

次世代光源において過渡的ビーム負荷補償を行うためのキッカー空洞の検討 STUDY ON THE KICKER CAVITY USED FOR TRANSIENT BEAM-LOADING COMPENSATION IN THE NEXT-GENERATION LIGHT SOURCES

内藤 大地 ^{*A, B)}, 坂中 章悟 ^{A, B)}, 山本 尚人 ^{A, B)}, 高橋 毅 ^{A)}, 山口 孝明 ^{B)}

Daichi Naito ^{*A, B)}, Shogo Sakanaka ^{A, B)}, Naoto Yamamoto ^{A, B)}, Takeshi Takahashi ^{A)}, and Takaaki Yamaguchi ^{B)}

^{A)}High energy accelerator research organization (KEK)

^{B)}The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

Abstract

In ultra-low-emittance synchrotron light sources, emittance growth and shortening of the Touschek lifetime caused by the intrabeam scattering (IBS) should be taken great concern. To deal with these problems, a bunch-lengthening using the main and harmonic cavities had been proposed. The performance of this bunch-lengthening method is strongly affected by the change of the RF voltages in cavities since this method sets the slope of the total rf wave to be zero at the bunch center. In particular, gaps in the circulating bunch-train induce a voltage of transient beam-loading on each cavity, then, the bunch-lengthening is suppressed. To compensate the beam-loading, we had proposed a method using wide-band kicker cavity. In this paper, based on parameters of the KEK-LS, we evaluate effects of beam-loading on the kicker cavity and instabilities caused by the kicker cavity. Based on the evaluations, we discuss optimal parameters of the kicker cavity and propose its design.

1. はじめに

次世代光源の目標は回折限界に迫る極低エミッタンスの達成である。しかし 3 GeV クラスの蓄積リングでは周回する電子ビームのバンチ内散乱 (IBS) によるエミッタンスの増大と Touschek 寿命の減少が目標の妨げになる [1]。これまでの加速器でも IBS 対策としてバンチを伸長するため、主空洞と高調波空洞によるダブル RF システム [2] が採用されてきた。この方式は主空洞 RF の勾配を打ち消すように高調波 RF を加え、電子バンチの位置で合成 RF 電圧の勾配を平坦にする。その結果バンチが伸長されるが、その程度は各空洞の電圧変動に強い影響を受ける。とりわけ、イオン捕獲解消のためにバンチトレイン間に存在する空バケットがバンチ電荷の変動を起こし、RF 電圧が変動する。この現象は過渡的ビームローディング (TBL) と呼ばれ、この現象を緩和してバンチ伸長効率を改善する事が、次世代光源実現の課題である。

この問題を解決するため、我々のグループでは TBL の小さい 3 倍高調波空洞を用いた常伝導のダブル RF システムを提唱した [3]。またこの研究では広帯域かつ高電圧のキッカー空洞でバンチ毎に異なる電圧を与え、主空洞と高調波空洞に発生する過渡的電圧変動を補償する手法も提唱した。その中でキッカー空洞に必要な空洞電圧と帯域は明らかになったが、その他のパラメータの最適化や具体的なデザインは未検討だった。そこで本論文では KEK-Light Source [4] のビームパラメータを用いてより具体的にキッカー空洞が満たすべき性能について議論する。また現在開発中のキッカー空洞のデザインについても紹介する。

2. KEK-LS での過渡的ビームローディング補償

KEK-Light Source (KEK-LS) は次世代光源として検討されてきた蓄積リングである [4]。Table 1 に本論文で使用したビームパラメータとその記号の一覧を示す。KEK-LS は 3 GeV、0.5 A の電子ビームを蓄積する。またイオン捕獲を解消するためにバンチトレイン中に 60 ns のバンチギャップを 2 箇所設ける。次に先行研究 [3] で仮定したダブル RF システムのパラメータを Table 2 に示す。このダブル RF システムの導入により、平均バンチ長を高調波空洞が無い場合の 9.5 ps から 30.5 ps まで伸ばせると見積もられた。

