

SuperKEKB ビームコミッショニングにおける LLRF 制御システムの稼働状況

OPERATION STATUS OF LLRF CONTROL SYSTEM FOR SuperKEKB COMMISSIONING

小林鉄也[#], 赤井和憲, 海老原清一, 小田切淳一, 可部農志, 中西功太, 西脇みちる, 吉本伸一
Tetsuya Kobayashi[#], Kazunori Akai, Kiyokazu Ebihara, Atsushi Kabe, Kota Nakanishi, Michiru Nishiwaki,
Jun-ichi Odagiri, Shin-ichi Yoshimoto
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

First beam commissioning of SuperKEKB (Phase-1), which is a double ring collider of 7-GeV electron and 4-GeV positron beams, was started from February and it was successfully accomplished at the end of June 2016. The commissioning has been progressed fairly, and then the storage current of 1A was achieved in the positron ring. This paper reports the details of the operation work related the LLRF control during the SuperKEKB, which includes the system tuning, confronted problems and cures of the problems.

RF system of SuperKEKB consists of about thirty klystron stations in the both ring. Newly developed low-level RF (LLRF) control system, which is composed of recent digital technique, is applied to the nine stations among the thirty for Phae-1. The new LLRF systems worked well without serious problem and they contributed to smooth progress of the commissioning. The old existing systems, which had been used in the KEKB operation, were still reused for the most stations, and they also worked as soundly as performed in the KEKB operation.

1. はじめに

SuperKEKB の最初のビームコミッショニング (Phase-1) が 2016 年の 2 月始から開始され、6 月末で無事に終了した[1]。コミッショニングは概ね順調に進み、ほぼ目標の蓄積電流 1A を達成した。本稿では、コミッショニングの間に行った調整や、トラブルとその対処など、RF 制御に関する状況を報告する。基本的に大きな問題はなく、新規に開発された低電力高周波 (LLRF) 制御システムも正常に動作し、期待通りの機能を果たしている。

SuperKEKB は 7GeV 電子リング (High Energy Ring, HER) と 4GeV 陽電子リング (Low Energy Ring, LER) で構成される非対称衝突型円形加速器で、KEKB の 40 倍のルミノシティを目指す。低エミッタンス化と共に、ビーム電流は KEKB の 2 倍 (空洞当たりのビームパワーは 3 倍) にもなる[2]。そのため、RF システム各コンポーネントの増強と合わせて、高周波 (加速電界) 制御の性能 (精度) 向上もビーム品質を左右する重要な要素の一つとなる。そこで SuperKEKB では近年のデジタル技術を基に、より高精度かつフレキシブルな LLRF 制御システムが新たに開発された[3][4]。これまで報告してきたように試作モデルでは、大電力試験で良好な性能が示され、Phase-1 では新 LLRF システム量産機 9 式をインストールし運転した。ただし、両リング全体では 30 の RF ステーション (クライストロン) があり[5]、従って、残りの 21 ステーションでは既存 (KEKB 用) のアナログ LLRF システムを用いてビーム運転を行った。

2. RF システム概要

本加速器では加速 RF 周波数が 508.876MHz (Phase-1 の運転値) で、RF システムは基本的に KEKB からの再

[#] tetsuya.kobayashi@kek.jp

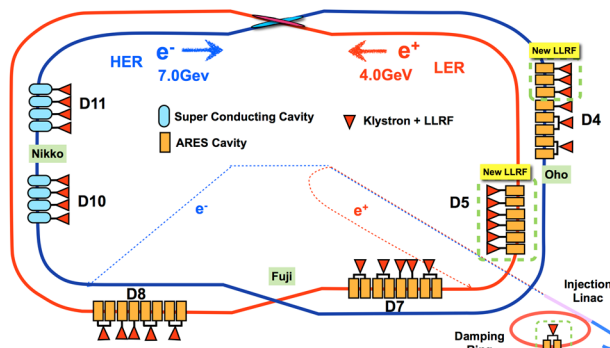


Figure 1: RF system arrangement for Phase-1.

