

ビーム負荷パワーのビーム電流依存性から求めた PF-AR のロスファクター LOSS-FACTOR MEASUREMENT OF THE PF-AR BY MEANS OF A DEPENDENCE OF BEAM-LOADING POWER ON THE BEAM CURRENT

坂中章悟[#], 山本尚人, 内藤大地, 高橋毅, 本村新, 高井良太

Shogo Sakanaka[#], Naoto Yamamoto, Daichi Naito, Takeshi Takahashi, Arata Motomura, Ryota Takai
Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

In the synchrotron light source PF-AR at KEK, a single bunch of electrons is stored to provide users with intense pulsed X-rays. Due to its high bunch charge of ~63 nC, the parasitic-mode losses limit the maximum beam current at the PF-AR. We tried to determine the total loss factor by measuring the beam loading power as a function of the beam current. As a result, we obtained the loss factors of 25.3–25.6 V/pC at a beam energy of 5 GeV, and 24.4–28.4 V/pC at 6.5 GeV. We also measured the shifts in the synchronous phase of the electron bunch as a function of the beam current using a streak camera, and estimated the loss factor.

1. はじめに

放射光リング PF-AR では大電荷の単一バンチをリング内に蓄積し、挿入光源や偏向電磁石で発生する放射光をユーザーに供給している[1]。PF-AR の主要なパラメータを Table 1 に示す。年間約 3,000 時間の運転時間の約半分をビームエネルギー 6.5 GeV で運転し、残り半分を 5 GeV で運転している。PF-AR は常時単バンチ運転を行っているため、強力な短パルス X 線を必要とする時分割実験のユーザーにはとりわけ有用な光源である。

PF-AR では約 63 nC という大電荷のバンチを蓄積するため、電子バンチが加速空洞や真空チェンバーの形状変換部などを通過する際にウェーク場を発生することによる損失電力（寄生モード損失）が特に大きい。例えば加速空洞では各加速セルに取り付けられた高次モード結合器から合計で約 30 kW の高次モード電力が引き出されている[2]。また真空チェンバーの形状変換部やバンチ毎フィードバック用のストリップライン電極などでは寄生モード損失による発熱があり、ファンで空冷をしている。

このように、PF-AR では寄生モード損失がビーム電流

を制限する主要な要因の一つである。リングの寄生モード損失の大きさは、ロスファクターで表される。

蓄積リングでは、放射光を発生する等によりビームが失う電力は、高周波加速 (RF) 系でビームに供給される電力に等しい。ビームが空洞から持ち去る電力（ビーム負荷パワー、 P_b ）のビーム電流依存性から、リングのロスファクターを測定する手法が文献[3]で報告されている。RF 系においてビーム負荷パワーは、空洞への入力電力の合計値（ジェネレータ電力、 P_g ）から、空洞での壁損失電力の合計値（ P_c ）と、空洞から反射される RF 電力の合計値（ P_r ）を差し引くことによって求めることができる：

$$P_b = P_g - P_c - P_r. \quad (1)$$

ビーム負荷パワー P_b のうち、シンクロトロン放射による損失電力は、リング 1 周での放射損失エネルギー U_0 [eV] とビーム電流 I_b [A] を用いて、

$$P_{b,SR} = (U_0 / e) \times I_b, \quad (2)$$

で与えられ、これはビーム電流 I_b に比例する。一方、寄生モード発生による損失電力は、単バンチ運転の場合、

$$P_{b,pm} = k_{loss} T_0 I_b^2. \quad (3)$$

で与えられ[4, 5]、これはビーム電流の 2 乗に比例する。ここで k_{loss} [V/C] はリングの合計ロスファクター、 T_0 [s] はビームの周回周期である。ビーム負荷パワー P_b のビーム電流依存性を測定し、それをビーム電流の 2 次関数でフィットすることにより放射損失と寄生モード損失の寄与を分離でき、リングの合計ロスファクターを求めることができる。ただし、ロスファクターはビーム電流に依存せず一定と仮定する。

