

厚生労働科学研究費補助金

労働安全衛生総合研究事業

水素ガス漏洩爆発作業安全基準策定のための被害評価方法の確立

一 次世代燃料利用技術開発に伴う災害防止への対応

(平成 14-16 年度)

課題番号 H14-労働-27

平成 14 年度報告書

主任研究者 名古屋大学大学院工学研究科 吉川典彦

分担研究者 独立行政法人産業安全研究所 松井英憲

分担研究者 名古屋大学理工科学総合研究センター 長谷川達也

分担研究者 名古屋大学大学院工学研究科 村上桂一

分担研究者 独立行政法人産業安全研究所 大塚輝人

リサーチレジデント 名古屋大学大学院工学研究科 斎藤寛泰

平成 15 年 4 月 8 日

目 次

1. 研究概要と平成 14 年度研究成果総括 吉川典彦	1-1～1-5
2. 水素爆発事故事例の分析 大塚輝人	2-1～2-5
3. 水素の定容爆発圧力特性 松井英憲, 吉川典彦	3-1～3-8
4. 水素ガス漏洩爆発の実験的研究 斎藤寛泰, 吉川典彦	4-1～4-18
5. レーザレーリ散乱法によるガス流の可視化および混合分率測定 斎藤 寛泰, 吉川 典彦	5-1～5-6
6. CFX-4 ソフトウェアを用いた水素濃度分布時間変化の計算 村上桂一, 大塚輝人	6-1～6-13
7. 水素の大気中拡散と燃焼の数値シミュレーション 長谷川達也	7-1～7-6

1. 研究概要と平成14年度研究成果総括

名古屋大学大学院工学研究科 吉川典彦

1. 研究概要

1.1 研究の主旨と研究項目

次世代クリーンエネルギーとして利用拡大が予想される水素ガスの利用技術開発に伴い、開放空間における大規模爆発に関する作業者の安全基準策定が必要となる。爆発には、デトネーション（爆轟）とデフラグレーション（爆燃）の2つの形態がある。前者は衝撃波と火炎が一体となって伝播する形態であり、後者は火炎の膨張によって前方に衝撃波を形成する形態である。デトネーションの方が被害は大きい。開放空間では起きる可能性は極めて低く、事故例も現在までのところ無い。事故例の大半はデフラグレーションである。

従来小型実験装置で得られた水素爆発に関する基礎データや知見では、大規模な爆発過程と被害状況を推算することは不可能である。本研究では、6つの研究項目を設け、爆発被害評価法確立に必要な要素研究を行う。研究項目は、小型実験と野外実験による基礎データの収集と数値計算コードの開発を含む。本研究者らは実験法と数値計算で多くの経験と技術を蓄積しており、その蓄積を水素爆発の実用評価法の確立に結集する。各研究項目の成果を統合して、信頼性の高い被害評価方法の確立を目指す。

研究項目（年度）

1. 室内小型実験による水素ガス漏洩空間濃度分布時間変化のレーザーレーリー分光計測法の開発とデータ取得（平成14年度）
2. 野外実験による水素ガス漏洩空間濃度分布時間変化のレーザーレーリー分光計測法の開発とデータ取得（平成15,16年度）
3. 水素ガス漏洩空間濃度分布時間変化の計算コードの開発（平成14-16年度）
4. 室内小型実験による水素ガス漏洩爆発過程の計測方法の開発とデータ取得（平成14,15年度）
5. 野外実験による水素ガス漏洩爆発過程の計測方法の開発とデータ取得（平成15,16年度）
6. 水素ガス漏洩爆発過程の計算コードの開発（平成14-16年度）

1.2 目的・必要性・期待される成果

水素ガスは次世代クリーンエネルギーとして注目されている燃料であり、自動車の燃料電池やエンジンの燃料、発電施設等の多くの分野で、その利用技術開発が着実に進展しており、試験的ではあるが、水素ガスステーションも設置されるようになった。又、最近では、重油の脱硫過程にも水素を利用する技術が普及しており、水素漏洩による爆発事故がしばしば起き問題となっている。このような水素利用拡大に伴い、その安全基準策定が課題として浮上する。しかし、既存のデータから信頼性の高い安全基準を確立することは極めて困難な状況にあり、実際の爆発事故で起こりうる多くの条件を考慮した基盤データの構築や高度な数値シミュレーターの確立が不可欠である。例えば、貯蔵した水素ガスが開放空間に拡散して空気

との混合気を形成して爆発した場合の衝撃波の強度と被害を及ぼす距離から、安全基準上重要な保安距離を設定するが、燃料の濃度は不均一であり時間と共に変化し、周囲に障害物がある場合には、乱流火炎は加速され、その結果衝撃波は強くなる。又、閉鎖空間（建物の部屋など）からの爆発ガスが開放空間に噴出する際に強い衝撃波を形成する可能性もある。更に、事故に備えて、防爆壁等の爆発防護構造物を設置して、安全対策に万全を期すことも必要である。

本研究では、室内小型実験、野外実験のデータと詳細な数値解析結果を基にして、水素漏洩爆発過程を模擬する数値計算コードを確立することを目標とする。そして、任意の水素燃料貯蔵量、周囲建物配置、風速分布等の条件に対して、任意の時刻と位置で着火が起きた場合の火炎伝播とそれに伴う衝撃波の伝播を計算して、被害レベルを推定する。

以上の様な基礎データの蓄積と高信頼性計算コードの開発によって、水素ガス漏洩に伴う爆発安全基準策定に必要な基盤手法を確立でき、安全な形で国民に新しいクリーンエネルギー普及の恩恵を提供できる。又、確立された研究方法は、他の燃料の爆発安全性評価にも利用できる。

1.3 研究計画

・平成14年度

1. 過去の水素ガス爆発事故例の分析：爆発事例の記録を収集して、被害状況、事故の時間経過等を検討して、本研究で検討すべき事項（例えば、実験での測定量）を最終的に決定する。
2. 「研究項目1. 室内小型実験による水素ガス漏洩空間濃度分布時間変化のレーザーレーザ分光計測法の開発とデータ取得」：水素は空気の約22%のレーザー散乱光強度を持ち、レーザー散乱光強度測定から、空気中の水素濃度が決定できる。新規導入のパルスレーザー光をシート状にして、スキャンさせて、新規導入のICCDカメラで散乱光強度分布を計測すれば、迅速に3次元水素濃度分布を得ることができる。
爆発実験にも利用できる容積約1 m³の容器を製作して実験する。水素タンク、着火装置、圧力変換器、熱電対、イオンプローブを設置する。又、障害物や密閉空間を設置して、その影響を評価できるように設計する。
3. 「研究項目3. 水素ガス漏洩空間濃度分布時間変化の計算コードの開発」：水素は軽い気体であり、開放空間では浮力の影響で上方に速く拡散する。水素の貯蔵容積・圧力・噴出口断面積・風速分布・障害物形状等を入力パラメータとした3次元非定常計算コードの開発を目指す。初年度は有限差分法・有限体積法・有限要素法の中から適切な方法を選択して、計算コードの開発を開始する。計算法の選択に際しては、火炎や衝撃波の伝播にも利用できる方法であることが条件となる。乱流状態のモデル化も重要である。上記2.の実験データと比較して、計算コードの改良を行う。
4. 「研究項目4. 室内小型実験による水素ガス漏洩爆発過程の計測方法の開発とデータ取得」：上記2.の実験装置を用いて、種々の初期条件下での実験を行う。温度・圧力・濃度・火炎の測定に加えて、高速度シュリーレン撮影を行い、火炎と衝撃波の伝播過程の全体像を把握する。又、障害物による火炎の加速への影響と、密閉空間から噴出する火炎の影響を追究する。