利用で、各コンポーネントにおいて大電流化に必要な増強を行っている。加速空洞は常伝導、超伝導の 2 種類の加速空洞がある[5][6]。常伝導空洞は ARES と呼ばれる特殊な空洞で[6][7]、大電流による結合バンチ不安定を抑えるために KEKB 用に開発されたユニークな構造を持つ高次モード (Higher Order Mode, HOM) 減衰型空洞である。ARES 空洞は、結合空洞 (C) を介して、加速空洞 (A) に貯蔵空洞 (S) が連結された 3 連空洞システム ($\pi/2$ モード運転) で、S 空洞に付けられた入力結合器から電力が投入される。超伝導空洞も KEKB 用に開発されたシングル・セルの HOM 減衰型空洞である[8][9]。これらの空洞は SuperKEKB でもほぼそのまま利用する。ARES 空洞は両リングで約 30 式、超伝導空洞は HER のみで 8 式ある。

SuperKEKB では ARES 空洞 1 台あたりのビームパワーが約 600kW (KEKB の 3 倍) となり、ARES の壁面損失 150kW (@ $V_c=0.5MV$) なので、空洞入力パワーが約 750kW となる。KEKB ではクライストロン 1 台で 2 台の ARES 空洞にパワー供給 (1:2 構成) をしていたが、クラ

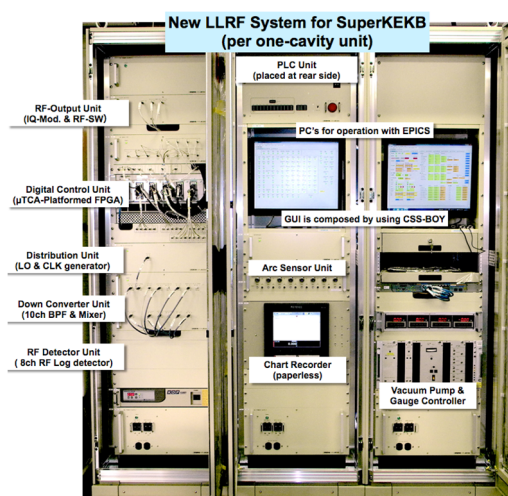


Figure 2: New LLRF control system for SuperKEKB.

イストロン出力は最大約 1MW なので、SuperKEKB では、クライストロン1台が ARES 空洞 1台をドライブする 1:1 構成に必要がある[5]。また、空洞入力カプラは高い入力に対する耐電力性の増強、および入力結合度 (β) の増加を行っている。

Figure 1 に Phase-1 における RF システムの構成を示す。一部の ARES 空洞において 1:2 構成から 1:1 構成に変更し、 β を約 3 から 5 にした。OHO の D5 セクションについては、KEKB では HER にあった ARES 空洞をすべて LER 側に移動させ 1:1 構成に変更している。これらに伴いクライストロンを 5 本追加している。デザイン電流において更に多くの ARES 空洞を 1:1 構成にしなければならない。

陽電子の低エミッタンス化のためダンピング (DR) が新設される[10]。DR の高周波制御 (RF 基準信号) はメインリング (MR) と共通の 508.9MHz で、MR と同様の RF システム (クライストロン、高圧電源等) 1式で加速する。ただし加速空洞 (ARES 式ではなく、単セル高次モード減衰型空洞) が最大 3 台構成 (RF 電力 3 分岐) となる[11]。DR でも MR と同様の新 LLRF システムを採用し、インストールが完了している。DR は Phase-2 から運転する予定である。

3. LLRF 制御システム

3.1 新 LLRF 制御システム

新しく開発された LLRF 制御システムの写真および空洞電圧制御系のブロック図をそれぞれ Figure 2, 3 に示す。この 1式がクライストロン1本 (空洞1ユニット) の駆動・制御に対応する。

Figure 3 に示すように、RF モニタ信号は約 10MHz の中間周波数で AD 変換され、その I/Q 成分を FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いてデジタル処理することで RF 制御 (I/Q 変調) する。FPGA は MicroTCA 規格をプラットフォームとする Advanced mezzanine card (AMC) となっていて[12]、機能別に次の 5 種類の FPGA ボード (AMC) を用いている - (1) 空洞電圧 Feedback (FB) 制御、(2) 空洞チューナー制御、(3) インターロック (I/L) 制御、(4) RF 検波波形モニタ、(5) アーク放電 (光

