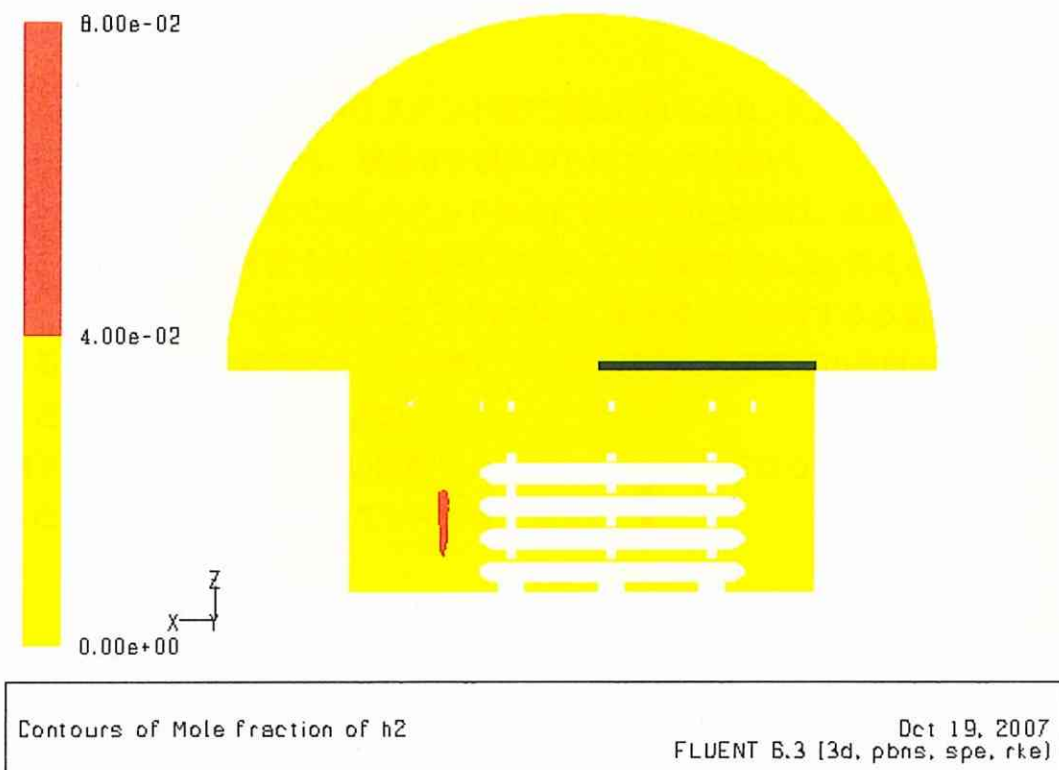
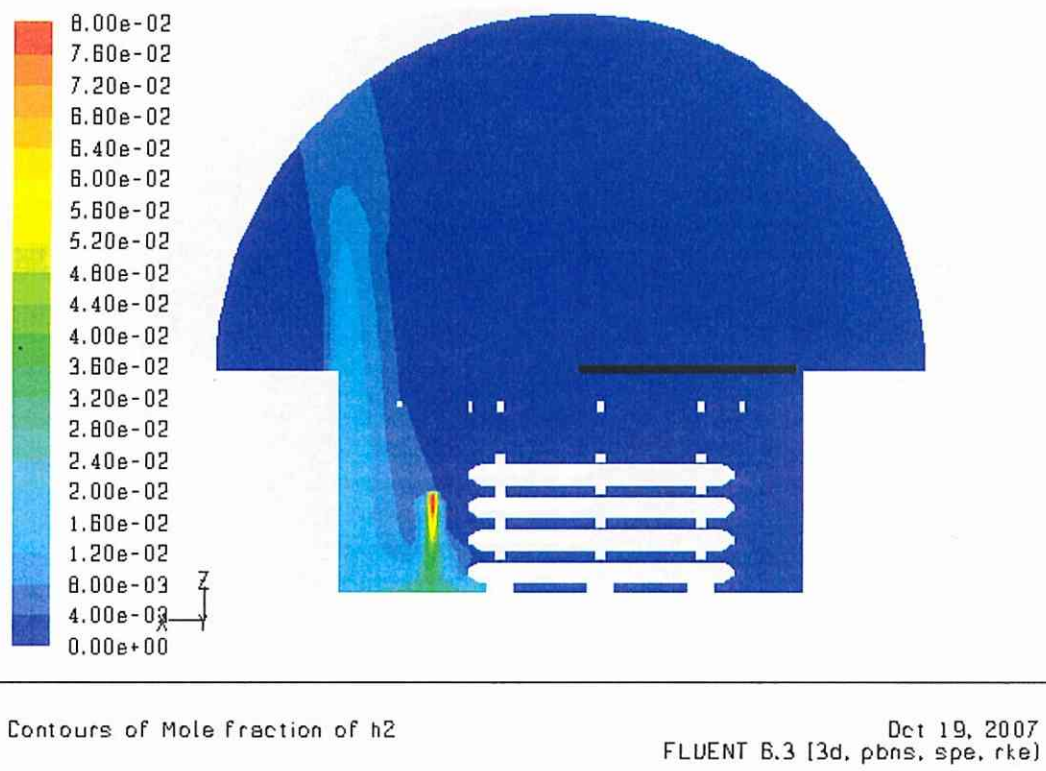


図 6.5.8-8 50%開放（換気なし）

図 6.5.8-9 に 100%開放（換気なし）の解析結果を示す。水素の滞留はほとんどなく、拡散していることが分かる。

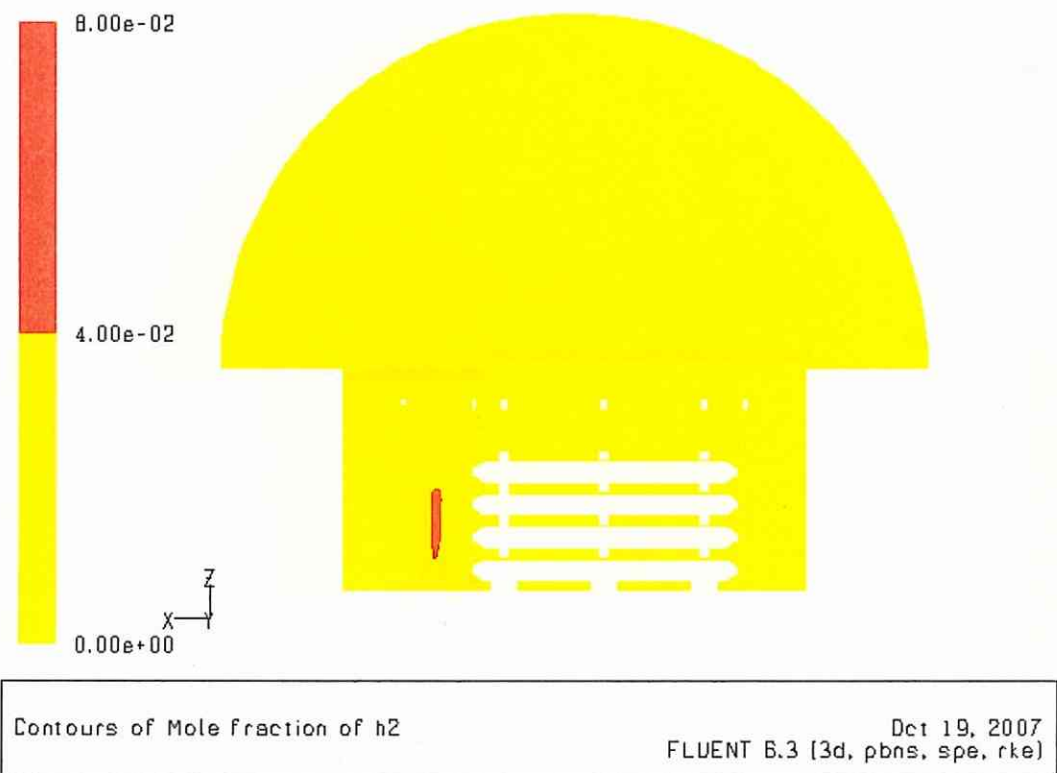
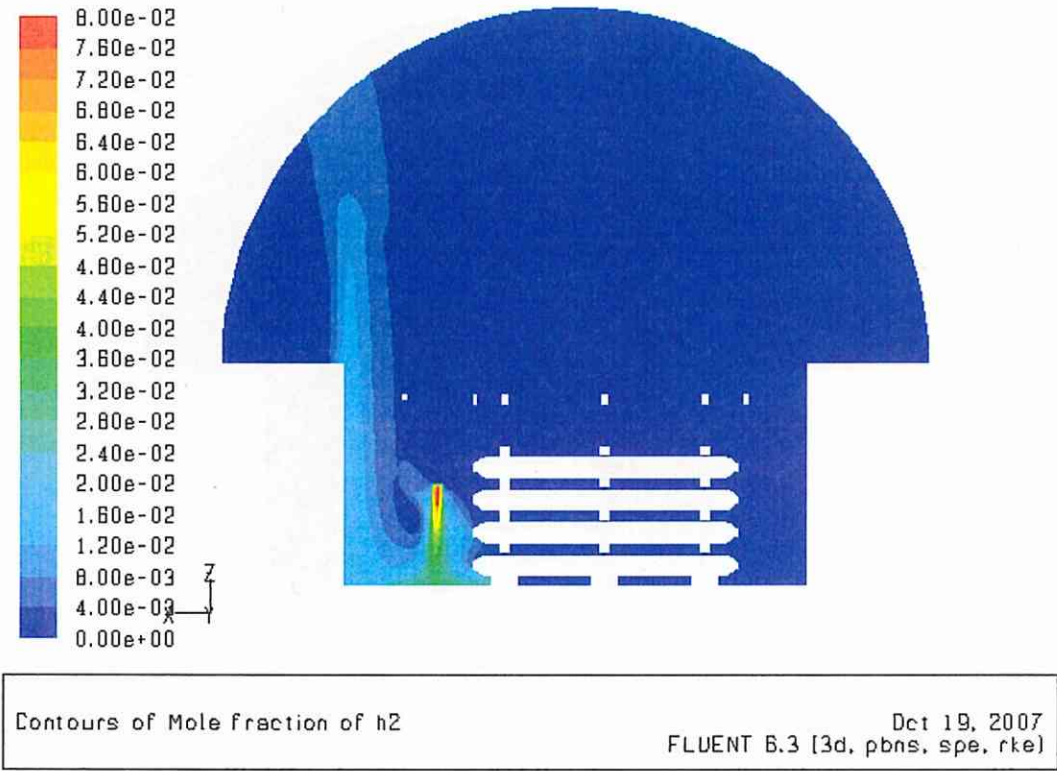


図 6.5.8-9 100%開放（換気なし）

6.5.9. まとめ

蓄圧器の地下設置について検討した結果、事故シナリオに対応する安全対策を見出すことができた。これらをすべて適用した場合、一定の安全性を確保することができる。特に、蓄圧器の屋外設置時にリスクランク H として残っていた、(1)ヘリコプター/航空機の墜落、(2)隣接敷地のクレーン倒壊に対し根拠データを示すことは難しいもののリスクランクを H 以下にできる可能性が大きいことは評価できる。

一方、使用する金属材料を規定することで発生する可能性は極めて小さいものの、

- ①遮断弁よりも上流（蓄圧器側）で開口したため遮断弁で閉止できない場合
 - ②安全を見込んだ代表開口径よりも大きなピンホールが開口した場合
- について、安全対策の必要性が指摘された。

安全対策としては、

- ア) 地下室のメリットを活かしつつ、天井部を一部開放し開放率にあわせた換気量を設定する。
- イ) 着火、爆発してしまった場合でも、外部へ影響を及ぼさないような強固な壁と天井を設置する。などが考えられる。

ア) については、地下室の天井の開放率とそれに合わせた換気量をどの程度にすべきかの根拠データが必要である。

イ) については、地下室内で発生した爆風圧を測定して影響度を評価しこれに耐える壁と天井の基準を定める必要がある。そのためには、水素漏えい時に地下室内で時刻ごとに変化する正確な水素濃度分布を把握し、そのタイミングごとの爆風圧を何ケースか測定し、シミュレーションでケーススタディーを行なうことで一般化する必要がある。

蓄圧器の地下設置については CNG スタンド既に認められており、スタンドの敷地を有効に利用できることが明らかであることから、事業者や業界からのニーズが高い。

一方、水素スタンドの規制を CNG スタンド並みに緩和するためには、水素と天然ガスの物性値や取扱う圧力の違いを考慮して安全対策を増やしてやる必要がある。例えば、換気量については CNG における考え方をベースに水素スタンドのそれに置き換えて検討する必要がある。また、地下室における吸気ダクトと排気ダクトの位置についても最適な位置関係の検討が必要で、三菱重工業株式会社などで検討がなされている[23]。

今後も地下室を想定したア) イ) の実験やシミュレーションを行なうなど、研究を継続し安全データを蓄積した上で規制緩和につなげていくべきである。

6.6. メンテナンス性を考慮した蓄圧器室モデルの検討

前述の蓄圧器室モデルはポンベの間隔が狭いため、法令で定められている全周・全面の非破壊検査を実施することが難しいことが分かった。そこで、この非破壊検査を容易に行なうことができるようにポンベの周りに十分なスペースを設けた蓄圧器室をモデル化し、CFD ソフト上で解析するためのメッシュを作成した。図 6.6-1 にその一部を示す。

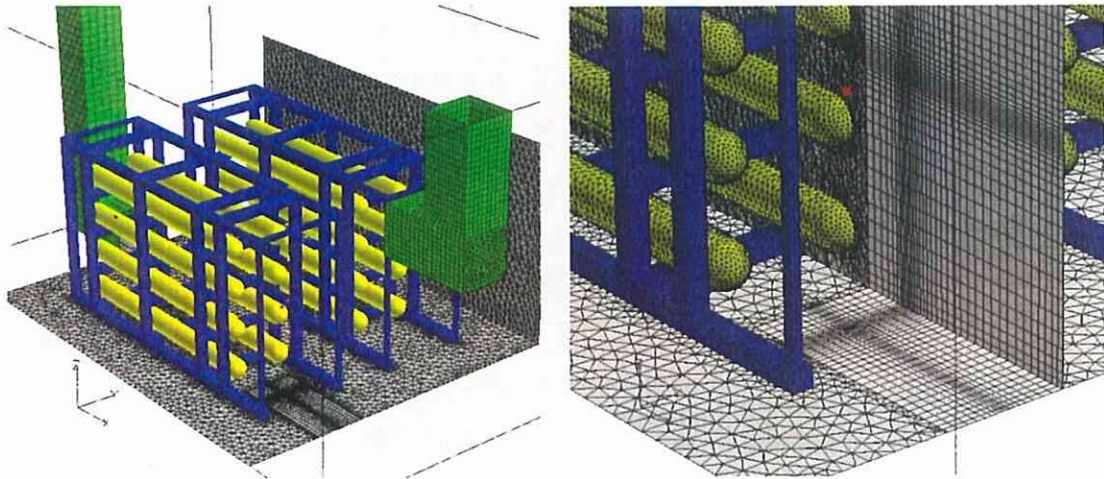


図 6.6-1 メンテナンス性を考慮した蓄圧器室のメッシュ

前述の蓄圧器室モデルと同様に、水素（圧力 40MPa、開口径 0.2mm）漏えいを想定した場合の換気量や漏えい方向を変化させてシミュレーションを行い、蓄圧器室内の水素分布を把握した。蓄圧器室内水素濃度分布を図 6.6-2 に示す。

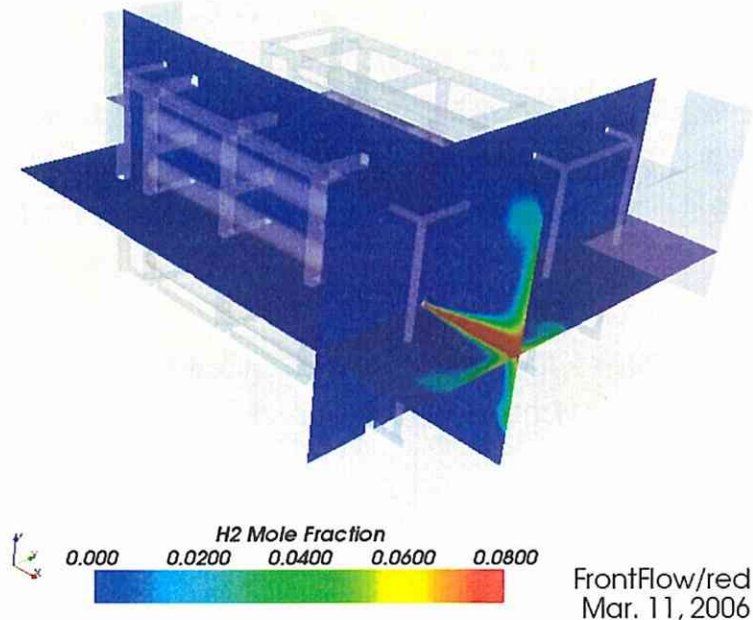


図 6.6-2 蓄圧器室内水素濃度分布の解析例

6.7. 圧縮機の地下設置の適応可能性の検討・評価

圧縮機の地下室へ設置することの適応可能性を検討するため、水素スタンドモデルと同容量(300Nm³/h)の圧縮機室モデルを定義した。これをCFDソフト上で解析するためのメッシュを作成した。

圧縮天然ガス(CNG)スタンドでは、圧縮機の地下設置が認められていることから、本検討における漏えい量や換気量は、CNGスタンドにおけるメタン(圧力25MPa、開口径0.2mm、換気量700m³/h)の漏えいシミュレーションをリファレンスにし、水素(圧力40MPa、開口径0.2mm)漏えいを想定した場合の換気量や漏えい方向を変化させてシミュレーションを行い、圧縮機室内の水素分布を把握した。図6.7-1にその一例を示す。

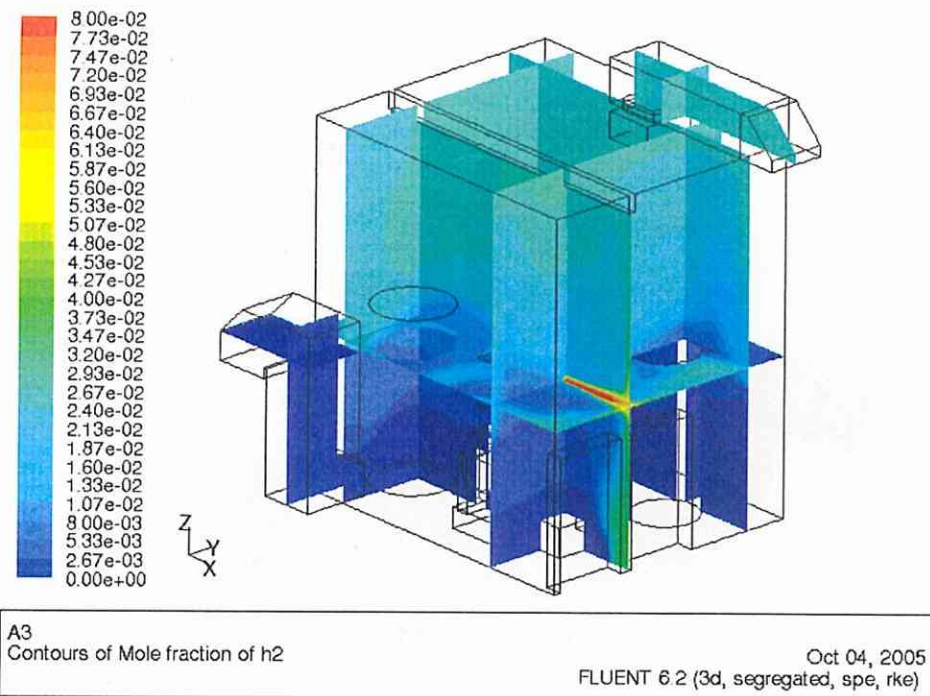


図 6.7-1 圧縮機室内水素濃度分布の解析例

6.8. 液体水素（二重管）の漏えい解析

6.8.1. 概要

本解析は液体水素スタンドで使用される断熱二重管（外管、内管、真空断熱層を備えるパイプ）において、内管にピンホールが生じた際の真空断熱層内の水素の拡散状況並びに、真空断熱層の圧力が上昇して真空弁（リリーフバルブ）が離脱する圧力（0.45MPa）になるまでの時間を調べることを目的である。以下に概略図を示す。

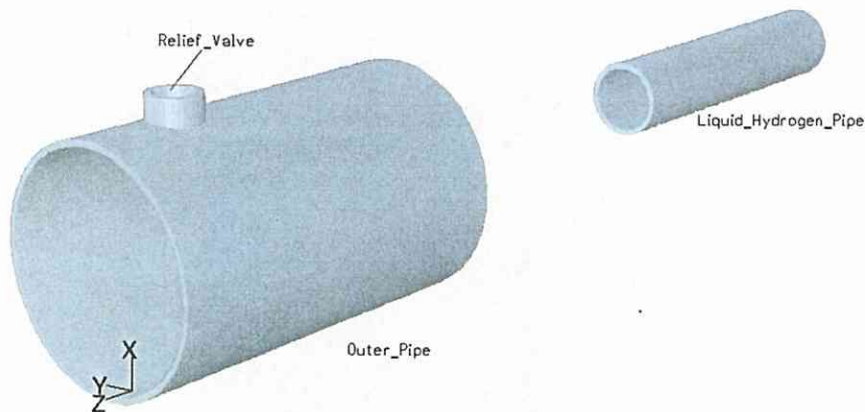


図 6.8.1-1 概略図

液体水素は圧力 0.4MPa、温度 20K で内部のパイプを通っており、Outer_pipe（以下外管と略）と Liquid_Hydrogen_pipe（以下内管と略）の間は真空断熱層となっている。

外管にはリリーフバルブと呼ばれるバルブ（真空弁）が付属している。これは、二重管設置後にこの部分から外管と内管の間の空気を抜き、真空断熱層を作成後このバルブで真空状態を保持するためのバルブである。外管内部が真空であるため大気との圧力差により外管に固定されている。このバルブは、真空断熱層の真空が失われた場合、約 0.45MPa で離脱することが分かっている。

内管は液体水素貯蔵タンクに接続されており常時液体水素が通っている。この状態で何からの原因により内管にピンホールが発生し液体水素が真空断熱層に漏洩すると、液体水素は瞬時に蒸発し、真空断熱層に気体した水素ガスが拡散し真空断熱層の圧力が徐々に増加すると予測される。その結果真空断熱層の圧力が大気圧よりも大きくなりリリーフバルブが離脱する。この一連の過程を解析する。

6.8.2. アプローチ

内管のピンホールは直径 0.2mmφ の場合を想定し、真空断熱層での水素拡散を計算する。ここでは以下の 2 つの Step で計算する。

- Step-1: 長さ 10cm のパイプを作成し、0.2mmφ のピンホールが液体水素パイプに空いた場合を想定し真空断熱層内での拡散状態シミュレートする。

- ・ Step-2 : 配管を実機長さ 5.5m で計算する (水素スタンドで使用される二重管は、真空断熱層が約 5.5m で区切られているため)

液体水素漏洩条件は 0.45MPa の液体水素が温度 20K で 0.00072L/s 漏洩する。

圧力 0.45MPa, 温度 20K での液体水素の密度は 71.520kg/m^3 である (NIST:米国 National Institute of Standards and Technology データベース参照) ので漏洩質量は以下のように計算できる。

$$0.00072\text{e-}3\text{m}^3/\text{s} * 71.520\text{kg/m}^3 = 0.0000514944\text{kg/s}$$

この液体水素が下図緑色の領域において完全にガス化した場合の真空層への広がり状態を解析する。真空層は以下の近似を用いた。

- ・ 超減圧下であるが、連続体近似を用いる。
- ・ 真空層には 10Pa(絶対圧)に減圧された水素が満たしてあると仮定。
- ・ 10Pa の水素の密度は理想気体方程式に沿うものとする。

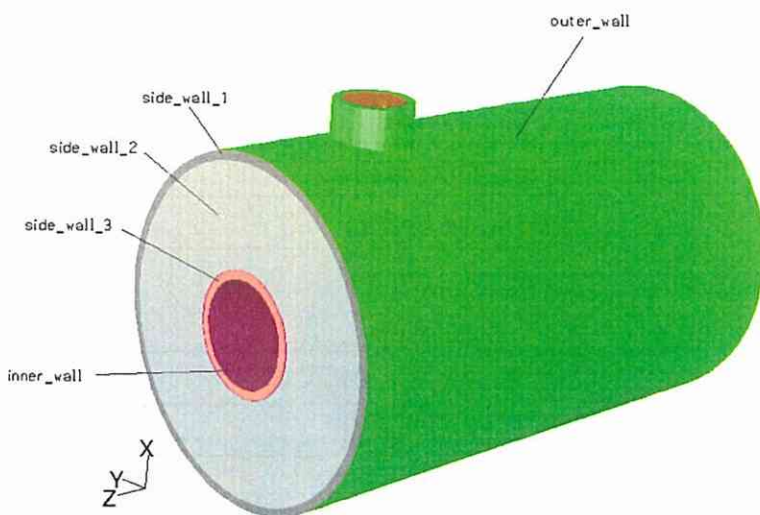


図 6.8.2-1 境界条件

初期条件は真空層圧力 10Pa, 温度 20K (実機では超高真空であるので温度分布等については未知であるが、ここでは超減圧下の連続体としての水素が存在すると仮定しているため 20K とした)。漏洩水素部は 0.0000514944kg/s , 20K の水素がピンホールを模擬した領域から湧き出すと仮定した。

6.8.3. 境界条件および物性値

(1) 壁面境界条件

実際の現象では漏洩した液体水素により外管は急激に冷却され大気中の酸素、窒素、二酸化炭素などを急冷却し外管表面で相変化すると予想される (気体→液体)。しかしながら、この相変化による熱収支は未知のパラメータとなるため、相変化による外管への熱の供給は無視することとした。壁面境界条件を以下に示す。

表 6.8.3-1 境界条件

壁面	熱条件
Outer_wall	無限遠方温度 300[K], 熱伝達係数 8[w/m ² /k]
Side_wall_1	断熱
Side_wall_2	断熱
Side_wall_3	断熱
Inner_wall	20[K]

本計算では減圧水素中に高圧水素が吹き込む仮定を用いたため、吹き込まれた水素と初期の減圧水素には明示的な区別がない。そこで本計算では FLUENT の UDS と呼ばれる機能を用いて吹き込まれた水素の位置をトレースする。

(2) 物性値

液体水素内管および外管は SUS316L を仮定した。使用した物性値は以下のとおりである。

表 6.8.3-2 SUS316L

密度	8090[kg/m ³]
比熱	500[J/kg/K]
熱伝導率	16.3[W/m/K]

表 6.8.3-3 水素

密度	理想気体方程式に従う
比熱	14283[J/kg/K]
熱伝導率	0.1672[W/m/K]
粘度	8.411e-6[kg/m/s]

6.8.4. ピンホールからの液体水素漏洩の影響

Step-1 では 0.2mmφ のピンホールからの液体水素の漏洩を想定しているが、実現象では漏洩した液体水素は内管の表面で一部液体状態のままパイプ表面に残ると考えられる。そのためピンホール周辺での液体水素の状態を 3 種類仮定して計算し、液体水素の濡れの状態によるリリースバルブ圧力の時間変化と蒸発水素ガス拡散の影響を調べる。それぞれの名称は upper, center, lower である。なお重力は-X 方向とした。ピンホールの位置はリリースバルブから 60mm とした。二重管の断面寸法を図 6.8.4-1 に示す。

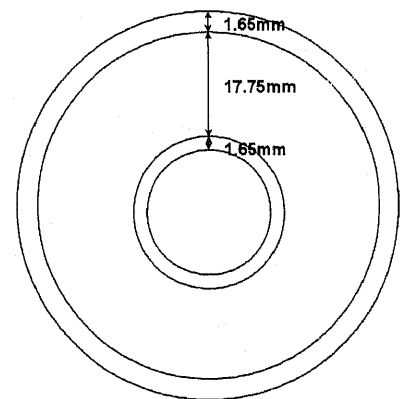


図 6.8.4-1 二重管の断面寸法

6.8.5. 結果

二重管内において内管に開口した場合、漏えいした液体水素が真空断熱層内で拡散する様子は、以下に示すように予想される。

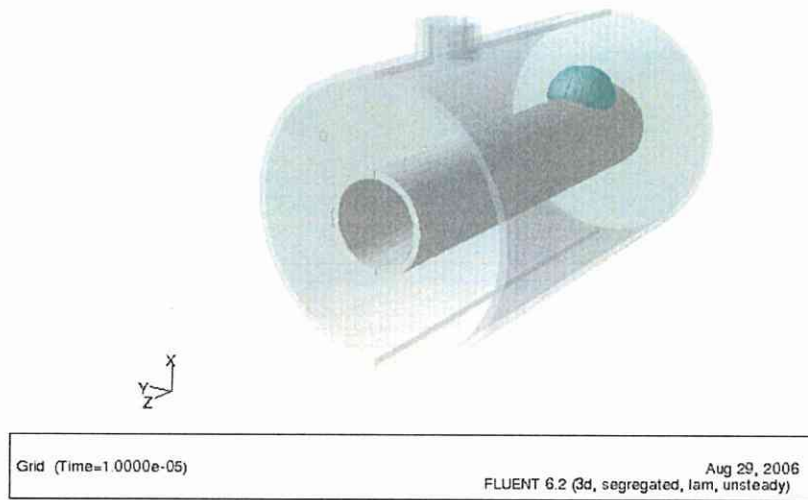


図 6.8.5-1 Upper(1e-6sec 後)

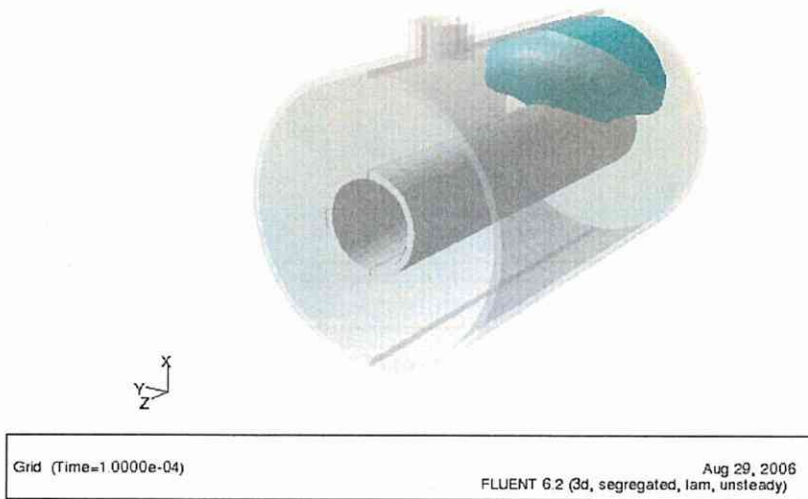


図 6.8.5-2 Upper(1e-4sec 後)

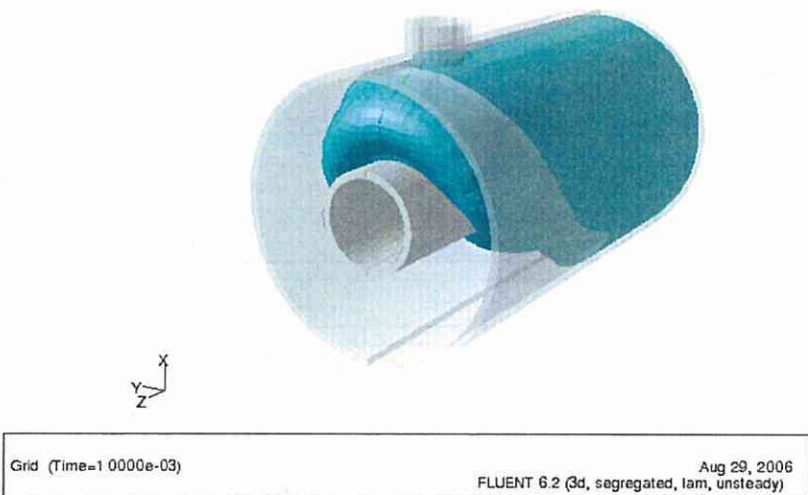
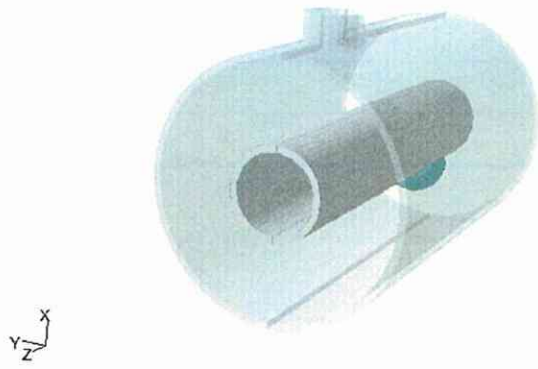
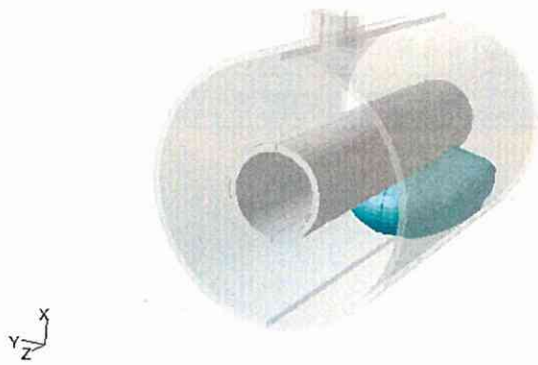


図 6.8.5-3 Upper(1e-3sec 後)



Grid (Time=1.0000e-05) Aug 29, 2006
 FLUENT 6.2 (3d, segregated, lam, unsteady)

図 6.8.5-4 Lower(1e-6sec 後)



Grid (Time=1.0000e-04) Aug 29, 2006
 FLUENT 6.2 (3d, segregated, lam, unsteady)

図 6.8.5-5 Lower(1e-4sec 後)



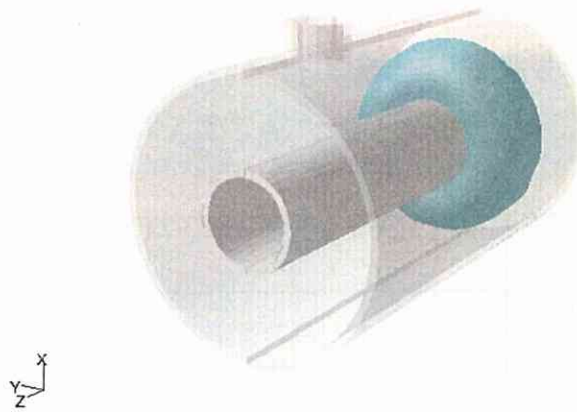
Grid (Time=1.0000e-03) Aug 29, 2006
 FLUENT 6.2 (3d, segregated, lam, unsteady)

図 6.8.5-6 Lower(1e-3sec 後)



Grid (Time=1.0000e-05) Aug 29, 2006
 FLUENT 6.2 (3d, segregated, lam, unsteady)

図 6.8.5-7 Center(1e-6sec 後)



Grid (Time=1.0000e-04) Aug 29, 2006
 FLUENT 6.2 (3d, segregated, lam, unsteady)

図 6.8.5-8 Center(1e-4sec 後)



Grid (Time=1.0000e-03) Aug 29, 2006
 FLUENT 6.2 (3d, segregated, lam, unsteady)

図 6.8.5-9 Center(1e-3sec 後)

液体水素漏えい後、真空断熱層の圧力が上昇し、リリースバルブが離脱するまでの時間については、以下となった。

まず、水素漏洩後、0.05sec でのリリースバルブの圧力はそれぞれの漏えい場所に対して以下の結果であった。

表 6.8.5-1 0.05sec 後のリリースバルブでの圧力

upper	1066.179Pa
lower	1065.993Pa
center	1063.9432Pa

表 6.8.5-1 からわかるように漏えいの位置はリリースバルブでの圧力の変化には差がほとんどないことがわかる。また図 6.8.5-10 に示すリリースバルブ圧力-時間変化をみると明らかなように、バルブ圧力は時間に対して線形的に変化している。そのためバルブの圧力が 0.35MPa(絶対圧換算 0.45MPa)になるまでの時間は約 21sec 程度と推測される。

本テストモデルの体積は 0.2206825L であるが、パイプ長さが 5.5m の場合は 12.1L となるので圧力-時間の比例関係から、5.5m のパイプの場合には液体水素漏えい後リリースバルブが離脱する圧力になるにはおよそ約 1151sec 程度要すると推測される。

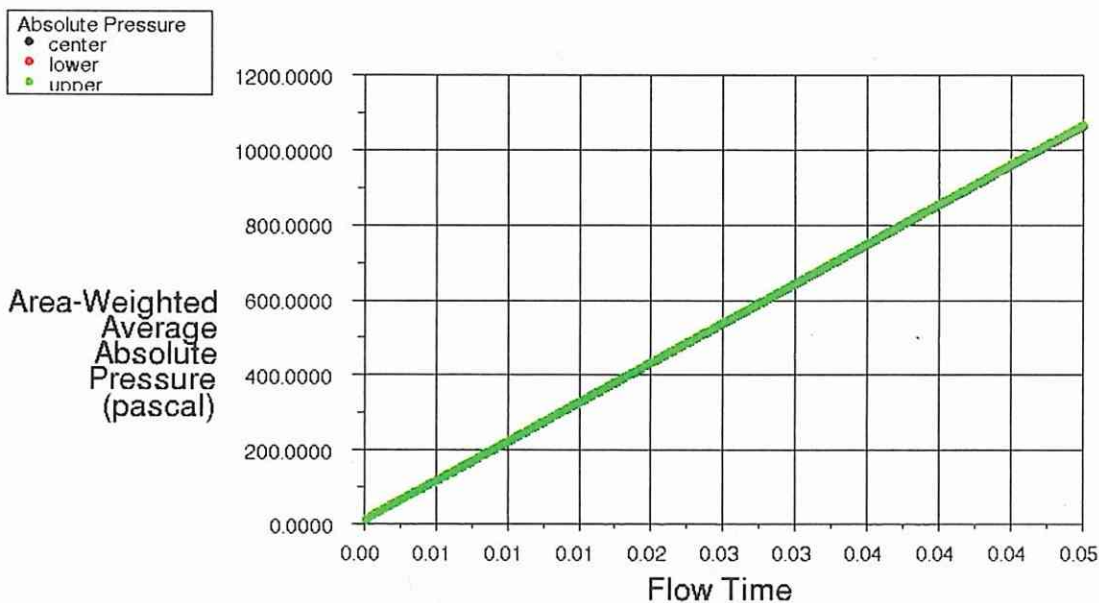


図 6.8.5-10 リリースバルブ圧力-時間変化

6.9. 70MPa 水素充てんノズル、充てんホース内の熱伝導解析

6.9.1. 背景と目的

現在、燃料電池自動車（FCV）の利便性をより高めるために、一回の水素充てんによる航続距離をガソリン車並の 500km 以上にする研究が行なわれている。この実現手段の一つとして、FCV の車載タンクの圧力を 35MPa から 70MPa に昇圧させることが有力である。車載タンクが 70MPa になった場合は、水素スタンド側でそれ以上の圧力（80MPa 程度）で水素を取扱う必要がある。

一方、空の車載タンクへ水素ガスを充てんし、70MPa（満タン）にする場合、充てん速度が速過ぎると車載タンクの温度が上昇し、複合容器の設計温度（85℃）を超える可能性がある。複合容器の設計温度を超えた場合は、カーボンファイバーを固定している接着剤が溶融し、強度を失うため大きな事故になるリスクがある。そこで、水素ガスを-30℃程度に冷却するプレクール設備を水素スタンドに設置して、冷却した水素を FCV へ充てんすることが検討されている。プレクール設備で冷却した水素ガスを充てんすることで、充てん時間の短縮（3分程度）と容器の設計温度を超える温度上昇の防止を狙っている。このとき、水素スタンドのディスペンサーにおいて、プレクール設備以降の機器（充てんノズル、充てんホース、緊急離脱カプラなど）が常温～-30℃かつ、常圧～70MPa の温度と圧力の履歴を受けるため、それらの安全性について検討しておく必要がある。

しかし、低温、高圧の水素充てんノズルと充てんホース内の温度を正確に測定することは、温度センサーの設置数や時間応答性などの技術的な問題や、センサー設置による強度計算など法令的な問題があり極めて難しい。そこで、本研究では CFD を使って充てんノズル、充てんホース内及び外表面の温度変化を把握することとした。

