

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

DESIGN OF BEAM WINDOW MADE OF BERYLLIUM 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)}, 倉崎るり^{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)}, 武藤亮太郎^{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)}, Yoshinori Sato^{A)}, Shin'ya Sawada^{A)}, Toshiyuki Takahashi^{A)}, Hitoshi Takahashi^{A)}, Kazuhiro Tanaka^{A)}, Akihisa Toyoda^{A)}, Erina Hirose^{A)}, Michifumi Minakawa^{A)}, Yuhei Morino^{A)}, Yutaka Yamanoi^{A)}

^{A)} Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

A new secondary production target system for 90 kW primary proton beam in the Hadron Experimental Facility at J-PARC is now under preparation. The target made of pure gold is located in an airtight chamber, which is filled up by inert helium gas at negative pressure around 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 partition, called a “beam window”, is necessary between the chamber and the beamline vacuum duct. Since the proton beam directly passes through the beam windows, high thermal load together with gas-pressure load is applied to the beam windows. In order to keep appropriate design-safety margin, we have adopted pure beryllium metal for the material of the beam windows. In this report, design and examinations of beam windows made of beryllium are reported.

1. ハドロン 2 次粒子生成標的

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。現在の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おり、最大約 53 kW の 1 次陽子ビーム強度まで対応している[1]。次期標的も現行と同じ間接冷却方式で最大約 90 kW (5.52 秒サイクル時) 対応に改良したものを設計し、2018 年度に製作を行い、2019 年度にビームラインへの設置を計画している[2,3]。

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ことを監視を行っている[4]。本報告では、次期 90 kW 対応の標的容器の中で最も熱負荷の大きいビーム窓について、その設計や実証試験について結果をまとめたものである。

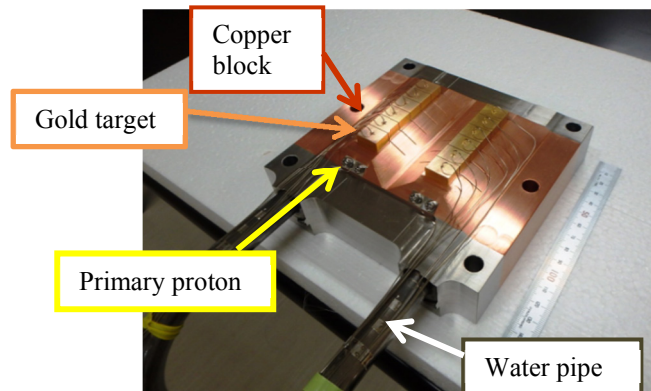


Figure 1: Photograph of a current production target made of pure gold for the beam power up to 53 kW.

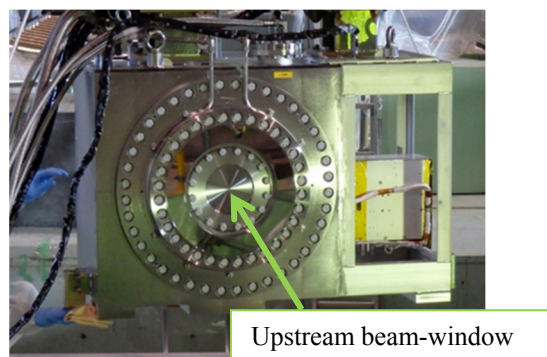


Figure 2: Photograph of a current airtight target chamber.

[†] nabe@post.kek.jp

2. ビーム窓の設計

2.1 標的容器およびビーム窓の概要

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。

ビーム窓は、厚すぎると標的で生成された 2 次粒子の散乱が増えビームの質(K/π比や K/n 比)が悪くなり、また窓中における 2 次粒子の発生により点光源の近似が悪くなるといった影響があるため、2 次ビームの質を維持するためには、なるべく薄い方が望ましい。また熱負荷総量を減らす観点からも一般的には薄い方が有利である。ただし高温時においてもガス圧による荷重を受けられるだけの厚さは必要である。構造としては厚いフランジ部分をなるべく外側に逃がして、薄肉部を増やす設計にすると平衡温度(熱応力)が下がり、より安全側の設計となる。

