

FCV 用 70 MPa 高圧水素貯蔵供給システムに対応した インタンク電磁弁の開発

Development of In-tank Solenoid Valve Compatible with 70 MPa High-pressure Hydrogen Storage and Supply System for FCV

朝 野 護 人*

Saneto ASANO

尾 崎 浩 靖*

Hiroyasu OZAKI

加 藤 航 一*

Koichi KATO

和 田 信*

Makoto WADA

要 旨

ABSTRACT

燃料電池自動車の一充填走行距離の拡大を目的として、水素貯蔵供給システムの高圧化の課題であるインタンク電磁弁の軽量化技術と水素シール技術の開発をおこなった。

70 MPa に対応したインタンク電磁弁には、従来 (35 MPa) 比で 2 倍の耐圧強度が必要となり、必要耐圧強度の増加はインタンク電磁弁の大型化、重量増加につながる。そのため、軽量化技術として、高圧水素タンクに接続し水素の供給と遮断をおこなうインタンク電磁弁の逆止弁 (充填側) と遮断弁 (供給側) を機能統合することによる充填および供給流路の共用化、温度センサのタンクへの内蔵、およびボデー材質へのアルミニウム合金の適用をおこない、従来の 35 MPa 用インタンク電磁弁に対して 41% の軽量化を達成した。

さらに、水素シール技術として、70 MPa の圧力によるシール材の損傷を防止できる構造、および強度の高いシール材料を採用することにより、水素シールの高耐圧化を実現した。

In order to increase fuel cell vehicle mileage per filling, technologies have been developed to reduce the weight of the in-tank solenoid valve and boost hydrogen seal performance, both issues in increasing the pressure of a hydrogen storage and supply system.

It was necessary for the in-tank solenoid valve for use at 70 MPa to display twice the pressure resistance of the previous model (for 35 MPa use). However, realizing the necessary increase in pressure resistance would increase the size and weight of the valve. The in-tank solenoid valve is provided with a check valve on the hydrogen filling side and a shut-off valve on the hydrogen supply side; these valves connect to the high-pressure hydrogen tank and supply and shut off hydrogen. As a means of reducing weight in the developed in-tank solenoid valve, the functions of these valves were integrated, making it possible to share the flow channels for hydrogen filling and hydrogen supply. The temperature sensor was built into the tank, and aluminum alloy was employed as the material for the valve body. These measures reduced the weight of the developed in-tank solenoid valve by 41% against the previous 35 MPa model.

For the hydrogen seal, a structure that helps to ensure that the seal material is not damaged at a pressure of 70 MPa was adopted, and a high-strength seal material was employed. These measures made it possible to realize a high level of pressure resistance in the hydrogen seal.

1. まえがき

地球温暖化やエネルギー問題に対応するために、水素を燃料とした燃料電池自動車 (FCV) は究極のエコカーとして期待されている。FCV の重要な性能の一つに、一充填走行距離がある。一充填走行距離を拡大するために、水素貯蔵量の増量化が求められる。

2009 年モデルの高圧水素貯蔵供給システム (35 MPa シ

ステム) では、高圧水素タンクの貯蔵圧力として 35 MPa を採用してきた⁽¹⁾が、2016 年モデルの高圧水素貯蔵供給システム (70 MPa システム) では、一充填走行距離拡大に有効な手段である貯蔵圧力の 70 MPa 化に対応した。しかし、従来の 35 MPa 技術を踏襲して 70 MPa インタンク電磁弁を作ると、ボデー強度を確保するために必要な肉厚が増加し、大型化、重量増加してしまう。また、従来の 35 MPa 水素シール構造では 70 MPa の圧力によりシール材が損傷してしま

* 四輪 R&D センター

うため、シール性を確保することができないなどの課題があった。そのため、今回は高圧化の課題である軽量化技術と水素シール技術を開発し、一充填走行距離の拡大を図った。

2. 開発のねらい

70 MPa システムの開発に際しては、以下の2点を開発の主要な目標とした。

- (1) 高耐圧化したインタンク電磁弁の軽量化
- (2) 水素シールの高耐圧化

3. システム構成

2016 年モデルの高圧水素タンクを車両に搭載した図を Fig. 1 に示す。70 MPa システムは、必要水素搭載量と乗員スペースを両立させるために、高圧水素タンク本数を大小、外径の異なる2本とし、リヤシート下部およびリヤシートバックの後部に配置している。

