

SuperKEKB ビームコミッショニングに向けた LLRF 制御システムの 状況と予備試験

STATUS AND PRELIMINARY TEST OF LLRF CONTROL SYSTEM FOR SUPERKEKB COMMISSIONING

小林鉄也^{#, A)}, 赤井和憲^{A)}, 岩城孝志^{B)}, 海老原清一^{A)}, 小田切淳一^{A)}, 可部農志^{A)}, 出口久城^{B)}, 中西功太^{A)},
西脇みちる^{A)}, 林和孝^{B)}, 漁師雅次^{B)}

Tetsuya Kobayashi^{#, A)}, Kazunori Akai^{A)}, Hisakuni Deguchi^{B)}, Kiyokazu Ebihara^{A)}, Kazutaka Hayashi^{B)}, Takashi
Iwaki^{B)}, Atsushi Kabe^{A)}, Kota Nakanishi^{A)}, Michiru Nishiwaki^{A)}, Jun-ichi Odagiri^{A)}, Masatsugu Ryoshi^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} Mitsubishi Electric TOKKI System Corporation (MELOS)

Abstract

Beam commissioning of the SuperKEKB will be started in JFY2015. A new LLRF control system, which is an FPGA-based digital RF feedback control system on the MicroTCA platform, has been developed for high current beam operation of the SuperKEKB. The mass production and installation of the new systems were completed as scheduled. In the beginning of the commissioning, the new LLRF control systems are applied to nine RF stations (klystron driving units) among existing thirty stations, and existing old systems are used for the other stations. Operation check of all LLRF stations with klystron high power operation was almost finished, and the LLRF control systems are ready for cavity conditioning, which will start in 2015.

As a new function, klystron phase lock loop was digitally implemented within the cavity FB control loop in the FPGA, and it worked successfully in high power test. High-beam loading compensation was also demonstrated in the high power test by using an ARES cavity simulator, and then the expected performance in the cavity-voltage feedback control was obtained for the beam loading compensation.

Fabrication of another new LLRF control system for damping ring, which is required for low-emittance positron injection, is scheduled in JFY2015.

1. はじめに

いよいよ 2015 年度に SuperKEKB のビームコミッショニングが始まる。本稿では、新たに開発された低電力高周波 (LLRF) 制御システムについて、ビーム運転開始に向けた状況を報告する。主な成果としては、空洞シミュレータを用いて SuperKEKB の最大ビーム電流の蓄積を想定した大電力試験 (ビームローディング補償制御) を行い、期待通りの結果が得られたことが挙げられる。

SuperKEKB では KEKB の 40 倍のルミノシティを目指し、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^[1]。このような大強度ビーム加速器において、高周波 (加速電界) 制御の性能はビーム品質を左右する重要な要素の一つとなる。そのため 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^[2]。既存 (KEKB 用) のアナログ LLRF システムは段階的に新 LLR システムに置き換えていく。これまで報告してきたように試作モデルでは、実際にビームラインの加速空洞を用いて大電力試験を行い良好な性能が示されている^[2]。量産モデルに向け様々な改良も施し^[3]、無事に量産機 9 式が製造

されインストールが完了した。

SuperKEKB リングの加速周波数は 508.9MHz で、加速電界の振幅・位相安定性 (pk-pk) はそれぞれ $\pm 1\%$ 、 $\pm 1^\circ$ 以内が要求されている。それに対し、本システムでは、それぞれ 0.02%、 0.02° (r.m.s) のフィードバック (FB) 制御安定性 (制御精度) が得られ、温度特性を含む長期安定性はそれぞれ $\pm 0.3\%$ 、 $\pm 0.3^\circ$ 以内 (pk-pk@空調 $\pm 2^\circ\text{C}$) を実現している^[2]。

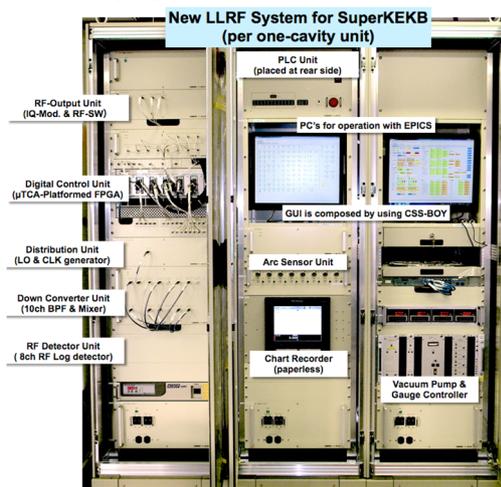


Figure 1: New LLRF control system for SuperKEKB.

