

cERL 用デジタル LLRF 制御システム

DIGITAL LLRF CONTROL SYSTEM FOR cERL

三浦孝子[#], 荒川大, 片桐広明, チュウ フェン, 松本利広, 道園真一郎, 矢野喜治, 明本光生
 Takako Miura [#], Dai Arakawa, Hiroaki Katagiri, Feng Qiu, Toshihiro Matsumoto, Shinichiro Michizono,
 Yoshiharu Yano, Mitsuo Akemoto
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The digital LLRF system has been constructed for the compact ERL (cERL) which is the prototype of the 3 GeV ERL in KEK. The radiofrequency (RF) feedback and frequency feedback with tuner have been performed by using the μ TCA digital FPGA boards. The RF stabilities have almost satisfied the requirement for 3 GeV ERL, 0.01% rms in amplitude and 0.01° rms in phase. The validity of the RF stability was confirmed by the beam energy jitter of 0.003% rms.

1. はじめに

KEKでは次世代放射光源として3 GeVエネルギー回収型リニアック(ERL)が検討され、その試験施設としてコンパクトERL(cERL)が建設された。2013年からビームコミッションが行われ、2016年現在では1 mAのビーム運転に成功している[1]。

cERLは常伝導のバンチャー空洞1台(BUN)と2セル超伝導加速空洞3台(INJ1,2,3)からなる入射器と、エネルギー回収を行う9セル超伝導加速空洞2台(ML1,ML2)からなる主線形加速器で構成されている(Fig.1)。RF周波数は1.3 GHzで、空洞負荷 Q (Q_L)や空洞電圧など現状の1 mAビームに対する運転パラメータをTable 1に示す。エネルギーは、入射器出口で2.9 MeV、主空洞で加速後の周回ビームは19.9 MeVとなっている。RF源については、バンチャー空洞とエネルギー回収を行う主空洞は大電力を必要としないので、8 kW~16 kWの半導体アンプ(SSA)を使用している。INJ1には25 kWクライストロンが使われ、INJ2と INJ3はベクターサム制御により300 kWクライストロン1台で駆動されている。この300 kWクライストロンは、将来100 mAのビーム電流に対応するために導入されたものである。

3 GeV ERLでは振幅、位相が0.01%、0.01°(rms)と高いRF安定度が要求されており、cERLでは0.1%、0.1°が要求安定度である。この安定度を満足するため、

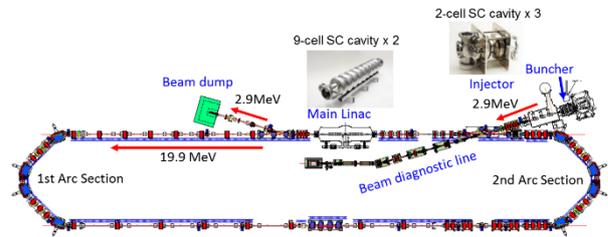


Figure 1: Plan view of cERL.

cERLではデジタル低電力高周波(LLRF)系を導入し、開発・改良を行ってきた。入射器は β が1より低いエネルギー領域にあり、INJ2,3ではベクターサム運転をおこなっているため、ここでの調整がビームのエネルギー変動に影響を及ぼしやすい。主空洞は Q_L が 10^7 と高いため、マイクロフォニクスの影響が懸念された。本稿では、cERLのLLRFシステムと現状の安定度について報告する。

2. デジタル LLRF システム

ERLで要求される高い安定度をめざし、空洞ピックアップからのケーブルを含むデジタルLLRF制御系は、温度安定となるように対策を施した[4]。Figure 2にLLRF制御室内の写真を示す。

Table 1: Operational Parameters

Cavity	Q_L	V_c	Pin	RF source
BUN	1.125×10^4	30 kV	0.2 kW	8 kW SSA
INJ1	1.20×10^6	0.7 MV	0.5 kW	25 kW Klystron
INJ2	5.78×10^5	0.7 MV	2.6 kW	300 kW Klystron
INJ3	4.8×10^5	0.7 MV		
ML1	1.31×10^7	8.6 MV	1.5 kW	16 kW Klystron
ML2	1.01×10^7	8.6 MV	2.0 kW	8 kW Klystron

