



水素ステーションでの1回あたりの水素充填は充填圧力70 MPaで3分程度かかる。市販されたトヨタの燃料電池車「MIRAI」は1回の水素充填で650 km走行する(参考値)。(写真撮影協力: JX日鉱日石エネルギー(株))

走り出した 燃料電池車と 水素ステーション整備

世界に先駆けて燃料電池車が市場投入され、にわかに燃料電池車(FCV)への関心が高まっている。それにとまない水素ステーションの設置も急ピッチで進められている。燃料電池車の開発動向と水素ステーションの整備、そこに関わる鉄鋼材料について紹介する。

市場投入された燃料電池車

2014年12月、トヨタから世界初となる燃料電池車の一般販売が開始された。4人乗りセダンで価格は高級車並みであるが、700台の販売に対し、発売後1か月で受注は1,500台に達した。一方、Hondaは2016年3月にも燃料電池車を市場投入すると発表している。

東京都は2016年度中にも都営バスに燃料電池車を導入するとし、2020年までに100台以上の導入を目標としている。舩添知事は「東京五輪の際に水素社会の到来を実感してもらうため、選手村や競技会場への輸送手段に活用したい」と意気込んでいる。

安倍総理は「成長戦略第2弾スピーチ」(2013年5月)において燃料電池車に言及し、「環境にやさしい革新的な自動車であり、規制を見直す」と述べている。政府は、燃料電池車を含む次世代自動車の普及台数に関して「2030年までに新車販売の5割から7割を次世代自動車が占めるようにする」という目標を掲げている。このように水素エネルギーの推進、および燃料電池車の実用化は、日本の政策として明確に位置づけられている。

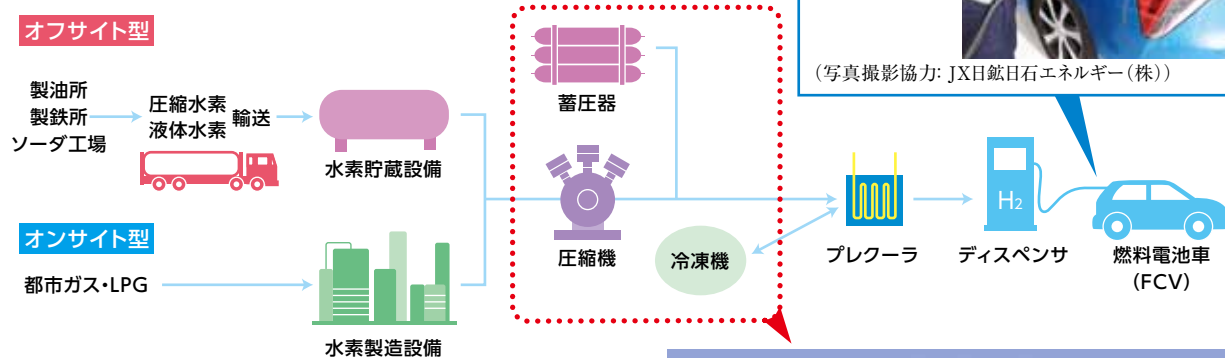
燃料電池は、燃料である水素と空気中の酸素との化学反応から電気エネルギーを直接取り出すため、発電効率が高い。燃料電池車は走行時にCO₂も環境負荷物質も排出しない。排出するのは水だけである。また、よく比較される電気自動車と異なり、燃料となる水素の充填が3分程度と短時間であり、しかも一度の充填でガソリン車並みの距離を走行することができる。現在、電気自動車の走行可能距離が200 km程度に対して、燃料電池車は500 km以上の走行が可能となっている。充電の必要もなく、駆動用の大きなバッテリーも不要である。

究極のエコカーと呼ばれる燃料電池車が市販化された今、本格普及をめざすには従来のガソリンスタンドに代わる施設、水素ステーションが不可欠である。そのため産学官が連携し、水素ステーションの拡大に向けた具体的な課題解決が進められている。

急務となる水素ステーションの整備

燃料電池車の市販に伴い、水素ステーションの整備が急がれており、2015年度内に四大都市圏(東京、名古屋、大阪、北部九州)を中心に100か所程度の設置を目標に産学官の取り組みが進められている。

① 水素ステーションで使用される設備構成 (図1)

