

連携記事

水素ステーション整備に向けた 神戸製鋼所の取り組み

KOBELCO's Business Approach for Hydrogen Refueling Station

(株) 神戸製鋼所
機械事業部門 開発センター
商品開発部 次長 三浦真一
Shinichi Miura

(株) 神戸製鋼所
産業機械事業部
重機械部 次長 真鍋康夫
Yasuo Manabe

1 まえがき

2014年12月にトヨタ自動車が世界に先駆けて燃料電池自動車「MIRAI」の市販を開始し、2015年1月15日に首相官邸へ第一号車の政府への納車式が行われた。この首相官邸での納車式には水素インフラ構築に協力する設備メーカー代表として当社川崎社長（前列左端）も出席した。当社は材料メーカーであると同時に高圧機械・機器メーカーであり、水素インフラ構築に向けた重要なステークホルダーの一角として認めていただいた。

トヨタ自動車では「MIRAI」を2015年秋から欧米でも販売を開始し、2020年を目途にグローバルで3万台以上/年に引き上げるとしている。今後本田技研工業が2015年度中に、日産自動車が2017年に燃料電池自動車の市販開始を予定しており、環境性の高い燃料電池自動車はますます注目されていくであろう。一方、燃料電池自動車に水素を供給する水素ステーションは2015年度までに81箇所の整備が進められようとしており、2016年度以降も継続した取り組みが予定されている。



図1 MIRAI 第一号車首相官邸納車式

次世代自動車は現状普及台数も少ないため道路交通部門でのCO₂削減に対する寄与は少なく、当面はハイブリッド車などの普及によると考えられている。将来的には省エネルギー・CO₂削減・エネルギー多様化・石油依存度の軽減などの観点および中進国や後進国のモータリゼーションの進展を考慮し、電気や水素といった代替エネルギーを利用した電気自動車・燃料電池自動車への期待が大きい。また水素インフラ整備への期待は自動車産業政策という観点のみではなく、エネルギー政策という観点からも重要である。日本のエネルギー政策の基本的視点は安全性 (Safety) を前提とした上でエネルギーの安定供給 (Energy Security) を第一とし、経済効率性の向上 (Economic Efficiency) による低コストでのエネルギー供給を実現し、同時に、環境への適合 (Environment) を図り多層化・多様化した柔軟なエネルギー需給構造の構築に向けて取り組んでいくというものである。昨年4月に改定された新たなエネルギー基本計画において、はじめて水素が「将来のエネルギー安定供給と地球温暖化対策に貢献する新たな二次エネルギー」として位置づけられた。水素は製造原料の代替性が高く、未利用エネルギーや再生可能エネルギーを含む多様な一次エネルギー源から様々な方法で製造することができ、将来的に再生可能エネルギーから製造された水素を利活用することでエネルギー自給率向上につなげることができる。これらの利点を活かし水素の利活用を拡大しエネルギーの供給安定性を向上させていくことが重要である。このような背景のもと、燃料電池自動車の普及を水素インフラ構築の契機とし、将来を見据えた地球環境対策に貢献できる新たな二次エネルギーインフラの構築が図られようとしている。

神戸製鋼所は売り上げの34%を機械事業が占めている。素材系事業と機械系事業をどちらも保有している当社の機械事業においては超高圧・極低温など素材にも配慮しなければならない極限条件で使われるような機械装置に特長がある。水

素は特に高圧で材料中へ侵入し水素脆化を引き起こしやすい。超高压水素設備は従来より当社の得意分野であり、水素ステーション用材料の開発に必須な高圧水素雰囲気下材料試験装置をはじめとして水素ステーションやその主要構成機器の開発など様々な取り組みを行ってきた。またこれらの超高压機器の開発で培った要素技術や法規対応・設備設計のノウハウを活かし、2013年度から商用化のはじまった水素ステーション整備の取り組みに様々な形で貢献をしてきた。本稿ではこれら水素ステーションの整備に必須な高圧水素関連機器と水素ステーションへの当社の取り組みについて紹介する。

