

## BEAM DIAGNOSTICS FOR THE J-PARC MR

Takeshi Toyama<sup>1,A)</sup>, D. Arakawa<sup>A)</sup>, Mitsuhiro Arinaga<sup>A)</sup>, Yoshinori Hashimoto<sup>A)</sup>, Shigenori Hiramatsu<sup>A)</sup>,  
Kotoku Hanamura<sup>C)</sup>, Susumu Igarashi<sup>A)</sup>, Seishu Lee<sup>A)</sup>, Hiroshi Matsumoto<sup>A)</sup>, Junichi Odagiri<sup>A)</sup>, Kenichiro Sato<sup>B)</sup>,  
Masaki Tejima<sup>A)</sup>, Makoto Tobiyama<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

<sup>B)</sup> Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

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

<sup>C)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd

2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045, Japan

### Abstract

Beam diagnostics for J-PARC, a high intensity proton accelerator complex, adopt several new challenges to accommodate the high intensity proton beam. Present status of diagnostic devices is summarized for the MR (Main Ring) with the stress on BPM calibration for the day-1 (low intensity) and beam loss monitor utility.

## J-PARC MR のビーム診断

### 1. はじめに

J-PARCは従来(KEK-PS)のビーム強度の約100倍を目指している。そのためビームモニタについても随所に従来とは異なった設計を採用している。ここでは、来年5月のビーム性能試験に向けて準備中のMR (Main Ring) および3-50BT (RCS - MR間のビーム輸送路)のビームモニタについて、設計および製作、設置状況を報告する。3-50BTのビームモニタは、FCT (Fast Current Transformer), MWPM (Multiwire Profile Monitor), BPM (Beam Position Monitor), BLM (Beam Loss Monitor)、MRは、FCT, Wall Current Monitor, DCCT, MWPM, Ionization Profile Monitor, Flying Wire Profile Monitor, BPM, BLM, Tune Meter から構成される。

本ビーム診断システムの特徴は、加速器が大強度ビーム ( $3.3 \times 10^{14}$  proton/pulse, 周回平均電流  $\sim 12$ A) であることに加えて、ビーム長が大きい ( $\leq 100$  m,  $\leq$  数10 MHz)、横方向サイズも大きい ( $\leq \phi 100$  mm) ことを反映して、次のようなものである。放射線損傷を避けるためモニター検出器近傍に処理回路は置かない。軽微なビームロスも気になる。例えば、コリメータ以外の場所でのロスの上限值(目標)は0.5W/mである。0.5Wは、ビーム粒子数にして  $4 \times 10^8 \sim 4 \times 10^9$  に相当する (3.64s周期で3-30GeV)。このような微弱な信号は、現在、ロスモニターでなければ測定不可能である。ビームロスは、機器破壊、残留放射能等、加速器システム全体に悪影響を与えるため、ビームロス信号がMPS (Machine Protection System) の制御ロジックに組み込まれ、厳格な処理がされる。また、大きなサイズに適応するためBPM、MWPMの断面は大きいサイズとなっている。周回ビーム用BPMは位置の線形応答を重視して、対角線分割としている。

### 2. 3-50BT (Beam Transportline) のビーム診断

3-50BTでは、FCT 5台 (内2台をPPS (Personel Protection System) 用として使用)、MWPM 9台 (day-1では3台)、BPM 14台を設置する。BLMは、比例計数管型62台、ケーブル電離箱型3台を予定している。守備範囲は、3N-BTと3-50-BTとの分岐点から下流である。Day-1では、特にMWPMが不足気味だが、最終的には、3-50BTの上流から順番に、水平偏向、ビーム・コリメーション、垂直偏向、水平偏向、マッチングの機能を調整するのに必要十分なモニターを設置する予定である。

### 3. MRのビーム診断

MRでは、DCCT 2台、FCT 7台 (内3台をRF位相フィードバック用、2台をFX kicker用として使用)、WCM 3台 (内2台をRFビームローディング対策用として使用)、全周の4極電磁石と対で設置するBPM 186台、dump/abort用BPM 4台、速いBPM 2台を設置する。BLMは、比例計数管型268台、ケーブル電離箱型18台を予定している。プロファイル測定には、入射取出しラインにMWPM 3台、周回ビーム観測用に、Flying wire 水平・垂直それぞれ1台 (day-1は水平のみ)、IPM 水平 (ディスパージョン=0)・水平 (ディスパージョン $\neq$ 0)・垂直それぞれ1台 (day-1は垂直のみ) を用意する。チューン測定には、水平・垂直それぞれ1式のエキサイターとビーム位置信号の周波数解析システムを準備中である。