6.9.2. 水素充てんノズル、充てんホースの形状

上記の目的を達成するためには、水素スタンドの充てんノズル設計図や充てんホース材料の物性値データなどが必要である。本研究実施現在（2007年）、70MPa 充てんノズルの形状について ISO 及び SAE（Society of Automotive Engineers, Inc.）にて議論されている最中である。従来型（35MPa 充てん対応）と同じ構造で、接続部のシール性を確保する Oリングを FCV のレセプタクル側につける構造（シール・オン・FCV）を推奨する WEH（独）と Walther（独）に対し、日本の OEM（自動車会社）は Oリングをノズル側に持たせた構造（シール・オン・ノズル）の日東工器製のノズルを推薦している。この理由は、Oリングがスタンド側にある方が、Oリングを取り巻く環境の変化が小さいこと（水素スタンドは移動しないため）、訓練を受けたスタンド従業員が定期的に Oリングをメンテナンスすることが期待できるためという。SAE はアメリカの DOE (Department of Energy) と日本の JARI（日本自動車研究所）と共同で、三社の製品をカナダの Powertech に持ち込み、水素漏れを防止するシール性を中心に実験を行い、議論の後、国際標準としてのノズル（スタンド側）とレセクタブル（FCV 側）の詳細な形状を規定する予定である。

こうした状況のため、現時点ではノズルの詳細な図面が入手できなかった。そこで展示会に出品された日東工器製のノズルの写真を元に任意でノズルの形状を決めた。このとき、ノズル部はできるだけ実機と同じような熱容量を持つものとして作成し、ノズル内流路の最小部の直径はヒアリングにより 2.5mm とした。図 6.9.2-1 に充てんノズル（カプラ）と充てんホースの全体図、図 6.9.2-2 に充てんノズルの拡大図、図 6.9.2-3 に充てんノズルの内部構造を示す。なお本検討では FCV 側のレセクタブルは検討対象外とした。

充てんノズルと充てんホースは、図 6.9.2-3 及び図 6.9.2-4 に示すように複数の素材を組み合わせ

たものである。水素ガスは図 6.9.2-4 に示す充てんホースの内側（ナイロン 11 層内）を通り充てんノズル内側（図 6.9.2-3）のステンレス製内管の内部の流路を通過して FCV 側に供給される。充てんホースの全長は 3.3m とした。図 6.9.2-5 にホースの断面図を示す。

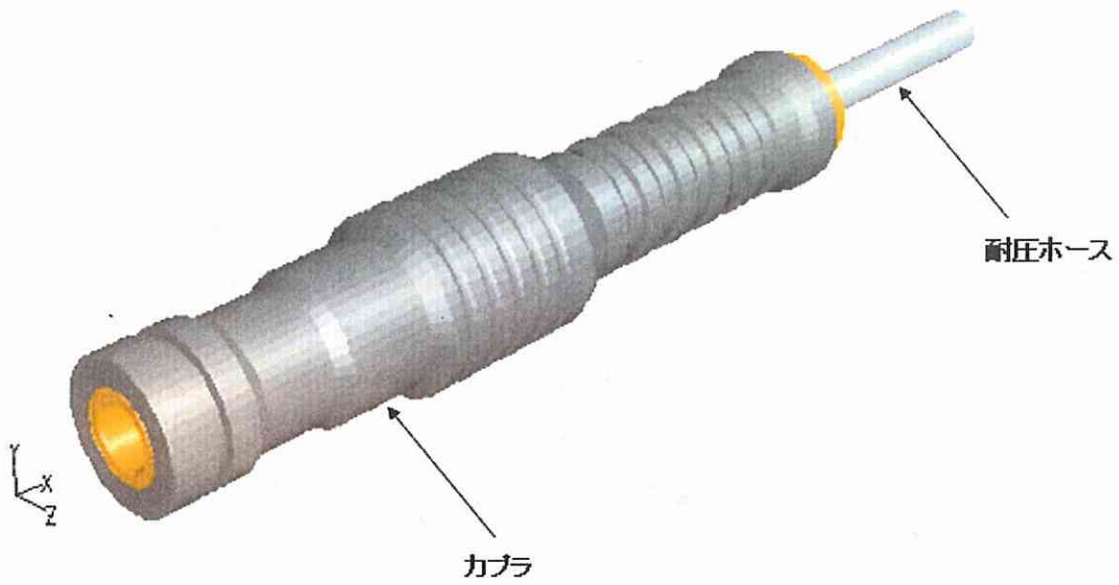


図 6.9.2-1 充てんノズル（カプラ）、充てんホース全体図

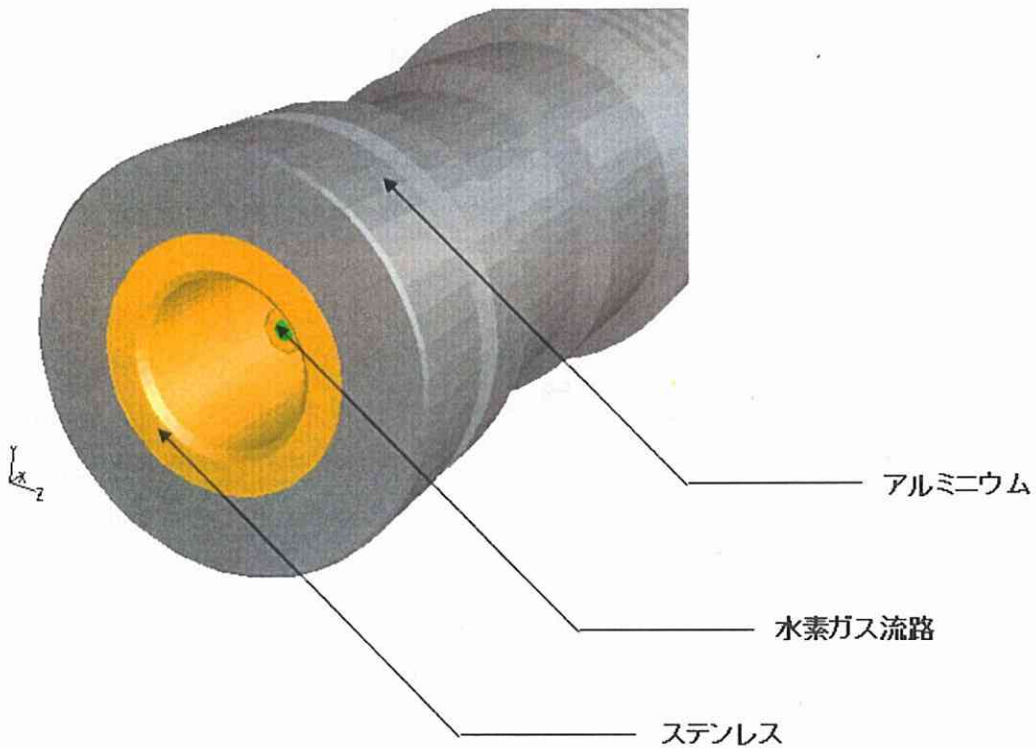


図 6.9.2-2 充てんノズル拡大図

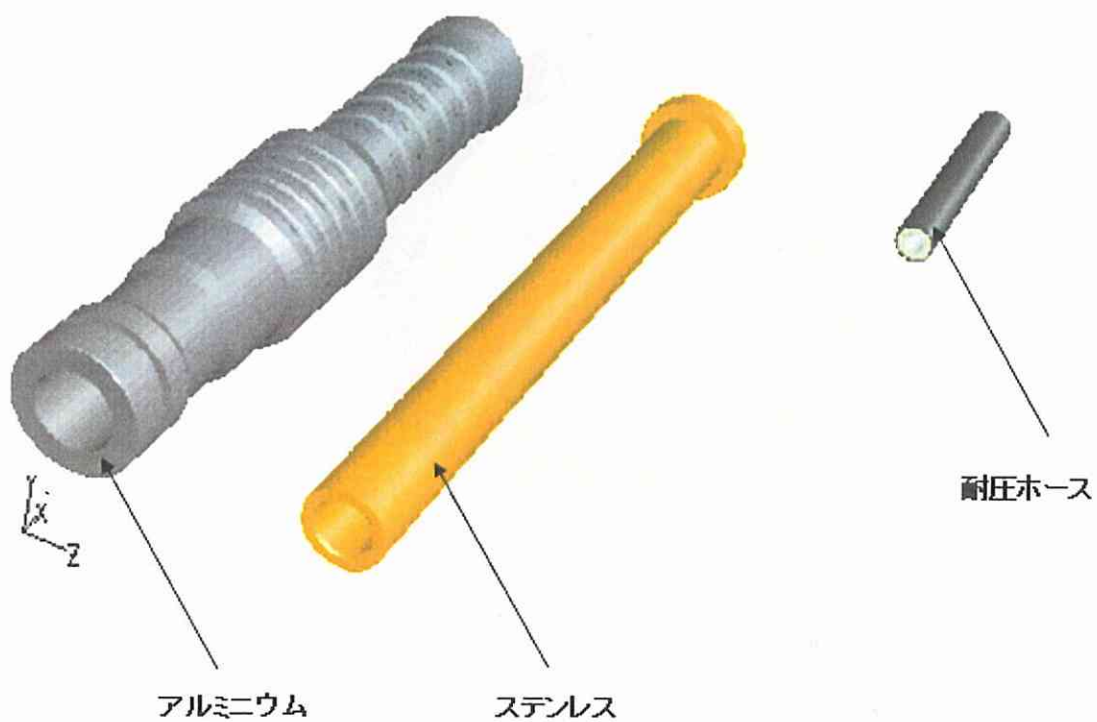


図 6.9.2-3 充電ノズルの内部構造

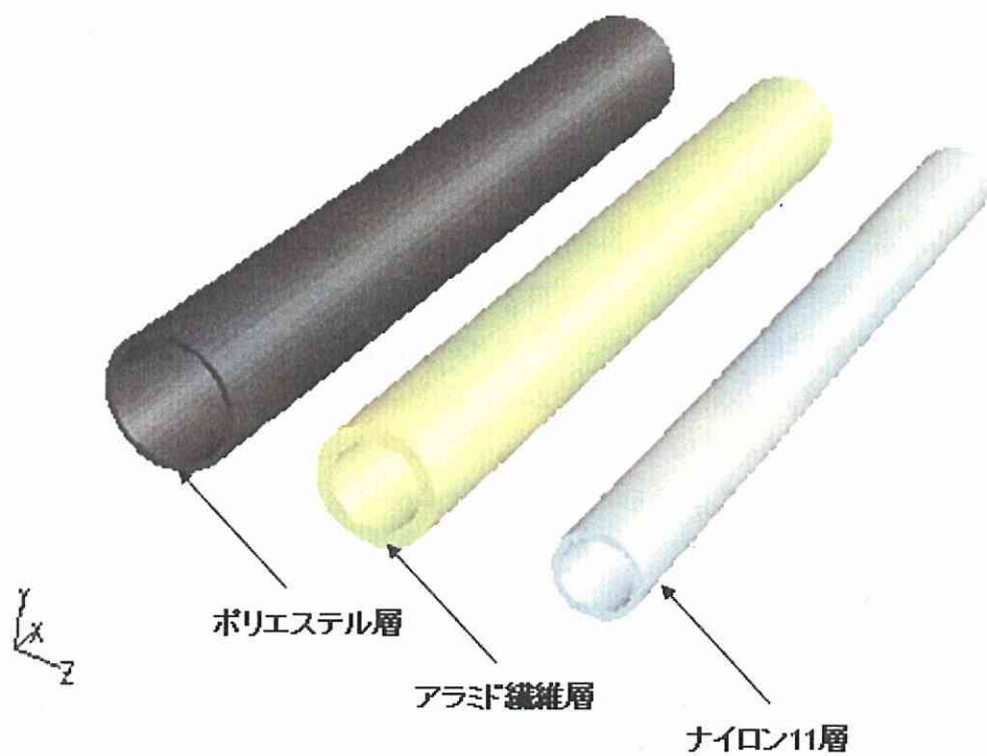


図 6.9.2-4 充電ホースの内部構造

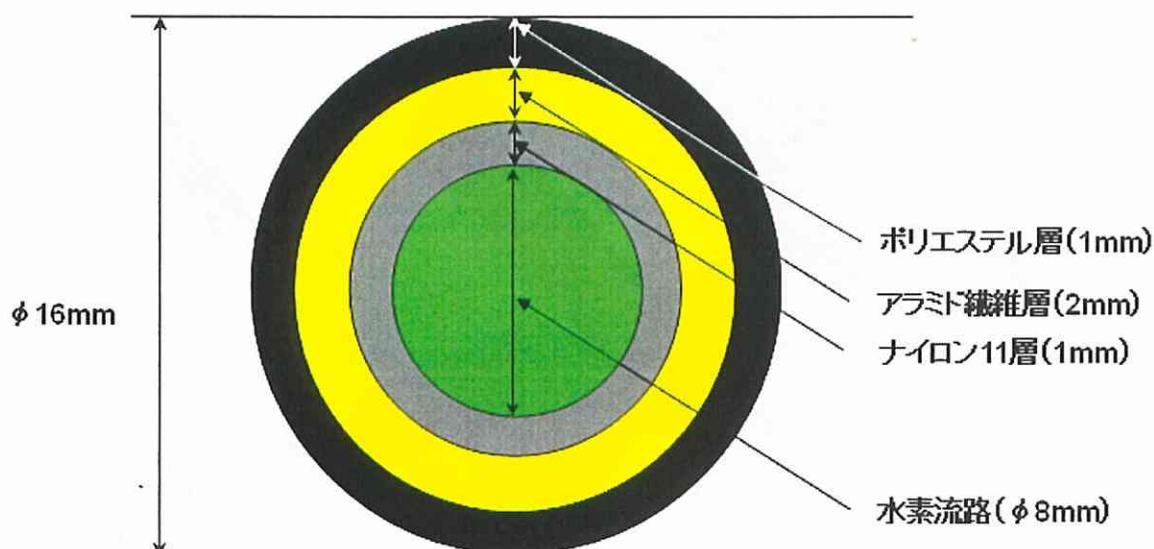


図 6.9.2-5 充てんホースの断面図

6.9.3. 解析条件などの設定

(1) 解析条件

解析は水素供給時間を 5 分とし、時系列での温度変化を得るため非定常計算とした。充てんホース部を曲がりがない直線状態で仮定すると、充てんノズルと充てんホースの形状は軸対称形状で近似できるため、3次元軸対称モデルを使って解析を行なった。

(2) 境界条件

本解析では充てんホースのディスペンサー取付け部（水素が流入する面）から -30°C の水素ガスが 70MPa で供給されると仮定した。充てんホース外表面およびノズル外表面は外気にさらされている。外気温を 300K とし、表面は自然対流による熱伝達（熱伝達係数 8W/m/K ）がある条件とした。

計算の初期条件として、充てんホース内の圧力は 10MPa とした。これは、充てんホースは充てん終了後、脱圧して大気圧に戻されるので 0.101MPa を初期条件にすることを検討したが、FCVの車載タンクの残圧を 10MPa と仮定したため、充てん開始直後はホース内圧力が大気圧から 10MPa になった時点でFCV側の逆止弁が開き、水素が流れ出すためこのように決めた。また、ホースとノズルの内面温度は -30°C (243K)、その他は 27°C (300K)とした。

FCV側の条件は、車載タンクの残圧は 10MPa で水素スタンドへ充てんに来所すると仮定し、5分間で 70MPa に線形に昇圧（昇圧速度一定）することを想定している。ただし、本解析ではFCVタンクをモデル化していないため、FCV側の条件とは充てんノズル先端の条件である。

(3) 物性値

解析に使用した各素材の物性値を表 6.9.3-1 から表 6.9.3-3 に示す。水素物性値と充てんノズル材料の物性値は各種便覧から引用し、充てんホース材料の物性値は横浜ゴム株式会社様よりご提示頂いた物性値を使用する。

表 6.9.3-1 水素物性値

密度[kg/m ³]	理想気体方程式より算出
比熱[J/Kg/K]	14283
熱伝導率[w/m/K]	0.1672
粘度[kg/m/s]	8.411e-6

表 6.9.3-2 充てんノズル材料の物性値

	アルミニウム	ステンレス(SUS316L)
密度[kg/m ³]	2719	8090
比熱[J/Kg/K]	871	500
熱伝導率[w/m/K]	202.4	16.3

表 6.9.3-3 充てんホース材料の物性値

	ナイロン 11	アラミド繊維	ポリエステル
密度[kg/m ³]	1060	1440	1150
比熱[J/Kg/K]	2430	828.8(@223.15K) 2013.3(@373.15K)	1350(@223.15K) 1950(@373.15K)
熱伝導率[w/m/K]	0.34	0.04	0.19

注 1：アラミド繊維は積層繊維のため、熱伝導率は本来非等方性がある。しかし、計算を簡素化するため等方性と近似した。

注 2：アラミド繊維とポリエステルの比熱は、各温度での値を元に線形補完した。

6.9.4. メッシュ分割

充てんノズルモデルの外形、充てんノズルとホース接合部断面図、接合部のメッシュ分割をそれぞれ図 6.9.4-1～3 に示す。モデルの縦横比が大きいため、ノズルとホースの接合部を中心に記載する。



図 6.9.4-1 充てんノズルモデル外形

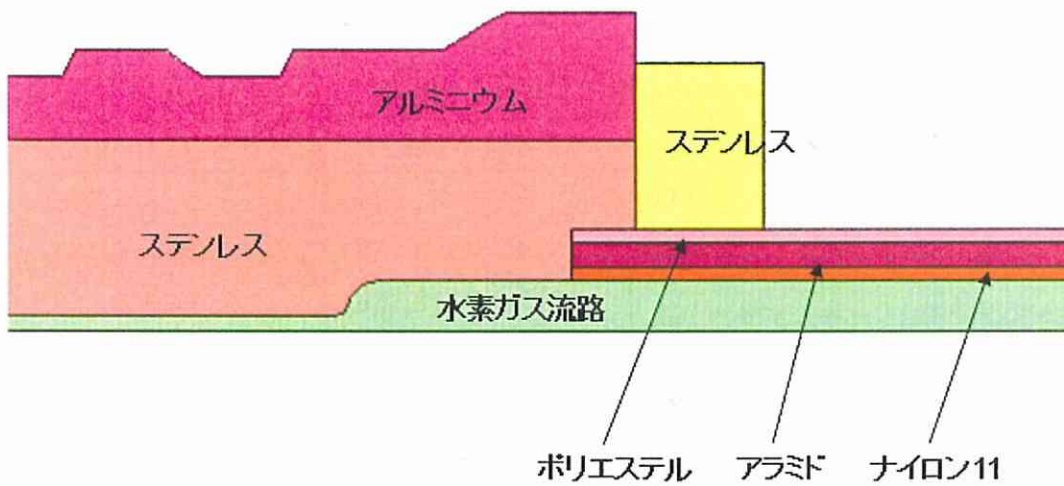


図 6.9.4-2 充てんノズルと充てんホース接合部断面図

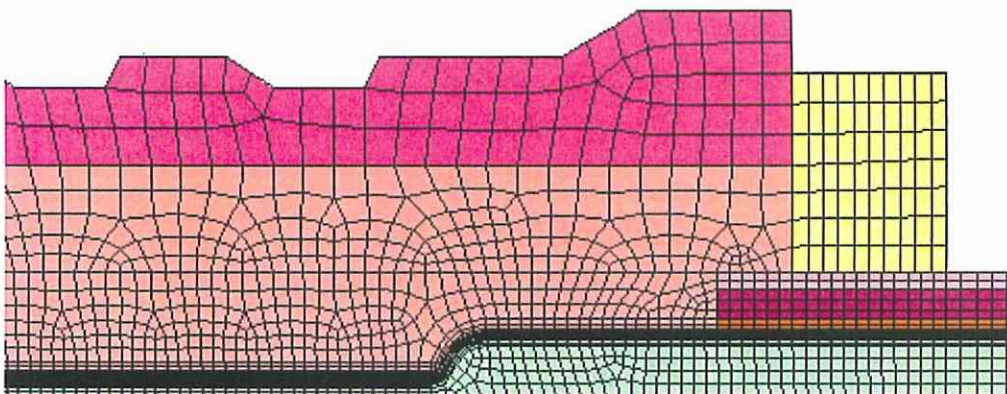


図 6.9.4-3 接合部のメッシュ分割図

6.9.5. 解析結果と考察

(1) 中心軸上の水素温度分布

任意の時間における中心軸上の水素温度分布の計算結果を示す。横軸は充てんホース長さ方向を示し、0m は充てんノズル先端、3.3m はホース他端の水素供給部分を示す。計算は非定常で実施した。

充てんホース中心軸上の温度分布を見ると、充てん開始直後では、ホース内に存在している 300K の水素が新規に供給された水素によって断熱圧縮されるため、ホース内の温度が一瞬上昇する（図 6.9.5-1 の山部分）。温度上昇したこの水素は、新規に供給された水素によって充てんノズル先端へ押し寄せられ（図 6.9.5-2）、0.8 秒後には新規供給水素がノズル先端に達していることが分かる（図 6.9.5-3）。つまりホース内の水素は、充てん直後に断熱圧縮されて温度が上昇するが、次の瞬間には新規に供給された水素に押し寄せられて、FCV のタンク内へ充てんされる。このとき温度上昇した水素は、ホース内に常圧で存在した水素であり FCV のタンク容量に比べれば無視できる程度の量であるため、タンク内の温度上昇にはほとんど寄与しないと考えられる。

0.8 秒後以後のホース中心軸上の水素温度は、ホース部とノズル部（金属カップラー部）からの入熱の影響を受けるが、おおむね -30°C ($243\text{K}+3\text{K}$) である。

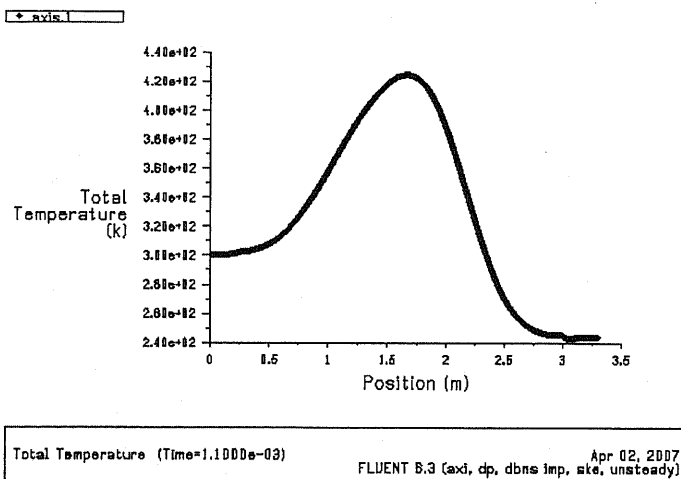


図 6.9.5-1 1.1e-3 秒後の中心軸上温度分布

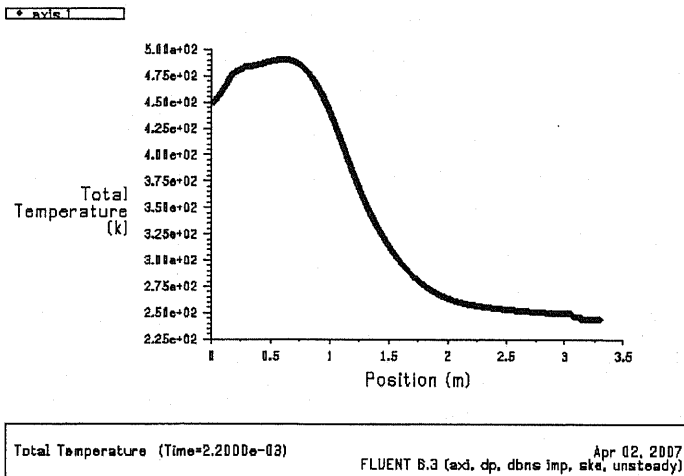
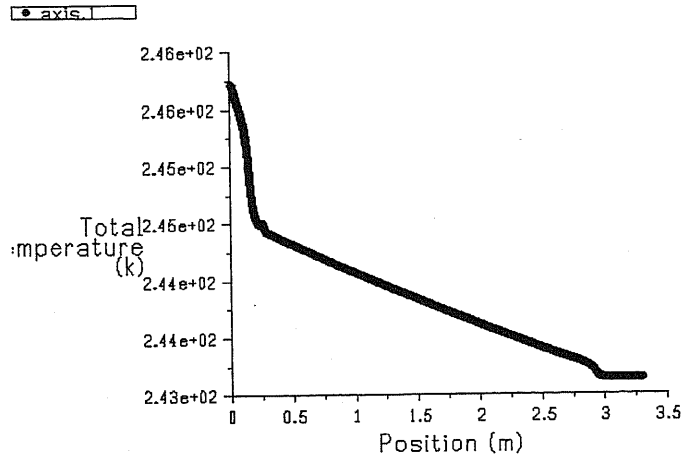
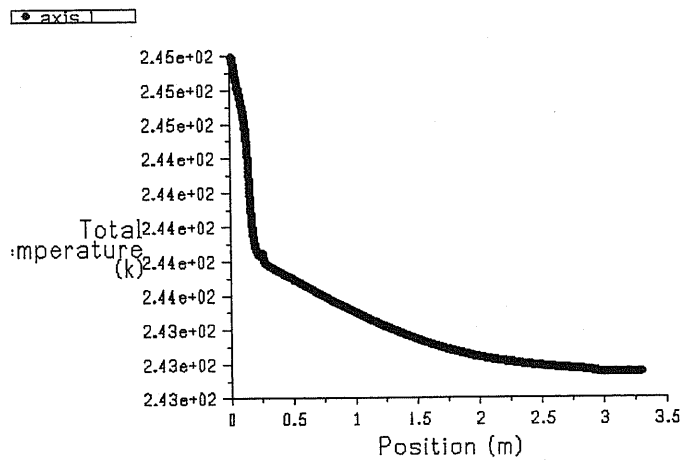


図 6.9.5-2 2.2e-3 秒後の中心軸上水素温度



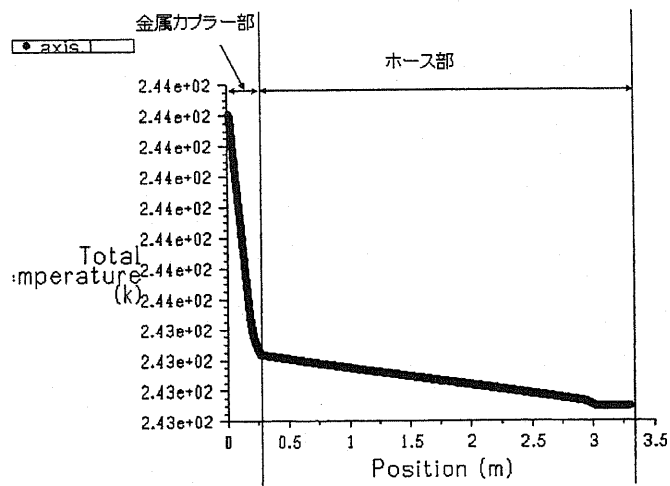
Total Temperature (Time=7.8560e-01) Jan 30, 2008
 FLUENT 6.3 (axi, dp, dbns imp, ske, unsteady)

図 6.9.5-3 約 0.8 秒後の中心軸上水素温度



Total Temperature (Time=1.7237e+01) Jan 30, 2008
 FLUENT 6.3 (axi, dp, dbns imp, ske, unsteady)

図 6.9.5-4 約 17 秒後の中心軸上水素温度



Total Temperature (Time=3.0000e+02) Jan 30, 2008
 FLUENT 6.3 (axi, dp, dbns imp, ske, unsteady)

図 6.9.5-5 300 秒後の中心軸上水素温度

(2) 水素ガス供給 300sec 後の断面温度

プレクール設備で-30℃に冷却された水素ガスは、外気にさらされた充てんノズルとホースから熱を受けて温められることが予想される。そこで、充てん終了時（300 秒後）の各部分の温度分布を比較する。水素供給元（プレクール設備出口）から 1m、2m、3m のホース断面および、ノズル先端部の断面の温度分布を示す（図 6.9.5-6~18）。ホース部、ノズル先端部ともにホース内面から外表面にしたがって外気温に近づいていることがわかる。水素ガス流路内の水素ガスは、ホース内表面（ナイロン 11）に接する部分を除きほとんど外気温の影響を受けていない。ただし、ノズル先端部は流路が細くなっていることからノズルの熱影響を受けている（図 6.9.5-18）。

（温度分布のスケールが統一されていないことに注意されたい。）

水素供給元から 1m 部の断面温度分布

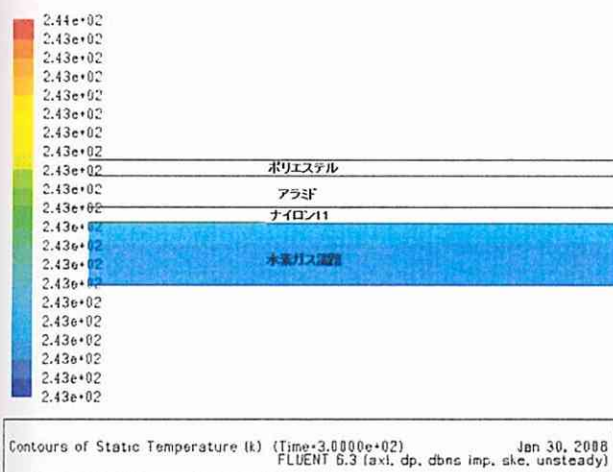


図 6.9.5-6 水素ガス温度

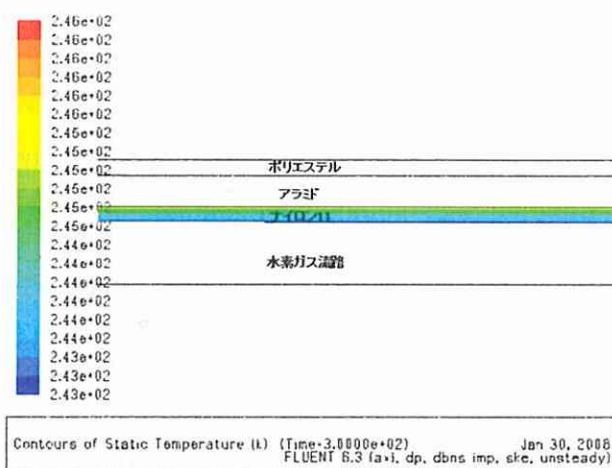


図 6.9.5-7 ナイロン 11 温度

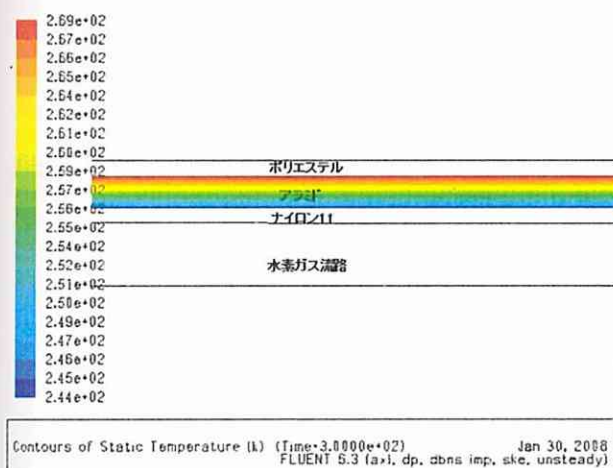


図 6.9.5-8 アラミド温度

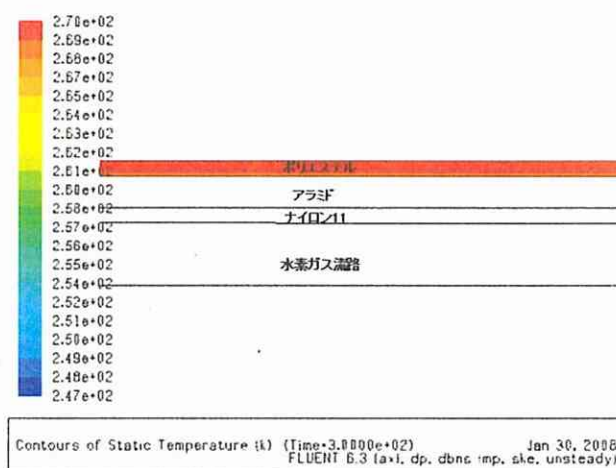
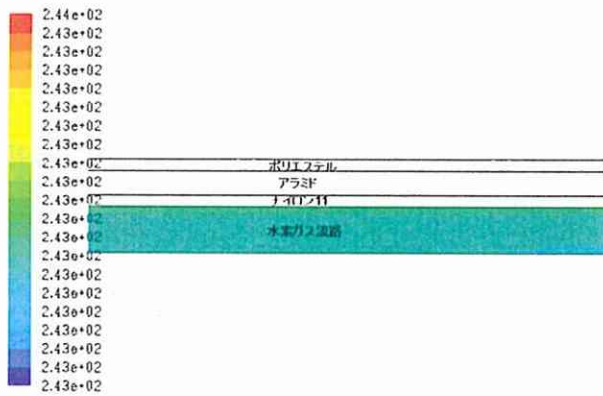


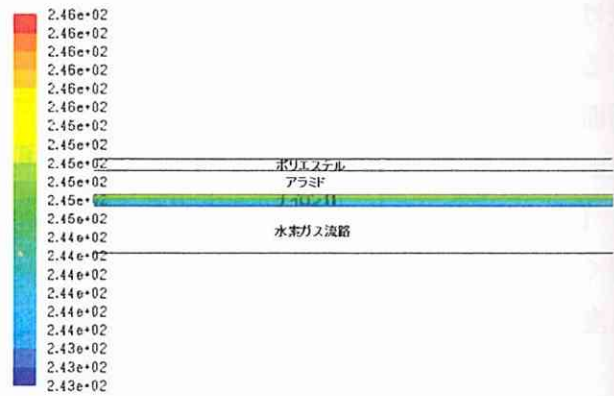
図 6.9.5-9 ポリエステル温度

供給元から 2m 部の断面温度分布



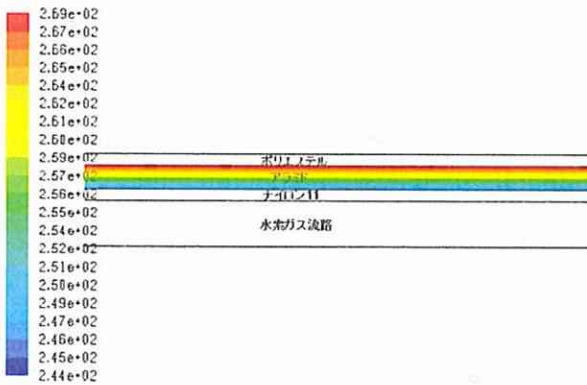
Contours of Static Temperature (k) (Time=3.0000e+02) Jan 30, 2008
FLUENT 6.3 (axi, dp, dbns imp, ske, unsteady)

図 6.9.5-10 水素ガス温度



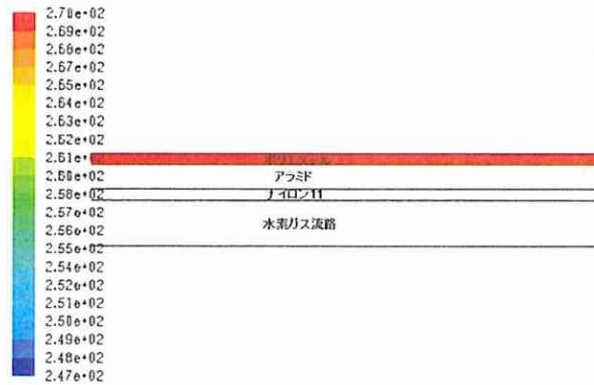
Contours of Static Temperature (k) (Time=3.0000e+02) Jan 30, 2008
FLUENT 6.3 (axi, dp, dbns imp, ske, unsteady)

図 6.9.5-11 ナイロン 11 温度



Contours of Static Temperature (k) (Time=3.0000e+02) Jan 30, 2008
FLUENT 6.3 (axi, dp, dbns imp, ske, unsteady)

図 6.9.5-12 アラミド温度



Contours of Static Temperature (k) (Time=3.0000e+02) Jan 30, 2008
FLUENT 6.3 (axi, dp, dbns imp, ske, unsteady)

図 6.9.5-13 ポリエステル温度

供給元から 3m 部の断面温度分布

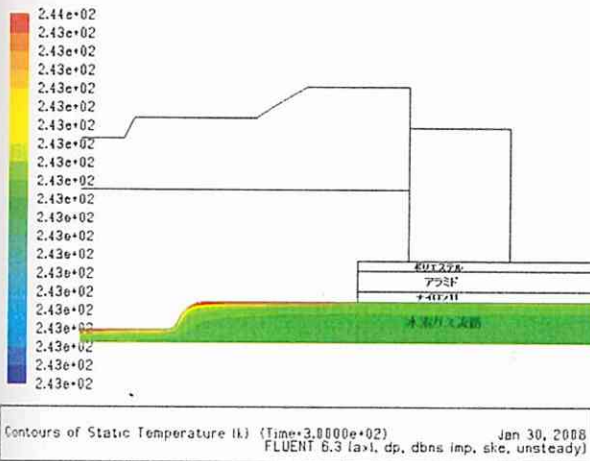


図 6.9.5-14 水素ガス温度

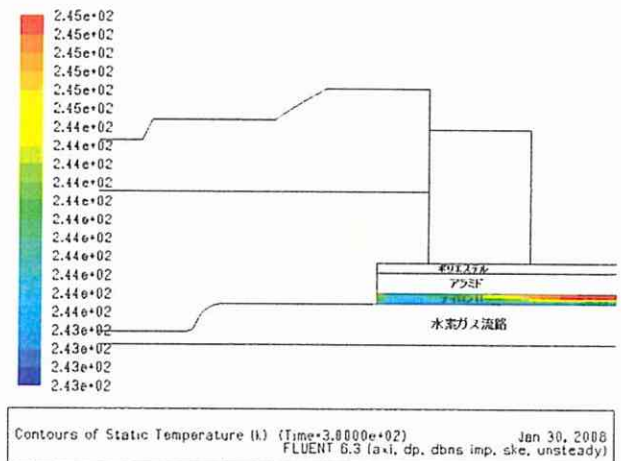


図 6.9.5-15 ナイロン 11 温度

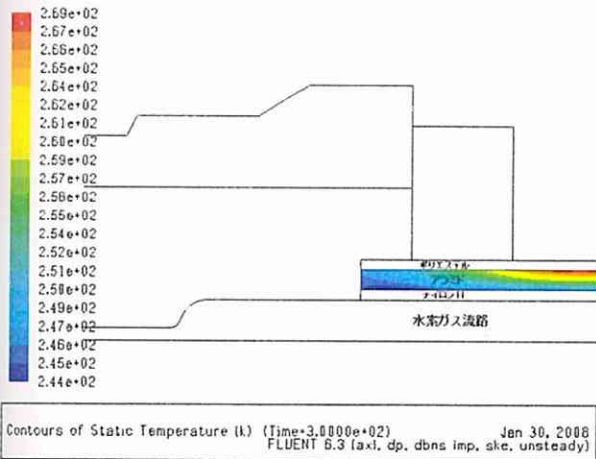


図 6.9.5-16 アラミド温度

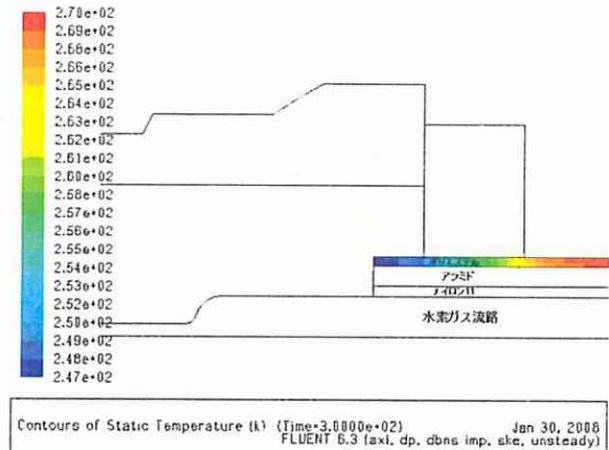


図 6.9.5-17 ポリエステル温度

ノズル先端近傍温度分布

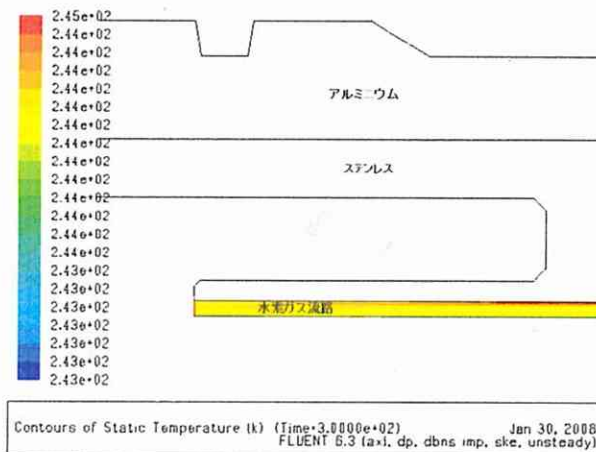


図 6.9.5-18 ノズル先端近傍での水素温度分布

(3) 充てんノズルの温度分布 (時系列変化)

