

J-PARC ハドロン実験施設における B ライン用ビーム窓の設計

DESIGN OF A BEAM WINDOW FOR THE B-BEAMLINE 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 B-beamline, has been constructed for nuclear-physics experiments at the J-PARC Hadron Facility. A first beam commissioning of the B-beamline has been successfully carried out in 2020. The proton beam is transported in the vacuum duct, and injected to the experimental targets, which are located in a target chamber filled by helium gas at atmospheric pressure. Therefore, a partition, called a “beam window”, is necessary between the vacuum duct and the target chamber. In the first commissioning, the beam window made of 0.1-mm-thick stainless-steel (SUS304) with an effective diameter of 260 mm was used. However, the experimental group has observed rather larger beam-related background than that of an original expectation. Therefore, in order to reduce beam loss at the beam window, we have newly adopted the beam window made of 0.1-mm-thick pure-titanium, which was installed in April, 2021. In this paper, a design of the titanium beam window, and results of several examinations are reported.

1. ハドロン実験施設と B ラインの新設

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(A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B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]。引き続き、2021年2月から6月にかけても原子核物理実験[4]のためのユーザー利用に供された。

Bラインにおいては、陽子ビームは1 Pa程度の真空ダクト中を輸送されたあと、金属製の実験標的に照射されることとなる。実験標的は、大気圧のヘリウムガスが封入された標的容器中に設置されている[3]。従って、真空ダクトの末端には大気圧に耐える隔壁として“ビーム窓”が必要となる。実験測定器に近いこともあり、このビーム窓はなるべく薄い物質が望ましい。一方、実験で使用されるビーム振幅やビームハローでのロス低減の観点などからビーム有効径として200 mm以上は必要となる。2020年に行われたビームコミッショニングにおいては、板厚0.1 mm、ビーム有効径260 mmのステンレス(SUS304)

[†] hiroaki.watanabe@kek.jp

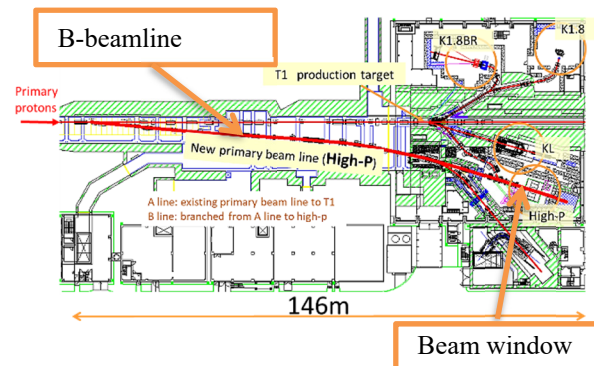


Figure 1: Plan view of the Hadron Experimental Facility at J-PARC in 2020.

製のビーム窓を使用していた。0.1 mm厚のステンレス製ビーム窓は、KEK 12GeV-PSの頃から使用されており、J-PARC ハドロン施設においてもK1.8ビームライン、K1.8BRビームラインやKLビームラインなどで10年以上の使用実績があり、採用したものである。

しかしながら、最初のBラインにおけるビームコミッショニングにおいて、実験グループより事前想定よりも多いビームバックグラウンドが観測されたという報告があった。そこで、ビーム窓でのビームロスを減らすため、板厚0.1 mmの純チタン製ビーム窓の設計および試験を行い、2021年4月にビームラインへの組み込みを行った。この交換によりビーム窓におけるビームロス量としては約40%低減することが期待される。

