

KEK 放射光源加速器 PF リングと PF-AR の現状

PRESENT STATUS OF PF RING AND PF-AR AT KEK

小林幸則[#], 阿達正浩, 上田明, 内山隆司, 江口 柊, 尾崎俊幸, 帯名崇, 影山達也, 金 秀光, 齊藤寛峻, 坂井 浩, 坂中章悟, 佐々木洋征, 佐藤政行, 佐藤佳裕, 下ヶ橋秀典, 塩澤真未, 塩屋達郎, 篠原智史, 島田美帆, 下崎義人, 高井良太, 高木宏之, 高橋 毅, 多田野幹人, 田中オリガ, 谷本育律, 田原俊央, 多和田正文, 土屋公央, 内藤大地, 長橋進也, 中村典雄, 濁川和幸, 野上隆史, 芳賀開一, 原田健太郎, 東 直, 本田 融, 丸塚勝美, 満田史織, 三増俊広, 宮内洋司, 山本尚人, 山本将博, 吉田正人, 吉本伸一, 渡邊 謙
Yukinori Kobayashi [#], Masahiro Adachi, Akira Ueda, Takashi Uchiyama, Shu Eguchi, Toshiyuki Ozaki, Takashi Obina, Tatsuya Kageyama, Xiuguang Jin, Hirotohi Saito, Hiroshi Sakai, Shogo Sakanaka, Hiroyuki Sasaki, Masayuki Sato, Yoshihiro Sato, Hidenori Sagehashi, Mami Shiozawa, Tatsuhiro Shioya, Satoshi Shinohara, Miho Shimada, Yoshito Shimosaki, Ryota Takai, Hiroyuki Takaki, Takeshi Takahashi, Mikito Tadano, Olga Tanaka, Yasunori Tanimoto, Toshihiro Tahara, Masafumi Tawada, Kimichika Tsuchiya, Daichi Naito, Shinya Nagahashi, Norio Nakamura, Kazuyuki Nigorikawa, Takashi Nogami, Kaiichi Haga, Kentaro Harada, Nao Higashi, Tohru Honda, Katsumi Marutsuka, Chikaori Mitsuda, Toshihiro Mimashi, Hiroshi Miyauchi, Naoto Yamamoto, Masahiro Yamamoto, Masato Yoshida, Shinichi Yoshimoto, Ken Watanabe
Accelerator Laboratory, KEK

Abstract

The present status of the Photon Factory storage ring (PF ring) and the Photon Factory advanced ring (PF-AR) at High Energy Accelerator Research Organization (KEK), including the measure against the decrepitude and the upgrade of several machine components, is reported.

1. はじめに

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構(KEK)の放射光実験施設(フォトンファクトリー:PF)は、1982年から今日まで大学共同利用を中心とした運営を行い、物質科学および生命科学を中心とした基礎科学の発展に貢献してきた。現在では、2.5 GeV PF リングと 6.5 GeV PF アドバンスリング(PF-AR)の2つの放射光専用リングを運転し、年間 3,000 人を超えるユーザに対して紫外線からX線までの放射光を供給している。Table 1 に、現在の PF リングと PF-AR の主なパラメータを示す。PF リング、PF-AR ともに稼働から約 40 年経過しており、各種装置の老朽化が顕著になってきているが、随時対策を講じながら、故障率 1% 台の安定な運転を維持してきた。2021 年度は両リングともに、ユーザ運転時間が例年の 2 割増を達成するとともに、故障率が 1% を下回る非常に安定な運転となった。さらに、PF リングでは、ビーム診断システムの高度化の作業を継続するとともに、4 極および 6 極電磁石電源の更新、低電力 RF システムの更新、安全インターロックシステムの更新作業を実施した。PF-AR では、南実験棟において測定器開発テストビームラインの建設が完了し、内部標的を挿入しての電子ビーム生成および取り出し等のコミッショニングを開始した[1]。本年会では、2020 年度より実施している高度化・老朽化および故障対策等を含めた PF リングと PF-AR における運転の現状について報告する。