図 6.9.5-19~24 に充てんノズルの温度分布を時系列で示す。充てんノズルの温度は、初期温度 300K で 300K の外気温の中に置かれているものとし、ノズルと空気との熱伝達係数は 8w/m/K とし て計算した。内部を通過する -30°C の水素によって充てんノズル全体が冷やされる様子がわかる。

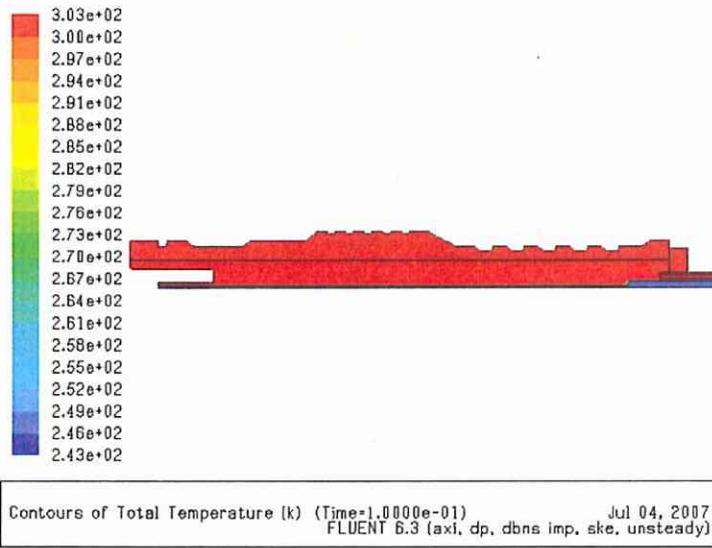


図 6.9.5-19 0.1 秒後

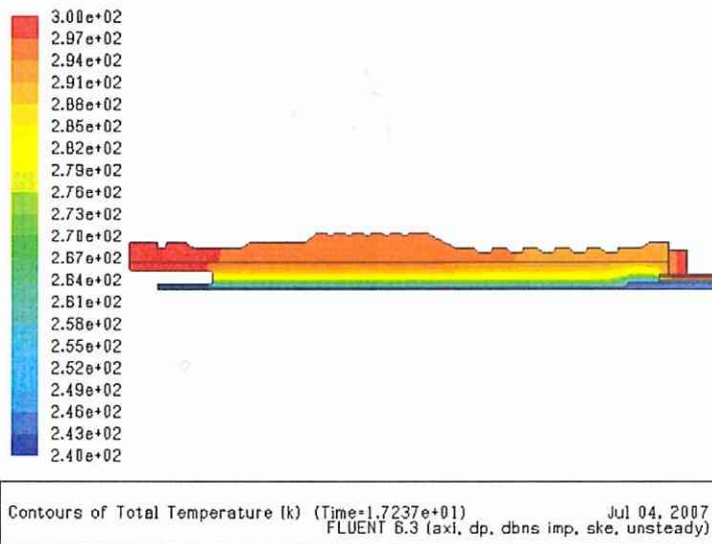


図 6.9.5-20 17.237 秒後

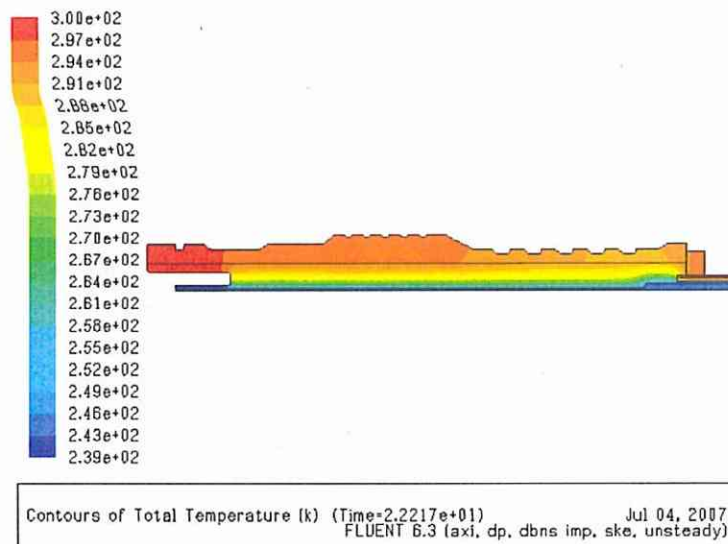
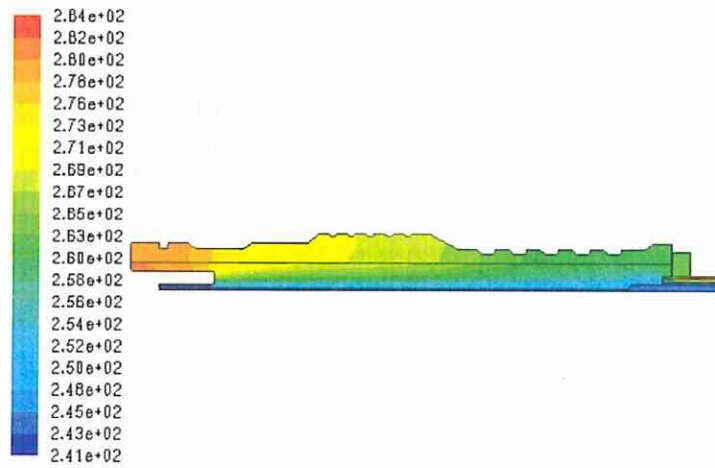
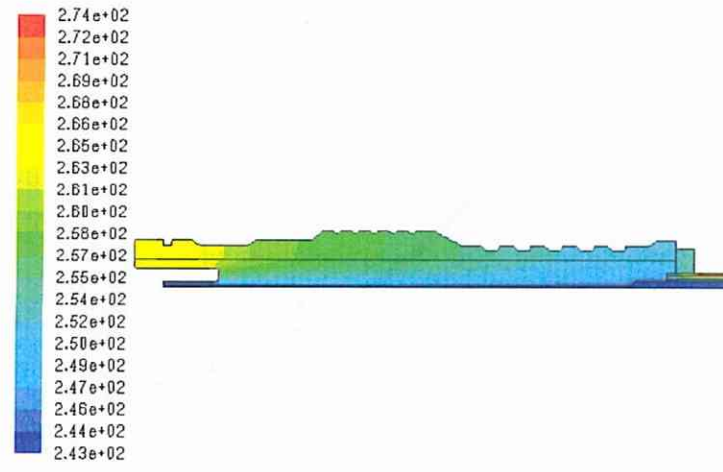


図 6.9.5-21 22.217 秒後



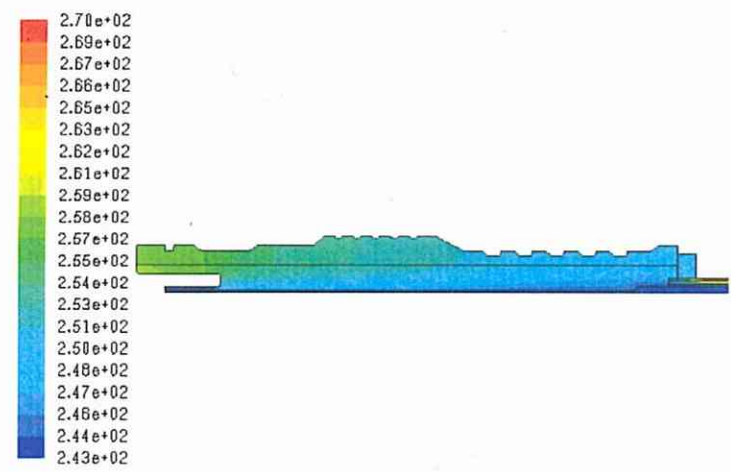
Contours of Total Temperature (k) (Time=1.2222e+02) Jul 04, 2007
 FLUENT 6.3 (axi, dp, dbns imp, ske, unsteady)

図 6.9.5-22 122.22 秒後



Contours of Total Temperature (k) (Time=2.2222e+02) Jul 04, 2007
 FLUENT 6.3 (axi, dp, dbns imp, ske, unsteady)

図 6.9.5-23 222.222 秒後



Contours of Total Temperature (k) (Time=3.0000e+02) Jul 04, 2007
 FLUENT 6.3 (axi, dp, dbns imp, ske, unsteady)

図 6.9.5-24 300 秒後

(4) 考察

プレクール設備で-30℃に冷却された水素ガスが、充てんノズルとホースの熱容量や外気温の影響を受けてどの程度温度上昇するかを検討した。計算結果は、-30℃+3℃程度で水素を充てんできることがわかった。これは、充てんノズルとホース表面の熱境界条件は、雰囲気温度からの熱の供給がある条件として計算しているが、一般的な水素スタンドで充てんホースとノズルを使用する条件では、ノズル外部からの熱の供給が少ないため内部の水素温度を大きく上昇させるには至らないためと考えられる。

図 6.9.5-25 に充てんノズル外表面温度の変化を示す。横軸は充てん時間、縦軸はノズルの表面温度を示している。充てんノズルは冷却された水素ガスによって充てん開始から連続的に温度が低下していくことがわかる。

300 秒後には 255K (-18℃) になることから、充てんノズルを金属材料だけで作成した場合は、充てん作業員が凍傷になることを防ぐため皮手袋等の着用が必要である。

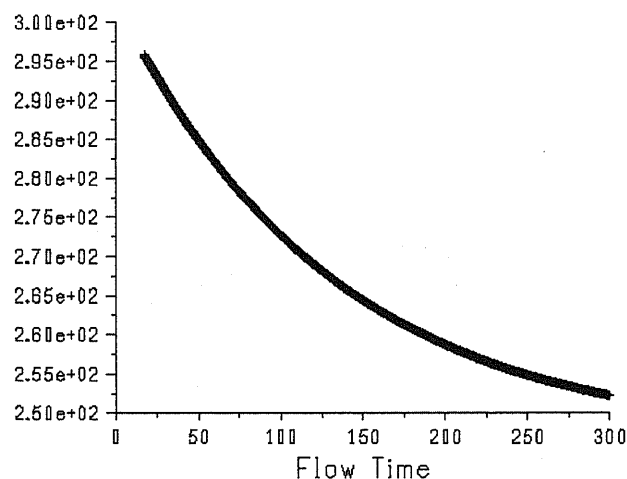


図 6.9.5-25 充てんノズルの表面温度変化

次に実機と数値計算との差異を考える。実機の充てんノズルおよびホースは、アルミニウム/ステンレス/耐圧ホースで構成されているため、それぞれの接合面において接触熱抵抗がある。また充てんホースのアラミド部は、アラミド繊維を織ったものであり、実際にはある程度の空気を含んでいる。しかしながら、本数値計算では、これらの接触熱抵抗およびアラミド繊維に含まれる空気量が不明であったため、これらが抵抗として振舞う効果を見逃している。言い換えれば本数値計算の結果は、実機よりも熱をより伝えやすい（水素温度が上昇する、またはノズルが冷えやすい）計算結果となっている。

充てんノズルが真夏の炎天下に置かれている場合は、今回のカプラ初期温度 300K よりも高温になると考えられる。しかしホース内に残留していた初期残留水素量が少なく、その移動時間（約 0.8sec）が短いこと、および今回無視した実機での諸熱抵抗を考慮すると、外気温の影響は新規に水素を供給する時の温度に殆ど影響しないと考えられる。

本解析は、水素ガスを理想気体として仮定している。つまりジュール・トムソン効果を考慮していない。研究の初期段階で実ガス則を用いるソフトの利用を検討したところ、水素ガスの物性が変化していない点では計算は可能であるが、40MPa を超える水素の物性データが無いため、実ガスでの計算を断念した。

ここで、当解析の妥当性を考える。当解析はホース内初期圧力 10MPa、充てん終了時の圧力が 70MPa である。この圧力条件下で水素は超臨界状態である。そこで水素（温度 300K）の圧力 5MPa から 80MPa までの密度の変化を超臨界状態と理想気体で比較したグラフを図 6.9.5-26 に示す。図 6.9.5-26 から、高压側では理想気体の方がより高い密度になっていることが分かる。これはホース内温度変化の計算において、理想気体を使った方がよりリスクが高い（高温になる）計算であることを示していることから、理想気体で計算を行なった。また、水素はジュール・トムソン効果の逆が現れることを考慮すると、実際には本解析結果ほど温度は上がらないと考えられる。

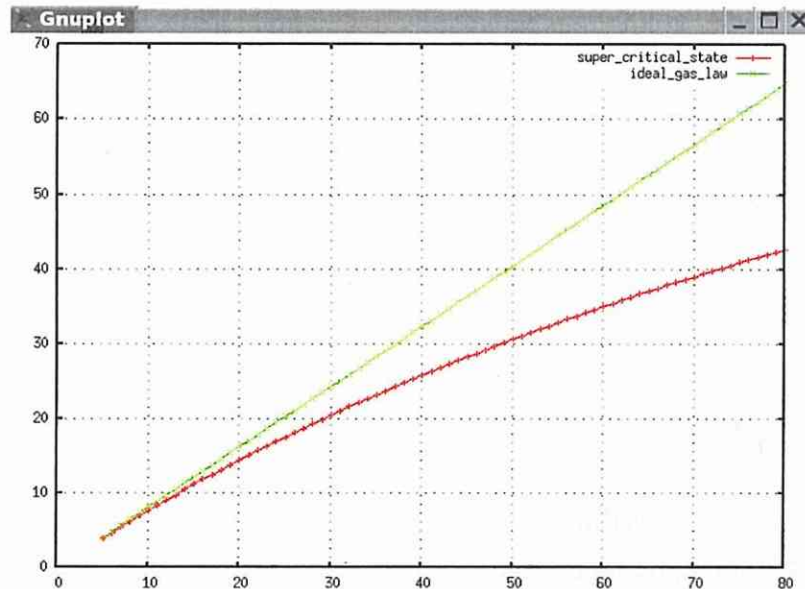


図 6.9.5-26 水素 300K における圧力と密度の関係

最後に、FCV メーカー側から要望があると思われる供給水素の温度測定に関しては、以下の理由により充てんノズルのステンレスインサート部の耐圧ホース近傍に温度計を設置して測定することが適当と思われる。

- ・ 充てんノズルは金属製であり熱伝導率はホースを構成する素材よりも良好ではあるが、密度および比熱が他材料と比較して非常に大きく、また体積も大きいため温度変化に対する時間応答性が悪い。
- ・ 実機ではアルミニウム/ステンレス/耐圧ホースとの接触熱抵抗があり、これは水素温度の時間応答性に大きく影響する。

References

- [1] Shigeki Kikukawa et al. Risk Assessment for Hydrogen Fueling Stations. Int: Proceedings of The Sixth Japan Conference on Structural Safety and Reliability 2007. p.613-618.
- [2] Yoshio Yamanaka et al. Development for Safe Utilization and Infrastructure of Hydrogen, Basic Research on Technologies for Safe Utilization of Hydrogen (FY2003-FY2004) Final Report, p. 89-93
- [3] Kenzo Fukuda et al. Development for Safe Utilization and Infrastructure of Hydrogen, Research on Fundamental Properties of Hydrogen (FY2003-FY2004) Final Report (1), p. 15-37
- [4] B. P. Xu, L. EL Hima, J. X. Wen, S. Dembele and V.H.Y. Tam, Numerical study on the spontaneous ignition of pressurized hydrogen release through a tube into air, submitted to the Journal of Loss Prevention in the Process Industry, 2007.
- [5] K., Takeno, K., Chitose, K., et al., Safety technology for a hydrogen supply infrastructure, Final report from 2004 to 2005, 2005, p. 122
- [6] Kenzo Fukuda et al. Development for Safe Utilization and Infrastructure of Hydrogen, Research on Fundamental Properties of Hydrogen (FY2003-FY2004) Final Report (1), p. 38-46
- [7] Schefer, R.W., Houf, W.G., Williams, T.C. Bourne, B., and Colton, J., "Characterization of High Pressure, Under-Expanded Hydrogen-Jet Flames," Int. Jour. of Hydrogen Energy, In Press, Oct.,2006.
- [8] Schefer, R.W., W.G. Houf, W.G., Bourne, B. and Colton, J., "Spatial and Radiative Properties of an Open-Flame Hydrogen Plume," Int. Jour. of Hydrogen Energy, Vol. 31, 1332-1340, Aug. 2006.
- [9] Houf, W.G., and Schefer, R.W., "Predicting Radiative Heat Fluxes and Flammability Envelopes from Unintended Releases of Hydrogen," Int. Jour. of Hydrogen Energy, Vol. 32, pp. 136-151, Jan., 2007.
- [10] Oikawa Susumu, Nozu Tsuyoshi Wind Tunnel Study on Peak Concentration of Leaked Hydrogen Gas from a Hydrogen Refueling Station, Journal of Japan Society for Atmospheric Environment, Vol.41, No.2, 2006, p. 65-77
- [11] Tanaka, T., Azuma, T., Evans, J. A. et al., Experimental Study on Hydrogen Explosions in a Full-Scale Hydrogen Filling Station Model, 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy, 2005
- [12] Kenzo Fukuda et al. Development for Safe Utilization and Infrastructure of Hydrogen, Research on Fundamental Properties of Hydrogen (FY2003-FY2004) Final Report (1), p. 47-59
- [13] Olav R. Hansen, Prankul Middha, CFD Simulation Study to Investigate the Risk From Hydrogen Vehicles in Tunnels, ICHS, San Sebastian, Spain, 2007
- [14] Papanikolaou E.A., Venetsanos A.G., CFD Modelling for Slow Hydrogen Releases in a Private Garage without Forced Ventilation, International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy, 8-10 September, 2005

- [15] Proust, Ch., Lacombe, J.M., Jamois, D., Perrette, L. Process of the Formation of Large unconfined Clouds Following a Massive Spillage of Liquid Hydrogen on the Ground, International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Spain, 2007
- [16] Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project 2007, URL:
<http://www.jhfc.jp/e/station/index.html>
- [17] ISO/IEC Guide 51 Safety Aspects-Guidelines for their inclusion in standards, Second edition, 1999
- [18] The technical standard examination report to the fuel gas supply facilities relate to the high pressure gas for the Liquid Petroleum Gas and Natural Gas Vehicles, The Japan Gas Association, 1996, p. 54-56
- [19] Okabayashi, K., Takeno, K., Chitose, K., et al., Safety technology for a hydrogen supply infrastructure, Final report from 2004 to 2005, 2005, p. 92
- [20] FLUENT 6.1 User's Guide, Fluent Inc. / Fluent Asia Pacific, August 2003, p. 10-4 10-20
- [21] FLUENT 6.1 User's Guide, Fluent Inc. / Fluent Asia Pacific, August 2003, p. 13-3
- [22] Toru Fukano, Fluidics (2), Shokabo Publishing Co., Ltd. 1994, p.199
- [23] NEDO 平成 17 年度～平成 19 年度成果報告書, 水素社会構築共通基盤整備事業, 水素インフラ等に係る規制再点検及び標準化のための研究開発, 水素インフラに関する安全技術研究 p.126

第7章

リスクアセスメントの結果と考察

第7章 リスクアセスメントの結果と考察

7.1. 水素スタンドモデルの定義に関する考察

7.1.1. 35MPa 充てん対応水素スタンドモデルと 70MPa 充てん対応水素スタンドモデルの違い

FCV の車載タンク圧力が 35MPa から 70MPa へ高圧化されることに伴い、圧縮水素スタンドにおいて取り扱う水素の圧力は 40MPa から 80MPa になる。(Booster type においては FCV への充てん圧力と同じ 70MPa で足りるかもしれない。) 水素スタンドモデルにおいては、内圧が高まることから、配管や使用する機器の肉厚を厚くしている。また、蓄圧器は充てんを効率的に行なう目的で高圧、中圧、低圧などバンク数を多くする傾向が見られるため蓄圧器のシステムが複雑になっている。ディスプレイに関して 35MPa 充てん対応のノズルを残し 70MPa 充てん対応のノズルを追加したことから設備が複雑化している。本研究の水素スタンドモデルは安全対策を外した状態で第一回目のリスク評価を行なうために安全弁等の安全装置がつけられていないが、実際の水素スタンドでは、システムの高圧化によって安全装置も重厚になる。このように、高圧化によってシステムは複雑化する。

一方、今後 70MPa の車載タンクを搭載した FCV が主流になると仮定すると、既存の水素スタンド (35MPa 対応) をベースに 70MPa 充てん対応へ増改造がなされると考えられる。これは水素スタンド建設コストを抑制することはもちろん、新規に水素スタンドを建設する場合の用地の制約から、既存の水素スタンドに 70MPa 充てん対応の機器を増強する方が効率的と考えられるためである。水素スタンドを改造する場合の設計については、70MPa 充てん対応の機器から 35MPa 充てん対応の機器へ 70MPa の水素が流入しないように設計する。そうしなければ、高圧の水素ガスが低圧側へ流入し最悪の事故シナリオとして蓄圧器や機器の破壊になりかねない。

さらに、圧力 70MPa での充てんは、車載タンクの温度上昇が大きいことから、水素ガスをスタンド側で -30°C 程度に冷却するプレクール設備が必要である。プレクール設備を安全装置と考えるか、水素スタンドの基本設備と考えるかは意見が分れると思うが、本研究では基本設備と考えることとした。しかし、充てん圧力の高圧化に伴って水素ガスの冷却装置が必要になるということは、研究を開始した当初は想定していなかった。それは本研究の対象が「水素スタンド」であることから、FCV のタンクなどの詳細は不勉強であった。水素スタンドで水素を充てんする場合の事故シナリオ抽出は当然実施しているが、このとき車載タンクの温度が大きく上昇するシナリオまでは抽出でなかった。こうした抽出漏れは大きな事故に繋がる可能性があることから、以後は十分な配慮を行なうべきことを明記しておく。

このプレクール設備を設置した場合については、緊急離脱カプラ、充てんホース、ノズル、レセプタクル (車両側) などの下流側に存在する機器が -30°C ～常温、常圧～70MPa の温度と圧力の履歴を受ける。しかし、これらの温度・圧力履歴が機器に及ぼす影響について現時点で安全性を証明するに十分なデータが揃っていない。今後、プレクール設備が 70MPa 充てん対応水素スタンドの安全性を左右する重要な機器として注目しなければならない。

7.1.2. 圧縮水素スタンドモデルと液体水素スタンドモデルの違い

燃料電池自動車等をガソリン自動車並に走らせるためには、燃料電池自動車等の燃料消費効率を向上させるとともに、できるだけ多くの水素効率よくコンパクトに搭載することが求められる。これには水素ガスを高圧のタンクに貯蔵する方法と、液体水素の状態に貯蔵する方法がある。水素ガスは常温で気体であるが、 -252.6°C 以下で液化する。液体水素の方が気体の水素ガスよりも高密度でタンク

に貯蔵できる。液体水素タンクを搭載する燃料電池自動車等には、それに対応する液体水素スタンドが必要である。

液体水素スタンドと圧縮水素スタンドを比べると、液体水素スタンドは常用圧力と温度が低い。圧縮水素スタンドに比べて使用する機器は、圧縮機が無くバルブも少ないためシンプルな構造である。しかし極低温の液体水素を取り扱うため、保冷のために真空断熱を施した二重構造の貯層、二重の配管、二重のディスペンサーホースを利用している。またディスペンサーが極低温の液体を扱うため、ディスペンサーの内部構造やノズルの構造が大きく異なっている。このように両水素スタンドモデルの相違点はいくつかあるが、液体水素スタンドでは使用する機器数がとても少ない点を強調したい。本検討において機器数が少ないことは、事故シナリオ数も少なくなることを再認識した。圧縮水素スタンドと液体水素スタンドの相違点を表 7.1.2-1 に示す。

表 7.1.2-1 圧縮水素スタンドと液体水素スタンドのおもな相違点

	圧縮水素スタンド	液体水素スタンド
水素の状態 (圧力、温度)	気体 (40MPa、常温)	液体 (0.35MPa、-253℃)
水素の製造方法	オンサイト / オフサイト	オフサイト
水素の輸送方法	－ / 圧縮水素トレーラー等	液体水素ローリー
水素の貯蔵方法	蓄圧器	断熱二重貯槽
水素の充てん方法	圧縮水素ディスペンサー	液体水素ディスペンサー
その他設備	圧縮機 配管	蒸発器 二重配管

7.2. 事故シナリオの抽出に関する考察

7.2.1. 35MPa 充てん対応水素スタンドの事故シナリオ抽出

検討対象のモデルに対して事故シナリオを漏れなく抽出することは、リスクアセスメントを実施するうえで最も重要な課題のひとつである。本研究では、HAZOP と FMEA の手法を用いて事故シナリオを抽出し、整理した結果 233 件の事故シナリオを抽出した。事故シナリオの中には、機器の劣化・故障によって引き起こされる事故に加えて、ヒューマンファクター、天災などを原因とするものも抽出している。これらの事故シナリオは、想定した事象、参考にした過去の事故事例など幅広く考慮していることから、現時点では網羅性が高いと考える。

しかし、日々技術が進歩するなか新しい機器が開発され、より効率の良い運転方法が考案され適用される。これに伴って、これまで想定していなかった事故シナリオが出てくる可能性は否定できない。今後、定期的なリスクアセスメントを実施するなど継続した取組みのなかで、事故シナリオの抽出を継続していくべきと感じた。

7.2.2. 70MPa 充てん対応水素スタンドの事故シナリオ抽出

35MPa 充てん対応水素スタンドの事故シナリオ (233 件) に比べて 70MPa 充てん対応水素スタンドのそれは大幅に増加している。この主な理由は、圧縮水素スタンドを高圧化させたことに伴って、機器が複雑になり機器数が増加したことである。以下に主な理由について考察する。

①機器数の増加

高圧化に伴い機器数が増加した。35MPa 充てん対応水素スタンドモデルの機器数は 135 に対し

て、70MPa 充てん対応水素スタンドモデルは、新設モデルで 272、改造モデル A で 155、改造モデル B で 103 に増加しているため事故シナリオが増加した。

②分割するセクション数の増加

高圧化に伴い、水素スタンドモデルに対し圧縮機数増加、蓄圧器のバンク数増加、ディスペンサーの種類増加などを行なった。これにより、35MPa 充てん対応水素スタンドモデルはセクション分割数 6 セクションだけであったものを、70MPa 充てん対応水素スタンドでは、新設モデル 9 セクション、改造モデル A で 7 セクション、改造モデル B で 5 セクションへ増加させている。これも事故シナリオの増加につながった。

④モデルの追加

既存の 35MPa 充てん対応水素スタンドを 70MPa 充てん対応水素スタンドに改造したモデルを追加した。改造の方法はいくつも想定されるが、検討の結果改造モデル A と B の二種類に集約させた。これらの改造モデルを追加したことにより、89 件（HAZOP：41 件、FMEA：48 件）の事故シナリオが増加した。

また、高圧化に伴い FCV の車載タンクの温度が上昇することから、プレクール設備を追加することとなった。これもプレクール設備モデルとしてモデルを追加したことから、事故シナリオが 48 件（HAZOP：18 件、FMEA：30 件）増加した。

⑤運転方法の検討

35MPa 充てん対応水素スタンドモデルでは運転モードを 1 種類しか考慮していなかったが、70MPa 水素スタンドでは、圧縮機から蓄圧器への蓄圧工程（蓄圧モード）について詳細な検討を行なった。これにより新たな事故シナリオ 27 件を抽出した。

さらに、35MPa 充てん対応水素スタンドモデルには存在せず、70MPa 充てん対応水素スタンドモデル特有の事故シナリオもあった。その代表的な例は、高圧バンク（80MPa）の水素が設計圧力 44MPa で設計された設備（既存の 35MPa 充てん対応水素スタンドの設備）に流入し、設備を損傷させ、80MPa 水素が漏洩し、事故に至るといった事故シナリオである。設備の高圧化は、思わぬところに新しい事故シナリオを生むことが分かった。

7.2.3. 液体水素スタンドの事故シナリオ抽出

液体水素スタンドモデルでは、液体水素を受け入れ、貯槽で貯蔵し、液体水素のまま FCV へ充てんする液体水素スタンドを対象とした。液体水素スタンドモデルは、機器数が少なくシンプルな構造であるにもかかわらず、相当数（131 件）の事故シナリオが抽出された。これは、液体水素の保冷のために配管に二重管を使い、貯槽に二重貯槽を使用していることから、最初の事故原因（トリガー現象）発生時に水素が漏えいした場所（開口場所）と、水素が外部へ漏えいする場所（放出場所）が異なるため、事故シナリオが複雑、多岐にわたったためである。本研究では、これを漏えいプロセスパターンと呼んで整理した。液体水素スタンドでは、開口場所と水素放出場所が異なることから、日々の安全管理が重要であること、漏えい等の事故が発生した場合は、どこが開口しているかを的確に予測した上で、対策を講じることが重要であると考えられる。

7.3. 安全対策検討に関する考察

安全対策検討においては、その安全対策が事故シナリオの発生可能性を下げるのか、影響度を下げるのかについて考察した。影響度を下げる安全対策とは、水素が漏えいする状況なった場合に漏えいする水素量そのものを低減させる対策である。水素スタンドのどこかが開口し、水素が全量流出して着火したとしても、漏えいする水素量が小さければ影響度は小さい。つまり影響度を下げる安全対策のひとつは、水素のタンク容量を小さくすることである。また、金属材料については、その材料がへき開（ひびが入って割れること）せず、LBB（Leak Before Break：破壊する前にピンホール漏えいで止まること）で止まることが影響度を下げる条件であると考えた。蓄圧器や配管に使用する材料がLBBであることを担保できれば、へき開する材料に比べて漏えいする水素量が格段に少なくなるため、影響度を下げる安全対策といえる。一方、安全弁は可能性を下げる対策であると考えた。安全弁は何らかの原因で圧力が上昇し、爆発する事故シナリオにおいて、圧力が一定以上になることを防ぐことから爆発する可能性を下げる。しかし、それでも圧力が上昇して爆発した場合の影響度を下げることは出来ないと考えたからである。また、安全弁に似た安全対策として、過流防止弁を考える。何らかの原因で配管が破断し、水素が大量に漏えいして着火爆発する事故シナリオにおいて、安全対策として過流防止弁を採用した。過流防止弁は大量に漏えいした水素ガスの力で自立的に作動する。配管内部に設置され、常に水素ガス雰囲気でごみや水分がほとんど無いクリーンな状態で使用されることから、さびることなく確実に作動することが期待できる。したがって、過流防止弁は漏えいする水素量を低減し、影響度を下げることが出来ると考えた。

安全対策を検討のなかで、安全対策が作動しないまたは機能しない可能性について考察した。ある事故シナリオの安全対策として安全弁を採用した場合、安全弁はその事故シナリオの発生する可能性を下げる事が出来るが、安全弁が作動しない可能性を考えなければならない。これは、その事故シナリオが発生する可能性×安全弁が作動しない可能性となる。ダブルフェールの考え方である。一つの考え方として、安全弁を2つ設置する案がある。これは、その事故シナリオの発生する可能性×（安全弁が作動しない可能性）の二乗となる。本研究では、ダブルフェールを考えないこととした。つまり安全弁などの安全装置は必ず作動するものとした。それを担保するのが定期点検である。事業者は、法律に則って定期点検を実施する。もちろんその費用を支払い実績のある専門家が点検を行う。したがって、安全弁等の安全装置は100%作動すると考えた。逆に定期点検を行なわない確率や、定期点検を行なっているにもかかわらず安全弁が作動しない確率を求めることは不可能と考えた。ただし、この点については議論の余地があると思う。

本研究では、安全対策検討にCFDを利用した。CFDをどのように利用したか、どう役に立ったかについて述べたい。水素の拡散/着火/爆発の実験と解析においては、三菱重工業(株)が実験で求めたデータをCFDで解析、補正し、一般性のあるデータに仕上げている。影響度評価においては、これらのデータを使用した。本論文の6章では、水素の漏えい拡散状況を明らかにするためにCFDを利用した。特に水素漏えい後の1%濃度到達範囲については、いろいろなケースで実験し測定することは、技術的にも予算的にも困難であることからCFDの利用が有効である。また、二重管内における液体水素の漏えい拡散状況の解析は、二重管内の漏えいを可視化することで事故シナリオのイメージ作りに役立った。CFDによる解析によって事故シナリオの網羅性が高まったと考える。その他、本論文では割愛しているが、バント放出口から水素を放出した場合の拡散状況をCFDで求め、バント放出口付近で何らかの原因で着火した場合の影響度の大きさを推測している。このようにCFDは解析結果が定量的であり、アニメーション処理することにより視覚的で分かりやすいデータを得ること

が出来る。CFD で求めた分かりやすいデータは、水素スタンドの状況を一般へ説明する場合にも利用できる。ただし、CFD の結果は常に実験結果との整合性を求められる。実験が可能なケースでは実験結果をリファレンスに出来るが、予算や技術、安全性の観点から実験が出来ない場合は、CFD による結果の信頼性について理論武装が必要である。

安全対策検討において、安全対策にかかるコストをどう考えたか。安全対策に費やす費用を無限大とすれば、考えられるすべての安全対策が可能である。例えば、水素スタンドで水素が爆発する事故シナリオに対して、爆風圧による影響度を下げるため、水素スタンド機器のすべてを障壁や鋼板で被い、爆風を封じ込める対策が考えられる。水素スタンドを要塞のように頑丈な障壁等で固めれば、安全性が確保できるかも知れない。しかし、利便性が失われてしまう。本研究の目的は、水素スタンドの普及と安全性確保の両立である。安全が確保できるとしても、非現実的と思われる安全対策を採用しないこととした。この考え方は純粋なリスクアセスメントとは異なるかもしれない。やや水素スタンドの普及を望む者寄りのアセスメントになっていることを否定できないかもしれない。特に反対住民から見ると、十分満足できる安全対策とは言えないかもしれない。反対に、水素スタンドを普及させる立場から見るとどうであろうか。離隔距離を圧縮天然ガス (CNG) スタンド並の 6m に仮置きしてリスクアセスメントを行い離隔距離 6m が達成できたが、安全対策が従来よりも多く水素スタンド建設コストが高くなったとの指摘を頂いた。このリスクアセスメントは、水素スタンドの普及を目的としているのか疑問だとのこと意見を頂いた事もある。水素スタンドも一般の工場も営利を目的とした建造物であることから、安全対策に対してその費用対効果を考慮する必要がある。費用対効果を見捨ててしまえば、リスクアセスメントを行なう以前にその対象物自体が成立しない。

これまで本研究の考え方を述べてきたが、結果として提案する安全対策とそのコストについては、まだまだ議論の余地がある。安全対策の費用に関する考察については、リスクアセスメントに関係する各位から忌憚りの無いご意見を頂きたい。

7.4. リスクアセスメントの結果と考察

7.4.1. 35MPa 充てん対応水素スタンドのリスクアセスメント結果と考察

水素スタンドのリスクアセスメントを実施した結果を表 7.4.1-1 に示す。表 7.4.1-1 の左側は安全対策実施前のリスク評価結果、右側は各種安全対策実施後のリスク評価結果である。図中の数字は該当するリスクレベルにあてはまる事故シナリオ数を表している。ここで、本質的対策を講じることができた事故シナリオは、当リスクマトリクスに合わないため表 7.4.1-1 の右側には記載していない。

検討の結果、安全対策実施後の水素スタンドのリスクは、安全対策実施前に比較して大幅に低減することができた。また、本検討において 87 件の安全対策案を得た。これらは水素スタンドに必要な安全対策である。言い換えると得られた安全対策を正しく適用した水素スタンドはリスクを可能な限り低減しており、高い安全性を有しているといえる。

一方、安全対策実施後において、M レベルの事故シナリオが 58 件存在する。これらは 4.4 節に示した通り、着火確率・人と建物の存在確率をどちらも保守的に 1 としたため、漏えい直近で従業員等が必ず噴出火炎に接すると評価され、敷地内の人的影響度が大きくなったためである。58 件の事故シナリオに対しては、可能性を低減する複数の安全対策が講じられており発生可能性は極めて小さいと考えられるが、L レベルにする現実的な対応策を見出すことが出来なかった。最終的に、敷地外にその影響が及ぶことが無い点を考慮して、M レベルの定義に従い「現実的な対策が見つからない場合に限ってこれを許容する」とした。

表 7.1-1 35MPa 充てん対応水素スタンドのリスクマップ

		可能性レベル			
		A	B	C	D
影響度レベル	I	7	2	8	58
	II	8		13	47
	III				
	IV	2		3	21
	V	2		6	56

➔

		可能性レベル			
		A	B	C	D
影響度レベル	I	9			
	II	58			
	III				
	IV	25	3		
	V	58	43	2	

【安全対策実施前】

【安全対策実施後】

残念ながら、安全対策実施後においても依然として H レベルに評価された事故シナリオが 9 件残った。これらは、①ヘリコプター/航空機の墜落、②隣接敷地のクレーン倒壊、③暴走車が水素ディスプレイへ衝突、④水素充てん中に FCV 誤発進、⑤ディスプレイ流量計の指示過小により充てん速度が大きくなり FCV タンク温度上昇、⑥圧力計の誤指示により FCV タンク過充てん、⑦地震による払い出し配管切断、⑧圧縮機出口温度計誤指示による高温水素の充てん、⑨配管から漏えいした水素が噴出火炎となり蓄圧器を破損である。①②は水素スタンド単独では対応が難しく、むしろ他の法令で対応すべき事故要因である。③は暴走車の重量、速度が規定できないため対策を明示できないシナリオである。その他は二重、三重の安全対策を実施しており、発生する可能性を極めて低くしているが、影響度を低減する対策を採ることができなかったため H レベルとして残った。この 9 件については、社会への説明責任を果たすために必要なものと考えリスクアセスメントを終了した。なお、この残存するリスクをどのようにとらえて管理するかはリスクアセスメントの範疇外であるとし、前述した本検討のリスクマトリクスの特殊性や燃料電池自動車为社会にもたらすと期待されるベネフィットなどの諸点を考慮して、リスクを「保有」[1]せざるを得ないとの判断をおこなった。

以上は本研究の研究範囲（水素スタンドのリスクアセスメント）における結果と考察である。これをリスクマネジメントの立場で考察する。本研究はあらかじめ定義した手順に従い、用意したリスクマトリクスを判断のクライテリア（ものさし）としてリスクの大きさを評価し、検討対象に対して必要な安全対策を施した。水素スタンドの普及と安全性を両立させることを目的に、各検討段階で関係者と議論を行いながらリスクアセスメントを実施した。その結果、得られた安全対策には十分な必要性和合理性があると説明できる。一方、このリスクアセスメント結果について、水素スタンドが設置される周辺住民の立場から見た場合はどう感じられるだろうか。Hレベルに評価された事故シナリオ9件、Mレベルが58件残存する。FCVが環境にやさしいことは理解できる。FCVの普及がもたらすベネフィットもイメージできだろう。FCV普及のためには水素スタンドの普及が必要で、その水素スタンドには十分な安全対策がなされている。しかし、リスクが残存する水素スタンドが自分の家の近くに建設されることを受け入れることが出来るだろうか。例えば、自動車のは毎年6000人程度の死亡事故を起こしている。しかしその便利さゆえに多くの人々はそのリスクを受け入れている。原子力発電は、すでに日本で使う電気の約30%を発電する基幹電源として重要な位置を占めているうえ、原子力発電所の放射能漏れによる死者は、これまでほんのわずかしかない。にもかかわらず、日本で原子力発電所のベネフィットを理解した上でリスクを許容する議論を行うにはまだまだ時間がかかると思われる。自動車と原子力発電所の例を挙げたが、水素スタンドのリスクに対する世間一般の認識は、原子力発電所のそれに近いのではないかと感じる。水素？高圧？爆発しないの？といったイメージから、FCVは乗りたいたいけれど、自分の家の隣に水素スタンドを設置するのは困る。という意見が多いのではないかと危惧する。

