

高圧水素漏洩時の理論流量と実験値との比較検討

Comparison between Theoretical and Experimental Mass Flow Rate
regarding Release of High-Pressure Hydrogen Gas

○ 河野慎吾 (三菱重工), 坂田展康 (三菱重工), 岡林一木 (三菱重工)
河内昭紀 (三菱重工), 千歳敬子 (三菱重工)

Shingo Kawano*, Nobuyasu Sakata*, Kazuki OKABAYASHI*
Akinori KOUCHI* and Keiko CHITOSE**

*Nagasaki R&D Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Nagasaki, 851-0392, Japan

** Nuclear Energy Systems HQ, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Yokohama, 220-8401, Japan

Experiments of the leak of the hydrogen from high pressure tank has been conducted to investigate the safety of the hydrogen station. In the experiments, it was confirmed that the mass flow rate of the hydrogen gas released from the nozzle was lower than the theoretical value that was derived from the assumption that the hydrogen was ideal gas and expanded isentropically. From the one-dimensional analysis including the real gas effect and numerical simulation that reproduced the shape of the nozzle, it was concluded that the real gas effect doesn't have much effect on the decrease of the mass flow rate and it is mainly due to the pressure loss by the shape of the nozzle.

1. はじめに

水素ガス供給ステーションでは、40~70MPaの高圧条件下における貯蔵・供給が計画されているが、水素ステーションの安全性を評価するためには、水素供給のための着脱部分やフレキシ配管の亀裂から水素が漏洩・着火した場合の挙動を把握しておくことが必要不可欠である^{1,2)}。これらの現象把握の一環として高圧タンクから大気中への野外水素漏洩拡散試験を行った。しかし、試験では理想気体・等エントロピー膨張を仮定した理論流量と実際に計測された漏洩量にずれが見られたため、安全性評価の際に設定すべき漏洩量の考え方を整理すべく、まず本論文では理論流量と実際の漏洩量にずれが生じる要因について検討した結果を報告する。

2. 水素漏洩試験

秋田県田代町の野外試験場において高圧タンクからの水素漏洩試験を行った。試験では漏洩源から下流におよそ70mまでの範囲において高さ1m~30mのポールを設置し、ポールに複数の濃度センサを設置して、漏洩源から下流位置での濃度計測を実施した。この試験において、以下のような方法で水素の漏洩量を求めた。

- ① 試験前後のタンク内圧力及び温度からタンク内密度を算出
 - ② ①のタンク内密度とタンク容積から試験前後のタンク内水素量を算出
 - ③ 試験前後のタンク内水素量を比較して漏洩量を求める
- なお、①の試験後の圧力及び温度には、タンク内温度が試験前の温度に昇温したときの値を用いた。

試験時の条件を Table. 1 に示す。

Table.1 Experimental Conditions

Tank Pressure p_0	40 MPa
Tank Temperature T_0	293 K

Table. 1 の条件において、スロート直径 2mm のノズルから漏洩する水素の理論流量は式より $7.79 \times 10^{-2} \text{kg/s}$ となる。

$$\dot{m} = 0.685 \frac{p_0 A^*}{\sqrt{RT_0}}$$

R : ガス定数 [J/(kg·K)], A^* : ノズルスロート面積 [m²]

ここではノズル出口においてチョークすると考えている。

一方、上記の①~③の方法から求められた実際の水素漏洩量は $6.46 \times 10^{-2} \text{kg/s}$ となり、理論流量からおよそ 17% の流量のずれが認められた。この要因として以下の 2 つの要因が考えられる。

- (i) 理論流量の算出では理想気体を仮定しており、一方試験では高圧のため実在気体効果が無視できず、算出した理論流量との差を生じた
 - (ii) ノズルでの圧力損失により試験時の流量が低下した
- 上記の要因についてそれぞれ検討を行った。検討方法及び検討結果を以下に示す。

3. 実在気体効果の影響検討

実在気体効果が流量変化に与える影響の検討として、実在気体の状態方程式を用いたノズルの一次元解析を行い、実在気体効果を含めた場合の流量を算出した。これと理想気体を仮定した場合の流量を比べ、実在気体効果を含めた場合、理想気体を仮定した場合に比べ流量の低下が見られるかを検討した。

3. 1 Peng-Robinson の式

実在気体の状態方程式には Peng-Robinson の式を用いた。Peng-Robinson の式は下式のようになる。

$$p = \frac{\rho RT}{M - b\rho} - \frac{a\rho^2\alpha}{M(M + b\rho) + b\rho(M - b\rho)}$$

ここで、

$$p: \text{圧力 [Pa]}, \rho: \text{密度 [kg/m}^3\text{]}, T: \text{温度 [K]}$$

である。また、

$$a = 0.45724 R^2 T_c^2 / p_c \quad b = 0.07780 R T_c / p_c$$

$$\alpha = \left[1 + m \left\{ 1 - (T/T_c)^{1/2} \right\} \right]^2$$

$$m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2$$

であり、それぞれの値として Table. 2 に示す値を用いた。

Table. 2 Value for hydrogen gas

P_c	1.30×10^6 Pa
T_c	33.25 K
ω	-0.216
\mathcal{R}	8314.5 J/(kmol·K)
\mathcal{M}	2.0159

3. 2 ノズルの面積変化に対する状態量の変化式

ノズルの面積変化に対し、連続の式と音速の式により以下の式が成り立つ。

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{M^2}{M^2-1} \frac{dA}{A} \quad \frac{du}{u} = \frac{1}{M^2-1} \frac{dA}{A}$$

$$dp = \rho u du$$

ここで、

M : マッハ数、 u : ガス流速[m/s]、 A : ノズル面積[m²]

