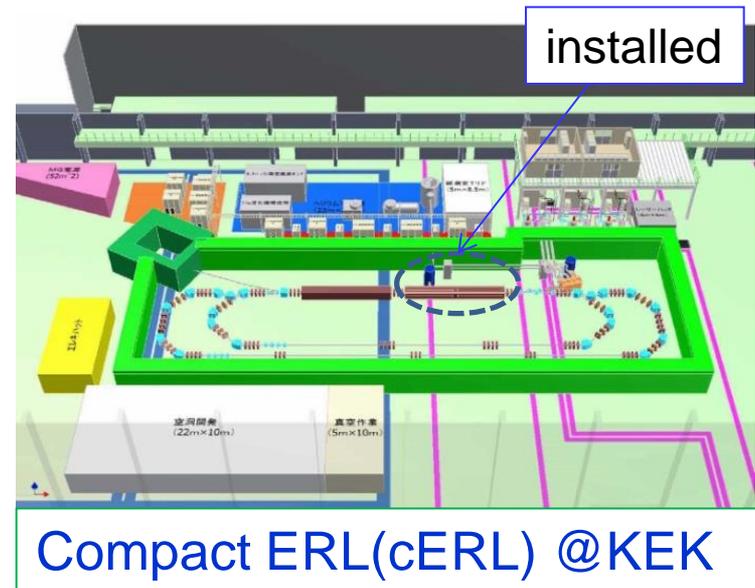


# Compact ERL主加速器超伝導空洞 クライオモジュールハイパワー試験

阪井寛志<sup>1)</sup>、梅森健成<sup>1)</sup>、江並和宏<sup>1)</sup>、佐藤昌史<sup>1)</sup>  
篠江憲治<sup>1)</sup>、古屋貴章<sup>1)</sup>、沢村勝<sup>2)</sup>、Enrico Cenni<sup>3)</sup>  
--- <sup>1)</sup>KEK、<sup>2)</sup>JAEA、<sup>3)</sup>総研大 ---

## Contents

- cERL主加速器超伝導空洞概要
- cERL主加速器クライオモジュール
- クライオモジュール組立、冷却
- クライオモジュールハイパワーテスト
- 他測定結果
- Summary&今後

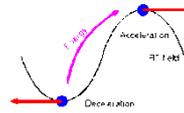


電子銃、超伝導空洞は当面は要素開発を行い、ERL実証機(CompactERL)に組み込みエネルギー回収、ビームダイナミクスの詳細研究を行い、ERLの問題点を見る。

# cERLの主加速部超伝導空洞:基本設計

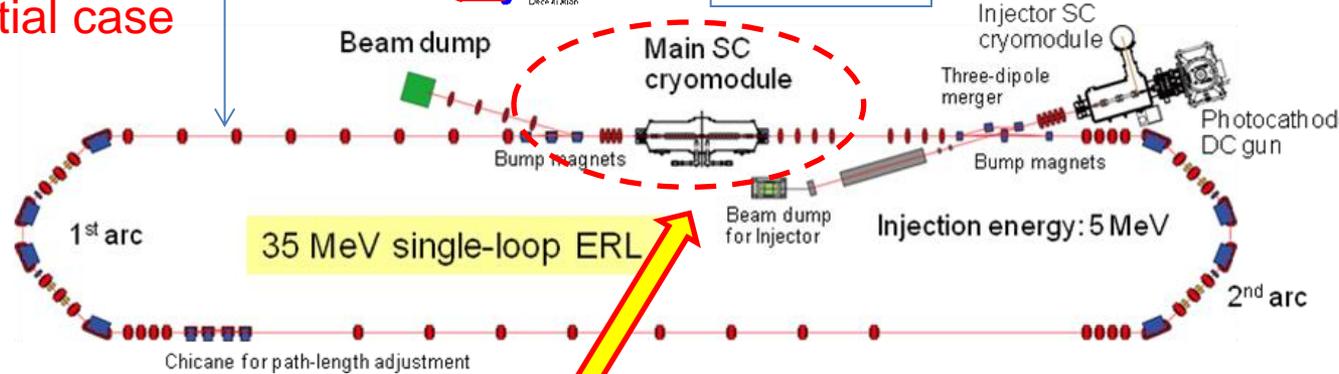
Current : 10-100mA  
 Emittance : 0.1-1 mm mrad  
 Bunch length : 0.1-3ps

cERL 概念図



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

$P_{loss} = 40W/m$  (20MV/m)  
 $10W/m$  (10MV/m)



cERL parameters Red: initial case

cERL主空洞の要求値(目標)

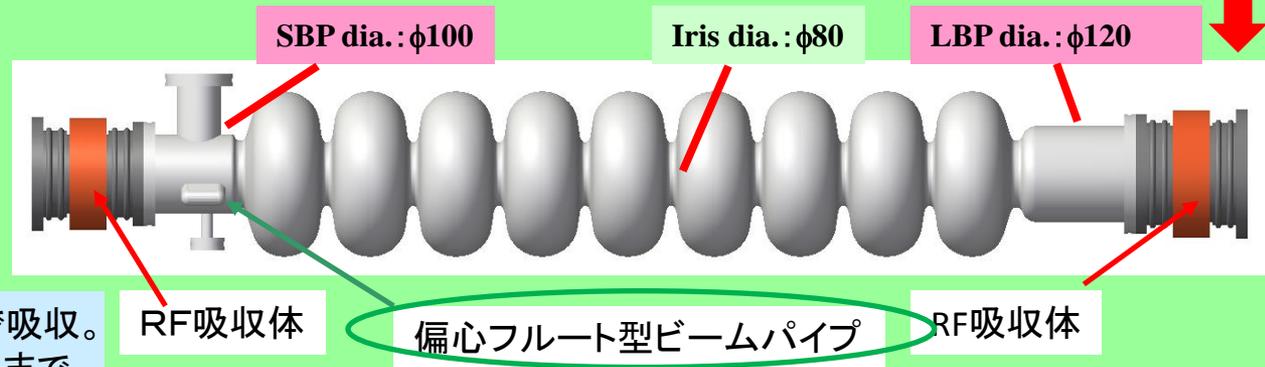
Frequency : 1.3 GHz  
 Gradient: 15-20MV/m  
 Q0: >1\*10<sup>10</sup>  
 Beam current : max 100mA  
 (100mA (in)+ 100mA(out))

## 設計方針(modify)

- 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

## KEK-ERL Model-2空洞

TESLA空洞をCW加速用にmodify。HOM coupler使用せず



空洞形状も変更。HOMをRF吸収体で吸収。HOM-BBU閾値で設計上最大600mAまでビーム運転可能になった。但し、 $E_{pk}/E_{acc}$ の比率が1.5倍となり、field emissionを誘起しやすい。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

## cERL主空洞 parameters

( )はTESLA空洞

Frequency	1300 MHz	加速勾配	15-20MV/m
Q0	1e+10	Coupling	3.8 % (1.9%)
$R_{sh}/Q$	897 Ω (1007Ω)	$Q_0 \times R_s$	289 Ω
$E_p/E_{acc}$	3.0 (2.0)	$H_p/E_{acc}$	42.5 Oe/(MV/m)

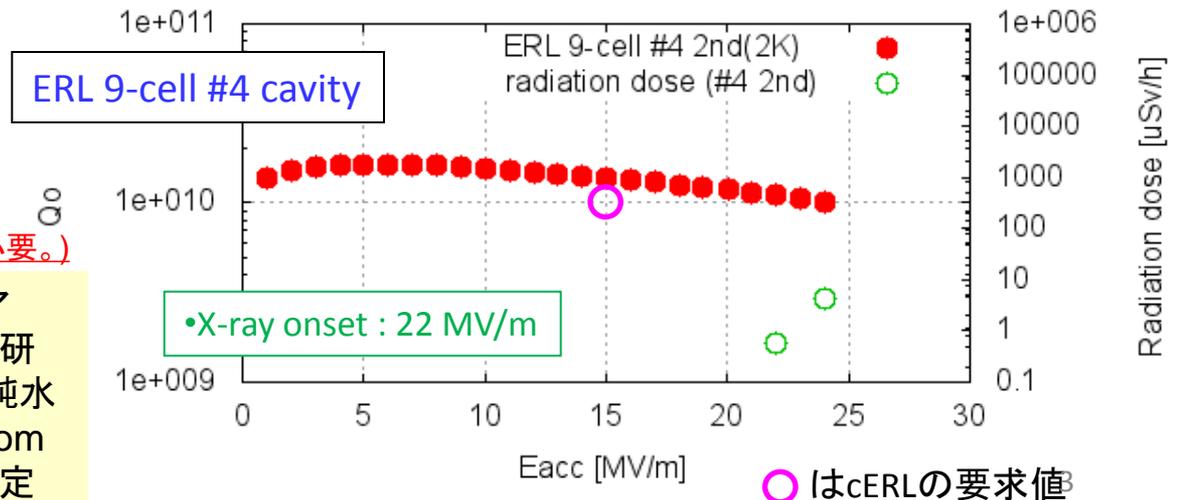
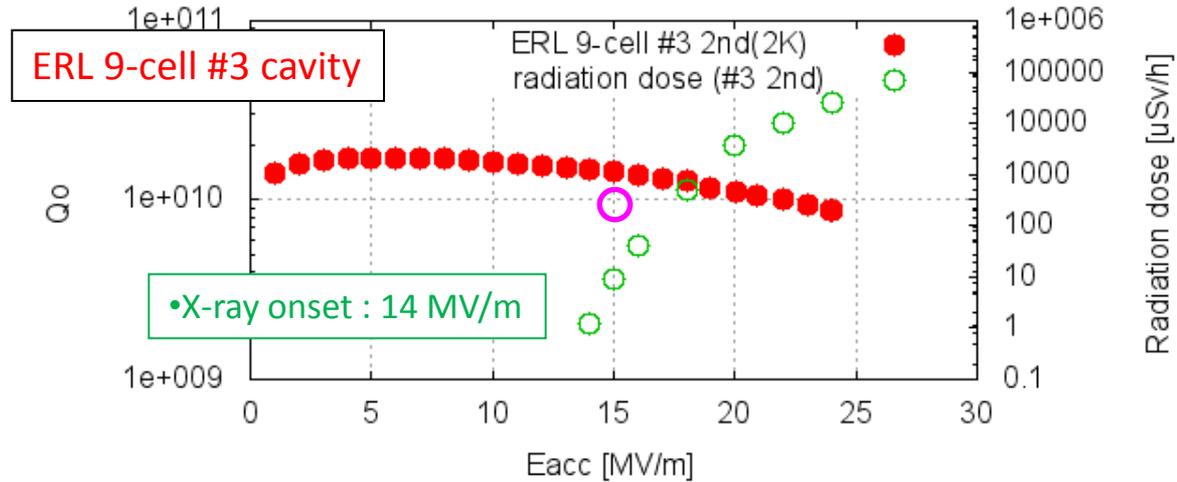
# 縦測定による空洞性能評価試験

cERL用に2台の空洞を作成し、縦測定で性能評価を行った(2011年)。それぞれの空洞は2回の縦測定を行い、最終的に25MV/mの加速勾配の達成。また、cERLの要求である15MV/mで $Q_0 > 1 \cdot 10^{10}$ を達成した。→cERLモジュール組込へ



