

## Digital Low Level RF Control System at STF Phase-1 in KEK

Toshihiro Matsumoto<sup>1,A)</sup>, Yoshihito Okada<sup>B)</sup>, Hiroaki Katagiri<sup>A)</sup>, Takako Miura<sup>A)</sup>, Shinichiro Michizono<sup>A)</sup>,  
Yoshiharu Yano<sup>A)</sup> and Shigeki Fukuda<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>B)</sup> NEC Network and Sensor Systems, Ltd.

1-10 Nisshin-cho, Fuchu-shi, Tokyo, 183-0036

### Abstract

At the Superconducting rf Test Facility (STF) in KEK, four superconducting cavities are operated with one klystron (STF Phase-1). In STF Phase-1, digital low-level rf (LLRF) control system is operated and the stabilities of the rf field under vector-sum feed-back control is examined. The stabilities of 0.007 % (rms) in amplitude and 0.018deg. (rms) in phase at flat top are obtained with addition of suitable feed-forward and satisfied the requirements of the International Linear Collider (ILC). Various studies (IF-mixture, direct sampling and circulator elimination) concerning LLRF also have been conducted and results of these studies are summarized.

## STF Phase-1におけるデジタル低電力高周波制御系

### 1. はじめに

KEKのSuperconducting rf Test Facility (STF) では、International Linear Collider (ILC) に向けて超伝導空洞を用いた線形加速器の開発・試験が行われている。STFでは、2008年秋から年末にかけて、4台の超伝導空洞を持つライオモジュールへRF電力の供給を行った(STF Phase-1)[1]。このSTF Phase-1において、導波管型移相器や導波管型可変ハイブリッドの開発[2]、4台の空洞への異なる2つの立体回路系での電力供給[3]や移相器と反射器を用いた超伝導空洞の外部Q値調整実験[4]を行った。

ILCでは、空洞内加速電場の安定度として、約1msのパルス平坦部において振幅0.07%、位相0.24度が要求されている[5]。この要求を満たすため、低電力系でフィードバック (FB) やフィードフォワード (FF) を用いた制御によって高周波源の運転をする必要があり、このためデジタル信号処理を利用する低電力高周波制御系の開発を進めてきた[6]。このSTF Phase-1において、高周波系の運転を4台の空洞をベクターサムによる制御で行った。その際、各空洞の $8/9\pi$ や $7/9\pi$ モードによる発振が、ベクターサム制御において振幅・位相不安定性として現れることが分かった[7]。その他にもSTF Phase-1において、デジタルLLRF制御系に関するスタディを行った。今回は、これまでの試験結果のうち、ベクターサムを用いた空洞電場の安定性の他、IF-mixture法の実証、ダイレクトサンプリングによる空洞信号測定、サーキュレーター撤去による振幅・位相安定性への影響について報告する。

### 2. デジタルLLRF制御システム

STFのLLRF系は、J-PARCリニアックと同様にcPCI筐体を採用し、FPGAを使ったデジタルFBシステムにより構成されている(図1)。FPGA ボードには10台の16ビットADCと2台の14ビットDACを持ち、このFPGAボードは市販のDSPボード (Barcelona、Spectrum Inc.) のドーターカードとして動作する。FPGAボードはFB、FF部を担当し、DSPボードがFPGAボード-CPUボード間のデータ転送を受け持つ。DACからのI/Q信号により変調をかけたRF信号でクライストロンをドライブする。4空洞からのRF信号は、ミキサで中間周波数へ周波数変換後にADCでサンプリングされ、FPGA内でI/Q成分の計算、ベクターサム制御が行われる。

