

cERL主空洞モジュールの 冷却及びハイパワーテスト のハイライト

ERL検討会

2013/1/22 → 2013/2/6 改訂

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

ERL主加速空洞の今年度開発現状

H.Sakai

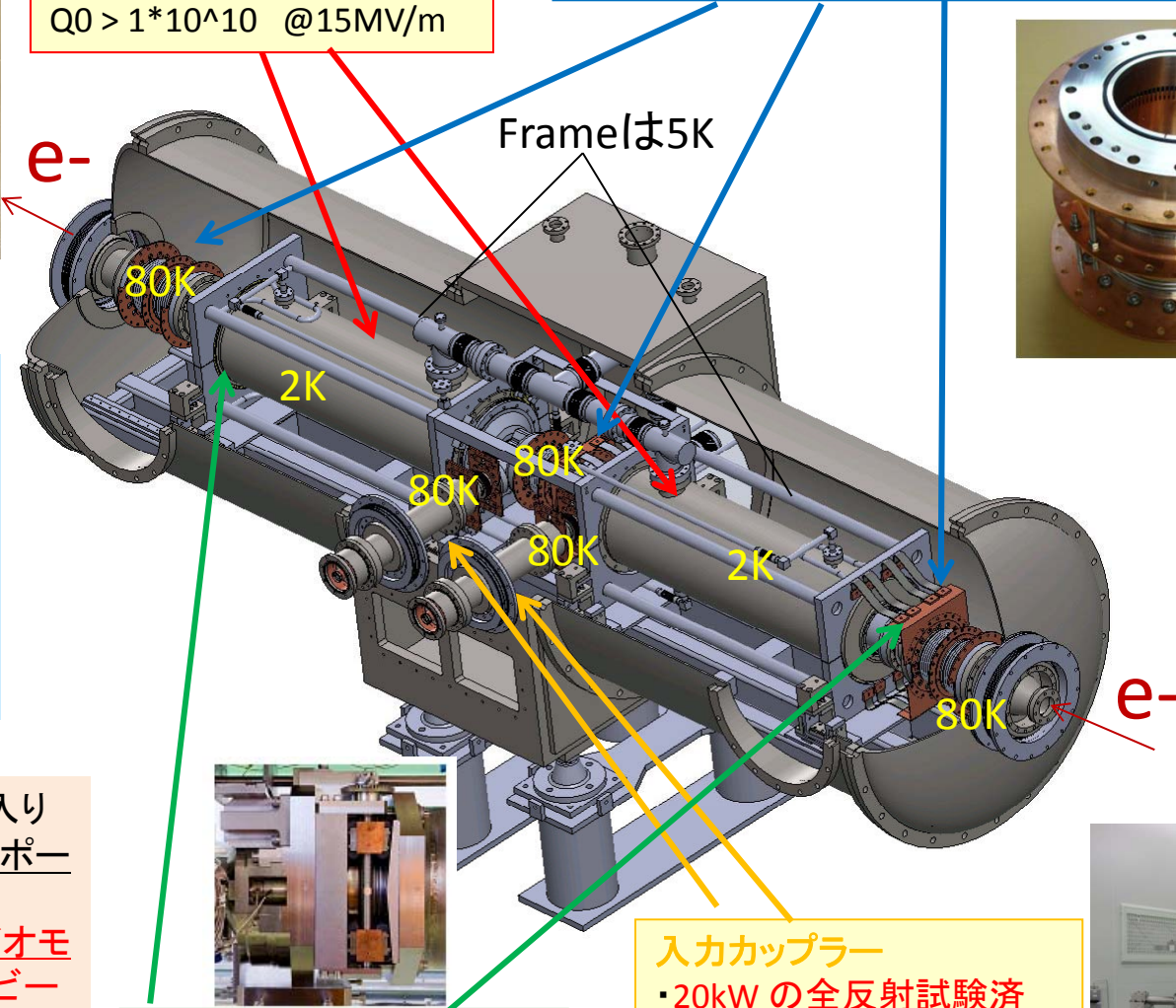


9セル超伝導空洞
 2011年度に単体で
 25MV/mまで性能確認済。
 $Q_0 > 1 \cdot 10^{10}$ @15MV/m

HOM ダンパー
 ・銅内面にフェライト吸収体をHIP加工
 ・80Kにて使用のため、**低温での吸収特性を確認。**



ERL主空洞の要求値
 Frequency : 1.3 GHz
 Input power : 20kW CW (SW)
 Gradient: 15-20MV/m
 $Q_0: > 1 \cdot 10^{10}$
 Beam current : max 100mA
 (HOM-BBU対策を施した空洞設計)



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。

2013/2/6

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

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)

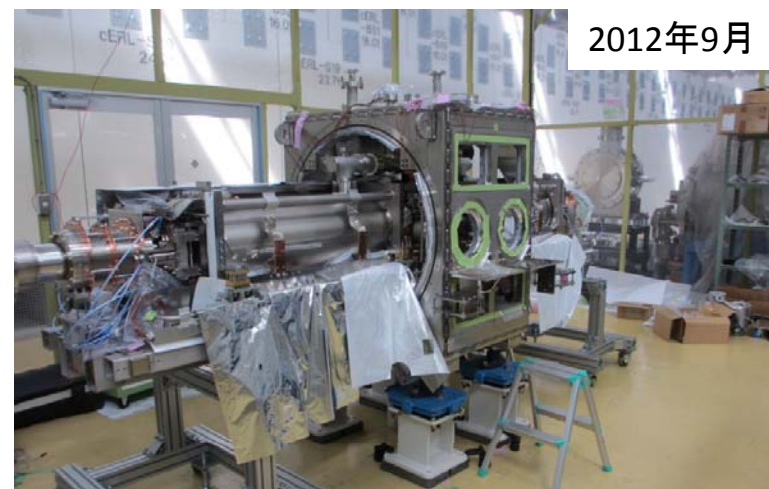
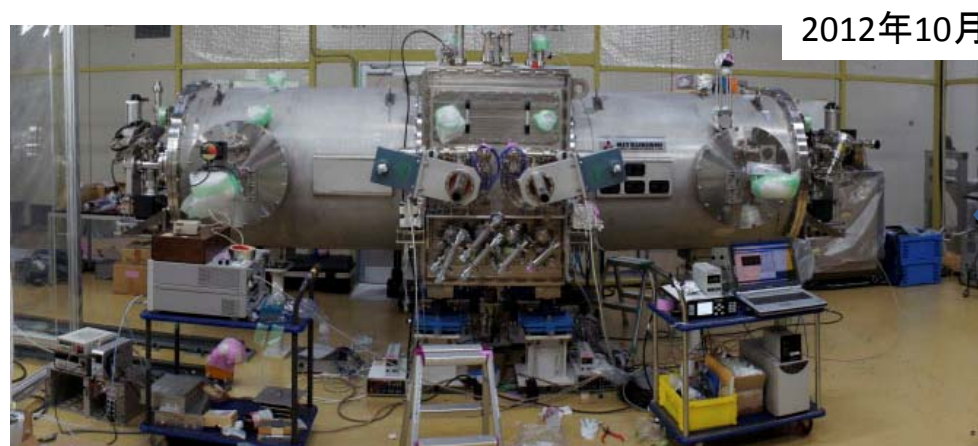


モジュールアッセンブリ(おさらい)

超伝導空洞、HOMダンパー、入力カプラー窓などをクリーンルーム(class10)にてアッセンブリ@KEK



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³

2013/2/6

Hiroshi Sakai (ERL検討会)

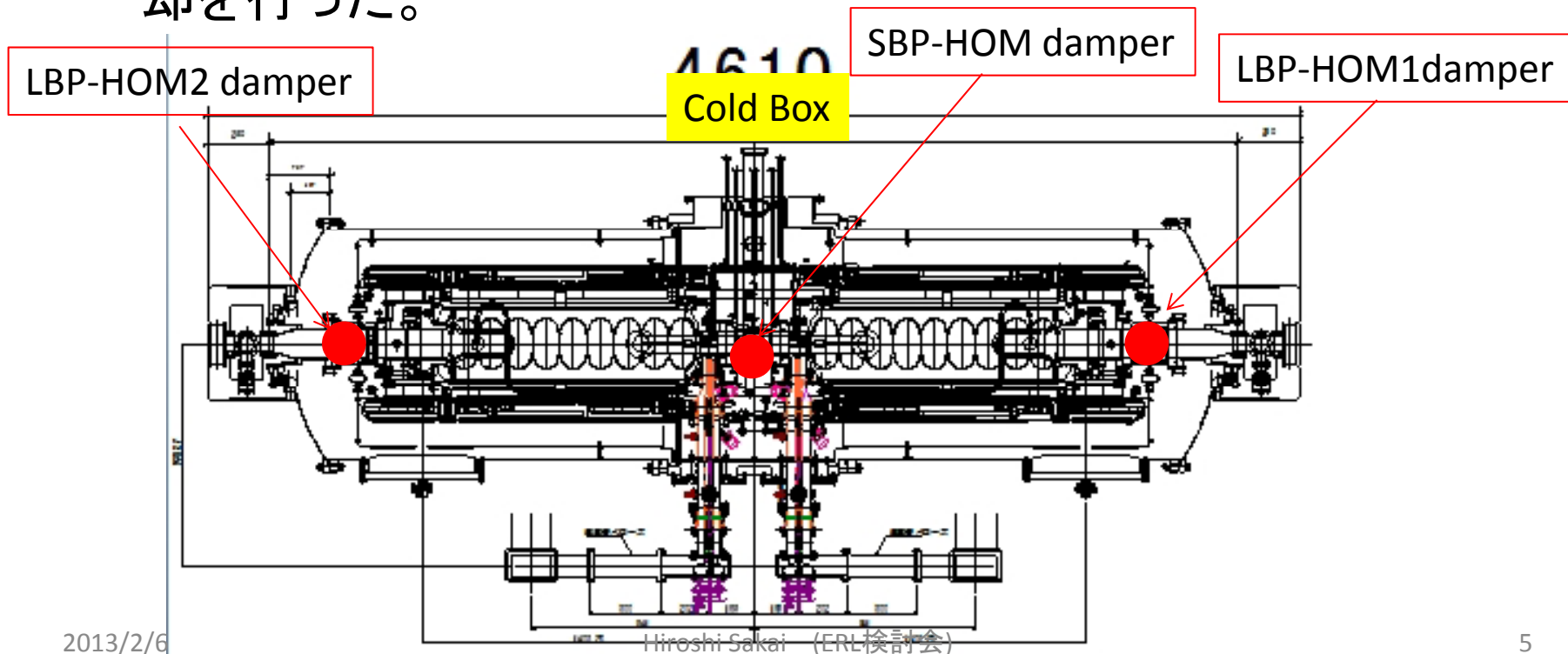
モジュール冷却 & パワーテスト履歴

- 10/15の週。cryomoduleビームライン設置。Cold Box接続。
- 10/22,29の週。ケーブル接続、導波管接続、system check。
- 11/5(月) 完成検査。
- 11/5の週。上流空洞カップラー常温エージング。
- 11/12の週。下流空洞カップラー常温エージング。
- 11/19の週。クライオモジュール冷却開始。→170K程度まで。
- 11/26の週。クライオモジュール冷却。→ 2K到達。
- 12/3の週。 2KでのLow level測定。(チューナーなど)
- 12/10(月):放射線発生装置検査。
- 12/10の週。2K上流空洞ハイパワー試験。
- 12/17の週。2K下流空洞ハイパワー試験。
- 12/24の週。Warm up。→年越し。

前回は設置および常温エージングまで発表。今回は冷却とパワーテストについて紹介。

冷却条件

- HOMダンパーを急冷することによる割れを防ぐべく、80K領域に置かれたHOM damperには今までのテストで行った最大の冷却勾配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。



