

水素エネルギーの利活用を推進する ポータブル水素カートリッジ用高圧水素バルブの開発

Promoting the Utilization of Hydrogen Energy

Development of High-Pressure Hydrogen Valve for Portable Hydrogen Cartridges

岡村和毅 K. OKAMURA 久保利賀剛 T. KUBO

We developed a high-pressure hydrogen valve for portable hydrogen cartridges to enable the safe and easy supply of hydrogen. The valve enables users to attach and detach the portable hydrogen cartridge to and from appliances, such as hydrogen cookers, whenever necessary. The valve incorporates a fail-safe mechanism that automatically limits hydrogen leakage in the event of a malfunction. We selected materials compliant with relevant regulations for the valve and conducted elastoplastic analysis to verify pressure resistance. The dimensions and geometry of the internal flow passage were optimized to achieve the required hydrogen flow rate while limiting stress concentrations, thereby meeting the required pressure resistance. Furthermore, sealing technologies established through the mass-production of high-pressure hydrogen valves enabled the valve to meet sealing requirements, including during cartridge attachment and detachment.

Key Words: valve, hydrogen, high pressure, portable hydrogen cartridge

1. はじめに

近年、脱炭素社会の実現のため、各種エネルギーの利活用が進められている。なかでも水素エネルギーは有用性の高い選択肢の一つとして注目されている。当社は、水素エネルギーを生活圏で広く活用する手段として、トヨタ自動車株式会社と共同でポータブル水素カートリッジを用いた実証研究および実用化に向けた検証を実施している。

ポータブル水素カートリッジを用いることでパイプラインなどのインフラが存在しない地域にも水素を容易に輸送できる。つまり、ボンベ交換方式と同様に運用でき、利用者は水素調理器、家庭用発電装置、モビリティ機器などの多様な用途で水素を使用できる。

本報では、ポータブル水素カートリッジ用高圧水素バルブ（以下、カートリッジバルブ）の開発を支える金属材料および加工技術、弾塑性解析、シール技術と、油圧・気圧技術を紹介する。

2. カートリッジバルブ

本章では、カートリッジバルブの構造および機能について述べる。

2.1 着脱機構

燃料電池車に搭載される従来の高圧水素タンクは、車両に固定されている。一方、ポータブル水素カートリッジは、利用者が必要に応じて機器から着脱できる。この着脱機構は、カートリッジに搭載された専用バルブによって実現される。図1(a)にポータブル水素カートリッジ、図1(b)にカートリッジバルブの外観を示す。

図2(a)に示すとおり、カートリッジバルブが機器から取り外されている状態では、ニードル型弁体がばねによって弁座に押し付けられ、高い気密性を保持する。一方、図2(b)に示すとおり、カートリッジが機器へ装着されると機器側に設けられた接続機構（インターフェース）によってニードル型弁体が後退し、バルブが開弁することで水素がタンクから機器へ供給される。このように、カートリッジバルブはカートリッジ内の水素ガスを機器へ安全に供給する構造となっている。



(資料提供：トヨタ自動車株式会社)

