

J-PARC/MUSE におけるミュオン生成標的の 300kW 陽子ビーム運転報告 REPORT FOR MUON PRODUCTION TARGET WITH THE 300-KW PROTON BEAM OPERATION AT MUSE/MLF/J-PARC

牧村俊助^{#A)}, 清水亮^{B)}, 河村成肇^{A)}, 明午伸一郎^{C)}, 三宅康博^{A)}, 小林庸男^{A)}, 大井元貴^{C)}, 坏敦^{C)}, 池崎清美^{C)}, 鬼澤聡志^{B)}, 松澤行洋^{B)}, 幸田章宏^{A)}, 藤森寛^{A)}, 下村浩一郎^{A)}, ストラッサーパトリック^{A)}, 小嶋健児^{A)}, 西山樟生^{A)}, 中村惇平^{A)}, 門野良典^{A)},

Shunsuke Makimura^{A)}, Ryo Shimizu^{B)}, Naritoshi Kawamura^{A)}, Shinichiro Meigo^{C)}, Yasuhiro Miyake^{A)}, Yasuo Kobayashi^{A)}, Motoki Ooi^{C)}, Atsushi Akutsu^{C)}, Kiyomi Ikezaki^{C)}, Satoshi Onizawa^{B)}, Yukihiro Matsuzawa^{B)}, Akihiro Koda^{A)}, Hiroshi Fujimori^{A)}, Koichiro Shimomura^{A)}, Patrick Strasser^{A)}, Kenji M. Kojima^{A)}, Kusuo Nishiyama^{A)}, Jumpei Nakamura^{A)}, and Ryosuke Kadono^{A)}

A) *Muon Section, J-PARC Center, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)*

203, Shirane, Shirakata, Toukaimura, Nakagun, Ibaraki, 319-1106, Japan

B) *The NIPPON ADVANCED TECHNOLOGY CO., LTD (NAT)*

3129-45 Hibara Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

C) *Neutron Source Section, J-PARC, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)*

2-4, Shirane, Shirakata, Toukaimura, Nakagun, Ibaraki, 319-1106, Japan

Abstract

The most intense pulsed muon beam will be generated by a 3-GeV 333-microA proton beam on a muon target made of 20-mm thick isotropic graphite (IG-430) in J-PARC/MUSE (Muon Science Establishment). The energy deposited by a 1-MW proton beam is estimated to be 3.9kW on the muon target. The first muon beam was successfully generated on September 26th, 2008. Gradually upgrading the beam intensity, continuous 300-kW proton beam operation was started in January of 2013. The temperatures of the principle components have been measured and recorded through thermocouples and a control system. The lifetime of the muon target is determined by a proton-irradiation damage of the graphite. Even in the 300-kW operation to July of 2013, the radiation damage was anticipated to surpass the lifetime. Therefore, the position of the proton beam has been moved to eight surrounding positions every three weeks to distribute the radiation damage uniformly to a wider area. The position-control is named EXILE operation. The variation of the temperatures at the muon target has been monitored. In this report, the status of proton beam operation and the lifetime extension of the muon target will be described.

1. はじめに

J-PARC/MLF/ミュオンセクション (Muon Science Establishment/ Materials and Life Science Facility/ Japan Proton Accelerator Research Complex) では、3 GeV, 333 μ 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 MLF の中性子上流に設置され、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。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、2009 年 11 月には 120 kW 連続運転を行い、2010 年 11 月には 200 kW 連続運転が開始されました [2]。その後、震災での休止期間を経て、220 kW 運転が再開され、2012 年 11 月からは 300 kW 連続運転が開始されました。現在はミュオン標的の冷却には直径 70 mm の円板上の黒鉛標的を用いた固定標的方式を採用しており、ステンレスの冷却水配管が銅フレーム内に埋め込まれ黒鉛材を熱伝導によって冷却しています。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 [3]。モンテカルロコード PHITS [4] 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に 3.9 kW の発熱が起きると予想されています [5]。ミュオン標的は真空内に設置されるので、ほとんど全ての熱は冷却水によって除去されます。図 1 にミュオン標的の写真を示します。



