

J-PARC ハドロン High-P ビームラインのための大伸縮型ピローシールの開発 DEVELOPMENT OF A LONG-STROKE PILLOW-SEAL FOR THE J-PARC HADRON HIGH-P BEAMLINE

倉崎 るり[#], 青木 和也, 上利 恵三, 秋山 裕信, 家入 正治, 加藤 洋二, 里 嘉典, 澤田 真也,
高橋 仁, 田中 万博, 豊田 晃久, 広瀬 恵理奈, 皆川 道文, 森野 雄平, 山野井 豊, 渡邊 丈晃
Ruri Kurasaki[#], Kazuya Aoki, Keizo Agari, Masaharu Ieiri, Hironobu Akiyama, Yohji Katoh, Yoshinori Sato,
Shinya Sawada, Hitoshi Takahashi, Kazuhiro Tanaka, Akihisa Toyoda, Erina Hirose, Michifumi Minakawa,
Yuhei Morino, Yamanoi Yutaka, Hiroaki Watanabe

Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

A new proton beamline at 30 GeV, referred to as High-P beamline, is now under construction for nuclear and particle-physics experiments at the J-PARC Hadron Facility. The beam for the High-P beamline is branched with a Lambertson-type magnet from an existing primary-proton beamline. Since a portion of the primary beam is injected to a pole piece of the magnet, the branching point is expected to be fairly radioactive. To reduce radiation exposure for maintenance workers, a pillow seal, which is full-remote handling system for a vacuum connection, was adopted around the Lambertson magnet. However, since the branching point is located in a slope section at an angle of 2.1° and the magnet is loaded in vertical direction with a crane, a gap between the vacuum ducts must be larger than 30 mm, where a gap of the conventional pillow seal for a disconnection mode is only 9 mm. Thus, a long-stroke pillow-seal was newly developed. In this paper, a design of the long-stroke pillow-seal, examination results with a prototype such as a cycle test, and an actual performance evaluated in the High-P beamline 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、Fig. 1 のように新たなビームラインとして、稼働中のビームライン (A ライン) から一部の1次陽子ビームを分岐させて実験で使用するための高運動量ビームライン (以下、High-P ビームライン) の建設を進めており、2020 年には最初のビーム取り出しを予定している。

1次陽子ビームの分岐はスッチャード (以下、SY) 区間の中の約 2.1 度傾いている傾斜区間で行われる。ビームの分岐はランバートソン型の電磁石とセブタム型の磁石により行われる[2]。ランバートソン型電磁石は、磁極の鉄芯中にビーム軸方向に貫通穴をあけた構造をしている。貫通穴中は磁場がなくビームは真っ直ぐに直進する。この磁場のある空間と磁場のない空間に適切な比率になるようビームを通すことで直進するビームと、曲げるビームに分けて軌道を分離させる。ただし、この分岐方式のために必ずある割合の陽子ビームが鉄芯に当たることになり、分岐部近傍の装置類は比較的放射化されるエリアとなる。

SY ではメンテナンスの際に、電磁石やビームモニタ等の装置についてはクレーンを使用して鉛直方向へ取り出すため、傾斜している区間においては装置と装置のビーム軸方向の隙間を、水平区間よりも広くとる必要がある[3]。装置と装置の接続部で最も近接するのは真空ダクトのフランジである。ランバートソン型電磁石近傍では、上記の通り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真空の接続・切り離しが可能なピローシールを採用している[4-6]。ただし、従来の水平区間用ピローシールでは、ピローシールの伸縮長は 9 mm であり、装置の間 (フランジ間) は 7 mm 程度の隙間ができる設計であった。これに対して 2.1 度傾斜している区間では 30 mm 以上の隙間を取る必要がある。そこで、ピローシールのベローズ部分の山数を大幅に増やすことによって、ピローシール伸縮長を従来の 9 mm から 30 mm 以上に改良した大伸縮型ピローシールの開発を行った。ベローズの山数を増やすこと、および傾斜状態で使用することでベローズの不等変形 (垂れ) がおきることが予想され、ピローシールの気密性能や寿命などへの影響が懸念された。そこで、モックアップによる予備試験や実証機による性能確認をするとともに、サイクル試験や表面観察を行い寿命への影響を評価した。本論文では、実証による各種評価に加え、実機の設置状況なども合わせて報告を行う。

