

高压水素ガス漏洩時の拡散爆発現象について

武野計二・岡林一木・一ノ瀬利光・河内昭紀・野中剛・橋口和明

三菱重工業（株）技術本部 長崎研究所

851-0392 長崎市深堀町 5-717-1

千歳敬子

三菱重工業（株）原子力事業本部 原子力技術センター

220-8401 横浜市西区みなとみらい 3-3-1

On the Phenomena of Dispersion and Explosion of High-Pressurized Hydrogen Gas

Keiji TAKENO, Kazuki OKABAYASHI, Toshimitsu ICHINOSE, Akinori KOUCHI, Tsuyoshi NONAKA,

Kazuaki HASHIGUCHI

Nagasaki Research & Development Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

717-1 Fukahori-machi 3 chome, Nagasaki 851-0392

Keiko CHITOSE

Nuclear Energy Systems Engineering Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

3-1 Minatomirai 3 chome, Nishi-ku, Yokohama 220-8401

This paper describes the experimental investigation on the hypothetical dispersion and explosion of high-pressurized hydrogen gas which leaks through a nozzle of 10mm diameters with 40MPa pressure brown down to atmosphere. Since the distribution of dispersed hydrogen gas changes with time, concentration contours of every 1 second was measured by 15 sets of new device which consisted of 10 gas sensors. The explosion experiments were carried out with changing the time of ignition after the start of dispersion, and it was clarified that the explosion power depended not only on the concentration and volume of hydrogen/air pre-mixture, but also on the turbulence characteristics before ignition.

Key words: dispersion, explosion, hydrogen gas, high pressure, ignition timing

1. まえがき

エネルギーの安定供給確保及び環境問題の解決を目的とし、水素エネルギー利用技術の開発や燃料電池自動車の普及拡大が計画されているが、燃料電池自動車のインフラ整備として燃料供給を行う水素ステーションの設置が必要である[1]。水素ステーションでは40MPaを越える高压水素ガスが市街地に貯蔵されることになるため、万一の事故時の水素挙動を把握し、安全性確保の為の対策を十分に検討することが必要である[2]。そこで、大量の水素が漏えいする事故として、40MPaの貯槽容

器(250L)に接続された配管(口径10mm^φ)が破断した場合を想定し、漏洩後の高压水素ガスの拡散状況及び着火時の爆風圧の影響を把握する目的で秋田県にある三菱重工業(株)田代試験場にて野外拡散爆発実験を実施した。

2. 拡散実験

2.1 実験概要

50Lの高压容器5本に、昇圧器を介して65MPaまで昇圧した水素ガスを貯蔵し、その高压容器と放出口(口径10mm^φのノズル)とを口径25mm^φの配管で結び、

その配管の先（放出口の直前）に、開閉弁を設けることで、ガスの放出を制御した。そして、そのノズルから40MPaの高圧水素ガスを大気圧になるまで大気中へ放出させた。濃度計測は、水素の浮力の影響を考慮して、約6m~30m高さのポールを複数本立て、各ポールに高さ方向に濃度センサー（新コスモス電機（株）製 KD-3A 防爆タイプ）を、ポール高さを噴出方向に徐々に高くすることで、空間的な水素ガスの拡がりを把握した。計測状況を図1に示す。ガスの放出方向は、ほぼ北から南方向となり、北風向きが出現する気象条件にて、実験を実施した。なお、実験中の気象条件は、放出口の上流側（北側）約50mの位置に高さ20mのポールを立て、そのポールに高さ5m毎に風向・風速計及び温度計を取り付けて計測した。風向・風速計は、高さ20mにおいて、3次元超音波風速計を使用し、それ以外は三杯・矢羽式の風向風速計とした。

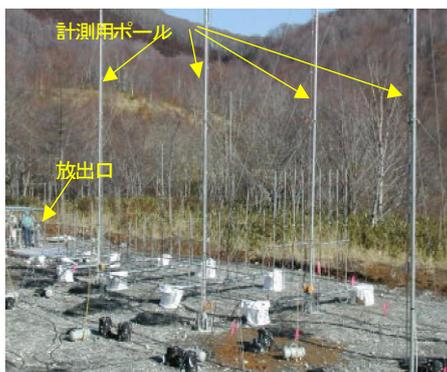


図1 計測準備状況

2.2 濃度変動計測装置

実験では、漏洩圧力が時間と共に変化するので、漏洩量の変化に伴って拡散濃度も変化する。そのため、上記濃度センサーでは応答性が遅く（約7秒）、正確な濃度計測が困難なため、別途新しく以下に示す濃度変動計測装置を試作し、濃度の時間変化が計測できるようにした。濃度変動計測装置の外観（組み立て中）を図2に示す。

