

# 水素の爆燃実験

佐藤保和

財団法人エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部  
〒105-0003 港区西新橋 1-14-2

千葉正毅

SRI インターナショナル 先端研究開発プロジェクト担当  
〒100-0013 千代田区霞が関 3-7-1

## Experiment of Hydrogen Deflagration

Yasukazu SATO

Research and Development Division, The Institute of Applied Energy  
14-2, Nishishinbashi 1-Chome, Minato-ku, Tokyo 105-0003

Seiki CHIBA

Advanced R&D Project Development, SRI International, Japan  
7-1, Kasumigaseki 3-Chome, Chiyoda-ku, Tokyo 100-0013

Safety measures need to be taken and existing regulations should be re-examined in order to realize installing hydrogen refueling stations in towns. To obtain a basis for re-examining regulations, we have carried out experiments on hydrogen deflagration. We have observed the maximum overpressure of 1.5 kPa from the deflagration of 5.2 m<sup>3</sup> of 30% hydrogen / 70% air mixture at the range of 10 m from the gas mixture with no obstacle in open space. The maximum overpressure did not exceed the safety limit of 9.8 kPa recommended in WE-NET safe design guideline, though the overpressure was much higher than one of 0.18 kPa from the deflagration of 9.5% town gas. However, greater overpressure and flame propagation velocity have appeared when a dense obstacle exists inside of hydrogen / air mixture. The hydrogen deflagration in confined space like a tube has also generated greater overpressure than in open space.

**Keywords:** Hydrogen, Deflagration, Overpressure, Regulations, WE-NET

## 1. 緒言

安全を確保しつつ都市部に実用規模の水素充てんスタンドを設置する場合、保安距離、水素貯蔵量等に関する現行規制が見直されることが望まれる[1]。災害リスクが許容範囲にあることを実証的根拠に基づいて確認する必要があり、漏えい、拡散、着火性、火炎、爆燃等における水素の挙動を実験とシミュレーションで把握することが求められる。本稿では特に爆燃実験の結果を報告する。

## 2. 見直しが望まれる主な法規制項目

見直されることが望まれる主な法規制項目を表1に示す。これらのうち離隔距離が例えば現行圧縮天然ガススタンドの規定(敷地境界から5m)並に緩和されること、および3,000 Nm<sup>3</sup>程度の高圧水素ガスを貯蔵できることが特に求められる。そのためには水素の爆燃に伴う災害の大きさを知ることが重要となる。

表1 主な法規制

高圧ガス保安法 ①高圧ガス製造設備の離隔距離 ・第1種保安物件(学校等)から17m以上 ・第2種保安物件(住宅)から11.3m以上 ・火気から8m以上 ・他の可燃性高圧ガス設備から5m以上 ②有資格者(保安技術管理者,保安係員)の配置	消防法 ①給油取扱所構内への水素製造設備 あるいは充てん設備の設置不可		
	道路法 ①危険物積載車両の水底トンネル通行の制限		
建築基準法 ①都市計画区域における建築物建築の禁止			
	圧縮ガスの貯蔵量/処理量の上限	可燃性ガスの上限	可燃性/圧縮ガスの製造
準住居地域	350 Nm <sup>3</sup> (または Nm <sup>3</sup> /日)	35 Nm <sup>3</sup> (Nm <sup>3</sup> /日)	不可
商業地域	700 Nm <sup>3</sup> (または Nm <sup>3</sup> /日)	70 Nm <sup>3</sup> (Nm <sup>3</sup> /日)	不可
準工業地域	3,500 Nm <sup>3</sup> (または Nm <sup>3</sup> /日)	3,50 Nm <sup>3</sup> (Nm <sup>3</sup> /日)	不可

### 3. 水素の爆燃実験 [2]

#### 3.1 開放空間における爆燃

水素/空気均一混合気の開放空間における爆燃に伴う圧力変化を測定し、主に最大ピーク過圧で評価した。なお、圧力センサはピエゾ型を用い、計測・記録系を含めた時定数は100kHz以上が確保されている。