<sup>1</sup> E-mail: takeshi.toyama@kek.jp

## 4. モニターの仕様・性能について

ここでは、それぞれのモニターの仕様および性能について簡単にまとめる。

### 4.1 DCCT

KEKBのDCCTと基本設計は同じである<sup>[1]</sup>。入力電流は0.2A, 2A, 20A/10Vの3レンジ切替で、電流分解能 $<100\mu\text{A}$ 、周波数帯域 DC - 20 kHz以上である。レンジによって高域遮断周波数(-3dB)が若干バラつくが、全て20kHz以上であった。図1に20A/10Vレンジ時の周波数特性を示す。

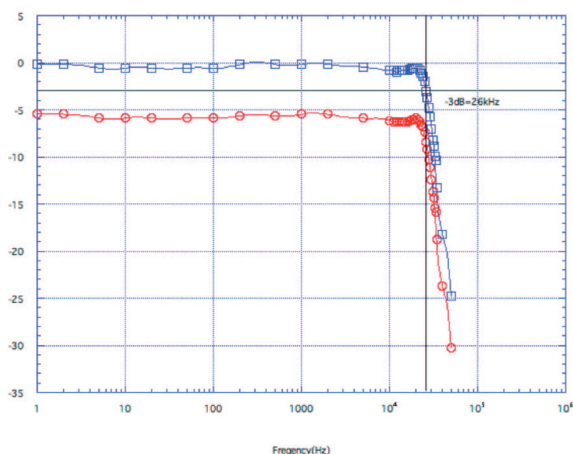


図1：DCCTの周波数特性。20 A/10Vレンジ。  
青：1 Hzの値で規格化、赤：測定値。

### 4.2 FCTおよびWCM

FCTは高域遮断周波数 $>20\text{ MHz}$ 、WCMは $>100\text{ MHz}$ を目標にしている。当初、KEK-PSサイズのものでテストして良好な特性が得られていたが、実機では、サイズの増大、負荷抵抗値の低減のため、FCTでは反共振および共振、WCMでは共振が現れている。反共振は10MHz程度から上でほぼ規則的に現れ、2次コイルでの信号伝搬時間が大きくなったためと考えられる。伝送線路モデルで良く再現出来ている。共振はFCTでは100 MHzより上、WCMでは10MHzより上で現れ、セラミック・ブレイクとシールド・ボックスの構成する空洞の共振で説明出来ると考えられる。ビーム電流が大きいのでパワーロスとの整合性を考慮の上、抵抗でのダンピングを予定している。

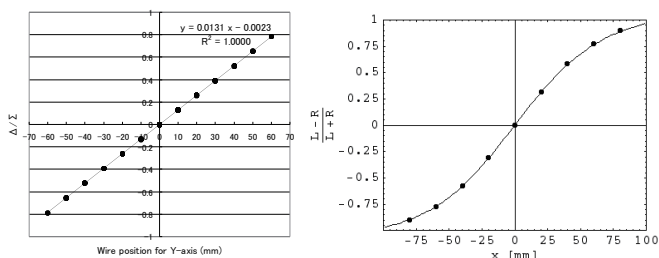


図2：BPMにワイヤー校正結果。  
左：対角線分割電極、右：平行分割電極。

### 4.3 BPM

周回ビーム観測用に4極電磁石と対で186台の対角線分割電極のBPMを設置する。3-50BTのBPMはビーム通過がそれぞれ1回に限られるので、位置に加えて、ビーム電荷分布の4極モーメントの測定も可能なように、対角線分割（電極開口角 $=60$ 度）を採用した。ワイヤー校正の結果を図2に示す。位置応答が、前者は線形、後者は非線形であり、設計通りの特性が得られている。しかし、数 $10\mu\text{m}$ のスケールで見ると誤差があることがわかっている。このような検出器自身の誤差を含めて以下のものを考慮して補正を行う予定である：