この原理[3]は、次の通りである。10台の上記濃度センサーを1組として、ガスを1秒間隔でサンプリングしながら、サンプリングされたガスをサンプリング毎（1秒間隔）に各センサーに順番に送り込む。この時、濃度センサーは10台あるので、各濃度センサーには10秒間隔でガスが送り込まれることとなり、10秒間はサンプリングガスがセンサー部に保持される。したがって、サンプリングガスが送り込まれて、10秒後の各濃度センサーの出力をピ

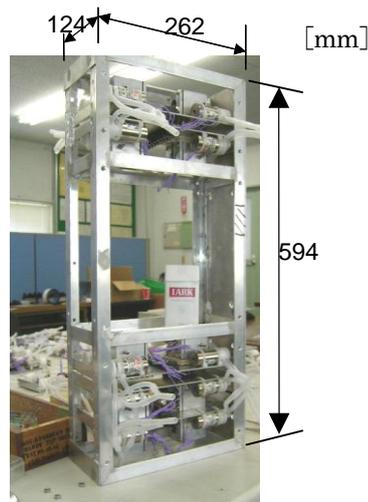


図2 濃度変動計測装置

ックアップしていけば、応答の遅れない1秒間隔の正確な濃度データが計測されることとなる。

そこで、濃度変動計測装置による計測精度を確認するために、高速計測の可能なメタンガスを用いて検証実験を実施した。この際、濃度変動計測装置はメタンガス用の濃度センサーを用いて組み立て、一方、高速計測にはこれまで実績のある高速炭化水素分析器（CAMBUSTION社製 HFR400）を用いた。この両者の計測結果を比較することで、濃度変動計測装置の計測精度の検証を行った。比較結果は、図3に示す通りであり、これにより、濃度変動計測装置は濃度の時間変化を把握する装置として、十分適用に耐えるものと判断できる。

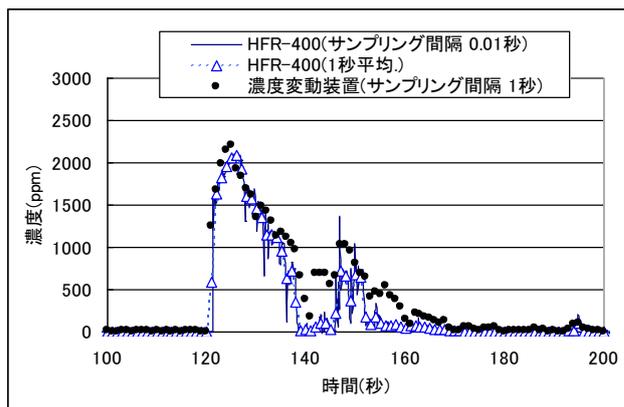


図3 濃度変動計測装置の検証

実際の応答性が改善されたことを確認するために、濃度変動装置に、従来のセンサーを隣接して取り付け、ほぼ同じ位置での濃度を同時計測した。この結果を図4に示す。これより、従来の濃度センサーでは、応答性が悪く、濃度の最大値も正確に抑えることの出来ないことが

わかるが、濃度変動装置では、大幅な応答性の改善が認められる。

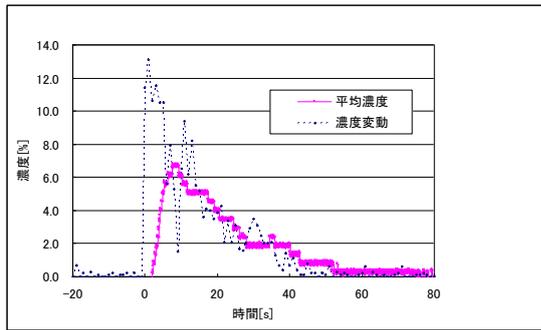


図4 応答性の比較

2.3 実験結果

40MPaの250L 高压水素ガス(約100Nm³)を、口径10mm^φのノズルから大気圧までブローダウンさせて放出した際の実験状況を図5に示す。この時の気象条件は、ほぼ無風(平均的には、西北西0.2m/s)であった。



