

PF-AR におけるトップアップ運転 TOP-UP OPERATION AT THE PF-AR

長橋進也[#]

Shinya Nagahashi[#]

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

In the Photon Factory Advanced Ring (PF-AR), which is an electron storage ring for a synchrotron radiation source in the X-ray region, the electron beam of 2.5 to 3.0 GeV were injected and accelerated to 6.5 GeV before user experimental mode. The construction of the PF-AR direct beam transport in 2017 enabled full energy injection. In response to this, PF-AR upgraded for top-up operation. We tested injection with the gap of the all in-vacuum undulator closed to the minimum in April 2017, and we modified interlock system for top-up operation during the summer shutdown. We measured radiation survey with the synchrotron radiation through the beam-line (MBS Open) in December and there were no problems at the all beam-lines. As a result, we inject beam with MBS open, and we succeeded the top-up operation in November 2018. The stability of the stored beam current achieves to about 0.2 mA (peak-to-peak) for 55 mA.

1. はじめに

X線領域の放射光源用電子ストレージリングである Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) では、2.5~3.0 GeV の電子ビームを入射し、6.5 GeV まで加速してから放射光利用実験を行っていたが、2017年に直接入射路が完成したことにより、6.5 GeV のフルエネルギー入射が可能となった[1]。これを受け、PF-AR では、トップアップ運転へ向けた整備を進めてきた。2017年4月には全真空封止アンジュレータのギャップを最小まで閉じた状態で入射を試み、同年夏の停止期間中にはインターロックの改修や制御ソフトウェアの改修を行った。同年12月には全ビームラインへ光を導いた状態(MBS開)で放射線量測定を実施し、問題ないことを確認した。これ以降は、MBS開のまま継ぎ足し入射を行っており、2018年11月には、トップアップ入射により蓄積電流値を一定に保ったままユーザー運転を行うことに成功した。蓄積電流値の安定度は、55 mA に対して±0.1 mA 程度を実現している。

2. トップアップ運転へ向けた準備

2.1 スケジュール

トップアップ運転へ向けたスケジュールを Fig. 1 に示す。

電子陽電子入射器(LINAC)は、SuperKEKB Phase III [2]で要求されている高電荷でかつ低エミッタンスなビームを安定的に供給するために開発を進めていた[3]。このため、PFリングおよびPF-ARへの入射は、2018年の夏まで1日3回の定時入射とすることが決まっていた。また、2018年秋に運転する蓄積リングはPFリングとPF-ARだけであることから、PF-ARのトップアップ運転の開始時期を同年秋に設定した。これを目標に、トップアップ運転に必要な課題を割り振った。

以下の節では、このスケジュールに沿った形で話しを

進める。

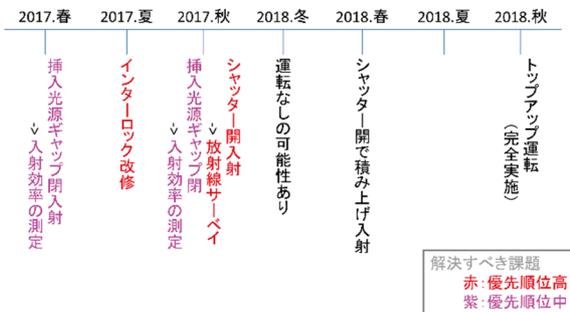


Figure 1: Schedule for the PF-AR top-up operation.

2.2 ビームロスの見積もり

PF-AR 直接入射路の建設における最大の目標はトップアップ運転の実現である。ビームロスの見積もりは、将来のトップアップ運転を見据えて建設前から行われた。

PF-AR の水平方向の物理口径は入射点が一番狭く、その他は十分に広い設計となっている。このため、入射パラメーターの乱れやビーム不安定性等によって全周にわたるビームロスが発生したとしても、それは蓄積ビームの寿命(寿命)で失われる電荷量と同程度であると仮定した。PF-AR の寿命は 55 mA 蓄積時で約 10 時間であり、寿命によるビームロス量は約 4.6 [nC/h]となる。この値は PF-AR の最大入射電荷量の 5×3,600 [nC/h]に比べて十分小さい。また、PF-AR には全蓄積ビームをダンプするためのビームストッパーが備わっている。このビームストッパーは 1 時間に 200 mA 相当の蓄積ビームをダンプさせる能力を持っている。1 時間で 200 mA に相当する蓄積ビームの電荷量は 250 [nC/h]である。したがって、PF-AR の最大入射電荷量の 98.6 %を入射点で失い、ビームストッパーでは 1.39 %を失うとし、残りの電荷は全周にわたって失われるものとして遮蔽計算を行い、実験室への最大漏洩放射線量を見積もった。