5. 「研究項目6. 水素ガス漏洩爆発過程の計算コードの開発」：上記3. で得た濃度分布を初期条件として、任意の場所と時刻で着火した後の火炎と衝撃波の伝播を計算する3次元非定常計算コードを開発する。大規模スケールの計算では、火炎面を不連続面として扱い、火炎面前方の未燃混合気の燃料濃度・温度・圧力・速度等をパラメータとした関数近似が必要である。又、乱流のモデル化も重要となる。適切な計算方法を選択し、計算コードの作成を開始する。上記4. の実験結果と比較しつつ、計算法を修正する。

・平成15年度

1. 野外実験に関する「研究項目2. 野外実験による水素ガス漏洩空間濃度分布時間変化のレーザーレーザ分光計測法の開発とデータ取得開発とデータ取得」「研究項目5. 野外実験による水素ガス漏洩爆発過程の計測方法の開発とデータ取得」を新たに開始する。：体積10～20m³の容積を持つビニールハウス型の装置を設計・作製する。室内小型実験で得た知見を基にして、計測法を拡張して利用し、必要があれば改良する。火炎による膨張の影響から、測定半径は数十メートルになる。
2. 「研究項目3, 4, 6」の継続：野外実験の結果を加えて検討する。

・平成16年度

1. 「研究項目2, 3, 5, 6」の継続
2. 研究のまとめ：最終報告書の作成等

2. 平成14年度研究成果総括

本研究は3ヵ年計画であり、初年度に当たる本年度は室内小規模実験と数値解析法の開発に着手した。

2.1 本年度主要研究成果

1. 1956-1999年の期間の爆発火災災害の中で、原因物質に水素が含まれる170件の災害について、分析した結果、漏れに関する災害が全体の約半数を占め、比較的大きな災害の引き金になりやすいことが分かった。従って、水素ステーションの様に作業員・客・水素が不可分な場所での災害対策は実用化に向けての急務であることが改めて浮き彫りになった。

(本報告書「2. 水素爆発事故事例の分析」, 大塚輝人)

2. 水素の定容爆発圧力特性は、従来常温条件下で得られたデータのみである。液体水素燃料の利用も提唱されている状況を考えると、低温での特性評価も重要であり、今回初めて、-60℃までの領域での水素30% - 空気混合気の測定データを得た。最大昇圧速度と平均昇圧速度は、温度に依らず一定である事が分かった。メタン・プロパン・メタノール・ガソリンと比べて、水素は、広い濃度範囲で燃焼し、爆発威力も高く、危険であることが示された。

(本報告書「3. 水素の定容爆発圧力特性」, 松井英憲, 吉川典彦)

3. ラテックス膜に水素 - 空気混合気を充填して直径約30cmの半球状のガス塊を作り、中心で着火させた。当量比を変化させて、火炎伝播爆発過程を高速度ビデオカメラと騒音計で観測した。比較のため、メタン - 空気混合気についても同様の実験を行った。当量比1の混合

気で、両者の騒音計音圧測定を比べると、メタンが110.8db、水素が125.9dbであり、水素の爆発威力が高いことが分かる。これは、燃焼速度の違いに因ると考えられ、層流燃焼速度で比べると、メタン0.3m/s、水素1.8m/sである。実際には乱流状態で燃焼しており、燃焼速度は層流の場合の5-10倍に増加するので、圧力波の差異は広がると思われる。

(本報告書「4. 水素ガス漏洩爆発の実験的研究」、斎藤寛泰、吉川典彦)

4. 以上を要約すると、小規模実験や密閉容器内での実験から、水素は他の燃料と比べて爆発危険性が高い燃料と結論できる。又、過去の爆発事例データの特徴として、漏洩による事故例の割合も高い。従来から水素燃料は、爆発危険性の高い燃料であることが指摘されており、今回の結果もそれを裏付けるものである。しかしながら、一方で、開放空間では、水素は軽い気体であるために、急速に上方に拡散して、僅かな可燃混合気体積しか形成せず、爆発危険性は大きく低下することも期待できる。この点については、平成15年度からの野外実験によって明らかにする。

5. パルスレーザーとICCDカメラを導入してレーリ-散乱法による水素濃度分布計測を計画しているが、その立ち上げとして、ヘリウム噴流の濃度分布を計測し、計測法が可能であることを確認した。

(本報告書「5. レーザレーリ散乱法によるガス流の可視化および混合分率測定」、斎藤寛泰、吉川典彦)

6. 既存の解析ソフトCFX-4(産業安全研究所所有)を用いた水素濃度分布時間変化の計算を行い、1m立方程度のサイズでも充分計算できることが確認できた。

(本報告書「6. CFX-4ソフトウェアを用いた水素濃度分布時間変化の計算」、村上桂一、大塚輝人)

7. 新たな水素の拡散・燃焼のシミュレーションモデル開発のための基礎方程式と計算法を確定した。

(本報告書「7. 水素の大気中拡散と燃焼の数値シミュレーション」、長谷川達也)

2.2 研究項目毎の実施経過

(1)室内小型実験装置による水素ガス漏洩空間分布時間変化のレーザーレーリ-分光計測法の開発とデータ取得：追加交付によって導入した高出力レーザーシステムとICCDカメラを用いた実験を開始した。レーリ-散乱光の強度と計測の感度を調べるために、レーザー光をシート状にして、大気中のヘリウムガス噴流の平面濃度計測を行った。空気中の微粒子によるミー散乱光がノイズとして現れるが、画像処理によって除去することが可能であり、レーリ-散乱法による濃度分布計測が可能であることを示した。今後は、水素ガス漏洩の濃度時間変化の測定に移行する。

