

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^{#,A)}, 浅岡聖二^{A)}, 阿達正浩^{A)}, 飯田直子^{A)}, 上田明^{A)}, 内山隆司^{A)}, 海老原清一^{A)}, 尾崎俊幸^{A)}, 小野正明^{A)}, 帯名崇^{A)}, 影山達也^{A)}, 加藤龍好^{A)}, 菊池光男^{A)}, 金 秀光^{A)}, 久米達哉^{B)}, 小玉恒太^{A)}, 田中オリガ^{A)}, 坂井 浩^{A)}, 坂中章悟^{A)}, 坂本 裕^{A)}, 佐々木洋征^{A)}, 佐藤政行^{A)}, 佐藤佳裕^{A)}, 下ヶ橋秀典^{A)}, 塩屋達郎^{A)}, 島田美帆^{A)}, 高井良太^{A)}, 鷹崎誠治^{A)}, 高木宏之^{A)}, 高橋毅^{A)}, 多田野幹人^{A)}, 谷本育律^{A)}, 田原俊央^{A)}, 多和田正文^{A)}, 土屋公央^{A)}, 長橋進也^{A)}, 中村典雄^{A)}, 濁川和幸^{A)}, 野上隆史^{A)}, 芳賀開一^{A)}, 原田健太郎^{A)}, 本田融^{A)}, 本田洋介^{A)}, 丸塚勝美^{A)}, 三増俊広^{A)}, 宮内洋司^{A)}, 宮島司^{A)}, 山本尚人^{A)}, 山本将博^{A)}, 吉田正人^{A)}, 吉本伸一^{A)}, 渡邊 謙^{A)}

Yukinori Kobayashi^{#,A)}, Seiji Asaoka^{A)}, Masahiro Adachi^{A)}, Naoko Iida^{A)}, Akira Ueda^{A)}, Takashi Uchiyama^{A)}, Kiyokazu Ebihara^{A)}, Toshiyuki Ozaki^{A)}, Masaharu Ono^{A)}, Takashi Obina^{A)}, Tatsuya Kageyama^{A)}, Ryukou Kato^{A)}, Mitsuo Kikuchi^{A)}, Xiuguang Jin^{A)}, Tatsuya Kume^{B)}, Kota Kodama^{A)}, Olga Tanaka^{A)}, Hiroshi Sakai^{A)}, Syogo Sakanaka^{A)}, Hiroshi Sakamoto^{A)}, Hiroyuki Sasaki^{A)}, Masayuki Sato^{A)}, Yoshihiro Sato^{A)}, Hidenori Sagehashi^{A)}, Tatsuro Shioya^{A)}, Miho Shimada^{A)}, Ryota Takai^{A)}, Seiji Takasaki^{A)}, Hiroyuki Takaki^{A)}, Takeshi Takahashi^{A)}, Mikito Tadano^{A)}, Yasunori Tanimoto^{A)}, Toshio Tahara^{A)}, Masafumi Tawada^{A)}, Kimichika Tsuchiya^{A)}, Shinya Nagahashi^{A)}, Norio Nakamura^{A)}, Kazuyuki Nigorikawa^{A)}, Takashi Nogami^{A)}, Kaiichi Haga^{A)}, Kentaro Harada^{A)}, Toru Honda^{A)}, Yosuke Honda^{A)}, Katsumi Marutsuka^{A)}, Tohihiro Mimashi^{A)}, Hiroshi Miyauchi^{A)}, Tsukasa Miyajima^{A)}, Naoto Yamamoto^{A)}, Masahiro Yamamoto^{A)}, Masato Yoshida^{A)}, Shinichi Yoshimoto^{A)}, Ken Watanabe^{A)}

^{A)} Accelerator Laboratory, KEK

^{B)} Applied Research 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 decrepitude of several machine components, are 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 33 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し、さらにフルエネルギー入射を目指した直接入射路増強計画が進行している [1]。しかしながら、改造は何度か行われているものの、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、トラブ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 の運転状況と老朽化の状況について報告する。

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 1 に平成 21 年度から 27 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 Figure 1 に示す。平成 27 年度のユーザ運転時間は、平成 26 年度の大幅な減少からやや回復し

