

BEAM PROFILE MEASUREMENT OF THE J-PARC MR RING

Kenichirou Satou^{1,A)}, Takeshi Toyama^{A)}, Hiroyuki Harada^{A,B)}, Yuko Kato^{C)}, Yoshinori Hashimoto^{B)}, Masaki Tejima^{A)}, Dai Arakawa^{B)}

^{A)} KEK/J-PARC

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

^{B)} Hiroshima University

Higashi-Hirosima, Hiroshima

^{C)} JAEA/J-PARC

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

Abstract

Residual Gas Ionization Profile Monitor (IPM) has been installed in the Main Ring synchrotron (MR) of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC). It is for to measure the beam-core profile and also to monitor the beam halo formation. Monitoring the beam halo is necessary on the way to the uncharted beam power of 0.73 MW, because the beam loss originating from the beam halo formation is likely to limit the beam power. Improvement of the signal to noise ratio is essential to measure the beam halo. However, the statistical error due to restricted number of detected ions limits the signal resolution. The simplest way to overcome the difficulty is to average some number of data. The oscilloscope-based data taking system was developed. By using this system, we can quickly average the data on-line even for a several hundreds times and obtain turn-by-turn beam profiles in good resolution.

J-PARC MRのビームプロファイル測定

1. はじめに

大強度陽子加速器施設(J-PARC)[1]では一昨年のリニアック、昨年の3GeV RCSと順次稼動をはじめ、今年5月より最後段加速器である主リング(MR)へのビーム供給が開始された。MRの最終目的は50GeV、0.75MWビーム(36×10^{13} ppp)を素粒子原子核実験施設およびニュートリノ実験施設へ供給することであるが、5、6月の試験では3GeV周回モードで、かつ定格の1/100程度のビーム強度で運転を開始した。

このMWクラスのビームは、すでにシャットダウンしているKEK-PS加速器(8×10^{12} ppp@12GeV)の2桁高いビーム強度である。一方で、加速器の運転上許されるビームロスに機器の放射化を考慮すると0.5W/m以下に限定されなければならない。つまり、KEK-PSと比べて2桁も高い高出力マシンにおいて、同程度のビームロスに抑える運転が要求される。当然そのような精緻なビーム運転には、格段に高いダイナミックレンジをもつビームモニターシステムが必要不可欠である。

本稿では、3種類あるプロファイルモニターのひとつ、残留ガスプロファイルモニター(IPM)について報告する。IPMをはじめとして、フライングワイヤープロファイルモニター(FWPM)、マルチワイヤープロファイルモニター(MWPM)がインストールされている。

図1はMRリングにおけるIPMの位置を示している。現在インストールされているものはV-IPMであり、垂直成分のプロファイルを測定できる。水平成

分のH-IPM2台は製作中である。このH-IPMは直線部(ディスパージョン無し)とアーク部(ディスパージョンあり)にそれぞれインストールされる。

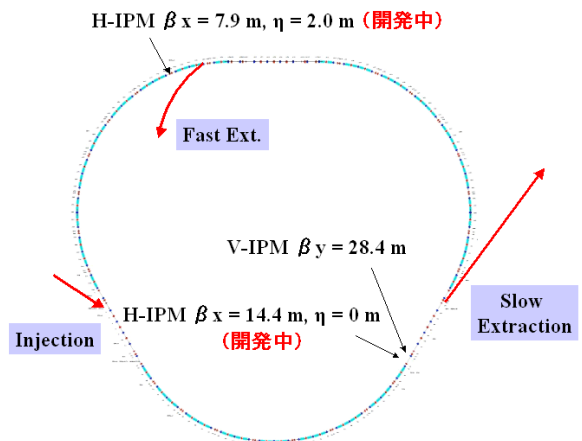


図1 MRにおけるIPMの配置

IPMについての測定原理や必要印加電圧については先に報告[2]があるため参照されたい。ここではMR用IPMの測定要件、現状の全体構成と、データ収集システムについて報告する。

2. IPMに必要なダイナミックレンジ

IPMはビームエミッタンス測定という本来の目的とともにビームハロー測定が期待されている。前章

¹ E-mail: kenichirou.satou@j-parc.jp

で述べたように、J-PARC加速器の特徴は大強度ビームに伴う厳しいビームロス条件である。ビームハロー形勢によるビームロスの増加が0.73MWビーム達成の枷になることが予想されるため、その発生メカニズムの詳細な研究が必要である。

ビームハローの定義は明確とは言い難い。したがって、ビームロスの観点からIPMに要求されるダイナミックレンジを考える。MR周長と0.5W/mのビームロス条件から、運転上許されるロス、定格ビームに対して1.8%(3GeV時)~0.1%(50GeV時)となる。つまり、全加速粒子に対して0.1%以下の分布領域を精度よく観測する必要がある。プロファイルをガウス分布と仮定すると必要なダイナミックレンジは 10^3 レベルと見積もることが出来る。

