

DEVELOPMENT OF LOW PRESSURE RESIDUAL GAS IONIZATION PROFILE MONITOR

Yoshinori Sato¹, Keizo Agari, Erina Hirose, Masaharu Ieiri, Youichi Igarashi, Susumu Inaba, Yohji Katoh,
Michifumi Minakawa, Hiroyuki Noumi, Masatoshi Saito, Yoshihiro Suzuki, Hitoshi Takahashi, Minoru Takasaki,
Kazuhiro Tanaka, Akihisa Toyoda, Yoshikazu Yamada, Yutaka Yamanoi, Hiroaki Watanabe,
Institute for Particle and Nuclear Studies,
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract

Non-destructive profile monitor is a crucial beam-diagnostic device at Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) where the beams of 750 kW (50GeV-15 μ A) must be handled safely and stably since beam losses must be kept as low as possible for maintenance. We have developed Residual Gas Ionization Profile Monitor (RGIPM) operated in low pressure of 1 Pa, which is achieved with rotary pumps. The knock-on electrons produced by ionization of residual gas with beams are collected with electric and magnetic fields. Applying the magnetic field parallel to the electric field is essential to reduce diffusion by collisions of electrons with residual gas molecules. The prototype RGIPM installed in the slow-extraction beam lines at KEK 12 GeV Proton Synchrotron shows the good performances of profile measurement, position and intensity dependences, and so forth. The present article reports the experimental setup and the results of test experiments.

低真空残留ガスビームプロファイルモニタの開発

1. 概要

現在茨城県東海村に建設中の大強度陽子加速器施設(J-PARC)では、750 kW (50GeV-15mA)の大強度陽子ビームを取り扱う。J-PARCのハドロン実験室(HD-Hall)では、50GeVシンクロトロン(MR)から約0.7秒間取り出されたビーム(slow-extraction)を二次粒子生成標的(T1)に照射し、大強度のK中間子、 π 中間子ビームが生成される。これらの二次ビームは実験エリアまで導かれ、原子核・素粒子実験に供与される。T1標的を通過したビームはビームダンプまで導かれ、安全に吸収される。ビームライン機器を安全かつ安定的に運転するためにはビームの軌道と空間分布(プロファイル)を正確に測定し、常時監視することが極めて重要である。

J-PARCでの陽子ビーム強度はKEK 12GeV陽子シンクロトロン(12GeV-PS)の100倍にもなるので、わずかのビームロスでもビームライン機器の放射化はメンテナンス上深刻なレベルになる。ビームロスを減らすためにはビームライン上に膜等のビームを遮る物質を極力なくさなければならない。従って、常時プロファイルを測定するビームモニタは非接触型でなければならない。

これまでKEK 12GeV-PSの取り出しビームラインでは、プロファイルを測定する装置としてセグメントされた電離箱(Segmented Parallel Ionization Chamber: SPIC)を用いてきた^[1]。SPIC

はHeまたはArガスを用いるため、真空膜(SUS 50 μ m)をビームダクトに取り付け、大気の領域を作って設置しなければならない。SPICは信号量が大きく、非常に強い放射線環境下でも安定して動作し、コストも安価であるといった長所がある。しかしながら、ビーム接触型であり設置には真空膜が必要であることからJ-PARCの大強度ビームには使用が困難である。

我々は、大強度陽子ビームのプロファイルを非接触で測定する残留ガスビームプロファイルモニタ(Residual Gas Ionization Profile Monitor: RGIPM)を開発した。残留ガスがビームによってイオン化され生成する電子または陽イオンを電場で収集し、プロファイルとして観測する。SPICとは異なり、RGIPMはビームダクト中の残留ガスのイオン化を利用するため真空膜が不要になるので、ビームロスは発生しないという利点がある。

RGIPMは様々な加速器施設で用いられている。加速器リングで通常達成されている 10^{-1} Pa以下の高真空下では、電離電子または陽イオンの信号を増幅するためMicro Channel Plate(MCP)を用いるのが一般的である^[2,3]。しかしMCPはわずかのビームロスで生成するX線や荷電粒子にも感度があるので、J-PARCハドロン実験室のように二次粒子生成標的が存在し多量のビームロスが前提となっている施設では使用できない。

