

INTRODUCTION OF HYBRID FILLING MODE IN PHOTON FACTORY STORAGE RING

Ryota Takai[#], Takashi Obina, Tohru Honda, Yasunori Tanimoto
High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Accelerator Laboratory
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

A hybrid filling pattern which enables shared use of limited machine time between the multi-bunch and single-bunch users has been introduced to the PF user operation. The hybrid filling pattern is composed of 130 low-current bunches (3.1 mA/bunch \times 130 = 400 mA) and a high-current single bunch (50 mA/bunch) located on the opposite side of the ring from the bunch train. We succeeded in maintaining the pattern for six days by an intellectual top-up injection without any trouble. The coupled-bunch instabilities in the multi-bunch component were completely suppressed by using a bunch-by-bunch feedback system. The single bunch impurity was kept below 10^{-6} by a gated RF-KO. The temperature distribution along the ring was similar to that of the usual single-bunch operation with the exception of a few high-impedance vacuum components. This is the first hybrid user operation for the PF-ring.

PF リングにおけるハイブリッド運転モードの導入

1. はじめに

放射光源リングにおけるハイブリッド運転とは、リング内に連続したバンチトレイン（マルチバンチ）と孤立したシングルバンチを同時に蓄積する運転モードのことである。高いトータルカレントを必要とするマルチバンチユーザーと、高いバンチカレントを必要とするシングルバンチユーザーとの間で限られたマシンタイムをシェアできるようになることから、ESRF や SPring-8 のような大型リングでは以前からユーザー運転モードの 1 つとして採用されてきた^[1, 2]。一方、PF リングのような比較的周長の短いリングでは、シングルバンチからの光を選択的に切り出して利用することが難しいといった理由から、これまで導入されてこなかった。すなわち、年間のマシンタイムはマルチバンチ運転期間とシングルバンチ運転期間とに明確に分けられ、絶対数の少ないユーザー側は非常に限られたマシンタイムの中で実験せざるを得ないのが通例であった。

近年、このような小型のリングでも任意のバンチからの光をメカニカルに切り出すことのできる高速光チョッパーが開発された^[3]。PF リングでは、これを機にハイブリッド運転導入に向けた検討を開始し^[4]、いくつかの光源側技術開発と 2 度の光源・測定器合同スタディを経て、2012 年 2 月にユーザー運転への正式導入を果たした。本稿では、この PF リング初のハイブリッド運転実現に貢献した技術対策を紹介するとともに、実際のハイブリッド運転中に計測したリングおよび蓄積ビームの状況、今後の改善項目等について述べる。

2. 安定なハイブリッド運転実現に寄与した主な技術対策

2.1 個別バンチフィードバックシステム

PF リングのマルチバンチ運転では、蓄積電流の増加に伴って個々のバンチが航跡場を介して結合し、コヒーレントな振動が誘起される“バンチ結合型不安定性”が発現することが確認されている。不安定によるビームの重心振動は放射光の強度変動に直結するばかりでなく、不安定の成長率が放射減衰による減衰率を上回ると入射効率の低下や深刻なビームロスにつながるため、外部から何らかの安定化対策を施さなければならない。2008 年 10 月に行った最初のハイブリッド運転試験でも行ったように^[4]、横方向（ビーム断面方向）の不安定性に関しては 8 極磁場がもたらすランダウ減衰効果を利用することで抑制することができる。しかしながら、このような非線形磁場の導入はリングの光学口径を小さくするため、特にトップアップ入射が不可欠なハイブリッドフィルではビームロスの観点から採用できない。

そこで、横方向不安定性の抑制には、“iGp (integrated Gigasample Processor)” と呼ばれるデジタル信号処理器（KEK, SLAC, INFN で共同開発、Dimtel 社製）を核とした個別バンチフィードバックシステムを使用した^[5]。図 1 にシステム全体のブロック図を示す。このシステムは、ビームの重心振動の大きさをバンチ毎に検出し、その情報を専用のビームキッカーにフィードバックすることで積極的に不安定を抑制するもので、KEKB をはじめとする近代の大電流蓄積リングでは不可欠なシステムとなっている。導入当初はシングルバンチからの突出した入力信号により iGp 内の ADC が飽和し、適切な信号処理ができなくなるという問題があったが、任意のバンチからの信号にマスクをかけられるようファームウェアを改良することで、シングルバンチとマルチバンチが共存するハイブリッドフィルでも安定な蓄積が可能となった。

