

平成18年度地方都市ガス事業
天然ガス化促進対策調査
「水素供給システム安全性技術調査」
(内管の仕様検討等)
調査報告書

平成19年3月

日立金属株式会社

調査報告書目次

I. 調査の概要

1. 背景と目的	1
2. 調査体制	1
3. 調査内容	4
3. 1 新設水素パイプラインの内管の仕様検討	4
3. 1. 1 内管材料に用いるシール用材料の水素透過性に関する調査	4
3. 1. 2 内管材料のメカニカルシール部の水素気密性に関する調査	4
3. 2 安全性確認試験設備の概念設計	4
3. 3 水素ガスメータに係る調査	4

II. 新設水素パイプラインの内管の仕様検討

1. 目的	5
2. 内管材料に用いるシール用材料の水素透過性に関する調査	5
2. 1 調査対象とするシール用材料の選定	5
2. 2 水素透過性測定方法	6
2. 3 耐久加速処理の内容	10
2. 4 試験結果	12
2. 4. 1 初期状態における各シール用材料の透過係数と測定温度の関係	13
2. 4. 2 初期状態及び耐久加速処理後の水素透過係数	14
3. 内管材料のメカニカルシール部の水素気密性に関する調査	16
3. 1 調査対象とする配管材料の選定	16
3. 2 水素気密性測定方法	22
3. 3 水素気密性測定装置	23
3. 4 試験の手順	26
3. 4. 1 内管材料の検査	26
3. 4. 2 施工	27
3. 4. 3 ドライ処理	30
3. 4. 4 内容積測定～水素封入～状態調整	32
3. 4. 5 計測	33
3. 4. 6 水素リークディテクタによる確認	34
3. 5 試験結果	35
4. 調査結果のまとめ	38
4. 1 水素透過性に関する調査結果のまとめ	38
4. 2 水素気密性に関する調査結果のまとめ	39

<参考文献>

Ⅲ. 安全性確認試験設備の概念設計

1. 目的	4 1
2. 調査方法	4 1
2. 1 水素供給内管モデルの検討	4 1
2. 2 安全性確認試験のための試験配管の概念設計	4 1
3. 水素供給内管モデルの設計	4 1
3. 1 モデル配管の想定	4 1
3. 1. 1 建物、水素供給方法	4 1
3. 1. 2 配管	4 2
3. 2 圧力損失計算	4 4
3. 2. 1 圧力損失値算出条件	4 4
3. 2. 2 圧力損失計算式, 係数	4 4
3. 2. 3 圧力損失計算結果	4 5
3. 2. 4 圧力損失計算結果のまとめ	4 7
4. 試験配管の概念設計	4 8
4. 1 試験項目	4 8
4. 1. 1 試験配管の気密性の確認	4 8
4. 1. 2 流過性能の測定	4 8
4. 2 試験配管の概念設計	4 8
4. 2. 1 概念設計の概略仕様	4 8
4. 2. 2 試験配管に使用する配管材料	4 8
4. 2. 3 試験配管の概念図	4 9
5. 安全性確認試験設備の概念設計のまとめ	5 0

<参考文献>

Ⅳ. 水素ガスメータに係わる調査

1. 調査の目的と水素の特性	5 1
1. 1 調査内容	5 1
1. 1. 1 調査の目的	5 1
1. 1. 2 調査項目	5 1
1. 1. 3 水素ガスメータの調査の条件・仕様（要求仕様）	5 1
1. 2 水素ガスの基本特性	5 2
1. 2. 1 環境にやさしい水素エネルギー	5 2
1. 2. 2 水素の基本的性質	5 2
1. 3 調査内容および初期調査結果	5 3
1. 3. 1 調査対象ガスメータ・流量計の抽出と初期調査結果	5 3
2. 既存の（家庭用）ガスメータ	5 9

2. 1	膜式（乾式）ガスメータ	59
2. 1. 1	家庭用膜式ガスメータの概要	59
2. 1. 2	テスト用膜式（乾式）ガスメータ	62
2. 1. 3	耐圧用膜式（乾式）ガスメータ	63
2. 2	フルイディック（流体振動式）ガスメータ	63
2. 2. 1	概要	63
2. 2. 2	原理構造	64
2. 2. 3	性能	64
2. 2. 4	水素ガスメータ化への課題と展望	65
2. 3	タービン式ガスメータ	65
2. 3. 1	概要	65
2. 3. 2	性能	66
2. 3. 3	水素ガスメータ化への課題と展望	66
2. 4	その他のガスメータ	66
2. 4. 1	羽根車式	66
2. 4. 2	回転式	67
2. 4. 3	湿式ガスメータ	68
2. 4. 4	ピストン式	69
2. 5	（家庭用）ガスメータおよび流量計の調査結果	70
2. 5. 1	水素ガスメータ化への可能性の評価	70
3.	水素ガスメータ化の難しい既存流量計（原理上水素ガスメータ化が難しい）	82
3. 1	層流式流量計（差圧式）	82
3. 1. 1	概要	82
3. 1. 2	原理構造	82
3. 1. 3	性能	82
3. 1. 4	水素ガスメータ化への課題と展望	82
3. 2	Vコーンオリフィス流量計（差圧式）	82
3. 2. 1	概要	82
3. 2. 2	原理構造と特徴	83
3. 2. 3	性能	83
3. 2. 4	水素ガスメータ化への課題と展望	83
3. 3	ベンチュリ流量計（差圧式）	83
3. 3. 1	概要	83
3. 3. 2	原理構造	84
3. 3. 3	性能	84
3. 3. 4	水素ガスメータ化への課題と展望	84
3. 4	楕円ベンチュリ流量計（差圧式）	84
3. 4. 1	概要	84
3. 4. 2	原理構造	84

3. 5	音速ノズル流量計（差圧式）	85
3. 5. 1	概要	85
3. 5. 2	原理構造	85
3. 5. 3	性能	85
3. 5. 4	水素ガスメータ化への課題と展望	86
3. 6	スワール渦流量計（渦式）	86
3. 6. 1	概要	86
3. 6. 2	原理構造	86
3. 6. 3	性能	86
3. 6. 4	水素ガスメータ化への課題と展望	86
3. 7	マスフロー流量計（熱式質量）	86
3. 7. 1	概要	86
3. 7. 2	原理構造	86
3. 7. 3	性能	87
3. 7. 4	水素ガスメータ化への課題と展望	87
3. 8	コリオリ流量計（質量）	87
3. 8. 1	概要	87
3. 8. 2	原理構造	87
3. 8. 3	性能	87
3. 8. 4	水素ガスメータ化への課題と展望	88
3. 9	調査結果	88
3. 9. 1	水素ガスメータ化の困難な既存流量計の調査と評価	88
4.	開発中および今後予測される水素ガスメータ	93
4. 1	超音波式ガスメータ	93
4. 1. 1	概要	93
4. 1. 2	原理構造	93
4. 1. 3	性能	94
4. 1. 4	水素ガスメータ化への課題と展望	94
4. 2	差圧式・ピトー管流量計	94
4. 2. 1	概要	94
4. 2. 2	原理構造	95
4. 2. 3	性能	96
4. 2. 4	水素ガスメータ化への課題と展望	96
4. 3	差圧式・オリフィス流量計	96
4. 3. 1	概要	96
4. 3. 2	原理構造	97
4. 3. 3	性能	97
4. 3. 4	水素ガスメータ化への課題と展望	98
4. 4	渦式・カルマン渦流量計	98

4. 4. 1	概要	98
4. 4. 2	原理構造	98
4. 4. 3	性能	98
4. 4. 4	水素ガスメータ化への課題と展望	98
4. 5	フルイディック渦流量計	99
4. 5. 1	概要	99
4. 5. 2	原理構造	99
4. 5. 3	性能	99
4. 5. 4	水素ガスメータ化への課題と展望	99
4. 6	熱線式（分流）流量計	99
4. 6. 1	概要	99
4. 6. 2	原理構造	100
4. 6. 3	性能	100
4. 6. 4	水素ガスメータ化への課題と展望	100
4. 7	MEMSフローセンサ搭載流量計・ μ フロー式流量計	101
4. 7. 1	概要	101
4. 7. 2	原理構造	102
4. 7. 3	性能	103
4. 7. 4	水素ガスメータ化への課題と展望	103
4. 8	新提案複合センサ搭載流量計	103
4. 8. 1	ピトー管+ μ フロー流量計	103
4. 8. 2	後流差圧検出ピトー管流量計原理構造	104
4. 8. 3	性能と特徴	104
4. 8. 4	ピトー管+ μ フロー流量計の提案	106
4. 8. 5	オリフィス+ μ フロー流量計の提案	106
4. 9	調査結果	107
4. 9. 1	開発中および今後予測される水素ガスメータの評価	107
5.	調査結果のまとめ	108
5. 1	水素ガスメータ化の可能なガスメータ・流量計の評価	108
5. 1. 1	評価結果	108
5. 1. 2	再評価結果（絞込み）	108
5. 1. 3	再評価結果（絞込み）	
	家庭用水素ガスメータ化の可能性のまとめ	108
5. 2	家庭用水素ガスメータ化の可能性の結論	108
5. 2. 1	可能性の結論	108
5. 2. 2	安全性の結論	108
5. 2. 3	その他	109

<参考文献>

I. 調査の概要

I. 調査の概要

1. 背景と目的

天然ガスは中東以外の地域にも広く分散して賦存しており、他の化石燃料に比べ相対的に環境負荷が少ないクリーンなエネルギーである。エネルギー基本計画（H15.10）では安定供給及び環境保全の両面から重要なエネルギーと位置づけられ、他のエネルギー源とバランスを踏まえつつ、天然ガスシフトの加速化を推進することが示されている。燃料電池の普及等、水素社会の実現のためには、水素の供給システムに係るインフラ整備や効率的な輸送・貯蔵技術の実用化が重要な課題と位置づけられている。水素の供給方法については、利用の地点で水素を分離製造・供給する方法と、水素を導管で輸送する方法が考えられる。水素パイプラインは欧米では千km以上の実績があるものの、日本においてはほとんど実績がなく、規模の大小を問わず実用化のための技術要件が明確にされておらず、パイプラインで水素を供給する場合、水素による管材料等の透過性、脆性、圧縮膨張特性等の課題が考えられる。

このため、将来の水素エネルギー社会に対応した「水素供給システム」の安全性に係る技術基準に資する調査を行うこととし、新設水素パイプラインの内管の仕様検討及び安全性確認試験設備の概念設計、並びに水素ガスメータに係わる調査を実施する。

2. 調査体制

経済産業省では平成17年度より水素供給システム安全性技術調査事業を開始したが、平成18年度については調査事業全体が4事業に分割公募され、日立金属株式会社ではそのうち「水素供給システム安全性技術調査（内管の仕様検討等）」の調査事業を受託した。

本調査に当っては、経済産業省から本調査事業の（委員会の運営等）の委託を受けた日本ガス協会の事務局組織（技術開発部燃料電池・水素プロジェクトグループ）にて設置（委員の選任を含め）した学識経験者、専門家、ガス事業者を代表する団体等から構成される「水素供給システム安全性技術調査特別専門委員会」に、年度始め、年央、年度末に事業の内容・進捗、指標の達成状況等について報告し審議を受けて、総合的に検討・評価を行いつつ事業を推進した。また、上記特別専門委員会の下部組織に「検討ワーキンググループ」が設けられ、細部に渡っての事業の内容・進捗、指標の達成状況等について確認を行って、事業を推進した。

図2-1に調査実施体制（全体関連図）、図2-2に調査実施体制（日立金属）を示す。また、表2-1、表2-2に調査担当者名簿を示す。

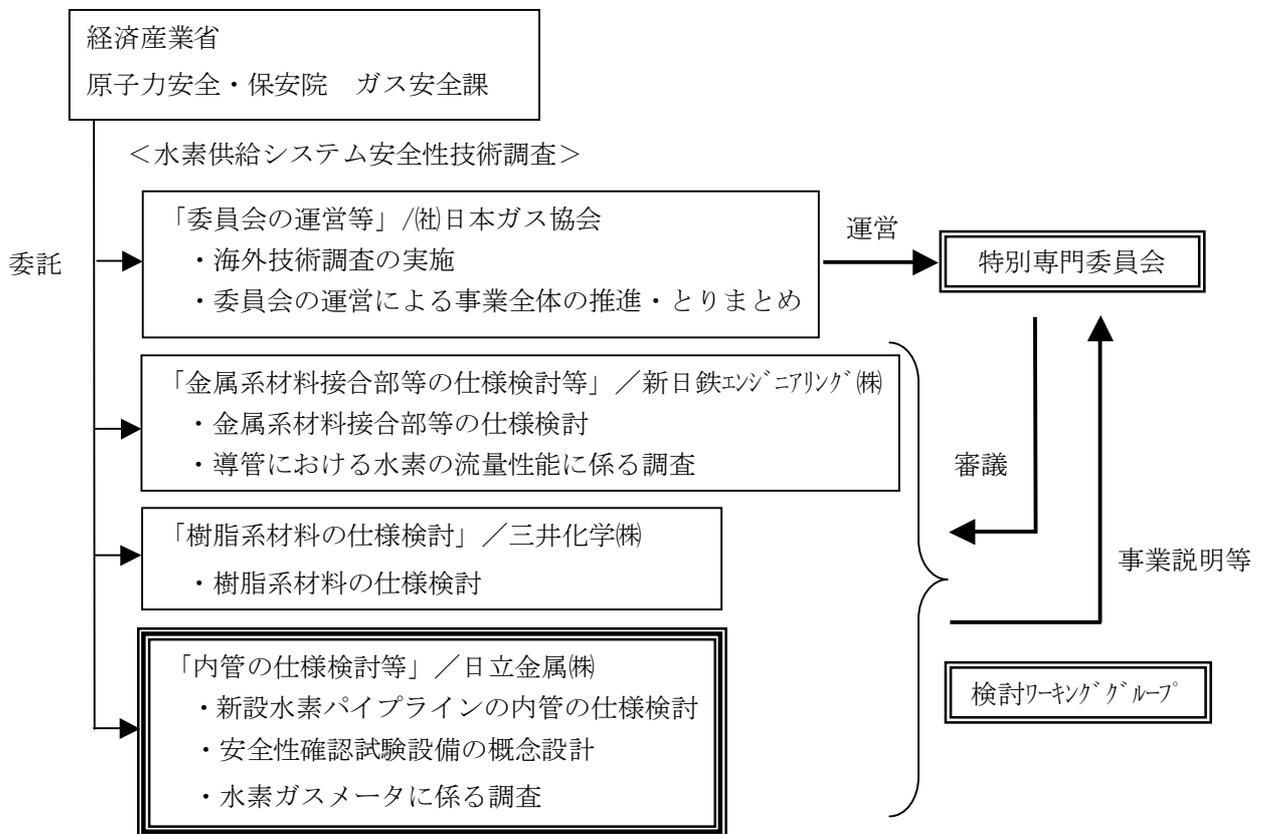


図 2 - 1 調査実施体制（全体関連図）

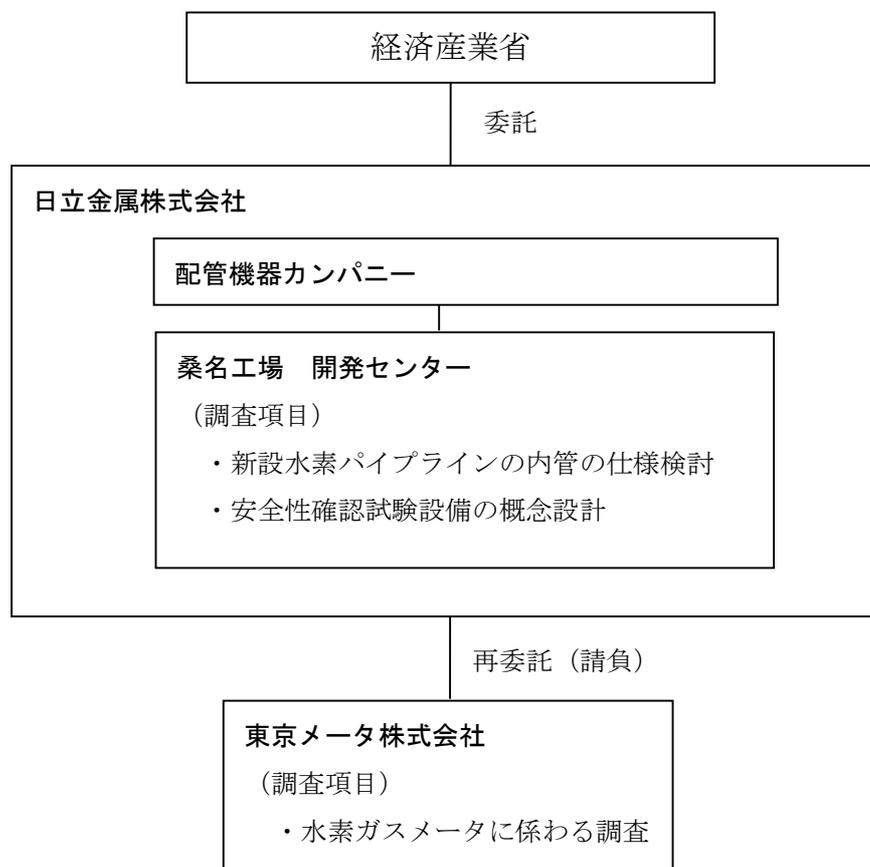


図 2 - 2 調査実施体制（日立金属）

表 2 - 1 調査担当者名簿（日立金属株）

氏名	所属・役職	調査項目
岡本 正幸	日立金属(株) 桑名工場開発センター 主任技師	<ul style="list-style-type: none"> ・新設水素パイプラインの内管の仕様検討 ・安全性確認試験設備の概念設計
永見 明夫	日立金属(株) 桑名工場開発センター 主管技師	
吉田 安孝	日立金属(株) 桑名工場開発センター 主任	
倉田 正範	日立金属(株) 桑名工場お客様センター 技術サポートグループ 試作係	<ul style="list-style-type: none"> ・新設水素パイプラインの内管の仕様検討

表 2 - 2 再委託（請負）先の調査担当者名簿（東京メータ株）

氏名	所属・役職	調査項目
小林 駿	東京メータ(株) 流体計測制御室 顧問 工学博士	水素ガスメータに係わる調査

3. 調査内容

平成17年度「地方都市ガス事業天然ガス化促進対策調査（水素供給システム安全性技術調査）」による水素パイプラインの導入シナリオ調査、水素パイプラインの海外技術調査、新設水素パイプラインの仕様検討結果を踏まえ、平成18年度地方都市ガス事業天然ガス化促進対策調査（水素供給システム安全性技術調査（委員会の運営等））における委員会の検討結果をうけ、以下に示す調査を実施した。

3. 1 新設水素パイプラインの内管の仕様検討

3. 1. 1 内管材料に用いるシール用材料の水素透過性に関する調査

中低圧の都市ガス供給システムに用いられる都市ガス用配管（以下、内管という。）に用いられている4種類のシール用材料（厚さ違いを入れると6水準）を選び、初期状態と耐久加速処理後状態での水素透過量の調査を行った。調査方法は、JIS K 7126-1に準じたガスクロ法の透過試験装置を用いて行った。

3. 1. 2 内管材料のメカニカルシール部の水素気密性に関する調査

内管材料として使用されている14種類の内管材料（継手、ガス栓、バルブ）に、所定の圧力の水素を48時間封入し、圧力低下を測定しメカニカルシール部の水素気密性を調査した。また、高性能の水素リークディテクターを用いてリーク部の確認を行った。

3. 2 安全性確認試験設備の概念設計

これまでに調査を行っている各種内管用配管部材・シール材料を組み合わせた水素供給内管システム試験装置を製作するため、次の内容の調査、設計を行った。

- (1) 都市ガスの内管システムを参考にして、水素供給システムのモデル配管を想定し、システムフローの概念設計を行い、圧力損失計算で燃料電池への水素供給に十分か確認した。
- (2) 代表的なモデル配管に、測定装置などを加えた安全性確認試験設備の概念設計を行った。

3. 3 水素ガスメータに係る調査

現在使用されている家庭用を主とするガスメータ、ガス流量計及び、現在開発中、あるいは今後予測される水素ガスメータ候補の計測原理、温度、圧力等の仕様について文献等で調査を行うことにより、家庭用を主とする水素ガスメータとしての使用の可能性を調査した。

Ⅱ. 新設水素パイプラインの内管の仕様検討

II. 新設水素パイプラインの内管の仕様検討

1. 目的

内管材料からなる低圧水素供給システムの構築に必要な安全性に係わる技術基準に資する調査を行うことを目的とし、内管材料について以下の項目を実施する。

①内管材料に用いるシール用材料の水素透過性に関する調査

内管材料に用いられる代表的なシール用材料について、水素の初期透過量及び耐久加速処理（大気雰囲気中での熱処理）後の透過量を調査する。

②内管材料のメカニカルシール部の水素気密性に関する調査

内管材料の接続体に水素を封入して密閉した後、圧力低下を計測することで、内管材料の水素気密性を調査する。

2. 内管材料に用いるシール用材料の水素透過性に関する調査

2. 1 調査対象とするシール用材料の選定

調査対象であるシール用材料は、内管材料にパッキン、Oリングやガスケットとして用いられるものであり、代表的なシール用材料として表2. 1-1に示す4種を選定した。これらのシール用材料を均一な厚さのシート状に加工した試料を作製し、水素透過性を調査した。また、試料厚さと透過性の関係を確認するために、NBR硬度70及びノンアスシートについては、厚さを2水準とした。

処理条件については、初期状態と耐久加速処理後とし、耐久加速処理による水素透過性への影響も確認した。なお、耐久加速処理の詳細については、2. 3項で詳述する。

表2. 1-1 水素透過性に関する調査の対象シール用材料

シール用材料	厚さ	処理条件	
		初期	耐久加速処理
NBR硬度 50	1 mm	1 水準	2 水準
NBR硬度 70	1 mm	1 水準	2 水準
	1.5mm	1 水準	2 水準
フッ素ゴム	1mm	1 水準	2 水準
ノンアスシート	1mm	1 水準	2 水準
	1.5mm	1 水準	—

ここで、選定した各シール用材料の一般的な特徴を簡単に述べる。

NBRは、ブタジエンとアクリロニトリルの共重合体からなっており、その優れた耐油性から、工業用品のOリングやオイルシールとして最も多く使用されているゴムの一つである。

フッ素ゴムは、フッ化ビニリデン系のものが一般的であり、耐熱性・耐薬品性などが他のゴムと比較して非常に優れているものである。

ノンアスシートは、無機繊維とアラミド繊維に無機充填剤を加え、バインダーにゴムを配合したもので、主に配管のフランジ用ガスケットとして使用されるものである。

2. 2 水素透過性測定方法

水素透過性測定は、JIS K 7126-1「プラスチックフィルム及びシートーガス透過度試験方法ー第1部：差圧法 附属書2（規定）ガスクロマトグラフ法によるガス透過度試験方法」に準じて行った。この方法は、試験片によって隔てられた一方（低圧側）を真空に保ち、他方（高圧側）に試験ガスを導入し、試験片を通過して低圧側に透過したガスをガスクロマトグラフ法によって測定し、ガス透過度を算出する方法である。図2. 2-1に代表的な装置の構成例を示す。

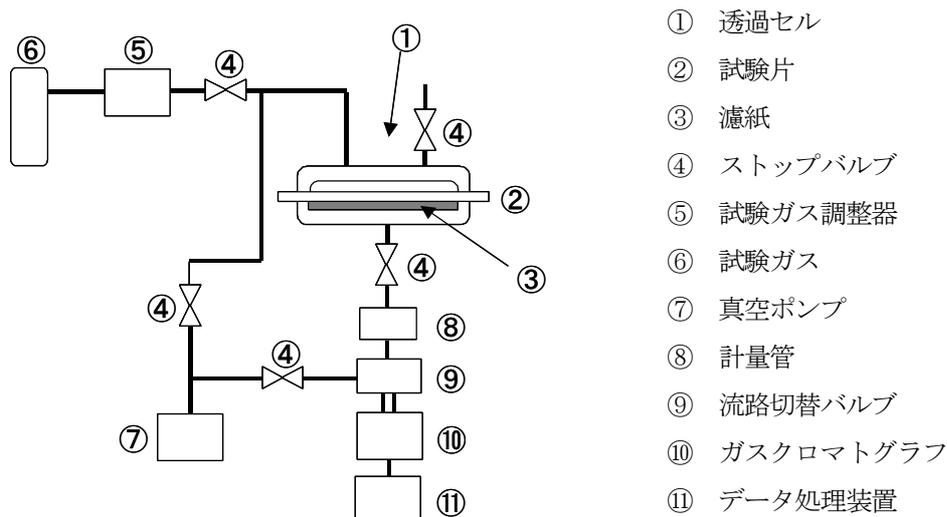


図2. 2-1 ガス透過度測定装置（ガスクロマトグラフ法）の例

本調査には、GTRテック（株）の差圧式ガス・蒸気透過率測定装置「GTR-30XAD, G6800T・F(S)」を用いた。装置の外観写真を図2. 2-2に、試料をセットする透過セル部分の写真を図2. 2-3に示す。本装置は搭載セル数が3個であり、試料3検体を同時に測定できるものである。



図2. 2-2 GTRテック（株）「GTR-30XAD, G6800T・F(S)」の外観写真



図2. 2-3 「GTR-30XAD, G6800T·F(S)」の透過セル外観写真

調査対象のシール材は、 $\square 95\text{mm}$ の均一な厚さのシート状のものを準備し、 $\phi 60\text{mm}$ に打ち抜いた後、装置にセットした。試料の外観を図2. 2-4に示す。

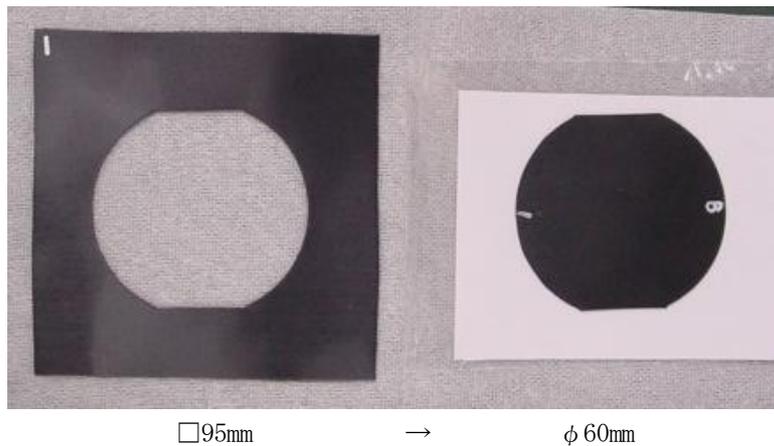


図2. 2-4 シール用材料の形状 (NBR硬度50の例)

測定温度は、 -5°C 、 23°C 、 40°C の3水準とし、試料のセット後、測定温度にて暫く状態調整を行い、水素透過量を測定した。測定は繰り返しい、透過量にバラツキが見られない状態になった時点で定常化に達したと判断し、測定を終了させ、データ処理を行った。

測定データの例を、図2. 2-5に示す。

計算日時 : 2006/9/29 07:17
 セル番号 : 1
 膜名称 : A-1
 測定温度 : 23.0 °C
 水槽温度 :

膜厚 l : 1035 μm
 透過面積 a : 15.2 cm²
 補正係数 k : 2.81
 測定時間 t : ブランク 10.00min 20.00min 40.00min
 データ名 : H2272034 H2272035 H2272036 H2272037

成分	圧力差 Δp cmHg	透過量 μl			透過係数 cc•cm/cm ² •sec•cmHg
		測定1	測定2	測定3	
H ₂	76	1.893e+000	3.711e+000	7.307e+000	7.798e-010

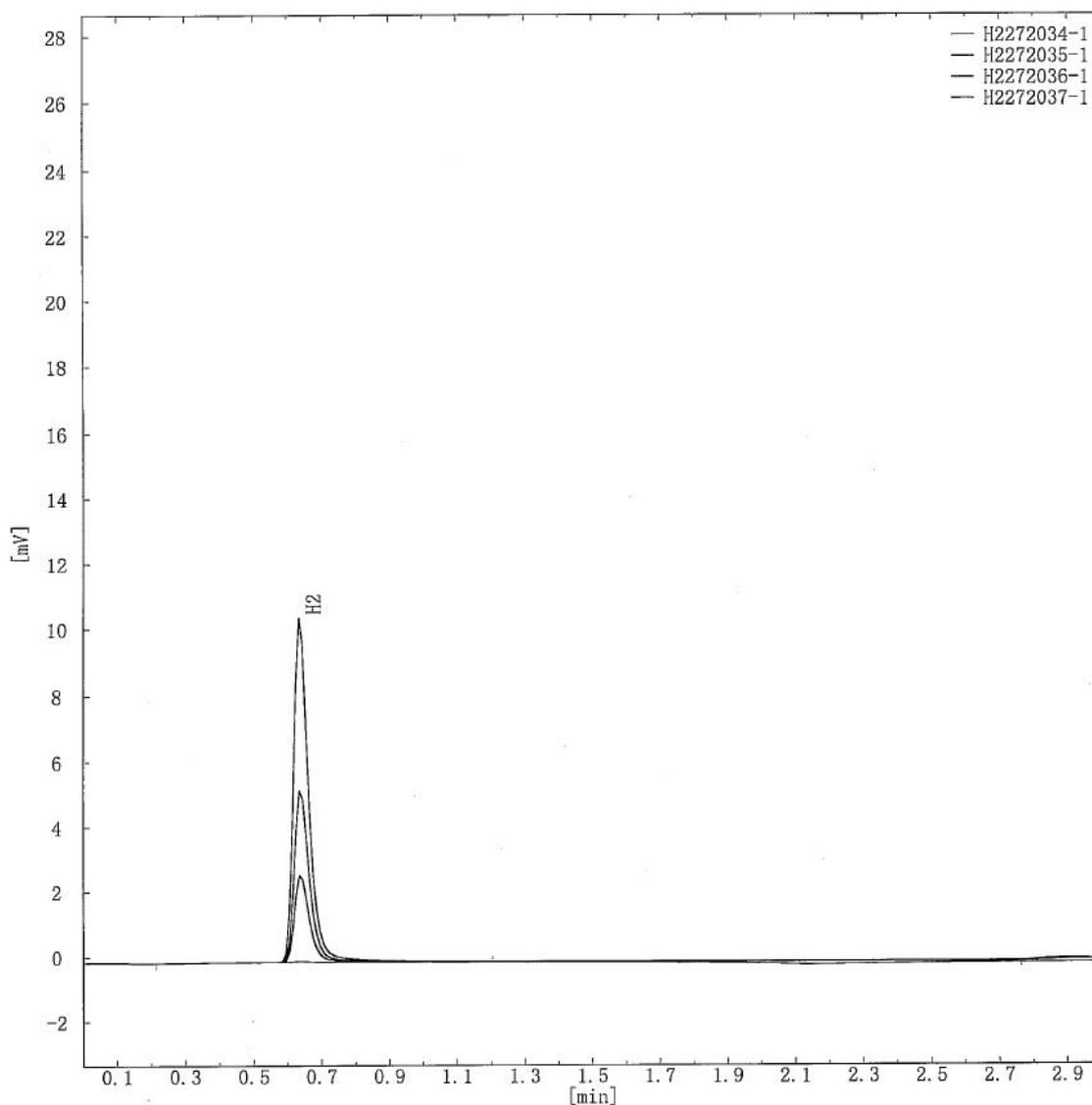


図2. 2-5 透過試験データの例

測定により得られた透過量と、膜厚、透過面積などの条件から、式2. 2-1に従い透過係数を算出した。

$$P = \frac{273 \times D \times k \times d}{22.4 \times T \times A \times t \times \Delta p} \quad (2. 2-1)$$

P : 透過係数 $[\text{m}^3 \cdot \text{m} / (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$

D : 透過ガスの測定量 $[\text{m}^3]$

k : 計量管体積から低圧側全体積を求める装置定数

d : 試験片の平均厚さ $[\text{m}]$

T : 試験温度 $[\text{K}]$

A : 透過面積 $[\text{m}^2]$

t : 透過時間 $[\text{sec}]$

Δp : 高圧側ガスの分圧 $[\text{Pa}]$

なお、測定数は各条件につき N=3 とし、その平均値を各試料の水素透過係数として採用した。

2. 3 耐久加速処理の内容

シール用材料の水素透過性調査では、初期状態での各材料の透過係数を調査するとともに、ある時間を経過した後に透過係数がどのように変化するかを把握することも重要である。そこで、耐久加速処理を行い、処理後の透過係数についても測定を行った。

ゴムなどのシール用材料では耐久加速処理として熱処理を行って促進劣化させる手段が一般的である。本調査においても、熱処理による耐久加速処理を採用し、処理の条件を以下の2水準とした。

①大気中、90℃×720時間の熱処理

②大気中、90℃×1440時間の熱処理

条件を決定した際の根拠については、文献⁽¹⁾「高分子材料の寿命とその予測」を参照した。熱処理による促進劣化で高分子の寿命を推定する簡便な方法として、式2. 3-1の促進比計算が提案されている。

$$Ac = \exp\left\{-\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s}\right)\right\} \quad (2. 3-1)$$

Ac : 促進比

E : 高分子の熱劣化反応の活性化エネルギー

殆どの高分子で経験的に10~20kcal/molであり、

大凡の推定をする場合には、中間値として15cal/molを採用する⁽²⁾

R : 気体定数 1.986 cal/ (K・mol)

T : 処理温度 [K]

T_s : 基準温度 [K]

ここで、処理温度90℃ (363K)、基準温度20℃ (293K)を代入すると、促進比は

$$Ac = \exp\left\{-\frac{15,000}{1.986}\left(\frac{1}{363} - \frac{1}{293}\right)\right\}$$

$$\doteq 144$$

となる。このように、20℃を基準とすると90℃では144倍促進となり、90℃×720時間の処理は20℃の環境で約10年相当、90℃×1440時間の処理は20℃の環境で約20年に相当する。この考え方を元に、耐久加速処理条件を決定した。

耐久加速処理について、図2. 3-1及び図2. 3-2に恒温槽の外観を、図2. 3-3に試料の設置状況を示す。



図2. 3-1 耐久加速処理用恒温槽



図2. 3-2 恒温槽内

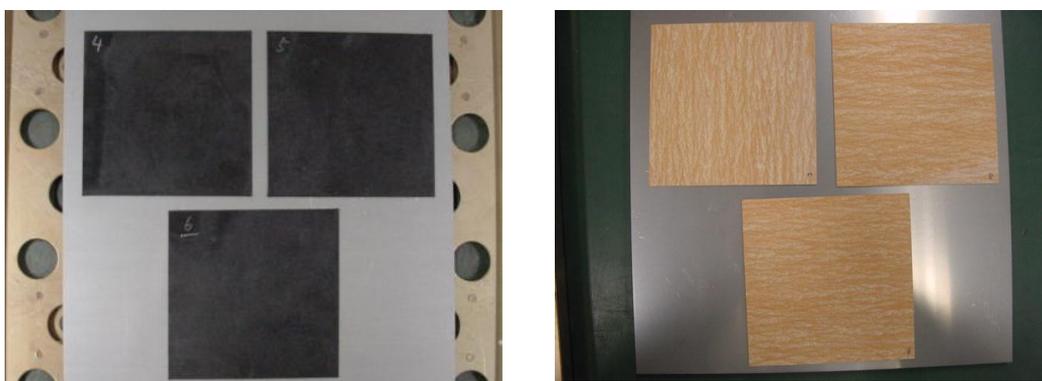


図2. 3-3 試料設置状況の例（左：NBR硬度50，右：ノンアスシート）

2. 4 試験結果

測定により得られた水素透過係数を表2. 4-1に示す。また、表2. 4-2にNBR及びフッ素ゴムの水素透過係数の文献値を示す。

表2. 4-1 各種シール用材料の水素透過係数測定結果

単位：[$\text{m}^3 \cdot \text{m} / (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]

アイテム	厚さ	条件	測定温度		
			-5℃	23℃	40℃
NBR 硬度50	1mm	初期	1.89×10^{-17}	6.41×10^{-17}	1.24×10^{-16}
		耐久加速1	1.71×10^{-17}	5.93×10^{-17}	1.13×10^{-16}
		耐久加速2	1.41×10^{-17}	5.20×10^{-17}	1.00×10^{-16}
NBR 硬度70	1mm	初期	4.00×10^{-17}	1.33×10^{-16}	2.45×10^{-16}
		耐久加速1	3.38×10^{-17}	1.10×10^{-16}	1.99×10^{-16}
		耐久加速2	3.25×10^{-17}	1.19×10^{-16}	2.07×10^{-16}
	1.5mm	初期	4.34×10^{-17}	1.51×10^{-16}	2.82×10^{-16}
		耐久加速1	3.55×10^{-17}	1.30×10^{-16}	2.42×10^{-16}
		耐久加速2	3.37×10^{-17}	1.26×10^{-16}	2.30×10^{-16}
フッ素ゴム	1mm	初期	3.66×10^{-18}	2.10×10^{-17}	4.80×10^{-17}
		耐久加速1	3.27×10^{-18}	2.05×10^{-17}	5.01×10^{-17}
		耐久加速2	2.93×10^{-18}	2.03×10^{-17}	4.79×10^{-17}
ノンアスシート	1mm	初期	1.12×10^{-15}	1.02×10^{-15}	1.08×10^{-15}
		耐久加速1	4.00×10^{-15}	3.49×10^{-15}	3.44×10^{-15}
		耐久加速2	3.81×10^{-15}	3.46×10^{-15}	3.32×10^{-15}
	1.5mm	初期	1.16×10^{-15}	1.02×10^{-15}	1.10×10^{-15}

※ 水素透過係数の測定結果は、測定数 N=3 の平均値

表2. 4-2 NBR及びフッ素ゴムの水素透過係数の文献値^{(3) (4)}

材 料		温度	水素透過係数 [$\text{m}^3 \cdot \text{m} / (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]
NBR	ニトリル 27%	25℃	1.18×10^{-16}
		50℃	3.33×10^{-16}
	ニトリル 32%	25℃	9.10×10^{-17}
フッ素ゴム		30℃	3.37×10^{-17}

NBRの文献値は、ニトリルの含有量により若干の違いはあるが、おおむね 10^{-16} のオーダーであり、フッ素ゴムの文献値は 10^{-17} である。これに対し、今回得られた結果もほぼ同じオーダーであった。