2017年2月のPF-AR直接入射路コミッションングに

[#] shinya.nagahashi@kek.jp

において、キッカー電磁石と入射ビームのタイミングが合わずに、入射ビームのほとんどを蓄積リングでロスするようなパラメーターで運転を行うことがあったが、この状態で放射線量を測定したところ、入射点近傍のケーブル貫通口の外側(一般管理区域境界)で数 $\mu\text{Sv/h}$ の放射線量が観測された。この時、0.24 [nC]の電子ビームを 5 Hz のビーム繰り返しで入射していたことから、得られた放射線量を最大入射電荷量まで外挿したとしても、KEK の一般管理区域の制限である 20 [$\mu\text{Sv/h}$]を下回っていることが確認できた。また、遮蔽計算でも 14.61 [$\mu\text{Sv/h}$]であったことから、ビームロスの仮定は正しいと判断した。

2.3 バンチ純化

PF-AR はシングルバンチ専用のストレージリングである。バンチの純度は、ストリップライン型キッカーを用いて RF-KO により不要バンチを蹴る方法で確保している。

PF-AR 直接入射路建設以前は、このバンチ純化を入射中と加速中のみ行っていた。これは、当時の最大入射エネルギーが 3.0 GeV であったため、純化キッカーも同程度の能力しか有していなかったためである。建設後は 6.5 GeV のフルエネルギー入射となることから、建設前に 6.5 GeV での純化スタディを行った。この結果、ベータとローンチューンの電流依存性を利用して不要バンチを蹴り落とすことはできなかったものの、RF-KO の周波数スイープを最適化することで、5 mA 以下の不要バンチであれば蹴り落とすことができることを確認した。

しかしながら、純化キッカーによる蓄積ビームの振動が実験に影響を与えてしまうため、それまでと同頻度で(8 時間毎に 1 回)しか純化を行うことができなかった。そもそも、PF-AR はバケット開口部が大きいと、時間とともに後続のバケットへビームが捕獲されてしまい、純度が維持できないことがわかっていて、2003 年の測定では、後続のバケットへ補足される確率は、 1.5×10^{-7} [1/min]であった。これらを解決するため、シングルバンチの純度を必要とするビームライン担当者との協議を重ねた結果、メインバンチから 1~2 バンチ後方の不要バンチは実験結果に影響を与えないことがわかったため、純化キッカーに印可する RF-KO を、メインバンチより約 5 ns(バケット間隔は 2 ns)遅れたところからかけ始めることで、2018 年 5 月より常時純化が可能となった。

2.4 真空封止アンジュレータの磁極間隔を最小にした状態で入射

PF-AR には 5 台の真空封止アンジュレータ(アンジュレータ、IVU)が設置されている。アンジュレータの磁極間隔(Gap)を最小にしても、垂直方向の物理口径が狭くなるだけなので、カップリング(PF-AR では 1 %を仮定している)による水平振動の垂直方向への回り込みが小さければ、入射への影響はないはずである。これを確認するため、2017 年 4 月にアンジュレータの Gap を最小にした状態で入射を試みた。結果を Table 1 に示す。

NW14-2 の Gap 値 8.0 mm において、蓄積ビーム電流値が 48 mA で頭打ちとなってしまったのは、蓄積リングのビームポジションモニター(BPM、Libera Brilliance plus [4])の保守や調整不足による軌道歪みが原因で、蓄積ビームがアンジュレータの Gap に当たって削れていたことが原因であった。PF-AR 直接入射路建設前後から、水

平および垂直ステアリング電磁石によるシングルレスポンス測定において、XY カップリングが観測されていたことから、2017 年夏の停止期間中に BPM の保守を行った。BPM 電極と Libera 間の接触不良やケーブルの不良、位置検出回路の不具合等を解消し、2017 年 11 月の立ち上げ時に Libera の各パラメーターの最適化を行ったところ、改善した。

その他のアンジュレータで入射効率が低下している原因はまだわかっていないが、アンジュレータの Gap を閉めると寿命が低下することから、何らかの非線形効果が影響しているのではないかと想像している。