本論文においては純チタン製ビーム窓の設計および試験結果について報告を行う。

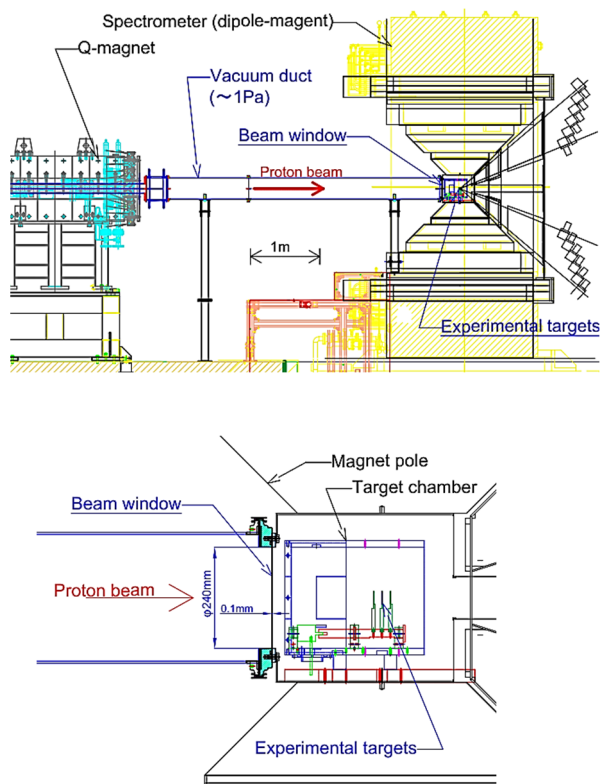


Figure 2: Vertical schematic drawings around the beam window. The bottom figure shows an expansion around the beam window and the target chamber.

2. ビーム窓の設計

2.1 設計のベースライン

Bライン下流部のビーム窓設置エリアの立面図を Fig. 2 に示す。ビーム窓はスペクトロメータとなるダイポール電磁石中の標的容器の直上流に配置されている。ダイポール電磁石近傍ということから、すべて非磁性の材質で構成される必要がある。またビームロス低減からなるべく物質量は少ない方が望ましい。ただし、ビームハローとの相互作用や、実験側でのビーム振幅などの観点から、ビーム有効径として 200 mm 以上は必要となる。ビーム窓上流のビーム輸送区間の真空パイプは内径 300 mm のアルミ合金(A6063)製であり、フランジ規格はテーパフランジの KEK 独自規格であるKRフランジ呼び径 310 を採用している。従って、ビーム窓もKRフランジの呼び径 310 となる。KRフランジはアルミ合金製A7204 (旧 A7N01)を使用している。ビーム窓の窓材は、2021年4月以前はステンレス(SUS304)の厚さ 0.1 mm を採用しており、ビーム有効径は 260 mm としていた。他のビームラインでは、窓材を抑えるフランジおよびボルトはステンレスを使用していたが、ビームハローとの相互作用を減らす目的で、抑えフランジはアルミ合金(A5083)とし、純チタン 2 種 (TP340) のボルトとした。なお、本ビーム区間はビーム強度が $1\text{E}+10$ protons/5.2秒と低いため、シール材はEPDM製Oリングを使用している。

前節に示したように、実験グループからの要請によりビームロスをより低減させた窓材する必要がある。1 つの

方法は、ステンレスのままでより薄くする方向であるが、単純な平板の場合、応力は板厚の 2 乗に半比例するため、板厚を 40%減らすと応力が 2.8 倍増加することとなり、板厚を劇的に減らすのは容易ではない。そこで、ここでは板厚を変更せずに材質変更をする方向を検討し、純チタン製の窓材とすることとした。Interaction length は SUS304 が 16.6 cm、純チタンが 27.8 cm のため、約 40% ビームロスが低減する計算となる。

純チタンで厚さ 0.1 mm、幅 300 mm 以上の素材で入手可能なものは純チタン 1 種で JIS-H4600 規定の TR270C (冷間圧延材)がある。ただし、仕上げの調質 (熱処理)として、Bright anneal 仕上げ(TR270C-BA、以下 BA 材)と冷間圧延仕上げ (TR270C-H、H 材)の 2 種類がある。ここでは両方の素材を調達し、評価試験を行うこととし、その結果を次節以降に記述している。また、入手可能な素材幅が 300 mm までだったため、Oリング等との取り合いからビームの有効径を 260 mm から 240 mm へ減らすこととした。

