

Operation Statistics of PF-AR

Manabu Tanaka ^{*,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. PF-AR is operated for one year for about 5000 hours a year, and about 4500 hours are used for the synchrotron radiation experiment. In fiscal year 2011, operation time was spent on the restoration after an East Japan great earthquake, and the user time scheduled from May to July was canceled. In this report, we describe the operation statistics of PF-AR in FY 2011.

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 6.5GeV、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、表 2 に現在のビームラインとステーション名を示す。

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

表 2 : ビームライン及びステーション名

NE1	レーザー加熱超高圧実験ステーション
NE3	タンパク質結晶構造解析ステーション
NE5	高温高圧実験ステーション/MAX 8 0
NE7	X 線イメージングおよび高温高圧実験
NW2	時分割 XAFS 及び時分割 X 線回折実験
NW10	XAFS 実験ステーション
NW12	タンパク質結晶構造解析ステーション
NW14	時間分解 X 線回折実験ステーション

2. 震災による影響

PF-AR は 2011 年 3 月 11 日の朝 9 時に 2010 年度の運転を終了し、そのおよそ 6 時間後に東日本大震災に見舞われた。地震と同時につくば市内においては大規模な停電が発生した。そのような状況において大きな余震が頻繁にあった中、PF-AR 担当者による被害状況の確認点検が行われた。幸い入射器 (LINAC) であったような電磁石の落下やビームダクトの破断は PF-AR では確認されなかった。また当日は加速器の運転を休止し春期シャットダウンに移行する日であった為、運転停止に伴い RF や電磁石の電源が落とされ、放射光リングのゲートバルブが閉じられていたことも不幸中の幸いであった。

2011 年度は当初 5 月の連休明けから 7 月 7 日までの放射光ユーザー運転が予定されていた。地震で加速器が被った損害の調査、復旧に要する時間、震災後の電力事情などの状況を踏まえて、5 月から 7 月のユーザー運転はすべてキャンセルとなった。

東日本大震災の余震及び KEK 内での厳しい電力制限の中、入射器グループは震災 3 日後には被害調査や復旧作業を開始し、2011 年 5 月中旬にはビーム入射が可能となっていた。2010 年秋より KEKB 加速器は Super KEKB 実現に向けた改造期間に入っており、全長 600m の LINAC のうち PF リングと PF-AR への入射に必要な後半部の仮復旧が優先して行われた。

PF-AR でも被害の調査や復旧作業を順次進め 2011 年 5 月 30 日には AR と BT (入射器から AR へのビーム輸送路) の安全システム検査を行った。5 月 16 日より行われた PF リングの立上げが完了した後、6 月 1 日より AR のリング立上げを開始し、両リングとも 7 月 7 日まで調整運転を継続した。AR では電磁石の落下やビームダクトの破断等は無かったものの、4 月の電磁石レベル測定では地下トンネルのエキスパンジョイント部分で最大で 0.5

* tmanabu@post.kek.jp

mm 程度の変位が観測された。時間の関係で 6 月のリング立上げ前には、電磁石のアライメントは行われなかった。調整運転終了後の 7 月に再度電磁石のレベル測量を行ったところ、地震後数か月の間にジョイント部での電磁石の変位が元に戻る方向に変化していることがわかった。地震の詳しい被害状況に関しては昨年度の加速器学会等ですでに報告^{[4][5]}されている。

3. 震災後のビーム調整運転

2011 年 6 月 1 日から開始されたビーム調整運転の様子を簡単に報告する。初日は朝 9 時よりリングと BT のパトロールを行った後、10 時過ぎより入射器の AR 入射用 3GeV ビームの調整が開始された。続いて BT およびリングの入射システムの確認を行った結果 10:50 にはビームの蓄積ができるようになり、6.5GeV への加速調整も行われた。COD 補正や Injection Phase 調整、RF Injection Vc の調整等を行い、午後には 30mA 近くまで蓄積電流値が増加した。1 台の四極電磁石電源に不調が発見されたので、一旦ビーム運転を中断し修理を行った後、夕方よりビーム調整が再開され、Tune の補正や入射用 bunch Feedback の調整を行い 18:17 には定格の 65mA までの蓄積を確認した。その後入射中にビーム不安定性によるビームロスが頻発する為、RF Injection Vc 調整や COD 補正を行いながら 18:40 には 60.67mA で 6.5Gev まで加速、19:04 には 62.1mA で 6.5Gev まで加速する事が出来た。19:10 には入射調整が終了し翌朝まで 40~60mA までの間でのビームによる真空焼きだしに移行した。図 1 に 2011 年 6 月 1 日の蓄積電流値とビーム寿命の記録を示す。

