

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

帯名 崇[#], 阿達 正浩, 上田 明, 内山 隆司, 江口 柊, 尾崎 俊幸, 影山 達也, 金 秀光, 小林 幸則,
齊藤 寛峻, 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, 本村 新, 山本 尚人,
山本 将博, 吉田 正人, 吉本 伸一, 渡邊 謙

Takashi Obina[#], Masahiro Adachi, Akira Ueda, Takashi Uchiyama, Shu Eguchi, Toshiyuki Ozaki,
Tatsuya Kageyama, Xiuguang Jin, Yukinori Kobayashi, Saito Hirotohi, 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,
Arata Motomura, Naoto Yamamoto, Masahiro Yamamoto, Masato Yoshida, Shinichi Yoshimoto, Ken Watanabe
Accelerator Laboratory, KEK, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

The High Energy Accelerator Research Organization (KEK) operates two synchrotron radiation experimental facilities: the 2.5 GeV PF ring and the 6.5 GeV PF Advanced Ring (PF-AR). In FY2022, the PF ring will continue to upgrade the beam orbit stabilization system and started to upgrade the low power RF (LLRF) system. In the PF-AR, various beam tunings are performed toward full-scale user operation at the instrument development test beamline (AR-TBL). In this paper, the present status of the PF ring and the PF-AR operation will be reported and presents a new concept of hybrid light source that combines the advantages of a superconducting linac and a storage ring.

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を中心に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 人を超えるユーザー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%の安定な運転を維持してきた。2022 年度の運転時間は 2021 年度とほぼ同じ時間を達成しており、これは例年の 2 割増に相当しているうえに故障率は 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、小型電源の更新と BPM 更新による軌道安定化システムの高度化が進行しているほか、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開始している。PF-AR では、南実験棟に

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

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ショニングを開始した。本年会では、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。また、次期光源として検討をすすめている超伝導加速空洞と蓄積リングを組み合わせた PF ハイブリッド光源(PF-HLS)について紹介する。

[#] takashi.obina@kek.jp

2. 運転の現状

2.1 2022年度の運転統計

Table 2 に 2009(平成 21)年度から 2022(令和 4)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。2022 年度の運転時間は、ここ数年の目標値であった 3000 時間の 2 割増である 3,600 時間を目標とした。これを実現すべく、年度当初リング運転時間 4128 時間(172 日)ユーザー運転時間 3616 時間で計画したが、実際のユーザー運転時間は 3590 時間と、わずかに目標に届かないものの概ね達成できたといえる。電気代の急激な上昇のため、場合によっては第3期のユーザー運転が中止となる可能性もあったものの、文部科学省による追加対策をうけてユーザー運転が実現できたことが大きく貢献している。

故障時間は昨年度と同程度の約 25.8 時間、故障率は約 0.7 %、平均故障間隔時間(MTBF)は約 144.6 時間で、昨年度に比べると少し悪化しているものの、いずれも良

好な値を維持できている。故障の内訳を調べてみると 2022 年度は電磁石関連が約 71.8 %を占めていた。これは第1期に電磁石の冷却水流量低下によるビームダンプが多発したこと、また、原因不明の軌道変動調査にも時間を割いたことが原因である。次いで制御・モニター関連のトラブルが約 16.7 %であり、老朽化の傾向が見える。RF 関連による故障率は 5.2 %と昨年度と同様に非常に低く、RF システムがほとんどトラブルなく安定に稼働したことが分かった。

Table 3 と Fig. 2 に PF-AR の運転統計を示す。令和 4 年度のユーザー運転時間は 2418 時間となり、昨年度とほぼ同程度の運転時間を維持できた。しかし、PF ユーザーと同様のユーザー運転 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。

故障時間は約 22 時間、故障率も 0.9 %で昨年度にくらべると少し悪化している。これは第1期には例年以上の急激な外気温の上昇により電源内冷却機能が追い付か

Table 2: Operation Statistics in PF Ring from FY2009 to 2022

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	5,032.0	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
2022	4,128.0	512.0	3,590.2	25.8	144.6

