

## 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>#, A)</sup>, 阿達正浩<sup>A)</sup>, 上田明<sup>A)</sup>, 内山隆司<sup>A)</sup>, 江口 柊<sup>A)</sup>, 尾崎俊幸<sup>A)</sup>, 小野正明<sup>A)</sup>,  
帯名崇<sup>A)</sup>, 影山達也<sup>A)</sup>, 加藤龍好<sup>A)</sup>, 金 秀光<sup>A)</sup>, 田中オリガ<sup>A)</sup>, 坂井 浩<sup>A)</sup>, 坂中章悟<sup>A)</sup>, 佐々木洋征<sup>A)</sup>,  
佐藤政行<sup>A)</sup>, 佐藤佳裕<sup>A)</sup>, 下ヶ橋秀典<sup>A)</sup>, 塩屋達郎<sup>A)</sup>, 島田美帆<sup>A)</sup>, 高井良太<sup>A)</sup>, 高木宏之<sup>A)</sup>, 高橋 毅<sup>A)</sup>,  
多田野幹人<sup>A)</sup>, 谷本育律<sup>A)</sup>, 田原俊央<sup>A)</sup>, 土屋公央<sup>A)</sup>, 内藤大地<sup>A)</sup>, 長橋進也<sup>A)</sup>, 中村典雄<sup>A)</sup>, 濁川和幸<sup>A)</sup>,  
野上隆史<sup>A)</sup>, 芳賀開一<sup>A)</sup>, 原田健太郎<sup>A)</sup>, 東 直<sup>A)</sup>, 本田融<sup>A)</sup>, 本田洋介<sup>A)</sup>, 丸塚勝美<sup>A)</sup>, 満田史織<sup>A)</sup>,  
三増俊広<sup>A)</sup>, 宮内洋司<sup>A)</sup>, 山本尚人<sup>A)</sup>, 山本将博<sup>A)</sup>, 吉田正人<sup>A)</sup>, 吉本伸一<sup>A)</sup>, 渡邊 謙<sup>A)</sup>  
Yukinori Kobayashi<sup>#, A)</sup>, Masahiro Adachi<sup>A)</sup>, Akira Ueda<sup>A)</sup>, Takashi Uchiyama<sup>A)</sup>, Shu Eguchi<sup>A)</sup>,  
Toshiyuki Ozaki<sup>A)</sup>, Masaharu Ono<sup>A)</sup>, Takashi Obina<sup>A)</sup>, Tatsuya Kageyama<sup>A)</sup>, Ryukou Kato<sup>A)</sup>, Xiuguang Jin<sup>A)</sup>,  
Olga Tanaka<sup>A)</sup>, Hiroshi Sakai<sup>A)</sup>, Shogo Sakanaka<sup>A)</sup>, Hiroyuki Sasaki<sup>A)</sup>, Masayuki Sato<sup>A)</sup>,  
Yoshihiro Sato<sup>A)</sup>, Hidenori Sagehashi<sup>A)</sup>, Tatsuro Shioya<sup>A)</sup>, Miho Shimada<sup>A)</sup>, Ryota Takai<sup>A)</sup>, Hiroyuki Takaki<sup>A)</sup>,  
Takeshi Takahashi<sup>A)</sup>, Mikito Tadano<sup>A)</sup>, Yasunori Tanimoto<sup>A)</sup>, Toshio Tahara<sup>A)</sup>, Kimichika Tsuchiya<sup>A)</sup>, Daichi Naito<sup>A)</sup>,  
Shinya Nagahashi<sup>A)</sup>, Norio Nakamura<sup>A)</sup>, Kazuyuki Nigorikawa<sup>A)</sup>, Takashi Nogami<sup>A)</sup>, Kaiichi Haga<sup>A)</sup>,  
Kentaro Harada<sup>A)</sup>, Nao Higashi<sup>A)</sup>, Tohru Honda<sup>A)</sup>, Yosuke Honda<sup>A)</sup>, Katsumi Marutsuka<sup>A)</sup>, Chikaori Mitsuda<sup>A)</sup>,  
Tohihiro Mimashi<sup>A)</sup>, Hiroshi Miyauchi<sup>A)</sup>, Naoto Yamamoto<sup>A)</sup>, Masahiro Yamamoto<sup>A)</sup>, Masato Yoshida<sup>A)</sup>,  
Shinichi Yoshimoto<sup>A)</sup>, Ken Watanabe<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> 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 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)の放射光科学研究施設(フォトンファクトリー: PF)は、1982 年から今日までおよそ 37 年の長きにわたり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、2.5GeV 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 3,500 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[1]、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。あとは超伝導ウイ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、さらにはフルエネルギー入射を目指した直接入射路が完成[2]、2019 年秋にはトップアップモードによるユーザ運転が実現した。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も行われている。しかしながら、両リングともに建設から 30 年以上経過しているた

