

PROFILE MEASUREMENTS OF PROTON BEAM WITH RESIDUAL GAS IONIZATION PROFILE MONITORS AT J-PARC HADRON FACILITY

Yoshinori Sato^{#,A)}, Keizo Agari^{A)}, Erina Hirose^{A)}, Masaharu Ieiri^{A)}, Yohji Katoh^{A)}, Michifumi Minakawa^{A)}, Ryotaro Muto^{A)}, Megumi Naruki^{A)}, Hiroyuki Noumi^{B)}, Shin`ya Sawada^{A)}, Yoshihisa Shirakabe^{A)}, Yoshihiro Suzuki^{A)}, Hitoshi Takahashi^{A)}, Minoru Takasaki^{A)}, Kazuhiro Tanaka^{A)}, Akihisa Toyoda^{A)}, Hiroaki Watanabe^{A)}, and Yutaka Yamanoi^{A)}

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

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

^{B)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

Abstract

At J-PARC Hadron facility, beam profiles of 30 GeV proton beams slowly extracted from the 50 GeV proton synchrotron are measured with residual gas ionization profile monitors (RGIPM) working under ~ 1 Pa vacuum pressure. RGIPMs are suitable for high intensity proton beams because of its non-interceptive feature. The monitors installed on the slow-extraction beam line have been working correctly since the first beam extraction on January 27th, 2009, and providing useful information for beam commissioning. In the present report, an overall explanation of the installed RGIPMs at J-PARC Hadron Facility and results of profile measurements are described in detail.

J-PARC ハドロン実験施設における残留ガスビームプロファイルモニタを用いた陽子ビーム測定

1. 概要

J-PARC ハドロン実験施設は、50 GeV シンクロトロン加速器から遅い取り出し方式で取り出された DC 的な大強度陽子ビームをハドロン実験ホール内の二次粒子生成標的に照射し、K 中間子・ π 中間子等、大強度の二次ビームを発生させて様々な原子核・素粒子物理学の実験を行う施設である。最大 50 GeV-15 μ A の大強度陽子ビームを安全に輸送するため、ビームの空間分布を測定するモニタは重要である。ハドロン実験施設では、一次陽子ビームの空間分布の測定に遷移放射光 (Optical Transition Radiation: OTR) モニタ、残留ガスビームプロファイルモニタ (Residual Gas Ionization Profile Monitor: RGIPM) が用いられている。ここでは RGIPM を用いたプロファイル分布測定の結果を報告する。

2. 低真空 RGIPM の概要

J-PARC ハドロン実験施設で用いられている RGIPM は、通常加速器で用いられているもの (10^{-4} Pa 以下の真空度で動作) と異なり、1 Pa 程度の真空中で動作することが特徴である。ビームダクトを通過する陽子ビームが真空中の残留ガスを電離して発生する電子を電極間に印加した電場と、電場に平行に印加された磁場によってセグメント化された電極にドリフトさせ、陽子ビームの水平・垂直方向の 1 次元プロファイルを測定することができる。残留ガスを利用しているためビームロスが発生させるこ

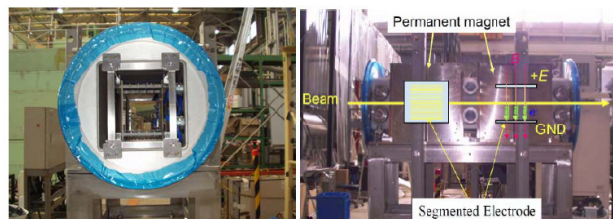


図 1 : 低真空 RGIPM の外観 (ギャップ 10 cm)

とがなく、大強度ビームであっても常時プロファイル測定することができる。

通常、加速器で RGIPM を用いる場合は真空度が 10^{-4} Pa 以下の高真空度のため、信号増幅に MCP (Micro Channel Plate) が用いられている。MCP は感度が極めて高いので容易に十分な S/N 比を得ることができるが、強い放射線環境である二次粒子生成標的周辺のような場所ではバックグラウンドが大きく、使用に適さない。また、耐放射線性の観点からも問題がある。

