平成24年度 経済産業省委託費

水素ネットワーク構築導管保安技術調査

(水素拡散挙動調査)

報告書

平成 25 年 3 月

独立行政法人産業技術総合研究所

- 1. 調査研究の目的等
 - 1.1 調査研究の目的
 - 1.2 調査研究の概要
- 2. 調査研究の結果・評価
 - 2.1 水素の拡散挙動・着火影響評価
 - 2.1.1 野外実験場及び設備の概要
 - 2.1.2 拡散挙動調査
 - 2.1.2.1 測定方法
 - 2.1.2.2 測定結果
 - 2.1.2.3 水素拡散濃度変化を再現するシミュレーションの実施
 - 2.1.3 着火影響評価
 - 2.1.3.1 測定方法
 - 2.1.3.2 測定結果
 - 2.2 管内ガス置換挙動調査
 - 2.2.1 実験設備の概要
 - 2.2.2 実験方法
 - 2.2.3 実験結果
 - 2.3 文献調查

1. 調査研究の目的等

1.1 調査研究の目的

本調査研究の目的は、一般需要家向けの水素のパイプライン供給に際して、保安確保の ために必要となる導管等のガス工作物について、そのネットワークとしての運用に係る安 全基準や工法等の具体的措置を明確化するため、これに有用な基盤技術、知見を整理し、 ガス事業法の技術基準等の見直しに反映させることで、水素ネットワーク社会構築におけ る保安確保を図ることである。

1.2 調査研究の概要

水素は、燃焼や燃料電池での酸化反応によりエネルギーを放出する際、生成物として水 だけを排出するクリーンな燃料として、その普及が期待されている。水素の物性は古くか らよく研究・報告されており、近年では最小着火エネルギー、火炎伝播速度、予混合爆発 における爆風圧、爆轟遷移転移距離等、燃焼爆発に関する危険性を評価するための実験的 データも多く報告されている。しかしながら新たなシステムを用いて可燃性ガスを供給・ 使用するにあたっては、そのシステム全体の安全性の確認が必要であり、そのためには新 たなシステムで起こりうる事故の発生頻度と被害程度が許容できる程度かを調査し、必要 な場合には許容可能な範囲に収めるための対策をとる必要がある。

本調査では、中低圧の水素のパイプライン供給を想定した場合に考え得る水素の拡散挙 動に係る調査を実施した。調査項目としては(1)水素の拡散挙動・着火影響調査、(2) 管内ガス置換挙動調査、並びに(3)文献調査である。

(1) 水素の拡散挙動・着火影響調査については、腐食によって発生する漏えい孔を想 定して配管に設けた模擬孔からの水素漏えいにおいて調査を行った。ここでは、都市ガス 配管などに発生が見られる腐食孔を参考にして定めた \$ 0.8mm、\$ 2mm、\$ 5mm、及び \$ 10mmの模擬孔径に対し、2.5kPa、15kPa、100kPa、及び 300kPa のいずれかの水素圧力 によって発生する漏えい水素の拡散挙動の調査と着火影響の調査を実施した。測定に際し ては、非着火状態では漏えい後の水素拡散濃度分布を、漏えいした水素に着火した状態で は火炎のサイズ、爆風圧及び火炎からの熱発生の特性を対象とした。火炎からの熱発生に ついては輻射熱の距離依存性について測定を行った。補足として熱電対による燃焼後のガ ス温度の測定も試みた。水素の漏えい量は大量となる条件があるため、調査は野外実験に よって実施した。実験と平行し、実験で得られた水素拡散濃度変化を再現するシミュレー ションを流体計算によって実施し、実験結果との比較検証から水素圧力-漏えい孔径-水素拡 散濃度分布間の相関について吟味した。

(2) 管内ガス置換挙動調査については、空気の充満した新設もしくは交換導管に直接 水素を導入することは危険性が著しく高く避けねばならないことを踏まえ、一定量窒素を 供給し不活性化した後に水素を導入するという作業を想定した模擬実験を行い、効率をな るべく損なわずに空気から水素への置換を安全に行う方法について検証した。試験に供する管としては、 $\phi 25$ mm及び $\phi 50$ mmの内径を有し長さ 50mの継ぎ目のない樹脂管と、 $\phi 25$ mmで長さ 5mのJIS G3452 SGP管を4本連結し合計 20mとした管の合計で3通りの管を直線状に設置したものを用いた。(1)と同様に扱う水素が大量となるため、野外実験で調査を実施した。

(3) 文献調査については、 高温物、静電気、金属火花、あるいは電気火花といった 水素導管工事の際の着火源として想定される要因と着火現象との関係について記載された 文献の調査と体系的な取りまとめを行い、水素パイプライン供給事業の実施に適した知見 とすることを目的として実施した。

2. 調査研究の結果・評価

2.1 水素の拡散挙動・着火影響調査

水素供給パイプライン網のうち、一般需要家向けに配される中低圧(=1MPa 未満)の水 素を蓄えた供給導管は数多く配備されることになり、その配備数に比例して腐食により孔 が生じる頻度も高まると考えられる。仮に孔による漏えいが発生した場合、可燃性ガスの 中でも特に容易に着火し、なおかつ着火時に引き起こす被害の規模が大きいガスの一つで ある水素が周囲に拡散することになり、著しく危険である。事業実施にあたっては、この ような水素の漏えいに由来する災害を未然に防ぐ、もしくは被害を許容できる程度以下に 低減するための方策を採らねばならず、そのために実際に漏えいの発生した際の危険性の 調査を行う必要がある。ここで、調査すべき対象としては主に「仮に漏えいが発生した際 に周囲に拡散する水素の濃度分布」及び「着火が生じてしまった際に火炎が周囲に及ぼす 影響」の2点に絞ることができる。平成 23 年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査 (水 素漏えい・拡散挙動調査)事業においては、比較的漏えい孔が小さく(モデルとして漏え い孔径 0.8mm、及び 2mm) なおかつ導管内の水素の圧力が低い場合(2.5kPa、10kPa、 15kPa)において、水素漏えい時の拡散濃度分布、及び着火挙動について調査を行った。本 事業ではこれらの結果を踏まえ、より漏えい孔径が大きい、もしくはより圧力が高い、水 素の漏えい量が多くなる条件において調査を行うことを目的とした。調査項目としては「腐 食を想定した模擬孔を有するモデル配管から水素が漏えいした際の大気中の水素濃度分布」 並びに「万一着火した場合の火炎の挙動」の2点である。このうち「大気中の水素濃度分 布」ついては、測定値の信頼性を担保し、なおかつ危険性の事前予知の観点から普遍性を もたせるためには、計算によって測定値を検証すること、並びに危険性の推算に用いうる 計算手法を導くことは欠かせない。そのため、本調査では実験と併せて、実験結果を再現 するシミュレーションを実施し、実験結果との比較検証を行った。

モデル配管としては肉厚 3.2mm/内径 25mm、長さ 3m の炭素鋼管(JIS G3452 SGP) を選び、径 0.8mm、2mm、5mm、及び 10mm の模擬孔を設けた合計 4 種の管を用いた。 それぞれの模擬孔径の管に対し内圧は 2.5kPa、15kPa、100kPa、及び 300 k Pa のいずれ かとし、合計で 10 パターンの模擬孔径:内圧の組合せについて調査を行った。

4

2.1.1 野外実験場及び設備の概要

実験に際しては、茨城県 日立セメント株式会社 太平田鉱山(日立市諏訪町 1233)の 旧堆積場を借用し、平成 24年10月29日~11月2日、11月19日~11月23日、12月10 日~12月14日、及び12月17日~12月21日の4週間、合計20日間に渡って行った。野 外実験場の位置、及び配置については図2.1.1.1~図2.1.1.3に示す。民家までの距離は最短 で約1kmであり、発生する可能性のある騒音の程度を試算し、日立市役所等への事前説明 を行った上で実施した。

水素は充填圧 20MPa 未満のカードルを用い、窒素及び空気は充填圧 14.7MPa 未満の 47 Lボンベを用いて供給した。配管で連結されたガスは常に合計で 300m³未満であり、また 予備の水素カードル並びに各ボンベも 30m 以内の距離に設置した合算の容量が常に 300m³ を超えないように配慮した。安全のため水素が配管内に供給されている状態では、全ての 人員は常に防護壁を備えた観測所内に退避の上操作・計測を行い、水素の存在する全ての 設備から人員の退避した観測所までは常に 70m 以上を確保するよう配置した。

管内水素圧力については MKS バラトロン 122A 及び 722B を用いてモニターし、水素流 通時に設定圧力になるように減圧弁を調整した上で測定を行った。



図 2.1.1.1 野外実験場(太平田鉱山)位置図



図 2.1.1.2 野外実験場配置図



図 2.1.1.3 野外実験場内設備概略図

2.1.2 拡散挙動調查

2.1.2.1 測定方法

水素濃度分布測定については、合計で 50 個の水素濃度センサー(設置 52 個、内故障 2 個)を用い、これを漏えい孔上 3m×3m×3m の空間に組み立てられた木製のやぐら内部に 針金を用いて設置することによって、同時に多点の測定を行った。

用いた水素濃度センサーについて、図 2.1.2.1.1 並びに図 2.1.2.1.2 に示す。水素濃度セン サーは新コスモス電機株式会社製接触燃焼式センサー(合計 26 個)、及び同社製気体熱伝 導式センサー(合計 26 個、内 2 個故障)である。用いた接触燃焼式センサーは測定に際し 時間・濃度共に感度が高いが、測定可能な濃度 0~10%乃至は 0~8%(vol%、空気中)で ある。気体熱伝導式センサーは接触燃焼式センサーに比べ時間・濃度共に感度が劣るが測 定可能な濃度は 0~100%(vol%、空気中)である。これらのセンサーの特性を鑑み、水素 濃度が低いことが予想され測定にあたって感度が要求される位置に接触燃焼式センサーを、 水素濃度が高いことが予想され要求される感度が相対的に低い位置には気体熱伝導式セン サーを配置するよう配慮した。木製やぐらの概観について図 2.1.2.1.3 に、やぐらと試験配 管の位置関係について図 2.1.2.1.4 に、やぐら内の水素濃度センサーの配置図について図 2.1.2.1.5 に示す。また、測定を行った漏えい孔径、及び水素圧力の組合せを表 2.1.2.1.1 に 示す。

各水素濃度センサーの出力は専用のアンプを通じてデータロガー(HIOKI 8861-50)に よって電圧値として計測した。データロガーはLANケーブルを通じて観測所内に設置し たPCからリモートで制御し、測定値は最終的にPCに取得した。目標とする水素濃度は、 各濃度センサーの更正曲線を基に電圧から濃度に換算して得た。

実験は屋外で行うために、自然風の影響を強く受け、測定値も時間と共に変動した値を とる。この影響を評価するために、測定は3分以上5分以下の連続した時間内で継続して 取得し、各々の位置のセンサーについて時間毎に水素濃度の変動を追跡した。

なお、野外実験において上記の調査を行うに先立ち、センサーの時間応答性や濃度分解 能、及び測定手法全般に関する事前の検証を行うために、産業技術総合研究所つくば西事 業所内に存在する可燃性ガス風洞等を用いて予備実験を行った。

8



図 2.1.2.1.1 接触燃焼式水素濃度センサー



図 2.1.2.1.2 気体熱伝導式水素濃度センサー



図 2.1.2.1.3 計測やぐら



図 2.1.2.1.4 計測やぐらに設置された試験配管



図 2.1.2.1.5 水素濃度センサー配置図

C +	漏えい孔径				
庄刀	0.8mm 2mm		5mm	10mm	
2. 5kPa			1-1-5	1-1-8	
15kPa			1-1-6	1-1-9	
100kPa	1-1-1	1-1-3			
300kPa	1-1-2	1-1-4	1-1-7	1-1-10	

表 2.1.2.1.1 測定を行った漏えい孔径と水素圧力の組合せ

2.1.2.2 測定結果

実際に測定を行った場合の、単一のセンサーが示す測定波形の一例を図 2.1.2.2.1 に示す。 前述の通り測定は自然風の影響を受け、水素濃度は 0%から最大値の間で時間毎に大きく変 動する。事前に産業技術総合研究所内にて行った予備実験によってセンサーの時間応答性 は十分確保されていることが確認されており、各瞬間の水素濃度は十分信頼に値すると考 えられる。時間変動のあるデータの評価手法については様々な考え方があるが、本調査で は漏えい孔から離れていても、着火の危険性を有する水素濃度が発生しうる位置を把握す ることが主たる目的であることを鑑み、継続した測定期間の中で各水素濃度センサーが観 測した最大濃度を以て測定値を代表した。

図 2.1.2.2.2~図 2.1.2.2.5 に測定結果を示す。漏えい孔の鉛直線上(漏えい孔からの水平 距離=0.0m)における、測定値の高さによる依存性を比較すると、どの条件でも全体的な 傾向は同様であり、漏えい孔に近いほど水素濃度は高く、離れるにしたがって濃度は減衰 する。ただし、漏えい孔径が小さくなるほどバラつきは顕著になる。特に漏えい孔径 0.8mm、 2mm の条件では管内水素圧力が高くなっても漏えい量、噴出速度は共に大きくなく、自然 風の影響などを受けて水平方向へと水素が分布する領域の移動が比較的優勢であり、相対 的に高さ方向に高濃度に分布する領域が狭くなり水素が検出されにくくなる。ただし、稀 に水素が高濃度となる領域がセンサーを通過するので突発的に高い濃度の水素が検出され る。漏えい孔径 5mm の条件では漏えい量、噴出速度共に大きく、特に 300kPa の水素圧力 ではジェット状に近くなり垂直方向への高濃度の分布が顕著である。漏えい孔から水平に 1.1m 離れた位置では水素自体の拡散と自然風の影響などを受け、300kPaの条件でも1.5 ~2.5m の範囲で4%を超える濃度が観測される。100kPa以下では漏えい量が減少し拡散も 速やかになり、1.1m 以上離れた領域で 4%を超える水素濃度は検出されない。漏えい孔 10mm の条件では漏えい量が多くなり、特に 300kPa ではほぼ上方に噴出速度を保ち続け 横方向への拡散が劣勢で、結果的に高さ 3m までの範囲では水平方向に 4%を超える水素濃 度が検出されない。15kPa でも上方の噴出が優勢であるがやや水平方向への拡散が 300kPa よりも多くなる。2.5kPa では水平方向への拡散が優勢で、漏えい孔に近い高さ 0.5m 付近 では 1.1m 離れていても高濃度の水素が検出される。さらに高さが高くなるにつれ、水素の 拡散は進み結果として水素濃度は減衰していく。

以上より、漏えい孔と管内水素圧力に依存した水平方向の水素濃度分布が明らかになり、 水素の場合上方への噴出による速度依存性が顕著で、噴出速度が大きいと多くが上方へと 達し水平方向には検出されにくいことがわかった。ただし、噴出速度や噴出量が大きくと も上方には高濃度の水素濃度の領域が存在すること、及び本測定に用いたやぐらより高い 位置では水平方向にも水素濃度の高い領域が広がると考えられるので注意が必要である。 また、多くの時間は水素濃度が低くとも突発的に高濃度の水素が接近することがあること にも十分留意するべきである。



図 2.1.2.2.1 測定波形の例 漏えい孔径 10mm Φ, 15kPa, 高さ 1.2m, 水平 0.75m 位置

漏えい孔からの水平距離 = 0.0m



漏えい孔からの水平距離 = 1.1m

漏えい孔からの水平距離 = 2.1m



図 2.1.2.2.2 漏えい孔径=0.8mm の場合

漏えい孔からの水平距離 = 0.0m



漏えい孔からの水平距離 = 1.1m

漏えい孔からの水平距離 = 2.1m



図 2.1.2.2.3 漏えい孔径=2mmの場合



漏えい孔からの水平距離 = 0.0m



図 2.1.2.2.4 漏えい孔径=5mmの場合





図 2.1.2.2.5 漏えい孔径=10mmの場合

2.1.2.3 水素拡散濃度変化を再現するシミュレーションの実施

流体解析ソフトウェアを用いて、ピンホールからの水素漏えい・拡散野外実験に対応す るシミュレーションを実施した。シミュレーションを実施した圧力と漏えい孔径の関係を 表 2.1.2.3.1 に示す。

実験条件	解析 1-1	解析 1-2	解析 1-3	解析 1-4	解析 1-5
圧力(kPa)	100	300	100	300	2.5
漏えい孔径(mm)	0.8	0.8	2	2	5
実験条件	解析 1-6	解析 1-7	解析 1-8	解析 1-9	解析 1-10
圧力(kPa)	2.5	15	15	300	300
漏えい孔径(mm)	10	5	10	5	10

表 2.1.2.3.1 数値シミュレーションの条件(圧力と漏えい孔径)

2.1.2.3.1 解析条件

支配方程式を Navier-Stokes 方程式として、定常解析モデルを適用して水素漏えい・拡 散シミュレーションを実施した。漏えい範囲が漏えい孔の大きさと管内圧力に依存するた めに、計算場の大きさは各条件を考慮して設定した。代表的な計算場を図 2.1.2.3.1 に示す。 漏えい孔は計算場の底面に 2 次元的に配置し、孔中は 0.2mm のメッシュサイズで構成した。 孔から離れるに従い、計算格子幅が広 0.02%ずつ増加するように格子幅を調整した。解析 モデルは圧力ベース圧縮性 Navier-Stokes 方程式、乱流解析はレイノルズ平均モデル (RANS)、ならびに 2-Equation Realizable k- ε モデルを採用した。計算場の気体は水素 と空気の 2 種とし、理想気体の混合気体とみなして密度等の状態量を決めた。計算に使用 したパラメータを表 2.1.2.3.2 に示す。漏えい孔は境界面とし、境界面で流れが鉛直方向に なるような圧力境界を設定した。