これから水素スタンドを設置し普及させようとする事業者は、水素スタンドにはリスクが残存することを十分に理解し、周辺住民に対してリスクとベネフィットに関する情報を開示した上で、住民の理解を得なければならない。この仕事は水素スタンドを設置する事業者だけで行うには、極めてハードルが高いと言わざるを得ない。そこで今後の課題として、水素スタンドにあるリスクをどのように考え、どのように対応していくべきかといったリスクマネジメントの研究が必要である。その一項目として、Hレベルの9件とMレベルの58件についてさらに厳密なリスク評価を行なう必要がある。つまり、本研究では影響度評価は一定の定量性を持たせているが、可能性評価が定性的である。この部分についてこれまで以上に定量的で客観的なデータを収集し、より詳細な検討を行なうことが必要である。そして、その可能性評価データを使って周辺住民に対してリスクが極めて小さいことを理解させ、納得してもらうような地道な活動が必要であろう。こうしたデータ収集と広報活動は、水素スタンドを設置する事業者が単独で行なうには限界がある。今後のFCVと水素スタンドの普及は、地球規模での環境問題に対する答えの一つとして産・学・官、さらにマスコミが一体となった取組が必要である。

7.4.2. 70MPa 充てん対応水素スタンドのリスクアセスメント結果と考察

事故シナリオの抽出（3章）において、70MPa 充てん対応水素スタンドの事故シナリオを769件抽出した。このうち、機器の仕様が未確定なプレクール設備モデルの事故シナリオ48件を除く721件の事故シナリオを対象にリスクアセスメントを行なった（表3.5.1-1参照）。

事故シナリオ721件のうち、実験データを使って影響度評価を確定できたもの64%、影響度評価を外挿で行ない仮評価したものが36%であった。仮評価のものは今後実験を行い、影響度評価を確

定する。

影響度評価が仮評価で、かつ安全対策のデータが不十分であることを前提に、リスクアセスメントを行なった結果、ほとんどの事故シナリオはMまたはLに低減できることが分かった。これは、事故シナリオ抽出において徹底的に事故シナリオを抽出したこと、水素の大量漏えいリスクに対して安全対策を行なった事によって、大量漏えいはありえないといえるレベルまでリスクを低減しているためである。また、完全に防止することが難しい小規模なピンホール漏えいについても十分な安全対策を行なっていることも要因のひとつである。もし、ピンホール漏えいが起こってしまった場合でも、爆風圧は十分小さく、火炎長も敷地外へ影響を及ぼすレベルにはないことが分かった。そして、本研究で得られた安全対策案を実施することで、水素スタンドの安全距離を6mに設定すればよいことが示唆された。

一方、安全対策の中には試作は可能であるが、製品を購入できないものがある。70MPa 充てん対応の緊急離脱カプラや過流防止弁がそれである。

緊急離脱カプラは、水素充てん中にFCVが誤って発進し、ディスペンサーのホースが引きちぎられて大量の水素が漏えいすることを防ぐための安全装置である。ガソリンスタンドにおいて実際にこのような事故が起こっていることから、車両誤発進事故によるリスクを低減するために緊急離脱カプラが必要である。緊急離脱カプラの機能は、充てんホースに弱い部分を作っておき、ホースに強い引張力が働いた場合にだけその部分から離脱すると同時にホースの両端を閉止して漏えい防止するというものである。さらに、通常の利用時は自由に稼動し、普通の引張りやねじれの力が加わっても接合部から漏えいすることがないという相反する機能を高い内圧を保持しながら実現しなければならない。現在、圧力20MPaのCNGスタンドや35MPaの水素スタンド用緊急離脱カプラは実用化されているが、70MPaのレベルでは適当な製品がない。これは、高圧によって接合部が膨張するためカプラ部が外れにくくなることや、接合部のシール部は充てん時の高圧と通常時の低圧の繰返しを受け、過酷な条件にさらされるためである。こうした問題点を技術的に解決し、一定期間メンテナンス不要で利用できる緊急離脱カプラの開発が望まれる。もしも、70MPa 充てん用の緊急離脱カプラが開発できない、または要求される機能を確実に満たすために費やされるコストが膨大となる場合は、FCV側で水素充てん中であることを認識し、インターロック機能などを使って水素充てん中は“FCVが動かない”ようにする機能をFCV側に搭載することを検討すべきである。なお、水素充てん中の誤発進による事故シナリオに対して“FCVを動かない”ようにする安全対策は、誤発進が起りえないことから本質的な対策として安全性を高く評価できる。

過流防止弁は、配管破断などで水素の大量漏えいが起こった場合に、漏えいする水素の運動エネルギーで自動的に閉止する弁である。内部は図5.2.2-5に示すような構造で、バネの力でポペット（蓋の部分）を保持している。配管破断が発生した場合など大量の水素が漏えいし、このバネ力よりも大きな力が加わると、自動的に（自立的）にポペットが流路を閉止する。したがって、論理的に水素の流量によってポペットを押す力を求めることができれば、過流防止弁は設計できる。しかし、重要な安全装置であるため、水素圧力80MPaレベルで実験し、作動を確認し、保証しなければならない。このフィールド実験が高額である。水素スタンドには各種の安全対策が施されているため、過流防止弁が作動するような事故シナリオの発生確率は極めて低いと考えられるが、過流防止弁は大量漏えいを防止するための重要な安全対策であることから早急な開発と作動確認が望まれる。

FCVのメリットは、長い航続距離と短い充てん時間である。長い航続距離を得るために、水素タンクを70MPaに高圧化した。短い充てん時間を達成するためには、充てんする水素を-30℃程度に

冷却しなければならない。なぜならば、常温の水素を3分で70MPaまで充てんすると、タンクの温度が設計温度（85℃）以上になる可能性があるためである。低温の水素を供給するためには、水素スタンド側にプレクール設備が必要である。プレクール設備を設置した場合、プレクール設備の下流側の機器は、常圧～高圧の水素による圧力の影響に加えて、-30℃と常温の繰り返しによる温度の影響を検討しなくてはならない。具体的には、充てんホースやノズルのOリングにおける水素漏洩、低温によるノズルの先端での着氷による不具合や、緊急離脱カプラの固着などが考えられる。

以上のように、水素スタンドに対するリスク評価を行なうことで、今後解決すべき具体的な課題が明らかになった。おもな課題を表 7.4.2-1 に示す。私たちは安全対策としての製品のないものは、その開発を促し、水素に関するデータの収集に継続的に取り組むことで、将来の水素スタンドの安全性向上に貢献できると考える。

表 7.4.2-1 水素スタンドの安全対策に関する課題

安全対策	80MPa 対応製品	耐久データ
遮断弁	Yes	None
流量調整弁	Yes	None
逆止弁	Yes	None
流量計	Yes	None
Break away	None	None
Excess flow valve	None	None
Pre-cooler	Yes	None

7.4.3. 液体水素スタンドリスクアセスメント結果と考察

液体水素スタンドのリスクアセスメントを実施した結果を表 7.4.3-1 に示す。対象とした液体水素スタンドモデルに対し、抽出された事故シナリオは 131 件である。全ての事故シナリオに対して、安全対策実施前のリスク評価結果を表 7.4.3-1 の左側に示し、安全対策実施後のリスク評価結果を右側に示した。表中の数字は該当するリスクレベルにあてはまる事故シナリオ数を表している。ここで、本質的対策を講じることができた事故シナリオに関しては、当リスクマトリクスにそぐわないため表 7.4.3-1 右側には記載していない。リスクアセスメントの結果、安全対策実施後の液体水素スタンドのリスクは、安全対策前に比較して大幅に低減することができた。

表 7.4.3-1 液体水素スタンドのリスクマップ

	可能性レベル					可能性レベル					
	A	B	C	D		A	B	C	D		
影響度レベル	I	8	1	12	29	影響度レベル	I	13	0	0	0
	II	0	0	0	6		II	5	0	0	0
	III	8	1	10	8		III	31	8	0	0
	IV	2	0	4	14		IV	13	2	1	0
	V	0	1	5	13		V	19	5	1	0

【安全対策実施前】
➔
【安全対策実施後】

本検討において 67 件の安全対策案を得た。これらは液体水素スタンドに必要な安全対策である。

言い換えると得られた安全対策を正しく適用した液体水素スタンドはリスクを可能な限り低減しており、高い安全性を有しているといえる。

一方、安全対策実施後において、Mレベルの事故シナリオが45件存在する。これらは前述のように着火確率・人と建物の存在確率をどちらも保守的に1としたため、漏えい部直近で従業員等が必ず噴出火炎に接すると評価され、敷地内の人的影響度が大きくなったためである。45件の事故シナリオに対しては、可能性を低減する複数の安全対策が講じられており発生可能性は極めて小さいと考えられるが、Lレベルにする現実的な対応策を見出すことが出来なかった。最終的に、敷地外にその影響が及ぶことが無い点を考慮して、Mレベルの定義に従い「現実的な対策が見つからない場合に限ってこれを許容する」とした。

残念ながら、安全対策実施後においても依然としてHレベルに評価された事故シナリオが13件残った。これらを表7.4.3-2に示す。

表 7.4.3-2 リスク H の事故シナリオ

	リスク H レベルの項目	対応
1	ヘリコプター/航空機が貯槽へ墜落	液体水素スタンド単独では対応が難しく、むしろ他の法令で対応すべき事故要因
2	隣接敷地のクレーンが倒壊し、貯槽を破損させる	液体水素スタンド単独では対応が難しく、むしろ他の法令で対応すべき事故要因
3	暴走車が水素ディスペンサーへ衝突する	暴走車の重量、速度が規定できないため対策を明示できないシナリオ。安全対策のシェア弁開発中
4	液体水素充てん中に FCV 誤発進してホースが破断する	車止め等の安全対策を実施しており、発生する可能性を極めて低くしているが、影響度を低減する対策を採ることができなかった。Break-away 開発中
5	液体水素充てん中に大地震により FCV が大きく移動してホースが破断する	FCV を完全に固定することが困難。Break-away 開発中
6	手動弁の誤操作により貯槽の圧力が上昇し液体水素が漏洩する	教育を受けた作業員が作業を行うが、ヒューマンエラーの対策が困難。
7	貯槽からベントラインへつながる自動弁が閉止し、貯槽の圧力が上昇する	安全弁等の安全対策は行うが、システムの信頼性により可能性はゼロではない
8	液体水素ローリーと貯槽の配管の接続不良により液体水素が漏洩する	教育を受けた作業員が作業を行うが、ヒューマンエラーの対策が困難
9	液体水素受け入れ中に液体水素ローリーが誤発進してホースが切断する	教育を受けた作業員が作業を行うが、ヒューマンエラーの対策が困難
10	液体水素受け入れ中に大地震により液体水素ローリーが大きく移動してホースが破断する	液体水素ローリーを完全に固定することが困難。液体水素ローリー用の Break-away は無い
11	液体水素受け入れ中に暴走車が水素ローリーへ衝突する	移動障壁等の対策を行うが、暴走車の重量、速度が規定できないため対策を明示できない。
12	液体水素ローリーの手動弁の誤操作によりローリーの圧力が上昇し液体水素が漏洩する	教育を受けた作業員が作業を行うが、ヒューマンエラーの対策が困難。
13	液体水素ローリーのサンプル弁を誤操作により全開にする	教育を受けた作業員が作業を行うが、ヒューマンエラーの対策が困難

この13件については、社会への説明責任を果たすためにリスクが残存することを示しておく。なお、この残存するリスクをどのようにとらえて管理するかはリスクアセスメントの範疇外であるとし、前述した本検討のリスクマトリクスの特異性や燃料電池自動車为社会にもたらすと期待されるベネフィットなどの諸点を考慮して、リスクを「保有」[1]せざるを得ないとの判断をおこなった。

References

[1] JIS Q2001 リスクマネジメントシステム構築のための指針 P.16, 2001

第 8 章

結 論

第8章 結 論

8.1. 結 論

本研究は、水素エネルギーを使った水素社会の実現に向けて、燃料電池自動車等（FCV）と水素スタンドの普及を支援することを最終的な目的とし、安全性の高い水素スタンドを市街地に建設できるようにするため、リスクアセスメント手法を用いて安全性検証と安全対策検討を行なった。水素スタンドとして予想されている圧縮水素スタンドと液体水素スタンドをタイプ別にモデル化し、想定される事故シナリオを網羅的に抽出した。それらの事故シナリオ一件ごとに事故が起きてしまった場合の影響度と可能性を算定し、提案したリスクマトリクスを用いてリスク評価を行った。リスク評価の結果、リスクが高い事故シナリオに対しては安全対策を施し、リスクが受け入れ可能なレベルまで低減させることに努めた。最終的に水素スタンドのモデルごとに多くの安全対策が得られた。これらの安全対策を正しく適用した水素スタンドは高い安全性を有していると言える。逆にこれらの安全対策は水素スタンドに必要な安全対策であることが分かった。

水素スタンドモデルの定義においては、現時点で考えられる圧縮水素スタンドと液体水素スタンドのモデルを定義した。圧縮水素スタンドモデルについては、現行の 35MPa 充てん対応と近い将来実用化が検討されている 70MPa 充てん対応水素スタンドモデルを定義した。35MPa 充てん対応水素スタンドでは、オンサイト型とオフサイト型を考慮し、70MPa 充てん対応水素スタンドモデルについては、新規に 70MPa の水素スタンドを設計するケース（新設モデル）に加えて、既存の 35MPa 充てん対応水素スタンドを改造するケース（改造モデル）を定義した。さらに、70MPa 充てん対応水素スタンドモデルでは、水素の充てん方法として、Cascade Type と Booster Type を設定した。

事故シナリオ抽出においては、機器の安全性を検討するうえで危険源抽出方法として広くその有効性が認められている HAZOP と FMEA の二種類の手法を使用し、網羅的な事故シナリオの抽出に努めた。その結果、35MPa 充てん対応水素スタンドのオンサイト型水素スタンドモデルに対して 233 件、オフサイト型水素スタンドモデルに対して 64 件（共通の事故シナリオはオンサイト型に含む）の事故シナリオを抽出した。

70MPa 充てん対応水素スタンドに対しては、新設モデル、改造モデル A 及び B、新設モデルの蓄圧モード考慮、プレカール設備モデルについて検討を行い、合計 769 件の事故シナリオを抽出した。35MPa に対して 70MPa 充てん対応水素スタンドモデルの事故シナリオが大幅に増加した理由は、高圧化に伴う機器数の増加、分割するセクション数の増加、改造モデルの追加、運転方法（蓄圧モード）を考慮したためである。

液体水素スタンドモデルに対しては、131 件の事故シナリオを抽出した。圧縮水素スタンドの事故シナリオ数に比べて液体水素スタンドのそれが少ない理由は、機器が少なくシンプルな構造であるためと考えられる。

本研究では、水素スタンドの普及と利用者や周辺住民に対する安全性の確保の両立が求められる。普及と安全の折り合いをつけるため、リスクアセスメント手法を使ってアセスメントを行なった。ここでリスクに対する判断基準（クライテリア）は、事故シナリオ数が相当数存在することから FN カーブによる評価に比べ効率的な評価が可能なりスクマトリクス法を採用した。このリスクマトリクス

については、水素スタンドを対象とした類似する研究を調査・検討し、本研究の目的に沿ったリスクマトリクス(5×4)を提案した。リスクマトリクスに対応する影響度レベルと可能性レベルは、各種文献を参考に設定した。提案したリスクマトリクスを使ってすべての事故シナリオを評価した。

リスク算定における影響度評価では、水素が漏えいした場合、着火して爆発するケースと噴出火炎になるケースが考えられるが、水素スタンドの事故シナリオにおいて、着火の要因やタイミングによって爆発と火炎のどちらになるかは正確に決めることができない。そこで、爆発時の爆風圧による影響度と噴出火炎の火炎長の影響度の両方を算定し、影響度レベルの大きい方を採用した。35MPa 充てん対応水素スタンドの影響度評価では、水素圧力 40MPa 以下の爆風圧と火炎長は実験にもとづくデータを使って定量的に評価した。しかし、70MPa 充てん対応水素スタンドの影響度評価では、水素圧力 40MPa を超える 80MPa クラスの爆風圧と噴出火炎の実験データが無い場合、40MPa のデータを元に外挿で求めた。液体水素スタンドの影響度評価では、液体水素漏えい時の爆風圧と噴出火炎を実験にもとづくデータを使って定量的に評価した。

リスク算定における可能性評価では、水素スタンドで使用される材料や機器の故障データや事故発生データが不十分であり、事故シナリオの発生確率を正確に求めることが困難である。そこで、事故シナリオが発生する原因となる第一の事象をトリガー現象と呼び、トリガー現象の発生する確率で事故シナリオの発生確率を代表させ、エンジニアリングジャッジメントにもとづき事故シナリオの発生確率を定性的に定義した。

水素スタンドモデルごとに抽出された事故シナリオの 1 件 1 件について、安全対策実施前の状態でリスク評価を行なった。ここでリスクが高いと評価された事故シナリオについて、安全対策検討を行ない、リスクが十分小さくなるまで安全対策を付加し、リスクを低減させた。安全対策検討の結果、35MPa 充てん対応水素スタンドで 87 件、液体水素スタンドで 67 件の安全対策を得た。これらの安全対策を正しく設置した水素スタンドは、リスクを許容できる範囲まで低減しており、安全な水素スタンドと言える。逆に、これらの安全対策は水素スタンドに必要な安全対策であり、法、省令、例示基準、自主基準など適当なレベルでのルール化を行い遵守させることが望ましい。これらの安全対策によって、本研究の目的である安全な水素スタンドの規制見直しに資する情報の提供ができたと考える。なお、70MPa 充てん対応水素スタンドの安全対策検討においては、水素漏えい時の爆風圧と火炎長のデータが外挿による仮のデータであったため影響度評価が確定できなかった点や、70MPa で使用するディスペンサー機器などの耐久性、安全性を示すデータが間に合わなかったことから、安全対策を確定するには至らなかった。しかし、リスクアセスメントを通して必要な安全対策や今後検討すべき課題を整理した。

安全対策検討において、いくつかの事故シナリオに対して CFD を利用した解析を行なった。障壁による敷地境界距離と火気距離の短縮検討において、ピンホールから漏えいする水素が拡散して濃度 1% になる距離(水素 1% 濃度到達距離)が実験で 5.3m であることをベースに、障壁と漏洩口の位置関係についてケーススタディーを行った。その結果、水素スタンドの高圧ガス設備から敷地境界に対して 6m 未満となる範囲が遮蔽されていれば、水素 1% 濃度到達距離(水平方向)は、常に $6\cos\theta$ (m) 以下になることを示した。つまり、障壁を使用した場合、敷地境界距離を $6\cos\theta$ (m) に短縮しても敷地外部からの火気によって引火する可能性は極めて低いことを示すことができた。

ガソリンスタンドのキャノピー（屋根）は、ガソリン蒸気が空気より重いいためガソリン蒸気が到達することを考慮していない。ここへ水素スタンド（水素充てん設備）を併設した場合、漏えいした水素ガスが上昇し、滞留防止構造でない（滞留してしまうような）構造のキャノピー下部に水素が滞留しないかどうかをCFDで検討した。ここでは水素濃度1%付近の精度を保ちつつ、メッシュ作成と計算時間の効率を向上させるため、ピンホール部の構造を無視した非圧縮流れの解析手法の妥当性を示した。この手法を用いて併設時のキャノピー下部への漏えいを解析した結果、ガソリンスタンド側のキャノピーが滞留防止構造でない構造であっても、キャノピー下部に水素濃度1%以上となる滞留がおこらないことを示した。

蓄圧器の地下設置モデルの検討においては、リスクアセスメントとCFD解析を行い、蓄圧器を部屋として閉鎖された空間に設置するよりも天井の一部を部分的に開放とする方が水素拡散に関して安全性が高いことを示した。

液体水素（二重管）の漏えい解析では、二重管内で漏えいする液体水素の振る舞いをCFDで解析した。これにより二重管内での水素の漏えい状況が可視化され、事故シナリオ抽出における事故のイメージを作るうえで有効な参考資料となった。

70MPa水素充てんノズル、充てんホース内の熱伝導解析においては、プレクール設備内で-30℃に冷却された水素ガスが、充てんホースとノズルで熱を吸収し、ノズル先端で何℃になっているかを計算で求めた。CFD解析の結果、プレクール設備で-30℃に冷却された水素ガスは充てんホースと充てんノズルで熱を吸収し温度上昇するが、ノズル先端では-30℃+2~3℃程度で充てんできることが分かった。また、充てんノズルについては、低温の水素ガスの影響を受けて内側から冷却されるため、作業員の凍傷防止のため皮手袋の着用などの対策が必要であることが分かった。

水素スタンドモデルに対しリスクアセスメントを実施した結果、前述の安全対策を得た。しかし、安全対策実施後においてもMレベルの事故シナリオが少なからず存在した。これらは、漏えい直近に従業員などヒトが必ず存在し、必ず爆風圧よりも影響度の大きい噴出火炎に接すると評価され、敷地内の人的影響度レベルが大きくなったためである。これらの事故シナリオに対しては可能性を低減する複数の安全対策が講じられており発生可能性は極めて小さいと考えられるが、Lレベルにする現実的な対応策を見出すことができなかった。最終的に、敷地外にその影響が及ぶことが無い点を考慮して、Mレベルの定義に従い「現実的な対策が見つからない場合に限りこれを許容する」とした。

残念ながら、安全対策実施後においても依然としてHレベルに評価された事故シナリオが数件残った。これらの事故シナリオに対しては、二重、三重の安全対策を実施しており、発生する可能性を極めて低くしているが、影響度を低減する対策を採ることができなかったためHレベルとして残った。これらについては、社会への説明責任を果たすために必要なものと考えリスクアセスメント終了とした。なお、この残存するリスクをどのようにとらえて管理するかはリスクアセスメントの範疇外であるとし、前述した本検討のリスクマトリクスの特異性や燃料電池自動車が社会にもたらすと期待されるベネフィットなどの諸点を考慮して、リスクを「保有」せざるを得ないとの判断をおこなった。

以上から、本検討は水素スタンドに対して提案したリスクマトリクスを使って水素スタンドの安全対策の有効性と妥当性を示し、水素スタンドのリスクアセスメントの枠組みを示すことが出来たと考える。

8.2. 法令への反映

本研究で得られた研究成果のうち、35MPa 充てん対応水素スタンドの安全対策(案)については、水素スタンドと水素安全の専門家からなる「水素インフラに関する安全技術検討委員会」(委員長: 東京大学 田村昌三名誉教授)にて承認を得た後、高圧ガス保安協会が主催する「燃料電池システム技術基準調査委員会」(委員長: 横浜国立大学 小林英男教授)にて技術的な承認を得た。そしてこの案をベースに経済産業省原子力安全・保安院保安課にて省令作成が行なわれ、2005年4月から特定圧縮水素スタンド(40MPa)に関する規制として高圧ガス保安法の一般高圧ガス保安規則 第7条の3が施行された。この省令によって事業者は安全な水素スタンドを消費者の身近な場所に建設することができるようになった。今後FCVの普及に伴って水素スタンドを併設したガソリンスタンドや高効率な大型の水素スタンド、さらにはバイオマスや再生可能エネルギーを使った水素スタンドを建設するためのベースとなる基準ができたと言える。つまり本研究の一部は既に規制へ反映されている。なお、日本の法令の見直しに関して、部分的にリスクアセスメントを使った例はあるが、リスクアセスメントの結果そのものをベースにして法令の見直し(安全対策案策定)を行なった例はまだまだ少数である。

液体水素スタンドの安全対策(案)については、前述の「水素インフラに関する安全技術検討委員会」にて承認を得ている。しかし、近年、液体水素を搭載するFCVの台数が増加せず、液体水素スタンド設置の要望も減速している(JHFC有明水素ステーションは2009年12月終了予定)ことから、安全対策(案)の規制への反映要望はペンディングすることとなった。ただし、液体水素スタンドに関する研究のうち、液体水素でFCVへ充てんする部分は減速しているが、水素製造工場から水素スタンドへ液体水素の状態で大量の水素を輸送、貯蔵する部分については実用化の可能性が高いため、将来において本研究成果の出番が期待できる。

70MPa 充てん対応水素スタンドのリスクアセスメントと安全対策(案)の作成については、70MPaを超える水素の漏えい、着火、爆発の実験データや機器の安全性を保証するデータなどが間に合わなかったため、仮評価に留めている。今後、これらの実験データを収集し、リスクアセスメントと安全対策(案)を確定させた上で、所定の手続きを踏んだ後に水素スタンドに関する規制へ反映すべく活動したいと考える。

8.3. 今後の課題

これまで述べてきたように、水素スタンドに対してリスクアセスメントを行い、安全対策案を作成して水素スタンドの規制見直しに資する情報提供を行なった。これにより水素スタンドの普及に向けたハードルのいくつかを取り除かれつつあると考える。しかし、残された課題も少なくない。

本研究に関しては、70MPa 充てん対応水素スタンドに関し、不足しているデータの収集を行いリスクアセスメントと安全対策案を完成させる必要がある。これにより 70MPa 充てん対応水素スタンドの規制見直しに資する情報提供となる。

リスクアセスメントの結果、安全対策実施後においてもまだ H レベルの事故シナリオが数件存在する。これらについては、リスクマネジメントの範疇として本研究での検討を終了している。しかし実際に水素スタンドを設置する事業者が周辺住民へ説明するケースを想定し、リスクマネジメントの立場から更なる検討が必要と考える。具体的には、これら数件の事故シナリオはリスクを可能な限り低減していると定性的な説明で終了していることから、対象の事故シナリオについてフォールトツリーアナリシス (FTA) やイベントツリーアナリシス (ETA) などの手法を用いて定量的な可能性評価を行なう必要があると考える。

水素スタンドに関する規制の見直しの課題として、高圧ガス保安法関係では、常用圧力が 40MPa 以下の特定圧縮水素スタンド (本研究では 35MPa 充てん対応水素スタンド) に限定している。このため、燃料電池自動車の航続距離を長くするために開発されつつある 70MPa 充てん対応水素スタンドに関する規制見直しを行なわなければならない。中でもプレクール設備について、エネルギー効率や水素価格へのインパクトを考慮した要否の議論が必要である。その上で、プレクール設備の仕様を確定し、リスクアセスメントによる安全性検証が行われなければならない。

また、FCV と水素スタンドの最適充てん圧力の議論も必要である。エネルギー効率の面から 70MPa と 35MPa の間に最適充てん圧力があるとする考え方がある一方で、海外では車載タンクへ安全にコストをかけずに沢山充てんできるようにするため、車載タンクの温度上昇を見極めた上で 87.5MPa (70MPa タンクの 1.25 倍) まで充てんする考え方がある。これは、日本の高圧ガス保安法上では許されないが、温度と圧力の定義を変えればありえないことではない。ただし、FCV 側が 87.5MPa になったとしても、当面は水素スタンド側の設備がこれに対応できない。さらに、米国の ASME の容器規格では、15,000psi (103MPa) を許容する動きがあり、これが国際標準になった場合は、高圧ガス保安法への影響が大きいと思われる。

消防法では、ガソリンスタンドに併設できる水素スタンドは 40MPa 以下の特定圧縮水素スタンドに限定されているため、70MPa 充てん対応の機器はガソリンスタンドに併設できない。建築基準法では、用途地域ごとの水素貯蔵量の上限見直しが必要である。現在許可されている貯蔵量では、利便性の良い場所に大型の商用水素スタンドを建築することが非常に難しい。

そもそも、水素社会構築に向けた第一歩を踏み出す意味で、FCV の普及台数が増加すること、増加する雰囲気を感じられることが必要である。FCV 台数が増えてこなければ、水素スタンドは経済的に成立することはなく水素スタンドの整備も進まない。

FCV 台数の増加が見込めることを前提にすれば、第一に水素スタンド設置のためのコストダウンが必要である。圧縮機、蓄圧器、ディスペンサー、水素製造装置等の機器のコスト低下はもちろんのこと、使用する配管、継手、バルブ、センサーの一つ一つについて製造コストを引き下げる必要がある。技術開発と普及に伴う量産化によるコストダウンを期待し、一方それをサポートするような規制

の見直しも極めて重要である。

第二に水素スタンドの敷地面積について更なる規制の見直しが必要である。例えば、ガソリンスタンドと水素スタンドを併設する場合、圧縮機、蓄圧器、水素製造装置等を敷地内に設置したうえで、敷地境界距離 6mをとる。さらに消防法で水素ディスペンサーはガソリン車が給油するエリア（給油空地）の外に設置することとなっているため、ガソリンと水素ディスペンサーを隣同士に設置することが出来ない。車の燃料（ガソリン、水素）によってスタンド内で停止する場所を離す必要がある。したがって水素スタンドをガソリンスタンドに併設するには、通常ガソリンスタンドのほぼ2倍の敷地が必要となる。つまり現状では広大な敷地をもつガソリンスタンドにしか水素スタンドの併設が出来ない。こうした不具合を解決するために、ひとつのディスペンサーにガソリンと水素のノズルを設置できるように規制の見直しを行うべきであろう。一方、圧縮機や蓄圧器の地下設置を可能にし、蓄圧器を事務所の2階に設置できるように規制を見直す必要がある。さらに、水素スタンドの敷地面積を小さくし、かつ安全性をより高めるために、貯蔵する水素量を少なくすることを考えなくてはならない。水素貯蔵量が少なければ、漏えいした場合の影響度が格段に小さくなるからだ。そのためには必要な時に必要な量の水素を製造し、充てん時に圧縮しながら FCV へ充てん（Booster system）する。このようなオンデマンド型の水素スタンドシステムの開発が課題となる。

最後に、水素エネルギー有効利用の観点に立ち、近隣の住宅、マンション、病院、ショッピングセンター等を水素パイプラインで結び、各家庭や各所におかれた燃料電池システムへ水素を供給する拠点として水素スタンドを利用することも考えたい。水素だけでなく燃料電池で作り出された熱と電力を供給し、個々の分散電源の発電量と需要状況に合わせた運転制御を行なうことで、マイクログリッドと呼ばれる小規模電力網を形成することも視野に入れなければならないと考える。そのための安全性検証と規制見直しについては、個々の企業間を越えた横断的な組織による推進が必要である。

Appendix

1. 事故シナリオとリスクアセスメント結果一覧表

- 1-1 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル（オンサイト型） HAZOP 表、FMEA 表
- 1-2 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル（オフサイト型） HAZOP 表、FMEA 表
- 1-3 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（新設モデル） HAZOP 表、FMEA 表
- 1-4 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（改造モデル） HAZOP 表、FMEA 表
- 1-5 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（蓄圧モード検討） FMEA 表
- 1-6 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（プレクール設備モデル） HAZOP 表、FMEA 表
- 1-7 液体水素スタンドモデル HAZOP 表、FMEA 表

2. 蓄圧モードの検討

- 2-1 蓄圧モード工程概略図
- 2-2 蓄圧モード工程作動不良組合せ表

3. 安全対策リスト

- 3-1 35MPa 充てん対応水素スタンドの安全対策一覧表
- 3-2 70MPa 充てん対応水素スタンドの安全対策一覧表（未確定）
- 3-3 液体水素スタンドの安全対策一覧表

4. 掲載論文リスト

1. 事故シナリオとリスクアセスメント結果一覧表

本研究では、事故シナリオを精力的に抽出し、それら1件1件についてリスク算定、リスク評価後、安全対策を施してリスクが許容できるレベルになるまで安全対策追加とリスク評価を繰り返した。事故シナリオとリスクアセスメント結果の一覧表を以下に示す。

当一覧表は、結果のサマリーであるため事故シナリオは1件1行で表している。1件の事故シナリオに対する影響度レベルと可能性レベルの算定、安全対策追加によるリスク低減量などを示す評価シートは別途用意されているが、本論文では省略する。

一覧表の列タイトルの一覧表を表 A-1 に示す。列タイトル内で使われている単語は、同じ事象を別の単語で表現する“ゆれ”を防ぐため、コード（マスター）化している。しかし紙面の都合上、本論文ではマスターの掲載は割愛した。

事故シナリオとリスクアセスメント結果一覧表を以下に示す。

- 1-1 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル（オンサイト型） HAZOP 表、FMEA 表
- 1-2 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル（オフサイト型） HAZOP 表、FMEA 表
- 1-3 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（新設モデル） HAZOP 表、FMEA 表
- 1-4 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（改造モデル） HAZOP 表、FMEA 表
- 1-5 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（蓄圧モード検討） FMEA 表
- 1-6 70MPa 充てん対応水素スタンドモデル（プレクール設備モデル） HAZOP 表、FMEA 表
- 1-7 液体水素スタンドモデル HAZOP 表、FMEA 表

表 A-1 列タイトルの一覧表（番号は列番号）

	圧縮水素スタンドモデル		液体水素スタンドモデル	
	HAZOP	FMEA	HAZOP	FMEA
事故シナリオ 表示部	1 NO	1 NO	1 NO	1 NO
	2 セクション名	2 セクション名	2 セクション名	2 セクション名
	3 パラメータ		3 パラメータ	
	4 ガイドワード		4 ガイドワード	
	5 偏差		5 偏差	
	6 偏差の原因		6 偏差の原因	
	7 偏差原因による影響		7 偏差原因による影響	
		8 機器NO		8 機器NO
	9 機器コード(略号)	9 機器コード(略号)		9 機器コード(略号)
		10 機器名		10 機器名
		11 機能		11 機能
	21 コード(トリガー現象)	21 コード(トリガー現象)	21 コード(トリガー現象)	21 コード(トリガー現象)
	22 トリガー現象	22 故障モード(トリガー現象)	22 トリガー現象	22 故障モード(トリガー現象)
		23 故障モードの原因		23 故障モードの原因
	25 漏えいパターンコード	25 漏えいパターンコード		
	26 漏えいパターン	26 漏えいパターン		
	27 開口パターン	27 開口パターン	27 開口パターン	27 開口パターン
		28 故障による影響		28 故障による影響
	30 懸念される事故	30 懸念される事故	30 懸念される事故	30 懸念される事故
			31 漏えいプロセスパターン	31 漏えいプロセスパターン
			32 部位	32 部位
			33 場所	33 場所
			27 開口径パターン	27 開口径パターン
			35 水素放出部	35 水素放出部
			36 放出口パターン	36 放出口パターン
	41 圧力	41 圧力	41 圧力	41 圧力
	42 容積	42 容積	42 容積	42 容積
		43 温度	43 温度	
		44 漏えい物	44 漏えい物	
45 影響度パターン	45 影響度パターン	45 影響度パターン	45 影響度パターン	
安全対策実施前 リスク評価結果	51 リスクランク(対策前)	51 リスクランク(対策前)	51 リスクランク(対策前)	51 リスクランク(対策前)
	52 影響度ランク(対策前)	52 影響度ランク(対策前)	52 影響度ランク(対策前)	52 影響度ランク(対策前)
	53 可能性ランク(対策前)	53 可能性ランク(対策前)	53 可能性ランク(対策前)	53 可能性ランク(対策前)
安全対策実施後 リスク評価結果	61 リスクランク(対策後)	61 リスクランク(対策後)	61 リスクランク(対策後)	61 リスクランク(対策後)
	62 影響度ランク(対策後)	62 影響度ランク(対策後)	62 影響度ランク(対策後)	62 影響度ランク(対策後)
	63 可能性ランク(対策後)	63 可能性ランク(対策後)	63 可能性ランク(対策後)	63 可能性ランク(対策後)
安全対策実施後 リスク評価データ	64 対物(爆発影響度 対策後)	64 対物(爆発影響度 対策後)	64 対物(爆発影響度 対策後)	64 対物(爆発影響度 対策後)
	65 人外(爆発影響度 対策後)	65 人外(爆発影響度 対策後)	65 人外(爆発影響度 対策後)	65 人外(爆発影響度 対策後)
	66 人内(爆発影響度 対策後)	66 人内(爆発影響度 対策後)	66 人内(爆発影響度 対策後)	66 人内(爆発影響度 対策後)
	67 対物(火炎影響度 対策後)	67 対物(火炎影響度 対策後)	67 対物(火炎影響度 対策後)	67 対物(火炎影響度 対策後)
	68 人外(火炎影響度 対策後)	68 人外(火炎影響度 対策後)	68 人外(火炎影響度 対策後)	68 人外(火炎影響度 対策後)
	69 人内(火炎影響度 対策後)	69 人内(火炎影響度 対策後)	69 人内(火炎影響度 対策後)	69 人内(火炎影響度 対策後)
	70 要対策事項	70 要対策事項	70 要対策事項	70 要対策事項

1-1 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル (オンサイト型) H A Z O P 表

No	セクション名	パラメータ	ガイドワード	備差	備差の原因	備差原因による影響	機軸コード	トリガー取換	過渡ハザード	過渡ハザード	閉口パターン	顕念される事故	圧力	容積	影響度 ハザード	リスク ランク	影響度 ランク	可能性 ランク	リスク ランク	燃焼影響 (別項後)		最大リスク (別項後)		要対策事項	
																				対物	人外	対物	人外		
201	圧入線入口ライン	圧力	More	圧力上昇	充満時供給元圧の上 昇による配管の過 熱	配管の破断→水素の漏 れ	RF	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	L	20	63	M	4	3	L	4	L	L	L	L	L
202	圧入線入口ライン	圧力	More	圧力上昇	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	PL	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	L	20	63	M	4	3	L	4	L	L	L	L	L
203	圧入線入口ライン	圧力	More	圧力上昇	S-201 配管の破断による 水素の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	S	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	L	20	63	H	4	4	L	4	L	L	L	L	L
204	圧入線入口ライン	圧力	More	圧力上昇	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	HW	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	L	20	63	H	4	4	L	4	L	L	L	L	L
205	圧入線入口ライン	圧力	Less	圧力低下	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	HW	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	L	20	302	H	2	4	M	2	L	M	L	L	L
206	圧入線入口ライン	圧力	Less	圧力低下	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	HW	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	L	20	91	H	2	4	L	5	3	L	L	L	L
207	圧入線入口ライン	圧力	Less	圧力低下	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	VE	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	L	20	24	H	2	2	2	2	2	L	L	L	L
208	圧入線入口ライン	圧力	More	圧力上昇	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	PL	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	1	121	H	1	3	M	2	L	L	L	L	M
209	圧入線入口ライン	圧力	More	圧力上昇	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	RF	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	1	121	H	1	3	M	2	L	L	L	L	M
210	圧入線入口ライン	圧力	More	圧力上昇	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	PL	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	1	62	L	5	3	L	5	L	L	L	L	M
211	圧入線入口ライン	圧力	More	圧力上昇	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	HW	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	1	22	H	4	4	L	4	L	L	L	L	L
212	圧入線入口ライン	圧力	More	圧力上昇	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	HW	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	1	301	H	2	4	M	2	L	M	L	L	L
213	圧入線入口ライン	圧力	More	圧力上昇	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	HW	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	1	800	H	2	4	L	5	1	L	L	L	L
214	圧入線入口ライン	圧力	Less	圧力低下	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	HW	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	1	800	H	2	4	L	5	1	L	L	L	L
215	圧入線入口ライン	圧力	Less	圧力低下	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	HW	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	1	800	H	2	4	L	5	1	L	L	L	L
216	圧入線入口ライン	圧力	More	圧力上昇	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	80	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	800	61	H	2	4	M	2	L	L	L	L	M
217	圧入線入口ライン	圧力	More	圧力上昇	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	80	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	800	61	H	2	3	M	2	L	L	L	L	M
218	圧入線入口ライン	圧力	Less	圧力低下	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	80	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	800	21	H	1	3	Z	4	S	Z	Z	Z	Z
219	圧入線入口ライン	圧力	More	圧力上昇	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	PL	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	800	61	M	2	1	M	2	L	L	L	L	M
220	圧入線入口ライン	圧力	More	圧力上昇	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	PL	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	1	62	L	5	3	L	5	1	L	L	L	L
221	圧入線入口ライン	圧力	Less	圧力低下	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	PL	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	800	61	H	2	4	Z	2	S	Z	Z	Z	Z
222	圧入線入口ライン	圧力	Less	圧力低下	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	PL	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	800	61	H	2	4	Z	2	S	Z	Z	Z	Z
223	圧入線入口ライン	圧力	Less	圧力低下	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	PL	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	800	61	H	2	4	Z	2	S	Z	Z	Z	Z
224	圧入線入口ライン	圧力	Less	圧力低下	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	HW	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	800	91	H	2	4	L	5	3	L	L	L	L
225	圧入線入口ライン	圧力	Less	圧力低下	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	HW	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	800	21	H	1	4	M	2	L	L	L	L	M
226	圧入線入口ライン	圧力	Less	圧力低下	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	PL	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	800	21	H	1	1	Z	1	S	Z	Z	Z	Z
227	圧入線入口ライン	圧力	More	圧力上昇	配管の破断による水素 の漏れ	配管の破断→水素の漏 れ	PL	配管破裂	721	内圧上昇による配管 の破断	C	水素の燃焼→火災 水素の燃焼→火災	H	1	62	L	5	3	L	5	1	L	L	L	L

