

J-PARC ハドロン実験施設におけるビーム窓の飛散防止隔壁の開発

DEVELOPMENT OF A PARTITION WALL TO PREVENT SCATTERING OF BEAM-WINDOW FRAGMENTS AT J-PARC HADRON FACILITY

渡邊丈晃[†], 上利恵三, 秋山裕信, 青木和也, 家入正治, 加藤洋二, 倉崎るり, 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
Hiroaki Watanabe[†], Keizo Agari, Hironobu Akiyama, Kazuya Aoki, Masaharu Ieiri, Yohji Katoh, Ruri Kurasaki, Yoshinori Sato, Shin'ya Sawada, Hitoshi Takahashi, Kazuhiro Tanaka, Akihisa Toyoda, Erina Hirose, Michifumi Minakawa, Yuhei Morino, Yutaka Yamano
Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

A new secondary production target system for 95 kW primary proton beam in the Hadron Experimental Facility at J-PARC is now under preparation. The target made of gold is located in an airtight target chamber, which is filled up by inert helium gas at 90 kPa. The most important function of the target chamber is airtightness in order to confine radioactive materials produced and accumulated in the target. Since transportation beam line is kept in vacuum at the 1 Pa level, a beam window is necessary between the chamber and the beamline vacuum duct. Since the proton beam directly passes through the beam window, high thermal load together with gas-pressure load are applied to the beam window. In order to keep appropriate design-safety margin, we have adopted beryllium metal for the material of the beam window, as reported in the previous annual conference [1]. However, since the beryllium is a toxic substance, a partition wall should be equipped to prevent scattering of beryllium fragments in the vacuum duct even if the beryllium window is broken. In this paper, design and examinations of the partition wall are reported.

1. ハドロン 2 次粒子生成標的と標的容器

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バ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。標的は純金製となっており、Fig. 1 の写真に示すように金が銅ブロックに接合され、銅ブロックに冷却水配管を接合して冷却する間接冷却方式となっている。これまで使用されてきた標的は最大約 53 kW の 1 次陽子ビーム強度まで対応している[2]。次期標的も現行と同じ間接冷却方式で最大約 95 kW(5.2 秒サイクル)対応に改良したものを設計し、2019 年度にビームラインへの設置を計画している[3, 4]。

金本体には、大強度・高エネルギーの陽子ビームを照射し続けるため、核破砕反応などを通じて金の内部に大量の放射性物質を蓄積することとなる。万が一、加速器装置等のトラブルにより、異常なビームが照射されるなどして金が破損すると、閉じ込められている放射性物質が放出されることとなる。そのため金標的は、Fig. 2 の写真に示すような気密性のある格納容器(以下、標的容器)の中に設置されており、異常なビーム照射においても標的容器の気密性が維持されることで外部環境への放射性物質の漏洩は起きないように設計されている。また、標的容器中には化学的に不活性なヘリウムガスを負圧で充填して循環させ、ヘリウムガス中の放射性物質濃度を監視することで標的自体や標的容器に異常が無いかが監視を行っている[5]。標的容器の中で最も熱負荷の大き

い 1 次陽子ビームが通過するビーム窓については、金属ベリリウムを採用し、その設計や実証試験による評価などは前回報告を行った[1]。ベリリウムは低密度、低放射化および高熱伝導率などメリットが多いが、一方で毒性があるため特定第一種指定化学物質に指定されている。仮にビーム窓が破損して真空ダクト中に飛散すると、その後のビームライン機器のメンテナンスにおいて多大な負担となることが予想される。そこで、万が一ビーム窓が破損した場合に備え、ベリリウムの飛散防止のための隔壁(以下、隔壁)の開発を行った。本論文においては隔壁の設計および実証試験の結果について報告を行う。