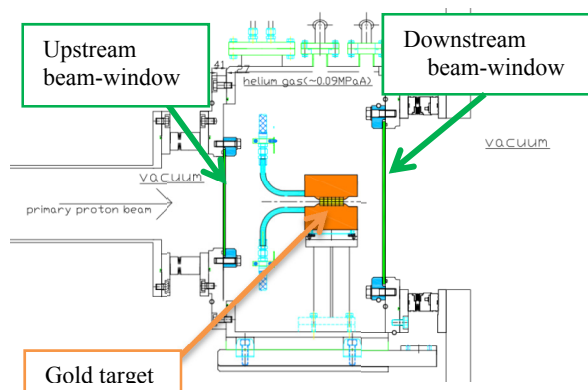


Figure 3: Schematic drawing of the new target chamber.

評価については、定常ビーム運転の強度計算に加え、想定される最も厳しい異常ビーム照射条件も採用している。評価は現行と同じチタン合金および以前使用されていたベリリウムの 2 種類の素材について行い、より安全側と考えられるベリリウムを第一候補と選定した。以下においてはベリリウム製ビーム窓の設計および実証試験について報告する。

2.2 設計条件

金標的本体の最大ビーム強度は約 90 kW(5.52 秒サイクル時)、陽子数で 1.03×10^{14} 個/5.52 秒のためビーム窓についても同じ強度をベースに評価を実施した^{††}。それに加えて J-PARC 加速器は電源や制御等の改良によりサイクル間隔を狭くする方向でビーム強度を増強する改良を進めているため、想定されるサイクル間隔の最

^{††} 2018 年 6 月は 5.2 秒サイクルで運転実績がある。ただし、ビーム強度が同じであればビーム窓の平衡温度はほぼ変わらないため、サイクルのみが変化しても評価に影響は与えない。

も短いケースとして 3.7 秒サイクル、約 125 kW 相当についても同様に評価を実施している。

本評価時における定常運転は、1 サイクル 5.52 秒となっており、このうち 2 秒間同じ強度のビーム(DCビーム)を加速器から取り出す“遅い取り出し”を行い、標的本体へ照射している。従って、2 秒間ビーム On-3.52 秒間ビーム Offを繰り返す構造となる。次に、想定される最も厳しい条件として、加速器リング内でバンチ化されたビームが装置の異常などにより一気に取り出される場合で、バンチ幅から 5 μsec という極めて短いビーム取り出しとなる。この場合、通常 2 秒間かけて負荷される熱量が 40 万分の 1 という短い時間でかかることでビーム窓の健全性が保たれるかという点が焦点となる。また、前述のようにビーム窓には約 90 kPa の差圧が掛かるが安全側として差圧 100 kPa にて評価を実施している。

評価において、ベリリウム素材(Materion 社 S200F)の引張強度、0.2%耐力、高温強度、ヤング率 E、熱伝導率、線膨張係数 α、比熱、密度、ポアソン比などはメーカカタログ値[5]および文献[6,7]を参考に設定を行った。

許容応力については、JIS-B8266”圧力容器の構造付属書 8 および 9”に規定された安全率の取り方をベースに上記素材強度から決定をした。具体的には、下記の基準により許容値を設定した:

- 設計応力強さ $S_m = \min(\text{引張強度}/3, \text{耐力}/1.5)$
- 1次応力(膜応力) < S_m
- 1次応力(膜+曲げ応力) < $1.5 \times S_m$
- 1次(膜+曲げ応力) + 2次応力(熱) < $3 \times S_m$
- 許容疲労強度 = $1/2 \times \text{疲労破断強度(応力振幅)}$