縦測定@STF

(SUP042) 梅森健成、「ERL主加速部超伝導空洞の開発」



製造& 表面処理(空洞内の埃や欠損をなくす作業が必要。)

Nb空洞製作(EBW)→ 電解研磨 (100um)→ アニール(750度,3h)→ プリチューニング→電解研磨(20um)→ 超音波洗浄(50度,1h)→ 高圧超純水洗浄(HPR)(8MPa,7h)→ アセンブリ(clean room class 10) → ベーキング(120度,48h) → 縦測定

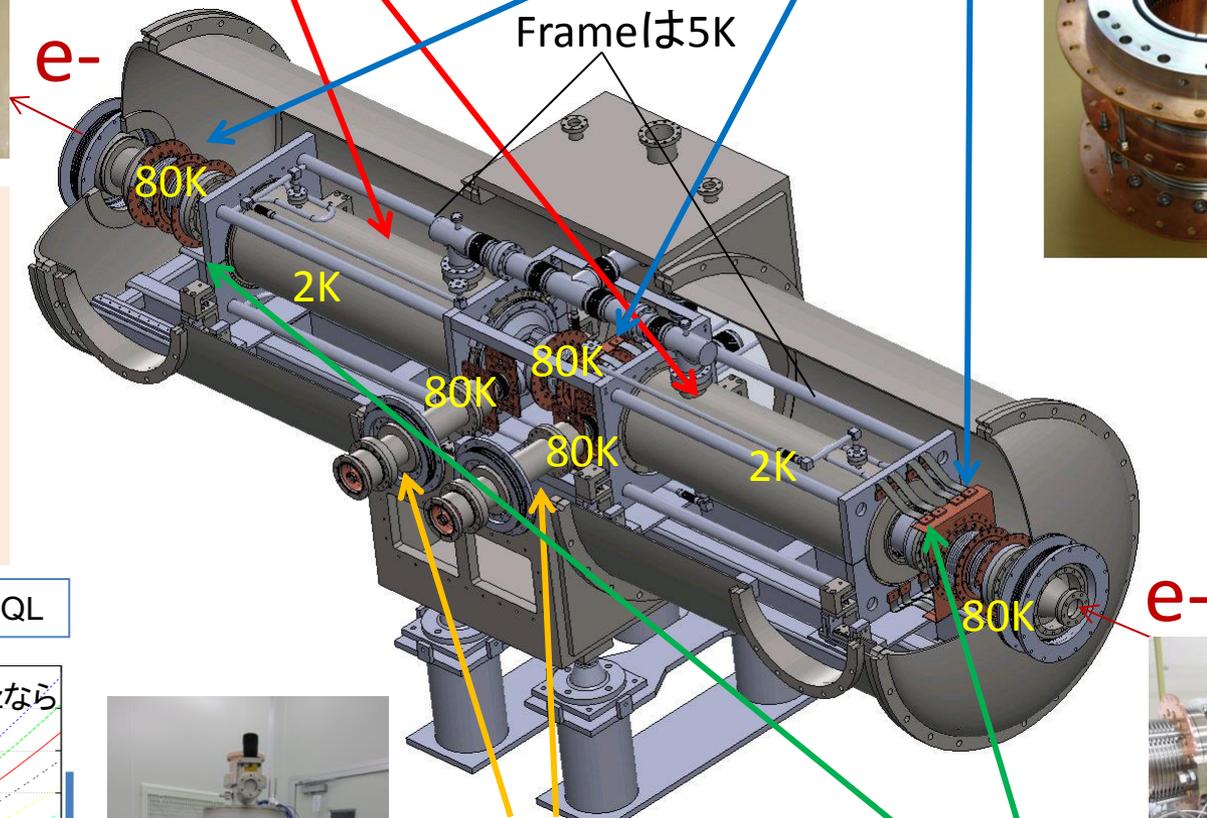
# cERL主加速空洞クライオモジュール概要



**9セル超伝導空洞**  
 2011年度に単体で  
 25MV/mまで性能確認済。  
 $Q_0 > 1 \cdot 10^{10}$  @15MV/m

## HOM ダンパー

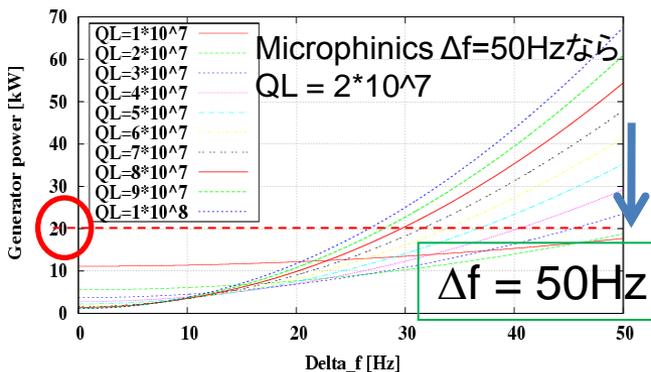
- ・銅内面にフェライト吸収体(1B004)をHIP加工
- ・80Kにて使用のため、**低温での吸収特性を確認。**



2011年度までにcERL用の2空洞入りクライオモジュールに必要な各コンポーネントの製作、性能評価を行った。**2012年度はこれらを統合し、クライオモジュール設計、製作を行い、cERLビームラインへ設置。2K冷却後、2空洞のハイパワーテストを行った。**

## Calculation of $\Delta F$ vs $P_g$ with different QL

f vs  $P_g$  (20MV/m)



## 入力カップラー

- ・20kWの全反射試験済
- ・Cold窓とWarm窓の採用
- ・HA997セラミックを使用
- ・ $QL = (1-4) \cdot 10^7$  (variable)

## Tuner

Slide jack tuner (粗調整)  
 piezo tuner (微調整)



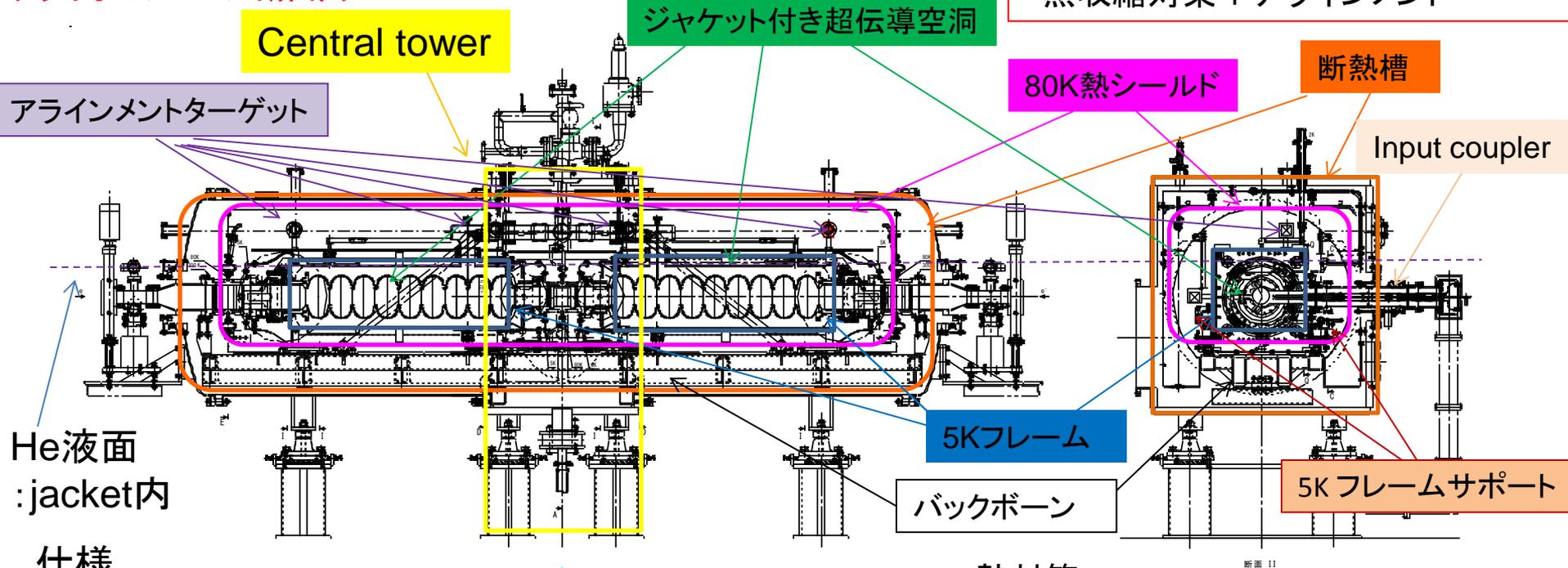
# クライオモジュールの設計、製作

## cERLモジュールのpoint

- ・CW運転の熱負荷対策、入熱
- ・熱収縮対策+アラインメント

5Kフレーム周りに  
磁気シールド設置

## クライオモジュール断面図



### 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 - 5Kフレームサポート  
- バックボーン(室温) - Central tower(室温)

### 熱対策

ジャケット径φ300mmで液面がジャケット内に回収ガスラインでの2相混合を防ぐ  
Gas He回収ライン= φ54mm。→CW対応。  
5Kフレームによる冷却で熱侵入回避

