

話 題

放射光用電子蓄積リングの単バンチ運転

春日 俊夫*・帯名 崇**

Single-Bunch Operation of Synchrotron Light Sources

Toshio KASUGA* and Takashi OBINA**

0. 序

筆者等は分子科学研究所の放射光用電子蓄積リング UVSOR^{脚注1)}や物質構造科学研究所の PF, PF-AR の単バンチ運転法の開発や単バンチ純度の向上, 単バンチ純度悪化のメカニズムの解明とその対策, 単バンチ純度測定のための装置の開発, 等々の研究に従事してきた。特に PF-AR は単バンチ専用マシンを標榜しているにもかかわらず, 同リングが電子陽電子衝突リング TRISTAN のブースターから放射光専用マシンに転用された当時, 単バンチ純度の確保に困難を来して

いた。専用化に当たっての我々の最初の仕事が単バンチ純化装置の開発であった。本稿では, これらの蓄積リングでの経験を中心に単バンチ運転関連事項について述べる。

これらのリングの本稿の話題に関係する主要なパラメーターを表 1 に示す。なおこのパラメーターは研究が行われた当時のものであり, 現在のパラメーターと異なっている場合があることをお断りしておく。

1. 単バンチ運転の意義

電子蓄積リングの全バケットに電子を蓄積すると,

表 1 UVSOR, PF, PF-AR の主なパラメーター

	UVSOR	PF	PF-AR
運用開始	1983 年	1982 年	1996 年放射光専用化
電子エネルギー	750 MeV	2.5 GeV	6.5 GeV
入射器	15 MeV Linac + 600 MeV Synchrotron 入射後加速	2.5 GeV Linac	2.5 GeV Linac (3 GeV Linac) 入射後加速
周長 (回転周期)	53.2 m (177 ns)	187 m (623 ns)	377 m (1257 ns)
加速周波数 (バンチ間隔)	90.1 MHz (11 ns)	500.1 MHz (2 ns)	508.6 MHz (2 ns)
ハーモニック数	16	312	640
チューン (水平方向)	3.25	9.60	10.15
(鉛直方向)	2.75	4.28	10.21
バンチ自然長 (σ)	124 ps (37 mm)	33 ps (10 mm)	62 ps (19 mm)
エミッタンス (水平方向)	250 nm·rad	36 nm·rad	290 nm·rad

脚注1) 以後 UVSOR, PF 等の愛称を用いるが概要については本誌 1 巻 1 号の「国内の加速器関連施設」を参照のこと。

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK E-mail: toshio.kasuga@kek.jp

** 高エネルギー加速器研究機構 KEK E-mail: takashi.obina@kek.jp

そこからの放射光パルスの周期は加速高周波の周期である2~10ナノ秒程度となる。放射光を利用して行う実験の中には、放射光パルスによる刺激後の過程を追うものがある。あるいは、レーザー光による励起後の過程を放射光パルスによりプローブする種の実験もある¹⁾。これらの時間分解実験においては、往々にして上記の光パルスの時間間隔では短すぎる場合がある。蓄積リングの全バケットのうち一個ないし数個のバケットのみに電子を蓄積すれば放射光パルスの周期は電子ビームがリングを一周する時間あるいはその数分の1になり、前記の値より数十倍から数百倍長くなる。すなわち、数百ナノ秒から数マイクロ秒の時間間隔が得られることになる。放射光検出器の読み出し速度が十分でない場合は、さらにメカニカルチョッパーを併用し放射光パルスを間引くことも行われるが、このためには放射光パルスの周期が1マイクロ秒程度より長いことが前提となる。不要バケット内の電子数の全電子数に対する割合をそのバケットの不純度と呼び、全不要バケット内の電子数の割合を(全)不純度と呼ぶことにしよう。現在では、実験の種類にもよるが不純度が 10^{-8} 以下であることが要求されている。

以上は単バンチ運転に対するユーザーから要請であるが、加速器研究上の必要性もある。加速器を正常に作動させるためにはマシンパラメーターの確認が前提となる。例えば、水平・鉛直方向のチューンの測定的重要性は自明であろう。電子蓄積リングの場合、イオン捕獲現象によりチューンが影響を受ける。単バンチ運転の場合、全バケットに電子を蓄積して運転する場合に比べてイオン捕獲が起こりにくいので、捕獲イオンによるチューンへの影響が小さくて済む。また、バンチ長の電流依存性を単バンチ条件で測定すれば、他バンチが引き起こす電磁場の影響を受けないで済む。さらに、カップルドバンチ不安定現象の影響を受けないことも単バンチ運転でのマシンパラメーター測定の利点である。このように加速器内のビームの振る舞いの実験的研究において単バンチ運転は重要である。