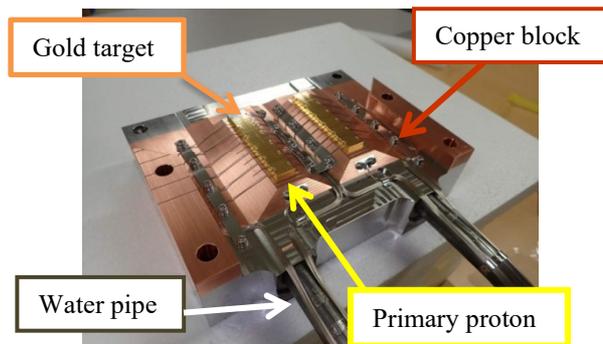


Figure 1: Photograph of a new production target made of gold for the 95-kW primary-proton beam (5.2-s cycle).

[†] nabe@post.kek.jp

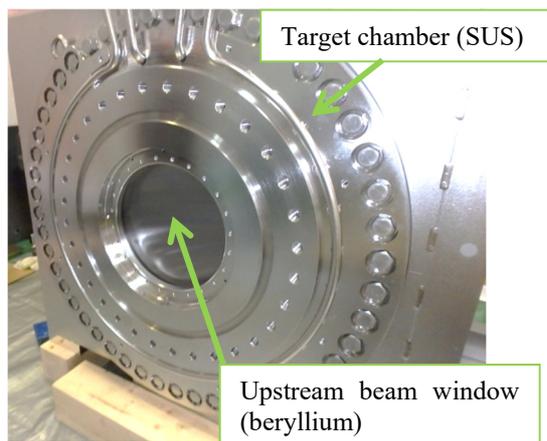


Figure 2: Photograph of a new airtight target chamber for the 95-kW primary proton beam.

2. ビーム窓飛散防止隔壁の設計

2.1 標的容器の構造

標的容器の概念図を Fig. 3 に示す。一次陽子ビームが通過する容器の隔壁部分はビーム窓 (beam window) と呼ばれ、最も熱負荷が高い部分であることから、標的容器の健全性は実質的にビーム窓の健全性が決めることとなる。標的容器には負圧 (絶対圧で約 90 kPa) のヘリウムガスを充填しており、ビームラインは真空のため約 0.9 気圧の差圧がビーム窓に負荷されることとなる。

報告[1]の通り、次期標的容器についてはベリリウム製ビーム窓を採用することとし、評価上は上記荷重に対し許容応力以下である。しかしながら万が一破損した場合は、ベリリウムの破片が真空ダクト中へ飛散することになる。そこで、飛散を抑止するための隔壁を設けた方が、より安全である。そこで、Fig. 3 に示すよう、ビーム窓より真空側にもう1層の隔壁を取り付けられるよう標的容器にフランジ構造を準備することとした。

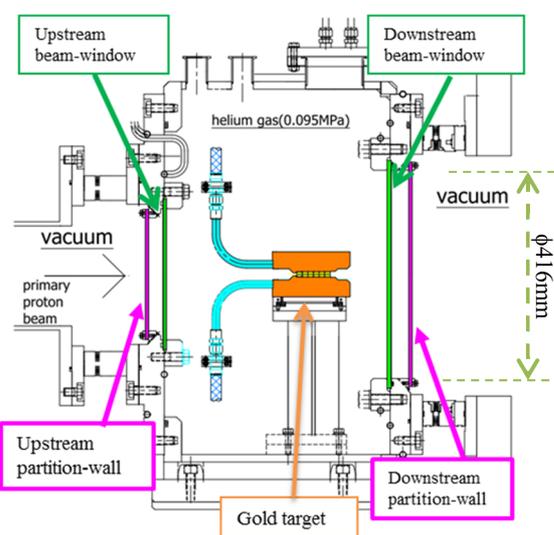


Figure 3: Schematic drawing of the new target chamber with the partition walls.

