

THE BEAM MONITOR SYSTEM OF J-PARC RCS

Seishu Lee^{1,A)}, Naoki Hayashi^{B)}, Seiji Hiroki^{B)}, Ryoji Toyokawa^{B)}, Kenichiro Satou^{B)}, Akira Ueno^{B)}, Takeshi Toyama^{A)}, Dai Arakawa^{A)}, Takako Miura^{A)}

^{A)} KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 305-0801

^{B)} JAEA/J-PARC

2-4 Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, Japan, 319-1195

Abstract

The beam monitor system has been developed to contribute to the beam commissioning for J-PARC rapid cycling synchrotron (RCS). The monitor system will be used for the tuning of injection and circulating beam, and the investigation of the beam loss mechanism. The system will also be an essential tool for machine protection system (MPS). The specification of wide dynamic range, fast time response and radiation hardness are required for high intensity proton synchrotron. In this paper, construction and application of the beam monitor system are described. Preliminary calibration results of beam position monitor (BPM) and experimental results of prototypes of beam loss monitors (BLM) and ionization gas profile monitor (IPM) are discussed in detail.

J-PARC RCSのビームモニターシステム

1. はじめに

J-PARC RCS^[1]は繰り返し周期25Hz、最大定格エネルギー3GeV、平均電流333 μ A (1MW)のビームを生成し、物質・生命実験施設、及び50GeV MRへ供給する。大強度陽子加速器ではビームロスに拠る放射化がビーム強度の上限を制限すると考えられている。安定・安全な加速器運転の為にビームモニターシステムの役割は極めて重要なものとなる。

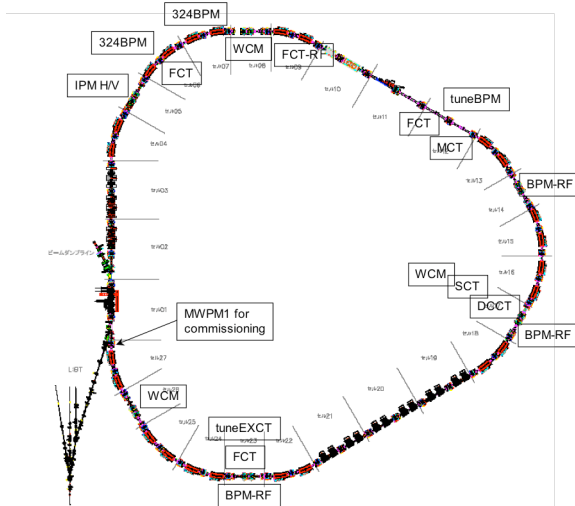


図1：J-PARC RCSのモニター配置

RCSではビーム調整やスタディの為に59台のビーム位置モニター(BPM)、124台のビーム損失モニター(BLM)、10台の電流モニターと壁電流モニター(DCCT, FCT, MCT, SCT, WCM)、2台の残留ガスプロファイルモニター(IPM)、2台のチューンモニター及び1台の

ハローモニターを開発してきた^[2]。さらにLinacからの入射ビーム調整用のモニターシステムも製作中である。RCSのモニターは、大口径、大強度及び高繰り返しというビーム特性により、広いダイナミックレンジ、高速時間応答性及び耐放射線性が求められる。これまでに主なモニターの試作を終了し、量産化を進めている。本報告では、これらモニターシステムの基本性能と今後の開発課題の詳細について報告する。

2. 入射調整用モニターシステム

RCSへは最大500 μ 秒のバンチ長を持つマクロパルスが入射される。マクロパルスはデューティー約0.5、バンチ長500n秒の中間バンチ480個により構成される。RCSのハーモニクスは $h=2$ であり、中間バンチはリング内に1つつつ交互に重畳されてゆく。入射調整ではこのLinacビームを使い、H0ダンプにビームを廃棄しながらセプタム電磁石やシフトバンブ電磁石の調整を行う。

