

J-PARC 遅い取り出しのためのマルチグラフェンリボンを用いた ビームプロフィールモニター

BEAM PROFILE MONITORS FOR SLOW EXTRACTED BEAM USING MULTI-LAYERED GRAPHENE IN THE J-PARC

橋本義徳^{#, A)}, 外山 毅^{A)}, 村上睦明^{B)}, 立花正満^{B)}, 多々見 篤^{B)}, 村島健介^{B)},
富澤正人^{A)}, 武藤亮太郎^{A)}, 堀 洋一郎^{A)}, 魚田雅彦^{A)}, 酒井浩志^{C)}, 遠藤正之^{C)}

Yoshinori Hashimoto^{#, A)}, Takeshi Toyama^{A)}, Mutsuaki Murakami^{B)}, Masamitsu Tachibana^{B)}, Atsushi Tatami^{B)},
Kensuke Murashima^{B)}, Masahito Tomizawa^{A)}, Ryotaro Muto^{A)}, Yoichiro Hori^{A)}, Masahiko Uota^{A)}, Hiroshi Sakai^{C)},
Masayuki Endo^{C)}

^{A)} KEK/J-PARC

^{B)} KANEKA Corporation

^{C)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

Abstract

Extracted-beam profiles in slow extraction at the J-PARC can be measured by using secondary electrons emitted from thinner target array made by multi-layered graphen, in real time during spill time of around 2 seconds. The target consists of 20 ch ribbons with width of 1 mm, pitch of 2 mm, and thickness of 1.1 micron. Secondary-electron current at each channel is measured by a current amplifier having sensitivity more than 1 pA. These configuration produces useful information for beam dynamics in slow extraction. We have successfully measured 51 kW extracted-beam recently.

1. はじめに

J-PARC メインリング (MR)では、トランスポートラインでの大強度ビームのプロファイル計測において、二次電子を放出させるターゲットに、2 から 3 ミクロンの厚みをもつグラファイトフォイルを用いてきた[1-3]。ターゲットは、測定場所に依るが、幅 1.5 から 4 mm のリボン状にして、32 ch または 64 ch にして並べて、ワンパスでビーム形状を測定することができる。このモニターをマルチリボンビームプロフィールモニター(MRPM)と称している。

大強度ビームの測定では、ターゲットの材料を、薄い均一なグラファイトフォイルとすることで、ビームロスの低減、発熱量の抑制、グラファイトフォイル自身の高耐熱性の利点がある[1]。これらは、基本的に、グラファイトの構成原子が炭素 (Z = 6) であり、低密度 2.0 [g/cc]であるために物質質量が小さいこと、また焼成温度が 2600°C 以上の高温であることによる。

大強度陽子ビームのためのこのような高い耐久性をもつ MRPM は、グラファイトターゲットを用いたものでは、MR への入射ビームラインである 3-50 BT に 5 台、MR の入射点に1台(ここでは入射ビームと 100 ターン程度の周回ビームを計測する[4])、遅い取り出しのビームラインに1台の合計 7 台が設置され、すでに運用中である[1-3]。

これまでに 3-50BT のビームトランスポートでの 3 GeV ビームの測定における最大ビーム強度は、 3.9×10^{13} p/bunch であった。これは将来のメガワットクラスのビーム試験であった。また、遅い取り出しのビームラインにおける1台は、2009 年の最初の遅い取り出しビームから、連続して 30GeV の遅い取り出しビーム(直近ではビームパ

ワー51kW[5])のプロファイルを測定しており、これまでに通過した全陽子数(POT)は、 1.2×10^{20} 以上となっている[6]。これらの大強度ビームや長期間使用において、いずれのモニターにおいても、ターゲット自身のトラブルは生じていない。

このような高い耐久性を実証してきた MRPM を、MR の遅い取り出し部に入れることとなった。ここには、初期の低いビーム強度のためのアルミナスクリーンを用いたスクリーンモニター[7]が設置されているが、近未来の 100 kW などの遅い取り出しのビームパワーでは、ロスが大きく使用できないため、その置き換えである。

