

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[#], 阿達正浩, 上田明, 内山隆司, 江口 柊, 尾崎俊幸, 小野正明,
帯名崇, 影山達也, 加藤龍好, 金 秀光, 田中オリガ, 坂井 浩, 坂中章悟, 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, 高木宏之, 高橋 毅,
多田野幹人, 谷本育律, 田原俊央, 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, 本田洋介, 丸塚勝美, 満田史織,
三増俊広, 宮内洋司, 山本尚人, 山本将博, 吉田正人, 吉本伸一, 渡邊 謙
Yukinori Kobayashi [#], Masahiro Adachi, Akira Ueda, Takashi Uchiyama, Shu Eguchi,
Toshiyuki Ozaki, Masaharu Ono, Takashi Obina, Tatsuya Kageyama, Ryukou Kato, Xiuguang Jin,
Olga Tanaka, Hiroshi Sakai, Shogo Sakanaka, Hiroyuki Sasaki, Masayuki Sato,
Yoshihiro Sato, Hidenori Sagehashi, Tatsuro Shioya, Miho Shimada, Ryota Takai, Hiroyuki Takaki,
Takeshi Takahashi, Mikito Tadano, Yasunori Tanimoto, Toshio Tahara, Kimichika Tsuchiya, Daichi Naito,
Shinya Nagahashi, Norio Nakamura, Kazuyuki Nigorikawa, Takashi Nogami, Kaiichi Haga,
Kentaro Harada, Nao Higashi, Tohru Honda, Yosuke Honda, Katsumi Marutsuka, Chikaori Mitsuda,
Tohihiro Mimashi, Hiroshi Miyauchi, Naoto Yamamoto, Masahiro Yamamoto, Masato Yoshida,
Shinichi Yoshimoto, Ken Watanabe
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 38 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などの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、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。あとは超伝導垂直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、フルエネルギー入射を目指した直接入射路が完成[2]、さらに PF リングと同時にトップアップモードでユーザ運転することも実現した。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が行われ、ユーザにより安定なビームを供給し続けている。しかしながら、両リングともに建設からおおよそ 40 年経過しているため、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おり、年々深刻度が増している。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 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	60 mA
Operation mode	Top-up, Decay	Top-Up, Decay
Number of insertion devices	11	5

2. 運転の現状

2.1 2019 年度の運転統計

Table 2 に 2009 年度から 2019 年度までの PF リングの

[#] yukinori.kobayashi@kek.jp

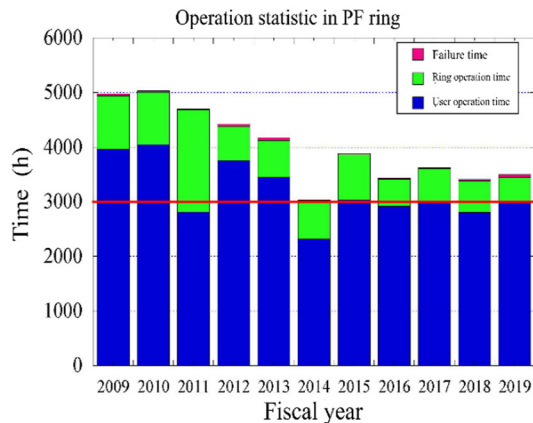


Figure 1: Operation statistics in PF ring from FY2009 to FY2019.

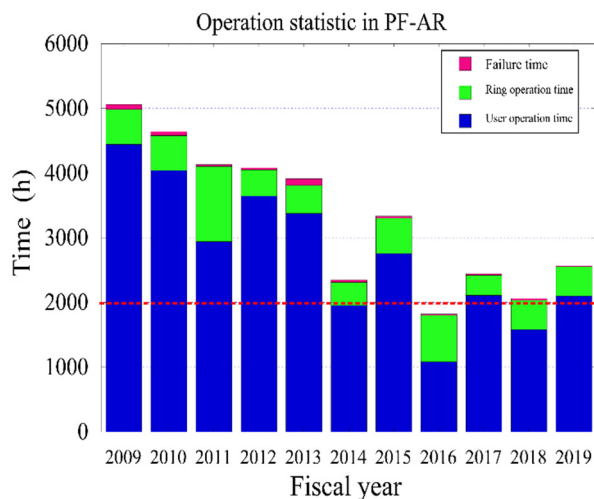


Figure 2: Bar graph of operation statistics in PF-AR from FY2009 to FY2019.

