

J-PARC RCS におけるビームモニタ用新信号処理システムの開発

DEVELOPMENT OF NEW DATA ACQUISITION SYSTEM FOR SEVERAL BEAM MONITORS IN J-PARC RCS

吉本政弘^{#, A)}, 高橋博樹^{A)}, 原田寛之^{A)}, 地村幹^{A)}, 不破康裕^{A)}, 林直樹^{A)},
栗山靖敏^{B)}, 澤邊祐希^{C)}, 畠山衆一郎^{C)}

Masahiro Yoshimoto^{#, A)}, Hiroki Takahashi^{A)}, Hiroyuki Harada^{A)}, Motoki Chimura^{A)}, Yasuhiro Fuwa^{A)},
Naoki Hayashi^{A)}, Yasutoshi Kuriyama^{B)}, Yuki Sawabe^{C)}, Shuichiro Hatakeyama^{C)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency, J-PARC center

^{B)} Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University

^{C)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

Abstract

In the J-PARC 3GeV synchrotron accelerator (RCS), a new signal processing system for beam monitors is developing to replace the existing system for the main beam monitors that monitor the stability of the accelerator: beam loss monitor, beam position monitor, and beam current monitor. The new system will consist of a TAG server and an ADC module that can be used commonly for the three main monitors. The main design concepts of the new system are: 1) the TAG server divides various beam J-PARC tag information to each ADC module, 2) the ADC module converts acquisition data from beam monitors to digital signals by ADC and performs high-speed analysis by FPGA with switching analysis methods to suit each monitor, 3) the ADC module periodically outputs the analysis data with tag information by packing the signal processing data of all shots for about 10 seconds, and also outputs any one shot data on-demand, and 4) the raw waveform data, the latest four shots of FFT-related data in the process of analysis and bunch data for each cycle are stored in the internal memory of the ADC module, and the data can be read out as needed. In this presentation, we will report on the progress of the data acquisition test of tag information reading and beam monitor signals using the prototype under development.

1. はじめに

J-PARC 3GeV シンクロトロン加速器(RCS)は、物質・生命科学実験施設(MLF)と 50GeV シンクロトロン加速器(MR)に陽子ビームを供給するプロトンドライバーである[1, 2]。RCS では、MLF と MR との間で異なるビーム条件で加速し、ビーム取り出し後に両施設に振り分けて供給することで、J-PARC の特徴である多目的利用を実現している。この多目的利用を安定的に維持・管理するためには、ショット毎のビーム状態を監視・分析するビームモニタのデータセット群の同期と共にビーム行先を含めた運転条件と連動が必須である。そこで、主要モニタとしてビームロスモニタ(BLM) [3]、ビーム位置モニタ(BPM) [4]、ビーム電流モニタ(DCCT および SCT) [5]について、リング型のリフレクティブメモリ(RFM) ネットワークを採用した同期データ取得システムを構築している[6-8]。

RCS の主要モニタ BLM, BPM, DCCT および SCT で使用している信号処理回路は設計から 15 年以上も経過している。また、モニタ毎に異なる設計であるため、故障対応や予備品管理が困難になりつつある。さらに大幅に技術革新が進んだ現在からみると、解析に時間がかかる、保存データ点数が少ない等の機能の陳腐化が顕著になり、ビームコミッショニングの弊害になっている。同様に、同期データ取得システムについても現行システムは開発から 10 年以上が経過しているため、経年劣化への対策が必要である。また、RFM のメモリサイズは 128MB となっており、それ以上のサイズの同期データへの対応が

[#] yoshimoto.masahiro@jaea.go.jp

難しい。そこで、これらの課題を解決に向けて、新しいビームモニタ用信号処理システムの開発を進めることにした。

2. 新信号処理システムの開発

2.1 基本的な設計思想

新しい信号処理システムでは、近年、急激に進歩している FPGA(Field Programmable Gate Array)を採用し、高速 ADC と組み合わせることで、オンラインでのデータ解析の実現を目指した。また、各モニタに必要な解析手法を内装し、接続するモニタに応じて切り替える方式を採用することで、共用デジタイザとして開発を進めた。

