

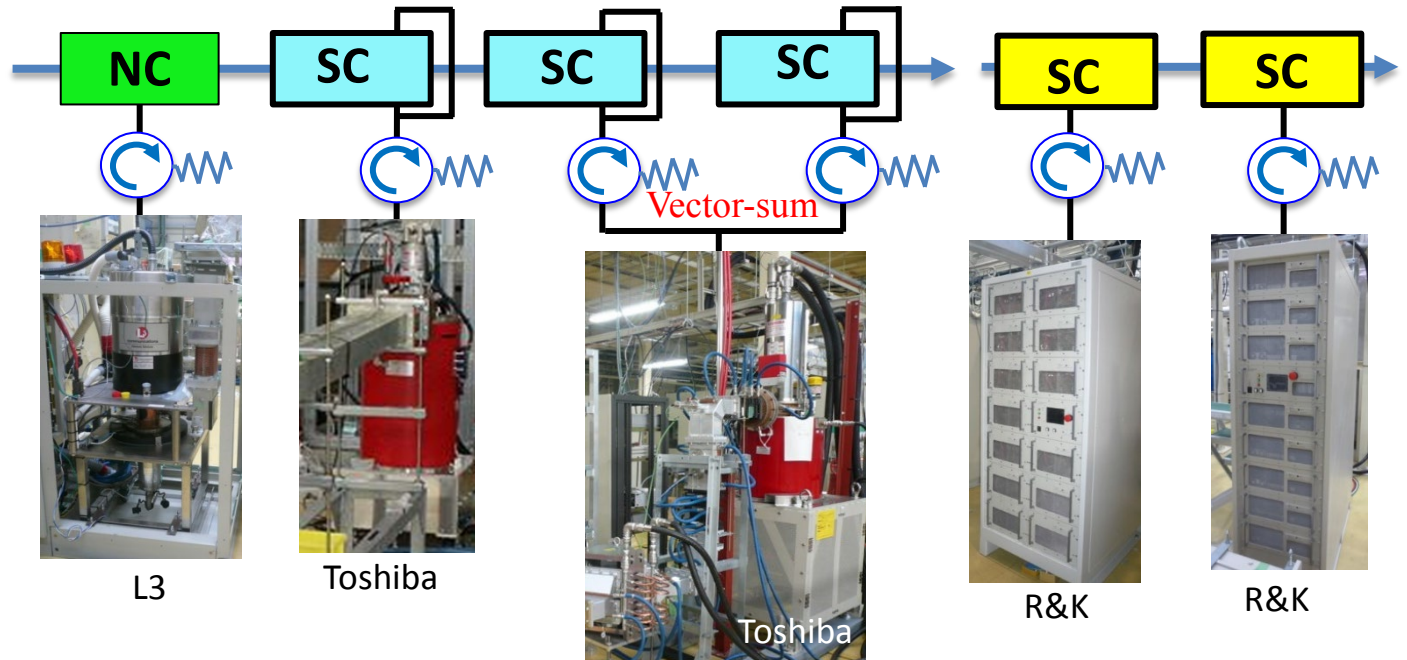
cERLのRF源

コンパクトERLミニワークショップ 2014/12/19

三浦

cERLのRF源

	Buncher	IJSC-1	IJSC-2	IJSC-3	MLSC-1	MLSC-2
Cavity	NC	2cell-SC	2cell-SC	2cell-SC	9cell-SC	9cell-SC
Cavity Voltage	114 kV	0.7 MV	0.7 MV	0.7 MV	8.6 MV	8.6 MV
Q_L	1.1×10^5	1.2×10^6	5.8×10^5	4.8×10^5	1.3×10^7	1.0×10^7
Cavity Length	0.068 m	0.23 m	0.23 m	0.23 m	1.036 m	1.036 m
Input RF Power @current operation (Low I_b)	3 kW	0.53 kW	2.6 kW		1.6 kW	2 kW
RF Source	IOT	Klystron	Klystron		SSA	SSA
Maximum Output	20 kW	25 kW	300 kW		16 kW	8 kW

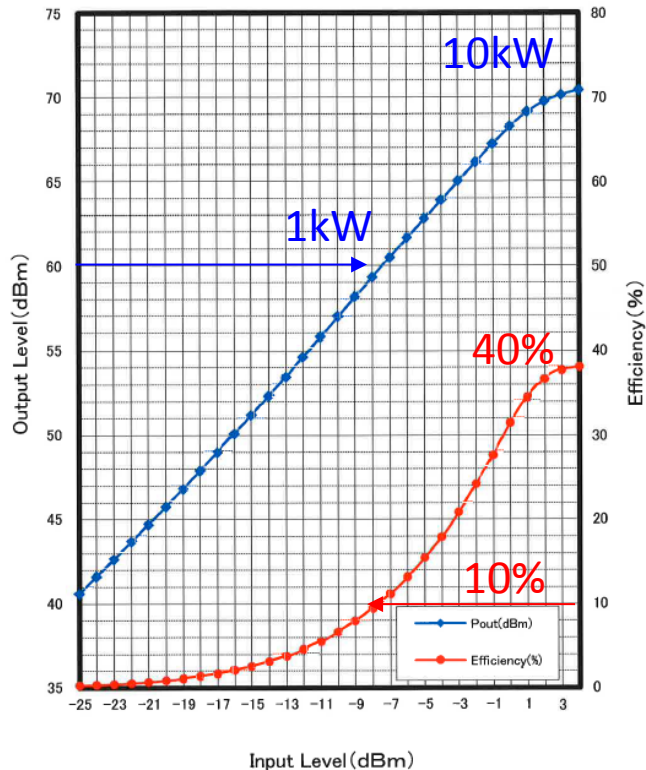


Requirements of RF stabilities: **0.1%rms, 0.1deg.rms** for cERL
0.01%rms, 0.01deg.rms for 3GeV-ERL

各RF源について

Injectorではで100mA, 5MeVを達成するには、300kW CWクライストロンが必要。
=>安定動作を確認している。

Main Linacでは、エネルギー回収するので、10~20kW程度の小型RF源でOK。
最近、1.3GHzの半導体アンプが、入手しやすくなった。
安定で、メンテナンスもしやすい。



リニアリティや位相が回らないことを重視した。
効率は低い。

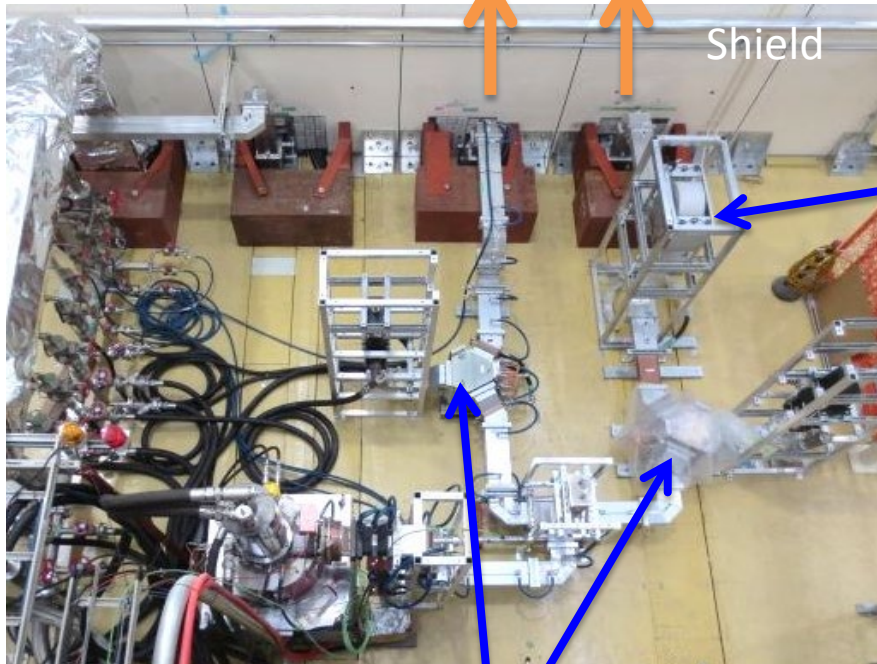
(現在、2kW出力で運転している)

海外では、F級のアンプを使って、出力に応じて
ドライブ電源電圧をダイナミックに変更し、
LLRFシステムでアンプもフィードバックし、
70%~80%の効率を狙っている。

300 kWクライストロンの導波管系

IJSC2 IJSC3

Shield



300 kW Klystron

Circulators

Phase Shifter



Flexible WG x2 + Ubend

Phase Adjustment
between **IJSC2** and **IJSC3**

導波管長を±30mm変更可能

WG650導波管 (0.1651 m x 0.08255 m)
管内波長: $\lambda_g = 0.322217302$ m
導波管1mmあたり、1.117 deg./mm

Distance of CAV2 - CAV3 = 0.65 m

IJSC2とIJSC3の導波管に必要な位相差は、(おおざっぱに)

$\beta=1$ の場合 $\Rightarrow 154.2$ deg.

$\beta=0.98935(3\text{MeV}) \Rightarrow 163.6$ deg.

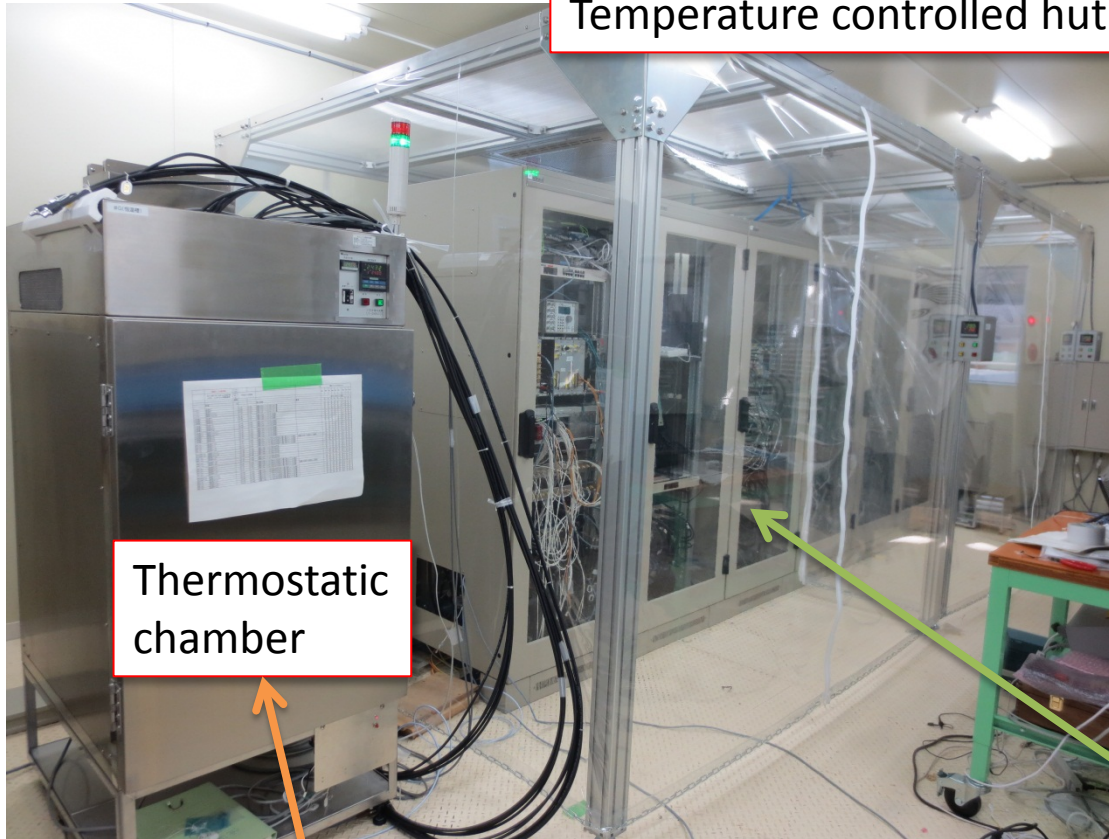
8.4 mm程度の導波管長の違い

160deg.程度の位相差になるように導波管を敷設し、移相器で微調することにした。

Low Level RF System

ハット内は、室温変動の1/10の温度変化

Temperature controlled hut



Thermostatic chamber

MO (master), LO (local oscillator) are installed inside thermostatic chamber (regulated $\sim 0.03\text{deg.C}$).

