

DEVELOPMENT OF NON-CONTACT BEAM INTENSITY MONITOR BY RESIDUAL GAS IONIZATION

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 (英語)

Non-contact beam intensity monitor is an important device for high-intensity proton accelerator, such as J-PARC. Especially, it is difficult to measure beam intensity of DC-like beam with off-contact. We have developed non-contact beam intensity monitor for J-PARC slow-extraction beam line by measuring charge of ionization electrons in 1 Pa residual gas. In this article, specifications of the residual gas ionization current monitor (RGICM) and results of a test experiment with 65 MeV proton beam at Research Center for Nuclear Physics in Osaka University are reported.

残留ガスを用いた非接触ビーム強度モニタの開発

1. 概要

大強度陽子加速器施設(J-PARC)^[1]のハドロン実験施設では、50GeV陽子シンクロトロン(MR)から取り出される陽子ビームをハドロン実験ホールの二次粒子生成標的に照射して K 中間子等の二次ビームを生成する。MR リングからのビームは 3 次共鳴を用いた遅い取り出し方式で DC 的に取り出される。設計ビーム強度は最大 50GeV-15μA (750kW) の大強度であり、6 秒周期の運転サイクルのうち取り出し時間は 2 秒である。

遅い取り出しビームのビーム強度を測定する手段として、ビームをアルミニウム等の金属薄膜に照射し、二次電子放出量を測定することでビーム強度を測定する SEC(Secondary Electron Chamber)が用いられてきた^[2]。SEC は精度及び直線性が優れているが、陽子ビームが直接当たるため原理的にビームロスが避けられず、大強度ビームには不向きである。

著者らは近年、1Pa 程度の真空度で動作する残留ガスビームプロファイルモニタを開発し、J-PARC 遅い取り出しビームラインで実際に使用している^{[3][4][5]}。同じ動作原理で、真空度を精度良く測定することができれば、得られた信号量からビーム強度に換算することが可能で、非接触でビーム強度を測定することができる。

陽子ビームが残留ガスを通過した際にイオン化して生じる電子の電荷量は次の式で表される。ここで $q_e(C)$ は電極で収集された電子量、 N_{beam} は

$$q_e = N_{beam} \times \frac{dE}{dx} \times \rho \times L \times \frac{P}{10^5} / I_{air} \times 1.602 \times 10^{-19} \quad (1)$$

ビーム粒子数、 dE/dx (MeV/g/cm²/proton) は陽子ビーム 1 個の空気におけるエネルギー損失率、 $\rho(g/cm^3)$ は空気の密度で常温では $1.29 \times 10^{-3} (g/cm^3)$ 、 $L(cm)$ は収集電極のビーム方向の長さ、 $I_{air}(eV/pair)$ は 1 イオン対を生成するために必要な平均エネルギーで空気では 35 eV/pair である^[6]。P(Pa) は残留ガスの真空度である。これより、P と q_e を精度良く測定すれば式 (1) より N_{beam} を求めることができる。

残留ガスビーム強度モニタ(Residual Gas Ionization Current Monitor: RGICM)の概念図を図 1 に示す。真空チェンバ内に平行平板を設置し、上部に電圧印加用の電極、下部に信号用見出し電極を設ける。信号読み出し電極の有効領域は幅 64 mm、ビーム方向の長さは 80 mm である。側面に電場成形用の電極を設け、整形電極は 1MΩの抵抗で接続されている。真空チェンバの外側には Sr-フェライトの永久磁石を上下に取り付け、その外側をリターンヨークで囲っている。図 2 に製作した RGICM の外観を示す。モニタのビーム軸方向長さは 400mm、重量は 80kg である。