##### 3.1.1 実験方法

装置の外観を図1に示す。大きさが2.22m x 2.22m x 1.05m(H) (障害物がある場合は1.13m(H))、水素/空気混合気の体積が5.2m<sup>3</sup>の実験装置を用いた。水素濃度は20%、30%、60%の3水準とし混合気をポリエチレンフィルム内に閉じ込め、着火直前にフィルムを除去した。電気火花(40J)を用いて混合気中心底部で着火させた。また、参考のため爆薬(C4火薬(5.2x10<sup>4</sup>J))を用いて着火させる実験も行った。混合気中に障害物(鉄パイプを溶接して3次元格子状に組んだもの(パイプ部の容積10.9%))を置いたケースと置かないケースを実験した。比較のため、水素に代えて都市ガスを使用した実験(都市ガス濃度9.5vol%は水素30vol%と燃焼熱がほぼ等しい)も日本原子力研究所と共同で実施した。

図2に燃焼直後の様子を示す。上昇する高温ガスを空気中の微量の塵により見ることができる。

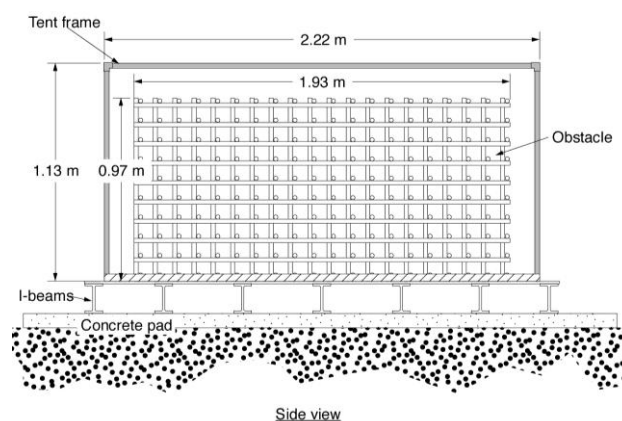


図1 開放系爆燃実験装置



図2 開放系水素爆燃の様子

3.1.2 実験結果

開放系実験の結果を表2と図3に示す。

(1) 水素と都市ガスの違い

障害物なし、電気火花による着火、ガス体積 5.2 m<sup>3</sup> の条件で、水素濃度 30%を爆燃させたときのガス端から

10m地点における最大ピーク過圧は約 1.54 kPa であった。一方、都市ガス 9.5%をこれと同じ条件で爆燃させると、最大ピーク過圧は約 0.18 kPa であった。化学量論比の空気との混合条件での比較で、水素では都市ガスより約1桁大きなピーク過圧が計測された。

表2 開放空間における水素爆燃の最大ピーク過圧とインパルス

水素濃度 (%)	障害物	点火源	最大ピーク過圧 (kPa)					インパルス (Pa·s)	火炎伝播速度 (ガス端付近) (m/s)
			着火点からの距離 (m)						
			障害物上部	混合気下端	11m	21m	41m	距離11m	
20	あり	電気火花	66	42	9.1	4.3	1.6	16	—
60	あり	電気火花	60	53	9.8	4.1	1.6	29	350
30	あり	電気火花	3,270	764	23	7.3	2.7	42	780
20	なし	電気火花	—	2.1	0.44	0.20	0.11	10	—
30	なし	電気火花	—	8.2	1.5	0.85	0.38	26	(43)
57	なし	電気火花	—	11	3.1	1.6	0.79	32	20
30	なし	爆薬	—	1,290	23	7.9	2.7	45	1,980
都市ガス *) 濃度 9.5%	なし	電気火花	—	0.40	0.18	0.09	0.03	~4	7.5

水素/空气体積: 5.2m<sup>3</sup>、インパルス: 過圧(kPa)を時間に対して積分したもの  
 障害物: 3次元格子 (参考\*) 日本原子力研究所の実験結果

(2) 距離と爆風圧

爆風圧の距離減衰については一般に TNT 爆薬の爆発における減衰が参照されるが、混合気の爆発についても例えば Baker-Strehlow のブラスト曲線により推測できる[3]。ピーク過圧、インパルスおよび距離は Sach のスケール則で標準化される。スケール化された距離  $R/(E/p_0)^{1/3}$  とピーク過圧:  $(p-p_0)/p_0$  の関係は火炎伝播速度をパラメーターとして同一曲線上に重なることが知られている[4]。ここで、