我々は、PF-AR にこの手法を適用し、ビームエネルギー 5 GeV および 6.5 GeV の運転においてリングの合計ロスファクターの測定を試みた。それらの結果を第 2 節と第 3 節で報告する。またバンチの同期位相のずれをストリークカメラを用いて測定し、その結果からロスファクターを求める試みも行った。その結果を第 4 節で述べる。第 5 節では、PF-AR のロスファクターのうち大きな割合を占めると考えられる加速空洞のロスファクターを計算した結果を報告する。第 6 節では得られた結果を考察する。

Table 1: Principal Parameters of the PF-AR with Middle-low-emittance Optics

Beam energy	6.5 GeV	5 GeV
Radiation loss/turn*	6.661 MeV	2.332 MeV
RF voltage	16 MV	8 MV
Natural bunch length	51.7 ps	48.1 ps
RF frequency	508.57 MHz	
Harmonic number	640	
Momentum compaction	0.0115	
Beam current	50 mA (top-up)	

* Without insertion devices

[#] shogo.sakanaka@kek.jp

2. ビームエネルギー5 GeV での測定

PF-AR のビームエネルギー5 GeV, RF 電圧 8 MV, middle-low-emittance optics, 単バンチの運転時に測定を行った。0~50 mA (10 mA おき) の各ビーム電流で RF 系のパワーを測定した。結果を Fig. 1 に示す。ジェネレータ電力 P_g はクライストロン出力直後の方向性結合器で測定し、これを空洞冷却水温度差から求めた空洞壁損失電力と空洞からの反射電力の合計値で校正した。温度差の誤差を $\pm 0.5^\circ\text{C}$ と仮定すると、校正の誤差は $\pm 5\%$ 程度となる。空洞壁損失電力 P_c は空洞のピックアップ信号で測定し、これを空洞の冷却水温度差で校正した。空洞からの反射電力 P_r は方向性結合器で測定した。

上記の測定値から Eq. (1) を用いて求めたビーム負荷パワーを Fig. 2 に丸印で示す。ビーム負荷パワーのビーム電流依存性は、直線からずれている事がわかる。この測定値をビーム電流 $I_b[\text{mA}]$ の 2 次関数でフィットした結果、

$$P_b[\text{kW}] = -16.27 + 2.380 \times I_b + 0.03179 \times (I_b)^2 \quad (4)$$

が得られた。まず Eq. (4) 右辺でオフセットが -16.27 kW あるが、これは P_g と P_c 等の測定で校正が少しずれている為と考えられる。 P_g の最大値 341 kW に対して上記のオフセットはその約 5% であり、校正誤差と同程度である。

次に Eq. (4) 右辺でパワーがビーム電流に比例している項は、シンクロトロン放射損失の寄与と考えられる。こ

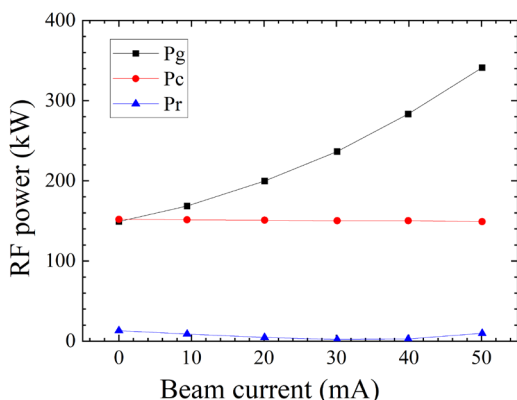


Figure 1: RF powers (P_g , P_c , and P_r) that were measured at a beam energy of 5 GeV of the PF-AR.

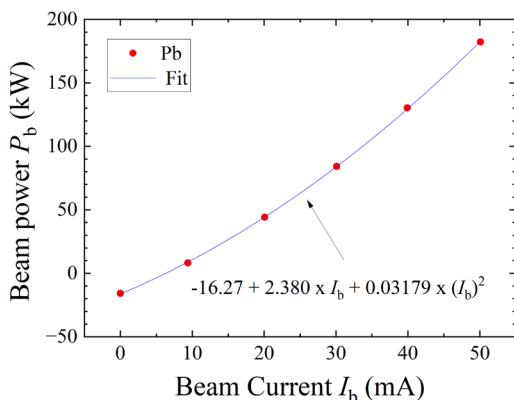


Figure 2: Beam power (P_b) as a function of the beam current at 5 GeV. Solid line denotes the fitting result.

