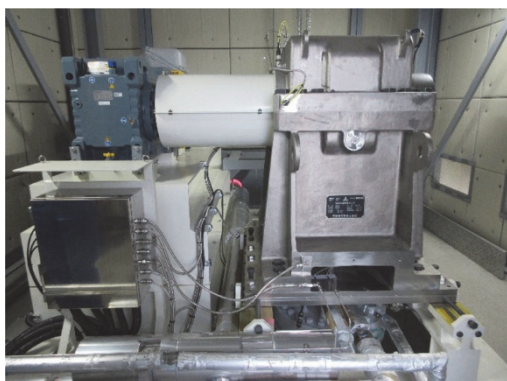


大規模水素ステーションを支える 超高圧液体水素昇圧ポンプの開発

Development of Ultra-high Pressure Liquid Hydrogen Pump for Heavy-duty Hydrogen Refueling Stations



原田 基至^{*1}
Motoshi Harada

浅井 英明^{*2}
Hideaki Asai

光田 公彦^{*3}
Kimihiko Mitsuda

岡本 郷^{*2}
Go Okamoto

木原 勇一^{*4}
Yuichi Kihara

諫山 秀一^{*5}
Shuichi Isayama

カーボンニュートラル実現に向けた世界的な取組みの中で、今後、燃料電池商用車(トラック、バスなど)を対象とする大規模水素ステーションの需要増加が予想される。商用車は長移動距離・高稼働率が求められるため、燃料電池車の普及には大量の水素を短時間で車両に充填する技術が不可欠となる。液体水素昇圧ポンプは大量・高速水素充填を可能とする機器であるが、ポンプの不具合は水素ステーションの稼働停止に直結するため、信頼性が極めて重要である。三菱重工業株式会社は大流量かつ高信頼性の超高圧液体水素昇圧ポンプを開発した。米国事業者の水素出荷拠点において長期耐久試験を行った結果、1200 時間以上の耐久性を持ち、大規模水素ステーションの安定運営に資するポンプであることが実証された。

1. はじめに

国内外でカーボンニュートラル実現に向けた技術開発が活発に進められている。とりわけ自動車を代表とする運輸部門は世界全体の温室効果ガス排出量のうち約 15%を占めているため⁽¹⁾、重要な技術開発対象となっている。その中でも、長移動距離・高稼働率が求められる商用車(トラック、バスなど)においては、燃料電池車(Fuel Cell Vehicle 以下、FCV)や水素エンジン車の開発、導入促進の取組みが行われている。車両の導入と並行して水素供給インフラの整備も喫緊の課題となっており、今後、商用車を対象とした大規模水素ステーションの需要増加が予想される⁽²⁾。

現在、FCV では常温・高圧(70MPaG または 35MPaG)で水素を車載タンクに貯蔵する方式が一般的となっている。FCV に水素を充填するためには、水素ステーション設備は FCV のタンクよりも高い圧力の水素を作り出す必要がある。これを実現する水素のハンドリング方法には図 1 に示す多数の方式が存在する。従来の乗用車向け水素ステーションでは、中圧(20MPaG 程度)の水素ガスボンベを工場から輸送し、水素ステーション設備の圧縮機で高圧(80MPaG 超)まで昇圧する方式が主流となっている。しかし、大規模水素ステーションにこの水素ガス・圧縮機方式を適用する場合、

- ・ 輸送・貯蔵:水素ステーションの水素消費量が多いため、水素製造工場から高頻度で配送する必要がある
- ・ 昇圧・充填:FCV への水素供給流量が大きいため、圧縮機の並列化や大量の蓄圧器設置が必要となる

*1 総合研究所 流体研究部

*2 原子力セグメント 水・エネルギー部

*3 原子力セグメント 水・エネルギー部 主席技師 技術士(機械部門)

*4 総合研究所 流体研究部 主席研究員

*5 総合研究所 機械研究部 主席チーム統括

といった課題が生じる。その結果、広大な敷地面積の確保が必要なことや高額な設備導入・運営コストなどが水素ステーション設置のネックとなりうる。一方、液体水素及びポンプを利用する方式は、

- ・ 輸送・貯蔵:液体水素は水素ガスよりも密度が高く、1MPaG 以下の低圧で取り扱うことができるため、大量輸送、大量貯蔵が可能となる
- ・ 昇圧・充填:ポンプは圧縮機に比べて大流量化やコンパクト化が容易であり、圧縮機や蓄圧器の数量、設置スペースを大幅に低減することができる

