

## 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<sup>#</sup>, 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, 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 <sup>#</sup>, Masahiro Adachi, Akira Ueda, Takashi Uchiyama, Shu Eguchi, Toshiyuki Ozaki, Takashi Obina, Tatsuya Kageyama, Xiuguang Jin, Shogo Sakanaka, Hiroyuki Sasaki, Masayuki Sato, Yoshihiro Sato, Hidenori Sagehashi, Mami Shiozawa, Tatsuro 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にした運営を行い、物質科学および生命科学などの基礎科学の発展に貢献してきた。現在では、2.5GeV 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、年間およそ 3,500 人の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 リングでは、高輝度化改造により低エミッタンス化が実現し性能が向上するとともに、直線部増強計画により、短周期アンジュレータの新設に加え、VUV・軟 X 線領域のアンジュレータの更新・新設も行われてきた。2018 年度には、アンジュレータ#19 の更新が実現し、90 年代前半に製造されたアンジュレータについては更新がほぼ完了した。あとは超伝導垂直ウィグラーの更新が課題である。PF-AR においては、高度化改造によりビーム寿命が大幅に改善、フルエネルギー入射を目指した直接入射路が完成、さらに PF リングと同時にトップアップモードでユーザ運転することも実現した。また、省エネルギー運転として、5 GeV にエネルギーを下げたユーザ運転を実施することで、できるだけ運転時間を確保する努力が行われ、ユーザにより安定なビームを供給し続けている。しかしながら、両リングともに建設からおおよそ 40 年経過しているため、

各装置の老朽化によるトラブルが頻発するようになってきており、年々深刻の度合いが増している。本年会では、最近の PF リングと PF-AR の運転状況および高度化・老朽化対策について報告する。

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	60 mA
Operation mode	Top-up, Decay	Top-Up, Decay
Number of insertion devices	11	5

### 2. 運転の現状

#### 2.1 2020 年度の運転統計

Table 2 に 2009 年度か 2020 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 Fig. 1 に示す。2020 年度のユーザ運転時間は 2426. 時間となり、大幅に 3000 時間を下回った。これは第 1 期の運転において、新型コロナウイルス感染防止対策により約 1 ヶ月間運転を停止したことによる。また、故障時間も 2019 年

<sup>#</sup> yukinori.kobayashi@kek.jp

度より大幅に増加して約 160 時間、故障率も 6.1%に上昇した。これらの増加は、第 3 期運転の後半に発生したパルスバンド電源の重故障により、ユーザ運転が中断したことによる。ただし、平均故障間隔時間(MTBF)は約 172 時間となり、故障回数としては例年通りであった。故障の内訳を調べると、2020 年度はビーム入射によるトラブルが約 96%を占めている。パルスバンド電源の重故障以外の故障時間はそれほど多くなかった。

Table 3 と Fig. 2 に PF-AR の運転統計を示す。2020 年度のユーザ運転時間は 1944.0 時間となり、2019 年度に比べて約 160 時間の減少にとどまった。PF-AR は新型コロナウイルス感染防止対策により、第 1 期の運転は実施しなかったが、当初予定されていなかった第 3 期の運転を行うことで、運転時間を取り戻したためである。しかし、PF リングと同様のユーザ運転 3000 時間の水準にはほど遠い状況にあることは変わらない。2019 年度に比べ故障時間は、約 170 時間、故障率は約 8.0%と大幅に上昇した。この理由は、PF リングと同様にパルスバンド電磁石電源の重故障によるものである。ただし、平均故障間隔(MTBF)は約 151 時間で故障回数は例年度同じ程度であった。故障の内訳は、約 90%がビーム入射関連(パルスバンド電源故障)、4.8%が RF 関連、3.6%が電磁石関連によるものであった。

Table 2: Operation Statistics in PF Ring from FY2009 to 2020

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	624.4	2,983.0	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	535.6	2,426.0	158.4	172.3

## 2.2 2021 年度の運転計画

過去 5 年における 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 時間で推移してきていた。10 年前のように 4000 時間を確保することは困難になっているが、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 時間を目指した運転計画が策定されている。