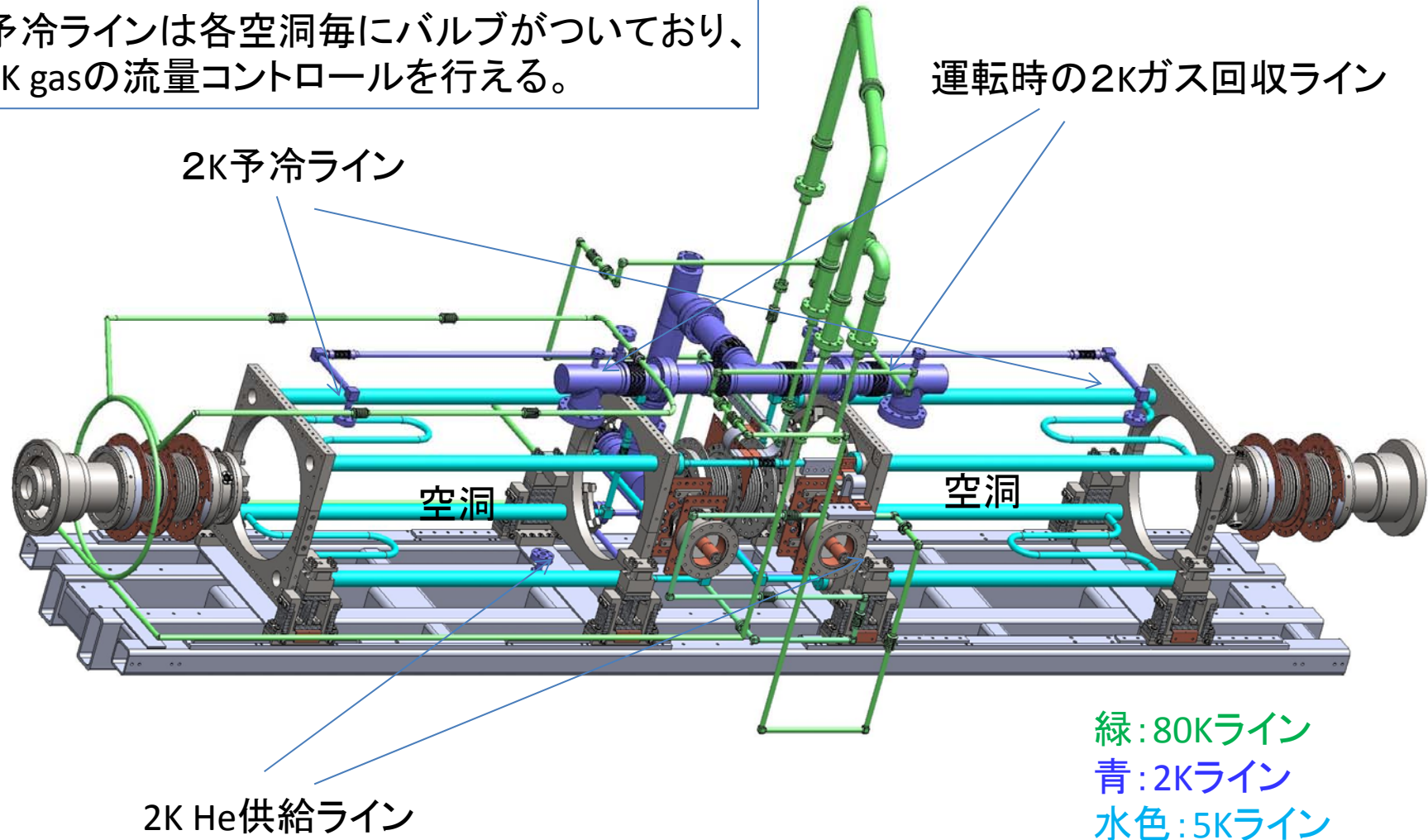
冷却配管図

5K,80Klineは一筆書き。

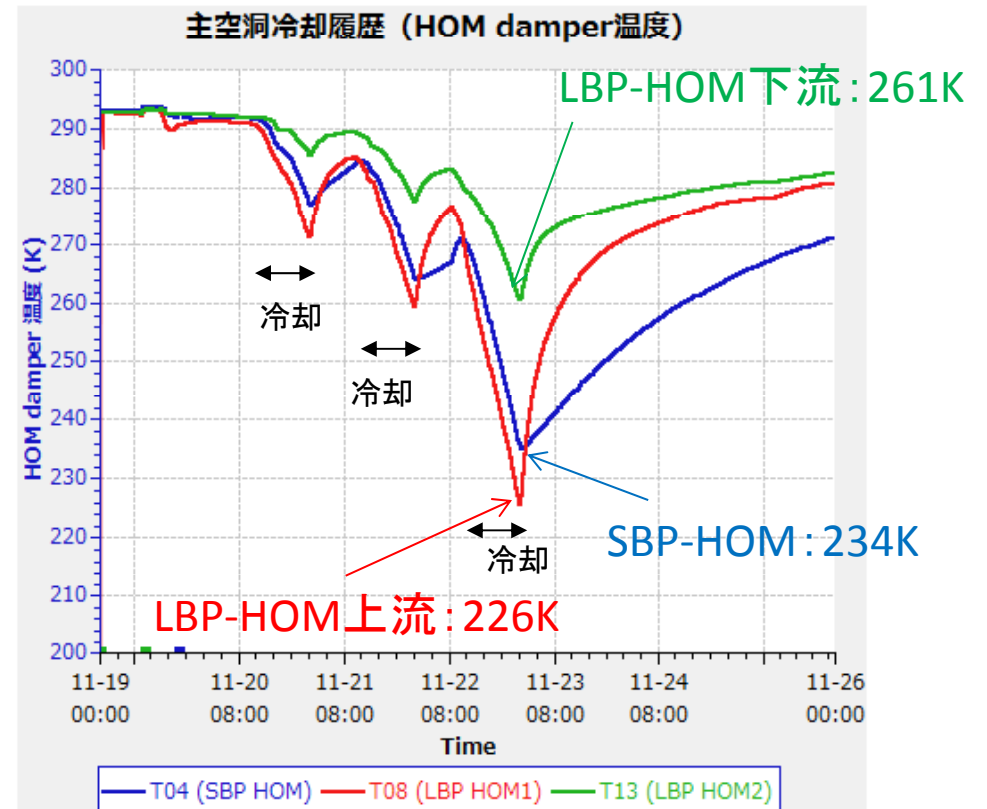
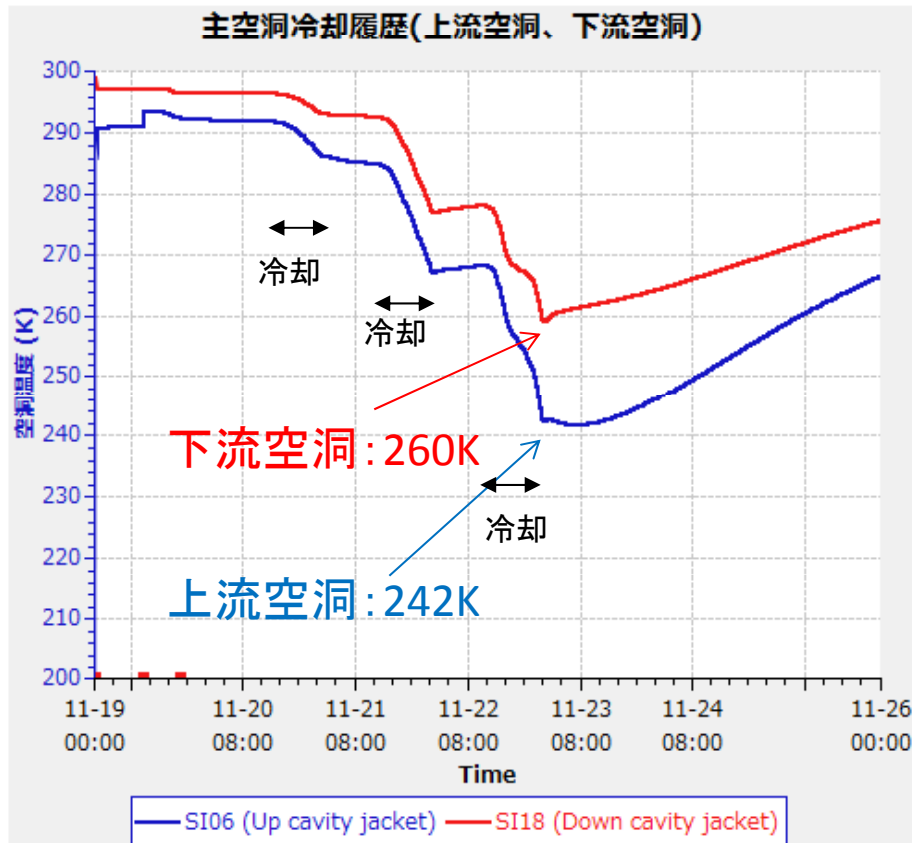
2K lineは各空洞の下からHe液を流し、上部でHe gasを回収。

冷却時は空洞が均等に冷えるように予冷ラインを用いる。

予冷ラインは各空洞毎にバルブがついており、
2K gasの流量コントロールを行える。



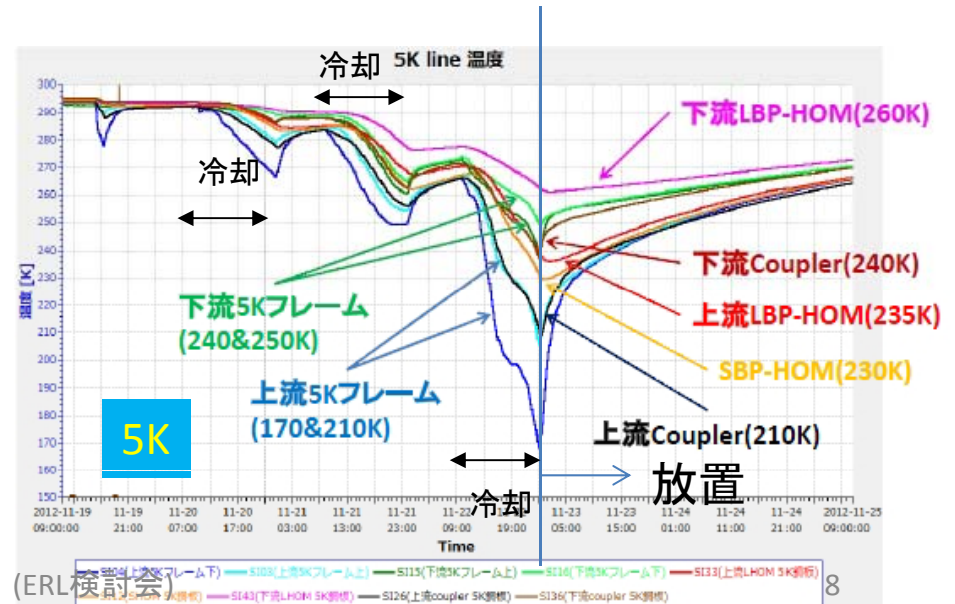
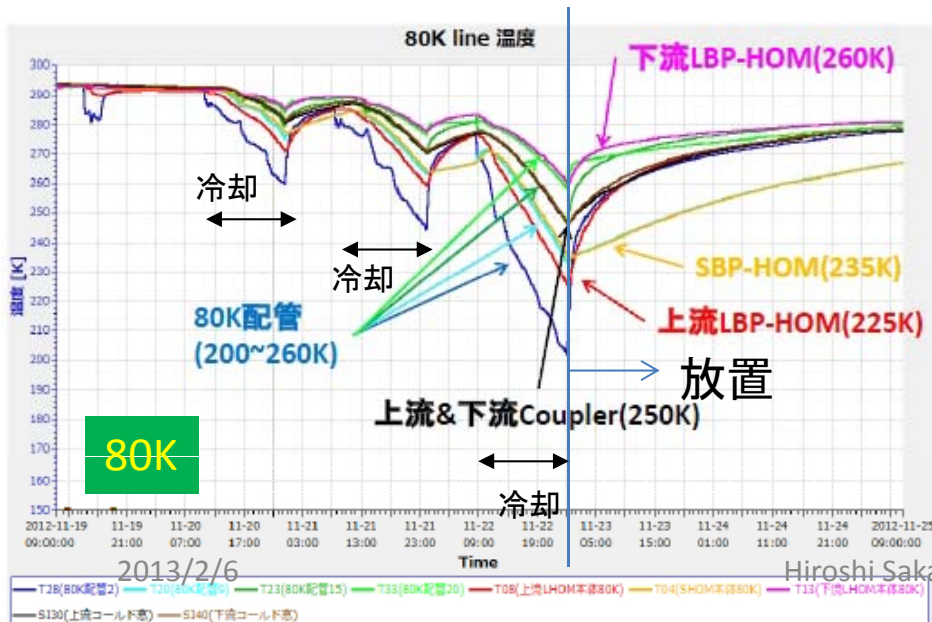
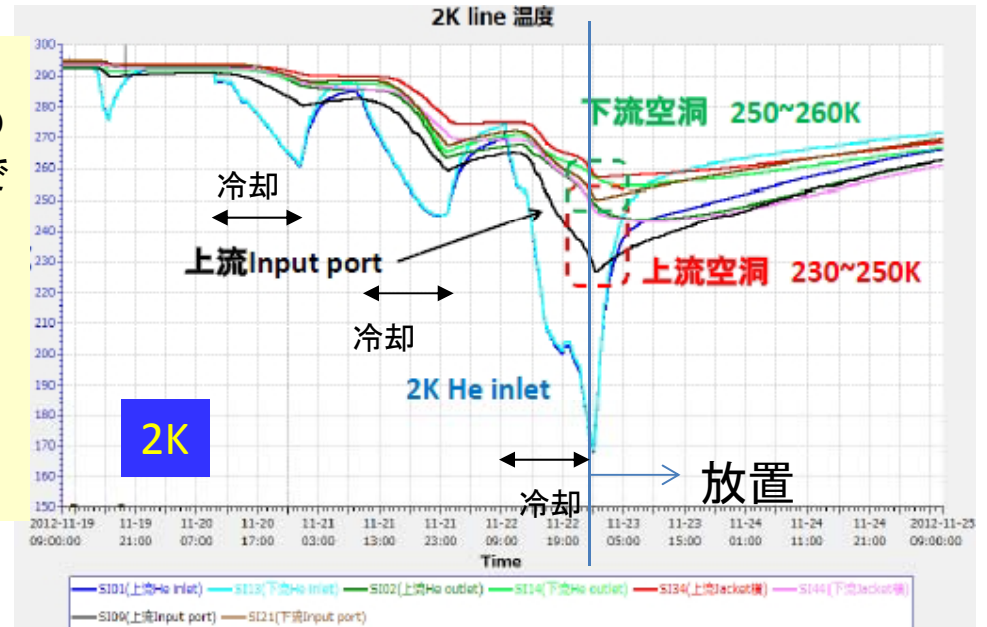
11/19の週(11/19 0:00-11/26 0:00)の冷却の状況



