

SuperKEKB 用 LLRF 制御システムの開発 DEVELOPMENT OF LLRF SYSTEM FOR SUPERKEKB

中西 功太^{*A)}、赤井 和憲^{A)}、海老原 清一^{A)}、小田切 淳一^{A)}、可部 農志^{A)}、小林 鉄也^{A)}、西脇 みちる^{A)}
出口 久城^{B)}、西尾 淳一^{B)}、林 和孝^{B)}、春松 和孝^{B)}、水野 隼一^{B)}、漁師 雅次^{B)}

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

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

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

Abstract

The digital LLRF system for SuperKEKB is being developed. The high power test which used the same cavity and klystron as actual operation was carried out. It was confirmed that the LLRF system fulfilled the specification. In order to perform maintenance easily, some improvement of the system was carried out. Eight sets of the LLRF systems for actual operation are being manufactured.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器は設計ルミノシティ $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を目指して現在アップグレード工事が進められている^[1]。このルミノシティは KEKB が記録した最大ルミノシティ $2.1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ の約 40 倍にあたり、RF 制御においてもより高い安定性が要求されている^[2]。現在開発中のデジタル LLRF システムは安定度の目標仕様を位相 $\pm 0.1^\circ$ (peak-peak)、振幅 $\pm 0.1\%$ (peak-peak) としている。また、既存のアナログ LLRF システムとの混在して使用出来るように、互換性にも配慮した設計となっている。

開発中の LLRF システムは μ TCA 規格の Advanced Mezzanine Card (AMC) プラットフォーム上に実装された FPGA を用いて高速なデジタルフィードバック処理を行い、同時に FPGA 搭載 CPU の Linux 上で EPICS IOC を動作させることが出来るため、FPGA のパラメータを EPICS IOC を通じて書き換えることにより、運転状態を容易に変化させることが出来るようになっている。RF 立ち上げシーケンスなどの複雑な動作は、EPICS IOC を搭載した PLC を中心に各 AMC が連携してを実現する仕組みとなっている^[3]。AMC は RF フィードバック用、チューナ制御用、インターロック制御用、アーク検出用、RF レベル検出用の 5 枚を用いている。図 1 に RF フィードバックとチューナ制御のブロック図を示す。

昨年の報告で低電力における基本的な動作試験を実施し、仕様を満たすことを示した^[4]。本稿では、実際のビーム運転と同等の大電力試験を実施した結果を報告する。大電力試験を行った結果、追加した機能についても報告する。

SuperKEKB では、運転開始時に 30 台のクライストロンが利用され、そのうち 8 台はデジタル LLRF システムで運転が始まり、運転開始後もアナログ LLRF システムのデジタル LLRF システムへの置き換えを進めていく計画である。また、クライストロンの増設も計画されており、最終的には 36 台のクライストロンが稼動する予定である。実際の運用においては、多数のデジタ

ル LLRF を管理する仕組みが必要である。この対策として、故障などにより AMC を交換した際にソフトウェアのコンフィグレーションを行う方法を整備したり、現場作業を伴わず、ネットワーク経由で FPGA データを更新出来るように AMC の機能を強化したりした。

2. 大電力試験

2.1 安定性

半導体アンプを用いて 100W 程度の RF 電力を投入した試験では、開発中の LLRF システムによる制御で位相の安定性が 0.012° (rms)、振幅が 0.019% (rms) であり、peak-peak では 6 倍になるとしても十分に仕様を満足していることはすでに報告した通りである^[4]。

ビーム運転時と同様に、クライストロンにより空洞に RF 電力を投入する試験を実施した。その結果、図 2 に示すように、位相の安定性が 0.02° (rms)、振幅が 0.02% (rms) と十分に仕様を満足した。デジタル処理のレイテンシが約 $0.7 \mu\text{s}$ 、立体回路長とモニター同軸ケーブル長からくるループディレイが約 $1.2 \mu\text{s}$ 、空洞の時定数が約 $17 \mu\text{s}$ であることを考慮すれば、これらの観測時間 4ms は制御ループの安定性を見るのに十分な時間であることが分かる。温度変化に起因する長期的な位相と振幅の変動については温度安定性として別途考慮した。