Table 3: Operation Statistics in PF-AR from FY2009 to 2020

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	407.9	1,944.0	168.1	150.9

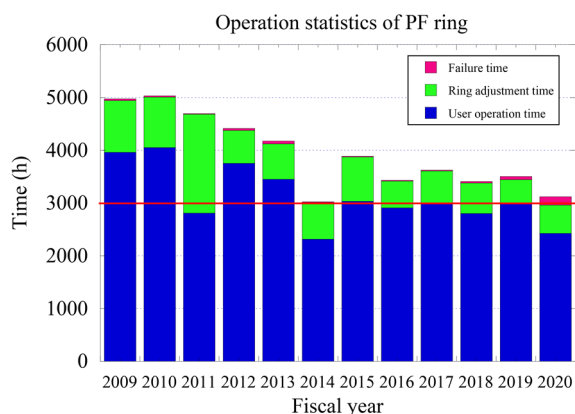


Figure 1: Bar graph of operation statistics in PF ring from FY2009 to FY2020.

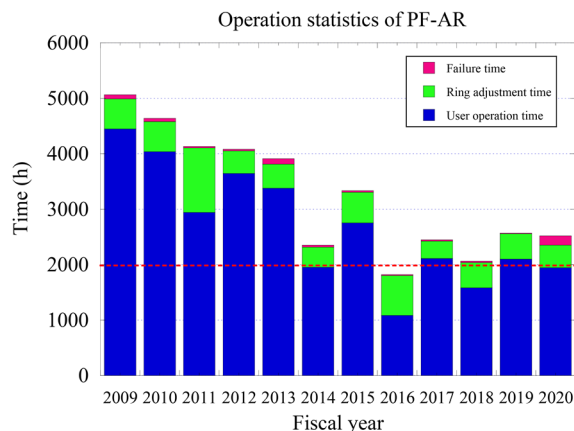


Figure 2: Bar Graph of operation statistics in PF-AR from FY2009 to FY2020.

## 2.3 2020 年度に発生した主な故障への対応

### 2.3.1 PF リング ID#13 トラブルについて

ID#13 は、2015 年 2 月に PF リングに設置した APPLE-

II型可変偏光アンジュレータで、総重量10トンを超える架台に長さ3mの磁石列を4列とビームダクトを備えた大型のシンクロtron光発生装置である。磁石列を垂直方向(ビーム軌道から離れる方向)と各磁石列の位相方向(ビーム進行方向)の計5軸方向に動かすことができ、磁石列の配置を変えることでシンクロtron光の偏光とエネルギーを制御し、ユーザ実験に必要な光を作り出す。

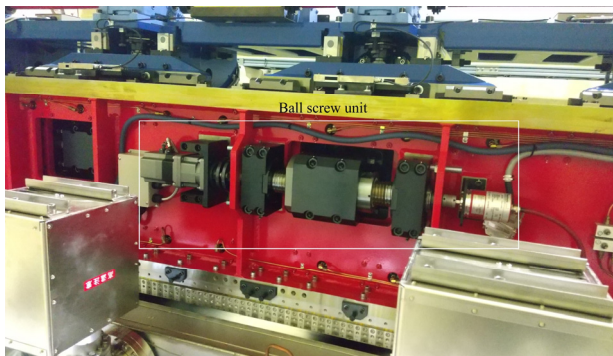


Figure 3: Photograph of ball screw unit in ID#13 failed due to damage caused by cooling water leakage.