という利点を持つ。そのため、米国や韓国の大規模水素ステーションではすでに液体水素・昇圧ポンプ方式が主流となりつつある。

三菱重工業株式会社(以下、当社)は液体水素・昇圧ポンプ方式の最重要機器、超高压液体水素昇圧ポンプを開発した。液体水素昇圧ポンプの不具合は水素ステーションの稼働停止に直結し、商用車の運行に支障をきたす。そのため、ポンプの信頼性、耐久性を最重要課題として開発に取り組んだ。また、容易かつ迅速に流量を制御できる、液体水素の蒸発損失が少ない、などの機能性にも重点を置いた。本報ではこれまでの開発過程や試験結果を述べ、当社製品の高い信頼性とすぐれた機能性を紹介する。

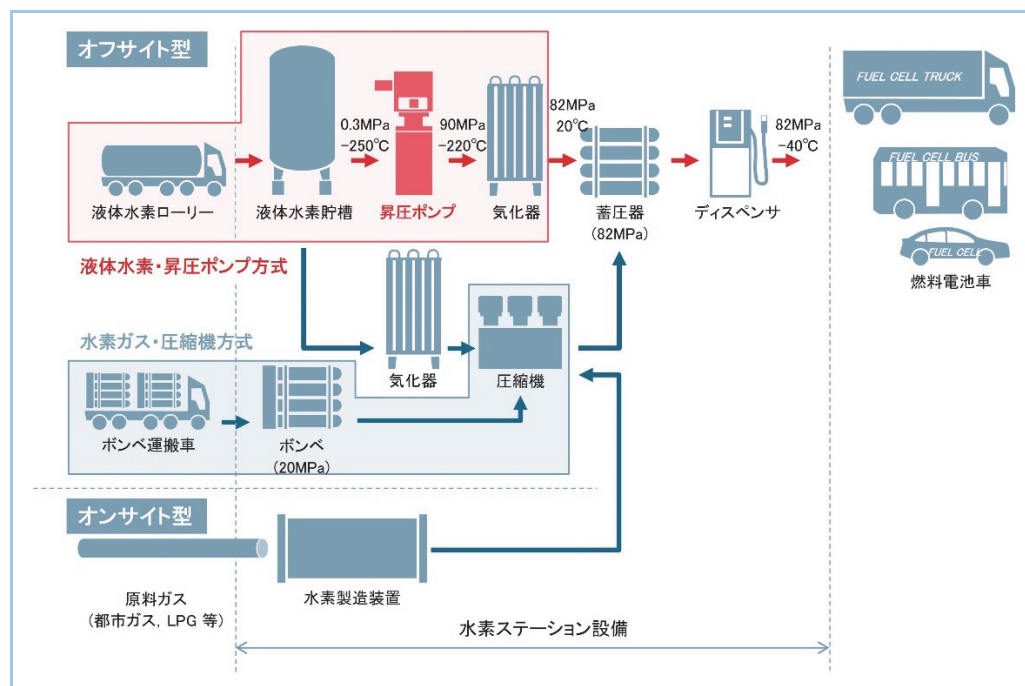


図1 水素ステーションにおける水素の輸送・貯蔵・昇圧・充填の方法

2. 当社の液体水素昇圧ポンプの概要⁽³⁾

当社が開発した超高压液体水素昇圧ポンプの構造図を図2に示す。ポンプの型式は往復動ピストンポンプであり、水素対応の防爆形モータで駆動している。モータはインバータ制御方式であり、ポンプの定格流量 160kg/h に対して、10～100%の広範囲で任意の流量に制御することができる。電動であるため流量制御の応答性も良好であり、水素充填規格(SAE J2601⁽⁴⁾など)に基づく要求流量変化へ素早く追従することができる。

このポンプには液体水素を一時的にためる小型容器が設けられており、シリンダ、ピストン、吸入弁、吐出弁などの昇圧機能に関連する部品は常に極低温の液体水素(約-253℃)に浸漬されている。液体水素昇圧ポンプに求められる能力は、低压液体水素(0～1MPaG)を最大 90MPaGまで昇圧し、下流配管へ送り出すことである。この機能を実現するにあたって大きな課題となるのは、液体水素が非常に蒸発、気化しやすい点である。液体水素は同じく極低温流体である液体

窒素に比べて、液体単位体積あたりの蒸発潜熱(kJ/L)が約 1/5(大気圧状態)しかない。そのため、ポンプの動力投入による水素自身の温度変化や機械部品の摩擦などで生じるわずかな発熱、大気からの入熱などによって液体水素が容易に気液二相状態となってしまう。特に超高压の液体水素昇圧ポンプでは、昇圧の際に生じる圧縮熱やシールリングのしゅう動発熱によって液体水素が気化する可能性がある。液体水素の気化に起因するポンプの主な問題点には、(1)ポンプの吸込み能力が悪化し、流量が低下する、昇圧不能となる、(2)設備を設計圧力以下で運用するために、気化した水素をシステム系外に放出する必要がある、水素の利用可能率が低下し(蒸発損失)、水素供給コストが上昇する、の2点が挙げられる。

