

SuperKEKB 加速空洞における過渡的ビーム負荷の状況

PRESENT SITUATION OF TRANSIENT BEAM LOADING IN SuperKEKB ACCELERATION CAVITY

小林鉄也*, 阿部哲郎, 山口孝明

Tetsuya Kobayashi*, Tetsuo Abe, Takaaki Yamaguchi
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Transient beam loading (TBL) is one of the concerns for high current beam acceleration in SuperKEKB which is one of the world highest luminosity ring colliders. Here, TBL means modulation of cavity voltage (V_c) caused by consecutive empty buckets in a bunch train; the empty-bucket interval is called a bunch gap or an abort gap for ramping-up of an abort kicker. The V_c phase modulation due to the bunch gap results bunch timing shift along the train. Furthermore, we have a special situation using the ARES cavity. The ARES cavity has unique structure of a three-cavity system which is operated in $\pi/2$ mode. The bunch gap also excites the parasitic modes of 0 and π modes which make large and rapid phase change at the leading part of the train; accordingly, luminosity deterioration will be concerned. Additionally, increase of power load to the parasitic mode damper in the ARES cavity should be cared. In this paper, details about the transient beam loading issues and recent situations in the SuperKEKB operation are reviewed. In the latest operation, the beam current of 1.7 A was achieved without relevant problems, and the luminosity world record was successfully updated. For the design current of 3.6 A, the paper of evaluation study has already published, and measures to mitigate the transient effect are also proposed in the paper. In recent study, we obtained advanced findings about ARES cavity parameters for more actual simulation of the transient effect; new results of comparison between the simulation and measurement are presented in this paper.

1. はじめに

SuperKEKB [1] は電子陽電子非対称衝突型円形加速器で、新物理の探索を目的とし、目標ルミノシティに向けたデザイン蓄積ビーム電流は非常に高く挑戦的な値である。そのため高周波加速にとっても多くの課題があり、過渡的ビーム負荷もその1つである。ここで過渡的ビーム負荷とは、バンチ列中のアポルト・ギャップ(=アポルト・キッカー立ち上げ猶予のための空バケットが続く歯抜け部分)により加速電圧が変調されることである。これによりバンチ列に沿って加速位相がシフトし、バンチ毎の同期位相 ϕ_s がずれるため、両リングで非対称な場合はルミノシティの低下が懸念される。ただし電子リングにおいては、アポルト・ギャップ(連続空バケット)はイオン・トラッピング不安定性の軽減に寄与するため有益である。過渡的ビーム負荷に関して SuperKEKB では、アレス (ARES) 空洞と呼ばれる KEKB 特有の常伝導空洞 [2,3] を使用していることに起因し、更に特殊な状況が生じる(詳細は後述)。その結果デザイン電流では、ルミノシティの大きな低下あるいは条件によってはビームロス招く恐れがある。

本稿では、過渡的ビーム負荷に関する課題および提案されている対策案を改めて紹介し、加えて最近の運転状況について報告する。現在の運転状況は蓄積ビーム電流が 1.7 A (デザイン電流は 3.6 A) で大きな問題はなく、ルミノシティの世界最高記録を更新している [4]。

2. RF システム概要

まず評価の条件となる SuperKEKB の RF システムについて簡単に紹介する。メインリング (MR) は 7 GeV

Table 1: RF-Related Design Parameters for SuperKEKB

Paramter	LER	HER
Beam energy [GeV]	4.0	7.0
Beam current [A] (I_b)	3.6	2.6
Bunch gap length [%]	2	2
Bunch length [mm]	6	5
RF freq. [MHz] ($\omega_{rf}/2\pi$)	508.876	
Harmonic number (h)	5120	
Revolution freq. [kHz] (f_{rev})	99.4	
Cavity type	ARES	SCC/ARES
R/Q [Ω]	15	93/15
Loaded Q [$\times 10^4$] (Q_L)	2.4	7.0/2.0
Coupling factor (β)	4.3	-/5
Number of cavities	22	8/8
Total RF Volt. [MV]	10~11	15~16
RF volt./cav. [MV] (V_c)	0.5	1.5/0.5
Wall loss/cav. [kW] (P_c)	150	-/150
Beam power/cav. [kW]	460	400/600
Cav. detuning [kHz] (Δf)	-28	-44/-18
Number of kly.	18	8/8
Kly. power/cav. [kW]	~600	~450/~800

