

SuperKEKB 用新 LLRF 制御システムの開発・製造状況

DEVELOPMENT AND PRODUCTION STATUS OF NEW LLRF CONTROL SYSTEM FOR SUPERKEKB

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 2015. A new LLRF control system, which is an FPGA-based digital RF feedback control system on the MicroTCA platform, has been developed to satisfy the requirement for high current beam operation of the SuperKEKB. The good performance of the prototype was demonstrated in the high power test with an ARES cavity. Then the mass production with several refinements was progressed as scheduled, and the installation was uneventfully completed. As a new function, klystron phase lock loop was additionally implemented within the cavity feedback control loop in the FPGA, and it was successfully worked.

RF reference distribution system was also newly installed for the SuperKEKB. It consists of star-topology multi optical transmissions with thermal drift compensation, and its good performance has been verified.

In this report, the latest design and new progress of the LLRF control system are summarized including the RF reference distribution system.

1. はじめに

いよいよ 2015 年に SuperKEKB のビームコミッショニングが始まる予定で、現在も運転に向けた開発・準備が進められている。本稿では、これに向け新たに開発された低電力高周波 (LLRF) 制御システムおよび RF 基準信号分配システムについて、最終的なデザインを総括し、現状を報告する。

SuperKEKB では KEKB の 40 倍のルミノシティを目指し、更なる大電流かつ低エミッタンスビームの蓄積が必要である^[1]。こういった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、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^[2]、既存 (KEKB 用) のアナログ LLRF システムを段階的に置き換えていく。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]、無事に最初の量産機 8 式の製造が完了した。

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 $\pm 2^\circ\text{C}$) を実現した^[2]。

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^[4]、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^{[5][6]}。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、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 空洞両者の並行したチューニング制御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、入射器ではダンプ (DR) が増設される^[7]。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^[8]。

2. SuperKEKB 新 LLRF 制御システム

2.1 システム構成

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。RF 制御系のブロック図を Figure 2 に示す。

Figure 1 にあ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もので MicroTCA 規格を採用した。その Advanced mezzanine card (AMC) として、次の 5 枚の FPGA ボードで構成されている^[9] - (1) デジタル FB 制御 (DFBCNT)、(2) チューナ制御 (TNRCNT)、(3) インターロック (I/L) 制御 (INTLCNT)、(4) RF 検波モニタ (RFDETMON)、

[#]tetsuya.kobayashi@kek.jp

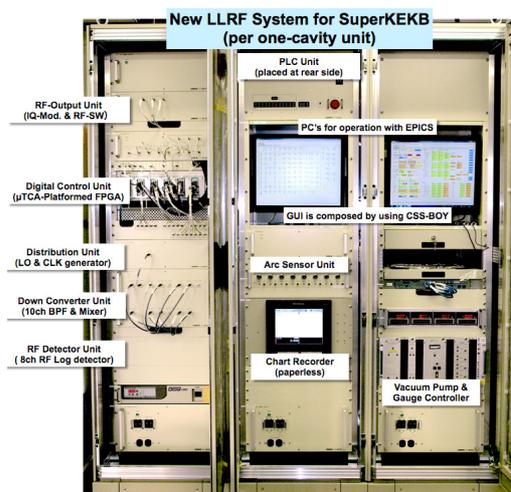


Figure 1: LLRF control system for SuperKEKB.

(5) アーク放電モニタ (ARCMON)。DFBCNT、TNRcnt 及び INTLCNT は 16bit の ADC と DAC をそれぞれ 4ch ずつ持っている。RFDETMON と ARCMON には 8ch の 14bit-ADC がある。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^[10]。

冷却水・真空度 I/L 等、特段の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。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^[11]。

2.2 RF 信号制御とインターロック処理

RF (振幅、位相) の制御について Figure 2 で簡単に説明する。本システムでは I/Q 成分の処理を行い I/Q 変調器を用いて制御する。空洞ピックアップなどのモニタ信号は 10.6MHz の中間周波数(IF)信号にダンウコバートされ、それを FPGA において 42.4MHz (IF の 4 倍のクロック) で AD サンプルすることで、I/Q 成分を得る。DFBCNT では得られた空洞の I/Q 成分それぞれに対して比例・積分 (PI) 制御を適用し、I/Q 変調器を FB 制御する。I/Q 成分でローレンション演算するため移相器はない。DFBCNT では、空洞もしくはクライストロン出力ど

