

## 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>, 浅岡聖二<sup>A)</sup>, 阿達正浩<sup>A)</sup>, 飯田直子<sup>A)</sup>, 上田明<sup>A)</sup>, 内山隆司<sup>A)</sup>, 江口 柊<sup>A)</sup>, 海老原清一<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>, 菊池光男<sup>A)</sup>, 金 秀光<sup>A)</sup>, 小玉恒太<sup>A)</sup>, 田中オリガ<sup>A)</sup>, 坂井 浩<sup>A)</sup>, 坂中章悟<sup>A)</sup>, 坂本 裕<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>, 鷹崎誠治<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>, 多和田正文<sup>A)</sup>, 土屋公央<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>, 三増俊広<sup>A)</sup>, 宮内洋司<sup>A)</sup>, 宮島司<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>, Seiji Asaoka<sup>A)</sup>, Masahiro Adachi<sup>A)</sup>, Naoko Iida<sup>A)</sup>, Akira Ueda<sup>A)</sup>, Takashi Uchiyama<sup>A)</sup>, Shu Eguchi<sup>A)</sup>, Kiyokazu Ebihara<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>, Mitsuo Kikuchi<sup>A)</sup>, Xiuguang Jin<sup>A)</sup>, Kota Kodama<sup>A)</sup>, Olga Tanaka<sup>A)</sup>, Hiroshi Sakai<sup>A)</sup>, Shogo Sakanaka<sup>A)</sup>, Hiroshi Sakamoto<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>, Seiji Takasaki<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>, Masafumi Tawada<sup>A)</sup>, Kimichika Tsuchiya<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>, Tohihiro Mimashi<sup>A)</sup>, Hiroshi Miyauchi<sup>A)</sup>, Tsukasa Miyajima<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 34 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 アドバンスドリング (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、短周期アンジュレータの新設に加え、90 年代前半に製造されたアンジュレータの更新がほぼ完了した。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し、加減速を伴わないユーザ運転が実施された [1,2]。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、装置の老朽化は避けられない状況で、いくつかのトラブル

ルが目立つ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のいくつかについて報告する。

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 GeV
水平エミッタンス	34.6 nm·rad	293 nm·rad
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	Decay
挿入光源 BL 数	11	5

#### 2. 運転の現状

Table 2 に 2009 年度から 2016 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したものを Fig. 1 に示す。2016 年度のユーザ運転時間は、運転経費 10%程度削減のため 3000 時間をわ

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

ずかに下回ったが、加速器調整時間をユーザ運転時間に回し約 4%の削減にとどめることができた。故障率は例年並みの 1%以下を維持でき、一方平均故障間隔(MTBF)は 160 時間を上回ったことから、安定な運転が行われたといえる。故障の内訳を調べると、やはり老朽化が要因となった電磁石電源や真空ダクトの故障が増加している。また、ビームライン側(特に発光点で有限の分散関数を持つビームライン)では、進行方向 4 極振動のビーム不安定により強度変動が起こるため、その抑制が課題となっている。さらに、昨年度同様、超伝導垂直ウィグラーで真空リークを伴う故障が再発した。真空シール剤等でなんとか抑制してきたが、秋の立ち上げ運転時に発生したクエンチの影響で、真空ダクトと断熱真空槽の 2ヶ所で同時にリークが再発してしまった。このリークもなんとかシール剤で食い止めたものの、今後さらに大きなリークが起こるとリングの運転の継続が危ぶまれたため、秋期の運転停止とともに昇温し、冬期の運転はウィグラーの冷却・励磁を行わず常温を保持し、2017 年度の停止期間を利用して真空

ため、ユーザ運転は春期のみ約 1000 時間程度となった。

Table 3: Operation Statistics in PF-AR from FY2009 to 2016

年度	リング運転時間 (h)	リング調整・スタディ時間 (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

Table 2: Operation Statistics in PF Ring from FY2009 to 2016

年度	リング運転時間 (h)	リング調整・スタディ時間 (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	2,910.7	17.3

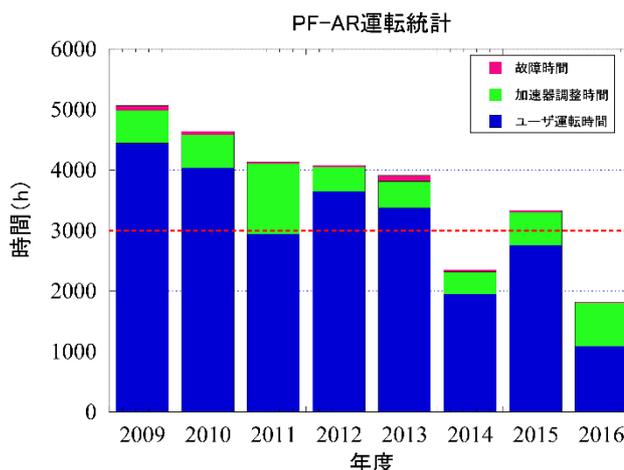


Figure 2: Bar graph of operation statistics in PF-AR from FY2009 to 2016.

