（解説）

水素ステーション整備に向けた神戸製鋼グループの取り組み

Technical Developments and Kobe Steel's Business Approach for Hydrogen Filling Stations

三浦真一[*1]（工博）
Dr. Shinichi MIURA
真鍋康夫[*2]
Yasuo MANABE
名倉見治[*3]
Kenji NAGURA
野一色公二[*4]（工博）
Dr. Koji NOISHIKI
栗城雄治[*5]
Yuji KURISHIRO

By the end of 2015, there will be 100 hydrogen filling stations installed in Japan. We, the Kobe Steel Group, have various technologies in the field of hydrogen and high pressure machinery. This paper introduces our new and reliable technologies for the installation of hydrogen filling stations.

まえがき＝エネルギーと環境問題の両立が21世紀の産業社会における主要課題である。世界では中・後進国の伸長によりさらなる化石エネルギーの消費が予想され，CO_2排出による地球環境への影響に配慮しなければいけない状況になってきている。日本ではエネルギー資源を海外に依存しており，環境に適合したエネルギーへインフラを再構築していく際に，特定のエネルギーに過度に依存せずに済む二次エネルギー，つまり水素エネルギーへの転換を図ることが重要になりつつある。

水素インフラ技術には，超高圧技術が必要であること，水素脆性により材料選択に特殊な配慮が求められることなどのハードルがあるが，当社では昭和11年に1,000気圧，1,600hpの７段ガス圧縮機という当時の最高圧力機や250気圧の5,000hp水素圧縮機を独自設計により製作している[1)]ほか，昭和９年に水素瓦斯分離装置の初号機を，昭和14年にはすでに毎時7,000立方メートルの水素瓦斯分離装置を製作した[2)]記録があるなど長い歴史があり，材料メーカであり高圧機器・機械メーカである当社ならではの多彩なメニューと取り組みとなっている。本稿では，当社グループの水素ステーションに関連した取り組みと関連技術に関して紹介する。

１. 水素ステーション

1.1　水素ステーションの設置計画

燃料電池車（Fuel Cell Vehicle，以下FCVという）は，燃料に水素を使用するため走行時にCO_2を排出せず，次世代の環境対応車としてその普及が期待されているが，水素インフラつまり水素ステーションの整備が進まなければFCVを普及することはできない。一方，水素ステーションもFCVが市場に普及しなければビジネスとして成立しないため投資決定のタイミングが難しく，FCVと水素ステーションはいわゆる「鶏と卵のジレンマ」の関係にある。燃料電池の実用化と普及に向けた課題解決のため設立された民間の任意団体である燃料電池実用化推進協議会（Fuel Cell Commercialization Conference of Japan，以下FCCJという）では，**図１**に示すように2015年をマイルストーンとしてFCVの一般ユーザ普及開始時期と位置づけ，主要な国内外自動車メーカ，国内エネルギー企業の同意として「2011年からは従来からの技術実証に加えて社会実証を開始し，2015年から一般ユーザへの燃料電池自動車の普及開始を目指すと共に，以後ユーザの利便性確保のための水素供給インフラをFCV普及に先立って構築する」とのシナリオを2008年７月に発表した[3)]。2011年１月には自動車メーカおよび水素供給事業者13社が共同声明を発表し，自動車メーカはFCV量産車を2015年に４大都市圏を中心とした国内市場へ導入し一般ユーザへ販売を開始することを目指して開発を進めていることや，水素供給事業者が2015年までにFCV量産車の販売台数の見通しに応じて100箇所程度の水素供給インフラの先行整備を目指すこと等が示された。

1.2　水素ステーションの構成

水素ステーションには，水素ガスを水素供給基地から40MPaの圧力で水素カードルなどを利用し輸送するオフサイト型水素ステーションと，天然ガス・液化石油ガス（LPG）などからステーション内で改質・精製するオンサイト型水素ステーションがあり，水素を低圧圧縮機で昇圧して中間蓄圧器にて貯留したものから高圧圧縮機で82MPaまで昇圧したうえで，プレクーラにより－20℃から－40℃まで冷却してからディスペンサ（充填機）を介して水素をFCVへ充填する。この際の圧縮機や蓄圧器の組み合わせ方や能力についてはいろいろな形式が