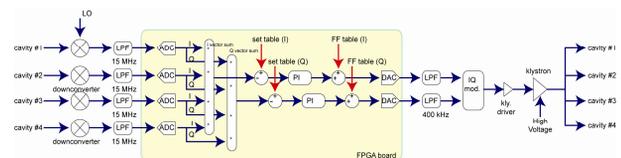


図 1:4 空洞のベクターサム FB 制御の模式図

### 3. STF Phase-1における試験結果

#### 3.1 4空洞のベクターサム制御[8]

4空洞のベクターサム制御での空洞電場の振幅・位相波形を図2に示す。このときFBは比例制御のみ、空洞のQ値に対応する時定数で電場を立ち上げ、一

<sup>1</sup> E-mail: toshihiro.matsumoto@kek.jp

定時間後に設定値になると設定である。またFFも同時に使用している。

このときの空洞電場の安定度は、約1msのパルス内で振幅0.007%rms、位相0.018度rmsとなり、ILCの要求を満たすものであった。FB制御へ適切なFFを加えることは、フラットトップのRF安定化に効果的であった。

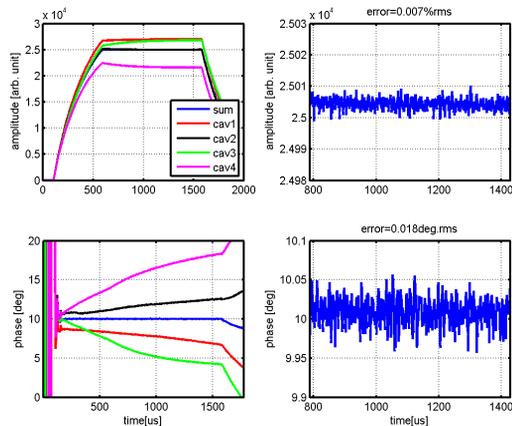


図 2: 4台の超伝導空洞のベクターサム制御。左上:各空洞振幅、右上:ベクターサムの振幅、左下:各空洞位相、右下:ベクターサムの位相

空洞への高周波入力停止後の空洞電場の減衰の時定数から空洞のQ値を、減衰時の位相の時間変化から離調を算出できる。平均電場17MV/mで1時間運転を行ったときの空洞のQ値と離調を求めた。空洞の離調の時間変化は、ほぼ4Hzrms程度であり、DESYのTTFにおける測定値[9]と一致する。

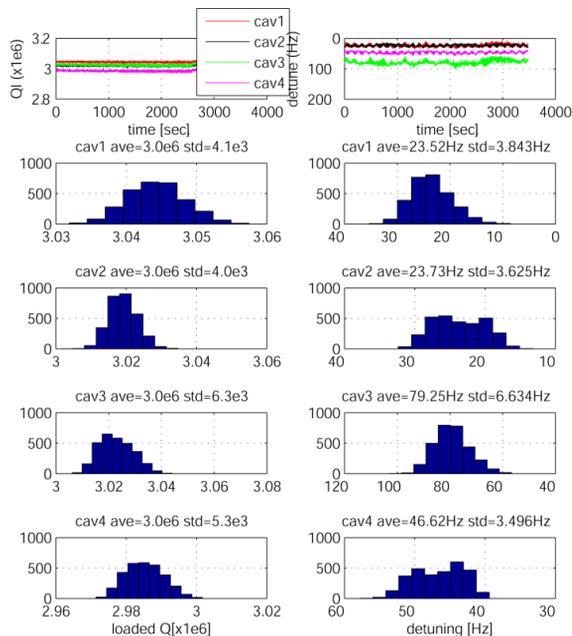


図 3: 左段:各空洞の Q 値の時間変化、右段:各空洞の離調の時間変化。

### 3.2 IF-Mixture法による信号分離の実証[10]

ILCの高周波源では、1台のクライストロンで26台の空洞を励振する構成となっている。ベクターサムによるFB制御では、空洞全数について振幅と位相の測定をする必要がある。また空洞へのRF入力や空洞からの反射も常時観測するため、1高周波源あたり80チャンネル程度のモニター入力が必要となる。その際に必要となるADC数を減らすことができる方法 (IF-Mixture法) の試験を行っている。

