

高圧水素圧縮機と水素社会を支えるトライボロジー

Tribology for high pressure hydrogen compressors and hydrogen facilities

神戸製鋼所（非）*三浦 真一・（正）兼井直史・（正）伊藤弘高・（非）福田貴之

Shinichi Miura, Naofumi Kanei, Hirotaka Ito, Takayuki Fukuda

Kobe Steel, Ltd

1. はじめに

第6次エネルギー基本計画¹⁾は、2030年に向けた政策対応のポイントとして「カーボンニュートラルを見据え、水素を新たな資源とし社会実装を加速する」と明記されている。水素輸送の形態には高圧水素、液体水素、有機ハイドライド（MCH）やアンモニアなど多様な可能性があり、燃料電池での利用や燃焼利用など最終的にどのような形で利用するのか規模も含めた検討を行うことが重要である。水素を輸送する際には高圧水素の場合はもちろん、液化水素の場合にも超高圧圧縮機が必要となる。燃料電池などの電気化学的な水素利用において、固体高分子膜の電極触媒の油分被毒による性能低下の懸念から潤滑油フリーが求められた。潤滑油フリーのアプローチとしては従来の潤滑油入りで圧縮したうえで高圧の下流側で油分離・吸着除去する方法と圧縮機の摺動部で潤滑油を用いない取り組みのふたつの方法が考えられる。圧縮機に限らず機械技術にとって稼働率の高いインフラ分野で「潤滑油を用いない機械分野の取り組み」が求められることは、「トライボロジー：潤滑・摩擦・摩耗など相対運動しながら互いに影響を及ぼしあう二つの表面の間におこる現象を対象とする科学と技術」におけるより高い取り組みが求められているということである。本稿では、水素ステーション用超高圧水素圧縮機での取り組みを通して、水素社会構築に向けたトライボロジー技術の動向と課題、そして社会インフラ構築のために必要な取り組みについて考察する。

2. 高圧水素圧縮機とトライボロジー技術

水素は分子が小さく、高温・高圧にした場合には漏洩リスクが高いうえ水素雰囲気下において固体表面との相互作用を介して摩擦や摩耗に深く関与すると考えられている。水素ステーション用高圧水素圧縮機の摺動部で潤滑油を用いない取り組みとする場合、ピストンリング（樹脂）とシリンダ（金属）のしゅう動部（図1、図2）に水素圧縮機のピストンリング部を示す）における耐摩耗性・強度・シール性などに課題がある。水素を80～100 MPaの超高圧・高温でしゅう動させるような圧縮機はこれまではなく、水素ST用高圧水素圧縮機のように毎回起動停止を繰り返すような圧縮機の運転の仕方はこれまではなかった。ピストンリング部の開発に向けて摩耗の少ない、もしくは、摩耗してもシール性を確保できるリング形状の開発、硫黄成分を配合しない材料で適切な強度を持ち、低摩擦、耐摩耗性に優れた樹脂材料の開発、リングに対して負荷の少ない圧縮機運転環境（差圧低減、しゅう動抵抗低減）、圧縮機構造など多面的な対応が必要である。圧縮部分以外の配管部分でもコーン&スレッド式や圧縮リング型式、メタ

ピストンリング式

- 機械的なピストンの往復運動によりガスを圧縮
- ピストンリングによりガスをシール
- 小容量から大容量まで対応が可能

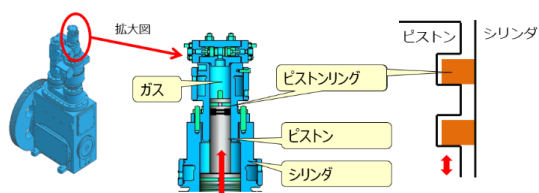


図1 ピストンリング式圧縮機の特長

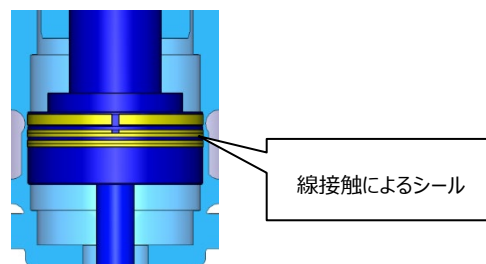


図2 水素圧縮機のピストンリング部

ルガスケット式等の継手シール部、フランジシール部、各種のプロセスバルブのシール部でもトライボロジーが存在しており、ねじ込み部分などにおいて緩みが頻発する傾向にあるうえに、頻繁に行われる起動停止の昇圧・昇温時において金属同士摩擦によって止まっている継手部からのリークも多い。継手部分が「潤滑・摩擦・摩耗など相対運動しながら互いに影響を及ぼしあう二つの表面」となりうるのである。特に、コーン&スレッド継手は高圧で用いられ、線接触によるシールとなるため接触部の少しの変化がリークにつながる。発停の繰り返しや振動によって金属間の摩擦でシールされている部分が次第に緩んでくるだけではなく、吸込・吐出が繰り返される脈動と起動・昇圧と停止・脱圧という大きな圧力変動の繰り返しによってOリングがねじれたりはみ出してシール機能が失われることも頻発している。いずれも従来の産業用高圧水素圧縮機の使い方では起きなかったことである²⁾。小職が主査を務めるFCCJ（燃料電池実用化推進協議会）エンジニアリング分科会（水素STのメーカー側分科会）では「水素STの課題である漏洩リスクに対する基盤研究」が必要であるとの要望をだし、2018年度から5年間NEDO技術開発機構の技術開発事