11/19(月)は各lineに液を少しだけ流し、温度計などのsystemcheck。
 11/20から本格的に冷却開始。11/23まで。9:00-24:30の冷却、夜中は冷却stop。
 3日間で240Kまで到達してるが、80KのHOM同士は下流にまで80Kの冷たいガスが
 流れていないようであり、上流と下流での冷却スピードに差(3K/h,1.5K/h)が出てい
 る。また夜間で80Kラインは温度上昇が大きく、週末で温度は下流、上流LBPとも
 280K程度まで戻ってしまった。空洞側は冷却のあと、わりと保温がよく上流で11/26
 までで15-20Kの温度上昇ですんだ。

2012/11/19の週の冷却状況(詳細)

- 全体として上流が冷えるが下流が冷えない。
- 特に80Kのラインは3K/hの冷却速度のため、Heの入口は150Kまで行くが、全体として、200K程度までの冷却でおわる。その後、週末は冷却無しで放置で280Kまで戻る。
- 80Kの熱シールドが無いと、Heも溜めれない。
- 冷却速度の見直しが必要となった。
- → 次週から3K/hを24時間行い、最終的に80Kをkeepすることに専念。

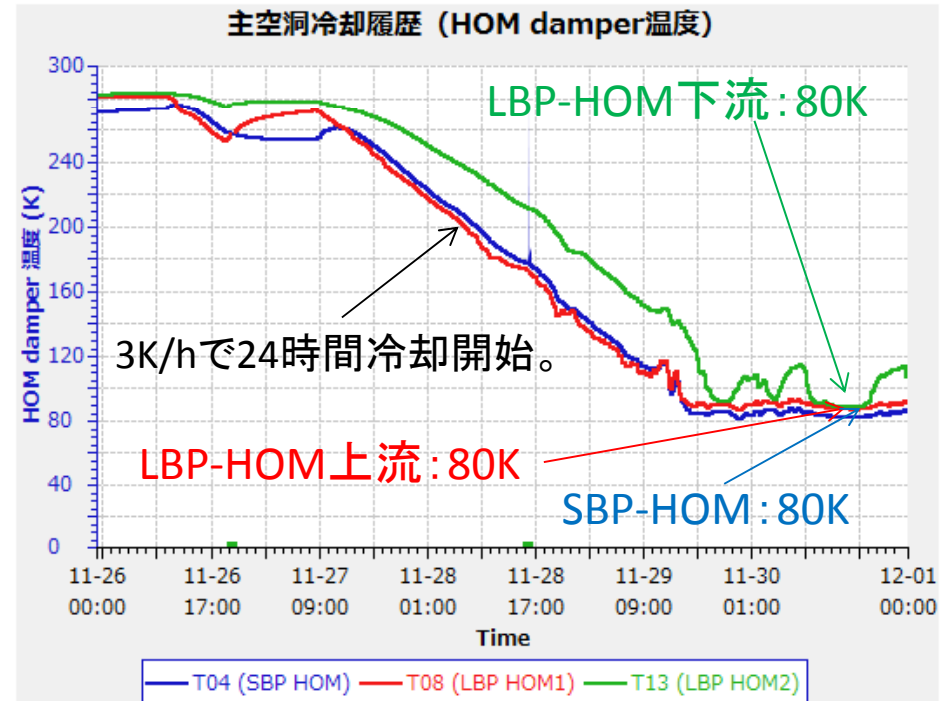
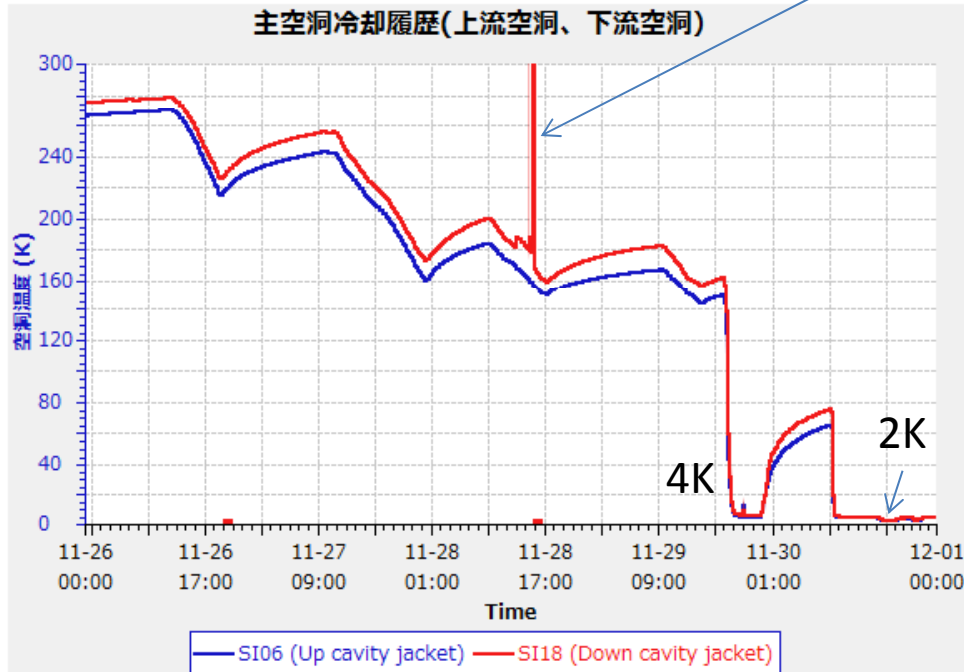


Hiroshi Sakai

(ERL検討会)

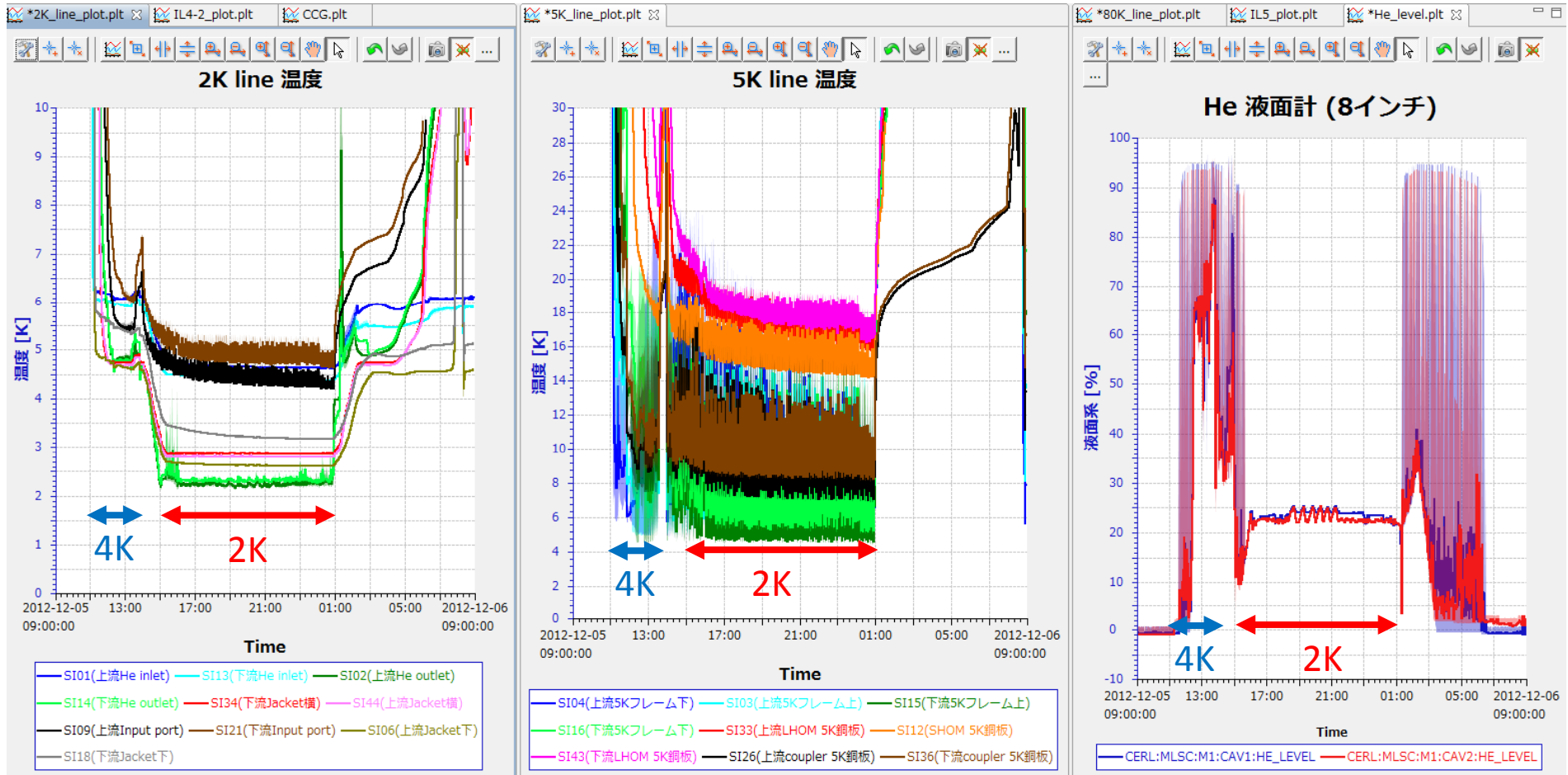
11/26の週(11/26 0:00-12/1 0:00)の冷却の状況

一時のSiのセンサートラブル



11/26から冷却再開。80Kでの夜間での温度上昇の改善が見られないため、11/27から24時間で3K/hのslopeをkeepしつつ、80Kの液体窒素ラインだけは流し続ける。それ以外の2K,5K lineは9:00-24:30で冷却を行う。特に予冷ラインでの冷却を行い、効率良く冷却を行った。11/29 22:00現在でCold box側に液がたまり、空洞側も4Kまで到達。Homdamperも80Kまで到達。11/30に2Kへの冷却は順調に行われた。