Table 3: Operation Statistics in PF-AR from FY2009 to 2022

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	312.0	2,111.3	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
2022	3,000.0	560.0	2,418.3	21.7	143.5

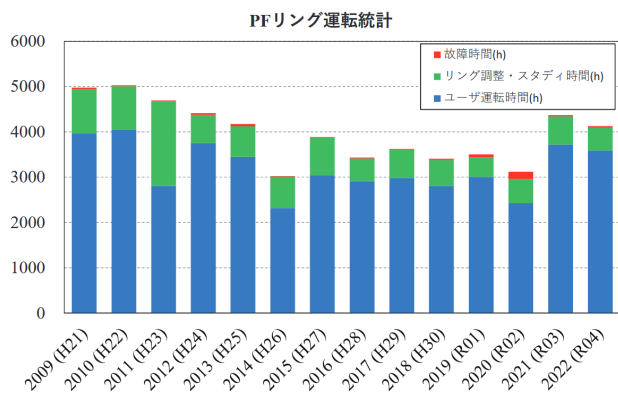


Figure 1: Bar graph of operation statistics in PF-Ring.

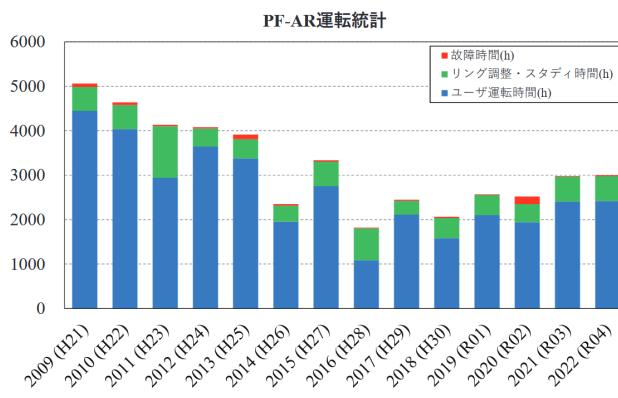


Figure 2: Bar graph of operation statistics in PF-AR.

なくなったため電源内部温度が上昇しインターロック発報したことによるビームダンプが多発したこと、入射キッカー電源の故障があったことに由来している。平均故障間隔(MTBF)は約 144 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 70 %が電磁石関連、22 %がビーム入射関連、7.5 %が RF 関連であった。

2.2 2023 年度の運転計画

Figure 1, 2 の青色バーに示すように、2009 年頃には両リングでおおよそ 4,000 時間のユーザー運転時間が確保できていたのに対して、2014 年以降では PF で 3,000 時間、PF-AR で 2,000 時間に留まっていた。これは主に運転経費削減と電気代の上昇が原因である。2021 年度になって予算増が認められ、ようやく PF リングで 3,600 時間、PF-AR で 2,400 時間まで回復できた。2023 年度も引き続き前年度と同様レベルの運転時間確保を目指す。

2.3 2022~2023 年度の主な故障への対応

2.3.1 PF リング水平方向軌道変動対策

昨年の施設現状報告[1]で報告したように、PF リングで水平方向の軌道変動が断続的に発生することがあった。変動の方向が水平方向に限定されることと、軌道フィードバックを高速化することによってユーザー運転への影響は最小限度に抑えられているものの、その原因追及を行った結果、B01 電磁石に水漏れの痕跡が発見された。写真を Fig. 3 に示す。軌道変動が B01 のシングルキックによって生じる軌道であること、他の 27 台の電磁石コイルには異常が見られないことから、このコイルが原因である可能性が高いと判断して 2023 年夏のシャットダウン期間中にコイルを予備電磁石のものと交換する予定である。

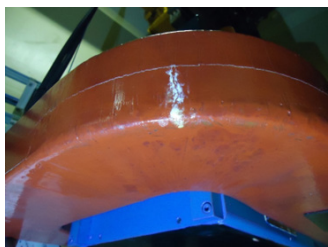


Figure 3: Traces of water leakage in B01 coil.

