

## KEK-PF と PF-AR の現状

### PRESENT STATUS OF PF RING AND PF-AR

原田 健太郎<sup>#</sup>, 浅岡 聖二, 阿達 正浩, 飯田 直子, 上田 明, 内山 隆司, 江口 柊, 海老原 清一,  
尾崎 俊幸, 小野 正明, 帯名 崇, 影山 達也, 加藤 龍好, 菊池 光男, 金 秀光, 小玉 恒太,  
小林 幸則, 田中 オリガ, 坂井 浩, 坂中 章悟, 坂本 裕, 佐々木 洋征, 佐藤 政行, 佐藤 佳裕,  
下ヶ橋 秀典, 塩屋 達郎, 島田 美帆, 高井 良太, 鷹崎 誠治, 高木 宏之, 高橋 毅, 多田野 幹人,  
谷本 育律, 田原 俊央, 多和田 正文, 土屋 公央, 長橋 進也, 中村 典雄, 濁川 和幸,  
野上 隆史, 芳賀 開一, 東 直, 本田 融, 本田 洋介, 丸塚 勝美, 三増 俊広, 宮内 洋司,  
宮島 司, 山口 孝明, 山本 尚人, 山本 将博, 吉田 正人, 吉本 伸一, 渡邊 謙, 平野 広太<sup>A)</sup>  
Kentaro Harada<sup>#</sup>, Seiji Asaoka, Masahiro Adachi, Naoko Iida, Akira Ueda, Takashi Uchiyama, Shu Eguchi,  
Kiyokazu Ebihara, Toshiyuki Ozaki, Masaaki Ono, Takashi Obina, Tatsuya Kageyama, Ryukou Kato,  
Mitsuo Kikuchi, Xiuguang Jin, Kota Kodama, Yukinori Kobayashi, Olga Tanaka, Hiroshi Sakai, Shogo Sakanaka,  
Hiroshi Sakamoto, Hiroyuki Sasaki, Masayuki Sato, Yoshihiro Sato, Hidenori Sagehashi, Tatsuro Shioya,  
Miho Shimada, Ryota Takai, Seiji Takasaki, Hiroyuki Takaki, Takeshi Takahashi, Mikito Tadano,  
Yasunori Tanimoto, Toshihiro Tahara, Masafumi Tawada, Kimichika Tsuchiya, Shinya Nagahashi, Norio Nakamura,  
Kazuyuki Nigorikawa, Takashi Nogami, Kaiichi Haga, Nao Higashi, Tohru Honda, Yosuke Honda,  
Katsumi Marutsuka, Tohihiro Mimashi, Hiroshi Miyauchi, Tsukasa Miyajima, Takaaki Yamaguchi,  
Naoto Yamamoto, Masahiro Yamamoto, Masato Yoshida, Shinichi Yoshimoto, Ken Watanabe, Kota Hirano<sup>A)</sup>  
Accelerator Laboratory, KEK

<sup>A)</sup> Graduate School of Science, Hiroshima University

#### Abstract

The brief reports of the operation and developments from the autumn 2017 until summer 2018 of the Photon Factory (PF) ring and the Advanced Ring (AR) are shown. Presently for the PF, the insertion device for BL19 is replaced in this summer shutdown 2018 and the new injection septum magnet is designed and will be installed next shutdown in 2019 for the replacement of the troubled one with the cooling water pipe leakage inside of the vacuum in 2015. For the AR, the studies were conducted for the top-up user operation from next autumn and 5GeV operation to save the electricity cost and extend the user operation periods.

#### 1. はじめに

現在 KEK には 2.5GeV の PF リングと 6.5 GeV の PF アドバンスリング (PF-AR) がユーザー運転に供されている。PF では、現在 19 番直線部の挿入光源の更新作業中であり、また、2015 年 4 月に水漏れ故障を起こした 1988 年製のセプタムの更新予算が認められ、現在、新しいセプタム1台を設計製作中である。PF-AR においては、LINAC による KEKB、PF との同時入射が実用化されつつあり、昨年完成した直接入射路によって試験的にトップアップ運転が行われた。また、電気代を節約して運転期間を延長する為の 5GeV 運転を検討中である。ここでは、PF 及び PF-AR について、2017 年秋から 2018 年夏までの運転、改造及び R&D の現状について簡単に報告を行う。