R: 距離 E: 爆発源の放出エネルギー  
 p<sub>0</sub>: 大気圧 p: 絶対的ピーク圧 である。

電気火花による点火では、点火位置からの距離 r(ガス端からの距離+1m) と最大ピーク過圧ΔPの関係は図3のようになった。障害物なしの場合、ΔP に対する r の次数は実験では-1.1であった (ΔP ∝ r<sup>-1.1</sup>)。

また、前述のように放出エネルギーに関する立方根則

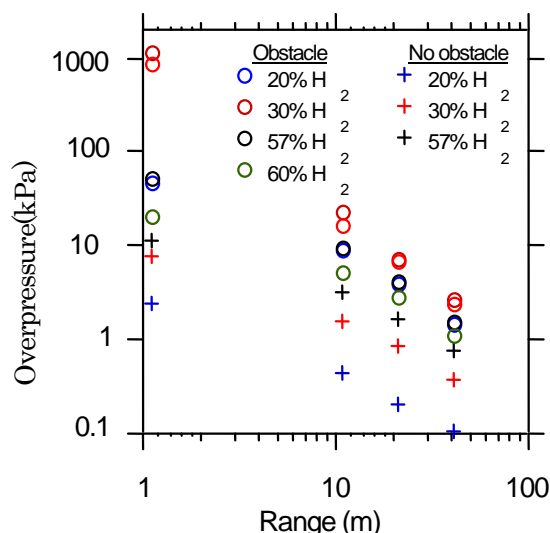


図3 水素の爆燃に伴う爆風圧(開放系)

が成り立つとすると、燃焼ガス量 W に対し、 $\Delta P \propto W^{1/3}$ となるので、均一濃度の予混合気を用いた本

実験の場合、 $\Delta P = A \cdot W^{1/3} \cdot r^{-1.1}$  の形となる。ここで、実験結果として、 $\Delta P = 1.54 \text{ kPa}$ 、 $W = 0.14 \text{ kg}$ 、 $r = 11 \text{ m}$  を当てはめると、濃度 30% の水素を障害物のない状態で爆燃させたときの関係式が、次のように求まる。

$$\Delta P = 41.5 \times (W)^{1/3} \times (r)^{-1.1}$$

$\Delta P$ : 最大ピーク過圧(kPa)  $W$ : 燃焼ガス量(kg)  $r$ : 距離(m)

例えば、水素ガスから 5 m の地点におけるピーク過圧許容限界値を 9.8 kPa としたとき\*)、漏えい、滞留の許される水素量は、この式から 2.7kg (30 Nm<sup>3</sup>) と試算

できる。ただしこれは 30% の均一な混合気が形成された場合の試算であり、実際の漏えいでは濃度分布が生ずるので、漏えい後の拡散の評価が重要となる。なお、本試算は、今回の実験結果を外挿したものであり、今後、水素量を増した実験等を実施して確認することも必要となる。

\*) 危険限界値 9.8 kPa(0.1 kgf/cm<sup>2</sup>) : コンビナート等保安規則新設設備向けの値

表 3 水素爆燃における障壁の効果及び水素量の影響

水素/空気 混合気 体積(m <sup>3</sup> )	障壁 *1)	点火源	最大ピーク過圧 (kPa)					インパルス (Pa·s)	火炎伝播速度 (ガス端付近) (m/s)
			着火点からの距離 (m)						
			混合気 下端	7m	11m	21m	41m	距離 11m	
5.2	なし	電気火花	8.2	(計算) 2.5	1.5	0.85	0.38	26	—
5.2	なし	爆薬	1,290	—	23	7.9	2.7	45	1,980
5.2	あり	電気火花	5.6	1.8	1.1	0.70	0.36	19	44
5.2	あり	爆薬	1,269	21.2	14	6.2	3.4	36	1,980
3.7	なし	電気火花	8.4		2.9	1.7	1.0	82	
3.7	なし	爆薬	1,266		66	20	8.5	194	

水素 30%/空気 70%濃度均一混合気に点火、障害物なし  
障壁：混合気端から 4m の位置に 2m(高)x10m(幅)のコンクリート

(3) 障害物の影響

3次元格子状の障害物を水素/空気混合ガス内に設置して、障害物の影響を実験した。結果を表 2 に示す。障害物が存在すると火炎伝播速度が増し、ガス中心から 11m の地点で最大ピーク過圧が障害物なしの場合の 3~15 倍になった。

