

溶接ステンレス板を使った大口径ピローシールの開発(2)

DEVELOPMENT OF A LARGE-DIAMETER PILLOW-SEAL USING WELDED STAINLESS-STEEL PLATES (2)

倉崎 るり^{#,A)}, 山野井 豊^{A)}, 渡邊 丈晃^{A)}, 中村 哲朗^{B)}

Ruri Kurasaki^{#,A)}, Yutaka Yamanoi^{A)}, Hiroaki Watanabe^{A)}, Tetsuro Nakamura^{B)}

^{A)} Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} MIRAPRO CO., LTD.

Abstract

At the J-PARC Hadron Experimental Facility, a new proton beamline at 8 GeV is currently under construction for COMET experiment. Since the pion-generation target is located in the center of the solenoid magnet, the radiation level is expected to be very high around the magnet downstream. To reduce radiation exposure to workers, we have developed a large-diameter all-metal pillow seals for vacuum connections around magnets. To fabricate a pillow-seal with an outer diameter of 1400 mm, a stainless-steel plate with a diameter of 1500 mm and a thickness of 0.2 mm is required, but it is not able to procure such a large “seamless” plate. Thus, welded plate was adopted for the large-diameter pillow seal. The fabrication of the large-diameter pillow seal was successfully carried out as designed, and subsequently vacuum tightness was measured with a newly constructed test bench. In this paper, results of the vacuum tightness are reported.

1. はじめに

J-PARC ハドロン実験施設では、30 GeV に加速された陽子ビームを利用して、多くの原子核・素粒子実験が実施されている[1]。

現在、新たなビームラインとして、COMET 実験[2]のためのビームラインの建設を進めている。ここで用いる捕獲ソレノイド電磁石は超伝導電磁石となっており、中心部にはパイ中間子生成標的が置かれ(Fig. 1)ビーム前方となる接続部周辺は高放射化が予想される。そのため作業の効率化、作業者の被ばく量低減のために、真空接続には遠隔からの真空接続・切り離しが可能な大口径ピローシールの採用を計画している[3-6]。ただし、これまでに類を見ない大型品となるため、最大の懸念事項は真空気密を作る膜材(ダイヤフラム)の材料となる継目のないステンレス板材の入手または製造が困難なことである。このダイヤフラムの製造に関しては前回の学会で報告した通り[7]、溶接による板材を製作し、そこからダイヤフラムを切り出して製作する手法を開発して、小型テストベンチを使い要求される気密性能が達成可能であることを実証した。引き続き、この溶接方式による大型ダイヤフラムを製作し、それを使用して実際に実機サイズの大口径ピローシールの製作を行い、製作方法を確立するに至った。この実機サイズの大口径ピローシールについて、これまでに専用の大型試験治具を準備し、真空気密性能の測定を実施した。

本論文では、溶接方式で製作したダイヤフラムを使用した大口径ピローシールの真空気密性能を報告する。

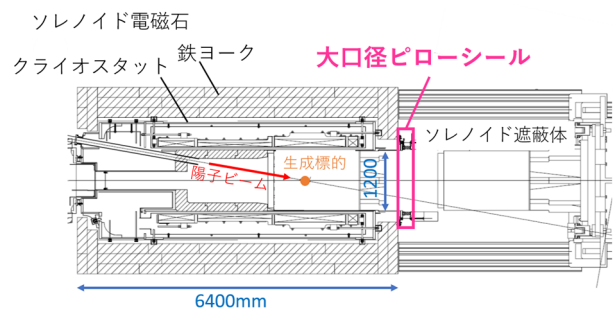


Figure 1: Drawing of a large-diameter pillow-seal and a solenoid magnet with a radiation shielding unit.