Table 1: Parameters of the KEK-LS Used in This Study [4]

Parameter	Symbol	Value
Beam energy	E_0	3 GeV
Momentum compaction factor	α_c	2.1893×10^{-4}
Average beam current	I_{av}	0.5 A
Beam current per bunch	q_b	1 nC
Bunch interval	T_b	2 ns
RF frequency (fundamental)	f_{rf}	500.07 MHz
Harmonic number	h	952
Number of bunch gaps		2
Number of buckets in a gap	N_g	30
Revolution frequency	f_{rev}	525 kHz
Synchrotron frequency	f_s	2.65 kHz
Horizontal betatron tune	ν_x	48.58
Vertical betatron tune	ν_y	17.62
Longitudinal damping time	τ_s	22.63 ms
Horizontal damping time	τ_x	29.25 ms
Vertical damping time	τ_y	38.28 ms

* daichi.naito@kek.jp

先行研究ではさらにキッカー空洞を加えたバン

Table 2: Parameters of the Double RF System [3]

Parameter	Main RF	Harmonic RF
RF Voltage	2.5 MV	777 kV
Synchronous phase	1.178 rad	-1.708 rad
Tuning angle	-0.962 rad	1.433 rad
Total R/Q	875 Ω	386 Ω
Total shunt impedance	35 M Ω	14.48 M Ω
Cavity coupling coefficient	3.5	0.27
Total reflected power	0.4 kW	11.4 kW

チ伸長をシミュレーションで検証している。先行研究で仮定したキッカー空洞のパラメータを Table 3、キッカー空洞に与えた補償用 RF 電圧の実成分を Fig. 1 の黒線に示す。キッカー空洞では主空洞と高調波空洞内に誘起される過渡的 RF 電圧変動を打ち消すため、50 kV 程度の RF 電圧が必要となる。またキッカー空洞の帯域としてはリングの周回周波数の数倍以上が必要となる。先行研究では共振周波数での RF 電圧から電圧が 3 dB 減少するまでの周波数帯を 5 MHz とし、この補償システムで平均バンチ長を 40.9 ps にできると見積もられた。この値は TBL が無い場合の 42.5 ps のバンチ長に近い値で、この補償システムで十分に補正できると期待された。

Table 3: Parameters of the Kicker Cavity [3]

Parameter	Value
Frequency	500 MHz
Coupling coefficient	399
Loaded Q	100
R/Q	175 Ω
3-dB bandwidth	5 MHz
Cavity voltage (V_c)	45 kV

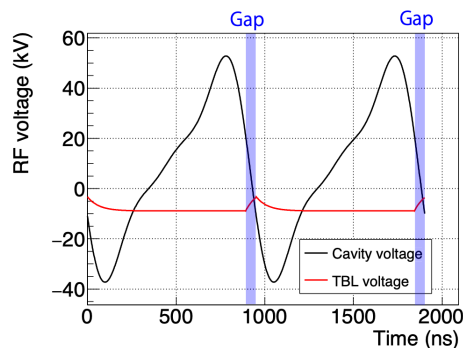


Figure 1: Voltages induced in the kicker cavity. The black line shows a required RF voltage (V_g) for compensating the TBL in case of the KEK-LS. The red line shows the estimated beam-induced voltage (V_b).

3. キッカー空洞の具体的な検討

本章ではキッカー空洞での過渡的電圧変動、入力電力、結合バンチ不安定性の観点から、キッカー空

洞のパラメーターの最適化について議論する。

3.1 キッカー空洞での過渡的電圧変動

キッカー空洞に励振される RF 電圧は外部から入力した RF パワーによる補償用電圧と、ビームが誘起する電圧 (V_b) の合成である。 V_b は一定であれば、ビームを減速するだけで電圧変動の補償に影響しない。しかし V_b の変動が大きいと電圧補償に影響があるので、その変動を小さくする必要がある。ここでは、バンチギャップによって誘起されるビーム誘起電圧の変動を見積もる。計算では全てのバンチが均一の電荷を持つと仮定し、バンチの同期位相の変化は無視した。 N 番目のバケットにおける RF 電圧を $V_b(N)$ とすると N 番目と $N+1$ 番目の電圧の関係は

$$V_b(N+1) = \exp(-\alpha) \left\{ V_b(N) + \frac{V_{b0}}{2} \right\} + \frac{V_{b0}}{2} \quad (1)$$

