

水素エネルギーの利活用拡大に寄与する計量技術と標準化に関する調査研究

青木 彩*

(2021年1月28日受理)

A survey on the metrological technology and standardization to contribute expanded utilization of hydrogen energy

AOKI Saya

Abstract

Hydrogen is identified as a clean energy source, especially when it is generated with renewable energy, since using it does not emit carbon dioxide. Recent trend of reducing global warming and improving energy self-sufficiency shed brighter light on hydrogen. To meet those industrial and social demands, it is necessary to improve measurement accuracy of hydrogen flow rate. Additionally, the measurement might be subject to legal metrology control when hydrogen flowmeters become widely utilized commercially. In this survey, the social and technological background of accelerated use of hydrogen, domestic and international energy policies, hydrogen flow metering technology, and standardization are reported.

1. はじめに

エネルギーは、生活と産業活動に欠かせないものであり、特に化石燃料は火力発電の燃料やガソリンなど様々な用途で大量に使用されているが、日本には化石燃料が少ない。日本のエネルギー自給率は経済開発協力機構(OECD)に加盟する34か国中2番目に低い水準¹⁾であり、2018年度において11.8%²⁾である。

また、2015年に採決された持続可能な開発目標(SDGs)³⁾や2016年にパリ協定⁴⁾の発効を受け、地球温暖化に対し、責任を一層果たす必要がある。そこで、2016年に国連へ提出した「自国が決定する貢献」に基づき、2030年度には温室効果ガスを2013年度に比べて26%減らすことが目標とされている。加えて、2050年までに温室効果ガスの80%排出削減を目指している^{1), 2), 5)}。さらに、2020年9月には菅首相の所信表明演説にて、2050年まで

に温室効果ガス排出を実質ゼロにする方針が表明された。

以上より、エネルギー自給率の上昇及びCO₂排出削減の観点から、自給自足できるクリーンエネルギーが必要である。

クリーンなエネルギーの一つとして水素がある。水素がエネルギーとして注目されている理由は、①供給源・調達先の多様性^{1), 5)}と、②CO₂排出削減への貢献¹⁾が期待されているからである。

水素は再生可能エネルギーを含め、様々なエネルギー源から製造し、貯蔵・運搬することが可能である。従って、特定のエネルギーに依存することがなくなる。

さらに、水素は利用時にCO₂を排出しない。製造段階でのCO₂回収・貯留(CCS)や再生可能エネルギーの活用により、CO₂フリーのエネルギー源¹⁾(green hydrogen)となりうる。

水素をエネルギーとして利用する際に、利用する機器や水素を充填する機器には流量計が設置され、取引する際に計測が必要である。流量計を使用する際には、その

* 工学計測標準研究部門流量計試験技術グループ

流量計の信頼性を担保するために校正も必要である。また、市場への普及率がさらに増加すれば、今後、燃料油メーターやガスメーターと同様に水素ディスペンサーや家庭用水素ガスメーター（以後、総称する際に水素用流量計と呼ぶ）も計量法で規制されている特定計量器になりうる。

本稿では、国内外の水素エネルギー政策、水素流量の計量方法、計量性能評価、校正方法、水素計量の標準化を紹介し、最後に今後の展望について述べる。

2. 国内外における水素エネルギー政策

2.1 日本における水素エネルギー政策

日本では、「水素社会」の実現に向けて、水素基本戦略¹⁾、第5次エネルギー基本計画⁵⁾、水素・燃料電池戦略ロードマップ⁶⁾が策定されている。本節では、特に、低コスト水素の開発方法、水素サプライチェーンの開発、再生可能エネルギー由来の水素開発、具体的な水素利用事例に関して紹介する。

2.1.1 低コスト水素の開発方法

2019年時点での、水素の価格は100円/Nm³⁷⁾(エネルギー換算：1279円/kJ)であり、天然ガス輸入価格である16円/Nm³¹⁾(エネルギー換算：204.6円/kJ)と比較すると高価である。そのため、水素コストの低減に向けた方策として、①海外の安価な未利用エネルギーとCCSを組み合わせる、②安価な再生可能エネルギーから水素を大量調達する、2つの方法^{1),5),6)}が有望である。これらの方策を行うため、水素の「製造、貯蔵、輸送、利用」まで一貫した国際的なサプライチェーンの構築が進められている。2030年頃に商用規模のサプライチェーンを構築し、年間30万トン程度の水素を調達すると共に、コストは30円/Nm³程度を目標とされている。将来的には、20円/Nm³程度まで低減し、既存エネルギーと同等のコスト競争力の実現を目指されている^{1),6)}。

2.1.2 水素サプライチェーンの開発

国際的な水素サプライチェーンの構築に、水素の輸送・貯蔵を可能とするエネルギーキャリアとして以下に示す代表的な5つの方法がある^{1),5),6)}。

(a) 液化水素による水素サプライチェーン

液化水素は、体積が水素ガスの約1/800であり、気化することで、純度の高い水素が取り出せる。

一方、沸点が液化天然ガス(LNG)よりも低温であるため、海上輸送、荷役・貯蔵に関する新規のインフラ

整備が必要である。これらを実現させるために、オーストラリアと川崎重工業株式会社ら3社により、液化水素専用の極低温蓄圧式の貨物格納設備⁸⁾が開発された。加えて、液化水素サプライチェーン開発実証¹⁾も行われており、液化水素の海上輸送は、世界初の試みである。大量の水素を効率よく安全に輸送する技術の確立が目指されている。

液化水素の海上輸送において、液化水素運搬船に係る安全基準も検討された。そこで、日本はオーストラリアと共同で提案した暫定基準が2016年に国際海事機関にて採択され^{1),6)}、将来的に商用船の国際基準を策定し、液化水素の安定的な輸送の確立が図られている。

(b) メチルシクロヘキサン(MCH)による水素サプライチェーン

メチルシクロヘキサン(MCH)は、①体積が水素ガスの約1/500で、②常温常圧で液体であることから取り扱いが容易であり、③長期貯蔵が可能で、④タンカーやタンク等の既存の輸送・荷役インフラを活用可能である¹⁾。水素をトルエンと触媒反応させてMCHに転換したり、次に紹介するアンモニア、メタンに変化させることで、貯蔵や輸送を容易にする方法を有機ハイドライド法^{1),9)}という。水素の利用先ではMCHから触媒を用いた脱水反応で水素を取り出して利用する。この脱水反応で得られるトルエンは再びMCH生成に再利用できる。

ブルネイで得られた水素を常温・常圧で液体のMCHへ転換して海上輸送する有機ハイドライドサプライチェーン構築実証が行われており、2025年以降の商用化が目指されている。

(c) アンモニア(NH₃)による水素サプライチェーン

アンモニア(NH₃)は、1分子中に多くの水素を含む。さらに、①密度が液化水素の1.5倍であるため、インフラ整備をより小規模にでき、②天然ガスから製造するため比較的安価で、③既存の商業サプライチェーンを活用できる¹⁾。そのため、一旦NH₃に変えて貯蔵及び輸送する手段が検討されている。加えて、NH₃を発電等に直接利用することも可能で、燃焼時にはCO₂を排出しない。NH₃から水素を分解するには吸熱反応であるため、反応を開始させるには高活性な貴金属触媒を用いた場合でも触媒層を400℃以上に加熱し、常に外部からの熱供給が必要である。この問題を解決する手段として、酸素を少量導入してアンモニアの一部を燃焼させる酸化分解反応を用い、酸化アルミニウム担持酸化ルテニウム触媒を利用して触媒層を内部から急速に加熱することで、アンモニアからの水素製造を瞬時に起動させ、高速で水素を製造することも研究されている¹⁰⁾。利用開始するため

に、① CCS や再生可能エネルギー利用と組み合わせた製造段階での CO₂ フリー化、②直接燃焼利用時の NO_x 低減、③可燃性劇物に係る安全性確保の課題解決に向けた技術開発、検討等を進められている。

(d) メタンによる水素サプライチェーン

水素は、CO₂ と合成することでメタン化（メタネーション）¹⁾できる。メタネーションによって作られたメタンは CO₂ 排出削減に貢献し、既存のエネルギー供給インフラである都市ガス導管や LNG 火力発電所等の活用、熱利用の低炭素化の観点から、水素をエネルギーとして利用するより導入しやすいため、エネルギーキャリアとして大きなポテンシャルを持つ。実用化に向けて、CO₂ 調達コストの低下、メタネーション設備の低コスト化について普及方策の検討が行われている。

(e) パイプラインによる水素サプライチェーン

水素の大量輸送手段として、将来的にコスト・環境性の両面からパイプラインが有力となる可能性がある。実際に、国内においてパイプラインを活用する取り組みは複数存在し、2030 年以降は、臨海部でのローカル水素ネットワークの形成や、メタネーション技術等を用いた既設の都市ガスパイプラインの活用の可能性がある¹⁾。