2. 単バンチの生成

現在は、電子銃および電子銃のパルサーの高性能化により、バケットの時間幅より十分に短く、かつ十分に切れの良い電子ビームパルスを得ることが可能となったため、これを線形加速器あるいはブースターシンクロトロンで加速し蓄積リングの所定のバケットに転送すれば比較的容易に純度の高い単バンチが得られる。UVSORにおいて単バンチ運転を開始するにあた

り、電子銃のグリッドパルサーのパルス幅を短くすることを考え、実際にも試みたが、当時UVSORで使われていた電子銃の電極は高速パルスを扱うための構造からは遠くかけ離れていた。そこで、単バンチはブースターシンクロトロン内で生成することとした。シンクロトロンのチューン測定用RFノックアウト^{脚注2)}(以後RF-KOと略記)装置に回転周波数でAM変調をかけ、所定外のバンチはRF-KOで除去されるが所定のバンチは(RF-KOの電磁場がゼロとなる位相でKO電極を通過するため)生き残るようにした^{2,3)}。このような単純な装置で得られた単バンチでも、蓄積リングでの蓄積直後で 10^{-4} 程度の不純度が得られた。この装置は後述のPFやPF-ARで用いられている単バンチ純化装置の原型となっている。

3. 単バンチ純度悪化のメカニズム

UVSORにおいて単バンチ生成の準備が出来、実際にユーザー実験が行われた。実験が開始されて直ぐ、ユーザーから単バンチ不純度は入射後刻々と悪化(不純度が大きくなる)すると言う事実を知らされた。当時UVSORのマシングループは純度を測定するために高速ビーム強度モニターの信号をオシロスコープで測定していた。この測定法での単バンチ不純度測定の分解能はせいぜい1%程度なので、単バンチ不純度の悪化は測定にかからなかった。急遽、不純度を精密に測定することの出来る光子計数装置を組み上げ、不純度悪化現象の定量的な測定を開始した⁴⁾。その結果を図1に示す。入射直後に不純度が 10^{-5} 台であったものが、1時間後には 1×10^{-4} 、3時間後には 3×10^{-4} 程度まで悪化しているのがわかる。この図には所定バンチの直後のバケットの不純度のみが示してあるが、測定でわかったことは後方数バケットの不純度が悪化し、前方のバケットの不純度は悪化しないことであった。純度悪化のメカニズムは次のように説明される。図2の様に縦方向の位相空間内の軌道には放射減衰による開口部があり、その開口部は前方のバケットの上方まで伸びている。このことは、所定のバケットから位相空間内で上向きにはじき出された電子がこの開口部に飛び込めば、放射減衰に従いやがては後方のバケットの中心に集まりバンチを形成することを示している。これが起きるためには、所定バケット内の電子がエネルギーを得てバケットを飛び出さなければ

^{脚注2)} 加速器研究の初期には、チューンを測定するためにビームロスを引き起こすまでベータートロン振動を強制励振していた。これがKOの所以だろう。

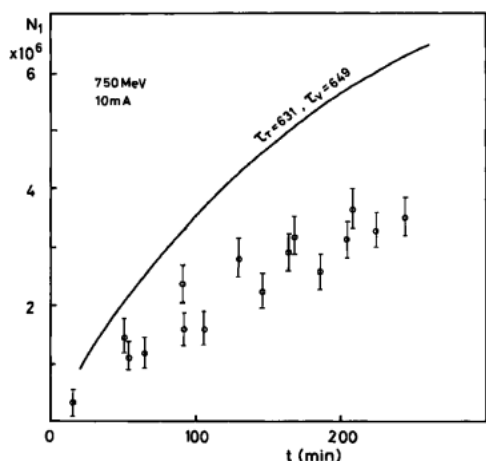


図1 UVSORでの単バンチ純度悪化現象. 横軸は入射後の経過時間を示し, 縦軸は所定のバケット直後のバケット内の電子数を示す. 10 mAは 1.1×10^{10} 個の電子に対応する.