(1)の問題点に関して、既存の液体水素昇圧ポンプには2段階に分けて90MPaGまで昇圧する方式がある。この方式は吸込み能力の安定化を狙った機器構成であるが、

- ・ 可動・しゅう動部品が多く、信頼性や耐久性を低下させる要因となりうる
- ・ 構造によっては1段階目と2段階目の流量を一致させられず、1段階目から送り出された液体水素の一部がポンプ入口側に戻り、蒸発損失量が大幅に増加しうる

などの課題がある。これに対して当社は信頼性や耐久性を重視し、2段階に分けず、1段階で昇圧する方式を採用している。ポンプの構造によっては1段では安定的な昇圧が困難となるが、当社はポンプの吸込み部や吸入弁に独創的な構造を考案、採用し、1段昇圧方式でも安定した昇圧性能を実現している。

(2)の蒸発損失の低減に関しては、大気から極低温部への入熱量を抑制することが重要である。真空断熱構造の液体水素容器を採用することに加え、極低温部と常温部の距離を十分にとる長軸化によって入熱量を抑えている。1段昇圧方式の採用もポンプ運転中の蒸発損失低減につながる。

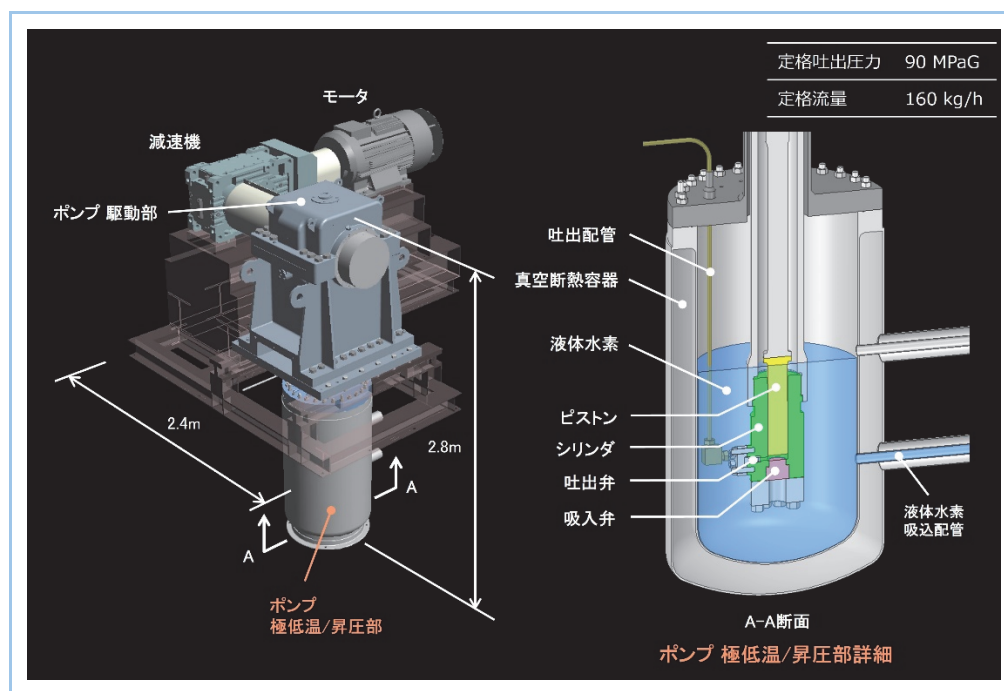


図2 超高压液体水素昇圧ポンプの構造図

3. 液体水素昇圧ポンプの開発試験⁽⁵⁾

3.1 開発過程

図3にこれまでの開発過程を示す。当社は1970年代初頭から半世紀以上にわたって液体水素の利用技術を研究、蓄積してきた。その一環として、2007年に水素ステーション向け40MPa級液体水素昇圧ポンプ(以下、40MPa機)の開発を完了した。その後、水素利用への注目が集まり始めた2018年に90MPa級液体水素昇圧ポンプ(以下、90MPa機)の開発に着手している。当社

は液体燃料ロケットや液化天然ガス機器、原子力発電関連機器、産業用エンジンなど多様な製品の開発経験を持つ。90MPa 機の開発では、40MPa 機の知見のみならず、これらの製品を通じて培った流体、伝熱、機械要素、強度、振動、材料など多分野の技術を活用して設計を行った。また、液体窒素や液体水素などの極低温流体をハンドリングできる高度な実験技術を保有しており、90MPa 機の要素試験やシステム試験を自社設備で実施した。その後、信頼性、耐久性、機能性の検証を目的として、米国企業と共同で液体水素実液による長期耐久試験を行い、所定の信頼性や耐久性、機能性を実証することができた。以下ではこれまでに実施した試験の概要、成果を述べる。