図 1: ミュオン標的 (固定標的方式)

[#] shunsuke.makimura@kek.jp

2. 陽子ビーム運転状況

黒鉛材は陽子ビームや中性子照射によって損傷を受け、寸法変化が発生し、照射開始時には主に収縮します。これまで実施された中性子照射効果の研究によると放射線損傷 1 dpa (displacement per atom) の照射によって最大 1 % の収縮が発生します [6]。ミュオン標的の場合は、黒鉛材の照射部が収縮する一方で、陽子ビーム非照射部によって拘束され破損すると予想しています。その破損する放射線損傷閾値は、安全係数を考慮し 0.8 dpa と仮定しています。これはビーム径 24 mm (ガウシアン分布 $\sigma=6$ mm ; 以後、ビーム径は σ の 4 倍で定義する) の 1 MW 陽子ビーム運転において、約半年に相当します。これまでの運転では、陽子ビーム強度は 1 MW には達しておらず、一方で実際に運転されたビーム径は当初の予定より、小さな値でした。また、ミュオン標的の下流への影響を考慮するとビーム径は小さなまま運転することを要求されました。その際に、300 kW 運転を、計画しているビーム径 14 mm で継続すると、黒鉛材の寿命の閾値を大幅に超えてしまうことが判明しました。そのため 2012 年 3 月よりビーム径は 14 mm を維持したまま、ビーム位置をミュオン標的中心から上、下、左、右、右上、右下、左上、左下 (ビーム進行方向から見る) に各 4 mm ずらして、黒鉛の放射線損傷を分散させる標的上位置ビーム制御運転 (通称 ; EXILE 運転) を開始しました。図 2 に EXILE 運転の概念図および放射線損傷の低減の効果を示します。

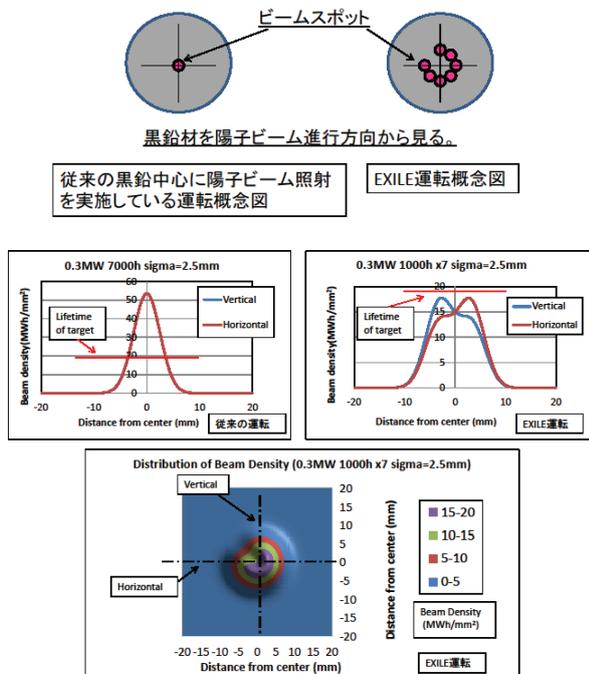


図 2 ; 従来の運転概念図と EXILE 運転概念図、および放射線損傷の低減の効果。
仮に黒鉛の放射線損傷を分散させるためにビーム径を大きくするとミュオン標的の下流でのビームロスが大きくなると同時に、中性子標的でのビーム径を小

さくする必要がある、中性子標的の寿命が短くなります。EXILE 運転においては、ミュオン標的の上下流のステアリング磁石によって標的位置での陽子ビームは平行に移動されるためビーム輸送に関するビームロス、ほとんど変わらず、中性子標的上でのビーム径を大きくすることが可能となりました。

