

J-PARC MR の入射ビームプロファイルモニターのアプリケーション開発

A DEVELOPMENT OF APPLICATION ON BEAM PROFILE MONITOR FOR INJECTION BEAM IN J-PARC MR

酒井浩志^{#, A)}, 濱田英太郎^{B)}, 佐藤洋一^{C)}, 橋本義徳^{C)}
Hiroshi Sakai^{#, A)}, Eitaro Hamada^{B)}, Yoichi Sato^{C)}, Yoshinori Hashimoto^{C)}

^{A)} Kanto Information Service Co., Ltd(KIS)

^{B)} KEK, ^{C)} KEK/J-PARC

Abstract

The J-PARC MR injection beam profile diagnostic tools include the following: 10 multi-ribbon beam profile monitors (MRPM) and a beam halo monitor using OTR and fluorescence (OTR/FL) at the injection beamline (3-50BT), an injection multi-ribbon profile monitor (INJ-MRPM) for measuring 100 turns immediately after injection at the injection point of the ring, and a scintillator (SCNT) installed in the MR collimator group to obtain information on the beam halo cut as it orbits. We have been continuously developing applications for measuring and evaluating these diagnostic tools. In recent years, we have been simplifying and speeding up data collection by using an ADC board with an FPGA and a PC oscilloscope. We are also building a user-friendly measurement and analysis environment. This report reports on the latest status of these tools.

1. はじめに

J-PARC MR では、大強度陽子ビームを運用しており、これまでに 750 kW を超えるビームパワーに到達した[1]。このような大強度ビームの特に MR への入射ビームのビームプロファイル診断装置(Fig. 1)について、そのツールの特徴とアプリケーションを紹介する。

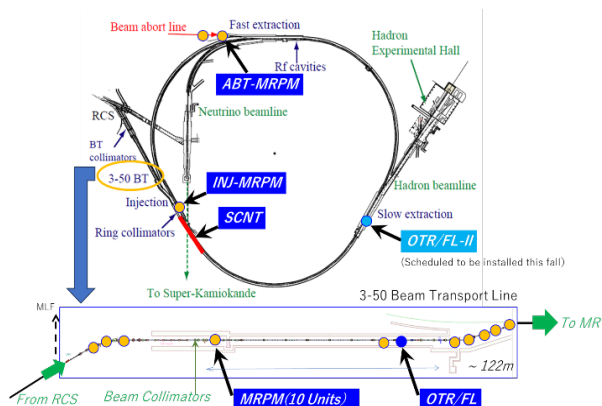


Figure 1: Beam-profile monitor for injection beam in J-PARC Main Ring.

尚、本報告以外にも MR にはこれら以外にも残留ガスモニター[2]、フライングワイヤーモニター[3]がある。

2. 3-50 BT MRPM

2.1 測定方法

ビームターゲットは、厚み 1 μm のグラファイトリボンまたはチタンリボンを、32 または、64 ch 並べたリボンアレイである。陽子ビームの通過により、各リボンではその位置の陽子密度に比例した 2 次電子が放出される。2 次電子

は、リボンアレイと対向する電子収集電極に正電位を印加することで収集され、各リボンでは、電子放出後の正電荷を検出する(Fig. 2)。この正電荷の分布がビームの形状を示す。入射の 3 GeV 陽子では、グラファイト表面から放出される電子数は、入射粒子数の 2.1 %である。

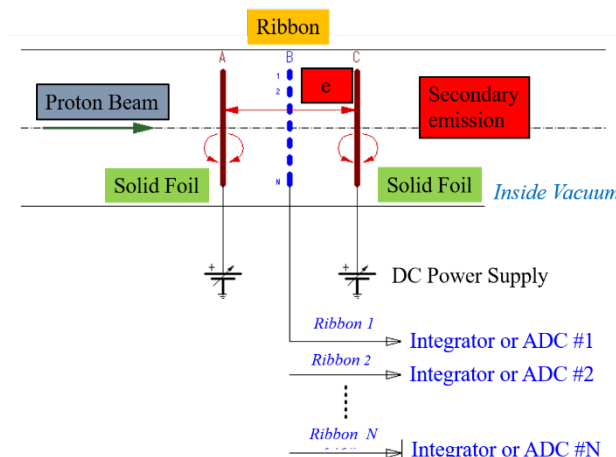


Figure 2: MRPM diagram. The positive charges produced by secondary electrons emission on each ribbon are detected.