[#] yukinori.kobayashi@kek.jp

て3000時間程度となった。しかし、震災前の平成21年度当時に比べれば、1000時間程度の減少である。故障時間に関しては微増であるが、故障率としては微減であった。平成27年度の運転全般では、BL#13、#28用のアンジュレータを更新して稼働を開始することがあげられる。大きなトラブルは無く、ユーザに新アンジュレータからの放射光が供給されている。しかし、超伝導垂直ウィグラーにおける断熱真空のトラブルで、ユーザ運転にビームを供給できない期間があった。また、冬期運転からスーパーKEKBの運転再開に伴い、PFリングではトップアップ運転（Top-up mode）をしばらく中断し、蓄積モード（Decay mode）での運転となった。

Table 3とFigure 2にPF-ARの運転統計を示す。PF-ARもPFリングと同様の傾向である。PF-ARでは、夏の停止期間中にビーム振動抑制用キッカーを更新した。この結果、以前大電流時に生じていたキッカーでの発熱や真空悪化が抑制された。秋期運転から、入射エネルギーを3GeVから2.85GeVに変更して運転を行った。これは、入射器でクライストロンや加速管等でトラブルが発生しても、安定な入射エネルギーが確保できるようにと対処したものである。入射・加速での好不調はあったものの概ね初期蓄積電流値50mA以上は維持してユーザ運転を開始でき、再入射を必要とする寿命急落はわずか1回しか発生しなかった。PF-AR直接入射路の改造へ向けた準備作業はすすんでいる。H28年度7月からリングを含めた入射路改造に入り、新入射路トンネルへの電磁石・真空ダクト・各種モニタの設置、運転再開へ向けた安全系の構築を行う予定である。改造完成後のビームコミッショニングは、H29年1月を見込んでいる。

Table 2: Operation Statistics in PF Ring from FY2009 to 2015

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

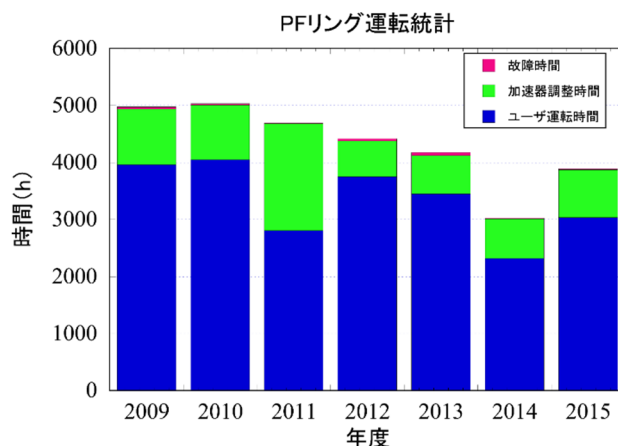


Figure 1: Bar graph of operation statistics in PF ring from FY2009 to 2015.

Table 3: Operation Statistics in PF-AR from FY2009 to 2015

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

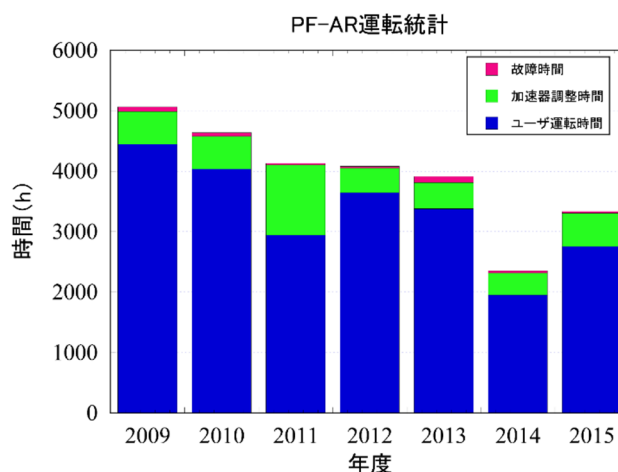


Figure 2: Bar graph of operation statistics in PF-AR from FY2009 to 2015.

3. 老朽化の現状

3.1 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る。今年 1 月の立ち上げ前に、断熱真空の悪化が見られ応急措置を施して運転に入ったものの、その後も真空悪化の傾向が続き、液体ヘリウムの消費量も通常の 2 倍以上に増加した。そのまま運転は継続したが、この状態で夏まで運転するのは厳しいと判断した。そこで、3 月 14 日の運転終了後にすぐに昇温して、4 月に室温になったところで、液体シール剤を用いてリーク止め作業を試みた。Figure 3 に作業の様子、Figure 4 に作業時の真空の変化のグラフを示す。シール剤を注入開始した直後は徐々に悪化したが、400 cc ほど入れたところで真空が下がり始め、翌日には真空度が 1 桁程度改善した。しかし、リークは完全には止まっておらず、リーク対処前の $5 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ からは大幅に減少しているが、 $3.1 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ のリークがある。

今回は応急的な処置であったが、この真空度が維持できればなんとか夏まで持ちこたえるのではないかと予想して、連休明け 5 月 10 日から冷却を試みた。冷却は順調に進み、約 2 週間後の 5 月 26 日マシスタディ時にリング内でウィグラー周辺の種々の調査を行った結果、特に異常は認められなかった。



Figure 3: Photograph of the work for a leakage of insulation vacuum chamber in superconducting vertical wiggler.

