

水素ガスの爆発事故対策に関する研究 (その3)

水素ステーションにおける水素ガスの漏洩検知性能向上に関する検討

土井 暁 諏訪 好英

Countermeasures to Accidents Due to Hydrogen-Gas Explosion (Part 3)

Improvement of Detection Ability of Gas Leakage in Hydrogen Refueling Stations

Satoru Doi Yoshihide Suwa

Abstract

Hydrogen gas is explosive and easily ignited. Therefore, it is very important to prevent the gas leakage and fire accidents in facilities such as hydrogen refueling stations. In these facilities, quick and reliable detection systems for gas leakage are also necessary as emergency measures. A new system that leads leaked gas to the sensors using a sloped ceiling was proposed, and its detection ability was studied. As a result, it was found that the system performed well in detecting leak accidents, and was superior to other conventional systems.

概要

本研究ではNEDO(独)新エネルギー・産業総合開発機構)の委託を受け、水素供給ステーションなど水素関連設備の安全性向上を目的とした一連の検討を進めている。本報では、施設に屋根を設けることにより半屋内構造とし、漏洩ガスの拡散、流動経路を制御することで、確実かつ迅速な漏洩検知を実現するシステムを提案し、水素ステーションの低压ユニットを対象とした水素ガスの漏洩に関する数値シミュレーションを実施した。この結果、想定するシステムは屋外型の施設に比べ、漏洩検知の確実性を大幅に向上できる可能性があることが分かった。

1. はじめに

水素エネルギーは次世代エネルギーとして最も有望なものと言われており、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る。一方、水素ガスは引火性、爆発性の高い物質であり、水素供給ステーション等のインフラ施設には、十分に安全を考慮した設計を行う必要がある。水素供給ステーションの事故を未然に防止するには、水素ガスを漏洩させないこと、着火要因を排除することとともに、水素ガスの漏洩を確実に検知し、緊急遮断などの適切な措置を迅速に行うことが重要と考えられる。本研究では水素供給ステーションを対象として、漏洩ガスの流路制御により漏洩検知性能の向上を図る方法を検討している。本報では、低压ユニットを対象として実施した数値シミュレーションの結果を報告する。

一般高圧ガス保安規則では、圧力1MPa以上の高圧ガスを扱う屋内設備に対しては設備群の周長10mにつき1個以上、屋外設備に対しては周長20mにつき1個以上の検知警報設備(水素センサ)の設置を義務付けている。しかし、ピンホール漏洩の指向性や周辺気流の影響などを考慮した場合、一般高圧ガス保安規則で規定する数のセンサで

は、検知可能な濃度の水素ガスがセンサに到達しない可能性も考えられ、緊急遮断までの間に大量のガスが漏洩して重大な災害に発展することも考えられる。

筆者らは、適切な屋根構造の設置により漏洩ガスをセンサに導くことで、確実かつ迅速な漏洩検知を実現できるものと考えた。既往の水素関連施設の多くでは、漏洩ガスの滞留を避けるため屋根を設けず大気開放させる構造を採用している。しかし、適切な屋根構造の採用によりガスを滞留させることなく漏洩検知性能を向上できるならば、着火、燃焼、爆発などの重大事故に発展する以前の早い段階において緊急対応を行うことが可能になると考えられる。

2. 水素ガスの物理的特性と漏洩検知の可能性

Table 1に水素ガスの主な物理的特性を示す。水素ガスの分子量は全ての気体中で最も小さく、最小のガス密度と最大の自己拡散係数を持つ。このため、水素ガスが空気中に漏洩しても速やかに希釈してしまうと思われるがである。しかし、水素分子の平均二乗平方変位から空気中での平均移動速度を計算してみると、たかだか数cm/sのオーダーであり、乱流拡散と同程度である。一方、空気

Table 1 水素ガスの物性値
Physical-properties of Hydrogen Gas

物性	値
分子径	2.3nm
分子量	2.016g/mol
密度 (0, 1atm)	0.0899kg/m ³

Table 2 各開口の開口条件
Inlet and Outlet Conditions

	西面 開口	東面 開口	南面 開口	北面 開口	排気口
面積(m ²)	1.438	1.438	0.925	0.925	1.295
開口率	0.3	0.3	0.3	0.3	0.7
床面からの 高さ(m)	0.1	0.1	0.1	0.1	-

