

ハドロン実験施設における回転円盤型2次粒子生成標的の開発

DEVELOPMENT OF A ROTATING-DISK-TYPE PRODUCTION TARGET AT J-PARC HADRON EXPERIMENTAL FACILITY

渡邊丈晃^{#,A)}, 青木和也^{A)}, 上利恵三^{A)}, 秋山裕信^{A)}, 家入正治^{A)}, 倉崎るり^{A)}, 里嘉典^{A)}, 澤田真也^{A)},
 高橋俊行^{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)},
 山我拓巳^{A)}, 山野井豊^{A)}

Hiroaki Watanabe^{#,A)}, Kazuya Aoki^{A)}, Keizo Agari^{A)}, Hironobu Akiyama^{A)}, Masaharu Ieiri^{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)}, Fumimasa Muto^{A)}, Yuhei Morino^{A)}, Takumi Yamaga^{A)},
 Yutaka Yamanoi^{A)}

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

Abstract

Developing a new production target for secondary particles at the J-PARC Hadron Experimental Facility is in progress. The new target is planned to be a rotating disk type with a diameter of 346 mm and a thickness of 66 mm. The weight of the disk including a shaft is about 42 kg for the current design. To support the disk rotation, radiation-hard ball bearing is difficult to apply because the bearing life is not long enough for this weight. Thus, a gas-lubricated bearing, which has no life limitation and is capable of rotating at a higher speed than the ball bearing, is now under development. This paper presents the design of the new target and the evaluation results of the rotation system with the gas-lubricated bearing.

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バラエティーに富んだ原子核・素粒子実験[1]が実施されている (Fig. 1)。現行の標的は純金製で、金が銅ブロックに接合された固定型となっており、冷却は銅ブロックに冷却水配管を接合して銅経由で冷却する間接冷却方式である。現行標的は、4.24 秒サイクルで最大約 115 kW の 1 次陽子ビーム強度まで対応している[2-3]。この標的は、2020 年から運用しており 2024 年 4 月に 82 kW (4.24

秒サイクル)での安定したビーム運転を達成している。

現行の固定型標的の場合、ビームによる熱負荷が一定の場所となるのが冷却の限界を決めており、4.24 秒サイクル時で 115 kW を超えるビームを受けることが困難である。そこで、熱負荷を円周方向に分散させることのできる回転円盤型標的の開発を進めている[4-6]。目標とするビーム強度は 150 kW 以上としている。特に固定型標的になかった要素として、標的近傍で長期間使用可能な回転システムの開発を進めており、前報[6]にある気体軸受についてさらに改良を施し、実機サイズのダミー円盤を適用した全体の回転システムの試験を実施した。本発表では、気体軸受を使用した回転システムの評価結果を中心に報告を行うものである。

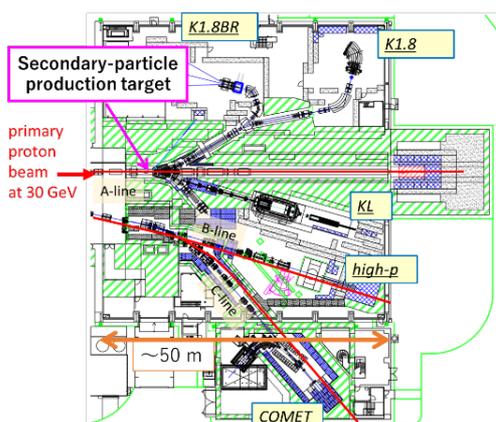


Figure 1: Plan view of the Hadron Experimental Facility at J-PARC.

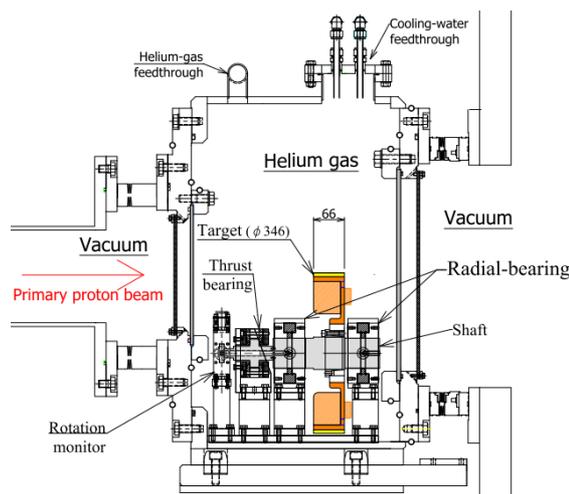


Figure 2: Cross-sectional view of the rotating target system.