その後の冷却のサイクル(2012/12/5の冷却状況)

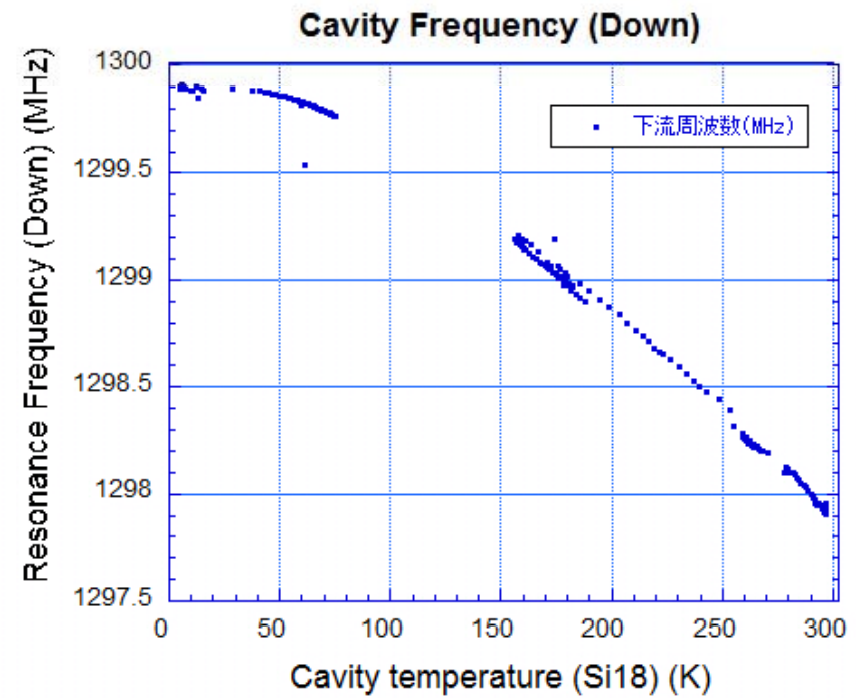
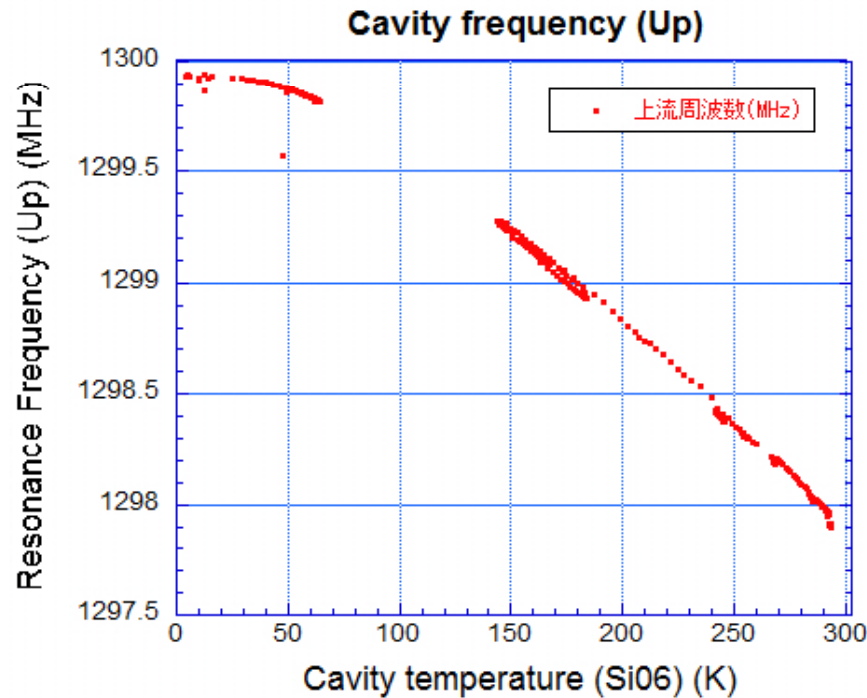


High power test中の1日のcycle

- 80Kは常にkeep。
- 午前中に冷却を行う。
- その後、13:00～24:00まで空洞ジャケット内にHeを溜め、2Kをkeep。

冷却での周波数変化

チューナーはfreeから1回転した所をlimitとし、さらに10回転させ、loadをかけて、熱的な接触がある状態にして、冷却start。

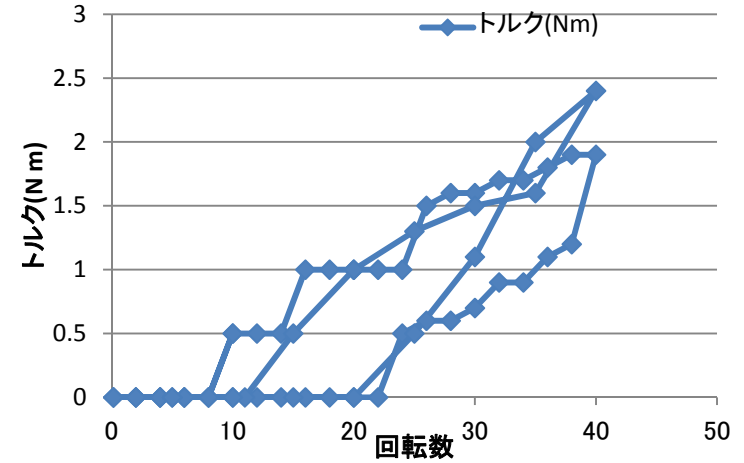


温度	周波数(上流)	周波数(下流)	4Kとの差(上流)	4Kとの差(下流)
293K	1297.9528MHz	1297.91093MHz	1.979MHz	1.988MHz
4.2K	1299.9316MHz	1299.8992MHz	-	-
2K	1299.9109MHz	1299.8716MHz	0.021MHz	0.028MHz

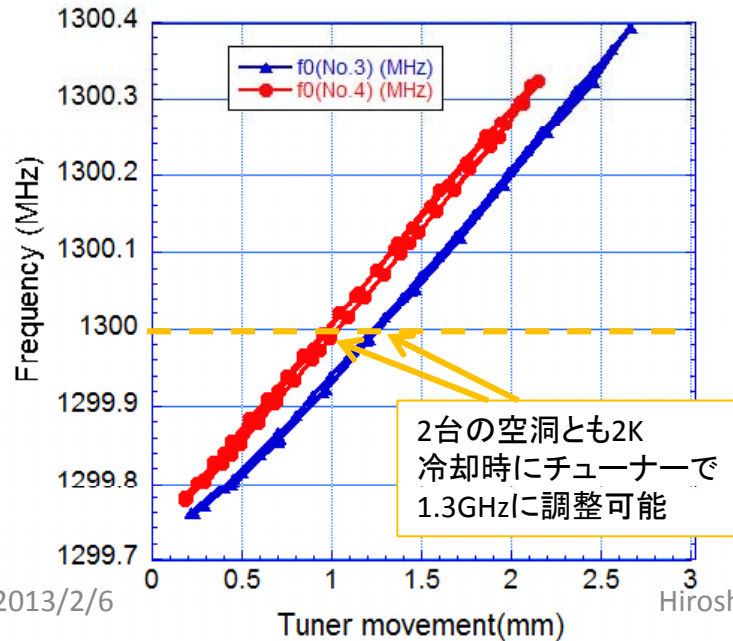
2Kでのチューナーテスト

チューナーを2K冷却下で動かす。20回転/1mm
 上流(#4): 1299.781MHz -- 1300.325MHz (0-40回転)
 下流(#3): 1299.795MHz – 1300.393MHz (0-50回転)
 1.3GHzに両方とも調整可能であることがわかった。
 上流、下流ともトルクは3Nm以内で収まっていた。
 ロードは900kg以下で抑えた所で回転を止めた。

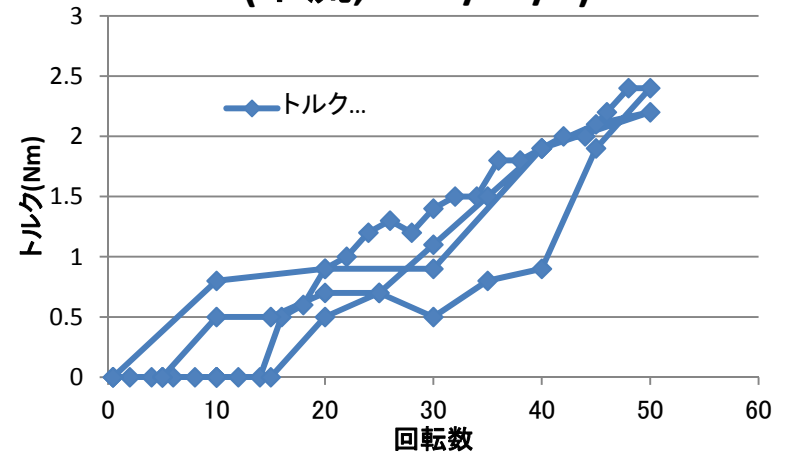
トルク(Nm) vs 回転数 (上流,2012/12/5)



2K冷却時のtunerでの周波数変化

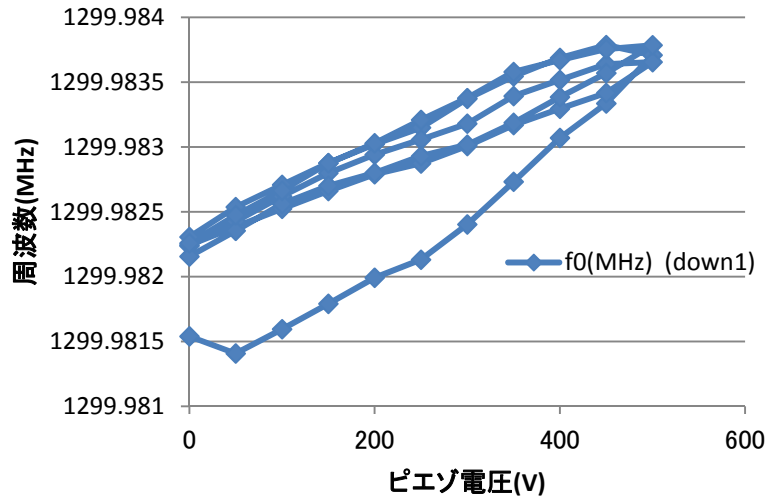


トルク vs 回転数 (下流,2012/12/5)

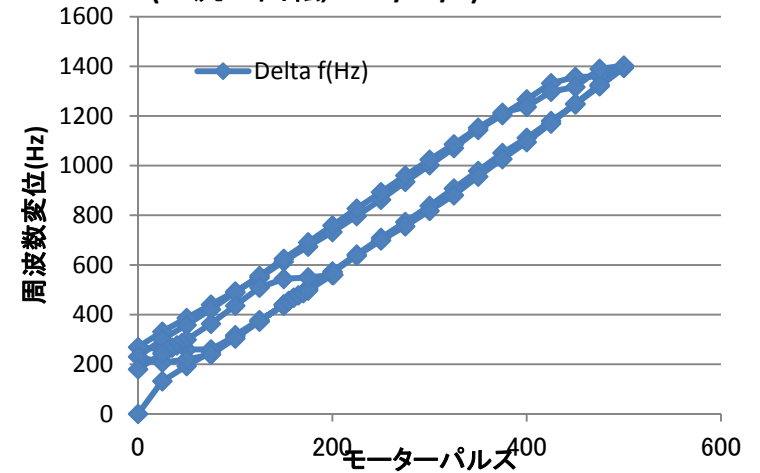


2K微小駆動テスト(ピエゾ&モーター)

