

水素ガスの爆発に伴う衝撃圧力の障壁による低減効果

諏訪好英・米澤健次

株式会社大林組技術研究所

〒204-8558東京都清瀬市下清戸4-640

Reduction of Overpressure caused by Hydrogen Explosion using Protect Walls

Yoshihide SUWA and Kenji YONEZAWA

Technical Research Institute, OBAYASHI Corporation

640, Shimokiyoto 4-chome, Kiyose-shi, Tokyo 204-8558

A purpose of this research work is to enhance the safety of hydrogen facilities such as hydrogen refueling stations. Characteristic of hydrogen explosion was studied using experimental data conducted by IAE and SRII, and numerical simulations of shock wave propagation by explosion were performed to study the effect of protective walls. Result of numerical simulations agreed well with experiments. As the result of simulations on various conditions, it was found that protective wall should have certain width at least 12 meters, and the reduction effect of explosion overpressure greatly depends on the height of the wall and it does not depend on its configuration.

Key words: Hydrogen explosion accident, Shock wave, Overpressure, Protective wall

1. 緒言

水素エネルギーは化石燃料に依存しないこと、環境影響がほとんどないことから、次世代エネルギーとして最も有望と言われている。現在、燃料電池自動車をはじめとする水素利用技術が実用段階となりつつあり、各地で水素供給ステーション等の実証プラント建設が進められている。普及段階では、より多くの水素インフラ施設が整備されていくものと予測されるが、水素は本来引火性、爆発性の高い物質であり、安全技術の確立と関連法規の規制再点検が当面の最重要課題である。特に将来、これら水素インフラ施設が一般の生活・居住域近くに広く浸透していった場合、保護すべき周辺の人的、物的財産は第三者の所有物であり、安全の確保は重大な社会責任となってくる。

本研究では、水素ガスの爆発事故が周辺の建築構造物等に及ぼす損傷影響を明らかにするため、爆発衝撃圧力の伝播特性およびこれによる構造物破壊現象等に関する基礎的な現象解析を実施している。本報では、既往の水素ガス爆発実験結果に基づく考察と、数値シミュレーションに基

づき検討した障壁による衝撃圧力の低減効果について報告する。

2. 水素ガスの爆発衝撃圧力に関する考察

2.1 爆発に伴う圧力波形

平成13年度に実施されたNEDO（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構のWE-NET（World Energy Network II）タスク2において、IAE（財）エネルギー総合工学研究所がSRII（Stanford Research Institute International）と共同で実施した半開放系における水素ガス爆発実験の結果が報告されている[1,2]。この実験は、容積 5.3m^3 の立方体テント（ $2.25\text{m}\times 2.25\text{m}\times 1.05\text{m}$ ）内に常圧水素ガスを充填し、テント膜の除去と同時に起爆させたときの爆発衝撃圧力等を周囲40mまでの範囲における各点で計測したもので、初期水素ガス濃度、着火方法等を変化させ、さまざまな条件で爆発させたときの結果が得られている。