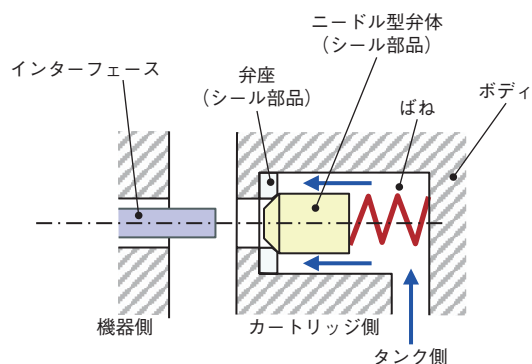
(a) ポータブル水素カートリッジ



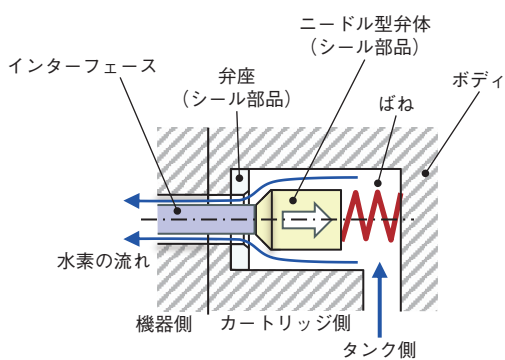
(b) カートリッジバルブ

図1 ポータブル水素カートリッジおよびカートリッジバルブの外観

Portable hydrogen cartridges and the cartridge valve



(a) 閉弁時



(b) 開弁時

図2 カートリッジバルブを通した水素の供給構造
Hydrogen supply mechanism of the cartridge valve

2.2 フェールセーフ機構

カートリッジバルブの逆止弁は、燃料電池車向け高圧水素バルブの量産で確立された基盤技術により、繰り返し開閉に対し高い気密性を有する。また、本バルブは、

故障や異常が発生した場合に安全側へ移行して危険を低減するフェールセーフ機構を備えており、故障時にバルブから水素ガスの漏えいが発生した場合でも過流防止弁が作用して漏えいを自動的に抑制する。さらに、手動弁との併用によって利用者は手動操作で水素ガスを封止できるなど、異常時の安全性を多重に確保している。カートリッジバルブの構成要素を図3に示す。

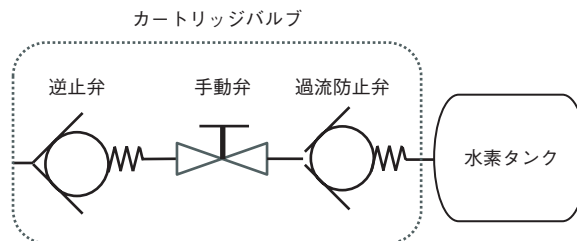


図3 カートリッジバルブの構成

Configuration of the valve for portable hydrogen cartridges

3. カートリッジバルブのコア技術

本章では、カートリッジバルブで適用している当社技術を紹介する。

3.1 金属材料および加工技術

カートリッジバルブには、水素環境下においてもぜい化しにくい金属材料が求められる。本カートリッジバルブの主要構成部品においてもアルミニウム合金 A6061-T6 およびステンレス鋼 SUS316L を使用している。これらの材料は、高圧ガス保安法に基づく「容器保安規則の機能性基準の運用について 別添 12 国際圧縮水素自動車燃料装置用附属品の技術基準の解釈」¹⁾ において規格材料として定められている。また、部品ごとに必要な強度などの要求特性を考慮し、材料種は用途に応じて適切に選定している。

水素は分子が小さいため、バルブから漏えいしやすい。さらに、可燃性が高い性質を持つため、一般ガス用バルブより高い気密性・安全性が求められる。したがって、ニードル型弁体と弁座のシール面は、適切な表面粗さに加工している。当社では、高圧タンク内に 70 MPa で充填された水素ガスを封止・供給できる高圧水素バルブおよび高圧水素減圧弁の開発実績を有している^{2), 3)}。長年の開発経験を通じて獲得した技術は、当社のコアコンピタンスとして確立されている。弁体の加工に関して

は適切な表面粗さを得るための知見を蓄積しており、本カートリッジバルブの加工にも適用した。

3.2 弾塑性解析

水素ガスの漏えい防止の観点からは、シール部のみならずバルブボディ部に生じ得る亀裂に対しても十分な配慮が必要である。

前述のとおり、本バルブのボディ部にはアルミニウム合金が使用されている。疲労寿命設計においては弾塑性解析を行い、使用時の各部に発生する応力を詳細に評価した。特に、交差穴や形状不連続部においては、図4に示すように局所的に塑性領域を伴う応力集中が確認されたため、改良設計に反映させた。

また、解析により得られた応力振幅および平均応力は、材料特性を考慮した疲労限度線図(修正グッドマン線図)に基づき整理した(図5)。修正グッドマン線図の作成に必要な材料データは、同材・同製法で過去に実施された実機試験および材料試験の実測データを使用しており、完成車メーカーの要求も反映させている。さらに、実使用条件を考慮して、応力振幅による疲労寿命への影響を評価した。

これらの解析および評価により、想定される使用条件下において、ボディ部は疲労強度の基準を満たすことを確認した。なお、上記の弾塑性解析は実験解析部署と連携し、材料データは材料研究部署と連携しており、社内でデータベースを構築できることも当社の強みの一つである。