[#] nabe@post.kek.jp

2. 回転円盤型標的の諸元

回転円盤型標的についての現時点のベース案を Fig. 2 に示す。標的本体となる円盤は外径 346 mm、厚さは現行の固定標的と同じ 66 mm である。円盤は、なるべく大型のほうが発熱を分散でき、かつ表面積を増やして冷却能力を上げることが可能となる。外径 346 mm は標的容器の内寸から許容できる最大値として設定されたものである。このような円盤大型化のデメリットは、円盤重量が増えることである。その影響で軸受設計が難しくなり、今回の気体軸受の開発へと繋がっている。Figure 2 は、気体軸受を採用した構成案を示している。

円盤本体について、陽子ビームが照射される外周部(標的部分)の素材は、現行の固定型標的と同じ金とするか、または同様に密度が大きく熱伝導率の高いプラチナまたはタングステン系素材が選択肢となる。現時点では素材は決定していないが、今後、有限要素法により最大ビーム強度を計算すると共に、製作コスト等も勘案した上でさらに検討を進める計画である。円盤内周側は、ビームが照射され高温となる外周部からの伝熱を受けて熱交換(冷却)する部分となる。そのため、熱伝導率が高く外周部素材と線膨張係数の近い素材が良い。外周部を金またはプラチナとする場合は、現行の固定型標的で実績のある組み合わせである無酸素銅を候補としている(Fig. 3 左図)。外周部を純タングステンとする場合は、その線膨張係数(4.5E-6[K])に近いもので、かつ熱伝導率の高い他種金属の選択肢がないため、外周も内周もすべてタングステンで構成する方式を検討しており、製作試験を進めている(Fig. 3 右図)。

円盤の冷却方法は、ヘリウムガス吹き付けによる直接冷却方式をベース案としている。現行の標的においては、標的健全性監視の目的で標的を収めた標的容器内でヘリウムガスを循環させるシステム[7]を運用しており、ヘリウムガスの利用が容易であること、気体としては熱伝導率が高いこと、化学的に不活性であること、水と比べて生成される放射性物質が少ないなどの理由から採用したものである。これに合わせて気体軸受の作動流体もヘリウムガスとしている。また、円盤の冷却能力を向上させるために、円盤内周側にはフィン加工をすることをベース案としている。Figure 3 に、フィン加工を施した実証モデルの写真を示している。後述する回転試験時において重量構成を模擬する目的で、Fig. 3(左図)の外周部は金の代わりにタングステン合金で、内周部は無酸素銅で構成されている。

上記で示したベース案で、外周が金、内周が無酸素銅で構成された円盤とすると、シャフトと円盤を合わせた重量は約 42 kg となる。従って、ラジアル方向の荷重をうける軸受1個あたりは約 21 kg の負荷となる。前報[6]において、21 kg を受けることのできる気体軸受の設計および試験結果について報告を行った。次に、純タングステンで円盤をすべて構成した場合は、なるべく重量を減らすよう減肉したとしてもシャフト込みで重量が約 49 kg となる。軸受1個あたりは約 25 kg の負荷となる。そこで、どちらの円盤でも対応できるよう、次節に記述するよう気体軸受の改良を行った。

回転速度については、別途実施している冷却能力の評価[4,5]より、円盤の定格速度として 500 rpm と設定し

た。なお、標的容器で使用実績のある固体潤滑材を使用した耐放射線型ボールベアリングの場合、仕様上の最高速度が 330 rpm、寿命は 1 年未満となり、要請(500 rpm, 5 年以上)を満たせない予想である。

最後に、円盤を回転させるための動力としては、気体軸受に使用するヘリウムガスの一部を直接円盤のフィンへ吹き付けことにより回転させる、いわゆる風車方式をベース案としている。これにより、回転動力としてモータは不要となり、また放射線レベルの高い気密容器の境界に回転導入フィードスルーが不要となって、全体としてよりロバストな構成になると考えている。



Figure 3: Photographs of prototypes for the rotating-disk-type target. The left photograph shows the Gold-Copper disk model (note: the outside ring is made of heavy metal as a dummy weight). The right photograph shows a trial production made of pure tungsten.