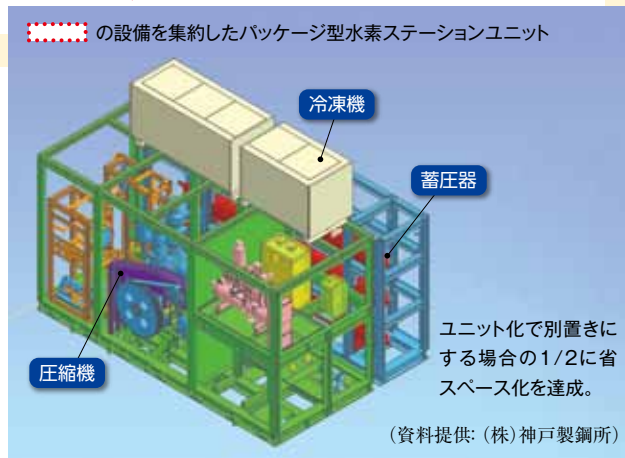


水素ステーションの拡大には、コストダウンが重要な課題となっている。現在、水素ステーションを1か所設置するのにかかる費用は4～5億円程度と言われ、一般的なガソリンスタンドの設置費用約1億円に対し、4倍以上のコストがかかる。今後、技術開発を通じて低コスト化を進めるとともに、規制を見直すことによって、使用可能な材料の拡大や設計基準の見直し等が必要となる。

現在、水素の供給方法は水素ステーション外で水素を製造し、トレーラーなどで輸送してくるオフサイト型と、ステーション内で都市ガスやLPGを原料とし、水素を製造するオンサイト型に分けられる。水素ステーションで使用される設備には主に、水素貯蔵設備（あるいは水素製造設備）、圧縮機、蓄圧器、プレクーラ、ディスペンサ（充填機）等がある。圧縮機で昇圧した水素をプレクーラで冷却してから、ディスペンサを介して燃料電池車へ供給する（図1）。燃料電池車への水素の充填圧力に関しては、2002年から35 MPaでの研究開発が進められてきたが、2008年からはガソリン車と同等の走行距離の確保を目指して充填圧力を70 MPaとし、高圧水素に対応した設備が開発されている。

水素の充填方式には、圧縮機で昇圧した水素を蓄圧器に貯めることなく燃料電池車の燃料タンクに注入する直接充填方式と、蓄圧器と燃料電池車の燃料タンクの圧力差で水素を送り込む差圧充填方式があり、またこの2つを併用する方法も提案されている。直接充填方式は蓄圧器を省略できるが、その場合には圧縮機をより大容量かつ高圧吐出可能な仕様にする必要がある。差圧充填方式では圧力変動の小さい充填を繰り返し行うことが効率的とされ、高圧蓄圧器、中圧蓄圧器、低圧蓄圧器の組み合わせによる3バンク制がとられている。

蓄圧器はタイプ1～4まで4種類検討されている（図2）。タイプ1は肉厚の金属容器で重量が大きく、これに対してより軽量化、低コスト化を目指し開発されているのがタイプ2～4である。これは薄肉のライナーの外側にCFRPを巻くことで容器が強化されており、ライナーの材料はタイプ2が低合金鋼、タイプ3がアルミニウム、タイプ4がポリエチレンとなっている。なかでもタイプ2はCFRPの



使用量を削減でき、より安価に製造できる可能性があると最近、注目されている。

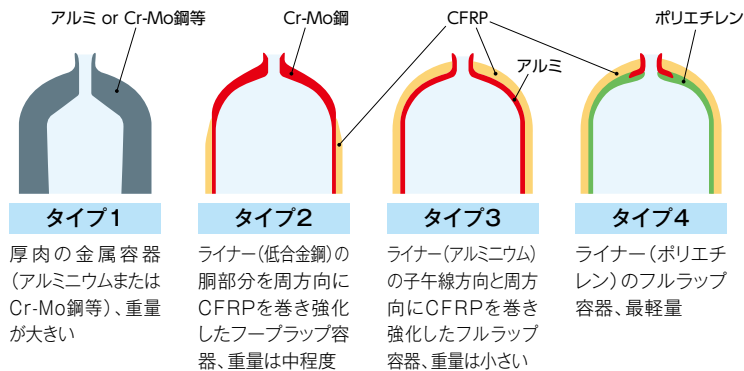
さらなるコストダウンへの取り組みとして、機器仕様の標準化や設置スペースのコンパクト化が求められており、圧縮機や蓄圧器、冷凍機などを集約させたパッケージ型水素ステーションユニットが開発されている。このユニットは別置きにする場合の1/2に省スペース化を達成し、現地工事費や工事期間の削減も図ることができる。今後、仕様の明確化、量産効果による製造コストダウンなどによって、さらなる低コスト化の実現が期待される。

使用可能な鋼種拡大への取り組み

水素ステーションの設備に使用される材料は、高圧水素環境下における耐水素脆性等の特性が必要となる。例えばSUS304の引張試験では、大気中、材料は引張方向に延性を示して細く絞れた後に破断しているが、水素中では引張方向への伸びがほとんど認められず、典型的な水素脆性破壊によって、破断している（図3）。

水素ステーションに使用される材料は高圧ガス保安法により使用可能な金属材料の種類が制限されている。現在認可されているSUS316Lは高圧水素中においても引張特性や疲労特性の顕著な低下を示さないことが確認されており、また長