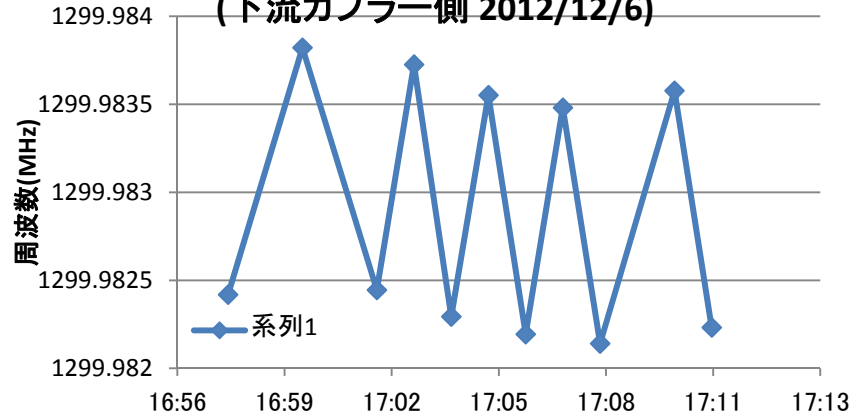
f0 vs ピエゾ電圧
(下流カプラー側 2012/12/6)



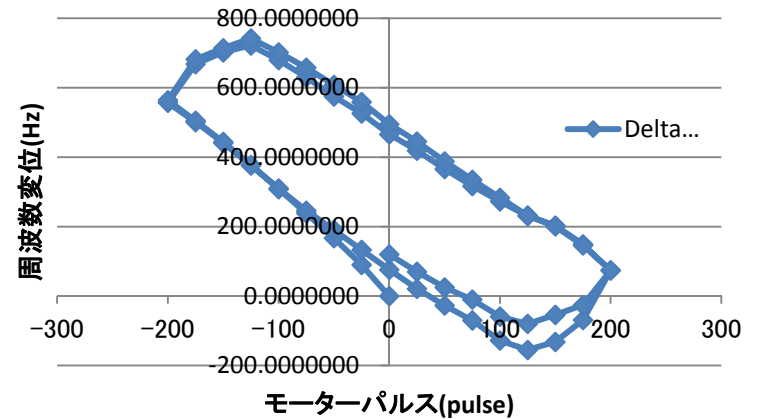
Delta f vs チューナ移動量
(上流16回転, 2012/12/7)



f0 (0-500V)5往復
(下流カプラー側 2012/12/6)



Delta f vs チューナ移動量
(下流20回転, 2012/12/7)



4つのピエゾとも2K冷却下で
500Vで1.3-1.4kHz動くことが確認された。但し、
チューナー温度は30Kくらいであった。

2013/2/6

Hiroshi Sakai

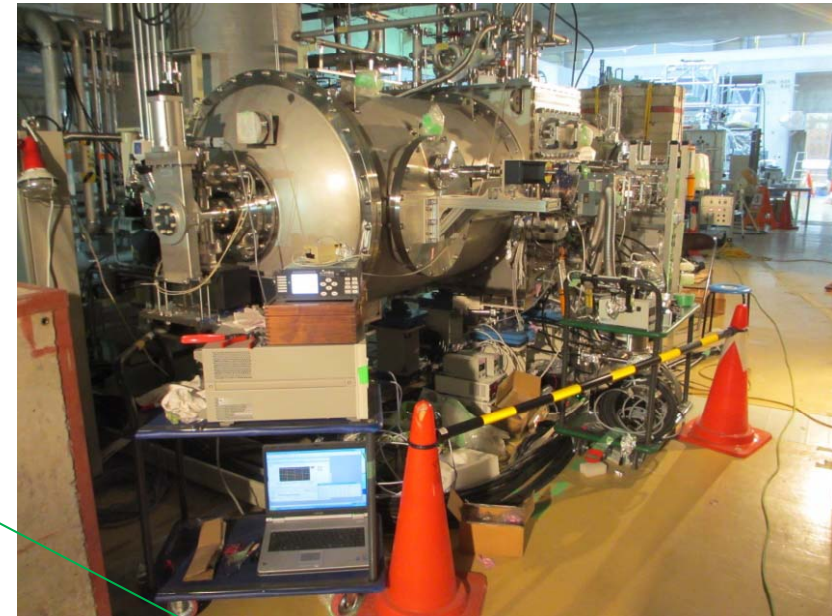
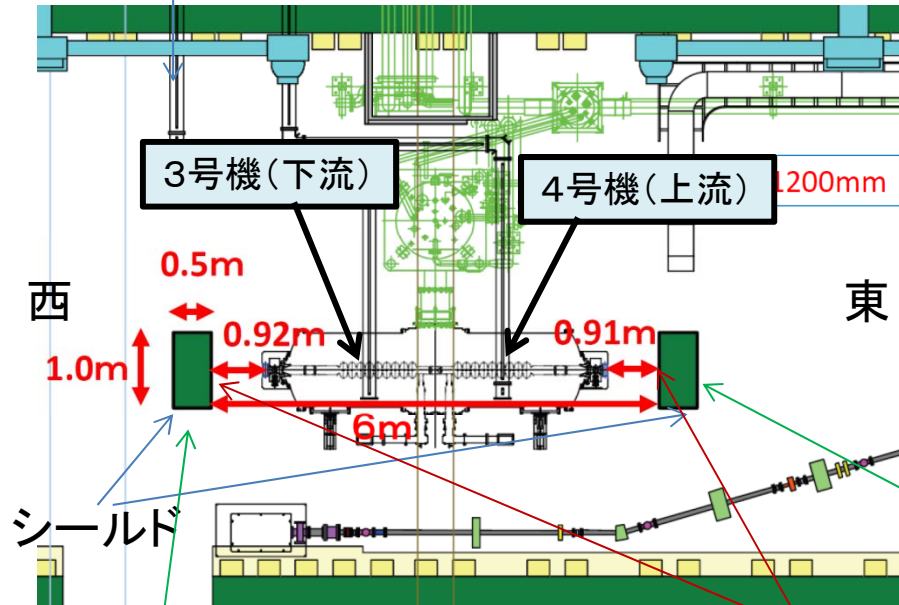
(ERL検討会)

上下流とも200Hz程度のhysteresysが見られるが、バックラッシュで急に周波数が飛ぶわけではない。ピエゾでの追いつきが可能である。

30kW IOT

ERL主空洞クライオモジュールパワーテスト(setup)

モジュール全体像



エリアモニターをシールドの内側に設置。



Power履歴 with radiation

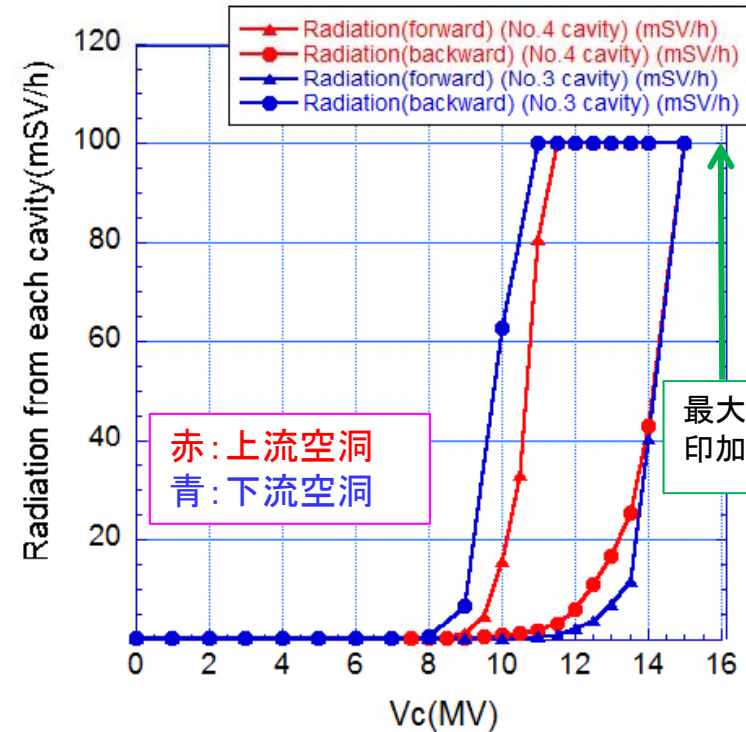
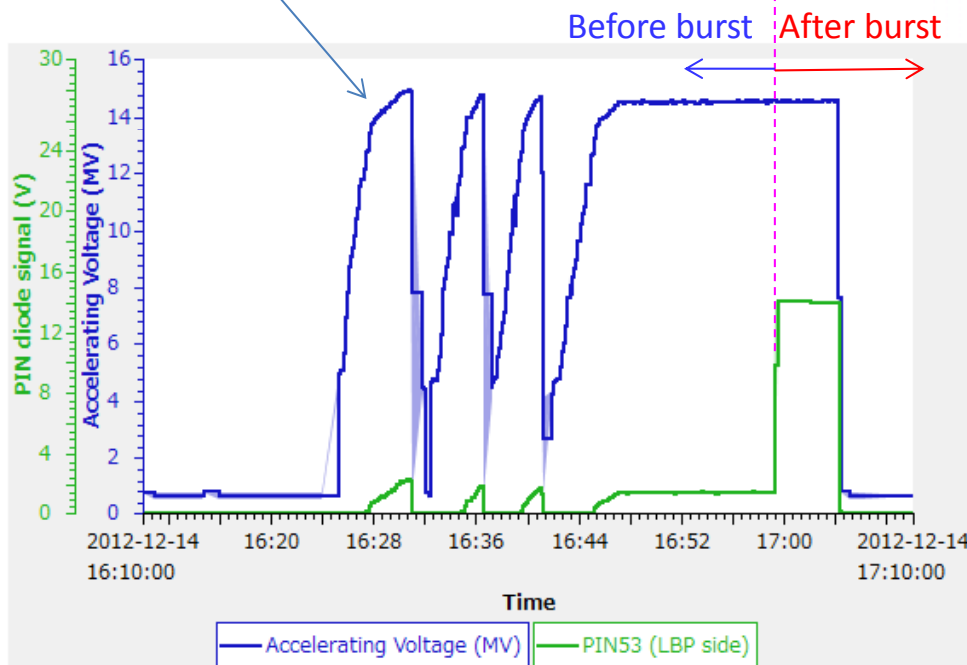
加速電圧は $V_c = \text{SQRT}(4 \cdot \text{Pin} \cdot R / Q \cdot \text{QL})$ を使用。

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

最大Pin 5kW弱

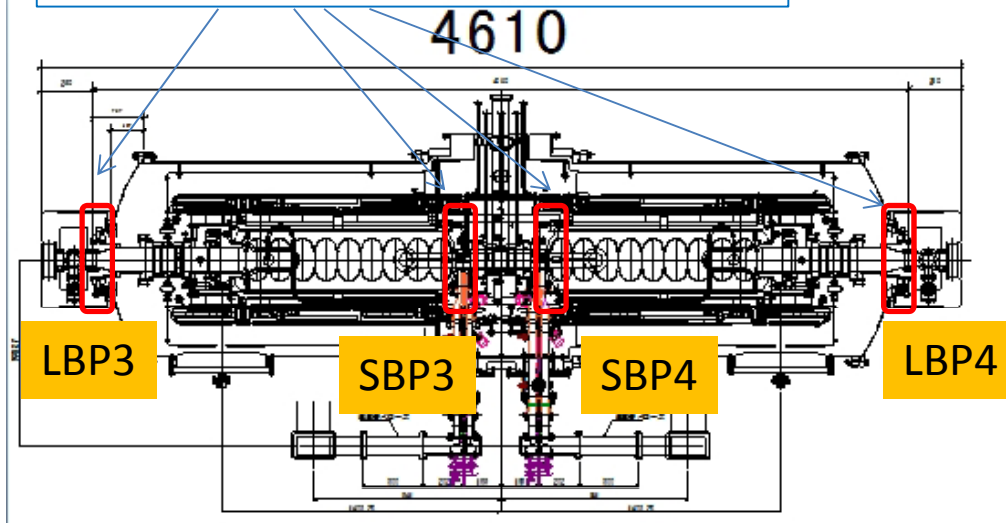
High power testでの各空洞の加速電圧と空洞軸上のradiation