2.1.3 再生可能エネルギー由来の水素開発

再生可能エネルギーの利用に伴い、調整電源の確保に加え、余剰電力を貯蔵する技術が必要である。特に、季節を超えるような長周期の変動に対しては、再生可能エネルギーで発電した電気を水素としてエネルギーを貯蔵する Power-to-Gas 技術^{1), 6)}が注目されている。Power-to-Gas 技術の活用には、コスト低減が鍵となる。再生可能エネルギー由来の水素のコスト構造は、①再生可能エネルギー電源からの電力供給コスト、②水素製造設備等の稼働率、③水電解装置を中心とした設備コストである。特に、海外市場への展開も含め商用化を進めると共に、Power-to-Gas 技術の中核である水電解システムについて、世界最高水準のコスト競争力を目指している。その上、再生可能エネルギーにより作られた電気の固定価格買取制度 (FIT 制度)¹⁾による全量買取期間が終了する 2032 年頃には商用化を目指している。

2.1.4 具体的な水素利用事例

(a) 電力

水素発電は、再生可能エネルギーの導入拡大に必要な調整電源・バックアップ電源として有力な手段となり得る。

また、既設の天然ガス火力における混焼発電を中心

に、小規模なコージェネレーションシステム¹⁾で発電した電気と、発電の際に出た熱の両方を利用するシステムにおける水素混焼も含め、導入拡大が図られている。将来的には、NO_x 値の低減、高い発電効率、高濃度な水素混焼などを解決し、早期の実用化を目標とされている。

コスト面では、国際的な水素サプライチェーンと共に 2030 年頃の商用化を実現し、17 円 /kWh が目指されている。さらに、既存の LNG 火力発電と同等のコスト競争力の実現を目標とされている。

(b) モビリティ

モビリティにおける水素利用の現在の中核は図 1 に示す燃料電池自動車 (FCV) である。2020 年 12 月時点では、3938 台の FCV が販売され、2025 年までに 20 万台程度、2030 年までに 80 万台程度の普及を目標とされている。そのためには、FCV の量産化や低価格化、航続距離の更なる伸長、ボリュームゾーン向け車種の投入等だけでなく、整備及び運営コストの低減された自立的な水素販売ビジネスの展開が必要である。

また、公共交通機関である路線バス等も燃料電池 (FC) 化が進められている (図 2)。そのため、2030 年度までに 1200 台程度の導入を目指されている。市販車による営業運行は日本初として、2017 年から都営バスで行われ¹²⁾、2019 年 3 月では都内に 18 台導入された¹³⁾。神奈川県、埼玉県、愛知県、福島県などでも FC バスは



図 1 燃料電池自動車 (FCV) の一例¹¹⁾
(トヨタ自動車株式会社フリー画像)



図 2 FC バスの一例¹¹⁾(トヨタ自動車株式会社フリー画像)

導入され、他の地域でも運行実証が行われている。

FCバスの他に、タクシーもFC化されている。FCタクシーは2019年3月現在福岡県、東京都、愛知県、神奈川県、埼玉県、宮城県に計25台導入されている¹³⁾。

FCフォークリフト(図3)は、電気自動車(BEV)や従来のガソリン車に比べ、充填時間やCO₂排出量の点で優位性があるため、2030年度までに1万台程度の導入が目標とされている。日本では、2016年から販売開始され、2018年3月時点では、77台が普及している¹⁴⁾。

トラックもFC化が進んでいる。特に、商用トラックは国内に320万台以上あり、バス(23万台)より大きな水素需要を見込める。ゆえに、コンビニエンスストアの配送車両などの実証実験が行われている¹⁶⁾。

電車に関してもFC化が検討されている。2005年度に、鉄道車両の走行用電源を想定した燃料電池システムと、水素を貯蔵し、供給する高圧水素タンクシステムが試作された。その後、FC電車が開発され、100kW級の燃料電池システムを車両に搭載可能であることが実証された¹⁷⁾。2021年には、安全性、環境性能、車両性能などの確認

を目的とした実証実験が行われる予定とされている¹⁸⁾。

モビリティの中でも船舶は低炭素化が難しいが、燃料電池の活用を含めた電動化等を進めることで、CO₂排出の削減が進められている。最近では、小型船舶の実船試験¹⁹⁾や高出力燃料電池搭載船の実用化に向けた実証事業²⁰⁾が行われ、技術開発が活発化している。

(c) 水素ステーション

FCVをはじめモビリティの普及に伴い、水素ステーション(水素ST:図4²¹⁾)の普及も重要である。まず、水素STにおける充填までのフローの一例を図5に示す。水素は圧縮機で高圧に圧縮され、蓄圧器に貯蔵される。水素の充填が開始すると、蓄圧器に貯蔵された高圧水素ガスは水素ディスペンサー内に送られ、フィルターを介して、流量調整弁、メーター、プレクーラーを経由し、充填ノズルにより、FCVに供給される。充填流量は水素ディスペンサー出口付近の圧力を検知し、流量調整弁を制御することで、一定昇圧率になるように制御している。水素STは2025年度までに320カ所、2030年までに900カ所程度の整備を目標とし、2020年代後半までに水素ST事業の自立化を目標とされている^{1),5),6)}。これ



図3 FCフォークリフトの一例
(株式会社豊田自動織機 転載許可済み)¹⁵⁾



図4 水素ステーション(水素ST)の一例
(@ 岩谷産業株式会社 掲載許可済み)²¹⁾

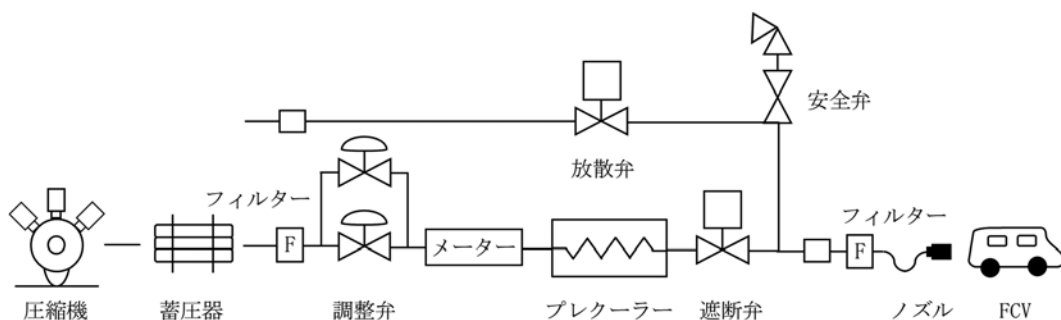


図5 水素STにおける充填までのフローの一例

を実現するには、規制の見直し、技術開発、官民一体によって水素 ST を整備し、水素コストを低減する必要がある。

再生可能エネルギー由来の水素 ST の場合では、①水素製造時も含め低炭素化、②再生可能エネルギーの地産地消、③地域における水素需要の喚起が可能である¹⁾。

(d) 家庭用燃料電池

現在、最も普及が進んでいる水素を利用したシステムはエネファーム^{5),6)}である。エネファームとは、都市ガスから取り出した水素を空気中の酸素と化学反応させて発電し、発電した電気と発電の際に出た熱を家庭で利用できる家庭用燃料電池システムである(図6, 7)。

エネファームに用いられている燃料電池には、固体高分子形燃料電池(PEFC)と固体酸化化物形燃料電池(SOFC)

の2種類が主である。エネファームは2030年までに530万台の導入を目指して普及が図られている^{5),6)}。ゆえに、更なる発電効率及び熱利用率の向上に向けた技術開発を進めると共に、優位性がある市場の開拓が行われている。

また、2030年以降は、再生可能エネルギーの供給拡大が見込まれるため、CO₂フリー水素が燃料である純水素燃料電池(図8)の導入拡大が検討されている^{1),6)}。エネファームとの違いは、直接、水素を家庭用燃料電池に供給し、改質器が不要な点である。