熱伝導係数, k (W/m-K)	0.0454
粘性係数, μ(kg/m-s)	1.75 x 10-5
拡散係数, Di',j' (m2/s)	2.88 x 10-5
大気圧, Pop (Pa)	101.325
重力係数, g(m/s ²)	9.81
乱流シミュット数, Sct	0.7

表 2.1.2.3.2 計算に用いた酸水素混合気体の各係数



図 2.1.2.3.1 代表的な計算場 (サイズ:2×2×7m, 総要素数: 1980892, 総接点数: 1935780)

2.1.2.3.2 解析結果

シミュレーションで得られた漏えい孔からの水素漏えい拡散濃度分布を図 2.1.2.3.2~図 2.1.2.3.11 に示す。濃度分布は体積分率で 4%から 20%の範囲で表した。漏えい孔径 2 mm と 0.8mm について水素圧力 100kPa と 300kPa の条件で水素濃度分布の顕著な違いは確認 されなかった。図 2.1.2.3.12 は漏えい孔上方への水素濃度分布に及ぼす漏えい孔径の影響を、 図 2.1.2.3.13 は水素濃度分布に及ぼす水素圧力の影響を示した。調査した範囲では、圧力の 増加による漏えい範囲の拡大よりも、漏えい孔径の増加による同範囲の拡大の方が顕著で あった。図 2.1.2.3.14~図 2.1.2.3.16 は、実験とシミュレーション結果との比較であり、そ れぞれ、漏えい孔 2mm, 5m, ならびに 10mm の場合である。漏えい孔 2mm の場合は 100kPaと300kPaの水素圧力についてプロットした。圧力差が3倍程度では実験も計算も 圧力による顕著な違いは確認されなかった。2mmの場合は計算の方が実験よりも高い水素 濃度を示したが、濃度変化の傾向は一致した。 孔径 5mm と 10mm の場合は、 300kPa の圧 カに対して、漏えい孔から 2m 以下の範囲で実験が計算よりも高い水素濃度分布を示した。 15kPa の圧力では数値解析と同等かあるいは漏えい孔から 2m 以上の離れた位置で計算値 が高い濃度分布を示す。2.5kPaでは全体的に計算が実験よりも高い水素濃度分布を示した。 漏えい孔からの高さに対して実験で得られた最大濃度とシミュレーション結果を比較する と 2.5kPa と 15kPa について比較的良い一致を示した。



図 2.1.2.3.2 実験条件 1-1 のシミュレーション結果 (内圧 100 (kPa),漏えい孔径 0.8 (mm))



図 2.1.2.3.3 実験条件 1-2 のシミュレーション結果 (内圧 300 (kPa),漏えい孔径 0.8 (mm))



図 2.1.2.3.4 実験条件 1-3 のシミュレーション結果 (内圧 100 (kPa),漏えい孔径 2 (mm))



図 2.1.2.3.5 実験条件 1-4 のシミュレーション結果 (内圧 300 (kPa),漏えい孔径 2 (mm))



図 2.1.2.3.6 実験条件 1-5 のシミュレーション結果 (内圧 2.5 (kPa),漏えい孔径 5(mm))



図 2.1.2.3.7 実験条件 1-6 のシミュレーション結果 (内圧 2.5 (kPa),漏えい孔径 10 (mm))



図 2.1.2.3.8 実験条件 1-7 のシミュレーション結果 (内圧 15 (kPa),漏えい孔径 5 (mm))











図 2.1.2.3.11 実験条件 1-10 のシミュレーション結果 (内圧 300 (kPa),漏えい孔径 10 (mm))



図 2.1.2.3.12 漏えい孔上方への水素濃度分布に及ぼす漏えい孔径の影響



図 2.1.2.3.13 漏えい孔上方への水素濃度分布に及ぼす圧力の影響



図 2.1.2.3.14 漏えい孔径 2 mm に関する実験と計算結果との比較



図 2.1.2.3.15 漏えい孔径 5 mm に関する実験と計算結果との比較



図 2.1.2.3.16 漏えい孔径 10 mm に関する実験と計算結果との比較

2.1.3 着火影響評価

漏えいした水素に着火することによって周囲に被害を及ぼす可能性のある現象として、 着火による爆風の発生と火炎が発する熱の2点が挙げられる。そのため、着火影響評価と しては、「着火する瞬間の爆風圧」と「着火し火炎が継続的に存在する状態での火炎サイズ、 輻射熱、及び火炎上方の気体温度」の2つに分類して測定を行った。

2.1.3.1 爆風圧測定

(1) 測定方法

測定に際しての漏えい孔径及び管内水素圧力の条件、並びに対応する実験ナンバーを表 2.1.3.1.1 に示す。

圧力	漏えい孔径					
	0.8mm	2mm	5mm	10mm		
2. 5kPa			2-1-5	2-1-9		
15kPa			2-1-6	2-1-10		
100kPa	2-1-1	2-1-3	2-1-7	2-1-11		
300kPa	2-1-2	2-1-4	2-1-8	2-1-12		

表 2.1.3.1.1 爆風圧測定における漏えい孔径・管内水素圧力と実験ナンバー

実験に際しては、バルブを開け数秒待ち管内水素圧力が目標値に達して漏えいが安定か つ継続的に行われていることを確認したのちに、着火を行い、併せて着火開始の瞬間をト リガーとして爆風圧センサーによって測定を行った。着火は漏えい孔上に数 mm の間隙を 設けて設置した 2 本のタングステン棒電極において、定格 2 次出力 15kV のネオントラン スを用い電極間に放電を生じさせることによって行った。

爆風圧の測定に用いた爆風圧センサーの配置を図 2.1.3.1.1 に、センサーの各 ch の距離を 表 2.1.3.1.2 に示す。漏えい孔からおよそ 1.5、3、6、12、24mの距離に爆風圧センサーch1 ~5 を設置し、さらに 3mの距離ではおよそ 90 度ずつ回転させた位置に ch6~8 を設置し、 合計 8 点で計測を行った。爆風圧センサーは地面から 1m の高さに専用のホルダー(整流 板)で側圧を測定するように設置した。爆風圧センサーはピエゾ圧力素子方式であり、PCB
106B52(定格出力 725mV/kPa)及び 378B02(定格出力 50mV/Pa)を使用した。各々の
センサーのライン・ドライバー(H-TECH Triple mode 30222)で増幅し、low noise ケーブルを通して波形記憶装置(HIOKI 8861-50)に入力・記録した。



図 2.1.3.1.1 爆風圧センサー計設置位置

表 2.1.3.1.2 爆風圧センサーの各 ch の噴出口からの距離(m)

	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8
水平距離(m)	1.56	3.05	5.97	11.95	23.99	2.99	2.98	3.12
角度(deg.)	210	206	205	205	205	109	27	292
高さ(m)	0.55	0.56	0.53	0.54	0.52	0.55	0.57	0.54
(2) 測定結果

実験ごとのピーク爆風圧

実験ごとのピーク爆風圧を距離に対してプロットしたグラフを図 2.1.3.1.2 及び図 2.1.3.1.3 にそれぞれ示す。ピーク爆風圧は実験 No.2-1-12(φ10 mm、300 kPa)において最 大となり、漏えい孔から 1.5 mの距離で1 kPa 程度となった。いずれの測定値でも、漏え い孔からの距離、爆風圧ともに対数でプロットすると、距離に対する爆風圧の減衰はほぼ 直線的であることがわかる。これはほぼ等方的に爆風圧は減衰し、その減衰の程度はほぼ 距離の2乗に対し反比例の関係となっていることを示す。



図 2.1.3.1.2 距離対ピーク圧力(1/2)



図 2.1.3.1.3 距離対ピーク圧力 (2/2)

漏えい孔径ごとの管内水素圧力対ピーク爆風圧

漏えい孔径ごとに管内水素圧力対ピーク爆風圧を整理したものが図 2.1.3.1.4 である。等 しい漏えい孔径であっても、管内の水素圧力が増加し漏えい量が増すごとに発生する爆風 圧が大きくなる傾向が明確である。



図 2.1.3.1.4 漏えい孔径ごとの管内水素圧力対ピーク爆風圧

管内水素圧力ごとの漏えい孔径対ピーク圧力

管内水素圧力ごとに漏えい孔径対ピーク爆風圧を整理したものが図 2.1.3.1.5 である。管 内水素圧力に対する爆風圧の関係と同様に、等しい管内水素圧力であっても、漏えい孔径 が拡大し漏えい量が増すごとに発生する爆風圧が大きくなる傾向が明確に示されている。



図 2.1.3.1.5 管内水素圧力ごとの漏えい孔径対ピーク爆風圧

(3) 人体及び建築物への影響に対する検討

得られた爆風圧の測定値を基に、発生する爆風圧が人体あるいは建築物に対しどのよう な被害を及ぼす可能性があるか検討した。

人体への影響としては、鼓膜の損傷率が1%となる爆風圧は16.5kPaとされている(産業 安全工学ハンドブック)。これに対し、今回の測定条件で得られた爆風圧の最大条件は 1,074Pa(漏えい孔径10mm、圧力300kPa、漏えい孔から1.5m地点)である。これは上 記の鼓膜への影響が発生するとされる爆風圧の約1/16である。すなわち、本測定で得られ た爆風圧は全てこの条件を下回っており、人体への物理的損傷の程度としては比較的軽微 なものにとどまっていると言える。ただし、飛散物等が発生した場合にはこの限りではな く、また爆風圧の威力の減衰は距離依存性が非常に強いので着火の発生する地点に1.5mよ りも接近するにつれて増大するので十分な注意が必要である。

一方、建築物への影響としては一般的に窓ガラスが割れる爆風圧は1,030Paとされている(石油コンビナートの防災アセスメント策定指針、平成6年)。この値と比べると、本測定の爆風圧の最大条件(1,074Pa)はほぼ等しく、1.5m地点という近接した距離ではあるが、このような爆風圧が発生すれば十分に建築物への物理的被害は発生しうる可能性があることが示される。

以上より、本測定と同様、即ち全くの開放空間で着火が生じた場合に発生する爆風圧の 大きさは、重篤とは言えなくとも距離などの条件によっては人体乃至は建築物に被害を生 じる可能性を内包する程度であることが示された。 2.1.3.2 火炎サイズ、輻射熱の測定

(1) 測定方法

測定に際しての漏えい孔径及び管内水素圧力の条件と実験番号の一覧を表 2.1.3.2.1 に示 す。

圧力	漏えい孔径				
	0.8mm	2mm	5mm	10mm	
2. 5kPa			2-2-5	2-2-9	
15kPa			2-2-6	2-2-10	
100kPa	2-2-1	2-2-3	2-2-7	2-2-11	
300kPa	2-2-2 吹き消えにより 測定できず	2-2-4	2-2-8	2-2-12	

表 2.1.3.2.1 火炎サイズ及び輻射熱の測定における 漏えい孔径・管内水素圧力と実験ナンバー

実験に際し、まず漏えいれから離れた位置に設置したバーナー(プロパンガスを使用) からパイロット火炎を設け、少量の水素を漏えいれから噴出して着火しバーナーを停止、 その後に管内水素圧力を設定値まで上昇させることによって測定目標となる火炎を形成し た。自然風等が測定値に与える影響を緩和するために、測定は火炎を維持し続けて最大 3 分間継続した。

火炎サイズの測定には高速度カメラを 2 台(nac 製 MEMRECAM HX-5、Photron 製 FASTCAM SA-X)用いた。MEMRECAM HX-5には赤外線フィルタ(朝日分光 LI0900、 カットオン波長 900nm)を取り付けることにより、水素火炎によって生じる赤外線の発 光を捉えることとした。FASTCAM SA-X に対してはフィルタ等を設けず直接撮影を行った。 水素の火炎は可視光を殆ど発することが無いので、直接撮影では火炎の像を捉えることが できない。そのため、炭酸ナトリウム水溶液を噴霧し、ナトリウムの炎色反応による発光 による可視化を併用した。この場合、ナトリウム水溶液噴霧の有無による火炎に対する影 響が懸念される。また、赤外線発光による像もしくはナトリウムの炎色反応による像のい ずれを火炎の像として判断するべきか検討の余地がある。そのため、本測定では

・炭酸ナトリウム噴霧無しで撮影 → 赤外線により撮像

・炭酸ナトリウム噴霧有りで撮影 → 赤外線とナトリウム発光を同時に撮像 と撮影方法を併用した。

輻射熱の測定には、輻射熱センサーを漏えい孔から 1、2、4 及び 8m の位置に互いに設 置し火炎から発せられる輻射熱を測定した。測定に際しては熱流束センサーも併せて設置 し検討を行った。用いた輻射熱センサーと熱流束センサーを図 2.1.3.2.1 に示す。また、両 センサーの設置の様子を図 2.1.3.2.2 に示す。センサーの出力はデータロガー(HIOKI 8861-50)によって電圧として取得した。図 2.1.3.2.3 は、実際の測定波形の一例である。 輻射熱センサーや熱流束センサーは自然風や火炎自体の発する気流等の影響を受けるのみ ならず、本質的に測定波形にノイズが大きく出力される。そのため、輻射熱や熱流束の測 定に際しては1分間以上継続して取得した波形の平均値を用いて代表した。

輻射熱の測定と並行し、火炎から受ける熱的影響の検証のために燃焼後のガスの温度を 測定することを試みた。測定に際しては、図 2.1.3.2.4 に示すように漏えい孔上 0.5、1.5、 2.2、2.9、3.7 及び 4.3m の高さに K型シース熱電対を設置した。ただし、熱電対は正確に 漏えい孔の垂直線上には無く、また火炎は形状が時間によって大きく変動しなおかつ自然 風の影響も受けるので、ここで得たデータはあくまでも参考値としての位置づけである。 熱電対の出力はデータロガー(HIOKI 8855)の熱電対用モジュールによって取得した。



図 2.1.3.2.1 輻射熱センサー(左)及び熱流束センサー(右)



図 2.1.3.2.2 輻射熱センサーと熱流束センサーの設置の様子 (漏えい孔近傍より撮影)



図 2.1.3.2.3 輻射熱の測定波形例(漏えい孔径 10mm、管内水素圧力 15kPa)



図 2.1.3.2.4 熱電対設置の様子

(2) 測定結果

<u>火炎サイズ測定</u>

撮影した火炎の画像の例を図 2.1.3.2.5 に示す。赤外線フィルタを取り付けたカメラの場 合、炭酸ナトリウム水溶液噴霧を行わなくても赤外線による像が明確に得られる。一方、 フィルタを取り付けないカメラの場合、炭酸ナトリウム水溶液噴霧を行わない場合は殆ど 像が得られない。炭酸ナトリウム水溶液噴霧を行うと、赤外線フィルタの有無に関わらず 火炎は可視化され像を取得することができる。

測定にあたっては、一定期間連続して撮影した火炎の動画から最大の高さの位置を以て 火炎サイズとした。測定結果を図 2.1.3.2.6 に示す。炭酸ナトリウム水溶液噴霧無しでの赤 外線撮影像、炭酸ナトリウム水溶液噴霧有りでの赤外線撮影像、及び炭酸ナトリウム水溶 液噴霧有りでの直接撮影像からなる測定値を比較すると、撮影条件による変動には相関性 が見られず、またバラつきはあるものの概ね近い値を示しており、炭酸ナトリウム水溶液 噴霧の火炎に対する影響は殆ど無視できると考えられ、また赤外線とナトリウム発光のい ずれでもほぼ火炎の像を捉えていると考えられる。

図 2.1.3.2.7 は同じデータを圧力軸のみ対数にしてプロットしたものである。この結果か ら、漏えい孔径ごとにほぼ直線的に火炎長は変化しており、管内水素圧力、即ち噴出流量 に対して火炎長は強い依存性を有することが示されている。一般に例えば炭化水素系の可 燃性ガスなどの場合、乱流域に達すると火炎長の噴出流量に対する依存性は小さくなるこ とが知られている。それに対し、本測定によって得られた結果はやや異なる傾向が示され ている。この原因は種々考えられるが、水素の拡散速度が他の可燃性ガスに比べ非常に大 きいことが一因として挙げられる。

本測定によって火炎のサイズは最大で4mを超え、かなりの高さまで達することが示された。また、図2.1.3.2.7の結果から、漏えい孔径や圧力がより大きくなるとさらに火炎サイズは増大する可能性が高い。大流量の際、特に漏えい孔径10mm・管内水素圧力300kPaのときに形成される火炎からは100m以上離れた観測所からも大きな音が聞こえ異常な事態が生じていることがわかるが、水素の火炎は視認できないので火炎を発生させないことが第一であるが万一火炎が発生してしまった場合には慎重な対策が必要である。



