

# cERL 入射器の高周波システム

## RF SYSTEM FOR CERL INJECTOR

三浦孝子<sup>#</sup>, 明本光生, 荒川大, 片桐広明, 設楽哲夫, 竹中たてる, 中尾克己, 中島啓光, 福田茂樹,  
本間博幸, 松下英樹, 松本利広, 道園真一郎, 矢野喜治, Feng Qiu,  
秋山篤美, 帯名崇, 坂中章悟, ニツ川健太, 本田洋介, 宮島司

Takako Miura<sup>#</sup>, Mitsuo Akemoto, Dai Arakawa, Hiroaki Katagiri, Tetsuo Shidara, Tateru Takenaka, Katsumi Nakao,  
Hiromitsu Nakajima, Shigeki Fukuda, Hiroyuki Honma, Hideki Matsushita, Toshihiro Matsumoto,  
Shinichiro Michizono, Yoshiharu Yano, Feng Qiu, Atuyoshi Akiyama, Takashi Obina, Shogo Sakanaka,  
Kenta Futatsukawa, Yosuke Honda, Tsukasa Miyajima  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

### Abstract

The compact ERL injector has a normal conducting buncher cavity and three superconducting (SC) 2-cell cavities. In particular, two input couplers for each SC cavity are equipped top and bottom side of the cavity, symmetrically. 1.3 GHz RF should be delivered with the same phase to the top and bottom couplers. RF sources of the buncher cavity and the 1-st SC cavity are prepared individually. However, the 2-nd and 3-rd SC cavities are operated by vector sum control using one klystron. LLRF system is based on IQ digital feedback using the FPGA. The beam commissioning started from April 2013. After the optimum RF feedback gain search was performed, the RF stabilities of SC cavities in the short time range were 0.01%rms and 0.02° rms, respectively. Finally, very low beam-energy-jitter of 0.006 % rms was achieved.

### 1. はじめに

3-GeV ERL 計画の試験施設として、コンパクト ERL(cERL)の建設が進められている<sup>[1]</sup>。cERL の入射器は、Figure 1 に示すように、常伝導(NC)のバンチャー空洞 1 台と、2 セルの超伝導(SC)加速空洞が 2 台、計 4 台の空洞から構成されており、これらに 1.3 GHz の高周波(RF)が供給される。高周波源は、入射部で 3 台しか用意できなかったため、バンチャー空洞用に 20-kW IOT、入射部第 1 空洞(CAV1)には 25-kW クライストロン、第 2(CAV2)、第 3 空洞(CAV3)は、ベクターサム(VS)制御を行い、300 kW クライストロン<sup>[2]</sup> 1 台で励振することになった。RF 源に要求されている安定度は、3-GeV ERL では 0.01%rms, 0.01°rms と非常に高く、cERL では 0.1%rms, 0.1°rms が要求されている。これまで、入射器の高周波源の整備、導波管系の構築と位相の校正、低電力高周波制御系(LLRF)の整備をほぼ終え、2013 年 4 月から cERL 入射器のビームコミッショニングが開始された。高周波システムとその安定度について報告する。

### 2. 大電力高周波系

Figure 1 に示すように、各高周波源と空洞の間にはサーキュレータが設置されている。空洞の反射波から高周波源を保護するとともに、CAV2 と CAV3 のアイソレーションもとることができる。入射器に使用された高周波源の写真を Figure 2 に示す。

<sup>#</sup> takako.miura@kek.jp

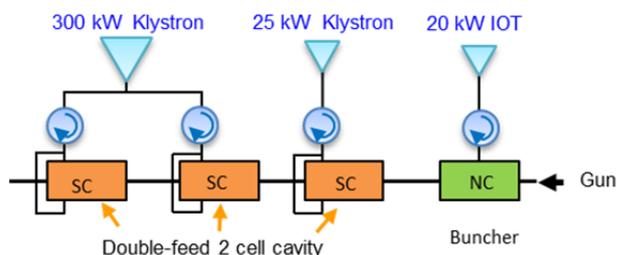


Figure 1: Configuration of RF sources of injector.



