

J-PARC ハドロン実験施設における回転円盤型標的の開発

○倉崎りり、青木和也、上利恵三、秋山裕信、家入正治、加藤洋二、里嘉典、澤田真也、高橋俊行、高橋仁、田中万博、豊田晃久、広瀬恵理奈、皆川道文、武藤史真、森野雄平、山野井豊、渡辺丈晃
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

概要

J-PARC ハドロン実験施設では、二次粒子生成標的として一次陽子ビーム強度 150 kW の大強度ビームに対応した回転円盤型標的の開発を進めている。円盤形状の標的を回転させることによりビームによる熱負荷を円周方向に分散させることで、より大強度のビームを受けられるようにするものである。回転円盤の冷却には、ヘリウムガスを吹き付ける直接冷却方式を検討しているが、冷却能力（熱伝達率）が重要となる。熱伝達率は物性値ではなく流れの状態や表面形状によって変わるため、理論的な算出が困難であり実験による計測が必要となる。そこで、冷却能力を評価するために実機サイズの円盤にヒータおよび熱電対を組み込んだ装置を構築し、空気による冷却とヘリウムガスによる冷却での温度測定を行った。本発表では、回転円盤における冷却能力の評価について報告する。

1. はじめに

J-PARC ハドロン実験施設（図1）では、加速器主リングから取り出された 30 GeV の一次陽子ビームを二次粒子生成標的（T1 標的）に当て、そこから発生する π 中間子、K 中間子などの粒子を実験エリアに供与することで様々な原子核・素粒子実験が行われている[1]。

一次陽子ビームの強度は、2009年のビーム運転開始から増強を重ねて、2021年6月には 64 kW に達した。

現在使用中の標的は 2019年11月に設置したもので、間接水冷方式の固定型標的である。この標的は、一次陽子ビーム強度としては最大 95 kW（5.2秒サイクル時）まで使用できる[2-7]。

今後さらなるビームの大強度化を目指して、回転円盤型標的の開発を進めている。想定強度は 150 kW、標的での損失はその 40%から 50%程度を想定して開発を行っている。標的を円盤型にして回転させることにより、熱負荷を円周方向に平均的に分散させる。また、冷却方法はヘリウムガス冷却を考えている。円盤の形状および分割、ヘリウムガスの吹き付け方法の最適化などで冷却能力を向上させるように開発を進めている。熱流体解析による冷却能力の計算では、乱流や固体表面近傍の流れ・熱交換などの複雑な物理現象を、現実的な計算時間に収まるよう単純化された物理モデルおよび有限のメッシュ分割数により計算していることや固体側の熱伝導と流体側の熱伝達の連成解析などの複雑性から一定の誤差が含まれると考えられる。そこで、冷却能力を実測する必要があり、回転標的の模擬装置を製作し、空気吹き付けによって冷却能力を実測するシステムを構築し測定を実施した[8]。その測定結果などから、さらに冷却効率を上げるためにターボフィン形状の円盤を新たに考案し、あわせてヘリウムガスで冷却するシステムを構築した。ここでは、空気冷却とヘリウムガス冷却におけるターボフィン型円盤の冷却能力の評価について報告を行う。

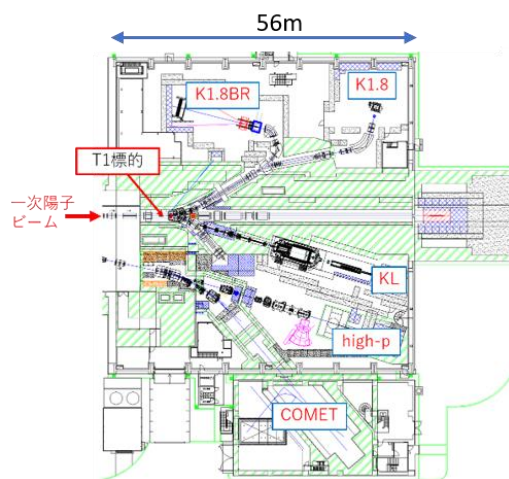


図1. ハドロン実験施設

2. 回転標的の設計諸元

2.1 構造

ビーム強度 150 kW に対応した新標的の構造の1案を図2に示す。ニッケル円盤または銅円盤の外周に高さ 6 mm 程度の金またはプラチナを接合した円盤型を考えている。ビームは金またはプラチナ部分に入射させる。回転円盤標的の直径は 346 mm である。また、別案としては円盤すべてをタンゲステンで構成する設計も検討している。図2の場合、ビーム方向の長さ 54 mm で、相互作用長で金は 41.2%ロス、プラチナは 44.7%ロスに相当する。

