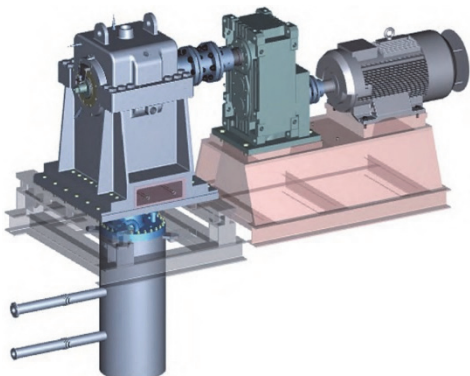


燃料電池車用水素ステーション向け 超高圧液体水素昇圧ポンプの特長

Features of Ultra-high Pressure Liquid Hydrogen Pumps
for FCV Hydrogen Refueling Stations



三菱重工業株式会社
原子力セグメント 水・エネルギー部
営業グループ
国内営業チーム

カーボンニュートラルの実現に向けて、燃料電池の技術は、乗用車のみならず、商用車、港湾、鉄道等の多様な場面においても今後の需要拡大が期待されている。それに伴い、燃料電池車向け水素ステーションの大容量化、車両への充填の高速化が求められている。

本報では水素ステーションの中でも大容量化、充填の高速化に適した液体水素昇圧方式の水素ステーションのシステムの紹介及びそのステーション向けに開発した液体水素昇圧ポンプの構造と特徴、開発状況及び今後の取組みについて紹介する。

1. 液体水素昇圧方式 水素ステーションでの燃料電池車への 充填フロー及び機器構成

現在の水素ステーションでは航続距離を延ばすために 70MPa 程度の高圧力での水素充填が求められており、その昇圧方式としては、液体水素をポンプで昇圧する方式と水素ガスを圧縮機で加圧する方式がある。従来の水素ステーションでは、各水素製造所で製造された水素ガスを輸送用に 20MPa 程度まで圧縮機で圧縮し、トレーラにて水素ステーションに輸送、その後、圧縮機でさらに 70MPa まで加圧する方式が主流であった。

一方で、今後の水素需要拡大、燃料電池 (Fuel Cell, 以下 FC) バスや FCトラックといった大型モビリティ向けの普及拡大を想定すると、製造した水素ガスを密度の大きい液体水素に変換後にローリーにて大量に水素ステーションの液体水素貯槽に輸送し、それを大流量のポンプで昇圧する方式の方が、重量当たりの消費エネルギーが半分以下になり、輸送量も大幅に増えるため主流になると見込まれている。

図 1 に液体水素昇圧方式水素ステーションの機器構成例を示す。ローリーにて運搬された液体水素は液体水素貯槽に蓄えられ、液体水素昇圧ポンプで昇圧された後、気化器を経て高圧貯圧器に高圧の水素ガスとして貯留される。高圧貯圧器との差圧を利用して、ディスペンサーを介して燃料電池車 (Fuel Cell Vehicle, 以下 FCV) に水素が充填される。FCV に急速に水素ガスを充填すると温度が上がるため、予め水素ガスをチラー (冷凍機) にて冷却してから充填される。充填により高圧貯圧器の圧力が規定値を下回った際、ポンプを運転することで、高圧貯圧器に再度水素が貯留される。

三菱重工業株式会社 (以下、当社) は、宇宙ロケットや船舶輸送用液化天然ガス開発で培った極低温技術、及び高い安全性・信頼性が要求される原子力発電プラント向け機器の製品開発で培った流体、材料、熱、振動等の要素技術を基に、2018 年から 90MPa 級の液体水素昇圧ポンプ開発を行い、2021 年に性能開発完了し、その後信頼性向上のため液体水素実液を用いた耐久性確認試験を実施しており、2024 年現在も継続実施中である。