2 高圧水素雰囲気下機械特性試験装置の開発

トヨタ自動車の燃料電池自動車「MIRAI」は走行時にCO₂や環境負荷物質を排出せず、3分程度の充填で走行距離約650km（JC08モード走行パターンによるトヨタ測定値）とガソリンエンジン車と同等の利便性を備えるものとされ、次世代自動車として電気自動車（充電時間が急速充電でも30分かかり走行距離が200km程度といわれている）に対して大きな利便性を期待できるといわれている。燃料電池自動車への水素の充填圧力を35MPaから70MPaへと引き上げたことによりこの走行距離が可能になったが、高圧水素を利用する最大の課題は金属材料の多くが高圧水素により劣化する可能性があることにある。今までも石油精製設備などで高圧水素の使用例は多いが、ほとんどは20MPa以下で使用されていた。高圧水素ガスを扱うための金属材料の特性評価は容易でなく、評価装置も十分に整備されていなかったため、国際的にも70MPa～100MPaレベルの高圧水素による金属材料の劣化評価は行われていないのが実情であった。特に燃料電池自動車への水素の充填圧力を70MPaレベルの高圧にしたことを要因として、水素により金属材料の劣化が進む可能性が考えられた。材料が劣化しなければ今までの高圧ガス保安法に係る例示基準を参考にできるが、劣化が進むのであれば設計方法、検査方法をすべて作り直す必要があり、高圧水素にさらされる各種部材の安全面での特性評価装置が必要となったのである。当社機械事業部門は、高圧シール機構、圧力測定技術などの要素技術をベースに、高圧技術の基礎研究開発を行い、高圧技術に関し世界で先導的地位を占めてきた。高圧ガスを利用する熱間等方圧圧加装置は、焼結体の緻密化、金属粉末の高密度焼結および拡散接合部材の製造目的のほか、含浸による複合材、超電導材料、カーボン材料、セラミックス部材などの製造に不可欠な技術として利用されている。神戸製鋼所は冷間等方圧圧加装置、熱間等方圧押出装置、圧力晶析装置、固体超高压プレス装置など多様な超高压装置を開発・

商品化してきた。その技術の応用として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（当時 以下、NEDOという）のプロジェクトにおいて2003年に初めて45MPa級の高圧水素雰囲気下機械特性試験装置を開発することとなり、高圧水素使用条件下における金属材料の機械特性評価に活用していただくこととなった。

さらに2006年にNEDO プロジェクト「水素社会構築共通基盤整備事業」の一環として自動車用高圧水素タンクの充填圧力を70MPaとするための拡張性も考慮した材料評価装置として、100MPa級の圧力と充填のためのプレクーリングを考慮した-45℃～90℃の試験温度が可能となる改良装置を開発し、新日本製鐵株式会社（現新日鐵住金株式会社）、株式会社日本製鋼所、および国立大学法人九州大学に3台納入して高圧水素ガス環境下における疲労試験を行っていただき、材料の強度に及ぼす水素の影響を評価し燃料電池自動車関連の水素材料例示基準策定などに活用していただいた。2010～2011年にはさらに120MPa級・120℃まで試験を行える装置に改良し3台製作・納入し、2015年には140MPa級・-50℃～300℃までの試験を可能とした上で装置をコンパクト化するなどの改良を施した。圧力容器の材料には、低温特性とともに耐水素脆化性に優れているとされているSUH660（A286）もしくはSUS316Lを採用している。SUH660（A286）の場合には、熱処理条件を検討し、水素脆化が生じにくい条件で熱処理している。試験対象項目として疲労試験、疲労き裂伝ば試験のほか、引張試験、破壊靱性試験（KIC、JIC）が可能であり、荷重設定値は±100kN、荷重速度は最大60mm/minで、油圧による負荷制御を行っている。圧力容器の開閉には独自のプレスフレームにより上下蓋に作用するガス圧の軸方向荷重を支える構造とし急な圧力変動や電源停止などのトラブル時においても安定した試験が可能となるように配慮した。引張試験や疲労試験などを実施した場合、通常用いられる圧力容器外のロードセルの荷重値は、試験荷重だけでなく、容器内圧力に応じた圧力容器シール部の摩擦抵抗が加わった値となる。そのため、正確な試験荷重が測定できない。そこで、容器内にロードセルを配置して荷重測定することを目指し、ロードセルの荷重検出には複数のひずみゲージを使用したホイートストンブリッジ方式を採用し、容器内ロードセル信号を圧力容器外に取出して、正味の荷重もしくは変位での制御に供した。市販のひずみゲージを高圧水素中に暴露した場合、荷重変動がないにもかかわらず、時間経過とともにひずみ値が変化する場合があった。高圧水素中でひずみ値が変化する原因については、水素がひずみゲージの金属抵抗箔に侵入することで金属抵抗箔の抵抗値が変化していると推定し、ひずみゲージメーカーと協力して材質の検討を加え、何種類かの材料について高圧水素中で行った試験結果からひず