[#] yukinori.kobayashi@kek.jp

Table 1: Principal Parameters of PF Ring and PF-AR

	PF ring	PF-AR
Beam Energy	2.5 GeV	6.5 or 5.0 GeV
Natural Emittance	34.6 nm	293 or 174 nm
Circumference	187 m	377 m
Maximum beam current	450 mA	50 mA
Operation mode	Top-up, Decay	Top-Up, Decay
Number of insertion devices	11	5

2. 運転の現状

2.1 2021 年度の運転統計

Table 2 に 2009 年度から 2021 年度までの PF リングの運転統計を示し、それらのデータを棒グラフにしたものを Figure 1 に示す。2021 年度は、ユーザ運転時間をここ数年の目標値であった 3000 時間の 2 割増となる 3600 時間に設定した。この目標値を実現すべく、年度当初リング運転時間 4368 時間(182 日)ユーザ運転時間 3744 時間で計画したが、実際のユーザ運転時間は 3720.8 時間となった。故障時間は 2020 年度から大幅に減少して約 23 時間、故障率は約 0.6%、平均故障間隔時間(MTBF)も約 220 時間となり、例年と同程度の値に回復するとともに、ユーザ運転時間 3600 時間の目標値を達成した。故障の内訳を調べてみると、2021 年度は制御・モニター関

連のトラブルが約 34%、電磁石関連が約 22%であったが、RF 関連による故障率が 1.1%と非常に低く、RF システムがほとんどトラブルなく安定に稼働した。

Table 3 と Fig. 2 に PF-AR の運転統計を示す。PF-AR も同様に目標値を 2000 時間から 2 割増の 2400 時間を目標値に設定し、年度当初のリング運転時間を 2976 時間(124 日)、ユーザ運転時間 2416 時間確保するよう計画したが、実際のユーザ運転時間は 2404.7 時間となった。故障時間は昨年度に比べ大幅に減少し約 11 時間、故障率は約 0.5%、平均故障間隔時間(MTBF)も約 246 時間となり、こちらも例年と同程度の値に回復するとともに、ユーザ運転時間 2400 時間の目標値を達成した。故障の内訳は、約 60%が電磁石関連、約 20%が制御・モニター関連、約 18%が RF 関連であった。電磁石関連の故障では、老朽化した電源の故障のほか、電磁石冷

却水用ゴムホースからの水漏れが多発するようになってきていることから、ゴムホース交換を含めた対策を検討している。

Table 2: Operation Statistics in PF Ring from FY2009 to 2021

Fiscal Year	Ring operation time (h)	Ring adjustment time (h)	User operation time (h)	Failure time (h)	MTBF (h)
2009	4,976.0	979.5	3,961.9	34.5	167.0
2010	5,037.0	958.7	4,050.8	22.5	226.7
2011	4,696.0	1,875.1	2,809.2	11.7	157.3
2012	4,416.0	624.0	3,752.9	39.1	164.9
2013	4,176.0	672.0	3,451.4	52.6	159.3
2014	3,024.0	696.0	2,316.6	11.4	155.2
2015	3,888.0	839.6	3,034.0	14.4	132.5
2016	3,432.0	504.0	2,910.7	17.3	162.7
2017	3,624.0	624.0	2,983.4	16.6	214.3
2018	3,408.0	576.0	2,803.6	28.4	166.6
2019	3,504.0	440.0	3,004.1	59.9	153.2
2020	3,120.0	536.0	2,425.6	158.4	172.3
2021	4,368.0	624.0	3,720.8	23.2	220.2

Table 3: Operation Statistics in PF-AR from FY2009 to 2021

Fiscal Year	Ring operation time (h)	Ring adjustment time (h)	User operation time (h)	Failure time (h)	MTBF (h)
2009	5,063.0	542.5	4,445.7	74.8	107.1
2010	4,638.5	542.5	4,037.5	58.5	54.5
2011	4,131.5	1,162.0	2,941.5	28.0	59.3
2012	4,080.0	408.0	3,643.2	28.8	111.3
2013	3,912.0	434.0	3,378.4	99.6	74.0
2014	2,352.0	360.0	1,955.0	37.0	90.5
2015	3,336.0	552.0	2,753.0	31.0	154.7
2016	1,821.0	717.0	1,085.7	18.3	84.9
2017	2,448.0	312.3	2,111.0	24.7	38.8
2018	2,064.0	456.0	1,581.6	26.4	64.3
2019	2,568.0	456.0	2,099.7	12.3	264.0
2020	2,520.0	408.0	1,943.9	168.1	150.9
2021	2,976.0	560.0	2,404.7	11.3	241.6

