

J-PARC ハドロンビームライン用回転円板型標的の開発(2)

DEVELOPMENT OF A ROTATING-DISC TYPE TARGET FOR J-PARC HADRON BEAMLINE (2)

倉崎 るり^{#A)}, 青木 和也^{A)}, 上利 恵三^{A)}, 秋山 裕信^{A)}, 家入 正治^{A)}, 加藤 洋二^{A)}, 小松 雄哉^{A)},
齋藤 真慶^{B)}, 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 史真^{A)}, 森野 雄平^{A)}, 山野井 豊^{A)}, 渡邊 丈晃^{A)}

Ruri Kurasaki^{#A)}, Kazuya Aoki^{A)}, Keizo Agari^{A)}, Masaharu Ieiri^{A)}, Hironobu Akiyama^{A)}, Yohji Katoh^{A)},
Yusuke Komatsu^{A)}, Masayoshi Saito^{B)}, Yoshinori Sato^{A)}, Shinya Sawada^{A)}, Hitoshi Takahashi^{A)}, Kazuhiro Tanaka^{A)},
Akihisa Toyoda^{A)}, Erina Hirose^{A)}, Michifumi Minakawa^{A)}, Fumimasa Muto^{A)}, Yuhei Morino^{A)}, Yamanoi Yutaka^{A)},
Hiroaki Watanabe^{A)}

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

^{B)} Tohoku University

Abstract

We have developed a new production target with a beam power up to 150 kW or more for the Hadron Experimental Facility at J-PARC. A primary candidate of the new target is a rotating disk in which platinum or gold is bonded on a periphery of a nickel disk edge. As for a cooling method of the disk, helium-gas cooling is better than water cooling from the viewpoint of controls of corrosion and radioactive materials. However, cooling efficiency for the rotating disks by helium gas tend to be lower than that by the water cooling. Since a theoretical estimation of the cooling efficiency is difficult, we have constructed a test bench and established an estimation method using a simple flat disk. In order to obtain better cooling efficiency, two new designs of the disc, a spoke type and a turbo-fin type, have been developed. In this report, a design basis of the new production target and results of the cooling efficiencies for newly designed disks are presented.

1. はじめに

J-PARC ハドロン実験施設 (Fig. 1) では、主リングから取り出された 30 GeV の一次陽子ビームを 2 次粒子生成標的 (名称 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二次ビームとして用いることで様々な原子核素粒子実験が行われている[1]。

1 次陽子ビームの強度は、増強を重ねて 2016 年 6 月には 42 kW、2018 年 1 月には 51 kW に達した。今後さらに増強が計画されており、より大強度ビームに耐えられる標的の設計、開発が必要となる。

現在の標的は 2019 年 11 月に交換したもので、間接水冷方式の固定型標的である。想定される入射ビーム強度は最大 95 kW (5.2 秒サイクル時)、標的におけるビームロス率は 50 % として設計されている[2-4]。

今後さらなるビーム増強を目指して、回転円板型標的の開発を進めている。想定強度は 150 kW、ビームロス率は 40 % 以上として設計、開発を行っている。標的を円板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、冷却方法は水またはヘリウムガスによる直接冷却があるが、第一候補としてヘリウムガス冷却を考えている。しかしながら、冷却能力が水冷方式より低くなるので、円板の形状および分割、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。冷却能力は、熱流体解析による計算では物体表面近傍の流体の再現が難しいことや物体側

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般的に信頼度があまり高くない。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冷却能力を実測するシステムを確立した[5]。そこから更に開発を進め、今回はより実機に近いものにするために円板の枚数を 3 枚にした。また、冷却効率を上げるために、ターボフィン形状の円板を新たに考案し、冷却能力の評価を行った。

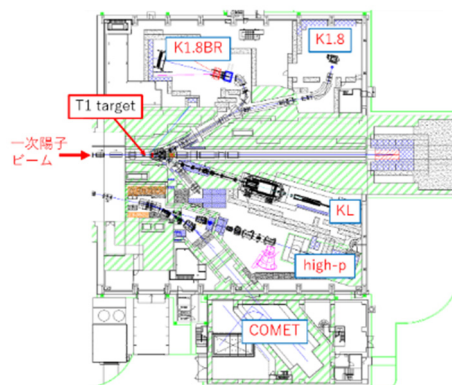


Figure 1: Plan view of the Hadron Experimental Facility at J-PARC.

