

THE STATUS OF THE J-PARC RCS BEAM MONITOR SYSTEM

Naoki Hayashi^{1,A)}, Seiji Hiroki^{A)}, Saha Pranab^{A)}, Ryuji Saeki^{A)}, Ryoji Toyokawa^{A)†}, Kazami Yamamoto^{A)},
Masahiro Yoshimoto^{A)}, Dai Arakawa^{B)}, Shigenori Hiramatsu^{B)}, Seishu Lee^{B)}, Kennichiro Satou^{B)}, Masaki Tejima^{B)},
Takeshi Toyama^{B)}, Hiroyuki, Harada^{C)}

^{A)} JAEA/J-PARC, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, Japan, 310-1195

^{B)} KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 305-0801

^{C)} Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, Japan, 739-8526

Abstract

The J-PARC RCS has been beam commissioned since fall 2007. During such a short period, the following items have been established. Establishment of the injection orbit, beam circulation, acceleration up to 3GeV, optics parameters measurements and it achieved 50kW beam power (4×10^{12} ppb). The beam monitor system has an important role for smooth beam commissioning. This paper describes the status of the beam monitor system, BPM, Injection monitors, IPM, current monitor, tune meter and BLM of the RCS.

J-PARC RCS ビームモニターシステムの現状

1. はじめに

J-PARC RCSは、パルス当り 8.3×10^{13} 個の陽子を 3GeVまで加速し、1MWのビームパワーを生み出す、繰返し25HzのRapid-Cycling Synchrotronである^[1]。RCSから取り出されたビームは、中性子やミュオンを使った実験を行う物質・生命実験施設やニュートリノ・原子核実験のためさらに陽子を加速するMR (Main Ring; 50GeV Proton Synchrotron)へ供給される。RCSのビームコミッショニングは、2007年10月より開始され、ビームパワー50kWまで達成している^[2]。大強度用に開発されてきたビームモニターシステム^[3,4]は、当初から順調に稼働を始めており、スムーズなビームコミッショニングに貢献している。図1にRCS全体図とビームモニタの配置を示す。これ以外に、BPM, BLMが全周に配置されている。

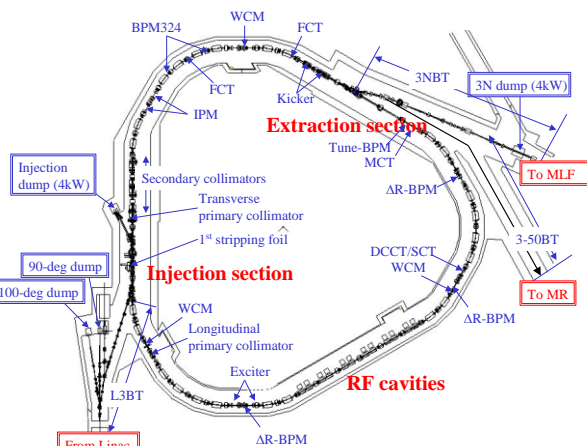


図1: Layout of the J-PARC RCS.

2. 入射モニター

入射部に配置したモニターは、MWPM (Multi-Wire Profile Monitor)とsingle passのBPMである。他にElectron catcher, H0ダンプへの電流を測るモニターが別途用意された。図2に、その配置を示す。コミッショニングの最初のモードは、荷電変換フォイルを抜いて、ビームを直接Injection dump (H0 dump)へ導くモードで、入射軌道の確立を目的に実施した。MWPMのワイヤーは、間隔の異なる(MWPM2では、3mm, 10mmピッチ)面が、17.7度傾けて取り付けられている。0.1mm毎に移動させながら、101回の連続測定を行うことで、分解能が向上した^[5]。近くのバンパ電磁石のノイズが大変大きく、S/N比改善のため、信号を積分した。また、H⁻ビームに比べ、H⁺ビームが通るダンプライン上のMWPM6,7は、信号が少なく、これを少しでも補うため、1mm幅程のチタンフォイルを採用した。また、MWPMは、破壊型モニターであるので、パルス当たり粒子数 4×10^{11} 、繰返し1Hz、ビーム周回なし、での使用に限定した。