また、NBR硬度70とノンアスシートでは、厚さが異なっても透過係数はほぼ同じ値を示していることを確認した。

2. 4. 1 初期状態における各シール用材料の透過係数と測定温度の関係

各シール用材料（試料厚さ：1mm）の初期状態における水素透過係数について抜粋し、測定温度との関係を図2. 4. 1-1にグラフで示す。

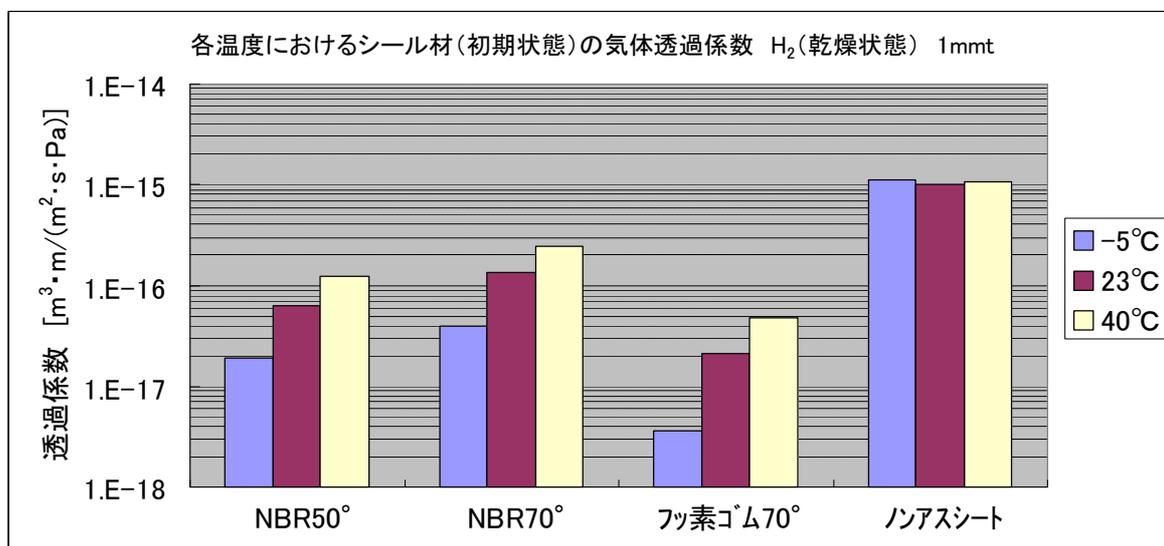


図2. 4. 1-1 初期状態における各シール用材料の透過係数と測定温度の関係

初期状態において、水素透過係数が最も小さいシール用材料はフッ素ゴムであり、続いてNBR硬度50、NBR硬度70、ノンアスシートの順であった。また、NBRとフッ素ゴムは、測定温度が上昇するに従い、水素透過係数も上昇するが、ノンアスシートでは今回の測定温度範囲内では測定温度によらず水素透過係数がほぼ一定であった。ノンアスシートは、無機繊維とアラミド繊維に無機充填剤を加え、バインダーとして合成ゴムを配合したものであり、剛直な繊維が絡み合った構造のため、NBRなどのゴム系材料と比較して分子運動の温度依存性が小さく、透過係数が変化しなかったと考えられる。

2. 4. 2 初期状態及び耐久加速処理後の水素透過係数

次に、各シール用材料の 23°Cにおける水素透過係数について、初期状態及び耐久加速処理後の比較結果を図 2. 4. 2-1 に示す。

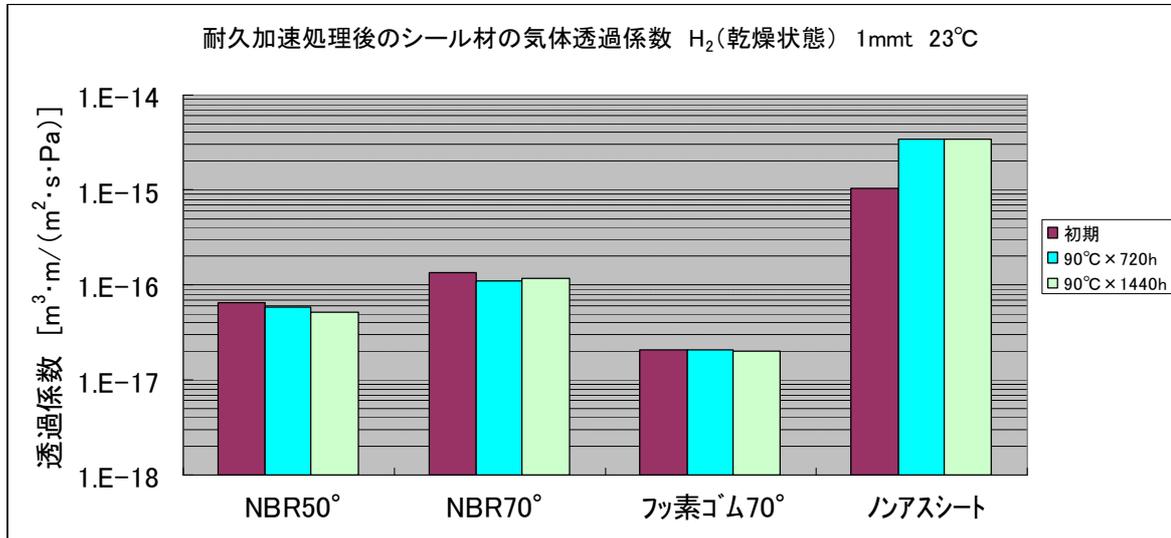


図 2. 4. 2-1 初期状態及び耐久加速処理後の水素透過係数

NBR 硬度 50 及び NBR 硬度 70 では、初期状態に対して耐久加速処理後の水素透過係数が僅かであるが小さくなる傾向を示した。フッ素ゴムについては、耐久加速処理後も水素透過係数には殆ど変化がみられなかった。ノンアスシートについては、90°C × 720 時間の耐久加速処理後に透過係数が 3 倍程度に増大し、1440 時間の処理では更なる透過係数の増大は見られない結果となった。

NBR で透過係数が微減した理由については、耐久加速処理により再架橋などの反応が進み分子運動性が低下したためであると考えられる。なお再架橋などの反応については、初期状態及び耐久加速処理後の試料について引張試験を行い、耐久加速処理後の試料に引張強度の上昇及び伸びの低下が見られたことから示唆される。なお引張試験は、JIS K 6251 「加硫ゴム及び熱可塑性ゴム-引張特性の求め方」に準じ、ダンベル形状は 5 号形、引張速度は 500 ± 50mm/min で行った。引張試験結果について、初期状態の引張強度及び伸びを 100 とした場合の物性保持率を表 2. 4. 2-1 に示す。

フッ素ゴムについては、NBR よりも耐熱性が高く、耐久加速処理による反応の度合いが小さいために、その影響が透過係数の変化に現われなかったと考えられる。

表 2. 4. 2-1 引張試験結果から求めた物性保持率

単位：[%]

		引張強度			伸び		
		初期	90°C × 720時間後	90°C × 1440時間後	初期	90°C × 720時間後	90°C × 1440時間後
NBR50°	1mmt	100	118	133	100	89	76
NBR70°	1mmt	100	105	101	100	83	55
NBR70°	1.5mmt	100	106	101	100	88	53
フッ素ゴム70	1mmt	100	97	98	100	95	91

ノンアスシートについては、耐久加速処理により透過係数が増大し、その後変化が見られなくなったという挙動から、原因の一つとして、水分や低沸点化合物の揮発を考えた。90°Cで処理を行う初期の段階で水分等が揮発し、水素が透過する空間の増大が起きたのではないかと考えた。しかし、TG-DTA測定を行ったところ、100°Cまでの重量減少率が0.2wt%と僅かである結果が得られ、水分等の揮発が原因である可能性は低いと考えられた。そこで初期状態及び90°C×1440時間後の試料についてSEMによる断面観察を行い、構造上の変化等の有無を確認した。なお、観察用の試料調製にはクロスセクションポリッシャー法（以下、CP法）を採用した。CP法はArイオンビームを試料に照射することでSEM観察用断面を作製する方法である。特徴は、従来の機械研磨法で問題となる塑性変形や研磨傷の影響を受けることなく、試料内部の構造を忠実に再現することが可能である点である。SEM観察結果を図2.4.2-2に示す。図中の白い丸や針状のものが無機繊維であり、黒い丸がアラミド繊維である。同一材料でも異なるシートであるために、繊維の絡み合いなどの形態も異なり、単純な構造の比較は困難であるが、少なくとも90°C×1440時間後に繊維の絡み合いの空隙が大きくなるなどの変化は起きていないものと思われる。従って、ノンアスシートの透過係数が増大した原因を明らかにすることは出来なかった。

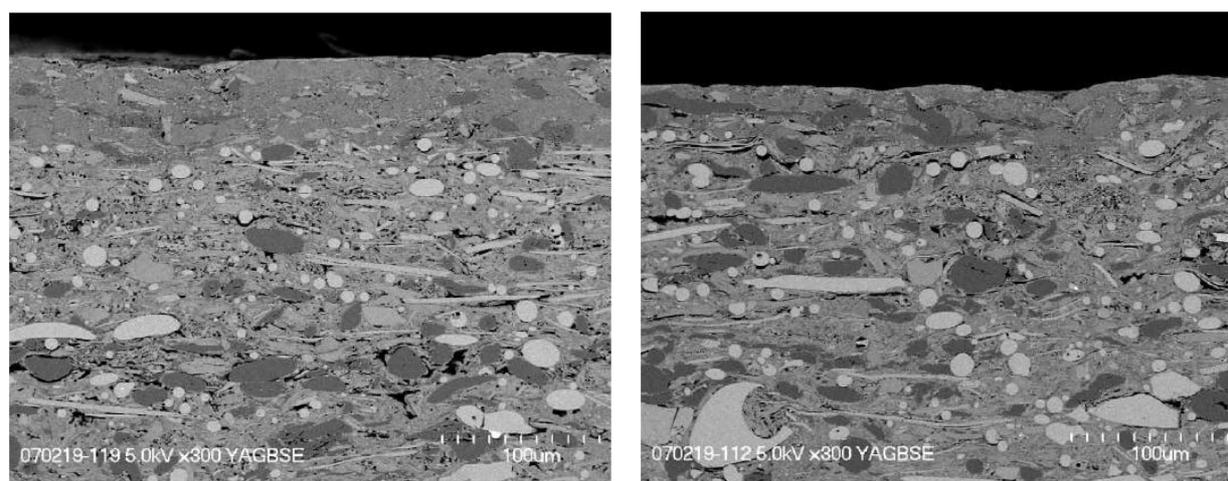


図2.4.2-2 ノンアスシートの断面SEM観察結果（左：初期状態， 右：90°C×1440時間後）

3. 内管材料のメカニカルシール部の水素気密性に関する調査

3. 1 調査対象とする配管材料の選定

内管とは、敷地境界線から需要家敷地内に引き込まれるガス栓までの導管を言い、需要家の資産となるガス配管設備である（ガスメータを除く）。内管の埋設部には主にPE管が使用されるが、露出部では鋼管、鋳物継手、ステンレスフレキシ管など様々な材料の組み合わせにより配管される。また、各々の材料の接合には、ねじ接合、機械的接合、フランジ接合等が用いられている。図3. 1-1に内管材料の配管例を示す。

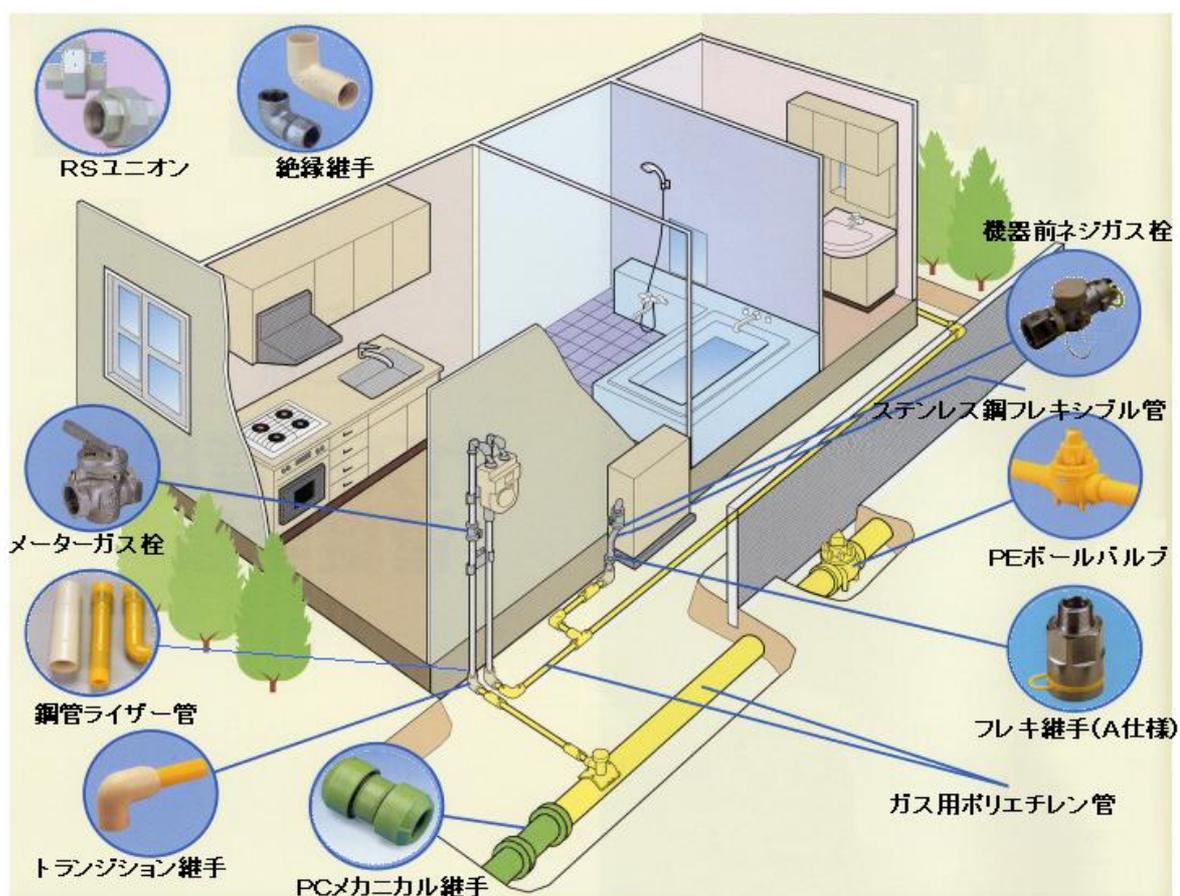


図3. 1-1 内管材料の配管例

これらの内管材料の内、代表的な14種の継手・ガス栓・バルブを選定し、表3. 1-1に示す18項目の水素気密性試験を実施することとした。選定した継手類の写真を図3. 1-2から図3. 1-7に示す。

表3. 1-1 水素気密性調査の対象材料

No.	内管材料	呼び径	調査対象シール部		備考
			名称	材質	
1	ねじ込み継手	20A	テーパネジ	シール材 A	
2		20A	テーパネジ	シール材 B	
3	絶縁継手	20A	テーパネジ コーティング	エポキシ樹脂	
4	R Sユニオン	20A	ガスケット	NBR 硬度 70	
5	P Cメカニカル継手	25A	パッキン	NBR 硬度 70	
6	トランジション継手	25×20A	パッキン	NBR 硬度 70	
7	鋼管ライザー管	30×25A	パッキン	フッ素ゴム	
8	フレキ継手 (A仕様)	20A	パッキン	NBR 硬度 50	
9	フレキ継手 (B仕様)	20A	ガスケット	ノンアシート	
10	フレキ継手 (C仕様)	20A	パッキン	NBR	
11	鋼管フランジ (ガスケット)	50A	ガスケット	ノンアシート +液状ガスケット	
12	鋼管フランジ (絶縁スペーサ)	50A	Oリング	SBR + NR	
13	メーターガス栓	25A	テーパ栓	グリース	開栓状態
14					閉栓状態
15	機器前ネジガス栓	20A	テーパ栓	グリース	開栓状態
16					閉栓状態
17	P Eボールバルブ	50A	Oリング	NBR 硬度 70	開栓状態
18			シートリング	NBR 硬度 70	閉栓状態



図3. 1-2 ねじ込み継手



図3. 1-3 ガス配管用ネジシール材（左：A仕様，右：B仕様）



図3. 1-4 絶縁継手



図3. 1-5 RSユニオン



図3. 1-6 PCメカニカル継手

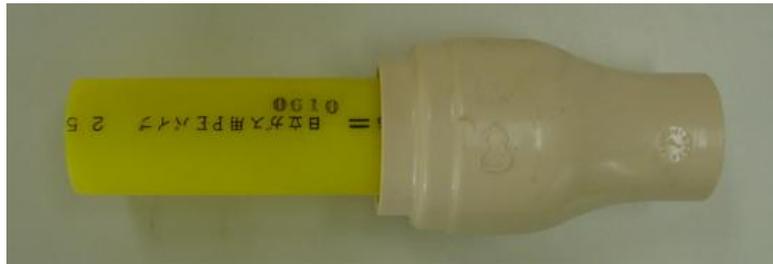


図3. 1-7 トランジション継手



図3. 1-8 鋼管ライザー管



図3. 1-9 フレキ継手 (A仕様)



図3. 1-10 フレキ継手 (B仕様)



図3. 1-11 フレキシ継手 (C仕様)



図3. 1-12 鋼管フランジ



図3. 1-13 フランジ用ガスケット (左: ノンアスシート, 右: 液状ガスケット)



図3. 1-14 フランジ用絶縁スペーサ



図3. 1-15 メーターガス栓



図3. 1-16 機器前ネジガス栓



図3. 1-17 PEボールバルブ

3. 2 水素気密性測定方法

内管材料及び内管材料接合部の水素気密性の計測には、実使用に近い状態での測定が可能な「内封圧力測定方式」を採用した。この方式は、試験体内部に水素を封入し密閉後、圧力低下を計測する方法で、今回の計測対象となる内管材料のように大きさや形状が様々である場合に適している。尚、今回の調査では、長時間に渡り圧力を計測するため、環境温度の変化に対応して圧力値も変化することが懸念された。そこで、接続体の温度も同時に測定して、温度補正した圧力値で水素気密性を評価するシステムとした。内封圧力測定方式の実施には、図3. 2-1に示すような水素気密性試験装置を用いる。

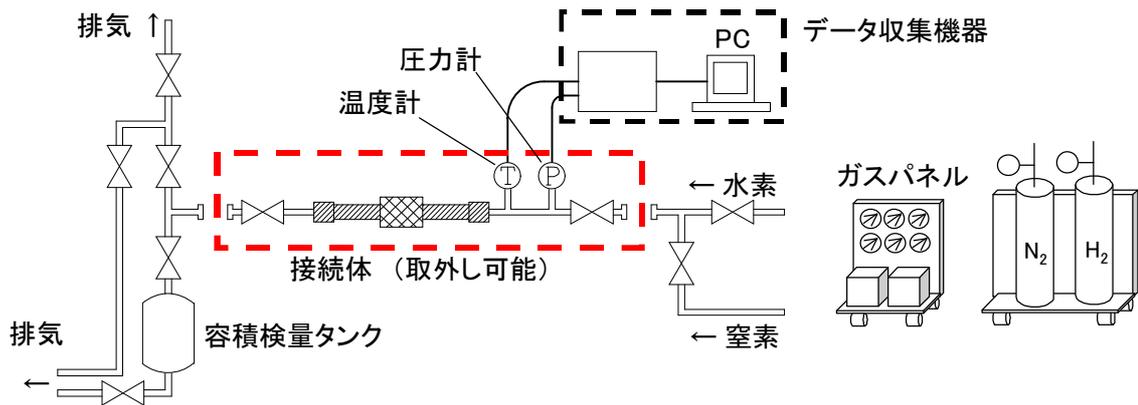


図3. 2-1 水素気密性試験装置の模式図

接続体は、調査対象となる継手及び管と、圧力計・温度計及びそれらを接続する治具と、両端を封止するバルブから成る。接続体の外観を図3. 2-2に示す。調査対象以外の部位で水素気密性に影響があることは好ましくない。そこで、対象シール部以外の接続箇所は半導体製造装置分野にて実績のあるVCR継手を用いた接続とし、封止バルブにはメタルダイヤフラムバルブ（以後MDVという）を採用した。

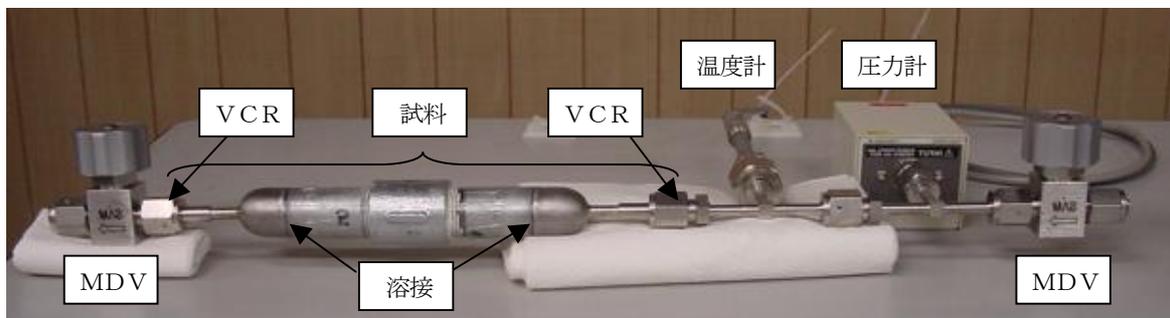


図3. 2-2 接続体の外観（ねじ込み継手の例）

3. 3 水素気密性測定装置

水素気密性試験装置は、窒素ボンベ及び水素ボンベ、ガス供給パネル、ガス排気パネル、圧力計・温度計及びデータ収集機器から成る。窒素及び水素は高純度グレードを採用した。その仕様を表3. 3-1に示す。

表3. 3-1 窒素ガス及び水素ガスの仕様

ガス	グレード	純度	露点	ボンベ容量
高純度窒素	G2	>99.9998vol%	<-80℃	47L
高純度水素	G2	>99.999vol%	<-70℃	10L

ガス供給パネルは、窒素ガス系と水素ガス系の2系統のガス配管から成る。ガス供給パネルの外観を図3. 3-1に示す。ガスの導入操作等に用いるバルブには、MDVを採用した。両系統とも各々のボンベレギュレーター後に接続され、上流側から、フィルター→MDV→ドライカラム（パネルの背面）→流量計→逆止弁→MDVの機器で構成され、接続体への接続直前のT継手部で合流する。逆止弁以降の配管は、高純度ガスのクリーン度を保持するため、ベーキング処理システムを付加した。ここでベーキング処理システムとは、クリーン度を保持したい配管の外周にリボンヒーター等を巻き付け、配管内部に付着した水分を最高80℃以下程度の比較的低温で配管内部表面から叩き出し、配管内部に流した窒素ガスと共に配管の外部に排出することを目的としたヒーター及び温調器のセットをいう。

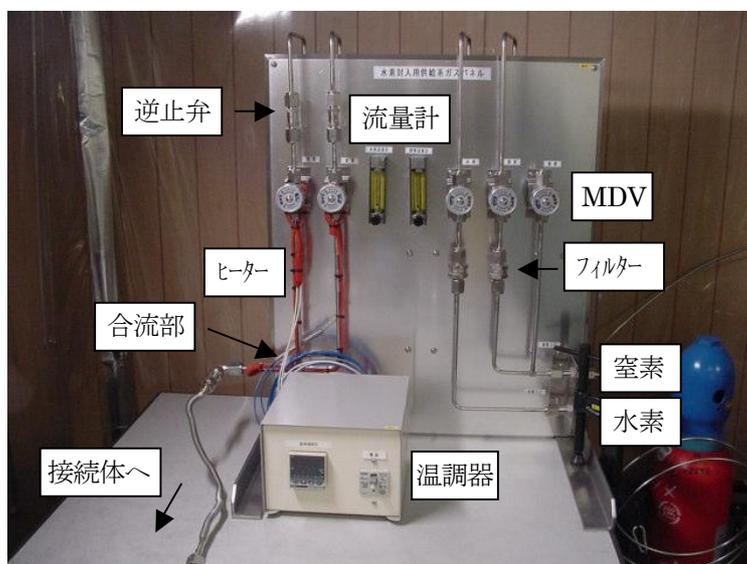


図3. 3-1 ガス供給パネル

ガス排気パネルは、Exhaust の 3 配管系統と、被試験体内容積測定用の検量タンク配管系統から構成される。ガス排気パネルの外観を図 3. 3-2 に示す。検量タンク配管系統は、被試験体内容積測定におけるマスターの位置づけであり、被試験体接続口から検量タンク後の MD V までの閉塞空間の内容積が既知の配管である。また、検量タンク配管系統にも、高純度ガスのクリーン度を保持するため、ベーキング処理システムを付加した。

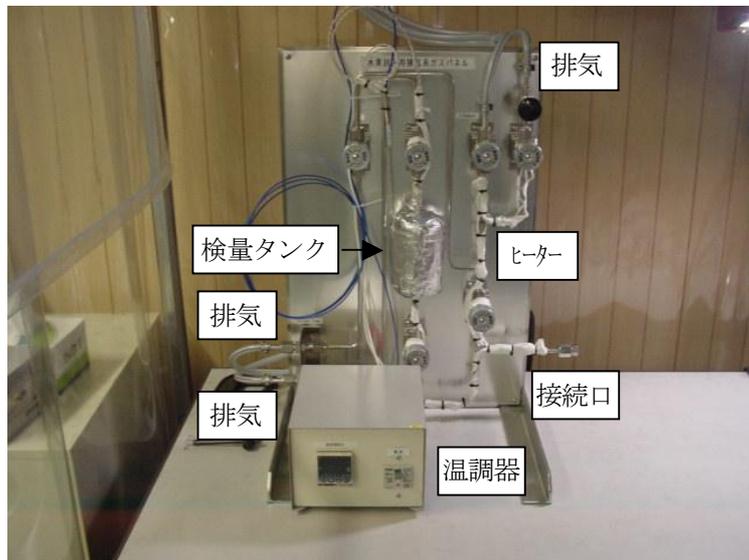


図 3. 3-2 ガス排気パネル

水素気密性試験に係る計測システムの構成は、高精度圧力センサーモジュール、圧力データ通信用 RS-232C ケーブル、測温抵抗体、温度データを取り込むインターフェース機器、データ収集 PC から成る。計測システムの構成図を図 3. 3-3 に示す。

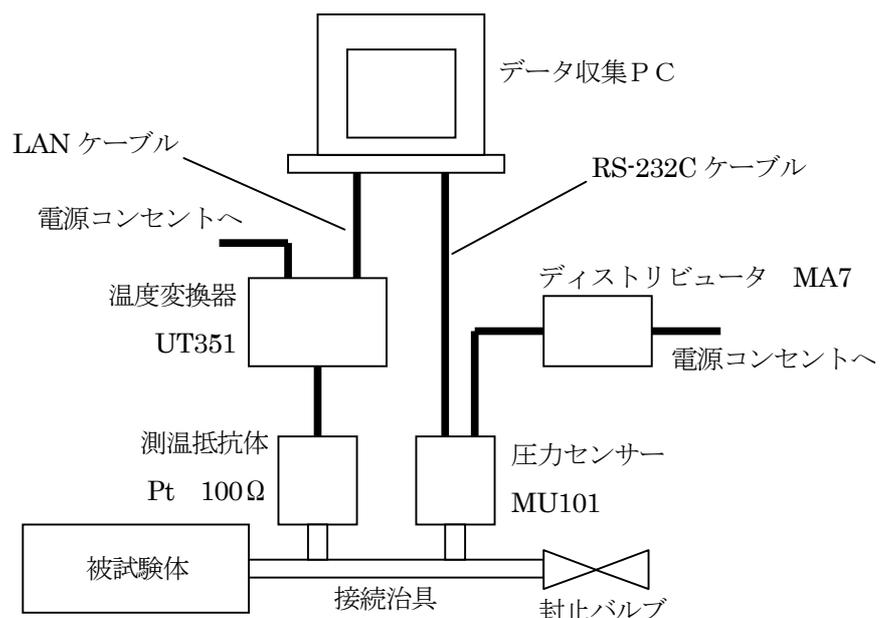


図 3. 3-3 水素気密性試験 計測システムの構成図

圧力センサー、測温抵抗体及び温度変換器の仕様を表 3. 3-2 から表 3. 3-4 に示す。

表 3. 3-2 圧力センサーの仕様

メーカー	横河電機 (株)
型式	MU101-AH1Z/Z
検出原理	シリコンレゾナント
測定スパン	0~700kPa (絶対圧)
精度	±0.01% F.S
補償温度範囲	5°C~45°C
プロセス接続	1/4VCR面シール継手

表 3. 3-3 測温抵抗体の仕様

メーカー	(株) 岡崎製作所
型式	R35-SP
エレメント	Pt 100Ω JIS-A 級
精度	± (0.15°C+0.002 t)
プロセス接続	1/2VCR面シール継手

表 3. 3-4 温度変換器の仕様

メーカー	横河電機 (株)
型式	UT351-0A
入力点数	1 点
サンプリング周期	250 ミリ秒
精度	±0.3°C±1digit

計測された圧力と温度のデータは、ソフトウェアによりパソコンに取り込まれる。本ソフトウェアは、圧力の温度補正変換機能・データ記憶機能・運用設定機能・表示機能等を有している。計測システムのデータ取得画面の例を図3. 3-4に示す。

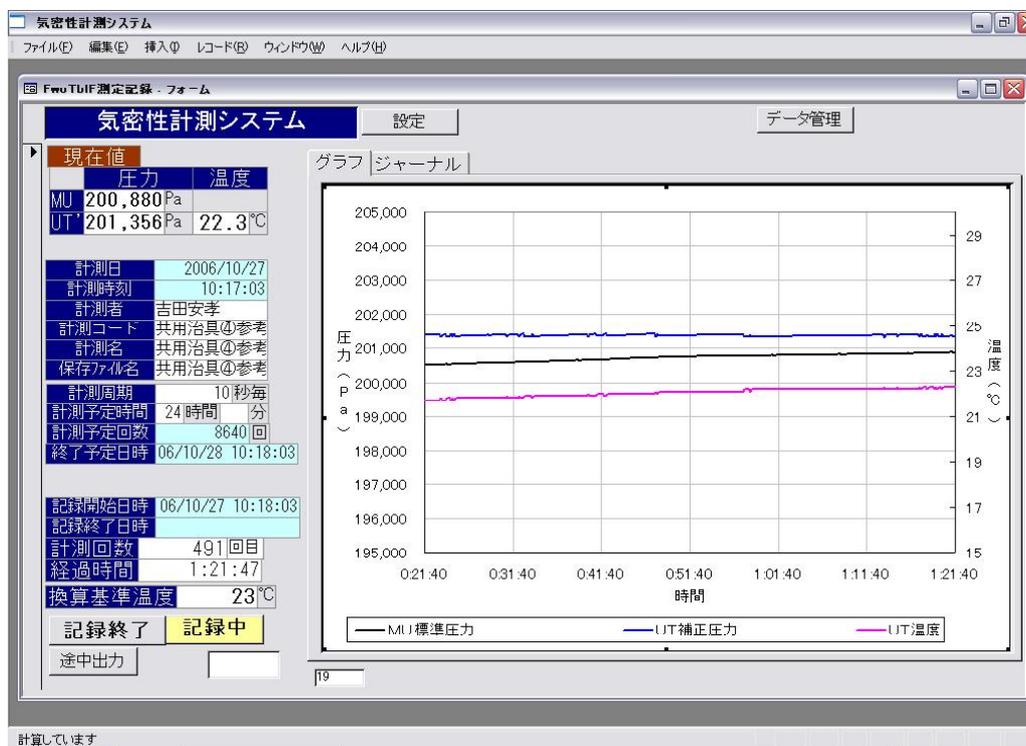


図3. 3-4 計測システムのデータ取得画面の例

3. 4 試験の手順

3. 4. 1 内管材料の検査

水素気密性試験に用いる各種内管材料について、外観検査及びネジ部を有するものについてはネジ検査を行った。ネジ検査項目と検査装置の一覧を表3. 4. 1-1に示す。なお、今回検査を行った全てのネジについて、合格基準に適合していることを確認した。

表3. 4. 1-1 ネジ検査項目と検査装置

ネジ検査項目	検査装置
ネジ長さ	ノギス
はめあい	ネジゲージ
歪み	板ゲージ
ネジ山形状	輪郭測定機

3. 4. 2 施工

試験に用いる継手及び接続管について施工前の外観検査を行い、有害な傷などが無いことを最終確認した。続いて継手及び接続管の内部の簡易洗浄を、エタノールを染みこませたウエスにて行った。施工は、各継手の施工要領書に従って実施した。施工後の外観を図3. 4. 2-1から図3. 4. 2-4に示す。なお、絶縁継手以降の試料のネジ部にはA仕様のシール材を塗布して施工を行った。

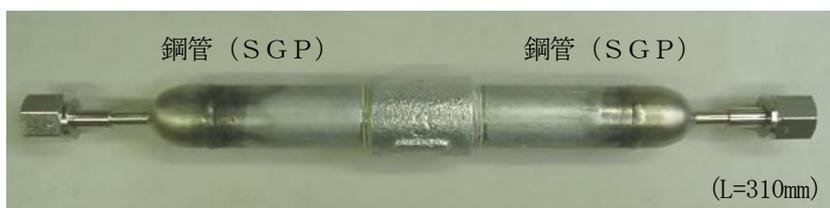


図3. 4. 2-1 ねじ込み継手 (シール材 B 仕様)



図3. 4. 2-2 絶縁継手



図3. 4. 2-3 RSユニオン



図3. 4. 2-4 PCメカニカル継手



図3. 4. 2-5 トランジション継手



図3. 4. 2-6 鋼管ライザー管



図3. 4. 2-7 フレキ継手 (A仕様)



図3. 4. 2-8 フレキ継手 (B仕様)



図3. 4. 2-9 フレキ継手 (C仕様)

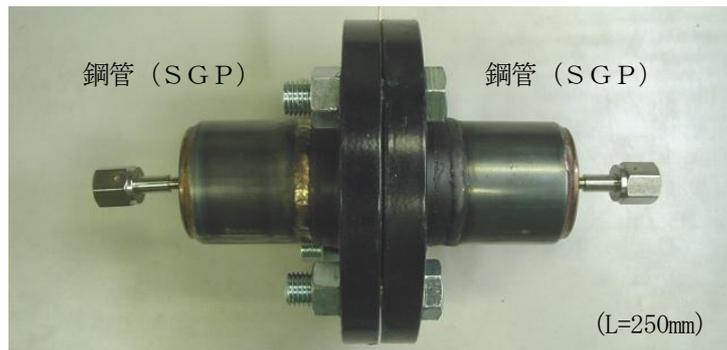


図3. 4. 2-10 鋼管フランジ (ノンアスガasket)

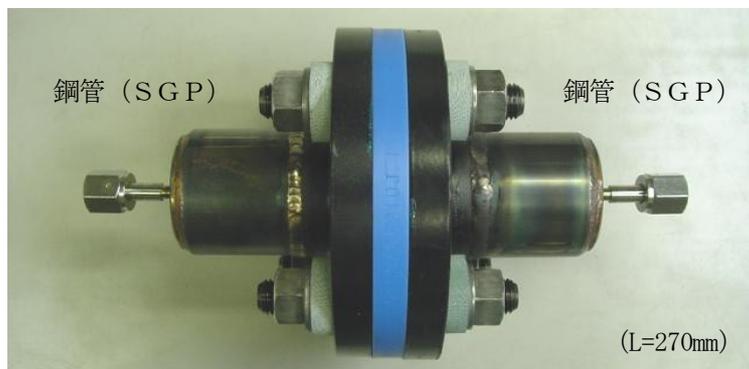


図3. 4. 2-11 鋼管フランジ (絶縁スペーサ)



図3. 4. 2-12 メーターガス栓



図3. 4. 2-13 機器前ネジガス栓



図3. 4. 2-14 PEボールバルブ

3. 4. 3 ドライ処理

施工した各種継手について、水素を封入する前に継手内部の水分を除去するため、ドライ処理を行った。ドライ処理システムの構成を図3. 4. 3-1に示す。本システムでは、ドライ処理箱に熱風を導入して箱内温度を50~60℃の比較的低温に保ち、試料を外部から温めるとともに、試料内部に窒素ガスを流すことで水分の除去を行った。

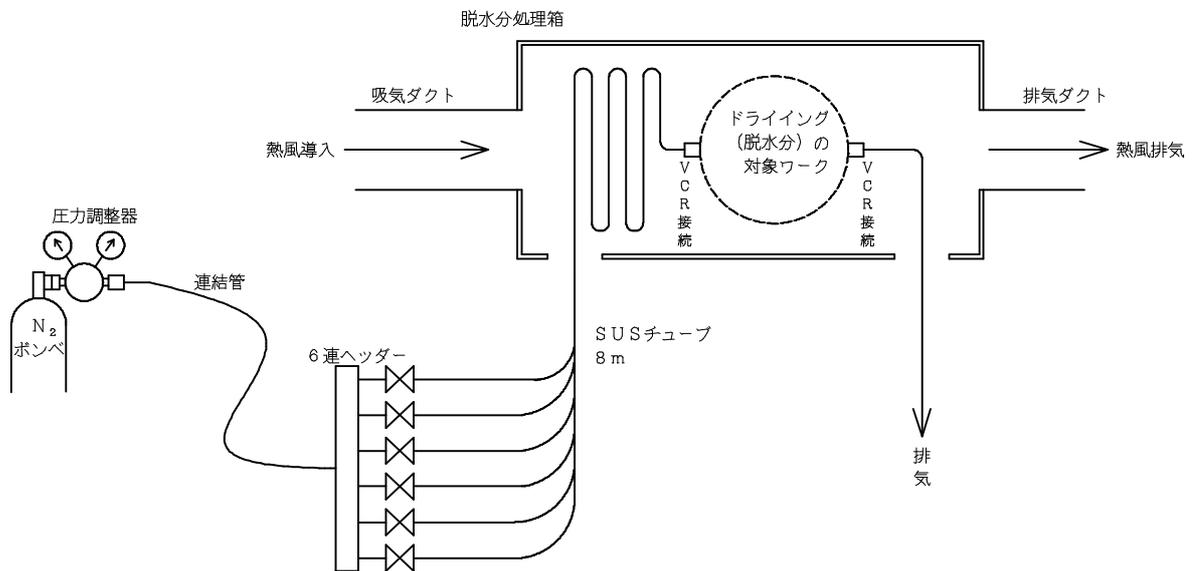


図3. 4. 3-1 ドライ処理システムの構成

図3. 4. 3-2にねじ込み継手をドライ処理箱に設置した様子を、図3. 4. 3-3にドライ処理箱内の温度測定の様子を示す。

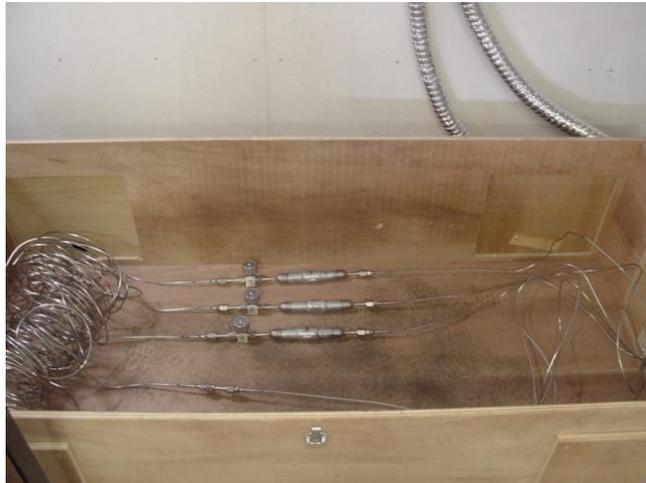


図3. 4. 3-2 ドライ処理箱内の接続状況（ねじ込み継手の例）



図3. 4. 3-3 ドライ処理箱内の温度測定状況

3. 4. 4 内容積測定～水素封入～状態調整

ドライ処理が完了した試料に圧力計・温度計及び封止用のMDVを接続した接続体を、ガスパネルにセットして内容積の測定を行った。図3. 4. 4-1に接続体とガスパネルの接続状況を示す。測定手順は、まず、容積既知の検量タンク（容積 V_1 ）に圧力 P_1 で窒素を導入し、検量タンクと接続体との連結部のMDVを封止した。次に接続体（容積 V_2 ）を圧力 P_2 にて封止し、最後に検量タンクと接続体連結部のMDVを開き、圧力 P_3 を測定した。これらの圧力から式3. 4. 4-1及び3. 4. 4-2を用いて試料の内容積を算出した。

$$P_3 * (V_1 + V_2) = P_1 * V_1 + P_2 * V_2 \quad (3. 4. 4-1)$$

$$\therefore V_2 = \frac{P_3 - P_1}{P_2 - P_3} * V_1 \quad (3. 4. 4-2)$$

V_1 : 検量タンク容積 492.5cc



図3. 4. 4-1 接続体とガスパネルの接続状況（ねじ込み継手の例）

接続体の内容積を算出した後、ガスを窒素から水素に切替えて一定時間流し、接続体内部の水素置換を行った。十分に水素置換を行ったところでMDVを操作し、水素を封入した。封入圧力は絶対圧で211kPa(abs)とした（ゲージ圧で110kPa）。これは、都市ガス低压配管の最高使用圧力の1.1倍に相当する。なお、メーターガス栓及び機器前ネジガス栓については、耐圧試験圧力がゲージ圧で22.5kPaのため、本試験では124kPa(abs)で封入することとした。