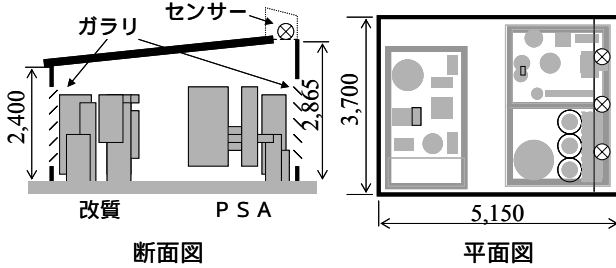


Fig. 1 検討対象としたシステム
Considered System of Low-Pressure Unit

との密度差により生じる浮力上昇速度は、数十cm/sから数m/sのオーダー、配管の微小亀裂等からピンホール漏洩を生じた場合の噴流初速度は音速を容易に超えてしまうものと見積られる。このため、水素ガスが漏洩した場合の拡散性状は、漏洩点付近では噴流による慣性効果が支配的であり、漏洩点からある程度離れて噴流の影響が小さくなった地点では浮力上昇効果が支配的になるものと考えられる。水素センサ等により漏洩検知する場合、予測される漏洩ガスの経路上にセンサを設置することが漏洩検知性能を左右する最も重要な要素と考えられるが、実際には漏洩の発生箇所やピンホールによる漏洩噴流の発生方向を予測することは困難である。このため、既往の水素関連施設の多くは、一般高圧ガス保安規則よりも多くの箇所にセンサを設置して対処しているのが現状である。

3. 検討対象としたシステム

本報では製造能力30Nm³/h規模を想定した天然ガス改質オンサイト型ステーションの低圧側ユニット(圧力1MPa未満の施設: オンサイト型水素供給ステーションでは改質および水素精製用PSAユニットがこれに相当することが多い)を対象とし、既往の水素供給ステーションを基にFig. 1のようなモデルを想定した。既往のステーションの多くは、設備郡の周囲をエンクロージャで覆っているが、上部を開放して漏洩ガスを上方に放出する方式を採用している。本モデルでは、さらに傾斜天井を設置して漏洩ガスを排気モニタに導くことを考えた。本モデルはユニットを半屋内構造とするものであり、以下のような効果を期待できると思われる。

- a) 傾斜天井により漏洩ガスの流路を制御し、センサに導くことで確実な漏洩検知を実現できる。
- b) 半屋内構造を採用することで、屋外気流の擾乱成

Table 3 基礎方程式
Fundamental Equations

連続の式および運動量方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} v_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + a_c$$

$$a_c = -g_i \cdot C \Delta \rho / (\rho - \Delta \rho), \Delta \rho = \rho - \rho_{H_2}$$

漏洩ガスの濃度輸送方程式

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u_i C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} D \frac{\partial C}{\partial x_i} + \dot{d}$$

乱流モデル (標準k-εモデル)

$$v_i = C_t \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_s - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_i}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_s - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$G_s = v_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

x_i : 座標, u_i : 流速, t : 時間, ρ : 空気密度, p : 圧力, v_i : 渦動粘性係数, ρ_{H_2} : 水素の密度, a_c : ガスの密度差による浮力項, g_i : 重力加速度, $\Delta \rho$: 空気と漏洩ガスとの密度差, C : 漏洩ガスの濃度, D : 拡散係数, \dot{d} : 漏洩ガスの発生項, K : 熱伝導率, k : 乱流エネルギー, ε : 乱流散逸率, $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, c_1, c_2$: モデル定数

分による漏洩ガスの攪拌を抑制できる。

- c) ガラリおよび排気モニタの位置、開口面積を適正化することで、ユニット内に天井へ向かう自然換気流を実現できる。

またこの自然換気流により、次の効果も期待できる。

- a) 自然換気流と漏洩ガスの浮力方向を一致させることにより、漏洩ガスがセンサへ達する時間を短縮できる。
- b) 緊急遮断後に残留ガスを速やかに除去する効果を期待できる。

