

SPring-8 における高純度バンチ運転

青木 毅 助高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
田村和宏 助高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

要旨 現在、SPring-8 では、高いバンチ純度で大電流の孤立バンチを用いた運転が定常的に行われ、単パルス放射光を必要とする時間分解実験等のユーザー実験に利用されている。バンチ純度とは、電子ビームから放射される放射光がどれだけ純粋な単パルス光であるかを表す指標であり、孤立バンチの電子数とその前後に存在する不要なバンチの電子数の比で表される。SPring-8 では $10^9 \sim 10^{10}$ という高いバンチ純度と孤立バンチのバンチ電流の高い均一性と安定性が実現されている。本記事では、SPring-8 の入射器における高純度単バンチビームの生成法と蓄積リングでの高精度バンチ純度測定について解説する他、高純度バンチ運転の現状について報告する。

1. はじめに

SPring-8 は 8 GeV の高エネルギー電子ビームを用いた第三世代の高輝度放射光施設で、電子ビームを蓄積して放射光利用を行う蓄積リングと、その入射器である線形加速器、ブースターの三つの加速器で構成される。SPring-8 の特徴として、世界最高レベルの高輝度放射光をユーザーに供給している事他に、短パルス X 線を利用するユーザーのために大電流孤立バンチを複数個周回させる運転が安定に行われている事が挙げられる。

SPring-8 蓄積リングは周長 1436 m、エネルギー 8 GeV の放射光専用電子蓄積リングである。SPring-8 蓄積リングには電子が安定に存在できるバケットと呼ばれる領域が 2436 個あり、電子はその中でバンチと呼ばれる塊を形成してリング内を周回している。電子は偏向電磁石や挿入光源で放射光を発生してそのエネルギーの一部を失うが、リングの四箇所に配置された高周波加速装置によりエネルギーを補充されるため安定に周回を続けることができる。高周波加速の周波数が 508.58 MHz であるため、バケットの時間間隔は約 2 ns となる。SPring-8 蓄積リングの電子ビームが出す放射光はバンチの時間幅に等しい約 40 ps のごく短いパルス光であり、どのバケットにどれだけの電子を蓄積するかによって放射光の時間構造が決まる。例えば、2436 個のバケット全てに電子を蓄積した場合はパルス光が 2 ns 間隔で連続的に放射され、一つのバケットだけに電子を蓄積した場合はバンチの周回時間 5 μ s で繰り返される単パルス光が放射されることになる。

大電流の孤立バンチ（主バンチとも呼ぶ）の電子数に対する、前後の不要なバンチ（不純バンチと呼ぶ）の電子数の比で「バンチ不純度」を定義し、またその逆数を「バンチ純度」と表すと、これらの値を用いて放射光の単パルス

光としての質、単パルス光の純粋さを表すことができる。純粋な単パルス光実現のためには、主バンチ以外のバケットには一つの電子も存在しない状態を作り出す必要がある。SPring-8 でのユーザー運転では、微少なバンチ電流のバンチを多数個蓄積する多バンチモード、バンチ電流の大きな複数のバンチあるいはバンチ列を等間隔に蓄積する少数バンチモード、多バンチモードと少数バンチモードが共存するハイブリッドモードの三種類の運転モードで放射光が供給されている。単パルス放射光利用のために高純度孤立バンチによる運転が必要とされているのは、少数バンチモードとハイブリッドモードである。

本記事では、SPring-8 の入射器における高純度単バンチビームの生成法と蓄積リングでの高精度バンチ純度測定について解説し、SPring-8 で達成されているバンチ不純度を示す。また、現在 SPring-8 でのユーザー運転では、微少な電子ビームを定期的に入射して蓄積電流を一定に保つトップアップ運転が行われている。少数バンチ、ハイブリッドモード時には、蓄積電流だけでなく、各孤立バンチのバンチ電流を一様かつ一定に保つよう、入射が頻繁に行われている。高純度バンチ運転の現状として、トップアップ運転中のバンチ不純度の変化についても報告する。

2. 高いバンチ純度の必要性

単パルス放射光は、ナノ物質・材料の外場に対する構造応答の実時間計測、レーザーにより対象物質の電子状態を特定の励起状態へ遷移させ、そこからの緩和過程を単パルス放射光をプローブとして計測するポンプ・プローブ実験、ナノ秒レベルでの磁化構造等、物質の構造変化を調べる X 線トポグラフィ、また、結晶場中の原子核の束縛状態を調べる核共鳴散乱実験等に利用されている。

核共鳴散乱実験では、吸収のエネルギー幅が μeV から neV と極めて狭く、核共鳴散乱に寄与する X 線が極端に少ないので、その時間分解測定には高い S/N 比が要求される。この実験で測定対象となるのは、放射光の照射後、原子核の寿命に対応してサブナノ秒からマイクロ秒で発生する核共鳴散乱 X 線である。この実験においては、核共鳴散乱 X 線とは別に発生する電子散乱 X 線の影響をいかに抑えるかが、測定精度を左右することになる。電子散乱 X 線は放射光の照射後ピコ秒以下の短時間に発生する X 線で、核共鳴散乱 X 線の 10^5 から 10^{10} も強力な X 線である。メインの単パルス光によって引き起こされた核共鳴散乱過程が続いている間に、 10^{-10} 以上の不純度の不純バンチによるパルス光の照射が行われた場合、不純バンチからのパルス光によって発生する電子散乱 X 線は、メインの単パルス光による核共鳴散乱 X 線と同程度の強度のノイズとなってしまう。これにより測定の S/N 比が著しく低下してしまうため、核共鳴散乱実験においてはできるだけ純粋な単パルス放射光を供給しなければならない。そのためには、不要な放射光の原因となる不純バンチを除去し高純度のバンチを生成する技術が必要となる。