3. 気体軸受の改良

気体軸受は、気体を潤滑剤とした滑り軸受の一種であり、シャフトと軸受の間に高圧の気体があり、その気体がシャフトを支えることで軸受と接触しない仕組みである。特に、潤滑剤(=気体)が常に流動しており放射線で劣化しないため標的近傍などの強烈な放射線場に適しており、定常運転では寿命がないと想定される。ただし、圧縮性流体(気体)で支えているため、油軸受と比較して剛性がやや低い、すなわちシャフトが外乱等の負荷で動きやすく、減衰性もやや低いことが問題となるケースが想定される。特に、回転中に軸受とシャフトが接触してしまうと焼き付いて復帰できない可能性がある。そのため後述の試験で問題となるか実証することとした。また、1 μm レベルのきわめて高い加工精度が要求される点も気体軸受のデメリットといえる。

気体軸受には、いくつかの様式があるが、ここでは円盤が 42~49 kg と比較的軽く、また回転速度は 500 rpm 程度と気体軸受としては比較的低速であることから、外部から高圧の気体を供給する“静圧型”を採用した。静圧型は、外部からの高圧気体を“絞り”を通して、軸受とシャフトの隙間へ供給している。絞りがないと、軸受とシャフトの隙間が大きい場所から気体の多くが流出してしまい、本来、圧力を維持したい隙間の小さいエリアの圧力が低下することとなり支持が安定しない。“絞り”により、流体が適正な圧力をもって隙間へ流出し、軸受としての荷重負荷能力(以下、負荷容量、図中 load capacity と表記)、および剛性(変位に対する抵抗力)が発生することとなる。回転円盤のラジアル軸受としては、高い負荷容量が期待できる 2 列給気型長方形スロット絞りを採用した。負荷

容量および剛性の計算は前報にある式にて実施した [6,8]。負荷容量は、高压ガスが接する軸受面積に比例する。そこで軸受1個あたりの負荷容量をあげるため、シャフト直径を 65 mm から 70 mm へ変更することとした。合わせて絞りサイズの最適化を行い、スロット高さを 9.5 μm から 10.4 μm へ変更を行った。Figure 4 に改良した気体軸受の負荷容量の計算値および測定結果を示す。測定は 0.5 MPa(G) の He ガスを供給して実施したものである。図中点線(requirement)は要求値で、(想定負荷) \times (安全率 1.3)を示している。結果として、軸受とシャフトの隙間設定としては 30 μm 以下に設定すれば純タングステン製円盤においても十分な負荷容量が得られることがわかった。そこに製作精度を勘案して、軸受隙間は 28 μm と設定した。前回製作のシャフト直径 65 mm、絞り 9.5 μm では軸受隙間 28 μm の場合は 28 kgf の負荷容量(計算値)であったが、これがシャフト直径 70 mm では 43 kg(計算値)となる。実測値は 41 (± 1) kgf であり、ほぼ計算と合っている。剛性は、軸受隙間 28 μm で計算値 3.8 kgf/ μm に対し、実測値 1.7 kgf/ μm と前報[6]と同様に低い傾向であった。この剛性の低さが問題となるかは、後述する地震想定振動試験で検証することとした。なお、スラスト方向(=シャフトと平行な方向)は、想定負荷が 5 kgf 以下と低いため、製作が容易な自成一絞りの気体軸受を採用し、 $\phi 0.3$ mm 程度の孔を 8 個とした。スラスト側のシャフト面と接する部分は焼き付き抑止のため金属含侵カーボンとしている。含侵する金属は銅およびアンチモンの両方を試験しており、どちらも焼き付きが発生しないことを確認している。