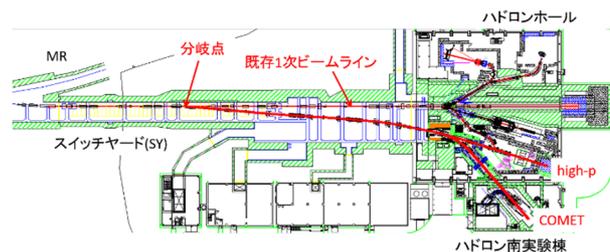


Figure 1: Plan view of the Hadron Experimental Facility at J-PARC.

[#] ruri.kurasaki@kek.jp

2. 大伸縮ピローシール

2.1 ピローシール

ピローシールは PSI 研究所 (Paul Scherrer Institut) で開発されたもので、Fig. 2 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、さらにオールメタルで構成されているため耐放射線性にも優れている[4-6]。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。また、2重ダイヤモンドでシールし、その中間を排気することで全体のリーク量を低減している。

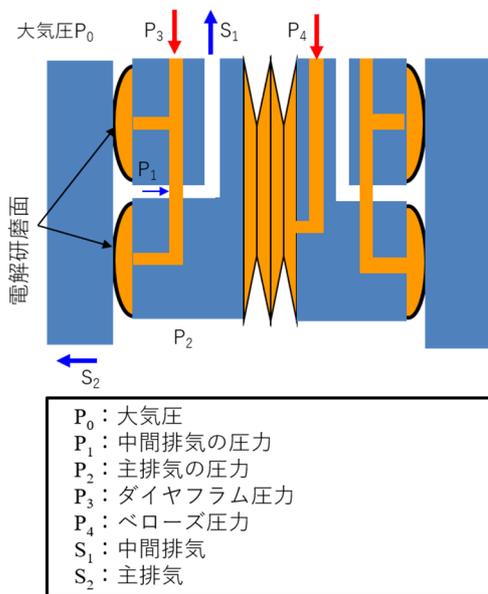


Figure 2: The drawing of a pillow-seal.

2.2 予備試験

大伸縮ピローシール実証機を製作する前段階として、ダイヤモンドのない二重ベローズ部分のみを製作し、伸縮量を広げたことによる両端フランジの鉛直変位量 (ベローズたわみ量) や、傾きによる影響を測る予備試験を実施した (Fig. 3)。結果として、標準状態 (ベローズ自然長) から 30 mm 伸張させた場合について、水平状態ではベローズたわみ量は 0.275 mm、傾き 2 度の状態では 0.480 mm であった。また、二重ベローズ内を加圧すると、まずはたわんだ状態 (ダイヤモンド側フランジが下がった状態) で対抗フランジへ接触し、さらに定格まで加圧することで、たわみが解消される方向 (鉛直上向き) にダイヤモンド面が変位して、対抗フランジとダイヤモンドが擦れることとなる。この効果も実測の結果、水平状態で 0.12 mm、2 度傾けた状態で 0.21 mm の変位 (擦れ) が発生した。この変位により、実機のダイヤモンドの鏡面においても 0.21 mm 程度の上下方向の傷が発生することが予想

される。装置の着脱などのために伸縮を繰り返すと、この傷により気密量が徐々に低下し、その結果通常品と比較して寿命を縮める可能性がある。ただし、ダイヤモンドとミラーフランジの接触幅は 5 mm 以上と広く、傷が径方向につながらなければ気密量の低下が限定的と予想される。実際に本予備試験機で 10 回接触させた程度では、表面粗さは測定誤算の範囲内で変化がなく、実機においても影響は限定的であると予想された。そこで、次節以降に示すようにダイヤモンド付きの実証機を製作し、伸縮の繰り返しによる寿命評価試験などを実施した。

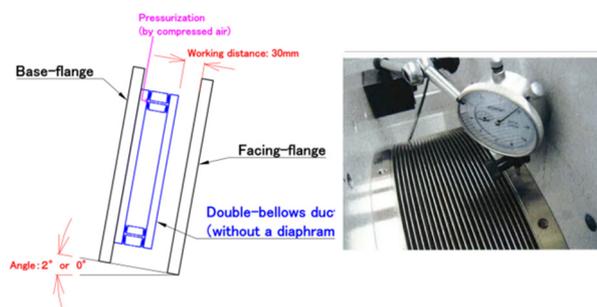


Figure 3: Schematic apparatus and a photograph of a preliminary test using a double-bellows duct without a diaphragm flange.

