

J-PARC RCS におけるビーム電流モニタのビーム強度依存性 INTENSITY DEPENDENCE OF THE BEAM CURRENT MONITORS AT J-PARC RCS

林直樹*

Naoki Hayashi*

Accelerator Division, J-PARC Center, JAEA

Abstract

Measurement of beam intensity or beam current is the one of the most important beam diagnostic in an accelerator. At J-PARC Rapid-Cycling Synchrotron (RCS), there are two kinds of beam intensity monitors and multiple Current Transformers (CT) with various bandwidth. The RCS is a high intensity proton accelerator and its designed beam power of 1 MW. The beam power delivered to users gradually increases in the recent year. Single pulse or short term with designed beam power has been also demonstrated. In addition, beyond 1-MW equivalent intensity has been attempted. Through the experience with achievement of the design goal and the operation beyond it, intensity dependence of beam current measurement has been summarized.

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Research Complex) は、大強度の陽子ビームから生成される二次粒子を使って様々な実験、研究を行う複合加速器施設である。初段の負水素イオン 400 MeV Linac に続く、速い繰返しのシンクロトロン RCS (Rapid-Cycling Synchrotron) は、3 GeV の陽子ビームを物質生命科学実験施設 MLF (Material Life Science Experimental Facility) に、繰返し 25 Hz で供給している。また、ビームの一部は、後段のシンクロトロン MR (Main Ring) にも送られ、30 GeV まで加速された後、NU (ニュートリノ実験施設) や HD (ハドロン実験施設) で利用される。その周期は、2020 年時点では、NU 向けには、2.48 s、HD 向けには、5.20 s 毎に、4 pulse 分のビームが送られている。

RCS のビーム出力は、シングルパルス運転ながら、そのパルス当たりの設計値を 2015 年に達成した [1]。定常的な、1 MW 連続運転も、2018 年から、約 1 時間で始め、2019 年には、約 10 時間 [2]、2020 年は、約 40 時間を達成した。

RCS は、初期設計値を達成し、今後は、長期的な定常・安定的な運転と設計値を超えるビーム強度試験が必要になる。そのためには、それを評価測定するビーム診断システム、ビーム強度モニタの正確性は極めて重要である。RCS は、2 つのビーム強度計を持っている。これらの系統的な誤差評価、今後の課題に対する検討についても触れる。

2. RCS のビーム強度モニタ

RCS には、ビーム強度を定量的に測定する二種類の Current Transformer (CT) を備えている。20 ms の間に加速しているパルスを見るためには、簡易的な CT では、低域時定数が十分でないので、25 Hz の運転に際しても正しくなるよう、DC Current Transformer (DCCT) と、フィードバックにより、時定数を 20 秒

ほどに延ばした Slow Current Transformer (SCT) から成る。

2.1 ビーム周回電流と粒子数

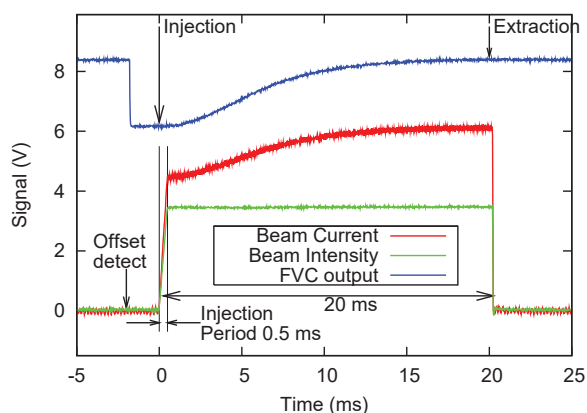


Figure 1: Procedure to determine a beam intensity. The beam current (red) is divided by the FVC output (blue) in order to determine the beam intensity (green), the number of particles.