1-1 35MPa充てん対応水素スタンドモデル (オンサイト型) HAZOP表

NO	セクション名	パラメータ	ガイドワード	偏差	偏差の原因	偏差原因による影響	機器コード	トリガー現象	トリガーコード	トリガー現象	開口バタコード	開口バタ現象	発生される事故	圧力	容量	影響度 ランク	リスク ランク	最大リスク (対策前)		最大リスク (対策後)		要対策事項		
																		51	52	53	54		55	56
228	ディスプレイ	圧力	Less	圧力低下	【いたずら】充填ホースを無理に引き回す【たす】充填ホースを引物等で傷つける	充填ホース亀裂発生→水素の漏洩	DH	充填ホース折れ(いたずら)	G330	充填ホース亀裂	C	水素の漏洩→火災	H	800	2	M	2	1	L	L	L	L	M	
229	ディスプレイ	圧力	Less	圧力低下	充填ホース亀裂発生→水素の漏洩	充填ホース亀裂発生→水素の漏洩	DH	充填ホース折れ(いたずら)	G331	充填ホース亀裂	C	水素の漏洩→火災	H	800	2	M	2	1	L	L	L	L	L	M
230	ディスプレイ	圧力	Less	圧力低下	充填ノズル、充填筒シール部に異物噛み込み→水素の漏洩	充填ノズル、充填筒シール部に異物噛み込み→水素の漏洩	DC	充填ノズル、充填筒シールの異物噛み込み	G36	充填ノズル、充填筒シールの異物噛み込み	C	水素の漏洩→火災	H	800	2	M	2	1	L	L	L	L	L	M
231	ディスプレイ	圧力	Less	圧力急低下	【たす】充填ホースを無理に引き回す【たす】充填ホースを引物等で傷つける	水素がバレンタインに放出される	HW	バレンタインからのガス放出	G301	バレンタインからのガス放出	E	バレンタインからのガス放出→火災、爆発	H	800	2	L	5	2	L	L	L	L	L	-
232	ディスプレイ	圧力	Less	圧力急低下	【ヒューマンエラー】充填筒閉鎖	充填中に充填筒閉鎖→充填ホース破断→水素の漏洩	DH	充填筒閉鎖	G321	充填筒閉鎖	B	水素の漏洩→火災	M	800	23	M	2	1	L	L	L	L	M	
233	ディスプレイ	圧力	Less	圧力急低下	【ヒューマンエラー】充填筒閉鎖	充填中に充填筒閉鎖→充填ホース破断→水素の漏洩	DH	充填筒閉鎖	G321	充填筒閉鎖	B	水素の漏洩→火災	M	800	401	M	2	1	L	L	L	L	M	
234	ディスプレイ	圧力	Less	圧力急低下	【ヒューマンエラー】充填筒閉鎖	充填中に充填筒閉鎖→充填ホース破断→水素の漏洩	DS	充填筒閉鎖	G320	充填筒閉鎖	B	水素の漏洩→火災	M	800	23	M	1	H	1	H	H	H	M	
235	ディスプレイ	圧力	Less	圧力急低下	【ヒューマンエラー】充填筒閉鎖	充填中に充填筒閉鎖→充填ホース破断→水素の漏洩	DS	充填筒閉鎖	G401	充填筒閉鎖	B	水素の漏洩→火災	M	800	23	M	1	H	1	H	H	H	M	
235	圧縮機出口ライン	温度	More	温度上昇	【自然】地震	地震による配管破断→水素の漏洩	HE	地震	G101	地震	A	水素の漏洩→火災	H	50	111	H	1	H	H	H	H	M	-	
240	圧力計	圧力	More	温度上昇	【自然】地震	地震による配管破断→水素の漏洩	BO	地震	G504	地震	A	水素の漏洩→火災	H	800	11	H	1	H	H	H	H	H	M	-
241	水素引出しライン	温度	More	温度上昇	【自然】地震	地震による配管破断→水素の漏洩	PL	地震	G504	地震	B	水素の漏洩→火災	H	800	21	H	1	S	Z	Z	Z	Z	Z	
242	圧力計	圧力	Less	圧力低下	【ヒューマンエラー】充填筒閉鎖	充填中に充填筒閉鎖→充填ホース破断→水素の漏洩	BO	充填筒閉鎖	G505	充填筒閉鎖	A	水素の漏洩→火災	H	800	11	H	1	H	H	H	H	H	M	-
243	圧力計	圧力	Less	圧力低下	【ヒューマンエラー】充填筒閉鎖	充填中に充填筒閉鎖→充填ホース破断→水素の漏洩	BO	充填筒閉鎖	G506	充填筒閉鎖	A	水素の漏洩→火災	H	800	11	H	1	H	H	H	H	H	M	-
244	水素引出しライン	圧力	Less	圧力低下	【ヒューマンエラー】充填筒閉鎖	充填中に充填筒閉鎖→充填ホース破断→水素の漏洩	PL	地震	G401	地震	B	水素の漏洩→火災	H	800	21	H	1	3	H	H	H	H	M	M

1-1 35MPa充てん対応水素スタンドモデル(オンサイト型) F.M.F.A 型

No	セクション名	機種No	機種名	機能	コード	材料	故障モードの原因	原因	部品名	故障モード	故障モードの発生確率	故障モードの発生場所	故障モードの影響	故障モードの発生条件	故障モードの発生時期	故障モードによる影響		修理	対策	リスクランク	影響度ランク	影響度ランク	人外	人内	対物	対人	要対策事項
																燃焼	電気										
49	デュオベンサCW	FCV	燃料供給	燃料供給	FCV	燃料供給	燃料供給	燃料供給	燃料供給	燃料供給	燃料供給	燃料供給	燃料供給	燃料供給	燃料供給	燃料供給	燃料供給	燃料供給	燃料供給	燃料供給	燃料供給	燃料供給	燃料供給	燃料供給	燃料供給	燃料供給	燃料供給
50	デュオベンサPL	PL	配管	配管	PL	配管	配管	配管	配管	配管	配管	配管	配管	配管	配管	配管	配管	配管	配管	配管	配管	配管	配管	配管	配管	配管	配管
51	デュオベンサFCV	FCV	流量調節弁	流量調節弁	FCV	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁	流量調節弁
52	デュオベンサPIC	PIC	圧力制御弁	圧力制御弁	PIC	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁	圧力制御弁
53	デュオベンサPI	PI	圧力センサー	圧力センサー	PI	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー
54	デュオベンサPI2	PI2	圧力センサー	圧力センサー	PI2	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー
55	デュオベンサPI3	PI3	圧力センサー	圧力センサー	PI3	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー
56	デュオベンサPSV	PSV	安全弁	安全弁	PSV	安全弁	安全弁	安全弁	安全弁	安全弁	安全弁	安全弁	安全弁	安全弁	安全弁	安全弁	安全弁	安全弁	安全弁	安全弁	安全弁	安全弁	安全弁	安全弁	安全弁	安全弁	安全弁
57	デュオベンサPI4	PI4	圧力センサー	圧力センサー	PI4	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー
58	デュオベンサPI5	PI5	圧力センサー	圧力センサー	PI5	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー
59	デュオベンサPI6	PI6	圧力センサー	圧力センサー	PI6	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー
60	デュオベンサPI7	PI7	圧力センサー	圧力センサー	PI7	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー	圧力センサー

1-2. 3.5MPa充電式家庭水素スタンドモデル (オフサイト型) H A Z O P 表

NO	セクション名	パラメータ	ガイドワード	導法	偏差の原因	偏差原因による影響	機器コード	トリガー現象	過熱パターンのコード	過熱パターン	開口パターンのコード	発生される事故	圧力	容量	影響度 ハザード	51 重大リスク (対策的)		53 可能性 ランク		55 リスク ランク		57 影響度 ランク		59 可能性 ランク		61 影響度 ランク		63 可能性 ランク		65 人外		67 人外		69 人外	
																21 トリガー現象	25 過熱パターンのコード	27 過熱パターン	30	41	42	45	51	53	55	57	59	61	63	65	67	69			
381	水素トラローラ及び 水素吸入ライン	圧力	More	圧力上昇	水素トラローラ及び 水素吸入ラインの過熱	水素トラローラ及び 水素吸入ラインの過熱 による水素の急速な 移動	380	火災 (水素)	721	圧力上昇による 過熱	0	水素の燃焼→火災	20	3000	134	H	2	3	M	2	1	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	M	
382	水素トラローラ及び 水素吸入ライン	圧力	Less	圧力低下	水素トラローラ及び 水素吸入ラインの過熱	水素トラローラ及び 水素吸入ラインの過熱 による水素の急速な 移動	381	バルブ動作 不良	765	水素トラローラ及び 水素吸入ラインからの 漏洩	8	水素の燃焼→火災	20	3000	132	H	1	4	H	1	1	H	H	M	M	L	L	L	L	L	L	L	L	M	
383	水素トラローラ及び 水素吸入ライン	圧力	Less	圧力低下	水素トラローラ及び 水素吸入ラインの過熱	水素トラローラ及び 水素吸入ラインの過熱 による水素の急速な 移動	382	バルブ動作 不良	761	バルブ動作不良	E	水素の燃焼→火災	20	3000	91	H	2	4	L	5	1	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	-	
384	水素トラローラ及び 水素吸入ライン	圧力	Less	圧力低下	水素トラローラ及び 水素吸入ラインの過熱	水素トラローラ及び 水素吸入ラインの過熱 による水素の急速な 移動	383	バルブ動作 不良	743	バルブ動作不良	B	水素の燃焼→火災	20	3000	132	H	1	1	Z	1	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
385	水素トラローラ及び 水素吸入ライン	圧力	Less	圧力低下	水素トラローラ及び 水素吸入ラインの過熱	水素トラローラ及び 水素吸入ラインの過熱 による水素の急速な 移動	384	バルブ動作 不良	739	バルブ動作不良	C	水素の燃焼→火災	20	3000	134	H	2	4	M	2	1	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	M
386	水素トラローラ及び 水素吸入ライン	圧力	Less	圧力低下	水素トラローラ及び 水素吸入ラインの過熱	水素トラローラ及び 水素吸入ラインの過熱 による水素の急速な 移動	385	バルブ動作 不良	743	バルブ動作不良	B	水素の燃焼→火災	20	3000	132	H	1	3	Z	1	S	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
387	水素トラローラ及び 水素吸入ライン	圧力	Less	圧力低下	水素トラローラ及び 水素吸入ラインの過熱	水素トラローラ及び 水素吸入ラインの過熱 による水素の急速な 移動	386	バルブ動作 不良	731	バルブ動作不良	B	水素の燃焼→火災	20	3000	132	H	1	1	H	1	H	H	H	M	M	L	L	L	L	L	L	L	L	M	M
388	圧縮機パイプ ライン	圧力	More	圧力上昇	圧力上昇による過熱	圧力上昇による過熱 による水素の急速な 移動	387	火災 (水素)	721	圧力上昇による 過熱	0	水素の燃焼→火災	40	1	62	L	5	3	L	5	3	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	

1-2. 35MPa 充てん対応水素スタンドモデル (オフサイト型) F.M.E.A. 型

Table with columns: NO, セッション名, 構造No, 構造コード, 構造名, 機能, コード, 故障モード (トリガー), 故障モードの原因, 故障モードの発生, 対策, 故障による影響, 懸念される事故, 圧力, 容積, 影響バタ, リスク (51-53), 可能性 (54), リスク (55), 対物 (56), 対物 (57), 対物 (58), 対物 (59), 対物 (60).

1-2 35MPa充てん対応水素スタンドモデル FMEA表

NO	セクシオン名	機種名	機能	コード	トリガー現象 (トリガー現象)	故障モードの原因	25	26	27	28	30	41	42	45	51	52	53	61	62	63	64		65		66		69	70	
																					対物	人外	対物	人外	対物	人外			対物
347	水素トローラ ライン	フレキチューブ	耐圧・気密性能 維持	G30	継ぎ手シール 劣化	シール材劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	134	H	2	4	M	2	1	L	L	L	L	L	L	M	M		
305	圧縮機パイプ ライン	圧縮機パイプ 継ぎ手	耐圧・気密性能 維持	XV	圧縮機パイプ 劣化	圧縮機パイプ劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	40	800	81	M	5	4	L	5	2	L	L	L	L	L	L	-	-		
327	水素トローラ ライン	水素吸入ライン 継ぎ手	耐圧・気密性能 維持	G41	グラウンド漏れ	グラウンド漏れ	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	81	M	5	4	L	5	2	L	L	L	L	L	L	L	-	-	
334	水素トローラ ライン	トレラポンスト ップ	耐圧・気密性能 維持	V	トレラポンスト ップ漏れ	トレラポンスト ップ劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	81	M	5	4	L	5	1	L	L	L	L	L	L	L	-	-	
337	水素トローラ ライン	トレラポンスト ップ	耐圧・気密性能 維持	V	トレラポンスト ップ漏れ	トレラポンスト ップ劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	81	M	5	4	L	5	1	L	L	L	L	L	L	L	L	-	-
340	水素トローラ ライン	トレラポンスト ップ	耐圧・気密性能 維持	V	トレラポンスト ップ漏れ	トレラポンスト ップ劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	81	M	5	4	L	5	1	L	L	L	L	L	L	L	L	-	-
343	水素トローラ ライン	トレラポンスト ップ	耐圧・気密性能 維持	V	トレラポンスト ップ漏れ	トレラポンスト ップ劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	81	M	5	4	L	5	1	L	L	L	L	L	L	L	L	-	-
346	水素トローラ ライン	各PI, PSV元弁 (精製00ml)	耐圧・気密性能 維持	V	各PI, PSV元弁 漏れ	各PI, PSV元弁 劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	81	M	5	4	L	5	1	L	L	L	L	L	L	L	L	-	-
303	圧縮機パイプ ライン	圧縮機パイプ 継ぎ手	耐圧・気密性能 維持	XV	圧縮機パイプ 劣化	圧縮機パイプ劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	40	1	62	M	5	4	L	5	2	L	L	L	L	L	L	L	-	-	
325	水素トローラ ライン	水素吸入ライン 継ぎ手	耐圧・気密性能 維持	XV	水素吸入ライン 劣化	水素吸入ライン劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	81	M	5	4	L	5	2	L	L	L	L	L	L	L	L	-	-
328	水素トローラ ライン	水素吸入ライン 継ぎ手	耐圧・気密性能 維持	PSV	水素吸入ライン 劣化	水素吸入ライン劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	81	M	5	4	L	5	2	L	L	L	L	L	L	L	L	-	-
332	水素トローラ ライン	トレラポンスト ップ	耐圧・気密性能 維持	V	トレラポンスト ップ漏れ	トレラポンスト ップ劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	81	M	5	4	L	5	2	L	L	L	L	L	L	L	L	-	-
335	水素トローラ ライン	トレラポンスト ップ	耐圧・気密性能 維持	V	トレラポンスト ップ漏れ	トレラポンスト ップ劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	81	M	5	4	L	5	2	L	L	L	L	L	L	L	L	-	-
338	水素トローラ ライン	トレラポンスト ップ	耐圧・気密性能 維持	V	トレラポンスト ップ漏れ	トレラポンスト ップ劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	81	M	5	4	L	5	2	L	L	L	L	L	L	L	L	-	-
341	水素トローラ ライン	トレラポンスト ップ	耐圧・気密性能 維持	V	トレラポンスト ップ漏れ	トレラポンスト ップ劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	81	M	5	4	L	5	2	L	L	L	L	L	L	L	L	-	-
344	水素トローラ ライン	各PI, PSV元弁 (精製00ml)	耐圧・気密性能 維持	V	各PI, PSV元弁 漏れ	各PI, PSV元弁 劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	81	M	5	4	L	5	2	L	L	L	L	L	L	L	L	-	-
320	水素トローラ ライン	水素吸入ライン 継ぎ手	耐圧・気密性能 維持	XV	水素吸入ライン 劣化	水素吸入ライン劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	302	H	2	4	M	2	1	L	L	L	L	L	L	L	M	-	-
321	水素トローラ ライン	水素吸入ライン 継ぎ手	耐圧・気密性能 維持	XV	水素吸入ライン 劣化	水素吸入ライン劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	302	H	2	4	M	2	1	L	L	L	L	L	L	L	M	-	-
323	水素トローラ ライン	水素吸入ライン 継ぎ手	耐圧・気密性能 維持	XV	水素吸入ライン 劣化	水素吸入ライン劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	302	H	2	4	M	2	1	L	L	L	L	L	L	L	M	-	-
324	水素トローラ ライン	水素吸入ライン 継ぎ手	耐圧・気密性能 維持	XV	水素吸入ライン 劣化	水素吸入ライン劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	302	H	2	4	M	2	1	L	L	L	L	L	L	L	M	-	-
301	圧縮機パイプ ライン	圧縮機パイプ 継ぎ手	耐圧・気密性能 維持	XV	圧縮機パイプ 劣化	圧縮機パイプ劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	40	800	61	H	2	4	L	5	1	L	L	L	L	L	L	L	L	-	-
319	水素トローラ ライン	水素吸入ライン 継ぎ手	耐圧・気密性能 維持	XV	水素吸入ライン 劣化	水素吸入ライン劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	132	H	1	4	L	4	1	L	L	L	L	L	L	L	L	-	-
302	圧縮機パイプ ライン	圧縮機パイプ 継ぎ手	耐圧・気密性能 維持	XV	圧縮機パイプ 劣化	圧縮機パイプ劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	40	800	61	H	2	4	L	5	1	L	L	L	L	L	L	L	L	-	-
322	水素トローラ ライン	水素吸入ライン 継ぎ手	耐圧・気密性能 維持	XV	水素吸入ライン 劣化	水素吸入ライン劣化	0	0	0	水素の連続漏洩→ 火災、爆発	20	3000	132	H	1	4	L	4	1	L	L	L	L	L	L	L	L	-	-

1-3 70MPa充てん対応水素スタンモデル (新設モデル) HAZOP表

NO	セクション名	パラメータ	ガイドワード	偏差	偏差の原因	偏差原因による影響	機材コード	トリガー現象	漏洩パターン	開口パターン	懸念される事故	圧力	影響 (ハザ)	リスク ランク	可能性 ランク	影響度 ランク	可能性 ランク	リスク ランク	対象			要対策事項								
																			人外	人内	対物		人外	人内	対物					
802	802.0 バンク重圧器 (周り)	温度	Lower	温度低下	【天】外気温度の低下、【水素】水素温度の低下	低温化により、配管破断→水素の連続漏洩	B	外気温低下	705	A	水素の連続漏洩→火災、爆発	HH	700	11	H	1	4	Z	1	S	1	1	2	-	-	-	-	G104適用 仮評価		
803	803.0 バンク重圧器 (周り)	温度	Lower	温度低下	【天】外気温度の低下、【水素】水素温度の低下	低温化により、配管破断→水素の連続漏洩	B	外気温低下	739	C	水素の連続漏洩→火災、爆発	HH	700	61	H	2	4	Z	2	2	2	5	5	4	5	5	2	2	G15適用 仮評価	
804	804.0 バンク重圧器 (周り)	組成 (水分)	More	水分増加	原料水素中に含まれる水分の増加	水分増加による配管破断→水素の連続漏洩	PL	水分増加	702	C	水素の連続漏洩→火災、爆発	HH	700	61	M	2	1	M	2	1	M	2	1	5	4	5	2	2	G15適用 仮評価	
805	水素抽出ライン	圧力	Less	圧力低下	【ヒューマン】操作ミス、【コントロール】手配ミス	配管破断→水素の連続漏洩	PL	圧力低下	732	C	水素の連続漏洩→火災、爆発	HH	700	61	H	2	4	Z	2	2	5	5	5	4	5	5	2	2	G15適用 仮評価	
806	水素抽出ライン	圧力	Less	圧力低下	【ヒューマン】操作ミス、【コントロール】手配ミス	水素がベントラインに放出される	V	バルブ操作ミス	761	E	ベントからの水素放出→火災、爆発	HH	700	91	H	1	4	L	5	3	5	5	5	5	5	5	-	-	G700. G916適用	
807	水素抽出ライン	圧力	Less	圧力低下	【ヒューマン】操作ミス、【コントロール】手配ミス	水素の連続漏洩	V	バルブ操作ミス	762	B	水素の連続漏洩→火災、爆発	HH	700	21	H	1	4	M	2	1	M	2	1	5	4	5	2	2	G704適用 仮評価	
808	水素抽出ライン	圧力	Less	圧力低下	【ヒューマン】操作ミス、【コントロール】手配ミス	配管破断→水素の連続漏洩	PL	配管破断	731	B	水素の連続漏洩→火災、爆発	HH	700	21	H	1	4	Z	1	3	1	3	1	5	4	5	2	2	G204適用	
809	水素抽出ライン	圧力	Less	圧力低下	【ヒューマン】操作ミス、【コントロール】手配ミス	配管破断→水素の連続漏洩	PL	配管破断	732	C	水素の連続漏洩→火災、爆発	HH	700	61	H	2	4	Z	2	2	5	5	5	4	5	5	2	2	G916適用	
810	水素抽出ライン	圧力	Less	圧力低下	【天】地震	地震により配管破断→水素の連続漏洩	PL	地震	731	B	水素の連続漏洩→火災、爆発	HH	700	21	H	1	3	H	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	G916適用	
811	70/70ディスプレイ	圧力	More	圧力上昇	近隣火災による配管の過熱	配管内圧上昇→継ぎ目より水素の連続漏洩	PL	火災 (近隣)	721	C	水素の連続漏洩→火災、爆発	HH	700	103	M	4	3	L	4	1	5	5	4	5	4	-	-	-	G91. G97適用	
812	70/70ディスプレイ	圧力	More	圧力上昇	構内火災による配管の過熱	配管内圧上昇→継ぎ目より水素の連続漏洩	PL	火災 (構内)	703	B	水素の連続漏洩→火災、爆発	M	700	25	H	1	2	H	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2	G916適用
813	70/70ディスプレイ	圧力	More	圧力上昇	【ヒューマン】操作ミス、【コントロール】手配ミス	水素の連続漏洩	DC	圧力上昇	902	A	水素の連続漏洩→火災、爆発	H	60	111	H	1	2	1	2	1	2	1	5	4	5	5	2	2	G154. G705. G904. G916適用	
814	70/70ディスプレイ	圧力	Less	圧力低下	【ヒューマン】操作ミス、【コントロール】手配ミス	配管破断→水素の連続漏洩	DH	配管破断	741	C	水素の連続漏洩→火災、爆発	HH	700	61	H	2	3	M	2	1	5	5	4	5	5	2	2	G154. G705. G904. G916適用		
815	70/70ディスプレイ	圧力	Less	圧力低下	【ヒューマン】操作ミス、【コントロール】手配ミス	配管破断→水素の連続漏洩	DH	配管破断	741	C	水素の連続漏洩→火災、爆発	HH	700	61	H	2	3	M	2	1	5	5	4	5	5	2	2	G154. G705. G904. G916適用		
816	70/70ディスプレイ	圧力	Less	圧力低下	【ヒューマン】操作ミス、【コントロール】手配ミス	配管破断→水素の連続漏洩	DC	配管破断	735	C	水素の連続漏洩→火災、爆発	HH	700	61	H	2	4	M	2	1	5	5	4	5	5	2	2	G207. G214. G904. G916適用		
817	70/70ディスプレイ	圧力	Less	圧力低下	【ヒューマン】操作ミス、【コントロール】手配ミス	水素がベントラインに放出される	V	バルブ操作ミス	761	E	ベントからの水素放出→火災、爆発	M	700	91	H	1	4	L	5	2	5	5	5	5	5	-	-	-	G212. G700. G917適用	
818	70/70ディスプレイ	圧力	Less	圧力低下	【ヒューマン】操作ミス、【コントロール】手配ミス	水素の連続漏洩	V	バルブ操作ミス	762	B	水素の連続漏洩→火災、爆発	M	700	101	H	1	4	L	4	1	5	5	4	5	5	4	-	-	G212. G700. G917適用	
819	70/70ディスプレイ	圧力	Less	圧力低下	【ヒューマン】操作ミス、【コントロール】手配ミス	配管破断→水素の連続漏洩	DH	配管破断	743	B	水素の連続漏洩→火災、爆発	M	700	25	H	1	1	H	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	G904. G916適用	
820	70/70ディスプレイ	圧力	Less	圧力低下	【ヒューマン】操作ミス、【コントロール】手配ミス	配管破断→水素の連続漏洩	DH	配管破断	743	B	水素の連続漏洩→火災、爆発	M	700	304	M	2	1	M	2	1	5	5	2	1	5	2	-	-	G904. G916適用	
821	70/70ディスプレイ	圧力	Less	圧力低下	【ヒューマン】操作ミス、【コントロール】手配ミス	配管破断→水素の連続漏洩	DS	配管破断	731	B	水素の連続漏洩→火災、爆発	M	700	25	H	1	1	H	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	G913-1適用 できればリスク低減できる 35MPa充てん対応水素スタンモデルにて対応水素スタンモデルにて対応	
822	70/70ディスプレイ	圧力	Less	圧力低下	【ヒューマン】操作ミス、【コントロール】手配ミス	配管破断→水素の連続漏洩	DS	配管破断	743	B	水素の連続漏洩→火災、爆発	M	700	25	H	1	1	H	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	G913-1適用 できればリスク低減できる 35MPa充てん対応水素スタンモデルにて対応

1-3 20MPa超圧対応水素スタンドモデル（新設モデル） FMEA表

No	セクション名	機能No	機能	コード	故障モード	故障モードの原因	リスクマトリックス (初期値)	リスクマトリックス (対策後)	対策	実施時期 (対策後)	リスクマトリックス (対策後)	リスクマトリックス (対策後)	リスクマトリックス (対策後)	リスクマトリックス (対策後)	リスクマトリックス (対策後)	リスクマトリックス (対策後)	別添事項
1	圧力感知	PG-201a	高圧警報	G11-1	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6103適用
2	圧力感知	PG-201b	高圧警報	G14-1	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6161, 6412, 6915適用
3	圧力感知	PG-201c	高圧警報	G11-2	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6103適用
4	圧力感知	PG-201d	高圧警報	G14-2	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6161, 6412, 6915適用
5	圧力感知	PG-201e	高圧警報	G2	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	616, 6412, 6915適用
6	圧力感知	PG-201f	高圧警報	G13-2	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6103適用
7	圧力感知	PG-201g	高圧警報	G11-1	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6103適用
8	圧力感知	PG-201h	高圧警報	G14-1	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6161, 6412, 6915適用
9	圧力感知	PG-201i	高圧警報	G11-1	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6103適用
10	圧力感知	PG-201j	高圧警報	G14-2	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6161, 6412, 6915適用
11	圧力感知	PG-201k	高圧警報	G2	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	616, 6412, 6915適用
12	圧力感知	PG-201l	高圧警報	G13-2	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6103適用
13	圧力感知	PG-201m	高圧警報	G11-1	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6103適用
14	圧力感知	PG-201n	高圧警報	G14-3	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6412, 6915適用
15	圧力感知	PG-201o	高圧警報	G13-2	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6103適用
17	圧力感知	PG-201p	高圧警報	G43	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	601, 6160適用
18	圧力感知	PG-201q	高圧警報	G43	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6160, 6400, 6355適用
19	圧力感知	PG-201r	高圧警報	G43	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6420適用
20	圧力感知	PG-201s	高圧警報	G43	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	601, 6160適用
21	圧力感知	PG-201t	高圧警報	G43	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6160, 6400, 6355適用
22	圧力感知	PG-201u	高圧警報	G43	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6420適用
23	圧力感知	PG-201v	高圧警報	G43	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	601, 6163適用
24	圧力感知	PG-201w	高圧警報	G43	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6162適用
25	圧力感知	PG-201x	高圧警報	G43	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	601, 6160, 6410, 6412, 6915適用
26	圧力感知	PG-201y	高圧警報	G43	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6160, 6400, 6355適用
27	圧力感知	PG-201z	高圧警報	G43	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	601, 6160, 6410, 6412, 6915適用
28	圧力感知	PG-201aa	高圧警報	G43	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6160, 6400, 6355適用
29	圧力感知	PG-201ab	高圧警報	G43	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6162適用
30	圧力感知	PG-201ac	高圧警報	G43	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6166適用
31	圧力感知	PG-201ad	高圧警報	G43	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6163適用
32	圧力感知	PG-201ae	高圧警報	G43	水素検知	水素検知	2	2	水素検知	201	2	2	2	2	2	2	6166適用

1-3 70MPa 赤ん対水素スタンモデル (新設モデル) F M E A 表

NO	セクション名	機種No	機種コード	機種名	機能	故障モード (トリガー項)	故障モードの原因	75		76		77	78	30	41	42	45	51	52	53	54	55		56		57	58	59	60									
								75	76	55	56											55	56															
100	圧縮機出口ライン	PC-207ab	01-1	水素酸化 (ISU)	耐圧・気密性 耐圧・気密性 耐圧・気密性 耐圧・気密性	水素酸化	水素酸化	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
104	圧縮機出口ライン	PC-207ab	04-2	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
105	圧縮機出口ライン	PC-207ab	01-2	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
106	圧縮機出口ライン	PC-207ab	01-2	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
107	圧縮機出口ライン	NV-207ab	04-5	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
108	圧縮機出口ライン	NV-207ab	04-5	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
109	圧縮機出口ライン	NV-207ab	04-3	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
110	圧縮機出口ライン	NV-207ab	04-3	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
111	圧縮機出口ライン	NV-207ab	04-6	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
112	圧縮機出口ライン	NV-207ab	04-6	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
113	圧縮機出口ライン	NV-207ab	04-4	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
114	圧縮機出口ライン	NV-207ab	04-4	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
115	圧縮機出口ライン	NV-207ab	04-2	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
116	圧縮機出口ライン	NV-207ab	04-1	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
117	圧縮機出口ライン	NV-206ab	04-5	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
118	圧縮機出口ライン	NV-206ab	04-5	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
119	圧縮機出口ライン	NV-206ab	04-3	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
120	圧縮機出口ライン	NV-206ab	04-3	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
121	圧縮機出口ライン	NV-206ab	04-6	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
122	圧縮機出口ライン	NV-206ab	04-6	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	燃料供給不良	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

1-3 TOMPaをてん対水素スタンドモデル (新設モデル) F M E A 表

Main table with columns: No, シェクション名, 機種, コード, 機能, 機種名, 機種コード, 故障モード (トリガー), 故障モードの原因, 故障モードの現象, 故障モードの対策, 故障モードの備考, 故障モードの修理, 故障モードの部品, 故障モードの材料, 故障モードの仕様, 故障モードの試験, 故障モードの承認, 故障モードの登録, 故障モードの発行, 故障モードの更新, 故障モードの廃止, 故障モードの削除, 故障モードの移行, 故障モードのリンク, 故障モードの参照, 故障モードの検索, 故障モードの表示, 故障モードの印刷, 故障モードのダウンロード, 故障モードのアップロード, 故障モードの共有, 故障モードの保護, 故障モードの解除, 故障モードのロック, 故障モードのアンロック, 故障モードのパスワード, 故障モードの暗号化, 故障モードの復号化, 故障モードのバックアップ, 故障モードのリストア, 故障モードのバックアップ, 故障モードのリストア, 故障モードのバックアップ, 故障モードのリストア...

1-4 70MPa充電対応水素スタンドモデル (改造モデル) H A Z O P 表

No	セクション名	パラメータ	ゲイド	偏差	備考	備考の原因	備考の原因による影響	機器コード	トリガーコード	漏洩バスターコード	漏洩バスター	開口バスター	重大リスク (対策前)			重大リスク (対策後)			火災影響 (対策前)			火災影響 (対策後)									
													リスクランク	影響度	可能性	リスクランク	影響度	可能性	対物	人内	人外	対物	人内	人外							
1301	圧縮機入ロライン	圧力	more	圧力上昇	N01~3/5バンプ重圧時圧力上昇	配管内圧力上昇→継ぎ手等より水素の逆流	配管内圧力上昇→継ぎ手等より水素の逆流	B	0801	35MPa対応重圧時圧力上昇	内圧上昇による継ぎ手等からの漏洩	0	水素の燃焼→火災、爆発	H	123	H	1	4	4	M	2	1	5	5	5	5	5	2	001, 0412, 0915適用		
1302	圧縮機入ロライン	圧力	less less	圧力急低下	【ヒューマンエラー】35MPa対応重圧時圧力急低下	重要圧縮機中にバンプライン閉鎖→圧縮機入口圧力が低下→吸引配管に逆流→継ぎ手等より空気流入→シリンダー内で圧縮機着火	重要圧縮機中にバンプライン閉鎖→圧縮機入口圧力が低下→吸引配管に逆流→継ぎ手等より空気流入→シリンダー内で圧縮機着火	HW	0301	バルブ開閉操作、いたすずら操作	圧縮機シリンダー内で圧縮機着火	Y	シリンダー内燃焼→口ケット飛散	H	303	H	2	4	4	M	2	1	5	5	2	-	-	-	-	G400, 6700, 6955適用	
1303	圧縮機入ロライン	圧力	less less	圧力急低下	【ヒューマンエラー】35MPa対応重圧時圧力急低下	重要圧縮機中にバンプライン閉鎖→圧縮機入口圧力が低下→吸引配管に逆流→継ぎ手等より空気流入→シリンダー内で圧縮機着火	重要圧縮機中にバンプライン閉鎖→圧縮機入口圧力が低下→吸引配管に逆流→継ぎ手等より空気流入→シリンダー内で圧縮機着火	HW	0301	バルブ開閉操作、いたすずら操作	圧縮機シリンダー内で圧縮機着火	Y	シリンダー内燃焼→口ケット飛散	H	303	H	2	4	4	M	2	1	5	5	2	-	-	-	-	G400, 6700, 6703, 6955適用	
1305	圧縮機入ロライン	圧力	less less	圧力急低下	【ヒューマンエラー】35MPa対応重圧時圧力急低下	重要圧縮機中にバンプライン閉鎖→圧縮機入口圧力が低下→吸引配管に逆流→継ぎ手等より空気流入→シリンダー内で圧縮機着火	重要圧縮機中にバンプライン閉鎖→圧縮機入口圧力が低下→吸引配管に逆流→継ぎ手等より空気流入→シリンダー内で圧縮機着火	XV	044	自動作動不良 (閉→開)	圧縮機シリンダー内で圧縮機着火	Y	シリンダー内燃焼→口ケット飛散	H	303	H	2	4	4	M	2	1	5	5	2	-	-	-	-	G19, 6160, 6400, 6955適用	
1306	圧縮機入ロライン	圧力	less less	圧力急低下	N01~3/5バンプ重圧時圧力急低下	圧縮機吸い込み圧力低下→継ぎ手等より逆流	圧縮機吸い込み圧力低下→継ぎ手等より逆流	CV	052	逆止弁作動不良 (開かない)	圧縮機シリンダー内で圧縮機着火	Y	シリンダー内燃焼→口ケット飛散	H	303	H	2	4	4	M	2	1	5	5	2	-	-	-	-	G173, 6400, 6955適用	
1307	圧縮機入ロライン	圧力	less less	圧力急低下	【ヒューマンエラー】N01~3/5バンプ重圧時圧力急低下	圧縮機吸い込み圧力低下→継ぎ手等より逆流	圧縮機吸い込み圧力低下→継ぎ手等より逆流	HW	0301	バルブ開閉操作、いたすずら操作	圧縮機シリンダー内で圧縮機着火	Y	シリンダー内燃焼→口ケット飛散	H	303	H	2	4	4	M	2	1	5	5	2	-	-	-	-	G400, 6700, 6955適用	
1308	圧縮機入ロライン	圧力	less less	圧力急低下	N01~3/5バンプ重圧時圧力急低下	圧縮機吸い込み圧力低下→継ぎ手等より逆流	圧縮機吸い込み圧力低下→継ぎ手等より逆流	XV	0604	圧力降動	圧縮機シリンダー内で圧縮機着火	0	水素の燃焼→火災、爆発	HH	500	HH	2	4	4	M	4	3	5	5	4	-	-	-	-	G403, 6907適用 原研済	
1310	圧縮機入ロライン	流量	more	流量減少	70MPa重圧時充填中→同じ35MPa重圧時より35MPa重圧時に戻ると流量減少	70MPa重圧時充填中→同じ35MPa重圧時より35MPa重圧時に戻ると流量減少	流量減少	XV	0605	70MPa対応圧縮機35MPa重圧時戻った	圧縮機シリンダー内で圧縮機着火	A	水素の燃焼→火災、爆発	HH	75	HH	1	4	4	Z	1	S	1	1	2	-	-	-	-	6905適用	
1311	圧縮機入ロライン	温度	higher	温度上昇	N01~3/5バンプ重圧時温度上昇	温度上昇→圧縮機出口で水素温度上昇→重圧時の赤で水素温度上昇→重圧時の赤で水素温度上昇→重圧時の赤で水素温度上昇	温度上昇	B	0603	35MPa対応重圧時温度上昇	重圧機シリンダー内で圧縮機着火	A	水素の燃焼→火災、爆発	HH	75	HH	1	4	4	H	1	1	1	1	2	-	-	-	-	G84, 6405適用	
1312	圧縮機入ロライン	圧力	more more	圧力急上昇	N01~3/5バンプ重圧時圧力急上昇	圧縮機吸い込み圧力低下→継ぎ手等より逆流	圧縮機吸い込み圧力低下→継ぎ手等より逆流	XV	044	自動作動不良 (閉→開)	圧縮機シリンダー内で圧縮機着火	B	水素の燃焼→火災、爆発	HH	2	HH	2	22	H	4	L	4	1	4	4	4	-	-	-	-	G01, 672, 6160, 6402適用 (圧力計調整済み)
1313	圧縮機入ロライン	圧力	more more	圧力急上昇	N01~3/5バンプ重圧時圧力急上昇	圧縮機吸い込み圧力低下→継ぎ手等より逆流	圧縮機吸い込み圧力低下→継ぎ手等より逆流	XV	044	自動作動不良 (閉→開)	圧縮機シリンダー内で圧縮機着火	B	水素の燃焼→火災、爆発	HH	2	HH	2	301	H	2	M	2	1	4	4	2	-	-	-	-	G01, 672, 6160, 6402適用 (圧力計調整済み)
1314	圧縮機入ロライン	圧力	more more	圧力急上昇	N01~3/5バンプ重圧時圧力急上昇	圧縮機吸い込み圧力低下→継ぎ手等より逆流	圧縮機吸い込み圧力低下→継ぎ手等より逆流	CV	052	逆止弁作動不良 (開かない)	圧縮機シリンダー内で圧縮機着火	B	水素の燃焼→火災、爆発	HH	2	HH	2	22	H	4	L	4	1	4	4	4	-	-	-	-	G01, 6165, 6402適用 (圧力計調整済み)
1315	圧縮機入ロライン	圧力	more more	圧力急上昇	N01~3/5バンプ重圧時圧力急上昇	圧縮機吸い込み圧力低下→継ぎ手等より逆流	圧縮機吸い込み圧力低下→継ぎ手等より逆流	CV	052	逆止弁作動不良 (開かない)	圧縮機シリンダー内で圧縮機着火	B	水素の燃焼→火災、爆発	HH	2	HH	2	301	H	2	M	2	1	4	4	2	-	-	-	-	G01, 6165, 6402適用 (圧力計調整済み)
1316	圧縮機入ロライン	圧力	more more	圧力急上昇	【ヒューマンエラー】35MPa対応重圧時圧力急低下	重要圧縮機中にバンプライン閉鎖→圧縮機入口圧力が低下→吸引配管に逆流→継ぎ手等より空気流入→シリンダー内で圧縮機着火	重要圧縮機中にバンプライン閉鎖→圧縮機入口圧力が低下→吸引配管に逆流→継ぎ手等より空気流入→シリンダー内で圧縮機着火	HW	0301	バルブ開閉操作、いたすずら操作	圧縮機シリンダー内で圧縮機着火	B	水素の燃焼→火災、爆発	HH	2	HH	2	22	H	4	L	4	1	4	4	4	-	-	-	-	G01, 6402, 6700適用 (圧力計調整済み)
1317	圧縮機入ロライン	圧力	more more	圧力急上昇	N01~3/5バンプ重圧時圧力急上昇	圧縮機吸い込み圧力低下→継ぎ手等より逆流	圧縮機吸い込み圧力低下→継ぎ手等より逆流	HW	0301	バルブ開閉操作、いたすずら操作	圧縮機シリンダー内で圧縮機着火	B	水素の燃焼→火災、爆発	HH	2	HH	2	301	H	2	M	2	1	4	4	2	-	-	-	-	G01, 6402, 6700適用 (圧力計調整済み)
1318	圧縮機入ロライン	流量	Reverse	逆流	70MPa重圧時充填中→同じ35MPa重圧時より35MPa重圧時に戻ると流量減少	70MPa重圧時充填中→同じ35MPa重圧時より35MPa重圧時に戻ると流量減少	逆流	PIA	061	圧力降動指示 過小	圧縮機シリンダー内で圧縮機着火	C	水素の燃焼→火災、爆発	H	800	H	2	3	M	2	1	5	5	5	5	2	-	-	-	G01, 6501, 6161適用 (圧力計調整済み)	