[#] ruri.kurasaki@kek.jp

2. 回転標的の設計諸元

2.1 構造

現在考えているビーム強度 150 kW 以上に対する新標的の構造を Fig. 2 に示す。ニッケル円板または銅円板の周りに高さ 6 mm 程度の金またはプラチナを接合した円板型を考えている。ビームは金またはプラチナ部分に入射する。奥行きは 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。回転円板標的の直径は 346 mm、奥行きは4分割で厚み 21 mm (1 枚)と厚み 11 mm(3 枚)の円板をビーム軸方向に並べて全体として 54 mm の厚みになるようにする。円板同士の隙間は 3 mm 程度開けることによって冷却しやすくしている。この円板の形状および分割、冷却方法などの条件の検討を進める。

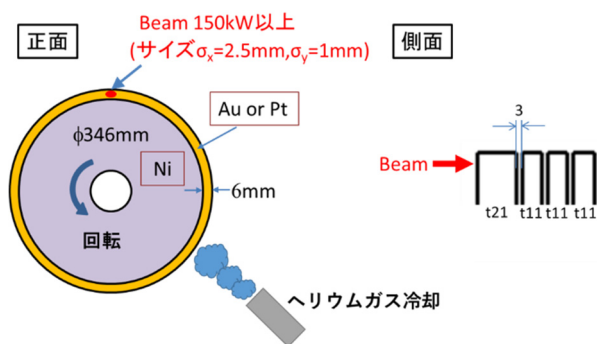


Figure 2: Structure of a rotating-disk target.

2.2 冷却方法

水による直接冷却またはヘリウムガスによる直接冷却があり、この2つの冷却方法を比較する。まず、直接水冷方式は冷却効率が良いという利点がある。その一方、冷却水循環装置の R&D が必要となり、リザーバタンクなどで汲み上げ循環する方法、イオン交換樹脂や復水器の使用法、脱ガス器と放射能を含むガスの取り扱い方など多くの検討事項がある。他にも、標的本体や周辺部品の腐食の問題、放射性物質濃度が高くなった水の取り扱いが問題となる。特に、腐食により標的回転部のベアリング寿命が1年程度しかないことが大きな欠点となっている。一方、ヘリウムガス冷却方式はトリチウムなどの生成が少ないという利点があり、腐食の問題がない。しかし、ヘリウムガスによる冷却効率(熱伝達率)が水冷と比べて低いこと、大流量のヘリウムガスを循環させる装置の開発が別途必要となる。それらのことを踏まえて、可能であればヘリウムガス冷却を採用したいと考えている。しかし、冷却能力が水冷と比べて低いことが予想される。そのため、次節以降で示すように、円板の形状を変えてそれぞれの円板での冷却能力を評価する。

3. 冷却能力の評価

3.1 測定装置

Figure 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。模擬標的円板の材質はアルミニウムで外径 346 mm でヒータを埋め込んである。円板は放射による熱放出を減らすために、外面はバフ研磨を行っている。放射率(全放射率)は、放射計(ジャパセンサ製 TSS-5X)により事前に測定を行った結果 0.076 である。さらに、空気(ガス)以外への熱伝達による放熱を減らすために、ガラスエポキシ製の断熱ワッシャー(熱伝導率 0.471 W/m/K)及び熱伝導率の低いステンレス製ボルト(熱伝導率 16 W/m/K)を用いて回転機構と連結している。この回転機構は PC からの制御で動くステッピングモータを使用した中空ロータリーアクチュエータを使用している。ヒータの入力と熱電対の読み出しについてはカーボンブラシを使った 32 極のスリップリングを使って、最大ヒータ 4 系統と熱電対 12 系統が取り付けられるようになっている。今回の測定では回転速度は静止 (0 rpm) ~ 200 rpm で行った。ヘリウムガスを使う測定の前段階として、まず簡易的に吹き出し直径 90 mm の送風機を使って 5.8 m/s 程度の空気を吹き付けて、冷却効率を評価するため測定を行う。