SPring-8 では、核共鳴散乱実験における測定精度等により考慮された「主バンチから 2 ns 離れた隣のバケットにおけるバンチ不純度は 10^{-9} 以下とすること、10 ns の間の積分値についても同程度の不純度とすること」という実験者側の要請を当初の目標として、高純度バンチの生成とバンチ純度測定技術の開発を行った。

3. 不純バンチの原因とバンチ純化の方法

本章では SPring-8 において不純バンチが生ずる原因とそれらを除去し、高純度バンチ運転を実現する方法について解説する。本文中では、必要とする主バンチ以外の不要なバンチを除去して高純度の単バンチビームを生成することを「バンチ純化」と記述する。

3.1 不純バンチの原因

一般に電子蓄積リングにおいて不純バンチが生ずる原因には、入射ビーム自体の純度が悪いこと、蓄積リングに蓄積中に徐々に純度が悪化していく現象が起こること、の二つがある。蓄積中に純度が悪化するものは、電子・電子散乱でエネルギーを得た孤立バンチ内の電子がバケットから飛び出し、その内の特定のエネルギーをもつ電子が後方のバケットに再捕獲されることが原因である^{1,2)}。SPring-8 蓄積リングの場合、電子エネルギーが 8 GeV と非常に高く放射減衰の効果が大きいので、後方のバケットに再捕獲されるためには非常に大きなエネルギー偏差が必要となる。しかしながら、そのようなエネルギー偏差を持つ電子は、後方のバケットに捕獲される前にエネルギー分散の大きな位置で真空ダクト等に衝突し失われてしまうため、SP-

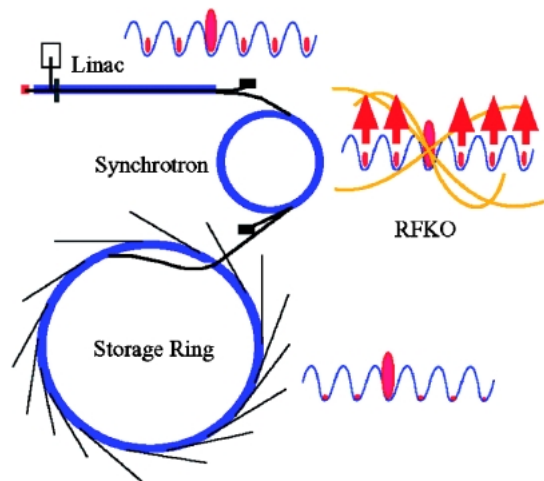


Fig. 1 Schematic illustration of the bunch purification at SPring-8.

ring-8 蓄積リングでは純度の悪化は起こらない。SPring-8 において入射ビームの純度を悪化させているのは、線形加速器の電子銃におけるグリッドエミッションによる暗電流、及び初段加速管上流部からのフィールドエミッションによる暗電流が主なものである。蓄積リングでは純度の悪化が起こらないことから、入射器において純化を行い高純度の単バンチビームを蓄積リングに入射すれば、蓄積リングでの高純度バンチ運転が実現可能となる。

3.2 バンチ純化の方法

Fig. 1 に SPring-8 におけるバンチ純化の概略図を示す。SPring-8 では、線形加速器の電子銃直下流に配置したディフレクターによる電子銃の暗電流の除去、及びブースターにおける RF Knockout (RFKO) による不純バンチの除去によりバンチ純化を行っている。入射器におけるバンチ純化のプロセスを経て、蓄積リングの任意のバケットに精度良く高純度単バンチビームを入射することにより、蓄積リングにおいて高純度バンチを用いた多様なフィリングパターンを実現することが可能となっている。なお蓄積リングでのバンチ純化は、8 GeV という高いビームエネルギーのため非効率であることや、バンチ純化のためにユーザータイムが中断されることを避けるため、行われていない。

3.2.1 線型加速器のディフレクター

線形加速器は、電子銃で電子ビームを作り出し 1 GeV まで加速する、全長 140 m の直線状の加速器である。

ディフレクターは、電子銃の直下流に配置した 2 つの電極間に、電子ビームの時間幅 1 ns に合わせた時間差をつけて -7 kV と $+7 \text{ kV}$ のパルス状の高電圧を印加する装置である。電子銃のグリッドエミッションによる暗電流は、ディフレクターで径方向に曲げられ、電極の 150 mm

下流にあるアイリスに当てることにより除去される。また、ディフレクター下流部の初段加速管上流部からのフィールドエミッションも暗電流の原因となることがわかっており、加速管に供給する電力を減少させるように調整することで暗電流を抑制することが可能となっている^{3,4)}。

3.2.2 ブースターの RFKO

ブースターは、線形加速器から入射された 1 GeV の電子を 8 GeV まで加速して蓄積リングに入射するための、周長 400 m のレーストラック型の円形加速器である。線形加速器で除去しきれなかった暗電流による不純バンチは、ブースターに設置された RFKO システムにより除去される^{5,6)}。RFKO による純化は、4 本のストリップライン型電極に大電力の高周波信号を供給し、電子ビームを垂直方向にキックして真空ダクトに衝突させるという極めて単純

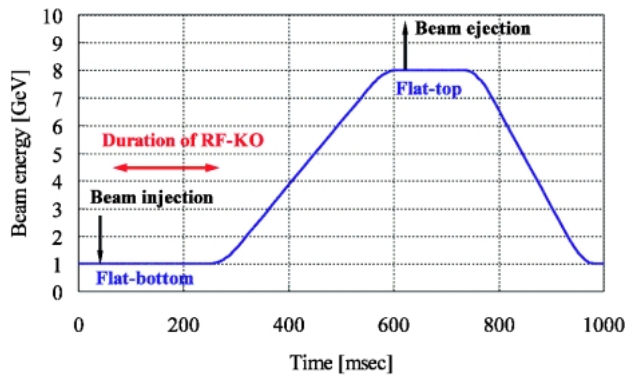


Fig. 2 Beam energy pattern of booster synchrotron. RFKO system operates at 1 GeV flat-bottom after beam injection.

