

DEVELOPMENT OF THE FILL PATTERN CONTROL SYSTEM USING AN OSCILLOSCOPE

Ryota Takai[#], Takashi Obina

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Accelerator Laboratory

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

We have developed a new injection control system to generate and maintain the arbitrary fill patterns at the Photon Factory storage ring. The heart of the control system is a general-purpose oscilloscope connected across the output of a wall current monitor. In this oscilloscope, an analytical program that can select out the RF bucket with the largest deviation from the nominal bunch current is running. Since the oscilloscope also functions as an EPICS-IOC, the bucket address obtained from the analysis is transferred to the Linac timing system via the network immediately. This feedback process on the bunch current allows the top-up injection controlled so that the deviation between the actual and nominal bunch currents becomes small. Our new injection system has been used in the user operation since March 2010. It has contributed not only to the smoothing of the multibunch fill but also to the rapid recovery from the critical beam loss.

オシロスコープを用いたフィルパターン制御システムの開発

1. はじめに

KEK の PF リング (2.5GeV 電子蓄積リング) では、2009 年 4 月からユーザー運転にトップアップ入射を導入している。DCCT の出力が許容範囲を超えないよう入射ゲートを開閉することにより、トータルカレントの変動は 0.1%以下に抑えられている^[1]。一方、ビームを入射する RF バケットは全く盲目的に選択されているため、個々のバンチカレントのばらつきについてはトップアップ入射の継続時間とともに増大する傾向にある。大部分のマルチバンチユーザーにとっては、光の微視的な時間構造よりも平均強度の安定度の方が重要であることから、これまでこの現象が PF リングの問題として表面化することはなかった。しかしながら、過度のばらつきはリングコンポーネントの不要な加熱を招くばかりでなく、場合によってはビーム軌道の安定化を阻害する原因となるため^[2]、可能な限り小さく維持されるべきである。

また、従来の入射制御システムには、入射バケットのアドレスが連続している単純なマルチバンチフィルか、リング内にバンチを 1 つだけ蓄積するシングルバンチフィルの 2 種類のフィルパターンにしかならずトップアップ入射を適用できないという大きな制限がある。例えば、適当な長さのバンチトレインとハイカレントのシングルバンチから構成される“ハイブリッドフィル”を考えると、従来の制御システムで生成はできても、トップアップによる維持はできない。このフィルパターンでは、バンチ内で生じる電子・電子散乱の影響により、シングルバンチ部の寿命がマルチバンチ部の寿命に比べて短い(タウチェック効果)。したがって、各バンチの寿命に応じて入射頻度が変わるような柔軟な制御システムでなければ、このパターンを一定に維持することはでき

きないのである。

以上の 2 つに代表される問題点を克服し、任意のフィルパターンを生成・維持できるようにするためには、現在のバンチカレントの情報を基に次の入射バケットを決定する仕組みが不可欠である。我々は、このようなフィードバック機構を備えたフィルパターン制御システムを新たに開発した。本稿では、開発した制御システムの詳細と実際に PF リングで試用した結果について報告する。

2. オシロスコープを用いたフィルパターン制御システム

PF リングで採用されてきた従来の入射制御は、あらかじめ指定した範囲内で RF バケットのアドレスを再帰的にスキャンしておき、入射トリガーの割り込みが入った時点でのアドレスを Linac へ伝えるという、言わばルーレット方式であった。この方式では入射バケットがほぼランダムに決まるため、特定のバケットにカレントが偏ることがなく、ある程度様なバンチトレインを形成できる。大容量データの転送や処理を必要としない分、動作が高速かつ安定という長所もある。しかしながら、前章でも述べたとおり、入射バケットのアドレスが連続していないパターンや、意図的にバンチカレントに差を持たせたパターンには全く対応できない。また、確率過程を介するため、バンチカレントのばらつきが入射回数に比例して増大することは免れない。

そこで、壁電流モニター (WCM) とオシロスコープを組み合わせた入射制御システムを新たに開発した。図 1 にその構成を示す。このシステムの中核は、Windows ベースの汎用オシロスコープ (Textronix, DPO7104) である。オシロスコープを用いるメリットとしては、手軽に導入できて信頼性にも優れていることと、後述するように 1 台で高速デジタル・信号処理機・EPICS-IOC^[3]の 3 役を