[#] tetsuya.kobayashi@kek.jp

本加速器では常伝導、超伝導 (SC) の 2 種類の加速空洞が使用される。常伝導空洞は ARES と呼ばれる特殊な空洞で^[3]、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常伝導空洞である^{[4][5]}。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。LLRF 制御においては A 空洞、S 空洞それぞれ独立したチューニング制御を同時に行うことも重要な機能の一つである。

陽電子の低エミッタンス化のため、入射器ではダンピング (DR) が増設される^[6]。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^[7]。

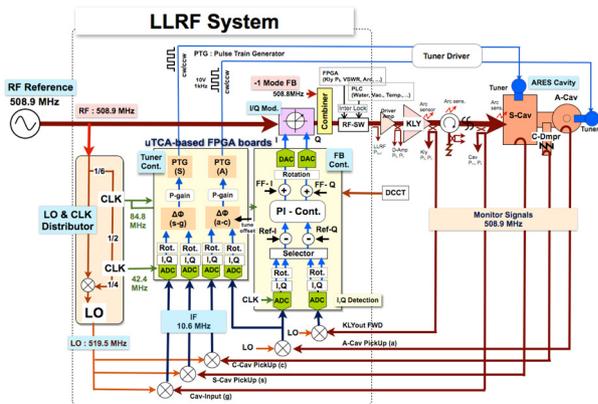


Figure 2: Block diagram for ARES cavity control.

2. SuperKEKB 新 LLRF 制御システム概要

Figure 1 に新 LLRF 制御システム量産モデル (1 式) の写真を示す。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。空洞電圧制御系のブロック図を Figure 2 に示す。

Figure 1 におけるデジタル制御ユニットが RF 制御の本質的な機能を担う。MicroTCA 規格を採用し、Advanced mezzanine card (AMC) として、次の 5 枚の FPGA ボードで構成されている^[8] - (1) 空洞電圧 FB 制御 (FBCNT)、(2) 空洞チューナー制御 (TNRcnt)、(3) インターロック (I/L) 制御 (INTLCNT)、(4) RF 検波波形モニタ (RFDET)、(5) アーク放電 (光検出波形) モニタ (ARCMON)。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^[9]。

Figure 2 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 でデジタル処理することで空洞入力を制御 (I/Q 変調) する^[10]。

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^[11]。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、インストール・運転準備が完了している^[12]。

3. コミッショニングに向けた準備状況

3.1 新 LLRF 制御システムのインストール

最初のビームコミッショニング (Phase-I) における RF システムの配置 (加速空洞とクライストロンの関係) を Figure 3 に示す。約 30 式ある RF ステーションのうち、始めは図のように OHO 直線部 (D4, D5 セクション) の 9 ヶ所を新 LLRF 制御システム (空洞とクライストロンを 1 対 1) で運転する。それ以外のステーションは、そのまま既存のアナログシステムを利用し、ARES 空洞では、そのほとんどが従来通りクライストロン 1 台で空洞 2 台に電力供給する (超伝導空洞は 1 対 1)。

新 LLRF 制御システム量産機 9 式は順調に製造・インストールされた。すでにインストールおよび受け入れ試験が完了している。新 LLRF 制御システム (量産機) がインストールされた様子 (写真) を Figure 4 に示す。上の写真が D4 で、既存システムが混在している。下が D5 の様子ですべて新システムに置き換わっている。各種信号ケーブルの配線、同軸ケーブル損失測定も完了し、校正作業、動作試験が順調に進んだ。秋以降に始まる空洞エイジングの準備がほぼ整っている。

一方、DR 用の LLRF 制御システム (DR-LLRF) を今年度中に製造・据付する予定である。DR-LLRF は MR とほぼ共通のシステムであるが、2 空洞以上のベクターサムの制御ができるよう FPGA (FBCNT) の機能を追加する。

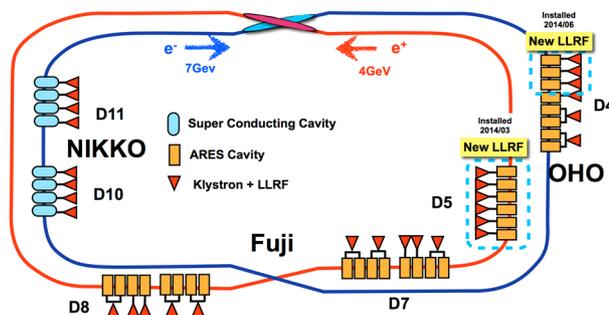


Figure 3: RF system layout for the SuperKEKB. Nine LLRF stations are replaced with the new ones.

