

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, 下ヶ橋 秀典, 塩澤 真未, 塩屋 達郎, 篠原 智史, 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, 卞 抱元, 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, Hidenori Sagehashi, Mami Shiozawa, Tatsuro Shioya, Satoshi Shinohara, 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, Baoyuan Bian, 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 FY2023, the PF ring has been continued to upgrade the beam orbit stabilization system and completed the upgrade of the low power RF (LLRF) system. In the PF-AR, full-scale user operation at the instrument development test beamline (AR-TBL) has been started. 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、2.5 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% 台の安定な運転を維持してきた。2023 年度は線形加速器の加速管交換とそれともなうエージング・調整作業が予定されていたため、当初からの計画運転時間はここ 2 年に比べて減少している。運転期間に関しては、故障率 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 システムの更新が完了し

て 2023 年秋の運転からは新しいシステムでの運転を行っている。更新以降に大きな問題は起きていない。PF-AR では、南実験棟において測定器開発テストビームラインがフルユーザー運転に入っており、既に多くの実験課題が実施されている。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。

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
Beam Current	450 mA	50 mA (single)
Operation Mode	Top-Up	Top-Up
Number of ID	11	5

[#] takashi.obina@kek.jp

2. 運転の現状

2.1 2023 年度の運転統計

Table 2 に 2021 年度から 2023 年度まで 3 年間の PF リングの運転統計を示す。(これより前の期間である 2009 年～2020 年度の統計数値は昨年度の加速器学会年会での施設報告[1]に記載しているので参照して頂きたい)。Figure 1 は過去 15 年間のグラフである。近年では PF 3,600 時間、PF-AR 2,400 時間のユーザー運転時間を目標としてきたが、2023 年度は前年度から延期していた線形加速器の加速管更新作業時間を確保するため、夏期停止期間を例年より長くとることとなった。そのため例年より短い PF 約 3,100 時間、PF-AR 約 2,100 時間程度という実績になっている。

故障時間は前年度よりさらに少ない約 15.2 時間、故障率は約 0.5 %、平均故障間隔 (MTBF) は約 172.0 時間で、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 2023 年度は入射システム関連が約 35.9 %、制御モニター系が 33.2 % となりこの 2 つが大部分を占めている。これは第 1 期にキッカー電源故障が起きたことが主要因であり、モニター関係も同様に老朽化が進んでいることが要因であった。RF 関連による故障率は 4.2 % と前年度と同様に非常に低く、RF システムはほとんどトラブルなく安定に稼働したことが分かった。今後も各グループとも老朽化対策を推進していく。このとき、単なる故障品の交換ではなく、性能・機能向上をとらせた更新を心がけていく。

Table 2: Operation Statistics of the PF-Ring

Fiscal Year	2021	2022	2023
Total Operation Time [h]	4368	4128	3648
Scheduled user time [h]	3744	3616	3096
Number of failures	17	25	18
Total down time [h]	23.2	25.8	15.2
Failure rate	0.6	0.7	0.5
MTBF [h]	220.2	144.6	172.0
Mean down time [h]	1.4	1.0	0.8

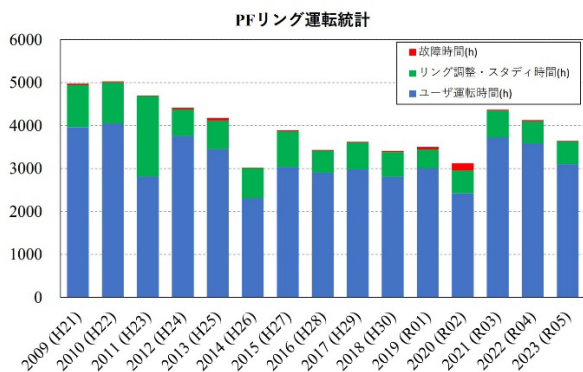


Figure 1: Bar graph of operation statistics in PF-Ring.

