

PF-AR における 5GeV 運転の状況

THE 5GEV OPERATION STATUS AT THE PF-AR

長橋進也^{#, A)}, 内山隆司, 帯名崇, 影山達也, 小林幸則, 坂中章悟, 佐藤政則, 高井良太, 高橋毅, 谷本育律,
内藤大地, 中村典雄, 野上隆史, 原田健太郎, 東直, 本田融, 丸塚勝美, 満田史織, 山本尚人, 吉田正人,
吉本伸一, 渡邊謙^{A)}, 工藤拓弥^{B)}

Shinya Nagahashi^{#, A)}, Takashi.Uchiyama, Takashi.Obina, Tatsuya Kageyama, Yukinori Kobayashi, Shogo Sakanaka,
Masanori Satoh, Ryota.Takai, Takeshi Takahashi, Yasunori Tanimoto, Daichi Naito, Norio.Nakamura,
Takashi.Nogami, Kentaro.Harada, Nao.Higashi, Tohru.Honda, Katsumi Marutsuka, Chikaori.Mitsuda,
Naoto Yamamoto, Masato Yoshida, Shin-ichi Yoshimoto, Ken Watanabe^{A)}, Ryushi Kasoku^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

Abstract

At the Photon Factory Advanced Ring (PF-AR), which is an electron storage ring for a synchrotron radiation source in the X-ray region, the construction of PF-AR direct beam transport line was completed in 2017. In contrast, user operation time is reduced to less than half FY2016 due to the reduction in operating costs. Therefore, we proposed low energy operation and suggested extending operation time. As a result of the simulation, we found that choosing 5GeV operation can reduce electricity costs by down to 60%. We started a machine study for 5GeV operation in June 2018. In March 2019, we succeeded a trial 5GeV experimental operation and officially started 5GeV user operation in May 2019. We will report the contents of the cost estimation, the machine study and the present status of 5GeV operation.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)の X 線領域の単パルス専用放射光源である Photon Factory Advanced Ring (PF-AR)は、2017年に PF-AR 直接入射路 (AR-BT)が完成したことにより、6.5GeV までの任意のエネルギーの電子ビームを入射することが可能となった[1]。また、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が実現し、入射によるユーザー実験の中断時間を削減することに成功した[2]。一方、2009年度は年間 5,000 時間を超えていた運転時間が、運転経費の削減により 2016 年度には半分以下になるなど、ユーザー運転時間の確保が大きな課題となっていた。そこで、運転エネルギーを 6.5GeV から下げることで電気代を削減し、その削減された電気代で運転時間を伸ばすことが提案された。検討の結果、運転エネルギーを 5GeV まで下げることで電気代を 6 割まで抑えられることがわかり、2018 年 6 月よりマシンスタディを開始した。2019 年 3 月にはビームラインへ光を導いて試験的な放射光利用実験を行い、同年 5 月から 5GeV 運転が正式に開始された。

電気代削減の検討からその測定結果、5GeV 運転が確立するまでのマシンスタディの内容と 5GeV 運転の現状を報告する。

2. 電気代削減の検討と測定結果

PF-AR では 2005 年まで医学臨床応用を行っていたが、この時の運転エネルギーは 5GeV であった。今回の検討を行うにあたり、まずは経験のある 5GeV の電力について検討を開始した。検討結果を Table 1 に示す。

Table 1: The Estimation of the Electronic Energy at PF-AR

	6.5GeV 運転@50mA		5GeV 運転@50mA	
	電力[MW]	内訳[MW]	電力[MW]	内訳[MW]削減率
AR 運転時	5.67		2.6	54%
電磁石		2.5	1.5	40%
RF		2.0	0.4	80%
その他		1.17	0.7	40%
AR 運転停止時	0.86		0.86	0%
AR 運転時 総電力	5.63		3.46	47%

6.5GeV 運転時の電力増加量は、2015 年度の実績によると 1 日当たり 136MWh であったことから、5.67MW と算出した。この時の電磁石と RF の電力は、それぞれの DC 出力から AC 電力を推計し、それぞれ 2.5MW と 2.0MW とした。運転時の電力から、それらの電力を差し引いたものが冷却水や空調等その他の電力として考え、1.17MW と算出した。これらに、待機電力として AR 運転停止時の 0.86MW を足し合わせたものが 6.5GeV 運転時の総電力 6.53MW と考えた。AR 運転停止時の電力も、2015 年度実績の 1 日当たり 21MWh から算出した。