IQ modulator

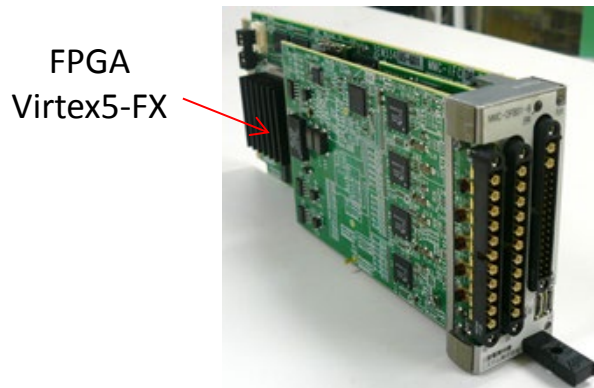
FPGA boards

Mixers (down-convertor)

Mixers and AD/DA/FPGAs are installed temperature stabilized hut

アークセンサ、VSWRメータやMPS等安全系は、RF源の近くに配置している。

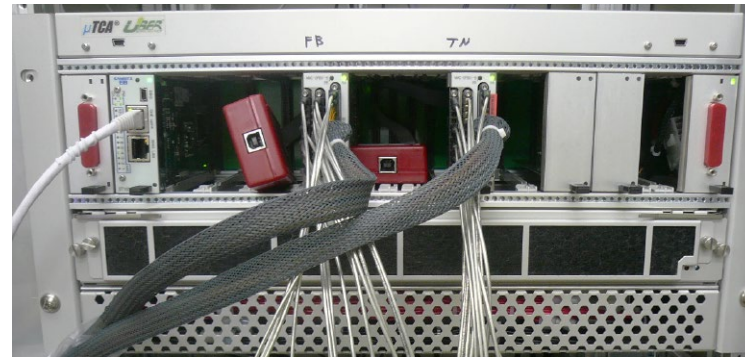
デジタルフィードバック用FPGAボード



FPGA
Virtex5-FX

16-bit ADC x 4ch (LTC2208)
16-bit DAC x 4ch (AD9783)
Clock input, Digital I/O, Ref clock input

実績のある16bitのADC,DACのチップを選択



μTCA digital control boards

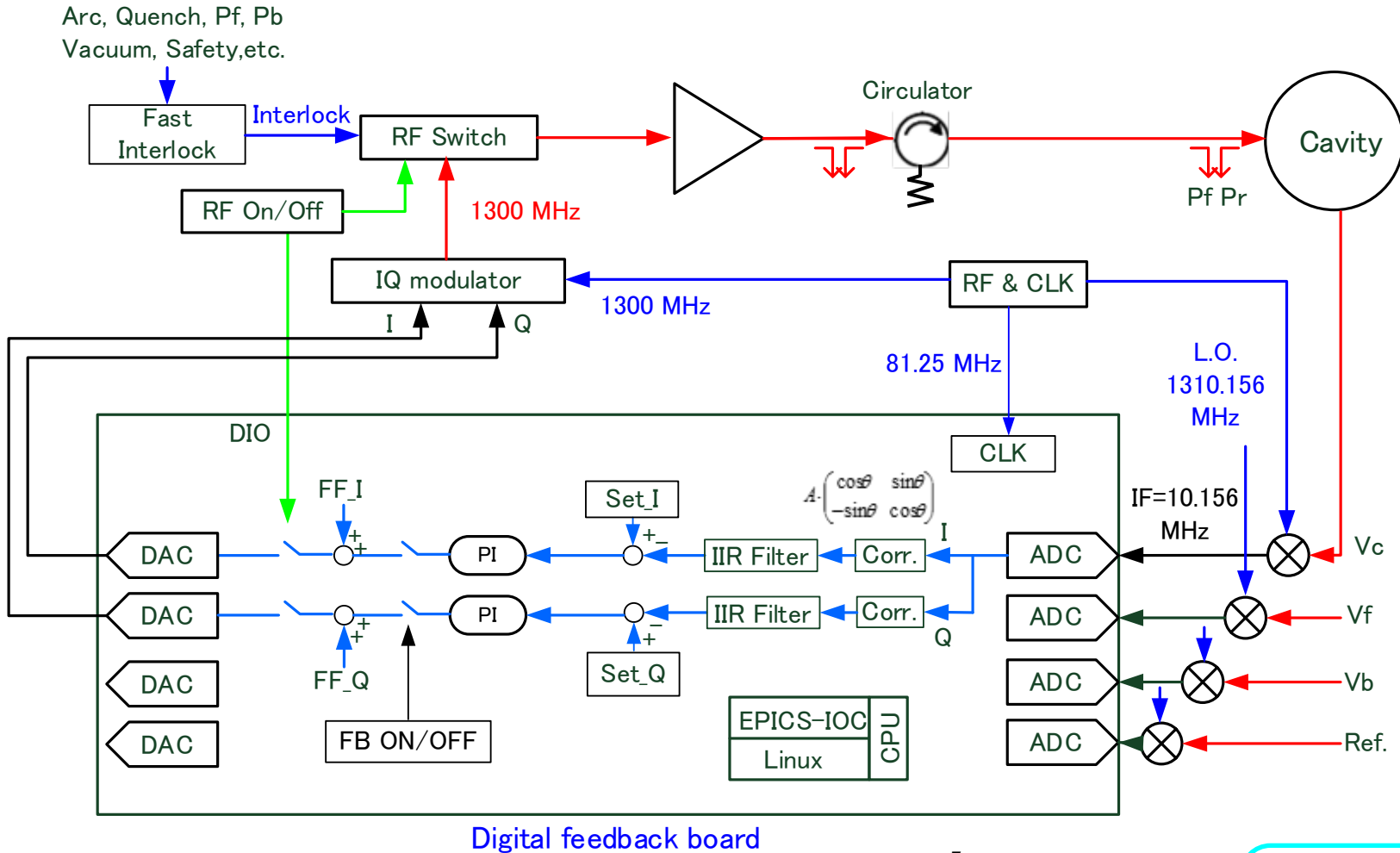
各ボードのFPGA Power-PC内で組み込みLinux
が動作しており、EPICS IOCになっている。
(→KEK小田切氏+三菱電機特機)

FPGAの内部回路を変更するだけで、
加速電場のフィードバックと空洞のチューナーフィードバックの両方に使える設計とした。

現在、11枚のボードが運転に使用されている。

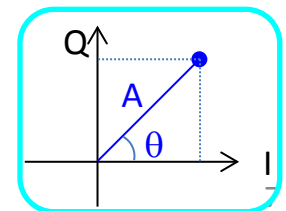
	BUN	ILSC 1	ILSC 2	ILSC 3	MLSC 1	MLSC 2
FB board	FB0	FB1	FB2 (Vector-sum)		FB4	FB5
Tuner board	TN0	TN1	TN2	TN3	TN4	TN5

空洞電場のデジタルフィードバック制御系



$$I = \frac{1}{4} \sum_{n=0}^7 \cos\left(2\pi \frac{n}{8}\right) \cdot V(n),$$

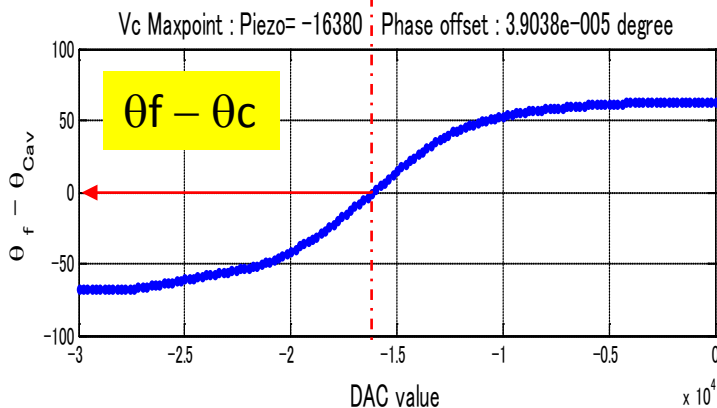
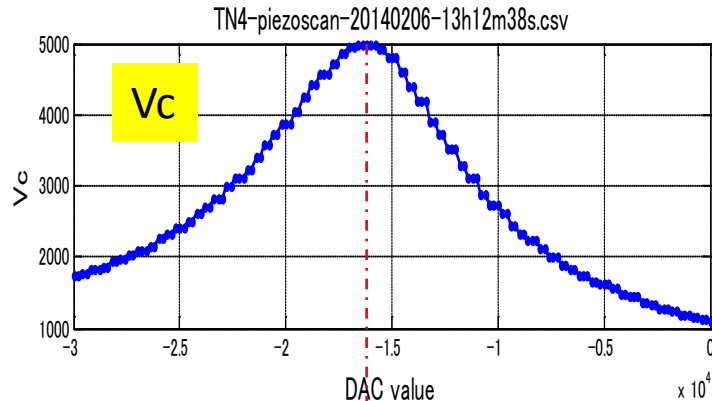
$$Q = \frac{1}{4} \sum_{n=0}^7 \sin\left(2\pi \frac{n}{8}\right) \cdot V(n)$$



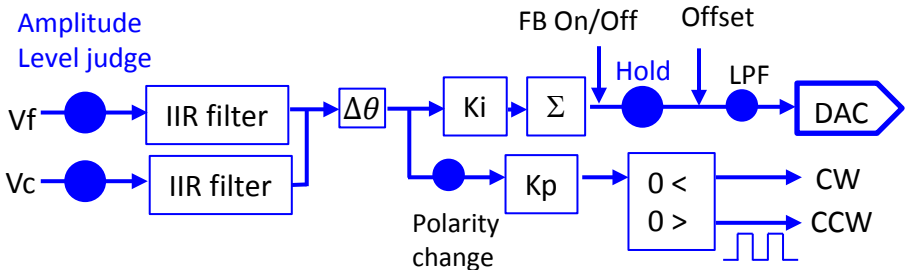
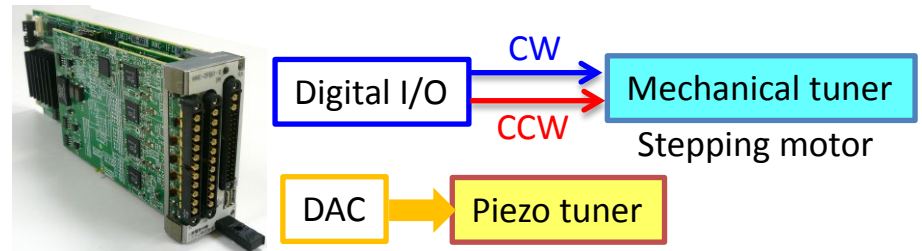
チューナーフィードバック制御