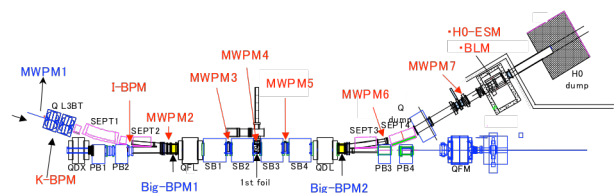


図2：入射調整用モニター配置

入射部は電磁石や荷電交換フォイルなどの機器が集中する為、極めてスペースが狭い。さらにダクトが大口径な事に加え、フォイル駆動機構や観察用

¹ E-mail: seishu.lee@kek.jp

ビューポートのアクセスを確保する為、BPMの設置は困難である。四重極磁石の隣には大口径BPMを用いるが、その他の場所は7台のマルチワイヤースキャナー(MWPM)を使って、ビーム位置と分布を観測する。MWPMはセンター入射やペイント入射などの各入射調整モードとチューンサーベイに対応する為、最大150mmの測定範囲が要求される(ダンプラインでは最大250mm)。一方rmsエミッタンス $6\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ のLinacビームを仮定するとrmsビームサイズは約1.5~2.5mmに過ぎない。0.1mm程度の分解能と最大150mmの測定範囲を両立するため、ワイヤを駆動方向に対して約 17° 斜めに張り検出器ヘッドをスキャンする。ワイヤ間隔(ch数)と駆動範囲を最適化し、水平・垂直の各1面あたり約10秒~20秒で測定する事が可能である。

3. 周回調整用ビームモニター

3.1 入射BPMによる1/3周軌道調整

入射ダンプまでのビーム調整後は、シングルパスビームを使った1/3周軌道調整を行う。linacビームを入射後、周回させる事なくRCSから取り出し3NBTの垂直ダンプに廃棄する。linacビームのピーク電流は5mA~50mAが予定されており、周回ビーム測定用リングBPMの本来のゲイン(最大ピーク電流~80Aを想定)では測定は難しい。このため高周波帯域を持つ四電極型BPMを第一アーク部に2台設置し、linacビームの324MHz成分を直接観測することで軌道調整を行う。L3BTと入射エリアを合計すると約200mのトランスポートラインとなるが、デバンチャーの調整によりマイクロパルスデバンチは10%程度に抑制される。さらに324MHz成分に限定することで、狭帯域フィルターによるノイズ低減が可能となり充分なS/N比が期待できる。さらにコミショニングの初期に限り、アーク部や出射付近のリングBPMにヘッドアンプを設置する。1/3周調整を行うことで偏向磁石や四重極磁石の設定値とアライメント等について実験的な知見を得る事ができる。リングの対称性を仮定すると残り2/3周の調整が、より簡便になると期待される。

3.2 リングBPMによる周回調整

周回調整では主にリングBPMを使う。最初のワン・ターン調整ではヘッドアンプを組み込んだ15台程度のBPMが重要となる。一周調整が確立されると24個の中間パルスを重畳させ、ビーム強度を少し高くする(定格の1/100ビーム)。これにより、信号強度はリングBPM本来のダイナミックレンジに入るため、54台のBPM全てを用いた軌道調整が可能となる。但し、RCSは四重極電磁石の電源が一括

制御される事に加え補助巻き線が無い為、ビームを使ったBPMのキャリブレーション(BBC)は難しい。この条件ではケーブルや処理回路の誤差を含めるとBPMの絶対精度は $\pm 1\text{mm}$ 程度と予測される。つまりCOD補正後もその程度のエラーが懸念されるため、現在RCSにおけるBBC手法の開発・検討を進めている^[3]。100kW以上のビーム強度を実現する為にはBPMの絶対精度を $\pm 0.2\text{mm}$ 程度まで向上させることが必須である。

