

# J-PARC MR のためのパルス駆動残留ガスプロファイルモニタの開発 DEVELOPMENT OF GATED IPM SYSTEM FOR J-PARC MR

佐藤健一郎<sup>#</sup>

Kenichirou Satou<sup>#</sup>

Acc. Div., J-PARC Center, KEK

## Abstract

In J-PARC MR, residual gas ionization profile monitor (IPM) is used to measure turn-by-turn profiles of bunched beams; the beam widths of only the first 20 profiles after the injection are analyzed to correct the Quadruple oscillation. On one hand, only a few dozen profiles are required to measure, on the other hand the present IPM necessarily detects all ionized charged particles from all bunched beams, more than  $2E6$  bunches from the injection to the extraction, because the present IPM is operating in DC. This situation is not preferable from the viewpoint of a limited life time of the MCP detector; the more the MCP senses the particles, the more it loses gain flatness and thus life time. To improve this situation, the gated IPM system is developing in which the HV is operated in pulse mode. Performances of a new HV power supply, improvement of the electrodes, and particle-tracking simulation taking into account the space-charge-electric field of the bunched beam are presented.

## 1. はじめに

J-PARC MR では 3 台の Ionization Profile Monitor (IPM) が設置されている [1-3]。直線部 Dispersion function が 0 のエリアに水平・垂直方向プロファイル測定用として、D2HIPM および D2VIPM が設置されている。また、Arc 部で Dispersion function が 0 ではない場所に水平方向 IPM である D3HIPM が設置されている。これらの IPM では電荷増幅器として Micro Channel Plate (MCP) が利用されている。電荷収集用電圧(HV)は DC であり、ビームが MR 内に存在する限りプロファイルを測定し続ける。

IPM には HV の極性を変えることにより、正電荷イオンを収集するモードであるイオン収集モードと、電離電子を収集する電子収集モードがあり、電子収集時にはガイド磁場(B)が必要である。現在 D2HIPM のみに電磁石が設置されている。漸次 D2VIPM にも電磁石を設置する予定であるが、D3HIPM に関してはほぼ利用実績がないため電磁石設置の予定はない。

IPM は Emittance 測定というよりはむしろ Turn-by-Turn プロファイル測定を利用した入射エラーマッチング調整に利用されている。IPM による Q mode 振動測定とその調整について文献[4]に報告されている。

この IPM には次章で述べているように、MCP 寿命問題と Turn-by-Turn 測定時に顕在化するゲイン抑制効果がある。特にゲイン抑制効果のために Turn-by-Turn 測定は入射後数 10 ターン分の測定に限定されてしまう。これらの問題を解決できる Gated IPM システムが米国フェルミ研究所(FNAL)で開発された[5]。HV をパルス駆動し、1加速周期のうち必要な電離電荷のみを加速し MCP で増幅するシステムである。このシステムでは MCP の平均出力電流を調整することができるため、MCP の長寿命化を図り、ゲイン抑制効果を改善することができる。

Figure 1 には Gated IPM システムの概念図を示してい

る。Gate on/off の 2 mode があり、Gate off 時に HV を x 軸方向に回転させ、本来下向きに加速させる電荷を E × B ドリフトを用いて、ビーム軸方向にシフトさせる。

本システムは今秋にインストール予定であるが、本論文では、以降の章で電源開発、電極改造、シミュレーション結果の紹介を行う。

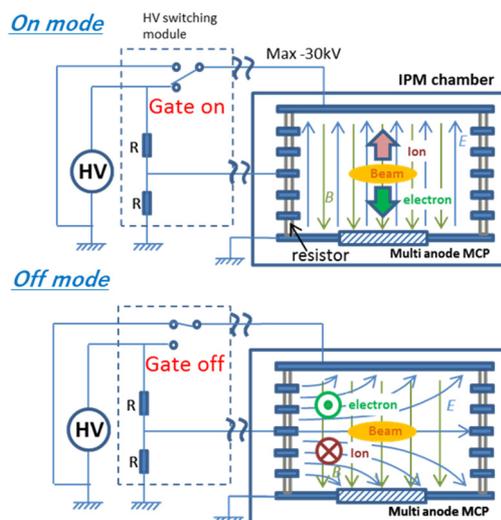


Figure 1: Schematic drawing of the gate on-off mode of the gated IPM system.