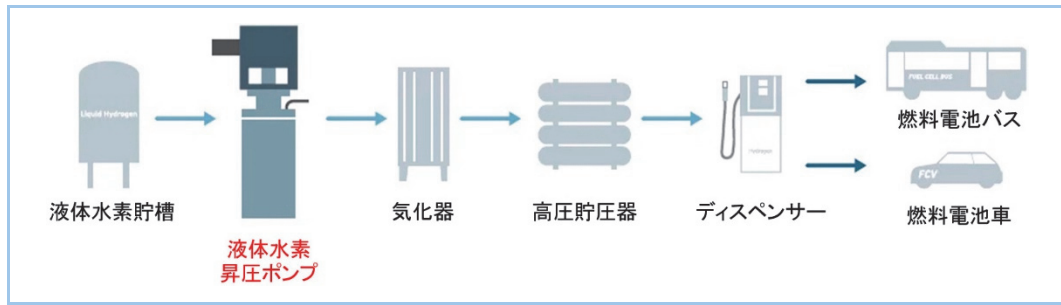


図1 液体水素昇圧方式水素ステーションの機器構成例

2. 当社の液体水素昇圧ポンプの構造と特長

当社の開発したポンプは、 -253°C の極低温環境かつ90MPaの超高压仕様という厳しい基本要件に加えて、今後の液化水素昇圧型水素ステーションに求められる高度な技術仕様を満たすべく開発し、その結果として下記特長を有する。本項ではそれぞれの特長について説明する。

- ・大容量かつ大流量から小流量まで高度な流量制御が可能
- ・省スペースなコンパクトユニット
- ・液体水素のガス化抑制による高効率性能
- ・要素試験を用いた長寿命設計
- ・実運用システムでの耐久性、性能確認試験により検証された高信頼性
- ・独自の遠隔監視システムによる安定運転が可能

2.1 大容量かつ大流量から小流量までの高度な流量制御が可能

図2に液体水素昇圧ポンプの外観図を示す。モータ駆動であり減速機を介してポンプ（駆動部）にトルク伝達される。モータは引火性雰囲気でも自らが引火源とならない防爆仕様を備えたモータを使用している。

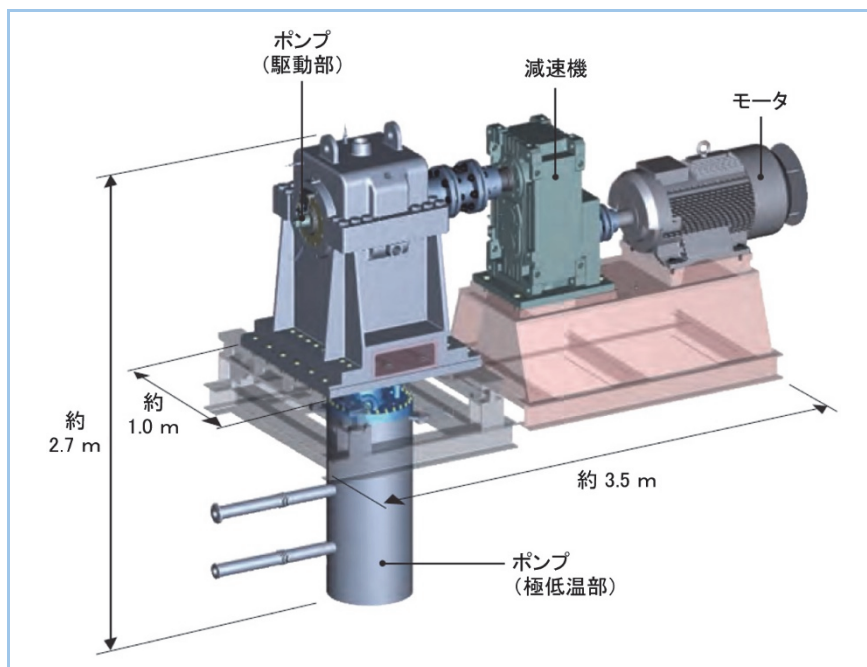


図2 液体水素昇圧ポンプの外観図

モータはインバータ駆動であるためインバータの出力周波数を制御することで、ポンプの回転数を任意に調整することができる。高圧貯圧器の状況に応じて柔軟かつ精密な流量調整が可能である。

水素ステーションでは車両ごとのタンク内の残存水素圧が異なり、極力短時間での充填完了が求められる。一方で、水素ガスの昇圧時の高温化を抑制するため昇圧速度に制約があり、各状

