

# 溶接ステンレス板を使った大口徑ピローシールの開発

## DEVELOPMENT OF A LARGE-DIAMETER PILLOW-SEAL USING WELDED STAINLESS-STEEL PLATES

倉崎 るり<sup>#A)</sup>, 山野井 豊<sup>A)</sup>, 渡邊 丈晃<sup>A)</sup>, 中村 哲朗<sup>B)</sup>

Ruri Kurasaki<sup>#, A)</sup>, Yutaka Yamanoi<sup>A)</sup>, Hiroaki Watanabe<sup>A)</sup>, Tetsuro Nakamura<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>B)</sup> MIRAPRO CO., LTD.

### Abstract

At the J-PARC Hadron Experimental Facility, a new beamline is now under construction for the COMET experiment using 8 GeV protons, in which a large diameter superconducting solenoid magnet with an inner diameter of 1200 mm is adopted. Since a target for muon production is installed in the center of the solenoid magnet, radiation level is expected to be very high around the magnet. In order to reduce the radiation exposure of workers, we plan to employ a large-diameter all-metal pillow seal for the vacuum connections around the magnet. To fabricate such a large-diameter pillow-seal, a stainless-steel plate with a radius of 1.5 m and a thickness of 0.2 mm is necessary. However, as of now, it is not able to procure such a large “seamless” plate. Thus, we have examined two types of a “welded” plate using a small-size pillow-seal to measure an airtightness performance. The results show that the airtightness of the welded-plate pillow-seal meets our requirement. We are now preparing a real-size pillow-seal using a welded plate to establish a fabrication procedure and to evaluate the performance.

### 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、Fig. 1 のように新たなビームラインとして、COMET ビームラインの建設を進めている。

COMET 実験[2]は、J-PARC の主リングからの 8 GeV 陽子ビームをパイ中間子生成標的に照射し、後方へ発生したパイ中間子をソレノイド磁場で捕獲し、下流のミュオン粒子静止標的まで輸送し静止させる。

この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標的が置かれ、超伝導状態のクエンチ防止のためにソレノイド遮蔽体が設置される。ソレノイド遮蔽体は 8 GeV 陽子ビーム下流 (Fig. 2 の右) に退避できる構造となっており、ソレノイド電磁石とソレノイド遮蔽体を真空接続する必要がある。ビーム前方となる接続部周辺は高放射化が予想されており、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・切り離しが可能なピローシールを採用する[3-6]。

Figure 2 のように、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径は  $\phi 1200$  mm である。そのため、従来がない大口徑のピローシール装置が必要となった。

大口徑ピローシールの開発で最大の懸念事項は、ダイヤモンドのための継目のないステンレス材を製造または入手が困難なことである。ダイヤモンドは極めて平滑な金属表面同士が接触して真空気密性を発揮する。そこで、複数のステンレス板を溶接で繋いで製造したダイヤモンドを小型のピローシールに組み込んで気密試験を実施することにした。本論文では、溶接型ダイヤモンドを使った小型ピローシールの気密性能の結果を報告する。

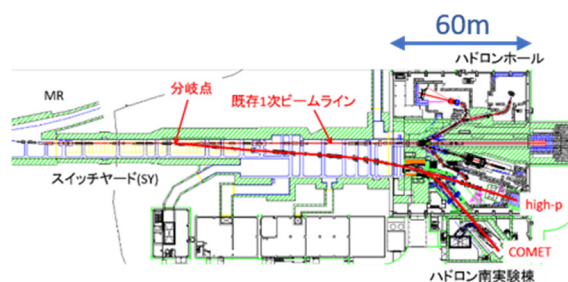


Figure 1: Plan view of the Hadron Experimental Facility at J-PARC.

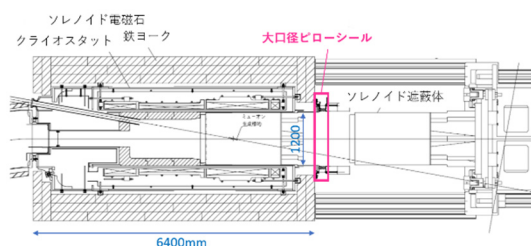


Figure 2: Drawing of a large-diameter pillow-seal and a solenoid magnet with a radiation shielding unit.