#### 2. 運転状況

##### 2.1 運転期間

SuperKEKB phase II に向けての改造の為、2017 年は

<sup>#</sup> kentaro.harada@kek.jp

5/15 にシャットダウン後、約 5 ヶ月のシャットダウン期間がとられた。それに伴い、2017 年秋の運転に向けての LINAC 立上げが 10/10、PF リングが 10/30 立上げ、AR が 11/6 運転開始であった。その後、両リングとも 12/27 運転を停止した。2018 年冬の運転は、当初は PF のみの予定だったが、運転経費が確保できた為、AR も 2 週間の運転が可能となった、PF が 2018/1/18~3/2、物構研サイエンスフェスタ中の休止を挟んで、3/5~3/20 の運転、AR が 2/5~2/23 の運転であった。2018 年度春の運転は、PF が 5/7~7/6、AR が 5/14~6/29 であった。なお、PF の 6/30~7/6 の期間は産業利用振興運転とし、ユーザーより利用料を徴収することを前提とした運転であったが、幸いなことにこの期間の運転経費を利用料でおよそ賄うことができるだけのユーザーが集まったとのことである。

##### 2.2 PF における電源故障の多発

PF リングでは、高輝度化から約 20 年、直線部増強から約 13 年が経過し、電源故障が多発するようになった。12/14 に 17 番直線部付近の垂直ステアリング電源が冷却 FAN 故障で停止し、リング全体で垂直に大きく軌道が変動、放射光によるガス放出で真空度が悪化した。現

在までに致命的な後遺症はなさそうだが、ベローや真空封止挿入光源の保護フィルムなどに光が当たると溶解事故になりかねない故障であった。現在、FAN の全数交換作業を行っている。他にも、2/13 に Q8A 電源、6/13 に Q9B 電源が異常で停止、ビームダンプした。いずれも IGBT スタックのコンデンサ破裂が原因であり、今後も、直線部増強時に導入した同様の電源 16 台に対し同様の故障が続発することが推定される。コンデンサを全台数分(1 台 9 個で 144 個)調達する手配を行っている。さらに 5/7 のリング立上げ時、SFD 電源の恒温槽が焼損し、通電不可能であった。これは電流制御用の DAC/ADC の温調部分のセンサが故障し、モジュール全体を加熱、内部全体を焼損に至ったもので、電源は高輝度化時(1997 年)のものである。焼損部分は再利用不可能で、モジュール新規制作に際しては、同じ部品の調達が不可能で根本的な新規設計が必須、基板 5 枚分のパターン起こしが必要などとなり、現実的な金額での修理が不可能であった。これは、PF の大型電源では初めての完全な修理不能事態である。(逆に、今までは PF、AR 通じて 1980 年代の電源でも全て何らかの形で修理復旧できていた。) 今回の故障に関しては、同様の電源を J-PARC で素核研のグループが利用しており、予備品を借用することで復旧させた。PF では高輝度化改造電源の予備品は予算の都合で存在しない。借りた部品は 10 月には返却する必要がある、後期は電源を 1 台減らしての運転となる。幸い、PF では高輝度化時、古いオプティクスを再現するために、弧部の QF、SF が 1 セルおきに別電源に接続されている。また、3GeV 運転のために電源容量が大きめに作ってある。そこで、2018 年後期の運転では、この 4 極、6 極の電源を統一し、QFF、QFD を QFF 電源 1 台で SFF、SFD を SFD 電源 1 台で励磁する接続変更を行う予定である。そうすると、モジュール返却した上でさらに 1 台電源の予備ができることになる。また、根本的に修理不能になってしまったという事態のおかげか、予備電源を 2 台、急遽製作できることになり、入札手続き中である。

### 2.3 AR RF HOM ケーブルの不具合

AR では、APS (Alternating Periodic Structure)空洞で使われている高次モード減衰用 20D 同軸ケーブル(HOM ケーブル)が発熱し、運転中断した事が 1 件あった。ケーブルのポリエチレン絶縁体が長期に X 線にさらされたことにより劣化し、誘電損失が大きくなったものと推定され、問題のケーブルを交換した。AR で 70 本使われているこれらの HOM ケーブルは、2003 年の低エミッタンススタディ時に焼損、真空リーク事故を起こした事があり、2003 年~2008 年にかけて全数を更新していた。その後約 10 年が経過し、再び劣化してきたと考えられるため、再度全数の更新を行う予定である。