本システムの基本コンセプトは、リフレクティブメモリに代わってデータ同期の機能を司る「TAG サーバー」と、各モニタ信号を解析するためのデジタイザ部である「ADC モジュール」とに機能を分離することである[9]。Figure 1 に、システム構成の概念図を示す。タイミング情報とモニタデータの基本的な流れは次の通り。

- (1) J-PARC に特有の様々なビームタイミング情報を TAG サーバーで集約し、TAG 情報として各 ADC モジュールに分配する。
- (2) ADC モジュールでビームモニタからの信号情報を ADC でデジタル信号に変換し、FPGA により各モニタに合わせた解析手法を切り替えながら高速解析処理を実施する。
- (3) ADC モジュールで解析処理済みのデータに、TAG 情報をヘッダファイルとして付加して出力する。

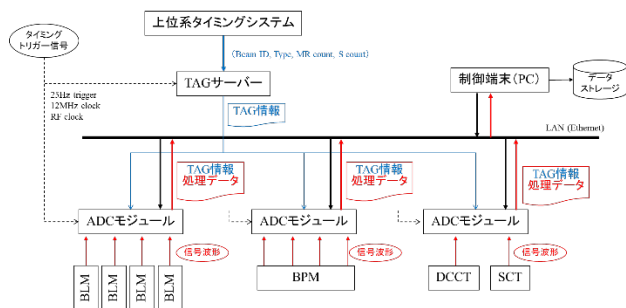


Figure 1: Schematic diagram of system configuration.

2.2 TAG サーバー

「TAG サーバー」では、J-PARC の上位系タイミングシステムから提供されるタイミング情報を整理し、各「ADC モジュール」に TAG 情報として供給する。タイミング情報には「ビーム ID」、「タイプ」、「MR カウント」、「S カウント」の 4 つ。「ビーム ID」はショット番号で 25 Hz 毎にカウントアップする。「タイプ」はビームの行先を示す情報。「MR カウント」は 25 Hz でカウントアップし、MR 周期毎にリセットされる。「S カウント」は MR カウントがリセットされるごとに 1 つずつカウントアップする (Figure 2 参照)。TAG サーバーで整理された TAG 情報は TTL 信号として、ADC モジュールに供給されるが、その際、FANOUT モジュールで分配することも、ADC モジュールからカスケード接続にて共有することも可能となっている。

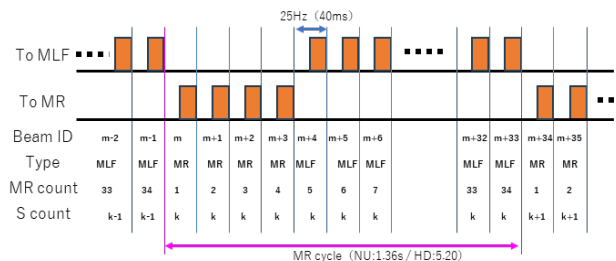


Figure 2: Timing information image.

また、TAG 情報には、ADC モジュールに対する「コマンド情報」も含まれており、後述する二つの LAN ポートからの出力指示を発行している。最終的な TAG 情報のデータフォーマットは Fig. 3 に示す通り、スタートマーク、32bit の「コマンド情報」、32bit の「S カウント」、32bit の「ビーム ID」、10bit の「MR カウント」、8bit の「タイプ」、14bit の予備で構成している。

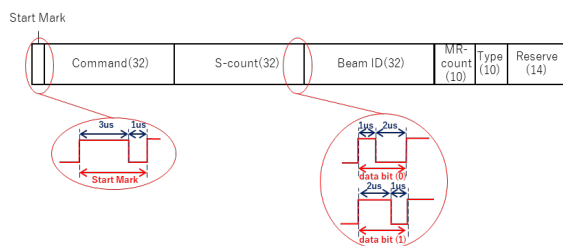


Figure 3: Data format of Tag information.

