

Effect of surface roughness on leak tightness of pillow seal

Yutaka Yamanoi^{1,A)}, Keizo Agari^{A)}, Hiroaki Watanabe^{A)}, Tetsuro Nakamura^{B)},
Masami Iio^{C)}, Masaharu Ieiri^{A)}, Yoji Katoh^{A)}, Akio Kiyomichi^{A)}, Yoshinori Sato^{A)}, Shin'ya Sawada^{A)},
Yoshihiro Suzuki^{A)}, Minoru Takasaki^{A)}, Hitoshi Takahashi^{A)}, Kazuhiro Tanaka^{A)}, Akihisa Toyoda^{A)},
Megumi Naruki^{A)}, Hiroyuki Noumi^{A)}, Erina Hirose^{A)}, Michifumi Minakawa^{A)}, Ryotaro Muto^{A)},

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} MIRAPRO Co., LTD., 1100 Anadaira, Sutama-cho, Hokuto-shi, Yamanashi, 408-0111

^{C)} Riken, 2-1, Hirosawa, Wako, Saitama, Japan, 351-0198

Abstract

High Energy Accelerator Research Organization (KEK) and Japan Atomic Energy Agency (JAEA) construct Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) in Tokai, Ibaraki. The nuclear and particle physics facility is adopted the pillow seal of all metals that have a large diameter and a high radiation performance.

The surface roughness and He leak tightness according to the use frequency were measured by using the same one as the pillow seal actually used. It has been understood that the surface of the membrane increases in proportion to the use frequency though deterioration in the surface of the other side of the mirror flange doesn't progress greatly. As for the conductance of the membrane, the thin rectangular cross section model with the free molecular flow was good approximations.

ピローシールの気密性能に関する表面粗さの影響

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究開発機構 (JAEA) は、大強度陽子加速器施設 (J-PARC) を茨城県東海村に建設している。その中の一つ、原子核素粒子実験施設 (ハドロンビームライン) では、ビーム輸送のための真空パイプは大口径かつ高い耐放射線性能をみたすためオールメタルのピローシール^[1]を採用する。ピローシールは同芯二重の金属メンブレンを用いて、ガスケットとする。金属メンブレンは0.3~0.8MPa程度に加圧、高さ0.3~0.6mm膨張させ、同時にベローズ伸張により対向フランジ面に接触させて気密シールを行う。金属メンブレン (SUS材) と対向フランジ面 (SUS材) による気密性能は、接触幅、表面粗さ、面圧により左右される。

前回の報告^[2]では、メンブレンへの加圧圧力と膨らむ高さとの関係を測定し、残留高さ履歴から溶接部に塑性変形が残ることを報告した。

本発表では、使用回数が進むと各表面に擦過傷、圧痕がつき、気密性能が悪くなっていく様子を、実機を用いて観察し、表面粗さと気密性能の劣化について発表する。

2. 繰り返し動作試験

2.1 ピローシールの概要

今回用いたピローシールの主要寸法は、有効内径

500mm、同芯2重メンブレンで、メンブレンの各幅は20mm、中間排気部は9mm、メンブレンの材質 SUS304、板の厚さは0.2mmである。このメンブレンは0.3MPaの加圧圧力で、高さ0.35mm程度に膨らむ。図1に断面形状の概念図を示す。実機では両面ピローシールを多く使い、ハドロンビームラインでは内径500mmと310mmを標準とした。両面シールの場合、中間排気ポートなどの配管径を確保するため全体の厚さは52.4mmである。また、設置位置とポンプとの距離がある程度必要のため中間排気圧力P1は 10^{-2} Pa程度である。

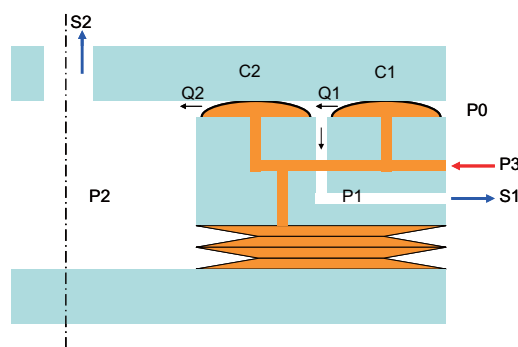


図1: 片面ピローシール断面図

2.2 動作試験

実際の使用と同じ動作での変化を観察するため内

¹ E-mail: yamanoi@post.kek.jp

径500mm片面ピローシールを縦に設置して用いた。表面の非破壊検査の出来る測定装置として、レーザー顕微鏡VK-9700^[3]を用いて、一つの測定範囲202 μm×270 μmの中心線平均粗さRa(μm)を数箇所を渡ってサンプリングし測定した。高さ分解能は0.001 μmであった。