2.3 大伸縮ピローシール仕様

SY 傾斜部 (約 2.1 度) で使用するピローシールである。したがって、ピローシール前後の機器の取り出しのために、ピローシールの伸縮長が 30 mm 以上になるようにベローズの山数を 4 山から 28 山に増やすように、Fig. 4 に示す大伸縮ピローシールを設計し実証機の製作を行った。片側がピローシールで、その反対側は JIS-V フランジの改良型を使ってボルト締結している。実際の大伸縮ピローシールの写真は Fig. 5 である。

また、ピローシールを使用するビームライン区間は、低真空区間 (~0.1 Pa) のため、He リークレートとしては $1E-7 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 以下であればよい。

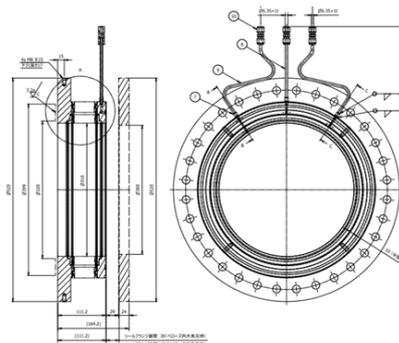


Figure 4: The drawing of a long-stroke pillow-seal.



Figure 5: The photograph of a long-stroke pillow-seal.

3. 性能試験

3.1 動作試験

実際の現場と同じように約 2.1 度傾いた状態で動作の確認を行った。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 6 のようにベローズを真空引きし、ベローズを最も縮めた状態にした時のダイヤフラムとミラーフランジの隙間は 48 mm であった。つまり、ピローシールの伸縮長は 48 mm で十分な隙間が得られた。また、加圧せず大気圧の状態(自然長)だと 1 mm 程度垂れていて、上部ダイヤフラムが下部ダイヤフラムより先にミラー面に当たるが、これは予備試験の結果と同程度の垂れであるということを示している。

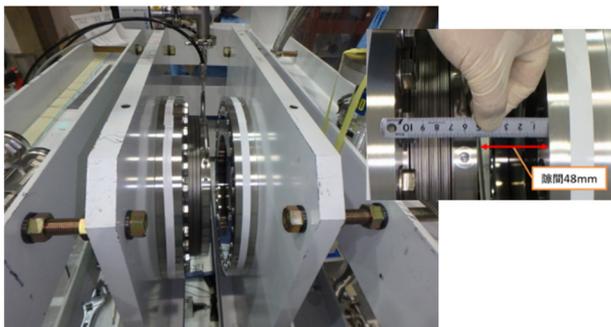


Figure 6: A prototype of the long-stroke pillow-seal with the shrink mode, which is made by evacuation in the bellows section made the shrink mode.

3.2 サイクル試験

サイクル試験の方法は実機の運用と同じように、ピローシールのダイヤフラム面とミラーフランジ面に隙間が空くように大気圧にして、ベローズが自然長になるまで縮める (Fig. 7)。その後、加圧をしてフランジ面 (鏡面) 同士を接触させる (Fig. 8) という一連の着脱サイクルを繰り返す。今回はこの減圧と加圧のサイクルを 5000 回繰り返し、適宜 He リーク試験を実施した。

大伸縮ピローシールのサイクル試験の結果を Table 1 に示す。加圧圧力が 0.3 MPa と 0.4 MPa の 2 つの結果を示す。なお、Table 1 は He リークレートの測定量からバックグラウンドを引いた値である。結果を見て分かるように、100 回伸縮試験ではリーク量は測定誤差の範囲で劣化はないことが分かる。5000 回までの伸縮試験の結果においても He リーク量は $1\text{E-}9 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}$ 未満であった。要求値 $1\text{E-}7 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}$ よりも十分に低いという結果が得られた。実際の使用では装置の脱着回数から 500 回未満の伸縮が想定される程度である。500 回程度着脱しても十分求める性能を保つことが分かった。

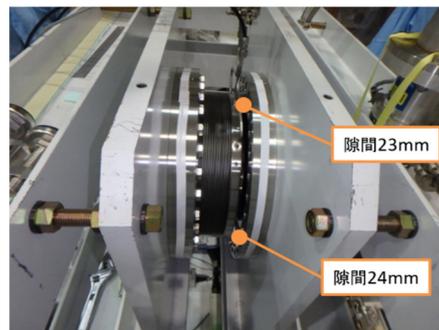


Figure 7: The prototype with the natural length, in which the bellows section is set at the atmospheric pressure.

