

SuperKEKB のビーム電流増強に向けた RF システムの課題

ISSUES FOR SuperKEKB RF SYSTEM FOR FUTURE BEAM CURRENT INCREASES

赤井和憲^{*}、阿部哲郎、池野孝、榎本瞬、岡田貴文、小笠原舜斗、小野礼人、小野正明、影山達也、小林鉄也、坂井浩、竹内保直、中西功太、西脇みちる、古屋貴章、丸塚勝美、光延信二、森田欣之、山口孝明、吉田正人、吉野一男、吉本伸一、渡邊謙

Kazunori Akai^{*}, Tetsuo Abe, Takashi Ikeno, Shun Enomoto, Takafumi Okada, Shunto Ogasawara, Ayato Ono, Masaaki Ono, Tatsuya Kageyama, Tetsuya Kobayashi, Hiroshi Sakai, Yasunao Takeuchi, Kota Nakanishi, Michiru Nishiwaki, Takaaki Furuya, Katsumi Marutsuka, Shinji Mitsunobu, Yoshiyuki Morita, Takaaki Yamaguchi, Masato Yoshida, Kazuo Yoshino, Shin-ichi Yoshimoto, Ken Watanabe
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

SuperKEKB started beam collision operation in 2018 and the peak luminosity has exceeded twice that of the KEKB record. The stored beam currents have been increased up to 1.5 A in the LER and 1.2 A in the HER while carefully taking into account various hardware risks and other factors. The RF system does not currently limit the beam currents, but will enter a new regime in the near future, aiming at the design currents of 3.6 A in the LER and 2.6 A in the HER, which are twice those achieved at KEKB. Consequently, we studied the issues for the RF system for future beam current increases: we evaluated the maximum beam currents allowed with the present RF system, as well as necessary improvements for further increases aiming at the design beam currents. We discuss the issues from RF system-wide perspective with specific points as: (1) beam power supply capacity, (2) performance of HOM dampers in the ARES and SC cavities, and (3) measures for the stability issues of the accelerating mode under heavy beam loading.

1. はじめに

SuperKEKB はナノビーム衝突方式を採用し [1]、前身の KEKB から大幅な改造を行って 2018 年に衝突実験を開始した [2]。ピークルミノシティはこれまでに $4.65 \times 10^{34} / \text{cm}^2\text{s}$ に達し [3]、今後さらに β_y^* を絞るとともに蓄積ビーム電流を高めることで、設計性能の達成を目指している。蓄積ビーム電流は各種ハードウェアのリスク等を考慮しつつ慎重に増やしてきており、これまでの運転での最大値は陽電子リング (LER) 1.5 A、電子リング (HER) 1.2 A である。

設計ビーム電流は LER 3.6A、HER 2.6A と、いずれも KEKB 実績値の約 2 倍である。RF システムは現状ビーム電流の制限要因となっていないが、今後新たな電流領域に向かうに備え、現有 RF システムで蓄積可能な最大ビーム電流を評価するとともに、更なるビーム電流増強に向けた課題について検討した。具体的なポイントは、(1) ビームパワー供給能力、(2) ARES と SCC 各空洞の高次モード (HOM) ダンパーの性能、(3) ビームローディングに起因する加速モードの不安定性への対策である。本報告では、個別課題のこれまでの検討状況も踏まえ、SuperKEKB の長期運転計画策定に資する目的で、RF システム全体として俯瞰する。

なお、以下では触れないが、TRISTAN および KEKB から数十年経過する機器を現在でも多く運用しており、これらの適切な老朽化対策も、今後長期間安定な運転を維持するうえで重要である [4,5]。

2. RF システムの概要

SuperKEKB の RF ステーションの配置を Fig. 1 に示す。加速空洞には、大電流ビーム蓄積用に開発され、KEKB で高い実績を持つ常伝導 ARES 空洞 [6] および HOM 減衰型超伝導空洞 (SCC) [7] を、SuperKEKB の要求に適合させて使用している。Table 1 に KEKB 実績値 [8] と SuperKEKB 設計値 [9] の RF 関連マシンパラメータ比較を示す。各リングの RF 加速電圧 V_c は同程度であるのに対し、ビーム電流およびビームパワーは 2 倍程度、SuperKEKB 設計値が高い。このため、クライストロンを増設し、ARES 空洞の配置換えと入力ケーブル改造を行って、クライストロン 1 本で ARES 空洞 1 台をドライブする 1:1 構成のステーションを導入した (KEKB は 1:2 構成) [10]。14 台の ARES 空洞につ