炭酸ナトリウム噴霧無し



炭酸ナトリウム噴霧有り

図 2.1.3.2.5 火炎画像の例



図 2.1.3.2.6 火炎サイズの測定結果



図 2.1.3.2.7 圧力軸を対数にプロットした火炎サイズの測定結果

輻射熱測定

輻射熱、及び同時に取得した熱流束の測定結果を図 2.1.3.2.8~図 2.1.3.2.16 に示す。い ずれの測定結果においても、距離と共に輻射熱、熱流束ともに大きく減衰する。ここで、 熱流束センサーの測定値はいずれの測定値においても常に輻射熱よりも小さな値を示して いる。これは輻射熱センサーが火炎の発する輻射熱のみを測定しているのに対し、熱流束 センサーは輻射熱と対流熱の合算した値を測定していることに由来すると考えることで理 解可能である。本測定条件においては対流によって火炎から運ばれてくる熱は殆ど無く、 逆にセンサーが受け取った熱を周囲の気体が自然風などの影響もあり奪っていく、即ち対 流の効果は負に働く結果であると考えられる。伝熱のメカニズム如何に関わらず被害発生 の可能性を議論するにはより熱量の高い測定値が重要なので、その点からも本測定におい て輻射熱を対象として検討することは妥当である。

図 2.1.3.2.8~図 2.1.3.2.17 の結果のうち輻射熱のみを距離軸を対数にとりプロットした ものが図 2.1.3.2.18~図 2.1.3.2.27 である。水素の噴出量・火炎共に小さい漏えい孔径 0.8mm や 2mm の場合は距離に対しバラつきが大きいが、5mm や 10mm の場合ほぼ直線 的に減衰する。この結果、火炎が安定に存在する条件では輻射熱は距離に対しほぼ 2 乗に 反比例して減衰していることを示す。これは同一平面において熱源が点に近い状態にある と考えた場合に相当し、妥当である。

水素の火炎は輻射熱が非常に小さく、ラボスケールではほぼ無視できるレベルでしか発 生しないことで知られている。それに対し、本測定の結果は噴出流量・火炎が大きいと相 当量の輻射熱が発生していることを示している。これは本測定のような大量に水素を消費 して燃焼するような条件ではそれに応じた量の高温の水蒸気が発生しそこから発生する輻 射熱があること、及び火炎が周囲の気体を巻き込み熱を伝えることによって輻射熱が発生 すること等に由来するものと考えられる。いずれにせよ、漏えいによって形成される火炎 からの輻射熱は決して無視できるレベルではないと言える。以上のことを鑑み、漏えい孔 から 1m 離れた位置での輻射熱の大きさを図 2.1.3.28 に、同じく漏えい孔から 4m 離れた 位置での輻射熱の大きさを図 2.1.3.29 に示す。一般に長時間浴びると人体に火傷等の深刻 な影響を及ぼすと言われる輻射熱の大きさは 1300Wm²程度であると言われており、これ は赤道直下近傍の正午の直射日光程度に相当する。火炎から 1m 以上離れていれば、漏えい 孔径 5mm 以下ではこの値を常に下回る。しかしながら、漏えい孔径 10mm では 2.5kPa 以上で常にこの値を上回っており、特に管内水素圧力が 300kPa の状態では 1 分ほどで火 傷に至る程度であり、非常に危険である。漏えい孔から 4m まで離れると輻射熱の大きさは 人体が発生する熱量程度あるいはそれ以下になり、ほぼ無害である。

以上の結果から、漏えい孔から噴出する水素で火炎が形成されているときに、接近して も火傷を負わないと考えられるおおよその距離をまとめたものを表 2.1.3.2.2 に示す。この 表に示した値は安全と考えられる距離の目安であるが、水素の場合火炎が視認できず、接 近に従い急激に熱・温度が増加するので、火炎の存在を認知していない場合は逆に危険で あり、強く注意する必要がある。



図 2.1.3.2.9 輻射熱及び熱流束測定 漏えい孔径 2mm、管内水素圧力 300kPa







図 2.1.3.2.11 輻射熱及び熱流束測定 漏えい孔径 5mm、管内水素圧力 15kPa







図 2.1.3.2.13 輻射熱及び熱流束測定 漏えい孔径 5mm、管内水素圧力 300kPa



図 2.1.3.2.14 輻射熱及び熱流束測定 漏えい孔径 10mm、管内水素圧力 2.5kPa



図 2.1.3.2.15 輻射熱及び熱流束測定 漏えい孔径 10mm、管内水素圧力 15kPa







図 2.1.3.2.17 輻射熱及び熱流束測定 漏えい孔径 10mm、管内水素圧力 300kPa







図 2.1.3.2.19 輻射熱測定(両軸対数) 漏えい孔径 2mm、管内水素圧力 300kPa



図 2.1.3.2.20 輻射熱測定(両軸対数) 漏えい孔径 5mm、管内水素圧力 2.5kPa



図 2.1.3.2.21 輻射熱測定(両軸対数) 漏えい孔径 5mm、管内水素圧力 15kPa



図 2.1.3.2.22 輻射熱測定(両軸対数) 漏えい孔径 5mm、管内水素圧力 100kPa



図 2.1.3.2.23 輻射熱測定(両軸対数) 漏えい孔径 5mm、管内水素圧力 300kPa



図 2.1.3.2.24 輻射熱測定(両軸対数) 漏えい孔径 10mm、管内水素圧力 2.5kPa



図 2.1.3.2.25 輻射熱測定(両軸対数) 漏えい孔径 10mm、管内水素圧力 15kPa



図 2.1.3.2.26 輻射熱測定(両軸対数) 漏えい孔径 10mm、管内水素圧力 100kPa



図 2.1.3.2.27 輻射熱測定(両軸対数) 漏えい孔径 10mm、管内水素圧力 300kPa



図 2.1.3.2.28 漏えい孔から 1m 離れた位置での輻射熱



図 2.1.3.2.29 漏えい孔から 4m 離れた位置での輻射熱

	0.8mm	2mm	5mm	10mm
2.5kPa	数 cm	数 cm	20cm 程度	1~2m
15kPa	数 cm	数 cm	40cm 程度	2m程度
100kPa	数 cm	数 cm~10cm	1m程度	2.5m 程度
300kPa	不明(※)	10cm 程度	2m程度	3m 程度

表 2.1.3.2.2 接近しても火傷を負わないと考えられるおおよその距離

熱電対による燃焼後のガス温度測定

熱電対により燃焼後のガス温度を測定した結果を図に示す。圧力に対する依存性につい ては、圧力軸を対数にプロットするとほぼ直線的に並ぶ。対して漏えい孔径に対する依存 性については、ほぼ径の大きさに対する比例に近い関係となる。



図 2.1.3.2.30 漏えい圧力と温度との関係(漏えい孔径 10mm φ)



図 2.1.3.2.31 漏えい孔径と温度との関係(漏えい圧力 300kPa)

2.2 管内ガス置換挙動調査

導管の新設、あるいは交換に伴う施工を行う際に、導管内に充満した空気に対し直接水 素で置換することは避けねばならない。そのため、窒素等の不活性な気体によって置換し、 その後に水素を導入する等の手法を採ることが安全上有用であるが、導管内を全て窒素で 置換せずとも、空気と水素の間に窒素の層を挟み、空気と水素を隔離することで安全に水 素へと置換しうる可能性がある。また、実際の施工において窒素への完全置換が困難な状 況も想定され、その場合にも窒素層を用いる置換手法は有用である。しかしながら、水素 は非常に拡散の早い気体分子であり、特に中・低圧では安全な窒素による隔離層は形成し えず危険な混合気の形成を招いてしまう懸念もある。これらの事情を背景とし、実際に導 管に用いられる管のうち、25mm 及び 50mm の内径を有する管を模擬した試験配管を用い て、20m 及び 50mの直線状の延長を有する管に対し、空気の充満している状態からまず一 定量窒素を流し、その後に水素を導入するという実際に想定される施工を模した実験を行 った。なお、野外実験場での本実験実施に先立っては、産業技術総合研究所つくば西事業 所内の可燃性ガス風洞等を活用し、本実験を模しつつスケールダウンした予備実験を行っ た。

実験番号と実験条件を表 2.2.1 に示す。なお、実験 3-2(3)、3-2(4)は水素導入後にそれぞれ 10 分間および 20 分間放置し、水素の拡散の状況を調べた。

実験番号	管材質	管径/mm	管長/m	窒素導入時間/s
1-1(1)	樹脂管	25	50	4
1-1(2)	樹脂管	25	50	4
1-2(1)	樹脂管	25	50	6
1-2(2)	樹脂管	25	50	6
1-3(1)	樹脂管	25	50	10
1-3(2)	樹脂管	25	50	10
2-1(1)	樹脂管	50	50	10
2-2(2)	樹脂管	50	50	10
2-2(1)	樹脂管	50	50	15
2-2(2)	樹脂管	50	50	15
2-3(1)	樹脂管	50	50	20
2-3(2)	樹脂管	50	50	20
3-1(1)	鋼管	25	20	4
3-1(2)	鋼管	25	20	4
3-2(1)	鋼管	25	20	5
3-2(2)	鋼管	25	20	5
3-3(1)	鋼管	25	20	6
3-3(2)	鋼管	25	20	6
3-2(3)	鋼管	25	20	5
3-2(4)	鋼管	25	20	5

表 2.2.1 管内ガス置換実験番号と条件

2.2.1 実験設備の概要

実験設備の概要を図 2.2.1.1、実際の設置状況を図 2.2.1.2~図 2.2.1.4 に示す。

内径 25mm または 50mm、長さ 20m または 50m の直線上の樹脂管または鋼管の上流側 には、水素および空気/窒素の導入部を接続し、末端部は破裂板で閉止して、上向きに放出 ロを接続した。導入部、放出口のバルブはいずれも内径 25mm のボールバルブである。導 入部、末端部および管長の 1/3, 2/3 の点には、ガス濃度センサの導入用キャピラリを設置 した。ガス濃度センサのキャピラリは末端部を除いては、管の上面内壁から約 1mm の位置 からガスを採取するように設置し、末端部は、水素などの界面の傾きを調べるために管上 面、管中央、管下面の 3 箇所に設置した。ガス濃度センサは、能美防災(株)製のマススペク トル型濃度センサ HX シリーズを用いた。



図 2.2.1.1 実験設備の配置図



図 2.2.1.2 実験設備の配置状況



図 2.2.1.3 末端の放出口の取り付け状態



図 2.2.1.4 末端部のガス濃度センサ用キャピラリの取り付け状態

2.2.2 実験方法

管内ガス置換実験の手順は以下の通りである。開閉バルブは安全のため全て窒素圧駆動 で遠隔操作としており、バルブの開閉には数秒の時間を要するため、各バルブの操作の間 は10秒程度の待ち時間を設定している。

実験手順 (実験 2-1 樹脂管, 管径 50mm, 長さ 50m, 窒素導入時間 10 秒の場合)

- 1. 管全体を空気に置換,末端放出弁開放
- 2. 窒素(9.6kPa)導入弁開放, 窒素導入開始 (T=0s)
- 3. 20 秒後 窒素導入弁閉止 (T=10s)
- 4. さらに 10 秒後 末端放出弁閉止 (T=20s)
- 5. さらに 10 秒後 水素(2.5kPa)導入弁開放,水素導入開始 (T=30s)
- 6. 圧力が平衡に達するのを待つ(110 秒間)
- 7. 末端放出弁開放 (T=140s), 水素流通開始
- 8. 放出端の水素濃度が 100%に達した後,水素導入弁閉止

以上の実験手順を管内の模式図とともに図 2.2.2.1 に示す。



図 2.2.2.1 実験手順模式図

2.2.3 実験結果

各実験の結果を実験番号とともに以下に記す。





図 2.2.3.1 1-1(1) 樹脂管, 25mm φ, 50m, 窒素導入時間 4秒



図 2.2.3.2 1-1(2) 樹脂管, 25mm ø, 50m, 窒素導入時間 4秒



図 2.2.3.3 1-2(1) 樹脂管, 25mm ø, 50m, 窒素導入時間 6秒


図 2.2.3.4 1-2(2) 樹脂管, 25mm ϕ , 50m, 窒素導入時間 6秒



図 2.2.3.5 1-3(1) 樹脂管, 25mm ø, 50m, 窒素導入時間 10 秒

73



図 2.2.3.6 1-3(2) 樹脂管, 25mm ø, 50m, 窒素導入時間 10 秒



図 2.2.3.7 2-1(1) 樹脂管, 50mm ø, 50m, 窒素導入時間 10 秒



図 2.2.3.8 2-1(2) 樹脂管, 50mm ø, 50m, 窒素導入時間 10 秒



図 2.2.3.9 2-2(1) 樹脂管, 50mm ø, 50m, 窒素導入時間 15 秒



図 2.2.3.10 2-2(2) 樹脂管, 50mm ø, 50m, 窒素導入時間 15 秒



図 2.2.3.11 2-3(1) 樹脂管, 50mm ø, 50m, 窒素導入時間 20 秒



図 2.2.3.12 2-3(2) 樹脂管, 50mm ø, 50m, 窒素導入時間 20 秒



図 2.2.3.13 3-1(1) 鋼管, 25mm ø, 25m, 窒素導入時間 4秒





図 2.2.3.14 3-1(2) 鋼管, 25mm ø, 25m, 窒素導入時間 4秒





図 2.2.3.15 3-2(1) 鋼管, 25mm ø, 25m, 窒素導入時間 5秒



図 2.2.3.16 3-2(2) 鋼管, 25mm ø, 25m, 窒素導入時間 5秒



図 2.2.3.17 3-3(1) 鋼管, 25mm ø, 25m, 窒素導入時間 6秒



図 2.2.3.18 3-3(2) 鋼管, 25mm ø, 25m, 窒素導入時間 6 秒



図 2.2.3.19 3-2(3) 鋼管, 25mm ø, 25m, 窒素導入時間 5秒, 水素圧入後 10 分間放置



図 2.2.3.20 3-2(4) 鋼管, 25mm ø, 25m, 窒素導入時間 5秒, 水素圧入後 20 分間放置

実験の結果得られた窒素導入時間と窒素による空気と水素の隔離時間、また、実測され た流速から計算した窒素による空気と水素の離隔距離の一覧を表 2.2.3.1 に示す。

実験 3·3 では、窒素導入時間 6 秒間で 20m の管内が全て窒素で置換されてしまったが、 それ以外の条件においては、それぞれ一定の時間、窒素が約 100%となり、窒素によって、 あらかじめ管内に存在する空気と導入された水素が安全に隔離できた。また、いずれの実 験においても、末端部の上面への水素の到達が早かったが、中央部、下面への水素の到達 との時間差は 1 秒以内であり、ほとんど同時に水素が到達した。これは、水素が先に導入 された窒素との比重差によって上面だけを伝わるようなことなく、ほぼ垂直な界面を保っ たまま管内を移動してきたことを示している。このことに関して、実験 3·2(3)、3·2(4)で水 素導入後にそれぞれ 10 分間および 20 分間放置し、水素の拡散の状況を調べたが、わずか に上面と中央部、下面の到達時間差が大きくなっただけで、時間差が 1 秒以内であること には変わりがなかった。

実験番号	管材質	管径/mm	管長/m	窒素導入時間/s	隔離時間/s	隔離距離/m
1-1(1)	樹脂管	25	50	4	4.75	15.1
1-1(2)	樹脂管	25	50	4	3.25	9.9
1-2(1)	樹脂管	25	50	6	7.00	21.3
1-2(2)	樹脂管	25	50	6	1.25	3.6
1-3(1)	樹脂管	25	50	10	7.00	23.3
1-3(2)	樹脂管	25	50	10	7.00	21.3
2-1(1)	樹脂管	50	50	10	1.25	2.6
2-2(2)	樹脂管	50	50	10	1.25	2.6
2-2(1)	樹脂管	50	50	15	3.50	7.0
2-2(2)	樹脂管	50	50	15	3.75	7.3
2-3(1)	樹脂管	50	50	20	6.50	13.0
2-3(2)	樹脂管	50	50	20	6.00	11.7
3-1(1)	鋼管	25	20	4	0.50	0.9
3-1(2)	鋼管	25	20	4	0.75	1.1
3-2(1)	鋼管	25	20	5	1.25	1.9
3-2(2)	鋼管	25	20	5	1.75	2.8
3-3(1)	鋼管	25	20	6	-	
3-3(2)	鋼管	25	20	6		
3-2(3)	鋼管	25	20	5	1.50	2.4
3-2(4)	鋼管	25	20	5	1.50	2.4

表 2.2.3.1 窒素による空気と水素の隔離時間と隔離距離

以上の結果より、今回実験を行った条件では、比較的短時間の窒素導入によって、空気 と水素を安全に隔離することができることが明らかになった。実作業に適用するには、今 後、より大きな管径での検討が必要である。

2.3 水素導管工事に係わる発火源に関する文献調査

水素導管工事においては低圧水素ガスを扱うことから、工事を安全に進めるためには 発火の危険性に対して十分な対策をとって進める必要がある。そこで、本章では水素ガ スの発火源に関して文献調査を行い、導管工事の中で発火源になる可能性のあるものに ついて発火源となる条件等を整理し、天然ガスとの比較を行いながらデータの解析評価 を行って発火源と発火現象の体系的な取りまとめを行った。

また、水素ガスが関連した過去の事故についてその原因となった発火源の傾向を知る ために、高圧ガス保安法に基づく事故事例データベースを利用して発火源による統計を 調査した。さらに、それぞれの発火源について各事例を整理し、代表的な事故事例をま とめた。