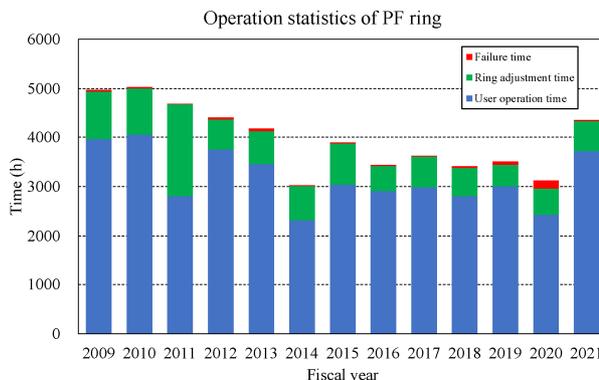


Figure 1: Bar graph of operation statistics in PF ring from FY2009 to FY2021.

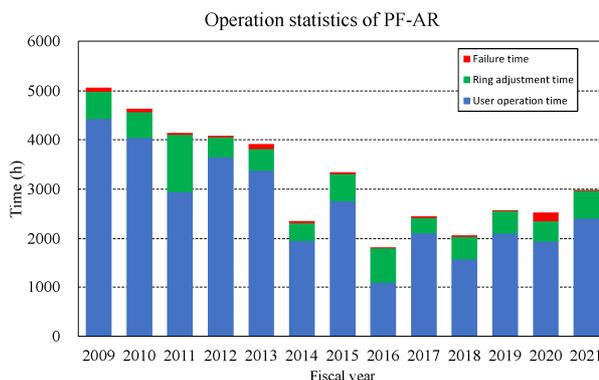


Figure 2: Bar Graph of operation statistics in PF-AR from FY2009 to FY2021.

2.2 2022 年度の運転計画

2016 年度から 2020 年度の 5 年間は PF リングおよび PF-AR のユーザ運転時間は、それぞれおよそ 3000 時間、2000 時間で推移してきた。10 年前のように両リングで 4000 時間を確保することは困難になっていた。この主な要因は運転経費削減と電気代が上昇したことであった。2021 年度は多少予算増が認められたことから、ユーザ運転時間を例年の 2 割増、すなわち PF リングで 3600 時間、PF-AR で 2400 時間を旨とした運転計画が策定され、実際にこの目標時間を達成することができた。2022 年度も 2021 年度と同様な目標時間を達成するよう運転計画を立てていたが、今年度予想を上回る電気代の高騰を受け、PF リングでおよそ 3000 時間、PF-AR で 2000 時間を旨とした計画に修正されている。ただし、予算の追加配分等があれば、運転時間を延ばす余地は確保している。

2.3 2021~2022 年度に発生した主な故障への対応

2.3.1 PF-AR 偏向電磁石電源変圧器絶縁油交換

2022 年 3 月停止期間中に 1 週間かけて、劣化により

早急に処置が必要となったPF-AR 偏向電磁石電源の変圧器絶縁油の交換作業を実施した。PF-AR 偏向電磁石電源は、リング全周の偏向電磁石を直列に励磁している1MW級の直流電源である。PF-AR 西電源棟に設置されている。電力源の1次側は6.6 kV 降圧変圧器をトランスヤードに2器備え、特別高圧変電所より直接420 Vに変換し利用している。変圧器点検において、絶縁油の $\tan \delta$ が5以下の規定値に対して、6を示していることが、2019年の履歴調査で判明した。さらに、2020年の保守点検の調査で、絶縁油の劣化が更に進行し、 $\tan \delta$ が40以上にまで上昇していた。急激な劣化の進行が判明したことから、絶縁油を交換することとした。