5GeV 運転時の電磁石と RF の電力は、それぞれの DC 出力から AC 電力を推計し、それぞれ 1.5MW と 0.4MW とした。装置の熱源の大半は電磁石によるものとして、その他の電力は電磁石と同じ比率で下がるものとして、0.7MW とした。それらに AR 運転停止時の電力

[#] shinya.nagahashi@kek.jp

を足し合わせたものが 5GeV 運転時の総電力 3.46MW と考えた。

6.5GeV 運転時の総電力と 5GeV 運転時の総電力を比較した結果、運転エネルギーを 5GeV まで下げることによって、電力を約 47%削減できることがわかった。5GeV であっても、電力を半分近く削減できることがわかったため、電気代削減のために行う運転エネルギーを 5GeV に決定した。

2019 年 5 月の正式運転開始時の電力の推移を Fig. 1 に示す。ここから得られた 6.5GeV 運転時の電力は 5.24MW、5GeV 運転時の電力は 3.22MW で、約 38.5% の削減に成功している。ただし、この時には Super KEKB が運転中であったため、待機電力を計測できていないことから、実際の削減率はもう少し低くなる。電気代削減の検討結果と測定結果の違いは、冷却水や空調等その他の電力が、思っていたよりも下がらなかったことが考えられる。仮に、5GeV 運転時のその他の電力が 6.5GeV のそれと同じだったと仮定すると、検討結果の削減率は約 39.8%となり、測定結果に近くなる。

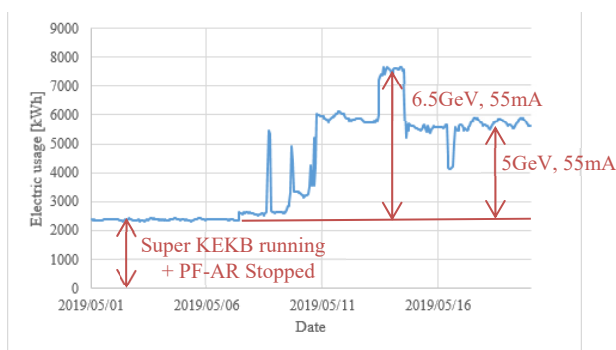


Figure 1: The measurement result of electric energy at PF-AR.

3. 事前スタディ

2018 年度中に 5GeV 運転を確立させることを目標に、6 月より事前スタディを開始した。

3.1 減速マシンスタディ

医学臨床応用は、2.5GeV または 3GeV で入射した電子を一旦 6.5GeV まで加速した後、5GeV まで減速することで行っていた。経験のある手法により 5GeV にすることができれば、蓄積ビームの応答等を測定することが可能となるため、先に蓄積リングの 5GeV 運転を確立しておくことができる。蓄積リングの運転が確立していれば、5GeV 直接入射の調整も容易にできることから、6.5GeV から 5GeV の減速を試してみた。しかしながら、2007 年に更新した偏向電磁石電源が減速に対応していなかったため、減速開始時と終了時に偏向電磁石電源の出力電流値が発振してしまって蓄積ビームを保持することができず、断念せざるを得なかった。

3.2 5GeV 直接入射、蓄積マシンスタディ 1 回目

5GeV を直接入射し、蓄積するためのマシンスタディを行った。蓄積リングの電磁石の設定には 6.5GeV と同じ k 値を使用し、Momentum を 5GeV に設定することで、

6.5GeV と同じビーム光学系を採用した。RF 加速電圧 (V_c) は、6.5GeV と 5GeV の Bucket height が同じくらいになる値に設定した。6.5GeV の Bucket height は V_c が 16MW の時に 0.917%、5GeV は V_c が 8MV の時に 0.859% である。AR-BT の電磁石は、設定電流値が 5/6.5 になるように設定した。これらの設定を行い、電子陽電子入射器 (LINAC) で作られた 5GeV の電子ビームを通して調整を行ったところ、約 3 時間後には 5GeV の蓄積に成功することができた。その後も調整を継続し、マシンスタディ開始から約 7 時間半後には PF-AR の定格蓄積電流値である 60mA を達成することができた。この時のビーム寿命は、370min であった。5GeV のビーム寿命は、6.5GeV のビーム寿命 1100min の約 55% まで短くなると予想していたが、それよりも短かった。

