

# cERL Main linac の今までの開発 状況とビーム運転状況

阪井寛志、梅森健成、江並和宏、佐藤昌人、  
沢村勝、篠江憲治、古屋貴章、Enrico Cenni

## Contents

- cERL main linacの概要
- Cryomoduleでのハイパワーテストから得たもの
- ビーム運転から得たもの
- Summary

# ① cERL main linacの概要: ERLの特徴と超伝導空洞への要求(おさらい)

cERL parameters

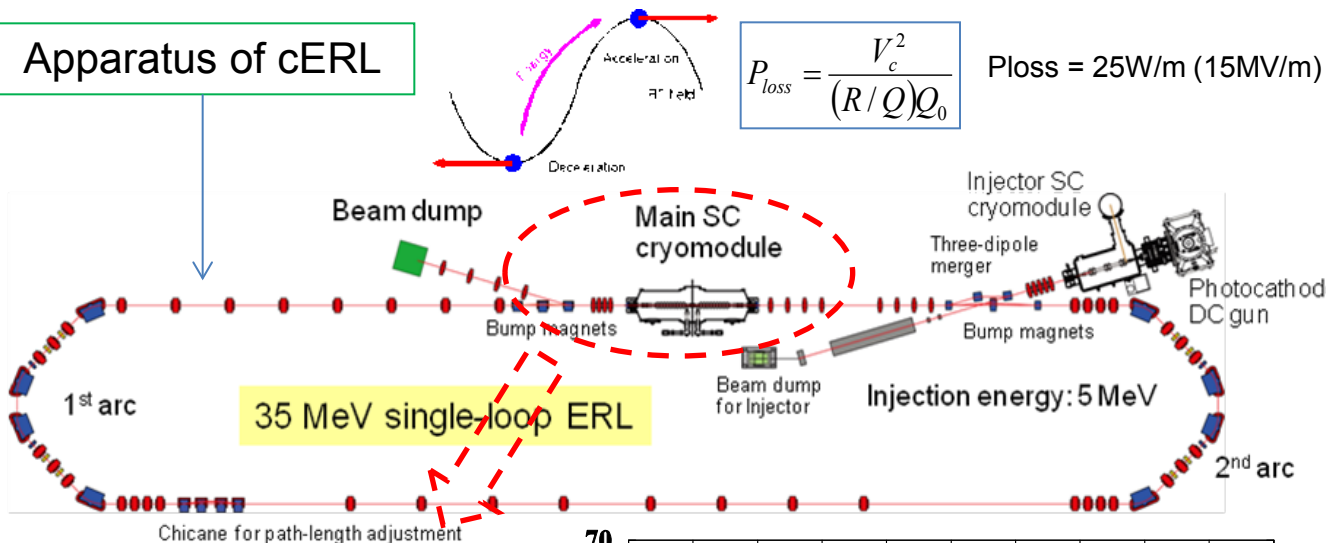
Red: initial case

Current : 10-100mA  
Emittance : 0.1-1 mm mrad  
Bunch length : 0.1-3ps

Apparatus of cERL

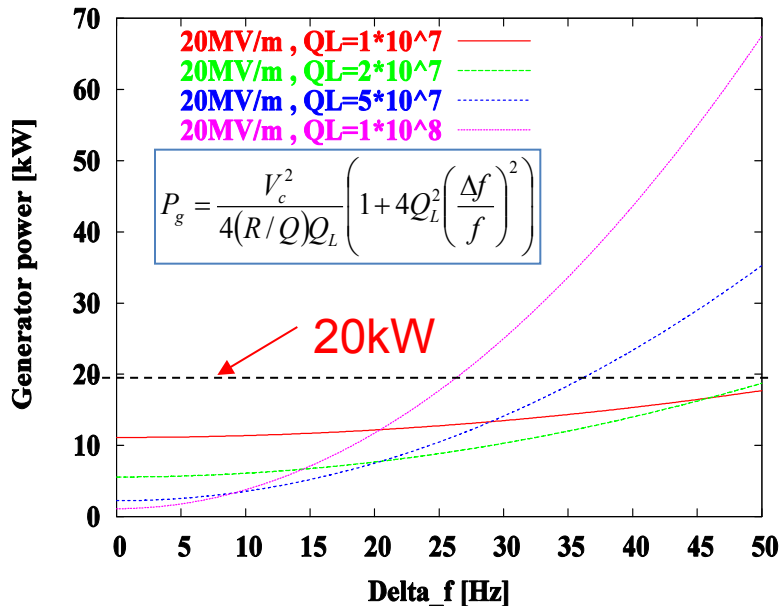
$$P_{loss} = \frac{V_c^2}{(R/Q)Q_0}$$

P<sub>loss</sub> = 25W/m (15MV/m)



3GeV ERLとしての超伝導主加速空洞  
開発のめざすべきは: **max 100mA**  
**(100mA (in)+100mA(out))**

	<b>主加速部</b>
Compact ERL	35MeV(最初) 9セル × 2空洞(最初) 15MV/m
エネルギー回収	あり
高周波電力/空洞	~20kW
課題	<b>HOM対策</b> ( <b>HOM-BBU</b> , 熱損失)



Assume Δf = 50Hz microphonics QL = 2 × 10<sup>7</sup>

特にILC, XFELとの違いは加速勾配は15-20MV/m程度でよいが、CWで20~100倍以上も違う入力パワーによる熱負荷、HOMを如何に軽減するかが問題。

# ERL主リニアック用超伝導空洞：基本設計思想

K. Umemori et al., Proc. of APAC07 (2007).

( )はTESLA空洞

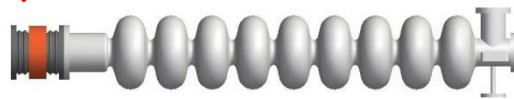
設計のベースはTESLA空洞から

TESLA空洞



Frequency	1300 MHz	加速勾配	15-20MV/m
Q0	1e+10	Coupling	3.8 % (1.9%)
R <sub>sh</sub> /Q	897 Ω (1007Ω)	Q <sub>0</sub> × R <sub>s</sub>	289 Ω
E <sub>p</sub> /E <sub>acc</sub>	3.0 (2.0)	H <sub>p</sub> /E <sub>acc</sub>	42.5 Oe/(MV/m)

Model 1



SBP dia.: φ100  
TE11: 1.757 GHz  
TM01: 2.295 GHz

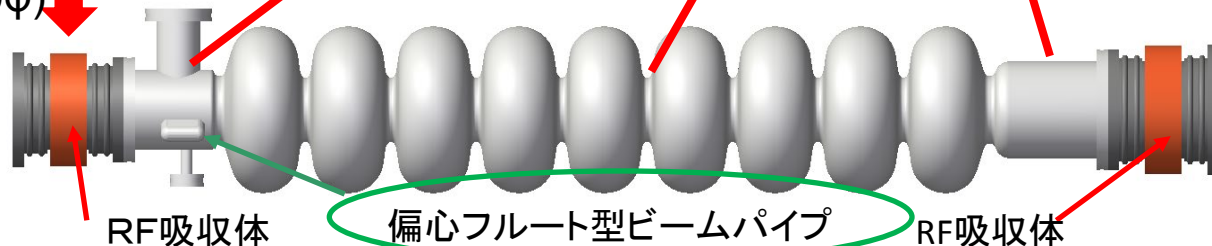
Iris dia.: φ80  
TE11: 2.196 GHz  
TM01: 2.869 GHz

LBP dia.: φ120  
TE11: 1.464 GHz  
TM01: 1.913 GHz

ビームパイプのみ変更(100φ.120φ)

KEK-ERL Model-2空洞

空洞形状も変更  
HOMをRF吸収体で吸収

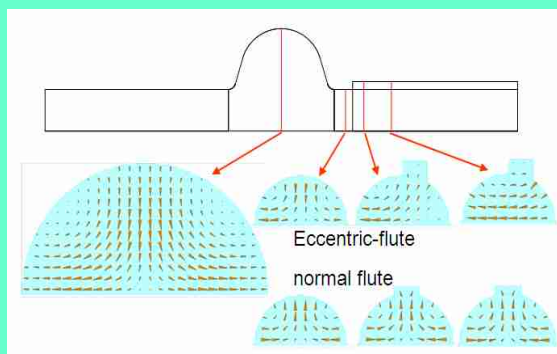


## 設計方針

- 1) 大口径ビームパイプ + RF吸収体
- 2) 空洞セル形状をERL用に最適化
- 3) 偏心フルート型ビームパイプ

HOM couplerの発熱を避けるため、RF吸収体を使用(後述)。

4極対策：偏心フルート(EFB)  
2極に変換してHOM取り出し

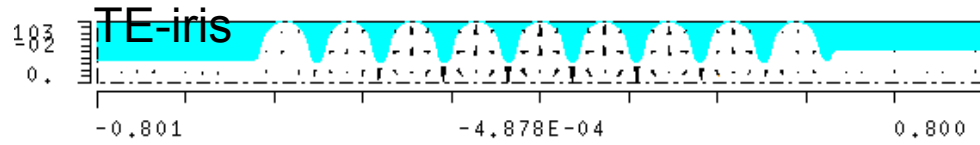


M. Sawamura et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 022003(2010).

設計の結果：HOM-BBU閾値は向上(次節)したが、唯一E<sub>pak</sub>/E<sub>acc</sub>の比率が1.5倍と上がった。同勾配でTESLA空洞と比べ、field emissionを起こしやすい空洞となっている。したがって、要求加速勾配である15-20MV/mが高いQ値のもと達成できるかが開発の鍵となる。

# HOM-BBU threshold current(dipole)

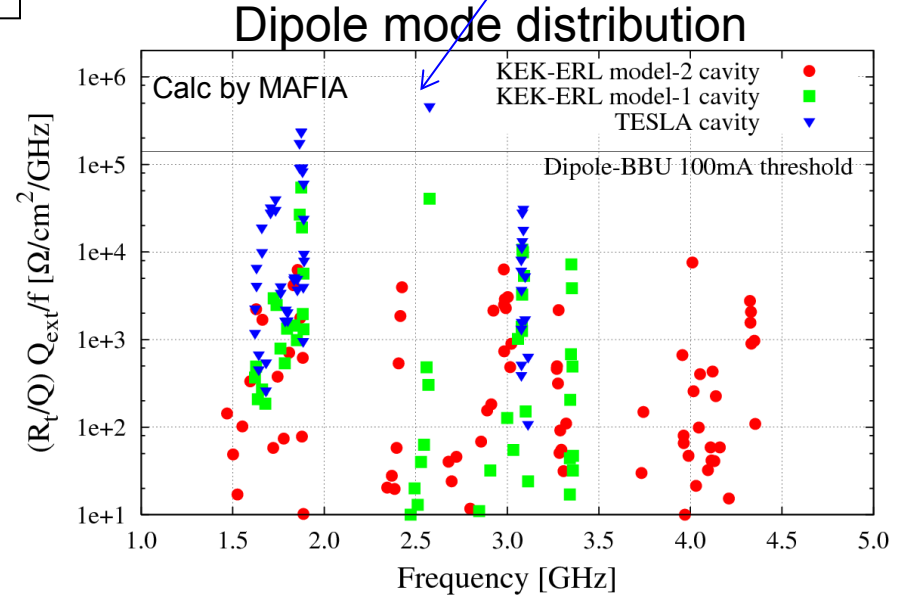
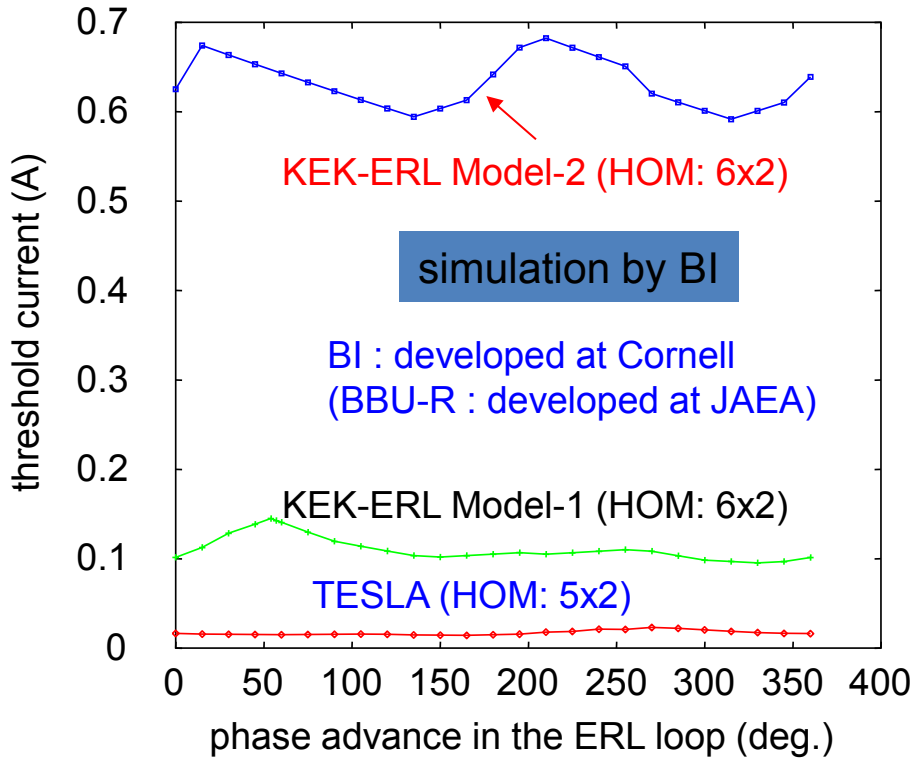
(Calculation performed by  
R. Hajima, R.Nagai, JAEA)



TESLA空洞では2575MHzのTE-iris modeが効く。

具体的な計算はRF simulation codeを使用

$$E_{inj} = 10 \text{ MeV}, E_{loop} = 5 \text{ GeV}, E_{acc} = 20 \text{ MV/m}$$



BBU threshold are significantly improved  
More than 600mA is possible for KEK-ERL model-2 cavity.

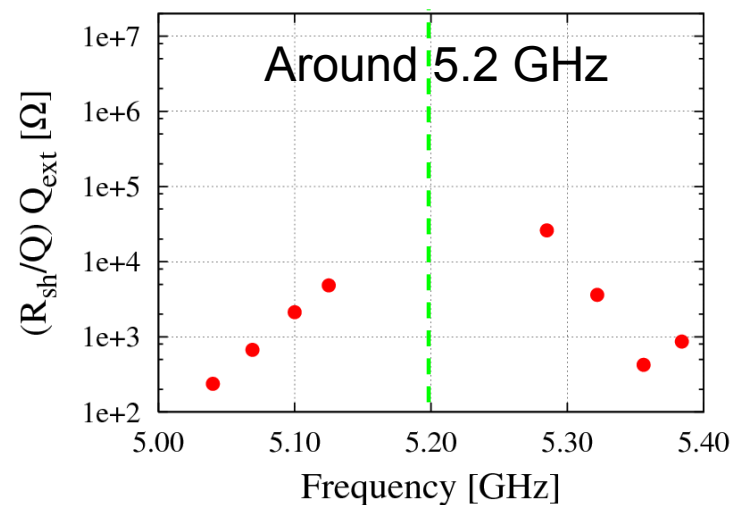
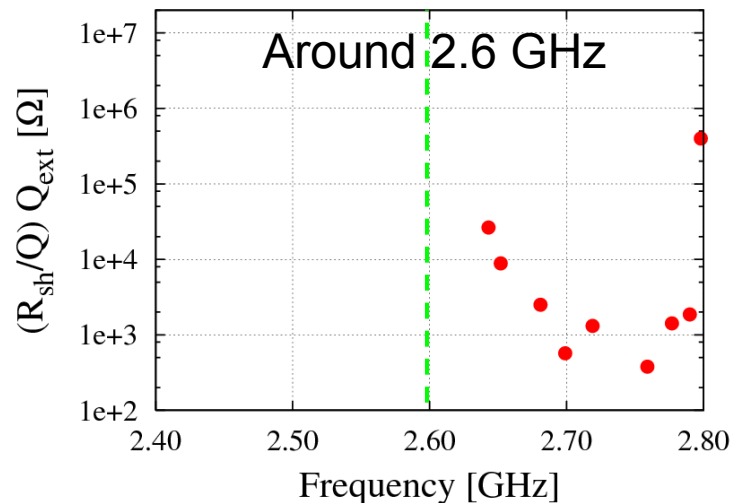
name	空洞形状とビームパイプ形状	Ith (max電流閾値)
KEK-ERL model-2 cavity	New cavity shape + Large beampipe damper	<600mA ○
KEK-ERL model-1 cavity	TESLA cavity shape + Large beampipe damper	<100mA △
TESLA cavity	TESLA cavity shape + Loop-type HOM coupler	<20mA ×

3GeV ERLの場合のBBU計算を次の加速勾配を決めてつめていくべし。

# Monopole & Loss Factor (バンチ長との関係)

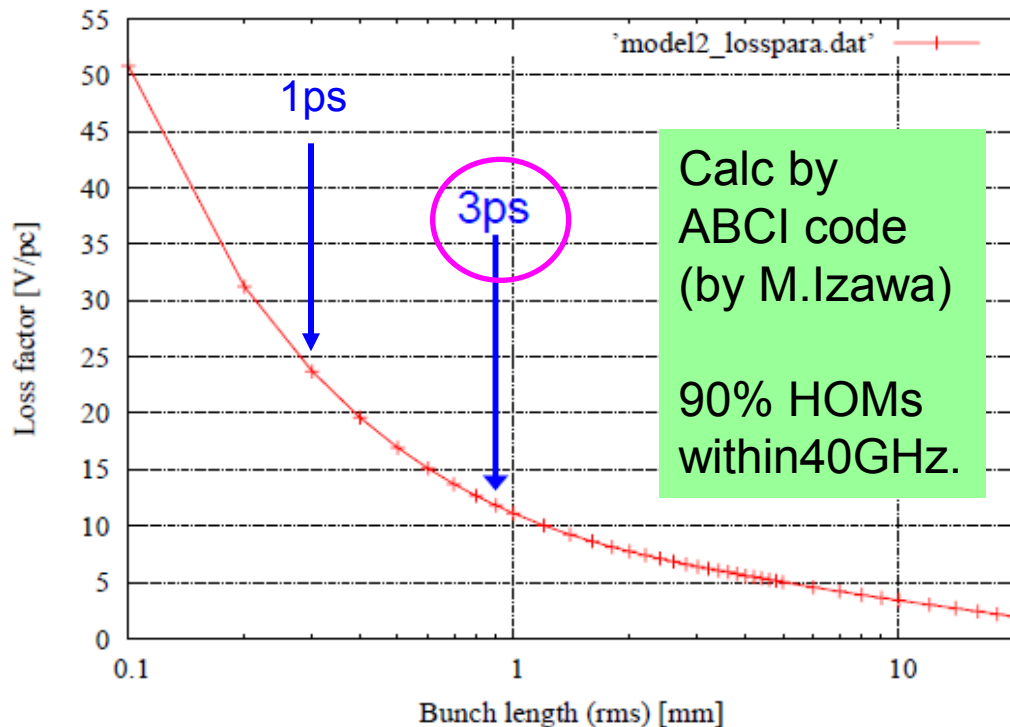
Monopoles of KEK-ERL model-2 cavity

Calc by MAFIA up to 6.5GHz



No monopole modes around 2.6GHz and 5.2GHz, within +/- 40MHz

Loss factor



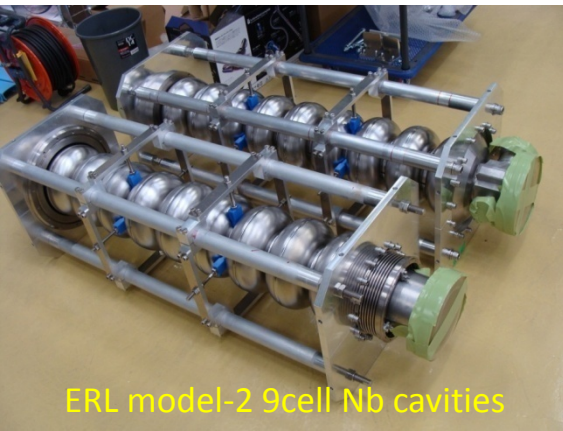
- Including loss factor for accelerating mode (2V/pC)
- Calculated from only cavity shape, not including RF absorber
- For 3ps bunch length, loss factor of HOM is  $12-2=10\text{V/pC}$   
Power is  $10\text{V/pC} \times 77\text{pC} \times 0.2\text{A} = 154\text{W}$ . (100mA case)  
→これを HOM absorberで吸収できるかがHOMのもう一つの課題