2021 年に製作した純チタン製ビーム窓の図面と写真を Fig. 3 に示す。基本設計はステンレス製ビーム窓と同じで、ビーム有効径のみ 240 mm としたものである。

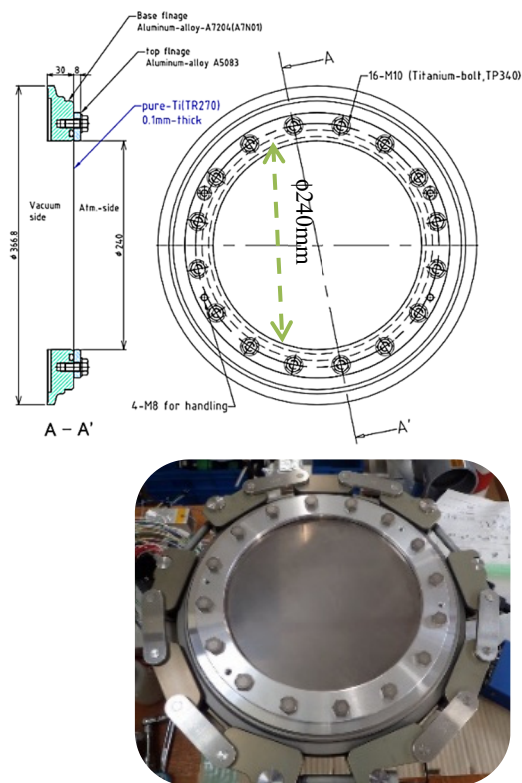


Figure 3: Drawing and photograph of the beam window made of 0.1-mm-thick pure titanium.

2.2 ビーム窓の温度上昇

ビーム窓には1次陽子ビームが通過することで energy deposition があり温度上昇が生じる。このビーム窓は片面が真空で断熱されており、片面が大気面で自然空冷となる。この条件で温度計算を行ったが、B ラインでは、A ラ

インからの 0.1%程度のビームを分岐したため 1E+10 protons/5.2 秒とビーム強度が低く、自然空冷として 5 W/m²/K の熱伝達率を仮定して計算すると、ビーム通過部分の平衡温度は室温+1℃を超えるような温度上昇とならない。従って、ビーム窓による温度上昇は問題となることはないと判断した。

2.3 純チタン薄板の引張試験

ビーム窓の製作時に、同じシートから引張試験片として、JIS-13 号 B 型で全長 200 mm、評点間距離 50 mm、評点幅 12.5 mm を製作し、3 サンプルずつ引張試験を実施した。引張試験片は圧延方向に切り抜いたものである。引張試験には複合材料試験機 INSTRON5966 を使用し、標点間距離の伸びの測定には、ビデオ伸び計 INSTRON2663-302 を使用した。

引張試験の結果を、Fig. 4 および Table 1 に示す。BA 材、H 材ともに3サンプル間で再現性の良い結果が得られた。BA 材は破断伸びが大きい素材で、最小引張強度は公称応力で 322 MPa、最小破断伸びが公称ひずみで 37.5%であった。H 材は、最小引張強度が 602 MPa、最小破断伸び 10%であった。また、BA 材は明確な降伏点があるのに対し H 材はそれが見られない特徴がある。

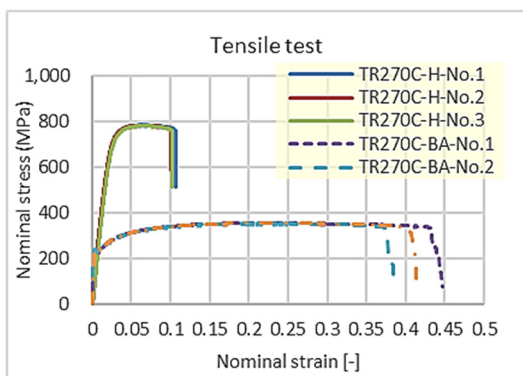


Figure 4: Stress-strain curves obtained by tensile-test results. Dashed lines show the bright-annealed sheet (TR270-BA). All of the test pieces were fabricated from a same sheet of the beam window.