2.3 計算条件

非線形解析や動的現象で適用例の多い陽解法による有限要素法ソフトである LS-DYNA R7.1.3 を使用した。Geometry は Fig. 4 に示す 1/4 対称モデルとし、ビームサイズは実際より 20%程度安全側(細いビーム)として σ 1.4mm の幅のビームを想定して MARS15 により熱負荷(単位 W/m³)を計算したものを入力している。ビーム窓中心付近の径方向 mesh サイズはビーム幅(1σ)の 1/4 以下となるよう設定し、外側へ行くに従い mesh サイズを段階的に大きくしている。標的容器に相当するステンレス板の外周を完全固定とする条件である。また計算にはベリリウムと標的容器の間の気密を取るために使う金属シール材に相当する荷重条件も含めている。

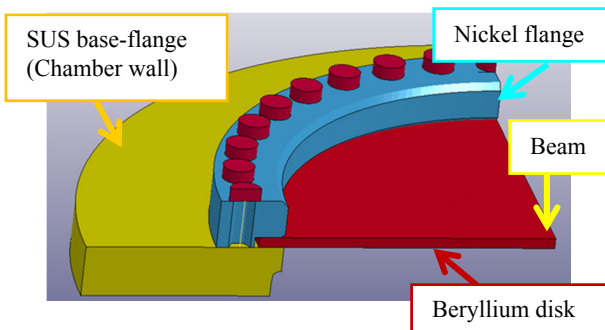


Figure 4: A 1/4-symmetry model of the beryllium beam window in LS-DYNA calculations.

2.4 計算結果および評価

Figure 5 に最も厳しい条件における計算結果の1例を示す。下流ビーム窓で 90 kW 定常運転中に、異常ビームとして 5μ 秒の短パルスビーム照射の条件で 90 kW 全量を窓中心に受けた際のミーゼス相当応力である。これにはガス差圧も負荷されている。ビーム窓中心はほぼ断熱条件で中心温度は 5μ 秒で $\Delta T \sim 130$ K 程度上昇する。最大応力はビーム窓中心から $r=2.4$ mm の場所になり、Fig. 6 に示しているように 5μ 秒で 230 MPa まで応力が上昇し、その後温度低下と共に徐々に応力が低下していく。なお、ビーム窓中心部では圧縮方向の応力であるが、最大値の位置 ($r=2.4$ mm) はちょうど圧縮方向から引張方向へ変わった直後である。また、ベリリウム中の音速が約 12900 m/sec と速く、音速で伝播する応力波は 1μ 秒で 12.9mm 拡がることになる。その結果 5μ 秒という短時間の照射条件であるがビームスポット ($\sigma 1.4$ mm) より充分外側まで応力波が散逸することとなり、応力波の重畳により生じる“熱衝撃”は発生していないことがわかる。Figure 6 中の点線は、熱応力の概算 ($E \cdot \alpha \cdot \Delta T$) と照射前の定常応力(ガス圧負荷および熱負荷)の合算値を表しているが、LS-DYNA の計算結果とほぼあっており熱応力のみで説明ができることを示している。これはビーム熱負荷の分布の場合、(応力波の伝播速度) \times (照射時間) \gg (ビームスポットサイズ) の条件下であれば熱衝撃が発生しないことを意味している。参考として、今回のケースでは 5μ sec 照射の場合はスポットサイズ $\sigma \sim 10$ mm 以上、逆にビームサイズ $\sigma 1.4$ mm の場合、照射時間を 0.1μ sec 以下まで圧縮すると熱衝撃の効果が見えるようになる。

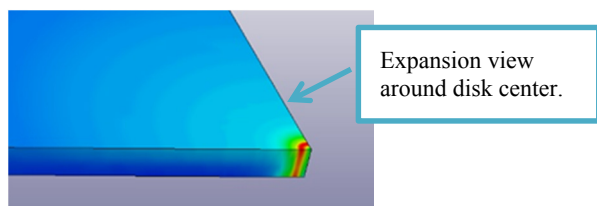
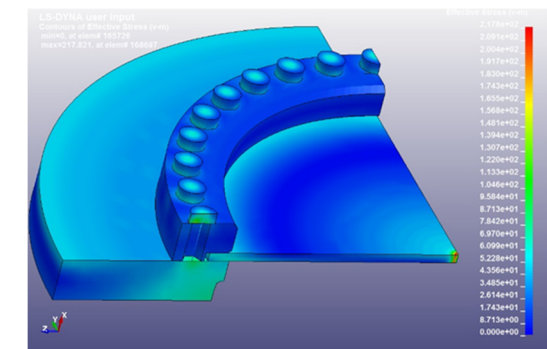


Figure 5: Example of von-Mises stress distribution in the case for the downstream window with a 5μ sec short-pulse irradiation of 90 kW proton beam.

