

J-PARC COMET 標的の現状

PRESENT STATUS OF COMET TARGET AT J-PARC

牧村俊助[#], 深尾祥紀, 吉田誠, 三原智

Shunsuke Makimura[#], Yoshinori Fukao, Makoto Yoshida, Satoshi Mihara

High Energy Accelerator Research Organization, J-PARC Center

Abstract

Construction of the COMET facility to explore the muon-electron conversion is underway at the J-PARC Hadron facility. The 8 GeV proton beam supplied from the J-PARC Main Ring irradiates a target at the center of the superconducting capture solenoid. Then produced pions and/or muons are transported to the experimental area through a curved solenoidal magnet. The target material for Phase 1 is graphite to be used with proton beam power of 3.2 kW, and the one for Phase 2 is a heavy metal e.g. tungsten with proton beam power of 56 kW. For designing the target, multiple aspects of the operating condition must be considered such as removal of the heat generated by proton irradiation, transport efficiency of pions/muons, radiation effect on the target material, and so on. In the COMET experiment, the proton beam intensity irradiated on the target is not high. However it is not possible to disperse the heat density with conventional technologies such as radiation cooling with target rotation because it is installed in magnetic field. In this presentation, results of thermal analysis of the COMET target in Phase 1 and 2 are discussed.

1. はじめに

J-PARC ハドロン施設ではミューオン電子転換過程を探索する COMET 計画の施設建設が進んでいる[1]。COMET 計画では、スイス PSI 研究所で実施された SINDRUM- α 実験[2]と比較して Phase 1 では 100 倍以上の Phase 2 では 10000 倍以上の高い感度の達成を目指している。加速器によって加速された陽子ビームを標的に照射することによって、発生したパイオン・ミューオンを実験室に輸送する。COMET では輸送中に親核種パイオンの崩壊で生成されたミューオンを用いて実験を行う。従来、荷電粒子であるパイオン・ミューオンビームを実験エリアに取り出す場合、陽子ビームラインの側面から捕獲電磁石を可能な限りパイオン生成標的に近づける方式が採用されてきた。しかし、捕獲効率を増大させるために電磁石を大きくすると陽子ビームラインとパイオン輸送のための電磁石が幾何学的に干渉し、さらに捕獲用磁場が陽子ビームラインに非対称な影響を与える。そのため、パイオン生成標的を、陽子ビームラインとほとんど同軸に設置された超伝導のソレノイド電磁石中に設置し、大立体角でパイオン・ミューオンビームを捕獲する方式(大立体角捕獲ソレノイド方式)の検討が進められ、大阪大学 RCNP-MuSIC 実験施設で原理実証されている[3]。Figure 1 に従来のパイオン・ミューオン取出し方式と大立体角捕獲ソレノイド方式の比較を示す。このとき陽子ビームは、分割されたソレノイド電磁石間を通るので幾何学的な干渉も小さくなるとともに、ほぼ同軸のソレノイド中を輸送されるため、陽子ビーム軌道への影響を最小限にとどめることが出来る。COMET 計画では J-PARC メインリング(MR)から供給される 8 GeV 陽子ビームを超伝導捕獲ソレノイド電磁石中の標的に照射し、発生したパイオン・ミューオンを実験室に輸送する。Phase 1 (陽子ビーム強度 3.2 kW) では黒鉛材を、Phase 2 (陽子ビーム

強度 56 kW) ではタングステン材などの高密度材料を標的的材料として想定している。以下ではモンテカルロ法 MARS[4]による発熱、有限要素法 ANSYS[5]による熱解析を元に議論を行う。

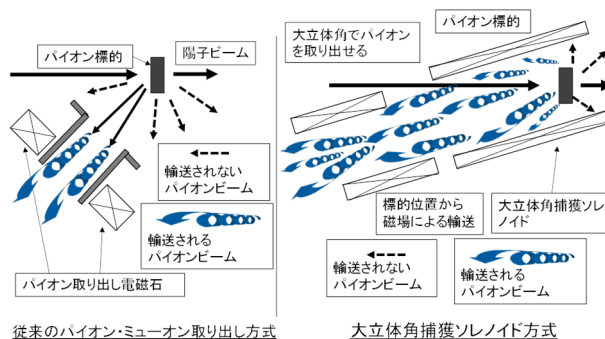


Figure 1: Comparison between the conventional method to capture the pions or muons and superconducting capture solenoid method