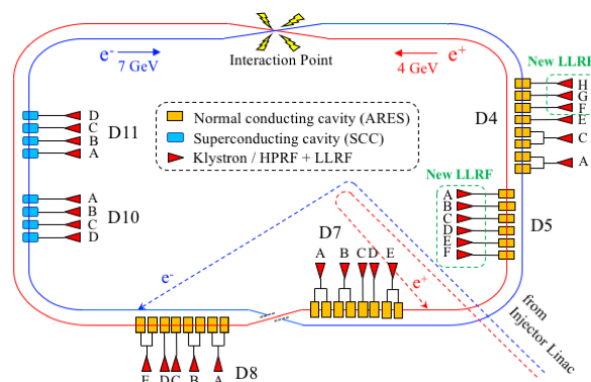


Figure 1: Layout of RF stations with the ARES and SC cavities in the LER and HER of SuperKEKB.

^{*} kazunori.akai@kek.jp

Table 1: RF-related Machine Parameters Achieved in KEKB and Those of the Design Values in SuperKEKB

| Parameter | unit | KEKB (achieved) | | SuperKEKB (design) | |
|-----------------------------|-------|-----------------|-------------|--------------------|--------------------|
| | | LER | HER | LER | HER |
| Beam energy | [GeV] | 3.5 | 8.0 | 4.0 | 7.0 |
| Beam current | [A] | 2.0 | 1.4 | 3.6 | 2.6 |
| Total RF voltage | [MV] | 8 | 13~15 | 10~11 | 15 |
| Radiation loss/turn | [MV] | 1.6 | 3.5 | 1.76 | 2.43 |
| Total beam power | [MW] | 3.3 | 5.0 | ~7 | ~7 |
| Cavity type | | ARES | ARES / SCC | ARES | ARES / SCC |
| No. of cavities | | 20 | 12 / 8 | 22 | 8 / 8 |
| No. of klystron stations | | 10 | 6(+1) / 8 | 18 [†] | 8 [†] / 8 |
| RF operating voltage/cavity | [MV] | 0.4 | 0.31 / 1.24 | ~0.5 | ~0.5 / 1.3~1.5 |

[†]Till date, partially increased to 16 (LER) and 6 (HER) for the ARES stations.

いて 1:1 構成への組替えをコミッショニング開始前までに完了し、当初計画で想定された SuperKEKB 最終形には LER、HER いずれもクライストロン 2 本の増設を残している (Table 1 脚注)。大電力や制御系の構成機器の多くは KEKB からの再利用であるが、新たにデジタル LLRF を開発し [11]、9 箇所の RF ステーションで運用している。

3. 加速位相差導入によるビーム負荷最適化

LER には 1:2 および 1:1 構成 ARES の 2 種類の、HER にはさらに SCC も含めて 3 種類の RF ステーションが共存している。これらは、空洞に関連するパラメータや許容されるパワーなどがそれぞれ異なる。そこで、異なるタイプの RF ステーションの加速位相を相対的にずらし、ビーム負荷を最適にバランスさせることで、RF システムがビームに供給できるパワーを最大化させる。KEKB の HER においても、SCC のビーム負荷軽減を目的として ARES に対して約 10° 位相差をつけていたが、SuperKEKB の大電流ビーム運転ではこの手法が不可欠となる。以下では、この手法で蓄積ビーム電流をどこまで最大化できるかを、定量的に評価した。

前述の最終形のステーション数は、現有建屋の収容能力を活かし、故障等で一部のステーションを運転から外す場合に補償できるよう、余力も考慮して設定された。しかし、本稿ではコスト抑制の観点を重視し、現有ステーション構成で可能な最大電流、および設計ビーム電流蓄積に最小限必要な追加増設に絞って評価する。