リングBPMは省スペース化の為、補正偏向電磁石の磁極間に設置される。最大繰り返し周波数25Hz、磁場振幅 $\pm 0.4\text{T}$ の交番磁場による渦電流発熱を抑える為、真空容器と電極の板厚は1~2mm程度にまで薄くしている。その一方、機械強度を確保する為リブ構造を採用した。さらに高真空の維持と低放射化を実現する為、材質はTi材を用いた。今回の開発研究を通して、高精度なビーム調整に必要な製作精度($\pm 0.1\text{mm}$)と静電容量のバランス(1%以下)を確保する製作法を確立した。

3.3 BPM校正

Ti製大口径BPMは加工、溶接及び組み付けなど全ての工程に困難さがある。電極形状は広範囲での線形性を期待して円筒を斜めに切ったダイアゴナルカット方式を採用した。完成後のBPMは各電極の静電容量測定を行う事に加え、ワイヤ法による感度特性試験を行う。周回ビームのエミッタンスを $324\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ と仮定するとビームサイズは最大で100mm程度になる事から、横方向感度の線形性を確認することはビーム重心の測定に必須である。これまでにワイヤ設置位置精度 $\pm 20\mu\text{m}$ 以下の校正台を整備し、先行機BPMの校正を行った。図3に示す様に半径 $\pm 100\text{mm}$ の範囲で非常に良好な線形性を確認している(図は周波数約1MHzと2MHzのデータ)。

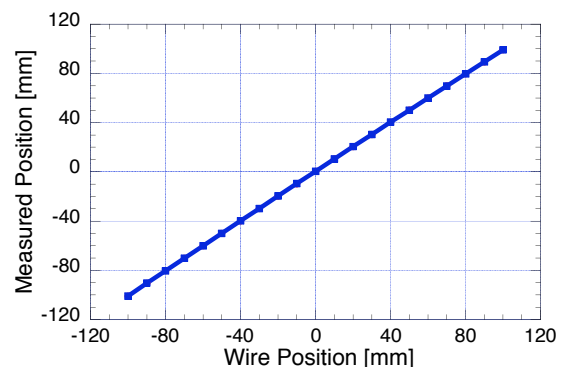


図3：ワイヤ法による校正試験結果

3.4 ビーム損失測定

ビーム損失モニター(BLM)^[4]は3種類のタイプを設置し、入射調整の初期から常時観測を行う。今回J-PARC用に開発した比例係数管型BLM(80台)

は最大1000倍の感度増幅機能（バイアス電圧2.15kVにおいて）と数 μ 秒以下の高速時間応答性を持つ。これらは入出射領域と周回側四重極電磁石付近に配置され、軌道調整やロス監視に利用される。特に1周調整（5mAのシングルパスビーム）においてはリングBPM本来のダイナミックレンジに入らない為、BLMは軌道調整に欠かせない。入出射付近ではロスが予測される場所に高速時間応答（1 μ 秒以下）を持つシンチレータ型ロスモニターも配置し機器調整に用いる。さらに主トンネル外周にはコルゲート管ケーブルを利用した電離箱型ロスモニター（20本）も配置している。KEK-PS等における数十年の長期使用で実績があり、リング全体のロスを広範かつ長期にわたり監視する。ビーム損失モニターはまた、過大なビームロスから機器を保護する機能も求められている。放射化を防ぐ目安とされる1W/m以下のビームロスを高速に検出し、必要な場合はビーム停止を行う。

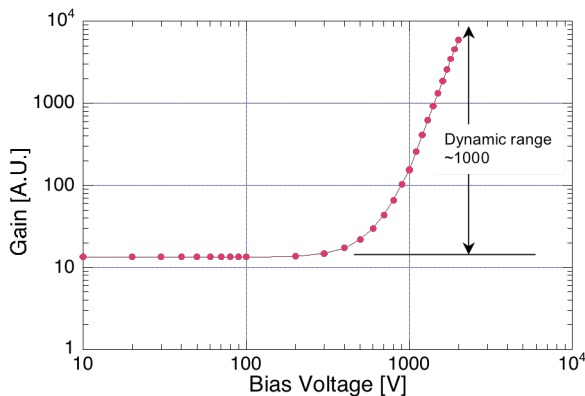


図4：比例計数管型ロスモニターの感度曲線
(X線管を用いた相対感度校正試験)

