

BEAM DIAGNOSTICS IN J-PARC MR COMMISSIONING

Takeshi Toyama^{1,A)}, Dai Arakawa^{A)}, Mitsuhiro Arinaga^{A)}, Kotoku Hanamura^{B)}, Hiroyuki Harada^{C)},
Yoshinori Hashimoto^{A)}, Shuichiro Hatakeyama^{B)}, Naoki Hayashi^{D)}, Shigenori Hiramatsu^{A)},
Susumu Igarashi^{A)}, Seishu Lee^{A)}, Hiroshi Matsumoto^{A)}, Junichi Odagiri^{A)},
Kenichiro Sato^{A)}, Masaki Tejima^{A)}, Makoto Tobiyama^{A)}, Kazami Yamamoto^{D)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

^{B)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd, 2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045, Japan

^{C)} Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8526

^{D)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA), 2-4 Shirakatashirane, Tokai, Naka, Ibaraki 319-1195, Japan

Abstract

J-PARC MR was successfully commissioned with single bunch accumulation at 3 GeV and the beam intensity of $\sim 4 \times 10^{11}$ protons per bunch, 1% of the design value. Beam diagnostic devices: current monitor's (DCCT, FCT, WCM), BPM's, BLM's, profile monitors (MWPM, Flying wire, IPM) and tune meter have come into operation at the above condition. Using outputs from these devices, beam related physical quantities were obtained with enough precision.

J-PARC MRコミッショニングにおけるビーム診断

1. はじめに

大強度陽子加速器施設J-PARCにおいて今年5, 6月に行なわれたビーム性能試験 (day-one) ^[1]における、MR (Main Ring) および3-50BT (RCS-MR間のビーム輸送路) のビームモニタ動作状況について報告する。

今回使用したモニターを表1にまとめる。Day-one以後、いくつかのモニターを増やす予定がある。今回は、バンチ当りビーム強度 $4-5 \times 10^{11}$ protons (設計値 4×10^{13} protons/bunchの約1%)、single bunch、エネルギー3GeV一定での運転であった。主なMRビーム・パラメータを表2にまとめる。

表2 Day-oneにおける主なビーム・パラメータ

| | | |
|------------|----------------------|---------|
| 陽子数 | $4-5 \times 10^{11}$ | protons |
| ピーク電流 | 3 | A |
| 平均電流 | 12 - 14 | mA |
| 速度 β | 0.9712 | |
| バンチ長 | 40 - 60 | ns |
| 周回周波数 | 186 | kHz |
| 周回周期 | 5.38 | μ s |
| RF周波数 | 1.67 | MHz |

表1 Day-oneで使用したモニター

| 装置名 | 台数 |
|------------|---------|
| 3-50 BT | |
| FCT | 5 |
| MWPM | 5 |
| BPM | 14 |
| BLM | 50 |
| MR | |
| DCCT | 2 |
| FCT | 7 |
| WCM | 2 |
| BPM | 186+2 |
| BLM | 238 |
| MWPM | 1 |
| FWPM | 1 |
| IPM | 1 |
| Tune meter | 2 (H/V) |

2. 3-50BT (Beam Transportline) のビーム診断

FCTは、トロイダルコアとしてナノ結晶軟磁性材料 (ファインメット®) を使用し、2次コイル25ターンに25 Ω (50 Ω 2並列) 負荷を取り付けている。信号は20D同軸ケーブルでローカル制御室まで伝送され、時定数160 μ sで積分後サンプルホールドされる (10^{14} protons / 10V)。これらはADC (10V / 20000) を搭載したPLCモジュールによりデジタル化される。5台中の下流2台はPPS (Personel Protection System) 用^[2]、また1台は入射キッカーとビームとの同期監視用として使用している。

MWPM^[3]は、金コートされたタンングステン・ワイヤー $\phi 30 \mu$ mを、設計ビームサイズに応じて2.5 mm, 3.5 mm, または4 mmの間隔で32本張っている。信号伝送には1.5D34芯同軸ケーブルを銅テープおよび鉄で一括シールドしたものを使用し、耐ノイズ性を高めた。信号処理は、ローカル制御室にてゲートをかけて積分後デジタル化される。