水素封入が完了した後、計測ブース内に接続体を静置して24時間の状態調整を行い、系の安定化を図った。状態調整の様子を図3. 4. 4-2に示す。



図3. 4. 4-2 状態調整の状況 (RSユニオン及びPCメカニカル継手の例)

3. 4. 5 計測

状態調整が完了した後、圧力測定を実施して計測データをPCに取り込んだ。計測時間は48時間とし、圧力値の変化量から水素気密性の評価を行った。なお、測定数は各試料につきN=3で行った。

ここで、圧力データの精度について説明する。

○圧力センサーによる圧力測定値の精度について

- ・圧力センサー：スパンの $\pm 0.01\%$ (スパンは700kPa(abs))

$$\Rightarrow \text{圧力測定値の精度} = \pm 70\text{Pa}$$

○測温抵抗体による温度測定値の精度について

- ・測温抵抗体 Pt100 Ω A級： $\pm (0.15^\circ\text{C} + 0.002|t|)$ ※ $|t|$ は正負の記号に無関係な温度

$$\rightarrow \text{測定温度 } 23^\circ\text{C} \text{ の場合、約 } \pm 0.2^\circ\text{C}$$

- ・温度通信変換器：0~100 $^\circ\text{C}$ の範囲では $\pm 0.3^\circ\text{C} \pm 1\text{digit}$

$$\rightarrow \text{変換器の精度} = \pm 0.4^\circ\text{C}$$

(1digit は表示最終桁が1の意味で、今回の温度測定では0.1 $^\circ\text{C}$)

$$\Rightarrow \text{測温抵抗体の精度} + \text{変換器のトータル精度} = \pm 0.6^\circ\text{C}$$

○圧力計測値の総合精度について (まとめ)

- ・圧力値の精度 $\pm 70\text{Pa}$ と温度値の精度 $\pm 0.6^\circ\text{C}$ から、23 $^\circ\text{C}$ 補正後の圧力値を計算すると

$$\text{最大値} \quad \dots \quad 211370\text{Pa}(\text{abs}) \times 296.15 / (296.15 - 0.6) = 211799\text{Pa}(\text{abs})$$

$$\text{最小値} \quad \dots \quad 211230\text{Pa}(\text{abs}) \times 296.15 / (296.15 + 0.6) = 210803\text{Pa}(\text{abs})$$

従って、メーカー保証精度を元に算出した211300Pa(abs)の圧力計測における温度を含めた圧力計測値の総合精度は $\pm 500\text{Pa}$ 、トータルで1kPaとなる。

3. 4. 6 水素リークディテクタによる確認

48 時間の計測完了後、水素リークディテクタによる確認を行った。水素リークディテクタの仕様を表 3. 4. 6-1 に、外観写真を図 3. 4. 6-1 に示す。また、検査の状況を図 3. 4. 6-2 に示す。

表 3. 4. 6-1 水素リークディテクタの仕様

メーカー	SENSISTOR 社 (スウェーデン)
型番	ディテクタ : H2000 プローブ : H50
検知形式	半導体センサー
検知方式	非スニファー式
検知感度	0.5ppm



図 3. 4. 6-1 水素リークディテクタ

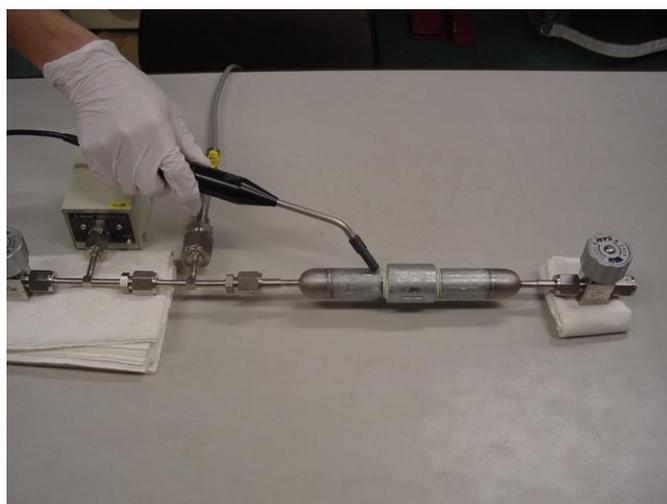


図 3. 4. 6-2 水素リークディテクタによる確認の状況 (ねじ込み継手の例)

3. 5 試験結果

内管材料の水素気密性に関する試験結果を表3. 5-1に示す。

表3. 5-1 水素気密性試験結果一覧

No.	アイテム	調査対象 シール部		内容積 [cc]	圧力値 (絶対圧)		圧力変化量 ΔP [kPa/2day]	水素リークイテクト による確認結果	
		名称	材質		初期 [kPa(abs)]	48時間後 [kPa(abs)]			
1	ねじ込み継手 (シールA仕様)	テーパーネジ	シール材A	①	85	211	211	N. D	検知不可
				②	85	211	211	N. D	検知不可
				③	83	211	211	N. D	検知不可
2	ねじ込み継手 (シールB仕様)	テーパーネジ	シール材B	①	97	211	211	N. D	検知不可
				②	96	212	212	N. D	検知不可
				③	96	211	211	N. D	検知不可
3	絶縁継手	テーパーネジ コーティング	エポキシ樹脂	①	103	212	212	N. D	検知不可
				②	104	212	212	N. D	検知不可
				③	102	212	212	N. D	検知不可
4	RSユニオン	ガスケット	NBR 硬度70	①	100	212	212	N. D	検知不可
				②	99	212	212	N. D	検知不可
				③	100	211	211	N. D	検知不可
5	PCメカニカル継手	パッキン	NBR 硬度70	①	251	212	212	N. D	検知不可
				②	251	212	212	N. D	検知不可
				③	251	211	211	N. D	検知不可
6	トランジション継手	パッキン	NBR 硬度70	①	262	210	209	-1	検知不可
				②	262	210	209	-1	検知不可
				③	262	210	209	-1	検知不可
7	鋼管ライザー管	パッキン	フッ素ゴム	①	384	211	211	N. D	検知不可
				②	382	211	211	N. D	検知不可
				③	382	211	211	N. D	検知不可
8	フレキ継手 (A仕様)	パッキン	NBR 硬度50	①	120	211	211	N. D	検知不可
				②	121	211	211	N. D	検知不可
				③	119	211	211	N. D	検知不可
9	フレキ継手 (B仕様)	ガスケット	ノンアシート	①	114	211	211	N. D	釘打ち損傷漏れ発見 機構に近接した場合 に検知 (N=3とも)
				②	114	211	211	N. D	
				③	114	211	210	-1	
10	フレキ継手 (C仕様)	パッキン	NBR	①	121	212	212	N. D	検知不可
				②	121	212	212	N. D	検知不可
				③	120	212	212	N. D	検知不可
11	鋼管フランジ (ガスケット)	ガスケット	ノンアシート +ペーパースト	①	394	212	212	N. D	検知不可
				②	394	212	212	N. D	検知不可
				③	392	212	212	N. D	検知不可
12	鋼管フランジ (絶縁スペーサ)	Oリング	SBR+NR	①	416	212	212	N. D	検知不可
				②	418	212	212	N. D	検知不可
				③	418	212	212	N. D	検知不可
13	メーターガス栓 (開栓状態)	テーパー栓	グリース	①	175	124	124	N. D	検知不可
				②	174	124	124	N. D	検知不可
				③	174	124	124	N. D	検知不可
14	メーターガス栓 (閉栓状態)	テーパー栓	グリース	①	89	124	124	N. D	検知不可
				②	88	124	124	N. D	検知不可
				③	87	124	124	N. D	検知不可
15	機器前ネジガス栓 (開栓状態)	テーパー栓	グリース	①	109	124	124	N. D	検知不可
				②	107	124	124	N. D	検知不可
				③	106	124	124	N. D	検知不可
16	機器前ネジガス栓 (閉栓状態)	テーパー栓	グリース	①	57	124	124	N. D	検知不可
				②	56	124	124	N. D	検知不可
				③	56	124	124	N. D	検知不可
17	PEボールバルブ (開栓状態)	Oリング シートリング	NBR 硬度70 NBR 硬度70	①	1108	211	210	-1	検知不可
				②	1108	211	210	-1	検知不可
				③	1112	211	210	-1	検知不可
18	PEボールバルブ (閉栓状態)	Oリング シートリング	NBR 硬度70 NBR 硬度70	①	420	211	210	-1	検知不可
				②	420	211	210	-1	検知不可
				③	423	211	210	-1	検知不可

今回水素気密性調査を行った18項目のうち、ポリエチレン管を接続したトランジション継手、PEボールバルブ（開栓状態）、PEボールバルブ（閉栓状態）の3項目について、48時間で1kPaの圧力低下が見られた。しかしこれらは局所部位からの漏れではなく、接合部の各箇所での水素濃度が低いことから、水素リークディテクタにより確認したが、いずれも検知されなかった。

フレキ継手（B仕様）では、試験数N=3の間で圧力変化量に違いが見られた。この要因として、ノンアスケットの透過係数の個体差が挙げられる。表3. 5-2にノンアスケットの水素透過係数と、その値から計算される圧力変化量を示す。なお透過係数の値は、2. 4項で示した水素透過性試験の結果である。ノンアスケットの透過係数はN1とN3で3倍近く異なり、その個体差が圧力変化量の違いに反映されたと考えられる。

表3. 5-2 水素透過性試験結果からの圧力変化量計算

		水素透過係数 (23°C) [m ³ ・m/(m ² ・s・Pa)]	圧力変化量 (計算値) [kPa/2day]
ノンアスシート	N1	6.16×10 ⁻¹⁶	-0.4
	N2	7.79×10 ⁻¹⁶	-0.5
	N3	1.68×10 ⁻¹⁵	-1.0
	平均	1.02×10 ⁻¹⁵	-0.6

水素リークディテクタによる確認では、N=3ともに釘打ち損傷漏れ発見機構に水素リークディテクタのプローブを近接した場合に水素が検知される結果となった。釘打ち損傷漏れ発見機構の外観を図3. 5-1に示す。

釘打ち損傷漏れ発見機構とは継手の側面にあり、超高分子量ポリエチレンの多孔体からなる穴状のもので、万一フレキ管本体に誤って釘が打たれてしまった場合でも、気圧検査時に容易に発見できることを目的として設けられたものである。今回、釘打ちによる多量漏れなどはないにもかかわらず、この部分で水素が検知された原因は、釘打ち損傷漏れ発見機構の構造によるものと考えられる。フレキ継手（B仕様）の断面図を図3. 5-2に示す。



図3. 5-1 フレキ継手（B仕様）の釘打ち損傷漏れ発見機構

フレキ継手 (B 仕様) は、ガスケットを透過した水素が継手内部の空間 A に滞留しやすい構造となっており、時間の経過とともに空間 A の水素濃度が上がる。滞留した水素は、釘打ち損傷漏れ発見機構の局所的な穴から外部に出るため、その穴の直近では水素濃度が水素リークディテクタの検知感度まで上昇していると考えられる。

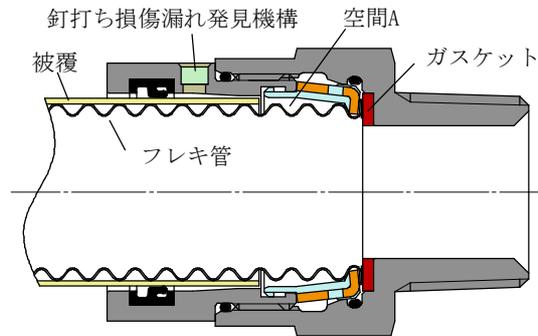


図3. 5-2 フレキ継手 (B 仕様) の断面図

4. 調査結果のまとめ

4. 1 水素透過性に関する調査結果のまとめ

内管材料及び内管材料接合部に用いられるシール用材料について代表的な 4 種を選定し、水素透過性の調査を行った。その結果以下の結論を得た。

- ・4 種のシール用材料で、最も透過係数が小さいものはフッ素ゴムであり、続いて NBR 硬度 50、NBR 硬度 70、ノンアスシートの順であった。

表 4. 1-1 初期状態における各種シール用材料の水素透過係数

シール用材料	水素透過係数 $[\text{m}^3 \cdot \text{m} / (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$		
	-5°C	23°C	40°C
フッ素ゴム	3.66×10^{-18}	2.10×10^{-17}	4.80×10^{-17}
NBR 硬度 50	1.89×10^{-17}	6.41×10^{-17}	1.24×10^{-16}
NBR 硬度 70	4.00×10^{-17}	1.33×10^{-16}	2.45×10^{-16}
ノンアスシート	1.12×10^{-15}	1.02×10^{-15}	1.08×10^{-15}

- ・ノンアスシート（初期状態）では、-5°Cから 40°Cの範囲で透過係数の変化が見られなかった。剛直繊維が絡み合った構造で、分子運動の温度依存性が小さいためと考えられる。
- ・NBR、フッ素ゴムでは耐久加速処理後に、引張強度、伸びに変化が見られたことから処理による反応は進んでいるものの、透過係数への影響は殆ど見られなかった。
- ・ノンアスシートでは 90°C×720 時間の耐久加速処理により、透過係数が 3 倍程度に増大した。1440 時間の処理では更なる透過係数の増大は見られなかった。但し、断面観察においても構造変化などは認められず、この原因は明らかでない。

4. 2 水素気密性に関する調査結果のまとめ

内管材料について代表的な継手、ガス栓、バルブを14種(18項目)選定し、所定の圧力で水素を封入した後の圧力変化量の確認及び水素リークディテクタによる確認を行うことで、内管材料及び内管材料接合部の水素気密性に関する調査を行った。その結果以下の結論を得た。

- ・以下に示す11種(14項目)について、圧力変化は確認されず、且つ水素リークディテクタによる確認においても検知されなかった。

- ① ねじ込み継手 シール材A仕様 及び シール材B仕様
- ② 絶縁継手
- ③ RSユニオン
- ④ PCメカニカル継手
- ⑤ 鋼管ライザー管
- ⑥ フレキ継手 A仕様
- ⑦ フレキ継手 C仕様
- ⑧ 鋼管フランジ ガスケット
- ⑨ 鋼管フランジ 絶縁スペーサ
- ⑩ メーターガス栓 開栓状態 及び 閉栓状態
- ⑪ 機器前ネジガス栓 開栓状態 及び 閉栓状態

- ・トランジション継手、PEボールバルブの開栓状態及び閉栓状態の3項目について48時間で1kPaの圧力低下が確認された。但しこの圧力変化量は、ガス工作物技術基準の解釈例 第51条第2項第三号に記載の「気密試験方法」の参照により、今回の試験条件に相当する試験方法との換算比較において、3桁程度小さいオーダーの微少領域を確認したものであり、更には3項目のいずれも水素リークディテクタによる確認で検知されなかったことから、実運用レベルでは気密性があると考えられる。

- ・フレキ継手(B仕様)について、水素リークディテクタで検知された原因は、ノンアスガスケットを透過した水素が継手内部に滞留しやすい構造となっており、時間の経過と共に継手内部の水素濃度が水素リークディテクタの検知感度まで上昇したためと考えられる。但し、圧力変化量は他の継手と同等であり、実運用レベルでは気密性があると考えられる。

<参考文献>

- (1) 早川 淨 高分子材料の寿命とその予測 平成元年 P36 アイピーシー
- (2) 早川 淨 高分子製品の寿命予測法通信講座テキスト 平成6年 No. 3 P7 アイピーシー
- (3) 西敏夫ほか 新版 ゴム材料選択のポイント 1988年 P102 日本規格協会
- (4) ダイキン工業㈱カタログ ダイエルG-501

Ⅲ. 安全性確認試験設備の概念設計

Ⅲ. 安全性確認試験設備の概念設計

1. 目的

水素供給内管システムのモデルパターンを検討し、これまでに調査を行ってきた各種内管用配管材料・シール材料を組み合わせることで安全性確認試験設備の概念設計を行う。

システムの安全性確認項目として、気密性、流量性能、その他の健全性確認を行うための測定機器類の配置も考慮に入れた設計とする。

2. 調査方法

2. 1 水素供給内管モデルの検討

戸建住宅、集合住宅の水素供給内管の事例を文献等で調査したが、公表されている事例は燃料電池と水素改質機が一体に組み込まれたタイプのみで、建物の屋内外に水素供給を設置した例がなかった。そのために、都市ガスの内管システムを参考にして、水素供給内管の配管システムフローを想定しモデル配管の検討を行った。

モデル配管の検討には、これまでに調査を行ってきた各種内管用配管材料を用い、配管サイズは、都市ガスの内管で使用されている計算式と係数を用いて圧力損失値を算出して決定した。

2. 2 安全性確認試験のための試験配管の概念設計

水素供給内管に要求される主要な機能は、水素に対する気密性と、燃料電池に安定して水素を供給することにある。この機能の確認を目的として、2. 1項で設計したモデル配管の代表例を用いて、下記の測定装置を組み込んだ安全性確認試験のための試験配管の概念設計を行った。

測定装置：流量計、圧力計、温度計、水素リーク検知器

3. 水素供給内管モデルの設計

3. 1 モデル配管の想定

3. 1. 1 建物、水素供給方法

建物の種類・大小、水素供給方法を考慮し、5種類モデル配管（表3. 1. 1-1）を想定して、水素供給内管モデルの概念設計を行った。

水素供給方法は、水素改質機を設置する場合と埋設水素配管から供給する2通りを想定した。前者の場合には、安全性を考慮して屋上に設置するようにした。配管には、これまでに気密性を調査してきた管材を使用した。

表3. 1. 1-1 モデル配管を行った建物、水素供給方法

モデル配管 No.		1	2	3	4	5
建物	タイプ	大型集合住宅		小型集合住宅		戸建住宅
	階数	30F		2F		—
	戸数	240戸		8戸		1戸
水素供給方法		屋上設置 改質機より	埋設水素 配管より	屋上設置 改質機より	埋設水素 配管より	埋設水素 配管より

3. 1. 2 配管

(1) 配管種類、径

これまでに調査を行ってきた各種内管用配管材料を用いた。

配管サイズは、3. 2項に示す都市ガスの内管で使用されている計算式と係数を用いて圧力損失値を算出して決定した。

(2) 水素配管の長さ

水素配管の長さは、(社)日本ガス協会発行「供給管・内管指針(工事編) JGA指-302-04」の参考資料1-11を参照して決定した。

検討してきた各モデル配管の概念図を図3. 1. 2-1から図3. 1. 2-5に示す。

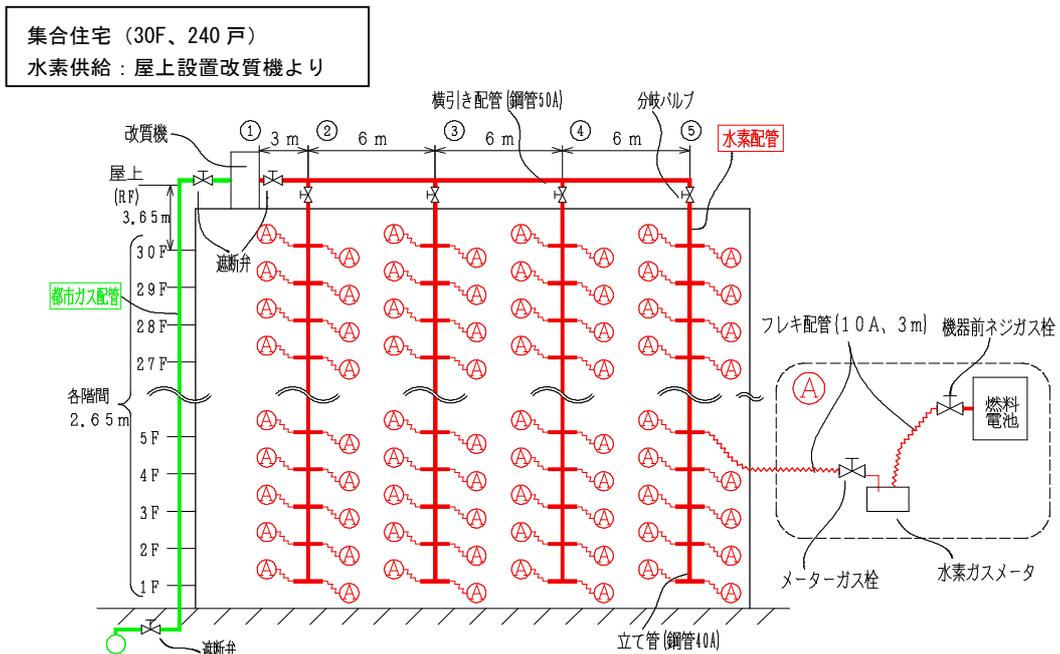


図3. 1. 2-1 モデル配管(No. 1)の概念図

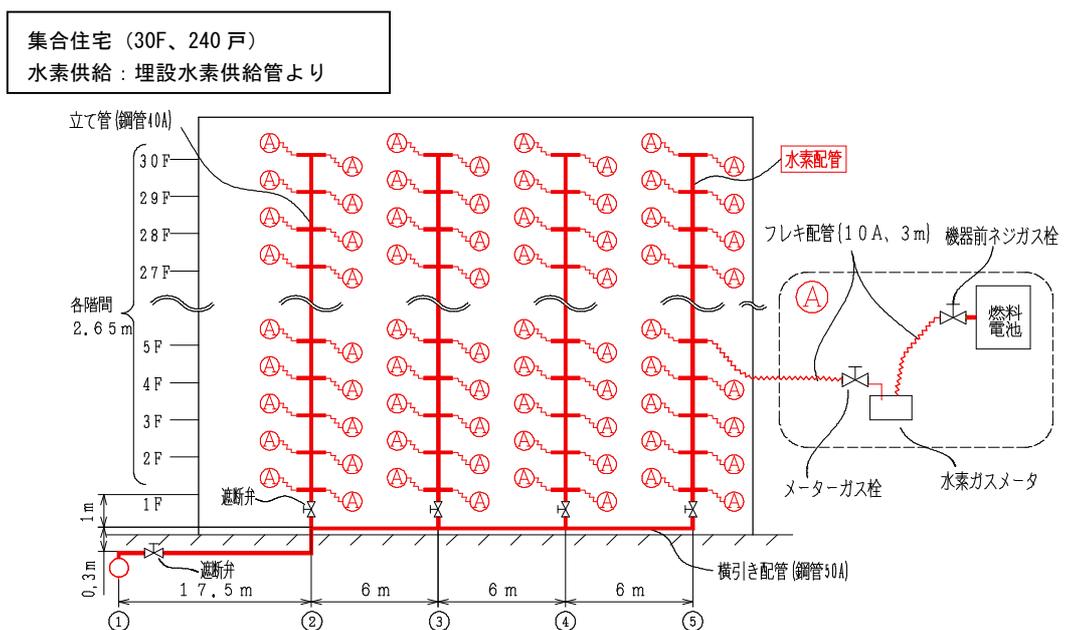


図3. 1. 2-2 モデル配管(No. 2)の概念図

集合住宅 (2F、8戸)
 水素供給：屋上設置改質機より

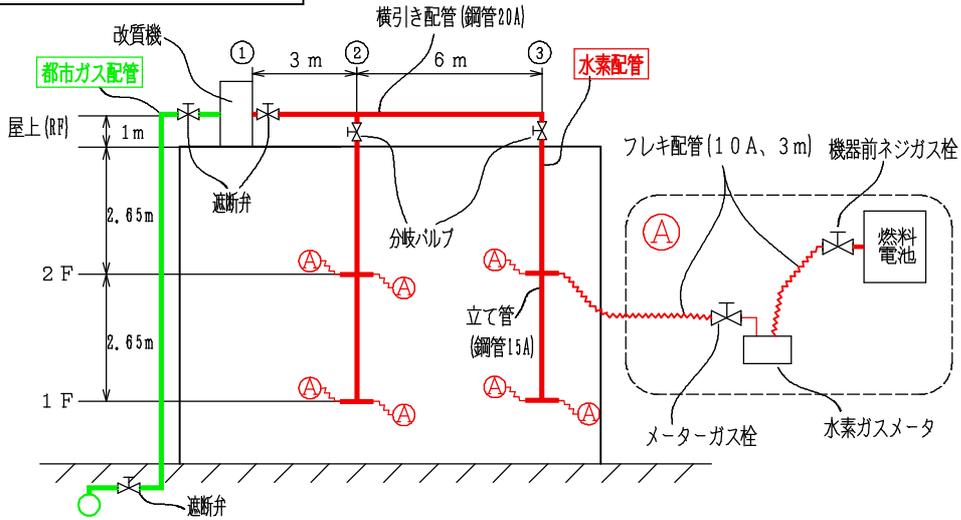


図 3. 1. 2-3 モデル配管 (No. 3) の概念図

集合住宅 (2F、8戸)
 水素供給：埋設水素供給管より

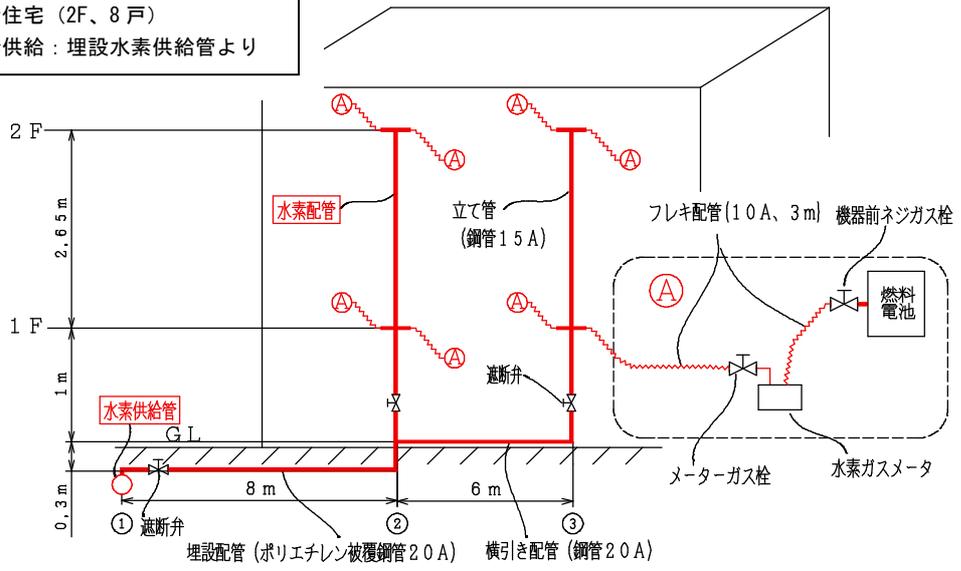


図 3. 1. 2-4 モデル配管 (No. 4) の概念図

戸建住宅
 水素供給：埋設水素供給管より

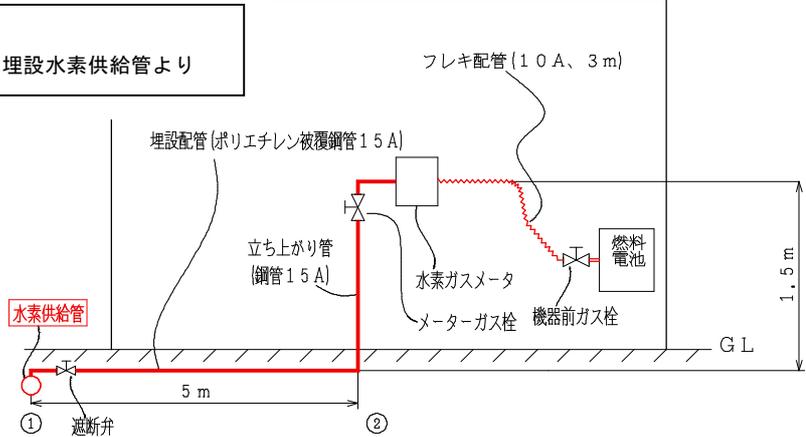


図 3. 1. 2-5 モデル配管 (No. 5) の概念図

3. 2 圧力損失計算

概念設計を行ったモデル配管の配管サイズの妥当性について、都市ガスの内管で行われている計算式と係数を用いて圧力損失を算出して確認した。

3. 2. 1 圧力損失値算出条件

(1) 燃料電池の個数、同時使用率

燃料電池は各戸に1台とした。

同時使用率は、電気は各戸一斉に使用されることもと考えられるので最も厳しい条件として100%とした。

(2) 水素消費量

1戸当たり（燃料電池1台当たり）の水素消費量については、(社)日本ガス協会 調査報告書「平成17年度地方都市ガス事業 天然ガス促進対策調査（水素供給システム安全性技術調査）」の表6. 3. 3-1中の2008年の水素消費量（0.67m³/h）を採用し、安全をみて1.5倍した1m³/hを用いて算出した。

3. 2. 2 圧力損失計算式、係数

(社)日本ガス協会発行「供給管・内管指針（設計編） JGA指-301-04」の7.3配管口径の決定に記載された流量公式と係数を用いて行った。

(1) 鋼管の場合（80A以下）

$$\Delta P_r = g \cdot K_D' \cdot S \cdot L_r' \cdot Q_r^2 \quad (3. 2. 2-1)$$

ΔP_r : 各配管部の起点と終点の圧力差・・・圧力損失値 [Pa]

K_D' : 継手類の使用状況を考慮し継手類の直管相当長を加味した口径ごとの
表3. 2. 2-1に示す係数

表3. 2. 2-1 K_D' 値（鋼管用）

呼び径	K_D'	呼び径	K_D'	呼び径	K_D'
15	8.15×10^{-1}	25	3.72×10^{-2}	40	4.58×10^{-3}
20	1.38×10^{-1}	32	8.32×10^{-3}	50	1.23×10^{-3}

S : 空気に対するガスの比重（空気を1として）・・・水素：0.06952

L_r' : 継手の直管相当長を含まない配管の延長距離 [m]

Q_r : 設計流量 [m³/h]

g : 重力加速度 [m/s²]

(2) フレキ管の場合

次式により、水素の流量を空気流量に換算し、フレキ管の圧力損失図（図3. 2. 2-1）から圧力損失値を算出した。

$$Q_{air} = \sqrt{S} \cdot Q_{gas} \quad (3.2.2-2)$$

Q_{air} : 空気流量 [m³/h]

Q_{gas} : 設計ガス流量 [m³/h]

S : 空気に対するガスの比重 (空気を1として) ……水素 : 0.06952

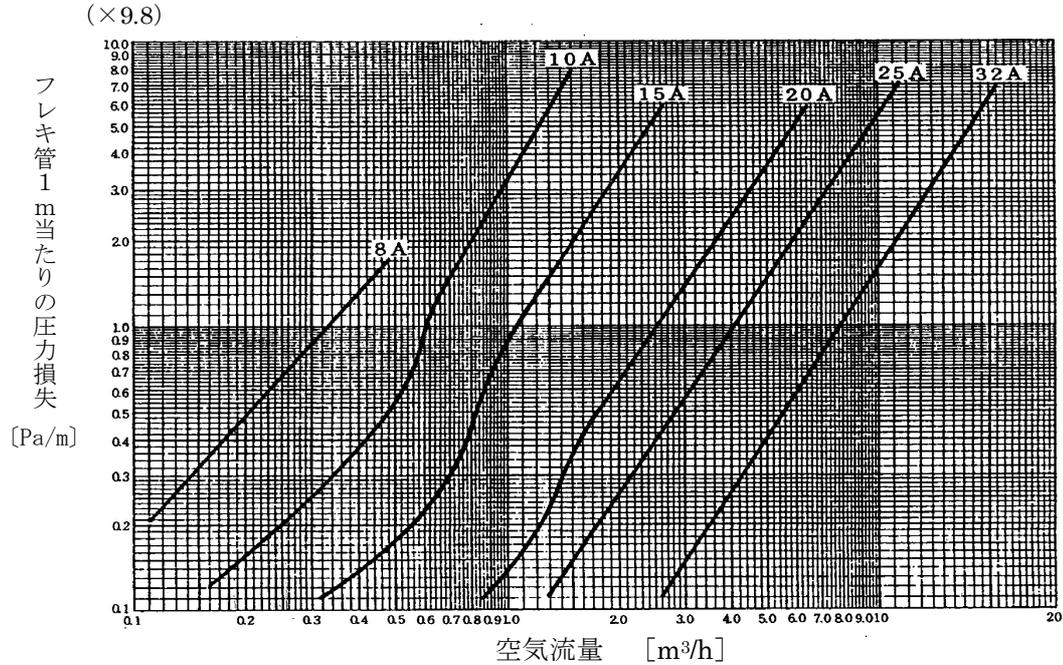


図 3. 2. 2-1 フレキシ管の圧力損失図

(3) 高低差による圧力上昇計算 [Pa]

次式より算出した $\Delta P'$ を、A で求めた立て配管の圧力損失値から減じて補正する。

$$\Delta P' = g \cdot \rho \cdot H \cdot (1 - S) \quad (3.2.2-3)$$

$\Delta P'$: 圧力変化 [Pa] (+の場合は圧力上昇、-の場合は圧力降下)

ρ : 空気密度 (1.293kg/m³)

H : 改質機から各戸分岐部までの高さ [m]

S : 空気に対するガスの比重 (空気を1として) ……水素 : 0.06952

g : 重力加速度 [m/s²]

3. 2. 3 圧力損失計算結果

(1) 計算詳細結果

表 3. 1. 1-1 に示す 5 タイプのモデル配管に対して、計算を行った。代表例として No. 4 の計算の詳細を表 3. 2. 3-1 から表 3. 2. 3-6 に示す。

表 3. 2. 3-1 埋設供給管-G L間の圧力損失値 (A 1)

配管部 区間	区間 延長 [m]	下流の 水素 メータ の数 [個]	同時 使用率 [%]	1戸 当りの 流量 [m ³ /h]	設計 流量 Q _r [m ³ /h]	口径		区間 圧力 損失値 [Pa]	横引き配管末端 (③)からの累積圧 力損失	
						呼び径 [A]	K _D '		累積 区間	累積値 [Pa]
埋設 供給管 -GL	0.3	8	100	1	1	20	0.138	1.8	埋設 供給管 -GL	1.8

表 3. 2. 3-2 G L-各階間の圧力損失値 (A 2)

配管部 区間	区間 延長 [m]	下流の 水素 メータ の数 [個]	同時 使用率 [%]	1戸 当りの 流量 [m ³ /h]	設計 流量 Q _r [m ³ /h]	口径		区間 圧力 損失値 [Pa]	横引き配管末端 (③)からの累積圧 力損失	
						呼び径 [A]	K _D '		累積 区間	累積値 [Pa]
GL-1F	1	4	100	1	4	15	0.815	8.9	GL-1F	8.9
1F-2F	2.65	2	100	1	2	15	0.815	5.9	GL-2F	14.8

表 3. 2. 3-3 横引き配管の圧力損失値 (B)

配管部 区間	区間 延長 [m]	下流の 水素 メータ の数 [個]	同時 使用率 [%]	1戸 当りの流 量 [m ³ /h]	設計 流量 Q _r [m ³ /h]	口径		区間 圧力 損失値 [Pa]	本支管(①) からの 累積圧力損失	
						呼び径 [A]	K _D '		累積 区間	累積値 [Pa]
①-②	8	8	100	1	8	20	0.138	48.1	①-②	48.1
②-③	6	4	100	1	4	20	0.138	9.0	①-③	57.2

表 3. 2. 3-4 高低差による圧力上昇値 (C)

フロア	圧力上昇値 [Pa]	記号
1F	15.3	C _{1F}
2F	46.6	C _{2F}

表 3. 2. 3-5 各戸分岐~燃料電池間フレキ管の圧力損失値 (D)

項 目	結 果
空気流量への換算 (Q _{air} =√S×Q _{gas} =√0.06952×1)	0.264 m ³ /h
フレキ管圧力損失図(図 3. 2. 2-1)より、フレキ管 1m 当たりの圧力損失値	0.215×9.8 Pa/m
フレキ管 3m 当たりの圧力損失値	4.2 Pa

表 3. 2. 3-6 全圧力損失値 (E)

場所	全圧力損失計算式	全圧力損失値 [Pa]
③列1F燃料電池 入口	$E=A1(\text{埋設供給管}-GL)+A2(GL-1F)$ $+B(\text{①}-\text{③累計})-C_{1F}+D$	56.7 (最大圧力損失値)
③列2F燃料電池 入口	$E=A1(\text{埋設供給管}-GL)+A2(GL-2F\text{累計})$ $+B(\text{①}-\text{③累計})-C_{2F}+D$	31.4

(2) モデル配管 5 タイプの最大圧力損失値 (圧力損失計算結果)

(1) 項の代表例と同様の計算でモデル配管 No. 1、2、3、5 の燃料電池入口での最大圧力損失値を算出した。その結果を、表 3. 2. 3-7 に示す。

表 3. 2. 3-7 各モデル配管の最大圧力損失値

モデル配管 No.		1	2	3	4	5
建物	タイプ	大型集合住宅		小型集合住宅		戸建住宅
	階数	30F		2F		—
	戸数	240 戸		8 戸		1 戸
水素供給方法		屋上設置 改質機より	埋設水素 配管より	屋上設置 改質機より	埋設水素 配管より	埋設水素 配管より
水素配管	埋設配管～ 立ち上がり 配管	—	ポリエチレン 被覆鋼管 50A 17.5+0.3 m	—	ポリエチレン 被覆鋼管 20A 8+0.3 m	ポリエチレン 被覆鋼管 15A 5+1.5 m
	横引き配管	鋼管※50A 3+6×3 m	鋼管※50A 6×3 m	鋼管※20A 3+6 m	鋼管※20A 6 m	—
	立て管	鋼管※40A 3.65+ 2.65×29 m	鋼管※40A 1+2.65×29 m	鋼管※15A 1+2.65 +2.65 m	鋼管※15A 1+2.65 m	—
	分岐～ 燃料電池	フレキ管 10A 3m	フレキ管 10A 3m	フレキ管 10A 3m	フレキ管 10A 3m	フレキ管 10A 3m
燃料電池入口 での最大圧力 損失値	場所	最遠列⑤	最遠列⑤	最遠列③	最遠列③	—
	場 所	1F	1F	1F	1F	—
	[kPa]	1646	1113	0.15	0.06	-0.01

鋼管※：SGP (JIS G 3452 配管用炭素鋼管) または塩化ビニル被覆鋼管

3. 2. 4 圧力損失計算結果のまとめ

(1) 燃料電池への供給圧力に関しての決められた数値はないが、実使用圧力としては一般的に数 kPa～50kPa、最大でも 100kPa である。表 3. 2. 3-7 の最大圧力損失値でも 2kPa 以下であり、水素供給源の圧力は、末端 (燃料電池) での要求圧力に対し、数 kPa 加えた圧力で対応することができるので、モデル配管の設計で実使用にも対応できるものとする。