ただし本システムを採用するには、どのような漏洩条件においても漏洩ガスが滞留しないことが重要であり、大気開放方式に比べ、着火事故などに対し十分な安全性を確保できる必要がある。またガラリおよび排気口面積は、水素ガスが全量漏洩しても滞留しないだけの十分な大きさが必要である。Table 2に各開口の条件を示す。

4. 数値シミュレーションによる現象のモデル化

想定したシステムの漏洩検知性能について、数値シミュレーションによる検討を実施するため、以下のような現象のモデル化を試みた。

4.1 基礎方程式

解析に用いた基礎方程式をまとめてTable 3に示す。解析は格子解像度の関係上、外部風に関する屋外の解析と、ユニット内の非定常解析を分離し、ユニット開口部の境界条件により内外を接合して計算を効率化した。屋外では乱流モデルに標準k-モデルを用いた定常解析を実施し、ユニット内解析では水素ガスの浮力及び拡散を考慮した非定常層流解析を実施した。漏洩ガスと空気との密度差による浮力効果は水素ガス濃度からモデル化して運動量方程式に加えた。解析には、汎用流体解析コードSTREAM for Windows ver.5 (ソフトウェアアクレイドル)を用い、漏洩ガスの浮力効果についてはユーザサブルーチンを新たに作成して使用した。

4.2 周辺気流とその影響

本研究で対象としたシステムでは、半屋内構造とすることで屋外気流の擾乱を排除し、また屋外気流による自然換気の効果も狙っている。ここではユニット内のみを解析対象とした詳細モデルと、ユニット周辺40mまでの範囲を含む屋外気流解析用のモデルを組み合わせることでユニット内への屋外気流の影響を考慮することとした。すなわち、各種風向・風速条件について屋外解析用モデルを用いた定常解析によりユニット各部の風圧係数を算出しておき、ユニット内解析用モデルではこの影響を開口部からの流入気流条件として次式により与えた。すなわち、

$$Q = \alpha A \sqrt{C_w v_w^2 - \frac{2}{\rho} p_{in}} \quad (1)$$

ここで、 Q : 流入風量、 A : 開口面積、 α : 流量計数
 C_w : 風圧係数、 v_w : 外部風速、 ρ : 密度、
 p_{in} : ユニット内圧力

なお、屋外気流については建築学会風荷重指針の粗度区分を想定し、風速および乱流統計量の鉛直プロファイルは以下のように設定した。

$$U(z) = U_s \left(\frac{z}{z_s} \right)^\alpha \quad (2)$$

k , の鉛直プロファイル

$$k(z) \equiv \{I(z)U(z)\}^2 \quad (3)$$

Table 4 各系統からの漏洩量と初速度の予測値 (孔径0.8mm)
 Assumed Leak Velocities and Volume from
 0.8mm Pinholes in diameter

系統	水素濃度 (%)	管内圧 (MPa)	温度 (K)	漏洩量 (L/min)	初速 (m/s)
原料ガス流入	0	0.1	293.15	10.3081	341.8
脱硫器後	20	0.1	553.15	14.8969	493.9
改質器後	60	0.1	643.15	7.0749	234.6
冷却器後	70	0.1	313.15	5.5020	182.4
圧縮機前	70	0.7	313.15	38.5143	1224.0
PSA後	100	1.0	313.15	215.9326	1229.0
オフガス	50	0.1	298.15	4.4669	568.0

$$\varepsilon(z) \equiv C_i^{1/2} k(z) \frac{U_s}{z_s} \alpha \left(\frac{z}{z_s} \right)^{(\alpha-1)} \quad (4)$$

ここで、 $C_i = 0.09$ 、 $I(z) = 0.1 \left(\frac{z}{z_G} \right)^{(-\alpha-0.05)}$

U_s : 基準高さ z_s (3.0m)における風速(3.0m/s)、 α : べき指数(1/5)、 z_G : 上空風高度(450m)