2.2 海外におけるエネルギー政策

日本のみならず、海外でも水素をエネルギーとして使う動きは活発である。本章では、海外における水素エネルギーに関する政策を紹介する。

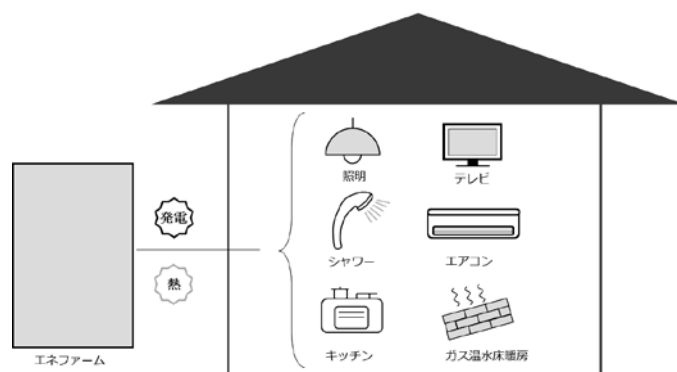


図6 エネファームで作ったエネルギーの家庭における利用例

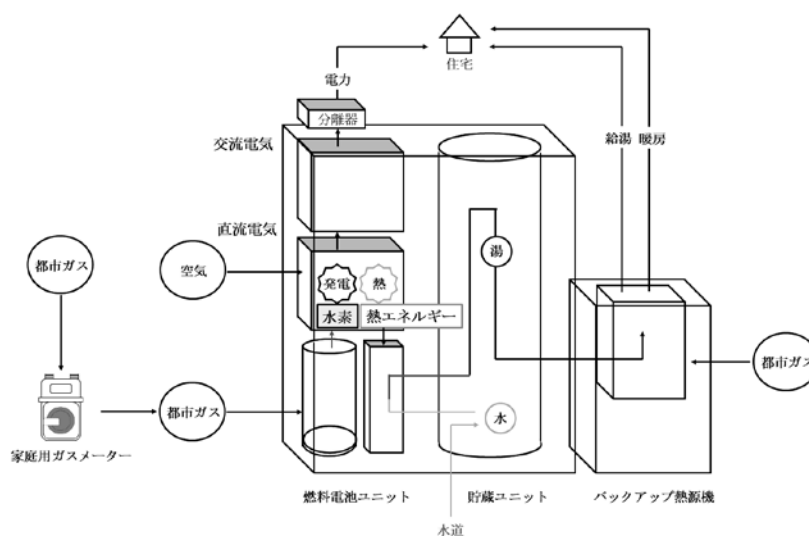


図7 エネファームの模式図

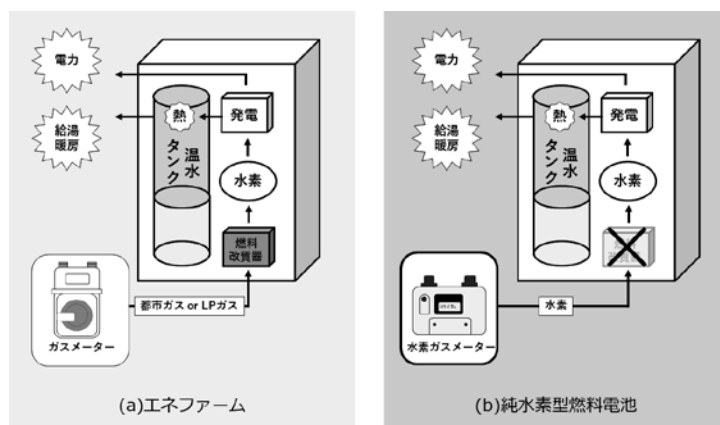


図8 エネファーム純水素燃料電池

2.2.1 欧州のエネルギー政策

欧州では、2008年に設立したFCH-JU（欧州水素・燃料電池官民パートナーシップ）によって、高品質かつ低価格の水素製造方法に関する研究やゴミを燃料にしたゴミ収集車の実証実験²²⁾をはじめ様々な実証研究が進められている。

2015年からCertif Hy プロジェクト²³⁾という、水素の環境価値の認証・取引に係る制度の検討も行われている。再生可能エネルギー由来の水素等の定義について整理され、天然ガス改質による水素製造時のCO₂排出量を基準とし、60%以下をPremium Hydrogen（プレミアム水素）として認証する。製造源に応じてGreen H₂（再生可能エネルギー由来）とLow Carbon H₂（非再生可能エネルギー由来）に分類され、認証制度構築に係るロードマップも作成されている。

また、ノルウェーをはじめ、イギリスやフランスなどでガソリン車やディーゼル車の販売を禁止し、BEVやFCVの次世代自動車の普及を促進する方針の表明も示されている。ガソリン車やディーゼル車の販売の禁止はEUに限らず、世界各国で検討されている。

欧州の代表的な国として、ドイツとフランスについて以下に記載する。

ドイツでは、2030年に再生可能エネルギーの導入比率を50%以上とし、2050年に温室効果ガスを80%から95%削減する目標達成に向け、再生可能エネルギーを自動車や発電等に利用する取り組みが進んでいる。水素STは、2015年に欧州民間6社により設立されたH₂ Mobilityの枠組みを活用し、2030年には1000カ所の水素STを設立することが目標とされている。また、欧州の中でも、特に、Power-to-Gasの実証を積極的に実施しており、2017年には推進するためにエネルギー機構

(DENA) がロードマップ²⁴⁾を公表している。2020年6月には国家水素戦略²⁵⁾を閣議決定され、水素技術が主力輸出分野に発展すると期待されているほど水素技術の開発に力を入れている。

フランスでは、燃料電池でバッテリーに電力を供給することで航続距離を伸ばす車両を開発し、約200台が導入されている。さらに、2018年には環境連帯移行省がエネルギー移行のための水素普及計画²⁶⁾を策定し、水素の普及推進の方針を明確にしている。2023年までに小型商用車5000台、大型車両（バス、トラック、鉄道、船舶）200台、水素ステーション100カ所の設置を目指している。2020年には国家水素戦略が発表されている²⁷⁾。

2.2.2 米国のエネルギー政策

米国では、2000年頃からFCVの研究開発が行われている。中でも最もFCV普及と水素STの整備を行っている州がカリフォルニア州である。カリフォルニア州大気資源局(CARB)は、ゼロエミッションビークル(ZEV)規制²⁸⁾を導入し、一定数以上の自動車の販売メーカーに対し、その販売台数の一定比率をBEV及びFCVとすることを義務付けられている。その結果、米国で販売されたBEV及びFCVは8931台、カリフォルニアで利用可能な水素STは42カ所、稼働中のFCバスは42台(2020年1月)²⁹⁾である。2030年には、カリフォルニア州でFCVを10万台、水素STを1000カ所の設置が目標されている。さらに、2020年9月には、2035年から新規ガソリン車の販売を禁止し、BEVやFCVなどの排ガスを出さない車にするよう義務づける行政命令が出された³⁰⁾。これにより、さらにFCVや水素STの開発は進むと考えられる。

米国全体としても水素エネルギーに力を入れており、エネルギー省 (DOE) は大規模な水素生成・製造、輸送、貯蔵、活用の可能性を探索するために H2@Scale concept へ 6400 万ドルを投じている³¹⁾。

2.2.3 アジアのエネルギー政策

アジアの代表国として、中国と韓国の水素エネルギー政策について紹介する。

中国では、十三五国家科学技術革新計画 (2016 年)³²⁾、十三五国家戦略性新興産業発展計画 (2016 年)³³⁾、自動車産業中長期発展計画 (2017 年)³⁴⁾と政策文章が発表され、燃料電池車が新エネルギーとして自動車戦略が重要であることが示された。それにより、燃料電池開発関連企業が次々に起業され、石炭や化学工業などの大手国有企業もサプライチェーンが建設された。さらに、中国汽车工程学会が策定した省エネルギー・新エネルギー自動車技術ロードマップ³⁵⁾及び中国製造 2025 重点領域技術革新グリーンブック技術ロードマップ³⁶⁾では、2030 年までに FCV を 100 万台、水素 ST を 1000 カ所整備することを目標としている。2019 年度時点では、FCV が 6178 台、水素 ST は 52 カ所設置されている。

加えて、自動車メーカーに対し、NEV 規制を設け、中国国内で 3 万台以上生産もしくは輸入している場合、ある比率以上の NEV の販売が義務付けられている。

最近では、北京市水素燃料電池自動車産業発展計画³⁷⁾ (2020 年)、四川省水素エネルギー産業発展計画 (2020 年)³⁸⁾が発表され、都市単位で水素エネルギー関連産業の戦略が発表された。

韓国では、2018 年に革新成長の戦略投資方向を政府が発表し³⁹⁾、三大戦略投資分野の 1 つとして水素経済が選定されている。翌年には、水素経済活性化ロードマップが策定され、2040 年までに FCV を 620 万台、水素 ST を 1200 カ所の整備を目標とされている⁴⁰⁾。

3. 水素流量の計測方法及び評価方法

各国で水素をエネルギーとして利用する取り組みが活発化している。水素をエネルギーとして利用するには、1 章でも記述したように、計測の技術が欠かせない。そのため、本章では、水素流量の計測方法及び校正方法について、モビリティで使用する高圧状態、エネファーム等の家庭用燃料電池で使用する低圧状態、運搬や貯蔵する際に注目されている液化水素の順番に紹介する。