ちなみに10mAだと HOM powerは  
 $10\text{V/pC} \times 7.7\text{pC} \times 0.02\text{A} = 1.54\text{W}$ と各段に小さくなる。100mAは Main linacにとっては非常に難しいターゲット  
 10mA運転ではHOMの熱負荷の問題があるかを見るには難しい。  
 →cERLでバンチ長を短くして熱負荷を見るか？

## ②cERL Main linac のhigh power試験によるERLへの知見

- ・各コンポーネント(空洞、入力カプラー、HOM damper、tuner)のcryomoduleでの結果。
- ・Cryomoduleそのもののperformanceは良好か？

# Compact ERL main linac cryomodule configuration



**9cell superconducting cavity**

$Q_0 > 1 \cdot 10^{10}$  @15MV/m

**HOM absorber**

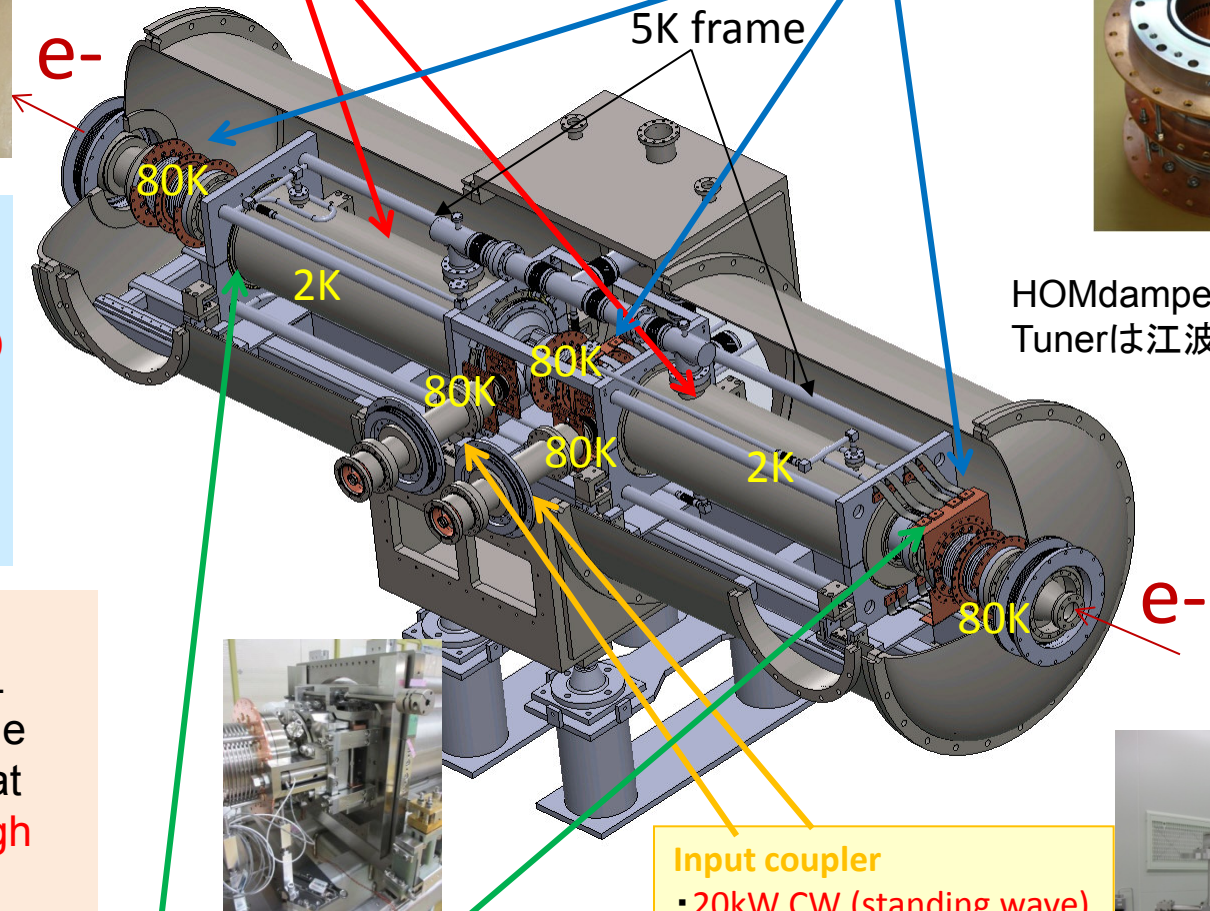
- HIP ferrite on Copper beampipe
- Operation at 80K. (expected 150W HOM power)
- Check enough absorption ability of ferrite at 80K



## (Compact) ERL target

Frequency : 1.3 GHz  
Input power : 20kW CW (SW)  
Gradient: 15MV/m  
Q0:  $> 1 \cdot 10^{10}$   
Beam current : max 100mA  
(against HOM-BBU instability)

2-cavity cryomodule was developed for compact ERL main linac to demonstrate the high current ERL operation at cERL. We have done the high power test by using this cryomodule.



HOMdamperは沢村  
Tunerは江波発表

**Frequency Tuner**

Slide jack tuner (mechanical)  
piezo tuner(fine tuning)

**Input coupler**

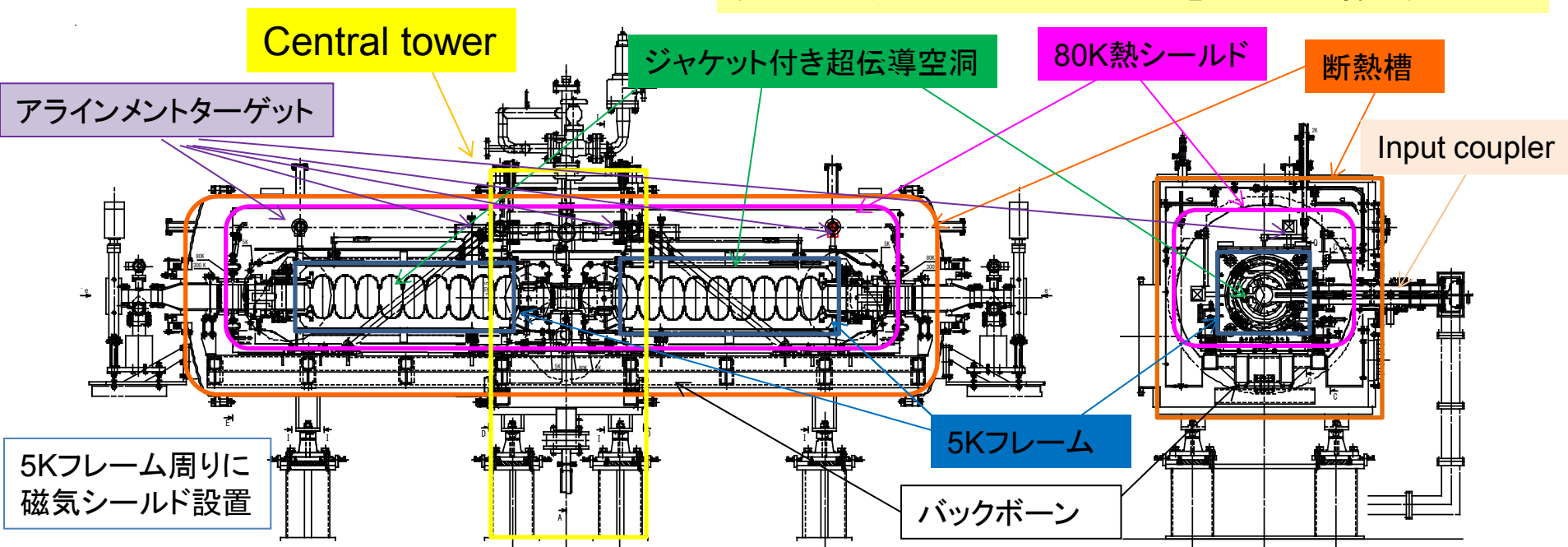
- 20kW CW (standing wave)
- Cold and warm window
- HA997 ceramic is used
- $QL = (1-4) \cdot 10^7$  (variable)



# クライオモジュールの設計、製作(詳細)

## クライオモジュール断面図

2009~10年当時はSTF moduleでは冷却時のreturn pipeの曲りが大きな問題。→ビーム運転必須のため失敗はできない。  
→下から支えるバックボーン方式をcEERLには採用。



### 仕様

#### Dynamic loss

Cavity : 25 W (for 2K) / cavity (@15MV/m)

Input coupler : 1.5 W (for 5K) / coupler

HOM absorber : 150W (for 80K) / cavity

#### Alignment

冷却込みで1mm以内でビーム軸に合わせる。

#### Support

Cavity(2K) – 5K フレーム – バックボーン(室温)

– Central tower(室温) (下からサポート)

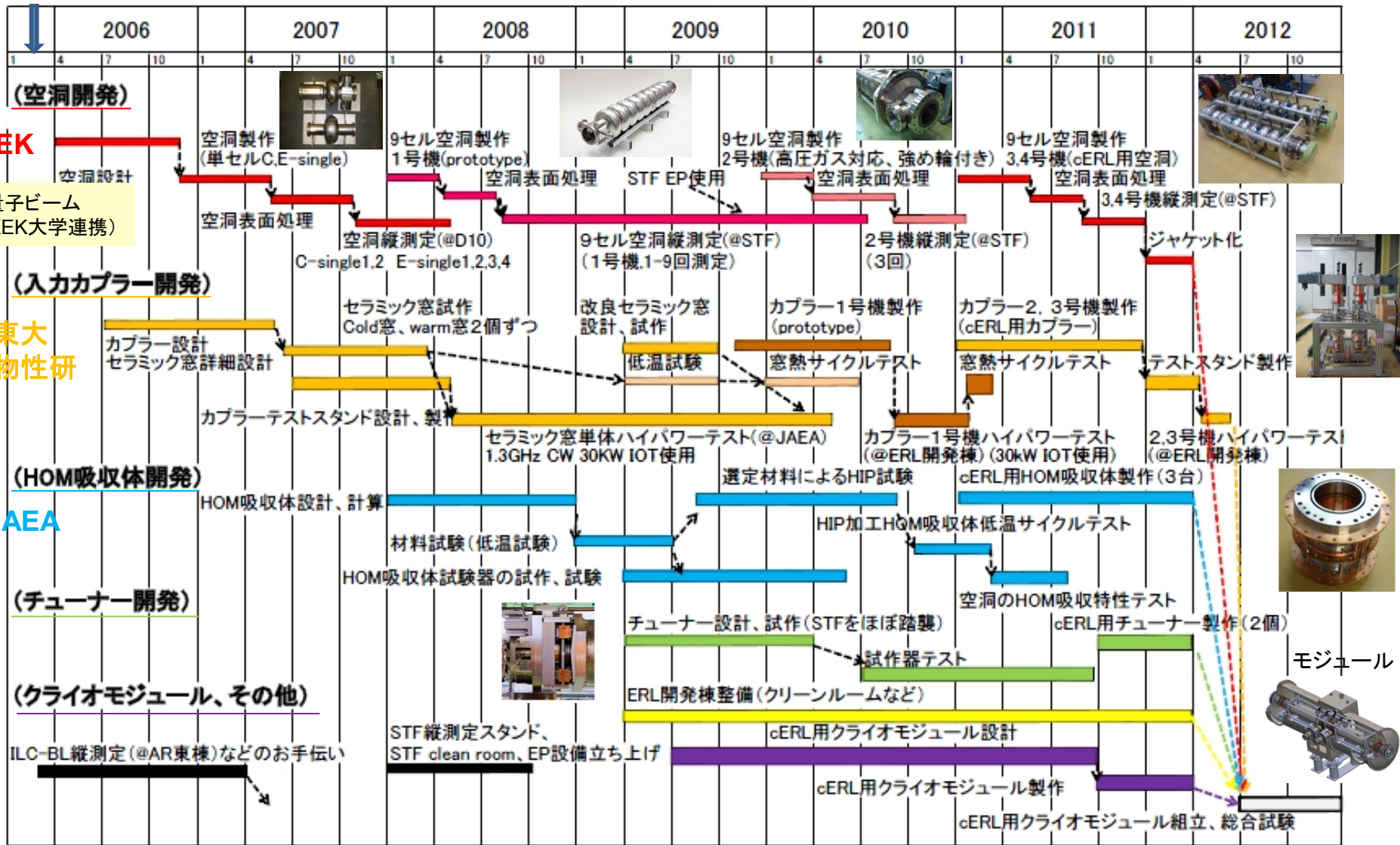
### 対策

ジャケット径φ300mmでCW対応。  
5Kフレームによる冷却で熱侵入回避

5Kフレームを空洞と機械的に一体化。フレーム上にアラインメントターゲットを設け、そこを基準にtowerに位置を移す。レーザー干渉モニターで冷却中の変化を常時モニター。バックボーンと5Kフレームは入熱&熱変形を抑える脚でサポート。



# これまでのERL主ライナック開発経緯(high power testまで)



特に初年度ILC-BLグループの9連空腔の縦測定を一緒に行い、空腔製作から表面処理、測定上の問題点をERL空腔の設計にfeedbackすることを考慮した。そのおかげで現在も問題点のある部分はILC-BLグループ(STF)と連携、議論をしながら進められるのが大きい。2009年以降、開発中心をERL開発棟に移していき、今年度は、2台の空腔をcERL用のクライオモジュールを組み込んで総合check。

# cERL用の主加速部超伝導空洞の性能評価試験 (縦測定 & cryomodule試験)

## Summary of performance

• 縦測定では単体で25MV/m達成。特に要求値の $1 \times 10^{10}$ @15MV/mを達成。

- Cryomodule組込み後は
- 2空洞とも  $V_c = 16$  MVまで印加可能であったが、8-10 MVからfield emissionが始まる。
- 冷凍機負荷に至るまでの $V_c=13.5-14$  MVで1時間keep可能。
- 但し、Low field (<10MV/m) では  $Q_0 > 1 \times 10^{10}$  を達成しており、磁気シールドの効果は低温で十分確保されていることがわかった。またHOM damperや入力カプラーからの入熱はない。

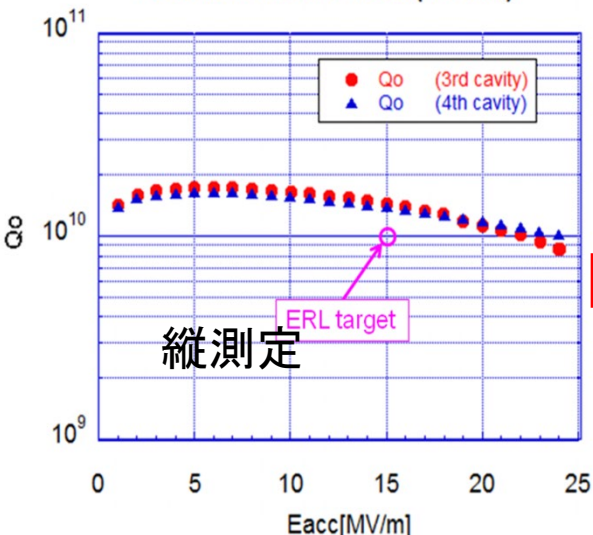


組立のdetailや劣化対策の今後詳細は梅森氏発表から

### cERLモジュール組込後性能劣化

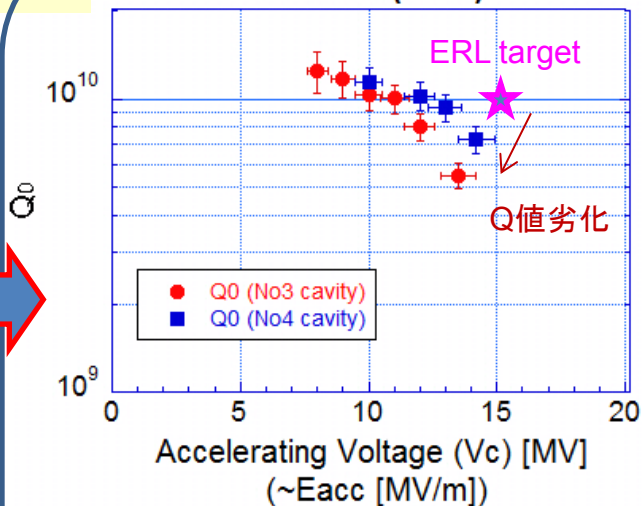
今後性能劣化原因詳細(sub-umレベルのゴミや埃の混入?)を調べ、cERL用モジュールの空洞の性能回復を目指すことが今後の課題。

Results of vertical tests (#3 & #4)



モジュール組込前空洞単体テスト(縦測定)->性能OK。

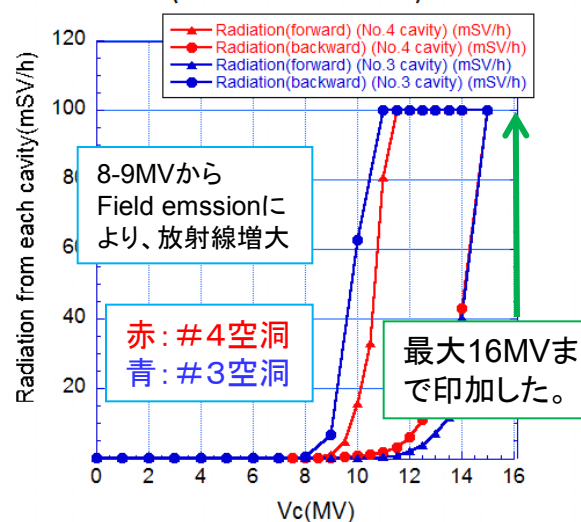
Vc vs Q0 (Final)



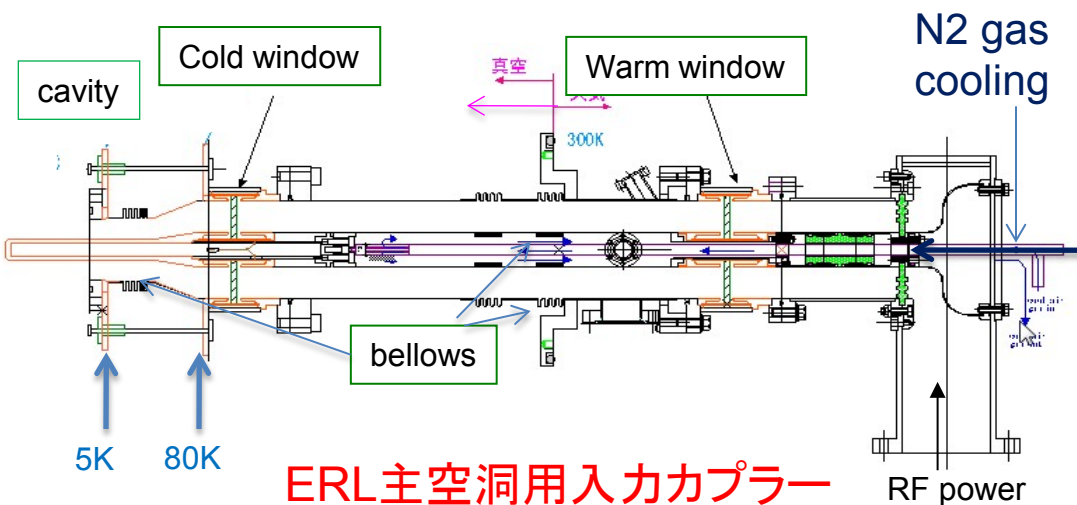
モジュール組込後性能劣化

field emissionによるradiation増加がみられる。

ERL Main Linac Cryomodule High Power Test (Radiation on axis vs Vc)



