

J-PARC 加速器施設における電流モニタの校正について

CALIBRATION OF BEAM CURRENT MONITORS AT J-PARC ACCELERATOR FACILITY

佐藤健一郎^{#, A)}, 外山毅^{A)}, 宮尾智章^{A)}, 小林愛音^{A)}, 守屋克洋^{B)}, 三浦昭彦^{B)}, 吉本政弘^{B)}, 畠山衆一郎^{B), C)}
Kenichirou Satou^{#, A)}, Takeshi Toyama^{A)}, Tomoaki Miyao^{A)}, Aine Kobayashi^{A)}, Katsuhiko Moriya^{B)}, Akihiko Miura^{B)},
Masahiro Yoshimoto^{B)}, Shuichiro Hatakeyama^{B), C)}

^{A)} J-PARC/KEK

^{B)} J-PARC/JAEA

^{C)} Mitsubishi Electric System & Service Co.

Abstract

The Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) consists of 400 MeV Linac, 3 GeV RCS and 30 GeV MR. The RCS aims for a steady-state operation at 1 MW output, while the MR has reached its initial goal of 750 kW output by reducing the operational cycle and is now adjusting to achieve 1.3 MW output. Minimizing beam loss is critical in J-PARC to limit equipment radioactivity, necessitating advanced beam loss and beam current monitors (BCMs). The BCMs are periodically calibrated to meet the specific measurement accuracy required by each facility, although calibration and operation procedures have not been standardized. This presentation will detail the calibration methods and accuracy for each beam current monitor and evaluate the overall beam current measurement precision at J-PARC.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)の加速器は 400 MeV Linac (Linac)、3 GeV Rapid cycling synchrotron (RCS)、30 GeV Main ring synchrotron (MR)で構成され、RCS は 1 MW 出力の定常運転を視野に入れ、MR では運転周期の短縮によって建設当初の目標である 750 kW 出力を達成しさらに 1.3 MW 出力に向けた調整が進んでいる。J-PARC では装置の放射化を抑えるためにビームロスとビーム電流モニタ: Beam Current Monitor (BCM)の高度化が必要不可欠である。特に入射、加速、出射過程の伝送効率を与える BCM の校正精度はもっとも重要であ

る。それぞれの加速器では施設毎の要求精度 1%に従って BCM の定期的な校正が行われてきたが統一的な校正、運用が行われてきたわけではない。

さらに MR の入射路である 3-50BT は最大 130 kW を受けるが、ここに設置されてるコリメータ機器は吸収パワーが最大 2 kW で制限されている。現在このパワーを評価するために Beam loss monitor (BLM)を使用しているが、放射線の発生メカニズムが複雑であるため、パワーの絶対値測定には BCM によるビーム電流測定が必要である。この要求に対して現状の 1%校正精度は不十分であり精度の向上が必要になっている。

次章ではそれぞれの施設で行われている BCM 校正の現状と校正精度について議論する。3章では MR へのビーム入射路である 3-50BT の Fast current transformer

Table 1: Beam Current Monitors for Each Facility

Facility	Name	Type	N. of Unit	Turn N	Core material	Core size (ϕ_{in} , ϕ_{out} , width)	L(H)	BW	Note
Li	FCT	Passive	14	1	FT-3M	90, 114, 5	3 n		
	SCT	Active	7	50	FT-3M	90, 114, 10	15 m	10 Hz~	
	FCT/SCT		13		FT-3M				Same case
RCS	FCT	Passive	4	20	FT-3M	390, 470		>100 MHz	
	MCT	Passive	1	1000	FT-3M	390, 470			
	SCT	Feedback ^[3]	1	-	FT-3M	390, 470		~10 kHz	
	DCCT	DCCT	1	-	-	-		DC~10 kHz	Bergoz.inc
	WCM	WCM	3	-	FT-3M	390, 470		200>10 MHz	
3-50BT	FCT	Passive	5	25	FT-3M	272, 335, 35	18 m	~20 MHz	
MR	DCCT	DCCT ^[4]	2	-	FT-3M	[4]	[4]	DC~20 kHz	Parallel feedback
	FCT	Passive	3	25	FT-3M			16~180 MHz	
	WCM	WCM	6	-	FT-3M			>100 MHz	

[#] kenichirou.satou@j-parc.jp

(FCT)[1]の校正精度とその限界について詳しく報告する。

2. 各施設の BCM 校正の現状

Table 1 に各施設 BCM リストを示す。赤字の一部は強度モニタもしくは Personnel protection system (PPS) 用電流モニタとして使用している。強度モニタは施設が出力するビーム電流を公式に保証する役割を担っている。PPS システムでは放射線発生装置としての最大出力を超過していないことを保証する。現状ではともに 1% の精度を保証おり、その精度を確かめるために定期的な校正を行っている。