況に合わせて充填による昇圧速度を制御することが求められる。当社ポンプは従来のコンプレッサと比較して約 5 倍の流量を流すことができる大容量であり短時間での充填(充填時間は約 1/5 となる)に適しており、かつ小流量への制御も容易である。

2.2 省スペースなコンパクトユニット

空冷のモータ駆動であり、油圧駆動の場合に必要な油圧ユニットや油圧配管の設置、冷却水などのユーティリティ設備が不要である。そのため機器を含めたユニットサイズとしては、図 2 に示すように、幅 約 3.5m、奥行 約 1.0m、高さ 約 2.7m とコンパクトであり限られたスペースへの設置が求められる定置式のステーションや車上に載せる移動式のステーションでは強みとなる。

2.3 液体水素のガス化抑制による高効率性能

液体水素昇圧ポンプの仕様諸元を表 1 に、構造図を図 3 に示す。モータの回転運動を駆動部でピストンの往復運動に変換している。ピストンが上側に運動することでシリンダ内に液体水素がサンプ側から引き込まれる。この際、吸入側の弁が開となり、吐出側の弁が閉の状態となる。次に、ピストンが下側に運動することで、液体水素が吐出側へ吐き出される。この際、吸入側の弁が閉となり、吐出側の弁が開の状態となる。

表1 液体水素昇圧ポンプの仕様諸元

ポンプ方式	往復動型
駆動方式	モータ(インバータ駆動)
吸込部構造	サブマージド型
定格圧力	90MPa
定格流量	1800 Nm ³ /h* (約 160 kg/h)

※Nm³:標準状態(大気圧, 0℃)における体積

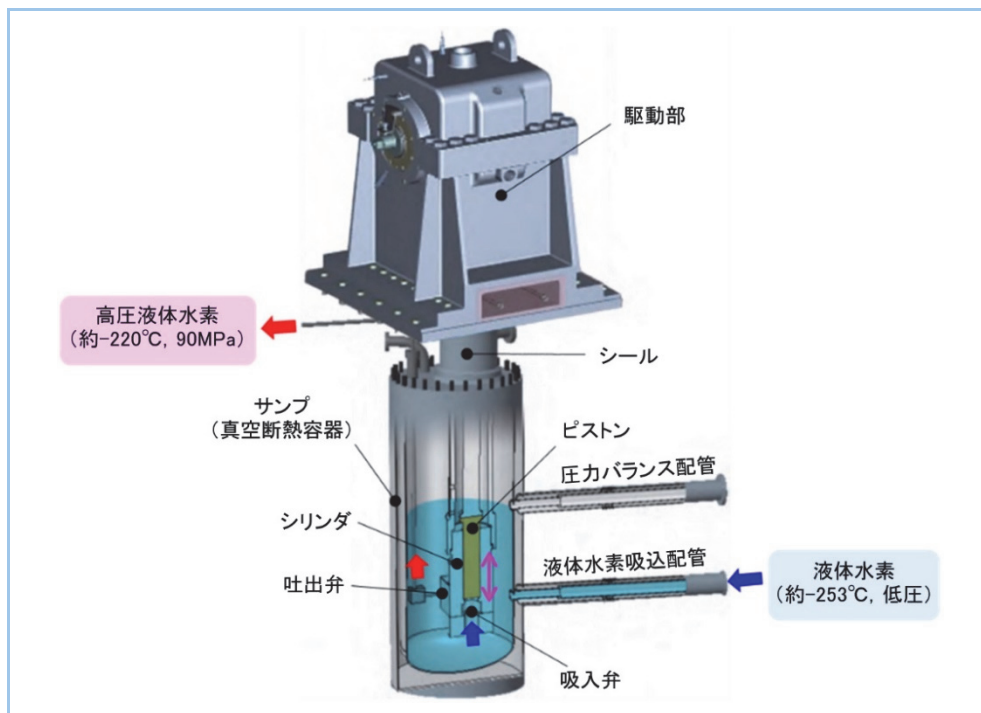


図3 液体水素昇圧ポンプの構造図

気体に比べて液体は圧縮効率に勝るため、ガス圧縮方式に比べて圧縮動力を約 1/4 に大幅低減できる反面、極低温流体である液体水素は、外部入熱、昇圧時の発熱によるわずかな熱によりガス化するリスクがあり、シリンダ内に水素ガスが混入すると、昇圧効率が大幅に低下する。