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 の運転状況および老朽化対策の現状について報告する。

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

	PF リング	PF-AR
ビームエネルギー	2.5 GeV	6.5 or 5.0 GeV
水平エミッタンス	34.6 nm	293 or 174 nm
周長	187 m	377 m
蓄積最大電流値	450 mA	60 mA
運転モード	Top-up, Decay	Top-Up, Decay
挿入光源 BL 数	11	5

#### 2. 運転の現状

##### 2.1 2018 年度の運転統計

Table 2 に 2009 年度から 2018 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。2018 年度のユーザ運転時間は 3091.6 時間と 3000 時間をわずかに上回った。故障時間は昨年より 12 時間弱増加したが、故障率は 1%以下、平均故障間隔時間(MTBF)は 180 時間程度を維持でき、比較的安定な運転が行われたといえる。故障の内訳を調べると、30 年度は電磁石電源の故障によるトラブルが約 70%、RF に起因するトラブルが 30%弱であった。

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

Table 2: Operation Statistics in PF Ring from FY2009 to 2018

年度	リング運 転時間 (h)	リング調 整時間 (h)	ユーザ 運転時 間(h)	故障時 間 (h)
2009 (H21)	4,976.0	979.5	3,961.9	34.5
2010 (H22)	5,037.0	958.7	4,050.8	22.5
2011 (H23)	4,696.0	1,875.1	2,809.2	11.7
2012 (H24)	4,416.0	624.0	3,752.9	39.1
2013 (H25)	4,176.0	672.0	3,451.4	52.6
2014 (H26)	3,024.0	696.0	2,316.6	11.4
2015 (H27)	3,888.0	839.6	3,034.0	14.4
2016 (H28)	3,432.0	504.0	2910.7	17.3
2017 (H29)	3,624.0	624.4	2983.0	16.6
2018 (H30)	3,696.0	576.0	3091.6	28.4

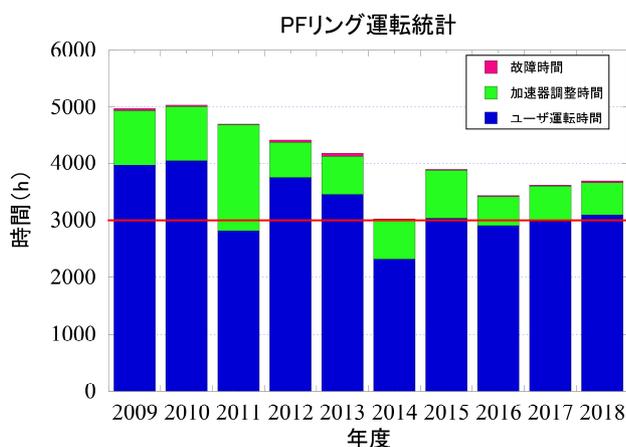


Figure 1: Bar graph of operation statistics in PF ring from FY2009 to 2018.