3.1 高圧水素流量の計測方法及び計量性能評価

3.1.1 高圧水素流量の計測方法

モビリティの中で最も実用化が進んでいる FCV への充填を例に高圧水素流量の計測方法を紹介する。ほとんどの水素ディスペンサーでは高圧水素に対応するコリオリ流量計が使用されている。コリオリ流量計は、配管中の流れの方向に垂直に外部から振動を加えると、流体の質量によって、反力としてコリオリ力が働き、配管の入口と出口でねじれ角や変形が生じる現象を利用する (図 9)。ねじれ角や変形量は質量流量に比例する。ゆえに、これらを測定することで、質量流量を算出できる。さらに、水素の充填時に急激な圧力変化や温度変化が生じるため (図 10)、質量流量が直接測定でき、超高圧化でも高精度で低圧損であるコリオリ流量計が採用されている⁴¹⁾。低流量での感度を確保するため、計測管の幅を広げて、上下流の固定端間距離を短くし、ねじれの剛性を下げ、耐振目的に適度な駆動周波数となるように高さを抑えた長円形状 (図 11) である⁴²⁾。

3.1.2 高圧水素における流量計の計量性能評価

水素ディスペンサーの計量精度検査試験には従来から

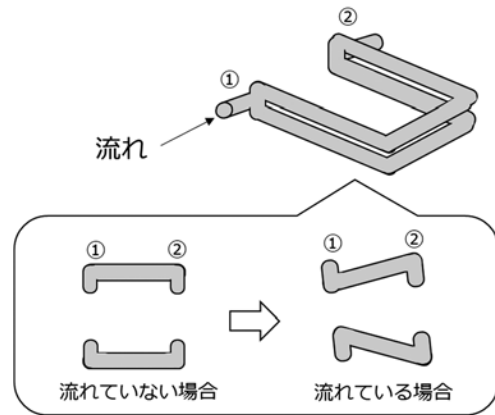


図 9 コリオリ流量計の模式図

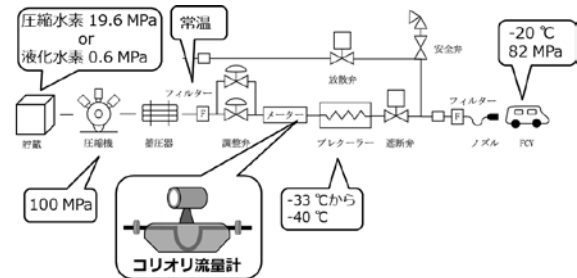


図 10 代表的な水素充填時の圧力及び温度変化

ある重量法に加え、新たな手法としてマスターメーター法が開発された。

重量法^{41),43)}とは、対象物の質量を秤量計によって計量する方法である。可搬式重量法計量精度検査装置⁴¹⁾を用いて、約70カ所の水素STに設置された水素ディスペンサーの計量精度検査⁴¹⁾が行われた。その結果を図12に示す。横軸は検査装置により計測された充填量、縦軸は水素ディスペンサーの表示値と計測値との偏差である。この結果から、偏差は±4%から±8%程度であることが確認された。ガソリン車にガソリンを充填し計量する自動車等給油メーターの最大許容誤差(±1%程度)と比較すると水素ディスペンサーの偏差は大きく、今後低減させることが課題である。

一方、開発されたマスターメーター法^{41),43)}は、国家標準にトレーサブルな流量計(マスターメーター：図13)を

ディスペンサーとFCVの間に設置し、水素流量を計測する方法である。マスターメーターとして、水素ディスペンサーで利用されている高圧水素用コリオリ流量計が使用されている。マスターメーターの校正には、大流量化、高圧化された臨界ノズルが複数入っているマルチノズル式校正器が用いられた。マルチノズル式校正器は気体流量国家標準設備で校正された臨界ノズル(ISO 9300⁴⁴⁾に規定されるトロイダルスロートベンチュリノズルに則った臨界ノズル式流量計)を基準として校正された⁴⁵⁾。

マスターメーター法計量精度検査装置の計量精度を確認するために、重量法計量精度検査装置との比較が2カ所の水素STで行われ、その結果を図14に示す。横軸はマスターメーター法計量精度検査装置による充填量の計測値 M_{mm} 、縦軸は重量法計量精度検査装置による充填量の計測値 M_{gr} との偏差 $(M_{mm} - M_{gr})/M_{gr} \times 100$ であ

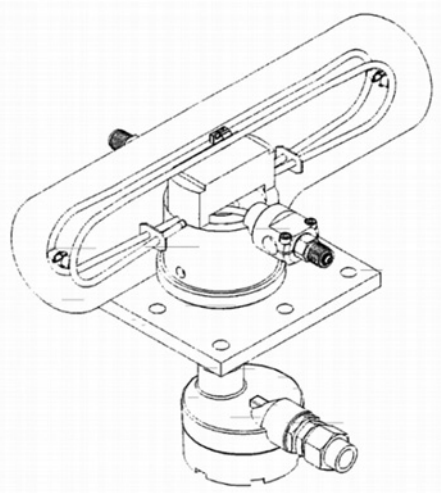


図11 長円形状のコリオリ流量計⁴²⁾(転載許可済み)

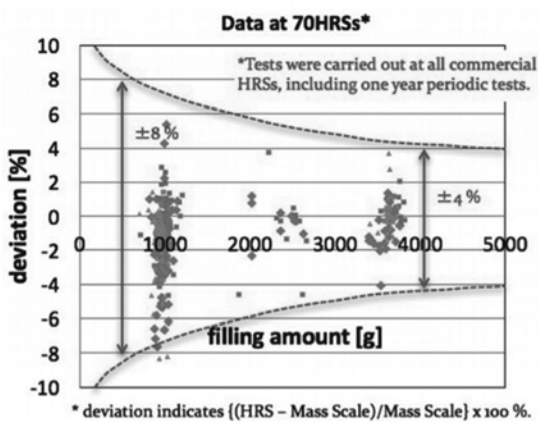


図12 水素ディスペンサーの計量精度検査の結果⁴¹⁾(転載許可済み)

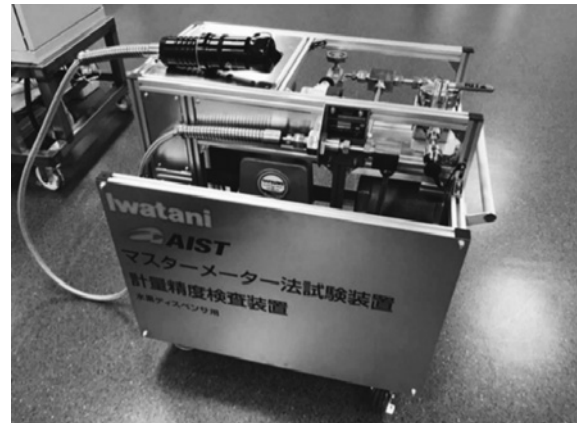


図13 マスターメーター法計量精度検査装置⁴¹⁾(転載許可済み)

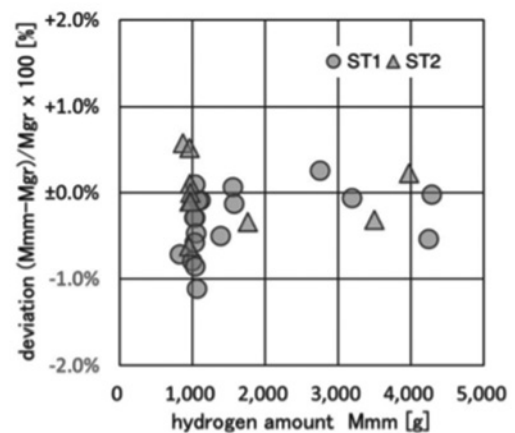


図14 マスターメーター法と重量法との比較結果⁴¹⁾(転載許可済み)

る。充填量が少ない場合においても、ほぼ同等の計量精度であることが確認された。

3.1.3 高圧水素における流量計の計量検査方法の問題点

水素ディスペンサーの計量において、脱圧量の計測が必要である。脱圧量はFCVへ水素の充填終了後、FCVから充填ノズルを外す際に、配管やホース等から放散される水素量のことであり、脱圧量は計量器を通過しているが、FCVに充填されないため、計量値と充填量に差が生じる。特に、充填量が少ない場合には計量精度に与える影響は大きい。脱圧量への影響は機器配置や配管構造が要因となるが、それらは水素STごとに異なる。そのため、現在では、水素STごとに脱圧量を算定し、補正するように規定されている。脱圧量の削減には、機器配置や配管構造の型式を規定することも改善策の一つと考えられ、現在検討されている。

3.1.4 海外における高圧水素流量の計測方法

海外においても、水素STの設置は活発であり、それに伴い水素ディスペンサーにおける計量性能の検証が行われている。ここでは米国とEUで実施された計量性能の検証について紹介する。