と書ける [5]。 V_{b0} は単一バンチが誘起する電圧で、バンチがあるバケット (バンチトレイン中のバケット数を N_b 、ギャップ中のバケット数を N_g とすると、1 から N_b または $N_b + N_g + 1$ から $2N_b + N_g$) では

$$V_{b0} = \pi f_a \frac{R}{Q} q, \quad (2)$$

その他の空バケットでは $V_{b0} = 0$ となる。ここで f_a はキッカー空洞の共振周波数、 R は TM010 モードのシャントインピーダンス、 Q はキッカー空洞の無負荷 Q 値、 q は電子バンチの電荷を示す。また α は、

$$\alpha = \pi \Delta f T_b (1 - j \tan \psi) \quad (3)$$

と書ける。 ψ はキッカー空洞のチューニング角、 T_b は電子バンチの間隔、 Δf は空洞の -3 dB の帯域幅を表している。 Δf は空洞の負荷 Q 値を Q_L とおくと

$$Q_L = \frac{f_a}{\Delta f} \quad (4)$$

という関係にあり、キッカー空洞の時間応答を決める。本研究では先行研究と同様に Δf を 5 MHz に固定して議論を進める。また $\psi = 0$ と設定した。

次にビーム誘起電圧の変動を具体的に計算していく。1 周前の最後のバケットでの電圧を $V_b(0)$ とすると、周期境界条件より $V_b(0) = V_b(2(N_g + N_b))$ が成り立つ。すると Eq. (1) を解く事ができ、キッカー空洞の周波数と R/Q を決めれば V_b の変動を計算できる。Figure 1 の赤線に Table 3 を用いて計算した TBL による電圧変動を示す。図では全てのバンチがリングを 1 周した時の電圧変動を示しており、空バケットがキッカー空洞を通過する度に電圧が大きく変動している事がわかる。先行研究では TBL 補正実現のために、ビーム誘起電圧の変動を 5.5 kV 以下にしなければならなかった。ここで電圧変動を ΔV_b とおくと $V_b(N_b) - V_b(0)$ から

$$\Delta V_b = \frac{(1 - \exp(-N_g \alpha))(V_b(N_b) - \frac{V_{b0}}{2} \exp(-N_b \alpha))}{1 - \exp(-(N_g + N_b) \alpha)} \quad (5)$$

$$V_0(N_b) = -\frac{V_{b0}}{2} + V_{b0} \sum_{n=0}^{N_b} \exp(-n\alpha) \quad (6)$$

と計算できる。Equation (5)-(6) の V_{b0} は Eq. (2) で表される値で、Eq. (5) は全ての項が V_{b0} を係数に持ち、

$$\Delta V_b \propto f_a \frac{R}{Q} \quad (7)$$

となる。よって先行研究での TBL 補正を実現するにはこの積を一定以下にしないといけない事がわかる。Figure 2 に ΔV_b と R/Q の相関を示す。キッカー空洞の共振周波数としては、主 RF 周波数の 1 倍、2 倍、3 倍、などの自由度がある。ここでは 3 倍高調波までを検討した。先行研究で仮定された 5.5 kV を ΔV_b の下限値として取れば、各周波数で許される R/Q は Table 4 で示すとおりとなった。

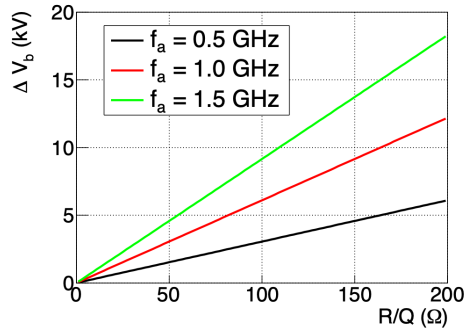


Figure 2: Correlation between ΔV_b and R/Q .