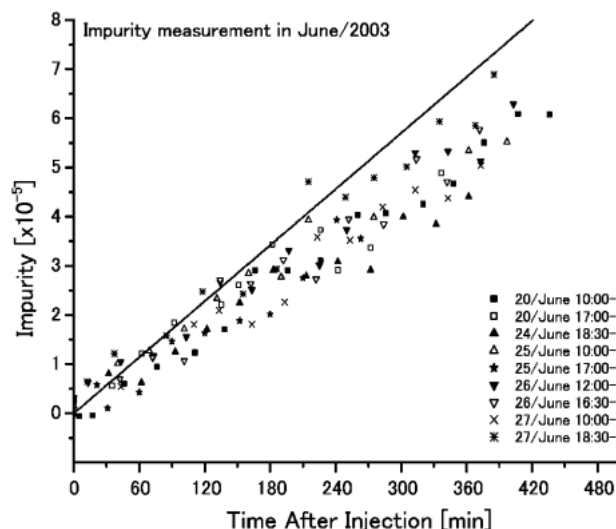


図3 PF-ARでの単バンチ純度悪化の様子. 横軸は入射後の経過時間を示し, 縦軸は所定のバケット直後のバケットの不純度を示す. 測定中にビーム電流は53から35 mAまで減少した. これは電子数が 4.2×10^{11} 個から 2.7×10^{11} 個まで減少したことに対応する.

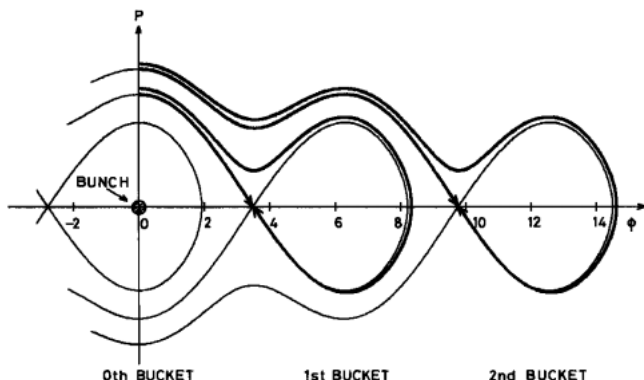


図2 縦方向位相空間内での電子の軌跡. 細線は放射減衰がない場合のセパトロリックスを示す. 減衰がある場合は, 太線で示すように, 開口部が前方バケットの上方まで伸びている.

ならないが, 量子ゆらぎにより電子がバケットから飛び出す効果は測定された不純度悪化の時間変化量を説明できない. エネルギーを得てバケット内から飛び出しビームロスとなる現象に Touschek 効果がある. この効果は電子蓄積リングの黎明期からよく研究されている⁵⁾. この効果により, 所定バケットから飛び出し, 直後のバケットの開口部に飛び込む電子の割合をもとに, バケットの不純度の悪化を計算したものが図1に実線で示されている. 当時はかなり荒い近似を行って不純度悪化の割合を評価したため, 実験に比べて1.5倍ほど大きい値となっているが, 両者の傾向は一致している. もしこのメカニズムが正しいとすれば, エネルギーを得てバケットを飛び出した電子を後続のバケットに捕獲される前に除去すれば不純度の悪化は

防げるはずである. 分散関数が大きい場所で閉軌道を超チャージりぎりまで外側に寄せて, 高いエネルギーを持ってバケットを飛び出した電子を速やかに除去することを試みた. この方法により不純度悪化の割合が改善されることが確かめられた⁴⁾. これに元気づけられ, 分散関数の大きい場所に邪魔板(スクレーパー)を設置しビームに外側から近づけながら不純度悪化の割合がどう改善されるかを定量的に測定した⁶⁾. 結果は, 予想したメカニズムを支持するものであった. PF および PF-AR でも純度悪化を入射後の経過時間とともに測定した⁷⁻⁹⁾. PF-AR での結果を図3に示す. 図中の実線はバンチの体積変化の効果まで計算にいれて評価した純度悪化の割合であり, 実測値と良い一致を示している.

4. 単バンチ純化

前節で述べたように, 純度の高い単バンチを蓄積しても時間の経過とともに純度は悪化する. あるいは, 入射蓄積時に要求された純度が実現していない場合もある. これらの場合, 蓄積時(ユーザーラン前あるいはユーザーラン中に)単バンチの純化を行わなければならない. すなわち, 出来る限り所定外バケット中の電子を除去しなければならない. 純化のために次の三方法を試みた.

