

PF リングにおける高速軌道フィードバックシステムの高度化計画 UPGRADE PLAN OF FAST ORBIT FEEDBACK SYSTEM AT PF-RING

高井 良太*, 帯名 崇, 多田野 幹人, 下ヶ橋 秀典, 塩澤 真未

Ryota Takai*, Takashi Obina, Mikito Tadano, Hidenori Sagehashi, Mami Shiozawa
High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Accelerator Laboratory

Abstract

The upgrade of the fast orbit feedback system for keeping the stored beam orbit to desired reference orbit is underway in the Photon Factory storage ring (PF-ring) at KEK. In the existing system, the feedback cycle and bandwidth are restricted to approximately 12 ms (80 Hz) and 0.3 Hz, respectively, because output signals from 65 beam position monitors (BPMs) are processed with 12 analog detection circuits by using semiconductor switches. In the new system under development, the high-speed and high-precision feedback can be achieved by processing all BPM signals in parallel with the state-of-the-art digital signal processors mutually linked via optical fibers as many as BPMs. The feedback cycle will be accelerated to nearly 100 μ s (10 kHz), and the orbit fluctuations up to 100-200 Hz can be suppressed as the result. In this paper, we outline the existing orbit feedback system for the PF-ring and the upgrade policy of it. After that, we introduce our new signal processor of MicroTCA.4 standard, as well as their test results obtained with real beam signals.

1. はじめに

放射光源加速器に求められる最も重要な機能の一つは、各ビームラインのユーザーが望む位置・角度に安定な放射光を提供し続けることである。そのためには、光源である電子ビームの軌道を安定に保つ必要があるが、これは実に様々な要因で変動し得る。加速器建屋の浮沈や外気温の年較差に起因する数年～数ヶ月周期のゆっくりとした変動は、各運転期間の前にユーザーを交えて行われる光軸調整（基準軌道の再設定）で補正すれば十分である。一方、潮汐力や日照による建屋の歪み、空調や冷却水の流れがもたらす振動、風や近隣の交通から生じる環境振動、真空ポンプによる機械振動、電磁石電源の出力ノイズといった多くの事象に起因する数時間～数10 ms 周期のより速い変動は運転期間中にその都度補正する必要があるため、現在のビーム軌道を定期的に測定して理想的な基準軌道と比較し、その差が常に小さくなるよう軌道を制御し続ける“ビーム軌道フィードバックシステム”が不可欠となる¹。蓄積リング型放射光源の場合、光利用のためのビームラインは一部の区間だけではなくほぼ全周に渡って設けられることから、フィードバックの対象となるビーム軌道は蓄積ビームが作る閉軌道全体であり、“Global Orbit Feedback (GOFB)”あるいは“Closed Orbit Feedback (COFB)”とも呼ばれる。GOFB システムは、汎用の PC やワークステーションの CPU ベースで行われる“Slow Orbit Feedback (SOFB)”と、専用の DSP や FPGA をベースに構築される“Fast Orbit Feedback (FOFB)”という帯域の異なる 2 つのシステムから構成されることが多い。当然ながら、ビーム軌道を測定してからそれを補正し終えるまでのフィードバック周期が短ければ短い程速い変動まで抑制すること

ができるため、通常「GOFB の高度化」と言った場合には後者の「FOFB の高速化・高精度化」を意味している。

本発表では、2020 年度より開始された「フォトンファクトリー (PF) 高度化計画」の第 1 弾として実施されることになった、PF リングの FOFB システム高度化計画について概説する。はじめに現在稼働中のシステムの概要と問題点を述べた後、高度化の方針とそれに沿って製作した新しい信号処理回路について説明する。続いて実ビーム信号を用いて行った評価試験の結果の一部を紹介し、最後に今後の導入スケジュールについて述べる。

