

1.2 μm チタンフォイルを用いたマルチリボンビームプロファイルモニター NEW MULTI-RIBBON BEAM PROFILE MONITOR WITH TITANIUM FOIL OF 1.2 MICRONS FOR INTENSE PROTON BEAM IN THE J-PARC

秋野英之^{#, A)}, 橋本義徳^{B)}, 三谷 稔^{C)}, 大津 聡^{A)}, 大森雄基^{A)}, 瀧山陽一^{D)}, 外山 毅^{B)}
Hideyuki Akino^{#, A)}, Yoshinori Hashimoto^{B)}, Minoru Mitani^{C)}, Satoru Otsu^{A)}, Yuki Omori^{A)}, Youichi
Takiyama^{D)}, Takeshi Toyama^{B)}

^{A)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.: 2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045

^{B)} KEK/J-PARC: 2-4 Shirakata Shirane, Tokai, Naka-Gun, Ibaraki, 319-1195

^{C)} Minotos Engineering, 1-16-28 Naka, Kunitachi, Tokyo, 186-0004

^{D)} AIRY CO., LTD., 2-12-2 Amakubo, Tsukuba, 305-0005

Abstract

For the measurement of beam profile of high-intensity proton beams of 3GeV in the injection beam transport line for the main ring of J-PARC (3-50 BT), the multi-ribbon profile monitor (MRPM) using a graphite ribbon of 1.6-3 μm thickness has been used.

Currently, the production of this graphite at the manufacturing company until now has been cut off, so different companies has been working on the development of such a graphite with us. Under such a circumstance, new five set of MRPM was needed. We tried to make this targets with titanium foils of 1.2 μm thickness in place of the graphite.

For heat resistance, melting point of titanium of 1668 $^{\circ}\text{C}$ is lower than that of the graphite of about 3000 $^{\circ}\text{C}$. There is also a disadvantage for titanium that its beam loss amounts to about 2.2 times larger than that of the graphite per unit thickness. So from the point of view of heat generated by the beam loss in the material, titanium is inferior to graphite. However, the temperature rise due to the heat generation of the beam loss in the 3-50 BT, is estimated about 400 $^{\circ}\text{C}$ maximum in the case of design beam intensity of 4×10^{13} protons/bunch, it is acceptable. Further it must be also considered that the titanium is superior in terms of mechanical strength and toughness. For these reasons, it was determined that the titanium foil of 1.2 μm as the MRPM target will be enough to endure against the current beam intensity of $1.5\text{-}2.0 \times 10^{13}$ protons/bunch.

Multi ribbon targets of 1.5 ~ 3.5 mm width of 32ch, and 220 mm length were fabricated by cutting a green laser in an argon atmosphere. And then their MRPMs of total five were installed in 3-50 BT in this early spring, finally high intensity beam profiles of 1.5×10^{13} protons/bunch were successfully measured.

In this paper, focusing on target fabrication technology, latest high-intensity beam profile measurement is also described.

1. はじめに

1.2 ミクロンのチタンフォイルは、入手できる圧延整形の長尺フォイルとしては一番薄い部類に入るものと思われる。かつて J-PARC 建設当初の $10^{11}\text{-}10^{12}$ protons/bunch オーダーのビーム強度のプロファイル計測での使用を検討した材料であった。当時においても均質な 220 mm 以上の長さをもつグラファイトフォイルの開発に時間がかかっていたため、それが間に合わない場合の代替としてである。今回も新たに開発しているグラファイトは 1~2 ミクロンの厚みの製作が可能となっているが、製造装置の都合により 150 mm 以上の製造にはしばらく時間が必要な状況であった。現在使用している 1.6~3 ミクロンのグラファイトを用いた 3-50 BT ビームの

測定[1, 2]の経験や解析から大きく見積もっても 200 ~ 400 度の温度上昇に耐えることができれば、当面のビーム強度である $1.5\text{-}2 \times 10^{13}$ protons/bunch のビーム計測ができると判断し、チタンフォイルでの MRPM ターゲットの製作に踏み切ることにした。

しかし、以前 1.2 ミクロンのチタンフォイルを断念したもう一つの理由として、大気中でのレーザーカットではチタンがレーザーパワーの集中により焼失してしまう問題が残っていた。この現象は 5 ミクロン以上の厚みのチタンフォイルでは生じず、1.2 ミクロンにすることで発生していた。レーザーのパワー密度をできる限りの最小にしても発生するものであり、一瞬にして目の前から大きなチタンフォイルが消え去る手品のような現象である。重量に対する表面積比が大きい場合に起きる、粉体や粉じんの山が一瞬に爆発する現象と同様なものとみられる。真空または、不活性ガスを充満した容器内でレー