名称に関しては各々がターゲットとする信号帯域に応じて Fact current transformer (FCT)、Slow current transformer (SCT) と名付けられており、Current transformer (CT) のタイプ別で区別されているわけではない。Linac の SCT は低域カットオフを広げるためにセンサヘッドから 1~2 m の離れた位置に設置したプリアンプを利用した Active CT (Fig. 1 参照) であるが、RCS、3-50BT および MR の FCT はコイルの巻き数と終端抵抗で周波数特性を調整した Passive type の CT である。この他、Medium-frequency current transformer (MCT)、Wall current monitor (WCM) が Alternating-current current transformer (ACCT) として使用されており、Direct-current current transformer (DCCT)[4] が RCS および MR のビーム強度モニタとして使用されている。RCS にはそのほか、DCCT と遜色ない周波数特性を有する Feedback CT[3] を SCT として使用している。

磁性体については RCS の DCCT (Bergoz 社製) を除いてすべて、日立金属社製 FINEMET FT-3M[2] を使用している。透磁率のばらつきに応じてコイルの巻き数を調整したわけではないため、透磁率に応じてインダクタンスのばらつきは大きい。表中のインダクタンスは典型的な透磁率を用いて評価したものである。

2.1 Linac BCM の校正

DTL1 部の SCT をビーム強度モニタとして使用している。強度モニタの校正セットアップを Fig. 1 に示す。その他の SCT も同様のセットアップで校正されている。FCT についてはビーム到達タイミングを測定する用途で設置されているため、校正は行われていない。

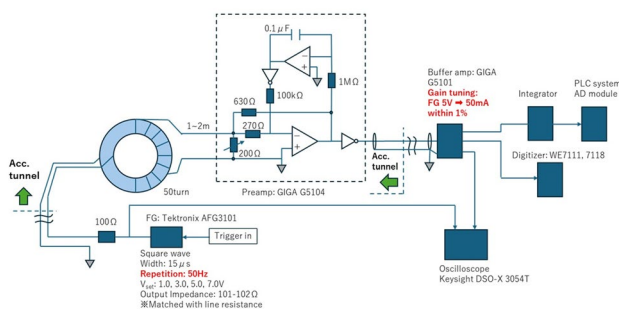


Figure 1: Calibration setup for Linac SCT.

校正では SCT コアに設置されている校正用 1 ターンコイルに 15 μ s 幅の矩形波を送りビームを模擬する。模擬信号は地上階のクライストロンギャラリーのビームモニ

タックから Function generator (FG): Tektronix AFG3101 を用いて伝送している。矩形電圧は電圧・電流変換用のシャント抵抗として 100 Ω 抵抗器を使用している。予めコイルの純抵抗成分を含めて系統の純抵抗を測定しておき、それに合わせて FG の出力インピーダンスを 101~102 Ω に設定している。

FG 出力 5 V がビーム電流 50 mA に相当する。電荷積分器の出力は Program logic controller (PLC) の 14 bit AD ユニットでデジタル変換される。校正パルスの電荷積分値のデジタル値が 50 mA 相当になるようにバッファアンプのゲインを調整する。校正頻度は 1 回/年である。

校正後は 100 Ω 抵抗、FG を外して運用しているため、ビーム、2 次コイル、ケーブルのキャパシタンスがコアを介して相互に結合していることになる。今後この影響を調査する予定である。

2.2 RCS BCM の校正

PPS 機器として 100° beam dump line および H0 beam dump line の FCT (Passive type) が Linac と同様の手法で 1% の精度で校正されている。

SCT およびビーム強度モニタである DCCT は校正されていないが、Material and life science facility (MLF) 施設へのビーム輸送路 3NBT の FCT (Passive type) の測定値に合わせる 2 次校正を実施している。

3NBT FCT 強度を 1 とした場合、各モニタの相対強度は以下の通りである。

3NBT FCT: 1.000

DCCT: 1.036

SCT: 1.039

測定されたビーム強度に対して上記相対強度をソフトウェアで補正して使用している。

2.3 3-50BT BCM の校正

3-50BT では MR 入射部の直前に設置されている 2 台の FCT を PPS 機器として 1 年に 1 回校正している。Figure 2 に校正セットアップを示す。

校正は校正用コイルに 1 μ s 幅の矩形波を通して行う。2 バンチ分のビーム電荷を模擬するため、HV DC 電圧を高速スイッチでパルス状に成形し、図のようにコイルに流す。2 次側の信号は Low pass filter を介して積分され、後段の Processing circuit の Offset subtraction 機能でグラウンドラインの変動を補正したうえで、実際のビームは前バンチから 1.2 μ s 後、テストパルスはパルス立ち上がりから 2 μ s 後の値が保持され AD される。矩形波の電荷は伝送ラインをコイルから切り離れた上で、50 Ω 両端の電圧波形をオシロスコープで取得し算出する。