2. Phase 1 と Phase 2 での黒鉛標的

2.1 黒鉛標的の静解析

Phase 1 で使用される黒鉛は東洋炭素 IG-430U[6]を想定して解析を進めている。解析では密度 1.82 g/cc、比熱 1200 J/kg/°C (30 °Cにおいて)、1500 J/kg/°C (600 °Cにおいて)とした。熱伝導率に関しては陽子ビーム照射による劣化を考慮し、30 W/m/°C (30°Cにおいて)、35 W/m/°C (600 °Cにおいて)としている[7]。輻射率を 1 とし、環境温度 30 °C に対する輻射冷却としている。Phase 1 (陽子ビーム強度 3.2 kW) での黒鉛標的上のビームロス は 110 W、最高温度は 164 °C、温度差は 30 °C で、Phase 2 でも黒鉛を標的として使用した場合、ビームロス 1.9 kW、最高温度は 600 °C、温度差は 150 °C であった。

[#] shunsuke.makimura@kek.jp

黒鉛の真空中での最高使用温度は 1600 °C 以上なので問題なく運転可能であることが分かった。Table 1 に黒鉛標的の静解析の結果を示す。

Table 1: Summary of Results for Static Analyses in Graphite Target

	単位	Phase 1	Phase 2
陽子ビーム強度	kW	3.2	56
標的上のビームロス	kW	0.11	1.9
黒鉛の最大温度	°C	164	598
黒鉛内の温度差	°C	30	150

2.2 黒鉛標的の過渡解析

次にビーム運転開始と停止時の過渡解析を行った。Phase 1 ではビームロスが小さく、リスクが小さいことに加えて、平衡に達する時間が長いため、Phase 2 でのビーム強度で解析を行っている。Phase 2 での時間構造は現段階では未定であるため、Phase 1 での時間構造を採用した。MR での運転周期 2.5 秒から 0.5 秒のスパルで取り出される。このスパル内にもバンチ構造を有しており、約 100 ナノ秒の時間幅を持つバンチが 1~2 マイクロ秒の間隔で COMET 標的に入射される。しかし、バンチ当たりのビーム強度は大きく無いので、スパル構造のみ考慮して、バンチ構造は無視し、0.5 秒間、連続ビームが照射されていると仮定している。Figure 2 に解析に用いた時間構造を示す (left)。このとき、ビーム運転開始から 30 分程度で熱平衡状態に達する。熱平衡状態からビーム停止時には 30 分程度で 80°C に達することが分かった。また、1 スパルあたりの温度上昇は室温近辺では 6.5 °C、600 °C では 5 °C であり、温度上昇は十分に小さいことが分かった。Figure 3 に Phase 2 黒鉛標的での典型的な解析結果 (upper) と温度推移を示す。温度上昇時に平衡に達するまでの温度推移 (upper-middle)、室温近辺での温度推移 (lower-middle)、最高温 (600 °C) での温度推移 (lower) を示す。

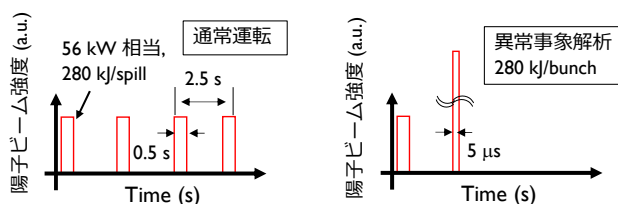


Figure 2: Time structure of proton beam in normal operation (left) and accidental extraction (right)

2.3 黒鉛標的の異常事象解析

異常事象解析として、MR から1スパルの 0.5 秒間に徐々にビームが取り出されるのではなく、5 マイクロ秒に一度に取り出された時のことを想定して解析を行った。この場合は、熱伝導は期待できないので、熱絶縁された黒鉛の最大発熱密度による温度上昇を見積もった。結果として、1スパルによる温度上昇は 12°C と十分に小さく、黒