Table 4: Upper Limit of the R/Q to Realize the TBL Compensation for the KEK-LS [3]. The Δf is Set to be 5 MHz

Resonance frequency	R/Q (Ω)
500 MHz	175
1.0 GHz	88
1.5 GHz	58

3.2 キッカー空洞の最大入力電力

入力カップラー (結合度 β) から RF 電力 P_g を入力し、空洞内に RF 電圧 V_g を励振するとする。 P_g と V_g の関係は、

$$P_g = \frac{(1 + \beta)^2}{4\beta R} V_g^2 \sim \frac{\Delta f}{4f_a} \frac{1}{R/Q} V_g^2 \quad (8)$$

と書ける [5]。この計算では Table 3 の値を考慮して

$$\beta \sim 1 + \beta = Q \frac{\Delta f}{f_a} \quad (9)$$

という近似を使った。キッカー空洞自身の TBL による空洞内の電圧変動を抑えるには $f_a R/Q$ を小さくする必要があったが、これを小さくすると大きな

入力電力 P_g が必要になる事がわかる。Figure 3 に $V_g = 50$ kV の時の P_g と R/Q の相関を示す。 P_g は R/Q が 100 Ω 以下の領域で急激に変化しており、高周波源のコストを考慮すると R/Q は Table 4 で示された上限値に設定する事が望ましいと分かった。

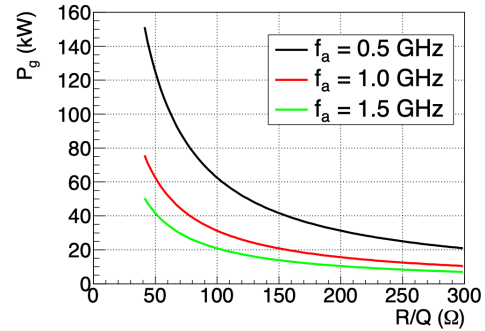


Figure 3: Correlation between P_g and R/Q .

3.3 キッカー空洞の加速モードによる結合バンチ不安定性

何らかの事情でキッカー空洞を使用しない際、周波数をずらしておく事が考えられる。その際にはキッカー空洞によって結合バンチ不安定性が起きるかどうかの問題となる。そこで本論文では全てのバケットに電子バンチが詰まっていると単純化して結合バンチ不安定性を計算した。キッカー空洞の加速モードによる結合バンチ不安定性の growth rate を $1/\tau_g$ とすると Table 1 に示したパラメータを使って

$$\frac{1}{\tau_g} = \frac{eI f_{\text{rev}} \alpha_c}{4\pi E_0 f_s} \sum_{p=1}^{\infty} \{ \omega_p^{(\mu)+} \text{Re}Z(\omega_p^{(\mu)+}) - \omega_p^{(\mu)-} \text{Re}Z(\omega_p^{(\mu)-}) \} \quad (10)$$

$$\omega_p^{(\mu)+} = \{(p-1)h + \mu\} 2\pi f_{\text{rev}} + 2\pi f_s \quad (11)$$

$$\omega_p^{(\mu)-} = (ph - \mu) 2\pi f_{\text{rev}} - 2\pi f_s \quad (12)$$

$$Z(\omega) = \frac{1}{1 + \beta} \frac{\frac{R}{2}}{1 + iQ_L \left(\frac{2\pi f_a}{\omega} - \frac{\omega}{2\pi f_a} \right)} \quad (13)$$

