

## J-PARC MLF MUSE のミュオン生成標的の現状報告

### PERSPECTIVE OF MUON PRODUCTION TARGET AT J-PARC MLF MUSE

牧村俊助<sup>#, A) B)</sup>, 的場史朗<sup>A) B)</sup>, 河村成肇<sup>A) B)</sup>

Shunsuke Makimura<sup>#, A) B)</sup>, Shiro Matoba<sup>A) B)</sup>, Naritoshi Kawamura<sup>A) B)</sup>

<sup>A)</sup> Muon Science Section, Materials and Life Science Division, J-PARC Center

<sup>B)</sup> Muon Science Laboratory, Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

A pulsed muon beam with unprecedented intensity will be generated by a 3-GeV 333-microA proton beam on a muon target made of 20-mm thick isotropic graphite at J-PARC MLF MUSE (Muon Science Establishment). The energy deposited by a 1-MW proton beam is estimated to be 3.9kW in the muon target. The first muon beam was successfully generated on September 26th, 2008. Gradually upgrading the beam intensity, continuous 300-kW proton beam has been operated by a fixed target method without replacements till June of 2014. However, the lifetime of the fixed target will be less than 1 year by the proton-irradiation damage of graphite through 1-MW proton beam operation. To extend the lifetime, a muon rotating target, in which the radiation damage is distributed to a wider area, had been developed. The muon rotating target was installed in September of 2014, and continuous and stable 500-kW proton beam operation has been successfully performed. Recently, new developments of muon target for further higher power operation are in progress. The perspective of the muon production target at J-PARC MLF MUSE will be introduced in this presentation.

#### 1. はじめに

J-PARC/MLF/ミュオンセクション (Muon Science Establishment/ Materials and Life Science Experimental Facility/ Japan Proton Accelerator Research Complex) では、3 GeV, 333  $\mu$ A, 1 MW の陽子ビームによって世界最高強度のパルス状ミュオンを発生させます。ミュオン生成標的は中性子標的の 30 m 上流の  $10^{-5}$  Pa 台の真空中に設置されており、標的材料として 20 mm 厚の等方性黒鉛 (IG-430 東洋炭素 [1]) を採用しています。陽子ビーム径は  $\sigma = 2.3 \sim 3.5$  mm のガウシアン分布をしており、モンテカルロコード PHITS [2] を用いた計算によると 1 MW の陽子ビームによってミュオン標的上で 5% のビームロスが発生し、黒鉛上に約 3.5 kW の発熱が起きると予想されています [3]。2008 年 9 月にミュオンビームが確認されて以来、徐々に陽子ビーム強度が増強され、2012 年 11 月には安定した 300 kW 連続運転が開始されました。運転開始当初は、直径 70 mm の円板上の黒鉛の周囲にステンレスの冷却水配管が埋め込まれた銅フレームを接合し熱伝導によって冷却する固定標的方式を採用していました。黒鉛と銅フレームの熱膨張の差を吸収するためにチタン層を中間に配置しています [4]。Figure 1 にミュオン固定標的の写真を示します。しかし、固定標的方式では黒鉛材の陽子ビームによる照射損傷によって、1 MW の陽子ビームでは寿命が 1 年以下になってしまうと予想されています。ミュオン標的は高度に放射化 (表面線量; 5Sv/h 程度) するために、遠隔操作による交換が必要とされ [5]、多大なるビーム停止時間、作業員の被曝、交換によるコストを伴います。そのため、黒鉛材の照射損傷を分散するために回転標的を開発しました [6-8]。Figure 2 にミュオン回転標的の図を示します。外径 330mm、内径 230mm、厚み 20mm の三分割されたリン

<sup>#</sup> shunsuke.makimura@kek.jp

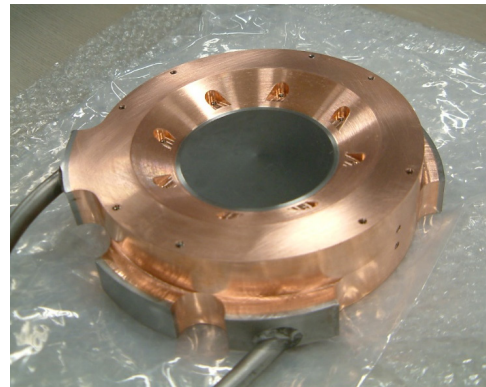


Figure 1: Muon fixed target at J-PARC MLF MUSE.



Figure 2: Muon rotating target at J-PARC MLF MUSE.