## 3. PF リング入射調整

### 3.1 セプタム水配管リークの再発

PF リングでは、2017 年のシャットダウン中に、真空リークが発生した超伝導ウィグラーのダクト交換作業と、セプタム上流の蓄積リングダクトにアブソーバを追加する作業が行われた。PF リングセプタム電磁石 S2 はリング入射

点に設置されたセプタムで、蓄積リング真空ダクトと入射路真空ダクトとを仕切るセプタム壁には、リング上流の偏向電磁石の光が当たる。その冷却の為の水路から 2015 年 4 月にリークが発生した。応急措置として有機液体のリークシーラーを水路に流し、リークを止めてから通水して使用していた。ところが、2017 年に再度真空悪化が生じ、シーラーでは直しきれないことが判明した。

### 3.2 セプタム保護用放射光アブソーバの追加

そこで、通水を諦め、上流にアブソーバを追加して偏向電磁石の放射光に対して影を作って対応することとなったが、予算的にも納期的にも新規のアブソーバを制作する余裕がなかった為、既存のアブソーバと既存のポート配置(リング軌道上の設置位置)の組み合わせの中から、最善のものを選ぶこととなった。真空中に最善で最も安全なケースが、セプタムのすぐ上流に軌道から 15 mm の場所まで挿さるアブソーバを設置する案で、蓄積ビームに対する物理アパーチャという面では問題なかったが、入射の為のキッカーバンプの内側の為、バンプの高さを下げなければいけないという困難が生じた。セプタム壁の温度上昇は増えるが、バンプの高さを変えずにすむ改善の案を含めて入射可能性について比較検討を行った結果、入射率は悪化するかもしれないが、全く入射できなくなる可能性は低い、パルス 6 極入射がバックアップとして使える、どうしても駄目だった時の為に再度シャットダウンして交換する準備は行っておく、こととして、最善の案を採用することとした。

### 3.3 入射関連パラメータの確定

PF リング入射パラメータは歴史的に不明な点が多く、入射点の機器配置やバンプの実際の高さなど、非常に基本的なパラメータすら確信を持って言えない状況であった。今回、入射が厳しくなる状況が想定された為、それらの状況をできる限り見直すことになった。

セプタム電磁石は大きな真空槽の中に設置されているが、1988 年製の為に消耗品の予備も存在せず、固着や劣化なども想定され、真空槽の蓋を開けると真空中にきちんと閉まらない可能性があり、開けて測量することができなかった。また、青焼きの図面に手書きの修正があり、どれが最終的に正しい数字なのか 100%の確信を持って読むことが困難であった。その上、2011 年の震災できちんと固定されていなかった為に全体の位置がずれ、可能な限り推測で修正したが、数ミリ程度の範囲で不定になってしまった。今回、入射点近傍のリング真空ダクト及びセプタムチェンバーの外側の測量を行い、図面数字と比較、直線部増強時のセプタムチェンバー移動とそれに伴うリングダクトの変更範囲を含めて、これが正しいであろうという配置を決定することができた。謎であったリング中心軌道からセプタム内壁までの距離は 21 mm と決定され、それはビームによる応答とも矛盾していない。

キッカーセプタムの蹴り角に関しても、直線部増強時や制御系更新時には歴史的な制御の値を保つ様に行ってきたが、その値では、実際の蹴り角と設定値に差があるということは長い間ずっと分かっていた。今回、測定時の CT の精度の問題などがあるものの、最も信頼できると思われる磁場測定結果を制御系に正しく反映させる変更を行った。その結果、最大でおよそ 10%、校正係

数を変える必要があったが、計算上バンプが閉じるパラメータを設定すれば本当にほぼ閉じる、という状況に至った。

### 3.4 入射調整

2017 年秋の立ち上げでは、初日の夜には定常的に入射できるパラメータを探ることができ真空焼き出しが可能となった。キッカーによるバンプは、アブソーバで蓄積ビームが削れない高さに設定したが、アブソーバ位置ははっきり分かっているため、それをシミュレーションと比較することで、キッカーバンプの高さを推定できた。アブソーバ位置で 13 mm、入射点で 19 mm のバンプ(外向き角度あり)が現在のパラメータと推定されていて、それはキッカー蹴り角の推定値とも矛盾していない。