2. 現 FOFB システムの概要と問題点

一般的な FOFB システムは、ビーム軌道を測定するためのビーム位置モニター (BPM) とその検波回路からなる位置検出部、位置検出部で得られたビーム信号を集約・デジタル化してリング 1 周に渡る閉軌道データを作成し、理想的な基準軌道との偏差を補正するのに必要なキック量を計算する信号処理部、信号処理部からの指令値に基いて実際にビームをキックし軌道を補正する軌道補正部に大別される。現在 PF リングで稼働中のシステムの位置検出部では、全 81 台の BPM のうちの 65 台を使用してリング 1 周に渡る閉軌道を測定している。この数の BPM に対して検波回路が 12 台しかないため、各 BPM と検波回路の間には 4 つの電極信号、及び 5~6 台分の BPM 信号を順次切り替えて送信するための半導体スイッチが設けられている。検波回路で抽出されたビーム信号は、高周波ノイズや接地レベルの差を除去するためのローパスフィルタ (LPF) と絶縁アンプを介して信号処理部の前段にある ADC に入力される。現在の信号処理部は、VME 規格の ADC, DSP, DAC, CPU, クロック, デジタル I/O ボードから構成されており、上述した閉軌道データの生成や逆行列演算による補正キック量の計算、PID 補償演算等はこの DSP 内で行われる。DSP から出力される演算結果は最終段にある DAC からアナログ信号として出力され、入力時と同じく LPF と絶縁アンプを介して軌道補正部の各補正電磁石電源に設定される。FOFB 用の補正電磁石は高速応答を実現するため

* ryota.takai@kek.jp

¹ ビーム不安定性や入射振動に起因する数 μ s オーダーの変動抑制には、バンチごとに振動を検出してそれをターンごとに減衰させることが可能な“Bunch-by-Bunch Feedback (BxB FB)”システムが使用される [1]。

0.35 mm 厚の積層鋼板で製作されており、計 28 台設置されている。このシステムによる FOFB は、現在のところ鉛直方向にのみ適用されている²。現システムの詳細については、文献 [2] を参照されたい。

このような切り替え方式による信号処理は、複数の BPM 信号を同じ回路で処理することから蓄積電流や環境温度に対する依存性を比較的小さく抑えられるというメリットがあるが、その一方で信号の処理速度をあまり速くできないというデメリットがある。上述した現システムの場合、リング全体のビーム軌道を測定し、各補正電磁石の電流を設定し終わるまでのフィードバック周期は約 12 ms (80 Hz) となっており、それに付随してフィードバックの有効帯域、即ち有効に抑えられる軌道変動の周波数成分の上限は 0.3 Hz 程度に留まっている。50 Hz 以下の累積変位は 2 μm 以下となっており、達成すべき軌道安定度の目安であるビームサイズの 1/10 以下を達成しているもの³、PF リングでは加速器室内の空調が原因と思われる 15 Hz 前後の振動成分や商用電源の周波数に由来する 50 Hz の振動成分が大きいことが判明しているため、より高い軌道安定度を実現するにはフィードバックの帯域が不足している。ビームのシンクロトロン振動の成分 (~20 kHz) を除去するために ADC 直前に設けているアナログの LPF を取り除けば、フィードバック周期を最短で 2 ms (500 Hz) 程度にまで速めることができ、結果として数 Hz まで帯域を伸ばせると考えられるが、それでもなお不十分である。10 Hz 以上の変動を効果的に抑えるためには、フィードバック周期を少なくとも 1 kHz のオーダーまで高速化する必要がある。

また、この FOFB システムは 1997 年に導入されたもので、年々老朽化によるハードウェアトラブルが増加してきている。近年の運転期間中に起こったトラブルとしては、高速補正電磁石の電源制御用 VME モジュールのコネクタ接触不良や VME クレート間の通信不良が原因と思われる断続的な軌道変動、VME クレートの電源故障、12 台の検波回路に共通の LO 信号を分配する際使用している ALC (Auto Level Control) モジュールの故障、DSP プログラムの制御に使用している専用ワークステーションのフリーズや HDD エラー等があり、いずれも運転を中断しての対処が必要であった。ストックしてある昔の予備品を駆使して何とか運用を続けているが、既に入手困難なパーツも多く、システムの中核機器に致命的な故障が発生した場合にはリング自体の長期シャットダウンも免れない状況となっている。