2.2 クライストロン位相制御ループの導入

2.1 に述べたように、クライストロンを使用して大電力の RF による空洞励振試験を行った。クライストロンは大電力を消費する機器であるため、本機器を高効率で運転することは加速器全体の消費電力を抑える上で非常に重要である。KEKB では、クライストロン入力電力のモニター値をクライストロン電源の変調アノードコントローラに渡し、クライストロン電源の変調アノード電圧を調整することで広い出力レベルでクライストロンの高効率に運転できるようにしている。図 3 に示すように、クライストロンの入力と出力電力は、概ね線形であるが、位相は途中で大きく変化しており、アノードコントローラの動作により、クライストロンの出力位相が大きく変化することが分かる。図 3 の例では、RF

* kota.nakanishi@kek.jp

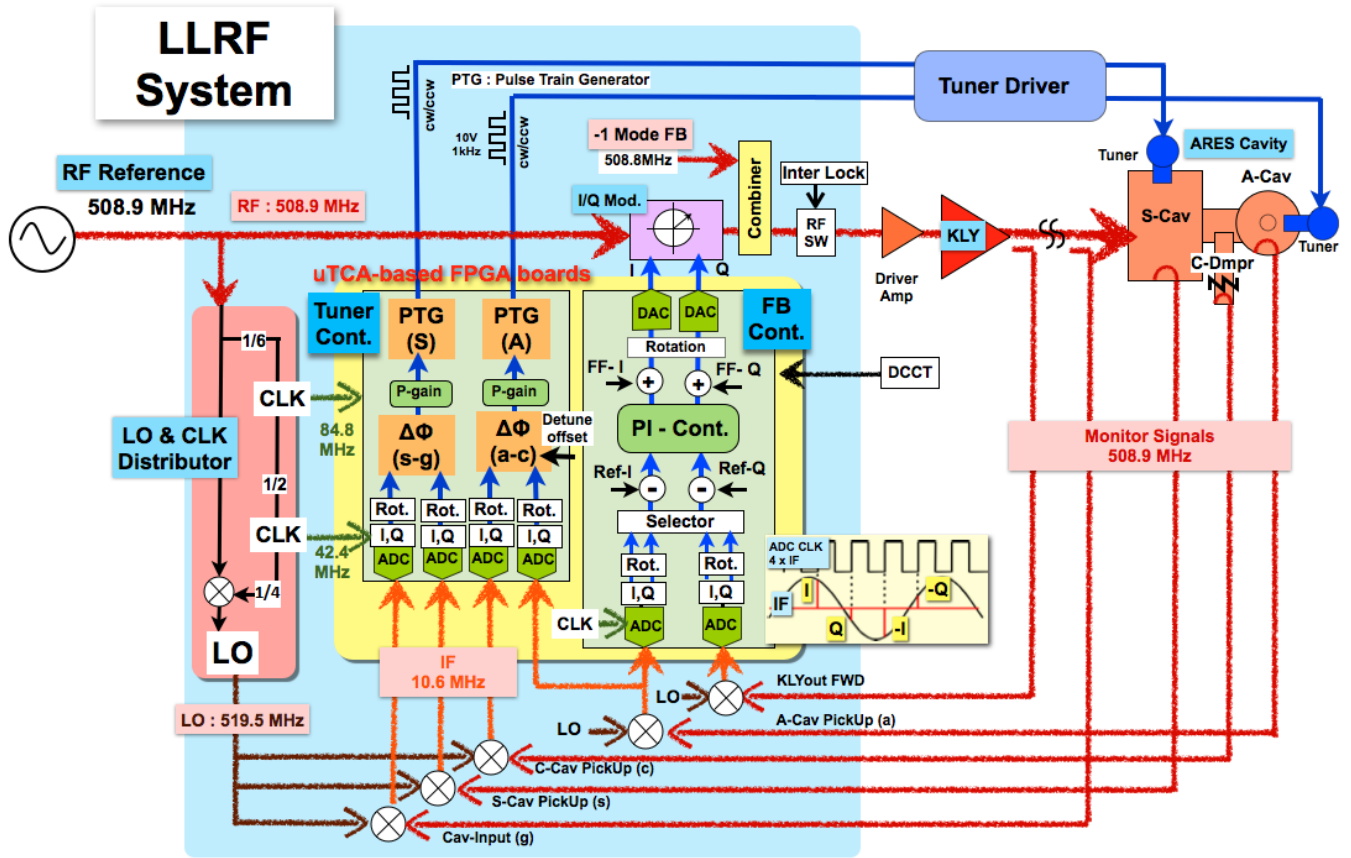


Figure 1: Block diagram of RF feedback and tuner control system.

出力が 0 から 40kW まで変化する間に約 80° の位相の変化が起こっている。アノードコントローラの制御速度は高速なものではなく、位相の変化には 1 秒程度かかっている。これは FPGA の制御周期やレイテンシと比べて十分に遅いものであると言える。