その後、定格蓄積電流値の 1/3 で蓄積リングの応答を測定した (Fig. 2)。5GeV においても 6.5GeV の光学系が保たれていることを確認した。

マシンスタディの最後に 5GeV から 6.5GeV に切り換える時間を測ったところ、装置の設定変更により約 15 分、入射蓄積に約 15 分と順調であった。その後、蓄積ビームの調整と確認作業を行い、切り換え開始から 3 時間以内に 6.5GeV 運転まで戻せることを確認した。

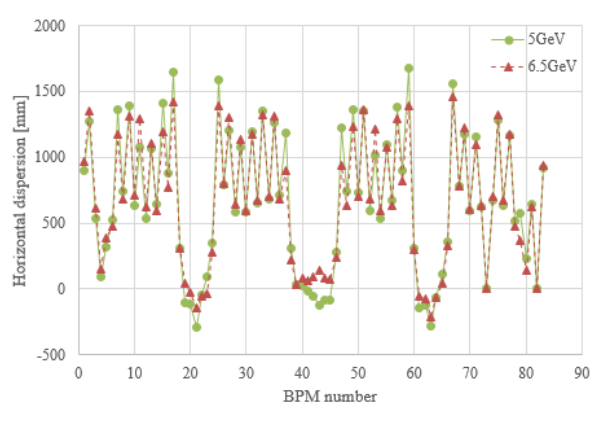


Figure 2: Measurement result of dispersion response.

3.3 ビームライン測定スタディ

前節のマシンスタディの成功を受け、ビームラインへ 5GeV の光を導き、ビーム強度やビームサイズ等のデータを測定するためのスタディを行った。前節のマシンスタディでは入射、蓄積に問題はなかったが、今回は、2 bunch に蓄積されてしまったり、入射効率が前節のマシンスタディの 1/10 以下しか得られなかったり、入射、蓄積が不安定な状態となってしまった。スタディ開始から 5 時間近く経っても 5mA しか蓄積できなかったが、ビームラインの測定を開始した。まず、光軸確認と呼ばれる、放射光の位置を確認する作業を行った。放射光の位置が合わないビームラインに対しては、電子ビームの開軌道にローカルなバンパを立てて放射光の向き (光軸) を合わせる調整を行い、約 2 時間半で終了した。その後も、入射、蓄積の調整を継続したが、蓄積電流値が 41mA を超えた辺りで入射が滞る現象が発生したため、40mA 程度の蓄積電流値が維持できそうなところで調整を終了した。この調整と並行して、ビーム強度やビームサイズ等の

データを約 12 時間半かけて測定し、5GeV の放射光の評価を行った。

3.4 5GeV 直接入射、蓄積マシンスタディ 2 回目

前節のスタディにおいて、入射、蓄積が不安定だったため、確認のため、7 時間程度のマシンスタディを行った。入射効率は 3.2 節の約 75% だったが、入射開始から約 2 時間後には 55mA 蓄積することができた。ビーム寿命は 330min と若干低めであったが、おおむね順調であった。

3.5 放射利用光実験

各事前スタディの成功を受け、7 日間の試験的な放射光利用実験を行った。このスタディは、冬の長期停止後に 5GeV 運転だけ行うものとしてスケジュールされた。初めの 2 日間に立ち上げ、残りの 5 日間に放射光利用実験という配分で行われた。長期停止後に 6.5GeV で蓄積リングの確認を行うことなく、5GeV で立ち上げを行うものであったが、調整開始から約 5 時間後には蓄積に成功し、約 11 時間後には立ち上げが完了した。

2 日目は光軸確認を行う予定だったが、RF 空洞の高周波引き出しケーブル (HOM ケーブル) の発熱による中断があったため、十分な時間を確保することができず、光軸確認を途中で切り上げて 3 日目の放射光利用実験開始時に再開することとなった。

3 日目の光軸確認は順調に進み、約 1 時間半後には放射光利用実験が開始された。しかしながら、複数のビームラインにおいて、2 日目に調整した光軸が 3 日目に再現していないことがわかったため、再調整を行った。

