

PERFORMANCE OF RESIDUAL GAS IONIZATION PROFILE MONITOR FOR HIGH INTENSITY PROTON BEAMS

Yoshinori Sato^{1,A)}, Keizo Agari^{A)}, Masaharu Ieiri^{A)}, Youichi Igarashi^{A)}, Susumu Inaba^{A)}, Yohji Katoh^{A)}, Masatoshi Saito^{A)}, Yoshihiro Suzuki^{A)}, Minoru Takasaki^{A)}, Kazuhiro Tanaka^{A)}, Hitoshi Takahashi^{A)}, Akihisa Toyoda^{A)}, Hiriyuki Noumi^{A)}, Erina Hirose^{A)}, Michifumi Minakawa^{A)}, Yutaka Yamanoi^{A)}, Hiroaki Watanabe^{A)}

^{A)} Institute for Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

Abstract (英語)

Residual Gas Ionization Profile Monitor (RGIPM) has been developed to monitor 50GeV-15 μ A proton beams at Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC). To reduce beam loss and monitor beam profile all the time, profile monitors must be non-destructive. The proof-of-principle prototype RGIPM has been developed with Sr-ferrite permanent magnets to reduce diffusion of electrons ionized by protons. The present RGIPM works under 1 Pa pressure and no amplification devices is necessary to measure profile distributions. The present RGIPM has been tested with 50MeV-3 μ A proton beams at Tohoku University Cycrotron Radioisotope Center (CYRIC) to confirm operation principles since the energy deposit of 50 MeV-3 μ A proton beams are similar to 50GeV-15 μ A proton beams at J-PARC. The RGIPM shows good performances as a profile monitor and good linearity up to 3 μ A. The present article reports the results of the test experiment in detail.

大強度陽子ビームのための残留ガスを用いたビームプロファイルモニタの性能評価

1. 概要

現在建設中の大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の原子核素粒子実験施設では、加速器から遅い取り出し方式で取り出された最大50GeV-15 μ Aの陽子ビームを30%ロス相当の二次粒子生成標的に照射し、K中間子等の二次粒子ビームを生成する^[1]。大強度ビームを安定に輸送するためには、ビームラインの要所に設置されたプロファイルモニタでビームの空間分布を常時監視しなければならない。接触型のモニタは不要なビームロスを引き、かつモニタ自身が放射線損傷を受けるため、非接触型のプロファイルモニタが望ましい。

我々はこれまで、非接触型のプロファイルモニタとして残留ガスのイオン化を用いたビームプロファイルモニタ (Residual Gas Ionization Profile Monitor: RGIPM) を開発してきた。遅い取り出しビームラインでは真空度が1Pa程度なので、MCP (Micro Channel Plate) 等の増幅装置なしで十分な信号量が得られる。一方1Paの真空度では、電離電子が電極までドリフトする間に残留ガス分子との弾性衝突によって拡散が起こり、プロファイルが広がってしまう。これを解決するため、収集電場と平行に400ガウス程度の磁場を印加することでドリフトする電子の運動を1mm程度のラーマー半径内に閉じこめ、拡散を抑制することができる。KEK 12GeV-PSの取り出しビームラインに試作機を設置し、基本原理を実証することができた^[2]。

試作器では磁場強度依存性を測定するため空冷コ

イルを用いた電磁石を使用した。ビームラインに多数設置されるプロファイルモニタのそれぞれに電磁石を用いることはメンテナンスの手間がかかり実用できでない。実機では永久磁石を用いるのが現実的である。Sr-フェライト磁性体は安価に入手でき、FermilabのRecycler Ringでも多数採用されており、耐放射線性は十分あると考えられる^[3]。J-PARC用のRGIPMにはSrフェライトを用いた永久磁石を採用した。

図1にSrフェライト永久磁石を用いて製作したRGIPMの外観図を示す。200mm角の真空チェンバの内部にギャップ100mmの平行電極が水平・垂直用に2つ設置されている。内部電極はセラミック基盤を使用しており片側には電圧印加用にSUSの薄板が張られ、対向する面にストリップ状の電極がエッチングしてある。典型的な印加電圧は100~200Vである。電極ストリップの間隔は2mmで、本数は32本であるので、電荷収集の有効領域は62mmである。電極の両側には平行電場を作るための補助電極が設置されている。