(2) 最大圧力損失値 (約 1.6kPa) が算出されたモデル No. 1 は、高層マンションを想定した大型集合住宅に改質機を屋上に設置したモデルである。

約 1.6kPa の内 9kPa 以上が配管系と関係のない高低差による圧力低下によるものである。圧力損失を抑えたい場合には、改質機を中間階にも設置するなどの対応が必要となる。

4. 試験配管の概念設計

3項で設計したモデル配管から代表例を選び、安全性確認試験のための計測機器を組み込んだ試験配管の概念設計を行った。

4. 1 試験項目

水素供給内管に要求される主要な機能は、水素に対する気密性と、燃料電池に安定して水素を供給することにある。この機能を確認することを目的として、以下の試験項目を行えるようにする。

4. 1. 1 試験配管の気密性の確認

試験配管に所定の圧力の水素を封入し、封入圧力低下の測定、発泡漏れ試験、水素リーク検知器等で初期及び長期使用後の気密性の確認を行う。

使用機器：圧力計、温度計、水素リーク検知器、石鹼水等

4. 1. 2 流過性能の測定

燃料電池の実使用に近い状態を想定して末端に水素を流し、各燃料電池での流量や圧力の変動を調査し、各燃料電池に安定して水素を供給できるかを調べる。

使用機器：流量計、圧力計、温度計

4. 2 試験配管の概念設計

本年度水素気密性調査を行ったアイテム全て配管材料の試験を行えるようにするために、埋設配管、立ち上がり管、横引き管、立て管を有し、かつ大掛かりの投資を必要としない試験配管とするために、表3. 1. 1-1のNo.4のモデル配管を採用し、4. 1項で示した測定機器を組み込んで試験配管の概念設計を行った。

4. 2. 1 概念設計の概略仕様

試験配管の概略仕様を表4. 2. 1-1に示す。

表4. 2. 1-1 試験配管の概略仕様

建物	タイプ	小型集合住宅
	階数、戸数	2F、8戸
水素供給方法		埋設水素配管より

4. 2. 2 試験配管に使用する配管材料

(1) 管、継手

本年度の水素気密性の調査を行ったアイテムを試験できるように設計した。その内容を表4. 2. 2-1に示す。

(2) ガス栓、バルブ

本年度の水素気密性の調査を行った種類以外のバルブ等の使用も必要である。使用するガス栓、バルブを表4. 2. 2-2に示す。

表 4. 2. 2-1 試験配管に使用する管、継手

用途	管		継手
埋設配管	ポリエチレン管	ポリエチレン管	EF継手
	ポリエチレン被覆鋼管	ポリエチレン被覆鋼管	PCメカニカル継手
埋設配管からの 立ち上がり配管	ポリエチレン管	鋼管 SGP(白) (塩化ビニル被覆鋼管)	鋼管ライザー管 トランジション継手
	ポリエチレン被覆鋼管	鋼管 SGP(白) (塩化ビニル被覆鋼管)	PCメカニカル継手
露出配管	鋼管 SGP(白) (塩化ビニル被覆鋼管)	鋼管 SGP(白) (塩化ビニル被覆鋼管)	ねじ込み継手
			RSユニオン
			絶縁継手
			フランジ接続
機器接続配管	機器等の管用テーパねじ	フレキシブル管	フレキ継手
水素メータ接続	—	—	RSユニオン

表 4. 2. 2-2 ガス栓、バルブ

本年度の水素気密性調査アイテム	メーターガス栓、機器前ガス栓
	PEボールバルブ
本年度の水素気密性調査対象外	遮断弁(埋設用、露出用)
	流量制御弁

4. 2. 3 試験配管の概念図

上記の概略仕様、配管材料で設計した概念図を図 4. 2. 3-1 に示す。

留意点として次の 3 点がある。

(1) 本年度の水素気密性の調査を行った配管材料を全て試験できるようにするために、埋設配管及び立ち上がり配管に対して、ポリエチレン被覆鋼管とポリエチレン管の両方を試験するために入れ替えできるようにした。

(2) 概念図に水素ガスメータを 1 箇所取り付けるようしたが、試験実施時は、水素ガスメータを除いて配管することも可能な配管とする。

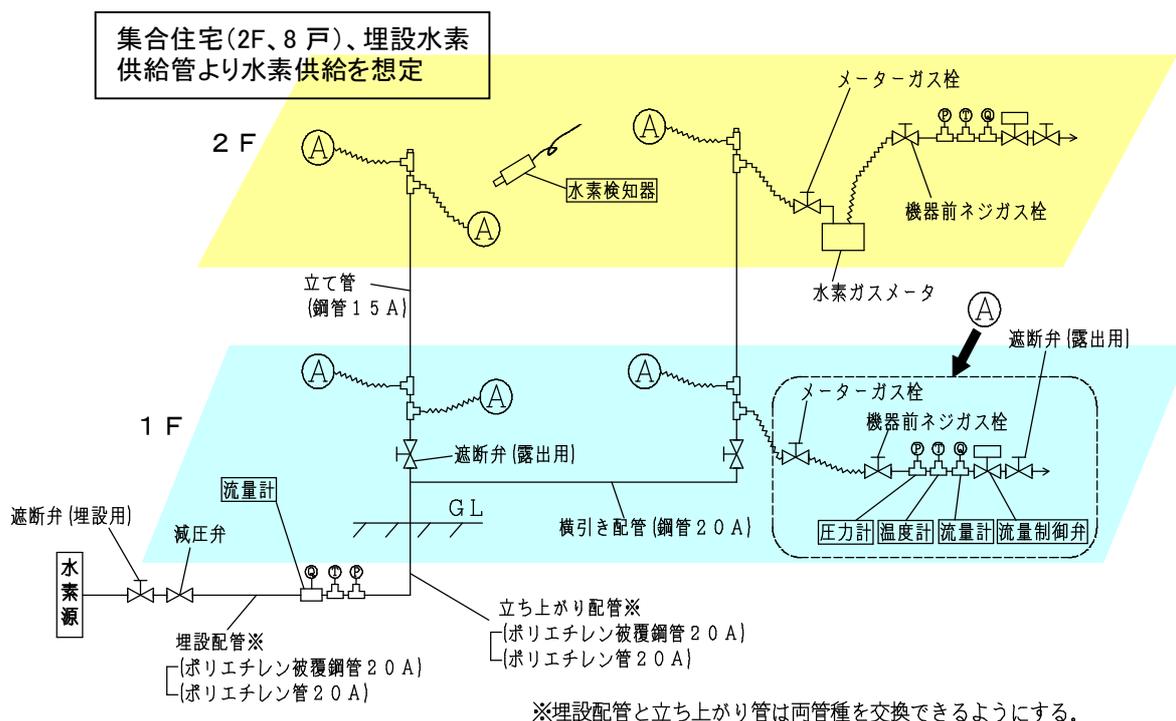


図 4. 2. 3-1 安全性確認試験設備

5. 安全性確認試験設備の概念設計のまとめ

戸建住宅、集合住宅の水素供給内管の事例はないため、都市ガスの内管システムを参考にして、水素供給内管のモデル配管の検討を行い、それを基に試験設備の検討を行った。

その結果、今までに水素気密性に関する調査を行ってきた配管材料を全て組み込んで、要求される安全性確認試験項目を試験することができる試験設備の概念図を作成した。

<参考文献>

- (1) (社) 日本ガス協会発行「供給管・内管指針 (設計編) JGA指-301-04」
- (2) (社) 日本ガス協会発行「供給管・内管指針 (工事編) JGA指-302-04」
- (3) (社) 日本ガス協会 調査報告書「平成17年度地方都市ガス事業 天然ガス促進対策調査 (水素供給システム安全性技術調査)」

IV. 水素ガスメータに係る調査

IV. 水素ガスメータに係わる調査

1. 調査の目的と水素の特性

1. 1 調査内容

1. 1. 1 調査の目的

燃料電池の普及など、水素社会を実現するためには、水素供給システムの整備・実用化が必要であるが、水素パイプラインについての技術要件が明確にされておらず、水素による配管材料等の透過性、脆性、圧縮膨張特性等の課題が考えられる。一方、供給された水素ガスは、各家庭で燃料電池の水素ガスを計量するシステム、いわゆる、家庭用水素ガスメータを主としたガスメータが必要となる。この「水素ガスメータに係わる調査」においては、現在使用されている家庭用を主とするガスメータ、ガス流量計及び、現在開発中、あるいは今後予測される水素ガスメータ候補の計測原理、温度、圧力等の仕様について文献等で調査を行うことにより、家庭用を主とする水素ガスメータとしての使用の可能性を調査することを目的とする。

1. 1. 2 調査項目

(1) ガス流量計の現状と水素ガスメータへの調査内容

① ガス流量計の分類と基本性能

a) ガス流量計の分類

一般には液体も含む流量計としての分類が明らかにされている。このなかの多くの流量計は気液ともに計量ができる。計測原理上ガスが測れない液体流量計は電磁式流量計と堰式流量計ぐらいである。図 1. 1. 2-1 は測定方式によるガス流量計の分類としてまとめたものである¹⁾。

b) ガス流量計の一般性能

表 1. 1. 2-1 は主な気体流量計の測定方式による性能比較一覧である¹⁾。横軸は計測原理等の測定方式を、縦軸は理論式、精度レンジアビリティ等を示す。

(2) 課題の抽出

① 調査項目

ガスメータおよびガス流量計に関する具体的な調査項目は以下のとおりとする。

a) 分類：体積系（ガスメータ）、推量式、差圧式、渦式、熱式（質量流量）、その他

b) 項目：計量原理/構造、現在の用途、分類、流量範囲、温度、圧力損失、耐圧（最高使用圧）、積算精度、対水分、耐水素ガス、価格、センサ/電源、長所/短所、水素を使用したときの課題、その他

1. 1. 3 水素ガスメータの調査の条件・仕様（要求仕様）

(1) 家庭用ガスメータの調査の条件・仕様

① 供給水素ガス

燃料電池より発生した水素ガスで純度 99.999%、水分なし。但し供給時に混入の可能性はある。

②圧力

5～100kPa： 但し、使用範囲を明確にすること。

③温度

環境温度： -5℃～40℃

④その他

明示されていない仕様は現行家庭用ガスメータに準ずる。

1. 2 水素ガスの基本特性

1. 2. 1 環境にやさしい水素エネルギー

産業の発達に伴いエネルギー消費が増大し、地球温暖化等が進んでおり、従来の化石エネルギーに代わって種々のエネルギーの研究開発が行なわれている。水素がこの地球上で最も優れたエネルギー源として化石エネルギーに取って代わるのも間近であるといわれている。海外でも国内でも水素を利用した燃料電池自動車が試験走行し、燃料電池による発電設備も多く使用されるようになってきた。

日本では、平成 14 年（2002 年）12 月 2 日、総理大臣官邸において燃料電池自動車の納入式が行われ、世界で初めて市販された。米国においても大統領が国家戦略として「水素エネルギー社会」の実現に取り組む考えを表明した。2020 年頃を目標に主要エネルギーが水素に転換するとされている。

水素は酸素と反応し水を生成することが知られているが、そのまま燃焼させれば熱エネルギーに、水素エンジンの様な内燃機関を用いることにより機械エネルギーに、また燃料電池を利用することにより直接電気エネルギーに変換することが可能で、エネルギー変換媒体と考えることができる。いずれの過程においても、水素と酸素が反応して生成される物質は水であり、地球温暖化ガスである CO₂ は排出されない。また水素は水の電気分解や熱化学分解等により製造可能な二次エネルギーであるため、太陽光エネルギーの様な再生可能エネルギーとの組合せによって、資源制約や地球環境負荷の少ない理想的なクリーンエネルギーシステムとして、水からの水素をベースとする水素エネルギーサイクルを描くことができる。これが水素は究極のクリーンエネルギーといわれる所以である。また、水素は物質（モノ）であるので、電気エネルギーに比べ大量貯蔵において優位性があり、これらのことが化学エネルギーとしての水素をユニークなものにしている。

1. 2. 2 水素の基本的性質

(1) 気体の一般的性質

水素ガスを計量するためにはその特性を知る必要がある。表 1. 2. 2-1 には気体ガスの物性値一覧を示す²⁾。

水素は常温常圧では気体であり、最も軽くて燃えるガスとしてよく知られているが、ここでは水素を使用される際に特徴的な水素の性質を以下示す⁴⁾。

- ①酸素との反応生成物は水であり、環境破壊の恐れが無いクリーンエネルギーである。
- ②原料を水とした場合、種々の再生可能エネルギーを利用して、水の電気分解等で造り出される二次エネルギーであり、資源的な制約が無い。
- ③常温常圧では気体であるが、沸点-253℃（常圧）以下の極低温では液体である。

- ④電気や熱とは異なり、水素は物質（モノ）であるため、大量貯蔵に適している。
- ⑤比熱が 20°C、大気圧で 14.9J/g・K と大きく、空気の約 14 倍あり、また熱伝導度も空気の約 7 倍あるので、冷却用媒体として利用できる。
- ⑥燃焼時の発熱量は 1kg 当たり 121MJ で、ガソリン（44MJ）の 2.75 倍であり、単位質量当たりのエネルギー密度が大きい（軽い）。
- ⑦単位体積当たりの発熱量は 1m³ 当たり 8.6J とガソリン（29.8J）の約 0.3 倍でかさばる。
- ⑧燃焼させなくとも、燃料電池を使用して発電すれば直接電気エネルギーを取り出すことが可能である。
- ⑨元素の中で最も原子半径が小さく（0.37Å）、材料の格子中に入出りが可能であり、拡散係数も大きいので、水素を材料中にエネルギーとして貯蔵し、必要な時に取り出して利用することができる。
- ⑩可燃性のガスであり、空気中の濃度が 4vol% を越えると火災や爆発の危険性がある。また発火エネルギーが小さく、着火しやすい。
- ⑪密度は空気の 1/14 と軽く閉塞場所では上部に滞留するが、拡散速度が非常に大きく、粘性は非常に小さいためオープンスペースでは散逸しやすい。

（2）水素ガスの爆発燃焼

①可燃性ガス

表 1. 2. 2-2 は可燃性ガスの空气中爆発限界（1 atm, 常温）³⁾ を示す。

②水素ガス

表 1. 2. 2-3 は水素ガスの爆発燃焼に関する物性値を示す⁴⁾。

（3）水素脆性

水素ガスは金属を脆化させる特性を有する。耐久性および耐久性能を重視するガスメータにあっては、使用部材の水素脆化の特性を知る必要がある。

（4）水素ガスの透過性

水素ガス分子は小さく、金属や樹脂を透過する性質があるので、水素ガス計測にあっては、ガスの気密を十分保たなければならない。

1. 3 調査内容および初期調査結果

1. 3. 1 調査対象ガスメータ・流量計の抽出と初期調査結果

（1）調査対象流量計の抽出と調査項目

調査対象ガスメータおよび流量計について、ガスメータは体積系ガスメータ、推量式ガスメータで 10 項、流量計では差圧式、渦式、熱式の分類で 16 項を文献および経験値より選択した。

なお、表の縦軸は計量原理・構造別に 26 種のガスメータ・流量計を、横軸は分類、計量原理・構造、計測流量、現行用途、流量範囲、環境温度、圧損、最大圧力、法定精度予測、対水分、耐水素ガス、既存品価格評価、センサ電源等について調査する。

(2) 初期調査結果

現行のガスメータおよび流量計の初期調査結果は、文献および報告者の経験値による実力値をベースに調査項目に基づき表1. 3. 1-1にまとめた。なお、表の縦軸は計量原理・構造別に26種のガスメータ・流量計を、そして横軸は分類、計量原理・構造、計測流量、現行用途、流量範囲、環境温度、圧損、最大圧力、法定精度予測、対水分、耐水素ガス、既存品価格評価、センサ電源を示す。

流量範囲は現行の実力値を、ガスメータ関連ではL/hで、流量計ではレンジアビリティを、環境温度は現法定計量における温度範囲-5°C~40°Cを、圧力損失はガスメータの一般的最大圧力損失を、法定低減とは計量法のガスメータの最大圧力損失までの低減への可能性を、法定精度予測とは、計量法、特定計量器で定める器差、測定範囲、温度誤差、耐久精度等の現行法定計量で定める合格範囲への可能性を3段階評価で示す。対水分は配管途中で水分混入した場合の水素ガスメータへの精度や性能についての影響予測評価を、既存品価格評価は、既存家庭用膜式ガスメータを規準に、センサ電源の自力とは、ガス計量をガス差圧による自力エネルギーで計量できるもの、電池とは電池によってセンシング計量できるもの、DCは12/24VDC電源でセンシング計量できるもの、商用とはAC100Vの商用電源でセンシング計量できるものをそれぞれいう。

(3) 初期調査結果のまとめ

26種のガスメータおよび流量計について、初期調査結果をまとめ表1. 3. 1-1^{5, 6)}に示す。

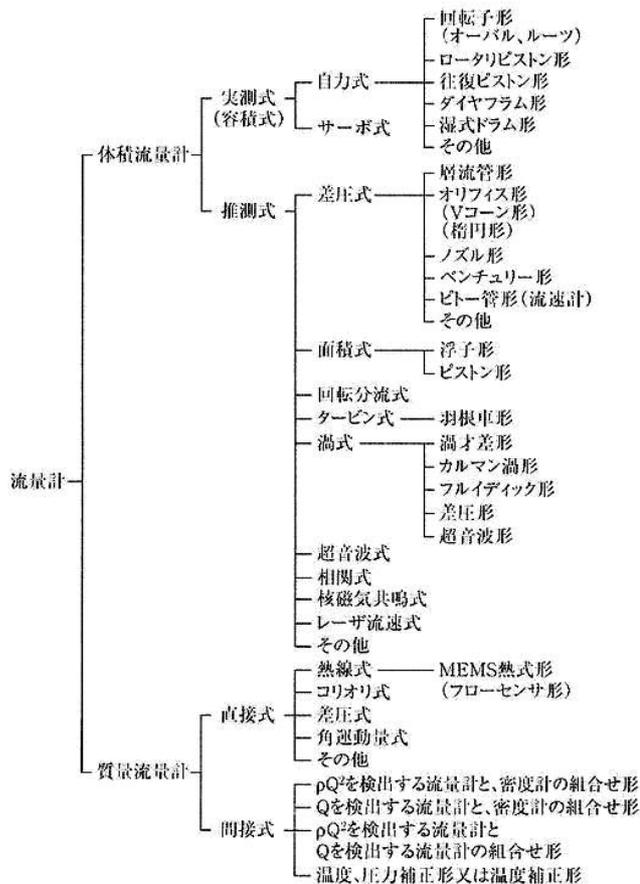


図 1. 1. 2-1 ガス流量計の分類¹⁾

表 1. 1. 2-1 流量計の性能比較一覧¹⁾

項目	容積流量計	面積流量計	差圧流量計 (オリフィス、 ベンチュリー、ラミナー)	タービン流量計	渦流量計	超音波流量計	質量流量計 (コリオリ式)	質量流量計 (熱式)
理論式 Q: 流量	$Q=K \cdot N$	$Q=K \cdot A$ 流体通過 断面積(A) $A=K_v \cdot H$	$Q=K \sqrt{P_1 - P_2}$ $Q=K \Delta P^*$	$Q=K \cdot \omega$	$Q=K \cdot f$	$Q=K \cdot \Delta t$	$Q=K \cdot \Delta t$	$Q=\Delta t$ 又は $Q=K \cdot \Delta q$
検出要素	一定容積 吐出数(N)	フロート位置(H)	差圧($P_1 - P_2$)	ロータの回転数(ω)	渦発生数(f)	超音波伝播 速度変化(Δt)	時間差(Δt)	温度差(Δt) または供給 熱量(Δq)
測定信号と 流量Qの関係	流量に比例	流量に比例	差圧の平方根に比例 ΔP に比例	流量に比例	流量に比例	流量に比例	流量に比例	流量に比例
測定精度 [%]	$\pm 0.2 \sim \pm 0.5$ (RD)	$\pm 1.0 \sim \pm 2$ (FS)	± 2.0 (FS) ± 0.5 (FS)	$\pm 0.2 \sim \pm 0.5$ (RD) 又は ± 3 FS	$\pm 1.0 \sim \pm 3$ (RD) 又は $\pm 1.0 \sim \pm 3$ (RD)	± 1 RD $\sim \pm 1$ FS	$\pm 0.1 \sim \pm 0.3$ (RD)	$\pm 0.5 \sim \pm 5$ (FS)
レンジアビリティ	10~20:1 200:1	5~12:1	3~10:1 10~50:1	15~25:1	10~80:1	30~150:1	20~100:1	50~200:1
口径 [mm]	10~500	1~400	15~3,000 15~200	6~600	10~400	1~7,000	2~150	10~150
温度	-30~+300	-200~+350	-40~+650	-250~+500	-200~+400	-160~+180	-240~+350	~+350
圧力[MPa]	~10	~60	~42	~10	~40	~2MPa	~95	~40
圧力損失	ストレーナを含んで大	フロアによる小	小~大	ストレーナを含んで大	小	無	小	小
必要直管部	不要	不要	上流10~62D 下流3~5D	上流15D 下流5D	上流50~10D 下流5D	上流10~15D 下流5D	不要	不要
相対価格	中~高	低	低	中	中	低~中	中~	中
JIS規格番号	B 7552	B 7751	Z 8762	B 8765	Z 8766		B 7555	
備考	ガス比重の 影響を受けない	管理用が主	圧力損失 $\Delta P 3,000 \text{ mmAq}$ 以内 *ラミナー形		挿入形を含む		大容量用	クリーンガスに限る

表1. 2. 2-1 気体ガスの物性値一覧²⁾

分類	番号	分子記号	名称	分子量 <i>M</i>	三重点		融点 <i>T_m</i> K	沸点 <i>T_b</i> K	臨界点				状態	標準状態 (25°C, 1atm)における物性値							融解熱 (融点) ΔH_f kJ/kg	蒸発熱 (沸点) ΔH_v kJ/kg	水に対する 溶解度(298) <i>s</i> kg/100kg		
					圧力 <i>P_t</i> Pa	温度 <i>T_t</i> K			圧力 <i>P_c</i> Mpa	温度 <i>T_c</i> K	体積 <i>V_c</i> cm ³ /mol	密度 ρ_c kg/m ³		密度 ρ kg/m ³	比熱 <i>C_p</i> kJ/(kg·K)	比熱比 α	粘性係数 η μPa·s	動粘性係数 ν mm ² /s	熱伝導率 λ mW/(m·K)	温度伝導率 <i>a</i> mm ² /s				プラントル数 <i>P_r</i>	
元素 (非金属)	101	He	ヘリウム Helium-4 (R704)	4.003	5035	2.177		4.21	0.2275	5.20	57.5	69.6	G	0.163	5.179	1.658	19.80	121	149.3	176	0.688	3.5	20.3	G1.56×10 ⁻⁴	
	102	Ne	ネオン Neon (R720)	20.179	43200	24.55	24.6	27.3	2.66	44.4	41.8	483	G	0.824	1.031	1.640	31.58	38.3	49.1	57.8	0.663	16.6	87.5	G9.12×10 ⁻⁴	
	103	Ar	アルゴン Argon (R740)	39.948	68700	83.78	83.8	87.5	4.865	150.7	74.5	536	G	1.634	0.522	1.331	22.61	13.8	17.63	20.7	0.667	29.41	163.2	G5.47×10 ⁻³	
	104	Kr	クリプトン Krypton	83.8			115.77	121.4	5.50	209.4	91.2	919	G	3.429	0.248		25.39	7.40	9.37	11.0	0.673	19.51	107.7	G2.01×10 ⁻²	
	105	Xe	キセノン Xenon	131.29			161.25	164.1	5.840	289.73	118	1110	G	5.397	0.158		23.18	4.29	5.59	6.54	0.656	23.43	120.8 (200)	G6.51×10 ⁻² (293)	
	106	H ₂	n-水素 n-Hydrogen (R720)	2.106	7200	13.96	13.96	20.39	1.316	33.2	63.9	31.6	G	0.0824	14.317	1.403	8.90	108.0	180.6	153.1	0.705	58	448	G1.56×10 ⁻⁴	
	107	HD	重水素化水素 Hydrogen deuteride	3.024	12370	16.60	16.60	22.13	1.48	36.0	62.8	48.2	G				10.53 (293)						390 (36)		
	108	D ₂	重水素 n-Deuterium	4.032	17145	18.73	18.73	23.67	1.66	38.4			G	0.165	7.248	1.395	12.69	76.9	139.9	117	0.657	59	304		
	109	T ₂	トリチウム(三重水素) n-Tritium	6.032	21600	20.62	20.62	25.04																	
	110	F ₂	フッ素 Fluorine	37.997	250	53.48	53.53	86.2	5.215	144.3	66.2	574	G	1.553	0.8256		23.5	15.1	27.7	21.6	0.699	26.78	180.6	分解	
	111	Cl ₂	塩素 Chlorine	70.906			172.17	238.6	7.70	417	124	573	G	2.944	0.4781		13.63	4.63	8.83	6.27	0.738	90.34	287.8	G0.641	
	114	N ₂	窒素 Nitrogen (R728)	28.013	12500	63.148	63.15	77.35	3.400	126.20	89.2	314	G	1.146	1.0404	1.399	17.77	15.5	25.84	21.7	0.714	25.73	1365	G1.75×10 ⁻³	
	115	O ₂	酸素 Oxygen (R732)	31.999	100	54.359	54.36	90.0	5.043	154.58	73.4	436	G	1.310	0.9194	1.401	20.57	15.7	26.59	22.1	0.710	13.90	213	G3.93×10 ⁻³	
	116	O ₃	オゾン Ozone	47.998			80.65	161	5.57	261.0	89	540	G	2.1415 (273)									251	G1.39×10 ⁻³ (300)	
	117	(Mix) Air	空気 Air (R729)	28.97				78.8	3.766	132.5	92.6	313	G	1.184	1.0061	1.395	18.4	15.5	25.9	21.7	0.714		213.3	G2.16×10 ⁻³	

備考: ()内の数値は温度(K)を示す。G: 気体

出展: 流体の熱物性値集
日本機械学会 昭和58年8月20日

表 1. 2. 2-2 可燃性ガスの空气中爆発限界 (1 atm, 常温) ³⁾

(数字は可燃性ガスの体積%)

ガス	下限界	上限界	ガス	下限界	上限界
アセチレン	2.5	81.0	硫化水素	4.3	45.0
ベンゼン	1.4	7.1	水素	4.0	75.0
トルエン	1.4	6.7	一酸化炭素 (湿気あり)	12.5	74.0
シクロプロパン	2.4	10.4	メタン	5.0	15.0
シクロヘキサン	1.3	8.0	エタン	3.0	12.4
メタノール	7.3	36.0	プロパン	2.1	9.5
エタノール	4.3	19.0	ブタン	1.8	8.4
イソプロピルアルコール	2.0	12.0	ペンタン	1.4	7.8
アセトアルデヒド	4.1	57.0	ヘキサン	1.2	7.4
エーテル	1.9	48.0	エチレン	2.7	36.0
アセトン	3.0	13.0	プロピレン	2.4	11.0
酸化エチレン	3.0	80.0	ブテン-1	1.7	9.7
酸化プロピレン	2.0	22.0	イソブチレン	1.8	9.6
塩化ビニル	4.0	22.0	1,3-ブタジエン	2.0	12.0
アンモニア	15.0	28.0	四フッ化エチレン	10.0	42.0
二酸化炭素	1.2	44.0			

表 1. 2. 2-3 水素ガスの爆発燃焼に関する物性値 ⁴⁾

1	爆発限界 (空气中、20°C、1atm)	4~75	%	6	消炎距離 (空气中、1atm、常温)	0.06	cm
2	自然発火温度 (空气中、1atm)	570	°C	7	理論空燃重量比	34.3	-
3	爆発限界 (酸素中、20°C、1atm)	4~94	%	8	拡散係数 (空气中、0°C、1atm)	0.611	m ² /s
4	自然発火温度 (酸素中、20°C、1atm)	560	°C	9	高位発熱量 (0°C、1atm)	12790	kJ/m ³
5	最小発火エネルギー	0.02	mJ	10	低位発熱量 (0°C、1atm)	10780	kJ/m ³

表 1. 3. 1-1 現行のガスメーター及び流量計の調査結果^{5, 6)} (初期調査)

具体的数値は報告者の研究・経験値に基づくものを含む

No.	分類		計量原理、 構造	計測 流量	現行用途	流量範囲 (L/h)	環境温度 (-5~ 40℃)	圧損		最大 圧力 kPa	法定精度 予測 (※1)	対水分	耐水素 ガス	既存品 価格評価 (※4)	センサ 電源		
								既存 kPa	法定低減 ※3								
1	ガス メータ	実測式	乾式	膜式	体積	家庭用	5-6000	OK	0.25	○	10	A	△	○	L(L)	自力	
2					体積	テスト用	5-2000	OK	0.25	○	5	B	△	○	L(L)	自力	
3					体積	耐圧用	5-7000	OK	0.25	○	100	A	△	○	H(H)	自力	
4				回転式	体積	工業用	1:20	OK	0.25	○	10	B	△	○	M(H)	自力	
5				ピストン式	体積		1:30	OK	0.25	○	10	B	△	○	—	自力	
6				湿式	体積	標準器	1-3000	OK	0.25	○	5	A	○	○	H(H)	自力	
7		推量式			フルイディック (流体振動式)	体積	家庭用	5-6000	OK	0.25	○	10	A	△	○	L(L)	電池
8					超音波式	体積	家庭用	5-6000	OK	0.25	○	10	B	△	△	L(L)	電池
9					タービン式	体積	家庭用	5-6000	OK	0.25	○	10	B	△	○	L(L)	自力
10					羽根車式	体積	家庭用	10-500	OK	0.25	○	10	B	△	○	—	自力
11	流量計	差圧式		ピトー管	体積	流量計	1:50	OK	0.2	○	500	B	○	○	M(L)	DC	
12				層流式	体積	標準器	1:30	OK	10	×	50	E	△	○	M(M)	DC	
13				オリフィス	体積	流量計	1:10	OK	10	△	50	C	△	○	M(L)	DC	
14				Vコノオリフィス	体積	流量計	1:20	OK	1	△	50	D	△	○	M(L)	DC	
15				ベンチュリ	体積	流量計	1:10	OK	10	△	50	D	△	○	M(L)	DC	
16				楕円ベンチュリ	体積	流量計	1:20	OK	5	△	50	C	△	○	M(L)	DC	
17				音速ノズル	質量	標準器	1:05	OK	100	×	50	E	△	○	H(L)	商用	
18				渦式	カルマン渦	体積	流量計	1:20-100	OK	1	△	50	C	△	○	M(L)	DC
19		スワール渦	体積		流量計	1:30	OK	10	×	50	E	△	○	M(L)	DC		
20		フルイディック	体積		流量計	1:30	OK	10	△	50	C	△	○	M(L)	DC		
21		熱式	マスフロー	質量	流量計	1:30	OK	50	×	150	E	×	○	H(M)	DC		
22			熱線式(分流)	質量	流量計	1:30	OK	10	△	400	B	×	○	H(M)	DC		
23			コリオリ	質量	流量計	1:50	OK	100	×	950	E	×	○	H(H)	DC		
24			MEMS ※2	質量	流量計	1:30	OK	10	△	50	B	△	○	M(L)	電池		
25			フローセンサ ※2	質量	流量計	1:50	OK	10	△	50	B	△	○	M(L)	電池		
26			μフロー ※2	質量	流量計	1:160	OK	1.5	△	500	A	△	○	M(L)	電池		

※1. 法定精度予測とは、器差、測定範囲、温度による誤差、耐久精度等、現行法定計量で定める合格範囲。(A: 現行計量法をクリアできる。 B: 少しの改造等でクリアできる。 C: 大幅な改造等で何とかクリアできる。 D: 大幅改造でもクリアは困難。 E: 計測原理上等によりクリアできない。)

※2. MEMSとはMEMSセンサ全般、μフローとは南山武製、フローセンサとは南山武製μフローを含む流量センサ。

※3. 圧力損失の低減が○は現状のまま可能、△は改造で可能、×は改造でも不可能。

※4. 既存品価格評価は、現行ガスメータに比較して、Hは非常に高い、Mは高い、Lは同等または少し高い。()内は水素ガスメータ化予想価格

2. 既存の（家庭用）ガスメータ

本章では過去に開発されたり、使われたり、現在使用中の家庭用を主とするガスメータの概要、原理構造、性能等の調査結果を示し、水素ガスメータ化する場合の課題と展望および現段階での結論をここに記述する。

2. 1 膜式（乾式）ガスメータ

2. 1. 1 家庭用膜式ガスメータの概要

(1) 膜式ガスメータの沿革

①歴史

1815年、英国の産業革命の時代に最初に、発明されたのは湿式ガスメータであった。いわゆる、水と計量回転ドラムによりガスを置換して計量する方式であった。その後、湿式ガスメータの父として知られている英国サミュエル・クレグは、ロンドンにて最初にドライガスメータ（膜式）の製作を試みた。

1833年、米国のジェームズ・ボガードス（James Bogardus）は、計量回転ドラムの代わりに、油をしみこませた絹の計量膜（ダイアフラム）と滑動弁（スライドバルブ）を使い、角形のブリキケースに内器を入れた乾式ガスメータを作った。しかし、ダイアフラムがあまり良く作動せず、ガスの排出が一定でなかった。また、スライドバルブの作動抵抗が非常に大きくガスの流れを阻害し、乾式ガスメータの基礎を考案したが実用化には至らなかった。

ウィリアム・リチャード（William Richards）は、初め三枚の角形膜と、ロータリーバルブを持ったメータを作ったが、1843年に2つ丸型ダイアフラム、2つのスライドバルブを持った乾式ガスメータを考案し、1844年、リチャードとクロール（Richards & Croll）はさらに改良して特許を取得した。これが現在の乾式（膜式）ガスメータの基礎である。図2. 1. 1-1にリチャード・クロール発明の乾式ガスメータを示す。

それから数年後、英国のRichards-Croll meterをトーマス・グローバー（Thomas Glover）が完全なものにしたために、“グローバー型2-ダイアフラム・スライドバルブメータ”と呼ばれている。このメータはこれまで発明されたガスメータの中でも最もシンプルな機構のものである。その原理は、現在使用されているところの二つの計量膜（ダイアフラム）、二重滑動弁（スライドバルブ）メータである⁷⁾。

②初期のブリキ製膜式ガスメータ

前述のガスメータは、日本でいうブリキ製のA型（B型）メータの基礎であった。その後、欧州では独立内器式の小型高性能乾式ガスメータが1950年代より開発が始まり、実用化に至った。

このメータは、ケースはブリキ板のプレス成形品からなり、計量室は独立した、いわゆる独立式内器メータである。今日においても、欧州ではこの型のメータが主流をなしている。当初内器部品はブリキ材が主であったが、その後アルミダイカスト材や樹脂材が多く使われるようになった。

日本のガスメータで約1世紀の長期に亘り使用された（A型はダイアフラムの形状が異なるだけであり、実質上A型B型も同一型式と考える）B型メータについては以下詳細に記述する。図2.