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。2019 年度のユーザ運転時間は 3004.1 時間となり、かろうじて 3000 時間を確保できた。故障時間は昨年より増加して約 60 時間、故障率は 2%程度、平均故障間隔時間(MTBF: mean time between failure)も 150 時間程度と、例年に比べると比較的故障が多かった年度となった。故障の内訳は、2019 年度も昨年度と同じく電磁石電源の故障によるトラブルが約 70%であったが、RF に起因するトラブルの割合は半分となり、15%程度となった。PFリングにおいては電磁石電源の老朽化がじわじわと進んでいると推察される。

Table 3 と Fig. 2 に PF-AR の運転統計を示す。2019 年度のユーザ運転時間は 2099.7 時間となり、昨年度に比べて約 600 時間増加した。これは、PF-AR において運転時間の 50%に対して、省エネルギー 5 GeV 運転を導入した結果である。しかしながら、PF リングと同様のユーザ運転 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。故障率は例年より少なく 0.6%程度、平均故障間隔(MTBF)は 264.0 時間と過去最高の数値であった。故障の内訳は、RF に起因するトラブルが約 70%、冷却

水関連のトラブルが約 14%であったが、ダストトラップによる再入射や入射機器によるトラブルが減少した。運転関係では、昨年度から始まった PF リングと PF-AR の入射が、高速切り替えによって互いの入射を妨げずに行える同時トップアップ運転が確立した。

Table 2: Operation Statistics in PF Ring from FY2009 to 2019

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	5,037.0	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	2910.7	17.3	162.7
2017	3,624.0	624.4	2983.0	16.6	214.3
2018	3,408.0	576.0	2803.6	28.4	166.6
2019	3,504.0	440.0	3004.1	59.9	153.2

Table 3: Operation Statistics in PF-AR from FY2009 to 2019

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	312.3	2,111.0	24.7	38.8
2018	2,064.0	456.0	1581.6	26.4	64.3
2019	2568.0	456.0	2099.7	12.3	264.0

2.2 PF リングと PF-AR 同時トップアップ運転

Figure 3 に、PF-AR 6.5 GeV 運転(上図)と PF リング 2.5 GeV 運転(下図: マルチバンチモード)における 2019 年 11 月 18 日 0:00~1:00 までの 1 時間の蓄積電流値の推移を示す。PF-AR が 6.5 GeV 運転の時は、PF リングと PF-AR の入射路にある 1 台の共通偏向電磁石の電流値

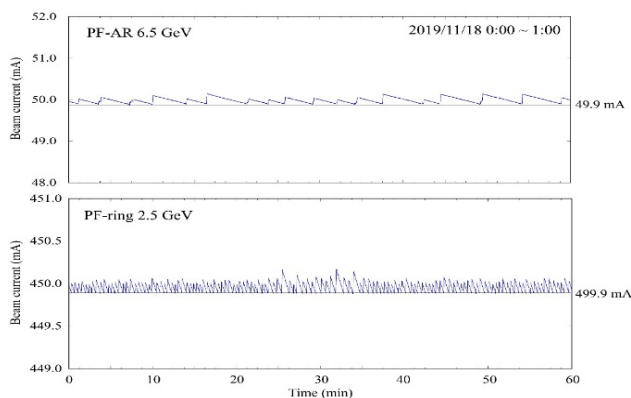


Figure 3: The stored beam current for 1 hour from 0:00 to 1:00 on November 18, 2019 in PF-AR 6.5 GeV operation (upper figure) and PF ring 2.5 GeV operation (lower figure: multi-bunch mode) are shown.

を固定にすることができ、2 リングの入射ビームの切り替えは入射器の電子銃で切り替えるだけでよく、最速 50 Hz (20 ミリ秒)で行うことが可能である。そのため、図に示すように、PF-AR と PF リングのビーム入射は互いに停止することなく随時行うことができ、蓄積電流値が約 0.1 mA 減衰した時点で積み上げ入射 (通常は 1 Hz の繰り返しで入射する)を行い、それぞれ概ね 450.0 mA ± 0.1 mA、50.0 ± 0.1 mA を維持してユーザ運転を実施している。

