

J-PARC RCS における大強度ビームプロファイル測定に向けた IPM の改良

IMPROVEMENT OF THE IPM FOR THE HIGH-INTENSITY BEAM PROFILE MEASUREMENT IN THE J-PARC RCS

加藤新一^{#, A)}, 原田寛之^{A)}, 畠山衆一郎^{A)}, 川瀬雅人^{A)}, 山本風海^{A)}, 金正倫計^{A)}
Shinichi Kato^{#, A)}, Hiroyuki Harada^{A)}, Shuichiro Hatakeyama^{A)}, Masato Kawase^{A)},
Kazami Yamamoto^{A)}, Michikazu Kinsho^{A)}
^{A)} JAEA/J-PARC

Abstract

In the J-PARC RCS, the residual gas ionization profile monitor (IPM) is adopted for the nondestructive detection of the 1D transverse distribution of the circulating proton beam. For the continuous improvement, the IPM shows intended performance in the beam commissioning with the low current condition. However, the distribution cannot be measured in the high current condition such as over 100 kW because the noise increases and hides the signal. To solve this problem, we investigated the source of this noise and examined measures. To compare the simulation and the noise measurement results, we identified the cause of the noise as the electric field from the beam. Therefore, we developed additional electrode component to shield that field based on the simulation result. This component will be installed in summer 2016. It is expected that the noise is reduced to be 1/100 compared with present one by the new component and the distribution measurement can be performed in the high current condition.

1. はじめに

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)[1]は、400 MeV リニアック、3 GeV シンクロトロン (RCS)、50 GeV シンクロトロン (MR) の 3 基の加速器と各実験施設で構成される。このうち RCS は 1 MW もの大強度出力を目指す陽子シンクロトロンで、Linac からの 400 MeV のビームを 3 GeV まで 20 ms で加速し、物質生命科学実験施設へのビーム供給と MR へのビーム入射を行っている。RCS の大強度出力を実現するためには、ビームロス低減させ機器の放射化をメンテナンスが可能なレベルに抑制することが必要である。ビームロスの低減のためには、ビームを直接観測し、その挙動を理解していくことが必須となる。特に RCS では、Linac からの入射ビームを 500 μ s 間、307 周回にわたって繰り返しリング内に蓄積する多重入射を行っており、この入射中の横方向ビーム分布の変化や、加速中のエミッタンス増加過程を連続的に測定することが求められている。そのため、周回ビームの横方向 1 次元横方向分布を非破壊かつ連続的に測定することが可能な残留ガスプロファイルモニタ (IPM) が導入されており、現在も継続的な改良が進められている。

IPM の概要を Figure 1 に示す。IPM は主に、外部電場生成用分割電極、Multi-Channel Plate (MCP) とアノード基盤を重ねた検出部及び外部磁場生成用電磁石で構成される。ビームが IPM チェンバ内を通過すると、残留ガスがイオン化される。このイオン化されたガスを、横方向の外部電場で検出部まで輸送し、Multi-Channel Plate (MCP) によって電子として増幅する。そしてこの電子をアノードで検出する。アノードはビーム中心部の横方向 78 mm の領域に 32 個、両端の 80mm の領域にそれぞれ 8 個の個別チャンネルを持っており、これらの

信号を再構成することでビームの 1 次元横方向分布を非破壊に測定することが出来る。信号は最大 2.5 GHz のサンプリングが可能なオシロスコープで取得しており、取得時間の設定次第で RCS の加速サイクルである 20 ms 間の分布変化を 1 shot で取得できる測定系となっている。

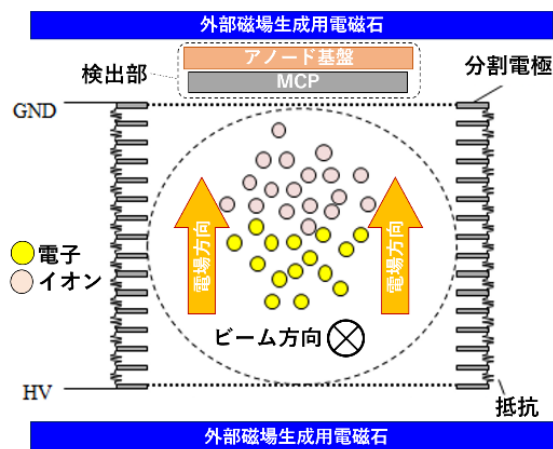


Figure 1: The schematic drawing of the IPM.

