

SuperKEKB における超伝導空洞用新 LLRF 制御システムの開発

DEVELOPMENT OF NEW LLRF CONTROL SYSTEM FOR SUPERCONDUCTING CAVITY IN SuperKEKB

小林鉄也^{*A)}, 赤井和憲^{A)}, 岡田 貴文^{A)}, 小笠原舜斗^{A)}, 可部農志^{A)}, 中西功太^{A)}, 西脇みちる^{A)},
岩城 孝志^{B)}, 林 和孝^{B)}, 張替 豊旗^{B)}, 山浦 正義^{B)}, 漁師 雅次^{B)}

Tetsuya Kobayashi^{*, A)}, Kazunori Akai^{A)}, Takafumi Okada^{A)}, Shunto Ogasawara^{A)},
Kota Nakanishi^{A)}, Michiru Nishiwaki^{A)},

Takashi Iwaki^{B)}, Kazutaka Hayashi^{B)}, Toyoki Harigae^{B)}, Masayoshi Yamaura^{B)}, Masatsugu Ryoshi^{B)}

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

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

Abstract

SuperKEKB accelerator is the world's highest luminosity collider with electron-positron asymmetric collision, which is aiming at the world highest luminosity. The commissioning of the SuperKEKB begun in 2016, and the world record of the luminosity was updated. In the RF system for SuperKEKB, both cavity types of normal conducting (NC) and superconducting (SC) are used. The digital LLRF control system for NC cavity operation has been developed. They are working successfully in the beam operation. In the present state, additionally, new digital LLRF control system was developed for SC cavity operation, and its prototype was constructed last year. Several new functions are implemented into the new system for the SC cavity operation. High power test of the prototype was performed by using a spare SC cavity, and desired performance was confirmed.

1. はじめに

SuperKEKB は電子陽電子非対称衝突型円形加速器で、世界初となる衝突方式（ナノビーム・スキーム）を採用し、前身である KEKB 加速器の 40 倍のルミノシティ ($8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-2}$) を目指している [1]。2016 年に最初のコミッシュニング (Phase-1) が開始され、2018 年から無事に衝突実験が始まった。その後も概ね順調に性能向上が続けられ、2022 年 6 月には更に世界最高記録を更新し、KEKB の 2 倍を大きく超えるルミノシティに達した [2]。今後も更なるアップ・グレード（電流の増加）を進め、目標ルミノシティを目指す。

SuperKEKB 加速器は、7GeV 電子リング (High Energy Ring, HER) と 4GeV 陽電子リング (Low Energy Ring, LER) とでメインリング (MR) が構成される。デザイン蓄積ビーム電流値は HER, LER それぞれ 2.6A, 3.6A である。

RF システムは常伝導、超伝導の 2 種類の加速空洞が用いられている [3]。RF 装置の多くは KEKB で使われていたシステム [4, 5] を、増強した上でほぼ再利用しているが、低電力高周波 (LLRF) 制御システムは、一部の常伝導空洞用ステーション (全体の約 1/3) において、FPGA を用いたデジタル式に更新された [3, 6]。残りのステーションに対してもデジタル化を進めるため、新たに超伝導空洞用デジタル LLRF 制御システムの開発を行い、試作機が完成した。本システムは、これまでの常伝導空洞用システムにはない新しい機能が多く追加されている。これらについて詳細を紹介する。また、実際の超伝導空洞を用いて大電力試験を行った結果を報告する。

2. RF システム概要と状況

RF 周波数は 508.9MHz で、前述の通り、常伝導空洞と超伝導空洞 (SCC) [7] の 2 種類の加速空洞が使用されている。常伝導空洞は、KEKB で結合バンチ不安定性を抑えるために開発されたユニークな構造で、ARES 空洞と呼ばれる [8, 9]。ARES 空洞は、加速空洞に結合空洞を介して貯蔵空洞を結合させた 3 連空洞 ($\pi/2$ モードで運転) にすることで、常伝導空洞としてはかなり高い Q 値 ($Q_0 \sim 120000$) を実現している。空洞パラメータ等は参考文献 [4] を参照のこと。