3.2 LLRF 制御システムの動作試験

クライストロン位相ロック制御 (KLY-PLL) を新たに FPGA に組み込んだため^[10]、その大電力試験を行った。また、SuperKEKB における最大ビーム電流の蓄積を想定したクライストロン出力試験を合わせて行った。この際、空洞シミュレータを用いて、大電流ビーロディング補償の制御試験を行った。これらの試験については詳細を後述する。

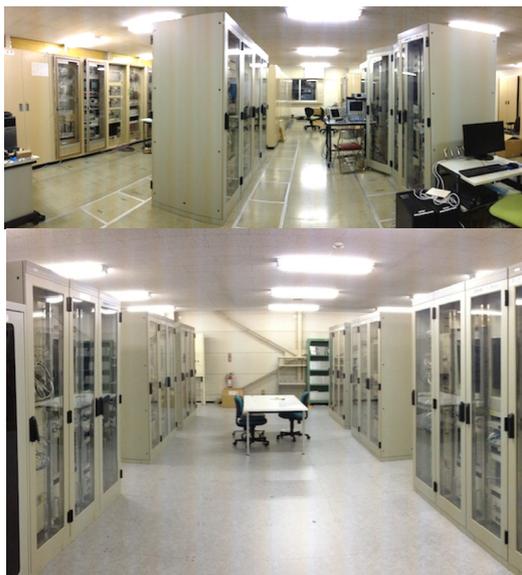


Figure 4: Installation appearance of new LLRF control systems in the RF control rooms of D4 (upper) and D5 (lower) section.

D4 の新システム (3 ステーション) のうち 2 ステーションにおいては、ビームラインに設置された実際の ARES 空洞を駆動する動作試験を行った (残り 1 ステーションについては空洞準備の都合でできない状況にあった)。この結果、FB 制御/チューナー制御等、これまで試作機で確認された性能を量産機でも再現され問題ないことが確認できた。ただし、この試験はトンネル内入域管理の都合上、10kW 程度の投入電力である。真空/冷却水/温度等、インターロックにも関係する多くの配線についても正常であることを確認した。

全ステーションについては、クライストロン立ち上げ試験運転 (300kW 出力) と合わせて新 LLRF 制御システムの動作確認 (地上部のみ) を行った。このクライストロン立ち上げ試験は、リング全体 (全ステーション) で行い、既存の旧 LLRF 制御システムの動作チェックも兼ねている。旧 LLRF 制御システムは KEKB のシャットダウン以来、約 3 年半ぶり稼働となる。老朽化もあり、いくつかの不具合も見つかったが、予備モジュールとの交換などで対処を行い、コミッショニング開始には問題ない。

SuperKEKB では、光伝送による高精度な RF 基準信号分配システムが新たに構築された^[13]。新旧を含む上記の全ステーションの LLRF 制御システムは、この新しい RF 基準信号により動作し、問題なく機能している。

3.3 オペレーションインターフェース (OPI)

Figure 3 で見ると SuperKEKB のコミッショニングでは、新旧の LLRF 制御システムが混在している。加速器のオペレータ (中央制御室における全体の遠隔操作画面) にとっては、これら新旧の違いを意識せずに運転できる必要がある。そのため、新システムではできるだけ旧システムと共通の EPICS レコード名を使うなど、整合性を図ってきた。しかし

ながら、アナログモジュール (振幅・位相変調) の組み合わせで構成される旧システムと、FPGA で I/Q 制御する新システムとでは動作が異なる点も多い。そこで、新システムでは、EPICS シーケンサー上に旧システムの動作を模擬する機能を組み込み、従来の OPI (sad スクリプト) で新旧区別なく運転ができるよう IOC ソフトの更新を進めている。ちなみに旧システムでは CAMAC および VME の EPICS-IOC を用いて遠隔制御・監視を行っている。特に D4 においては従来の CAMAC-IOC と新システム (各装置の IOC) が共存している。

