

PF-ARの現状

PF-AR高度化共同チーム*

高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

概要

PF-ARはX線領域の放射光実験のための単バンチ専用の電子蓄積リングである。電子は3.0GeVで入射されて、通常のユーザー運転では6.5GeV、医学利用では5.0GeVまで加速される。6.5GeVの通常運転での初期ビーム電流は55mA、ビーム寿命は50mAのときで15時間となっている。入射直後の単バンチ不純度は 10^{-8} を達成しているが、ユーザー運転中にその純度が悪化する現象が観測されており、これから解決しなければならない問題である。エミッタンスについては現在の値 $290\text{ nm} \cdot \text{rad}$ では不十分であり、達成可能な $160\text{ nm} \cdot \text{rad}$ の実現を目指している。このリングにおける質の良いパルスX線はこれまで測定が困難であった時間領域 and/or 時間分解測定を容易に測定出来るものになっている。

1 はじめに

ARは本来、TRISTAN衝突リングのためのブースターシンクロトロンとして建設され、それと平行して1996年までX線源としても使用されていた。TRISTANプロジェクト終了後、このリングはX線領域の放射光源専用電子蓄積リング（PF-ARに改名）に改修された。しかし、このリングは単バンチ運転をメインにしているのにもかかわらず、必要な単バンチ純度が常時確保されているわけではなかった。また、蓄積リングを主目的として建設されたのではないので、光源専用リングとしての性能はとうてい満足出来るものではなかった。この状況を打破するために、PF-ARの高度化共同チームが組織され、まずは最優先課題である単バンチ純度化装置の構築にあたった。その間、PF-ARの基本性能を高度化するための予算が採択され、リングの改良、in-vacuumタイプの挿入光源と新しいビームラインの設置が1999年に開始されている。この高度化の作業は2001年末に終了し、2002年の1月初めにコミッショニングも成功裡に終わっており、リングを無事に立ち上げることが出来た。その後、リングのパラメータの微調整が施された後、4月からはユーザー運転を開始している。6.5GeV通常運転での初期ビーム電流は55mA、ビーム寿命は50mAのときで15時間であり、単バンチ不純度も 10^{-8} を達成している。質の良いパルスX線は、これまで測定が困難であった時間領域 and/or 時間分解測定（核共鳴ブラッグ散乱実験、時間分解X線吸収 and/or 回折測定等）を容易に測定出来るものになっている。また硬X線の高い強度は蛋白結晶解析、医学利用、高エネルギーX線回折及び散乱実験のためにも利用されている。

2 リングの性能

PF-ARは常時、単バンチモードで運転されている。電子エネルギーは通常のユーザー運転時に6.5GeV、医学利用時に5.0GeVとなる。リングの基本パラメータを表1に

ビームエネルギー	5.0 / 6.5 GeV
入射エネルギー	3.0 GeV (2.5 GeV)
リング周長	377.27 m
ハーモニック数	640
ベータトロンチューン	10.15 (h) 10.21 (v)
RF 周波数	508.57 MHz
エミッタンス(6.5GeV)	294 nmrad
初期蓄積電流	55mA (単バンチで)