[*1] 技術開発本部　機械研究所（現 機械事業部門　開発センター　商品開発部）　[*2] 機械事業部門　産業機械事業部　重機械部
[*3] 機械事業部門　圧縮機事業部　回転機技術部　[*4] 機械事業部門　開発センター　商品開発部　[*5] ㈱神鋼エンジニアリング＆メンテナンス　プラント事業部　技術部

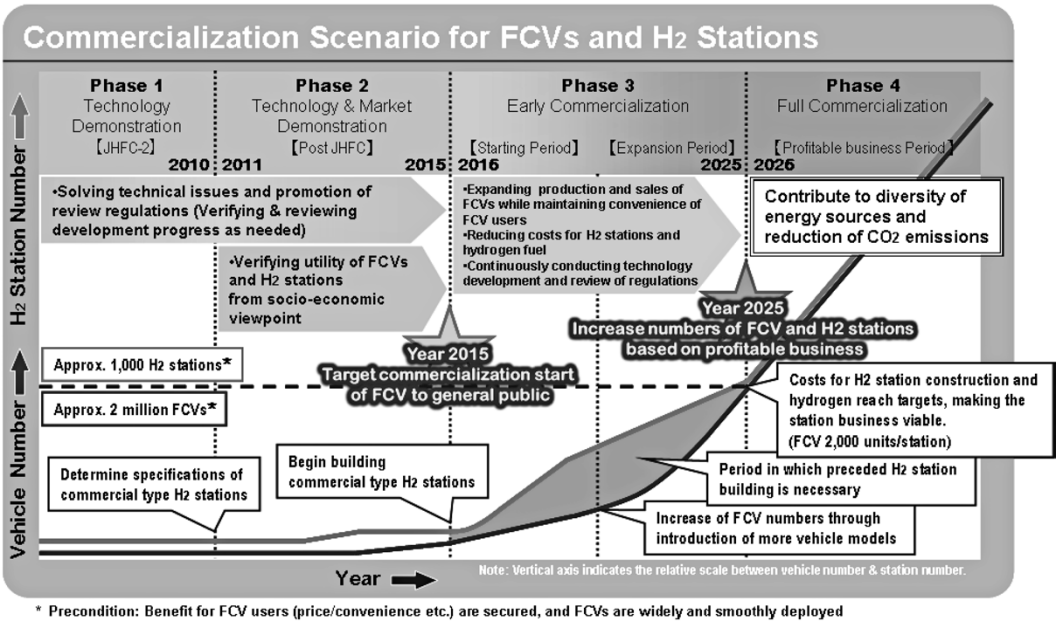

図１ FCVと水素ステーションの普及に向けたシナリオ[3)]
Fig. 1 Commercialization scenario for FCVs and HRSs in Japan[3)]

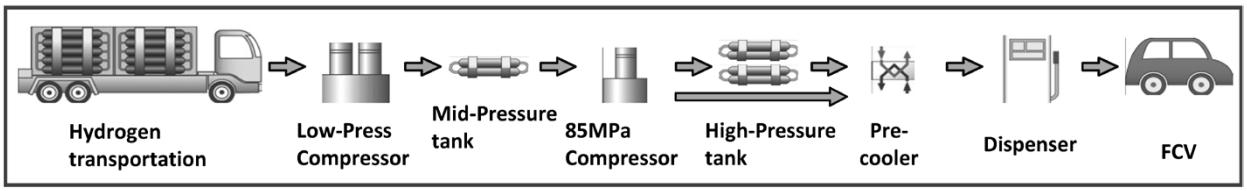

図２ オフサイト型水素ステーションの構成
Fig. 2 Configuration of off-site hydrogen station

検討されている。**図２**にオフサイト型水素ステーションの簡単な構成を示す。

当社は，これらの水素ステーションに求められる各種技術を保有および開発しており，次章以降にその詳細を述べる。

２. 高圧水素雰囲気下機械特性試験装置[4)]

水素ステーションに関連した技術開発・実証研究は，水素・燃料電池実証プロジェクト（JHFC）としてFCVへの充填圧力35MPaでの「燃料電池自動車等実証研究」と「水素インフラ等実証研究」が2002年から行われてきたが，FCV実用化課題のひとつである１充填当たりの走行距離（航続距離）の確保，つまり既存のガソリン車と同等の走行距離の確保を目的としてFCVへの充填圧力を70MPaとした実証試験が2008年頃からスタートした。