異常ビーム照射の条件の場合、前述の通り LS-DYNA により計算して得られた最大応力値としては 230 MPa となっているが、これは許容値 ($3 \cdot S_m = 295$ MPa) を下回っていることから、十分に安全な設計と考えられる。

上記のような異常ビーム評価の他に、定常運転時の

評価として、1次応力(ガス圧による曲げ応力等)、1次応力+2次応力(ビーム熱負荷による熱応力)、ビームの shot by shot の応力振幅(金属疲労)、およびビーム運転の On/Off に伴う応力振幅(金属疲労)を評価し、すべて許容値以下になることを確認している。もっとも安全裕度の少ないのは前述した異常ビーム照射によるケースであるが、これはほぼ断熱温度上昇の条件のため $\Delta T =$ 熱量 / (比熱 \times 密度) と物性値のみで温度上昇、すなわち熱応力値 ($E \cdot \alpha \cdot \Delta T$) が決まっているため、設計上で工夫できるところは素材の選定、および定常状態の初期応力(ガス圧荷重や定常運転時の熱荷重)の低減に限定される。なおビーム運転のサイクルが短くなった場合、最も短いサイクルで 3.7 秒サイクル(約 125 kW 相当)まであり得るが、いずれのケースも計算を行い、異常ビーム照射を含むすべてのケースで、応力値は許容値を下回ることを確認している。

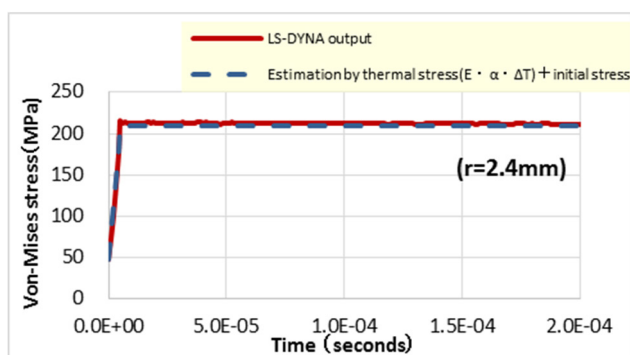


Figure 6: History plot of stress at the maximum-stress point ($R=2.4$ mm) with a 5μ sec short-pulse beam irradiation for downstream window. Dash line shows a simple estimation by summing up a thermal stress ($E \cdot \alpha \cdot \Delta T$) and initial stress.

3. ビーム窓締結方法の実証試験

3.1 標的容器への取り付け方法

これまでハドロン実験施設では、ベリリウムと金属フランジ(純ニッケル等)の接合には気密性のあるロウ付け法による接合を使用してきた。その接合された金属フランジをシール溶接あるいはメタルシールで容器側へ接続していた。しかし、ロウ付けによる接合強度は、母材強度に比較して約 1/4 程度と比較的低い。ロウ付け接合部の疲労強度は明確にはわかっていないが、一般的な鉄鋼材料の疲労強度(応力振幅)は引張強度の 1/2 程度となることが知られている。そこでロウ付け部の疲労強度も、ロウ付け部の破断応力から安全率2をとったものを許容疲労強度(許容応力振幅)と設定した。この条件で、ビーム運転・停止サイクルによる疲労(応力振幅)を評価したところ、90 kW ビーム強度の場合、接合部の応力振幅が許容値を若干超える可能性があることがわかった。

このため新たにロウ付けを介さないでメタルシールを使って直接標的容器にベリリウム円板を取り付ける方式(直接取付方式)について以下に示すような設計検討を行い、その実証試験を実施した。メタルシールとしては加速器施設で実績の多い U タイプシールを採用した。U タ

