

Refinements of the new LLRF Control System for SuperKEKB

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

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} Mitsubishi Electric TOKKI System Corp., 8-1-1 Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki, Hyogo, 661-0001

Abstract

For the SuperKEKB project, a new LLRF control system has been developed to realize high accuracy and flexibility. It is an FPGA-based digital RF feedback control system using 16-bit ADC's, which works on the μ TCA platform. In this μ TCA-module, the Linux-OS runs then it performs as the EPICS-IOC. A prototype of the LLRF control system for the SuperKEKB was produced. Its basic performances of the RF control and tuner control were evaluated by using the ARES cavity of KEKB. The evaluation results and refinements for the production model will be presented in this report.

Sufficient performance of feedback control was obtained. However, the temperature dependence was not small for present room temperature condition. The countermeasures for the temperature drift were implemented in the FPGA.

SuperKEKB 用 LLRF 制御システム試作評価と改良

1. はじめに

SuperKEKB は、KEKB 加速器のルミノシティを 40 倍にするため、衝突点におけるナノ・ビーム方式を採用し、かつ、蓄積ビーム電流を 2 倍にする加速器である。このような大強度かつ高品質ビームを加速し、ビーム不安定性を避けるためには、高周波（加速電場）制御の性能が非常に重要となる。

そこで SuperKEKB 加速器では、高精度で、かつ、フレキシブルな制御を可能にする、新しい LLRF (Low Level RF) 制御システムの開発を行ってきた^[1]。

新しい LLRF システムの核となる RF 信号制御は、4ch 16bit ADC 入力と 4ch 16bit DAC 出力を持つ、FPGA 制御ボード^[2]が行う。このボードの特徴は 2 つ有り、(1) μ TCA (micro Telecom Computing Architecture) 規格をプラットフォームとする事、(2) Linux 組込み EPICS IOC として動作する事である。cERL の LLRF^[3]、STF (DRFS, 量子ビーム装置) の LLRF^{[4], [5]}、SuperKEKB の

LLRF 向けに共通化している。本 FPGA 制御ボードを用いて、DRFS では超伝導空洞で大電力運転、量子ビーム装置ではビーム加速運転の制御を行った。その他、SuperKEKB の軌道フィードバック用 BPM (Beam Position Monitor) 信号処理ボードへの適用が進められている^[6]。

SuperKEKB の LLRF システムを試作した。FPGA 制御ボードを 3 枚使い、1 枚目は FB (Feedback) 制御、2 枚目はチューナー制御、3 枚目には RF 信号による高速のインターロック制御を担当させている。図 1 に、FB 制御とチューナー制御のブロック図を