空洞入力RFの位相と空洞ピックアップ信号の位相差が0となるようにフィードバック

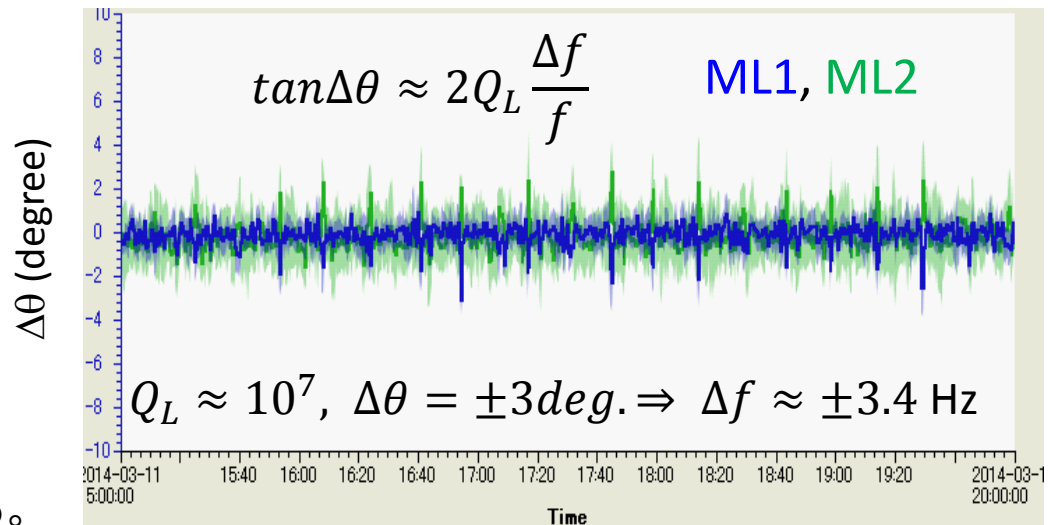
$$\Delta\theta = \theta_f(Pf) - \theta_c(Cav) \Rightarrow 0$$



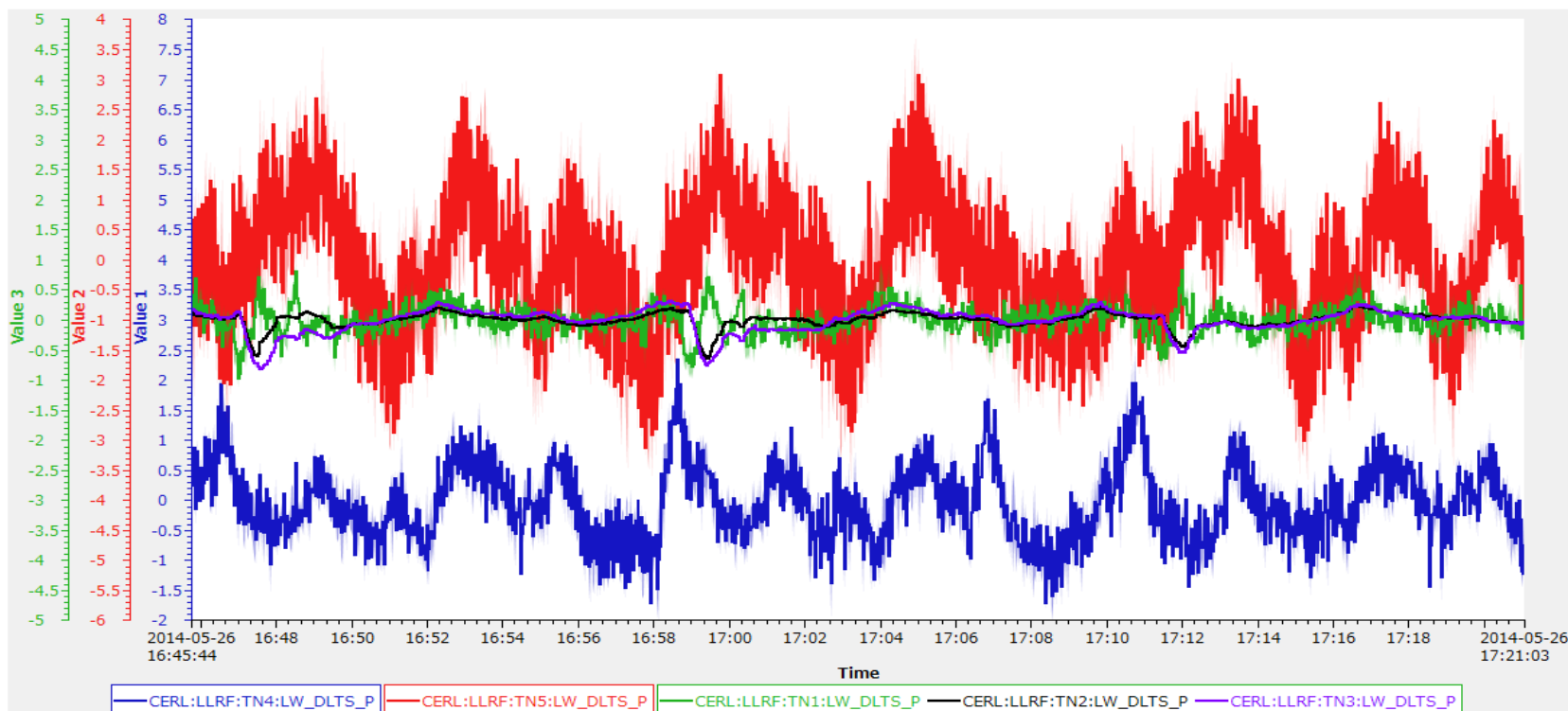
Vcが最大のときに、 $\Delta\theta=0$ となるように位相校正を行い、フィードバックを開始する。



ピエゾを壊さないような制御を行うことに注意して論理設計を行った。



チューナーフィードバック制御



$$\tan\Delta\theta \approx 2Q_L \frac{\Delta f}{f}$$

$$\text{IJSC1: } Q_L \approx 1.2 \times 10^6, \Delta\theta = \pm 0.9 \text{deg.} \Rightarrow \Delta f \approx \pm 8.5 \text{ Hz}$$

$$\text{IJSC2, IJSC3: } Q_L \approx 5 \times 10^5, \Delta\theta = \pm 0.5 \text{deg.} \Rightarrow \Delta f \approx \pm 11 \text{ Hz}$$

$$\text{MLC1: } Q_L \approx 1.3 \times 10^7, \Delta\theta = \pm 2.2 \text{deg.} \Rightarrow \Delta f \approx \pm 2 \text{ Hz}$$

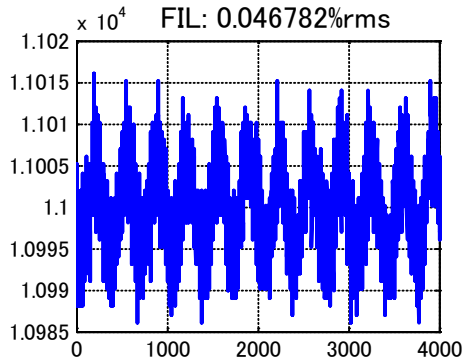
$$\text{MLC2: } Q_L \approx 1.0 \times 10^7, \Delta\theta = \pm 3 \text{deg.} \Rightarrow \Delta f \approx \pm 3.4 \text{ Hz}$$

Stabilities of Cavity Fields in Injector

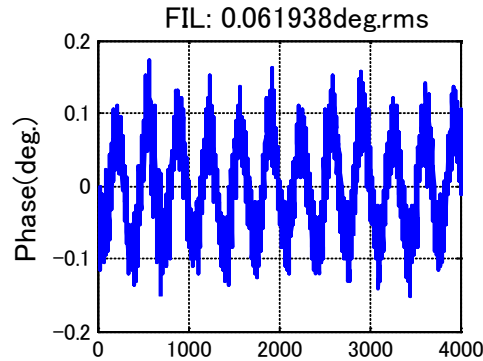
Feedback gains have optimized by gain-scan.

FB0 (Buncher)

100kS/s



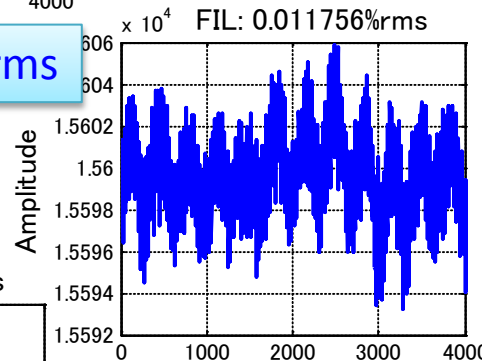
Amp 0.05% rms



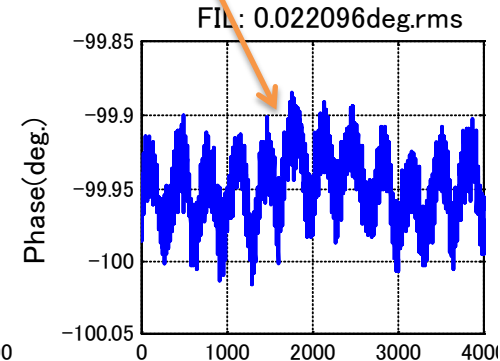
Phase 0.06 deg. rms

300Hz ripple caused by power supply

FB2 (Vector-sum)

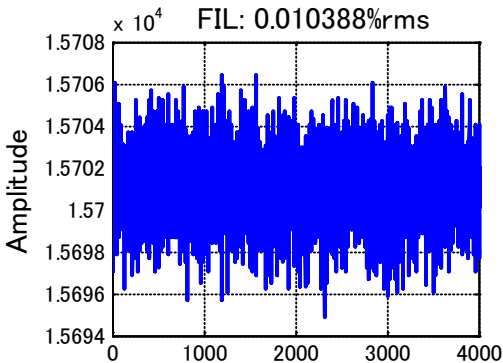


Amp: 0.01% rms

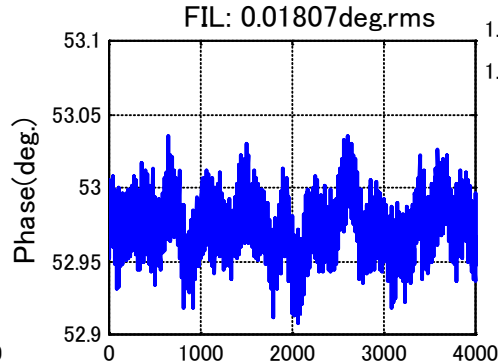


Phase 0.022 deg.rms

FB1 (CAV1)



Amp: 0.01% rms ,

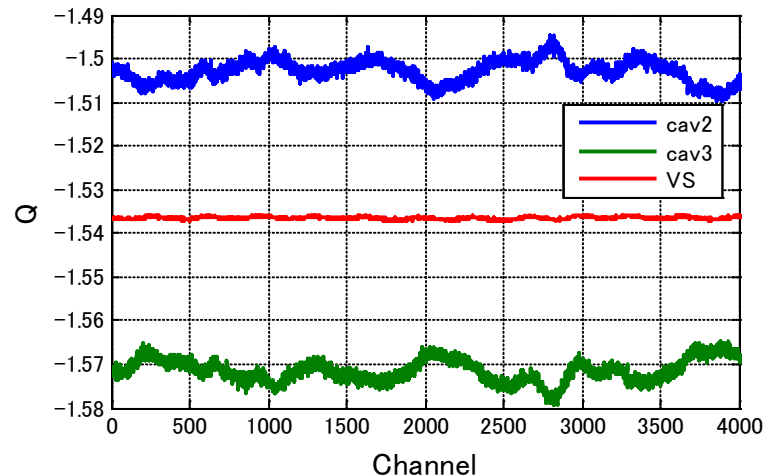
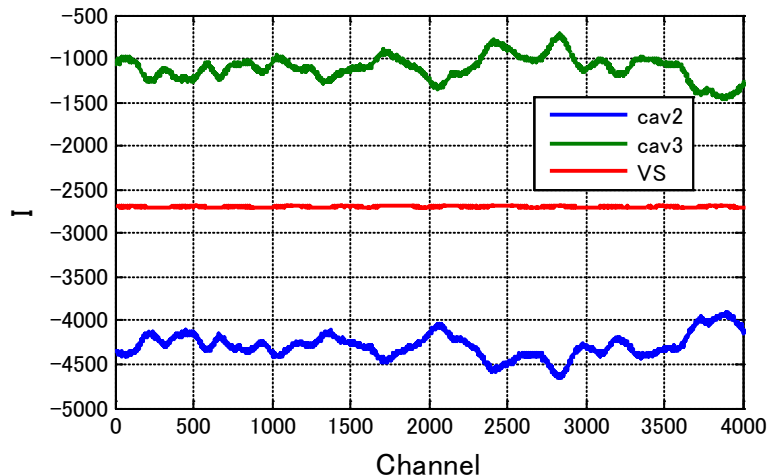


