

# cERL主空洞モジュールのパワーテスト --beam運転に向けたaging--

2013/12/25

阪井寛志、梅森健成、江波和宏、佐藤昌史、  
沢村勝、篠江健治、Cenni Enrico、古屋貴章

# 2012年度のcERL主空洞の性能評価試験 (2012年12月)

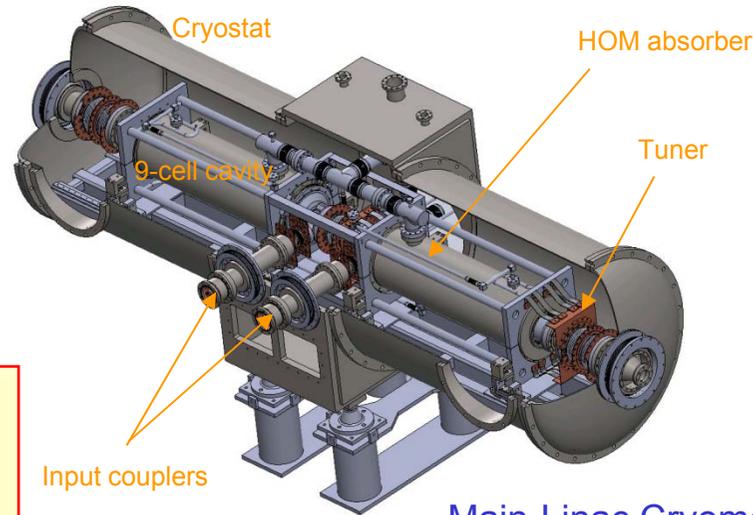
## Specifications

- RF frequency: 1.3 GHz
- Input power : 20kW CW (SW)
- $E_{acc}$ : 15 MV/m (目標)
- Unloaded-Q:  $Q_0 > 1 \times 10^{10}$

大電流100mA ERL運転を可能とする  
空洞設計 (HOM-damped cavity)

### Summary of performance

- $V_c=13.5-14$  MVで1時間keep可能。
- 8-10 MVからfield emissionが始まる。



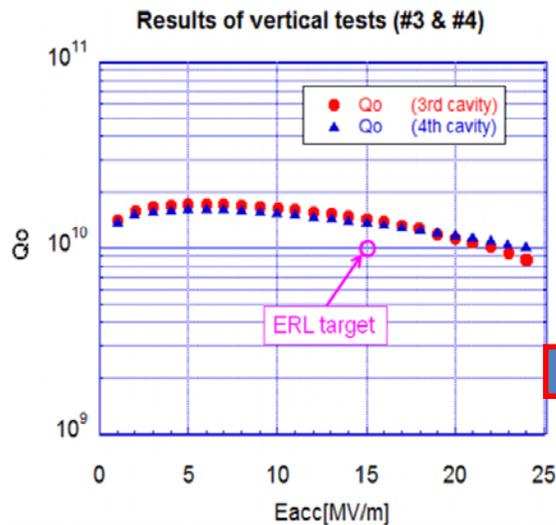
Main-Linac Cryomodule



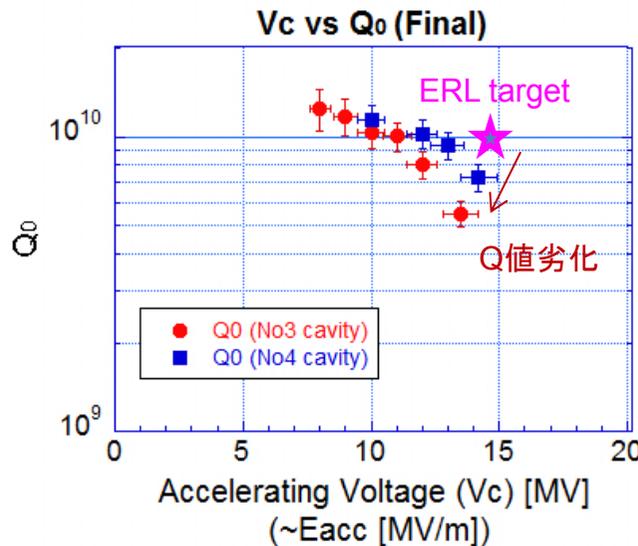
Assembly in clean room



Installation

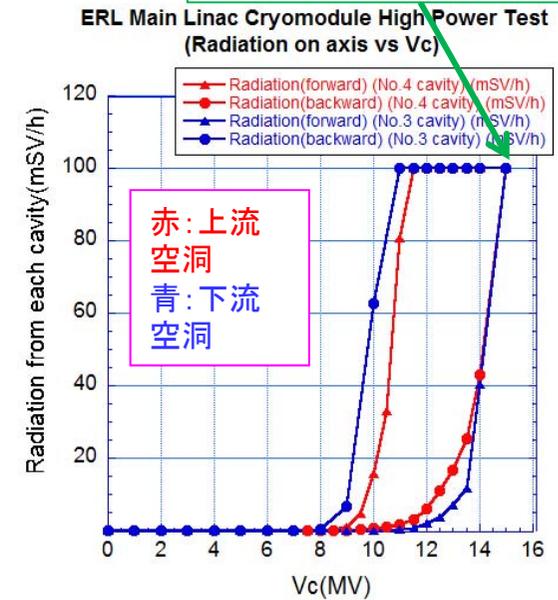


モジュール組込前空洞  
単体テスト->性能OK。



モジュール組込後性能劣化 field emissionによるradiation増加がみられる。

最大16MVまで印加した。



2013年はこの性能がさらに劣化せず、ビーム運転に持っていけるかを確認することが最優先事項

# cERLスケジュール2013年11月

11/11から冷却開始、ビーム運転に向けて8.3MV×2のkeepが可能かが目標

11

November

2013

平成25年

Sunday	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday
					1 前ページに記載	2 前ページに記載
3 文化の日	4 振替休日	5	6	7 ダンプ上 天井閉め 酸欠安全教育	8	9
		← ILソフト入替・確認 →		← インターロックシステム確認 →		
		← ケーブル配線等(電磁石、真空、モニタ) →				
10	11 <b>空洞冷却スタート</b>	12	13	14	15 IL自主検査 (終日人払い)	16
	← 300K →	← 空洞冷却(300K→80K, 3K/h) →				
17	18 cERL安全 教育訓練	19 放射線 教育訓練 9:50 監査	20 区域責任者 検査(10:00~)	21 主任者 検査(9:30~)	22	23 勤労感謝の日
	← 100K→4K →	← 9:00-10:00 最大出力 試験(人払い) →	← 空洞冷却 →		← 入射器&主空洞個別LLRF測定 (他グループの作業は可能) →	← 空洞4K →
		← 4K→2K →				
24	25	26	27	28 可能なら見学	29	30
← 空洞4K →	← 主空洞個別エイジング、LLRFテスト →		← 入射器エイジングと主空洞エイジング →			← 空洞4K →
	← 空洞冷却4K→2K →		← 空洞冷却(2K/深夜4K) →			

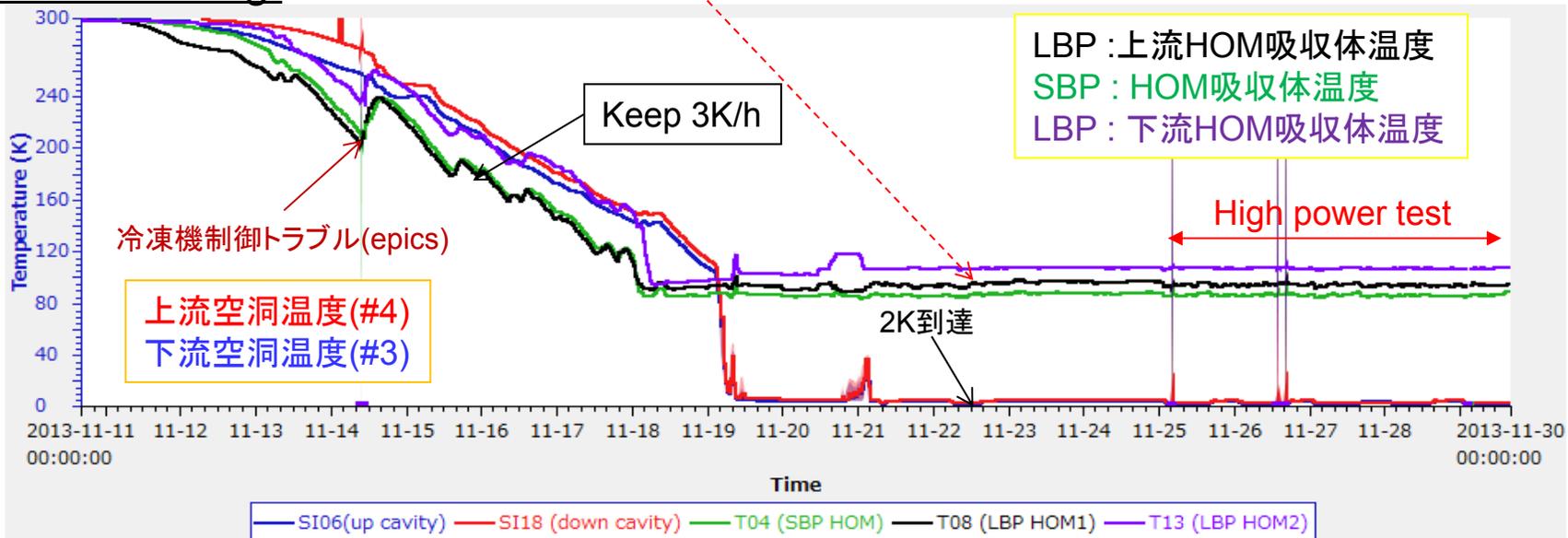
# Cryomodule Cooling to 2K

## 冷却条件

- ・80K領域に置かれたHOM damperにはferriteの割れを防ぐため、最大の冷却勾配3K/hourをkeep。
- ・他2K領域(空洞・ジャケット)、5K領域(5K配管)、80Kの上流、タワー部、下流部などの各温度領域を決めて、そのグループ内での温度モニター間の最大温度差50K以下になるように冷却を行った。

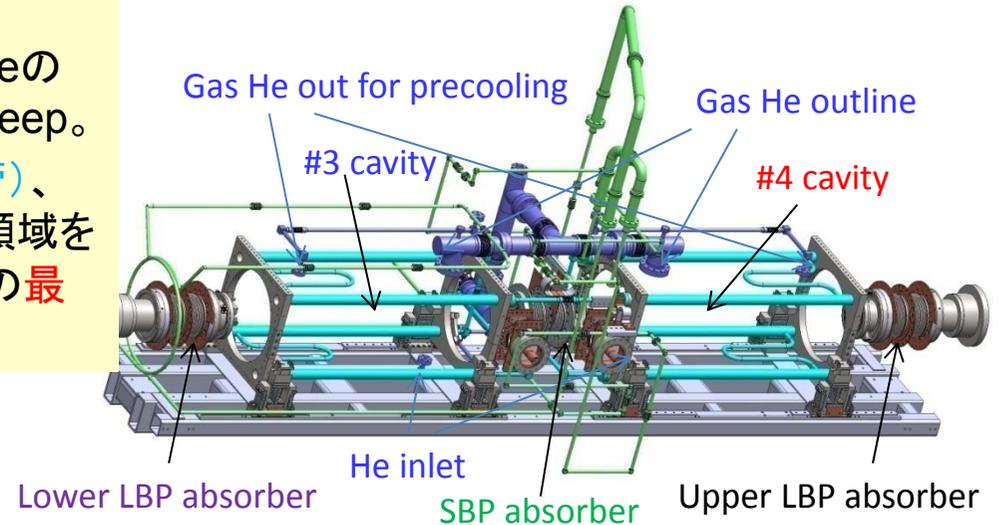
冷却後は80K&4Kは24時間常にkeep。

## History of 2k cooling



## Cooling pipe configuration

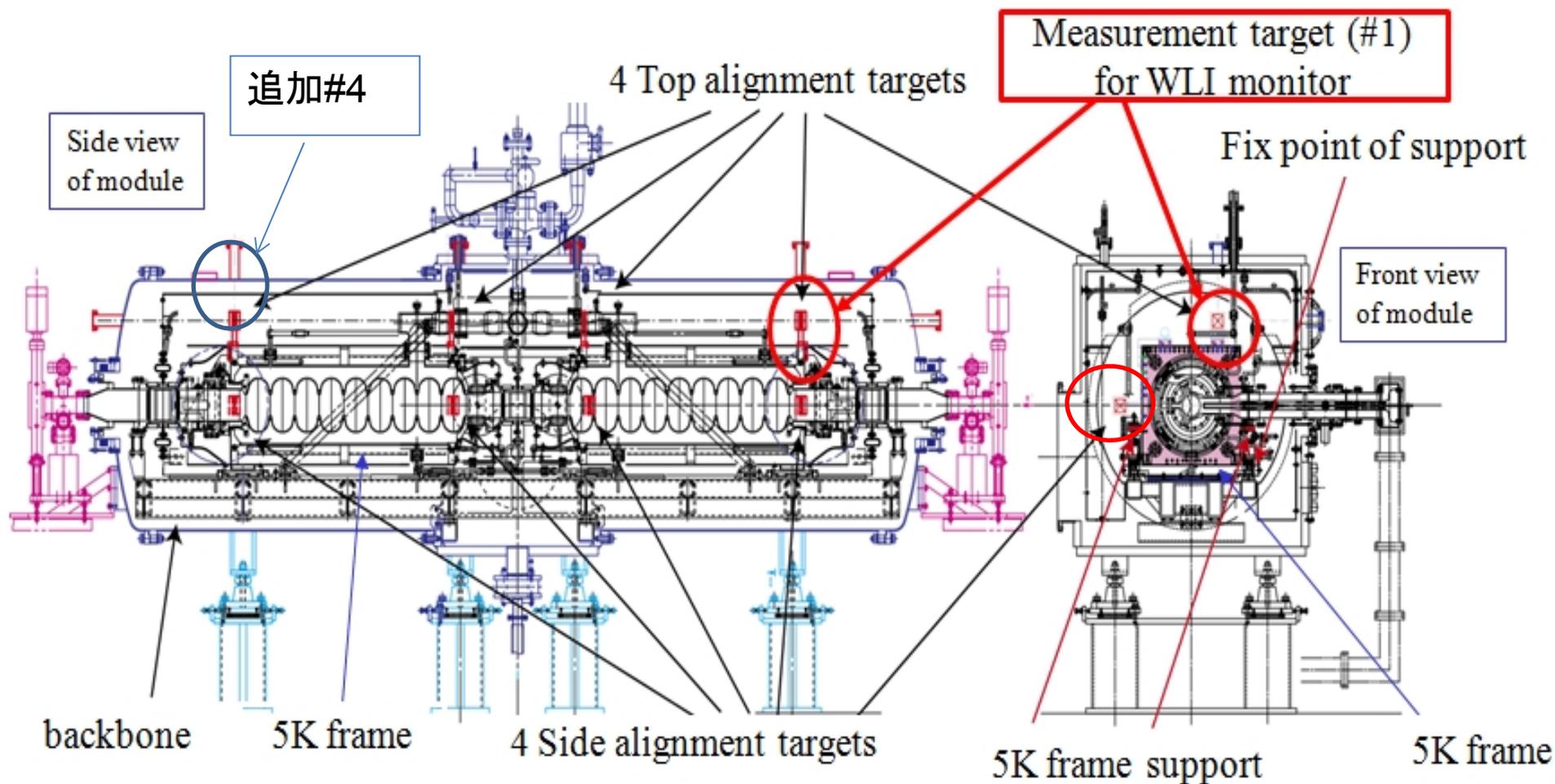
Green : 80K line  
 Blue : 2K line  
 Light blue : 5K line