(2)水素ガス漏洩空間濃度分布時間変化の計算コードの開発：産業安全研究所所有市販プログラムCFX-4を用いた水素濃度の時間変化の計算を行った。プログラムのデータ入力方法を整備した後に、幅1.1m・高さ1.5m・奥行き1.1mの大気空間の底部に、一辺10cm立方体の大気圧水素貯気槽がある場合について、水素濃度場の時間変化を計算した。他に同様なケースを計算し、得られた結果は妥当と判断した。格子サイズを大きく取った場合でも計算が可能なる事が分かった。大きなスケールの計算にどれ位適用できるか、今後検討する。又、プロ

グラムは燃焼過程の計算も含んでおり、爆発過程の計算にも適用できるかを検討する。

- (3) 室内小型実験による水素ガス漏洩爆発過程の計測方法の開発とデータ取得：ラテックス膜を用いた水素－空気混合気ガス塊の爆発試験装置を立ち上げた。今後は、現行の高速度ビデオカメラと騒音計に加えて、圧力変換器を用いた近接場での圧力測定を行う予定である。又、破膜後に着火した場合の爆発過程についても実験を行う。
- (4) 水素ガス漏洩爆発過程の計算コードの開発：燃焼モデルには水素・酸素・窒素・水蒸気の4つの化学種を考慮した1段不可逆反応近似を採用し、外力として重力を考慮し、拡散はFickの法則に従う。乱流を考慮した拡散と燃焼の基礎方程式を導出し、更に、乱流モデルには $k-\epsilon$ モデルを、燃焼モデルにはMagnussenの渦散逸モデルを採用した。計算手法は、不均等間隔直交格子系を用いて、空間2次精度・時間2次精度の陰解法を採用する。今後は、計算プログラムの作成に着手して、計算結果を得て、前述の産業安全研究所のプログラムの結果との比較や、実験との比較を行う予定である。
- (5) 水素－空気混合気の定容爆発実験：産業安全研究所の爆発試験容器を用いて、水素 - 空気及び水電気分解水素製造の場合の水素 - 酸素 - 窒素混合気の爆発特性と、液体水素利用の場合の低温水素 - 空気の爆発特性を測定した。
- (6) 水素爆発事故例分析と水素ステーション調査：産業安全研究所に集積された過去の爆発災害記録を新しい観点から分析し、水素爆発事故の特徴をまとめた。水素は着火エネルギーが小さいために、静電気を着火源とする事故の割合が高い事と、高温プロセス製造工程における水素漏洩の自然発火が多い事が分かった。又、高松市にある四国総合研究所の水電解型水素供給ステーションを訪れ、水素供給装置や安全対策等について、担当者の説明を聞き、意見交換した。

2. 水素爆発事故事例の分析

独立行政法人産業安全研究所 大塚輝人

1. 概要

産業安全研究所の持つ爆発火災災害データベースを用いて、水素を原因物質とする爆発火災災害を抽出し、その傾向について以下に述べる。

2. データベースについて

産業安全研究所の持つ爆発火災災害データベースは、様々な種類の災害のうち、爆発、火災、破裂高温物に分類される災害を対象としている。データベースの元となった資料は、発生した労働災害を産業安全研究所科学安全研究グループで要約整理した資料が中心であり、このほかに中央労働災害防止協会発行の「産業安全年鑑」(1980年に「安全衛生年鑑」と改称)に記載されている重大災害を一部参考としている。

データベースの情報項目は、災害発生の日時、場所の他、爆発・火災の有無、災害発生装置、発生の原因物質、着火源、作業工程、数、重傷者数、軽傷者数、重傷者死亡者数、軽傷者数、損害積、損害額等が単語程度の短い日本語で記載されているほかに、損害の状況、概要についての自由記述の欄が設けられている。

3. 分析結果

3.1 全体概要

分析に供したのは、1956年から1999年までの爆発火災災害のうち、原因物質に水素が含まれる170件の災害についてのデータである。この期間における死亡者の合計は63人、死傷者は437人であり、平均して1件当たり0.37人の死亡者、2.57人の死傷者を出している計算になる。この数字は爆発火災災害全体の一件当たりの死亡者0.84人と一件当たりの死傷者5.0人と比較して小さい数字であると言える。しかしながら、製油所の脱硫装置で起こるような大規模な爆発火災の引き金になる場合もあり、多大な被災者を出すこともある。

図.1に災害発生件数と災害による死亡者数と死傷者数の推移を示した。発生件数そのものは減少傾向になく、むしろ増加している。水素は最小着火エネルギーの非常に小さい気体であり、また、金属の脆化を引き起こす物質であるので、本質的な災害防止が難しいためであると考えられる。図.2に示したのは一件当たりの死亡者数と死傷者数の推移である。一件当たりの死傷者は減少の傾向にあるといえる。これは、主に水素を利用している作業場でラインと作業員との分離が進んだためであると考えられる。しかしながら、今後エネルギーのクリーン化を受けて、水素ステーションなどが設置されると、作業員と水素ラインとの分離は不可避であり、また、そこには客として一般の人も存在する空間となるため、災害は致命的になる恐れがある。

図.1 水素を原因物質とする爆発火災災害の推移

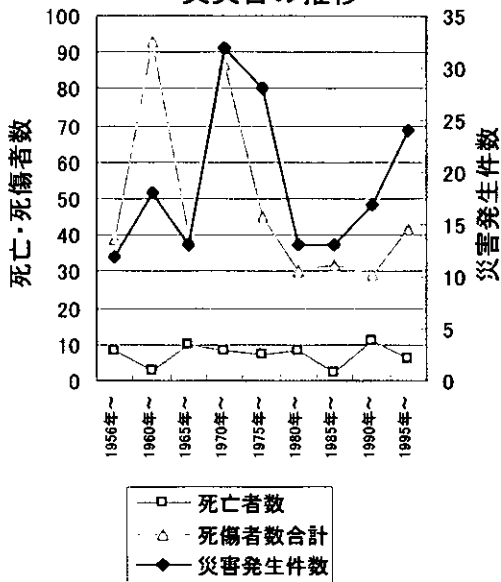


図.2 水素を原因物質とする爆発火災災害における被災者の推移

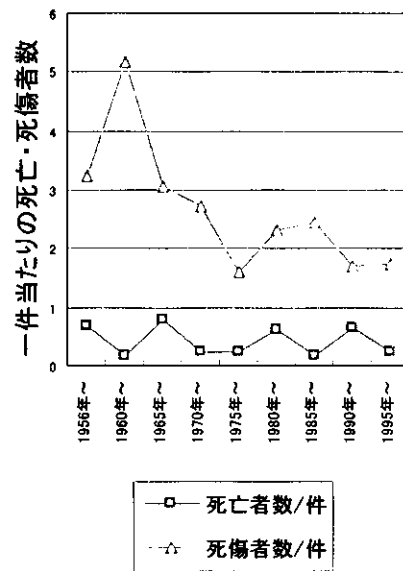


表.1 は災害の着火源についてまとめたものである。通常の爆発災害に比して静電気を着火源とする災害が多い。ただこれは水素の最小着火エネルギーが極めて低いことは周知であるため、不明な災害について静電気に帰属されている可能性がある。