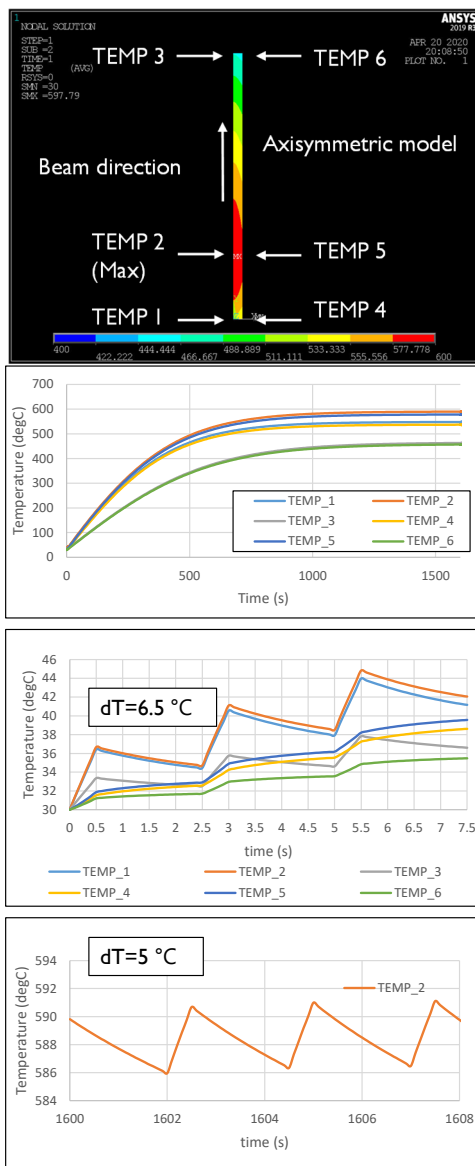


Figure 3: A thermal analysis result. Temperature values are estimated in 6 different locations as defined in (top). Temperatures variance for long term to reach thermal equilibrium (upper-middle), for initial 7.5 seconds (lower-middle), and 1600 seconds later after the start of irradiation where temperature reaches maximum (lower).

鉛標的は Phase 2 でも安定して使用可能であることが分かった。Figure 2 に異常事象解析に用いた時間構造を示す (right)。

3. Phase 2 でのタングステン標的

3.1 標的材としてタングステンを使用する利点

標的上で発生したパイオンを実験エリアに効率的に捕獲・輸送するためには二次粒子発生源の空間的広がりを、なるべく小さくすることが望ましく、その観点からは標的 material の密度は高いほうが良い。一方で、密度が高い場合には、標的 material の内部からパイオンが離脱する

確率は小さくなるため、必ずしもパイオンの捕獲・輸送効率が密度に比例して高くなるわけではない。しかし、8 GeV 陽子入射の場合は、密度が高い方が生成される高エネルギーのパイオンの捕獲・輸送効率は高くなると言って差し支えない。タングステンを使用する場合には、陽子ビーム照射による発熱を、どのように冷却するかも大きな課題である。COMET Phase 2 で想定している直径 10 mm、長さ 160 mm の場合には、56 kW の陽子ビームによって、タングステン上には約 7 kW の熱が発生する。タングステンを冷却水によって冷却する場合には加速器真空との隔壁がパイオンの輸送を妨げる可能性があるため慎重な評価が必要である。本章では、輻射冷却の場合に受け入れ可能な陽子ビーム強度と典型的な水冷標的の解析状況に関して紹介する。

3.2 輻射冷却タングステン標的

焼結したままのタングステンは脆性材料であるため、通常は圧延などの強塑性加工によって高靱性化する。この時、室温でも延性を示し、破壊強度も高まるが融点 3450°C を大幅に下回る再結晶温度で、強塑性加工の効果を失い、再び脆くなる。この現象を再結晶脆化と呼び、タングステンに強度を期待する場合の最高使用可能温度を決定する。核融合炉 ITER で使用される ITER-grade タングステン[8]では、融点を大幅に下回る 1250°C で再結晶脆化する。現在の解析では陽子ビーム強度 3 kW でタングステンの最高温度が 1250°C に達するため目標とする 56 kW には遠く及ばない。ビーム受入可能強度を増大させるためには、タングステンの使用可能温度を上昇させる必要がある。著者らが開発する超耐熱高靱性タングステンは粒界強化された等軸微細粒タングステン合金であり、1650°C に加熱後も延性を示す[9]。この 1650°C をタングステンの最大使用可能温度とすると陽子ビームを 7 kW の強度まで受け入れ可能となる。

さらに、ビーム受入可能強度を増大させるためにはタングステンの輻射率を向上させる必要がある。通常、タングステンは輻射率 0.3 程度であるが、例えば、表面に微細構造や SiC 被覆を形成するなどの高温まで使用可能で、輻射率 1 に近づける事も可能な黒体化処理技術の開発も進められている。このような技術を実現できた場合には、上記の超耐熱高靱性タングステンと組み合わせれば、強制的な冷却を行わなくとも 20 kW の陽子ビーム強度が受け入れ可能となる。Figure 4 に陽子ビーム強度に

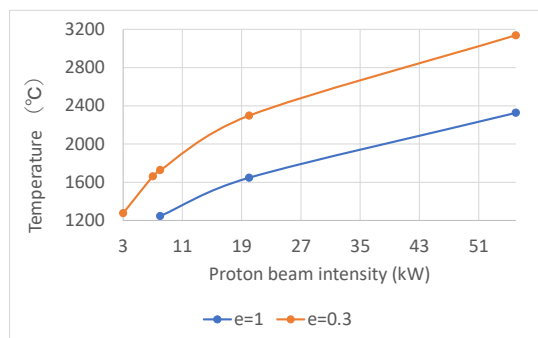


Figure 4: The maximum temperature of tungsten depending on beam intensity and emissivity.