70 MPa システムの透視外観を Fig. 2 に示す。水素ステーションから供給される水素は、充填口 (図中 a) および逆止弁 (図中 b) を通った後に分岐され、インタンク電磁弁 (図中 c) を通り2本の高圧水素タンク (図中 d) へと充填される。高圧水素タンクに貯蔵された水素は、インタンク電磁弁を通り減圧弁 (図中 e) により減圧され、燃料電池スタックへと供給される。

また、貯蔵圧力 35 MPa および 70 MPa の高圧水素タンク外容積当たりの水素貯蔵量 (体積水素貯蔵密度) を Fig. 3 に示す。水素貯蔵圧力を 35 MPa から 70 MPa にすることで、体積水素貯蔵密度を 30% 向上させることができる。

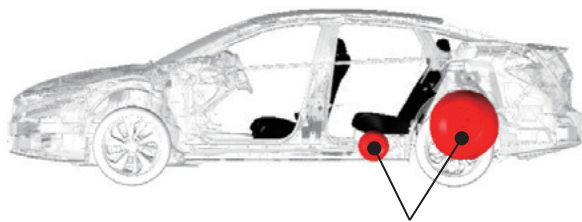


Fig. 1 High-pressure hydrogen tank installation layout

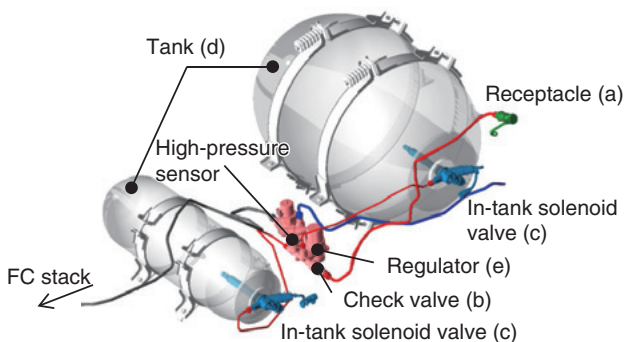


Fig. 2 Hydrogen storage and supply system for 2016 model year FCV

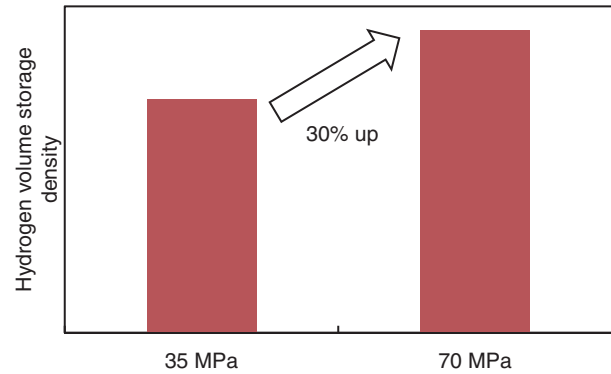


Fig. 3 Hydrogen volume storage density

4. インタンク電磁弁の軽量化

4.1. 逆止弁と遮断弁の機能統合

35 MPa システムと 70 MPa システムの構成を Fig. 4 に示す。35 MPa システム (図中 a) では高圧水素タンク1本に適した充填、供給のガス流路別体を採用していた。しかし、35 MPa システムと同じ考え方で複数タンクシステム (図中 b) にすると、充填、供給のガス流路を複数本ずつ配置する必要があり、システムとして大型化してしまう。そ