3. ミュオン標的計測系による運転監視

ミュオン標的の上流の銅フレーム上のチタン層との境界付近には 8 個の熱電対 (上下に各 2 個、左右に各 2 個) を配置して温度を計測しています。銅フレームの外側にも左右に各 1 個ずつ熱電対を配置し、温度を計測しています。また、冷却水の標的への入水温度と出水温度も熱電対によって計測しています。これらの温度計測に用いている熱電対は常温において 3 °C 程度の誤差を持っています。そのため、ビーム停止時のなるべく温度変化の少ない時間帯を選び、熱電対の計測温度の校正を行いました。流量に関しては、耐放射線性を考慮し、単純な構造の流量計を想定しており、流量を直接アナログ信号で取り出していません。そのため冷却水の流量計の表示を撮像管カメラで観察することによって、定期的に流量を確認しています。よって、その測定精度はそれほど高くありません。

冷却水入水温度は外気温や電磁石の運転状況によって大きく変化します。出水温度と入水温度の差はビーム運転時にはビームロスにより大きくなり、冷却水流量と冷却水の温度上昇からミュオン標的におけるビームロスを計測することが出来ます。東日本大震災後には陽子ビーム強度が 120 kW から 300 kW に徐々に増強されました。この時に冷却水の温度上昇と流量からビームロスの評価しました。比較のために、全て陽子ビーム強度 1 MW 換算で標準化します。ビームロスの評価値は 3500 W から 4300 W と大きなばらつきがありましたが、陽子ビーム強度が増強された 300 kW 時にはビームロス評価値は 3600 W から 3800 W と安定し、また、PHITS によるビームロスのシミュレーションと近い値を得ることが出来ました。

4. EXILE 運転の解析と実測値の比較

次に、EXILE 運転によって、ミュオン標的の銅フレームに配置した熱電対の温度上昇に関して、検証を行いました。実測値と比較をするために黒鉛中心から 4 mm オフセットして陽子ビームによって照射される標的に関して有限要素法を用いた熱解析を行いました。冷却水温度 30 °C、冷却水配管と冷却水の間熱伝達係数は 12000 W/m²/K としました。銅、ステンレス、チタンの熱伝導率は各々 380 W/m/K、15 W/m/K、17 W/m/K としました。黒鉛材の熱伝導率に関しては、陽子ビーム強度 1 MW 時にはアニールの効果で熱伝導率は高くなるのですが、低温照射時の 20 W/m/K (ビーム照射部)、50 W/m/K (非照射部) としました。ビーム径 14mm に一様に発熱すると仮定します。陽子ビーム強度 300 kW 運転の場合の方が、温度差が大きくなり解析と実測値の比較

をしやすいのですが、実際の 300 kW 運転の際には右上、右下、左下に照射したため、上下左右に配置した熱電対では比較が難しくなります。よって、陽子ビーム強度 200 kW の解析と実測値の比較を行います。図 3 に陽子ビーム強度 200 kW、EXILE 運転時の温度分布を示します。

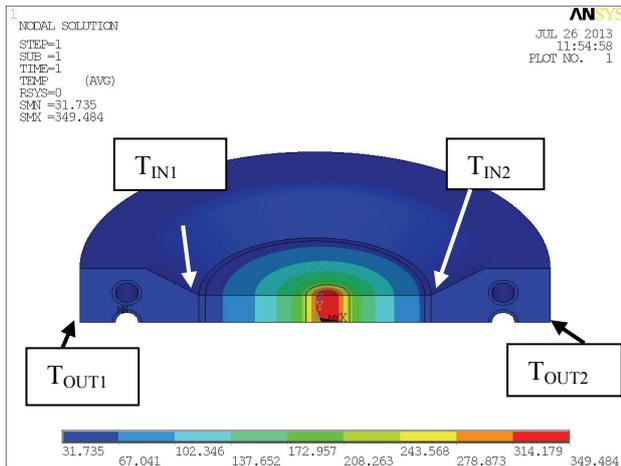


図 3 ; 陽子ビーム強度 200 kW、EXILE 運転時の温度分布

実測値と熱電対位置の解析における温度を比較します。解析においては EXILE 運転によってオフセットされた陽子ビームの遠隔側の銅フレーム内側温度を T_{IN1} 、近接側の内側温度を T_{IN2} 、遠隔側の銅フレーム外側温度を T_{out1} 、近接側の外側温度を T_{out2} とします。 T_{IN1} は 37.1 °C、 T_{IN2} は 39.3 °C と約 2.2 °C の温度差となっています。 T_{out1} は 33.3 °C、 T_{out2} は 34.0 °C と約 0.7 °C の温度差となっています。