な方法である。ブースターでは垂直方向のダクト寸法が 30 mm と小さいため、垂直方向にキックを行う。Fig. 2 にブースターにおけるビームエネルギーのランピングパターン、入出射のタイミング、及び RFKO を行う区間を示す。電子ビームが 1 GeV の低エネルギーの時に長時間キックを行えるよう、250 msec のフラットボトム区間を設けている。キックの効率を上げるためにはブースターを周回している電子ビームの固有振動に共鳴するような周波数でのキックが有効である。垂直方向のベータトロンチューン（リング一周当たりのビームの固有振動数）が 8.78 回であるため、周回周波数の 756 kHz に 1.78（整数 + チューンの小数）を掛けた周波数である 1.35 MHz 近傍の信号でキックすることで電子ビームの振動を励起し、効率よく不純バンチを除去することが可能となる。初期の設計では、蓄積リングへの入射時間短縮のために、1 サイクル当たり最大 8 パルスの入出射を可能としていた。これら 8 つのバケットに入射されたバンチには影響を与えることなく、他のバケットに入った不要なバンチのみを除去することが RFKO システムの目的である。しかもこれら 8 つのバケットからわずか 2 ns しか離れていない隣のバケット内の電子をも除去しなければならない。

Fig. 3 に RFKO システムのブロック図を示す。8 つのバケットの電子を残すように周回周波数の 4 倍の繰り返し周波数をもつ矩形波を用いることとした。矩形波の約 4 ns の速い立ち上がり・立ち下りのゼロクロス部を、電子を残したい 8 つのバケットに一致させることにより、主バンチを残しつつ 2 ns 離れた両隣のバケットに存在する不必要なバンチをキックすることができる。加速周波数 508.58 MHz を外部クロックとして任意波形発生器で作成

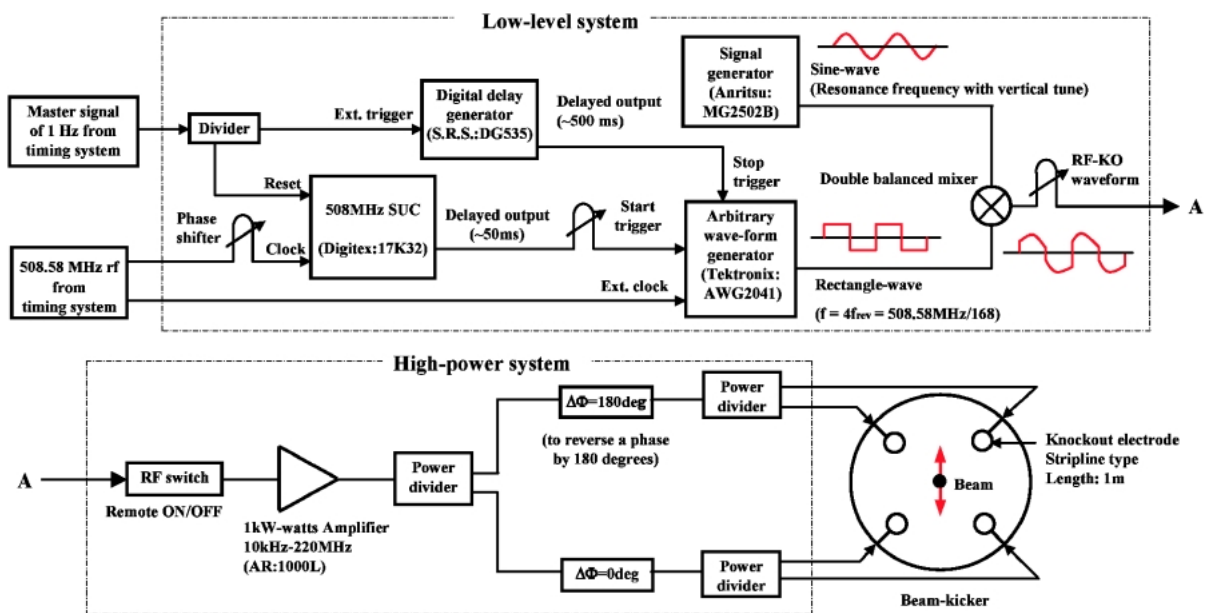


Fig. 3 Block diagram of RFKO system of SPring-8 booster synchrotron.

した矩形波に、シンセサイズド信号発生器から出力される垂直のベータatronチューンと共鳴する周波数のサイン波を掛け合わせるにより、RFKO波形が作成される。

ゼロクロス部のタイミング調整は、508.58 MHz をクロックとする Synchronous universal counter (SUC) のデジタルディレイ出力の出力タイミングとフェーズシフターの調整により行われる。SUC のデジタルディレイ出力により主バンチのバケットのアドレスを選択し、フェーズシフターで約 1 ns の範囲の微調整を行うことによりゼロクロス部と主バンチとを 40 ps 以下の精度で一致させている。RFKO 信号は最大 1.2 kW 出力が可能なハイパワーアンプで増幅し、ビームを垂直方向にキックするよう 2 電極だけ位相反転を行い 4 電極に分配する。電極は長さ 1 m のストリップライン型であり、電極出力側では -30 dB のアッテネーターを通して RFKO 出力信号がモニターされる。

4. バンチ純化で重要となるパラメータの調整

これまでに高純度のバンチを達成するために数々のスタディを行い、バンチ純度に密接に関わるブースターの運転パラメータについての最適化を行っている。以下に RFKO システムのチューニングと同時に行う、各種運転パラメータの調整について説明する。