まず、米国の国立標準研究所(NIST)で、州の計量検査官が水素ディスペンサーの精度を定期的に検証するために使用できる実地試験規格(FTS)が開発された⁴⁶⁾。35 MPaまで使用可能な水素ディスペンサーの精度試験のみを実証するために、実験室内での試験と実地試験の両方で試験が行われた。試験方法は、重量法、PVT法(充填前と充填後のタンク内容積とガス密度の変化から、タンク内に流入される質量を求める方法)⁴⁷⁾、マスターメーター法の3つの方法である。

その結果、全ての試験方法において、実地試験では、実験室で測定した際に存在しなかったセンサーのドリフトが不確かさの最大の要素だと判明された。

EUでは、フランス、オランダ、ドイツにある7か所の水素STにおいて、水素用流量計測のトレーサビリティチェーンの実現を目標とし、重量法を用いた試験が行われた⁴⁷⁾。基準流量計がディスペンサー内に設置されていない水素ST(水素ST-A)と設置されている水素ST(水素ST-B)の2パターンで試験が行われた。水素ST-Aにおいて、フル充填試験では、誤差がゼロに近く、非常に再現性が高い結果が示された。一方、部分充填試験では、不確かさは2%から4%と示された。これは、基準流量計とディスペンサー間の配管内の充填開始時と終了時の圧力差によるもので、基準流量計とディスペン

サー間の距離が長いほど誤差が大きくなると考えられている。反対に、水素ST-Bでは、基準流量計とディスペンサー間の距離が非常に短いため、圧力差による誤差は無視できる程度と示された。

このように主要各国で水素ディスペンサーの計量性能は検証されており、今後も活発に行われると考えられる。

3.2 低圧水素流量の計測方法及び校正方法

3.2.1 低圧水素流量の計測方法

最も普及している水素をエネルギーとして利用するシステムはエネファームである。現在、エネファームで使用される水素は、2.1.4節で紹介した通り、都市ガスから抽出した水素である。そのため、既存の都市ガス用ガスメーターを用いて使用流量の計測が行われている。これに加え、家庭用燃料電池に水素を直接供給することが検討され、その水素は都市ガスやLPガスと同様に低圧で供給される。本節では、現在家庭で利用されている超音波式流量計及び膜式流量計の計測方法を紹介する。

超音波式流量計は3種類の測定原理があるが、ここでは最も代表的な伝搬時間差法⁴⁸⁾について紹介する。測定原理の模式図を図15に示す。ガスが流れる配管の上流と下流に超音波センサーを設置し、下流側の検出器から送信し上流側の検出器で受信するまでの伝搬時間 t_u (式(1))と、上流側の検出器から送信し下流側の検出器で受信するまでの伝搬時間 t_d (式(2))を測定し、時間差 Δt を算出する(式(3))。

$$t_u = \frac{L}{C - V \cos \theta} \quad (1)$$

$$t_d = \frac{L}{C + V \cos \theta} \quad (2)$$

$$\Delta t = t_u - t_d = \frac{2LV \cos \theta}{C^2} \quad (3)$$

L は流体中の超音波パルスの伝搬経路の長さ、 C は流体の音速、 V は流速である。この時間差 Δt により配管内を流れるガスの流速 V を算出できる(式(4))。

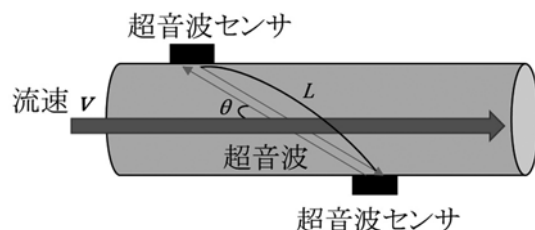


図15 超音波式流量計の測定原理の模式図

$$V = \frac{C^2}{2L \cos \theta} \Delta t \quad (4)$$

水素は空気と比べて音速が約4倍で、超音波が減衰しやすい。つまり、空気での計測の4倍以上の分解能と、空気以上の発信エネルギーが必要となる^{49),50)}。次に、膜式流量計⁴⁸⁾について説明する。膜式流量計は世界中で家庭用ガスメーターとして使用されている。膜式流量計の主要構成は計量部、内機部、積算表示部である。計測原理の模式図を図16に示す。ガスが計量膜で仕切られた一定容積の計量室に流入し、充滿した後に流出する。計量膜はポリエステル製基布がベースの寒さに強い合成ゴムが使用されている。計量膜が受けたガスの圧力により、ガスの吸入及び排気の切り替えを行う分配器が移動し、

4つの計量室で流入、流出を交互に繰り返すことで、流量を算出することができる。

ガスメーターはガスの使用量を計測するものとされ計量精度の向上が図られてきたが、近年ではこれに加えてガスの異常を検知する安全機能が搭載されたマイコンメーターである。

3.2.2 低圧水素における流量計の評価方法

上述したような流量計を評価する際、国家標準にトレーサブルなマルチノズル式流量計校正装置(図17, 18)で校正が行われている。基準流量を発生させる装置であるマルチノズル式校正器には、ISO 9300型トロイダルスロート臨界ベンチュリノズル(臨界ノズル)⁴⁴⁾が

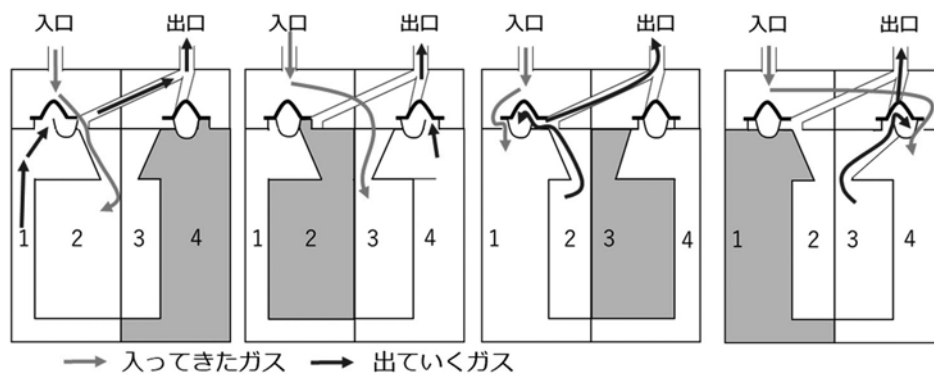


図16 膜式ガスメーターの計測原理の模式図



図17 マルチノズル式流量計校正装置

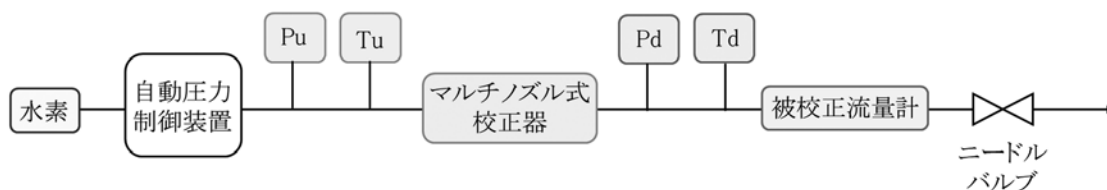


図18 校正フロー

5本組み込まれ、組み合わせることで様々な流量を発生させることができる。すべての臨界ノズルは国家標準気体流量校正設備を用いて水素ガスで校正されている。

校正では不確かさ評価が行われる。被校正流量計が示す流量値の相対拡張不確かさ $u_{Q_{met,cal}}$ は、式 (5) で求めることができる。

$$u_{Q_{met,cal}} = \sqrt{u_{Q_{met,cal}}^2 + \sigma_{met}^2 + \delta_{met}^2} \quad (5)$$

$u_{Q_{multi}}$ はマルチノズル式校正器の流量値の不確かさ、 σ_{met} は被校正流量計における上流側条件のばらつき、 δ_{met} は校正適合曲線における残差の標準偏差である。ここでは、マルチノズル式校正器の流量値 $u_{Q_{multi}}$ の求め方の詳細を紹介する。

校正の際に算出する流出係数 C_d は式 (6) で求められる。

$$C_d = Q_m / Q_{mth} \quad (6)$$

Q_m は実用標準器から得られる質量流量、 Q_{mth} は臨界ノズルの理論質量流量を示し、式 (7) で求められる。

$$Q_{mth} = SP_u \sqrt{\frac{M}{RT_u}} \quad (7)$$

S は臨界ノズルのスロート断面積、 P_u は気体のモル質量、 R は普遍気体定数、 P_d 及び T_u は臨界ノズル上流のよどみ点で計測された圧力及び温度である。

これらの測定後に不確かさを算出する。まず、流出係数 C_d の相対標準不確かさは式 (8) で求められる。

$$\frac{u(C_d)}{C_d} = \sqrt{\left[\frac{u(Q_m)}{Q_m} \right]^2 + \left[\frac{u(Q_{mth})}{Q_{mth}} \right]^2} \quad (8)$$