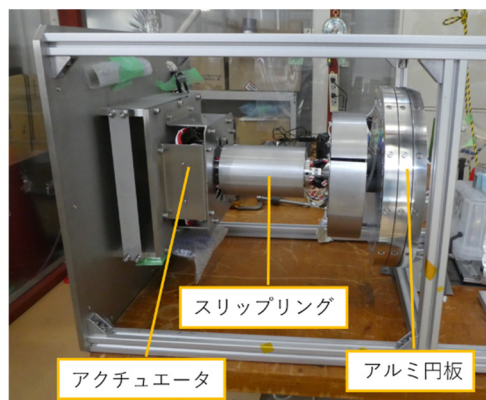


Figure 3: Photograph of apparatus.

3.2 円板形状

①平板

この円板は理論式の計算と比較して測定方法に問題がないことを確かめるために用意した。アルミニウム円板は厚さ方向に 2 分割したものを 1 枚に組み合わせて使用している。片側にはヒータ用の溝を掘り、100 W 程度のシリコンコードヒータをサーマルグリスを塗布して埋め込んでいる。その際、円板全体の温度が上がるように全体に埋め込んだ。Figure 4 のように隙間を 2 mm にしてこの円板を 3 枚並べて設置している。熱電対の設置場所は Fig. 5 に示す。

②スポーク型

Figure 6 のように、回転軸の温度上昇を抑制し冷却のための表面積を増やすために、平板の表面にスポーク状に溝を入れたものである。陽子ビームの照射を模擬して円板の外側の温度が上がるようにヒータを外側に埋め込んだ。それ以外の構造は平板円板と同様で、隙間を 2

mm で 3 枚並べて設置している。熱電対の設置場所は Fig. 7 に示す。

③ターボフィン型

Figure 8 のように 3 枚分の円板を 1 つにしてターボフィンのような形をしたものである。回転円板標的はもともと直接水冷を前提としていたので、平板やスポーク型は円板の間に隙間を入れるために厚さ方向に分割していた。しかし、円板の間に挟まれる中央部の円板は、スポークがあっても空気の壁ができて中まで冷えにくいという結果となった。そこで、厚さ方向を一体にしても、さらに全体としてスポーク型より冷却できる形状として、円板自身の回転によりガス流体の駆動力を積極的に発生させることのできるターボフィン型を考案した。実機を想定すると、固定型標的と同じように熱応力を緩和するためにビーム軸方向に 6 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に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(上記①、②の円板型の 3 枚分割相当)とし、3 系統の独立したヒータを入れている。1 分割(1 系統)が約 90 W で 3 系統合計が 270 W である。熱電対の設置場所は Fig. 9 に示す。

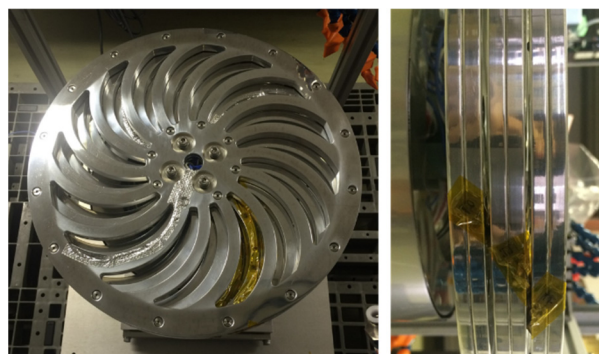


Figure 6: Photograph of the spoke-type disc.