の項を Eq. (2) と比較すれば、1 周での放射損失として $U_{0,\text{meas}} = 2.380 \text{ MeV}$ が得られる。一方、このスタディ時の挿入光源のギャップ値も考慮した放射損失の計算値は $U_{0,\text{calc}} = 2.383 \text{ MeV}$ であり、上記の測定値はこれと良く一致している。

最後に、Eq. (4) 右辺でパワーがビーム電流の 2 乗に比例している項は、寄生モード損失の寄与と考えられる。この項を Eq. (3) と比較し、周回周期 $T_0 = 1.258 \mu\text{s}$ を用いると、リングの合計ロスファクターとして $k_{\text{loss}} = 25.3 \text{ V/pC}$ が得られる。

再現性を見るため、同様の測定を別の日時に行った。これら 2 回の測定結果を Table 2 にまとめた。2 回目の測定では放射損失 U_0 の値が計算値と約 6% ずれていたが、ロスファクターは 1 回目の測定値に近い値 (25.6 V/pC) が得られた。

Table 2: Summary of Two Measurements of Loss Factors at a Beam Energy of 5 GeV

	1st measurement (Feb. 13, 2024)	2nd measurement (June 3, 2024)
k_{loss}	25.3 V/pC	25.6 V/pC
U_0 (meas.)	2.380 MeV	2.194 MeV
U_0 (calc.)	2.383 MeV	2.335 MeV

3. ビームエネルギー6.5 GeV での測定

前章と同様の測定をビームエネルギー6.5 GeV, RF 電圧 16 MV, middle-low-emittance optics, 単バンチの運転時にも行った。ジェネレータ電力 P_g , 空洞壁損失電力 P_c , 空洞からの反射電力 P_r の測定結果を Fig. 3 に示す。これらの測定値から Eq. (1) を用いて求めたビーム負荷パワーを Fig. 4 に丸印で示す。エネルギー6.5 GeV での運転では、放射損失電力が大きい為、 P_b のビーム電流依存性は直線に近い。この測定値をビーム電流 $I_b[\text{mA}]$ の 2 次関数でフィットした結果、

$$P_b[\text{kW}] = -6.31 + 6.6609 \times I_b + 0.03066 \times (I_b)^2 \quad (5)$$

が得られた。まず、右辺のオフセット -6.31 kW は、パワー校正のずれの為と考えられる。

次に Eq. (5) 右辺でパワーがビーム電流に比例してい

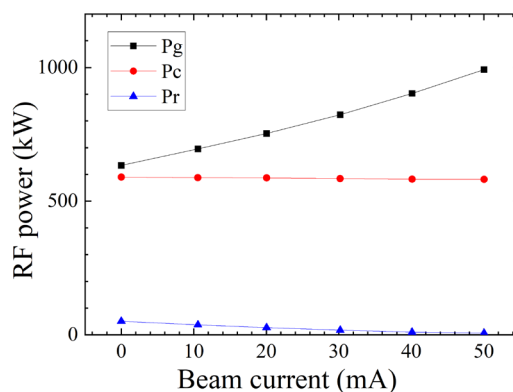


Figure 3: RF powers (P_g , P_c , and P_r) that were measured at a beam energy of 6.5 GeV of the PF-AR.

る項から、1 周での放射損失 $U_{0,meas} = 6.661$ MeV が得られる。このスタディ時の挿入光源のギャップ値を考慮した放射損失の計算値は、 $U_{0,calc} = 6.719$ MeV であり、上記の測定値は計算値と 1% 以内で一致している。

最後に、Eq. (5) 右辺でパワーがビーム電流の 2 乗に比例している項から、リングの合計ロスファクターとして $k_{loss} = 24.4$ V/pC が得られた。ここでも再現性を見るため、同様の測定を別の日時に行った。これら 2 回の測定結果を Table 3 にまとめた。2 回目の測定ではロスファクターの値として 28.4 V/pC が得られ、1 回目の結果と約 16% ずれていた。また、得られた放射損失 $U_{0,meas}$ は計算値と約 8% ずれていた。Figure 4 からわかるように、ビームエネルギー 6.5 GeV では、ビーム負荷パワーのビーム電流依存性は直線に近く、この直線からの小さなずれをもとにロスファクターを見積もる。そのため、ロスファクターの測定値は RF パワーの測定誤差に敏感であると考えられる。