以下、粒子数を決定する信号処理の手順について述べる。1 MW 相当時のパルス当たり粒子数 (particles per pulse; ppp) は、 8.3×10^{13} 個である。RCS は、入射時間 $500 \mu\text{s}$ で、多重周回入射されたのち、20 ms の間に、入射エネルギー 400 MeV から出射エネルギー 3 GeV まで加速される。通常のバンチ数は 2、つまり、harmonic 数は 2 である。陽子の速度も光速の 71% から 97% まで、周回 (RF) 周波数も 614 (1.23) から 836 kHz (1.67 MHz) まで変化する。見かけのビーム周回電流は、これに相当する分だけ増加する。そのため、実際に粒子数を決めるためには、周回電流を周回周波数に比例した (周波数を電圧に換算した Frequency-to-voltage converter; FVC) 信号で、ノーマライズしてやる必要がある。定格 1 MW のビーム強度

* naoki.hayashi@j-parc.jp

では、入射から出射まで、周回電流は、8.2 から 11.1 A まで約 35 % 増加する (Figure 1)。

2.2 ハードウェア

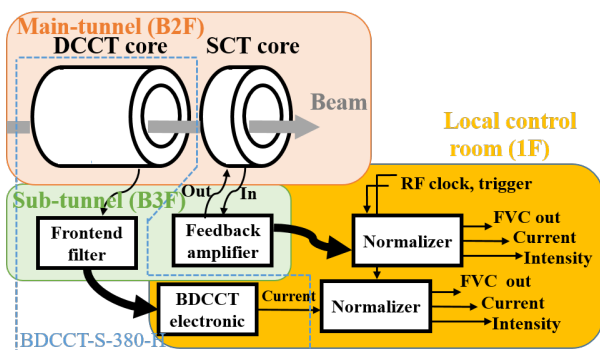


Figure 2: The schematic view of the beam intensity monitor system.

DCCTのコア及び専用の回路、一部のケーブルは、Bergoz [3] から購入し、セラミックギャップ付ダクト、磁気シールドなどにインストールした。ノーマライザなどの回路も別途調達した。DCCT コアの大きさは、内径 380, 外径 464, 長さ 482 mm である。SCT は、検出した信号をコアに戻し、時定数を長くする原理に基づいている [4]。コアは、FINEMENT の FT-3M で、内径 390, 外径 470, 幅が 25 mm のものを 2 枚重ねたものを用いている。検出の 1 次コイルの巻き数は、1000、フィードバックの 2 次コイル巻き数は、66 である。

Figure 2 に、DCCT 及び、SCT のシステム構成を示す。検出器はメイントンネル内にあり、必要な電気回路、フィルター等は、サブトンネルに設置している。そこから地上上部まで、周回電流の信号を伝送し、そこで、ノーマライザの処理 (粒子数換算)、VME ADC で粒子数を読出し、アーカイブする。ノーマライザ回路の出力仕様は、粒子数について、10 V で、 1×10^{14} ppp、周回電流については、10 V で、15 A と定義している。

2.3 強度モニタの問題点

SCT は、間欠的な、シングルパルス運転では、問題が無かったが、定格近い 1 MW の連続運転になると異常動作を示すことが、2018 年に発覚した。SCT は、比較的、長い時定数 (10 数秒以上) をもつが、完全な DC 特性ではないため、サグによりベースが下がるはずである。つまり、1 周期より十分長い時間平均すれば、GND 程度になる。しかし、予想に反し、出力が増えてくと正のオフセットが発生した。これは、出力増強につれて、大きくなり、ついには、出力回路の飽和により正常な出力が得られなくなるのが分かった。これは、入射期間 (最長 500 μ s)、加速時間 (~ 20 ms) は、比較的ゆっくりなのに対し、出射は、速い取り出しで、1 周の内に終わる (< 1 μ s)。この非対称性に対し、フィードバックに用いる回路 (feedback amplifier; 以下、FB-amp) に問題があった。2020 年 3

月以降、新しい FB-amp に交換し、解決策 [5] に基づいた改造を行い、その有効性を 2020 年 6 月末に、約 40 時間の 1 MW 連続試験運用で、確認した。

一方で、DCCT については、後述する、1 MW 相当を超える大強度試験で、測定したビーム周回電流の電圧換算出力に、(12 A 強付近で) 制限があることが分かった。