1-4 70MPa充てん対応水素スタンドモデル (改造モデル) H A Z O P 表

1	2	3	4	5	6	7	8	9	21	22	23	27	30	41	42	45	51	52	53	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	
制	セクション名	パラメータ	偏差	偏差の原因	偏差原因による影響	機設コード	トリガー現象	シフト	シフトコード	トリガー現象	シフト	シフトコード	シフト原因	シフトコード	シフト原因	シフトコード	シフト原因	シフトコード	シフト原因	シフトコード	シフト原因	シフトコード	シフト原因	シフトコード	シフト原因	シフトコード	シフト原因	シフトコード	シフト原因	
1316	【改造9】 圧縮機入口ライン	流量	逆流	指示不良により流量減少 35MPa運転時、圧縮機入口ラインから逆流	35MPa運転時、圧縮機入口ラインから逆流	PIA	圧力指示不良	721	721	圧力指示不良	721	圧力指示不良	圧力指示不良による燃焼停止	HH	75	61	H	2	3	M	2	1	5	5	4	5	5	2	G01, G01, G10適用 (圧力計異常発生) 燃焼停止	
1320	【改造9】 圧縮機入口ライン	圧力	圧力低下	N01-N03バンク圧力低下	圧縮機入口圧力低下 →水素温度上昇 →水素流量減少 →燃焼停止	XV	35MPa対応圧力低下	721	721	35MPa対応圧力低下	721	35MPa対応圧力低下	圧縮機入口圧力低下による燃焼停止	HH	75	112	H	1	4	Z	1	5	1	2	-	-	-	-	G05適用	
1400	【改造9】 圧縮機入口ライン	圧力	圧力上昇	N01-N03バンク圧力上昇	圧縮機入口圧力上昇 →水素温度上昇 →水素流量減少 →燃焼停止	B	35MPa対応圧力上昇	721	721	35MPa対応圧力上昇	721	35MPa対応圧力上昇	圧縮機入口圧力上昇による燃焼停止	H	800	123	H	1	4	M	2	1	5	5	5	5	5	2	G01, G412, G915適用	
1405	【改造9】 圧縮機入口ライン	圧力	圧力低下	N01-N03バンク圧力低下	圧縮機入口圧力低下 →水素温度上昇 →水素流量減少 →燃焼停止	HV	圧力低下	801	801	圧力低下	801	圧力低下	圧縮機入口圧力低下による燃焼停止	H	800	303	H	2	4	M	2	1	5	5	2	-	-	-	-	G400, G700, G955適用
1406	【改造9】 圧縮機入口ライン	圧力	圧力低下	N01-N03バンク圧力低下	圧縮機入口圧力低下 →水素温度上昇 →水素流量減少 →燃焼停止	HV	圧力低下	801	801	圧力低下	801	圧力低下	圧縮機入口圧力低下による燃焼停止	H	800	303	H	2	4	M	2	1	5	5	2	-	-	-	-	G400, G700, G955適用
1406	【改造9】 圧縮機入口ライン	圧力	圧力低下	N01-N03バンク圧力低下	圧縮機入口圧力低下 →水素温度上昇 →水素流量減少 →燃焼停止	XV	圧力低下	801	801	圧力低下	801	圧力低下	圧縮機入口圧力低下による燃焼停止	H	800	303	H	2	4	M	2	1	5	5	2	-	-	-	-	G12, G160, G400, G955適用
1406	【改造9】 圧縮機入口ライン	圧力	圧力低下	N01-N03バンク圧力低下	圧縮機入口圧力低下 →水素温度上昇 →水素流量減少 →燃焼停止	CV	圧力低下	801	801	圧力低下	801	圧力低下	圧縮機入口圧力低下による燃焼停止	H	800	303	H	2	4	M	2	1	5	5	2	-	-	-	-	G175, G400, G955適用
1407	【改造9】 圧縮機入口ライン	圧力	圧力低下	N01-N03バンク圧力低下	圧縮機入口圧力低下 →水素温度上昇 →水素流量減少 →燃焼停止	HV	圧力低下	801	801	圧力低下	801	圧力低下	圧縮機入口圧力低下による燃焼停止	H	800	303	H	2	4	M	2	1	5	5	2	-	-	-	-	G400, G700, G955適用
1408	【改造9】 圧縮機入口ライン	圧力	圧力変動	N01-N03バンクへの切り換え	N01-N03バンク間の切り換え	XV	圧力変動	70	70	圧力変動	70	圧力変動	圧縮機入口圧力変動による燃焼停止	HH	500	61	H	2	4	M	4	3	5	5	4	-	-	-	G403, G907適用 燃焼停止	
1410	【改造9】 圧縮機入口ライン	流量	more	70MPa運転時、圧縮機入口ラインから逆流	70MPa運転時、圧縮機入口ラインから逆流	XV	70MPa対応圧力低下	901	901	70MPa対応圧力低下	901	70MPa対応圧力低下	圧縮機入口圧力低下による燃焼停止	H	800	112	H	1	4	Z	1	5	1	2	-	-	-	-	-	G505適用
1411	【改造9】 圧縮機入口ライン	温度	higher	N01-N03バンク圧力低下	圧縮機入口圧力低下 →水素温度上昇 →水素流量減少 →燃焼停止	B	圧力低下	723	723	圧力低下	723	圧力低下	圧縮機入口圧力低下による燃焼停止	H	800	112	H	1	4	H	1	1	1	1	2	-	-	-	-	G04, G405適用
1412	【改造9】 圧縮機出口ライン	圧力	圧力上昇	N01-N03バンク圧力低下	圧縮機入口圧力低下 →水素温度上昇 →水素流量減少 →燃焼停止	XV	圧力低下	722	722	圧力低下	722	圧力低下	圧縮機入口圧力低下による燃焼停止	HH	2	22	H	4	4	L	4	4	4	4	4	4	-	-	-	G01, G12, G160適用
1413	【改造9】 圧縮機出口ライン	圧力	圧力上昇	N01-N03バンク圧力低下	圧縮機入口圧力低下 →水素温度上昇 →水素流量減少 →燃焼停止	XV	圧力低下	722	722	圧力低下	722	圧力低下	圧縮機入口圧力低下による燃焼停止	HH	2	301	H	2	4	M	2	1	4	4	4	2	-	-	-	G01, G12, G160適用
1414	【改造9】 圧縮機出口ライン	圧力	圧力上昇	N01-N03バンク圧力低下	圧縮機入口圧力低下 →水素温度上昇 →水素流量減少 →燃焼停止	CV	圧力低下	722	722	圧力低下	722	圧力低下	圧縮機入口圧力低下による燃焼停止	HH	2	22	H	4	4	L	4	4	4	4	4	4	-	-	-	G01, G165適用
1415	【改造9】 圧縮機出口ライン	圧力	圧力上昇	N01-N03バンク圧力低下	圧縮機入口圧力低下 →水素温度上昇 →水素流量減少 →燃焼停止	CV	圧力低下	722	722	圧力低下	722	圧力低下	圧縮機入口圧力低下による燃焼停止	HH	2	301	H	2	4	M	2	1	4	4	4	2	-	-	-	G01, G165適用
1416	【改造9】 圧縮機出口ライン	圧力	圧力上昇	N01-N03バンク圧力低下	圧縮機入口圧力低下 →水素温度上昇 →水素流量減少 →燃焼停止	HV	圧力低下	722	722	圧力低下	722	圧力低下	圧縮機入口圧力低下による燃焼停止	HH	2	22	H	2	4	L	4	4	4	4	4	4	-	-	-	G01, G700適用

1-4 70MPa充てん対応水素スタンドモデル (改造モデル) H A Z O P 表

No	セクション名	パラメータ	ガイド	偏差	偏差の原因	発生原因による影響	機路コード	トリガー現象	過渡バスターンコード	過渡バスターン	開口バスターン	30	41	42	45	51	52	53	54	55	56	57	58	59	70			
																										リスクランク	影響度ランク	可能性ランク
1417	[改造⑨] 圧縮機出口ライン	圧力	more more	圧力急上昇	【いたずら、ヒューマンファタ】マンファタ発生時、手動停止ボタンが作動し、停止した	アンロード運転→手動停止→圧縮機切リ遅延→圧縮機出口ラインから逆流→圧力急上昇→配管破裂→水素漏洩	HW	バルブ開操作、いたずら操作	722	内圧上昇による配管破裂	B	配管破裂→ロケット飛散物	HH	2	301	H	2	4	4	4	2	4	2	-	-	-	001, G700適用	
1418	[改造⑨] 圧縮機出口ライン	流量	more	流量増加	【いたずら、ヒューマンファタ】3バンク圧圧縮機入口配管閉止	0バンク→3バンク圧圧縮機入口配管閉止→アンロード→圧縮機切リ遅延→圧縮機出口ラインから逆流→圧力急上昇→配管破裂→水素漏洩	XV	自動開操作、手動開操作(動作)	401	車内圧上昇による配管破裂	A	水素の燃焼→火災、爆発	HH	75	112	H	1	4	Z	1	1	1	2	-	-	-	0506適用	
1419	[改造⑨] 水素排出ライン	圧力	more more	圧力急上昇	【いたずら、ヒューマンファタ】マンファタ発生時、手動停止ボタンが作動し、停止した	圧縮機切リ遅延→配管閉止→圧力急上昇→配管破裂→水素漏洩	HW	バルブ開操作、いたずら操作	722	内圧上昇による配管破裂	B	水素の燃焼→火災、爆発	HH	2	22	H	4	4	L	4	4	4	4	-	-	-	001, G700適用	
1420	[改造⑨] 水素排出ライン	圧力	more more	圧力急上昇	【ヒューマンファタ】マンファタ発生時、手動停止ボタンが作動し、停止した	圧縮機切リ遅延→配管閉止→圧力急上昇→配管破裂→水素漏洩	HW	バルブ開操作、いたずら操作	722	内圧上昇による配管破裂	B	配管破裂→ロケット飛散物	HH	2	301	H	2	4	M	2	1	4	4	2	-	-	-	001, G700適用
1421	[改造⑨] ディスプレイ	圧力	more more	圧力急上昇	【ヒューマンファタ】マンファタ発生時、手動停止ボタンが作動し、停止した	圧縮機切リ遅延→配管閉止→圧力急上昇→配管破裂→水素漏洩	HW	バルブ開操作、いたずら操作	722	内圧上昇による配管破裂	B	水素の燃焼→火災、爆発	HH	2	22	H	4	4	L	4	4	4	4	-	-	-	-	001, G700適用
1422	[改造⑨] ディスプレイ	圧力	more more	圧力急上昇	【ヒューマンファタ】マンファタ発生時、手動停止ボタンが作動し、停止した	圧縮機切リ遅延→配管閉止→圧力急上昇→配管破裂→水素漏洩	HW	バルブ開操作、いたずら操作	722	内圧上昇による配管破裂	B	水素の燃焼→火災、爆発	HH	2	301	H	2	4	M	2	1	4	4	2	-	-	-	001, G700適用
1423	[改造⑨] ディスプレイ	流量	Reverse	逆流	指示不良により、マンファタ発生時、手動停止ボタンが作動し、停止した	ディスプレイ表示不良→マンファタ発生時、手動停止ボタンが作動し、停止した	PIA	圧力指示不良、過小	723	内圧上昇による配管破裂	C	水素の燃焼→火災、爆発	HH	75	61	H	2	3	M	2	1	5	5	4	5	2	001, G501, C161適用 (圧力制御装置のみ) 低評価	
1424	[改造⑨] ディスプレイ	流量	Reverse	逆流	指示不良により、マンファタ発生時、手動停止ボタンが作動し、停止した	ディスプレイ表示不良→マンファタ発生時、手動停止ボタンが作動し、停止した	PIA	圧力指示不良、過小	723	内圧上昇による配管破裂	C	水素の燃焼→火災、爆発	HH	75	61	H	2	3	M	2	1	5	5	4	5	2	001, G501, C161適用 (圧力制御装置のみ) 低評価	
1425	[改造⑨] 圧縮機入口ライン	圧力	less	圧力低下	【ヒューマンファタ】マンファタ発生時、手動停止ボタンが作動し、停止した	圧縮機切リ遅延→配管閉止→圧力急上昇→配管破裂→水素漏洩	XV	35MPa切替操作、圧力低下	901	車内圧上昇による配管破裂	A	水素の燃焼→火災、爆発	H	800	112	H	1	4	Z	1	1	2	-	-	-	-	0505適用	

1-4. 7.0MPaをてん対水素スタンモデル (改造モデル) FMEA表

71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	
70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
N0	セクション名	機器名	機能	故障モードの原因	故障モード (トリガー現象)	影響の範囲	故障による影響	発生される事故	圧力	信頼	リスクランク	影響度ランク	可能性ランク	リスクランク	漏洩影響 (劣質状態)	火災影響 (劣質状態)	対物	人外	人内	要対策事項
1117	[改造9] 酸素センサー	XV-801.821	酸素センサーの検出	センサーの故障	センサーの故障	酸素センサーの検出	酸素センサーの検出	酸素センサーの検出	HI	2	301	2	4	M	-	-	-	-	-	GOV, G12, G16D適用
1118	[改造9] 酸素センサー	S-801.821	酸素センサーの検出	センサーの故障	センサーの故障	酸素センサーの検出	酸素センサーの検出	酸素センサーの検出	HI	2	22	4	4	L	-	-	-	-	-	GOV, G154, G170適用
1119	[改造9] 酸素センサー	S-801.821	酸素センサーの検出	センサーの故障	センサーの故障	酸素センサーの検出	酸素センサーの検出	酸素センサーの検出	HI	2	301	2	4	M	-	-	-	-	-	GOV, G154, G170適用
1120	[改造9] 酸素センサー	DBA	酸素センサーの検出	センサーの故障	センサーの故障	酸素センサーの検出	酸素センサーの検出	酸素センサーの検出	HI	2	22	4	4	L	-	-	-	-	-	GOV適用 G17適用でできればリスク低減できる
1121	[改造9] 酸素センサー	DBA	酸素センサーの検出	センサーの故障	センサーの故障	酸素センサーの検出	酸素センサーの検出	酸素センサーの検出	HI	2	301	2	4	H	-	-	-	-	-	GOV適用 G17適用でできればリスク低減できる
1122	[改造9] 酸素センサー	PL	酸素センサーの検出	センサーの故障	センサーの故障	酸素センサーの検出	酸素センサーの検出	酸素センサーの検出	HI	2	62	4	4	L	-	-	-	-	-	GOV, G14, G40D適用 G154, G16D適用
1123	[改造9] 酸素センサー	CS	酸素センサーの検出	センサーの故障	センサーの故障	酸素センサーの検出	酸素センサーの検出	酸素センサーの検出	HI	2	62	4	4	L	-	-	-	-	-	GOV, G14, G40D適用 G154, G16D適用
1124	[改造9] 酸素センサー	OW	酸素センサーの検出	センサーの故障	センサーの故障	酸素センサーの検出	酸素センサーの検出	酸素センサーの検出	HI	2	62	4	4	L	-	-	-	-	-	GOV, G14, G40D適用 G154, G16D適用

1-5.70MPa充てん対応水素スタンプモデル(蓄圧モード検討) FMEA表

NO	セクション名	機種名	機能	コード	故障モード (トリガー現象)	故障モード (トリガー現象)	原因	発生メカニズム	27	28	30	41	42	46	51	52	53	54	55		56		57	58	59			
																			形状	寸法	形状	寸法						
1501	全般	CP-201ab	蓄圧時に設定圧力まで充てん	G107	勝手に起動	制御系故障	制御系故障	内圧上昇による蓄圧機動作	A	バック切替時の圧降停止時(圧降機出口逆閉弁が開いている時)圧降機が勝手に起動した→蓄圧機より80MPa水素が逆流→0-201ab圧力急上昇→0-201ab検器→水素漏洩警報	水素の漏洩警報→火災、爆発	HH	700	11	H	1	4	Z	1	S	1	3	2	-	-	-	G421適用	
1502	全般	CP-201ab	蓄圧時に設定圧力まで充てん	G107	勝手に起動	制御系故障	制御系故障	内圧上昇による蓄圧機動作	A	バック切替時の圧降停止時(圧降機出口逆閉弁が開いている時)圧降機が勝手に起動した→蓄圧機より80MPa水素が逆流→0-201ab圧力急上昇→0-201ab検器→水素漏洩警報	水素の漏洩警報→火災、爆発	HH	700	301	H	2	4	M	2	1	4	4	2	-	-	-	G01、G410、G907適用	
1503	全般	CP-201ab	蓄圧時に設定圧力まで充てん	G106	勝手に停止	制御系故障	制御系故障	内圧上昇による蓄圧機動作	A	バック切替時の圧降停止時(圧降機出口逆閉弁が開いている時)圧降機が勝手に停止した→蓄圧機より80MPa水素が逆流→0-201ab圧力急上昇→0-201ab検器→水素漏洩警報	水素の漏洩警報→火災、爆発	HH	700	11	H	1	4	M	2	1	4	3	2	-	-	-	G01、G410、G907適用	
1504	全般	CP-201ab	蓄圧時に設定圧力まで充てん	G106	勝手に停止	制御系故障	制御系故障	内圧上昇による蓄圧機動作	A	バック切替時の圧降停止時(圧降機出口逆閉弁が開いている時)圧降機が勝手に停止した→蓄圧機より80MPa水素が逆流→0-201ab圧力急上昇→0-201ab検器→水素漏洩警報	水素の漏洩警報→火災、爆発	HH	700	301	H	2	4	M	2	1	4	4	2	-	-	-	G01、G410、G907適用	
1505	バンク毎1	CP-201ab	蓄圧時に設定圧力まで充てん	G106	勝手に停止	制御系故障	制御系故障	内圧上昇による蓄圧機動作	C	バック切替時の圧降停止時(圧降機出口逆閉弁が開いている時)圧降機が勝手に停止した→蓄圧機より80MPa水素が逆流→0-201ab圧力急上昇→0-201ab検器→水素漏洩警報	水素の漏洩警報→火災、爆発	HH	700	121	H	1	4	L	4	1	5	4	5	4	-	-	-	G01、G409、G907、G915適用 感度調整
1506	全般	XV-207ab	圧機立ち上げ時のライオン切替	G46	自動動作不具合(閉→開に勝手に動作)	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	内圧上昇による蓄圧機動作	A	圧降機出口逆閉弁が開いている時、圧降機が勝手に開く→蓄圧機より80MPa水素が逆流→0-201ab圧力急上昇→0-201ab検器→水素漏洩警報	水素の漏洩警報→火災、爆発	HH	700	11	H	1	4	Z	1	S	1	3	2	-	-	-	G421適用	
1507	全般	XV-207ab	圧機立ち上げ時のライオン切替	G46	自動動作不具合(開→閉に勝手に動作)	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	内圧上昇による蓄圧機動作	A	圧降機出口逆閉弁が開いている時、圧降機が勝手に閉まる→蓄圧機より80MPa水素が逆流→0-201ab圧力急上昇→0-201ab検器→水素漏洩警報	水素の漏洩警報→火災、爆発	HH	700	301	H	2	4	M	2	1	4	4	2	-	-	-	G01、G160、G410、G907適用	
1508	全般	XV-207ab	圧機立ち上げ時のライオン切替	G46	自動動作不具合(閉→開に勝手に動作)	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	内圧上昇による蓄圧機動作	C	圧降機出口逆閉弁が開いている時、圧降機が勝手に開く→蓄圧機より80MPa水素が逆流→0-201ab圧力急上昇→0-201ab検器→水素漏洩警報	水素の漏洩警報→火災、爆発	HH	700	121	H	1	4	L	4	1	5	4	5	4	-	-	-	G01、G160、G409、G907、G915適用 感度調整
1509	全般	XV-208ab	圧機立ち上げ時のライオン切替	G44	自動動作不具合(閉→開に勝手に動作)	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	内圧上昇による蓄圧機動作	C	圧降機出口逆閉弁が開いている時、圧降機が勝手に開く→蓄圧機より80MPa水素が逆流→0-201ab圧力急上昇→0-201ab検器→水素漏洩警報	水素の漏洩警報→火災、爆発	HH	700	61	H	2	4	M	2	1	5	5	4	5	2	-	-	G01、G160、G907、G915適用 感度調整
1510	全般	XV-321.32	蓄圧補充時の充満バンク切替	G46	自動動作不具合(閉→開に勝手に動作)	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	内圧上昇による蓄圧機動作	A	圧降機出口逆閉弁が開いている時、圧降機が勝手に開く→蓄圧機より80MPa水素が逆流→0-201ab圧力急上昇→0-201ab検器→水素漏洩警報	水素の漏洩警報→火災、爆発	HH	700	11	H	1	4	M	2	1	4	3	2	-	-	-	G01、G160、G410、G907適用 感度調整	
1511	全般	XV-321.32	蓄圧補充時の充満バンク切替	G46	自動動作不具合(閉→開に勝手に動作)	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	内圧上昇による蓄圧機動作	A	圧降機出口逆閉弁が開いている時、圧降機が勝手に開く→蓄圧機より80MPa水素が逆流→0-201ab圧力急上昇→0-201ab検器→水素漏洩警報	水素の漏洩警報→火災、爆発	HH	700	301	H	2	4	M	2	1	4	4	2	-	-	-	G01、G160、G410、G907適用	
1512	バンク毎 全バンク2.3	XV-321.32	蓄圧補充時の充満バンク切替	G46	自動動作不具合(閉→開に勝手に動作)	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	内圧上昇による蓄圧機動作	A	圧降機出口逆閉弁が開いている時、圧降機が勝手に開く→蓄圧機より80MPa水素が逆流→0-201ab圧力急上昇→0-201ab検器→水素漏洩警報	水素の漏洩警報→火災、爆発	HH	700	11	H	1	4	M	2	1	4	3	2	-	-	-	G01、G160、G410、G907適用 感度調整	
1513	バンク毎 全バンク2.3	XV-321.32	蓄圧補充時の充満バンク切替	G46	自動動作不具合(閉→開に勝手に動作)	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	内圧上昇による蓄圧機動作	A	圧降機出口逆閉弁が開いている時、圧降機が勝手に開く→蓄圧機より80MPa水素が逆流→0-201ab圧力急上昇→0-201ab検器→水素漏洩警報	水素の漏洩警報→火災、爆発	HH	700	301	H	2	4	M	2	1	4	4	2	-	-	-	G01、G160、G410、G907適用 感度調整	
1514	バンク毎 全バンク2.3	XV-321.32	蓄圧補充時の充満バンク切替	G46	自動動作不具合(閉→開に勝手に動作)	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	内圧上昇による蓄圧機動作	C	圧降機出口逆閉弁が開いている時、圧降機が勝手に開く→蓄圧機より80MPa水素が逆流→0-201ab圧力急上昇→0-201ab検器→水素漏洩警報	水素の漏洩警報→火災、爆発	HH	700	121	H	1	4	L	4	1	5	4	5	4	-	-	-	G01、G160、G409、G907、G915適用 感度調整
1515	全般	XV-311	蓄圧補充時の充満バンク切替	G46	自動動作不具合(閉→開に勝手に動作)	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	駆動部(7クチュエータ)故障 信号線断線 駆動系(圧力、電圧)喪失	内圧上昇による蓄圧機動作	A	圧降機出口逆閉弁が開いている時、圧降機が勝手に開く→蓄圧機より80MPa水素が逆流→0-201ab圧力急上昇→0-201ab検器→水素漏洩警報	水素の漏洩警報→火災、爆発	HH	2000	12	H	1	4	M	2	1	4	3	2	-	-	-	G01、G160、G410、G907適用 感度調整	

1-6 70MPa充てん対応水素スタンションモデル(ブレイクモデル) H A Z O P 表

NO	セクション名	パラメータ	ガイドワード	偏差	偏差の原因	偏差原因による影響	機械コード	トリガー現象	トリガーコード	TRCコード	開口バウンス	開口バウンス	開口バウンス	51 熱水リスク (対策前)		52 熱水リスク (対策後)		53 熱水リスク (対策前)		54 熱水リスク (対策後)		55 熱水リスク (対策前)		56 熱水リスク (対策後)		70
														リスクランク	影響度ランク	可能性ランク	リスクランク	影響度ランク	可能性ランク	リスクランク	影響度ランク	可能性ランク	リスクランク	影響度ランク	可能性ランク	
2317	【液体要素式】 デバイスベンチ	速度	less	速度低下	【ヒューマンフアクター】T-501.502を低温側に調整	FCV故障の懸念充てん速度が外装温度以下→走行中に容器内の水素温度が低下→FCV故障の懸念充てん速度が低下→容器内水素温度が低下→水素の燃焼漏洩	723	バルブ開操作 いたすずら操作	G01		内圧上昇による容器破損	A	水素の燃焼漏洩→火災、爆発	HH	75	112	H	4	1	4	1	1	2	-	-	
2318	【液体要素式】 デバイスベンチ	速度	less	速度低下	スタント配管圧力損失	充てん後期の充てん速度低下→熱交換器の中間温度差減少→充てん水温度低下→FCV故障の懸念充てん速度が低下→容器内水素温度が低下→水素の燃焼漏洩	723	スタント配管圧力損失	G130		内圧上昇による容器破損	A	水素の燃焼漏洩→火災、爆発	HH	75	112	H	4	1	4	1	1	2	-	-	

1-6 70MPa充てん対応水素スタンドモデル(ブレイクール設備モデル) F M E A 表

NO	セクション名	機器ID	機器名	機能	トリップモード コード	故障モードの原因	誘致メカニズム	開口 径	28	30	41	42	46	51 重大リスク(対策前)		52 重大リスク(対策後)		53 重大リスク(対策前)		54 重大リスク(対策後)		55 重大リスク(対策前)		56 重大リスク(対策後)		70				
														リスク ランク	影響度 ランク	リスク ランク	影響度 ランク	可能性 ランク	可能性 ランク	リスク ランク	影響度 ランク	可能性 ランク	可能性 ランク	リスク ランク	影響度 ランク		可能性 ランク	可能性 ランク		
2066	【液体窒素式】 ディスプレイベンチ	HEX-501 HEX-502	船交換器(液体 窒素液漢式)	高圧・高圧性能 維持	G122 内漏リーク	水素液化 (-195℃~常温)	70: 材料劣化による漏 れからの噴出	0	故障による影響 配管の水素中に液体窒素混入→赤 い開始→液体窒素をFCVタンクに 同時供給→配管・ホース・シール許容温 度以下→低温度脆化→漏えい	懸念される事故 水素の漏れ噴出→ 火災、爆発	MM	700	25	H	1	H	1	4	1	4	1	4	1	2	1	2	1	2	1	2

1-2 液体水素スタンダードモデル F.M.E.A

No	セクショ名	機番No	機番コード	機番名	機能	コード	トリガ二要素 (機番コード+機番コード)	故障モードの原因	開口径 ハト寸	故障による影響	想定される事故 状態	識別 ハト寸	開口径 ハト寸	開口場所	開口位置	開口形状	開口径 ハト寸	水素 流出量 kg/年	水素 流出部	圧力	容積	温度	漏洩 速度	44	45		46		47		48		70			
																									45	46	47	48	49	50	51	52		53	54	55
453	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	L11-3	予冷機	予冷機	B	予冷機	予冷機	B	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	D20	H	1	4	M	3	1	L	L	M	-	-	-	-
454	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	L11-3	予冷機	予冷機	D	予冷機	予冷機	D	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	D2	H	3	4	M	3	1	L	L	M	-	-	-	-
455	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	L11-3	予冷機	予冷機	B	予冷機	予冷機	B	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	D22	H	1	4	M	3	1	L	L	M	-	-	-	-
456	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	L11-3	予冷機	予冷機	C	予冷機	予冷機	C	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	D3	H	3	4	M	3	1	L	L	M	-	-	-	-
457	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	L11-3	予冷機	予冷機	C	予冷機	予冷機	C	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
458	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	L11-3	予冷機	予冷機	0	予冷機	予冷機	0	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	D12	M	5	4	L	5	1	L	L	L	-	-	-	-
459	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	L11-3	予冷機	予冷機	D	予冷機	予冷機	D	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	D16	H	4	4	L	4	1	L	L	L	-	-	-	-
460	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	L11-3	予冷機	予冷機	C	予冷機	予冷機	C	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	D13	H	3	4	M	3	1	L	L	L	M	L	L	M
461	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	L11-3	予冷機	予冷機	D	予冷機	予冷機	D	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	V9	M	5	4	L	5	1	L	L	L	-	-	-	-
462	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	L11-3	予冷機	予冷機	B	予冷機	予冷機	B	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	V6	M	4	3	L	4	1	L	L	L	-	-	-	-
463	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	L11-3	予冷機	予冷機	B	予冷機	予冷機	B	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機	予冷機

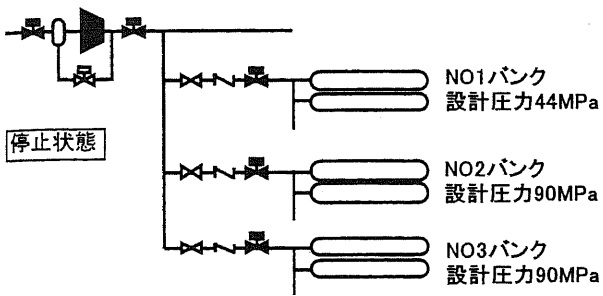
2. 蓄圧モードの検討

2-1 蓄圧モード工程概略図

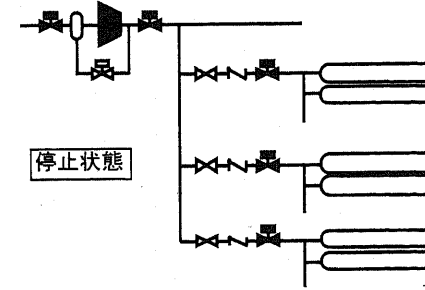
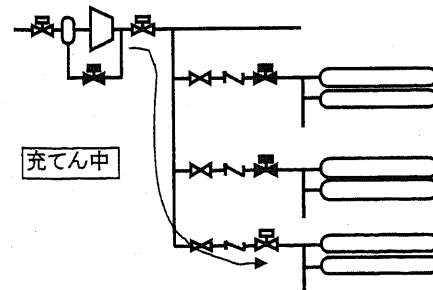
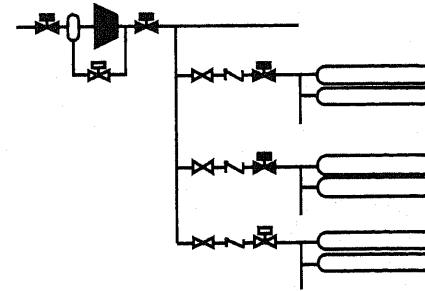
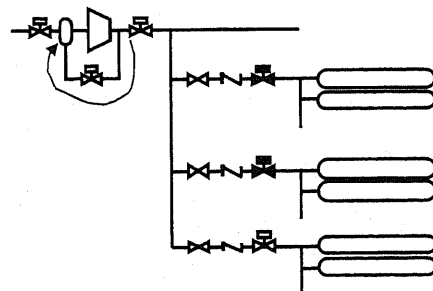
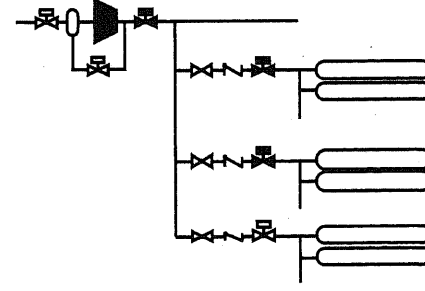
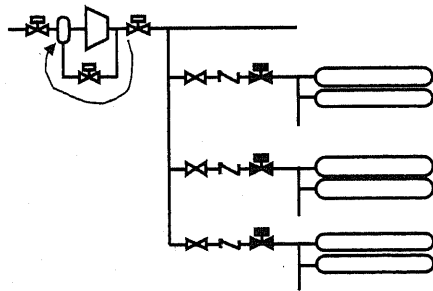
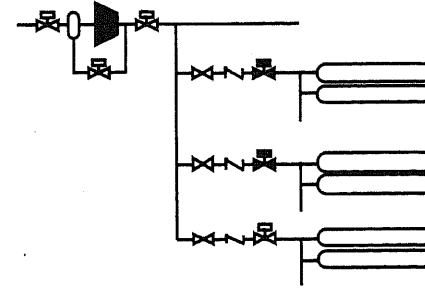
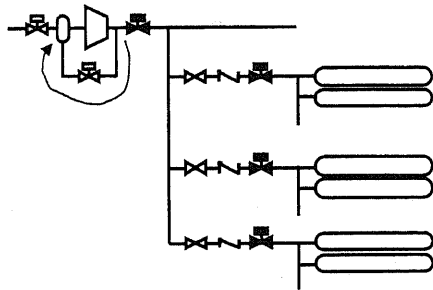
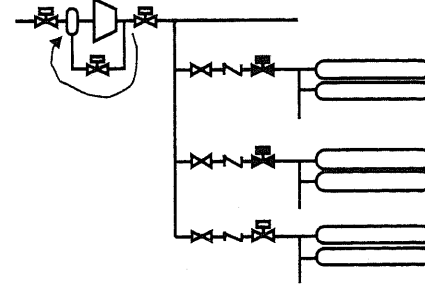
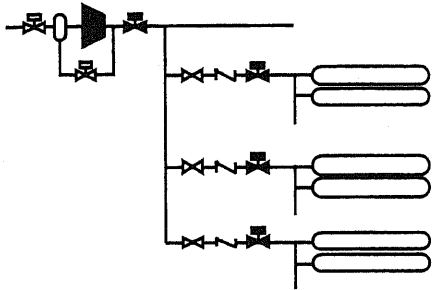
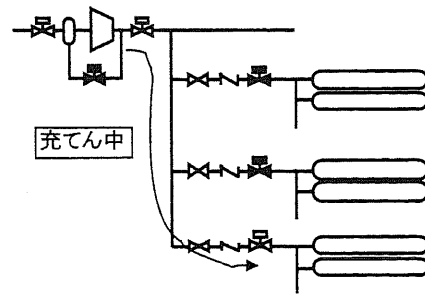
2-2 蓄圧モード工程作動不良組合せ表

バンク毎1

起動手順

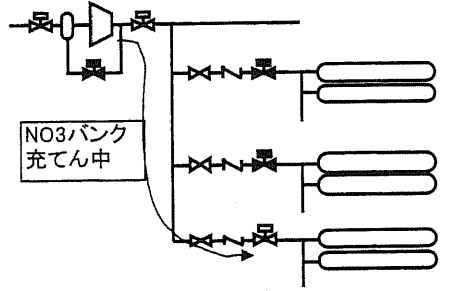


停止手順

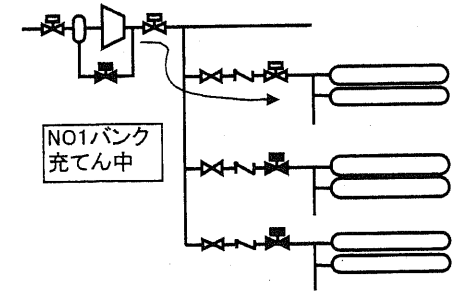
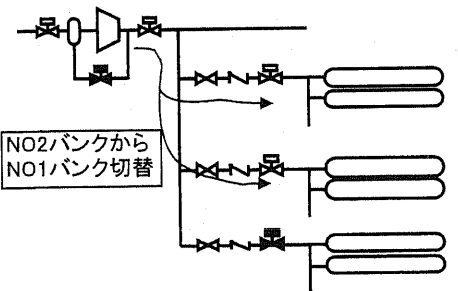
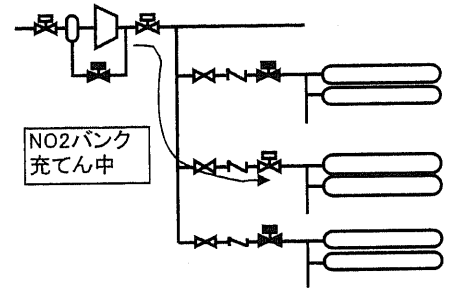
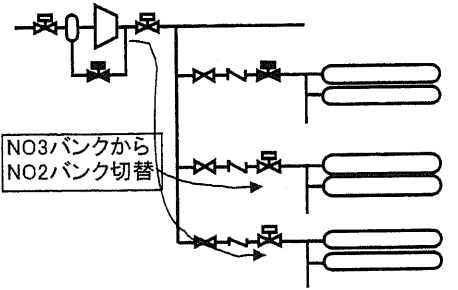


バンク毎2

バンク切替時に両入口遮断弁開

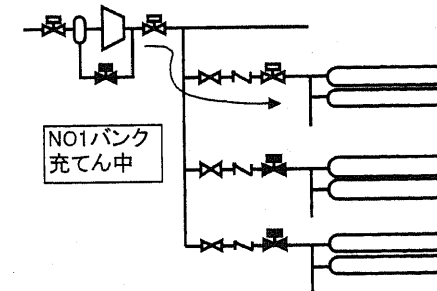
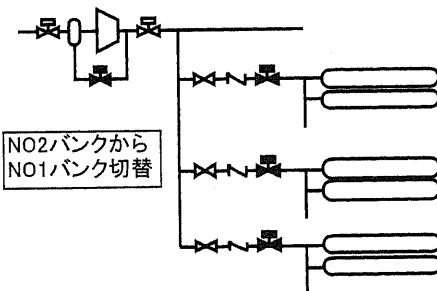
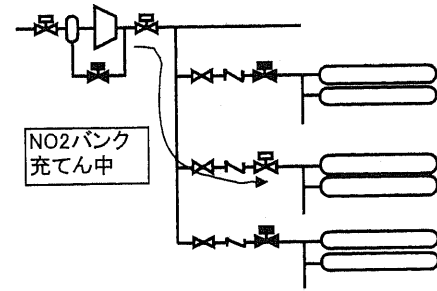
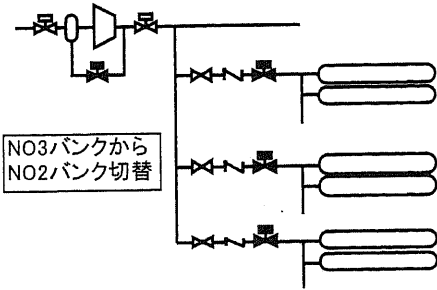
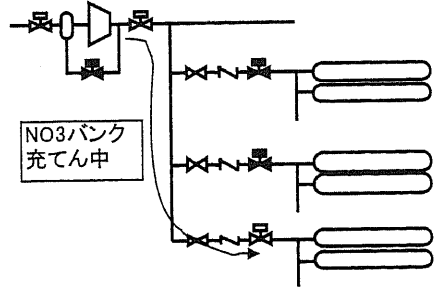