Table 1: Results of the tensile tests. These results show the minimum strength and the lowest strain among three samples.

Type	TR270C-BA	TR270C-H
Ultimate strength (nominal stress)	322 MPa	786 MPa
Yield strength	218 MPa	531 MPa
Nominal Strain	38.5 %	10.0 %

2.4 有限要素法による評価

引張試験の結果を利用して、有限要素法による計算 (以下、FEM 計算) を実施した。ソフトウェアは非線形計

算に実績の多い LS-DYNA(R10.2)を使用し、薄板のため Shell モデルとした。まず、Fig. 5 上段に示すように引張試験片をモデル化し、引張試験の結果(Fig. 4)を再現するように応力-ひずみ曲線を含む材料モデルを構築した。BA 材の例を Fig. 5 下段に示している。この材料モデルをつかって、ビーム窓の窓部分の計算を行った。窓部の端は完全固定として、窓部分に一気圧 (1.013E+5 Pa) を付加させている。結果の1例を Fig. 6 に示している。

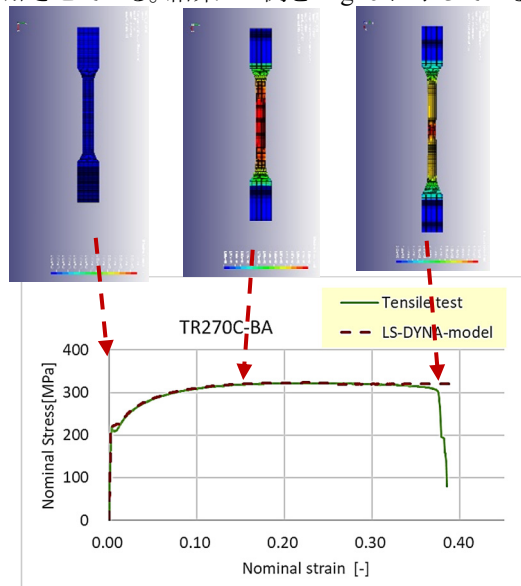


Figure 5: The top three figures show FEM-calculation examples for the tensile test, in which the color map shows the Von-Mises stress. The bottom figure shows a comparison of the stress-strain curves for TR270C-BA between the tensile test (solid green line) and the FEM calculation (dashed red line).

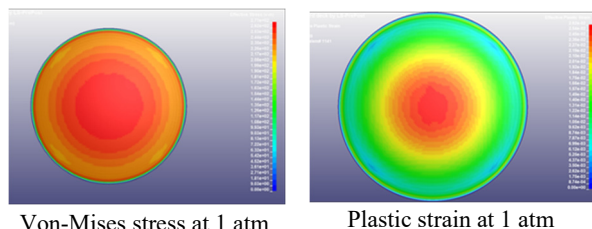


Figure 6: Results of the FEM calculation after being applied at atmospheric pressure, that is 1.013E+5 Pa, for the TR270C-BA.

次に、この有限要素法モデルをつかって、窓にかかる差圧を変えて、ミーゼス相当応力の差圧依存性を示したものが Fig. 7 になる。参考として引張試験で得られて破断応力(真応力換算)を点線で示している。BA 材は、1 気圧において 271 MPa の応力が発生していて 0.2%耐力(218 MPa)を超えて塑性変形域となっている。相当塑性ひずみが 2.6%である。H 材は、1 気圧では発生応力は 514 MPa と 0.2%耐力(531 MPa)をわずかに下回る応力となっており、1.1 気圧以上から塑性変形が始まっている。また、単純に破断応力と発生応力の比を設計尤度(=