ちらか一方の FB 制御を行う (セレクタで切り替える)。セレクタに連動してループフィルタ帯域等のパラメータも自動で切り替わる。その他、ビーム電流に応じたフィードフォワード (FF) 等も将来的に組み込み可能である。結合バンチビーム不安定性に対しては従来の KEKB 運転と同じ方式 ($\mu = -1$ モード信号の混合)^[6]を行う (Figure 2 参照)。

TNRcnt では空洞入力、S 空洞、C 空洞の、A 空洞の信号をモニタし、S 空洞と A 空洞のチューニング制御をそれぞれ同時に行う。位相差に応じて FPGA 自身でパルス列を出力し、チューナのパルスモータを動かす。加えて SC 空洞用にピエゾ制御の電圧を出力する。

INLCNT では空洞入力および反射信号をモニタし、反射レベルもしくは VSWR により空洞異常を検知で I/L をかける。他の AMC からの I/L 信号も集約し、高速に RF スイッチを切る。RF-I/L の応答時間は実測 $0.8\mu s$ である。RFDETMON では、RF 検波 (log 検波) の信号波形をモニタ (42.4MHz で AD サンプル) し I/L に利用する。単に閾値だけでなく波形からより高度な判定 (フィルタリング) が可能である。外部トリガにも対応できる。

ARCMON も同様にアークセンサーの光検出信号を取得する。アークセンサーユニット (Figure 1) には光電子増倍管光検出器 (浜松フォトニクス H10721) が 8ch あり、クライストロン窓、立体回路、空洞入力結合器などの放電光を検出する。放電光は大口径光ファイバ (コア径 $600\mu m$) でアークセンサーへ伝送される。この大口径光ファイバおよびアークセンサー等の特性を評価し、実用上十分な感度や応答性であることを確認した^[12]。

2.3 その他、改良点

文献[3]で報告されているように最初の試作機から多くの改良を行い、更に量産において細かな改善がいくつも加えられている。例えば FPGA ファームウェア (コンフィギュレーションデータ) をリモートで更新できるようにした。これにより、すべてのファームウェアを容易に一斉アップデートできる。

3. クライストロン PLL の導入

3.1 KLY-PLL の必要性

試作機の大電力試験において、クライストロン (KLY) の出力位相が約 80° 変化すること分かり、KLY 出力位相ロックループ (KLY-PLL) が必要になることを昨年報告した^[2]。この位相の変化は、効率化 (コレクタ損失最小化) のために入力レベルに応じてアノード電圧を制御している結果で、想定以上に大きい。本システムのように I/Q 成分でそれぞれ独立に FB 制御する場合、ループ内の大きな位相変化 (すなわち I-Q 結合が大きい場合) は、制御が不安定となる。大電力試験の結果、運転可能な位相変化は $\pm 50^\circ$ 程度であり、計算による解析とも一致する。この値は単に発振しない範囲であって、必要な信頼性/安定性にとっては十分なマージンがない ($\pm 40^\circ$ の変化でも許容できると言えない)。

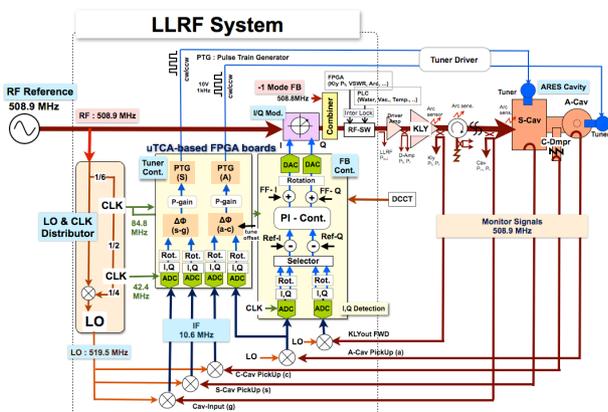


Figure 2: Block diagram for ARES cavity control.