NO1バンク
設計圧力44MPa
NO2バンク
設計圧力90MPa
NO3バンク
設計圧力90MPa



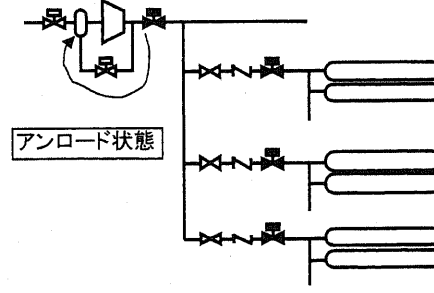
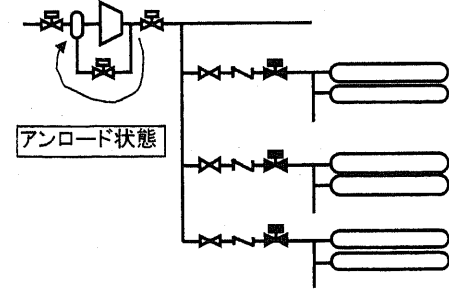
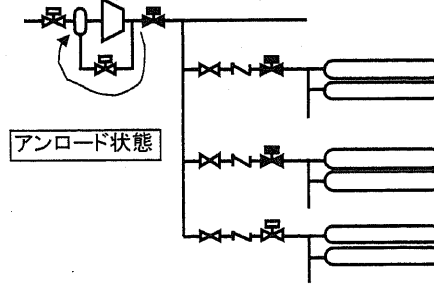
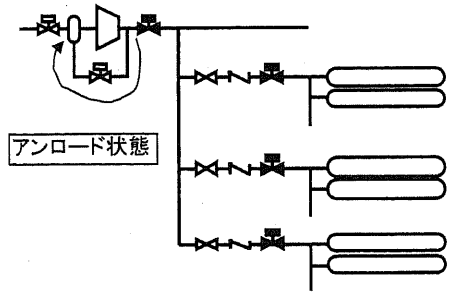
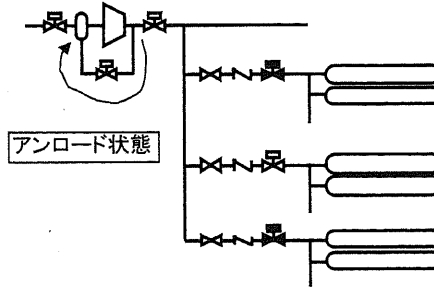
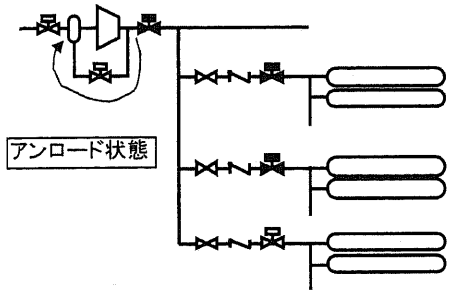
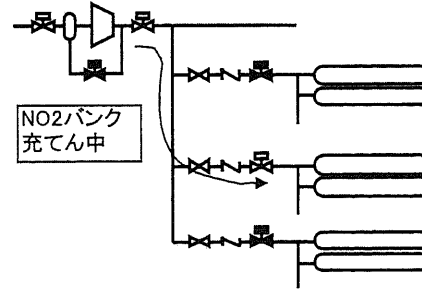
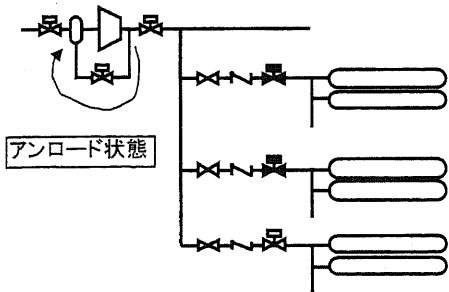
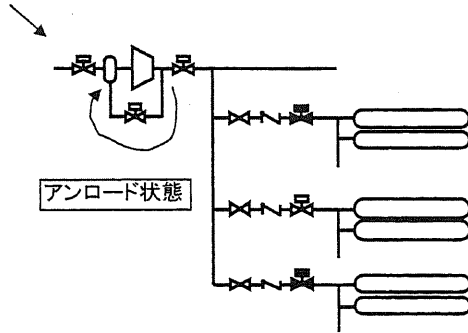
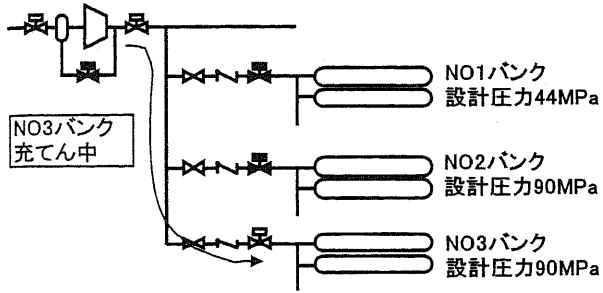
バンク毎3

バンク切替時に両入口遮断弁閉



バンク毎4

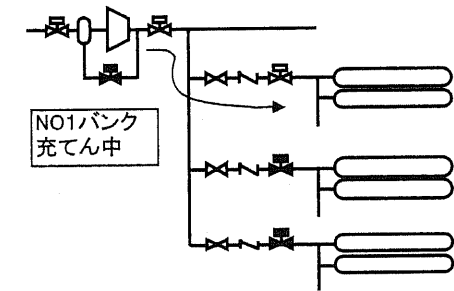
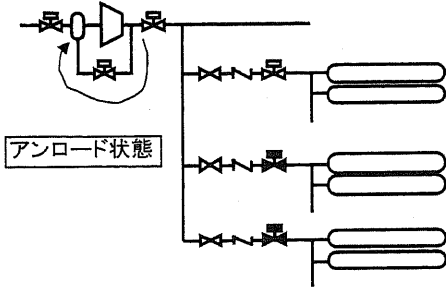
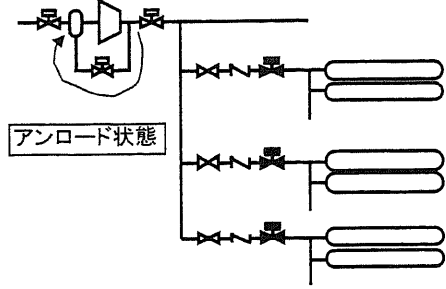
バンク切替時にアンロード運転



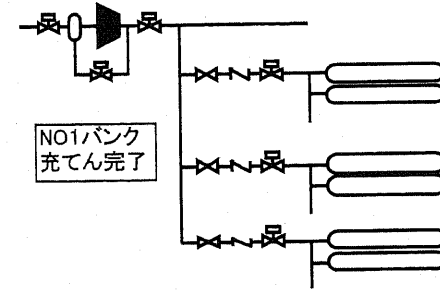
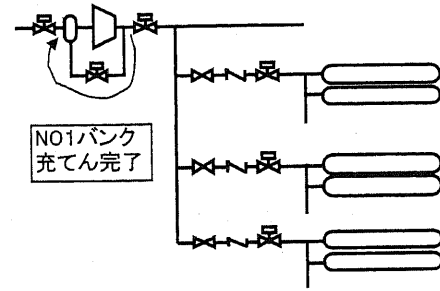
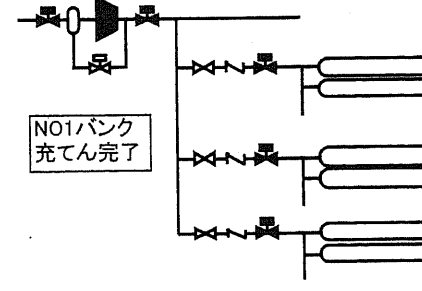
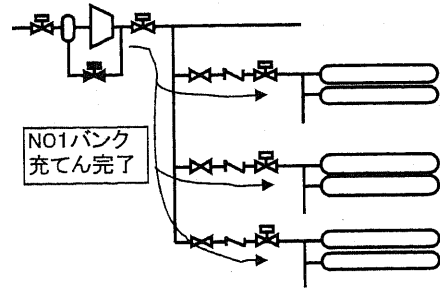
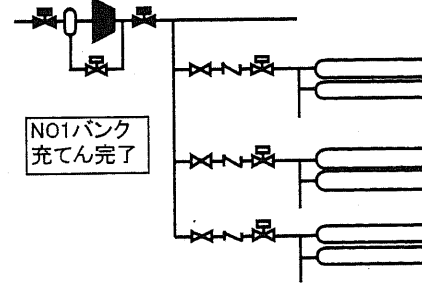
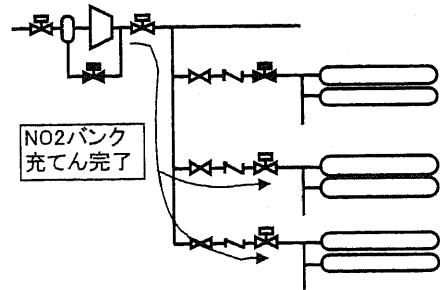
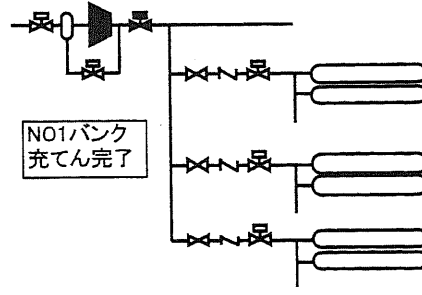
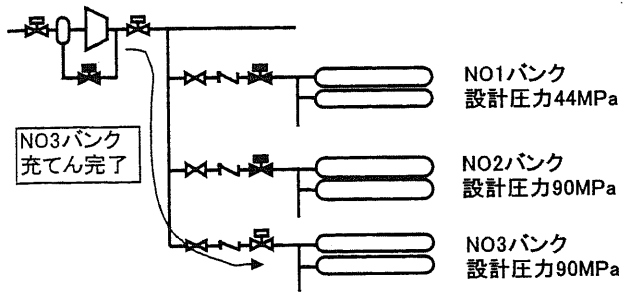
次ページ

バンク毎4

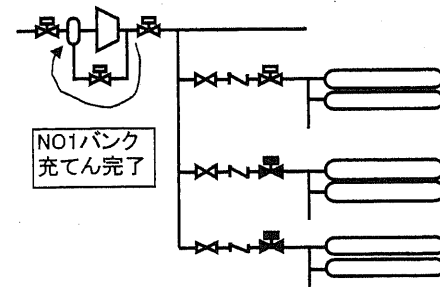
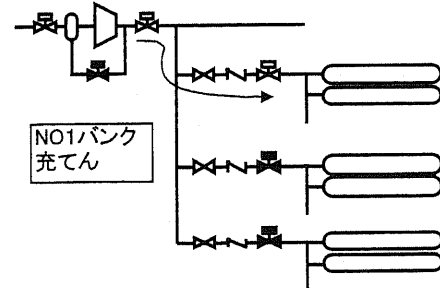
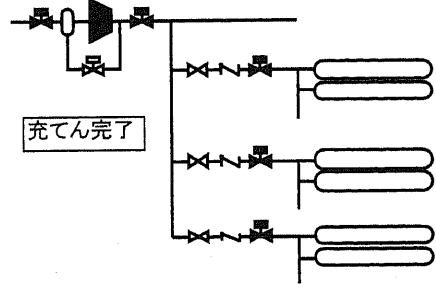
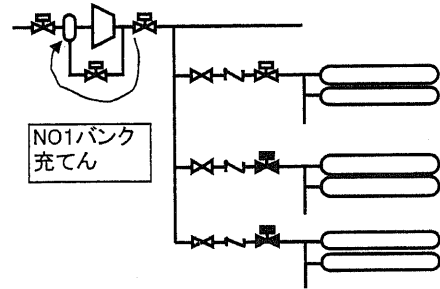
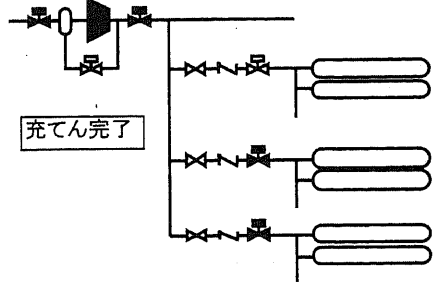
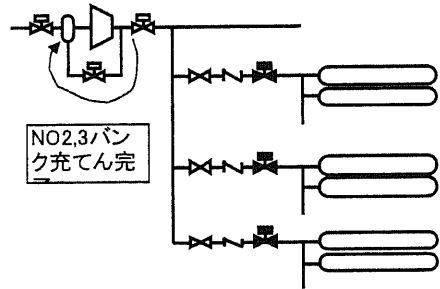
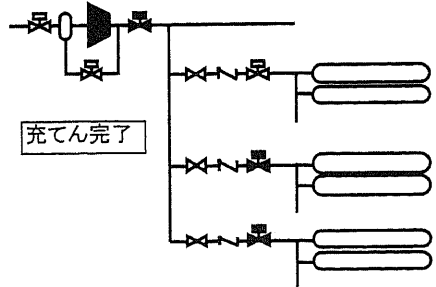
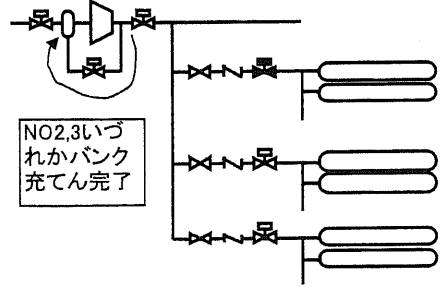
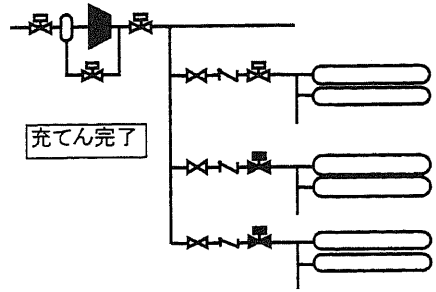
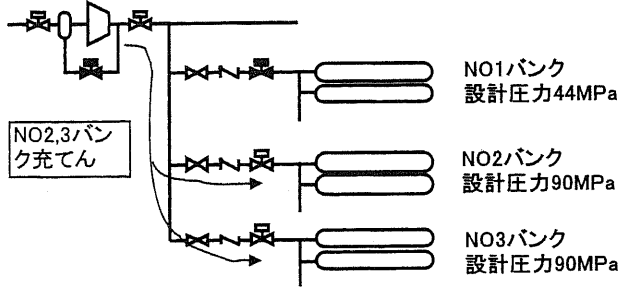
バンク切替時にアンロード運転



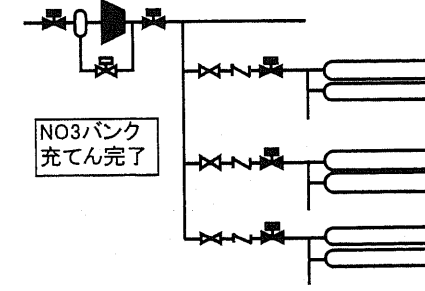
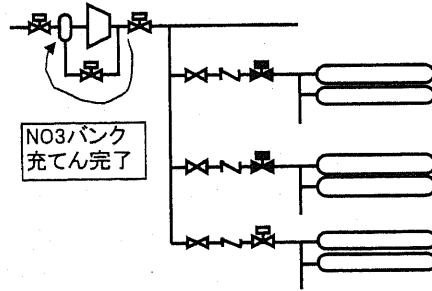
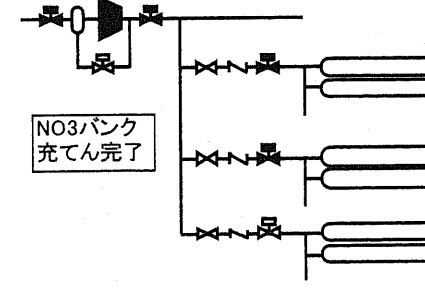
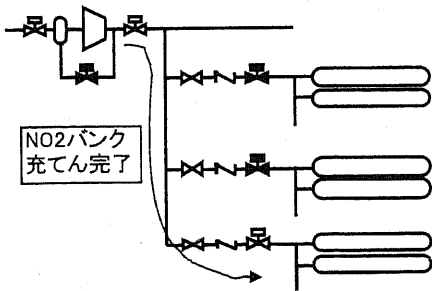
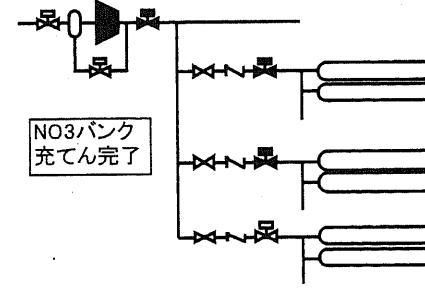
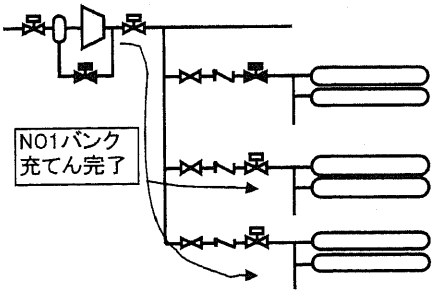
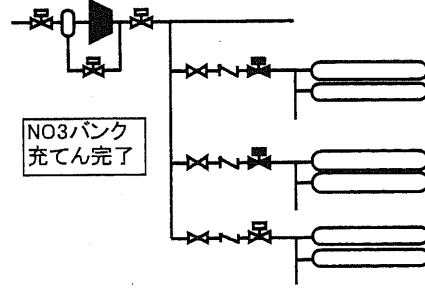
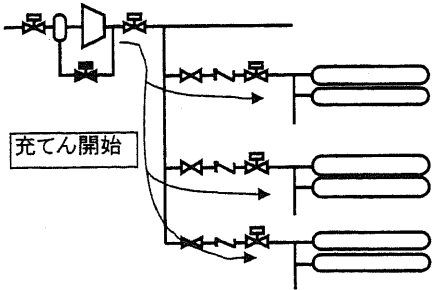
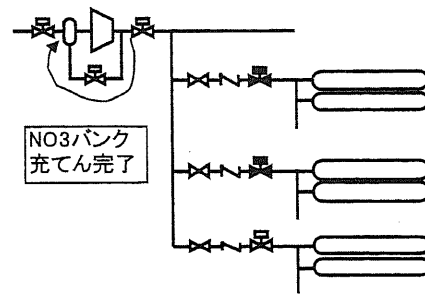
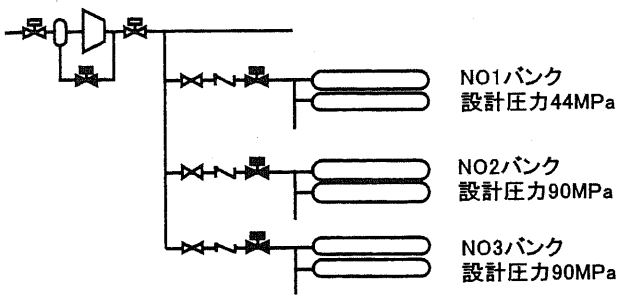
全バンク1



全バンク2



全バンク3



圧縮機入口遮断弁	XV-201	開											閉
圧縮機	CP-201		起									停	
圧縮機出口遮断弁	XV-207		開										閉
アンロードライン遮断弁	XV-208					閉						開	
NO3バンク入口遮断弁	XV-331				開								
NO2バンク入口遮断弁	XV-321						開	閉					
NO1バンク入口遮断弁	XV-311											開	閉
圧縮機入口遮断弁勝手に閉止		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
圧縮機入口遮断弁勝手に全開													x
吸い込み負圧					○	○	○	○	○				
圧縮機閉め切り運転													
過充てん													
ホルダーへ逆流													
NO1バンクへ逆流													
圧縮機への逆流													
充てんできない													
問題なし		○	○	○	○					○	○	○	○
圧縮機勝手に停止		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
圧縮機勝手に起動		x										x	x
吸い込み負圧													
圧縮機閉め切り運転													
過充てん													
ホルダーへ逆流					○					○	○		
NO1バンクへ逆流													
圧縮機への逆流					○	○		○	○				
充てんできない													
問題なし		○	○	○			○			○	○		○
圧縮機出口遮断弁勝手に閉止		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
圧縮機出口遮断弁勝手に全開		x	x									x	x
吸い込み負圧													
圧縮機閉め切り運転													
過充てん													
ホルダーへ逆流													○
NO1バンクへ逆流													○
圧縮機への逆流													○
充てんできない													
問題なし		○	○	○									○
アンロードライン遮断弁勝手に閉止		x	x	x	x					x	x	x	x
アンロードライン遮断弁勝手に全開						x	x	x	x				
吸い込み負圧													
圧縮機閉め切り運転						○							
過充てん													
ホルダーへ逆流						○		○	○				
NO1バンクへ逆流								○	○	○	○		
圧縮機への逆流													○
充てんできない													
問題なし		○	○		○	○		○					○
NO3バンク入口遮断弁勝手に閉止		x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x
NO3バンク入口遮断弁勝手に全開		x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
吸い込み負圧													
圧縮機閉め切り運転						○							
過充てん								○	○				
ホルダーへ逆流						○				○	○		
NO1バンクへ逆流								○	○	○	○		
圧縮機への逆流													○
充てんできない													
問題なし		○	○		○	○							○
NO2バンク入口遮断弁勝手に閉止		x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x
NO2バンク入口遮断弁勝手に全開		x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x
吸い込み負圧													
圧縮機閉め切り運転									○				
過充てん									○	○			
ホルダーへ逆流						○				○	○		
NO1バンクへ逆流									○	○	○		
圧縮機への逆流													○
充てんできない													
問題なし		○	○			○	○						○
NO1バンク入口遮断弁勝手に閉止		x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x
NO1バンク入口遮断弁勝手に全開		x	x	x	x	x	x	x					x
吸い込み負圧													
圧縮機閉め切り運転										○			
過充てん													
ホルダーへ逆流						○	○						
NO1バンクへ逆流								○	○				
圧縮機への逆流													○
充てんできない													
問題なし		○	○			○	○		○	○	○	○	○

圧縮機入口遮断弁	XV-201	開														閉
圧縮機	CP-201		起													停
圧縮機出口遮断弁	XV-207			開												閉
アンロードライン遮断弁	XV-208				閉											開
NO3バンク入口遮断弁	XV-331					開										閉
NO2バンク入口遮断弁	XV-321						開									閉
NO1バンク入口遮断弁	XV-311							開								閉
圧縮機入口遮断弁勝手に閉止		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
圧縮機入口遮断弁勝手に全開																x
吸い込み負圧								○	○	○						
圧縮機閉め切り運転																
過充電																
ホルダーへ逆流																
NO1バンクへ逆流																
圧縮機への逆流																
充電できない																
問題なし		○	○	○	○					○	○	○	○	○	○	○
圧縮機勝手に停止			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
圧縮機勝手に起動		x														x
吸い込み負圧																
圧縮機閉め切り運転																
過充電																
ホルダーへ逆流																
NO1バンクへ逆流																
圧縮機への逆流																
充電できない																
問題なし		○	○	○	○											
圧縮機出口遮断弁勝手に閉止		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
圧縮機出口遮断弁勝手に全開		x	x													x
吸い込み負圧																
圧縮機閉め切り運転																
過充電																
ホルダーへ逆流																
NO1バンクへ逆流																
圧縮機への逆流																
充電できない																
問題なし		○	○	○	○					○	○					
アンロードライン遮断弁勝手に閉止		x	x	x	x											
アンロードライン遮断弁勝手に全開																x
吸い込み負圧																
圧縮機閉め切り運転																
過充電																
ホルダーへ逆流																
NO1バンクへ逆流																
圧縮機への逆流																
充電できない																
問題なし		○	○							○	○	○	○	○	○	○
NO3バンク入口遮断弁勝手に閉止		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
NO3バンク入口遮断弁勝手に全開		x	x	x												x
吸い込み負圧																
圧縮機閉め切り運転																
過充電																
ホルダーへ逆流																
NO1バンクへ逆流																
圧縮機への逆流																
充電できない																
問題なし		○	○							○	○	○	○	○	○	○
NO2バンク入口遮断弁勝手に閉止		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
NO2バンク入口遮断弁勝手に全開		x	x	x	x	x										x
吸い込み負圧																
圧縮機閉め切り運転																
過充電																
ホルダーへ逆流																
NO1バンクへ逆流																
圧縮機への逆流																
充電できない																
問題なし		○	○							○	○	○	○	○	○	○
NO1バンク入口遮断弁勝手に閉止		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
NO1バンク入口遮断弁勝手に全開		x	x	x	x	x										x
吸い込み負圧																
圧縮機閉め切り運転																
過充電																
ホルダーへ逆流																
NO1バンクへ逆流																
圧縮機への逆流																
充電できない																
問題なし		○	○							○	○	○	○	○	○	○

圧縮機入口遮断弁	XV-201	開													閉
圧縮機	GP-201		起											停	
圧縮機出口遮断弁	XV-207			開											閉
アンロードライン遮断弁	XV-208					閉					開				
NO3バンク入口遮断弁	XV-331					開									閉
NO2バンク入口遮断弁	XV-321					開				閉					
NO1バンク入口遮断弁	XV-311									閉					
圧縮機入口遮断弁勝手に閉止		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
圧縮機入口遮断弁勝手に全開															x x
吸い込み負圧						○	○	○							
圧縮機閉め切り運転															
過充てん															
ホルダーへ逆流										○	○				
NO1バンクへ逆流						○	○								
圧縮機への逆流						○	○	○	○						
充てんできない															
問題なし		○	○	○	○					○	○	○	○	○	○
圧縮機勝手に停止			x	x	x	x	x	x	x						
圧縮機勝手に起動		x								x	x	x	x	x	
吸い込み負圧															
圧縮機閉め切り運転															
過充てん															
ホルダーへ逆流										○	○				
NO1バンクへ逆流						○	○								
圧縮機への逆流						○	○	○	○						
充てんできない															
問題なし		○	○	○						○	○			○	○
圧縮機出口遮断弁勝手に閉止		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
圧縮機出口遮断弁勝手に全開		x	x												x x x
吸い込み負圧															
圧縮機閉め切り運転						○	○								
過充てん										○					
ホルダーへ逆流										○	○				
NO1バンクへ逆流															
圧縮機への逆流										○					
充てんできない															
問題なし		○	○	○	○					○	○			○	○
アンロードライン遮断弁勝手に閉止		x	x	x	x					x	x	x	x	x	x
アンロードライン遮断弁勝手に全開									x	x	x				
吸い込み負圧															
圧縮機閉め切り運転						○	○								
過充てん										○					
ホルダーへ逆流										○	○				
NO1バンクへ逆流										○	○				
圧縮機への逆流															
充てんできない															
問題なし		○			○	○	○			○	○			○	○
NO3バンク入口遮断弁勝手に閉止						x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
NO3バンク入口遮断弁勝手に全開		x	x	x											x
吸い込み負圧															
圧縮機閉め切り運転										○					
過充てん															
ホルダーへ逆流						○									
NO1バンクへ逆流															
圧縮機への逆流															
充てんできない															
問題なし		○	○		○	○	○			○	○			○	○
NO2バンク入口遮断弁勝手に閉止						x	x	x							
NO2バンク入口遮断弁勝手に全開		x	x	x						x	x	x	x	x	x
吸い込み負圧															
圧縮機閉め切り運転															
過充てん										○					
ホルダーへ逆流						○				○	○				
NO1バンクへ逆流															
圧縮機への逆流															
充てんできない															
問題なし		○	○		○	○	○			○	○			○	○
NO1バンク入口遮断弁勝手に閉止						x	x								
NO1バンク入口遮断弁勝手に全開		x	x	x						x	x	x	x	x	x
吸い込み負圧															
圧縮機閉め切り運転															
過充てん										○	○				
ホルダーへ逆流						○				○	○				
NO1バンクへ逆流										○	○	○	○	○	○
圧縮機への逆流															
充てんできない															
問題なし		○	○		○	○								○	

3. 安全対策リスト

- 3-1 35MPa 充てん対応水素スタンドの安全対策一覧表
- 3-2 70MPa 充てん対応水素スタンドの安全対策一覧表 (未確定)
- 3-3 液体水素スタンドの安全対策一覧表

3-1 35MPa充てん対応水素スタンドの安全対策一覧表

分野	安全対策コード	安全対策名	目的	内容	有効性	リスク評価に対する目的
全般	G01	安全弁設置	内圧上昇防止	・安全弁設置、1年毎の検査、元弁誤操作対策	非常に有効	可能性低減
	G07	敷地境界に防火壁設置(敷地外火災対策)	敷地外の火災対策	・敷地境界に高さ2mの防火壁設置	非常に有効	可能性低減
	G09	炭素鋼製の貯槽、配管の外表面塗装(外面腐食対策)	外面腐食防止(SS)	・炭素鋼製設備の外面塗装	非常に有効	可能性低減
	G12	遮断弁誤動作検知対策	遮断弁誤動作防止	・遮断弁アンサーバック ・1年毎の動作確認試験	非常に有効	可能性低減
	G13	水素出し配管の塗装(塩化物SCC対策)	塩化物SCC防止	・配管外面塗装	非常に有効	可能性低減
	G15	メタルタツテのねじ込み式継ぎ手使用	シール材劣化対策	・メタルタツテのねじ込み式継ぎ手使用	本質的対策	可能性低減
	G16	配管・機器の隔離(塩化物SCC対策)	塩化物SCC防止	・配管機器の外部からの隔離	非常に有効	可能性低減
	G18	並行する水素配管の火災対策	水素スタンド設備の火災対策	・並行する水素配管間の距離確保 又は 遮蔽板設置	本質的対策	可能性低減
	G905	水素漏洩検知機及び運転停止インターロック設置	大量漏洩防止	・設備周辺への漏えい検知器の設置と運転停止・遮断弁閉止インターロック	効果期待小	影響度低減
	G916	ベントライン元弁(手動弁)2次側にオリフィス設置	大量漏洩防止	・ベントライン元弁2次側にオリフィス設置	効果あり	影響度低減
	G917	水素出しラインのパージノズル元弁のサイズ選定	大量漏洩防止	・パージノズル元弁に小口径弁の採用	効果あり	影響度低減
	G950	障壁設置(噴出火災対策)	影響低減	・敷地境界距離不足の位置に、障壁を設置	敷地外に効果大	影響度低減
G953	配管のトレンチ内設置(噴出火災対策)	影響低減	・配管のトレンチ内設置	敷地外に効果大	影響度低減	
材料	G100	適切な材料選定(SUS)	水素脆化防止(SUS)	・SUS316Lの使用	非常に有効	可能性低減
	G101	適切な材料選定(SCM)	水素脆化防止(SCM)	・SCM435の使用	非常に有効	可能性低減
	G102	適切な材料選択(SUS、内面腐食対策)	腐食防止(SUS)	・SUS316Lの使用	非常に有効	可能性低減
	G103	適切な材料選定(SUS、20MPa以下)	水素脆化防止(SUS、20MPa以下)	・SUS316Lの使用	本質的対策	可能性低減
	G104	適切な材料選定(SCM、20MPa以下)	水素脆化防止(SCM、20MPa以下)		データ不足	データ不足
	G901	適切な材料選定(水素脆化、不安定破壊防止、SUS)	大量漏洩防止	・SUS316Lの使用	小さな開口	影響度低減
	G902	適切な材料選定(水素脆化、不安定破壊防止、SCM)	大量漏洩防止	・SCM435Lの使用	小さな開口	影響度低減
検査	G150	定期的な気密検査(SUS配管、水素脆化対策)	水素脆化対策(SUS)	・1年毎の気密検査	有効	可能性低減
	G151	定期的な検査と交換(SCM蓄圧器ボンベ、水素脆化対策)	水素脆化対策(SCM)	・1年毎のボンベ内面検査	有効	可能性低減
	G152	定期的な検査と補修(炭素鋼、外面腐食)	外面腐食対策(SS)	・1年毎の外観目視検査	有効	可能性低減
	G153	定期的な検査と交換(充填ホース)	充填ホース劣化対策	・1年毎の外観目視検査 ・定期的な交換	非常に有効	可能性低減
	G154	始業前気密検査(水素出しライン、ディスペンサ、充填ホース)	水素出しライン配管のリースペンサホースの開口対策	・始業前の気密検査(シーケンス対応)	非常に有効	可能性低減
	G155	定期的な検査(質量流量計、チューブ疲労対策)	センサーチューブ疲労対策	・1年毎の気密検査	ある程度有効	可能性低減
	G156	定期的な検査と補修(SCM蓄圧器ボンベ、外面腐食対策)	外面腐食対策(SCM)	・1年毎の外観目視検査	有効	可能性低減
	G159	定期的な検査と措置(ネジ部緩み、シール材劣化対策)	ネジ緩み、シール材劣化対策	・1年毎の気密検査	非常に有効	可能性低減
	G160	定期的な検査(遮断弁の誤作動防止策)	遮断弁誤作動対策	・1年毎の動作確認試験	有効	可能性低減
	G161	定期的な検査(圧力計)	圧力計誤指示対策	・1年毎の動作確認試験	有効	可能性低減
	G162	定期的な気密検査(グラウンド漏れ)	バルブのグラウンド漏れ対策	・1年毎の気密検査	非常に有効	可能性低減
	G163	定期的な気密検査(シート漏れ)	バルブのシート漏れ対策	・1年毎の気密検査	非常に有効	可能性低減
	G17	充填車両のレセプタクルシール材定期点検	シール材劣化対策	・レセプタクルシール材定期点検	非常に有効	可能性低減
	ディスペンサー	G203	漏洩検知器設置(ディスペンサ内部)及び運転停止インターロック	水素大量漏洩防止	・漏洩検知器設置 ・運転停止インターロック	非常に有効
G204		配管のトレンチ内または架空設置(車両衝突対策)	配管損傷防止	・トレンチ内設置(通気性の確保、跳ね上げ式蓋の採用、噴出火災対策実施)	本質的対策	可能性低減
G205		車両衝突防止ガードの設置	車両衝突防止	・防護柵の設置	非常に有効	可能性低減
G206		緊急離脱カブラ設置	車両誤発進対策	・緊急離脱カブラの設置	非常に有効	可能性低減
G207		ディスペンサノズルの防塵対策	カブラノズルの防塵	・キャップの取り付け、異物付着を防ぐ収納措置	有効	可能性低減
G208		充填ホース接地部の磨耗防止策(スパイラルガード)	ホースの磨耗防止	・スパイラルガードの取り付け	本質的対策	可能性低減
G210		流量計指示不良防止対策	誤作動防止	・1年毎の動作確認試験	有効	可能性低減
G212		バルブ、機器類はディスペンサーケーシング内に収納	いたずら防止	・バルブ、機器類のディスペンサー内への収納、操作扉の施錠	非常に有効	可能性低減
G213		ディスペンサー基礎/アンカーボルト設計(地震時転倒対策)	地震対策	・基礎の上にアンカー止め	本質的対策	可能性低減
G214		充填ノズルレセプタクル接続部の漏洩検知と充填停止インターロック	災害防止(漏洩)	・充填カブラ接続部に水素漏洩検知器設置、遮断弁閉止のインターロック	非常に有効	可能性低減
G215		車両充填速度のコントロール	充填速度異常防止	・流量計の設置、制御装置の設置	本質的対策	可能性低減
G307		火災検知器	災害拡大防止(噴出火災)	・ディスペンサーへの火災検知器の設置と運転停止・遮断弁閉止のインターロック	非常に有効	可能性低減
G904		ディスペンサにおける車両充填速度上限監視と運転停止インターロック(外部漏洩対策)	異常流量充填の防止	・充填流量の監視と遮断弁閉止インターロック	効果期待小	影響度低減
G906		充填作業停止ボタンの設置	大量漏洩防止	・緊急停止ボタンの設置、遮断弁閉止インターロック	効果期待小	影響度低減
G909	ディスペンサにおける車両充填速度上限監視と運転停止インターロック(脱圧遮断弁誤動作対策)	大量漏洩防止	・流量制御と流量監視及び上限値にて作動する遮断弁閉止インターロック	効果大	影響度低減	
G914	ディスペンサーに衝撃センサーの設置	大量漏洩防止	・ディスペンサー内部に衝撃センサー(兼感震器)の設置と遮断弁閉止インターロック	効果期待小	影響度低減	

分野	安全対策コード	安全対策名	目的	内容	有効性	リスク評価に対する目的
蓄圧器	G02	圧力リリーフ弁と圧力スイッチの設置(蓄圧器)	内圧上昇防止	・圧力リリーフ弁と圧力スイッチ設置	非常に有効	可能性低減
	G04	散水設備と温度監視装置の設置	敷地外の火災対策	・蓄圧器表面温度計設置 ・散水設備設置(エンジンポンプ)	非常に有効	可能性低減
	G14	蓄圧器ボンベの塗装(外面腐食対策)	外面腐食防止(SCM)	・蓄圧器外面塗装	非常に有効	可能性低減
	G300	蓄圧器圧力上昇監視及び運転停止インターロック	圧力上昇防止	・圧力計の設置、圧力監視と運転停止インターロック	非常に有効	可能性低減
	G306	蓄圧器ユニット基礎/アンカーボルト設計(地震時転倒対策)	地震対策	・基礎上にアンカー止め	本質的対策	可能性低減
	G307	火災検知器及び散水設備(蓄圧器周り)	温度上昇防止	・蓄圧器ヘッダー部への火災検知器の設置と運転停止・遮断弁閉止、散水設備自動起動のインターロック	非常に有効	可能性低減
	G907	逆止弁設置(蓄圧器入口)	大量漏洩防止	・バンク毎に逆止弁を設置	効果大	影響度低減
	G912	感震機、遮断弁FC、フレーム設計(蓄圧器転倒時の配管破断対策)	地震対策	・感震装置の設置と運転停止・遮断弁閉止インターロック及び蓄圧器付属品フレーム内への設置	効果大	影響度低減
	G913	蓄圧器出口配管に過流防止弁を設置	大量漏洩防止	・バンク毎に過流防止弁の設置	効果大	影響度低減
圧縮機	G400	圧縮機入口側圧力低下監視及び運転停止インターロック	負圧防止	・圧力指示計の設置、圧力監視と運転停止・遮断弁閉止インターロック	非常に有効	可能性低減
	G402	圧縮機出口側圧力上昇監視及び運転停止インターロック	配管損傷防止	・圧力指示計の設置、圧力監視と運転停止・遮断弁閉止インターロック	非常に有効	可能性低減
	G403	配管振動防止対策	配管損傷防止	・配管、安全弁、圧力計等の振動防止	有効	可能性低減
	G404	熱交換器冷却水流量監視及び運転停止インターロック	ガス温度上昇防止	・冷却水流量監視と運転停止・遮断弁閉止インターロック	非常に有効	可能性低減
	G405	圧縮機出口配管表面温度計設置及び運転停止インターロック	ガス温度上昇防止	・出口配管表面温度監視と運転停止・遮断弁閉止インターロック	非常に有効	可能性低減
	G406	熱交換器冷却水温度監視及び運転停止インターロック	ガス温度上昇防止	・冷却水温度監視と運転停止・遮断弁閉止インターロック	非常に有効	可能性低減
	G408	スナッチャータンク基礎/アンカーボルト設計(地震時転倒対策)	地震対策	・基礎上にアンカー止め	本質的対策	可能性低減
	G409	圧縮機中間段圧力上昇監視及び運転停止インターロック	配管損傷防止	・圧力指示計の設置、圧力監視と運転停止・遮断弁閉止インターロック	非常に有効	可能性低減
	G410	スナッチャータンク圧力上昇監視及び運転停止インターロック	配管損傷防止	・圧力指示計の設置、圧力監視と運転停止・遮断弁閉止インターロック	非常に有効	可能性低減
	G412	圧縮機室内の漏洩検知器設置	災害防止(漏洩)	・漏洩検知器の設置、運転停止・遮断弁閉止インターロック	非常に有効	可能性低減
	G413	圧縮機出口側圧力低下監視及び運転停止インターロック	配管開口、弁誤開放対策	・圧力指示計の設置、圧力監視と運転停止・遮断弁閉止インターロック	非常に有効	可能性低減
G915	圧縮機室内の換気装置設置(滞留防止対策)	災害縮小対策	・圧縮機室内に換気装置設置、換気装置非稼働時運転停止・遮断弁閉止インターロック	効果あり	影響度低減	
G955	圧縮機をケーシング内に設置(圧縮機からの飛散物対策)	影響低減	・圧縮機の室内あるいは鋼製ケーシング内設置	敷地外に効果大	影響度低減	
オフサイト	G600	水素トレーラの緊急遮断弁	トレーラ誤発進によるフレキチューブ破断対策	・水素スタンド側から動力供給および制御を行う緊急遮断弁の設置(トレーラ側に設置)	本質的対策	可能性低減
	G601	フレキチューブ接続時の連結確認	漏洩防止	・接続時、漏洩のないことの点検	非常に有効	可能性低減
	G602	トレーラボンベ散水設備の設置	温度上昇防止	・散水設備の設置	非常に有効	可能性低減
	G603	トレーラボンベ・付属配管の水素供給事業者管理	誤操作防止	・トレーラボンベ及び付属品に対する事業者側の管理	非常に有効	可能性低減
	G604	バージ作業時のフレキチューブ連結確認	漏洩防止	・バージ作業時の接続部からの漏洩のないことの点検	有効	可能性低減
	G605	車両衝突防止対策(水素トレーラ)	車両衝突防止	・トレーラ設置場所にガード、障壁の設置	非常に有効	可能性低減
	G908	逆止弁設置(オフサイト水素受入れライン)	大量漏洩防止	・トレーラ受入れラインに逆止弁設置	効果大	影響度低減
ヒューマンエラー	G700	手動弁誤操作、いたずら操作対策	誤操作・いたずら防止	・教育、開閉札、防火壁内への設置	有効	可能性低減
	G703	エンドプラグにロックワイヤー(いたずら、誤操作対策)	誤操作・いたずら防止	・バージノズル等のエンドプラグにロックワイヤー等取り付け	非常に有効	可能性低減
	G704	パイプラック、壁面、トレンチ内に配管設置(高圧配管踏つけ対策)	配管損傷防止	・配管の設置場所(パイプラック、壁面、トレンチ内)	本質的対策	可能性低減
	G705	トレンチ蓋を跳ね上げ式にする(トレンチ蓋落下対策)	トレンチ内配管損傷防止	・跳ね上げ式蓋の設置	本質的対策	可能性低減
	G706	充填ホースの折り曲げ防止策(ガードスプリング)	ホース損傷防止	・ガードスプリングの取り付け(折り曲げ、磨耗防止等)	非常に有効	可能性低減
	G707	手動弁の施錠など(誤操作、いたずら対策)	誤操作・いたずら防止	・ハンドル、施錠、ロックワイヤー設置、ハンドル取り外し	非常に有効	可能性低減
	天災	G801	水素払出し配管の強風飛来物対策	配管損傷防止	・トレンチ配管には、トレンチ蓋の設置(グレーティング等)、架空配管にはカバーの設置	本質的対策
G802		水素払出し配管の設計(地震対策)	配管損傷防止	・ルーズな緊結	本質的対策	可能性低減
G900		感震装置と緊急遮断インターロック	地震対策	・感震装置の設置と運転停止・遮断弁閉止インターロック	効果期待小	影響度低減