Table 1: IVU Gap Value vs. Injection Rate

アンジュレータ名	Gap 値 [mm]	Injection rate [mA/s]	備考
全アンジュレータ	All Open	0.126	
全アンジュレータ	All Close	0.087	
NE3	17.8	0.108	
NW2	10.0	0.094	
NW12	10.0	0.085	
NW14-1	10.0	0.100	
NW14-2	8.0	0.060	48mA で頭打ち
NW14-2	10.0	0.090	

2.5 放射線安全対策

トップアップ運転では、ビームラインのメインビームシャッター(MBS)を開けた状態で入射を行う必要があるが、これまでの放射線安全インターロックでは、排他的な論理となっていた。これを、MBS を開けた状態でも入射できるように、2017 年夏の停止期間中に改修した。Figure 2 に改修後の論理図を示す。

これを実現するため、ビームラインインターロックとの信号は、それまでの配線には手を加えず、放射線安全管理している(安全系)Programmable Logic Controller (PLC)のプログラムを改修するだけで行った。

上位の制御系との信号は、Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) [5] が Computer Automated measurement And Control (CAMAC) の Output モジュールに指令を出し、その信号を安全系 PLC 直近のリレーで一旦受け、安全系 PLC へと渡していた。今回の回収にあわせ、PF リングと同様に CAMAC を廃止し、安全系 PLC の直近に EPICS が動作可能な横河製 PLC を設置し、横河製 PLC と安全系 PLC をハードワイヤーで接続する方式を採用した[6]。Figure 3 に安全系 PLC と横河製 PLC の全景を示す。上部に設置してあるのが安全系 PLC で、下部に設置してあるのが、今回導入した横河製 PLC である。

2.6 入射キッカー電磁石暴発対策

PF-AR の入射キッカー電磁石は、PF-AR 直接入射路を建設にあわせて新規に制作した[7]。2017 年 4 月 15 日以降に蓄積ビームの寿命を縮めたり、ビームダンプさせ

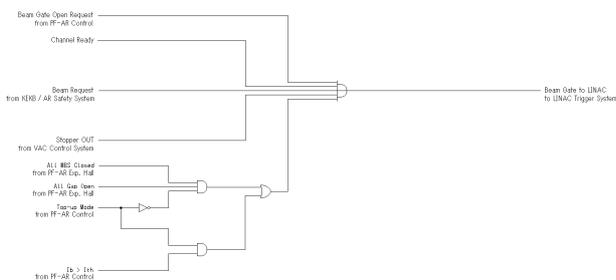


Figure 2: Beam gate logic for the top-up operation.

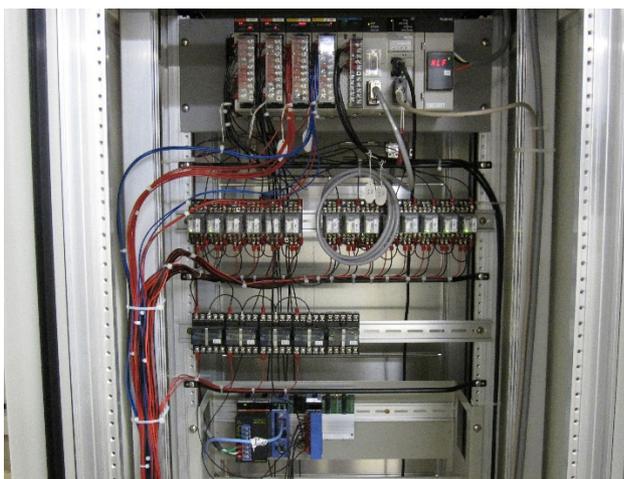


Figure 3: PLCs for the PF-AR safety system.

たりする現象が発生した。同年 11 月 23 日より、その頻度が急激に増えたため、キッカー電磁石が入射トリガーとは無関係に励磁されていること(暴発)を疑い、2017 年 11 月 27 日に、入射が完了した時点でキッカー電磁石電源を OFF にしてみたところ、これらの現象が収まった。このことから、キッカー電磁石が暴発し、蓄積ビームに影響を与えていることがわかった。以降は、入射が完了した時点で同電源を OFF することで対処したが、入射中や入射が完了して同電源を OFF にする前に現象が起きてしまうこともあり、このままではトップアップ運転どころか、通常の積み上げ入射もできなくなってしまう可能性があったため、原因の究明と対策を急いだが、ここから先の調査には時間を要してしまった。