HV を最大 500 V まで順次変更して、測定値との相関を 1 次関数で評価している。測定電荷が 1% を過小評価する場合、校正関数を更新することになっているが、いままでも更新されたことはない。

2.4 MR BCM の校正

MR では DCCT がビーム強度モニタとして使用されている。この DCCT は Parallel feedback 方式[4]のもので 1% の精度で設計されたものであり、校正は校正用コイルに DC 電流を流すことにより行われている。矩形波入力時の立ち下がり特性を調整することでサグの調整も行わ

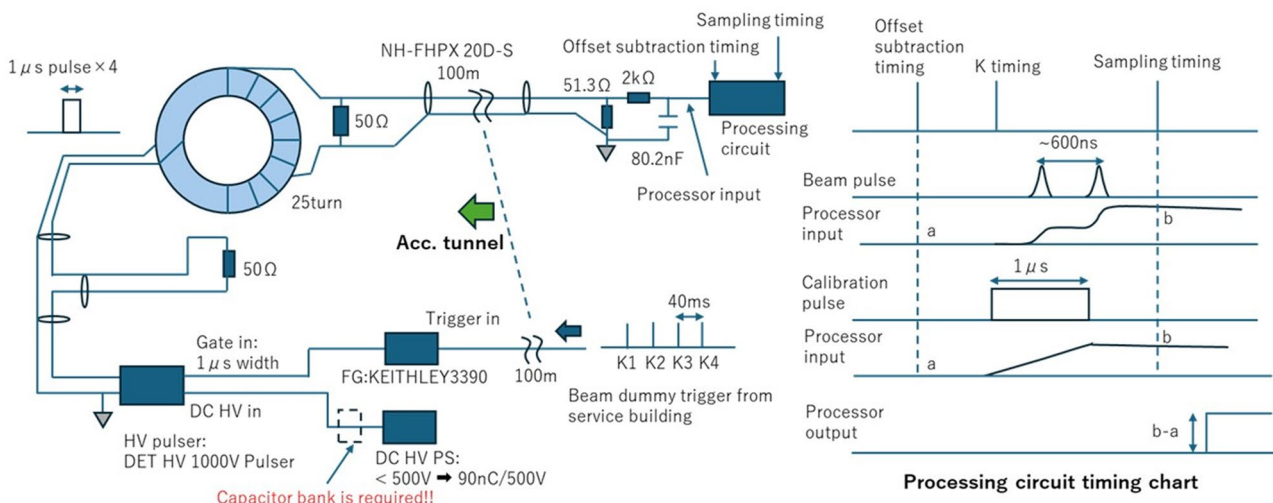


Figure 2: Calibration setup for 3-50BT FCT.

れている。

校正精度は公称 1%である。校正信号が目標値に対して±0.5%を超過した際にその都度、回路ゲインが調整されている。

3. 3-50BT FCT 校正の精度について

現在の校正手法の限界を調べるために LTspice[5]を用いて等価回路による解析を実施した。Figure 3 にオフラインで測定した周波数特性と等価回路による計算値を示す。オフライン測定はインストール前に実施したもので、FCT 中心にワイヤを通し TEM mode を励起して測定したものである。図では理論上のゲインを dB として表している。250 kHz 付近でピーク値 -0.03 dB (0.9966) を示す。低域カットオフ周波数は別途測定したステップ応答の測定結果を再現するように設定している。

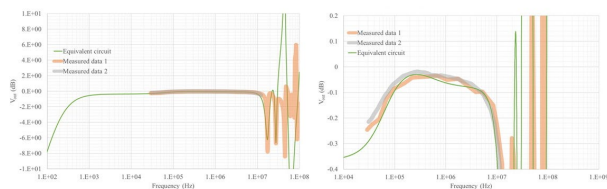


Figure 3: Frequency response of 3-50BT FCT.

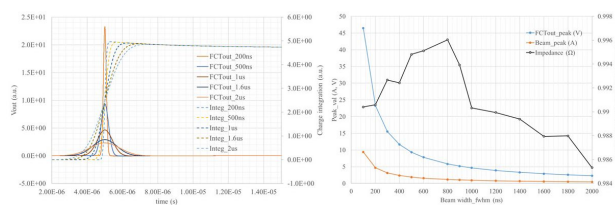


Figure 4: (Left) Gaussian beam response of 3-50BT FCT and its integration. (Right) Peak current and voltage for gaussian beam input and FCT output, respectively. Transfer impedance of beam current to a FCT output is also shown.