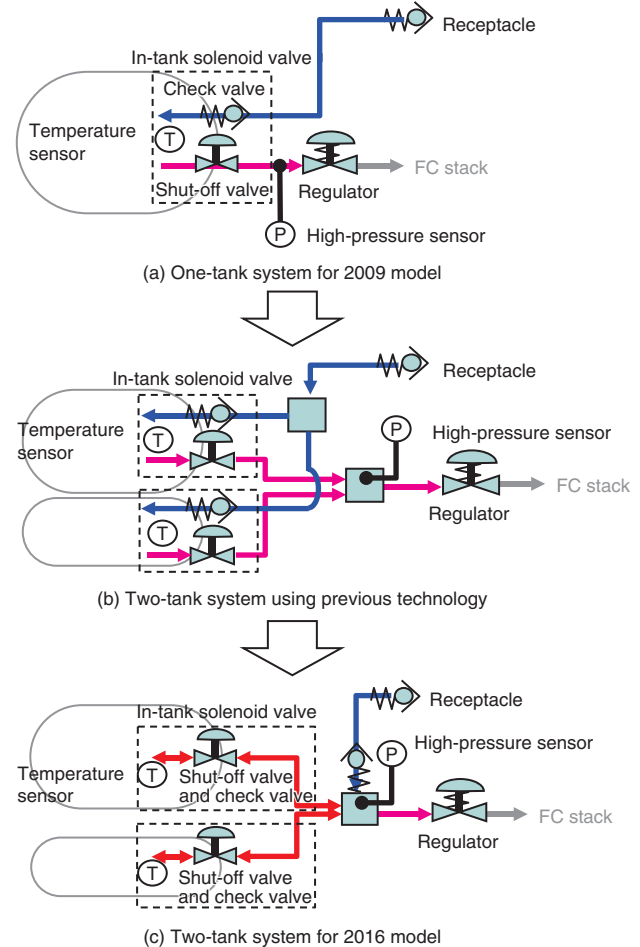


Fig. 4 Configuration of high-pressure hydrogen storage and supply system

のため、70 MPa システム (図中 c) は、逆止弁と遮断弁の機能を統合し、充填および供給流路を共用化したインタンク電磁弁を開発し、システムの軽量化をおこなった。

2009 年モデル (図中 a) および 2016 年モデル (図中 c) のインタンク電磁弁の構成および水素シール仕様を Fig. 5 に示す。今回の開発では、逆止弁と遮断弁を統合しインタンク電磁弁内の充填、供給の二つのガス流路を共用化することで部品数を 6% 削減した。

4.2. 温度センサのタンクへの内蔵

車両への水素充填中および走行中の高圧水素タンク内の水素温度を監視するために、インタンク電磁弁に温度センサを設置している。2009 年モデルと 2016 年モデルの温度センサのレイアウトと構造を Fig. 6 に示す。温度センサに使用されるサーミスタ素子は Mn, Co, Ni を主体とする遷移金属酸化物であり、水素に触れると還元され、特性が変化する。そのため、2009 年モデルの温度センサは、サーミスタ素子をステンレス鋼 (SUS) きょう体で覆い、O リングシール (ボデーと温度センサ) で水素から隔離する構造を採用した。しかし、従来の O リングシールの構造で 70 MPa に対応すると、SUS きょう体の強度を確保するための必要な肉厚が増加し、温度センサを設置するインタンク電磁弁

の口金が大径化してしまう。インタンク電磁弁の 70 MPa への対応と軽量化を両立するために、温度センサをタンク内に内蔵した。

2016 年モデルの温度センサは、Fig. 6 に示すように O リングシール (ボデーと温度センサ) で水素から隔離する構造ではない。温度センサにハーメチックシール技術を適用し水素から隔離することでタンク内に内蔵化することが可能となり、インタンク電磁弁の口金の小径化を実現した。なお、ハーメチックシールとは、金属管内にガラスとリード線を設置し、ガラス溶融後の徐冷処理時に、リード線、ガラスおよび金属管の熱膨張差によりガラスに圧縮応力を印加することで、リード線とガラスの密着力を高めシールする技術である。

4.3. ボデー材質へのアルミニウム合金の適用

インタンク電磁弁を軽量化するために、ボデー材質を 2009 年モデルの SUS からアルミニウム合金に変更した。アルミニウム合金のような非鉄材料は疲労限度が存在しないため、実車で想定される圧力の変動量と頻度を考慮し、疲労寿命設計をおこなうことでボデーの高耐圧化を実現した。