2.3.1 はじめに

我が国で安全工学の学問体系を構築するとともに産業現場の安全技術の向上に力を 注いだ北川は、火災・爆発災害予防のための発火源対策の重要性を説く中で、発火源と して衝撃摩擦、裸火、高温表面、自然発熱、断熱圧縮、電気火花、静電気火花及び光線 熱線の8種類を挙げている¹⁾。その後、長谷川はこれを整理して下の表にまとめた²⁾。 実際の事故ではこのような区分で明確に分類できないケースもあるが、予防対策を検討 する際に発火源の排除や抑制を考えるためのベースになるものとして有効な分類法と 考えられる。本調査ではこの分類法により発火源に関する文献調査を行った。

重复的双水海	①電気火花
电风印充八你	②静電気火花
劫的戏队酒	①熱面、熱流体
款的充火你	②放射熱、熱光線
小学的 戏龙海	①裸火
化子印充八你	②発熱反応
+% +击伤 % 小酒	①衝撃、摩擦、打撃
機械的充入你	②断熱圧縮、衝撃波

1) 北川徹三、"化学安全工学"、95頁、日刊工業新聞社(1969)

2) 長谷川和俊、"危険物の安全"、52 頁、丸善(2004)

2.3.2 電気火花

電気火花は比較的低電圧の放電による誘導性火花放電と比較的高電圧の放電による 容量性火花放電があるが、容量性火花放電は誘導性火花放電に比べて電流値が高く放電 持続時間が非常に小さいため、静電気火花放電に似た現象となる。

低電圧の電気火花の例としては、電気回路のスイッチの開閉時に発生する火花や電気 溶接で発生する火花、通電中の配線の切断あるいは短絡時に発生する火花などがある。 このとき、放電エネルギ(*E*[J])は下式で与えられる。ただし、*L* は回路のインダクタン ス[H]、*I* は電流[A]である。

$$E = \frac{1}{2}LI^2$$

2.3.2.1 IEC Standard 60079-11、"Explosive Atmospheres - Part 11: Equipment Protection by Intrinsic Safety "i" "(爆発性雰囲気-第11部:本質安全防爆構造" i ")、International Electrotechnical Commission (2011)

電気設備の防爆規格に関する IEC 規格のひとつであり、本質安全防爆の構造と試験 法を定めたものであるが、この中で低電圧電気火花放電の測定方法と分類基準を定めて おり、分類基準となるメタンと水素の測定データが示されている。

試験法の概要を以下に示す。空間容積が250cm³以上の容器を用い、内部に互いに相 反する方向に回転する2本の平行な軸があり、一方の軸には2本の溝を付けたカドミウ ム製円盤を取り付ける。他方の軸には矩形盤を取付け、上記の円盤との間隔を10mm とする。矩形盤の四辺に直径0.2mmのタングステン線4本を固定して回転(毎分80 回転)とともに円盤(毎分約19.2回転)の表面に垂直に接触するようにしておく。円 盤には溝があるため、タングステン線は円盤との接触が断たれ、円盤とタングステン線 との間に通電しておくと電気回路の開閉に伴って誘導火花放電が繰り返されることに なる。なお、カドミウムは電極材料として最もガスに点火しやすい火花を発生する材料 のひとつであるために使われている。

防爆規格では可燃性ガスの種類により以下に示す区分に従ってそれぞれ対応する防 爆構造が決められている。本質安全防爆の試験を行う場合は各グループごとに使用する ガスと組成も定めている。なお、キャリブレーションでは直流 24V でインダクタンス が 95(±5)mH の回路を使って以下の電流値で発火することを確認しなければならない。

グループ	試験ガスと空気中の濃度[vol%]	電流[mA]
Ι	メタン、8.3±0.3	110-111
ΠА	プロパン、5.25±0.25	100-101
ΠВ	エチレン、7.8±0.5	65-66
ΠС	水素、21±2	30 - 30.5

検査対象物の試験にあたって安全率を考慮する場合は爆発がより激しい試験ガス組 成を用いることが多い。標準的な試験法は、直流回路で400回転(5分間)で、そのう ち半数は逆回転とする。交流回路では1000回転(12.5分間)とするが、容量性回路で は直流400回転(5分間)で、そのうちの半数は逆回転とする。この間に雰囲気ガスの 点火が一度も起きないことを確認する。水素はグループIICの試験に使用し、メタンは グループIの試験に使用されるが、それぞれ回路のインダクタンスに応じて最小発火電 流は変化する。メタンの場合は、インダクタンス(L)が100mHでは最小発火電流(I) は0.1Aで、Lが1mHではIは約1Aで、さらにLが低下すると回路の電圧により異 なるがIは増加しない。一方、水素の場合はLが100mHではIは0.03Aで、Lが1mH ではIは約0.23Aで、さらにLが低下すると回路の電圧により異なるがIは増加しなく なる。水素では電圧が4VでもLが大きくなると小さなIで発火することが示されてい る。なお、最小点火電流におけるエネルギ値は水素の場合は0.04mJ、メタンの場合は 0.525mJであり、いずれも静電気火花放電を用いて求めた最小発火エネルギ値より大 きい。これは放電電極間の距離が小さいため、電極による冷却効果が影響して大きなエ ネルギを与えなければ火炎伝播が起きないことによる。

電気回路が抵抗のみの場合は電圧 Vと最小発火電流 Iの関係が得られている。メタン では Vが 100V では I は約 0.09A であるのに対して、水素では 0.023A である。Vが 20~300V の範囲で水素の I はメタンの約 1/2~1/5 倍になっている。

電気回路が抵抗を持たず容量のみの回路と考えられる場合も容量(*C*)と最小発火電圧 (*V*)との関係が得られている。回路の容量が大きくなると低電圧で発火するが、メタン では *C*が 100 μ F では *V*は 13V であるのに対して、水素では 7.2V である。*C*が 0.1~ 100 μ F の範囲で水素の *V*はメタンの約 1/2~1/8 倍になっている。.

2.3.2.2 "低圧直流誘導回路の開離火花による爆発性ガス蒸気の点火限界(最小点火電流)"、田中隆二、産業安全研究所研究報告、RIIS-RR-17-6 (1969)

上記 2.1 項で示した IEC タイプの火花発生装置を用いて水素-空気の最小点火電流 を測定した。直流電源は 24V である。回路のインダクタンスが 1H の場合は水素濃度 が 10~35%では最小点火電流は約 10mA でほとんど変わらないが、30mH では 100mA (水素 21%)から 150mA (同 10 及び 35%) に変化し、0.1mH では 215mA (同 21%) から 260mA(同 35%)まで変化しており、インダクタンスが低下するとともに変化が 大きくなった。

また、水素 21vol%で電源電圧を変化させると、6V の場合にはインダクタンスが 0.1mH から 10H の範囲で最小点火電流が約 0.5A から 4mA まで低下している。96V の場合には同じ範囲で 28mA から 4mA まで低下しており、電圧の低い場合の方がイン ダクタンスの影響が大きくなっている。さらに、インダクタンスが 1H 程度以上になる と電圧にかかわらず最小発火電流はほとんど変わらないようになる。

電気回路で接点の劣化あるいは損傷を防止するために使われる火花消去回路と最小 点火電流の関係についても調べている。インダクタンスと並列にオーム抵抗を接続する と、インダクタンスが 10mH 以上で、抵抗が小さい場合には最小点火電流が増大して 防爆に効果が期待されることが示された。同様に、インダクタンスと並列にコンデンサ を接続した場合も、インダクタンスが 10mH 以上でコンデンサの容量が大きくなると 最小点火電流が増大して火花消去の効果が現れる。

2.3.2.3 "人工環境下における電気設備の安全化に関する研究(第1報)− 放電火花 による CH₄-O₂混合ガスおよび O₂中の可燃性固体の点火危険限界−"、田中隆二、菅原 宣義、産業安全研究所研究報告、RIIS-RR-19-6 (1971)

酸素雰囲気で扱う電気設備の安全化を目的として着火危険性の測定を行った報告の中で水素及びメタンの最小発火電流に関する測定結果を報告している。

上記 2.1 項で示した IEC タイプの火花発生装置を用い、直流電源を使って誘導回路、 抵抗回路及び容量回路について測定した。誘導回路に関しては、電源電圧が 24V で空 心コイルのインダクタンスを変化させて測定した。インダクタンスが 2~2000mH の範 囲では、最小発火電流(I)はメタン及び水素のいずれもほぼ同様に変化しており、発火 エネルギがコイルの電磁エネルギ 1/2LP で表されることを示している。メタンと水素 の I及び 1/2LPの比率を下表に示す。水素の Iはメタンの場合を1とすると 0.20~0.27 程度の小さな値であり、コイルの電磁エネルギとしての 1/2LP についても水素はメタ ンに対して 0.04~0.07 程度の小さな値になるので、水素はメタンに比べて発火しやす いことが結論される。

インダクタンス			可燃性混合ガス						
L[mH]		CH4(8.3%)-AIR	$H_2(21\%)$ -AIR	$CH_4(17.5\%)$ - O_2					
9	Ι	1.00	0.20	0.20					
J	$1/2LI^{2}$	(1.00)	(0.04)	(0.04)					
20	Ι	1.00	0.23	0.18					
30	$1/2LI^{2}$	(1.00)	(0.05)	(0.03)					
05	Ι	1.00	0.25	0.17					
90	$1/2LP^{2}$	(1.00)	(0.06)	(0.03)					
1000	Ι	1.00	0.27	0.18					
1000	$1/2LP^2$	(1.00)	(0.07)	(0.03)					

抵抗のみの回路に関しては電圧を変化させて最小発火電流(*I*)を測定した。抵抗回路 の場合も電圧が低くなるとともにいずれのガスでも*I*は増大し、発火は起こりにくくな る傾向にある。メタンでは電圧 24V のときに *I*は約 1000mA、水素では約 170mA であ る。また、電圧が 200V までの範囲では水素の *I*はメタンの約 1/4~1/10 である。

容量のみの電気回路の発火限界に関しては最小発火電圧(V)を測定した。回路の電気 容量(C)が増加するとともに Vは低下する。Cが 1 µ F の場合、メタンの Vは 85V であ るのに対して水素の Vは 22V であるが、Cの増大とともに両者の差は徐々に小さくな る。メタンを基準として水素の Vと発火エネルギ 1/2CV²を求めると下表が得られた。 回路の Cが小さい場合は水素の発火エネルギはメタンの約 1/30 であるが、Cが大きく なると約 1/7 まで増加するが、水素の発火エネルギはメタンに比較してかなり小さい。

容量		可燃性混合ガス						
$C [\mu F]$		CH4(8.3%)-AIR	H ₂ (21%)-AIR	$CH_4(17.5\%)$ - O_2				
0.2	V	1.00	0.16	0.08				
0.3	$1/2 CV^{2}$	(1.00)	(0.027)	(0.007)				
1	V	1.00	0.26	0.13				
L	$1/2 CV^{2}$	(1.00)	(0.068)	(0.017)				
10	V	1.00	0.37	0.21				
10	$1/2 CV^{2}$	(1.00)	(0.140)	(0.046)				

2.3.3 静電気火花

2.3.3.1 ANSI/AIAA Standard G-095, "Guide to Safety of Hydrogen and Hydrogen Systems", American National Standards Institute/American Institute of Aeronautics and Astronautics (2004)

最小発火エネルギは、空気中で最も発火が起こりやすい組成で発火に必要な最小の放 電エネルギと定義される。101.3kPa では 0.017mJ である。圧力が低くなると最小発火 エネルギは増加して 5.1kPa では 0.09mJ、2.03kPa では 0.56mJ になる。

水素の最小発火エネルギはメタン(0.29mJ)及びガソリン(0.24mJ)に比較して1 桁小さい。ただし、いずれのガスの最小発火エネルギも充分に小さく、火花、マッチ、 高温熱面、裸火などの弱い発火源で発火する。人体から発生する静電気放電により起こ る弱い火花であってもこれらのガスを発火させるのに充分である。

静電気は、毛髪などをすいたり撫でることにより、また、機械の皮ベルトを操作する などの日常的な動作で発生する。特に、合成繊維製カーペットや乾燥地面の上を歩行し たり、ナイロン等の合成繊維製衣服を着用したり、車のシート面を滑ったり、毛髪をす くなどの行為で高電圧の静電気が発生する。混在物を含む水素ガスが流れると静電気が 発生する。システム中の流れと同様に容器中の乱流でも同じである。激しい雷雨の際も 静電気帯電が発生する。

2.3.3.2 NASA Standard NSS 1740.16, "Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems, Guidelines for Hydrogen System Design, Materials Selection, Operations, Storage, and Transportation", National Aeronautics and Space Administration (1997)

最小発火エネルギは、空気中で最も発火の起こりやすい組成において発火に必要な最 小の放電エネルギである。圧力 101.3kPa では 0.017mJ である。圧力 5.1kPa になると 0.09mJ、2.03kPa では 0.56mJ になる。水素の最小発火エネルギは、メタン (0.29mJ) 及びガソリン (0.24mJ) に比較してかなり小さい。ただし、これらのガスの最小発火 エネルギは小さいため、火花、マッチ、高温熱面、裸火などの弱い発火源が存在すると 発火する。人体からの静電気放電により発生する弱い火花でもこれらのガスを発火させ るのに充分である。

2.3.3.3 ISO Technical Report, ISO/TR 15916, "Basic Considerations for the Safety of Hydrogen Systems", International Standard Organization (2004)

水素/空気混合ガスの爆発範囲では最小発火エネルギは 0.017mJ を最小値として約 3桁の変化をする。ただし実際的には化学量論組成を挟んで水素濃度が 25~35%ではほ ぼ一定と見なせる。ほとんどの発火源は 10mJ を超えるエネルギを発生するので、水素 だけでなくメタン、プロパン、ガソリン等の燃料も爆発下限界以上の濃度になれば発火 する。

2.3.3.4 EIGA Document 121, "Hydrogen Transportation Pipelines", European Industrial Gases Association (2004)

空気中では水素は最小 0.017mJ のエネルギで発火し、一方、炭化水素は 0.25mJ であるので、両者を比較すると水素は非常に発火しやすい。

2.3.3.5 "Spark Ignition, Effect of Molecular Structure", H.F.Calcote, C.A.Gregory, Jr., C.M.Barnett, R.B.Gilmer, Ind.Eng.Chem., 44, 2656 (1952)

先端を半球状にした外径 1/8 インチ(約 3.2mm)のステンレス鋼(SUS316)製電極を用いて室温大気圧の空気中の最小発火エネルギを測定した。水素は 0.02mJ で、この値は 米国鉱山局が報告している 0.019mJ とよく一致している。

2.3.3.6 "高圧水素ガスの噴出着火現象"、三村和男、西岡正行、山本哲也、安全工学、 5(3)、208 (1966)

水素の噴出着火を水素の圧力 0.5~5MPa の範囲で内径 8.6mm のノズルを用いて測 定した。鉄粉 1g を添加して 0.5MPa の水素を噴出すると、前方に設置した金網に帯電 する静電気の帯電電圧は約 5kV であった。圧力を 2MPa にすると約 6kV になるが、水 素の圧力をそれ以上高くしても帯電電圧に変化は見られなかった。また、水を添加した 場合、3mL の場合は約 5kV、10mL の場合は約 6.7kV であったが、それ以上水を増量 しても帯電電圧は増加しなかった。ただし、四塩化炭素やベンゼンを添加した場合は添 加量とともに帯電電圧は一様に増加した。

静電気の発生が添加物質と管壁との摩擦によるものと考えられるので、管壁の影響に ついて調べるため、ノズル内面を機械加工した場合と、さらに内面を塩酸により腐食さ せた場合について比較を行った。その結果、腐食させないノズルを用いると腐食させた ものに比べて帯電電圧は数分の1であった。

噴出水素気流中に放電電極を設置して金網に帯電した静電気を導き、放電火花により 噴出水素に着火させた。金網と放電電極を含む測定系の対地静電容量は37.5pFである。 鉄粉を0.2g添加した場合は着火が見られなかったが、0.3gでは着火することがあり、 0.8gではほとんどの場合に着火した。蒸留水を添加した場合は0.1mLでも着火する場 合があったが、四塩化炭素の場合は1.0mLでも着火しなかった。ベンゼンの場合は 0.5mLで着火が見られた。

2.3.3.7 "静電気による噴出水素ガスの着火現象とその機構について"、柏木晴夫、篠木 和弘、硫安技術、20(2)、1 (1967)

水素をバルブから放出する際にガスのみを放出する場合はバルブに静電気はほとん ど発生しないが、バルブ内にあらかじめ異物を混入した状態にすると放出とともに静電 気の帯電が認められた。1gの泥、炭素鋼粉、酸化鉄粉、黄銅粉、及び銅粉を入れると、 発生した静電気の帯電電圧の最高値はそれぞれ 22.2、19.3、10.9、3.1、及び 1.6kV で あった。