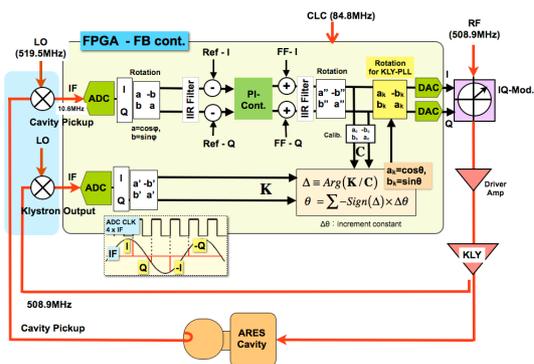


Figure 3: Block diagram of FB control and klystron phase lock loop in the DFBCNT.

3.2 制御方式

以上の理由から、Figure 3 に示すように空洞 FB ループに加え、KLY 位相 FB ループを構成する機能を FPGA (DFBCNT) に組み込んだ。I/Q 変調器への DAC 出力の手前にもう一つ位相ローテーション機能を挿入し、KLY 位相変化をキャンセルするように位相シフトさせる。その移相量 (図中の θ) は、制御出力 (KLY 入力) 位相に対して KLY 出力の位相変化を打ち消す方向へ (位相差の符号に応じて) 積算されていく。ローテーション係数である三角関数の値 ($\cos \theta$, $\sin \theta$) はテーブル参照と線形補完で求めている。アノード電圧制御の応答は 1Hz 程度なので、ループ帯域は 1kHz あれば十分である。

3.2 試験結果

Figure 4 に KLY-PLL の動作試験結果を示す。残念ながら現状ではクライストロンによる大電力試験を行うことができず、ドライバンプを用いた 100W 試験であるが、ビームラインの実機 ARES 空洞を用いた制御試験である。アンプ入力の位相を移相器 (電圧制御) で変化させた。Figure 4 の右側は横軸が時間で約 1.5 秒の位相をプロットしたものである。緑色が移送器 (ループ内) の位相変化に相当し、1Hz で 90° 変化させている。それに対し橙色が空洞位相である。この結果、KLY-PLL は期待通り機能し、正常に空洞位相が安定していることが確認できた。更に厳しい条件 (例えば 10Hz で 360° 以上変化) でもまったく問題ないことが確認されている。

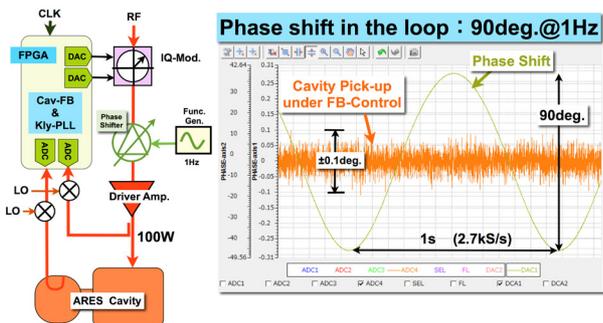


Figure 4: KLY-PLL test result with an ARES cavity by 100-W driving.

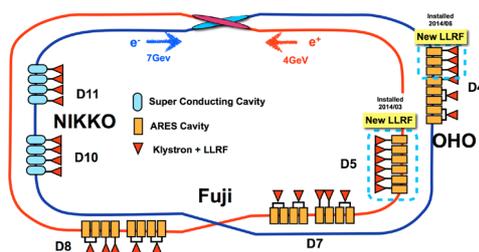


Figure 5: RF system layout for the SuperKEKB. Nine LLRF stations at the OHO section are replaced with the new ones.

4. 量産機の製造およびインストール

4.1 状況概要

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 5 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) に変更する。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、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。現在、新 LLRF 制御システム量産機 8 台が予定通り順調に完成し、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。残り 1 台も今年度中に製作する予定である。

4.2 量産中の問題

今回、量産中に分かった問題で、システム内に約 250Hz の周期的かつ定期的な位相変動 (約 $\pm 0.07^\circ$) が見つかった (Figure 6)。これはダウンコンバータ等の 509MHz バンドパスフィルタ (BPF: 帯域 20MHz) の振動が原因と分かった。量産機 8 式で 96 個あるうち 14 個の BPF に問題があり、機械的な共鳴特性 (まるで音叉のような反応) を有していたため、ファンの振動等に非常に敏感になり常に位相が揺らぐ結果となっていた。これに対し BPF メーカー側が (詳細は企業秘密で) 無償の修理に応じて解決された。前回報告した通り、BPF は温度ドリフトの最大の要因であったため温度係数が非常に小さい値 (振幅、位相それぞれ $0.005\text{dB}/^\circ\text{C}$ 以下、 0.1 度 $^\circ\text{C}$ 以下) になるよう特別に調整を行っている^[2]。