2.3 ADC モジュール

「ADC モジュール」では、各モニタからの波形信号を解析し、TAG サーバーから供給された TAG 情報をヘッダ情報に加えて、ファイル出力する。データ解析は、各モニタに合わせて、次の 4 つの解析手法を切り替えて実施する。

- (1) BLM モード:
BLM 信号を 0~20 ms の期間で、1 ms 毎に積分した 20 点の値をビームロス信号として出力する。
- (2) BPM モード:
BPM 信号を 0~20 ms の期間で、1 ms 毎に最初の 4096 点を抽出し、FFT 処理信号からビーム位置に変換した 20 点の値を COD 中心位置信号として出力する。
- (3) BPM-d モード:
BPM 信号を RF クロック信号のタイミングで切り出したターン毎の信号ピークからビーム位置に変換した約 30,000 点の値をターン毎のビーム重心位置信号として出力する。
- (4) CT モード:
DCCT および SCT 信号を 0~20 ms の期間で、1 ms 毎にピックアップした値をビーム強度信号として出力する。

データ出力には 2 つのフォーマット「解析データ」と「モニタデータ」を定義している。「解析データ」フォーマットは、25 Hz 全ショットのデータを保存するモードである。ただし、ネットワークに対する負荷低減の観点から、S カウントの整数倍 (おおよそ 10 秒周期) のデータ群を一つのファイルにフレーミングして出力する方式とした。しかし、この場合、ビームコミッションの様にすぐにデータが欲しい場合には適していない。そこで、MR カウントの任意のタイミングの解析データを S カウント毎に出力するための「モニタデータ」を追加した。設定する MR カウントのタイミングをビームコミッションで使用する 1 ショットリガーのタイミングに合わせることで、オンデマンドで解析データを取得することが可能となる。

データ出力はイーサネット (LAN) を介して転送される。プロトコルには、高エネルギー物理学実験に典型的な多チャンネル高速データ収集システム用に開発された SiTCP を使用している [10]。ここでは、高速データ転送の可能な TCP ポートと、メモリアクセスと同様の低速の UDP ポートの 2 つの LAN ポートを有しており、TCP ポートにオンデマンドでのデータ取得に対応する「モニタデータ」を、UDP ポートにはフレーミングした全ショットデータ群をおおよそ 10 秒周期で出力する「解析データ」に割り当てている。

更に、ADC モジュール内部のメモリには、直近 4 周期分の生データや FFT 解析データ等を保存している。またバンチデータに関しては直近の 256 周期分が保存されている。トラブル等でビームが止まった際に、この内部メモリのデータを取り出すことで、より詳細な原因分析に繋げるようにしている。

2.4 試作機の開発

上記の設計思想を基に新信号処理システムの試作機を開発した。Figure 4 に開発した TAG サーバーおよび

ADC モジュールのフロントパネルの写真を、また主要特性を Table 1 にまとめた。

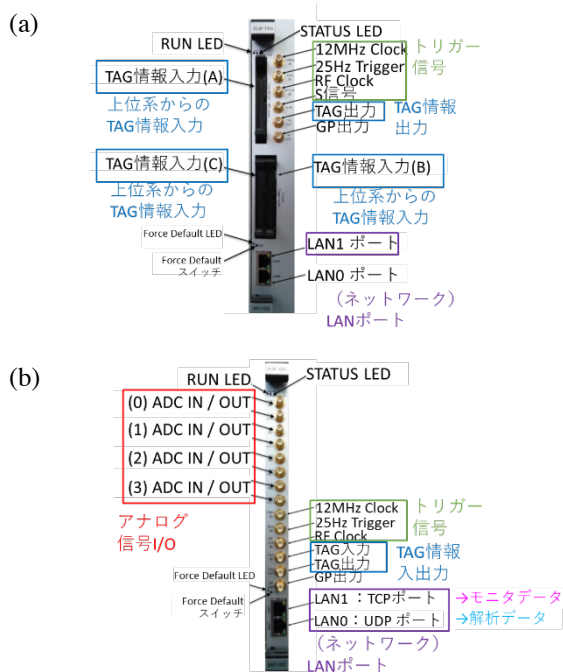


Figure 4: Front panels of new data acquisition system modules. (a) TAG server, (b) ADC module.