### 2. 大口徑ピローシール

#### 2.1 ピローシール

ピローシールは Fig. 3 のように、鏡面研磨された金属ダイヤモンドを圧縮空気で空気枕 (ピロー) のように膨ら

<sup>#</sup> ruri.kurasaki@kek.jp

ませ、同じく鏡面研磨されているミラーフランジへ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。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(有機材料を使用していない)で構成されている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。

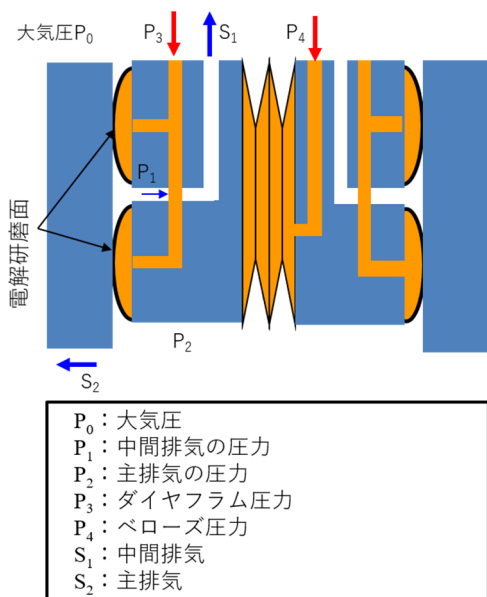


Figure 3: Schematic drawing of a pillow-seal.

## 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。伸縮長は 10 mm 程度になるように、ベローズは成形ベローズ 4 山とした。

また、ピローシール全体としての要求されているヘリウム気密性能は  $1E-8$  Pa $\cdot$ m<sup>3</sup>/sec 以下である。

大口径ピローシール実機を製作する前段階として、溶接ステンレス板のダイヤフラムを使った小口径のピローシールを製作し、性能の確認を行った。その詳細は次節で説明する。

## 3. 溶接ステンレス板ダイヤフラム試験

### 3.1 溶接ステンレス板ダイヤフラムの 1 重ピローシール

溶接ステンレス板を使ったダイヤフラムの性能を確認するために、口径 110 mm サイズのダイヤフラムを作って 1 重ピローシールを製作した。Figure 4 のようにステンレス板を 2 種類の配置で溶接後、固溶化熱処理を行い、内外径加工後に電解複合研磨してダイヤフラム材として使用した。出来上がったダイヤフラムは Fig. 5 である。試験用のピローシールはダイヤフラム材の性能が測定しや

すようにダイヤフラムは 1 重とした。

溶接後および固溶化熱処理後にマイクロビッカース硬度計で硬度測定を行った結果を Table 1 に示す。なお、ステンレス板(母材)の硬度は 370 から 400 である。

Figure 6 は口径 110 mm のダイヤフラム評価用のピローシールである。加圧や減圧によりピローシールを伸縮させてみたところ動きに問題がないことを確認した。

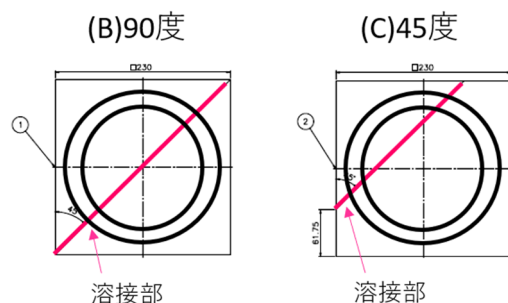


Figure 4: Schematic drawings of the welded plate for the diaphragm.