4.3 加速セクションの真空中制御

Figure 5 のように 1 つの加速セクションには最大 8 式の空洞が並ぶ。このセクション全体の真空 I/L 制御 (各空洞のゲートバルブ開閉等) をまとめて管理するシステムも別途新たに開発・製造された^[13]。D4, D5 セクションでは新 LLRF 量産機と併せて、この真空統括システムも設置が完了したところで、旧システムから移行する。真空統括システムは各 LLRF 制御システムとの複雑な連携処理が必要で、PLC がその制御を担っている。またセクション毎に空洞の数や配置が異なっても対応できるよう柔軟性/汎用性も持ち合わせている。

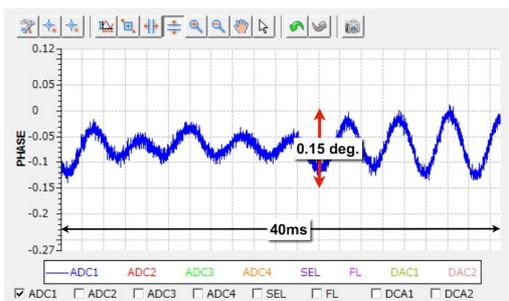


Figure 6: Phase oscillation of 250 Hz due to BPF mechanical (acoustic) resonance.

4.4 今後の予定等

ケーブル配線（同軸、計装等）等は、地上制御室からトンネル中継盤まではほぼ完了した。今後は、トンネル内の空洞接続、端末処理・測定試験等を行う。地上も端末処理や真空統括システムとの接続配線が残っている。また、アークセンサー用光ケーブルの敷設も今後の予定である。2015年度内には空洞のRFコンディショニングを行う予定で準備を進めている。

DR用LLRF制御システムについては来年度にインストールする予定である。DRでは、FPGAボードも含め基本的にMRと同じハードウェア機器を用いるが、配線やソフトウェアなど空洞3台の制御に対応しなければならない。FPGA内の機能を変更し、空洞3台のベクターサムでFB制御を行う。

5. 高周波基準信号分配システム

5.1 全体構成

KEKB運転では同軸ケーブルで伝送していたRF基準信号の分配を、SuperKEKBでは新たに光伝送システム構築する。昨年の学会で、そのデザインと安定化制御（温度ドリフト補償）の評価について詳細を報告した^[14]。現在、実機システムのインストール（光ケーブルの敷設および光送受信・安定化制御システムの製作・設置）が完了している。前述の第4節で触れたLLRF量産機の納品試験においても本システムによる基準信号を用いて動作確認を行った。

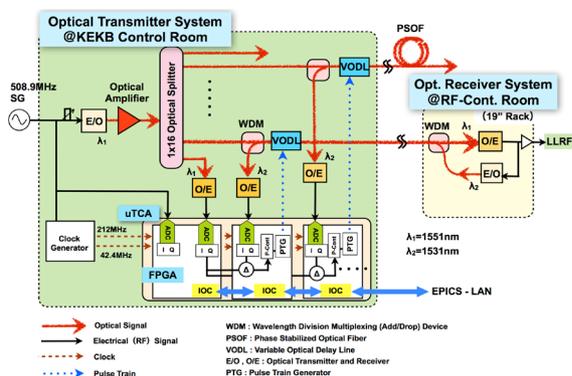


Figure 7: Functional block diagram of the reference distribution system with thermal drift compensation.

