

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(2)

DEVELOPMENT OF A ROTATING-DISK-TYPE PRODUCTION TARGET AT J-PARC HADRON EXPERIMENTAL FACILITY (2)

渡辺丈晃^{#,A)}, 青木和也^{A)}, 上利恵三^{A)}, 秋山裕信^{A)}, 家入正治^{A)}, 伊多波辰徳^{A)}, 倉崎りり^{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)}, Tatsunori Itaba^{A)}, Ruri Kurasaki^{A)}, Yoshinori Sato^{A)}, Shinya 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 49 kg for the pure-tungsten disk design. To support disk rotation, a radiation-hard ball bearing is difficult to apply because the bearing life and the maximum rotation speed are insufficient. 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 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 2 次粒子を使ったバラエティーに富んだ原子核・素粒子実験が実施されている (Fig. 1) [1]。現行標的の材質は純金製で、金が銅ブロックに接合された固定型となっており、除熱は銅ブロックに冷却水配管を接合して銅経由で伝熱させ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 2025 年 4 月に 92 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[4-10]。目標とするビーム強度は 150 kW である。固定型標的でない開発要素が回転システムであり、標的近傍の放射線場でも長期間使用可能な回転システムの開発を進めている。特に、放射線で劣化がなく寿命もない気体軸受を採用している点が特徴的といえる。これまでに実機サイズの円盤を使用して回転システムの試験評価を実施してきた[6, 8, 10]。本論文では、ビーム運転想定的高温環境下での試験、および室温における長期間の連続回転試験について結果を報告する。

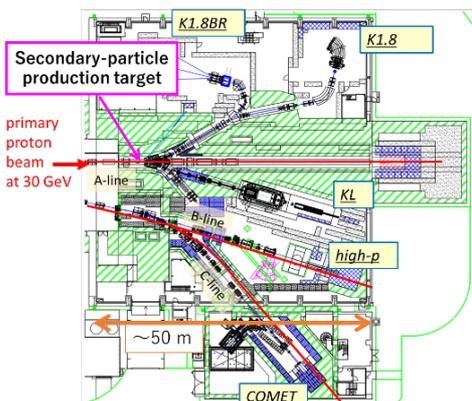


Figure 1: Plan view of the Hadron Experimental Facility at J-PARC.

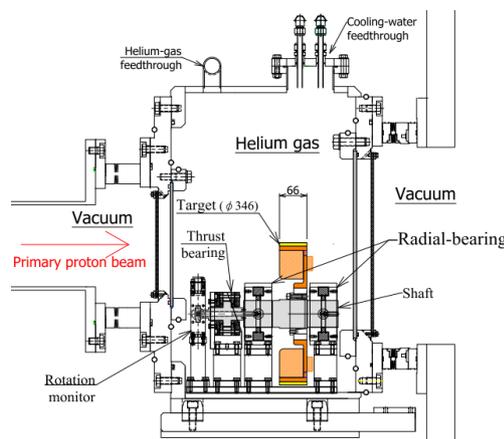


Figure 2: Cross-sectional view of the rotating-disk-type target.

[#] nabe@post.kek.jp

2. 回転円盤型標的の設計と試験状況

回転円盤型標的についての現時点のベース案(側面図)をFig. 2に示す。標的本体となる円盤は外径346 mm、ビーム方向厚さは現行の固定標的と同じ66 mmである。ビームは円盤の外周部へ照射する設計である。円盤としては、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容易となる。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、前報[6, 8]にある気体軸受の開発へつながったものである。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比較的熱伝導率の高いプラチナまたはタングステン系素材が候補となる。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候補を絞る計画である。円盤内周側は、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(4.5×10^{-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とする構造を検討している。ただしタングステンは難切削材のため通常の加工手法による試作(Fig. 3右図)に加えて、積層造形法による試作および評価も進めている [7-10]。