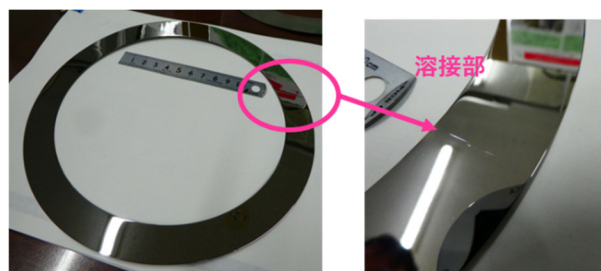


Figure 5: Photographs of the diaphragm made from a 45-degree welded plate.

Table 1: Results for Hardness Measurement by a Micro Vickers Hardness Tester, Where the Unit is HV

Hardness measurement (HV)	Base plate	Welded seam
After the welding	372	244
After the heat treatment	129	135

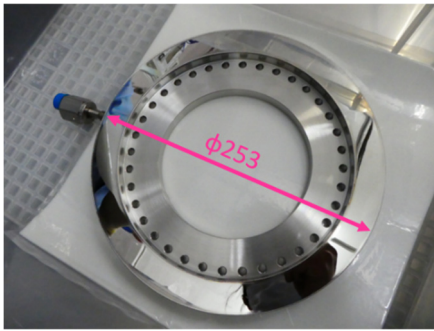


Figure 6: Photograph of the pillow seal with the diaphragm made from the welded plate.

### 3.2 ヘリウムリーク試験

用意したダイヤフラムサンプルは、(A)継目なし、(B)溶接部 90 度、(C)溶接部 45 度の 3 種類である。

それぞれに対して、ヘリウムリーク試験は 2 通りの条件で行った。(1)ダイヤフラム圧力一定でベローズ圧力を変化させる方法と、(2)ベローズ圧力一定でダイヤフラム圧力を変化させる方法である。

実機の運用と同じように、加圧順序は、先にダイヤフラムを加圧してからベローズ加圧を行い、真空排気したのち、ヘリウムを吹きかけてヘリウムリーク試験を実施した。溶接ステンレス板を使ったダイヤフラムの場合は溶接部にヘリウムを吹きかけている。

ヘリウムリーク試験の結果を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。(1)ダイヤフラム圧力一定でベローズ圧力を変化させたときの結果が Fig. 7 で、(2)ベローズ圧力一定にしてダイヤフラム圧力を変化させたときの結果が Fig. 8 である。

結果より、(B)と(C)の溶接継目ありのダイヤフラムは(A)継目なしダイヤフラムと比べて、ヘリウムリーク量が約 10 倍大きい。

また、Fig. 7 からベローズ圧力は気密性能には大きな影響を与えていないのに対し、Fig. 8 からダイヤフラム圧力は気密性能に一定の影響があることが確認された。

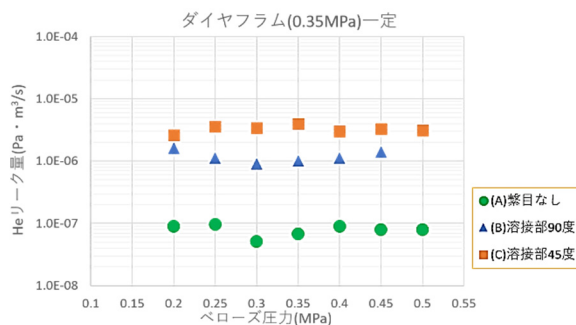


Figure 7: Results of the helium-leakage rate as a function of the bellows pressure, where the diaphragm pressure is fixed to be 0.35 MPa.

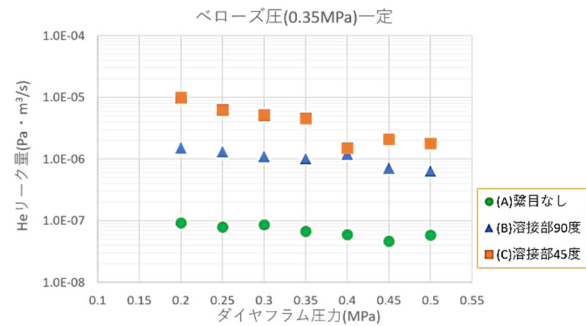


Figure 8: Results of the helium-leakage rate as a function of the diaphragm pressure, where the bellows pressure is fixed to be 0.35 MPa.