ハドロン実験施設では、取り出しビームを輸送するビームダクト内の真空はロータリーポンプで

¹ E-mail: yoshinori.sato@kek.jp

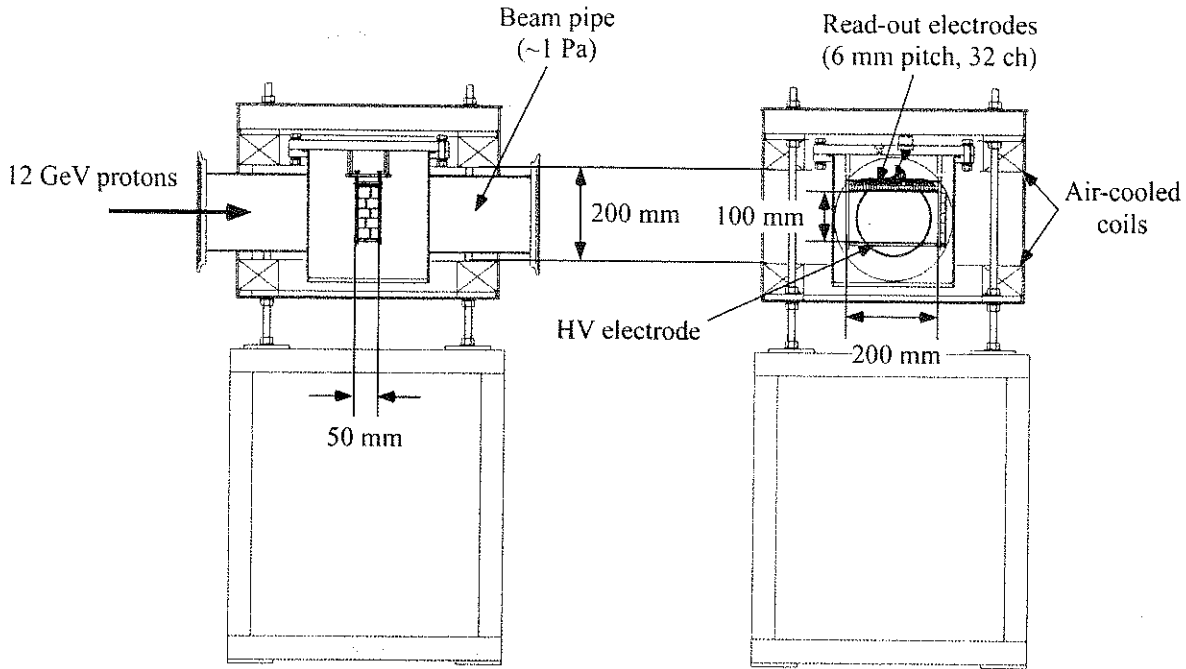


図1 RGIPM側面図(左)と正面図(右)

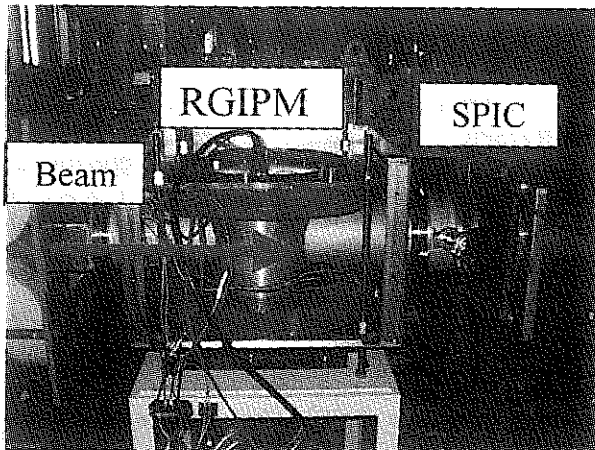


図2 KEK 12GeV-PSのEP2-Cビームラインに設置途中の低真空RGIPM。下流には参照用のSPICが設置されている。

達成できる1Pa程度の真空度である。このためMCPで信号を増幅することなく電離電子または陽イオンの信号を測定できると思われる。しかし、著者らのこれまでの研究では、1 Pa程度の低真空内で陽イオンを10 cm程度ドリフトさせると、他の残留ガス分子と弾性衝突してプロファイル幅が広がって観測されることがわかっている^[1]。

この困難を避けるため、筆者らは電離電子を電場と平行に印加した磁場に巻きつけて収集することを考案した。電離電子がラーマー半径内に閉じ込められるため、残留ガス分子との衝突による拡散を抑えられると期待される。本論文ではこのような原理を持つ低真空RGIPMのプロトタイプ機と、

12GeV-PS取り出しビームラインでの試験結果について報告する。

2. 低真空RGIPMプロトタイプのビーム試験結果

図1に低真空RGIPMプロトタイプの概要を示す。真空チェンバ内に幅200mm、高さ100mmの電極を設置する。上下に高圧印加用の電極と信号読み出し電極(SUS)を設置し、電場でドリフトしてきた電離電子を検出する。電極のビーム軸方向の長さは60mmである。真空チェンバはビームダクトと接続し、ロータリーポンプで排気され、真空度は1.3Pa程度である。2×10¹²ppp(proton/spill)の陽子ビームの場合、信号強度は1.4nC程度と予想される。真空チェンバの外部には電磁石コイルが取り付けられた。モニタ全体は磁場を閉じ込めるため鉄のシールドで覆われている。この磁石では電場と平行に約500 Gaussまでの磁場を発生することができる。電離電子の典型的なエネルギーは50eV程度と予想されるため、ラーマー半径を1mmにするために必要な磁場強度は230 Gauss程度である。磁場強度を変化させてプロファイル幅を測定することで、電離電子が磁場によって閉じ込められる効果を検証することが出来る。