Single pass専用のBPMは、入射ライン(K,I-BPM)と第1アーク部(BPM324)に配置した。Linac beamの周波数成分は、324MHzなので、この周波数で検波し、ビーム位置の計算を行った。アーク部にあるBPMは、入射後のビームの重ね合わせだが、324MHzは、概ね4周ほどで減衰することが分かっている。

Electron Catcherは、荷電変換フォイル直近に置か

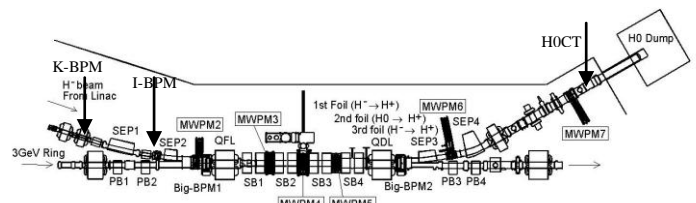


図2: 入射部ビームモニター配置。

¹ E-mail: naoki.hayashi@j-parc.jp

[†] Present affiliation: Nippon Advanced Technology Co.,Ltd.

れ、ストリップされた電子を収集する。ビームがフォイルに当たっていれば、バンチ構造が観測される。H0ダンプライン上のCT (H0CT)は、粒子数をカウントする。周回上に設置した電流モニター(FCT)と異なり、低域時定数を延ばすためシャント抵抗を小さくした。これだけでは、感度が下がるので、放射線の低いサブトンネルにプリアンプを設置した。

3. BPMシステム

リングのBPMは、half cell毎に1台ずつ配置し、全体で、54台ある。入射部の2台(BigBPM)は、入射軌道を確保するために特別に大きなBPMを製作した。BPMシステムは、検出器、ケーブル、信号処理回路からなる。位置精度は、0.2mmを目指している。

3.1 検出器

検出器は、静電型で、線形性を重視し、diagonal cut形状を採用した。限られたスペースのため、検出器は、補正電磁石の中に置かれ、かつコネクタを斜めに取り付けたため電極も45度回転している。この補正は、信号処理時に行う。大きさは、内径でφ257, 297, 377のものがある。信号は、2mのPEEKケーブルで取り出され、直ぐ近くにあるインピーダンス変換トランスで、50Ω系に変換する。

検出器の据付前の較正は、ワイヤー法により実施した。3ポートのネットワークアナライザーを使い、1ポートはワイヤーに入力信号を入れ、残りの2ポートで2電極の出力を測定した。ワイヤー位置は、20mm間隔で断面をマッピングした。4電極の測定が必要なため、これを各検出器2回繰り返した。位置1点当たり、周波数範囲は、150kHz~10MHz、21点測定した。

据付は、隣にセラミックスタクトがあるので、慎重を期した。本来は、BPM中心と四極電磁石の中心を合わせる必要があるが、BPMと一体のベローズが硬いので、原則2mm以内の差であれば、セラミックスタクトを正とした。このズレは、全データ付後、レーザートラッカーにより、各四極電磁石に対し測量を実施した。較正データとこの測量データを元に、位置計算用のパラメーターを決定した。

3.2 信号処理回路

回路の心臓部は、40MS/sの14bit ADCである。この入力範囲、約±1.1Vに入るよう増幅器、減衰器を配置した。対向電極間に対応するchannelの特性バランスには、非常に注意を払った。またノイズ低減のために、回路入力直前の全信号ケーブルにコモンモードチョークを挿入した。

通常のCOD測定モードでは、各電極信号を約100μsec分、4096点分のデータをFFTし、ピーク値を比較することにより位置を計算する。1msec毎、計20回の測定が出来るようになっている。測定データは、リフレクトメモリに書かれ、他の系から読み出すことが可能である。1秒ごとにEPICS recordにも変換され、コミッシング時のstudyには、専ら