破断応力/発生応力)とすると、BA材で1.57、H材は1.65と、H材のほうが静的荷重については設計余裕が大きいという結果が得られた。結論としては、FEM計算上は、設計余裕の大小はあるが、BA材もH材もどちらも実機適用可能な範囲と判断している。

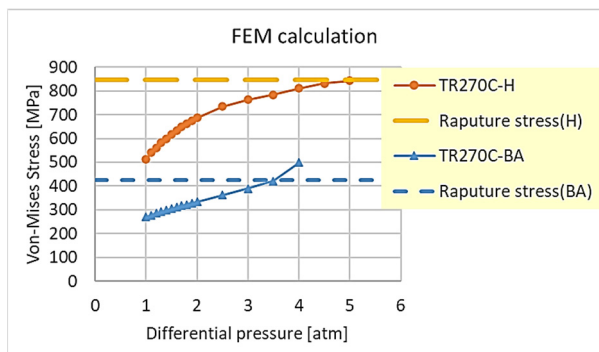


Figure 7: Results of the FEM calculation showing the von-Mises stress as a function of the differential pressure, where 1 atm means 1.013E+5 Pa. Dashed lines show rupture stresses obtained by the tensile test.

3. 実機による評価

3.1 計算との比較

実機形状はFig. 3に示した図面の通りで、窓材として、純チタン1種のBA材(焼鈍材)とH材(冷間圧延材)の2種類を準備した。

前節で示したFEM計算の妥当性をみるために、窓材の変位量(真空排気の直後)を径位置で比較したものをFig. 8に示す。BA材の方は、FEM計算がよくデータの変形を再現していることがわかった。一方、H材のほうは、実機の変形量がFEM計算より小さいことがわかった。実機の変形量が小さかったことから、H材についてはFEM

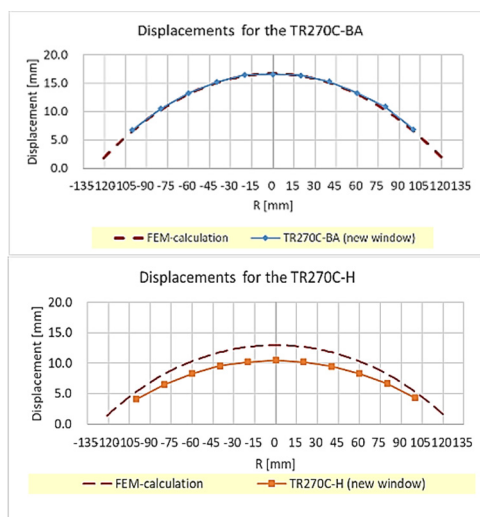


Figure 8: Comparisons of displacements as a function of the radius between the data (circles) and the FEM calculation (dashed line). The top figure shows that for the TR270C-BA, and the bottom figure shows that for the TR270C-H.

計算による応力値などはやや過大評価側(安全サイド)と考えている。このH材の変形量の差異については原因調査中であるが、今後の解析では、実機変形量への合わせ込みをしつつ引張試験結果と整合性をとるようなモデル構築が課題の1つである。

3.2 大気圧-真空サイクルの試験

2.4節で示したように、ビーム窓には大気圧がかかることで0.2%耐力前後の大きな荷重がかかる。そのため大気圧と真空の繰り返しにより低サイクル疲労が発生する可能性がある。そこで、TR270C-BAおよびTR270C-Hの両方について10000回の大気圧と真空の繰り返しサイクル試験を実施した(Fig. 9)。サイクルでは真空引き1回目、10回目、100回目、その後は1000回毎にHeリーク試験を実施し、10000サイクル後も1E-10 Pa・m³/sec以下であることを確認し気密性能に影響がないことを確認した。また、窓材にも目視では“き裂”等は見られなかった。サイクル試験の結論として、圧力サイクルでは破断やリークに至らず、健全性が維持されたと判断した。