3. 1 MW 超の大強度試験

元来、Linac、RCS の設計は、25 Hz で運転した際に、出力ビームパワーが 1 MW になるようパラメータを定めた。Linac では、ピーク電流 50 mA、マクロパルス長 (RCS への入射時間) は 500 μ s、RCS での粒子数は、 8.3×10^{13} ppp である。「1 MW 超の大強度」とは言っても、実際には、1 パルス毎の試験であり、「仮に定格の duty で、かつ、3 GeV まで加速し運転した場合に、幾らのビームパワーになるか」で、「1.2 MW 相当」等と呼称している。1.2 MW 相当の試験は、Linac のピーク電流を 60 mA にする、又は、マクロパルス長を 600 μ s に延ばすことで実施した [6,7]。ピーク電流の調整は、大元のイオン源調整から行う必要があり、パルス毎の細かなビーム強度の調整は、マクロパルス長を変えることで実施した。さらに、60 mA とを 600 μ s を同時に行うことで、「1.5 MW 相当」の試験を行っている。

実際に、1 MW 相当を超えるビーム強度を所定の出射エネルギー 3 GeV まで加速するには、RCS の RF システムの増強が必要である。無理に実施すると過電流で RF システムが落ちてしまい制御されない状態でビームロスしてしまう。よって、大半は、RF が制御できる間、例えば、0.8 GeV になる入射後約 5 ms で、ビームを出射している。ビームダイナミクスとして、ビームロスの大半は入射直後に起きるものなので、初期の試験としては、十分な意義がある。

4. ビーム強度測定データ

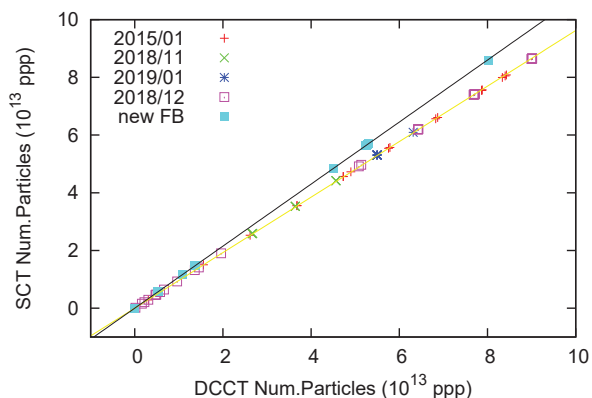


Figure 3: Correlation plot between DCCT and SCT measured values.

運転開始当初、DCCT と SCT の出力するビーム強度は、近い値を示していた。しかし、次第にビー

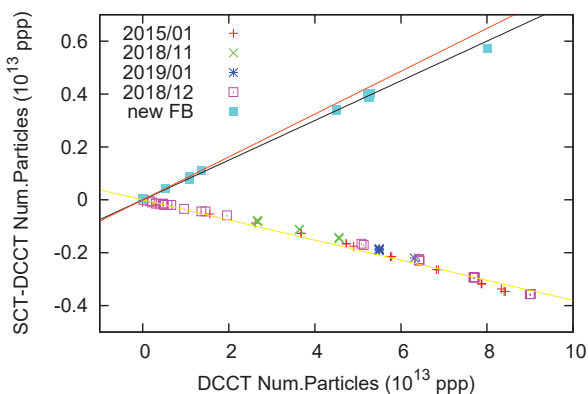


Figure 4: Correlation plot between DCCT and difference between (SCT-DCCT) measured values. While old FB-amp is about -4 % less, on the other hand new FB-amp is about +7 % above comparing with DCCT.

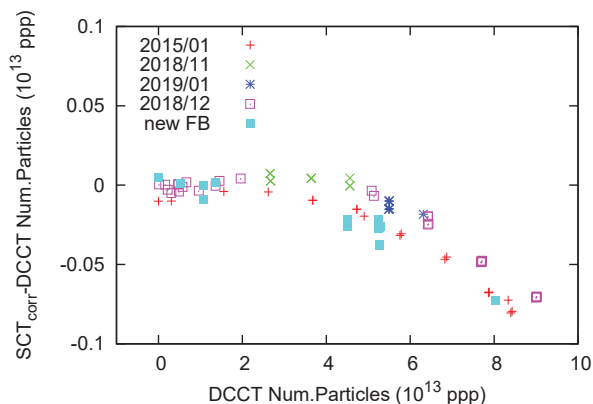


Figure 5: Correlation plot between DCCT and difference between (corrected SCT-DCCT) measured values.