3.1 評価計算方法

蓄積ビームが放射光と parasitic loss で失うパワーの補填に必要な空洞入力パワー P_{in} とクライストロン出力パワー P_{kly} を計算する際に、各ステーションタイプ毎の位相を独立変数とした。計算に用いたパラメータを Table 2 に示す。導波管やサーキュレータなどの大電力機器での伝送ロス を 7% とした。また、空洞および大電力機器が実用的に安定運転を行える最大パワーを規定した。リスクおよびマージンの取り方にも依存するが、各機器の設計性能やこれまでの運転実績等を踏まえ、クライストロンあたり ARES では $P_{kly} < 800$ kW、SCC は

Table 2: Parameters for the RF Power Calculation

| Klystron : Cavity | ARES | | SCC |
|--------------------------------|-------------------------|-----|-----------------------|
| | 1:1 | 1:2 | 1:1 |
| RF freq. (f_{rf}) [MHz] | 508.9 | | |
| Revolution (f_{rev}) [kHz] | 99.4 | | |
| R/Q [Ω] | 15 | | 93 |
| Q values | $(Q_0) 1.1 \times 10^5$ | | $(Q_L) 5 \times 10^4$ |
| Input coupling β | 5.0 | 2.7 | - |
| V_c [MV/cav] | 0.5 | | 1.35 |
| Tuning offset [deg] | -5 | | -8 |

$P_{kly} < 400$ kW とした。その上で、ステーション位相を任意に与えて P_{kly} をビーム電流 I_b の関数として計算し、この制限を満たす最大ビーム電流を求めた。

なお、parasitic loss V_{para} はバンチ長 σ_z に依存するが、LER は平衡位相のバンチ電流依存性の測定結果 [12] からロスファクターを $k_{loss} \sim 24$ V/pC と見積もって、設計ビーム電流では $V_{para} \sim 0.35$ MV となる。一方 HER は空洞やビームパイプの多くを KEKB から再利用しているので、KEKB の測定データ [13] から $\sigma_z = 6 \sim 7$ mm で $k_{loss} = 30 \sim 40$ V/pC と見積もり $V_{para} = 0.32 \sim 0.42$ MV。これらを考慮し、必要パワーを過小評価しないよう、両リングとも $V_{para} = 0.5$ MV に設定した。

3.2 計算結果

LER について、現有 RF ステーション構成で計算した結果を Fig. 2 に示す。点線は位相差をつけない場合である。およそ 2.1 A で 1:2 ステーションの P_{kly} が実用的リミットの 800 kW を超えるため、ここでビーム電流が制限される。これに対し、位相差 11° をつけて 1:1 ステーションのビーム負荷を重くした場合を実線で示す。この位相差導入により、LER は追加のクライストロン増設を行わず現有システムのみで、設計値 3.6 A のビーム蓄積に必要なビームパワーが供給できる。

同様に、HER について、現有 RF ステーション構成での計算結果を Fig. 3 (a) に示す。位相差をつけない場合

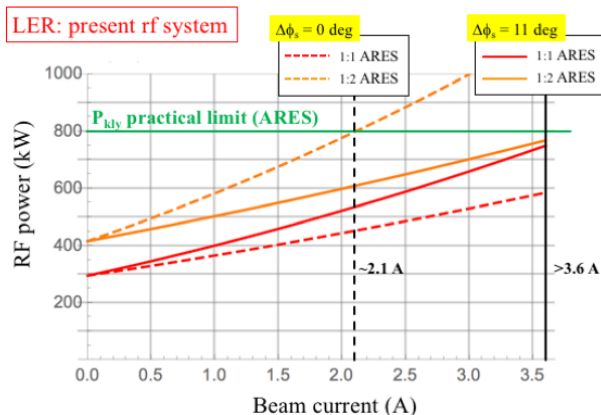


Figure 2: RF power delivered to beam as a function of beam current with the present RF system in the LER. The red (orange) lines show the 1:1 (1:2) stations. The dotted (real) lines indicate the relative phase difference between the 1:1 and 1:2 stations of 0 (11) degrees.