これに先立って当社は，独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下，NEDOという）プロジェクトにおいて2003年に初めて高圧水素雰囲気下機械特性試験装置を開発した（**図３**）。さらに2006年には100MPa級の同装置を３台製作・納入し，FCV関連の水素材料例示基準策定などに活用された。

当社機械事業部門では，1950年代前半に140MPaの増圧機を活用した液体を対象とする高圧容器の強度研究に端を発し，高圧技術の基礎研究開発を行ってきた。高圧シール機構，圧力測定技術などの高圧要素技術をベース

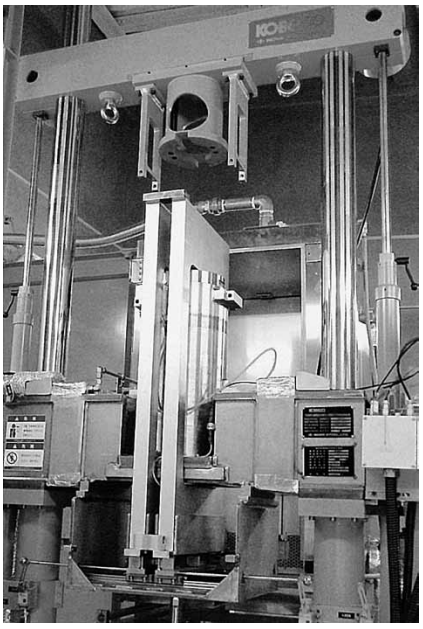

図３ 高圧水素雰囲気下機械特性試験装置外観
Fig. 3 Testing apparatus with hydrogen under high pressure

に，高圧技術に関し世界で先導的地位を占めるに至っている。高圧ガスを利用する熱間等方圧加圧（Hot Isostatic Pressing，以下HIPという）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。これまで当社は350台以上のHIP装置の納

入実績があり，現在では国内唯一の高圧HIP装置メーカとしてその地位を確立している。その他，冷間等方圧加圧装置，熱間等方圧押出装置，圧力晶析装置，固体超高圧プレス装置など多様な超高圧装置を開発・商品化してきており，100MPa級高圧水素雰囲気下機械特性試験装置はその技術の応用である。

3．直接充填用高圧水素圧縮機

当社機械事業部門は，1915年に国産初のレシプロ式圧縮機を製造して以降，スクリュー式やターボ式など圧縮方式の多様化を進め，冷凍機やヒートポンプなどへの用途拡大と技術改良を重ねて，現在では1.5kWの小型から数万kWに及ぶ大型までの幅広いメニューを有する総合圧縮機メーカである[5)]。プロセス用レシプロ圧縮機メーカとしても世界トップクラスの実績を保有しており，水素関連の圧縮機は石油精製プラントや水素ボンベ充填用などとして様々な分野で多数の実績を有している。

当社では高圧水素ガスに適したレシプロ式を採用し，2003年に50Nm^3/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（**図4**）。本機は水素関連の顧客に納入し，2013年現在も水素ステーション用高圧水素機器の試験ガス製造用にご活用いただいている。

2011年，当社はNEDOより公募された「直接充填方式水素ステーション用圧縮機の研究開発」に採択され，運転吐出圧力87.5MPaかつ水素流量1,200Nm^3/hの水素圧縮機の試作機を開発・設計・製作した。水素ステーション用高圧水素圧縮機は，短時間でFCVへ超高圧水素を充填する必要があり，1,200Nm^3/hは5kg／3分で充填するための平均必要流量とした。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，FCVへ連続充填を行うためには，超高圧蓄圧タンクを数多く設置しなければならず拡張性に問題があるほか，FCV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，大型圧縮機への展開が可能な当社に開発が求められたのである。FCV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。折しも高圧ガス保安法改正に伴い，100MPaクラスの水素ガス雰囲気における材料の水素脆化等の評価が新たに求められるなど，まさに超高圧機器における豊富な実績を有する材料・機械総合メーカである当社でなければ対応できない開発であり，開発・商品化を行政・顧客サイドと一体となって行ってきた。