2. 大口径ピローシール

2.1 ピローシールの利点

ピローシールは、Fig. 2 に示すように鏡面研磨された金属ダイヤフラムとミラーフランジとを密着させることで真空気密を得ることができる真空着脱装置である[7]。遠隔からの圧縮空気の On/Off のみで真空の接続・切り離しが可能で、さらにすべて金属材料で構成され、有機材料を使用していないため耐放射線性に非常に優れている[3-6]。そのため、近接作業が困難なハドロンビームラインの高放射化エリアなどで多く採用されている。

[#] ruri.kurasaki@kek.jp

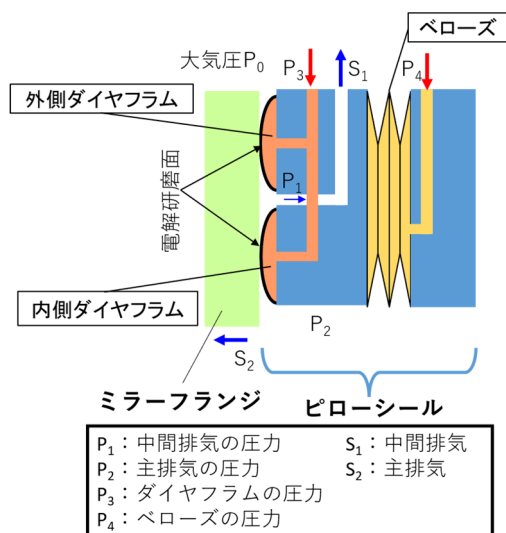


Figure 2: Schematic drawing of a pillow-seal.

2.2 大口径ピローシールの仕様

捕獲ソレノイド電磁石のクライオスタット下流部の有効内径は $\phi 1200$ mm で、片側フランジが固定されもう片方が伸縮する片持ち型のピローシールである。大口径ピローシールの図面を Fig. 3 に示す。設置方向はミラーフランジがクライオスタット側(一次ビームライン上流側)、ダイヤフラムが下流側となる。二重ベローズ内に 0.3 MPa かけた時に伸縮長 10 mm 程度になるように、成形ベローズは 3 山とした。二重のダイヤフラムの溶接場所は内側と外側で直線上にならないように位相を 45 度回転させた。ダイヤフラムの幅は、前回報告[7]の小型試作機より幅を大きく取り 30 mm とした。製作した実機サイズの大口径ピローシールの写真を Fig. 4 に、性能試験の様子を Fig. 5 に示している。

このピローシールに要求されている気密性能は、COMET 実験の要請により、ヘリウムリークレートで $1E-8$ Pa \cdot m³/s 以下とされている。

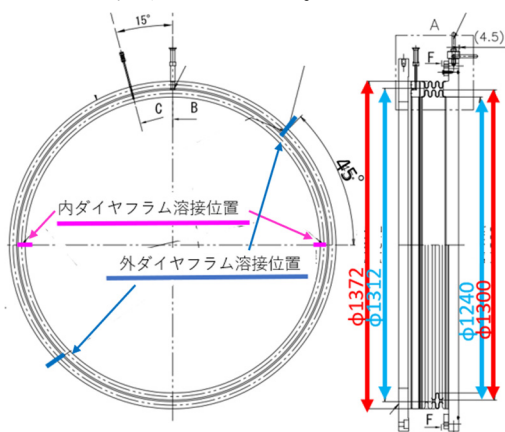


Figure 3: Drawing of the large-diameter pillow-seal. The pink and blue lines in the left figure show the weld seam position of the diaphragm. The unit in the right figure is in mm.

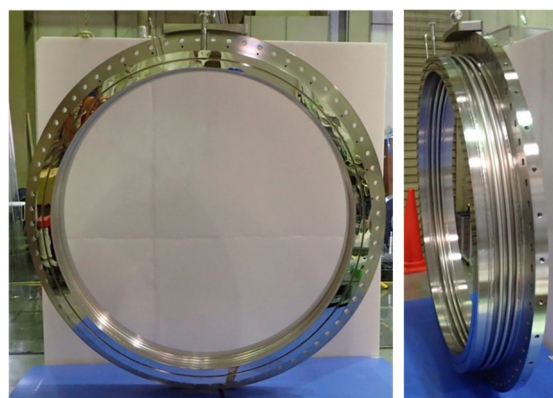


Figure 4: Photograph of the large-diameter pillow-seal.