ガウスビームに対する応答を Fig. 4 に示している。左図は FCT 出力と積分波形を示し、右図にはガウスビームのピーク電流値、FCT 出力電圧ピーク値およびその変換抵抗を半値幅(FWHM)の関数で示している。抵抗の理論値は 1 Ω である。抵抗は、ビームの形状(周波数特性)と FCT の周波数特性を反映し、山なりの形状を示している。FWHM = 800 ns で最大値 0.996 Ω を示し、実際のビーム領域である FWHM = 100~200 ns の領域では 0.990 Ω と 1.2%程度低い値を示している。尚、計算精度の関係で 0.001 Ω 程度の誤差がある。

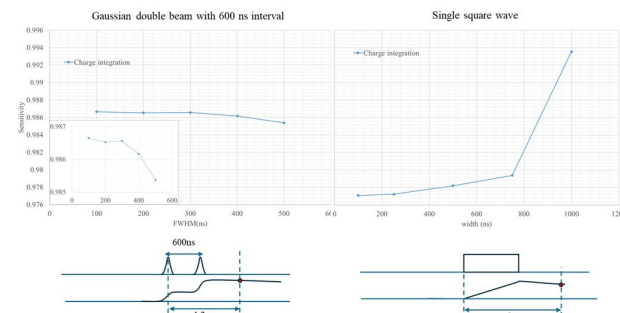


Figure 5: Sensitivities for the charge integration for double gaussian beam with 600 ns interval and for the single square wave for calibration. Lower figures illustrate the AD timing for integrating signals.

校正精度を議論するために校正で使用している 1 μs 幅矩形パルスの積分電荷特性を調査した。実際のビーム電荷測定の正確性を確かめるために 600 ns 間隔の 2 バンチガウスビームを仮定し、積分電荷量として先頭バンチ中心から 1.2 μs 後の波形積分値を採用した。結果を Fig. 5 の左図にビーム幅の FWHM 値の関数で示している。他方、校正で使用している単一矩形波(ビーム 2 バンチ分の電荷)の応答を幅の関数で右図に示している。積分電荷量として矩形波の立ち上がりから 2 μs の積分値を採用している。電荷量の評価値を理論上の電荷量で規

格化し、感度係数として表している。図が示すように現状の $1\ \mu\text{s}$ の矩形波で 99.35% の電荷を積分できている。他方、2 バンチビームでは $\text{FWHM} = 100\sim 200\ \text{ns}$ の領域で 98.65% である。矩形波の電荷は別途オシロスコープで測定し FCT 入力電荷として採用するため、校正精度は矩形波の電荷を基準に $0.9865/0.9935=0.9930$ となる。このことから $1\ \mu\text{s}$ 幅矩形波で 1% 精度の校正が実現できていることが確認できた。

さらに、2 バンチビームでは $\text{FWHM} = 100\sim 300\ \text{ns}$ の範囲で 0.1% 以下の変動で安定している。これは上記校正精度 0.9930 を補正できれば現状の 1% を 0.1% 以下まで改善できることを示している。

4. まとめ

J-PARC 加速器施設のさらなる大強度化に向け、各施設の出力パワーの一貫性を確認するため BCM の校正精度の調査を開始した。各施設とも 1% 精度を校正目標にし、それぞれ独立に実施している。校正手法の妥当性を調査し可能な限り統一化を図り、現状の校正精度の向上を目指している。

調査の第一弾として、本稿では 3-50BT の FCT の校正手法について等価回路による解析を実施した。解析の結果、校正精度は 0.9930 を見込み、1% 精度は達成していることが確認できた。もっともこの評価では FCT の周

波数特性のみを対象としているため、その他の影響である、校正信号入力ポートの周波数特性、オシロスコープや基準信号源特性のドリフト、センサーの熱特性、放射線照射による性能劣化特性等は考慮されていない。これらの影響は順次報告する予定である。

本解析によって FCT センサーの周波数特性上の変動を抑えることによって 0.1% 程度まで校正精度が向上できることが原理的に確認できたことは重要である。今度校正手法の高度化を図り実現する予定である。

参考文献

- [1] D. Arakawa, “Beam Intensity Monitor for 500 MeV Beam Transport Line at KEK Proton Synchrotron”, KEK Internal 93-9, Nov. 1993 (in Japanese).
- [2] https://www.proterial.com/products/soft_magnetism/ (旧日立金属(株)).
- [3] S. Hiramatsu *et al.*, “Beam Intensity Monitor for KEK Proton Synchrotron”, KEK-77-21, Feb. 1978 (in Japanese).
- [4] K. Satou *et al.*, “J-PARC MR 用 DCCT の性能評価”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, pp. 1076-1080.
- [5] <https://www.analog.com/jp/resources/design-tools-and-calculators/itspice-simulator.html>