また、アルミニウム合金は SUS と比較するとアルカリ系の薬品に対し腐食しやすいため、アルミニウム合金

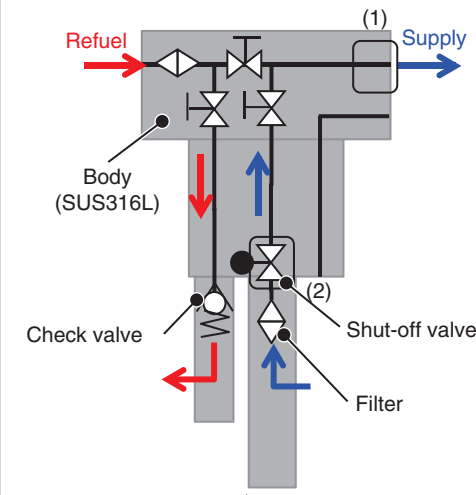
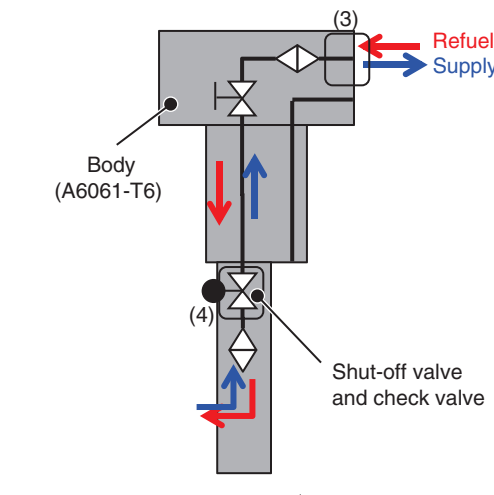
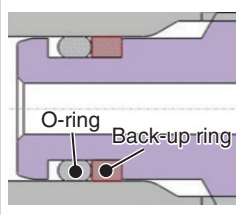
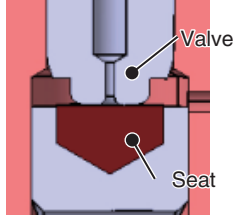
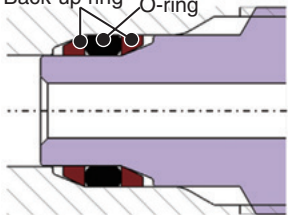
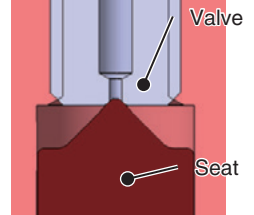
	2009 model		2016 model	
Nominal working pressure	35 MPa		70 MPa	
Weight	1.85 kg		1.09 kg	
Structure				
Seal Structure	(1) O-ring seal	(2) Valve seat	(3) O-ring seal	(4) Valve seat
				

Fig. 5 Structure and specifications of in-tank solenoid valve

Table 1 Tests stipulated by GTR No. 13

Component	Test items
Shut-off valve and check valve	Hydrostatic strength test Leak test Extreme temperature and pressure cycling test Salt corrosion resistance test Vehicle environment test Atmospheric exposure test Electrical test Vibration test Pre-cooled hydrogen exposure test
TPRD	Pressure cycling test Accelerated life test Temperature cycling test Salt corrosion resistance test Vehicle environment test Drop and vibration test Leak test Bench top activation test Flow rate test

表面に無電解 Ni メッキ処理を施し、耐薬品性を確保した。なお、インタンク電磁弁の Global technical regulation (GTR) No. 13⁽²⁾の耐薬品性確認試験として、インタンク電磁弁を水酸化ナトリウム水溶液等に浸した後、外観、気密性および耐圧強度を確認する車両環境試験 (Table 1) があり、試験を実施した結果、ボデー材質の腐食がないことを確認した。

以上三つの逆止弁と遮断弁の機能統合、温度センサのタンクへの内蔵およびボデー材質へのアルミニウム合金の適用により、従来モデルに対し 70 MPa に対応しているにも関わらず、41%の軽量化を達成した。

5. 70 MPa 水素シール技術

5.1. 70 MPa 用 O リングシールの開発

5.1.1. シールの考え方

結合部に O リングを用いたシール (O リングシール) を採用する場合、圧力印加時に O リングの剛性が不足していると、圧力に押され O リングがボデーとコネクタの隙間に噛み込んでみ出してしまい、O リングが損傷しシール性が低下してしまう (Fig. 7)。そのため、使用圧力に対して O リングが許容できる隙間 (はみ出し限界) を超過しないように設計する必要がある。