表1 PF-ARの基本パラメータ

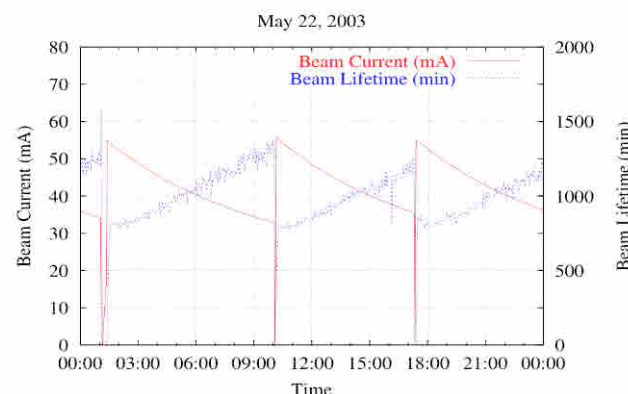


図1 高度化後の1日の運転状況

示す。ビームエネルギーが高く、フルタイムに単バンチ運転されているのが、PF-ARの特徴である。

通常運転ではシングルバケットに55mAのビームが蓄積され、44秒で最終エネルギー（5.0か6.5GeV）に加速される。この加速の間に著しいビームロスが起こらない。高度化プロジェクトの動機の一つは、ビーム寿命の著しい短さ（6.5GeV、40mAで約2時間）であった。これは、リングが蓄積リングを主目的として建設されなかったことに起因しており、真空システムの改良によって大幅に改善されて、50mAでビーム寿命は15時間となっている[1]。このビームの長寿命化によって、ビーム入射も以前の1日8回から1日3回にまで減少し、現在は1:00、10:00、17:00の定時入射になっている。図1は1日のうちのビーム電流とビーム寿命の変化を示したものである。

通常のユーザー運転中にビーム電流依存の軌道変動が観測されている。これを抑えるために、グローバル軌道フィードバックのシステムが構築された。このシステムによって、水平及び垂直方向の軌道の変動はそれぞれ $85\mu\text{m}$ から $16\mu\text{m}$ へ、 $63\mu\text{m}$ から $29\mu\text{m}$ へと改善されている。

5.0GeV運転時、いくつかの真空コンポーネントにおける温度が6.5GeV運転時に比べて著しく上昇しているのが観測されている。この現象は5.0GeVにおけるバンチ長が6.5GeVのときよりも短くなっているという事実に関係し

*連絡先 皆川 康幸 (yasuyuki.minagawa@kek.jp)

ていると思われる。そこで、我々はシンクロトロン振動の2倍の周波数でRFを変調して、パンチ長を引き延ばす試みを行った。これによって、パンチ長を10%引き延ばすことに成功し、温度の上昇も軽減されることが確認されている。

PF-ARの現在のエミッタンスは90度オブティクスで $290\text{nm} \cdot \text{rad}$ である。このリングはブースターシンクロトロンとして建設されているので、6.5GeVの光源としてはリングの周長が短く、実現可能なエミッタンスは最小でも $160\text{nm} \cdot \text{rad}$ となる。2003年4月、この値を実現すべく、低エミッタンスオブティクスのスタディが開始された。3.0GeV入射、低エミッタンスオブティクスの条件で電子は入射出来たが、30mA以上の蓄積を実現することは出来なかった。ビーム電流に制限が発生する原因は次の章で述べられるものと同じビーム不安定性に引き起こされていると思われる。このビーム不安定性を避けることができるオペレーティングポイントの探索、および6.5GeV (5.0GeV) への加速が次に我々がなすべきことである。

3 ビーム不安定性

PF-ARでは高度化後もいくつかのビーム不安定性が観測されている。これらのビーム不安定性の発生源はいまだ明らかではないが、対応策としてこのリングには以前からtransverse方向のビームフィードバックのシステムが備えられている。高度化以前はビームフィードバックの稼働によって2.5GeVの入射でビーム電流は最大40mAまで蓄積されている。しかし、高度化後はビーム電流は15mAまでしか蓄積出来なかった。これはこの後述されるようにlongitudinal方向のエミッタンスの縮小に伴うエネルギーブレッドの減少によるものと考えられる。この状況を想定して、我々は高度化時に八極電磁石を設置しておいた。八極電磁石の稼働により、最大蓄積電流は47mAまで改善されたが、これは満足出来る値ではなかった。そこで、我々は入射エネルギーを3.0GeVに引き上げることを決断した。この改善により、最大蓄積電流は67mAまで引き上げられている。この最大蓄積電流に制限がかかってしまうビームの入射問題について、ビームダイナミクスの観点だけではなく、マシンを安定に運転するためにも、その原因を調べている[2、3]。一例として、ビーム入射時に現れる横方向のビーム振動のパターンを図2に示す。これまでのところ、このパターンがビーム電流に依存し、ビームフィードバック系の影響も受けていることが判明してい