今回は入射器と主空洞が初めて総合で冷却を行った。最初のうちは負荷のバランスが取れない&モニターや制御のトラブルがあり、3K/hでの冷却がかからないところがあり、speedが出せなかった。2週間かけて無事、2K到達。その後、週末や夜間は80K&4Kをkeep。パワーテスト時に朝から2Kにする。

## 空洞冷却中の位置測定

8個のアライメントターゲット + 白色干渉センサー(WLIモニター)を#1と#4に設置。



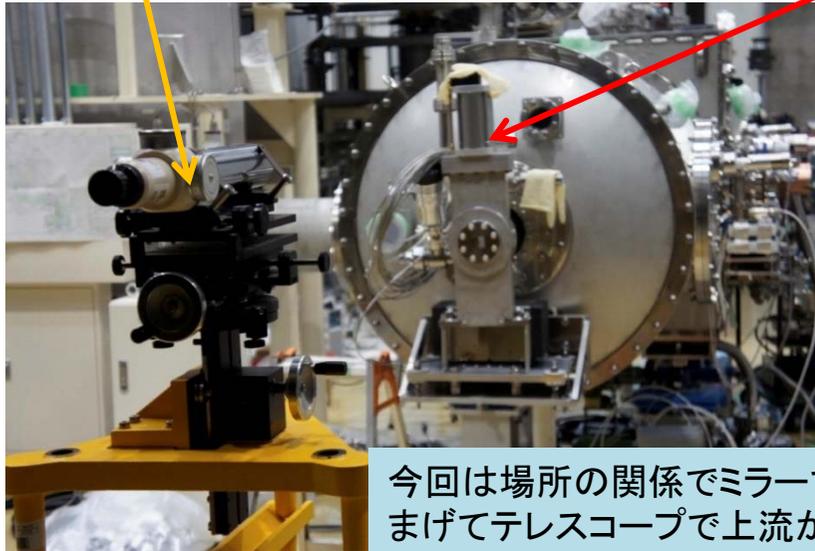
ターゲットは空洞前後についている。

# アラインメントテレスコープ

# 空洞冷却中の位置測定(各測定法)(\*)

断熱槽外にもターゲットがあり、これが室温部の基準(前後)となる。

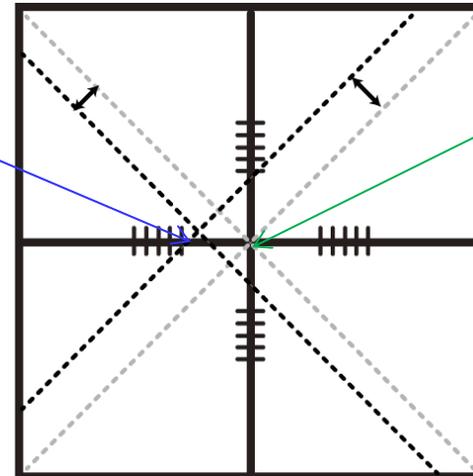
## ターゲット測定



ターゲットは平面精度を出した石英ガラスに0.1mmのラインでけがいたものを使用。

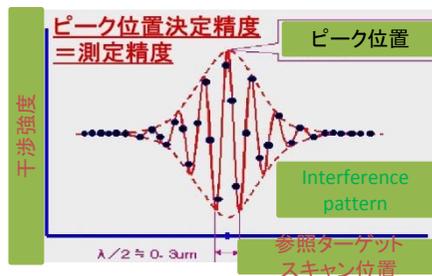
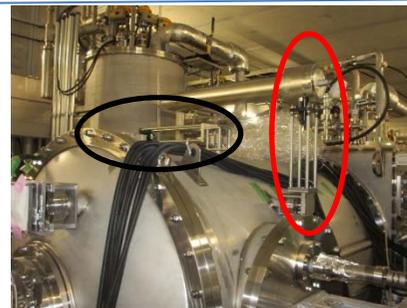
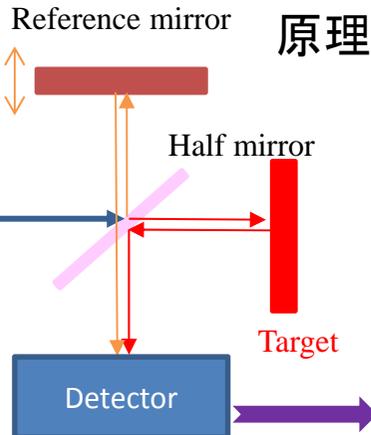
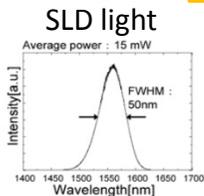
テレスコープ中心

断熱槽内ターゲット中心

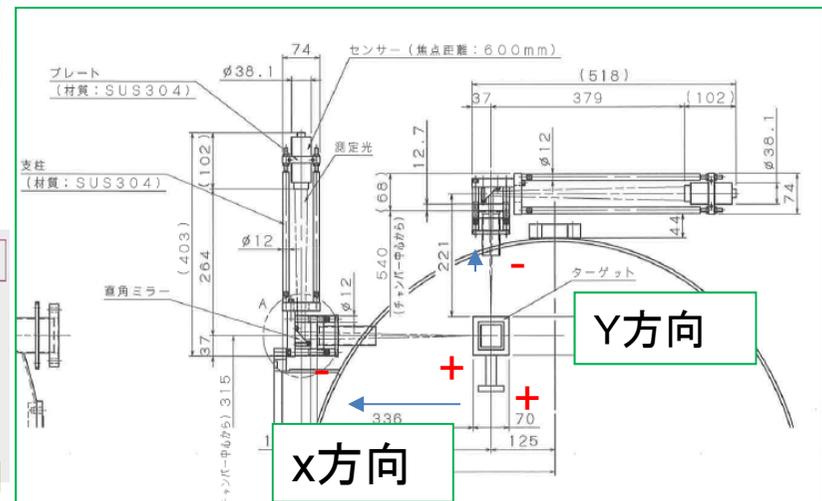


今回は場所の関係でミラーで90度まげてテレスコープで上流から覗いた。

## 白色干渉モニター

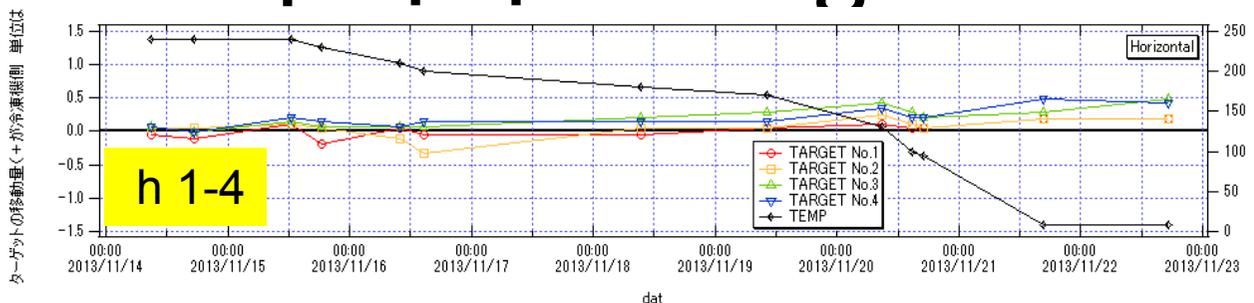


ターゲットの側面を常時断熱槽の外からモニター

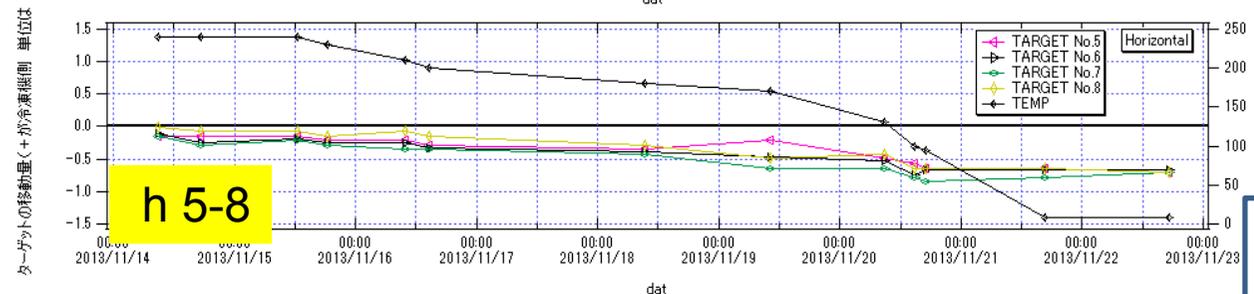


# 冷却中のAlignment

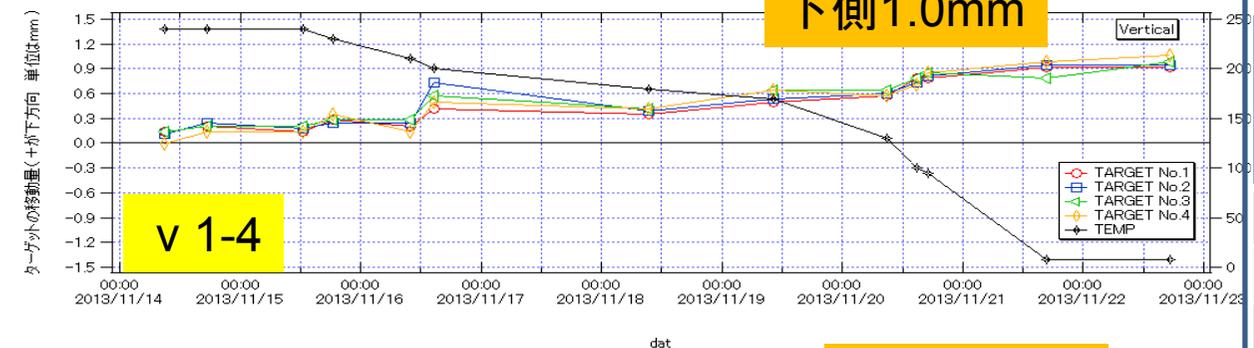
今回は1側から覗いた。  
4or8が精度が出にくい。



冷凍機側0.2-0.5mm  
(ここがエラーがでかい)



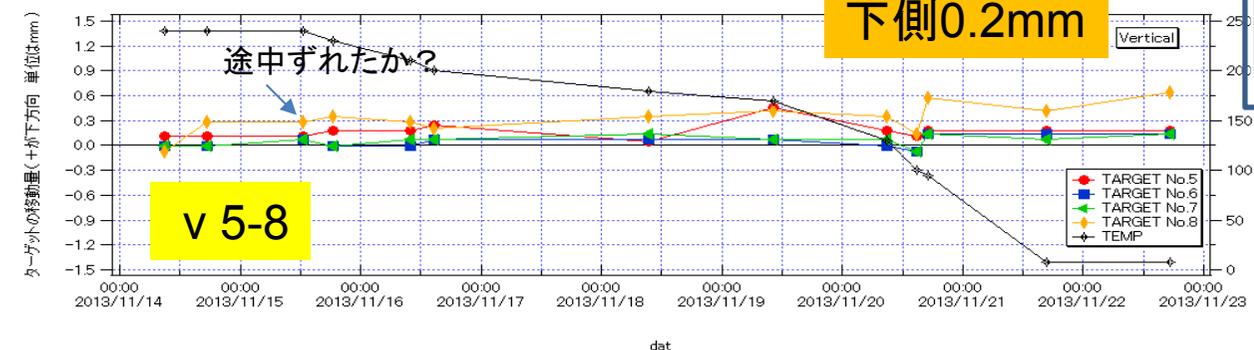
入力カプラー側  
0.7mm



下側1.0mm

2012年の冷却時の  
変化のデータ

Summary of displacements of targets and cavities between RT to 2K	Horizontal (mm)	Vertical (mm)
Target 1-4 (Average)	-0.11	-1.06
Target 5-8 (Average)	0.87	-0.37
Average movement of cavity center (from target 5-8)	0.39	-0.37