4.1 ベータatronチューンの均一性

RFKO により不純バンチを効率よく除去するためには、ベータatronチューンを一定にして共鳴状態を長時間保つことが重要である。ブースターの電磁石の磁場はあらかじめ決められたビームエネルギーのパターンに従い変動しているため、ある程度のチューンの変動は避けられない。ビームの入射から出射までのチューンの変動を精度良く測定することは最適なベータatronチューンを設定するためには必要不可欠である。リアルタイムスペクトラムアナライザ (Tektronix : 3056) の高速 FFT 解析によりビーム入射から出射までのチューンの時間変化が測定可能となり、チューンの調整が容易になったことがバンチ純度の向上に非常に役立っている。このチューン測定により、ベータatronチューンの周波数を変動させる要因がいくつか存在することが確認され、これらの抑制が必要になった。

まず問題になったのが、RFKO を行うフラットボトム区間における四極電磁石の磁場の変化が大きく、ベータatronチューンを変動させていたことである。1 GeV における電磁石電源の出力電流は電流偏差が 2×10^{-4} 以下の精度で出力される。ところが、1 サイクルごとに 1 GeV から 8 GeV に変化する動的な磁場は必ずしもその電流パターンと同じ精度で制御されていなかった。立下り後に磁気余効と呼ばれる遅い変動磁場がフラットであるはずの 1

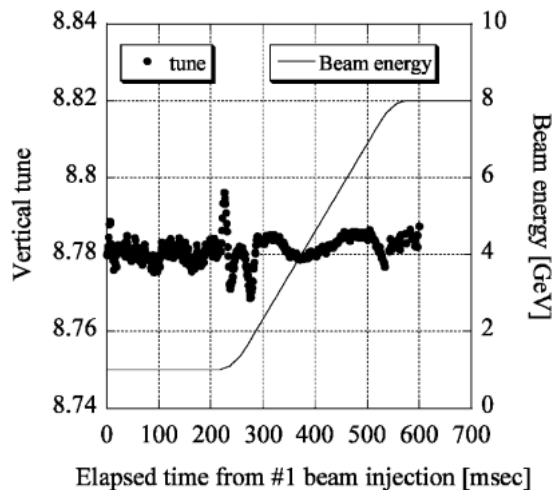


Fig. 4 Time variation of vertical betatron tune.

GeV 区間の磁場を変動させていたため、ベータatronチューンが一定に保たれていなかった。電磁石電源の出力は磁場を一定に保つようなフィードバックを行っていないため、チューンの変化を測定しながら、チューン値が一定になるようにフラットボトムにおける励磁電流パターンの再調整を行った。ベータatronチューンを変動させるもう一つの大きな要因として、電磁石電源のリップル成分がある。電磁石電源はサイリスタによる 12パルスの出力制御を行っているため、商用周波数である 60 Hz の高調波成分が出力電流にリップルを生じさせる。電流リップル抑制のため、ベータatronチューンを観測しながら電源のアクティブフィルタの調整を行い出力電流の高調波成分の抑制を行った。その結果、60 Hz, 120 Hz の低い周波数成分の影響が大きいのことがわかり、これらを抑えるように調整を行った。これらの調整により、ベータatronチューンの変動を最小に抑えることができるようになった。Fig. 4 に調整後の垂直方向のベータatronチューンを示す。チューン値は 8.78ではほぼ一定値を保っている。

また、RFKO 周波数とバンチ純度の関係についてスタディを行った結果、RFKO 周波数の変動が ± 500 Hz の範囲内であればバンチ不純度の増加に大きな影響がないことがわかっていて。従って、バンチ純化を行っている間は RFKO 周波数とベータatronチューンの共鳴周波数が相対的にこの周波数範囲からずれないようにする必要がある。ベータatronチューンの変動に関して、ビームエネルギーの変動によるベータatronチューンの変動の割合を表すクロマティシティというパラメータがある。クロマティシティが大きいほどベータatronチューンの変動の可能性が高くなるため、フラットボトム区間においてはクロマティシティを 0 に保つように六極電磁石の励磁電流を調整している。

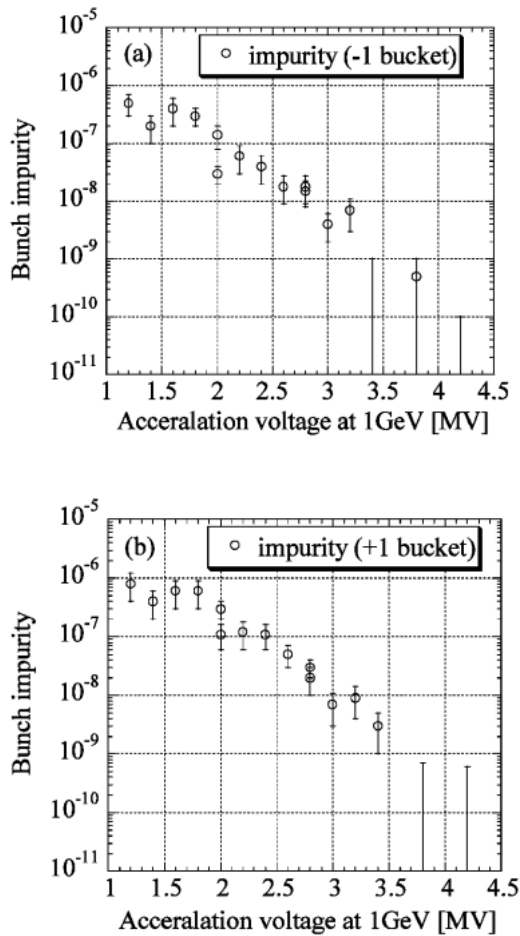


Fig. 5 Relation between the acceleration voltage of the booster and the bunch impurity. Upper (a) is -1 st bucket and lower (b) is +1 st bucket, which are just before and after the main rf bucket, respectively.