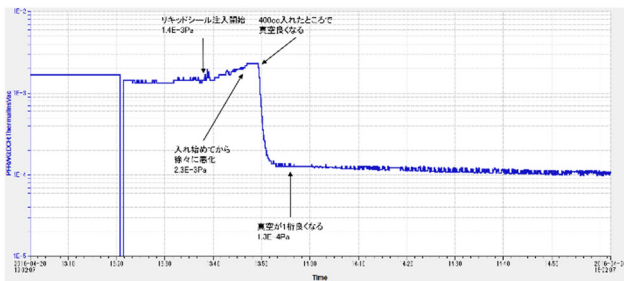


Figure 4: Trend of the vacuum pressure near the location of the leakage point before and after infusion of the liquid seal in superconducting vertical wiggler.

そこで予定どおりウィグラーの励磁を行い、翌日 5 月 27 日からビームラインの運転を再開した。

3.2 電磁石電源

PF リングは 1981 年に建設され、その後、1990 年の 3GeV 運転開始、1996 年の高輝度化、2005 年の直線部増強と、大規模な改造の度に電磁石電源の入れ替えが行われてきた。しかし、1979 年製造の偏向電磁石電源用 6.6kV 受電盤は現在まで更新されることなく使用されている。また、高輝度化改造時に導入された 4 極及び 6 極電磁石電源、ステアリング及びビームトランスポート電源もまだ使用されており、製造後約 20 年を経過したここ数年、故障が頻発するようになってきている。

偏向電磁石電源の受電盤は 6.6kV という高電圧を直接受けているため、些細な故障が重大事故になりかねない危険な状況にある。メンテナンス時の調査によると、全体の絶縁耐圧を含めた性能は、長年の汚れや劣化等によって確実に低下してきており、コンタクトの経年劣化についても、いつまで異常なく使用できるのか誰も経験したことのない経過年数になりつつある。部品を交換しようにも高圧部品は高価なため、単年度予算では困難な状況である。さらに、製造中止部品がほとんどであるため、中途半端に部分改造を行って無理に取り付けることは、場合によっては危険性の増大につながりかねないことから、現時点では安全性・コストの面からも受電盤全体を新規に製造して交換するのが最も良いと判断している。

4 極及び 6 極電磁石電源については、80 年代製造の電源は、高輝度化時に約半数が、直線部増強時に残りの半数が更新された。とはいえ、高輝度化は約 20 年前であり、その時に導入された大型電源 (SFF、SFD、QFD、Q2、SD、QFF、QAA、QAB、QDA、QD) 10 台の故障が、ここ数年頻発している。具体的には、電流リップルの経年劣化による増大や、サイリスタの劣化、制御素子の劣化に伴う 3 相 400V の AC に対する相間バランスの崩れなどがメンテナンス時の性能測定で分かっており、運転中もインターロックの誤検出やチューンの変動など故障がここ数年増加してきている。

偏向電磁石電源については、2001 年製造でまだ 15 年 “しか” 経過していないとも言えるが、負荷が飛び抜けて大きく、電源自体の大きさも、他の大型電源 4 台分を優に超える電源である。特別な受電盤およびトランスが必要なのも、電源の容量が大きいためである。消耗品である電解コンデンサの劣化が生じており、出力電流の安定性に悪影響が懸念される。リングの補正電磁石電源、スキュー 4 極電源、ビームトランスポートの 4 極及び補正電磁石電源については、高輝度化改造時に導入された約 20 年のものであり、台数も 200 台近い。電源自体は製造業者がす