1. 1-2にB型ガスメータを示す。

ケーシングはブリキ板を板金加工して、全て半田付作業によって組立された。バルブ、バルブシートはホワイトメタル（スズ、鉛、亜鉛合金）からなり、摺動平面度は現代のテフロン入りフェノール樹脂から比べると、非常に粗く微小流量域では、バルブとバルブシートの間には微量のガスが漏れ、器具の口火流量では計量はできなかった。また、その隙間より、ガス種（ガスの比重、粘度）により器差が異なる事より、実験値より一般の空気計量された器差に対して当時のガス（石炭ガス）では、0.4%の器差補正（換算）を行っていた。

計量膜（ダイアフラム）はインド産の羊の皮をなめした毛穴から、ガス洩れを防止するため、特殊なオイルを浸した。また、長期間脱油を防止するために、含浸オイルの開発については、相当の苦労があった。

その後、インド産の羊皮の代わり合成ゴム膜が開発され、作業面および性能面で大きく寄与した。

カウンタはアナログダイヤル式のものであり、素人には積算量を読むことが難しかった。

B型メータは家庭用3灯、5灯から商工業用600灯の大型のものが製作された。このB型メータのガス管への接続はブリキ製でケースが弱いので、配管のストレスが加わらないようにするためにガスメータの配管は鉛管で接続された。やがてこのB型ガスメータはガスメータの小型化や産業の発達によりH型（T型）、NH型を経て、今日ではN型（日本ガス協会統一型）となっている⁷⁾。

③現代のN型&M型マイコンメータ

図2. 1. 1-3はN型ガスメータ本体部を示す。また、図2. 1. 1-4はマイコン搭載M型ガスメータを示す。

N型メータは1975年10月（昭和50年）に開発が完了、N型5号（7号）は1976年12月（昭和51年）に開発完了、天然ガスの本格的採用と相まって全国の家庭に登場していった。これ以降の開発は、口金スパン等のみならず、全ての部品に至るまで日本ガス協会統一規格とした。

その後順次実用化され、全国に普及していった。1機種に約3年の歳月と、ガス会社、メータメーカーの英知を結集し、世界に誇る高性能家庭用ガスメータが完成した。その後実用化して、今も生産、使用している。電話回線を使用した自動検針機能も持っている。

特徴としては、内器と本体が一体化したアルミダイカスト製で、コンパクト、堅牢、組立精度が良い。計量膜は円形皿型、スライドバルブは扇形で、長期安定した性能を維持出来るものである。

また一方、地震の多い我が国に於いて、ガスの安全性能確保のためメータに遮断弁と感震器、圧力センサ、マイコンチップ等をN型メータに搭載したM型メータが1983年より登場し、今日に至っている。いわゆる、電気ヒューズの役割を持たせた、マイコンガスメータである。この安全機能付ガスメータは、我が国独特のものであり、外国では見られない。海外からは、別名を「インテリジェントガスメータ」と呼ばれ、注目されている⁷⁾。

(2) 原理・構造

一般的に膜式ガスメータの計量エレメントは、2つの計量膜に仕切られた4つの計量室からなる。その4室のガス切替をするための2つのスライド弁と2つの膜がタイミングよく連動するための連

動機構と回転を伝達し積算量を表示する積算機能がケーシング内に納まり、構成されている。図2。

1. 1-5は、膜式ガスメータの測定原理図を工程別に示す⁸⁾。図2. 1. 1-5のとおり、ガスはガスメータの入り口金から入り、スライド弁を通り、1つの部屋に入る(吸気)。その反対側の部屋ではガス差圧によって膜が移動する。充滿されていたガスはスライド弁をくぐり出口金に排出される(排気)。もう1つの膜は連動機構により90°位相し、同様にガスを計量するので、比較的ガスをスムーズに連続計量する。膜にかかる差圧は微小で約100Pa以下でガスを計量している。したがって、この膜式メータの性能・精度が安定したのは、この計量膜に依存することが最も大きい。次には、スライド弁に依存する。すなわち、長期安定した摺動抵抗の維持にあるが、これらの材質には、今日いづれも高分子材料を使用することにより精度が向上した。

一方、性能とは直接関係ないが、ケーシング材料はブリキ板の半田付からアルミダイカストに代わり、組立工数の削減および安全性、耐久性の向上が図られた⁷⁾。

(3) 性能

膜式メータの性能を決定するのは、第一に計量膜である。現在計量膜はテフロン繊維基布に、ゴム膜をトッピングし、加硫成形した円形皿型状からなり、永年の研究開発により長期安定した性能を保持できるものである。現在は検定2周期(20年)間使用の実績があり、近年ではさらに10年延長した30年間の使用に耐える耐久性能が検証されている優れたものである。

次に、スライドバルブの機構と材質である。形状は扇形方式を採り、材質は熱可塑性樹脂に耐磨耗材を添加し、長期間安定した負荷抵抗を示す。特に、マイコンメータにあっては、3L/hという微量のガス洩れを検知する能力もある。また、この弁座とスライドバルブが接触する面は、精密に研磨されており水素ガスであっても殆ど洩れることがないので、近年では燃料電池の水素ガス実験評価用としても使われている。

また、家庭用の使用目的を改め、各種ガス流量計の校正用標準器としても多く使用している。器差、耐久性、温度特性等、計量法の特定計量器の規準を満足している。

(4) 水素ガスメータ化への課題と展望

既存の家庭用膜式ガスメータは、計量法に基づいた初期性能は勿論、耐久性能も優れ、信頼性も高く、低コストでしかも永年の計量実績を誇るガスメータである。

水素ガスの計量では実測式のゆえ、空気による校正(器差試験)ができる特徴がある。また、今日水素ガス計量の多くの実績がある(家庭用N型ガスメータを用いたDS型テスト用ガスメータ)。但し、10年間の耐久性の確認が必要である。

膜式ガスメータの家庭用水素ガスメータ化へはコスト、性能、信頼性より最も可能性が高いと推定できる。

水素ガスメータ化の課題を以下挙げる。

- ①計量エレメントである計量ゴム膜の耐水素ガスの耐久性能等の調査確認。
- ②耐久性を視野に入れた、水素脆性とガスシール性に関するケーシング材料やガスケット材の調査研究。
- ③膜式の最大の課題は意匠性と容積が大きいことにある。改造設計をする場合には、小型化の調査検討が必要である。意匠性を含む小型化の具体的提案としては、水素ガスは流体抵抗が小さ

く、バルブ開口面積および流路断面積を縮小化、複式バルブを単口バルブに、併せて、連動機構、弁形状の見直しをする。すなわち、弁線図の見直しによる小型化が可能である。

④小型化はさらに、コスト低減や気密性向上にも繋がるメリットが考えられる。

⑤水素ガス供給中に水分の混入した場合には、体積流量計を計量しているため水分による計量誤差は非常に小さい。その上、既存の膜式ガスメータは水分が混入しても十分に計量でき、故障も非常に少ない。

⑥最高使用圧力が現行法規 10kPa より高い仕様となった場合は、計量法の特定計量器から除外される。したがって、計量法の改正と耐圧ケーシング構造としなければならない。この2点より、膜式水素ガスメータ化への可能性はより厳しいものとなる。当然改造設計計画が必要となる。

2. 1. 2 テスト用膜式(乾式)ガスメータ

(1) 概要

テスト用膜式ガスメータを大きく2つに分類できる。一般的には、家庭用ガスメータのカウンタ部を改造し、アナログ指針を搭載し、細かい計量パルスレート出力が出せるものと、樹脂材を用いた小型・軽量化設計製作したものがある。前者の図2. 1. 2-1は(株)シナガワの家庭用ガスメータを改造したDS-6A型テスト用ガスメータを示す。後者の図2. 1. 2-2は、小型・軽量化を図ったマノメータ付き同社のDC-2型テスト用ガスメータの外観図を示す。両者とも校正は家庭用ガスメータと異なり、厳密に器差試験が行われ、器差値が管理されている。これらのテスト用ガスメータは既に水素ガスの計量に多く使用された実績がある。特徴としては、微小流量を除き、空気でも校正された値(器差)が原理上、水素ガスでも同じ器差値が得られる。

(2) 原理構造

基本的な原理・構造は膜式ガスメータと同じである。ここでは、テスト用に設計開発された、DC型テスト用ガスメータについて記述する。DC-1型テスト用ガスメータはポリフェニレン・サルファイド(PPS)、やポリブチレン・テレフタレート(PBT)のエンジニアリング・プラスチック材がケーシングや計量ユニットに使用されている。また、家庭用と異なる点は、スライドバルブが家庭用の扇形バルブに対して、ロータリ回転式が採用され、小型・軽量化が図られていることである⁹⁾。

(3) 性能

基本的性能、精度については家庭用ガスメータに準ずるのでここでは割愛する。2. 1. 1 (1)項を参照。

(4) 水素ガスメータ化への課題と展望

膜式ガスメータと同じく、水素ガスの計量では多くの実績がある。家庭用膜式ガスメータの水素ガスメータ化を検討する場合の小型化とエンプラ材等の参考となるが、耐久性性能面からすると家庭用膜式ガスメータに集約されることになる。したがって、現在のDC型テスト用ガスメータが家庭用水素ガスメータになる可能性は極めて少ない。

2. 1. 3 耐圧用膜式(乾式)ガスメータ

(1) 概要

基本的な原理・構造は家庭用膜式ガスメータと同じで、圧力容器には膜式ガスメータを内装し、耐圧を向上させたもので、一般に高い圧力のガス量の計測に使われている。実測式であることから空気から校正し、そのまま、種々のガスを計量できる。

(2) 原理構造

基本的な原理・構造はN型膜式ガスメータと同じである。圧力容器に家庭用ガスメータを内装し、マグネットカップリングによって指示機構に伝達表示している。

(3) 性能

基本的に圧力仕様を除き、家庭用膜式ガスメータと同じである。2. 1. 1 (3) 項を参照。

(4) 水素ガスメータ化への課題と展望

家庭用ガスメータの耐圧を超える高い圧力用には実測式として水素ガスの計量に適するが、圧力容器にガスメータを収納するため、高価で、しかも、大きくなるという大きな課題がある。したがって、耐圧用膜式ガスメータは家庭用水素ガスメータとして、コストも含めその可能性はない。

2. 2 フルイディック(流体振動式)ガスメータ

2. 2. 1 概要

(1) 沿革

家庭用フルイディックガスメータは、2世紀にわたり使用されてきた膜式に代わる小型化・電子化ガスメータとして研究開発した。この計測原理は、既に流量計や流体制御素子として確立されていた、コアンダ効果による、流体が壁面に付着する特性を活かし、流体振動素子をベースとした流量計を基本としたガスメータである。(本項では指示ない限り図表等は「温井一光、酒井克人：都市ガスメータの現状、微小流量研究会」に基づく¹⁰⁾)

図2. 2. 1-1はフルイディックガスメータの測定原理図を示す¹¹⁾。大・中流量域はフルイディック素子で計量し、微小流量は熱式流量センサで計量する、小型で意匠性に優れた家庭用ガスメータである。日本におけるフルイディック流体素子流量計の基礎を確立したのは元東京大学山崎弘朗教授らによって1970年代後半より行われた。その後、大阪ガス(株)の河野明夫らによってガスメータ化への研究が行われ、後に、大手ガス3社と既存のガスメータメーカ6社に東洋ガスメータ(株)が参入、さらにセンサ関連として矢崎計器(株)、(株)山武、長野計器(株)、松下電器産業(株)の共同開発として、多額の開発費を投入し共同研究開発が行われた。

1987年までに計量機能の1次試作モデルを開発し、1991年から1993年にかけて1,2次フィールド試験を開始した。その結果を踏まえて、最終の実用化開発したガスメータを1997年からガス3社は、東京、大阪、名古屋において320台の最終フィールドテストをおこなった。既に申請してあった計量法に基づく型式承認を1998年10月に取得した。その後、1998年10月から最大流量6m³/hの

フルイディックガスメータの市場導入を行った。その後、バブル経済の崩壊により膜式ガスメータより高価なフルイディックガスメータの導入を中止し、生産が打ち切られた。図2. 2. 1-2はN5型膜式ガスメータとFD6型フルイディックの比較を示す。最大流量はそれぞれ5m³/h、6m³/hで、マイコン安全機能が両者に搭載されている¹⁰⁾。

2. 2. 2 原理構造

(1) 構成

フルイディックガスメータは図2. 2. 1-1に示す構造を有する。200L/h以上の中大流量域を計量するのは、フルイディック流体素子で、圧力センサにより検出する。切り替え弁で流路を切り替え250L/h以下の小流量域は熱式フローセンサで検出計量するシステムである。また、ガスヒートポンプ等の振動流の影響を防止するために図2. 2. 2-2に示す、圧力変動吸収機構が搭載しているため、非定常流をも膜式と同様に正確に計量できる。

(2) フルイディックの測定原理

フルイディック(流体振動)の測定原理は図2. 2. 2-3に示す、フルイディック素子において、上部のノズルから測定ガスを噴出させるとノズル正面のターゲットに衝突して、左右に流れが偏流する。最初に右側に偏流するとその流れはコアンダ効果により側壁に沿った流れとなり、下部の出口から流出する。また、この流れの一部がノズル部分にフィードバックされると、圧力がノズル部分に伝わり流れ方向が切り替わる。この切り替えは交互に発生し、流量に比例した周波数を持つ流体振動になる。

(3) 微圧センサ

このフルイディック流体振動を図2. 2. 1-1に示すように、噴出口左右の出口近くから取出した圧力変動を差圧センサで検出する。図2. 2. 2-4はMEMS技術で開発した微差圧センサの構造図を示す。

(4) フローセンサ

小流量を計量するフローセンサは図2. 2. 1-1に示すように、ガス噴射口の下部壁に取り付けられている。フローセンサは図2. 2. 2-5に示すような構造を有し、MEMS技術で開発され、1.7mm角で厚さが0.5mmのシリコンチップからなる。このセンサは㈱山武が開発した熱式マイクロフローセンサで、ガスの流れを上流と下流の温度変化を捕らえ質量流量を計量する。

2. 2. 3 性能

フルイディックガスメータは現在の計量法における特定計量器(家庭用ガスメータ)の規格をすべて満足している。なお、LNG都市ガス6m³/h(6号)家庭用フルイディックガスメータの仕様は以下のとおりである。

最大使用流量(Q_{max}) : 6m³/h

大きさ : 180mmW×160mmH×90mmD

器 差 : ±1.5% (流量範囲 $Q_{max} \sim 600L/h$) ±1.5% (流量範囲 $600L/h \sim 300L/h$)
最大検出流量 : 6 から $12m^3/h$
最低検出流量 : 3L/h 以下
圧力損失(天然ガス) : 130Pa(at Q_{max})
付加機能 : 安全機能, 自動検針機能 遠隔遮断弁開閉機能
適応ガス種 : 天然ガス
有効期間 : 10年
電 源 : リチウム電池(10年間交換なし)

2. 2. 4 水素ガスメータ化への課題と展望

現行ガスメータとしての研究開発の実績からしても膜式ガスメータの次に水素ガスメータ化への可能性の確率が高い。可能性への検討には、以下のことが挙げられる。

- (1) 空気、13Aガス、水素ガスによる器差性能比較試験
- (2) 膜式ガスメータに比較して本ガスメータは、コストが少し高い。したがって、コストの低減の検討が必要。例えば、現行微差圧センサのコスト低減を図るか、もしくはフローセンサで流体振動を捕らえるとコスト低減が図れる可能性がある。
- (3) 既存のフルイディックガスメータを、a 未改造、b 一部改造、c 新規設計製作の方向性を確定する調査、研究が必要である。
- (4) 膜式メータ同様に耐久性を視野に入れた、水素脆性とガスシール性に関する金属材質の調査研究が必要である。
- (5) 最高使用圧力が現行法規(10kPa)より高い仕様となった場合は、膜式に比べ比較的容易に耐圧ケーシング構造は可能である。しかし、膜式同様に特定計量器から除外され、計量法の改正が必要となる。

2. 3 タービン式ガスメータ

2. 3. 1 概要

(1) 沿革

1983年より、トキコ(株)で実績のある軸流タービン式メータ(ポッタメータ)の技術をベースに、大阪ガス(株)とトキコ(株)で家庭用小型ガスメータの中核部である計量機構について基礎研究について着手した。

その後、非常に軽い樹脂成型タービン計量エレメントをベースに軸流タービンの構造および性能、回転センサおよび計量電子回路部について研究開発を進めた結果、1986年、家庭用3号ガスメータに匹敵する初期性能が得られ、家庭用ガスメータとしての可能性を見いだした。

その後、ガス会社3社、大阪ガス(株)、東京ガス(株)、東邦ガス(株)が共同開発体制の下で計量部、付加機能、および電子回路部の実用化技術の開発に着手することが確認した。

実用化にあたってさらに広範な技術を必要としており、ガス3社にトキコ(株)を加えさらにガスメ

一タメーカ6社(関西ガスメータ㈱、㈱竹中製作所、東洋ガスメータ㈱、㈱金門製作所、矢崎計器㈱、愛知時計電機㈱)をあらたに追加し、10社体制で1986年10月実用化開発がスタートした。1986年 International Gas Research Conference で世界一小さいガスメータとして、この概要を発表した。その後、家庭用超小型タービン式ガスメータとして完成した。米国AGAへ持ち込み評価も得られた。しかし、構造上ガスが停止してもオーバーメタリングするなどの課題もあり、社会情勢と相まって消費者からのクレームを配慮し、ガス会社が実用化を断念し、新たなフルディック式の開発検討へと進んでいった^{1,2)}。

(2) 原理構造

図2.3.1-1は、マイコン機能等を未搭載の開発初期の試作品の基本構造図を示す^{1,2)}。軸流タービンロータは非常に軽い樹脂成型品からなり、下部からロータを押し上げながら、ロータ上部のわずかの間隙が動圧軸受けとなる構造となっている。またロータにはマグネットが埋められており、回転をマグネットセンサで検出流量を計量する。ガス漏れ検知流量(3L/h)や150L/hの微小流量の検知については、流量を切り替え弁によりロータの接線方向から小口径ノズルから計量ガスを噴射させ微小流量も検知できるようになっている。(本図には顕されていない)。

図2.3.1-2は、マイコン安全機能および、微小流量用切り替え弁が搭載された機能試作品の外観写真を示す。姿勢テスト、ガス密度差テスト、低温度テスト、高温高湿テスト、温度差テストを実施し、確認されている。

2.3.2 性能

機能は当時の3号(3m³/h)家庭用ガスメータの法定計量規格をすべてクリアしている。

姿勢テスト、ガス密度差テスト、低温度テスト、高温・高湿テスト、温度差テストを実施し、フィールドテストも行われ性能が確認されている。当時の課題は急速にガスを止めたときに、ロータの慣性力で僅かオーバーメタリングがあることであった。

2.3.3 水素ガスメータ化への課題と展望

タービン式ガスメータは計測原理上水素ガスの計量も十分可能性がある。また、コスト的にも現在の膜式ガスメータの範疇にあると推測できる。当時、ガス密度差テストを実施しているが水素単体ガスの評価は行っていないと思われるので、水素ガスでの実験評価の必要がある。しかし、それ以前に当時のタービンメータの在庫や、タービンの樹脂成型型の存在確認が必要となる。そして、膜式ガスメータに比べ小型であることが、意匠性を含め大きな特徴ともいえる。

2.4 その他のガスメータ

家庭用超音波式は次章の超音波ガスメータの項で述べる

2.4.1 羽根車式

(1) 概要

都市ガス用ガスメータに続いてプロパン用ガスメータも計量の要求がされるようになった。1960

年代半ばにプロパン用として初めに開発されたのが羽根車式ガスメータであった。当初計量法の検定非対象品であったが、その後計量法が改正され検定対象となった。一時期使われたがその後ガス使用量の増大に伴い膜式ガスメータへと変遷していった。

今日では使われていないが、当時は膜式に比べ圧力損失が高かったがローコストであった。最大流量は $0.5\text{m}^3/\text{h}$ 以下でガバナ付きとメータ単体の2種類があった。当時の検定は膜式7年に比べ羽根車式は6年であった。

(2) 原理構造

羽根車式ガスメータは、シリンダ（LPガスボンベ）の中の高圧ガスを圧力調整器で減圧し、そのガスを口径2mm程度のノズルより羽根車に噴射させて（衝撃タービン式）、その回転がギヤーに連結減速され、すべて機械的に積算計量される。羽根車の回転速度はノズルを通るガス速度に比例したことを原理として計量した。また、圧力調整器と独立したのもあった。

(3) 性能

測定範囲は10L/hから500L/h、性能は当時の計量法をクリアしている。

(4) 水素ガスメータ化への課題と展望

水素の計量が可能で、しかも低コストが魅力であるが、圧力損失、測定範囲について現行の計量法をクリアすることが大変難しいと予測される。要求仕様が変更されても機械式のため、登用の可能性は難しい。

2. 4. 2 回転式

(1) 概要

回転式ガスメータ(流量計)には、ロータリベーン式、ロータリバケット式、歯車式、プローディ式、ルーツ式、オーバル式等がある。今日まで最も多く生産、使われてきた回転式は、ルーツ式である。ルーツ式はガス会社のガス発生量を計量するため、大きな湿式ステーションガスメータに代わって開発され、主に大容量のガス流量計である。今日でもガス会社では多く使われているが、メンテナンス等の課題があり、タービン式等、他の流量計に代わってきており、生産量は大幅に減少している。しかし、高精度であることから今日でも基準器として使われている。現在も実績があるものは、オーバル式である。オーバル式は(株)オーバルが開発、中、小流量用として生産量は少ないが標準器や高精度計量に使われている。本項では、主にオーバル式について示す。

(2) 原理構造

最初に回転式で最も高精度なCVM式を示す。

図2. 4. 2-1はロータリベーン式の1種でCVM式と呼ばれている、その構造図を示す。

このタイプは米国で1950年代に生産開始し、日本では1970年代より輸入して、今日においても大容量基準器として使用している¹⁵⁾。

ルーツ式より脈流が少なく、測定範囲も広く、精度も良い。構造は図2. 4. 2-1 に示すとおり、4枚のベーン（羽根）と一つの小さな回転子、そして円筒形のケーシングからなり、構造上ルーツ式に比べ出口側へのガスリークが少ないので、小流量域の計測範囲も広く、脈流の発生も少ない。

回転式オーバル式は図2. 4. 2-2 に示すとおり、二つの楕円型をした回転子が高速回転をして、ガスを計量する。回転子自体が楕円形ギヤで出来ているので、ルーツ式のようにタイミングギヤが不用である。その分、ルーツ式より圧力損失が低いので、精度が良い。また、回転子内に埋められているマグネットにより回転数を検出計量している。現在回転子に樹脂性のものもある¹⁴⁾。

(3) 性能

オーバル式の性能は以下のとおり示す。

口径15mm、75～1200L/h、精度1%FS、圧力損失、250Pa以下、最高使用圧力は0.97MPa。(オーバル GAL50)

(4) 水素ガスメータ化への課題と展望

回転式ガスメータは回転子間の間隙より、ガスが計量されないでリークする構造であるため、ガス成分により小流量域の器差がマイナスとなる。特に水素ガスの場合は分子が小さいため、回転子間のリーク量が増大するので水素ガスメータには適さない。

オーバル式は家庭用水素ガスメータへの可能性は、回転子間のガスリークと測定範囲、コスト等の課題クリアが難しい。よって、その可能性非常に難しい。

2. 4. 3 湿式ガスメータ

(1) 概要

①沿革

湿式ガスメータは体積式（実測式）流量計の中でも最も古く、英国のサミエル・クレック兄弟により約190年前に発明実用化された。そのときは、もっぱらガス灯のガス消費量の計量に使用していた。

その後変遷を経て、今日では、各種流量計の校正用標準器や、家庭用ガスメータの検定用基準器として年間400万台の家庭用ガスメータを検定にする基準器として使用されている。また、公害ガスの流量やガス機器の燃焼検査用ガス流量の測定に使用、比較的低流量域の標準器として使用されている。その他ガス発生量の計量や、研究室での気体計測に一部使用されている。最近では、燃料電池から発生する水素ガスや酸素ガスの計量の基礎実験にも多く使用されている。このような湿式ガスメータの用途の変遷から、今日では時代と共に生産台数は減少、特にここ半世紀では大幅に減少した。現在、我国における湿式ガスメータメーカーは(株)シナガワが一社となっている。

湿式ガスメータは、ガスの比重、密度、粘度の影響を受けずにこれ等の異なるガス体を正確に計量できることが大きな特徴である。一方、計量回転ドラムにより、水やオイルと置換して計量するため、取り扱いが難しいことと、容積が大きいことが短所である¹³⁾。

(2) 原理構造

①測定原理と構造

湿式ガスメータの構造と作動原理は、図2. 4. 3-1に示す。回転軸を有する円筒形のドラムが図のように立方体のケースの中に取りつけられている。ドラム室に入れられた封液は、ガスが計量されないで素通りするのを防ぐためと、ドラムが回転したときに部屋に閉じ込められたガスを出口側に押し出す役目をする。そのため、機械的な抵抗のほかに、回転速度によって封液の流体抵抗を受ける。その始動圧力は10~30Pa、最大流量で約200Pa程度の小さいエネルギーによって計量される。封液の液面管理がよければ高精度が得られるため、基準器や基礎実験用として広く使用されている。

(3) 性能

①性能・精度

湿式ガスメータは、構造・原理的に計量ドラムの回転と置換封液で通過するガスを計量し、少しのガスも漏らすことなく完全に計測する。すなわち、ガス流量をゼロから計量できる。また、ガスの比重・粘度・密度が変わっても正確に計量できる。取扱い方法を間違わなければ、高い精度のガス流量計測ができるなどの特性を有する。

圧力損失は約20Paから、最大流量でも200Pa以下と比較的低エネルギー損失で計測できる。また、体積・流量を測定する精度（計量法では器差といい、ISO、JISでは誤差という）は、最大流量の約半分の流量近くまでは若干右肩下がりを示し、最大流量近くでは-1.5~-3.0%を示す。基準器仕様タイプでは、-0.5~-1.5%である。表2. 4. 3-1は、実験用の特性を示す。器差の再現性精度は約0.05%と高精度である¹³⁾。

②性能と仕様

(株)シナガワで生産販売している湿式ガスメータの主要な仕様を、湿式基準器 Reference と一般湿式 Experimental ガスメータに分類している。表2. 4. 3-1に実験用の仕様一覧を示す¹⁴⁾。

(4) 水素ガスメータ化への課題と展望

湿式ガスメータは、ガス成分の影響を受けずに、微小のガスをも漏らさず正確に計量できることから、燃料電池の水素ガスの計量基礎実験に多く使われている。しかし、以下の理由で家庭用水素ガスメータには適さなく、その可能性はない。①封液の管理・取扱いが容易でない、その上定期的メンテナンスが必要、②容積が大きい。③コストが非常に高くコスト低減が難しい。

2. 4. 4 ピストン式

(1) 概要

ピストン式流量計は、主に液体用の流量計で、ガスの計量もできるが、今日では使われていない。しかし、原理上高精度が得られることから、この原理を応用展開したピストンルーバとして体積の標準器として使用されている。また、ロータリピストン式も存在するがガス用にはピストン式同様に今日使われていない。

(2) 原理構造

図2. 4. 4-1はピストン式流量計の構造図を示す。シリンダ内に測定ガスを交互に出し入れしてガスを計量する構造である。ピストンを計量膜に換えたのが現在の膜式ガスメータである。原理上高精度であるが、ピストンからのリークや摩擦がネックとなっている。図2. 4. 4-2はロータリピストン式流量計の構造図を示す¹⁵⁾。

(3) 性能

現在ガス用として生産されていないが、レンジアビリティは自力式で1対10、他力式(外部駆動)で1対30程度。

(4) 水素ガスメータ化への課題と展望

ピストン式流量計は、ピストンからのガスリーク、コスト、圧力損失、メンテナンス面からして家庭用水素ガスメータ化への可能性は見出せない。

2. 5 (家庭用) ガスメータおよび流量計の調査結果

2. 5. 1 水素ガスメータ化の可能性の評価

(1) 調査結果および評価

既存のガスメータおよび流量計について、既存のガスメータは最大流量 $1.6\text{m}^3/\text{h}$ を標準に、計量法に基づき項目別に具体的調査結果を記入、水素ガスメータ化の可能性を評価した¹⁶⁾。家庭用ガスメータは過去の経緯から見ても、時代背景からしても価格が最優先すると考え、水素ガスメータとなった場合の推定価格を水素ガスメータ化予測価格として記入した。また、総合判定、水素ガスメータ化への課題、および水素ガスメータ化への展望とその他のコメント欄を設けた。

現状のままでの水素ガスメータ化への調査と評価結果を表2. 5. 1-1にまとめた。その結果、膜式のみが「可能性あり」として選択された。

また、改造開発した場合の同様の可能性について表2. 5. 1-2にまとめた。その結果、ガスメータでは、膜式、テスト用膜式、フルイディック、超音波式、タービン式ガスメータが残った。

流量計ではピトー管をはじめ μ フローセンサ等の8機種が条件つきで可能性ありと選定された。さらに、超音波ガスメータを含む、既存の家庭用ガスメータの可能性について、改造なしと改造ありの場合に分けて評価と考察を試み、表2. 5. 1-3にまとめた。その結果、改造ありでは、膜式、フルイディック、超音波式、およびタービン式が可能性ありと選択された。

(2) 既存ガスメータの可能性評価のまとめ

①改造なしでの可能性あり

既存のガスメータについて改造なしで水素ガスメータ化の可能性を評価した。その結果、膜式ガスメータのみが耐久性の確認が条件つきで「可能性あり」とし選択された。表2. 5. 1-3参照のこと。

②改造なしでの可能性なし

既存ガスメータの水素ガスメータ化の調査結果、改造の有無に関係なく、可能性なしとして評価されたガスメータは、テスト用膜式、耐圧用膜式、回転式、ピストン式、湿式、羽根車式である。その理由は主に、コスト、精度等である。表2. 5. 1-2を参照のこと。

③改造ありでの可能性の有無

超音波ガスメータを含む、既存の家庭用ガスメータの可能性について、膜式、フルイディック、超音波式、およびタービン式は可能性ありとして選択された。表2. 5. 1-3参照のこと。

(3) 結論

①改造なしの場合は、膜式ガスメータのみが水素ガスメータ化への「可能性」がある。但し10年の耐久性の確認が必要である。

②改造ありの場合は、膜式が「可能性あり」、フルイディックとタービン式は「可能性小」、そして、超音波式は既に開発プロジェクトが立ち上げられていることもあり“(可能性あり)”と結論した。

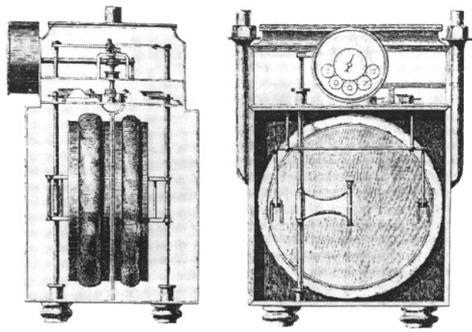


図2. 1. 1-1 1844年 リチャード・クロール発明の乾式ガスメータ⁷⁾

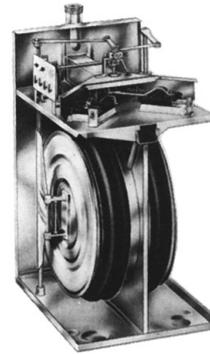
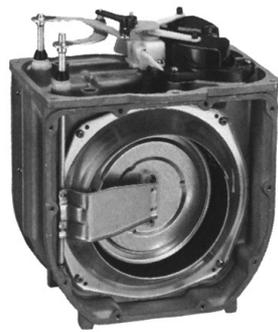


図2. 1. 1-2 B型ガスメータ
(「METERING FOR AMERICA」BY ALFLED LIEF)
より転載⁷⁾



N小型メーターの
計量部

図2. 1. 1-3 N型ガスメータ⁷⁾

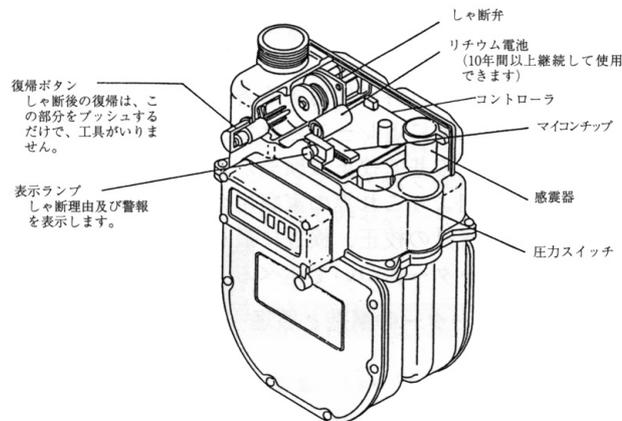


図2. 1. 1-4 マイコン搭載M型ガスメータ⁷⁾

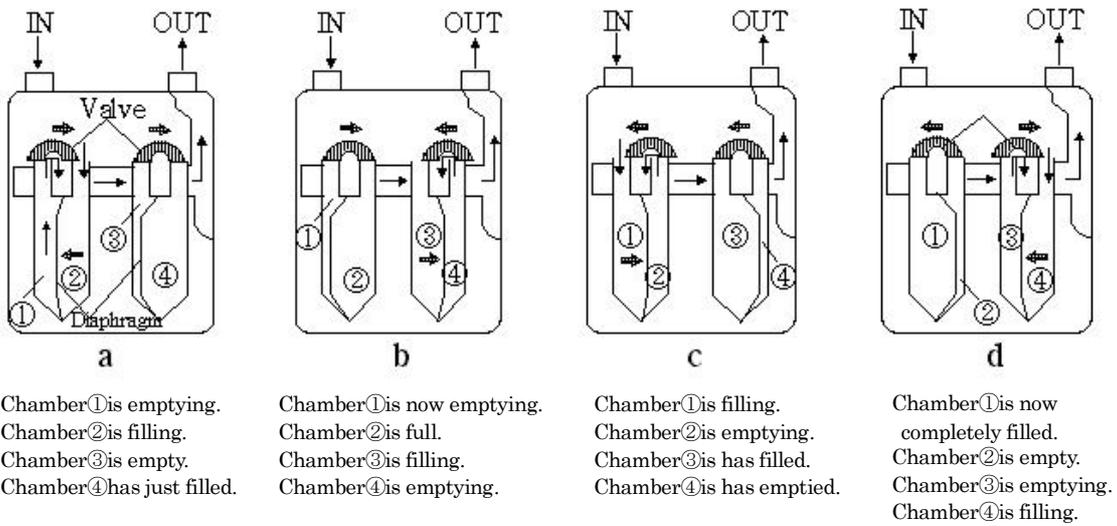


図2. 1. 1-5 膜式ガスメータの測定原理⁸⁾



図2. 1. 2-1 (株)シナガワ
DS-6A 出展: (株)シナガワ カタログ



図2. 1. 2-2 シナガワ社製
DC-2 出展: (株)シナガワ カタログ

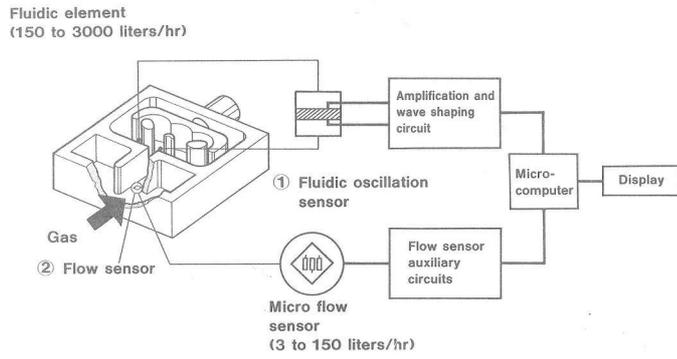


図2. 2. 1-1 フルイディックガスメータの測定原理図
出典：岡林フルイディック¹¹⁾

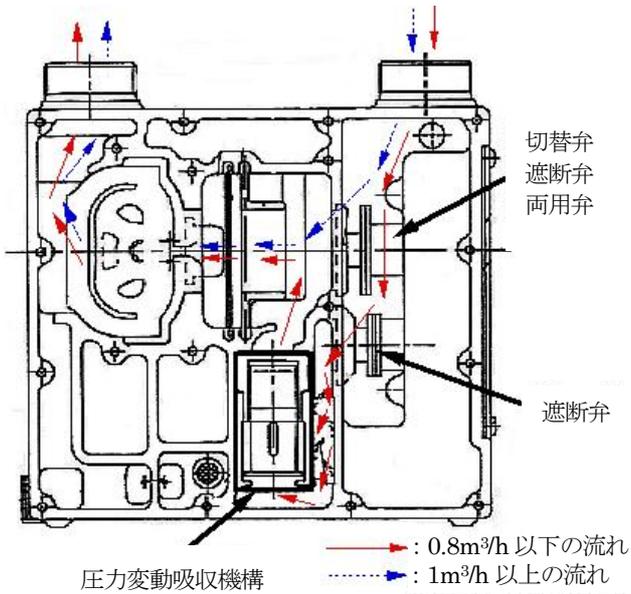


図2. 2. 2-1 フルイディックガスメータの構成¹⁰⁾



図2. 2. 1-2 膜式ガスメータ (左) とフルイディックガスメータ¹¹⁾ (右)

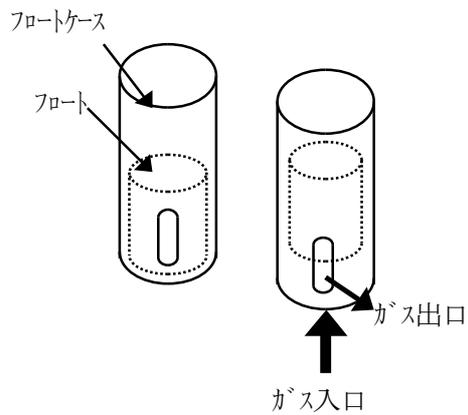


図 2. 2. 2-2 圧力変動吸収機構の構造¹⁰⁾



図 2. 2. 2-3 フルイディック素子¹⁰⁾

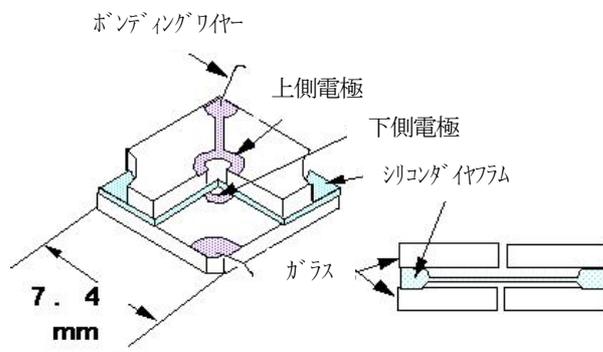


図 2. 2. 2-4 微差圧センサの構造¹⁰⁾

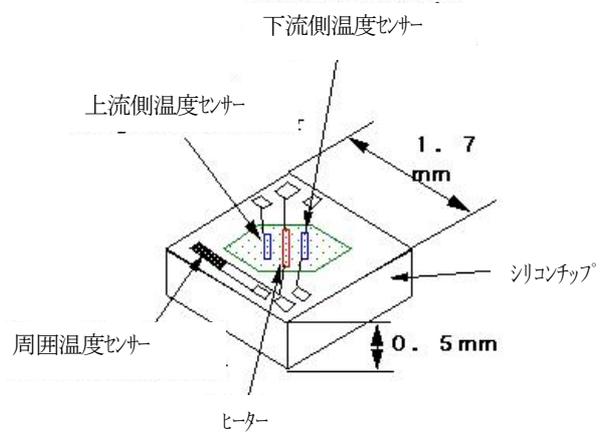


図 2. 2. 2-5 マイクロセンサーチップ¹⁰⁾

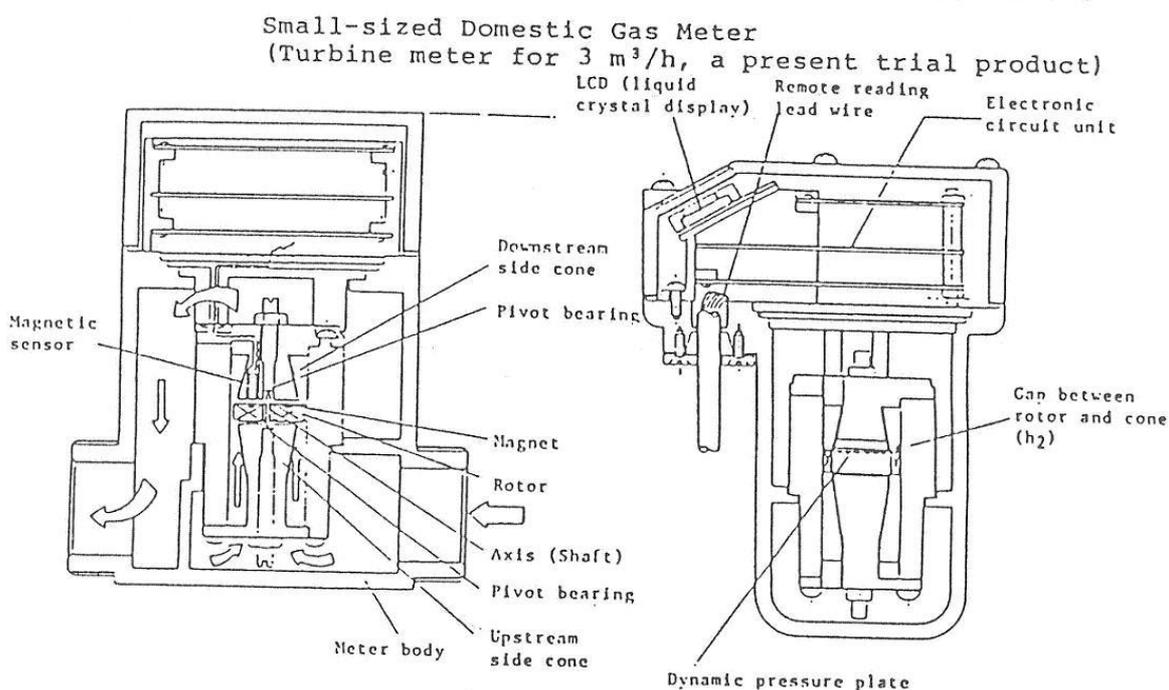


図2. 3. 1-1 タービン式ガスメータ

出展：Y.Morita, Research of Small-Sized Domestic Gas Meter,
International Gas Research Conference, (1986)

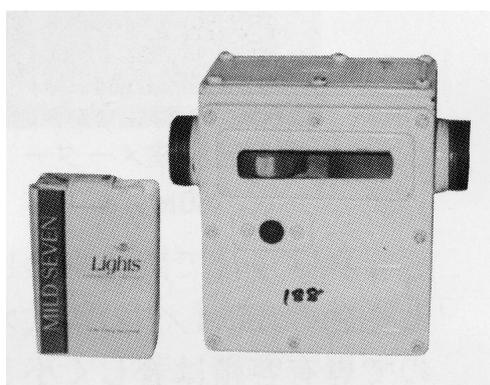


図2. 3. 1-2 タービン式ガスメータ機能試作

出展：小林駿、ガスメータの歴史、(2002. 1)