中央制御室（CCR）から各加速セクションRF制御室6ヶ所、衝突点（IP）Belle-II検出器（筑波実験棟）およびDR制御室の計8ヶ所へスター配線で伝送される。光ケーブルは位相安定化光ケーブル（温度係数が1ppm以下）を採用し、加速器トンネルに敷設した。ただし最も長い筑波実験棟へのルートについては途中D4制御室で中継点を設けている。放射線の影響が心配される箇所には局所的に防護（鉛シールド巻付）を施した。またケーブルルートの一部では50mほど屋外を通るため、そこには冷却水（チラー）配管と保温パイプによる恒温化対策を講じた。ただしチラーはまだ準備されていない。

5.2 光送受信と温度ドリフト補償制御

以上のように、ある程度パッシブに温度の影響を抑えた上で（それだけでは不十分なので）、温度ドリフト補償制御（伝送遅延FB制御）を行う。Figure 7に安定化制御システム（光送受信）のブロック図を示す。RF基準信号（509MHz）は直接変調で光信号に変換され増幅、分岐・伝送される。分岐直後の各チャンネルに挿入された可変光遅延ライン（VODL）を制御することで、それぞれの位相変化を補償する。往復信号は多重波長（WDM）方式で同一ファイバ内を伝送される。VODLは機械式（反射型）を採用しパルスモータで動かす。8チャンネルの位相測定およびVODL（パルスモータ）制御は、LLRF制御システム同様、MicroTCA規格のFPGAボード（EPICS-IOC組込AMC）が担う。これは空洞チューナ制御に似ている。ただし位相測定はRF直接サンプリング（アンダーサンプリング）方式である。このためダンコンバータを必要としないので多チャンネル系でも構成をシンプルにできる。ただしクロックジッターの影響が大きい平均化が必要である（温度ドリフト補償なので遅くて良い）。各伝送先それぞれ1枚のAMCが対応し、AMC8枚の構成になる。本システムにより $\pm 0.1^\circ$ （ $\pm 0.55\text{ps}$ ）の位相安定性（pk-pk）が得られる^[14]。E/O、O/Eは温度補償型かつ低ジッターで^[15]、J-PARCリニアックにおいて高い実績があるものを採用した。

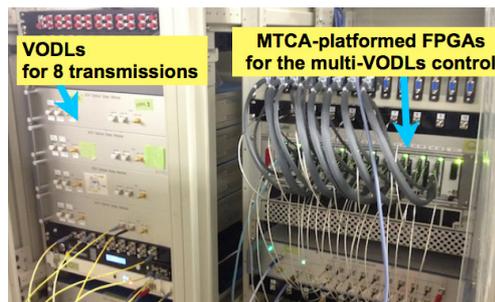


Figure 8: Picture of the multiple VODL control system installed at the CCR for the stabilization of the RF reference distribution.

Figure 8に示す通り、実機光伝送システムがCCRに設置され、正常な動作が確認できた。ラック左側は光アンプ、E/O、O/E、VODL（8チャンネル分）等で、ラック右側はそれらを制御するMicroTCAデ

デジタルユニットとクロック分配器である。これらの装置（ラック）は空調ブースの中に置かれ $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内に恒温化されている。

5.3 光ケーブル位相変動評価

今回敷設された光ケーブルルート（VODL 制御なし）の位相変動を測定した。Figure 9 にその結果（8日間のレコード）を示す。これは、本システムにより CCR から分配され戻って来た往復信号（509MHz）の位相（Figure 7 の FPGA による測定）で、最も距離の長い筑波実験棟へのルート（往復で 3km 以上）についてプロットしたものである。赤（左縦軸）が往復の位相で青（右縦軸）が外気温、緑が中継点（D4 制御室）の室温を示す。ドリフト補償制御はせずに（トンネル空調も停止中、前述の屋外ルートも配管前で）純粋に光伝送経路による変動である。ルートのほとんどはトンネル内に敷設しているが、昼夜の温度差が大きい時期（2014 年 5 月初旬）で、外気温との相関ははっきり見える。ただし、中継点の空調温度も大きく影響していることが分かる（@ 96h 辺り）。これは中継端末のスプライスボックス等が普通の（位相安定化でない）光ファイバであるためと考えられる（パッチ配線のみで E/O、O/E はない）。これは各光受信ラックも同様であるが、この光ファイバの変動は安定化制御により抑えられるので問題ない。上記（@96h）の影響を除くと、約 20°C の気温変化に対し往復の位相変化は約 0.7° 、すなわち約 $4\text{ps}/3\text{km}/20^\circ\text{C}$ （ 0.04ppm 相当）で、光伝送経路としては非常に安定と言える。年間通して夏冬の差が更に大きいとしても VODL の可変範囲 330ps は十分である。実際に VODL 制御を行い、正常に安定化されることが確認できた。これは CCR（戻り信号）における位相測定（被制御量）なので当然ではあるが、VODL 制御の結果、離れた伝送先が安定化されることは文献[14]で確認できている。