試験の操作手順は以下の通りである。

1. ダイヤフラムライン 0.3MPa 5s
2. ベローズライン 0.3MPa 10s
3. ビームライン vac 5s
4. ビームライン atm 5s
5. ベローズライン atm 5s
6. ダイヤフラムライン atm 5s
7. ベローズライン vac 5s
8. ベローズライン atm 5s

以上の一連の操作、計45secを1サイクルとし、所定の回数に達したところで、気密性能の測定とメンブレンとミラーフランジそれぞれの表面粗さを観察、測定した。最大5000回の動作試験をした。図2はレーザー顕微鏡による観察をしている様子である。



図2：レーザー顕微鏡による測定の様子

3. 測定結果

図3に測定結果を示す。電解研磨直後のメンブレンの表面粗さRaは、同時に鏡面処理を施した試験片でRa=0.0053 μmである。

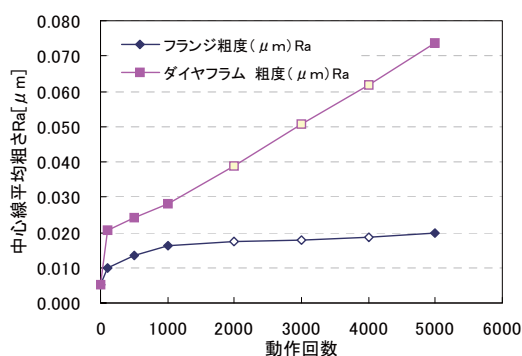


図3：動作回数と各劣化の関係

繰り返し動作の結果、厚さ0.200mmのメンブレンは動作回数に比例して表面粗さRaは増加している。一方、ミラーフランジは動作1000回以降の劣化は非常に緩やかな増加であった。

同時に測定したヘリウム気密性能を図4に示す。表面粗さRa=0.025 μm以降のリーク量Qの増加は、コンダクタンスCを記述するRoth^[4]の式(1)に示すA²(=Ra²)に比例する増加を示した。

$$Q=C \Delta p=34A^2(L/w)\exp[-3F/(LwR)] \cdot \Delta p \quad (1)$$

ここで各変数は以下の通りである。

- A：面粗度 (Ra)
- L：ガスケット周長
- w：ガスケット接触幅
- F：押し付ける面圧
- R：ガスケット材質の塑性変形特性
- Δp：内外の圧力差

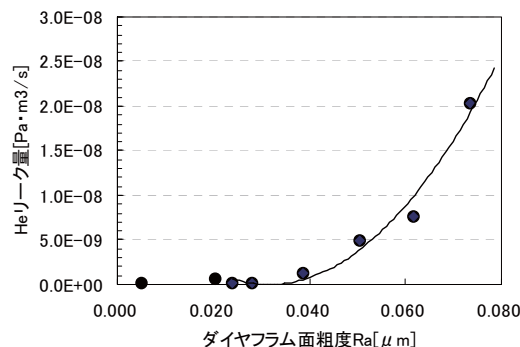


図4：面粗さRaとHeリーク量の関係

4. コンダクタンス

4.1 分子流

繰り返し試験前に測定した内と外のコンダクタンスを図5に示す。メンブレンの加圧圧力を0.3MPa一定にして、それぞれの通過するHe流量を測定し、圧力差に対するコンダクタンスC1(外)、C2(内)を計算で求めた。図5より、メンブレンをはさむ内