4. 最大ビーム電流を想定した大電力試験

SuperKEKB のデザインパラメータでは、ARES 空洞 1 台当たりのビームパワーが、最大で KEKB の 3 倍となる。最大のビーム電流を蓄積した場合、空洞消費電力 150kW に対しビームパワーが 600kW (トータル 750kW 入力) となるため、クライストロン出力では最大 850kW 程度の出力が必要になる^[4]。そのため 800kW 以上のクライストロン出力試験を KEKB 運転終了以来初めて行った。併せて新 LLRF 制御システムの大電力試験も行い、KLY-PLL 制御、及び最大蓄積ビーム電流を想定した LLRF 制御 (ビームローディング補償) の特性を評価した。

4.1 大電力試験セットアップ

Figure 5 に大電力試験のセットアップを示す。図中には FPGA 内 (I/Q-FB 制御および KLY-PLL) の機能的ブロック図も示している。ビームがない状態で実際の空洞に 850kW を投入することはできないので、図のようにクライストロン出力はすべて 1.2MW ダミーロードに吸収させ、導波管のピックアップ信号を新 LLRF 制御でモニタする。また、ARES 空洞シミュレータ^[4]を用いて空洞電圧制御の試験を行った。分岐されたクライストロン出力のモニタ信号を空洞シミュレータに入力し、その応答を LLRF 制御シス

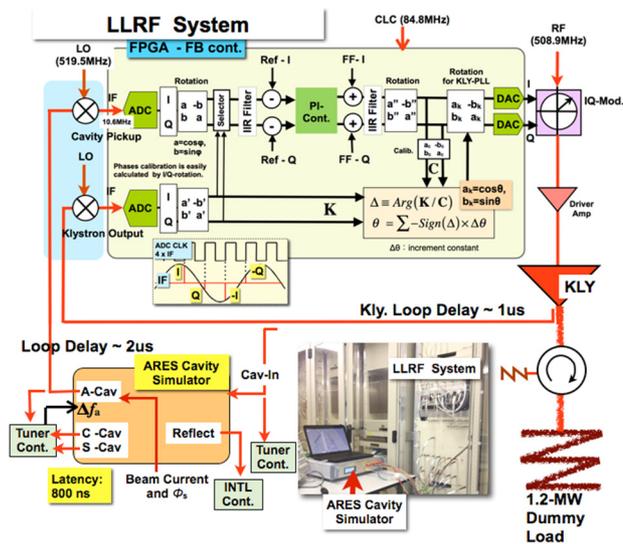


Figure 5: Setup of high power test of KLY-PLL and beam loading test using ARES cavity simulator.

テムでモニタする。ARES 空洞シミュレータは空洞反射、A,C,S 空洞の応答をリアルタイムで出力する。またチューナー制御にも対応し、LLRF 制御システムが出力する機械式チューナー（ステッピングモータ）の制御パルスに応じて共振周波数が変わる。更にシミュレータでは、ビーム加速を模擬することができ、ビームローディングに応じた応答を試験できる。シミュレータのレイテンシ約 800ns とクライストロンの遅延を合わせるとループ遅延時間は約 2 μ s となり、実際の空洞制御に相当する。

4.2 KLY-PLL 制御試験

前回報告した通り、以前の大電力試験において、アノード電圧制御（コレクターロスの最適化）によりクライストロン出力位相が最大 80° 変化することが観測された。I,Q 成分で FB 制御する LLRF 制御にとって、ループ内で 80° もの位相変化（I-Q 結合）は致命的で、FB 制御が不安定となる（50° 程度が許容範囲）。これに対処するため、FPGA（FBCNT）内でデジタル的にクライストロン位相をロックする機能（KLY_PLL）を追加した（制御の詳細は文献 [10] を参照）。アノード電圧制御の応答は 1 秒程度であり、KLY-PLL の応答速度は空洞電圧 FB 制御に比べて十分に遅い。この KLY-PLL については低電力試験による模擬的な確認のみだったため、今回、実際のクライストロンによる大電力試験を行った。

Figure 6 にクライストロン入出力特性を示す。この図はクライストロン出力による I/Q-FB 制御と KLY-PLL 制御が機能している状態の測定である。赤線がクライストロン出力を示し、問題なく 850kW 達成した。また運転電力（250kW※～800kW、※後述参照）における線形性も非常に良い。アノード電圧制御を 850kW が最大とした調整で最適化した。飽和点は 900kW 以上である。