2.2 隔壁への要請と候補素材

隔壁は、1次陽子ビームが通過し、かつ真空中に置かれるため、放射線耐性があり、放射化が少なく、熱伝導率が高く、高温強度に優れた素材が望ましい。また、ベリリウムよりも Robust な素材 (= 靱性が高い素材) が良いことから、ここでは原子炉等でも実績のある炭素系素材を候補とすることとした。

具体的には、炭素繊維 (微細な黒鉛結晶構造をもつ繊維状の炭素物質) を基材 (糸材) とした平織物 (fabric) を使用する方式、つまり極力物質量を減らす方向でかつ全体としては柔軟な素材を1つの候補とした。もう一方は、炭素繊維強化炭素複合材 (以下、C/C コンポジット) を使用する方式、つまり、がっちりとした構造体とする方向の2つの方式について検討を行った。

炭素繊維織物は、素材としてアクリルを原料とした PAN 系と、ピッチを原料としたピッチ系がある。ここでは真空中で熱負荷のある条件のため熱伝導率の高いピッチ系で、かつ折れにくい細径 ($\phi 7 \mu\text{m}$) 繊維である YSH-50A[6]の平織物を候補として選定することとした。C/C コンポジットも熱伝導率の高い素材を選定して CFC デザイン社の FS140[7]を候補として選定した。Table 1 に候補素材の物性値を示す。

Table 1: Candidate Materials and its Properties

Material	Density (g/cm^3)	Thermal conductivity (W/m/K)	Young modulus (GPa)	Ultimate strength (MPa)
Carbon-fiber fabric (YSH50A- 140)	2.1 (142 g/m^2)	120	520	3830
C/C composite (FS140)	1.6	120	70	100

2.3 素材の物性評価

C/C コンポジットは、引張強度は既知であるが、応力-ひずみ曲線が不明なため、引張試験を実施した。引張試験片は JIS-2 号ダンベル形状とし、全長 100 mm、標点間距離 20 mm、板厚 2 mm である。引張試験機は島津製作所 AGX を使用し、変位測定は、ビデオ伸び計 (TRViewX800D) により標点間距離を測定している。また、引張速度は 5 mm/分である。参考として、引張試験前後の試験片の写真を Fig. 4 に示している。

引張試験結果としては、最小破断応力は 140 MPa、最小破断歪みは 0.22%であった。Figure 5 に測定で得られた荷重-変位線図を示している。通常の金属類とは異なる独特な挙動であり、初期の剛性の高い領域を過ぎるとズルズルと伸びていく線図となる。次に、3つのサンプルで得られた荷重-変位曲線の平均値 (Fig. 5: 青い実線) を再現するよう有限要素法 (以下 FEM) のモデルを構築した (Fig. 5: 青い破線)。FEM ソフトとしては LS-DYNA を使用している。参考として、この FEM モデルで計算した破断直前のミーゼス応力分布を Fig. 4 右図に示している。この FEM モデルを使用して、実機サイズの隔壁 (有効内径 416 mm) の円板を想定した場合に、大

気圧分の差圧 (100 kPa) が円板に付加された場合の最大応力を Fig. 6 に示している。破断応力を 140 MPa とすると、板厚は 5 mm 以上必要ということになる。突入荷重であることやモデルの不定性などから、仮に破断応力からの安全係数 3 を取ると板厚 8 mm が必要とされる。次節以降に示す実証試験では板厚 2, 6, 8 mm の 3 種類の円板による試験を実施した。



Figure 4: Tensile-test species made of C/C composite. The left and middle photographs show before and after the tensile test. The right figure shows a von-Mises stress distribution just before rupture, which is calculated by the LS-DYNA.

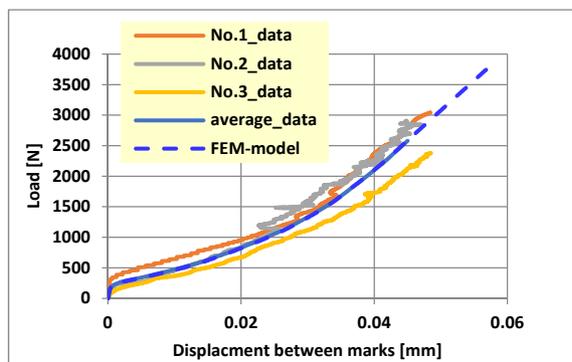


Figure 5: Results of the tensile tests for the C/C composite, showing displacement vs load. The blue dashed line shows an output from the FEM model, which is reproduced the average data of three tensile tests.

