

Developments of Residual Gas Ionization Profile Monitors for J-PARC RCS and 50 GeV MR

Kenichirou Satou^{1,A)}, Seishu Lee^{B)}, Takeshi Toyama^{B)}, Naoki Hayashi^{A)}

^{A)} JAEA/J-PARC

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

^{B)} KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

3 GeV Rapid Cycling Synchrotron and 50 GeV Main Ring Synchrotron in J-PARC are expected to accelerate high power proton beam of 1 MW and 0.75 MW class, respectively. To measure such a high intense beam profile, we have been developing Residual Gas Ionization Profile Monitors (IPMs). To confirm the reliability of this type monitors, we constructed a prototype and installed in Main Ring of Proton Synchrotron at KEK and tested using proton beams for two different operation modes, that is ion and electron collection mode using magnetic guiding field. The obtained data are used to discuss the detection reliability of the real ones.

J-PARC RCS 及び 50GeV MR用残留ガスプロファイルモニターの開発

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) 加速器群^[1]は Linac、3GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS)、50 GeV Main Ring Synchrotron (MR) から成っている。RCSはLinacからの181/400MeVビームを受け、繰り返し周期25Hzで最大3GeVまで加速し、平均電流133 μ A (1MW) ビームを物質・生命実験施設及びMRへ供給する。MRはさらに50GeVまで加速し、原子核・素粒子実験施設およびニュートリノ実験施設へ0.75MWビームを供給する。

このような大強度ビームのプロファイルを非破壊で測定するため、残留ガスプロファイルモニター (IPM) がRCSに設置され、エミッタンス測定とビームハロー観測に利用される。5%の精度でエミッタンスを測定する場合、1mmのビームサイズ測定精度が必要とされる。

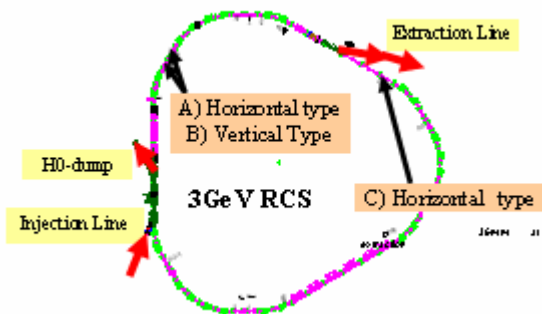


図1 : RCSにおけるIPMの設置位置

RCSでは、図1に示す3箇所500Gauss磁場発生用電磁石を備えたIPMを設置する。A) とC) では水平プ

ロファイルを、B) では垂直プロファイル電子収集により測定する。さらにA) で測定されるビームサイズ σ_a からは、予めC) で ϵ が測定されるため、 $\Delta p/p$ 値が同定される (式(1))。

$$\sigma_a = (\beta_a \epsilon + (\eta_a \Delta p/p)^2)^{1/2}, \quad \sigma_c = (\beta_c \epsilon)^{1/2} \quad (1)$$

RCSビームはペイント入射時のビームエミッタンスが216 π mm mradと大口径であるため、荷電粒子検出面を広くとる工夫が必要であった。李ら^[2]は既存のマイクロチャンネルプレート (MCP) をビーム軸に対して横に3台並べた構造をRCS用に採用した。また、MRでもIPMの導入が検討されている。

我々はRCS用実機的设计と平行して試験機を製作し、KEKの陽子加速器主リング (KEK-PS) でビーム試験を行った。ここではビーム試験から得られた知見をもとに実機の検出精度を議論する。

2. IPMの動作原理

2.1 イオン収集と電子収集

ビームは真空ダクト内を通過する毎に残留ガスを電離し、イオン・電子対を生成する。IPMは生成された荷電粒子を収集用外部電場 E_{ext} (y軸方向)によりビーム軸(z軸)に対して垂直な面(z-x平面)に引き出し検出する。よって収集される荷電粒子種により、イオン収集と電子収集に大別される。

イオン収集の場合、位置分解能がビーム電荷由来の電場 (空間電場) に強く依存するため、 E_{ext} の強度が重要である。空間電場によるプロファイルゆがみ^[3] (空間電荷効果: 2.2参照) はビーム形状、パンチ形状、収集距離に依存するため、 E_{ext} の強度決定には

¹ E-mail: kenichirou.satou@j-parc.jp

イオンの軌道計算が必須である。

電子収集では静止質量 m_e がイオン質量と比べて小さいため、数ns程度の短時間で収集可能であるが、空間電荷効果の影響が大きい。そこで、ゆがみ補正のためガイド磁場 B_g を E_{ext} と並行に印加することが行われる。電子が E_{ext} により B_g に沿って収集される場合、電子は磁束周りにラーモア回転運動をする。このときプロファイルゆがみの原因となる空間電場 E_s のx軸成分 E_{s-x} によるキックは、 $E \times B$ ドリフトによりz軸方向への変位に変換される。よってガイド磁場を導入する場合、位置分解能は以下のラーモア半径で与えられる。

$$r_L = \sqrt{2m_e K_0 / eB_g} \quad (2)$$

ここで K_0 は初期運動エネルギー、 e は素電荷を表す。電離電子の初期エネルギーは高々数10eV^[4]であるので、500Gauss印加した場合の位置分解能は0.4mm以下となる。ここで、 E_s は引力として働くため、 E_{ext} は E_s の最大値を超えなければならない。