2.2 3-50 BT のプロファイルモニター

RCS からの 3 GeV ビームの入射ライン 3-50 BT (長さ約 220 m) には、10 台の 3-50 BT MRPM[4]と 4 章に述べる OTR/FL[5, 6]がある。各 MRPM は基本的に Horizontal(H) 32 ch、Vertical(V) 32 ch のリボンターゲットで構成され、ビーム形状を 10 台同時に測定する。これらのビーム形状と位置情報から入射ビームの診断を行う。

[#] kan-saka@post.j-parc.jp

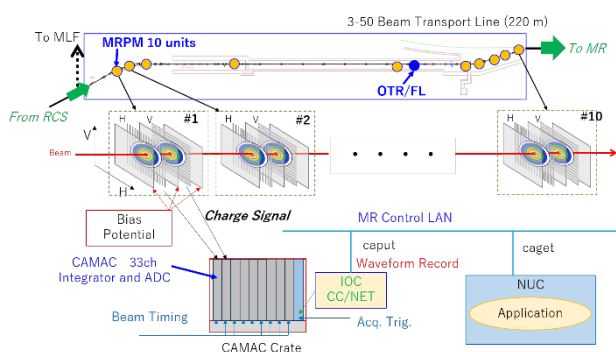


Figure 3: 3-50 BT MRPM DAQ system. Each signal is carried from the tunnel to the local control room via a coaxial cable that aggregates 34 channels of 1.5D. Signal processing is performed by a CAMAC module consisting of 34 channel integrators and ADCs.

2.3 CAMAC ADC

3-50 BT MRPM DAQ システムを Fig. 3 に示す。D1 ローカル制御室の CAMAC モジュール群は、1980 年代の KEK つくばキャンパスの 500 MeV 陽子ビームライン (中性子中間子ビームライン) のビームプロファイルモニターで使用されていたものの再利用である。J-PARC MR のビーム開始の 2008 年より継続して使用している。

Figure 4 に CAMAC モジュールとネットワーククレートコントローラ CC/NET での信号処理タイムチャートを示す。

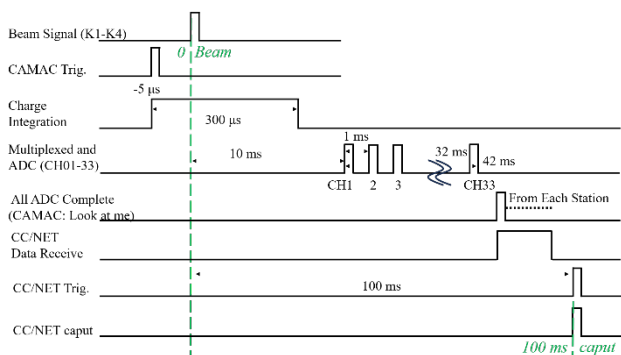


Figure 4: Time chart of signal processing by CAMAC integration and ADC module and CC/NET.

MR への入射は K1~K4 の 4 バッチ入射であり、バッチ間隔 40 ms、また各バッチは 2 バッチ構成で約 600 ns のバッチセパレーションである。CAMAC モジュールの積分器の積分時定数は 30 μs であり、ノイズ平均化のために 300 μs の積分処理を行う。また積分開始前に Auto Zeroing 機能をもつ。長い積分時間で 2 バッチのビーム信号を識別できないため、通常はシングルバッチ入射で測定する。積分信号は、マルチプレクサで 1 ms 間隔でチャンネルを切り替えて 12 bit ADC でデジタル化される。33 ch 全ての処理が完了すると CAMAC の Look At Me 信号が出され、CC/NET で各モジュールの 33 ch 信号が waveform データに変換される。CC/NET(Linux OS)には EPICS が搭載されている。ビーム入射後 100 ms の時刻に CC/NET にトリガーが送られ、このタイミングで EPICS caput で各 waveform レコードが制御ネット上の