炭素繊維織物についても繊維に平行な方向で引張試験を3試料について行った。ただし織物のため通常の固体の引張試験とは条件を同一にはできないため注意が必要である。引張試験片は L-180 mm × W-34 mm (=fiber 37 本分) の長方形であり、両端掴み部位はエポキシ接着剤で板材に固定している。試験機は島津の AG-IS を使用した。結果は、最少破断強度 1600 MPa、最少破断ひずみ 1% という結果を得ている。

さらに参考として、布地の検査で用いられる引裂試験も実施した。試験は東洋精機製エルメンドルフ引裂試験機を使用し、ベンジウム法 (JIS-L1096) に準拠して実施した。3試料実施し、結果としては完全に引き裂くところまで至らず引裂強度としては 64 N 以上 (装置の計測上限値) となる。ただし、9割以上の繊維が破断していることから目安としては 50 N 程度と考えている。参考として衣服の布地の引裂強度は 13 N 以上、またテントに使われる

素材は一般的には 30~100 N であることから、炭素繊維織物の引裂強度は、ざっくり言って中強度のテント素材と同程度といえる。

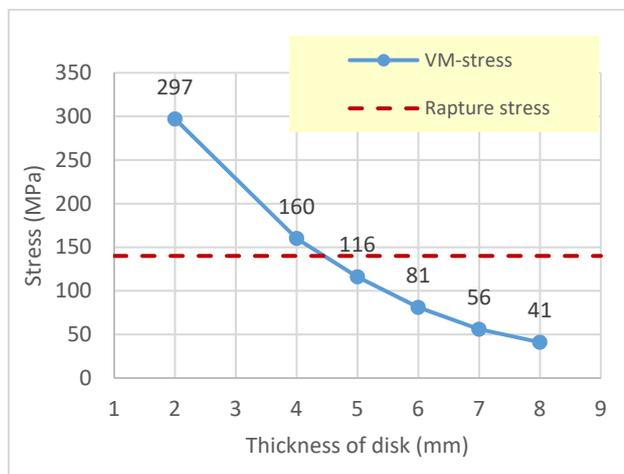


Figure 6: Results of the von-Mises stress calculation as a function of thickness for the φ428-mm C/C-composite disk by LS-DYNA, in which the load to the disk is a differential pressure with 100 kPa.

2.4 隔壁の温度評価

隔壁もビーム窓と同じく 1 次陽子ビームなどが通過することで発熱することとなるが、真空中に置かれるため固定部 (フランジ接続部) との熱接触を通じて放熱されることとなる。下流側の隔壁の場合、最大ビーム強度として 125 kW, 3.7 秒サイクルとすると MARS を使った計算により 3.7 秒あたりビーム中心で $3.1 \times 10^8 \text{ W/m}^3$ の発熱密度と想定される。熱伝導率は安全をみて仕様値から 20% 低い値を仮定して 96 W/m/K とすると、最も高温になるケースで $T \sim 150^\circ\text{C}$ ($\Delta T \sim 120^\circ\text{C}$) となる。この温度計算では、フランジ部分については熱収支計算から $T \sim 60^\circ\text{C}$ ($\Delta T \sim 30^\circ\text{C}$) と見積もられ、これを境界条件 (固定値) としている。熱応力 (σ) の概算としてはヤング率 (E)、線膨張係数 (α) から $\sigma \sim E \cdot \alpha \cdot \Delta T = 70 \text{ GPa} \cdot (0.2 \cdot 10^{-6}) \cdot 120 = 1.7 \text{ MPa}$ と破断強度よりも十分に低い。これは炭素材料の線膨張係数が低いことに起因している。