4.3 ピンホール漏洩による噴流のモデル化

水素ガスの漏洩条件には、LPガス、天然ガスに対する既往の研究に従い、孔径0.8mmのピンホール漏洩を想定した。漏洩量はノズルチップのガス噴出量の計算式により求められる。すなわち、

$$W = \alpha A p \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{1}{RT}} \quad (5)$$

W : 漏洩量、 α : 流出係数、 k : 比熱比、 R : 気体定数、
 T : 絶対温度、 A : ピンホール面積、 p : 内部圧力

想定する水素供給ステーションの低圧ユニット各部配管内における圧力、温度条件について、(5)式から予測した孔径0.8mmのピンホールからの漏洩量、ガスの噴出初速度をTable 4に示す。

Table 4からも明らかのように、ピンホール漏洩におけるガスの噴出初速度は、多くの場合、音速を超えてしまう。しかし孔径0.8mm、管内圧力1MPa以下のピンホール漏洩を想定した場合、音速を超える領域は漏洩箇所から数十cmの範囲である。したがって、本研究で対象とする漏洩ガスの流れは、ユニット内のほとんどの領域において非圧縮性流体として振舞うものと考えられる。また、解析すべきユニット内の空間容積を考えた場合、孔径0.8mmのピンホールを表現し得る程度の計算格子を設定することは、事実上困難である。ここでは、漏洩箇所近傍について実施した噴流の圧縮性流体解析の結果を非圧縮性自由噴流の経験式にフィッティングし、この経験式を用いてユニット内解析用モデルの漏洩箇所に仮想吹出し噴流としてモデル化した。

フィッティングに用いた経験式をTable 5に示す。圧縮性噴流解析の結果と経験式とでは、漏洩箇所近傍の状況

Table 5 ピンホール噴流のフィッティングに用いた経験式
Adjusted model to the Leak flow from Pinholes

第 域： $x \leq 4d$ ： $v_x = v_0$
第 域： $4d \leq x \leq 8d$ ： $v_x = C/\sqrt{x}$
第 域： $8d \leq x \leq 20d \sim 100d$ ： $v_x = k \frac{d}{x} v_0$ $v_r = v_x \cdot \exp(-n)$ ， $n = 2k^2 \cdot r^2 / x^2$
第 域：第 領域 $\leq x$ ： $v_x = 0.25$

x ：軸方向の座標， r ：横断方向の座標， d ：吹き出し口
 C, k ：定数， v_0 ：軸方向速度の初期値，
 v_x ： x 座標上の軸方向速度， v_r ： r 座標上の軸方向速度