蓄圧器の種類と特徴 (図2)



米国や欧州ではタイプ2容器を一般的に使用している。

（資料提供：燃料電池実用化推進協議会）

期間の使用中に水素を吸収したとしても、想定される使用条件範囲の吸収量であれば大きな脆化には至らないことが確認され実用に供している。しかしこの材料の強度は、溶体化処理状態で480 MPa程度であり、用途によっては厚肉材を使用する必要があることから、さらなる高強度化や溶接が可能な材料が望まれている。

現在、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のプロジェクトにおいて、参画する各研究機関により、高圧水素ガス中の各種金属材料の評価や新規材料の開発が推進されている。

これまで35 MPa級水素ステーション建設時に配管やバルブ、継手類に広く使用されたSUS316L材は70 MPa充填を想定した高圧化に伴い使用が制限されたが、規制緩和の要望を受け、使用可能範囲の確認のため、評価範囲を拡大した試験

が行われた。材料選定基準の検討として、評価試験は低歪速度法（SSRT, Slow Strain Rate Test）、疲労試験、疲労き裂進展試験が実施され、水素の影響は水素中の試験データと、大気中（または不活性ガス）のデータの比較により行われた。そして各種試験結果からSUS316系はオーステナイト安定化度の指標であるNi当量^{*1}を用いることにより使用条件ごとの選定基準を整理できることがわかった。

実際の水素ステーションの使用条件を考慮し、評価範囲を拡大して試験を行い、Ni当量で整理した結果、SUS316系Ni当量材はこれまで-40～85℃での温度域での使用に限られていたが、これを-45～250℃に拡大し、また圧力は低温時70 MPaが上限となっていたが、82 MPaまで使用可能とする許容範囲の拡大が進められている（図4）。

多分野が注目するSOFC (Solid Oxide Fuel Cell) の開発動向

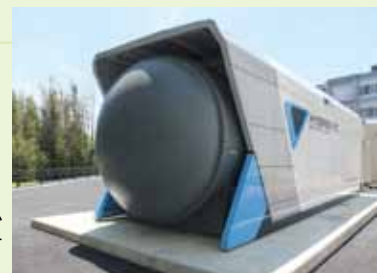
燃料電池は使用される電解質によって、発電効率や運転温度が異なるため、想定される用途が異なる。

燃料電池車に搭載されている固体高分子形（PEFC, Polymer Electrolyte Fuel Cell）は、電解質材料にイオン交換膜を使用しており、発電効率は30～40 %（HHV）となっている。運転温度が80℃前後と低く、機器の小型化が可能のため、家庭用の燃料電池や自動車や携帯端末の動力源として研究開発が進められている。

PEFCより高効率といわれているのが、固体酸化物形（SOFC）である。SOFCは電解質がイオン伝導性セラミックスで、発電効率は40～65 %（HHV）と高い。また、作動温度が700～1000℃と高く、火力発電所等の高出力発電設備の代替に期待されている。

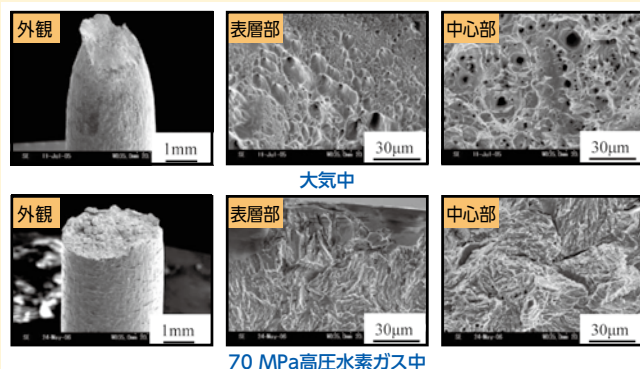
福岡県と北九州市、福岡市が共同で推進しているグリーンアジア国際戦略総合特区では、九州大学伊都キャンパスを

燃焼電池発電システム
（三菱日立パワーシステムズ（株）製）



実証フィールドとした「スマート燃料電池社会実証」が行われている。九大では、将来の業務用・産業用・発電用に展開可能な250 kW級の燃料電池発電システムを学内に設置し、キャンパス全体の電力需要の3～6 %を賄う実証研究に成功した。現在は連続運転試験を行っている。SOFCではすでに家庭用が実用化されているが、高出力な業務用や産業用は試作段階であり、九大ではこうした大型化に向けた開発を加速させる予定である。