Table 1: Main Specification of New Data Acquisition System

	TAG server	ADC module
Size	VME 2U	VME 1U
ADC	—	AD9653BCPZ-125 (125 Msps, 16bit, 4ch)
FPGA	SC7K160T-2FFG6761 (Kintex-7, 676pin)	
Flash memory:	S25FL128SAGNF1000 (128Mbit)	
Memory	DDR3 SDRAM 16M x 16bit x 8 Banks (2Gbit) 400 MHz	
LAN port	LAN1: SiTCP (TCP port) LAN0: RBCP (UDP port)	

TAG サーバーのタグ情報入力、ADC モジュールのアナログ信号入出力の他に、双方にトリガー信号入力として以下の信号入力を設けている。12 MHz の基準クロック、25 Hz のタイミングトリガー、周回ビームを参照するための RF クロック。また、TAG サーバーには S カウントリガーも取り込んでいる。

アナログ信号入出力およびトリガー信号入力の取り合いは SMA コネクタ、タイミング情報入力は MIL コネクタ、

LA ポートは RJ45 コネクタ (2 ポート) となっている。入力/出力インピーダンスは 50 Ω、信号レベルは 12 MHz の基準クロックのみ Fast NIM レベルで、それ以外は TTL レベル。

基板サイズは VME ボードに合わせており、+5V、+12V を VME ラックから供給しているが、VME バス規格には準拠しない。(バスを介した信号の伝達はしない。)

3. 性能評価試験

試作機完成後、工場での試験検査、J-PARC サイト内でのオフライン動作確認試験を経て、RCS の実機に組み込んで新信号処理システムの性能評価試験を実施した。今回はセル 14 および 15 に設置している 4 台の P-BLM (C14P01, C14P02, C15P01, C15P02) の信号を接続し、BLM モードによる解析手法の性能評価試験を実施した。Figure 5 に試験時に設置したモックアップの様子を示す。P-BLM の波形信号をアッテネータ (24dB) で減衰させて ADC モジュールに入力した。また、データ収集は利用運転中に実施した。

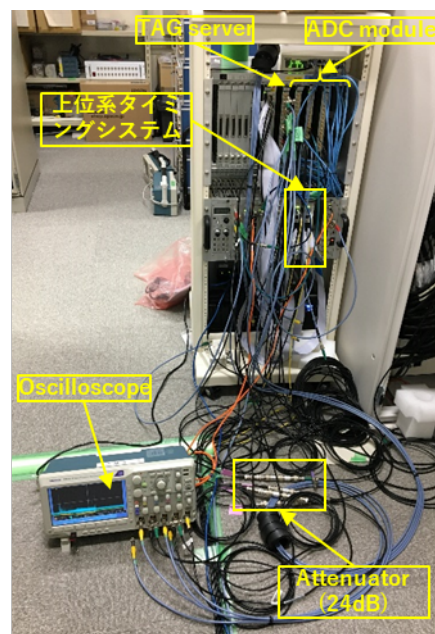


Figure 5: Setup for performance evaluation tests.

3.1 アナログ信号の評価試験

まず初めに、ADC モジュールの信号入出力の前後で波形信号をオシロスコープで取り込んで比較した結果を Fig. 6 に示す。上段がオシロの波形を比較したものとその差分、下段が入力信号と出力信号の相関を見た結果である。RCS におけるビームロス構造は、入射直後に大きくロスが発生するが、その後加速と共にビームロスは殆ど見られなくなる傾向にある [11]。しかし、C15P02 の波形に比べて、残りの 3 台のビームロス波形はビームが存在する 20 ms の期間に信号が大きく振動している様子が見られる。これは、真空容器に流れる壁電流によるもので、アースラインを介してノイズとして重畳している。

