

# 40年の水素エンジン自動車の経験から 水素の安全性を考える

山根 公高

東京都市大学 総合研究所 水素エネルギー研究センター

〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1

## Hydrogen Safety for the Research and Development of Hydrogen Fuelled Internal Combustion Engine Vehicles for 40 Years

Kimitaka Yamane

Hydrogen Energy Research Center

Advanced Research Laboratories, Tokyo City University

1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo, 158-8557

**Abstract:** There is no denying that safety is the top priority in the society. Hydrogen safety has been reviewed reflecting the 40-year experience in the research and development of hydrogen fuelled internal combustion engine vehicles.

In this paper, first of all, the characteristics of hydrogen were clarified by comparing those of methane and gasoline from safety points of view. Next, safety considerations were reviewed when hydrogen at high pressure and liquid hydrogen were used. Lastly, an example for safety considerations was introduced when a new test bench for hydrogen fuelled engines was set up.

**Keywords:** Safety, Hydrogen, Engine, High Pressure, Liquid Hydrogen

### 1. まえがき

化石燃料の枯渇化問題や地球環境問題、特に地球温暖化問題を同時に解決してくれる2次エネルギーとして、この40年水素エネルギーが注目され、燃料電池自動車やエンジン自動車の研究開発が続けられている。また、水素エネルギー利用の柔軟性、すなわち、水素エネルギーは、熱エネルギーや電気エネルギーに簡単に変換できることから、化石エネルギー社会後のエネルギーとして水素の製造、貯蔵、移送および利用技術が検討されている。

社会で水素エネルギーを使うためには、最優先項目はその安全性である。今回は、無事故でここまで実施してきた40年に及ぶ水素エンジンや水素エンジン自動車の研究開発を通して、水素安全に対してどのように取り組んできたか文献等を参照しながらお話したい。今回は、小生のわずかな経験をご披露させていただきただけであり、

水素の安全について多くの研究調査〔1, 2, 3〕が実施されているので是非その文献を参照していただきたい。

### 2. 安全を左右する水素の物性

最初に、言わなければならないことは、水素は危険な物質であるということである。自動車用の燃料として使われてきたガソリン、軽油、天然ガス、プロパンも水素同様に危険な物質である。われわれは、知恵と経験をフル活用して、それらの危険物を社会に役立ててきた。今後水素を安全に利用してゆくためには、今まで使われてきた燃料と比較をしながら、水素の物性を正確に理解する必要がある。

その上に立って、危険であるガソリン、軽油、天然ガス、プロパンをわれわれのエネルギーとして使ってきたように、安全に使うことができることを、具体的な例を

表1 安全に関する水素、メタンおよびガソリンの物性値

物性値		水素	メタン	ガソリン	
—	化学式	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>7.5</sub> H <sub>17</sub>	
	分子量	2.02	16.0	107	
	理論混合割合 (Vol.%)	29.5	9.48	1.76	
安全	比重量(気体@1気圧、273K) (kg/m <sup>3</sup> )	0.084	0.651	4.40	
	自発火温度(T <sub>ig</sub> ) (K)	858	813	501 - 774	
	空気中拡散係数 (cm <sup>2</sup> /s)	0.61	0.16	0.05	
	火炎輻射率 (%)	17-25	25-33	34-43	
	* 空気中火炎伝播速度 (cm/s)	265	40	40	
危 う い	断熱火炎温度(T <sub>flame</sub> ) (K)	2318	2148	2473	
		着火限界 (Vol.%)	4-75	5.3-15	1.0-7.6
	デトネーション限界 (Vol.%)	(空気過剰率λ)	10-0.1	1.9-0.6	1.8-0.2
		(空気過剰率λ)	2.8-0.2	1.6-0.7	1.6-0.5
	* 最小点火エネルギー (mJ)	0.02	0.29	0.24	
同 程 度	* 消炎距離 (mm)	0.6	2.0	2.	
	デトネーション速度 (km/s)	1.48-2.15	1.39-1.64	1.4-1.7	
	理論爆発エネルギー (gTNT/kJ)	0.17	0.19	0.25	
	色、におい	無色透明、無臭	無色透明、無臭	無色透明、有臭	