2.3.2 PF リングキッカー故障

2023 年 5 月 16 日にキッカー電源#3 (K3) の動作不良によりビームダンプが発生した。これまで K1-K3-K4 の 3 台で入射してきたが、急遽 K1-K2-K4 の 3 台で入射できるパラメータを計算した結果、K2 の極性切り替えで対応できることが判明したためリング内での作業を実施した。このときの設計バンプ軌道を Fig. 4 に示す。ビーム調整の結果、入射・蓄積することができたため、ユーザー運転を再開した。メーカーの調査により故障箇所は K3 充電用のサイラトロンとそのソケット部の損傷と判明した。ソケット部の調達に時間がかかるため、K3 の修理は夏期シャットダウン時とした。

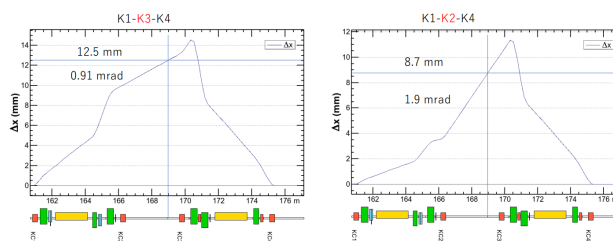


Figure 4: Example of orbit bump calculation. Left: Injection bump orbit when three conventional Kicker #1, #3, and #4. Right: three units of Kicker #1, #2, and #4. Several other patterns were also considered. In this example, the injection beam oscillation increases by about 3.8 mm and the required injection angle at septum 2 is 1 mrad larger, but the tracking simulation indicates that the beam can be stored in the ring.

2.3.3 気温上昇に関連した PF-AR トラブル

2022 年 6 月には急激に気温が上昇したことが原因と思われるトラブルが頻発した。いずれも PF-AR 西電源棟に設置されている 4 極電磁石電源で温度インターロックの他、出力過電流インターロック(後にメーターリレーの故障と判明)、トランス温度異常などが発生した。いずれも現場担当者により適切に対応するとともに、一部にはスポットクーラーで冷却するなど追加の対応でなんとか運転を継続することが出来た。このほかにも西電源棟にある RF 空洞の冷却水温度が上がりすぎてビーム不安定を誘発するなどの事象も発生した。いずれも根本的には老朽化のために機器が動作不良を起こしている場合が多く、適切なメンテナンスをおこなうとともに、機器更新に向けた予算獲得を目指している。

3. 既存施設の高度化、マシンスタディ、老朽化対策など

3.1 PF リング

ユーザー運転時の軌道安定度を向上することを目的として、小型バイポーラ電源の更新を進めている。これは 2021 年度から始まっている BPM 更新と合わせて高速デジタルリンクによる軌道補正を達成することが目標である。既存の小型電源は PF の高輝度化に合わせて 1998 年頃に製作されたもので老朽化が著しく故障が発生していたほか、制御系も外部 VME ボードからのアナログ電圧制御に限定されていたため、近年の技術更新に対応したデジタル電源に更新することが目的である。2022 年度から一部調達を始めており 2023 年度までに約 170 台の更新を目指している。

このほか、垂直超伝導ウィグラーについても老朽化が著しいことから更新に向けて検討を開始している。

高周波低電力系の更新も順調に進行している。これまでは多数のアナログモジュールによって構成されていた機器をデジタル (μ TCA.4 規格) の制御に更新するものである。詳細は本年会で報告される[2]のでそちらを参照していただきたい。2023 年秋からの導入を目指している。