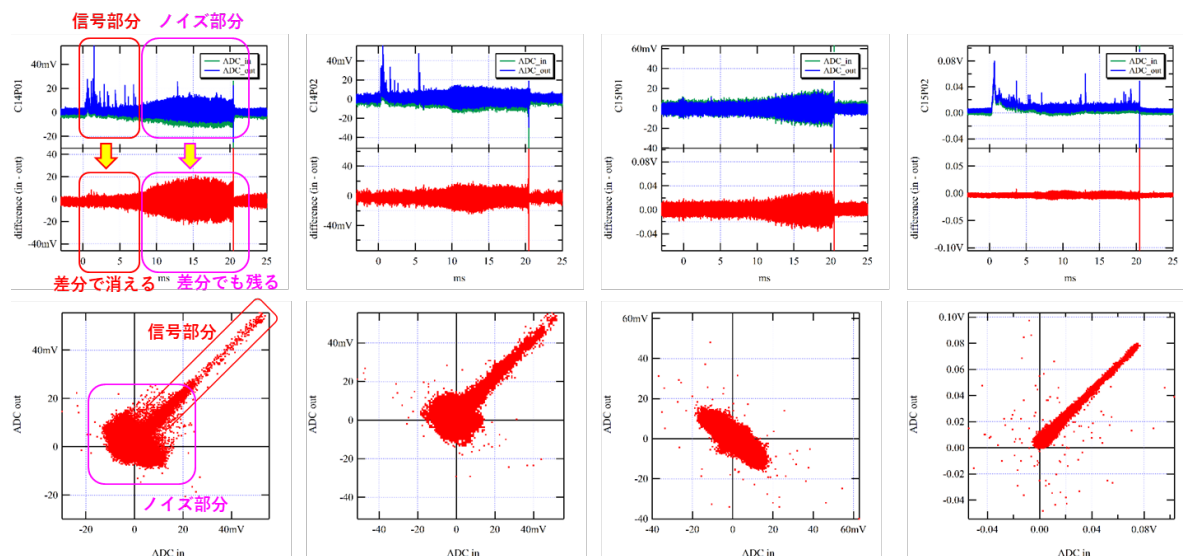


Figure 6: Comparison result between input and output analog signals of ADC module.

ADC01					ADC02				
S Count	Beam ID	MR Count	Type M3		S Count	Beam ID	MR Count	Type M3	
3913984	181634466	88	147		3913984	181634466	88	147	
CH1	CH2	CH3	CH4		CH1	CH2	CH3	CH4	
data0	32816	32491	32332	32898	62137	62591	62137	62591	...
data1	32876	32543	32454	32815	62137	62591	62137	62591	...
data2	32830	32469	32333	32835	62137	62591	62137	62591	...
data3	32853	32544	32336	32891	62137	62591	62137	62591	...
data4	32875	32543	32333	32913	62137	62591	62137	62591	...
data5	32829	32684	32422	32856	62137	62591	62137	62591	...
data6	32901	32691	32288	32800	62137	62591	62137	62591	...
data7	32830	32605	32383	32942	62137	62591	62137	62591	...
data8	32910	32600	32361	32833	62137	62591	62137	62591	...
data9	32871	32521	32423	32850	62137	62591	62137	62591	...
data10	32777	32570	32433	32782	62137	62591	62137	62591	...
data11	32834	32500	32330	32793	62137	62591	62137	62591	...
data12	32800	32529	32476	32789	62137	62591	62137	62591	...
data13	32836	32471	32385	32802	62137	62591	62137	62591	...
data14	32853	32572	32397	32731	62137	62591	62137	62591	...
data15	32887	32569	32448	32793	62137	62591	62137	62591	...
data16	32907	32521	32425	32756	62137	62591	62137	62591	...
data17	32936	32631	32346	32853	62137	62591	62137	62591	...
data18	32860	32545	32356	32778	62137	62591	62137	62591	...
data19	32978	32469	32304	32791	62137	62591	62137	62591	...
data20	32863	32438	32345	32872	62137	62591	62137	62591	...
data21	32890	32472	32386	32711	62137	62591	62137	62591	...
.
.
.

Figure 7: Example of the raw data in ADC.

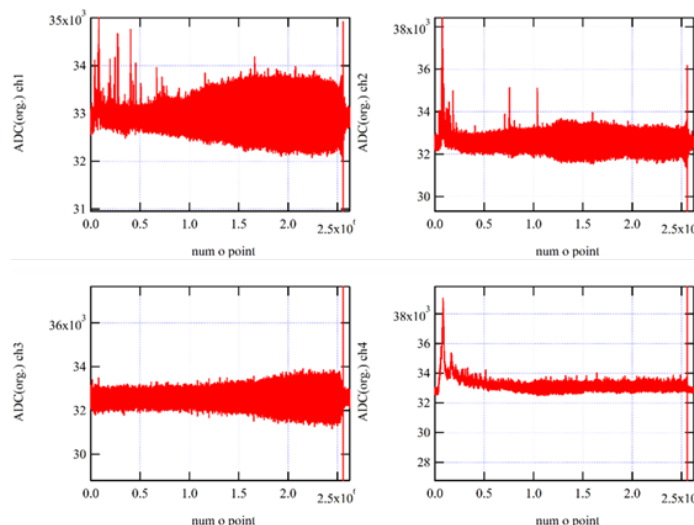


Figure 8: Beam loss signal plots from the raw data.