ム強度が上がるにつれて、その差異は、目立つようになってきた。実際の運転のデータに基づいた DCCT と SCT それぞれから決定される粒子数の相関を Fig. 3 に示す。DCCT の測定を基準にすると、旧 FB-amp で、約 -4%、新 FB-amp で、約 +7% の値となっていることが分かった。Figure 4 は、測定値の差分 ($SCT - DCCT$) を縦軸として明示したものである。

新旧 FB-amp の差異については、出力回路の定数の問題と思われる。また、どちらの場合も、中間の所で傾きが変わっている様にみえる。新旧 FB-amp について、 $SCT = DCCT \times a$ (a : 比例係数) と仮定し、それぞれ全領域のデータで fit した場合、0.962, 1.075, 4×10^{13} ppp までのデータでフィットした場合、0.968, 1.081 の係数を得た。Figure 5 は、後者で補正した SCT の値と DCCT との差を示したものである。設計値に近い大強度領域 (8×10^{13} ppp 付近) で、約 1 % 程、小さくなった。

5. 周回電流データ

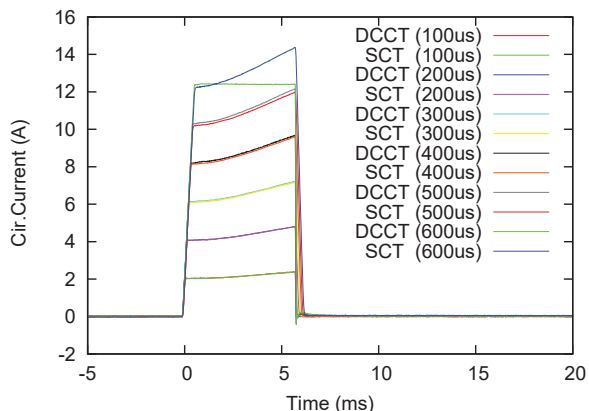


Figure 6: Circulating current of DCCT and SCT.

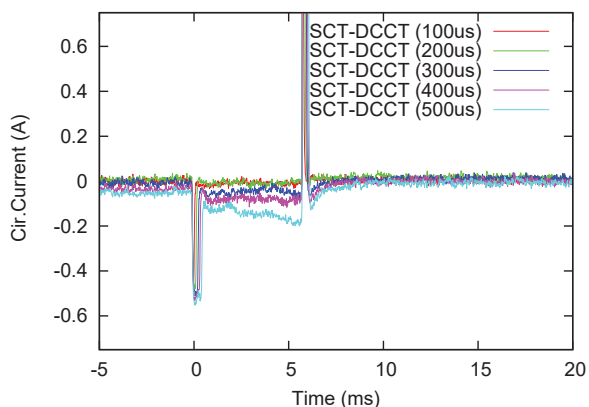


Figure 7: Circulating current difference between DCCT and SCT.

DCCT, SCT のノーマライザは、Fig. 2 にあるように、粒子数換算前の周回電流の出力もあるので、その比較も行った。なるべく高い電流まで比較できるよう、1.5 MW 相当試験時のデータを用いた。周回電流測定は、オシロスコープを用いたが、DCCT と SCT の差異を詳しく評価するため、 $20 \mu s$ 毎に平均処理を行った。Figure 6 は、DCCT, SCT の測定した周回電流値である。100 ~ 600 μs は、入射時間のパラメータである。また、Fig. 7 は、補正後の SCT から DCCT 分を引いたものである。