このデータを使用した。

時間は、掛かるが約25msec分の波形をそのまま保存するモードもあり(8MBytes/BPM)、その後のoffline解析用に使用した。Turn-by-turnのビーム位置測定にも用いている。

3.3 軌道フィードバック用BPM

Dispersionの大きな場所の内3箇所、軌道フィードバック用のBPMを置いた。Normal BPMと同じ電極形状だが、水平方向のみ2電極とした。信号処理回路は、理想ダイオード検波のアナログ回路に接続した。フィードバック用には、このうち2台を使用する。現状は、フィードバックは、使っていないが、synchrotron motionの観測に使用している。

3.4 コミッシングでのパフォーマンス

当初、ビーム電流がまだ低く、周回するまで、アンプをトンネル内に設置する準備もした。しかし、地上1階の信号処理回路内でのアンプでも遜色ないS/N比が確保されたので、実際には、使用しなかった。これは、全系でのノイズ対策によるところが大きい。Linacのビーム電流5mAでも10倍アンプ後約5mV(ADC値で40~50)で、ビームの存在確認には、十分であった。ビームスタディの要請で、リニアック電流25mA、中間バンチ1つ(~1x10¹¹ppb)の入射も実施している。この際も、入射時にADC値200くらい、電圧で20mV程である。これくらいのビーム強度でturn-by-turnのビーム位置分解能は、1~2mmである。ビーム強度が上がれば(中間バンチ22、Linacのビーム電流5mAで)0.2mm程になる。入射部のBigBPMでは、バンパ電磁石からのノイズがまだ大きく、ビーム入射直後の位置測定は、困難である。

次に、COD測定モードでの分解能について調べた。水平方向は、Dispersionによる振動などビーム起因のバラつきや、個別に問題が残るBPMはあるが、垂直方向のデータから20~30μmくらいと推定している。

全般に、BPM系のノイズは、非常に良く低減されていたが、時々問題があった。それらは、回路入力の接触不良、トランスBOX内部の絶縁箇所が甘くなっていた等であった。RFからのノイズは、概ね問題ないが、運転パターンによっては、実際に電子が電極に突入して来ている可能性がある。また、意図せず、真空容器内面の段差ができてしまった箇所ではBPMの測定値が、異常値を示しており、その対応が今後の課題である。

4. 電流モニター

CT (Current Transformer)は、周波数帯域により5種類(DCCT,SCT,MCT,FCT,WCM)全部で10台作製した。FCTは、(H0ダンプラインのものを含み)4台、WCMは、3台、それ以外は、各1台。DCCTは、<10kHz程の帯域を持つ、ビーム電流の目安となるものであり、head及びエレクトロニクスは、Bergozより購入した。バックアップとしてほぼ同じ周波数帯域を持つSCT^[6]を製作した。これらの電流出力は、

RF周波数で割り算し、粒子数に換算して表示する。

MCTは、multi turn injection時のビームの積み上がりを観測するものであり、FCT,WCMは、RFの位相feedback、feedforward feedback、バンチ観測用に用意した。DCCTを除き、トロイダルコアは、内径390mm,外径470mmのFINEMETに統一した。コア特性に対する要求が厳しいWCM用について、特性の良いものを選んだ。各CTの時定数は、コイル巻き数により調整した。Shunt impedanceは、各CTに適切になるよう選択した。定格平均11Aでの運転が前提のため、低ビーム強度での、運転では、感度が低く感じてしまう。

MCT, FCT, WCMについては、50Ω系の伝送線路を作り、周波数特性を測定した。WCMについても100MHzを超えるまで、よい周波数特性が得られたが、400MHz付近に共鳴ができてしまった。

5. IPM

IPM (Ionization Profile Monitor)は、RCSの最初のアーク部に垂直用、水平用各1台が据付られている。将来は、Dispersionが無い所に、水平用一台増設予定である。Detectorには、80mm幅のMCP3枚を使い、中央は、32ch、両端は、8chの読出しが可能となっている。3枚のMCPの設定で、全体で 10^4 のダイナミックレンジが得られる。電荷収集電極は、最大45kV、プリアンプは、入力impedance 1kΩ、gain 100又は1000倍で使用している。電荷収集のモードは、電子、イオンともに可能である。現状は、主にイオン収集モードで、110パルスの平均を20MS/sでサンプリングでしている。これで、turn-by-turnのプロファイルを計算している。