3. 高度化の方針と新 FOFB システムの紹介

このようなシステムで長年運転を続けてきたが、2020 年度に開始された「PF 高度化計画」の第 1 弾として、ついにその更新が認められた。ただし、導入までの希望スケジュールは非常にタイトで、更新が認められた 2020 年度の半ばから年度末までの半年間で仕様を確定して入札 (政府調達) を行い、2021 年度の前半でハードウェアを製造して夏の停止期間中に現システムと入れ替え、秋

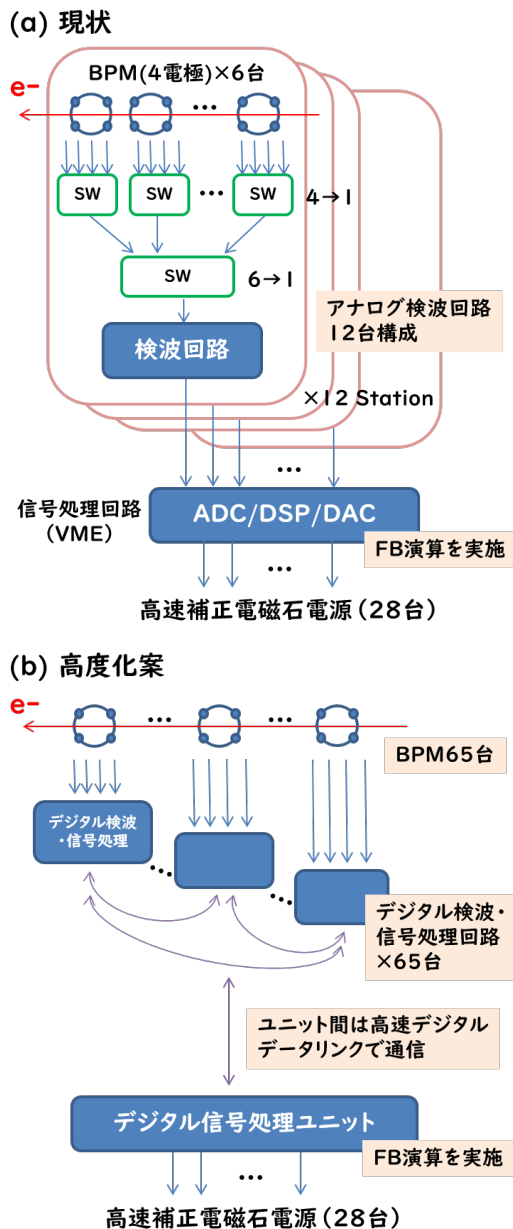


Figure 1: Upgrade policy of the PF-ring FOFB system.

のユーザー運転から試験運用を始めるというものであった。したがって、試作機の製作・評価を経て量産、といった通常の開発手順は取れないため、市販品か他施設で実績のある回路をベースに検討を進めた。

高度化の方針としては、まず Fig. 1(a) に示したような現在の切り替え方式では BPM 信号の処理や収集に時間がかかり、フィードバック周期の大幅な高速化は難しい。そこで、新システムでは Fig. 1(b) のように最新のデジタル技術を駆使した検波・信号処理回路を BPM と同数用意し、全ての BPM 信号を速やかにデジタル化して並列に処理する。BPM ごとに得られた位置データはダイジェーション接続による光リンクによって中央のデジタル演算装置に収集され、FPGA 内で軌道フィードバックに必要な各種演算が施される。演算結果は高速のデータ