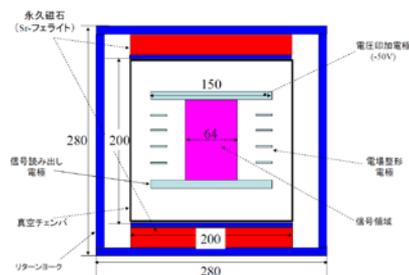


図 1 残留ガスビーム強度モニタ概念図

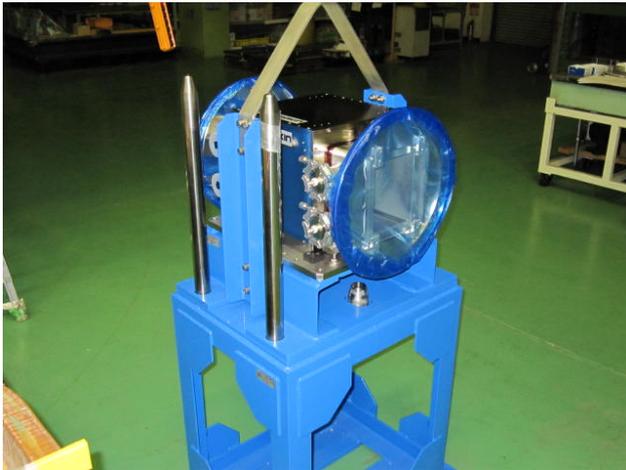


図2 残留ガスビーム強度モニタの外観

2. 65MeV 陽子ビームによるビーム試験

製作した RGICM の性能を試験するため、大阪大学核物理研究センター(RCNP)^[7]の ENN コースにおいて、65MeV 陽子ビームを用いてテスト実験を行った。ここではサイクロトロンからの DC ビームが最大 100 μ A まで利用できるため、J-PARC と同程度の条件で試験が可能である。但し、実際のビーム試験では、放射線量の関係から最大 4 μ A まで試験した。ENN コースでの実験セットアップを図3に示す。

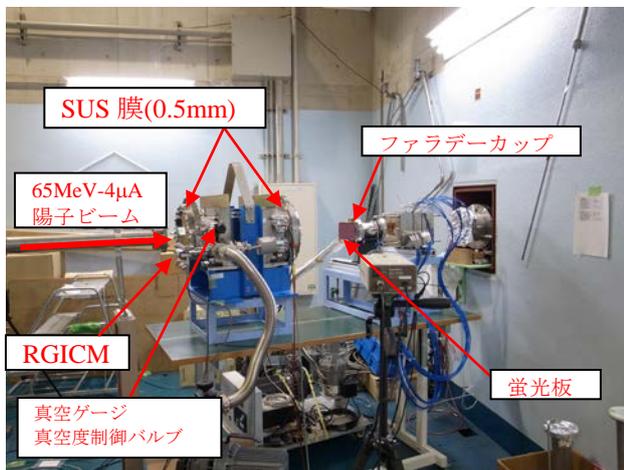


図3 RCNP ENN コースでの実験セットアップ

ビーム強度は RGICM の下流に設置したファラデーカップからの信号を 0.1 nC/pulse の ORTEC 製 Current Integrator で測定し、スケーラで記録した。RGICM からの電流信号は、Keithley 6514 型エレクトロメータで電荷量を積分して計測した。RGICM の真空度は ULVAC 製のキャパシタンスマノメータ (CCMH-1A: フルスケール 0.01~133 Pa、精度 \pm 0.15%) で測定した。また、真空度を制御するため、MKS 製の 250E マスフローコントローラおよび 947 型ピラニゲージを取り付けた。これらの機器は横河製 FA-M3 シリーズの PLC で遠隔制御された。陽子ビームの取り出し時間は+5V のゲート信号によって

制御された。典型的な測定時間は 1 回あたり 10 秒であった。ビーム取り出し毎にファラデーカップと RGICM の信号を同時に計測して比較した。

3. ビーム試験結果

65MeV の陽子ビーム 1 個が密度 1.29×10^{-3} g/cm³ の常温空気における単位長さあたりのエネルギー損失率 (dE/dx) は、SRIM コード^[8]によると 8.89 MeV/(g/cm²) と計算される。式(2)にエネルギー損失率と内部電極の信号有効領域の長さ 8cm を代入すると、式(2)が得られる。ここで、 q_e (C) は RGICM で測定された電荷量、 P (Pa) は RGICM の真空度、 q_{beam} は陽子ビームの電荷量である。RGICM で測定された陽子ビーム電荷量を、ファラデーカップで計測された電荷量と比較する。

$$q_{beam} = \frac{38.11 \times q_e}{P} \quad (2)$$

図4にビーム強度 100nA、真空度を 1, 5, 9, 83Pa と 5 段階変化させて測定したプラトーカーブを示す。縦軸は RGICM で測定された電荷量をファラデーカップで測定された電荷量でノーマライズしている。印加電圧 100V (電場 1kV/m) 以下においてプラトー領域があり、式(2)で求めたビーム電荷量と、ファラデーカップで測定されたビーム電荷量は 10% 以内で良く一致している。