運転開始直後、キッカー4 台を用いたバンプで入射を行っていたが、K2 のタイミングがずれ、バンプ形状が変わり、蓄積ビームの裾がアブソーバにかかって見かけの入射率が悪くなるという現象が起きた。また、入射率優先で調整を行ったため、入射中のビーム振動が前期に比べて大きくなったという問題が測定系より指摘された。そこで、11 月の運転ではマシンスタディの時間を使い、K2 を使わず、キッカー3 台で入射を行い、さらに、高速 BPM (Libera Brilliance+) を用いて入射中の蓄積ビーム振動を抑制するスタディを行った。入射パラメータをほぼ確定できていたおかげで調整はスムーズに行うことができ、ビーム振動を抑制した上で様々なジッタに対しても安定に入射ができるパラメータを探ることができた。

リークしたセプトラム 1 台に関しては、今年度(2018 年度)、やっと新規製作の予算が認められ、仕様確定し、現在入札手続き中である。順調に進めば 2019 年の夏に交換される予定である。

## 4. マシンスタディ

SuperKEKB に対して LINAC は、2017 年夏に phase II 向け、学会期間中の 2018 年夏に phase III 向けの改造を行っている。2018 年夏前までの運転では、PF ハイブリッド運転時のみ PF トップアップで、他の期間は AR も含めて 1 日 3 回入射での運転であった。マシンスタディ期間中には、LINAC と共同で PF と AR の同時 top-up 入射に向けてのスタディが何度か行われ、準備が進んでおり、2018 年秋の運転からは PF、AR とともに常時トップアップ運転が可能になる見込みである。

### 4.1 AR top-up 運転開始に向けて

AR に対して top-up を行う為には、リング側の課題として、挿入光源のギャップを閉じ、チャンネルを開けたままに入射を行うことができるようにする必要があり、2017 年の秋から具体的なビームスタディが開始された。インタロックの変更、実験ホールの放射線測定などのスタディが行われ、挿入光源のギャップを閉じると入射率が悪くなったり、寿命が急落したりするという現象についてはほぼ解決された。試験的な top-up 運転の様子を Fig. 1 に示す。一方で、直接入射路建設時に導入した新しいキッカー電源がノイズで誤作動し、ビームを削る、ダンプさせる、という現象が希に生じている。測定器を仕掛けての長時間運転を含め、原因調査が行われ、決定的な原因が

まだ不明であるが、ノイズに対する耐性を向上させる改修や調整が行われており、秋の運転開始までには解決され、top-up 運転が開始される予定である。

### 4.2 AR 5 GeV 運転の検討

また、AR では電気代を節約し、運転時間を延長するための 5 GeV 運転が検討されており、特に RF では 5 GeV にすると現在の 15 MV から約 8 MV に電圧を下げられるため、大幅な電力節約が可能である。ただし、LINAC 第 3 スイッチヤードのビーム輸送路に、PF と AR の共通 DC 偏向電磁石が存在するため、エネルギー比を 2.5 GeV/6.5 GeV から変更するには、その DC 電磁石を変更する必要がある。今のところ、top-up の間隔を伸ばし、例えば 10 分おき入射などとして電磁石電流値を変更して対応する予定であるが、ゆくゆくは曲げ角が合わないままで真空ダクトの縁を通し、小型磁石と組み合わせて DC 電磁石だけで解決する方法を含めて、パルス毎切り替えを可能にする方法を様々な観点から模索中である。なお、ビーム輸送路を含めて実際に 5GeV にして入射蓄積するスタディが行われ、問題なく順調に入射蓄積することができた。

### 4.3 AR 低エミッタンス化スタディ

AR では、低エミッタンスオプティクススタディを約 15 年ぶりに再開した。6.5 GeV 入射が可能になったため、不安定性による特に大電流領域での積み上げ入射の難しさがある程度は解消されていると期待されたが、1 シフト(約 8 時間)のスタディではリングを数十ターン周回するパラメータを見つけることはできたものの、蓄積には至らなかった。機器を損傷しないように最大限気をつけつつ、今後もスタディを継続して行ってゆく予定である。

### 4.4 PF リングで行われたスタディ

PF に関しては、前述のアブソーバ追加に伴う入射調整に並行して、ビームを使った入射パラメータ測定スタディ[1]を行った。他に、真空封止アンジュレータの壁電流インピーダンス測定[2]、15 番光モニタの応答測定と光軸調整の改善の検討、入射路の BPM 回路更新などが行われた。