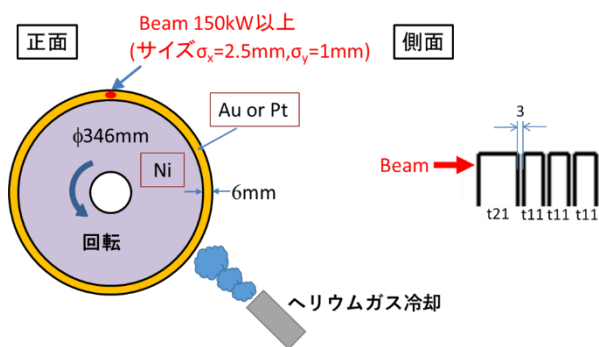


図 2. 回転標的の構造

2.2 冷却方法

冷却方法はヘリウムによる直接冷却とし、この冷却方式は直接水冷と比較するとトリチウムなどの生成が少ないという利点があり、また化学的に不活性ガスであり腐食の問題もない。しかし、ヘリウムガスによる冷却効率(熱伝達率)が直接水冷と比べて低いことが欠点となる。そのため、次節以降で示すように、実機と同じ形状の円盤でヘリウムガスによる円盤の冷却能力を評価する。

3. 冷却能力の評価

3.1 測定装置

図 3 の回転標的の模擬装置を使って、冷却能力の評価を行った。模擬標的円盤の材質はアルミニウム合金(A5083)で外径 346 mm の円盤外周近く(ビーム照射部)にヒータが埋め込んである。回転動力はサーボモータを使用し、PC(Windows)から直接制御している。ヒータの電力入力と熱電対等の信号の読み出しについてはカーボンブラシを使った64極のスリップリングを使っている。

円盤は図 4 のように一体のターボフィン形状のものである。この形状により、円盤の回転によって流体の駆動力が能動的に発生し、内周側から外周側に強い流れが生成される。次に、実機を想定すると、固定型標的[2-7]と同じように熱応力を緩和するためにビーム軸方向に分割するスリットを入れることとなる。そこで、このテスト機においても外周部分のみ溝加工を入れることで、外周部(ビーム照射部)をビーム軸方向に3分割構造とした。各分割には、独立したヒータを入れている。1分割(1系統)が約90Wで3系統合計が約270Wである。円盤の温度を測定する熱電対は図 5 に示すように12カ所取り付けられている。

冷却方法は図 3、6 に示すように模擬装置をチェンバー内にいれて精密空調機(ORION Machinery PAP01B)からの空気またはヘリウムガスを円盤の正面へ吹き出す位置関係での冷却能力の測定を行った。精密空調機からの吹き出し温度は、チェンバーの吹き出し口で18.5℃であり、±1℃範囲で制御されている。チェンバーからの排気は再び精密

空調機へ戻す循環運転となっている。ヘリウムガスによる測定中は、ヘリウムガス純度が98%以上になるようにコントロールしている。今回の測定では円盤の回転速度は静止(0 rpm)から1000 rpmで行った。

今回の試験で模擬標的円盤の材質にアルミニウム合金を使用した理由を説明する。流体と固体の間の熱伝達率は、固体側(円盤)が同じ形状・同じ表面状態であれば流体の状態のみで決まる。したがって、アルミニウム合金製円盤で測定した熱伝達率は、そのまま銅製フィンなどの違う素材の円盤にもそのまま適用可能であると考えられる。ここで流体の状態とは、流体の速度・圧力・熱伝導率・粘性・流れの状態(乱流か層流か)等を意味している。しかしながら、固体の素材が変わることで物性、特に熱伝導率や比熱が変わる影響があり、円盤外周のみといった局所的な発熱を想定すると、円盤の温度分布は素材によって違いが発生することとなる。熱伝達による伝熱量はニュートンの冷却法則により温度差(ここでは流体と固体の温度差)に比例するため、例えばフィンの先端部まで温度が上がる素材(熱伝導率の良い素材)の方が冷却効率は高いなどの影響が予想される。後述する円盤の最高温度については、銅の熱伝導率:約390 W/m/K に対しアルミ合金の熱伝導率:約120 W/m/K と低いことから、今回のアルミ合金製円盤の最高温度による評価は、実機の金+銅標的を想定すると、安全側の評価と予想している。また、比熱は発熱部を想定して1 m³あたりの換算で金:約2510 kJ/m³/K、アルミ合金:約2570 kJ/m³/K と大きな差はないため影響は少ないと予想している。より詳細には、アルミ合金製円盤を設定した熱流体計算(CFD計算)を実施して、今回の測定データと比較し、定量的な再現性が得られることを確認した上で、そのCFD計算で固体の物性値を実機の候補素材へ変更して計算することで最高温度や熱伝達率等への影響を評価する方針である。