- 1) チューンの電流依存性を利用する方法

2) 分散関数の大きい場所においたスクレーパーによる方法

3) 選択的 RF-KO 法

1)はチューンがバンチ内の電子数に依存することを利用する。所定のバンチ（電子数が多い）のチューンと所定外のバンチ（不純バンチ、電子数が少ない）のチューンはわずかに異なる。PF の場合、鉛直方向チューンのビーム電流依存性と回転周波数の積 ($f_{rev} \times \Delta v / \Delta I$) は 0.2 kHz/mA であり、PF-AR の場合 0.3 kHz/mA 程度である。すなわち、50 mA の所定バンチと不純バンチのチューンの差は各々 10 kHz と 15 kHz である。RF-KO の周波数を不純バンチのチューンに合わせておけば、所定バンチに影響を与えずに不純バンチを除去できる可能性がある¹⁰⁾。両者の周波数差は前記のように 10 kHz から 15 kHz と小さく、後で述べるように RF-KO には周波数変調を掛ける必要があるため非常に繊細な調整を必要とする。序で述べた PF-AR での単バンチ純度確保の困難さもこのことに起因していた。一方、この方法では RF-KO を起こす周波数のうち最も低い周波数を単独で使うことが出来るので、安価な電力増幅器の利用を可能にし、長い RF-KO 電極が使える利点がある^{脚注3)}。PF-AR におけるこの方法での純化の結果を図 4 に示す。

2)の原理は前節で述べた。バケットの高さより高いエネルギーに対応する位置にスクレーパーを置くので、原理的にはバケット高さによって決まるビーム寿命には影響を与えないはずであるが、スクレーパー位置は微細な調整が必要である。また所定外バケットに入ってしまったビームを除去することは出来ない。

3)の原型については第 2 節で述べた。現在、多くの放射光用蓄積リングは加速高周波として 500 MHz 近辺を採用している。すなわちバケットの間隔は約 2 ns である。この時間間隔で RF-KO のオン/オフを切り替える必要がある。バンチ毎フィードバック装置の開発に伴いバンチ毎にビームを制御することがそれほど困難でなくなってきたため、この方法は単バンチ純化の有効な方法となっている¹¹⁾。序で述べた PF-AR

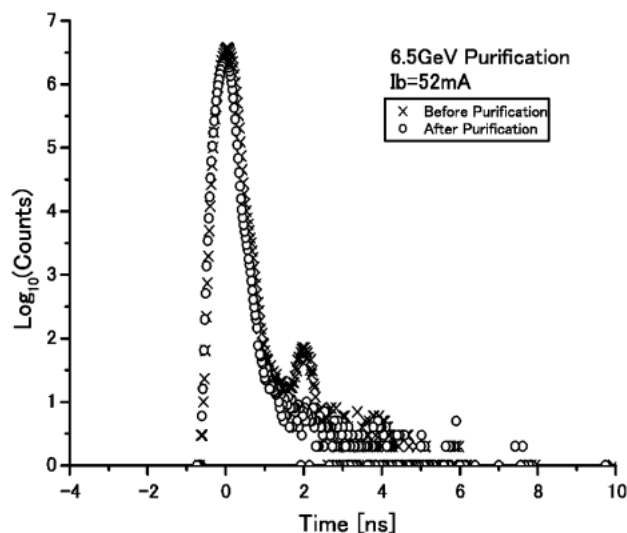


図 4 PF-AR におけるチューンの電流依存性を利用した純化の例 (6.5 GeV でのユーザーラン中の純度悪化防止のためのテスト実験)。純化の結果、最初 10^{-5} より悪かった (大きかった) 不純度が 10^{-6} まで改善された。6.5 GeV での純化のため 3)の方法では短いキッカーで高パワーの RF-KO 系が必要となる。これを避けるため長大な KO キッカーを用いることのできる 1)の方法を用いた。

の単バンチ純度確保の問題も、1)の方法から 3)の方法に変更することにより解決した^{脚注4)}。しかしながら、RF-KO を用いる場合には共通の問題がある。横方向のビーム安定性を確保するために非線形磁場が導入されていることが普通である。すなわち、ベータートロン振動は非線形な復元力の元での振動となり、単一の周波数で励振すると線形な復元力の場合よりも小さな振幅で成長がとまる。出来る限り振幅を大きくするためには、振動の成長とともに励振周波数を変化させる必要がある。実際に、励振周波数に周波数変調 (あるいは周波数スイープ) を掛けることが行われる。PF および PF-AR においては周波数スイープを掛けた選択的 RF-KO 法を用いて純度の確保を行っている。PF と PF-AR の所定バンチ直後の不純度はともに現用のバンチ純度モニターの測定限界である 10^{-6} 以下である。なお、両リングともユーザーラン中の純度悪化を防ぐため、1)から 3)の何れかの方法によって連続純化を行う必要がある。

脚注3) リングを周回する周波数を f_{rev} 、ベータートロン数を ν 、 n を任意の整数としたとき RF-KO は周波数 $|n \pm \nu| f_{rev}$ で引き起こされるので、最低周波数は $f_{rev}/2$ 以下である。3)の方法ではこの周波数をバンチの時間間隔程度でオン/オフすることになるため、高い周波数 (RF 周波数の半分程度) と広いバンド幅 (f_{rev} 程度) が必要となる。なお、ストリップラインタイプのキッカーはその長さを a 、光速を c とするとき、 $f = c/2a$ の周波数でのキックがゼロとなる。