IAE-SRIIの実験結果を距離ごとのピーク圧力としてまとめたものを図1に、本論文で参照した実験条件を表1に

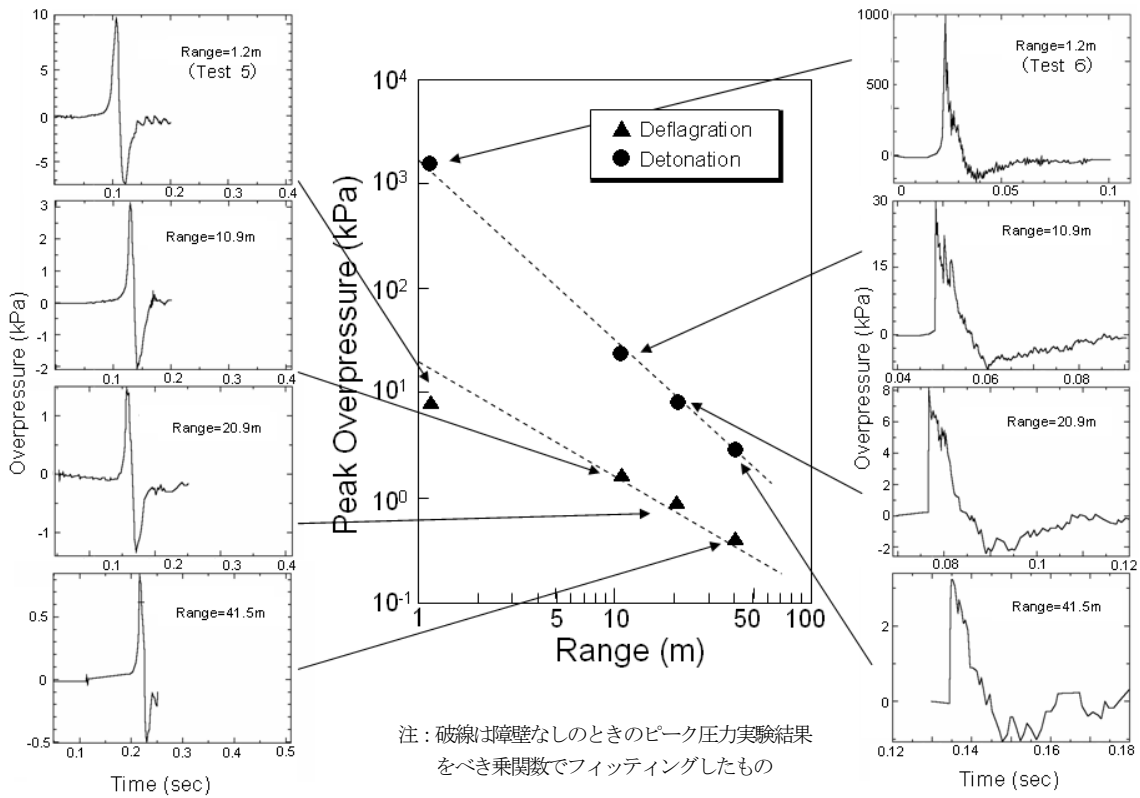


図1. 水素の爆発衝撃圧力とその波形の伝播状況 (文献[1]のデータから再集計)

示す。水素ガスの爆発現象には、比較的緩やかな爆燃 (deflagration) と反応の激しい爆轟 (detonation) とが知られている [3]。図1においても、爆轟による衝撃圧力のピークは爆燃の場合に比べ1桁以上大きな値を示しており、爆燃、爆轟の違いを明確に読み取ることができる。また図には代表的な測定点での圧力の時間変化を併記してあるが、両者の圧力波形にも大きな違いが認められる。すなわち、爆燃の場合には正圧、負圧が交互に現れる典型的なN波が認められるのに対し、爆轟による圧力波形では、ピーク圧力までの立ちあがり非常に急峻であり、正圧域がこれに続く負圧域に比べ卓越している。これらは、爆轟条件における高速の燃焼反応によるものと考えられ、IAE-SRIIの実験でも水素テント内に設置したイオンピンの計測結果から2,000m/s近い反応伝播速度が得られている。

2.2 衝撃圧力の伝播特性

図1には爆発源からの距離ごとに観測された圧力波形を併記したが、爆燃の場合、爆轟の場合とも波形の特徴は爆発源近傍から遠方までほとんど変化していない。爆燃燃焼反応の過程で形成される衝撃波の高周波成分は強いソリトン性を有しており、十分遠方までその波形を持続するものと考えられる。

表1. 文献[1]の実験条件

Configuration	Ignition	H ₂ (%)	Comments
Obstacle	Spark	56.6	
Obstacle	Spark	30.0	
No Obstacle	Spark	20.2	
No Obstacle	Spark	30.0	
No Obstacle	Spark	57.0	
No Obstacle	10g C-4	30.0	Detonation
No Obstacle	50g C-4	20.2	Detonation

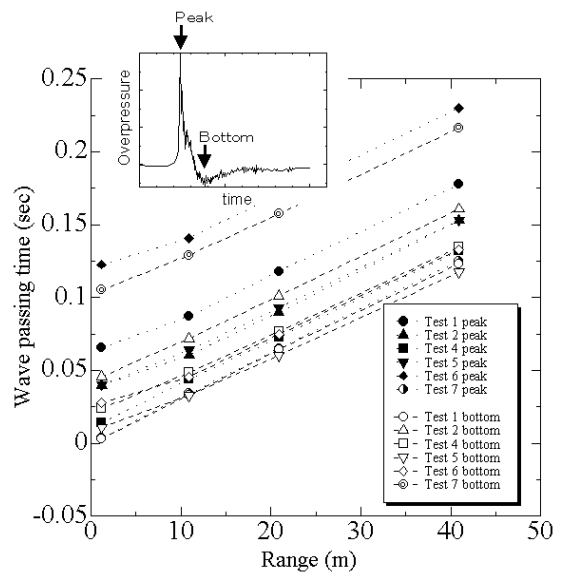


図2. 爆発衝撃圧力の伝播速度 (文献[1]から再集計)