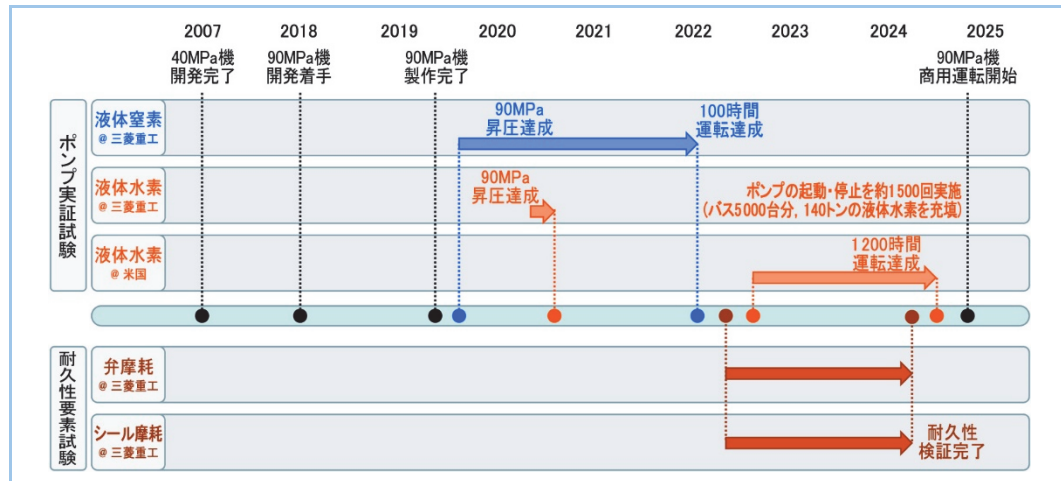


図3 超高压液体水素昇圧ポンプの開発過程

3.2 ポンプ社内試験

2018 年に 90MPa 機の成立性検討を開始し、基本設計、詳細設計を経て、試作ポンプを製作した。ポンプ試験はまず液体窒素を用いた機能試験を行い、極低温環境下で正常に作動し、かつ 90MPaG の昇圧能力があることを確認した。次に液体水素実液を使用した性能検証試験を行った。その結果、液体水素でも 90MPaG の安定した昇圧が可能であり、目標以上の流量 160kg/h の性能を持つことが示された。その後、当社内で実施可能な耐久試験として、液体窒素を用いた 100 時間の運転を行った。図 4 に 100 時間試験の状況及び試験結果を示す。複数台のローリー車から液体窒素を供給し、ポンプ吐出圧力 90MPaG の条件で合計 100 時間の運転を行った。試験初期と終盤でポンプの流量にわずかな差がみられるが、ポンプ上流側の条件による影響であり、ポンプ自体の性能に劣化はみられなかった。また、試験後の詳細点検では疲労損傷や異常摩耗は見受けられず、設計時の想定とおりの耐久性を持つという結論を得た。

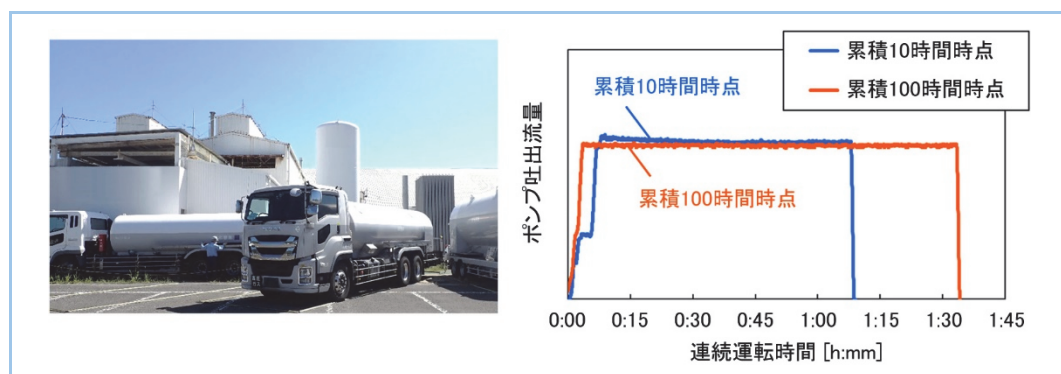


図4 液体窒素 100 時間試験の状況及び試験結果

3.3 要素試験⁽⁶⁾

当社内にて 100 時間のポンプ耐久試験を実施したが、実際の水素ステーションで望まれるメン

メンテナンス間隔に対しては数分の一以下の運転時間にすぎない。そこで、メンテナンス間隔を支配する機械要素部品を対象とし、部品単体での耐久性検証試験を行った。主な検証対象は吸入弁、吐出弁、ピストンリング(ピストン外周に装着するシールリング)、ロッドシール(液体水素容器内部と大気を隔離するシールリング)である。吸入弁、吐出弁の弁体は往復運動を行い、サイクルごとに最大 90MPa の差圧が作用するため、弁体と弁座の接触面に極めて高い面圧が発生する。これによって摩耗が進行し、弁の基本的な機能であるシール性が損なわれると、ポンプの流量低下や昇圧能力の喪失につながる。また、ピストンリングとロッドシールも往復動しゅう動環境で使用されるため、流体の押付け力によって摩耗が進行し、ポンプの流量低下や水素ガスの漏えいを引き起こす可能性がある。