脚注4) 図 4 は 1)の方法での純化試験の結果である。通常の運転時には 3)の方法を用いている。

5. 単バンチ純度の測定

ユーザーから要請される単バンチ不純度は前述のように 10^{-8} 程度である。第3節でもふれたようにこの程度の不純度を測定するのに適した方法は光子計数法である。所定外のバンチから放出された光子と所定バンチから放出された光子を一個毎に一定時間計数し、両者の比を取れば不純度が得られる。測定時間を適当に長く取れば事象数が増えるので、 10^{-5} ないし 10^{-6} 程度の不純度の測定は容易である。測定の制限は光子検出器である光電子増倍管やアバランシェフォトダイオードなどの雑音（光子が入射されないときにランダムに発生する事象）と計数速度によって決まる。散乱 X 線を注意深く除去して、単色 X 線をアバランシェフォトダイオードを用いて検出すれば 10^{-9} 程度の不純度まで測定できる¹²⁾。不要バンチからの単位時間あたりの事象を増やすと、所定バンチからの単位時間あたりの事象が計数速度をオーバーする。SPRING-8 ではこれを避けるためにポッケルスセルによる高速光シャッターを用いて所定バンチからの光子を遮って、不要バンチの単位時間あたりの事象数を増やすことを行い 10^{-10} 程度の不純度の測定を行っている¹³⁾。

6. バンチ長の問題

ユーザーにとっては、放射光パルスの時間間隔が長いと同時に、光パルス自体の時間幅が短いことが重要である。表1に示したように、バンチの自然長は数十ピコ秒から数百ピコ秒程度である。現在1ピコ秒以下の光パルスの要請が高まっている。現時点では通常型のストレージリングではこの値を十分なビーム電流のもとで実現することは困難である。ユーザーの要請にどのように応えるかは今後の課題である。

謝辞

本稿をまとめるに当たって、本機構足立伸一氏、岸本俊二氏、張小威氏に単バンチ運転の意義についてお話を伺った。単バンチ純化装置に関し、本機構飛山真理氏との有益なディスカッションを行った。なお、PF-AR で用いている純化装置は、同氏が開発した KEKB のバンチ毎フィードバック装置のテスト機を

流用している。単バンチ純度測定装置の分解能について本機構岸本俊二氏、勲高輝度光科学センターの田村和宏氏より貴重なコメントをいただいた。これらの方々にお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 足立伸一 他, 「パルス X 線とフェムト秒レーザーによる動的構造解析」, 応用物理 第73巻第6号 (2004) 725.
- 2) T. Kasuga, et al., "Single Bunch Storage in UVSOR Storage Ring", Proc. 5th Symp. on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, 1984.
- 3) T. Kasuga, et al., "Single Bunch System for UVSOR", Proc. 6th Symp. on Accelerator Science and Technology, Tokyo, 1987.
- 4) T. Kasuga, et al., "Increase in Impurity in Single Bunch Mode of UVSOR Storage Ring", JJAP 28 (1989) 541.
- 5) H. Bruck, Accélérateurs Circulaires de Particules (Presses Universitaires de France, Paris, 1966) p. 302.
- 6) M. Tobiyama, et al., "Suppression of Increase in Impurity in Single Bunch Mode for the UVSOR Storage Ring", JJAP 29 (1990) 210.
- 7) T. Obina, et al., "Measurement of the Longitudinal Bunch Structure in the Photon Factory Positron Storage Ring with a Photon Counting Method", Nucl. Instru. Meth. in Phys. Research A354 (1995) 204.
- 8) M. Tobiyama, et al., "Impurity Growth in Single Bunch Operation of PF", Proc. 1995 Particle Accelerator Conference, Dallas (1995) 3300.
- 9) 飛山 他, "電子蓄積加速器における単バンチ不純度悪化機構の解析", 平成5年度科学研究費補助金(一般研究(C))研究成果報告書(1994).
- 10) Photon Factory Activity Report #8 (1990) p. R-6.
- 11) T. Obina, et al., "A New Purification Method for Single Bunch Operation at the Photon Factory", Proc. 1999 Particle Accelerator Conference, New York (1999) 2310.
- 12) S. Kishimoto, "Bunch-purity measurements of synchrotron X-ray beams with an avalanche photodiode detector", Nucl. Instru. Meth. in Phys. Research A351 (1994) 554.
- 13) K. Tamura, et al., "Single Bunch Purity During SPRING-8 Storage Ring Top-up Operation", Proc. 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi (2004).