2018 年 2 月の立ち上げ時には、リング BPM を Turn by turn で、キッカー電磁石による蓄積ビームの振動を測定したところ、キッカー電磁石 3 台のバンプが閉じていないため、水平方向に $\pm 1 \mu\text{m}$ 以上振動させていることがわかった。この振動を小さくするために、キッカー電磁石 3 台の電圧を変えてみたところ、キッカー電磁石 2 (K2) を弱くした時に振動が小さくなる様子が観測された。しかしながら、サイクロトンの仕様により、充電電圧を 1 kV 以下に下げることができず、K2 を OFF し、K1, K3 のみ励磁してみたところ、蓄積ビームの水平振動を $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 程度まで抑えることができた。また、K1, K3 のみで入射し、K1, K3 の電圧を最適化してみたところ、キッカー電磁石 3 台の時と同じ入射効率が得られた。この時の振動の様子を Fig. 4 に示す。更に、キッカー電磁石と入射ビームのタイミングがずれた時の入射効率の悪化は、キッカー電磁石

3 台の時よりも鈍感であった。以降は、K1, K3 のみで入射を行っている。

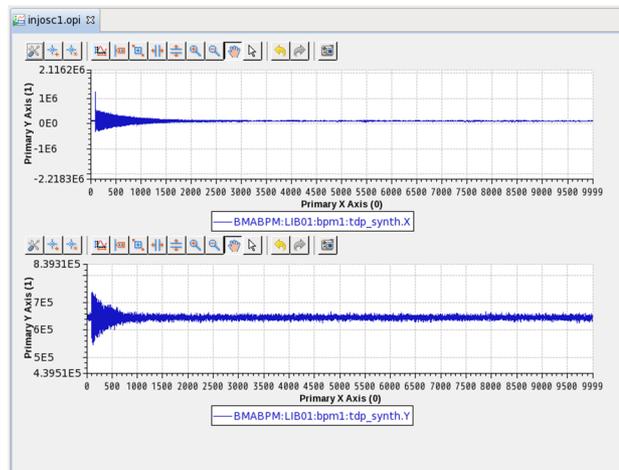


Figure 4: Beam oscillation by injection kickers.

2018 年 2 月 16 日に、キッカー電磁石 1 (K1) が暴発し、それにつられるように K3 が励磁されている(誘発)現象を捕まえることができた。前述のように、この時 K2 は OFF であったため、マシンスタディの時間を利用して、キッカー電磁石 3 台の時の不正な振る舞いを観測してみたところ、暴発しているのは K1 であることがわかった。

これを受け、2018 年夏の停止期間中に、充電部とパルサー部の両方を、K1 と K2 で入れ替えてみたところ、暴発する症状が K1 から K2 へと移った。K1 は正常となったため、ギリギリではあったが、2018 年 11 月のトップアップ運転開始までに、対策を済ませることができた。

3. トップアップ運転の試行

3.1 4+1 リング同時入射

LINAC は、エネルギーの異なる電子または陽電子を 4+1 リング (SuperKEKB 電子リング (HER) と陽電子リング (LER)、PF リングおよび PF-AR + SuperKEKB 陽電子ダンプリングリング (DR)) へパルス毎に打ち分ける能力を有している。

4+1 リング同時入射に先立って、2017 年 11 月には、PF リングと PF-AR の同時入射スタディを行った。入射効率も安定しており、問題ないことを確認した。

4+1 リング同時入射も 2019 年 5 月に実現している[8]。

3.2 ビームラインへ光を導いた状態での入射

2.3 で述べた放射線安全対策が完了したことを受け、2017 年 12 月と 2018 年 2 月に、アンジュレータの Gap を最小にして、ビームラインへ光を導いた状態 (MBS Open) で入射した時の、各ビームライン近傍での放射線量を測定した。これまでの経験から、蓄積ビームからの放射線漏洩量はそれほど大きくないと仮定し、2 mA から 60 mA まで、0.21~0.25 [nC] の電子ビームを 5 Hz のビーム繰り返しで入射しながら測定した。通常トップアップ運転では、寿命で減少した蓄積電流値を補う分しか入射しないので、入射条件としては厳しい状態での測定であったが、一番線量の高かった NW14A でも約 2.0 [$\mu\text{Sv/h}$] と、KEK の一般管理区域の制限値よりも十分低かった。NW14A