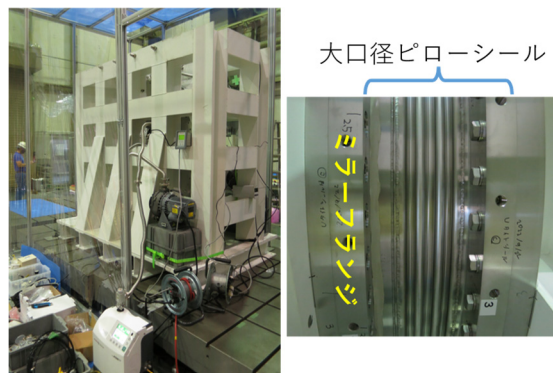


Figure 5: Photographs of the setup for the large-diameter pillow-seal performance test.

3. 性能試験

3.1 全体の気密性能測定

大口径ピローシール全体の気密性能(ヘリウムリークレート)の測定結果を Fig. 6 と Fig. 7 に示す。ミラーフランジおよび大口径ピローシールを対向フランジ(試験用フランジ)に取り付ける際にはゴム O リングを使用した。測定は大口径ピローシールの主排気にヘリウムリーク検出器(PFEIFFER VACUUM 社製 ASM310)を接続して、外側のダイヤフラムとミラーフランジの密着面の外にフードを構成し、フード内にヘリウムガスを封入して行った。この時、ダイヤフラムの中間排気にはターボポンプを接続して排気し、中間排気の到達圧力は約 1.7 Pa の状態であり、主排気の到達圧力は約 $2.0E-3$ Pa であった。

ダイヤフラム圧力を 0.35 MPa に固定してベローズ圧力を変えた時のヘリウムリークレートの測定結果を Fig. 6 に示している。ベローズ圧力を 0.35 MPa に固定してダイヤフラム圧力を変えた時のヘリウムリークレートの結果を Fig. 7 に示している。全体のヘリウムリークレートの結果としては $1.3E-7$ Pa \cdot m³/s から $2.9E-7$ Pa \cdot m³/s であった。この値は、現状として目標値($1E-8$ Pa \cdot m³/s)に約 1 桁届かなかったことを意味する。この原因を探るべく、次節以降

に示すように個別のリーク特性や接触幅の測定を実施した。また、Fig. 6とFig. 7に示している圧力特性としては、ダイヤフラム圧力を上げるよりも予めダイヤフラム圧力を固定してベローズ圧力を上げる方が気密性能は良くなる傾向が見られた。これは現状として鏡面(ダイヤフラム)と鏡面(ミラーフランジ)の接触圧力よりも接触幅の方が気密性能に効いていることを示唆している可能性があると考えられる。

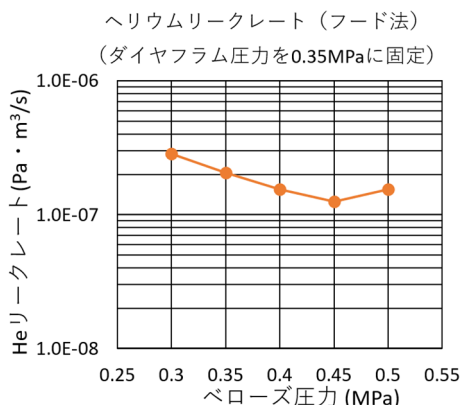


Figure 6: Results of the helium-leakage rate as a function of the bellows pressure, where the diaphragm pressure is fixed to be 0.35 MPa.