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。



上流空洞(Burst後)と下流空洞の軸上においてあるArea monitorの線量を測定した。8-9MVからField emissionにより、放射線増大。最大両方ともクエンチなしで16MVまで電圧印加可能であったが、放射線量は両方とも99mSV/h以上で振りきれた。

PIN diodeを周方向に16個ずつ設置。合計64個設置。

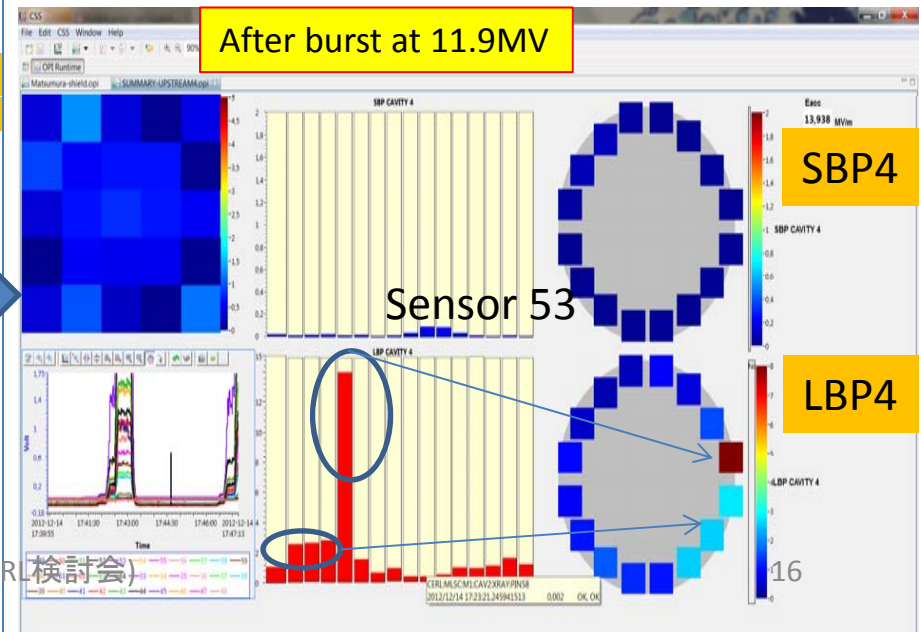
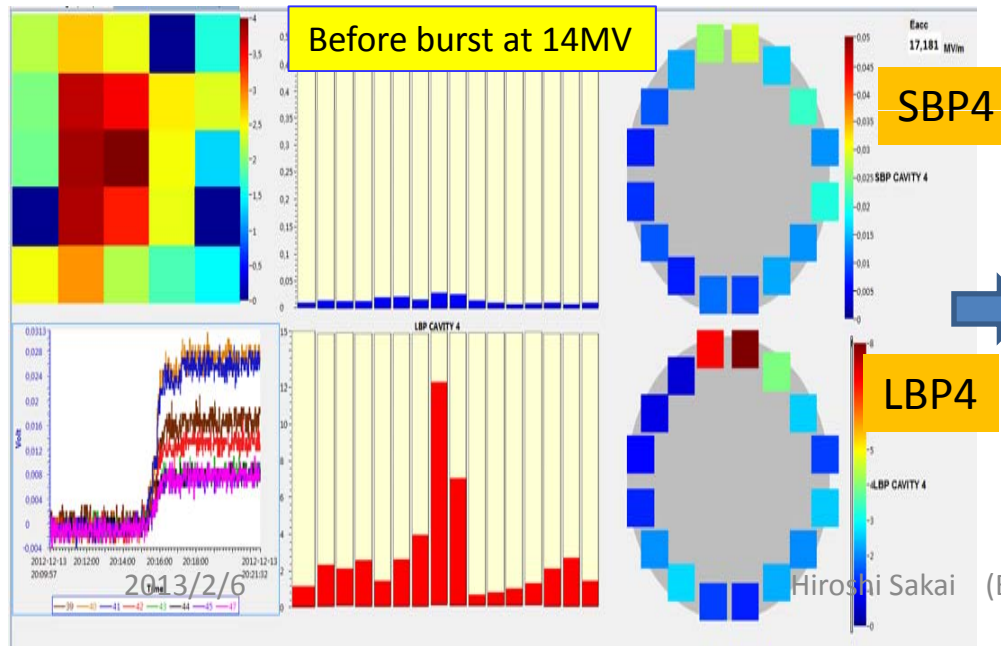


PIN Radiation分布 By enrico cenni



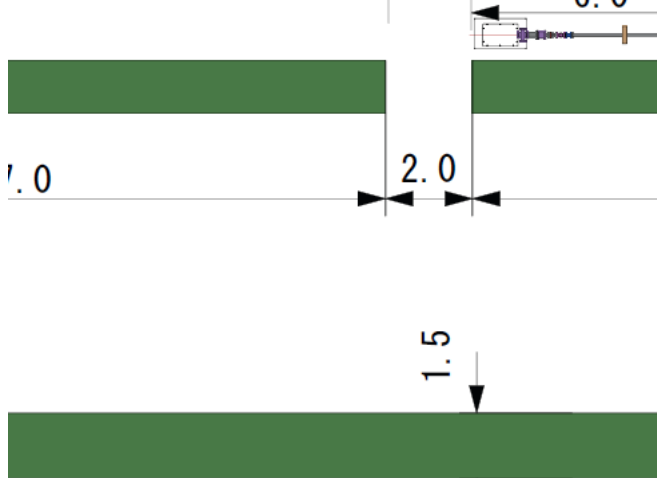
PIN diodeを軸周りに配置

バースト前後でradiationの分布が変わっていることがわかる。また、分布は縦測定の場合とまったく異なっていることから、radiationソースは縦測定時のものとは別物であることが分かる。現在詳細解析中。

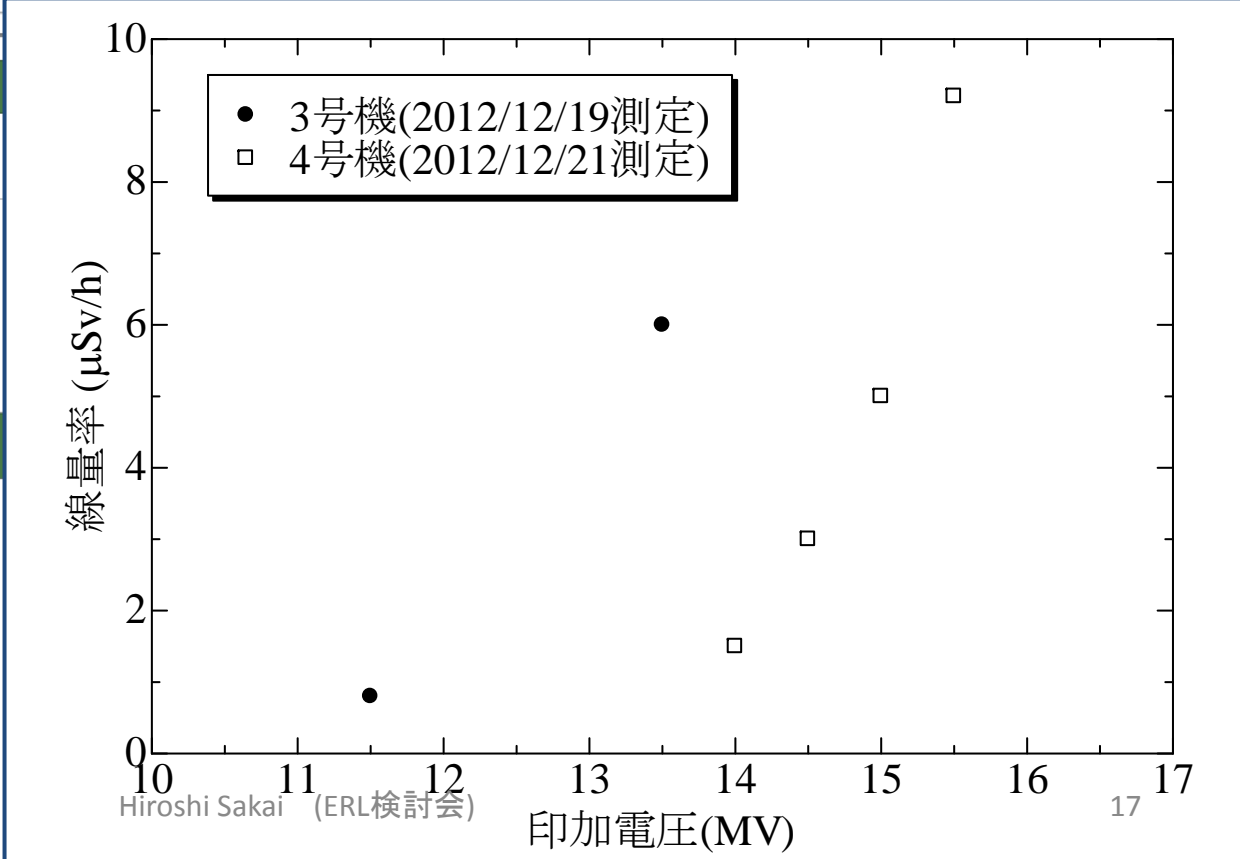


主空洞運転時の天井上部の線量率測定

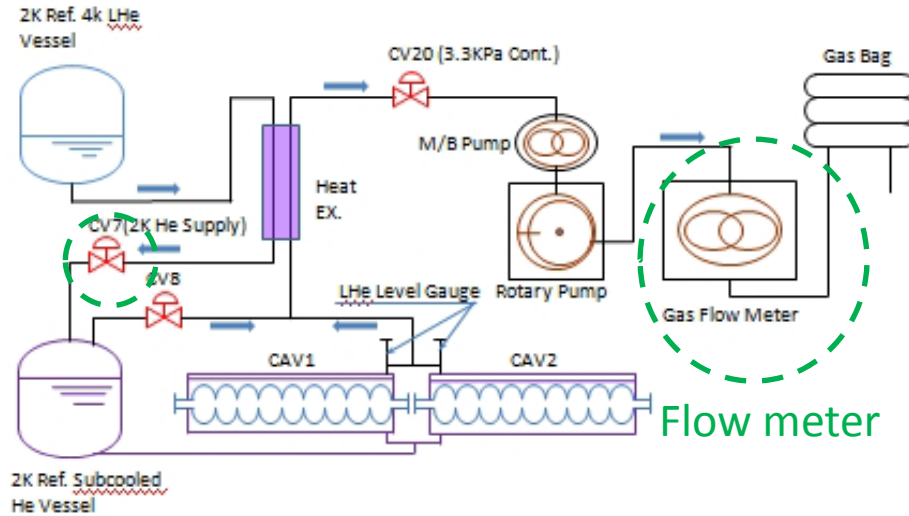
By H.Matsumura



線量計で測定。
天井はmaxで10uSV/h弱。横は厚みが1.5mあるため、<math>< 1\text{uSV/h}</math>。両方ともシールド部が一番線量が高い。計算の予想と合っているようだ。