青線は KLY-PLL 制御により補償された位相（制御結果）である。すなわちクライストロンの位相変化を表している。以前の試験同様に 80° 位相が変化していることが分かる。これにより KLY-PLL が期

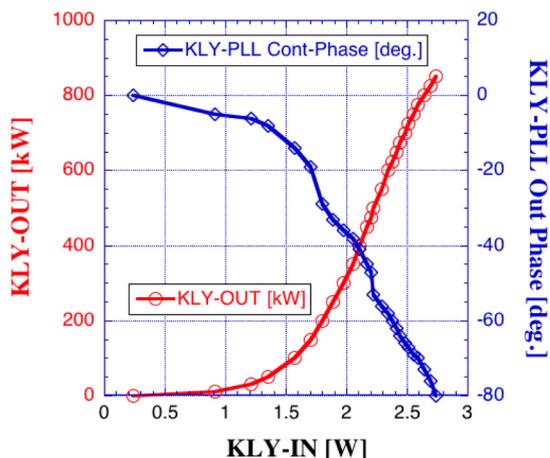


Figure 6: Klystron input-output characteristics measured under closed loop of the I/Q-FB control with the KLY-PLL control.

待通りに機能し、クライストロン出力位相（FB 制御系から見たループ位相）は一定になっていることが確認できた。また、その結果 I/Q-FB 制御は正常に動作し、シミュレータを用いた空洞電圧制御においても良好な性能が確認できた。

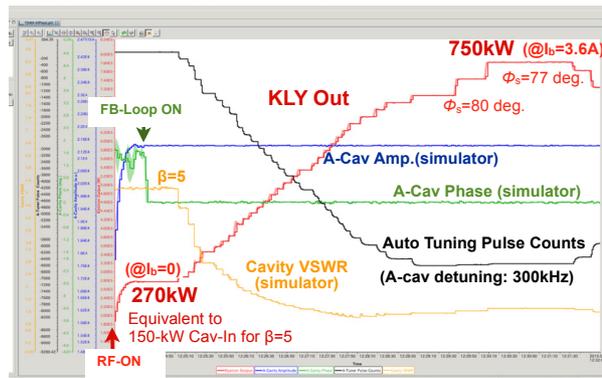


Figure 7: The chart of beam loading simulation test by using ARES cavity simulator under the closed loop for the cavity-voltage regulation control with KLY-PLL.

4.3 ビームローディング模擬試験

Figure 5 に示すように、この大電力試験において ARES 空洞シミュレータを用いて、ビームローディングを模擬した制御試験を行った。前述したように ARES 空洞 1 台当たり、空洞消費電力が 150kW で最大ビームパワーが 600kW なので、空洞入力最適カップリングは 5 である。また、ビーム電流によるリアクティ成分をキャンセルさせるため加速空洞の detuning は最大-280kHz にもなる。ただし、ARES 空洞全体として $\pi/2$ モードはその 1/10 で 28kHz である。空洞入力カップリングが 5 なのでビームがない時は反射電力が約 44% で、空洞消費を 150kW（加速電圧を定格 0.5MV）とするためには、空洞入力（クライストロン出力）で 270kW 必要になる。

上記のように SuperKEKB で大電流ビームを蓄積していく状況を ARES 空洞シミュレータで模擬（カップリングを 5 に設定）し、その制御応答（ビームローディング補償とクライストロン出力の関係）を評価した。その結果（チャート）を Figure 7 に示す。赤線が実際のクライストロン出力電力で、青線、緑線がそれぞれ加速空洞振幅、位相を示す。Synchronous 位相を 80 度付近として、ビーム電流を 0 から徐々に増やしていくと、ビームローディング補償（FB 制御）の結果、加速電圧、位相は一定に保たれクライストロン出力（赤線）が上昇し、最大ビーム電流において 750kW となり期待通りの結果となった。黄色が空洞反射（VSWR）を示し、5（カップリングと同じ）からビーム電流の増加に応じて反射が小さくなっていくのが分かる。これら空洞の応答は ARES 空洞シミュレータによる応答である。黒線は自動チューナー制御によるパルス出力数（LLRF 制御システムから出されたチューナー駆動パルスカウンタ）を示す。パルス数の変化は ARES 加速空洞の detuning が約 300kHz に相当し、想定通りである。このようにチューナー制御についても正常

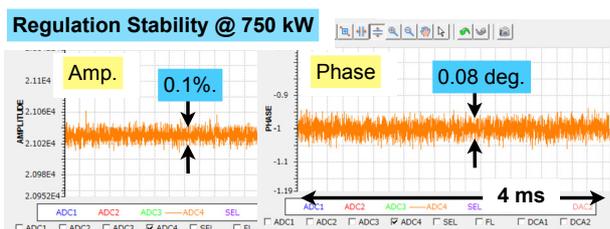


Figure 8: Regulation stability of amplitude and phase of cavity-voltage FB control measured at 750-kW output of the klystron.