4.2 高周波加速電圧とバンチ純度の関係

以前にバンチ純度が1桁程度悪化する異常が発生し、原因調査を行った。この時発生していた機器の異常は508.58 MHz 基準信号を伝送する光ファイバーが折れたことによる信号のレベルと位相の変化であった。ブースターでは2台のクライストロンを使用し、それぞれのクライストロンの相対位相を1 GeV の低エネルギーでは反対位相になるように、8 GeV では同位相になるようにして実効的な加速電圧の制御を行っている。ところが光ファイバーが折れたことにより位相制御が異常となり、加速電圧が大きく変動していた。

純度悪化の原因が加速電圧の変動にあることを確認するため、主バンチの隣のバケットについて、1 GeV フラットボトム加速電圧を変えながらバンチ不純度の変化を測定した。結果を Fig. 5 に示す。-1 はメインバンチの前方を、+1 は後方のバケットを表す。バンチ不純度が高いのは、測定に要する時間を短縮し、かつバンチ不純度の加速電圧依存性を明確にするために、RFKO の出力を下げて

不純度を意図的に高くしたためである。結果は予想通り加速電圧がバンチ純度に大きく関係することを示すものであった。幸運なことに、この結果は加速電圧を高くすれば指数関数的にバンチ純度が向上することを示すものであった。

以上の結果より、ビーム不安定性を生じることなく安定な運転が可能な加速電圧の上限値の調査を行った。加速電圧を変化させるとシンクロトロンチューン（ビームの進行方向における振動数）が変化してベータトロンチューンとの共鳴が発生し、大きなビーム損失を生じるポイントがいくつか存在することがわかった。これらシンクロ・ベータ結合共鳴によるビーム不安定性を避け、かつ高いバンチ純度が得られる最適な加速電圧として、設計値の2 MV から6.4 MV へ変更することにより、バンチ不純度を二桁近く下げることができた。

5. バンチ純度モニター

SPring-8 蓄積リングにおける少数バンチ、ハイブリッドモード時のバンチ電流値は0.3 mA から1.5 mA の値であるが、本章では1 mA をバンチ電流の典型的な値として話を進める。SPring-8 蓄積リングの場合、バンチ電流1 mA の孤立バンチの中には 3×10^{10} 個の電子が含まれている。孤立バンチ前後のバケットにおいて電子の有無を判断するためには 3×10^{10} 以上のダイナミックレンジとバンチ間隔2 ns 以下の時間分解能を有するモニターが必要となる。

多くの放射光用電子蓄積リングにおいて、バンチ純度の測定法として光子計数法が採用されている^{1,2)}。光子計数法は、放射光を一つ一つの光子として検出し、その検出タイミングとバンチの周回に同期した基準信号との時間差を統計処理し、各バンチから放出される放射光パルスの平均的な時間構造を測定する方法であり、広いダイナミックレンジを有する測定法として知られている。しかしながら、そのダイナミックレンジを実現するためには長時間の測定を必要とし、また仮に長時間の測定が可能だとしても、光子検出器や信号処理系がもつ有限の時間応答特性やノイズ特性のため、実現できるダイナミックレンジには限界がある。これらを考慮すると光子計数法の現実的なダイナミックレンジは 10^6 程度であり、目標とする 10^{10} 台のダイナミックレンジには到底及ばない。そこで我々は、可視光領域で動作する高速光シャッターを開発し、光子計数装置と組み合わせることにより 10^{10} 台のダイナミックレンジと2 ns 以下の時間分解能を有するバンチ純度モニターの開発を行ってきた。

5.1 光シャッター

光シャッターは二つの偏光子とその間に置かれたポッケルスセル、セルを駆動する高電圧パルサーで構成される。ポッケルスセルは、内部の結晶に電界を印加することで屈

折率の変化を起こさせ、結晶中を伝播する光の偏光状態を変化させる光学素子である⁷⁾。偏光子の偏光方向を互いに直交する向きに配置した場合を考える (Fig. 6)。セルに電圧が印加されていない時は、セルを通過しても偏光状態が変化せず、光は後方の偏光子を通過できない (光シャッター閉)。一方、セルに電圧を印加して結晶に電界をかけると、セルを通過する間に偏光状態が変化し、光がセル後方の偏光子を通過することになる (光シャッター開)。

実際には、光の角度広がり、結晶の不完全性、アライメント不足等により光シャッター閉の状態でも微少な光が透過してしまう。光シャッター開時と閉時の透過光量の比で「消光比」を定義すると、孤立バンチの前方あるいは後方の不純バンチにタイミングを合わせ、高速のパルス電圧を加えて光シャッターを開くことにより、光シャッター通過後の光パルスの強度比を消光比の分だけ小さくすることができる。孤立バンチと不純バンチの強度比が $10^{10} : 1$ である

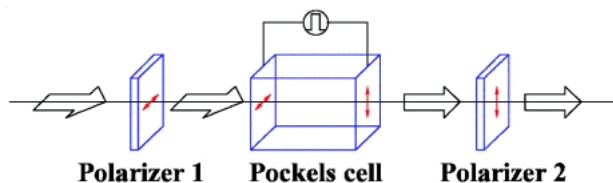


Fig. 6 Conceptual drawing of the light shutter system.