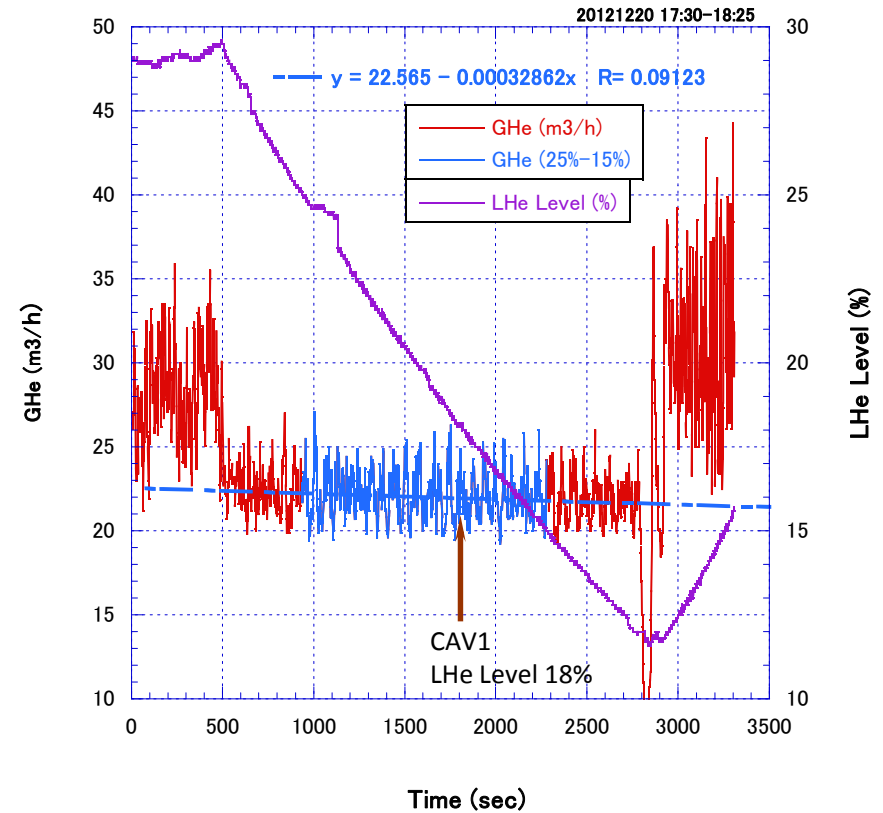
冷凍負荷測定(Return He Gas 測定方法)



バルブ、液面操作

- RF入力してCAV1 LHe液面計で28%以上を一定時間維持する。
- CV7のバルブを閉じ2K LHeの供給を停止する。
- Gas flow meterでReturn He Gasを計測。
- CAV1 LHe Levelが14%以下になったらRF入力を停止し次の測定に備えてCV7バルブで2K LHeを供給する。

#3 cavity Q Loss (10MV)



He Gas量の求め方

- 決まった液面高さ間(25%-15%)での傾きを求める。
- 定めた(18%)液面高さのReturn He Gas流量を求める。
- その18%時のStatic loss(detuneのdynamic lossとほぼ同じ)を除いたものをHe Gas量とする。

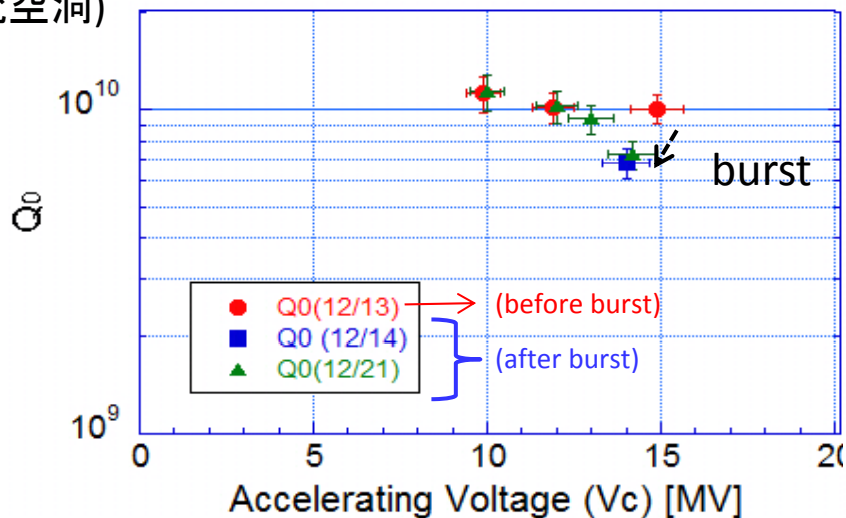
$$\text{Heat loss (W)} = 1.076 * \text{He流量(m}^3/\text{h)}$$

冷凍機負荷 & (Vc vs Q0)

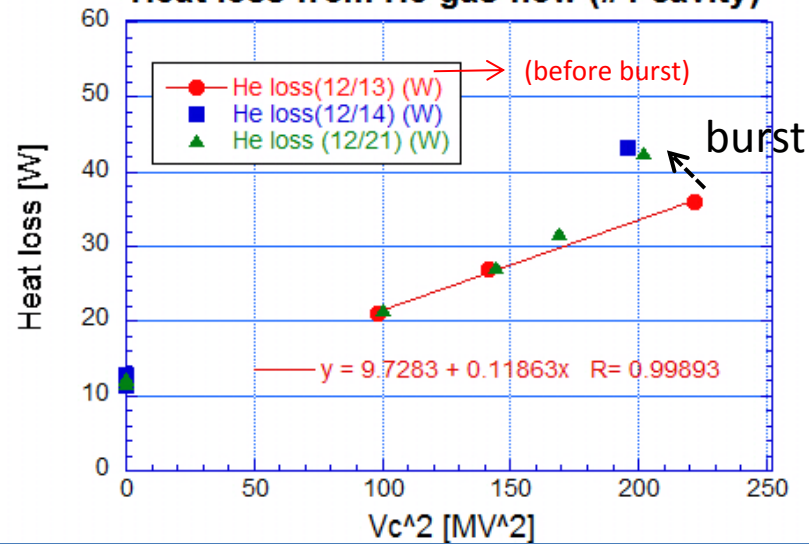
上流空洞はバースト後がHeat lossがふえているのがわかる。加速電圧の増加に伴うRadiationの増加からheat lossの増加はfield emissionによるlossであると思われる。低い加速勾配では $>1e10$ のQ0があるのがわかる。磁気シールドの効果あり。HOM damperの割れもなさそうだ。Q-diseaseによる劣化も見られない。

#4
(上流空洞)

Vc vs Q0 (#4 cavity)

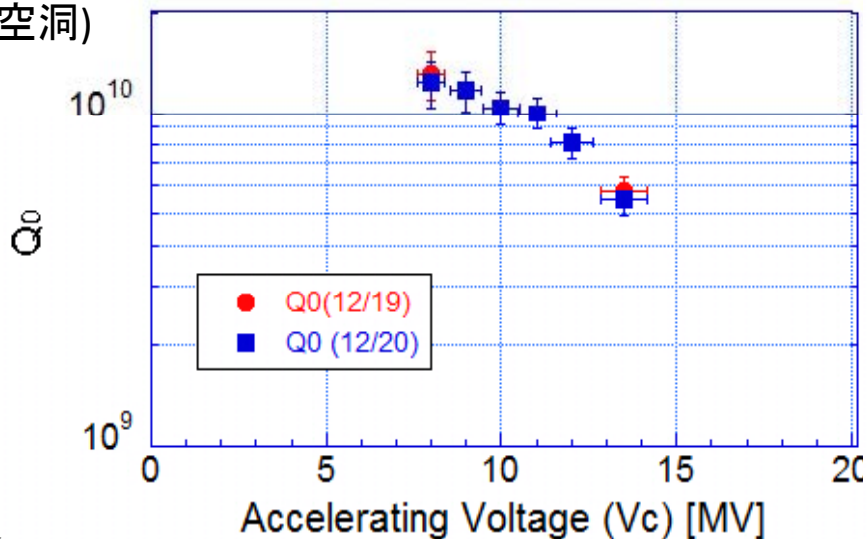


Heat loss from He gas flow (#4 cavity)

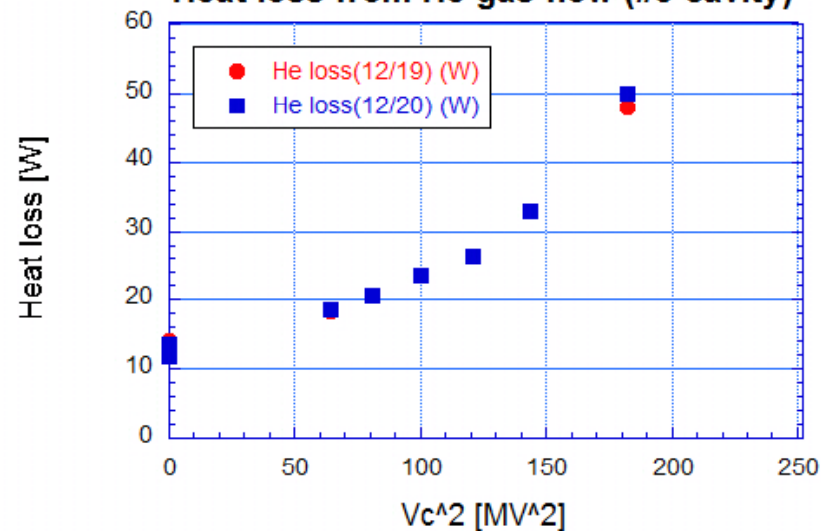


#3
(下流空洞)

Vc vs Q0 (#3 cavity)



Heat loss from He gas flow (#3 cavity)



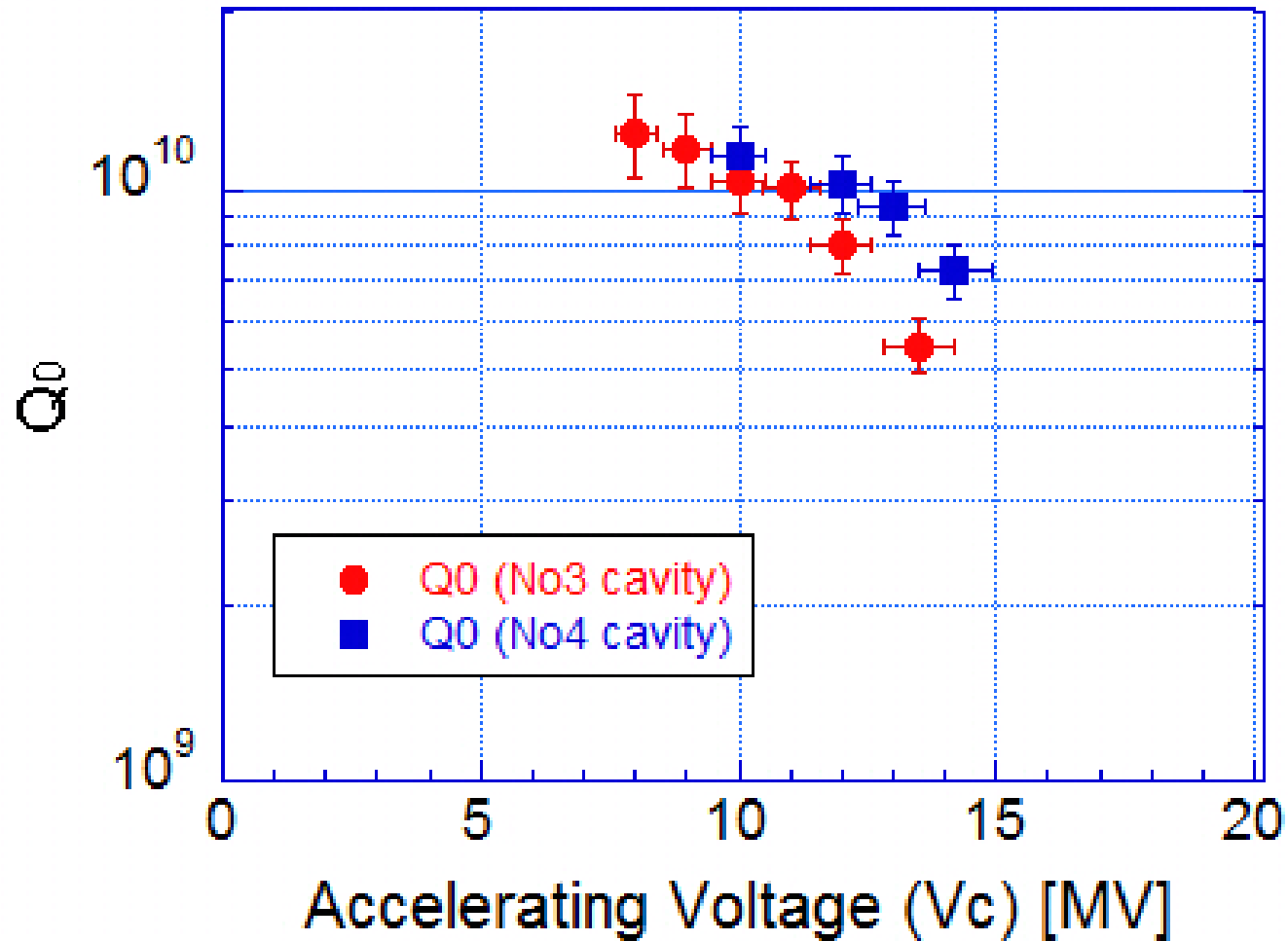
2013/2/6

Hiroshi Sakai
(ERL検討会)