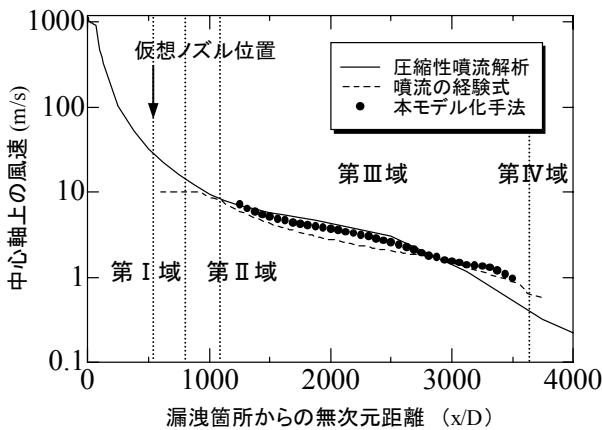


Fig. 2 噴流軸上の速度分布の比較
Comparison of Velocity Profiles in Center Axis

が大きく異なるが、中心軸速度が距離に反比例する第 域以降は傾向が一致する。ここでは、第 域以降における中心軸速度および噴流域の幅の広がり方が圧縮性噴流解析の結果と一致するよう経験式のパラメータをフィッティングし、ピンホールからの距離 $L=1m$ の位置に仮想的な非圧縮吹き出し噴流として与えた。なおここに、 $L < 1m$ における漏洩気流は計算には考慮していないため、実際のピンホール漏洩箇所と経験式におけるノズル位置とは一致しなくてもよいものと考えた。 $L=1m$ という距離は、本報で想定するいずれの条件においても非圧縮性流体の仮定が成り立ち、また漏洩開始後1/10秒以内に漏洩ガスが到達する位置として選定したものである。また $L=1m$ 程度の範囲では噴流の慣性力が十分大きく、浮力効果が漏洩ガスの分布に顕著な影響を及ぼすのはさらに後流側であると仮定した。なお、非定常解析において仮想吹き出し噴流を放出開始する時刻は、あらかじめ求めた圧縮性解析結果の噴流到達時刻に一致させた。

Fig. 2~Fig. 4は、圧縮性解析、噴流経験式および経験式を仮想吹き出し噴流としてモデル化して非圧縮解析した場合の、中心軸速度およびピンホールからの距離2m（仮想吹き出し噴流設定位置の後流1m）における横断方向の速度、濃度の分布を比較したものである。仮想吹き出し噴流としてモデル化した漏洩ガスの流れおよび濃度分布は、圧縮性噴流解析の結果とよい一致を示しており、本