Phase 0.02 deg. rms

RF stabilities satisfy the required stabilities of 0.1%rms, 0.1deg.rms

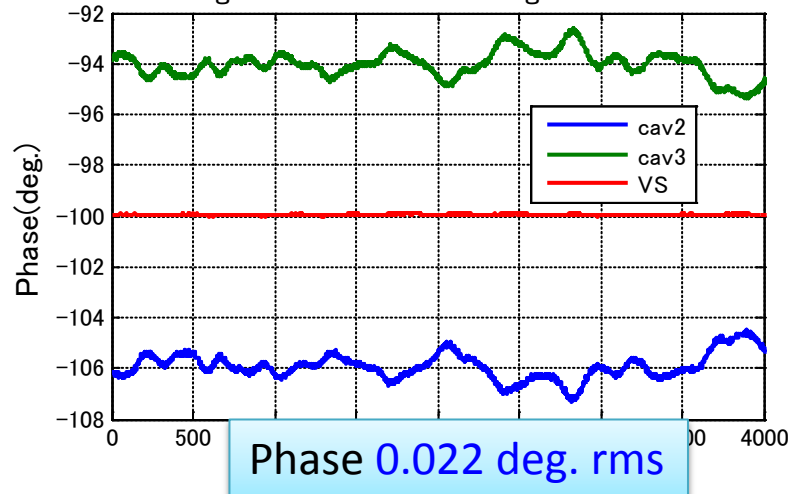
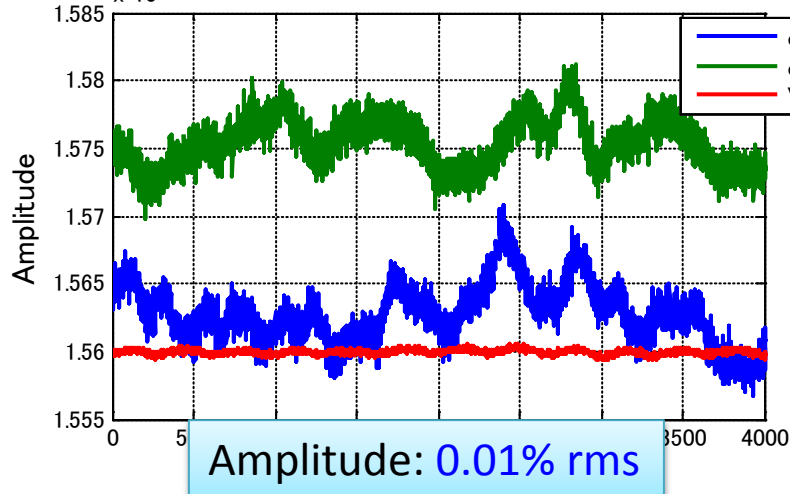
Waveforms of FB2 (vector-sum)

IとQの各平均値が所定の値となるように、フィードバックをかける



FB2-P6000I200-7MV-rate799-WL130k-20130614-1.csv

CAV2: 0.014111%rms CAV3: 0.11541%rms VS: 0.011756%rms CAV2: 0.51122deg.rms ADC3: 0.71094deg.rms FIL: 0.022096deg.rms



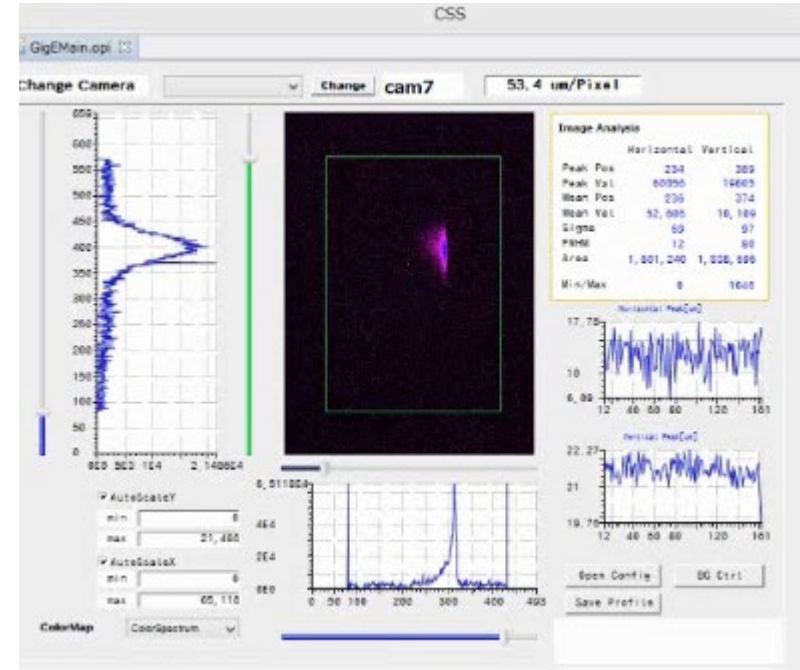
ベクターサムの校正と運動量ジッター

RF安定度は良かったが、当初ビームの運動量ジッターが **0.3% rms** と非常に悪かった。

CAV2でフィードバックをかけながら、CAV3側の移相器でクレスト位置を調整したところ、導波管長が34mm 短くなった。つまり、**38deg.**分ずれていたことになる。
 ⇒ **間違っただ位相でVectorSum演算をやっていた。**

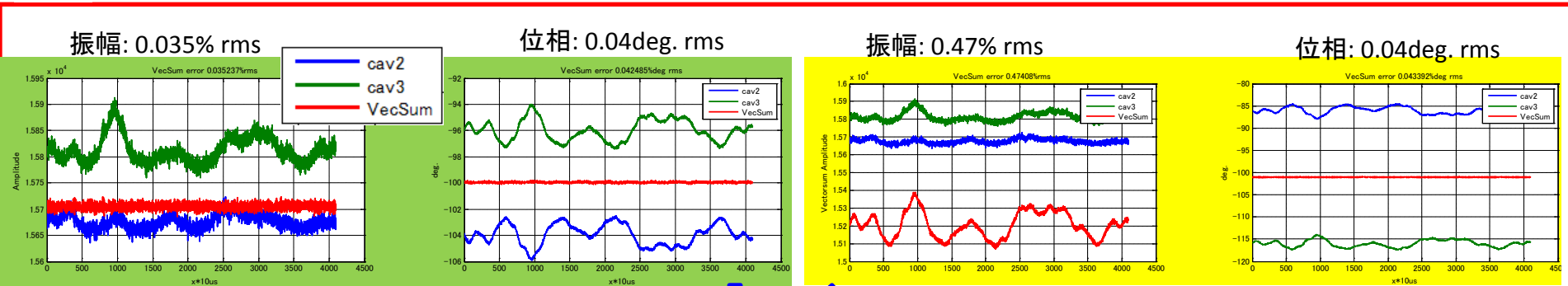
（運転開始前に当初予定と大きく違う場所に移相器を合わせていた。調整後は、予定通り、移相器の中心近くにセットできた。）

Dispersion @ screen monitor = 0.82m
 Resolution = 53.4 $\mu\text{m}/\text{pixel}$



@Injector Analyzer Line

e.g.

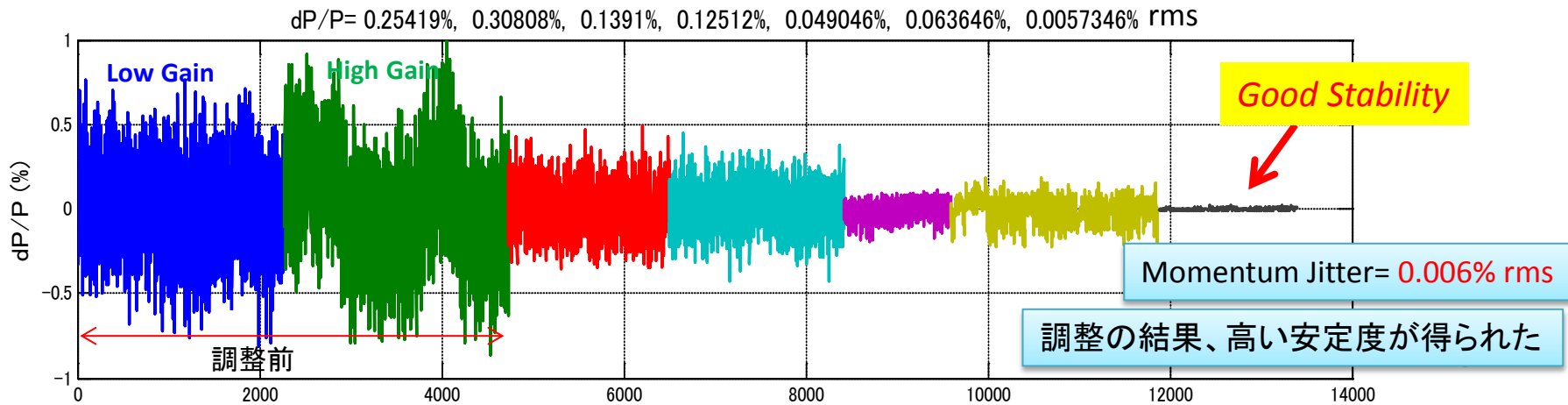


Vector sumが一定になるようにフィードバックしていたが。。

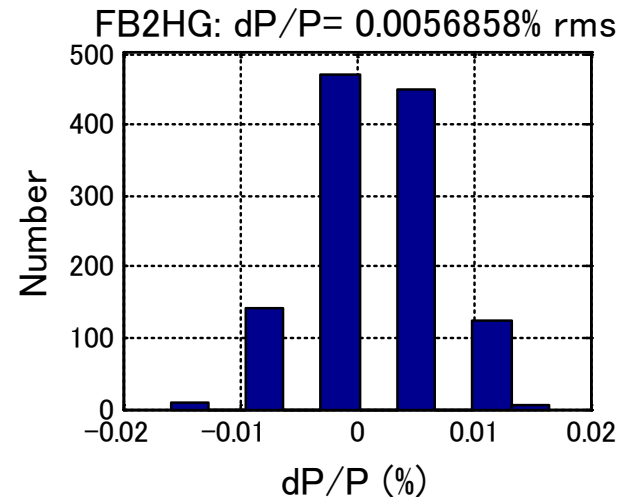
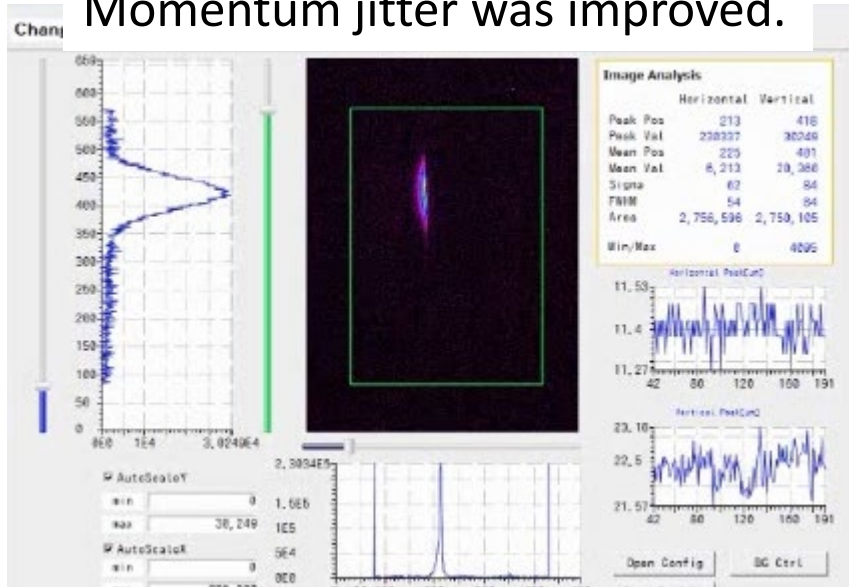
実際は、大きく変動していることになる (計算結果)

ベクターサムの校正と運動量ジッター

History of momentum jitter in adjustment.



