

J-PARC ハドロン実験施設における残留ガスビーム強度モニタを用いた 遅い取り出しビームの duty factor 測定

MEASUREMENT OF DUTY FACTOR OF SLOW-EXTRACTION PROTON BEAMS WITH A RESIDUAL GAS IONIZATION CURRENT MONITOR IN J-PARC HADRON EXPERIMENTAL FACILITY

里 嘉典#, 上利 恵三, 秋山 裕信, 豊田 晃久, 森野 雄平

Yoshinori Sato#, Keizo Agari, Hironobu Akiyama, Akihisa Toyoda, Yuhei Morino

Institute for Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

The duty factor of semi-DC beam extracted with 3rd order resonance, so called “slow-extraction beam”, is an interesting quality indicator for users of nuclear and particle physics experiments with intense primary and secondary beams in terms of maintaining good data collection efficiency. In Hadron Experimental Facility (HEF) at the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), the current duty factor of 30 GeV proton beams extracted from the Main Ring (MR) is estimated to be about 70 % up to 10 kHz by measuring the beam-loss at a thin vacuum window with a plastic scintillator and a photomultiplier tube. Recently, it has been demonstrated that an existing non-destructive intensity monitor (Residual Gas Ionization Current Monitor: RGICM) in HEF can also be used to measure the duty factor of the primary proton beam. The present article details the results of the duty factor measurements with the RGICM, a comparison of these results with the existing monitor, and future plans.

1. 概要

J-PARC ハドロン実験施設では、主リング(MR)から 3 次共鳴を用いた遅い取り出し法によって取り出された陽子ビームをハドロン実験ホールへ輸送し、多様な原子核・素粒子物理学の実験研究が行われている[1]。Figure 1 にハドロン実験施設の一次及び二次ビームラインの配置を示す。A-line では、30 GeV 陽子ビームをハドロン実験ホールの二次粒子生成標的(T1 target)に照射し、生成した K 中間子等の二次粒子ビームを実験に供給している。B-line は A-line の途中に設置した Lambertson 電磁石を用いてビームを分岐し、毎秒 10^{10} 個程度の 30 GeV 陽子ビームをハドロン実験ホールに輸送して直接物理実験に使用するためのビームラインである[2]。C-line は 8 GeV の de-bunch されていない遅い取り出しビームをハドロン南実験棟に輸送し、二次粒子生成標的で発生したミューオンの稀崩壊事象探索実験(COMET[3])を行うためのビームラインである。ビームラインの運転形態として、A-line のみビームを輸送する A 単独運転、A-line と B-line に同時にビームを出す AB 同時運転、及びハドロン南実験棟のみに陽子ビームを輸送する C 単独運転の 3 通りがある。A 単独運転及び AB 同時運転時には、MR は 4.24 秒周期で運転され、ビームの取り出し時間(Spill 長)は約 2 秒である。C 単独運転時の MR 運転周期は 9.6 秒、Spill 長は約 0.5 秒である。

遅い取り出しビームを利用する観点では、まずビーム強度ができるだけ高いことが望ましいが、同時に取り出し中のビーム時間構造(Spill 構造)ができる限り直流に近いことも実験遂行上重要である。ビーム強度が高くてでもビームの時間構造の平坦度(以下、Duty Factor と呼ぶ)が悪いと瞬間的なビームの強度が高くなり、検出器が窒息

してデータ収集効率が低下し問題となるためである。このため、遅い取り出しビームのコミッションングにおいてはビーム強度の増強と同時に Duty Factor の改善も重視されている。遅い取り出しビームの Duty Factor とは、以下で定義される指標である。

$$\text{Duty Factor} = \frac{(\sum_{i=0}^N F(i))^2}{N \sum_{i=0}^N (F(i))^2} \quad (1)$$

ここで $F(i)$ は特定の周期でサンプリングされたビーム強度の時間分布、 N はサンプリング点数である。この指標が 1 に近いほど直流に近いビームである。

MR からハドロン実験施設への遅い取り出しを行う場合、取り出されたビームの瞬間的な強度をフィードバック信号として使用し、MR の EQ (Extraction Quadrupole) 電磁石及び RQ (Ripple Quadrupole) 電磁石を用いて取り出し中のビームスピン構造が平坦になるように制御している[4]。このフィードバック信号は、Fig. 1 に示す位置にある SX Spill Monitor で測定されている。このモニタは、近