自然発火は、高温プロセスに用いられている水素が何らかの理由で漏れ、発火する場合と、反応により副次的に生成していた水素に、主反応の熱によって着火した場合が含まれている。

表.1 水素を原因物質とする災害における着火源
(二つ以上が併記されている災害について各々に 0.5 を割り振った)

着火源	災害件数
ライター・点火具	3
高温表面ヒーター	5.5
溶接・溶断	12
摩擦衝撃火	12
電気火花	20.5
バーナー・炉・裸火	22.5
反応・自然発火	30.5
静電気	35
上記外・不明	29

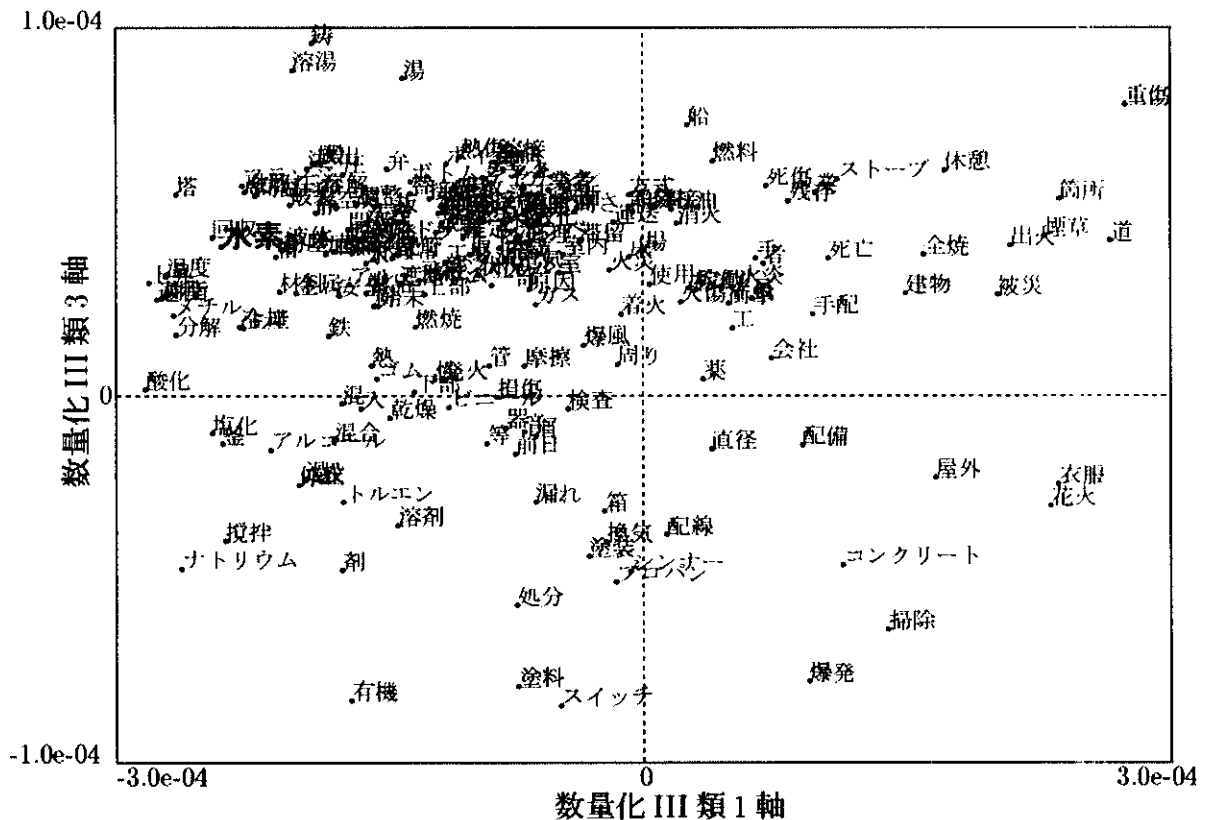
3.2 概要の数量化 III 類による分析

登録されている災害を先入観なしにグループ化するために、数量化 III 類による分析を試みた。数量化 III 類は複数のサンプルに対して、チェックシート状の質的情報 (カテゴリー) が与えられた時、類似するサンプルが近くに並ぶようにデータに値を与える手法である。これは、1 サンプルに対して 1 つずつスコアを与え、1 カテゴリーについて 1 スコアを与えたときにサンプルスコアとカテゴリースコアの相関値を極大にするように与えられる。今回はサンプルとして災害データベースの個々の災害を用い、カテゴリーとしてはその災害の概要部分に用いられている名詞を用いた。したがって、数量化 III 類によって、類似する記述を持

つ災害が近接するように並べられる。また、カテゴリーも同時に類似するものが近接するように配置されるので、用いられた名詞の関連性も客観性の高い類似度が災害データベースの観点から定義されることになる。

最初に、データベース全体の中で、キーワード「水素」がいかなる災害に関連するかを見るために、図.3に数量化 III 類の結果を名詞について散布図にしたものを図示した。数量化 III 類においては、複数の値の与え方が可能であるため、相関値の高い順に 1, 2, 3 軸と名前をつけていくのが慣例である。ここでは 1 軸と 2 軸はほとんど同じ値の与え方であったため、1 軸と 3 軸で散布図を作成した。1 軸は負の値側に反応プロセスに関するキーワードがグループを作り、正の値側には直接の火災災害に関するキーワードがグループを作っている。また、3 軸では負の方向に塗装に関係するキーワードがグループ化され、正方向の上部には溶接や溶湯などの高温における災害のキーワードがグループを形作っている。キーワード「水素」は 1 軸負、3 軸正の部分に位置し、反応プロセス-高温災害で関与していると考えられる。

図.3 全爆発火災災害の概略に用いられた名詞の数量化 III 類の結果



次に前項で抽出した水素を原因物質とした爆発火災災害について同様に数量化 III 類を行った結果を図.4に示す。1 軸正方向に脱硫などを含む水素を用いたプラントでの災害が位置し、中央に酸、滞留などの偶発的な水素の発生を示すキーワードが位置する。図から外れた大きな負側にはアドバルーン、風船などのキーワードが位置している。

この、水素利用プラントと、偶発的な水素の発生に伴う災害と水素の取り扱いのミスによる災害の分類は、災害事例についての散布図である図.5において1軸 $1. e-3$ 付近の値を境に分かれている。この右側に位置する災害が水素を用いたプラントでの災害を示しており、今後の水素ステーション等で発生する災害は主にこのタイプであると考えてよい。中間的な、あるいは、不明な災害があるので正確な災害数を述べることはこの分析の主意ではないが、およそ70件がこの災害のパターンに属する。これは、水素を原因物質とする災害のほぼ半分がこのタイプであることを示す。このパターンに属すると判断された災害の死亡者数は33人、死傷者数は178人であった。死傷者の中の死亡者の割合が大きいのは、先に述べた脱硫プラントでの爆発火災災害のような、比較的大きな災害がこちらに属しているためである。