[#] gakkai@kasokuki.com

ザーカットする方法はすぐ思い浮かぶが、そのような装置で加工用のレーザービームを透過させるためのガラスは、レーザービームでの破損を避けるために不純物や脈理などがなく、 $230 \times 230 \text{ mm}^2$ 程度以上 (3-50 BT の MRPM のターゲットサイズ) の大きさを有し、かつ容器内を真空にするために大気圧に耐えられる 15 mm 程度の厚みが必要と考えてきた。対応できるのは脈理フリーの石英ガラスであり、大変高価であるため、断念したままになっていた。

今回のトライでは、そのような方法を取らずに次の2つの方法を試すことにした。一つは波長 532 nm のグリーンレーザーを用い、できるだけ収束勾配を高めた光学系を用いることである。それはビームが切断チタン面に至る前のガラス透過部ではレーザーのパワー密度をできるだけ抑える目的をもつ。二つ目は、容器中は真空にするのではなくアルゴンガスをフローさせることである。そのようにして容器内を真空に置換しない方法をとればガラスを薄くできる方法であり、さらには多少の不純物がガラス中にあっても影響をもたらさないと予想された。

2. グリーンレーザーによるチタンフォイルのカット

2.1 予備試験：カットのためのガラス板とガス種

1.2 ミクロンチタンフォイルのグリーンレーザーによるガス種を変えての切断試験を、弘陽精工 (株) [3]で行った。試験容器は Fig.1 に示すアクリルケースであり、レーザーパワーはこのアクリルにダメージを与えない程度に十分下げた値 (Peak 280~2900 mW) とし、レーザースポットサイズは 30 ミクロンとした。このケース内にガスをフローさせたが、流速を上げすぎるとフォイルが振動するため 100 sccm 程度に流量を抑えた。また、基本的にあらかじめ 5 分のフローを行いケース内でガスが十分に置換された状態でカットを行った。試験したガス種は、不活性でありかつ空気の比重と同じか高い CO_2 , N_2 , Ar の 3 種類である。結論から先に述べると、アルゴンガスをフローさせた状態では、切断したチタンフォ

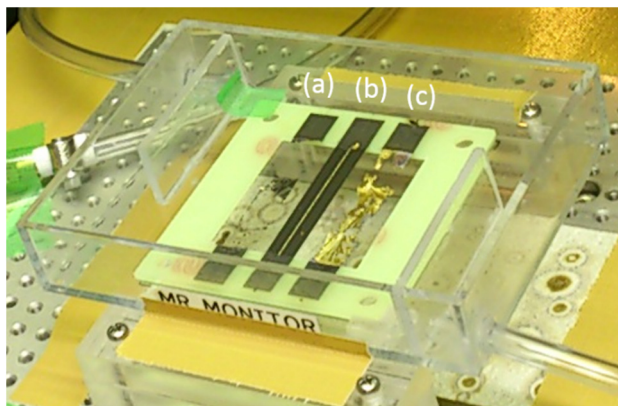


Figure 1: Laser cut tests using gas flow with CO_2 (a), and N_2 (b), (c).

イルのエッジが乱れることなくカットできた。 CO_2 と N_2 での切断結果を Fig.1 に示す。 CO_2 では、切断

開始直後に図の(a)のように焼失した。破片はほとんど残っておらず大気中の切断と同じような結果となった。 CO_2 がレーザーパワーにより解離して発生した酸素による燃焼が生じたと考えられる。また N_2 のフローでは、同図(b)のように切断は可能であったが、切断エッジが金色になりエッジラインがギザギザになる乱れが生じた。また、同じ N_2 でも置換のための 5 分のフローではなく、フロー開始 1 分後のカット試験 (同図(c)) では、半ば焼失状態であるが残破片は金色となった。窒素の反応で金色の TiN が生じることと、ケース内の窒素の置換が不十分であり、残存大気中の酸素が燃焼に寄与したと考えられる。このような試験により、次の結果を得た。