に電源製造から撤退、制御系に関しても絶縁フォトカプラや AD/DA 素子など、主要部品は既に製造中止で修理すらもできない状態である。その結果、故障時は電源、制御系ともに、手持ちの予備品（製造年代は同じ）に置き換えるしかなく、予備品が尽きたら数を減らしての運転に移行することで対処している。ここ数年、やはり故障が頻発しており、例えば、電流モニタが突然振り切れる、制御していないのに電流が流れ、実際にビームが蹴り落とされる、インターロックの誤検出などが頻発している。ビームを誤って蹴るのは極めて危険で、例えば、真空封止短周期型アンジュレータというギャップ幅 4 mm まで狭めて X 線を発生させる装置が PF リングに 4 台導入されているのだが、垂直ステアリング電磁石の誤動作によって意図しない場所に放射光が照射されると、重大な真空事故が発生する可能性がある。小型電磁石電源の誤動作も重大な事故を引き起こす可能性が大きい為、一刻も早い更新が求められている。

PF-AR は、トリスタン計画のブースター・リングとして昭和 57 年度に整備されたアキュムレーション・リング (AR) を改造した蓄積リングである。AR は、もともとは電子・陽電子リニアックからの 2.5 GeV ビームを蓄積した後、8 GeV まで加速してトリスタン主リング (MR) に入射していた。その機能の性格上、ビーム処理を効率良く、繰り返し運転できるように最適化されていた。トリスタン計画終了後、B ファクトリーとして MR は利用されることとなったが、リニアック直接入射となったため、AR は放射光専用リングにしようという提案があり、そのための機能の最適化が必要とされた。ビーム寿命を 2 時間から 24 時間に改善するために、真空チャンバーの交換や長時間の連続運転の信頼性の確保が要求された。トリスタンでは AR を 8 GeV で最大 30 分継続する仕様で機器が設計されていたが、放射光利用の運転では、長時間での運転を要求されるためエネルギーを 6.5 GeV に下げて運転する。電磁石電源としては、ステアリング電源の長時間安定性が問題になり、ステアリング電源が更新された。この放射光専用リング改造作業は 2001 年に実施された。放射光専用リングへの転用後は、特に電源機器の老朽化が問題になり、2008 年には偏向電磁石電源の更新が、2013 年には 4 極電磁石電源 16 台の更新が達成できた。しかしながら、4 極電磁石電源 8 台 (QCN 電源) の更新が未達成で、残された課題である。4 極電源 (Q 電源) は、東西南北 (EWSN) に配置された 4 極電磁石を励磁するための電源である。東西の加速空洞周辺にある 4 極電磁石 (QRE、QRW)、ビーム入射機器が配置されている南直線部にある 4 極電磁石 (QCS)、これらを励磁する電磁石電源は更新されて、加速器の性能向上に貢献した。未更新の電源 (QCN) の負荷である電磁石は北直線

部にあり、放射光ユーザのビームラインが多くある。これらは昭和 57 年 (1982 年) 建設時に設置された電源である。



Figure 5: Oldest quadrupole powers supplies in PF-AR.

QCN 電源は製作後 33 年が経過し、深刻なトラブルの前兆とも思えるトラブルが起きている。電源内部のトランスやトランジスタは水冷している、水冷の銅パイプに通水している。最近のトラブル 2 件は、このパイプの平坦な箇所ピンホールが起こした水漏れである。33 年の長きに渡って 10 気圧の純水を流したために、かなりの浸食が起きたものと認識できる。これらは、保守点検時に発見され、工場で修理し、大事に至らなかったが、運転時に発生した場合には、最低でも 3 日程度は停止しなければならなかったであろう。電源にも内部に多くの保護センサーがあるが、水冷系が多く分岐していて、必ずしも万全ではなく、異常加熱が連続して焼損や火災の危険もある。老朽化した電源では、入手不可能になってしまった部品が多々ある。現時点では、倉庫にある旧 Q 電源から部品取りをして急場こそ対応できそうであるが、やがて全くなくなることになる。このような現状であるため、電源の更新が早急に必要である。電磁石が異常になった場合、それを電源停止シーケンスにつなぐために、インターロック回路があるが、これもまた老朽化しているので、同時に更新してシステムとして信頼性を向上させる必要がある。

3.3 ビーム診断装置

PF リングのビーム位置モニターシステムは平成 7 年度 (1995 年度) に導入された。PF リングでは約 187m の加速器 1 周にわたって 65 台のビーム位置モニタ電極を配置し、信号を半導体リレーで順番に切り替えながらアナログ検波回路に入力している。検波した信号は VME 計算機の ADC でデジタル化し、信号強度をデジタル信号処理回路 (DSP) にて演算