4. おわりに

ここでは、水素を原因物質とする災害について、従来の細分類に見られるような分割方法では有意な結論を導くことは難しいと考えられるため、概要記述文章からの客観的な分類を試みた。その結果は、本研究の対象となる水素取り扱い作業場での漏れに関する災害が、水素を原因物質とする災害の約半数を占め、比較的大きな災害の引き金になりやすいことが確かめられた。2002年の苫小牧での火災も記憶に新しく、人的被害はなかったものの、水素ステーションのように作業者、客、そして水素が空間的に不可分な場所での災害対策は実用化に向けての急務であると思われる。

3. 水素の定容爆発圧力特性

独立行政法人産業安全研究所 松井英憲
名古屋大学大学院工学研究科 吉川典彦

1. まえがき

21世紀は水素の時代といわれており、今後水素利用技術開発が飛躍的に進歩することが予測される。水素利用技術開発の成否は、利用に伴う安全の確保に懸っており、技術の開発と同時に安全性の評価がなされねばならない。そのためには、水素の爆発危険性（爆発・燃焼特性等）が正確に把握されている必要がある。水素の爆発危険性に関する研究は、古くから行われており、多くのデータが蓄積されているが、水素燃料電池、水素エンジン・タービンの開発や水素ステーションの建設といった水素の新しい利用局面での危険性に関するデータの把握は十分とはいえない。

ここでは、①水素が大気中へ漏洩した場合の濃度と爆発圧力特性の関係、②水の電気分解によって水素を製造する場合、水素と同時に酸素も生成することを考え、水素/酸素/窒素 3成分系の爆発圧力特性、③液体水素の利用を考え、低温下での水素・空気混合ガスの爆発圧力特性について、基礎的なデータを実験により測定した結果を報告する。

2. 空气中水素濃度と爆発圧力

水素の空气中爆発濃度範囲は4~75vol.%であることが知られている¹⁾。しかしその爆発圧力特性については意外と知られていない。特に下限界濃度近傍での爆発圧力特性は安全上重要である。ここでは、水素/空気混合ガスの全爆発濃度範囲について、爆発圧力の測定を行った。

2.1 実験装置及び方法

混合ガスの爆発圧力特性の測定には、図1に示すような、内容積20Lのステンレス製円筒容器（102mmφ×210H 観測窓付）を爆発容器として用いた。着火は、容器中心部において、電気スパーク（2次側出力20mA, 15kVのネオントランス）を用いて室温、大気圧下で行った。爆発圧力波形は、容器上端部に取り付けた歪ゲージタイプの圧力変換器（共和電業製PE-30KF）の出力をアンプで増幅し、デジタルメモリに記録した。容器内の混合ガスの調整は分圧法によった。精度3桁のデジタルマンノメーターを用いて、予め真空にした容器内

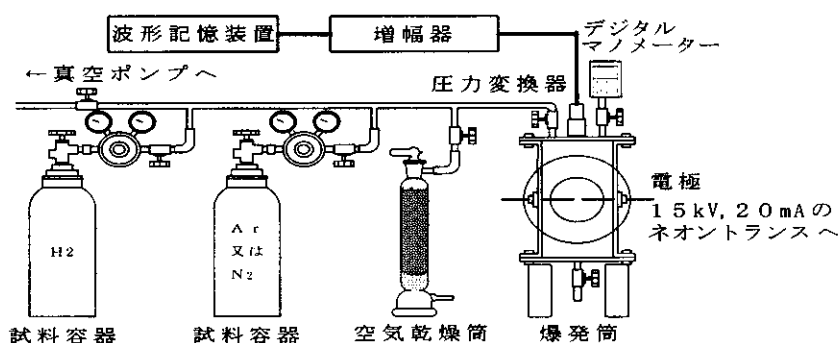


図1 ガス爆発特性試験装置（20円筒容器）

へ所定量の水素を導入、最後にバルブを急開して、空気を大気圧まで導入した。この時のガスの自然流動によって、容器内のガスは均一に予混合される。

2.2 実験結果と考察

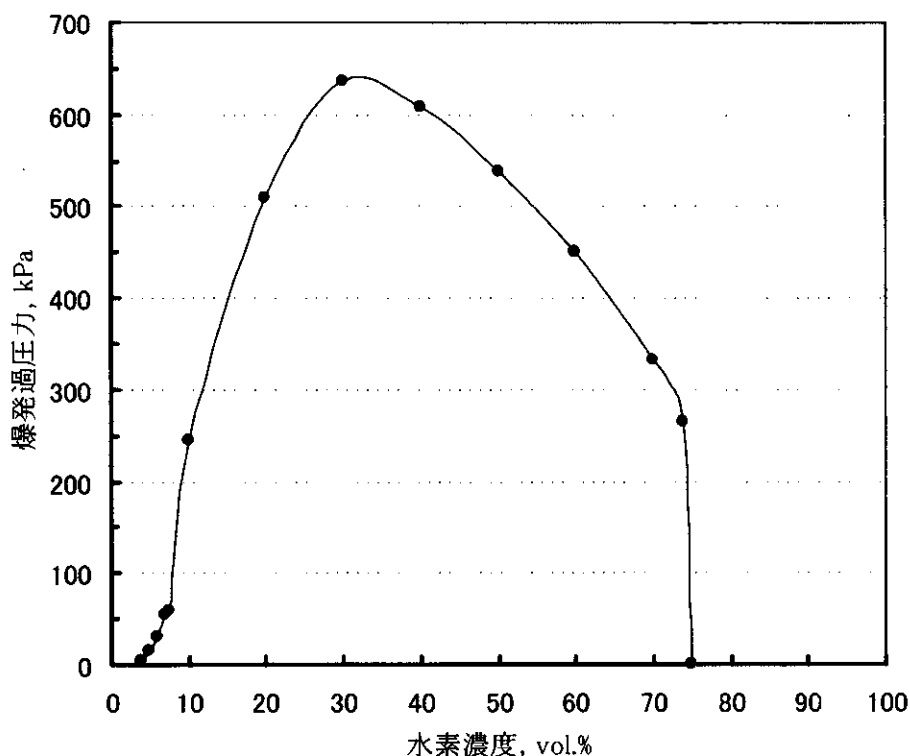


図2 水素／空気混合ガスの爆発圧力（20円筒容器，初圧：大気圧）

水素を空気と種々割合に予混合し、円筒容器内で着火した場合の大爆発圧力の測定値を図2に示す。爆発上限界付近においては、ガス濃度変化に対する爆発圧力の変化が大きく、爆発限界が明瞭に判定できるが、下限界付近では爆発圧力の変化は、上限界と比べると小さい。下限界とされている水素濃度4%では爆発圧力はわずかに5kPa程度であり、火炎は目視できない。5%では16kPaの過圧力が測定され、着火源の上方を細い火炎が狼煙状に伝ばするが、火炎は下方や横方向へは伝ばしない。6%でもほぼ同じ状況であるが、爆発圧力は32kPa程度となる。7%では56kPaの過圧力が測定されるが火炎はやはり上方の一部分を伝ばするのみである。8%になると爆発過圧力は100kPaを超えるようになり、爆発の危険性急激には高くなる。最大爆発圧力は、化学量論組成である30%付近で得られる。そのときの最大過圧力は650kPaになる。