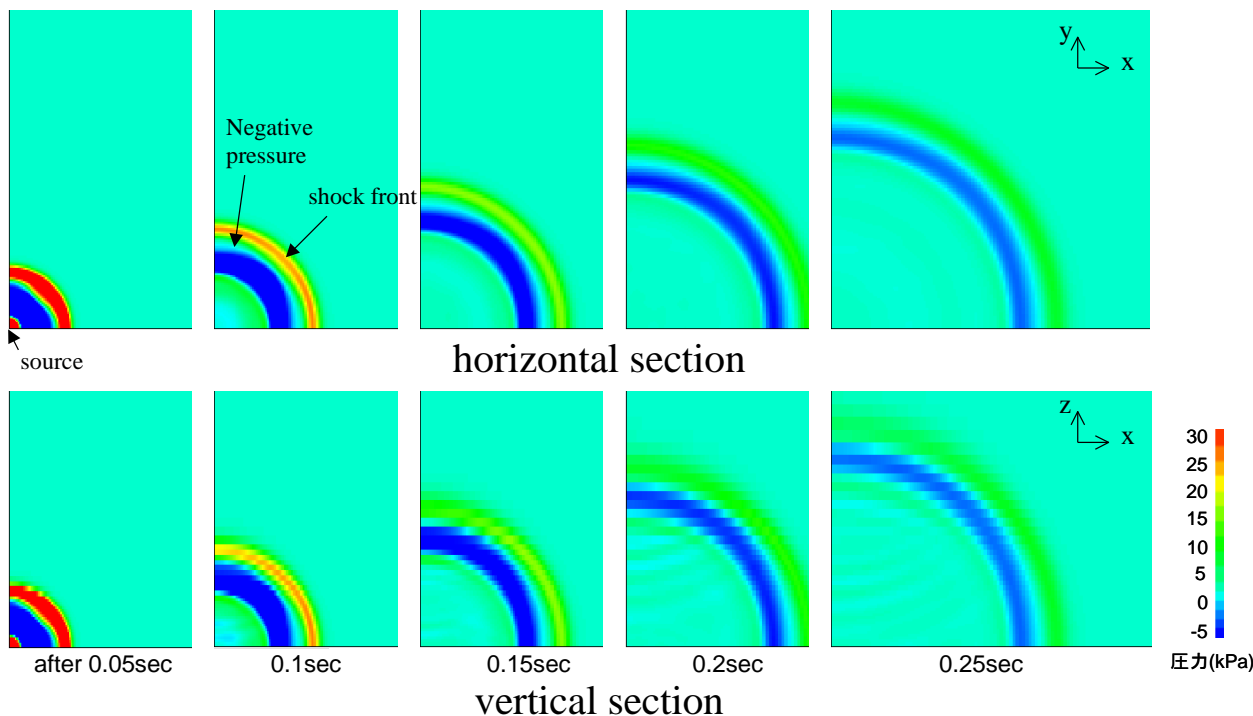


図3. 半開放空間における水素の爆発衝撃圧力伝播状況の数値シミュレーション結果

表2 基礎方程式

IAE-SRII実験結果のうちの7条件について、各測定点における正圧ピークおよび負圧ピークの通過時刻を求め、整理した。結果を図2に示す(図では正圧ピークをpeak、負圧ピークをbottomと示した)。その結果、爆燃、爆轟条件のいずれの場合も、水素テント外部における正圧ピーク、負圧ピークの通過時刻はほぼ平行な直線で表され、一定速度で衝撃圧力が伝播していることがわかった。図2の勾配から爆発衝撃圧力の伝播速度を求めたところいずれも330~340m/sの範囲にあり、ほぼ音速となっていることがわかった。このことから、水素ガスの爆発燃焼反応はテント内およびその近傍で既に終了し、その後、単純な波動伝播に移行していると考えられる。

3. 爆発衝撃波の数値シミュレーション[4]

3.1 数値シミュレーションによる現象の再現性

IAE-SRIIの実験と同様の系を想定し、濃度30%、容積5.3m³の水素ガスを爆轟条件で爆発させた場合の衝撃圧力伝播過程を数値シミュレーションした。解析にはLos Alamos研究所の公開コードBAAL[5]を用い、ICEd-ALE法[6]による非定常解析を実施した。基礎方程式を表2に示す。解析には爆発源中心を通る鉛直断面を対称面とした4分割モデルを用い、水辺方向50m、上空40mまでを解析