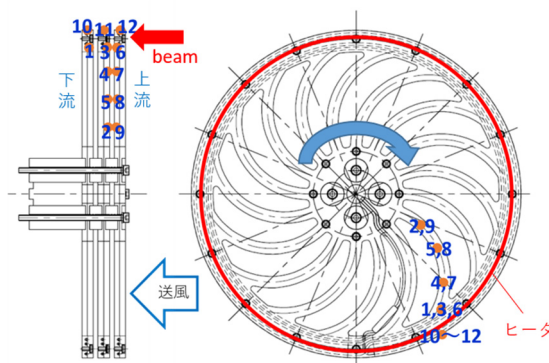


Figure 7: Positions of thermocouples on the spoke-type disc.

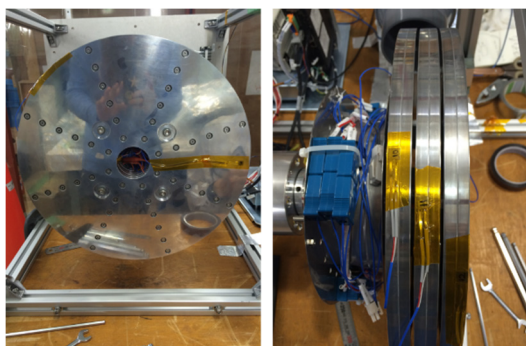


Figure 4: Photograph of plate disc.

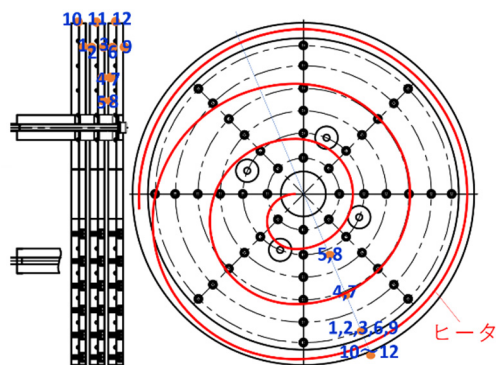


Figure 5: Positions of thermocouple on the plate disc.

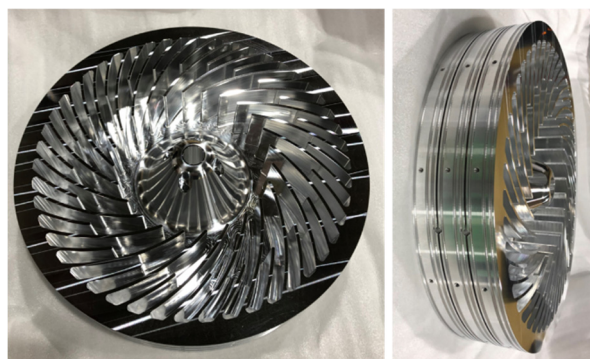


Figure 8: Photograph of the turbo-fin-type disc.

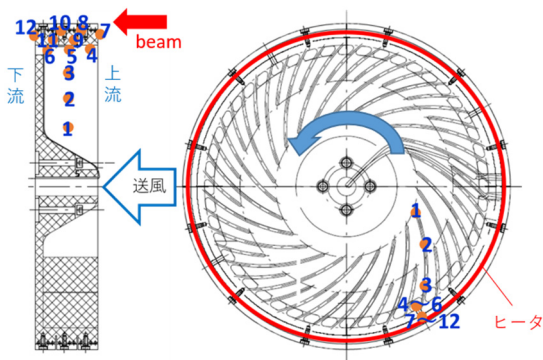


Figure 9: Positions of thermocouples on the turbo-fin disk.