一方、1 Pa 程度の真空度では、電荷量を積分すれば MCP のような信号増幅装置がなくても十分な信号量を得られる。このため構造をシンプルにすることができ、高い放射線環境でも安定して使用することができる。但し、1 Pa 程度の真空度で単純に電場を印加しただけでは電離電子が電極に到達する前に残留ガスと散乱して拡散し、空間分解能が悪くなる。電場と平行に磁場を印加し、電子を磁場に巻き付けて集めることによって、拡散の効果を抑え、必要な空間分解能 (~ 1 mm) を得ることができる^[1,2]。磁場の印加に永久磁石を使用すれば、低コストでメンテナ

[#] yoshinori.sato@kek.jp

ンスフリーを達成できる。図1にギャップ10 cmの低真空 RGIPM の外観を示す。印加する電場はギャップ10 cmのモニタの場合10 V/cm程度である。以前報告したように^[3]、ある程度耐放射線性を持つと思われるフェライト系永久磁石を選定し、真空ダクトの外側に取り付けた。ビーム中心付近の磁束密度はギャップ10 cmのモニタの場合約400 Gである。

2. ハドロン実験施設におけるビームプロファイルモニタの配置

現在、50 GeV シンクロトロン加速器から取り出されている一次ビームのエネルギーは30 GeV、定常運転でのビーム強度は3.6 kW (6秒周期で 4.5×10^{12} Protons Per Pulse)で取り出されている。図2に一次ビームラインのビームプロファイルモニタの配置を示す。50 GeV シンクロトロンからの取り出し点付近には、加速器グループが設置したマルチリボンの二次電子収集型プロファイルモニタ(MWPM)が1台あるが、これは大強度ビームを取り出す際には常時設置しておくことができない。一次ビームラインの上流部は加速器と真空接続しており、真空度は 10^{-5} Pa以下となっているため、この区間は遷移放射光を用いたプロファイルモニタ(Optical Transition Radiation Profile Monitor: OTR)を使用している^[4]。ビームラインに設置された真空膜より下流は1 Pa程度の低真空区間で、ここにRGIPMが計14台設置されている。スイッチヤード及びハドロン実験ホール一次ビームラインの真空度はガス流量調整装置によって1 Pa程度を保つように自動調整されている。今後一次ビームの強度が増強される場合でも、真空度を下げることで信号が読み出し回路の範囲に入るよう調整することができる。

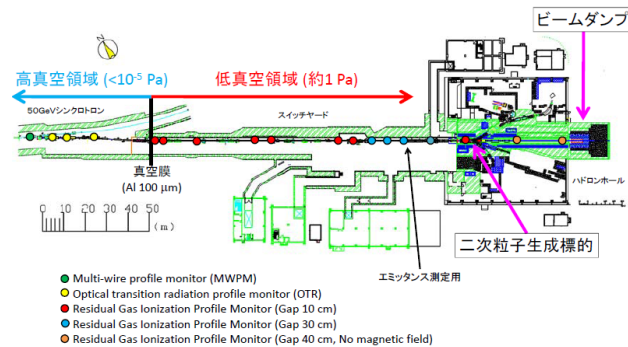


図2：ハドロン実験施設におけるビームプロファイルモニタの配置

14台のRGIPMの内訳は、電極ギャップ10 cmのタイプが8台、電極ギャップ30 cmのタイプが4台、電極ギャップ40 cmのタイプが2台となっている。ビームダンプ上流に設置された電極ギャップ40 cmのタイプ2台は永久磁石が取り付けられておらず、電離したイオンを収集する方式を取っている。読み出しchannelについては、水平、垂直方向共に32ch、ピッチは2mm, 3mm, 6mm, 10mmの4種類が