開発中の LLRF システムは IQ 変調方式を採用しているため、空洞入力の位相が校正値から大きくずれると原理的にフィードバック制御を行うことが出来ない。今回の試験においても 60° 以上位相がずれた条件においては正常にフィードバック制御を行うことが出来なかった。アノード電圧変化による位相変化量は、クライストロンによって大きく異なるため、特性をあらかじめ入力することは難しい。このためフィードバックにより、クライストロン位相の変化を補正する方法を採用した。クライストロン位相制御ループを FPGA に組み込み低電力での動作試験を行い、クライストロン部分の位相を 360° 以上変化させた場合にも問題なく空洞制御ができることを確認した。図 4 に示すように、クライストロン位相制御ループは空洞制御のコントローラが出力した IQ 信号を回転させる位相器に相当する演算を追加したもので、空洞制御フィードバックループの中に位置している。このため、不連続に回転角を変更すると空洞入力にも不連続な位相の RF が供給されるため、クライストロン位相の回転速度に制限を設け、空洞制御に影響を与えないように設計された。また、三角関数の演算誤差により回転行列のノルムが不連続に変化しないように三

角関数のテーブルを線形補間して使用するなどの配慮を行った。

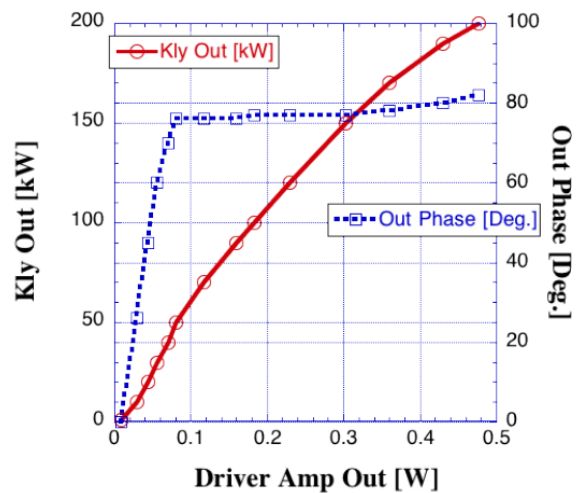


Figure 3: Output power dependency of klystron output phase.