EPICS にプロセスされる。このように信号処理には 100 ms 程度の時間を要することから、4 バッチのうち 1 バッチ (かつシングルバッチ) でのプロファイル計測しか実行できない。

2.4 ビームプロファイル解析アプリケーション

このアプリケーションでは、3-50 BT MRPM 10 台の各ターゲット H, V (標準は各 33 ch) の計 20 個の waveform レコードデータを取得(caget)し、解析は CERN ROOT 上でオンライン処理を行う。Beam Shot Number レコードの更新と同時に 20 個の waveform レコードが CERN ROOT の 1-D hist.に格納される。これらのデータはプロットされ、各々の Gaussian like な波形形状から Bias, Peak, Center, Sigma の初期値を得る。この初期値を入れた”Bias + Gaussian”の Fitting を行い、元のプロファイルに Fitting の結果を合わせてプロットする(Fig. 5)。その解析結果と画面の画像データをサーバーに保存する。ユーザーは、元の epics waveform データとこれらの Fitting データを共有できる。

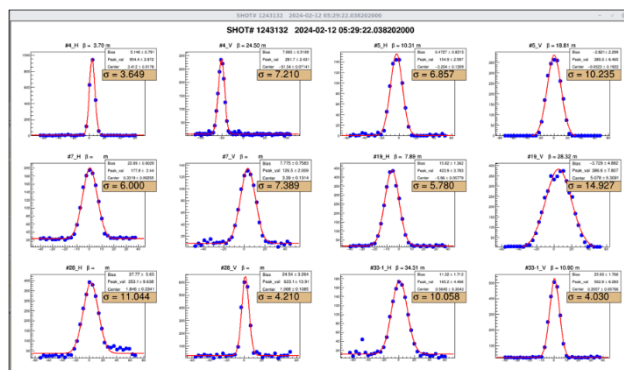


Figure 5: 3-50 BT MRPM analysis display (some of them).

2.5 新しい DAQ システムへの移植

現行の CAMAC システムでは上述の問題、すなわち老朽化、入射の 4 バッチのうち 1 バッチしか測定できないこと、1 または 2 バッチをまとめて積分した電荷量しか取得できないことがある。これらを克服して、4 バッチ、計 8 バッチのプロファイルを計測するために、ABT-MRPM で実績のある Cavalier (6 節参照) [7]を用いたシステムへの移行を準備している。さらに、現行 CAMAC システムで各モジュールの INPUT に抵抗分割型の Attenuator をビーム強度に合わせて交換してきたが、台数とチャンネル数も多いことから、これも ABT-MRPM で使用を開始した Remote 64 ch Attenuator (64 ch ATT)を導入する。

2.6 Cavalier[7]

Cavalier は、検出器からのアナログ電荷信号を差動入力し、250 MS/s で 12 bit のデジタル信号に変換する 16 ch モジュールであり、J-PARC Neutrino Beam Line のプロファイルモニターのために開発された。汎用性が高いため本モニターでも採用させていただいた。特徴は、FPGA を搭載した ADC モジュールであり、常時 16 ch のアナログ信号を A/D 変換し、FPGA 内に構成されたリングバッファに一時格納しており、トリガーにより最大 2048 Sample のデータを SiTCP で LAN 上の PC に転送することである。そのサイズは 6U の VME モジュールサ

イズである。VME ソケットから+5 V の電源電圧を給電するのみでデータベースは使用しない。主要スペックを Table 1 に示す。表中 ESM とあるのは、Neutrino のオリジナルのモジュールの仕様、HALO とあるのは MRPM の仕様である[8]。3-50 BT MRPM では、入射の 4 バッチ間隔が 40 ms であり 25 Hz サイクルでデータを取得する必要がある。トリガーサイクルを変えて 500 Hz の繰り返しまで対応できることをテストベンチで確認した。

Table 1: Main Specification

	ESM	HALO
Channel	16 ch	
Input Range	±1000 mV	±50 mV
Gain	1	20
Sampling Freq.	Variable(MAX 250 MS/s)	
Sampling Time	Variable(MAX 8.2 μs @250 MS/s)	
Sampling Num.	2048	
LPF	125 MHz	3 MHz