### アラインメント+構造

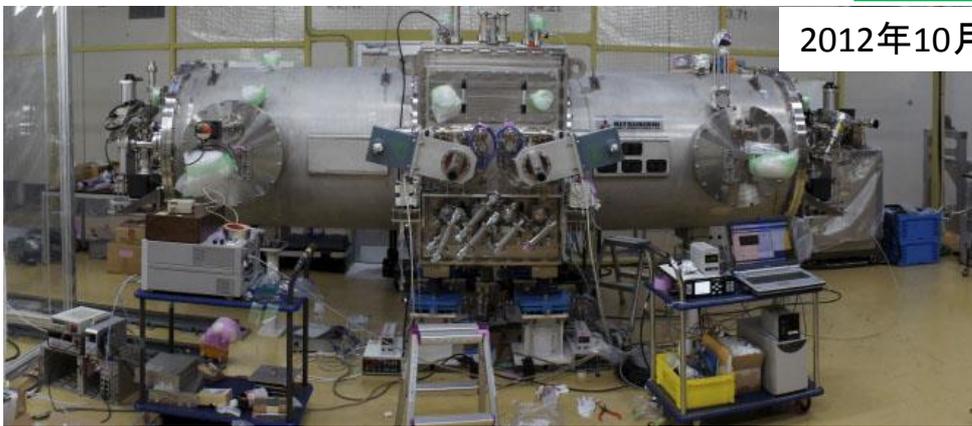
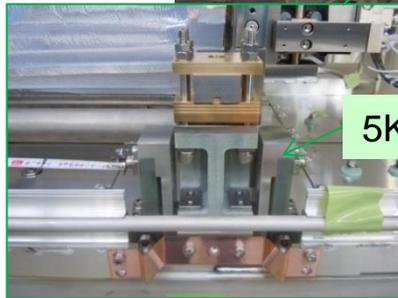
5Kフレームを空洞と機械的に一体化。フレーム上にアラインメントターゲットを設け、そこを基準にtowerに位置を移す。バックボーンと5Kフレームは入熱&熱変形を抑える5kフレームサポートで支える。

# 縦測定後のモジュールアッセンブリ

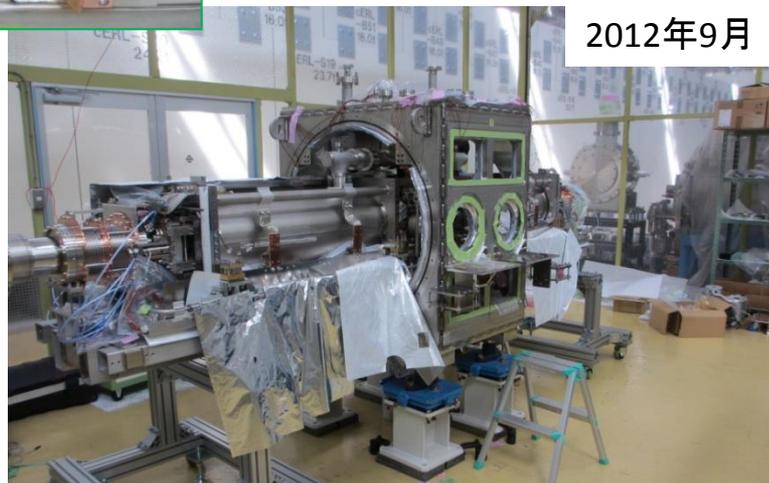
超伝導空洞、HOMダンパー、入力カップラー窓などをクリーンルーム(class10)にてアッセンブリ@KEK →ゴミ混入回避のため



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。



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、アッセンブリ完成。

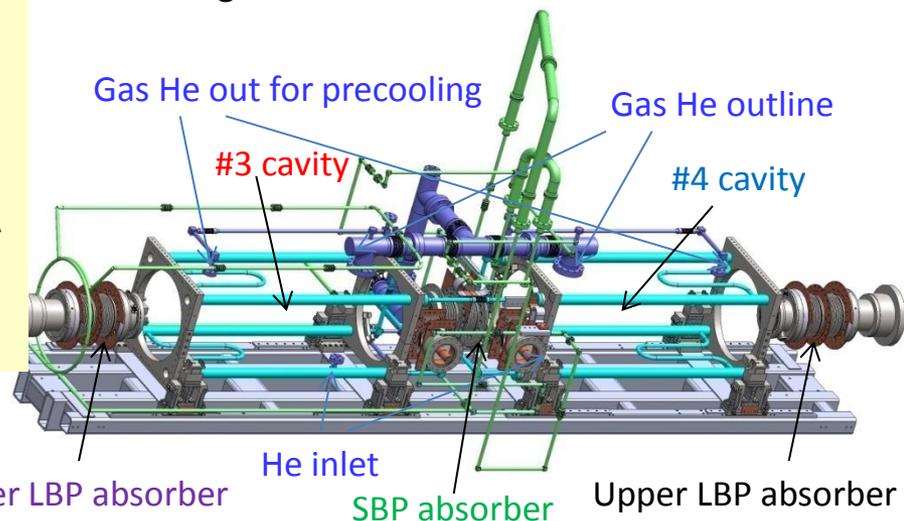


クリーンルームから出し、Heライン、磁気シールド、チューナー、センサー、熱シールドなどを装着。

# Cryomodule Cooling to 2K

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

## Cooling pipe configuration

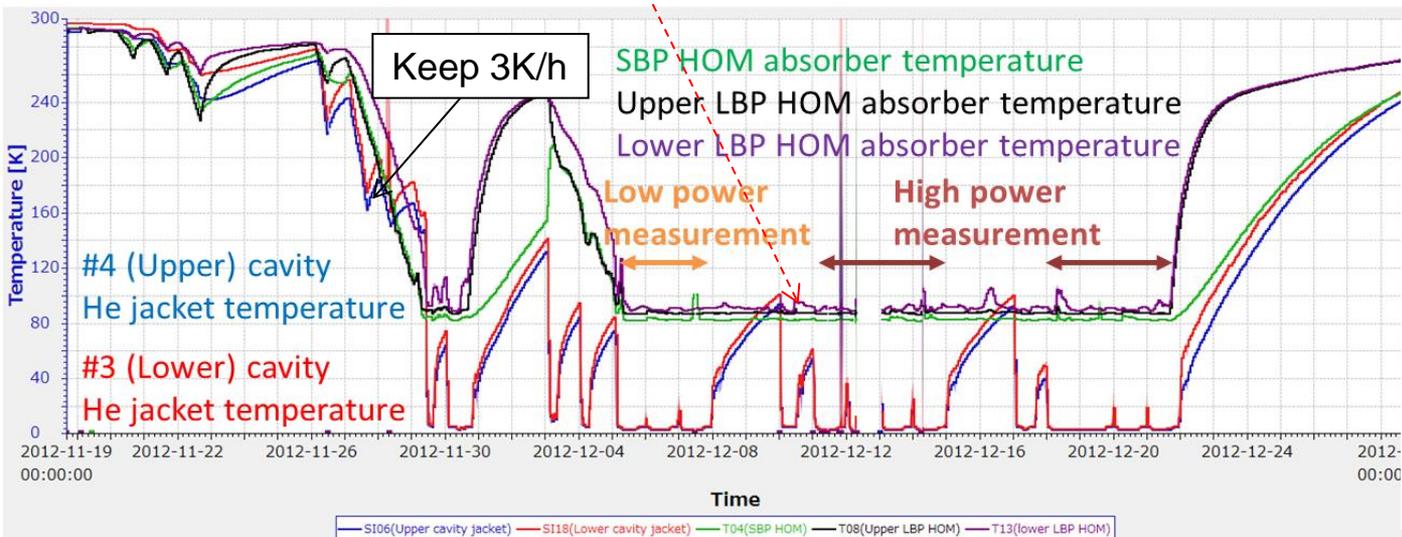


## 冷却条件

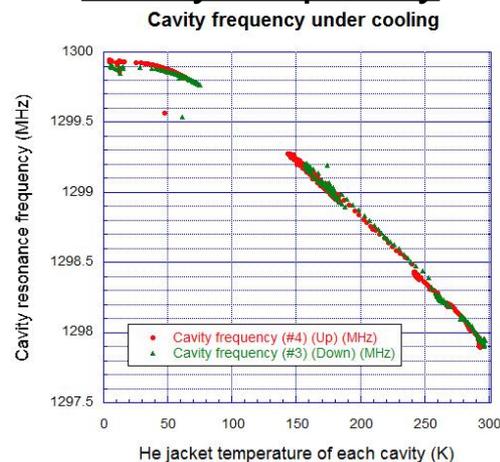
- ・80K領域に置かれたHOM damperにはferriteの割れを防ぐため、最大の冷却勾配3K/hourをkeep。
- ・他2K領域(空洞・ジャケット)、5K領域(5K配管)、80Kの上流、タワー部、下流部などの各温度領域を決めて、そのグループ内での温度モニター間の最大温度差50K以下になるように冷却を行った。