PF リングのビーム輸送ライン (PF-BT) においては、Linac からの入射ビームパラメータを理解するためのマシンスタディが進行している。これまでリングへの入射は問題なく出来ていたもののビームのふるまいが理解できなかった部分があったため、まずは軌道計算に使用している計算機コード (SAD) に入力しているパラメータと、実際に設置されている機器の位置との差異を検証することから始まり、補正電磁石や Q 磁石の応答 (いわゆる K 値) をビーム応答によって検証し、磁場測定結果との整合性を確認した。PF-BT は建設以降に何度か改造されている部分もあったが一連のマシンスタディによって不確定性を排除できた。これらの軌道パラメータをもとに Q-Scan によるビームエミッタンス計測を行うとともに、PF-BT に設置されている複数のスクリーンモニタ画像からのエミッタンスを比較している。定期的にこれらのパラメータを取得することで長期的な Linac からのビーム変動を測定することが可能となった。あわせて、BT 下流部分でのビーム軌道を補正するためのレスポンス測定をおこない、自動的に軌道フィードバックをかけるシステムを構築した。これによってビーム調整後に PF リングへの入射効率が下がる頻度が減少しており、オペレータへの負担軽減につながっている。さらに、Linac との合同マシンスタディによってより上流でのエミッタンス計測と、今回確立した下流での測定との整合性を検証する試みも行っている。これら一連のマシンスタディの詳細は参考文献[3]を参照して頂きたい。

3.2 PF-AR

3.2.1 5.0 GeV トップアップ運転に向けた改造

PF-AR を 6.5 GeV で運転している場合には PF リングと PF-AR, KEKB HER, LER の 4 リング (陽電子ダンピングリングを含むと 5 リング) に対して Linac の 50 Hz 繰り返しパルスに同期した振り分け入射が達成されていたが[4]、PF-AR を 5.0 GeV で運転する際には Linac 第 3 スイッチヤードにある DC 電磁石の設定を変更する必要があったため、ある程度の切り替え時間を要していた。Figure 5 に機器配置を示す。近年の運転経費削減と電気代高騰に対応して PF-AR では 5.0 GeV での運転時間の割合が増えるようになったことや、各リングを独立して運転する際の利便性向上を目指して、5.0 GeV 運転時にも PF-AR トップアップ入射を可能とすることを旨として 2022 年度の夏に Phase1 改造が完了し、2023 年度より 5.0 GeV トップアップ運転の運用が開始されている。詳細は本年会でも個別の発表で報告しているのでそちらを参照していた



Figure 5: Electron beam transport lines for the PF-AR and the PF-Ring in Linac 3rd switch yard.

だきたい[5-7]。

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; AR-TBL) を PF-AR 南実験棟に設置した[8]。建設は 2020 年度から開始し、2021 年 9 月にビームラインの建設を完了した。10 月から蓄積ビームと内部標的の駆動試験、照射試験等を実施してビームライン側で GeV 級の電子を確認した。その後も放射光運転と内部ターゲット挿入とを共存する試用運転・マシン調整を行い、2023 年春の運転からは 6.5 GeV エネルギー運転期間での AR-TBL ユーザー運転を開始することが出来た。Figure 6 は調整中のビーム電流、ターゲット挿入位置、イベントレートの一例である。ターゲットの蓄積ビームに対する影響等の検討も本年会で報告されている[9]。

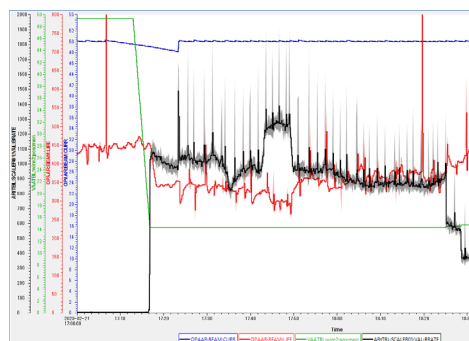


Figure 6: Trend graph of the stored current (blue: unit: mA), the position of the internal target from the beam center (green: unit: mm), the beam lifetime (red: unit: min), and the event rate (black: unit: Hz) observed at the beamline side during the period from 17:00 to 18:30 on February 21, 2023.