MR は両リング併せて全 38 台の加速空洞があり (HER は ARES 空洞と SCC を併用、LER は ARES 空洞のみ使用)、約 30 式の RF (クライストロン: KLY) ステーションで構成される。その他の詳細 (RF システム全体構成、運転パラメータおよび運転状況など) は前回の報告 [10] を参照して頂きたい。

加速電圧 (V_c) の制御を行う LLRF 制御システムについては、SuperKEKB 用にデジタル技術 (FPAG) を用いて高精度な LLRF 制御システムが開発され、早くからデジタル LLRF 制御の実用を始めている。しかしながら、本システムは今のところ ARES 空洞のみに対応し、適用は全体の約 1/3 のステーションだけとなっている。一方、SCC を含め、残りのステーションでは KEKB から引き続きアナログ方式の制御システム (CAMAC を介したりリモート制御) で運転されている。将来的にこれらも順次デジタル系に更新することを目指し、SCC 用のデジタル LLRF 制御システムの開発を行った。昨年、試作機が完成したところである。

* tetsuya.kobayashi@kek.jp

3. SCC 用デジタル LLRF 制御システム

3.1 概要

Figure 1 に、本 SCC 用デジタル LLRF 制御システムの RF 制御 (V_c 制御と空洞チューニング制御) に関するブロック図を示す。本システムは μ TCA 規格のプラットフォームに載った FPGA ボードを用いて、RF 信号 (約 10MHz の中間周波数に変換) を 16bit-AD 変換し、IQ 検波 / IQ 変調方式でフィードバック (FB) 制御 (=PI 制御) を行う。また、図には無いが、高速 RF インターロック (空洞反射検知やアーク放電検知など) のための FPGA ボードがある。その他、真空・温度インターロック機能や、運転シーケンス動作などは PLC が担っている。各 FPGA ボードと PLC は組込 EPICS により完全リモート制御が可能になっている。実際のハードウェア構成は、すでに稼働している ARES 空洞用デジタル LLRF 制御システムを踏襲し、FPGA や PLC の機能、ロジックを SCC 用に適合させた。既存システムの詳細は参考文献 [6] や過去の発表を参照して頂くとして、本稿では、SCC 用としての新機能について紹介する。

従来の ARES 空洞用には無く、SCC 用で加わった機能は、主に下記の 4 種類である。

- (1) Piezo Tuner Control
- (2) Direct IQ Feedback
- (3) Breakdown (Quench) Detector
- (4) Pulse Aging Function

それぞれについて詳細を以下に説明する。

3.2 Piezo Tuner Control

チューナー制御を司る FPGA ボード (TNRcnt) のブロック図を Fig. 2 に示す。空洞入力と空洞ピックアップアップ信号の位相差 (tuning オフセット込み) に応じて、チューナー制御信号を生成する。ARES 空洞用と同じ機械式チューナー制御 (ステッピング・モーター駆動用パルス生成) に加え、 Piezo 制御用ロジック

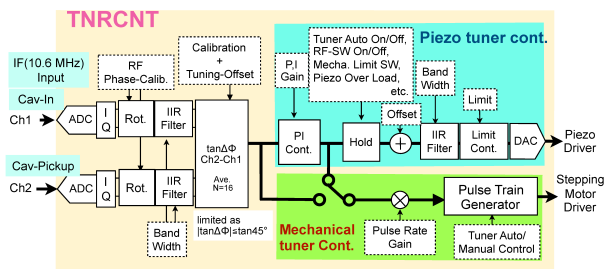


Figure 2: Block diagram of tuner control for SCC.

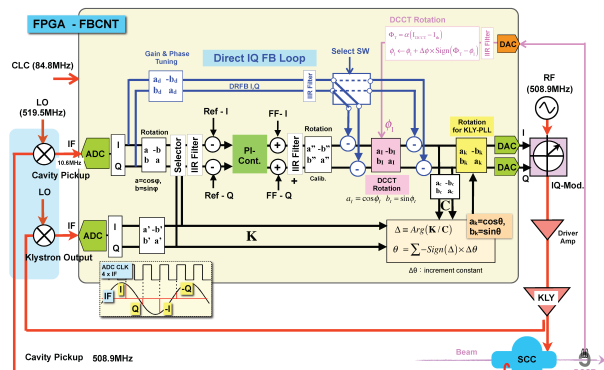


Figure 3: Detailed block diagram for Vc-Loop and KLY-Loop.