交換作業は変圧器2機分を順番に1機ずつ行うことで進められた。1機あたりの絶縁油は鉱油(第4類第3石油類非水溶性)を1470 L/機使用しており、総油量は3000 L弱に達するが、1機ずつ行うことで消防での立ち合いが必要となる本油種の2000 Lを超過しないため、消防への通知のみの手続きで作業が行われることとなった。また、油を抜く抜油、新油を投入する注油をそれぞれタンクローリーより直接やり取りし、作業完了後KEK所内より所外へ搬出されることで、可燃物保管の規定からも除外した作業となるように考慮された。工事が設定された日程期間中、あいにくの雨、季節外れの雪の日が続いたため、抜油、注油には、新油に水分が入らないように慎重な作業が行われた。抜油では窒素置換法(通常なら大気開放であるが)を採用し、窒素置換による水分の混入を防ぎ、注油では、真空脱気装置を介しながら行った。せっかくの絶縁油の交換が無駄とならないように処置された。また、注入された新油は真空脱気循環を3循環、つまり1500 Lを3循環の4500 L分行い、徹底して絶縁油の油質の劣化要因を除くよう処置した。絶縁油の油質の管理は、現場に絶縁耐圧試験機を持ち込み、タンクローリーで搬入された直後の生油の状態、真空脱気装置を介して注油した新油の状態、注入及び脱気循環、不活性ガス充填封止が完了し、液面調整後の1日寝かせた後の3種の状態にて採油し耐圧試験を行い、規定値である50 kV 絶縁耐圧を全ての状態でクリアした。窒素充填は真空容器内の大気混入を97%以下まで低減するように酸素モニターで監視しながら行った。

全ての交換作業を終え、1日後の油面が安定した時点で、総合動作試験となるPF-AR 全周に渡る通電試験を行い問題なく運転を完了することができた。本来ならば変圧器容器の破損などを疑い容器の更新など劣化原因の排除を行うべきところであるが、今後の運転計画とコストバランスを勘案し、この交換で10年以上かけて進行する劣化には対応できると判断し、絶縁油交換の処置をとることとなった。この絶縁油交換により、偏向電磁石電源変圧器故障で長期運転停止に追い込まれる事態が回避され、PF-AR において安定した放射光実験が継続できたと考えている。

2.3.2 PFリング4極電磁石電源冷却水トラブル

2022年2月頃から一部のリング4極電磁石の冷却水流量が低下し、インターロックが動作して電源が停止、ビームダンプとなる現象が時折発生するようになった。原因は、電磁石を保護するためのストレーナが目詰まりして、冷却水量が閾値を下回るためであることが判明した。

対処として、ストレーナを新品と交換する、または汚れを除去する作業を行うことであった。5月になると多数の4極電磁石でインターロックが動作するようになったことから、メンテナンスやマシン調整日を利用して定期的に清掃・除去作業を実施し、ユーザ運転中のビームダンプ現象を回避した。ストレーナの汚れを成分分析したところ、主成分は酸化銅であった。なぜ2月から急にストレーナが目詰まりが発生し始めたのか原因は判明していないが、対策として夏期の停止期間に冷却水の入れ替え作業を実施した。

2.3.3 PFリング水平方向軌道変動

2021年11月頃から断続的な水平軌道変動が発生するようになった。Figure 3に、2022年5月19日0:00~9:00(上図)と5月20日0:00~9:00(下図)の9時間のビーム位置モニターBPM032:水平方向ベータ関数が比較的大きな場所のモニター)で測定された水平方向のビーム位置を示す。この変動の特徴は、

- 1) 単一キック(ある特定の場所:推定では偏向電磁石B01)による軌道変動と推定される。
- 2) 水平方向のみ、断続的に発生する。
- 3) 振動の振幅は概ね100 μm 以下であるが一定ではない。ただし100 μm を超える振動も時折発生し、ビームライン側に影響する場合がある。
- 4) 変動は数秒で収まる。Slow Feedback Systemである程度抑制できる。