しかしながら、上記リーク試験と合わせて、ビーム窓中央の変位を監視していたが、Fig. 10に示すようにTR270-BAの試験時に窓が徐々に真空側に引き込まれてく現象が観測された。試験終盤で累計3mmの変形が発生している。最初は塑性変形がサイクル毎に進行しているものと予想したが、FEM計算でサイクルさせてもすぐにシェイクダウンしてしまい塑性変形が進行しないことや、変形結果がサイクル数と直線的な関係でないことから、別の原因として室温クリープの可能性があるとわかった。通常クリープは融点の1/2程度の高温領域が問題になる現象であるが、純チタンや一部チタン合金など結晶が六方最密充填構造(HCP構造)をもつ金属では室温でも比較的大きなクリープ現象が起こることが知られている[5]。

3.3 長時間の真空保持試験

そこで、室温クリープによる効果を調べるために200時間程度の真空保持試験を実施した。その際、室温は20°C~22°Cの範囲に収まるよう空調している。

真空保持試験の結果をFig. 11に示す。縦軸は真空に引いた直後(<10Pa)での窓中央の変位量を基準(縦軸ゼロ)として、そこからの変位幅を縦軸にプロットしたものである。TR270C-BAについては、長時間の真空保持で3mm以上の変位が確認された。この結果からFig. 10で観測された変位量の約90%は圧力サイクルではなくクリープ現象で説明可能であることがわかった。これに対しTR270C-Hでは、0.5mm程度の変位に留まった。純チタンに関して冷間圧延材のほうにクリープによる変形が強く抑制される現象は文献[5]にある結果と合致する。Figure 11中の点線は、下記に示すクリープの式[5]でfittingしたものである。

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \ln(1 + \beta_0 t) + \dot{\varepsilon}_s t \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon(t)$ は全ひずみ、 ε_0 および β_0 は初期クリープに関するパラメータ、 $\dot{\varepsilon}_s$ は最小クリープ速度に相当するパラメータである。Fitting結果は、BA材で ε_0 :0.312、 β_0 :148、 $\dot{\varepsilon}_s$:1.14E-5、H材で ε_0 :0.121、 β_0 :0.372、 $\dot{\varepsilon}_s$:5.45E-10であった。このfitting結果から、参考として、3ヶ月後(2160

時間後)の変形量を外挿すると、BA材で4.0 mm、H材で0.8 mmとなる。参考程度ではあるが、これをFEM計算で得られた窓中央の変位量とミーゼス応力(Fig. 7)の関係から逆算すると、BA材で+23 MPa(引張強度比で+7.1%)、H材で+46 MPa(引張強度比で+5.9%)に相当することとなり、無視できない効果であることがわかった。ただし、ビーム運転が連続3ヶ月程度であり、その都度ビーム窓の交換が可能であることと、2.4節示したFEM計算で得られた静的破断応力までの尤度を考えると、クリープの効果を勘案しても破断までは至らず、BA材およびH材はどちらも実機適用は可能であると判断した。

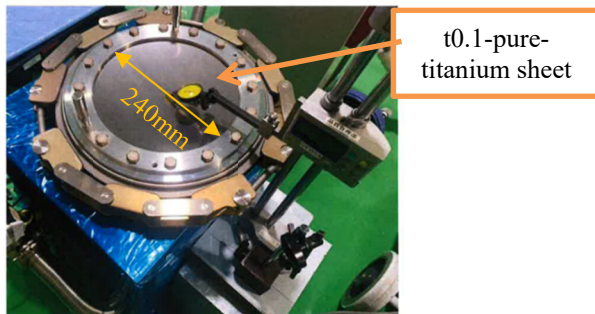


Figure 9: Photograph of the pressure-cycle test for the TR270C-BA.

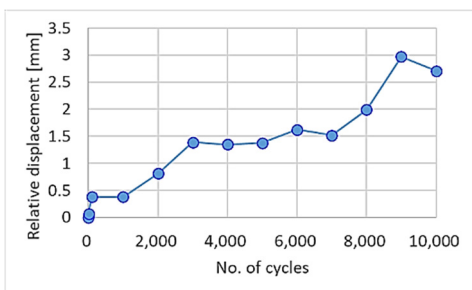


Figure 10: History plot of the relative displacement at the center of the beam window during the pressure-cycle test for the TR270C-BA.