IPM では分割電極の極性を入れ替えることで、イオン化ガスのうち陽イオンと電子を選択して輸送、検出することができる。現在の運用では陽イオンを選択しており、ビーム調整時に数 kW 程度の低強度ビームの測定を行っている。しかし、数百 kW の大強度ビームを測定する際には、ビームの空間電荷力によって陽イオンが MCP に到達する前に広がってしまう。そこで大強度ビームの測定では質量の軽い電子を選択し、電場と平行に付加した外部磁場に巻き付けながら輸送する。周回ビームがこの磁場から受ける蹴り角は、上下流の電磁石で逆向きの磁場を励磁することによって打ち消している。

Figure 2 に、実際の IPM の分割電極、検出部の写真

[#] skato@post.j-parc.jp

と、アノード基盤の電極パターンを示す。写真で示した分割電極一式は電磁石で挟み込まれた角チェンバの中に導入されており、メンテナンスの際には横方向から簡単に引き出せる構造となっている。アノード基盤はセラミックで作られており、各電極には上下流方向に交互に信号引出し用ストライプが接続されている。電子引き出しモード時に外部磁場を乱さないようにするため、分割電極などは非磁性の SUS316L で作られている。

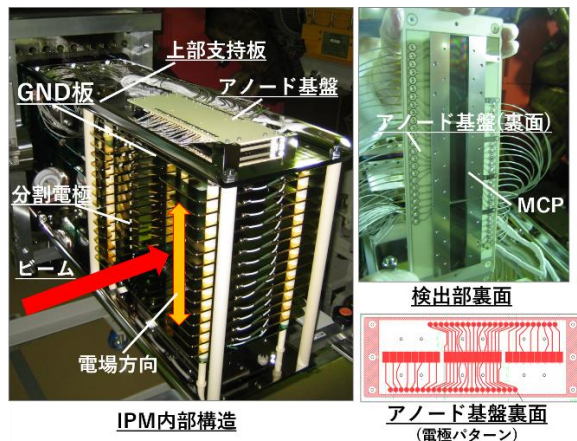


Figure 2: The pictures of the IPM construction.

2. IPM のこれまでの改良

IPM は RCS の運転開始時から導入されており、ビーム測定と解析を通して継続的な改良が行われている。IPM ではイオン化ガスを用いて横方向分布の斜影を行うため、外部電場を均一に形成することが特に重要である。当初導入していた分割電極では、大きな電場の歪みによって陽イオン生成位置と信号検出位置との比が 0.5 となっており、検出される分布が狭くなっていた。そこで、分割電極の形状の最適化、等分割だった分割電極間のポテンシャルの最適化を行った[2] [3]。その結果、外部電場が均一化され、陽イオン生成位置と信号検出位置との比は 0.93 と改善された。

また、当初導入していた MCP は印加電圧に対して急激に変化するゲイン特性を持っていたため、特に小さい増幅率に調整することが出来なかった。そのため、100 kW を超えるビームに対しては MCP 内部で電子が飽和してしまい測定が不可能であった。そこで、最大増幅率を 10^6 に抑え、かつ印加電圧に対して緩やかなゲイン特性を持ち、ゲインの調整幅が大きな MCP を新たに採用している[4]。

3. 大強度ビーム測定時の課題

3.1 大強度ビーム測定時のノイズ

これまでの改良により、IPM は数 kW の低強度ビームを用いたコミッションングにおいて、主に周回毎のビーム位置を素早く検出するために必須の装置となっている。しかし、大量のノイズの混入によって 100 kW を超える大強度ビームの分布を測定するには至っていない。

入射から 1 ms 間の大強度ビーム測定結果を Figure 3 に示す。これはビーム中心部の 1 チャンネル分の生信号

で、128 発分の信号を平均化している。横軸はビーム入射からの時間である。ビーム強度、パラメータは 200 kW の MLF 供用運転と同様で、分割電極には 20 kV を印加している。図中の青線は MCP に電圧を印加していない時の結果で、バックグラウンド測定に相当する。一方、赤線は MCP に電圧を印加した時の結果である。この測定では、MCP からの増幅電子による信号は正方向に 0.5 V 程度になると予想されていた。しかし、MCP への電圧印加の有無に関係なく正負両方向に激しく振動する大きなノイズが発生しており、増幅電子由来の信号が全く検出できなかった。