検出波形) モニタ。各 FPGA ボード (AMC) 上の CPU では Linux-OS が動作し、それぞれ EPICS-IOC が組み込まれている[13]。

冷却水・真空度 I/L 等、特段の高速さを求められない処理は PLC (ラダーCPU) が行う。Linux-CPU (F3RP61) も利用し、AMC と同様 EPICS-IOC として機能する[14]。また空洞の RF 立ち上げシーケンスなども PLC の EPICS シーケンサーが司る。

加速直線部全体の真空系 (主に空洞間のゲートバルブ) を監視・制御するための真空統括システムも同様に PLC を用いて構築した[15]。

クライストロン高圧電源のリモート制御についても、D4, D5 においては、KEKB の CAMAC システムから PLC (Linux-CPU による EPICS-IOC) に置き換えた。

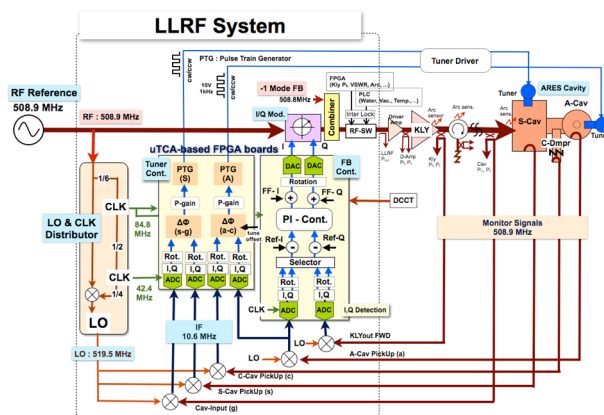


Figure 3: Block diagram for ARES cavity control.

3.2 旧 LLRF 制御システム

Figure 1 に示すように、Phase-1 では、この新 LLRF システムは Oho-D4 セクションの 3 ステーションおよび D5 の全ステーションに適用した。残りの 21 ステーションでは KEBK 運転時の旧 (アナログ) システム[6]をそのまま運用した。ただし、ステーション (空洞配置) 構成の変更に伴い若干の変更を行っている。Figure 4 は旧システム1式 (1:2 構成) の写真を示す。システム方式はトリスタン時代から継承されるもので、NIM 規格モジュールの組み合わせで構成されている。また、リモート制御も基本的に KEBK 運転時そのまま CAMAC システムと VME (電源棟毎に1台) による EPICS-IOC で成り立っている。従っ



Figure 4: Old LLRF control system, which was used in KEBK operation, continues in use for SuperKEKB.

て D4 は旧システムの CAMAC の IOC と新 LLRF システム (組込 EPICS) が混在した状態になっている。

昨年、空洞コンディショニングが開始されるまでに、全ステーションについて動作チェック、ケーブルチェック (ロス測定)、校正作業等を行った。その際、老朽化により NIM モジュール等の動作不良が多数見つかったが、幸いそれぞれ予備と交換するだけで済んだ。

3.3 RF 基準信号分配システム

以前に報告したように RF 基準信号の分配については、SuperKEKB 用に新たに高精度かつ高安定な伝送システムを構築した [16]。KEKB では RF 基準信号は同軸ケーブルで各 RF セクション (電源棟) 間を数珠繋ぎのように (各セクション間で PLL 制御) してリング一周に分配されていた。これに対し SuperKEKB では一ヶ所 (中央制御室) からスター配線で光伝送により各セクションに分配している。また位相安定化 (PLL) のため中央で一括して光伝送の遅延を制御している。

3.4 オペレーション・インターフェース (OPI)

新 LLRF システムでは EPICS-IOC がシステム内に組み込まれ、完全に EPICS 経由による操作設定・データ取得が可能となっている。そのユーザーインターフェースとして CSS-BOY を採用している。一方、KEKB 運転時 (旧システム) のリモート操作は sad スクリプトによる OPI を利用していた。SuperKEKB においても、まだ多く残る旧システムのリモート操作として、またビーム運転制御用として、KEKB 運転で確立された従来の OPI を (空洞の配置変更に対する修正をした上で) 利用するほうがメリットは大きい。そのため、新 LLRF システム側で従来 OPI と整合するように EPICS-IOC (レコード名やセンサー) を構築した。その結果、加速器オペレータにとっては、この新旧システムの違いをまったく意識せずに全体の操作を行うことが可能になった。ただし、新 LLRF システム特有の操作については個々に CSS-BOY を用いた。