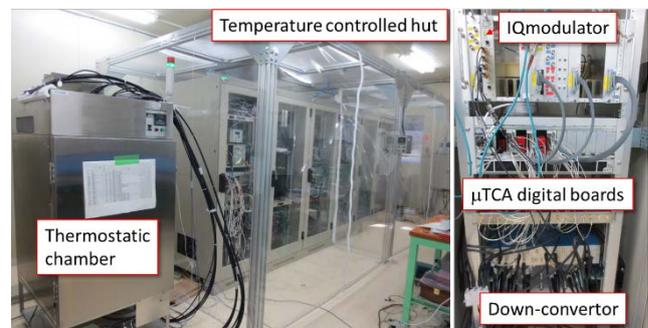


Figure 2: LLRF control racks.

周波数の高いLO生成系は恒温槽内($\pm 0.03^\circ\text{C}$)に入れ、ダウンコンバーターやデジタルフィードバックボード、IQモジュレータなどは19インチラックごと恒温ハットに収

[#] takako.miura@kek.jp

められている[3]。しかし、最近の測定の結果、温度だけでなく湿度が大きく影響していることがわかり、特にLO生成に用いている1.31 GHz±2.7 MHzのバンドパスフィルターの影響が大きいことが判明した[4]。今後、湿度への対策が必要であると考えている。

2.1 RFフィードバック系

Figure 3にRFフィードバック系のブロック図を示す。1.3 GHzのRF信号を10.156 MHz (1300 MHz/128)の中間周波数(IF)にダウンコンバートし、 μ TCA デジタルFPGAボードに入力している。このボードは、16bitのADC (LTC2208)が4ch、16bitのDAC (AD9782) 4chとデジタルI/Oポートがあり、FPGA (Vertex5FXT)を搭載している[5]。ボード製作にあたり、空洞のRFフィードバックとチューナー制御の両方に使用できるような構成とし、信頼性の点から μ TCAの規格を採用した。

IF信号は、81.25 MHz(1300 MHz/16)でサンプリングされ、FPGA内部でI/Q分離、振幅位相補正が行われ、ベクターサム演算が行われる。フィードバック制御は、比例・積分(PI)演算で行われているが、特に9セル空洞では、加速に使用される π モード以外の $8/9\pi$ モードなどの寄生モードがあるため[6]、フィードバック演算の前にあらかじめローパスフィルター(LPF)によって他のモードを除去している。各空洞に対するフィードバックゲインは、それぞれ値を変化させ、実験的に決定している[7]。クウェンチの事象を検出して素早くRFを停止するために、空洞の振幅レベルを判定する内部インターロックも組み込んでいる。

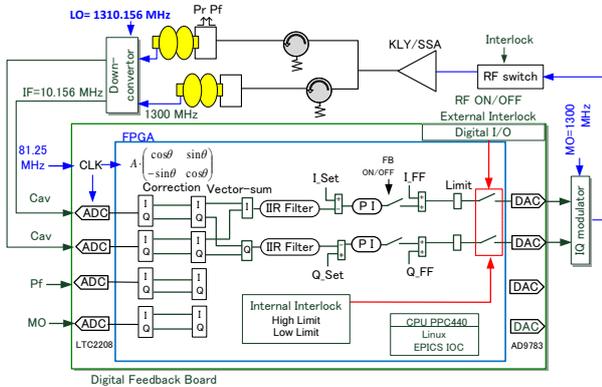


Figure 3: Schematic diagram of RF field feedback.