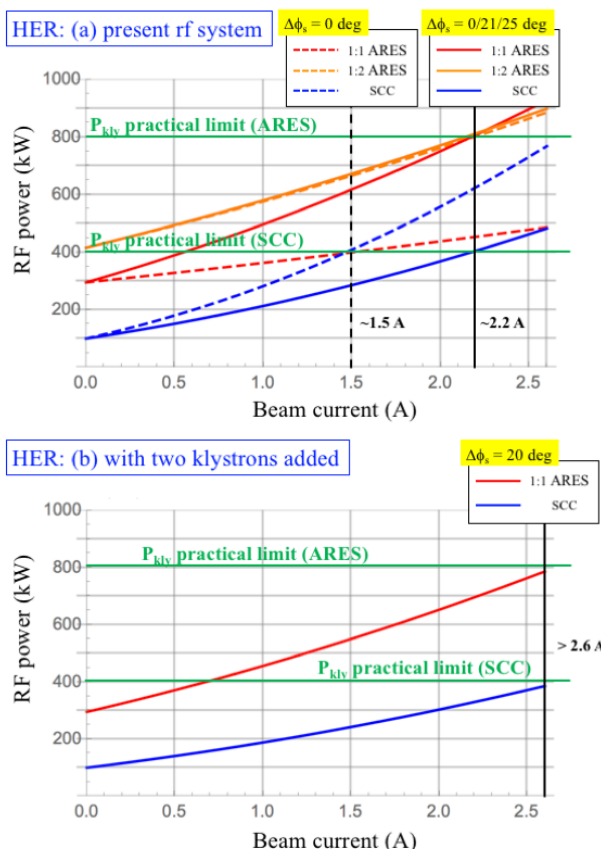


Figure 3: RF power delivered to beam in the HER: (a) with the present RF system, and (b) with two klystrons added to make all ARES cavities into the 1:1 configuration. The red, orange, and blue lines show the 1:1 ARES, 1:2 ARES, and SCC stations, respectively. The dotted lines in (a) indicate without introducing the phase difference. The real lines in (a) and (b) indicate with appropriate relative phases introduced.

(点線)、約 1.5 A で SCC の P_{kly} が制限値 400 kW を超え、ここでビーム電流が制限される。そこで、SCC から 1:1 ARES にビーム負荷を移し、かつ 1:2 ARES の負荷は大きく変えないような位相差を設定する。1:1 ARES を基準として 1:2 ARES は 21°、SCC は 25° に設定すると (実線)、全てのステーションで最適なビーム負荷バランスが得られ、2.1~2.2 A 程度まで増やせる。

HER の設計ビーム電流 2.6 A の蓄積には、計画で想定された最終形 (クライストロン 2 本を増設して 8 台全ての ARES を 1:1 にする) にする必要がある。この構成にすれば、Fig. 3 (b) に示すように、SCC と ARES 間の位相差 20° の設定で、2.6 A までビームパワーを供給できる。この加速位相差の導入により全加速電圧 (V_c のベクトル和の絶対値) は減少するが、シンクロトロン振動数 (f_s) 換算でたかだか 0.6% 程度の違いである。

なお、大電流ビーム蓄積では僅かな位相変化でビーム負荷バランスが大きく変化する。また、個々のステーションの特性に応じた微調整が必要な場合もある。設定されたビーム負荷配分を精密に維持するために、各ステーションの RF 電力収支から加速位相のずれを評価して補正するツールを開発し、運用に供している [14]。

4. HOM ダンパー

4.1 SCC 用 HOM ダンパー

SCC は空洞セル上下流のビームパイプ (SBP 220φ、LBP 300φ) にフェライト製円筒形 HOM ダンパーを装備している (Fig. 4 参照)。KEKB では最大ビーム電流 1.4 A、空洞あたり HOM パワー 16 kW で安定に運転した実績を持つ。しかし、SuperKEKB の設計パラメータでは空洞あたり 37 kW が見込まれ、このダンパーの能力を超えると予想される。発熱の増大により、フェライト表面からの放出ガスが空洞性能を損なう懸念や、銅製冷却ジャケットとの接触面でのフェライトのクラック発生リスクが高くなる。一方で冷却能力は、配管の腐食防止のため冷却水流量が制限されることや、チラーの性能の限界がある。フェライトダンパーの改造・交換は空洞真空を破る作業で空洞性能劣化のリスクがあるため、別の方策を検討した。