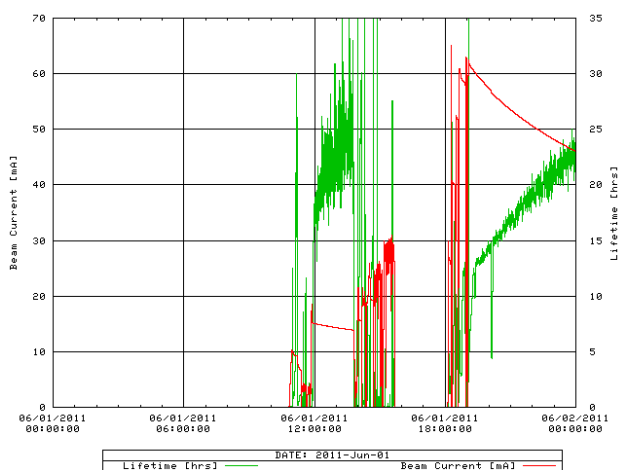


図 1：2011 年 6 月 1 日のリング立上げの記録

AR には真空封止型アンジュレータが 5 台設置されており、最少ギャップ 8 mm から 13 mm で運用されている。6 月 2 日にはこれらの真空封止アンジュレータのギャップを一台ずつ閉じて、ビーム軌道のずれによって、ビーム寿命やアンジュレータ内部の真空の悪化等が見られないかの調査を行った。

また震災では放射光ビームラインのシールド壁がリング内で損壊する被害もあった。そこで 6 月 2 日

に放射光ビームラインのビームシャッターを閉じた状態で、ビーム入射時および蓄積時の実験フロアの放射線サーベイが念入りに行われ、異常がないことが確認された。リングの真空焼き出しは、週明け 6 月 6 日の朝まで継続された。

2011 年 6 月 6 日の 9 時には放射光ビームラインへの光導入試験、光軸確認が行われた。最初は 5mA 程度で Channel Permit (加速器側からのビームシャッター開の許可信号を出す) し、その後 20mA で再度光軸確認が行われた。ビームシャッター開での放射線サーベイ、光軸確認と軌道調整を何度も繰り返し、定格電流 62mA での光軸確認及び軌道調整が終了したのは 18 時過ぎであった。ビーム寿命もほぼ回復し、その後は 1 日 2 回の定時入射によるビーム運転となり、入射後は Channel Permit して、ビームラインの実験機器の調整、復旧を兼ねた調整運転が 7 月 7 日まで続けられた。正式のユーザータイムではなかったが、夏前の約 1 ヶ月程度 PF-AR ユーザーにビームを供給することが出来た。

4. ビーム入射

KEK の電子陽電子入射器(LINAC)は PF-AR、KEKB の HER と LER、PF リングの 4 リングで共有している。PF-AR 以外の 3 リング、KEKB の HER (8.0 GeV 電子)、LER (3.5 GeV 陽電子) と PF リング (2.5 GeV 電子) へは 50 Hz の入射パルスごとに加速エネルギーを切り替えることによって、同時に連続入射することが可能である。PF-AR は入射エネルギーの異なる HER と BT を共有している為、同時入射にはまだ対応出来ていない。現在は PF-AR と PF リングの 2 リングのみが運転しているが、PF-AR 入射時は PF への連続入射を中断する必要がある。

放射光実験モードを終了 (Channel Close) すると、自動的に真空封止アンジュレータのギャップが開き入射可能となる。6.5GeV から 3GeV へ減速し残った蓄積ビームをビームストッパーでダンプしたのち、BT 上流部にある安全マグネットを立上げ、入射モードを切替える。モード切替えに要する時間は数分程度である。

6.5GeV 蓄積時には軌道フィードバックによって、リングの RF 周波数が自動的に変更されるが、3GeV 入射時の RF 周波数は一定の値に固定している。

3GeV での入射中に RF-KO (RF knock out) を用いてシングルバンチの純化を行う。62mA 蓄積した後 6.5GeV まで加速し、加速後には純化信号はオフする。COD 補正を行い、軌道フィードバックを動作させる。その後ビーム寿命、ビーム軌道が安定したのを確認し放射光実験モードへ切り替え (Channel Permit を出す)、PF リングへビームを切り替える。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. 運転時間の統計