真空容器の外側には水平および垂直方向に磁場を印加するためのSrフェライト永久磁石が2台設置されている。電極中心での磁場強度は420ガウスであり、中心付近の一様度は10%以内である。内部電極はビーム中心から ϕ 100mmの領域には何も物質が無いよう設計されているので、この範囲をビームが通過してもビームロスは発生しない。

KEK 12GeV-PSのビーム強度はJ-PARCの約1%にすぎないので、J-PARCでの性能を確認するため東北大

¹ E-mail: yoshinori.sato@kek.jp

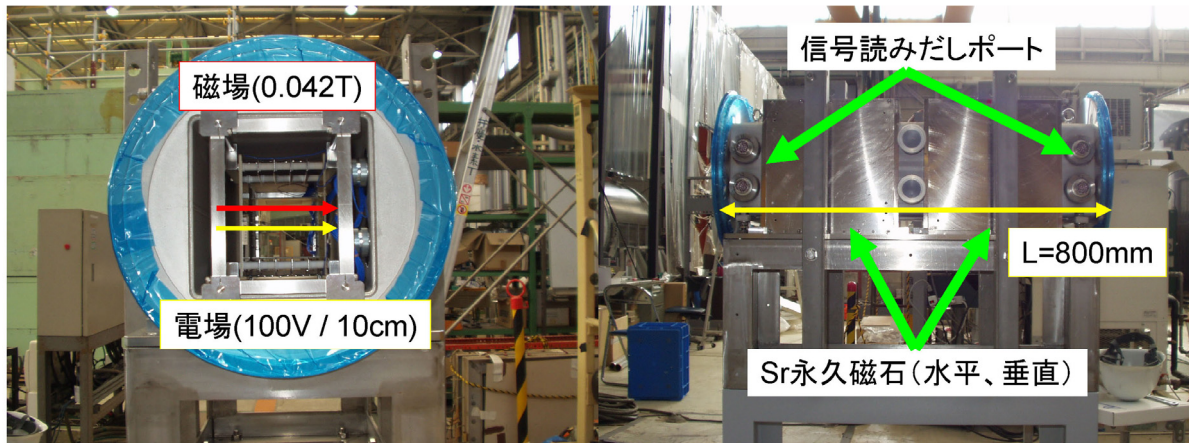


図1 Sr-永久磁石を用いたRGIPM実証機の外観

学サイクロトロンRIセンター(CYRIC)の50MeV陽子ビームを用いてモニタの動作試験を行った。陽子ビームの強度は最大 $3\mu\text{A}$ であり、50MeV陽子の空気中のエネルギー損失 ($10\text{MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)$) が50GeV陽子 ($2\text{MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)$) の約5倍であることを考慮すると、J-PARCの最高ビーム強度である $15\mu\text{A}$ での動作試験に相当する。ビーム試験の主な目的はビーム強度に対して信号収量が比例するかどうか、プロファイルが安定して測定できるかの2点である。

2. 東北大学CYRICでのビーム試験

図2にCYRICの31コースに設置されたRGIPMのビーム試験セットアップを示す。930サイクロトロンで50MeVに加速された陽子ビームがRGIPMを通してビームダンプに捨てられる。RGIPMの上流に設置されたアルミナフォイルとプラグでプロファイルと電流値をモニタする。RGIPMの上流は 10^{-4}Pa 程度の真空度である。RGIPMは 1Pa 程度の真空度で使用するため、真空を仕切るTi膜(厚さ $50\mu\text{m}$)をRGIPMの上流に設置した。RGIPMはスクロールポンプで 2Pa 程度まで排気された。RGIPMのポンプ引き口に真空ゲージとガス導入配管を設置し、真空度をモニタしつつ外部から空気を入れることで真空度を変えられるようにした。