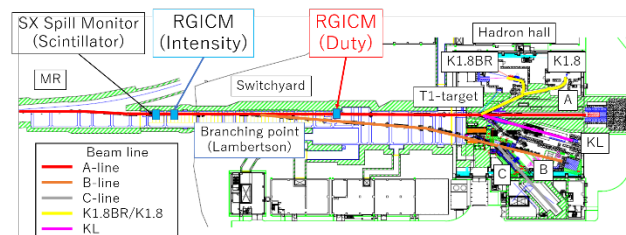


Figure 1: Locations of beam lines, RGICMs, and SX spill monitor in HEF.

yoshinori.sato@kek.jp

傍の真空ダクト内の真空仕切り膜 (Al 100 μm 厚) でのビームロスにより生じた二次粒子をプラスチックシンチレータと光電子増倍管で測定している。この方法はビーム強度の変動に応じたロスの時間変化を高速に検知できる利点がある一方で、ビーム強度を間接的にビームロスで観測しているためビームラインの他の場所でのビームロスに影響を受ける可能性があること、瞬間的に高い強度の信号が入力された場合には光電子増倍管が飽和する可能性があることがデメリットである。

ハドロン実験施設では、遅い取り出しビームのビーム強度 (ショット毎に取り出された粒子数) を測定するため、残留ガスビーム強度モニタ (Residual Gas Ionization Current Monitor: RGICM) を使用している。このモニタは陽子ビームがビームダクト内の残留ガス (典型的には 0.1~1 Pa 程度) を通過した際に発生する電離電子を収集し、積分した電荷量を熱電対真空ゲージで測定した真空度及びトンネル内の雰囲気温度で補正すると一次陽子ビームの強度を非接触で測定することができる。この方式ではビームロスの影響は無視でき、また電荷信号を積分しているため短パルスビームが入射した場合でもモニタが飽和することなく測定が可能である。RGICM 本体の構造及びビーム強度測定の結果は以前に報告されている[5]。

Figure 1 に示すように、ハドロン実験施設には 2 台の RGICM が設置されており、B-line 分岐部より上流の RGICM(Intensity)は、取り出しビームの強度測定、及び短パルスビーム検知のために運転中は常時使用している。本研究では 2 台目の RGICM(Duty)を用いて遅い取り出しビームの Spill 構造を shot 毎に測定し、ビーム調整及び連続運転時の指標として活用することを目指した。

2. RGICM を用いた遅い取り出しビームの Spill 時間構造の測定

2.1 信号処理回路と RGICM の周波数帯域

Figure 2 に RGICM を用いて Spill 時間構造を測定するための信号処理回路を示す。ビーム強度を測定する

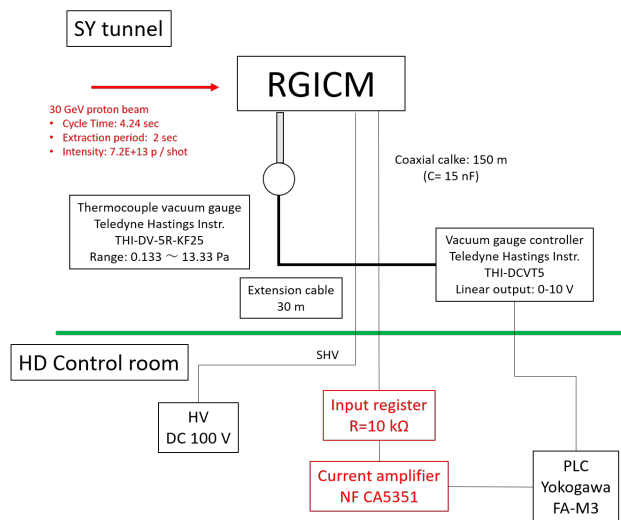


Figure 2: A schematic diagram of signal processing circuits for RGICM(Duty).

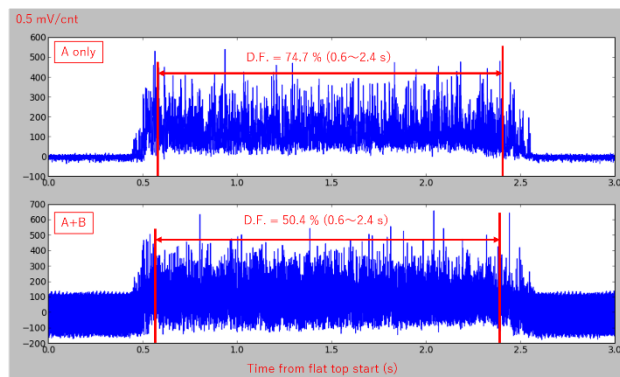


Figure 3: Typical spill structures measured with RGICM(Duty). Beam intensity, input register, amplifier gain, and LPF time constant were 7.2×10^{13} p/shot, 10 kΩ, and 100 μs , respectively. The upper figure is the spill time distribution during A-only operation, and the lower one is the one during AB operation.