\*: 理論混合割合状態

示しながら、社会に受け入れてもらえるよう水素エネルギー社会の実現を推進する必要があると思っている。

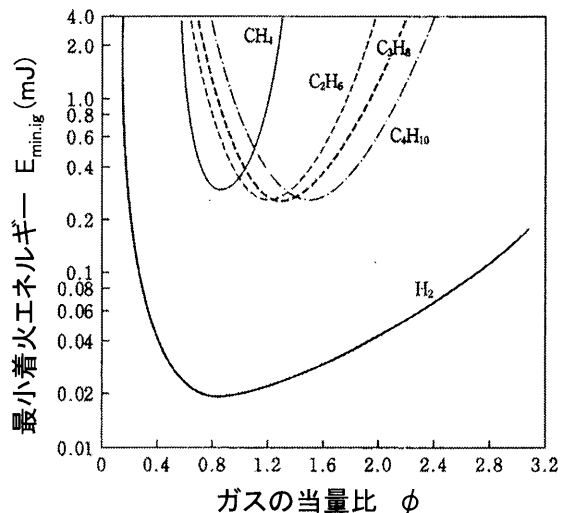
表1は、参考文献 [4] より安全に係わる特性項目を抜粋して水素、メタンおよびガソリンについて比較した表である。ガソリンやメタンに比べて高い安全性が担保される項目、安全性を危うくする項目およびガソリン、メタンと比べ安全上同等である項目がある。

2.1. 安全性が担保される項目

- (1) 比重量が小さい。万一大気中にもれても、非常に軽いため上空に速い速度で移動する。
- (2) 自発火温度が高い。かなり高い温度の熱源がないと着火しない。
- (3) 空気中拡散係数が大きい。万一大気中にもれても、直ちに空気中に拡散して着火混合気が形成し難い。
- (4) 火炎輻射率が小さい。水素の火炎が発生しても、周囲に延焼する危険が少ない。
- (5) 空気中火炎伝播速度が大きい。速く燃えて火炎がなくなってしまう。

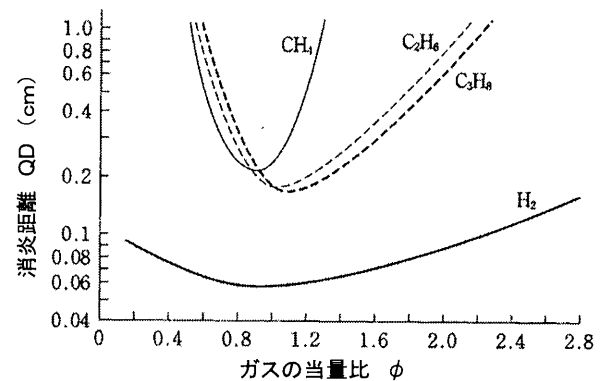
2.2. 安全性を危うくする項目

- (1) 着火限界が広い。着火し易い。
- (2) デトネーション限界が広い。デトネーションし易い。



Ref.: B. Lewis, G. von Elbe, "Combustion, Flames and Explosions of Gases", Second Ed. Academic Press Inc., New York and London, 1961

図1. ガスの当量比に対する最小着火エネルギー



Ref.: B. Lewis, G. von Elbe, "Combustion, Flames and Explosions of Gases", Second Ed. Academic Press Inc., New York and London, 1961

図2. ガスの当量比に対する消炎距離

- (3) 最小着火エネルギーが小さい。小さいエネルギーでも着火し易い。図1にガスの当量比に対する最小着火エネルギーを示す。水素は、希釈されるとその最小着火エネルギーは格段と大きくなり、火がつきにくくなる。よって、換気をすることは、有効であることがわかる。
- (4) 消炎距離が短い。一端火がついたら、消火することが難しい。図2にガスの当量比に対する消炎距離を示す。これも最小着火エネルギーと同じような傾向を示している。換気をすることは、安全性を高める。

### 2.3. ガソリン、メタンと比べ安全上同等である項目

以下の項目の危険度はガソリンおよびメタン並みである。

- (1) 各燃料燃焼ガス温度は、同じぐらいで、高温ではあるが水素だからといって温度による損傷が大きくなるならない。
- (2) デトネーションで発生する衝撃波によるインパクトは同じである。
- (3) 爆発することによる破壊は、水素だから大きいとはいえない。むしろ、ガソリンのほうが大きい。
- (4) 水素もメタンも無色透明であり、無臭である。ただしガソリン蒸気は、無色透明であるが、無臭ではない。

このようにして水素の安全にかかわる特性項目をガソリンおよびメタンと比較すると、水素だから特別に危険であるとはいいがたい。水素、メタンおよびガソリンも同じように危険である。