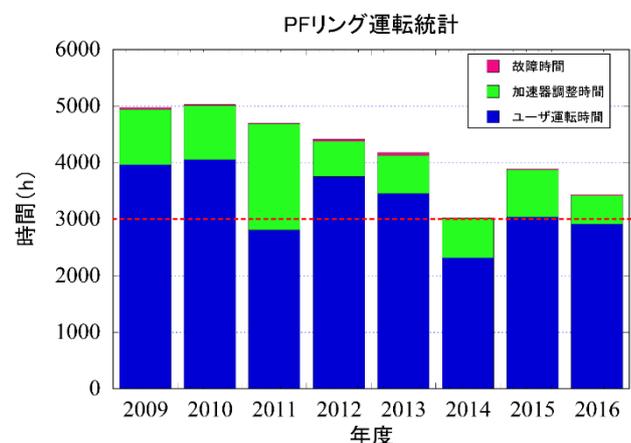


Figure 1: Bar graph of operation statistics in PF ring from FY2009 to 2016.

ダクトの更新を行うことを決めた。

Table 3 と Fig. 2 に PF-AR の運転統計を示す。PF-AR は 6.5GeV 直接入射路の建設・立ち上げを行った

H28 年度冬期の PF-AR の運転は、新設された直接入射路を用いた 6.5GeV フルエネルギー入射・蓄積、放射線施設検査およびリングの真空光焼きだし等、来期のユーザ運転へ向けた準備のための調整運転に充てられた。

立ち上げ初日 2 月 13 日の午後 2 時過ぎに新入射路に 6.5GeV の電子ビームが入り、スクリーンモニターでビーム軌道およびプロファイルを確認しながら、電磁石パラメータの微調を行ったところ、午後 7 時には PF-AR 入射点セプタム電磁石 I の手前のスクリーンモニター(SC#15)でビームが確認できた (Fig. 3)。

その後、2 台のパルスセプタム電磁石 I と II を励磁したところ、セプタム電磁石 I の下流のスクリーンモニター (SC#16) でビーム捉えたが、セプタム電磁石 II の直後 (リング直前) のスクリーンモニター (SC#17) でビームが確認できなかった。スクリーンモニター本体やセプタム電磁石の励磁タイミ

ング、軌道を調査したが、結局なぜ見えないのか不明のままであった（後日 SC#17 でビーム見えない原因は、カメラを絞りを過ぎていたためであったことが判明した）。SC#17 でビームが確認できないという問題はあったが、午後8時20分頃、リングのビーム位置モニターでビームが入射されているのを確認した。そこまでで初日の入射調整を終了した。2日目の2月14日は、リングのビーム位置モニターでビームが数ターン周回しているのを確認、RFにパワーを投入して各種調整を行ったところ、午後2時49分に電子ビームがリングに蓄積したことを確認した。そのときの、入射ビーム位置モニターの信号、蓄積後のリングの軌道、蓄積電流値の推移、リング真空度の様子を Fig. 4 に示す。

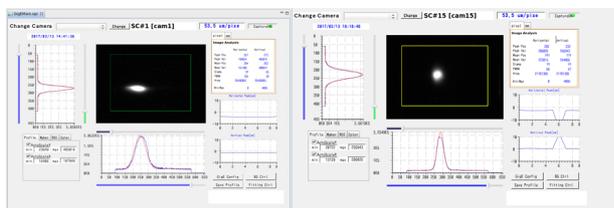


Figure 3: Beam position and profile of injected electron beam captured by the screen monitor in PF-AR new direct beam transport line (BT). The left figure is the first screen monitor (SC # 1) of BT, and the right figure is the screen monitor (SC # 15) before the septum magnet I.