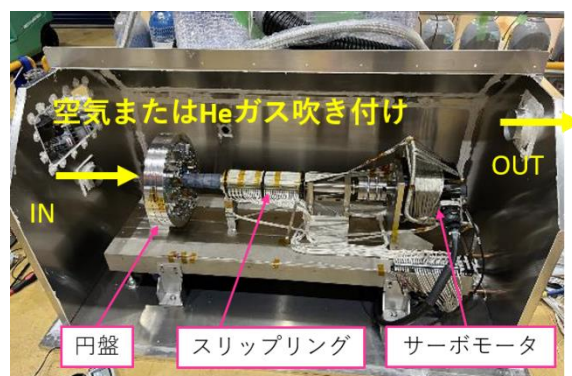


図 3. 回転標的の模擬装置



図4. ターボフィン形状の円盤

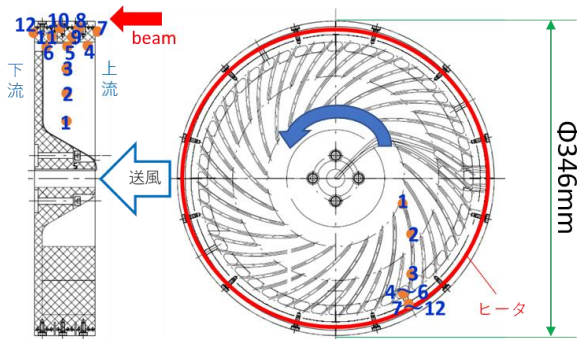


図5. 熱電対の設置場所

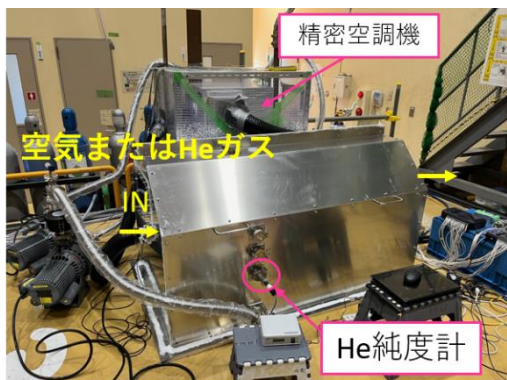


図6. 模擬装置が入っているチャンバー

3.2 測定結果

円盤を 500 rpm で回転してヘリウムガス冷却した際の 12 個の熱電対の温度変化 ΔT のグラフが図 7 である。横軸が時間で、縦軸はヒータを ON 時の円盤温度からの温度変化である。時間 0 秒の時にヒータ ON 時で 0 K としている。ヒータを ON にした後、温度が上昇しそののち温度変化が落ち着く。温度の変化が落ち着いたのを確認したらヒータを OFF にする。その後の温度の下降も確認する。このグラフから円盤の最高温度を算出する。回転速度および冷却方法によって最高温度が熱電対 8 から 11 の中で分散するが温度差は ± 0.5 K 以内と少ないため、熱電対 8 から 11 の平均を取って評価温度とすることとした。また、ヒータへの電力入力値は若干のバラつきがあるため、以下の結果では 300 W 入力相当に規格化している。図 8 は回転速度が 500 rpm で空気冷却の時とヘリウムガス冷却の時の温度測定結果である。ヘリウムガス冷却の方が空気冷却よりも温度上昇が低く、より冷えることが分かる。このグラフより温度変化 ΔT を算出する。