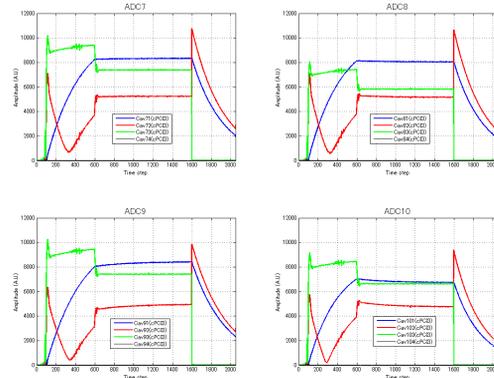


図 4: IF-Mixture 法による信号処理後の空洞信号 (青)、入力信号 (緑)、反射信号 (赤) の振幅波形

IF-Mixture法によるデジタルLLRF制御系で4台の超伝導空洞のFB制御試験を行った。図4は、各空洞の空洞信号、入力信号、反射信号の合成を行い、1台のADCへ入力、分離した結果である。FB運転時での振幅と位相の安定度は、0.07%rms、位相0.06度rmsであった。

### 3.3 ダイレクトサンプリングによる空洞信号測定[11]

近年のFPGAの高速化、ADCの広帯域、高サンプリングレート化により、RF信号が直接に測定できる新しいデータ収集系の構築が可能になってきている。このダイレクトサンプリング方式では、ジッターの影響を受けやすくなるがミキサーは不要となり、その特性に依存した測定誤差の影響が排除できる利点がある。

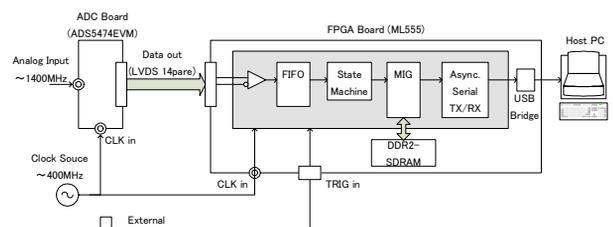


図 5:ダイレクトサンプリングデータ収集系模式図

STF Phase-1では、14ビットで最大400MSPSのADC (ADS5474、TI) とFPGAボード (ML555、Xilinx) を組み合わせたデータ収集系を構築(図5)し、1.3GHzのRF信号を200~300MHzのクロックで直接

サンプリングする試験を行った。図6は、トリガータイミングをずらしつつ、7回に分けてパルス全体の測定結果の振幅と位相である。

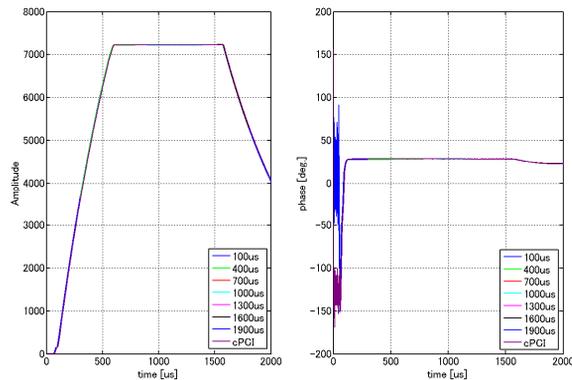


図 5: ダイレクトサンプリングで得られた振幅と位相

今回の測定で安定なものとしては、269.0MHzのサンプリングで振幅安定度0.07%rms、位相0.09度rmsのILCの要求を満たす結果が得られた。

### 3.4 サーキュレーター撤去による空洞電場安定度の影響[8]

高周波系の低コスト化は、ILCでの重要な開発要素である。1台のクライストロンで多数の超伝導空洞を励振させる構成上、個々の超伝導空洞の直前に置かれているサーキュレーターの撤去は、低コスト化に向けて望ましいことである。しかし、空洞間の干渉で空洞制御の困難を引き起こす可能性があるため、サーキュレーター撤去前後での性能評価を行った。STF-1での導波管系を図6に示す。