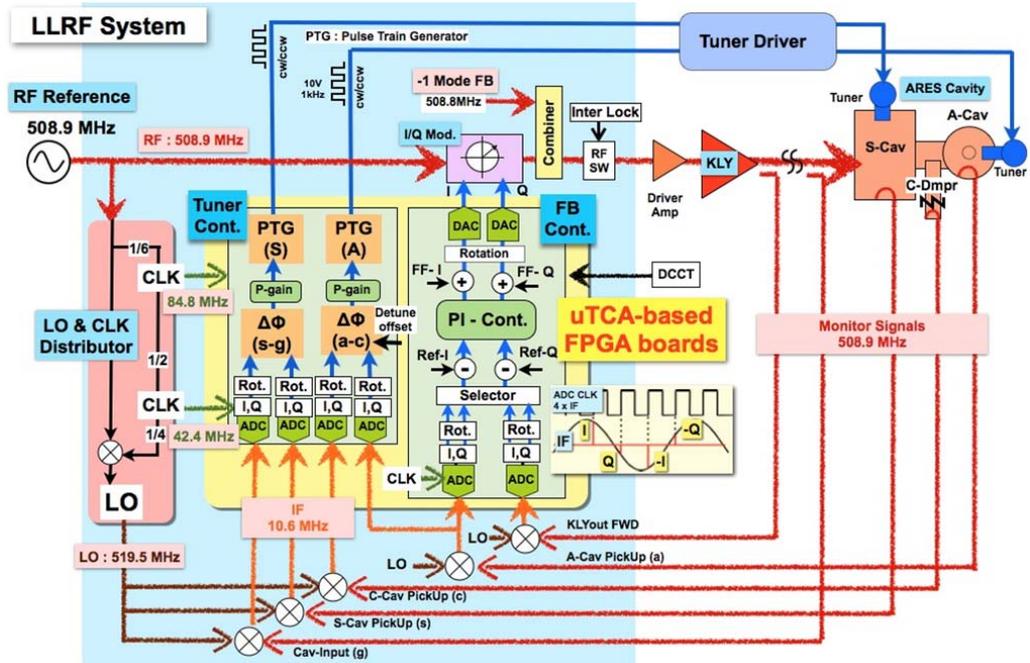


図 1: FB 制御とチューナー制御のブロック図。

示す。通常（真空、温度、安全系）の信号処理全般は PLC が担当する。PLC には、LLRF システムのシーケンス制御も含まれる。各 FPGA ボードと PLC には、EPICS が組み込まれ IOC として動作する。

2011 年は、LLRF システム試作機の評価結果を、報告した^[7]。同軸型模擬空洞を用いた評価で、デジタル FB 制御等 RF の基本的な性能に問題がないことを確認した。

本報告では、長期変動（温度変動）やチューナー制御の課題に対する検討と評価結果、および、実用運転に向けての改良の結果を述べる。

2. LLRF システム試作機の評価

2.1 長期変動（温度特性）

1 枚目の FPGA 制御ボードによる FB 制御で、十分な短期安定度を確認したが、加速器を長期間安定運転するためには、温度特性が非常に重要である。SuperKEKB の LLRF システムでは、目標安定度を、振幅変動で $\pm 0.3\%$ 以下、位相変動で ± 0.3 度としている。約 $\pm 2^\circ\text{C}$ で空調されている場所に LLRF システムを設置するため、許容される温度係数は、振幅で $0.1\%/^\circ\text{C}$ 、位相で 0.1 度 $^\circ\text{C}$ となる。LLRF システム試作機の温度係数を測定した結果、振幅で 0.6% 、位相で 0.25 度 $^\circ\text{C}$ であった。このままでは要求

を満足できない。温度係数の主たる要因は BPF

(Band Pass Filter) 単体であるが、この BPF は LO 信号の生成や RF モニター信号取り込みのフィルタとして欠かす事が出来ない部品である。

温度係数を改善するために、1 枚目の制御ボードに取り込んでいるレファレンス信号入力を使った補償方式を適用した。空洞ピックアップ信号を想定する RF モニター信号と、レファレンス信号は、それぞれが同じ構成のダウンコンバート回路を経由、それぞれ IF 信号として、1 枚目の制御ボードの別チャンネル(ch4 と ch1)に入力される。FB 制御値に対して、FPGA 内で、レファレンス信号の変化分を補償する処理を行う（図 2 を参照）。これによって、BPF の温度係数を、相殺させる事を意図している。

レファレンス信号入力を使った補償方式の評価を行った。図 2 に、測定系統図を示す。FB 制御中の出力信号は、Agilent E5061B を、ベクトル電圧計として使って、モニターした。図 3 に、測定結果を示

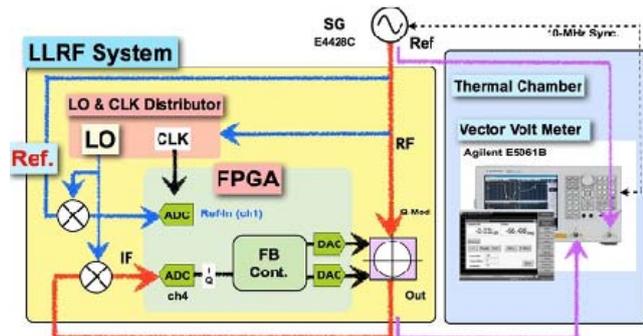
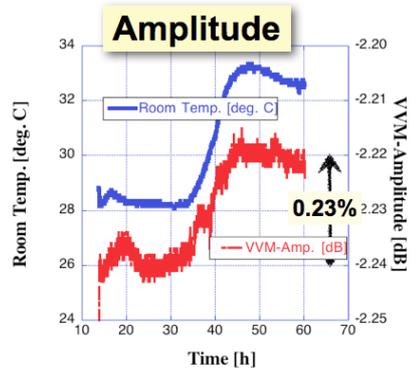
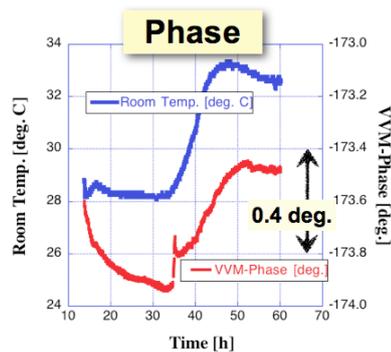