2.7 Remote 64 ch Attenuator

64 ch ATT(カイズワークス KL2016 [8, 9])は、64 ch の個別減衰器(ATT)を持ち、各 ch で-20 dB, -40 dB, Thru, 50 Ω の切り替えを IOT モジュール XPort [10]経由で設定できる。ATT 部は、TE 社の RF スイッチ HF3 を用いることで低インサクションロス化を図ると同時に広帯域化も得た[8]。またモジュールのシャーシには、最大 4 枚の Cavalier を挿す VME スロット(電源+5 V 供給)を持つ。

3. INJ-MRPM

INJ-MRPM は、リングに設置された唯一の MRPM で、3-50BT と MR の合流地点に設置されており、入射ビームと周回ビーム両方を検出することができる。周回ビームは 100 turn 以下のビーム取出しで運用している[11]。

測定例を Fig. 6 に示す。強度 2.1×10^{13} proton/bunch のビーム入射から 20 turn のプロファイルを解析している。各周回でのバンチ形状、重心位置、サイズが表示されている。グラフィトリボンによる多重散乱でのビーム広がり、100 turn で 10 %程度である。このように、入射ビームの形状評価と入射マッチングに情報を提供している。

この解析アプリケーションを説明する。INJ-MRPM では、6 台の 4 ch オシロスコープで 125 MS/s の 8 bit データを取得し、オフラインで Linux PC の CERN ROOT で解析を行っている。データは、2-D Hist.に置かれ、これが空間と時間波形のデータテーブルとなっている。このテーブルから水平方向・時間、垂直方向・時間といった空間・時間のコンターグラフを作成する。さらに、周回毎の Bunch スライスを行い、各バンチ波形のコンターグラフを作成する。この Bunch データを空間軸へ射影し、Gaussian フィットを行い、各周回時刻でのバンチ重心位置とバンチサイズを得ている。現在は、5 章で述べる PicoScope[12]での測定とオンライン解析を開発している。PicoScope での高速なデータ収集機能とオンライン解析を行い、その解析に EPICS IOC となる PC を用いること

で、入射バンチ情報を EPICS レコードとして共有できる。

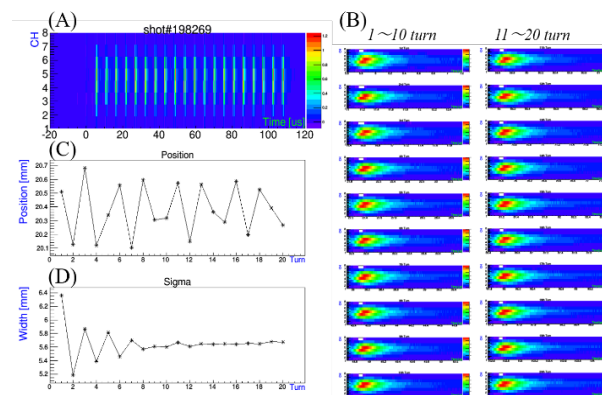


Figure 6: INJ-MRPM analysis display. (A) Time data of horizontal direction, (B) sliced bunch shape at each circulating time, (C) bunch center position, (D) bunch size.

4. OTR/FL

4.1 OTR/FL

OTR/FL(Optical Transition Radiation/Fluorescence) モニター[5, 6]は 3-50 BT に設置されている高感度の 2 次元プロファイルモニターであり、ダイナミックレンジは 6 桁と広く、ビームコアからハローまでの形状を 2 次元で診断することができる。ターゲットは、OTR 用チタンフォイルと 4 方向アルミナスクリーンを組み合わせて構成され、ビームコアはチタンフォイルからの OTR により、またビームハローは周辺部の 4 枚のアルミナスクリーンからの蛍光 (FL)により検出される(Fig. 7)。ビームコア、ビームハロー単体測定とそれらの同時測定が可能である。