対するタングステンの最高温度を示す。輻射率向上によって、冷却効率が向上するため陽子ビーム受け入れ強度は 20 kW まで向上する。

3.3 水冷タングステン標的

輻射冷却タングステン標的では、最大 20 kW の陽子ビームしか受け入れる事は出来ない。56 kW の陽子ビームを受け入れるためには冷却水による冷却が必要となる。タングステン表面が一様に熱伝達係数 20000 W/m²/°C で冷却されると仮定すると、タングステン表面の最高温度は 140 °C となる。実際には、蒸発潜熱を利用する核沸騰領域の冷却も期待できるため、さらに高い冷却効率も期待できるが、仮に上記の熱伝達係数を仮定し、冷却水の想定使用圧力である沸点 130°C を下回る 120 °C を使用限界温度とすると、解析結果は、使用限界温度を超える。しかしながら、発熱密度の高い領域の形状を最適化すれば、水冷タングステン標的は実現可能と考えられる。Figure 5 に典型的な解析結果 (upper) と表面 (surface) と中心 (center) の温度分布を示す (lower)。

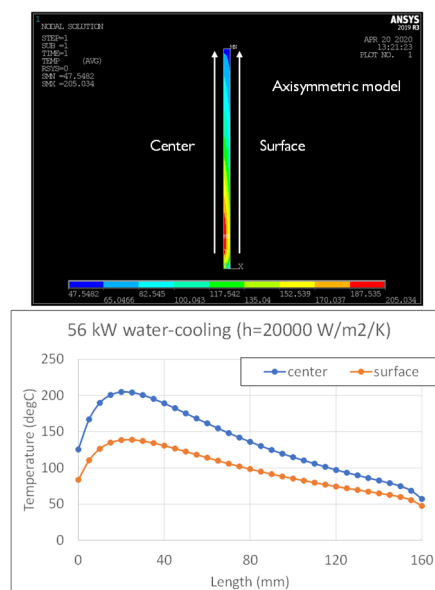


Figure 5: A thermal analysis result. Temperature is estimated along the target center and surface as defined in (upper) and its distribution shown in (lower).

水冷タングステン標的の実現のためには、タングステンの冷却水による腐食を防止するような表面処理や陽子ビームの照射によって高度に放射化した冷却水の循環システムや保守システムの構築も大きな課題となる。

4. まとめと今後の予定

J-PARC COMET 計画におけるパイオン生成標的の解析を進めている。黒鉛標的は Phase 2 でも安定して使用できることが分かった。一方で、パイオンの捕獲・輸送効率を向上させるために高密度な標的材料としてタングステンを使用する場合、輻射冷却では従来のタングステン材料では 3 kW しか使用できない。開発中の超耐熱高靱性タングステンに黒体化処理を実現したとしても受け入れ

可能な陽子ビーム強度は 20 kW が最大となる。COMET で計画している 56 kW の陽子ビームを受けるためには冷却水によって除熱する必要がある。

捕獲・輸送効率をさらに向上させるために標的の形状の最適化が進められている。今後は最終形状を反映した解析を進める必要がある。また、標的材料を冷却する隔壁や標的を支持する支持体はパイオンの輸送を妨げる。このため、パイオンの輸送効率の低減を抑制する構造の検討や、安定した保守を実現する冷却システムの開発が必要である。

参考文献

- [1] The COMET collaboration, “COMET Phase-I technical design report”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 033C01, DOI: 10.1093/ptep/ptz125
- [2] W. Bertl *et al.*, “A search for μ -e conversion in muonic gold”, Eur. Phys. J. C 47, 337 (2006).
- [3] S. Cook, A. Sato *et al.*, “Delivering the world’s most intense muon beam”, PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS 20, 030101 (2017), DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.20.030101
- [4] N.V. Mokhov and C.C. James, "The Mars Code System User's Guide, Version 15 (2016) ", Fermilab-FN-1058-APC (2017).
- [5] <https://www.ansys.com/>, accessed in Aug. 2020.
- [6] Toyo Tanso Co.,Ltd. accessed in Aug. 2020; <https://www.toyotanso.com/>
- [7] S. Makimura *et al.*, “Remote-controlled non-destructive measurement for thermal conductivity of highly radioactive isotropic graphite used as the muon production target at J-PARC/MUSE”, J. Nucl. Mater. 450(1-3) 110 – 116.
- [8] 長谷川晃“ダイバータ対向・構造材料と照射影響研究の現状と研究開発” プラズマ核融合学会誌 92(12) 891 - 896 2016 年 10 月.
- [9] 牧村俊助他“大強度陽子加速器標的材・遮へい体として期待されるタンゲステン” プラズマ核融合学会誌 95(8) 365 - 369 2019 年 8 月.