² CPU ベースで稼働している SOFB は水平・鉛直両方向に適用されている。

³ 偏向電磁石の光源点におけるビームサイズを基準としている。

リンクを通じて DAC に伝送され、現補正電磁石電源の制御仕様に則ったアナログ信号として出力される。近年のデジタル技術の進展は目覚しく、市販の信号処理回路でも 100 MHz 以上の ADC サンプリグデータ、1 MHz 程度の Turn-by-Turn (TBT) データ、10 kHz 前後の Fast Acquisition (FA) データ、10 Hz 前後の Slow Acquisition (SA) データ、という大きく帯域の異なるデータを同時に取得することが可能となっている。これらのうちの FA データを活用すれば、軌道フィードバックの周期は最短で 100 μ s (10 kHz) 程度となり、100-200 Hz までの軌道変動を抑制できる可能性がある。これは現代の蓄積リング型放射光源における標準的な性能であり、PF リングの次期計画にも十分流用可能なシステムとなり得る。

2021 年 2 月に行われた入札の結果、新システムでは European-XFEL を中心に開発された MicroTCA.4 (MTCA.4) 規格のデジタル信号処理回路を採用することに決まった [3]。MTCA.4 は高い可用性を有した高速のデータバス規格であり、長期稼働や高信頼性を求められる加速器システムに適していることから、ヨーロッパを中心に世界各国の加速器関連施設で導入が進んでいる。MTCA.4 では、Fig. 2(a) に示したような“シェルフ”と呼ばれる共通のシャーシに、“AMC (Advanced Mezzanine Card)”や“RTM (Rear Transition Module)”と呼ばれる機能拡張用の子基板を複数枚挿入して使用する構成となっている。既存の BPM ヘッドで得られた 4 つの電極信号は、まずシェルフ背面の μ RTM に入力される。この μ RTM にはアナログのフロントエンド回路が実装されており、504 MHz を中心におよそ 10 MHz の帯域を持つ狭帯域バンドパスフィルタ (BPF) で PF リングの加速周波数である 500.1 MHz 成分が抽出された後⁴、可変アッテネータや低ノイズアンプを通じて後段の ADC に適した信号レベルに調整される。メインのアンプは 2 段構成となっており、前段のものは入射ビーム等の微弱な信号からハイブリッド運転時の孤立バンチから来る大振幅の信号までカバーできるよう、リモートで使用・不使用を切替可能となっている。また、ビーム信号に含まれる周波数からわずかにずらした一定周波数のトーン信号を入力ポートから BPM ヘッド側に出力し、その反射波の振幅を利用して各チャンネルのゲインドリフト等を定期的に補正する較正機能も有している。

μ RTM で得られたアナログのビーム信号は、 balan によって差動信号に変換された後、Zone3 と呼ばれる高速伝送コネクタで直結されたシェルフ前面の AMC へと送られる。この AMC は高速の ADC (8 ch, 16 bit, 370 MSPS max.) と高速・大容量の FPGA (Xilinx, Zynq XC7Z045-1FFG900C) を備えたデジタル信号処理回路であり、FPGA 内の CPU で起動させる EPICS IOC により各種パラメータの外部制御も可能にしている。Zone3 で互いに接続された μ RTM と AMC の写真を Fig. 2(b) に示す。 μ RTM から送られてきたビーム信号は、AMC の先頭にある ADC で加速周波数の 8/13 にあたる 307.7 MHz でアンダーサンプリングされた後、DDC (Digital Down Converter) を介してサンプリング周波数の 1/4 である 76.9 MHz の IQ 信号に変換される。

⁴ BPF の中心周波数と帯域は、加速周波数が 508.6 MHz の PF-AR でも利用可能なように設定されている。

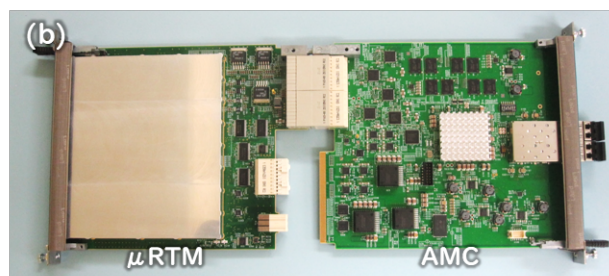


Figure 2: Photos of the new BPM electronics: (a) MTCA.4 shelf and (b) μ RTM and AMC connected through the Zone3 connector.