実用標準器から得られる質量流量 Q_m の相対標準不確かさは、気体流量校正設備による質量流量計測から求められる。次に理論質量流量 Q_{mth} の相対標準不確かさは式 (9) で求められる。

$$\frac{u(Q_{mth})}{Q_{mth}} = \sqrt{\left[\frac{u(P_u)}{P_u} \right]^2 + \left[\frac{u(T_u)}{T_u} \right]^2} \quad (9)$$

5本の臨界ノズルを用いて発生される質量流量 Q_{multi} は式 (10)、不確かさは式 (11) で求めることができる。

$$Q_{multi} = \sum_{i=1}^5 Q_{m,i} \quad (10)$$

$$u(Q_{multi}) = \sqrt{\sum_{i=1}^5 [Q_{m,i}]^2} \leq 5 \times u(Q_{m,max}) \quad (11)$$

$Q_{m,i}$ は臨界ノズル i から得られる質量流量、 $u(Q_{m,max})$ は5本の臨界ノズルの質量流量の不確かさ $u(Q_{m,i})$ のうち

で最も大きいもので、式 (12) で求めることができる。

$$u(Q_{m,max}) = \sqrt{Q_{mth}^2 \times [u(C_{d,max})]^2 + C_{d,max}^2 \times [u(Q_{mth})]^2} \quad (12)$$

$u(C_{d,max})$ は5本の臨界ノズルのうちで流出係数の不確かさが最大である臨界ノズルの流出係数 C_d を示す。式 (11) 及び式 (12) より、臨界ノズルを用いて発生される質量流量 Q_{multi} の相対標準不確かさは式 (13) で求めることができる。

$$\frac{u(Q_{multi})}{Q_{multi}} \leq \sqrt{\left[\frac{u(Q_{mul})}{Q_{mul}} \right]^2 + \left[\frac{u(C_{d,max})}{C_{d,max}} \right]^2} \quad (13)$$

このように校正された流量計は実証実験での評価に用いられることもあり、今後、純水素型燃料電池の普及に伴い増えると考えられる。

3.2.3 海外における低圧水素流量の計測方法

EUを中心に家庭用燃料電池は世界中で開発されている。例として、EUでは2012年から2017年まで、家庭用燃料電池の実証実験が行われ、燃料電池が天然ガスから効率的に電気と熱を生成できることが実証された⁵¹⁾。ガスメーターも取り付けられて試験されているが、天然ガスから水素に取り出して利用されている。すなわち、現時点では、純水素型燃料電池での実証実験は行われていない。

3.3 液化水素における計測方法

液化水素はロケットの燃料として利用されており、流量計として古くからタービン流量計が採用されている⁵²⁾。

ロケットの燃料の他に液化水素をエネルギーの貯蔵や輸送手段としての利用の拡大が期待されているが、現時点では企業間の取引となるため、タンクローリーへの移送はトラックスケールなどの秤量計の上で液化水素を充填し、計量されている。ゆえに、流量計を用いた計量は行われていない。

しかし、液化水素を用いた水素STにおける安全面に関する研究は数多くされている。例えば、超高圧下の液化水素が漏洩した際の噴出温度と噴出係数の測定が行われた⁵³⁾。ピンホール漏洩を模擬したピンホールノズルを取り付けて、基準流量計としてコリオリ流量計を使用し、ピンホール自体の流量係数やオリフィス流量計の流量係数が評価された。このように、実験として流量計を

用いた測定は行われているものの、液化水素は水素の貯蔵及び運搬としての利用が主である。

また、固体水素粒子と液化水素が混在するスラッシュ水素⁵⁴⁾の利用も貯蔵や輸送手段として検討されている。マイクロ波によるドップラー効果を利用した流量計の他に、密度計として配管の流れに沿った上流、下流2カ所に二分割した円筒型電極を配管壁に設置し、電極間の静電容量変化を、LCRメーター⁵⁵⁾で測定する静電容量型流量計の研究が行われている。

これらからわかる通り、液体水素やスラッシュ水素を測ることができる流量計は少ないが、特に液体水素は貯蔵や運搬としての需要が大きいので、今後取引する際に流量計を用いる可能性がある。

4. 水素計量における標準化

水素用流量計の開発が進み、それに伴い、標準化の整備も行われている。本章では、水素流量計測における国内外の規格及び関連する法規制について紹介する。

4.1 水素計量における日本産業規格 (JIS)

水素ディスプレイを含む水素燃料計量システムの日本産業規格として JIS B 8576⁵⁶⁾が2016年に制定された。JIS B 8576は、FCVユーザーの保護及び水素ステーション事業者による自主的な適正計量の確保を目的とされている。具体的には、自動車に水素燃料を充填する水素燃料計量システムの構造、性能、試験の方法、器差検査の方法、使用中検査の方法などが規定されている。

JIS B 8576において特徴的な点は、精度等級、脱圧量、モジュール評価である。

精度等級は4段階(表1)⁵⁷⁾とされている。JIS B 8576制定時は水素STの普及を促進するために精度等級10まで設けられたが、現在設置されている水素燃料計量システムの使用中最大許容誤差はほとんどが±5% (精度等級5)である。

脱圧量は算出された容積を評価する方法及び、充填後に減圧量を測定し評価する方法のいずれかの最大値を脱

表1 JIS B 8576 に規定されている精度等級
(一部編集を含む許諾済み)⁵⁷⁾

精度等級	最大許容誤差[%]	使用中最大許容誤差[%]
2	±1.5	±2.0
3	±2.0	±3.0
5	±4.0	±5.0
10	±8.0	±10

圧量とし計量システムに入力することと規定されている。

補助装置の試験及び計量システムの試験に限り、モジュール評価を可能としている。モジュール評価が検討された理由は、①アッセンブリ製造事業者において部品調達の際に、部品の計量性能評価を行うことで全体の計量性能評価ができ、②部品製造事業者による構成要素だけの評価が可能となるので、新規参入が容易となり、技術開発の促進が期待できるからである。

水素燃料計量システムにおける試験は大きくわけて器差試験、構造試験、性能試験の3種類である。特に、メーター又は計量変換器の試験では、重量法試験装置を用いることが決められている。マスターメーター法は、JIS検討時に、検査方法として規定するには時期尚早と判断されたため採用されていない。現在、JIS B 8576は改定中であり、マスターメーター法を加えようと議論されている。団体規格である HySUT 計量管理の運用ガイドライン (HySUT-G 0002 (2018))⁴³⁾にはすでにマスターメーター法に関して記載されている。

4.2 水素計量における国際規格

4.2.1 ISO/TC197

国際標準化機構 (ISO) とは、国際間における取引をスムーズにするために製品やサービスに関して、世界中で同じ品質を提供できるようにするための共通基準である。

その中でも、ISO/TC197⁵⁸⁾は、エネルギーとして用いる水素の製造、貯蔵、輸送、測定及び利用に関するシステム・装置に関わる標準化を目的とし、1989年に設立された。参加国は33カ国で、議決権を持つ20カ国に日本は含まれている。

ISO/TC197には14種類の Working Group (WG) が設けられ⁵⁹⁾、そのうち水素ST用ディスプレイ、水素ST用バルブ、水素品質、水素品質管理は日本が議長国である。しかし、水素流量計測におけるWGは設けられていない。

4.2.2 OIML R139

国際法定計量機関 (OIML) は、法定計量法分野で用いられる計量器の国際規格を規定し、計量器の信頼性や国際的同等性を確保する活動が行われている。

OIML R139⁶⁰⁾は自動車用圧縮ガス燃料の計量システムについて記載された国際勧告である。OIML R139は、自動車、鉄道機関車、ボート、船舶及び航空機に充填される圧縮天然ガス、圧縮ガス状水素、バイオガス、ガス混合物、その他圧縮ガス燃料を補給する計量システムに

ついて記載された国際勧告である。水素に関しては、2018年の改定の際に議論され追加された。OIML R139-1は計量及び技術要求事項、OIML R139-2は計量管理及び性能試験、OIML R139-3は試験報告書の様式について記載されている。水素計量システムの試験は、現場で実施可能である。重量法又はマスターメーター法のいずれかを用いることが望ましいとされている。

次に、OIML R139の中で特徴的な等級精度、脱圧量、モジュール試験について紹介する。OIML R139に規定されている等級精度は3段階（表2）であり⁶⁰⁾、JIS B 8576とは異なっている。

脱圧量は付属書Bに規定されている。長さや配管などの内容積から算出した値を評価する方法A、あらかじめ放散量を計量した値を評価する方法Bの2種類の評価方法が規定されている。

OIML R139にはモジュール試験も規定されている。計量システム全体としての試験が不可能な場合、又はその計量器において個々の試験だけが関連している場合に、それらモジュールに対して個別に試験を実施しなければならない。