### 3.3 プレスケールによる接触幅の測定

FUJIFILM 社製の圧力測定フィルムプレスケール[7]を使ってダイヤフラムの接触幅の測定を行った。

ヘリウムリーク試験と同様に、用意したダイヤフラムサンプルは、(A)継目なし、(B)溶接部 90 度、(C)溶接部 45 度の 3 種類、ヘリウムリーク試験は、(1)ダイヤフラム圧力一定と(2)ベローズ圧力一定の方法である。

Figure 9 は(C)溶接部 45 度でダイヤフラム圧力が 0.35 MPa でベローズ圧力が 0.35 MPa の時のプレススケールの結果である。接触幅の測定結果を Fig. 10 および Fig. 11 に示す。(1)ダイヤフラム圧力一定のときの結果が Fig. 10、(2)ベローズ圧力一定のときの結果が Fig. 11 である。接触幅は赤色化したドーナツ形状部分の 4 か所の平均値である。(A)継目なしは(B)と(C)の溶接継目ありに比べて接触幅が大きい。また、(1)ダイヤフラム圧力一定の時、ベローズ圧力がダイヤフラム圧力以上になると接触幅は大きくならない。また、接触幅の大きさはヘリウムリーク量には大きく影響がしないことが分かった。

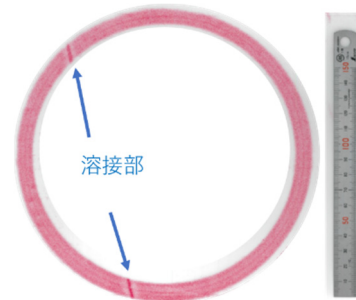


Figure 9: An example of pressure distribution in case (c). The pressures on the diaphragm and bellows are 0.35 MPa and 0.35 MPa, respectively. The dark red area indicates high pressure.

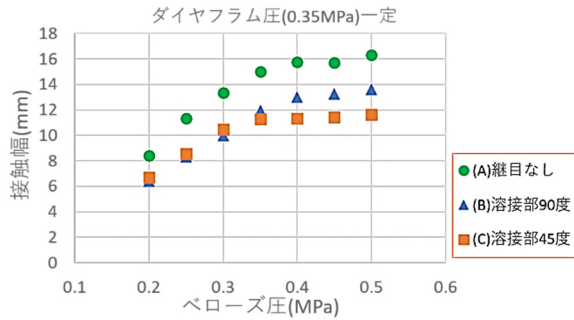


Figure 10: Results of the contact width of the diaphragm as a function of the bellows pressure, where the diaphragm pressure is fixed to be 0.35 MPa.

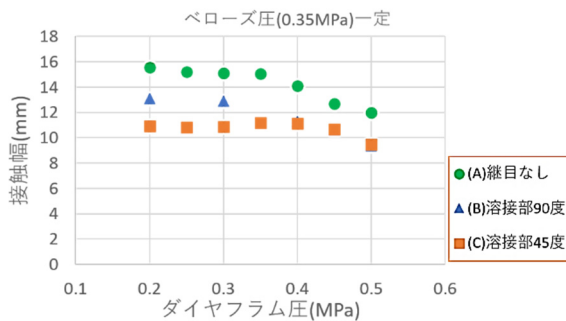


Figure 11: Results of the contact width of the diaphragm as a function of the diaphragm pressure, where the bellows pressure is fixed to be 0.35 MPa.