Figure 2: RF sources (left:20 kW IOT, center:25 kW klystron, right: 300 kW klystron)

入射空洞では 2 台の入力カップラーが上下に対向して取り付けられており、カップラーの作る電場の擾乱の対称性を高めている。そのため、同相でパワーを供給する必要がある。高周波源からのパワー

は、マジック T で 2 分岐し、上下のカップラーへ分配される(Figure 4)。ほぼ同位相で入るようあらかじめ導波管の長さを計算して敷設した。敷設の誤差や、カップラーの個体差などのバランスもあるので、実際には、低電力でパワーを入れて最も空洞電界が高くなるように、フレキシブル導波管を組み合わせた位相器で調整している。この位相器は、導波管の長さを  $\pm 30$  mm 動かすことができ、位相にして  $\pm 33.5^\circ$  の調整代がある。今回は、中心からほとんど大きくずれることは無かった。位相器は、この他、CAV3 の遮蔽壁外の導波管系に組み込まれており、CAV2 と CAV3 間の位相調整にも使用された(Figure 3)。

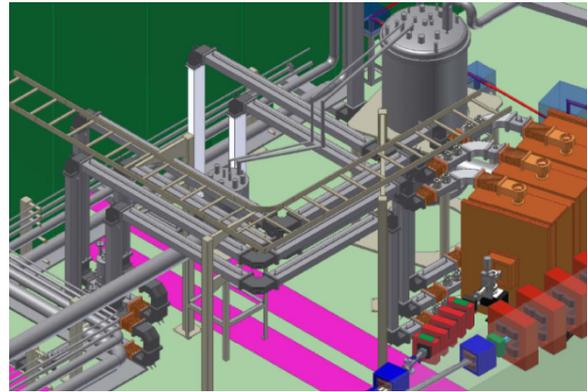


Figure 4: Power distribution layout to feed injection cavity on the inside of the shielding-wall.

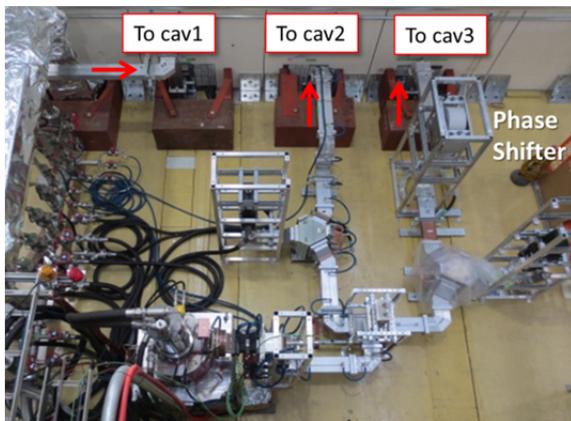


Figure 3: Power distribution system of 300-kW klystron on the outside of the shielding-wall.

### 3. 低電力高周波系

Figure 5 に低電力高周波(LLRF)デジタルフィードバックシステム<sup>[3]</sup>の概念図を示す。空洞からのピックアップ信号は、ミキサーで 10 MHz にダウンコンパートされ、 $\mu$ TCA デジタルフィードバックボード<sup>[4,5]</sup>の 16bit ADC で 80 MHz サンプリングされる。ボード上の FPGA で I,Q 成分に分離した後、位相回転を行い、IIR ローパスフィルターを通過後 PI 制御演算が行われる。最終的に DAC からそれぞれベースバンドの I,Q を差動出力し、IQ モジュレータで 1300 MHz にし、増幅された RF が空洞を励振する。加速電界のフィードバックのために、各高周波源に対して、1 枚のフィードバックボードを使用し、FB0, FB1, FB2 という名称にした(BUN:FB0, CAV1:FB1, VS(CAV2&CAV3):FB2)。

