

高圧水素環境下におけるゴム製 O リングの密封特性について

Sealing characteristic of O-ring in high pressure hydrogen environment

NOK (正) *佐藤 陽平 (正) 佐藤 博幸

Yohei Sato*, Hiroyuki Sato*

*NOK Corporation

1. はじめに

カーボンニュートラル社会実現に向け、燃料電池自動車普及の取り組みが進められている。水素ステーションのランニングコスト低下を狙い、ディスペンサーで使用されるゴム製 O リングの耐久性向上が求められている。水素は可燃性ガスであるため、安全性確保が不可欠であるが、拡散しやすく、分子の小ささゆえに漏れを起こしやすい。また、使用環境は $-40\sim 85^{\circ}\text{C}$ 、 90MPa と非常に過酷である。ゆえに、このような条件での耐久試験で認められた破壊現象を調査し、製品開発に反映させることは、安全性の高い製品を社会に提供するうえで重要なプロセスといえる。Figure 1 は、基礎評価としてゴム製 O リングを用いた耐久試験で認められた破壊現象 (a: はみ出し, b: 座屈, c: ブリスタ, d: 摩耗) を示している。本報では、耐久試験で認められた破壊現象の発生メカニズムとその対策について紹介する。

2. ゴムの物性に起因する破壊現象^{1) 2)}

Figure 2 に、EPDM 製 O リングを 90MPa 、 30°C の条件で 24 時間水素暴露した後に速やかに圧力容器から取り出した際に認められた体積変化の様子を示す。取り出し直後に O リングの体積増加が確認され、時間経過と共に元の体積に戻ることがわかる。これは、加圧時のゴム内部への水素の溶解と減圧時の膨張によるものと考えられる。Figure 3 に示すように、はみ出しや座屈はこの体積増加に起因し、前者は O リング内周側の溝隙間へゴムが入り込むことに、後者は周方向に生じた応力増加により変形を起こすことによるものと推定している。一方、ブリスタ破壊はゴム中に溶解した水素が減圧時に微小な気泡を形成し、マイクロクラックを発生させ、水素が膨張する事でマイクロクラックが成長し O リング内部の割れの形成に至ると考えられる。

これらの破壊現象を回避するためには、水素溶解量が低く、弾性率や引張強度が高いゴム材料の適用が望ましい。また、体積増加を見込んだ適切な溝設計やバックアップリングの併用も有効であると考えられる。

3. トライボロジー特性を起因とする破壊現象³⁾

平面固定用 O リングの高圧水素耐久試験において水素の漏れが認められた現品の中には、摩耗と思われる表面損傷が認められることがある。これは、Figure 4(a)に示すような圧力印可時の O リングの変形過程において発生する、O リングと相手面との微小滑りに起因したフレッチング摩耗現象と考えられる。Figure 4(b)に、線径 3.3mm の O リングに対して 90MPa の圧力をかけた場合のしゅう動距離を見積った FEM 解析結果を示しており、圧力印可により最大 0.13mm しゅう動している事がわかる。このフレッチング摩耗に対する環境温度の影響の検証した。Table 1 に、VMQ 製 O リングを用い、 -40°C および 85°C それぞれで $0\sim 90\text{MPa}$ の耐久試験を行った時の、漏れ検出までのサイクル数、試験後 O リングの表面粗さおよび相手金属表面の観察画像を示す。いずれの温度においても、O リング表面粗さは新品時と比較して増加傾向にあり、相手表面に摩耗粉の付着が確認された。低温環境では温度低下によるゴム収縮に伴う圧

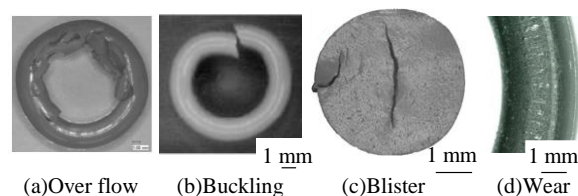


Fig. 1 The fracture pattern of O-ring. (Reprinted from [2])

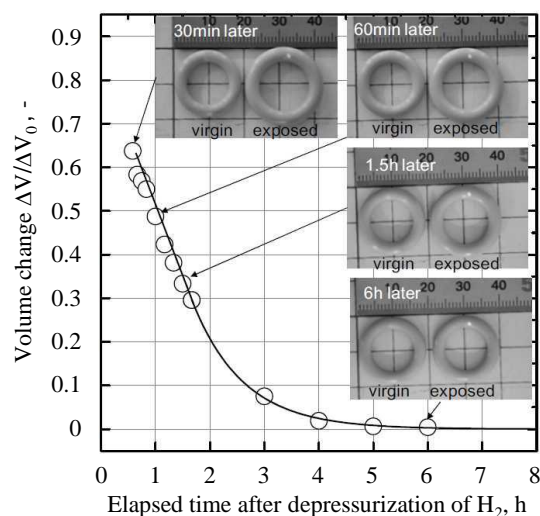


Fig. 2 Volume change of the O-ring. (Reprinted from [2])

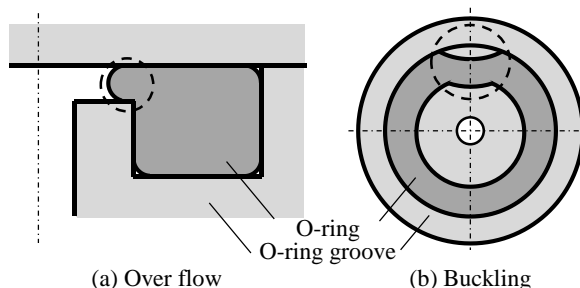


Fig. 3 Fracture mechanism of O-ring by volume expansion. (Reprinted from [2])