RGICM(Intensity)では、モニタからの微小電流信号 (典型的には 10 nA 程度) を精度よく積分するためにエレクトロメータ (Keithley 6514 [6]) を用いているが、Spill 時間構造を測定するためにエレクトロメータを広帯域の電流電圧変換アンプ (NF 回路ブロック CA5351 [7]) に置き換えた。電流アンプの設定は増幅ゲイン 10⁷、アンプ内蔵の low-pass filter (LPF) の時定数を 100 μs に選んでいる。電流アンプの出力信号は、横河電機 FA-M3 シリーズ[8] の高速データ収集モジュール (F3HA12) に入力し、ビーム取り出しに同期してショット毎に Spill 波形を取得している。同時に、得られた波形データを F3RP71-2L 上で動作している EPICS-IOC 上でフーリエ変換 (Fast-Fourier-Transform: FFT) し、ショット毎の周波数スペクトル及び Duty Factor も計算できるようになっている。得られたデータは EPICS [9] によって運転管理室においてオンラインで監視・記録し、ビームコミショニングに活用できる。

Figure 3 に 2024 年 5 月の A 単独運転時及び AB 同時運転時に RGICM を用いて測定された 30 GeV-82 kW 遅い取り出しビームの典型的な Spill 時間構造を示す。この測定におけるサンプリング周期は 200 μs 、ビーム取り出しの前後を含めたデータ収集点数は 15,000 点で、取り出しのフラットトップ開始 (P3) から 3 秒間測定している。図からわかる通り、A 単独運転時には Spill 時間構造が良好な S/N 比で測定されている。

Figure 4 の Spill 時間構造において、A 単独運転時に測定された Spill 波形と AB 同時運転時の波形では S/N 比が大きく異なり、同じ条件での測定にもかかわらず Duty Factor がそれぞれ 74.7% と 50.4% と大きく異なる。AB 同時運転時にはハドロン電源棟 1 階の B ライン電磁石電源を通电する。この際、RGICM の信号ケーブルが布設されているケーブルラック付近の電磁石用電源 3 台 (定格出力 100 V-5000 A:1 台、120 V-2500 A:2 台) の電源を運転電流で通电すると電流アンプの出力に 600 Hz 及びその逡倍の周波数成分のノイズが重畳され、ノイズ成分が peak-to-peak で 10 倍以上増加する。従って、より正確な測定のためには S/N 比の向上が重要である。

SY トンネル内の RGICM 本体から計測室までの信号伝送用同軸ケーブルの長さは約 150 m あり、モニタ本体

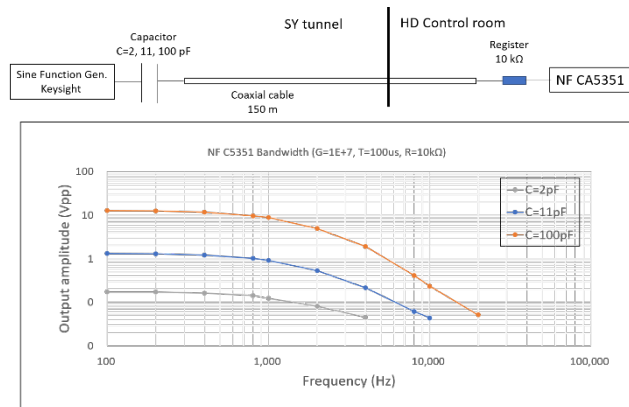


Figure 4: Results of bandwidth measurement with a function generator and a capacitor.

を含めた静電容量は 15 nF である。信号ケーブルを電流アンプに直結した場合、長いケーブルに電磁石電源等から重畳したノイズの影響で電流アンプの入力が Overflow し、正常な測定ができない。電流アンプ内蔵の LPF 時定数を大きくすると Overflow を回避できるが、測定周波数帯域が狭くなってしまふ。