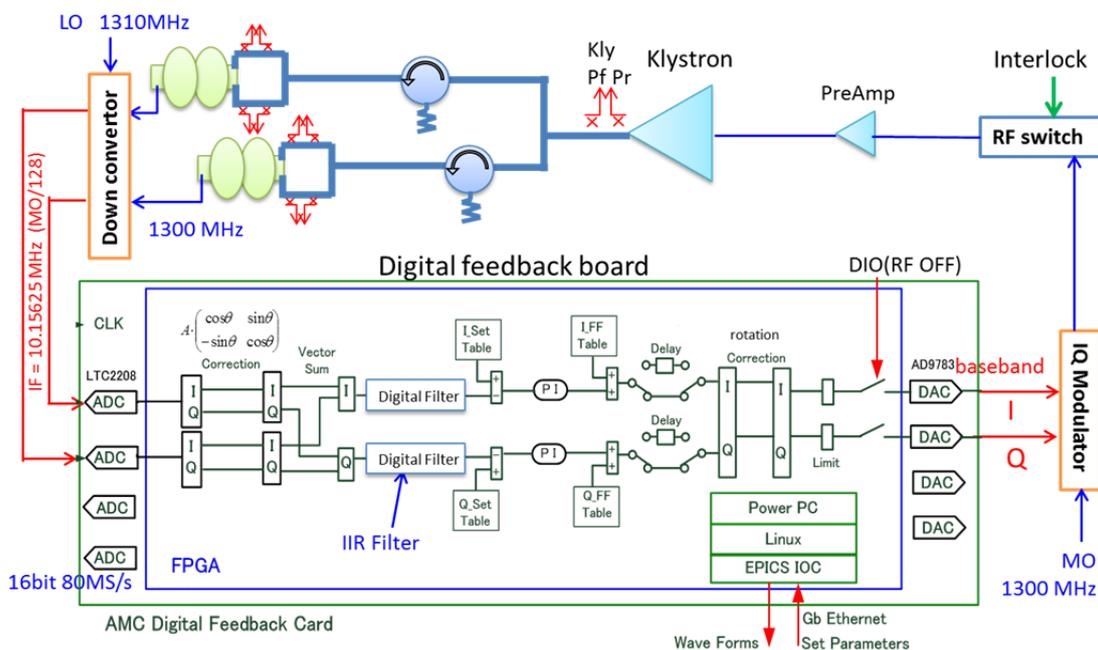


Figure 5: LLRF digital feedback system

また、チューナー制御用には、各空洞に1枚チューナーボードが用意された。チューナーボードは、FBボードとハードウェアは同じものだが、内部のFPGAロジックが異なっている。デジタルI/Oのポートから、ステッピングモーター用のパルスを出し、DACからは、ピエゾ制御信号を出力する構成となっている<sup>[6]</sup>。Figure 6にLLRF制御ラックの写真を示す。主発振器(MO)や局部発振器(LO)生成系は、恒温槽に入れて温度安定化<sup>[7]</sup>を行う。(ただし、今回のビーム試験時には、恒温槽が故障していたため、温度安定化はなされていない)。信号ケーブルは19インチラックに集められ、ミキサーや $\mu$ TCAボードもここに収められている。



Figure 6: Photo of the LLRF control racks

## 4. RF コミッショニング

### 4.1 高周波源の運転パラメータ

バンチャー空洞は、ビームローディングは無く、供給されたパワーが全て空洞内で損失される。エージングは7 kW ~ 10 kWで行われ、運転は3 kW程度で行われた。

Table 1: Typical parameter in this commissioning.

	BUN	CAV1	CAV2	CAV3
Type	NC	SC	SC	SC
Q <sub>L</sub>	1.125×10 <sup>4</sup>	1.2×10 <sup>6</sup>	5.78×10 <sup>5</sup>	4.8×10 <sup>5</sup>
θ <sub>b</sub>	-90°	0°	0°	0°
E <sub>c</sub>		7 MV/m	7.4 MV/m	6.7 MV/m
V <sub>c</sub>	114 kV	1.6 MV	1.7 MV	1.55 MV
P <sub>g</sub>	3 kW	2.6 kW	18.5 kW	
SRC	IOT	Klystron	Klystron	
P <sub>spc</sub>	20 kW	25 kW	300 kW	

入射空洞は、空間電荷効果でのビーム発散を抑制するために、βの小さいCAV1の位相をCAV2、CAV3とは独立に位相を回す必要がある。そのため、CAV1は独立のRF源とし、CAV2とCAV3はVS運転を行った。今回のコミッショニングでは、HOMカップラーでの発熱の理由で空洞電界が7 MV/mに制限された。コミッショニング時のビームは、5 nA程度と非常に小さく、このときの典型的な運転パラメータをTable 1に示す。

IOTと300 kWクライストロンのRF出力には300 Hzのリプルが見られ、低ゲインのFB運転時には、空洞電界にもリプルが観測され、必要とされる0.1%rms, 0.1deg. rmsを達成できなかった(Figure 7参照)。300 kWクライストロン用の高圧<sup>[8]</sup>を直接高圧プローブで測定したところ、300 Hzのリプルが確認され、さらに50 Hzに近いものも見られた。このとき(HV=30kV)の電源安定度は、1.7%<sub>p-p</sub>であった。このクライストロンは高圧変動に対し、10deg/%程で位相が変化するため、RFの位相が17deg<sub>p-p</sub>変動することになるが、実際に同程度の変動が見られた。IOTの高圧電源も製作会社が同じく、制御方式も同じであるため同様のリプルが見られたと考えられる。一方、25 kWクライストロンの電源<sup>[9]</sup>は、インバーター電源で、リプルの周波数は20 kHz、変動は0.15%<sub>p-p</sub>であった。