次に、バルブに帯電した静電気を放電ギャップに導き、放電させて放出した水素が着 火する条件を測定した。なお、放電ギャップが 6mm のときに対地静電容量は 160pF である。0.1 及び 0.3g の酸化鉄粉を加えると放電ギャップが 8mm のときは着火しない 場合もあるが 6mm 以下のときはほとんどの場合に着火した。4.2cc の水を加えた場合 も放電ギャップを 6mm 以下にするとほとんどの場合に着火した。水素の容器を接地し た場合も酸化鉄を加えると最高 18.5kV 以上の帯電電圧が観測され、放電ギャップに導 いて放電させると水素が着火するケースもあった。

放出装置全体の接地抵抗を 220~1000MΩの範囲で変化させて放出時の静電気帯電 電圧と着火について測定したところ、酸化鉄粉 0.5 あるいは 1.0g ではいずれの条件で も着火の起こる場合があった。接地抵抗を∞にすると帯電電圧は最大 22.4kV であった が、放電ギャップが 3mm の電極を入れると接地抵抗が 220Ω、10kΩ、45kΩあるい は 1000MΩの場合にそれぞれ着火した。

2.3.3.8 "高圧水素の噴出による火炎発生の危険性"、岩阪雅二、浦野洋吉、橋口幸雄、 高圧ガス、16(7)、333 (1979)

水素をノズルから空気中に噴出するとき、気流中に酸化鉄を添加すると静電気が発生 するので、前面に金網をおいて噴出気流中の電荷を捕捉して電圧を測定した。水素圧が 2.2~2.6MPa で口径 4mm のノズルの場合、発生電圧は 5kV 以上であり、電気量とし ては 3.25×10⁻⁷クーロン以上になる。金網のない状態にして同じ条件で水素を噴出さ せると発火は起きないが、気流中に放電用の電極を設置しておくと噴出とともに放電が 起こり発火した。

2.3.3.9 "Ignition Tests with Brush Discharge between a Spherical Electrode and a PVC Plate in Hydrogen-Air Mixture", K.Sun, H.Zhao, S.Gao, J.Electrostatics, 57, 689 (2003)

先端の尖った電極で放電するコロナ放電に対して、平板状の電極や曲率半径の大きな 電極で放電するのがブラシ放電である。コロナ放電に比較して放電エネルギが大きくな るため、発火事故になりやすいといわれている。直径 100mm の塩ビ製円板に電荷を与 え、直径 10mm の球形電極との間でブラシ放電を発生させて水素の発火を調べた。電 荷が-10kV より低いと放電は起きない。また、-20.2kV 以下では発火しなかった。 水素濃度は 20~25%で発火した。放電エネルギは約 0.25mJ と推定され、水素の最小 発火エネルギに比較するとかなり大きいが、これはプラスチック電極に与えた電荷のう ち放電に関与するのは一部分のみであることを示している。

2.3.3.10 "Spontaneous Ignition of Hydrogen leaks: A Review of Postulated Mechanisms", G.R.Astbury, S.J.Hawksworth, Int.J.Hydrogen Energy, 32, 2178 (2007)

人体の指先から発生する静電気放電が水素の発火源になる可能性について検討した。 空気の絶縁破壊電圧は 30kV/cm で、水素は 17.5kV/cm であるので、水素濃度 30%(化 学量論組成)における絶縁破壊電圧は、 $0.3 \times 17.5 + 0.7 \times 30 = 26.25$ kV/cm である。ここ で、空気中の水素の消炎距離は 0.69mm であるので、発火時の電圧は最低で 26.25× 0.069 = 1.81kV となる。人体の静電容量はサイズや着衣により異なるが、通常は 100~ 300pF といわれているので、100pF とすると人体に蓄積されるエネルギ $E = 1/2 \cdot CV^2$ $= 1/2 \times (100 \times 10^{-12}) \times (1.81 \times 10^3)^2 = 0.164$ mJ と算定される。この値は、水素の最小発 火エネルギ 0.017mJ の約 10 倍に達する。従って水素は容易に発火に至る。

一方、プロパンの最小発火エネルギは 0.29mJ であるので、これに相当する静電エネ ルギが人体に蓄積すると、放電電圧は *E*=1/2・*CV*²より、*V*=約 2.4kV となる。この静 電電圧に対して放電間隙は 2.4/30=0.08cm=0.8mm となるが、この値はプロパンの消 炎距離である 1.8mm よりも小さくなるので、火炎が発生しても消炎して広がる可能性 は低い。なお、1mJ 程度以下のエネルギの静電気放電では人体に対する電撃はほとん ど感じられない。

また、通常は水素自体が静電気の電荷を持つことはないが、微粒子が水素気流中に流 れると静電気が発生することはよく知られている。水素の放出時にコロナ放電が発生し た例も報告されている。

2.3.3.11 "Minimum Ignition Energy of Hydrogen-Air Mixture: Effects of Humidity and Spark Duration", R.Ono, M.Nifuku, S.Fujiwara, S.Horiguchi, T.Oda, J.Electrostatics, 65, 87 (2007)

水素-空気混合ガスの最小発火エネルギを容量放電法により測定した。電極は直径 1mmのタングステン製で先端の開度が40°の針状電極を用いた。水素濃度が22~26% で、電極間隔が0.5mmのときに発火エネルギが最小となり、その値は0.017mJであっ た。乾燥空気の場合と相対湿度90%の空気中の場合では、ほとんど発火エネルギに差 がなかった。

次に、放電回路に抵抗を挿入して RC回路として放電させることにより、放電時間の 影響を調べた。抵抗を 0Ω から $50M\Omega$ で変化させると放電時間は 5ns から 1ms まで変 化したが、最小発火エネルギーへの影響は小さく、約 0.022mJ に増加したにすぎなかった。

2.3.4 熱面、熱流体

2.3.4.1 NASA Standard NSS 1740.16, "Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems, Guidelines for Hydrogen System Design, Materials Selection, Operations, Storage, and Transportation", Natinal Aeronautics and Space Administration (1997)

空気中の発火温度は、水素濃度、圧力、容器壁の表面処理状態に依存する。報告されている発火温度はシステムに依存するところが大きいので、その値は同じシステムのみに適用するべきである。空気中の化学量論組成の水素の発火温度は101.3kPaで773K(500℃)から850K(577℃)の範囲にある。低圧で590K(317℃)程度の低温の物体と長時間接触していると発火することがある。

2.3.4.2 ANSI/AIAA Standard G-095, "Guide to Safety of Hydrogen and Hydrogen Systems", American National Standards Institute/American Institute of Aeronautics and Astronautics (2004)

空気中の発火温度は、水素濃度、圧力、容器壁の表面処理状態に依存する。報告されている温度データはシステムに依存するところが大きく、数値は同一システムのみに適用するべきである。空気中の化学量論組成の水素の発火温度は 101.3kPa で773K(500℃)から 850K(577℃)の範囲にある。

ただし、590K(317℃)程度の低温でも低圧下で長時間の接触により発火する。

2.3.4.3 EIGA Document 121, "Hydrogen Transportation Pipelines", European Industrial Gases Association (2004)

空気中の最低発火温度は 500℃である。

2.3.4.4 IEC Standard 60079-20-1, "Explosive Atmospheres - Part 20-1: Material Characteristics for Gas and Vapour Classification - Test Methods and Data", International Electrotechnical Commission (2010)

防爆機器の分類に使われる発火温度の測定方法と測定値が示されている。測定には内 容積が 200mL のガラス製三角フラスコを使い、電気炉で定温に加熱して空気を入れた 容器に試験ガスあるいは液体を導入することにより測定する定温式発火温度測定法に より求める。この方法で得られた水素の発火温度は 560℃である。一方、メタンの発火 温度は 600℃(鉱山内メタンは 595℃)である。

2.3.4.5 NFPA 2, "Hydrogen Technologies Code", Natinal Fire Protection Association (2011)

大気圧の水素-空気混合ガスの発火温度は米国鉱山局より最低値が 932F(500℃)と 報告されている。

2.3.4.6 "Kindling Temperatures of Mixtures of Air and Hydrogen", M.Prettre, P.Laffitte, Compt. rend., 187, 763 (1928)

空気中の水素の発火温度を直径 35mm、内容積 110cc のパイレックス管中で昇温法 により測定した。水素濃度と発火温度は次のようになり両者の間の関係は明らかにする ことができなかった。測定では水分の影響を排除するために使用するガスの乾燥に気を 配っている。

H ₂ [%]	10.10	14.30	19.90	24.30	29.70	35.85	42.90	47.20	58.80	68.85	79.40	90.45
発火温度 [℃]	456	460	462	465	468	471	475	477	482	496	514	540

2.3.4.7 "Comparison of Hot Surface and Hot Gas Ignition Temperatures", J.M.Kuchta, R.J.Cato, M.G.Zabetakis, Comb. & Flame, 8, 348 (1964)

3 種類の測定方法により発火温度を測定して測定方法によるデータの違いを比較した。測定装置は、(1)パイレックスガラス製の三角フラスコ(容積 200cm³、長さ 13cm、 相当半径 2.2cm)、(2)パイレックスガラス製円筒容器(半径 0.5cm、長さ 15cm)、(3) 空気ジェット(半径 0.5cm、長さ 10cm 以上)。

測定結果を下に示す。三角フラスコ中の発火温度は、AIT(自然発火温度)として知ら れている数値とほぼ一致しているが、他の方法で得られた値は高い温度になっている。 信頼性のある値を得るためには、十分大きな熱源と十分な接触時間を考慮する必要があ る。

		発火温度 [℃]	
熱源	パイレックスガラス	パイレックスガラ	空気ジェット
ガス	製三角フラスコ中	ス製円筒容器中	
水素	554	635	640
メタン	537	745	1040
ブタン	405	630	910

2.3.4.8 "Ignition of Gases and Vapors"、F.Powell、Ind. Eng. Chem.、61(12)、29 (1969) 高温物体による発火に関する検討のひとつとして、発火を起こす高温粒子の大きさと 発火温度の関係を調べた。8%メタンー空気では直径 6.5mm の白金球では発火温度は最 低で 1200℃であるのに対して、水素-空気は同じ温度で直径が 1mm の白金あるいは 石英の球で発火する。また、0.5~5.5mm の直径の種々の材料の球では、メタン-空気 が 1120℃でも発火しないのに対して、水素-空気は比較的容易に発火する。

2.3.4.9 HySafe, "Biennal Report on Hydrogen Safety", Chap.3.1.5, Hydrogen Ignition (2007)

水素の自然発火温度は、585℃である。

2.3.4.10 "Ignition of Explosive Atmospheres by Small Hot Particles: Comparison of Experiments and Simulations", M.Beyer, D.Markus, Sci.Tech.Energetic Materials, 73(1), 1 (2012)

粒径 0.5~1.3mm の単一粒子を垂直にしたタングステン細線(線径 25µm)の先端 に固定し、水素-空気混合ガス中で外部から YAG 連続レーザ(波長 1064nm、出力 50-2000W)を照射することにより加熱して高温粒子表面で水素が発火する条件を調べ た。粒子は酸化鉄とセラミック接着剤から作られている。粒子表面の温度は放射計を用 いて測定した。

粒径が 500 μ m の場合、水素濃度が 5、10、15、20 及び 25%に対して発火温度のば らつきは大きいが、それぞれおよそ 1260、1280、1320、1360 及び 1360K であった。 粒径が 1000 μ m の場合は同じく、それぞれおよそ 1130、1090、1050、1050 及び 1070K であった。発火源が 1mm 程度以下の微小な高温粒子の場合は発火温度がかなり高い。 また、水素濃度の影響は比較的小さく、粒径の影響が大きい。同様の傾向は、プロパン、 エチレンについても測定されている。

2.3.5 放射熱、熱光線

高温に加熱された物体から放射される放射熱により可燃性のガス、液体、固体は高温 になり、発火温度以上の高温になって発火する。高温加熱物体には、高温固体表面、高 温液体表面あるいは火炎などの高温気体が考えられる。また、放射熱は電磁波の一種で あり、波長はおよそ 0.3~50 µ m のものといわれている。

エネルギ密度の大きな熱光線のひとつにレーザがある。位相と波長のいずれもが狭い 分布に揃った光線で、干渉性がよく指向性と収束性が高いために化学種を励起し化学反応を引き起こす効果がある。直接ガス分子を活性化して発火する場合だけでなく、照射 された固体表面からプラズマが発生して可燃性ガスを発火させる場合もある。 2.5.5.1 "ArF エキシマレーザによる水素 – 酸素 – アルゴン混合気の着火・火炎核成長過程の実験的研究、古谷博秀、濱純、高橋三餘、日本機械学会論文集(B編)、61(590)、3470 (1995)

アルゴン-フッ素エキシマレーザ(波長 193nm、最大出力 300mJ、パルス時間 10ns) を用いて、20%水素/10%酸素/70%アルゴン混合ガスを発火させた。初気圧は 0.08MPa である。レーザ光が集光する焦点付近で発火し、その後火炎は成長する。照 射エネルギが 212mJ 以上では発火が見られたが、169mJ では中心に微少な高温領域と 思われる部分が生じるものの発火には至らなかった。酸素濃度を 30%まで高めると発 火に必要な照射エネルギは低下した。また、混合ガスの初気圧の高い方が低い照射エネ ルギで発火した。

2.3.6 裸火

2.3.6.1 NFPA Standard 2、"Hydrogen Technologies Code"、National Fire Protection Association (2011)

圧縮水素及び液化水素の製造、貯蔵、配管、利用、取扱いにおける基本的安全対策を 施すために使われる基準を定めたもので、下記の区域内での喫煙を禁じている。

・屋外にある水素の貯蔵庫及び消費区域から 25ft (約 7.6m)

・水素を貯蔵あるいは消費している建屋内及び区域

2.3.7 発熱反応

2.3.7.1 長谷川和俊、"危険物の安全"、63、丸善(2004)

発火源としての発熱反応は、発熱化学反応によってそれ自体が発火に至るケースもあ れば、あるいは、発熱化学反応によって周囲のものを直接的に発火させるケースもある と考えられる。ただし、後者は「4. 熱面、熱流体」で述べた現象と明確な区別を行う ことは難しい。発熱反応は化学反応に着目した見方であり、熱面及び熱流体は熱環境に 着目した見方と考えることができる。

2.3.7.2 "Catalytic Ignition of Fuel/Oxygen/Nitrogen Mixtures over Platinum", P.Cho, C.K.Law, Comb. and Flame, 66, 159 (1986)

金属には石油化学プロセスにおいて水素化触媒などに使われているように、表面活性 が高いものは水素の反応性を高めるため、発火燃焼に対しても触媒として作用すること がある。例えば、高圧下で爆発限界を測定する際、金属線溶断着火法に白金線を使用す ると着火させる前に自然発火を起こすことはよく知られている。ここでは、直径 0.127 µmの白金線を用いて大気圧下の発火温度を測定し、ガスの流速や濃度の影響を調べた。 水素と空気の混合ガスの場合、ガスの流速が 5~20cm/s では水素濃度が 1.0%の時に 70 ~75℃、6.0%では 90~95℃でそれぞれ発火した。なお、プロパン及びブタンは 0.5% では 390~400℃で発火するが 2.0%では約 340℃であった。

2.3.8 衝撃、摩擦、打撃

2.3.8.1 "Ignition of Gases and Vapors", F.Powell, Ind. Eng. Chem., 61(12), 29 (1969)

回転する砥石に対して種々の硬い物質を打ち付ける方法ではメタン-空気は発火し なかったが、水素が共存すると発火する。

また、鉄車輪を回転させながら砂岩に切り込む場合に、周速度が 3.8m/s ではメタン -空気は発火するが、2.2m/s では発火しない。一方、石灰岩では 3.8m/s を超えた速度 でも発火は起きなかった。これに対して、水素-空気では、石灰岩、花崗岩、砂利、コ ンクリート舗装などに切り込むとともに直ちに発火した。

さらに、鋼球(質量1または2g)を高速で砂岩の表面に打ち込んだ場合、メタンー 空気では914m/sの速度でも発火しなかったが、水素-空気は容易に発火した。その際 のエネルギは600または2000Jになる。打ち込み角度に関しては表面と平行に近くな ると発火しやすい傾向が見られる。

次に、軟鋼同士を 2m/s の速度でこすると水素-空気は直ちに発火した。一方、メタ ン-空気は 9m/s の周速度で軟鋼を回転させながら軟鋼に切り込むと発火が見られた。

マグネシウム合金(Mg93%)、アルミニウム合金、軟鋼、銅、亜鉛、鉛などを岩石 に衝突させると水素-空気は発火する。鉛球の場合は衝突時に球が破壊したときにのみ 発火が起きている。同様の球をハンマーで壊した場合には水素-空気は発火したが、メ タン-空気あるいはペンタン-空気では発火しなかった。