4. ビームコミッショニング状況

Figure 5 に Phaes-1 における両リングの蓄積ビーム電流と積分値 (上側)、および全加速電圧 (Total-Vc) (下側) の履歴を示す。2016 年 2 月 1 日からコミッショニングが開始され、入射調整、optics 調整等が順調に進み、LER では 2 月 10 日に RF パワーを投入し初の周回ビームが観測された。その後も順調に蓄積ビーム電流を増やすことができた。同様に HER も 2 月 26 日から RF 加速を行い順調なビーム蓄積に成功している。蓄積ビーム電流およびその積分値は Phase-1 の目標が達成され、必要な真空焼き出しを行うことができた。

RF システム全体としてはコミッショニングを通し大きなトラブルはなく、十分な加速電圧を供給することが出来た。最終的に各空洞の加速電圧は定格の 80~90% であった。ただし、Phase-1 で必要な加速電圧に対し余裕があり、電力節約のため 2 台の空洞を停止 (detune) させていた。また他にも空洞やハイパワー系のトラブル等でいくつかの空洞を detune させておく場合があった。

LLRF 制御システムに関しては、新しいデジタル LLRF 制御システムが 9 ステーションで使われ、初めてのビー

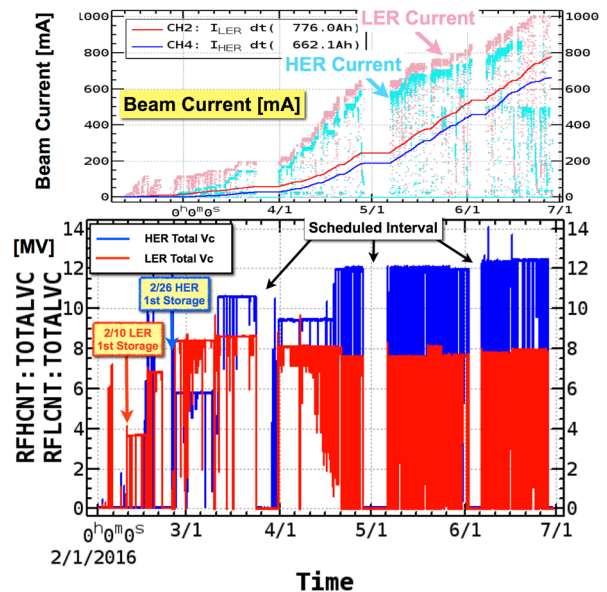


Figure 5: History of the stored beam current, the beam dose (upper side), and the total acceleration voltage called Total-Vc (lower side) for the both ring.

ム運転において大きな問題はなく、ほぼ期待通りの機能を示した。若干 (主にソフト) の不具合も見つかったが、幸いその都度修正し対処できるものであった。旧 LLRF 制御システムも健全に動作し、KEKB 運転時と同様の機能を果たした。

以下では、LLRF 制御に関してビーム運転で行った調整や問題対処等をいくつか紹介する。

4.1 空洞間位相調整

運転が開始される前に、それぞれの RF セクション内 (電源棟) では各 LLRF ステーション間の位相を RF 測定により (1:2 構成では導波管の移相器も) 調整しておいた。RF セクション間の位相は入射ビームにより調整を行った。セクション毎にひとつの空洞を立ち上げ、入射したビームがより多く周回するようにセクション全体の位相を調整した。各 RF セクションの制御室にはその区間全体の位相 (ルーム位相と呼んでいる) を変える移相器がひとつある。ただし、新 LLRF システムでは移相器は一切使用せず、ルーム位相は I/Q 制御 (FB 基準位相) のオフセットとし各 LLRF ステーションで共通に設定される。

その後、複数の空洞で加速すると問題なくビームが蓄積された。蓄積後はシンクロトロン振動数により各ステーション位相の調整を行ったが、蓄積電流が大きくなるとビームローディングにより合わせる重要性となった。

4.2 加速空洞による結合バンチ不安定性

大電流の蓄積リングでは、加速空洞のインピーダンスに起因する縦方向の結合バンチ不安定性 (シンクロトロン振動の増大) が問題となる。加速周波数 (0 モード) を除き、最も低い振動モード ($\mu=-1$ モード) の不安定性が起きるビーム電流閾値は、空洞インピーダンスから LER, HER それぞれ 1.6A, 1.1A 程度と予想されている。