で比較的高い線量が観測されたのは、ビームラインと入射点が近いことが関係していると思われる。以上の結果より、トップアップ運転でも安全に実験できることが確認できた。

3.3 蓄積電流値の決定

PF-AR の蓄積電流値は公称 60 mA としていたが、トップアップ運転によって高い電流値を維持することによって、各機器が受ける熱量が増加することが考えられたため、各機器の発熱状態を監視しながら 55 mA とした。しかしながら、2018 年 5 月より、運転中に突然 RF 高周波空洞の高周波吸収部が発熱する事象が相次ぎ、ケーブルや吸収体が故障することが頻発した。原因としては、これらの絶縁体が放射線損傷により経年劣化したことが考えられたため、その都度交換を行い、この夏の停止期間中に全数交換を行っているところであるが、経年劣化だけが原因ではないとの報告を受けている。同箇所の発熱がみられた時には、蓄積電流値を 50 mA まで落として運転していたが、故障した状態であっても、50 mA では異常な発熱がみられなかったことから、次期の運転より、50mA かそれよりも低い蓄積電流値を検討している。

4. トップアップ運転の現状

トップアップ運転に向けて解決すべき課題は多かったが、設定したスケジュールに沿って進めることができ、予定通り 2018 年 11 月 20 日からトップアップ運転を開始することができた。Figure 5 は、トップアップ運転開始日の運転監視画面である。この時の入射間隔は 2 から 4 分程度で、蓄積電流値の安定度は、前述のように、蓄積電流値 55 mA に対して ± 0.1 mA 程度を実現している。

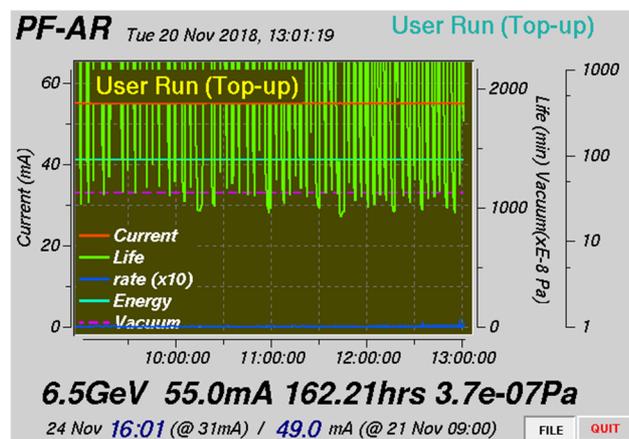


Figure 5: PF-AR status panel with top-up operation.

5. トップアップ運転の今後と課題

2.5 で述べたキッカー電磁石 2 台入射の原理は理解できていない。また、キッカー電磁石と入射ビームのタイミングがずれることによる入射効率の悪化も、リングのベータトロンチューンを数 kHz 変えることで様子が変わることが観測されている。しかしながら、総運転時間の減少により、マシンスタディ時間のほとんどを運転調整にあてているため、データの取得ができていない。今後は、運転調整だけでなく、これらの現象を理解するためのマシ

ンスタディ時間を確保し、データの蓄積を試みたい。また、並行して、シミュレーションによる解析も行いた。

謝辞

PF-AR 直接入射路の建設から PF-AR におけるトップアップ運転の成功に至るまで、KEK 加速器研究施設加速器第三、四、五、六系、放射光実験施設、そして、放射線科学センターの皆様には多大なるご協力をいただきました。この場を借りて、深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] N. Higashi *et al.*, “PF-AR 直接入射路の建設とコミッションング”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 212-215; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/THOL/THOL10.pdf
- [2] Y. Ohnishi *et al.*, “SuperKEKB フェーズ3コミッションング”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, July 31 - Aug. 3, 2019.
- [3] Y. Seimiya *et al.*, “KEK 電子陽電子入射器の現状”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 1285-1288; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/FSP0/FSP006.pdf
- [4] <https://www.i-tech.si/>
- [5] <https://epics.anl.gov/>
- [6] S. Nagahashi, “放射光源加速器の安全システム”, Proceedings of the Meeting on the Technical Study at KEK, Tsukuba, Japan, Dec. 5, 2013, pp. 21-27; https://www2.kek.jp/engineer/tsukuba/koryu/2013/GijyutsuKouryuukai_Final_m.pdf
- [7] A. Ueda *et al.*, “Construction of the New Kicker Magnet Systems for PF-Advanced Ring”, Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, May 14-19, 2017, pp. 3401-3403; <http://epaper.kek.jp/ipac2017/papers/wepva060.pdf>
- [8] R. Zhang *et al.*, “KEK 電子陽電子入射器の現状”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, July 31 - Aug. 3, 2019.