2.2 周回ビームの空間電荷効果

大強度ビームのプロファイル測定では、空間電荷によるプロファイルゆがみがもっとも深刻である。この原因は空間電場 E_s のx軸成分 E_{s-x} により荷電粒子が収集過程でx軸方向にキックされることにある。キックを受けた荷電粒子はMCP面に到達するまでに変位 Δx を起こす。

プロファイルのゆがみ（ビームサイズ測定誤差）を確かめるために数値計算を行った。計算では粒子数 2.5×10^{11} ppb、バンチ長60ns（KEK-PS相当）、最大収集距離70mm（試験機相当）を仮定した。空間電場の最大値は7kV/mである。空間電荷効果を考慮したイオン軌道計算結果を図4に示す。プロファイルゆがみの低減化のためには、空間電場に抗して強力な外部電場 E_{ext} （HV=10kVのとき143kV/m）が必要であるこ

とがわかる。

この効果は空間電場強度に加えて収集荷電粒子の収集距離（イオン化位置からMCP面までの距離）にも依存する。RCSのビームダクト径が300mmである一方、MRが130mmである。RCSでは収集距離が長くMRより空間電荷効果が大きい。

3. 試験機のビーム試験

3.1 試験機の構成

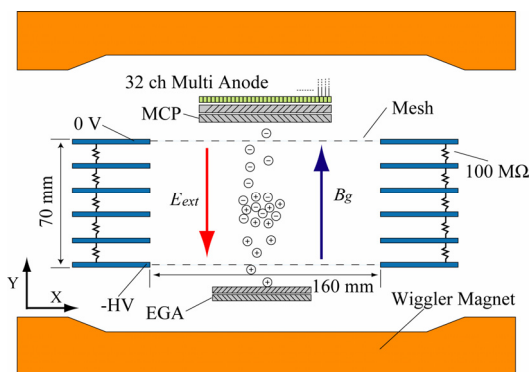


図3：試験機の構成機器

IPM試験機の構成図を図3に挙げる。均一な外部電場を生成するために6組の電極を配置し、抵抗分割法で各電極に電圧を印加した。32chマルチアノードストリップ（幅2.5mm）を備えたマイクロチャンネルプレート検出器（MCP検出器）では荷電粒子の到達位置と信号強度を同時に検出し、プロファイルを測定する。ここで、MCP検出器は信号の増幅（最大 10^6 倍）と検出を行う。試験機では静磁場を生成するため3極ウイグラー電磁石を設置した。この電磁石は中央と両サイドの磁極は極性が逆であり、BL積を相殺できるようにになっている。中心定格磁束は610Gaussである。