## 2. 既存 IPM システムの問題点: MCP ゲイン変動

IPM システムでは電離電荷粒子の電荷を増幅する目的で、おおむね  $10^6$  倍の荷電増幅度が得られる2枚重ねの  $80 \times 20 \text{ mm}^2$  の矩形 MCP が利用されている。MCP で増幅した信号を各々 2.5 mm 幅の一次元配列 32 ch ストリップアノードで電流信号として取得し、後段の電流・電圧変換回路で処理したのち、オシロスコープで AD 変換している。MCP ゲインの一様性は測定プロファイルの歪に影響を与えるため、慎重な校正が求められる。MCP ゲ

<sup>#</sup> kenichirou.satou@j-parc.jp

インを確認するために校正用の電子源である Electron Generator Array (EGA)[6]が導入された。他方、EGA 自身も MCP と同様の構造を有しているため、やはり放出電子電流の一様性が重要である。

Gated IPM 化に合わせて、EGA による校正手法からステアリング電磁石で作るシフトバンプ軌道でビーム位置を振り、測定されたプロファイルが一致するように MCP ゲインを推定する手法に改めた。Figure 2 に校正結果を示す。

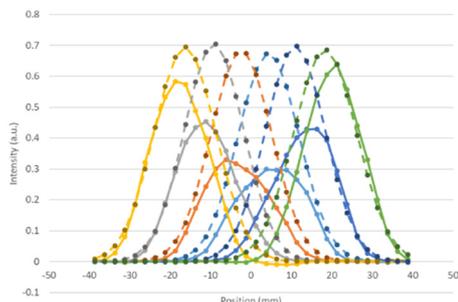


Figure 2: Local gain deterioration of MCP of D2VIPM after long-turn operation since the installation in 2008.

2008 年にインストールして以来、ビームが常に通過するダクト中心に相当する位置のゲインが 40%程度に減少していることがわかる。MCP のゲイン変動は積算出力電荷に比例するため、下記 Eq. (1)のように表現できる。

$$\Delta G(x) \propto Q(x) \propto G_0(V_{bias}) \cdot \bar{\rho}(x - f_{x0}(x)) \cdot \bar{I}_0 \cdot T \cdot D_{beam} \cdot D_{IPM} \quad (1)$$

Local gain change ← Integrated output charge  $\Delta G(x) \propto Q(x) \propto G_0(V_{bias}) \cdot \bar{\rho}(x - f_{x0}(x)) \cdot \bar{I}_0 \cdot T \cdot D_{beam} \cdot D_{IPM}$  Integrated time of measurement  
MCP gain set ← Beam center fluctuation  $\bar{\rho}(x - f_{x0}(x))$  Beam on ratio  
Averaged profile measured ← Averaged intensity  $\bar{I}_0$  Duty of IPM operation  
Gated IPM system can optimize this parameter ←  $D_{IPM}$

MCP ゲイン変動がさらに大きくなる場合、MCP の交換が必要になるが、MCP 自体が高額であり、また交換作業には IPM チャンバーの大気暴露が伴うため頻繁に行うことは難しい。このため、MCP 交換作業を行わないように利用頻度 (Eq. (1)中の  $T$ ) を抑えて運用してきた。