そこで、このノイズの特徴を調査した。まず、ノイズを構成する周波数成分を調査した。Figure 4 に、Figure 3 の信号をフーリエ変換して得られた周波数スペクトルを示す。この結果、データ取得時の平均化によりランダムノイズは取り除かれ、観測しているノイズの成分のほとんどは入射エネルギー 400 MeV での周回周波数に対応する 624 kHz とその倍数のみであることが判明した。次に、チャンネル間でのノイズの関係性を調査した。取得したノイズ信号を用いて構成した横方向分布を Figure 5 に示す。MCP からの増幅電子由来の信号は得られていないため、当然ビーム分布としては形成されていない。しかし、ノイズの振幅が大きいタイミングで図に示されるのこぎり状の形が生じることが判明した。これは、隣り合うチャンネルでノイズの正負が逆転していることを示している。これらに加えて、このノイズの振幅はビーム出力の増加やビーム加速に伴って増大することも判明した。

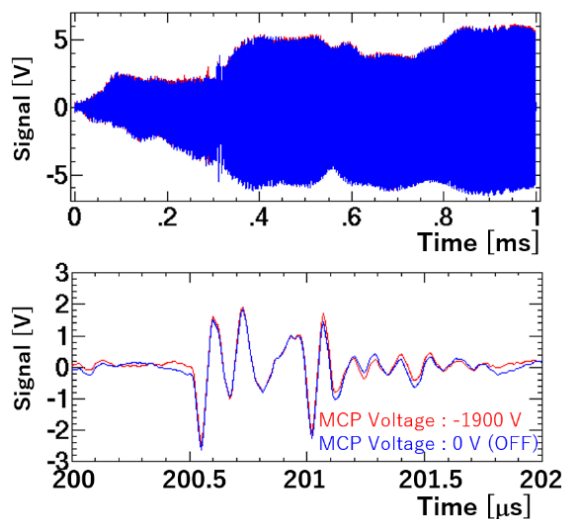


Figure 3: The one anode channel signal detected during 1 ms. The lower figure is the enlarged view of the upper one. The red and blue lines indicate the results in the case of MCP on and off, respectively.

3.2 電磁場シミュレーションによるノイズ源の特定

周波数スペクトルの結果とビーム出力や加速に伴う振幅の増加傾向から、我々はノイズの起源をビームが誘起する電磁場であると予想した。これを確認し、ノイズの低減方法を検討するために、CST STUDIO[5]による電磁場シミュレーションを行った。

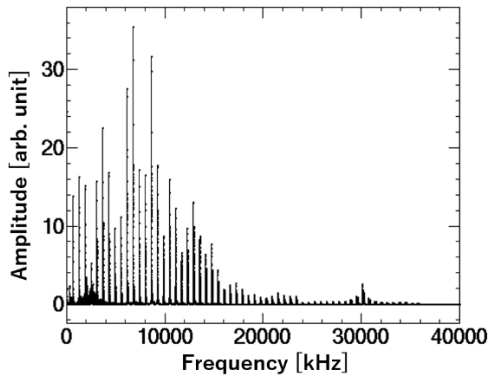


Figure 4: The frequency spectrum of the detected signal shown in Figure 3.

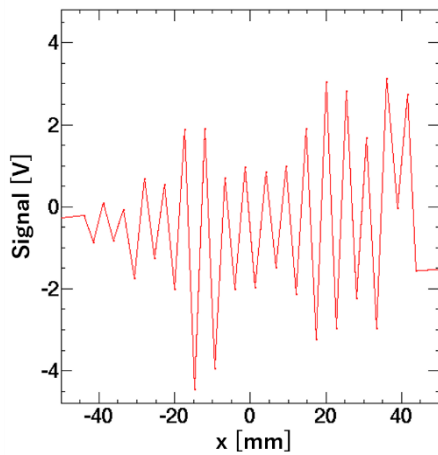


Figure 5: The reconstructed horizontal distribution at 250 μ s.

Figure 6 に、今回作成した 3D モデルを示す。分割電極は上部支持板直下の GND 板以外を省略した。また、アノード基盤の電極とストライプも一体とした。ストライプの先端と GND としているアノード基盤の表面との間に仮想的な 50 Ω の抵抗を設置し、ビームが IPM 中心を通過した際にこの抵抗に励起される電圧を求めた。シミュレーションコードの制約から、ビームのバンチ長、粒子数は RCS の 1 MW 相当のビームと比べてそれぞれ約 1/10、1/1000 となるように設定した。今回のシミュレーションはノイズ源を特定する目的で行ったため、得られた電圧の絶対値評価は行っていない。