場合でも、消光比 10^5 の光シャッターを用いれば、光パルスの強度比を $10^5 : 1$ にまで下げることができる。これは通常の光子計数法で十分測定可能な値である。

5.2 セットアップ

SPring-8 蓄積リングのバンチ純度モニターは加速器診断 I (BL38B2) に設置されている。加速器診断 I は偏向電磁石を光源とするビームラインで、電子ビームの診断や加速器を構成する機器の試験開発等を行うことをその目的としている⁸⁾。加速器診断 I 光学ハッチ内に設置されている輸送チャンネル部の機器構成を Fig. 7 に示す。バンチ純度測定に用いる放射光の可視光成分は、輸送チャンネル上流部に設置された真空中のミラーによって下側に反射され、石英窓を介して大気中に取り出される。取り出された可視光は鉛遮蔽された輸送管を通して光学ハッチ外に導かれ、バンチ純度モニターが設置されている可視光暗室内に導入されている。

SPring-8 蓄積リングのバンチ純度モニターの光学系を Fig. 8 に示す⁹⁾。 10^5 台の消光比を実現するため、偏光子を 4 個、ポッケルスセルを 2 個用いて二段構成の光シャッターとしている。高速時間応答を実現し、また 1 台の高電圧パルサーでの駆動を可能とするため、ポッケルスセルには 50Ω 同軸線路型の高速ポッケルスセル (FastPulse Technology, N1072FW) を使用している。光子計数装置

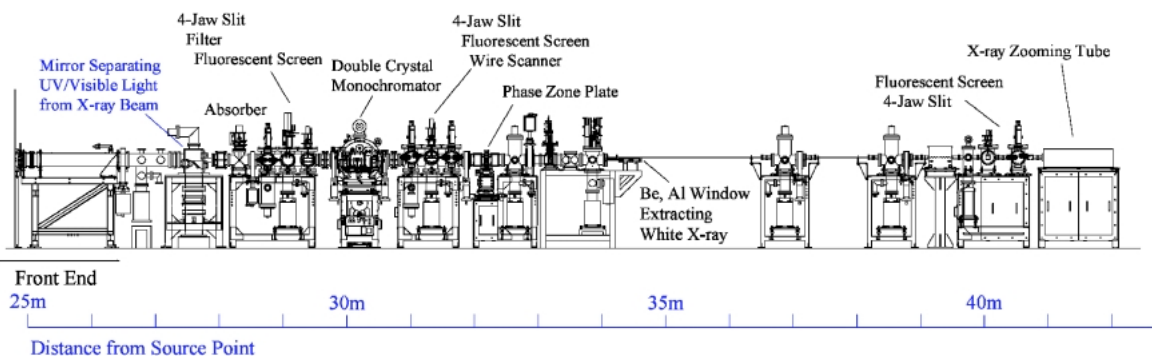


Fig. 7 Transport channel of BL38B2.

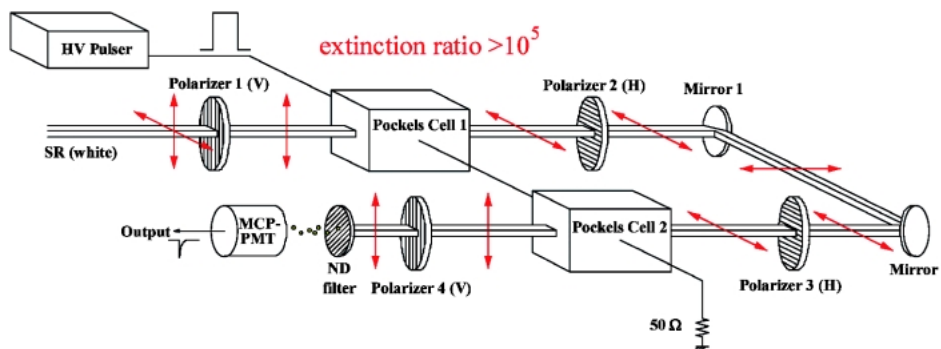


Fig. 8 Purity monitor of SPring-8 storage ring.

の光子検出器にはマイクロチャンネルプレート内蔵型光電子増倍管 (MCP-PMT, 浜松ホトニクス R3809U-52) を用いている。MCP-PMT は光電子の増倍にマイクロチャンネルプレートを用いているため、高利得かつ時間分解能に優れるという特長がある。また R3809U-52 は光電面に紫外光対応の材質を用いており、低熱ノイズであるという特長がある。MCP-PMT 及び後段の信号処理系による数え落としを避けるため、MCP-PMT に入射される放射光は直前の ND filter により孤立バンチが約百周する間に一個の光子が検出される程度にまで減光されている。

6. 高純度バンチ運転の現状

6.1 純化性能

入射器での純化の性能を評価するため、入射器で純化された単バンチビームを蓄積リングの一つのバケットだけに入射してバンチ電流 1 mA の単バンチ運転を行い、バンチ不純度を測定した。

主バンチの前方及び後方のバケットにタイミングを合わせて光シャッターを開き測定した時間プロファイルを Fig. 9 に示す。縦軸はカウント数で、光パルスの強度に相当する。横軸はバケット間隔 2 ns で規格化した時間を表している。0 が主バンチ、-1, +1 はそれぞれ、主バンチの直前、直後のバケットに相当する時間位置を表す。測定時間は前方、後方の測定とも 500 秒ずつとした。Fig. 9 のプロファイルは二つの測定データをつなぎ合わせて得られたものである。主バンチのデータは主バンチ後方で光シャッターを開いて測定した時のデータを用いている。1 mA の主バンチの光子計数率は 2.7 kcps であった。主バンチのプロファイルを見ると、メインピークの直後に弱いピークが現れ、さらに +1 バケット付近まで延びる裾が現れている。このプロファイルは、バンチの時間構造と測定系の時間応答とを掛け合わせて得られる時間構造を表したもので、実際のバンチがこのような時間構造をしているわけではない。実際のバンチはガウス分布に近い構造をしており、その時間幅は約 40 ps と非常に短いため、メインピークから後ろの構造は全て測定系の時間応答特性を表しているといえる。測定系の時間応答特性が悪く裾の部分で +1 バケット以降まで重なってしまう系の場合には、主バンチ後方で不純度評価に悪影響を与えることになるが、我々の現在のシステムでは問題となるレベルではない。