# ERL主空洞用の入力カプラー (cERL用カプラーのハイパワーテストとモジュール評価)



ERL主空洞用入力カプラー

## Basic parameters

- 加速勾配: Max 20MV/m (1.3GHz)
- 入力パワー: max 20kW, 定在波 ( $\Delta f < 50\text{Hz}$ )
- 負荷 $Q(Q_L)$ :  $(1-4) \times 10^7$  (variable coupling)

## Points (STF-BL coupler からの修正 >CW対応)

- 内導体をN2 gasで強制空冷
- Impedance を50 $\Omega$  から60 $\Omega$ に変更
- 99.7%の純度のセラミック窓を使用。
- cold窓にbellows追加。+5mm可変。

# cERL用入力カプラー(#2,3号機)の性能評価

## テストスタンドでの評価:

到達パワー 105kW (pulse)  
43kW (CW)

Keep 40kW CW, 4hours

一番温度が高い場所:  
内導体のベローズ (80°C)  
( $\Delta T \sim 60\text{degree}$ , OK)

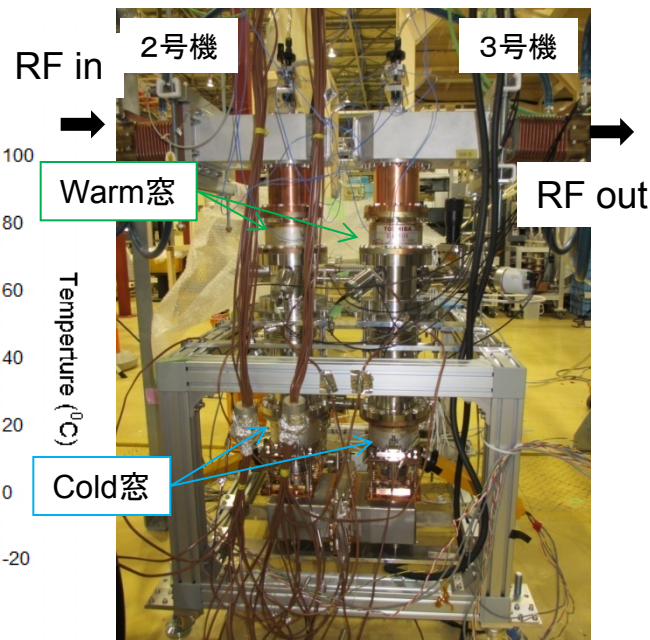
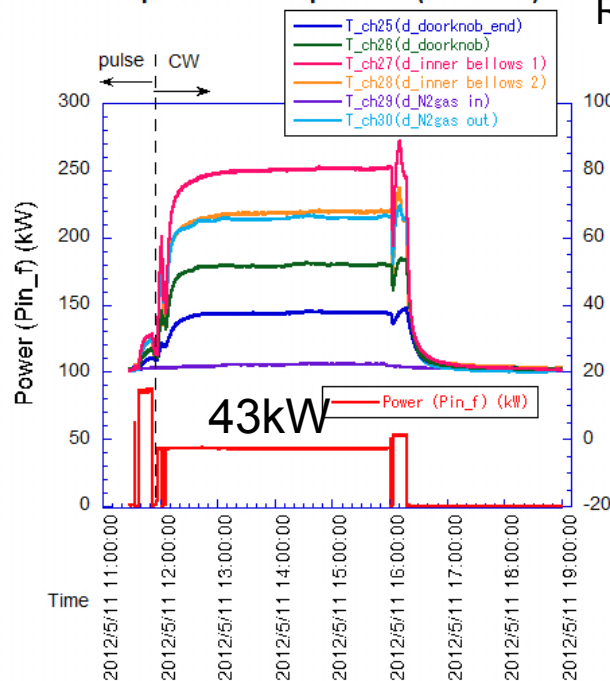
## モジュール組込み2K冷却後:

pulse: 25kW, CW: 15kW

でモジュール試験にて真空 & 温度上昇も $\Delta T < 60\text{K}$ で問題なし

➡ cERLモジュールへの組込OK

power vs Temperature (2012/5/11)

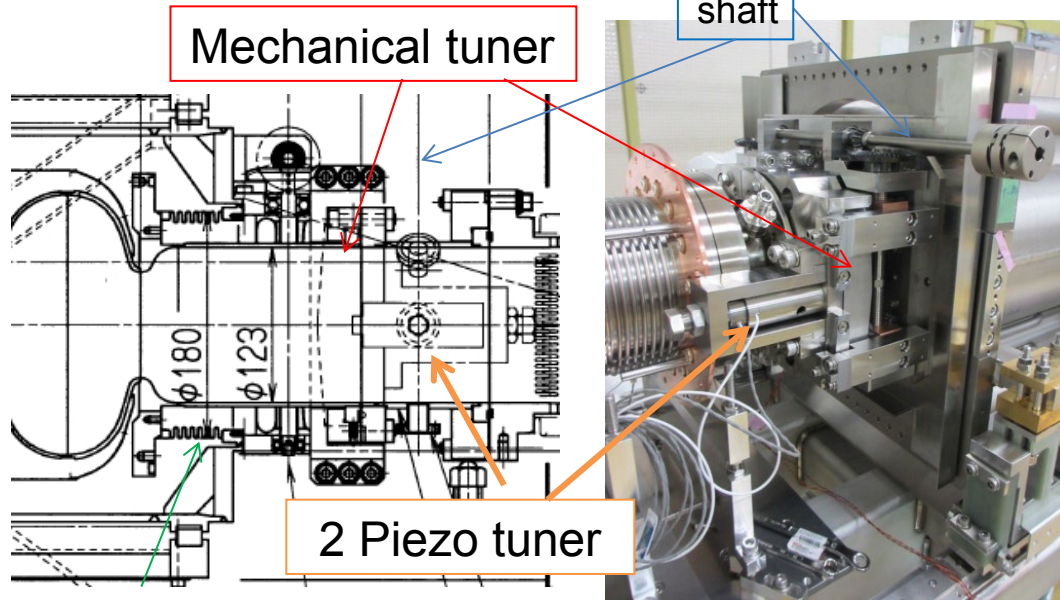


cERL用のカプラーテストスタンド

# Performance test of cERL cryomodule (tuner & HOM damper)

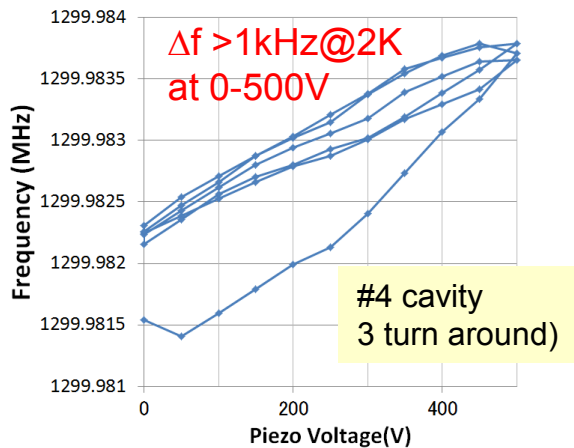
Detail 江波 & 沢村

## Performance of frequency tuner

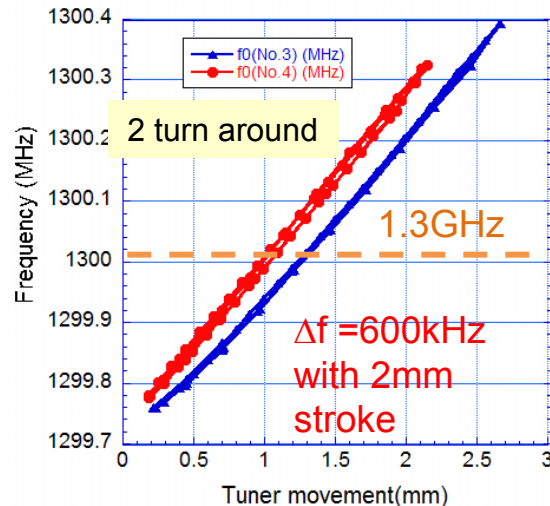


Cancel pressure variation

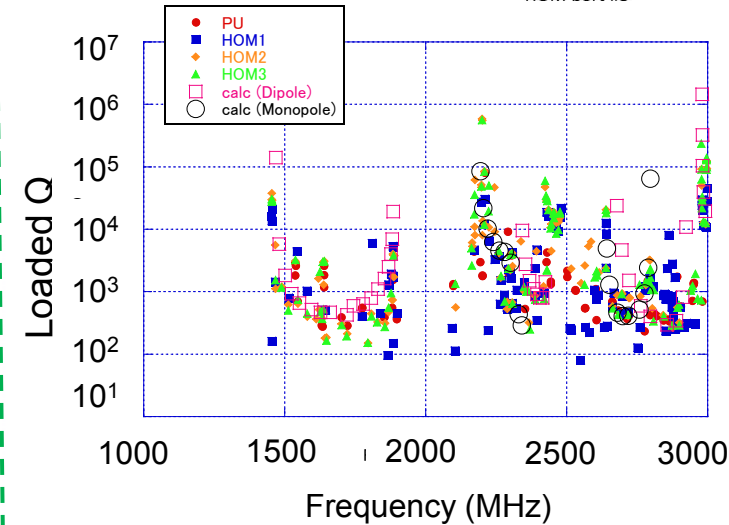
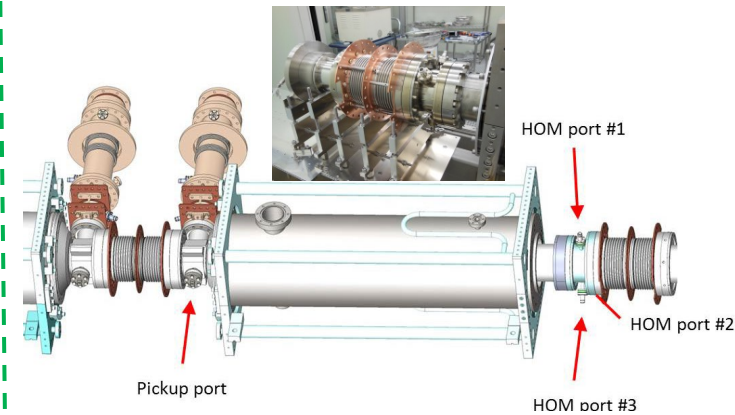
Piezo performance @ 2K



Coarse mechanical tuner stroke @ 2K



## HOM properties under 2K condition



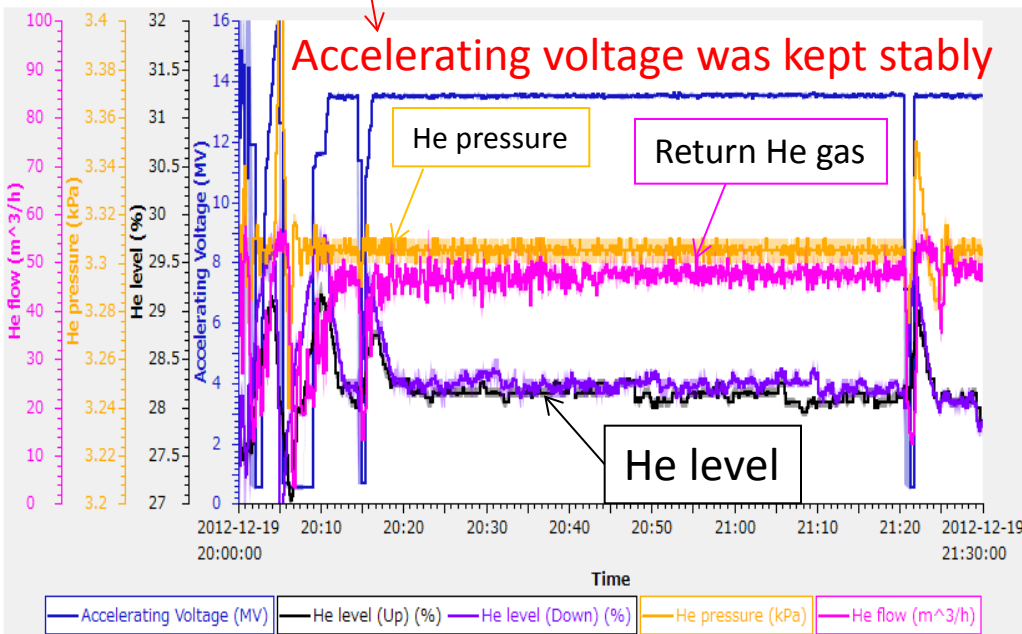
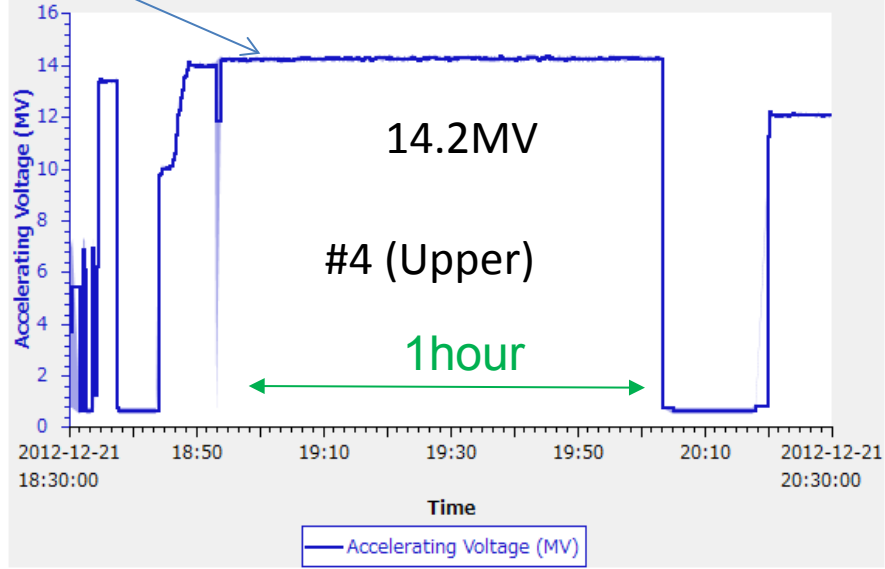
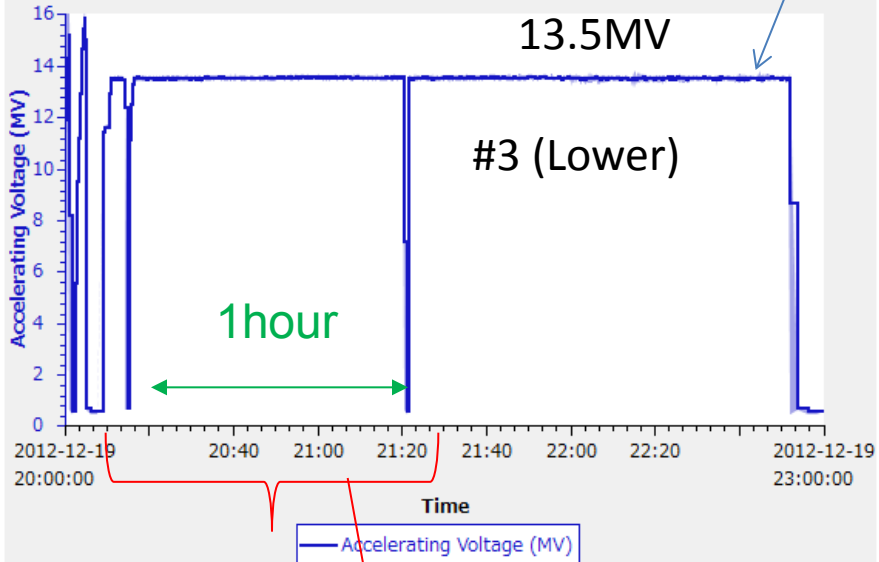
Course and fine piezo tuners also worked smoothly and had enough stroke under 2K cooling.

- Using fundamental pickup port (PU) and HOM ports (HOM1, 2, 3), HOM characteristics were measured.
- Their behavior, frequency and loaded Q-values, were generally agreed with calculation results.

# Field keep試験と冷却能力

Accelerating Voltage

Vc keep test @ high power test

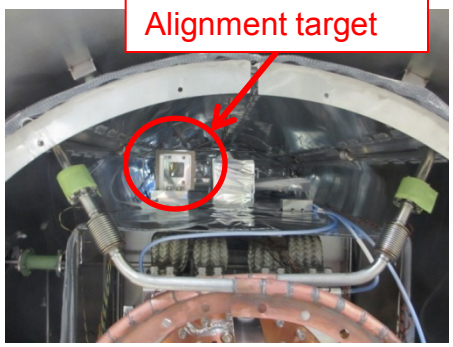
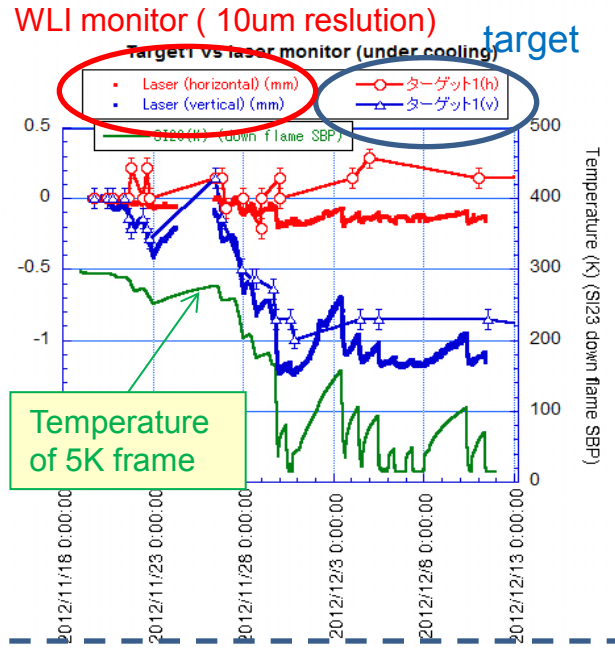
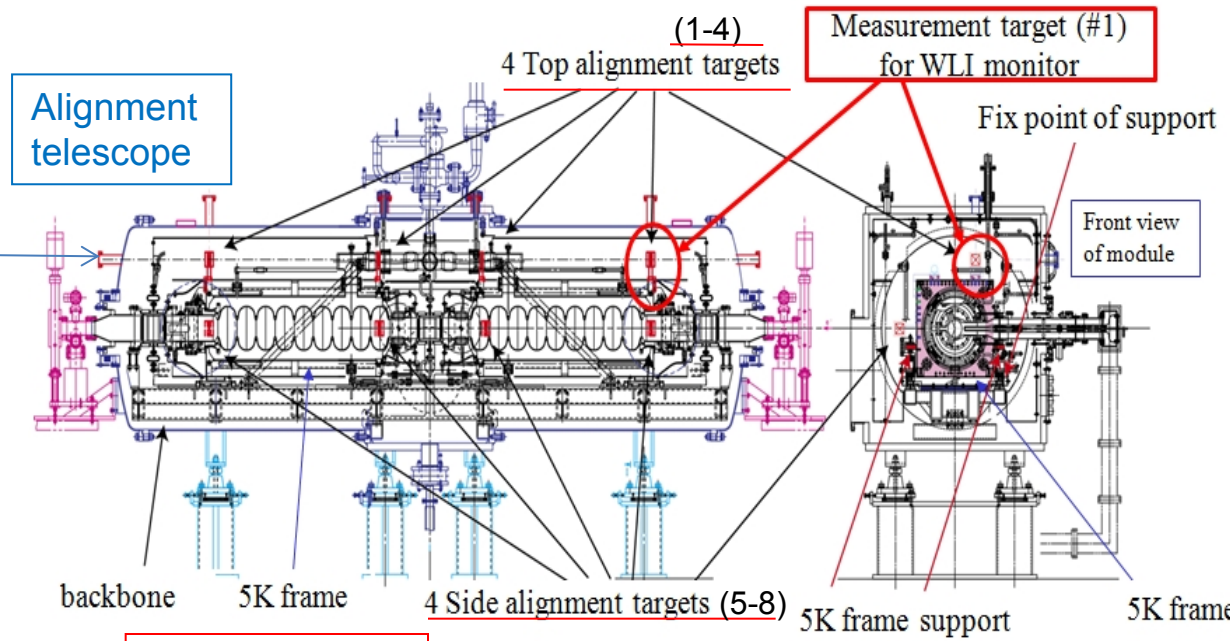