BPMは平行4分割電極型で、ビームサイズに合わせて内径 $\phi 230$ mm, 200 mmの2種類のサイズがある。チャンパー外側のトランス (巻数比15:2) により低域遮断周波数を230kHzまで拡げてバンチ波形を忠実

¹ E-mail: takeshi.toyama@kek.jp

に観測できるようにした。信号伝送には8D4芯同軸ケーブルを銅テープにより一括シールドしたものを使用し、ローカル制御室にてデジタルオシロスコープ(DSO6014L: 垂直軸分解能8bit, 周波数帯域幅100MHz, サンプルング速度2GSPS)により電圧波形をサンプルングしている。

BLM^[4]は同軸構造の比例計数管型で、50台設置した。φ50μmのPtワイヤーを内径φ23mmのステンレス・チューブの中心に張り、Arガスと、光子による誤信号防止のためのquench gasとして約1%のCO₂を加え封印してある。長さは800mmである。信号伝送は8DFB同軸ケーブルで高電圧印加はRG59/U同軸ケーブルで行なっている。ローカル制御室の信号処理回路では、増幅後に「生信号」と積分信号とを出力する。3-50BTはビームが1回通過するだけなので積分器のゲインを大きくとった(RC = 20μs)。また、各信号を外部から設定された閾値電圧と比較し、越えた場合は警報信号をMPS (Machine Protection System)へ出力する^[5]。

信号処理回路は、入力抵抗50Ω/10kΩ、ゲイン10/100/1000の切替が可能である。|入力電圧| < 1V、|出力電圧| < 10V (高インピーダンス負荷時)である。積分ゲートの時間幅は12msとした。5月の試験では、入力抵抗50Ω、ゲイン10、高電圧-1.6kVとした。6月の試験では、信号処理回路の入力抵抗10kΩ、ゲイン10、高電圧-1.1kVとした。今回はビーム強度が低いので機器の損傷の懸念が無く、またBLMのビームによる最終調整が未完了だったので、MPSへの発報信号は受けつけないようにした。

3. MRのビーム診断

ビーム強度を測定するために設置した2台のDCCTは、トロイダルコアとしてファインメット®を使用している。回路構成の工夫によりコアのバラツキによるリップルを抑制している^[6]。周波数帯域DC~約20kHzで、動作レンジ0.2A, 2A, 20A/10Vである。前置AC増幅回路を、放射線を避けるためにサブトンネル内の、検出器から約30mの場所に置いた。出力はビーム電流値なので、これをRF周波数で割算してビーム強度に変換した後、デジタル化WE7272 (16bit, 40kHz, 100kSPS)で取込む。換算係数は 5×10^{12} , 5×10^{13} , 5×10^{14} ppp/10V (0.2, 2, 20Aレンジ時)である。アナログ信号もローカル制御室、中央制御棟に分配している。今回は2Aレンジを使用した。

FCT (RF位相フィードバック用3台、FX kicker用1台、観測用2台)は、3-50BTのFCTと同様にトロイダルコアとしてファインメット®を使用した。周回ビームであることを考慮して、基本構成は2次コイル巻線50ターンに25Ω (50Ω2並列) 負荷を取り付けている。このままでは、10数MHz以上で反共振、および100M - 200MHz付近で共振が発生したので、反共振はコイル巻線間に抵抗100Ωを合計50個取り付けて減衰させ、共振はセラミックギャップに180

Ω36並列、および校正コイル(1ターン)に負荷抵抗50Ωを取り付けて減衰させた。最終的な高域遮断周波数は約180MHz (-3dB)、サグは約10msである。

WCM (RFビームローディング対策用2台、観測用1台)は、ビームダクト(SUS316L)のセラミック・ブレイクを跨ぐ抵抗92mΩを流れる壁電流の作る電圧を25Ω (50Ω2並列)で観測する。壁電流がノイズ対策用シールドボックスを流れるのを防止するためのインダクタンスはファインメット®を使用している。サグは、コア・インダクタンスのバラツキを反映して0.36m - 1.05msである。高周波側では数10MHzから1GHz以上までゲインが緩やかに約36dB上昇する。設置後はケーブルの減衰と相殺する方向である。また、設計ビーム強度では抵抗の発熱が問題になるため空冷ファンを取り付けた。