一方、PF-AR のビームエネルギーを 5.0 GeV に下げ、省エネルギー運転 (約 6 割の電気代となる)を行う場合は、Fig. 4 のようになる。図は、PF-AR 5.0 GeV 運転 (上図)と PF リング 2.5 GeV 運転 (下図: マルチバンチモード)における 2019 年 10 月 29 日 0:00~1:00 までの 1 時間の蓄積電流値の推移である。PF-AR を 5.0 GeV で運転する場合、入射路最上流にあるパルス偏向電磁石と 1 台の直流型共通偏向電磁石の電流値をそれぞれのエネルギーに合わせた電流値に切り替えを行わなければならない。パルス電磁石の切り替えは高速で可能であるが、直流型電磁石の切り替えにはおよそ 8 秒程度の時間を要する。そのため PF-AR の電流値に合わせて入射している時間、PF リングの方は入射を中断せざるを得なくなる。この条件の下、2019 年秋の運転では、PF-AR を 90 秒、PF リングを 150 秒、切り替え後は約 8 秒の待ち時間を見て、自動切り替えを行うことにした。Figure 4 で参照されるように、この取り決めによりビーム入射の切り替えは概ね順調に実施することができ、それぞれ 450.0 mA - 0.6 mA + 0.1 mA、50.0 mA - 0.6 mA + 0.1 mA を維持して、ユーザ運転を実施することができた。

PF-AR 5.0 GeV 運転時でも 6.5 GeV 運転時と同様に高速で切り替えることを可能にするには、共通偏向電磁石を直流型電磁石からパルス電磁石に交換するなどいくつかアイデアはある。しかし、いずれにしても交換に必要な予算と改造期間がかかることから、しばらくは上述した取り決めによる自動切り替えで対応していくことになる。

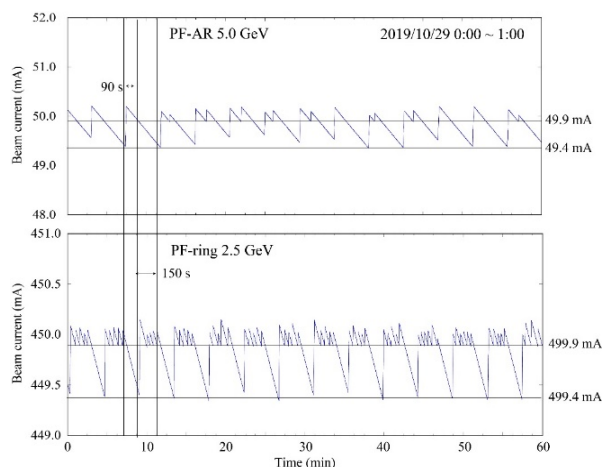


Figure 4: The stored beam current for 1 hour from 0:00 to 1:00 on October 29, 2019 in PF-AR 5.0 GeV operation (upper figure) and PF ring 2.5 GeV operation (lower figure: multi-bunch mode) are shown.

3. 老朽化対策の現状

3.1 PF-AR 加速空洞の高次モード減衰用ケーブルの更新

PF-AR では、6 台の APS (Alternating Periodic Structure) 型加速空洞を用いてビームを加速している。ちなみに APS 構造とは、高エネルギー物理学研究所第 2 代所長の故西川哲治先生が考案された加速構造である[3]。PF-AR では、TRISTAN 計画の加速空洞として 1985 年頃に開発された APS 型加速空洞[4]を現在でも現役で使用している。

PF-AR の加速空洞では、各加速セル (空洞当たり 11 個ある) に高次モード結合器 (HOM カップラー)[5]という一種のアンテナが取り付けられていて、ビームが空洞内に誘起する余分な電磁場 (Higher Order Mode; HOM) を引き出し、ビーム不安定性を起し難くしてある。高次モード結合器から引き出された電磁波は、同軸ケーブルを通してダミーロードに導かれ、そこで消費される。

PF-AR では 2017 年 2 月に直接入射路が完成し、フルエネルギー (6.5 GeV) でのビーム入射を開始した。2018 年 11 月からは、蓄積電流を一定に保つトップアップ入射を開始した。これらによりビーム電流を高い値 (50 ~ 55 mA 程度) に維持できるようになり、放射光の平均強度が大幅に向上した。一方で、蓄積電流が向上したのと同時期の 2018 年 5 月頃から、上記の高次モード引き出し用ケーブル (HOM ケーブル) が発熱するトラブルが急増した。2018 年 5 月~2019 年 6 月の期間に、ユーザ運転を中断して HOM ケーブルまたはその周辺機器を交換した事例が 4 件起きている。取り外した HOM ケーブルを観察すると、ケーブルのポリエチレン絶縁体が黒色に変色し、溶けている事例もあった。(なお、HOM ケーブルの温度が上昇した場合には、温度スイッチにより加速用高周波が停止されるため、火災に至る事はない)。