これらの事象を踏まえた耐久性を検証するため、液体水素環境及び水素ガス環境で部品単体を評価することができる往復動しゅう動試験装置を当社で開発した。図 5 に試験装置の外観図を示す。液体水素環境下の試験装置は吸入弁、吐出弁、ピストンリングのいずれにも対応できる構造となっており、実環境相当の接触面圧としゅう動速度を試験体に負荷することができる。この試験装置はポンプ実機よりも往復動の周期を高くした加速試験も行うことができる。これによって、比較的短期間で実機の数百～数千時間に相当する耐久性評価が可能となった。水素ガス環境下の試験装置はロッドシールの評価を目的としており、こちらも加速試験や複数試験体の試験ができるようになっており、耐久性を効率的に評価することができる。

図 6 に吸入弁の代表的な耐久性試験結果を示す。弁体、弁座の表面粗さ計測結果であり、接触を繰り返すことで弁体に数 μm のわずかな変形が生じているが、表面の荒れはほとんどみられず良好なしゅう動面形状が維持されている。試験前後に吸入弁へ流体圧を負荷してリーク流量を計測したところ、検出限界以下であり、吸入弁の高い耐久性が確認された。

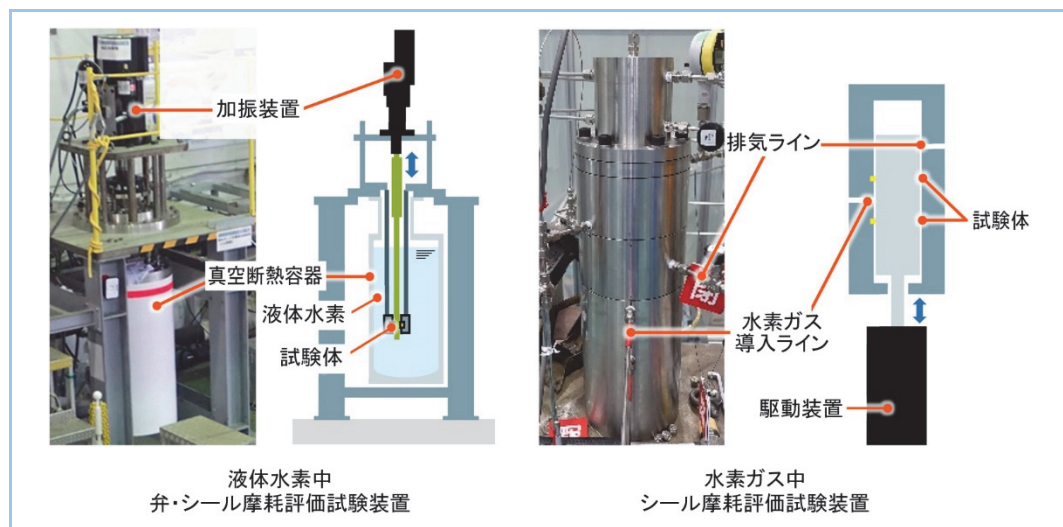


図5 往復動しゅう動試験装置

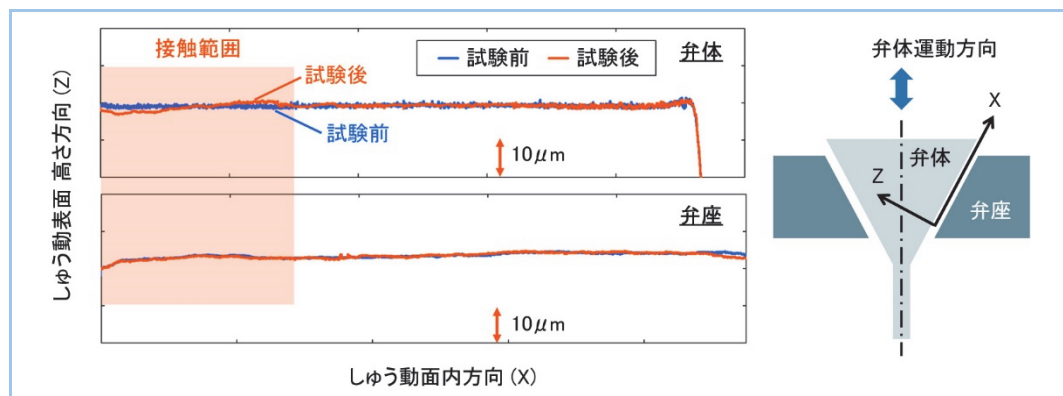


図6 吸入弁の耐久性試験結果

3.4 米国長期耐久試験⁽⁷⁾

当社内含め、現時点では国内において液体水素実液で長期耐久試験を実施できる設備は見当たらなかった。そこで液体水素の流通量が多い米国に着目し、FirstElement Fuel Inc. (以下、FEF 社)と共同で長期耐久試験を実施した。FEF 社はカリフォルニア州を拠点とする水素ステーション開発・運営事業者である。図 7 に当社製ポンプの設置状況を示す。この設備は FEF 社がカリフォルニア州北部に保有する水素ガス充填・配送ハブであり、サンフランシスコを中心としたベイエリア一円の水素ステーションに水素ガスを供給する役割を持つ。通常は貯槽から払い出した液体水素を気化させた後、圧縮機で水素輸送用トレーラー搭載の蓄圧器に充填し、トレーラーが各水素ステーションへ水素ガスを配送している。ここに当社のポンプを追設し、トレーラーの蓄圧器へ充填を繰り返した。

往復動ポンプの吐出圧力は充填対象の圧力に依存する。そのため、蓄圧器の水素残量が少なく、圧力が低い充填開始初期はポンプの吐出圧力も低くなってしまふ。この事象に対して、耐久試験の観点で最も厳しい吐出圧力 90MPaG を常に維持できるよう、ポンプ下流に調圧弁を設置し、蓄圧器の圧力に応じてバルブ開度の自動制御を行った。