そしてターゲットマテリアルの分野においては、カネカ[8]では、それまでのマルチグラフェン製作の研究成果を生かして、これまでよりさらに薄い 1.0 - 1.2 ミクロンの厚みをもち、かつフォイル全面における均一性の高い、実用的な J-PARC 用のマルチグラフェンフォイル[9]を製作できるようになった。これまで J-PARC で用いてきた初期のグラファイトフォイルでも部分的にグラフェンのレイヤーを構成していたが、さらに充実した構成となった。

このマルチグラフェンを用いた最初の SX-MRPM (SX は遅い取り出しの意味)は¹2015 年[10]に、2台目を2017 年にインストールした。

2. ビームとターゲットの位置関係

Figure 1 にMR遅い取り出し部のレイアウトを示す。図は上下段で構成され、ビームは上段左より右に進み、続いて下段の左から右に進む。遅い取り出しの構成機器は、上段の ESS1, 2(静電セプトラム)、下段の SMS1, 2, 3(セプトラム電磁石)である。遅い取り出しビームは SMS1, 2, 3 で図の下側に蹴られ、ハドロンビームラインへ導かれる。これまで、スクリーンモニター(SCM1~5)が、構成

[#] Yoshinori.hashimoto@kek.jp, ¹このケースでは、NEDO のプロジェクトにより製作されたマルチグラフェンを用いた。

機器の前後の設置されていた。これらの位置は、構成機器によりビームがキックを受ける場所であり、取り出しビームの顕著な特性がみられる場所である。SCM3, 4 は、マルチグラフェンリボンターゲットの SX-MRPM#82, #83 に置き換えられた。2009 年から使用するグラファイトターゲットの MRPM は、ハドロンビームラインに位置する。以降は、SMS#1 入口の SX-MRPM#82 に関して記述する。

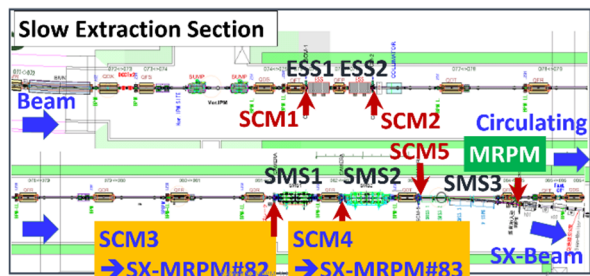


Figure 1: Slow Extraction Section Layout.

次に SMS1 入口での遅い取り出しビームのシミュレーションの結果を Fig. 2 に示す。入射ビームのエミッタンスは、 $81 \pi \text{mm.mrad}$ であり、30 GeV 取り出しの場合である。図では、X, Y 断面での入射ビーム(赤丸: 3σ)と取り出しビーム(黒)、その他の色は 1, 2, 3 ターン前のビームである。取り出しビームのサイズは、X 10 mm, Y 22 mm 程度である。周回ビームとのターンセパレーションは、3 mm 程度であり、直後の SMS1 のセパタム導体の厚みが 2 mm であるので、この範囲に収まることがわかる。ターゲットをデザインするにあたり、ターゲットフレームが入射ビームに当たらないように設計する必要がある(加速中のビームはダンピングによりサイズは入射より小さい)。図から、取り出しビームと入射ビームの距離は 10 mm 程度であることがわかる。Y 方向の内法 70 mm としたターゲットフレームを図の様に配置することで、入射ビームと無干渉で取り出し時のビーム測定ができることがわかる。

3. マルチグラフェンリボンターゲット

製作した水平プロファイル測定用のマルチグラフェンリボンターゲットと、各チャンネルのリボン幅の分布の測定結果を Fig. 3 に示す。アルミナ純度 99.5% の厚み 2 mm