上記ゲイン変動とともに出力電流によるゲイン抑制も測定プロファイルの歪に影響を与える。文献[7]にあるように、MCP のゲインは MCP 厚み方向に多段直列接続されたダイノードとして表現される。微視的に各ダイノードは、微小抵抗体と微小コンデンサの並列回路を構成し、各段で増幅された電流は微小コンデンサに蓄積される電荷から供給される。蓄積電荷は微小抵抗体を流れるバイアス電流により補給されるため、MCP 出力電流は各段ダイノードに流れるバイアス電流に対して十分に小さく抑えなければならない。しかもバイアス電流は MCP 全体のものでしか測定できないため、中心部の出力電流が多い場所に対して選択的にバイアス電流を制御することは不可能である。

このため高速測定で、パルス波高が高くなる Turn-by-Turn 測定では、入射直後の数10ターン程度のバンチビームを測定対象にしている。Figure 3 に Turn-by-Turn 測定時の MCP 出力電流を示している。パルス波形の SN 比を改善するためにバイアス電圧を上げ出力電流を高めている。MCP 全体で数  $\mu\text{A}$  程度であるバイアス電流では、電子供給が追い付かない状況であり、中心部電流回路の平衡状態を保つために、ゲインが自律的に抑

制され頭打ちになる。

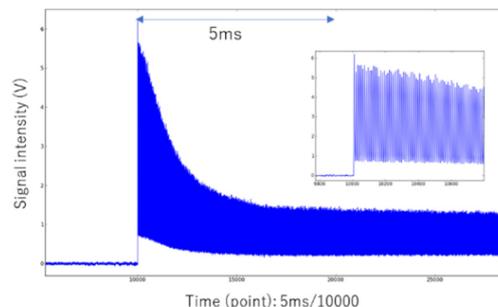


Figure 3: Sum of the signals from all 32 strip anodes.

Gated IPM では HV をパルス駆動することにより Eq. (1) の右辺最後の要素である Duty を調整することが可能である。仮に 10 Hz 運転、100  $\mu\text{s}$  パルスで駆動した場合、Duty は 0.001 になる。積算出力電荷が減少するためゲイン変動を抑えることができ、運用次第では実質的に MCP 交換が必要ないシステムになるだろう。また、十分なパルス電流強度を確保しつつ、平均出力電流を下げることでゲイン抑制効果を下げることが可能となる。入射から出射まで離散的ではあるが、Turn-by-Turn 測定が可能になると期待できる。

以降の章では Gated IPM システムのための 30 kV 高圧パルス電源の開発について、また、IPM チャンバー内の電極の改造について説明する。

### 3. Gated IPM システム

#### 3.1 30 kV 高圧パルス電源開発について

Figure 4 は電源回路の系統図である。電源システムは +30 kV DC 電源(1mA)、-30 kV DC 電源(1 mA)、 $\pm 20$  kV DC 電源(0.6 mA)の3種の高圧電源、極性切り替え用 30 kV 耐圧のリレー (切り替え時のみ使用するため図中には未表示)、30 kV-30 A MOSFET Push-Pull スイッチ (Rise time, Fall time:  $\sim 20$  ns)で構成され、外付けの 30 kV 定格 1  $\mu\text{F}$  オイルコンデンサ2台とともに使用する。Figure 5 は電源内部の写真である。

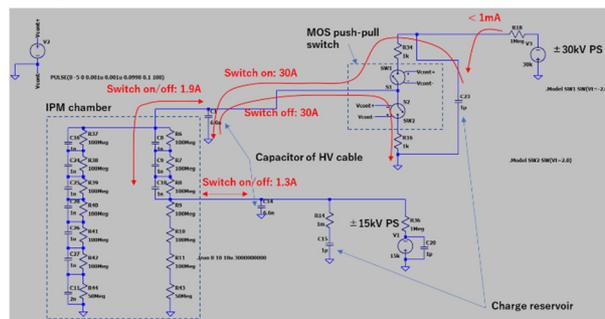


Figure 4: Block diagram of the HV switching power supply. The current of 30 A is exchanged between charge reservoir of 1  $\mu\text{F}$  and capacitor of HV coaxial cable at the time of switching. On the contrary, the charge stored in the charge reservoir is supplied from the DC HV power supplies slowly.