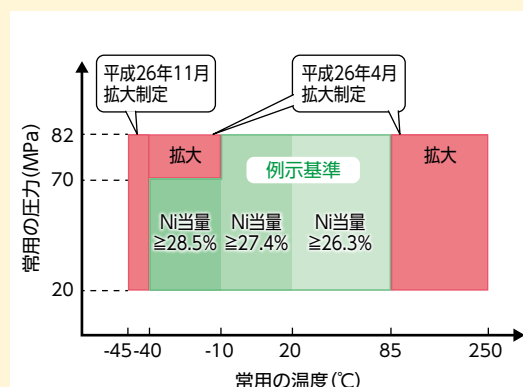
● 水素中での引張試験破断結果(SUS304) (図3)



大気環境下では延性的なディンプル破面(えくぼ状の模様)が全面にみられるが、高圧水素ガス環境下では表層部から中心部まで脆性的な破面を示している。

(出典: NEDO平成17-21年成果報告書「水素社会構築共通基盤整備事業」)

● SUS316 (Ni当量材) の一般則例示基準 (図4) (平成26年11月改訂)



(資料提供: (一財)石油エネルギー技術センター)

一方で使用可能な材料の種類の拡大も進められており、例えば圧縮機本体や充填ノズルへの使用が考えられる耐熱鋼SUH660の常温以上の許容引張応力(ASME規格値)の国内基準化が進められている。またCr-Mo鋼に代表される低合金鋼は高圧水素用機器のコスト低減に寄与し得ると、将来的な基準化を目指して、利用に向けてのガイドラインが作成されている*2。

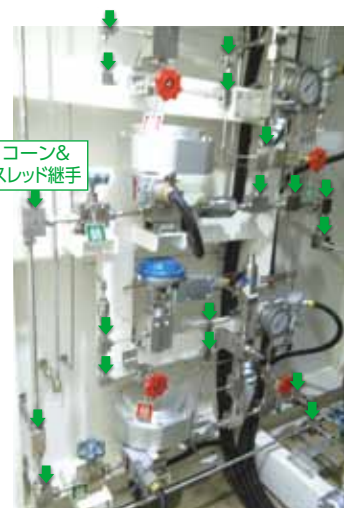
施工コストの削減をめざして

水素ステーション設置のコストを上げている要因の一つに、現地工事の日程・工数がある。

水素ステーションでは現在、公的な判断基準がないことから、配管の接続に溶接を使用できず、機械式継手であるコーン&スレッド継手を使用せざるを得ない状況にある。現在、1ステーションあたり、数百個使用されており、コスト高の一要因となっている。また、コーン&スレッド継手では施工に熟練の技能を要するうえ、振動や熱応力による締結性能の低下など、長期使用時の信頼性が懸念され、溶接施工が強く望まれている。

溶接継手を用いた場合、充填能力を満たす流量確保のために配管の内径は5~6 mm以上が求められるが、これを確保するためには、現行SUS316(引張強度480 MPa)では外径が14.29 mmの配管が必要となる。

新たに開発された高圧水素用ステンレス鋼はSUS316の約2倍の強度を有し、これを配管に用いた場合、外径が9.53 mmまでサイズダウンできる可能性がある。また、高圧水素用ステンレス鋼と溶接を併用すると、小径化にともない薄肉化できる上に、溶接施工によるコンパクト化が期待できる。耐水素脆性に関してもオーステナイトステンレス鋼では世界最高水準を



新たに開発された高圧水素用ステンレス鋼。既存の鋼管(写真左)よりも薄肉化することができる。

(資料提供: 新日鐵住金(株))

水素ステーション配管の継手部位。1ステーションあたり数百個の機械式継手を使用している。

(資料提供: (一財)石油エネルギー技術センター)

達成しており、すでに商用水素ステーションの高圧環境下における配管や継手、バルブなどで採用されている。

2020年の東京オリンピック・パラリンピックにおいて、政府は競技場や選手村を含めて水素エネルギーの供給ネットワークを展開し、世界に向けて「水素タウン」をアピールする計画を立てている。現在、産学官が連携してインフラ整備を積極的に進めており、水素ステーションの安全性やコスト等の課題を克服した先に、水素エネルギー普及の未来があるのだろう。

*1 Ni当量 (mass%) = $12.6C + 0.35Si + 1.05Mn + 1.0Ni + 0.65Cr + 0.98Mo$

*2 本取り組みは、(一財)石油エネルギー技術センター、高圧ガス保安協会、(国)九州大学により進められている。また、水素環境用の新規鉄鋼材料の開発については、JRCMグループ((株)日本製鋼所、新日鐵住金(株)、新日鐵住金ステンレス(株)、愛知製鋼(株)、国立研究開発法人物質・材料研究機構、(一財)金属系材料研究開発センター)が主体となって進められている。

●取材協力 (一財)石油エネルギー技術センター、(株)神戸製鋼所、JX日鉱日石エネルギー(株)、燃料電池実用化推進協議会、(国)九州大学、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、新日鐵住金(株)、(一財)金属系材料研究開発センター

●文 藤井美穂