空気冷却の時とヘリウムガス冷却の時の最大上昇温度の測定結果を図 9 に示す。回転速度を上げると冷却能力が上がる事が分かる。

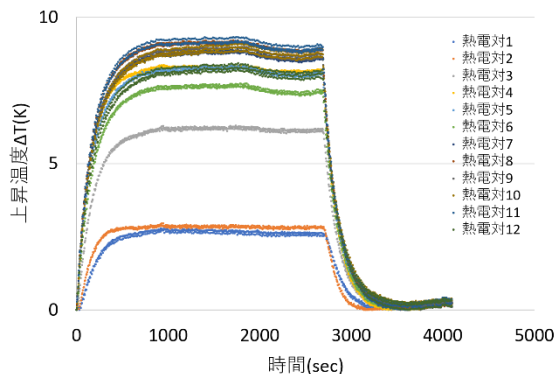


図7. 500 rpm でヘリウムガス冷却での円盤の温度測定結果

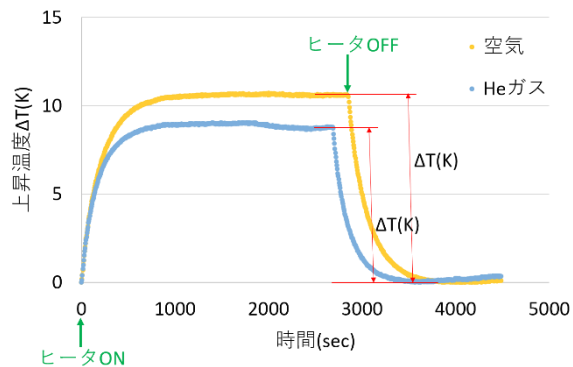


図8. 500 rpm で空気とヘリウムガス冷却での測定結果の比較 (300 W に規格化していない)

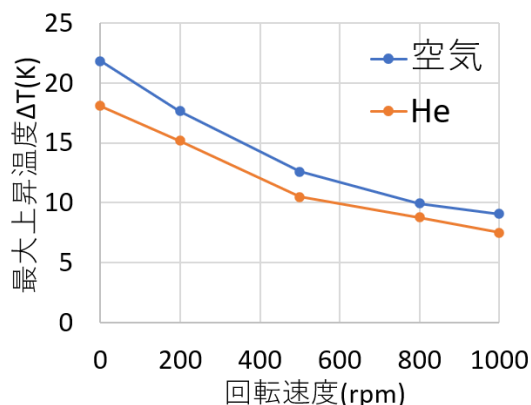


図 9. 300 W あたりの空気とヘリウムガス冷却での円盤の最大上昇温度

3.3 考察

今回の試験で測定した冷却能力がどのくらいの能力かを考察する。直径 346 mm の回転円盤型の金標的を 120 rpm で回転させ、ビーム強度 150 kW (想定ビームサイズ $\sigma_x=2.5$ mm, $\sigma_y=1.0$ mm) を照射した時の ANSYS[9]による温度解析および熱応力解析の結果を図 10 に示している。この時、熱伝達率は 50 W/m²/K と仮定している。結果は、金標的の最大上昇温度は $\Delta T=312$ K であり、応力値からこの温度上昇量は許容可である。また、MARS code[10]による計算から、150 kW 時の金標的 (41.2%ロス) に対する熱負荷の合計は 7.4 kW と見積もられている。ビーム強度 150 kW 運転時の $\Delta T=312$ K は、模擬装置 300 W 入力時で $\Delta T=(300$ W/7400 W) \cdot 312 K=12.6 K に相当する。したがって、図 11 に示すようにヘリウムガス冷却の場合、回転円盤を回転速度 500 rpm で回すと 150 kW のビームを受けることが出来ると考えられる。図 11 の赤線は、150 kW ビーム照射時の最大上昇温度を模擬装置 300 W 入力へ換算した値 $\Delta T=12.6$ K を示している。

次に結果として得られたヘリウムガスと空気の冷却能力の比 (最高温度の比で約 1.2) について考察をする。例えば、等温加熱の平盤で強制対流 (乱流域) の場合の平均熱伝達率として、半経験式は下記で与えられている[11]：

$$h = 0.037 \cdot \lambda \cdot L \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{1/3}$$

ここで λ : 流体の熱伝導率、 L : 代表長さ、 Re : レイノルズ数 (= 流体速度 \cdot L / 動粘性係数)、 Pr : プラントル数である。仮に、温度を 300 K、圧力 0.1 MPa として物性値 (プラントル数、動粘性係数) を決め、代表長さ 0.346 m (円盤直径)、流体速度を 10 m/s (別途実施している CFD による円盤外周付近の流速は最大値で 12.5 m/s) とすると、空気では $h = 48$ W/m²/K、ヘリウムでは $h = 53$ W/m²/K、熱伝達率の比 (He/Air) で約 1.1 となり、ヘリウムガスの方が良く冷えるという点については、定性的には一致する。また、層流の場合は、同様の半経験式 ($h = 0.664 \cdot \lambda \cdot L \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$) [11] から、この比は約 2.1 となり、実際に回転円盤では乱流域の部分もあることが想定されるため、実際の熱伝達率の比は 1.1~2.1 の間に来ることが予想される。