Table 3 と Fig. 2 に PF-AR の運転統計を示す。2018 年度のユーザ運転時間は 1581.6 時間と 2000 時間を大きく下回った。やはり、PF-AR についてはユーザ運転 3000 時間の水準にはほど遠い状況にある。故障率は例年並みの 1.6%程度を維持でき、平均故障間隔(MTBF)

Table 3: Operation Statistics in PF-AR from FY2009 to 2018

年度	リング運 転時間(h)	リング調整 時間(h)	ユーザ運 転時間(h)	故障時間 (h)
2009 (H21)	5,063.0	542.5	4,445.7	74.8
2010 (H22)	4,638.5	542.5	4,037.5	58.5
2011 (H23)	4,131.5	1,162.0	2,941.5	28.0
2012 (H24)	4,080.0	408.0	3,643.2	28.8
2013 (H25)	3,912.0	434.0	3,378.4	99.6
2014 (H26)	2,352.0	360.0	1,955.0	37.0
2015 (H27)	3,336.0	552.0	2,753.0	31.0
2016 (H28)	1,821.0	717.0	1,085.7	18.3
2017 (H29)	2,448.0	312.3	2,111.0	24.7
2018 (H30)	2,064.0	456.0	1581.6	26.4

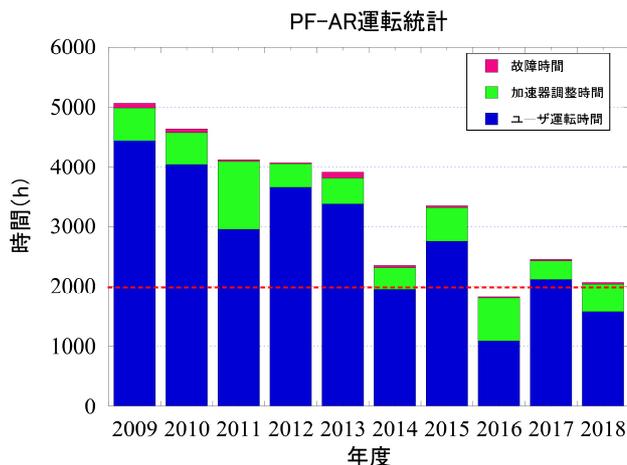


Figure 2: Bar graph of operation statistics in PF-AR from FY2009 to 2018.

は 64.3 時間と例年並みの数値であった。故障の内訳は、RF に起因するトラブルが約 75%、入射関連が約 14%、ダストトラップによる再入射が 8%であった。運転関係では、PF-AR では 6.5GeV 直接入射路が完成、フルエネルギー入射によるユーザ運転および連続入射によるトップアップ運転が実現した。しかも、40 ミリ秒で PF リングと PF-AR の入射の切り替えも実現したことから、お互いの入射を妨げずに同時にトップアップ運転を行うことができるようになった。

## 2.2 アンジュレータ #19 の更新作業

PF リングのビームライン#19 (BL#19) の増強計画に伴うアンジュレータの更新作業を 2018 年夏期停止期間中に実施した。これまで使用していた旧アンジュレータ (リボルバー : R#19) を撤去して、新しいアンジュレータ (APPLE-II タイプ : U#19) と入れ替えを行うとともに、アンジュレータを設置する B18-B19 間直線部の床補強工事を行った。春期の運転停止後ただちに、R#19 の撤去のための真空パージ作業、上流下流のコンポーネントの切り離し、配線撤去などを行なった。その後、R#19 をリングトンネルから地下機械室のプラットフォームへ移動、補強用 H 鋼の撤去を行った。プラットフォームへ移動した R#19 の磁石の放射線線量測定を計測したところ問題ないレベルであることがわかり、磁石の取り外し作業を行った。磁石はドラム缶に入れてしばらく保管した後、再度線量を計測し問題ないことを確認して廃棄した。一方で、U#19 用の新しい真空チャンバーが納品され、リング北搬入口から地下機械室へ搬入し、真空引き等の作業を行った。この真空チャンバーは内面に排気作用を持つ非蒸発型ゲッター (NEG) コーティングを施したチャンバーで、PF リングで使用するのは建設以来初めてであった[3]。アンジュレータ本体の PF-AR 北棟挿入光源準備室における磁場調整が終了した 9 月下旬に、B18-B19 間の直線部に設置した。設置後、アンジュレータの磁石の中心とビーム軌道をあわせるための精密アライメントおよびリング真空チャンバーとの接続作業が実施された。Figure 3 に設置された U#19 の写真を示す。その後に行