長期耐久試験ではポンプの吐出流量や吐出圧力など基本的な指標を常時計測した。それに加えてポンプの運転状態をより詳細に把握するため、後述の PV 線図(指圧線図)を評価することとした。また、有限寿命部品の耐久性評価を目的として、分解点検時に吸入弁、吐出弁、ピストンリングの摩耗量やリーク流量を計測した。

図 8 は往復動ポンプと往復動圧縮機に関する理想的な PV 線図である。(1)非圧縮性流体(水など)、(2)圧縮性流体(気体)、(3)液体水素の 3 パターンを示している。P はシリンダの内圧(筒内圧)、V はシリンダ容積を指す。PV 線図は非圧縮性流体では矩形状、圧縮性流体では台形状となる。一方、液体水素の PV 線図は圧縮性流体と非圧縮性流体の中間的な形状となる。これは液体水素が高い圧縮性を持ったためであり、PV 線図上では昇圧の行程が曲線的となる特徴がある。PV 線図の理想状態と実状態の差は、吸入条件、容積効率(シリンダ容積に対する吐出量)、断熱効率、吸入弁・吐出弁の動作遅れ、ピストンリングの漏れ、各所の圧力損失など多岐にわたる影響を示し、往復動ポンプの状態分析に有用である。

PV 線図をプロットするためには筒内圧変動を計測する必要がある。筒内圧は 1 サイクルの中で 0MPaG と 90MPaG を行き来するため、耐圧性の高い計測方法が求められる。また、往復動ポンプの運転回転数は数 Hz~10Hz 程度が一般的であるため、筒内圧計測には 1~10kHz 以上の応答性が求められる。圧力 10MPaG の高压液体水素において、筒内圧変動が水晶圧電式圧力センサで短時間計測された事例⁽⁸⁾はあるが、今回の耐久試験では圧力センサにも 1000 時間以上にわたる寿命が求められる。以上の要求に応えるため、ひずみゲージを活用した独自手法を構築、適用した。

耐久試験は 1 年超にわたるため、当社の試験人員が米国現地でポンプの状態監視を続けることは難しい。そのため、運転状態に関する計測値をリアルタイムで日本から確認できるシステムを構築した。PC 上のブラウザにリアルタイムで計測値を表示できるシステムであり、開発関係者各人がポンプの運転状態を詳細に把握することができるようにした。このシステムは高いセキュリティ性と低コストの装置構成という特徴も持っており、実際の水素ステーションにも適用できるよう設計されている。基本的な閾値管理のみならず、機械の特性を考慮した異常予兆検知にも活用可能であり、水素ステーションの安定運営に大きく貢献することができるシステムである。

長期耐久試験は約 1 年半にわたって実施し、累積 1200 時間の運転となった。図 9 に運転データの一例を示す。耐久試験終盤の運転データであり、約 1 時間半の連続運転でも非常に安定した吐出流量となっている。図 10 に PV 線図の実測結果を示す。耐久試験初期段階の 300 時間時点と後半の 900 時間における計測値を比較した。長期間安定的に筒内圧を計測できており、理想状態に近い動作で推移していることが分かる。充填対象である蓄圧器の圧力がやや異なる