この HOM ケーブルの発熱トラブルの原因は、ビーム電流の向上に伴って高次モード電力が増加したことに加えて、HOM ケーブル等に使われているポリエチレン絶縁体が劣化したことが原因と考えられる。HOM ケーブルは前回更新してから 10 年以上が経過している。その間 PF-AR の偏向電磁石から放出される放射光の散乱 X 線に晒され続け、劣化していると推察された。このため、2019 年夏の停止期間中に HOM ケーブル等の更新を行った。

HOM ケーブル等の更新では、放射線により劣化していると考えられるポリエチレン部品を全て交換した。具体的には、1) 70 台の 3 kW ダミーロードを工場に運びオーバーホール、2) 70 台の HOM カップラーに使われているポリエチレン絶縁体を交換、3) 70 本の HOM ケーブルを更新、を実施した。また、HOM ケーブルの温度モニターに用いているデータロガーも更新し、温度モニターも 70 点を増設した。作業工程としては、まずダミーロードを取り外し、工場に運んでオーバーホールした。ダミーロードの保守中に HOM カップラーの点検および部品交換を、真空リークを起こさないよう注意して行った。ダミーロードの保守が完了した後、それらを加速器トンネル内に再設置し、その後新しい HOM ケーブルを設置した。HOM ケーブルは硬いうえに比較的短い(長さ約 80 cm)ため、設置場所に合わせて形状を微調整する必要があり、1 本設置するのに 1 時間程度かかった。HOM ケーブルの設置が完了した後、温度スイッチ(計 280 個)、温度センサー(計 140 本)の取り付けを行い、温度インターロック等の動作確認を行った。これらの作業を PF-AR が停止する 6 月下旬から 10 月下旬までの約 4 ヶ月間で完了する必要があり、工期を短縮するための様々な工夫をした。9 月末で全ての HOM ケーブルの取り付けが完了し、10 月 23 日からの PF-AR の運転再開に向け、仕上げの作業を急ピッチ実施した。この HOM ケーブル更新等により、HOM ケーブルが発熱するトラブルを回避でき、PF-AR の安定な運転に貢献できたと考えている。詳細については、本加速器学会ポスター発表(WEPP30)で報告される。

3.2 PF リングにおける入射パルスセプタム 2 の更新について

PFリングでは、2020年夏の加速器停止期間を利用して、入射部パルスセプタム2の更新に伴う入射部改造を実施する。リング入射部には2台の真空封止パルスセプタムが設置されており、パルスセプタム2(Sep2)は入射点に直近(入射路最下流)のセプタム電磁石である。この電磁石は、PFリング直線部増強改造(2005年)時に、磁場強度の増強が行われている。ただし、真空容器と水冷配管は1988年から使用していたものの再利用で、長年の運用による経年劣化によって、2015年4月にSep2真空容器内の水冷配管から漏水があり、ユーザ運転が中断した。液体リーク補修材による応急処置により、ユーザ運

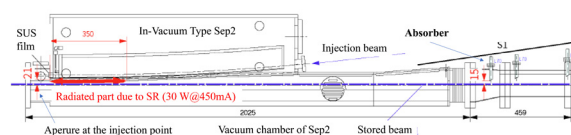


Figure 5: Layout of the pulsed septum magnet 2 and other components in the injection point of the PF ring before the replacement of the magnet.

転を継続したものの、断続的にリークが発生していた。その都度、補修材の注入を行っていたが、この処置の頻度が増加傾向にあったため、2017年には水冷配管の閉止措置を取ることにした。冷却水を止める処置に伴い、蓄積リングからの放射光の入熱による温度上昇を防ぐために、放射光を遮るアブゾーバーを入射点上流の蓄積リング側に蓄積ビームの軌道中心から15 mmのところまで挿入する対策を行った(Fig. 5)。その結果、ユーザ運転の継続性は確保されたものの、アブゾーバーで入射ビームの一部が損失する結果となり、入射効率は30%以下にまで

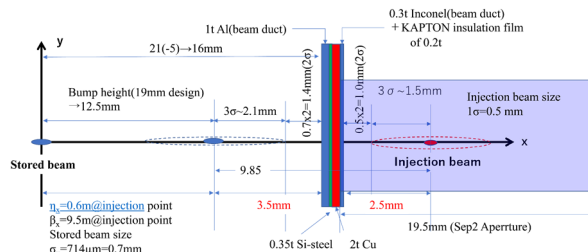


Figure 6: New geometrical position between the injection and the stored beam at the injection point of PF ring.