ADC01				ADC02			
S Count	Beam ID	MR Count	Type M3	S Count	Beam ID	MR Count	Type M3
3913984	181634466	88	147	3913984	181634466	88	147
CH1	CH2	CH3	CH4	CH1	CH2	CH3	CH4
data0	63169	63184	62076	65535	62137	62591	...
data1	62958	62495	62061	64952	62137	62591	...
data2	62873	62078	62060	64067	62137	62591	...
data3	62939	62055	62064	63708	62137	62591	...
data4	62808	62079	62093	63393	62137	62591	...
data5	62888	62173	62133	63335	62137	62591	...
data6	62827	62263	62134	63110	62137	62591	...
data7	62801	62119	62122	62946	62137	62591	...
data8	62783	62192	62121	62978	62137	62591	...
data9	62797	62116	62125	63015	62137	62591	...
data10	62784	62117	62133	63040	62137	62591	...
data11	62793	62122	62127	63069	62137	62591	...
data12	62835	62157	62149	63187	62137	62591	...
data13	62837	62148	62142	63196	62137	62589	...
data14	62786	62112	62124	63126	62137	62589	...
data15	62765	62103	62100	63174	62137	62590	...
data16	62781	62096	62117	63241	62137	62589	...
data17	62778	62109	62123	63256	62137	62590	...
data18	62803	62128	62126	63224	62137	62590	...
data19	62788	62114	62139	63249	62137	62590	...

Figure 9: Example of the analyzed data.

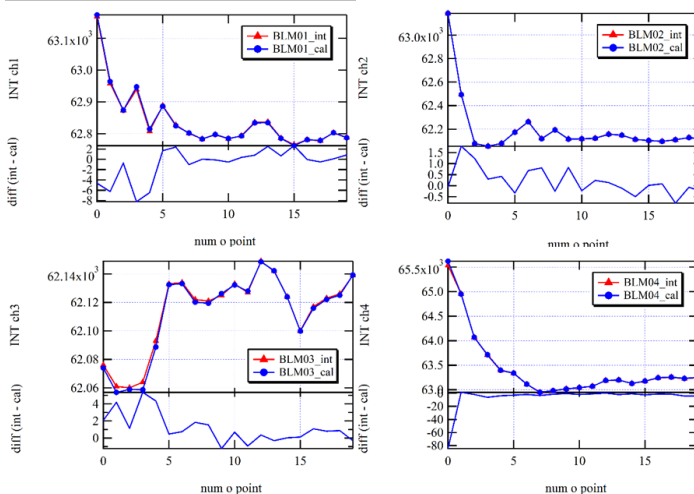


Figure 10: Comparison results between analyzed data in the ADC module and analyzing data from raw data.

信号部分は、波形の差分で見ると打ち消し合っており、また相関をみても、リニアにตอบสนองしていることが分かる。しかし、重畳しているノイズは差分でも打ち消すことが出来ず、また特徴的な相関を見つけることが出来ない。現状でこれ以上の評価が出来ておらず、アナログ回路のアーサ周りについて、もう少し詳細な調査を進める必要がある。

3.2 デジタル信号の評価試験

まず、ADC モジュール内にある 4 周期分の保管メモリの内、1 周期分に対しページロックをかけて(更新を停止して)、当該データの収集を行った。収集したデータファイルの中身は Fig. 7 の様になっており、TAG 情報がヘッダとして組み込まれていることが確認できた。また Fig. 8 は収集したデータをプロットした結果であり、前節でオシロスコープを用いて計測した信号波形と同様の結果を得た。