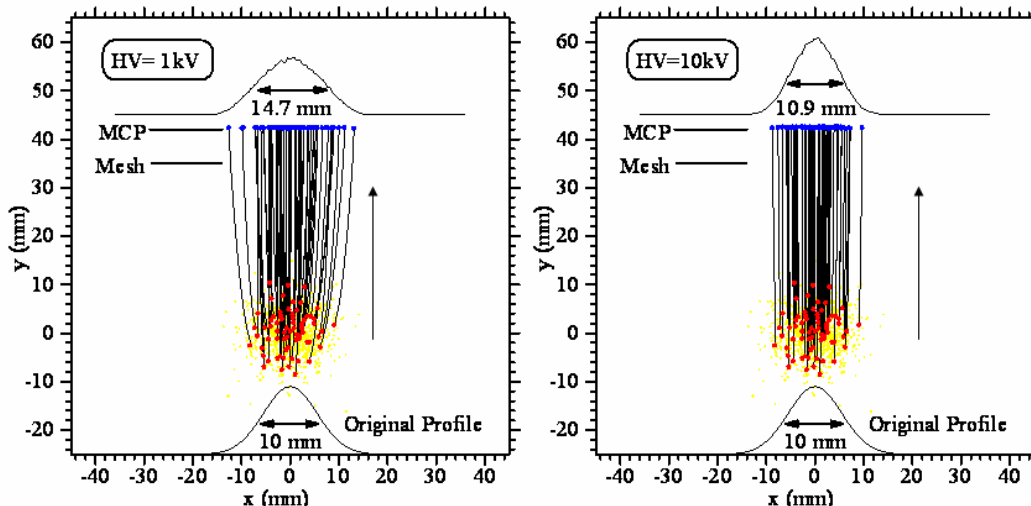


図2：試験機におけるイオン収集時の軌道計算結果。グラフ上方の分布は測定されるプロファイルを示している。

さらにMCP検出器の経年変化を補正するための電子源^[5]を設置した。

3.2 プロファイル測定結果

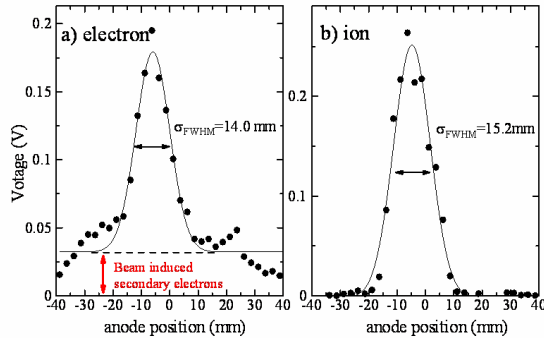


図4：電子及びイオン収集プロファイル

図4に試験機で得られたプロファイルを示す。a)はガイド磁場500Gaussでの電子プロファイル、b)はHV=10kVでのイオンプロファイルである。電子収集時にはビーム由来の二次電子が混入している。実機ではTiNコーティングによる二次電子の抑制が必要である。得られたビームサイズはイオンの方が電子と比べて9%ほど大きい。これはイオン収集時の空間電荷効果によるものと考えられる。

4. 実機の検出精度

4.1 RCS用IPM

RCS用のIPMでは500Gaussガイド磁場を用いた電子収集と45kV定格電圧 ($E_{\text{ext}}=150\text{kV/m}$)を用いたイオン収集が可能である。電子収集の位置分解能は先に記したように0.4mm以下と期待され、要求される位置分解能1mmと比べて十分な精度であるといえる。

イオン収集の検出精度を確かめるためイオンの軌道計算を行った。ビームサイズ(半値幅)40mmを仮定し、定格45kV印加した場合の計算結果を図5に示す。定格ビーム (4.3×10^{13} ppb)の場合、測定ビームサイズは79mm、定格1/10の場合42mmとなる。

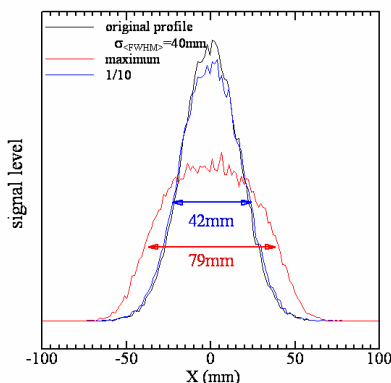


図5：RCS用IPMによるイオン収集プロファイルのゆがみ計算

以上から定格ビームのプロファイル測定には、ガイド磁場を用いた電子収集が必要不可欠であることがわかる

4.2 MR用IPM---イオン収集型の実現性

MRビームプロファイルをイオン収集で測定する場合の必要 E_{ext} 強度を計算で評価する。計算ではビームサイズ30mm(半値幅)、ビームバンチ長300nsの定格入射ビームを仮定し、空間電荷効果によるプロファイルゆがみを計算した。図6に測定されるビームサイズの印加電圧依存性を示す。

エミッタンスを5%以内の誤差で測定する場合、ビームサイズ測定誤差は0.8mm以内となり、図からHV=40kV($E_{\text{ext}}=310\text{kV/m}$)以上が必要であることがわかる。

入射時にはイオン収集によるプロファイル観測が可能であるが、ビームが加速されると断熱減衰によりエミッタンスが減少し、空間電荷効果が増大する。50GeVまで加速した場合、ビームサイズが1/3、バンチ長が1/6程度減少することが予想され、HV=100kV($E_{\text{ext}}=770\text{kV/m}$)印加しても測定ビームサイズは実際の2.4倍にもなり、誤差0.8mm以内のビームサイズ測定は困難である。よって、MRのプロファイル測定でも、500Gauss程度のガイド磁場を用いた電子収集が必要不可欠である。

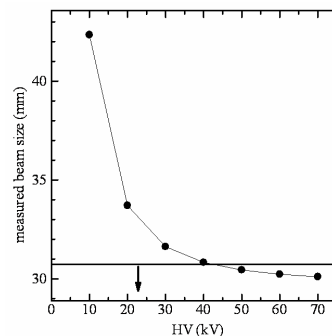


図6：MR用IPMにおけるイオン収集時の測定ビームサイズ

参考文献

- [1] Y. Yamazaki, eds, Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Facility Report, J-PARC, KEK-Report 2002-13; JAERI-Tech 2003-044.
- [2] S. Lee, et al., "Design Study of a Nondestructive Beam Profile and Halos Monitor Based on Residual Gas Ionization for the J-PARC RCS", Proceedings of the 14th symposium on accelerator and Technology, Tsukuba, Japan, Nov. 2003.
- [3] K. Satou, et al., "A Prototype of Residual Gas Ionization Profile Monitor for J-PARC RCS", EPAC'06, TUPCH065.
- [4] J. D. Jackson, "Classical Electrodynamics", Wiley, New York, 1962, p. 430.
- [5] ELECTROGENTM, the electron generator array made by BURLE Electro-Optics, Inc., <http://www.burle.com>.