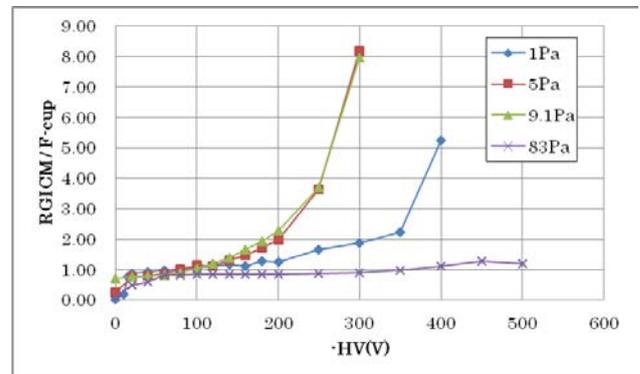


図4 プラトーカーブ測定結果

図5及び図6に 1.1Pa の真空度において、ビーム強度を 1nA から 4 μ A まで変化させて測定した結果を示す。図5に一次直線でフィットした直線も示す。図6にファラデーカップで測定されたビーム強度からの偏差を示す。ビーム強度の低い所ではばらつきが見られるものの、真空度安定状態での偏差は 10% 以内に収まっており、ビーム強度モニターとして使用できる見込みがあることがわかる。ビーム強度の低い所ではばらつきが多いのは、電荷を積分するエレクトロメータの測定誤差が原因と考えられ、測定毎の校正及びビーム OFF 時のバックグラウンド差し引きを行えば改善できると思われる。

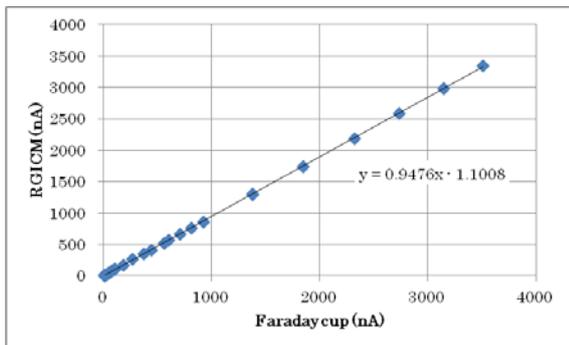


図5 真空度 1Pa でのビーム強度依存性測定結果

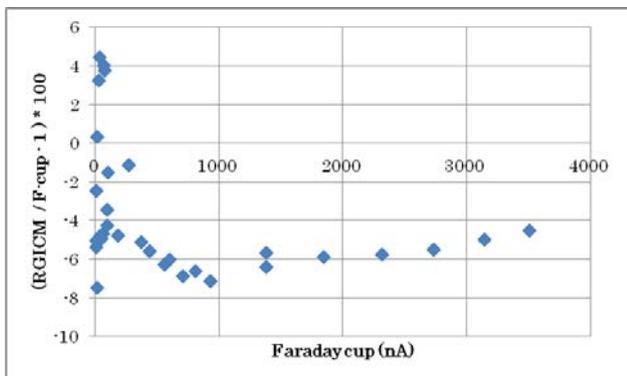


図6 1Pa 真空度における RGICM とファラデーカップで計測された電荷量の偏差(%)

図7にビーム強度 100nA で、真空度を 1Pa から 84Pa まで変化させて測定した結果を示す。ファラデーカップで計測された陽子ビームの電荷量とのずれは真空度によって条件が異なるが、±20%の範囲に収まっている。圧力が高い領域では変動が少なく、数 Pa の領域では圧力変動によるデータのばらつきが比較的大きい。これは真空ゲージ及び圧力制御系のばらつきが系統誤差の原因と考えられる。改良案としては真空度を測定する頻度を上げ、リアルタイムで補正していくことが必要と考えられる。