### 4.2 高周波安定度

コミッショニング開始時には、フィードバックをかけながら位相をスキャンすることができるように低いフィードバックゲイン(LG: low Gain)を設定した。セットした値は、全てのFBボードで、K<sub>p</sub>=0, K<sub>I</sub>=10とした。FBボード内での演算係数はK<sub>p(real)</sub>=K<sub>p</sub>/2<sup>7</sup>, K<sub>I(real)</sub>=K<sub>I</sub>/2<sup>18</sup>となっている。Figure 7に1例としてFB2のベクターサム制御の振幅・位相の測定値を示す。細かなふらつきは、300 Hzに対応するものである。Table 2に各FBボードに対する安定度を示す。ゲインが低い場合、どの空洞でも安定度0.1% rms, 0.1° rmsを満足しなかった。

その後、FBゲインスキャン<sup>[10]</sup>を行い、各空洞でゲインの最適化を決定した。このゲインを高いゲイン(HG: High Gain)として区別する。各係数は、FB0ではK<sub>p</sub>=20, K<sub>I</sub>=40, FB1ではK<sub>p</sub>=13500, K<sub>I</sub>=200, FB2ではK<sub>p</sub>=6000, K<sub>I</sub>=200となった。また、各HFRフィルターの値は、FB0で500 kHz、FB1とFB2では100 kHzが採用された。Table 2に示すように、HGの場合、短時間安定度としては、必要とされる0.1% rms, 0.1° rmsは十分に満足された。

Table 2: Cavity field stabilities.

	BUN	CAV1	CAV2&CAV3
FB board	FB0	FB1	FB2
w/o FB	0.5% rms 0.7° rms	0.05% rms 1.23° rms	1.0 % rms 3.4° rms
LG FB	0.15% rms 0.2° rms	0.05% rms 0.3° rms	0.16% rms 0.5° rms
HG FB	0.05%rms 0.06° rms	0.01% rms 0.02° rms	0.01% rms 0.02° rms

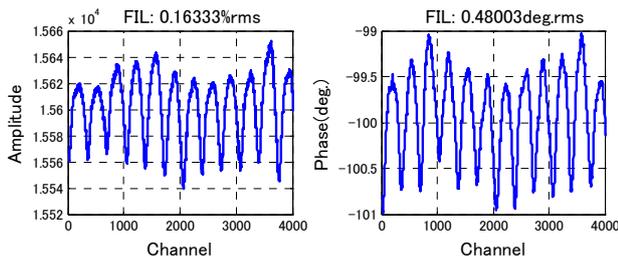


Figure 7: Amplitude and phase data in low-gain feedback for FB2 (vector-sum). (100 kS/s).

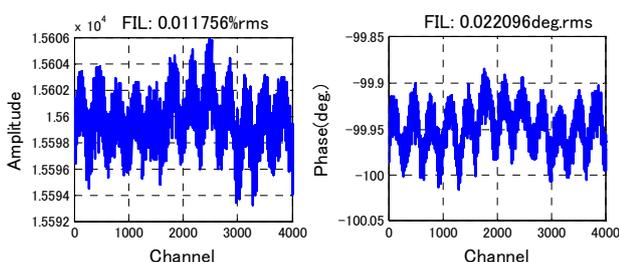


Figure 8: Amplitude and phase data in high-gain feedback for FB2 (vector-sum). (100 kS/s).

## 5. ビームのエネルギー安定度

入射器下流のビーム診断ライン<sup>[1]</sup>でビームのエネルギー安定度の測定を行った。測定は、偏光電磁石の下流で分散が 0.82 m のところに設置されたスクリーンモニター<sup>[12]</sup>を使って行われた。ビームパラメータは、5Hz, パルス長 1  $\mu$ s, 0.77pC/Bunch, 5nA である。パルス毎にピークサーチを行い、運動量のジッターを測定した。このとき、バンチャーは OFF している。FB1, FB2 ともに LG の場合、運動量ジッターは、0.3%rms であった。これは、最大振幅で 1.8%に相当し、スクリーン上で 15mm と大きく振れた。この状態で、FB ゲインを高くした場合の測定結果を Figure 9 に示す。RF 安定度が良くなることでビームの運動量のジッターが小さくなることを期待したが、実際は変わらなかった。

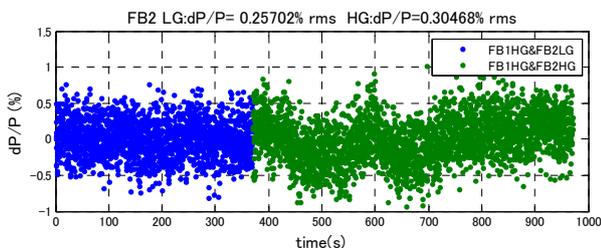


Figure 9: Momentum jitter of the beam before phase optimization between CAV2 and CAV3. (FB1 high gain. Blue:FB2 low gain, Green: FB2 high gain.)