[#] ryota.takai@kek.jp

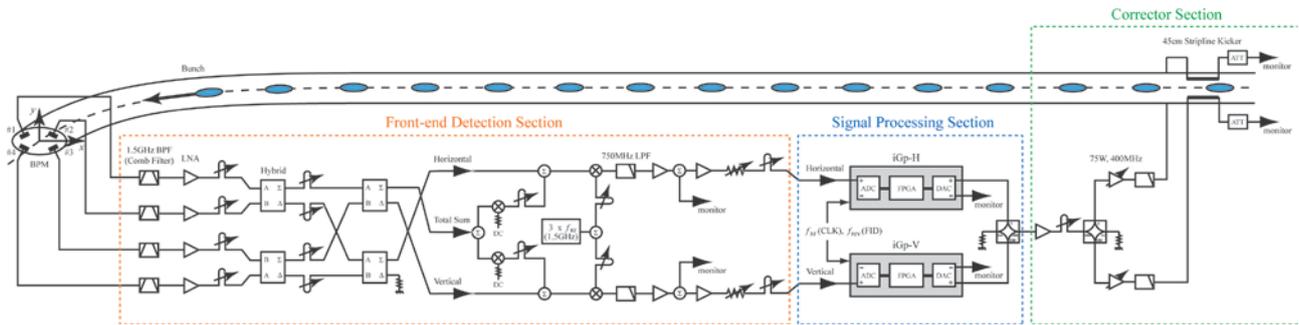


図 1：横方向フィードバックシステムのブロック図

ビーム進行方向の不安定性についても、iGp を使用した個別バンチフィードバックシステムにより抑制することができた^[6]。ただし、後述する旧式ゲートバルブの撤去により現在の進行方向フィードバックシステムでは抑えられないランダムな 4 極振動（バンチの伸縮に対応）が起こらなくなったため、これまでその対策として使用してきた“RF 位相変調法^[7]”を併用する必要がなかった。これにより実効的なバンチ長が以前より短くなり、エネルギー分散のある箇所設置されたビームラインでは同じ蓄積電流でも放射光輝度が上がるという恩恵もあった。図 2 に進行方向フィードバックに使用している空洞型ビームキッカーの写真を示す。



図 2：空洞型進行方向キッカー（DAFNE タイプ）

2.2 入射制御システム

蓄積ビームの寿命はバンチカレントに反比例して短くなる（タウシェック効果）。したがって、バンチカレントが大きく異なるビームから構成されているハイブリッドフィルをトップアップ入射で一定に維持するためには、ビーム寿命に応じて入射バケットを適当に振り分ける柔軟な入射制御システムが不可欠である。そこで、我々は汎用のデジタルオシロスコープ（Tektronix, DPO7104, 図 3 参照）を用いた入射制御システムを新たに開発した^[8]。システムを中心となるこのオシロスコープには、OS として Windows がインストールされているため、VISA ライブラリを利用すれば入力信号に対して任意の処理を施すことができる。ここでは BPM の出力信号を

直接入力し^{*1}、指定した理想のバンチカレント分布から最も遠いバンチを選び出すための解析プログラムを常駐させた。また、KEK で加速器制御の標準フレームワークとして採用している“EPICS”の Software IOC（Input/Output Controller）も同じ Windows 上で起動し、選び出されたバンチのバケットアドレスを制御ネットワークを通じて Linac のタイミングシステムに送信する役割も持たせた。バンチカレントに対するこの一連のフィードバック機構によりビームは常に理想から最も遠いバンチを狙って入射されるようになるため、ハイブリッドフィルのような偏ったバンチカレント分布でも一定に維持することが可能となった。なお、この入射制御システムは、通常マルチバンチ運転においてもフィルの平滑化や深刻なビームロスからの早期復旧、フィルパターン制御によるビーム不安定の回避等に役立っている。システムとしての安定度にも特に問題はない。