放射光利用実験は、8 時間間隔の定時入射と 55mA Top-up 運転が混在した状態で行われた。放射光実験への支障はなかったものの、4 日目夕方以降のビーム寿命が短く、同日夜以降の Top-up 運転再開後には 55mA を維持することが困難な状態であった。更に、6 日目の午後に発生した原因不明の Beam dump 以降、ビーム寿命が極端に短くなり、入射調整を行っても 55mA が維持できなくなってしまった。正式運用までにマシンスタディの時間を確保できないことから、WG を立ち上げ、改善の検討を開始した。

4. 5GeV 運転の現状

2019 年度より 5GeV 運転が正式に開始された。6.5GeV が必要なユーザーに配慮し、1 年間の 6.5GeV と 5GeV のユーザー運転時間が半々になるようにスケジュールが組まれた。

4.1 5GeV 運転の立ち上げ

前述の WG において、5GeV の入射、蓄積が安定していた時と、不安定だった時の違いについて調査、検討した結果、2 つの原因が見えてきた。

1 つめに、3.3 節のビームライン測定スタディ時に発生した 2 bunch に入射されてしまう現象と、蓄積電流値が 41mA を超えた付近で入射が滞る現象は、入射ビームのエネルギーと蓄積リングのエネルギーがずれていることが原因であると考えた。これは、LINAC で作られた 5GeV の電子ビームを AR-BT を調整して蓄積リングまで輸送したところで、蓄積リングの偏向電磁石の電流値を

0.1% きざみで上げ下げし、その都度ベータトロンチューン (チューン) を補正することを繰り返すことで確認した。この結果、偏向電磁石の電流値を約 0.19% 低くしたところで入射が安定することがわかった。その後の立ち上げにおいても同じ調整方法を続けていたが、入射ビームのエネルギーと蓄積リングのエネルギーを毎回合わせなくても、チューンを目標値の ± 0.0016 以内に補正するだけで入射が安定することがわかってきた。これ以降の立ち上げでは、AR-BT の偏向電磁石と蓄積リングの偏向電磁石の設定値は固定し、チューンの補正を細かく行うことによって、毎回、安定した入射を再現させることが可能となった。この調整では、ビームポジションモニター (BPM, Libera[3]) を使って入射ビームの振動を Turn-by-turn で測定 (Fig. 3(b)) し、その結果を高速フーリエ変換 (FFT) にかけてチューンを得る (Fig. 3(a)) ことで、調整時間の短縮に成功した。ここで、2 bunch 入射されてしまう現象は、LINAC の加速管の RF 周波数と PF-AR のそれが整数関係にないことから、PF-AR の RF bucket に対して入射ビームのタイミングが $\pm 350\text{ps}$ 程度ゆらいでいることが原因だと推察しているが、6.5GeV では発生していない。

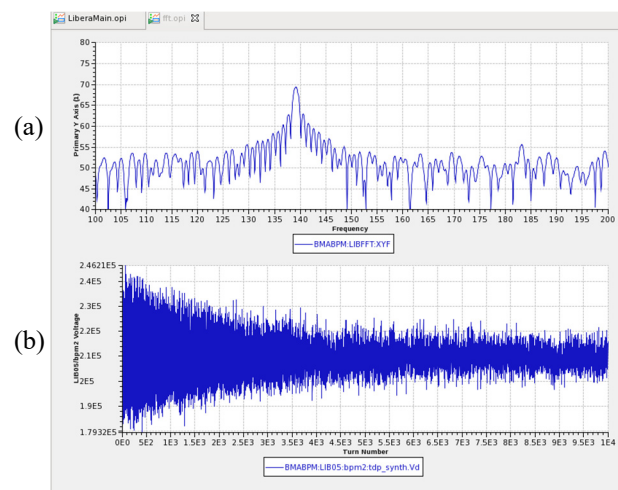


Figure 3: Oscillation of injection beam by Libera.