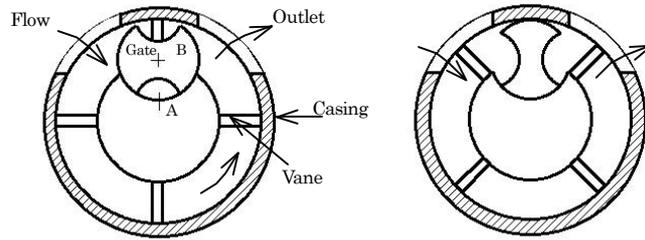


図2. 4. 2-1 CVM meter at two stages in its operating cycle¹³⁾

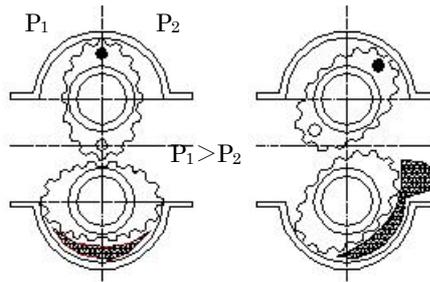


図2. 4. 2-2 オーバル式¹³⁾

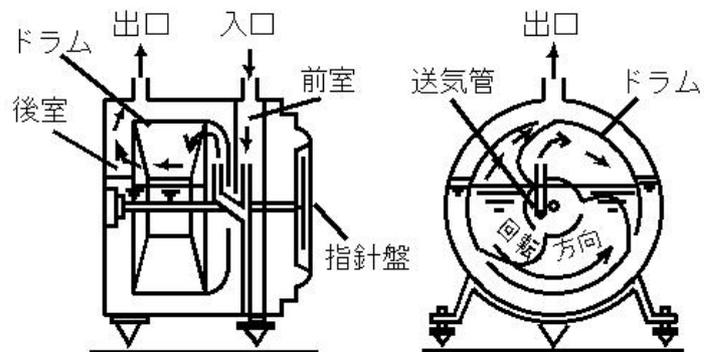


図2. 4. 3-1 湿式ガスメータの原理と構造⁷⁾

表 2. 4. 3-1 実験用湿式ガスメータ 標準仕様 Specification of Experimental Wet Gas Meter¹⁴⁾

ドラム 容量 (L/rev)	測定範囲 (L/h)	指 針 一回転 (L)	最小目盛 (mL)	発信器 (mL/P)	外径寸法(mm)				接続管内 径 (φ mm)
					W・D・H				
0.5	1~300	0.5	1	10	W288	D198	H435	角	9.5
1.0	2~600	1	1	10	W318	D218	H484	角	9.5
2.0	4~1200	2	5	10	W360	D262	H510	角	13
2.5	5~1500	5	20	10	W360	D262	H510	角	13
5	10~3000	5	10	100	W448	D305	H590	角	19
10	20~6000	10	20	100	W537	D372	H678	角	25
20	50~10000	20	100	100	W576	D561	H695	丸	1 1/4B
25	100~10000	50	100	100	W576	D611	H695	丸	1 1/2B
50	150~23000	50	200	100	W720	D712	H871	丸	2B
100	100~10000	100	500	100	W908	D895	H1099	丸	2 1/2B
*WS-1	1~600	1	5	10	W260	D204	H253	角	9.5

注 1. : 標準使用圧力 5kPa
 注 2. : 高使用圧力 10kPa
 注 3. : 使用温度 50°C以下

注 4. : 封液 オイルまたは水
 注 5. : 付属部品 マノメータ、温度計

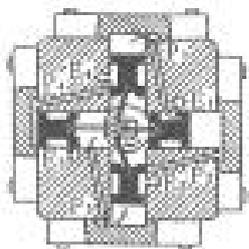


図 2. 4. 4-1 ピストン式流量計の構造図¹⁵⁾

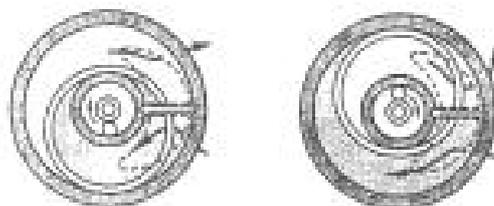


図 2. 4. 4-2 ロータリピストン式流量計の構造図¹⁵⁾

表 2. 5. 1-1 現状ガスメータ及び流量計の水素ガスメータ化の評価

(既存のガスメータ及び流量計が水素メータとして、未改造のままでの使用可能性を評価する)

No.	分類	計量原理・構造	用途(現在)	計測流量	調査出展元		水素ガスに使用時の判定								環境温度	寿命、耐水素ガス性	脈動流対策	対水分	水素ガスメータとしての価格	総合判定	水素ガスメータ化への課題等	水素ガスメータへの展望 その他のコメント		
					機種	サイズ口径	漏洩検知 L/h	流量範囲		計測最大圧力		最大圧損		法定精度予測										
								L/h	判定	kPa	判定	kPa	判定											
要求仕様							3	最大 1m³/h 160-50対 1		2.5		計量法による	計量法による	-5~40℃	10年の耐久性	要否	◎結露OK RH70%以下 結露なし	ガスメータと同等価格						
1	ガスメータ	実測式	乾式	膜式	家庭用	体積	M1.6	3/4B	△	10-1600	○	5	○	0.22	○	A	○	△	不要	○	L	可能性あり	材質の確認	水素計測の使用実績あり、コスト、精度を含め最有力。ただし、10年の耐久性の確認が必要。
2					テスト用	体積	DC1	9mm	△	10-1100	○	5	○	0.32	○	B	○	△	不要	○	M	×	材質の確認	NO.1項の検討で、ケーシング樹脂化等の参考となる。
3					耐用用	体積	DNM2	13mm	△	10-2000	○	97	○	0.22	○	B	○	△	不要	○	H	×	材質の確認	水素ガス評価で実績あり。コスト厳しい。
4				回転式	工業用	体積	GAL50	15mm	×	75-1200	×	97	○	0.22	○	C	○	△	不要	○	M	×	回転子のリーク	オーバル型で可能性はあるが、小流量域が厳しい
5				ピストン式		体積			×		×		○	0.22	○	C	○	△	不要	○	H	×	回転子のリーク	コストを含め難しい
6				湿式	標準器	体積	WNK2	3/4B	○	4-1200	○	5	○	0.3	○	A	○	△	不要	◎	H	×	メンテナンス	水素ガス評価に実績有り。コスト、取り扱いから厳しい
7	流量計	推量式		フルイディック(流体振動式)	家庭用	体積	1.6	3/4B	○	10-1600	○	5	○	0.22	○	B	○	△	不要*	○	L	×	材質の確認	家庭用ガスメータとして完成してる。MEMSセンサ使用、有力
8				超音波式	家庭用	体積	1.6	3/4B	△	10-1600	○	5	○	0.22	○	C	○	△	不要*	○	L	×	大気下での精度	水素ガス流量計が開発中、検討の価値あり
9				タービン式	家庭用	体積	1.6	3/4B	○	10-1600	○	5	○	0.22	○	B	○	△	不要	○	L	×	羽材質確認	20年前に技術は確立している。有力
10				羽根車式	家庭用	体積		1/2B	×	10-500	×	5	○	0.22	○	B	○	△	不要	○	L	×	現在未生産	プロパンメータで過去に実績有り
11	流量計	差圧式		ピトー管	流量計	体積			×	1:50	×		○	0.2	○	C	○	×	必要	◎	H	×	MEMS圧力センサ	精度測定範囲拡大可。水分に強い。
12				層流式	標準器	体積			×	1:30	×		○	10	○	C	○	×	必要	○	H	×	層流管の量産	圧損、コストから厳しい
13				オリフィス	流量計	体積			×	1:10	×		○	10	○	C	○	×	必要	○	H	×	測定範囲	測定原理から難しい。*1
14				Vコーンオリフィス	流量計	体積			×	1:20	×		○	1	○	C	○	×	必要	○	H	×	測定範囲	測定原理から難しい。*1
15				ベンチュリ	流量計	体積			×	1:10	×		○	10	○	C	○	×	必要	○	H	×	測定範囲	測定原理から難しい。*1
16				楕円ベンチュリ	流量計	体積			×	1:20	×		○	5	○	C	○	×	必要	○	H	×	測定範囲	測定原理から難しい。*1
17				音速ノズル式	標準器	質量			×	1:05	×		○	10	○	C	○	×	必要	×	H	×	測定範囲	測定原理とコストから難しい
18	流量計	渦式		カルマン渦	流量計	体積			×	1:20-100	×		○	1	○	C	○	×	必要	○	H	×	測定範囲	MEMS搭載のものも登場している。可能性あり
19				スワール渦	流量計	体積			×	1:30	×		○	10	○	C	○	×	必要	○	H	×	測定範囲	測定原理から難しい
20				フルイディック	流量計	体積			×	1:30	×		○	10	○	C	○	×	必要	○	H	×	測定範囲	No.7項目に同じ。
21	流量計	熱式		マスフロー	流量計	質量			×	1:30	×		○	50	×	C	○	×	必要	×	H	×	圧損、測定範囲	コスト、圧力損失からして厳しい
22				熱線式(分流)	流量計	質量			×	1:30	×		○	10	○	C	○	×	必要	×	H	×	測定範囲	新しい流量計として注目されている。主に大流量用
23				コリオリ	流量計	質量			×	1:50	×		○	100	×	C	○	×	必要	○	H	×	コスト/小流量化	コスト、小流量から厳しい
24				MEMS ※2	流量計	質量			×	1:30	×		○	10	○	C	○	×	必要	▲	H	×	水分混入と精度	新しい流量計として注目されている。
25				フローセンサ ※2	流量計	質量			×	1:50	×		○	10	○	C	○	×	必要	▲	H	×	水分混入と精度	新しい流量計として注目されている。水素計測可能
26				μフロー ※2	流量計	質量			×	1:160	×		○	1.5	○	C	○	×	必要	▲	H	×	小流量化	家庭用のフルイディック GM から展開品、可能性大

1. 法定精度予測とは、器差、測定範囲、温度による誤差、耐久精度等、現行法定計量で定める合格範囲。A：現行法をクリアできる、B：改造等でクリアできる、C：大幅な改造でもクリアできない。 2. 水素ガス使用時の判定は、○は合格の可能性大、△は可能性あり、×は可能性なし。
 3. 材質の確認とは、水素ガスによる脆性、シール性、耐久性能等を意味する。 4. *1コメントは、既存品では難しいが、改良または別のセンサ追加搭載等で測定範囲の拡大が可能と推定。 5. ※2 MEMSとはMEMSセンサ全般、μフローとは備山武製、フローセンサとはμフロー同様のセンサで備山武製以外。
 6. 総合判定の×は可能性なし。 7. 脈動流対策の*は対策済みであるが厳密には要対策。 8. 寿命、耐水素ガス性の○は合格の可能性大、△は改造等で可能性あり、×は可能性なし。 9. 対水分の○は問題なし、△は要対策▲は△より劣る、×は問題あり、計測原理上誤差要因となる等。
 10. 水素化価格予想は現行膜式ガスメータと比較して、Hは非常に高く使えない、Mは高く家庭用としては難しい、Lは同等(改良等により低減できる可能性あり)。 11. 水素ガスの圧力損失は、空気の約1/3になることから判定。

表 2. 5. 1-2 水素ガスメータ化（家庭用）の絞り込み調査後の可能性評価表（再評価） 改造ありの場合

No	分類	計量原理・構造	用途 (現在)	計測 流量	調査出展元		水素ガスに使用時の判定								環境 温度	寿命、 耐水素 ガス性	脈動流 対策	対水分	水素ガス メータ としての 価格	可能性 結論	水素ガスメータ化への課題等	水素ガスメータへの展望 その他のコメント	
					機種	サイズ 口径	漏洩 検知	流量範囲		計測最大圧力		最大圧損		法定 精度 予測									
								L/h	L/h	判定	kPa	判定	kPa										判定
要求仕様							3	最大 1m ³ /h 160-50対1		2.5		計量法に よる		計量法 による	-5~ 40℃	10年の 耐久性	要否	◎結露O K RH70%以下 結露なし	ガスメータ と同等 価格	(改造あり)			
1	ガス メ ー タ	乾式	膜式	家庭用	体積	M1.6	3/4B	△	10-1600	○	5	○	0.22	○	A	○	○	不要	○	L	OK	材質の確認	水素計測の使用実績あり、コスト、精度を含め最有力
2				テスト用	体積	DC1	9mm	△	10-1100	○	5	○	0.32	○	A	○	△	不要	○	L	OK	材質の確認	NO.1 項の検討で、ケーシング樹脂化等の参考となる。
3				耐圧用	体積	DNM2	13mm	△	10-2000	○	97	○	0.22	○	A	○	○	不要	○	H	NG	材質の確認	水素ガス評価で実績あり。コスト厳しい。
4			回転式	工業用	体積	GAL50	15mm	×	75-1200	×	97	○	0.22	○	B	○	△	不要	○	M	NG	回転子のリーク	オーバル型で可能性はあるが、小流量域が厳しい
5				ピストン式	体積			×		×		○	0.22	○	B	○	△	不要	○	H	NG	回転子のリーク	コストを含め難しい
6		湿式	標準器	体積	WNK2	3/4B	○	4-1200	○	5	○	0.3	○	A	○	△	不要	◎	H	NG	メンテナンス	水素ガス評価に実績有。コスト、取り扱いから厳しい	
7	推量式	フルイディック (流体振動式)	家庭用	体積	1.6	3/4B	○	10-1600	○	5	○	0.22	○	A	○	○	不要*	○	L	OK	材質の確認	家庭用ガスメータとして完成してる。 MEMS センサ使用、有力	
8			超音波式	家庭用	体積	1.6	3/4B	△	10-1600	○	5	○	0.22	○	B	○	△	不要*	○	L	OK	大気下での精度	水素ガス流量計が開発中、検討の価値あり
9			タービン式	家庭用	体積	1.6	3/4B	○	10-1600	○	5	○	0.22	○	A	○	○	不要	○	L	OK	羽材質確認	20年前に技術は確立している。有力
10			羽根車式	家庭用	体積		1/2B	×	10-500	×	5	○	0.22	○	B	○	△	不要	○	L	NG?	現在未生産	プロパンメータで過去に実績有り
11	差圧式	ピトー管	流量計	体積			△	1:50	△		○	0.2	○	B	○	○	必要	◎	L	(*OK)	MEMS の圧力センサ	精度測定範囲拡大可。水分に強い。	
12		層流式	標準器	体積			△	1:30	△		○	10	△	B	○	○	必要	○	H	NG	層流管の量産	圧損、コストから厳しい	
13		オリフィス	流量計	体積			△	1:10	△		○	10	○	B	○	○	必要	○	L	(*OK)	測定範囲	測定原理から難しい。*1	
14		Vコネクティブ	流量計	体積			△	1:20	△		○	1	○	C	○	○	必要	○	H	NG?	測定範囲	測定原理から難しい。*1	
15		ベンチュリ	流量計	体積			△	1:10	△		○	10	○	C	○	○	必要	○	H	NG?	測定範囲	測定原理から難しい。*1	
16		楕円ベンチュリ	流量計	体積			△	1:20	△		○	5	○	C	○	○	必要	○	H	NG?	測定範囲	測定原理から難しい。*1	
17		音速ノズル	標準器	質量			△	1:05	△		○	100	×	C	○	○	必要	×	H	NG	測定範囲	測定原理とコストから難しい	
18	流量計	渦式	カルマン渦	流量計	体積		△	1:20-100	△		○	1	○	B	○	○	必要	○	L	(OK)	測定範囲	MEMS 搭載のものも登場している。可能性あり	
19			スワール渦	流量計	体積			△	1:30	△		○	10	○	C	○	○	必要	○	L	NG	測定範囲	測定原理から難しい
20			フルイディック	流量計	体積			△	1:30	△		○	10	○	A	○	○	必要	○	L	(OK)	測定範囲	No. 7 項目に同じ。
21	熱式	マスフロー	流量計	質量			△	1:30	△		○	50	×	B	○	△	必要	×	H	NG	圧損、測定範囲	コスト、圧力損失からして厳しい	
22		熱線式(分流)	流量計	質量			△	1:30	△		○	10	○	B	○	△	必要	×	M	(*OK)	測定範囲	新しい流量計として注目されている。主に大流量用	
23		コリオリ	流量計	質量			△	1:50	△		○	100	×	C	○	△	必要	○	H	NG	コスト/小流量化	コスト、小流量から厳しい	
24		MEMS ※2	流量計	質量			○	1:30	△		○	10	○	B	○	△	必要	▲	L	(OK)	水分混入と精度	新しい流量計として注目されている。	
25		フローセンサ ※2	流量計	質量			○	1:50	△		○	10	○	A	○	△	必要	▲	L	(OK)	水分混入と精度	新しい流量計として注目されている。水素計測可能	
26		μフロー ※2	流量計	質量			△	1:160	△		○	1.5	○	A	○	△	必要	▲	L	(OK)	小流量化	家庭用のフルイディックガスメータから展開品、可能性大	

注) 1. 法定精度予測とは、器差、測定範囲、温度による誤差、耐久精度等、現行法定計量で定める合格範囲。(A:クリア、B:改造でクリア、C:クリア不可) 2. 可能性結論の「*OK」とは、μフローセンサ等の複合センサ搭載により可能性あり、また、「NG?」は要求仕様を変えることで可能性あり。流量計の括弧()はガスメータに比べOKのレベルが低い。 3. 材質の確認とは、水素ガスによる脆性、シール性、耐久性能等を意味する。 4. *1コメントは、既存品では難しいが、改良または別のセンサ追加搭載等で測定範囲の拡大が可能と推定。 5. ※2 MEMSとはMEMSセンサ全般、μフローとは株式会社武蔵、フローセンサとはμフロー同様のセンサで株式会社武蔵以外。 6. 水素ガス使用時の判定、○:合格の可能性大、△:改造等で可能性あり、×:可能性なし。 7. 対水分の、○:問題なし、△:要対策、▲:△より少し劣る、×:問題あり・原理上誤差要因となる等。 8. 水素化価格予想は現行膜式ガスメータと比較して、H:非常に高く使えない。 M:高く家庭用としては難しい。 L:同等(改良等により家庭用の価格には低減できる可能性あり)

表2. 5. 1-3 家庭用水素ガスメータの可能性評価 (ガスメータ改造の有無) (評価基準は表2. 5. 1-2参照)

No	分類	計量原理構造	主計測分類	現状のガスメータのまま、改造なしの場合の評価と考察						改造・開発ありの場合の考察		
				法定精度予測	耐水素ガス10年の耐久性	脈動流対策	現状価格	水素ガスメータ化の可能性評価	①評価判定理由 ②水素ガスメータへの展望・コメント	水素ガスメータ化の可能性 総合評価	総合評価の判定理由と特徴その他のコメント	
①	ガ ス メ ー タ	実 測 式	膜式 (家庭用)	体積	A	△	不要	L	可能性あり	①原理的には可能性あり ②圧力 10kPa 以下では、水素計測の使用実績あり、コスト、精度を含め最有力。ただし、耐久性等の確認が必要。	可能性あり	①水素計測の使用実績あり (実験室の計測、燃料電池評価) ②現状のガスメータの使用の可能性あり (計測原理が実測式でありガスの性質が異なっても体積を正確に計測できる) ③10年の耐久性は不明だが、コスト、精度を含め最有力
③			フルイディック (流体振動式)	体積	B	△	不要*	L	×	①現在未生産 ②家庭用ガスメータとして完成している。MEMS センサ使用、有力	可能性小	①家庭用ガスメータとして完成している ②圧力検出部をMEMS センサとすることでコスト低減が望める。 (流体素子で計測、微小流量はμフロー) ③膜式について有力
④			超音波式	体積	C	△	不要*	L	×	①大気下での精度 ②現状の家庭用超音波ガスメータでは水素計測はできない。	(可能性あり)	①LNG 家庭用ガスメータとしてはほぼ完成 ②高圧水素ガス流量計が開発中 ③H17 水素ガスメータ開発プロジェクト (九大)
⑤			タービン式	体積	B	△	不要	L	×	①現在未生産 ②20年前に技術は確立している。有力	可能性小	①20年前に技術は確立している。 (特殊な樹脂製タービンで計量、微小流量は切り替えてノズルより噴射) ②小型低コスト
			推 量 式									

3. 水素ガスメータ化の難しい既存流量計（原理上水素ガスメータ化が難しい）

本節では既存のガス流量計で水素ガスメータとして対応しくない、流量計の概要、原理構造、性能等を述べ、水素ガスメータ化する場合の課題と展望および現段階での結論をここに記述する。

3. 1 層流式流量計（差圧式）

3. 1. 1 概要

流体の流れの状態には層流と乱流がある。層流状態のときはレイノルズ数が 2300 より小さい、すなわち遅い流量の状態や、流体の粘性が高い場合をいう。渦の発生がない流れで、流量が圧力損失に比例する。乱流状態では速い流量でレイノルズ数が 2300 を超え渦が発生し、流量が圧力損失の二乗に比例する特性がある。層流式流量計はその特性を利用して、細管内の圧力損失を計測し瞬時体積流量を計量する。

計測原理からして圧力損失はやや高いが高精度が得られ測定範囲が広い、小流量の標準器として使われている。また構造上コストが高い。標準器の場合温度圧力センサを搭載しノルマル流量に換算し質量流量と等価にして使用している。

3. 1. 2 原理構造

層流式流量計の測定原理は、細管内の両端の圧力差を測り流量を計測する方法である。細管内の流れがハーゲン・ポアズイユ流れであるため生じる圧力差と体積流量は線形関係にある。すなわち、流量は圧力損失に比例する。図 3. 1. 2-1 は層流式流量計の差圧発生部の構造図を示す¹⁷⁾。

3. 1. 3 性能

圧力損失は 1kPa、精度 1%、直線性 0.5%、測定範囲は 30 から 100 対 1 でほぼゼロから計測できる。
(司測研 L E F シリーズ)

3. 1. 4 水素ガスメータ化への課題と展望

層流式流量計は精度が高く、流量範囲も広いが、構造上コスト低減が非常に難しく、家庭用水素ガスメータ化への可能性は少ない。

3. 2 Vコーンオリフィス流量計（差圧式）

3. 2. 1 概要

Vコーンオリフィス流量計は 1986 年米国のケテン社マッククロメータ部門が開発した製品で日本では東京計装㈱が製造販売している。オリフィス流量計に比べ、流体の渦発生が少なく、圧力損失も小さい。したがって、測定範囲も広く、大流量流用に適している。Vコーンオリフィス流量計はオリフィスに代わって円すい絞り構造を有する。

3. 2. 2 原理構造と特徴

(1) 測定原理と構造

V コーンオリフィス流量計は、図3. 2. 2-1に示すような断面構造を示す¹⁸⁾。従来オリフィスのプレート部分を流れに沿って円錐状にすることで、整流効果やエネルギー損失の低下を特長とする流量計である。

測定原理は、オリフィス流量計と同じで、ベルヌーイの定理に基づき、絞り長径比 β は $\sqrt{(D^2 - d^2)/D)}$ で与えられる。

(2) 特徴¹⁸⁾

①短い直管部：オリフィス流量計に比べ、1/5と短い。直管部が短いので設置スペースが狭くてよい。

②広いレンジアビリティ：流体が絞り部を通過した後、発生渦がオリフィスに比べて小さいため、差圧信号に対するノイズ信号が小さく、差圧出力が安定している。そのため、10～14対1のレンジアビリティを可能にしている。

a) 低圧力損失：オリフィスに比較して約1/2の圧力損失で済む。

b) 精度：指示値の±0.5%である。

c) 磨耗、付着に強い：オリフィスのようにエッジ部がないので磨耗による精度劣化がない。また、流体に付着物があっても構造上付着しにくい。これらのため長期間安定性能が得られる。

d) 実流体校正：V コーンオリフィス流量計は、多くの特長を有するが流量校正試験にあつてはJIS規格から外れているのでウェット・キャリブレーションが必要である。したがって、校正費用はオリフィスに比べ高い。

3. 2. 3 性能

精度：±0.5%、再現性：±0.1%、レンジアビリティ：10～14対1。

3. 2. 4 水素ガスメータ化への課題と展望

V コーンオリフィス流量計の家庭用水素ガスメータ化へは、測定範囲が狭い、構造上小型化が難しいおよび、コスト低減が難しいことから可能性は極めて厳しい。

3. 3 ベンチュリ流量計（差圧式）

3. 3. 1 概要

ベンチュリ流量計には円すい形ベンチュリ管とノズル形ベンチュリ管があるが、前者は一般的である。円すい形ベンチュリ流量計の構造図を図3. 3. 1-1に示す。構造上流れを乱すことが少ないので、圧力損失は少ないが、直管長が長く必要で設置スペースを多く必要とする欠点がある。また高価で、大流量用流量計である。また、オリフィス同様JISで規格されており、信頼性も高い流量

計である^{19、20)}。

3. 3. 2 原理構造

ベルヌーイの定理に基づく差圧式流量計で、図3. 3. 1-1で示すように、極めて簡単な構造を有する流量計である。

3. 3. 3 性能

最大流量は、同一絞り比でオリフィスに比べ約1.6倍流量が流れる。圧力損失はオリフィスに比べ1/4から1/6小さい。流出係数Cの不確かさは0.7%から2%で、オリフィスに比べ大きい、すなわち精度はやや悪い。レンジアビリティは5対1程度である。

3. 3. 4 水素ガスメータ化への課題と展望

ベンチュリ流量計の家庭用水素ガスメータ化へは、測定範囲が狭い上、構造上設置スペースが広くなる等の大きな課題を有している。設置スペースについては他の楕円ベンチュリ流量計がこの課題を解決している。よって、本流量計の水素ガスメータ化は、可能性は極めて難しい。

3. 4 楕円ベンチュリ流量計（差圧式）

3. 4. 1 概要

(1) 概要

楕円ベンチュリ流量計は、ベンチュリ絞りに代わって流路に楕円形状のテーパの絞りを設け、絞りの前部と絞り部分との差圧を測定する絞り式流量計で、(株)山武が開発商品化したもので、商品名を「楕円スロート流量計」と呼んでいる。

測定流体の気体は勿論蒸気、パウダーなどを含む固気二相流体および液体が可能である。

特徴として、差圧を取り出す動圧孔と検出部は、付着物が溜まりにくい構造を有し、規格化オリフィスに比べて圧力損失が約2分の1小さい。また、測定範囲がオリフィスに比べ1対10と約2倍広い。図3. 4. 1-1は断面構造図を示す。

3. 4. 2 原理構造

(1) 測定原理

楕円ベンチュリ流量計は図3. 4. 1-1に示すようにベンチュリ絞り構造に代わって楕円形状の絞り構造を有し、ベルヌーイの定理に基づく差圧流量計である²¹⁾。

(2) 特徴

楕円ベンチュリ流量計には以下の特徴を有する²¹⁾。

- ①低圧力損失： 同一絞り比のオリフィスと比較して、1/2 以下の低圧力損失。
- ②必要直間長の低減（メータランの低減）： 楕円絞り構造の副次的効果として、整流効果があり、メータランが上流直間長は通常オリフィスの 1/7 以下である。
- ③ダストに強い： 2 分の 1 楕円形状の滑らかな流線により、配管内の詰まりを防止できるので精度の低下防止できるとともにメンテナンス周期の延長をも可能にした。
- ④広いレンジアビリティ： 低流速から高流速までオリフィスに比べ約 1 対 10 の広いレンジアビリティで安定した流量指示が得られる。
- ⑤安定した計測の実現： 2 分の 1 楕円の絞り構造より、流れが滑らかになり下流発生渦も少なく、安定した差圧が発生できる。すなわち、再現性に優れた流量指示が得られる。

(3) 性能

精度はレイノルズ数により異なるが 0.75%~1.25%にある。口径は 25 A から 150 A。

(4) 水素ガスメータ化への課題と展望

楕円ベンチュリ流量計の家庭用水素ガスメータ化へは、測定範囲が狭い、構造上小型化が難しい。また、コスト低減が難しいことからその可能性は極めて難しい。

3. 5 音速ノズル流量計（差圧式）

3. 5. 1 概要

ベンチュリ管で気体流量を測定する場合、差圧がある程度以上になると流れはチョークし、通過する流量は差圧に関係なく、下流の影響を受けることなく、上流の状態のみで決まる。この現象を利用したのが音速ノズルという。この原理を用いた流量計は質量流量計である。したがって高純度の窒素ガス等を用いている。測定ガスが変わるとそのガス専用の音速ノズルが必要とする。計測機器を含めるとコストは非常に高い。なお、非常に精度がよいことから、国家流量標準器として近年多く使われるようになってきている。流れてきた流量は測定できないので本来流量計ではなく、標準流用発生器である。

3. 5. 2 原理構造

図 3. 5. 2-1 は音速ノズルの原理図を示す。上下流の圧力比が $1/2$ を超えると流れは音速となり一定流量が流れる。音速ノズルは測定原理上、流量計の中で最も圧力損失が高いが精度は最高位にあり、国家標準器として使われている²²⁾。

3. 5. 3 性能

付帯する機器にもよるが、精度は 0.2% 以下で、再現性は 0.02% 程度。測定範囲は極めて狭いが精度は最高に高い。

3. 5. 4 水素ガスメータ化への課題と展望

音速ノズル流量計では、既に水素ガスの計測を行なっているが、測定原理とコスト面から、家庭用水素ガスメータへの可能性はあり得ない。

3. 6 スワール渦流量計（渦式）

3. 6. 1 概要

スワール渦の力や渦の数を計測して流量を計測するが、現在は流量計として殆ど使われていない。スワール渦はガソリンエンジンの空気とガソリンの混合器等、燃料噴射に多く使われている。

3. 6. 2 原理構造

図3. 6. 2-1はスワール渦流量計の測定原理図を示す。

3. 6. 3 性能

圧力損失が高いが再現性精度は高いとされている。明確なデータは見当たらない。

3. 6. 4 水素ガスメータ化への課題と展望

スワール渦流量計は、測定範囲等から水素ガスメータへの可能性は極めて難しい。

3. 7 マスフロー流量計（熱式質量）

3. 7. 1 概要

熱式流量計の一種で、流量制御を搭載したいわゆるマスフローコントローラとして半導体製造等に多く使用されている。質量流量計で高価で高精度であるが圧力損失が大きい。質量流量計であるので、ガス成分の変動や水分が混入すると誤差増大となることから、計量ガスは純度の高いドライガスに限る。

3. 7. 2 原理構造

図3. 7. 2-1は気体微小流量用のマスフロー流量計を示す。フローエレメントとして細い層流管の差圧から分流した毛細管のヒータ熱の消費電力量が流量に比例の関係にあることから流量を求める。

3. 7. 3 性能

レンジアビリティは1対30～100程度、精度は2%RD、再現性は0.2%。

3. 7. 4 水素ガスメータ化への課題と展望

マスフロー流量計は、構造上圧力損失が高い、水分混入に弱く、コスト低減が難しいことから、家庭用水素ガスメータ化への可能性は極めて難しい。

3. 8 コリオリ流量計（質量）

3. 8. 1 概要

コリオリ流量計は、まったく新しい“コリオリ”力で質量流量を直接計量する流量計で、価格は非常に高いが高精度なため、主に大容量用の液体用流量計または、高圧のガス流量計として、近年生産量も増えてきている流量計である。最近では7.5MPa高圧水素のガスの流量計としても使われてきている。また、微小用の製品も開発商品化されているが、構造上圧力損失が高く、価格が高いことからガス計量には殆ど使われていない。

3. 8. 2 原理構造

（1）測定原理

コリオリ流量計の原理図を図3. 8. 2-1に示す。図3. 8. 2-1に示すように、流体が流れるU字形のチューブは外部から励磁され、チューブのばね定数と、チューブおよびチューブの中の流体の質量によって決まる固有振動数で振動している。一種の片持ち梁であり、このU字管は先端にいくほど振幅は大きくなる。そのため、流体はその根元から先端の方に進むにつれ、垂直方向の速度が増加していく。すなわち、流体のある部分をとれば、チューブから垂直方向の加速度を受けていることとなる。一方、ニュートンの第二法則より、質量×加速度は力に他ならないので、U字管が流体に対し力を与えられていることになる。流体には慣性があり直進しようとしているので、流体からU字管に対し反力が働く。これをコリオリの力という。このねじれ角 θ は質量流量に比例するので、これを検出して質量流量を計量することができる^{2,3)}。

3. 8. 3 性能

気体と液体で精度が異なり、メーカーや型式でも異なるがM社CMFシリーズでは、レンジアビリティ100対1で0.65%～3.25%、20対1で0.35%～0.001%RD程度である。また圧力損失は0.06MPa～0.1MPaと高い。

3. 8. 4 水素ガスメータ化への課題と展望

コリオリ式流量計は、広い計測範囲で高精度が得られるが、圧力損失が非常に高いことと、コストが高くコスト低減の可能性は見出せない。よって、家庭用水素ガスメータ化への可能性は極めて厳しく、不可能といえる。

3. 9 調査結果

3. 9. 1 水素ガスメータ化の困難な既存流量計の調査と評価

(1) 調査と評価結果

計測原理上を主に既存のままで水素ガスメータ化の困難な流量計を挙げ、表2. 5. 1-2の調査結果に基づき評価した結果を表3. 9. 1-1にまとめた。ここに取り上げた流量計はいずれも家庭用水素ガスメータ化の現時点での可能性はないといえる。

(2) 結論

既存の流量計にあつては、主にコストによる評価が重く、層流式、Vコーンオリフィス、ベンチュリ、楕円ベンチュリ、音速ノズル、マスフロー、コリオリの7機種は家庭用水素ガスメータ化の可能性は非常に厳しい。

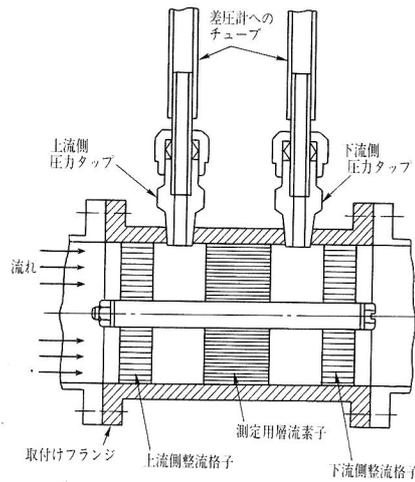


図3. 1. 2-1 層流式流量計の差圧発生部¹⁷⁾

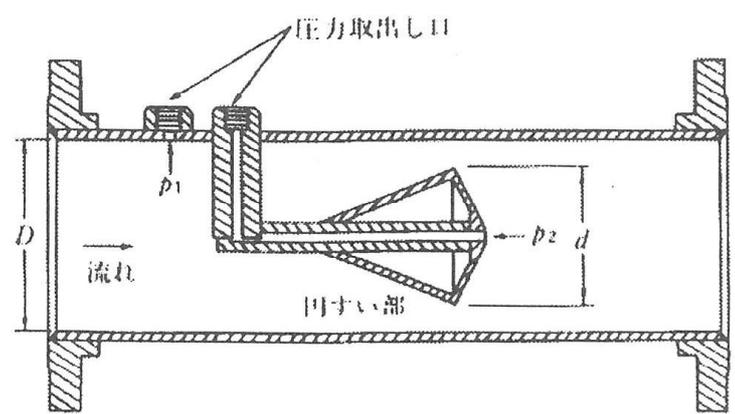


図3. 2. 2-1 Vコーンオリフィス流量計断面図¹⁸⁾

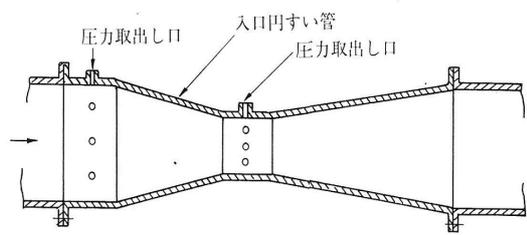


図3. 3. 1-1 円すい形ベンチュリ流量計の構造図¹⁹⁾

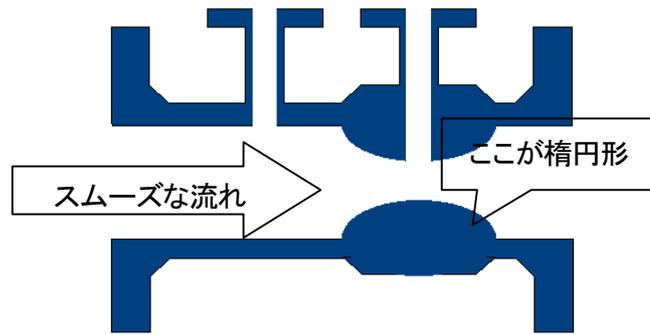


図3. 4. 1-1 楕円ベンチュリ流量計断面図^{2 1)}

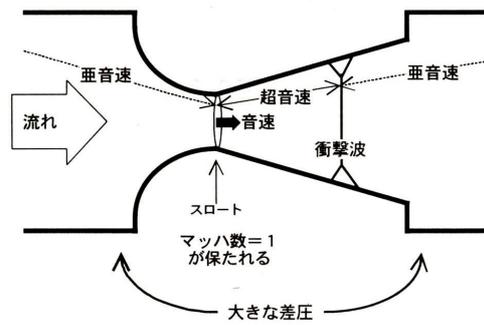


図3. 5. 2-1 音速ノズルの原理図^{2 3)}

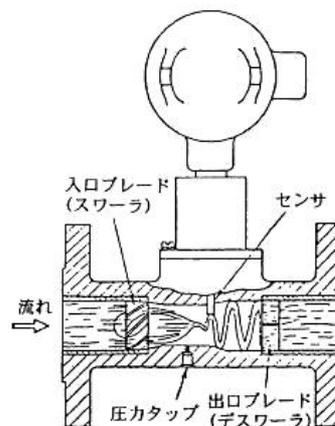


図3. 6. 2-1 スワール渦流量計の原理図^{2 4)}

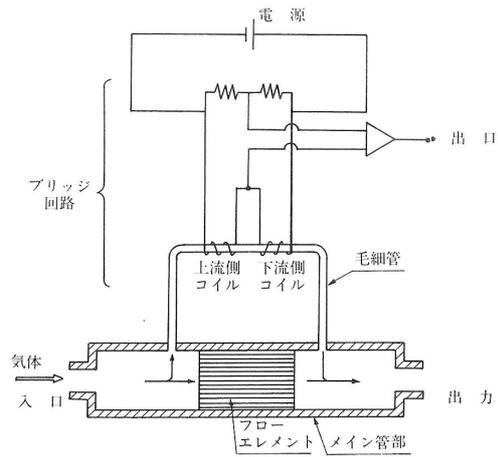


図3. 7. 2-1 気体微小流量用のマスフロー
ー流量計の原理構造図^{2.4)}

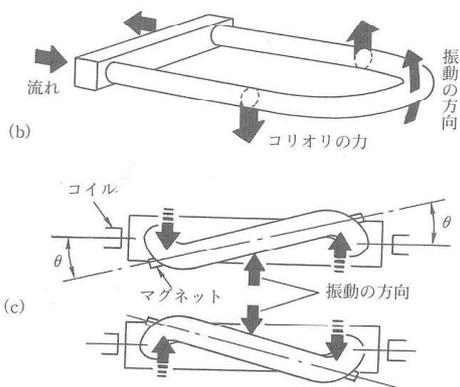


図3. 8. 2-1 コリオリ流量計の原理図^{2.3)}

表 3. 9. 1-1 水素ガスメータ化の困難な流量計の評価と考察

No	分類	計測原理	計測流量	測定範囲	最大圧力損失	対水分	水素ガスメータとしての価格予測	総合判定	水素ガスメータ化への課題等	水素ガスメータへの展望 その他コメント
12	差圧式	層流式	体積	1:30	10kPa	○	H	×	コスト	圧損, コストから厳しい
14		V コーンオリフィス	体積	1:20	1kPa	○	H	×	コスト	測定原理から難しい. *1
15		ベンチュリ	体積	1:10	10kPa	○	H	×	コスト	測定原理から難しい. *1
16		楕円ベンチュリ	体積	1:20	5kPa	○	H	×	コスト	測定原理から難しい. *1
17		音速ノズル	質量	1:05	100kPa	×	H	×	コスト	測定原理とコストから難しい.
21	熱式	マスフロー	質量	1:30	50kPa	×	H	×	コスト	コスト, 圧力損失からして難しい
23		コリオリ	質量	1:50	100kPa	○	H	×	コスト	コスト, 小流量から難しい