後半3週間は80Kは24時間常にkeep。

## History of 2k cooling



## Cavity frequency

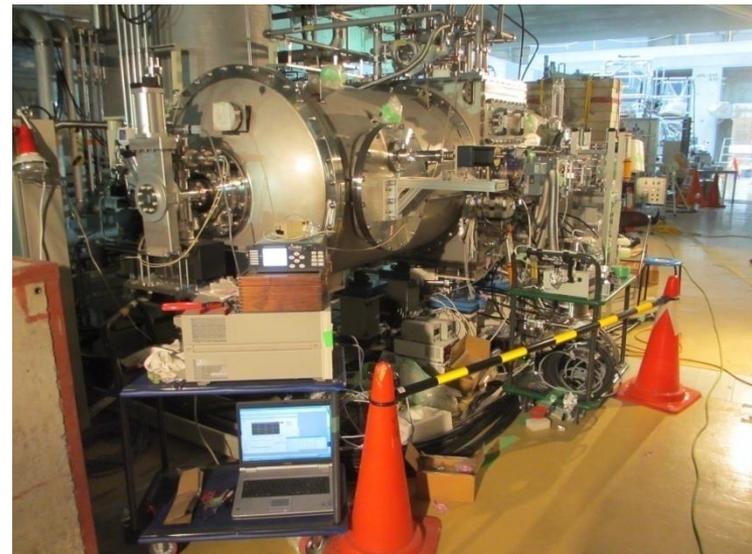
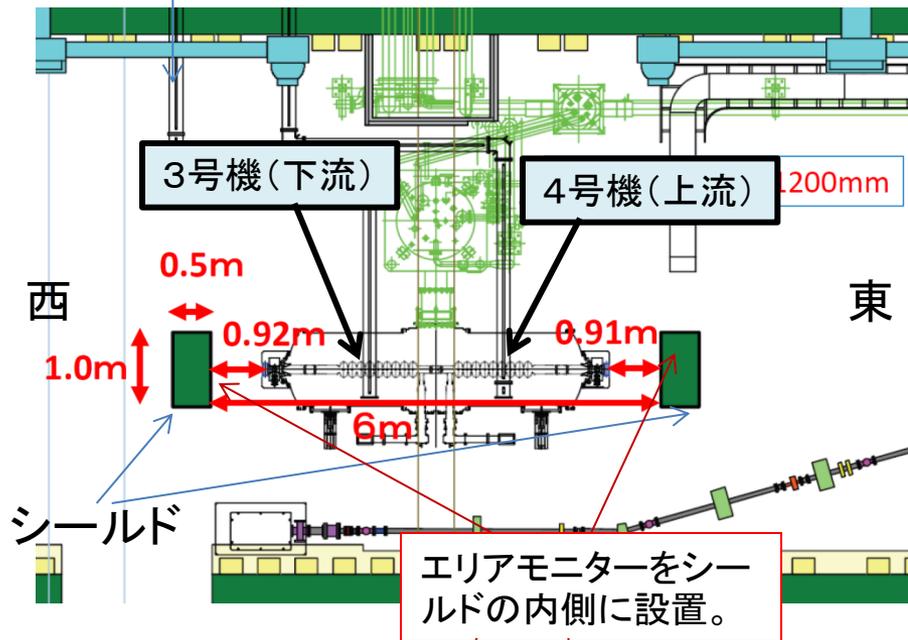


2週間かけて2Kに冷却。最初の週は夜間に80Kを止めたため、冷却がうまくいかず、次の週に80Kラインだけ24時間 3K/hのスロープで冷却し、無事、2K到達。その後、1週はlow level testに最後の2週で各空洞のハイパワーテストを行った。

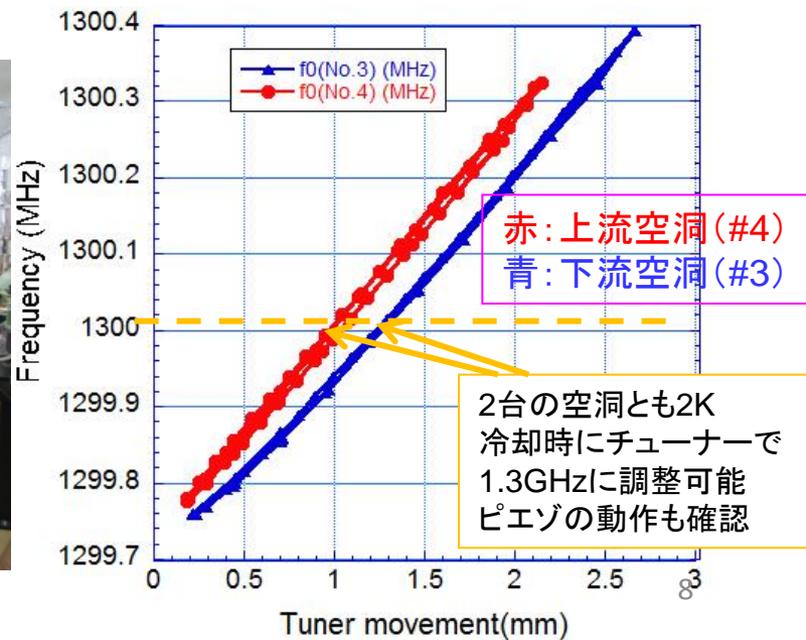
$\Delta f = 2\text{MHz}$   
(2K  $\leftrightarrow$  300K)  
1299.9 MHz @2K

30kW IOT

# cERL主空洞クライオモジュールsetup

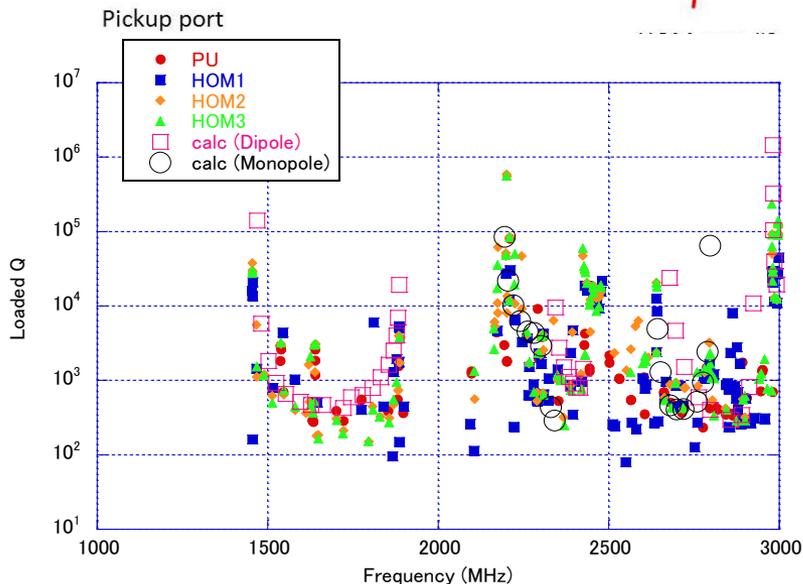
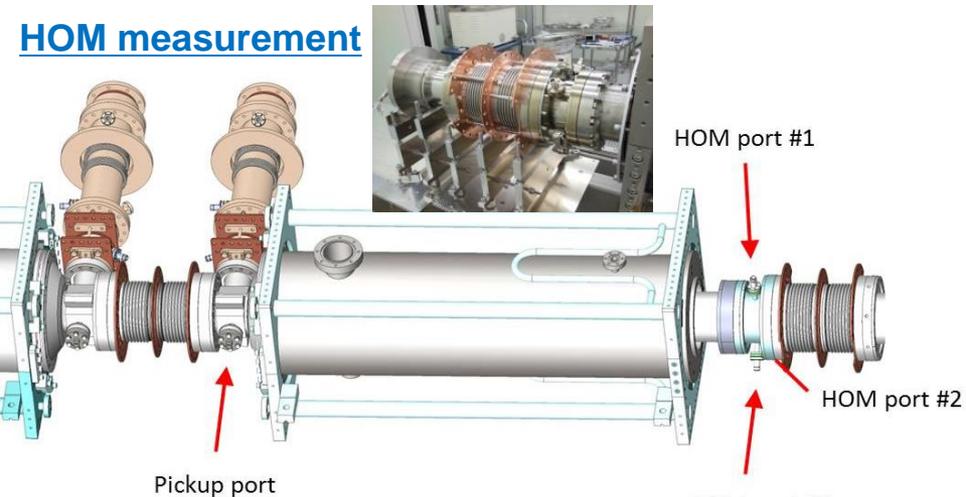


### 2K冷却時のtunerでの周波数変化



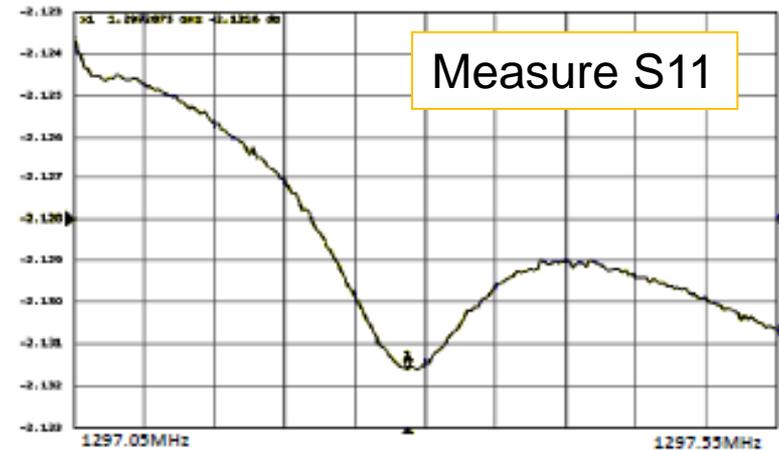
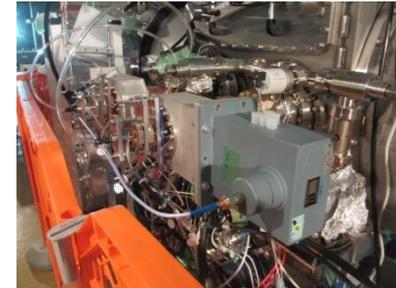
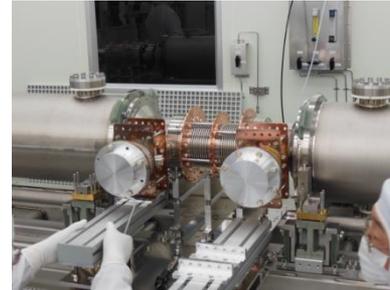
# 2K Performance test (HOM damper & input coupler)

## HOM measurement



- 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.