2009 年モデルの 35 MPa 用 O リングシールの構造を Fig. 7 に示す。圧力印加時 O リングのはみ出す隙間を埋めるために、O リングの大気側にバックアップリング (ゴム材料) を設置し、0.09 mm の隙間を埋めている。圧力印加時にバックアップリングが許容できる隙間 (はみ出し限界)⁽³⁾を Fig. 8 に示す。Fig. 8 の横軸が直径隙間、縦軸が印加圧力、赤線がバックアップリングのはみ出し限界を示しており、この赤線を超過 (赤線の右上) するとバックアップリングが隙間に噛み込んでみ出してしまふ。35 MPa 圧力印加時には隙間がはみ出し限界を超過していないが、70 MPa 圧力印加時には隙間がはみ出し限界を超過し、バックアップリングが隙間にはみ出し損傷してしまう。これより、2009 年モデルの O リングシールの構造では 70 MPa の水素貯蔵には対応できない。

そこで、今回 70 MPa 用 O リングシールの構造について検討をおこなった。

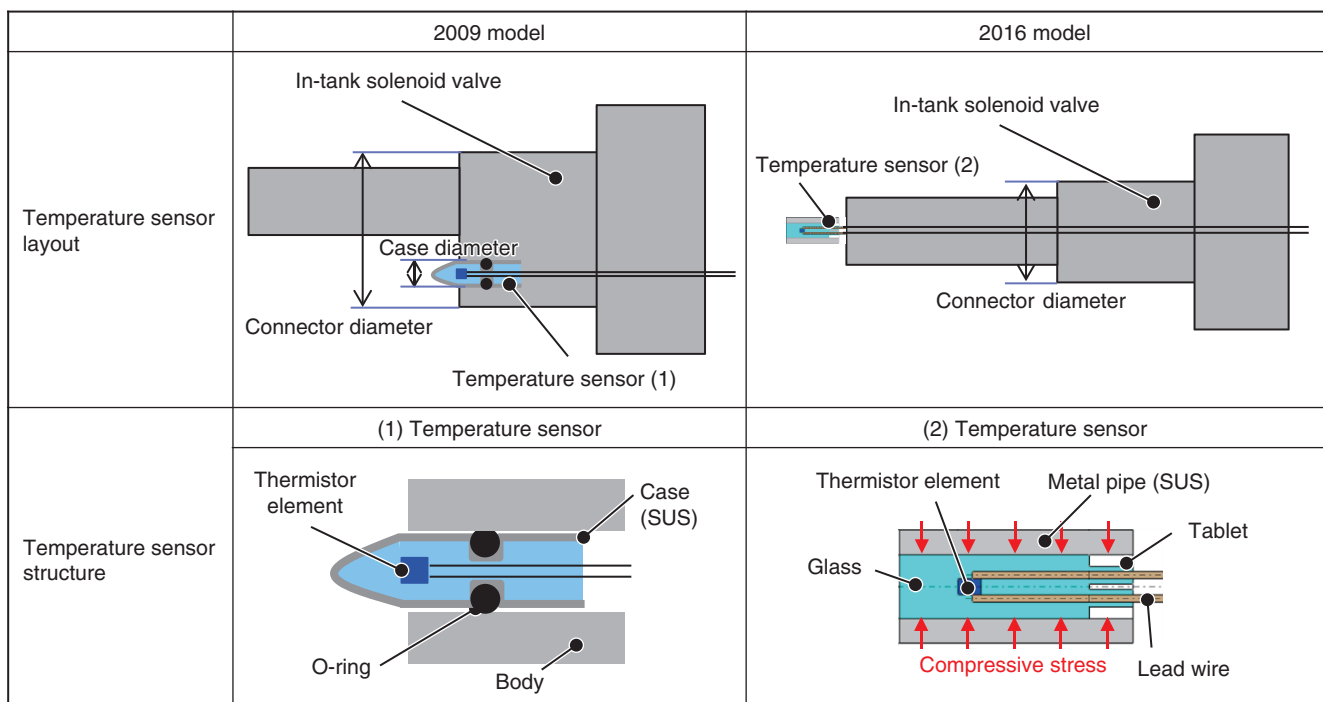


Fig. 6 Layout and structure of temperature sensor

5.1.2. シール構造

開発した 70 MPa 用 O リングシールの構造を Fig. 9 に示す。2016 年モデルでは、バックアップリングの強度を確保するために材質をゴムから樹脂に変更し、かつ圧力によって変形し隙間を埋めることができるテーパ形状を採用している⁽⁴⁾。