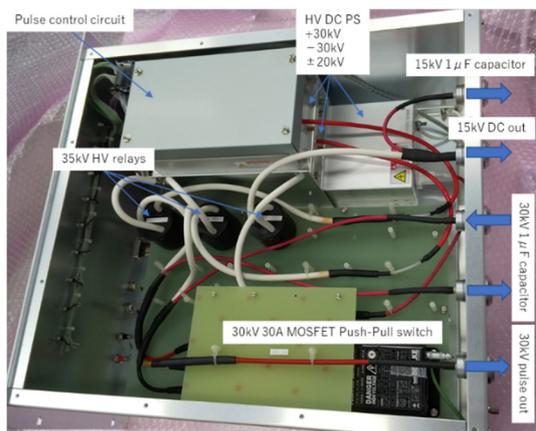


Figure 5: Photo of the HV switching power supply.

DC電源の出力部およびPush-Pullスイッチの入力・出力端子に電流制限のための抵抗、それぞれ1MΩ、1kΩを挿入した。スイッチ切り替え時のパルス立ち上がりおよび立ち下がりタイミングにコンデンサから30Aのパルス状電流が供給される。DC電源からは1MΩの電流制限抵抗と1μFで構成されるLPFにより、ゆっくりと電荷が供給されることになる。

IPMチャンバー内には多段の電極が設置されており、段間抵抗値のバランスで、電圧が分配される。この各段の抵抗器に並列にコンデンサを挿入しインピーダンスマッチングを取ることで、切り替えスピードを改善している。インピーダンスマッチングによりIPMチャンバー内回路は無関係となり、立ち上がり、立ち下がり速度はHV同軸ケーブルの静電容量6.6μFに電荷を注入するスピードつまりスイッチング時の電流30Aで決定される。

### 3.2 スイッチング性能について

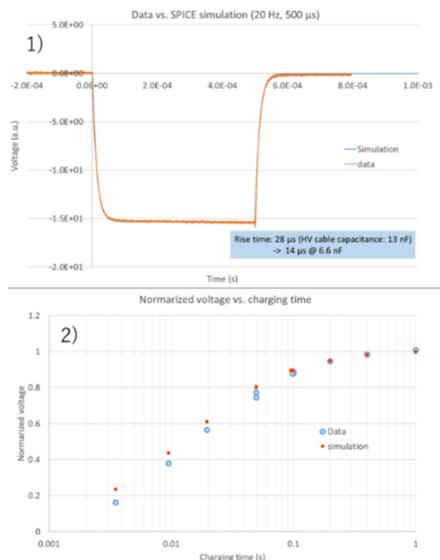


Figure 6: The switching response measured by using dummy load. 1) Measured switching response compared with the simulated result. 2) Pulse height dependence on the charging time which is determined by the time difference between pulses in 1 sec; it is defined as  $1 - (\text{switching frequency}) \times (\text{pulse width}) \text{ sec}$ .

Figure 6は製作した電源にIPMチャンバーを模擬したダミーロードを接続した試験結果である。実際のHVケーブルの静電容量が6.6nFである一方、ダミーロードには13nF分の同軸ケーブルを接続して試験を実施した。

1) 図は切り替え時のスイッチング応答(矩形応答)を示している。立ち上がり時間28μsは、13nFのケーブルに目的の電圧する時間であり、全電荷はパルス電流で供給される。測定結果はシミュレートした結果と一致している。実際のケーブル容量は6.6μFであるため、14μsになる。

2) は応答波形の波高値変化をパルス間隔の関数としてあらわしている。ここではパルス間隔を電荷注入時間1-Duty secと仮定している。ここでDutyはSwitching frequency×Pulse width secと定義している。Figure 4中のCharge reservoir 1μFへの供給電流はDutyに比例して増加するが、1MΩの電流制限抵抗を介して供給されるため波高が変動する。実験データとモデル計算値はおおよそ一致しており、ここでも電源のモデル設定が適切であることを示している。運用上はSwitching frequencyとPulse widthを決定しFig. 6の2)図を参照して印加電圧を算出できる。