イトシールは、ヘリコフレックス型、すなわち金属製の中空Oリング外皮があり、その内部に金属スプリングを内蔵することで、ゴムOリングのように気密を保った状態の圧縮範囲(有効弾性復元量)を大きくとれることが特徴である。その特徴から、熱伸縮等が発生する温度変動のある環境においても信頼性が極めて高いシール材である。ハドロン実験施設では300個以上のUタイトシールを使用しているが、これまでのところシール材起因のリーク事象は発生していない。Figure 7に示すよう、直接取付方式では、このUタイトシールをベリリウムと標的容器のシール用溝との間に挟みこむことで気密性を確保する方式である。ただし、靱性の低いベリリウムにボルト用の穴をあけて直接ボルト締結するのは困難であるため、穴のないフラットなベリリウム円板の上から冷却水配管付の純ニッケル製フランジを使って抑えつける設計としている。純ニッケルは以前よりベリリウム用フランジとして使用しているもので、強度・剛性・熱伝導率・耐食性などを勘案して採用した。

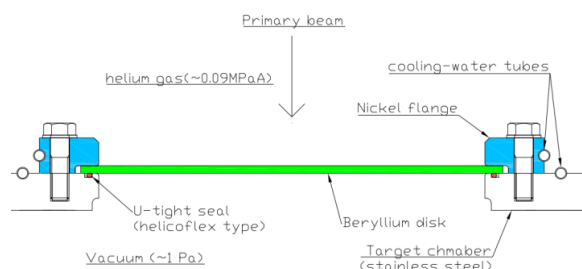


Figure 7: Schematic drawing of the airtight connection between the beryllium disk and the target chamber using a helicoflex-type metal seal.

直接締結方式は強度の低いロウ付け接合部を含まない点でメリットが大きいですが、下記のような懸念事項が考えられる:

- 必要な気密性能($<10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$)を得られるか?
- メタルシール締結時にベリリウムへ過剰な荷重がかかることで破損する可能性はないか?
- ガス入れ換えのため標的容器側を真空排気する場合などに伴う圧力サイクルに伴う気密性の低下。
- ビーム運転・停止に伴う熱サイクルによる気密性能の低下。

上記のような懸念事項に対し、以下に示すように実証試験を実施した。なお、shot by shotのサイクルではシール材部分における温度変化は 0.1°C 以下と評価されており気密性能などへの影響はないと考えられる。

3.2 気密性能の評価

まず、ベリリウム円板の直接締結方式について気密量の測定を実施した。使用したベリリウム素材は実機と同じMaterion社製S200Fで、2種類のサイズ:外径180mm-板厚3mm、外径300mm-板厚6mmについて試験を実施した。いずれも表面粗度はRa1.6程度、平面度0.1以下で加工されたものである。Figure 8に示すように、試験ではベースフランジは標的容器と同じステンレス(SUS304)、抑えのフランジは純ニッケルと物性の近い

一般構造鋼(SS400)を使用している。Uタイトシールについては①アルミ外皮(メッキなし)、②金メッキを施したもの、③スズメッキを施した3種類について評価を実施した。メッキ品については $\phi 180$ はニッケル外皮、 $\phi 300$ はCu外皮の上にメッキ処理を施している。いずれも内皮はステンレス製、スプリングはインコネル製である。メッキは軟質のものでベリリウムの保護と、微小隙間を埋めるなど表面接触状態を向上させる目的でつけたものである。

Table 1にヘリウムリーク試験の結果を示している。どちらのサイズでも金メッキをしたシール材はアルミ外皮タイプよりリーク量が1桁程度多く、スズメッキをしたシール材はアルミ外皮タイプより1桁以上リーク量が少ない結果が得られた。この差は主にベリリウムの表面粗さや硬度とシール材表面硬度の相性によるものと推定している。標的容器の気密性への要請としては $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 以下のため、いずれのケースも要請は満たしている。また、シール部分での温度は最高で 45°C 以下と評価されており、どの素材・メッキでも適用は可能であるため、最もリーク量の少ないスズメッキを施したタイプを第一候補として選定し、3-4節に示すようなサイクル試験などを実施した。