図5 高压水素ガスの放出状況

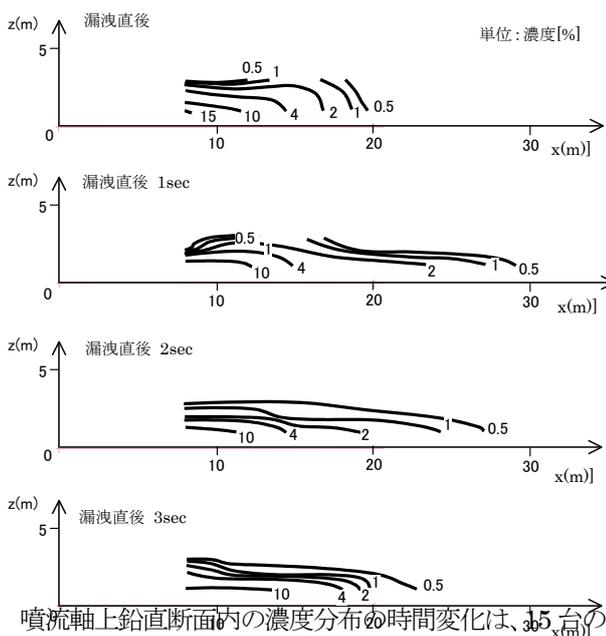


図6 濃度分布の時間変化

濃度変動計測装置により計測し、図6に整理した(但し、X<8mは未計測)。この結果、漏洩後1秒を過ぎると、ガスの拡散範囲は徐々に小さくなる傾向を示した。

3. 着火爆発実験

3.1 実験装置及び手法

計測は、圧力波、輻射熱、静電探針(イオンプローブ)、及び画像(400f/s 高速度ビデオ、50f/s ノーマルビデオ、400f/s 紫外線ビデオ)であり、図7にそれらの配置を示す。特に圧力波計測では周波数特性が重要となるため、過去の爆発実験において信頼性が証明されているピエゾ型(Kulite、共振周波数>150KHz)及び50m以上の遠隔地はマイクロフォン型(B&K、共振周波数>140kHz)を用い、またゲージアンプやプリアンプをピックアップから5m以内に設置するなど留意した。さらにデータレコーダ(12ビット、サンプリングレート:10MHz)を図7に示した中継点に配置し、約300m離れた建家(ブロックハウス)からLANを介して操作した。着火は連続スパークで行い、実際の着火時刻は着火点に向けたフォトセンサで同定した。

実験パラメータは、①漏洩口径(直径:0.5~25mm^φ)、②漏洩開始からスパーク着火までの時間(0.5~20s)、③漏洩水素タンクの容量及び初期圧力(25~100Nm³、10~40MPa)、及び④着火位置(漏洩口からスパークプラグまでの距離:0.5~7.5m)である。なお、漏洩水素タンクの容量を変化させた理由は、図8に示す通り、特に5mm以上の口径の場合には、漏洩開始から時間の経

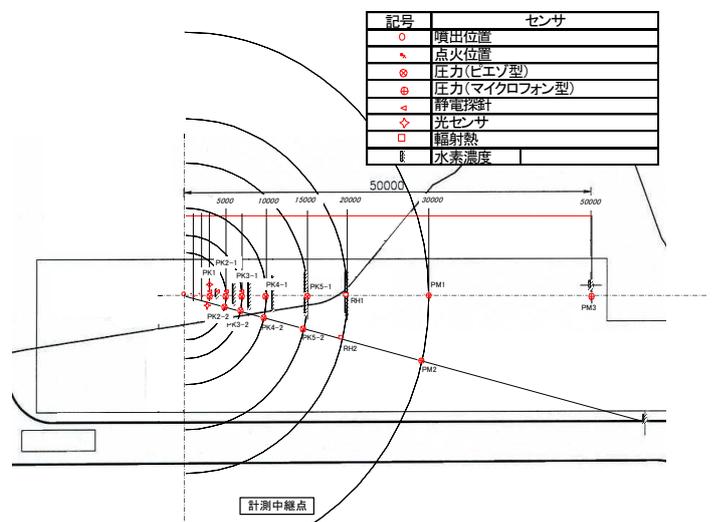


図7 爆発実験におけるセンサ配置

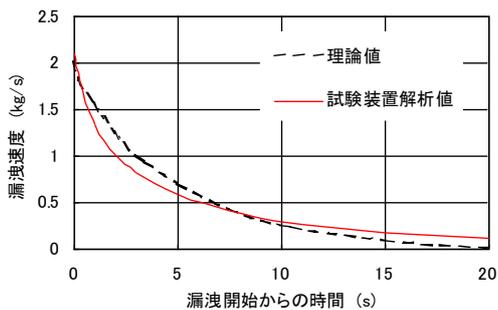


図8 水素漏洩速度の時間変化及び可燃性予混合気体積 (P₀=40MPa, d=10mm^φ)