シミュレーション計算によると、SCC で発生する

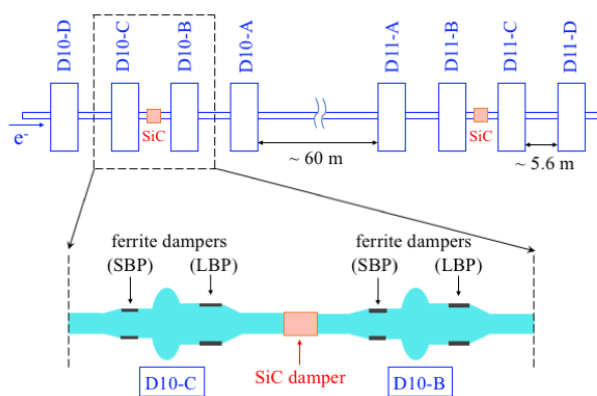


Figure 4: Layout of ferrite HOM dampers in the SCC with additional SiC dampers between the cavities.

HOM パワーのうち約 40 % は LBP 側ダンパーより下流側に抜けて流れ、隣接する空洞のダンパーの負荷となる。そこで、空洞間に SiC 製ダンパーを置いてパワー吸収を分担させることで、SiC 自体のロスファクターにより HOM パワー総量は増えるものの、フェライトダンパーへの負荷は減少することが期待される [15]。この効果を検証するため、Fig. 4 に示すように、D10C-D10B 空洞間および D11B-D11C 空洞間に 1 セットずつ、SiC ダンパーを設置した。SuperKEKB ビーム運転における測定で、SiC ダンパー直下流空洞のフェライトダンパーの吸収パワーの低減が実際に確認された [16, 17]。今後のビーム電流増加に備えて、他の空洞間にも SiC ダンパーを順次設置していく計画である。合わせて、能力の高いチラーへの置き換えや冷却システムの工夫などによって冷却能力の強化を図っており、一部のステーションで試験運用を進めている。

なお、測定データの最近の精密な解析で、LBP 側ダンパーの吸収パワーはバンチフィルパターンに依存し、大電流蓄積で運用されている 2 バケット間隔フィルでは計算値よりも 1 割程度高いことが判明した (SBP 側は計算値に近い)。これは一部の HOM の共鳴励起効果で説明できる [17]。インピーダンスが比較的高く、かつ共鳴周波数が LBP 側カットオフより高く SBP 側より低いモード (TM011 (1018MHz) など) が問題となる。このパワーは追加 SiC ダンパー部に流れてこないため、SiC による負荷分担効果は期待できない。

さらに、SBP 側、LBP 側いずれも、個々のフェライトダンパーの吸収パワー測定値は空洞毎にばらつきがあり、運転条件によっては約 30 % もの開きがある [18]。この要因として、ダンパーの個体差のほか、RF 直線部内の空洞の位置により他の空洞から流れ込む HOM パワーが異なること、上述の HOM 周波数の空洞毎の僅かな違いによって共鳴励起効果の強さが異なることなどが考えられる。最も条件の厳しいダンパーによって今後 HER の蓄積ビーム電流が制限される懸念があるため、吸収パワーの個体差の原因を究明し、なかでも特に厳しい状況にあるダンパーについて事態を緩和する何らかの有効な対策を探ることも重要である。

4.2 ARES 空洞部ダンパー

ARES 空洞は加速空洞と貯蔵空洞を結合空洞を介して電磁的に結合させた三連結空洞の構造を持つ。HOM ダンパーとして、加速空洞セルに取り付けた導波管型 (WG) のもの 4 組に加え、上下流ビームパイプ上下に溝付きタイプ (Groove) のものを装着している。吸収体素材にはいずれも SiC を用いている。Table 3 に示すように、両タイプとも、KEKB での吸収パワー実績値に対して、SuperKEKB 設計ビーム電流では 3 倍程度高い吸収パワーが見込まれる。これらの HOM ダンパーは、テストスタンドでのパワー試験により、SuperKEKB 設計値での運転に十分なマージンを持って使用できることが示されている (Table 3 の rating) [9]。