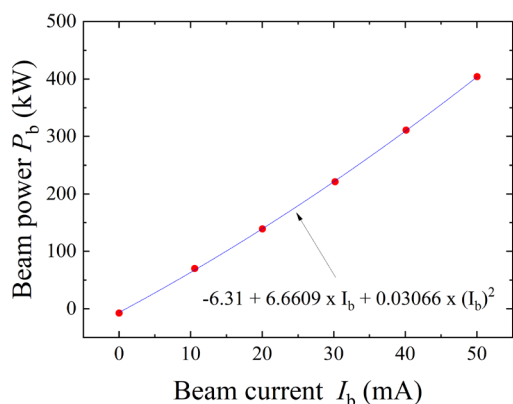


Figure 4: Beam power (P_b) as a function of the beam current at 6.5 GeV. Solid line denotes the fitting result.

Table 3: Summary of Two Measurements of Loss Factors at a Beam Energy of 6.5 GeV

	1st measurement (Feb. 28, 2024)	2nd measurement (May 9, 2024)
k_{loss}	24.4 V/pC	28.4 V/pC
U_0 (meas.)	6.661 MeV	6.154 MeV
U_0 (calc.)	6.719 MeV	6.666 MeV

4. バンチ長とバンチ同期位相の測定

寄生モード損失がある場合、バンチの同期位相がビーム電流とともにシフトすることが予想される。これを確認するため、以前取得したストリークカメラを用いたバンチ進行方向プロファイルの再解析を行った。データを取得した条件は、ビームエネルギー 6.5 GeV, middle-low-emittance optics, RF 電圧 16 MV, 単バンチ運転であった。測定時にはまずビーム電流 50 mA を蓄積し、データを取得した後、一旦ビームを捨て、ビーム電流 40 mA を蓄積する、という手順をビーム電流 10 mA まで行った。

ビーム電流 50 mA と 20 mA で測定したバンチの進行方向プロファイルの例を Fig. 5 に示す。横軸(時間)の数

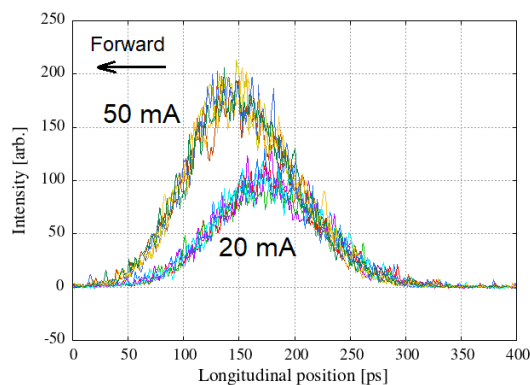


Figure 5: Longitudinal bunch profiles observed at beam currents of 20 mA and 50 mA. For each beam current, five traces were overlaid. Beam energy: 6.5 GeV.

値が小さい方がバンチの前方を示す。この図から、ビーム電流 50 mA では 20 mA に比べて、バンチの中心がバンチ前方にシフトしていることがわかる。

各ビーム電流で 20 回測定したストリークカメラの画像を、1 画像毎にガウス分布でフィットし、rms バンチ長とバンチ中心位置を求めた。20 画像から求めたデータの標準偏差をエラーバーとした。解析の結果を Fig. 6 と Fig. 7 に示す。Figure 6 より、ビームエネルギー 6.5 GeV, ビーム電流 10~50 mA の範囲では、rms バンチ長はビーム電流によらずほぼ一定である事がわかった。このことから、少なくとも 6.5 GeV 運転時には、ロスファクターがビーム電流によらず一定とした第 3 節での仮定が妥当であることが裏付けられた。得られたデータを単純平均した rms バンチ長は 48.0 ps であった。

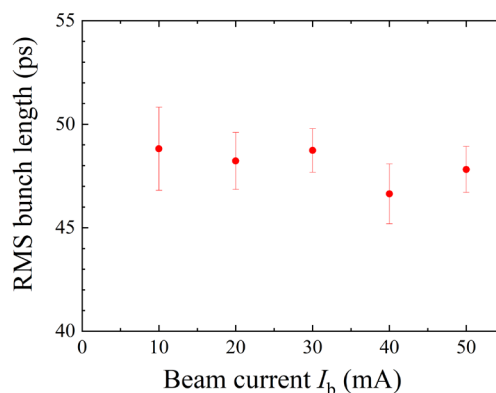


Figure 6: Measured rms bunch length as a function of the beam current. Beam energy: 6.5 GeV.