電子リング (High Energy Ring, HER) と 4 GeV 陽電子リング (Low Energy Ring, LER) とで構成される。Table 1 に RF に関するデザインパラメータ (および記号標記) を示す。

加速空洞は各リングそれぞれ 3ヶ所ある加速セクション (直線部) に配置され、前述の常伝導空洞 (アレ

* tetsuya.kobayashi@kek.jp

ス空洞)と超伝導空洞(SCC)[5]の2種類が使われている。HERはアレス空洞とSCCを併用し、LERはアレス空洞のみとなる。HERでは、供給電力の制限等から、アレス空洞とSCCで加速位相に約20度の差をつける必要がある[6](過渡的ビーム負荷の評価においても、これを考慮する必要がある)。その他、RFシステム構成に関する詳細や現状については文献[6]を参照のこと。

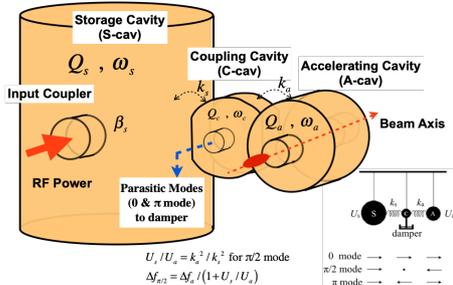


Figure 1: Illustration of ARES Cavity Structure.

ここで後述の議論のため、アレス空洞についてももう少し説明しておく。Figure 1に示すように、加速空洞(A)に結合空洞(C)を介して貯蔵空洞(S)を連結させた3連空洞で、 $\pi/2$ モードで運転される。RF電力はS空洞の入力結合器から投入される。S空洞の大きな蓄積エネルギーにより常伝導空洞としては非常に高いQ値(約110000)を実現している。これによりA空洞におけるビーム負荷補償の空洞離調度(optimum tuning)は空洞全体($\pi/2$ モード)としては約1/10と(周回周波数より十分小さく)なり、結合パンチ不安定性の致命的な影響を避けることができる。Table 1に示す空洞離調度は $\pi/2$ モードに対する値であり、A空洞単体ではこの約10倍の周波数で離調される(アレス空洞の optimum tuningの詳細は文献[7]参照)。

アレス空洞のC空洞には寄生モード減衰機構(Cダンパー)があり、C空洞に励起される電磁場は外へと排出・吸収され減衰する構造となっている($\pi/2$ モードはC空洞にほとんど電磁場はないので減衰しない)。

3. 過渡的ビーム負荷の概要と課題

ビームのバンチは基本的にはほぼ等間隔に並べ、一様なバンチ列(トレイン)にするが、冒頭に述べたようにトレインの一部(一周の数%~10%)には空バケットが続く部分(バンチがないトレインの歯抜け部分)がある。この空バケット部分は、アポート・キッカー電磁石を立ち上げる猶予を与える隙間である。そのためアポート・ギャップと呼ばれるが、本稿では以降、より一般的にバンチ・ギャップと呼ぶ(トレイン・ギャップとも言われる)。バンチ・ギャップはイオン除去の効果もあり、電子リング(放射光リング)ではイオン不安定性を抑える役割を果たす。

加速電圧はクライストロン(KLY)からの供給電力による電圧とビームが励起する電圧との合成である。そのため、連続したビームにギャップがあることで、空洞電圧(振幅 V_c 、位相 ϕ_c)は周回周期 $T_{rev} = 1/f_{rev}$ で変調を受ける。その様子をFig. 2に示す。図のように V_c, ϕ_c が伴ってトレインに沿ってスロープのように変

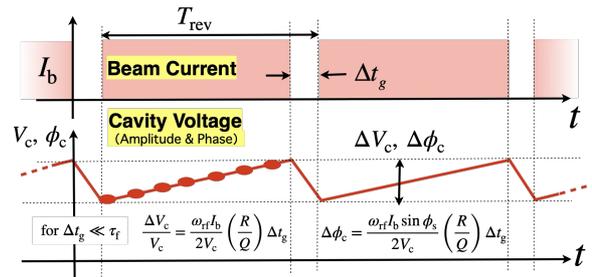


Figure 2: Illustration of transient beam loading (gap transient effect) in an acceleration cavity voltage.