### 3.4 大口径ピローシールの場合

今回の試験結果を実機の口径 1200 mm のピローシールに適用した場合の気密性能を求めた。今回の口径 110 mm のピローシールのヘリウムリーク量(ペローズ圧力 0.35 MPa, ダイヤフラム圧力 0.35 MPa)から口径 1200 mm のピローシールのヘリウムリーク量を予想する。

外部からのリーク量  $Q_2$  が気密性能を示す。 $Q_2$  は形状因子であるダイヤフラムのコンダクタンス  $C$  により、次のように表せる[3]。

$$Q_2 = \frac{C^2 P_0}{S_1}$$

$C$ : ダイヤフラムのコンダクタンス

$P_0$ : 大気圧

$S_1$ : 中間排気速度

ここでコンダクタンス  $C$  は、面粗度  $A$  (算術平均粗さ  $Ra$ )、ダイヤフラム周長  $L$ 、ダイヤフラム幅  $w$ 、押し付ける圧力  $F$ 、フォルム材質の塑性変形耐力  $R$  を用いて Roth[8]により、次のような関係があることが示されている。

$$C = 34A^2 \left(\frac{L}{w}\right) \exp\left[-\frac{3F}{LwR}\right]$$

ダイヤフラムの面粗度  $A$ 、使用条件である押し付ける圧力  $F$ 、フォルム材質の塑性変形耐力  $R$  は同じとする。 $\exp\left[-\frac{1}{Lw}\right]$  はおよそ 1 となるため、ダイヤフラム周長  $L$  と幅  $w$  は形状サイズで比例させることとする。

今回の試験装置のコンダクタンスを  $C(110)$ 、実機のコンダクタンスを  $C(1200)$  とする。それぞれのダイヤフラムの幅  $w$  は 20 mm と 30 mm、周長  $L$  は 570 mm と 4340 mm であるから、

$$C(1200) \propto \frac{4340}{30} \frac{20}{570} C(110) = 5.1 \times C(110)$$

ダイヤフラムサンプル (A) 継目なしの場合、

$$C(110) = \frac{Q_1}{P_0 - P_1} = \frac{1.0E - 7}{101325 - 0.93}$$

$$= 9.9E - 13 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$C(1200) = 5.0E - 12 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$Q_2 = \frac{C(1200)^2 P_0}{S_1} = \frac{(5.0E - 12)^2 \times 1E5}{3.0E - 5}$$

$$= 8.3E - 14 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$$

と見積られる。同様に継目の有るサンプル (B)、(C) の  $C(1200)$  を求めると、(B) は  $8.3E-12 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 、(C) は  $1.3E-10 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$  と予想され、いずれの場合も設計基準性能  $1E-8 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$  以下を満たしている。従って、溶接継ぎ目のあるステンレス材を使ったダイヤフラムによる大口径ピローシール実機の製造可能性が得られた。

しかし、これまでの口径 300 および 500 のピローシール実機では、リーク量はもっとも良い結果で  $1E-11$  台であった。そのため、上記の(A)継目なしで 2 桁悪くなる可能性がある。他の(B)および(C)においても同様に 2 桁悪くなる可能性があるが、設計基準性能  $1E-8 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$  以下を満たせる可能性はまだ十分ある。そのためにも、口径 1200 mm の実機サイズのピローシールで性能を検証する必要がある。

## 4. まとめ

溶接ステンレス板を使った大口径ピローシールの開発のために、口径 110 mm サイズのピローシールにより、溶接ステンレス板ダイヤフラムの性能確認を行った。

溶接ステンレス板を使うことにより、これまで使用してきたシームレス板と比べて平滑度が悪くなり、その影響で気密性能の悪化が懸念されていたが、要求されたヘリウムリーク性能はクリアしているという結果が得られた。この結果より、実機に適用可能であることが示された。

今後は実機である口径 1200 mm の大口径ピローシールを製作し、製作方法の確立および気密性能の検証を実施する予定である。

## 参考文献

- [1] A list of experiments in the J-PARC Hadron-hall; <http://research.kek.jp/group/nucpart/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] [https://www.fujifilm.com/products/measurement\\_film/en/prescale/product/](https://www.fujifilm.com/products/measurement_film/en/prescale/product/)
- [8] A. Roth, Vacuum technology, Fourth impression 1998, ISBN 0-444-88010-0 (Elsevier).