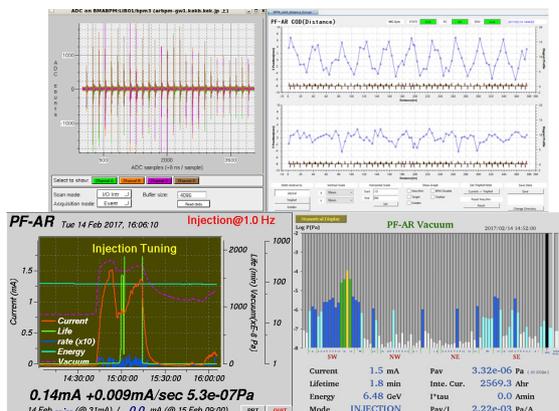


Figure 4: Coherent oscillation of injected beam, closed orbit of stored beam, ring vacuum pressure and stored beam current at the first successful capture into the ring of 6.5 GeV electron beam, are shown.

ビーム蓄積成功後は、パルス電磁石のタイミングやビームエネルギー、入射位相調整を行うとともに軌道補正を行い、徐々にビーム電流を積み上げて、リングの真空焼き出しを継続した。そして、2月20日（月）午後5時20分頃に、リング改造前のユーザ運転初期ビーム電流値 50mA の蓄積に成功した。直接入射路におけるビームロス是非常に少なく、また蓄積リングの電荷捕獲効率も 80%を上回り、ビーム入射については従来の 3 GeV 時より大きく改善し、

今後のトップアップ運転実現に向けても明るい兆しが見えた。その後も、リング真空焼き出しを中心に各種調整を継続し、真空度も順調に改善、60 mA 蓄積時にビーム寿命が 10 時間 ( $I \cdot \tau \sim 40 \text{ A} \cdot \text{min}$ ) を超えるまでに回復した (Fig. 5)。また、3月1日(水)に放射線施設検査が行われ無事合格するとともに、PF-AR 各ビームライン側への光導入も順調に行われた。H29 年度春期は 4月12日 9:00 に立ち上げを行い、リングの調整は順調に行われ、4月14日 9:00 の光軸確認後、約 9 か月ぶりにユーザ運転を再開した。2月13日のコミッショニング開始からの蓄積電流値の推移を Fig. 6 に示す。

PF-AR光焼出し状況

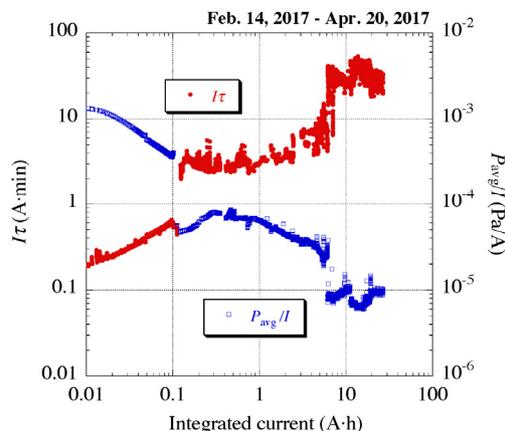


Figure 5: Trend graph of the ring average vacuum divided by the beam current ( $P_{\text{avg}}/I$ ), and the product of beam current and lifetime ( $I \cdot \tau$ ) as a function of the integrated stored current from February 14 to April 20, 2017.

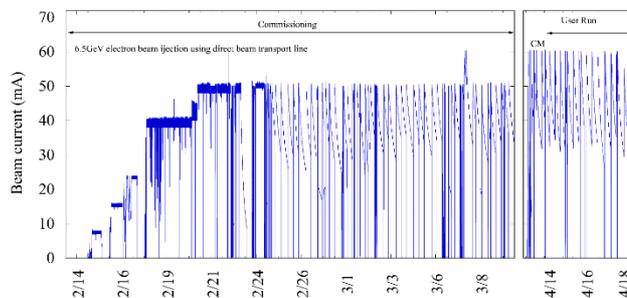


Figure 6: Trend graph of the stored beam current from February 14 to April 20, 2017.

### 3. 老朽化対策の現状

#### 3.1 PF-AR 直接入射路

PF-AR 直接入射路の外観図と各箇所の写真を図 7 に示す。2013 年に建設開始された PF-AR の 6.5GeV 直接入射路の作業は、2017 年 2 月のコミッショニング開始に向け、2016 年夏期の停止期間中の大規模作業はほぼ完了し、最終段階を迎えた。PF-AR 運転停

止後の7月からPFリング運転開始の10月までの3ヶ月強の期間に多くの作業が集中した。再利用される既存ビーム輸送路 (BT)の偏向電磁石の解体搬出作業、電磁石電源の入れ替え作業、LINAC 第3スイッチヤード (SY3) および LINAC と新トンネルの境界領域の作業などであった。放射線安全に関しては、新 BT 運転開始までには放射線申請を新規に行う必要があり、来年4月以降のユーザ運転開始前には施設検査に合格しておかなくてはならないため、安全系に関する作業も並行して行われた。