落球試験においてもメタンー空気は発火しなかった。ただし、15%水素-空気は軟鋼 と軟鋼の衝突で発火が起きた。

衝突による発火に関する種々の実験結果を整理すると以下のようになる。

○軟鋼対鋼

・継続的な摩擦(研磨を含む) ・・・ メタンー発火

・落槌の落下 ・・・ 水素 – 発火、 メタン – 不発火

○高炭素鋼対鋼

・工具による衝撃または模擬した方法
 ・・・水素-発火、メタン-発火

・継続的な摩擦 ・・・ メタンー発火

・高速小球衝突 ・・・ 水素 - 発火、 メタン - 不発火、

○高炭素鋼対炭素鋼

・落槌の落下 ・・・ メタンー発火

○高炭素鋼対アルミニウム

・高速小球衝突 ・・・ 水素 – 発火 ○高炭素鋼対マグネシウム ・高速小球衝突 ・・・ 水素 – 発火 ○高炭素鋼対鉛 ・高速小球衝突 ・・・ 水素-発火(小球破壊時のみ) ○高炭素鋼対銅 ・高速小球衝突 ・・・ 水素-発火 ○高炭素鋼対亜鉛 ・高速小球衝突 ・・・ 水素-発火 ○錆びた鋼対チタン ・落球の落下 ・・・ メタンー発火 ○錆びた鋼対マグネシウム合金(Mg93%) ・落球の落下 ・・・ メタンー発火 ○鋼対アルミニウム及びアルミニウム合金(Mg10%) ・高速小球衝突 ・・・ 水素 – 発火 ○錆びた鋼対アルミニウム及びアルミニウム合金(Mg10%) ・落球の落下 ・・・ 水素 一発火、メタン 一発火 発火しにくいとされている金属についても試験して以下の結果が得られた。 ○鋼対研磨ホイール(金剛砂、コランダム) ・継続的な摩擦 ・・・ 水素-発火 ○ニッケル合金対研磨ホイール(金剛砂、コランダム) ・継続的な摩擦 ・・・ 水素-発火 ○銅-ベリリウム対研磨ホイール(金剛砂、コランダム) ・継続的な摩擦 ・・・ 水素 – 発火(持続時間 5s 以上) ○アルミニウムー青銅対研磨ホイール(金剛砂、コランダム) ・継続的な摩擦
 ・・・
 水素 - 発火(持続時間 5s 以上) ○鋼対銅ベリリウム合金 ・落球の落下 ・・・ メタンー不発火 ・工具による衝撃または模擬した方法 ・・・水素 - 発火 ○コランダム対ニッケル合金 ・工具による衝撃または模擬した方法 ・・・水素-不発火 ○花崗岩対ニッケル合金 ・工具による衝撃または模擬した方法 ・・・水素-不発火 ○砂岩対青銅 ・工具による衝撃または模擬した方法 ・・・メタンー発火

○鋼対青銅

・工具による衝撃または模擬した方法 ・・・メタンー発火

・落球の落下 ・・・ 水素-発火

○鋼対亜鉛

・落球の落下 ・・・ 水素-不発火

2.3.8.2 "Ignition of Flammable Gases and Vapours by Friction between Footwear and Flooring Materials", F.Powell, J.Hazard. Mat., 2, 309 (1977)

床材と靴底との摩擦による可燃性ガスあるいは蒸気の発火の可能性について実験を 行った。可燃性混合ガスの雰囲気で先端に試験体を取付けたハンマーを半径が 0.91m の円弧を描きながら対象物(幅 75mm)に接触するように回転させて摩擦により発火す るのを目視で調べた。対象物の取付け角度や試験体の回転速度を調節して試験体ごとに 最も火花を生じる条件で測定している。対象物を砂岩にした場合の発火の確率と信頼限 界 95%の範囲を示す。全試験回数は1000回である。水素及びメタンの結果を下に示す。 ガス濃度は、化学量論組成よりも低濃度側で発火しやすいことを考慮して決めている。 また、付与エネルギ値はハンマーの回転を駆動するバネに加えた負荷から求めている。

		発火の確率 [%]			
試験体		カッコ内は 95%信頼限界範囲 [%]			
(付与エネルギ計算作	直)	15%水素-空気	7%メタンー空気		
タングステンカーバイド鋲	(117J)	—	0 (0 - 0.7)		
鋲釘	(117J)	—	0.2 (0 - 1.1)		
シルバースチール	(289J)	—	14 (0.4 - 58)		
耐熱性ランプガラス	(117J)	47 (23 - 72)	0 (0 - 1.4)		
瓶ガラス	(117J)	39 (28 - 52)	—		

対象物を綱にし	た堪合の発ル	・の確索を「	下に示す	付互てネバ	レギ計管値け	117.1°	であス
刈豕物で൝にし	ノに勿口 ツガルハ		「「「クリック」	下ナエイル	レイ 印 弁 胆は	1110	$\langle \alpha \rangle \langle \alpha \rangle$

		発火の確率 [%]				
試験体	対象物	カッコ内は 95%信頼限界範囲 [%]				
		15%水素-空気	7%メタン-空気			
軟鋼	錆びた軟鋼	42 (28 - 58)	—			
EN36 硬化鋼	EN36 硬化鋼	_	0 (0 - 1.2)			

水素(可燃性グループⅡC)、メタン(同I)、プロパン(同Ⅱa)及びエチレン(同 Ⅱb)を用いて各種の対象物と試験体の組合せで発火試験を行った結果から、摩擦によ る発火の危険性が高いと考えられるのは表面が硬いものやざらつきのあるものに衝突 して可燃性粒子を発生するもので、チタン、セリウム、ハフニウム、ジルコニウムなど である。次に、マグネシウム及びその合金は、錆びのある鋼並びにシリカ(砂)とテル ミット反応を起こす可能性があり危険性が高い。アルミニウムはシリカとの反応性がな いので危険性は低くなる。ただし、マグネシウムとアルミニウムのいずれも(合金を含 む)錆びのついた表面に衝突すると金属粉を残すので、それがさらに硬い物質と衝突す るとテルミット反応の発光を起こす可能性がある。

軟鋼、鉄、タングステンカーバイドなどはメタンに対して発火の危険性はかなり低く、 プロパンに対してはやや高くなり、エチレンに対してはさらに高くなる。水素に関して は記述がないが、かなり高いと判断しなければならない。

砂岩、花崗岩、クレイタイル、煉瓦、コンクリート、アスファルトなどが靴底の鋼と 接触するところでは、メタンの発火の危険性は低いが、プロパンではやや高くなり、エ チレンはかなり高くなる。水素については記述されていないが、さらに発火の危険性は 高いと考えなければならない。

2.3.8.3 "Limiting Values for the Ignition of Hydrogen/Air Mixtures by Mechanically Generated Ignition Sources", F.Welzel, M.Beyer, C.-P.Klages, 23rd Int. Conf. on Detonation, Explosion and Reactive Systems (2011)

金属の摩擦による水素の発火を金属製回転板と金属製ピン(Φ8mm)を接触させる 方法で実験した。それぞれ SUS 製と軟鋼製同士を使用し、回転速度を変えることによ り接触時の負荷密度は 0.5 から 38N/mm²の範囲で変動した。このとき回転速度が 1m/s の低速でも水素の発火が起こる。

表面の力の密度を回転速度と負荷密度と摩擦係数の積から求めると、SUS の場合は 水素濃度が 10%及び 30%で、それぞれ、2.1W/mm²及び 3.7W/mm²が発火する限界で あった。一方、軟鋼の場合は、同様に、それぞれ 4.4W/mm²及び 6.4W/mm²が発火の 限界となっており、SUS の場合の約 2 倍の力が必要であった。

2.3.9 断熱圧縮、衝撃波

一般に、ガスが外部との熱の出入りがない場合の状態変化を断熱変化というが、断熱 状態で圧縮が起きると系の温度が上昇して可燃性ガスの発火温度に達すれば発火して 燃焼爆発に至る。理想気体を仮定すると、圧縮前後の温度、圧力、体積をそれぞれ、 T_1 、 T_2 、 p_1 、 p_2 、 V_1 、 V_2 とすると、それらの間に下式の関係が成り立つ。ここで、 γ は比熱容量の比である。

$$p_1 V_1^{\gamma} = p_2 V_2^{\gamma}$$

$$T_2 / T_1 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma - 1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\gamma - 1) / \gamma}$$

したがって、例えば 25℃、大気圧の空気(γ=1.40)が断熱圧縮を起こすと以下の 温度になる。このとき可燃性ガスが存在していると発火温度以上になって発火に至るこ とがある。

圧縮後の圧力 [MPa・abs.]	0.4	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0
圧縮後の温度 [℃]	168	300	426	635	834	1076

断熱圧縮では圧縮の過程が音速以下の速度で進行するが、超音速で圧縮が起きると衝撃波圧縮になり温度の上昇は断熱圧縮の場合よりも大きくなる。したがって、可燃性ガスの雰囲気に外部から衝撃波が侵入した場合はその衝撃波により圧縮されて高温になり、可燃性ガスの発火温度以上の高温になれば発火する。配管中やダクト内を進行する衝撃波を仮定すると、高圧側から低圧側に向かって進行する超音速の圧縮波が進行しているので、その高圧側の温度、圧力をT₂、p₂、低圧側の温度、圧力をT₁、p₁とすると、理想気体では以下の関係が得られる。

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{\alpha + \frac{p_2}{p_1}}{1 + \alpha \frac{p_2}{p_1}}$$

$$\Box \Box \heartsuit, \quad \alpha = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \quad \heartsuit \And \image$$

例えば、25℃、大気圧の空気が衝撃波による圧縮を起こすと下表に示す温度になる。 ただし、実際には高温では解離やイオン化が起きるためにこの値には至らない。

圧縮後の圧力[(MPa・abs.]	0.4	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0
圧縮後の温度 [℃]	201	502	995	2467	4928	9820
また、外部から衝撃波が進入するケースのほか、高圧ガスがノズル状の開口部から低 圧空間に噴出する場合に噴出口の前方でマッハディスクと呼ばれる衝撃波領域が発生 して高温が発生することがある。高圧側(po)と低圧側(pc)の圧力比(pdpo)が臨界圧力比以 下の場合、噴出するガスの流速は音速になる。臨界圧力比は、ガスの比熱容量比を γ と して下式で示される。したがって、低圧側が大気圧の場合は水素の圧力 po=0.192 MPa を超えると開口部から流出する水素の流速は音速である。その際、大気中に出た水素は 急速に膨張して圧力が低下するが、その途中で超音速の流れの部分が生じ、そこから衝 撃波が発生して高温になり火炎が発生する場合がある。

$$\mathbf{p}_{\mathbf{c}} / \mathbf{p}_{\mathbf{0}} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\gamma / (\gamma - 1)}$$

2.3.9.1 "Ignition of Combustible Gases by Converging Shock Waves", J.Fay, E.Lekawa, J. Applied Physics, 27(3), 261 (1956)

直径 2.75 インチ(70mm)の衝撃波管中で大気圧の水素-空気混合ガスに超音速の 衝撃波を打ち込んで発火の起こる限界条件を求めたところ下表のようになった。水素の 濃度で異なるが、マッハ数が 1.1 程度の弱い衝撃波でも発火している。このときの理論 火炎温度の分布状況を消炎距離と等しい直径の円筒の範囲で求めて発火エネルギ密度 を計算し、衝撃波発火エネルギとした。これを放電による発火エネルギの文献値を消炎 距離で割った値と比較するといずれの水素濃度においてもよく一致している。

H_2 [%]	マッハ数
7	1.306
12	1.15
20	1.115
40	1.115
64	1.215

2.3.9.2 "Spontaneous Ignition of Pressurized Releases of Hydrogen and Natural Gas into Air", F.L.Dryer, M.Chaos, Z.Zhao, J.N.Stein, J.Y.Alpert, C.J.Homer, Combust.Sci. and Tech., 179, 663 (2007)

破裂板の作動により高圧の水素が噴出した場合に衝撃波が発生して水素が自然発火 する現象を種々の条件で実験により調べた。1/2 インチ径のパイプの場合、水素圧が 20.4atm では発火が起こらないが、22.1atm では発火した。このとき、破裂板の下流側 のパイプの長さは 5.08cm であるが、これを 3.8cm と短くすると 56.6atm でも発火せ ず、パイプの長さが影響していることが示された。一方、メタンの場合は 99.66atm ま で高圧にしても発火しなかった。

2.3.9.3 "水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術(WE-NET)第Ⅱ期研究開発タ スク2安全対策に関する調査・研究"、新エネルギー・産業技術総合開発機構、エネル ギー総合工学研究所、平成14年度成果報告書、157 (2003)

高圧水素がノズルから大気中に噴出したときのノズル近傍の流体力学的構造の数値 シミュレーションを行った。その結果、例えば、水素圧 1MPa、ノズルロ径 1mm では、 ノズルから出た水素の圧力及び温度は膨張により低下し、一旦大気圧以下の圧力になる。 圧力の極小点ではマッハ数が約 2.8 に達して極大値となる。そしてその直後に衝撃波面 が形成された。ただし、水素圧が 1MPa の場合にマッハ数極大点近傍の温度は約 100K 程度まで低下しており、その後温度は回復するものの水素が発火する温度までには至っ ていない。噴出圧力が高くなれば通常の可燃性ガスの場合と同様にマッハディスクが安 定して火炎として存在するようになると考えられる。

2.3.9.4 "Self-Ignition and Flame Propagation of High-Pressure Hydrogen Jet during Sudden Discharge from a Pipe", T.Mogi, Y.Wada, Y.Ogata, A.K.Hayashi, Int.J.Hydrogen Energy, 34, 5810 (2009)

高圧水素を PET 製の破裂板を破壊してパイプ中に放出すると衝撃波により水素が発 火した。パイプは直径が 5 あるいは 10mm で、長さが 50~500mm である。水素圧が 6.5MPa より低圧側では発火が見られず、6.5MPa 以上の圧力で発火する。パイプ中で 発火した火炎は水素とともに大気中に噴出して火炎が広がった。

2.3.10 水素関連の事故に関する統計

高圧ガス関係の事故報告を集積したデータベースの中から水素に関連した事故について漏洩着火の事例を抽出し、実際の事故につながった着火源について整理した。使用した事故データベースは、高圧ガス保安協会作成のもので、経済産業省の以下のサイトで公開されている。

http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/hipregas/files/ incident_db_2012.xls

1965~2011年(47年間)の高圧ガス関連の全事故(盗難は除く)は5827件である。 このうち、水素が関連したもの(混合ガス含む)は、257件である。事故の件数として は、ガスの種類別で見ると、液化石油ガス(1740件)、アセチレン(957件)、酸素 (899件)、アンモニア(563件)、フルオロカーボン(472件)、窒素(287件)、 塩素(275件)、水素の順になっている。ちなみに、メタン及び天然ガスは両者で171 件である。 水素の事故を現象により分類すると以下のようになる。

漏洩	95 件	[2	このうち、	水素のみは、	53 件]
火災	105 件	[同		59 件]
爆発	44 件	[同		25 件]
破裂	16 件	[同		8件]
配管変形	1件(漏洩	なし) [司		0件]
その他	1件(車両	横転) [同		0件]
(ただし、	「爆発・火災」とし	て分類されてい	いるもの	2 件、及び「火	災·漏洩等」

として分類されているもの3件はそれぞれ重複して分類している。)

次に上記の火災事故105件について着火源により分類すると以下のようになる。

静電気	39 件
自然発火	13 件
自然発火(高温)	17 件
裸火	9件
高温(酸化反応)	1件
火花	1件
火花(衝撃)	7件
火花(グラインダ)	2 件
火花(電気)	2 件
火花(衝突)	2 件
火花(溶断)	1件
不明あるいは調査中	4件
記載なし	9件

(ただし、「静電気・自然発火(高温)」として分類されているもの1件、及び 「静電気・裸火」として分類されているもの1件はそれぞれ重複して分類してい る。)

一方、上記の爆発44件についても着火源により分類すると以下のようになる。

静電気	8件
自然発火	1件
自然発火(高温)	2 件
裸火	6件
高温	1件
火花	1件
火花(電気)	4件

断熱圧縮 2件 爆ごう 1件 熱暴走反応 1件 摩擦熱 1件 その他 1件 無 1件 不明あるいは調査中 5件 記載なし 10 件 (ただし、「摩擦熱、断熱圧縮」として分類されているもの1件は重複して分類 している。)

火災、爆発のいずれの事故においても着火源として多いのは、静電気、自然発火、裸 火、火花等が挙げられる。

2.3.11 水素の着火事故事例

過去に報告されている水素の関係した火災・爆発事故の中から発火源に注目して代表 的な事故事例を記す。

2.3.11.1 静電気火花による事故例

(1) 連続触媒再生改質装置からの水素漏えいによる火災(2009年9月、山口県)¹⁾

石油コンビナート地区にある製油所内で、停電により連続触媒再生改質装置を含む全 精製装置が停止した。装置の安全確認を行った後に、スタートアップの水素張り込み作 業を行っていたところ、巡回点検中の従業員が第3反応塔出ロフランジで火災を発見し た。直ちに自衛消防組織を立ち上げ、公設消防の指揮の下で、発災部周辺設備への冷却 散水を行うとともに、発災設備への窒素置換を行い、鎮火させた。発災後の調査では、 フランジ下部から漏えいは確認されたが、設備の機械的損傷及びガスケットの損傷は見 られなかった。このことから、原因は、緊急停止による急激な温度降下のため、フラン ジ部の締め付け圧力が減少して、水素が漏えいしたものと考えられる。また、周辺に着 火源もないことから、静電気により火災に至ったものと推定される。今後は、緊急停止 時等において、フランジ部のボルトの増し締め、ガス検知器による漏えい確認を行うよ う手順書の見直しを実施することとした。

