

PRESENT STATUS OF THE KEK PF-RING AND PF-AR

Takashi Obina[#], for Accelerator Division 7 (Light Source Division)
Photon Factory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

Abstract

The Photon Factory storage ring (PF-Ring) and the Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) continue a stable user operation as a synchrotron radiation facility. The operation status and the improvements at PF-Ring and the PF-AR are presented.

KEK PF及びPF-ARの現状

1. はじめに

KEKでは蓄積エネルギー2.5GeVのPFリングと、6.5GeVのPF-ARという2つの放射光源リングが稼働中である。通常PFリングはマルチバンチ450mA, PF-ARはシングルバンチ60mAにて年間約5000時間のユーザー運転に供している。近年ではLinacのタイミング系更新やパルス偏向電磁石の導入により、PFリングとKEKB HER/LERの3リング同時入射が実現され、PFでは2009年4月以降にトップアップ運転が常時ユーザー運転で使用されるようになってきている。一方、PF-ARでは入射路の一部を8GeVのKEKB HERと共有していることや、ビーム輸送路・入射システムの制限のため、3GeVで入射を行った後6.5GeVまで加速する。現状でトップアップ運転は不可能であるため、1日2回の定刻入射で運転している。

本稿では2009年度及び2010年前半の運転状況について報告するとともに、PF及びPF-ARでなされてきた加速器性能向上のための研究開発やマシンスタディについて報告する。過去になされてきた改造の詳細については、前年度までの施設報告[1, 2]を参照されたい。

2. PF-Ring

2.1 運転状況

2009年度の年間運転時間は4976時間であった。このうちユーザーランに予定されていた時間4008時間に対して実際にユーザー運転に供したのは3965.3時間であり、達成率は99%以上を維持している。表1に2007年以降の運転統計を示す[3]。平均故障間隔(MTBF)は160時間以上であり、非常に安定した運転を実現している。

主な中断要因はRFのクライストロン故障及び2010年2月に発生したクライストロン高圧電源の重大故障である。また、2010年6月にはRFの反射インターロックによる運転中断が何度か発生した。最終的にはLLRF(低電力制御系)の故障と判明してモジュール交換を行った結果、その後は安定して運転

表1: PF運転統計

年度	2007	2008	2009
総運転時間 (h)	5104	5000	4976
ユーザー運転時間			
当初予定 (h)	4296	4032	4008
実績 (h)	4177.1	3943.6	3965.3
故障回数	23	18	24
全故障時間 (h)	91.1	23.8	42.7
平均故障間隔 (h)	186.8	224.0	167.0
平均故障時間 (h)	3.8	1.3	1.8

を行っている。2月及び6月のトラブルの原因となったハードウェアはいずれも25年近く運用してきたものであり、定期的にメンテナンスはしてきたものの、やはり老朽化が深刻であることを示しているといえる。高圧電源に関しては故障以前から順次更新を進めてきており、当該電源も2010年8月に更新を行う予定であった。計画通り更新を実施する。クライストロンも運転時間が既に50000時間を超えており、これも夏期シャットダウン中に更新する。また、LLRF系については当面は各種モジュールのメンテナンスを実施するとともに別途モニター系を充実させる予定である。並行して回路系を全面的に更新する計画も進めている。

2.2 偏光スイッチング光源開発

PFリングで最長の直線部は約9mである。ここに2台のAPPLE-II型アンジュレータをタンデムに設置し、上下流に設置したキッカー電磁石によって軌道を振ることで2つのアンジュレータからの光を周期的に切り替える。この軌道スイッチングに同期したロックイン測定を行うことで、円二色性など物質の偏光依存性の高精度測定を実現することが可能となる。

この計画の第1段階として、1台目のアンジュレータと、軌道スイッチング用の高速電磁石を2008年3月にリングに設置した。2010年8月には2台目のアンジュレータがリングに設置され、秋からはいよ

[#] takashi.obina@kek.jp

いよ高速偏光スイッチングのコミッションングに入る予定である。なお、この光源のターゲットエネルギーは200eVから1keVのVSX領域である。

2台のアンジュレータからの光軸を十分に分離すると同時に、アンジュレータの外側では軌道が動かないことが求められる。そのため、5台のキッカー電磁石によってバンパ軌道をつくる方式を採用した。図1に機器の配置及び光軸の模式図を示す[4]。2009年度の段階ではアンジュレータは1台のみ設置された状態であるが、高速バンパ軌道を実用化するためのスタディを行った。高速・高精度での軌道調整を行うため、任意波形発生器と可変減衰器による新たな制御系を導入して現在調整を行っている。また、BPMの振幅と位相情報から軌道変動を最小化する手法についても開発した。スイッチング周波数10Hzに対して、ビームサイズの1/10程度まで軌道変動を抑制出来ている。今後、100Hz程度までの実用化と、バンパ外側への漏れをより小さくすることを目指して調整している[5]。