### 3.3 電極改造について

Gated IPM化に合わせて電極の改造もおこなった。Figure 7に変更部を示している。1)、2)図にあるように電極各段間にインピーダンス整合を取るためのコンデンサを挿入した。最下部には50MΩ抵抗に2nF(1nFコンデンサを2並列)を、それ以外には100MΩ抵抗に1nFを挿入した。2)にあるように中間電極にはSUSロッドを介して最大15kVのDC電圧が印加されるが、印加部とグランド間にはパルス電圧がかからないためコンデンサは挿入していない。

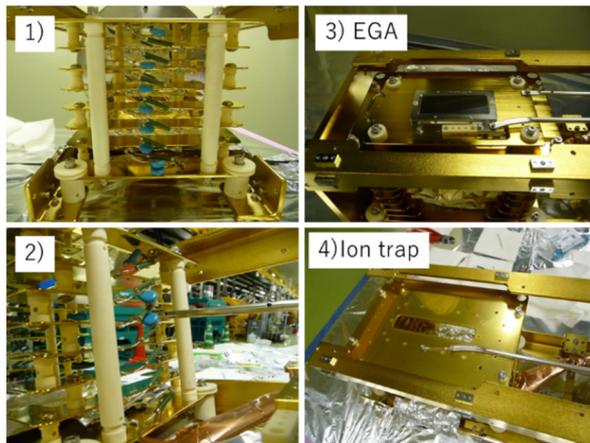


Figure 7: Electrode modifications for gated IPM system. 1), 2) In total 11 capacitors (1 nF, 10 kV) are installed in parallel to a resistor to make the impedance at each stage equally. 3), 4) The Electron Generator Array (EGA) installed to check the gain flatness of the MCP detector was removed and an ion-trap structure was newly installed at the same position.

従来のIPMにはMCP校正用EGAを配していたが、EGAおよびその固定プレートに加速された電離イオンが衝突し、2次電子が発生して真の信号に混入しコンタミ

信号となる。このため EGA を取り去り、Ion-trap 構造[8]を新たに採用した。

MCP 校正は Fig. 2 に示したようにビーム自体の軌道を変更することによって実施することとした。

### 3.4 電極改造後のインピーダンス評価

新しい電極にはコンデンサを導入したため、Fig. 8 にあるようにビームインピーダンスを計算で確認した。計算では 1)図にあるように単純化したモデルを想定し、Ion-trap がある Top plate、MCP 前面の Bottom plate に発生するビーム誘導電圧を求めた。

Top plate は高圧同軸ケーブルの静電容量 6.6 nF、Bottom plate は 200 nH 程度の銅製のロッドを介して真空チャンバーに接続されている。高圧同軸ケーブルは実際には MOSFET Push-Pull switch を介して 1  $\mu$ F の Charge reservoir および 1 M $\Omega$ +DC HV 電源に接続されているが、スイッチに挿入されている直列抵抗 1 k $\Omega$  により興味ある周波数領域においてはケーブル静電容量のみと近似しても問題ない。2 Plate 間は抵抗器およびコンデンサで接続されている。本モデルでは高圧ケーブルをはじめすべての要素を集中定数で近似しており、ケーブル端部の反射やケーブル減衰は考慮していないため、計算結果はあくまでも目安程度の意味でしかない。

2)図にインピーダンスを、3)図に想定したビーム電流を示している。誘起される差電圧は 4)図にあるように 25 MHz 近辺に 3 V 程度である。周波数はビーム周波数に比べて高く、また強度も無視できる程度に小さいためビーム運動には影響を与えないレベルといえる。