上式より、ノズル面積が A となる場所の状態量が分かっている場合、面積が dA 変化した場所での密度、流速及び圧力を求めることができる。また、密度、圧力から Peng-Robinson の式よりその場所での温度を求めることができる。

Peng-Robinson の式を状態方程式とした場合、音速 as は下式で定義される。

$$as = \left[\frac{\rho^2}{CvT} \left\{ \frac{\mathcal{R}T}{(\mathcal{M}-b\rho)} + \frac{a}{\mathcal{M}(\mathcal{M}+b\rho)+b\rho(\mathcal{M}-b\rho)} m \sqrt{\frac{\alpha T}{T_c}} \right\}^2 + \frac{\mathcal{M}\mathcal{R}T}{(\mathcal{M}-b\rho)^2} - \frac{2a\mathcal{M}(\mathcal{M}+b\rho)\rho\alpha}{\{\mathcal{M}(\mathcal{M}+b\rho)+b\rho(\mathcal{M}-b\rho)\}^2} \right]^{1/2}$$

この音速と流速からマッハ数が求められる。よって、ノズル面積が A となる場所の状態量が分かっている場合、面積が dA 変化した場所での状態量が求められる。

3. 3 ノズルの一次元解析結果

上記の考え方から、ノズルの軸方向にノズルを細かく分割し、Table. 3 のような条件を与えることにより、実在気体効果を含めた場合の水素流量を求めた。

Table. 3 Conditions of one-dimensional analysis

Inlet conditions	p	40 MPa
	T	293 K
	A	3.85×10^{-5} m ²
Exit conditions	M	1.0
	A	3.14×10^{-6} m ²

解析より、理想気体・等エントロピー膨張を仮定した場合に比べノズル出口において密度が 10% 程度の低下するものの、流速は 10% 程度増加するという結果が得られ、結果的に流量は 0.3% 程度の低下と理想気体・等エントロピー膨張を仮定した場合と比べ大きな違いは見られなかった。このため、実在気体効果が流量変化に与える影響は小さいと考えられる。

4. ノズル内圧力損失の影響検討

次に、ノズル内圧損が流量変化に与える影響の検討として、CFD によるノズルの軸対称解析を行った。なお、3. より実在気体効果が流量変化に及ぼす影響は小さいとの結論が得られたことから、本解析では理想気体の状態方程式を用いた解析を行った。なお、解析では圧縮性 Navier-Stokes 方程式を支配方程式とし、乱流モデルには $k-\epsilon$ モデルを使用した。

Fig. 1 にノズル近傍の解析格子、Fig. 2 に解析により得られたノズル軸方向の平均全圧分布を示す。

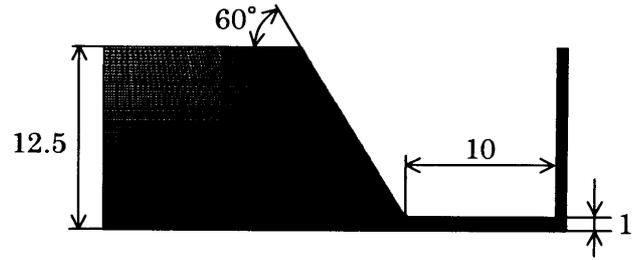


Fig. 1 Numerical grid for CFD

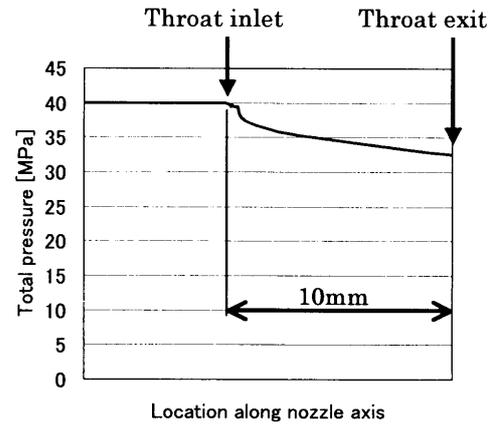


Fig. 2 Total pressure distribution along nozzle axis

Fig. 2 に示すように、ノズルスロート入口部での剥離及びスロート内での摩擦によると考えられる全圧損失が生じており、ノズル出口部の全圧は貯気槽圧 p_0 に対し 20% 程度低下していることが分かる。このため解析では水素流量が 6.86×10^{-2} kg/s となり、理論流量に比べおよそ 12% の低下と試験に比べ低下量は小さいものの、ほぼ同程度の流量低下が見られた。このことから、試験での流量低下は主にノズル形状に起因する圧力損失によると考えられる。

5. 結論

高压タンクからの水素の大気中への漏えい試験において、理想気体・等エントロピー膨張を仮定した理論流量に比べ試験時の流量が低くなるという結果を得た。この原因について検討を行った結果、実在気体効果が流量変化に与える影響は小さく、試験での流量低下はノズル形状に起因する圧力損失によると考えられ、実験条件によっては、試験時のノズル形状による流量変化の可能性を考慮しておく必要のあることが示唆された。

6. 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プロジェクトの一環として実施された。ご指導、ご支援いただいた NEDO ならびに (財) 石油産業活性化センターの方々へ感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 河内昭紀、岡林一木：風洞実験及び数値計算による水素ガス漏洩時の拡散予測、大気環境学会年会講演要旨集、(2003) 419
- 2) 武野計二、一之瀬利光、岡林一木、河内昭紀、坂田展康、河野慎吾、千歳敬子：高压水素噴出における拡散挙動と着火時の影響、水素エネルギー協会大会予稿集、(2003) 49-52