- i. ピークパワー 3W 以下のグリーンレーザーにより 1.2 ミクロンのチタンフォイルを切断することができた。
- ii. このときレーザースポット (切断面) の上方 20 mm の位置にある 2 mm の透明アクリル板はレーザーを透過しダメージを受けない。
- iii. 100 sccm 程度の流量のガスフロー状態のアルゴン雰囲気ではチタンフォイルは焼損しない。

2.2 ターゲットフレームへのチタンフォイルのアプライ

本番のレーザーカットは、3-50 BT 用 MRPM のセラミックフレーム [1] へチタンフォイルを貼り付けた状態で行う。従来のグラファイトと同様に仮フレーム (ガラスエポキシ:G10, 2.0° mm) に張り付けたフォイルにテンションをかけてセラミックフレームへの圧接を行う [1]。使用したチタンフォイルは圧延整形されたロール巻のものであり、ミルエンド部を除いた正味幅は 56 mm であった。また検査成績書にある厚み公差は、 1.2 ± 0.12 ミクロンであった。

MRPM セラミックフレーム (Fig.2)は、内寸 $200 \times 200 \text{ mm}^2$ であり、33ch の電極が AgPd プリントパターンになっている。チタンフォイルの幅の上限が

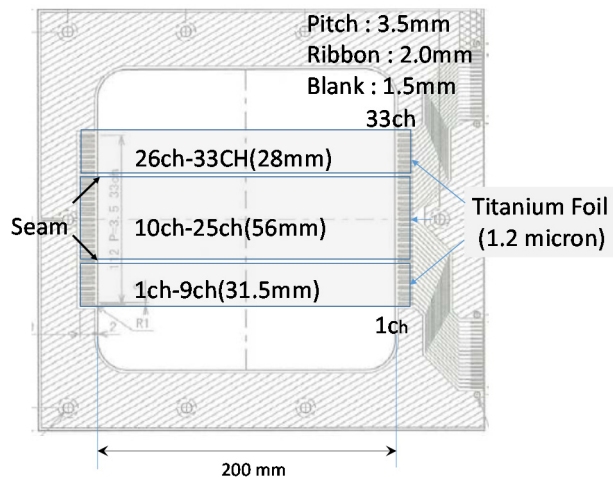


Figure 2: MRPM frame and distributed Ti foils.

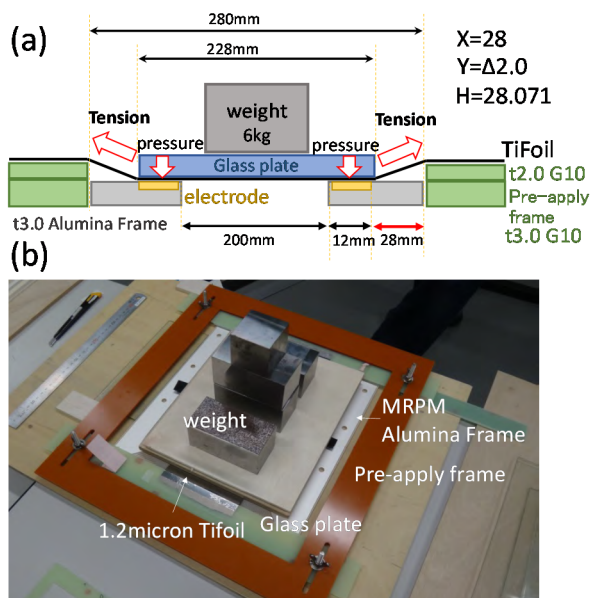


Figure 3: Tensioned foil was welding with epoxy based glue by weighting. (a) Schematic view, (b) actual photo.

56 mm であるために、Fig.2 に示すように、領域を 3 分割してアプライした。アプライの直前にスクリーン印刷で電極端子に耐放性の導電性接着剤をあらかじめ印刷しておき、印刷してから 5 分程度の時間でアプライは完了する。

アプライでは、伸び率がほぼゼロのグラファイトと違って、チタンフォイルは延性をもつため、テンションをかけすぎるとしわが発生する。テンションは、Fig.3 (a) に示すように、段差を利用して発生させている。この図では 28 mm の部分に対して 70 ミクロン程度の伸びに相当する力である。圧接のためのウェイトは 6kg とした。