しかしながら最初は節電やトラブル等で停止 (detune) している空洞が多く、その影響により $\mu=-1$, -2 モードの不安定性が起こった。Detuning (Δf) は $\mu=-1$ と -2 モードの間に設定し、かつ複数の空洞が互いにプラスマイナスでキャンセルする方向 ($\Delta f=-150\text{kHz}$, $+150\text{kHz}$) にずらした (ビームの周回周波数は約 100kHz)。それにもかかわらず、低い蓄積電流でも、たびたび不安定性が起きた。その場合は detuning (チューナー位置) を調整して不安定性から逃げる対処をした。

HER では 450mA を超えてから detuning 調整では $\mu=-1$ モードを抑えることが難しくなり、KEKB で使われた $\mu=-1$ モードダンパー (振動抑制のための FB システム) [17] を適用した。これにより、Figure 6 に示す通り $\mu=-1$ モードは十分に抑えられ、その後は上記のような問題は起きず順調に蓄積電流を増やすことができた。また、HER は電流増加に伴いできるだけ全ての空洞を運転し、各空洞の加速電圧も上げること及び direct RF feedback [6] のゲインを調整することで $\mu=-2$ モードも起きなくなった。以上のように、HER では予想以上に早い段階で $\mu=-1$ モードダンパーが必要だったが、今回 LER では必要にならなかった。

4.3 バンチギャップ過渡効果による位相変調

蓄積ビームのバンチトレインにはビームアポートのためのバンチギャップ (空のバケット列) が約 500ns (最終デザインでは 200ns) あり、このバンチギャップによりビーム周

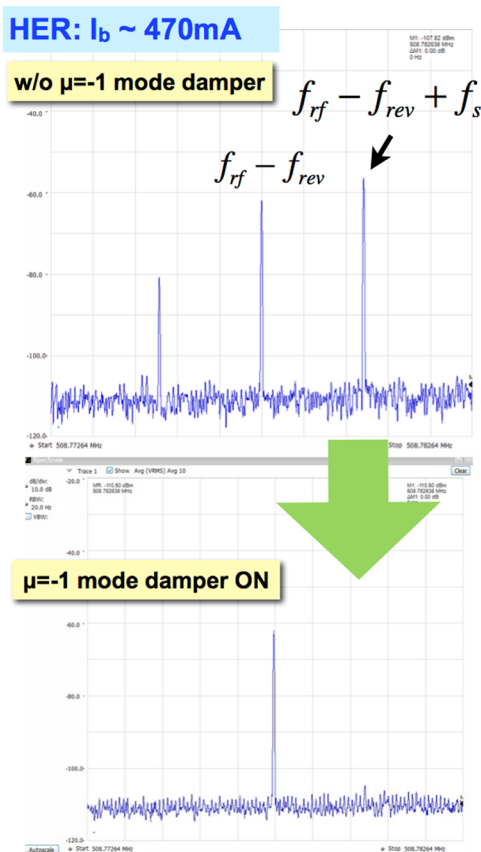


Figure 6: HER beam spectrum at the $\mu=-1$ mode. By applying the $\mu=-1$ mode damper, the couple bunch instability was successfully suppressed.

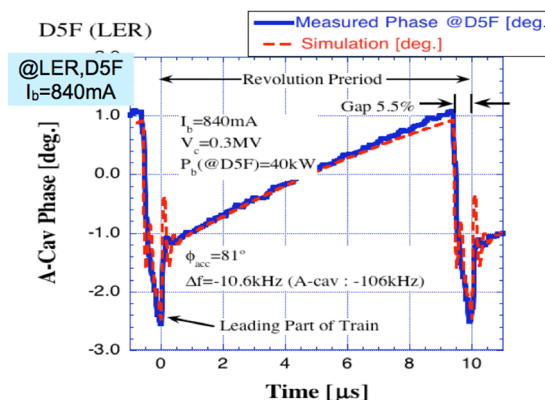


Figure 7: Simulation and measurement results of cavity phase modulation due to bunch gap transient effect.