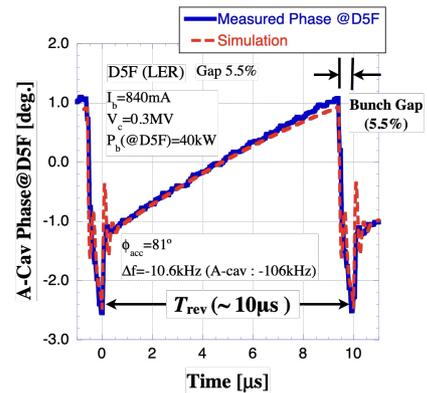


Figure 3: Waveform example of phase change of an ARES cavity voltage during the revolution period.

化し(位相変化の方向は定義による)、その変化の幅($\Delta V_c, \Delta \phi_c$)はビーム電流 I_b およびギャップ幅(時間幅) Δt_g に比例する(Δt_g が空洞のfilling time τ_f に比べて十分短い場合)[8,9]。従って、各バンチの同期位相(タイミング)がトレインに沿って少しずつ異なり、その変化が両リングで異なるとバンチ毎に衝突点がズレることになる。特にSuperKEKBでは両リングが非対称であるため、ルミノシティの低下が懸念される。ちなみに、この加速電圧の変調は、J-PARCリニアックにおける中間パルス(chopped beam)による変化と(加速空洞にとっては)まったく同じで現象である。

更にSuperKEKBでは、アレス空洞を利用していることに起因して特殊な状況が加わる。その様子(アレス空洞の過渡的ビーム負荷の例)をFig. 3に示す。図はビーム運転時(コミッショニング初期)におけるアレス空洞の加速電圧モニター波形の例で、位相の時間変化をプロットしている。横軸の0点がトレインの先頭に相当し、あるバンチ・ギャップから次のギャップまで(約1周回周期)の波形を示す。実線が測定値で、波線はシミュレーション結果である。この図で分かるように、通常のスロープ的な変化に加えて、トレイン先頭部で急激で大きな変化が見られる。これはアレス空洞の寄生モード(0, π モード)の励起によるものである(C空洞のQ値に応じて減衰する)。SuperKEKBの前身であるKEKB加速器の運転時においても、ビーム位相にこのような速い変化が観測されていたが、当時はその

原因が明確に示されていない。その後 SuperKEKB の評価のために著者等が開発した時間領域シミュレーション・コードにより、アレス空洞の3連構造を考慮することで (Fig. 3 に示すように) その位相変化が再現され、 $0, \pi$ モード起因であることが明確になった [10]。

この過渡的变化で問題となるのは LER と HER の非対称性である。HER ではアレス空洞と併せて SCC (単セル空洞) が使われているため、リング全体の加速電圧としては $0, \pi$ モードの影響は HER では小さい。一方 LER はアレス空洞のみであるため、上記の $0, \pi$ モードの影響がそのまま現れ、デザイン電流では衝突における両リングの位相差 (タイミングのズレ) がトレイン先頭部において非常に大きくなる。また、トレインに沿ったスロープ変化も両リングでは異なる。その結果、ルミノシティの低下のみならず、ビーム・ビーム効果の影響で致命的なビームロスに繋がる可能性も懸念される。SuperKEKB ではナノ・スキームと呼ばれる世界初の衝突方式を採用していることも心配の一つである。この問題に対して、シミュレーション・スタディを行い、RF システムでできる対策案を文献 [10] で提案した。それについて次節で簡単に紹介する。

4. デザイン電流における評価スタディ

4.1 評価結果と対策案

本節では、デザイン電流におけるシミュレーション・スタディの結果と対策案を文献 [10] に基づいて簡単に紹介する。シミュレーション・コードの詳細や評価条件については本稿では割愛する (文献 [10] を参照)。

Figure 4 にバンチ・ギャップによる位相変化のシミュレーション結果を示す。図は LER, HER の位相変化 (それぞれ $\Delta\phi_{\text{LER}}, \Delta\phi_{\text{HER}}$ 、波線) およびその位相差 ($\Delta\phi_{\text{HER}} - \Delta\phi_{\text{LER}}$ 、実線) をギャップ周辺 (トレイン先頭) についてプロットしている。背景を色塗りしている範囲がトレイン部分で、白地の部分がバンチ・ギャップ (ギャップ幅 2%) に相当する。LER はアレス空洞のみ、HER はアレス空洞と SCC の位相変化についてリング全体で合成 (vector sum) している。位相変化は振幅変化も考慮し、ビームに対して実効的な位相変化を表す。

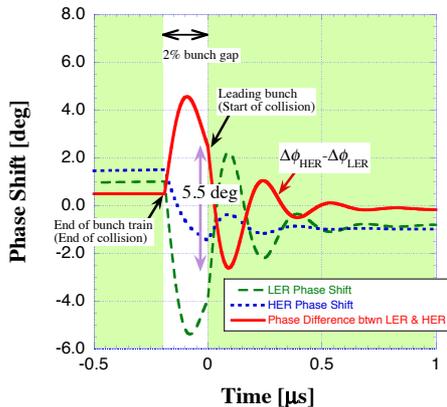


Figure 4: Simulation result of beam phase shift due to bunch gap for the design current.