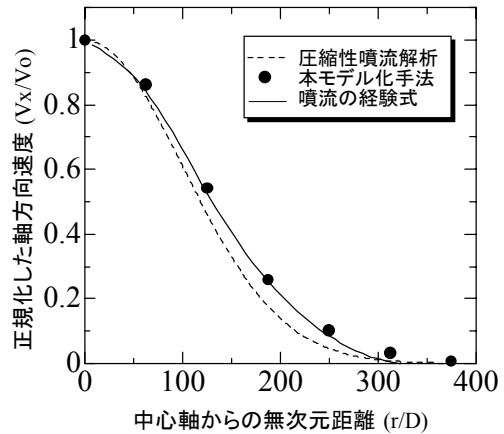


Fig. 3 横断方向の速度分布の比較
Comparison of Velocity Profiles in Transverse direction

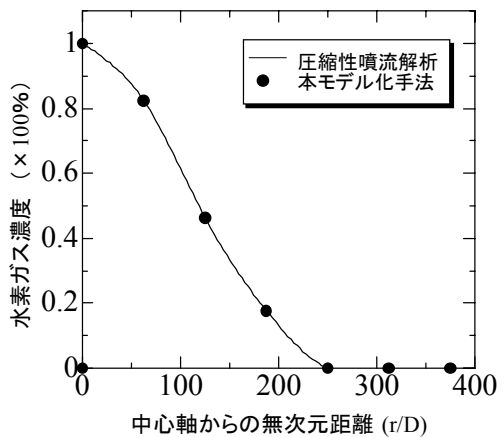


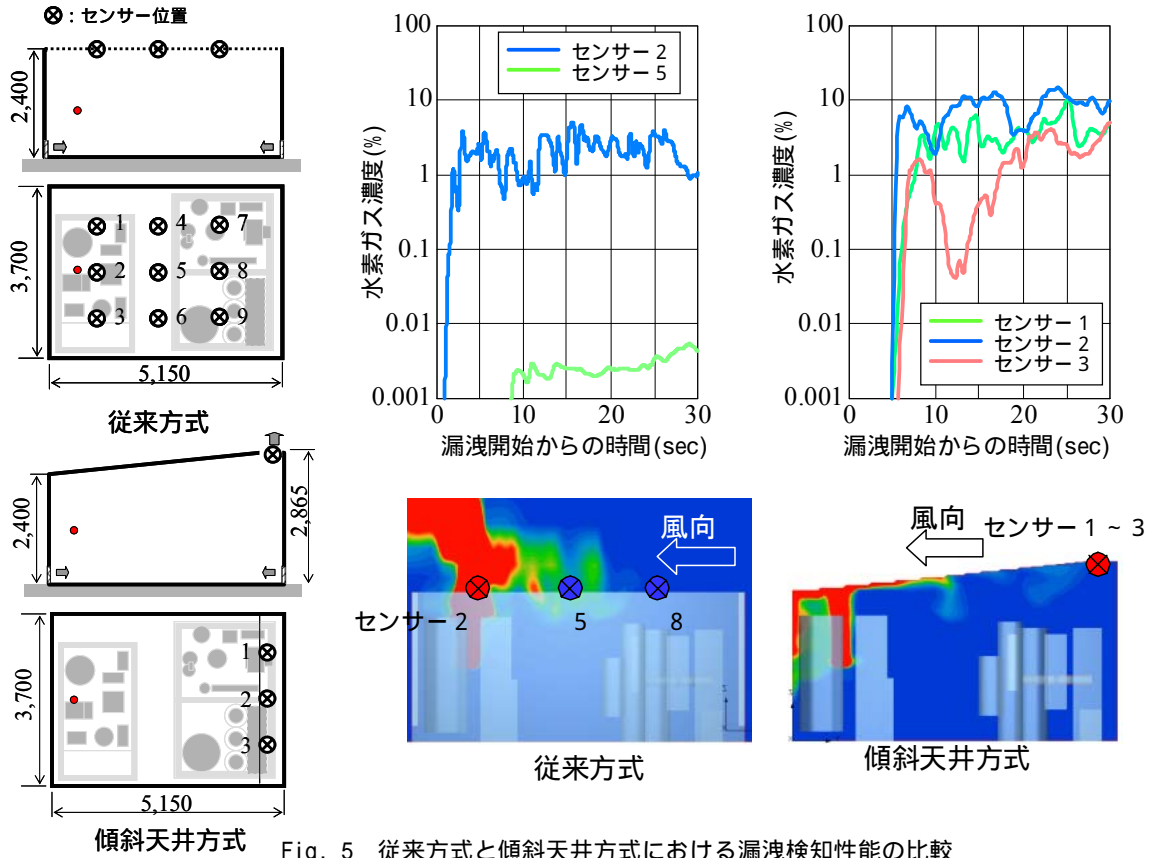
Fig. 4 横断方向の濃度分布の比較
Comparison of Concentration Profiles in Transverse direction

手法によりピンホール漏洩の状況を十分模擬できるものと判断した。

5. 数値シミュレーションによる検討

5.1 従来システムとの比較

3章で想定した傾斜天井方式と従来方式の大気開放型システムについて数値シミュレーションを実施し、それぞれの漏洩検知性能を比較した。Fig. 5に解析結果から求めた各センサ位置での濃度時刻歴および漏洩開始から8秒経過後の水素ガス濃度分布を示す。漏洩発生箇所は管内圧力1MPaの配管とし（漏洩量約200L/min）、濃度100%の水素ガスが上向きピンホールより漏洩した場合を想定した。一般高圧ガス保安規則の高圧ガス施設に対する規定に従うと、想定した規模のユニットでのセンサ設置箇所の最小値は2箇所となる。ここでは従来方式について9箇所、傾斜天井方式について排気モニタ近傍3箇所のセンサを想定したが、検知警報設備の閾値を1%（水素ガスの爆発下限界濃度の1/4）とした場合、従来システムでは、9箇所のセンサのうち漏洩箇所近傍を除く6箇所検知不能であるのに対し、傾斜天井方式では想定したすべての



傾斜天井方式 Fig. 5 従来方式と傾斜天井方式における漏洩検知性能の比較

Comparison of Leakage Detection Ability between Conventional System and Proposed System with Sloped Ceiling