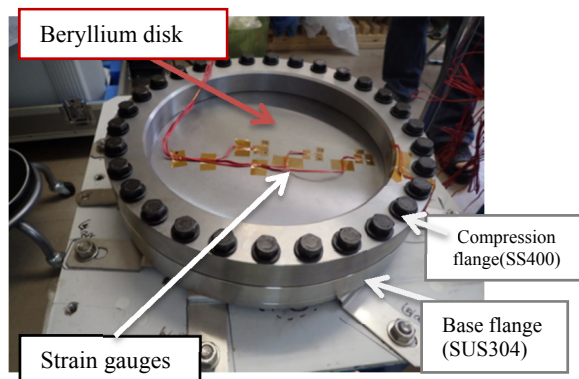


Figure 8: Photograph of a fastening examination and a helium-leakage test for the $\phi 300$ beryllium disk.

Table 1: Summary of helium-leakage test. The unit in the table is $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$.

	① Al-skin	② Gold plated	③ Tin-plated
$\phi 180(\text{t}3)$	3.0×10^{-10}	3.0×10^{-9}	$<1 \times 10^{-11}$
$\phi 300(\text{t}6)$	1.5×10^{-10}	1.2×10^{-9}	$<1 \times 10^{-11}$

3.3 締結作業の影響

Figure 8に示すように、ベリリウム表面に歪みゲージを貼り付けてメタルシール締結作業中の歪み量の測定を実施した。その結果、ボルトの締付トルク $40 \text{ N} \cdot \text{m}$ (推定軸力 $20 \sim 30 \text{ kN}$)で最大歪み値 $100 \mu \text{ ST}$ 程度を示し、その後歪みが低下して締め付け完了時にはほぼ初期値($\sim 0 \mu \text{ ST}$)に戻った。これは締め付け中にベリリウム板には、シール材の力点と抑えフランジの力点のずれにより若干の曲がりが生じており、締め付け完了時にはシール材が圧縮されることで平面に戻ることを意味している。最大の歪み値約 $100 \mu \text{ ST}$ は、応力に換算すると約 30 MPa の応力に相当する程度であり、ベリリウムの一次一般膜応力の許容値($S_m=108 \text{ MPa}$)と比べても十分に小さく、ベリリウムに破損や異常変形等の問題が発生するレベル

ではない。また、2種類のサイズのベリリウム円板を各3回締結試験を行ったが、ひずみ量はいずれも同レベルで、ベリリウムのシール接触部やフランジ抑え部についても通常の接触痕が見える程度で有害なキズは見られなかった。以上より、締結作業によりベリリウムが破損するような影響はないことを確認できた。

3.4 サイクル試験

前述したように気密試験の結果からスズメッキを施したUタイトシールを候補として選定し、次に圧力変動や温度変動に対しての信頼性についてサイクル試験を実施した。この試験には外径180mm・厚さ3mmのベリリウム円板を使用した。圧力サイクルは、Fig. 9に示すように大気圧(約 10^5 Pa,abs)と真空(約10 Pa,abs)の間を1000回繰り返し、100回毎にヘリウムリーク試験を実施した。熱サイクル試験は、Fig. 10に示すような円形のシリコンラバーヒータをベリリウム板の上に置き、ベリリウムの中心温度で 30°C と 70°C の間を1000回繰り返し、100回毎にヘリウムリーク試験を実施した。いずれのケースもヘリウムリーク量の変動は観測されず 1×10^{-11} Pa \cdot m³/sec以下と十分な気密性能を得ることができた。以上の試験により、メタルシールを使った直接締結方式においても、十分な信頼性が得られていることがわかった。

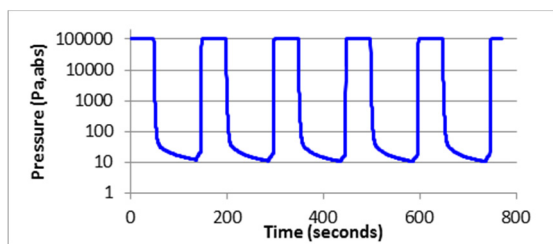


Figure 9: A part of a pressure trend graph for pressure-cycle test between vacuum around 10 Pa and atmospheric pressure.