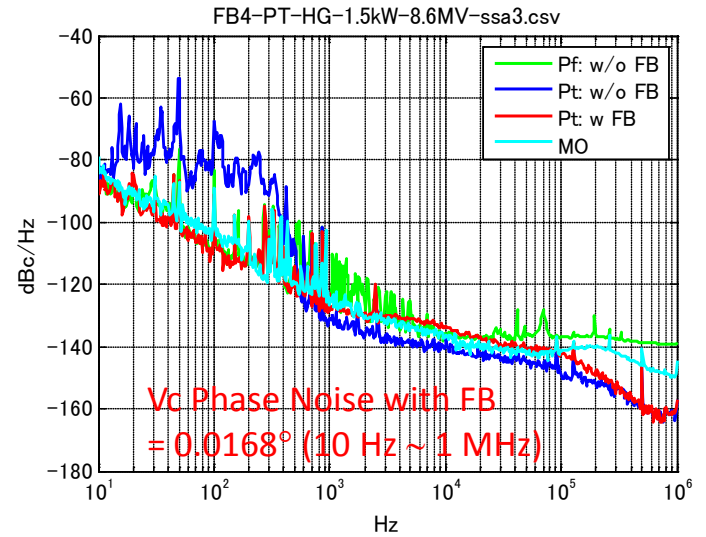
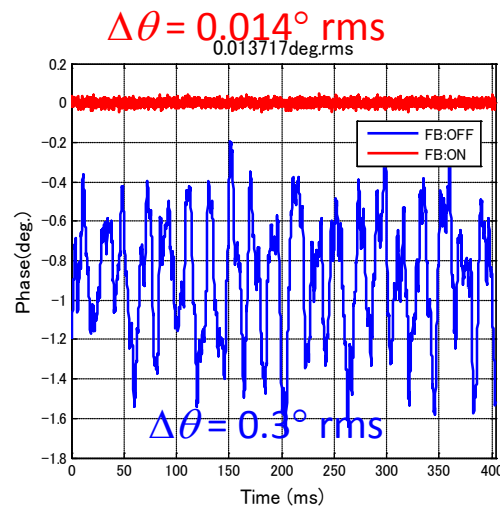
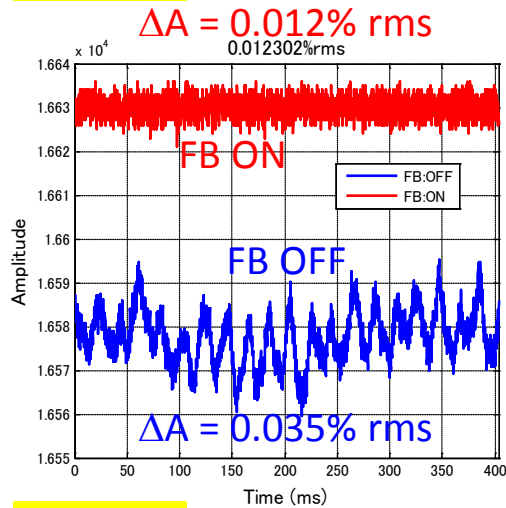
Momentum jitter was improved.



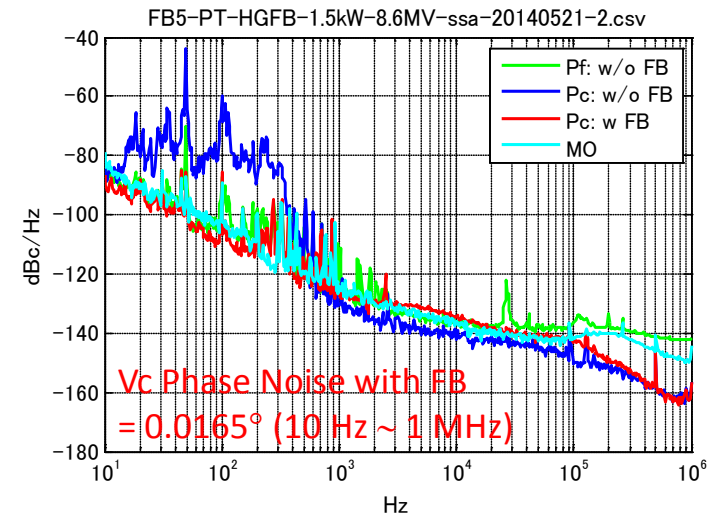
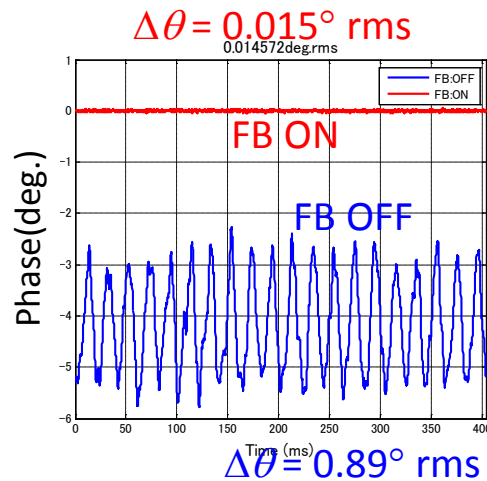
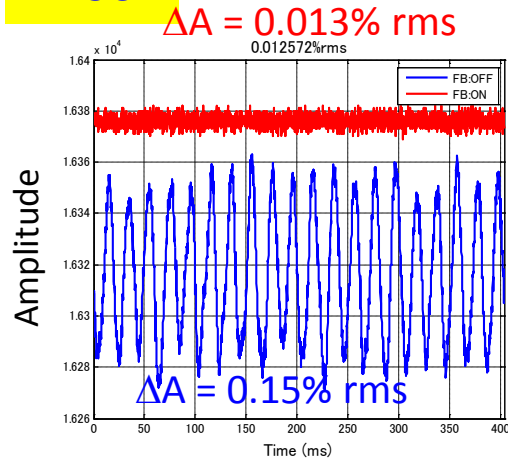
@Injector Analyzer Line

Stabilities of Cavity Fields in Main Linac

MLSC1



MLSC2



マイクロフォニクスによるジッターは、フィードバックによって抑え込まれていることがわかる。

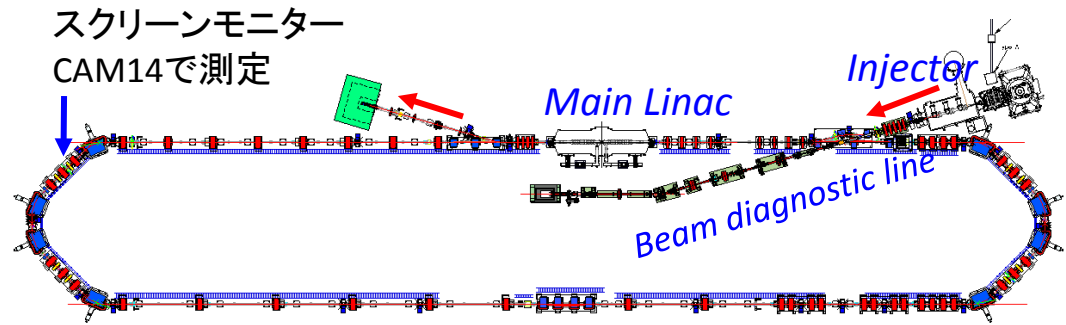
シグナルソースアナライザによる測定結果

Master Oscillatorと同程度まで
ダンピングされていることがわかる

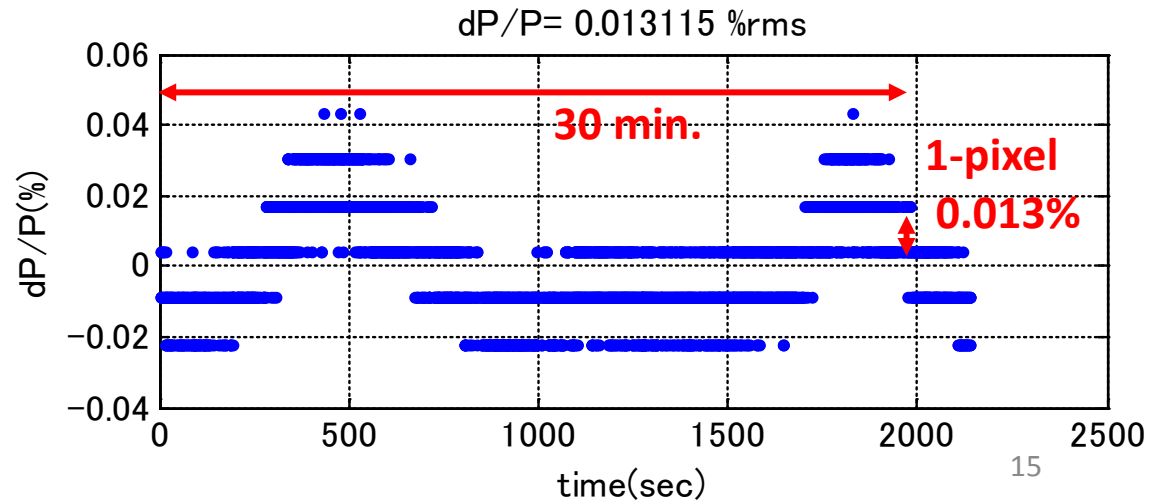
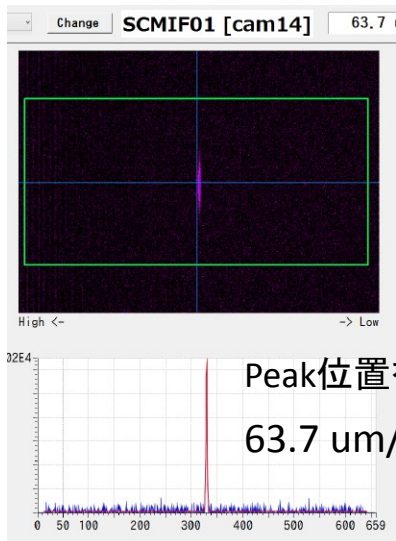
cERLのRF安定度について

	BUN	Inj1	Inj2 & Inj3	ML1	ML2
Amplitude	0.05% rms	0.01% rms	0.01% rms	0.012% rms	0.013% rms
Phase	0.06° rms	0.02° rms	0.02° rms	0.014° rms	0.015° rms

Required stabilities of 0.1%rms, 0.1deg.rms have been satisfied enough.