## Input coupler



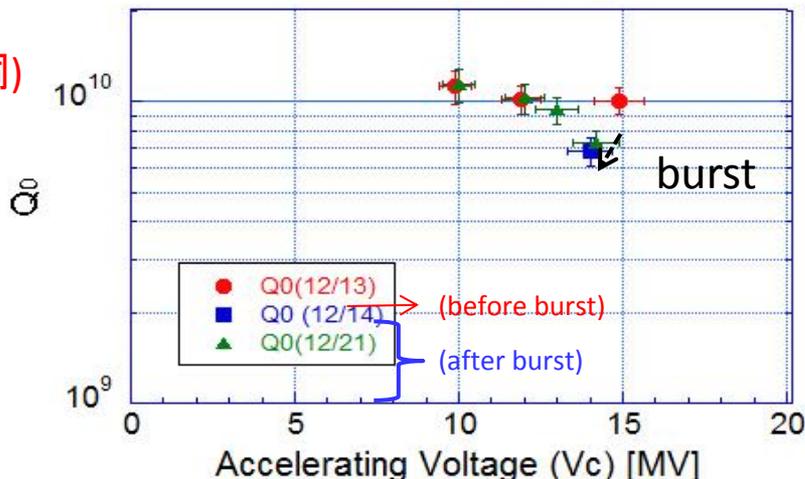
- Input coupler has variable mechanism for  $Q_{ext}$  tuning.
- Measured  $Q_{ext}$  followed design values.
  - $1.5 \sim 5.3 \times 10^7$  (#4 cavity)
  - $8.7 \times 10^6 \sim 3.3 \times 10^7$  (#3 cavity)
  - design:  $1 \sim 4 \times 10^7$

上流QL :  $1.54 \cdot 10^7$   
 下流QL :  $1.15 \cdot 10^7$

Pin: 入力パワー  
 (max 5kW程度)  
 QL: 負荷Q値

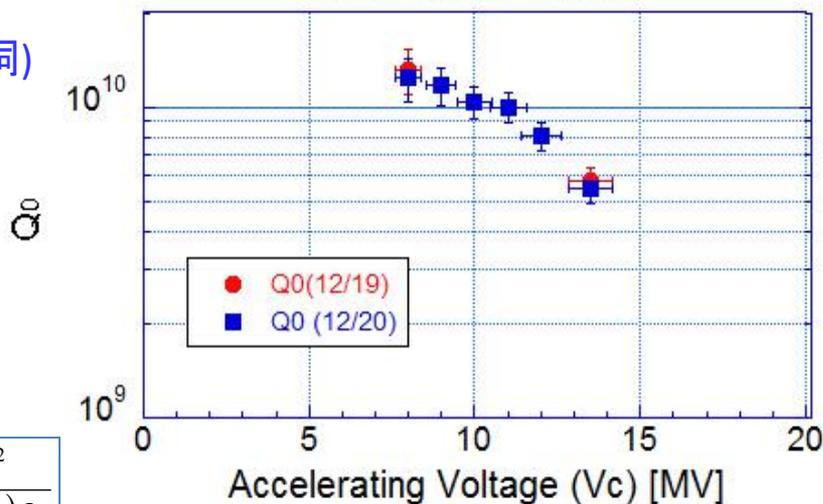
$$V_c = \sqrt{4 \cdot (R/Q) Q_L P_{in}}$$

Vc vs Q0 (#4 cavity)



#4  
 (上流空洞)

Vc vs Q0 (#3 cavity)



#3  
 (下流空洞)

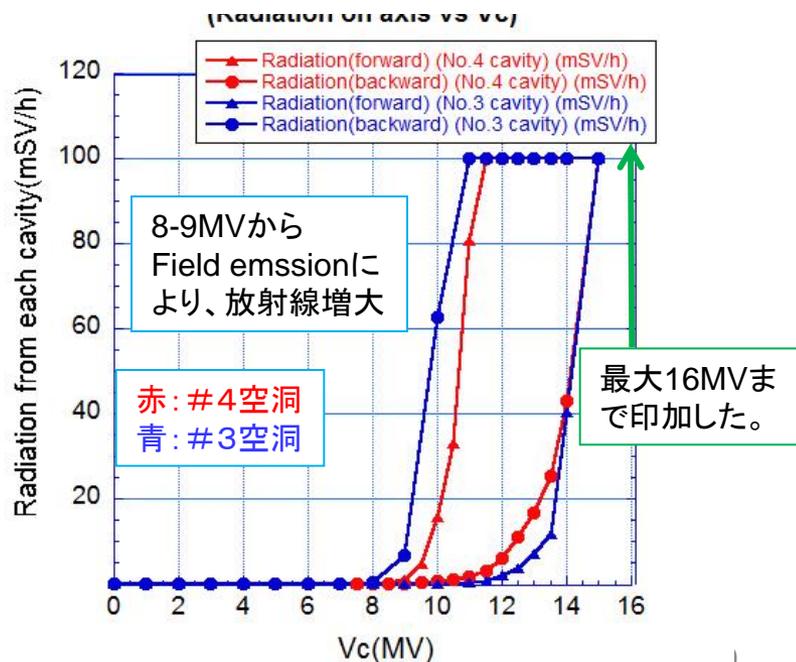
$$P_{loss} = \frac{V_c^2}{(R/Q)Q_0}$$

Q0は空洞の熱負荷(Ploss)をHeの蒸発流量から測定し加速電圧を入れて換算。

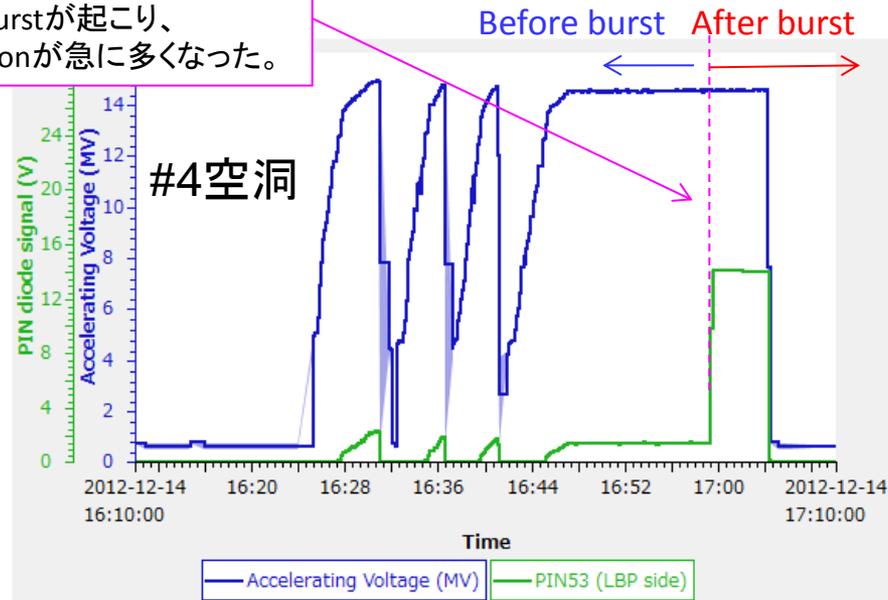
## 空洞ハイパワーテスト(Vc vs Q0)

- ・上流空洞はバースト後がQ0が減少。特に縦測定時の性能より低い**10MV以上でQ0の減少**が起こった。加速電圧の増加に伴うRadiationの増加から熱負荷の増加はfield emissionによるものと思われる。
- ・低い加速勾配では**>1e10のQ0**があるのがわかる。磁気シールドの効果あり。HOMダンパーの割れもなさそうである。
- ・**最大16MV**まで電圧を印加可能であった。

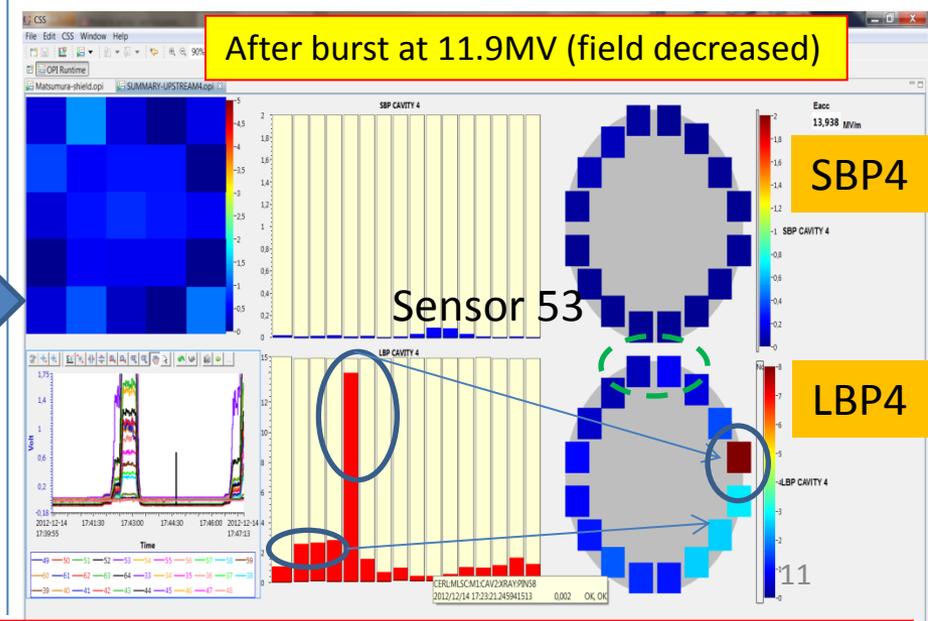
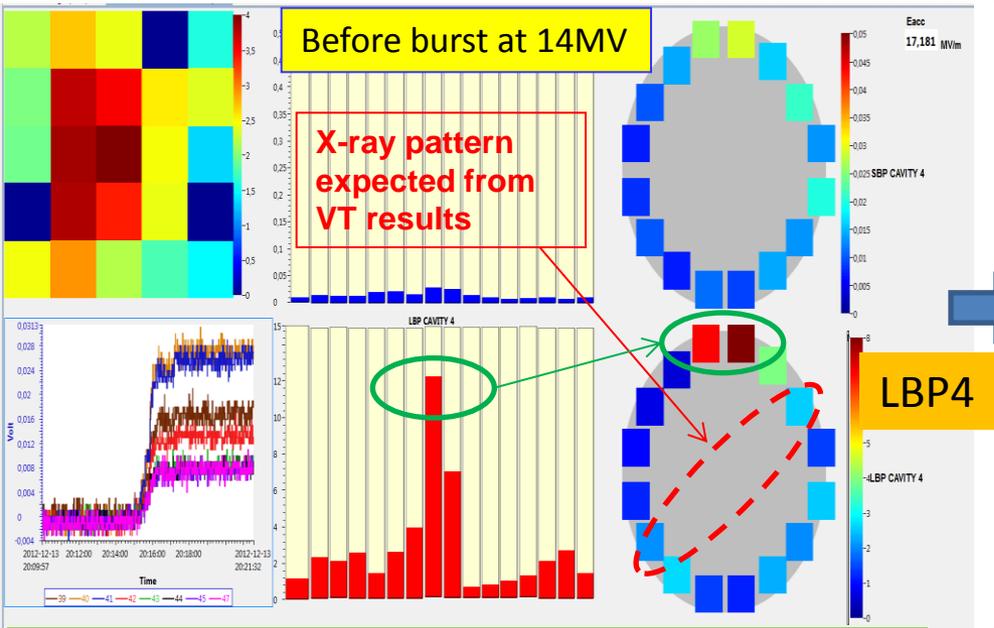
Burst後のHigh power testでの各空洞の加速電圧と空洞軸上のradiation