2.3 アルゴン雰囲気中でのレーザーカット

グリーンレーザーによるカットは Fig.4 のようなガスフローケースにチタンフォイルをアプライしたセラミックフレームをセットして行われた。上面のガラスは、1mm 厚みのソーダ石灰ガラスに変えてある。電極部まで入れた長さ 228 mm のリボンに 33 ch 切断する (33 往復) 時間は、5 分程度であった。またフレーム 1 枚あたりの切断に要するアルゴンガス量は、100 L 程度であった。レーザーカットでは、

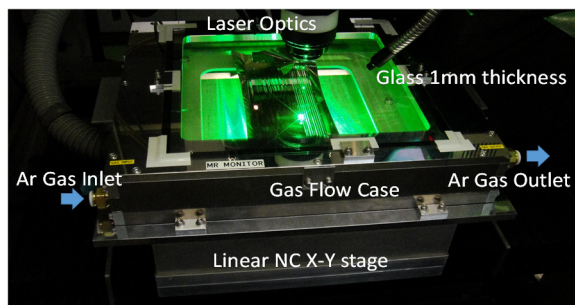


Figure 4: Multi-ribbon target fabrication by a green laser in argon atmosphere.

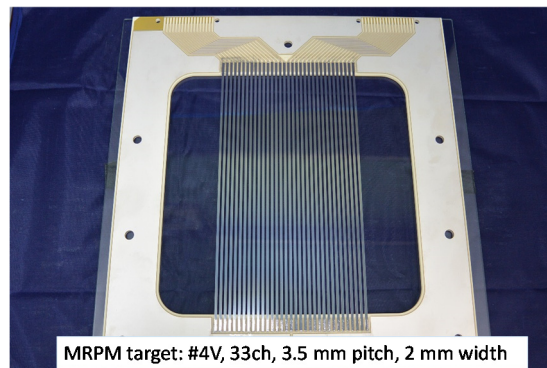


Figure 5: Fabricated Multi-ribbon target.

レーザーの焦点深度が 70~100 ミクロン程度であるために、切断面での平坦性が要求される。セラミックフレームの平坦性を含むアプライされたフォイルの平坦性、およびレーザー加工機のステージ上での水平ポジショニングがポイントである。

今回は、MRPM 実機 5 台 (H, V ターゲット各 1 枚/セット) であるために、予備を含めて合計 16 枚のカットを行った。レーザーカット後のマルチリボンターゲットを Fig.5 に示す。一様なりボンが 33 ch 並んだ、適度なテンションの利いた状態に仕上げることができた。

2.4 切断されたリボン幅の測定

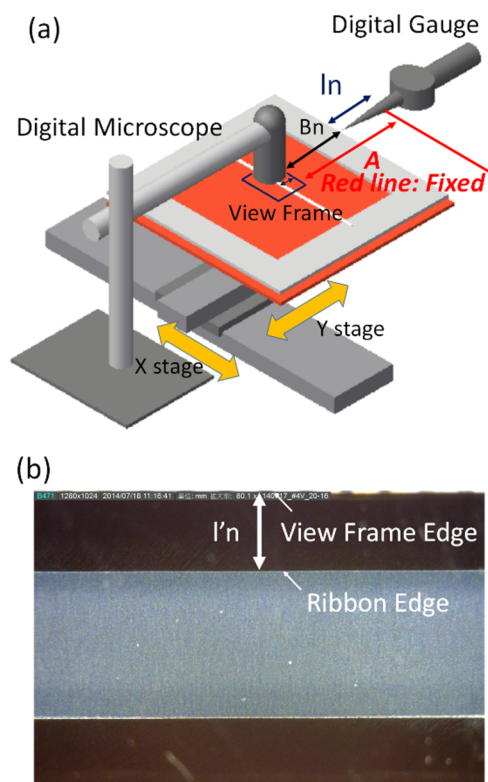


Figure 6: An instrument for ribbon position and width distribution measurement using a digital-microscope and a digital-gauge. (a) A layout of instrument. (b) A view of ribbon edge by the digital microscope.