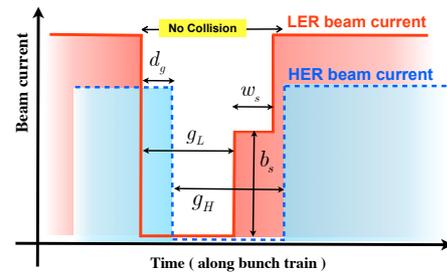


Figure 5: Optimization parameters for proposed mitigation method of the gap transient effect.

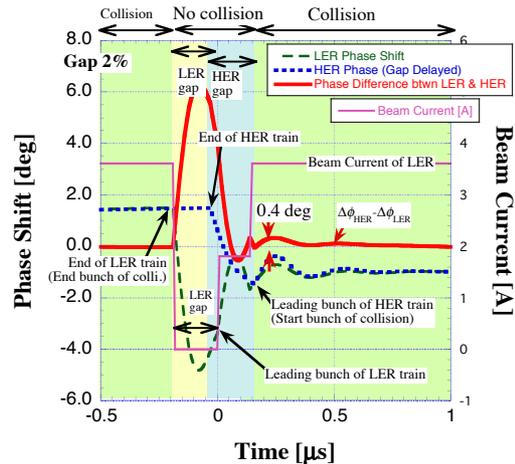


Figure 6: Simulation result of optimization for the mitigation method shown in Fig. 5.

この図のように LER ではアレス空洞の $0, \pi$ モードによりトレイン先頭で大きな位相変化があり、HER との位相差が 5 度以上になると予想される。トレインに沿ったスロープ変化は約 1 度のズレがある (図は省略)。

前述したように両リングの大きな位相差により、衝突性能への影響、もしくは大きなビームロスが懸念される。その対応策として以下のような方法を提案する。RF 制御による補償は非現実的であるため (詳細は後述)、現実的な方法としてトレイン側 (fill pattern) に手を加えて位相変化の影響を低減させることを考える。その方法を Fig. 5 に示す。図のように HER のギャップのタイミングを遅らせてトレイン先頭での衝突を避け、更に LER のトレイン先頭のバンチ電流 (fill pattern) を 2 段階にする場合を検討した。図に示すパラメータ (遅延量、LER の 1 段目の高さ、幅など) を最適化した結果を Fig. 6 に示す (細い実線が LER のビーム電流を表す)。この結果ではトレイン先頭含めトレイン全体において位相差が 0.5 度以内に抑えられている (トレイン全体は文献 [10] を参照)。ただし、両リングでトレインの重なりをずらしていることで、ルミノシティは約 1.6% 損をするようになる。それでもビーム・ビーム効果等による致命的なビームロスが起きる場合に、それを避けることができれば非常に有効であると考えられる。

上記の最適化結果はあくまで、ある運転条件を仮定

した場合であるため、実際にはビーム運転の状況に合わせて調整する必要がある。また運転条件も元のデザインから大きく変わる可能性もあるため、今後はビーム電流増加に伴い、条件の変化に応じて改めて評価（最適化）を行っていく。更に最近では、アレス空洞のパラメータ（特に空洞間結合度）に関して不確定な要素が取り除かれ [11]、以前より実際に近い応答評価が可能となっている。とは言え、以前の評価における基本的な議論や結論（対策方針）に影響はない。