状態を比較しているため、300 時間時点と 900 時間時点で圧力のピーク値に若干の差異があるが、波形としては大きな変化がみられず、筒内圧波形からもポンプが健全であると判断した。また、液体水素の蒸発損失は設計値以下の極めて少ない量であり、耐久試験の期間に水素ガスを大気へ放出することはなかった。

耐久試験完了後にポンプの全部品の検査を行った。吸入弁・吐出弁には有意な摩耗やリーク、劣化はみられなかった。ピストンリングとロッドシールの摩耗量は要素試験結果と同等であり、設計の妥当性が確認された。その他の部品にも異常はみられず、消耗部品は交換が必要な状態まで十分な裕度があった。以上により、当社のポンプに 1200 時間以上の耐久性があり、高い信頼性、耐久性、機能性を持つことが実証された。液体水素昇圧ポンプの開発段階において実環境で 1000 時間超の耐久性評価を行った事例は当社以外にない、お客様に安心して使用いただけることを示すことができた。



図7 FEF 社試験場に設置した当社製液体水素昇圧ポンプ

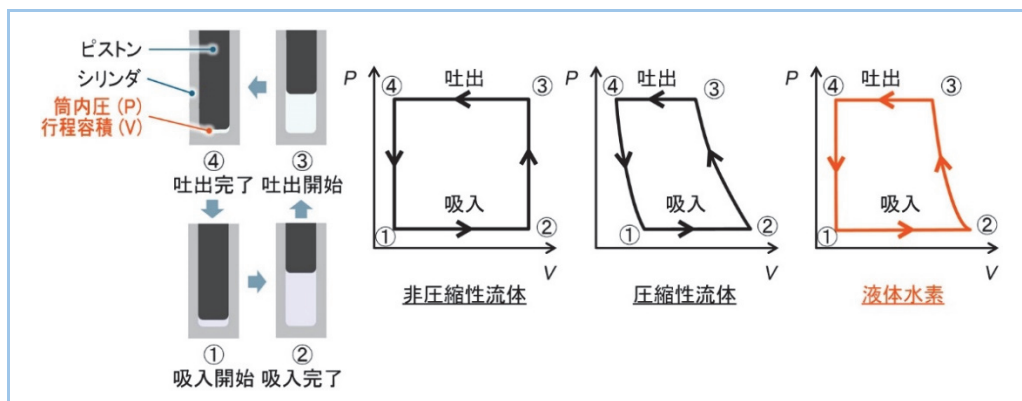


図8 往復動ポンプ/圧縮機の理想的なPV 線図

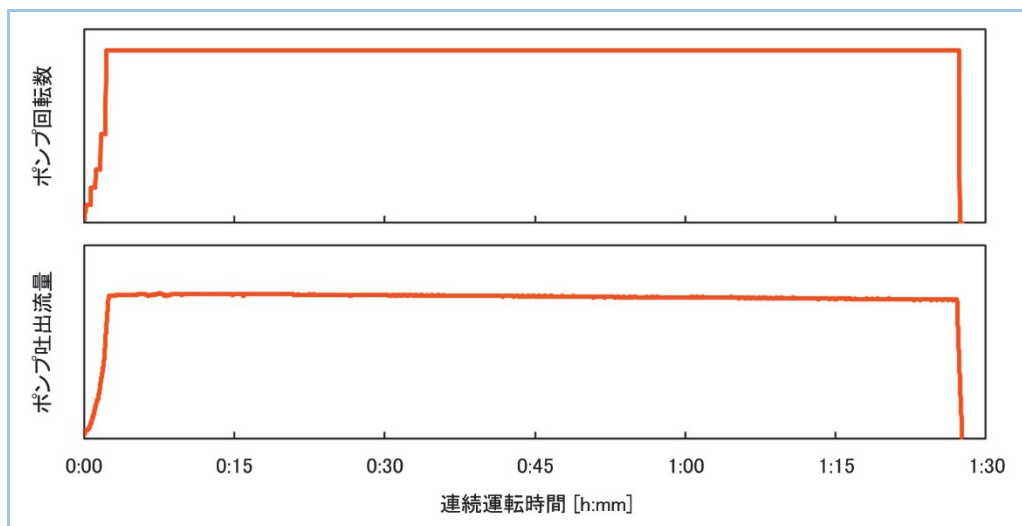


図9 長期耐久試験における運転データの一例

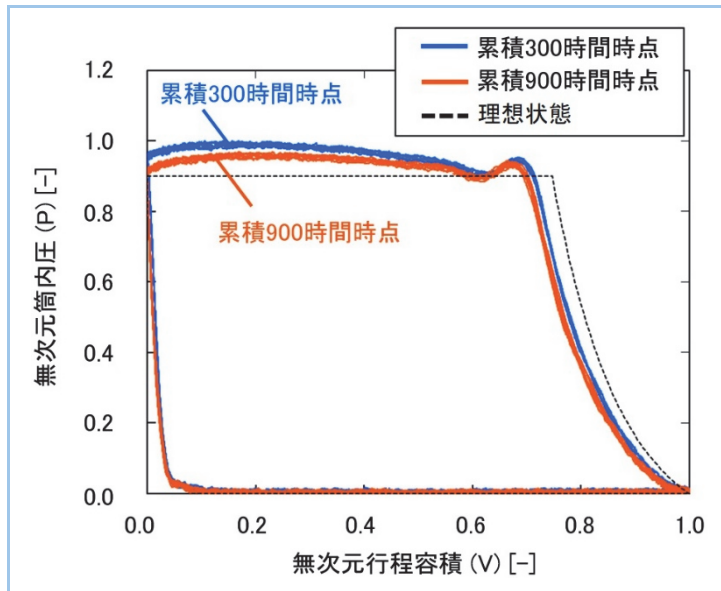


図 10 PV 線図の実測結果

4. まとめ

燃料電池商用車向けの大規模水素ステーションをターゲットとして、90MPa 級超高压液体水素昇圧ポンプを開発した。ポンプの信頼性、耐久性を最重要課題として開発に取り組み、当社内のポンプ試験や要素試験を経て、米国の実環境設備で長期耐久試験を実施した。1200 時間の試験期間に有意な損傷、摩耗、リークなどはみられず、高い耐久性を実証することができた。また同時に、液体水素の蒸発損失が極めて少ないなどの機能性も示すことができた。

本ポンプの開発は 2024 年度に完了した。2025 年 4 月から東京都の岩谷コスモ水素ステーション有明自動車営業所にて製品初号機が運用を開始しており(図 11)、都営バスの水素充填に利用されている。初の国産ポンプでありながら、不具合がなく順調に稼働を続けている。