2 つめに、3.5 節の放射利用光実験の 2 日目の光軸が 3 日目に再現できていなかった現象と、4 日目以降にビーム寿命が短く、蓄積電流値が 55mA を維持できなくなった現象は、加速器トンネルと装置の温度が安定する前に放射光利用実験を開始したことが原因であると考えた。これは、立ち上げ前に電磁石を 6.5GeV 相当で 24 時間以上通電し、ビーム運転初日の 24 時間を 6.5GeV で立ち上げることによって、温度を安定させることができるはずである。これらを実施した結果、室温や冷却水温度に優位な差は見られなかったが、以降の運転期間中にビーム寿命が短くなったり、蓄積電流値を維持できなくなったりする現象は発生していない。これは、トンネルや装置の温度変化により、チューンが微少に変化するためだと推察しているが、放射光利用実験中はチューンを測定していないため、わかっていない。

これらの対策を効率よく行うため、立ち上げ期間中に行うことをリストアップし、それらの実施時間を 1 時間程度で調整した。これにより、立ち上げ期間が 3 日間まで短

縮された後でも、安定した 5GeV の放射光利用実験を開始できる手法を確立することができた。

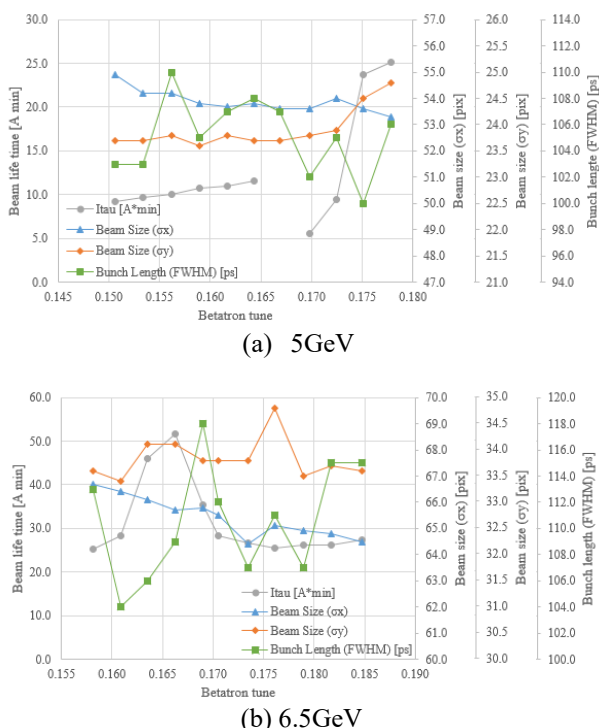


Figure 4: Result of beam parameters.

4.2 5GeV 運転のためのマシンスタディ

5GeV 運転が正式に開始された後も、前述の WG で検討を続けながら、5GeV 運転のためのマシンスタディを行った。

まず、立ち上げの際にチューン補正を細かく行わなければならない理由を確かめるため、チューンを変えながらビーム寿命、ビームサイズ、バンチ長の各データを測定した。ビームサイズは、可視光モニターの画像を二次元フィットして求めた。バンチ長の測定にはストリークカメラを使用した。また、比較のために、6.5GeV でも同様の測定を行った。水平方向のチューンに対する測定結果を Fig. 4 に示す。6.5GeV でも 5GeV でもチューンが 0.003 変わっただけで、各測定値が大きく変化していることがわかる。

次に、蓄積リングのエネルギーや V_c が適切であるかどうか、RF 周波数や V_c 、蓄積電流値を変えながら、上と同じデータを測定した。この測定も同様に 6.5GeV で行ったが、6.5GeV でも 5GeV でも各測定値が大きく変化していることがわかった。解析を進めるためには、このマシンスタディを重ねていく必要があるが、5GeV のエネルギーや V_c は適切に設定されているようである。

これらの結果から、PF-AR はチューンの変化に敏感であることがわかった。そこで、以降の運転では、ビーム寿命が安定していて、バンチ長が伸びていない領域にチューンを合わせることにした。この結果、ビーム寿命の変化や入射不調が起き難くなり、ビーム寿命は 400min で安定した。6.5GeV のビーム寿命は 1100min だが、真空封止型挿入光源の Gap を閉めるとビーム寿命が

800min まで低下することがわかっている。6.5GeV でも 5GeV と同様にチューンを合わせてみたところ、このようなビーム寿命の変化が緩和され、800min で安定するようになった。3.2 節において、5GeV のビーム寿命は 6.5GeV の約 55%まで短くなると述べたが、800min と 400min であればその比は 50%となり、予想していた値に近づいたことになる。