である。Figure 3の上図は、Slow Feedback Systemの補正周期を約20秒にしていた時の変動で、下図は補正周期を2秒に高速化したときの変動の様子を示している。高速化したことで、振幅が100 μm を超えるような変動はかなり抑制された。しかしながら、20 μm 程度の変動はやはり断続的に発生していて、完全に抑制されていない。軌道変動を発生する可能性のある機器について相関がないかどうか調査しているが、原因特定には至ってなく、PFリングにおける継続的な課題となっている。

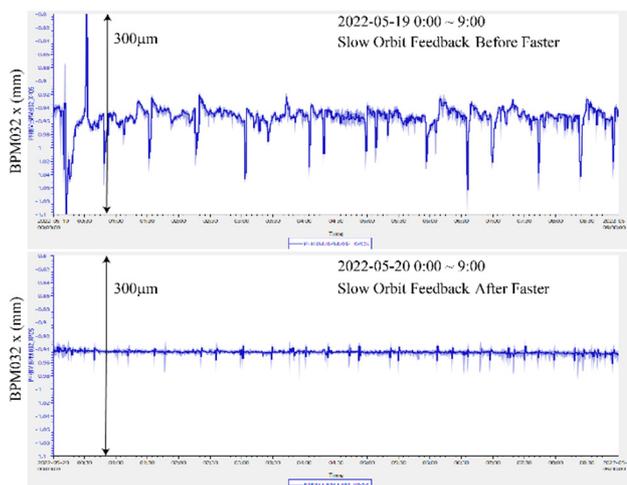


Figure 3 : Horizontal orbit oscillations measured at BPM032 in PF-ring. Upper part shows the oscillations before slow orbit feedback faster, bottom part after faster.

3. 老朽化対策および高度化について

3.1 PF リング

3.1.1 PF リングビーム位置モニター更新および高速軌道安定化システムの高度化

現在 PF リングで使用しているビーム位置モニターシステムは、1995 年に導入された。PF リングでは約 187m のリング1周にわたって 65 台のビーム位置モニター電極を配置し、信号を半導体リレーで順番に切り替えながらアナログ検波回路に入力している。1995 年当時としては高速の半導体スイッチと並列化 DSP を使用することで、リング全体の軌道測定に要する時間は約 100 ms、位置分解能は数 μm を達成した。また、システムは軌道測定だけではなく、もう1つの重要な役割として軌道安定化のための演算機能を有している。すなわち、28 台の補正電磁石に適切な電流値を設定することで電子ビームを制御して軌道が常にある一定になるようなフィードバック演算を行っている。

導入当時としては高速なシステムではあったが、リレーによる切り替え方式では高速化に限界がある。また、近年のデジタル技術の発展は目覚ましく、FPGA を演算に使用することで 100 MHz 以上のデジタルサンプリングデータと、10 Hz 程度の高精度データ出力を同時に出力することも可能となっている。更新においては最新のデジタル技術を使ったモニタ・フィードバック回路を導入することで、既存の回路では抑制できなかった素早い軌道変動や、より微少な軌道変化までも安定化することを目指している。2021 年度内に高速なフィードバックに対応したフルデジタル制御による補正電磁石電源製造を含めて、システムのハードウェア一部の製作を行った。2022 年度前半で、システムの調整、制御系の整備を行って、第 2 期の運転からシステムの試験運用を開始する。

3.1.2 PF リング 4 極および 6 極電磁石電源の整備

1993 年から 1995 年にかけて PF リングの高輝度化改造時に導入された 4 極および 6 極電磁石電源 (10 台) は著しく老朽化が進んでいる。毎年、定期的な保守を行ってきたが限界に近づきつつある。更新には、最新のモジュール式高安定化スイッチング電源を採用し、2021 年度製作を開始し、メーカーからの納品待ちの状況となっている。

3.1.3 PF リング低電力高周波制御システムの更新 [2]

PF リングが稼働した 1980 年代に整備された現在の低電力高周波制御システム (LLRF) は、計 8 台のラックに搭載されたアナログ機器群で構成されている。更新後の LLRF システムでは、これらが機能特化型の 6 枚のボードに収められ、メンテナンス性も向上する。また、光源モニターシステムと一部の部品を共通化することで、冗長性を向上させる。高精度デジタル技術により、高周波の変動を低減し、ビーム安定性を向上させる。2021 年度からシステムのプロトタイプ製作・試験を開始し、2022 年度内にシステム全体の製作を実施する。