回の繰り返し (周期約 $10\mu\text{s}$) で空洞の電界が変調を受ける。この位相変調でビーム位相 (相対的な衝突点の位置) が大きく変わると、ルミノシティに影響する可能性がある。

KEKB の運転では、この位相変動がバンチトレインの大部分は予想通りであったが、両リングにおいてバンチトレインの先頭部分 (先頭バンチから約 400ns の間) に非常に急峻な位相変化が観測された [6]。KEKB ではバンチギャップの影響は問題にならなかったが、最近の詳しいシミュレーション解析により、バンチトレイン先頭の急峻な位相変化は ARES 空洞 (3 連空洞システム) の寄生モード ($0, \pi$ モード) の励起に起因していることが明らかにされ、また、そのシミュレーションにより SuperKEKB のデザイン電流では大きな位相変化 (約 6°) が予想されている [18]。これは目標ルミノシティの達成には懸念される問題であるが、これを回避するための対処方法も提案されている [18]。

Phase-1 では衝突実験はないのでバンチギャップの影響は問題になっていないが、新 LLRF システム (FPGA) ではバンチギャップによる速い位相変化が直接測定でき、Figure 7 に示すように、シミュレーションとよく一致することが確認できた。このことから、上記の将来における変動の予測値や問題の回避方法が有効であると期待できる。

4.4 LLRF 制御に関するトラブル

コミッショニング初期の段階において、新 LLRF システムの自動空洞チューナー制御が頻繁に止まってしまう問題が起きた。この原因を調べると、一瞬のノイズ等により、チューナーがリミットスイッチを叩いた (可動範囲の端に達した) と FPGA が誤判定していると分かった。これに対し、運転中に FPGA を修正するのはリスクがあるため、応急処置として EPICS シーケンサーにより、自動チューナー制御が止まると再び制御を開始するようソフトで対処した。Phase-2 ではノイズで誤判定しないように FPGA を修正する。

上記チューナー制御以外ではソフト (立ち上げシーケンスト等) のバグがほとんどで、すぐに修正でき運転に支障を与えることは無かった。

その他、制御システムの問題ではないが、今回の運転では超伝導空洞においてチューニング用ピエゾの絶縁破壊が度々起きた。その場合、空洞を detune して運転か

ら外すか、ピエゾを使わずにモーターチューナーのみで運転を行った。ピエゾなし(モーターチューナーのみ)での運転ではチューニングが取れにくく、チューナー制御パラメータ(位相感度など)の微妙な調整が必要であった。また、その結果、ピエゾなしではチューニング位相は±1.5度のふらつきが出る。ピエゾの絶縁破壊が起こる詳しい原因は調査中である。

5. Phase-2 に向けての課題

上記以外には、新 LLRF 制御システムに大きな問題はなく、FB 制御など正常に動作した。ただし Phase-1 での蓄積電流はデザイン値の 1/3 程度である。目標の蓄積電流(ビームローディング)は KEKB での実績を大きく超えるものであり、安心できるわけではない。ビームローディングによる空洞 detune 量 Δf (リアクティブ成分の補償)は、ARES の A 空洞の場合、KEKB 運転時で最大 $\Delta f_a=170\text{kHz}$ であったのに対し、SuperKEKB のデザイン電流では $\Delta f_a=280\text{kHz}$ となる(ただし ARES 全体の $\pi/2$ モードはその 1/10、すなわち $\Delta f_{\pi/2}=\Delta f_a/10$)。これは RF 位相変化にすると $\pi/2$ モードで約 70° 相当である。このように大きな detune 量で起こりうる問題とその対策を検討している。特に I/Q 成分による FB 制御(I,Q 成分それぞれ独立の制御の場合)は大きな位相変化に弱く、FB 制御が不安定性になる可能性があるため、ビーム電流に応じた補正機能が必要であると考えている。

その他、SuperKEKB のデザイン電流では $\mu=-2$ モードの結合バンチ不安定性が起きると予想されるが、KEKB で開発されたダンパーシステムは $\mu=-1$ モードのみ対応したものである。そのため新たに $\mu=-2$ モードのダンパーシステムが必須となる。また、低いビーム電流でもトラブル等で停止させて detune しておく空洞により、 $\mu=-2, -3$ モードが励起されることがある。Phase-1 でも detune する際のチューナー位置の調整に苦労した。従って Phase-2 にも $\mu=-2, -3$ モードのダンパーシステムがあるとコミッショニングの進行に大きな助けとなる。以上により、 $\mu=-1, -2, -3$ モードに対応し並列に適用できる不安定性ダンパーシステムを新たに開発している[19]。