われた真空チャンバーのコンディショニングおよび制御系の構築も停止期間内にすべて終了した。秋のリング立ち上げ時には、アンジュレータの各種モード確立のための調整が行われ、無事ユーザ運転に供されることとなった。



Figure 3: Photograph of new undulator #19 (U#19) after installation into B18-B19 straight section in the PF ring.

### 2.3 PF-AR トップアップモードによるユーザ運転開始

PF-AR 直接入射路完成し、フルエネルギーでの入射、ビームシャッター開および真空封止型アンジュレータのギャップ閉でのビーム入射が可能にするための安全系の構築、入射器側での 4 リング同時入射の準備がすべて整い、2018 年 11 月 20 日から PF-AR においてトップアップモードによるユーザ運転が開始された。1988 年 PF-AR でユーザ運転が開始され以来、約 30 年目での特筆すべき出来事であった。Figure 4 に示すように、トップアップモードによる約 1 ヶ月間のユーザ運転は非常に安定であった。

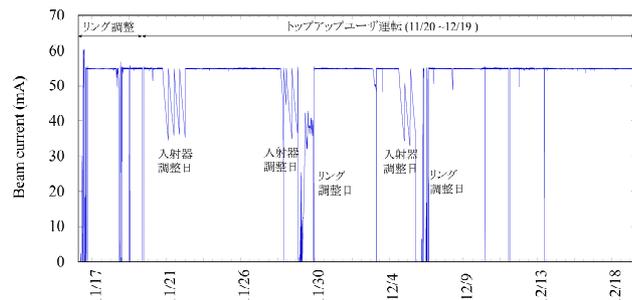


Figure 4: Trend graph of the stored beam current from November 17th to December 19th, 2018 under the 6.5 GeV top-up operation at PF-AR.

### 2.4 PF-AR 5 GeV でのユーザ運転

2018 年 3 月 4 日から約 1 週間、エネルギーを通常の 6.5 GeV から 5.0 GeV に下げた試験運転を実施した。入射路およびリングの調整を行いながら、徐々に電流値を積み上げていき、最大電流値 55 mA まで容易に到達することができた。3 月 6 日に光軸確認を行い、放射光をビームライン側に供給した。試験運転の結果、15 keV 以上の硬い X 線領域で、フラックスが 6.5 GeV より減少に転じ、約 27 keV で半減することが判明した。しかしながら、リング側およびビームライン側でも致命的な問題がな

いこと、利用側でうまくエネルギーの選択を行えば、ユーザ運転で使用できること、さらに 5 GeV 運転では、6.5 GeV 運転時の約 6 割の電力で運転できることを考慮して、2019 年度 PF-AR の運転は、およそ 6.5 GeV と 5.0 GeV の運転時間の比を 1:1 として、運転計画が立てられた。まず、2019 年 5 月 17 日から 6 月 5 日の期間で、5.0 GeV でのユーザ運転が実施された。この期間は、PF リングと PF-AR のビーム入射間隔を、PF リングが 170 秒、PF-AR が 30 秒実施するという取り決めで、同時にトップアップ運転を行うこととした。それは、PF リングと PF-AR のエネルギー比 2.5:6.5 で固定されている入射路で共通に使用されている直流の偏向電磁石 1 台が存在し、5 GeV のビームに対応するのに 10 秒ほどの切り替え時間を要するからである。6.5 GeV 運転時に比べれば、蓄積電流値の一定度の精度がわずかに落ちるもの(およそ 0.04%→0.1%)、ユーザ実験としては許容の範囲と判断されている。なお、Figure 5 に示すように 3 週間弱のユーザ運転は、次節で記述する HOM ケーブルの発熱問題やビーム入射不調等のトラブルが何度かあり、残念ながらそれほど安定なユーザ運転とはいかなかった。