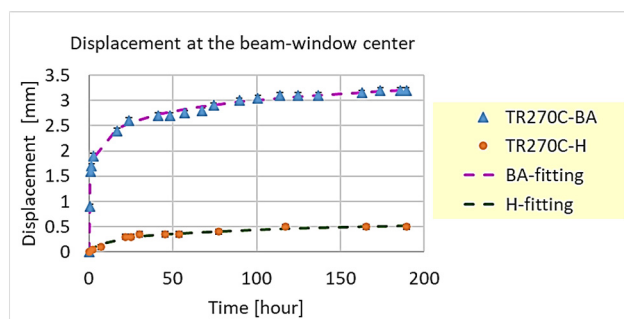


Figure 11: Continuous displacements at the beam-window center. The vertical axis, displacement, set to be zero right after evacuated lower than 10 Pa. The dashed line shows a fitting result by the Eq. (1) of the creep effect.

4. 実機の選定と運用状況

実機の純チタン製ビーム窓としては、前節に示した長期安定性の観点や静的強度評価(FEM計算)の結果か

らTR270C-Hを窓材として選定した。実機は、2021年4月にステンレス窓からの交換を実施した。交換後のビームライン写真をFig. 12に示す。交換後すぐに真空排気を開始し、2021年5月から6月にかけてBラインのビーム運転を実施した。その後7月にユーザー側測定器のupgradeのために大気開放してビーム窓の取り外しを行った。この間の約2.5ヶ月はビーム運転中も含めて安定して運用することができ、ビーム窓の健全性に問題は見られなかった。

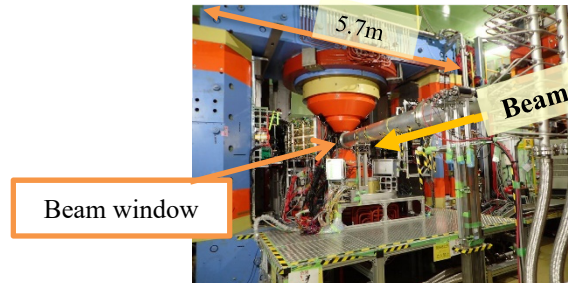


Figure 12: Photographs after a replacement from the stainless beam window to the titanium beam window.

5. Summary

J-PARCハドロン実験施設では、30 GeVの陽子ビームを直接物理実験に供与するBラインについて、2020年に初めてのbeam commissioningを実施し、引き続き2021年にもユーザーへビームを供与するなど、安定したビーム運転を行っている。

Bラインエンドの真空と大気を仕切るビーム窓でのビームロス低減を目的で、窓材を0.1 mm厚のステンレスから同じ厚さの純チタンへ変更を行った。純チタンについては焼鈍材(BA材)と冷間圧延材(H材)の二種類の素材について、引張試験、FEM計算および実機サイズの試験を実施した。その結果から、強度計算で破断までの尤度が大きく、かつ長期変形(クリープ変形)が抑制されている冷間圧延(TR270C-H)を実機素材として採用した。実機ビーム窓については、2021年4月に設置を行い、引き続き5月から6月でのビーム運転で使用され、その間、ビーム窓の健全性に問題は見られなかった。

今後は、窓材の厚さを低減する方向などで、さらなるビームロス低減を目指すことを検討している。

参考文献

- [1] A list of experiments in the J-PARC Hadron-hall; <http://research.kek.jp/group/nuclpart/HDeppc/Exp/>
- [2] 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近傍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] J-PARC E16 experiment; <https://ribf.riken.jp/~yokkaich/E16/E16-index.html>
- [5] E. Sato *et al.*, "結晶構造による金属・合金の室温クリープ現象の分類", 軽金属 第55巻, 第11号 (2005).