4. 回転システムの全体試験

次に、改良した気体軸受を使って、Fig. 3 (左図) に示す模擬円盤を回転システムへ組み込み、動バランス調整を実施した(Fig. 5)。円盤には、あらかじめ下流側フィン(銅部分)に M5 タップ孔を施工してあり、ここにタングステン合金製ウエイトを入れて六角穴付き止めネジで固定することでバランス調整を実施した。バランス測定は、シグマ電子工業製 フィールドバランサ SB-8806 を使用した。これは軸受部にて回転同期振動を測定することで、偏芯量(円盤重心と回転中心の差)を測定する装置である。バランス調整結果を Fig. 6 に示す。赤色の点線

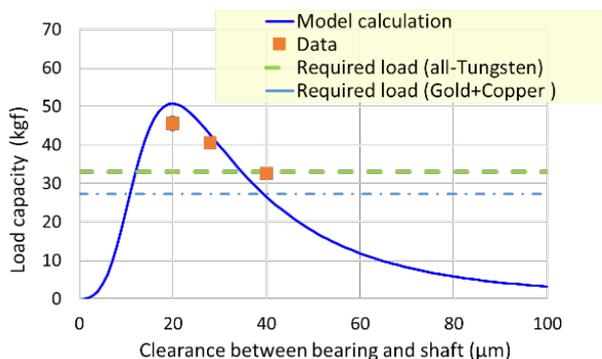


Figure 4: Results of the load capacity for the modified radial He-gas-lubricate bearing at 0.5 MPa(G).

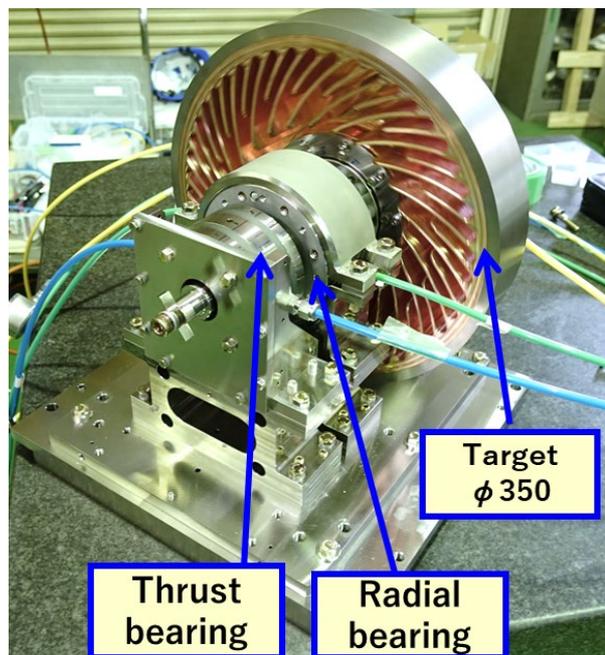


Figure 5: Photograph of the rotation system with the dummy disk during dynamic balance adjustment.

(2 μm)が要求レベルを示しており、運転中の軸受隙間として 30%偏芯状態の隙間 20 μm を想定して、その 1/10 として設定したものである。図中青丸がバランス調整前の測定で、石定盤(Fig. 5 写真の架台)に固定して測定したデータである。445 rpm に縦の点線で示している軸受の第一共振点(円筒モード)の共振を拾っており、偏芯量が危険域(>10 μm)に達している。図中緑四角もバランス調整前であるが、高剛性の鉄定盤に固定して測定したものであり、これだけで偏芯量が一桁改善された。ここから、固定する架台との相性も重要であることがわかった。この時点(バランス調整前)で、定格速度 500 rpm で要求レベル(2 μm 以下)はクリアしていたが、バランスはなるべく取れていた方が安全なため、鉄定盤にて調整を続けた。具体的には、定格速度 500 rpm にてフィールドバランサによる測定を実施し、指示値に近いウエイトを追加するサイクルを3回実施したところで、準備した最小ウエイト未達の指示値となり、図に示すとおり偏芯量が

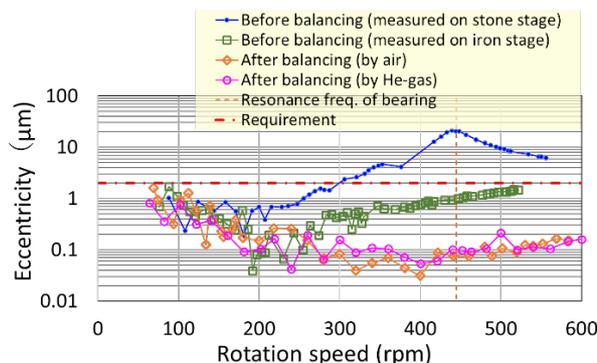


Figure 6: Results of balancing for the dummy disk.