[#] ryota.takai@kek.jp

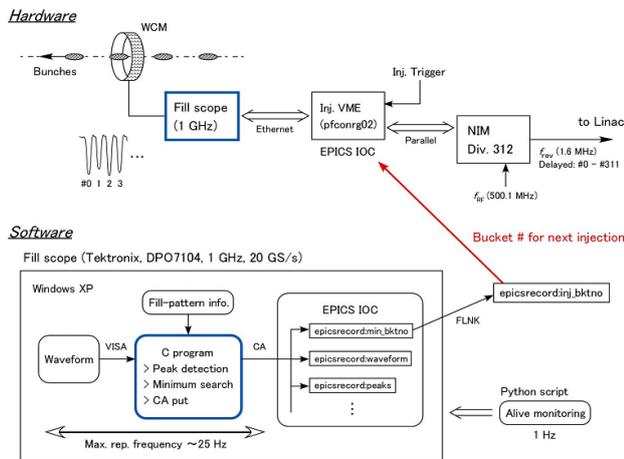


図 1. 新入射制御システムの構成

兼ねられることが挙げられる。PF リング（バンチ間隔：2 ns、バケット総数：312）のフィルパターンを最低限バケットレベルで分解できるように、周波数帯域は 1 GHz、サンプリングレートは 20 GS/s のものを採用した。サンプリングモードは実時間サンプリングであるが、トレースごとのふらつきの影響を軽減するため、10 トレースごとのアベレージモードとした。トリガー信号には 500.1 MHz の基準高周波信号をハーモニック数 312 で分周して作ったビーム周回信号（1.6 MHz）を使用し、水平掃引の遅延時間は取得した WCM 信号にバケットアドレスを正しく割り当てられるよう調整してある。

このオシロスコープには、統合開発環境として Microsoft Visual C++^[4]がインストールしてあり、取得した WCM 信号からバンチカレントが理想と比べて最も小さい RF バケットを選び出すことができる解析プログラムを常時動作させてある。プログラムは C 言語で記述され、オシロスコープおよび EPICS-IOC との通信には、それぞれ VISA ライブラリと CA ライブラリが利用されている。プログラム内で行っている信号処理のフローチャートを図 2 に示す。プログラムを起動すると、まずこれから積み上げようとするフィルパターンの情報がアスキー形式の初期設定ファイルから読み込まれる。初期設定ファイルの書式は単純で、1 列目に予定しているバンチの総数とそのアドレス情報（ビームを入射する区間の最初と最後のバケットアドレス）、2 列目にトータルカレントとその内訳（入射区間ごとに設定）を書く（図 3 参照）。これらの情報を与えることで、ビームを入射すべき全てのバケットアドレスと、フィル完成時に各バンチカレントが全体に占める割合（理想比率）を設定することができる。その後、プログラムはオシロスコープからデジタル化された WCM 信号を取得し、リング 1 周に対応するデータの中からノイズレベル（動作中に変更可）以上のピークを検出する*。検出されたピーク数が予定バンチ数に満たない場合、プログラムは入射区間内のバケットアドレスを 1 ずつインクリメントしながら順番に出力し、再度波形を取得してピーク検出