み値の変化の少ないものを選定した。選定したひずみゲージでは、高圧水素中でドリフトの少ない安定した出力が得られている。このように誤差影響因子を排した精度の良い試験を可能とする設計を心掛けた。

NEDOの後継事業である「水素インフラ等に係る基準整備に関する研究開発」水素ステーション用金属材料の鋼種拡大に関する研究開発では、圧力設備の設計基準における設計係数と水素適用に関する研究開発を行うことにより既存規制の見直し等に資するデータ、高度な技術基準案を国内及び国際

標準に提案するためのデータ取得並びにそれに係わる技術開発がなされた。装置を超高圧・高温・極低温に対応できるように開発する途上では、高圧水素や共存水分の影響がそれまでより強く働き構成部材であるシール部の樹脂材料や電気制御系統に思わぬ影響がでることもあったが、ひとつひとつの課題に対し粘り強く対応し性能の向上を実現したものである。最新型の装置の写真と仕様を示す。本装置は、雰囲気圧力が高圧になるほど有効性を持ってくるため、現状唯一無二の装置との評価を得ており、引続き多方面で活用されることを期待している。



図2 140MPa級 高圧水素雰囲気下機械特性試験装置外観

3 水素ステーション建設に向けた取り組み

当社では2003年に50Nm³/hの100MPa級水素ステーション用無給油高圧水素圧縮機「HECT」を他社に先駆けて独自開発・上市した。しかし当時から水素ステーションに100MPa級高圧水素圧縮機が必要であるといわれてはいたが、10年前の段階では実際に水素ステーションでの100MPa級高圧水素圧縮機の需要はなく、ビジネスにはならなかった。開発した「HECT」は水素関連の顧客に納入し、テスト用として使っていただくこととした。この開発機は2015年現在も水素ステーション用高圧水素機器の試験ガス昇圧用設備として見学される方にご紹介いただくほどにご活用いただいている。その後もJHFC（水素・燃料電池実証プロジェクト）で水素ステーションの実証が続けられたが、それからしばらく当社は水素ステーション用機器の取り組みは行わなかった。

再度参入したのは水素ステーション整備に向けて2011年にNEDOより公募された「直接充填方式水素ステーション用

表1 高圧水素雰囲気下機械特性試験装置仕様一覧

Maximum pressure	140MPa pure hydrogen	120MPa pure hydrogen	99MPa pure hydrogen
Temperature range	RT to 300℃	-45 to 120℃	-45 to 90℃
Loading type	Oil hydraulic	Oil hydraulic	Oil hydraulic
Evaluation items	Fatigue strength, Fatigue crack growth, Tensile strength, Fracture Toughness (KIC, JIC)	Fatigue strength, Fatigue crack growth, Tensile strength, Fracture Toughness (KIC, JIC)	Fatigue strength, Fatigue crack growth, Tensile strength, Fracture Toughness (KIC, JIC)
Maximum load	-100 to 100kN	-100 to 100kN	-100 to 100kN
Loading velocity	0.001 to 60 mm/min	0.001 to 60 mm/min	0.001 to 60 mm/min
Inside vessel size	φ145mm×460mm	φ145mm×380mm	φ150mm×460mm
Vessel structure	Double plate press frame type Bottom-closure-penetrating pull rod	Double plate press frame type Bottom-closure-penetrating pull rod	Double plate press frame type Bottom-closure-penetrating pull rod
Vessel material	SUH660(A286), SUS316L	SUH660(A286), SUS316L	SUH660(A286), SUS316L