隔壁は最高温度 $T \sim 150^\circ\text{C}$ に対して、ベリリウム製ビーム窓の最高温度は同じビーム条件で 80°C 程度と見積もられており、隔壁よりビーム窓の方が平衡温度が低い。そこで隔壁側から放射によってビーム窓がどの程度熱せられるか計算をおこなった。条件として、隔壁は黒色の炭素素材のため安全サイドで放射率を 1.0 とし、ビーム窓はベリリウムのカタログ値を使って 0.71、フランジ部 (ステンレス) は 0.25 とし、かつフランジ部は 60°C ($\Delta T = 30^\circ\text{C}$) に温度を固定している。また放射計算に関わる形状係数は 1 としている。上記条件で放射の効果を計算したところ、ビーム窓の温度は $\Delta T \sim 1^\circ\text{C}$ 程度の上昇であり、隔壁から放射による影響がほとんどないことがわかった。以上の検討から、熱伝導率の良い炭素素材を隔壁素材として採用した場合、熱的には問題がなく、ビーム窓への熱的影響も少ないという結論が得られた。

3. ビーム窓飛散防止隔壁の評価

3.1 製作性の検証

まず製作性について検証を行った。織物の場合、固定側フランジに適切なテンションで張った状態で固定可能かどうかポイントである。C/C コンポジットの場合は薄肉大口径の円盤を削り出して作れるかという点が問題となる。結果としては、どちらも製作性については問題ないことが確かめられた。実機サイズ(有効内径 416 mm)の織物写真を Fig. 7 に示している。織物は強度の方向性を緩和するため 45 度位相をずらした 2 枚を積層しステンレスフランジで挟んでボルトで締結している。C/C コンポジットは、切削加工による板の曲がりや部分的な欠損などが懸念されたが、十分な精度で板厚 2 mm までの円板が製作可能であることがわかった(Fig. 8)。

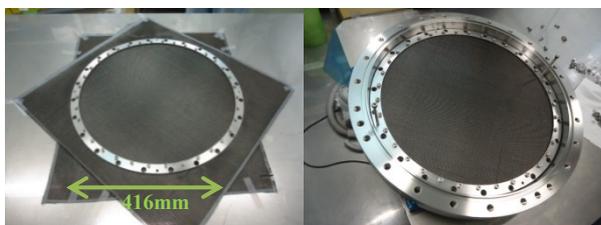


Figure 7: Photographs of the carbon-fiber fabric. Two sheets with a different phase are piled up and clamped by stainless rings with bolts. Left figure shows a photograph during being clamped and right figure shows after installation on the test flange.



Figure 8: Photograph of a prototype of the C/C composite disk. The large-diameter disk with 2-mm thick was successfully fabricated with enough machining accuracy.

3.2 隔壁の評価

隔壁としての適用可否は、実際にビーム窓が破損した際に起こる事象を模擬した試験により実証した。靱性の低いベリリウム窓は、ガラスが割れる時のように、大規模に一気に破壊する可能性がある。その場合、標的容器中のヘリウムガス(0.9 気圧)がベリリウムの破片と共に真空ダクト中へ突入してくることとなる。その状況を想定し、下記3パターンの検証を順次実施することとした:

- ① ガスのみが隔壁へ突入した場合。
- ② 金属物体(鋼球)が隔壁へ突入した場合。
- ③ ビーム窓の破片を想定したセラミック破片が隔壁突入した場合。

Figure 9 は、③のセラミック破片突入試験のセットアップ写真を示している。実機同様に炭素繊維織物または C/C コンポジット円板を真空容器中央部に固定し隔壁の

両側を真空状態(10 Pa 以下)とする。その状態で 40g のセラミック破片を大気とともに隔壁へ突入させる。突入要領は薄いアルミフォイルの上にセラミック破片を積み上げ、ハンマーによる打突でフォイルを一気に破り、隔壁へ大気と共に突入させるものである。また、セラミック破片は、Fig. 9 右写真に示すようなもので、事前に板厚 5 mm のアルミナ(Al_2O_3)製の板にポンチを当ててハンマーの打突で破碎することで製作したものである。