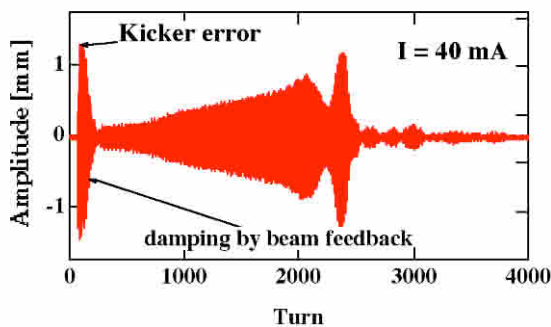


図2 ビーム入射時に観測される横方向のビーム振動パターン。

る。この現象はビーム電流に制限が出来ることに関係しているものと思われる。

PF-ARは単バンチ専用マシンなので、longitudinal方向のカップリングインピーダンスは最も関心ある問題の一つである。我々は真空システムのカップリングインピーダンスが可能なかぎり小さくなるように設計し、ペローズはその内側にインピーダンスを小さくするためのシールドを備えたものを採用している。高度化によるカップリングインピーダンスの改善を評価するためにビーム電流によるパンチ長の変化を測定している。測定システムとしてはビームスペクトルからパンチ長を換算するシステム[4]を使用しており、図3は高度化前後で測定されたパンチ長と計算値を示している。図2に示されているように、測定結果と計算値は低電流の範囲ではよく一致している。この結果から、longitudinalインピーダンスは高度化前後でそれぞれ 1.0 ± 0.05 、 $0.25 \pm 0.05 \Omega$ と評価出来る。シールド付きのペローズのインピーダンスが無視出来るほど小さく、高度化前後でマスクなどの他のコンポーネントに変化がないと想定すると、この高度化前後でのインピーダンスの差はシールド無しのペローズのインピーダンスに等しいと推定出来、その値は 0.75Ω と評価することが出来る。このシールド無しペローズのインピーダンスの計算値は 0.62Ω と算出されているので、測定結果とよく一致している[5]。また、まだ測定は行われていないが、高度化によってエネルギーブレッドが大幅に改善されていることが期待される。

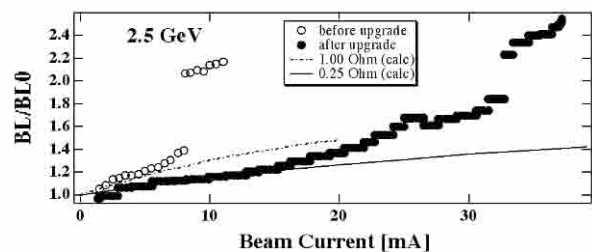


図3 高度化前後におけるパンチ長のビーム電流依存。自然パンチ長で正規化している。

4 単バンチ不純度

単バンチ不純度（メインバケットに入った電子に対して望まないバケットに入った電子の割合）が小さいことは放射光実験の時間分解測定には本質的である。PF-ARでは、この望まないバケットに入った電子を選択的RFノックアウトシステムを用いて、ビーム入射時にふるい落とししている。このシステムは6.5GeVに加速された後に停止させている。このシステムで初期時の単バンチ不純度は 10^{-8} が達成されている。

初期時にメインバケット以外のバケットに電子が存在しない状態にあっても、単バンチ純度は徐々に悪くなっていく。これは、Touschek効果によってメインバケットから飛び出した電子が次のバケットの開口部（radiation dampingによって発生する）に取り込まれる可能性があるからである[6、7]。この問題は低エネルギーのリングではよく問題にされるものであるが、PF-ARのような高エネルギーなリングでもいまだにその問題は存続している。図4はユーザー運転中のメインバンチの不純度の成長の様

子を示している。図において点線で示されている不純度の平均成長率は $1.5 \times 10^{-7}/\text{min}$ 、直線で示された不純度の成長率の計算値は $1.88 \times 10^{-7}/\text{min}$ となっており、測定結果とよくあっている。この計算はバケットの開口と、ZAPコードを使用してTouscheck寿命を計算したものであり、xyカップリングは1%を仮定している。

この不純度の成長を防ぐために、水平方向のスクレーパーを使用してメインバケットからこぼれた電子を除去する方法を試みる予定である[8]。また、選択的RFノックアウトシステムのアンプの出力パワーを増強して、このシステムが6.5GeVでも使用出来るようにする予定である。