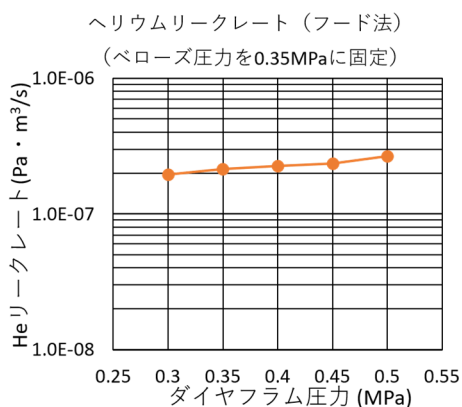


Figure 7: Results of the helium-leakage rate as a function of the diaphragm pressure, where the bellows pressure is fixed to be 0.35 MPa.

3.2 シームレス部と溶接シーム部の気密性能測定

二重になっているダイヤフラムの外側のうち、シームレス部と溶接シーム部の気密性能を測定した。測定方法は中間排気にヘリウムリーク検出器を接続して、外面の一部にのみヘリウムガスを吹きかけることで行った。ヘリウムガスを吹きかけた場所はシームレス部(一次ビームライン上流から見て 10 時の方向)と溶接シーム部(一次ビームライン上流から見て 2 時の方向)の 2 カ所である。

ダイヤフラム圧力を 0.35 MPa に固定してベローズ圧力を変えた時のヘリウムリークレートの測定結果は Fig. 8 である。ベローズ圧力を 0.35 MPa に固定してダイヤフラ

ム圧力を変えた時のヘリウムリークレートの結果は Fig. 9 である。ダイヤフラムの溶接および加工は前回報告[7]と同じ方法・手順で行ったが、前回の測定結果とは異なりシームレス部との性能に大きな違いは見られなかった。これはダイヤフラムの幅が前回報告時の小型実証機では 20 mm に対し、今回の実機サイズでは 30 mm になったことで溶接シームの影響が緩和された可能性がある。この点は今後の検証課題の1つと考えている。

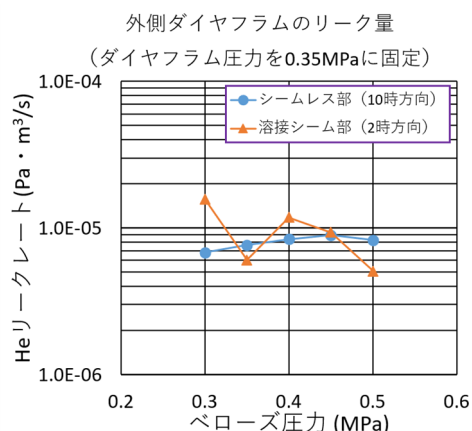


Figure 8: Results of the helium-leakage rate of the outside diaphragm at the weld seam point and at the seamless point as a function of the bellows pressure, where the diaphragm pressure is fixed to be 0.35 MPa.

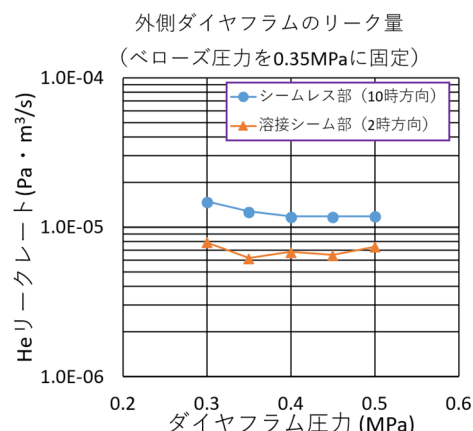


Figure 9: Results of the helium-leakage rate of the outside diaphragm at the weld seam point and at the seamless point as a function of the diaphragm pressure, where the bellows pressure is fixed to be 0.35 MPa.