人的被害 なし

事故原因 点検不良

(2) 水素精製装置の出口継手部からの水素漏えいによる火災(2009年12月、兵庫県)¹⁾

事業所内で、水素ガスを容器に充てん中(圧力 18.5MPa)に、従業員が計器室で着火音 を確認した。直ちに現場を確認したところ、水素精製装置からの着火を確認し、水素ガ ス充てん圧縮機を緊急停止し、散水を開始した。火災は、水素製造装置内の水素精製装 置の脱酸塔出口継手から漏えいした水素ガスが、保温外装板をつたわり、上部に設置さ れている保温外装板内に溜まり、静電気等の原因により、着火したと推定される。ガス ケット交換により漏えいは止まったことから、漏えいの原因は、ガスケット(ダイフロ ン:フッ素系樹脂)の当たり面に異常が出たものと推定される。今後は、保温材内部に ガス漏れが生じた場合にも検知できるよう、保温材上部に点検口を設け、定期的にガス 検知器で漏えい検査を実施することとした。

人的被害 なし

事故原因 製作不良

(3) 水素ガス容器交換時における火災(2008年4月、滋賀県)¹⁾

研究施設において、炭化水素計の水素容器が空になった際、レギュレーターの調圧器 のバルブを全開にしたまま容器を交換し、元弁を開けた時、レギュレーター2次側の安 全弁から水素ガスが噴出・漏えいし、発火した。この事故により作業員1名が火傷によ る軽症を負った。発火の原因は静電気と推定される。

人的被害 軽傷1名

事故原因 誤操作、認知確認ミス

(4) 水素ガス容器のバルブからの発火(1997年8月、愛知県)¹⁾

販売店の作業員が消費先に水素ガス容器を納入するため、容器の保護キャップを廻した時、バルブハンドルが共廻りを起こし水素ガスが漏えい・着火し作業員が火傷を負った。発火の原因は静電気と推定される。

人的被害 軽傷1名

事故原因 誤操作(取扱い不良)

(5) 移動中の容器転落による水素ガス火災(1996年2月、熊本県)¹⁾

車両の荷台に水素ガス容器2本をのせて走行中、急ブレーキをかけたため容器が転倒 し、はずみでバルブが緩み水素ガスが噴出し、火災となった。車は全焼したが、けが人 はなかった。容器を固定しないで走行したため転倒したもの。発火の原因は静電気と推 定される。

人的被害 なし

事故原因 認知確認ミス

(6) 石油樹脂製造装置の水素供給配管フランジからの火災(1986年7月、岡山県)¹⁾ 化学工場で石油樹脂に高温、高圧下で水素を添加して合成接着剤を製造していたとこ ろ、反応塔下部の水素供給配管に取付けている逆止弁のフランジ部から水素ガスが漏え いし、静電気により着火した。ガスケットにアルミを使用しており、高温によりアルミ が変形し締付力が低下していたもの。

人的被害 軽傷1名

事故原因 誤判断 (ガスケット)

- (7) 配管フランジ部からの水素ガス漏えい・火災(1978 年 10 月、山口県)¹⁾
- 他社に水素ガスを供給していたところ、配管フランジ部のガスケットが劣化により亀 裂し、水素が漏えいして静電気によって着火した。

人的被害 なし

事故原因 劣化(亀裂)

(8) 製油所内の水素製造装置(熱交換器)の火災(1975年4月、茨城県)¹⁾

石油コンビナートの製油所内で第1水素製造装置の空冷式熱交換器のチューブから 水素ガスが洩れているのを発見した。漏えい個所を外気と遮断し、水素ガスの拡散を図 るためにスチームを吹きかけていたところ着火した。着火と共にプラントを停止した。 火は約20分後に消火した。発火の原因は静電気と推定される。

人的被害 なし

事故原因 劣化 (摩耗)

(9) 水素カードル容器に充てん中のホース破損による火災(1970年10月、東京都)¹⁾ 水素ガスをガスホルダーに貯蔵し、これを圧縮機で加圧して容器に充てんする高圧ガ ス製造所において、カードル容器(30本組)に高圧ホースを接続して充てん作業をし ていたところ、他のトラックが入って来て高圧ホースを切断し、吹き出した水素ガスに 着火した。附近のカードル容器を次々に加熱し、火災が大きくなった。ホースは反動で 反対側に停っていたトラックの燃料タンクを加熱し、トラックは炎上した。発火の原因 は静電気と推定される。

人的被害 重傷1名

事故原因 誤操作

(10)移動中の水素ガス火災(1967年4月、東京都)¹⁾

7本の水素ガス充てん容器を現場に運び、店員が、すでに4本を自動車から降ろし、 直立させた状態で自動車から約2m運んで手を離した直後、バルブ付近から「ボーン」 という音とともに、発火したため店員は、2週間の火傷を負った。その後もガスが完全 に放出されるまで燃焼を続けた。

人的被害 軽傷1名

事故原因 点検不良

(11) エピタキシャル装置の排ガス配管部の爆発(2010年11月、福岡県)¹⁾

工場内で破裂音がしたため現場へ急行したところ、屋外に設置してあるエピタキシャ ル装置 Y-6 用の排ガス配管部周辺から出火していることを確認したため、直ちに消火作 業を開始した(消防、警察が出勤)。また、エピタキシャル装置が設置されているクリー ンルームでは、排ガス配管に設置された微差圧計で「Y-3、Y-4、Y-6 スクラバー差圧異 常」を示す警報が発報したため、エピタキシャル装置 Y-3、Y-4、Y-6及び同装置で使 用していた低圧水素の供給を停止し、クリーンルーム内の作業者に対し避難指示を行っ た。屋外消火作業の終了後、周囲を調査したところ、エピタキシャル装置 Y-3 用の排ガ ス配管、スクラバー及びエピタキシャル装置 Y-6 用の排ガス配管の溶融、並びにスクラ バーを囲っているネットの焼損、エピタキシャル装置 Y-4 用スクラバーの破損を確認し た。原因は、エピタキシャル装置では特殊高圧ガスを使用するため、この装置から排出 されるガスは除害装置(希釈レススクラバー)により強制的に吸引され、除害された後大 気に放出される構造となっている。破損の状況から、エピタキシャル装置 Y-3 用の排 ガス配管の経年劣化により内部へ大気が混入し、静電気が着火源となり爆発がおきたと 推定される。爆発によりエピタキシャル装置用の Y-3 排ガス配管が飛散し、希釈レスス クラバーが破損、さらにエピタキシャル装置 Y-4 用の希釈レススクラバー、及びエピタ キシャル装置 Y-6 用の排ガス配管も破損した。破損したエピタキシャル装置 Y-6 用の 排ガス配管から漏えいした低圧水素に着火し、火災に至ったと推定される。今後は、排 ガス配管の材質と接続方法の見直し、漏えい検査の頻度の増加、常時モニタリング化も しくは高頻度化、排ガス除害設備の型式変更を検討することとした。

人的被害 なし

事故原因 劣化(腐食)

(12) メタン生成菌繁殖実験中のガス爆発(1997年1月、埼玉県)¹⁾

研究所の実験室でメタン生成菌の観察及び土壌培地での繁殖を確認するために、嫌気 性グローブボックス法によって実験を行っていたところ、突然爆発が起こり作業員が負 傷した。アクリル製グローブボックス内にメタン生成菌を接種した土壌培地の入った試 験管と密閉するためのゴム栓を入れてあり、グローブボックスの蓋は閉じた状態であっ た。ボックスには内部作業をするための気密性のゴム手袋が付いており、内部を真空引 きするとゴム手袋が膨らみ、真空バルブを閉じた後水素ガスを入れる。グローブボック ス内の作業を開始するため、ゴム手袋に両手を入れたが指先まできっちりと入らなかっ たので手袋の指先を引張り、1本ずつ指を入れていた。ゴムを伸び縮みさせているとき に爆発したことから静電気により着火したものと思われる。

人的被害 軽傷1名

事故原因 操作基準の不備

(13) 水素カードル容器に充てん中の爆発(1991年5月、大阪府)¹⁾

石油コンビナート地区の石油化学工場にある水素ガス充てん所で、水素カードル容器 に圧縮機で加圧しながら充てん中、配管の袋ナットから水素ガスが漏れ爆発した。配管 を連結する袋ナットの締付けが不十分であったもの。発火の原因は静電気と推定される。

人的被害 重傷1名

事故原因 点検不良(取付不良)

(14) コンテナに充てん中の水素ガス爆発(1966年11月、大阪府)¹⁾

ガス充てん所で水素ガスカードル容器(容量 617Nm³、15 本組容器)に水素ガスを 圧力 80~90kg/cm² で充てんしていたところ、充てん枝管部に取付けられた安全弁のね じ部が破損し、水素ガスが噴出・引火した。着火は静電気によるものとみられ、約 15 分間ほど燃焼が続いた。この爆発で詰所で仮眠していた従業員 2 名が負傷した。充てん 圧力の変動及び振動によって安全弁取付部のねじに亀裂が入り水素ガスが噴出したも のとみられている。

人的被害 重傷2名

事故原因 劣化(亀裂)

(15) 発電所タービン建屋屋上における火災(2004年3月、静岡県)²⁾

定期点検中の原子力発電所タービン建屋屋上にある水素排出管出口付近で火災が発 生し、コンクリート壁面の防水塗料や床面のアスファルト等が焼損した。原因は、ター ビン冷却用に使用していた水素を定期点検のために配管を通して屋上から放出したと ころ、配管内に鉄錆が生じておりガスの放出とともに排出されたため静電気を発生し、 外部の非接地金属(壁面の壁付リング)を帯電させて放電にいたり、水素が発火したも のと結論された。水素放出配管出口に火炎防止のための金網が設置されており、静電気 の発生と放電に影響した可能性がある。

人的被害 なし

事故原因 設計不良、点検不良

2.3.11.2 電気火花による事故例

(1) 石油精製工場の常圧蒸留装置の空冷式熱交換器のヘッダから漏えい火災(1987年7 月、宮城県)¹⁾

常圧蒸留装置は定修のため停止中であった。事故当日は稼働準備のため、スチームに

よる気密テストを行っていたところ、空冷式熱交換器のヘッダーと管の接合部に漏えい が見られたため、窒素ガスでパージした後、漏えい個所の修理を行った。その後、同装 置のヘッダーカバーを電動式トルクレンチでボルト締めを行っていたところ出火した。 窒素ガスでパージした時、バルブの誤操作により窒素ガス中に水素ガスが混入し、電動 式トルクレンチの火花により着火した。

人的被害 軽傷2名

事故原因 情報提供の不備(指示・伝達の不徹底)、誤操作(バルブ操作)

(2) 電気盤内への水素ガス混入による爆発(2001 年 12 月、秋田県)¹⁾

電器工場で液化石油ガスを原料とする水素発生装置の試運転を行っていた。当該工場 では電子部品である積層セラミックコンデンサの製造を行っており、これに水素ガスが 使用されている。試運転中、LPガス流量計の構造不良等のトラブルが発生し対応に追 われていた。事故当日、分析盤の水分計指示不良が見つかったため、分析盤内の配管を 窒素パージした。2時間後、作業員は窒素パージした時、分析用水素元弁を閉め忘れた のに気付き、急いで現場に駆けつけた。この時、水素発生機は既に送ガスされており、 分析盤内の水素ガス漏えい検知器の指示計メータが振り切れていたため、水素が流入し 極めて危険と判断し水素元弁を閉じると共に多量の窒素ガスを送入した。ガス漏えい検 知器指示計の値が 0 になったので置換されたものと勘違いして分析盤の扉を開けたと ころ、残留していた水素ガスと扉を開けた時に侵入した空気が混合し、電気の火花によ って爆発したものとみられている。この爆発で電気盤及び周辺装置が破損したが、作業 員は爆発個所から離れていたため無事であった。

人的被害 なし

事故原因 設計・構造上の不良(構造不良)、認知確認ミス(バルブの閉止)

(3) ガス警報器試験中の水素ガス爆発(1980年5月、大阪府)¹⁾

電機会社の社員がガス警報器の実験をするために試験装置のボックス内にガス警報 器を入れて水素ガスを流したところ、ボックス内部に電源コンセントがあったため電気 により着火・小爆発を起こし作業者が負傷した。

人的被害 重傷1名

事故原因 操作基準の不備

2.3.11.3 自然発火による事故例

(1) 漏えいした水素混合ガスの火災(2004年10月、北海道)¹⁾

石油コンビナート地区の製油所において、接触改質装置の反応塔入口配管フランジ部 より水素と炭化水素の混合ガスが漏えいし、火災が発生した。火災発生後、直ちに当該 装置を緊急停止して窒素パージを実施、まもなく自然鎮火した。当日はフランジ部にお いて劣化したウェザーシールを取り替える工事を行っており、発災個所のウェザーシー ルは発災直前に新規製作のタイプに交換されていた。新規製作された代替品は従来の物 よりも通気性が悪く、熱がこもりやすい構造になっていたため、ウェザーシール内部の 温度を上昇させることになり、フランジよりもボルトの温度が上昇してフランジの締め 付け力が低下し、そのために内部の高温流体が漏えいして空気と触れたことで自然発火 して火災に至ったものとみられる。当該部位は他のフランジ部と比較しても長いボルト を使用していたため、この現象を顕著に受けたと考えられる。

人的被害 なし

事故原因 設計・構造上の不良

(2) 配管の繰り返し疲労による割れからの火災(2004年1月、岡山県)¹⁾

石油コンビナート地区の石油化学工場で反応装置を定常運転中、オペレータが定期巡 視点検で反応器入口配管と冷却用水素合流部で有色の火炎を発見した。装置の緊急停止 作業に入り、落圧により火炎は鎮火した。反応器内の温度を制御するため、反応器入口 配管へ冷却水を注入しているが、このプロセス流体と冷却水素の温度差が500℃以上で あったこと、及び水素の注入量を大幅に変化させたことにより、配管に熱応力の繰り返 し疲労が発生し、割れが発生したとみられる。漏えいしたガスが発火した原因は高温に よる自然発火と推定される。

人的被害 なし

事故原因 劣化 (疲労)

(3) 水素製造装置の配管腐食によるガス漏えい・火災(2002年6月、大分県)¹⁾

水素製造装置の定期修理が完了し、プラントをスタートアップする段階で、一酸化炭 素を二酸化炭素に変成するコンバーターを昇温させるために、水素を主成分とする流体 をコンバーターに送っていたところ、この配管が腐食していたため、配管が開口し内部 の水素ガスが漏えいし火災が発生した。この配管は通常時には使用せず、スタートアッ プ時にコンバーターを昇温するために使用するものである。また、この配管は保温材が 施されているが、発災部分は歩廊下部のサポート材と配管保温材が干渉しており、保温 材の上部が切欠いた状況となっていたため、この切欠部から雨水が保温材内に侵入し、 配管外面が腐食して開口したものである。発火の原因は高温による自然発火と推定され る。

人的被害 軽傷1名

事故原因 劣化 (腐食)

(4) 反応器出口配管フランジ部からの混合ガス火災(1999年2月、兵庫県)¹⁾ 石油コンビナート地区の石油精製工場で、定期修理を終えた後、重油脱硫装置は順調 に稼働を続けていた。当日、製油所周辺が異常な寒波に見舞われる中で、反応塔の出口 配管部から突然出火した。直ちに装置を緊急停止した。発災部位は出口配管のフランジ 部でウェザーシールによって保温されていたが、下部フランジのみ保温されていなかっ た。折からの寒波に晒され、上下フランジで保温の有無により温度差が大きくなり、そ の繰り返しによりリングガスケットの当り面に微小な変化が生じ、炭化水素を含む水素 ガスが漏えいして高温により自然発火に至ったものと見られている。

人的被害 なし

事故原因 点検不良

(5) 水素化分解装置の熱交換器からの火災(1990年7月、愛媛県)¹⁾

石油コンビナート地区の石油精製工場で水素化分解装置の定期修理のため、停止操作 に入ったところ、熱交換器のシェル側入口部調節弁と配管フランジから水素と軽油の混 合流体が漏えいし、高温部(バルブ、フランジ)に触れ、高温により自然発火して火災 となった。

人的被害 なし

事故原因 点検不良(締付け不良)

(6)重油間接脱硫装置の熱交換器からのガス漏えい・爆発(1992年10月、千葉県)¹⁾ 石油コンビナート地区の石油精製工場で、重油間接脱硫装置の反応器の触媒交換作業 を完了した後、スタートアップ準備作業にとりかかった。窒素ガスで置換した後、系内 の窒素ガス及び実ガス(水素)による昇温昇圧を続けオイルインを行った。ほぼ定常状 態に入り熱交換器→加熱炉→反応器の各接続配管の最終段階のボルト締付け作業を実 施していた。熱交換器1基の検知孔から水素ガスが漏えいしているのを発見し、その対 応途上に爆発、火災が発生した。熱交換器の構成部品が飛散し、隣接会社のタンク、配 管類に被害を与えた。調査の結果、熱交換器のガスケットリテイナーが熱変形によりガ スケット溝に収まらなくなって溝に乗り上げ、この部分から水素ガスが漏えいして各部 材間に充満したものと結論された。その圧力により熱交換器本体が膨張・変形し、また チャンネルカバーを支持しているロックリングが変形したため、ねじの噛み合いが減少 しロックリング等がガス圧により離脱し飛翔した。発火の原因は高温ガスの自然発火と 推定される。

人的被害 死亡 10 名、軽傷 7 名

事故原因 劣化 (疲労)