そこで、CAV2 と CAV3 の導波管長の調整がまだきちんとなされていないため、FB2 をベクター

サムから CAV2 に対する FB 運転に変更し、CAV3 のラインに入れた導波管位相器を調整した。ビームのエネルギーが高くなる方向に位相器を調整し、FB の位相もスキャンした。当初バンチ長は、10 ps 幅であったが、ジッターでは無く、バンチ内でのエネルギー広がりが見えてきたので、バンチ長も 3 ps rms と短くした。ビームが全ての空洞でクレスト位相にのるように調整を行った。導波管は約 34mm 短くなり、CAV3 への入力 RF が 38°早く到達する方向に修正された。位相最適化を行ったあとの測定結果を Figure 10 に示す。FB2 が LG の場合でも、ジッターが 0.06 %rms となり、cERL で必要とされるビーム安定度は満足する結果となった。HG の場合、さらに一桁改善され、0.006% rms となり、非常に高いビーム安定度を実現することができた。

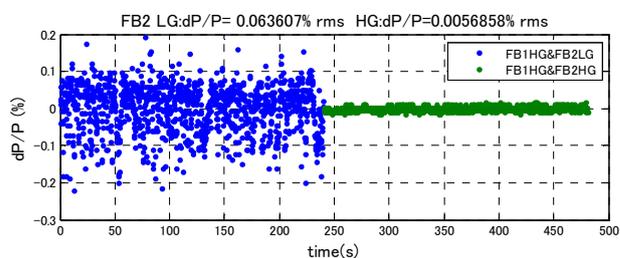


Figure 10: Momentum jitter of the beam after phase optimization. FB1 is in high gain, Blue:FB2 low gain, Green: FB2 high gain.

## 6. 今後の予定

ピエゾチューナーの制御は今回、EPICS を使ったソフトウェアで遅いフィードバックを行った。今後、機械チューナーやピエゾチューナーのフィードバックを FPGA 内部で行う予定である。2013 年 11 月半ばからは、周回部の運転もあるため、それまでに主加速部の超伝導加速空洞 2 台分の RF システムを完成させる予定である。

### ● 参考文献

- [1] S.Sakanaka, et al., “コンパクト ERL 入射部の建設と周回部の建設状況”, in these proceedings, SUP027
- [2] T.Miura, et al., “KEK における cERL の高周波源”, Proc. 7th PASJ, Himeji, THPS049 (2010)
- [3] T. Miura et al., “LOW-LEVEL RF SYSTEM FOR CERL”, Proc. of IPAC'10, Kyoto, pp.1440-1442 (2010)
- [4] M.Ryoshi, et al., “ $\mu$ TCA プラットフォームによる LRF 制御ボード”, Proc. 7th PASJ, Himeji, 667-669(2010)
- [5] T.Miura, et al., “PERFORMANCE OF THE  $\mu$ TCA DIGITAL FEEDBACK BOARD FOR DRFS TEST AT KEK-STF”, Proc. of IPAC2011, 445 (2011)
- [6] S.Michizono, et al., “デジタルフィードバックを用いた cERL 空洞のチューナー制御 p.749”, Proc. 8th PASJ, 749 (2011)
- [7] D.Arakawa, et al., “ERL に用いる高周波コンポーネントの温度特性”, Proc. of 7th PASJ,650 (2010)
- [8] H.Nakajima, et al., “cERL における 300kW(CW)クライストロン用電源の開発”, Proc. 7th PASJ, Himeji, THPS051 (2010)

- [9] H.Nakajima, et al., “cERL における 30kW CW IOT/ク  
ライストロン用電源の開発”, Proc. 9th PASJ, Osaka,  
1253 (2012)
- [9] F.Qiu et al., “Evaluation of the Superconducting LLRF  
System at cERL in KEK”, Proc. of IPAC’13, Shanghai,  
2956 (2013)
- [10] Y.Honda, et al., “ERL 試験加速器入射部における縦方  
向ビーム性能評価”, in these proceedings, SUP010
- [11] R.Takai, et al., “コンパクト ERL 用ビーム位置モニ  
ターとスクリーンモニターの開発 ” , in these  
proceedings, SUP024.