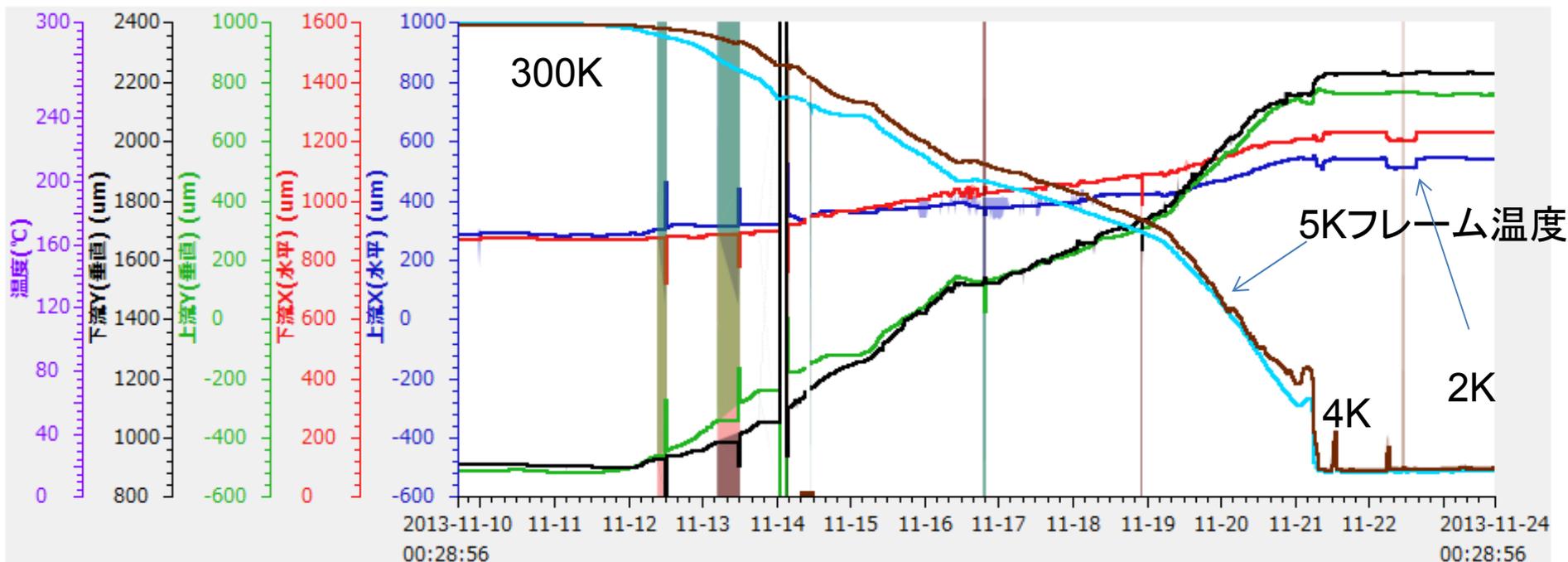


下側0.2mm

大体前回を再現している。

空洞中心の変化は0.4mm程度

# 白色干渉計での変位(2013.11.10-11.24)

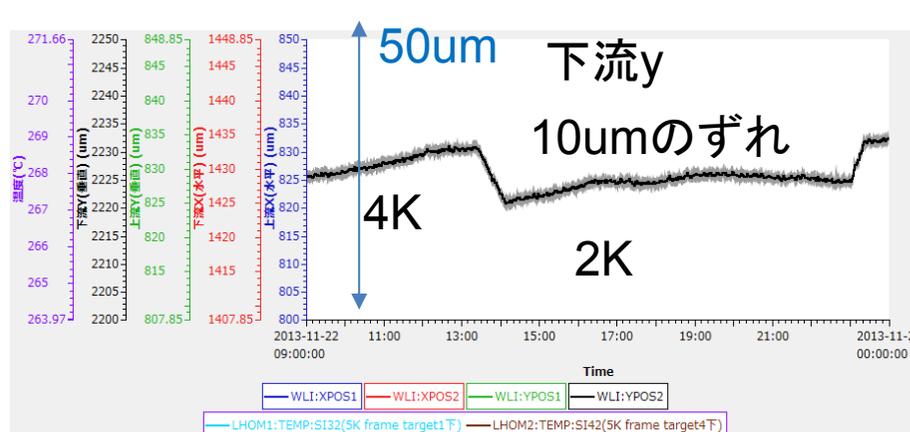
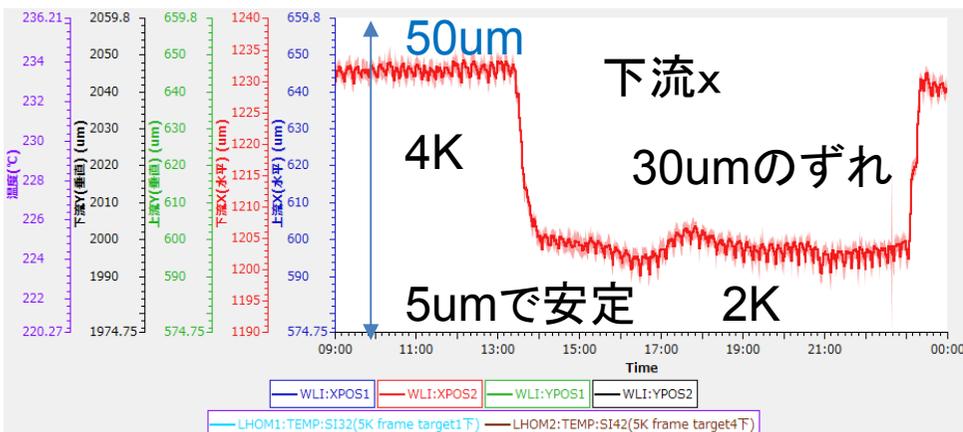


前回は再現

精度は±2um



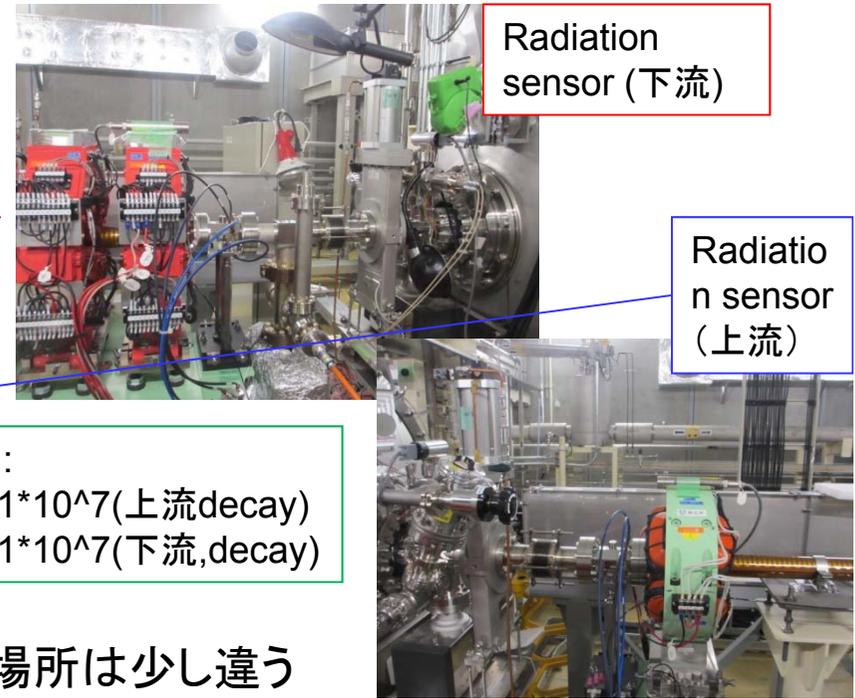
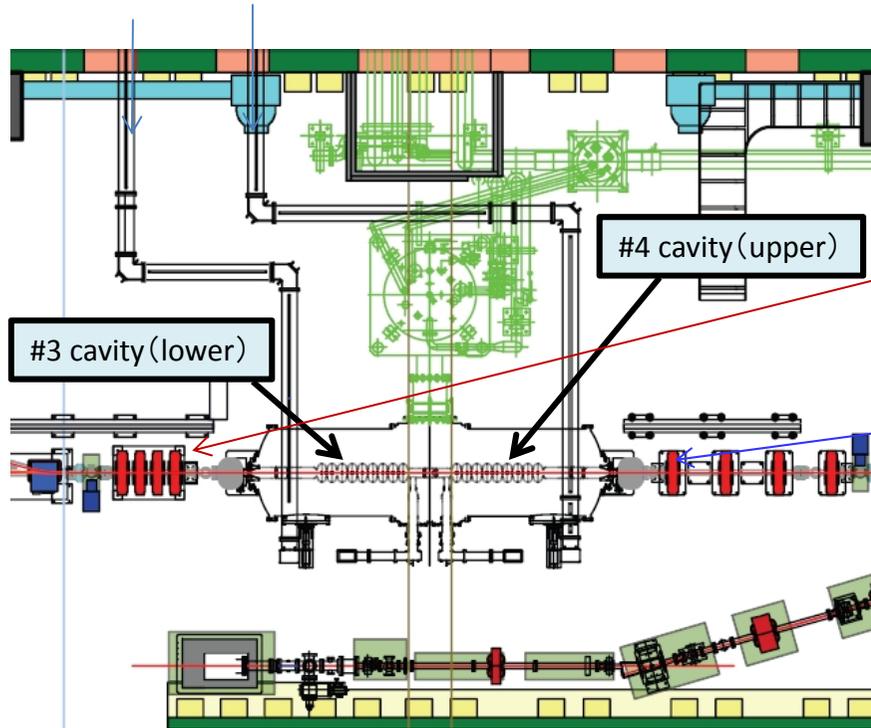
冷凍機側に0.2mm  
下に1.3mm  
大体ターゲットとあっている。



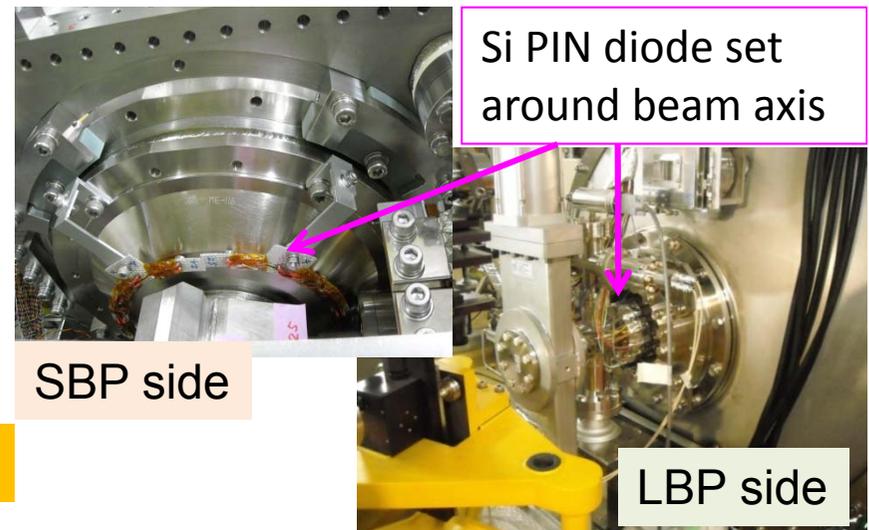
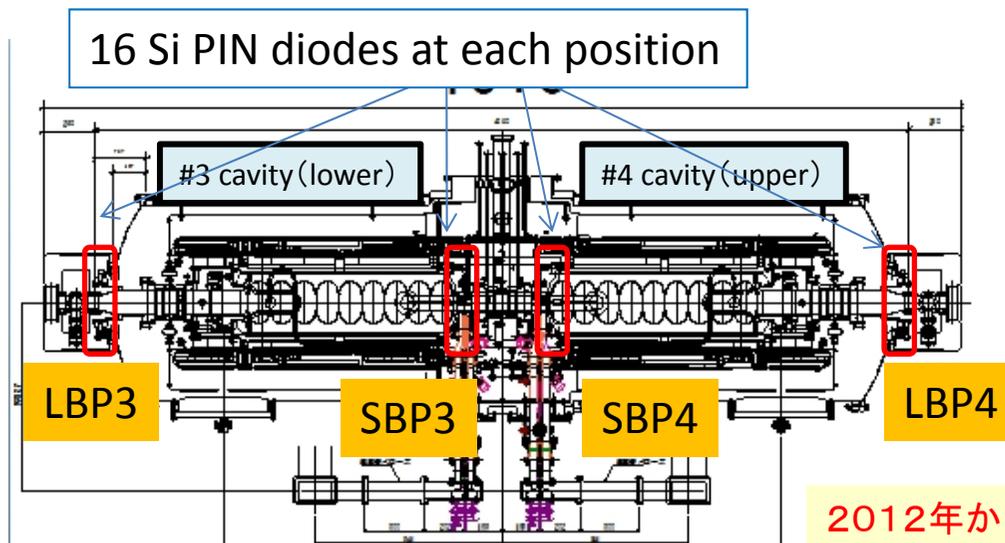
4Kから2Kでの減圧時に毎回、ターゲットの変位(10um(v),30um(h))が見られる。

30kW IOT 16kW Solid State Amp

# Setup of high power test at cERL



## PIN radiation profile monitor set around beam axis



2012年から設置しており、これで前回の放射線の比較を行う。

# High power test中やったこと(2013/11/25の週)

- System check (power meterなどの読みのcheck)
  - ITL check (真空, power level, 温度、N2 flow, 2K He 圧力, He 流量, He level, arc sensor)
  - 11/25 上流空洞エージング (local + 5MVまで)
  - 11/26 上流空洞LLRF study、下流空洞エージング準備
  - 11/27 下流空洞エージング、上流空洞LLRF study  
(Vc = 13MVまでエージング, Vc = 8.3MV 30分keep可能)
  - 11/28 (13:30-18:00 injectorエージング, 7MV/mまで3台)  
18:00~: 上流空洞再エージング  
(Vc = 12MVまでエージング, Vc = 8.3MV&10MVで30分keep)
  - 11/29 (11:00-16:30 injectorエージング、3台3.5MVで安定)  
18:00~: 下流空洞LLRF study, 最後はLLRF(FPGA)でALC&piezoのfeedbackを使い  
上下流空洞安定性check (8+8MV & 10+10MVで30分keep)
- SGでのlocal feedback

- 主空洞としては、最終的に両空洞で8.3MV&10MVでkeep可能であった。
- LLRF(FPGA)でALC+piezoを使って安定性checkを行った。  
low levelで $\Delta E/E_{acc} < 0.1\%$  r.m.s,  $\Delta\phi < 0.1^\circ$  r.m.s (両空洞とも(詳細は後日))
- Xray onsetは上流空洞: 6.4MV (>10uSv/h上流側)、下流空洞 8.0MV (>10uSv/h下流側)、(上流のXray monitorは下流より近い場所にしか置けなかったため、前回より少しonsetが下になっている。前回とは完全に比較できない。)
- PIN dode でのprofileは前回は再現しており、劣化はないようである。
- 8.3MVでラフに7W/cavityの熱負荷であった。

# Field history (エージング)

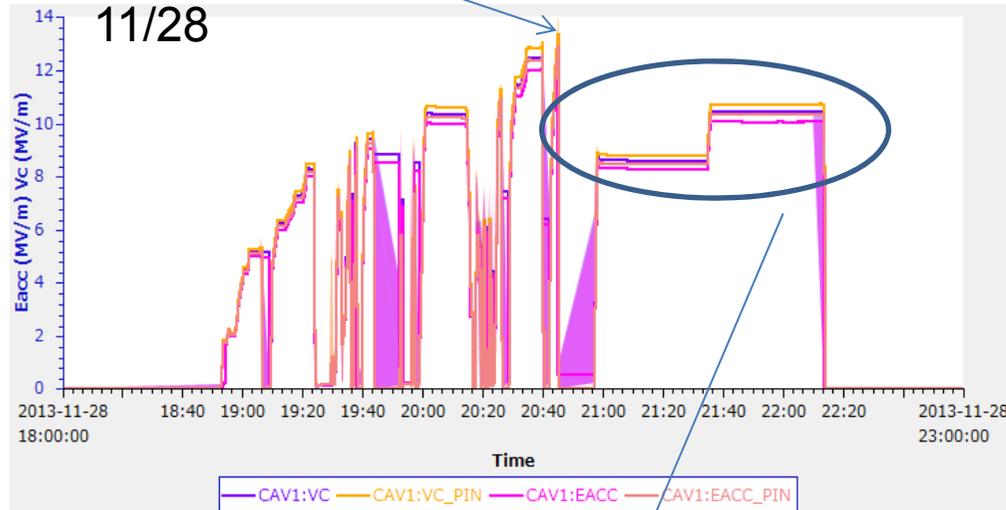
w/o ALC control (Frequency Feedback by local → SG)

