

Operation Statistics of PF-AR

Manabu Tanaka ^{*A)}, Hirohito Asai^{A)}, Tohru Honda^{B)}

^{A)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd

2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 305-0045

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 305-0801

Abstract

PF-AR (Photon Factory Advanced Ring) supplies high-intensity pulsed X rays by a stored energy of 6.5 GeV and an exclusively single-bunch mode operation. PF-AR is used as a dedicated synchrotron radiation source since 1987 after the TRISTAN project was completed. The total operation time is about 5000 hours a year, and about 4500 hours are used for the synchrotron radiation experiment. From 2006 to 2008, reinforcement of the total pumping speed and renewal of the bending magnet power supply were accomplished. The mean time between failures (MTBF) was improving gradually, and exceeded 100 h for recent two years.

PF-AR の運転統計

1. はじめに

PF-AR (Photon Factory Advanced Ring) ^{[1][2][3]}は蓄積エネルギー 6.5 GeV、単バンチ・大電流運転によって大強度のパルス X 線を供給する放射光源リングである。単バンチを利用した研究例として時間分割 X 線吸収分光(XAFS)、核共鳴散乱による非弾性散乱の観測、コンプトン散乱による電子・磁気構造の研究などがある。大強度 X 線を利用した研究例としては医学診断応用、超高圧下の構造物性などがある。最近では真空封止アンジュレータの数も 5 台に増え、タンパク質の結晶構造解析にも利用されている。PF-AR では現在 8 つのビームラインに放射光を供給している。表 1 に PF-AR の主なパラメータを示す。

表 1 : PF-AR の主なパラメータ

Beam energy	6.5 GeV
Circumference	377 m
Natural emittance	299 nm · rad
Injection energy	3.0 GeV
Typical num. of bunches	1
Initial stored current	62mA
Num. of insertion devices	6

2. 安全システムと運転

PF-AR は元々トリスタン加速器のブースターリングであった。トリスタンに代わって KEK B ファクトリーが建設された際に、LINAC からメインリングへの直接入射路が新設された。それに伴い AR はブースターとしての役割を終え、1998 年以降は放射光実験専用リングとして運転されている。PF-AR は KEKB の電子リングと BT(Beam Transport)を共有しており、安全システムについては PF-AR、KEKB リング及び BT を一括して KEKB 制御室で管理している。

* tmanabu@post.kek.jp

加速器の運転状態はフリー（立入可能）、リミット（立入制限）、キープアウト（運転状態）の 3 段階に分けている。フリー状態では加速器トンネルへの立入りは ID カードとパーソナルキーで管理している。トンネル内の安全巡視を行ってリミット状態とした後は、立入者の名簿と各個人のトンネルへの出入をすべてコントロール室で監視し、パーソナルキーがすべて返却されれば直ちに運転状態へ移行できるようにしている。フリー状態とするのは加速器の運転が長期停止される期間に限られる。また長期停止後の運転再開時には、トンネル出入口の扉やパーソナルキーのインターロックシステムが正常に動作するかテストを行う。図 1 に PF-AR 及び KEKB、BT の安全システム操作盤と入退域監視端末を含む安全監視台の様子を示す。



図 1 : PF-AR 及び KEKB、BT の安全システム操作盤(左)と入退域監視端末(右)を含む安全監視台

リミット（あるいはフリー）状態で加速器トンネルへ人が立ち入る際の安全を確保する装置には以下のようなものがある。BT の一部の偏向電磁石を安全マグネットとし、安全マグネットの磁場をおろすことで入射ビームがリングへ到達できなくする。リングにビームストップを挿入し蓄積ビームを完全にダンプする。正規の手順を踏まないで運転状態から

リミット状態に移行しようとする、インターロックが働き BT の安全マグネットがダウンシリングにストッパーが挿入される。またユーザー運転中にビームシャッターの故障など放射光ビームラインの安全条件が成立しない状態が発生すると、入射、蓄積とも不可能なリミット状態へ強制的に移行し人的安全を確保するようになっている。

3. 運転時間とその内訳

PF-AR は 2001 年度に真空系の全面入れ替えやステアリング電磁石の増強、制御系の入れ替え等の高度化改造が行われた。また 2006 年度から 2008 年度にかけてはスパッタイオンポンプ増設によりリング真空の排気速度が大幅に改善され、2007 年度には偏向電磁石電源の更新が行なわれた。図 2 に 2001 年度の高度化改造以降の総運転時間とその内訳を示す。また図 3 に内訳ごとの割合、図 4 に 2005 年度から 2009 年度を通算した運転時間の内訳ごとの割合を示す。