RGIPMからのプロファイル信号は放射線シールドの外に設置された信号積分回路に接続した。積分回路は0.5秒のゲート時間で 4nC の入力に対して 5V の出力を出す回路で、今回のビーム試験では1秒毎に200msecのゲート幅で信号を積分し、出力信号電圧をスキャニングADC(アドバネット社製Advme2607)で全チャンネルを読み出した。

50MeV陽子ビームの強度は最低 30nA から最大 $3\mu\text{A}$ まで変化させた。RGIPMの上流および下流のビームプロファイルはアルミナ蛍光板からの光を撮像管カメラで撮影し、ビデオテープに録画しつつビデオカードで画面を取り込み、プロファイルを解析した。

図3にビーム強度 $1.5\mu\text{A}$ 、真空度 1.9Pa に固定して印加電圧を変化させてプラトーカーブを測定した結果を示す。水平および垂直の信号収量はお互いよく一致しており、 $100\sim 200\text{V}$ の間にプラトー領

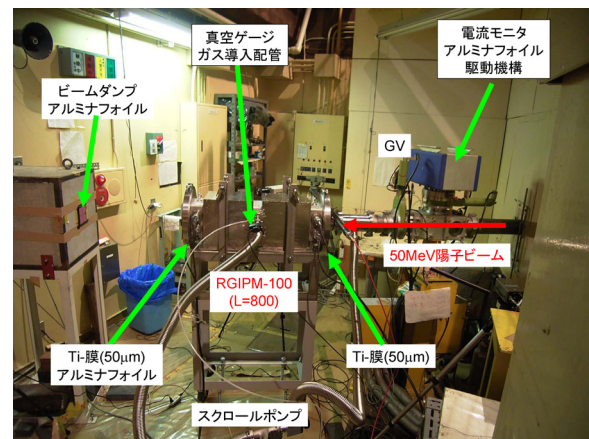


図2 CYRIC31コースでの実験セットアップ

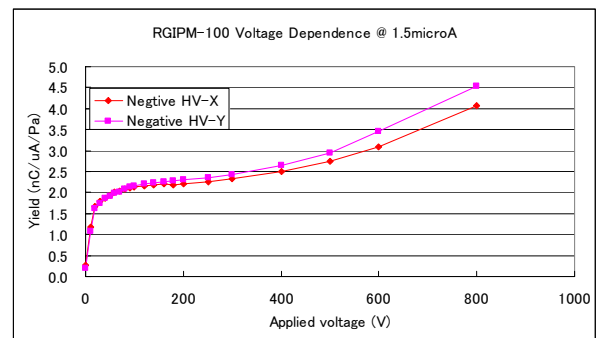


図3 ビーム強度を固定した場合の信号収量の印加電圧依存性

域が確認され、電離箱モードで動作していることが確認できる。印加電圧は -100V に固定して実験を行った。

図4にRGIPMで測定された50MeV- $1.5\mu\text{A}$ 陽子ビームの典型的なプロファイル分布を示す。ガウス関数でフィットして求めた水平および垂直ビーム幅はそれぞれ $\sigma=2.8\text{mm}$ および 4.2mm であった。この結果は上流の蛍光板で測定されたプロファイル幅に $50\mu\text{m}$ のTi膜での陽子ビームの多重散乱で広がる効果を加味すると計算とよく一致する。また、RGIPMで測定された電荷量は陽子ビームが 1.9Pa の空気をイオン化して生じる電離電子の収量の約半分であった。この原