(4) 障壁の効果

図 1 の開放系爆燃実験装置を用い、混合気端から 4m の位置に 2m(高) x 10m(幅)のコンクリート製障壁を設置して障壁の効果を実験した。電気火花による点火と爆薬による点火をそれぞれ実施した。結果を後述の水素量の影響とともに表 3 に示す。

障壁の後方 6m における地表面上の最大ピーク過圧は障壁により約 30%低減された。遠ざかるにつれ障壁の効果は小さくなった。また、障壁の後方 2m における地表面上でも約 30%の最大ピーク過圧の低減が推測された。

(5) 水素量の影響

大きさが 4.29m x 4.29m x 2.0m(H)、水素 30%/空気 70%混合気で、体積が 37m<sup>3</sup>の実験装置を用い、(1)と同様の爆燃実験を実施した。水素量が約 7.1 倍になるのに伴い、距離 11m におけるピーク過圧が約 1.9 倍となった。ピーク過圧が水素量のほぼ 1/3 乗に比例し、スケール則が成り立つことが確かめられた。

3.2 ダクト内における水素の爆発

3.2.1 実験方法

図 4 にダクト型爆発実験装置を示す。1辺 38.1cm の正方形を断面とし長さ 990cm のダクト上壁に圧力検知器と火炎伝播速度を計測するためのイオン電流検知器を配置し、またダクト端から 10m の地点にも圧力検知器を置いた。ダクト内全体を 30%水素で均一に満たし、閉じた一端にて電気火花で着火し爆発させた。また、ダクト内に遮蔽断面積比 0.32 で遮蔽板を 7 個、13 個、25 個それぞれ設置し、障害物の影響を試験した。

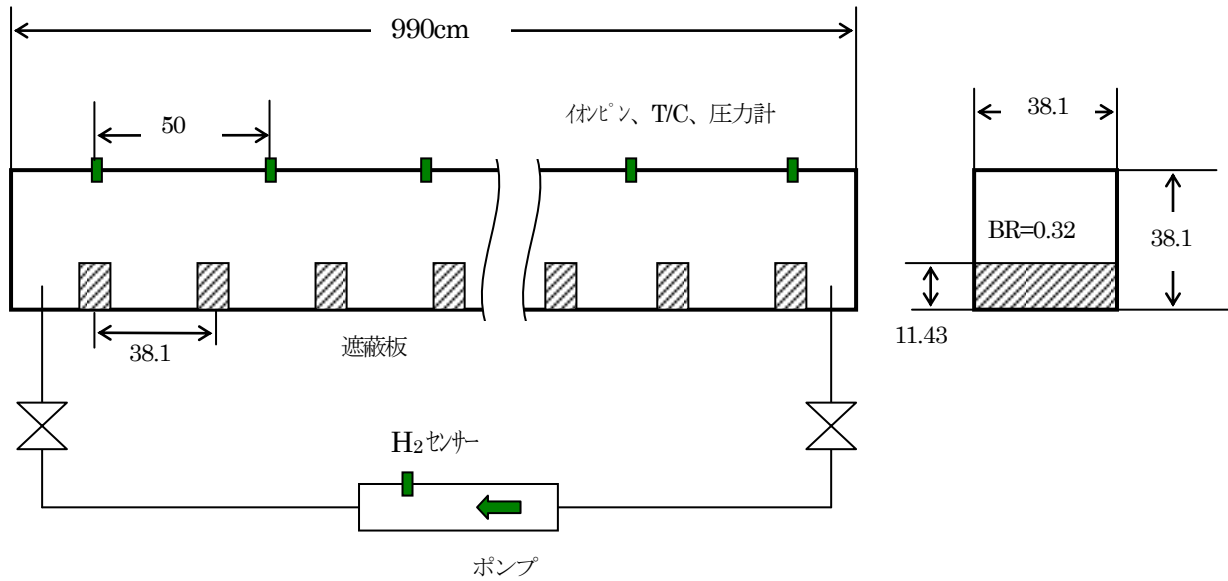


図4 ダクト型爆燃実験装置

3.2.2 実験結果

ダクト内における実験の結果を表4に示す。遮蔽板がない場合で開放した反対側のダクト端における最大ピーク過圧は約 320 kPa、火炎速度は約 610m/s となった。開放系の場合(8 kPa)に比べ、壁で囲われることでピーク過圧は顕著に増加した。ダクト内に遮蔽板7個を置くと、ダクト端における最大ピーク過圧は約 1,580 kPa、火炎