バンチ中心の位置を示した Fig. 7 のデータより、ビーム電流が 20~50 mA の範囲では、ビーム電流が高いほどバンチ中心が前方(縦軸の数値が小さい方向)に移動することがわかる。ただ、ビーム電流 10 mA のデータはこの傾向に従っておらず、その理由は理解できていない。10 mA のデータは最後に測定したため、その前に RF 基準信号源からストリークカメラまで、または RF 系までの基準信号分配系で位相がずれたり、ストリークカメラのトリガーのタイミングが何らかの原因でずれたりした可能性が考えられる。より信頼性の高いデータを得るには、再測定を行う必要があるが、ここではビーム電流 20~

50 mA のデータを用いて、ロスファクターを見積もってみる。線形フィットを行うと、バンチ位置シフトの電流依存性は -0.761 ps/mA (同期位相のずれに直すと -2.43 radian/A) であった。

寄生モード損失がある場合、バンチの同期位相 ϕ は

$$\cos \phi = \frac{(U_0 / e) + k_{\text{loss}} I_b T_0}{V_c}, \quad (6)$$

で与えられる。ここで V_c は RF 電圧である。寄生モード損失がない場合の同期位相を ϕ_0 、 $\phi = \phi_0 + \Delta\phi$ とおき、 $\Delta\phi$ は小さいと仮定して線形近似すれば、

$$k_{\text{loss}} \approx -\frac{V_c \sin \phi_0}{T_0} \frac{\Delta\phi}{I_b}, \quad (7)$$

が得られる。実験時の条件、 $V_c = 16 \text{ MV}$ 、 $U_0 = 6.66 \text{ MeV}$ 、フィッティングで求めたバンチ同期位相のずれを用いると、PF-AR のロスファクターとして $k_{\text{loss}} = 28.1 \text{ V/pC}$ が得られた。

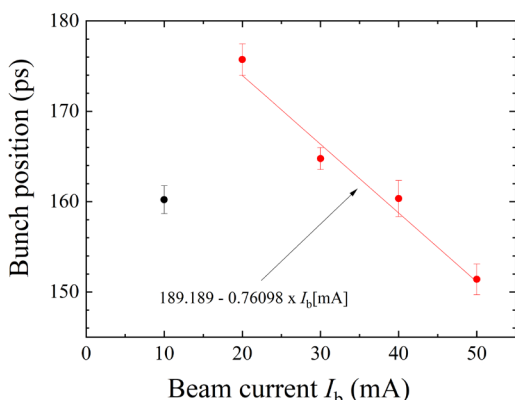


Figure 7: Measured shifts (black and red circles) in the bunch-center position as a function of the beam current. Beam energy: 6.5 GeV.

5. APS 空洞のロスファクターの計算

PF-AR では 11 個の加速セルを持つ APS (Alternating Periodic Structure) 型加速空洞[6]を 6 台使用している。これらの空洞は PF-AR のロスファクターに大きく寄与すると考えられるため、そのロスファクターを計算した。APS 加速空洞(上流側半分)の内面形状を Fig. 8 に示す。電磁場解析コード MAFIA を用いて、2 次元軸対称形状に対する時間領域計算を行った。r, z 方向ともメッシュサイズは 0.5 mm とした。

バンチ長 14.4 mm (48 ps) に対する縦方向 wake potential の計算例を Fig. 9 に示す。この例では、空洞の

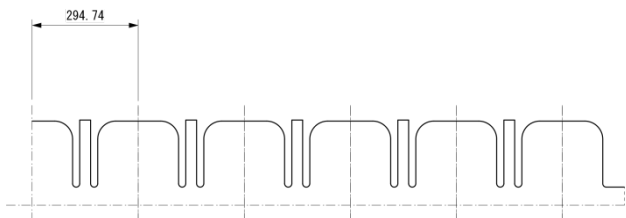


Figure 8: Inner shape of the APS cavity. Only upper half of the cavity is shown.