なお、ヘリウムガスの熱伝導率が空気と比べて約 6 倍高いことから、ヘリウムガスの方が冷却能力は高くなりそうだが、大気圧付近では動粘性係数 (ヘリウムガスが約 8 倍大きい) でキャンセルする方向のため、そこまで大きな差とならないことが半経験式から読み取ることができる。

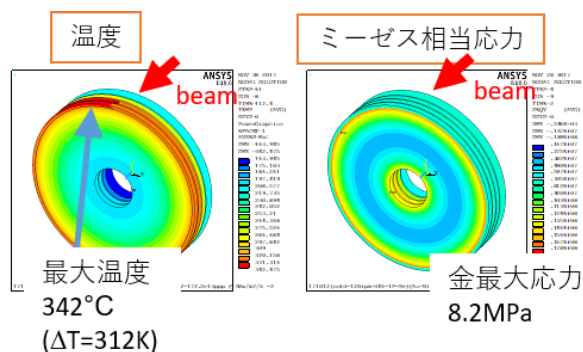


図 10. ANSYS による温度解析・熱応力解析の結果

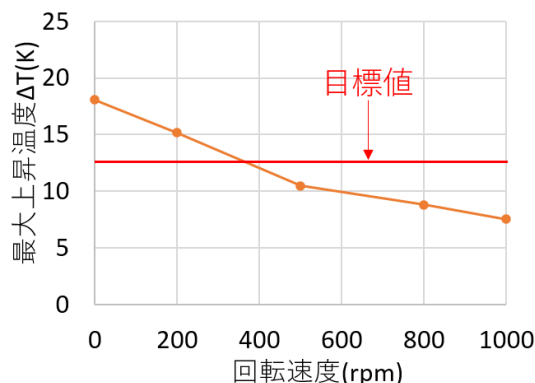


図 11. ヘリウム冷却による最高温度と目標値 (150 kW ビーム照射を 300 W 入力へ換算した値 $\Delta T = 13.4$ K)

4. まとめ

ハドロン実験施設における大強度ビームに対応した新しい二次粒子生成標的として、回転円盤型標的の開発を進めてきた。回転円盤の冷却にはヘリウムガス冷却を考えており、大強度ビームによる熱負荷に対して十分な冷却効率を達成することが重要である。そこで、模擬装置によるヘリウムガス冷却での測定方法を構築しデータの収集を行った。ヘリウムガス冷却は空気冷却よりも冷却能力が高いことが分かった。ヘリウムガス冷却で 500 rpm で回転すると、ビーム強度 150 kW 以上に対応した冷却能力が得られることが分かった。

今後は、ANSYS で行っている円盤の温度解析・熱応力解析の入力値として使用しているヘリウムガス冷却を想定した平均熱伝達率 50 W/m²/K の妥当性を確認するために、模擬装置で熱流センサーによる局所熱伝達率を測定するとともに、熱流体解析を実施

して比較・評価を行う計画である。

参考文献

- [1] A list of experiments in the J-PARC Hadron-hall;
<http://research.kek.jp/group/nuclpart/HDeppc/Exp/>
- [2] H. Takahashi et al., “Development of new production target at J-PARC hadron experimental facility ” , Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2017, pp. 660-663, TUP109.
- [3] H. Takahashi et al., “Development of new production target at J-PARC hadron experimental facility (2)”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2018, pp. 879-880, THP038.
- [4] H. Watanabe et al., “Development of a New Production Target at J-PARC Hadron Experimental Facility”, Proc. 14th Int. Workshop Spallation Materials Technology (IWSMT), JPS Conf. Proc., 041004 (2020).
- [5] 「Indirectly cooled secondary-particle production target at J-PARC Hadron Experimental Facility」 by Masayoshi Saito, Keizo Agari, Hironobu Akiyama, et al. PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS.
- [6] ハドロンビームラインサブグループ中間報告、KEK Internal 2002-8, July 2002, P79-90.
- [7] ハドロンビームラインサブグループ第2次中間報告、KEK Internal 2004-3, July 2004, P91-119.
- [8] R. Iwasaki *et al.*, “Development of rotating-disk target for J-PARC Hadron beamline”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2016, pp.949-953, TUP041.
- [9] ANSYS <http://www.ansys.com/>
- [10] MARS code: N. V. Mokhov and C. C. James, The Mars code system user’s guide version 15(2016), Report No. Fermilab-FN-1058-APC, 2017.
- [11] “伝熱工学資料 改訂第5版”、日本機械学会 (2009)、P 28-29.