連続の式	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0$
運動量方程式	$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial (p+q)}{\partial x_i} + \frac{\partial \pi_{ij}}{\partial x_j} + \delta_{i,3} \rho g$
エネルギー方程式	$\frac{\partial \rho I}{\partial t} + \frac{\partial \rho I u_i}{\partial x_i} = -(p+q)D + \pi_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$
$p = p(\rho, I), \quad \pi_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad \pi_{ii} = \mu 2 \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \lambda D$	
t : 時間, x : 座標, u : 速度, ρ : 密度, π : 応力, p : 流体圧力, q : 人工粘性圧力, I : 内部エネルギー, D : 速度の発散量, λ : 粘性係数	

領域とした。計算格子数は150×150×100、爆発源から障壁近傍までの領域については格子幅を細かく、遠方および上空では徐々に大きくなるように格子分割を行った。障壁表面の最小格子幅は0.1m、上空の最大格子幅は1.5mである。なおここでは、爆轟による反応そのものは扱わず、実験結果の圧力減衰カーブから予測される初期圧力(1,300kPa)が水素テント内に瞬時に生じるものと仮定し、その後の衝撃波伝播状況を解析することとした。

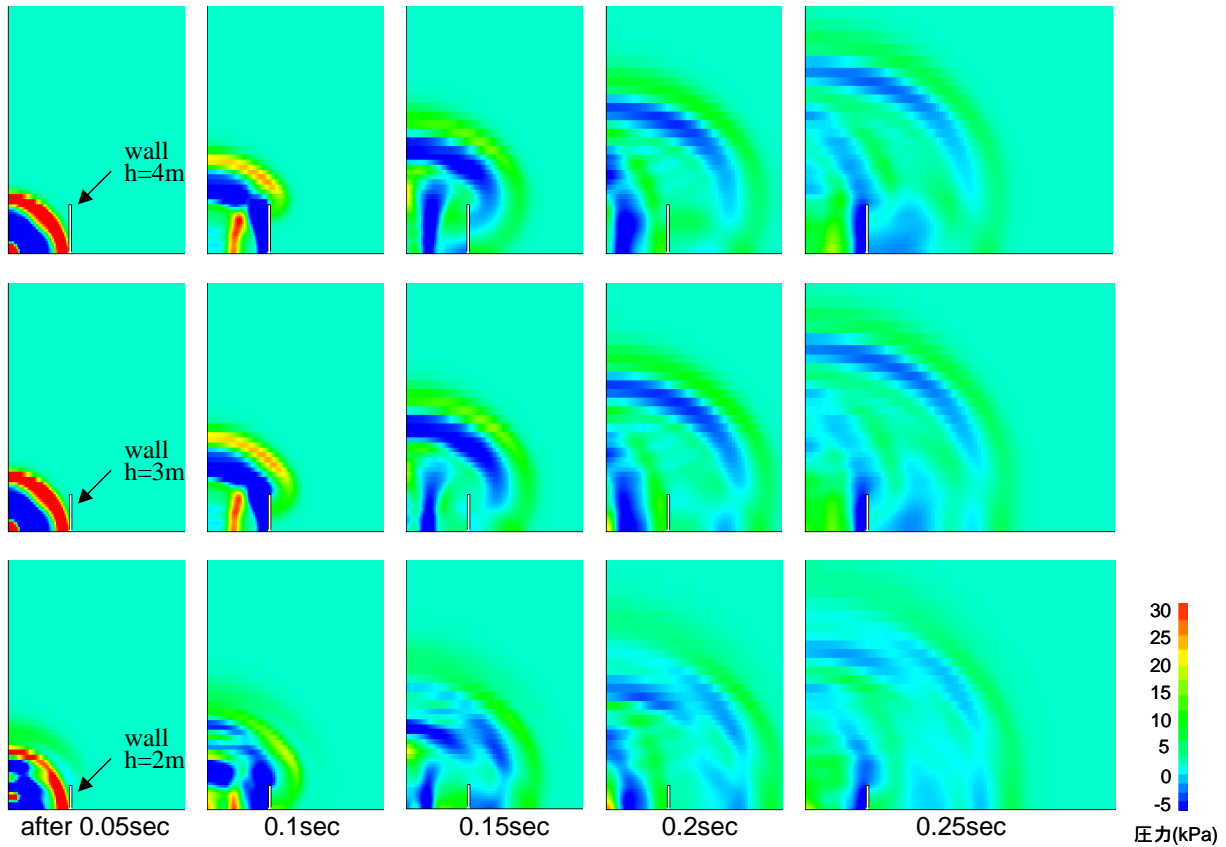


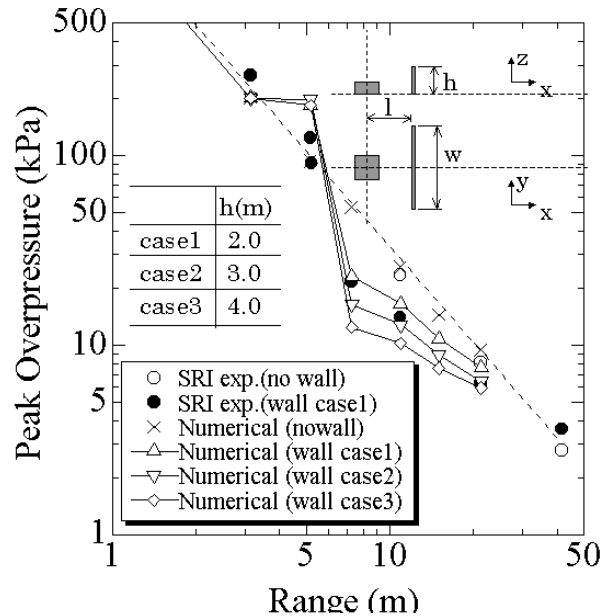
図4. 障壁を設置した場合における爆発衝撃圧力伝播状況の数値シミュレーション結果