入射中や、出射のタイミングでは、時間応答など複雑な要素が入り込むので、入射が終わり、出射前までの加速時間 0.5 ~ 5.6 ms の条件を満たすデータのみ、で比較したものが、Fig. 8 である。ここで、縦軸は、補正後の SCT と DCCT の周回電流の差分、横軸は、DCCT による周回電流である。Figure 5 と同様、ビーム強度が高くなると差が大きくなるのが分かる。

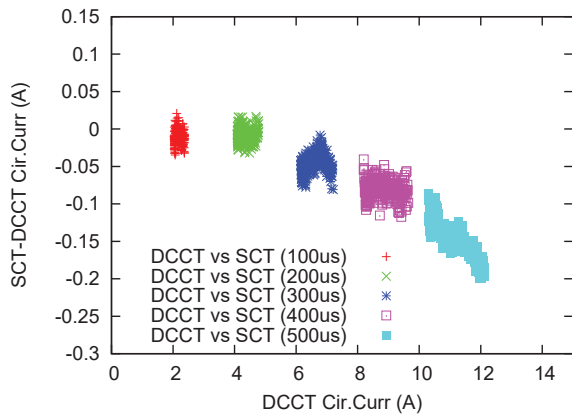


Figure 8: Circulating current correlation between DCCT and SCT.

6. 議論

今回の測定からは、1 MW 領域では、SCT と DCCT の差は、約 1 % であった。DCCT の周回電流に限界があったため、それ以上は、比較ができなかった。一方で、DCCT、SCT、夫々の 100 ~ 500, 100 ~ 600 μ s のデータセットについて、入射時間の長さで信号強さを規格化したところ、SCT の方が一致度は高かった。このことから、SCT の方がより線形性がよい可能性もある。低強度ビームのデータをみても、まず、SCT FB-amp のゲイン再調整は、必要である。ただ、1 MW 及びそれ以上の大強度については、より多角的な DCCT と SCT の比較が必要である。

Table 1: Beam Power and Corresponding Intensity and Circulating Current

Beam power (MW)	Intensity ($\times 10^{13}$ ppp)	Circulating current (A)		
		0.4 GeV	0.8 GeV	3 GeV
1.0	8.33	8.2	9.7	11.1
1.2	9.996	9.8	11.6	13.4
1.5	12.495	12.3	14.5	16.7

1 MW とそれを超えるビームパワーの、パルス当たり粒子数及び周回電流を Table 1 に示す。標準の電気回路は、出力 10 V が、普通の仕様である。よって、1.5 MW 時の粒子数、出射時の周回電流では、これを上回ってしまう。本格的な、1.5 MW 試験に対応するには、ノーマライザを含む回路仕様の見直しが必要となる。

7. まとめ

J-PARC RCS は、設計値の 1 MW を達成し、その際のビーム強度モニタ、DCCT と SCT のデータについて紹介した。SCT の回路のゲイン補正後、1 MW まで、約 1 % で一致することを示した。既に実施されている限定的な 1 MW を超える試験にも、強度モニ

タは適用可能ではあるが、本格的な試験に対しては、回路の見直しが必須である。

参考文献

- [1] H. Hotchi *et al.*, “Achievement of a low-loss 1-MW beam operation in the 3-GeV rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex”, *Phys. Rev. Accel. Beams* 20, 060402 (2017).
- [2] K. Hasegawa *et al.*, “J-PARC 加速器の現状”, *Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan FSPI001.
- [3] Bergoz Instrumentation, “Parametric Current Transformer”; <https://www.bergoz.com/>
- [4] J.B. Sharp, “The induction type beam monitor for the PS” *MPS/In. CO62-15* (1962).
- [5] N. Hayashi, M. Yoshimoto, S. Hatakeyama, “High Intensity Measurement Issues at the J-PARC RCS” to be published in *Proceedings of the 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019)*.
- [6] H. Hotchi *et al.*, “J-PARC 3-GeV RCS: 1-MW beam operation and beyond”, *J. Inst.* 15 P07022 (2020); <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/07/P07022>
- [7] H. Hotchi *et al.*, “1.2-MW-Equivalent High-Intensity Beam Tests in J-PARC RCS”, to be published in *Proceedings of the 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019)*.