Table 3: Operation Statistics of the PF-AR

Fiscal Year	2021	2022	2023
Total Operation Time [h]	2796	3000	2760
Scheduled user time [h]	2416	2440	2184
Number of failures	10	17	16
Total down time [h]	11.3	21.7	30.3
Failure rate	0.5	0.9	1.4
MTBF [h]	241.6	143.5	136.5
Mean down time [h]	1.1	1.3	1.9

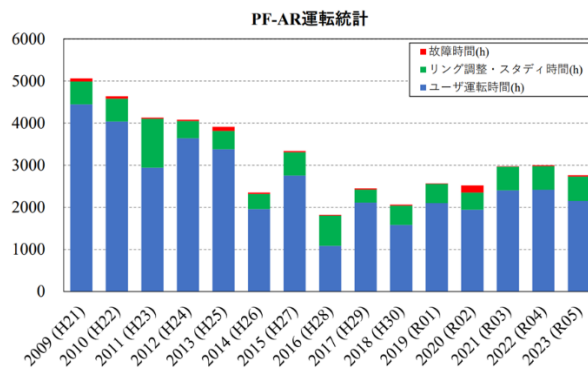


Figure 2: Bar graph of operation statistics in PF-AR.

Table 3 に PF-AR の過去 3 年間の運転統計数値を、Fig. 2 に過去 15 年間の運転統計をグラフにしたものを示す。令和 5 年度のユーザー運転時間は 2154 時間となり、PF リングと同様の理由で例年に比べると少ない状況であった。故障時間は約 30.3 時間、故障率も 1.4 % で昨年度にくらべると少し悪化している。これは蓄積電流増加に向けた入射調整に時間がかかったほか、セプト電磁石の冷却水トラブルやビームライン関係のトラブル、バンチ純化システムのトラブルも発生したこと起因している。MTBF は約 136 時間で故障回数は例年度と同じ程度であった。故障の内訳は約 62.5 % がビーム入射関連であった。

2.2 2024 年度の運転計画

Figure 1、2 の青色バーに示すように、2021 年度には運転時間が増加したものの、その後 2022、2023 年度はエネルギー価格の上昇や、前述した線形加速器の加速管交換もあって少し運転時間が減少した。しかしながら、2024 年度は当初目標である PF リングで 3,600 時間、PF-AR で 2,400 時間を達成する計画となっている。

2.3 2023～2024 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

これまでの施設現状報告[1,2]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。そこで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した。その後、秋の運転開始以降、同様の現象による軌道変動は全く発生しておらず、コイル交換が奏功したと考えている。取り外したコイルのインピーダンス測定を実施したところ正常なコイルと今回の異常を起こしたコイルで明らかに違う周波数応答を示すことが判明した。今後、原因の追究を進めるとともに、他のコイルでも同様のトラブルが起きないかの検討と対策を検討していきたい。詳細は[3]で報告する。

2.3.2 PF リング大型電源故障とその対応

2023年10月の運転直前に、これまで使用してきた3台の大型電源(QFF, SD, SFD)内部のオイルコンデンサについてオイル漏れの痕跡があることが判明した。メーカーによる外観検査、容量検査や安定度検査などを行った結果では直ちに電源故障や火災につながるような深刻な状況ではないと判断されるものの、電気安全を最優先として代替電源による運転を最優先とすべきと判断した。担当職員らの尽力により、PFリングで過去に使用していた保管電源・SuperKEKB電源グループからの貸与電源・産総研から譲渡された電源の3台を確保することができたためこれらを立ち上げて運転を実施できた。2024年夏期の長期メンテナンス期間まではこれらの代替電源でユーザー運転を実施し、問題は発生していない。

2.3.3 気温上昇に関連したトラブル

2024年5月24日にPF大型電磁石Q3電源トラブルのためビームダンプした。IGBTユニットのファンが動いていないことが判明したため、早期のユーザーラン再開を目指して電源筐体内部をスポットクーラーやファンにて外部から送風することに加えて冷却ユニットの電源裏側パネルを取り外すなど、応急措置を実施した。その後にはフィルターを設置するなどの追加対応を行っている。これらはいくまでも運転を継続するための応急措置であり、7月の運転停止後に本格的な対応を実施する。