上限界付近での爆発圧力の変化は大きく、74%で270kPaの爆発圧力が得られるが、75%ではもはや火炎伝ばは生じない。

水素が8%未満の濃度では、発熱量はわずかであり、理論上火炎伝ばは生じないはずである。実際に上方火炎伝ばが可能なのは、火炎前方の未燃焼の水素が選択的に高温の火炎面へ向かって拡散してくるためである²⁾。水素は気体の中では最も密度が小さく、空気の成分である窒素や酸素に比べてその運動性（拡散速度）が著しく大である。したがって、火炎前面に存在する未燃混合気中の水素濃度は周囲の混合気中の濃度より高くなる。このように局部

的な水素濃度の増大が起こるため、局所的な上方火炎伝ばが起こりうるものと考えられている。

3. $2H_2+O_2+nN_2$ 系の爆発圧力特性

水素は水の電気分解によって製造される場合がある。この場合、同時に酸素も生成する。鉛蓄電池の爆発事故に見られるように、水素/酸素/窒素の3成分系の混合ガスが形成され、着火源があると爆発災害が生ずる危険性がある。このような場合を想定してこの系の爆発時の威力を評価しておく必要がある。

密閉容器内でのガス爆発時の最大爆発圧力 (P_m) は、近似的に次式によって示される。

$$P_m = P_1 \times (n_2 \cdot T_2) / (n_1 \cdot T_1) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 P_1 はガスの初圧、 n_1 , n_2 は爆発前後のガスのモル数、 T_1 , T_2 は爆発前後のガスの温度である。

3.1 実験装置及び方法

混合ガスの爆発威力を測定するには、通常、最も熱損失の少ない球状爆発容器が用いられる。図3に示すような、内容積20のステンレス製球状容器(78mmR)を用いた。着火は、容器中心部において、電気スパーク(3~5mJの容量放電)を用いて室温、大気圧下で行った。爆発圧力波形は、容器上部に取り付けた歪ゲージタイプの圧力変換器(共和電業製PE-30KF)の出力をアンプで増幅し、デジタルメモリに記録した。容器内の混合ガスの調整は分圧法によった。精度3桁のデジタルマノメータを用いて、予め真空にした容器内へ所定量の水素、酸素ガスを1:2の割合で導入、最後にバルブを急開して、窒素を大気圧まで導入した。この時のガスの自然流動によって、容器内のガスは均一に予混合される。

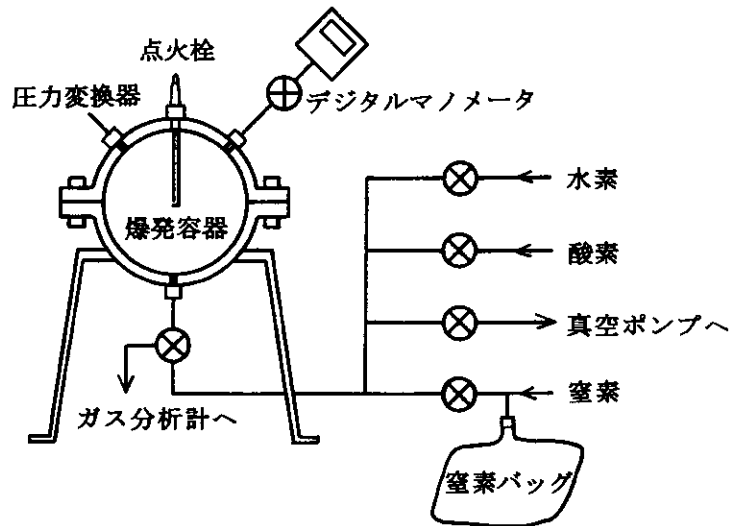


図3 20球状爆発容器の概要

3.2 実験結果と考察

化学量論組成の水素~酸素混合ガスを、種々割合の窒素で希釈したときの、爆発容器内での爆発圧力特性(最大爆発圧力 ΔP_m , 最大昇圧速度 $(dP/dt)_m$, 昇圧時間 τ)を測定した。20球状容器内での測定結果を図4に示す。最大爆発圧力については、計算値も併せて示した。これらの結果から以下のことが分かる。

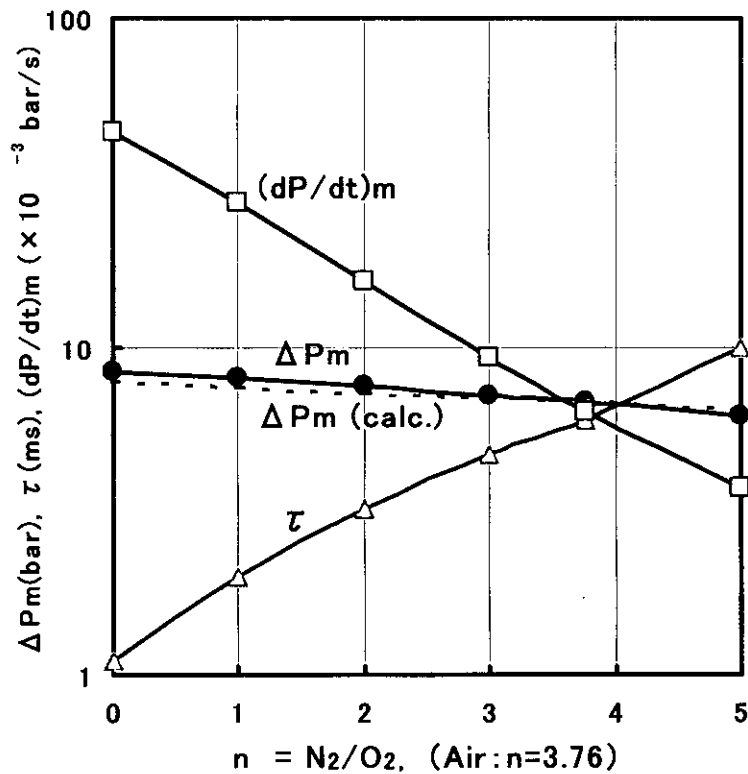


図4 2H₂+O₂+nN₂系の爆発圧力特性 (20球状容器, 初圧: 大気圧)