4.2 RF 制御による V_c 変調補償

これまでの話において、位相変化が分かっているのだから変化を補償（キャンセル）するようにフィードフォワード的な RF 制御をすれば良いのではないかと、思われるかもしれない。しかし我々の装置・運転条件では、ほぼ不可能であると考えられる。なぜなら空洞の狭い帯域（ ~ 10 kHz）における変動であり、それを逆に打ち消すための KLY 出力には、バンチ・ギャップ（ビーム電流）の変化に匹敵する強度と速さが必要になるからである。そのため必要な帯域は MHz オーダーであるのに対し、KLY の帯域は 100 kHz 程度（ T_{rev} と同程度）しかない。またデザイン電流におけるビーム励起電圧は KLY 駆動電圧より約 1.2 倍高く、補償時に必要な KLY 出力は定常時の 2 倍以上になる（位相変化だけ速く補償しても空洞に入らない）。しかし定常状態も大電流加速のために KLY 出力はほぼ限界で運転するため、過渡応答を補償できる余裕はまったくない。

仮に KLY の特性が理想的（広帯域、高出力）であったとしても、アレス空洞では補償のための RF 入力が必要で、 $0, \pi$ モードを励起することになる。その際、S 空洞から RF 電力を供給するので A 空洞の変動を正常に補償するのは非常に難しいであろう。これについてシミュレーションの例を文献 [12] で示している。更にはトレイン先頭だけでなくトレイン全体を補償する必要があり、それを両立させるのは至難の技と思われる。

以上の通り、今のところは RF 制御による過渡応答の補償は非現実的であると考えられるが、将来もしかしたら画期的な補償方法が見つかることにも期待したい。

5. 最近の過渡的ビーム負荷の状況

次に、最近の運転における過渡的ビーム負荷の状況を紹介します。現在の運転ではバンチ・ギャップ（アポート・ギャップ）を 2 つ（ギャップ周期を 1/2）にしている。その理由は、アポート可能な機会を増やし（短い時間内にアポートさせ）ビームロスによる検出器の被害を小さくするためである。ちなみにギャップが 2 つ（頻度が 2 倍）になっても V_c 変調の変動幅（pk-pk）には影響しない（ギャップ幅だけで決まる）。

最後のビーム運転（RUN2024c）において、ルミノシティの最高記録を更新した時の運転条件で測定した、空洞ピックアップ信号の波形を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。Figure 7 は HER のアレス空洞（左）と SCC（右）について、Figure 8（左）は LER のアレス空洞についてプロットしている。これらの図は縦軸が V_c の位相変化、横軸が時間（スパンが周回周期）の過渡的变化である。実線が測定で波線がシミュレーション結果を示す。こ

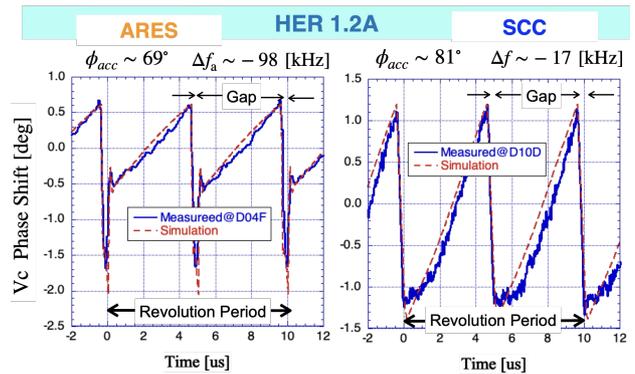


Figure 7: V_c phase transient of an ARES Cavity (left) and a SCC (right) of HER for the maximum luminosity in RUN2024c.

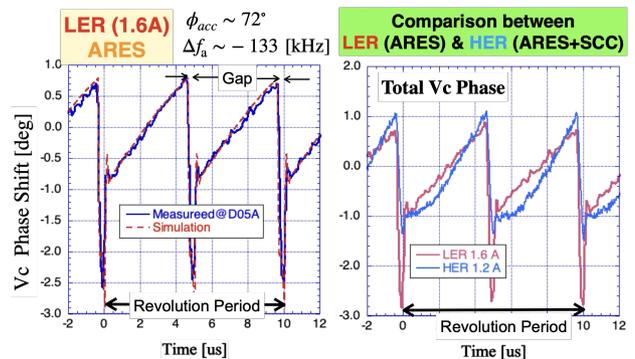


Figure 8: V_c phase transient of an ARES in LER (left) and the comparison of phase change between LER and HER (right) for the maximum luminosity in RUN2024c.