力印可時のしゅう動距離増加、高温環境では引張強度低下によるためと考えられる。Oリングやガスケットは、相手面との間で連続的な接触を形成して密封対象の流路を遮断することで密封状態を作り出している。そのため、フレッチング摩耗によって増大した表面粗さや摩耗粉はその連続的な接触形成の障害となり、漏れの原因となる可能性が考えられる⁴⁾。そこで、このフレッチング摩耗粉を除去し同一条件で再度漏れ試験を行った。Figure 5は、摩耗粉除去前後での耐久試験における二次容器側の水素の圧力推移を示しており、-40℃、85℃での試験とも摩耗粉の除去により漏れた水素の圧力が大幅に低減していることがわかる。このことから、Table2に示したインパルス耐久試験での漏れは、圧力変動で生じたフレッチング摩耗粉がシール面に留まったことが主要因と考えられる。フレッチング摩耗による漏れを回避するためには、摩耗粉の接触面外への効果的な排除を可能とする取り付け溝設計も効果は認められるが、他システムへの影響を考慮し、グリースでのしゅう動抵抗低減や、適切な溝設計によるしゅう動自体の抑制が有効であると考えられる。

4. まとめ

高压水素環境下における破壊現象とその対策についてまとめた。

- (1) 高压水素がゴムの中へ溶解し、減圧時に内部で膨張することで内周部はみ出し破壊、座屈破壊、ブリスタ破壊が生じる。これらに対しては、水素溶解量が少なく、機械特性に優れたゴムの使用、また水素による体積増加を考慮したシール系の設計が重要である。
- (2) 固定用Oリングにおいても加減圧時のOリング変形に伴うフレッチング摩耗が生じ、摩耗粉のかみ込みによる漏れが発生することがあることを示した。潤滑の改善やしゅう動自体の防止が効果的である。

謝辞

本成果の一部は「NEDO 超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業」の一環で、九州大学水素材料先端科学研究センター(HYDROGENIUS)の技術協力の元実施したものである。

文献

- 1) 西村伸：高压水素ガス環境下におけるエチレンプロピレンゴム製シール材の破壊現象，日本ゴム協会誌，86，12，360（2013）
- 2) 古賀敦 西村伸：高压水素ガスによるゴムOリングの破壊現象の原因と対策，トライボロジスト，60，10，664（2015）
- 3) 竹越雅史，市川景将，林英象，鈴木清宏，高压水素の繰返し負荷によるOリングの摩耗，トライボロジー会議2017 秋 高松予稿集(2017) C21
- 4) 山本雄二，關和彦：はじめてのシール技術 NOK(株)編，工業調査会(2008)

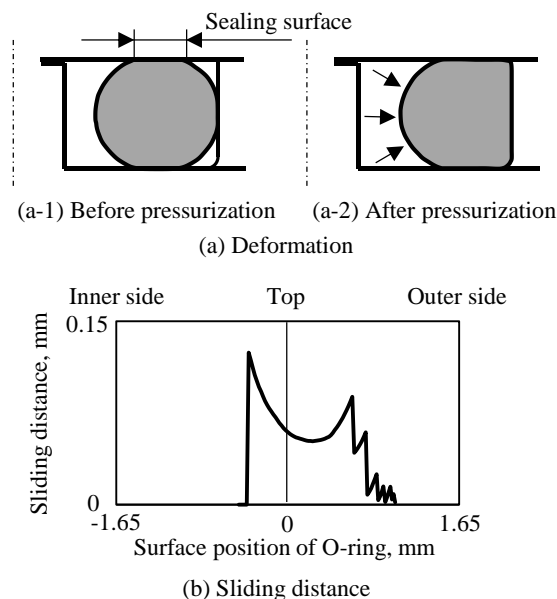

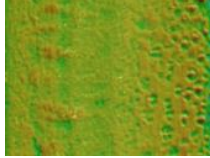
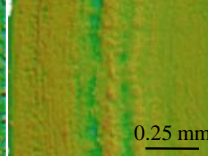
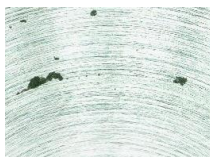
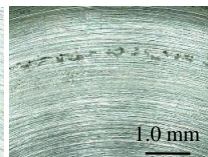


Fig. 4 Deformation and sliding distance of the O-ring due to pressurization calculated by FEM analysis.

Table 1 O-ring roughness and wear debris on jig after cyclic test.

	-50  50μm	
O-ring surface		
Wear debris on jig		
Temperature, °C	-40	85
Cycle time, x10 ⁴	4.4	0.8
Sz, μm	40.5	32.9
※Roughness of virgin: Sz 27.1 μm		

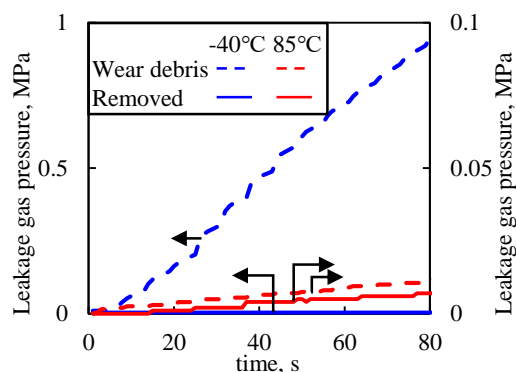


Fig. 5 Effect of wear debris on sealing.