ビームによる発熱量は抵抗体を温めるためガス放出の原因となるが、それは 1 W 程度である。従来の IPM では DC HV を印加するため、常時 1.4 W 程度の発熱がある。一方で Gated IPM ではパルス駆動するため印加電圧による発熱は無視でき、ビームによる発熱 1 W を考慮しても発熱によるガス放出は減少するものと考えられる。

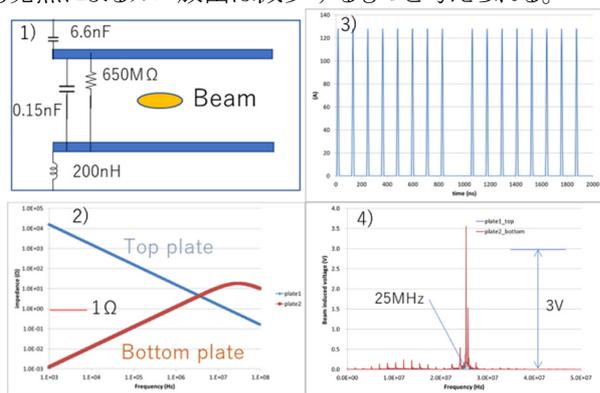


Figure 8: 1)Simplified model of gated IPM chamber taking into account of HV cable capacitance. 2)The impedances of the top plate where the HV is applied and the bottom plate which is grounded through the inductance of about 200 nH. The assumed beam current is shown in 3) and the induced voltage is shown in 4).

### 3.5 Ion-trap 構造による 2 次電子抑制

Ion-trap 構造による 2 次電子抑制を確認した。試験結果は従来の IPM システムで実施したものであるが、結果

と Gated IPM システムとの間に本質的な違いはない。Figure 9 に Ion-trap 設置の前後におけるプロファイル測定結果を示す。入射開始後から 18 ターン分のプロファイルを示している。

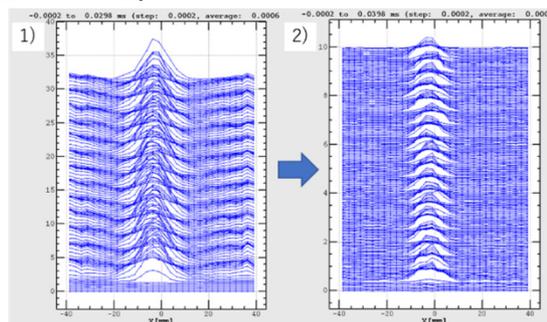


Figure 9: Profiles obtained by the electron detection using 0.2 T guiding magnetic field and -10 kV collection HV applied on the top plate; 1) from the original IPM design with EGA on top plate and 2) from the new design with ion-trap structure. The MCP bias voltage was 1.9 kV for both cases. The secondary electrons superimposed on the real profiles are appeared in Fig. 1) which would be generated by the impact of ions on the top plate and the EGA surface. These are drastically diminished as shown in Fig. 2).

試験では 0.2 T の磁場を印加し、電荷収集用電圧 -10 kV DC を印加した。MCP バイアス電圧は 1.9 kV に固定した。1)図は EGA 付のもので、改造前のデータである。真のプロファイル信号以外に別の信号が重畳していることがわかる。これは a)イオンが Top Plate に衝突する際に発生したもの、b)Electron Cloud 起因によるもの、c)IPM 電極外で発生した電子由来等による電子信号であることが文献[1]で指摘されている。イオン収集モードでの出力信号強度との比較から 10 倍程度の信号が観測されており、ほとんどの信号は本来観測すべき電離電子ではないことを示している。

2) 図は EGA と取り去り、Top plate に Ion-trap 構造を設置した場合のデータである。1)図でみられていたコンタミ成分の大部分が消えており、a)由来の 2 次電子が主原因であったことを示唆している。また、イオン収集モードに変更した際の信号強度とほぼ一致していることも確認した。

## 4. 粒子軌道シミュレーション

Gate on/off 時の電子およびイオン軌道を IPMsim3D を用いて評価している。Figure 10 に IPMsim3D[9,10]の計算チャートフローを示す。