2.3.4 RF クライストロン故障

2024年5月10日15:42にRF#3のクライストロン不調のためビームダンプが発生した。クライストロン内の真空悪化も起きており、深刻な状況と判断された。短時間で復旧することが困難だったため、RF3台運転に移行し、あわせて蓄積電流値を450mAから420mAまで下げることで運転を再開した。夏の運転停止までは3台運転を継続した。

当該クライストロンは定格180kW(E3774)で1995に導入したものであり、すでに総運転時間は10万時間を超える、比較的長寿命の管であった。2024年7月から予備品との交換作業に入った。これでPFでのクライストロン予備が無くなること、これから製造する場合でも長納期であることなどから早急に予備品製作に入ることが求められる。

2.3.5 PF-AR 大型電磁石電源の老朽化

2023年夏に偏向電磁石電源のゲート回路基板の出力不良が発生した。自然復旧する場合もあるなど原因追

及に時間を要したが、最終的に類似の電源を使用して J-PARC 関係者の協力のもと、予備基板の貸与を受けて交換対応を行うことができた。その後は問題無く運転出来ている。今後は予備基板作成なども含め対応していく。このほかにもQC3N四極電磁石電源の立ち上げ時にAC受電異常が発生しリセットが効かない状態であったが一日後に自然復旧するなどの現象も起きている。両方のトラブルともに、老朽化が深刻であることを示しており、現場対応にてなんとか運転を継続しているが根本的な更新、あるいは定期的な重点保守をおこなうなどの対策が早急に必要状況となっている。

2.3.6 PF リング ID02 下流部の放射線防護

PFリングの連続入射時に、ユーザーフロアのID01ビームラインハッチ内にて放射線レベル上昇する現象が起きていた。リング内のDose量測定結果とも合わせ、当該部分に鉛シールドを設置し、最も線量の高い部分での低減効果が確認できた。入射ビームが原因であることは判明しているため、ビーム輸送ラインでの調整やセプタム電磁石ダクトの改造など、シミュレーションと実ビーム調整、ビームロスやDose量計測など、多方面からビーム損失のメカニズム解明とロス低減につとめていく。

2.3.7 PF リング超伝導ウイグラーの励磁電源トラブル

2024年3月の運転停止後に、超伝導ウイグラーの励磁電源(300A電源)から水漏れが発生し、ウイグラーを消磁出来なくなるといふトラブルが発生した。通常は運転が停止した後は消磁して液体ヘリウムの供給も停止するところであるが、電源故障のため永久電流モードでの運転状態を継続するしかない状態であった。電源は1980年代の製品であり、すでにメーカーによるサポートは無い状態である。最終的には水漏れを起こした継手の内側にある段差を活用した特殊なアダプターを急遽製作することにした。製造には約2週間を要し、その後の試験にて問題なく通水できることが確認できた。

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

高周波低電力系の更新は順調に進行した。昨年度の年会でも一部報告したように、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)の制御システムに一新するものである。夏期停止期間でのハードウェア入れ替えと、ハイパワーテストによって準備を進め、その後、2023年秋からは実ビームによる立ち上げを実施した。導入にあたってはいくつかが軽微なトラブルはあったものの、全般的には極めて順調に遂行できたといえる。そのままユーザー運転に入り、現在に至るまで深刻なトラブルは起きていない。

また、新システムによってこれまでは不可能であったハイブリッド運転時の安定度上昇や、位相安定度の向上などの効果も得られている。また、デジタル化によってさまざまな診断が可能となったことも特筆すべきである。詳細は文献[4, 5]を参照して頂きたい。

詳細はここでは記載しないが、このほかにも既存施設

の高度化と老朽化対策を兼ねて様々なR&Dを行っている。セブタム更新計画やビームロスモニタ[6]、放射線モニター開発[7]、機械工学センターとの協同によるロボットによる遠隔監視システム[8]などである。真空関係ではNEG コーティング[9, 10, 11]をはじめとする真空の高度化や、イオンポンプ電源開発[12]、挿入光源関連では超伝導ウィグラー開発[13]なども実施している。これらは次章に述べる次期光源に向けた研究開発と不可分である。