2.2 チューナー制御系

空洞の共振周波数フィードバックのためのチューナー制御には、同じデジタルフィードバックボードを使用し、FPGA内部のロジックをチューナー制御用に書き換えている。超伝導空洞の共振周波数制御には、ステップモーターで駆動されるスライドジャッキ型のメカニカルチューナーや高速に微調可能なピエゾチューナーが用いられている[8,9]。デジタルボードのDAC出力をピエゾ制御用に、デジタルI/O出力をステップモーターの制御に適用している。フィードバックのブロックダイアグラムをFig.4に示す。空洞入力(Vf)と空洞のピックアップ信号(Vc)をI,Q変換し、VcとVfの位相差($\Delta\theta$:離調角度)が0になるようにチューナーを制御する。

位相補正(ROT)は、1.3 GHzの共振時に、位相が0になるように校正した。次に振幅レベルがチェックされ、閾値以上の時だけフィードバックが可能となる。空洞は、50 Hz付近からメカニカル共振が現れるため、20 Hzのローパスフィルター(LPF)を通した後に $\Delta\theta$ を求めている。ピエゾ側は積分演算、モーター側は比例演算を行い、インターロックなどでフィードバックが停止状態になった時に、ピエゾに急激に大きな変動が生じないように、DACの値は停止直前の値(HOLD値)に保持される。

DAC 出力は ± 2.5 Vに変換され、+2.5 V のオフセット電圧を足されて 0 V-5 Vに変換される。これをピエゾ駆動電源に入力して10倍に増幅し、0 V-500 Vでピエゾが駆動されている。

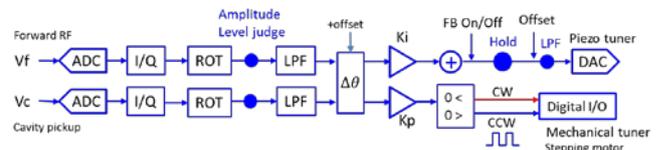


Figure 4: Schematic diagram of tuner control.

3. 空洞電場の安定度

ADC のノイズを除去するため、フィードバックループとは別に、モニター用に帯域を狭めたデジタル LPF を通して、各空洞電場を測定した。振幅・位相に対する安定度の結果を Table 2 に示す。主空洞では、マイクロフォニクスによる電場の振動が観測されたが[10]、Fig.5 に示すように、フィードバック制御によって十分に安定化された。

Table 2: RF Stabilities

Cavity	θ_b	$\Delta A/A$ (rms)	$\Delta\theta_c$ (rms)
BUN	90°	0.07%	0.04°
INJ1	0°	0.005%	0.007°
Vec.Sum (INJ2&INJ3)	0°	0.01%	0.02°
ML1	0°	0.003%	0.0094°
ML2	0°	0.003%	0.0086°

θ_b : beam phase

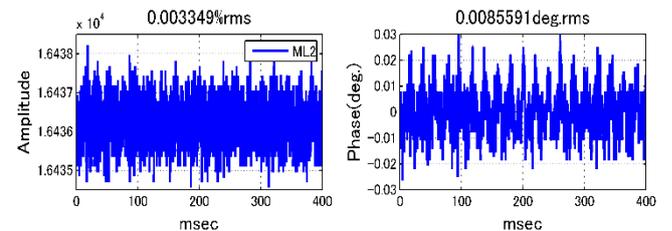


Figure 5: Stability of ML2: 0.0033% rms in amplitude and 0.0086° rms in phase.

cERLで要求される0.1%, 0.1°(rms)の振幅・位相安定度は満足している。特に超伝導空洞については、3 GeV ERLで要求されている0.01%, 0.01°(rms)をほとんど満足している。INJ2とINJ3のベクターサムの箇所位相だけ

が、 0.02° と2倍程度大きいですが、これは、クライストロン電源の300 Hzのリプルが原因で、電源電圧変動がクライストロン出力の位相変動に影響しているためである[11]。

4. ビームのエネルギー安定度

空洞の加速電場の安定度を確認するため、ビームのエネルギー安定度を測定した。ビーム条件は、5 Hz, 23 fC/バンチ、バンチ長3 psで、エネルギーは、19.9 MeVである。ビームの中心エネルギーの安定度を第一アークのスクリーンモニターで測定した。結果をFig.6に示す。その結果、ビームのエネルギー安定度は0.013% rmsであったが、約15分毎にうねりが観測された。