図 2： LLRF システム温度特性の測定系統図

す。LLRF システムを空調無しで 2 日間連続運転し、ベクトル電圧計による測定値（振幅と位相）と室温をプロットしている。レファレンス信号を使った補償により、LLRF システムの温度係数は、図 3 (a) から振幅で $0.05\%/^\circ\text{C}$ 、図 3 (b) から位相で 0.07 度 $^\circ\text{C}$ となり、要求を満足する事が出来た



(a) 振幅



(b) 位相

図 3： リファレンス補償適用（2 日間）時の LLRF システム温度特性測定結果。

2.2 チューナー制御

KEKB 独自の ARES 空洞は、貯蔵空洞 (S-cav)、結合空洞と加速空洞 (A-cav) の 3 つの空洞で構成される。貯蔵空洞と加速空洞のそれぞれにチューナーがあり、同時にチューニング維持することが必要である。このため、空洞入力信号と空洞ピックアップ信号を FPGA ボード内で位相差（チューニング位相）を求め、位相差に応じたパルス信号を出力する回路を、2 系統用意した。出力パルス信号で、チューナー制御（チューナードライバ経由、パルスモータ駆動）を行う。加えて、超伝導空洞には必須となる piezo-tuner 制御の回路も 1 系統備えている。SuperKEKB と cERL の超伝導空洞のチューナー制御にも対応している。

実際の ARES 空洞を使って、LLRF システムによる FB 制御と自動チューナー制御の動作評価を行った。LLRF とドライバアンプをつなげて、アンプ出力（100W）を、ARES 空洞に入力した（図 1 参照）。ただし、クライストロンはバイパスされ

ている)。図 4 に、24 時間運転した時の、ARES 空洞の貯蔵空洞 (S-cav) と加速空洞 (A-cav) の両方のチューナー位置と、それぞれの空洞のチューニング位相を示す。図 4 では、それぞれのチューナーが作動し位置が少し変化して (貯蔵空洞のチューナー位置変化は、位相、約 15 度分に相当)、それぞれの空洞のチューニング状態を安定的に保持していることが示されている。

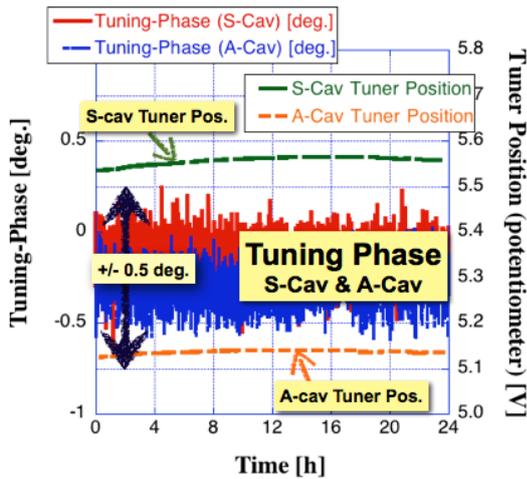


図 4： ARES 空洞に 100W 入力でドライブ、FB 制御と自動チューナーで、1 日間連続動の結果。

2.3 ARES 空洞 FB 制御

LLRF システムと ARES 空洞を組合せ、FB 制御を行い、FB ループ外にモニタ (検波器、位相検出器等) を置いて安定度確認を行った。

FB ループの遅延量は、uTCA の制御ボード部のレイテンシ $0.7[\mu s]$ と、ドライブ系 $0.5[\mu s]$ 、ピックアップ系 $0.5[\mu s]$ の合計で、 $1.7[\mu s]$ と見積もられる。それから、ARES 空洞 ($Q_L=30000$)、チューニング時のボード線図は、図 5 のようになる。なお、図 5、図 6 の P 利得値は、入力値であり、実際は $1/8$ である事に注意。(P=80 は、実際は 10)