パルス電源開発も着実に進行している。文献[14]に述べる高速半導体パルス電源の開発を実施しているほか、ここで開発した技術をもとにして Linac グループとの協同によりSKEKBの2バンチ入射時の軌道補正に活用されつつある。

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 への直接入射路が建設された当時、基本的なビームエネルギーは 6.5 GeV が想定されていた。一方で、近年では電気代の高騰が大きな問題となっており、PF-AR の運転時間を少しでも長く確保することを主眼として 5.0 GeV での運転時間を多く確保するようになった。このとき、PF-AR の蓄積リング側は両エネルギーに対応できるものの、ビーム輸送ラインの一部には PFリングと共用している部分があり、当初設計が 6.5 GeV であったことから 5.0 GeV 運転時に直流磁石の設定を変える必要があった。そのため、パルスごとの切り替えが出来ず、数分単位で PF リングと PF-AR の切り替えを実施するなどの対策を行ってきたが、マシンスタディやビーム調整時にはこの切り替え時間では不十分であること、年間の運転計画が PF と AR で独立にできないなどの問題があった。

そこで PF と AR の運転をビームエネルギーによらず自由に選択できることを目指して Linac 終端部分である第3スイッチヤードにある輸送ラインの改造を実施した[15]。

3.2.2 テストビームラインのユーザー運転開始

放射光源加速器の多角利用一環としてKEK素粒子原子核研究所の測定器開発室と連携協力し 2021年に GeV クラスのエネルギーレンジ測定器開発用テストビームラインが建設された。5.0 GeV または 6.5 GeV 電子加速器の真空容器内にインターナルターゲットを挿入してガンマ線を生成し、コンバータからの電子・陽電子対生成を利用する。放射光ユーザー実験と両立するため、蓄積ビームのごく一部(裾野部分)のみ衝突させる調整が必要となる。2023年にいよいよ開始されたユーザー利用の加速器運転の状況についても本年会にて報告する[16]。

3.2.3 既存光源での R&D

PF-AR でもユーザー運転の安定化および高度化に向けてエミッタンス低減オブティクス導入調整[17]や、AR の特徴である単バンチ大電流でのビームパラメータの測定などを実施している[18]。

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 とともに稼働から約 40 年経過しており、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は喫緊の課題である。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[19]および加速器学会誌(2022年7月; Vol.19, No.2)[20]等で鍵となるコンセプトを紹介している。現在の設計概略については昨年度の施設報告[1]でも述べているほか、最新情報は Web での公開も行っている[21]。2024年1月には Conceptual Design Report (CDR) ver1.0 を公開し、半年後の7月には ver1.1 を上記 Web サイトに公開しているので設計の詳細はそちらを参照頂きたい。Figure 3 にオブティクスを示す。5 m と 10 m の直線部を有し、2 m の単直線部がそれぞれの間にある構成とし、それぞれ等時セルとノーナルセルから成っている。10 m の長直線部にはアンジュレータをタンデムに配置し広い波長領域をカバーするビームラインを構成する。

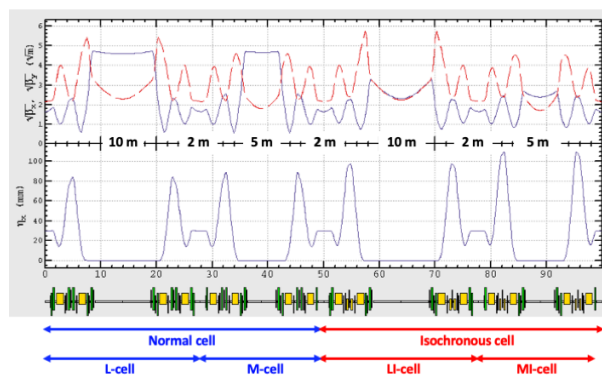


Figure 3: Optics of the four basic cell types.