3. IPMの現状

3.1 全体構成

高真空に保たれている真空ダクト内をビームが通過すると、電離作用により荷電粒子が生成する。チャンパー内部には電極が設置されており、イオン収集のための均一電場(収集電場)が発生する。生成イオンを収集電場により粒子検出器マイクロチャンネルプレート(MCP)へ導く。最大収集電場強度は50kV/130mmである。測定原理については[3]に詳しい。

広ダイナミックレンジの実現には、S/N比の改善が重要である。信号強度を高めるために 10^6 倍という高い信号増幅度をもつMCPを採用している。MCPの有効検出面積は $81 \times 31 \text{mm}^2$ で、電子放出面には32chのストリップアノードを設置している。各々のアノード幅は2.5mmであり、信号強度とともに位置情報が得られる。

MCPには使用に伴う経年変化があるため校正装置として電子源Electron Generator Array (EGA) [4]を設置している。

IPMは電離作用により生成した陽イオンを検出する場合と電子を収集する場合とで2種類に大別することが出来る。電子収集の場合には、収集電場と平行に均一磁場をかけ、磁場の収束効果を利用して正確に電子を収集することが行われている[3]。現状の

IPMではイオン収集が行われているが、将来計画としては磁場を利用した電子収集がある。

3.2 検出イオン数に関する統計誤差

定格ビームが生成するイオンはバンチあたり数万個程度であるが、この内の0.1%に相当する領域(ビームハローを含む)を測定する必要がある。このためビームコアから離れた外縁部で測定する粒子数は数10個に限られる。このため統計誤差が無視できなくなり、単純にMCPのような高増幅素子を使えばよいというわけにはいかなくなる。

この統計誤差を改善するためには以下の方法が挙げられる。

- 1)ビームパルス信号を時間積分する
- 2)IPMチャンパー内にガスを導入し、生成イオン数を増やす
- 3)測定プロファイルを任意周期にわたって平均化処理する

1)の場合は時間分解能を犠牲にする。2)の場合は局部的にガス圧を高める必要があるため、技術的課題が多く困難である。3)の場合は大量のデータを平均化処理しなければならないが、RCSからの入射ビームが長期安定的であったならば、1)のように時間分解能を犠牲にすることなく実効的に統計誤差を減らすことが可能である。100回平均化処理を行えば統計誤差は1/10となり、ダイナミックレンジは格段に改善されることになる。

3.3 信号処理系

図2に信号処理系の概念図を示す。MCPの各アノードに誘起される電荷を同軸ケーブルで帯域50MHzのアンプに入力する。モニターヘッドからアンプ入力までの静電容量は2nFである。アンプの入力インピーダンス(Z_{in})は50、1k、10k Ω 、ゲイン(G)は $\times 10$ 、 $\times 100$ 、 $\times 1000$ で切換可能であり、定格出力は10Vである。現在は $Z_{in}=1\text{k}\Omega$ 、 $G=100$ である。アンプには生信号出力とともに入力32ch分の時間積分信号をマルチプレクスしたプロファイル信号も出力される。