0.2 μm 以下と十分小さくなった。また、気体軸受への給気を空気(図中橙色菱形)と He ガス(図中桃色丸印)の両方で測定を実施したが、偏芯の傾向に差が無いことが確かめられた。偏芯調整後、最高速度としては 700 rpm まで問題無く回転できることを確認している。

次に、Fig. 7 に示すように風車方式による回転実証試験を実施した。これは圧縮ガスを円盤下流フィン外周の接線方向へ吹き付けることで回転動力とするものである。制約は、He ガスコンプレッサの想定能力から 150 liter/min. 程度に流量を抑える必要がある。吹き付け部は、流速を上げるためにラバール型ノズルにして、吹出口で音速を超えるよう設計している。ノズルの絞り径を変えて試験した結果を Table 1 に示す。この結果からノズル絞り径 1.5 mm とすれば流量 122 liter/min. 程度で、定格速度 500 rpm 以上を達成できることがわかった。

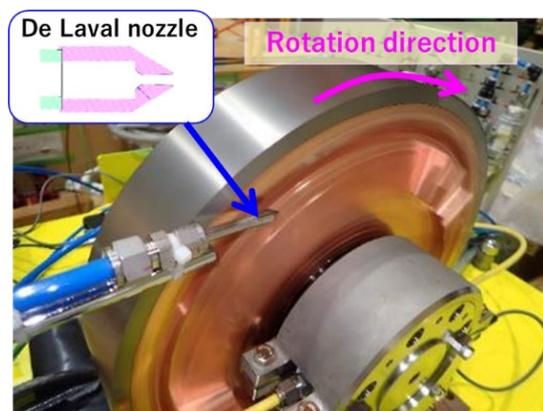


Figure 7: Photograph of the rotation test by the wind turbine method.

Table 1: Results of Rotation Test by the Wind-Turbine Method

Restriction diameter of the nozzle	Maximum rotation speed (rpm)	Flow rate (liter/min.)
0.5 mm	225	20
1.0 mm	421	65
1.5 mm	542	122
No nozzle (1/4" tube-end)	~100	N/A

5. Robustness 評価

標的の軸受として気体軸受を選定したのは、玉軸受と比較して、標的の近傍の強烈な放射線場においても長寿命であること、および高速回転が可能であること、の 2 点が主な理由である。しかし、運転中に地震や停電といった異常事態が発生し、そこで故障してしまうと寿命の観点で適用が難しくなる。前述したよう気体軸受は、剛性がやや低く、またシャフトが軸受に接触すると焼き付きを起こして回復できない恐れがある。また前述のとおり設計値よりも軸受の剛性がやや低いことがわかっている。そこで、

まず地震想定の変動試験を実施し、次に、停電等を想定したハードランディング試験を実施した。

5.1 地震想定の変動試験

地震想定の変動試験のために、1 軸の大型振動試験機 IMV 社 EM2605S を使用した。1 軸試験機のため、水平方向の振動として 3 パターン(シャフトに並行な方向、シャフトと 45 度傾いた方向、シャフトと 90 度方向)および鉛直(上下)向きの合計 4 つの向きで振動試験を実施した。試験で使用した振動波形は、2011 年の震度 6 強の地震における観測データ[9]を元に振動試験機で再現できる波形に補正して使用した。加速度(指令値)としては、水平方向は最大 725 gal、鉛直向きは最大 478 gal である。振動試験機の特徴として最初から 100% では加振できないため、設定出力の 40%、80%、100% (鉛直向きは 50%、80%、100%) と 3 セットずつ試験をすることとなる。この内、40% (鉛直は 50%) が震度 5 強に相当する。回転試験としては、定常運転想定で 500 rpm の回転動作中に、加振を加えて回転運動を継続するかを確認するものである。また、停止時想定として、無回転・給気あり、無回転・給気無しでも振動を与えて、その後、問題なく定格速度での回転動作ができるか確認を実施した。さらに、気体軸受への加圧ガス給気は、乾燥空気および He ガスの 2 パターンを実施した。Figure 8 に、水平 45 度方向の試験時の写真を示す。