上流空洞はkeepしている最中にBurstが起こり、radiationが急に多くなった。



# Radiationの詳細測定(burst前後)

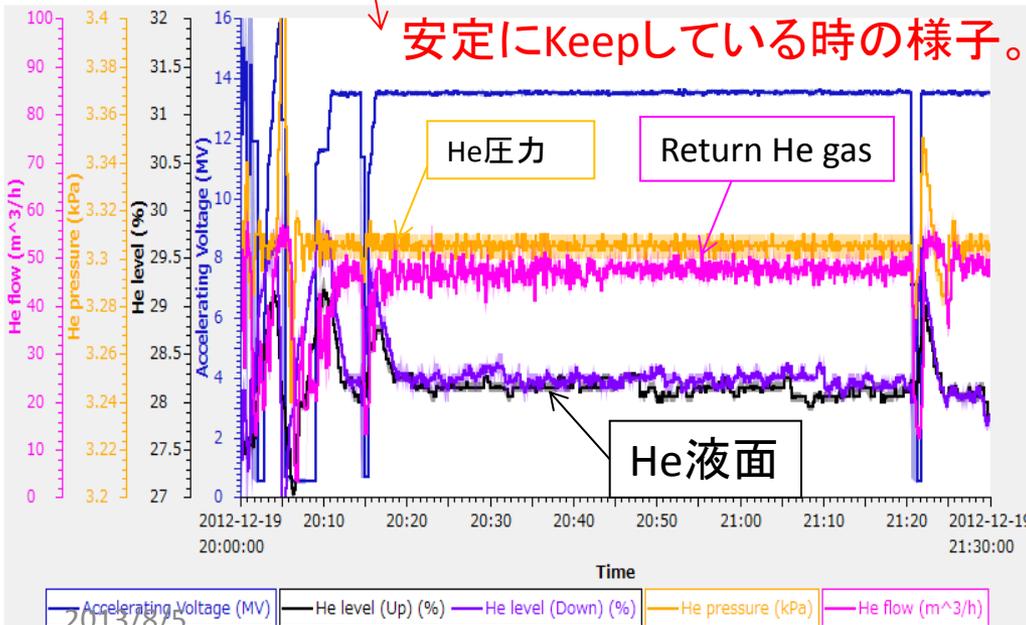
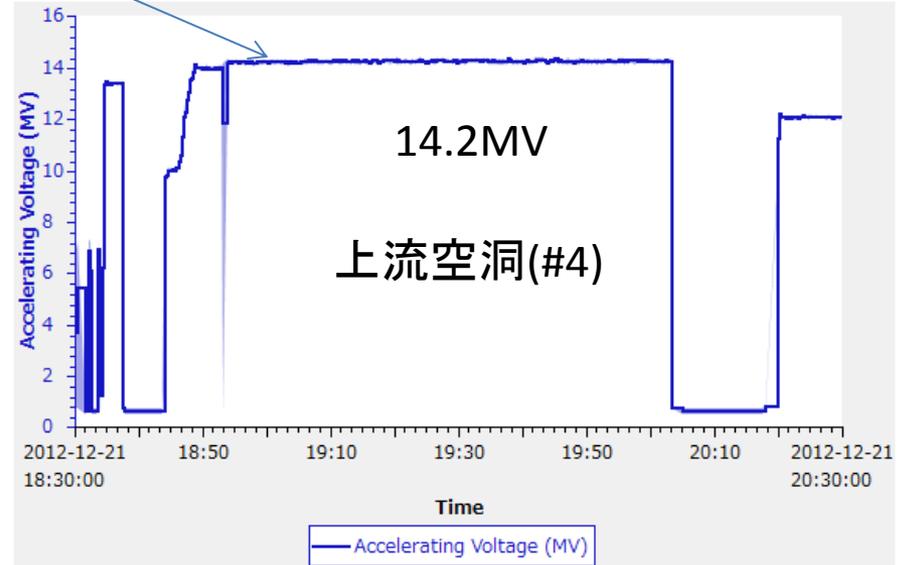
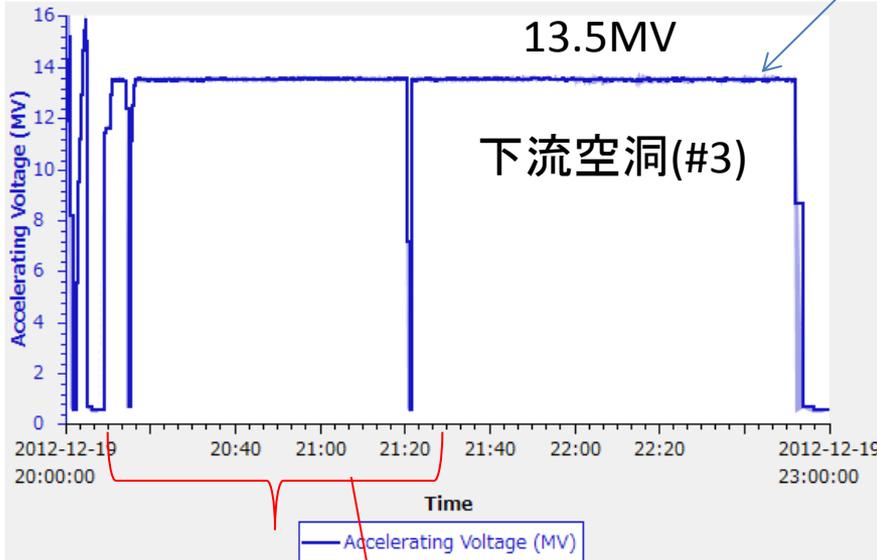


- Radiation pattern was changed from V.T
- Radiation pattern also changed after X-ray burst

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

# 空洞電圧

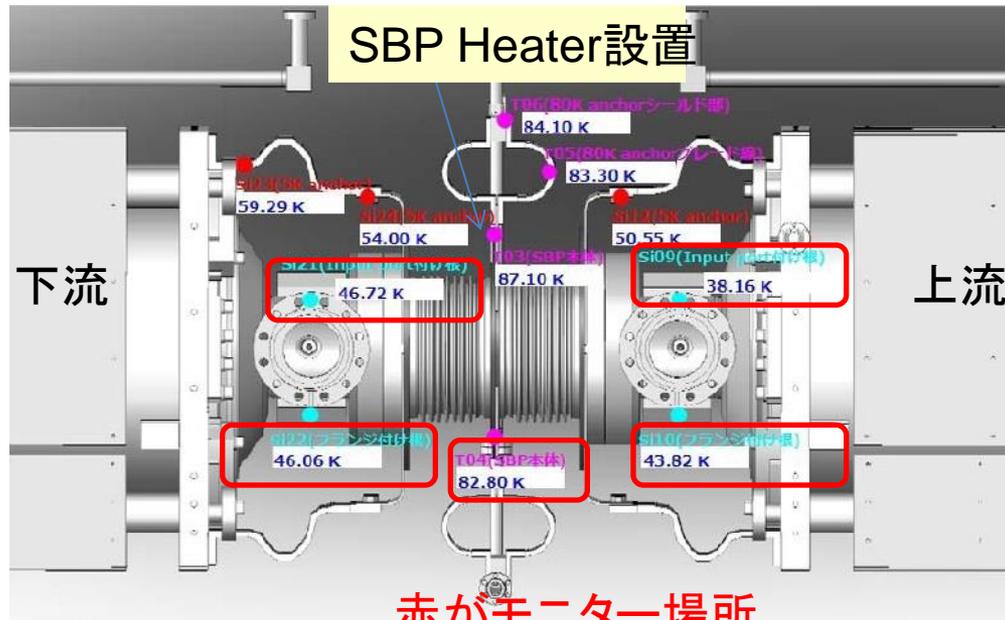
# 連続運転試験(Vc keep)



減圧下で上流、下流空洞をある一定電圧のもとでkeep。  
**上流空洞: 14.2MV**  
**下流空洞: 13.5MV**  
 で1時間以上keep可能であった。  
 それ以上の電圧では現冷凍機の当時の減圧ポンプの容量over(>50m<sup>3</sup>/h)でKeepが不可能であった。(現在80m<sup>3</sup>/h)

