

J-PARC ハドロン実験施設におけるセミリモート型ベローズダクトの開発

DEVELOPMENT OF A BELLOWS DUCT WITH A SEMI-REMOTE HANDLING SYSTEM AT J-PARC HADRON FACILITY

渡邊丈晃^{†A)}, 上利恵三^{A)}, 秋山裕信^{A)}, 青木和也^{A)}, 家入正治^{A)}, 加藤洋二^{A)}, 倉崎り^{A)}, 小松雄哉^{A)}, 里嘉典^{A)}, 澤田真也^{A)}, 高橋仁^{A)}, 田中万博^{A)}, 豊田晃久^{A)}, 広瀬恵理奈^{A)}, 皆川道文^{A)}, 武藤 史真^{A)}, 森野雄平^{A)}, 山野井豊^{A)}

Hiroaki Watanabe^{†A)}, Keizo Agari^{A)}, Hironobu Akiyama^{A)}, Kazuya Aoki^{A)}, Masaharu Ieiri^{A)}, Yohji Katoh^{A)}, Ruri Kurasaki^{A)}, Yusuke Komatsu^{A)}, Yoshinori Sato^{A)}, Shin'ya Sawada^{A)}, Hitoshi Takahashi^{A)}, Kazuhiro Tanaka^{A)}, Akihisa Toyoda^{A)}, Erina Hirose^{A)}, Michifumi Minakawa^{A)}, Fumimasa Muto^{A)}, Yuhei Morino^{A)}, Yutaka Yamanoi^{A)}

^{A)} 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, has been constructed for nuclear-physics experiments at the J-PARC Hadron Facility. A first beam commissioning of the High-P beamline has been successfully carried out in May and June, 2020. The beam for the High-P beamline is branched using 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 bellows duct with a semi-remote handling system for vacuum connections was newly developed. In this paper, a design of the bellows, and several examination results are reported.

1. ハドロン実験施設と High-P ビームライン

ハドロン実験施設では、30 GeV の1次陽子ビームを2次粒子生成標的(以下、標的)へ照射し、そこで発生する2次粒子(K中間子、 π 中間子など)を実験エリアへ輸送しており、各実験エリアではK中間子などを使ったパラエティーに富んだ独創的な原子核・素粒子実験が実施されている[1]。2019年度中には既存の1次陽子ビームラインから0.1%程度のビームを分岐して、主に原子核物理実験へ30 GeVの高エネルギー陽子ビームを直接供与するためのHigh-Pビームラインの建設が完了した(Fig. 1)。引き続き、2020年5月から6月にかけて最初のbeam commissioningを実施し、当初の計画通り約 1×10^{10} protons-on-target/5.2秒サイクルのビーム強度で安定したビーム運転の成功に至った[2,3]。

1次陽子ビームラインからHigh-Pビームラインへの分岐はスイッチャード区間(以下、SY)のなかの約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により行われる[4]。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おり、磁束が穴周辺の鉄中を迂回することで、穴の内部は磁場のない空間となり、磁極の間は磁場が発生する。この磁場のある空間と磁場のない空間(貫通穴)に適当な比率になるようビーム位置を調整して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方式である。ただし、そ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となり、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区間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

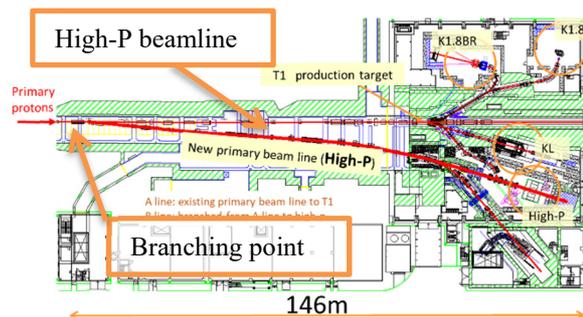


Figure 1: Plan view of the Hadron Experimental Facility at J-PARC in 2020.