あり、想定されるプロファイル分布によって使い分けている。二次粒子生成標的の直近のモニタについては、ビーム幅が狭いため1 mmピッチ、64chで読み出しを行っている。

図3にRGIPMのデータ収集系の概要を示す。ビームライントンネルに設置されたビームモニタからの信号は、多芯同軸ケーブル及び多芯ツイストペアケーブルを用いて制御室まで増幅器を介さず直接伝送される。一次ビームラインに近い部分には耐放射線性を考慮してセラミックフェルトを用いた多芯ケーブルを使用している。制御室では、VMEクレート上の多チャンネル積分回路(GNV-370N-4: 4nC/5V)で約2秒のビーム取り出し中に電荷を積分し、電圧信号に変換する。ビーム取り出し終了後は電圧をホールドしておき、その信号を高速のマルチプレクサ(Advantec advme2607)で読み出してプロファイル情報を取得する。また、ビーム加速中にビーム無しのバックグラウンドデータを計測しておき、毎回バックグラウンドを差し引くことできれいなプロファイル分布が得られる。得られたプロファイルデータはEPICSのWaveformレコードに格納され、各種表示やデータアーカイブに用いられる。

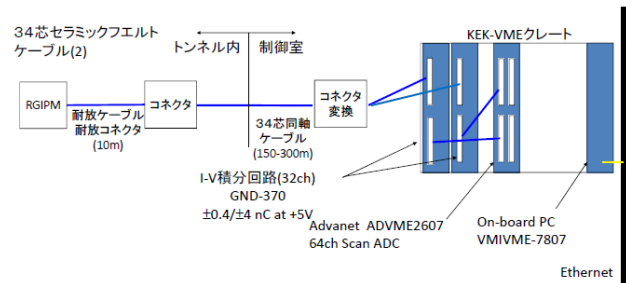


図3：RGIPM データ収集系の概要

3. 30 GeV 陽子ビームのプロファイル測定

図4は3.6 kW 運転時の典型的な運転時のビームプロファイル表示画面である。Waveformレコードに格納されたプロファイル情報をPythonのEpicsCAを用いてWxPythonで作成された表示画面に描画している。得られたプロファイル情報から中心値や幅を算出し、ビーム軌道の調整を行っている。同じWxPythonの表示画面上で、Channel Archiverに格納された過去のデータを呼び出すこともできる。また、2010年11月15日には、段階的に10 kW相当までのビーム取り出しを行ったが、問題なくビームプロファイル計測できた。

図5はビーム運転中にRGIPMの印加電圧を変化させながら全モニタのプロファイルと真空度を同時に測定し、信号量の和を計算してプラトーカーブを測定した結果である。横軸をE/p、縦軸を陽子ビーム強度と真空度で規格化された信号強度の和をプロットした。ギャップ10 cmと30 cmのそれぞれのRGIPMで、プラトーカーブがよく一致しており、モニタの特性に違いがないことがわかる。得られた信号強度は、30 GeV 陽子ビームが空気中でエネルギー