- (1) 検出器の誤差（感度係数、オフセット、回転の誤差）<sup>[2]</sup>
- (2) 検出器・ケーブルと負荷の不整合により発生する定在波が原因となる、検出器での信号電圧と、処理回路での信号電圧との誤差
- (3) 処理回路のゲイン誤差
- (4) 検出器の据付け誤差（オフセット、回転の誤差）<sup>[3]</sup>。

これらの補正の結果、day-1でのBPM中心位置の精度は約 $300\mu\text{m}$ 以下となる予定である。設計ビーム強度に近くなると、空間電荷効果によるハローの生成によりビームロスが発生する。ロスがCODが大きいほど、増加するという計算結果が得られており<sup>[4]</sup>、CODを小さくすること、すなわちBPMの精度を良くすることは重要だと予想される。そのため、十分なビーム強度に達してから、beam based calibrationにより $100\mu\text{m}$ 以下を目指すことにしている。

### 4.4 BLM

ビームロスの許容値は、設計では、コリメータで450W、それ以外の領域では0.5W/mを目標としている。0.5Wは、3.64s周期の場合で、全粒子数に対する割合にして $10^{-5}$  (3 GeV)  $\sim 10^{-6}$  (30 GeV) に対応する。このような微弱な信号、およびコリメータでの大きなロスを測定し、機器保護のためのMPS (Machine Protection System)<sup>[5]</sup>に $10\mu\text{s}$ 以下でインタロック信号を渡すための検出器として、応答時間( $<数\mu\text{s}$ )および感度(ゲイン $=1\sim 1000$ )を重視して、比例係数管型を主たる検出器として採用した<sup>[6]</sup>。これを、各4極電磁石および入射、取出し部の機器、コリメータに設置し、それぞれの領域のビームロスを監視する。また、過去の使用実績のあるコルゲート同軸ケーブルを使った電離箱型も一部重複して配置した。

信号処理のブロック図を図3に示す。前置処理回路は、放射線損傷を避けるために使用しない。ローカル制御室に設置されるアナログ処理回路で、生信号と積分信号に2分岐し、それぞれを、デジタイザに出力するとともに、閾値の外部制御可能なコンパレータでインタロック信号に変換してMPSに渡す。観測のための積分信号は12 bit、100Hzのデジタイザで処理し、EPICSを使った制御システムで上位に伝送される<sup>[7]</sup>。

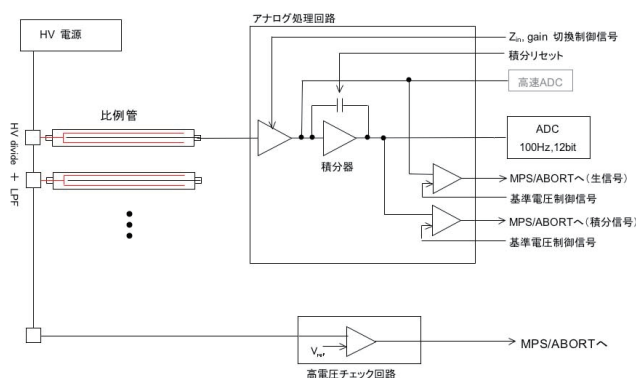


図 3 : ビームロスモニター信号処理のブロック図。

#### 4.5 MWPM

ビーム通過が1回のビームトランスポート・ラインに設置する破壊型モニターである。ターゲットとなる「wire」からの2次電子放出を測定するものであるが、実際には、膜状のチタン、あるいはカーボンを使用する。大強度ビームによる膜の破断が問題になるため、KEK-PSや放医研で各種の材料を使ってテストをしてきている。最終的に、ビーム・アポート・ラインのビームダンプ直前のプロファイル測定には、チタン(厚さ $10\mu\text{m}$ 、幅 $40\text{mm}$ )の短冊を使用する。その他のモニターには、カーボン短冊を予定している。