速度は約 1,230m/s となりさらに増大した。図5にダクト内での火炎伝播の結果を示す。ダクト内を火炎が伝播するにつれ、特に遮蔽板が存在すると伝播速度が著しく増大した。

トンネル内等の半閉鎖空間で水素/空気混合気に着火すると、爆風により大きな災害が引き起こされる恐れがある。

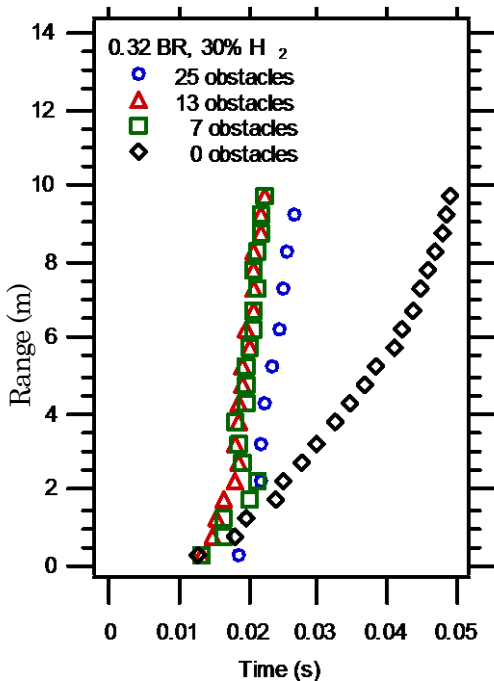


図5 ダクト内でのイオン電流検出器位置と火炎到達時間

障害物	最大ピーク過圧(kPa)		火炎伝播速度 (ダクト端付近) (m/s)
	ダクト端	ダクト端から10m	
遮蔽板なし	320	12	610
遮蔽板7個	1,580	11	1,230
遮蔽板13個	1,720	11	1,460
遮蔽板25個	1,050	9	1,660
(参考) 開放系障害物なし (水素濃度 30%)	8	1.5	(43)
開放系障害物なし (水素濃度 57%)	11	3.1	20

ダクト : 38.1 x 38.1 x 990 cm (角型 4 面壁)  
 遮蔽板 : ダクト断面遮蔽率 0.32 水素濃度 : 30 vol%

表4 ダクト内における水素の爆燃実験結果

#### 4. おわりに

近年、発生件数が減少したものの、かつて石油精製等  
高圧水素を大量に取り扱う工場において水素の爆発に伴  
う事故事例がいくつか報告された。産業界で取扱い経験  
の乏しい高圧（～40MPa）水素を取り扱う水素スタンド  
を都市部に設置する等のために現行の法規制を緩和する  
にあたっては、想定される事故事象の発生頻度とその被害  
の大きさを推定して、災害リスクが許容範囲にあること  
が確認される必要がある。水素の性質は天然ガス等  
他の燃料とは大きく異なるので、規制緩和にあたり新た  
な安全対策を施すことが求められる可能性がある。また  
一方では、水素の普及を図るうえで、コスト高となる過  
剰、不必要な安全対策を強制することは避けなければな  
らない。そこで、水素の性質等を明確にして災害リスク  
評価の精度を高めることが求められることになる。本研  
究の結果が関連法令、基準の見直しに役立ち、水素普及  
のための一助になれば幸いである。

#### 謝 辞

本研究はNEDOからの委託を受け、WE-NET  
プロジェクトの一環として実施された。ご指導してい  
ただいたNEDO、WE-NETタスク2委員会委員、三菱重  
工業(株)の方々に感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] 副大臣会議燃料電池プロジェクトチーム：  
燃料電池プロジェクトチーム報告書，平成14年5月
- [2] 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成13年度  
成果報告書 NEDO-WE-NET-0102,平成14年3月
- [3] R.A. Strehlow, R.T. Luckritz, A.A. Adamczyk and  
S.A. Shimp, COMBUSTION and FLAME, **35**,  
297-310, 1979
- [4] M.J. Tang and Q.A. Baker, Process Safety Progress,  
**18**(3), 235-240 (1999)