ック (DAC 出力) がある。 Piezo 制御では、すでに運用されている cERL 用 LLRF [11] のロジックを踏襲し、PI 制御を採用した。ただし、空洞シミュレータ (Section 4.1 参照) を用いた試験の結果、SuperKEKB での運用では支障になりそうな点が見つかったので改善 (後述) を行っている。

ちなみに、ARES 空洞 (3 連空洞) 用のチューナー制御では、加速空洞用と貯蔵空洞用の 2 系統 (機械式チューナー制御のみ) を有している。

3.3 Direct IQ Feedback

SuperKEKB の大きな蓄積ビーム電流では、ビーム負荷の増大に伴いコヒーレントなシンクロトロン振動数が低下し、安定な振動 / 復元力を失う、いわゆる static Robinson 不安定性が深刻な問題になる恐れがある。特に超伝導空洞がこの問題を顕著にする。これを抑える手段の一つとして直接 RF フィードバック (Direct RF Feedback: DRFB = 空洞ピックアップ信号を逆位相で直接合成) が有効である [12, 13]。本デジタル・システムでは、DRFB に相当する機能として、Fig. 3 に示すように、IQ 成分を直接 (PI 制御を介さず) 反転・加算する "Direct IQ Feedback (DIQFB)" ループを新たに加えた。図は、Vc 制御ループ (Vc-Loop) と KLY 出力制御ループ (KLY-Loop) に関するブロック図で、青色で示す信号ラインが DIQFB である。

DIQFB では、ゲインや位相を調整する IQ-Rotation、および IIR ファイルタが挿入されている。また反転加算するポイントを DCCT-Rotation [14] の前後どちらかに選択できる (どちらが良いか検討の余地あり)。DCCT-Rotation とは、大電流による大きな空洞離

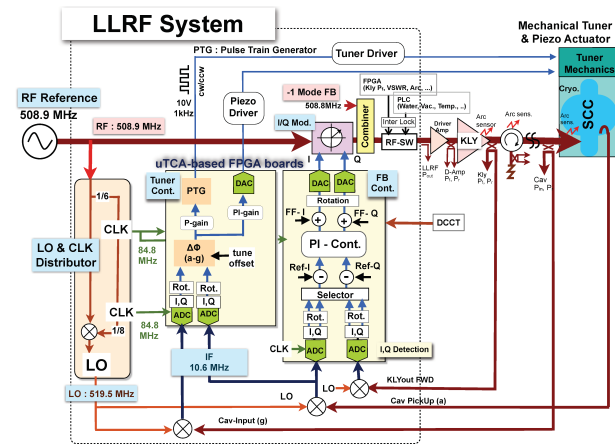


Figure 1: Block diagram of new SCC-LLRF control system, which is based on that for ARES Cavity.

調 (optimum tuning) に対してループ位相を補償する機能である。

ちなみに、Vc-Loop 又は KLY-Loop の内側には、KLY 出力位相ロックループ (KLY-PLL) がある。

3.4 Breakdown Detector

超伝導状態の異常 (クエンチ等) を検知するための Breakdown Detector (BDD) を、Vc-Loop 用 FPGA (Fig. 3) に新たに組み込んだ。BDD が異常を検知すると、RF スイッチを切ると同時にビーム・アポートのリクエスト信号を出力する。本 BDD では、1) Vc-Drop、2) Kly-Out Rising、3) Kly-Out Max の 3 種類の検知方式を用意した。これらの動作ブロック図を Fig. 4 に示す。

”Vc-Drop” は、FB 設定電圧 (V_{FBref}) に対して V_c の低下を検知する。”Kly-Out Rising” は、Vc-Loop 状態において KLY 出力 (V_k) の上昇 (クエンチすると Q0 値が低下により V_c が低下し、それを V_c 制御ループが補償するために KLY 出力を上昇させる) を検知するもので、上昇分の (任意時間幅の) 積分値で判定する。ここでビーム電流 (I_b) の増加を考慮して判定される。”Kly-Out Max” は、単純に KLY 出力の閾値で判定するものであるが、その閾値は EPICS から与えられ、ビーム電流に応じて常に最適に (動的に) 変化させることを想定している。SCC では BDD に加え、RF 停止時に大電流ビームによる高い励起電圧を避けるため、ビーム励起信号を検知しアポート・リクエストを出す空洞保護機能 (Fig. 4 の”Beam Induce@RF-OFF” でアポート) を必要とする。