そこで、入熱を最小限にすべくシリンダ全体を液体水素サンプに収めるサブマージド構造を採用している。また、高荷重での摺動を繰り返すピストンリングとシリンダ間では摺動熱が発生し液体水素のガス化が促進されるため、ピストンリングの開発においては要素試験を繰り返し実施し、当該環境において摺動熱が低くかつシール性に優れる材料を選定した。これらの検討を通して入熱・

発熱による液体水素のガス化を最小限に抑えられる、安定して効率の高いポンプを実現した。

2.4 要素試験を用いた長寿命設計

弁やシールはポンプ運転中、ピストンの上下に伴い高頻度で接触または摺動状態となるため、これらの部品の消耗速度はメンテナンス頻度に大きく影響する。そこで、ポンプ全体の耐久性試験とともに消耗部品の寿命評価のための要素試験を実施している。これらの試験では作動周期を加速した試験とし、短期間で寿命評価を可能としている。

図 4 に液体水素環境下での弁要素試験の様子を示す。弁は液体水素の極低温環境下であり、ピストンの上下に伴い開閉を繰り返すため、厳しい使用条件となる。要素試験では実物と同サイズの弁を液体水素環境下において、実荷重を繰返し付加し一定の評価時間ごとの詳細観察及び形状計測により摩耗、変形など消耗の推移を確認し、長寿命化設計に反映している。

また、シールの要素試験も実施している。サンプの上部は外部からの入熱による液体水素のガス化により、ガス水素環境となる。ピストンが上下の往復運動を行うため、本シールはピストンの軸と静止部品の間で繰返し摺動する部品となる。図 5 にガス水素環境下でのシール要素試験の様子を示す。要素試験では実物と同サイズのシールと軸を用い、軸を往復運動させるとともに、シール部を水素ガスにて加圧している。シールからのリーク量を連続的に計測し、シールの機能評価を行っている。本シールも同様に一定の評価時間ごとの点検、計測により消耗の推移を確認し長寿命設計に反映している。

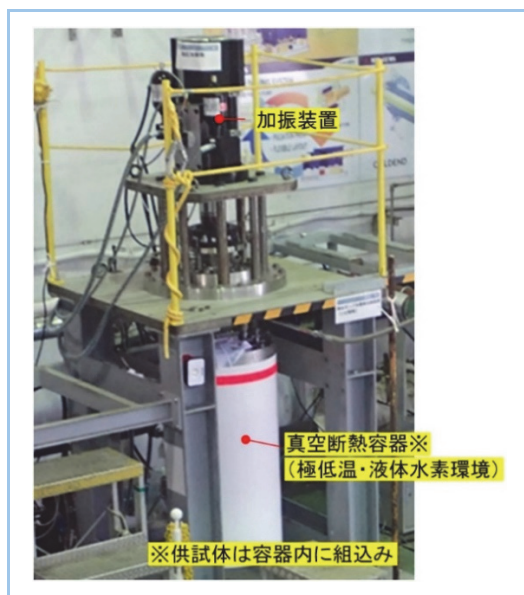


図4 液体水素環境下での弁要素試験装置



図5 ガス水素環境下でのシール要素試験装置

2.5 実運用システムでの耐久性、性能確認試験により検証された高信頼性

当社はシステム全体の耐久性試験のため、国内では実施困難な液体水素実液での長期耐久試験を米国カリフォルニア州のファーストエレメントフューエル社が運営する水素供給設備にて実施している。図 6 に水素供給設備を示す。ここは、米国カリフォルニア北部の水素ステーションに水素ガスを供給するためのハブ設備であり、貯槽に貯められた液体水素を気化器で気化させ、圧縮機を用いてトレーラに搭載された高圧貯圧器に水素を充填する設備である。ここに当社のポンプにより昇圧し、気化させる設備を追設し実運用の中で長期耐久性確認、性能確認試験を実施している。