の時 LER, HER のビーム電流はそれぞれ 1.6 A, 1.2 A である。ギャップ幅は周回周期の約 4% である（デザインは 2%）。図中にそれぞれの加速位相 ϕ_{acc} および空洞（アレス空洞は A 空洞の）離調度を示している。

また測定値を基に、LER と HER で比較した（重ねた）プロットを Fig. 8（右）に示す。HER についてはアレス空洞と SCC の Vector Sum である（加速位相差を考慮）。これを見て分かるように HER（青実線）は SCC の電圧が高いため、アレス空洞の $0, \pi$ モードの影響（トレイン先頭の変化）は小さいが、一方 LER（赤実線）はアレス空洞のみであるため、 $0, \pi$ モードによる速くて大きな変化が見られる。その結果、トレイン先頭部では最大で約 2 度の位相差が生じる。ただし衝突における中心位相（重なるのオフセット）がどこか分からないので、実際の位相差は不明である（平均的にルミノシティが最高になる位相に合わせている）。

以上のような状況で、今のところ過渡的ビーム負荷による問題は起きていない（それによるルミノシティ低下は判別できない）。ただし RUN2024c ではトレイン先頭付近のバンチの寿命が短い現象が見られた。これについてはチューンの値が関係しているようで（それによってビームロスする）、過渡的ビーム負荷とは直接

関係ないと考えている。

ここで、シミュレーションにおけるアレス空洞のパラメータに関して補足しておく。前節でも少し触れたが、等価回路モデルにおける個別の空洞パラメータ（特に空洞間結合度）は、これまで正確に把握することが困難であったが（3連空洞全体の特性は測定できるが）、最近これらのパラメータをより正確に得る手法が見出された（詳細は本年会発表 [11] を参照）。本節ではその結果を踏まえてシミュレーションを行っている（Section 3 で示した Fig. 3 のシミュレーションは以前のパラメータによるもので本節とは条件が異なる）。

ところで Fig. 7, Fig. 8 において、アレス空洞のシミュレーションではトレイン最先頭部が測定と合わない（鋭いピークが見られる）のが気になる点である。これは測定系の帯域（バンドパスフィルター等）によって見えていない可能性がある。こちらが正しいとすると両リングの位相差はより多くなり、今後の検証が必要である。ちなみに振幅変動については紙面の都合により割愛しているが、測定とシミュレーションは概ね一致している。

6. シミュレーション評価における課題

ここでやっているシミュレーションは空洞電圧の応答（時間発展）であり、その際ビーム位相は平均的な（全バンチ同じ）同期位相を仮定している。従って電圧変動に伴う各バンチ位相の変化は考慮していない。本来なら（厳密には）イタレーションすべきだが、それが可能になっていない（それでも過去のバンチ位相測定は概ね再現する）。これに対し、山口（本稿著者の1人）によって全く異なる計算・評価手法が提案されている。それは各バンチとそれが励起する電磁場（および KLY 駆動電圧）との相互作用の並行状態を解析的に計算し、イタレーションすることで各バンチの位相が自然に得られるものである。その際、アレス空洞の寄生モード（ $0, \pi$ モード）の励起も組み込まれているので、トレイン先頭の速い変化も得られる。また、バンチの fill pattern の変更にも対応可能である。今後この手法に関してビーム位相測定との比較などを行い検証を進める予定である。

7. C ダンパーへの電力負荷

アレス空洞における過渡的ビーム負荷に関して、上記に加えて、C ダンパーへの電力負荷の問題がある。

バンチ・ギャップで励起された $0, \pi$ モードは C ダンパー（ダミーロード）に吸収される。その電力は大電流ビームでの optimum tuning（A 空洞の離調）に伴い高くなり、デザイン電流では $\pi/2$ モードも含め平均 20 kW 以上になると予想される。また過渡的ビーム負荷では、Fig. 9（青実線）に示すように C ダンパーへの電力はバンチ・ギャップにおいて非常に高いピークとなる（図はギャップが1つの場合の例）。そのため C ダンパーの耐電力/耐電圧性が懸念され、ダミーロードの耐電力仕様を 30 kW から 50 kW へと増強した。別の対策として、optimum tuning における空洞離調（S,A 空洞離調の組み合せ）の最適化で C ダンパー電力負荷を小さくできないか検討したが、今のところ良い解は見当たらず

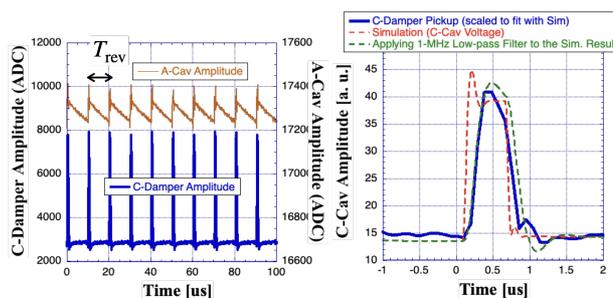


Figure 9: Waveform example of measured C-damper pickup amplitude (solid blue line) and the simulation results (dashed lines) for a case of single gap in a train.