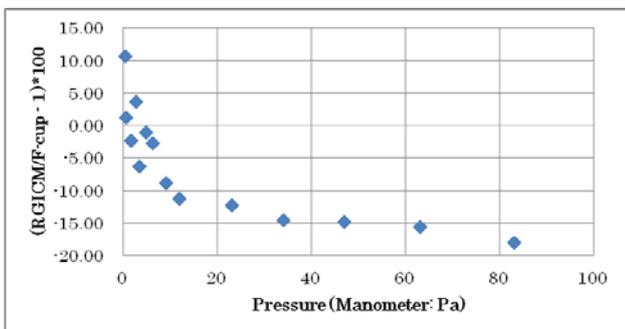


図7 ビーム強度 100nA における RGICM とファラデーカップで測定されたビーム電荷量の偏差(%)

図8及び図9に、ビームライン上流のステアリング電磁石の設定を変更し、ビーム位置を水平および垂直に変化させた場合の測定結果を示す。水平位置

を移動させても測定された陽子ビーム強度に大きな変動は見られないが、ビームを縦方向に移動させた場合、垂直上方、信号読み出し電極から遠ざかると信号強度が増大し、読み出し電極に近付くと信号強度が減少する傾向が見られた。これは電離電子が残留ガス中をドリフトしている際、二次電離を起こすためだと考えられる。

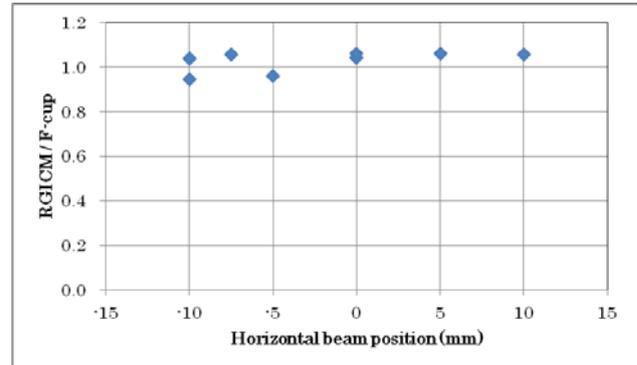


図8 100nA ビーム、1Pa の条件でビーム水平位置依存性測定結果

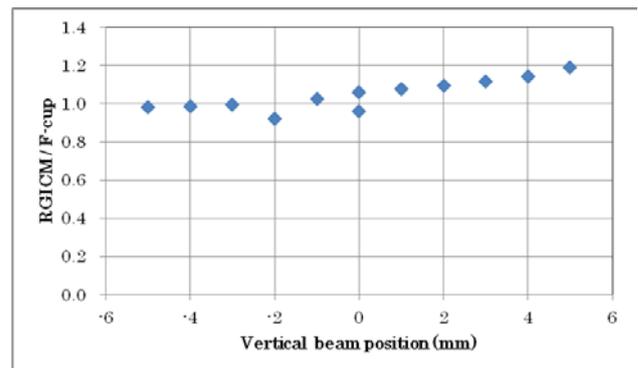


図9 100nA ビーム、1Pa の条件でビーム垂直位置依存性測定結果

4. まとめと今後

今回のビーム試験の結果、RGICM は陽子ビームの電荷量を 10%以内の誤差で測定できることがわかった。系統誤差によるばらつきを抑えるため、ビーム OFF 時のバックグラウンド測定及び真空度の読み出し回数を上げて補正することで、より安定にビーム強度を測定することが可能であると考えられる。今後は RGICM を J-PARC 遅い取り出しビームラインに設置し、30GeV 陽子ビームに対してのビーム強度測定試験を実施する。ビーム位置依存性、ビーム強度に対する直線性、および長期安定性についてもデータを集める予定である。

謝辞

実験準備及びビーム調整に協力して頂いた大阪大学核物理研究センターのスタッフに感謝致します。この研究は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(C) No.23540357 の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] <http://j-parc.jp>
- [2] M. Ieiri *et al.*, Proc. 9th Symp. On Accelerator Science and Technology (1993) 477.
- [3] Y. Sato, *et al.*, "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.
- [4] Y. Sato, *et al.*, "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.
- [5] Y. Sato, *et al.*, "Profile measurements of proton beam with residual gas ionization profile monitors at J-PARC Hadron Facility", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society in Japan, pp.485-487, 2011.
- [6] F. Sauli, CERN 77-09 (1977)
- [7] <http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/>
- [8] SRIM code, <http://www.srim.org/>