この IQ 変換におけるパラメータは、PF リングで過渡的ビームローディングによる加速位相の変動を検出するのに最適な値となっている [4]。その後は多段のデジタルフィルタを介してビームの周回周波数に同期した 1.6 MHz の TBT データ、10 kHz の FA データ、10 Hz の SA データにデシメートされ、振幅計算とゲイン・オフセット補正を行った後に他チャンネルの信号と合わせてビーム位置演算が行われる。位置演算は電極信号のビーム位置に対する非線形性の影響を補正するため、5 次の多項式まで対応している。このようにして得られる各帯域の位置データのうち、FA データについてはシェルフ共通の GbE ポートの他、AMC 前面に設けられた 2 つの SFP ポートからも出力することができ、隣接する AMC の SFP ポート同士を光ファイバでデジタイゼーション接続することでリング 1 周に渡る閉軌道データの高速収集が可能となっている。

加速周波数に同期した基準 RF 信号やそれを基に生成した ADC のサンプリングクロック等は、各シェルフに 1 台設けられた“eRTM (extended RTM)”と呼ばれるモジュールからシェルフのバックプレーンを介して各モジュールへ分配される。一方、ビームの周回周波数や入射トリガー信号は、同じシェルフ内の μ RTM から 1 台だけ割り当てられたマスター RTM の DIO ポートから入力され、上記の基準信号と同様にシェルフのバックプレーンを介して分配される。各 AMC で検出された軌道逸脱等によるインターロック信号もバックプレーンを介してマスター RTM に収集され、同じ DIO ポートから出力される。他にはシェルフ自体の制御や各モジュール