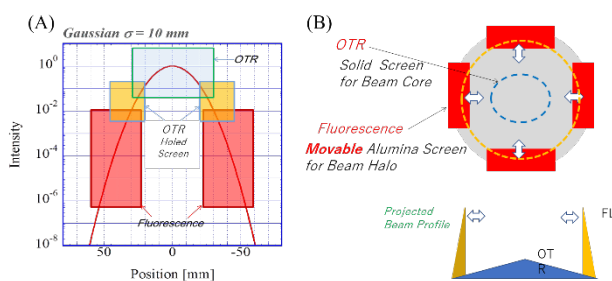


Figure 7: Concept for OTR/FL profile monitor. (A) Coverage of two targets with a Gaussian beam of 1×10^{13} protons with σ 10 mm. (B) Front view of the targets. The alumina targets can be positioned.

4.2 制御・測定システム

Figure 8 に OTR/FL の制御・測定システムを示す。制御と測定は、小型 PC のサバ太郎[13]で行う。サバ太郎は LAN ポートを 2 つもち、PORT#0 は制御 LAN に、PORT#1 はトンネル内 OTR/FL 機器の LAN に接続されている。尚、このシステムのサバ太郎は EPICS IOC ではない。サバ太郎の制御と測定の実アプリケーションのライブラリは、制御 LAN 上のサーバーに置かれ、リンクして使

用する。PORT#1 の OTR/FL 機器側の LAN には、機器の電源、測定用 CMOS カメラ、イメージンテンシファイア(I.I.)、カメラと I.I.のタイミングを出力する F.G.がある。

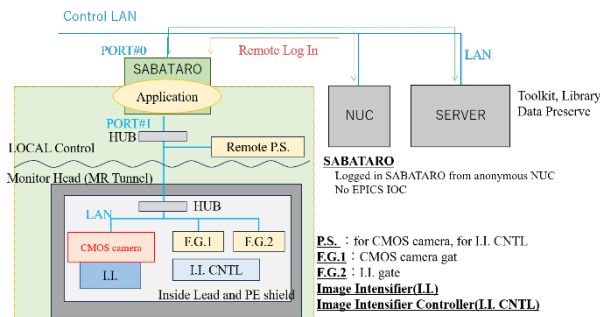


Figure 8: OTR/FL's control and measurement system.

4.3 OTR/FL アプリケーション

このアプリケーションは、制御と測定、解析の機能がある。制御は機器の電源供給、CMOS カメラの設定、I.I.のゲイン設定、カメラと I.I.のトリガーとビームゲートの設定がある。測定では OTR/FL ターゲットで発生した光プロファイルを高速ゲートを掛けた I.I.で増幅し、CMOS カメラで撮像する。カメラのデジタルデータを転送し、制御 LAN 上のサーバーに保存する。

4.4 解析処理

サバ太郎では、サーバーに保存した光画像 12 bit バイナリデータを読み出し、アスキー変換して3次元データテーブル(CERN ROOT 2-D Hist.)に値を格納する。BG データを使用する場合は、同様の BG データ用 2-D Hist.に、取得データと BG の差分を格納する。

ビームプロファイル

2-D Hist.上で ROI(Region of Interest)の区間で X 軸、Y 軸へそれぞれ射影する。射影データは 1-D Hist.に格納され、このカーブから Bias, Peak, Center, Sigma の初期値を得て、"Bias + Gaussian"で Fitting を行う。Fitting した結果は測定画面の射影データにプロットする。

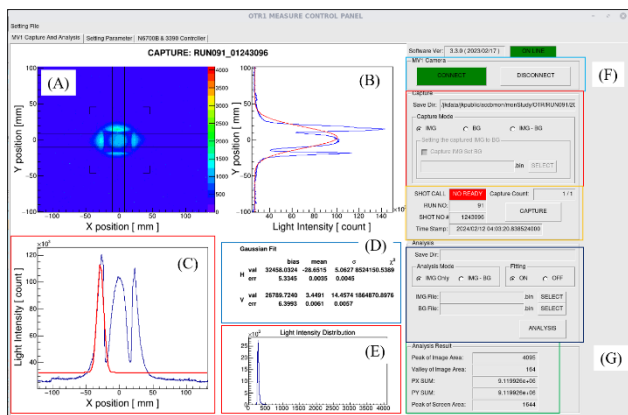


Figure 9: Measurement Panel. (A) Beam Image, (B) Vertical Projection, (C) Horizontal Projection, (D) Fitting Results, (E) Pixel Intensity Histogram, (F) Capture Property, BG selection, and (G) Areas, Max-, Min-pixel.