6. まとめ

SuperKEKB のビームコミッショニング(Phase-1)が 2016 年 2 月から 6 月末まで行われ、ほぼ目標の蓄積電流を達成した。

RF システムは両リング併せて 30 のクライストロンステーションで構成され、そのうち 9 ステーションは近年のデジタル技術を用いて開発された新 LLRF 制御システムを適用している。これらの新 LLRF システムは期待通りに機能し、大きな問題はなくコミッショニングの進行に貢献した。残りの新システムではないステーションについては、KEKB 運転時の従来システムをそのまま使い、メンテナンス作業の結果、大きな問題はなく KEKB での実績通りの機能を十分に果たした。

電子リング(HER)では、ピエゾ故障や節電等のため、いくつかの超伝導空が運転せずに detune され、それにより、縦方向の結合バンチ不安性($\mu=-1$ モード)が抑えられなくなった。そのため KEKB で使われていた $\mu=-1$ モードダンパーを予想より早い段階で適用することになった。

SuperKEKB のデザイン電流では更に $\mu=-2$ モードの不安定性も予想され、新たに $\mu=-1, -2, -3$ モードに対応したダンパーシステムを開発中である。今回の運転でもトラブル等で停止された detune 空洞により、 $\mu=-2, -3$ モードが励起されチューナー調整で苦労したため、Phase-2 でも新ダンパーの有効性が大いに期待される。

参考文献

- [1] Y. Funakoshi, "Phase 1 Beam Commissioning of SuperKEKB", to be presented in this annual meeting, 2016, MOOL02.
- [2] Y. Ohnishi *et al.*, "Accelerator design at SuperKEKB", Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A011.
- [3] K. Nakanishi *et al.*, "Development of LLRF system for SuperKEKB" Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2013, pp. 1154-1158.
- [4] T. Kobayashi *et al.*, "Development and Production Status of LLRF system for SuperKEKB", Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2014, pp. 1320-1324.
- [5] K. Akai *et al.*, "RF System for SuperKEKB", Proc. of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2010, pp. 177-181.
- [6] K. Akai *et al.*, "RF systems for the KEK B-Factory", Nucl. Instrum. Meth. A 499 (2003) 45-65.
- [7] T. Kageyama *et al.*, "The ARES cavity for KEKB", Proc. of APAC98, 1998, pp. 773-775.
- [8] T. Furuya *et al.*, "A Prototype Module of a Superconducting Damped Cavity for KEKB", Conf. Proc. of EPAC96, 1996, pp. 2121-2123.
- [9] S. Mitsunobu *et al.*, "Superconducting cavities for KEK B factory," Adv. Cryog. Eng. 2000, 45A, pp. 861-870.
- [10] M. Kikuchi *et al.*, "Design of Positron Damping Ring for Super-KEKB", Proc. of IPAC10, 2010, pp. 1641-1643.
- [11] T. Abe *et al.*, "High Power Testing of the RF Accelerating Cavity for the Positron Damping Ring at SuperKEKB", Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2013, pp. 586-593.
- [12] M. Ryoshi *et al.*, "LLRF Board in Micro-TCA Platform", Proc. of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2010, pp. 667-669.
- [13] J. Odagiri *et al.*, "Fully Embedded EPICS-Based Control of Low Level RF System for SuperKEKB", Proc. of IPAC10, 2010, pp. 2686-2688.
- [14] J. Odagiri *et al.*, "EPICS on F3RP61 for SuperKEKB Accelerator Control", Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2014, pp. 785-789.
- [15] M. Nishiwaki *et al.*, "Integrated Vacuum Control System for SuperKEKB Accelerating Cavities", Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2014, pp. 1308-1311.
- [16] T. Kobayashi *et al.*, "RF Reference Distribution System for SuperKEKB", Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2013, pp. 1159-1163.
- [17] S. Yoshimoto, "The -1 Mode Damping System for KEKB", Proc. of The 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, 2003, 1P072.
- [18] T. Kobayashi and K. Akai, "Advanced Simulation Study on Bunch Gap Transient Effect", Phys. Rev. Accel. Beams 19, 2016, 062001.
- [19] K. Hirose *et al.*, "Development of a Coupled Bunch Instability Damper Caused by the Acceleration Mode for SuperKEKB", to be presented in this annual meeting, 2016, TUP012.