リボン幅の差は実際のターゲットとしての使用時に二次電子の放出量に影響するために、リボン幅をデジタルマイクロスコープで詳細に計測した。測定装置を Fig. 6 に示す。マルチリボンの貼られたセラミック基板を直交する X-Y ステージに載せ、セラミック基板の位置 (ln) をデジタルゲージで測定し、基板上的リボンエッジの位置はデジタルスコープで視野の端部からの距離 (l'n) として測定する。デジタルゲージとデジタルスコープを X-Y ステージが載っている机に固定しておくことで、リボンエッジなどの基板上的位置は、ln と l'n を使って測定することができる。予想される測定誤差は、デジタルゲージの最大 5 μm のシステム誤差と、デジタルスコープの 7 μm の読み取り誤差である。まず、デジタルスコープだけを使ってターゲット中央部のリボン幅を計測したときの典型的な結果を Fig.7 に示す。

図(1)では、ch 毎のリボン幅 (赤) と隣接するリボンまでのブランク距離 (青) をプロットし、(2)では、その統計を示す。これらは、大部分が 2 mm ± 10 μm のリボンが形成されたことを示している。一方、フォイルの継ぎ目または端部 (Fig.7: 1 ch, 10 ch,

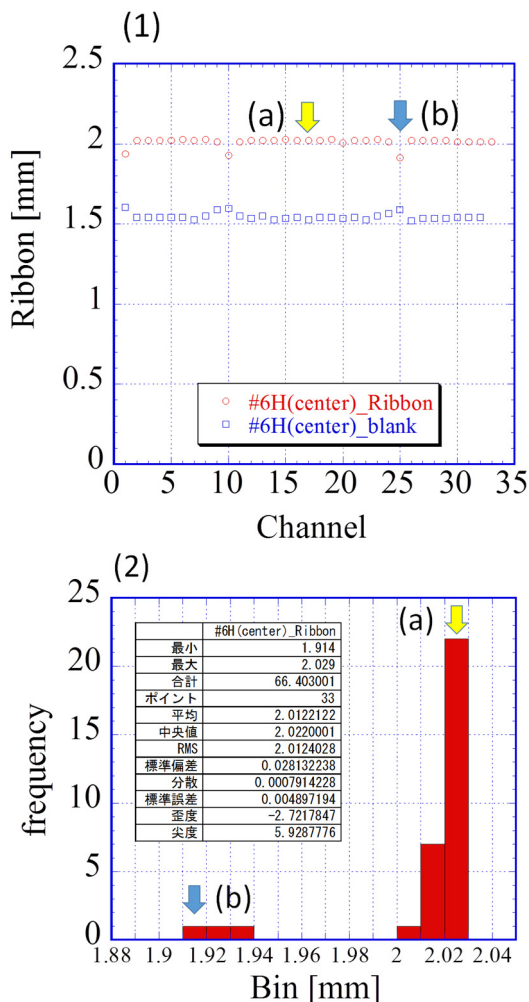


Figure 7: A typical results of ribbon-width measurement. (1) position dependency, (2) statistics.

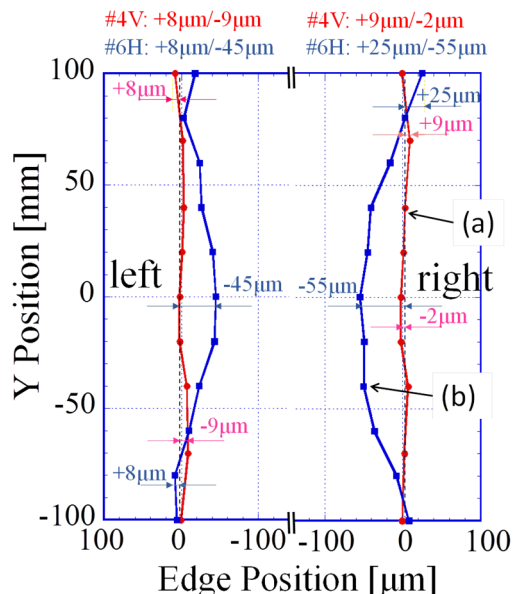


Figure 8: Ribbon profiles. (a) 25 ch, (b) 17 ch, both in Fig. 7.

25 ch) では、リボン幅が 100 ミクロン程度細い(b)。このリボン形状を測定し、通常のリボン部(a)との比較を Fig.8 に示す。この図ではリボン全体のエッジの形状を示している。25 ch では、中央部の両サイドがウェストとなっていることが分かった。1 ch と 10 ch でもほぼ同じ結果であった。この理解は十分ではないが、フォイルの継ぎ目の両サイドで生じているわけではないため、レーザーでどちらの ch から順番に切断していくかが寄与していると思われる。そのとき、レーザーカットによるフォイルへの熱付与やそれによるたわみ、また、レーザーパルスによるフォイルの微弱な振動とその振幅によるレーザー焦点からのズレなどが寄与していると考えられている。ただ、フォイルの継ぎ目以外の ch では極めて安定な幅に揃っているので、フォイル継ぎ目が端部であることでテンションがフォイルの中ほどの他の場所と異なっているということが一つの要因であると考えている。定量化や条件を変えての試験などがまだなされておらず今後の検討課題である。尚、これらの ch での実際の測定データの二次電子数は、減少したリボン幅で補正している。