図2に示すように、プロトタイプRGIPMをKEK 12GeV-PSのEP2-Cビームラインに設置した。RGIPMの下流には参照用のSPICが設置され、測定したプロファイルと比較してRGIPMが適切に動作しているかを検証できる。今回の試験での取り出しビーム強度は最大2×10¹²pppであり、取り出し時間は約1.8秒であった。

図3に低真空RGIPMとSPICを用いて測定された

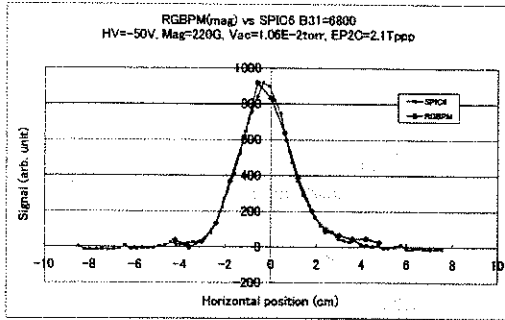


図3 RGBPM(赤)とSPIC(青)で測定された陽子ビームプロファイル。

12GeV陽子ビームの水平方向のプロファイル分布を示す。参照用SPICのピッチ幅は2.54mmであり、RGBPMのピッチ幅は6mmである。RGBPMでは32chある読み出し電極のうち、真中の16chのみ読み出している。このとき印加電圧は-50V、印加磁場強度は220 Gaussであった。図からわかるとおり、SPICとRGBPMのプロファイルは非常によく一致しており、RGBPMの基本的な動作原理が実証された。

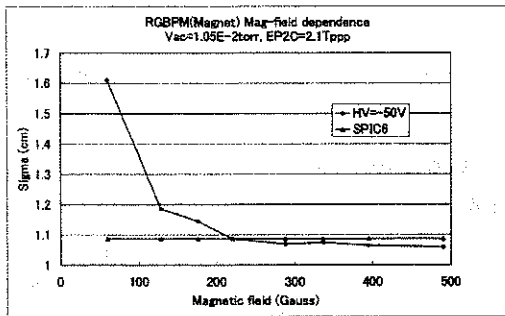


図4 印加磁場強度を変化させた場合のプロファイル幅の変化。青線はSPICでの測定値。

図4に印加磁場強度を変化させてプロファイル測定した結果を示す。磁場強度の増加に伴ってプロファイル幅が狭くなり、SPICで測定されたプロファイル幅に近づくことがわかる。予想したように、200 Gauss付近でプロファイル幅はほぼ一定になり、電離電子がラーマー半径内に閉じ込められていることが実証された。

図5に陽子ビーム強度を変化させてプロファイル信号強度依存性を測定した結果を示す。信号強度はプロファイル分布をガウス関数でフィットし、その面積を計算して求めた。図5からわかるように、信号強度はビーム強度の変化に対してほぼ直線的に変化することがわかった。これは残留ガスのイオン化がビーム強度によく比例することを示しているため、ビーム強度モニタとしても有望であることがわかる。

今回の測定では、観測された信号強度は約6nCであり、予想された信号量よりも4倍程多かった。これは電子が電極にドリフトする間に電場で加速さ

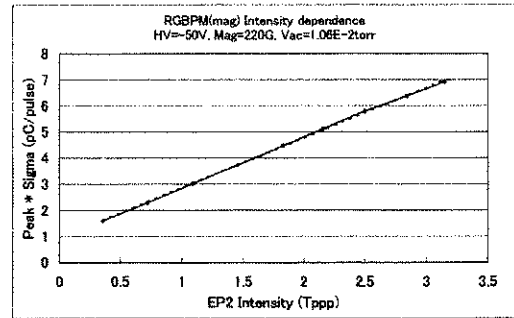


図5 ビーム強度を変化させたときの信号強度の変化。横軸は取り出しビームの強度 (10^{12} proton / spill)

れ、残留ガス分子と非弾性衝突して二次電子が生成した結果信号量が増えたと考えられる。印加電圧を100V以上に上げていくと信号量の増加が著しくなるので、電子雪崩現象が起きていると思われる。

3. まとめと今後

低真空残留ガスのビームによるイオン化で生じる電離電子を電場と磁場で収集することによってビームロスを生じずにプロファイルが常時測定できる低真空RGBPMのプロトタイプを製作し、KEK 12GeV-PSの遅い取り出しビームラインに設置してビーム試験を行った。得られたプロファイルは参照用のSPICとよく一致し、プロファイルが正しく得られた。これらの試験によって低真空RGBPMの動作原理が実証された。J-PARCに向けてさらに研究開発を進め、実際の使用に耐えるモニタを開発していく。

参考文献

- [1] K. H. Tanaka et al., KEK Preprint 91-27, (1991)
- [2] J. Krider, Nucl. Inst. Meth. A278, 660-663 (1989)
- [3] T. Kawakubo et al., Nucl. Inst. Meth. A302, 397-405 (1991)
- [4] Y. Sato et al., presented at the 3rd International Conference on Nuclear and Particle Physics at J-PARC (NP04). URL: http://www-ps.kek.jp/jhfp/np/NP04/presentations/Joint_1/NP04_Ysato.pdf