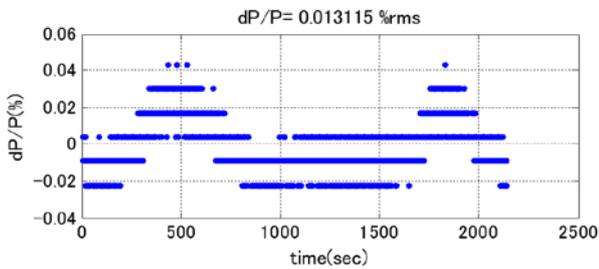


Figure 6: Stability of beam energy. (Before improvement).

この変動の原因を調査したところ、Fig.7の左図のように離調角度に15分程の頻度で同様の変動が見られた。主空洞でも同じタイミングで変動が見られたため、低温に冷やしている箇所に限定された。原因は、入力カップラーを冷却する液化窒素の流量調整の影響であると推測された。

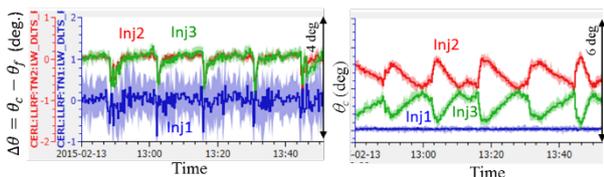


Figure 7: Stabilities of detuning angles $\Delta\theta$ (left) and cavity phases θ_c (right). (Before improvement)

空洞と高周波源が1対の場合には、離調が変化しても、空洞電場の位相はRFフィードバックによって安定化されるが、ベクターサム運転を行っているINJ2, INJ3では、ベクトル和が一定となるように制御されるため、Fig.7の右図のように、各空洞の位相には大きな変動がみられた。もし、ベクターサムを行う空洞の振幅・位相に校正誤差がある場合、ベクターサムの結果に誤差が生じてしまう。また低エネルギー領域では、エネルギーバランスで速度が変わり、空洞から受けるエネルギーも多少影響すると考えられる。そこで、対症的ではあるが、各空洞のRFバランスができるだけ変動しないように、周波数フィードバックのゲインを上げて、離調角が大きくならないようにチューナー制御を改善した。DAC(16bit)の出力変動をFig.8に示す。特にINJ1,2,3に対しては、DACの振幅変動が大きく、ML2,3では少し中心がドリフトしているのが観測されている。全ての超伝導加速空洞で10分から15分毎に同じタイ

ミングで変動しており、それをDACで補正していることがわかる。

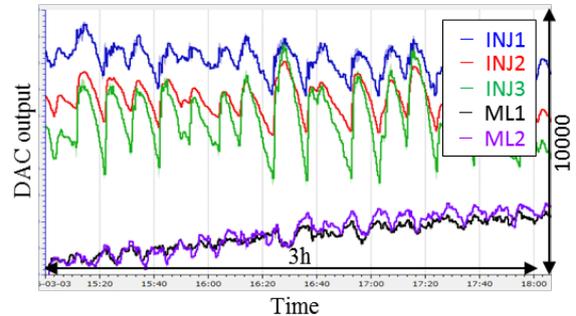


Figure 8: Trend graph of DAC output for 3 hours.

この改善の結果、Fig.9の左図に示すように、離調角 $\Delta\theta$ に大きな変動は無くなり、全ての空洞で 0.1° rms から 0.2° rms の範囲の変動に収まっている。また、Fig.9の右図のように、INJ2, INJ3の空洞電場の位相も安定した。

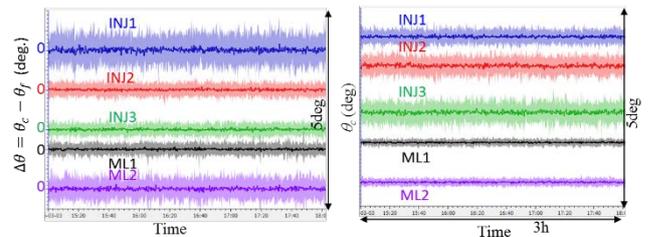


Figure 9: Stabilities of detuning angles $\Delta\theta$ (left) and cavity phases θ_c (right). (After improvement)