3.5 残留ガスプロファイルモニター (IPM)

RCSでは繰り返し周期が25Hz（入射から出射まで20msec）であることからフライングワイヤー（挿引速度 \sim 10m/s）による分布測定は困難である。その為、MCP検出器を使ったIPMを採用した。大強度ビームの空間電荷効果により収集電子の分布が歪むのを防ぐ為、荷電粒子収集方向に500Gauss程度の外部磁場を用いる。これまでにIPMのプロトタイプを製作し、KEK-PSでビーム試験を行ってきた^[5]。ノイズ低減、MCP校正及び外部磁場のBL積を相殺する磁場調整法などについて得られた知見を実機の製作に反映する。

3.6 チューン測定

水平・垂直方向のチューンはそれぞれ6.68, 6.27、空間電荷効果によるチューンシフトはRFに2次高調波を重畳した場合で、 $\Delta \nu = -0.25/-0.16$ (181/400MeV)程度と見込まれている。RCSでは20m秒毎に加速、取り出しを繰り返すことから時間分解能（時間平均）1m秒程度、チューン測定精度0.01程度が要求されている。KEK-PSでの試験結果を基にエ

キサイター、アンプ及びチューン測定専用BPMを設計し、試作機を製作中である。

3.7 ビーム電流モニター

周回ビームの平均電流測定や入射効率の評価には直流電流モニター（DCCT）と低域時定数を延ばした遅い電流モニター（SCT）を用いる。また、入射ビームの重量を観測する為、中速ビームモニター（MCT、帯域 <1.6 MHz）を製作する。波形観測モニター（FCT）は10MHz以上の高帯域を持ち、バンチ波形の観測とRFの位相調整に用いる。壁電流モニター（WCM）は300MHz以上の帯域を持ち、RFのフィードフォワード補償やビーム不安定性の測定に用いる。大強度ビームの加速を実現するためにはビームに誘起される高調波成分をキャンセルすることが必須であり、これらビーム電流モニターは不可欠である。

4. まとめ

RCSは高電流パルス電磁石やボア径の大きな電磁石群で構成されており、モニターによるビーム測定・補正が必要である。大強度である事によるビームローディングの補償にもモニターは欠かせない。1MWビームの実現には高精度で信頼性の高いモニターシステムが不可欠である。

その反面、RCSのモニターは大口径である事により ± 0.1 mmという精度での製作・調整は非常に困難であった。また、25Hzの高繰り返し率の為に、モニターの高速応答性と渦電流の抑制が必要となる。またRCSはLinacビームの入射が行われる為、コミッション時と定格時のビーム特性が全く異なり、非常に広いダイナミックレンジが求められる。さらに、極めて高い耐放射線性が要求されることで材料選択にも厳しい制約が加わった。これらの制限はコスト、工程及び性能の全てにとって大きな障壁となった。特にRCSでは通常的手法によるBBCが行えない。今後必ず解決しないといけない問題である。

これまでの取り組みにより殆どのモニターの試作は終了し、量産工程に入ることができた。今後は据え付け工程の管理とアライメントの実施が主な課題となる。BBCを初め、その他コミッションアプリケーションの作製にも取り組む。

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] N. Hayashi *et. al.*, Proc. of PAC2005, 299. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p05/PAPERS/TOAD003.PDF>
- [3] N. Hayashi *et. al.*, Proc. of EPAC2006, TUPCH064.
- [4] S. Lee, *et. al.*, "The Beam Loss Monitor System of the J-PARC Linac, 3GeV RCS and 50GeV MR", EPAC'04, Lucerne, July 2004, p.2667.
- [5] K. Satou, *et. al.*, "A Prototype of Residual Gas Ionization Profile Monitor for J-PARC RCS", EPAC'06, TUPCH065.