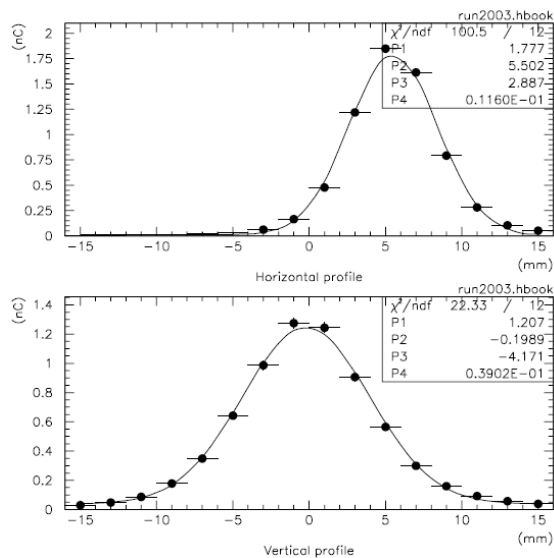


図4 RGIPMで測定された50MeV-1.5 μ A陽子ビームの水平および垂直方向のビームプロファイル分布

因は、真空ゲージがガス導入配管と同じ所につけたためと考えられる。

図5に陽子ビームの強度を0.3 μ Aから3 μ Aまで変化させた時の水平および垂直プロファイルで測定された電荷量の変化を示す。収集電荷量をビーム強度と真空度で規格化するとビームのイオン化で生じた電離電子数になり、RGIPMの収量がビーム強度に対してよい線形性を持っていることを示している。プロファイル幅についてもよい安定性が得られた。

ビームを水平および垂直方向にシフトさせてプロファイル測定し、ビームの重心位置が移動してもプロファイルが正しく測定できた。

図6にビーム強度を50nAに固定して外部から空気を導入し、真空度を変化させてプロファイル測定した結果を示す。真空度が悪化すると電子の平均自由行程が短くなるので、印加磁場の磁束を横切る方向への拡散の効果でプロファイル幅が真空度の平方に比例して広がることが予想される。実験データは真空度の0.5乗より少し小さい0.45乗程度の依存性になっている。

3. まとめ

今回のビーム試験の結果、RGIPMはプロファイルモニタとして期待される性能を満たしていることが確認された。J-PARCの最大ビーム強度に匹敵する50MeV-3 μ A陽子ビームに対して非接触でプロファイルを正しく測定することができた。信号収量やプロファイル幅がビーム強度によく比例していることが確認できた。これを利用すればプロファイルモニタの測定からビーム強度を間接的に知ることできる。ビーム強度が増加した場合でも信号測定に特に問題は見られなかった。RGIPMはJ-PARCの環境でも実用に耐えるビームプロファイルモニタの性能を持っていることが実証された。

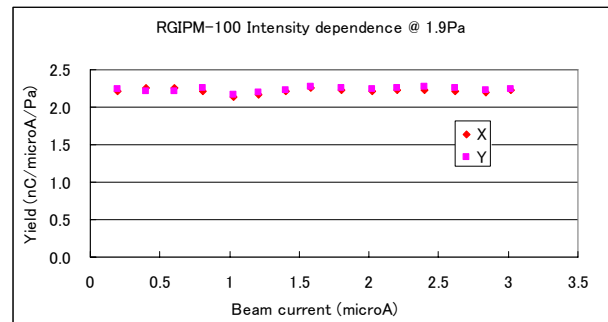


図5 RGIPMで測定された収集電荷量のビーム強度依存性。横軸は陽子ビームの強度、縦軸はビーム強度と真空度で規格化された水平および垂直プロファイルの電荷量

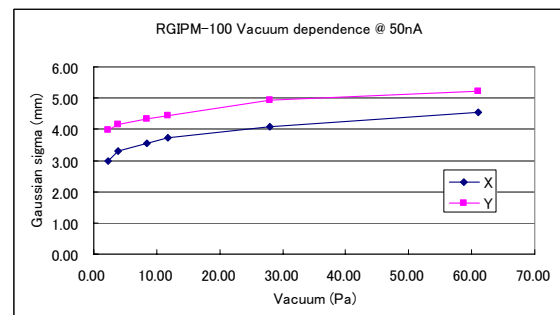


図6 RGIPM内の真空度を変化させた時のプロファイル幅の変化。

今後はJ-PARCの環境下で磁性体材料の放射線による減磁の効果を定量的に推定し、モニタの寿命を定める。また、放射線環境下でリモートメンテナンスを円滑に行うための設置架台を検討していく。

謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費基盤研究(A) (15204024、17204019)及び若手研究(B) (17740175)の補助の元になされた。

参考文献

- [1] <http://www.j-parc.jp/>
- [2] 里嘉典他、第2回日本加速器学会年会報告pp760-762 (2005).
- [3] R. F. Holsinger, Proc. PAC95, Dallas, TX, USA (1995),pp1305-1309.