ギー損失をして生じるイオン対の数(35 eV/pair)と真空度から予想される信号強度とよく一致している。

図6は 3.6 kW 運転時に、スイッチャードトンネルのモニタ1台(図2参照)を用いてパラボラ法による一次ビームエミッタンス測定を行った結果である。

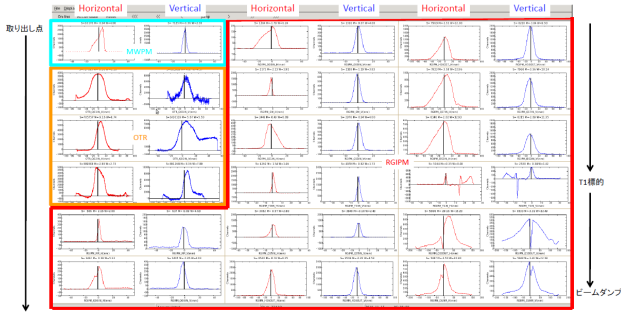


図4: WxPython で作成されたビームプロファイルモニタ表示画面

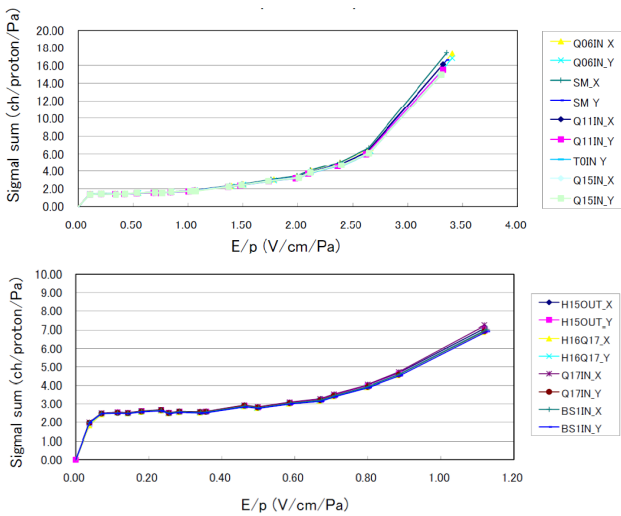


図5: RGIPM ギャップ 10 cm 及び 30 cm タイプのプラトーカーブ測定

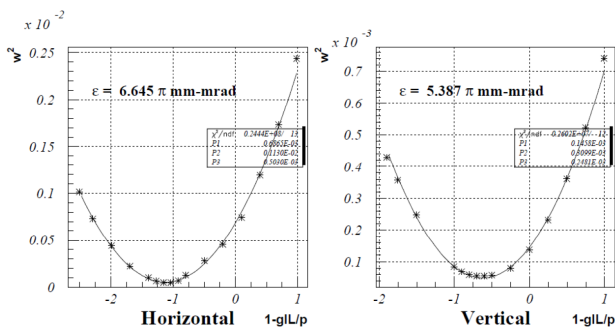


図6: 3.6 kW 運転時における RGIPM を用いた 30GeV 陽子ビームのエミッタンス測定の例

4. まとめと今後

J-PARC ハドロン実験施設では、3タイプ14台の低真空残留ガスビームプロファイルを使用しており、現時点で最大 3.6 kW の 30 GeV 陽子ビームのプロファイルを測定しており、全て順調に稼働している。

今後陽子ビームの強度をさらに増強していく予定であるが、S/N 比は向上する方向であるので、性能を確認しつつビーム調整を行っていく予定である。また、ビーム強度が増大して信号量が十分増えれば、1回のビーム取り出しに複数回のデータ読み出しを行ってマウンテンプロット表示を行うことも可能になると考えられる。これが実現すればビーム取り出し中の軌道の蛇行等について、より詳細な情報が得られると思われる。

また、同じ原理を応用して、陽子ビームの強度を比較的精度良く測定することも考えられる。高エネルギーの遅い取り出しビームでは、非接触でビーム強度を測定することはこれまで困難であったので、この可能性についても今後調査していく予定である。

謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金若手研究(B)(課題番号 17740715)、及び基盤研究(A)(課題番号 17204019)の助成の元に行われた。

参考文献

- [1] 里嘉典他、"Development of low pressure residual gas ionization profile monitor", Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society in Japan, pp.760-762, 2005.
- [2] 里嘉典他、"Performance of residual gas ionization profile monitor for high intensity proton beams", Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society in Japan, pp.118-120, 2006.
- [3] 里嘉典他、"A radiation damage test of permanent magnet materials for residual gas ionization profile monitor", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society in Japan, pp.294-296, 2007.
- [4] 豊田晃久他、"Development of OTR profile monitor for J-PARC hadron beamline (4)", Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society in Japan, pp.130-132, 2009.