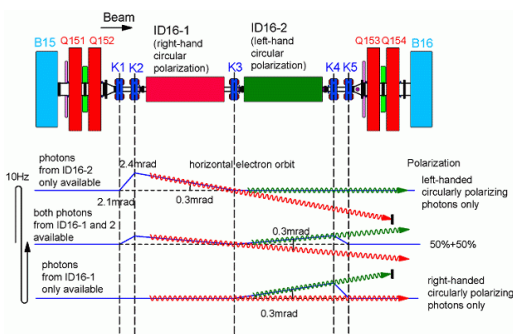


図1：スイッチング原理図

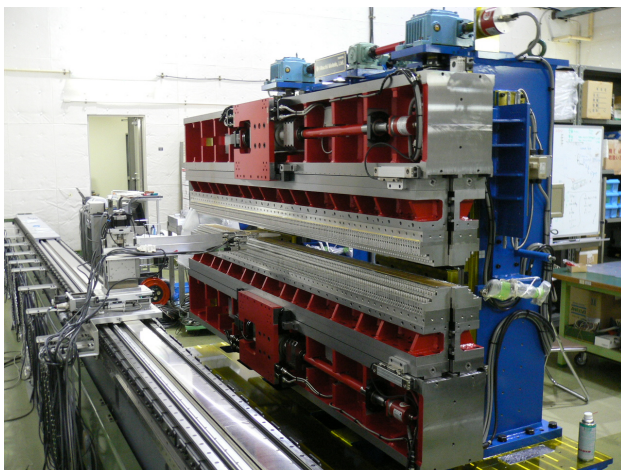


図2：2台目のアンジュレータ磁場測定

2台目のAPPLE-II型アンジュレータの磁場調整も順調に進行している。最初に個々のマグネットブロックの水平・垂直磁場分布を測定し、数値シミュレーションによって最適な磁石列配置順序を決定した。今回約700個以上の磁石ブロックの磁場分布を測定した結果、鉛直方向に磁化した磁石に関して磁場の中心位置が約0.3mm程度ばらついていることが判明した。これは実際に磁石を並べて直線偏光モード

で磁場積分をおこなったときに位相誤差として現れてしまう。今回はこの効果まで含めて最適化を行った結果、特に何も調整しない最初の磁場測定の段階から位相誤差で1.5°という非常に小さい値を達成することが出来た。図2は磁石列を並べた状態での磁場測定の様子である。その他の偏光モードでの磁場測定も進んでいる[6]。

既に設置されている1台目のアンジュレータの軌道調整も順調に進み、既にユーザー運転に使用されている。直線偏光（水平・垂直）、円偏光（ $B_x/B_y=1$; 右・左）、楕円偏光（ $B_x/B_y=1/2$; 右・左）が利用可能で、放射光ユーザーはこれらの偏光モード及び光子エネルギーを自由に選択することが可能である。

2.3 パルス六極入射システムの開発

PFでは通常の入射では4台のキッカー電磁石によってバンパ軌道をつくって入射している。キッカーパルスの頂点部分、すなわち入射ビームに同期しているタイミングでは4台のディレイと強さ（キック角度）を調整して完全にバンパを閉じることが可能であるのに対し、パルスの立ち上がり・立ち下がり部分まで含めて完全に4台の波形を合わせることは困難である。この対策のため多極電磁石による入射システムを開発してきた。すなわち、磁場中心を通過する蓄積ビームは影響をうけず、中心から離れた場所を通る入射ビームのみをキックする方式である。2006年にはPF-ARにパルス四極電磁石を設置し、入射に成功した。四極磁場の場合はパルスを励磁した際にビームサイズが変化するという欠点もあるため、2008年にはPFリングにパルス六極磁石をインストールし、やはり入射に成功している。当初はAR入射用の電源を流用したため、パルス長が長かったが、2009年度にはPF用に最適化したパルス高圧電源を導入した。その後、トップアップ運転での実用化へ向けての各種調整を行っている。図3に高速ゲートカメラで測定した入射時の蓄積ビームプロファイルの変化を示す。

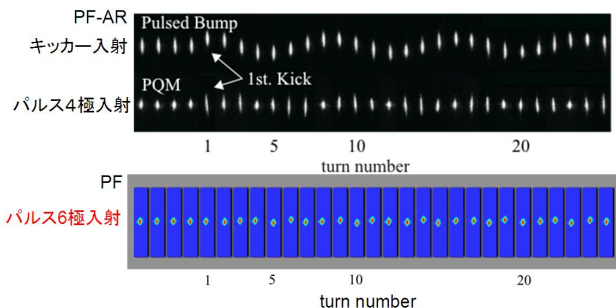


図3：パルス六極入射時のビームプロファイル変化。高速ゲートカメラによる測定。単バンチ時の測定で、横軸は周回数を示す。

パルス四極での入射時に観測されていたビーム形状のまたたきが、パルス六極での入射では抑制出来ていることがわかる。2010年秋からは実際のユーザーランで常時使用する予定である。