結果は、すべての条件において回転動作に異常(異音や停止等)は発生しなかった。以上の試験結果より、気体軸受を採用した回転システムは震度 6 強の地震を想定した振動に対しては問題ないことが確認された。

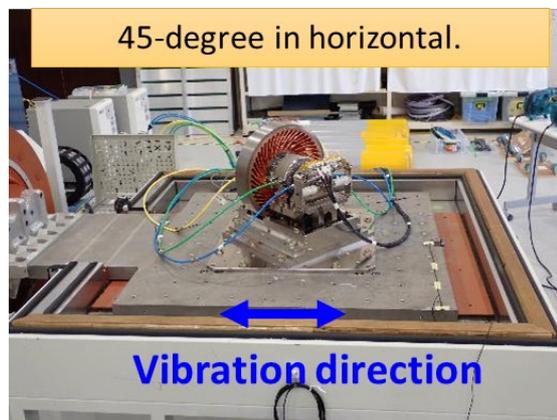


Figure 8: Photograph of the vibration test assuming a big earthquake for the rotation system.

5.2 ハードランディング試験と対策

回転動作中に、停電またはコンプレッサ故障等が発生すると、気体軸受への給気が停止し、高速回転したまま軸受に着地する(ハードランディング)することとなる。これは静圧型気体軸受としては最もシビアな状況の一つと考えられる。

システム全体の設計としては、停電時は無停電電源でコンプレッサを維持して、回転停止まで圧空を維持する設計であり、またコンプレッサは 3~4 ユニットの並列運転のため、仮に 1 ユニットが故障しても問題無い設計として

いる。しかし、想定外の事態、たとえば配管の破断等が起る可能性は否定できない。停電や故障の頻度から、標的運用中に最大で 10 回のハードランディングに耐えれば十分と考えられる。そこから安全率 2 を乗じて、20 回以上耐えれば合格と設定した。

試験の前に、シャフトの改良を行った。シャフトはビーム熱負荷による膨張を抑制するため低膨張金属であるスーパーインバーで製作しているが、比較的柔らかく焼き付きが起き易いと考えられる。そこでハードランディング時の焼き付き対策として、寸法精度を維持可能で、耐摩耗性に優れ、摩擦係数が低く、低温(60°C)で施工可能な硬質炭化クロムメッキをラジアル軸受面に施した。

シャフトの改良後、ハードランディング試験を実施した。試験は、まず回転速度 20 rpm の状態で圧空給気を停止し、回転したまま着地(ハードランディング)させて停止するまで待ち、その後、圧空を復帰させて浮上することを確認する。次のステップとして回転速度 40 rpm として、同様に実施する、といった手順で徐々に速度を上げていき、定格速度 500 rpm を超える 600 rpm まで実施する方針とした。

結果として、ラジアル軸受の素材として当初採用のステンレス(SUS630・熱処理あり)を使用した場合、80 rpm でやや大きな異音が発生し始めた。100 rpm の試験後までは圧空復帰で浮上したが、120 rpm での試験中に焼き付きを起こし、シャフトがラジアル軸受に食い込んで回復できなかった。

そこで、軸受素材を変更することにした。ここでは、高荷重軸受で耐焼き付き性の良い素材として適用されて

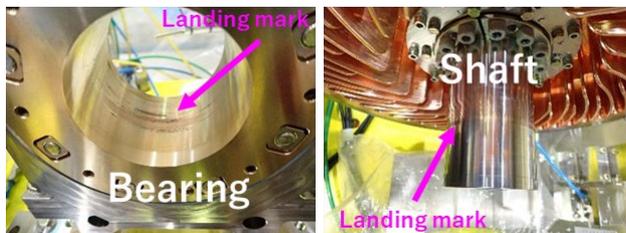


Figure 9: The top figure shows the stopping time from 500 rpm after the gas-valve close in the hard-landing cycle test. The bottom photographs show the bronze bearing and the shaft after 100 cycles of hard-landing tests. No serious damage is seen.