3-2 70MPa充てん対応水素スタンドの安全対策一覧表(未確定)

分野	安全対策コード	安全対策名	目的	内容	有効性	リスク評価に対する目的
全般	G01	安全弁設置	内圧上昇防止	・安全弁設置、1年毎の検査、元弁誤操作対策	非常に有効	可能性低減
	G02	圧力リリーフ弁と圧カススイッチの設置(蓄圧器)	内圧上昇防止	・圧力リリーフ弁と圧カススイッチ設置	非常に有効	可能性低減
	G07	敷地境界に防火壁設置(敷地外火災対策)	敷地外の火災対策	・敷地境界に高さ2mの防火壁設置 (敷地境界距離、火気離隔距離は調査中)	非常に有効	可能性低減
	G12	遮断弁誤動作検知対策	遮断弁誤動作防止	・遮断弁アンサーバック ・1年毎の動作確認試験	非常に有効	可能性低減
	G13	水素漏出し配管の塗装(塩化物SCC対策)	塩化物SCC防止	・配管外面塗装	非常に有効	可能性低減
	G15	メタルタッチのねじ込み式継ぎ手使用	シール材劣化対策	・メタルタッチのねじ込み式継ぎ手使用	本質的対策	可能性低減
	G16	配管・機器の隔離(塩化物SCC対策)	塩化物SCC防止	・障壁等による配管機器の外部からの隔離	非常に有効	可能性低減
	G18	並行する水素配管の火災対策	水素スタンド設備の火災対策	・並行する水素配管間の距離確保 又は 遮蔽板設置	非常に有効	可能性低減
	G19	設備エリア周辺の障壁設置(車両飛び込み対策)	設備エリアへの車両飛び込み防止	・公道に面した設備エリアの境界に障壁を設置	本質的対策	可能性低減
	G905	水素漏洩検知機及び運転停止インターロック設置	大量漏洩防止	・設備周辺への漏えい検知器の設置 ・運転停止&遮断弁閉止インターロック	効果期待小	影響度低減
	G916	ベントライン元弁(手動弁)2次側にオフィス設置	大量漏洩防止	・ベントライン元弁2次側にオフィス設置	効果あり	影響度低減
	G917	水素漏出しラインのパージノズル元弁のサイズ選定	大量漏洩防止	・パージノズル元弁に小口径弁の採用	効果あり	影響度低減
	G950	障壁設置(噴出火災対策)	影響低減	・敷地境界距離不足の位置に、障壁を設置	敷地外に効果大	影響度低減
	G953	配管のトレンチ内設置(噴出火災対策)	影響低減	・配管のトレンチ内設置	敷地外に効果大	影響度低減
材料	G100	適切な材料選定(SUS)	水素脆化防止(SUS)	・SUS316Lの使用	非常に有効	可能性低減
	G100-1	適切な材料選定(SUS、水素脆化対策、圧力計)	水素脆化防止(SUS)	(対応可能な材料は調査中)		
	G100-2	適切な材料選定(SUS、水素脆化対策、流量計)	水素脆化防止(SUS)	(対応可能な材料は調査中)		
	G101	適切な材料選定(SCM)	水素脆化防止(SCM)	・SCM435の使用	非常に有効	可能性低減
	G101-1	適切な材料選定(SNCM)	水素脆化防止(SNCM)	・SNCM439強度低減材の使用 (SNCM439適用性は調査中)	非常に有効	可能性低減
	G102	適切な材料選択(SUS、内面腐食対策)	腐食防止(SUS)	・SUS316Lの使用	本質的対策	可能性低減
	G103	適切な材料選定(SUS、20MPa以下)	水素脆化防止(SUS、20MPa以下)	・SUS316Lの使用	本質的対策	可能性低減
	G104	適切な材料選定(SCM、20MPa以下)	水素脆化防止(SCM、20MPa以下)	・水素ローリー容器にSCM435,SUS316Lの使用	本質的対策	可能性低減
	G105	適切な材料選定(SUS、外面腐食対策)	外面腐食防止(SUS)	・SUS316Lの使用	本質的対策	可能性低減
	G106	適切な材料選定(SUS、低温脆化)	低温脆化防止(SUS)	・SUS316Lの使用	本質的対策	可能性低減
	G107	適切な材料選定(SCM、低温脆化)	低温脆化防止(SCM)	・SCM435の使用	非常に有効	可能性低減
	G108	適切な材料選定(SNCM、低温脆化)	低温脆化防止(SNCM)	・SNCM439強度低減材の使用 (SNCM439適用性は調査中)	非常に有効	可能性低減
	G109	適切な材料選定(シール材)	高圧水素環境劣化防止	(高圧水素環境下での使用可能なシール材は調査中)		
	G901	適切な材料選定(水素脆化、不安定破壊防止、SUS)	大量漏洩防止	・SUS316Lの使用	小さな開口	影響度低減
	G902	適切な材料選定(水素脆化、不安定破壊防止、SCM、SUS)	大量漏洩防止	・SCM435、SUS316Lの使用	小さな開口	影響度低減
	G902-1	適切な材料選定(水素脆化、不安定破壊防止、SNCM)	大量漏洩防止	・SNCM439強度低減材の使用 (SNCM439適用性は調査中)	小さな開口	影響度低減
	G902-2	適切な材料選定(低温脆化、不安定破壊防止、SCM)	大量漏洩防止	・SCM435使用	小さな開口	影響度低減
	検査	G150	定期的な気密検査(SUS配管、水素脆化対策)	水素脆化対策(SUS)	・1年毎の気密検査	有効
G151		定期的な検査と交換(SCM蓄圧器ボンベ、水素脆化対策)	水素脆化対策(SCM)	・1年毎のボンベ内面検査あるいは超音波探傷試験	有効	可能性低減
G151-1		定期的な検査と交換(SNCM439蓄圧器、水素脆化対策)	水素脆化対策(SNCM)	・1年毎のボンベ内面検査あるいは超音波探傷試験 (外面からの超音波試験方法は調査中)	有効	可能性低減
G152		定期的な検査と補修(炭素鋼、外面腐食)	外面腐食対策(SS)	・1年毎の外観目視検査	有効	可能性低減
G153		定期的な検査と交換(充填ホース)	充填ホース劣化対策	・1年毎の外観目視検査 ・定期的な交換(ホース検査方法、交換周期などは調査中)	非常に有効	可能性低減
G154		始業前気密検査(水素漏出しライン、ディスペンサ、充填ホース)	水素漏出し配管~ディスペンサホース開口対策	・始業前の気密検査(シーケンス対応)	非常に有効	可能性低減
G155		定期的な検査(質量流量計、チューブ疲労対策)	センサーチューブ疲労対策	・1年毎の気密検査	ある程度有効	可能性低減
G156		定期的な検査と補修(SCM蓄圧器ボンベ、外面腐食対策)	外面腐食対策(SCM)	・1年毎の外観目視検査	有効	可能性低減
G159		定期的な検査と措置(ネジ部緩み、シール材劣化対策)	ネジ緩み、シール材劣化対策	・1年毎の気密検査 (シール材の劣化周期は調査中)	非常に有効	可能性低減
G160		定期的な検査(遮断弁の誤動作防止策)	遮断弁誤動作対策	・1年毎の動作確認試験	有効	可能性低減
G161		定期的な検査(圧力計)	圧力計誤指示対策 水素脆化対策	・1年毎の動作確認試験 (圧力計の劣化は調査中)	有効	可能性低減
G162		定期的な気密検査(グランド漏れ)	バルブのグランド漏れ対策	・1年毎の気密検査	非常に有効	可能性低減
G163		定期的な気密検査(シート漏れ)	バルブのシート漏れ対策	・1年毎の気密検査	非常に有効	可能性低減
G164		定期的な検査(手動弁)	弁棒破損、固着防止	・1年毎開閉動作検査	有効	可能性低減
G165		定期的な検査(逆止弁)	シート固着、噛み込み防止	・1年毎の動作確認	有効	可能性低減
G166		定期的な検査(安全弁)	通常運転時の誤動作防止	・1年毎の動作確認	有効	可能性低減
G167		定期的な検査(充てんノズル)	ノズル損傷による連結部漏洩防止	・1年毎のノズル機器の検査 (損傷パターンなど調査中)	有効	可能性低減
G168		定期的な検査(フランジのボルトナット緩み確認)	ボルトナット緩み防止	・1年毎のボルトナット緩み確認	有効	可能性低減

3-2 70MPa充てん対応水素スタンドの安全対策一覧表(未確定)

分野	安全対策コード	安全対策名	目的	内容	有効性	リスク評価に対する目的
	G169	定期的な検査(流量調整弁)	流調弁の誤作動対策	・1年毎の動作確認	有効	可能性低減
	G17	充填車両のレセプタクル・ノズルシール材定期点検	シール材劣化対策	・レセプタクルシール材定期点検 ・ノズルシール材定期点検	非常に有効	可能性低減
	G170	定期的な検査および掃除(フィルター)	詰まり、メッシュ損傷防止	・1年毎のフィルター内部点検	有効	可能性低減
	G171	定期的な検査(緊急離脱カブラー)	誤作動防止	・1年毎の気密、内部目視、動作確認試験(点検周期、点検箇所は調査中)	有効	可能性低減
	G172	定期的な検査(圧縮機)	圧縮機各部品損傷防止	・1年毎にオーバーホール(点検方法などは調査中)	有効	可能性低減
	G173	定期的な検査(過流防止弁)	誤作動防止	・1年毎に気密、外観目視、動作確認(点検周期、点検箇所は調査中)	有効	可能性低減
	ディスペンサー	G203	漏洩検知器設置(ディスペンサー内部)及び運転停止インターロック	水素大量漏洩防止	・漏洩検知器設置 ・運転停止インターロック	非常に有効
G204		配管のトレンチ内または架空設置(車両衝突対策)	配管損傷防止	・トレンチ内設置(通気性の確保、跳ね上げ式蓋の採用、噴出火災対策実施)	本質的対策	可能性低減
G205		車両衝突防止ガードの設置	車両衝突防止	・防護柵の設置	非常に有効	可能性低減
G206		緊急離脱カブラー設置	車両誤発進対策	・緊急離脱カブラーの設置(作動条件は調査中)	非常に有効	可能性低減
G207		ディスペンサノズルの防塵対策	カブラーノズルの防塵	・キャップの取り付け、異物付着を防ぐ収納措置	有効	可能性低減
G208		充填ホース接地部の磨耗防止策(スパイラルガード)	ホースの磨耗防止	・スパイラルガードの取り付け	本質的対策	可能性低減
G210		流量計指示不良防止対策	誤作動防止	・1年毎の動作確認試験	有効	可能性低減
G212		バルブ、機器類はディスペンサーケーシング内に収納	いたざら防止	・バルブ、機器類のディスペンサー内への収納、操作扉の施錠	非常に有効	可能性低減
G213		ディスペンサー基礎/アンカーボルト設計(地震時転倒対策)	地震対策	・基礎上にアンカー止め	本質的対策	可能性低減
G214		充填ノズル/レセプタクル接続部の漏洩検知と充填停止インターロック	災害防止(漏洩)	・充填ノズル接続部に水素漏洩検知器設置、遮断弁閉止のインターロック	非常に有効	可能性低減
G215		車両充填速度のコントロール	充填速度異常防止	・流量計の設置、制御装置の設置(問題のない充てん流量は調査中)	本質的対策	可能性低減
G307		火災検知器	災害拡大防止(噴出火災)	・ディスペンサー内部の火災検知器の設置と運転停止・遮断弁閉止のインターロック	非常に有効	可能性低減
G904		ディスペンサーにおける車両充填速度上限監視と運転停止インターロック(外部漏洩対策)	異常流量充填の防止	・充填流量の監視 ・遮断弁閉止インターロック	効果期待小	影響度低減
G906		充填作業停止ボタンの設置	大量漏洩防止	・緊急停止ボタンの設置 ・遮断弁閉止インターロック	効果期待小	影響度低減
G909	ディスペンサーにおける車両充填速度上限監視と運転停止インターロック(脱圧遮断弁誤作動対策)	大量漏洩防止	・流量制御と流量監視 ・流量上限にて遮断弁閉止インターロック	効果あり	影響度低減	
G914	ディスペンサーに衝撃センサーの設置	大量漏洩防止	・ディスペンサー内部に衝撃センサー(兼感震器)の設置と遮断弁閉止インターロック	効果期待小	影響度低減	
G918	ディスペンサーにおける車両充填速度上限監視と運転停止インターロック(安全弁誤作動対策)	大量漏洩防止	・流量制御と流量監視 ・流量上限にて遮断弁閉止インターロック	効果大	影響度低減	
蓄圧器	G04	散水設備と温度監視装置の設置	敷地外の火災対策	・蓄圧器表面温度計設置 ・散水設備設置(エンジンポンプ)	非常に有効	可能性低減
	G09	炭素鋼製の貯槽、配管の外表面塗装(外面腐食対策)	外面腐食防止(SS)	・炭素鋼製設備の外表面塗装	非常に有効	可能性低減
	G14	蓄圧器ボンプの塗装(外面腐食対策)	外面腐食防止(SCM,SNCM)	・蓄圧器外表面塗装	非常に有効	可能性低減
	G300	蓄圧器圧力上昇監視及び運転停止インターロック	圧力上昇防止	・圧力計の設置、圧力監視と運転停止インターロック	非常に有効	可能性低減
	G306	蓄圧器ユニット基礎/アンカーボルト設計(地震時転倒対策)	地震対策	・基礎上にアンカー止め	本質的対策	可能性低減
	G307	火災検知器及び散水設備(蓄圧器周り)	温度上昇防止	・蓄圧器ヘッダー部への火災検知器の設置と運転停止・遮断弁閉止・散水設備自動起動のインターロック	非常に有効	可能性低減
	G308	逆止弁設置(蓄圧器入口)	逆流防止	・各バンク入口に逆止弁設置	ある程度有効	可能性低減
	G309	蓄圧器急速充てん防止	蓄圧器温度上昇防止	・鋼製蓄圧器設置	本質的対策	可能性低減
	G907	逆止弁設置(蓄圧器入口)	大量漏洩防止	・バンク毎に逆止弁を設置	効果大	影響度低減
	G912	感震機、遮断弁FC、フレーム設計(蓄圧器転倒時の配管破断対策)	大量漏洩防止	・感震装置の設置と運転停止・遮断弁閉止インターロック ・蓄圧器付属品フレーム内への設置	効果大	影響度低減
	G913	蓄圧器出口配管に過流防止弁を設置(40MPa)	大量漏洩防止	・バンク毎に過流防止弁の設置	効果大	影響度低減
	G913-1	蓄圧器出口配管に過流防止弁を設置(80MPa)	大量漏洩防止	・バンク毎に過流防止弁の設置	効果大	影響度低減
	G919	適正な35MPa側ディスペンサー水素払い出し配管設置	大量漏洩防止	・35MPa蓄圧器容量と70MPa蓄圧器容量を安全な容量比に設定	小さな開口	影響度低減
	G932	適正なバイパス配管設置	大量漏洩防止	・35MPa蓄圧器容量と70MPa蓄圧器容量を安全な容量比に設定	小さな開口	影響度低減
圧縮機	G400	圧縮機入口側圧力低下監視及び運転停止インターロック	負圧防止	・圧力指示計の設置、圧力監視と運転停止・遮断弁閉止インターロック	非常に有効	可能性低減
	G402	圧縮機出口側圧力上昇監視及び運転停止インターロック	配管損傷防止	・圧力指示計の設置、圧力監視と運転停止・遮断弁閉止インターロック	非常に有効	可能性低減
	G403	配管振動防止対策	配管損傷防止	・配管、安全弁、圧力計等の振動防止	有効	可能性低減
	G404	熱交換器冷却水流量監視及び運転停止インターロック	ガス温度上昇防止	・冷却水流量監視と運転停止・遮断弁閉止インターロック	非常に有効	可能性低減
	G405	圧縮機出口配管表面温度計設置及び運転停止インターロック	ガス温度上昇防止	・出口配管表面温度監視と運転停止・遮断弁閉止インターロック	非常に有効	可能性低減
	G406	熱交換器冷却水温度監視及び運転停止インターロック	ガス温度上昇防止	・冷却水温度監視と運転停止・遮断弁閉止インターロック	非常に有効	可能性低減
	G408	スナッチャータンク基礎/アンカーボルト設計(地震時転倒対策)	地震対策	・基礎上にアンカー止め	本質的対策	可能性低減
	G409	圧縮機中間段圧力上昇監視及び運転停止インターロック	配管損傷防止	・圧力指示計の設置、圧力監視と運転停止・遮断弁閉止インターロック	非常に有効	可能性低減
	G410	スナッチャータンク圧力上昇監視及び運転停止インターロック	配管損傷防止	・圧力指示計の設置、圧力監視と運転停止・遮断弁閉止インターロック	非常に有効	可能性低減
	G412	圧縮機室内の漏洩検知器設置	災害防止(漏洩)	・漏洩検知器の設置、運転停止・遮断弁閉止インターロック	非常に有効	可能性低減
	G413	圧縮機出口側圧力低下監視及び運転停止インターロック	配管開口、弁誤開放対策	・圧力指示計の設置、圧力監視と運転停止・遮断弁閉止インターロック	非常に有効	可能性低減
G414	圧縮機の運転監視及び改質器運転停止インターロック	圧縮機異常停止時の圧力上昇防止	・圧縮機運転モニタ、改質器運転停止インターロック	非常に有効	可能性低減	

3-2 70MPa充てん対応水素スタンドの安全対策一覧表(未確定)

分野	安全対策コード	安全対策名	目的	内容	有効性	リスク評価に対する目的
	G416	圧縮機ケーシング内設置(外からの飛散物対策および近隣火災対策)	飛散物、近隣火災による損傷対策	・圧縮機の室内あるいは鋼製ケーシング内設置	本質的対策	可能性低減
	G417	圧縮機クランクケース内圧力上昇防止	クランクケース内圧力上昇防止	・クランクケースからベントより大気放出できる構造	非常に有効	可能性低減
	G418	圧縮機基礎/アンカーボルト設計(地震対策)	地震対策	・基礎上にアンカー止め	本質的対策	可能性低減
	G419	逆止弁設置(圧縮機出口)	水素ホルダーへの逆流防止	・圧縮機出口に逆止弁を設置	ある程度有効	可能性低減
	G420	水素ホルダー座屈しない設計	負圧時の座屈防止	・座屈しない設計	本質的対策	可能性低減
	G421	適正な圧縮機運転停止制御	運転異常停止による負圧および逆流防止	・圧縮機運転停止操作順序を制御	本質的対策	可能性低減
	G422	適正な圧縮機運転起動制御	運転異常起動による負圧防止	・圧縮機運転起動操作順序を制御	本質的対策	可能性低減
	G423	適正なアンロード運転時制御	アンロード運転時の遮断弁異常による逆流防止	・アンロード運転操作順序の制御	本質的対策	可能性低減
	G915	圧縮機室内の換気装置設置(滞留防止対策)	災害縮小対策	・圧縮機室に換気装置設置 ・換気装置非稼働時運転停止&遮断弁閉止インターロック	効果あり	影響度低減
	G930	逆止弁設置(圧縮機出口)	大量漏洩防止	・圧縮機より車両充填するために増設した圧縮機の出口配管に逆止弁設置	効果大	影響度低減
G955	圧縮機をケーシング内に設置(圧縮機からの飛散物対策)	影響低減	・圧縮機の室内あるいは鋼製ケーシング内設置	敷地外に効果大	影響度低減	
改造	G501	逆止弁設置(バイパス配管)	逆流防止	・35MPa蓄圧器から70MPaディスベンサーへの供給ラインに逆止弁設置	ある程度有効	可能性低減
	G505	適正な圧縮機入口配管設置	温度上昇防止	・圧縮機入口側圧力の変動を一定にする制御	本質的対策	可能性低減
	G506	適正なアンロードライン設置	温度上昇防止	・アンロード配管を35MPa蓄圧器と入口遮断弁の間に接続	本質的対策	可能性低減
	G931	逆止弁設置(バイパス配管)	大量漏洩防止	・バイパス配管に逆止弁を設置	効果大	影響度低減
ヒューマンエラー	G700	手動弁誤操作、いたづら操作対策	誤操作・いたづら防止	・教育、開閉札、防火壁内への設置	有効	可能性低減
	G703	エンドプラグにロッキングワイヤ(いたづら、誤操作対策)	誤操作・いたづら防止	・バージノズル等のエンドプラグにロッキングワイヤー等取り付け	非常に有効	可能性低減
	G704	パイプラック、壁面、トレンチ内に配管設置(高圧配管踏つけ対策)	配管損傷防止	・配管の設置場所(パイプラック、壁面、トレンチ内)	本質的対策	可能性低減
	G705	トレンチ蓋を跳ね上げ式にする(トレンチ蓋落下対策)	トレンチ内配管損傷防止	・跳ね上げ式蓋の設置	本質的対策	可能性低減
	G706	充填ホースの折り曲げ防止策(ガードスプリング)	ホース損傷防止	・ガードスプリングの取り付け(折り曲げ、磨耗防止等)	非常に有効	可能性低減
	G707	手動弁の施錠など(誤操作、いたづら対策)	誤操作・いたづら防止	・ハンドルの施錠、ロッキングワイヤー設置、ハンドル取り外し	非常に有効	可能性低減
	G708	35MPa、70MPa充てんノズルが供用できない構造	誤操作防止	・70MPa充てん用ノズルが35MPa車両に接続できない構造	本質的対策	可能性低減
天災	G801	水素払出し配管の強風飛来物対策	配管損傷防止	・トレンチ配管にトレンチ蓋の設置(グレーチング等) ・架空配管にカバーの設置	本質的対策	可能性低減
	G801-1	圧縮機出口配管の強風飛来物対策	配管損傷防止	・トレンチ配管にトレンチ蓋の設置(グレーチング等) ・架空配管にカバーの設置	本質的対策	可能性低減
	G802	水素払出し配管の設計(地震対策)	配管損傷防止		非常に有効	可能性低減
	G803	避雷針の設置	落雷防止	・避雷針を設置	本質的対策	可能性低減
	G900	感震装置と緊急遮断インターロック	災害拡大防止	・感地震装置の設置 ・運転停止&遮断弁閉止インターロック	効果期待小	影響度低減

3-3 液体水素スタンドの安全対策一覧表

分野	安全対策コード	安全対策名	目的	内容	有効性	リスク評価に対する目的
全般	L01	安全弁設置	内圧上昇防止	・安全弁設置、1年毎の検査、元弁誤操作対策	非常に有効	可能性低減
	L07	敷地境界に防火壁設置(敷地外火災対策)	敷地外の火災対策	・敷地境界に高さ2mの防火壁設置	非常に有効	可能性低減
	L12	遮断弁誤動作検知対策	遮断弁誤動作防止	・遮断弁アンサーバック ・1年毎の動作確認試験	非常に有効	可能性低減
	L16	配管・機器の隔離(塩化物SCC対策)	塩化物SCC防止	・配管機器の外部からの隔離	非常に有効	可能性低減
	L52	シールオフ弁の飛散対策	人への損傷防止	・飛散防止カバー設置	非常に有効	可能性低減
	L905	水素漏洩検知機と運転停止インターロック	大量漏洩防止	・設備周辺への漏えい検知器の設置と運転停止・遮断弁閉止インターロック	効果期待小	影響度低減
	L916	ベントライン手動弁2次側に加温器とオリフィス設置	大量漏洩防止	・ベントライン元弁2次側に加温器とオリフィス設置	効果有	影響度低減
	L920	バージ弁のベントライン接続	大量漏洩防止	・バージ弁をベント接続し、オリフィス設置	効果大	影響度低減
	L950	障壁設置(噴出火災対策)	影響低減	・敷地境界距離不足の位置に、障壁を設置	敷地外に効果大	影響度低減
材料	L102	適切な材料選定(SUS316L、内面腐食対策)	腐食防止(SUS)	・SUS316Lの使用	本質的対策	可能性低減
	L105	適切な材料選定(SUS316L、水素脆化対策)	水素脆化防止	・SUS316Lの使用	非常に有効	可能性低減
	L106	適切な材料選定(SUS316L、低温脆化対策)	低温脆化防止	・SUS316Lの使用	非常に有効	可能性低減
	L901	適切な材料選定(SUS316L、水素脆化対策)	大量漏洩防止	・SUS316Lの使用	小さな開口	影響度低減
	L902	適切な材料選定(SUS316L、低温脆化対策)	大量漏洩防止	・SUS316Lの使用	小さな開口	影響度低減
検査	L152	定期的な検査と補修(炭素鋼、外面腐食)	外面腐食対策(SS)	・1年毎の外観目視検査	有効	可能性低減
	L153	定期的な検査と交換(充填ホース)	充填ホース劣化対策	・1年毎の外観目視検査 ・充填ホース外管の腐付を確認したら交換	非常に有効	可能性低減
	L159	定期的な検査(ネジ部緩み、シール材劣化対策)	ネジ緩み、シール材劣化対策	・1年毎の気密検査	非常に有効	可能性低減
	L160	定期的な検査(遮断弁の誤作動防止策)	遮断弁誤作動対策	・1年毎の動作確認試験	有効	可能性低減
	L162	定期的な気密検査(グランド漏れ)	バルブのグランド漏れ対策	・1年毎の気密検査	非常に有効	可能性低減
	L163	定期的な気密検査(シート漏れ)	バルブのシート漏れ対策	・1年毎の気密検査	非常に有効	可能性低減
ディスベンサー	L203	漏洩検知器設置(ディスベンサー内部)及び運転停止インターロック	水素大量漏洩防止	・漏洩検知器設置 ・運転停止インターロック	非常に有効	可能性低減
	L204	配管のトレンチ内設置(車両衝突対策)	配管損傷防止	・トレンチ内設置(通気性の確保、跳ね上げ式蓋の採用、噴出火災対策実施)	本質的対策	可能性低減
	L205	車両衝突防止ガードの設置	車両衝突防止	・防護柵の設置	非常に有効	可能性低減
	L206	緊急離脱カブラ設置(開発中)	車両誤発進対策	・緊急離脱カブラの設置	有効	可能性低減
	L207	緊急離脱カブラ代替措置(車止め等)	車両誤発進対策	・車止め等の実施	有効	可能性低減
	L209	シェア弁の設置(開発中)	車両衝突防止	・液水ディスベンサーにシェア弁を設置	有効	可能性低減
	L212	バルブ、機器類はディスベンサーケーシング内に収納	いたざら防止	・バルブ、機器類のディスベンサー内への収納、操作扉の施錠	非常に有効	可能性低減
	L213	ディスベンサー基礎/アンカーボルト設計	地震対策	・基礎上にアンカー止め	本質的対策	可能性低減
	L214	充填ノズル/レセプタクル接続部の漏洩検知と充填停止インターロック	災害防止(漏洩)	・充填ノズル接続部に水素漏洩検知器設置、遮断弁閉止のインターロック	非常に有効	可能性低減
	L216	ヘリウムによる気密検査	災害防止(漏洩)	・ヘリウムによる気密試験の実施 ・警報設備の設置	非常に有効	可能性低減
	L217	液検知器設置及び運転停止インターロック	過充填防止	・液検知器設置 ・遮断弁閉止のインターロック	非常に有効	可能性低減
	L218	充填ホース真空層圧力監視及び警報装置	断熱性能低下防止	・充填ホース真空層への真空計の設置 ・警報設備の設置	非常に有効	可能性低減
	L307	火災検知器	災害拡大防止(噴出火災)	・ディスベンサーへの火災検知器の設置と運転停止・遮断弁閉止のインターロック	非常に有効	可能性低減
	L906	充填作業停止ボタンの設置(ディスベンサー)	大量漏洩防止	・緊急停止ボタンの設置、遮断弁閉止インターロック	効果期待小	影響度低減
L914	ディスベンサーに衝撃センサーの設置	大量漏洩防止	・ディスベンサー内部に衝撃センサー(兼感震器)の設置と遮断弁閉止インターロック	効果期待小	影響度低減	
液水貯槽/蒸発器	L04	散水設備と温度監視装置の設置	敷地外の火災対策	・貯槽表面温度計設置 ・散水設備設置(エンジンポンプ)	非常に有効	可能性低減
	L09	液化水素貯槽の外面塗装	外面腐食防止(SS)	・炭素鋼製設備の外面塗装	非常に有効	可能性低減
	L500	液面計の設置	過充填防止	・液面計の設置	有効	可能性低減
	L501	自力式遮断弁の設置	内圧上昇防止	・PCV-41下流に自力式遮断弁の設置	非常に有効	可能性低減
	L502	圧力調整弁(PCV-61)の設置	内圧上昇防止	・圧力リリーフ弁にて敷地境界濃度1%以下で放出	非常に有効	可能性低減
	L503	自力式保圧弁の設置	内圧上昇防止	・V-111と並列に自力式保圧弁の設置	非常に有効	可能性低減
	L504	圧力警報器の設置	内圧上昇防止	・貯槽に圧力警報器の設置	ある程度有効	可能性低減
	L505	液水貯槽基礎/アンカーボルト設計	地震対策	・貯槽基礎の耐震設計	本質的対策	可能性低減
	L507	地震対策(液水貯槽の耐震設計)	地震対策	・貯槽本体の耐震設計	本質的対策	可能性低減
	L508	地震対策(液水設備の共通基礎設計)	地震対策	・液水設備の共通基礎設計	本質的対策	可能性低減
	L509	異物混入防止対策	誤操作対策	・フィルターの設置	非常に有効	可能性低減
	L510	液水貯槽真空断熱層の圧力監視	誤操作対策	・液水貯槽真空断熱層に真空計の設置 ・警報設備の設置	非常に有効	可能性低減
	L511	保安係員による対応	貯槽外損傷防止	・液水設備の断熱性能低下時の適切な対応	有効	可能性低減
	L551	蒸発器基礎/アンカーボルト設計	地震対策	・基礎上にアンカー止め	本質的対策	可能性低減
	L908	逆止弁設置(液水貯槽受入配管)	大量漏洩防止	・液水貯槽受入ラインに逆止弁設置	効果大	影響度低減
L935	貯槽加温器と加圧蒸発器の流量差設計	大量漏洩防止	・加圧蒸発器<ベントへ通じる加温器能力とする	効果有	影響度低減	

3-3 液体水素スタンドの安全対策一覧表

分野	安全対策コード	安全対策名	目的	内容	有効性	リスク評価に対する目的
液水ローリー	L601	フレキホース接続時の連結確認	漏洩防止	・接続時、漏洩のないことの点検	有効	可能性低減
	L603	液水ローリー車載容器・付属配管の水素供給事業者管理	誤操作防止	・ローリー及び付属品に対する事業者側の管理	有効	可能性低減
	L604	パージ作業時のフレキチューブ連結確認	漏洩防止	・ローリーのパージ作業時に接続部からの漏洩のないことの点検	有効	可能性低減
	L605	車両衝突防止対策(液水ローリー周り)	車両衝突防止	・ローリー設置場所にガード、障壁の設置	非常に有効	可能性低減
	L606	受入ホース真空層の圧力監視及び警報設備	断熱性能低下防止	・受入ホース真空層に真空計の設置 ・警報設備の設置	非常に有効	可能性低減
	L607	液水受入作業の監視	誤操作防止	・ローリー管理者の作業内容を保安管理者が監視	非常に有効	可能性低減
	L608	液体水素ローリーの固定(ワイヤーロープ)	地震対策	・ローリーをワイヤーロープにて固定	非常に有効	可能性低減
	L609	液体水素ローリーの誤発進防止措置	誤発進防止	・ローリー側にインターロック機構を設置	非常に有効	可能性低減
	ヒューマンエラー	L700	手動弁誤操作、いたずら操作対策(教育、札)	誤操作・いたずら防止	・教育、開閉札、防火壁内への設置	有効
L703		手動弁誤操作、いたずら操作対策(ロックワイヤ)	誤操作・いたずら防止	・パージノズル等のエンドプラグにロックワイヤー等取り付け	非常に有効	可能性低減
L704		パイプラック、壁面、トレンチ内に配管設置	配管損傷防止	・配管の設置場所(パイプラック、壁面、トレンチ内)	本質的対策	可能性低減
L705		トレンチ蓋を跳ね上げ式にする(トレンチ蓋落下対策)	トレンチ内配管損傷防止	・跳ね上げ式蓋の設置	本質的対策	可能性低減
L707		ブラインドキャップの取付	誤操作・いたずら防止	・パイオネット継手にブラインドキャップ取付	非常に有効	可能性低減
天災	L801	強風時の飛来物対策(配管)	配管損傷防止	・トレンチ配管には、トレンチ蓋の設置(グレーチング等)、架空配管にはカバーの設置	非常に有効	可能性低減
	L803	強風時の飛来物対策(液水貯槽)	貯槽外槽損傷防止	・貯槽外槽胴板の板厚(貯槽モデルでは12mm)	非常に有効	可能性低減
	L900	感震装置と緊急遮断インターロック	災害拡大防止	・感地震装置の設置と運転停止・遮断弁閉止インターロック	効果期待小	影響度低減

4. 掲載論文リスト

■学術雑誌発表論文

- [1] 菊川重紀, 小森雅浩, 尾上清明, 吉田剛, 水素スタンドのリスクアセスメント, 構造物の安全性及び信頼性, **6**, 613-618 (2007)
- [2] Shigeki Kikukawa, Consequence analysis and safety verification of hydrogen fueling stations using CFD simulation, International Journal of Hydrogen Energy, **33**, 1425-1434 (2008)
- [3] Shigeki Kikukawa, Fuyume Yamaga and Hirotada Mitsuhashi, Risk assessment of hydrogen fueling stations for 70MPa FCVs, International Journal of Hydrogen Energy, **33**, 7129-7136 (2008)
- [4] Shigeki Kikukawa, Hirotada Mitsuhashi and Atsumi Miyake, Risk assessment for liquid hydrogen supply stations, International Journal of Hydrogen Energy, **34**, 1135-1141 (2009)

■国際会議発表論文

- [1] Masahiro Komori, Shigeki Kikukawa and Kiyooki Onoue, Safety study of Hydrogen Supply Stations for the Review of The High Pressure Gas Safety Law in Japan , Proc. 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa (2005)
- [2] Shigeki Kikukawa, Hirotada Mitsuhashi, Risk management Approaches to the Japanese Regulations of Hydrogen Supply Stations, Proc. 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian (2007)
- [3] Shigeki Kikukawa, Hirotada Mitsuhashi and Atsumi Miyake, Risk Assessment for Liquid Hydrogen Supply Stations, Proc. 7th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, 334-342, St.Petersburg (2008)
- [4] Fuyume Yamaga, Shigeki Kikukawa, Hirotada Mitsuhashi, Identification of Accident Scenarios for Risk Assessment of 70MPa Hydrogen Stations, Proc. 17th World Hydrogen Energy Conference, Brisbane (2008)

■その他参考論文等

- [1] 菊川重紀, 「水素社会の未来予想図」水素インフラの現状と将来, バイオサイエンスとインダストリー, **63**, 8-578 (2005)
- [2] 菊川重紀, 水素インフラに関する規制の見直しと安全技術の開発, エンジンテクノロジー, **7**, No.6, 26-31, December, 2005
- [3] Kiyooki Onoue and Shigeki Kikukawa, Building an Infrastructure for the Utilization of Hydrogen as a Viable Energy Source in Society Present Status and Future Issues, Journal of the Japan Institute of Energy, **85**, 745-751 (2006)
- [4] 菊川重紀, 水素ステーションの安全管理, セイフティエンジニアリング, **149**, 15-20 (2008)

謝 辭

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、暖かいご指導とご鞭撻を賜りました横浜国立大学大学院 三宅淳巳教授に深く感謝の意を表し、心からお礼申し上げます。

本研究および論文執筆に関し、貴重なご指導およびご助言を頂きました東京大学 田村昌三名誉教授、横浜国立大学大学院 小川輝繁名誉教授、太田健一郎教授、大谷英雄教授、佐土原聡教授、岡泰資准教授に感謝の意を表し、厚くお礼申し上げます。

本論文をまとめるきっかけは、(株)ENEOS セルテック 尾上清明常務取締役（当時、(財)石油産業活性化センター（PEC）新燃料部水素利用推進室室長）との出会いでありました。石油精製について製造から品質管理、安全管理に至る幅広い知識はもとより、水素社会の実現に対する情熱や規制の見直しを推進する行動力を学び取ることができました。感謝の意を表し、心からお礼申し上げます。

本研究に着手した当時から多くの課題を解決しながら進めるにあたり、的確なご指導とご協力を頂きました PEC 中野賢行専務理事、工藤富之専務理事、亀井隆徳常務理事、新燃料部水素利用推進室 三橋弘忠室長、大石康之室長（現在、(株)ENEOS セルテック部長）、吉田剛氏（現在、出光興産(株)）、小森雅浩氏、山鹿冬芽氏（現在、(株)男鹿テクノ）、高木清美氏（現在、コスモ石油(株)）、森武巳氏（現在、東亜石油(株)）、鹿田敏弘氏（現在、出光興産(株)）、結城正氏（現在、東亜石油(株)）、田上博康氏、武富安昭氏、辻井貢氏、岡田泰彰氏（現在、アンシス・ジャパン(株)）に心より感謝申し上げます。

本論文は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託を受けて PEC が平成 15 年度～20 年度「水素インフラに関する安全技術研究」の一環として実施した成果をベースにしています。本研究を進めるにあたり暖かいご理解とご配慮を頂いた NEDO 燃料電池・水素技術開発部 佐藤嘉晃部長、梅花豊一主査、川村亘主査、高橋靖主査に厚くお礼申し上げます。

また、本研究の根幹をなすリスクアセスメントと安全技術に関し幅広い視点からご指導頂いた水素インフラに関する安全技術検討委員会をはじめとする各専門委員会、ワーキンググループの委員各位、関係機関・有識者の方々、ならびに実験・解析・安全性検証等にご協力頂いた連名委託先各機関（三菱重工業(株)殿、(株)日本製鋼所殿、(中)日本産業・医療ガス協会殿、(株)タツノ・メカトロニクス殿ほか）の研究員の皆様に感謝いたします。

本論文をまとめるために社会人ドクター入学を援助して頂き、また、貴重なご助言を頂きました、コスモ石油(株) 岩名利憲執行役員、井原克幸坂出製油所所長、岩崎徹研究開発部長、菊池和廣部長に厚く感謝いたします。

在学中、多大なご協力を賜りました横浜国立大学 三宅研究室の皆様には感謝いたします。

最後に私事ながら、私が社会人博士課程にチャレンジすることに関して理解と協力を頂いた妻 三樹子といつも明るく元気をくれた長女咲紀、次女都貴に感謝します。

これら、数多くの方々にご支援を頂きまして、本研究を達成することができました。改めて感謝の意を表します。