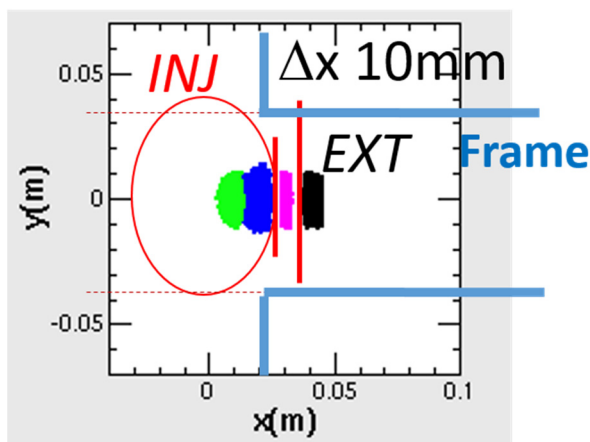


Figure 2: 30GeV Extracted-Beam Simulation.

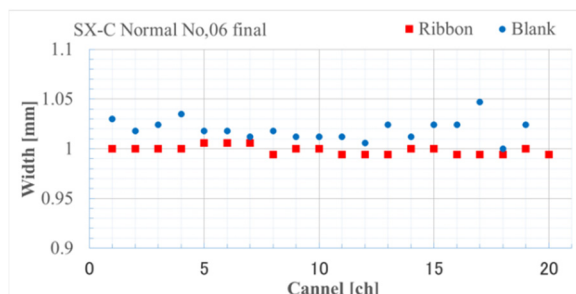
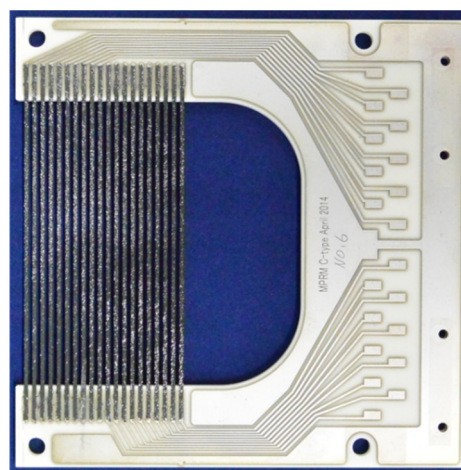


Figure 3: Multi-Graphen ribbon target(upper), Ribbon width deviation(lower).

の C 型セラミックフレームに、AgPt の電極配線パターンを焼成してある。フレームは C 型で、上下の内寸 70mm、基盤外径は、110(H)×110(V) mm²、平面の非平坦性は 100 ミクロン以下である。マルチグラフェンリボンのピッチは 2 mm で、リボン幅は、1 mm、リボンの厚みは 1.1 ミクロンで、20 ch のアレイを構成している。各チャンネルのリボン幅と隣のリボンとの間隔(Blank)を、Fig. 3(下)にプロットした。リボン幅の偏差は、最大±0.6%であり、標準偏差が、0.4%であった。

マルチグラフェンのリボンターゲットの製作は、次の方法[3]に従った。(1) フレームの電極部に耐放射線性の導電性接着剤をスクリーン印刷する。(2) マルチグラフェンフォイルに一定のテンションと面圧を掛けて、電極に貼り付ける。(3) YAG レーザ(2倍高調波、スポットサイズ 30 ミクロン程度)で、1 mm 間隔にフォイルをカットする。(4) 電極間にある切断された不要なフォイルを取り除く。

ターゲットアセンブリを Fig. 4 (upper)に示す。マルチグラフェンターゲット A~B を、6 mm のスペースをおいて配列したものである。ターゲット B は水平方向測定用リボン(Fig. 3)、ターゲット D は 15 度傾けたリボンで、鉛直方向の成分の目安を見るためのもの、ターゲット A, C, E には、プラスの電圧を印加して、リボンで発生した二次電子を捕獲する役目をもつ。各電極の信号は、PEEK の 0.5sq ペアケーブルで多極フィードスルーを通して、大気側のケーブルに接続されている。Figure 4 (lower) に装置の外観を示す。最初のセパタム電磁石(SMS1)の直上流のチタンチャンバー内にターゲットは置かれ、直線導入機で位置移動する。放射線環境のためメンテナンス時には、装置全体をスライドステージ上で移動させて脱