開発仕様においては，燃料電池の特質を考慮し無給油型としてガス側に油が同伴することを防ぐ設計としている。また，高頻度の起動停止が求められる水素ステーション用圧縮機としてインバータ制御電動機を採用し，起動時の突入電流を抑えることでステーション側の受電設備仕様を抑え，トータルとして顧客サイドでの低コスト化に貢献することにも配慮した。また圧縮機に求められる充填流量を明らかにするため独自にシミュレーションプログラムを開発し，充填モデル流量カーブを作成したうえでインバータ制御を活用してこれに従った可変速度運転を行い問題なく運用できることを実証した。さらに，従来の二重管式熱交換器に替えて後述する拡散接合型コンパクト熱交換器（Diffusion bonded Comapct Heat Exchanger, 以下DCHEという）を採用することで，ガスクーラ部のサイズを劇的にコンパクト化し，ユニットサイズの小型化を実現した。これらの成果を活用した形で，水素供給・利用技術研究組合（以下，HySUTという）・千住ステーションへ同型機を，さらにHySUT・海老名中央水素ステーションへは高圧水素圧縮機と低圧水素圧縮機を一体型としたパッケージ圧縮機「HyAC（ハイアック）」を納入し，FCVへの水素充填試験に利用していただいている（**図5**）。水素ステーション用としては，上述したように超高圧圧縮機の運用性を考慮して開発することが求められており，水素ステーションの中心機器である水素圧縮機に関しては今後も顧客と連携した性能向上が求められる。

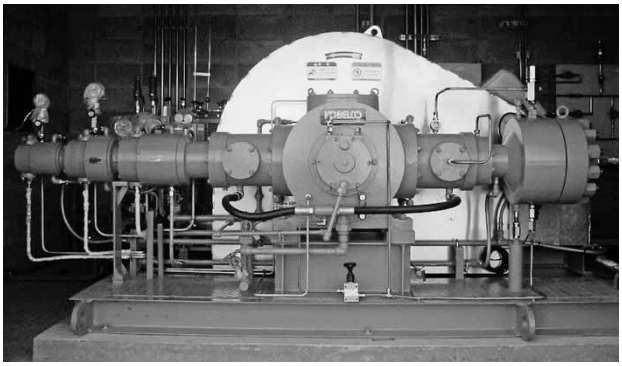

図4 水素ステーション用無給油高圧水素圧縮機外観
Fig. 4 Oil-free compressor preparing high-pressure hydrogen for filling station

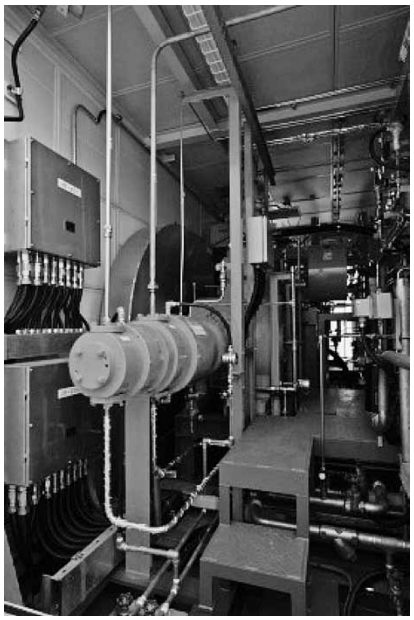

図5 パッケージ型水素ステーション用無給油高圧水素圧縮機外観（写真提供：JX日鉱日石エネルギー㈱）
Fig. 5 General view of package type oil-free high pressure hydrogen compressor for hydrogen filling station (Photo : Courtesy of JX Nippon Oil & Energy Corporation)

4. 拡散接合型コンパクト熱交換器（DCHE）[6)]

圧縮機の開発を進める中で，水素ステーションにおいては，超高圧水素を水やブラインで冷却するための熱交換器のコンパクト化に課題があることが明らかになった。当社はこれまで，40年以上の納入実績を有するアルミ製ろう付けプレートフィン熱交換器「ALEX®注)」の設計・製作技術を適用したマイクロチャネル熱交換器であるDCHEの開発に取り組んできていた。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るため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。従来，水素ステーション用熱交換器としては，二重管式熱交換器などが使われてきたが，接続継手の数が多いことや，機器サイズが大きいことが課題であった。とくに，ガソリンスタンドの併設を想定されている水素ステーションにおいては小型化が大きな課題となっていた。そこでDCHEを圧縮機のインタクーラ・アフタクーラ（設計圧力95MPa，設計温度～180℃）およびディスペンサ用プレクーラ（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で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⇔1 MPa，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。