にビームローディングを補償（リアクティ成分をキャンセル）し、期待通りの結果が得られた。このビームローディング試験において KLY-PLL も正常に機能した。

クライストロン出力 750kW（最大ビームローディング、加速空洞 detuning 約 300kHz）時における空洞振幅、位相制御の安定性を Figure 8 示す。この結果、位相安定性が $\pm 0.04^\circ$ (pk-pk) で、試作機と同様に非常に良好な制御特性が再現されている。この時、空洞 detuning が非常に大きい（約 70° の位相変化に相当する）が、FB 制御に異常は見られなかった。

5. まとめ

大電流ビームを蓄積する SuperKEKB では、高精度かつ高いフレキシビリティを持つ新しいデジタル LLRF 制御システムが開発され、量産機のインストールが完了している。いよいよ 2015 年度に始まる SuperKEKB のコミッショニング運転に向け LLRF 制御システムの立上げ準備が順調に進められている。

約 30 ある RF ステーションのうち、9 ステーションに新 LLRF 制御システムをインストールした。他のステーションでは KEKB の旧 LLRF 制御システムをそのまま使用する。そのためビーム運転で新旧システムの混在を意識しなくて済むように、操作インターフェース上の整合性を図っている。これら新旧 LLRF システムについて、各種ケーブル配線、システム立上調整等が完了し、全ステーションでクライストロンの立ち上げ試験（300kW 出力）が無事終了した。秋以降に行う空洞エイジングに向け、準備がほぼ整った状態である。

新 LLRF 制御システムの大電力試験において、新規に追加された KLY-PLL 制御の正常な動作を確認できた。また、ARES 空洞シミュレータを用いて、最大ビーム電流の蓄積を模擬した大電力試験を行った結果、期待通りにビームローディング補償が機能し、良好な制御結果が得られた。

また、2016 年度に予定している DR の立ち上げ運転に向け、DR 用の LLRF 制御システムを今年度中に製造・据付を行う。

また、2016 年度に予定している DR の立ち上げ運転に向け、DR 用の LLRF 制御システムを今年度中に製造・据付を行う。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi et al., "Accelerator design at SuperKEKB", Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A011 (2013).
- [2] K. Nakanishi, et al., "Development of LLRF system for

- SuperKEKB", Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp. 1154-1158 (2013).
- [3] T. Kageyama et al., "The ARES cavity for KEKB", Proc. of APAC98, pp. 773-775 (1998).
- [4] K. Akai, et al., "RF System for SuperKEKB", Proc. of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp. 177-181 (2010).
- [5] K. Akai et al., "RF systems for the KEK B-Factory", Nucl. Instrum. Meth. A 499 (2003) 45-65.
- [6] M. Kikuchi et al., "Design of Positron Damping Ring for Super-KEKB", Proc. of IPAC10, pp. 1641-1643 (2010)
- [7] 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, pp. 586-593 (2013).
- [8] M. Ryoshi et al., "LLRF Board in Micro-TCA Platform", Proc. of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp. 667-669 (2010).
- [9] J. Odagiri et al., "Fully Embedded EPICS-Based Control of Low Level RF System for SuperKEKB", Proc. of IPAC10, pp. 2686-2688 (2010).
- [10] 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, pp. 1320-1324 (2014).
- [11] J. Odagiri et al., "EPICS on F3RP61 for SuperKEKB Accelerator Control", Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp. 785-789, (2014).
- [12] M. Nishiwaki, et al., "Integrated Vacuum Control System for SuperKEKB Accelerating Cavities", Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp. 1308-1311 (2014).
- [13] T. Kobayashi, et al., "RF Reference Distribution System for SuperKEKB", Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp. 1159-1163 (2013).
- [14] T. Kobayashi et al., "Development of ARES Cavity Simulator", Proc. of the 9th Annual Meeting of Particle Acc. Society of Japan, pp. 757-761 (2012).