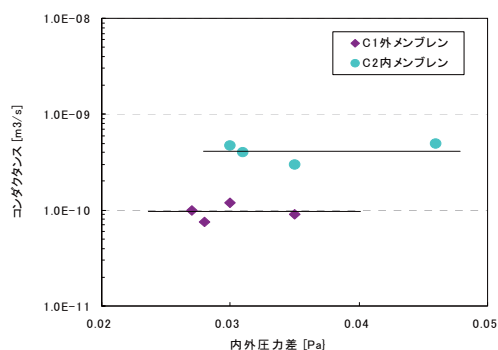


図5：内、外メンブレンの各コンダクタンス

と外の圧力差に依存せず、メンブレンのC1(外) $=9.57 \times 10^{-11} \text{m}^3/\text{s}$ 、C2(内) $=4.17 \times 10^{-10} \text{m}^3/\text{s}$ であった。この様子からピローシールのメンブレンでのコンダクタンスC1、C2は、分子流に近い様相を呈している。

4.2 薄い平行2面モデル

メンブレンを通過する流れが分子流であるとして、の薄い平行2平面のモデル^[5,6]と比較する。このときコンダクタンスCsの式は次ぎ通りである。

$$Cs(20^\circ\text{C}, \text{He}) = 309Ks \times ab^2/l \quad (2)$$

ここで(1)式のパラメーターとの関係は、KsはClausing係数、開口部の幅aは円形のメンブレンの周長(=1.816m, 1.634m)に相当する。高さbは、メンブレンとミラーフランジとの間隙を作る表面粗さRa、長さlは、分子の進入する方向であるからメンブレンの幅w(～10mm)である。接触している平行2面であることから、 $a \ll l$, $b \ll l$, $b \ll a$ である。

図6は値 l/b に対するKsの値を示す。 $l/b > 10$ の時、 $Ks = (3/8) \cdot \ln(l/b)$ である。

測定された初期コンダクタンス値Cs(内)、Cs(外)から(2)式を満たすRa(=b)を求めると、それぞれRa(内) $=0.019 \mu\text{m}$ 、Ra(外) $=0.042 \mu\text{m}$ であった。

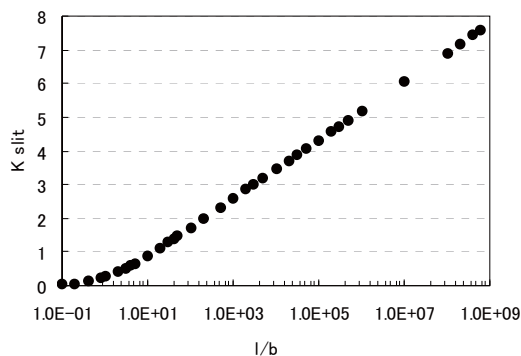


図6 : l/b とKs値の関係

5. まとめ

ピローシール実機を用いて、使用回数を重ねた時の表面粗さと気密性能について測定した。ミラーフランジの劣化は大きく進行しないがメンブレン側は使用回数に比例して増大していくことが分かった。

表面の観察から圧痕は数千回以上の操作から性能に影響してくる。しかし、実際の運用上、開閉操作は1000回以下であり、真空フランジ全般に言える塵埃の進入が少ない環境であれば、問題無いといえる。

また、性能を評価する上で、薄い平行2面のモデルが適用できることが分かった。

気密性能劣化に対する、修復作業は圧痕による凹凸を小さくする修理、または埋める修理で改善でき

ると考えられる。

今後、この方法による修復でどの程度気密性能が改善するか測定する予定である。

6. 謝辞

本研究は、日本学術振興会 科学研究費補助金、基盤研究(A) No.17204019、基盤研究(A) No.18204026によって支援されている。

参考文献

- [1] 田中万博他、大強度陽子加速器施設原子核素粒子実験施設建設グループ ハドロンビームラインサブグループ中間報告書、KEK Internal 2002-8 (2002)
- [2] 山野井豊他、第3回日本加速器学会年会報告、pp472-pp474 (2006)
- [3] 株式会社キーエンス、レーザー顕微鏡VK-9700カタログ (2007)
- [4] A. Roth, Vacuum technology, Fourth impression (1998), ISBN0-444-88010-0 (Elsevier)
- [5] A. Guthrie and R. K. Wakerling, Vacuum Equipment and Techniques I-1, McGraw-Hill, 1949
- [6] 日本真空技術株式会社編、真空ハンドブック、オーム社、p38 (1992)