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、標的容器内に封入したヘリウムガスを循環させるシステム[11, 12]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、化学的に安定(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。Figure 3(左写真)は外周部を金の代わりにタングステン合金として、重量を再現するため外径350 mmとしており、その内周部は無酸素銅で、円盤重量はシャフト込みで約42 kgである。Figure 3(右写真)はすべて純タングステンで試作した実機サイズ円盤であり、軽量化のためフィン構造を変更したもので、それでも重量はシャフト込みで約49 kgとなる。後述する試験ではこの純タングステン円盤を使用した。

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, 10]より、円盤の定格速度として500 rpmと設定

した。標的容器で使用実績のある固体無機潤滑剤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)を満たしていない。そこで前報までにあるよう気体軸受の開発を実施した[6, 8]。気体軸受は、気体(ここではHeガス)を潤滑剤とした滑り軸受の一種であり、シャフトと軸受の隙間(通常10-40 μm程度)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の強烈な放射線場に適しており、定常運転では総回転数の制限(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低く、シャフトが外乱等の負荷で動きやすく、減衰性も低いことが問題となるケースがある。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きが発生して復帰できない可能性がある。気体軸受の場合、荷重負荷能力(負荷容量)と円盤重量(重力)と回転遠心力(重心と回転芯がずれていることによる振れ回り遠心力)の3つのつり合いでシャフト位置の平均偏芯位置が決まる。回転速度が増すと遠心力も増して、シャフトの偏芯量が増えて軸受面に近づいていき、ある回転速度で接触することとなるが、そこが回転速度の限界値となる。今回開発した気体軸受については、計算上は2500 rpm程度が上限と見積もっている。ここで、前述の気体軸受の焼き付き問題は、一旦ビーム運転を開始すると修理ができない標的としては致命的な欠陥となる。そこで前報にある通り、定格500 rpmで回転中に軸受への供給ガスをとめてシャフトを軸受にハードランディングさせる試験を実施し、焼き付きを起こさずに回転復帰可能な軸受材質(青銅 CAC603)へ変更を行う対策を施した[8]。

円盤を回転させるための動力としては、圧縮したヘリウムガスの一部を直接円盤のフィンへ吹き付ける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。前報にてラバールノズルをつかったガス吹き出しにより定格回転速度500 rpmに到達することを実証している[8]。

気体軸受に圧縮ガスを供給すると、円盤(シャフト)は浮上するため電気的には絶縁される。これに陽子ビーム

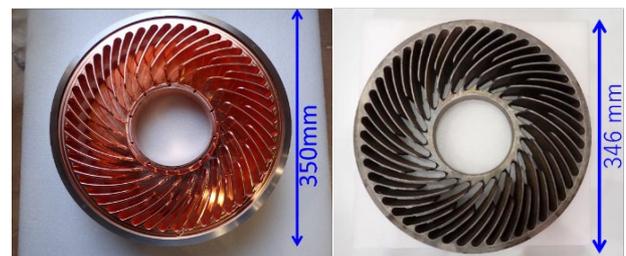


Figure 3: Photographs of prototypes for the rotating-disk-type target. The left photograph shows the Gold-Copper disk model (note: the outside ring is made of tungsten alloy as a dummy weight). The right photograph shows a trial production made of pure tungsten [10].

を照射すると浮上している円盤が帯電する可能性がある。そこで、軸受側にステンレス製の除電ブラシ($\phi 12 \mu\text{m}$ のワイヤーを束ねたブラシ構造)を固定して、ワイヤー部分をシャフトに接触させて電氣的に接続することとした。後述する長期試験では除電ブラシを付けた状態で試験を実施し、その耐久性の確認も行った。