グ状黒鉛を標的材料として使用しており、陽子ビーム照射による発熱は輻射によって冷却され、黒鉛の温度は 650°C 程度となります。このとき黒鉛材自体の寿命は十分に長くなりますが、軸受がその寿命を決定し、特に潤滑

剤の選定には注意を払う必要があります。回転標的の軸受は真空内(10<sup>-5</sup>Pa 台)、高放射線(100 MGy/年)、高温(130 °C)で使用するため固体潤滑材を用いる必要があります。通常、このような環境下では SUS440C の外輪、内輪、ボールに潤滑材として銀または二硫化モリブデンをコーティングした軸受を使用します。しかし、この場合、潤滑材の量に制限があるため軸受の寿命は短くなります。そのため J-PARC ミュオン回転標的ではより多くの潤滑材量によって 10 年の寿命を目指して、二硫化タングステン焼結した固体潤滑材をセパレータとして用いている WS 軸受(JTEKT Co., LTD [9])を採用しています。

2014 年 9 月にミュオン固定標的はミュオン回転標的に交換され、2018 年 6 月末までの 4 年間、一度もインターロックによってビームを停止させることなく運転を継続しました。総運転時間は 12600 時間、回転数は 1220 万回転に達しました。2018 年 7 月 3 日には、1 時間の 1 MW 相当運転(935 kW)を実施し、その挙動が想定した範囲に収まっている事を確認しました。

## 2. ミュオン標的システム

### 2.1 ミュオン標的システム

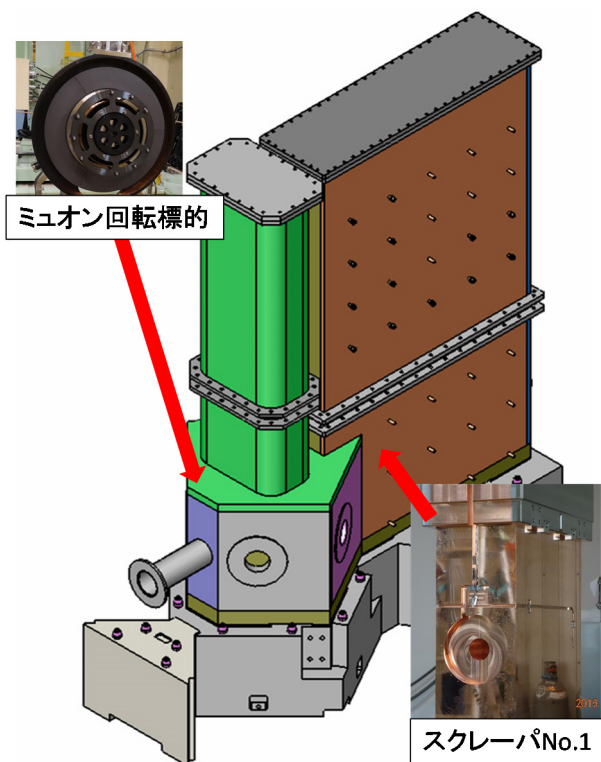


Figure 3: Muon target system.

ミュオン標的システムはミュオン回転標的と2機のスクレーパ No.1、スクレーパ No.2、それらを格納するミュオン標的のチェンバで構成されます。陽子ビームによる発熱はそれぞれ、4 kW、19 kW、6 kW、10 kW です。スクレーパは標的上で散乱した陽子ビームをコレレートする役割を持っており、銅の中にステンレス製 SUS316L の配管が HIP 法によって埋め込まれています。スクレーパには 10 対の熱電対が取り付けられており、温度を計測しており

ます。スクレーパ No.1 は 2015 年に大強度に対応できるように新たに導入されました [10]。スクレーパ中の温度差が 100°Cを超えないように設計されています。ミュオン標的のチェンバはステンレス SUS304 で製作されており、ステンレス製 SUS316L 配管をアルミ溶射で接合しています。20 対の熱電対が取り付けられており、ミュオン標的のチェンバの温度が 100°Cを超えないように設計されています。Figure 3 にミュオン標的システムの概要を示します。

### 2.2 ミュオン回転標的

ミュオン回転標的の黒鉛部は、陽子ビームに照射されることによって約 4 kW の熱が発生しますが、回転しているため直接、温度を計測する事は出来ません。運転中は回転している事が重要なので、回転モーターのトルクと回転速度を常時監視しており、モータートルクがある閾値以上になった時、回転速度がある閾値以下になった時、サーボモーター偏差異常等でビームを停止させます。また、冗長性を確保するために、回転の停止が検出できなかった場合でも、黒鉛温度の上昇を検知するためにビームラインの真空圧力劣化によってもビームを停止させます。軸受や黒鉛材を輻射によって間接的に冷却する冷却ジャケットの温度も監視しており、冷却水の停止を検出する事が出来ます。

これらに加えて、回転軸の温度を計測するために、中空な回転軸に熱電対を挿入し、間接的に温度を計測しています。これまでの試作機による実験では、モータートルクの上昇、すなわち軸受の損耗に伴い、回転軸温度が上昇する現象が観測されています。Figure 4 に軸温度