3.5 Pulse Aging 機能

FB 制御の一部として、パルス・エイジング (PA) 機能を加えた。FB 制御の目標設定値 (Fig. 3 の”Ref”) をパルスの任意の割合で上昇させ、FB 制御の結果として出力上昇パルスが作られる。FPGA 内で任意にパルスを生成 (上昇量、パルス幅および繰り返しレートを設定) できるので、外部からの信号入力は

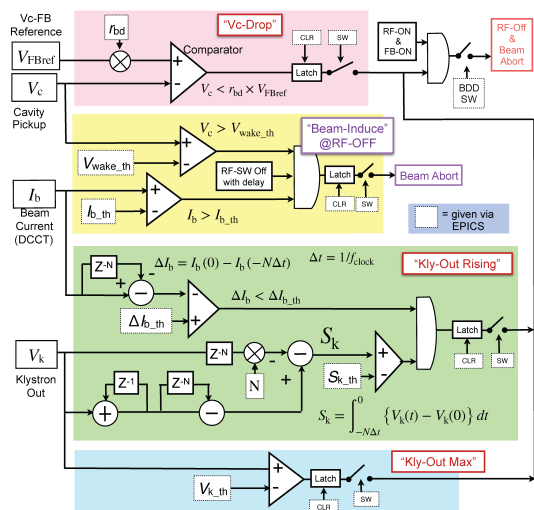


Figure 4: Functional block diagram of breakdown detector.

必要とせず、非常に簡単に PA を行うことができる。

4. 空洞シミュレータを用いた性能評価

4.1 空洞シミュレータ

本システムの性能評価は、まず空洞シミュレータ (Fig. 5) を用いて低電力で行われた。空洞シミュレータは、ARES 空洞用システム評価のために開発した ARES 空洞シミュレータ [15] (製造は (株) 三光社 [16]) を、SCC 用に適用させたものである。本シミュレータは、ARES 空洞特有の 3 連空洞の応答 (反射を含む) を模擬し、チューナー機能およびビーム負荷 (バンチ・ギャップを含む) を模擬することが可能である。直接、RF 信号の入出力で使用でき、応答は FPGA によるリアル・タイム演算処理で模擬する (レイテンシは約 800ns)。SCC 用に用いる場合は、ARES 空洞の貯蔵空洞部分を SCC とみなして使用する。ここに、今回ピエゾ・チューナーを模擬する機能 (制御信号の ADC 入力) の追加・改造を行った。

空洞パラメータは任意に設定できるが、SCC の大きな入力結合度は (ARES 空洞兼用では)、FPGA での整数演算 (AD/DA-16bit) の精度が足りないので実際の反射特性は模擬できない。一方、負荷 Q 値 (Q_L) は実際の空洞と同じようにしている。

後述するように、大電力試験前に空洞シミュレータにより重要な不具合も見つかかり修正できたので、非常に有用であった。



Figure 5: Photo of the ARES cavity simulator including piezo tuner function.

4.2 ピエゾ・チューナー制御試験

空洞シミュレータを用いて、ピエゾ・チューナー制御試験を行った結果、基本的には正常に機能することが確認できた。ただし、比例制御では、かなり帯域を狭くするか、比例ゲインを小さくしないと発振することが分かった (空洞シミュレータの問題の可能性もある)。一方、積分制御が非常に有効で精度良く安定にチューニングが取れることを確認した。しかし、設定できる積分ゲインの値が粗すぎる (速すぎる) ことが判明したので、より細かく (遅く) 設定できるように改修した。また、制御 OFF 時に積分値 (アキュムレータ) がクリアされない (制御 ON 時に出力が跳ぶ) 不具合があったので、これについても修正した。その他、IIR フィルタにおけるオーバーフロー処理が不完全だったので対処した。