Qt=7.10\*10<sup>11</sup>

Qt=7.07\*10<sup>11</sup>

12MVまでエージング  
上流

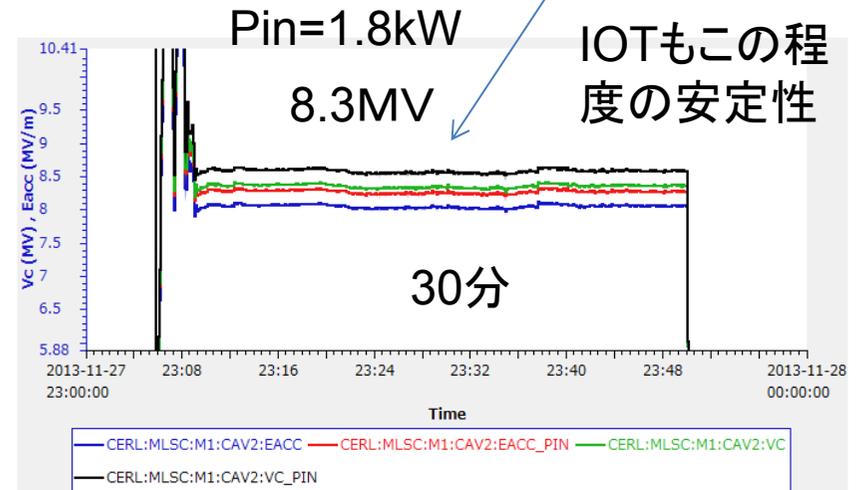
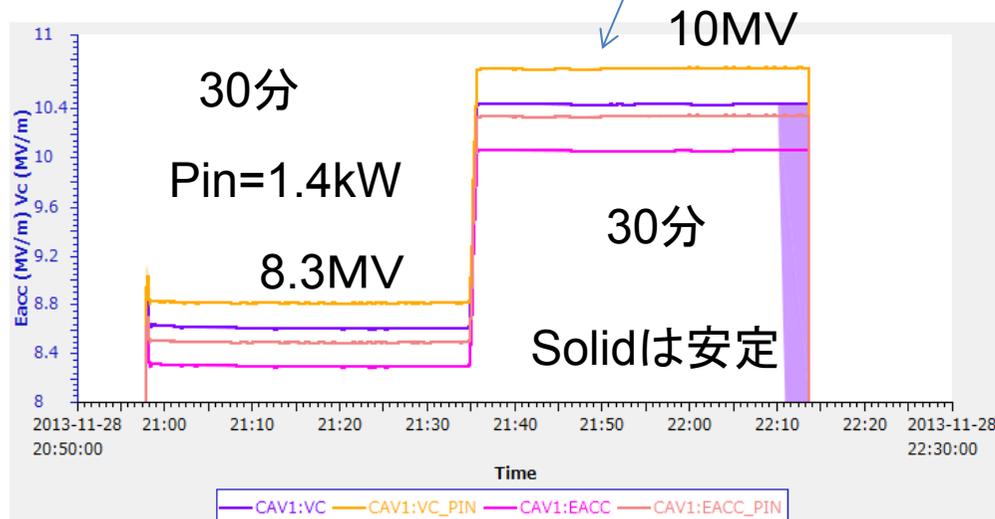
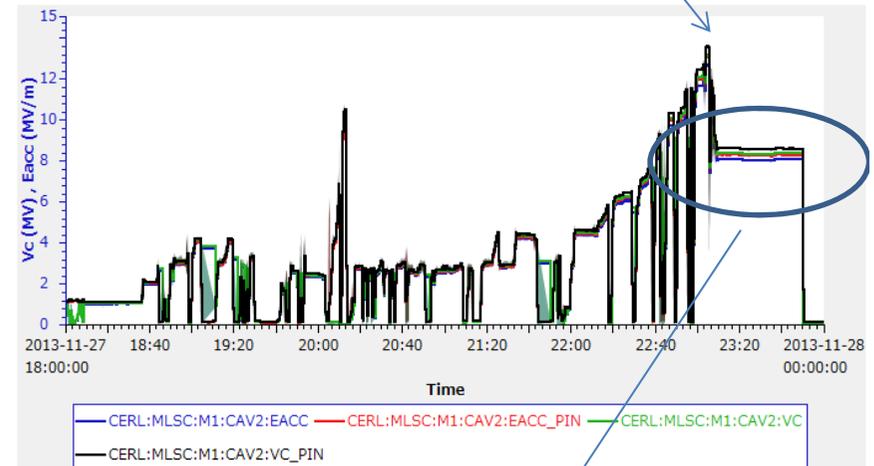
Pin,Ptでの  
加速勾配の違い  
は3%程度



Pin,Ptでの  
加速勾配の違い  
は4%程度  
11/27

13MVまでエージング

下流

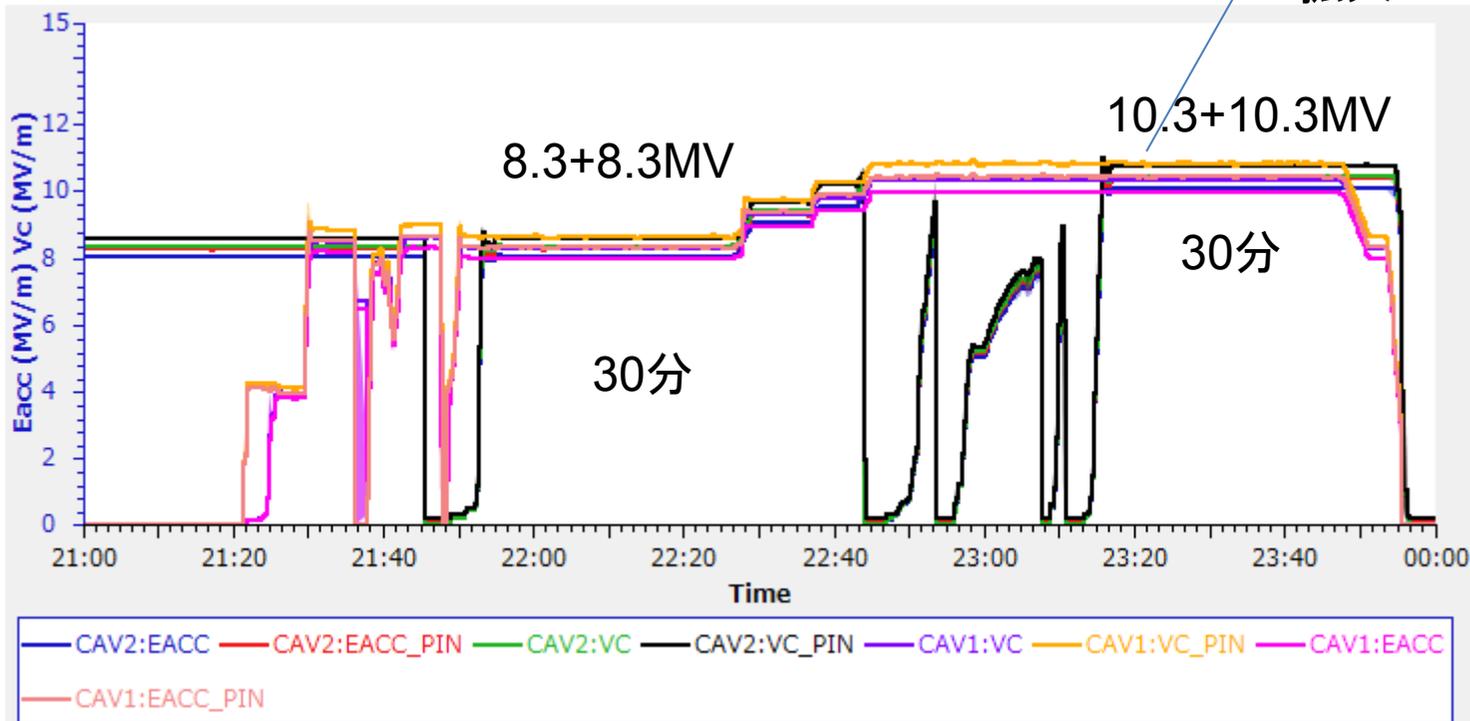
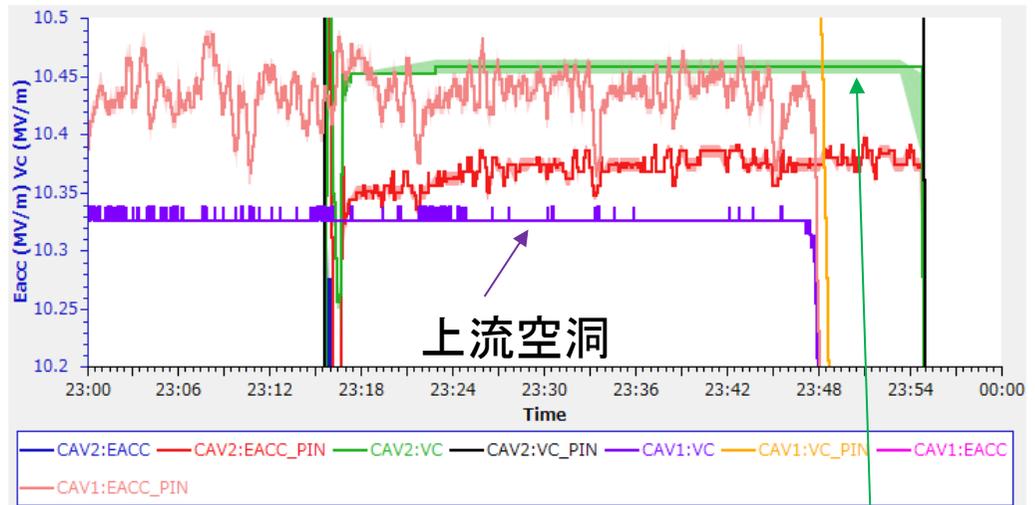


IOTもこの程  
度の安定性

# Field history (with piezo&ALC feedback by FPGA)

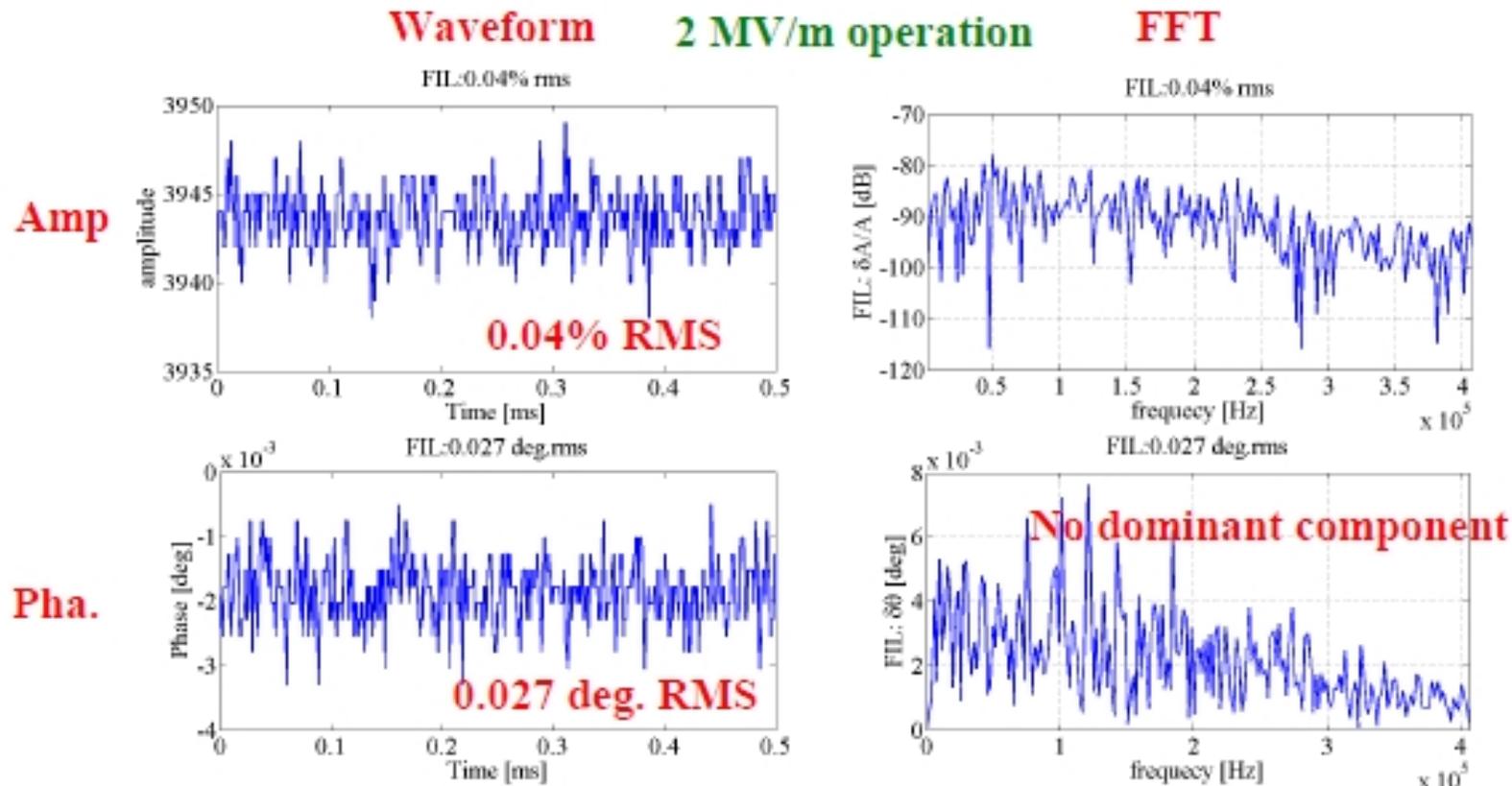
11/29に  
FPGAを用いて  
2台の運転を行う。

piezoのfeedbackで安定に  
運転が可能であった。  
Aging効果もあり、fieldはすんなりあがった。  
Fieldの安定性は三浦、Qiuから詳細  
 $\Delta E/E = 0.02\%$  ,  $\Delta\phi = 0.02\text{deg r.m.s}$ 達成。



下流空洞

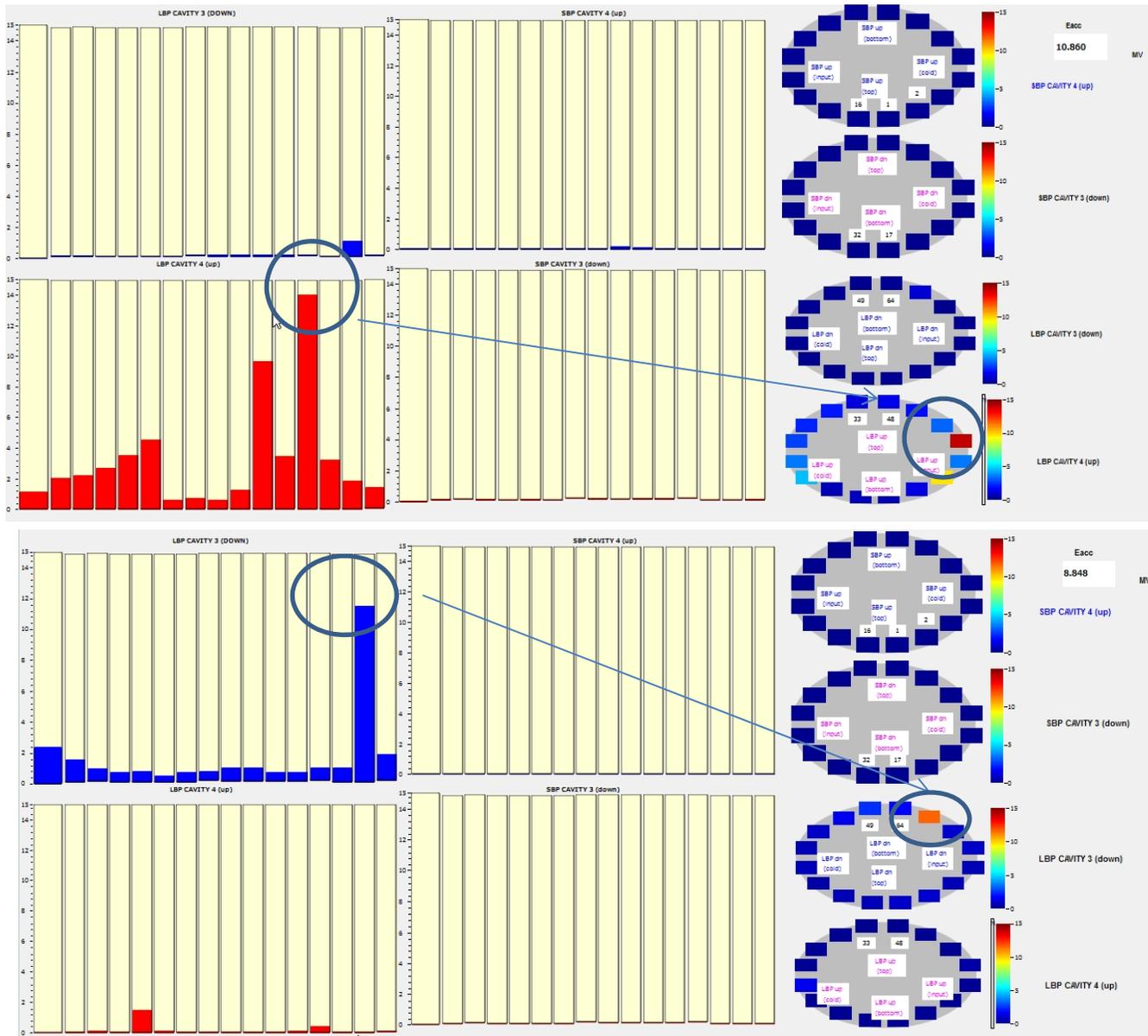
# Feedback 詳細(preliminary)(三浦、道園、Qiu) ML1 closed loop operation



- The stability of ML1 is **0.04%** RMS for amplitude and **0.027 deg.** for phase, both satisfy our requirement (0.1% for amplitude and 0.1 deg for phase).