4. 次期光源に向けての研究開発

冒頭で述べたように PF リング、PF-AR ともに多くの放射光ユーザーに活用されている施設であり、稼働から約 40 年経過しているものの現在でも競争力のある極めて重要な施設である。しかしながら、これまで随時対策を講じているとはいえ、さらなる性能向上を達成するためには新しいコンセプトに基づく新たな放射光源を開発し建設することが必須であることは言を俟たない。

そこで我々は汎用性と先端性の両方を併せ持つ新たなコンセプトとして、超伝導線形加速器からの高品質ビームと、蓄積リングからのビームの両方を活用できる施設として「ハイブリッド光源 (PF-HLS)」を提案している。既に投稿論文[10]および加速器学会誌 (2022 年 7 月; Vol. 19, No. 2)[11]等で紹介しているので、詳細はそちらを参照して頂きたい。あわせて Web での情報公開も行っている[12]。Figure 7 に PF-HLS の概念図と典型的なビームパターン、ビーム軌道の例を示す。

プロジェクト全体の進め方としては「フォトンファクトリ計画推進委員会」[13]を設置して KEK 内外から広く検討と評価を受けながら進めている。また、KEK 内ではロードマップと Project Implementation Plan (PIP 2022) [14]に掲載される重要課題として位置付けられている。

本稿ではあくまでも暫定的なパラメータとしての光源スペックをいくつか紹介する。ハイブリッド光源を構成する蓄積リング部分は、多岐にわたる放射光ユーザーからの要望をカバーできることと長期にわたる学術研究の基盤となり、拡張性に優れることが求められる。そこで蓄積リングを 2.5 GeV - 5.0 GeV のエネルギー切り替えで運転することによって、建設と運転コストを抑制しながら広波長領域に対応する光源を実現する。リングの周長は約 750 m としてエミッタンスは 5.0 GeV 運転時に 1 nm.rad、2.5 GeV 運転時に 0.25 nm.rad である。長直線部に低エネルギー用と高エネルギー用の 2 台の挿入光源をタンデムに配置して 10 eV ~ 100 keV の広波長域の高輝度ビーム利用を可能とする。このときカバーできる放射光スペクトル領域を Fig. 8 に示す (Brilliance 絶対値はエミッタンスやオプティクス設計、挿入光源設計によって変わるため、あくまでも暫定的な参考値である)。

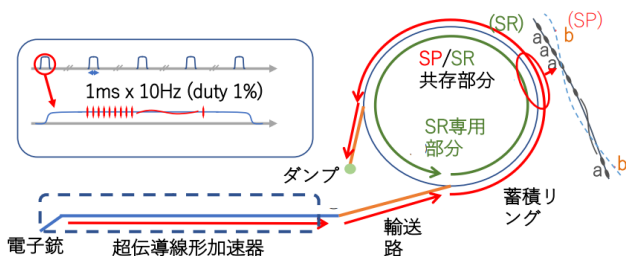


Figure 7: Conceptual diagram of hybrid (Linac/Ring) light source and typical beam patterns.

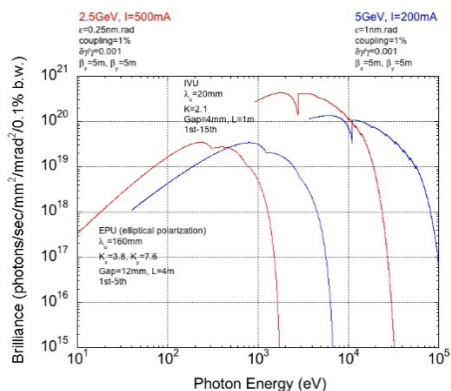


Figure 8: Synchrotron radiation spectra of PF-HLS based on tentative beam parameters.