3.3 内外側ダイヤフラムの気密性能測定

2重になっているダイヤフラムの内側と外側それぞれのダイヤフラムの気密性能を測定した。内側ダイヤフラムの気密性能の測定方法は、主排気にヘリウムリーク検出器を接続して中間排気にヘリウムガスを封入して測定する。外側ダイヤフラムのリーク量の測定方法は、中間排気にヘリウムリーク検出器を接続して外面フード内にヘリウムガスを封入する。

ダイヤフラム圧力を 0.35 MPa に固定してベローズ圧力を変えた時の内外ダイヤフラムのリークレートの結果は Fig. 10 である。また、ベローズ圧力を 0.35 MPa に固定してダイヤフラム圧力を変えた時の結果は Fig. 11 となった。内側ダイヤフラムのリークレートは $5.4 \text{ E-4 Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ から $1.5 \text{ E-3 Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 、外側ダイヤフラムの気密性能は $2.0\text{E-4 Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ から $3.5 \text{ E-4 Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ であった。この測定から、内側ダイヤフラムの気密性能が低いことが分かった。これもまた気密性能を下げる要因の 1 つである可能性がある。また、圧力による気密性能の変化は内側と外側では同じような傾向が見られる。

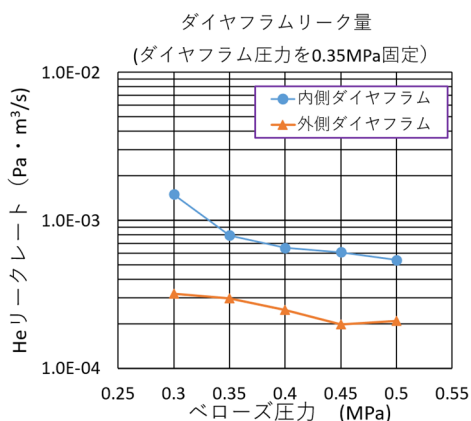


Figure 10: Results of the helium-leakage rate of the diaphragm as a function of the bellows pressure, where the diaphragm pressure is fixed to be 0.35 MPa.

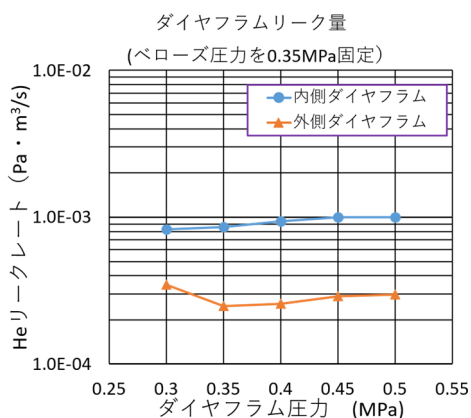


Figure 11: Results of the helium-leakage rate of the diaphragm as a function of the diaphragm pressure, where the bellows pressure is fixed to be 0.35 MPa.

3.4 ダイヤフラムの接触幅測定

FUJIFILM 社製の圧力測定フィルム(プレスケール[8])を使ってダイヤフラムの接触幅の測定を行った。ダイヤフラム圧力 0.35 MPa、ベローズ圧力 0.35 MPa でプレスケールの加圧時間は 2 分間とした。測定箇所は 45 度ずつ 8 カ所、一次ビームライン上流から見て 0 時の方向を 0° としてダイヤフラムに向かって右回りに 45° ごとに区画

を定めた。

プレスケールの結果から接触幅を測った結果は Fig. 12 である。内側ダイヤフラムの溶接箇所は 90° と 270° で、外側ダイヤフラムの溶接箇所は 45° と 225° である。ダイヤフラムの接触幅は、 135° の位置で若干細くなっている。最小幅で 6 mm 以上のため他のピローシールの実績上から推定すると十分な接触幅が確保されているように考えられるが、このことが気密性能を下げる要因の 1 つである可能性も否定できない。また、プレスケールでの測定ではダイヤフラムの溶接継ぎ目の跡は確認できなかった。つまり、溶接継ぎ目部分も他のシームレス部と同様にミラーフランジへ接触しているものと考えられる。