### 3. 高圧水素ガスおよび液体水素の安全性

水素を取り扱うときに、心して取り扱わねばならぬことがある。以下に水素ガスを扱うときにいつも頭に描いて作業してもらいたい項目を示す。

- (1) ガソリン、メタンやプロパンと同じように可燃性燃料で、取り扱いを誤れば危険な燃料である。よって、着火の三要素、燃えるもの（ガソリン、メタン、プロパン、水素等）、燃やすもの（酸素）および着火源が同時に同じ場所に存在させない。
- (2) 十分な換気をする。

- (3) 使うときは水素を漏らさない。
- (4) 漏れたら、知らせる仕組みを備える。
- (5) 漏れても水素を溜めない構造とする。

基本的には、(1)の条件を満足させるよう心掛ける。  
 (2)に示したように換気を十分して環境を可燃範囲外と酸素欠乏にならないようにする。(3)が完全にできれば、着火することがないが、経年変化、不慮の事故で水素ガスが漏れることがある。その時は水素検知器を配備しておいて(4)で対処する。知らせを受け自動的に閉じる仕組みを使って元弁を閉じる。しかし、それでも対処できない場合に備えて、漏れた水素を溜めないような構造を備えておく。

#### 3.1. 高圧ガスを扱うとき

高圧ガスを扱うときには、使用ガスは高圧である。それを認識して作業をする必要がある。そのためには、次のことを備える。

- (1) 高圧が分かるように、配管、タンク、装置等に高圧ガスであることを明示する。
- (2) 装置内圧力を表示する圧力センサーを備える。
- (3) 万一、圧力センサーが正しい値を示されなかったりすることに備えて、もしかするとこの配管または装置には、高圧ガスが残っているという意識で分解をする。特に、フレキシブル継手は、圧力がかかっている場合、配管や装置から外されるとき、思わぬ動き（あばれ）を起こす。よって、フレキシブル継手ははずすときは、継手を徐々に緩めることが必要である。

#### 3.2. 液体水素を扱うとき

液体水素は、大気圧下で極低温20Kである。熱が加われば沸騰する。その結果密閉環境では、中の圧力が上昇して装置が破壊することがある。そこで液体水素を利用する時に注意すべき項目を以下に示す。

- (1) 液体水素のような液化ガスは、リリーフ弁が備わっていない配管、容器は密閉しない。
- (2) 液体水素のような低温で液化ガスとなっているものは、停止弁、調圧弁、逆止弁、リリーフ弁等、大気的水分が凍ることによる機能不良が起こる。それを防止するため、空気との接触をさせない。どうしても空気との接触が避けられない場合は、

常温で機能させられるように操作部分を常温環境に置く。

- (3) 液体水素は、極低温であるため、断熱を施す。断熱を行っていない場合は、凍傷を受けることがあるので素手で触らない。また、充填時、噴出現象が起こる場合があるので、液体水素の飛散による凍傷を避けるため、肌を露出しない。かつ顔のように隠せないものは、顔面マスク、メガネをかける等できるだけ直接液体水素の飛散液がかからないようにする。

実験室では、何が起こるか分からないことが多いので、万全の安全体制をひく必要がある。しかし、一般のユーザーが利用する実用段階では、どんなことがあっても安全性を担保する安全システムを構築する必要がある。図3に示すように、ドイツでは既に液体水素のセルフ充填スタンドが存在している。

#### 4. 水素エンジンベンチの安全確保のスキームの例

文献[5]に、水素エンジンベンチの設置の考え方が紹介されていたので以下に要点を述べる。

##### (1) 換気量

水素ベンチでの換気装置の役目は、エンジンからの熱を外部にすてることと、エンジンから発生または漏れたガスを希釈し、外部に吐き出すことである。よって、その換気用ファンは、エンジンベンチの温度を一定に保つために、ファンの回転数を調整するようにしている。ガス漏れをガス検知器が感知したときには、換気ファンは、瞬時フル回転して換気を行い安全なガス濃度に下げる。

換気量は、最大負荷でエンジンが放出する最大熱量を換気で掃出しエンジンベンチ室内温度が所定の温度になるように換気量を決める。その後、その換気量が想定した最大ガス漏れのガスを安全なレベルすなわち最低着火濃度以下になるかを再検討すると良い。不足であれば、換気量を増量する必要がある。しかし、実用的には、1時間にエンジンベンチ室内容積の50から100倍の換気ができるようにするとよい。