4.3 5GeV 運転の現状と今後

5GeV 運転の立ち上げ手法の確立や前節のマシンスタディにより、2019 年度後半には、入射不調等の不安定な状態になることもなくなった (Fig. 5)。Top-up 運転時の蓄積電流値は 50mA を維持できており、ビーム寿命は 400min 程度で安定していた。ここで、PF-AR の公称蓄積電流値は 60mA であるが、Top-up 運転時は熱負荷を軽減するため 55mA としている。また、3.5 節の放射利用光実験中にも発生した HOM ケーブルの発熱を受け、2019 年 5 月 25 日以降は、蓄積電流の最大値を 50mA まで下げて運転している。この HOM ケーブルは、2019 年夏の停止期間中に全数更新されたが、HOM ケーブルの発熱の様子をみながら、蓄積電流の最大値を 55mA に戻すかどうか慎重に検討を進めているところである[4]。

今後は、更に電気代を削減するため、立ち上げ前に行っている 6.5GeV 相当の電磁石の通電時間を短縮することや、6.5GeV での立ち上げ期間を 6 時間程度まで短縮することを検討している。

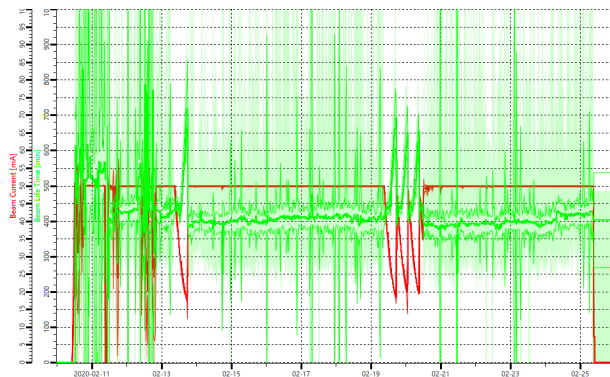


Figure 5: Trend of PF-AR 5GeV operation.

5. 疑似 Top-up

AR-BT は、PFリングの入射路 (PF-BT) と LINAC 終端のパルス偏向電磁石を共有し、PF-AR の 6.5GeV の電子ビームと PFリングの 2.5GeV の電子ビームの軌道をエネルギー比で分ける設計となっている。6.5GeV の電子ビームは AR-BT 専用の偏向電磁石 2 台で更に曲げられ、LINAC 第 3 スイッチヤード (SY3) の共有の偏向電磁石内で交差する設計となっている (Fig. 6)。この際、この軌道が交差する偏向電磁石内の軌道も同様にエネルギー比で分かれるため、AR-BT の 5GeV のエネルギーに合わせて偏向電磁石の電流値を下げると PF-BT の軌道も変わり、PF-AR の 5GeV 入射と PFリングの 2.5GeV 入射は両立しなくなってしまう。これでは、両リング同時に Top-up 運転を行うことは不可能であるため、LINAC と BT の設定を自動で高速に切り換えて、PF-AR の 5GeV

Top-up 運転と PF リングの 2.5GeV Top-up 運転を実現させたのが、疑似 Top-up 運転である。

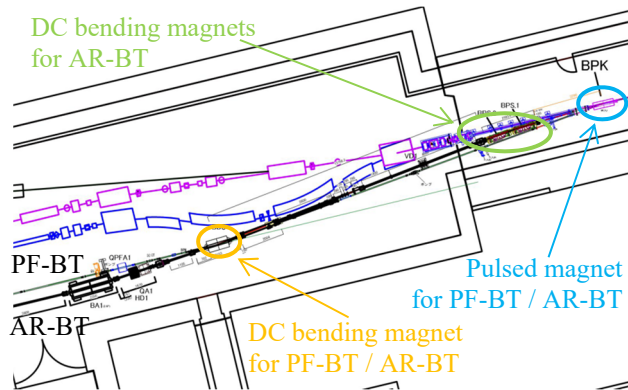


Figure 6: The 3rd switchyard at LINAC.