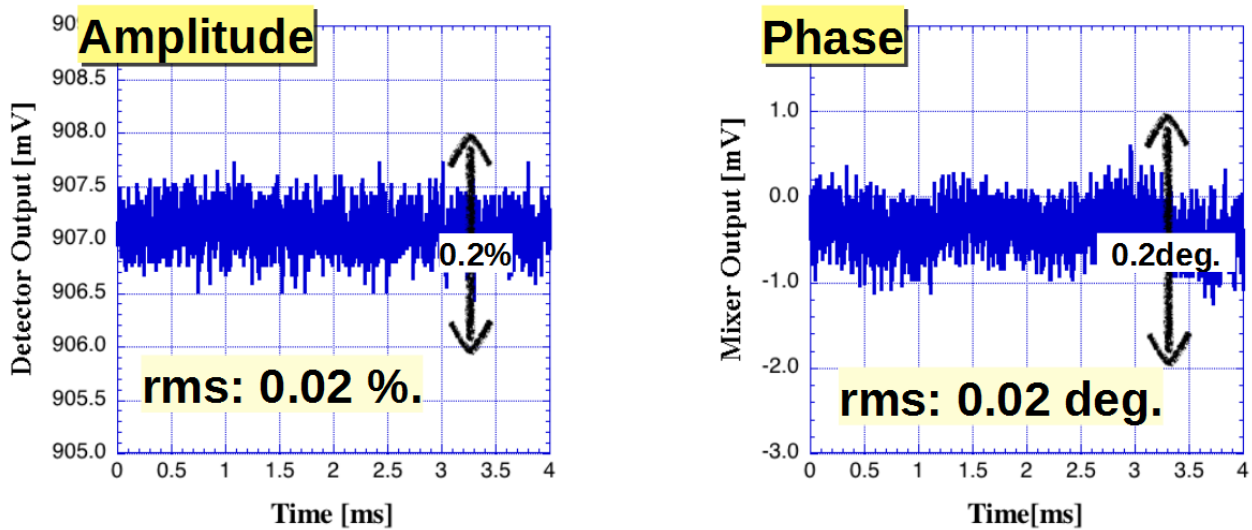


Figure 2: Cavity amplitude and phase stabilized by new LLRF system.

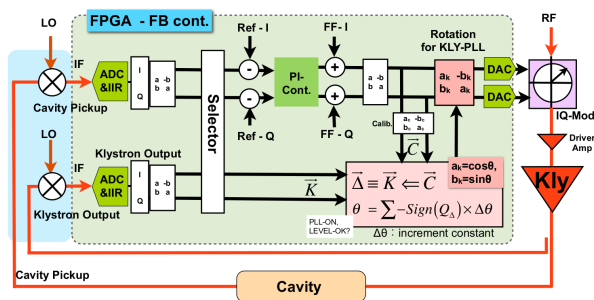


Figure 4: Block diagram of the klystron phase lock loop.

3. 量産に向けた改良

3.1 温度安定性

はじめに試作した LLRF システムの温度依存性は、位相が約 $-0.25^\circ/\text{C}$ 、振幅が約 $-0.52\%/^\circ\text{C}$ であったため、仕様である $\pm 0.1\%$ (peak-peak), 振幅 $\pm 0.1\%$ (peak-peak) を実現するためには LLRF システムの温度変動を 0.2°C 程度に抑える必要がある。現状では、LLRF システムの設置される制御室は一般的なエアコンで管理されており、 2°C 以上の変動があるため、ラックの温度制御が LLRF システムの温度依存性を改善する必要がある。LLRF システムの温度依存性は、バンドパスフィルターの影響が支配的であることが分かったため、利用する温度領域 (25°C 近傍) での温度係数が小さいフィルター素子を用いることで温度特性の向上させることを試みた [5]。フィルターの特性を見直した結果、図 5 に示すように温度安定性は位相が約 $-0.09^\circ/\text{C}$ 、振幅が約 $-0.06\%/^\circ\text{C}$ に向上した。位相については、基準信号をピックアップ信号と同等の回路で検出して、基準信号によるピックアップ信号の補正を行った結果、温度依存性は $-0.02^\circ/\text{C}$ に改善された。

3.2 保守性

開発中の LLRF システムでは、複数の AMC や PLC 間の通信や、LLRF システムと中央制御室との通信には EPICS の通信プロトコルである CA(Channel Access) を利用している。CA を使用することで、SuperKEKB 制御ネットワークに接続されたすべての機器とパラメータをやり取りすることが出来るが、複数の機器が同じレコードにパラメータを書き込むと正常な制御が行えなくなる問題がある。多数の同型の LLRF システムのソフトウェアを一元的に管理し、同時に各 LLRF システムがユニークなレコード名を使用できるようにするために、全ての LLRF システムにステーション名と呼ばれる名称を与え、ステーション名を含むようにレコード名を設定する必要がある。ソフトウェアの一元的な管理を実現するためには、LLRF システムが起動時にステーション名を知り、レコード名を展開する必要がある。この機能を実現するために、各 AMC と PLC が設定用のディップスイッチを持ち、ステーション番号を 2 進数で設定出来る設計となっている。LLRF 起動時にステーション番号から共有ファイルを検索してステーション名を得るソフトウェアを実装し、正常に動作することを確認した。この仕組みにより、AMC などを交換する際にディップスイッチの設定を修正して μTCA のシェルフに差し込むだけでソフトウェアの設定がすむことになり、保守作業の負荷を軽減することが出来る。また、専らステーションの内部での通信に使用されるレコードはステーションの外の機器から変更することが出来ない設定としている。このため、AMC 交換時には内部通信を許す IP アドレスリストの変更が必要となるが、同じ仕組を利用することで容易に管理することが出来る。