1. 対水分 ○:問題なし、×:問題あり(測定原理上使用できない)
2. 水素ガスメータとしての価格予測のHは現膜式ガスメータの価格に比べ非常に高く水素ガスメータ化は不可能。
3. 総合判定の×は水素ガスメータ化が不可能。
4. *1は複合センサ等で測定範囲の拡大の可能性あり。

4. 開発中および今後予測される水素ガスメータ

本章では現在開発中または今後予測される家庭用ガスメータおよび流量計の概要、原理構造、性能等を述べ、水素ガスメータ化する場合の課題と展望および現段階での結論をここに記述する。

4. 1 超音波式ガスメータ

4. 1. 1 概要

(1) 超音波流量計の沿革

音波を利用して液体やガスの流速を測定する着想は古くからあったが、1950年頃まではあまり進歩がなかった。1955年米国で、航空機用流量計など減衰の少ない液体用に始めて実用に供された。1970年代にIC技術の進歩により広く使われるようになり、その後1974年に気体用にも採用され、今日に至っており、さらなる電子技術の発展にともない多く広く使われている²⁴⁾。

(2) 家庭用超音波ガスメータの沿革

家庭用超音波ガスメータは1980年代に欧州で開発され1990年よりイギリスのBG社で膜式に代わり、10%に当たる200万台が取り付けられた。電力とのエネルギー競合により、BG社は1994年規制緩和政策実施により、膜式メータのコストダウンが進み、膜式へと回帰していった。2002年には生産を中止し現在はすべて膜式に回帰している。ガスメータ固体のコストだけでなく、もう1つの理由として、超音波ガスメータは電池寿命が10年に設計されていたが、5~6年で電池切れや、液晶表示消え等のトラブルの対応に多くの人件費が費やされたようである。しかし、超音波メータの性能は膜式と同等もしくは上回っていたようである。なお、現在欧州の膜式ガスメータは日本の膜式ガスメータより性能・長期安定性でやや劣っている^{25、26)}。

(3) 家庭用超音波ガスメータの開発

1990年代にはいと、わが国でも超音波ガスメータ研究開発が開始された。わが国では1998年電子化フルイディックガスメータの導入中止を機に、これまでのガスメータメーカーの共同開発の枠を外したコンペ方式で超音波ガスメータが開発商品化した。2005年には完成、翌年型式承認も取得、部分的導入を開始した。コンペ方式のためか、情報が公開されていないが、高圧ガス誌にLPG用超音波ガスメータが紹介されている。記事によると、超音波センシング方式は実績のある欧州のWパスも検討したが低消費電流特性に優れたZ方式を採用している。これは低流量測定にも優れており、かつ大容量への展開も可能にしている。また、ガス漏れ検知流量3L/hの検出速度が膜式に比べ速いことが特徴である²⁷⁾。図4. 1. 1-1は、前方が日本の家庭用超音波ガスメータで、後方はN型膜式ガスメータである。

4. 1. 2 原理構造

流体の流れの中で音を出すと流れに沿った音は早く着き、流れに逆流する音は遅く着く。超音波流速計はこの原理を使ったもので、気体用の音源の周波数は20kHzから400kHzが一般的である。測定方法として、時間差法、ビーム偏位法やドプラー法等がある。図4. 1. 2-1において上図は超音波ガスメータの測定原理図を示し、下図は流体の流れと超音波の伝播速度の関係式を示す。超音波センサではガス流速 U を求める際、変数として伝播時間 $T1, T2$ ガス温度で変化する音速 C があるが、往

復で測定を行なうことにより温度（音速）に影響されず、到着時間（T1, T2）のみを計測すれば流速を容易に求めることができるという特徴があり、温度の補正が不用となる利点もある²⁷⁾。

超音波流量計の最大の特徴は、膜式に比べ流体計測部に稼動部分がない。また、圧力損失が非常に小さく、計測範囲が広いことである。

4. 1. 3 性能

計量法の型式承認に適合しているので膜式と同等の性能を有する。

4. 1. 4 水素ガスメータ化への課題と展望

現在高圧水素ガスの超音波流量計は開発され商品化されたばかりだが、水素ガス計測にあっては精度上疑問視されながらも注目を集めている²⁸⁾。現在商品化された家庭用超音波ガスメータがそのまま簡易な改造で水素ガスの計量ができる可能性は極めて少ないと推定する。その理由として、LNGやLPGと水素ガスの成分（粘性、密度、音速）が大きく異なっているためである。

現行の計量法、特にガス漏れ検知流量等や微小流量を、コスト・パフォーマンスとしてクリアすることは非常に難しいと思われる。よって超音波ガスメータの家庭用水素ガスメータ化への可能性は難しいと推定する。しかし、要求仕様の変更等があれば可能性も考えられる。水素ガスメータ化への課題として以下挙げる。

- (1) 空気、13Aガス、水素ガスによる器差性能比較試験の実施。現行超音波ガスメータが使えるか否かの評価。
- (2) 大気圧下での超音波計測の基礎研究開発による、可能性を見極める。
- (3) 管路、センサ、および計測システムの確立調査、研究、開発。
- (4) 膜式メータ同様に耐久性を視野に入れた、水素脆性とガスシール性に関する金属材料やシール材料の調査研究。
- (5) 最高仕様圧力が現行法規 10kPa より高い仕様となった場合は、水素ガスメータ化への可能性は増大する。また、膜式に比べ比較的容易に耐圧ケーシング構造は可能である。

なお、文科省傘下で、課題分類「需要家用水素計量システムに関する研究開発」課題名「需要家用水素計量システムの研究開発」研究代表者「九州大学、古川雅人教授」で、水素ガスメータの研究開発が平成17年度より3年計画でプロジェクトがスタートしている。よって研究開発費と時間を費やせば、水素ガスメータ化への可能性がないとはいえない。

4. 2 差圧式・ピトー管流量計

4. 2. 1 概要

(1) 沿革

管路を絞らずに差圧で流量を測定する方法として、ピトー管を用いた流速・流量計測が有名である。ピトー管は、1732年フランスの物理学者ヘンリー・ピトー（H. Pitot, 1695～1771年）が発明、水の流速や船の速さを測定するのに最初に使用した。

ピトー管を使用した流量計は、配管内にピトー管を挿入するだけで、低圧力損失で容易に流速・流量計測ができることから、世界中で多く使用されるようになっていった²⁹⁾。

しかし、本質的に配管内の流速測定は一点のため、流量測定用としては使いにくい面もあった。

そこで1966年米国のデータリック・スタンダード社 (Dieterich Standard 以降D. S社という) は平均化ピトー管を考案し、それから工業用に多く使用されるようになっていった。このタイプの流量計を一般的に「アニューバ流量計」と呼んでいる²⁹⁾。

(2) 概要⁽⁵⁾⁽⁶⁾

ピトー管差圧流量計は配管内にピトー管を挿入し、圧力を取り出すだけでベルヌーイの定理に基づき比較的容易に流速・流量が精度よく計測できることから、航空機のスピードメータをはじめ空調の流量制御のための流速・流量計測、煙道ガスの流量計測等、特に大流量用として古くから多く使用されており、挿入型流量計だけでもアニューバ式を含め世界で100万台を超えている。なかでも、ピトー管は航空機用流速計・昇降計・高度計に多く使用されている²⁹⁾。

(3) 新しいピトー管流量計

流量計用として、これまでのピトー管流量計は大容量が主体であったことや、ダスト・ミストの影響を受けるなどの短所や、流量計測を目的とした中流量以下の汎用流量計としては測定装置が高価となりコストメリットがないことから、ピトー管流量計の使用量は少なかったといえよう。

近年の目覚ましいMEMS (Micro Electro Mechanical Systems)技術の発達に付随し、これらの課題を解決した「後流圧検出式ピトー管流量計」が東京工業大学の香川・川嶋研究室の温井一光氏らによって開発された³⁰⁾。これは家庭用水素ガスメータとしての可能性もあり、この「後流圧検出式ピトー管流量計」については別に述べる。

一方、低圧力損失のアニューバ流量計 (平均化ピトー管ともいう) もT字型センサの開発により高精度化が得られかつ、耐ダスト製にも優れた流量計へと発展している²⁹⁾。

4. 2. 2 原理構造

(1) 測定原理と特徴

流体の流れに対して垂直に置いた板には、流れの静圧と、ベルヌーイの定理に基づいて流量の二乗に比例した総圧と静圧の和が働くことより流量を求める。

図4. 2. 2-1に示す原理図によって総圧と静圧を測り、その差圧を求めれば流量に比例した値が求められる。

ベルヌーイの定理によると非圧縮性流体の定常流において、一つの流線について次式の関係が成立する。

$$1/2 \rho u^2 + P = \text{constant} \quad (4. 2. 2-1)$$

ここで ρ は密度、 u は流速、 P は圧力を示す。

物体の前面で流体は、せき止められ流れはその両側に分かれる。この中の一つの流線に着目すれば速度がゼロの点がある、この点をよどみ点という。

ベルヌーイの式から次式の関係が導かれる。

$$1/2 \rho u^2 + P_s = P_t \quad (4. 2. 2-2)$$

ここで、 u は流速、 P_s は圧力、 P_t はよどみ点の圧力を示す。この式は、流体をせき止めることで圧力が $1/2 \rho u^2$ だけ増加することを示し、 $1/2 \rho u^2$ を動圧と呼ぶ。

これに対して P_s を静圧、静圧と動圧の和 P_t を総圧と呼ぶ。総圧はよどみ点に穴をあけ、その圧力

を圧力計に導けばよい。このような装置をピトー管という³¹⁾。

4. 2. 3 性能

主に大容量用で、通常品のレンジアビリティは1:3~15程度、温井氏らの開発した後流圧検出式ピトー管では、1:30から50で精度は2%RD。

4. 2. 4 水素ガスメータ化への課題と展望

通常のピトー管の流量計は大容量用であり、かつレンジアビリティが3~10対1程度であり、水素ガスメータ用への可能性は非常に難しい。また、新しいアニューバ流量計は測定範囲が拡大されているものの、小流量化は困難といえる。水素ガスメータ化の可能性のあるピトー管流量計については4. 8. 2項で「後流圧検出式ピトー管流量計」を推奨、記述する。

4. 3. 差圧式・オリフィス流量計

4. 3. 1 概要

(1) 差圧式流量計の沿革

18世紀にベルヌーイの定理が確立され、流量と差圧の関係が明確となった。イタリアのベンチュリ(1746-1822)によりベンチュリ流量計が考案され、具体的に工業化したのは米国のハーシェル(1742-1830)であった。また、それから約2世紀後20世紀の初頭に英国のゲールサルコやホジソンによって差圧式オリフィス流量計等が開発された。

中でも、この流量計で最も重要な流出係数Cは、米国とドイツによって同時期の1930年代に算出された。現在このときの流出係数が基本となり世界中で使用されている。本格的に差圧式オリフィス流量計が使用され始めたのはこの頃からであった。

ISOでは差圧式流量計(オリフィス、フローノズル、ベンチュリ)は1967年に制定され、その後1991年にISO-5167-1として規格が発刊された。

日本では、JIS Z 8762が1962年に制定され、1969年、1988年、1995年に改定、ISO-2003年度版にあわせ現在も改定中である。また、差圧式流量計のなかでもオリフィス流量計が幅広く、しかも、多く使用されている^{32, 33)}。

(2) オリフィス流量計の現状と課題

①現況

近年は環境保全や安全対策の重要性が高まり、経済性や信頼性および安全性を考慮して、精度、再現性、保守性等を含めた、総合的なコスト・パフォーマンスの見直しが厳しく求められている。流量計測の原理や手法は様々であり、測定対象や用途に応じて各々の特徴や性能を生かした分野で使用されている。古くから工業用流量計として使用されてきた差圧式オリフィス流量計は、構造が簡単で廉価であり、国際的にも規格が確立され、実ガスを流さずに検定・校正ができる。いわゆる、ドライ・キャリブレーションが可能な流量計である。その上、精度・不確かさがJISで確立検証されている³³⁾。

オリフィス流量計は、このような大きな特長を持つため、高いシェアを占めている。

なお、同じ差圧式流量計のなかでもベンチュリやフローノズルの流量計はオリフィスに比

べて使用量はごく僅かである。

②原理上の課題

しかし、オリフィス流量計は流量が差圧の平方根に比例することにより、低流量域での誤差が大きくなり、実質的な流量測定範囲が約1対5と狭いという短所を有する。

これを改善するために、ばねから成る可変絞り機構を備えた「可変オリフィス流量計」等が開発され製品化されているが、部品点数が多く構造が複雑となることや実ガス校正が必要となるなどから気体計測用として多くは使用されていないようである。その他にVコーンオリフィスや4孔オリフィス等がある³²⁾。

4. 3. 2 原理構造

(1) 測定原理

図4. 3. 2-1に示すように、断面が円形の水平配管の中心に同心円の孔の開いた板状の絞り機構を流れに直角に取り付ける。流体は非圧縮性で粘性の影響のない流体を仮定し、流れは定常で管路を充満して流れているとすると、絞りの上流断面①と、下流の流れが絞られた断面②、と流れの連続の式からベルヌーイの式と流れの連続の式から、差圧と流量の関係が求められる。

$$P_1 + 1/2 \rho u_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + 1/2 \rho u_2^2 + \rho g h_2 \quad (4. 3. 2-1)$$

断面②(面積 A_2 を流体速さ u_2 で流れるとすれば、断面②を単位時間当たり通過する流体の出力は、流体が消滅しない(質量保存則)から、断面①を通過する流体の質量と同じである。よって、次式が得られる。

$$\rho_1 A_1 u_1 = \rho_2 A_2 u_2 \quad (4. 3. 2-2)$$

ここで、 P は圧力、 ρ は流体の密度、 u は流速、 gh は基準位置からの重力加速度と高さを示す。添え字は流れ場の位置をそれぞれ示す。すなわち、次式となる。

$$P + 1/2 \rho u^2 + \rho g h = \text{一定} \quad (4. 3. 2-3)$$

連続の定理より、流速は面積比に反比例する。また、ベルヌーイの定理より、流速が速いと圧力が低下し、遅いと圧力は上昇する。流速とエネルギーの関係は、流速 $u = \sqrt{2gh}$ の関係になる。したがって、流速がわかれば容易に差圧が算出できる³²⁾。

4. 3. 3 性能

差圧流量計の不確かさは、誤差伝播則より差圧式流量計の不確かさは $\delta q_m/q_m$ (%)は、次式で与えられる。

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \sqrt{\left(\frac{\delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + 4\left(\frac{\beta^4}{1-\beta^4}\right)^2 \left(\frac{\delta D}{D}\right)^2 + 4\left(\frac{1}{1-\beta^4}\right)^2 \left(\frac{\delta d}{d}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{\delta \rho}{\rho}\right)^2} \quad (4. 3. 3)$$

ルート内の第1項は流出係数 C 、第2項は気体の膨張補正係数 ε 、第3項は管口径 D 、第4項は絞り口径 d 、第5項は差圧 ΔP 、第6項は流体密度 ρ の不確かさをそれぞれ示す。

JISによる絞り機構の流出係数 C の不確かさは、一般的には、管口径は $\pm 0.4\%$ 、絞り口径では $\pm 0.07\%$ の不確かさとしてよいとされている³³⁾。

したがって、JISに基づくオリフィス流量計の総合標準不確かさは1.0から2.0%程度である。当然こ

れより小口径で低レイノルズ数の場合は精度（不確かさ）が若干低下する。レンジアビリティは1対5から15程度である。

4. 3. 4 水素ガスメータ化への課題と展望

オリフィス流量計の家庭用水素ガスメータ化へは、特に測定範囲が狭いので、現状の要求仕様ではその可能性は極めて難しい。しかし、要求仕様変更や、他のセンサと複合させる等で、可能性が考えられる。本流量計は特に水分混入には比較的強い特徴を有する。

4. 4 渦式・カルマン渦流量計

4. 4. 1 概要

流れの中に棒状の物体をおくとその下流に交互に渦が発生する。この渦発生数は流速に比例することが1912年カルマンによって理論的に証明された。この原理に基づく流量計をカルマン渦と呼んでいるが、現在では単に渦流量計と呼ばれている。検出物体が三角形のものも多くデルタ流量計とも呼ばれている。本流量計は比較的計測範囲が広く、圧力損失も小さく、精度もよい等の理由から、体積式流量計に代わって多く使用されるようになってきている。原理上同一レイノルズ数ではストローハルス数が同じであることから同一センサで気体、液体、蒸気の計量が可能である。渦のセンシング方式には圧力差、温度差、超音波等様々なものがある³⁴⁾。

オリフィス流量計同様 JIS Z 8766 (2002 年) で規格化している。また、天然ガス計量方法として JIS M 8010 (1993 年) でも規格化されている。

4. 4. 2 原理構造

図4. 4. 2-1は渦流量計の渦発生原理図を示す。ここで、渦発生体の下流に放出される渦の周波数 f と流速 v との間には比例関係があり、次式が成り立つ。

$$f = S t v / d \quad (4. 4. 2)$$

この $S t$ はストローハルス数といい、渦発生体 d の寸法と形状によって決まる。ストローハルス数は、レイノルズ数のある範囲内で一定であるので、渦の周波数は流速に比例する。渦流量計の最大の特徴はレイノルズ数が同じであれば液体も気体も同じ器差となる。よって、体積計流量計と同様に空気での検定・校正ができる³⁴⁾。

4. 4. 3 性能

レンジアビリティは10～80対1、精度は1%RD、圧力損失はオリフィスの1/2～1/4程度。

4. 4. 4 水素ガスメータ化への課題と展望

カルマン渦流量計の家庭用水素ガスメータ化へは、測定範囲にやや問題があるが、既にMEMSセンサ搭載の複合センサ流量計も(株)オーバルにより開発されており、レンジアビリティが500対1のものも登場している。精度も高く、測定原理上からも家庭用水素ガスメータへの可能性が考えられる。しかも、本流量計は計測原理上水分混入には、比較的強い特徴をも有する。但し、他のセンサと複合が条件となろう。

図4. 4. 4-1は(株)オーバルが開発した渦式複合センサ流量計の構造図を示す。

4. 5 フルイディック渦流量計

詳しくはフルイディックガスメータの項で記述するため、本項では項目を挙げ、簡易な説明にとどめる。

4. 5. 1 概要

流体の粘性特性にあるコアンダ効果による流体振動を用いてガスを計測・計量するもので、今日流体制御等には使われているが、汎用流量計としては生産していない。2. 2フルイディックガスメータの項参照

4. 5. 2 原理構造

流体振動数より流量を測る流量計。詳しくは、2. 2フルイディックガスメータの項参照のこと。

4. 5. 3 性能

2. 2 フルイディックガスメータの項参照のこと。

4. 5. 4 水素ガスメータ化への課題と展望

複合センサの登用で可能性が考えられる。詳しくは、2. 2フルイディックガスメータの項参照のこと。

4. 6 熱線式(分流)流量計

4. 6. 1 概要

(1) 分流式流量計の概要

分流式流量計は、差圧流量計と面積式流量計や層流管流量計の各々の特徴をいかして開発された流量計で、コンパクトで取扱い、および保守点検が容易で、比較的安価な大容量流量計である。従来はバイパス回路に面積式(浮き子式)を用いたものが多く生産されていたが、近年ではMEMS (Micro Electro Mechanical Systems)技術の発展に伴い熱線センサや μ フローセンサが多く使用されるようになってきた。一方、マスフローコントローラとして知られている流量計も分流式流量計であるがメイン流路に極細い層流管を使用しているので圧力損失が高いため、家庭用水素ガスメータへの可能性は極めて少ない。

(2) 熱式分流流量計

本項に記述する熱式分流流量計はメイン流路がオリフィスで、バイパス流路に μ フローセンサを用いた質量流量計である。

この流量計は、最近佛山武が開発・商品化したもので、「CMG型ガス流量モニタ」と呼ばれ、オリフィスを用いた分流式サーマル質量流量計の一つである。

近年、工業炉やボイラなどの燃焼装置において、使用エネルギーの低減や低NO_x化を図るため、空気と燃料を最適な比率で燃焼させる空燃比管理用に開発した。低圧損かつ燃焼装置の高頻度の間欠流量にも対応する応答速度の速い流量計である。

4. 6. 2 原理構造

(1) 測定原理

熱線式分流流量計の基本計測原理は以下のとおり示す。図4. 6. 2-1は、本流・メイン流にオリフィスを分岐・バイパス回路に熱線式サーマルセンサを搭載した分流式流量計の測定原理図を示す。

分流式の差圧と流量の関係は、 Q はメイン流路の流量、 q はバイパス流路の流量を、 ΔP は差圧を、 K は比例定数をそれぞれ示す。 q/Q の分流比が十分に小さい場合にはメインの流量 $Q=Kq$ となり、微小のバイパス流量 q の測定で、大きなメインの流量 Q が計測できる。

(2) 熱式分流流量計の原理・構造と特徴

以下(株)山武の新井、佐藤、島田：「ガス流量モニタの開発」³⁵⁾ 報文を引用してこの流量計を紹介する。図4. 6. 2-2は、(株)山武の熱式分流流量計の構造図を示す。

- ①低い圧力損失、広い流量範囲、高い耐ダスト性を満足するために、直接流体の流量を測るのではなくオリフィスの差圧を利用したバイパス分流方式としている。
- ②偏流や乱流の発生を防止するために、オリフィスによる分流方式を用いることで、本体に整流機構を持たせることなく、多孔オリフィスの採用によりバイパス流路自体が整流効果となり、低圧損で「マイクロフローセンサ」近傍の整流を行うことを可能としている。
- ③本流量計のレンジアビリティは低圧力損失で1対10を可能にした。(通常は1対5)
- ④「 μ フローセンサ」は超小型チップの熱式センサのため、流量変化への応答性が数msオーダーと大変速い。本流量計はマイクロコンピュータでノイズ成分をキャンセルするフィルタを入れて0-100%のステップ応答1.6sの高速応答性を実現している³⁵⁾。
- ⑤本流量計は体積流量計ではないので、実流量表示ではなく、 0°C 、 1atm 下、すなわちノルマル値で表示されている。また本器は質量流量計であるので、温度、大気圧による補正が必要ない。したがって、温度大気圧変動の影響を受けない。しかし、質量流量計であるため、ガス成分の変化やガス中に水分等が混入した場合は、原理上測定誤差が生じることを知らなければならない。

4. 6. 3 性能

測定範囲は1対10、精度は13Aガス、空気の場合は、 $\pm 4\% \text{RD}$ ($10\sim 40^{\circ}\text{C}$) となっている。計測は質量で行ない、 0°C 、 1atm 下の体積流量 (m^3/h) を演算、単位表示している。なお、製品の校正はドライ・キャリブレーション方式で実施されている³⁵⁾。

4. 6. 4 水素ガスメータ化への課題と展望

計測原理上、熱式分流流量計は水素ガスの計量は可能である。家庭用水素ガスメータ化への課題は計測範囲の拡大、

小流量化、コスト低減等が考えられる。容積が小さいので耐圧仕様には容易に対応できる。最大のネックは水分混入による誤差増大対策であろう。計測範囲を現ガスメータの仕様に対応しようとすれば小流量域に μ フローセンサ等の別途複合流量センサの追加搭載が必要となる。

結論としては現計量法を満足することは難しいが、水素ガスメータの独自の仕様として計測範囲等が縮小変更可能であれば、その可能性もあり得る。

4. 7 MEMSフローセンサ搭載流量計・ μ フロー流量計

本項ではMEMSフローセンサ搭載流量計と μ フロー式流量計をまとめて μ フロー流量計について本項で記述する。本報告書ではMEMSとは μ フローセンサ（株式会社）を除くフローセンサ等を指す。

4. 7. 1 概要

(1) 熱式質量流量計の歴史

熱式質量流量計の歴史は古く、1911年に同原理のトーマスガスメータが考案されている。しかし本格的な製品は、1950年代に米国の宇宙開発のために研究・開発されたマスフローメータ・コントローラが初めてとされている。その後マスフローメータは、日本でも半導体製造装置に多く使用されるようになった。今日、熱式流量計は半導体の他、他の産業にも広く使われている。

(2) マイクロフローセンサの沿革

1980年代米国で半導体技術・薄膜技術に始まったマイクロマシン技術開発研究が発達、医療用、業用等のMEMS技術開発が発展した。

日本では流量センサとして、株式会社 が1980年代後半より気体用熱式フローセンサの開発に本格的に取り組み、1994年に1.7mm角、厚さ0.5mmの超小型、1cm/secの微流速も計測可能な超高感度の優れた特徴を有する「マイクロフローセンサ」の量産化に成功した。その後10年間フィールドに設置されていたセンサを回収、評価した結果、高い信頼性が検証され、本格的に実用化に入った³⁶⁾。

当初は、空気用気体用流量センサとして従来の浮き子式流量計や小型管理用タービン式流量計に代わる空気機器用フローメータとして多く商品化されていった。

(3) ガスメータへの応用展開

一方、1990年代ガス会社・ガスメータメーカーがフルディック式電子化ガスメータの開発に取り組み中に微小流量検出センサとしての導入・検討研究が進められた。このセンサの登場で電子化ガスメータが完成できた。

ここでは特に、燃焼ガスに関する研究が行われガスメータとして「マイクロフローセンサ」が優れた特性を有することが検証された。電池駆動、低消費電力で1~300L/hの計測が実現した。

最小流速0.01m/sec、最大流速10m/sec、すなわち、1対1000の超ワイドのレンジアビリティを可能にした¹⁰⁾。

(4) 「マイクロフローセンサ」の現況

その後、株式会社始め多くの流量計メーカーがMEMSセンサとして多くの流量計を開発商品化した。今日、空気・ガスの流量計として小型で廉価な、いわゆる、フローメータやフロースイッチの名称で多く生産、広く使用されている。また、今日では自動車にもこのセンサが多く搭載され、センサ性能、信頼性は10倍、価格は10分の1のニーズにも対応できている。

さらに近年、燃料電池評価のための水素ガスの計測をも可能としている。

図4. 7. 1-1は、(株)山武のCMS シリーズ気体用流量計の外観を示す。

4. 7. 2 原理構造

(1) 構造と概要

「マイクロフローセンサ」搭載流量計は、熱式流量計の構成要素である発熱体と温度測定素子を、薄膜形成技術と微細加工技術によって半導体基板上に製作したセンサチップを検出部とする流量計である。

図4. 7. 2-1は(株)山武の「マイクロフローセンサ」チップの構造図および断面図を示す。シリコン表面中央部にヒータがあり、その両側に上流側温度センサと下流側温度センサがある。また、周囲温度センサが周辺部に配置されている。

ヒータと上流側、下流側温度センサがあるチップの中央部は、その下部のシリコン基盤がエッチングにより除去され、ヒータと測温抵抗体が空中に保持される構造である。検出部の厚さは、 $1\sim 3\mu\text{m}$ であり、熱容量が非常に小さく基板への熱伝導も小さい。このため、流速に対して高感度になり 10mm/sec 以下の流速が検出可能である。

また、電源投入から正常動作までの時間が 50ms 以下、流速変化に対する応答は 5ms 以下と非常に速い上に、低消費電力という特長をもっている。

センサチップに流れがないときの温度分布は、上下流側に対称となり両側の温度センサに温度差は無いが、流速に応じて温度分布が下流側に傾斜する。両側の温度センサの温度差を差動増幅して流量信号として検出する。センサチップで計測した平均流速 v 、および流路断面積 A との積から質量流量 Q が求められる³⁶⁾。

(2) 計測動作原理⁽³⁾⁽⁴⁾

図4. 7. 2-2は、「マイクロフローセンサ」の計測原理図を示す。ヒータに電流を流すと、流れの無いときは図4. 7. 2-2(a)のようにヒータ両側の温度分布は対称になり上流側温度センサ(R_u)と下流側温度センサ(R_d)の温度は等しくなる。ここに流れが生ずると図4. 7. 2-2(b)のようにヒータ両側の温度分布の対称性が崩れ、この温度差(抵抗値の差)をブリッジ回路で検出することにより、流れに応じた電気出力が得られる。

このセンサは、熱を利用した計測原理を用いるため、出力は気体の熱伝導率に関係しており、質量流量の計測ができる。したがって、温度・圧力の影響を受けない。すなわち、質量流量計(マスフローメータ)であるからである。このMEMSセンサの大きさは 1.7mm 角で厚さが 0.5mm と小さく、原理上逆の流れも計測できる。

分子量が小さく、熱伝導率が極端に大きい水素やヘリウムは、一般的には原理上測定できないとされていたが、(株)山武が専用チップを開発され、燃料電池の水素ガス評価にも使用できる流量計が開発・商品化されている³⁶⁾。

(3) 特徴

図4. 7. 2-3は、CMS 流量計の断面構造図を示す。図よりわかるように、整流用メッシュが6段設けられており、その下流路は滑らかな絞り機構が設けられ、そこにマイクロフローセン

サが搭載されている。低圧力損失、高精度、広測定範囲、高速応答性の特長を有し、水素ガスやヘリウムも計量可能なフローセンサである³⁷⁾。

4. 7. 3 性能

圧力損失最大 2kPa (ゲージ圧力 50kPa 時) で通常 100Pa 程度と小さい。精度は、レンジアビリティ 5 対 1 を ±3%RD、それ以下の 1/100 のレンジまで FS の 1% を保証し、広レンジアビリティで高精度。20°C、1atm で体積流量値を演算表示。測定ガスは、空気/窒素、アルゴン、炭酸ガス、酸素、都市ガス 13A、メタン、プロパン、ブタン、水素、ヘリウム。脈動流や非定常流の計測用流量計としても高速応答性に優れている³⁷⁾。

SUS 製本体の製品は、接続口径 1/4B で空気の場合、最大測定流量 0.5、2、5、20、50、L/min 接続口径 1/2B で 200、500L/min (20°C、1atm) のラインナップがある。

4. 7. 4 水素ガスメータ化への課題と展望

MEMS フローセンサ搭載流量計と μ フロー流量の家庭用水素ガスメータ化については、既に水素ガスが計量できる μ フローセンサが商品化されている。具体的な流量計としてもレンジアビリティが 160 対 1 の大容量ガスメータがも登場している。精度も高く、測定原理上からも家庭用水素ガスメータ化への可能性が考えられる。しかも、センサの耐久寿命が検証されている。本流量計の最大の課題は測定原理上、水分が混入すると計量誤差が生じることにある。本器の採用課題としては、まず水分混入量と誤差の関係を実験で検証する必要がある。一方要求仕様を変え水分混入しない条件にするか、または、水分混入防止対策をすることである。なお、 μ フローセンサ個体では結露がない水分混入の計測はできることが検証されている。流量計の中では本流量計が開発期間最短と推定できる。また、本流量計は水素ガスメータ化への有力な候補の 1 つである。

4. 8. 新提案複合センサ搭載流量計

4. 8. 1 ピトー管 + μ フロー流量計

(1) 後流差圧検出式ピトー管流量計概要

① 開発の背景

空気等の圧縮性流体の流量測定において、様々な測定原理を用いた流量計が実用化されているが、産業界のプラント、煙道廃ガス、ビル空調等ではピトー管流量計が多く使用されている。また、次世代技術の燃料電池、省エネ監視、環境分析、医療ガス等の流量測定分野への適用を考えると、安定した条件下の定常流のみならず、非定常な脈動流やミストの混合状態の流量を正確に測定する流量計が必要となる。

さらに、少量、多品種をバッチ処理する製造装置内で使用される流量計には小型高速応答、測定範囲の広い低価格な製品が求められている。

これらの要求に応えるために、ピトー管に最近の MEMS 技術「マイクロ微差圧センサ」を組み合わせた、「後流差圧検出式のピトー管流量計」が東京工業大学・香川・川嶋研究室の温井一光らによって開発された^{38)、39)}。

一般的にピトー管流量計は、煙道等の大口径配管、ダクトにおける廃ガス量の測定、低圧気体用の流量等の測定に用いられている。また、ピトー管は航空機の流速測定や風洞内の流速測定

にも多く使用されているが、今度、開発・提案しているピトー管流量計は小口径のものである。
また、差圧検出孔が下流側にある「後流差圧検出ピトー管流量計」と呼ばれる特徴のある新しい流量計である。

4. 8. 2 後流差圧検出式ピトー管流量計原理構造

(1) 原理・構造

ピトー管流量計の測定原理は、配管内にピトー管を挿入し、圧力を取り出すだけでベルヌーイの定理に基づき、流速と圧力差の関数により流量が精度よく計測できる。特に大流量用として古くから多く使用されている。詳細は、4. 8 ピトー管流量計の項を参照のこと。

(2) 特徴

図4. 8. 1-1は、本流量計の試作品の構造図を示す²⁸⁾。両側出入り口に流体の流れを整流するためにメッシュを配置し、中央に後流差圧(以下、後流圧という)測定用のピトー管を挿入している。

本流量計の特徴は以下のとおりである。

まず、配管接続口径より管路口径を小口径に設計することによって、流体の流れを縮流し、流速分布を均一にする。この結果、管路中心部に配置したピトー管の中心に加工した後流圧検出孔において、差圧を安定して測定することが可能である。

また、流体の整流効果を試験するため、ピトー管を中心にして、両側に5mm間隔に整流用の金網80メッシュを2枚取り付け、双方向の流れの均一化を図り、双方向流量計測を可能にしている。

さらに、通常のピトー管流量計ではピトー管の構造は図4. 8. 1-1に示すように、総圧検出孔が流れに対して上流方向に向いている。しかし、この流量計で使用するピトー管は後流圧検出孔が流れに対して後流方向に配置されている。この結果、後流圧は吸引方向で負圧になる²⁸⁾。このため、通常の左方向からの流れてくる流体中に存在するミスト、ダストによりピトー管の後流圧検出孔がふさがれることを防止できる。したがって、ダスト・ミストに強く、しかも、流量測定時の差圧が安定する。その上、フィルタ効果により直管長が短い。さらに、MEMS微差圧センサの採用も含め、その効果より、ワイドなレンジ計測、測定精度の向上、応答速度の向上、非定常流量の計測を可能にしている。その上、シンプルな構造により、廉価で提供できる。

4. 8. 3 性能と特徴

(1) 実験結果

具体的な性能比較は表4. 8. 3-1に示す³⁹⁾。

①オリフィス流量計との圧力損失比較

図4. 8. 3-1は、本ピトー管とオリフィスの乾燥空気における流量—圧力損失特性図である。同一開口比ではオリフィスに比べ圧力損失が約1/5小さい。

②ライン圧とガス密度と流量の関係

加圧下での実験においては、測定流体の圧力はゲージ圧で0.1MPa、0.2MPa、0.4MPaとした。このようにライン圧力を変更することで、密度の異なる気体を入手して測定する状態と等価の特性試験をした。

管路内径16mm、ピトー管外径6mmの場合に、ライン圧を変えて差圧と流量の関係を測定した結果を図4. 8. 3-2に示す。流体の圧力が上昇すると測定気体の密度が大きくなるため、差圧出力の値が小さくなる。その関係は理論的には次式で与えられる。

$$Q=Kp \pi D^2/4 \left((2\sqrt{PPa}) / (\rho Pm) \right) \quad (4. 8. 3-1)$$

ここで、Paは大気圧、Pmはライン圧、 ρ は気体密度を示す。

図4. 8. 3-2の結果において4. 8. 3-1式を満たしていることを確認している。つまり、ライン圧が変化してもピトー管係数は一定の値を用いて流量が算出できることがわかった³⁸⁾。

③整流効果

図4. 8. 3-3、メッシュの有無によるピトー係数Kpの値の比較図である。

口径10mmピトー管径4mmを用いて、メッシュ位置とその整流効果について実験により整流のための最適条件を調査した。その結果、図4. 8. 3-3に示すように、メッシュ有りの方がピトー係数は、流量に対して安定していることが伺える。また、ばらつきが±3%以内にあることが確認された³⁹⁾。

④正逆流量と圧力損失

図4. 8. 3-4は口径16mm、ピトー管径6mmの場合の流量-圧力損失特性図を示す。

さらに、今回のピトー管流量計に流体を逆流させた場合の総圧側の差圧特性を確認した。方法は逆流方向から0-400NL/minの流量を流して、流量と差圧特性試験を行った。その結果を図4. 8. 3-4に示す。

流量と差圧特性は後流圧と総圧は非対称になるが両方向の流れを測定できることが確認できた。

後流圧の流量特性と総圧の流量特性を比較すると約2倍になっている³⁸⁾。

$$\text{総圧}=\text{後流圧}/\text{開口比} (1/0.534=1.87) \quad (4. 8. 3-2)$$

また、この特性を利用することにより、複数の排気ダクトを並列に接続しているダクト内で発生する閉塞現象の逆流状態の異常検知システムを構成できる。

⑤器差特性と測定範囲

図4. 8. 3-5は、口径15mm、6mmのピトー管流量計のレイノルズ数とピトー係数Kpのグラフである。この結果からReは800から24000まで、ピトー係数が安定している。よって、レンジアビリティは1対30が確認されている。図4. 8. 3-6は、口径15mm器差特性を示す。

50NL/min以下で±3% (RD)、50~700NL/minの範囲では、±2% (RD) 以内であることが実験により検証されている³⁹⁾。

⑥形状による非定常流量特性

非定常流量追従特性については、ピトー管の形状別に非定常流量発生器から平均流量53NL/min±17NL/min、周波数1, 5, 10, 20Hzの非定常流量を発生して追従特性の確認試験をした。なお、この試験に用いた非定常流量発生装置は、東京工業大学の香川教授らによって開発されたもので、その不確かさは約5%である⁴⁰⁾。

円形は非定常流量Qの波形と測定流量の波形は20Hzまで追従している。四角形と半円形の10、20Hz位相は追従しているが、発生平均に対して10%減少している。三角形、楕円形は位相遅れが見られ、さらに、発生平均流量に対して20、30%それぞれ減少があった。アンニューバ・ダイア形は10、20Hzともに位相が遅れ、しかも、中心値が低い方にずれ振幅は増大している。

実験結果、ピトー管形状による非定常流量の応答性は円形が最も優れている。したがって、脈

動流の計測にも使用できることがわかった^{38, 39)}。なお、図は紙幅により割愛した。

4. 8. 4 ピトー管+ μ フロー流量計の提案

(1) 概要

前述の「後流差圧検出ピトー管流量計」^{38, 39)}で大流量から小流量域を主計量し、微小流量域を μ フローセンサで計量する流量計を家庭用水素ガスメータとして提案する。

主計量部の「後流差圧検出ピトー管流量計」はレンジアビリティが1対50は可能である。例えば最大流量1000L/h用の場合、最小流量は20Lである。この間を実体積流量として計量する。ヒステリシスをもたせ50L以下は熱式 μ フローセンサで質量流量を計量する。後者を仮に18°Cを基準に体積流量値に換算計量とする。現在のガスメータは実体積積算流量で評価する規格となっているため、本水素ガスメータに水分が混入しても主計量部は体積計量であるため、理論的な器差への影響がない。また、小流量域は熱式 μ フローセンサのため水分の影響は受けるが、総積算量値から見ると影響は小さい。したがって、燃料電池から発生する水素ガスの積算量を正確に計量できる。使用センサはMEMS技術で開発された微差圧センサと μ フローセンサを搭載する。

(2) 原理構造

主計測を「後流差圧検出式ピトー管（体積系）」微小流量を「 μ フローセンサ（質量系）」の複合流量計を用いた流量計である。

(3) 性能

現計量法の家庭用ガスメータの性能を満足できる可能性がある。測定範囲3L/hの漏洩検知流量から最大流量は可能。最高使用圧力は10kPaを超え、100kPaでも可能。