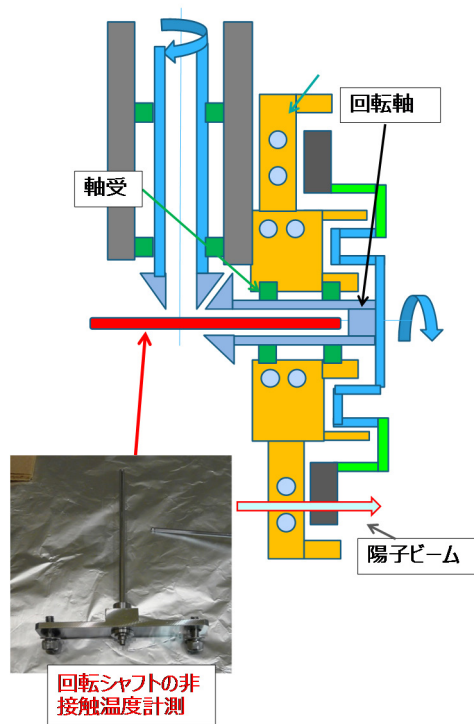


Figure 4: Thermo-couples to measure the shaft of the rotating target.

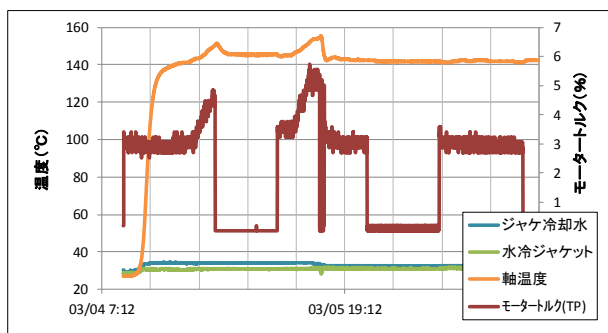


Figure 5: Temperature variation of the shaft of the rotating target.

を計測する熱電対の概念図、Fig. 5 に試作機での実験においてモーター温度と軸温度が相関を取れている例を示します。

回転する黒鉛材のみを観測する熱絶縁された熱電対が冷却ジャケットの左右に取り付けられています。散乱した陽子ビームによる発熱より、やや多い程度の数 mW の輻射熱を黒鉛材から受けます。反応速度も遅いので、参考値として計測を開始し、運用の中で閾値を決定していく計画です。Figure 6 に黒鉛材の非接触温度計の写真を示します。

### 3. ミュオン標的システムの 1 MW 運転

#### 3.1 ミュオン標的システムの 1 MW 試験

2018 年 7 月 3 日には、1 時間の 1 MW 相当運転 (935 kW) を実施しました。スクレーパ以外は熱平衡に達しませんが、過去の実績と比較して予想の範囲内であることを確認しました。スクレーパ No.1 は到達最高温度が予測値 60 °C に、ほぼ近いことが分かりました。Figure 7 に 1 MW 運転におけるスクレーパ No.1 の実測値を示します。

#### 3.2 ミュオン回転標的の 1 MW 試験

ミュオン回転標的の温度分布は有限要素法と差分法にて評価を行っています。それぞれは 20 °C 程度の差が出ているが、同じような傾向を示しています。しかしながら、回転体の温度は直接、計測する事が出来ないため、

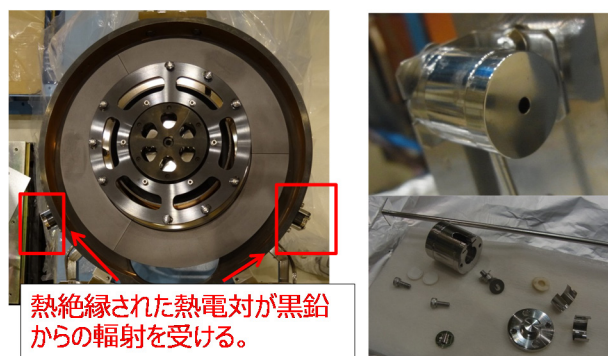


Figure 6: Non-destructive temperature measurements of the graphite.

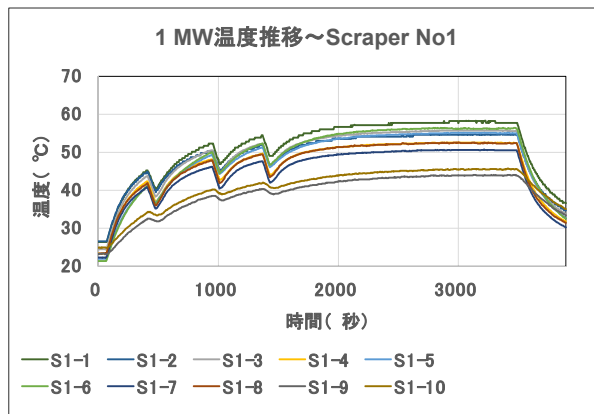


Figure 7: Temperature variation of the Scraper No.1.