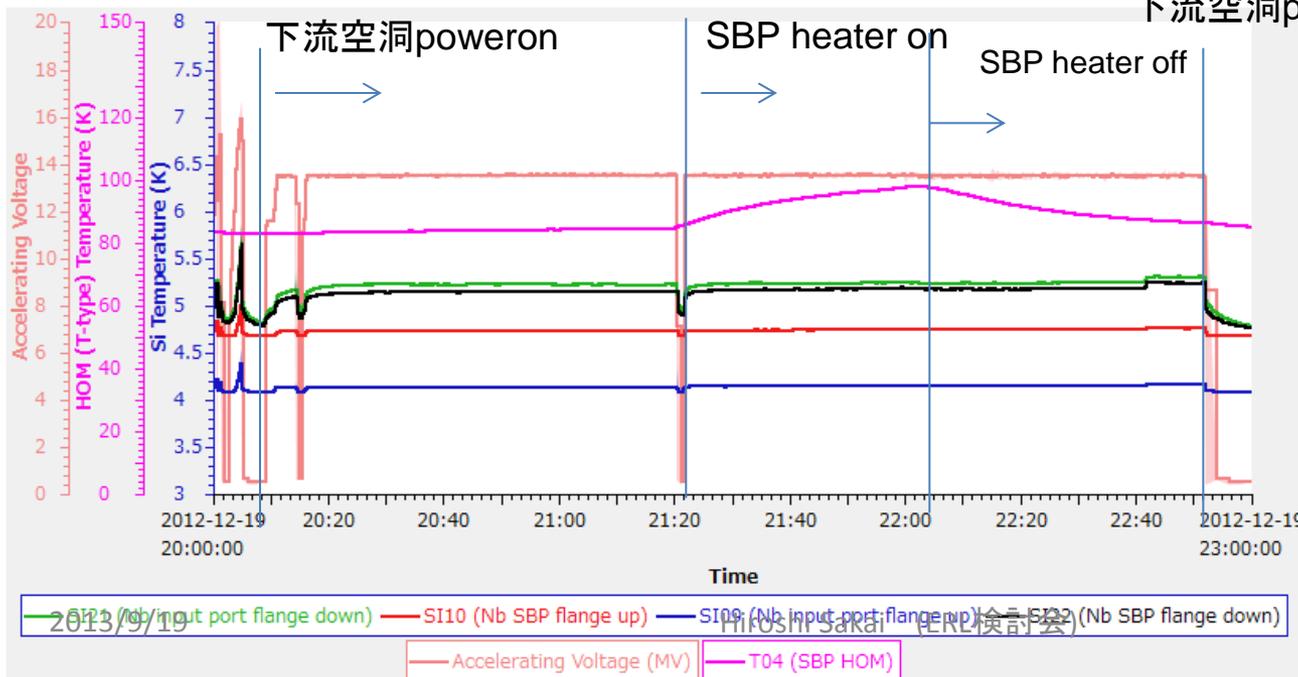
He gas, He 液面, He圧力ともに安定。特にHe圧力は10Pa以下で安定にControlしている。Microphonics抑制に必要。

# SBP HOM heater test、&カプラーinput portの温度上昇



下流に13.5MVの電圧を立てた時のNb flangeの温度上昇及び、SBPIに30W (50mA程度の電流によるHOM heatを想定)のheaterを立てた時のheat leakがNb flangeにどう影響するかを測定した。

下流空洞にカプラーからpowerを投じる。Pin は4kW程度。



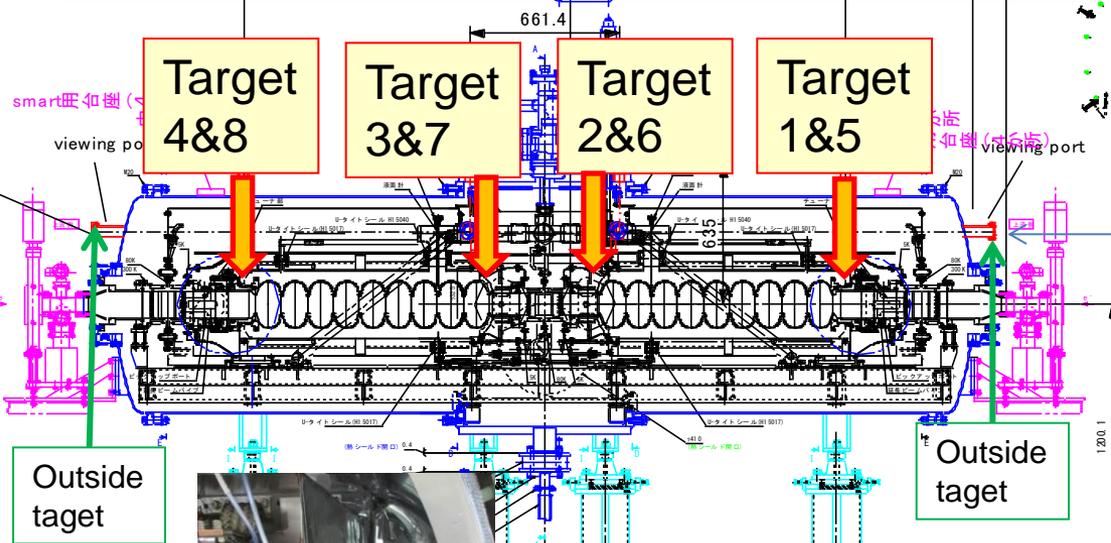
下流空洞power off

- カプラーパワー投入によるNbフランジの温度上昇は4.8K->5.2K ( $\Delta T = 0.4K$ )
- SBP HOM heaterによるNb空洞(flange)への温度上昇はなし。
- Heat leakはベローズによって防がれている。



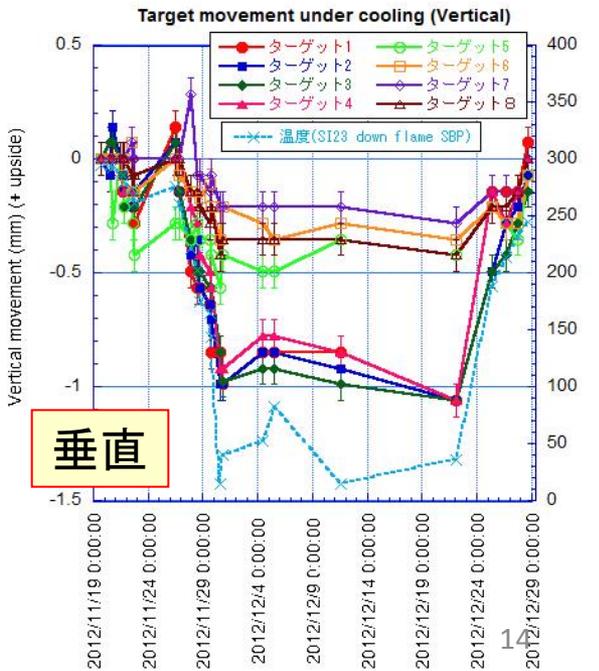
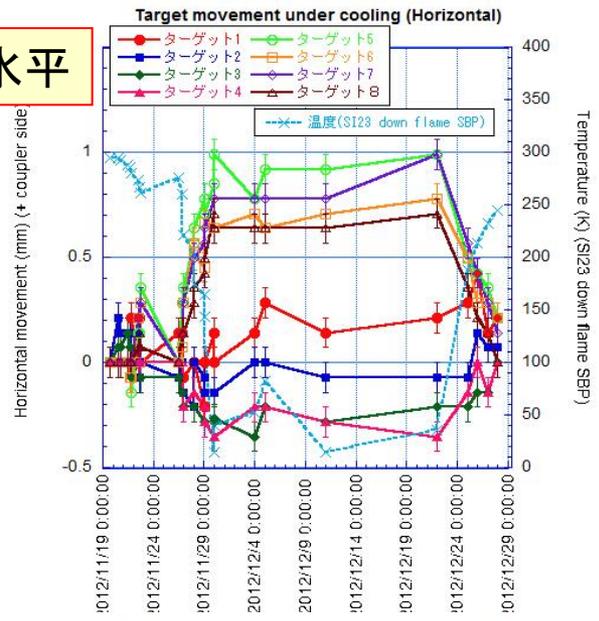
大電流運転に十分な仕様

アライメントテレスコープにて冷却中のターゲットの動きを測定。



テレスコープ

水平



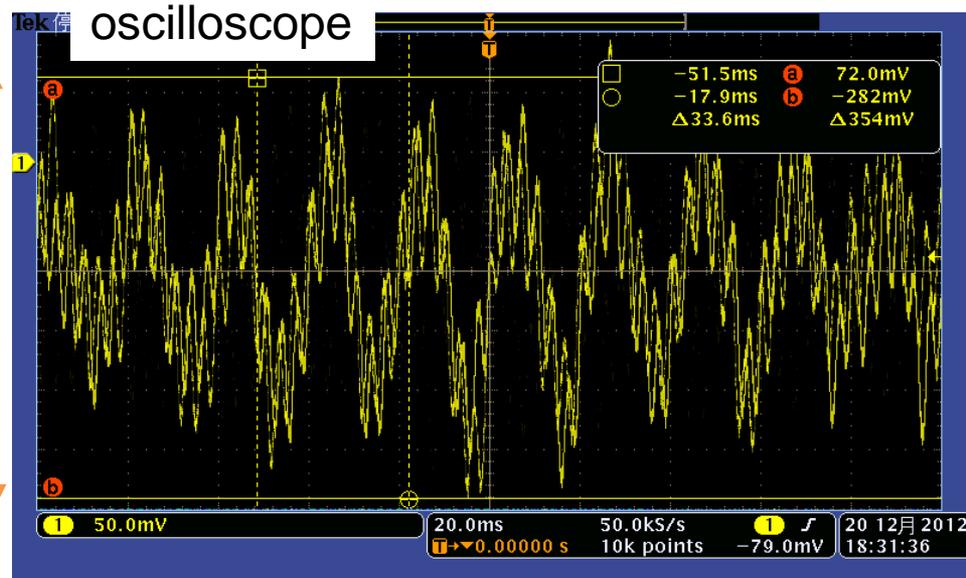
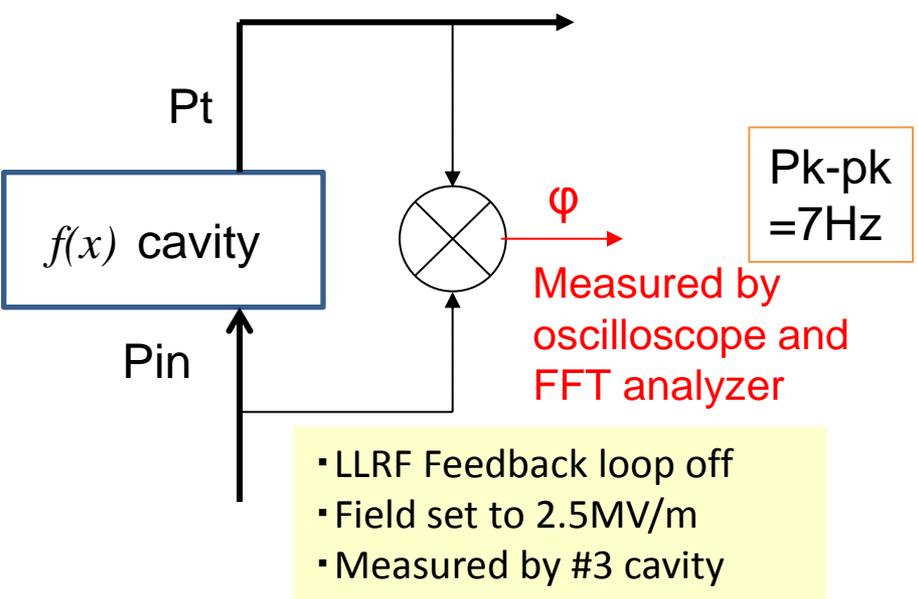
垂直