しかし、このシステムは、設置するのにお金がかかるため、本学では、ドア、窓は解放して、天井は雪が舞い込むほどの隙間を開け、傾斜屋根を装備、自然対流でエ



図3. ドイツで設置された液体水素セルフ充填スタンドでBMW水素エンジン自動車に液体水素を充填している写真

ンジンベンチ室内の換気を行っている。

##### (2) ガス警報とガス検知器

ガスが漏れた場合は、できるだけ早期にそのガスを検知できるようにする。そのために、検知器のタイプや設置位置をガスの特性を加味して選ぶ必要がある。プロパンのように空気より重たいガスに対しては、床、ピットに検知器を設置する。メタンや水素のように軽いガスについては、エンジンベンチ室内で最も高い所に設置する。できればできるだけガスの漏れやすいエンジンおよびガス供給システムの近くに設置するのがよい。一酸化炭素(CO)のように、毒でかつ空気と同じぐらいの比重のガスは、床から約1.5mの高さに設置する。人間の頭部ぐらいの高さで検知することが必要である。加えて、計測レンジ1000ppmの水素検知器を吸引ダクト中、または、吸引フードを設置している場合は、吸引フード内に設置すると良い。注意警報は、最低着火濃度の10%で、警報は20%で鳴らす。これが標準になっているようである。

本学は、ガス警報器は、水素カードル室天井から約1~1.5m下に2個、各エンジンベンチ室天井から約1~1.5m下に3個、準備室とエンジン実験室の出入り口上部に1個が設置されている。その監視盤は、職員居室の壁に取り付けられ、万一作動した場合、ブザーが鳴って最小着火限界の10%で注意警報ブザー、20%で水素カードル室に設置してある空気作動緊急遮断弁が自動的に、全閉となるように装置されている。注意警報ブザーは、年に1~2回程度なることがあるが、この数年緊急遮断弁が作動したことはない。

##### (3) 電気と制御システム

本文献発行の国オーストリアすなわち欧州連合国では、

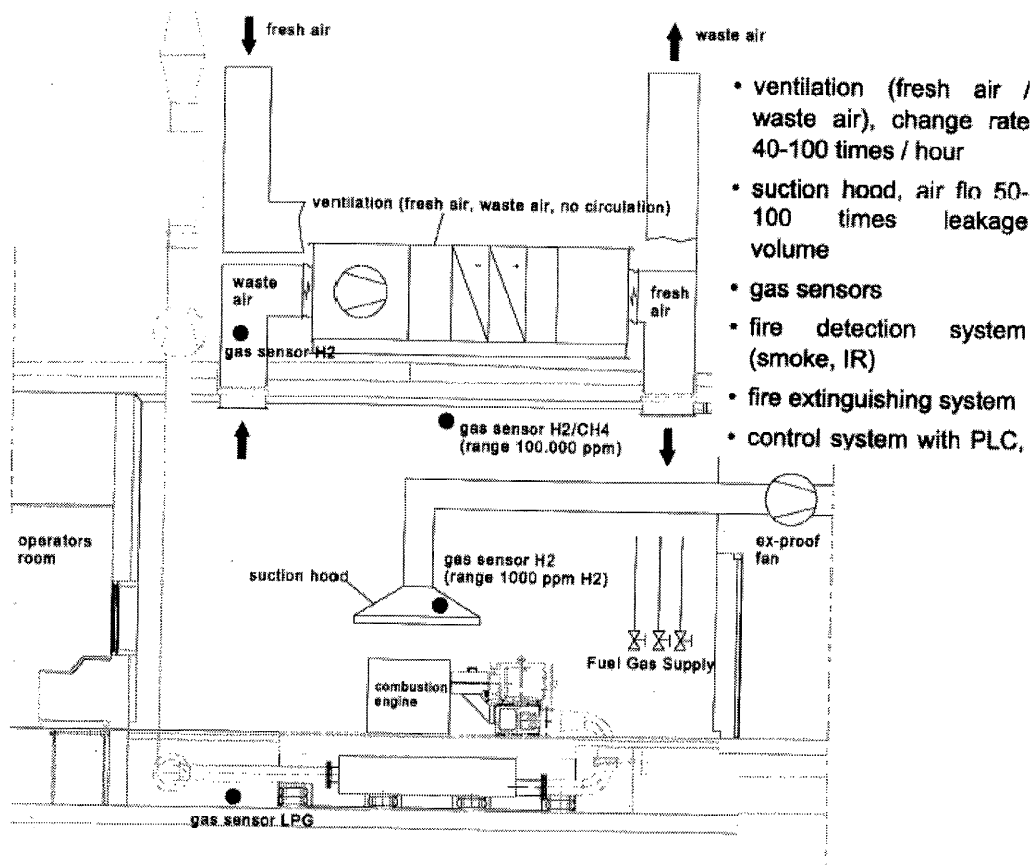


図4 水素エンジンベンチ設置例[5]