半開放系における爆発を想定したときの数値シミュレーション結果を図3に示す。図は爆発中心を通る鉛直断面、水平断面内圧力分布の時系列変化を示している。本シミュレーションでは、初期水素位置を実験系と同様に立方体領域としたが、爆発の直後すぐに圧力分布は同芯半球状となり、周囲に伝播していくことがわかる。

数値シミュレーションから各点における圧力ピーク値を集計し、衝撃圧力の距離減衰特性を実験結果と比較した。爆発衝撃波は特に圧力の立ちあがりにおいて非常に急峻な変化を示すため、数値シミュレーションにより波形そのものを精度よく再現することは困難である。しかし数値シミュレーションにより求めた圧力の距離減衰特性は実験結果ともよい一致を示しており、ある程度の範囲で現象解析を行うことが可能と考えた。

3.2 障壁による衝撃圧力低減効果

一般高圧ガス保安規則では、鉄筋コンクリート製、コンクリートブロック製などの障壁構造を規定しているが、いずれも高さ2m以上必要としている[7]。3.1節と同様の系において爆発源中心から5mの位置に高さ2~4m、幅12mの障壁を設けた場合を想定し、シミュレーションを



注：破線は障壁なしのときの実験結果をべき乗関数でフィッティングしたもの

図5. 障壁を設置した場合の衝撃圧力 (シミュレーション)

実施した。なおここでは障壁を剛体と仮定し、地表面に対しても剛に固定されているものとした。

鉛直断面圧力分布の時系列変化として整理した結果を

まとめて図4に示す。障壁を設置した場合、図3に認められた同芯半球状の圧力分布が大きく崩れ、障壁前面では反射波の発生を、また障壁背面では衝撃波の回り込みおよびこれに伴う複雑な分布状況を生じることがわかった。

それぞれの場合について爆発源からの距離ごとに圧力ピークを集計し、比較した結果を図5に示す。いずれの場合も障壁の前面で圧力上昇が認められ、障壁を設置すると、その背面および後流側10m程度までの領域で衝撃圧力が低下することがわかった。障壁後流側5mにおける圧力低減効果を次式により、

$$\frac{[\text{障壁を設置した場合のピーク圧力}]}{[\text{障壁無しの場合のピーク圧力}]} \quad (1)$$

として評価すると、障壁高さ2mの場合64.65%、3mの場合49.77%、4mの場合39.88%であり、障壁後流側の圧力は障壁が高いほど低減され、より効果的な防御効果を期待できることがわかった。