実際には8.3MVでも上記同様  
<0.1%Amp&<0.1deg phaseを実現している  
詳細はまたQiuさんから

# Xray map(片側ずつ)

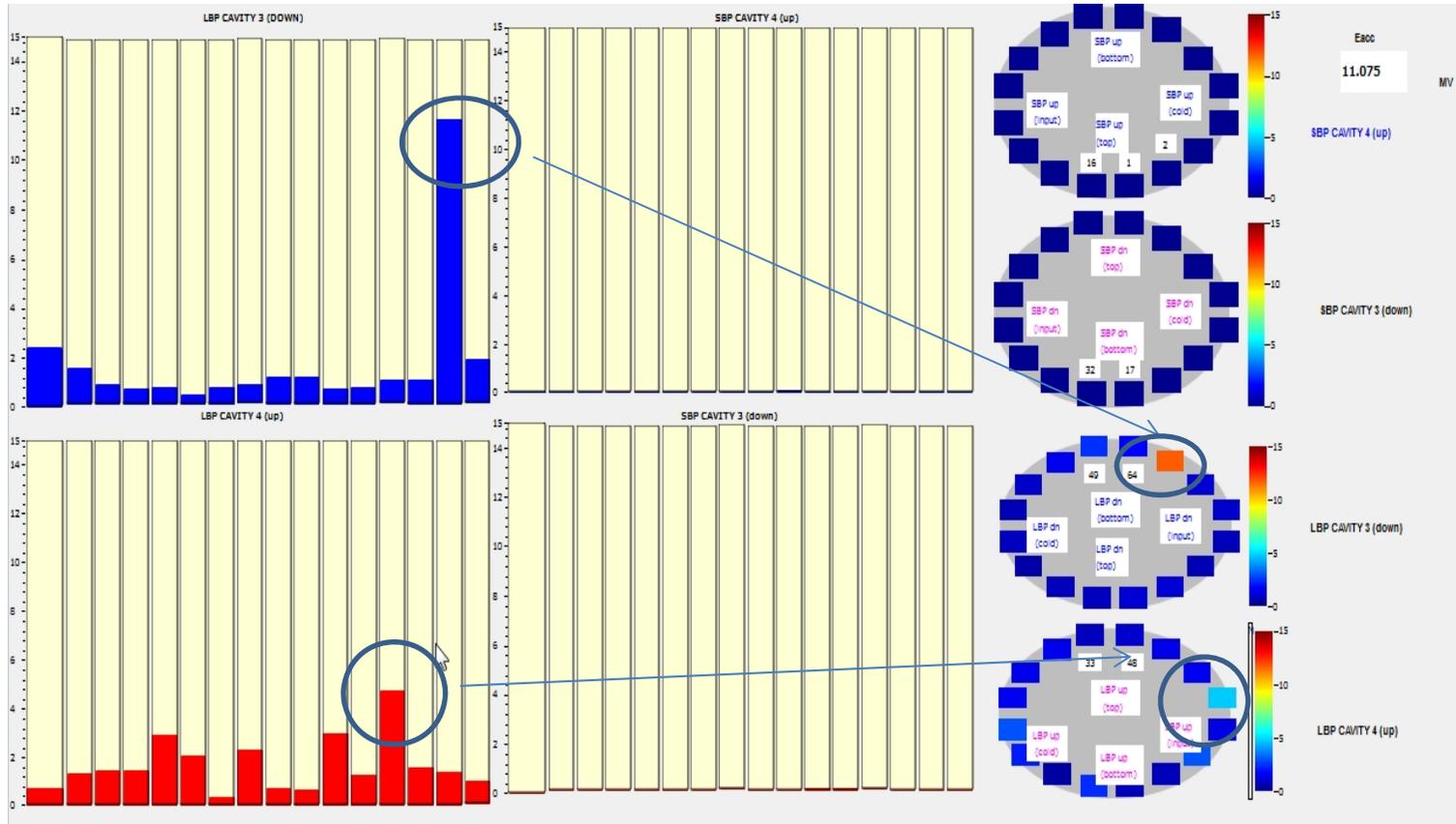


上流10MV  
前回と同じ場所

前回との詳細な比較は同fieldのデータと重ねるまで少しお待ちください。

下流10MV  
前回と同じ場所

# Xray map(10.3MV+10.3MV)



10.3MV + 10.3MV total : PIN profileのpeakの位置は変わらず。互いの空洞同士でのField emission増大はなかった。(phaseは違う)

# cERLスケジュール2013年12月

# 12

# December

# 2013

# 平成25年

Sunday	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday
<b>1</b> レーザー光路調整(低電力) 機構内加速器定期検査 空洞4K	<b>2</b> ローディングチェンバーク 空洞4K	<b>3</b> 合流磁石角度修正 電磁石通電(不定期) 空洞冷却(昼間2K/夜間4K)	<b>4</b> カソード活性化 空洞冷却(2K/深夜4K)	<b>5</b> 15:00 cERL放射線定期検査 空洞低電力測定	<b>6</b> 14:00 コミッショニング打合せ 空洞GV動作試験	<b>7</b> 半導体アンプテスト 空洞4K
<b>8</b> 空洞4K	<b>9</b> 空洞冷却4K→2K 入射器なし主空洞2台同時運転 with LLRF	<b>10</b> バンチャー空洞エイジング(主に午前) 入射器エイジング、入射器+主空洞同時運転	<b>11</b> 空洞冷却(2K/深夜4K)	<b>12</b> 空洞GV動作試験	<b>13</b> 空洞GV動作試験	<b>14</b> 空洞4K
<b>15</b> 空洞4K	<b>16</b> cERLコミッショニング 空洞冷却(2K/深夜4K)	<b>17</b> cERLコミッショニング	<b>18</b> 空洞冷却(2K/深夜4K)	<b>19</b> 空洞冷却(2K/深夜4K)	<b>20</b> 空洞冷却(2K/深夜4K)	<b>21</b> 昇温
<b>22</b>	<b>23</b> 天皇誕生日	<b>24</b>	<b>25</b> 昇温	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>
<b>29</b>	<b>30</b>	<b>31</b>				

## 12/5の週 & 12/12の週やったこと

- 先週: ML チューナー 詳細study & 空洞振動測定。(@2K)
- 12/9(Mon) LLRF study (manual check & optimum feedback control search )
  - Local radiation survey (MLSC 10MV+10MV → no radiation except for 導波管 (7uSV/h))
- 12/10(Tue) 入射空洞 + 主空洞同時運転
  - Total energy 20MeV (ML(8.3+8.3MV) & Inj 2.5MV)
  - Total energy 24MeV (ML(10+10MV) & Inj 3.1MV)
- 12/11(Wed) LLRF study again (feedback condition search & phase scan)
  - 下流のfeedbackに対してはI gainをかけるとSpike(a few %)が見られており、そのspikeの原因を見つける & feedbackの条件だしをした。
- 12/12(Thu) 放射線survey (total energy 20MeV → 24MeV)  
& He loss measurement
- 12/13(Fri) 真空ITL check & 再aging

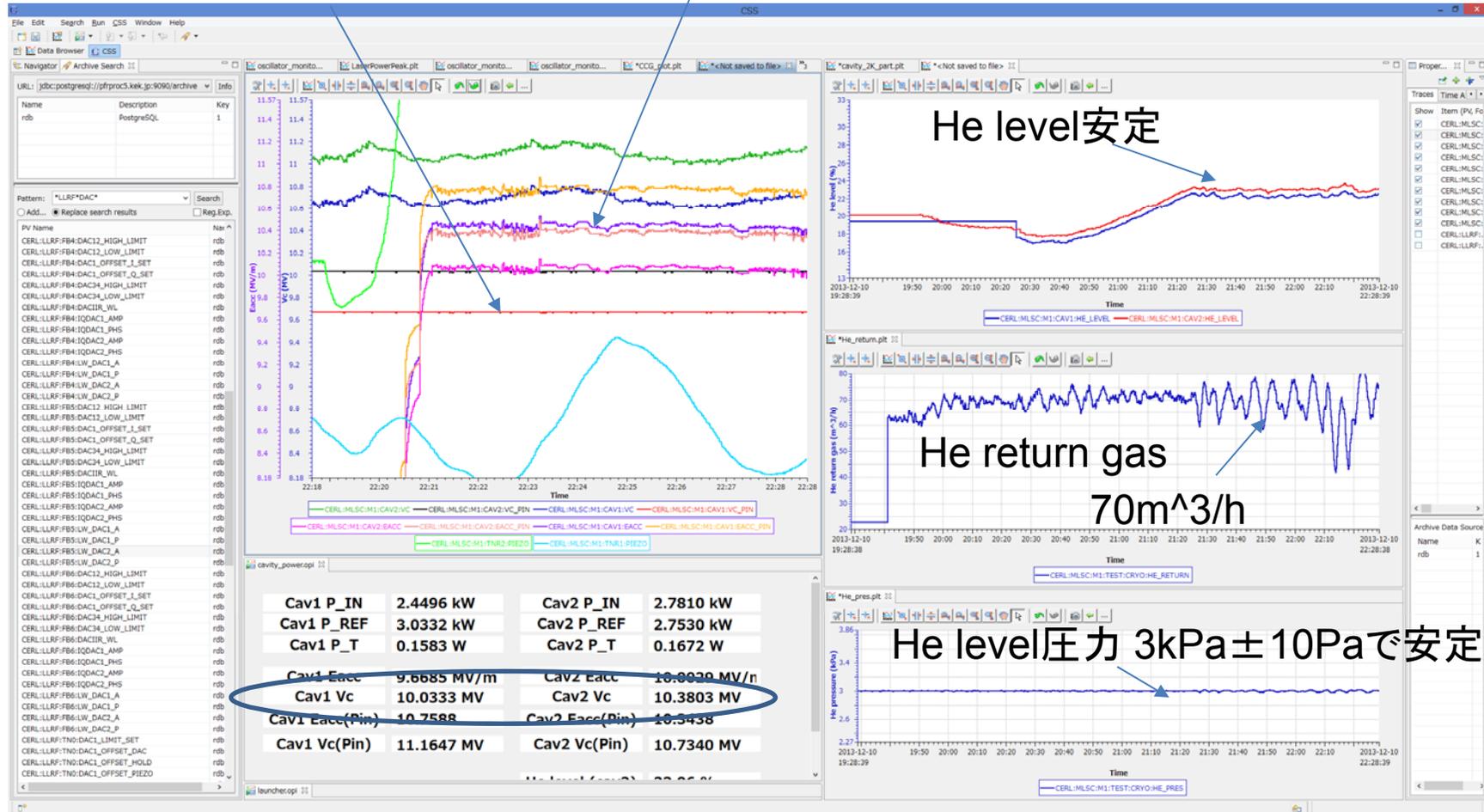
### Brief summary

- LLRFのstudyを行い、上流下流とも10MV+10MVでAmp < 0.1% , phase < 0.1%で安定に運転する条件を見つけた。コメントとして、ML2のIOTの影響が不安定であるのとLLRFのI gainの制御がまだ完全に理解できていないため、ML2に関してはP gainのみで制御して、上記安定性を確保している。これらの理解を深めることとIOTからSSAに変更する作業は1月に行いたい。
- 冷凍負荷としてはML (10MV+10MV) +Inj 3.1MVで最大70m<sup>3</sup>/hのHe gas量であったが、maxの80m<sup>3</sup>/h内でkeep可能であった。したがって、24MeV運転までは可能である。
- 上記24MeV運転に対しても放射線としては天井も含め0.2uSV/h以下であった。
- 来週の運転に向けてはOK。