Figure 11 には Gate off モード時の電子及びイオン軌道を示す。ここでは電極が作る電場  $E_c$  については Poisson/Superfish コード[11]を用いた 2 次元静電場計算結果を用い、磁場分布  $B$  については  $y$  方向一定の理想的な条件として計算を実施している。ビーム空間電荷効果  $E_s$  については、ビームプロファイルを  $\sigma_t = 10$  ns,  $\sigma_x = 2.7$  mm,  $\sigma_y = 4.4$  mm の 3 次元ガウシアン分布とし、ビーム強度は 4E13 ppb(particles per bunch)として計算している。

荷電粒子は、x 軸方向の電場 ( $E_c$  と  $E_s$  の x 軸方向成分) と y 軸方向成分である電場  $B$  による  $E \times B$  ドリフトで z 軸方向に移動し、検出領域(赤線で指示)の外へ外れる。検出エリアに到達する一部の粒子は到達時の運動エネルギーが低い場合 MCP 感度が低く増幅されない。

より正確には、3次元での  $E_c$ 、 $B$  評価が必要であり、今後の実施する予定である。

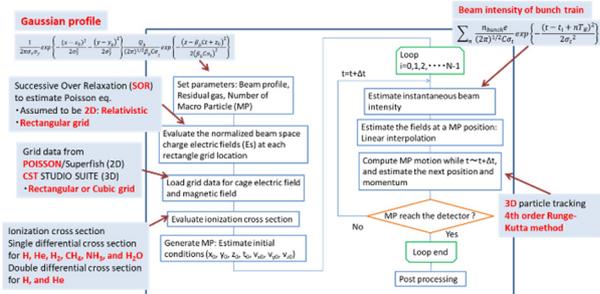


Figure 10: Flow chart of particle tracking code IPMsim3D designed to simulate profiles in the IPM system.

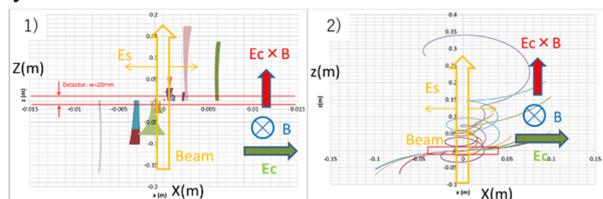


Figure 11: Examples of simulated electron and ion motions in case of the gate-off mode of the gated IPM, in presence of beam space charge electric field ( $E_s$ ), external electric field ( $E_c$ ) generated by the electrodes, and magnetic guiding field ( $B$ ). The particles are escaped along the beam axis from the detection area of MCP, Z, forced by the  $E \times B$  drift.

## 5. まとめ

J-PARC MR の IPM システムでは、MCP の寿命を延ばし、入射から出射までの Turn-by-Turn プロファイルを精度良く測定するため、本来 DC 運転する IPM システムをパルス駆動する Gated IPM システムへ改良している。今夏までにパルス電源の開発を終え、その性能を確認した。設定したモデルによるシミュレーション結果と一致した結果が得られた。実機に組み込んだ際の立ち上がり、立ち下がり時間は  $14 \mu\text{s}$  程度になる。

また、Gated IPM 化に向けて、IPM チャンバー内に設置されている電極に対しても改良を行った。一つは電極間にコンデンサを挿入し多段電極間のインピーダンスマッチングをスイッチング時間を改善した。もう一つは電子収集時に混入していた、イオン衝突に起因した 2 次電子コンタミを抑えるために、EGA 電子源を取り去り、代わりに ion-trap 構造を新たに設置した。試験の結果ほぼすべての 2 次電子コンタミを抑制できることを確認した。

Gated IPM における電子、イオンの運動を IPMsim3D を用いたシミュレーションを実施し、動作原理の理解を進めている。今後は電極形状が作る電場と電磁石による磁場分布を3次元で評価し、シミュレーションを行う予定である。また、微小ではあるが電極改良後にも依然として