- We can keep the following voltages of  
Upper cavity : 14.2MV  
Lower cavity : 13.5MV  
for more than 1 hour. (40-45W heat @2K)
- We cannot keep more than 14.5MV field because of the lack of the cryogenic power (>50m<sup>3</sup>/h ~50W)

We note that He gas return, He level and He pressure were also stable. Especially He pressure was kept stable within 10Pa (measured)

45Wまで空洞冷却可能

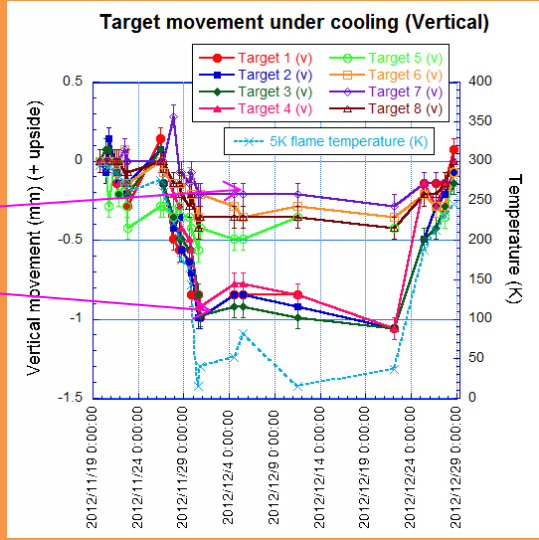
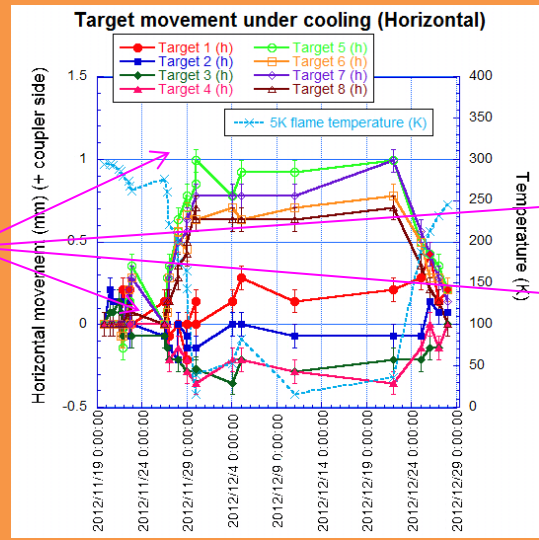
# Measurement of displacement under 2K cooling



Alignment target

Measured displacements of targets

Move same way with targets at same transverse position

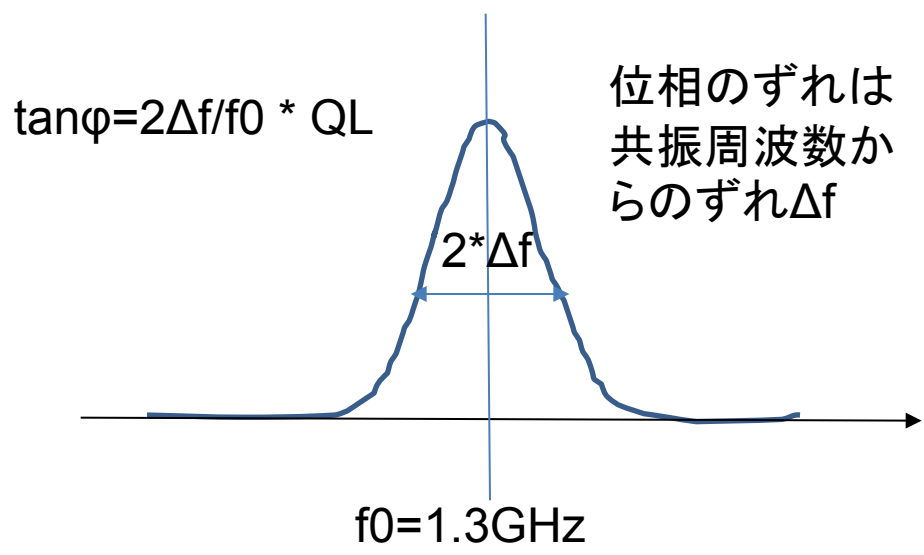
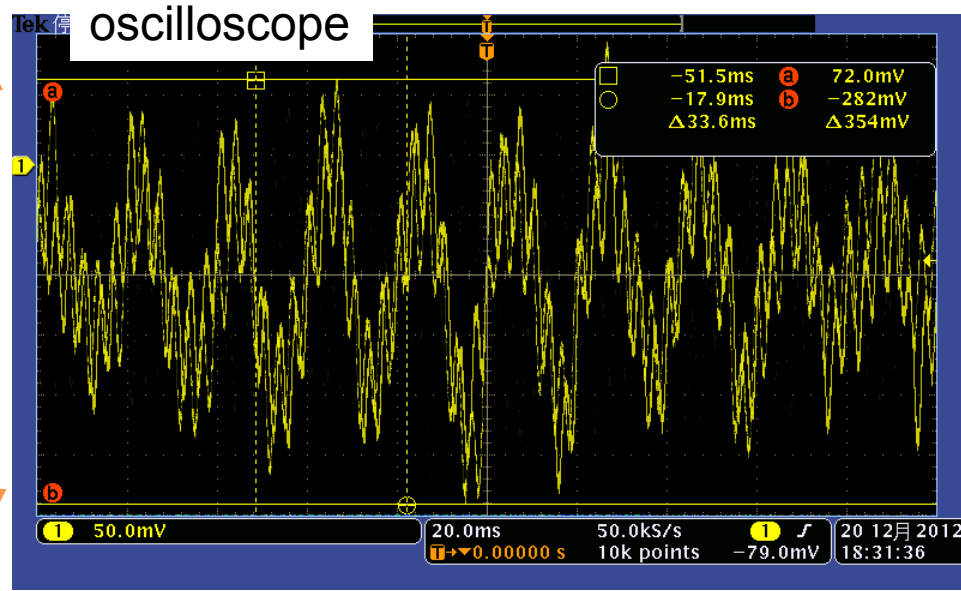
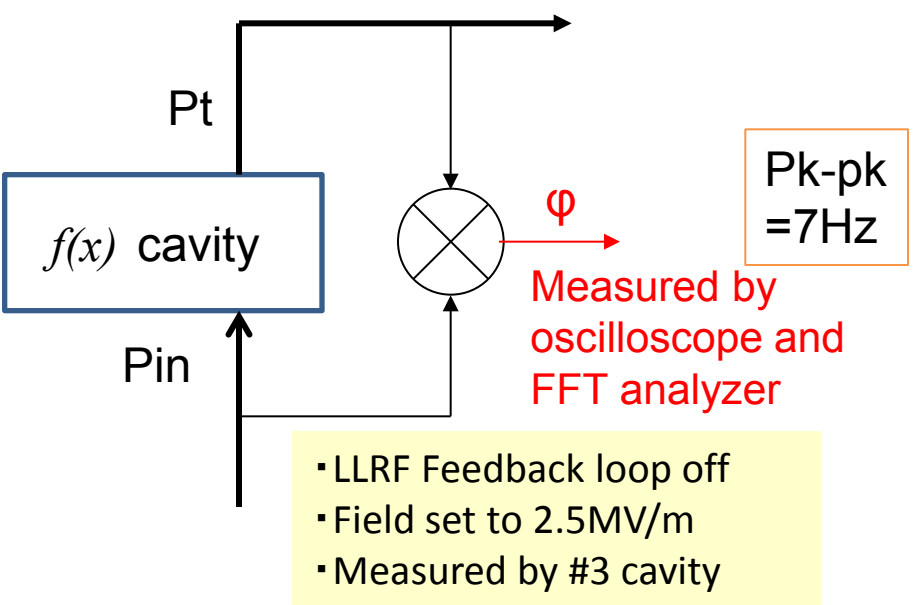


Summary of displacements of targets and cavities between RT to 2K	Horizontal (mm)	Vertical (mm)
Target 1-4 (Average)	-0.11	-1.06
Target 5-8 (Average)	0.87	-0.37
Average movement of cavity center (from target 5-8)	0.39	-0.37

- About 0.4mm of cavity center movement was evaluated horizontally and vertically, which agreed with expected values of thermal shrink of 5K supports.
- These values were within alignment error from beam requirement of 1mm.
- Thermal cycle による位置再現性は50um以内(レーザー変位計)で再現。

# 2K microphonics measurements

• Example of #3 cavity,  $QL = 1.15 \cdot 10^7$



- Pk-pk = 7Hz by oscilloscope. It allow us to increase the QL higher than several  $\cdot 10^7 \rightarrow$  lower power
- Main peak was observed at 49.5Hz (not 50Hz of electrical noise) by FFT analyzer ,which was not come from cavity resonance frequency.
- It might come from backbone and/or 5K flame resonance frequency??



We need to continue measuring microphonics on next cERL operation 振動についてのdetailは佐藤、三浦から

# ERL main linacとしてcERLパワー試験までで知り得たこと

- **空洞** : 単体では25MV/m達成。cryomoduleに組み込み16MV(/m)までの性能を見たが、8-10MV(/m)でfield emissionを誘発し性能劣化。**モジュール組立による性能劣化調査と劣化回復が今後の課題。**
- **入力カプラー** : 40kWまで単体で問題なし。モジュールでも15kWまでのCW試験は達成。→ OK.
- **HOM damper** : 冷却時のHOMの吸収特性は確保。HOM damperの冷却中の割れなど多くの課題あり。→詳細沢村氏。
- **Tuner** : cryomodule冷却時に粗調整(600kHzストローク)、piezo(500V)ともに問題なく1.3GHzで動作確認。→ OK. → 詳細江波氏。
- **Alignment** : 冷却時も追従し、設計通り、0.5mm以内で冷却可能。全体で要求の1mm以内に抑えることができた。→OK.
- **磁気シールド** : 現設計(増澤氏)で $1 \times 10^{10}$ をkeep可能であった。→OK。
- **支持機構と入熱** : バックボーン、5Kフレームによる構造によりmicrophincsをpk-pkで7Hzに抑えている。→OK。但し、入熱は2Kへ10Wと予想より、多い。5Kフレームの一部の温度上昇が高く、フレームへの**入熱が予想より多い**。→△
- **冷却** : 予冷ラインは冷却時に必須。ジャケットサイズをSTF typeに比べ、Φ300に拡大し、**CW運転**に必須な最大40-45Wの空洞の熱負荷に持つことは確認 →OK

今後これらの性能特に空洞性能が**ビーム運転時に劣化するか、またさせないように**にはどうすればいいかが**cERLビーム運転時の主空洞の最大の関心事**である。 16



# ③cERL Main linac のビーム試験によるERLへの知見

- Field emissionのビーム運転への影響は？。
- 運転中の空洞性能は？
- 運転に対するfieldの安定性は？
- 空洞起因のtripは？
- 空洞性能のためのInterlock(保護)ができていないか？



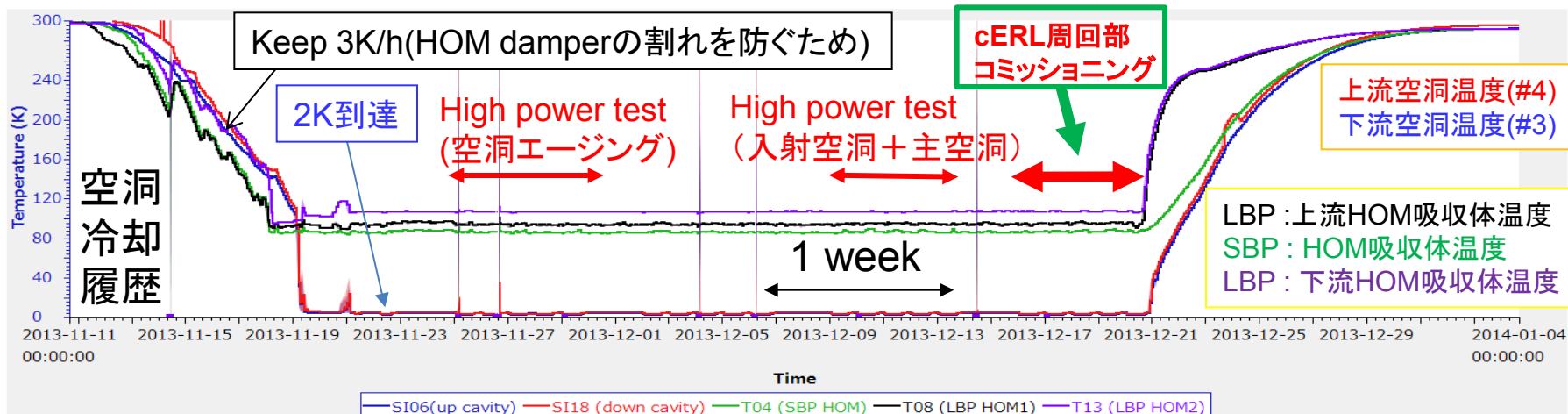
どれくらいのfield が今のところ運転可能と言えるか？



最終的に知りたいことは：**大電流時(max 100mA)**に本cERL Main linacがenoughか？ → 特にHOM damperおよびITL対策。

# 超伝導空洞入射器 & 主空洞総合冷却 & パワーテスト(2012.Nov-Dec.)

11/11から冷却。入射空洞と主空洞の同時冷却は今回が初めてであり、**2K到達まで2週間弱の冷却期間が必要**であった。

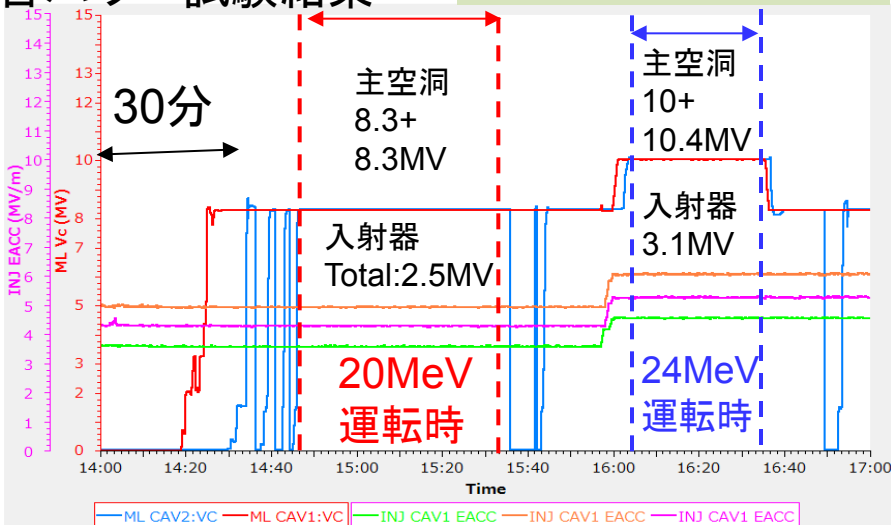


## ハイパワーテスト時 & ビーム運転中の冷凍機運転

- ・午前中(9:00~)にHe冷却を行う。13:00~22:00(or24:00)まで空洞ジャケット内にHeを溜め、2Kをkeep & study。
- ・夜間 & 週末はHeは4K keep また80Kの液体窒素を流し続ける(80K keep)。

## 入射空洞 + 主空洞総合パワー試験結果

20MeV運転時:  $56\text{m}^3/\text{h}$   
24MeV運転時:  $70\text{m}^3/\text{h}$



- ・最大12-13MV、  
・8.3MVおよび10MVで30分以上保持可能
- ・放射線 onset は前回と同じく 8MV程度
- ・Gate valveを開けても放射線の増大なし。
- ・冷凍機の熱負荷はMax  $80\text{m}^3/\text{h}$ を超えず安定に熱負荷の制御可能。

超伝導空洞の性能劣化なし

cERLの要求値

振幅安定度:  $<0.1\%$   
位相安定度:  $<0.1\text{deg}$   
を十分満たした

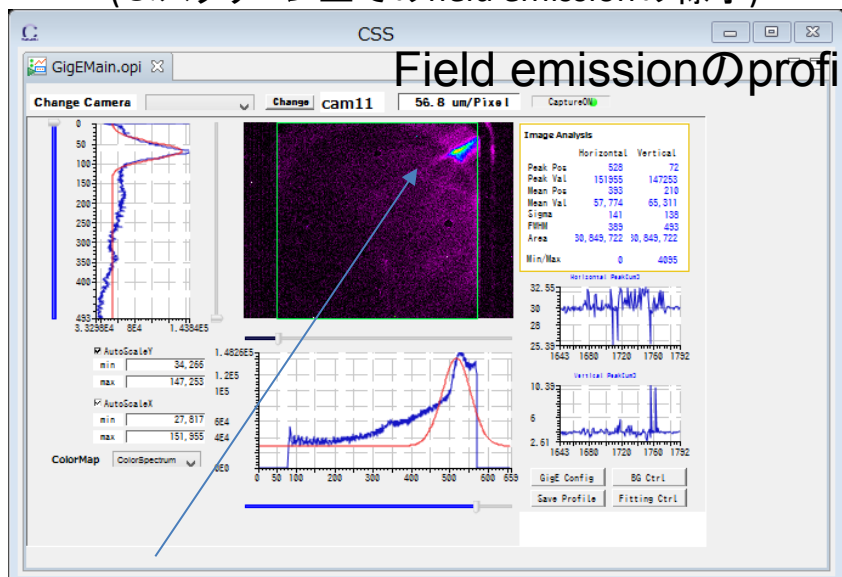
FPGAによる digital制御  
詳細LLRF発表



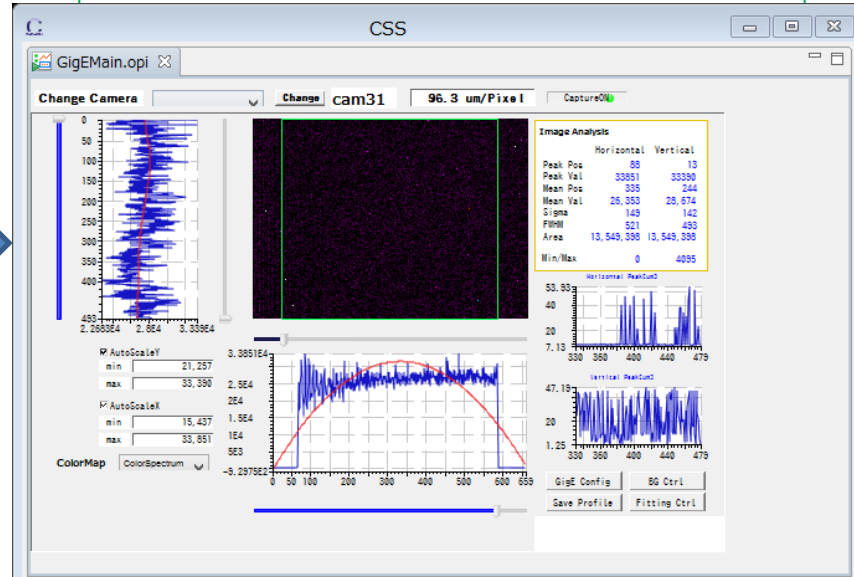
marginを見て20MeVで運転

ビームcommissioning時の最初の主空洞へのビーム入射(2013.Dec)  
(&スクリーン上でのfield emissionの様子)