6. まとめ

2015 年に運転開始予定の SuperKEKB では、近年のデジタル技術（FPGA 等）を用いて新しい LLRF 制御システムが開発された。約 30 ある RF ステーションのうち、ビームコミッションニングでは 9 式を新システムで開始する。現在、予定通り 8 式の量産機が製造され無事に据付が完了した。今後、各種ケーブル配線、システム調整等を行い、空洞コンディショニングの準備を進める。

前回報告している通り、クライストロンの位相変化が予想以上に大きく空洞 FB 制御が不安定になる可能性があるため新たに KLY-PLL 機能を FPGA に組み込んだ。実機 ARES 空洞を用いた 100W 試験で期待通り KLY-PLL が動作し、大きな位相変化に対し正常に FB 制御が維持されることを確認した。

RF 基準信号分配システムも新たに更新され CCR からスター配線で 8 箇所へ光伝送する。光ケーブル敷設、光送受信システムの設置が完了し、正常な動作を確認した。本システムでは FPGA で 8 チャンネルの VODL 制御（温度リフト補償）を行い、 \pm

0.1° （ $\pm 0.55\text{ps}$ ）の位相安定性を実現する。

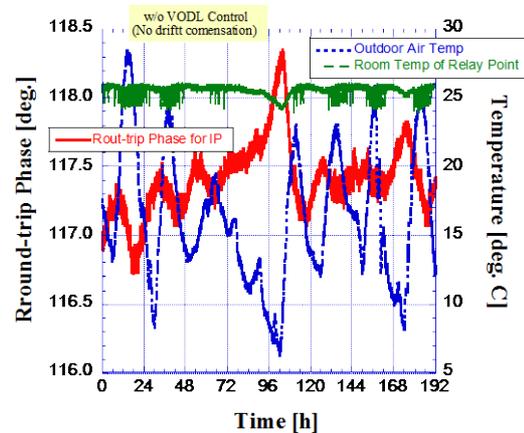


Figure 9: 8-days record of round-trip phase to Tsukuba-Lab. without thermal drift compensation, and ambient temperatures are plotted.

参考文献

- [1] K. Akai et al., "Progress in Super B-Factories", Proc. of IPAC13, pp. 1096-1100 (2013)
- [2] K. Nakanishi, et al., "Development of LLRF system for SuperKEKB", Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, SUP093 (2013)
- [3] T. Hayashi, et al., "Refinements of the new LLRF Control System for SuperKEKB", Proc. of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, WEPS125 (2012)
- [4] T. Kageyama et al., "The ARES cavity for KEKB", Proc. of APAC98, pp. 773-775 (1998).
- [5] K. Akai, et al., "RF System for SuperKEKB", Proc. of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2010)
- [6] K. Akai et al., "RF systems for the KEK B-Facility", Nucl. Instrum. Meth. A 499 (2003) 45–65.
- [7] M. Kikuchi et al., "Design of Positron Damping Ring for Super-KEKB", Proc. of IPAC10, pp. 1641-1643 (2010)
- [8] 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, SAP057 (2013)
- [9] M. Ryoshi et al., "LLRF Board in Micro-TCA Platform", Proc. of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 668 (2010)
- [10] J. Odagiri et al., "Fully Embedded EPICS-Based Control of Low Level RF System for SuperKEKB", Proc. of IPAC10, p. 2686 (2010)
- [11] J. Odagiri et al., "EPICS on F3RP61 for SuperKEKB Accelerator Control", to be presented in this Annual Meeting, SAP100, (2014)
- [12] K. Nakanishi, et al., "Evaluation of the optical fiber for arc sensor for the RF system in SuperKEKB", to be presented in this Annual Meeting, SAP108, (2014)
- [13] M. Nishiwaki, et al., "Integrated Vacuum Control System for SuperKEKB Accelerating Cavities", to be presented in this Annual Meeting, SUP104, (2014)
- [14] T. Kobayashi, et al., "RF Reference Distribution System for SuperKEKB", Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, SUP094 (2013)
- [15] T. Kobayashi, et al., "RF Reference Distribution System for J-PARC linac", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 585 (2008) 12–19