4.3 Direct IQ Feedback の特性評価

基本的な FB ループ特性は過去の報告 (ARES 空洞用) を参照して頂くとして、本稿では新たに追加さ

れた DIQFB の試験について紹介する。

Figure 6 に示すセットアップで、空洞入力に与えた外乱（振幅／位相変調）に対する抑制効果を評価した。変調周波数は、シンクロトロン振動を想定して 3kHz とした。この FB ループをブロック線図にすると Fig. 7 のようになる。ここで、Direct FB ループを含む空洞の伝達関数 H_{cavDF} (I,Q の転送行列) は、空洞単体の伝達関数 $C(s)$ を用いて、

$$\mathbf{H}_{\text{cavDF}} = [\mathbf{E} + \gamma \mathbf{C}]^{-1} \cdot \mathbf{C} \quad (1)$$

$$\gamma = \alpha / (1 - \alpha), \quad \alpha = V_{\text{DF}} / V_{\text{PI}}$$

$$\mathbf{C}(s) = \frac{\omega_{1/2}}{\Delta\omega^2 + (s + \omega_{1/2})^2} \begin{bmatrix} s + \omega_{1/2} & -\Delta\omega \\ \Delta\omega & s + \omega_{1/2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\omega_{1/2} = 2\pi f_a / (2Q_L), \quad \Delta\omega = 2\pi(f_a - f_{\text{rf}})$$

と書ける。ここで \mathbf{E} は単位行列、そして f_a, f_{rf} はそれぞれ空洞共振周波数、RF 周波数である。また、 α は、メイン・ライン信号 V_{PI} に対する FB 信号 V_{FB} の振幅比である。一般的に DRFB の場合、反転位相からズレた分、 \cos で γ に掛かるが [12]、本 DIQFB では、ほぼ理想的に IQ 反転で FB できるので、反転位相のズレはないものとする。これより、外乱に対する抑制特性（閉ループ）の伝達関数 $\mathbf{H}_{\text{DR}} (= x/y)$ は、

$$\mathbf{H}_{\text{DR}} = [\mathbf{E} + \mathbf{H}_{\text{cavDF}} \cdot \mathbf{H}_{\text{PI}}]^{-1} \cdot \mathbf{H}_{\text{cavDF}} \quad (3)$$

と書ける。 \mathbf{H}_{PI} は PI 制御の伝達関数で、 $\mathbf{H}_{\text{PI}}(s) = (P_{\text{gain}} + I_{\text{gain}}/s)\mathbf{E}$ ($P_{\text{gain}}, I_{\text{gain}}$ はそれぞれ比例ゲイン、積分ゲイン) である。また本評価におけるループ遅延は (3kHz の外乱に対しては) 無視する。

以上を踏まえ、DIQFB の特性を、異なる PI ゲインについて測定した結果を Fig. 8 に示す。横軸を α として、外乱 (3kHz) の抑制率を ($\alpha = 0$ を基準に) プロットしている。左右それぞれ振幅変調、位相変調を行った場合で、記号マークが測定点、実線／破線が Eq. (3) による計算値を示す。 Q_L は 60000 として、空洞は共振点 (I,Q は独立と見做せる状態) での評

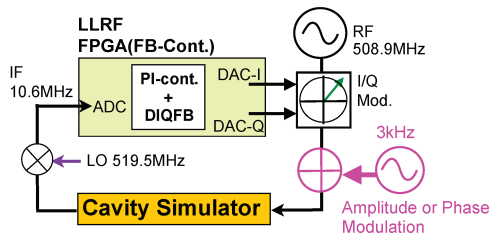


Figure 6: Measurement setup for evaluation of DIQFB.

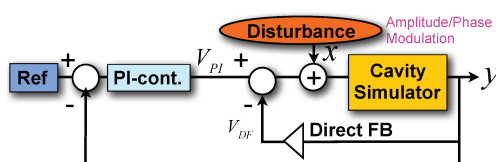


Figure 7: Block diagram of the FB loop including direct feedback.

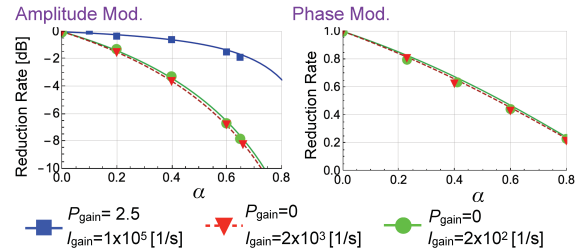


Figure 8: Evaluation Results of disturbance reduction by DIQFB for $Q_L = 60000$. Solid and dashed lines indicate the calculation.