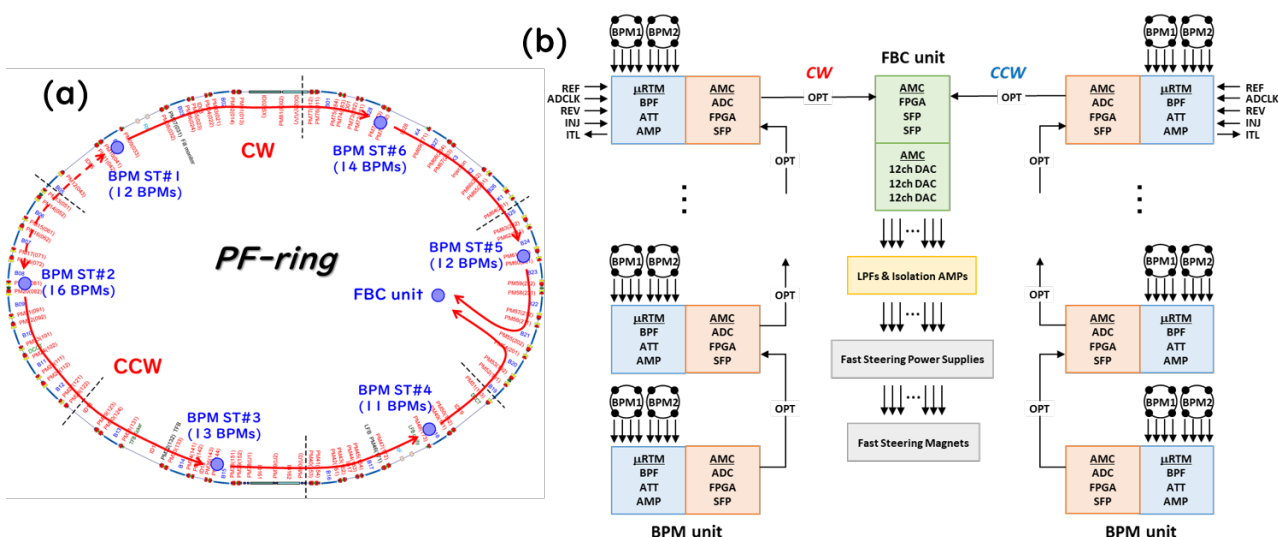


Figure 3: (a) Layout of the new BPM stations (BPM ST#1-#6) and the FBC unit. Red arrows indicate optical fibers for fast datalink. (b) The new FOFB system diagram for the PF-ring.

ルのステータス監視、EPICS の Channel Access 等を司る“MCH (MicroTCA Carrier Hub)”モジュールや電源モジュールがあり、いずれのモジュールも故障時には個別にホットスワップ可能となっている。これら一連のモジュール類は、他の加速器施設で使用実績のあるものがベースとなっており、特に μ RTM については SPring-8 で次期計画の BPM 用に開発されたものを PF リング用にアレンジして製作したものである [5]。

Figure 3 に新システムにおける BPM ステーションの配置と全体系統図を示す。前章でも述べた通り、PF リングには全部で 81 台の BPM が設置されているが、それらのうち 3 台は BxB FB システムやフィルパターンの制御に継続して利用するため、新システムは残りの 78 台を全て使用する前提で製作された。 μ RTM と AMC は、1 組で BPM2 台分の信号を処理できることから、予備も含めて計 40 組 (BPM80 台分) が用意された。これらは加速器室の真下にある地下機械室に設置されるが、BPM ヘッドから各回路までの同軸ケーブルが長くなり過ぎないように、6ヶ所の BPM ステーションに 1 台ずつシェルフを置いて分散配置される。各ステーション間は BPM 専用のサブネットワーク回線も含めた 4 芯の光ケーブルで接続されており、各 AMC の SFP ポートから出力された FA データを最速で伝送可能となっている。6 台のシェルフで同期して取得された FA データは、時計回り (CW) 方向の 3 台と反時計回り (CCW) 方向の 3 台で伝送経路が分けられ、補正電磁石電源の近くに設置された“FBC (Feedback Control) ユニット”に収集される。FBC ユニットでは BPM ごとに割り当てられたスロット番号を基にリング 1 周に渡る軌道データを作成し、基準軌道との偏差を小さくするような各補正電磁石の電流値を応答行列の逆行列演算によって求める。得られた補正電磁石の台数分のデータは、PID 制御のための演算が施された後、高速の DAC (12 ch \times 3, 16 bit, 500 MSPS max.) でアナログ信号に変換され、補正電磁石電源の制御仕様に合わせてレベルで出力される。これ以降の機器

は当面既存のシステムで使用中のものをそのまま流用する予定であるが、将来的にはデジタル制御可能な電磁石電源の導入や FOFB の水平方向への拡張も検討されている。

4. 実ビーム信号による評価試験の一例

これら BPM 回路の製作は 2021 年度に行われた。世界的な半導体不足の影響で当初の契約納期は延長を余儀なくされたが、2022 年 2 月には全てのコンポーネントが無事納品された。それと並行して、回路の設置場所となる PF 光源棟の地下機械室では、6 台のシェルフを納める 19 インチラックの設置や各ラックに入線する BPM ケーブルの敷設、ラック間光伝送ケーブルの敷設、クロック・トリガー分配用同軸ケーブルの敷設といったインフラの整備作業が行われた。現在は同じ棟の 2 階に構築したテストベンチにて回路の特性評価を行っており、そこで明らかになった問題点や不具合についてはメーカーと相談しながら順次改修を進めている。これまでに出力信号のリニアリティや長期安定度、温度依存性、ADC チャンネル間のレベル差、タイミング差、クロストークレベル等、多くの試験が行われたが、ここでは PF リングが運転中に実際のビーム信号を入力して取得したデータの一部を紹介する。