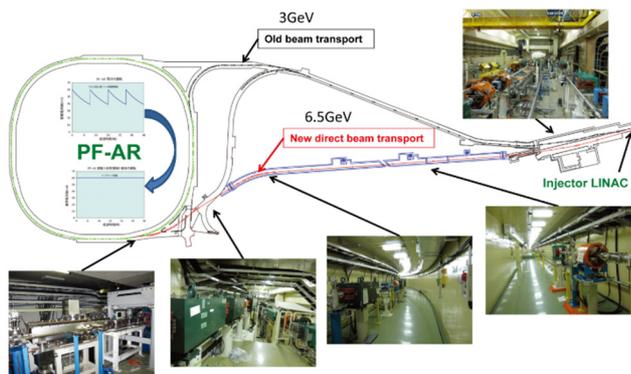


Figure 7: Outline view of new direct beam transport line for PF-AR and the photographs at several locations.

### 3.2 超伝導垂直ウィグラー

PFリングの超伝導垂直ウィグラーは、1989年に稼働し、25年以上にわたり利用運転に寄与してきた。しかしながら、近年は老朽化によるトラブルが見られるようになってきていた。

このウィグラーは、液体ヘリウム消費量を少なくするために、Joule-Thomson (JT) 効果を利用した冷凍能力の高い、4K冷凍機 (再液化機と呼ぶ) を装備している。JT ラインは弁でヘリウム流路を非常に細く絞るため、微量の不純物でつまりが発生しやすい特徴がある。再液化機は平成14年に一度交換を行っているが、最近JTラインのコンタミ詰まりで運転不能となる故障が連続して2回発生したため、2015年度から2016年度にかけて再液化機を新規製作し、2016年夏の停止期間中に更新作業を行った。しかしながら、秋の運転では超伝導ウィグラーの真空悪化のトラブルが続いた。立ち上げ時にクエンチが発生したときから、ビームダクトと断熱真空の圧力低下が始まった。ヘリウムの消費量に変化は見られなかったが、ビーム寿命は約半分程度まで短くなっていた。真空度の悪化状況を監視しつつ、メンテナンス日の11月10日まで運転を継続して、再度リークテストを行った結果、これまでに経験のない場所でのリークが発見された。さらに、ビームダクトと再液化機の断熱真空の同時にリークが発生していた。リークの原因は、クエンチ時にビームダクトに何らかの振動が付加されたことによるものと判断された。ビームダクトの方はリークシーラで補修しリークは一端止まったが、13日の5:00ごろに前触れ

もなく圧力が低下し始めたため、同じ場所にリークが発生したと予想し、再度17日にリーク対処を行った。2度の対処で現時点までは真空悪化はみられなかった。しかし、断熱真空の方は悪化したままであるため、12月19日のリングの運転停止とともに超伝導ウィグラーを長期間停止にして、ビームダクトと断熱真空悪化の原因を根本的に改善するため、ビームダクト本体の更新を決めた (2017年7月18日真空ダクト作業が開始された)。2017年度秋の運転で無事稼働することを期待している。

## 4. まとめ

2016年度のユーザ運転時間は、運転経費10%程度の削減のため3000時間をわずかに下回ったが、加速器調整時間をユーザ運転時間に回し約4%の削減にとどめることができた。老朽化の激しい超伝導ウィグラーの真空トラブルが頻発し、根本的な解決のためビームダクト本体の更新を決定した。

PF-ARについては、2016年度直接入射路の建設およびリング入射点等の改造が順調に進み、2017年2月13日より立ち上げが行われ、一週間以内に6.5GeV入射およびビーム電流50mAの蓄積に成功した。その後も加速器調整が行われ、3月1日に放射線施設検査に合格した。この合格を受けて、2017年度春期より、ユーザ運転を開始することが可能となり、4月12日にユーザ運転が再開された。今後は、トップアップ運転やリングの低エミッタンス化へ向けた調整を行っていく予定である。

## 参考文献

- [1] A. Higashi *et al.*, "CONSTRUCTION AND COMMISSIONING OF DIRECT BEAM TRANSPORT LINE FOR PF-AR", Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, 2017, pp.2678-2680.
- [2] A. Ueda, S. Asaoka, T. Honda, S. Nagahashi, N. Nakamura, T. Nogami, H. Takaki, T. Uchiyama, "CONSTRUCTION OF THE NEW SEPTUM MAGNET SYSTEMS FOR PF-ADVANCED RING" Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, 2017, pp.3398-3400.