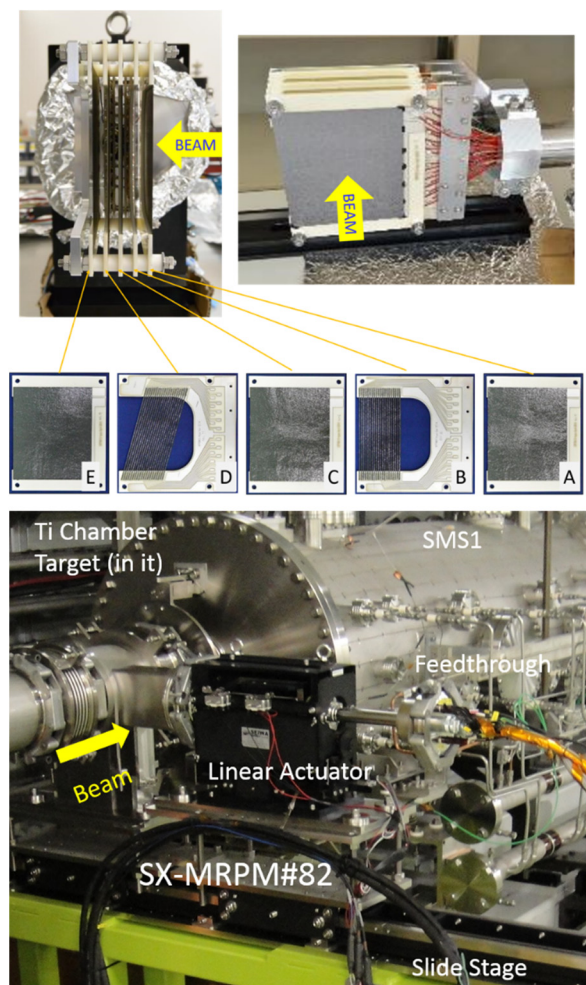


Figure 4: Multi-Graphen Target Assembly for SX-MRPM#82 (upper), Monitor appearance (lower).

着する。トンネル内の SX-MRPM#82 の信号は、1.5D の 34ch 集合同軸ケーブル(フジクラ 1.5D-QEBZ×34C EM-MCX-TAZE)を用いて 220 m 離れたローカル制御室(LCR)に送られる。

4. 信号処理回路

4.1 I/V アンプ回路の設計

まず処理回路の感度を見積もると次のようになる。数 10kW クラスの遅い取り出しでは、スピン時間の約2秒にわたり、数 μA のビームが射出される。GeV クラスのエネルギーの陽子ビームでの二次電子放出効率は、0.018 [電子/陽子][1]であるので、全二次電子電流は、数 10 nA である。上で述べたように、水平方向で 10 mm 程度に空間的に広がったビームを、2 mm ピッチ、1 mm 幅のリボンで検出するので、リボンあたりの二次電子電流は nA クラスとなる。また、ビームテールなどの3桁程度低いハロー領域までの感度を持たせたいために、pA クラスまでの高い感度をもつ I/V 変換アンプを設計することにした。一方低感度側では、周回ビームの大きな電流までを計測の視野に入れて、10nA と 100 nA のレンジも用意することにした。

次に信号経路長が 220 m と長いため、このような高感度アンプの初段でのノイズ特性が問題となるが、入力部のフィルターとリミッタ、アンプのフィードバック部での容量でバランスをとることにした。

I/V 回路はハイブリッド IC 構成とし、外部信号により、レンジを切り替える方式とし、20ch のモジュールを製作した (Kaizuworks [11] KB2014A SX-MRPM 20ch Pico Current Amplifier)。