結合空洞部 (C-cav) には別のダンパーを装着している。連結三空洞の加速周波数帯域内に生成されるモードのうち、ビーム加速に使う $\pi/2$ モードは高い Q 値を維持しつつ、寄生モード (0 および π モード) の Q 値を 100 程度に低減させるために、C-cav に励起されるフィールドを吸

Table 3: ARES HOM Damper Handling Power Capability in the LER of KEKB and SuperKEKB [9]

| | KEKB | SuperKEKB | |
|-------------------------|-------------------|-----------|---------------------|
| | achieved | design | rating [‡] |
| Beam current [A] | 1.6 | 3.6 | |
| No. of bunches | 1293 | 2503 | |
| Bunch length [mm] | 7 | 6 | |
| Loss factor [V/pC] | 0.39 [†] | 0.44 | |
| HOM power / ARES [kW] | 5.4 [†] | 17 | |
| HOM power / WG [kW] | 1.05 [†] | 3.3 | 5.0 |
| HOM power / Groove [kW] | 0.3 [†] | 0.93 | 1.2 |

[†]Based on calorimetric measurement.

[‡]Continuous power handling rating estimated from power tests.

収するものである。このダンパーには、アポートギャップによって過渡的にたつフィールドからのパワーも加わるほか、空洞内の放電などに起因するトリップの際にパルス的に発生するパワーを吸収する役割もある。ビーム電流の増加とともにこのダンパーの平均吸収パワーが増大し、設計ビーム電流では 1:1 ステーションで 30 kW 程度に達すると予測される。現在 C-cav 用に使用している水冷ダミーロードの冷却不足が懸念されるため、冷却水流量増加をはかる、より高い定格のダミーロードに換装する、などの対策を検討している。

このほか、RF 直線部の両端に、空洞で発生した HOM パワーを RF 区間で閉じる目的で、KEKB 用に製造された SiC 製円筒型の吸収体が設置されている。SuperKEKB での運転実績をもとに設計ビーム電流での吸収パワーを評価するとともに、性能上限を見極めるためにテストスタンドでのハイパワー試験を進めている [19]。

5. ビーム負荷と加速モードの不安定性

大電流ビーム蓄積においては、加速モード帯域内での加速空洞へのビームローディングに起因する縦方向ビーム不安定性が問題となる。特に、ゼロモード (加速周波数) は、Robinson 不安定性に関連して、ビームと RF 制御システムとの相互作用を十分に考慮した検討が必要である。また、インピーダンスの高い SCC はこの問題をより顕在化させる。

KEKB においてゼロモードの安定化のために、直接 RF フィードバック (direct RF feedback, DRFB) およびゼロモードダンパー (zero-mode damper, ZMD) を導入した [20]。前者はゼロモード振動の励起に寄与する空洞インピーダンスを下げ、後者は振動の発生を検知して減衰させる機能をもつ。SuperKEKB でも引き続き DRFB と ZMD を使用してゼロモードの安定化を図っている。Figure 5 に HER の例を示す。緑色枠部分は各 RF ステーション (代表例として D11-A を記載) の制御システム概要を表しており、空洞電圧制御ループに DRFB が組み込まれている。青色部分が ZMD 系を表し、ビームピックアップ信号からゼロモード振動成分を取り出し、リングの基準 RF 信号の移相器に位相変調をかけている。

SuperKEKB の今後の電流増強に向けて、DRFB、

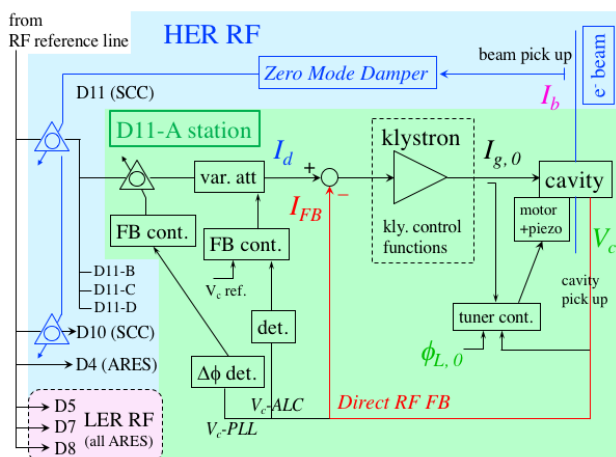


Figure 5: Schematic view of the LLRF system for SuperKEKB, while highlighting one SCC station (D11-A) in the green colored part. The blue (red) colored region correspond to the HER (LER) rf.