鋼球突入もほぼ同じ要領であるが、鋼球サイズは外径 1, 2, 3 mm の 3 種類のを各 40 g ずつ突入させる試験を実施した。鋼球突入には手動の NW40 ボールバルブを使用してバルブの弁体に鋼球を乗せておいて、手動でバルブを開放して大気とともに突入させている。

大気突入試験は、鋼球突入試験と同じ要領で鋼球がない状態で実施している。

いずれの試験においても C/C コンポジット円板の場合は、実機と同じようにフランジ外周側に気抜き穴を用意し、気抜き穴の一端には 2 μ m グレードの金属製フィルタを取り付けている。炭素繊維織物の場合は、気体が織物の隙間を抜けていくため気抜き構造は不要である。

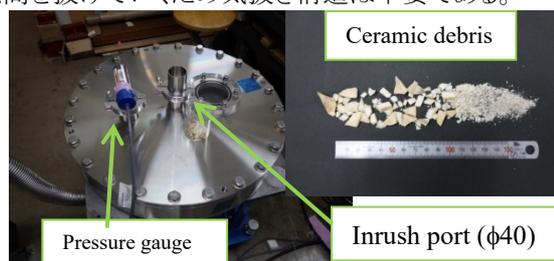


Figure 9: Photographs of an experimental setup for the ceramic-debris inrush test.

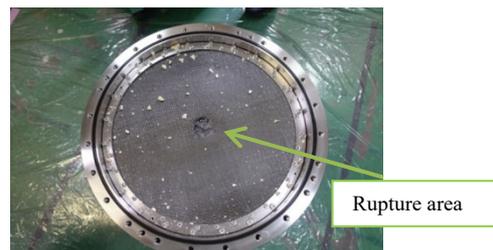


Figure 10: Photograph of the carbon-fiber fabric after the ceramic-debris inrush test. Rupture area can be seen around inrush position. The 30% ceramic debris were penetrated to the opposite side.

3.3 試験結果

Table 2 に突入試験を含めた結果をまとめたものを示す。結論としては C/C コンポジットの 6 mm と 8 mm がすべての試験をクリアしたことになる。

炭素繊維織物(2層)は、鋼球についてはすべての大きさ(ϕ 1, 2, 3 mm)で貫通させることなく止めることができたが、Fig. 10 に示すようにセラミック片の突入試験で2層とも破断してしまった。これは、セラミック片のシャープなエッジにより、炭素繊維が切れてしまうことが原因である。重量ベースで約 30%のセラミック片が隔壁の反対側へ貫通していた。また同時に炭素繊維の断片が多数飛散

したのが観察された。これより炭素繊維織物(2層)は、隔壁としては採用できないことがわかった。

Table 2: Results of the Partition-Wall Examinations

Thickness	Carbon-fiber fabric (two layers)	C/C composite		
	0.3mm(284g/m ²)	2mm	6mm	8mm
Productivity	Passed	Passed	Passed	Passed
Inrush test by air	Passed	Broken	Passed	Passed
Inrush test with Iron-balls (no penetration)	Passed	—	Passed	Passed
Inrush test with the ceramic debris	Broken	—	Passed	Passed

次に C/C コンポジットの試験結果について記述する。厚さ 2 mm の場合は、大気突入試験の11回目で破断した。これは Fig. 6 の FEM 計算からは妥当な結果といえる。厚さ 6 mm と 8 mm は、大気突入、鋼球突入およびセラミック片の突入試験まですべてクリアした。さらに 6 mm については合計 10 回のセラミック片突入試験を実施したが、Fig. 11 に示すように破断することなく持ちこたえることができた。セラミック片が衝突したと思われる場所に小さい窪みが観察されたが、全体強度に影響を及ぼすサイズ(大きさ、深さ)ではなかった。本試験においては、真空排気ラインにトラップ用のフィルタを設置していたが、炭素の破片や粉塵などは観察されなかったことから、真空ダクト側への影響は全くないことも確認された。

以上の試験結果から、隔壁としては、C/C コンポジット材の板厚 6 mm 以上が採用できることが示された。



Figure 11: Photograph of the 6 mm-thick C/C-composite disk after the ceramic-debris inrush tests. The close-up photograph shows an impact point of the sharp edge of the ceramic debris.