4.2 I/V アンプの特性

製作した I/V アンプの入出力特性を Fig. 5 に示す。測定は入力 DC ソースに Keithley 6220 を、アンプ出力電圧の測定には、Keithley 6517A を使い、各測定点で 10 回測定した。各プロットのエラーバーは、標準偏差である。フィットは、1次関数である。各カーブに付けた矢印は、直線の適用できる下限である。各レンジとも、 10^{-3} 程度のダイナミックレンジを確認できた。1 nA/[V] レンジでは、 10^{-4} [nA] まで直線が伸びていることが確認できた。各チャンネルのカーブフィットの理想の傾き(レンジ[V])からの偏差、出力の最大電圧である 1V に対するオフセット電圧の割合を、Table 1 にまとめる。また、応答周波数も記す。表から、傾きの偏差とオフセットの割合は、ともに小さく、実用上の問題が無いレベルと言える。

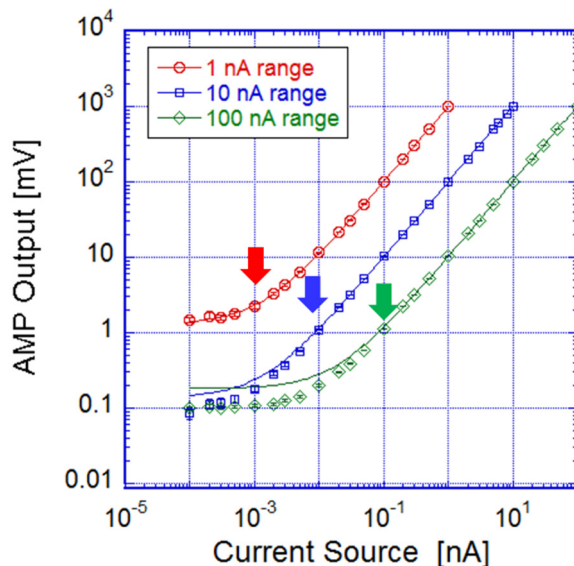


Figure 5: Linearity of Current amplifier KB2014A.

Table 1: Range and Frequency Response of KB2014A

Range [nA/V]	Slope Dev. [%]	Offset [%]	Response Frequency [Hz]
100	0.4	0.018	1000
10	0.4	0.013	160
1	0.4	0.13	160

4.3 A/D 変換

20ch の I/V アンプの連続電圧出力は、8ch, 250MS/s,

12 bit の VME の ADC (CAEN V1720 DPP-CI [12])を 3 台用いて、チャンネルごとにリアルタイム平均化処理される。平均化処理は、V1720 の FPGA を用いて信号にゲートを掛けて時間積分する機能を用いる。例えば、MR の周回時間の $5.3 \mu\text{s}$ 毎に、 $2 \mu\text{s}$ のゲートを掛けて、ゲート時間内の 250 MS/s のサンプルレートの AD 値の積分値 (平均値) を、周回時間ごとに出力させることができる。

5. ビームプロファイルの試験測定

5.1 測定条件

51kW の遅い取り出しビームを用いて、2018 年 6 月末のビームスタディで、上で述べた 20ch 同時計測の試験を行った。使用したのは、SMS1 直上流の SX-MRPM#82 の水平プロファイル用ターゲットである。I/V アンプのレンジは 100 [nA/V] を用いた。A/D 変換後の FPGA での積分は、 $10 \mu\text{s}$ ごとに $1.2 \mu\text{s}$ のゲート時間内の信号を積分した。このとき、まず一番内側のリボンのエッジを周回ビームの中心軌道に対して 25 mm に位置させた。ワンショットで、 2 mm ピッチの 20ch の信号のリアルタイム処理ができた。さらに、 0.5 mm ステップで、ターゲットを 3 ステップビーム中心から遠ざける方向に移動させて、合計 4 ショットにより空間的に 0.5 mm ピッチのデータを得た。