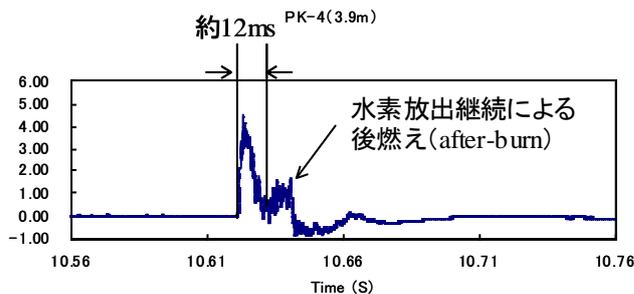


図9 圧力波形例 (着火点から噴流軸上の3.9m位置) (d=10mm^φ, P₀=40MPa, tign=2s)

過に伴いタンク圧力及び流量が減少するため、爆発に関与する予混合気の体積や濃度がタンク容量に依存すると考えられた為である。

3.2 実験結果及び考察

図9に典型的な圧力波形を、図10に着火タイミング tign (漏洩開始から着火までの時間) を変化させた場合の最大過圧と距離の関係を示す。この圧力波形、圧力の減衰特性、及び tign の変化の影響には、過去に行われたチャンバーに封入した予混合気に着火させる爆燃実験では見られなかった以下の特徴がある。

①圧力波の立ち上がり爆燃としては極めて速い。また、着火点から10~15m遠方まで圧力の降下は小さく、tign=2sの条件にて ΔP_{max}>15kPa と開放空間としては非常に高い圧力が計測された。初期の最大圧力となるピークが終了した後は、着火後も継続して放出された水素の燃焼 (after-burn) に対応する低い圧力波が持続する。

②図9の条件では、紫外線高速ビデオでの撮影結果から、火炎の乱流化を促進させる障害物等が無い開放空間条件において、約4m地点で300m/s以上まで火炎伝播速度が上昇していることが判った。これは高圧噴出による初期乱流混合により、着火直後から強い乱流予混合燃焼が起こった為と考えられる。但し予混合気の形状が円筒状であり、遠方における圧力波の減衰は速い(距離のほぼ-1.5乗)。

③図8に示した拡散計算結果によると、濃度10%以上、及び4%以上の濃度の予混合気の体積は、漏洩から約3s、及び7s後に最大となるが、漏洩後の着火時刻が早い程、最大過圧は大きい傾向にあった。これは、漏洩総量や予混合気の体積以上に、漏洩速度(乱流エネルギー)が爆発威力に効いていることを示唆している。

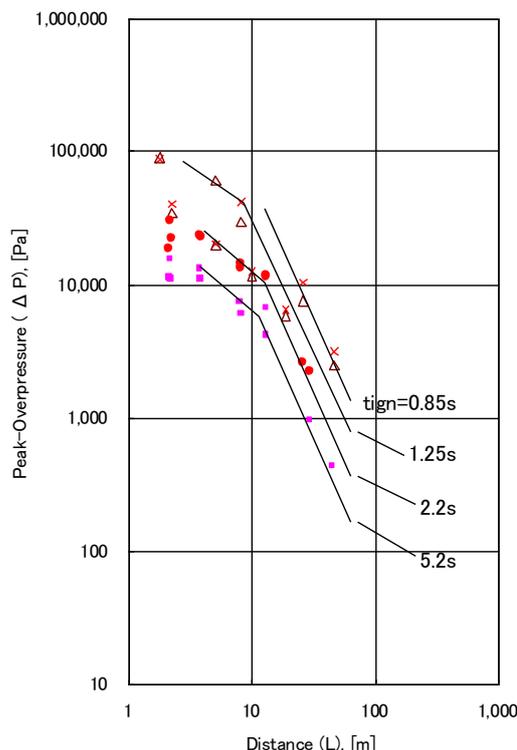


図10 距離と最大過圧の関係 (P₀=40MPa, d=10mm)

3.3 爆発シミュレーション

ここでは、汎用爆発解析ソフト (AutoReaGas) を利用した。各圧縮性保存式の数値計算を行い(乱流はk-εモデル)、化学反応速度は以下に示す乱流燃焼速度 (St) に反映され、その燃焼速度に対応した発熱が火炎面で生じる。

$$S_t = 1.8u^{0.412} L_t^{0.196} S_{ll}^{0.784} \nu^{0.196}$$

$$S_{ll} = S_t(1 + F_c R_f)$$

$$R_c = -T_c \cdot \rho \cdot \frac{S_t^2}{D_f} \cdot \min[m_{fu}, m_{O_2} / s, m_{pr} / (1 + s)]$$