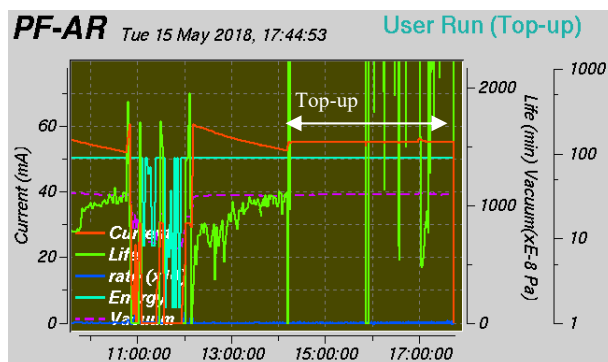


Figure 1: Top-up test on 15 May, 2018.

## 5. PF 19 番挿入光源更新

2018 年夏のシャットダウン中に PF では 19 番挿入光源の更新作業が行われている。19 番直線部のリポルバー型アンジュレータは 1988 年に設置され、上下に 4 つずつの磁極列(A~D 面という)をもち、それを回転させることでギャップ変更だけで可能になる範囲よりも広い範囲の波長が利用可能になるという特徴があった。東大物性研のアンジュレータだったが、2014 年に物性研は KEK から撤退、接着部分が劣化して磁極が脱落するといった老朽化も激しく、近年は使用不可能な磁極面に対して脱落を防ぐためのカバーをつけた上で、B 面のみの利用に限って運用されていた。

新 19 番挿入光源を Fig. 2 に示す。APPLE II 型の可変偏光アンジュレータで、低エネルギー側は垂直偏向モードで約 200 eV、楕円偏光モードで約 100 eV、高エネルギー側は高次光で 2~2.5 keV までの利用が可能である(Fig. 3)。調整は単体の磁極に対する磁場測定結果を基に数値的に予め最適解を求めて磁極列を作るという方法[3]を使って、複数の偏光モードに対する同時最適化を行うという新手法で行われ、最終的な磁場測定で良好な結果が得られている。古い 19 番挿入光源に対してはリングトンネル内床面に H 鋼の梁を渡してその上に設置されているが、新挿入光源設置に際してその梁は廃止し、床下、地下ピットでの補強を行うこととなった。台車や重量物の運搬に対する障害が解消される。現在、古い挿入光源の撤去が完了し、真空ダクト[4]の準備中、9 月下旬に新挿入光源が設置される予定である。秋の運転では 11/9 より PF は立上げ開始、フリーチューニングとチューン補正が行われ、ユーザー運転時間に利用可能となる。

### 参考文献

- [1] K. Hirano *et al.*, “Beam Based Measurement of Injection Parameters at KEK-PF”, Proceedings of IPAC2018, Vancouver, May, 2018, THPMF042.
- [2] O. Tanaka *et al.*, “Impedance Evaluation of In-Vacuum Undulator at KEK Photon Factory”, Proceedings of IPAC2018, Vancouver, May, 2018, THPAK001.
- [3] K. Tsuchiya and T. Shioya, “Practical method using superposition of individual magnetic fields for initial arrangement of undulator magnets”, Rev. of Sci. Instrum., vol. 86 p.043305 (2015).
- [4] Y. Tanimoto *et al.*, “Design and manufacture of the NEG-coated beam duct for Undulator #19 at PF-ring”, in these proceedings, 第 15 回加速器学会年会, 2018, WEP114.



Figure 2: New insertion device for BL19.

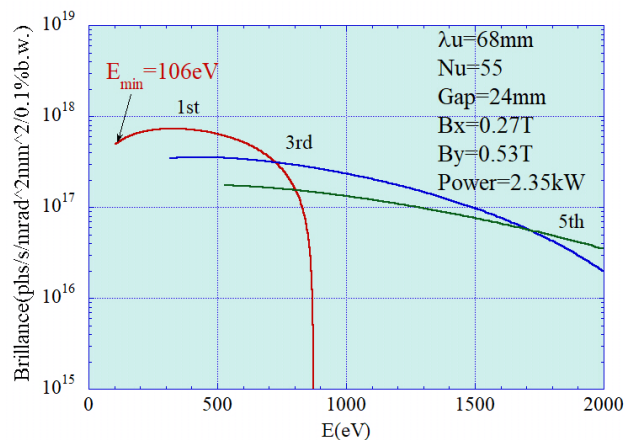


Figure 3: Brilliance of new ID#19.