2011 年度の総運転時間は震災の影響もあり減少した。例年であれば約 5000 時間程度運転し、その 80%程度 (約 4000 時間) は放射光実験に利用されていた。2010 年度と 2011 年度の運転時間の比較を表 3 と図 2 に示す。年度は上期と下期に分け、上期は春と夏に下期は秋と冬に分けている。

表 3：2010年度と2011年度のPF-AR運転時間

	2010年度			2011年度		
	上期 (h)	下期 (h)	総計 (h)	上期 (h)	下期 (h)	総計 (h)
運転	1587	3052	4639	902	3230	4132
放射光 実験	1412	2684	4096	0	2942	2942
調整 運転	0	0	0	592	0	592
ビーム 開発	127	277	403	249	242	490
故障	21	38	59	19	28	47
その他	81	54	135	43	19	62

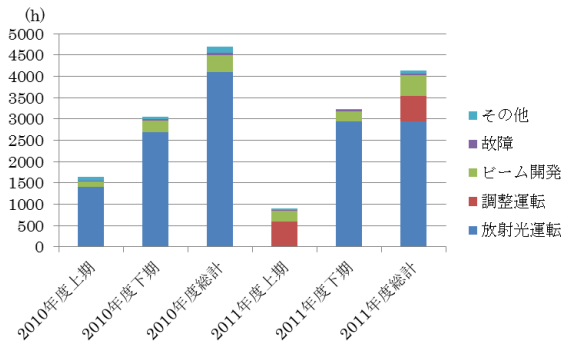


図 2：2010 年度と 2011 年度の PF-AR 運転時間

2011 年度上期の正式な放射光実験時間はキャンセルされ 0 時間となってしまった。そのビーム調整運転の中で、600 時間程度 Channel Permit して実験フロアに放射光を供給した。下期に関しては 2010 年度と 2011 年度の放射光実験はそれぞれ 2684 時間と 2942 時間となっており、2011 年度の方がユーザーにビームを提供した時間が長かった。ビーム開発はマシンスタディーやリング立上げの時間であるが、震災後の立ち上げ調整時間が加わったため 2011 年度が 490 時間と 2010 年度の 403 時間に比べ多くなっている。故障やその他に関しては 2011 年度のほうが 2010 年度よりかえって少なくなっており、震災後の運転で、特にユーザー運転が再開されてからは、前年に比べて故障の発生が増加したわけではなかった。

6. 故障と MTBF

PF-AR でユーザー運転中に発生した故障件数とそ

の内訳を図 3 に示す。ここで故障とは、ユーザー運転を 1 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至った全ての事象を含む。

故障原因の内訳は、電磁石(MAG)、入射器(Linac)、真空系(VAC)、ビーム寿命急落 (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)、その他に分類した。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内訳を図 4 に示す。

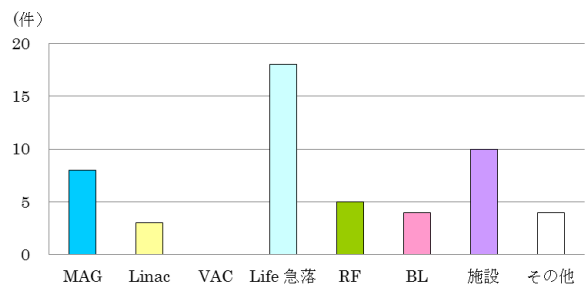


図 3：ユーザー運転中の故障発生件数

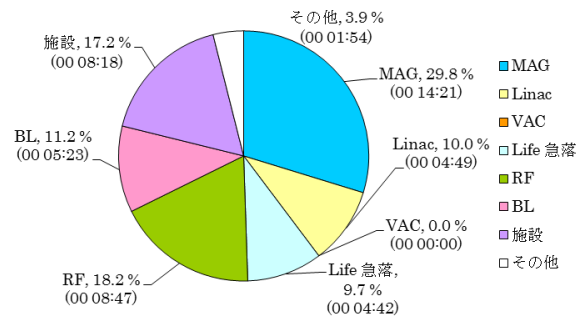


図 4：ダウンタイムの内訳

2011 年度において発生件が一番多いのはビーム寿命急落 (Life 急落) であり、18 件となっている。ビーム寿命が極端に減少したとき、ビームを一旦捨てて再入射を行った回数であり、寿命急落の原因はダストトラッピング⁶⁾と考えられる。ダストトラッピングの頻度は年々減少する傾向にはあるが、週に一回程度の頻度で再入射が行われている。ただし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可能なので、図 4 のダウンタイムではビーム寿命急落発生回数が多い (全体の 35%) 割には 10%程度と目立たない。