圧力印加時にバックアップリングが変形し隙間を埋める状態を表す CAE 結果を Fig. 10 に示す。初期状態の隙間は、図中 (a), (b), (c) の順に圧力が上昇すると徐々に埋められ、所定の圧力 (c) にて隙間がゼロとなる。O リングのはみ出し限界と隙間の関係を Fig. 11 に示す。Fig. 11 の赤線は O リングのはみ出し限界を、青線は圧力により変形した

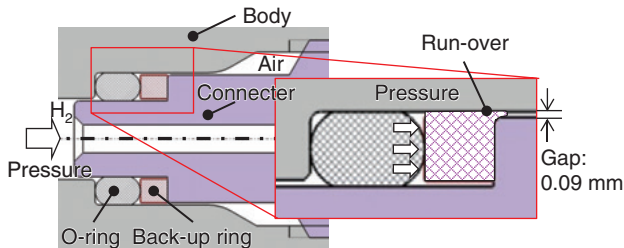


Fig. 7 O-ring seal structure for 35 MPa

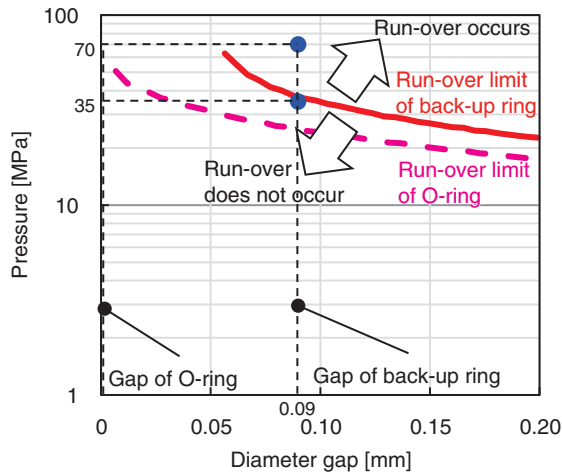


Fig. 8 Relationship of run-over and gap of back-up ring

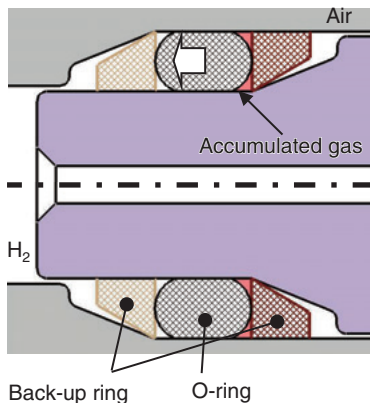


Fig. 9 O-ring seal structure for 70 MPa

バックアップリングとボデーの隙間と圧力の関係を示している。圧力 18 MPa 印加した時の O リングが許容できる隙間は 0.19 mm 以下であり、その時の隙間はテーパ型のバックアップリングの変形によってゼロ (< 0.19 mm) となるため、O リングのはみ出し損傷は発生しない。CAE にて算出した隙間 (青線部) は、O リングのはみ出し限界 (赤線部) 以下となり、O リング損傷を防止することができる。

また、ゴム材料の O リングの方が樹脂材のバックアップリングより水素透過量が多く、O リングを透過したガスが O リングとバックアップリングの間に滞留するため、減圧時に O リングが水素側へ押され O リングのはみ出し損傷してしまう可能性がある。さらに、70 MPa 水素環境下に長時間曝された O リングは、内部に水素が浸透し、減圧時に膨張する事象も考慮して、O リングの水素側にも大気側と同様のテーパ型のバックアップリングを適用した。