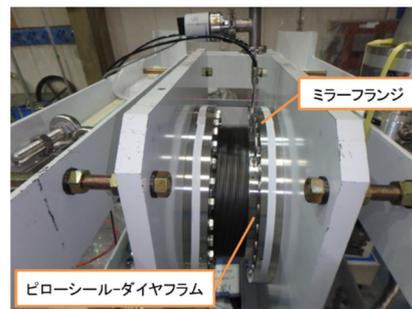


Figure 8: The prototype with the vacuum-connection mode (stretch mode), which is made by applying pressure to the bellows and diaphragm section above 0.3 MPa.

Table 1: Results of the cycle tests, showing helium-leakage rate. The unit is Pa·m³/sec.

No. of cycles	Air pressure for diaphragms and bellows.	
	0.3 MPa	0.4 MPa
1	1.0E-10	0.6E-10
10	1.0E-10	0.4E-10
100	0.7E-10	0.3E-10
500	3.1E-10	1.6E-10
1000	3.5E-10	2.1E-10
2000	9.1E-10	2.7E-10
3000	5.7E-10	2.9E-10
4000	13E-10	4.5E-10
5000	15E-10	4.9E-10

3.3 表面観察

サイクル試験前後に、株式会社キーエンス協力のもとレーザー顕微鏡を使ってダイヤフラム面の表面粗さや傷深さを測定した。測定機として適用したのは形状測定レーザーマイクロスコープ VK-X210 である[7]。表面観察は新品のもの、100 回寿命試験後のもの、5000 回寿命試験後のものの 3 つの条件のピローシールの表面観察を行った。ダイヤフラムの表面粗さの結果は Table 2 に示す。また、表面粗さとリーク量との相関については Fig. 9 に示す。5000 サイクル後で、初期の 10 倍程度の粗さになり、He リークレートとしても有意に上昇していることが分かる。

サイクル試験および表面観察の結果の全体的な傾向としては、文献[6]の傾斜なしの繰り返し動作試験データと矛盾はない。リーク量も同じレベルであることから、傾斜および伸縮長変更による機密性能への影響は少ないことを示唆している。ただし、文献[6]は呼び径 500 であり、本論文に示した呼び径 300 とサイズが異なるため直接比較することはできない。

Table 2: Results of the surface roughness of a diaphragm, where a σ_{Sa} indicates a standard deviation of the roughness in several points.

No. of cycles	Surface roughness of a diaphragm[nm]
new	Sa=4.7 (σ_{Sa} =1.2)
100	Sa=20 (σ_{Sa} =9)
5000	Sa=51 (σ_{Sa} =11)

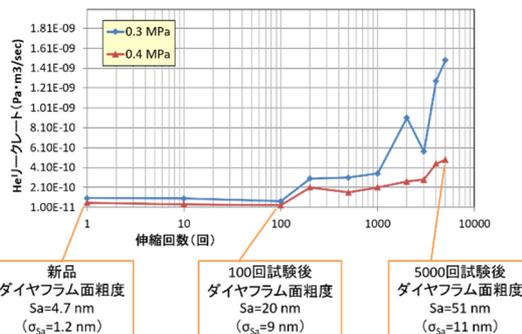


Figure 9: History plot of the helium-leakage rate in the cycle tests.