Dispersion : $\eta_x = 0.487\text{m}$
 Beam: 5Hz, 3ps rms, 23 fC, $E_{\text{total}} = 19.9\text{ MeV}$



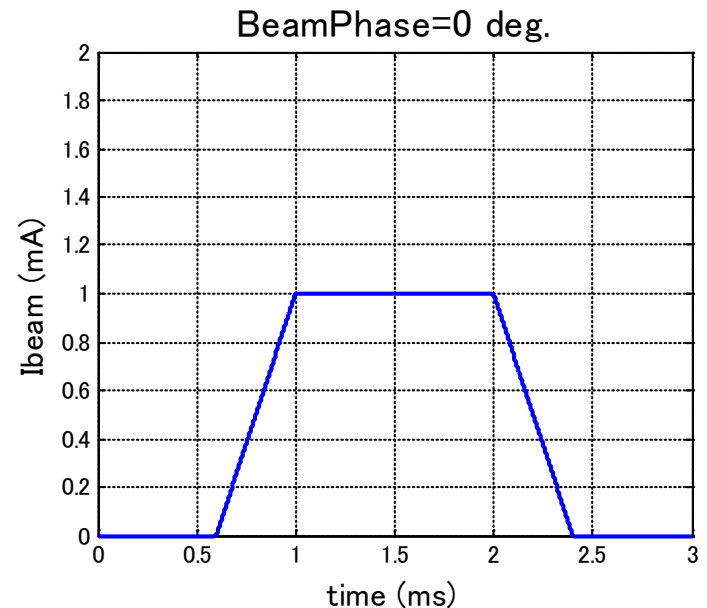
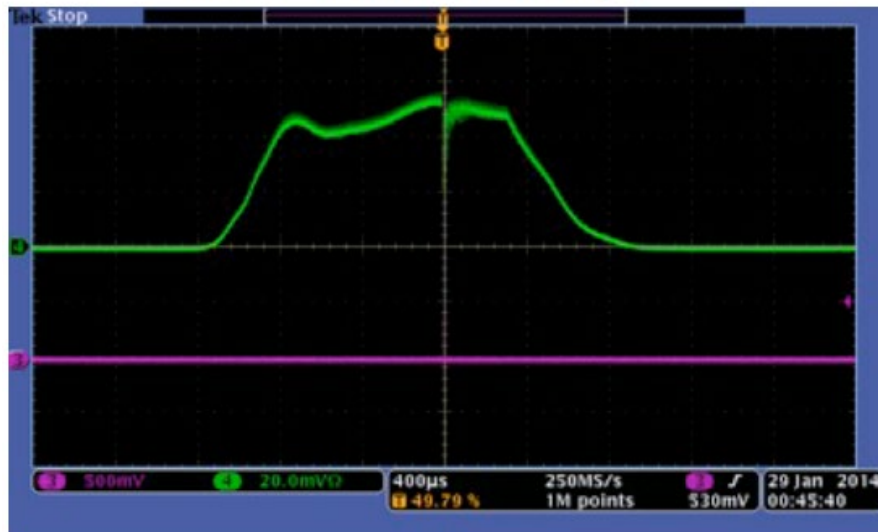
今後のビーム運転について

ビームのCW運転では、ビーム強度に大きなふらつきがなければ、現状のRF安定度と同程度が得られるはず。。。

マクロパルス(バースト)モードについて検討をおこなった。
ピーク電流1mA(0.77pC/bunch), マクロパルス幅1ms

立ち上がり、立下り時間で、各400 μ s程度を想定(実績値を考慮)

ロングパルス運転



RF Powerの計算式

$$P_g = \frac{V_{cav}^2}{R_L} \frac{\beta + 1}{8\beta} \left(\left[1 + \frac{2 R_L I_{b0}}{V_{cav}} \cos \phi_b \right]^2 + \left[\tan \psi + \frac{2 R_L I_{b0}}{V_{cav}} \sin \phi_b \right]^2 \right) \quad (3.45)$$

In the case of superconducting cavities with $\beta \gg 1$, this formula can be simplified to

$$P_g = \frac{V_{cav}^2}{\left(\frac{r}{Q}\right) Q_L} \frac{1}{4} \left(\left[1 + \frac{\left(\frac{r}{Q}\right) Q_L I_{b0}}{V_{cav}} \cos \phi_b \right]^2 + \left[\frac{\Delta f}{f_{1/2}} + \frac{\left(\frac{r}{Q}\right) Q_L I_{b0}}{V_{cav}} \sin \phi_b \right]^2 \right) \quad (3.46)$$

T. Schilcher

%% Injector Cavity 1 %%

Vc=0.8 MV;

r/Q=205 Ω;

QL=1.2e6;

Inj1: Pg= 0.6kW @ w/o beam

Inj1: Pg= 1.1kW @ beam:1mA

⤵ x 1.8

%%Main Cavity1 %%

Vc=8.3 MV;

r/Q=897 Ω;

QL=1.3e7;

ML1 : Pg= 1.48kW @w/o beam

ML1 : Pg= 8.54kW @ beam:1mA

⤵ x 5.8

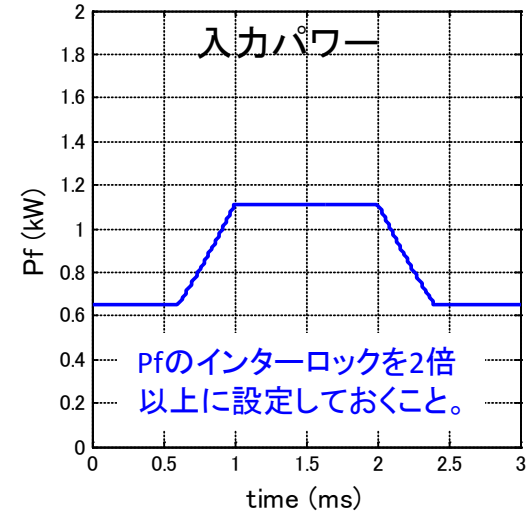
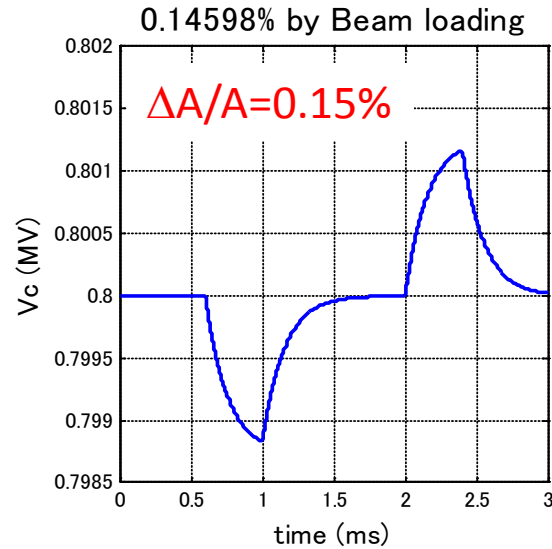
(w/o Energy Recovery)

$\Delta f=0, \phi_b=0$ を仮定

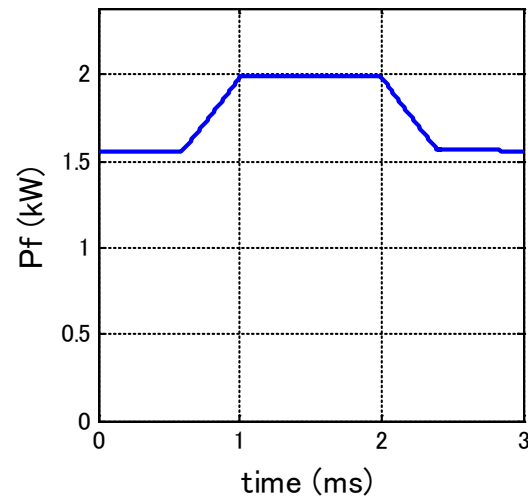
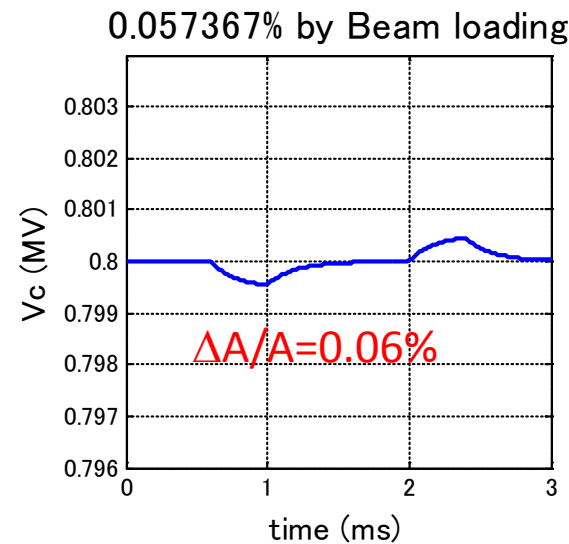
Injector

@High Gain Feedback

<I JSC1>
 $V_c=0.8$ MV
 $r/Q=205$
 $QL=1.2e+6$



<I JSC2, I JSC3>
 $V_c=0.8$ MV
 $r/Q=205$
 $QL=5e+6$



Main Linac SCC

$V_c=8.3$ MV; $r/Q=897$; $QL=1.3e7$;

High Gain Feedback

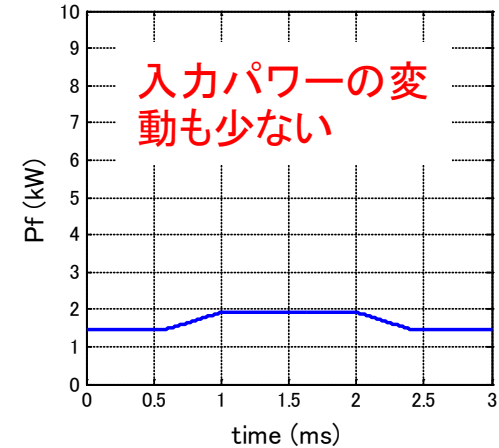
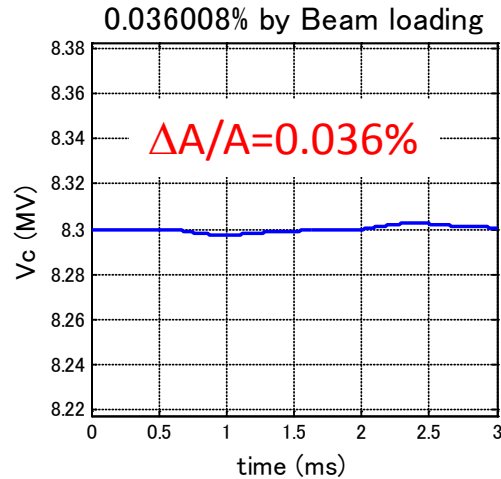
$K_p=1000/8*2=250$;

$K_i=4000/128/dt/4096 = 6.1E+5$;

Energy Recovery Mode

Circumference=90m
10%のビームロスが
あったとして計算した。

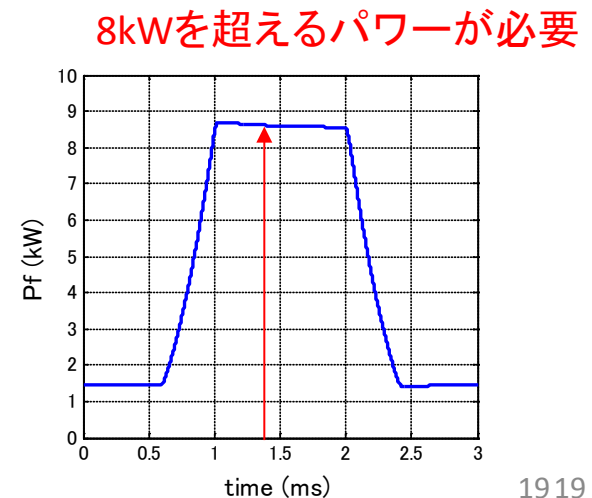
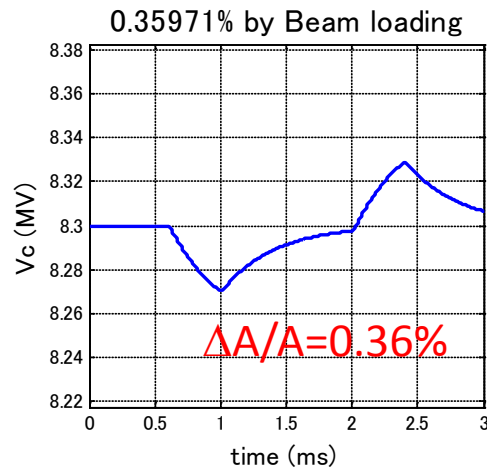
問題なく運転が可能