と書ける [6]。ここで μ は結合バンチ不安定性のモード数であり、0 から $h-1$ までの整数値を取る。さらに Eq. (13) から実成分を書き出すと、

$$\text{Re}Z(\omega) = \frac{1}{2} \frac{R}{Q} \frac{f_a}{\Delta f} \frac{\omega^2 (2\pi f_a)^2}{\omega^2 (2\pi f_a)^2 + \left(\frac{f_a}{f} \right)^2 ((2\pi f_a)^2 - \omega^2)^2} \quad (14)$$

となる。したがって Eq. (10)-(14) から、growth rate が大まかには $f_a R/Q$ に比例する事がわかる。次にキッカー空洞の f_a を変化させていった時に、growth rate がどう変化するかを Eq. (10)-(14) を使って計算した。Figure 4 に横軸をキッカー空洞の周波数にとり、上図にその周波数での最大 growth rate、下図に最大 growth rate を与えるモード数を示す。黒、赤、緑の線がそ

それぞれの R/Q での growth rate を示しており、青線が Table 1 に示した longitudinal radiation damping rate から許容できる最大の growth rate を示す。Equation (10)-(13) の形から分かるように、 f_a が hf_{rev} の半整数倍になると + と - の項が打ち消しあって growth rate が非常に小さくなる事が分かる。また Figure 4 で示された Maximum growth rate の周波数依存性と R/Q の相関関係より、 $f_a = 1.5$ GHz、 $R/Q = 58 \Omega$ では空洞に電力を入力しない場合にも周波数を 1.5 GHz に保たなければいけない事、その他のパラメータでは共振周波数をずらす事が可能だという事がわかった。

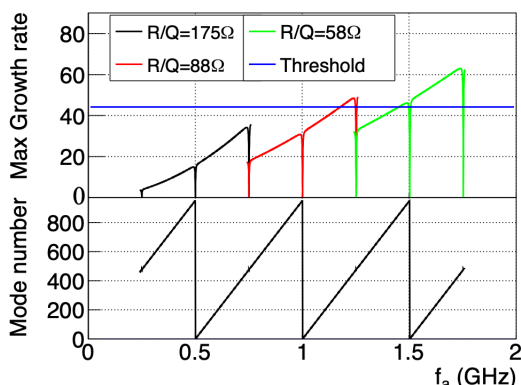


Figure 4: Maximum growth rate of the cavity-induced longitudinal coupled-bunch instability as a function of the resonant frequency.

3.4 パラメータ比較のまとめ

これまでの議論より、各周波数での最適な R/Q とその際の ΔV_b 、 $V_g = 50$ kV とした時の P_g 、デチューンの可否を Table 5 にまとめる。また次章の議論の参考に $V_g = 50$ kV かつ $\beta = 399$ の時の空洞壁損失電力 (P_c) も示す。この表からはどの周波数でも問題ない事が分かる。しかし実際の空洞デザインを考えると 1.5 GHz には以下の利点がある。

- 設置スペースが小さい。
- single mode cavity (SMC) [7] が応用可能。

1 点目はキッカー空洞には TM010 モードを励振するので、空洞半径が周波数に反比例して増大する事に起因する。2 点目は低い R/Q に起因する。SMC は空洞半径と比較して大口径でダクトと繋げる必要があり、80 Ω 以上の R/Q を実現する事が難しい。その特徴は高次モードを大きなダクトを介してビームパイプへ伝播させるので、空洞内に高次モードを減衰させる機構がいらず、空洞本体がコンパクトになる事である。上記の理由により、キッカー空洞として 1.5 GHz の SMC 型空洞が最適であると結論づけた。

4. キッカー空洞の試作デザイン

前章の議論を踏まえ、1.5 GHz の SMC 型空洞を電磁場シミュレーションコードである CST MW Studio [8] を用いて設計した。Figure 5 に概念設計した

Table 5: Proper Parameters of the Kicker Cavity Under the $\Delta f = 5$ MHz, the $V_g = 50$ kV and $\beta = 399$

Parameter	0.5 GHz	1 GHz	1.5 GHz
R/Q (Ω)	175	88	58
ΔV_b (kV)	5.4	5.4	5.3
P_g (kW)	35.7	35.5	35.9
P_c (kW)	0.35	0.35	0.36
De-tune	Yes	Yes	No