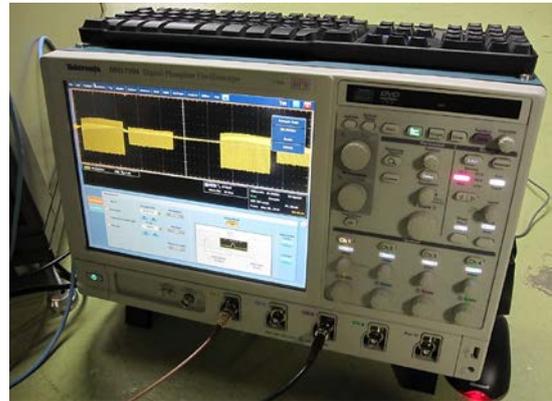


図 3：オールインワンのシンプルな入射制御装置として使用している汎用オシロスコープ

2.3 旧式ゲートバルブの撤去

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災後に初めてシングルバンチを蓄積して行ったビームライン調整運転において、リングに設置されていた旧式の RF シールド付きゲートバルブ付近で深刻な真空悪化が観測された。現場を詳細に調査したところ、当該ゲートバルブの真空シール材として使用されていた O リング（エチレンプロピレンゴム製）の一部が変質しており、周辺の金属部も異常な発熱があったことを窺

*1 当初はバンチカレントの測定に壁電流モニターを使用していたが、震災で破損したためボタン電極型の BPM に切り替えた。

わせる干渉色を呈していることが分かった（図 4 参照）。地震以前の運転でこのような発熱が発生したことはないことから、地震の影響で RF シールドのスライド機構に動作不良が生じ、シングルバンチが立てる HOM を十分抑制できなかつたことが原因と推測される。

この問題が発覚後、全部で 3 台設置されていた同型のゲートバルブをダミーダクトに交換したところ^{*2}、それまでのマルチバンチ運転では必ず発生していたビーム進行方向の 4 極振動が起こらなくなっていることに気付いた。正確には、4 極振動が発生する不安定領域が変化しており、少なくともユーザー運転に使用している 450 mA の蓄積電流では 4 極振動が発現しなくなった。ハイブリッドフィルにおいても同様に、ゲートバルブ撤去前は進行方向の不安定性が原因でトータル 400 mA（マルチ 350 mA + シングル 50 mA）までしか蓄積し得なかつたが、撤去後は目標としていたトータル 450 mA（マルチ 400 mA + シングル 50 mA）での蓄積が可能になった。撤去したゲートバルブの内部構造が 4 極振動のインピーダンス源となっていたことを示唆する結果である。

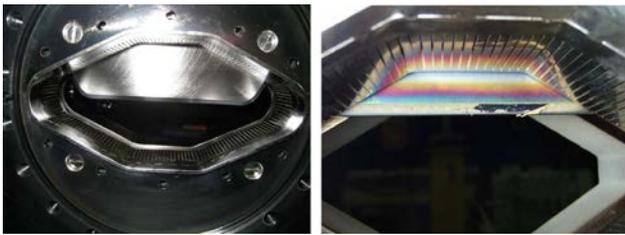


図 4：正常なゲートバルブ（左）と発熱した旧式ゲートバルブ（右）

3. ハイブリッド運転中のリング状況

上記の技術対策により安定なハイブリッド運転の目途が付き、2 度の光源・測定器合同スタディでハイブリッドフィルの有用性も確認されたことから、2012 年 2 月 3 日からの 6 日間、例年のシングルバンチ運転に替えてハイブリッド運転が実施された。稼働を開始してから今年で 30 年になる PF リングにおいて、ハイブリッドフィルがユーザー運転に採用されたのはこれが初めてである。