次に、フレーミングされている解析データから、先ほど収集した生波形に同期した解析結果を抽出する。Figure 9 に示す通り、タグ情報のビーム ID が一致する箇所を検索することで、容易に同期データを取り出すことが出来る。さらに、ADC 内で解析した結果と、生波形をオフラインで積分した結果の比較を Fig. 10 に示す。現状のビームロスモニタの解析システムでは、入射直後、加速途中、加速終了後の 3 点でのビームロスの積算量を保管していたが、新システムでは、入射から加速終了までのビームロスの時間構造が得られることを実証した。また、ADC 内での解析結果と取り出した生波形をオフラインで積分した結果がほぼ同じ値を示していることを確認した。一方で、両者の結果の差分を取るとわずかに違いがみられた。どちらもデジタル化した後の値を積分処理しているだけなので正しく一致するとの期待通りにはならなかった。今後、FPGA の中の演算をさらに詳細に追跡・確認する必要がある。

4. まとめ

現在、RCS におけるビームモニタ用新信号処理システムで使用する新型デジタイザ (TAG サーバーおよび ADC モジュール) の開発を行っている。TAG 情報によりデータ同期をおこなう、高速 ADC と FPGA を組み合わせることでオンライン解析を実現する、異なるモニタのデータ解析手法を FPGA に組み込み接続するモニタ毎に切り替えることで汎用性の高いデジタイザを実現する、といった基本設計方針のもと、試作機の開発を行った。また、RCS の実機に組み込んで、性能評価試験を実施し、タグ情報の埋め込み及びデータ同期が設計通りに実装できていることを実証した。また、BLM モード解析において、ビームロスの時間構造をオンライン解析で取得できることを確認した。アナログ処理やデジタル演算部の両方に詳細調査が必要ではあるが、おおむね期待通りの結果を得ることが出来た。

引き続き、その他の解析モードに係る評価試験についても計画していたが、J-PARC HD 施設での火災事象により運転が停止したために、実施できなかった。運転再開後に、改めて実施する予定である。また、単体での評価試験がうまくいったら、複数台を遠隔に配置したときの同期試験や大規模化に伴う処理速度への評価などを行い、採取的には新システムへの移行を計画していく。ま

た、本システムの実装により大量に生成される解析データを用いたトラブル予兆の事前予測などの新たな活用に向けた AI 診断やビッグデータ解析などの取組も並行して進めていく。

参考文献

- [1] JAEA/KEK Joint Project Team, KEK Report 2002-13, JAERI-Tech 2003-044, March 2003.
- [2] K. Yamamoto, *et al.*, "Design and actual performance of J-PARC 3 GeV rapid cycling synchrotron for high-intensity operation", *Journal of Nuclear Science and Technology* 2022, Vol. 59, No. 9, 1174-1205.
- [3] K. Yamamoto *et al.*, "BEAM LOSS MONITOR SYSTEM OF THE RAPID CYCLING SYNCHROTRON OF JAPAN PROTON ACCELERATOR RESEARCH COMPLEX", *Proc. PASJ2013*, Nagoya, Japan, SUP069, pp. 1060-1064.
- [4] N. Hayashi *et al.*, "Beam position monitor system of J-PARC RCS", *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A* 677 (2012) 94-106.
- [5] N. Hayashi *et al.*, "High Intensity Measurement Issues at the J-PARC RCS", *Proc. 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019)*, JPS Conf. Proc., 011017 (2021).
- [6] H. Takahashi *et al.*, "SYNCHRONIZED DATA MONITORING AND ACQUISITION SYSTEM FOR J-PARC RCS", *Proc. EPAC 2006*, Edinburgh, Scotland, THPCH117, pp. 3077-3079.
- [7] H. Takahashi *et al.*, "J-PARC 3GeV RCS CONTROL SYSTEM", *Proc. PASJ2006*, Sendai, Japan, WP58.
- [8] S. Hatakeyama *et al.*, "THE FAST MEASUREMENT OF THE MONITORS DATA WITH THE BEAM SYNCHRONIZED TAG IN J-PARC", *Proc. PASJ2019*, Kyoto, Japan, THPI025, pp. 789-793.
- [9] H. Takahashi *et al.*, "Development of new synchronized data system for J-PARC RCS", *Proc. IPAC'23*, Venezia Italy, 2023, THPA028, pp. 3957-3959.
- [10] SiTCP, <https://www.sitcp.net/>
- [11] H. Hotchi *et al.*, "J-PARC 3-GeV RCS: 1-MW beam operation and beyond", *Journal of Instrumentation*, Volume 15, July 2020. DOI 10.1088/1748-0221/15/07/P07022