BPMのうち対角線分割型の186台(リング用)は全周ほぼ全Q電磁石に隣接して設置した。Injection dump lineにはBPM2台(ダンプ用)を設置した^[7]。

リング用BPMでは、入射直後の5ターンの位置測定、および入射後1秒間の1msまたは10ms毎のCOD測定を行なった^[7]。ターン毎の位置計算にはバンチ信号のpeak-peak値を使用した。COD計算には、1時刻につき、14bit, 80MSPS ADC後の4096サンプル点を使用した。連続する4データ点毎を平均し1点とし、全部で1024データ点(リング9ターン分)を得る。これをFFTし、RF周波数の2倍の3.34MHzのピーク値を位置計算に使用した。また、RF加速システムの制御系に提供する位置基準信号をアナログ処理回路^[8]で作っている。Injection dump lineには、上流側1台はリング用BPMの予備品(I.D. φ200mm)を、下流側1台は平行4分割型トランス付きBPMを使用している。信号は、5D4芯同軸一括シールドケーブルで伝送後、ローカル制御室のデジタル化WE7118 (14bit, 80MHz, 100MSPS)によってサンプルングされる。

BPMデータはEPICSに取込んだ後、校正、測量データ^[9]による補正を行ない、軌道補正が行なわれる^[10]。今回はゲイン補正のみを行なった。

BLMは、前節で述べた比例計数管型を238台使用した。周回ビームでロスが増えるため、信号処理回路の積分ゲインは小さくした(RC = 20ms)。積分ゲートの時間幅は100msとした。5月の試験では、入力抵抗50Ω、ゲイン10、高電圧-1.6kVとした。6月の試験では、入力抵抗のみ10kΩに変更した。MPSへの発報信号は受けつけないようにした。

5月運転時の「生信号」出力の一例を図1に示す。図1.(a)はQDR7、図1.(b)はQFR10に取り付けたBLMの信号である。QDR7(第1コリメータ下流)では最初の2ターン、QFR10(第3コリメータ下流)では最初の1ターンのみでロスが発生していることがわかる。MPSの要求時間<100μsに比べて十分速い応答をしていることがわかる。

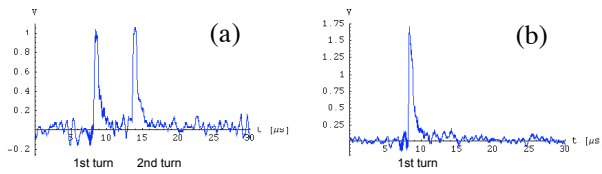


図1: BLMの応答 (5月の運転)

6月運転時には、積分信号出力のビーム強度モニターによる校正を試みた。ビーム強度モニターによるロス量とBLM積分信号全周の総和の間には、約±20%のバラツキの範囲内で比例関係がみとめられた。今後さらにデータを積み重ね、ビームロス量の精度を向上させていく予定である。今回の校正結果のみから試験的に、積分信号電圧値からビームロス量に換算した結果を図2に示す。MRの一般区間のロス上限値 $0.5W/m^{[1]}$ は、3GeVにおいて 5.9×10^{12} protons (3.64s 周期の場合)、0.5W 単独ロスは 3.8×10^9 protons に対応する。図より、これらのロスを検出するのに十分な感度を持っていることがわかる。

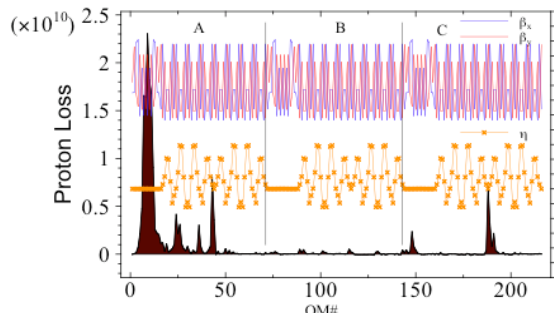


図2: ビームロスを陽子数に換算する試み
全周ロス分布のプロット。青線 β_x 、赤線 β_y 、橙線 η_x 。

入射ビームのプロファイル測定のために、入射セプトラム下流にMWPMを設置した^[3]。サイズ以外は基本的に3-50BTのものと同様である。

水平方向プロファイル測定に用いたFlying wireは、カーボン・ファイバー $\phi 7 \mu m$ をアルミニウムのフレームに張り、10m/sでビームを横切る時に発生する2次粒子を観測している^[11]。