LLRF システムではトリガー信号の前後の RF の振る舞いについて記録を残す仕組みを用意しており、特にビームアポート発生時には全てのステーションのトリガーが働いたため、それぞれのステーションから 1GB を超えるデータが同時にサーバに書き込まれることになる。SuperKEKB 制御ネットワークでは CA をブロード

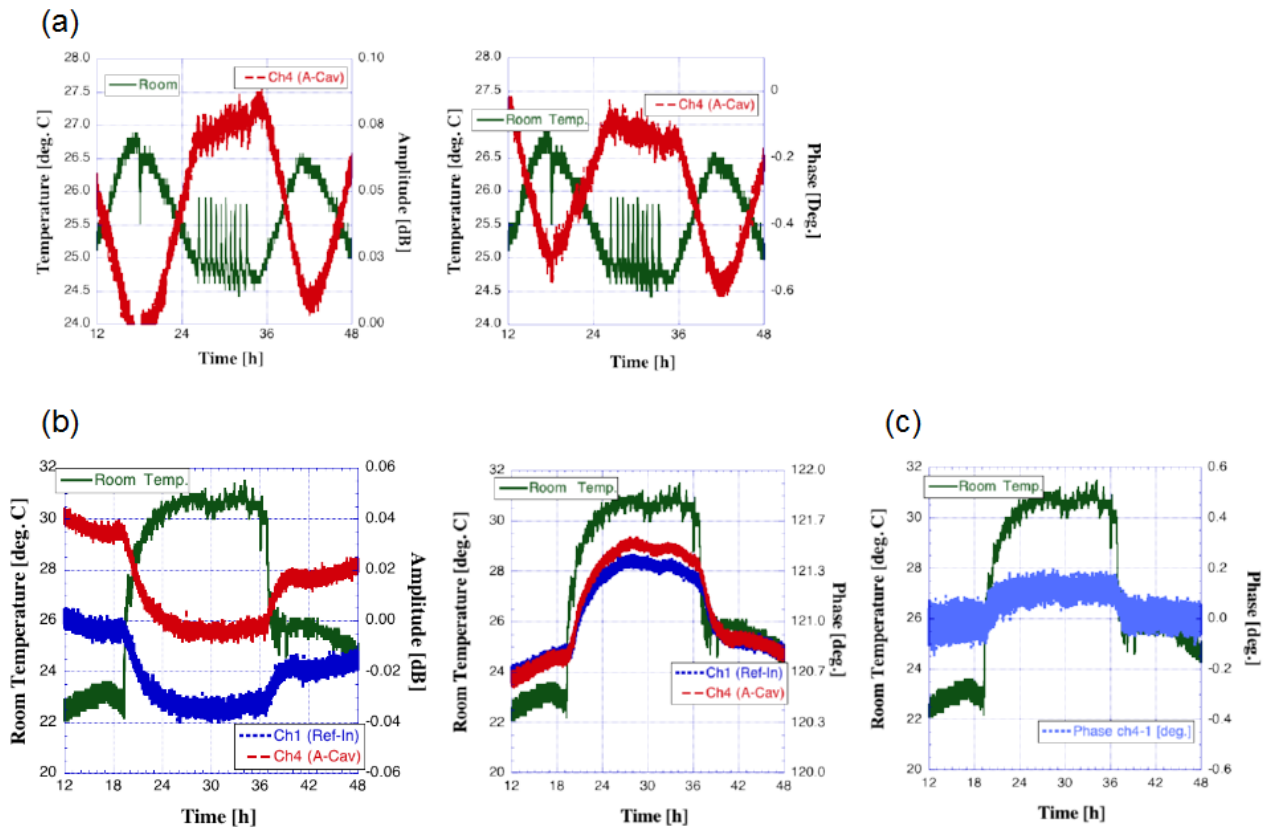


Figure 5: Thermal Stability of the System. The amplitude stability of 0.01db is equal to 0.115%. (a) The result of first prototype. (b) It was improved by using thermal stable band pass filter. (c) It was improved by using thermal stable band pass filter and compensation with reference signal.

キャストに流して通信を行うため、特にビームアポート発生時などに通信が集中し十分な通信速度が確保できなくなる可能性がある。この問題を解決するために、これらのデータはCAを使用せずにサーバに書き込むことにより、サーバは少なくとも8ステーションに1台は用意され、LLRFシステムが接続されたネットワークハブに直接接続される予定である。LLRFシステムが書き込むべきサーバもステーションによって異なるため、この設定もディップスイッチと関連付けることで解決できる見通しである。

FPGAデータ(MCSファイル)を書き換えることで容易にLLRFシステムの機能を変更できることは、本LLRFシステムの特徴であるが、多数のLLRFシステムが稼動している場合には、全てのLLRFシステムのFPGAのMCSファイルを同時に書き換える必要があり、そのバージョン管理は非常に重要である。現状ではAMCを取り外してFPGAデータを書き換える作業を必要としていたが、多数の信号線が接続されたAMCを取り外しと再組み立てするのは困難な上、接続ミスなどの可能性も高めることにもなる。また、多数のLLRFのAMCについて漏れなく作業を行う必要があり、作業の検証のためFPGAデータのバージョンが確認可能であることが望ましい。これらの問題を解決するために、ネットワーク上で各AMCのFPGAデータのバージョンが確認や更新が出来る仕組みを準備した。FPGAデータはAMC起動時にAMCに搭載されたフラッシュROMから読み込