3.1.4 PF リング安全インターロックシステムの更新

システムの中核をなす Programmable Logic Controller (PLC) は、メーカーによる保守期限を超えており、故障しても修理が不可能な状況にある。更新では、一極集中型の配線方式を見直し、産業用 Ethernet による省配線方式に変更する。さらに、部品の長期供給・保守 (新型機器との部品の互換性) を特長とする PLC を採用することで、システムの長寿命化を実現する。併せて、各種発光部を蛍光灯から省エネ・長寿命の LED に更新する。2021 年度からハードウェアの製作、配線作業等を行い、更新の準備が整ったので、2022 年第 2 期の運転から運用を開始した。

3.2 PF-AR

粒子検出器開発のため GeV 級の電子を供給するテストビームライン (測定器開発テストビームライン) を PF-AR 南実験棟に設置した。建設は 2020 年度から開始し、2021 年 3 月にはビームステージが完成した。2021 年の夏期停止期間中に、リングの真空チャンバー改造作業、内部標的およびコンバーターの設置、ビームライン用電磁石の設置・配線・アライメント作業を実施し、9 月中旬に建設が完了した。内部標的によるビーム損失の影響を最小限に抑えて、放射光実験と同時運用を行うため、蓄積ビームとの衝突により γ 線を生成する内部標的を蓄積ビームの中心軌道から外側約 5σ の位置に精度良く設置できるように設計されている。内部標的には、グラフェンシートと CNT ヤーンの 2 種類が選定され、駆動機構に組み込んで 2 台設置された (Fig. 4)。制動放射で生成された γ 線を銅製コンバーターで電子に変換し、運動量 2 GeV/c の電子を実験室に kHz のレートで供給することを目標としている。2021 年 10 月から蓄積ビームのある状態で、内部標的の駆動試験、照射試験等を実施するなどコミッションを開始した。2022 年 3 月に蓄積モードにおける内部標的挿入時に、ビームライン側で GeV 級の電子を確認した。いくつかの課題はあるものの、2022 年第 2 期 (11 月頃) から、放射光ユーザ実験との共存運用試験を開始する予定である。

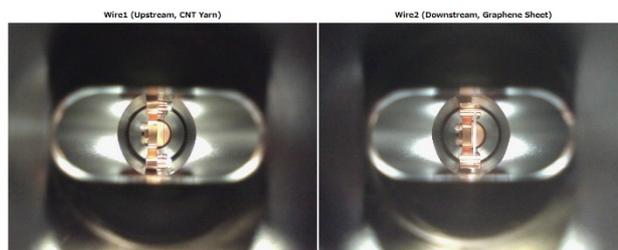


Figure 4: Photograph of two internal wire targets: (left) CNT yarn, (right) graphene sheet.

4. まとめ

2021 年度は、ユーザ運転時間がここ数年の運転時間の 2 割増、すなわち PF リングで 3600 時間、PF-AR2400 時間を達成するとともに、両リングともに故障率 0.5% 程度と非常に安定な運転となった。

しかしながら、老朽化による故障は着実に増加傾向にあり、今後 10 年程度を見据えて、これまでと同様に安定

な放射光実験が継続的に実施できるよう、定常的な保守維持だけでなく、追加的な老朽化対策や高度化を実施していく予定である。

PF-AR においては、測定器開発テストビームラインが完成、コミッショニングを開始して、放射光ユーザ実験と共存運用へ向けた準備を進めた。

参考文献

- [1] C. Mitsuda *et al.*, “PF-AR の測定器開発テストビームライン建設計画”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-12, 2021, QST-Takasaki Online, pp. 379-383;
<https://www.kek.jp/ja/topics/20220311-2>
- [2] D. Naito *et al.*, “KEK-PF の LLRF 系更新の検討状況”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-12, 2021, QST-Takasaki Online, pp. 946-950.