垂直方向プロファイル測定に用いたIPMは、残留ガスとビームとの衝突により発生する電離イオン電子対のうち、イオンを30kVの静電場により収集し、MCPで増幅された信号を観測している^[12]。

FWおよびIPMは、コミッショニング当初ビームロスのバックグラウンドが問題となったが、軌道調整後信号が得られた。

チューン測定には、水平・垂直それぞれ1組のエキサイターとBPMを使用した^[7]。エキサイター (50 Ω ストリップライン・キッカー) は2つのパワーアンプの差動電圧で駆動される。各アンプにより1M - 2MHzの帯域幅のホワイトノイズ約800Wを入力した。ベータトロンチューンはQFR10のBPMの水平方向、QDR09のBPMの垂直方向のそれぞれの差信号をリア

ルタイム・スペクトラム・アナライザ (RSA3408A) に入力し、EPICSによりIQデータを取込み、周波数解析を行なっている。今回のチューン測定の分解能は ~ 0.007 であった。図3がSextupole電磁石ON時の水平方向ベータトロン振動の周波数スペクトルである。十分なSNが取れている。Sextupole電磁石OFF時もSNはやや悪化するが問題なく測定できた。図4は入射後120ms間のチューンの変化である。電源リップルによる変動が見られる。

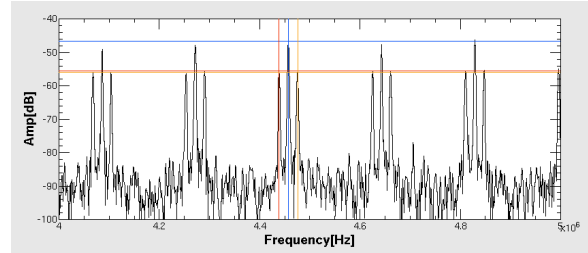


図3: 水平方向チューンの周波数スペクトル

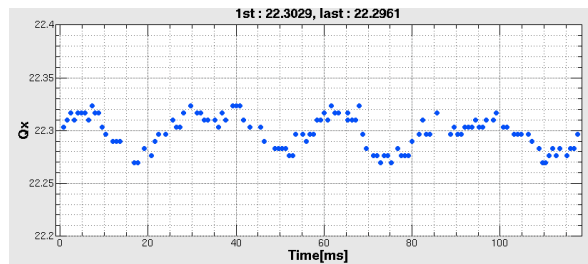


図4: 水平方向チューンの時間変化

4. まとめ

J-PARC MRのビームコミッショニングにおけるビーム診断装置は、ビーム強度が設計値の約1% (パンチ当り) であり、IGBTなどのスイッチング電源のノイズが数MHzまで被っている厳しい状況であったが^[13]、加速器調整に十分な機能を果たした。今後12月のビーム取り出しに必要な機器の整備を行っていく。

参考文献

- [1] T. Koseki *et al.*, these proceedings.
- [2] S. Motohashi *et al.*, these proceedings.
- [3] Y. Hashimoto *et al.*, these proceedings.
- [4] S. Lee *et al.*, Proc. of the 3rd Ann. Meeting of Part. Acc. Soc. of Japan (2006).
- [5] H. Nakagawa *et al.*, Proc. of the 4th Ann. Meeting of Part. Acc. Soc. of Japan (2007).
- [6] S. Hiramatsu *et al.*, Proceedings of the 12th Symp. on Acc. Sci. and Tech. (1999) p. 561.
- [7] T. Toyama, *et al.*, Proc. of the 4th Annual Meeting of Part. Acc. Soc. of Japan (2007).
- [8] D. Arakawa *et al.*, these proceedings.
- [9] K. Hanamura *et al.*, these proceedings.
- [10] J. Takano *et al.*, these proceedings.
- [11] S. Igarashi *et al.*, these proceedings.
- [12] K. Satou, *et al.*, these proceedings.
- [13] M. Tejima *et al.*, these proceedings.