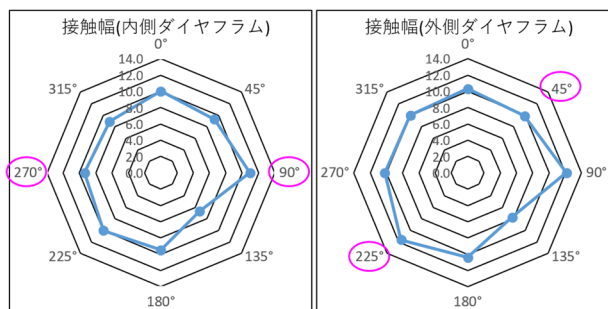


Figure 12: Results of the contact width (unit: mm) of the diaphragm measured with the PRESCALE [8], where the bellows pressure and diaphragm pressure are fixed to be 0.35 MPa. The left and right figure show the width for the inner diaphragm and the outer diaphragm, respectively. The pink circles (90° and 270° in the left figure, 45° and 225° in the right figure) show the weld seam position.

4. 改善策と測定結果

前節までに示した試験結果より、気密性能が目標値に達しなかったことと関連していることは、①内側ダイヤフラムの気密性能が外側より低かったこと、②ダイヤフラムの接触幅が一部細い(当たりの弱い)区画があったことの 2 点である。そのため、内側ダイヤフラムの接触幅を増やすこと、接触幅を全周でより均一することが必要であると考えられる。ここで、並行して実施していたフランジの寸法(平面度)検査において、ミラーフランジの真空シールを試験用のゴム O リングから実機で適用するメタルシールにすることによって、ミラーフランジの内側がわずかに反る(平均で 0.06 mm 程度)ことが測定された。そこで、この変形によりダイヤフラムの接触具合が強くなる可能性が考えられたため、実際にメタルシールで締結したミラーフランジを使用して試験を実施した。

まず、ダイヤフラム接触幅の測定結果を Fig. 13 に示している。ゴム O リングの時と比べて、内側ダイヤフラムの接触幅は平均で 6 mm 程度増加することが分かった。外側ダイヤフラムの接触幅はほぼ変わらなかった(平均で 0.3 mm の増加)。次に、大口径ピローシール全体の気密性能の測定結果を Fig. 14 に示している。ダイヤフラム圧力を 0.35 MPa に固定してベローズ圧力を変えた時の測定結果である。ダイヤフラム圧力 0.35 MPa、ベローズ圧

力 0.5 MPa の時に大口径ピローシール全体のヘリウムリークレートは $4.2 \text{ E-9 Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ となり、目標値 ($1.0 \text{ E-8 Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下) を達成することが分かった。Figure 14 に示す通り、ミラーフランジの真空シールをメタルシールにした時、ダイヤフラム圧力 0.35 MPa の場合はベローズ圧力 0.4 MPa 以上で目標値をクリアすることが明らかとなった。

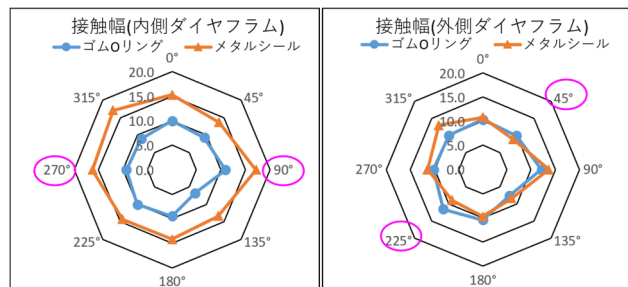


Figure 13: Results of the contact width (unit: mm) of the diaphragm, where the bellows pressure and diaphragm pressure are fixed to be 0.35 MPa. Orange triangles show the result with a metal seal for fastening the mirror flange to the test flange, and blue circles shows the result with an elastomer seal (same result as shown in Fig. 12).