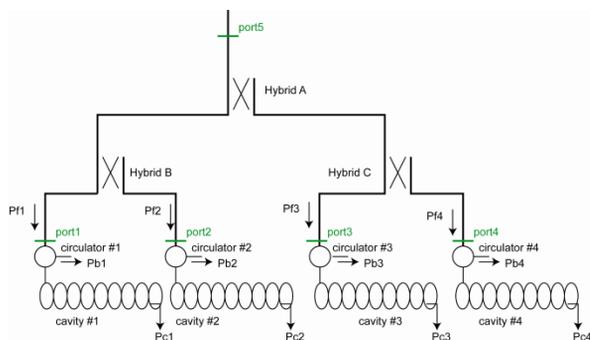


図 6: STF Phase-1 導波管系のレイアウト

取り外し前後でのFB制御における振幅安定度は、それぞれ $3.8 \times 10^{-4}$  rmsと $3.7 \times 10^{-4}$  rms、位相安定度は0.021度rmsと0.018度rmsでほぼ同じ結果となり、ベクターサムFB制御に対してサーキュレーターの有無は影響していないことがわかった(図7)。但し、サーキュレーターを外したことにより、他空洞の影響を受け、見かけのQ値に10%程度のばらつきが生じることを確認した。

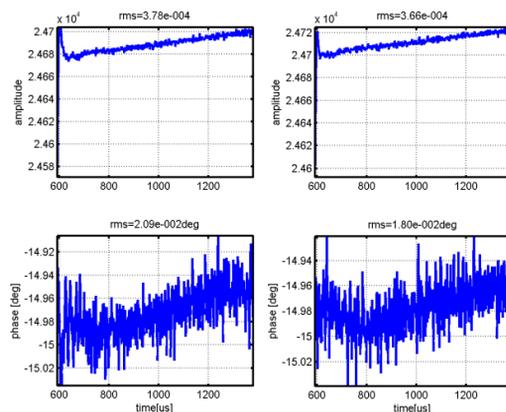


図 7: ベクターサムでの振幅(上段)と位相(下段)サーキュレーター撤去前(左側)と撤去後(右側)

## 4. まとめ

STF Phase-1において4台の超伝導空洞のベクターサム制御により、空洞内電場の振幅安定度0.007% rms、位相安定度0.018度rmsの結果が得られた。また、IF-Mixture法を用いたFB制御やダイレクトサンプリングによる信号測定を行い、ILCの要求を満たす精度で測定できること、導波管系のサーキュレーターを撤去しても振幅・位相安定度に影響しないことを確認した。

## 参考文献

- [1] 福田茂樹. “KEK超電導RF試験装置(STF)のRF源の開発”, in these proceedings.; STF Group. “STF Phase-1 Activity Report”, KEK Report, 2009-3.
- [2] Kazakov Sergey, et al., “L-band waveguide elements for SRF application”, in these proceedings.
- [3] 竹中たてる 他, “STFにおける導波管システム”, in these proceedings.
- [4] 吉田光宏 他, “STFにおける導波管コンポーネントによる超伝導空洞のQ調整”, in these proceedings.
- [5] <http://www.linearcollider.org/cms/?pid=1000437>
- [6] S. Michizono, et al., “Performance of Digital LLRF System for STF in KEK”, LINAC08, Victoria, BC, Canada, pp. 1048-1050.
- [7] 三浦孝子 他, “STFにおける低電力高周波源の安定性評価”, in these proceedings.; T. Miura, et al., “Evaluation of LLRF Stabilities at STF”, PAC’09, Vancouver, Canada, WE5PFP084.
- [8] S. Michizono, et al., “Vector-sum Control of Superconducting RF cavities at STF”, PAC’09, Vancouver, Canada, WE5PFP083.
- [9] T. Schilcher. “Vector Sum Control of Pulsed Accelerating Fields in Lorentz Force Detuned Superconducting Cavities”, TESLA Report, 1998-20.
- [10] T. Matsumono, et al., “Digital Low-level RF Control System with Four Intermediate Frequencies at STF”, PAC’09, Vancouver, Canada, WE5PFP086.
- [11] Y. Okada, et al., “Direct Sampling of RF Signal for 1.3 GHz Cavity”, PAC’09, Vancouver, Canada, WE5PFP088.