価である。これより、計算と良く合あう測定結果が得られ、FPGA ロジックに問題ないことが確認できた。PI ゲインが大きいと DIQFB の効果は小さくなるが、実際の運用で PI 制御のループ帯域を絞る場合に DIQFB が重要になる。

4.4 ビーム負荷の模擬試験

もう一つ、ビーム負荷を模擬した FB 制御試験について簡単に紹介する。

Figure 9 に、Vc-Loop において、空洞シミュレータでバンチ・ギャップを含むビーム負荷を模擬（加速電圧 1.5MV、加速位相 80°、ビーム電流 2A、バンチ・ギャップ 5% を想定）した例を示す。横軸を時間（スパン 48μs）に、空洞モニタ信号（左右それぞれ振幅、位相）をプロットしている。バンチ・ギャップにより 10μs 周期 (=SuperKEKB の Revolution 周期) で振幅・位相が変調されている。ここでは通常の Vc-Loop 制御およびチューナー制御と併せて、 $\alpha = 0.5$ (ゲイン -6dB, $\gamma = 1.0$) として DIQFB も加えている。また、空洞はビーム負荷に応じて離調 (optimum tuning) されている。これにより（入力結合器の条件は異なるが）、バンチ・ギャップ・トランジェントのような大きな変調に対しても DIQFB は安定に動作し、制御システムに問題ないことが確認できた。これでビーム不安定性については模擬できないが、DRFB の効果は実際の運転で検証されている [12, 13]。バンチ・ギャップ・トランジェントによる影響や対策については、文献 [17] 等を参照のこと。

5. 実際の超伝導空洞を用いた大電力試験

最後に、実際に SCC (運転用の予備空洞: $Q_L \sim 55000$) を用いて、横測定用テストスタンドで行った大電力試験について紹介する。

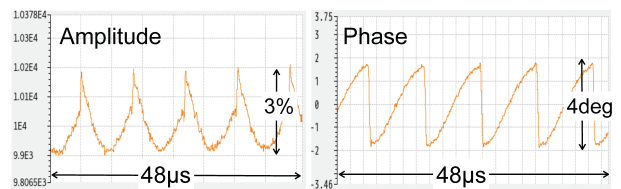


Figure 9: Simulation test of applying beam loading with bunch gap transient in Vc-regulation control. V_c amplitude and phase transient are shown.

試験結果の例として、 V_c レギュレーションと PA における波形を、それぞれ Fig. 10 と 11 に示す。いずれも横軸を時間（それぞれスパン 5 ms、20 ms）にした空洞ピックアップ信号 ($V_c=1\text{MV}$ 時) の振幅 (左) と位相 (右) である。Figure 11 は KLY 出力波形も併せて示している。

V_c レギュレーション (Fig. 10) において、従来通り振幅、位相それぞれ 0.03%, 0.03° (rms) 以下の安定性が確認できた。ここで DIQFB ($\alpha = 0.5$) も適用しており、問題なく動作している。

PA (Fig. 11) は、周期 5 ms、幅 1 ms で振幅 10% 上昇させている例で、期待する矩形パルス出力が正常に作られた。ここで KLY 出力がオーバーシュートしないように、FB 制御は積分制御だけ (比例ゲインを 0) にしている (積分ゲインでパルス形を調整)。PA により実際に予備空洞でエージング効果が得られ、効率的に V_c を上昇させることができた。図は V_c -Loop での例であるが、KLY-Loop でも同様に可能である。

その他、チューナー制御 (ピエゾ制御を含む) や BDD も正常に機能する (空洞シミュレータでの状況を再現する) ことが確認できた。ただし、ピエゾ制御における比例制御は、更にループ帯域を狭く (ゲインを小さく) する必要がある。この理由の一つとして、空洞や cryostat の機械的な共振 (周波数が数十 Hz) が考えられる。いずれにせよピエゾ制御は積分制御により問題なく高精度にチューニングを取ることができた。また、実際の運転を想定し、様々な条件での動作確認や、立ち上げシーケンスなどの試験を行った結果、このままでもビーム運転に適用できると判断された。