電子収集モードの時は、ビームの空間電荷による拡がりを抑制するための磁場必要になる。このため0.5Tの直流磁石も用意している。CODを発生しないように、3ポールで打ち消しあい、主コイル、副コイルのバランス調整で、大きなCODを発生しないことまでは、確認している。

6. チューンメーター

チューンメータシステムは、ビームに振動を与える垂直、水平のExciter各1台と、tune測定専用のBPMから成る。Exciterへは、任意波形発生器を信号源とし、最大1kW、0.1~7MHzの高周波アンプを経て印加される。専用のBPMの電極は、水平、垂直方向に平行4分割されたものである。上下、又は、左右の差信号を選択し、リアルタイムスペクトルアナライザに入力する。デジタル化されたデータを上位計算機にコピーした後、再度FFT変換など処理を施し、revolution周波数、sideband peakを検出し、時間依存のtuneを計算する。

入射直後は、入射エラーのソースによりExciter無しでも見られるが、加速中は、Exciterが必要になる。Momentum spreadが大きい場合など、ビーム条件によっては、加速全過程でのsideband信号の検出が困難で、この改善が、今後の課題である。

7. BLM

BLMは、シンチレータタイプ(S-BLM)、比例計数管タイプ(P-BLM)、電離箱タイプ(AIC-BLM)の3種類ある。S-BLMは、通常-600V、P-BLMは、-1550Vを印加、プリアンプインピーダンスは、50Ω、ゲインは、100倍にしている。P-BLMは、MPS (Machine Protection System)の一部としても使われている。

Dispersion部のロス、非常に敏感で、リニアックでビームの蹴り残しが分かたり、ビーム強度が上がると、現在RF空洞が、10台(設計では、11台必要)しかないため、ロスが増えるのが分かる。

短期的なビーム試験用のデータ収集システムは、動いているが、電流モニター等も含め、長期的なデータアーカイブする仕組みが必要である。また、個々のシステムの測定精度、長期安定性も調べて行く必要がある。

8. まとめ

J-PARC RCSで使われた様々なビームモニターシステムの現状について報告した。システムは、当初から、非常によいパフォーマンスを示し、ビームコミッシングの成功に貢献した。ビームパワーは、4分間だが52kW相当の出力を出した。1パルスの最高値では、2バンチで 1.1×10^{13} の記録を出した。これは、25Hzで運転されれば、130kWに相当する。

システムは、1MW相当でも十分ダイナミックレンジを見込み設計されているが、今後は、その検証が必要である。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki, eds, Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Facility Project, J-PARC, KEK-Report 2002-13; JAERI-Tech 2003-044.
- [2] 發知英明, 金正倫計 “J-PARC 3GeVシンクロトロン の現状” Proceedings of the 5th Accelerator Meeting in Japan, Higashi-Hiroshima, Aug. 6-8, 2008
- [3] N. Hayashi et al., “Development of the beam diagnostics system for the J-PARC Rapid-Cycling Synchrotron” Proc. of PAC2005, Knoxville, May 2005, p. 299.
- [4] S. Lee et al., “J-PARC RCSのビームモニターシステム” Proceedings of the 3rd Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Aug. 2-4, 2006
- [5] S. Hiroki et al., “Multi-wire Profile Monitor for J-PARC 3GeV RCS” Proc. of the EPAC08, Genoa, Jun. 23-28, 2008, TUPC036, p1131.
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e08/papers/tupc036.pdf>
- [6] S. Hiramatsu, KEK-77-21 (Japanese).
- [7] K. Satou, et al., “Beam Profile Monitor of the J-PARC 3GeV Rapid Cycling Synchrotron” Proc. of the EPAC08, Genoa, Jun. 23-28, 2008, TUPC036, 1275.
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e08/papers/tupc093.pdf>