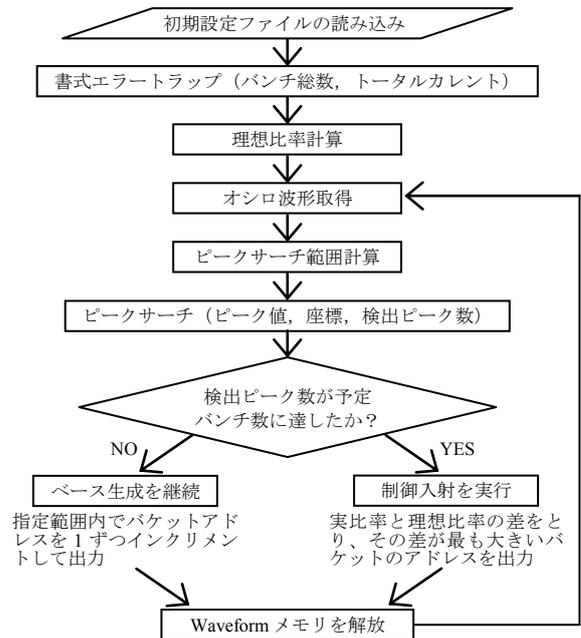


図 2. 入射制御のフローチャート

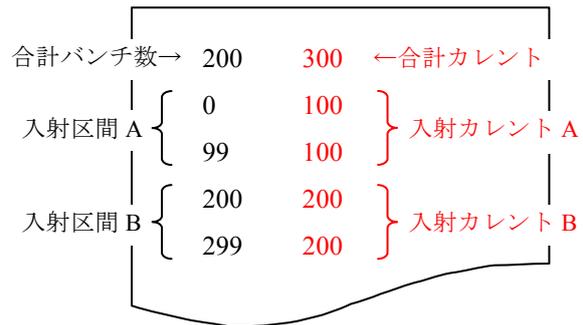


図 3. 初期設定ファイルの書式

を試みる。一方、検出ピーク数が予定バンチ数に到達した場合、プログラムは実際のカレント比率と理想比率の差を計算し、その差が最も大きいバケットのアドレスを出力するようになる。いずれの場合でも、出力されたバケットアドレスは、同じくオシロスコープの OS 上で動作させた EPICS-IOC を経由し、即座に Linac のタイミングシステムへ伝送される。バンチカレントに関するこの一連のフィードバックプロセスにより、ビームは常に理想から最も遠いバケットを狙って入射されるようになるため、任意のフィルパターンを自動的に、かつ理想に近い形で生成・維持することが可能となる。

解析プログラムの動作はビームの入射間隔（最短 40 ms）よりも高速であるので、プログラムと入射の間で厳密な同期は取っていない。また、長期安定性にも優れているが、万一停止した場合に備えて、Python/CA を利用した死活監視スクリプトを別途用意してある。このスクリプトは、解析プログラムのループ内に仕込まれたカウンターの値を 1 秒おきに監視しており、もし値に変化がなければプログラム

*ここでは WCM 信号を用いたが、対向する 2 つのボタン電極の SUM 信号等でも代用できる。また、バンチ伸縮の影響まで考慮すると、解析には信号のピーク値ではなく面積を使用した方がベターである。

が異常停止したと判断する。その際は EPICS を通じてアラームを発するとともに、入射バケットの選択方法を従来の方式へ切り替える役割を果たす。

3. PF リングでの試用結果

3.1 テストパターンによる動作チェック

構築したフィルパターン制御システムが正しく動作することを検証するため、図 3 に示したものと同等の初期設定ファイルを使ってビームの積み上げを実施した。この場合に想定されるフィルの時間変化は図 4(a)のとおりである。まず、積み上げの初期段階では特にバケット選択は行われず、ファイルで指定した入射区間内へ順番にビームが入射されていく（フィルパターンのベース生成）。ノイズレベル以上に成長したピーク数が予定バンチ数に達すると、初めて理想から最も遠いバケットへの選択的入射が開始され、各バンチカレント間にファイルで指定した理想比率が形成される（理想比率の形成）。その後は比率を保ったまま成長を続け、トータルカレントが別途指定したリミットカレントに到達した時点で入射完了となる（フィルパターンの完成）。

図 4(b)が実際に PF リングの電子ビームで試験した結果である。赤（左軸）が WCM で計測したリング 1 周にわたるバンチカレント、青（右軸）が解析プログラムで計算した理想比率との差を表している。予定していたとおりの入射制御が為され、最終的に

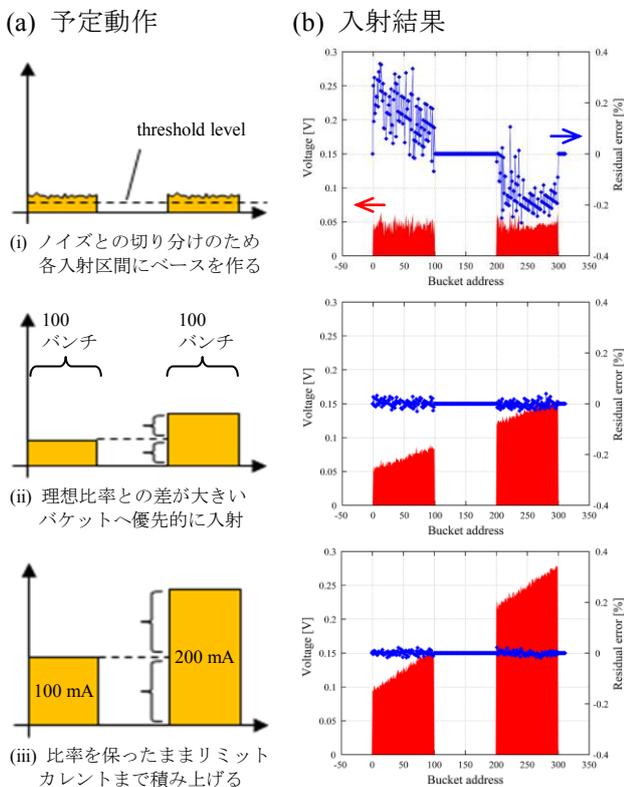


図 4. テストパターンによる動作チェック

初期設定ファイルで指定したフィルパターンがきれいに再現されているのが分かる^{**}。これにより、本システムを使えばビームの積み上げにかかる時間と手間を大幅に削減できるだけでなく、任意のフィルパターンに対してトップアップ入射を適用可能となることが証明された。