取り出すため、傾斜しているスロープ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[5]。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。ランバートソン電磁石では、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・切り離しが可能な大伸縮型ピローシールを採用している[6]。しかしながら、ランバートソン電磁石の下流に設置されているセプタム電磁石の下流部では、ビームダクトが2股に分岐しているなどの都合のため、ピローシールが設置できない空間的取り合いとなっている。そこで、半遠隔で脱着するためのセミリモート型ベローズの開発を行った。特に、スロープ区間であることや分岐直後で空間が狭いことなども考慮しつつ、なるべく短時間でベローズ伸縮ができるよう設計を行っている。

本論文においてはセミリモート型ベローズダクトの設計および試験結果について報告を行う。

[†] hiroaki.watanabe@kek.jp

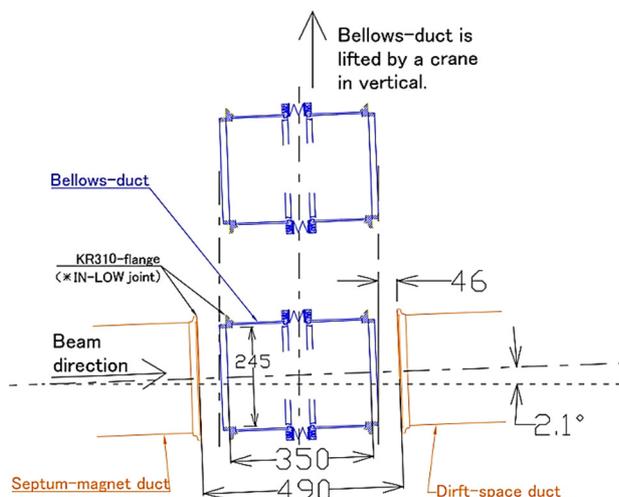


Figure 2: A vertical drawing showing a design basis for the bellows duct with semi-remote handling.

2. セミリモート型ベローズの設計

2.1 設置場所と要求仕様

セミリモート型ベローズダクト(以下、ベローズダクト)の全体寸法に関する立面図を Fig. 2 に、ビームライン上から見た平面図を Fig. 3 に示す。ベローズダクトとしては Primary ライン側 1 台と High-P 側 1 台の計 2 台が必要となる。真空としては、ビーム有効径が 245 mm で、これに対応してベローズダクト両端は KR 規格(呼び径 310)を採用している。KR 規格は KF 規格のようにテーパフランジを持ち、helicoflex 型メタルシール(ここでは U タイシール)をつけて、ステンレス製チェーンクランプで締結する規格である。さらにセミリモート化の一環として、フランジはインロー嵌合方式でベローズを伸ばすと自動でセンタリングする機能を設けている。ここではベローズダクト側が出っ張るフランジ側で、その前後装置側を受け側のフランジ構造とした。そのため、通常規格の KR フランジより、16 mm 外側へインローのガイド部分がせり出す構造となっている。ベローズダクトが接続すべきビーム軸長さ(ベローズ伸張時)のフランジシール面の面間は 490 mm である。ベローズダクトの設置・取り出しは、鉛直方向にクレーンにより吊り上げて行う。クレーンでつり上げ時に前後機器の真空ダクトフランジに当たらないことを基本的な要請として、つり上げ時の振れや回転も勘案して、ベローズの収縮幅は片側 70 mm ずつ、両側合わせて 140 mm 縮むものとした。この場合、つり上げ時の最も近接する距離が 46 mm となる。全体のスペースは Fig. 3 に示すように、分岐直後で隣のラインのダクト表面まで約 100 mm と近く、セプタム磁石や下流の鉄遮蔽体もベローズダクトの近傍にあることをすべて設計に織り込む必要がある。ハドロン施設における通常のベローズダクトは、前後の真空締結により自重を支えているが、このベローズダクトは、つり上げ時の振れを低減しつつ設置時の位置を決めるためのガイド構造も必要であることから、ベローズダクト専用の架台が設計した。

2.2 セミリモート化の要点

作業者の被曝を低減するためには、下記 3 点がある:

1. 放射化した場所から距離を取って作業をする。
2. 作業時間を短くする。
3. 局所遮蔽を設置する。

今回のベローズダクト本体は通常作業としては最も時間を要する部分(2)に重点をおいて設計をおこなった。具体的には、ベローズの伸縮をなるべく短時間で実施できる点を重視して設計を行っている。同時に、ダクト表面に張り付かないでもベローズ伸縮が可能であることも考慮した。また、ベローズダクトの設置・取り出しについても、距離を取って実施できるような架台構造としている。さらに作業空間が限られる high-P ライン側はセミリモート型のチェーンクランプを試験投入しており、真空の締結・開放まで半遠隔で可能とした。そのため、high-P ライン側のベローズダクト設置の際、近接作業として残るのはメタルシールの取り付け・撤去だけとなる。なお、Primary ライン側はシール材に加えてチェーンクランプの取り付け・取り外しについては近接作業となるが、やや広い空間があるため、必要に応じて局所遮蔽を設置することとした。

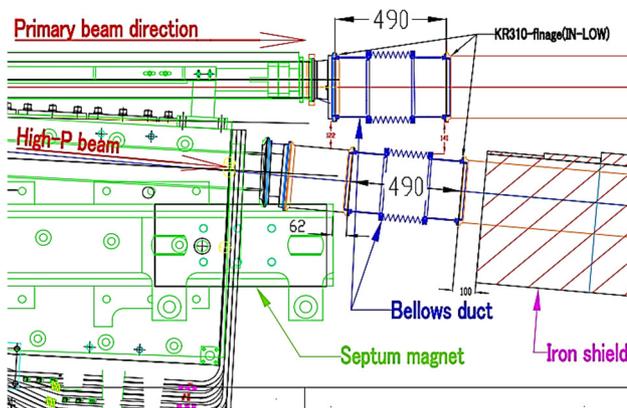


Figure 3: Plan view downstream the septum magnet with the bellows ducts.

2.3 ベローズ伸縮方式の事前試験

ベローズの伸縮方式を決定するために 2 つの方式について事前に試作・試験を行った。1 つは、圧空を動力とするエアシリンダを利用した方式で、もう 1 つはボルト回転を駆動力としたパンタグラフ型ジャッキ方式である。

エアシリンダ方式は、完全遠隔で圧空の On/Off でベローズの伸縮ができるメリットがある。しかし、放射線環境からゴム O リング等の有機素材を使用できないため結果として高価となりやすい。実際、受注生産ではあるが、オールメタル製で気体軸受方式のエアシリンダもカタログ品として存在するが、これは極めて高価であり、ここでは採用不可である。そこで、市販品のゴム O リングを使用しているエアシリンダ(ガイド付ツインシリンダ型、ストローク 70 mm)を分解してゴム O リング等の有機素材を撤去し、グリス等も洗浄し除去することで耐放射線仕様とした。O リングを除去しているためエアが多く漏れるが、その状態でも伸縮できる推進力が得られるかが試験の 1

つのポイントとなる。そこで実機と同等の状況で実証する試験を実施した。試験の様子を Fig. 4 に示す。実機サイズのベローズダクトの上下に各 2 台ずつのエアシリンダを取り付け、140 mm を伸縮させられる設計としている。試験の結果としては、ベローズの伸縮させる動力としては十分に得られており、伸縮状況の再現性もあり、この方式でも伸縮可能との結論が得られた。ただし、以下に示す新たな懸念事項が見つかった：

- ① スムーズな動作のためには 4 個のエアシリンダを同じ圧空圧力ではなく、個別に圧力（流量）の微調整が必要であることがわかった。各シリンダの個性（リークのバラツキ等）、および負荷（荷重）もバラツキがあることが原因と考えられる。
- ② 途中で意図した場所に停止させるといった細かい位置制御が難しいことがわかった。
- ③ 長期的な課題としては、エアシリンダの軸が滑らかな初期はよいが、放射線起因で生成される NO_x ガス等で腐食されシャフト表面がざらざらになると、①と同じ原因（各シリンダのバラツキ）でスムーズな動きが損なわれる恐れがある。また、何度も伸縮させる過程でシャフトに傷が入ったりすると軸が噛んでしまう恐れがある。一度噛んでしまうと、ベローズダクトを取り外す際にエアシリンダの接続部を解体する必要がある。これらは使用現場での長期サイクル試験などにより原理的には検証可能であると考えられる。