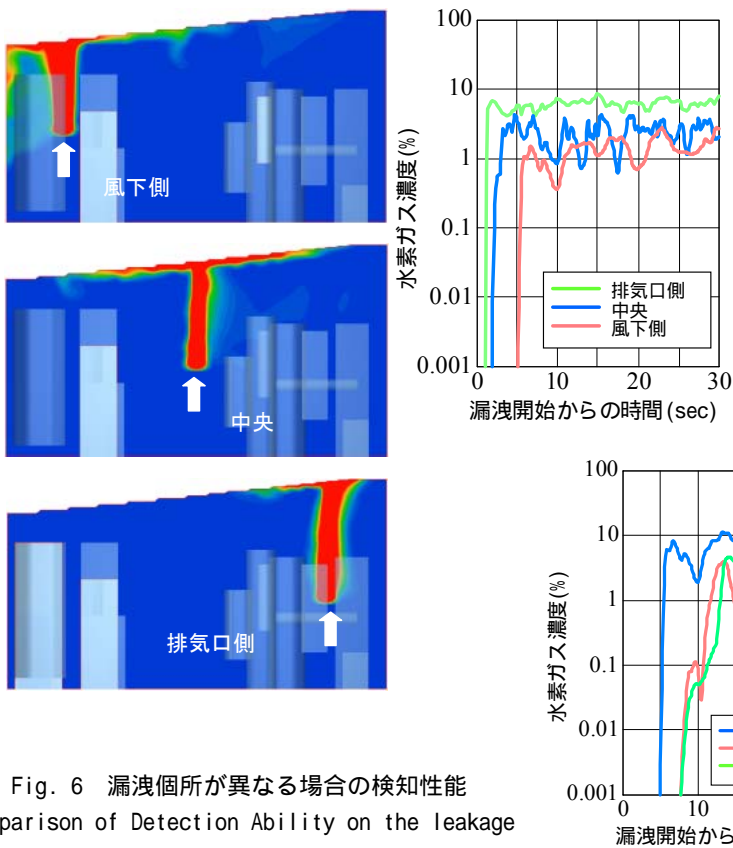


Fig. 6 漏洩個所が異なる場合の検知性能
Comparison of Detection Ability on the leakage from different locations

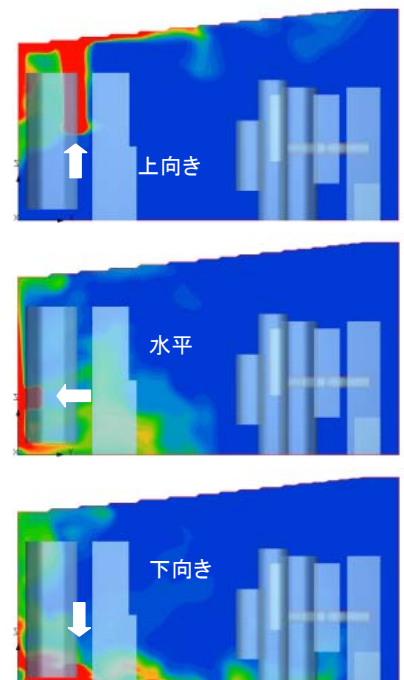


Fig. 7 漏洩方向が異なる場合の検知性能
Comparison of Detection Ability on different leakage directions

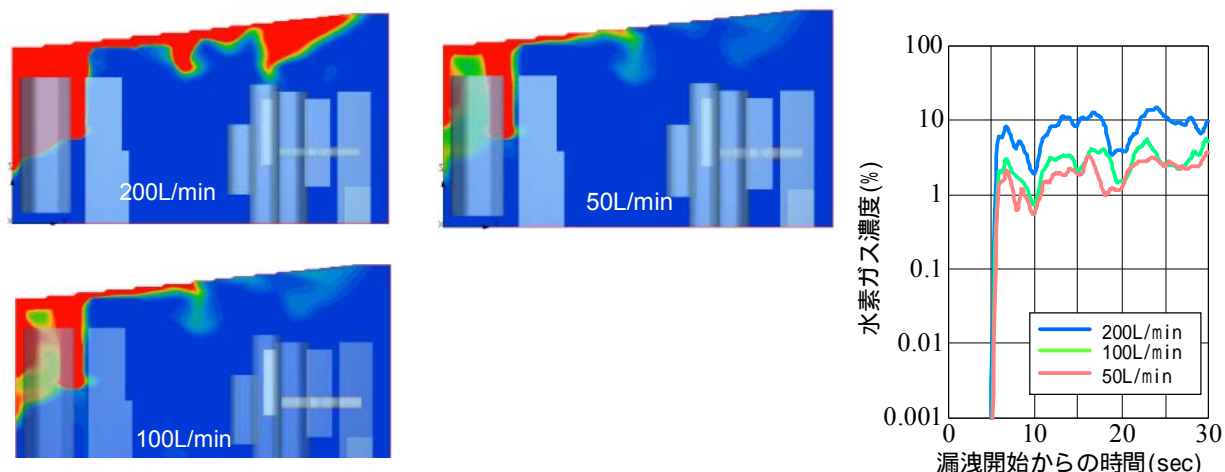


Fig. 8 漏洩量が異なる場合の検知性能
Comparison of Detection Ability on different Leakage Flow Rate