チューナー制御を改善後、再度ビームのエネルギー安定度を測定した。結果をFig.10に示す。大きな変動は見られなくなり、安定度は 0.003% rms であった。3 GeV ERL への要求性能はほぼ満足していると考えている。

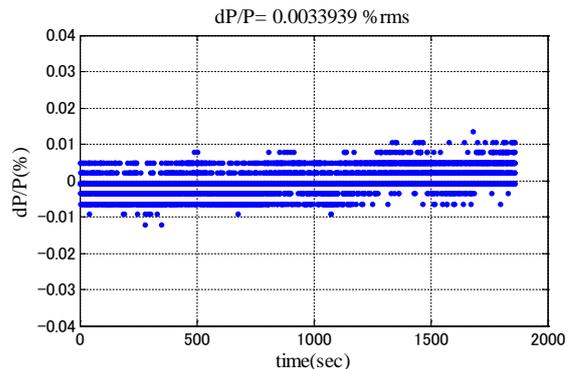


Figure 10: Stability of beam energy. (After improvement)

5. まとめ

cERLでは、デジタルLLRFシステムの構築し、16bit ADCと16bit DACを有するデジタルFPGAボードを用いて、RFフィードバックとチューナー制御を行っている。各空洞電場の安定度は、3GeV ERLの要求値 (0.01% rms, 0.01° rms) をほぼ満たす結果となった。RF性能を検証するために、実際にビームのエネルギー安定度を測定した

結果、エネルギーのドリフトが観測された。これは、空洞の離調によって、ベクターサムをしている2台の入射器超伝導空洞のエネルギーバランスが変わり、ビームのエネルギー変動に影響していることが原因であった。各空洞電場の変動を抑えるために、周波数フィードバックのゲインを上げてチューナー制御を改善した結果、各空洞電場が安定し、最終的に0.003% rmsのエネルギー安定度が得られた。長時間安定度については、温度については対策を行ってきたものの、湿度が位相ドリフトに大きく影響していることが分かったため[4]、湿度への対策も今後行っていきたいと考えている。

参考文献

- [1] 坂中章悟, 他, “コンパクトERLにおけるビーム電流約1mAの運転”, WEOM15, these proceedings.
- [2] T. Miura *et al.*, “Performance of RF System for compact ERL Injector in KEK”, Proceedings of ERL2013, Novosibirsk, Russia, 2013, pp.58-61.
- [3] Y. Yano *et al.*, “KEKB入射器のマスターオシレーター”, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, TP15, 2003.
- [4] 荒川大, 他, “cERLにおける高周波計測系の振幅・位相の変動”, MOPO011, these proceedings.
- [5] M. Ryoshi *et al.*, “ μ TCAプラットフォームによるLLRF制御ボード”, Proceedings of pasj2010, 2010, p667.
- [6] T. Miura *et al.*, “KEK-STFにおける低電力高周波源の安定性評価”, Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, Tokai, 2009, p959.
- [7] F. Qiu *et al.*, “Performance of the Digital LLRF System at the cERL”, Proceedings of IPAC2014, Dresden, 2014, p2477.
- [8] K. Enami *et al.*, “Performance evaluation of ERL main LINAC Tuner”, Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany, 2014, pp2534-2536.
- [9] 加古永治, “ILC用超伝導空洞の開発”, 低温工学 48 巻 8号, 2013, pp.415-425.
- [10] T. Miura *et al.*, “Performance of RF System for compact-ERL Main LINAC at KEK”, Proceedings of IPAC2014, Dresden, 2014, pp2450-2452.
- [11] F. Qiu *et al.*, “Performance of the Digital LLRF System at KEK cERL”, Proceedings of ERL2015, Stony Brook, NY, 2015, pp.84-87.