その次に多かったのが冷却水電気等 (施設関係) で 10 件であった。そのうち 7 件は放射線モニターのトラブルとその対処のための時間であった。放射線モニターは加速器の周辺の要所要所に設置されており、基準を超える積算放射線量を検知した場合に、インターロックで該当する加速器の運転を止める。Linac や BT の放射線モニターが働いた場合ビーム入射が一時的に出来なくなり、リングの場合は蓄積ビームがダンプされる。今回の故障は、放射線レベ

ルの上昇が原因ではなく、放射線モニターに雑音が混入したため、ビーム運転を休止した場合である。

震災前は震度 4 以上の地震は減多になく、PF-AR は比較的地震に強い（震度 3 程度の揺れでもビームダンプしない）リングであった為、地震によるユーザー運転の中断は年に 1 回あるどうかであった。そこで地震も施設という分類にひとまとめにしていた。KEK では震度 4 以上の地震があった場合は、一旦ビーム運転を停止しリング内の異常の有無を点検する規則である。また大きい地震を予告する緊急地震速報の構内放送があった場合にもビームチャンネルを閉める場合がある。2011 年度は、多くの余震が発生し地震によるユーザー運転の中断も何回か記録されている。震災後 1 年以上を経過して、現在は余震の発生頻度も落ち着いたように思える。地震の分類に関しては再検討するつもりである。

電磁石(MAG)に関しては 8 件と 3 番目に多く、またダウンタイムも約 3 割を占めた。分類に関しては電源と電磁石を 1 つの分類にまとめている。電磁石電源は、偏向電磁石電源、QD 電源、QF 電源と大型の電源から更新が徐々に進められているが、数多くの電源が老朽化しており、2010 年度、2011 年度と続けて故障回数が多く記録されている。また電源および電磁石は一旦故障が起きると対処に数時間以上の長時間を要する 경우가多く、ダウンタイムも長くなる傾向がある。

放射光ビームライン(BL)に関しても 2011 年度は地震の影響が大きかった。地震によりメインハッチの扉が一瞬開いた状態となって、ビームライン側からの I/L 信号よりビームダンプする現象が 4 件発生している。ビームラインおよび加速器の安全システムのインターロックの双方のリセットが必要となるため、安全確認も含めて復旧に時間を要する。

VAC は主としてビームダクトの真空悪化であるが、幸い 2011 年度に関しては 0 件であった。

故障発生の頻度、MTBF (Mean Time Between Failures)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 MDT (Mean Down Time) とする。比較のため 2010 年度と 2011 年度の MTBF と MDT を表 4 に示す。MTBF は 2008 年度と 2009 年度には 100 時間を超えていたこともあった。2010 年度には故障回数が多く 3 年連続 100 時間を超えることは出来なかった。2011 年度は放射光実験の時間は震災の影響を受け少なくなったが MTBF は 2010 年度より改善され 68 時間となった。

表 4 : 2010 年度と 2011 年度の MTBF と MDT

	放射光 実験	故障 回数	故障 時間	MTBF (h)	MDT (h)
2010年度	4096	75	72.5	54.6	0.96
2011年度	3534	52	60.25	68.0	1.3

7. まとめ

PF-AR は 2011 年 3 月 11 日の朝 9 時に 2010 年度の運転を終了し、そのおよそ 6 時間後に東日本大震災に見舞われた。その後研究所内外の多くの人の協力を得て、わずか 3 か月後にはビーム運転を再開、半年後にはユーザー運転を再開する事が出来た。

PF-AR では 1980 年代の運転開始当初から継続して使用している機器が数多くあり、老朽化による故障多発が心配される部分が多い。故障回数やその内訳の統計を活用し早急に手当てが必要な個所を的確に判断し、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思われる。

今後も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。

8. 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 の方々に心より感謝いたします。また AR 運転員には運転データの集計に協力して頂き感謝いたします。

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] T. Obina, Proc. 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, August. 1-3, 2011,
- [5] T. Ozaki, Proc. 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, August. 1-3, 2011,
- [6] Y. Tanimoto et al., J. Particle Accelerator Society of Japan, 7 (2010) 43.