5.2 スピルの空間・時間構造

Figure 6 にスピル時間の周回ビームの端部と取り出しビームのプロファイルを示す。また、得られたデータを 500 ms の時間ステップで積分したビームプロファイルを

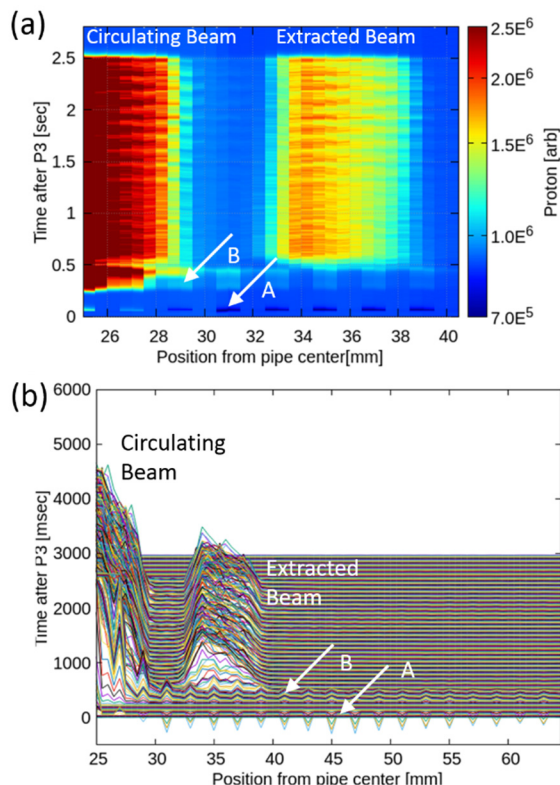


Figure 6: 51 kW-Beam Profile, (A) Log Color Contour Plot and (B) Mountain View Plot.

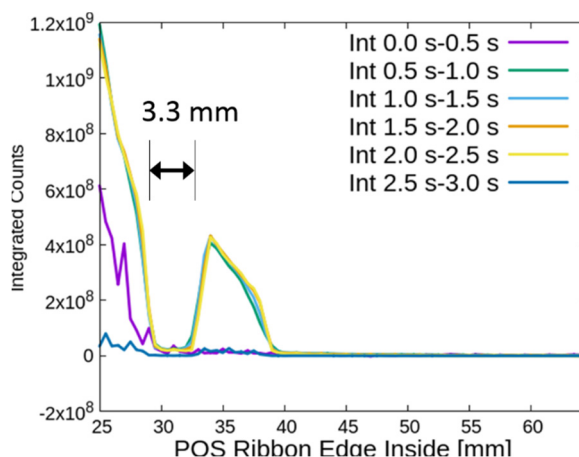


Figure 7: Integrated Beam Profiles at every 500 ms time step.

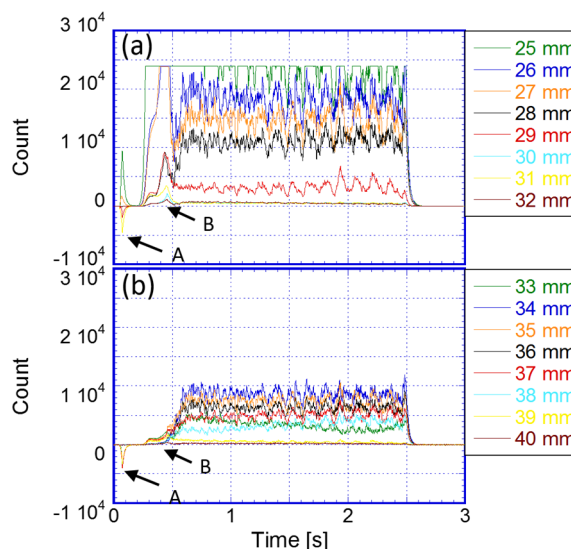


Figure 8: Time structure of each ribbon, (a) Circulating beam (25-32 mm), and (b) Extracted Beam (33-40 mm). Time zero means P3 timing.