センサで漏洩を検知できるものと予測される。また、漏洩開始から各センサに検知可能な濃度の漏洩ガスが到達するまでに要する時間は、5～7秒であり、傾斜天井方式の採用により確実に迅速な漏洩検知が期待できると判断した。

5.2 さまざまな漏洩条件に対する検知性能

漏洩箇所、漏洩方向、漏洩量などさまざまな漏洩条件を想定したシミュレーションを実施し、想定したシステムの漏洩検知性能を検討した。Fig. 6はユニット内の異なる箇所から漏洩を生じた場合、Fig. 7は漏洩方向を上向き、下向き、水平方向とした場合の解析結果である。いずれも漏洩条件は5.1節と同様、漏洩量200L/min、水素濃度100%を想定した。漏洩箇所が異なる場合でも、漏洩方向が上向きの場合には漏洩ガスの拡散状況に大きな違いは認められず、いずれの場合も漏洩ガスは傾斜天井に沿って排気モタへ誘導され、速やかにセンサ位置に到達する。一方、漏洩方向が下向き、水平方向の場合には、ユニットの内壁や床面に噴流が衝突し、その後浮力効果により天井側へ上昇してセンサ位置に到達することがわかった。このため、内壁や床面に衝突した後のガスの挙動は拡散的となり、漏洩方向が上向きの場合に比べセンサへの到達時間に若干の遅れを生じるが、12～14秒でセンサ位置に到達した。Fig. 8は漏洩量を50～200L/minに変化させた場合の結果である。漏洩箇所、漏洩方向が同じ場合には、センサ位置への漏洩ガス到達時間はほぼ同等となるものと推測される。なお、本検討で想定したすべての漏洩条件において、傾斜天井方式ではすべてのセンサ位置に検知可能な濃度の漏洩ガスが到達した。またその到達時間は十数秒以内であり、緊急遮断などの迅速な対応が可能と考えられる。以上の結果から、傾斜天井方式を採用したシステムでは、さまざまな漏洩条件に対して有効な検知性能を実現できることを確認した。

6. まとめ

水素供給ステーションの低圧ユニットを対象としてピンホール漏洩を想定した数値シミュレーションを実施し、大気開放方式と傾斜天井方式の漏洩検知性能を比較した。その結果、傾斜天井方式を採用したシステムでは漏洩検知の確実性、迅速性を大幅に向上できる可能性のあることがわかった。既往の水素関連施設の多くでは大気開放方式が採用されているが、今後、水素エネルギーの利用が普及した場合には周辺環境との関係から漏洩ガスを大気放出できない状況も想定される。傾斜天井方式により滞留の可能性がなく、迅速・確実な漏洩検知が実現できるならば、水素ステーションへの適用も十分考えられる。今後、さらに安全性の検証やシステムの規模による適用性の違いなどについて検討を進めていく予定である。

謝辞

本研究はNEDO（(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構）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関係者の方々、本業務の評価・サポート委員会委員の方々へ感謝いたします。

参考文献

- 1) WE-NET：H13年度成果報告書（-2）、エネルギー総合研究所、pp.13～16、（2002）。
- 2) LPガス・天然ガス自動車用燃料充てん設備等の高圧ガスに関する技術基準検討報告書。
- 3) 高圧ガス保安協会：高圧ガス保安法令関係例示基準資料集（改訂版）、高圧ガス保安協会（平15）。
- 4) 柳場重男：解説工業熱力学、共立出版（昭31）。
- 5) 石原正雄：建築換気設計、朝倉書店（昭44）。