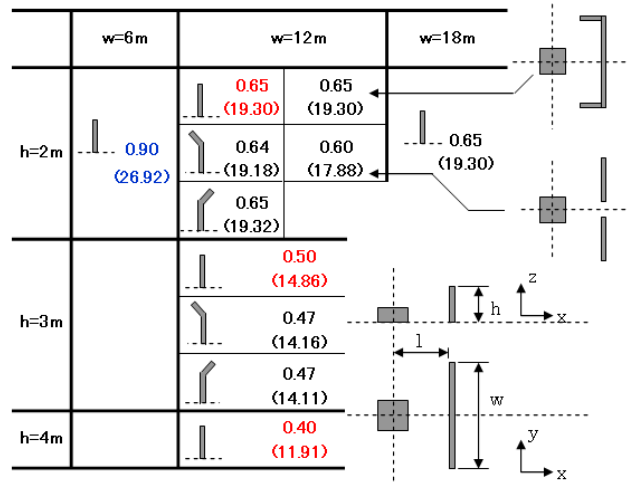
なお、高さ2mの障壁を設置した場合の圧力低減効果については、既にIAE-SRIIIによる実験が行われており、図5にはその結果も併記した。シミュレーション結果は、障壁前面の圧力上昇について若干大きめの値を示しているものの、障壁後流側における圧力低減効果については実験結果と定量的によく一致した。

3.3 様々な障壁構造による圧力低減効果の違い

障壁の幅、平面形状、断面形状が異なる場合について同様の数値シミュレーションを実施し、圧力低減効果を比較した。解析した全ケースについて3.2節の(1)式と同様の圧力低減効果を比較した結果を表3に示す。

障壁高さが同一(2m)で幅の異なる場合を比較すると、障壁幅が12m以上のときにはほぼ同等な圧力低減効果が得られるが、障壁幅6mのときには十分な効果が得られていない。これは、圧力衝撃波の障壁背面への回り込みが水平方向にも生じるためと考えられ、障壁には十分な幅を確保する必要があることがわかる。また、障壁幅を12mとして平面形状をコの字型に配置した場合も、同一高さで平面形状が直線的な場合と同等の圧力低減効果を得た。障壁断面形状を変化させた場合についても、同一高さであればほぼ同等な圧力低減効果が得られており、障壁の防御効果は障壁の高さに最も大きく依存することがわかった。

表3. 各種障壁による衝撃圧力低減効果の比較
(数値シミュレーション結果)



注：値は(1)式による圧力低減効果の評価値。(内)は距離10mのピーク圧力(kPa)を表す。(障壁なしの場合29.86kPa)

4. 結言

IAE-SRIIIによる既往の実験結果をもとに、水素ガスの爆発に伴う衝撃圧力の特性を考察した。その結果、爆発現象により形成される圧力波形は爆轟、爆燃の違いにより大きく異なるが、その波形はかなり遠方までその特徴を保存したまま伝播すること、爆発源から数m離れた地点以降の衝撃圧力は単純な波動伝播に移行しており、音速で伝播すること、などの知見を得た。また、衝撃波伝播状況の数値シミュレーションを実施し、障壁による圧力低減効果について考察した結果、圧力低減効果は障壁の高さに大きく依存し、障壁断面形状などによらないことがわかった。

水素ガスに対する関連法規の規制再点検では、CNGとの比較が重要な参考例のひとつと思われるが、WE-NETIIで実施された各種検討結果[1],[8]では、化学量論比でほぼ等価な発熱量を有する水素ガスと天然ガスの爆発圧力について水素の方が一桁大きな値を示すことが報告されている。今後、想定される爆発事故の規模に対してどの程度の障壁高さが必要となるのか検討していく予定である。

謝辞

本研究はNEDOからの委託を受け、「水素安全利用等基盤技術開発—水素インフラと建築構造物の耐爆、耐震性の

研究開発」の一環として実施したものである。本研究の実施にあたりご指導をいただきましたNEDO、IAE、SRII、(財)石油産業活性化センターの関係者の方々、および本委託業務に関する評価・サポート委員会委員の方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 佐藤、千葉：水素の爆発実験、水素エネルギーシステムVol.28,
No.1(2003).
- [3] 橋口、堀口：水素の爆発危険性、化学工業資料、Vol.18, No.2(1983).
- [4] 諏訪、米澤：水素爆発による鉄筋コンクリート造構造物への
影響予測(その1)、第23回水素エネルギー協会大会(2003).
- [5] Pracht, W.E. and Brackbill, J.U. : Los Alamos National Laboratory
Report, LA-6342 (1976).
- [6] Amsden, A.A, Ruppel, H.M. and Hirt, C.W : Los Alamos National
Laboratory Report, LA-8095 (1980).
- [7] 経済産業省資源エネルギー庁原子力安全・保安院保安課：一般
高圧ガス保安規則の機能性基準の運用について-例示基準、22
障壁(平13).
- [8] 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成14年度成果報告書
NEDO-WE-NET-0202.