BPM で観測したハイブリッド運転中のフィルパターンを図 5 に示す。リング 1 周（624 ns）は、130 個の小バンチからなるバンチトレインと、残りの空きバケット列の中央に入射された 1 個のシングルバンチから構成されている。シングルバンチのバンチカレントは 50 mA で、マルチバンチ部と合わせたトータルの蓄積電流は通常のマルチバンチ運転と同じ 450 mA に設定された（ $3.1 \text{ mA/bunch} \times 130 + 50 \text{ mA/bunch} = 450 \text{ mA}$ ）。このようなフィルパターンを上述した入射制御システムにより 6 日間一定に維持した。その間、ハイブリッドフィルであることに起因するマシントラブルは皆無であった。マルチバンチ部で発生するバンチ結合型不安定性は、水平・鉛

直・進行方向とも上記の個別バンチフィードバックシステムにより完全に抑制できた。シングルバンチのバンチ純度（メインのシングルバンチとその 1 バケット後方に生じる不要バンチとの強度比）は、シングルバンチ後方の領域を選択的に RF-KO することで 10^{-6} 以下に維持された。

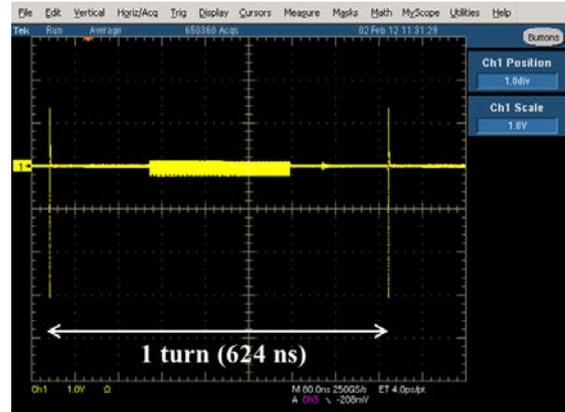


図 5：130 個の小バンチからなるバンチトレイン（ $3.1 \text{ mA/bunch} \times 130 = 400 \text{ mA}$ ）と 1 個のシングルバンチ（ 50 mA/bunch ）から構成されたハイブリッドフィル

図 6 は、ハイブリッド運転中、および通常のシングルバンチ運転中（ 50 mA/bunch ）のリング 1 周にわたる発熱分布である。2 つの分布はよく似ているが、RF-Q 電磁石用のセラミックダクトと超伝導ウイグラー（VW#14）下流のペローズダクトについてはハイブリッド運転の方が高温になっている。どちらの温度も許容範囲内ではあるが、既に使用していない RF-Q のセラミックダクトの方は 2012 年夏のメンテナンス期間中に撤去する予定である。これにより、次回のハイブリッド運転からはリング 1 周を通じて 100°C を超えるビームダクトのない、より健全な運転状態を期待できる。