図3 高圧水素圧縮機「HyAC」外観
写真提供 JX日鉱日石エネルギー(株)殿

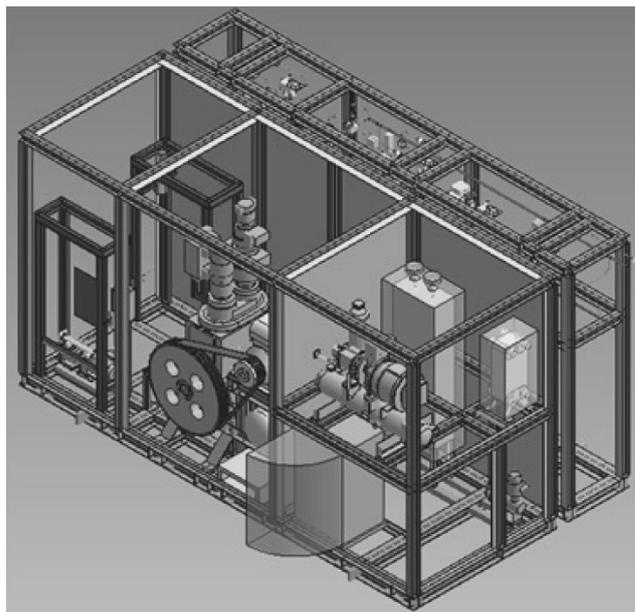


図5 水素ステーションパッケージ「HyAC mini」



図4 ディスペンサーに収納した「DCHE」
写真提供 JX日鉱日石エネルギー(株)殿

圧縮機の研究開発」に採択されてからである。このプロジェクトで運転吐出圧力87.5MPaかつ水素流量1,200Nm³/hの高圧水素圧縮機の試作機を開発・設計・製作した。

水素ステーションでは短時間で燃料電池自動車へ超高压水素を充填する必要があり大流量の圧縮機が必要であったが、水素ステーション用大型高圧水素圧縮機は国内にはなく、300Nm³/h機が最大であった。圧縮天然ガスステーションのような蓄圧タンクからの差圧充填では、燃料電池自動車へ連続充填を行うためには、超高压蓄圧タンクを数多く設置しなければならないと拡張性に問題があるほか、燃料電池バスや大型車等、より大容量の充填には適さない。このため、大流量圧縮機への展開が可能な当社に開発が求められた。燃料電池自動車への直接充填用圧縮機は過去に例がなく、流量をはじめ設計の基本となる要求仕様自体をメーカーサイドで模索しつつ顧客へ提案し、開発の中で最適化をしていく必要があり、メンテナンス性も含めこれまでの産業向け圧縮機でのアプロー

チと異なる柔軟な対応が求められた。5kg/3分で充填するための平均必要流量として1,200Nm³/hを風量仕様として開発を行った。その他産業用と異なり連続的に運転する使い方ではなく燃料電池自動車の来訪に合わせて運転しなければならないことや、燃料電池自動車への水素の充填において昇圧率一定を求められることから流量変化や起動停止が容易であるように、大型レシプロ圧縮機でははじめてインバーターモーターを採用した。

この事業を実施する中で水素ステーションにおいて水素を燃料電池自動車へ充填する際に-40℃までプレクーリングするため100MPa級の超高压熱交換器が必要であり、水素ステーションのディスペンサーに内蔵できるほどのコンパクトで高性能なプレクーラーが望まれていることがわかった。当社産業用熱交換器部門では長年極低温用にアルミろう付けプレートフィン熱交換器を製作してきたが、その設計・製作技術を適用した拡散接合型コンパクト熱交換器DCHEを開発しつつあった。DCHEは、化学エッチングにより流路を加工した板を積層し、拡散接合にて接合することで一体化した熱交換器である。材質にステンレス鋼を用いる場合は、流路サイズが数mm程度であるうえ、強度が高いため薄肉化が可能であり、比較的熱伝導が悪いステンレス鋼であっても高い伝熱性能が得られコンパクト化が可能である。当社では、このDCHEの適用用途として、コンパクト性が求められる洋上開発関連の冷却器などを中心に検討していたが、この技術を転用し、短期間で水素ステーション用に適用する開発を行い商品化した。DCHEを圧縮機のインタークーラ・アフタークーラ（設計圧力95MPa、設計温度～180℃）およびディスペンサー用プレクーラー（設計圧力92MPa、設計温度-50℃～50℃）に適用する