3.5 節の放射光利用実験の初日は、LINAC と BT の設定を手動で切り換えていた (Fig. 7(a)) が、翌日には自動で切り換えることに成功した (Fig. 7(b))。前者は、PF リングの Top-up 運転を 30 分に 1 回中断し、手動で PF-AR 入射に切り換えて PF-AR へ 5GeV の電子ビームを 55mA まで入射し、再び手動で PF リング入射に戻して PF リングの Top-up 運転を再開するものである。切り換えに要する時間は、PF リングの 2.5GeV 設定から PF-AR の 5GeV 設定に変えるのに約 1 分 30 秒、その逆が約 2 分 30 秒だった。切り換え時間の不均衡は、偏向電磁石の設定を変える際、初期化のループに乗せているためであ

る。この時、PF リングの蓄積電流値は 420mA に対して 418mA 以上、PF-AR の蓄積電流値は 55mA に対して 50mA 以上に保つことができた。

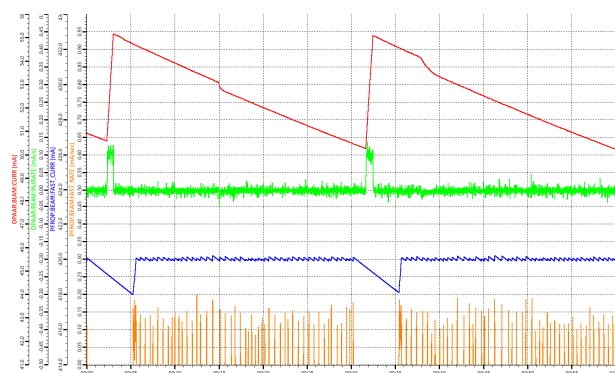
後者は、設定を自動で切り換えながら PF リングへ約 3 分間、PF-AR へ約 30 秒間交互に入射するものだが、偏向電磁石の設定値は初期化のループに乗せるのではなく、各々の設定値を直接行き来するようにした。この方式による切り換え時間は双方向共に 15 秒から 20 秒程度であった。この時、PF リングの蓄積電流値は 420mA に対して 419.5mA 以上、PF-AR の蓄積電流値は 55mA に対して 54.4mA 以上であった。PF リングと PF-AR の入射時間の配分は、通常の Top-up 運転での PF-AR の入射間隔が 3 分前後であったことから、PF-AR が 1 サイクルに 1 回入射できるように決定した。

しかしながら、PF-AR への入射時間が短いために PF-AR の入射調整が十分に行えず、一定の蓄積電流値を保てなくなる事象が発生した。そこで、PF-AR の入射調整が十分に行えるよう、PF リングへ約 2 分 30 秒間入射し、PF-AR へ約 1 分 30 秒間入射する設定に変更した。これにより、両リングの蓄積電流値の変化量を、通常の Top-up 運転の約倍程度まで抑えることに成功した。

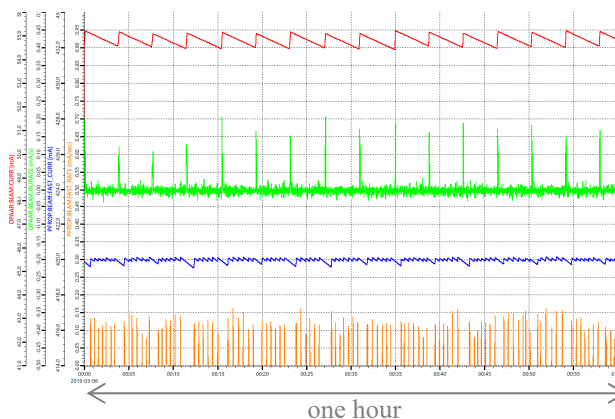
現在、両リング同時に通常の Top-up 運転を可能にするための BT の改造を検討している[5]。

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ニング”, 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] S. Nagahashi, “PF-AR におけるトップアップ運転”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, July 31-August 3, 2019, pp. 1066-1069; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/FRPI/FRPI019.pdf
- [3] <https://www.i-tech.si/>
- [4] S. Sakanaka *et al.*, “放射光リング PF-AR 用加速空洞の高次モード引き出し用ケーブル系の更新”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Japan, Sep. 2-4, 2020.
- [5] N. Higashi *et al.*, “PF-AR 5 GeV におけるトップアップ運転実現の検討”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Japan, Sep. 2-4, 2020.



(b) Manual switching operation



(b) Automatic switching operation

Figure 7: Switching operations.