4. ビーム窓飛散防止隔壁の実機

前節までの試験により隔壁としては、C/C コンポジット材を採用し、下流側(有効内径 416 mm)に対しては板

厚 6 mm 以上が必要であることがわかった。実機においては、各種の不定性を考慮して FEM 計算による安全係数を 3 以上とることとし、板厚 8 mm を採用することとした。

Figure 12 に標的容器実機の下流側ベリリウム製ビーム窓、および板厚 8 mm の C/C コンポジット製隔壁を取り付けた写真を示す。隔壁とビーム窓の間の空間を真空引きするために気抜き穴構造が必要であるが、ベリリウム破損時に気抜き穴から破片が漏れないよう、実証試験の時と同じステンレス製の焼結フィルタを気抜き穴出口に溶接にて固定している。フィルタは 95%捕集粒子径が 0.7 μm と十分な性能を有したものを選定している。

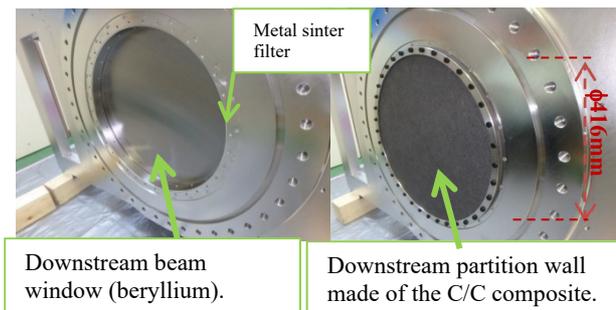


Figure 12: Photograph of the new airtight target chamber. The left figure shows the beam window made of beryllium, and the right figure shows the partition wall. The metal-sinter filter is equipped on an evacuation hole.

5. Summary

現在、準備が進められている次期標的容器に対し、万が一ベリリウム製ビーム窓が破損した場合に備えて、飛散防止のための隔壁の開発を実施した。炭素繊維織物(fabric)および C/C コンポジットを候補として選定し、素材評価、強度計算、製作性の確認および隔壁性能の実証試験などを実施した。その結果、C/C コンポジット材を実機として採用し、実装を行った。なお、次期標的は 2019 年 11 月に設置する予定である。

参考文献

- [1] 渡邊丈晃 他, “J-PARC ハドロン実験施設におけるベリリウム製ビーム窓の設計”, 第 15 回日本加速器学会, WEP038, (2018).
- [2] H.Takahashi *et al.*, “Indirectly Water-Cooled Production Target at J-PARC Hadron Facility”, J.Radioanal Nucl. Chem., doi: 10.1007/s10967-015-3940-9, (2015).
- [3] 高橋仁 他, “J-PARC ハドロン実験施設における新しい二次粒子生成標的の開発”, 第 14 回日本加速器学会, TUP109, (2017).
- [4] 高橋仁 他, “J-PARC ハドロン実験施設における新しい二次粒子生成標的の開発(2)”, 第 15 回日本加速器学会, THP038, (2018).
- [5] R.Muto *et al.*, “Monitoring System for the Gold Target by Radiation Detectors in Hadron Experimental Facility at J-PARC”, 13th International Conference on Radiation Shielding, EPJ Web of Conferences 153, 07004.
- [6] 日本グラファイトファイバー株式会社; <http://www.ngfworld.com/product/fabric.html>
- [7] 株式会社 CFC デザイン; <http://www.cfc-design.co.jp/>