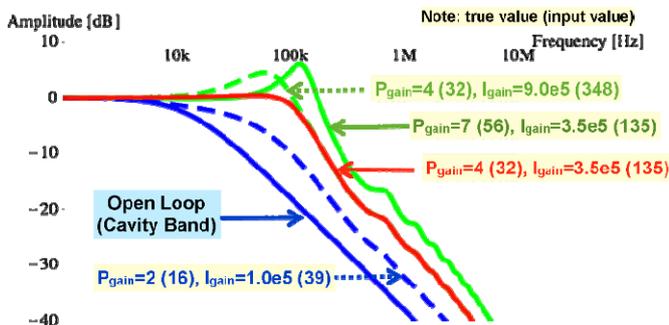
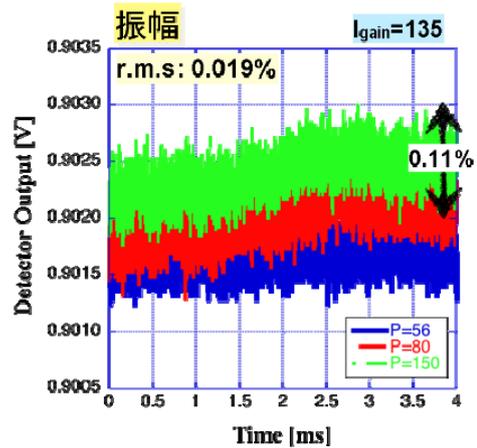


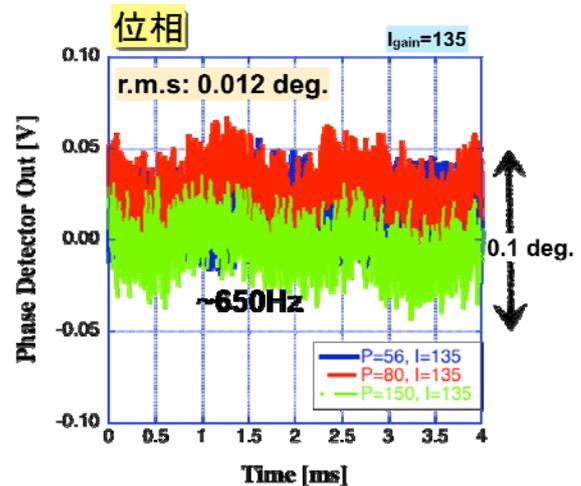
図 5： ARES 空洞を用いた FB 制御系のボード線図

実際の ARES 空洞に 100W 程度ドライブさせて (図 1 参照) A-cav ピックアップ信号を分岐し、検波器で振幅の安定度測定した結果を、図 6(a) に示す。安定動作しており、振幅変動は 0.019% rms 程度であった。A-cav ピックアップ信号を分岐したも

のと、レファレンス信号を分岐したものから、位相検出器を使って位相測定した結果、位相変動は 0.012 度 rms 程度であった。しかし、時間スケールを長くして観測すると、位相に揺らぎがみられ、その周波数は約 650Hz であった (図 6(b))。あまり問題にはならないレベルであるが、この振動は旧 LLRF システムでも観測されていることから、電源等を含めた外部環境に原因があると想定され、配電系を含む全体システムでの調査を検討している。



(a) 振幅 (ループ外の検波器)



(b) 位相 (ループ外の位相検出器)

図 6： FB 制御時の安定度

3. LLRF システムの量産に向けた改良

3.1 LLRF の構成再編

試作 LLRF では、uTCA 規格の FPGA 制御ボードの有用性を確認できた。量産 LLRF では、さらに FPGA 制御ボードを増やし、多くの信号を取り込む。それに合わせて、LLRF のユニット (RF 検波とアーク光検出) を見直した。FB の温度特性を改善させるため BPF 単体の温度特性の改善を図る。K EKB の LLRF は、ステーションによって、空洞

間の真空ゲートバルブ制御機器の有無や、真空機器監視制御配線等が異なっている。LLRF システム量産に向けて、どのステーションでも共通の LLRF システム（標準化）と、そのために、真空統括制御システムとして、真空関連（真空ゲートバルブ制御等）機器と配線の整理統合を図った。

図 7 に、標準化された LLRF システム（左側 3 ラック）と、真空統括制御システム（右 1 ラック）を示す。EPICS OPI には、CSS-BOY を採用し、操作画面の作りやすさ、使いやすさが、大いに改善された。



図 7：改良した LLRF システム（左 3 ラック）と真空統括制御システム（右 1 ラック）

3.2 FPGA 制御ボード改良と増強

従来の FPGA 制御ボードで用いていた小型の同軸コネクタは、固定が出来ず構造的に弱かったため、小型同軸の集合コネクタ（nicomatic 社製：高周波用、ロック可能）に変更した（図 8（上））。CPU のモニター端子（mini-USB）も前面パネルに用意した。