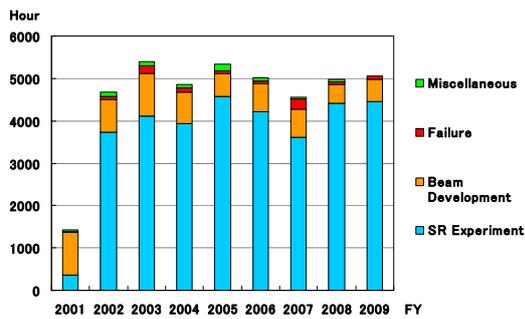


図 2：高度化改造以降の運転時間とその内訳

ユーザー運転 (SR Experiment) の他、Beam Development にはマシンスタディーやコミッションング、Failure には電磁石や高周波加速の故障や真空トラブルなどによる運転停止、Miscellaneous には定期保守やリング内巡視の時間などが含まれている。

2001 年度は真空系の全面入れ替えやステアリング電磁石の増強、制御系の入れ替え等の高度化改造作業が 2001 年 2 月末より 12 月末まで行われた。2002 年の年明けより加速器のコミッションングが行われ、運転時間は 1416 時間(59 日)と短いものであった。また 2001 年度には高度化改造作業と同時に新しい放射光実験棟の建設とビームライン整備も行われた。2002 年度からは通年にわたり放射光実験が順調に行われ 2002 年から 2009 年度までの平均運転時間は 4982 時間、放射光実験に利用された時間は 4133 時間で全体の 83.0%となっている。またビーム開発には 669 時間 13.5%、故障 104 時間 2.1%、その他 76 時間 1.5%となっている。2005 年から 2009 年の過去 5 年に限っては、平均運転時間は 4987 時間、放射光実験に利用された時間は 4255 時間で全体の 85.3%となっている。またビーム開発は 568 時間 11.4%、故障 95 時間 1.9%、その他 68 時間 1.4%となっている。2007 年度までは 1 週間に 1 日、2008 年度以降は 2 週間毎に 1 日マシンスタ

ディーの時間をとっており、2008、2009 年度は総運転時間の約 90%が放射光実験時間となっている。

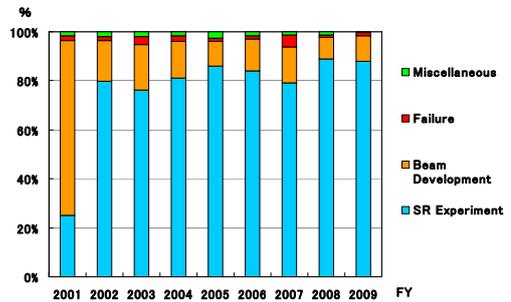


図 3：高度化改造以降の運転時間の内訳の割合

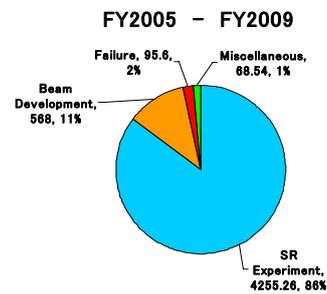


図 4：2005 年から 2009 年度を通算した運転時間内訳の割合

4. ビーム入射

PF-AR は BT を KEKB のメインリングと共有しているのは既に述べたとおりである。現在 PF-AR では 1 日 2 回の定時入射を行っている。

入射器(LINAC)は PF-AR、KEKB、PF の 4 つのリングで共有しており、PF-AR へは 3.0 GeV の電子、KEKB へは 8.0 GeV の電子と 3.5 GeV の陽電子、PF へは 2.5 GeV の電子を入射している。また KEKB 及び PF へは 8.0GeV の電子、3.5GeV の陽電子、2.5GeV の電子の 3 ビームをパルスごとに切り替えることが可能で、3 リング同時に連続入射を行っている。PF-AR への入射では電子リングと共有している BT のエネルギーを KEKB 用の 8.0GeV から 3.0GeV へ変更する必要がある、他のリングとの同時入射には対応していない。したがって PF-AR への入射時は KEKB 及び PF への連続入射を中断し PF-AR 単独で入射を行っている。BT のエネルギー変更や PF-AR の安全マグネット立上げなど入射の切替えに要する時間は数分程度である。ビーム入射中に蓄積バンチの純度を上げる為、リング内の RF-KO(RF knockout)を用いてバンチ純化を行い、単バンチ 62 mA 程度蓄積した後 6.5 GeV まで加速を行う。加速後にはビーム軌道を補正し、軌道フィードバックを動作させて放射光実験モードへ切り替える。またビーム加速後、ビーム寿命やビーム軌道が安定したのを確認し BT のエネルギーを KEKB 用へ切り替える。この一連の手順で PF-AR 入射に要する時間

は約 15 分程度である。

5. 故障統計と MTBF

PF-AR でユーザー運転中に発生した故障件数とその内訳の統計を示す。ここで故障とは、ユーザー運転を一日 2 回の定時入射以外で中断することであり、ビームダンプの他、放射光ビームラインのビームシャッターを閉じるにいたった全ての事象を含む。図 5 に 2005 年度から 2009 年度までの故障回数とその内訳を棒グラフにして示す。また故障が発生してから、故障への対処を行い、ビームを再入射して放射光実験を再開するまでに要した時間をダウンタイムと定義し、そのダウンタイムの合計と内訳を図 6 に示す。