現在、ポンプのさらなる能力・機能向上はもちろん、車載型移動式水素ステーションへの展開や水素ステーションの合理化に向けた取り組みも進めている。今後お客様の事業の一助となるソリューションを通じて、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。

最後に、長期耐久試験の共同実施で当社の開発にご協力いただいた FirstElement Fuel Inc. へ謝意を表します。

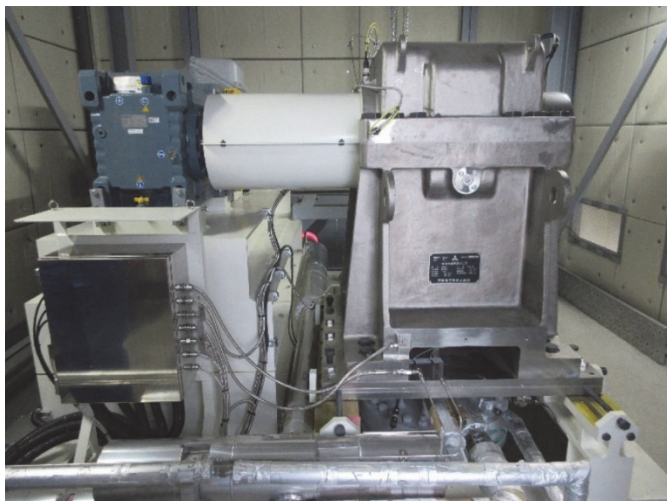


図 11 液体水素昇圧ポンプの製品初号機

参考文献

- (1) United Nations Environment Programme, Emissions Gap Report 2022: The Closing Window – Climate Crisis Calls for Rapid Transformation of Societies (2022)
- (2) 経済産業省, モビリティ分野における水素の普及に向けた施策の検討, (2024)
- (3) 三菱重工業株式会社, 燃料電池車用水素ステーション向け超高压液体水素昇圧ポンプの特長, 三菱重工技報 Vol.61 No.4 (2024)
- (4) SAE J2601, Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles (2020)
- (5) 浅井英明, 水素ステーション向け超高压液体水素昇圧ポンプの開発, 配管技術, 2024 年 7 月号, p.40-44
- (6) 林慎之ほか, 水素ステーション向け液体水素昇圧ポンプにおけるトライボロジー課題への取組, トライボロジー会議 2024 秋 名護 (2024)
- (7) 原田基至ほか, 水素ステーション向け液体水素昇圧ポンプの信頼性検証, 日本機械学会第 102 期流体工学部門講演会 (2024)
- (8) 水出隆ほか, 水晶型指圧計を用いた極低温環境下における圧力計測, 自動車技術会学術講演会予稿集 No.68 (2000) p.1~4