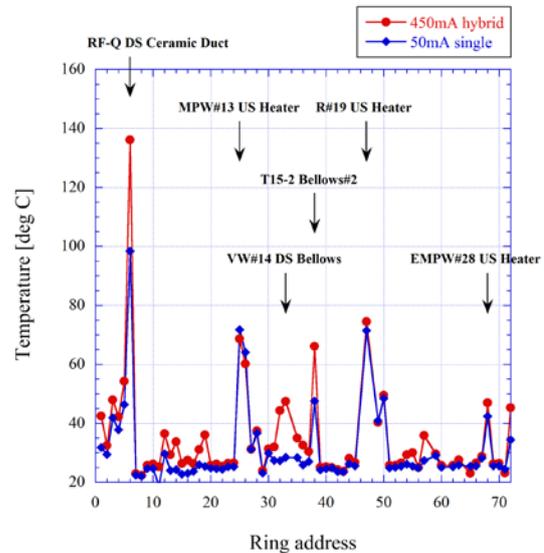


図 6：リング 1 周にわたる発熱分布の比較（赤：ハイブリッド運転，青：シングルバンチ運転）

^{*2} 最終的には全てオールメタルのゲートバルブに交換する予定である。

図 7 は、ハイブリッド運転中にトップアップ入射を停止した際の、マルチバンチ・シングルバンチ各成分の電流変化である。これらのデータは、上述した入射制御用オシロスコープで計測したバンチ毎の BPM 信号に、DCCT を用いて較正した変換係数を乗じて得られたものである。それぞれのグラフに指数関数をフィットして時定数を見積もると、マルチバンチ部 (3.1 mA/bunch) の寿命が 9.1 時間、シングルバンチ部 (50 mA/bunch) の寿命が 2.0 時間となった。シングルバンチ部の寿命の方が 4 倍以上短いのは、バンチ内の電子-電子散乱 (タウチェック効果) の影響と考えられる。DCCT で計測したハイブリッドフィル全体での寿命は 5.3 時間程度であり、通常のシングルバンチ運転時 (50 mA/bunch) の寿命: 2.0 時間よりは長い、マルチバンチ運転時 (1.8 mA/bunch) の寿命: 23 時間と比べると圧倒的に短いという結果になった。これは、ビームダクトの発熱による真空悪化の影響を考慮すると妥当な値である。

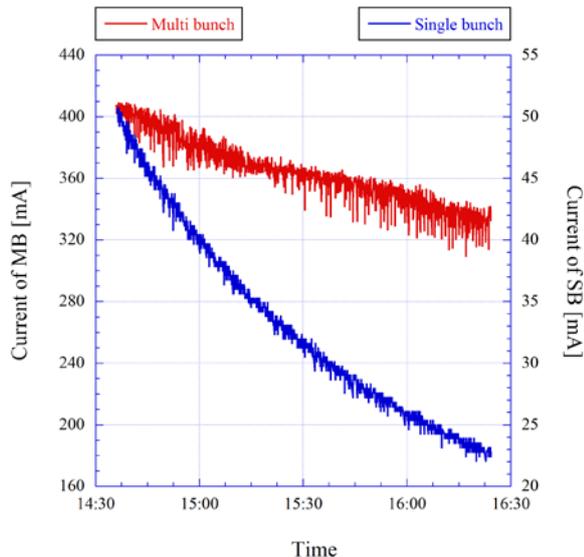


図 7: ハイブリッドフィル各成分の電流変化 (赤: マルチバンチ部, 青: シングルバンチ部)

2 時間軸同期掃引型のストリークカメラ (浜松ホトニクス, C5680 + M5675 + M5679) で観測したハイブリッドフィルのストリーク像、および強度分布を図 8 に示す。連続したマルチバンチ部と孤立したシングルバンチが鮮明に映し出されている。ストリークカメラの同期周波数の関係上、マルチバンチは全体の 1/4 (33 個) しか映っていない。マルチバンチ部の像が若干傾いて見えるのは、シングルバンチがもたらす大きなビームローディングの影響で、進行方向のビームポジションがバンチトレインに沿ってリニアに変化しているためである。Potential Well Distortion と Microwave Instability の影響により、シングルバンチの密度分布がバンチのヘッド側 (ストリーク像の上方) に偏っていることも確認できる⁹⁾。マルチバンチ部とシングルバンチ部の強度比が理想より若干小さく見える原因としては、横軸方向の時間分解能が不足しているのと、シングルバンチ

中心部の撮像時にストリークカメラ内の MCP が飽和していた可能性がある。より時間分解能が高いレンジで取得した 10 回分の積算平均データから、マルチバンチ・シングルバンチ各成分のバンチ長を評価すると、それぞれ 36.8 ps、56.3 ps となった (自然バンチ長: 33 ps)。これらはストリークカメラの入力光学系で生じる色収差や同期掃引のタイミングジッター等を考慮すると妥当な値であり、過去の詳細な計測結果¹⁰⁾とも矛盾しない。