累計運転時間は 1000 時間以上、累計水素充填量は約 120 ton を達成した。これは FC バスの水素充填量を 28 kg/台とすると約 4200 台分に相当する量である。本耐久性試験において、大流量の液体水素を安定して供給可能であること、ポンプ運転中の液体水素のガス化が極めて少なく、大気への水素ガス放出がゼロであることを確認した。この耐久性試験において、全運転期間の性能関連データを収集・蓄積している。また、評価時間ごとの分解点検を実施し、主要消耗部

品の耐久性確認を行っている。

液体水素昇圧ポンプは極低温(−253℃)・超高压(90MPa)という過酷な環境下で使用されるため、消耗部品(弁、シール等)の寿命が一般的に短くなってしまいが、当社は消耗部品の長寿命化に取り組んでおり、ポンプのメンテナンスインターバル延伸化を図る。



図6 ファーストエレメントフューエル社運営の水素供給設備

2.6 独自の遠隔監視システムによる安定運転が可能

当社では、ポンプの各運転パラメータ(流量、温度等)を常時、遠隔から監視できるよう独自の遠隔監視システムを構築した。これにより、長期間のポンプ運転状況のデータ構築、異常発生時の状況把握、異常発生前の予兆検知による的確なメンテナンス計画の検討が可能となり、ポンプの安定運転を可能とする。

3. 今後の展開

液体水素昇圧ポンプ開発の更なる取組みとして、液体水素昇圧ポンプをキー技術に、当社が培った原子力プラント設計技術を活かし、水素ステーションの全体最適化(水素ガスのロス抑制、機器構成の最適化等)にも取り組んでいる。図7に水素ステーション最適化の取組み例を示す。圧縮機系統は、ポンプ停止時など限定的な水素ガス回収用途のみとすることで小容量化、FCバス・FCトラックのような大容量車両に対してもポンプからの直接充填を可能とすることで高圧貯圧器の削減等により、CAPEX(資本的支出)及びOPEX(事業運営費)の低減を図る。

水素社会の実現に寄与する新たなソリューションとして、今回開発した液体水素昇圧ポンプ及びステーション全体の最適化を通じて、グローバル社会全体のカーボンニュートラル実現に貢献していく所存である。

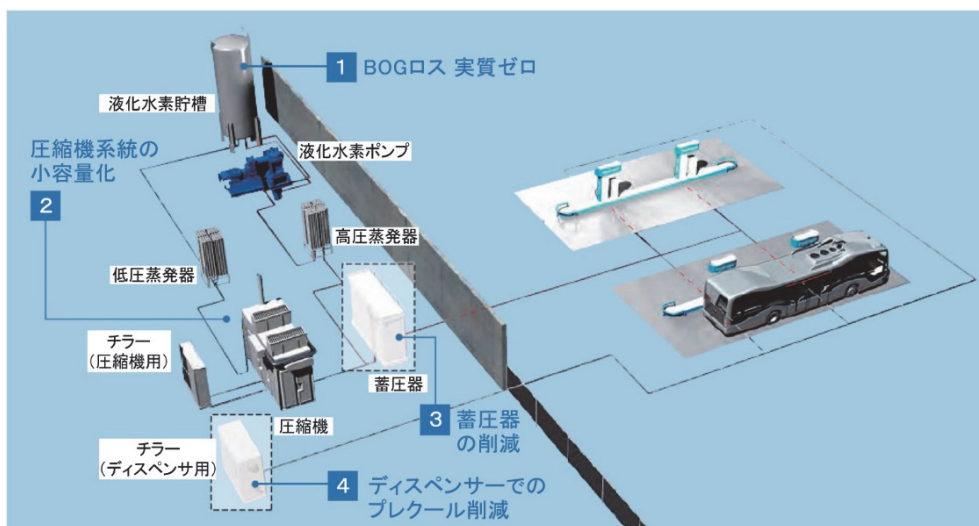


図7 水素ステーション最適化の取組み