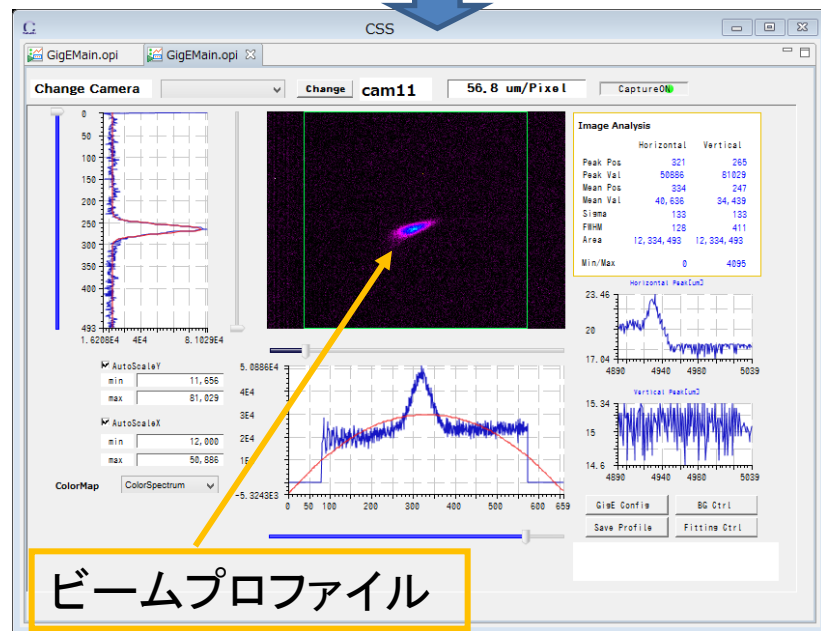
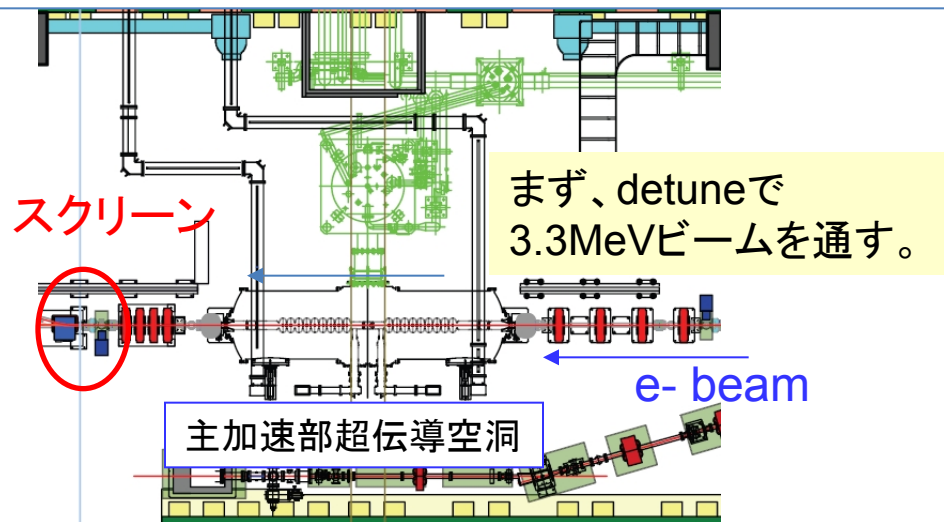
Gate widthを小さく10usしたところ、FEの影響はほ  
ぼみられなくなった。(ビーム調整可能に)



Field emissionのprofile



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。

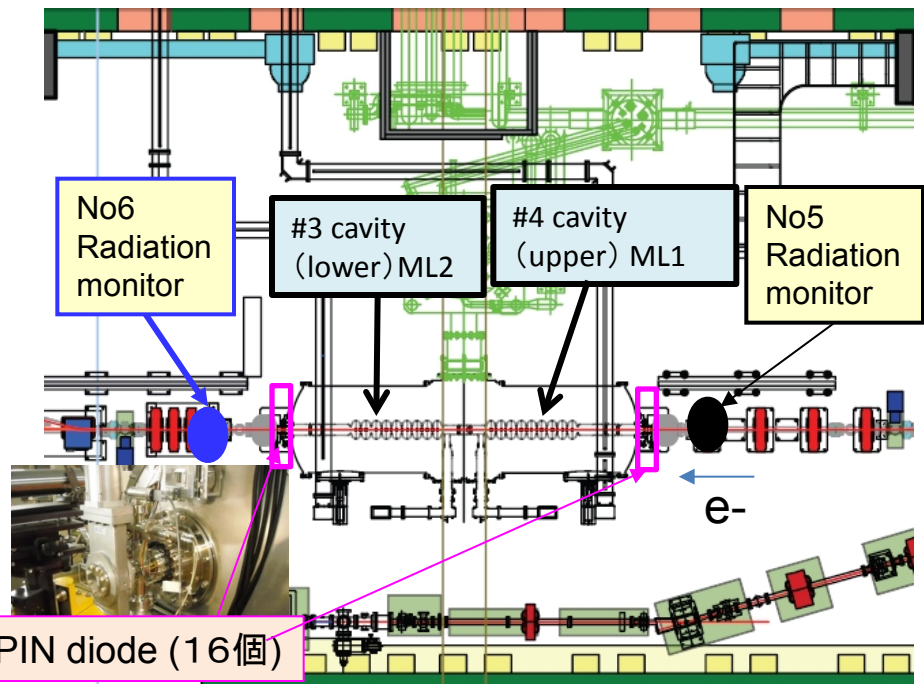


ビームプロファイル

- ・懸念のHOMダンパーや空洞キックなどの影響なく、加速成功。
- ・ビームプロファイル測定へのfield emissionの影響はなし。

そのお、ビームを主空洞に入射(3.3MeV)。スムーズにビームがスクリーンでクリアに見える

# cERL主空洞のビーム運転状況と劣化の現状(1月以降の長期運転での空洞性能劣化)



2013年12月16日にcERL周回部commissioning開始  
 Beam energy 20MeV, beam current (max) 10uA

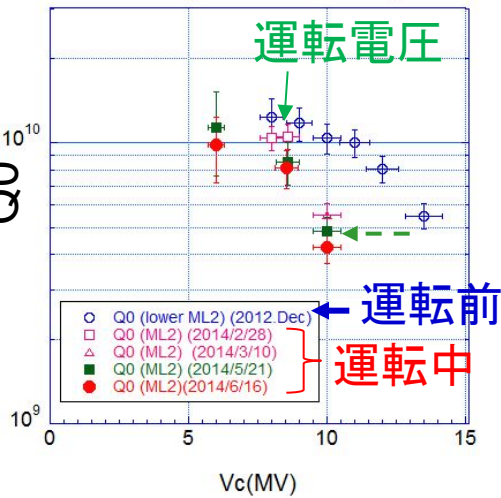
2014年					
1月	2月	3月	4月	5月	6月
	7週間			5週間	

周回部ビーム運転(1/30-3/14)  
 放射線試験CWビーム10uA。  
 エネルギー回収達成。

周回部ビーム運転  
 (5/22-6/20) optics調整  
 &大電荷運転(7.7pC)

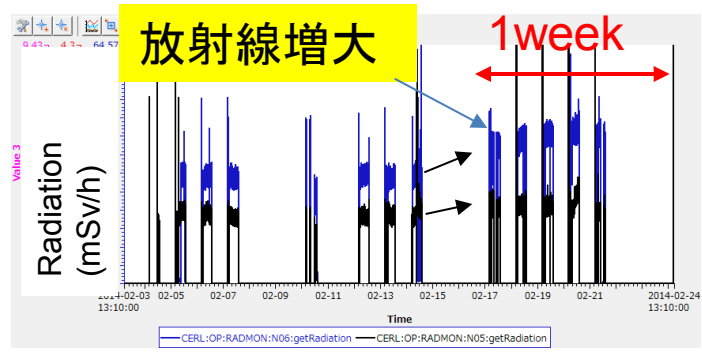
長期運転中のradaiton増大による空洞劣化を見るため2つのモニター(radiation monitor (Si) (ALOKA)、PIN profile monitor)を radiationの出る空洞の軸方向に常時設置。

## 運転前後のQ値測定

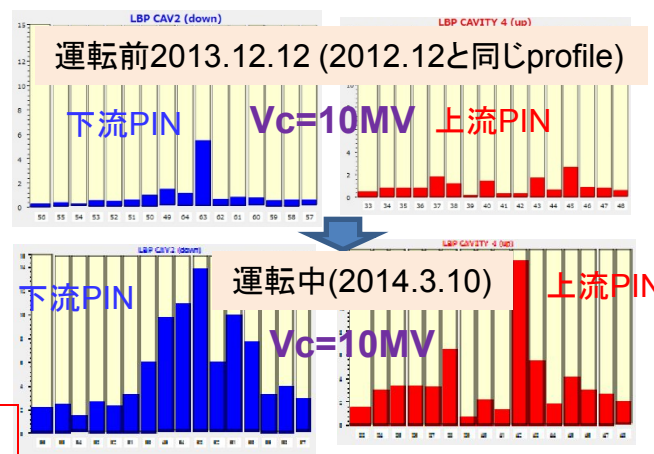


## 運転に伴う放射線の状況

2月初めの20MeV運転を始めてから3週間の radiationの様子。3週間後に突然下流に radiationが増える現象が見られる。



運転電圧ではQ値の劣化は少ないが、高い電圧ではQ値の劣化が見られた。それに合わせて、PINの放射線も全体的に増大していることも判明した。

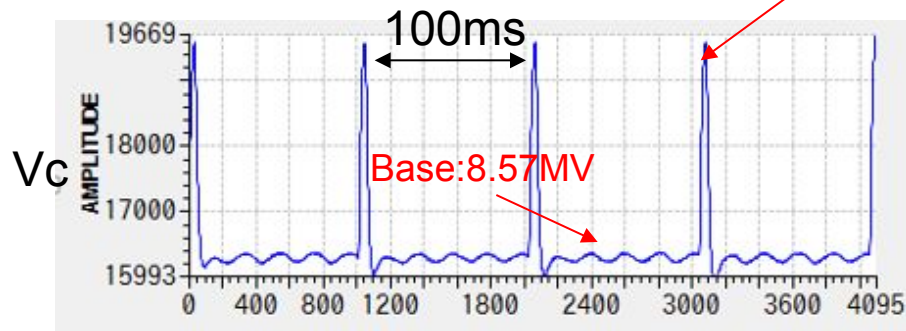


運転中に空洞以外の真空悪化に伴う空洞性能劣化も見られた。

長期的な運転での空洞性能劣化は radiationの変化から追従可能。

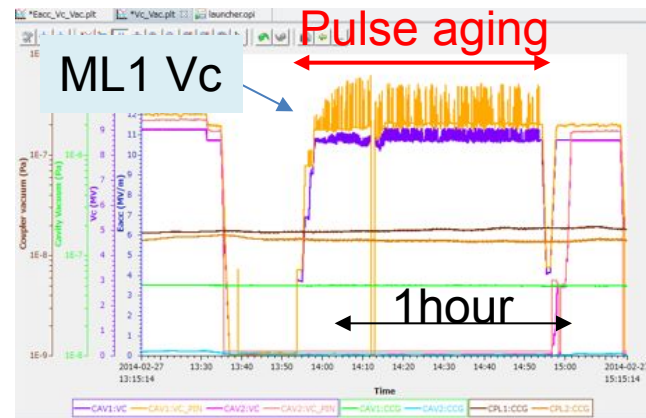
# 運転中の空洞劣化回復メソッド(Pulse aging)

## 空洞電圧測定波形(digital)(Vc)

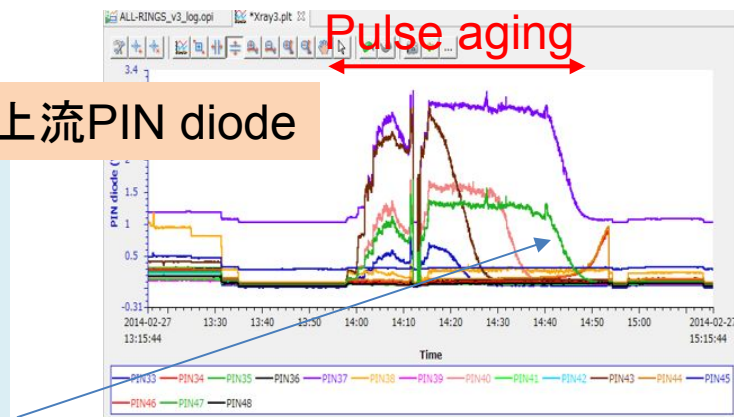


Duty 10Hz 4ms [peak:11MV] (pulse)

運転中に空洞以外から異物が空洞内の電場の高い処に付着するとfield emissionを起こす可能性が考えられる。その際はその異物を砕くために逆にさらに高い電場を一瞬与え、瞬間的に高いエネルギーを異物に与え、なくす(異物を溶かす?)方法が空洞パルスエージングである。これが超伝導空洞の性能改善に寄与するかを確認した。



## 上流PIN diode



Pulse aging中にPINの信号が独立に減少しているのがわかる。(aging効果あり。)

パルスエージングを行った。(10Hz 4ms) 8.5MV+2.5MV(pulse)

ML1 は15分 + 1時間

ML2は15分 + 1時間

両方ともパルスエージングの効果あり。減少。(ML1 : 8.57MV & ML2 8.57MV)

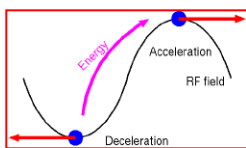
上流radiation(No.5) 38.7mSv/h (2/25 21:00) → 20.48mSv/h (2/26 21:47)

下流radaition(No.6) 133mSv/h (2/25 21:00) → 77.9mSv/h (2/26 21:47)

放射線量が半減した。長期運転中の劣化はpulse agingにて現在は対処可能。さらに劣化源をなくすため、空洞内にHeを流し、電場の集中している場所にionをぶつける方法(He processing)を検討中。

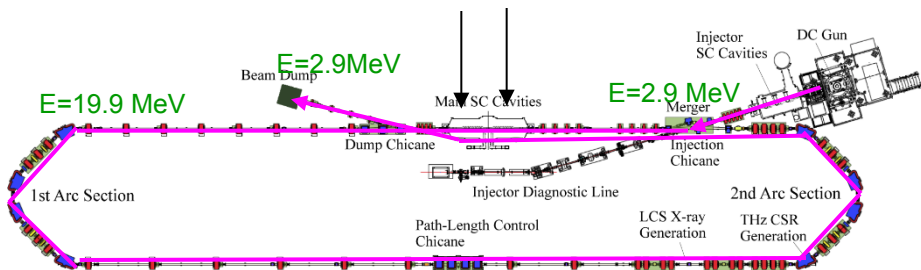
主空洞の加速電圧を変えず、敢えてERLを行なわない運転を行い、エネルギー回収の確認を行った。

### ERL operation (Case 1)

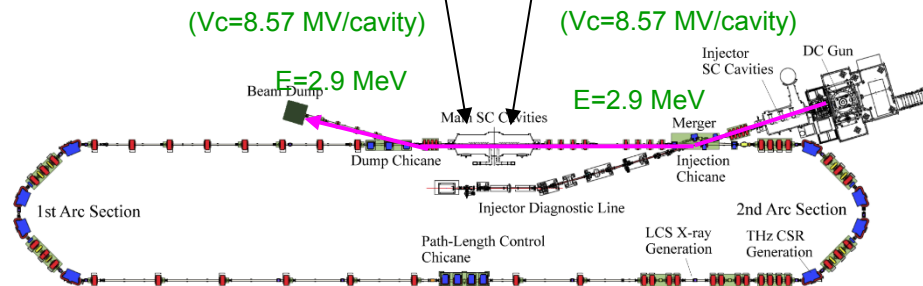


### Non-ERL operation (Case 2)

Cavity 1 and 2: 加速(1週目)、減速(2週目)



Cavity 2: 減速 Cavity 1: 加速



加速電圧  $V_c = 8.57 \text{ MV}$  (Cav1, Cav2)

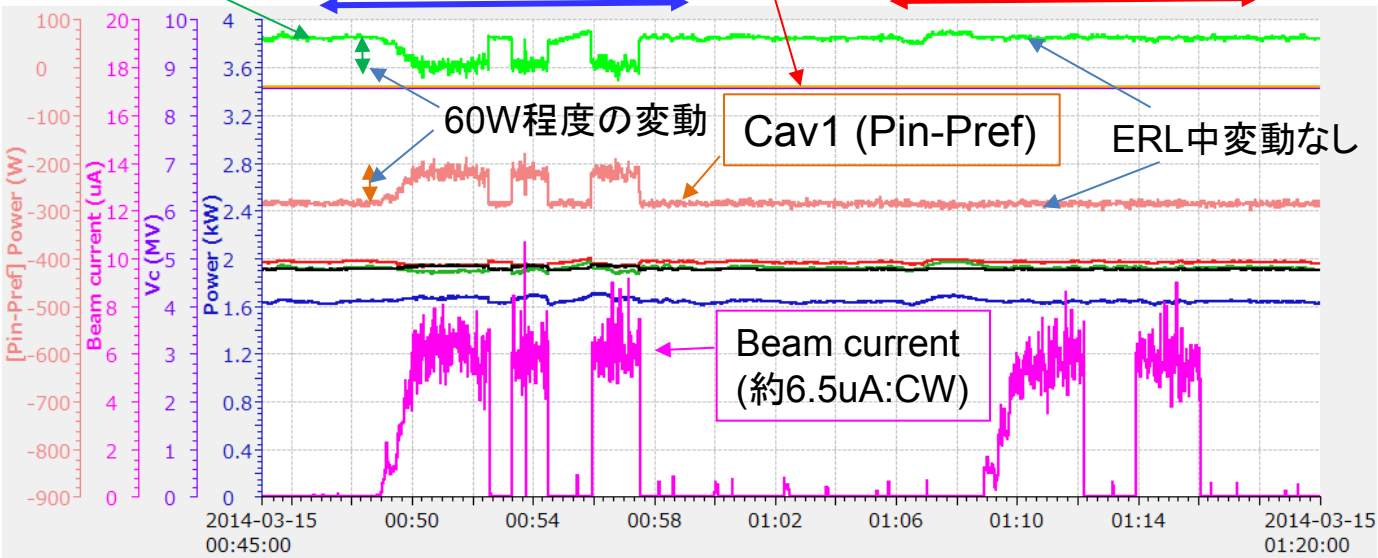
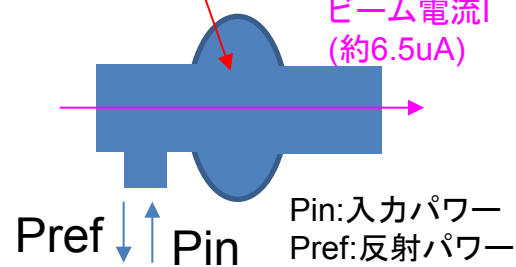
加速電圧  $V_c = 8.57 \text{ MV}$

Cav2 (Pin-Pref)

Non-ERL

ERL

ビーム電流  $I$   
(約  $6.5 \mu\text{A}$ )