3.3 測定結果

平板円板で測定方法の確立、基礎データの収集を行った後に、スポーク型円板、ターボフィン型円板の順で試験を行った。以下、測定温度は円板1枚あたり(ターボフィン型は1山あたり)100 W 入力へ規格化して結果の比較を行った。

Figure 10 に代表的なデータをまとめる。Figure 10 のグラフは、スポーク型円板で正面からの強制送風ありで回転数を変えた時の結果である。横軸が時間で、縦軸は円板1枚あたり100 W 入力へ規格化した温度変化である。時間0秒の時がヒータON時で0度としている。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。この測定により平衡温度を算出して100 W 入力時の温度上昇を計算する。

スポーク円板での測定結果を Fig. 11 に示す。グラフは各チャンネルの100 W 入力時の最大温度上昇である。これを見ると、最も冷却したい円板同士に挟まれている中央円板の冷却能力が低いのが分かる。次に、ターボフィン型円板の測定結果を Fig. 12 に示す。グラフは各チャンネルの100 W 入力時の最大温度上昇である。これを見ると、円板全体はほぼ一様に冷えているのが分かる。厚さ方向に一体構造としたためスポーク型のように中央部分の冷却能力の低下がなかった。また、フィンの先端の温度が下がりきっていないのが分かる。これは、フィンの先端からも放熱していることを意味している。フィンの長さをもっと長くしたり、フィンの数を増やしたりすることでさらに効果が出ると考えられる。

平板、スポーク型円板、ターボフィン型円板の100 W 入力時の最大温度上昇の測定結果を Fig. 13 に示す。回転数を上げると冷却能力が上がるのが分かる。したがって、回転数を200 rpm以上にするさらに冷却能力が上がると思われる。これについては、今後より回転数を上げられるような装置を製作し実証する予定である。正面から送風すると平板、スポーク型は空気の壁ができて中まで冷えにくいようだが、ターボフィン型で奥行方向に加工したことにより風が奥まで届きよく冷えた。したがっ

て、ターボフィン型にすることにより大幅に冷却能力が高くなった。

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。回転円板型の金標的が直径346 mmの平板4枚(厚さ21 mm, 11 mm, 11 mm, 11 mm)で回転速度120 rpmとして、ビーム強度150 kW(サイズ $\sigma_x=2.5$ mm, $\sigma_y=1.0$ mm)を照射した時の熱強度解析の結果は Fig. 14 である。この時、ヘリウムガス冷却の熱伝達率は50 W/m²/Kと仮定した。結果を見て分かるように、金標的の最大温度上昇は $\Delta T=312$ Kである。この温度上昇は許容可能な温度上昇である。また、MARS[6]の計算により、150 kW時の標的への熱入力の合計は7 kWと見積もられている。熱流体解析ソフトOpen FOAM ver.6[7]の計算により、冷却方法のヘリウムガスから空気への換算係数は1.5と見積もられている。つまり、本条件における強制冷却の条件では、ヘリウムガスの方が空気よりも約1.5倍熱伝達率が高いことが示されている(この換算係数は今後実験により実証が必要である)。今回の試験でターボフィン型のヒータの全入力熱量(3系統の合計)はおよそ270 Wである。これらの結果を総合して、ビーム強度150 kW 運転時の $\Delta T=312$ Kは、模擬装置(円板1枚あたり)100 W 入力時で $\Delta T=20$ Kに相当する。したがって、ターボフィン型円板を回転数200 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。

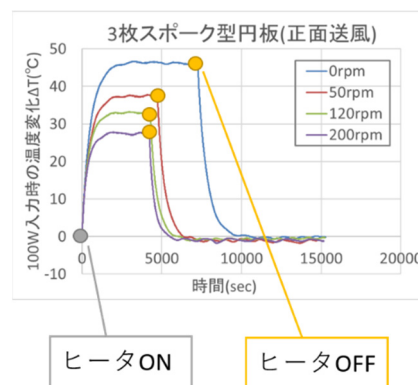


Figure 10: Trend graphs of the temperature of the spoke-type disk at the rotation speeds: 0, 50, 120 and 200 rpm. These graphs show a highest temperature point in the disks.

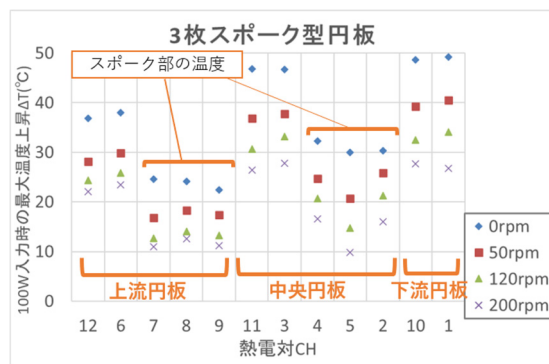


Figure 11: Result of equilibrium temperatures at the each point on the spoke-type disk with the blower.