これらの懸念事項については、解決するには時間を要するとの結論に至り、本方式はここでは不採用とした。

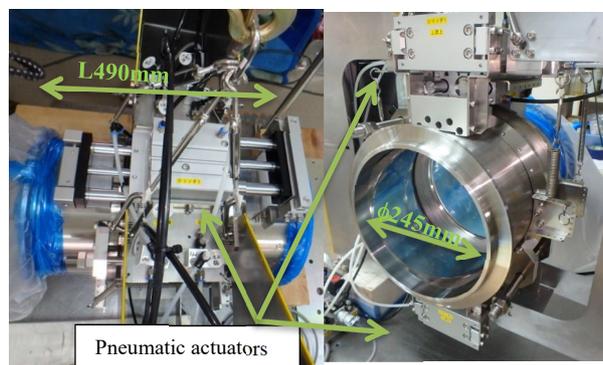


Figure 4: Photographs of the bellows-expansion and -contraction examinations using a pneumatic actuator equipped on a real-size bellows-duct. In total, four actuators were used.

次に、より単純な機構として、ボルト1本でメカニカルに伸縮可能なパンタグラフ型ジャッキ機構（以下、パンタグラフ機構）によるベローズ伸縮方式の試作と試験を行った。パンタグラフ式のジャッキは、小型なものでも自動車を持ち上げられる程度の動力が発生可能であり、しかもコンパクトな機構なため本用途としては適している。Figure 5 に試験時の写真を示す。パンタグラフ機構は2セット使用し、上下に独立に取り付けている。これを同時に駆動させてベローズを伸縮させる方法を取る。パンタグラフ部分は、耐放射線や強度を勘案して、構造部分は

ステンレス製となっており、ボルトは M12 サイズの SCM 鋼製で表面の防錆処理としてジオメットを施しており、ネジ部には”かじり”防止として無機バインダーの二硫化モリブデンを塗布している。試験結果としては、当初の予想以上にスムーズに伸縮でき再現性も良いことがわかった。8 N・m 程度の小型の電動ドライバーを使い、約 30 秒で 140 mm の伸張・収縮の動作が可能であった。また、上下で独立に微妙な伸縮量の調整も可能であった。

この試験時において、ベローズダクトの上流に2個、下流に2個の独立したオールステンレス製の車輪をつけることで、床面に自立・自走して伸縮できるようにした。初期は、車輪に加えて両サイドに直進性を担保するためのシャフトとリニアプッシュを取り付けていたが、この車輪と車輪用のガイド溝があれば、両サイドのシャフト構造も省略しても問題ないことがわかった。この試験結果より、実機としては、単純な機構でよりロバストなパンタグラフ機構を用いることとした。

まとめるとベローズダクト本体の基本設計は以下の通りとなった：

- ベローズの伸縮にはパンタグラフ機構2個を独立に上下に取り付け、
- 床面側にオールステンレス製の車輪を取り付けて自走させる、
- 両サイドはリニアプッシュ等の補助ガイドはなし。

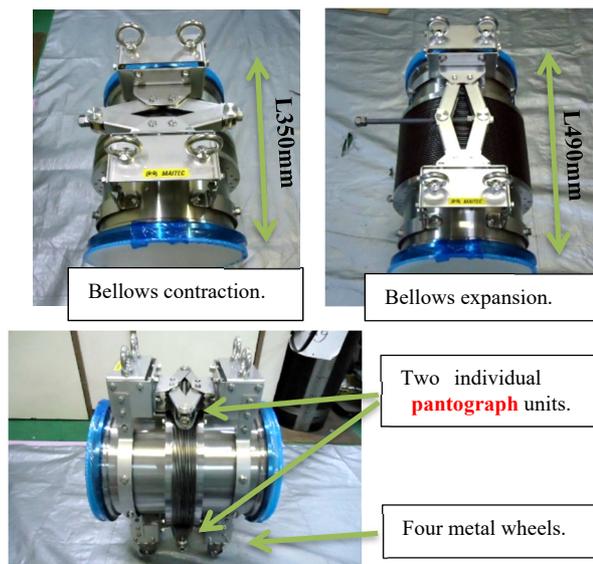


Figure 5: Photographs of the bellows-expansion and contraction examinations using two pantograph units.