Pin: 入力パワー  
Pref: 反射パワー

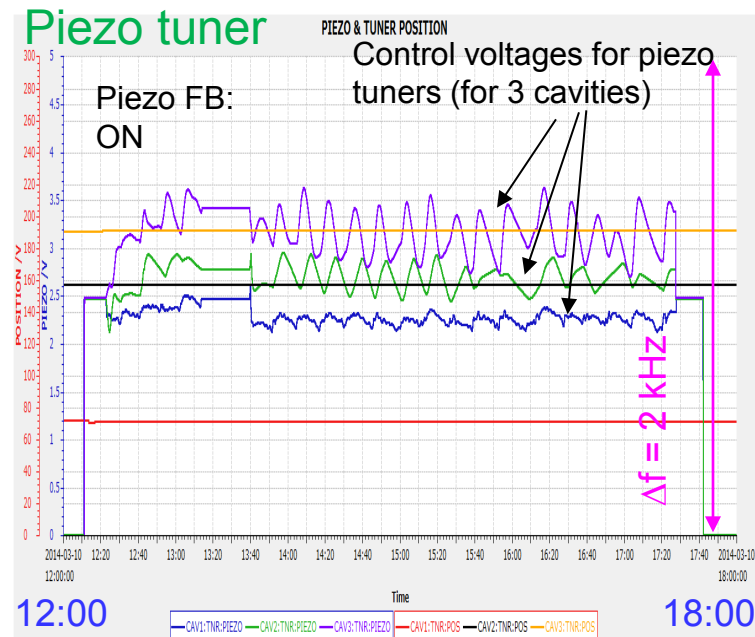
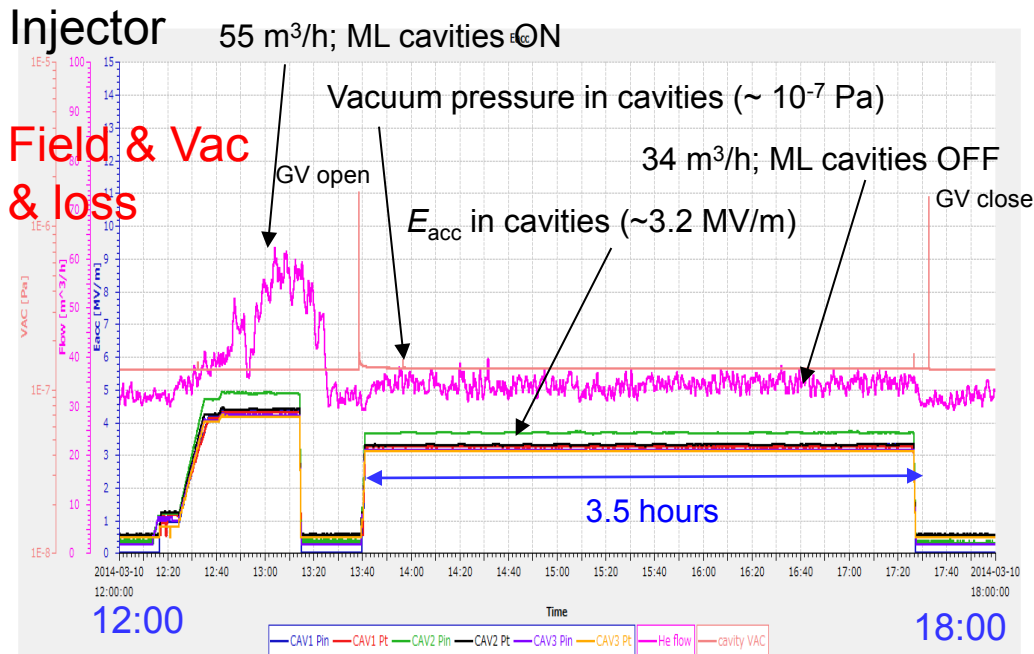
エネルギー回収がない場合、  
ビーム加速には  
 $(\text{Pin} - \text{Pref}) = V_c \cdot I$  ( $= 55.7 \text{ W}$ )  
分が必要になる。ERLが成立  
しているときは空洞内でビー  
ムエネルギーをやりとしてい  
るため、Pin-Prefに変動が見  
られない。

エネルギー回収を確認

— CAV1:P\_IN — CAV2:P\_IN — CAV1:P\_REF — CAV2:P\_REF — CAV1:Vc — CAV2:Vc — BEAM\_CURR  
— Pin-Pref (ML1) — Pin-Pref (ML2)

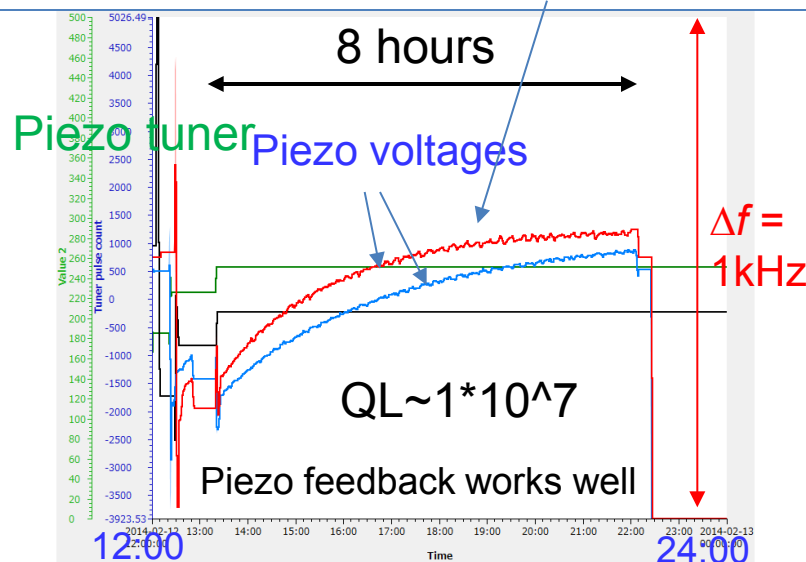
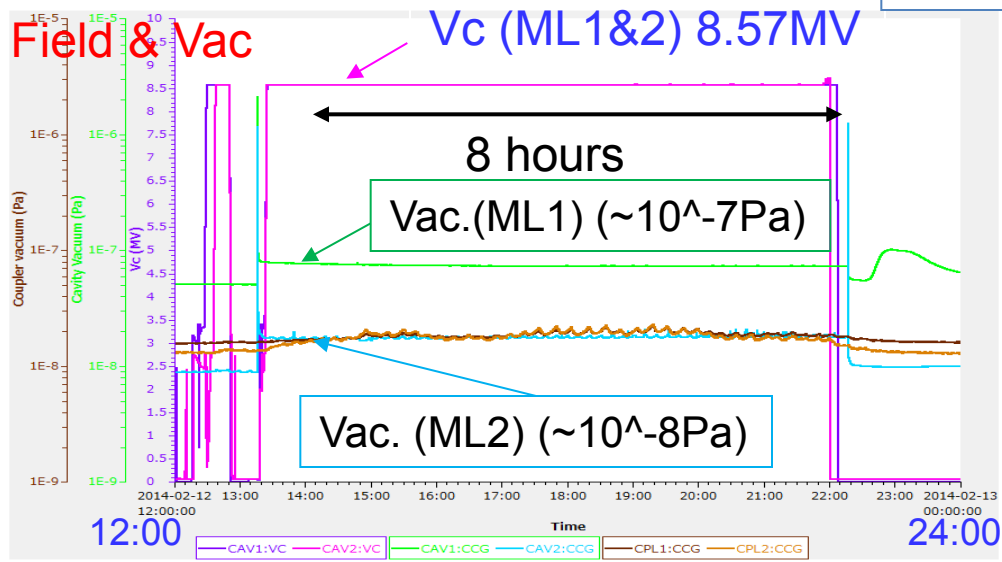
# 20MeV運転時の入射器 & 主空洞の運転状況と長期安

入射器 & 主空洞とも20MeV運転時にVcが安定に運転可能。

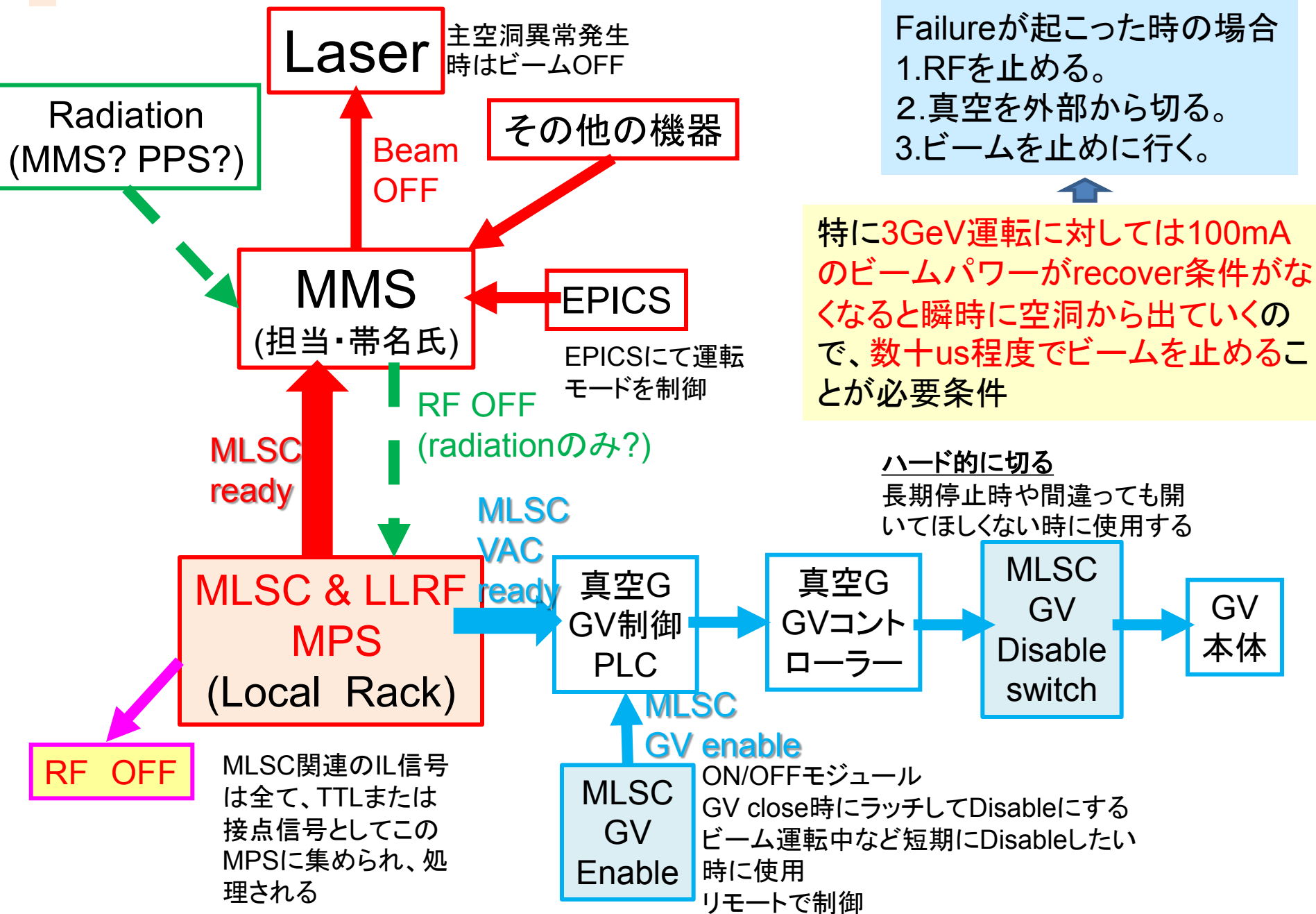


## Main linac

4K→2Kによるpiezoのdrift→2K keepでは問題ない



# ERL主空洞 RF & 真空インターロック全体概念図





## cERL運転中の超伝導空洞停止の統計

- 2014年5月20日～6月20日までの1か月間(空洞運転時間: 10時～22時)
  - 主超伝導空洞の停止回数: 20回

ITLの内容(RFに対して):

**Power** Pin(up), Pref(up), Pt(up,down) (Pin, Pref<5kW) , Pt (5MV/m< , <9MV/m)

**冷凍機**: He level±5mm, He pressure (<3.05kPa)

**空洞&カプラー真空**: < 1\*10<sup>-5</sup>Pa

**カプラー窒素ガス流量**: in & out (>30l/min) (default 60ml/min)

**温度**: 上限(80度以下)(常温部)

**アークセンサー**3つずつ

**MPS**: ビーム&放射線など

原因	回数	
チューナ	1回	
RF FB制御(High gain 運転)	3回	Pin急激に上がった。(振動などによるもの) Middle gain で運転することで対処可能
アークセンサに太陽光入射	3回	対策済み
位相の設定ミス	1回	
ビーム調整中のカプラー・空洞の放電	4回	ビーム調整法の修正で対応(ビームが空洞にあたったことによるもの)
空洞下流の真空圧力上昇	4回	ビームダンプからの圧力上昇
ビーム負荷	3回	RF FBのゲインを変えて対処
冷凍機のオーバーロード	1回	対策済み

→ 空洞起因の field emission や quench による trip や ITL は ない。

すべて、人的 operation miss か 外部によるもの。

**安全サイドで働いている。** その分 ITL で落ちる ratio もまだ調整しきれていない。(少し多く ITL がかかる。) 特に High Gain では空洞の microphonics の増幅やビーム負荷による Pin の増幅が大きいので、今後は gain 調整といかに早く ITL が落ちた時から立ち上がりを早くすることが大切。

## ERL main linacとしてビーム運転で知り得たこと(summary)

- 空洞には、大きな影響なく、ビームを通すことができた。(CCG磁場の対策は必要。)  
Field emissionもビーム調整などに対しては大きな影響は今のところ、問題ない。
- Fieldの安定性
  - QL  $1.3 \times 10^7$ でmicrophonicsの影響もなく、振幅 $<0.1\%$ 、位相 $<0.1\text{deg}$ を運転中は確保。今後はQLをさらに高く( $>2 \times 10^7$ )して運転可能かが課題。
- 空洞性能劣化に関して
  - ビーム運転前では空洞劣化はなかったが、運転中に劣化が進んだ。
  - 対処策としてはpulse agingにて劣化対策を行っている。根本的なHe processingなどが効くかが今後の課題。
  - 但し、今のところ8.5MVではQの劣化はまだない。今のところこのfieldが運転可能電圧として我々が提唱できるもの。→今後fieldを上げて長期運転はしてみたいところ。
- 運転中のITLとtripの原因。
  - 5月～6月にかけての5週間では20回のITL
  - ビーム負荷、及び、HGIによる振動起因のPinの増加によるもの、またダンプの真空劣化によるGVclose時の振動によるRF offが主な原因。
  - 但し、空洞起因のfield emissionやquenchによる空洞tripは一度もなし。カプラー原因のtripもなし。この結果はJlabのCEBAFとは違う。→今後fieldを上げて長期運転してみたい。
  - ITLは安全サイドにRFを落とすにいく→空洞保護はほぼ完璧。今後はgainのoptimiseでtripを減らし、かつ落ちた時にいかに早く立ち上げるかが課題。
- HOMの大電流、大電荷試験はこれから。但し、ビーム対し、今のところHOM damperによるcharge upなどの大きな影響はまだない。

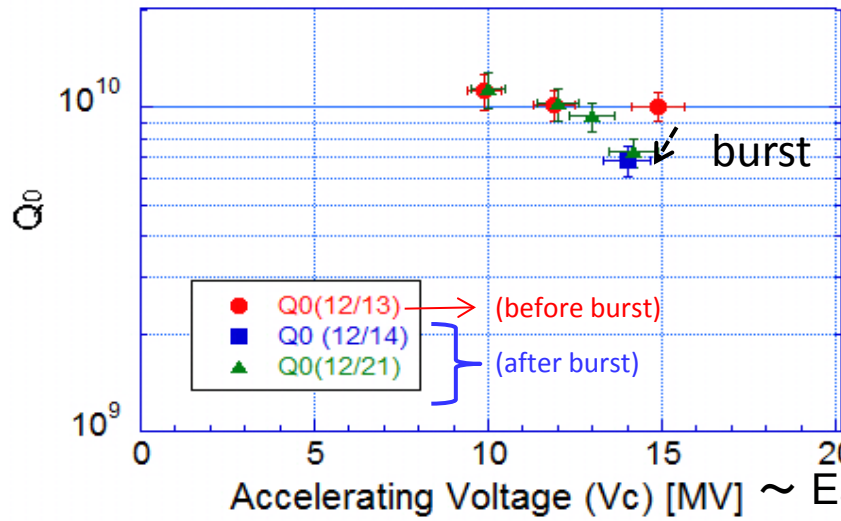
# Backup



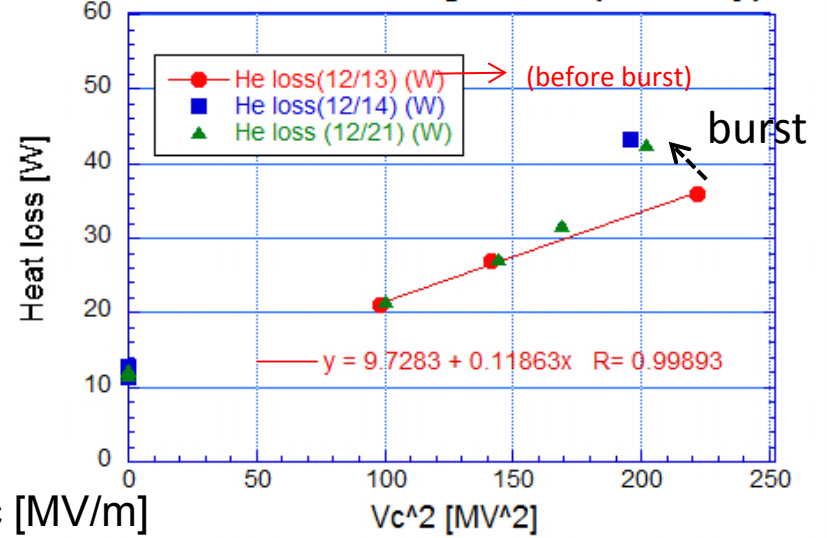
# Dynamic loss measurements

#4 (Upper)

Vc vs Q<sub>0</sub> (#4 cavity)

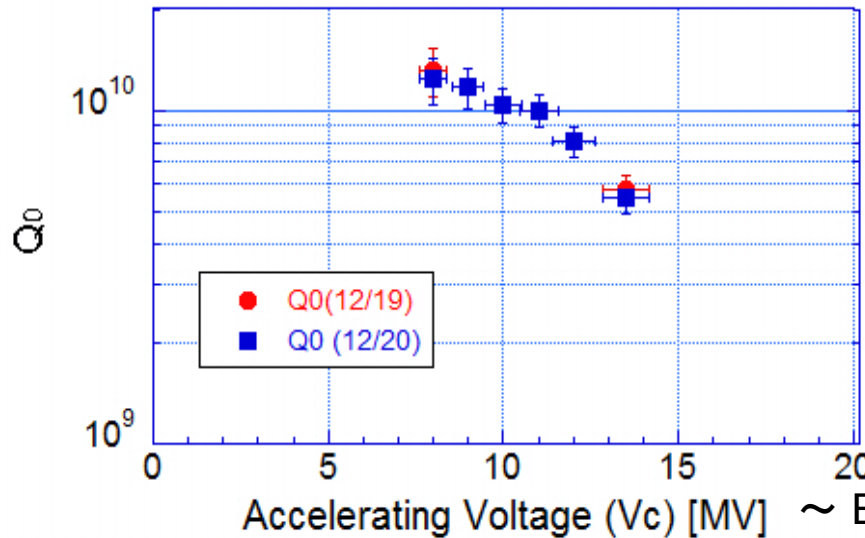


Heat loss from He gas flow (#4 cavity)

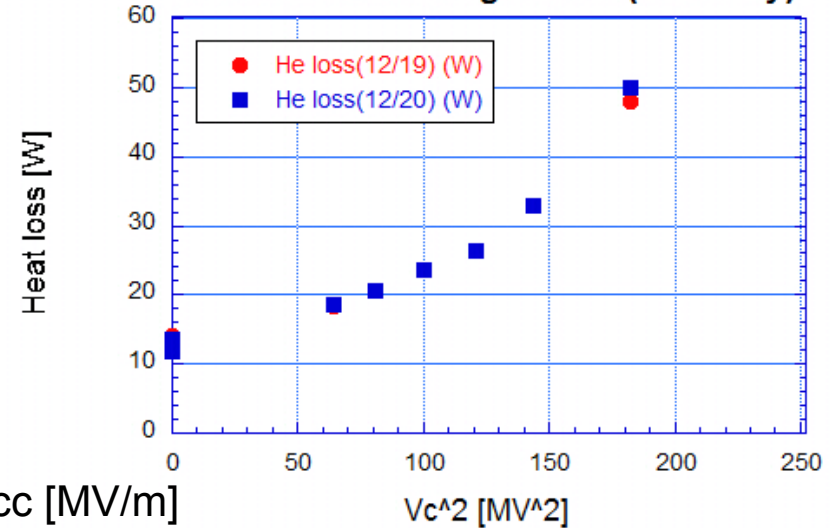


#4(Lower)

Vc vs Q<sub>0</sub> (#3 cavity)



Heat loss from He gas flow (#3 cavity)



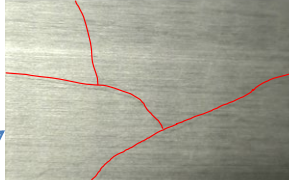
Q-value was dropped by field emission ← Cryogenic loss drastically increased.  
 Q-value is higher than  $1 \cdot 10^{10}$  at low field of less than 10MV of Vc.  
 Magnetic shield works well .