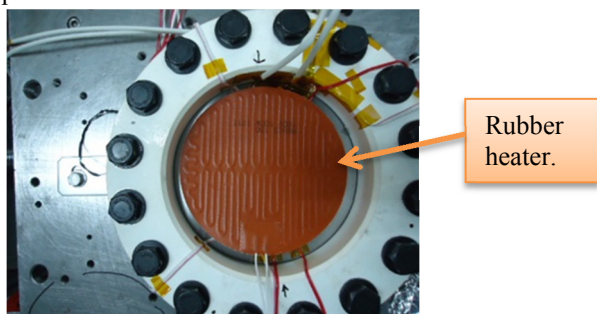


Figure 10: Photographs of a setup for a heat-cycle test.

4. ベリリウム破損時の対策

ベリリウムはビーム照射により放射化して窓中に放射性物質を蓄積することとなる。それに加えて、ベリリウムは毒性[8]があり特定化学物質第1類物質に該当するため、破損した場合の想定と対策が必要となる。万が一ベリリウムが破損した場合、破片は真空パイプ側へ引き込まれることとなる。破損時のベリリウムの粒径は数 μm 程度までの小さな破片までが発生すると予想している[8]。ハドロンビームラインの真空ポンプの吸込側にはHEPAフィル

タが付けられており、 $0.3 \mu\text{m}$ の粒径で99.97%以上の効率で捕集がされることとなる。その後段には活性炭フィルタが取り付けられている。さらに真空ポンプの排気は回収タンクで一旦すべて蓄積されており、ビーム運転中は密閉保持されている。従って、真空排気系から外部環境へのベリリウム破片の排出は極めて限定的で、その排気もタンク内で閉じ込められることとなる。しかしながら、ビームラインの真空ダクト中に残った破片は回収が困難である。真空中装置としてビームモニター、ピローシール、および一部の電磁石等があるが、ベリリウムの破損事象が発生した場合、各装置をメンテナンスで取り出す場合は、作業員については半面マスクの着用等の防護処置を行い、飛散防止のため作業エリアの区画等の処置が必要となる。

そのため万が一ベリリウムが破損した場合に備えて、真空側への破片飛散を抑止するための隔壁構造の開発を進めている。これにはベリリウムと同等のビームに対する強度や、飛散してくるベリリウム破片を止める強度が必要となる。現在、炭素繊維シートまたはカーボン-カーボンコンポジットなどを中心に設計および基礎的な試験を進めている段階である。

5. まとめ

ハドロン実験施設において約90 kWに対応した2次粒子生成標的の準備を進めている。それに合わせて標的を格納する標的容器の中で最もシビアな条件となるビーム窓についての設計を実施し、金属ベリリウムを採用した設計で適切な安全係数が得られることがわかった。また、新たにメタルシールによる直接締結方式の設計および実証試験を実施し、標的容器へ適用可能であることを確認した。今後は、より安全性を高めるために、ベリリウム飛散防止隔壁などの開発を推進していく計画である。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 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).
- [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(2)", 第15回日本加速器学会, THP038, (2018).
- [4] R. Muto, H. Watanabe *et al.*, "Monitoring System for the Gold Target by Radiation Detectors in Hadron Experimental Facility at J-PARC", 13th Int'l Conf. on Radiation Shielding, EPJ Web of Conferences 153, 07004.
- [5] Materion Corporation; <https://materion.com/>
- [6] F.Scaffidi-Argentina *et al.*, *Fusion Engineering and Design* 51-52 (2000) 23-41.
- [7] T.A.Sisneros *et al.*, *Material Science and Engineering A527* (2010) 5181.
- [8] IPCS, "Beryllium and Beryllium Compounds (2001)", Concise International Chemical Assessment Document No.32.