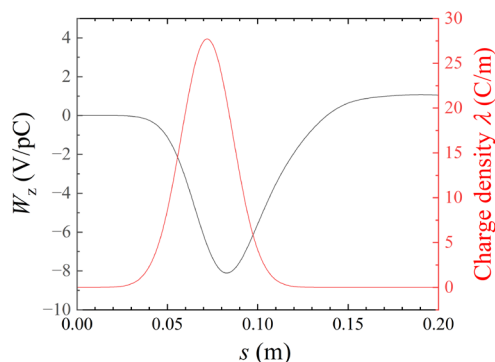


Figure 9: Calculated longitudinal wake potential (black line) of the APS cavity for a bunch length of 14.4 mm. Assumed charge distribution is also indicated by red line.

ロスファクターは $k = 5.608 \text{ V/pC}$ と計算された。加速空洞では、バンチが誘起する加速モードの電磁場は RF システムのエネルギー収支で扱われるため、ロスファクターのうち加速モードの寄与を差し引いた寄生モード・ロスファクターを使う必要がある。電磁場シミュレーションで得られたロスファクターを k 、加速モードのロスファクターを $k_0 = (\omega/4) \cdot (R/Q)$ 、加速モードの共振角周波数を ω 、時間で表した rms バンチ長を σ_τ とすれば、寄生モード・ロスファクターは

$$k_{\text{pm}} = k - k_0 \exp(-\omega^2 \sigma_\tau^2), \quad (8)$$

で与えられる[4, 5]。APS 空洞の加速モードのパラメータ $R/Q = 2006.2 \Omega$ を用いると、rms バンチ長 14.4 mm (48 ps) に対して、 $k_{\text{pm}} = 4.043 \text{ V/pC}$ が得られた。同様に計算した、バンチ長 $10 \sim 20 \text{ mm}$ に対する寄生モード・ロスファクターを Fig. 10 に示す。

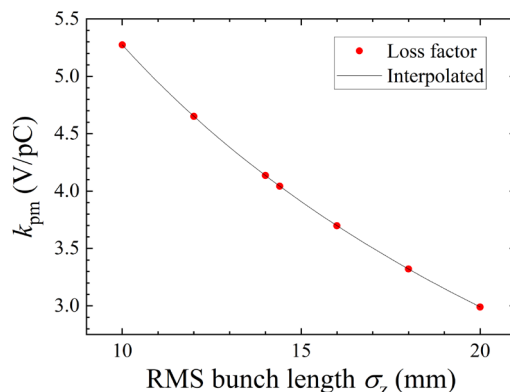


Figure 10: Calculated parasitic-mode loss factor of the APS cavity as a function of the rms bunch length. Solid line indicates a result of interpolation.

6. 考察

PF-AR おけるビーム負荷パワー (P_b) のビーム電流依存性を測定し、PF-AR の合計ロスファクターを求めた。その結果、5 GeV 運転時に 25.3 および 25.6 V/pC (2 回の測定結果) が得られ 6.5 GeV 運転時に 24.4 および

28.4 V/pC が得られた。ビームエネルギー6.5 GeV における測定では、シンクロトン放射損失に比べて寄生モード損失が小さいため、測定誤差が相対的に大きいと考えられる。

ビーム負荷パワーを解析する際、ロスファクターはビーム電流によらず一定であると仮定した。ストリークカメラを用いたバンチ長測定により、6.5 GeV 運転時にビーム電流 10~50 mA の範囲では、バンチ長はビーム電流によらずほぼ一定である事が示された。従って、少なくとも6.5 GeV 運転時にロスファクターが一定であるとした仮定は妥当である。

今回適用した RF パワー測定よりロスファクターを求める手法は、RF パワーの測定誤差の影響を受ける。特に、寄生モード損失電力がシンクロトン放射損失に比べて小さい場合には、結果は測定誤差に敏感になる。今回行った RF パワーの測定では、パワーの校正精度にまだ改善の余地がある。本手法を適用するには、できるだけ高い精度でパワーの校正を行うのが望ましい。