2K Static loss :  
 11W at final (little large)

# Cryomodule Cooling to 2K

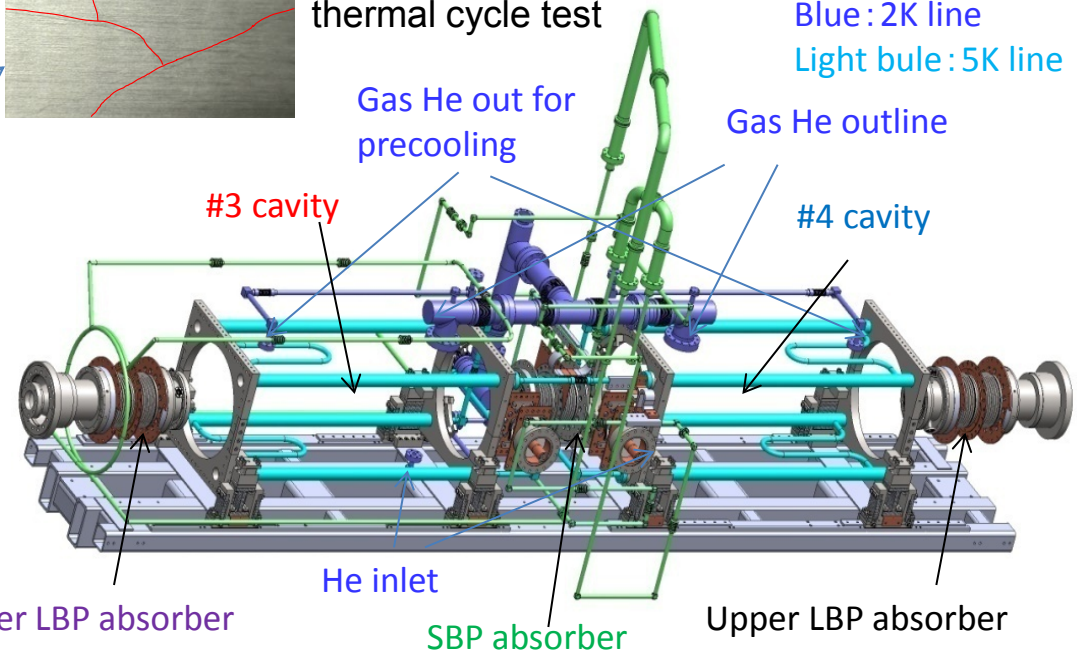
## Strategy of cooling

- HOM damper should be cooled down slowly, to **avoid cracking of ferrite**. 3K/h was required for 80K line, which cool the HOM dampers.
- Relatively large temperature difference was avoided within each 2K, 5K(He) and 80K(N<sub>2</sub>) lines.

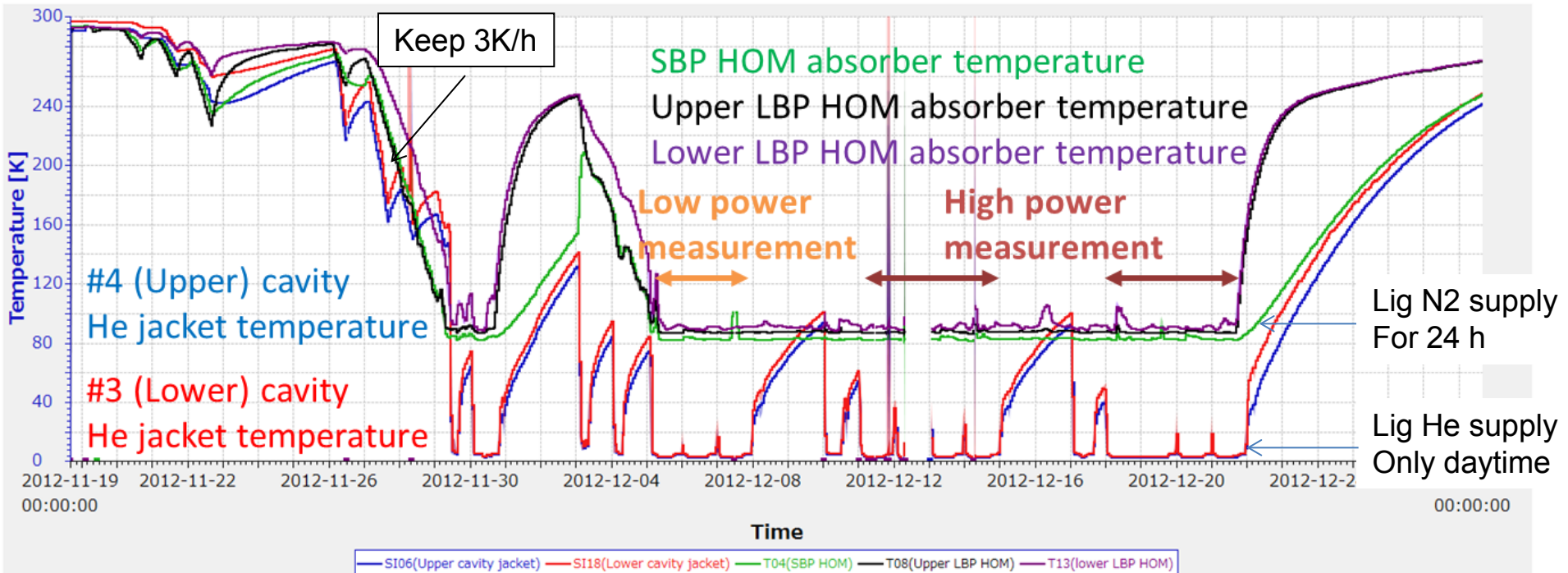


Crack of damper ferrite at thermal cycle test

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



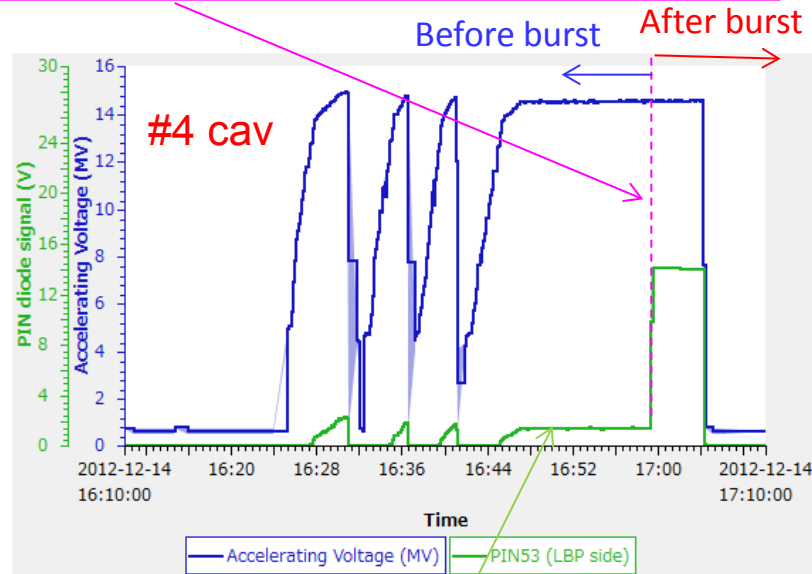
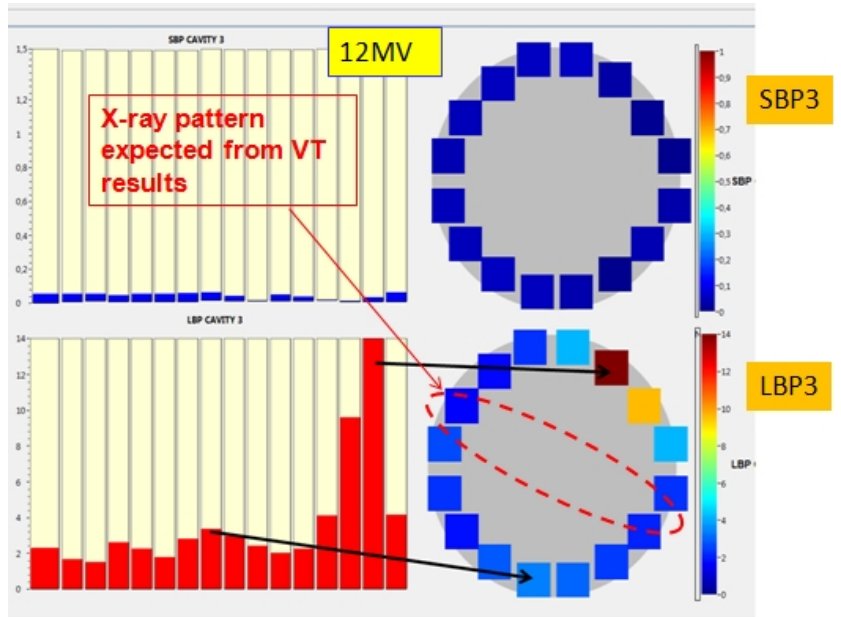
## History of 2k cooling



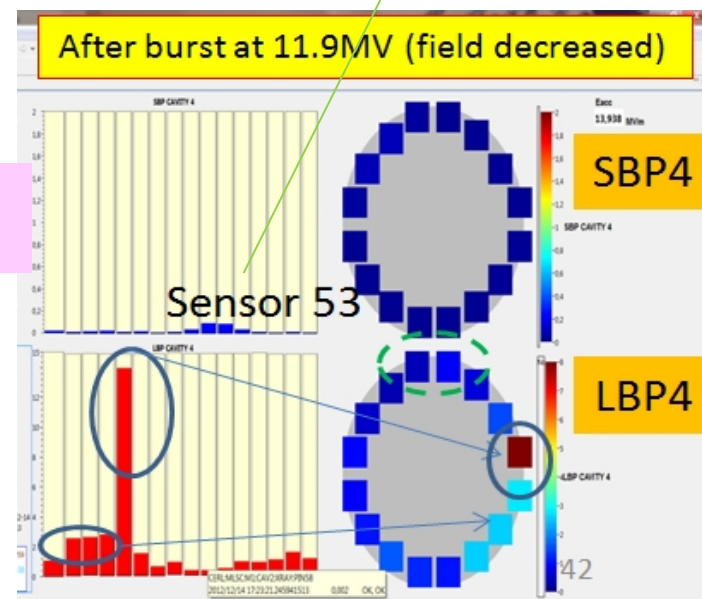
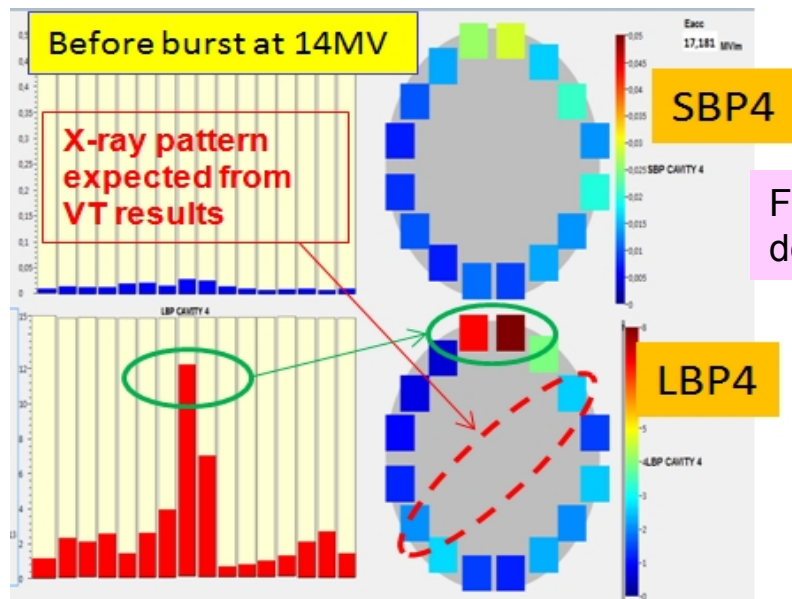
# Detail radiation profile measurement

Sudden burst event was observed under keeping field of 14.5MV

#3  
(lower)



#4  
(upper)



- Radiation pattern was changed from V.T
- Radiation pattern also changed after X-ray burst

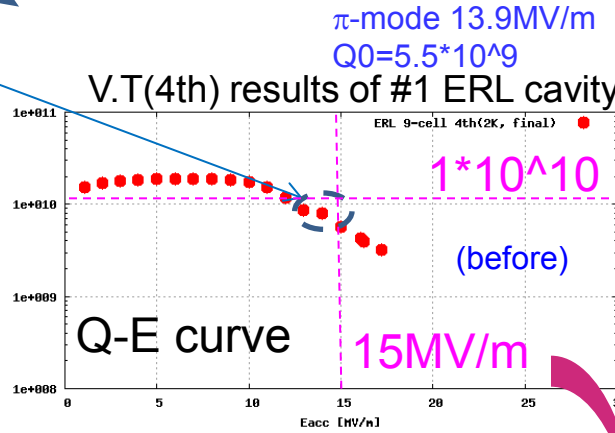
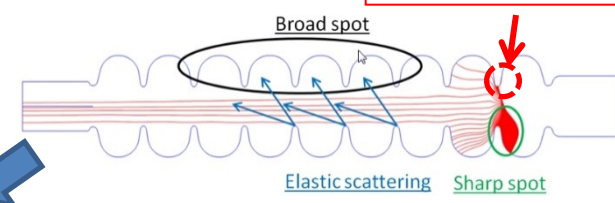
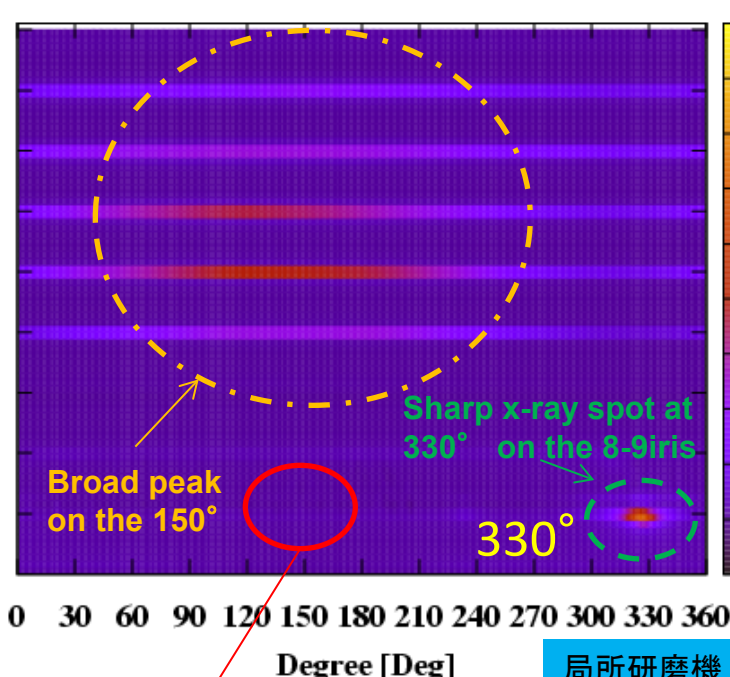
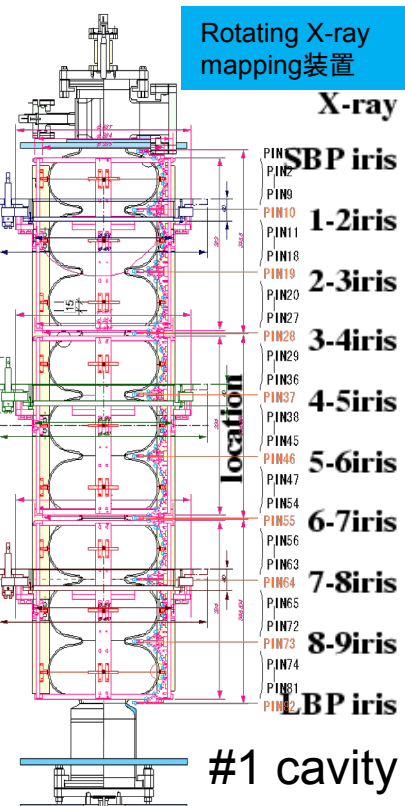
- Another new radiation sources were produced during assembly work and high power test.

Rotating X-ray mapping装置

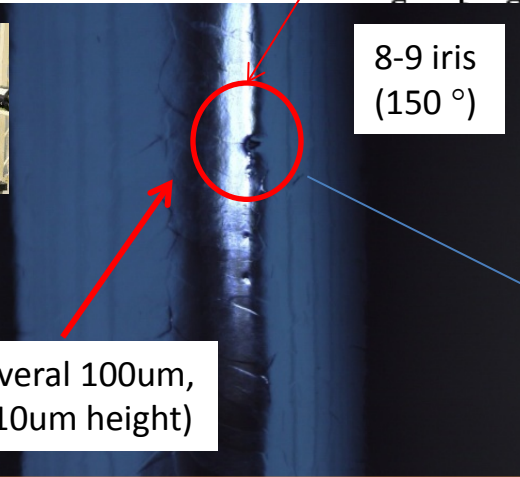
ERL 9cell prototypeでの縦測定例 (field emissionの回復には?)

Source on iris

X-ray mapping (No.10) (2nd pi-mode 13.9MV/m ccw 145sec/turn)

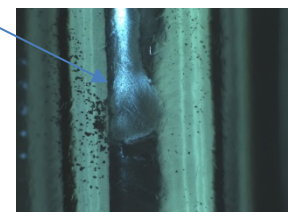
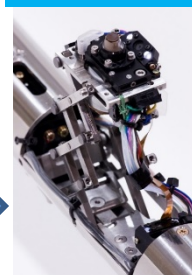


内面検査カメラ



tip ( $\phi$  several 100 $\mu$ m, several 10 $\mu$ m height)

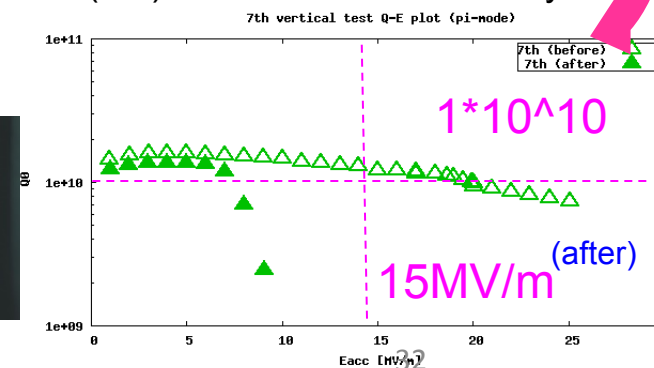
局所研磨機



After grinding local dip

Local grind後に縦測定を行った処、Fieldが急激に伸びた。研磨の効果あり。

V.T(7th) results of #1 ERL cavity



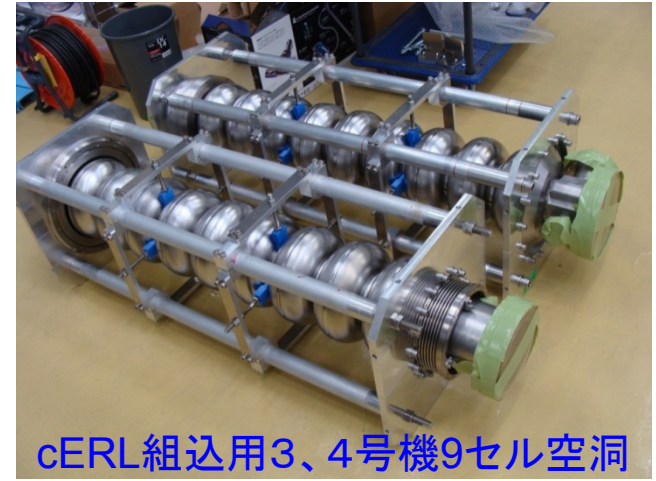
We found clear X-ray profile (broad & sharp) by rotating mapping system.  $\rightarrow$  powerful tool for radiation source search  
Tip were observed opposite side of x-ray sharp peak.