3. 高温環境での動作試験

実際のビーム運転時は、ビーム熱負荷により冷却を行っている標的容器内でも温度上昇があり、現行標的における容器内の温度データから、ビーム強度比で換算すると 150 kW ビーム運転時に軸受は $\Delta T: 34 \text{ K}$ 程度の温度上昇が見込まれている。温度上昇によりシャフトや軸受は熱膨張が発生し、軸受とシャフトの間の隙間が変化する。気体軸受の負荷容量は特に軸受隙間によって大きく変わるため慎重に評価を行う必要がある。標的用に開発した軸受では軸受隙間は室温で $25\text{--}28 \mu\text{m}$ と設定しており、実際に試験で使用した軸受は実測で $25 \mu\text{m}$ である。シャフト材質は、一般的な気体軸受での実績から線膨張係数が $1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ と極めて小さいスーパーインバー相当の材質を使用している。軸受本体は、前報[7]にある通りハードランディングでの焼き付き防止の目的でステンレス(SU630)から青銅(CAC603)に変更を行った。ただし、CAC603については、信頼できる線膨張係数のデータが得られなかったため、実機の軸受メタルを使用して $-14^\circ\text{C} \sim +75^\circ\text{C}$ の範囲で内径と外径の測定を 3 次元測定器 (Keyence XM-1200) で行った。Figure 4 に測定データを示す。ここから以下の検討では CAC603 の線膨張係数として安全側として $17.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ を採用した。

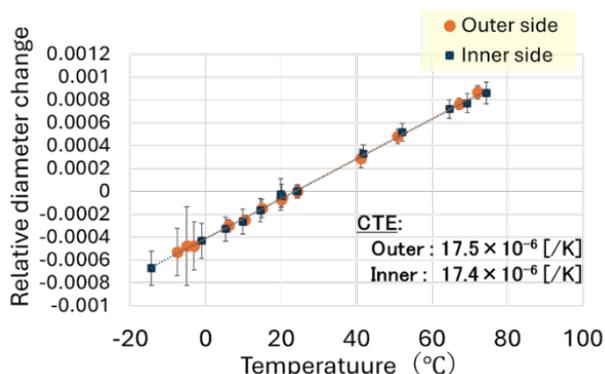


Figure 4: Data for the coefficient of thermal expansion (CTE) of the CAC603 bearing metal.

温度上昇として想定される $\Delta T: 34 \text{ K}$ に対し、安全側として $\Delta T: 40 \text{ K}$ として、軸受性能(負荷容量)の検討を行った。上記で得られた CAC603 の線膨張係数を使用して計算すると、Fig. 5 のような推定結果となる。図中のデータ(四角点)は軸受単体の負荷容量の実測値[7]である。室温で軸受隙間は $25 \mu\text{m}$ (青の一点鎖線)であるが、これが温度上昇($\Delta T: 40 \text{ K}$)により約 $50 \mu\text{m}$ (赤の一点鎖線)に変わること示している。実際にかかる荷重(24.5 kgf)を横線で示しており、仮にデータを直線で $50 \mu\text{m}$ まで外挿すると軸受の負荷容量は、円盤を浮上させることができるギリギリのレベルまで低下することを示しており、高温

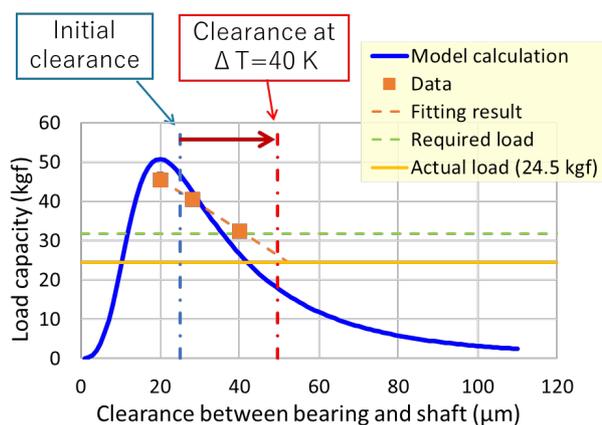


Figure 5: Load capacity of the radial He-gas-lubricated bearing at 0.5 MPa(G) [7].

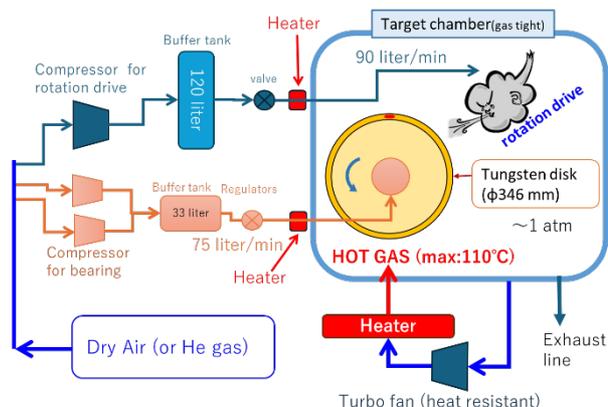


Figure 6: Schematic drawing of the rotation test in the high-temperature environment.