Figure 7 に、シミュレーションから得られた励起電圧を示す。予想した通り、ビームが通り抜けるタイミングでアノードに電圧が励起された。また、ストライプを上流、下流それぞれに設置した場合で、励起される電圧の符号が逆転していることを確認した。この結果は、Figure 5 の測定結果と合致している。つまり、隣り合うチャンネルの信号引出し方向が逆のため、測定されたノイズの正負が逆転していたと考えられる。これらの結果から、我々はノイズの原因がビーム起因の電磁場であると特定した。また、この励起電圧は GND 板と格納容器である角チェンバとの間が接続されていないために生じていることも特

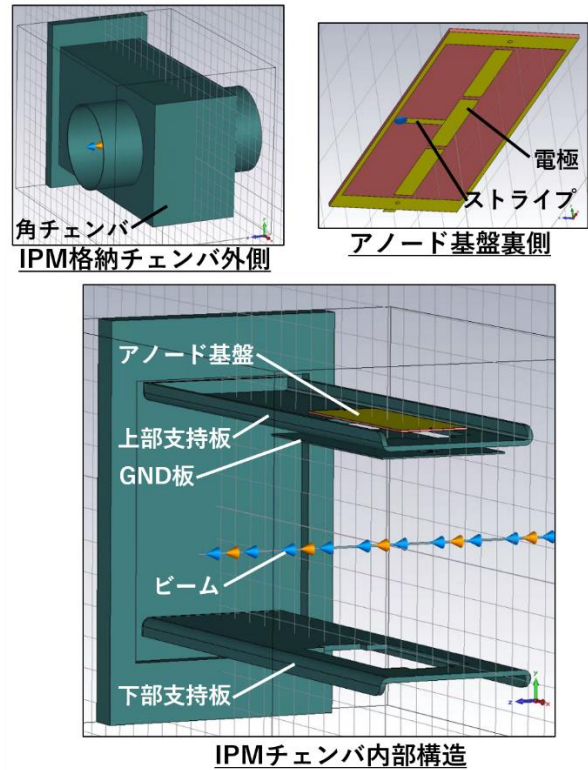


Figure 6: The 3D simulation model.

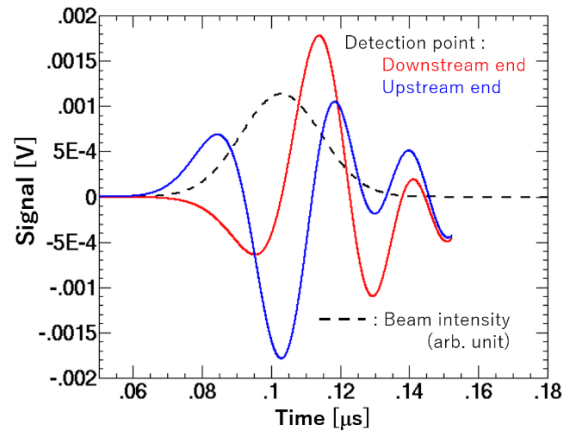


Figure 7: The detected voltage in the simulation. The red and blue line indicate the results when the detection points are downstream and upstream end, respectively.

定した。Figure 8 に、垂直-ビーム進行方向断面での、ビーム通過中の垂直方向の電場強度マップを示す。IPM では内部電極を簡単に引出せる構造のため、角チェンバと GND 板、上下支持板とがビームライン上で接続していない。そのため、図に示されるように角チェンバ側面と GND 板との間に隙間が生じている。そのため、そこからビームの電場が検出部に漏れ出しており、励起電圧源となっていた。

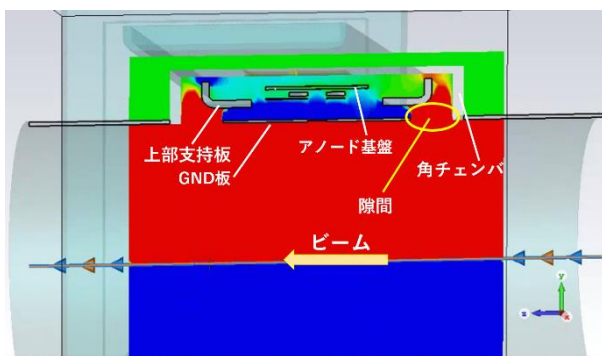


Figure 8: The vertical electric field map in the vertical-longitudinal plane caused by the passing beam. The red and blue indicate the positive and negative direction, respectively.