Fig. 9 のデータでは、主バンチ直前の -1 バケットでは光子を一つも検出することができなかった。事前に測定しておいた光シャッターの消光比 10^5 と主バンチの光子計数率を用いると、-1 バケットでのバンチ不純度は 2×10^{-11} 以下と評価できる。1 mA の主バンチには 3×10^{10} 個の電子が蓄積されていることから、このビームでは -1 バケットには電子が全く存在しない、と結論付けることができる。一方、主バンチの後方には複数の細かいピークが現れ

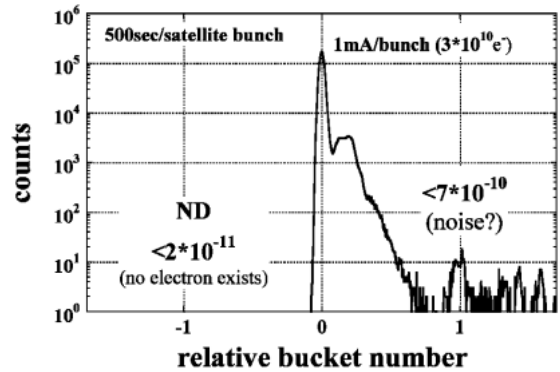


Fig. 9 Time spectrum of the single bunch beam injected with the RF-KO of the booster synchrotron.

ており、+1 バケットに相当する時間位置では百カウント程度のイベントが検出された。これらのピークは光シャッターを閉じて測定した場合には現れないため、MCP-PMT や信号処理系の時間応答特性、ノイズ特性によるものではなく、主バンチの後方で光シャッターを開くことによって現れたピークであるといえる。現時点では、+1 バケットで検出されたイベントが不純バンチからの光子を検出したものであるか、光シャッターの光学系で起こる多重反射等によるノイズであるかの判別ができていない。しかしながら、仮にこれらのイベントが全て光子を検出したものであるとしても、+1 バケットでのバンチ不純度は最大で 7×10^{-10} となり、入射器での純化により高純度の単バンチビームが生成されていることがわかる。また、以上の結果から、我々が開発したバンチ純度モニターは、バンチ電流 1 mA の単バンチに対して、直前のバケットで 2×10^{-11} 、直後のバケットで 7×10^{-10} の測定感度を有していると評価できる。

6.2 トップアップ運転時のバンチ不純度

SPring-8 蓄積リングでは、2004年5月からユーザー運転時にトップアップ運転が行われている^{10,11)}。トップアップ運転とは、ビーム寿命により失われた電子を継ぎ足し入射で補い、蓄積電流を一定に保つ運転である。現在は蓄積電流を $99 \text{ mA} \pm 0.1\%$ に保つことができています。少数バンチモードやハイブリッドモードでは、バンチ内電子数が多くバンチ内の電子・電子散乱によるビーム損失の影響が顕著なため、ビーム寿命が20数時間と非常に短い。トップアップ運転の導入により、これらの運転モードにおいても、事実上、ビーム寿命が無限とみなせるようになり、平均輝度の格段の向上が期待されている。

少数バンチ、ハイブリッドモードでのトップアップ運転では蓄積電流を一定に保つだけでなく、各孤立バンチのバンチ電流を一様かつ一定に保つようトップアップ入射が行われている。しかしながら、少数バンチ、ハイブリッドモードでのトップアップ運転時には、高いバンチ純度を長

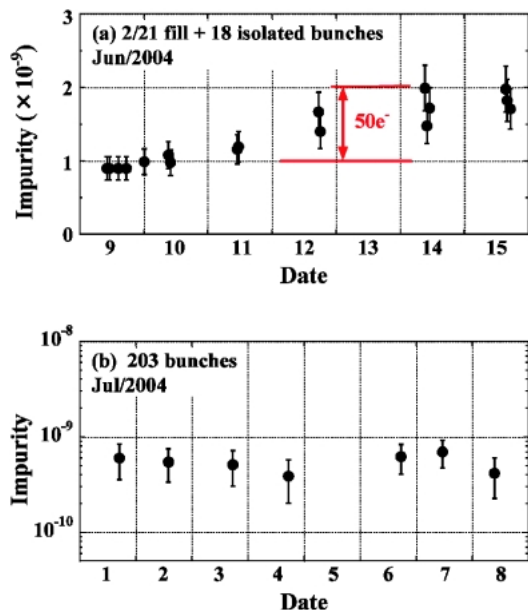


Fig. 10 Variation of bunch impurity during the top-up operation.

期間に亘って保ち続けることも重要である。微少な不純バッチのビーム寿命は孤立バッチに比べて桁違いに長く、不純バッチ内の電子が失われることはほとんどないと言ってよい。純度の悪い入射ビームを使ってトップアップ運転を行った場合、孤立バッチ内の電子数が一定に保たれる一方で不純バッチ内の電子数は入射の度に増え、バッチ純度が徐々に悪化していくことになる。これを防ぐためには、長期間に亘って高純度の単バッチビームを安定に生成・供給できる純化システムを実現することが重要である。

SPring-8 蓄積リングにおけるトップアップ運転時のバッチ不純度の推移を Fig. 10 に示す。Fig. 10 (a) はハイブリッドモード（この時は 2/21 バッチトレイン + 18 バッチ：全周を 21 等分して 2/21 に連続バッチを、残りの部分に 18 個の孤立バッチを等間隔に配するフィリング）時に、Fig. 10 (b) は少数バッチモード（この時は 203 バッチ：全周に 203 個の孤立バッチを等間隔に配するフィリング）時に、特定の孤立バッチに注目して、その直後のバケット（+1 バケット）の不純度を約一週間にわたって測定した結果である。この間はビームアポート等のトラブルはなく、トップアップ運転が安定に継続されていた。先に述べたように、+1 バケットでは測定系のノイズの影響を除去しきれないが、+1 バケットの時間位置で検出されたイベントが全て放射光光子によるものと仮定してバッチ不純度の上限值を図示している。