環境下では円盤を支えられない可能性がある。そこで、以下のように高温環境下で回転試験を実施することとした。

本試験では、最後の試験を除き軸受・風車用のガスとして乾燥空気を使用した。円盤は純タングステン製の模擬円盤(シャフト込み 49 kg)を使用し、気密容器内に設置した。その容器中ガスを吸って 1200 W のヒータで加熱したホットガスを容器に戻して平均温度を上げると共に、軸受や風車へのガス供給ラインもヒータで加熱して供給ガス自体も昇温させた(Fig. 6)。温度は、軸受表面に K 型熱電対を貼り付けて測定をした。温度条件として、軸受表面で 70°C ($\Delta T: 40 \text{ K}$ 以上)と 80°C ($\Delta T: 50 \text{ K}$ 以上)の 2 ケースを実施した。Figure 7 に 80°C 試験についての結果を示す。実際の運転状況を模擬して、回転している状態で温度を上昇させている。特に 80°C では上記検討から気体軸受の負荷容量が低下して円盤が浮上できなくなり、回転中にシャフトが軸受に衝突するハードランディング事象が発生する可能性が高いと想定していたが、試験の結果として回転動作に特に異常は起こらなかった。また、高温環境下での回転の起動・停止テスト(非定常回転試験)を行ったが、これも特に問題がなかった。最後に軸受への供給ガスとしてヘリウムガスを使用して起動したが問題なく規定速度(500 rpm)まで到達した。

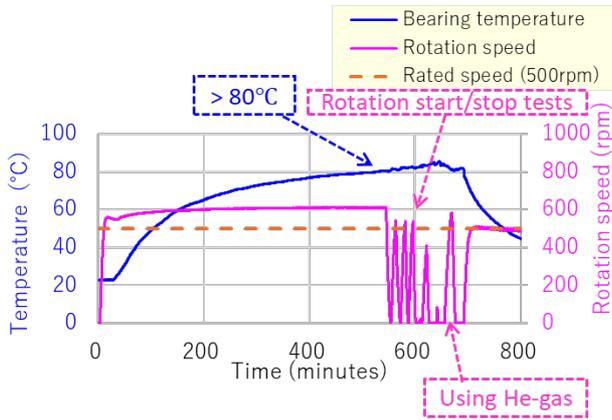


Figure 7: Results of the rotation test with temperature greater than 80°C. The latter part shows rotation start-stop tests, in which the last start-stop test was conducted with He-gas to the bearings. The dashed orange line shows the rated rotation speed (500 rpm).

上記の通り、 $\Delta T: 50\text{ K}$ までの高温環境での回転試験では問題が発生しなかったが、軸受の負荷容量としては安全率がほとんど残っていない可能性が高い。そのため実機では水冷ジャケットを軸受に適用するなどして、温度上昇を抑制する計画である。併せて試験機のシャフトは熱膨張の少ない材質としたが、実機では軸受の熱膨張率に近い材質への変更を検討している。さらに、標的容器中のヘリウムガスを直接冷却することを目的に熱音響冷却器の開発に着手した。現状は熱音響エンジンの基礎的試験を実施している段階であるが、仮に標的へ適用できるとなった場合は、大きな冷却効果が得られる可能性があるかと期待している。