することでビーム位置を演算している。高速の半導体スイッチと並列化 DSP を使用することで、リング全体の軌道測定に要する時間は約 100 ミリ秒、位置分解能は数マイクロメートル以下を達成した。また、このシステムは軌道測定だけではなく、もう 1 つの重要な役割として軌道安定化のための演算機能を有している。すなわち、28 台の補正電磁石に適切な電流値を設定することで電子ビームを制御して軌道が常にある一定になるようなフィードバック演算を約 12 ミリ秒の制御周期で行っている (Figure 6)。

導入した平成 7 年当時としてはかなり高速な信号処理・フィードバックシステムであったが、リレーによる切り替え方式ではこれ以上の高速化・高精度化は困難である上に、既存システムは老朽化が深刻である。製作から 20 年以上経過しており、製造会社による保守・保証期間は過ぎており、当時と同等のパーツを市場で調達できないために故障しても修理が不可能で現状では予備品と入れ替えるしかない。また、完全に故障しないまでもリレーの切り替えタイミングが不安定になることが発生し、あたかも軌道が動いたような偽信号を出す事象がときおり発生している。しかし前述の通り修理が困難であるため、軌道補正から除外するしかない状況である。これらの対処作業のため場合によってはユーザーの実験時間を一時中断する場合もあって深刻である。

近年のデジタル技術の発展は目覚ましく、FPGA を演算に使用することで 100 MHz 以上の高速サンプリングデータと、10 Hz 程度の高精度データ出力を同時に出力することも可能となっているため、ミリ秒以下の高速な軌道フィードバックとサブマイクロレベルの高分解能を 1 つの信号処理回路で実現することが可能となってきている。

既存システムでは水温変動のような分オーダーのゆっくりとした軌道変動は抑制できていたが、数 Hz ~ 20 Hz 程度に成分をもつ機械振動や 50 Hz 以上の電気信号に起因する軌道変動は抑制できなかったのに対し、近年のシステムではこれらの高周波領域まで起動を安定化することが可能となる。また、挿入光源のギャップ変更や、偏光面の切り替えなど、ある瞬間からステップ的に発生する軌道変化にたいしても軌道を安定化することが可能となる。その他にも、線形加速器から入射されてきた電子ビームの振る舞いをビーム周回ごとに解析することが可能となるため、従来は専用の回路調整が必要となっていたキッカー・セプタム入射システムの調整など、各種加速器コンポーネントの調整を円滑にすすめることが可能となることも大きなメリットである。また、突然のビームダンプなど、予期しない事態が生じた際の原因究明にも利用可能となるため故障からの平均復帰時間 (MTTR, Mean Time To Recover) 改善にも寄与すると期待される。

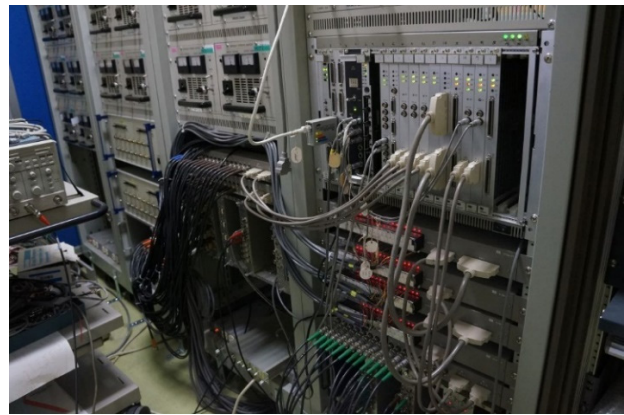


Figure 6: Photograph of the orbit feedback system and the power supplies for the fast steering magnets.

4. まとめ

2015 年度は PF リング、PF-AR ともに昨年度に比べて約 1000 時間の増となったものの、震災以前の運転時間までは回復していない。2016 年度は、PF リングについては、2015 年度とほぼ同等の運転時間は確保される見込みである。PF-AR については、今年 7 月初めから直接入射路設置のための改造作業が開始され、2017 年 1 月末まで作業が行われ、その後コミショニングを開始する予定である。両リングの老朽化対策については、これからの大きな課題である。一方で、将来計画としての 3 GeV 蓄積リング型高輝度光源の検討も開始されており、早期の実現が期待されている [2]。

参考文献

- [1] Shinya Nagahashi *et al.*, “The construction of the direct beam transport line for the PF-AR”, in Proceedings of the 13th Annual Meeting of PASJ, 2016, MOP075.
- [2] Kentaro Harada *et al.*, “Design of the 3 GeV light source of HMBA type lattice with short straight section”, in Proceedings of the 13th Annual Meeting of PASJ, 2016, WEOM16.