ZMD、および空洞電圧と位相制御も含めた RF システム全体の機能を解析し、ゼロモードの安定性の確保に必要な対策を検討した [21]。その研究では、まず、Pedersen [22] が導出した空洞の伝達関数を、新たに DRFB を装備した系に拡張し定式化した。次に、ビーム負荷のもとでの各種フィードバックを含めた RF システム全体の特性を、特性方程式による安定性評価、および時間領域でのシミュレーションの 2 つの独立した手法を用いて評価した。両者で矛盾の無いことを確認するとともに、SuperKEKB での観測データ [23] との比較も行い、解析手法の妥当性を確認した。さらに、1:1 と 1:2 の各 ARES ステーションおよび SCC の共存する SuperKEKB の RF システムをできるだけ忠実にモデル化し、この手法を用いて解析した。設計ビーム電流に向けたゼロモード安定性確保のために、(1) 現状では ARES の運転電圧は定格より低い、これを定格まで上げる、(2) 一部のステーションのみに適用している ZMD を、リング全周の RF に拡張する、(3) 空洞離調の増加に見合った制御ループの最適化 (具体的には、 V_c 制御ループの帯域制限や位相・振幅間結合を緩和するデカップリングの導入、および DRFB ゲインの最適化) などの方策を提示し、その有効性を定量的に示した [21]。なお、第 3 章で述べた加速位相差の導入は、ゼロモード安定性向上の観点からもメリットがあることも示された。

このほか、ビーム負荷に整合させる空洞ディチューンによって $f = f_{rf} - nf_{rev} + f_s$ ($n = 1, 2, \dots$) の周波数に励起される不安定性 (いわゆる -1 , -2 モードなど) への対策として、各モード毎に独立に振動を抑えるダンパーを開発し、運転に使用している [24]。現在は各リング 2 台の RF ステーションのみに適用しているが、今後のビーム電流増加でフィードバックのパワーが不足する事態に備え、ダンパー運用ステーション数を増やす方向で増強を図る。