3.2 従来のフィルパターンとの比較

図 5 に従来のフィルパターンと本システムを使って生成したフィルパターンを並べて示す。10%以上あったバンチカレントのばらつきが 1%以下まで改善している。その上、従来のシステムではこのばらつきがトップアップ入射の継続時間とともに大きくなるのに対し、本システムでは小さいまま維持される。冒頭でも述べたように、この改善はビームやリングの状態を安定に保つのに効果がある。また、BPM 信号をフーリエ変換して得られるビームスペクトルが理想的な形へ近づくため、ビーム不安定現象の解析も非常にやり易くなると期待される。

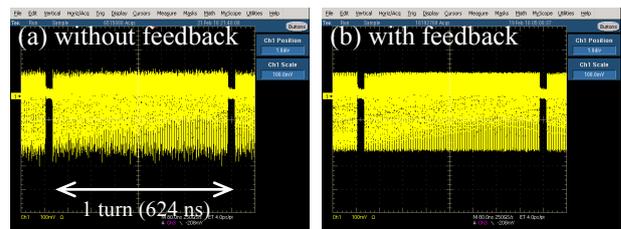


図 5. 従来のフィルとの比較 (300 バンチ, 450 mA)

3.3 フィル平滑度の時間変化

従来のシステムでマルチバンチフィルを生成した後、入射バケットの選択方法を上述した新方式に切り替えた場合の時間変化を図 6 に示す。(a)がリング 1 周にわたるバンチカレント（全体に占める割合に換算）、(b)がその平滑度（理想比率を基準にした標準偏差）である。入射制御のフィードバックループを閉じて以降、バンチカレントの平滑度は指数関数的に減衰し、元の値のおよそ 80%減の値で飽和している。時定数の値は入射頻度に依存して変化するためあまり本質的ではないが、15 秒に 1 回程度のトップアップ入射（最も入射頻度が低いケース）であった本実験の場合、およそ 110 分であった。平滑度については、原理的には個々の入射ビームが持つチャージのばらつき程度まで小さくできるはずであるが、本実験はユーザー運転中に行われたため、そ

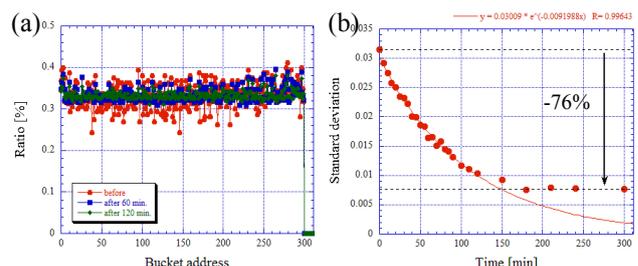


図 6. フィル平滑度の時間変化

^{**}さらに、この例では 1 バケットごとにニアなカレント差をつけることに挑戦している。

の飽和値にはビーム進行方向の不安定抑制用に印加していた RF 位相変調^[5]の影響が含まれている。すなわち、本実験で観測された飽和値は原理的な限界ではなく、RF 位相変調による周期的なバンチ伸縮の影響を含んだ値と考えられる。

3.4 深刻なビームロス後の復旧

図 7 は、実際のユーザー運転中に本システムの有効性が示された一例である。前項でも少し触れたように、本システムはマルチバンチフィルの平滑化を主な目的として、2010 年 3 月からユーザー運転で使用されている。その期間中に、入射キッカーの異常動作が原因でフィルの一部が大きく削られるトラブルが発生した(a)。このような場合、従来のシステムでは一度蓄積ビームを全て捨ててから再入射する必要があったが、本システムでは上述したフィードバック機構により削られた部分へ自動的に入射が集中するため、その必要は全くない。一時的にトップアップ入射の間隔を短くするだけで、最短時間のうちに効率良く復旧することができた(b)。