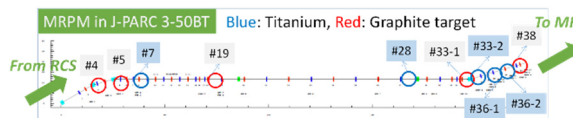


Figure 9: MRPM map in 3-50 BT of the J-PARC.

3. チタンフォイルターゲットのインストールと大強度ビームの計測

J-PARC 3-50BT にインストールされた 5 台の MRPM の場所を、Fig. 9 に示す。これでグラファイ

トリボンをターゲットとする MRPM と合わせて 10 台が、220 m の輸送ラインに設置された。チタンリボンの MRPM は、この春のビームスタディーから使用され、 1.5×10^{13} proton/bunch のような大強度ビームでも特に問題なく S/N の良いデータを安定して提供している (Fig.10)。

ゲットを実用に供することができた。

参考文献

- [1] S. Otsu, Y. Hashimoto, et al., Ribbon Target Assembly Using Carbon Graphite for Secondary Emission Type Beam Profile Monitor, Proc. 8 th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2011 (in Japanese).
- [2] Y. Hashimoto, et al., Multi-Ribbon Profile Monitor Using Carbon Graphite Foil for J-PARC, Proc. of HB2010, Morschach, Switzerland, 2010, p.429-433.
- [3] 弘陽精工株式会社 : <http://www.koyo-laser.co.jp/>

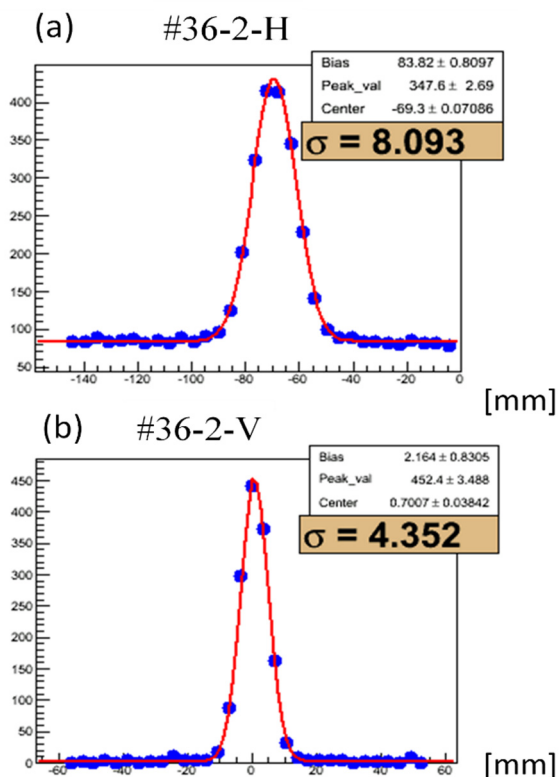


Figure 10: Typical beam profiles of high beam intensity of 1.5×10^{13} protons/bunch by the titanium-ribbon MRPM. (a): horizontal projection, (b): vertical projection.

4. まとめ

焼失の問題があった 1.2 ミクロン厚みのチタンフォイルの大気中でのレーザーカットは、アルゴンガスをフローさせる雰囲気中で切断する方法を採用することで解決した。スポットサイズ 30 ミクロンのグリーンレーザーを用い、リボン幅は ± 10 ミクロンに揃えることができた。アプライ時のチタンフォイルの継ぎ目の位置のリボンでは、最大 100 ミクロン程度細くなる現象がみられた。今後、改善を検討する。チタンフォイルターゲットを採用した 5 台の MRPM は、J-PARC の 3-50BT にインストールされ、現在の最大ビーム強度においても特に問題なく、S/N 良いデータを提供できた。

弘陽精工 (株) の中澤繁雄氏、松本義明氏には、グリーンレーザーを用いたチタンのフォイルのカットにあたり、特段のご協力をいただいた。グラファイトのマルチリボンターゲット同様に、精密なレーザーカット技術によりチタンのマルチリボンター