まれる仕組みになっており、FPGA運転時にフラッシュROMのデータを書き換えてもAMCの運転に影響を与えない。FPGAに搭載されたCPU(PowerPC)上LinuxのプログラムからFPGAデータをフラッシュROMに書き込み、AMCを再起動することでFPGAデータの更新を行う。データの転送に失敗した場合に備えてフラッシュROMは複数のFPGAデータが保存できる容量を確保し、確実にFPGA起動することが出来るsafe dataを保持することで、FPGAが起動しない場合にもそこから起動出来る仕組みとなっている。

4. まとめ

SuperKEKB用に開発中のLLRFシステムの大電力試験を実施し、十分な性能を有することを確認した。大電力試験によりクライストロン位相制御ループの導入が必要なが分かったため、この機能を追加し問題なく動作することを確認した。

ビーム運転時の保守管理作業を軽減するため、各LLRFシステムが、それぞれのステーション名を自動的に認識し、共通の設定ファイルから起動する仕組みを用意した。この仕組みはAMCの交換作業時にも、予備の機材を容易にステーションに対応づれられるように考慮されている。

ネットワーク越しにFPGAデータのバージョンの確認と更新が出来る仕組みを用意した。

参考文献

- [1] K.Akai, et al., “DESIGN IMPROVEMENT AND CONSTRUCTION STATUS OF SUPERKEKB “ Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba (2011)
- [2] K. Akai, et al., “ RF System for SuperKEKB” Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, himeji (2010)
- [3] J.Odagiri, et al., “Application of Embedded EPICS to SuperKEKB Accelerator Control”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka (2012)
- [4] K.Hayashi, et al., “Refinement of the new LLRF Control System for SuperKEKB”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka (2012)
- [5] T.Kobayashi, et al., “PROGRESS IN DEVELOPMENT OF NEW LLRF CONTROL SYSTEM FOR SUPERKEKB”, Proceedings of the IPAC 2013, Shanghai, China (2013)