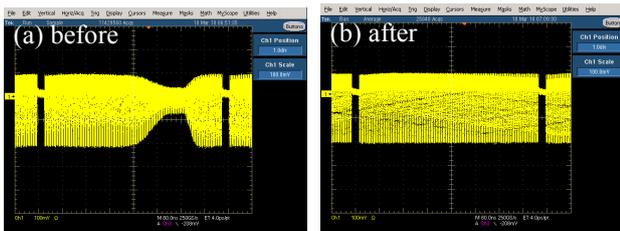


図 7. ビームロス後の復旧例

3.5 実現可能になった様々なフィル

図 8 に本システムを使って生成した様々なフィルパターンの例を示す。言うまでもなく、従来のシステムではこれらのパターンを生成・維持することは不可能であった。特に、冒頭でも述べたハイブリッドフィルは、マルチバンチユーザーとシングルバンチユーザーでマシンタイムの共有を可能にする魅力的なパターンであり、オプティカルチョッパーの高

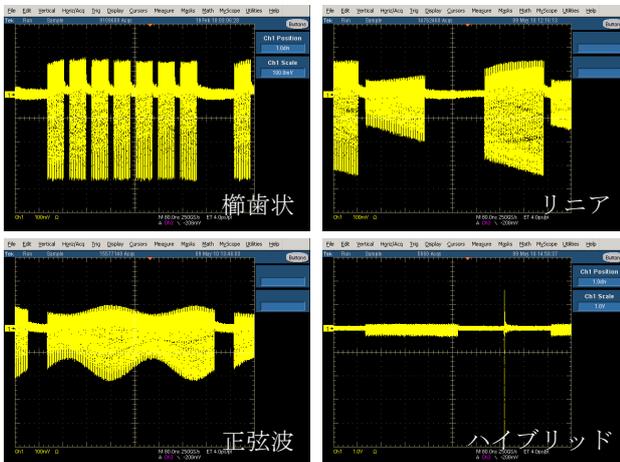


図 8. 新システムで生成した様々なフィル

速化を背景に PF リングでもユーザー運転への導入が検討されている^[6]。本システムの開発で初めてその目処が立ったと言える。また、適当な間隔でバンチを間引いた楕円状フィルやバンチカレントにモジュレーションをつけた特殊フィルは、現在 PF リングで問題となっているビーム進行方向のバンチ結合型不安定性^[7]を抑制する手段の 1 つと目されており、今後もマシンスタディ等での利用が予定されている。

3.6 EPICS を利用した制御パネル

前章で述べたとおり、解析プログラム内で使用している任意のデータは CA ライブラリを通じて EPICS レコードに変換できる。したがって、EPICS 付属の GUI 作成支援ツールを利用すれば、短時間で容易にフィルパターンの制御パネルを作成可能である。ただし、WCM の生波形のような大容量 2 次元データは、ネットワーク負荷を増大させ、スムーズな信号伝達を妨げる恐れがあるため、表示の際は適当な間隔で間引く等の配慮を必要とする。図 9 は、EDM^[3]を用いて作成した制御パネルの一例である。各種波形の他、現在の入射バケット、解析プログラムの繰り返し周波数、異常停止アラーム等が掲載されている。今後は、フィルパターン名の表示機能や各種波形の一括保存機能を付加する予定である。

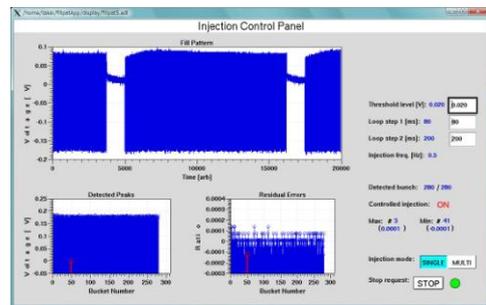


図 9. フィルパターン制御パネル

4. まとめ

任意のフィルパターンを生成・維持することができるフィルパターン制御システムを新たに開発した。システムは汎用のオシロスコープであり、1 台で高速デジタイザーと信号処理機、EPICS-IOC の 3 役を兼ねている。2010 年 3 月からは PF リングのユーザー運転で使用され、マルチバンチフィルの平滑化や深刻なビームロスからの素早い復旧に貢献している。今後もオペレーターやユーザーの意見を取り入れながら、より使い易く柔軟なシステムを目指して改良を続けたい。

参考文献

- [1] T. Honda, *et al.*, Proc. IPAC'10, (2010) 2561.
- [2] B. Kalantari, *et al.*, Proc. EPAC'04, (2004) 2885.
- [3] <http://www.aps.anl.gov/epics/>, and links therein.
- [4] See, e.g., <http://msdn.microsoft.com/>.
- [5] S. Sakanaka, *et al.*, Phys. Rev. STAB **3**, (2000) 050701.
- [6] R. Takai, *et al.*, Proc. IPAC'10, (2010) 2564.
- [7] T. Obina, *et al.*, Proc. BIW'08, (2008) 120.