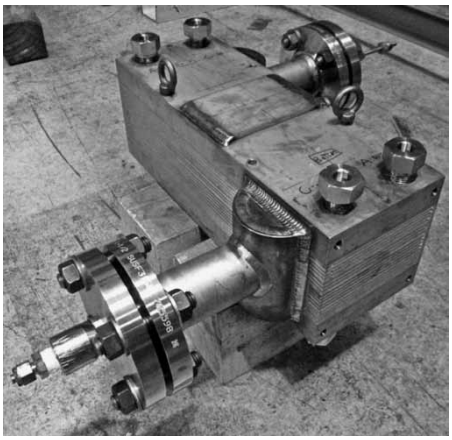

図6 水素ステーション向けDCHE外観
Fig. 6 General view of DCHE for hydrogen filling station

脚注）ALEXは当社の登録商標である。

図7 DCHEが設置された水素ステーション用ディスペンサの外観（写真提供：JX日鉱日石エネルギー㈱）
Fig. 7 General view of dispenser with DCHE for hydrogen filling station (Photo : Courtesy of JX Nippon Oil & Energy Corporation)

2012年度には，実際に水素圧縮機用のアフタクーラおよびディスペンサ用のクーラを高圧ガス保安法特定設備検査規則に基づき製作，受検のうえ納入し，HySUT・海老名中央水素ステーションにて運用いただいている（**図6**，**図7**）。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を劇的に少なくした。このため，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り，特にディスペンサ内にプレクーラを内蔵することでコンパクト化したことを関係者に高く評価いただいている。

5. 水素ステーションエンジニアリング[7)]

水素ステーションの最適化・低コスト化のためには，優れた機器を開発するのみでなくステーションの運用面を考慮し最適化することが重要である。直接充填用高圧水素圧縮機の開発において圧縮機能力と高圧蓄圧器・中圧蓄圧器と組み合わせた能力検討，コンパクト性の追求が重要であることがわかった。このシミュレーション検討に関しては，当社グループ企業である㈱神鋼エンジニアリング＆メンテナンスが担当している。同社は化学プラントの設計・施工で多数の実績があり，汎用非定常プロセスシミュレータを利用した水素ステーション全体の充填シミュレーションプログラムを作成した。70MPa級の水素ステーションに必要となる水素物性データは，シミュレータ保有の物性データでは誤差が大きいため，NIST（National Institute of Standard and Technology，アメリカ国立標準技術研究所）およびAIST（National Institute of Advanced Industrial Science and Technology，独立行政法人産業技術総合研究所）の水素物性データと一致するように同社にて独自に補正した物性式を組み込んだ。また，配管部や機器部における圧力損失や放熱なども，これまでのプラント設計でのノウハウに基づきシミュレーションに考慮することで精度を向上することが可能となった。なお，本シミュレーションモデルにて実際の水素ステーションでの水素充填試験を再現した結果より，設備検討するのに十分な精度があることを検証済みである。充填シミュレーション例を**図8**に示す。このシミュレーションプログラムは，HySUT商用モデルステーションの計画の段階で活用いただき高い評価をいた