エンジンベンチは、爆発危険域と見なされていない。爆発や火災になる条件はあるが、そこで使われている装置すべて、正常時で使われるものとみなされている。爆発や火災を防ぐために2つの方法がある。一つは、着火源を断つということである。エンジンベンチの機能から言ってそれは不可能である。そこでもう一つの策を講じる。それは換気を行うことで着火限界内の濃度に環境をしないこと、ガス漏洩警戒システムで監視をして爆発や火災に至らないようにする。ガス検知器のレベルが警戒レベルの20%に達した場合、電気で動いている装置は、自動的に電気が切られるように、フェールセーフ、PLC（電力線通信）監視システムが24時間365日、ガス、火災検知システムをモニターしていて、あらゆる電源、燃料および換気システムをコントロールしている。その状況に応じ、換気量を増やして最小着火限界以下に環境濃度を下げることがいいのか、それともすべてシステムを止めて火災に備える方が良いのかを瞬時に決めている。どの場合でも被害の拡大を防ぐため燃料供給は、停止されるようになっている。図4は、オーストリアグラーツ工科大学の水素エンジンベンチ設置例を示す。

本学は、エンジンベンチ内のエンジンもしく、計測装置もしく、すべて着火源になりえる。防爆対策を装置にすることは不可能であるため、基本的には、青空天井並みの十分な自然換気環境の下で、実験をしている。最小着火範囲の20%を超えると、水素供給緊急遮断弁が自動的に瞬時に全閉になる。よって、配管中に残留している高圧ガスのみが排出される。それにより災害の拡大を防止している。

## 5. まとめ

本学は、40年の水素エンジンおよび自動車の研究開発を行ってきた。高圧ガスは10~40MPaまで使ってきた。1974年より野外で自ら液体ヘリウムを使って液体水素を製造した、また液体水素高圧ポンプを研究開発するため、液体水素を小型液体水素タンクから移充填してポンプの実験や水素エンジン自動車の液体水素タンクの実験、および液体水素を積んだ水素エンジン自動車を試走させてきた。これに参加するのは、3年間の経験を積んだものから駆け出しの学生である。何が起ころうとも不思議ではないが、ただ学生に口を酸っぱく伝えたことは、水素は、

ガソリン、都市ガス、プロパンと同じように危険なものである。水素には、ほかの燃料と異なる特異な性質がある。事故から自分を守りたければ、十分注意して実験をするように。万一、事故が起これば、どんなに研究をやりたくてもできなくなると。高圧ガス危害予防に従った教育を行っていつも「水素は危ない」という気持ちを忘れないで研究をしてきた。そのおかげで、40年間無事故で研究ができています。

## 謝 辞

本大学の水素エンジン自動車の研究開発が40年続けられてきたのは、まじめで慎重な多くの学生にめぐまれたことであり、加えて東京都環境局環境改善部環境保安課、高圧ガス協会、東京都高圧ガス協会の適切なご指導、水素ガス供給会社岩谷産業、大宝産業、丸由工材、鈴木商館、臼井国際産業、および日産、トヨタ、スズキ、日野、富士重工、ホンダ、日本ピストンリング、リケン、いすゞ、日立オートモティブ、土屋製作所、下村製作所、栃木機械製作所等日本の自動車メーカーや部品メーカーの支援と協力があおげたからである。ここに心より感謝の意を表明したい。

## 参考文献

1. 安全工学学会, 「特集号 水素利用技術と安全」, 安全工学, Vol.44, No.6, (2005)
2. (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 「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, 水素安全利用等基盤技術開発、水素インフラに関する研究開発, 平成17年5月, 平成15年度～平成16年度成果報告書04000473-0.pdf
3. (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 「水素基礎物性の研究(その1)」, 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, 平成17年3月, 平成15年度～平成16年度成果報告書04000482-0-1.pdf
4. 山根公高, 「レシプロ方式水素内燃機関の技術現状と今後」, 水素エネルギー協会会誌, 「水素エネルギーシステム」 Vol.31, No.1, p.12-19, 2006
5. Rossegger W., "DESIGN CRITERIA AND INSTRUMENTATION OF HYDROGEN TEST BENCH", 1st International Symposium on Hydrogen Internal Combustion Engines, held on 28-29, Sep. 2006,

Reports Published by Univ. Prof. Helmut Eichlseder,  
Vol.88, pp.132-148, 2006