ない [7, 13]。

現在の電流値 1.7 A において、C ダンパーへの電力は定常状態（トレイン部分）で約 4 kW、ギャップによるピーク値が約 32 kW と測定されている。ただし C ダンパーのモニター系はチューナー制御用に RF 信号に対して 1 MHz 幅（全幅 2 MHz）の狭いバンドパスフィルターを入れているため、ギャップにおける正確なピーク電力は測定できていない。これに関して C ダンパーのモニター信号の測定例とそれに対するシミュレーション結果を Fig. 9（右）に示す（縦軸はシミュレーションに合わせてスケール）。シミュレーション（赤波線）では測定値（青実線）より振幅で約 1 割（電力で約 2 割）高くなっている。緑波線はシミュレーション結果を 1 MHz 帯域幅に絞ったとした場合の計算結果で、概ね測定値に合っている。今後は運転時でもフィルターなしで直接的に観測（シミュレーションと比較）できるようにする予定である。

ちなみに C ダンパー電力に対するインターロックは、デジタル LLRF システム (FPGA) [14] では、ギャップのピーク（短時間）は無視し、トレイン部分の値でインターロックが働くようにしている。

8. まとめ

SuperKEKB における過渡的ビーム負荷（バンチ・ギャップ）に関して課題と現状について総括した。特に SuperKEKB 特有の問題として、アレス空洞（3連空洞システム）の寄生モード励起による大きな位相変化がある。これによりルミノシティ低下あるいは致命的なビームロスに繋がる可能性があり、その対策案を紹介した。また過渡的ビーム負荷による C ダンパーへの高いピーク電力が懸念される。現状の運転では今のところ大きな問題はなく、1.6 A 以上のビーム電流を蓄積ルミノシティの世界記録を更新した。今後は更なる電流増加に伴い状況を注視し、必要に応じて再評価を行い提案される対策を講じる。また過渡的ビーム負荷の評価・計算に関して新たな手法の検証を進めたい。

参考文献

- [1] <http://www-superkekb.kek.jp>
- [2] 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.
- [3] T. Kageyama *et al.*, “The ARES cavity for KEKB”, Conf. Proc. of APAC98, 1998, pp. 773-775.
- [4] https://www-linac.kek.jp/skekb/status/web/2024c_history.png
- [5] T. Furuya *et al.*, “Superconducting Accelerating Cavity for KEK B-factory”, Proceedings of SRF1995, CEA-Saclay, France, 1995, p. 729.
- [6] K. Akai *et al.*, “Issues for SuperKEKB RF System for Future Beam Current Increases”, Proc. of PASJ2024, WEP075, 2024, pp. 436-441.
- [7] T. Kobayashi *et al.*, “Reconsideration on Optimum Tuning of ARES Cavity for High Current Beam Storage”, Proc. of PASJ2024, FRP31, 2024, pp. 914-918.
- [8] P. B. Wilson, “Beam Loading in High Energy Storage Rings”, PEP-Note 37, SPEAR-163, 1973.
- [9] D. Boussard, “RF Power Requirements for High Intensity Proton Collider”, Proc. of PAC91, 1991, pp. 2447-2449.
- [10] T. Kobayashi and K. Akai, “Advanced simulation study on bunch gap transient effect”, Phys. Rev. Accel. Beams 19, 062001, 2016.
- [11] T. Yamaguchi *et al.*, “Evaluation Method of the Coupling Factors between Cavities in the ARES Cavity System”, in this annual meeting, FRP051, 2025.
- [12] T. Kobayashi, “RF システム (2) ”, OHO’19 テキスト, Chapter 13-2, 2019.
- [13] T. Yamaguchi *et al.*, “Simulation study on power loss in the coupling cavity damper of the accelerating $\pi/2$ mode for the SuperKEKB ARES cavity”, Proc. of IPAC2025, WEPS059, 2025, pp. 2366-2369.
- [14] T. Kobayashi *et al.*, “Development and Construction Status of New LLRF Control System for SuperKEKB”, Proc. of IPAC2014, WEPME071, 2014, pp. 2444-2446.