PF-HLS のもう1つの特徴として、2.5 GeV と 5.0 GeV のエネルギー切り替えでの運転を想定していることが挙げられる。放射光蓄積リングとして、設計段階からこのような大きなエネルギー切り替えを想定する例は無く、大きな特徴であると同時に検討すべき項目も多い。特に 5.0 GeV で必要となる加速電圧に対応する空洞を設置すると 2.5 GeV 運転ではインピーダンス源となってビーム不安定を誘起してしまう。また、超伝導 Linac からの短パルスビームに対応するため等時セルが必須となり、モーメントコンパクションファクターも通常リングにくらべて小さくなるため特に注意が必要となる。非線形のビームダイナミクスおよびインピーダンス不安定に関する研究開発を中心に検討を進めている。前述の CDR および本年会での発表[22-25]を参照していただきたい。

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

PF リング、PF-AR とともに老朽化にともなう機器のトラブルは多くあったものの、幸いにも長期停止につながるような深刻な事象は起きていない。なおかつ、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ている。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] T. Obina *et al.*, “Present status of PF ring and PF-AR at KEK”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Aug. 2023, Funabashi, Japan, pp. 1088-1092.
- [2] 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), Oct. 2022, Online (Kyushu University), pp. 1099-1103.
- [3] N. Higashi *et al.*, “Orbit fluctuation in PF and study on coil of bending magnet”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, THP052, this meeting.
- [4] D. Naito *et al.*, “Performance evaluation and development of the new digital LLRF system at the KEK 2.5 GeV ring”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, WEP028, this meeting.
- [5] D. Naito *et al.*, “Commissioning and operation status of the LLRF system at the KEK Photon Factory 2.5 GeV ring”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, FROA01, this meeting.
- [6] H. Sagehashi *et al.*, “Development of non pulse counting type radiation detection circuit”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, THP009, this meeting.
- [7] M. Shiozawa *et al.*, “Development of radiation detector using Spresense camera module”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, THP012, this meeting.
- [8] A. Takasu *et al.*, “Development of a remote-controlled electric cart for measuring radiation intensity in the PF ring”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, FRP069, this meeting.
- [9] X. Jin *et al.*, “Development of high performance coating films for vacuum of synchrotron radiation accelerators”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, THOA01, this meeting.
- [10] X. Jin *et al.*, “Photon-stimulated desorption analysis for Ag plating films”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, WEP082, this meeting.
- [11] T. Nogami *et al.*, “Long-term trend of vacuum pressure at NEG-coated beam duct of PF-ring”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, FRP082, this meeting.
- [12] T. Michikawa *et al.*, “Development and progress of EPICS control ion pump power supply”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, WEP080, this meeting.
- [13] H. Saito *et al.*, “Study of coil geometry for a vertically polarized superconducting multipole wiggler”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, WEP033, this meeting.
- [14] S. Shinohara *et al.*, “High repetition tests of a prototype pulsed power supply using SiC-MOSFETs for a fast kicker system in KEK-PF”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, WEP060, this meeting.
- [15] S. Nagahashi *et al.*, “Installation of magnets for realizing the top-up injection with 5 GeV at the PF-AR on phase 1.5”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, WEP069, this meeting.
- [16] C. Mitsuda *et al.*, “Launch of the new GeV range test beamline for the development of an instrumentation technology in the KEK PF-AR”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, WEP029, this meeting.
- [17] N. Higashi *et al.*, “Application of the middle-low-emittance optics to PF-AR”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, WEP031, this meeting.
- [18] “Loss-factor measurement of the PF-AR by means of a dependence of beam-loading power on the beam current”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, WEP086, this meeting.
- [19] 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>
- [20] 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
- [21] <https://www2.kek.jp/imss/pf/pf-hls/>
- [22] N. Nakamura *et al.*, “Impedance analysis of NEG-coated vacuum pipes and its application to the PF-HLS ring”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, THP079, this meeting.
- [23] N. Nakamura *et al.*, “Analytical study of transverse beam instabilities in a storage ring with a very low momentum compaction factor”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, THP080, this meeting.
- [24] T. Olga, *et al.*, “Impedance evaluation of vacuum duct for insertion device of PF-HLS ring”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, THP083, this meeting.

PASJ2024 WTSP10

- [25] Y. Shimosaki, *et al.*, “Optimization of sextupole magnetic fields for KEK future light source”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 2024, Yamagata, Japan, WEP026, this meeting.