◎水素の酸素中の最大爆発圧力は、空気中のそれより約2割高いだけである。これは、水素が酸素中で燃焼したとき、火炎温度 (T₂) は酸素中の方が空気中の場合に比べて約400K高いが、他の炭化水素の場合と異なり、燃焼後のモル数 (n₂) が少なくなる (主として水蒸気が生成する) ためである。

◎酸素濃度の増大と共に爆発威力の指標となる最大昇圧速度は指数関数的に増大し、酸素中の爆発威力は空気中に比べて1桁強くなる。

◎最大爆発圧力の実測値と計算値は概ね一致する。通常の炭化水素系のガス爆発では実測値は断熱計算値より約1割低い値が得られるが、水素の火炎速度は1桁速いため、器壁への熱損失が少ないためと考えられる。

◎球状容器内の爆発圧力は、円筒容器内のそれより約4%高くなる。これは、球状容器では壁面による熱損失が最小になるためである。又、最大昇圧速度は、球状容器の方が同じ容積の円筒容器 (図1) の場合と比べると約3倍速い値を示した。これは同じ容積でも火炎の伝ば距離の長い円筒容器の方が、全部のガスが燃焼するまでにより長い時間を要するためである。

4. 低温での水素/空気混合ガスの爆発圧力特性

水素燃料自動車の開発では、液体水素の利用も考えられている。液体水素は、-253°C (20K) の極低温であるため、漏洩した場合の水素ガスはかなり低温であることが予測される。このような状態で空気と混合して爆発が生じた場合の爆発圧力やその威力を予め把握しておく必

要がある。最大爆発圧力は、計算で予測し得るが、昇圧速度などの動的な特性は実測でしか得られず、高温下での測定値は得られているが³⁾、低温下でのデータも見あたらないので、小型爆発円筒容器（容積 1ℓ）を用いて、室温から約 -60°C までの低温域での化学量論組成の水素／空気混合ガスの爆発圧力特性の測定を行った。

4.1 実験装置及び方法

爆発容器は低温での温度制御を容易にするため、内径 106mm、高さ 111mm のステンレス製円筒容器を用いた。中央部に間隙 4mm の電極を有しており、市販の電子ライタによる放電スパークで着火した。片側のフランジは強化ガラスになっており、放電の状態及び火炎の伝ばが目視できるようになっている。爆発容器には、ガス導管、弁、デジタルマノメータ、圧力変換器、シース K 型熱電対が取り付けられている。爆発容器は、 -60°C まで冷却可能な低温恒温エタノール槽に浸漬して温度制御を行った。

試験方法は、予め別のタンクに調整した 30%水素／空気混合ガスを爆発容器内に導入して、容器と一緒に低温槽内で所定の温度まで冷却し、容器内ガス温度が一定になったところで、ガス圧を大気圧迄放出して着火した。圧力波形はデジタルオシロスコープで記録・解析した。

実験装置の概略を図 5 に示す。

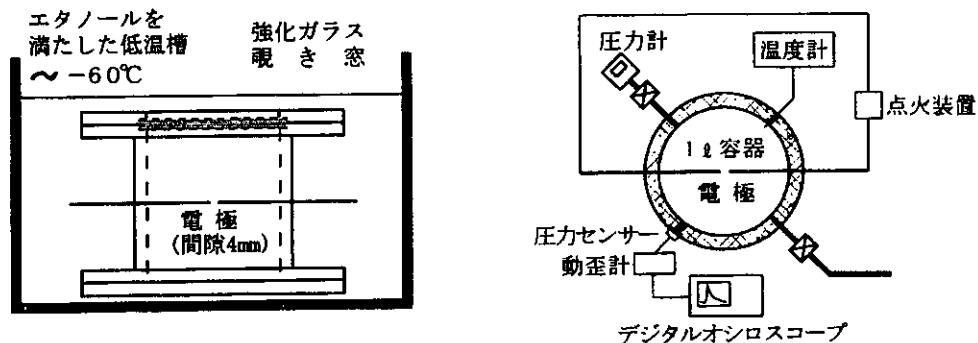


図 5 低温水素ガス爆発特性試験装置の概略

4.2 実験結果と考察

種々初期温度 (T_1) における爆発圧力波形の測定結果を図 6 に示す。初期圧力はどれも大気圧である。また、各温度における爆発圧力の特性値を表 1 に示す。

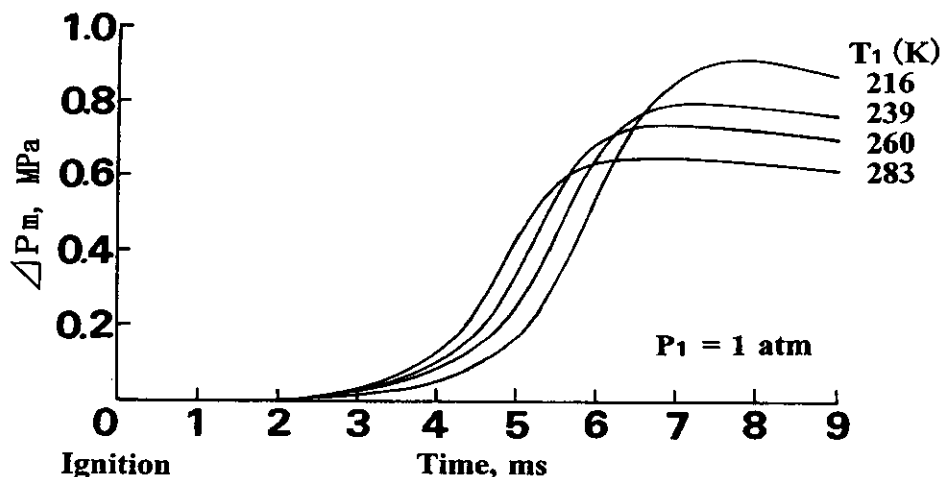


図 6 低温下における水素 30%／空気混合ガスの爆発圧力波形（1ℓ円筒容器、初圧：大気圧）

表 1 低温下における水素 30%／空気混合ガスの爆発圧力特性 (10円筒容器, 初圧: 大気圧)

初期温度	最大爆発圧力	昇圧時間	最大昇圧速度
(T1, K)	(Pm, MPa)	(τ , ms)	((dP/dt)m, MPa/s)
216	0.91	7.8	436
239	0.79	7.2	455
260	0.74	6.8	439
283	0.66	6.5	402

(1) 式から予測されるように最大爆発圧力(Pm)は, 初期温度(T0)が低いほど高くなる. 測定値は何れも断熱定容燃焼の計算値より 4~8%低い値であった. これは, 爆発容器が 10と小型であり, 容器形状が円筒状であるため, 容積に対する表面積の割合が大きくなり, 熱損失が増大したためと考えられる. ここで注目すべき点は, 初期温度が低くなると反応速度が遅くなるため燃焼速度が低下して昇圧速度が低下することが予測されるが, 爆発威力の指標となる実際の最大昇圧速度 ((dP/dt)m) 及び平均昇圧速度 ($\Delta P_m / \tau$) は, 測定の温度範囲ではほぼ一定の値が得られたことである. このことは, 低温下でも爆発の威力は, 最大爆発圧力の増大と, 最大爆発圧力到達時間 (τ) の増大で相殺され, 初期温度によってあまり変わらないといえることができる.