2.4 架台の設計

本体設計に加えて、実際の運用上では設置や取り外し際に作業性としては架台構造が重要である。架台は、ベローズ側の車輪が乗るためのビームラインと同じ傾き（約 2.1 度）のステージを備えている。車輪の動きの直線性を保証するために、ステージ上に溝を掘ってその中に車輪を走らせる構造を採用している。また、ベローズダクトの設置・取り外しの際は、クレーンで上げ下げをするが、その際に手を離しても振れや回転がなく自動で車輪を溝中へ着座させる必要がある。設置場所周辺は Fig.

2 に示すようにスペースが狭いことを考慮して、Fig. 6 に示すようにガイド用のポール2本を架台より鉛直に立てて、ベローズ側の受け穴を通す方式を採用した。ただし、受け穴はベローズの伸縮と共に動くため、Fig. 7 に示すように半円に切った板を、ベローズの動作方向側を制限しない方向に取り付けて、上流と下流で半分ずつポールに嵌合させてガイドする方式とした。また、車輪の動きの遊びの範囲で、どちらにずれてもガイドポールへ誘導されるよう半円の手前はテーパ形状にしている。実地で数往復させたが、毎回ポールへ嵌合する再現性があることを確認した。実際の取り付け状態の架台の写真を Fig. 8 に示す。なお、仮に設置スペースにあと 50 mm 余裕があれば、ベローズ(蛇腹)部分を上流と下流で2分割し中央に独立した真空パイプをつけて、そこを不動の中心点とすれば通常の丸穴構造の受け穴の採用が可能であった。今回はベローズストロークとスペース上の都合から上記のようなやや難しいガイド構造をとることとなった。

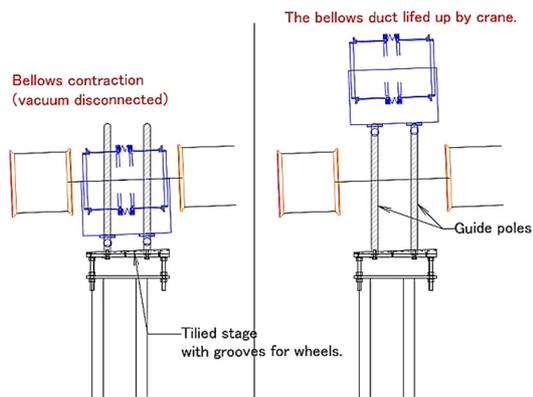


Figure 6: A vertical schematic view of the bellows duct with a stage. Two poles are used as a guild during mounting and dismounting by a crane.

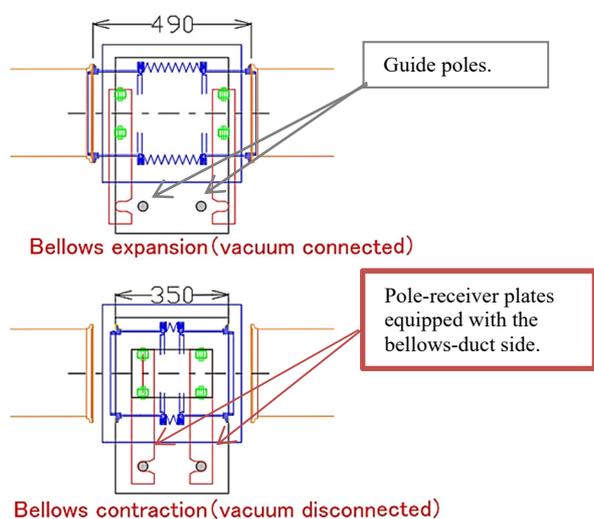


Figure 7: Plan schematic view of the bellows duct with the stage. Two plates equipped with the bellows duct are used as guild-pole receivers, which are released from the poles during bellows-expansion motion.