#### 4.6 Flying wire profile monitor

MRの周回ビームに使用するモニターである。MRは、RCSの加速時間 $20\text{ms}$ に比べて、約 $1\text{s}$ と遅いので、scan speed  $\sim 10\text{m/s}$ のflying wireでも使用出来る。KEK-PSで使用実績<sup>[8]</sup>がある $\phi 7\text{-}10\mu\text{m}$ のカーボン・ターゲットを使う予定である。このモニターは、機械的精度を確保すれば、測定の不定性が少ないので、測定精度が良いが、1加速周期に高々数回の測定しか出来ない。また、大強度でwireが切れる可能性がある。そのため、次項のIPMと相補的に使用することを考えている。

#### 4.7 IPM

KEK-PSでテストし、RCSでも設置されているものとほぼ同じシステムを製作中である<sup>[9]</sup>。IPMは加速中ほぼ連続的に測定ができるため、ビームプロファイルの時間発展の測定に役立つと期待される。RCSからの大きな変更点は、イオン/電子収集用のHV電源とMCP校正用EGA(電子エミッタ)用HV電源の供給を、高電圧ターミナルを使用して、連動して行うことである。

Day-1では、簡便なイオン収集モードを用い10%程度の精度でプロファイル測定を行う予定である。電子収集モードでは、磁場で電子の軌道を束縛して測定分解能を向上出来る。しかし、バックグラウンドとなる電子の検証、分離が必要で、これを行ってからの使用となる。

#### 4.8 Tune meter

ビームにコヒーレントなダイポールキックを与える「エキサイター」(水平、垂直方向で独立なシステム)と、BPMで測定されたダイポール振動を周波数解析するスペクトル・アナライザから構成される。エキサイターは特性インピーダンス $50\Omega$ のストリップライン・キッカー(シャント・インピーダンス $V^2/2P = 29\text{K}\Omega$ (計算値))を使う。これを2台の $1\text{kW}$  RFアンプにより差動で励振する。チューン測定の分解能は $0.001\text{-}0.01$ の予定である。

### 5. 電磁ノイズについて

電磁ノイズから解放される方法として光ケーブルがあるが、検出器側での電気/光変換部の放射線損傷、ケーブルの放射線損傷を考え、メタルケーブルを選択した。そして、KEK-PSおよび試作電源でノイズ対策の予行演習を行ってきたが、電源システムのIGBT化に伴い、完全に防ぎきれていない。これらのスイッチング電源は数MHz以上までの周波数のノイズを発生するため、ビーム信号と重複してしまう。KEK-PS、試作電源でのテスト結果より、信号伝送の同軸ケーブルは、銅またはアルミ・テープ(コーティング)が縦添えのシールドで構成されているものを選定した。これはコストとの兼ね合いで許される範囲内で、shielding effectiveness (transfer impedance)の良いものにした、ということである。しかし、最近のステアリング電磁石との組み合わせ試験では、上記に加えて、電源側にも対策を施さないとノイズを抑えきれない状況が起きている<sup>[10]</sup>。

### 6. まとめ

J-PARC MRのビーム診断装置は、大強度陽子ビーム加速器に対応した特徴的な設計がなされている。DCCT, BPM, BLM, Tune meterは据付けに至っており、完成間近である。FCT, WCM, IPMは、改善も含めて製作中である。2007年12月の総合試験に間に合うように製作、試験、据付けが急ピッチで進行中である。総合試験では、ノイズ対策が大きなテーマになると予想される。

### 参考文献

- [1] S. Hiramatsu *et al.*, Proceedings of the 12th Symp. on Acc. Sci. and Tech., 1999, pp. 561-563.
- [2] Y. Hashimoto *et al.*, WP31, these proceedings.
- [3] K. Hanamura *et al.*, WP28, these proceedings.
- [4] Shinji Machida, "Beam Loss in Rings", ATAC2005.
- [5] H. Nakagawa *et al.*, WP69, these proceedings.
- [6] S. Lee *et al.*, Proc. of the 3rd Ann. Meeting of Part. Acc. Soc. of Japan (2006).
- [7] J. Odagiri *et al.*, WP68, these proceedings.
- [8] S. Igarashi *et al.*, NIM A482 (2002) 32-41.
- [9] K. Satou, *et al.*, "A Prototype of Residual Gas Ionization Profile Monitor for J-PARC RCS", EPAC'06, TUPCH065.
- [10] K. Niki *et al.*, WP68, these proceedings.