輝度ヒストグラム

生データ用 2-D Hist.での各 pixel の ADC データの度数分布を作成しプロットする。この輝度分布は I.I. ゲインの適正化の指標となる。

解析結果

OTR と FL の同時計測を行った測定例を Fig. 9 に示す。一連のデータと画像はサーバーに保存される。

5. MR コリメータ群シンチレータ

5.1 MR コリメータ群シンチレータ

リング入射部の MR コリメータ群には、計 10 台の PMT(SCNT)が設置されており、PMT 単体またはプラスチックシンチレータを付けて運用されている[14]。バンチごとのビームハローカットの信号を取得することができる。これまではオシロスコープで取得した時間波形データから BG を差し引き、オフラインでの解析を行ってきた[14]。8 バンチ個々の周回ごとのロスオンラインで評価するための計測システムを、安価な PC ベースのオシロスコープである PicoScope 5444D MSO[12]を用いて開発している。

5.2 PicoScope を用いた計測システム

PicoScope のデータ収集には Pico Technology 社の API(Application Programming Interface)[15]を使用する。測定は次の流れである。PC から USB3.0 で接続した PicoScope デバイスを開き、デバイス設定の構造体でトリガーと転送データの格納バッファ設定を行う。次に RunBlock コマンドでデータの取得方法 (Block, Rapid Block, Streaming)を指定し取得を開始する。取得完了時に IsReady ステータスが返り、同時に GetValues コマンドで PC メモリにデータを Binary 転送する。

テストベンチでの試験では Table 2 のデータ条件において、最速で 900 ms 程度の時間でデータ取得を行うことができた。内訳としては、IsReady までが 300 ms 程度、GetValues で 600 ms 程度、Binary データのファイル保存はほとんど無視できる時間であった。将来 MR のパルスサイクルは、1.16 s を予定しており、連続パルスでのデータ取得が可能である。

Table 2: DAQ Test Parameters

Sampling Rate	62.5 MS/s (16 ns cycle)
Data Size	1.92 × 10 ⁷ sample × 2 byte × 4 ch/unit/shot
	*acquisition length=300 ms

5.3. SCNT のためのデータ解析アプリケーション

SCNT のためのデータ解析では、各 turn の 8 バンチの各 PMT 信号の面積から BG データを差し引きした正味の PMT 信号面積をバンチごとに算出処理を行うことが基本となる(Fig. 10)。PicoScope で取得した binary データをアスキー変換して配列に格納する。PMT 信号のない部分で BG データの平均値を算出する。次に PMT バンチ信号の積分値から BG データ部分を減算し、全 56600 turn (入射後 300 ms 区間)についての各バンチ信号の正味の積分値のテーブルを作成し、binary ファイルに保存する。テストベンチでは Table 2 のデータでの処理

時間は 900 ms 程度であり、これも将来の 1.16 s MR サイクルでの連続パルスでの解析処理も可能である。実用化においてはデータ取得とデータ解析を連続で行い、ファイル保存のプロセスは行わず、PC のメモリ上で解析処理を行う。またデータ取得とデータ解析は、マルチスレッド処理とすることが効率的であると考えている。

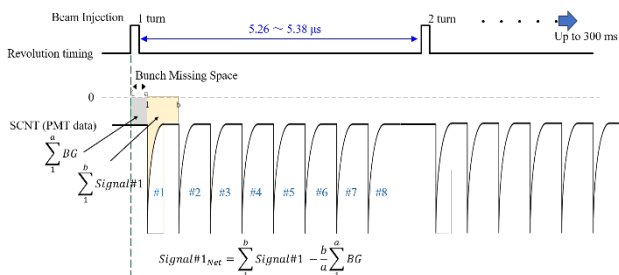


Figure 10: SCNT data operation scheme.