2.4 その他

リング内の壁電流モニターとオシロスコープを組み合わせたバンチ電流・フィルパターン調整システムを開発した[8, 9]。オシロスコープ内ではEPICS制御システムの入出力コントローラー(IOC)が動いており、安定した運用を実現している。任意のバンチ電流制御が可能であるため、大電流の単バンチと多数の小電流バンチを同時に蓄積するハイブリッド運転時には不可欠となる。現在はバンチ電流を均一に保持する目的でユーザーラン中に常時使用しており、順調に稼働している。特にトラブルは生じていない。

2009年9月には新たな真空封止型短周期アンジュレータSGU#01を設置した。これは1.4mの短直線部に極小ギャップ(4mm)・短周期(12mm)のアンジュレータを設置して数keV~12keVの高輝度X線を発生させることを目的としたものである。既存のSGU#03, SGU#17に続く3台目の短周期アンジュレータである。インストール後の立ち上げ及び調整は順調に進み、既にターゲットタンパク研究用ビームラインとしてユーザー運転に供している。

入射キッカーの制御バスとして従来はCAMACを使用してきた。老朽化対策・信頼性向上のため、PLCベースの制御系へ置き換えが進んでいる[10]。

3. PF-AR

3.1 運転状況

表2に2008年度及び2009年度のPF-AR運転統計を示す。運転時間はPFとほぼ同じく約5000時間である。トラブル数はPFに比較すると多いものの、MTBFは100時間を超えており、十分に安定なマシンである。

表 2 : PF-AR運転統計

年度	2007	2008	2009
総運転時間 (h)	4516	4969	5063
ユーザー運転時間			
当初予定 (h)	3660	4457	4392
実績 (h)	3614.0	4414.6	4301.0
故障回数	60	40	41
全故障時間 (h)	45.2	41.7	91.0
平均故障間隔 (h)	60.4	108.6	107.1
平均故障時間 (h)	0.8	1.0	2.2

PF-ARに特徴的な現象としてビーム寿命急落現象が挙げられる。2009年度には16回発生しており、ビーム再入射まで至る最大の原因となっている(この現象は機器の故障や停電等の外的要因ではないものの、再入射を要するという意味から運転統計上は故障の1つとしてカウントしている)。この寿命急落現象の原因はダストトラッピングと考えられており、次項で述べるように原因究明のための研究がなされている。

3.2 ダストトラッピング研究

前項で述べたダストの主な発生源は偏向電磁石内に設置されたDIP(分布型イオンポンプ)と考えられていたため、ユーザーラン中にDIPの高圧電源をオフにすることでダストの発生を抑えることを試みた。その結果、寿命急落現象の頻度は明らかに減少することが判明した。しかしながら寿命急落を完全に抑制することは出来ていない。この現象をより深く理解するために、さまざまな放電パターンを起こして、人為的にダストトラッピング現象を起こすことを試みた。さらにダストを観測する装置の開発を行った結果、世界で初めて電子ビームに捕獲されたダスト粒子をCCDカメラで直接観測することに成功している[11, 12]。今後さらに研究を行い、現象の解明とその対策をすすめる。

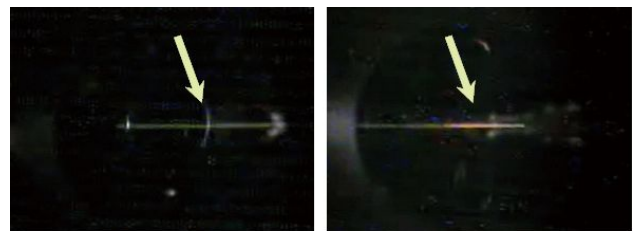
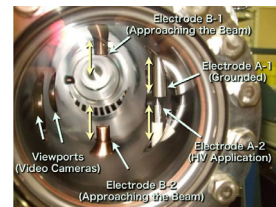


図 4: リング内に設置された放電装置(上)と、CCDによって観測されたダスト(下)。

4. 今後の予定

PFではID16スイッチング実用化を目指す他、新規SGU#15設計、ビームの縦方向四極振動抑制、老朽化対策などの課題が挙げられる。AR入射に関してはKEKBアップグレードに合わせて輸送路を改造し、陽電子入射を行う計画も検討中である。

参考文献

- [1] T. Honda, 2008加速器学会 p.631
- [2] H. Miyauchi, 2009加速器学会 p.681
- [3] T. Honda, et al., Proceedings of IPAC10, p.2561
- [4] K. Harada, et al., Proceedings of IPAC10, p.3150
- [5] K. Harada, et al., in these proceedings (WEPS039)
- [6] K. Tsuchiya, et al., Proc. IPAC10, p.3153
- [7] H. Takaki, Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 020705(2010)
- [8] R. Takai, et al., in these proceedings (WEPS107/)
- [9] R. Takai, et al., Proc. IPAC10, p.2564
- [10] S. Nagahashi, et al., in these proceedings (WEPS119)
- [11] M. Tanaka, et al., in these proceedings
- [12] Y. Tanimoto, Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 110702(2009)