故障発生頻度の、すなわち Mean Time Between Failures (MTBF) を、スケジュールされた放射光実験時間を故障回数で割って算出した。またダウンタイムの合計を故障回数で割った値を Mean Down Time (MDT) として、それぞれを年度ごとに表 2 に示す。

表 2 : PF-AR の MTBF と MDT

Fiscal Year	2005	2006	2007	2008	2009
User Time	4456	4032	3624	4344	4392
Failures	79	51	60	40	41
Total Down Time (h)	69.3	55.1	45.2	41.7	91.0
MTBF (h)	56.4	79.1	60.4	108.6	107.1
MDT (h)	0.9	1.1	0.8	1.0	2.2

故障原因の内訳は、電磁石(MAG)、ビーム診断系(BM)、入射システム(入射)、入射器(LINAC)、真空系(VAC)、寿命急落(Life 急落)、高周波加速(RF)、放射光ビームライン(BL)、冷却水電気等(施設)などに分類してグラフに示している。

MTBF は改善がみられ、ここ 2 年間は 100 時間を超えている。例えば同じく 6GeV 級の放射光リングである ESRF^[4]では 50 時間全後の MTBF が報告されているが、これと比較しても遜色ない値を記録している。図 5 に示した故障分類の中で RF によるビームダンプがほとんどの年度で 10 回未満であることが MTBF の長さに寄与している。どの年度においてもビーム寿命急落による再入射が故障回数で最も多いが、これはダストトラッピング^[5]によるもので PF-AR に特徴的な現象である。ダストトラッピングはハードウェアの故障ではなく直ぐに再入射が可能なので図 7 のダウンタイムでは発生回数が多い割に目立たない。2006 年度から 2008 年度にかけてスパッタイオンポンプを増設し排気速度を充分確保できたので、ダストトラッピングの主因となっていた分布型イオンポンプ(DIP)を 2008 年度以降休止している。2008 年度、2009 年度に寿命急落回数が以前に比べて減少したのは DIP 休止の効果があったと考えられる。2009 年度はビームダクトの真空リークが 2 回発生した。リング内での真空作業が必要となり、ダウンタイムはこれだけで 42 時間に及んでいる。図 6 によるとここ 3 年間で電磁石電源の故障によるダウンタイムの増加がみられる。故障回

数の増加はそれほどではないが、数多くある大型電源の老朽化が心配される。

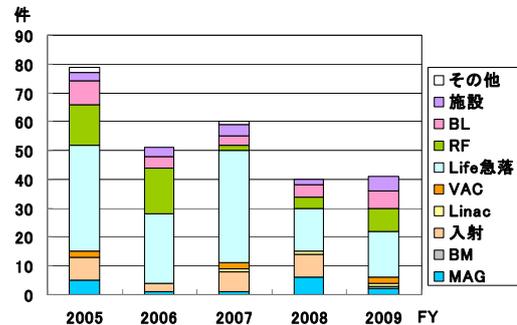


図 5 : ユーザー運転中の故障発生件数

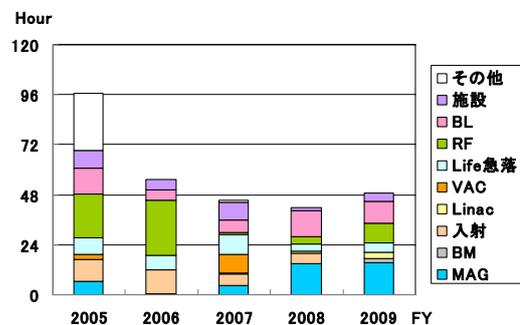


図 6 : ダウンタイムの合計とその内訳

6. まとめ

PF-AR では 2001 年度の高度化改造ではビームダクトや補正電磁石、2007 年度には偏向電磁石電源など更新を完了した加速器コンポーネントもあるが、偏向電磁石本体や四極、六極電磁石の本体や電源、高周波加速系や入射セプトム、キッカーなど 1980 年代の運転開始当初から継続して使用しているコンポーネントも数多くある。したがって老朽化による故障多発が心配される部分が多いので、故障回数やその内訳の統計を活用して、早急に手当てが必要な箇所を的確に判断し、維持保守を続けていくことが今後いっそう重要になるとと思われる。運転統計の整備に努め、PF-AR の安定な運転の継続を目指したい。

7. 謝辞

日々 PF-AR の運転や開発維持に携わって尽力している PF、KEKB 及び LINAC の方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] <http://pfwww.kek.jp>
- [2] T. Honda, Proc. 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Higashihiroshima, August. 6-8, 2008, p631.
- [3] H. Miyauchi, Proc. Particle Accelerator Society Meeting 2009, JAEA, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, p681.
- [4] J-L. Revol et al., Proc. EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, p3290.
- [5] Y. Tanimoto et al., J. Particle Accelerator Society of Japan, 7 (2010) 43.