Fig. 7 に示す。周回ビームと、取り出しビームのターンセパレーションは、 3.3 mm であり、直下流 SMS1 のセプタム導体厚みの 2 mm より大きい値であった。また、取り出しビームのサイズは、 6.5 mm 程度であり、スピル時間の 2 s の間は、ほぼ一定であった。

次に、各リボンでの時間構造を Fig. 8 に示す。リボンエッジが、 25 mm の位置では、信号の飽和がみられ、二次電子電流は 100 nA を超えていたことがわかる。Figure 8 (a) では、スピル後半に 8 Hz 程度の周期的な小さな時間構造があり、(b) の取り出しビームの側でもそれを反映しているように見えている。この構造は、取り出しシステムでのフィードバック制御に依存すると考えられる。これらの細かい点を除けば、取り出し時間の 0.6 から 2.5 s においては、ほぼ平坦なスピルと言える。

5.3 電子雲

ところで、Fig. 6 と Fig. 8 の、A, B の信号に関して詳細

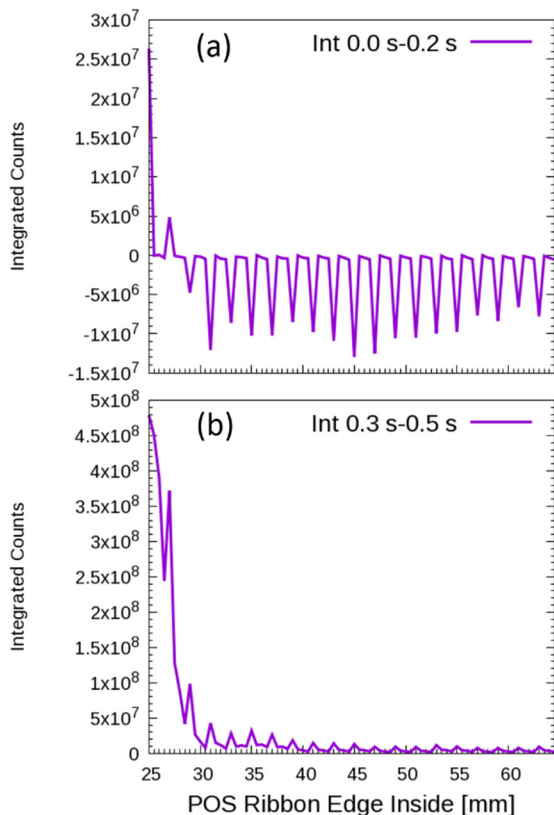


Figure 9: Spatial signal at fixed time region, (a) time 0.0 – 0.2 s, and (b) time 0.3 - 0.5 s. (a) and (b) means A and B respectively shown in Figures 6 and 8.

に見てみる。A の時間帯は、0.0-0.2 s であり、B の時間帯は、0.3 – 0.5 s である。これらの時間範囲のデータを時間積分して、リボンの位置ごとにプロットしたのが、それぞれ、Fig. 9 の(a), (b) である。(a), (b)ともに特長あるスパイクが周期的に表れている。これは、上述のように、0.5 mm ステップのターゲットの移動で、4ショットでデータを測定したが、A, B のスパイク信号は、共にそのうちの1ショットにしか発生しなかったためである。以下は、スパイクの発生しているリボンの位置の 25, 27, 29, …mm にある信号に着目して考察する。