6. ABT-MRPM

6.1 ABT-MRPM

ABT-MRPM(#23[8, 16], #75)はMRのアボートビームライン(Fig. 11)にある。入射時刻のみならず任意の加速時刻にリングから周回ビームを取り出すことで、その時刻のビーム形状を評価することができる。

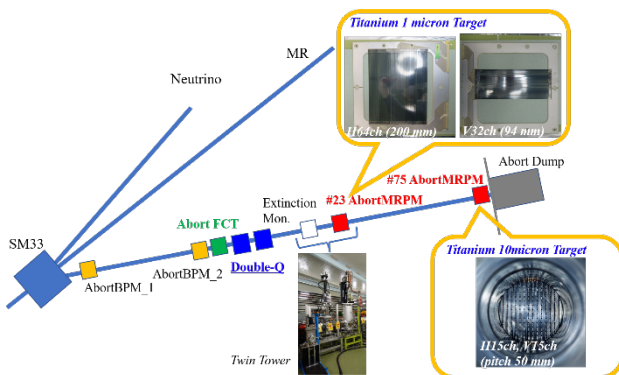


Figure 11: MR abort beamline and beam monitors.

6.2 データ収集システム

ABT-MRPM のデータ収集システムを Fig. 12 に示す。2 次電子の電荷信号は、Attenuator で信号レベルを調整して 16 ch ADC モジュールである Cavalier (2.6 節参照) でデジタル信号となり、SiTCP により IOC サバ太郎に転送されて EPICS レコードとなる。EPICS 上では、他の解析に必要なビーム信号のレコードと合わせて cadump(データのパック)が行われ、ショット毎にアーカイブされる。本解析アプリケーションではこの cadump ファイルを unpack して解析を行う。

また現在、Remote 64 ch ATT (2.7 節参照) への移行中であり、今後遠隔で ATT 値の設定ができるようになる。

6.3 解析アプリケーション

解析処理は、CERN ROOT 上で行われる。まず必要な各チャンネルの条件(BG データ、ATT データ、SWAP データ、ターゲットリボン幅)をデータベースから読み込

む。SWAP はリボン ch と Cavalier ch の対応表である。

これらと cadump ファイルを unpack した ABT-MRPM の shot データから各リボン ch での単位幅あたりの 2 次電子電荷量を算出して 2-D Hist. に格納する。格納したデータを空間軸へ射影(全 8 バンチ)、時間軸への射影を行い、さらにバンチ毎の時間でスライスして空間軸への射影を行う。射影データはそれぞれの 1-D Hist. に格納され、その波形カーブから得た Bias, Peak, Center, Sigma の値を算出し、これらを初期値として”Bias + Gaussian”で Fitting し、結果をプロットする(Fig. 13)。

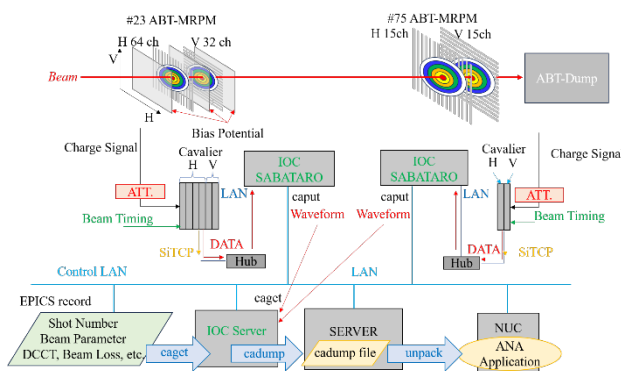


Figure 12: ABT-MRPM DAQ system.

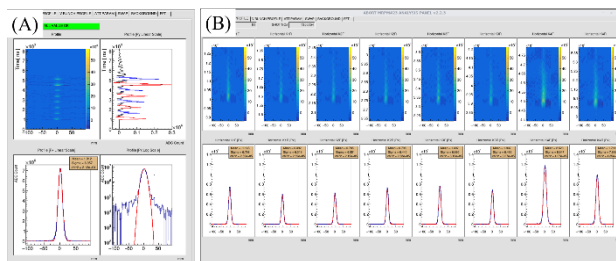


Figure 13: ABT-MRPM analysis display. (a) Horizontal beam profile of eight bunch total, (B) sliced beam profiles of every bunch.