6. まとめ

SuperKEKB の今後のビーム電流増強に向けた RF システムの課題について検討した。まず、(1) 1:1 と 1:2 構成の ARES および SCC のステーションに相対的に異なる加速位相を設定してビーム負荷バランスを最適化し、ビームパワー供給能力を最大化させる。この手法を適用し、空洞および大電力機器が安定運転を行える範囲で、実用的な最適解を計算した。結果、LER は現有 RF システムで設計値 3.6 A のビームパワー供給ができる。HER は現有システムではこの手法をもってしても 2.2 A 程度が限界となるが、クライストロン 2 本を増設し、予定された最終形にすることで、設計値の 2.6 A に必要なビームパワー供給ができる。次に、(2) 今後の HER ビーム電流増加に向け、SCC のフェライト製 HOM ダンパーの発熱を許容範囲に収めるため、すべての隣接空洞間に追加 SiC ダンパーを設置してフェライトへの熱負荷を下げることや、冷却能力の強化策の検証を進めることに加え、吸収パワー測定値の特に大きい個体については個別対策の検討も重要となってくる。ARES 空洞については、結合空洞用ダンパーおよび直線部両端の円筒形 SiC ダンパーが LER 3.6 A 蓄積に耐えるよう、より高い定格のものへの換装や冷却強化の検討を進めている。さらに、(3) 大電流ビームローディングに起因する加速ゼロモード不安定性への対策として、ARES 運転電圧を定格まで高めること、ZMD のリング全周への拡張、各種フィードバックループのビーム電流に応じた最適化などを、また -1 , -2 モード用のダンパーの増強も進めていく必要がある。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, "Accelerator design at SuperKEKB", Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A011 (2013).
- [2] K. Akai, "SuperKEKB status - Belle II physics run started", Proc. the 39th ICHEP, International Conference on High Energy Physics, Seoul, Korea, 2018, p. 102.
- [3] Y. Funakoshi *et al.*, "The SuperKEKB has broken the world record of the luminosity", Proc. 13th PAC, Bangkok, Thailand, 2022, pp. 1-5.
- [4] K. Watanabe *et al.*, "Current status of the high power RF system for SKEKB MR in LS1", Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. 2023, pp. 586-590.
- [5] T. Kobayashi *et al.*, "Operation status of LLRF control system in SuperKEKB", Proc. PASJ2021, QST-Takasaki (Online), Japan, Aug. 2021, pp. 541-545.
- [6] Y. Yamazaki and T. Kageyama, "A three-cavity system which suppresses the coupled-bunch instability associated with the accelerating mode", Part. Accel., 44, 107 (1994).
- [7] T. Furuya *et al.*, "Achievements of the superconducting damped cavities in KEKB accelerator", Proc. SRF2003, Lubeck/Travemunder, Germany, 2003, p. 78.
- [8] T. Abe *et al.*, "Performance and operation results of the rf systems at the KEK B-Factor", Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A006 (2013).
- [9] T. Abe *et al.*, "Technical Design Report of SuperKEKB". <https://kds.kek.jp/indico/event/15914>
- [10] K. Akai *et al.*, "RF system for SuperKEKB", Proc. PASJ2010, Himeji, Japan, Aug. 2010, pp. 177-181.

- [11] T. Kobayashi *et al.*, “Development and construction status of new LLRF control system for SuperKEKB”, Proc. IPAC2014, Dresden, Germany, 2014, pp. 2444-2446.
- [12] M. Tobiyama, private communication.
- [13] T. Ieiri, K. Akai, and N. Akasaka, “Measurement of longitudinal coupling impedance at KEKB”, Proc. the 12th Sympo. on Accel. Sci. and Tech., Wako, Japan, 1999, p. 409.
- [14] S. Ogasawara *et al.*, “Adjustment of rf phase and beam loading distribution among rf stations in SuperKEKB”, Proc. PASJ2022, (Online), Japan, Oct. 2022, pp. 440-444.
- [15] M. Nishiwaki *et al.*, “Developments of SiC damper for SuperKEKB superconducting cavity”, Proc. SRF2015, Whistler, BC, Canada, 2015, pp. 1289-1292.
- [16] M. Nishiwaki *et al.*, “Status of superconducting accelerating cavity at SuperKEKB Phase-2 operation”, Proc. PASJ2018, Nagaoka, Japan, Aug. 2018, pp. 428-432.
- [17] T. Okada *et al.*, “Loading test of HOM dampers for superconducting cavities for high current at SuperKEKB”, Proc. SRF2023, Grand Rapids, MI, USA, 2023, pp. 271-274.
- [18] M. Nishiwaki and T. Okada, private communication.
- [19] S. Enomoto *et al.*, “Performance evaluation of SiC-HOM duct for the section of the ARES cavities in SuperKEKB”, Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. 2023, pp. 800-803.
- [20] K. Akai *et al.*, “RF systems for the KEK B-Factory”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A 499, pp. 45-65 (2003).
- [21] K. Akai, “Stability analysis of rf accelerating mode with feedback loops under heavy beam loading in SuperKEKB”, Phys. Rev. Accel. Beams 25, 102002 (2022).
- [22] F. Pedersen, “Beam loading effects in the CERN PS booster”, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-22, No. 3, 1906 (1975).
- [23] K. Akai *et al.*, “Verification of rf feedback to suppress longitudinal instability due to beam loading in SuperKEKB”, Proc. PASJ2020 (Online), Japan, Sep. 2020, pp. 320-324.
- [24] K. Hirose *et al.*, “Advanced damper system with a flexible and fine-tunable filter for longitudinal coupled-bunch instabilities caused by the accelerating mode in SuperKEKB”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A 953, 163007 (2020).