悪化した。これは安定した放射光供給の弊害となっていて、改善が急務であった。

この改善策として、以下に述べる2つの方法をとることとした。第一は、Sep2を真空外セプタムとし、放熱性能を含む冷却性能を改善し、今後の保守性・運用性の向上を図ることである。これにより追加的措置であったアブゾーバーを廃止することが可能となる。第二の改善策は、入射点パラメータの見直しを行い、入射点をリング内最小物理口径とする設計に変更することである(Fig. 6)。これによって、蓄積ビームと入射ビームとの相対距離を13~15 mmから9.85 mmまで減らすことができ、入射ビームの損失を低減できると期待される。また、入射点蓄積ビームダクトの口径を21 mmから16 mmまで縮小することにもつながり、下流側の既存の片側45 mm口径の蓄積リングダクトは入射ビームダクトと蓄積ビームダクトを完全に包含する設計となる。これら2つの改善策により、現状の入射効率は30%から80%程度(目標90%)まで増加することが見込まれる。また、入射ビームと蓄積ビームの近接化に伴い、入射バンプの高さを6 mm程度低くできることにより、バンプ電磁石励磁時に生ずる蓄積ビームの水平振動の緩和にもつながることも期待される。

Figure 7に、入射部改造後の入射パルスセプタム2の周辺の機器の配置図を示す。入射部の改造においては、いくつかの新たな試みが採用されている。1) セプタム磁

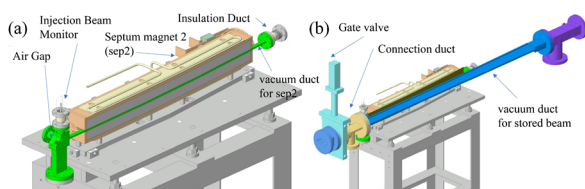


Figure 7: (a) Schematic drawing of the replaced pulsed septum magnet 2 with the beam duct for the injected beam, (b) the connection between the magnets and the beam duct for the stored beam.

石ギャップを縮小し磁場強度の増強を行い、0.3 tのインコネル718の薄肉ダクトの採用で渦電流による磁場遮蔽を低減しながら同時に構造強度も確保し、既存電源の再利用を図る。2) 薄肉ダクトで生じる渦電流ループの広範囲に広がる弊害をなくすため、磁石下流側蓄積ビームダクトとの合流点にてエアギャップを設け、上流側にはセラミックスの絶縁管を設置する。エアギャップの上下流はギャップを挟んで0.2 t SUS箔で対面させ、真空系を輸送路と蓄積リングで隔離し真空作業の保守性の向上を図る。3) エアギャップ手前の入射ビームダクトには入射ビームの精密な監視手段として、入射ビームダクト内壁0.85 mmまで近接させる駆動挿入のYAGスクリーンモニター設置し、相補的なシステムとしてエアギャップに対面するSUS箔を45度に傾け利用するリアルタイムOTRモニターの導入を図る。4) セプタム壁への放射光入熱を緩和するため、蓄積ビームダクトのセプタム壁側の壁面は入射点で薄肉化されているものの上流に向かうに従い構造強度を増すように厚肉化し、さらにSep1との空いたスペースにテーパ状にアパーチャーを広げることで放射光をダクト壁面全体で受け止める工夫を施す。その放熱のために蓄積ビームダクトはアルミダクトで製作され、徐熱のため水冷配管が設置される。この構造的工夫は上流側アプゾーバーの挿入度を蓄積ビーム軌道から37 mmまで後退させることにつながり入射効率改善に貢献すると期待される。

現在、改造更新作業に関しては、多少の遅れはあるものの、概ね順調に進行している。

4. まとめ

2019年度のユーザ運転時間は、PFリングでは3000時間をわずかに超え、PF-ARも5 GeV省エネルギー運転の導入で、2000時間を上回った。

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。昨年同様、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。

老朽化対策として、2019年度はPF-AR加速空洞の高次モード減衰用ケーブルの更新を実施した。2020年度はPFリングにおける入射パルスセプタム2の更新作業が現在進行中である。

今後10年程度を見据えて、これまでと同様に安定な

放射光実験が継続的に実施できるように、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継続して要求を行っていく。

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] T. Nishikawa, S. Giordano, and D. Carter, Dispersion relation and frequency characteristics of Alternating Periodic Structure for Linear Accelerators, Rev. Sci. Instrum. **37**, 652 (1966).
- [4] or example, T. Higo, Y. Yamazaki, T. Kageyama, M. Akemoto, H. Mizuno, and K. Takata, Development of an APS cavity for TRISTAN Main Ring, IEEE Trans. on Nucl. Sci. **NS-32** (1985) 2834.
- [5] Y. Morozumi, T. Higo, and Y. Yamazaki, Higher order mode damper with self-cooled coupler, Part. Accel. **29**, 85 (1990).