# 12/10 (Inj 3.1MV+ML10MV+10MV)熱負荷テスト

Vc(ML1):10.0MV

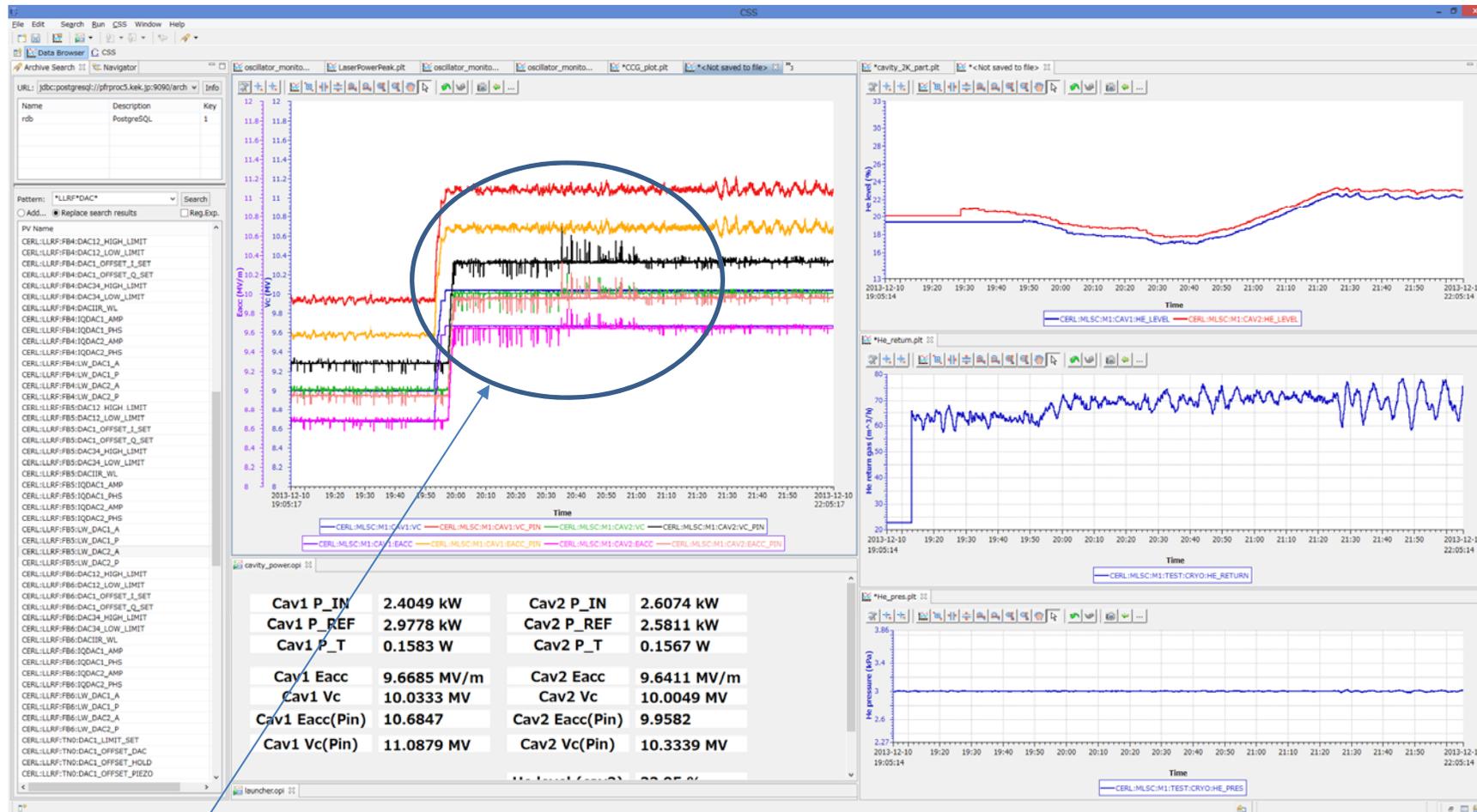
Vc(ML2):10.4MV



Injector 3.1MV(3空洞), 10MV (ML1), 10.4MV (ML2)で最大24MeV運転まで可能な状況で熱負荷テストを行った。冷凍機的能力80m<sup>3</sup>/hに対し、70m<sup>3</sup>/hで収まった。

冷凍機としては24MeV運転まで問題ない。

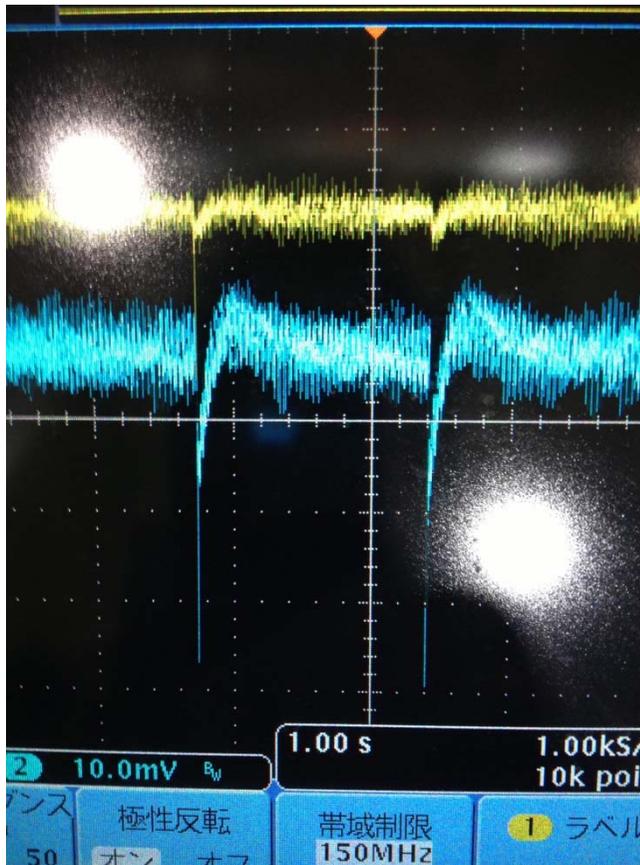
# Something spike (12/10)



LLRFの調整時特にIOT側でこのような現象がみられた。これは最後にはboardにさしているD-subの問題だということが判明した。

# Pin and Pt signal @2013/Dec/10 ~22:00

Cavity 2 (fed by IOT) 10MV

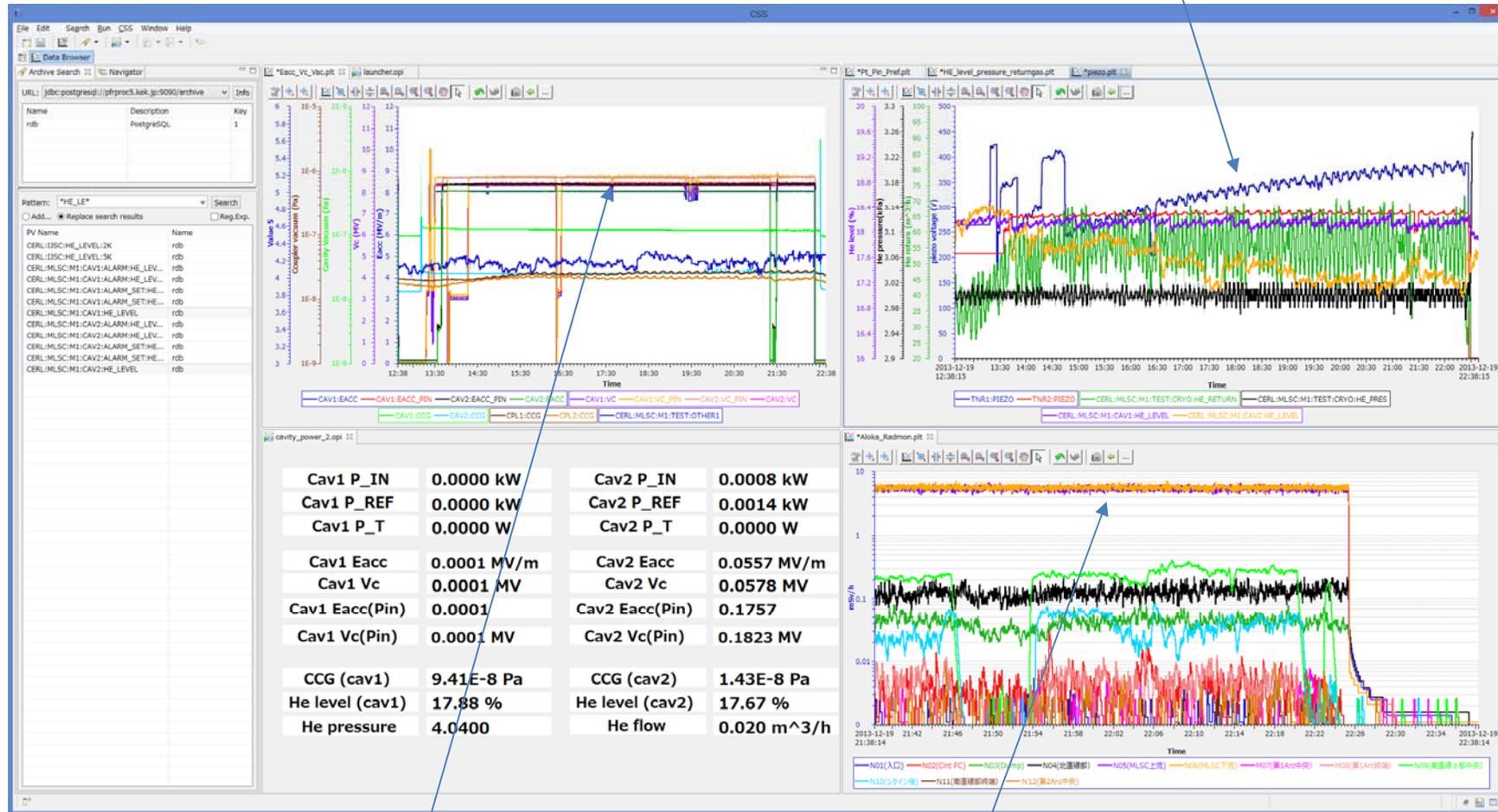


CH (Color)	Signal	Oscilloscope setup	Pin and Pt drop
CH1 (yellow)	Pin	5mV/div, ~30mV offset	~10mV (~30%)
CH2 (Blue)	Pt	10mV/div, ~600mV offset	~35mV (~5%)

# After LLRF optimize (operation status) (12/19)

spikeは消えて、安定して運転ができるようになった。

上流Piezoが上がり続ける



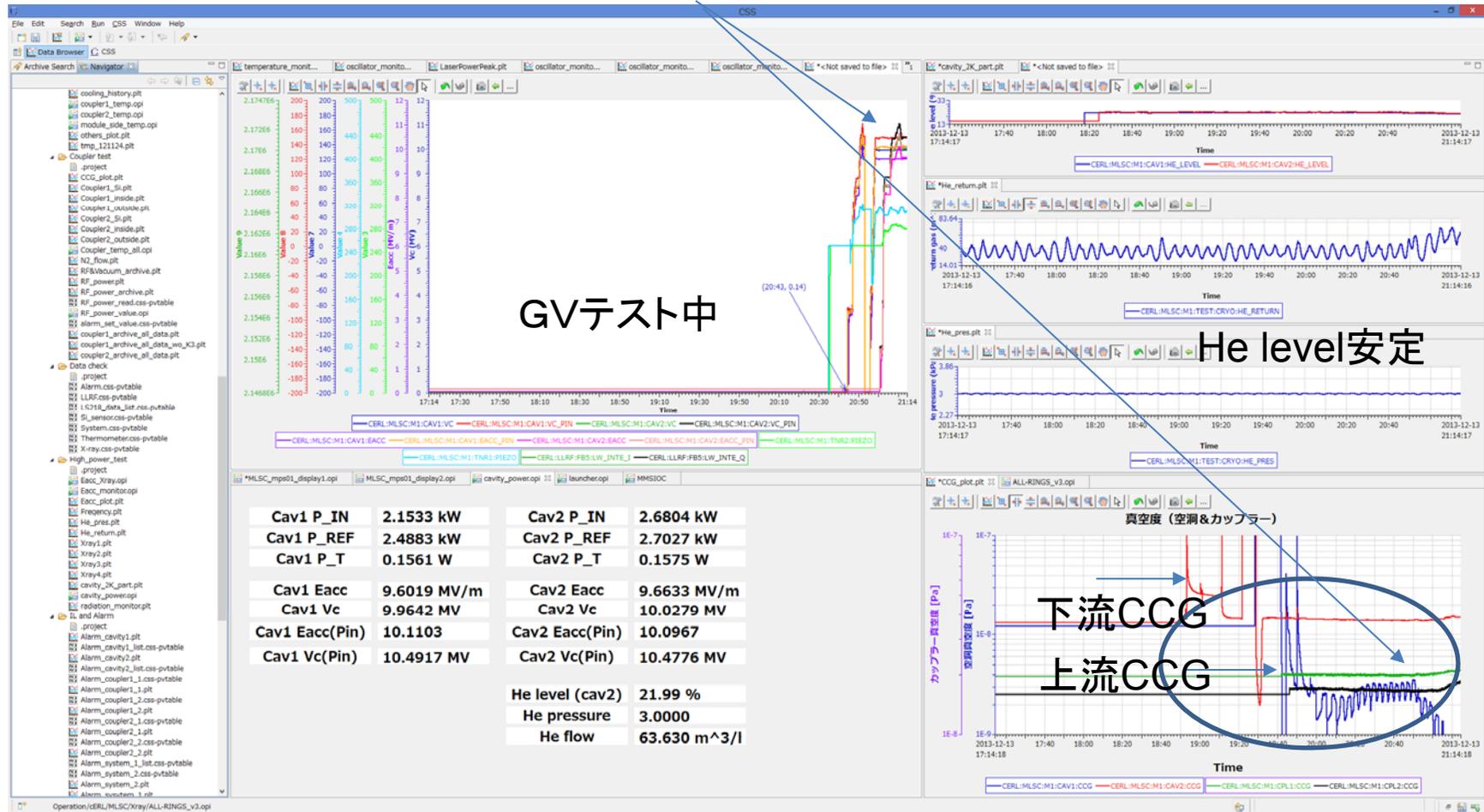
keep 7hours (2miss operation for high gain)

Radiation 4mSV/h@8.3MV

ピエゾの長期的な変動の様子を追う必要あり。( )

# GV open/close後(12/13)

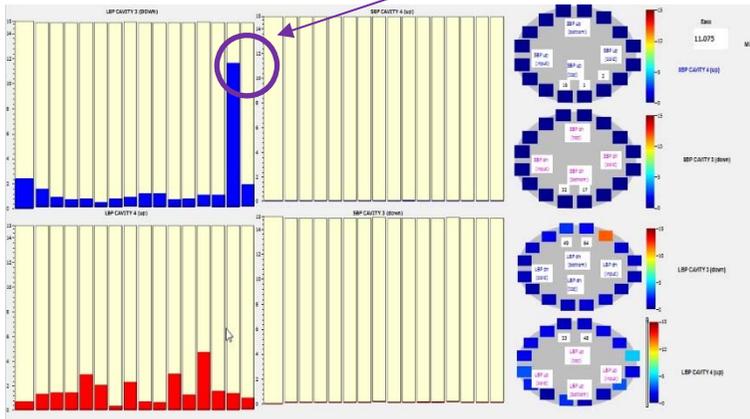
10MV+10MV



Gvopenで真空は跳ね上がるが、そののち、パワーを投入しても、真空悪化は見られなかった。

# After GV open 10MV+10MV

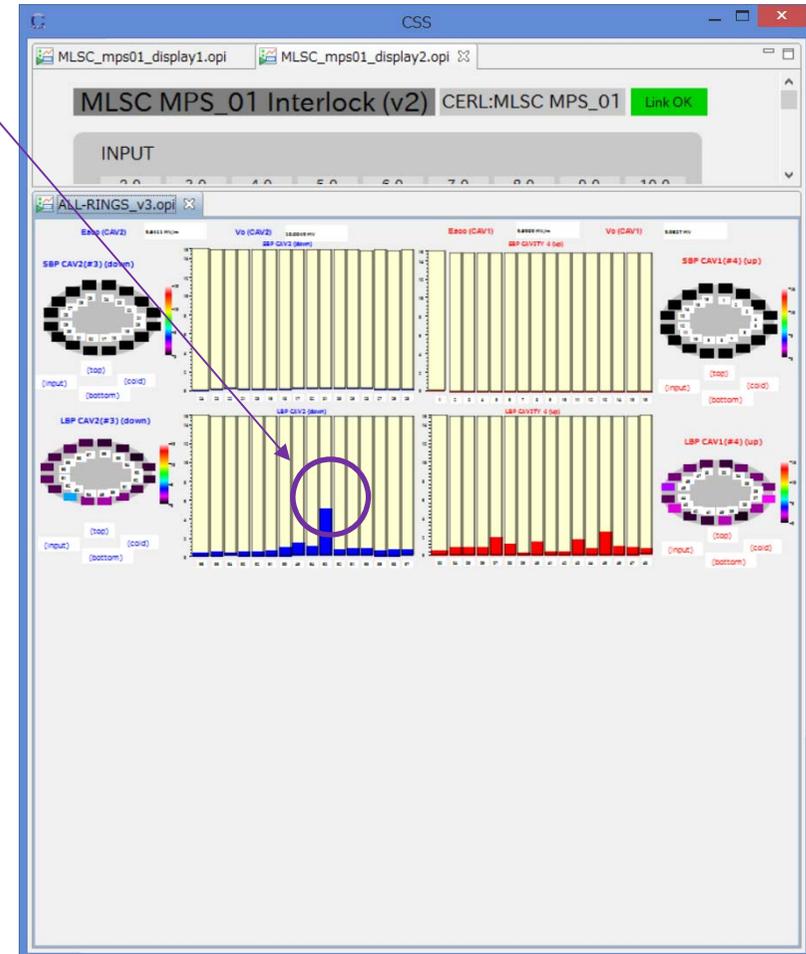
わかりづらいですが、同じピーク。(ソフト変更のため)