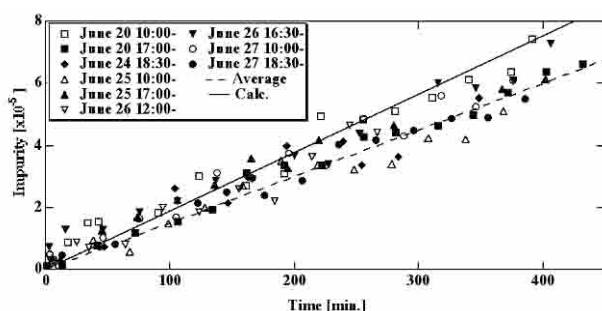
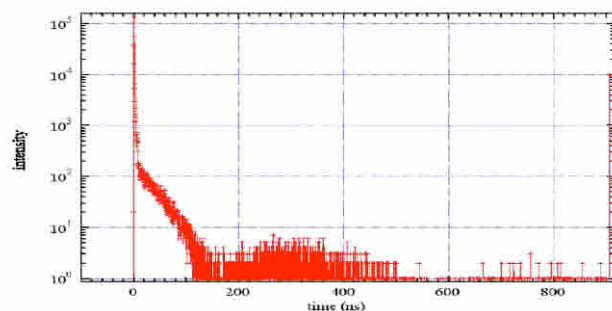


図4 ユーザー運転中の不純度の成長

5 実験施設

PF-ARは二種類の測定、時間領域 and/or 時間分解測定と硬X線の高い強度を利用した測定をカバーしている。前者の主題は物質の中間状態と励起状態を明らかにするメスbauer分光時間領域測定と時間分解X線吸収 and/or 回折測定である。これらの実験はX線アンジュレータビームラインのNE3とNW2で行われている[9]。それら両方の挿入光源はin-vacuumアンジュレータであり、NW2についてはtaperedアンジュレータにするためのメカニズムも持っている[10]。このtaperedアンジュレータは時間分解分散XAFS実験用の3次の相対的に広いエネルギーブレッド($\Delta E/E \sim 10^{-4}$)を得るためのものである。図5は低温状態での ^{83}Kr の時間減衰スペクトルの一例を示している。 ^{83}Kr のメスbauer共鳴エネルギーは9.3keVである。 ^{83}Kr の半減期はほぼ140nsであるので、パルス間隔が長いパルスX線を利用する必要がある。1.26 μs のパルス間隔のパルスX線を供給出来る単バンチ運転はこの種のメスbauer分光に役立っている。時間分解XAFS and/or 回折測定については実験装置の立ち上げが図5 低温状況下での



^{83}Kr の時間減衰スペクトルの例

進行中であり、最初のps時間分解測定は2004年初頭に行われる予定である。後者の主題はNW12における蛋白結晶解析[11]やNE1A2やNE5Aにおける医学利用[12]、NE1A1における高分解コンプトン及び磁気コンプトン散乱測定、NE5Cにおける高圧高温X線回折測定等である。とりわけ、蛋白結晶解析用に新しく建設されたX線アンジュレータのビームライン (NW12) はMAD実験のために高い処理能力をもった実験ステーションとしてよく整備されている。実験ステーションの総合的なパフォーマンスは回折データセットを得るのにかかる時間からも3世代光源のパフォーマンスとほとんど同等である。

参考文献

- [1] Miyajima T. et al., Proc. 2003 Particle Accelerator Conf., 2003.
- [2] Fujita T. et al., Proc. 2003 Particle Accelerator Conf., 2003.
- [3] Minagawa Y. et al., Proc. 2003 Particle Accelerator Conf., 2003.
- [4] Ieiri T., Nucl. Instrum. and Methods A329, 1993, pp. 371-380.
- [5] Ieiri T. et al., Proc. 2003 Particle Accelerator Conf., 2003.
- [6] Kasuga T. et al., Japan. J. Appl. Phys. 28, 1989, pp. 541.
- [7] Obina T. et al., Nucl. Instrum. and Methods A354, 1995, pp. 204
- [8] Tobiyama M. et al., Japan. J. Appl. Phys. 29, 1990, pp. 210
- [9] Mori T. et al., Proc. 2003 Synchrotron Radiation Instrumentation conf.
- [10] Yamamoto S. et al., Proc. 2003 Synchrotron Radiation Instrumentation conf.
- [11] Matsugaki N. et al., Proc. 2003 Synchrotron Radiation Instrumentation conf.
- [12] Hyodo K. et al., Proc. 2003 Synchrotron Radiation Instrumentation conf.