このように内面をきれいにして性能を確保する



# cERL 主空洞用空洞(3、4号機)の縦測定 (2011年末)

空洞性能で2台ともEaccで25MV/mを確保。  
 E<sub>pk</sub>/Eacc比較ではILCの37MV/mレベルの出来。  
 さらに2個とも15MV/mでQ<sub>0</sub>=1\*10<sup>10</sup>を確保。  
 ERLの要求を満たすことが可能となった。  
 今までと何が違ったのか？  
王道はなく以下のような今までの積み重ねが大きい。



- クリーンな洗浄、組立方法への改善
  - EPエリアのクリーン化。
  - EP電流密度低下(表面の荒れをなくす。)
  - &一次水洗を水封入方式(表面のシミをなくす。)
  - 組立時のイオンガンの導入。(particle 混入の回避)
  - リンス工程でDegreaserの実施(硫黄の除去)
  - エンドグループ周りのブラッシング洗浄。

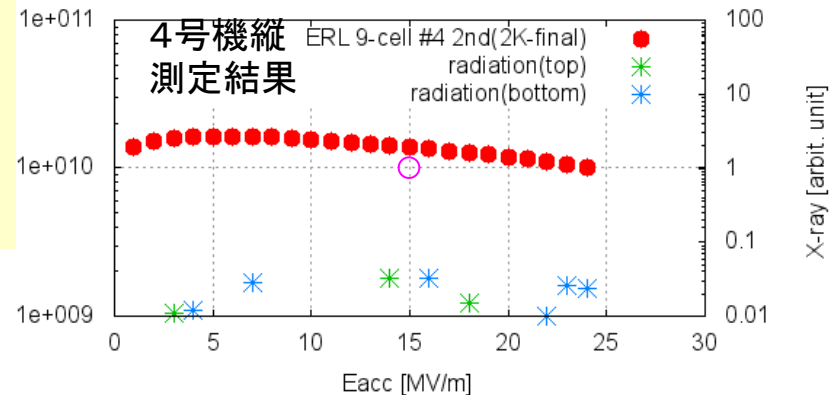
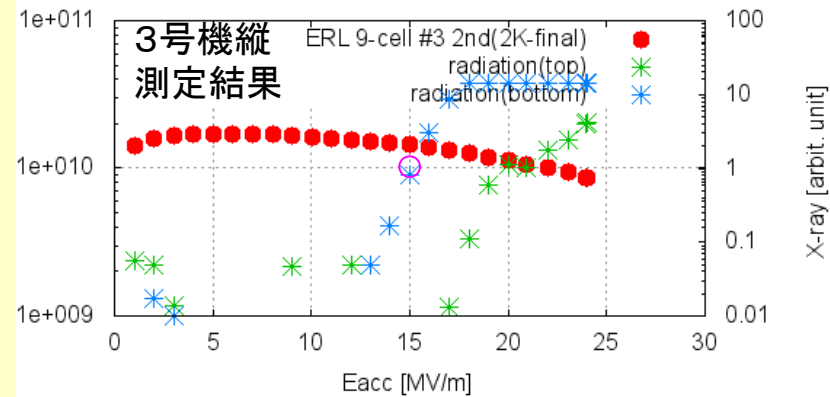
埃や異物の混入を抑える努力の積み重ね。

- ミクロの欠損などの同定、repair。
  - 縦測定時の温度、X線mappingによる欠陥部の同定(ERL用の回転式mappingが威力を発揮)
  - 測定前後の空洞内面検査システム導入。
  - 内面のlocal gridding systemの導入。

溶接の欠陥などの局所&早期除去可能。

これらはILC用にSTFで培った技術が非常に大きい。

X線のonsetを向上させ、Field emissionを大きく落とすことが可能に→モジュールの組み込み後にfield emissionを起こさないようにすることが次の課題。

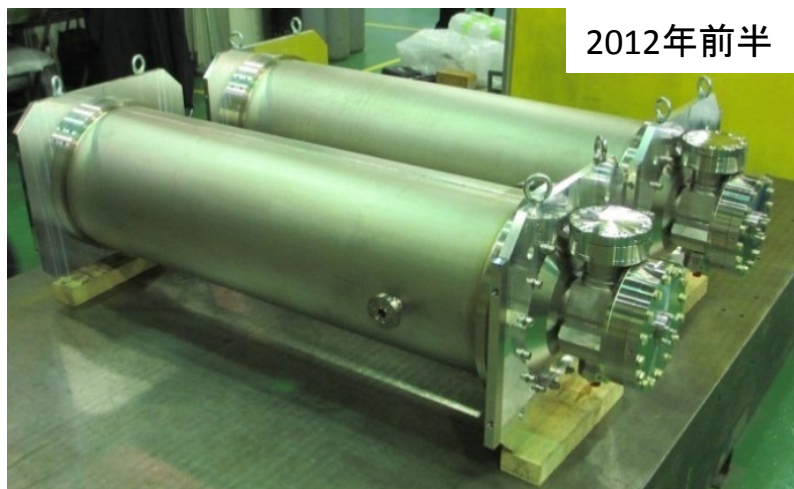


By K.Umemori

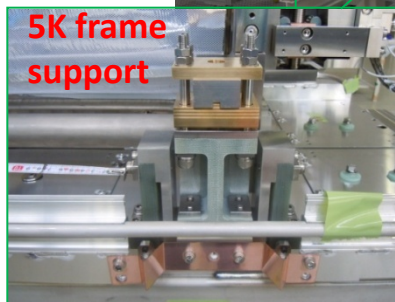
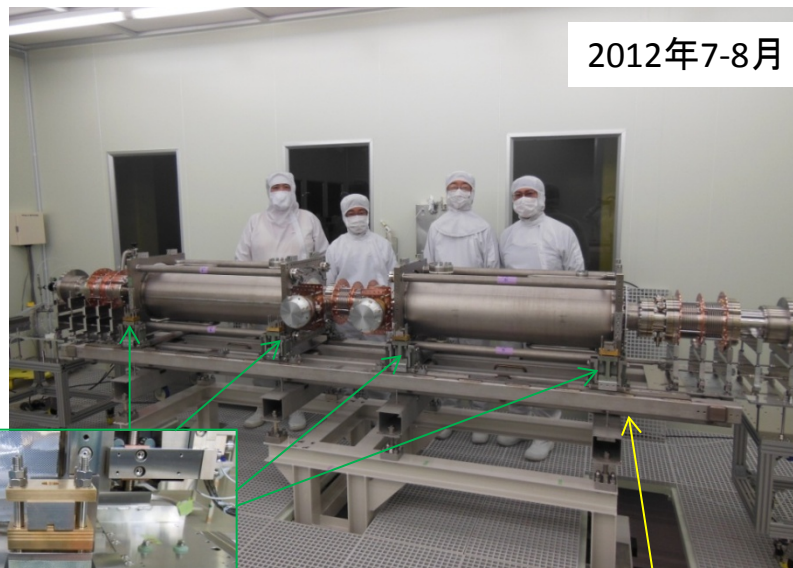
○がERLの目標値

## 縦測定後のモジュールアッセンブリ(2012)

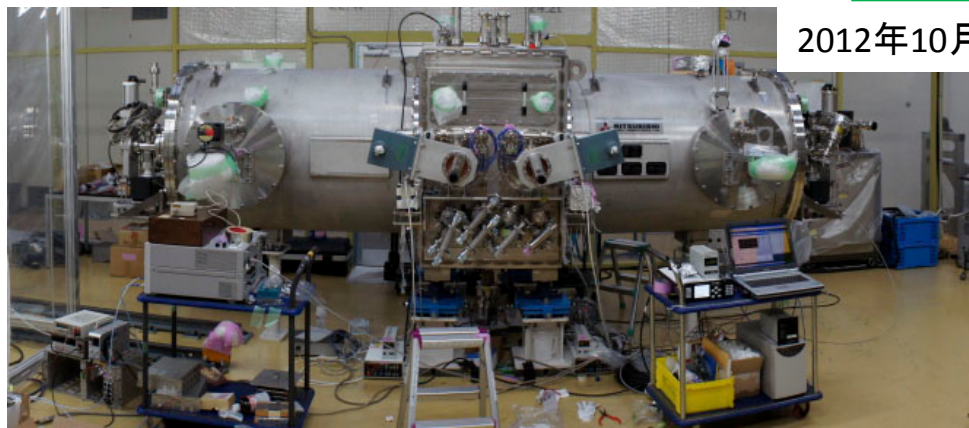
超伝導空洞、HOMダンパー、入力カップラー窓などをクリーンルーム(class10)にてアッセンブリ@KEK →ゴミ混入回避のため



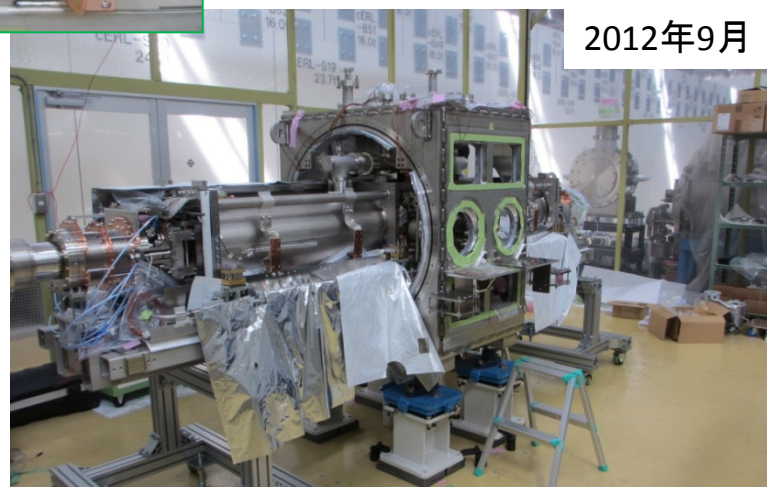
空洞単体での性能確認後、Ar封入した2台の空洞にHeジャケットを溶接。高圧ガス検査を行った後にKEKに。



Backbone set at 300K



空洞のアラインメント後、断熱槽をかぶせ、ゲートバルブを取付、リークcheckを行い、アセンブリ完成。



クリーンルームから出し、Heライン、磁気シールド、チューナー、センサー、熱シールドなどを装着。

# ここまで(cryomodule組込みまで)の課題: 空洞はなんで性能劣化したの？

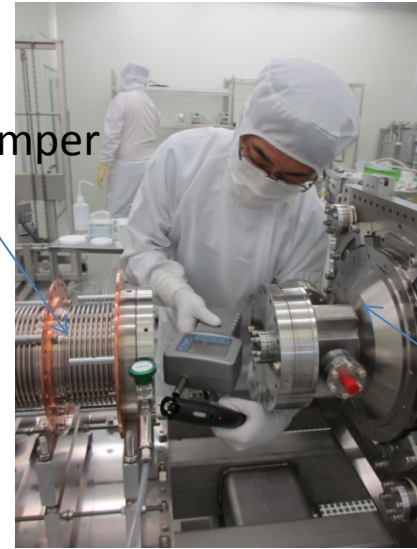
## [縦測定後モジュールアセンブリ前]

1. 縦測定スタンドにて真空状態で保管
2. ジャケット化に備えArパージ → O.K (2014.4月)
3. ジャケット化に備えフランジ交換 (最後はAr flowしながらバルブ封止)
4. メーカーとの間の輸送 (空洞内はAr封止)
5. メーカーにてジャケット化 (空洞内はAr封止)

- ## [モジュールアセンブリ]
6. HOM damper、beampipeの組立・ベーキング
  7. 空洞とHOM damperの連結 (空洞内Ar flow)
  8. 組立時のAr flow
  9. 空洞とinput couplerの連結 (空洞内Ar flow)

- ## [モジュールアセンブリ後]
10. リークテスト → Arパージ
  11. ゲートバルブ接続
  12. リークテスト → Arパージ
  13. シールド内への移動 (空洞内はAr封止)
  14. 空洞内の真空引き
  15. Coupler aging
  16. 冷却
  17. ビームラインでのパワーテスト

HOMdamper



Ar導入口(0.01umのフィルター通して)  
(カウンターフローを作る)

超伝導空洞

HOMダンパーつなぎ作業(class 10 clean room)



Gate valveつなぎ作業  
(クリーンブース  
class 100???)

超伝導空洞

ゲートバルブ

赤は空洞へのアクセス作業(クリーンルーム(class 4))  
緑は空洞へのアクセス作業(クリーンブース)  
青は空洞に絡む真空作業

縦測定に比べ、空洞性能評価後はより空洞内へのゴミ混入となりうる可能性の作業が圧倒的に多い。

- ・新しい治具や組立方法を検討し、縦測定(X-mapping)などにて、各工程での性能劣化の有無を調べる。
- ・さらに劣化時には空洞を高圧超純水洗浄にて、再度回復可能かを調べる。→縦測定後の洗浄効果

# Summary & 課題 → 課題と今後の詳細は梅森さんの発表より

- 夏の周回部建設後、主空洞+入射器空洞の総合ハイパワーテストでは2012年に行った空洞性能から放射線や冷凍負荷の増大も見られず、空洞性能を維持したまま、totalエネルギーで **20MeVのビームの加速**に成功した。
- 空洞電圧は10MV+10MVまでの安定に生成可能であり、FPGAによるデジタルfeedbackにより、**空洞振幅安定度 <0.1%, 位相安定度 <0.1deg**を達成した。→詳細三浦氏から
- 1月以降の長期運転にてfield emission増大での空洞性能劣化あり。**pulse agingを行うことで、性能劣化回復**を行うことが可能。→**長期運転への一つのアプローチが確立**。今後はよりよいprocess方法(He processsなど)の確立が必要。
- ビームダンプまでのビーム輸送を行い、主空洞にて、ビームの加減速を確認。その後、6uA程度のCWビームにて、**エネルギー回収を実現**した。→**大きなmilestone**
- 周回部の長期運転時(2014/1/29-6/20)でも入射+主加速部超伝導空洞の空洞起因のtripはほぼなく、**長期的に安定なビーム加速**を実現した。→ゲイン調整は必要。

ビーム運転に関してはエネルギー回収含め、一つの目途が立った。今後は以下の**赤(青)**が課題。

○今までの超伝導空洞開発、モジュール製作からビーム運転まで通じての評価&課題

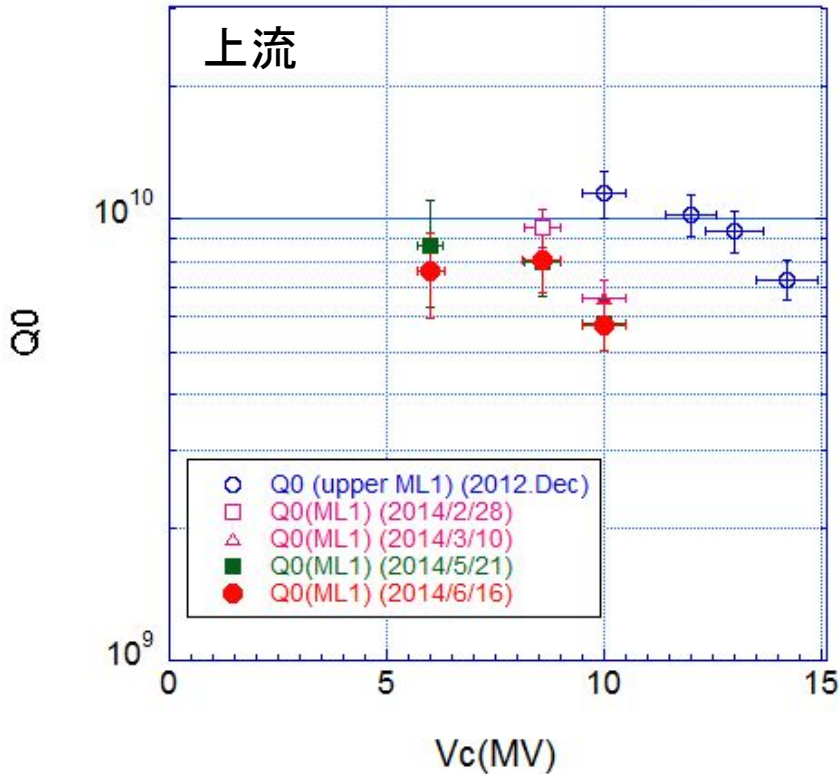
	空洞	入力カプラー	HOM	Tuner	真空	アライメント	static熱侵入	Field 安定性	その他
入射器	O.K (Q値劣化はHOM)	<b>100mA対応(熱負荷対策)</b>	<b>HOM couplerの熱負荷対策</b>	O.K(beamあり)	No leak, No trip	<b>Δ(&lt;0.4mmは厳しい)</b>	10W程度(設計通り)	O.K. (7MV/m) <0.1%, <0.1deg	10MeV加速
主空洞	<b>Field emission抑制</b>	O.K QL > 1*10 <sup>7</sup>	<b>HOM damperの熱サイクル割れ対策</b>	O.K(beamあり)	No leak, 1 trip	O.K (<1mm)	<b>10W程度(少し多い)</b>	O.K (8.57MV) <0.1%, <0.1deg (microphonics O.K)	<b>4連化対応。量産</b>

# 運転中と今後行いたいstudy

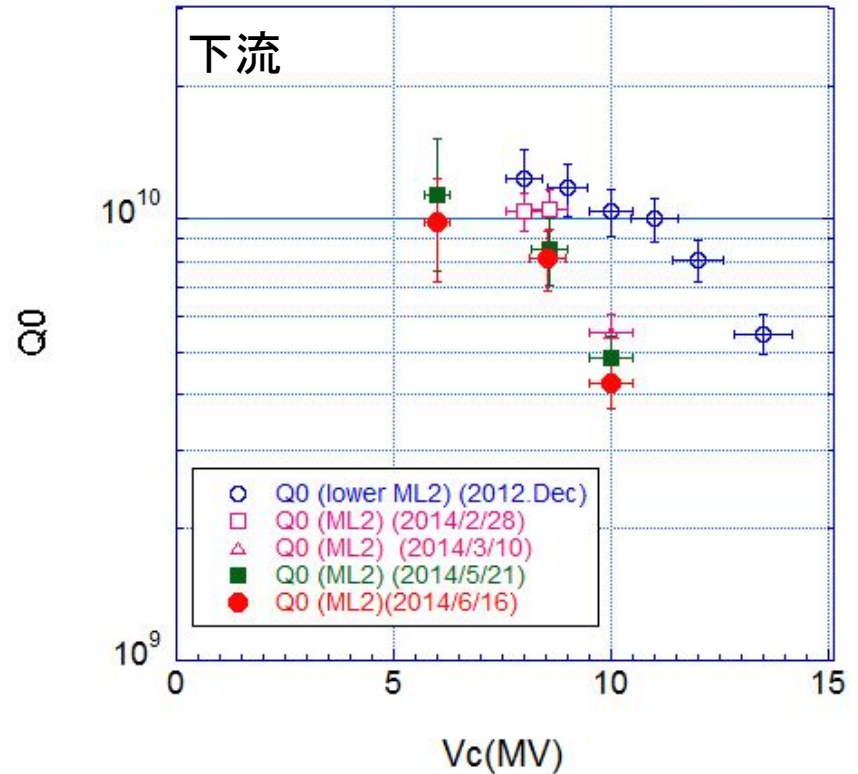
- 運転中
  - ML&LLRF含めて
    - QLを $2\sim 4 \times 10^7$ に上げてfeedback
    - **Middle gain** → 振動などのでHGだと何回かPin, Pref ITLで落ちたため。
    - Qiuさんstudy。(model feedback)
  - ML側
    - Microphonics 続き
    - He lossの早い測定
    - pulse processingのさらにoptimization
    - BPMとの相関
    - HOM study (100uAだと厳しいか？, 10mAのburstの時)
    - High fieldでのField emissionの効果(空洞の劣化 & trip ratioが増えるのか？)  
例えば10MV+6MVでasymmetryで片方をhigh fieldにして長期運転。
      - 運転ソフトの成熟化 (ITLで落ちた時をいかに早く立ち上げるか？)
- モジュールばらしで何が起きたかを最後みたい。

# Q値測定結果(cryomodule history)

Vc vs Q0 history (ML1)  
after cryomodule assembly



Vc vs Q0 history (ML2)  
after cryomodule assembly



モジュールテスト(2012.12月)(青丸)とビーム運転中(2014年1月～6月まで)の上流(ML1)、下流(ML2)空洞のQ値の履歴