Before(10.3MV+10.3MV)

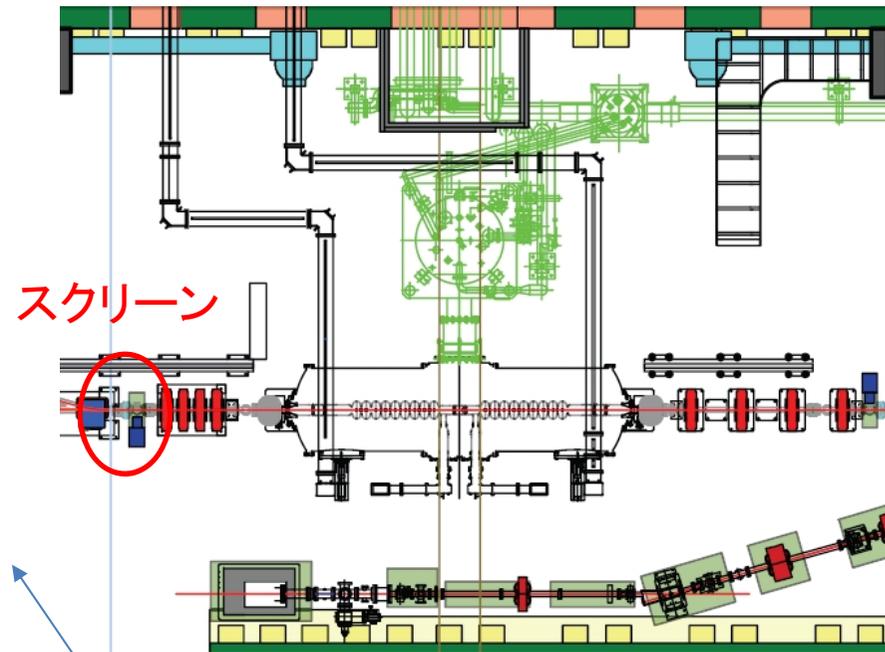
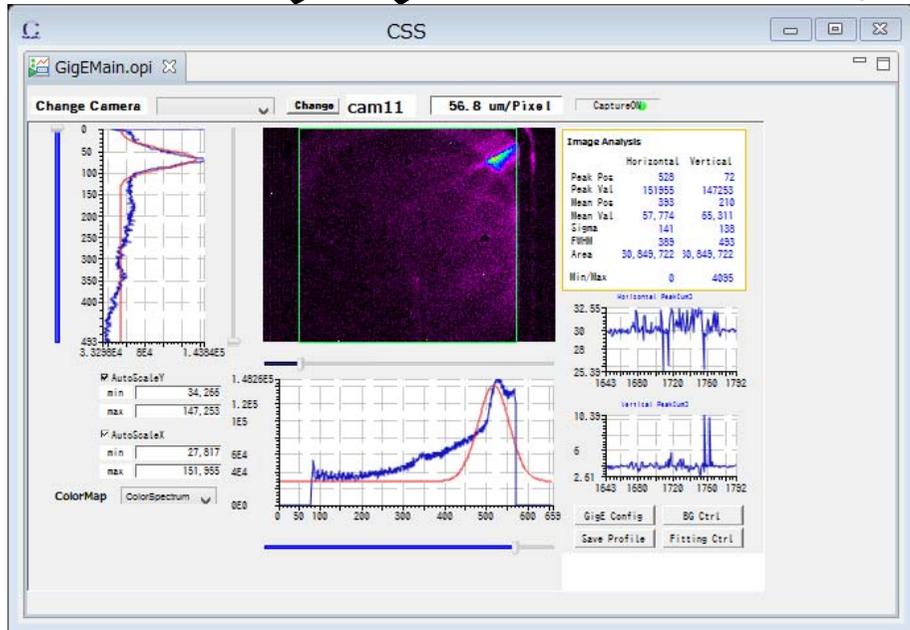
Profile 変化なし

Gvopenのちも空洞の劣化はなかった。

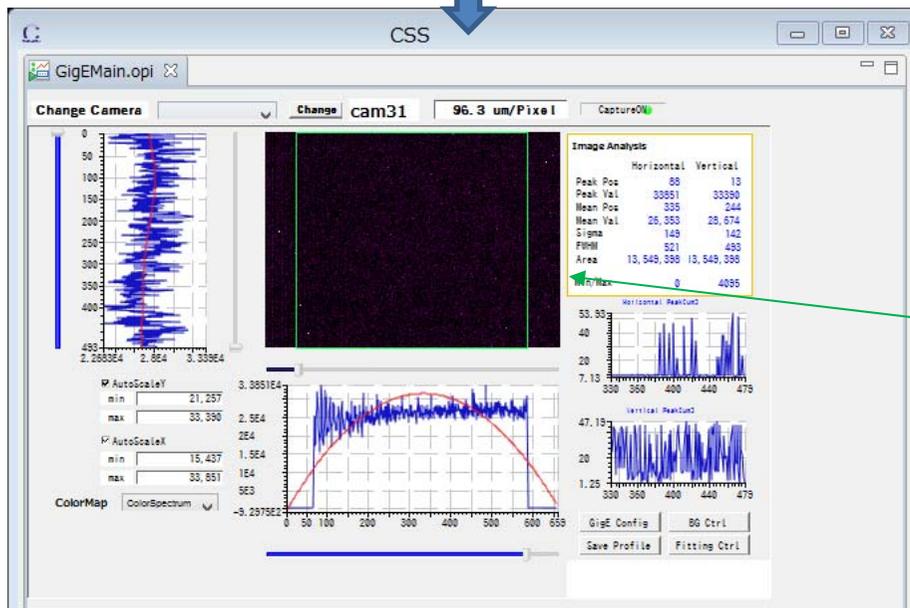


After GV open(10MV+10MV)

# スクリーン上でのfield emission



ML1,ML2 8.3MVでの  
露光時間100msでの下流のスクリーン。  
Field emissionによるprofileが見られた。



Gate widthを小さく1ms?くらいにしたときにはfield emissionの影響は見られない。1usのpulse運転でのチューニングでは問題ないことが判明。

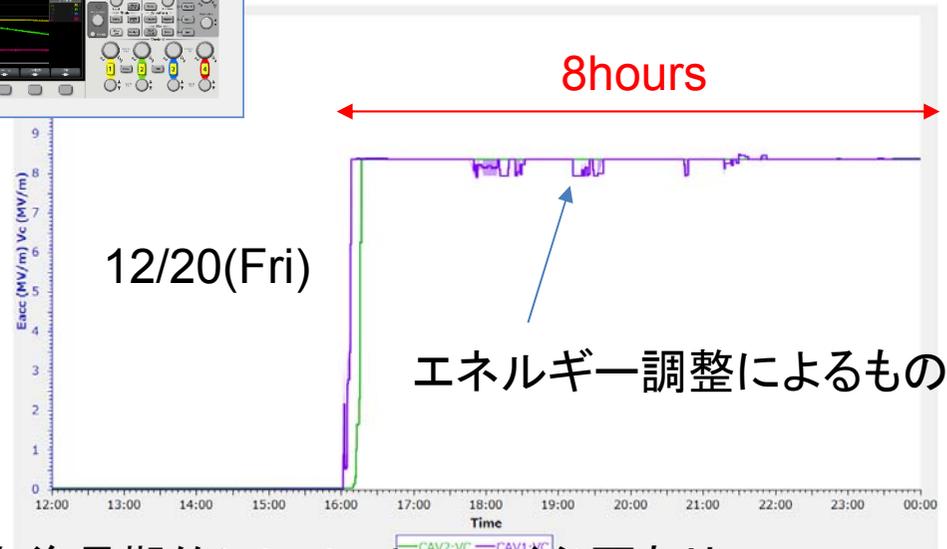
# 運転中のfailure&final status

MLをbeamが20MeVで通過したのちの3日間をplot

緑: 上流Vc (8.36MV)  
紫: 下流Vc (8.37MV)

- 12/18 : 2回 high gain でparameterを振り、パワーforward(Pf)でITL
- 12/19 : 2回 1回はhigh gainでのPf ITL  
もう1回は現場でbuffer ampの抜き差しで行ったもの。(写真)
- 12/20 : no failure (8hours keep)

RF downはすべて人為的な調整ミスによるもの。  
で空洞起因(真空、アーク)のRF downは運転中  
はなかった。運転中の調整の仕方を確立する  
必要がある。(マニュアル化)



空洞のRF down時に何が起こったか今後長期的にloggingしていく必要あり。

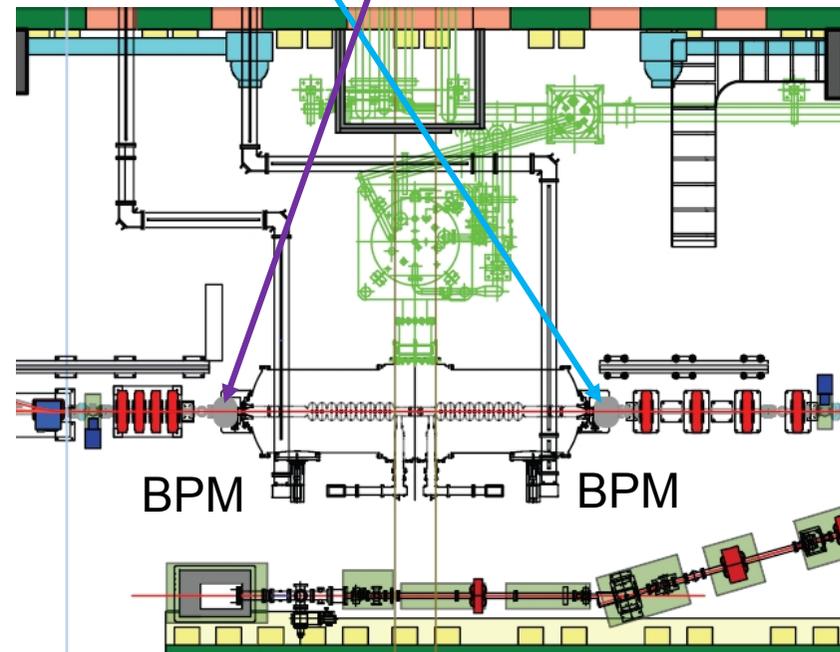
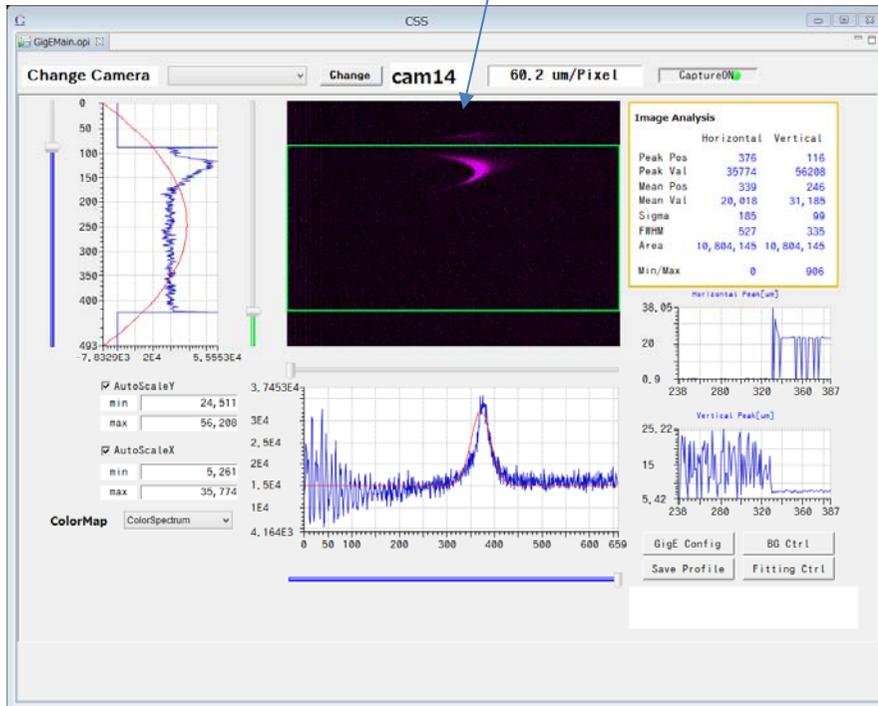
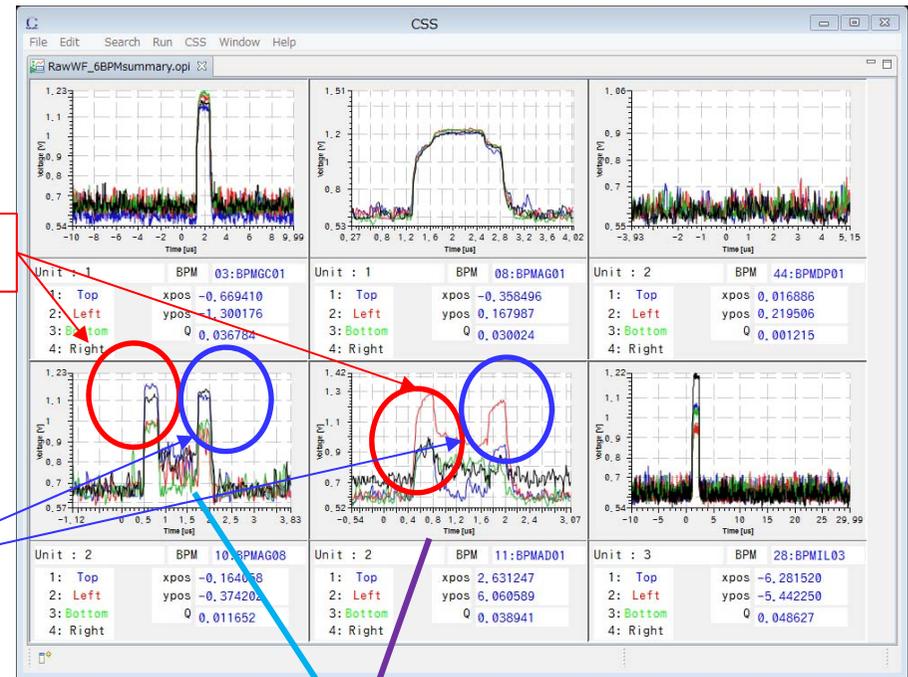
# ビーム加速 & 減速(?)