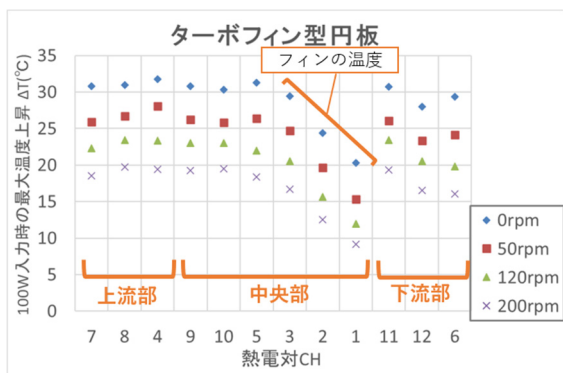


Figure 12: Result of equilibrium temperatures at the each point on the turbo-fin-type disk with the blower.

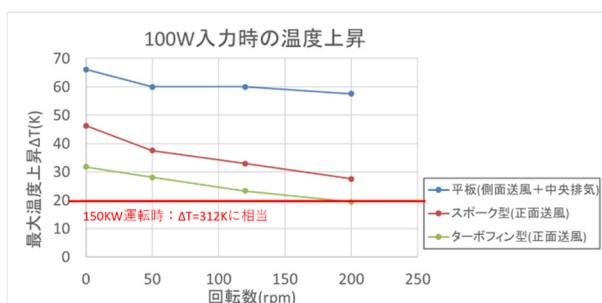


Figure 13: Comparison result of three type disks.

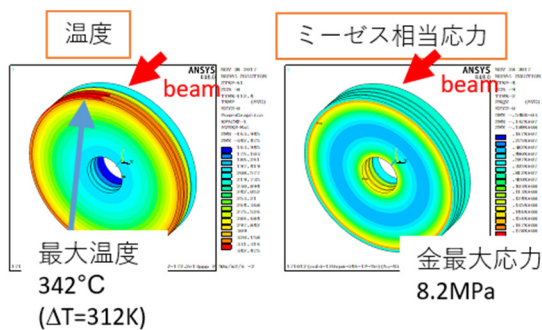


Figure 14: Results of the thermal analysis by the helium-gas cooling.

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2次粒子生成標的の候補として、回転円板型標的の開発を進めている。回転円板の冷却にはヘリウムガス冷却を第一候補として考えており、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、平板円板で測定方法を確立させ、基礎データの収集を行った。円板に挟まれた中央円板が冷えるようにスポーク型にして冷却能力を評価した。しかし、スポーク型は中央部の円板が比較的冷えにくいという結果となった。そのため、厚さ方向を一体にして、さらに全体としてスポーク型より冷却できる形状として、ターボフィン型を考案して冷却能力を評価した。その結果、ターボフィン型は円板全体がほぼ一様に冷えやすく冷却能力が高いことが分かった。ターボフィン型円板は、ビーム強度 150 kW 相当の冷却能力が得られると期待される。

今後は、より高速に回転させた場合の評価や標的模擬装置にヘリウムガス冷却システムを付けてヘリウムガス冷却による冷却能力を評価する。また、最適化のために、熱流体解析や熱強度解析を行い、円板形状を決定する。それらの結果を踏まえて、円板の形状および分割、ヘリウムガスの吹き付け方法などの更なる改善を行い、ビーム強度 200 kW に耐える冷却効率を目指していく。

謝辞

本研究の一部は、JPS 科研費 JP16H03989 の助成を受けて実施されたものです。

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] 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.
- [6] NV. Mokhov, "The Mars Code System User's Guide", Fermilab-FN-628 (1995).
- [7] OpenFOAM; <https://openfoam.org/version/6/>