2 項に示したような非接触な温度計測を実施しており、これらは過去の運転実績と相対的に比較されます。Figure 8 に回転軸温度と黒鉛平均温度の解析値の温度依存性と非接触温度計による実測値の比較を示します。

1 時間の運転では、どちらも熱平衡には到達しません。1 時間、ビームが停止しない場合には、過去の運転実績から推測される温度上昇は、軸温度 85 °C、黒鉛温度 (右) は 75 °C、黒鉛温度 (左) は 90 °C でした。実際には軸温度 95 °C、黒鉛温度 (右) は 70 °C、黒鉛温度 (左) は 82 °C でした。複数回ビーム停止があり、また、軸温度は特に時定数が大きいので 1 時間の大強度運転前の調整運転の影響も受けてしまったため、完全に予測とは一

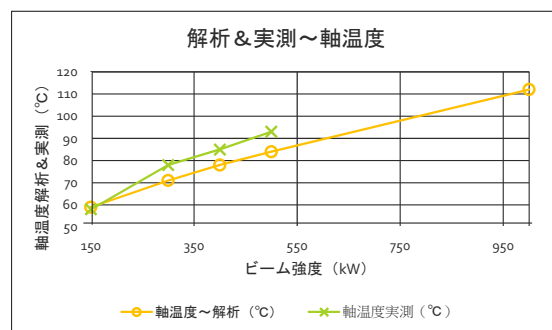
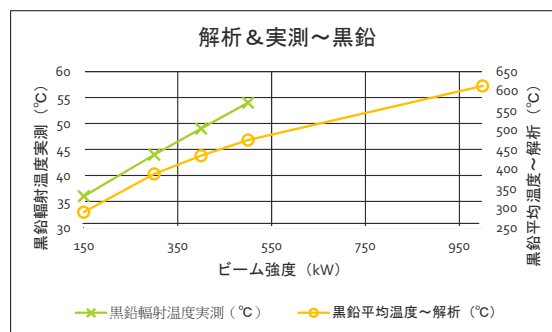


Figure 8: Comparison between analysis and measurement for temperatures of the shaft and the graphite with the beam intensity dependence.



PASJ2018 FROM02

致しませんでした。おおむね予想の範囲内であったと言えます。Figure 9 に、黒鉛温度(右、左)、軸温度の実測値を示します。熱平衡に達していない事が分かります。

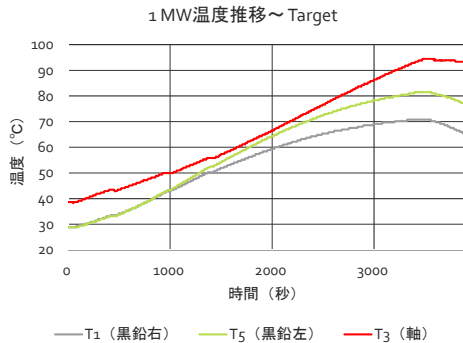


Figure 9: Temperature variation of the graphite (Left), the graphite (right), and the shaft at 1 MW operation.

#### 4. まとめ

J-PARC/MLF/ミュオンセクションでは、2014年に二硫化タングステン潤滑材を採用した回転標的の運用を開始しました。2018年6月末に至るまで4年間の安定運転を継続しました。2018年7月3日には1 MW相当(935 kW)の試験運転を行いました。スクレーパは1 MWで運転可能であることを確認できました。回転標的は評価に近い事を確認できましたが、熱平衡には至っていないので長期運転試験が望まれます。

#### 参考文献

- [1] [http://www.toyotanso.co.jp/index\\_en](http://www.toyotanso.co.jp/index_en)
- [2] H. Iwase, K. Niita, T. Nakamura (2002), J. Nucl. Sci. Technol. 39: 1142.
- [3] N. Kawamura *et al.*, (2009) Nucl. Instrum. Methods A 600: (2009)114.
- [4] S. Makimura *et al.*, (2009) Nucl. Instrum. Methods A 600: (2009)146–149 JPS Conf. Proc. 21, 011058 (2018)
- [5] S. Makimura *et al.*, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Japan, Aug. 4–6, WEPS054, 479–483. (2010)
- [6] S. Makimura *et al.*, J. Radioanal. Nucl. Chem., 305, 811–815, 10.1007/s10967-015-3949-0. (2015)
- [7] S. Makimura *et al.*, JPS Conf. Proc. 21, 011058 (2018)
- [8] KEK Proceeding 2014-5, ミュオン回転標的レビュー報告書および発表資料;  
<https://lib-extopc.kek.jp/preprints/PDF/2014/1425/1425005.pdf>
- [9] <http://www.jtekt.co.jp/e/index.html>