いる青銅 CAC603(Cu-80%, Sb-10%, Pb-10%)を使ってラジアル軸受を製作した。この素材は鉛が摺動成分として働き焼き付きを防止する効果がある。軸受寸法は SUS630 製軸受と同じである。完成後に、換装して円盤の偏芯量を測定し SUS630 と回転状況に差が無いことを確認した。

青銅製軸受でのハードランディング試験の結果は、20 rpm から 600 rpm まで焼き付き無しで停止状態に至り、軸受に圧空を戻すことでいずれも復帰(浮上)させることができた。さらに、定格速度 500 rpm での 100 回のハードランディング耐久試験を実施し、焼き付き無しという結果であった。耐久試験での回転停止にかかる時間および耐久試験後の写真を Fig. 9 に示す。目視では着地痕がみられるが寸法を確認したが問題となるような損傷(変形)はないことがわかった。これより、青銅 CAC603 を採用したラジアル軸受であれば十分なハードランディング耐久性があることが確認でき、実機に必要な性能を達成したと考えている。

6. Summary

ハドロン実験施設における1次陽子ビームの大強度化のため回転円盤型標的の開発を進めている。標的の回転システムとして特に難しい軸受については、寿命および回転速度の要請からヘリウムガスを作動流体とした気体軸受を選定し、回転システム全体の試験を進めている。ここでは、ラジアル軸受について改良を行い、必要な荷容量が得られていることを確認した。次に、実際に実機相当の円盤を組み合わせて円盤の動バランス調整を実施した後、風車駆動による試験を行い定格速度 500 rpm での回転できることを実証した。異常時の想定として、まず地震想定での振動試験を実施し、震度6強の地震相当の外乱では回転動作に支障が無いことを確認した。最後に、停電想定として、圧空断によるハードランディング試験を実施した。当初のステンレス製軸受では 120 rpm で焼き付きが発生したが、耐焼き付き性の良い青銅製軸受では 500 rpm のハードランディングでも問題なく復帰できることが実証された。以上から、回転システムは実機に必要な性能を達成できたと考えている。今後は、並行して試作を進めているオールタンクステン製円盤を使用した回転システムの実証試験を計画している。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22H00143、21K03609、24K07082 の助成を受けたものです。本研究で使用した地震データは、気象庁の強震観測データ web ページ[9]で公開されている茨城県による観測データを利用したものです。

参考文献

- [1] A list of experiments in the J-PARC Hadron Experimental Facility, <http://research.kek.jp/group/nuclpart/HDeppc/Exp/>
- [2] R. Kurasaki *et al.*, “大強度の遅い取り出し陽子ビームによる二次粒子生成用標的”, Journal of the Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 19, Issue 1, 2022, pp 225-232.
- [3] M. Saito *et al.*, “Indirectly cooled secondary-particle

- production target at J-PARC Hadron Experimental Facility”, *Phys. Rev. Accel. Beams* 25, 2022, 063001.
- [4] R. Kurasaki *et al.*, “J-PARC ハドロンビームライン用回転標的の開発”, *Proc. 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2016)*, Aug. 8-10, 2016, Chiba, Japan, pp. 949-953.
- [5] R. Kurasaki *et al.* “J-PARC ハドロンビームライン用回転標的の開発 (2)”, *Proc. 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2020)*, Sep. 2-4, 2020, Matsuyama (Online meeting), Japan, pp 402-406.
- [6] H. Watanabe *et al.* “ハドロン実験施設における回転円盤型2次粒子生成標的のための気体軸受の設計”, *Proc. 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022)*, Oct. 18-21, 2022, Kitakyushu (Online meeting), pp 427-431.
- [7] 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.
- [8] 十合普一他、“気体軸受技術”, 共立出版, ISBN 9784320081963, (2014).
- [9] 気象庁ホームページ-強度観測データ。本研究では茨城県が整備した震度計データを使用。
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/>