(4) 水素ガスメータ化への課題と展望

新提案の「後流差圧検出式ピトー管流量計」を主計測とした本流量計は家庭用水素ガスメータとしての可能性が十分ある。以下の特徴を有する。

- ①水分やダスト等が混入しても器差への影響は少ない、よって水分の混入に強い。
- ②膜式ガスメータに比べ大幅な小型化が実現できる。
- ③膜式よりローコストにできる可能性が大きい。
- ④小型であるから、気密性に優れ、10kPaを超える耐圧型用でも容易に対応可能である。
- ⑤小流量域に使う μ フローセンサは既に水素ガス計測ができることが確認されている。
- ⑥検定・校正試験用気体に空気が使用できる。（膜式に同じ）

4. 8. 5 オリフィス+ μ フロー流量計の提案

(1) 概要

「オリフィス流量計」で大流量から中流量域を主計量し、中流量域以下微小流量域を μ フローセンサで計量する流量計を家庭用水素ガスメータとして提案する。

主計量部の「オリフィス流量計」はレンジアビリティが1対10は可能である。例えば最大流量1000L/h用の場合、最小流量は100Lである。この間を実体積流量として計量する。ヒステリシスをもたせ150L以下は熱式 μ フローセンサで質量流量を計量する。後者を仮に18°Cを基準に体積流量値に換算計量とする。現在のガスメータは実体積積算流量で評価する規格となっているため、本水素ガスメータに水分が混入しても主計量部は体積計量であるため、理論的な器差への影響が少な

い。また、小流量域は熱式 μ フローセンサのため水分の影響は受けるが、総積算量値から見ると影響は小さい。また、オリフィス流量計の測定範囲を拡大の可能性がある。使用センサはMEMS技術で開発された微差圧センサと μ フローセンサを搭載する。

(2) 原理構造

主計測をオリフィス（体積系）微小流量を μ フローセンサ（質量系）の複合流量計

(3) 性能

現計量法の家庭用ガスメータの性能を満足できる可能性がある。測定範囲 3L/h の漏洩検知流量から最大流量は可能。最高使用圧力は 10kPa を超え、100kPa でも可能。

(4) 水素ガスメータ化への課題と展望

新提案の「オリフィス流量計」を主計測とした本流量計は家庭用水素ガスメータとしての可能性がある。以下の特徴を有する。

- ①水分やダスト等が混入しても器差への影響は少ない、よって水分の混入に強い。
- ②膜式ガスメータに比べ大幅な小型化が実現できる。
- ③膜式よりローコストにできる可能性が大きい。
- ④小型であるから、気密性に優れ、10kPa を超える耐圧型用でも容易に対応可能である。
- ⑤小流量域に使う μ フローセンサは既に水素ガス計測ができることが確認されている。
- ⑥検定・校正試験用気体に空気が使用できる。（膜式に同じ）
- ⑦本ガスメータでは圧力損失が高いことがネックになるが、水素は密度が小さいから流体抵抗は小さくなり、空気の約 1/3 となるので圧力損失はクリアできる可能性大である。

4. 9 調査結果

4. 9. 1 開発中および今後予測される水素ガスメータの評価

(1) 評価結果

①まとめ

開発中および今後予測される可能性候補について新提案も含め水素ガスメータ化を評価し 10 機種が選択された。その結果を表 4. 9. 1-1 にまとめた。表は評価および、水素ガスメータ化の課題等と水素ガスメータへの展望と考察を示す。ガスメータでは、超音波式が、流量計では、ピトー管、オリフィス、カルマン渦、フルイディック、熱線分流式、MEMS センサ式、 μ フローが、新提案では、主計測が新ピトー管とオリフィスの 2 機種が選択された。

5 調査結果のまとめ

5. 1 水素ガスメータ化の可能なガスメータ・流量計の評価

5. 1. 1 評価結果

水素ガスメータ化の可能なガスメータおよび流量計の候補評価結果を表5. 1. 1-1にまとめた。ガスメータが5機種、流量計が8機種、新提案流量計が2機種、計15機種が選択された。(絞込み前)

5. 1. 2 再評価結果(絞込み)

表5. 1. 1-1の15機種より再評価、さらに絞り込み評価を行い、7機種を選択した。結果を表5. 1. 2-1に示す。水素ガスメータ化可能な機種は、ガスメータでは、膜式、フルイディック、超音波式、タービン式が、流量計では、カルマン渦、熱式フローセンサが、新提案では、新ピトー管がそれぞれ選択された。

5. 1. 3 再評価結果(絞込み) 家庭用水素ガスメータ化の可能性のまとめ

表5. 1. 2-1の評価の結論より、結果7機種に絞り込まれた。それぞれの可能性について以下のとおりである。“可能性あり”では膜式が、“可能性小”にはフルイディックとタービンが選択された。また、条件つき“(可能性あり)”には超音波式およびカルマン渦、フローセンサ、新ピトー管となった。

5. 2 家庭用水素ガスメータ化の可能性の結論

5. 2. 1 可能性の結論

- (1) 現状のまま改造なしで、家庭用ガスメータに転用できるガスメータはない。
- (2) 10kPa 以内において膜式ガスメータは原理的には水素ガスメータに使用できる可能性があると考え、現状では試験的に使用される程度であり、耐久性の確認が必要である。
- (3) 超音波式ガスメータは、低圧水素ガスの計測が難しいが、現在(九大)で開発プロジェクトが開始されていることから、水素ガスメータに使用できる可能性があるものと思われる。

5. 2. 2 安全性の結論

- (1) 水素防爆
 - ①現在のマイコンガスメータは本質安全防爆構造を基本とした設計思想となっており、LNGが水素ガスに変わっても同様の考えでよいと思われる。そのために屋外設置を義務づけが必要である。
- (2) 圧力仕様
 - ①最高使用圧力が10kPaを超える場合は、計量法の特定計量器から除外(検定対象外)されるので、水素ガスメータの最高使用圧力はこれを超えない仕様が望ましい。10kPaを超える場合は防爆認定が必要となり、大幅な価格アップに繋がる。また計量法の改正が必要となり、家庭用水素ガスメータの導入は難しくなる。
- (3) 耐水素脆性材料
 - ①機能部品の強度の劣化や気密、性能への影響について今後調査研究が必要である。

(4) 気密性

- ①ガスケット材、シール材の耐水素ガス、10年間に耐え得る耐久気密性の調査研究が今後必要である。

5. 2. 3 その他

- (1) 家庭用ガスメータはエネルギー供給コストに含まれる。これまでも国内外を含め新しい超音波式やフルイディックガスメータが高額の開発費をかけ開発されて。初期導入されたが、ローコストの膜式に回帰した歴史的経緯がある。よって、水素ガスメータ導入にあっても、まず「コストありき」の開発思想が大事であろう。
- (2) 今後の調査研究にあっては、本調査で明らかになった内容を踏まえ、水素ガス供給条件と水素ガスメータの要求仕様についてトータルコストを視野に入れた検討が大事であろう。

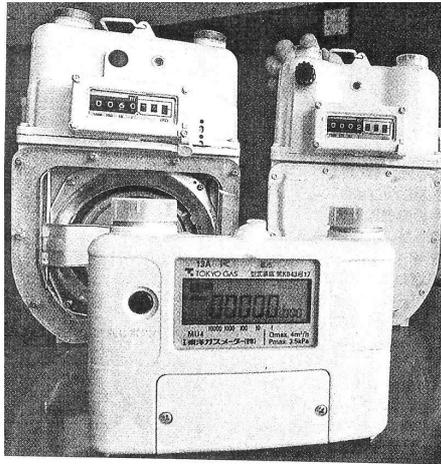


図4. 1. 1-1 家庭用超音波式ガスメータ 朝日新聞、2005年12月11日

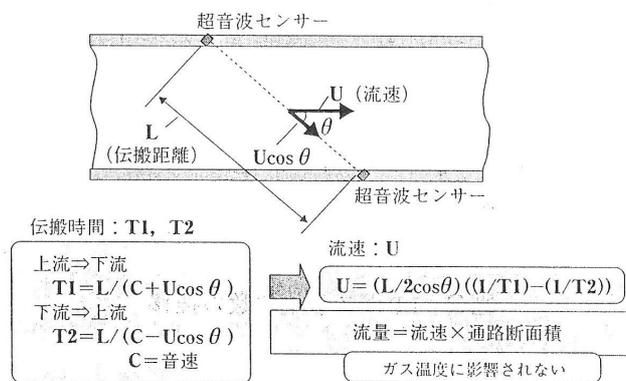


図4. 1. 2-1 超音波式流量計の測定原理図と伝播計測時間と流速の関係式 (佐藤重忠, 難波三男, 原正一: 次世代マイコンメータの開発—膜式から電子式(超音波式)へ、高圧ガス Vol. 401 No. 11 (2004) 38P)

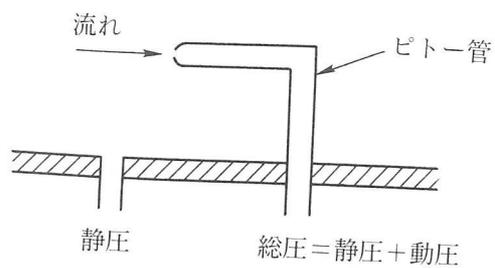


図4. 2. 2-1 ピトー管流量計の原理図 出典：松山裕、実用流量測定

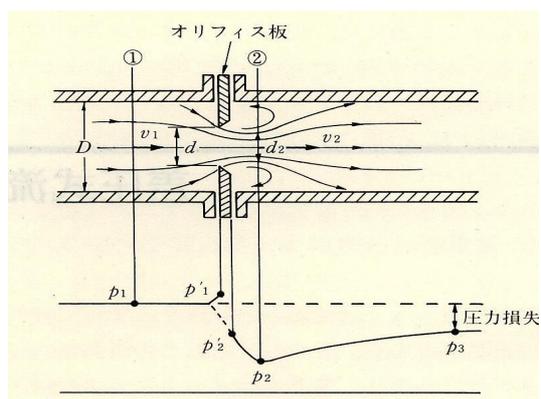


図4. 3. 2-1 オリフィス流量計の原理図^{2,4)}

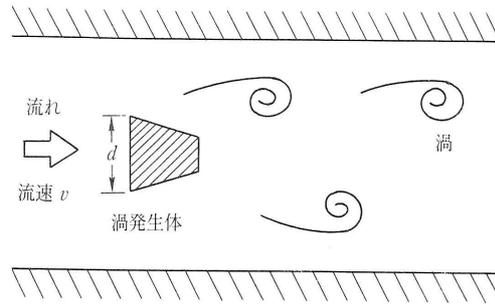


図4. 4. 2-1 渦流量計の渦発生
の原理図^{2,3)}

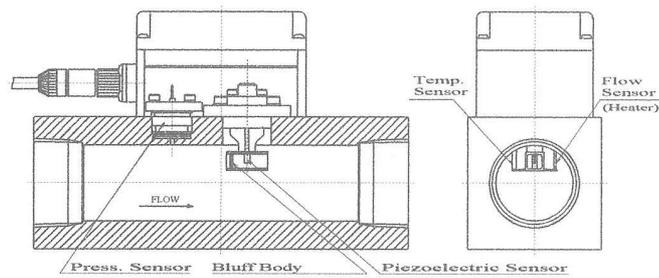


図4. 4. 4-1 (株)オーバルが開発した渦式複合センサ流量計の構造図
出展：小澤貴浩他、ハイブリッドマルチデジタル流量計の開発、(2006)

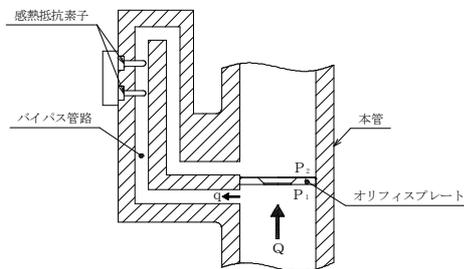


図4. 6. 2-1 分流式流量計の
測定原理図

出典：下田英司：新型質量流量計、
計測技術 (2005年9月)⁽³⁾

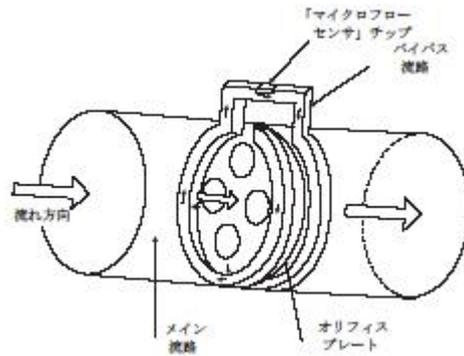


図4. 6. 2-2 熱式分流流量計の構造図
 出展：新井敏也他：「ガス流量モニタの開発」³⁵⁾



図4. 7. 1-1 (株)山武のCMSシリーズ気体用流量計
 出展：伊勢谷順一他、：汎用気体小型流量計 (CMS, CMR) の開発、Savemation Review, 67P(1996. 2)

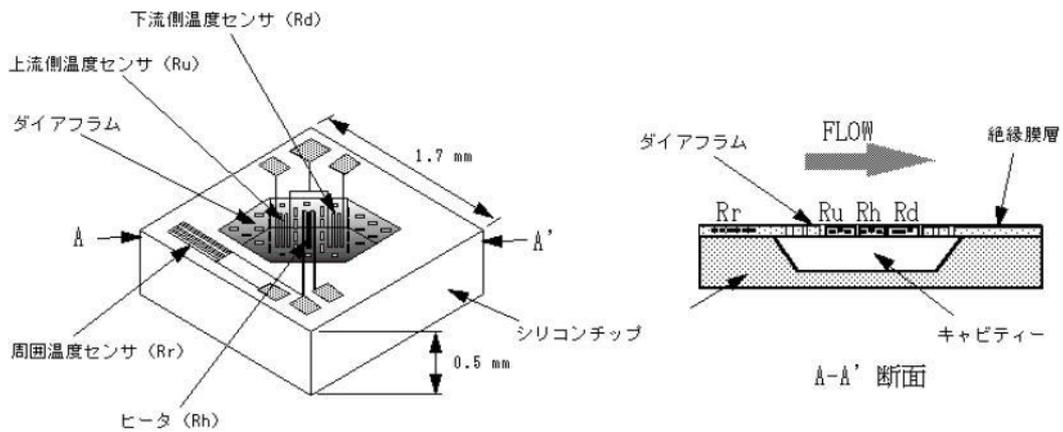


図4. 7. 2-1 「マイクロフローセンサ」チップの構造図
 出典：田中秀一：「マイクロフローセンサ」チップ製作技術³⁶⁾

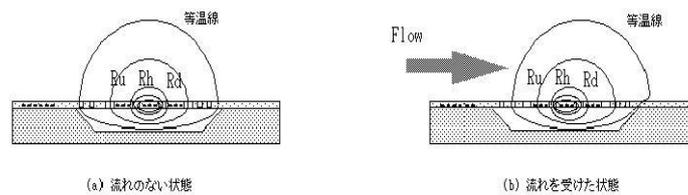
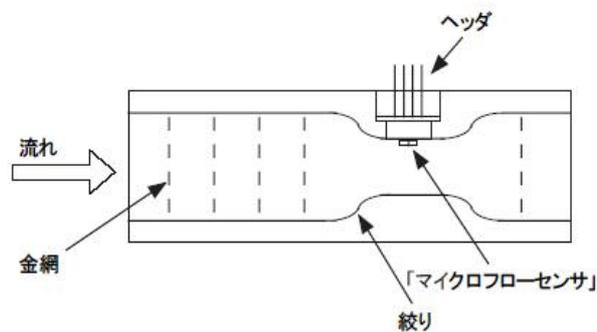


図4. 7. 2-2 「マイクロフローセンサ」の計測原理 (A-A' 断面)
 出典：田中秀一：「マイクロフローセンサ」チップ製作技術³⁶⁾



間隔を開けて配置した複数 (3~5) 枚の金網 + 絞り + 絞り直後に「マイクロフローセンサ」

図4. 7. 2-3 CMS 流量計の断面構造図
 出展：伊勢谷他：汎用気体小型流量計 (CMS, CMR) の
 開発³⁷⁾

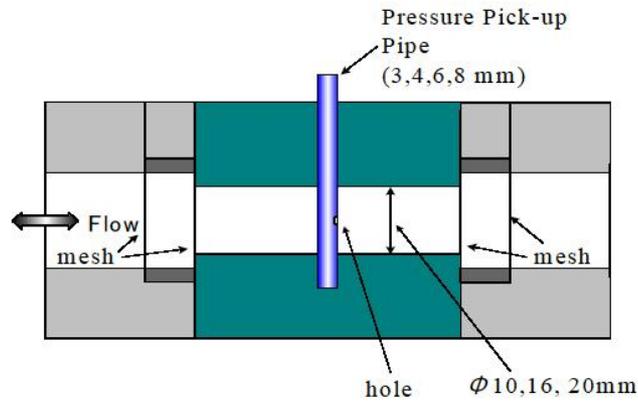


図4. 8. 1-1 後流差圧検出ピトー管流量計構造図
 出典：温井、川嶋、香川、小宮：後流差圧検出ピトー管流量計の実用化、SICE (2004) ³⁸⁾

表4. 8. 3-1 従来品との性能比較表
 出典：温井一光：後流差圧検出ピトー管流量計による圧縮性流体の流量測定、東京工業大学 (2006) ³⁹⁾

項目	従来製品	研究目標
レンジアビリティ	1:3~10	1:30以上
測定精度向上	2%FS	1~1/10 : 2%RD 1/10~1/30 : 0.2%FS
ダスト、ミスト対策	×	後流圧検出で○
応答速度	10~30s	100ms以下
低価格化	1	0.6以下
小口径、小型化	50mm以上	5~50mm
整流構造	なし	メッシュ内蔵
双方向特性	×	○
非正常流量特性	×	10Hz以上

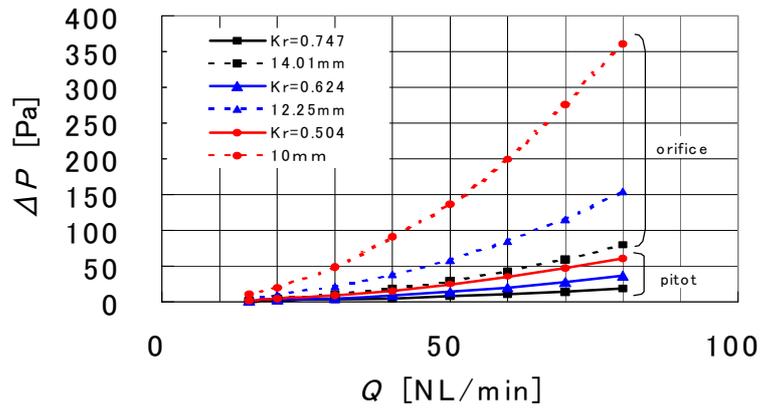


図4. 8. 3-1 流量—圧力損失特性図

出典：温井一光：後流差圧検出ピトー管流量計による圧縮性流体の流量測定、東京工業大学（2006）³⁹⁾

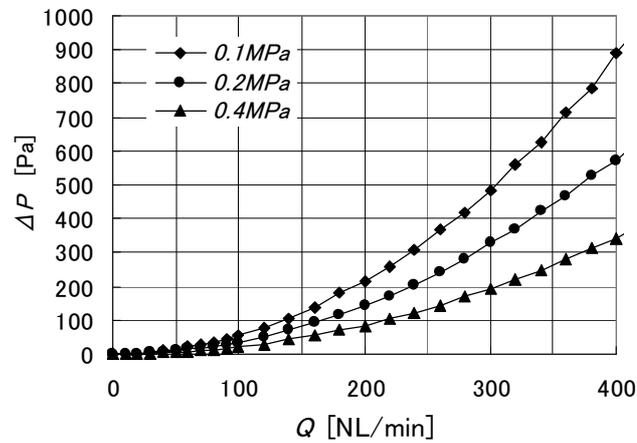


図4. 8. 3-2 ライン圧力と圧力損失

出典：温井、川嶋、香川、小宮：後流差圧検出ピトー管流量計の実用化、SICE（2004）³⁸⁾

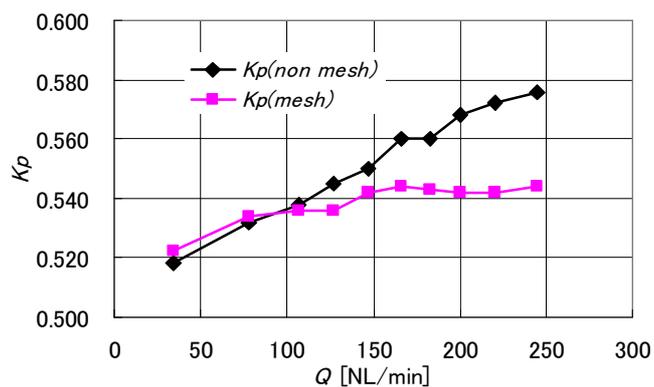


図4. 8. 3-3 メッシュの有無とピトー係数
 出典：温井一光：後流差圧検出ピトー管流量計による圧縮性流体の流量測定、東京工業大学（2006）³⁹⁾

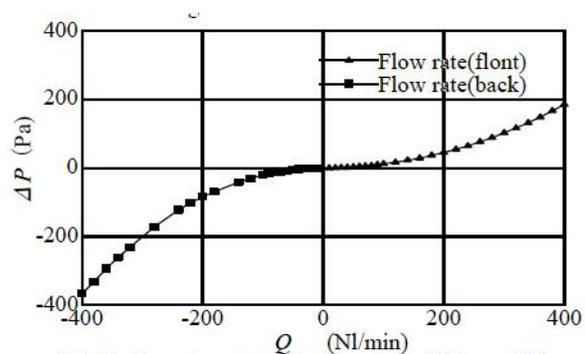


Fig 7 Experiment results flow meter (16mm-6Φ)

図4. 8. 3-4 正逆流量と圧力損失
 出典：温井、川嶋、香川、小宮：後流差圧検出ピトー管流量計の実用化、SICE（2004）³⁸⁾

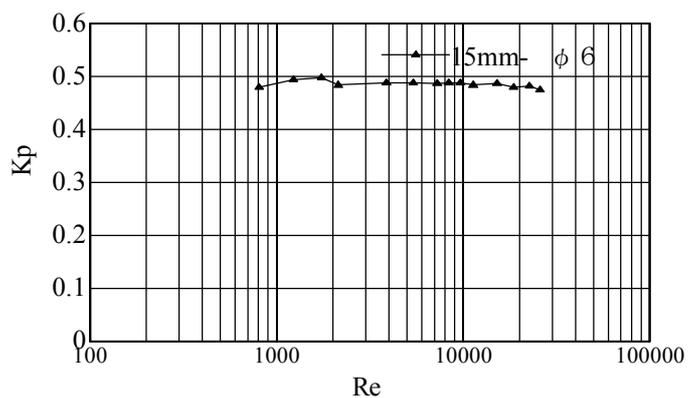


図4. 8. 3-5 レイノルズ数とピトー係数

出典：温井一光：後流差圧検出ピトー管流量計による圧縮性流体の流量測定、東京工業大学（2006）³⁹⁾

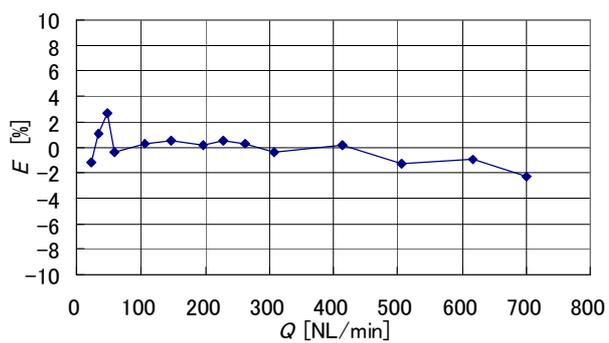


図4. 8. 3-6 器差特性 (15mm)

出典：温井一光：後流差圧検出ピトー管流量計による圧縮性流体の流量測定、東京工業大学（2006）³⁹⁾

表 4. 9. 1-1 開発中および今後予測される水素ガスメータの候補

(既存のガスメータを除く)

No	分類		計量原理 構造	主 計測 分類	法定 精度 予測	対水分	耐水素 ガス	水素化 価格 予測	脈動流 対策	可能性 評価	可能性 結論	水素ガス メータ化 の課題等	水素ガスメータへの展望 その他のコメント
8	ガス メータ	推量式	超音波式	体積	B	○	○	L	△	△	OK	低消費電力化 大気下の 水素計測	①LNG 家庭用ガスメータとしてはほぼ完成 ②高圧水素ガス流量計が開発中 ③水素ガスメータ開発プロジェクト発足 (九大)
11	流量計	差圧式	ピトー管	体積	B	○	○	L	×	△	(* OK)	測定範囲拡大	①水分に強い ② * 1
13			オリフィス	体積	B	○	○	L	×	△	(* OK)	測定範囲拡大	①測定原理から難しいが、 ② * 1
18		渦式	カルマン渦	体積	B	○	○	L	×	△	(* OK)	測定範囲拡大	①MEMS 搭載のものも登場している。 可能性あり ② * 1 ③ μ フローセンサで渦を検出により体積計測⇒水分に強い
20			フルイディック	体積	A	○	○	L	×	△	(* OK)	コスト、 フルイディック 素子の確認	①フルイディック単体では厳しいが、 家庭用ガスメータとして完成している ②家庭用フルイディックに集約
22		熱式	熱線式(分流)	質量	B	△	○	M	×	△	(OK)	測定範囲拡大	①新しい流量計として注目されている。 ② * 1
24			MEMS * 2	質量	A	▲	○	L	×	△	(* OK)	水分混入と精度	①新しい流量センサとして検討の価値あり
26			μ フロー * 2	質量	A	▲	○	L	×	△	(OK)	小流量化	家庭用のフルイディック GM から展開品、 可能性大
27	新提案水素 ガス メータ	差圧 & μ フロー式	新ピトー管	体積	A	○	○	L	×	△	(OK)	測定範囲拡大	①新開発ピトー管式流量計 ②小流量域は μ フローセンサ ③水分に強い
28			オリフィス	体積	A	○	○	L	×	△	(OK)	測定範囲拡大 圧力損失低減	①大中流量はオリフィス、小流量域を μ フローセンサで計量 ②MEMS 圧力センサが登場しつつある。

注)

1. 法定精度予測とは、器差、測定範囲、温度による誤差、耐久精度等、現行法定計量で定める合格範囲。(A : 現行法をクリアできる、B : 改造等でクリアできる、C : 大幅な改造でもクリアできない)
2. 可能性結論の「*OK」とは、μ フローセンサ等の複合センサ搭載により可能性あり、また、「NG」は要求仕様を変えることで可能性あり、流量計の括弧 () はガスメータに比べレベルが低い。
3. 材質の確認とは、水素ガスによる脆性、シール性、耐久性能等を意味する。
4. *1 コメントは、既存品では難しいが、改良または別のセンサ搭載等で測定範囲の拡大が可能と推定。
5. *2 MEMS と MEMS センサ全般、μ フローとは株式会社 藤山武製、フローセンサとは株式会社 藤山武製 μ フローを含む流量センサ。
6. 水素化価格予測は現行膜式ガスメータに比較して、H : 非常に高い、M : 高い、L は同等または少し高い
7. 可能性評価： ○は可能性大、△は可能性あり、×は可能性無し。
8. 脈動流対策： △は対策されているが厳密には更に必要、×は対策が必要。
9. 対水分： ○は問題なし、△は要対策、▲は△より劣る、×は問題あり (計測原理上誤差要因となる等)

表5. 1. 1-1 家庭用水素ガスメータ化可能なガスメータ・流量計の候補

No	分類		計量原理構造	主計測分類	法定精度予測	対水分	耐水素ガス	水素化価格予測	脈動流対策	可能性評価	可能性結論	水素ガスメータ化の課題等	水素ガスメータへの展望 その他のコメント
①	ガスメータ	実測式	膜式(家庭用)	体積	A	○	○	L	○	○	最有力	材質の確認	①水素計測の使用実績あり ②現状のガスメータの使用の可能性あり ③低開発費 ④コスト、精度を含め最有力
②			膜式(テスト用)	体積	B	○	○	L	○	△	家庭用膜式に統合	材質の確認	①新開発の場合小型化、ケーシング樹脂化等の参考となる ②最終的には家庭用に集約
③		推算式	フルイディック(流体振動式)	体積	A	○	○	L	○	○	有力	材質の確認	①家庭用ガスメータとして完成している ②MEMS センサ使用でコスト低減が望める。 ③膜式について有力
④			超音波式	体積	B	○	○	L	△	△	やや有力	低消費電力化 大気下の水素計測	①LNG 家庭用としてほぼ完成 ②高圧水素ガス流量計が開発中 ③水素ガスメータ開発プロジェクト発足
⑤			タービン式	体積	B	○	○	L	△	△	有力	材質の確認	①20 年前に技術は確立している。 ②小型低コスト
⑥	流量計	差圧式	ピトー管	体積	B	○	○	L	×	△	(* OK)	測定範囲拡大	①水分に強い ② * 1
⑦			オリフィス	体積	B	○	○	L	×	△	(* OK)	測定範囲拡大	①測定原理から難しいが。 ② * 1
⑧		渦式	カルマン渦	体積	B	○	○	L	×	△	(有力)	測定範囲拡大	①MEMS 搭載のものも登場している。可能性あり ② * 1 ③μ フローセンサで渦を検出により体積計測→水分に強い
⑨			フルイディック	体積	A	○	○	L	×	△	ガスメータへ統合	測定範囲拡大	①フルイディック単体では厳しいが、家庭用ガスメータとして完成している ②家庭用フルイディックに集約
⑩		熱式	熱線式(分流)	質量	B	△	○	M	×	△	(可能性あり)	測定範囲拡大	①新しい流量計として注目されている。主に大容量用。 ② * 1
⑪			MEMS * 2	質量	B	▲	○	L	×	△	フローセンサに統合	水分混入と精度	①新しい流量センサとして検討の価値あり
⑫			フローセンサ * 2	質量	A	▲	○	L	×	△	(有力)	水分混入と精度	①水素ガスが計量できる唯一の流量計
⑬	μ フロー * 2		質量	A	▲	○	L	×	△	フローセンサに統合	小流量化	①家庭用のフルイディックガスメータから展開品、可能性大	
⑭	新提案	差圧 & μ フロー式	ピトー管	体積	A	○	○	L	×	△	(OK)	測定範囲拡大	①新開発ピトー管式流量計 ②小流量域はμ フローセンサ ③水分に強い
⑮			オリフィス	体積	A	○	○	L	×	△	(OK)	測定範囲拡大 圧力損失低減	①大中流量はオリフィス、小流量域をμ フローセンサで計量 ②MEMS 圧力センサが登場しつつある。

注)

- 法定精度予測とは、器差、測定範囲、温度による誤差、耐久精度等、現行法定計量で定める合格範囲： A：現行計量法をクリアできる。B：改造等でクリアできる。C：大幅な改造でもクリアできない。
- 可能性結論の「*OK」とは、μ フローセンサ等の複合センサ搭載により可能性あり、また、「NG」は要求仕様を変えることで可能性あり。流量計の括弧()はガスメータに比べレベルが低い。
- 材質の確認とは、水素ガスによる脆性、シール性、耐久性等を意味する。
- *1 コメントは、既存品では難しいが、改良または別のセンサ搭載等で測定範囲の拡大が可能と推定。
- *2 MEMS と MEMS センサ全般、μ フロー式とは山武製、フローセンサとは山武製μ フロー式を含む流量センサ。
- 可能性評価： ○は可能性大、△は可能性あり、×は可能性無し。 流量計の括弧()はガスメータに比べOKのレベルが低い。
- 脈動流対策： ○は対策不要、△は要対策、×は抜本的な対策が必要。
- 対水分： ○は問題なし、△は要対策、▲は△より劣るが使用可、×は使用不可
- 水素化価格予測： H：非常に高く、家庭用には使えない。M：中間、家庭用としては非常に厳しい。L：現家庭用同等、やや高い。

表 5. 1. 2-1 家庭用水素ガスメータ化可能なガスメータの可能性の評価 (まとめ)

No	分類	計量原理構造	主計測分類	水素化価格予測	法定精度予測	対水分	耐水素ガス	脈動流対策	可能性評価	可能性結論	評価の判定理由と特徴 その他コメント		
①	ガスメータ	実測式	膜式 (家庭用)	体積	*L	A	△	○	○	○	有り	①水素計測の使用実績あり ②現状のガスメータの使用の可能性あり ③低開発費	①従来ガスメータ使用の可能性あり。
③		推量式	フルイディック (流体振動式)	体積	L	A	△	○	○	○	小	①家庭用ガスメータとして完成している ②MEMS センサ使用でコスト低減が望める。 ③膜式について有力	①流体素子で計量、微小流量域はμフロー。
④			超音波式	体積	L	B	△	○	△	△	* 有り	①LNG 家庭用としてはほぼ完成 ②高圧水素ガス流量計が開発中 ③H17 水素ガスメータ開発プロジェクト発足	①全流域超音波で計量する。
⑤			タービン式	体積	L	B	△	○	△	△	小	①20 年前に技術は確立している。 ②小型低コスト	①特殊な樹脂製タービンで計量、微小流量は切り替えてノズルより噴射。
⑧	流量計	渦式	カルマン渦	体積	L	B	△	○	必要	△	(* 有り)	①新規提案 ②μフローセンサで渦を検出により体積計測 ⇒水分に強い	①大、中流量はカルマン渦、小流量はμフロー
⑫		熱式	フローセンサ	質量	L	A	▲	○	必要	△	(* 有り)	①水素ガスが計量できる唯一の流量計 ②質量流量のため計量法の改正が前提	①μフローセンサで全流域を計量する。 ②水分が誤差に繋がる
⑭	新提案	差圧式 & μフロー式	新ピトー管	体積	L	A	○	○	必要	△	(* 有り)	①新開発ピトー管流量計 ②小流量域はμフローセンサ ③水分に強い	①大、中は差圧センサ、小流量域はμフロー ②オフィスに比べ更に水分に強い

調査結果のまとめ

1. 現状のガスメータで改造無しで、そのまま家庭用の水素ガスメータに転用できる可能性のあるものは膜式ガスメータのみである。(ただし要耐久性の確認)
2. 現状のガスメータで改良する場合は、膜式ガスメータが最有力である。これ以外は、フルイディックやタービン式、超音波式も有力な候補である。
3. 新提案を含む、流量計の中では、カルマン渦やピトー管とμフローセンサを組み合わせた流量計が有力である。
また、μフローセンサを用いた質量流量ガスメータも有力である。ただし、要計量法改正。
4. 最高使用圧力が10kPaを超える仕様の場合は、現計量法から除外され検定が受けられない。

注1) 可能性評価: *印は新規設計開発が必要、流量計の括弧()はガスメータに比べレベルが低い。

注2) 水素化価格予測: *Lは、膜式が製品単価、改造開発費、メンテナンス費を含め最も廉価である。

注3) 対水分: ▲は△より劣る。

<参考文献>

- 1) 小林駿：ガス流量計測のはなし 1 3 回、計測技術、VOL. 34No. 6, 60/61(2006. 5)
- 2) 日本機械学会：流体の熱物性集、8/9、(1997. 8)
- 3) 岩手大学：web 危険物（ガス）138P
- 4) New Energy and Industrial Technology Development Organization：
http://www.enea.or.jp/WE-NET/contents_j.html、(1998-2003)
- 5) (社) 日本計量機器工学連合会：流量計の実用ナビ、全編 (2003. 3)
- 6) 松山裕：実用流量測定, 省エネルギーセンター、全編 (1995. 5)
- 7) 小林駿：高精度ガスメータ標準器の研究開発、32/37, 早稲田大学、(2003. 7)
- 8) West Virginia University, : "Appalachian Gas Measurement Short Course", (1971) .
- 9) Hyao Kobayashi, M. Takamoto :Improvement of Gas Meter Performance Using Polymer Materials , Polymer
for adv. Technol, 14(, 2003)
- 10) 温井一光、酒井：都市ガス用ガスメータの現状、計量研究所・流体研究室編：「微小流量の計測技術に
関する報告書」、116/122, (2000. 3)
- 11) 岡林誠：流体振動形流量計のガスメータへの応用に関する研究、7 4P, 東京大学、(1992. 11)
- 12) 小林駿：家庭用タービンガスメータ開発メモ、(1986)
- 13) 小林駿：高精度ガスメータ標準器の研究開発、30/31, 41/49 早稲田大学、(2003. 7)
- 14) (社) 日本計量機器工学連合会：流量計の実用ナビ、41/42、(2003. 3)
- 15) 計量研究所・流体研究室編：「微小流量の計測技術に関する報告書」、142/143, (2000. 3)
- 16) 通商産業省計量行政室：新版 計量関係法令規集、(2001. 9)
- 17) 松山裕：実用流量測定, 省エネルギーセンター、214P、(1995. 5)
- 18) Richard W. Miller:Flow Measurement Engineering Hand Book, Third Edition, 56P(1996)
- 19) 松山裕：実用流量測定, 省エネルギーセンター、23/24 (1995. 5)
- 20) 日本規格協会：JIS-Z-8762 絞り機構による流量測定方法、(2003)
- 21) 小林駿：ガス流量計測のはなし 1 7 回、計測技術、VOL. 34No. 12, 53/54(2006. 11)
- 22) 計量研究所・流体研究室編：「微小流量の計測技術に関する報告書」、142/143, (2000. 3)
- 23) 松山裕：実用流量測定, 省エネルギーセンター、103/166 (1995. 5)
- 24) (社) 日本計量機器工学連合会：流量計の実用ナビ、126/143 (2003. 3)
- 25) 岡村繁憲、大阪ガス(株)導管部：ガスメーター欧州調査報告、1/25 (2004. 10)

- 26) 鈴木守、東京ガス(株)技術開発部：英国における家庭用超音波ガスメーターの状況について、
1/7, その他付属書を含む、日本計量機器工業連合会(2005. 10)
- 27) 佐澤重忠、難波、原：次世代マイコンメータの開発—膜式から電子式（超音波式）へ、高圧ガス Vol. 41
No11, 36/40, (2004)
- 28) 平田秀徳、他：燃料電池自動車の燃料計測手法（流量法）自動車研究 vol. 26, 21P, (2004)
- 29) 小林駿：ガス流量計測のはなし 19 回、計測技術、Vol. 35. No. 3, 45/51 (2007. 2)
- 30) 温井一光、川嶋、香川、小宮：後流差圧検出ピトー管流量計の実用化、SICE 産業論文 (2004)
- 31) 小林駿：ガス流量計測のはなし 16 回、計測技術、Vol. 34. No. 10, 43/45 (2006. 9)
- 32) 小林駿：ガス流量計測のはなし 17 回、計測技術、Vol. 34. No. 11, 49/54 (2006. 11)
- 33) 日本規格協会：JIS-Z-8762 絞り機構による流量測定方法、(2003)
- 34) 松山裕：実用流量測定, 省エネルギーセンター、83/101 (1995. 5)
- 35) 新井敏也、佐藤、島田：ガス流量モニタの開発、山武 Savemation Review, vol. 14No. 1, 88/93 (1996. 2)
- 36) 田中秀一：「マイクロセンサ」チップ製作技術、山武 Savemation Review, vol. 14No. 1, 14/19 (1996. 2)
- 37) 上運天庄司：「マイクロセンサ」を用いた流量計測、山武 Savemation Review, vol. 14No. 1, 28/35,
(1996. 2)
- 38) 温井一光、川嶋、香川、小宮：後流差圧検出ピトー管流量計の実用化、SICE 産業論文 (2004)
- 39) 温井一光：後流差圧検出ピトー管流量計による圧縮性流体の流量測定、15/84 東京工業大学、(2006. 3)
- 40) 香川利春、川嶋健嗣：非定常流量の計測、日本フルードパワーシステム学会第 3 6 巻第 4 号 (200 5. 7)