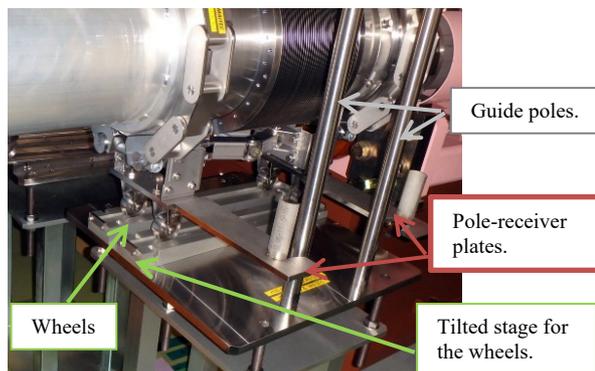


Figure 8: Photograph of the stage for the bellows duct after installation.

3. セミリモート型ベローズ実機のインストール状況

3.1 実機の設置

Figure 9 に設置中の写真の1例を示している。設置側の手順は下記の通りである:

- ① 事前準備としてメタルシールを固定側ダクトへ取り付けておく。
- ② ベローズダクトを縮めた状態でクレーンにより吊り上げる。この時、約2.1度の傾きになるようにチェーンブロックで傾きを調整する。
- ③ 架台側の2本のガイドポールに、ベローズ側の受け穴位置が合うようにベローズダクトを誘導し、ポールと勘合したら、Fig. 9 左写真のように降ろして車輪をステージ上の溝内へ接地させる。
- ④ 接地後に、Fig. 9 右写真のように、電動ドライバーに延長シャフトをつけたもの2セットを使用してパンタグラフ機構によりベローズを伸張させ、KR310 インローフランジを勘合させる。
- ⑤ チェーンクランプを取り付けて真空を締結する。その際も、延長シャフトを使って50cm以上距離をとって締結する。

実機2台により実際の場所において10回以上の伸縮試験を行い、フランジ勘合の再現性があることを確認した。クレーンによる設置・取り外しの試験についても繰り返し、全体を通じてスムーズな作業が可能であることが確認した。最終的な設置完了時の写真を Fig. 10 に示す。

設置・取り外しの練習時の作業時間やダクトからの距離などから推定すると、通常型のベローズダクトに比べて被曝量は1/3以下になると想定している。

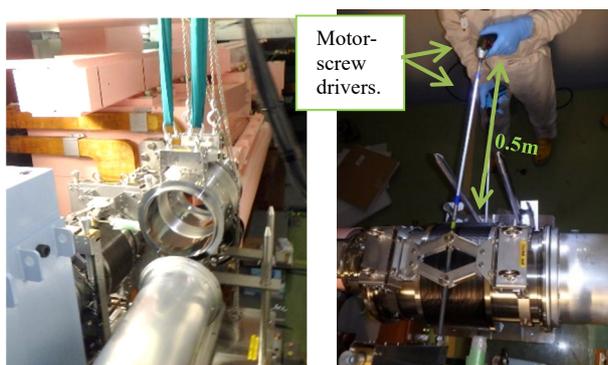


Figure 9: Photographs during an installation. An expansion of the bellows was made by two small motor-screw drivers with extension rods.

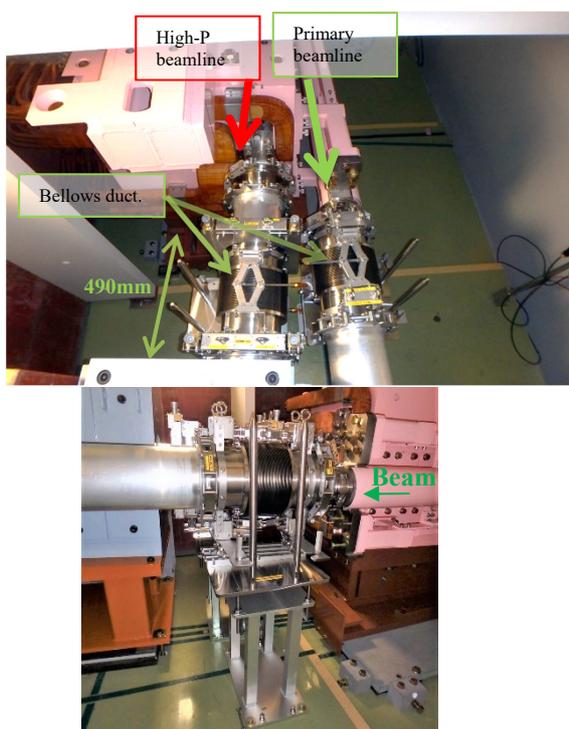


Figure 10: Photographs of the bellows ducts with the semi-remote handling system after installations.