(a) は、ビームのデバンチ時に生じる電子雲[13, 14]の情報と考えられる。リボンエッジが 25, 27 mm のときはプラスの信号で、29 mm 以降はマイナスの信号であり、65 mm の遠方まで見えている。29 mm 未満でのプラスの信号は、リボンで止まる粒子がプラス、または出射粒子がマイナスである場合と考えられる。1.1 ミクロンのリボンで陽子が止まることは考えられないので、リボンを通過した陽子または電子が、リボンに付与したエネルギーに依り二次電子が放出されていると考えられる。また、エネルギーの低い電子はリボンで止まる可能性もあるため、止まった電子の電荷信号も含まれているとみるべきで、止まった電子の電荷と放出された二次電子の電荷の和と言える。そして、プラスは二次電子の方が多ことを示している。一方、29 mm 以遠の、マイナスの信号は、これも、リボン内で止まった電子と放出された二次電子の和であり、止まった電子の方が多ことを示している。これらのスパイク信号は、他の3ショット(25.5, 26, 26.5, 27.5, 28,

28.5 …mm など)では、全く現れないので、通常より大きく広がったビームまたは電子雲であると読み取れる。(b) は、スピル開始時刻の 0.6 s よりも早い時間に、取り出しビームが生成されたもので、フライングである。(a)と同じショットで発生していること、周回ビームに広がりが発生していることから、電子雲が起因していると推測される。

6. まとめ

SX-MRPM では、厚み 1.1 mm の高耐久性マルチグラフェンリボンを、1 mm 幅、2 mm ピッチで 20ch 並べて、取り出しビームのプロファイルをスピル時間内に連続して計測することができた。計測システムでは、各 ch ごとに 1 pA 以下までの直線性を有する I/V アンプで処理し、アンプ出力は、時間ごとのゲート積分を FPGA で処理させることで、高感度化とデータ処理の効率化を図った。

処理された信号は、空間的かつ時間的な情報を同時に有するため、今後のスピルのフィードバック制御等において有用な情報を提供するものと言える。

電子雲に関する空間的広がりの情報は新たな知見となった。電子雲とスピルの開始時刻前にフライングで取り出されるビームの相関は、今後の課題となった。また、ビームロスとの相関の調査も必要である。

謝辞

ターゲットの製作には、ミトス 三谷 稔氏、弘陽精工 松本義明氏、シチズン 赤尾祐司氏に、また高感度アンプの製作には、カイズ 新川英雄氏と小西信彰氏に、計測装置としての全般にわたる製作と調整には、三菱電機システムサービスの 大津 聡氏、大森雄基氏、秋野英之氏に、大変お世話になった。

参考文献

- [1] Y. Hashimoto *et al.*, Proc. of HB2010, Morschach, Switzerland, p.429-433.
- [2] Y. Hashimoto *et al.*, Proc. of the 6th annual meeting of Particle Accelerator Soc. of JAPAN, Tokai, 2009, p.347-349.
- [3] S. Otsu *et al.*, Proc. of the 8th annual meeting of Particle Accelerator Soc. of JAPAN, Tsukuba, 2011, p.429-433.
- [4] T. Yasui *et al.*, WEP020, in these proceedings.
- [5] R. Muto *et al.*, WEP010, in these proceedings.
- [6] Sato Yoshinori, 私信.
- [7] M. Tomizawa *et al.*, Proc. of the 6th annual meeting of Particle Accelerator Soc. of JAPAN, Tokai, 2009, p.30-32.
- [8] <http://www.kaneka.co.jp/>
- [9] カーボンナノチューブ・グラフェンの研究最前線; https://sv39.bestsystems.net/~dazjr000/item/detail/summary/nano/20160900_36.html
- [10] プレスリリース; <https://www.kaneka.co.jp/wp-kaneka/wp-content/uploads/2017/06/多層グラフェン膜開発リリース文.pdf>
- [11] <http://www.kaizuworks.co.jp/>
- [12] <http://www.caen.it/csite/CaenProd.jsp?idmod=570&parent=11>
- [13] B. Yee-Rendon *et al.*, Proc. Of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, THPVA010, p.137-139.
- [14] B. Yee-Rendon *et al.*, Proc. Of IPAC2016, Busan, Korea, MOPMB024, p.4436-4438.