2020年11月14日から始まったPFリングのユーザ運転は同年12月22日に停止した。翌日、ID#13の底部リング外側磁石列(A3列)がビーム軌道方向(位相方向)に動かないことに気がついた。その後動作ログを精査し、A3列の位相動作異常が12月19日に始まっていることを確認した。なお、12月9日にはビームライン(BL#12)基幹チャンネル部側の冷却水配管から漏水トラブルが発生し、当該駆動系にも冷却水が降りかかっていたことは認識していた。ただし、漏水トラブル直後の動作確認では特に異常はなく、翌日より運転を再開していた。故障調査で見つけた部品(ボールねじユニット: Fig. 3)の修理についてメーカーと協議を行ったところ、次期のPFリング運転開始日までの復旧が困難であることが判明した。これにより、復旧まで当面ID#13の運転は水平偏光、最小ギャップ(最小基本光子エネルギー)に固定することとした。位相駆動系は制御器からの信号でモーターを動かし、カップリングを介して接続したボールねじユニットに力を伝える。ボールねじユニットは磁石列と架台ピラー部とを接続し、モーターの回転力はボールねじユニットを介して位相方向の駆動力に変換される。位相動作では、3トンを超える力で磁石列同士が吸引反発するため、大型のボールねじユニットを使用している。部品を個別に捜索し、ボールねじユニットに故障箇所を絞り込み、さらにボールねじユニットを分解して捜索を続け、ボールねじとボールナットの固着が異常動作の原因と特定した。さらにメーカー調査の結果、異常動作の原因が錆によるものであることが判明した。錆はやはり漏水トラブルで、冷却水がボールねじに降りかかってしまったことによると推測される。修理として錆の除去は行うものの、メーカーとしては長期的な安定動作は保証できないとのことから、新規のボールねじを平行して調達することとした。納期

的には厳しい状況であったが、4月26日に納品、4月29日まで4日間で新規ボールねじの設置作業および動作確認を実施した。装置は正常に動作して、5月6日の運転再開から、従来通りの5軸駆動が可能になった。

### 2.3.2 パルスベンド電源トラブルについて

2021年3月26日深夜2時頃、入射器リニアックの終端部にあるPFリングおよびPF-ARのための電子ビーム振り分けパルス偏向電磁石[1]の励磁電源[2]で、「充電器異常」-「オーバーカレント」インターロックが発報し停止した。インターロックは現場で解除できたが、わずかに異臭がするなどの現場の状況から、トップアップ連続入射でのユーザ運転中であったが、電源は重故障と判断し、ビーム入射を停止、翌朝メーカーによる調査を依頼した。PFリングおよびPF-ARのユーザ運転は、これ以降トップアップ連続入射無しでの利用となり、4月1日9:00の運転停止を待たずに3月30日9:00で終了した。3月29日からメーカーによる調査を行った結果、高電圧ユニット背面にある高周波整流コンデンサーが破裂し焼損していることが分かった。Figure 4に故障した高電圧ユニットを示す。コンデンサー、および、ダイオードの損傷は、IGBT素子の故障に起因すると思われることから、IGBTも全数交換することになった。

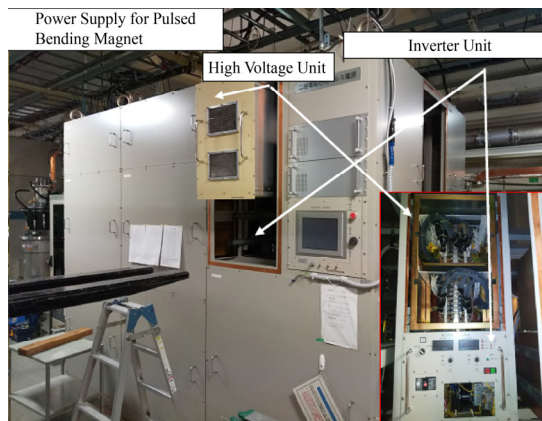


Figure 4: Photograph of the power supply for a pulsed bending magnet.

幸い焼損した整流部の複合ユニット(ダイオード、コンデンサー、ヒートシンクなど)やIGBTなど長納期部品の予備品があること、他の部品も早期に調達できたことから、4月12日に焼損部の修理作業を開始し、4月15日には通電試験を実施した。この時の復旧作業では仕様安定度( $1 \times 10^{-3}$ )までには調整できず、安定度が $2 \times 10^{-3}$ 程度にとどまったものの、それ以外は正常に動作することを確認した。5月6日からのPFリングの運転は可能となった。なお、仕様安定度( $1 \times 10^{-3}$ )までの調整を、7月の停止期間に実施した。