ここで St 、 Si 、 u' 、 L_t はそれぞれ乱流燃焼速度、層流燃焼速度、速度変動成分、乱流スケールを表す。また R_c は燃料の単位体積当たり消費速度を、 D_f は乱流拡散係数を表す[4]、[5]。 T_c 及び F_c は St を規定する燃料特有の定数であるが、これは SRI-Poulter 研究所において実施された、水素-空気予混合気の爆発実験結果の解析によって求めた値を用いた[6]。

先ず圧縮性流体計算により気相に形成される予混合気の濃度、速度、温度分布を求め、それらを初期条件として爆発計算を行った。特に初期乱流特性が効いている高圧漏洩の場合、流体計算で求められる変動速度成分や乱流スケール等の乱流特性を上記の乱流燃焼モデルに適用することが重要である。図11に圧力波の計測値と計算結果の比較例を示すが、圧力の立ち上がり特性や最大値が良く再現されていることが判る。

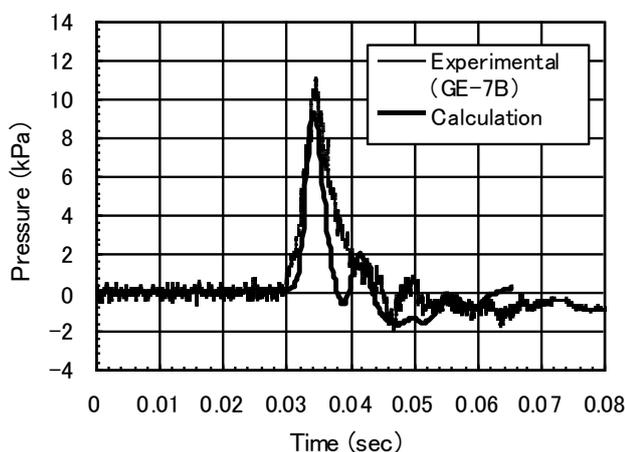


図1.1 圧力波形計測値と計算値の比較
($P_0=40\text{MPa}$, $d=10\text{mm}$, $t_{\text{ign}}=5\text{s}$)

4. まとめ

口径 10mm の配管が破断し、初期圧力 40MPa の高圧水素ガスが大気中に漏洩した際の拡散爆発特性について野外実験やシミュレーションによる調査を行った。漏洩水素ガスの拡散性状の時間変化を把握するため濃度変動計測装置を考案し、その計測精度を検証した上で噴流軸上鉛直断面の濃度分布の時間変化を計測した。爆発実験では、漏洩後の着火位置やタイミング等を変化させ爆風圧データを取得した。その結果、爆発威力は着火時の予混合気の濃度と体積のみならず、高圧漏洩による乱流化にも依存すること等が判り、これら反映させたシミュ

レーションにより、圧力波形が再現できた。これらの実験結果及び数値シミュレーションは、高圧の水素を用いる設備の安全性評価や安全対策検討に活用できる。

参考文献

1. Iwai, Y., Japan's Approach to Commercialization of Fuel Cell/Hydrogen Technology, Proceedings of 15th World Hydrogen Energy Conference, June 2004, Yokohama Japan.
2. Hayashi, T., et al., Hydrogen Safety for Fuel Cell Vehicles, Proceedings of 15th World Hydrogen Energy Conference, June 2004, Yokohama Japan.
3. 岡林 他：第 18 回技術開発研究成果発表会講演要旨集, 石油産業活性化センター, 2004
4. Catlin, C. A. and Lindstedt, R. P., Premixed Turbulent Burning Velocities Derived from Mixing Controlled Reaction Models with Cold Front Quenching, Combustion and Flame, vol.85, pp.427 (1991).
5. Bray, K.N.C., Turbulent Reacting Flows, Topics in Applied Physics, Springer Verlag, Berlin (1980).
6. 武野 他：第 23 回水素エネルギー協会大会講演要旨集, 2003.

謝 辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託を受け、「水素安全利用等基盤技術開発」の一環として実施された。ご指導・ご支援していただいた NEDO、(財)石油産業活性化センター、ならびに(財)エネルギー総合工学研究所の方々に感謝申し上げます。