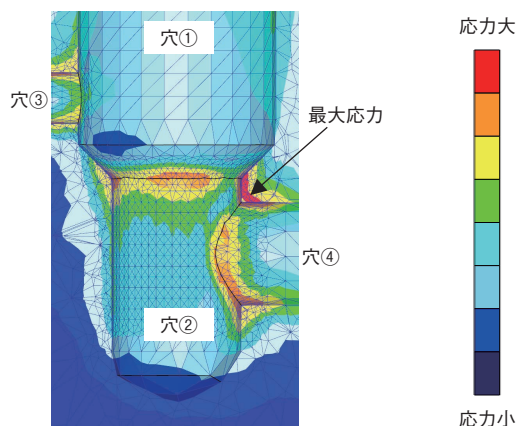


図4 交差穴部の弾塑性解析

Elastoplastic analysis of the intersecting-hole region

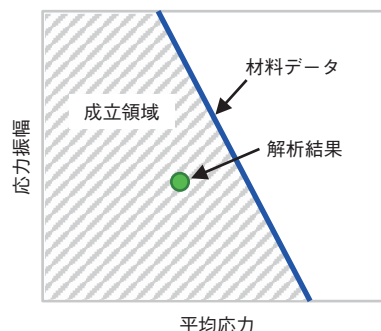


図5 疲労限度線図

Fatigue limit diagram

3.3 シール技術

カートリッジの着脱操作時に水素ガスを外部に漏えいさせないことは、本バルブに求められる重要な機能の一つである。この要求を満たすため、本バルブでは燃料電池車向け高圧水素バルブの量産開発で蓄積されたシール技術を応用し、着脱時においても高い気密性を確保できる構造を採用した。

本バルブのシール構造は、ニードル型弁体と弁座が接触し、弁体先端と弁座の接触面に生じる面圧によって気密性を確保する方式である。このシール構造では、開閉操作の繰り返しに伴って接触面の摩耗や変形が進行し、面圧が次第に低下する。そのため、開閉耐久性を考慮したうえで、必要な気密性能を維持できる設計が不可欠である。

そこで本設計では、弁座の表面粗さと、水素ガスの漏えい防止に必要な最小面圧との関係について、過去の量産開発および実機評価で取得したデータに基づいて検討した。これらの実測データを用いることで開閉の繰り返し後でも必要な面圧条件を満たすことを確認し、着脱時を含む全使用条件下で安定した気密性能を実現した。

3.4 油圧・気圧技術

本バルブには、必要な流量の水素を安定して供給する性能が求められる。適切な流量の確保は、水素充填時間の短縮に寄与するだけでなく、燃料電池の発電性能および水素バーナーの燃焼量の向上にも寄与する。これらの要求を満足するため、本バルブでは内部流路の断面寸法および流路形状を最適化し、水素ガスの流動抵抗を低減する設計とした。

前述のとおり、当社は高圧水素減圧弁などの開発実績を有し、気流解析に関する豊富な知見を蓄積している。

これらの解析結果と理論式を基にして、表計算ソフトを用いた独自の解析ツールを構築した。本解析ツールでは、内部流路の断面寸法および流路形状を入力パラメーターとし、所定の圧力および温度条件下において必要な流量の水素を確保できるか算出する。これにより、設計時のパラメーター設定に要する時間を短縮し、迅速な開発が可能となった。

4. おわりに

当社は、10年以上にわたり高圧水素バルブを量産してきた実績を有し、開発に必要な技術および知見を蓄積している。これらのコアコンピタンスの応用により、軽量かつコンパクトなポータブル水素カートリッジの開発を実現した。本報で述べた技術は水素エネルギーの利活用を推進し、水素社会の実現に向けた基盤技術となる。今後も水素用バルブ技術の高度化および信頼性向上に取り組み、水素社会の発展に貢献していく。

参考文献

- 1) 経済産業省：容器保安規則の機能性基準の運用について、別添 12 国際圧縮水素自動車燃料装置用附属品の技術基準の解釈、高圧ガス保安法等・通達、2025-11-11, https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/hipregas/files/youki_reiji.pdf(参照 2026.06.01)219-225.
- 2) 久保利賀剛：燃料電池車用高圧水素減圧弁の開発, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1013 (2015) 74-76.
- 3) 小林寛明：水素エンジン用減圧弁およびリリーフ弁の開発, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1022 (2025)94-97.

筆者



岡村和毅*
K. OKAMURA



久保利賀剛*
T. KUBO

* 自動車事業本部 FC システム技術部