3.2 セミリモート型チェーンクランプの試験

high-P ライン側では左右の作業スペースが限られているため、Fig. 11 に示すよう上部方向からアクセスする新しいタイプのセミリモート型チェーンクランプの試験投入を行っている。チェーンクランプはベローズダクトに固定されている。このチェーンクランプは Fig. 11 の左写真に示すように、1.5 m 離れた鉄遮蔽体の上から延長シャフト付きトルクレンチにより締結・開放ができるようになっている。実地での試験の結果としては、真空接続を半遠隔から“開放する”作業はとて容易に実施できた。“締結”側については、真空フランジ間の勘合部分が、離れた位置からはセミリモート型クランプの外装の影となっていて見え難く、勘合の目視確認のために短時間近接する必要が

あった。この点は今後検討を要する点であるが、1 案としてはビデオカメラをあらかじめ設置しておけば改善可能かもしれない。総合的な結論としては、セミリモート型チェーンクランプを採用したほうが、通常型チェーンクランプと比較すると、クランプ締結・開放作業の被ばく量としては半分以下に低減できると予想している。

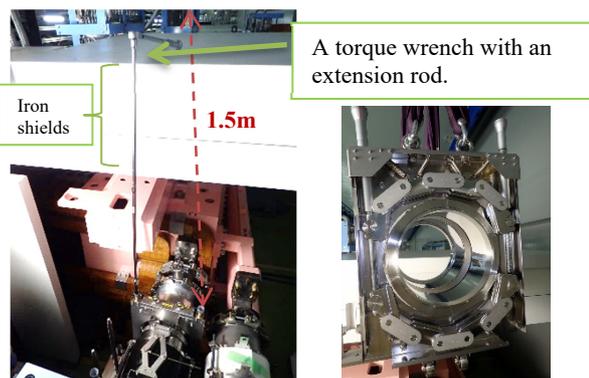


Figure 11: Photograph of a semi-remote handling type chain-clamp. The clamp is able to be handled from 1.5 m above the beam level. Right photograph shows front view of the semi-remote chain clamp.

4. Summary

J-PARC ハドロン実験施設では、High-P ビームラインの建設を 2019 年度中に完了し、2020 年 5 月に初めての beam commissioning を実施しており、安定したビーム取り出しに成功している。

High-P ビームラインのビーム分岐部近傍における作業員の被曝を低減する目的で、セミリモート型ベローズダクトの開発を行った。ここでは、なるべく短時間でかつ半遠隔で作業ができる点に重点をおいて試作・評価などを行い、実機としてはパンタグラフ型ジャッキ機構を用いたベローズ伸縮機構を採用した。実機 2 台について、現場での設置・取り外しの試験を実施し全体としてスムーズな作業が可能であった。

参考文献

- [1] A list of experiments in the J-PARC Hadron-hall; <http://research.kek.jp/group/nuclpart/HDeppc/Exp/>
- [2] Y. Komatsu *et al.*, “J-PARC ハドロン実験施設の新設1次ビームラインのビームコミッションング”, 第 17 回加速器学会年会, THPP17, (2020).
- [3] F. Muto *et al.*, “J-PARC 高運動量ビームライン標的のビームプロファイル測定システム”, 第 17 回加速器学会年会, THOO10, (2020).
- [4] 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): 1-4 (2016).
- [5] 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”, 第 13 回加速器学会年会, TUP109, p. 1012, (2015).
- [6] R. Kurasaki, H. Watanabe *et al.*, “J-PARC ハドロン High-P ビームラインのための大伸縮型ベロースールの開発”, 第 16 回加速器学会年会, WEPH013, p. 302, (2019).