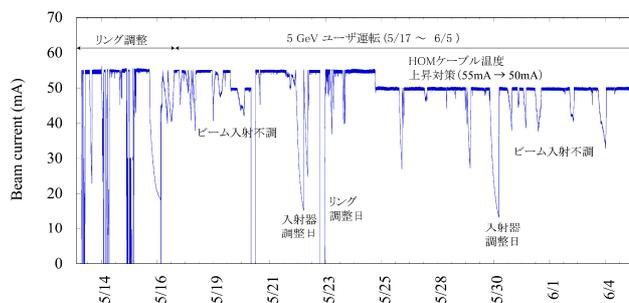


Figure 5: Trend graph of the stored beam current from May 13th to June 5th, 2019 under the 5.0 GeV user operation at PF-AR.

## 3. 老朽化対策の現状

### 3.1 PF-AR における HOM ケーブルに関するトラブル

2018 年 5 月、PF-AR 東電源棟 (AR 東棟) の RF が停止し、ビームダンプが発生した。空洞 E-4 (東直線部、最下流の空洞) の高次モード (higher order mode, HOM) ケーブルの温度異常を示すインターロックが動作したことが原因であった。PF-AR では 11 セル APS 型加速空洞を 6 台使用しており、それらの空洞の加速セルから有害な高次モードの電磁場を引き出すために、空洞 1 台あたり 12 本 (1 台の空洞だけ 10 本) の HOM ケーブルが使われている。それぞれの HOM ケーブルには 2 個の温度スイッチが取り付けられており、温度 60°C 以上になるとスイッチが動作し、ローレベル系で RF を停止する。最初のインターロック動作の後、温度スイッチをリセットし、最大ビーム電流を 50 mA に下げて運転再開を試みたが、約 1 時間後に同じインターロックが動作した。シフトリーダーが当該ケーブルの交換が必要と判断して早朝に担当者に連絡し、朝から交換作業を開始した。新品の予備ケーブルと交換後、AR 東棟のクライストロンを立ち上げ、昼頃にユーザ運転を再開した。不具合のあったケーブル

(NH-HF-20D ケーブル、両端コネクタ付き)を調査したところ、内導体と外導体の間に螺旋状に入っているポリエチレン製の絶縁体のうち、ダミーロード側の絶縁体が黒色に変色して一部溶けていた。反対の HOM カップラー側の絶縁体は健全であった。ちなみに、ケーブルに貼り付けたサーモラベルは、中央部とダミーロード側ともに 60℃以上の温度上昇があったことを示していた。前回ケーブルを交換してから約 10 年が経過しており、今回のケーブル発熱の原因は、ARトンネル内の強い X 線環境下での経年劣化が原因と考えられる。他の HOM ケーブルも同程度の年月使用しており、交換が必要な時期に来ていると考えられるため、全数 70 本の交換を 2019 年 7 月から 10 月にかけて実施しているところである。