キッカー空洞の 3 次元図を示す。キッカー空洞は空洞本体、周回ビームパイプと接続するためのテーパ型ビームパイプ、RF 入力のための 2 本の WR-650 型導波管、高次モードを吸収するためのマイクロ波吸収体から構成される。

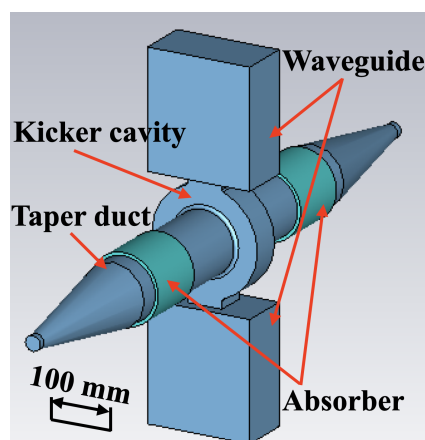


Figure 5: 3D view of the 1.5 GHz kicker cavity.

まず空洞形状の設計について説明する。空洞の外径形状はできるだけ R/Q を下げるため、単純な形とした。アイリスの形状、ノーズコーンについても検討を行なったが、高次モードをビームパイプへ伝播するには、単純な形状が一番良い結果になった。

次に導波管接続部の設計について説明する。5 MHz の広帯域を達成するには 300 以下の負荷 Q 値が必要だったので、接続部の開口を大口径 (48 mm × 55.7 mm) とし、導波管を上下から空洞に接続する事にした。導波管ポートの外部 Q 値は eigenmode solver と Slater の同調曲線法の組み合わせと、frequency domain solver での計算結果をクロスチェックしながら求め、空洞との接続部の口径と長さを最適化した。最適化の過程で導波管接続部での発熱が大きい事が判明したため、接続部の口径の形状も最適化した。その結果、50 kV の RF 電圧を励振した際の表面電流は導波管との接続部で最大 70 A/cm と十分許容できる大きさとなり、そこから計算される発熱密度も 26.6 W/cm² と許容できる値に収まった。

最後に吸収体とビームパイプの設計について説明する。ビームパイプのテーパ部分の角度は第 3 世代の光源リングを参考に 10° にした。吸収体はビームパイプへと伝播した高次モードを吸収するため、空洞の上下流の 2 箇所に設置した。吸収体の材質に

はフェライト (IB-004) を想定し、複素誘電率と複素透磁率は参考文献 [9] の測定結果を用いた。吸収体と空洞までの距離は吸収体での TM010 モードのロスが空洞全体のロスの 10% 以下になるギリギリの位置に設定した。また吸収体の端とビームパイプのテーパーが始まる位置までの距離によって高次モードが吸収される割合が変わるため、この部分の長さも最適化した。さらにビームパイプ径と吸収体の長さも最適化を行なった。上記 3 点の最適化の際には、キッカー空洞の高次モードによる縦方向および横方向の結合バンチ不安定性が起きない事を条件とした。結合バンチ不安定性が起きる結合インピーダンスの閾値は、縦方向の結合インピーダンスを $Z_{\parallel}(f_a)$ 、横方向の結合インピーダンスを $Z_{\perp}(f_a)$ とすると Table 1 で示した値を使って

$$\text{Re}[Z_{\parallel}(f_a)]_{\text{th}} = \frac{2f_s E_0}{e\alpha_c I_{\text{av}} f_{\text{rev}} \tau_s f_a} \quad (15)$$

$$\text{Re}[Z_{\perp}(f_a)]_{\text{th}} = \frac{4\pi\nu_{x,y} E_0}{ecI_{\text{av}} \tau_{x,y}} \quad (16)$$