7. まとめ

これまで J-PARC MR の入射ビームのビームプロファイル診断装置を中心に、測定と解析のためのアプリケーション開発を行ってきた。

ビームコミッショニングの高度化と制御機器の環境の進化により、FPGA が搭載された機器を中心にした測定環境が求められている。また PicoScope などの安価な高機能デバイスもポピュラーになってきた。今後も継続して、ビームコミッショニングからの要望の実現を最優先に、高機能でユーザーフレンドリーなアプリケーション開発を進めていきたい。

謝辞

これらの開発においては、J-PARC MR 制御グループの山田秀衛氏、ビームコミッショニンググループ、ビームモニターグループから多くの貴重な助言を頂いた。

参考文献

- [1] T. Yasui *et al.*, "Resonances in J-PARC MR and future strategy", PASJ2024, Yamagata, Japan, Aug. 2024, In these Proceedings, 2024, WEP088, this meeting.
- [2] K. Satou *et al.*, "MERITS OF PULSE MODE OPERATION OF RESIDUAL GAS IONIZATION PROFILE MONITOR FOR J-PARC MAIN RING", Proc. of IBIC2022, Kraków, Poland, pp.434-437.
<https://accelconf.web.cern.ch/ibic2022/papers/wep21.pdf>
- [3] Igarashi *et al.*, "FLYING WIRE BEAM PROFILE MONITORS AT THE J-PARC MR", Proc. of IBIC2012, Tsukuba, Japan, pp. 527-530.
<https://accelconf.web.cern.ch/IBIC2012/papers/tupb78.pdf>
- [4] Y. Hashimoto, *et al.*, Proc. HB2010, Morschach, Switzerland, Sep. 2010, WEO2A01, pp. 429-433.
<https://accelconf.web.cern.ch/HB2010/papers/weo2a01.pdf>
- [5] Y. Hashimoto *et al.*, "A Development of High Sensitive Beam Profile Monitor Using Multi-Screen", Proc. IBIC2013, Oxford, UK, Sep. 2013, pp. 338-341.
<https://accelconf.web.cern.ch/IBIC2013/papers/tucl2.pdf>
- [6] Y. Hashimoto *et al.*, "Two-Dimensional And Wide Dynamic Range Profile Monitor Using OTR /FluorescenceScreens For Diagnosing Beam Halo of Intense Proton Beams", Proc. of HB2014, East-Lansing, USA, Nov. 2014, pp. 187-191.
<http://accelconf.web.cern.ch/HB2014/papers/tuo2ab04.pdf>
- [7] 濱田英太郎, "T2K 実験における陽子ビームモニタ用読み出し回路の開発", 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018. <https://openit.kek.jp/project/fadc250>
- [8] Y. Hashimoto *et al.*, "A MULTI-RIBBON BEAM PROFILE MONITOR IN A BEAM DUMP LINE OF J-PARC MR", Proc. of PASJ,FRP013, 2022, Oct18, pp.931-935.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FRP0/FRP013.pdf
- [9] <http://www.kaizuworks.co.jp/>
- [10] <https://www.lantronix.com/products/xport/>
- [11] T. Yasui *et al.*, "Transverse emittance growth caused by space-charge-induced resonance", PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS 23, 061001 (2020).
<https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.23.061001>
- [12] <https://www.picotech.com/oscilloscope/5000/flexible-resolution-oscilloscope>
- [13] https://www.pinon-pc.co.jp/hp/?page_id=102
- [14] K. Kadowaki *et al.*, "EVALUATION OF BEAM HALO CUTTING WITH COLLIMATORS BY SCINTILLATOR DETECTORS", Proc. PASJ2023, FRP06, Funabashi, Japan, Aug. 2023, pp. 830-834.
- [15] <https://www.picotech.com/download/manuals/picoscope-5000-series-a-api-programmers-guide.pdf>
- [16] K. Sato, "Development of a Multi-Ribbon Prole Monitor in a beam dump line of J-PARC MR", MA theses, UTokyo, Tokyo, Japan, 2020.