4. 大強度ビーム測定に向けた開発

4.1 ノイズ低減方法の検討

前章で示した通り、作成した電磁場シミュレーションモデルによって、測定されたノイズを定性的に再現することが出来た。そこで、これを用いてノイズ低減方法の検討とその効果の評価を行った。具体的には、GND板と角チェンバ側面の隙間を埋めるためにGND板の上に追加の遮蔽板を設置することを考え、これをシミュレーション上に構築しノイズ低減効果を評価した。Figure 9 に、シミュレーション上で導入した遮蔽板の構造を示す。図中の黄色い構造体は、角チェンバ側面とのコンタクトを取るための銅製の板バネである。これによりビーム直上は、上下流の円ダクトを含めて金属面が滑らかに接続した構造となる。GND板自体のサイズを拡張しなかったのは、GND板の交換のためには上下支持板を含めた分割電極全体の解体と再組立が必要となるからである。特に分割電極は既に放射化物となっているため、改造作業は加速器トンネル内で行わなければならない。そのため、短時間で行える遮蔽板の追加という方法を選択した。この遮蔽板を導入したシミュレーションの結果、ビームによる励起電圧は現在の 1/100 に抑制できるという結果を得た。

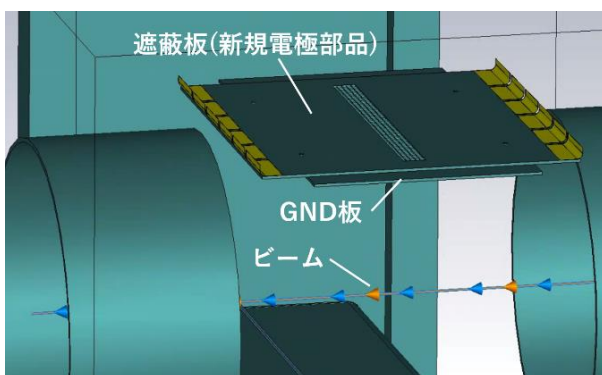


Figure 9: The construction of the new shielding plate.

4.2 新規分割電極部品の製作

シミュレーションから遮蔽板によるノイズ抑制効果が確認されたため、これを新規電極部品として設計、製作している。Figure 10 に製作中の電極部品の写真を示す。IPM電極一式は角チェンバ内に押し入れる構造のため、この電極部品は電極一式の格納途中では角チェンバと接触せず、格納された時に初めて角チェンバ側面と接続する構造としなければならない。そこで今回、電極部品の上下流に可動機構を取り付けた。これは主に、押し込み棒、リンク機構、板バネで構成されている。電極一式が格納されると、角チェンバの壁面で押し込み棒が押される。この運動方向をリンク機構で 90 度回転させ、板バネを押すことにより、板バネと角チェンバ側面を接続するという仕組みである。電極一式を引き抜く際には、押し込み棒が内蔵されたバネに戻されることで、板バネと角チェンバ側面との接続が外れるようになっている。本体は既存の分割電極と同様の SUS316L 製で、板バネにはベリリウム銅を用いている。この部品は 2016 年 9 月に IPM 本体へ導入予定である。



Figure 10: The new electrode as the shield.

5. まとめ

RCS において、大強度ビームの横方向分布を非破壊に測定するために、IPM の改良を進めている。現在の IPM では大強度ビームの測定の際に大きなノイズが発生し、分布の測定が不可能だった。そこで、ノイズ測定結果とシミュレーション結果を比較することでノイズの原因を調査した。その結果、ノイズの原因がビーム起因の電磁場であることを特定した。現在、この電磁場を遮蔽する新規電極部品を設計、製作している。シミュレーションより、この電極部品によってノイズを現在の 1/100 に抑制できるという結果を得た。今回の改良によって、大強度ビームの非破壊分布測定が可能になると期待される。

謝辞

本開発においてご協力いただいている、コマヤマエレクトロン株式会社の地場氏、増田氏、その他多数の皆様へ深く感謝いたします。また、板バネ部材選定においてサンプルを提供していただいた、日本ガイシ株式会社金属事業部の皆様へ深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Facility Project, JAERI Report No. JAERI-Tech 2033-004 and KEK Report No. 2002-13.
- [2] H. Harada *et al.*, Proceedings of IPAC2012, New Orleans, USA, May. 20-25, 2012, pp. 840-842.
- [3] H. Harada *et al.*, Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, May. 12-17, 2013, pp. 515-517.
- [4] H. Harada and S. Kato, JPS Conf. Proc. 8, 012011 (2015).
- [5] Computer Simulation Technology (CST) studio;
<https://www.cst.com/Products/CSTS2>