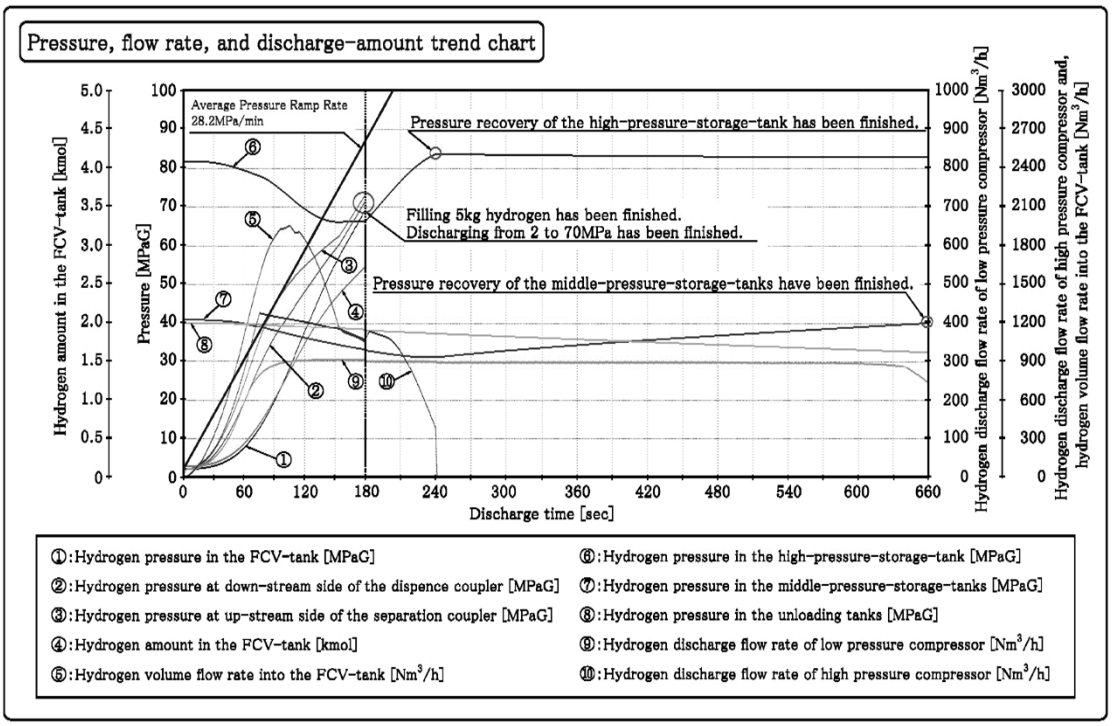

図８ 水素充填シミュレーションの例
Fig. 8 Example of simulation results for hydrogen filling

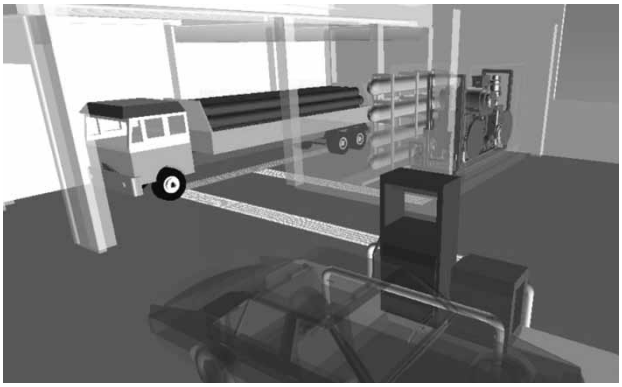

図９ 水素ステーションの３Dモデルの例
Fig. 9 Example of 3 dimensional modeling for hydrogen filling station

だいた。設計段階での仕様の最適化検討・運用検討に利用し，連続充填への対応，水素トレーラ不在時の対応，ステーションの能力拡張検討などに活用いただいている（**図９**）。今後，FCVが普及する過程において既設水素ステーションの拡張性検討などに活用したい。

むすび＝当社グループは，高圧機器の開発・製造を行ってきた豊富な実績とノウハウを活用し，70MPa級の水素ステーション設置における高圧ガス保安法対応・顧客へのサポートに関しては国内トップクラスの体制を整えている。今後，実用化に向け低コスト化が求められる水素ステーションは，これまでに実績のない超高圧分野であり，汎用小型機器の組み合わせでの対応は初期黎明期のみの限定的なものである。必要な機器・技術を独自に開発し，提供しながら最適化・コンパクト化・低コスト化を図っていく取り組みと，エンジニアリング的な観点から全体を取りまとめて機器仕様にフィードバックしていく視点および体制が必要であり，当社の取り組みは行政やステーションオーナであるインフラ各社から高く評価いただいている。今後，ステーションオーナをはじめディスペンサメーカなどと協力し，水素ステーションの最適化・コストダウンを行い，水素インフラの整備を通して将来の水素社会に貢献していきたい。

参　考　文　献

1） 花井嘉夫. 神戸製鋼. 1953, Vol.3, No.4, p.151-153.
2） 牧田顕次郎. 神鋼. 1940, Vol.4, No.13, p.7-11.
3） 燃料電池実用化推進協議会. "FCVと水素ステーションの普及に向けたシナリオ". FCCJ活動案内　燃料電池の実用化と普及に向けて. 2011, http://fccj.jp/pdf/fccj_pamphlet.pdf,（参照 2013-11-29）.
4） 宮下泰秀ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.2, p.53-56.
5） 毛利修三. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.3, p.1.
6） 三輪泰健ほか. R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.2, p.23-27.
7） 山下和宏ほか. 第20回燃料電池シンポジウム講演予稿集. p.113-116.