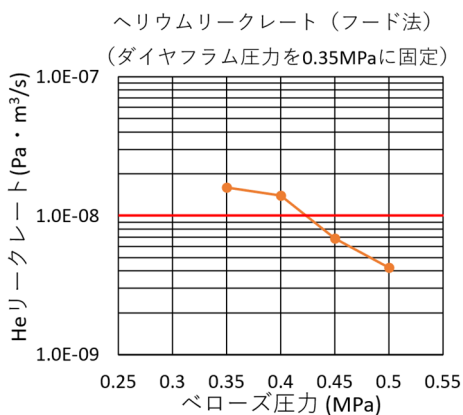


Figure 14: Results of the helium-leakage rate as a function of the bellows pressure, where the diaphragm pressure is fixed to be 0.35 MPa. The red line at $1 \text{ E-8 Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ shows the requirement for the helium-leak rate. The difference from the result shown in Fig. 6 is that the mirror-flange was fastened to the test flange with a metal-seal.

5. まとめ

J-PARC ハドロン実験施設 COMET 実験用ビームラインのために、ビーム有効径 1200 mm というこれまでに類をみない大口径のピローシール開発を進めている。ここでは、溶接ステンレス板からダイヤフラムを切り出す手法により大口径ピローシールの実機サイズの製作を行い、その気密性能の測定を行った。ミラーフランジの真空シールでゴム O リングを使用した場合、全体のヘリウムリークレートとしてはフード法で $1.3 \text{ E-7} \sim 2.9 \text{ E-7 Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ の範囲で、目標 ($1 \text{ E-8 Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下) には届かなかった。

各種測定から、溶接シーム部の問題ではないことが確認された。気密性能の低減させる要因として以下 2 点が見つかった。①内側ダイヤフラムの気密性能が外側と比べて低かったこと、②ダイヤフラムの接触幅が一部細い区画があったことである。ここで、並行して実施していた平面度検査において、ミラーフランジの真空シールを試験用のゴム O リングから実機用のメタルシールにすることによって、ミラーフランジがわずかに変形(内側がわずかに反る)ことを確認した。その影響でダイヤフラムの接触状況が変わる可能性があり、メタルシールを使用した場合についても測定を実施した。その結果、内側ダイヤフラムの接触幅が増えると共に、全体の気密性能が向上することが確かめられた。特に、ダイヤフラム圧力 0.35 MPa、ベローズ圧力 0.5 MPa の時に大口径ピローシール全体のヘリウムリークレートは $4.2 \text{ E-9 Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ となり、目標の気密性能を達成することが分かった。

今後、引き続き気密性能に関する調査を進めると共に、メタルシールで締結したミラーフランジ(実機使用条件)における試験を進め、システム全体として実機完成を目指す計画である。

参考文献

- [1] A list of experiments in the J-PARC Hadron-hall; <http://research.kek.jp/group/nuclpart/HDeppc/Exp/>
- [2] COMET experiment; <https://comet.kek.jp>
- [3] Y. Yamanoi *et al.*, “Development of Pillow Sealing for J-PARC Hadron Beamline”, Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2005, pp. 736-738, LAM736.
- [4] Y. Yamanoi *et al.*, “Development of Vacuum Sealing Devices for J-PARC Hadron Beamline”, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2006, pp. 472-474, WP68.
- [5] Y. Yamanoi *et al.*, “Effect of surface roughness on leak tightness of pillow seal”, Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2007, pp. 826-828, FP59.
- [6] R. Kurasaki *et al.*, “Development of a long-stroke pillow-seal for the J-PARC Hadron High-P beamline”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2019, pp. 302-306, WEPH013.
- [7] R. Kurasaki *et al.*, “Development of a large-diameter pillow-seal using welded stainless-steel plates”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2021, pp. 243-247, MOP010.
- [8] https://www.fujifilm.com/products/measurement_film/en/prescale/product/