Figure 2 に示すように電流アンプの入力に抵抗を直列に挿入した場合、入力部に信号ケーブルと抵抗による LPF 回路が形成され、ケーブルに重畳した高周波ノイズ（スイッチングノイズ等）が減衰する効果が得られる。このため電流アンプ飽和しない範囲でゲインを上げて S/N 比を改善できる。入力抵抗を小さくすると入力部の時定数が小さくなって周波数帯域は伸びるが、一方で重畳されるノイズのために S/N 比が悪化するトレードオフの関係にある[10]。従って、アンプが飽和しない範囲でゲインをできるだけ上げつつ、電流アンプ内蔵 LPF の時定数をできるだけ小さくして Spill 構造測定の周波数帯域を広げた状態で測定することが望ましい。現在の測定環境では、入力抵抗 10 kΩ、ゲイン 10^7 、内蔵 LPF 時定数 100 μs の場合に最も良好な結果が得られた。この設定は信号入力部及び内蔵 LPF のカットオフ周波数 1.6 kHz に相当する。

Figure 4 に、Function Generator とキャパシタを用いて信号処理系の周波数特性を測定した結果を示す。Function Generator で発生した sine 波形の出力電圧振幅と周波数の積 (\propto 電流振幅) を一定に保った状態で電流アンプの出力振幅を測定した結果、ゲインが 1 kHz 付近から低下しており前述の考察と合致していることを確認した。

2.2 SX Spill Monitor との比較

Figure 5 に、82 kW の A 単独運転中 (7.2×10^{13} protons/s) の同一ショットにおいて RGICM(Duty)及び SX Spill Monitor で測定された Spill 時間構造を比較した結果を示す。測定時の SX Spill Monitor と RGICM(Duty)のサンプリング周期はそれぞれ 10 μs 及び 80 μs である。波形を比較するため、SX Spill Monitor の測定点が RGICM(Duty)の測定点(32768 個)に一致するように平均化処理を行い、ビームが出ていな

い区間のデータを用いて定数バックグラウンドを差し引いた後、波形データを全区間で 1 に規格化して重ね合わせた。FFT 変換して得られた周波数スペクトルでは、18、600、900、1200 Hz にピークが見られる。なお周波数スペクトルの上限は 6.25 kHz である。

Spill 時間構造の全体的な傾向はよく一致している。RGICM(Duty)で測定された波形の方が S/N 比はよい。SX Spill Monitor では信号ケーブルに MR の電磁石電源からのノイズが重畳されて S/N 比が悪化していると考えられる。FFT 変換して得られた周波数スペクトルも全体の傾向はよく一致しているが、前述の通り RGICM(Duty)では 1 kHz の帯域では感度が低下するため、SX Spill Monitor のスペクトルとの差が大きくなっている。Duty Factor は Fig. 5 に示した区間で算出すると RGICM(Duty)では 77%、SX Spill Monitor では 70% となった。RGICM(Duty)では 1 kHz 以上での感度低下のため、Duty Factor が見かけ上よくなっていると考えられる。

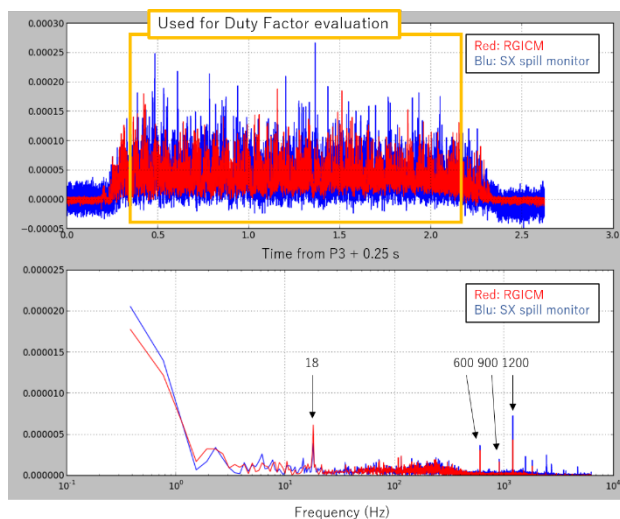


Figure 5: The Spill time structure and its frequency spectrum simultaneously measured with RGICM (red) and SX Spill Monitor (blue) during 82 kW operation.

3. Micro Channel Plate を用いた信号増幅

Figure 6 に RGICM(Duty)本体の改造図及び電気接続図を示す。最近、1 Pa の真空度まで安定して増幅が可能な Micro Channel Plate (MCP) F14844 [11]が入手可能になった。MCP を用いると最大 10^6 までの高速な信号増幅が可能になるので電流アンプを省略できる。これにより信号ケーブルに重畳するノイズの影響を相対的に小さくできる可能性がある。また、測定可能な周波数帯域も広がり、SX Spill Monitor と同程度の高速な応答が期待される。懸念事項としては、ビームに近い場所で増幅するため、ビームに付随したバックグラウンドの影響をどの程度受けるかは実際のビーム運転時に確認する必要がある。