W/o Energy Recovery

スクリーンなどでビームを止めて
の運転は、ML2は、RF出力8kW
Maxなので許容できない。

安定度もよくない。



Main Linac SCC

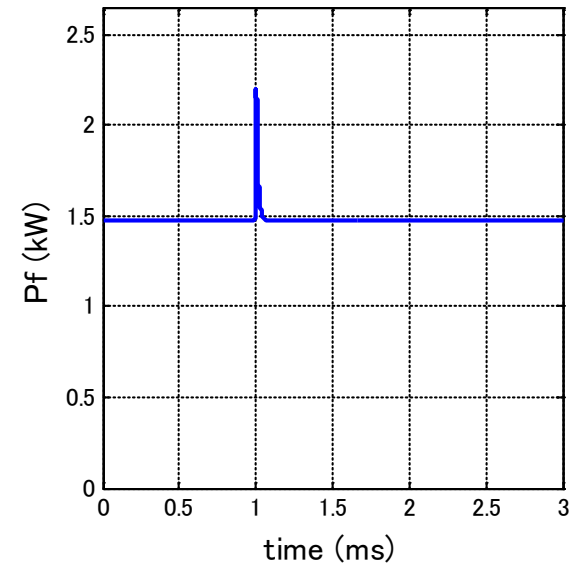
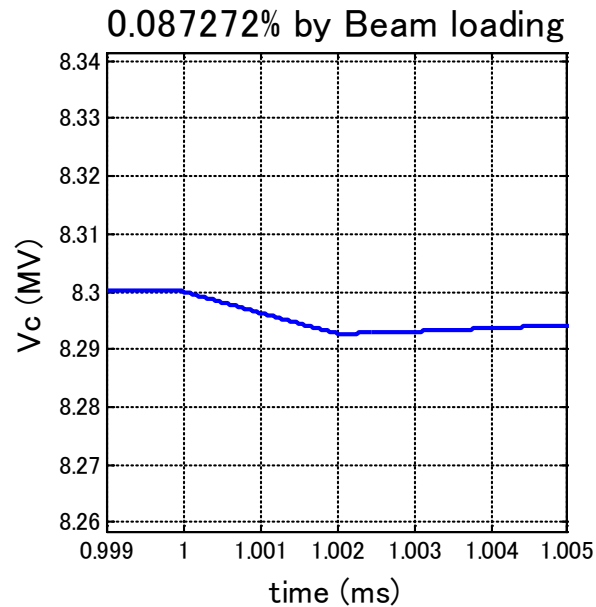
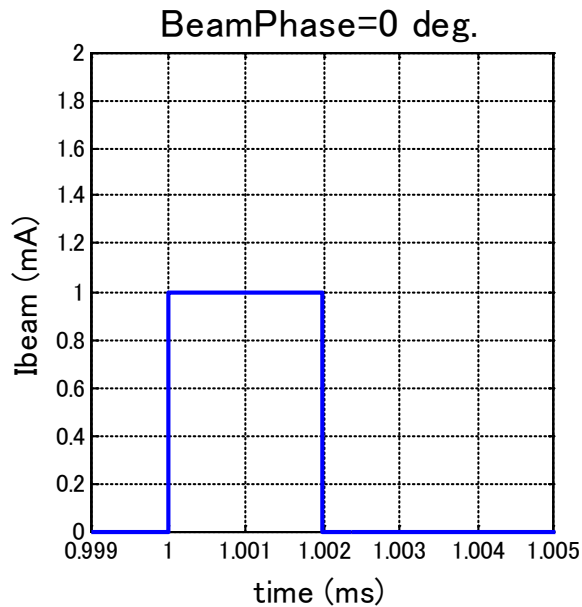
どうしてもビームをスクリーンで見たい場合は。。。。？

1~2 μ sの短パルス(矩形)ビームで行うこと。

%High Gain%

$$Kp=1000/8*2=250;$$

$$Ki=4000/128/dt/4096 = 6.1E+5;$$



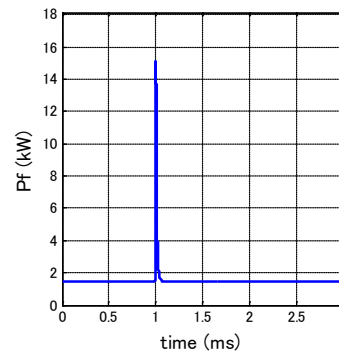
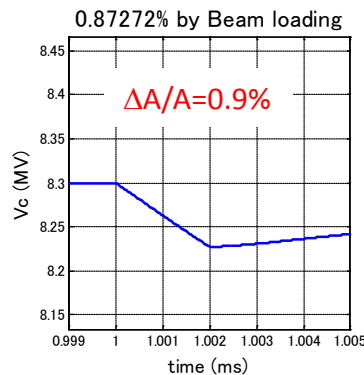
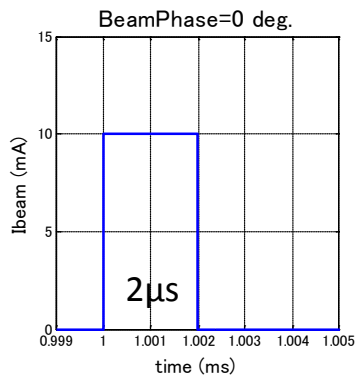
7.7pC/bunch(10mAピーク)の運転@6/18へのコメント

6/18 の運転ログ:

7.7 pC/bunch (10mAピーク相当)の運転では、ビームローディングが大きいため、主空洞でHighゲインフィードバックができず、Lowゲインで運転を行った。

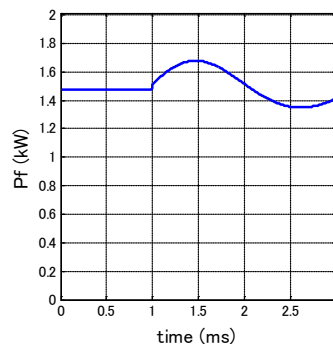
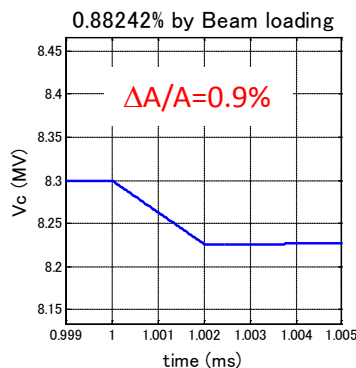
注意: MLSCで10mAの場合、

Energy Recoveryが無い場合は、**335kW**のRFパワーが必要@定常状態



<= High Gain FBの場合

Pfインターロックで落ちる



<= Low Gain FBの場合

BeamローディングはHigh Gainとほぼ同じ。

ただし、マイクロフォニクスの影響は大きい

まとめ＋今後の課題

RFの安定度は、cERLの要求性能は満足している。
大電流運転での安定性能を示したい。(低電流では相手にされないような。。)

<今後>

0.01% rms, 0.01deg. rmsに向けて更なる改良を加える。

長期安定度もStudyしたい。

前回測定した20MeVでの $\Delta P/P$ の変動が、IJSC2とIJSC3の離調バランスから発生していたかもしれない。

入射部でのチューナーフィードバックを改善したので、安定性を確認したい。
環境温度の影響もどうか？

バーストモードのビーム運転では、特に入射LINACのところで、ビームローディング補償が有効。今後、Studyしたい。

RF源の高効率化も、今後視野に入れたい。

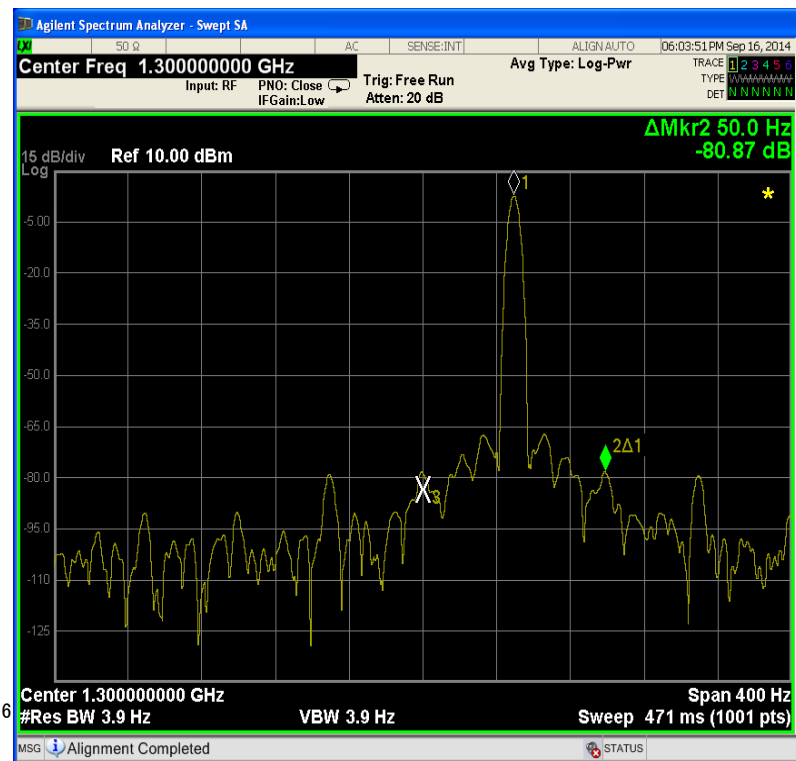
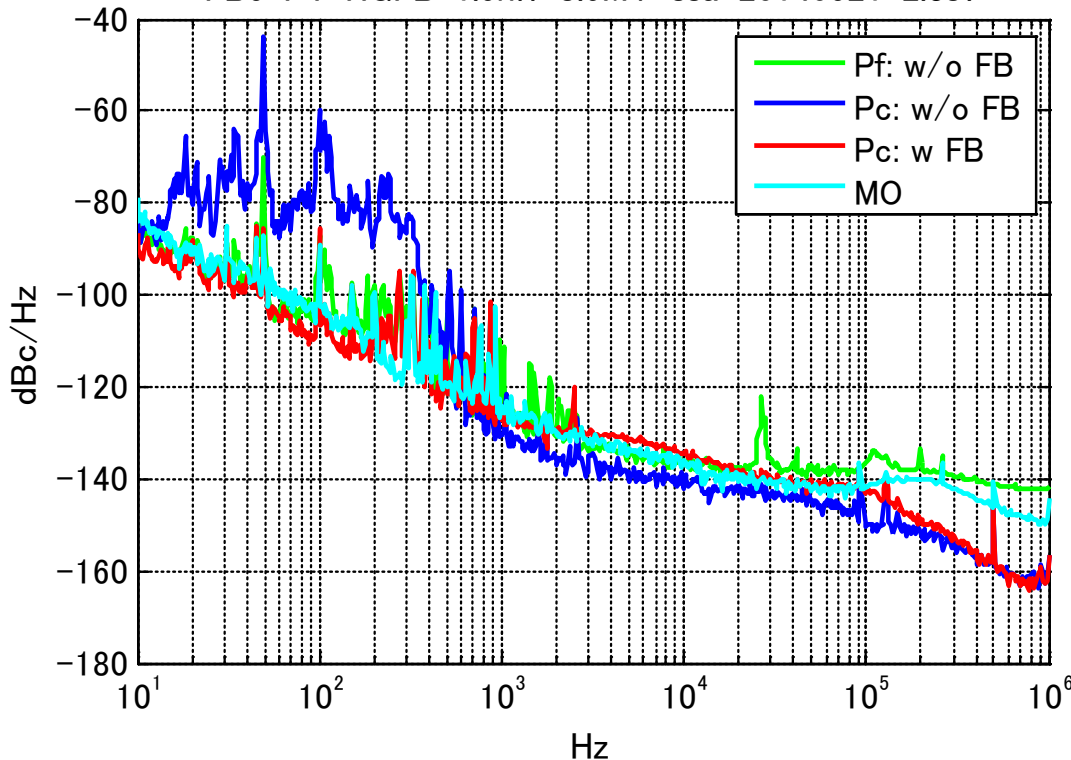
<今季からの変更点>