Figure 4(a) はマルチバンチ (250 バンチ, 1 トレイン, 120 mA) を蓄積中にビームの入射トリガーに同期して取得した TBT データの水平方向ビーム位置である。横軸のおよそ 10 ms の地点で入射が行われており、それを起点にして入射バンチの不完全性による蓄積ビームの重心振動 (入射振動) が綺麗に捉えられている。振動の減衰時間は BxB FB の効果でリングの放射減衰時間よりも短い 1 ms (1600 turns) 程度に抑えられているが、これは BxB FB のパラメータが最適化されている 450 mA 蓄積時の減衰時間と比べると数倍長い結果となっている。Figure 4(b) は同じデータをスペクトログラムとして解析したものである。入射を起点に水平方向のチューンで

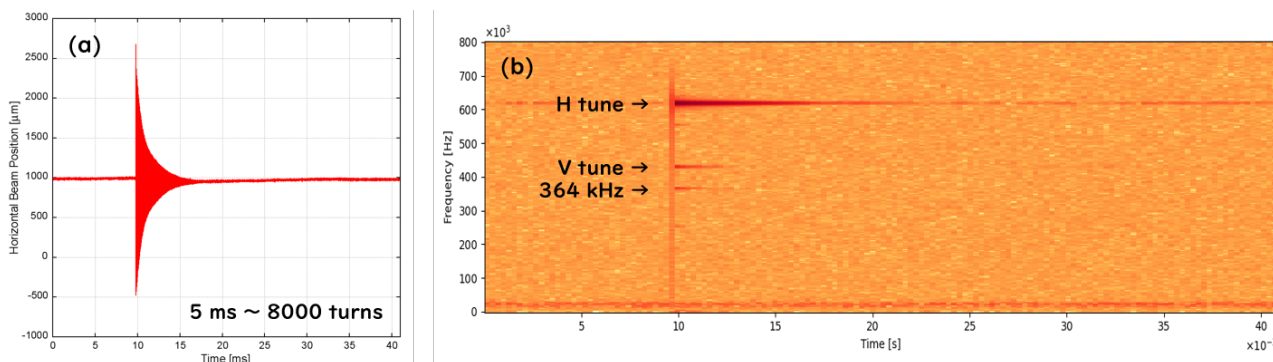


Figure 4: Horizontal injection oscillation captured by TBT data during a multi-bunch storage: (a) Time domain waveform and (b) its spectrogram.

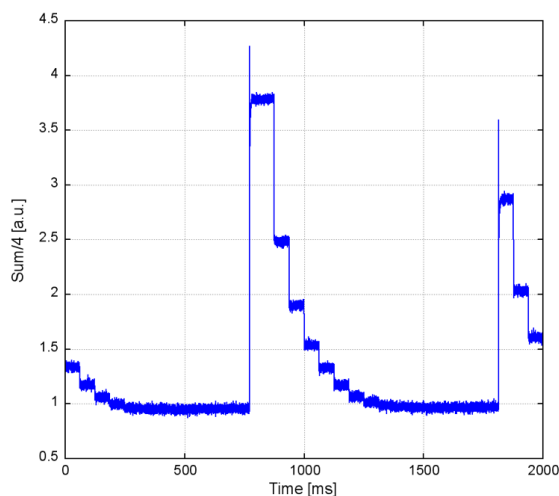


Figure 5: Injection beam charge with the gated RF-KO captured by FA data.