アンプ入力が高インピーダンスであるため、MCPからの電荷は一旦、入力の静電容量2nFに蓄積し、アンプの入力インピーダンス1k Ω で放電する。この

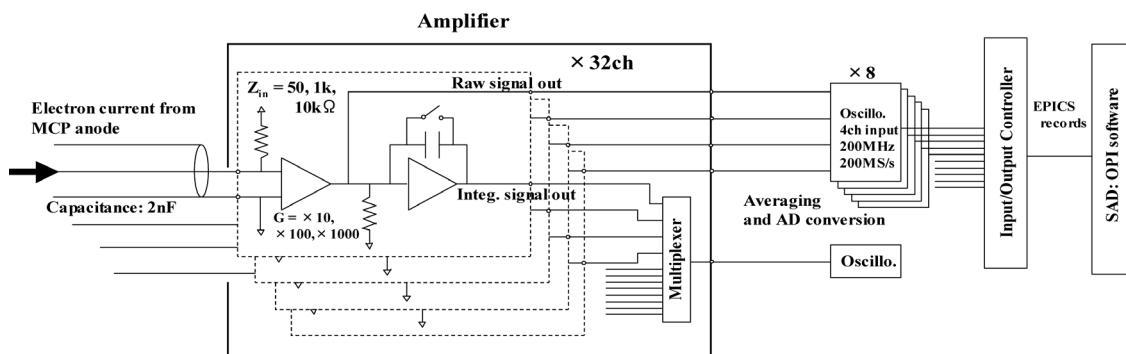


図2 信号処理システムの概念図

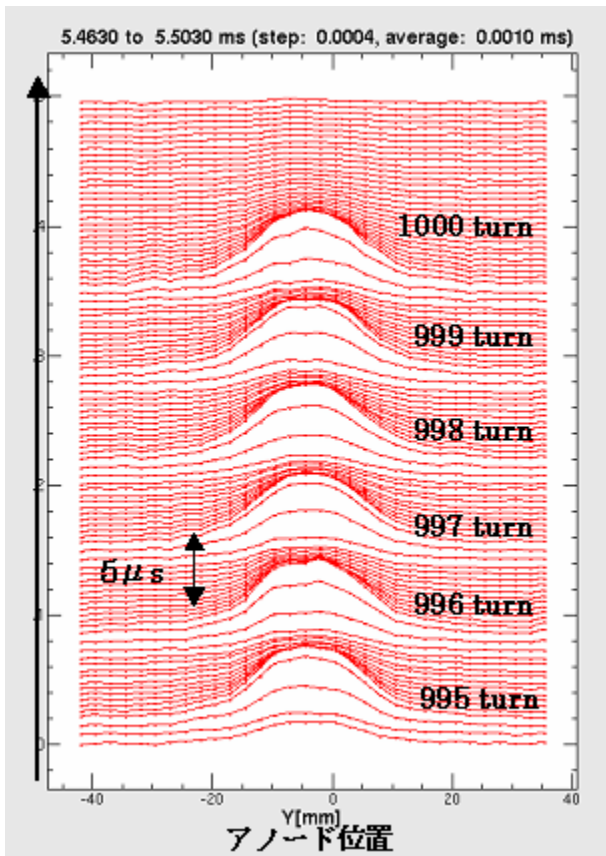


図3 プロファイルのマウンテンプロット
出射直前の様子

ときの放電時間は $2\mu\text{s}$ であるが、ビームバンチの周回時間 $5\mu\text{s}$ とくらべて十分速く、ターン毎のプロファイル測定が可能である。

アンプの出力信号をオシロスコープに入力し、AD変換を行う。帯域：200MHz、サンプリング速度：200MS/s、メモリ：最大8MWの横河製オシロスコープDL1640を採用した。ただし、平均化処理を行う場合、メモリサイズは1MWに限定される。現在の設定では、ビームバンチを測定するためにサンプリング速度を20MS/sに設定している。このため、一度に取れるデータは200ms間のものである。MRの加速周期は3.64sであるため、トリガータイミングを変えることにより任意のターンのプロファイルを測定している。

このシステムでは、平均化処理をオシロスコープで行えるため、大量のデータ（1データセット=1MW×32ch分）を上位計算機にあげる必要がない。

オシロスコープでAD変換されたデジタルデータはInput/Output Controller (IOC)を介し、EPICSレコードとして上位計算機に登録される。EPICSレコードはSADで作られたOPIソフトウェアで読み込み、表示する。

4. 測定結果

100回平均化処理を行ったプロファイルのマウンテンプロットを図3に示す。横軸はMCPに設置した

アノードの位置を、縦軸は経過時間を示している。平均化処理後のノイズレベルは3mVであり、プロファイル中心の信号レベルは50mVであった。測定時のビーム強度は 4×10^{11} ppbで、真空度は 0.6×10^{-6} Paであった。ビームは、入射後1000ターンしてから入射直線部に設置されたビームダンプへ出射した。測定されたプロファイルにはビームコア部と検出器全体に広がったテール部があることが分かる。ビームコア部の全幅がおよそ40mmであることから、コア部のエミッタンスは約 $14\pi\text{ mm} \cdot \text{mrad}$ である。

5. まとめと結論

J-PARC MR用のIPMについて、その現状について述べ、最初の測定データを報告した。定格の1/100というビーム強度であったがバンチ毎のプロファイルが測定できた。これはオシロスコープを利用したデータ収集システムの構築により、任意回数の平均化処理をオンラインで行えるようになったことが大きい。検出イオン数由来の統計誤差と、高周波ノイズを低減化し、ノイズレベルは3mV程度に抑えることができた。

今後ビーム強度が改善され、アンプのゲインをさらに10倍にした場合、アンプの出力は10V以上となり、アンプのダイナミックレンジをフルに使える。この場合 3×10^3 レベルのダイナミックレンジが期待できるが、プロファイル外縁部の信号強度を選択的に増幅するため、アノード毎にアンプゲインを調整する必要があるだろう。

現状のアンプでは32chのアンプゲインを個別に設定することは不可能であるため、あらたにアンプを開発中である。さらにH-IPMについても開発が進んでおり、本年12月までにインストールする予定である。

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] K. Satou et al., Developments of Residual Gas Ionization Profile Monitors for J-PARC RCS and 50 GeV MR, Proceedings of the 3rd Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Aug. 2-4, 2006
- [3] K. Satou, et al., A Prototype of Residual Gas Ionization Profile Monitor for J-PARC RCS, EPAC'06, TUPCH065.
- [4] ELECTROGENTM, the electron generator array made by BURLE Electro-Optics, Inc., <http://www.burle.com>.