### 3.2 PF-AR クライストロン用高圧電源制御盤内 PLC 更新作業

PF-AR のクライストロン用高圧電源 (2 台) の制御盤は 1988 年に製造された。内部で使用している PLC (プログラマブル・ロジック・コントローラ) はすでに製造中止、さらに開発環境も失われており、プログラムの書き込みが出来ない状態になっている。2017 年 9 月の PF-AR クライストロン用高圧電源の保守中に、PF-AR 東棟に設置されている制御盤内の PLC の ROM (読み出し専用メモリ) が故障しているのが判明した。ROM は予備がないため、東棟の高圧電源立ち上げのために、西棟の PLC から ROM を外して、東棟の ROM と置き換えて、PLC をブートして立ち上げるといった操作を行った。一度電源を立ち上げれば、そのまま運転できる状態にはなるものの、西棟の ROM も故障すると、高圧電源が東西とも動かなくなるという状況となった。そのため、PLC の更新を電源メーカーと協議し、更新作業を実施することとした。更新に当たっては既存の PLC は廃番であるため入手可能な PLC を使用する事になるが、すべての高圧電源立ち上げ手順の動作を既設電源に合わせるため、ソフトウェアの改変を含めてかなり労力のいる作業となることが判明した。結果的には新規 PLC の調達、ソフトウェア製作、現場設置作業で約 1 年がかりの作業となった。PLC 更新の現場作業と動作確認作業は、2018 年夏期の停止期間中に行われた。東棟と西棟の両方の PLC が更新され、これによって高圧電源が動作しなくなり、PF-AR が長期に運転停止になるという危険な状況は回避された。

### 3.3 PF リング 4 極電磁石電源 2 台の更新

2018 年 5 月 PF リングの立ち上げ時、電磁石の初期化を行っている最中に、リング高輝度化改造時 (1994 年 ~1996 年) に製造された電源に不具合あることが判明した。制御系の不具合と予想され、すぐにメーカーに連絡し調査を行ったところ、DAC/ADC モジュールの恒温槽の故障で、モジュールの内部基板が焦げ、抵抗 2 個破裂、配線も焦げているのが分かった。残念ながらこのモジュールの予備品はなく、また約 24 年前に製造された基板であるため、修理および代替品の製造も困難と判断された。同時期に製造された電源が 10 台稼働中であり、同様の故障が頻発すると長期運転停止になることが想定されたため、急遽機構から予算を手当てしていただいて、新規に電源 2 台を製造することとした。新電源は 2019 年 3 月末に納品されたのち、設置、配線および調

整作業を 4 月中に終え、無事に 5 月の運転に使用することができた。立ち上げ時から新電源は特に問題なく運転されている。しかしながら、まだ旧電源は 8 台残っており、リングの安定な運転を維持するためには、できるだけ早いうちに更新すべきであると考えている。

## 4. まとめ

2018 年度のユーザ運転時間は、PF リングでは 3000 時間をわずかに上回ったものの、PF-AR は 2000 時間を大きく下回った。一方で、2018 年秋の運転から、PF リングではアンジュレータ #19 の更新が順調に進みユーザ利用に供されるとともに、PF-AR ではトップアップによるユーザ運転が実現した。また、省エネルギー運転として、ビームエネルギーを 5.0 GeV に下げた試験運転を行い、ユーザ運転に使用できること、電力量が 6 割で運転できることが判明し、実際に 2019 年度からユーザ運転が開始された。ユーザ運転時間をできるだけ長く確保する努力がリングおよびビームライン側双方でなされている。

故障時間に関しては、両リングともに例年とそれほど違いはないものの、明らかに老朽化に起因する故障は増加傾向にある。しかも、電磁石電源や高周波加速システムなど故障すると運転に大きなダメージを与える装置での故障が大きな割合を占めてきている。

今後 10 年程度を見据えて、これまで同様に安定な放射光実験が継続的に可能なよう、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 年で実施する事が重要であると考えて、高度化予算獲得へ向けた準備を行っているところである。

## 参考文献

- [1] K. Tsuchiya *et al.*, "Construction of a new elliptically polarizing undulator (U#19) at the Photon Factory", AIP Conference Proceedings, vol. 2054, p. 030010, 2019.
- [2] N. Higashi *et al.*, "Construction and commissioning of direct beam transport line for PF-AR", Journal of Physics: Conference Series, vol. 874, p. 012024, 2017.
- [3] Y. Tanimoto *et al.*, "Design and manufacture of the NEG-coated chamber for Undulator #19 at PF-ring", Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 654-658.