業として、国立大学法人九州大学などにより「長寿命高圧水素シール部材・継ぎ手部材及び機器開発に関する研究開発」を実施いただいている。このプロジェクトではシール基盤技術として高圧水素シール用ゴム・樹脂材料劣化機構の解明とデータベースの構築、機械継手の漏洩因子の解明などトライボロジー面での取組みが系統的になされようとしている³⁾。

3. トラブルデータの集積と分析

九州大学などによる「長寿命高圧水素シール部材・継ぎ手部材及び機器開発に関する研究開発」の5年間で評価試験や理論解析によって基盤的な取組みは行われつつあるが、トライボロジー視点での課題解決の難しさは実際の運用データとの比較によってはじめて確認が可能なものが多い。超高圧水素ステーションはこれまで経験のない運転条件や設計条件で運用されており、超高圧の実運転条件での長期間運用データを大量に蓄積して設計に反映させることが重要である。水素ステーションの整備には税金を投入されていることもあり、産業界側として実際の運転環境での漏洩トラブルのデータを系統的に集積したうえで分析するなど、学術側に協力した取組みを行うことが重要であるがそのアプローチは不足しているように思われる。

米国カリフォルニア州では水素ステーションは2022年春の段階で52箇所整備されているが、公的補助を受けている各ステーションは運転・保守・安全・コストに関するデータをNREL国立再生可能エネルギー研究所のNFCTEC (National Fuel Cell Technology Evaluation Center) に3か月ごとに提出することが求められている⁴⁾。NFCTECでその生データは効率的に処理、四半期ごとの分析が行われ、守秘の必要な個別の分析結果は各ステーションにフィードバックされ、水素ステーション全体分析や複数のシステムにまたがる集約分析の結果は、DOE(エネルギー省)の年次報告会でまとめを発表されたうえでホームページに公開されている。例えば水素リークまでの平均的充填回数や機種ごとのトラブル頻度や所要修理時間の分析などで、100枚以上のスライドにまとめられている。このような科学的な枠組みを通じた集積と情報の共有は、長期的には産業に大きな力を生むだろう。一方日本の水素ステーションは税金で運営補助がされているものの、残念ながらこのような分析、特に機器の向上に資するような議論や公的なフィードバックは行われていない。FCCJエンジン分科会としては、前に述べたように「水素STでの漏洩リスクに対する基盤研究」をお願いするだけでなく実際にメンテナンスに携わるエンジニアリング会社側メンバーと研究者との情報交換会を企画し研究側に現場の声を拾ってもらうようにしたり、このNFCTECのトラブル分析データを定期的に追跡し、分析データを整理・共有するような取組みを行っている。

4. 水素社会に向けて技術社会としてなすべきこと

水素をエネルギーとして使うことはカーボンニュートラルな社会を実現するためには必須のことといわれている。水素ステーション用機器をはじめとしてガスタービンなどの発電技術やアンモニア、MCH、液体水素などの貯蔵・輸送技術、水電解など様々な開発が行われ、新しい技術が生み出されつつある。しかし開発は最終ゴールではなく、開発された技術を試用して課題を発見・改良することは必ず必要である。また改良した製品を量産することで低コスト化し現状の化石燃料技術と同等のレベルまでブラッシュアップすることも必要である。そしてさらにメンテナンスも含めた社会システムとしての汎用化・低コスト化を実現しなければならない。新しいエネルギーである水素を着実に利用できる基盤は華々しい技術開発だけではなく、地道なデータの蓄積と分析、改良改善に導く技術社会としての仕組みづくりこそ重要であり、そのような枠組み作りの議論が求められている。同時にトライボロジーという新しい学問分野にとっても、データのフィードバックを活用できる「運用データが蓄積される社会の仕組み」が必要なのではないだろうか。

文献

- 1) <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005.html>
- 2) 三浦・兼井・伊藤・福田：高圧水素圧縮機を支えるトライボロジー技術の動向と課題，トライボロジスト，67，6 (2022)
- 3) NEDO 技術開発機構「平成30～32年度超高圧水素インフラ本格普及技術開発事業 水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発 長寿命高圧シール部材・継手部材及び機器開発に関する研究開発」
- 4) NREL: Next Generation Hydrogen Station Composite Data Products: Retail Stations. Summer 2021: Data through Quarter 2 of 2021, May 20, 2022, <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/83036.pdf> (2023年3月4日アクセス)。