ある 620 kHz のピークが強く現れており、わずかながら鉛直方向のチューンである 430 kHz のピークも確認できる。364 kHz にも入射に同期して小さなピークが現れているが、これは水平方向の大きな非線形振動で生じたチューンの倍波成分がエイリアシング（折り返し現象）で現れたもので、ビームの周回周波数を f_{rev} 、水平方向のチューンを $f_{\beta x}$ とすると $f_{rev} - 2f_{\beta x}$ に相当する。

Figure 5 は、LINAC から 1 Hz で入射されてきた 0.1 mA (60 pC/bunch) 以下の入射ビームを FA データで捉えたものである。グラフの縦軸は 4 つの電極信号の平均値で、ビーム電荷に相当する。この実験では 1 回の入射で送られてくる電荷のみを観測するため、ゲートをかかけた RF ノックアウト (RF-KO) 信号をビームの入射トリガーから一定のディレイを持たせてキッカーに印加し、リングを周回していた入射ビームを次の入射までに蹴り落とす手法を用いている。RF-KO 時にはベータatron 振動の振幅依存チューンシフトに対応するため FM 変調を利用しているが、その変調周波数である 16 Hz (60 ms) の周期で階段状に電荷が減少していく様子まで明確に捉えられている。

他にも 420 mA のバンチトレインと 30 mA の孤立バ

ンチからなるハイブリッドフィルや数 mA のシングルバンチ等に対してデータの取得試験を行っており、十分実用に耐え得るダイナミックレンジと測定精度を有していることを裏付ける結果が得られている。

5. まとめと今後の導入スケジュール

KEK の PF リングでは、2020 年度より FOFB システムの高度化が進められている。新システムでは従来のアナログ切り替え方式から脱却し、BPM と同数のデジタル検波・信号処理回路を導入することで大幅な高速化と高精度化が図られる。高い可用性と高速のデータベースを備えた MicroTCA.4 規格の回路が採用され、BPM80 台分の信号を処理できるだけの数の回路がリングに沿った 6 ヶ所に分散配置される。光リンクを通じて 10 kHz レートで軌道データを収集し、100-200 Hz の FB 帯域を目指している。

現在は BPM 回路のテストベンチにて SG を用いた特性評価と問題点の洗い出しを行っている最中であるが、主な問題点の改修が済み次第現場へ移設し、全台での光データリンクを確立する。その後はまず現在 FOFB に使用していない BPM を新回路に接続し、オープンループでの調整を進める。マシンスタディの時間を利用して実際にフィードバックループを閉じる試験を行い、結果が良好であれば現在の FOFB システムで使用している BPM を段階的に新システムへ繋ぎ変えることで、運転を継続しながらのシームレスな移行を試みる。新システムへの完全移行は、2023 年度第 I 期 (4-7 月) のできるだけ早い時期を目標としている。

謝辞

PF 高度化計画の第 1 弾として、長年の要望であった本件を採択してくださった放射光実験施設の船守展正施設長、並びに加速器第 6 研究系の小林幸則主幹に心より感謝いたします。また、SPring-8 の次期計画画に開発された BPM モジュールの利用を快く認めてくださった理化学研究所の前坂比呂和氏、各モジュールの設計から製作・改修に至るまで多大なご尽力をいただいている三菱電機特機システム株式会社の漁師雅次氏にも、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] R. Takai *et al.*, “Bunch by Bunch Feedback System using iGp at KEK-PF”, Proceedings of DIPAC09, Basel, Switzerland, May 25-27, 2009, paper MOPD08, pp. 59-61.
- [2] T. Obina *et al.*, “Global Feedback System for Photon Factory Storage Ring”, Proceedings of EPAC98, Stockholm, Sweden, Jun. 22-26, 1998, pp. 1726-1728.
- [3] PICMG MicroTCA open standard.
<https://www.picmg.org/openstandards/microtca/>
- [4] D. Naito *et al.*, “Investigation of Bunch-phase Detection Method Compensating TBL Voltages in Next Generation Light Sources”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Japan, Aug. 9-12, 2021, paper THP048, pp. 946-950.
- [5] H. Maesaka *et al.*, “Development of MTCA.4-based BPM Electronics for SPring-8 Upgrade”, Proceedings of IBIC2019, Malmö, Sweden, Sep. 8-12, 2019, paper WEBO03, pp. 471-474.