4. 実機

4.1 インストール状況

前節までに示すように、プロトタイプによる試験で十分な性能が得られることが分かった。実機はプロトタイプと全く同形状とすることとし、実機 3 台の製造を行った。

2018 年 10 月頃にハドロン実験施設 SY 区間のコリメータ上流部とランバートソン型電磁石の上流と下流の真空接続に計 3 台の大伸縮ピローシールを設置した。あらかじめランバートソン型電磁石のフランジに大伸縮ピローシールを付けておき、その状態でランバートソン型電磁石をビームラインに設置した。その様子は Fig. 10 である。電磁石設置後に、大伸縮ピローシールへ圧縮空気を導入して加圧しベローズを伸ばす作業を行った。コリメータとランバートソン型電磁石の間の大伸縮ピローシールの設置の様子は Fig. 11 である。

3 台の大伸縮ピローシール設置し 0.4 MPa に加圧した状態で、それぞれの伸縮ピローシールの He リーク試験を行った。ビームラインを真空引きした状態で、He ガスを各大伸縮ピローシールに直接吹き掛ける方法でリーク試験を行った。使用したヘリウムリークディテクターは PhoeniXL300 である。He リーク試験の結果は Table 3 に示す。Table 3 は測定したリーク量からバックグラウンドの値を引いた値である。要求値 1E-7 Pa·m³/sec よりも十分に低いという結果が得られた。



Figure 10: Photograph during an installation of the Lambertson magnet with the long-stroke pillow-seals.

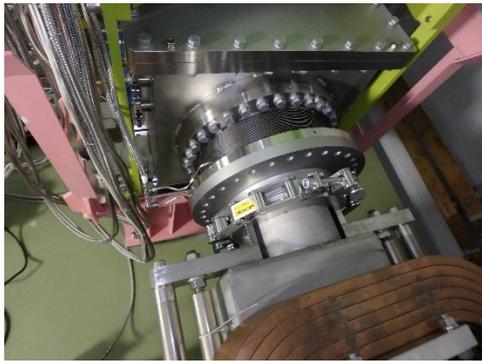


Figure 11: The long-stroke pillow-seal installed between the collimator and the Lambertson magnet.

Table 3: Results of the helium-leakage rate after installation to the beamline, in which beamline was evacuated with 1-Pa level.

Position in the beamline.	He leakage rate. [Pa·m ³ /sec]
Upstream a collimator chamber in front of the Lambertson magnet.	9.9E-10
Upstream the Lambertson magnet.	0.4E-10
Downstream the Lambertson magnet.	1.1E-10

4.2 運用状況

大伸縮ピローシール 3 台を現場に設置してから 2019 年 2 月よりビーム運転が開始した。ビームタイム中も 1 次ビームラインの真空度が悪くなる等の問題もなく、安定に大伸縮ピローシールを含めた真空系は運用されていた。

5. まとめ

ハドロン実験施設の SY 内の High-P ラインに使用する大伸縮ピローシールの開発を行った。

ベローズの山数を増やすこと、および傾斜状態で使用することでベローズの不等変形がおき、ピローシールの気密性能や寿命などへの影響が懸念されたが、実証機による性能確認およびサイクル試験や表面観察を行うことにより、十分な気密量が得られることが分かり実機として問題がなく適用可能であることが示された。実際に High-P ラインに大伸縮ピローシール 3 台を設置しビームタイム中も問題もなく使用できることも確認できた。大伸縮ピローシールの導入により、今後 SY 分岐部の放射化が予想されるエリアにあるランバートソン型電磁石の遠隔着脱が可能になった。これにより、作業者の被ばく量を低減することができる。

謝辞

本研究の一部は、基盤研究 C(一般)No.25400310 の助成を受けて実施されたものです。

参考文献

- [1] A list of experiments in the J-PARC Hadron-hall; <http://research.kek.jp/group/nuclpart/HDeppc/Exp/>
- [2] R. Muto *et al.*, “Development of Lambertson Magnet and Septum Magnets for Splitting 30 GeV Proton Beam in Hadron Experimental Facility at J-PARC”, IEEE Trans on Appl. Superconductivity 26 (4): 1-1 (2016). DOI:10.1109/TASC.2016.2536560.
- [3] E. Hirose *et al.*, “J-PARC ハドロン実験施設における1次ビームライン分岐部電磁石のメンテナンスシナリオ”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2016, pp. 1214-1218, TUP109.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 株式会社キーエンス:形状測定レーザマイクロ스코ープ VK-X210; https://www.keyence.co.jp/products/microscope/laser-microscope/vk-x100_x200/models/vk-x210/