2K冷却時(2012/12/21)のターゲットの常温からの動き平均	水平方向 (mm)	垂直方向 (mm)
ターゲット1-4	-0.11	-1.06
ターゲット5-8	0.87	-0.37
空洞中心平均(ターゲットから)	0.39	-0.37

空洞の中心は水平、垂直とも0.4mm以内の変化におさまっていた。別途用意高精度白色干渉による位置変位計とも良い一致を示す。**ビーム要求値±1mmに対しては十分小さい。**

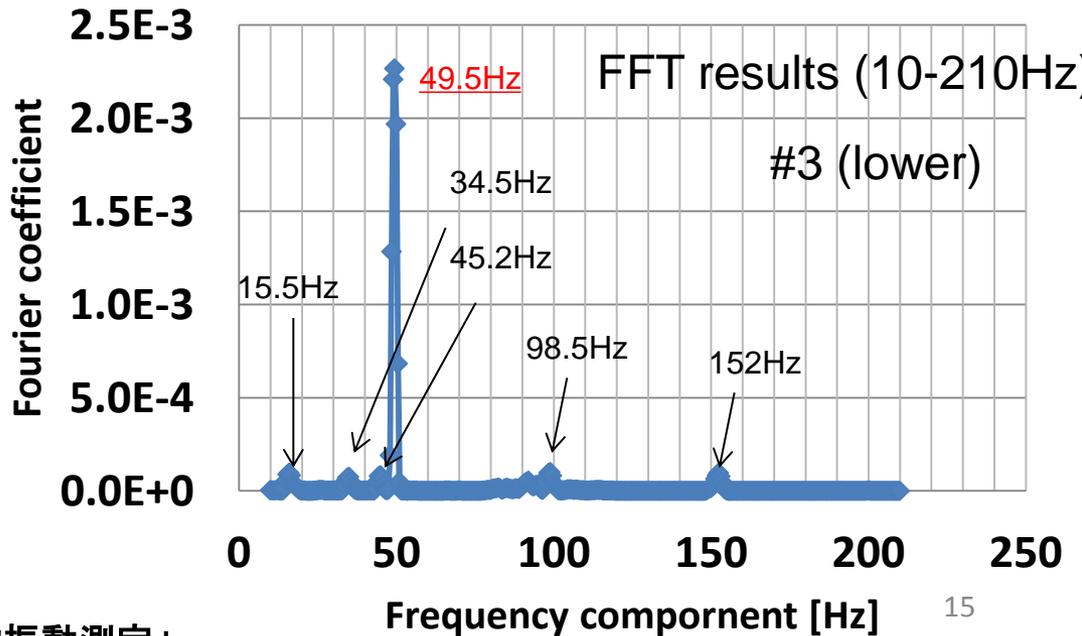
# 2K microphonics measurements

#3 (lower)



trace13\_23:19\_Eacc=2.5MV/m\_PLL/OFF

• Pk-pk = 7Hz. この値は 予想の50Hzに対して十分小さく、チューナによるLLRFの制御が十分可能。またより高いQL (> 2 \* 10<sup>7</sup>)の運転可能 → 投入パワー減。  
 • メインのpeakは49.5Hz (50Hzではない。) 空洞ではなくおそらくバックボーンによる共振周波数であると予想。



次のビーム運転で再度測定を行う予定。

# Summary

- 2012年度主空洞クライオモジュールを作成組立。2012年10月半ばにビームラインへinstall。
- cryomoduleの2Kへの冷却に成功。2Kにて、チューナー、カップラー、HOMダンパーなど周辺機器の動作確認。
- 2空洞とも16MVのCW加速電圧印加を確認。
- 13.5-14MVの加速電圧にて、両空洞ともに1時間以上のkeep試験を実施。それ以上の電圧では field emissionによるパワーロスが大きい。
- 冷却時の空洞の変位は0.5mm以下で納まっているようである。冷却後はもとの位置に戻っている。振動もpk-pk=7Hzで十分小さい。
- field emission抑制が今後の課題。

- 2013年1-6月まではinjectorのビーム運転を行い、入射部でのビーム加速&性能評価確認。
- 2013年夏に周回部の建設を行い、後半(11月)に再冷却を行い、まずはlow levelの安定化studyを行う。その後、周回部のビーム運転を行う予定。



入射部beam comissioningの様子

# 謝辞

- ・このハイパワーテストまで色々お世話になりました多くの関係者の方々に深く感謝いたします。
- ・この研究開発は量子ビーム基盤技術をもとに遂行されました。

# Backup

# Field emission対策

事前にイオンガンで除去

超伝導空洞

HOMdamper



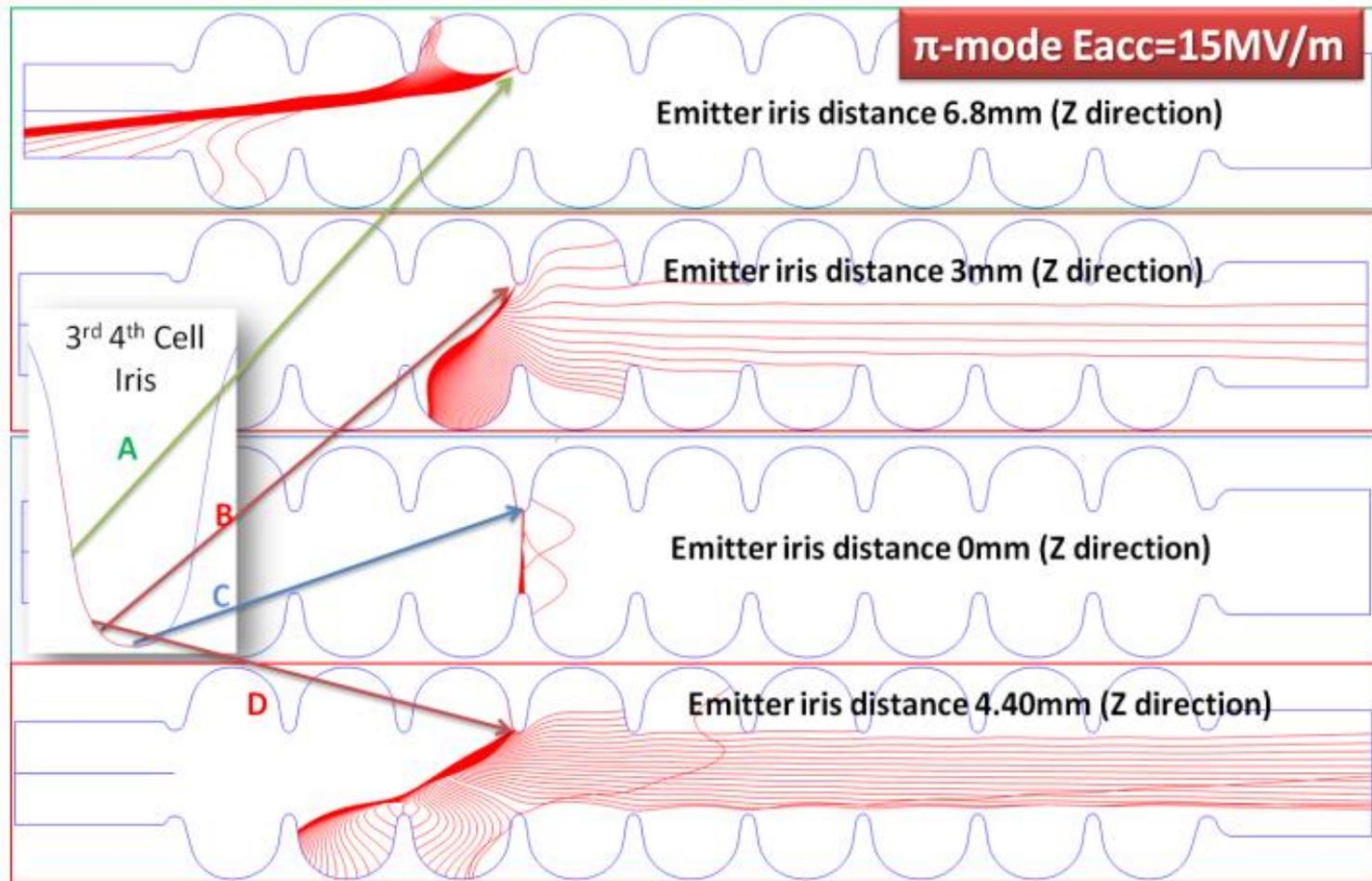
実は性能評価後も  
ビームライン設置まで  
にたくさんの空洞内へ  
ゴミなどがアクセスする  
可能性のある  
作業工程がある。超純  
水洗浄工程はこの中  
には入らない。

HOMダンパーつなぎ作  
業(class 10 clean room)

Gate valveつなぎ作業  
(clean boose class 100???)

- **Field emissionの抑制** (Q値劣化改善に向けて)
  - HOMの性能を損なわないようにかつ $E_{pk}/E_{acc}$ を下げる空洞の新設計。
  - 埃、チリ無し環境による空洞の組立、アSEMBリの方法の探索。  
(半導体工場なみのクリーン環境と全自動化が理想。)
  - 運転中のField emissionソースの同定 (simulationと測定の比較から)
  - プロセス方法の検討 (Heガスプロセス)。

# Field emission(電界放出)の計算例



- ・電界放出を起こす場所・位相により、様々なパターンが起こり得る  
→ 事前に放射線の発生する方向・線量・分布を知ることは困難
- ・ビーム軸方向に加速されると、ほぼ空洞電圧の分加速される