4. 長期連続試験

実機と同じ状況を想定して、ガスの密閉循環システムを構築し、室温にて長期連続回転試験を実施した。本試験は、気体軸受を使用した回転機構の長期的な安定性(信頼性)を確認することが目的である。試験セットアップを Fig. 8 および Fig. 9 に示す。模擬円盤には、前節と同じ純タングステン円盤を使用した(Fig. 9 下写真)。コンプレッサは、密閉循環に対応した比較的気密性の良いタイプで、アネスト岩田社製 2 段式コンプレッサ EFBS07B95S5 (標準吐出流量 200 liter/min、吐出圧力 0.8-0.95 MPa)を風車系統に適用し、その改良型である EFBS07B95S5B (標準吐出流量 63 liter/min、吐出圧力 0.8-0.95 MPa、メンテナンスサイクル 5800 時間) 2 台を並列接続して軸受系統に適用した。どちらも吸い込みは大気圧に対応しており、冷却は空冷式で、乾燥空気およびヘリウムガスの両方に対応している。吐出側にはCKD社製クリーンフィルタ(ろ過精度 0.01 μm 、除去効率 99.99%)を取り付けて気体軸受や風車ノズルの目詰まりが起きないようにした。ただし、ここで使用したコンプレッサは完全な気密タイプではなく、主に加圧部(ピストン部)で一定量の外部へのリークがあるため、長期試験の際は、定期的にガス補充が必要であった。また、軸受系統のコンプ

レッサは停電に備えてクズミ電子工業社製の無停電電源(UPS) KE-0520II/L を経由にて電力を供給した。ガスループの流れとしては、コンプレッサからの吐出ガスが標的容器内で風車ノズルと気体軸受から吹き出す。標的容器はほぼ大気圧(若干負圧)となるよう全体のガス量を調整した。標的容器からは高気密真空ポンプ(アネスト岩田社製 ISP-500C-TVS31)で吸い込み、リターンのがスタックへ戻し、再びコンプレッサ 1 段目が吸い込むという流れとなっている。また真空ポンプ停止時に標的容器が一定以上加圧されないよう逆止弁付きのバイパスラインを備えている。標的容器自体にも加圧防止のため、安全

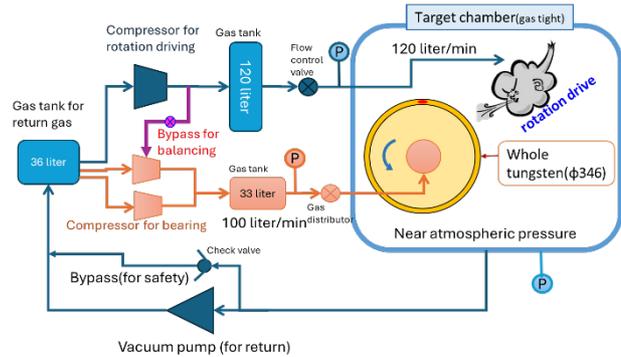


Figure 8: Schematic drawing of the closed gas loop for the long-term rotation test.

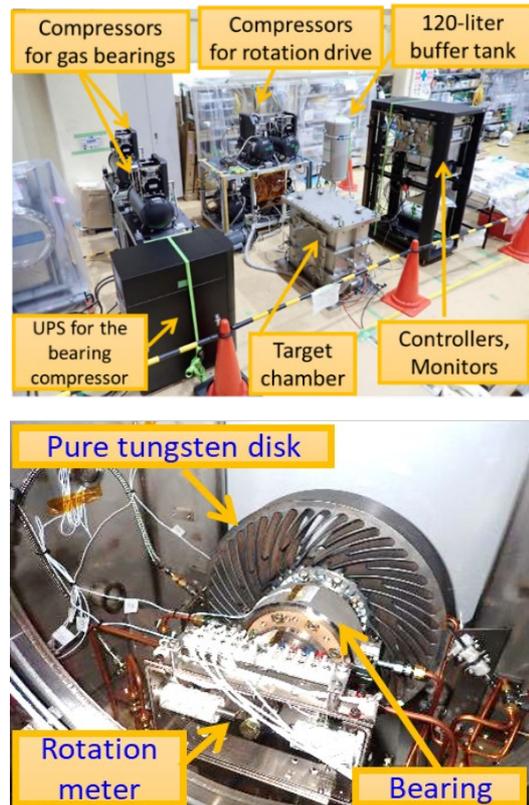


Figure 9: Photographs of the experimental setup for the long-term rotation test. The bottom shows the setup in the target chamber.