(7) 接触改質装置の反応塔フランジからの漏えい・火災(2010年8月、大阪府)¹⁾ コンビナート地区の石油精製事業所内で、接触改質装置の第一反応塔頂部のフランジ

から、ガス(水素とナフサの混合物)が漏えいし火災が発生した。火災発見後、装置を緊

急停止し、系内の圧力降下操作を行ったところ消火を確認したので、泡放水等の消火活 動は実施しなかった。約1時間45分後に公設消防による鎮火が確認された。原因は、 反応塔頂部のフランジボルトが保温材に囲まれており、長時間高温環境となって推定 498℃程度に達していたと思われる。そのため、ボルトが伸びて締付力が低下したため と推定される。発火の原因は高温による自然発火である。今後は、反応塔頂部のボルト 部への熱のこもりを防止するため、フランジ周りの保温材は取り外すこととした。

人的被害 なし

事故原因 劣化

2.3.11.4 裸火による発火事故例

(1) アニール機水素炉における火災(2006年7月、新潟県)¹⁾

金属加工工場で、加熱したタングステン線を水素ガス雰囲気中(水素炉中)で延伸し て細線を製造する装置において、警備会社社員が巡回していたところ、アニール機水素 炉の流量計付近からの火災を発見した。消火器で消火するとともに、消防機関に通報し た。当該装置は、水素ガスが非高圧ガスの状態でホルダーに貯められ、水素が供給され る仕組みとなっている。原因は、作業員が設備の運転開始後、水素炉への水素流量を減 少させることを怠ったためである。水素炉からの余剰水素は燃焼していたが、供給され る水素量が通常より多かったため、水素炉から出る水素炎が通常より大きくなり、この 火炎により高圧ホース等が損傷し、漏えいしたガスが燃焼したとみられる。なお、この 装置は、水素炉と流量計等との距離が近く、また異常があった場合の水素ガス遮断装置 が破損部より下流に付いている形式であったため、構造上の安全対策を講じる予定であ った。今後、設備の安全化対策を早急に講じ、また日常点検実施内容の見直しを行うこ ととした。

人的被害 なし

事故原因 認知確認ミス

(2) 脱硫装置加熱炉からの漏えい・火災(2003年4月、北海道)¹⁾

石油コンビナート地区にある石油精製工場で、減圧軽油脱硫装置の通常運転中、オペレータがパトロール中に加熱炉で通常と異なる燃焼状態を確認したので、脱硫装置の緊急停止作業を開始した。その後、加熱炉ののぞき窓から火炎が炉外へ出ているのを発見したので、自衛消防組織発令と共に公設消防に連絡した。連絡後、加熱炉出口配管が接続している熱交換器のボルト部から漏えいが起こり、シェル側の油が漏れて自然発火した。この火災は水による消火で5分後に鎮火した。加熱炉管側の火災は配管の一部が破裂して、水素、軽油等が流出し、油の火炎により発火して火災となったものである。事故後、加熱炉管を調査したところ、長手方向に穴があいており、発災部位付近のコーキングが多く、コークス層が認められた。開口の原因は高温およびコークスによる浸炭と

考えられる。 人的被害 なし 事故原因 劣化(腐食)

(3) アンモニア合成装置の火災(1991年3月、神奈川県)¹⁾

石油コンビナート地区の化学工場においてアンモニア合成装置の定修工事が終わり、 合成炉のヒーターに点火し合成炉の触媒が所定温度に達したので水素を含む原料ガス の導入を開始した。原料ガスが反応を開始したのでヒーターを絞りながら降温作業をし ていたところ、バルブ絞りの微調整がうまくいかず、急激な温度降下によってボルトの 締付力の低下をきたし、合成炉出口フランジ部からガスが漏えいし、裸火又は静電気に よって原料ガスが着火した。

人的被害 なし

事故原因 点検不良(締付け不良)

(4) 水素カードル容器の火災(1985年8月、千葉県)¹⁾

容器検査所で、水素カードル容器の再検査を実施するため、操作箱の取付けボルトを

アセチレンで切断中、突然、1本のカードル容器から炎が出て作業員が火傷を負った。 人的被害 重傷1名

事故原因 認知確認ミス(置換不良)

(5) 熱交換器火災(1975年4月、岡山県)¹⁾

石油コンビナート地区の石油化学工場にあるベンゼン製造施設において、熱交換器の 修理中に、この熱交換器に附属しているコールドボックス内の混合ガス(メタン、水素) が漏えいし、溶接の火花により引火して熱交換器が炎に包まれた。コールドボックスの バルブの不完全な閉止(仕切板の挿入を怠った。)が事故の原因である。

人的被害 軽傷 11 名

事故原因 認知確認ミス

(6) 熱処理炉での水素ガス爆発(2001年11月、兵庫県)¹⁾

一般化学工場で窒化炉の増設工事を行っていた。請負工事会社の従業員が炉本体、ガス配管に窒素ガスを封入し気密試験を実施したが異常はなかった。炉の試運転のため、 系内に水素ガスを流す置換作業を開始した。その後、水素ガスを追い出すために窒素ガ スを流し始めたところ、排ガス燃焼用のバーナー付近で小爆発が起きた。この爆発で排 気ダクトが脱落し別の作業をしていた作業員に当たり、軽い打撲を負った。気密試験実 施後、実ガス置換する際に炉内空気を窒素ガスでパージするのを忘れ炉内に水素ガスを 流したため、混合気が排ガス燃焼筒のバーナーに到着し爆発に至ったものである。 人的被害 軽傷1名

事故原因 認知ミス(置換不良)

(7) 水素雰囲気焼結電気炉のガス爆発(1998年12月、埼玉県)¹⁾

非鉄金属加工工場で、水素を還元雰囲気ガスとして使用する焼結電気炉のスイッチを 入れたところ、炉内で異常音がしたので水素ガスの流入を止め、窒素ガスに切り替えた。 続いて昇温スイッチを切ったところ異常燃焼が起こり炉の安全弁からガスが噴出し、窓 ガラス、ドア及び屋根等が破損した。炉内の窒素ガスによる置換が十分でなかったうえ インターロック回路が取り付けられていなかったため残留した水素ガスが爆発に至っ たものである。ヒーターが発火源と推定される。

人的被害 なし

事故原因 認知確認ミス(置換不良)

(8) 焼鈍炉の水素ガス爆発(1970年3月、神奈川県)¹⁾

電機部品の製造工場で部品の熱処理をするため、焼鈍炉のバーナーに点火したところ 突然爆発し、作業員が死亡した。濃度計の故障により焼鈍炉内に水素を含む混合ガスが 残留していることを気付かずに点火したものと考えられる。

人的被害 死亡1名

事故原因 認知確認ミス(置換不良)

(9) 試験設備のバルブから水素が漏えいし爆発(2012年9月、宮城県)

研究所内の試験設備で、点火装置の不調が見られたため、水素ガスのバルブ(複数あ り)を閉止し、窒素ガスでパージして点火装置の点検を行っていたところ、複数のバル ブのうち最終段のバルブに埃が挟まり、出流れを生じた。ところが、それに気付かずに 点火装置を作動させたため、引火し大音響を発生した。なお、作業員が耳に不調を訴え た。

人的被害 軽傷1名

事故原因 検査管理不良

2.3.11.5 衝撃火花による発火事故例

(1) 安全弁圧抜き用ブリーダー弁からの漏えい・火災(2000年6月、沖縄県)¹⁾

石油精製工場で接触改質装置の定期点検を終えてスタートアップ中に、加熱炉から反応塔に至る配管の途中に取付けられた安全弁圧抜き用ブリーダー弁からナフサ及び水素ガスが噴出し着火した。直ちに安全弁入口弁を閉め、消火器ですぐ消し止めたため大事には至らなかった。当該安全弁ラインは2系列あり、1系列は通常運転用で、他の1

系列は触媒再生時に使用する安全弁である。事故発生個所は触媒再生ラインに取付けら れたブリーダー弁で定修時に引継ぎが十分になされておらず、定修完了後ブリーダー弁 が開いたままの状態で元バルブを開いたため漏えい・着火したものである。発火の原因 は火花(衝撃)と推定される。

人的被害 なし

事故原因 認知確認ミス (バルブの閉止)

(2) 水素カードル配管の破損による火災(1985年9月、群馬県)¹⁾

機械工場の中で使用済みの水素カードルを取り替えるため、フォークリフトを使って 移動しようとしたところ、誤って別の消費設備に連結された水素カードルを移動してし まったため、接続部が破損して水素ガスが漏えいし着火した。発火の原因は衝撃による 火花と推定される。

人的被害 軽傷1名

事故原因 誤操作

(3) トラックの追突による水素カードル容器の破損・火災(1972年5月、兵庫県)¹⁾

トラックに水素カードル容器(370 リットル×22 本組)を積載して国道を走行中、 信号待ちのため停車していたところ、大型トラックが後から追突した。このためカード ル容器の配管およびバルブが破損し水素ガスが噴出、着火した。双方の運転手が死亡し、 また通行人2人が負傷を負った。さらに、近くの商店、民家などが類焼した。大型トラ ックの運転手が居眠り運転していたものと結論されている。発火の原因は衝撃による火 花と推定される。

人的被害 死亡2名、軽傷2名 事故原因 交通事故

2.3.11.6 グラインダー火花による発火事故例

(1) 水素カードル解体中の火災(2010年6月、埼玉県)¹⁾

容器検査所において事故発生の前日の夕方、作業員が大気圧下で水素カードル (140m³)を解体していたが、容器とカードルを固定している金属固定リング20本中の1 本が取れなかったため、上司に相談した。上司は、容器のネックリングと金属固定リン グが供廻りして外せないと推定し、ネックリングを固定するため、ポンチによるカシメ を指示した。翌朝、作業員はカシメ作業を行うが、金属固定リングが取れないため、再 度上司に相談した。上司が、容器のバルブを外してから、再度カシメを行うよう作業員 に指示したため、9時頃、作業員はバルブを外し、再度カシメ作業を実施した。しかし、 金属固定リングを取り外すことができなかったため、再度上司に相談して作業内容を検 討した結果、金属固定リングをグラインダーで切り取り、容器を取り外すこととなった。 グラインダー作業に詳しい熟練作業員が、金属固定リングを切り離すため、グラインダ ーを近づけたところ、刃がリングに触れた直後、火は確認できなかったが、「ボォ」と 音をたてた後に軍手が焼け、左手甲に火傷を負った。原因は、バルブを外した時、水ま たは不活性ガスで置換しなかったことから、容器内(水素 100%)に空気が進入し、濃度 が燃焼範囲になったためと推定される。その後、金属固定リングとグラインダーの刃が 接触して火花が飛び、容器内のガスに引火したと考えられる。再発防止策として、可燃 性ガス容器に火気を伴う作業が必要な場合、窒素ガス等または水で容器内のガスを置換 するよう、作業手順書を見直すとともに、社員教育を実施した。

人的被害 軽傷1名

事故原因 誤判断

(2) 容器と連結管の接続部分からの水素の漏えい火災(2004年4月、長野県)¹⁾

工場にある無酸化焼入れ焼戻し炉では雰囲気ガスとして水素を使用していた。作業員 が、左側系統の水素容器 5 本を交換したが、水素容器と連結管の接続が緩かったため水 素が漏えいした。さらに、別の作業員が消費設備と約 2m 離れた場所でグラインダーを 使って台車の切断作業を行っていたため、このグラインダーの火花で着火した。着火後、 熱により水素容器連結部分の口金根元のろう付けが溶けて連結管が外れ、集合配管のた めすべての水素容器に引火した。その後、隣の事業所の職員が異変に気付いたため消防 署に連絡し、到着した消防の散水により容器を冷やしながら水素が燃え尽きるのを待ち、 約 40 分後に鎮火が確認された。今後は、水素配管と火気の距離を確保するために、グ ラインダーの作業場所を変更し、容器交換時に漏えい検知液による漏えい検査を実施す ることとした。

人的被害 なし

事故原因 誤操作

(3) 圧縮機のドレン弁からの水素漏えい(2012年6月、茨城県)¹⁾

コンビナート地区の化学工場にある水素充てん施設で、水素圧縮機(K-381C)の配管 補修中に、グラインダーから発生した火花がドレン弁から出ていた水素に着火した。火 は消火器により鎮火され、ドレン弁閉止により水素の漏えいを停止させた。原因は、水 素の漏れていたドレン弁は圧縮機潤滑油の配管に設置されたものであったが、他の施設 のパージを行った際に、パージ配管の縁切りが未実施で水素が逆流したためと推定され る。今後は、操作手順を見直し、作業員に再教育する。

人的被害 なし

事故原因 操作基準の不備

引用文献

1) 高圧ガス保安協会、"高圧ガス事故データベース"、

http://www.meti.go.jp/policy/safety_

 $security/industrial_safety/sangyo/hipregas/files/incident_db_2012.xls$

2) 中部電力株式会社、"浜岡原子力発電所2号機タービン建屋屋上における火災につい

 $\texttt{``, http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/oshirase/2004/info_71.html}$

2.3.12 まとめ

水素を扱う際に発火源として想定されるものには、電気的発火源(電気火花、静電気 火花)、熱的発火源(熱面・熱流体、放射熱・熱光源)、化学的発火源(裸火、発熱反 応)及び機械的発火源(衝撃・摩擦・打撃、断熱圧縮・衝撃波)があり、それぞれにつ いて過去の文献資料から関連する実験データ等を整理した。

電気火花については、防爆規格において水素は最も発火しやすいガスであるグループ ⅡCに分類されていることから分かるように発火危険性は高い。したがって使用する電 気機器類はそれに対応するものを準備し、適切な管理の下で使用することが重要である。

静電気火花については、水素の最小発火エネルギが小さいことに配慮しなければなら ない。消炎距離が小さいことも影響してわずかな静電気の帯電で狭い間隙での放電が可 能であり、発火につながる危険性が高い。特に、作業する人体への帯電は極力抑制し、 発火源とならないように注意することが重要である。

熱面・熱流体などの発火源に関しては、高温物体の種類、形状及び大きさ等により水素の発火温度が異なることは従来よりよく知られている。防爆電気機器の温度等級の考 え方等も参考にしながら高温になる可能性のある機械工具類を適切に選定し管理する ことが重要である。

放射熱・熱光源に関しては、周囲にある高温の固体、液体、ガスからの放射熱が水素 の発火源となるのを防止する対策を考えておくことが重要である。また、エネルギ密度 の高いレーザなどの光線も発火源になる可能性があることに注意することも必要であ る。

裸火に関しては、たばこ、マッチ、ライター、溶断用バーナー、暖房用ヒーター、ボ イラーなどのほか、車のエンジンなどにも注意を払い、適切な離隔距離を確保しておく ことが重要である。

発熱反応に関しては、水素を単独で扱う場合も金属の種類によっては表面の活性が高 く、触媒的に水素・酸素の反応を促進し、高温が発生して発火爆発する可能性がある。 爆発に至らなくても、高温になることによって周囲に熱影響を及ぼす可能性があること に注意する必要がある。

衝撃・摩擦・打撃に関しては、各種の金属が衝突、摩擦などの際に高温が発生して水 素の発火に至る例が過去の報告に紹介されている。比較的安全と考えられているベリリ ウム銅合金も場合により水素の発火源となることもあり、各種機械工具類の材料選択と ともに水素ガスの管理取扱いに注意することが重要である。

断熱圧縮・衝撃波に関しては、高圧の水素ガスを扱う場合には発火源として可能性の 高いものと認識しておく必要があるが、低圧の水素ガスの場合は比較的その可能性は低 いと考えられる。ただし、低圧の水素ガスでも大量漏えいになると衝撃波の生じる可能 性があるので、発火源になる可能性がある。

発火源と導管工事作業のまとめ

発火源	電気的発火源	熱的発火源	化学的発火源	機械的発火源
文献情報	 ①電気火花 ・IEC防爆分類基準 最小点火電流における エネルギー値と防爆区分 水素:0.04mJ (IIC) メタン:0.525mJ (I) ・最小発火電流値 水素:メタン=0.20-0.27:1 ②静電気火花 ・最小発火エネルギー 水素:0.017mJ(0.1MPa) メタン:0.29mJ ・帯電電圧 鉄粉1g添加, 0.5MPaの噴出:約5kV 水3mL添加:約5kV ・静電気による着火 鉄粉0.5gまたは水1mL 添加:着火する場合有り 	 ①熱面・熱流体 ・化学量論組成の水素の 発火温度 空気中で773-850K 長時間であれば590K ・定温式発火温度測定法 水素:560℃ メタン:600℃ ・高温物体(球体直径/mm) 水素:1120℃で着火(0.5) メタン:1200℃(6.5) ②放射熱・熱光線 ・レーザー着火 H₂/O₂/Ar:20/10/70 212mJで発火 	 ①裸火 ・禁煙区域(NFPA) 屋外の水素貯蔵庫, 消費区域から7.6m 水素貯蔵・消費している 建物内および区域 ②発熱反応 ・熱面・熱流体と区別困難 	 ①衝撃・摩擦・打撃 ・鋼との衝突 軟鋼-鋼(落球) 水素発火,メタン不発火 高炭素鋼-鋼(工具模擬) 水素発火,メタン発火 高炭素鋼-鋼(高速小球) 水素発火,メタン不発火 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
対応する 導管工事作業	ガスバッグ作業	穿孔作業	作業全般	穿孔作業 工具使用作業