6.5 GeV 運転時に行ったストリークカメラを用いた進行方向バンチプロファイルの測定では、ビーム電流 20~50 mA の範囲で、バンチの中心位置がビーム電流と共にバンチ前方に移動する傾向が観測された。この 20~50 mA でのバンチ同期位相のシフトを用いて PF-AR のロスファクターを見積もったところ、28.1 V/pC の値が得られた。この結果は、RF パワー測定から得られた値(24.4 および 28.4 V/pC)と近い値である。ただし、ビーム電流 10 mA での振る舞いが不規則で、その理由が理解できていない。より信頼性の高いデータを得るには、ストリークカメラでの再測定が必要だと考えられる。ストリークカメラを用いたバンチ同期位相の測定では、RF 基準信号の伝送系や空洞 RF 電圧で位相がずれると、測定誤差になる。従って、基準信号や RF 系、ストリークカメラのトリガー系の安定度に注意すると共に、何回かの測定で再現性をチェックする必要があると考えられる。

ストリークカメラのデータ解析では、バンチのプロファイルをガウス分布でフィッティングした。大電流ではプロファイルがガウス分布からややずれるため、ガウス分布を仮定せず、バンチの電荷分布の一次モーメントを求めるなどの解析方法も試したい。

PF-AR で使用している APS 空洞のロスファクターを計算した結果、加速モードの寄与を差し引いた寄生モード・ロスファクターの値として、バンチ長 14.4 mm (48.0 ps) に対して 4.04 V/pC の値が得られた。PF-AR に設置されている空洞 6 台の合計では、24.24 V/pC となる。この値は、RF パワー測定で得られた PF-AR のロスファクター(24.4 または 28.4 V/pC)の 85~99%である。従って、PF-AR のロスファクターのうち、概ね 85%以上は APS 空洞の寄与であると考えられる。今後は、PF-AR の他の真空コンポーネントのロスファクターの評価も行いたい。

7. まとめ

PF-AR のビームエネルギー5 GeV および 6.5 GeV、単バンチ運転時に RF パワーの測定を行い、ビーム負荷パワー(P_b)のビーム電流依存性を測定した。その依存性をビーム電流の 2 次関数でフィットする解析により、PF-AR の合計ロスファクターとして、5 GeV 運転時に 25.3 および 25.6 V/pC、6.5 GeV 運転時に 24.4 および 28.4 V/pC が得られた。

PF-AR で使用している 6 台の APS 型加速空洞の寄生モード・ロスファクターの合計値は 24.2 V/pC と計算された。従って PF-AR のロスファクターのおよそ 85%以上は空洞の寄与であると考えられる。

また、ストリークカメラを用いたバンチ進行方向プロファイルの測定により、バンチ同期位相のビーム電流依存性が観測された。得られた結果はまだ信頼性が十分ではないが、ビーム電流 20~50 mA でのバンチ同期位相のずれを用いたところ、PF-AR のロスファクターとして 28.1 V/pC が得られた。

本稿で報告した RF パワー測定によるロスファクターの測定は簡便で実用的な方法である。パワー測定の精度をより高めることで、より高精度なロスファクターの測定が可能である。また、ストリークカメラを用いたバンチ同期位相のずれからロスファクターを求める方法も有望な方法である。RF 伝送系などでの位相安定度に注意して測定を行えば、信頼性のあるロスファクターの評価が可能であると考えられる。

謝辞

KEK の帯名崇氏には有益なコメントを頂き、阿達正浩氏にはスタディ時の挿入光源のパラメータを調べて頂きました。本研究は JSPS 科研費 JP24K15602 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] T. Obina *et al.*, “KEK 放射光源加速器 PF リングと PF-AR の現状”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 29-September 1, Funabashi, Japan, 2023, pp. 1088-1092.
- [2] 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, September 2-4, Online, 2020, pp. 303-307.
- [3] A. Novokhatski, “Overall HOM measurement at high beam currents in the PEP-II SLAC B-Facility”, Proceedings of PAC07, Albuquerque, USA, 2007, pp. 45-47.
- [4] J. N. Weaver, “Measuring, calculating, and estimating PEP’s parasitic mode loss parameters”, PEP-NOTE-342 (1981).
- [5] P. B. Wilson, “Introduction to wakefields and wake potentials”, AIP Conf. Proceedings 184 (1989) pp. 525-564.
- [6] K. Akai *et al.*, “RF System with room-temperature cavity of the TRISTAN e+e- storage ring”, KEK Preprint 86-54 (1986).