加速ビーム

3.37MV+8.35MV+8.35MV = 20.07MeV  
 測定値: 20.3MeV  
 大体あっている。

減速ビーム

第一アークbend直後でのスクリーンで  
 エネルギー測定。



# Summary

- 11月から入射器、主空洞同時冷却開始。無事2Kに到達。
- アラインメントは前回は再現し、0.4mm以内には収まっているようである。
- 主空洞では2台の空洞のエージングが終了。上流12MV,下流13MVまでエージング完了。
- 入射器(3.1MV)+主空洞(10+10MV)の最大24MeV運転まで熱負荷的には問題ないことは確認した。
- Xray mapの比較では昨年度から、空洞が劣化している様子は見られてなかった。
- さらにGV openやビームオペレーション中にも空洞劣化は前回からは起こっていない。
- 空洞によるfield emissionの影響はモニターにはそれほど大きくなく、ビームoperation上問題ないことは確認。ビーム加速も20MeVで運転は問題なし。
- 運転中のRF downの影響は主にオペレーションミスによるものであり、真空やarcセンサーのよるITLなど空洞起因のものはなかった。

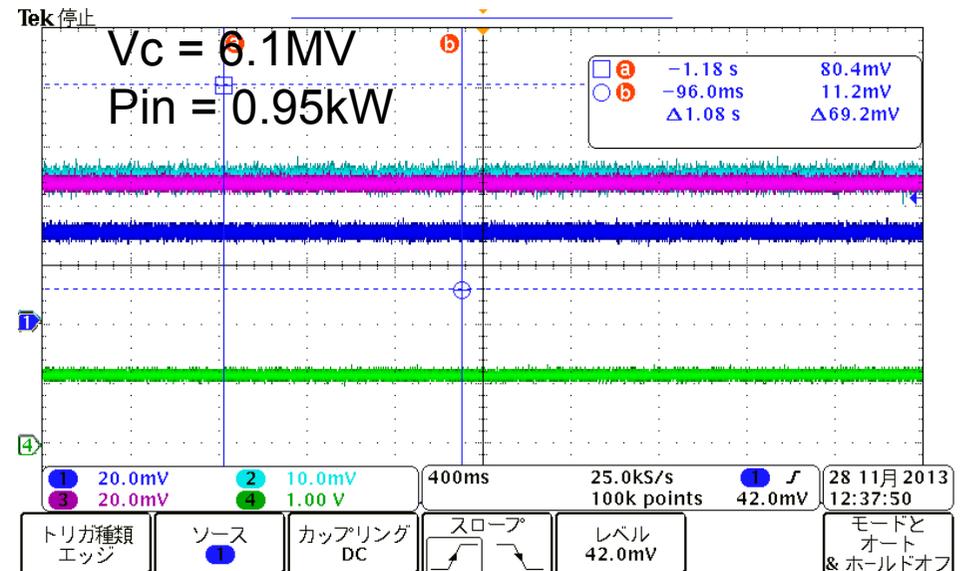
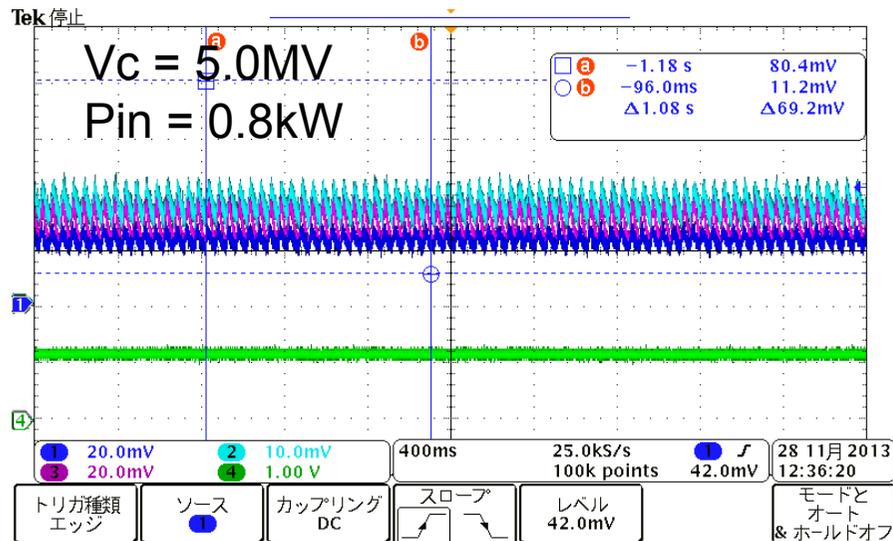
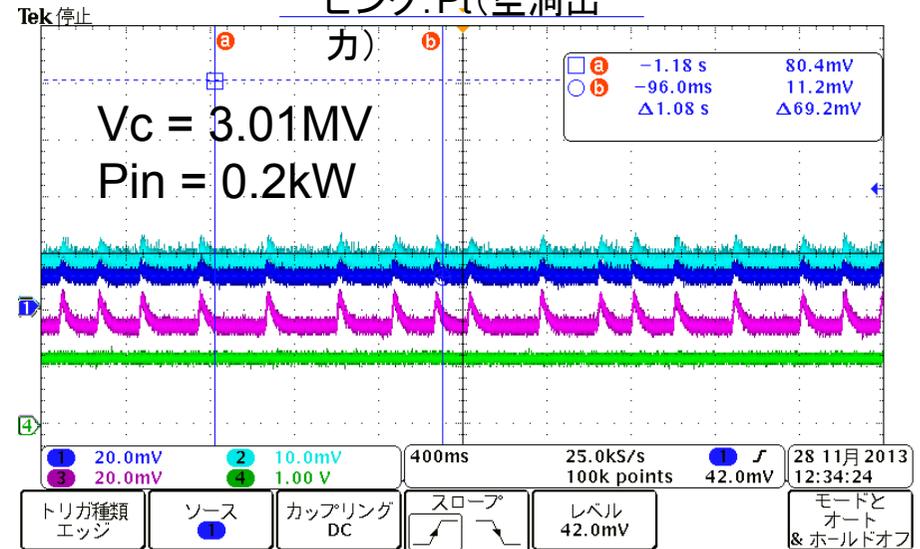
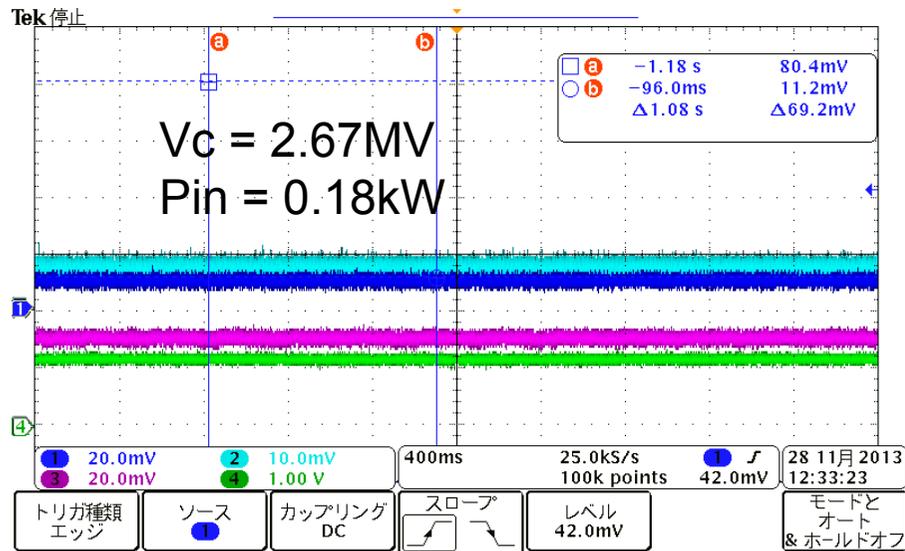
## 今後

- ・長期的に空洞のオペレーションが可能か(piezo feedbackなど)を見たい。
- ・運転中のfailureが毎回logできるような体制をとり、空洞が万が一劣化した際の条件を見る用意をしておく。
- ・大電荷用にビーム信号と同期してRFの状態がモニターしておけるようにしたい。

backup

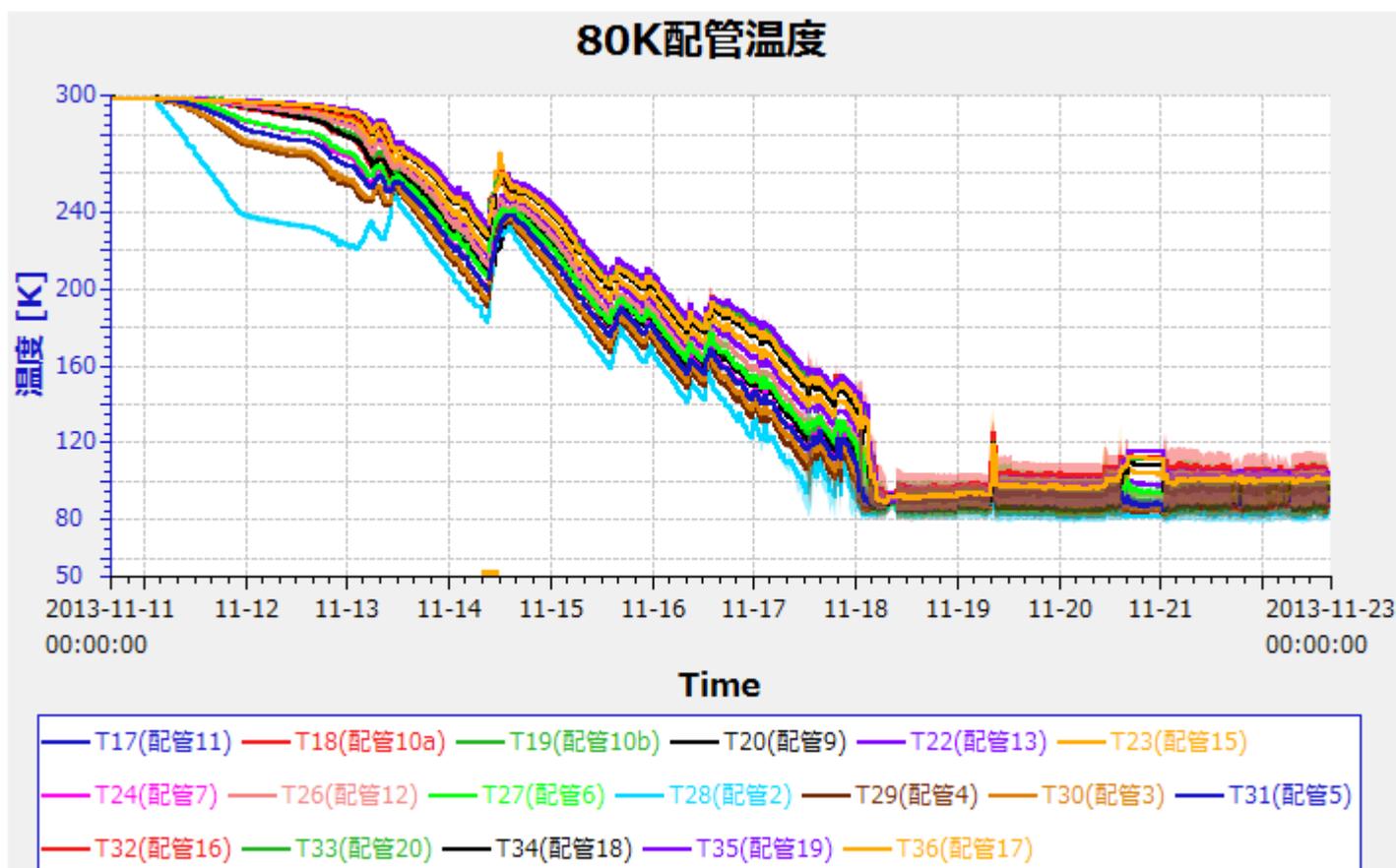
# IOTの出力

青: Pin  
水色: Pref  
ピンク: Pt(空洞出力)

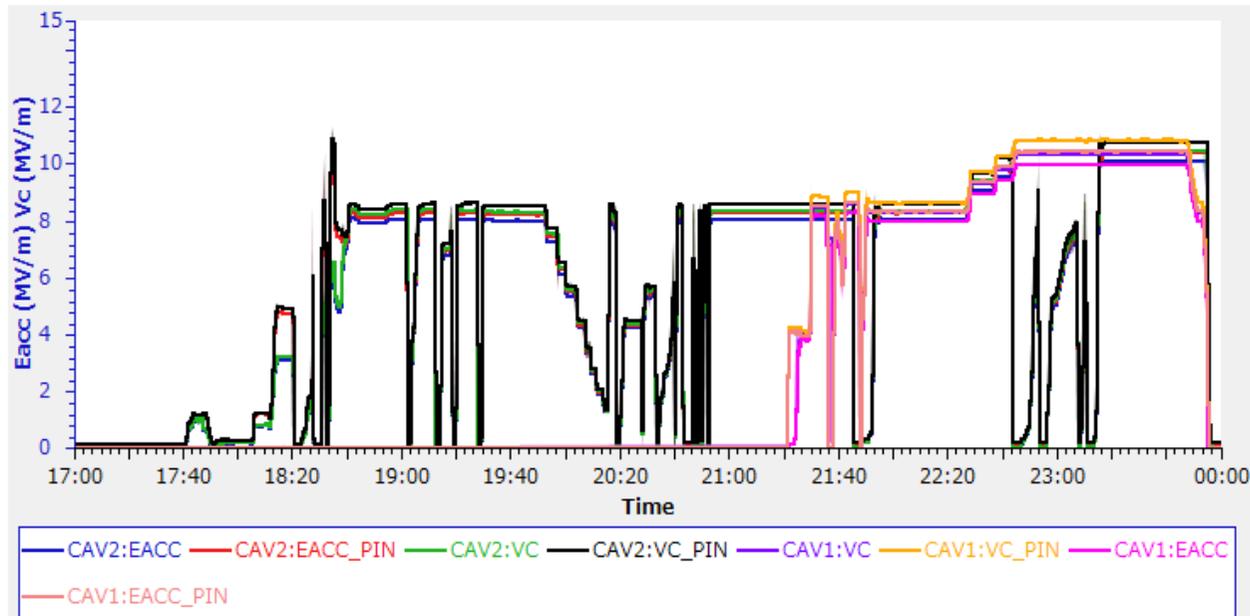


0.2-0.8kWの低いあたりだと変な15-20Hzでの変動がIOTの出力に見られる。  
1kWを超えると見られない。(まずは $V_c = 8.3\text{MV}$ で今晚LLRFのテストを行う。)

# 80K温度(2013.11.11 - 11.23)



# He loss



ラフに

0MV :

33W

8.3+8.3MV :

46W (+13W)

10.3+10.3MV :

58W (+25W)

10.3+10.3だと液面が減って  
いっている。

逆算しても  
 $Q_0 > 1 \cdot 10^{10}$   
程度は保っている。