弁を取り付けている。ループ全体で必要となるガス量としては運転圧力にて約 3.2 m³ である。制御としては、異常時に備え、停電信号、UPS 異常信号、および軸受系統の圧力低下信号のいずれかを検知した場合は、緊急回転停止シーケンスが自動で働くように設定した。また、事前のテストにより、風車系統のコンプレッサが停電または故障で停止したとしてガス供給部直前にあるバッファータンク(120 liter)の残圧のみで回転停止に至ることを確認している。データは、回転速度の他に、温度や圧力および一部流量データをデータロガーで記録した。

試験は、乾燥空気 で 10 日連続試験を 2 セット行い、その後ヘリウムガスに置換して 31 日間、累計で 1245 時間の連続回転試験を実施した。ヘリウムガスによる試験期間中は He ガス純度として 100%(+0-3%)を維持していた。なお、試験場所は空調がない屋内のため、温度は成り行きで、試験時の環境温度は 18~31℃の範囲であった。Figure 10 にヘリウムガスによる 31 日間連続試験時の代表的なデータを示す。今回は試験期間を通じて定格速度 500 rpm を大きく超える 800-900 rpm での回転速度にて試験を行った。前述したとおり、高速回転のほうが気体軸受としては偏芯量が増えるためより過酷な条件と考えられる。ガス流量は、風車系統で 120 liter/min 程度、軸受け系統で 130 liter/min 程度であった。試験結果として、期間を通じて回転システムに問題は発生しなかった。前述したとおり今回は気密型のコンプレッサではなく一定のリークがあるため、合計 4 回の He ガス補充を行った。長期試験に際しては、軸受への供給圧力がゲージ圧で 650 kPa を下回らないようにすることが回転の維持を図る上で最も重要と考えられる。長期試験によってわかったことの1つとして、コンプレッサは風車系統と軸受系統と 2 系統が並列となっているが、リターンタンクからの吸い込み流量が 2 系統間で同一とならないため、長時間連続で運転をすると各系統へのガス量の分配率が変動する。今回のセットアップでは風車系統の吸い込み流量が、軸受系統よりも若干多かったため、軸受系統の圧力が徐々に低下し、何もしないと 650 kPa を下回る状態となる。逆に風車系統の圧力は徐々に上がり、回転速度がゆるや

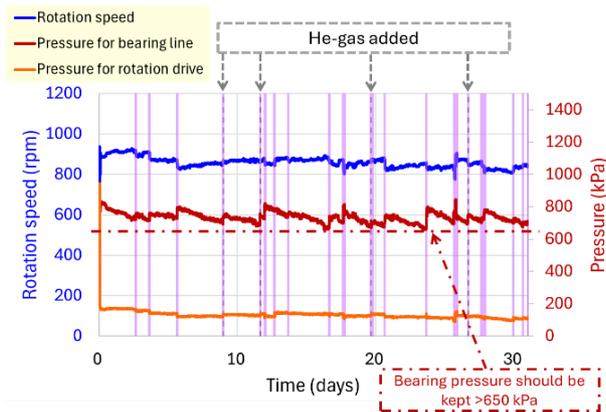


Figure 10: Monitoring data of the long-term rotation tests with Helium gas. Vertical purple-shaded lines indicate the timing of the bypass adjustment. The grey dashed arrows indicate the timing of the He-gas compensation.

かに上昇している。そこで、バイパスライン(Fig. 8 紫線)の流量調整バルブおよび風車吹き出し側バルブを調整することで軸受系統の圧力維持を図った。Figure 10 にある紫色縦線が流量調整のタイミングを示しており、軸受系統の圧力が増え、代わりに風車系統の圧力が減り、回転速度も変動している。実機を想定すると、回転速度が変わると冷却能力が変動するため、回転速度を一定(=風車の吹き出し流量を一定)としつつ、軸受圧力も一定以上で維持するよう各系統の流量を自動で調整するフィードバック型の流量調整システムが必要と考えている。