5. 水素のガス爆発危険性評価

可燃性のガス・蒸気の爆発危険性を評価するには, 爆発濃度範囲のほか, 爆発の起こり易さ(感度)の指標となる最小着火エネルギーや発火温度, また, 爆発の激しさ(威力)の指標となる最大爆発圧力, 燃焼速度, Kg 値などが用いられる. 中でも, 密閉容器内における爆発圧力特性の測定によって得られる Kg 値は, ガス・蒸気に固有の値で, ガス・蒸気の爆発の威力を示す指標として重要なものである. Kg 値は, 次式によって定義される⁴⁾.

$$K_G = (dP/dt)_m \cdot V^{1/3} \text{ [bar} \cdot \text{m/s]} \dots \dots \dots (2)$$

ここで, (dP/dt)m は最大昇圧速度, V は爆発容器の容積である. この式は, 容積の異なる爆発容器でも, 同じ条件 (①同一初期圧力, 同一混合ガス, ②同じ形の爆発容器, ③同程度の擾乱状態, ④同一の着火源と着火位置) で爆発が生じた場合には, 同じ Kg 値が得られることを意味している. またこの式は, 爆発圧力は時間の 3 乗に比例して増大するという, いわゆる 3 乗則(Cubic Law)に基づいている. Kg 値そのものは, 1m³ の爆発容器における最大昇圧速度ということもできる. この式を用いると, 小さな容器の爆発実験で求めた最大圧力上昇速度から, 大容量の容器における最大圧力上昇速度を推算することができることを示している. (2) 式の単位の次元から分かるように, Kg 値は圧力[bar] (爆発圧力) と速度[m/s] (火炎速度) の要素から成っており, 火炎速度の大きな爆発性混合物ほど大きな値を示す. また, 火炎温度が高い (最大爆発圧力が高い) 物質ほど大きな値となり, ガス爆発や粉じん爆発 (粉じんでは K_{st} で示し, ガスの場合の Kg と区別して用いる) の威力を示す指標となる.

Kg 値は, 化学装置や容器内で生ずる万一の爆発に対して, 安全装置として用いられる爆発圧力放散設備の開口面積を決定する際に極めて有用である. 表 2 に水素燃料電池の燃料として候補に挙げられている水素, メタン (天然ガス), プロパン (LPG), メタノール, ガソリン

について、3.5 l円筒容器を用いた場合の最大爆発圧力及び Kg の測定値と共に、代表的な爆発危険特性値を示す。

表 2 燃料電池用燃料の爆発危険特性値

燃料	水素	メタン	プロパン	メタノール	ガソリン
Kg 値(bar・m/s)	590	100	170	190	153
最大爆発圧力(ΔPm, bar)	6.6	6.5	6.9	7.4	7.2
爆発濃度範囲(vol.%)	4~75	5~15	2.1~9.5	6.7~36	1.4~7.6
爆発危険度(H=(UL-LL)/LL)*	17.8	2	3.5	4.4	4.4
最小着火エネルギー(mJ)	0.02	0.28	0.25	0.14	
発火温度(°C)	500	537	432	385	280
最大燃焼速度(cm/s)	291.2	37	43	55	
火炎逸走限界(mm)	0.28	1.14	0.92	0.92	>0.6
燃焼熱(kJ/mol)	242	890	2220	764	約 5000
ガス比重(空気=1)	0.07	0.55	1.56	1.1	3~4

* 爆発危険度 H は、(爆発上限界—爆発下限界) / 爆発下限界、で定義される。

これらの Kg の値から、水素はメタンに比べて 6 倍の爆発威力があり、可燃性混合気が擾乱状態にあると、静止している場合に比べて更に 1 桁程度爆発の威力が増大するとみなされなければならない。また、ガソリンなどの一般の炭化水素蒸気は、プロパンと同程度の爆発威力を持つといえる。

6. まとめ

水素はクリーンなガスであることは論を待たないが、表 2 に示すように、燃焼性や爆発特性から見ると必ずしも安全なガスとはいえない面がある。パイプや容器内で空気と混合した場合、あるいは大気中へ漏洩した場合には、微少な着火エネルギーによって着火・爆発する危険性を有している。このような危険性は全ての可燃性ガスに対していえることであるが、水素の場合はその危険性の幾つかにおいて他のガスに比べて際だった特徴を有している。

水素の燃焼速度は可燃性ガスの中で最も速いことが知られている。また着火エネルギーは最も小さく、静電気火花等で容易に着火が起こる。火炎速度が速いため、爆発したときの威力も大きなものとなる。爆発濃度範囲が広いことも危険な要因といえる。

逆に水素は別な面では安全性が高い要因も有している。最も大きな要因は、ガス比重が空気に比べてきわめて小さいことにある。これは大気中へ漏洩した場合、速やかに大気上方へ拡散してしまい、プロパンなどのように地表に滞留する危険性が少ないことである。また発火温度が高く、たばこの火程度では着火しないようである。炭素成分が無いので燃焼しても炎が目に見えず、輻射熱が小さいので火傷の危険性は小さいといえるであろう。

水素を取り扱う作業者の安全を確保するためには、危険な要因を正確に把握し、危険が顕在化しないような災害防止対策を確立することが重要であり、また、安全な要因を活用して、施設の構造の設計や配置を行う必要がある。

参考文献

- 1) Zabetakis, M.G., Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors, U.S. Bureau of Mines Bulletin, 627, p.121 (1965)
- 2) 平野敏右, 燃烧学, p.85 (1986), 海文堂出版 (株)
- 3) NFPA, National Fire Code (1964), 翻訳: 可燃性ガス, 蒸気-空気混合物の爆発圧力に関するデータ表, 安全工学, Vol.5, No.3, p.233 (1966)
- 4) Bartknecht, W., Explosions, p.9 (1981), Springer-Verlag N.Y.
- 5) 産業安全研究所技術指針, ユーザーのための工場防爆電気設備ガイド, RIIS-TR-94-2 (1994)