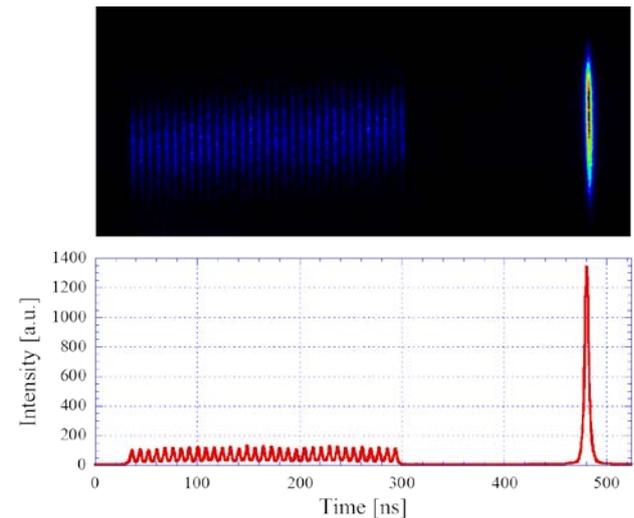


図 8: ハイブリッドフィルのストリーク像と強度分布 (リング 1 周: 624 ns)

4. ユーザーからの評価と今後の改善項目

6 日間に及んだハイブリッド運転終了後、各ビームライン担当者にユーザーからの評価を聞き取り調査した。ユーザーの多くを占めるマルチバンチユーザーからは、通常のマルチバンチ運転と全く遜色のない実験ができ、実質的なビームタイム増となるので今後も継続を望むとの意見が大半であったが、一部のビームラインからは光の強度変動がいつもより若干大きく感じたとの意見も挙がった。光源側では期間中にビーム不安定等は検知されていないが、今後ビームライン側の調査も含めて原因を追究していきたい。

一方、シングルバンチユーザーからは、高速の光チョッパーがないと実験に支障があるため、チョッパーの早期開発と従来のシングルバンチ運転存続を希望する意見がいくつかわ寄せられた。また、今回はリングの発熱・真空度の悪化に配慮してマルチバンチ部のバンチカレントが 3 mA/bunch 程度になるようバンチトレインの長さを決定したが、光を時間的に分離して使用する立場からはバンチトレインをできるだけ短くし、シングルバンチ前後の時間間隔をより大きく確保してほしいとの要望が出された。

光源側の技術課題としては、シングルバンチ前後の同時純化手法の開発や、バンチカレントの制御分解能の向上等が挙げられる。今後もより安定で実験に適したハイブリッド運転モードの確立を目指して努力を続けたい。

5. まとめ

PF リングにおいて初のハイブリッドユーザー運転が実施された。フィルパターンは 130 個の小バンチからなるバンチトレイン ($3.1 \text{ mA/bunch} \times 130 = 400 \text{ mA}$) と 1 個のシングルバンチ (50 mA/bunch) から構成されており、バンチカレントのフィードバック機構を備えた入射制御システムにより 6 日間一定に維持された。蓄積ビームの安定性やビームダクトの発熱に問題はなく、ユーザーからの評価も上々であった。今後もより有用なハイブリッド運転実現に向けて努力を続けていく。

謝辞

KEK 加速器研究施設の飛山真理教授には、個別バンチフィードバックシステムの構築に際して多大なご協力をいただきました。また、KEK 物質構造科学研究所の岸本俊二准教授には、合同スタディの調整やユーザー意見の集約等で大変お世話になりました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] JM. Filhol, *et al.*, Proc. of PAC99, (1999) 2334.
- [2] T. Nakamura, *et al.*, Proc. of EPAC08, (2008) 3284.
- [3] K. Ito, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **80**, (2009) 123101.
- [4] R. Takai, *et al.*, Proc. of IPAC10, (2010) 2564.
- [5] R. Takai, *et al.*, Proc. of DIPAC09, (2009) 59.
- [6] T. Obina, *et al.*, Proc. of BIW08, (2008) 120.
- [7] S. Sakanaka, *et al.*, Phys. Rev. STAB **3**, (2000) 050701.
- [8] R. Takai, *et al.*, Proc. of 7th Annual Meeting of PASJ, (2010) 659.
- [9] R. Holtzapple, *et al.*, Phys. Rev. STAB **3**, (2000) 034401.
- [10] T. Obina, *et al.*, Proc. of DIPAC07, (2007) 256.