4.3 計量器の法規制

上述したJISやOIMLは計量及び技術要件を規定したものであり、必ずしも法規制の対象とは限らない。

我が国における近代的な計量制度での計量器の法規制として、明治24年（1891年）に度量衡法が公布された。昭和26年（1951年）に度量衡から計量法が切り替わり、平成5年（1993年）に新計量法が施行されている⁶¹⁾。

現行の計量法による規制の対象となる計量器は、取引若しくは証明における計量に使用される計量器のうち、適正な計量の実施を確保する必要がある計量器を指し、これらを特定計量器という。ガスメーターや水道メーターをはじめ18器種が特定計量器の対象である。特定計量器は、構造及び器差に係る基準が定められ、検定に合格し、検定証印又は基準適合証印（図19）が付されたもののみ取引・証明に使用することができる。

ガスメーターを例に、検定の流れを図20に示す。検定では全数検査が行われており、図20(a)の場合、出荷予定の特定計量器全てに対し、構造検定と器差検定を行わなければならない。図20(b)の場合、特定計量器



図19 検定証印及び基準適合証印⁶²⁾

表2 OIML R139に規定されている等級精度

Accuracy class	MPE for the meter [in % of the measured quantity value]		MPE for the complete measuring system [in % of the measured quantity value]	
			at type evaluation, initial or subsequent verification	in-service inspection under rated operating conditions
			For general application	1.5
For hydrogen only	2	1.5	2	3
	4	2	4	5



図20 検定の流れ（例としてガスメーター）

の検定を合理的に行うことができるように、開発品に対して構造試験と器差試験を行う型式承認制度が設けられている。例えば、ガスメーターの場合、年間に約500万台が市場へ供給されるため、自ずと型式承認制度が採用されている。現時点で、水素用流量計は特定計量器に含まれていない。

4.4 水素用流量計の法規制に関する課題

水素STは2020年代後半の自立化が目標とされているため、水素STの普及状況により、水素ディスペンサーを含む水素燃料計量システムが計量規制の対象となる特定計量器に含まれる可能性がある。国際的にはOIML R139に規定されている高い精度等級⁶⁰⁾の水素ディスペンサーの供給を目指し、各国で技術開発や実証実験が行われている。日本では、業界ガイドラインにおいて、水素ディスペンサーの計量精度の試験が運用されている。最新の水素ディスペンサーでは、OIML R139の要求事項を満たす機種もあるが、計量性能の耐久性評価を行うための後続検査を実施している水素ディスペンサーも少なく、検証実績としては不十分な状況であると考えられる。

また、一般家庭に水素を直接供給した純水素燃料電池の普及が広がれば、家庭用水素ガスメーターも計量規制の対象となる特定計量器に含まれる可能性がある。特定計量器に含まれるガスメーターの型式承認試験及び検定において、空気を用いて試験が行われている。ガスメーターにおける空気とガスとの相関関係を検証し、空気での試験結果の妥当性が確認され、空気を用いた試験で運用されている。また、空気を用いることは、企業における安全面及びコスト面のメリットが大きい。そのため、水素ガスメーターにおいても、個々の計量性能の試験を行うようになれば、ガスメーターと同様に、水素ガスではなく、安全面及びコスト面のメリットが大きい空気を用いた試験を行うことが想定される。ゆえに、家庭用水素ガスメーターにおける水素ガスと空気との検証する必要があると考えられる。

4.5 海外における計量規制

本節では、水素計量に関する海外での規格に関して、米国とEUを例に紹介する。

NIST内にあるUS National Work Groupは、消費者保護の強化及び公正な競争を促進の観点から、水素ディスペンサーにおける法定計量標準の確立を促進、奨励、参加するよう取り組んでいる⁶³⁾。具体的には、(1) デバイスの設計、精度、設置、及び使用要件、(2) 販売方法

の要件、(3) テスト手順、(4) 燃料品質基準を規定している。

EU全体として水素計量の標準化された測定方法が確立されていない。そこで、英国のTUV SUD 国立工学研究所は、大規模研究プロジェクトの一環として、水素STの測定及び価格設定基準を開発している。新しい水素測定標準は、水素STでの相互比較試験で検証され、他のヨーロッパ計量標準機関が開発した標準と同じであるか検証される⁶⁴⁾。

5. まとめ

以下に、本調査研究の結果をまとめる。

- 1) 国内の政策として、水素基本戦略、第5次エネルギー基本計画、水素燃料電池戦略ロードマップが策定されており、製造、貯蔵、運搬方法、利用事例等が詳細に記載されている。
- 2) 海外においても、政策及び戦略の策定が活発であり、それに伴い水素エネルギーに関する実証実験等が行われている。
- 3) 水素ステーション(ST)のディスペンサーで使用する流量計は、高圧水素に対応したコリオリ流量計である。
- 4) 水素ディスペンサーの校正方法には重量法とマスターメーター法の2種類があり、ほぼ同等の計量精度である。
- 5) 流量計を評価する際には校正が必要であり、校正は国家標準にトレーサブルなマルチノズル式校正器が使用され、純水素型燃料電池の開発がより活発になることで実証実験の機会が増えると予想される。
- 6) 液化水素は貯蔵や運搬の際に用いられているため、現状では流量計が使用されることが少ない。
- 7) 水素ディスペンサーや家庭用水素ガスメーターは特定計量器に含まれていないが、今後の普及によって特定計量器に含まれる可能性がある。

6. 今後の展望

4.4節で述べた通り、一般家庭に設置される家庭用水素ガスメーターが計量規制の対象となる特定計量器に含まれる可能性があり、これを見据え、水素ガスメーターにおける水素ガスと空気との相関関係を検証する。具体的には、様々な水素ガスメーターを用いて、水素ガスと空気それぞれの計量性能を評価し、水素ガスと空気との相関関係が実証できることを検討する。

謝辞

本調査研究を行うにあたり、多くの方にご指導いただきました。流量計試験技術グループの島田正樹グループリーダー及び安藤弘二主任研究員から法定計量に関して、気体流量標準研究グループの森岡敏博グループリーダーから水素計測及び校正方法に関して、直接ご指導いただき、本調査研究へ貴重なご意見をいただきました。また、流量計試験技術グループ及び気体流量標準研究グループの皆様からたくさんのご助言をいただきました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議、水素基本戦略 (2017)
- 2) 経済産業省 資源エネルギー庁、エネルギー白書 2020 (2020)
- 3) 外務省, SDGsとは?, <https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/about/index.html> (2020/06/12)
- 4) UNITED NATIONS, PARIS AGREEMENT (2015)
- 5) 経済産業省 資源エネルギー庁、第五次エネルギー基本計画 (2018)
- 6) 経済産業省 資源エネルギー庁 水素・燃料電池推進協議会、水素・燃料電池戦略ロードマップ (2019)
- 7) 一般社団法人日本自動車会議所、経産省、FCVの普及拡大へ 水素価格3分の1に、ST開設コストも半減、<https://www.abaj.or.jp/info/industry/7822/> (2020/06/12)
- 8) 技術研究組合 CO₂ フリー水素サプライチェーン推進機構 (HySTRA)、豪州と日本におけるパイロット水素サプライチェーン実証事業、<http://www.hystra.or.jp/project/> (2020/06/12)
- 9) 株式会社フレイン・エナジー、有機ハイドライド技術、<http://hrein.jp/technology> (2020/06/12)
- 10) K. Nagaoka, T. Eboshi, Y. Takeishi, R. Tasaki, K. Honda, K. Imamura, and K. Sato, Carbon-free H₂ production from ammonia triggered at room temperature with an acidic RuO₂/γ-Al₂O₃ catalyst, *Science Advances*, 3, 4 (2017)
- 11) トヨタ自動車株式会社, 画像・動画DL, https://search.newsroom.toyota.co.jp/jp/all/search.x?q=MIRAI&ie=utf8&cat=0&pagemax=20&imgsize=3&pdf=ok&zoom=1&ctor=0&lfor=0&utfrom=-1&utto=-1&ref=global.toyota&pid=VrLsUKNVdd6ZtVBi9RK3ww.&qid=imeJP3URGOWEQXIRjEDoQ0Xm9Eg3J02D&tag=%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%83%90%E3%83%A0%2C%E7%94%BB%E5%83%8F&fix_tag=&terms=0&vsort=1&text_display=true&page=2 (2021/9/28)
- 12) 東京都交通局、都営バスで燃料電池バスによる運行を開始!, https://www.kotsu.metro.tokyo.jp/pickup_information/news/bus/2017/bus_p_201702247164_h.html (2020/09/12)
- 13) 環境省 水・大気環境局自動車環境対策課 国土交通省 自動車局環境政策課、燃料電池自動車・バスの普及に向けた導入支援策について (令和元年)
- 14) 経済産業省 資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギーシステム課 水素・燃料電池戦略室、第13回水素・燃料電池戦略協議会 事務局提出資料 水素・燃料電池戦略ロードマップの進捗状況 (平成30年)
- 15) 株式会社豊田自動織機、燃料電池 (FC) フォークリフトの取り組み (2016)
- 16) セブンイレブン 水素燃料トラックでの店舗配送実証実験開始 / 栃木, <https://movochannel.movo.co.jp/transport-news/553.html> (2021/1/20)
- 17) 山本貴光、燃料電池車両の開発, *日本 AEM 学会誌*, 63, 11, 39 (2006)
- 18) 東日本旅客鉄道株式会社, JR 東日本ニュース 水素をエネルギー源としたハイブリッド車両 (燃料電池) 試験車両製作と実証試験実施について (2019)
- 19) ヤンマーホールディングス株式会社, 2018 年度の CSR・環境活動特集, <https://www.yanmar.com/jp/about/csr/highlight/2018/01.html> (2020/09/12)
- 20) 日本郵船株式会社, 高出力燃料電池搭載船の実用化に向けた実証事業を開始, https://www.nyk.com/news/2020/20200901_01.html (2020/09/12)
- 21) 岩谷産業株式会社, ステーション画像, <http://www.iwatani.co.jp/jpn/downloads/h2sta.html#amagasaki> (2021/10/12)
- 22) FCH-JU, Discover the 2020 Success Stories (2020)
- 23) CertifHy, Project description, <https://www.certifhy.eu/project-description/project-description.html> (2020/09/12)
- 24) DENA, Roadmap Power to Gas (2017)
- 25) The Federal Government, The National Hydrogen Strategy (2020)
- 26) Ministère de la Solidarité Transition écologique et solidaire, Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique (2018)
- 27) Gouvernement, Stratégie nationale pour le dével-