長期試験後に、回転システムの健全性を確認するため、ヘリウムガスを使用して定格速度(500 rpm)までの回転起動・停止の試験(非定常回転試験)を 5 回実施したが特に問題が見られなかった。試験後の目視点検やバルト緩み確認も実施し、回転システムに対する長期試験の影響、たとえば振動による軸受アライメントの大きなずれや固定のゆるみ等は無いと判断した。次に、ヘリウムガスを使用してコンプレッサの最大定格(最大流量)による回転試験を約 14 時間実施した。Figure 11 に示すとおり、1100 rpm という高速回転で安定していた。本試験から、実機においても同程度の性能(流量)をもつコンプレッサで運用すれば定格回転速度に対して適度に余裕があることを確認できた。ただし、実機ではより気密性の良いコンプレッサが必要と考えている。今回の試験条件では概算 15 liter/day 程度のヘリウムガスリークが観測された。現行の固定型標的では標的内で生成された放射線物質の一部がヘリウムガスへ移行することが観測されており[13]、その閉じ込めの観点から、実機では今回使用したコンプレッサと比較してリーク量で 1/1000 以下の気密性をもつコンプレッサが必要と考えている。

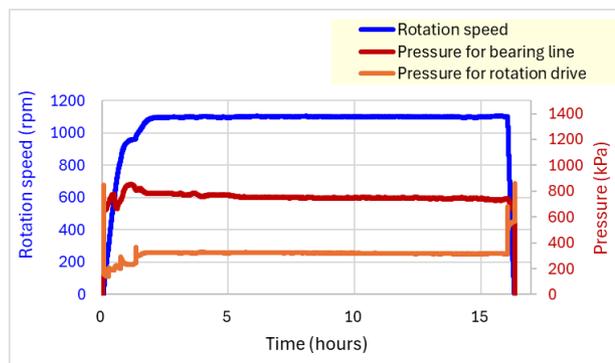


Figure 11: Results of the rotation test with maximum flow rate of the compressors after the long-term tests.

5. Summary

ハドロン実験施設の次期標的として 150 kW に対応した回転円盤型標的の開発を進めている。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、実際のビーム運転状況を想定した高温環境下での回転試験、および室温での長期連続試験を行った。結果として、回転システムとしては一定の信頼性があることが確認された。今回の試験や他試験で得られた知見を加えて、今後、標的システム全体の実機設計を進めたい考えである。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22H00143、JP21K03609、JP24K07082、JP25K07346 の助成を受けたものです。

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, pp. 225-232 (2022).
- [3] M. Saito *et al.*, “Indirectly cooled secondary-particle production target at J-PARC Hadron Experimental Facility”, Phys. Rev. Accel. Beams 25, 063001 (2022).
- [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, Chiba, pp. 949-953 (2016).
- [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, Online meeting, pp. 402-406 (2020).
- [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, Online meeting, pp. 427-431 (2022).
- [7] H. Watanabe *et al.*, “金属 3D プリンタにより造形されたタングステン材の評価”, Proc. 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, pp. 65-69 (2022).
- [8] H. Watanabe *et al.*, “ハドロン実験施設における回転円盤型2次粒子生成標的の開発”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Yamagata, pp. 507-512 (2024).
- [9] H. Watanabe *et al.*, “2次粒子生成標的のための金属 3D プリンタにより造形されたタングステン材の評価 (2)”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Yamagata, pp. 513-517 (2024).
- [10] H. Watanabe *et al.*, “Status and Prospect of Production Target at J-PARC Hadron Experimental Facility”, Proc. the 4th J-PARC Symposium (2024) (to be appeared).
- [11] H. Watanabe *et al.*, “J-PARC ハドロン実験施設における標的監視用ヘリウムガス循環装置の構築”, Proc. 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, pp. 944-948 (2016).
- [12] 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 (2017).
- [13] K. Bessho *et al.*, “Analysis of Radionuclides in Helium Gas Circulating Through the Target Chamber at the J-PARC Hadron Experimental Facility”, Proc. 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019), JPS Conf. Proc. 33, 011143 (2021).