Fig. 10 (a) に示すトップアップ運転期間では、注目した孤立バッチ直後の +1 バケットにおいて、 1×10^{-9} の不純度の増加が観測された。トップアップ運転によって孤立バッチのバッチ電流値は約 1.5 mA（バッチ内の電子数は 4.5×10^{10} 個）に保たれていたため、この不純度の増加は +1

バケットに約 50 個の不純電子が入射されたことに相当する。この間、孤立バッチには約 15 mA の電流（ 5×10^{11} 個の電子）がトップアップ入射されたので、入射ビームの平均的な不純度は +1 バケットにおいて 1×10^{-10} であった、と評価できる。一方、Fig. 10 (b) に示すトップアップ運転期間では、孤立バッチに約 2.5 mA（ 8×10^{10} 個の電子）がトップアップ入射されたが、+1 バケットにおける不純度の増加は観測されず、測定感度 7×10^{-10} 以下の状態を保ち続けることができていた。

トップアップ運転中のバッチ不純度の増加を防ぐためには、機器の故障等により純化されなかった単バッチビームが蓄積リングに入射されることを防ぐ必要がある。現在は RFKO 出力が低下した場合にトップアップ入射を停止するインターロックを組み、バッチ純度が悪化するのを防いでいる。今後はトップアップ入射を停止することなく高純度バッチが保てるよう、RFKO システムのハイパワーアップ、及びキッカー電極を二重化した純化システムの導入を計画中である。

7. まとめ

SPring-8 では高純度の孤立バッチを達成するために、入射器におけるバッチ純化法と蓄積リングにおけるバッチ純度測定法の開発を行ってきた。現在の純度測定結果では、1 mA の単バッチビームに対して、主バッチ前方のバケットでは 2×10^{-11} 以下、後方では 7×10^{-10} 以下のバッチ不純度が達成されている。ただし、トップアップ運転の開始以降、ビーム入射回数の増加によるバッチ不純度の増加が懸念されており、一週間の運転期間において、主バッチ後方のバケットで 1×10^{-9} の不純度の増加が確認されている。今後は、トップアップ運転においても高純度のバッチを保つことができるように、純化システムの高度化を行う予定である。

謝辞

バッチ純化システム並びにバッチ純度測定法を開発する機会を与えて下さいました JASRI 加速器部門の熊谷教孝部門長、大熊春夫運転・軌道解析 Gr. リーダー、米原博人リング加速器 Gr. リーダーに感謝致します。バッチ純度測定システムの開発に御協力頂いた高野史郎光診断チームリーダー、本記事を執筆するにあたって有益な助言を頂いた田中均軌道解析チームリーダーに感謝致します。また、利用研究促進部門構造物性 II グループの依田芳卓主幹役員には利用実験における有益な情報を頂いたことを感謝します。

参考文献

- 1) T. Kasuga et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 28, 541 (1989).

- 2) T. Obina et al.: Nucl. Instr. and Meth. A354, 204 (1995).
- 3) T. Kobayashi et al.: Proc. of European Part. Acc. Conf., Paris, France 2685-2687 (2002).
- 4) T. Kobayashi et al.: Proc. of European Part. Acc. Conf., Lucerne, Switzerland 1324-1326 (2004).
- 5) H. Suzuki et al.: Nucl. Instr. Meth. A444, 515-533 (2000).
- 6) T. Aoki et al.: Proc of the 2003 Part. Acc. Conf., Portland, USA, 2551-2553 (2003).
- 7) A. Yariv: QUANTUM ELECTRONICS, third ED., JOHN WILEY & SONS, Chap. 14.
- 8) H. Ohkuma et al.: Proc. of the 1st Ann. Meet. of Part. Acc. Soc. of Japan and the 29th Lin. Acc. Meet. in Japan, Funabashi, p593-595.
- 9) K. Tamura, T. Aoki: Proc. of the 1st Ann. Meet. of Part. Acc. Soc. of Japan and the 29th Lin. Acc. Meet. in Japan, Funabashi, p581-583.
- 10) H. Tanaka et al.: Proc. of the 2004 Euro. Part. Acc. Conf., p222-224.
- 11) 田中 均 他: 放射光 18, 57 (2005).

● 著者紹介 ●

**青木 毅**

財団法人 高輝度光科学研究センター

E-mail: aoki@spring8.or.jp

専門: 加速器工学

【略歴】

1992年3月, 北海道大学大学院工学研究科原子工学専攻修士課程修了。1992年4月より特殊法人 日本原子力研究所入所し, SPring-8 ブースターの建設に従事。1999年7月から現職。

**田村和宏**

財団法人 高輝度光科学研究センター

E-mail: tamura@spring8.or.jp

専門: 加速器物理学

【略歴】

1997年3月, 広島大学大学院理学研究科物性学専攻博士課程修了。理化学研究所基礎科学特別研究員を経て, 2000年4月から現職。SPring-8 蓄積リングにおいて加速器診断用ビームラインの建設に従事し, 現在に至る。

Operation with highly purified isolated bunches at SPring-8

Tsuyoshi AOKIJapan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)
1-1-1 Kouto, Ssyo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan**Kazuhiro TAMURA**Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)
1-1-1 Kouto, Ssyo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan

Abstract In SPring-8, routine operation with isolated bunches of high bunch purity and high bunch current has been performed, and user-experiments that require single pulse synchrotron radiation, such as the time resolved experiments, have been carried out. Bunch purity shows how much the synchrotron radiation is pure pulse light, and is defined as the ratio of number of electrons in an isolated bunch to that in an unwanted bunch around the isolated bunch. We have achieved the high bunch purity of $10^9 \sim 10^{10}$, and high uniformity and stability of the bunch current of each isolated bunch. This article shows how to form the highly purified single bunch beam at the SPring-8 injectors and how to measure the bunch purity with high resolution at the storage ring. The article also illustrates the beam performance in highly purified bunch operations.