ことを検討し、次のような項目について事前に確認した。

拡散接合部における耐水素脆化確認試験として、拡散接合試験体から採取した試験片を対象に、水素チャージしたうえで各種引張試験を実施し、高圧水素環境であっても、母材と同様に水素の影響が認められないことを確認した。また、水素ステーションでの高頻度の起動停止を考慮し、解析による強度評価を実施するとともに、実機相当の試験体を用いた高圧環境の疲労試験(①水(常温):87.5MPa⇔1MPa、100万回、②水素(-40℃):92MPa⇔0.6MPa、7万回)により、使用上問題ないことを確認した。機器サイズは従来の二重管式熱交換器に比べ1/30~1/100と非常にコンパクトになり接続部が劇的に少なくなり、リークチェックなどのメンテナンスコストの低減が可能になった。そして2012年度にガソリンスタンド併設型商用モデルステーションのひとつとして建設されたHySUT・海老名中央水素ステーション(当時)に高圧水素圧縮機と低圧圧縮機を一体型としたパッケージ圧縮機「HyAC」およびディスプレイ収納型コンパクトプレクター「DCHE」を納入した。さらにステーションの設計において、超高圧の水素物性とその物性推算を考慮した動的シミュレーションが必要なことがわかり、当社グループで化学プラント建設およびエンジニアリングを担っている神鋼エンジニアリング&メンテナンスで燃料電池自動車への充填における様々な条件を検証することができる非定常シミュレーションを開発しステーションの設計検討に協力した。

これらの機器と実績をもとに2013年度の商用化開始から水素ステーションビジネスに参入し各機器の納入を進めるとともに、圧縮機の流量や蓄圧タンクの容量と本数、冷凍機的能力と冷媒量など機器の最適化を改めて行い、水素ステーションのコンパクト化・低コスト化および納期短縮に寄与する圧縮機・蓄圧容器・冷凍機システム・制御盤などを組み込んだ水素ステーションパッケージ「HyAC mini」として2014年に上市した。「HyAC mini」は1時間あたり最低でも6台の燃料電池自動車への水素充填が可能な能力を持つ340Nm³/hの高圧水素圧縮機を内蔵し、蓄圧タンク3バンク方式による差圧充填により3分充填が可能な仕様とした上で、商用ステーション普及に向けて狭小地や既存のスタンドに設置可能なコンパクトなものとした。また神鋼エンジニアリング&メンテナンスでは、前述した非定常シミュレーションによるモデル検討を設計に反映し、「HyAC mini」を組み込んだ水素ステーション全体エンジニアリングを行った。

当社グループの取り組みの特徴は、燃料電池自動車が普及していない黎明期の状況下、超高圧機器で構成される水素ステーションの整備においてステーション全体のエンジニアリングを行いながら流量や圧力など機器の仕様を検討し、必要な超高圧機器を自ら開発する取り組みにある。

100MPa級の機器は市場には数えるほどしかなく、上市されている機器を購入した組み合わせでは水素ステーションのコンパクト化をしながら最適な性能を発揮させることはできないため自社で機器開発を行えることは大きなメリットがある。

水素ステーションの整備および燃料電池自動車の普及拡大は、水素ステーションの設置数が増え利便性が向上しなければ燃料電池自動車の普及が進まず、燃料電池自動車が普及しなければ水素ステーションがビジネスとして成立しないため設置を進めることができないという卵と鶏の関係に例えられている。ビジネスとして成立しにくい中で機器開発を行って最適化を模索するものの、黎明期の今はマーケット規模に制限がありしかも水素ステーションの価格およびメンテナンス費用の低減が必須であるため投資回収が難しい。さらに水素ステーションは燃料電池自動車の普及に合わせた進化が求められており、普及数や車種(大型車・小型車・バス・バイクなど)の増加に応じて水素ステーションの処理能力を最適化し、超高圧設備を民生用として安全にかつ使いやすく改良しながら利便性を向上させていくことが必須であるが、このことはコストダウン可能な量産化への取り組みと背反してしまう。このような難しい条件に対応することが必要であるため、水素ステーションの整備においてますます設備メーカーの取り組みの重要性が認識されてきていると感じている。仕様の最適化も量産・低価格化を自動車業界・インフラ業界・行政などと連携した長期的な取り組みとし、関係者の皆様と緊密に協力しつつ、水素ステーションの整備に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁、第四回水素・燃料電池戦略協議会資料、(2015.6.11)
- 2) 福本紀：第9回高圧水素研究分科会 高圧水素機器適合鋼種拡大の動向について、(2015.9.11)
- 3) 真鍋康夫、宮下泰秀：神戸製鋼所技報、58(2008)、2、19
- 4) 宮下泰秀、渡辺克充：神戸製鋼所技報、59(2009)、2、53
- 5) 平成22年度～平成24年度成果報告書 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発 水素インフラ等に係る基準整備に関する研究開発成果報告書、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
- 6) 水素・燃料電池戦略ロードマップ2014ほか、資源エネルギー庁資料より
- 7) 三浦真一、真鍋康夫、名倉見治、野一色公二、栗城雄治：神戸製鋼所技報、64(2014)1、49。

(2015年11月5日受付)