と見積もられるので [6]、これを CST の wake field solver で計算した結合インピーダンスと比較した。最適化後の結合インピーダンスの周波数依存性を Fig. 6 に示す。左図が縦方向、右図が横方向の結合インピーダンスをそれぞれ示す。縦方向では一見、加速モードの結合インピーダンスが閾値を超えているが、加速モードの誘起する縦方向不安定性の growth rate は Fig.4 に示されるようにほぼゼロになるため、問題ない。横方向では 1.85 GHz のところに TM120 モードによるピークが見えているが、閾値よりも十分小さくできた。

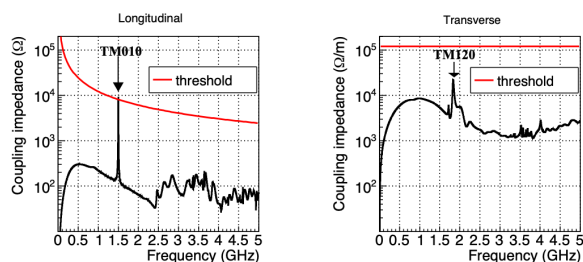


Figure 6: Frequency dependence of the coupling impedance of the kicker cavity.

現状のキッカー空洞の設計パラメータのまとめを Table 6 に示す。評価は CST の 2 つの solver を使って値の妥当性を担保した。両 solver での結果は一致し、概ね目標の R/Q と Q_L を達成する事に成功した。

5. まとめと今後

極低エミッタンスの次世代蓄積リングの実現にはバンチ内散乱によるエミッタンス増大と Touschek 寿命の減少を改善しなければならない。この問題を解決するため、我々のグループでは常伝導のダブル RF システムとキッカー空洞による過渡的ビームローディングの補償を提案した。本論文ではキッカー

Table 6: Parameters of the Designed Kicker Cavity Under $V_c = 50$ kV

Parameter	Eigenmode	Frequency domain
Frequency	1.50001 GHz	1.50003 GHz
R/Q	59.23 Ω	59.54 Ω
Q	16853	16814
Q_L	296	291
P_c	2.52 kW	2.53 kW
Max power density	26.6 W/cm ²	25.1 W/cm ²

空洞に発生する過渡的ビームローディング電圧やキッカー空洞への入力電力、結合バンチ不安定性の観点から、キッカー空洞に求められる要求をあきらかにした。またこの結果から 1.5 GHz の single mode cavity 型空洞をキッカー空洞として提案した。CST を用いてデザインの検討を行い、概ね要求性能を満たすキッカー空洞の設計を実現した。高次モードによる結合バンチ不安定性についても評価を行い、高次モードが十分減衰できている事も確認できた。今後はこの空洞のコールドモデルを作成して各種パラメータを実測するとともに、過渡的ビームローディングを補償するためのフィードバック回路の開発を進めていく。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20H04459 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] S. Leemann, “Interplay of Touschek Scattering, Intrabeam Scattering, and RF Cavities in Ultralow-emittance Storage Rings”, in the Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference, 2014, TUPRI025.
- [2] A. Hofmann, S. Myers, “Beam dynamics in a double RF system”, CERN-ISR-TH-RF-80-26.
- [3] N. Yamamoto, T. Takahashi, S. Sakanaka, “Reduction and compensation of the transient beam loading effect in a double rf system of synchrotron light sources”, Physical Review Accelerators and Beams **21** (1) (2018) 012001.
- [4] KEK 放射光 Conceptual Design Report (CDR) ver. 1.1 (2017).
- [5] Perry B. Wilson, and James E. Griffin, “High energy electron linacs; application to storage ring RF systems and linear colliders”, AIP Conference Proceedings **87**, 450, 1982, pp. 486-495.
- [6] 赤井和憲, RF システム, 高エネルギー加速器セミナー OHO’ 94 (1994), pp. 17-31.
- [7] T. Weiland, “Single mode cavities a possibility for fighting collective beam instabilities”, DESY 83-073.
- [8] <https://www.3ds.com>
- [9] S. Terui *et al.*, “Development of HOM absorbers for Super KEKB”, in the Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, 2017, p. 704.