### 3. 老朽化対策および高度化について

#### 3.1 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。検波した信号は VME 計算機の ADC でデジタル化し、信号強度をデジタル信号処理回路 (DSP) にて演算することでビーム位置を演算している。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  $\mu\text{m}$  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。これは従来では2つ以上の異なった帯域幅の信号処理回路で構成するしかなかったものである。また、現在ではミリ秒以下の高速な軌道フィードバックをサブマイクロレベルの高位置分解能で達成することが可能となってきている。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。サブマイクロ以下の精度を持つ回路の導入と、kHz バンド幅をもつ軌道フィードバック系の導入によって、従来に比べて軌道の安定性の向上を図る。例えば、従来は水温変動のような分オーダーのゆっくりとした軌道変動は抑制できていたが、数 Hz~20 Hz 程度に成分をもつ機械振動や 50 Hz 以上の電気信号に起因する軌道変動は抑制できなかったのに対し、これらの高周波成分まで安定化する。また、挿入光源のギャップ変更や、偏光面の切り替えなど、ある瞬間からステップ的に発生する軌道変化にたいしても軌道安定化を図る。2021 年度内にはシステムの製作を行い、2022 年度中の稼働開始を目指している。

#### 3.2 その他 2021 年度から 2022 年度における老朽化・高度化対策について

##### 3.2.1 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。2021 から 2022 年度にかけて、これらの電源の更新を実施することとなった。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、さらに省エネルギー化を推進する。

##### 3.2.2 PFリング低電力高周波制御システムの更新

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。特に、放射光パルスのタイミング変動を約 10 ピコ秒から 1 ピコ秒以下に低減して、放射光実験の時間分解能を向上させる。さらに、機器保護のための非常停止回路の見直しにより、異常検出時の運転中断時間を短縮し、光源加速器トラブルによる放射光実験への影響の低減を目指す。

##### 3.2.3 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。

##### 3.2.4 PF-ARテストビームラインの建設

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を PF-AR 南実験棟に設置する。建設は 2020 年度からすでに開始されており、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、10 月からの稼働開始を目指している。テストビームラインの運用は、影響を最小限に抑えて放射光実験と同時に行うため (ビーム寿命の劣化を 10 %以下)、 $\gamma$  線を生成する 100  $\mu\text{m}$  程度の細い金属ワイヤーの内部標的を蓄積ビームの中心軌道から外側  $5\sigma$  (約 10 mm~12 mm) の位置に精度良く設置する。制動放射で生成された  $\gamma$  線を銅製コンバーターで電子に変換し、運動量 2 GeV/c の電子を実験室に約 5 kHz で供給することを目標としている。

## 4. まとめ

2020 年度のユーザ運転時間は、新型コロナ感染防止対策で第 1 期 (5~6 月) の運転をほとんど停止したことが要因となり、PF リングでは 3000 時間を大きく下回った。PF-AR は、当初予定されていなかった第 3 期 (2~3 月) を運転することで、なんとか 2000 時間近くを確保することができた。

故障率に関しては、両リングともに例年から大幅に増加し、PFリングで約6.1%とPF-ARで約8.0%になった。原因は、ビーム入射路最上流のパルス偏向電磁石電源の故障であるが、この程度の故障率に止まったのは、故障が運転停止の5日前に発生したという幸運によるものであった。年々、老朽化に起因する故障は増加傾向にある。特に、電磁石電源や高周波加速システムなど故障すると長時間の停止となり、運転に大きなダメージを与える。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に、定常的な保守維持費だけでなく、追加的な老朽化対策費の確保、さらにリングの高度化等によって古い装置の更新を2~3年で実施する。

## 参考文献

- [1] M. Tawada, M. Kikuchi, T. Mimashi, S. Nagahashi, and A. Ueda, "Development of pulsed bending magnet for simultaneous top-up injection to KEKB and PF ring", Proceedings of PAC09, Vancouver, BC, Canada, (2009)175.
- [2] T. Mimashi, K. Furukawa, N. Iida, K. Kakihara, M. Kikuchi, T. Miyajima, S. Nagahashi, M. Sato, M. Tawada, A. Ueda, T. Kubo, K. Iwamoto, S. Kodama, A. Sasagawa, N. Ishii, H. Mori, "The pulsed magnet system for the simultaneous injection of KEK-PF and KEKB ring", Proceedings of PAC09, Vancouver, BC, Canada, (2009)172.