残っているコンタミ成分の原因も調査する。

製作した電源は今秋に実機に組み込み、Gated IPM として運用を開始する予定である。Gated IPM のパフォーマンスに関しては次年度以降に報告する予定である。

## 謝辞

本研究は U.S.-Japan Science and Technology Cooperation Program in High Energy Physics として実施されている Accelerator and Beamline Research and Technology Development for High-Power Neutrino Beams の一環として研究費がサポートされています。Gated IPM システムを初めて開発した米国フェルミ研究所(FNAL)の J.R. Zagel 氏および R. Thurman-Keup 氏からは、電源システム、粒子軌道計算について様々なアドバイスをいただきました。ここに御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] K. Satou, S Lee, T. Toyama, KEK, H. Harada, N. Hayashi, A. Ueno, "IPM SYSTEMS FOR J-PARC RCS AND MR", Proceedings of HB2010, Morschach, Switzerland, pp 506-510, 2010.
- [2] K. Satou, T. Toyama, D. Arakawa, M Arinaga, K. Hanamura, H. Harada, Y. Hashimoto, S. Hatakeyama, S. Hiramatsu, S. Igarashi, S. Lee, H. Matsumoto, J. Odagiri, J. Takano, "BEAM DIAGNOSTIC SYSTEM OF THE MAIN RING SYNCHROTRON OF J-PARC", Proceedings of Hadron Beam 2008, Nashville, Tennessee, USA, pp 472-474, 2008.
- [3] Kenichirou Satou, Hironori Kuboki, Takeshi Toyama, "PROFILE MEASUREMENT BY THE IONIZATION PROFILE MONITOR WITH 0.2T MAGNET SYSTEM IN J-PARC MR", Proceedings of IBIC2016, Barcelona, Spain, pp 811-814, 2016.
- [4] T. Yasui, S.Igarashi, Y.Sato, K.Satou, K.Ohmi, T.Koseki, "TUNE SHIFTS AND OPTICS MODULATIONS IN THE HIGH INTENSITY OPERATION AT J-PARC MR", in Proc. 10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'19), Melbourne, Australia, May 2019, pp. 3148-3151.
- [5] J.R. Zagel, M. Alvarez, B. Fellenz, C. Jensen, C. Lundberg, E. McCrory, D. Slimmer, R. Thurman-Keup, D. Tinsley, "THIRD GENERATION RESIDUAL GAS IONIZATION PROFILE MONITORS AT FERMLAB", in Proc. of IBIC2014, Monterey, CA, US, 2014, pp. 408-411.
- [6] <https://www.photonis.com/products/electron-generator-arrays>
- [7] L. Giudicotti, "Time dependent model of gain saturation in microchannel plates and channel electron multipliers", Nucl. Instr. And Meth. A 659 (2011) pp 336-347.
- [8] K. Satou, J.W. Story, S. Levasseur, G. Schneider, D. Bodart, M. Sapinski, "A novel field cage design for the CPS IPM and systematic errors in beam size and emittance", Journal of Physics: Conf. Series 1067 (2018) 072008.
- [9] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/IPMSim/>
- [10] M.Sapinski, P.Forck, T.Giacomini, R.Singh, S.Udrea, D.M.Vilmsmeier, B.Dehning, J.Storey, F.Belloni, J.Marroncle, C.Thomas, R.M.Thurman-Keup, K.Satou, C.C.Wilcox, "IONIZATION PROFILE MONITOR SIMULATIONS - STATUS AND FUTURE PLANS", Proc. of IBIC2016, Barcelona, Spain, 2018, pp 520-523.
- [11] K. Halbach and R. F. Holsinger, "SUPERFISH - A Computer Program for Evaluation of RF Cavities with Cylindrical Symmetry", Particle Accelerators 7 (1976) 213-222.