- oppement (2020)
- 28) California Air Resources Board, Zero-Emission Vehicle Program, <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/zero-emission-vehicle-program> (2020/07/25)
- 29) California Fuel Cell Partnership, By The Numbers, https://cafcp.org/by_the_numbers (2020/07/25)
- 30) Office of Governor GAVIN NEWSOM, Governor Newsom Announces California Will Phase Out Gasoline-Powered Cars & Drastically Reduce Demand for Fossil Fuel in California's Fight Against Climate Change, <https://www.gov.ca.gov/2020/09/23/governor-newsom-announces-california-will-phase-out-gasoline-powered-cars-drastically-reduce-demand-for-fossil-fuel-in-californias-fight-against-climate-change/> (2020/09/24)
- 31) H2@Scale concept, Department of Energy, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/h2scale> (2020/07/25)
- 32) Xinhua Finance Agency, 13th Five-year Plan on Scientific and Technological Innovation issued, <http://en.xfafinance.com/html/Policy/2016/249077.shtml> (2020/09/22)
- 33) CENTER for SECURITY and EMERGING TECHNOLOGY, National 13th Five-Year Plan for the Development of Strategic Emerging Industries, <https://cset.georgetown.edu/research/national-13th-five-year-plan-for-the-development-of-strategic-emerging-industries/> (2020/09/22)
- 34) KING & SPALDING, China Issues Mid- and Long-Term Plan for the Automobile Industry, <https://www.kslaw.com/blog-posts/china-issues-mid-and-long-term-plan-for-the-automobile-industry> (2020/09/22)
- 35) Automotive Industry Portal MARKLINES, China's technology roadmap: Targets for energy-saving and new energy vehicles in 2030, https://www.marklines.com/en/report/rep1558_201612 (2020/09/22)
- 36) Institute for Security & Development Policy, Made in China 2025 roadmap, <https://www.isdp.eu/publication/made-china-2025/> (2020/09/22)
- 37) 新華社, 北京市, 水素燃料電池自動車産業発展計画を発表, <https://www.msn.com/ja-jp/news/world/%E5%8C%97%E4%BA%AC%E5%B8%82%E6%B0%B4%E7%B4%A0%E7%87%83%E6%96%99%E9%9B%BB%E6%B1%A0%E8%87%AA%E5%8B%95%E8%BB%8A%E7%94%A3%E6%A5%AD%E7%99%BA%E5%B1%95%E8%A8%88%E7%94%BB%E3%82%92%E7%99%BA%E8%A1%A8/ar-BB18Xx9H> (2020/11/18)
- 38) 四川省经济和和信息化厅, 关于印发《四川省氢能产业发展规划(2021-2025年)》的通知, <https://jxt.sc.gov.cn/scjxt/wjfb/2020/9/21/12979ab0d1cf41b18489d7d9559e4abf.shtml> (2020/11/18)
- 39) Korea IT News, South Korean Government Puts out Direction for 2020 Strategic Investments to Further Support Innovative Growth, <https://english.etnews.com/20190822200003>
- 40) HANKYOREH, South Korean government announces roadmap for hydrogen economy, http://english.hani.co.kr/arti/english_edition/e_business/879097.html
- 41) 森岡敏博, 水素ステーションにおける水素計量性能管理技術, 低温工学, 55, 1 (2020)
- 42) 中尾雄一, 高圧水素の流量計測に用いられるコリオリ質量流量計, 日本機械学会論文集, Dynamics & Design Conference, 235 (2011)
- 43) 一般社団法人水素供給利用技術協会, HySUT-G002 (2018) 水素計量管理の運用ガイドライン (2019)
- 44) ISO 9300, Measurement of Gas Flow by Means of Critical Flow Venturi Nozzles (2005)
- 45) 森岡敏博, 中尾晨一, 石橋雅裕, 高圧水素ガス計測用臨界ノズル式流量計の特性評価, 日本機械学会論文集 B 編, 77.776, 1088 (2011)
- 46) Jodie G. Pope n and John D. Wright, Hydrogenfield test standard: Laboratory andfield performance, Flow Meas. Instrum., 46, 112 (2015)
- 47) R. Maury, et al., Hydrogen refuelling station calibration with a traceable gravimetric standard, Flow Meas. Instrum., 74, 101743 (2020)
- 48) 一般社団法人 日本計量機器工業連合会 編, 流量計の実用ナビ - 初心者からエキスパートまで -, 改訂版, 有限会社工業技術者 (平成 24 年)
- 49) 渡邊一樹, 超音波式需要家用水素用流量計の開発, 日本機械学会誌, 112, 1082 (2009)
- 50) 愛知時計電機株式会社, 水素の流れを測る 超音波で測る, <https://www.aichitokei.co.jp/technicalinfo/techlist/hydrogen/> (2020/07/05)
- 51) European Commission, European-wide field trials for residential fuel cell micro-CHP, <https://cordis.europa.eu/project/id/303462> (2020/09/18)
- 52) I. Warshawsky, H. F.Hobart, H. L. Minkin, Small turbing-type flowmeters for liquid hydrogen, NASA TM X-52984 (1972)

- 53) 小林弘明ら, 超高压 (84MPa) 液化水素の流量計測, 機械学会 2017 年度年次大会講演論文集, J0110104 (2017)
- 54) K.OHIRA, K.NAKAMICHI, Y.KIHARA, Development of a Waveguide-Type flowmeter Using a microwave Method for Slush Hydrogen, JSME int., J., Ser.B, 69, 114 (2005)
- 55) 日置電機株式会社, LCR メータの基本測定原理, <https://www.hioki.co.jp/jp/products/listUse/?category=32> (2020/11/18)
- 56) 日本産業規格, JIS B 8576, 水素燃料計量システム - 自動車充填用 (2016)
- 57) 日本産業規格, JIS B 8576, 水素燃料計量システム - 自動車充填用, 表 1 (2016)
- 58) International Organization for Standardization, ISO/TC 197 Hydrogen technologies, <https://www.iso.org/committee/54560.html> (2020/09/12)
- 59) 一般社団法人 燃料電池開発情報センター, 水素技術の国際標準化情報 (2017)
- 60) International Organization of Legal Metrology, OIML R 139 Edition 2018 (E) Compressed gaseous fuel measuring systems for vehicle (2018)
- 61) 経済産業省 産業技術環境局 計量行政室, 計量制度の概要 (平成 28 年)
- 62) 経済産業省, 特定計量器を利用する場合, https://www.meti.go.jp/policy/economy/hyojun/techno_infra/12_gaiyou_keiryouki1.html (2020/09/12)
- 63) U.S. National Work Group, Hydrogen, <https://www.nist.gov/pml/weights-and-measures/legal-metrology-devices/hydrogen-us-national-work-group> (2020/09/22)
- 64) electric & hybrid vehicle technology international, New research program opens up huge potential for hydrogen vehicles, <https://www.electrichybridvehicletechnology.com/news/industry-news/new-research-program-opens-up-huge-potential-for-hydrogen-vehicles.html#:~:text=The%20Metrology%20for%20Hydrogen%20Vehicles%20%20project%20is,to%20improve%20the%20accuracy%20of%20hydrogen%20refueling%20stations.> (2020/09/22)