蓄積リング・超伝導線形加速器ともに開発要素は多く、多岐にわたっている。昨今のエネルギー情勢を反映した省エネ設計も必須であり検討を進めている。超伝導線形加速器のパラメータは基本的には ILC(国際リニアコライダー)用の加速空洞をもとにしており、このスペックでも十分な成果が得られると考えているが、さらなる性能向上を目指して電子銃開発やビームローディング補償、パワーカップラなど検討すべき項目がある。今後も蓄積リング部分の詳細設計を優先しつつ、全体計画の実現に向けた研究開発を進めていく。

5. まとめ

2022 年度は老朽化にともなうトラブルは多くあったものの、スタッフによる迅速かつ適切な対応によってユーザーへの影響は最低限度に抑えることが出来た。今後も適切な保守を行うとともに、既存施設の改良を含めた研究開発を進めていく。また、次期光源に向けての研究開発を強く推進していく。

KEK 加速器第六系のメンバーは PF リング、PF-AR の 2 つの放射光源を担当しているほか、第五研究系(Linac)や応用超伝導加速器イノベーションセンター (iCASA) と共同でコンパクト ERL(cERL)や EUV-FEL 関連の研究開発を行っている。紙面の都合もあるためこれらの活動についてはそれぞれ別の発表を参照していただきたい。

参考文献

- [1] Y. Kobayashi *et al.*, "PRESENT STATUS OF PF RING AND PF-AR AT KEK", Proc. 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022), Online, Oct. 2022, pp. 1099-1103.
- [2] D. Naito *et al.*, "Progress report on the update of the low-level RF system at KEK-PF ring", PASJ2023, Chiba, Japan, Sep. 2023, THOB06.
- [3] Y. Shimosaki *et al.*, "Modification of simulation model for machine tuning at KEK PF-BT", PASJ2023, Chiba, Japan, Sep. 2023, TUP47.
- [4] M. Satoh, "Simultaneous Top-Up Injection into Five Rings at KEK Electron/Positron Injector Linac", 「加速器」Vol. 17, No. 3, (2020) p.169, https://doi.org/10.50868/pasj.17.3_169
- [5] N. Higashi *et al.*, "Commissioning and application to user-run of simultaneous top-up operation of PF and PF-AR in 5 GeV", PASJ2023, Chiba, Japan, Sep. 2023, WEOA6.
- [6] C. Mitsuda *et al.*, "Improvement of the beam transport line for realizing the top-up injection with 5 GeV beam energy in KEK PF-AR", PASJ2023, Chiba, Japan, Sep. 2023, TUP15.
- [7] S. Nagahashi *et al.*, "Installation of magnets for realizing the top-up injection with 5 GeV at the PF-AR", PASJ2023, Chiba, Japan, Sep. 2023, TUP43.
- [8] C. Mitsuda *et al.*, "Construction of the GeV-range test beamline at KEK PF-AR", Proc. PASJ2022, Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp.320-324.
- [9] H. Takaki *et al.*, "Effect of the GeV-range test beamline wire target on the stored and injected beams at KEK PF-AR (2)", PASJ2023, Chiba, Japan, Sep. 2023, WEP27.
- [10] K. Harada *et al.*, "Conceptual design of the Hybrid Ring with superconducting linac", J. Synchrotron Rad. (2022), 29, 118-124, <https://doi.org/10.1107/S1600577521012753>
- [11] K. Harada *et al.*, "Conceptual Design of the Hybrid Ring", 「加速器」Vol. 19, No. 2, (2022) p.62, https://doi.org/10.50868/pasj.19.2_62
- [12] <https://www2.kek.jp/imss/pf/pf-hls/>
- [13] <https://kds.kek.jp/event/40742/>
- [14] <https://www.kek.jp/ja/assessment/roadmap/>