以上の通り、大電力試験では特別な問題は見られず期待通りの動作が確認できた。空洞シミュレータを用いた事前の試験により予め問題点を把握し、対処できていたことは非常に良かったと感じる。

6. まとめ

SuperKEKB の更なる大電流ビーム蓄積に向け、新規に SCC 用のデジタル LLRF 制御システムを開発した。本システムでは、SCC の運転に必要な (従来の ARES 空洞にはない) 様々な機能を追加している。試作機の性能評価を行った結果、期待通りの特性が確認でき、このままビーム運転に適用しても問題なさそうである。

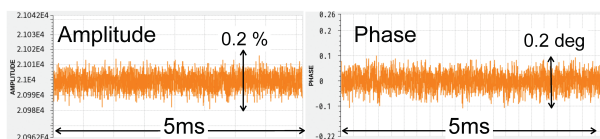


Figure 10: Waveform of V_c amplitude and phase under V_c -regulation FB control at $V_c = 1\text{MV}$.

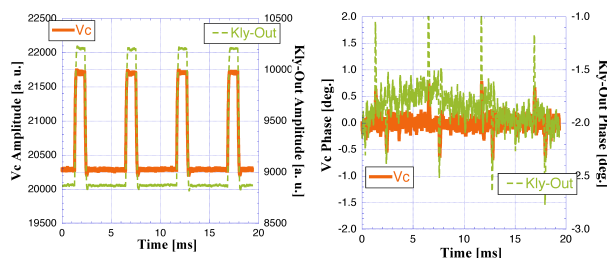


Figure 11: Waveform of amplitude and phase of V_c and klystron output in pulse-aging applying.

謝辞

ARES 空洞シミュレータの開発および SCC 用に向けた改造においては、(株) 三光社の石垣氏および武田氏に多大な貢献をして頂き、期待するシステムが完成したことに、心より感謝致します。

参考文献

- [1] <http://www-superkekb.kek.jp>
- [2] https://www-linac.kek.jp/skekb/status/web/2022ab_history.png
- [3] “RF System”, SuperKEKB Deign Report, 2014, pp. 149-215.
- [4] K. Akai *et al.*, “RF systems for the KEK B-Facory”, Nucl. Instrum. Meth. A 499, 2003, pp. 45-65.
- [5] T. Abe *et al.*, “Performance and operation results of the RF systems at the KEK B-Facory”, Prog. Theor. Exp. Phys., 2013, 03A006.
- [6] T. Kobayashi *et al.*, “Development and Construction Status of New LLRF Control System for SuperKEKB”, Proc. of IPAC2014, WEPME071, 2014, pp. 2444-2446.
- [7] T. Furuya *et al.*, “Superconducting Accelerating Cavity for KEK B-factory”, Proceedings of SRF1995, CEA-Saclay, France, 1995, p. 729.
- [8] 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.
- [9] T. Kageyama *et al.*, “The ARES cavity for KEKB”, Conf. Proc. of APAC98, 1998, pp. 773-775.
- [10] T. Kobayashi *et al.*, “Operation Status of LLRF Control System in SuperKEKB”, Proc. of PASJ2021, TUP044, pp. 541-545.
- [11] T. Miura *et al.*, “Digital LLRF Control System for cERL”, Proc. of PASJ2016, MOP012, pp. 336-339.
- [12] K. Akai *et al.*, “Verification of RF Feedback to Suppress Longitudinal Instability due to Beam Loading in SuperKEKB”, Proc. of PASJ2020, WEPP35, pp. 320-324.
- [13] K. Akai, “Stability analysis of rf accelerating mode with feedback loops under heavy beam loading in SuperKEKB”, Phys. Rev. Accel. Beams 25, 102002 (2022)
- [14] T. Kobayashi *et al.*, “Phase Compensation Function for Cavity Detuning due to Heavy Beam Loading in I/Q-Feedback Control”, Proc. of PASJ2018, WEP104, pp. 622-627.
- [15] T. Kobayashi *et al.*, “Development of ARES Cavity Simulator”, Proc. of PASJ2012, WEPS121, pp. 757-761.
- [16] <http://www.sanko-sha.net/>
- [17] T. Kobayashi and K. Akai, “Advanced simulation study on

PASJ2022 WEP048

bunch gap transient effect”, Phys. Rev. Accel. Beams 19,
062001, 2016.