実測値の整理にあたって、陽子ビーム運転時は、頻繁にビームが停止するため、ビーム停止時のデータは除いて、評価しています。また、冷却水入水温度は大きく変化するので、銅フレームを計測しているそれぞれの熱電対の実測値から冷却水入水温度の差を解析における温度と比較しました。陽子ビームを運転している RUN の内、温度変動が比較的安定している一週間から二週間程度の平均値を採用しています。表 1 に銅フレーム温度の実測値と冷却水入水温度の差を示します。解析との比較のための T_{IN1} と T_{IN2} の温度差は表中の IN 温度差に相当します。同様

に T_{out1} と T_{out2} の温度差は表中の OUT 温度差に相当します。実測値は、解析の傾向に一致していることがわかりました。

5. まとめと今後の予定
黒鉛材の放射線損傷を分散させ、ミュオン標的の寿命を長期化するために EXILE 運転を開始した。ミュオン標的に配置した熱電対による温度の実測値と解析における温度と比較した。実測値は解析の傾向に一致していることがわかりました。今後は、より黒鉛材の放射線損傷を分散させる回転標的方式に移行することが計画されています。

参考文献

[1] <http://www.toyotanso.co.jp/index>
 [2] S. Makimura et al., Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (2011) p1188-1191
 [3] S. Makimura et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A:600 (2009) 146-149
 [4] H. Iwase, K. Niita, T. Nakamura, Journal of Nuclear Science and Technology 39 (2002) 1142.
 [5] N. Kawamura et al., Nuclear Instruments and Methods A 600 (2009) 114.
 [6] H. Matsuo, graphite1991 [No.150] 290-302

RUN No	40	41	42	43-1	43-2	44	45	46	47
ビーム位置	中心	右側	上側	下側	下側	左側	右上	右下	左下
ビーム強度	113 kW	206 kW	209 kW	212 kW	206 kW	212 kW	273 kW	282 kW	309 kW
期間	2012/3/5 ~3/14	2012/3/17 ~3/21	2012/4/24 ~4/29	2012/5/29 ~6/6	2012/6/11 ~6/20	2012/10/27 ~11/12	2012/12/6 ~12/12	2013/1/14 ~1/20	2013/2/25 ~3/4
平均流量	9.5 L/min	8.9 L/min	8.9 L/min	8.1 L/min	7.2 L/min	9.7 L/min	8.3 L/min	8.0 L/min	8.0 L/min
IN上1	31.9	35.2	37.2	35.1	35.5	36.9	39.2	37.4	39.0
IN上2	31.9	35.7	37.1	35.4	35.7	36.0	39.3	37.7	38.0
IN右1	31.9	36.3	35.6	34.5	34.8	33.9	38.3	38.1	37.1
IN右2	32.4	37.4	35.5	36.4	36.9	34.7	38.8	40.0	38.9
IN下1	32.5	36.7	34.7	37.3	37.8	35.0	37.6	39.7	39.6
IN下2	32.5	35.7	34.7	37.2	37.7	36.0	37.2	38.8	40.4
IN左1	32.1	34.6	34.8	35.8	36.2	36.2	36.7	37.3	39.9
IN左2	32.0	34.3	35.7	34.7	35.0	36.5	37.2	36.8	39.3
OUT右	31.3	34.9	33.9	34.0	34.3	33.6	36.5	36.9	36.3
OUT左	31.2	33.6	33.8	34.1	34.3	34.4	35.5	35.7	37.2
IN温度差	-	2.4	2.4	2.0	2.1	2.1	-	-	-
OUT温度差	-	1.3	-	-	-	0.8	-	-	-

表 1 ; 銅フレーム温度の実測値と冷却水入水温度の差