4. まとめと今後の計画

J-PARC ハドロン実験施設で使用される遅い取り出し

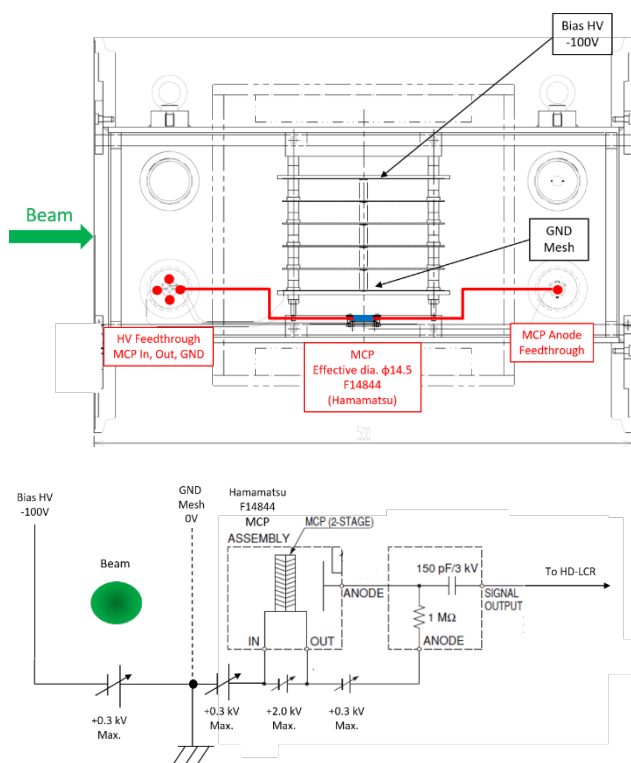


Figure 6: Schematic drawings of RGICM equipped with a micro channel plate and its electrical connection.

ビームの Duty Factor を非接触で測定するため、RGICM の信号を電流アンプで増幅し、約 1 kHz 程度まで良好な S/N 比でビーム Spill 波形を取得することに成功した。現在遅い取り出しビームのフィードバックに用いられている SX Spill Monitor で測定された Spill 波形と比較し、良い一致が得られた。

今後の進め方として、以下のことを検討している。

- RGICM の内部電極を改造し、1 Pa の真空度で動作する MCP を用いて電流アンプ無しでより高速な信号応答を得ること、及びビームに起因するバックグラウンドの影響の調査
- 電磁石電源運転時のノイズによる S/N 比の悪化を避けるため、よりノイズの影響の少ないケーブルの選定、布設経路、シールド強化等ノイズ低減の検討
- 短パルスのビーム取り出しを高速で検知してビーム取り出しを中止するインターロックの整備

- RGICM(Duty)の信号を MR へ光信号で伝送し、遅い取り出しビームのフィードバック信号として使用すること

2024 年秋以降のビーム運転で R&D を進め、RGICM を用いて測定した Duty Factor を活用したハドロン実験施設における遅い取り出しビームの品質向上につなげたい。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (C) 22K03656 の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] K. Agari *et al.*, “Primary proton beam line at the J-PARC hadron experimental facility”, Prog. Theo. Exp. Phys. 2012, 02B008.
- [2] Y. Komatsu *et al.*, “J-PARC ハドロン実験施設における新設一次ビームラインのビームコミッショニング”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society Japan, Online, September. 2-4, 2020, pp. 485-489.
- [3] <http://comet.kek.jp/>
- [4] M. Tomizawa *et al.*, “J-PARC 遅い取り出し運転の現状と今後の計画”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 8-10, Chiba, Japan, 2016, pp. 70-74.
- [5] Y. Sato *et al.*, “J-PARC ハドロン実験施設における残留ガスを用いたビーム強度モニタの信号応答”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18-21, Online, 2022, pp. 338-342.
- [6] Keithley 6514 system electrometer. <https://tek.com>
- [7] NF Programmable current amplifier CA5351. <https://www.nfcorp.co.jp/pro/mi/lb/preamp/ca5351/>
- [8] Yokogawa Co. Programmable logic controller FA-M3V. <https://www.yokogawa.co.jp/solutions/products-and-services/control/control-devices/programmable-logic-controller>
- [9] Experimental Physics and Industrial Control System. <https://epics.anl.gov/>
- [10] Y. Kotani, NF Co., private communications.
- [11] Hamamatsu Photonics Co. MCP assembly F14844. https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/electron_ion-sensor/mcp/circular_low-vacuum-operation_compact_demountable/F14844.html