- ・Vector sumのところ(IJSC3)の移相器は、モーターで遠隔操作できるようにした。
- ・Buncher部のRF源は、8 kW半導体アンプに変更した。

Backup

Pf w/o FBの50Hzについて

FB5-PT-HGFB-1.5kW-8.6MV-ssa-20140521-2.csv



デジタルボード → IQモジュレータ → アナログ系 → 8kW 半導体アンプ → Pf
50Hzは、-80dB小さいので、励振側に混入していない。

IOT (Inductive Output Tube)

EFFICIENCY VERSUS OUTPUT POWER

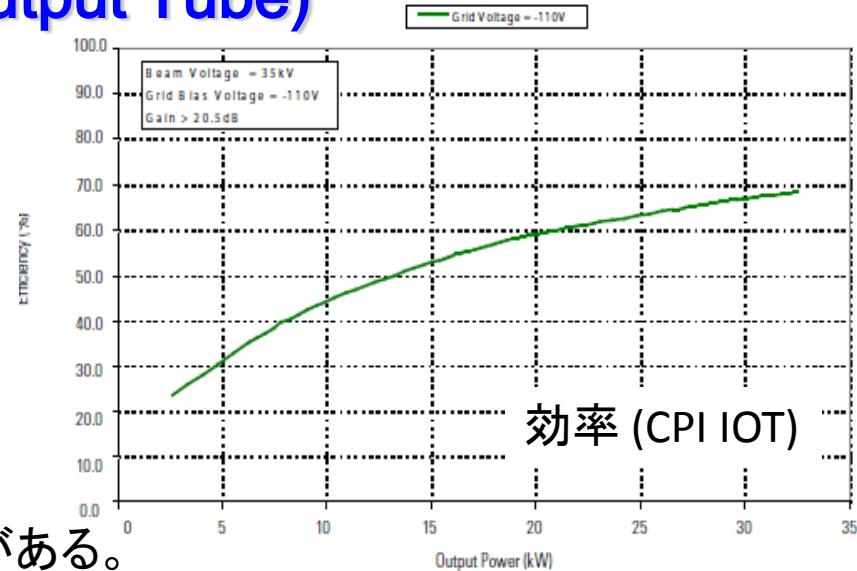
低パワー出力で高効率を期待して、
IOTを導入した。

20kW(L3社)と30kW(CPI社)のIOTを導入

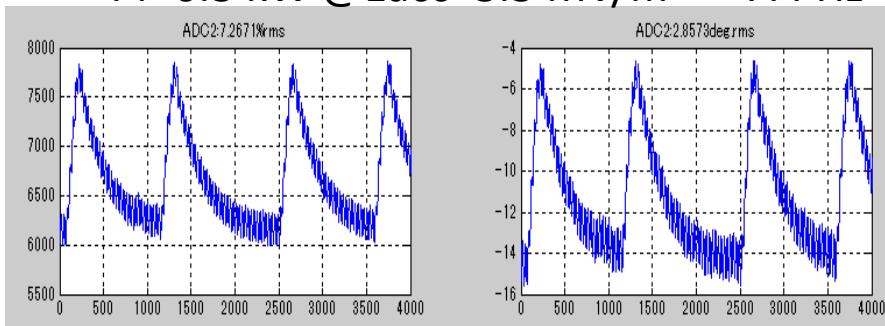
1kW以下で発振が見られた。

→グリッド電圧などパラメータを合わせこむ必要がある。

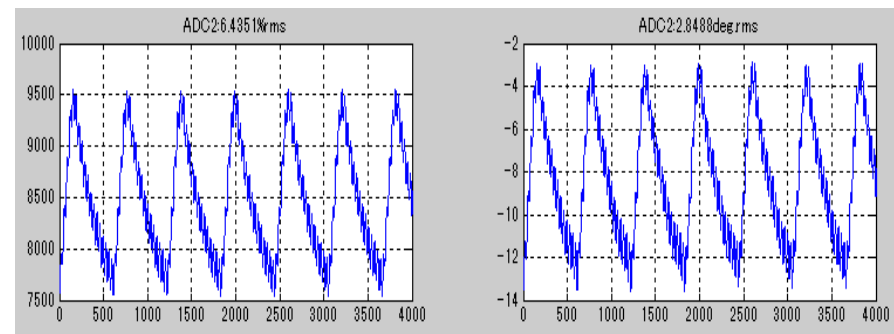
(今回の運転では、投入パワーが低く、影響されやすかった。)



Pf=0.3 kW @Eacc=3.3 MV/m 7.4 Hz



Pf=0.5 kW @Eacc=4.2 MV/m 17.36 Hz



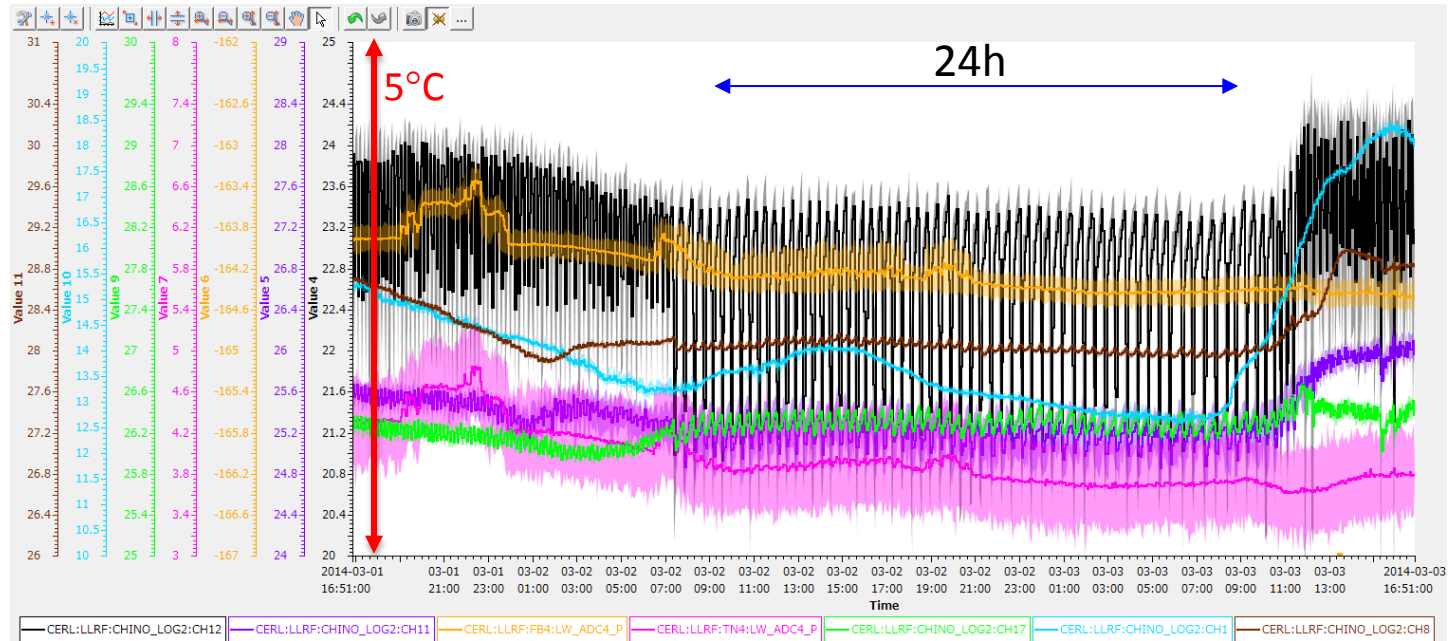
特に、L3社のIOTは、しばらく運転しないと、ヒーターをONするだけでアウトガスが
でやすく、真空でダウン頻発。エージングが必要。
基本的に出来が悪かった。室温に出力特性が影響する。

Low Level RF Temperature Stabilization



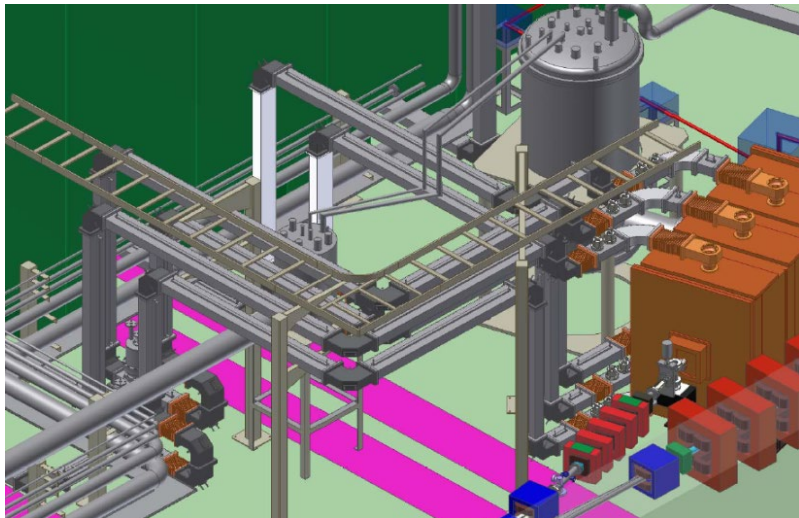
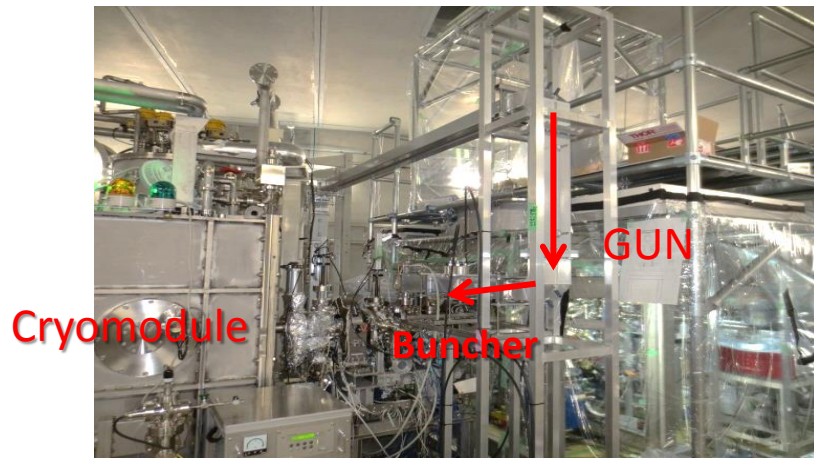
Temperature controlled hut

室温は $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ p-p (うまく制御できている場合)
 温度安定化ビニルハット内はその $\sim 1/10$ に抑えられている。
 床の断熱が悪いため、外気の変動を受けやすい。

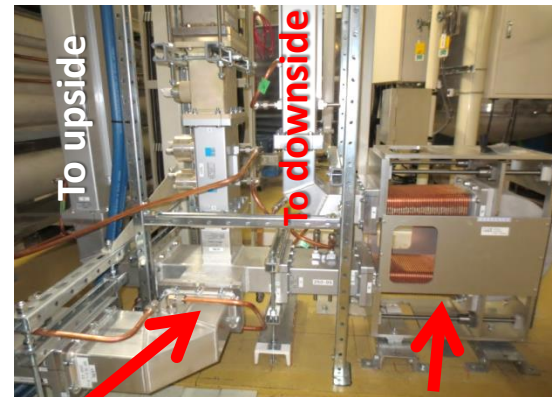


LLRF Room
 Outside (1/2のスケール)
 Local Reference Phase
 Inside of 19" rack (INJ)
 Inside of 19" rack (ML)
 Ref. phase transmitted by long cable

RF power distribution system (inside shield)



Space is narrow and very complicated.



Magic-T

Phase shifter ($\pm 33.5^\circ$)
: match RF phase between **top** and **bottom** input-couplers