5.2. 70 MPa 用弁部シートの開発

5.2.1. シールの考え方

水素の供給および遮断をおこなうインタンク電磁弁には、O リングシールの他に Fig. 5 (2), (4) に示す弁部シート構造が必要であり、その弁部は上流と下流の圧力差がある条件で作動しなければならない。2009 年モデルでは、弁部シート材料にゴム材料を、弁部構造にはフラット形状のバ

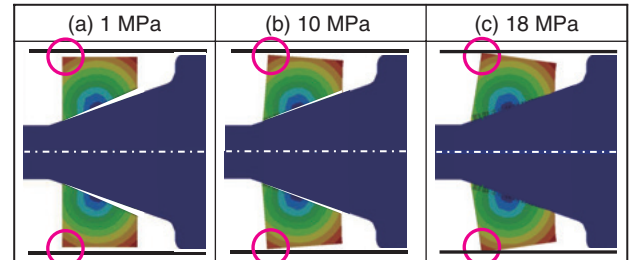


Fig. 10 CAE Results for run-over gap under pressure

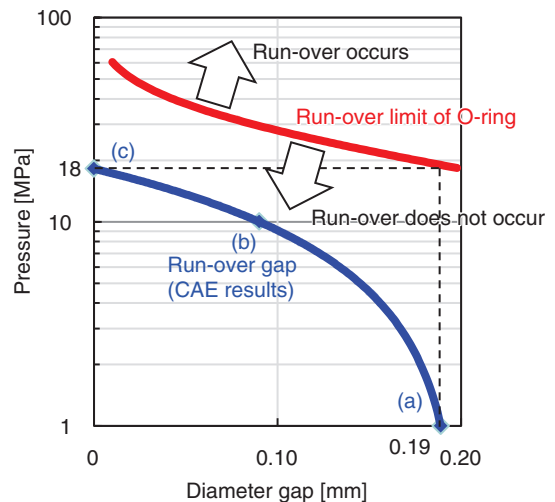


Fig. 11 Relationship between run-over and O-ring gap

ルブシートに突起形状のバルブを押し付ける構造を採用した。しかし、2009 年モデルの 35 MPa 用弁シートを 70 MPa 差圧条件で作動させると、圧力によってゴムシートに発生した引張応力がシート材の引張強度を上回り、シート材が下流流路に入り込み損傷する事象が発生し、シール性を確保することができない (Fig. 12)。

そこで、今回 70 MPa 用弁シートのシール材質およびシール構造について検討をおこなった。

5.2.2. シール材質

水素貯蔵圧力の 70 MPa 化に対応するためには、シール材質を機械強度が高い樹脂に変更することが必要である。しかし、一般的に樹脂には力が加わるとバネのように反発する性質 (弾性) があるとともに、流体のように流動する性質 (粘性) がある。そのため、高温高圧下で長期間ソークされると、樹脂はクリープ変形し永久ひずみが発生する。弁部シートのクリープ変形イメージを Fig. 13 に示す。弁部シートで永久ひずみが進行した場合、永久ひずみにより樹脂と金属の接触面積が増加してシート面圧が低下し、シール漏れが発生する懸案がある。

そのため、今回水素貯蔵圧力 70 MPa 化に対応した樹脂シート材料として、機械強度が高く、耐クリープ性に優れたポリアミドイミドを選定した。樹脂シートにポリアミドイミドを採用したことにより、差圧作動および熱老化に対する耐久性を確保することができる。しかしながら、ポリアミドイミドは比較的高い力で圧縮しなければバルブ表面の微細な凹凸を埋めることができずシール性を確保できないため、水素シールに必要なシート面圧を確保可能な構造を検討した。