図 8：改良した FPGA 制御ボード（上）と、実装した LLRF システム（下）

クロック分配 IC をより低ジッターの物に変えるなど、親基板・子基板の全てに改良を施した。増強としては、8ch 14bit ADC 入力子基板を新しく用意し、多チャンネル入力可能とした。内蔵 CPU に EPICS IOC 組込みの他、大容量 DRAM を利用したダブルリングメモリ等、多彩なデータ処理とモニター機能の特徴は、そのまま引き継いでいる。

改良した LLRF システムでは、改良と増強された FPGA 制御ボードを 5 枚実装する（図 8）。表 1 に、5 枚の FPGA 制御ボードの構成と機能を示す。FB 制御、チューナー制御、インターロック制御の 3 枚の機能は試作機と同じ。検波信号モニター、アーク光センサー信号モニターの 2 枚が加わった。FPGA 制御ボードは、表 2 の子基板（3 階用の子基板と 2 階用の子基板）とデジタル親基板（1 種類）の 3 枚の基板の組合せで構成されている。子基板の組合せと、FPGA のロジックをカスタマイズする事で、多くの用途に対応が可能となっている。

表 1：改良 LLRF システムの FPGA 制御ボード一覧

| | 子基板構成 | FPGA 制御ボードの機能 |
|---|---------|----------------|
| 1 | AD1+DA1 | デジタル FB 制御 |
| 2 | AD1+DA1 | チューナー制御 |
| 3 | AD1+DIO | インターロック制御 |
| 4 | AD3+DIO | RF 検波信号モニター |
| 5 | AD3+DIO | アーク光センサー信号モニター |

表 2：FPGA 制御ボード用の子基板一覧

| 呼び | 配置 | 子基板の特徴 |
|-----|-----|-------------------------|
| AD1 | 3 階 | 4ch, 高精度 ADC (16bit) 入力 |
| AD2 | 3 階 | 2ch, 高速 ADC (14bit) 入力 |
| AD3 | 3 階 | 8ch, ADC (14bit) 入力 |
| DA1 | 2 階 | 4ch, 高速 DAC (16bit) 出力 |
| DIO | 2 階 | デジタル入出力 |

3.3 真空統括制御

建屋内全ての加速空洞ステーションの真空関連機器と配線の整理統合を図り、真空統括制御システム（図 7 右側のラック 1 本）を作った。真空ゲートバルブの監視制御等を PLC が行う。PLC 用 Linux 搭載の CPU（Yokogawa 製：F3RP61）で、EPICS IOC を動作させる。

4. まとめ

SuperKEKB 加速器用に、新しい LLRF システムの開発を行っている。その試作機で、RF 制御に関する性能評価を行った。温度特性はそのままでは要求を満足できなかったが、レファレンス信号を使っ

た補償により、LLRF システムの温度係数は、振幅 0.05%/°C、位相 0.07 度/°Cで、要求を満足する事が出来た。現状施設の空調環境で、新しい LLRF システムを使用可能である。実際の ARES 空洞を使って、LLRF システムによる 100W レベルでの評価試験にて、FB 制御と自動チューナー制御が問題なく動作することを確認した。FB 制御の安定度も十分（振幅 0.012% rms、位相 0.019 度 rms）であった。

量産に向けた LLRF 改良として、FPGA 制御ボード改良と増強を行い、さらに、ステーション毎の差異を真空統括制御システムとして分離、LLRF システムの標準化を図った。改良システムは、現在、量産前の検証を行っている。

参考文献

- [1] K. Akai, et al., " RF System for SuperKEKB", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2010)
- [2] M. Ryoshi, et al., "LLRF Board in Micro-TCA Platform", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (2010)
- [3] S. Michizono, et al., " Tuner control for cERL cavities by digital feedback system", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2012)
- [4] T. Miura, et al., " DIGITAL FEEDBACK SYSTEM USING μ TCA FOR DRFS", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2011)
- [5] M. Omet, et al., "Development and Application of a Frequency Scan-based and a Beam-based Calibration Method for the LLRF Systems at KEK STF", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2012)
- [6] H. Ishii, et al., "DEVELOPMENT OF A BEAM POSITION DETECTOR FOR AN ORBIT FEEDBACK SYSTEM IN SuperKEKB", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2011)
- [7] T. Kobayashi, et al., "Prototype Performance of Digital LLRF Control System for SuperKEKB", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2011)