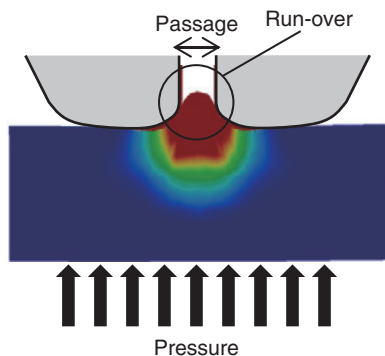


Fig. 12 Seat damage by run-over

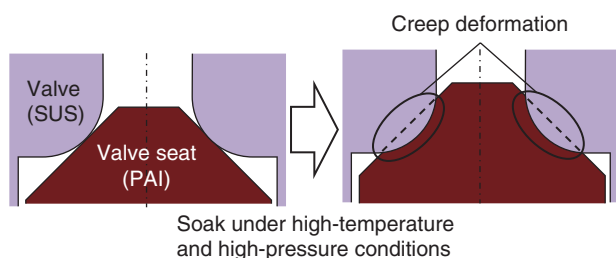


Fig. 13 Creep deformation of valve seat

5.2.3. シール構造

開発した 70 MPa 用樹脂シート構造を Fig. 14 に示す。

テーパ型樹脂シート構造は、バルブが閉じてバルブシートと接触した時に調芯する方向に力が働くため、バルブとバルブシートとの位置関係が適切に保たれている。また、シートに発生する面圧については、テーパ形状によりシート荷重が分力化され、発生応力を軽減することができる。

圧力印加時にシートに発生する面圧の CAE 解析結果を Fig. 15 に示す。弁部シートの圧力差が大きい場合には発生応力がシートの許容面圧以下となり、圧力差が小さい場合でも水素シールに必要な面圧が確保できる 45° テーパ型樹脂シート構造を選定した。

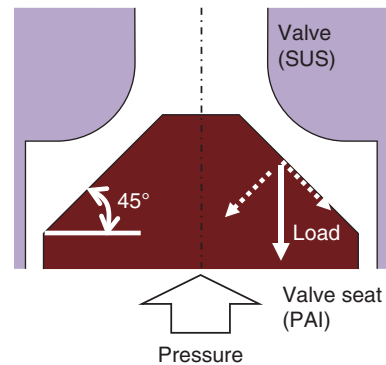


Fig. 14 Valve seat structure for 70 MPa

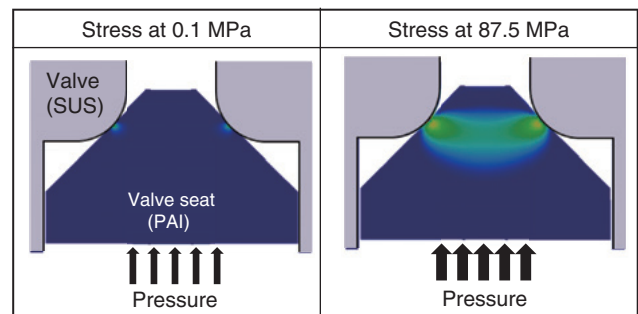


Fig. 15 CAE results for surface pressure

6. まとめ

70 MPa システムの高耐圧化によるインタンク電磁弁の軽量化と水素シール性の向上をおこなった。

- (1) インタンク電磁弁の軽量化技術として、逆止弁と遮断弁を統合しバルブ内の充填、放出の二つのガス流路を共用化することで部品数を 6% 低減した。また、ボデー材質を SUS からアルミニウム合金に変更し、かつ温度センサのタンクへの内蔵により口金を小径化した。従来モデルに対し 70 MPa に対応しているにも関わらず、41% の軽量化を達成した。

- (2) 水素シール技術として、70 MPa 用 O リングシールには O リングの水素側、大気側にテーパ型のバックアップリングを設置するシール構造とした。70 MPa 差圧条件で作動する弁部には 45° テーパ型樹脂シート構造をそれぞれ採用することにより、水素シールの高耐圧化を実現した。その結果、従来の 35 MPa に対して体積水素貯蔵密度を 30% 向上させることができた。

参考文献

- (1) 松永稔, 福島達也, 尾島邦明, 木村顕一郎, 小川隆行:
FCX クラリティ用燃料電池パワートレイン, Honda
R&D Technical Review, Vol.21, No.1, p.7-14
- (2) Global technical regulation (GTR) No.13: Global
technical regulation on hydrogen and fuel cell
vehicles, (2013)
- (3) 日本フルードパワー工業会規格 JFPS 1003:1999, 油
圧シリンダ用パッキンの仕様・選定方針
- (4) NOK 株式会社, Japan Patent 3543617, (1999)

■ 著 者 ■



朝野 護 人



加藤 航 一



尾崎 浩 靖



和 田 信