2K Static loss : 冷却直後 12:00 13W --- 実験終了前24:00 & 週最後11W

Final Vc vs Q0

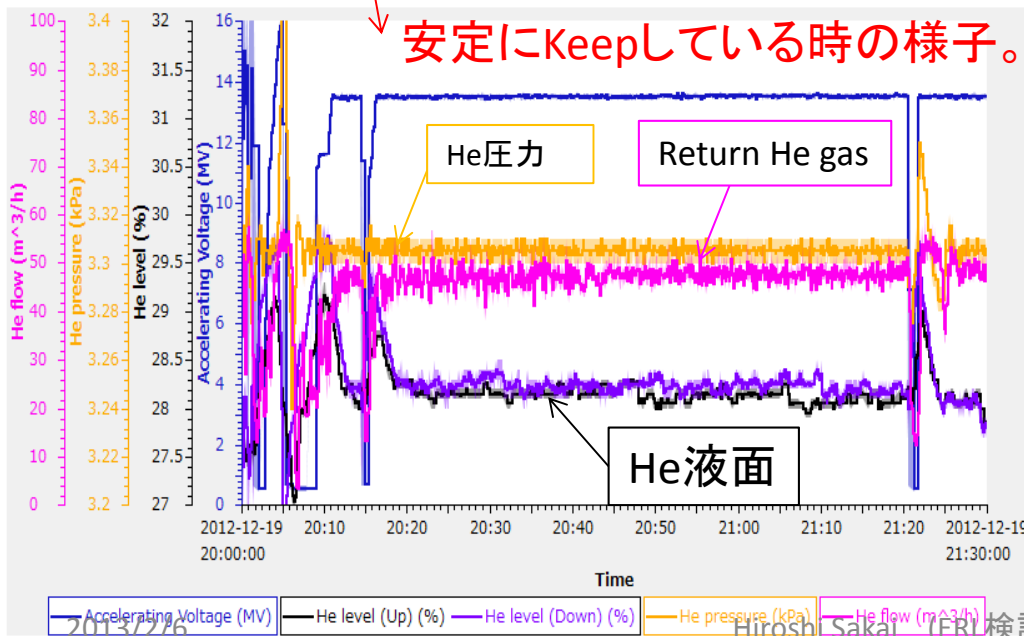
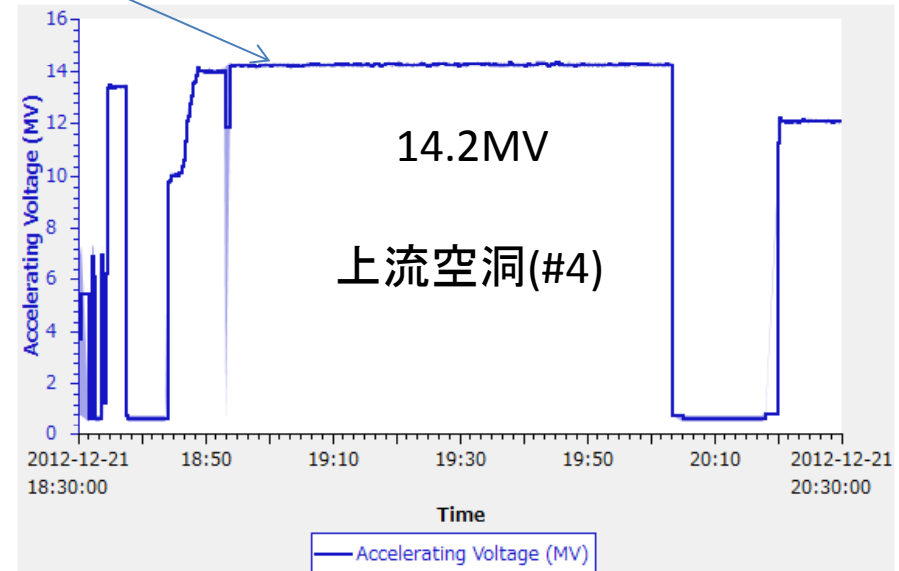
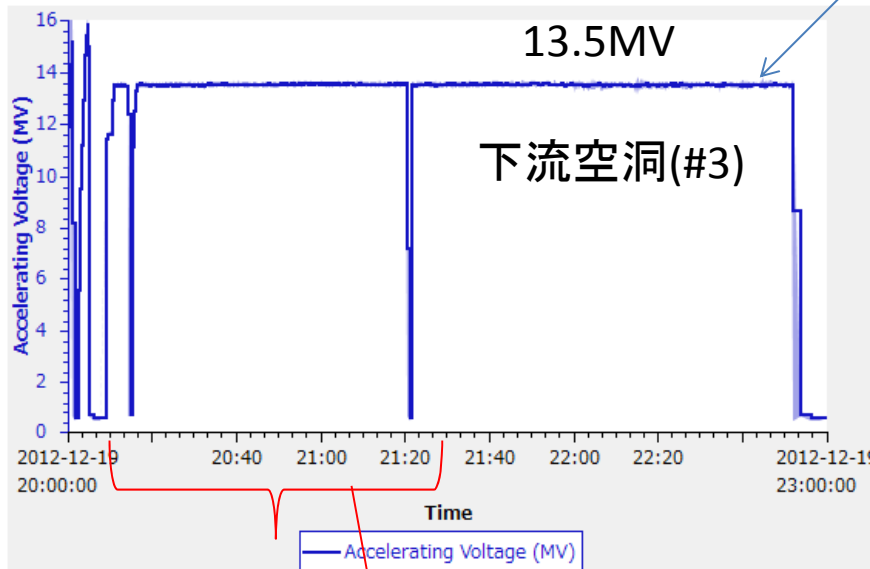
Vc vs Q₀ (Final)



FinalのVc vs Q₀の状況。上流のNo4の方が性能が良い。

空洞電圧

Vc keep test



減圧下で上流、下流空洞をある一定電圧のもとでkeep。

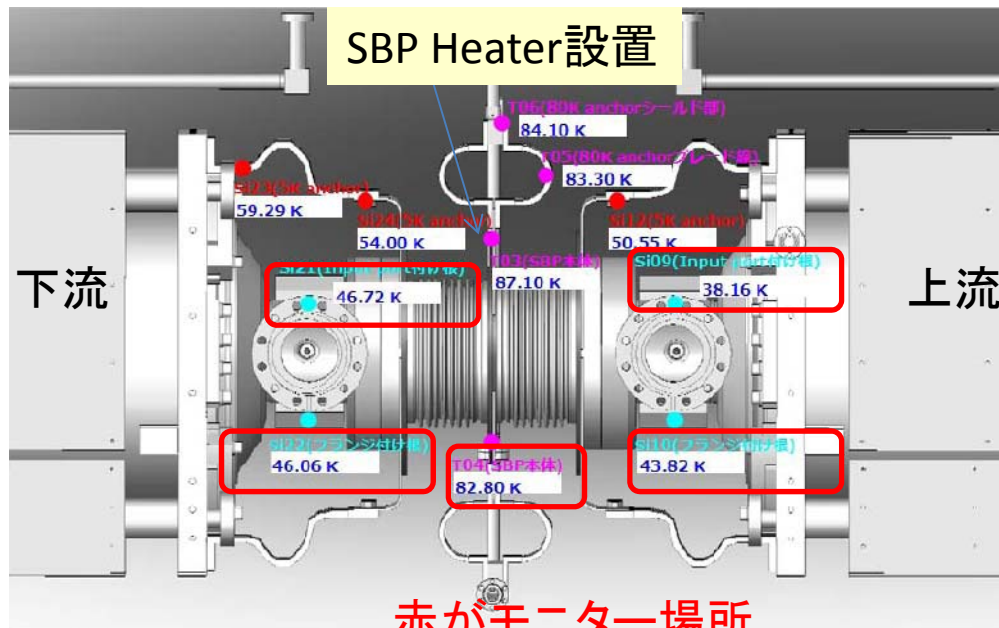
上流空洞: 14.2MV

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減圧ポンプの容量over(>50m³/h)でKeepが不可能であった。

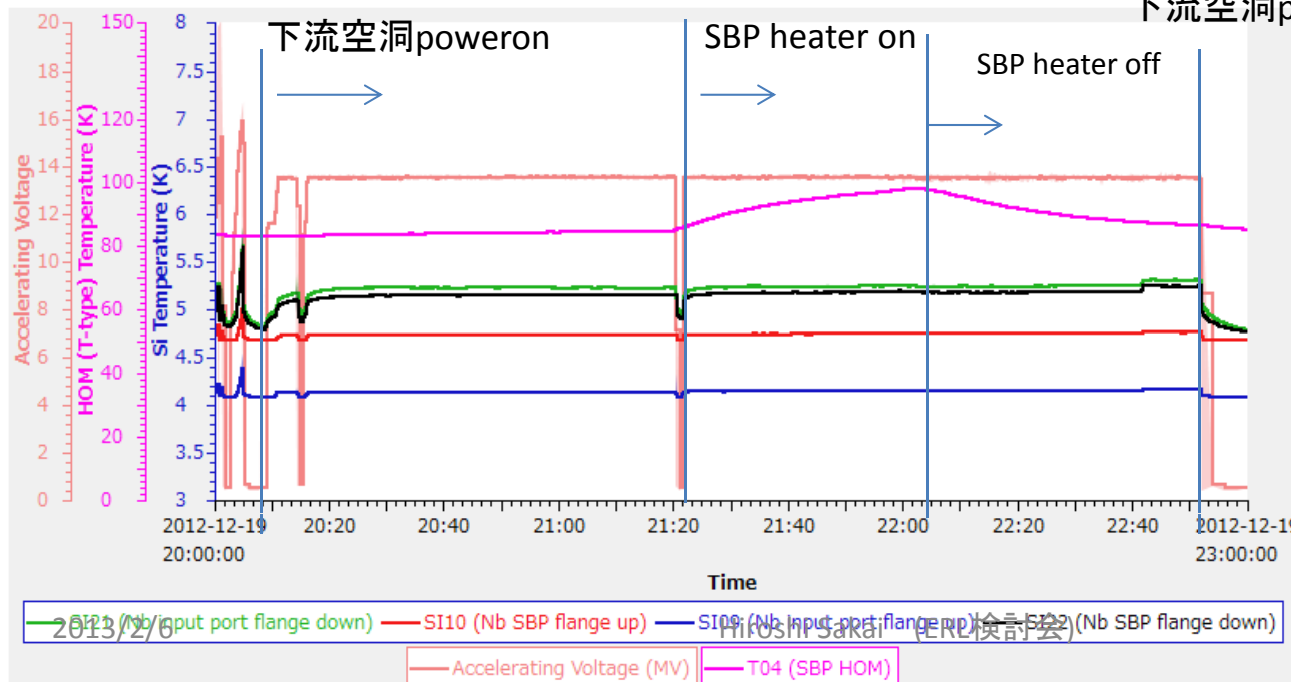
He gas, He 液面, He圧力ともに安定。特にHe圧力は10Pa以下で安定にControlしている。Microphonics抑制に必要。

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、SBP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。

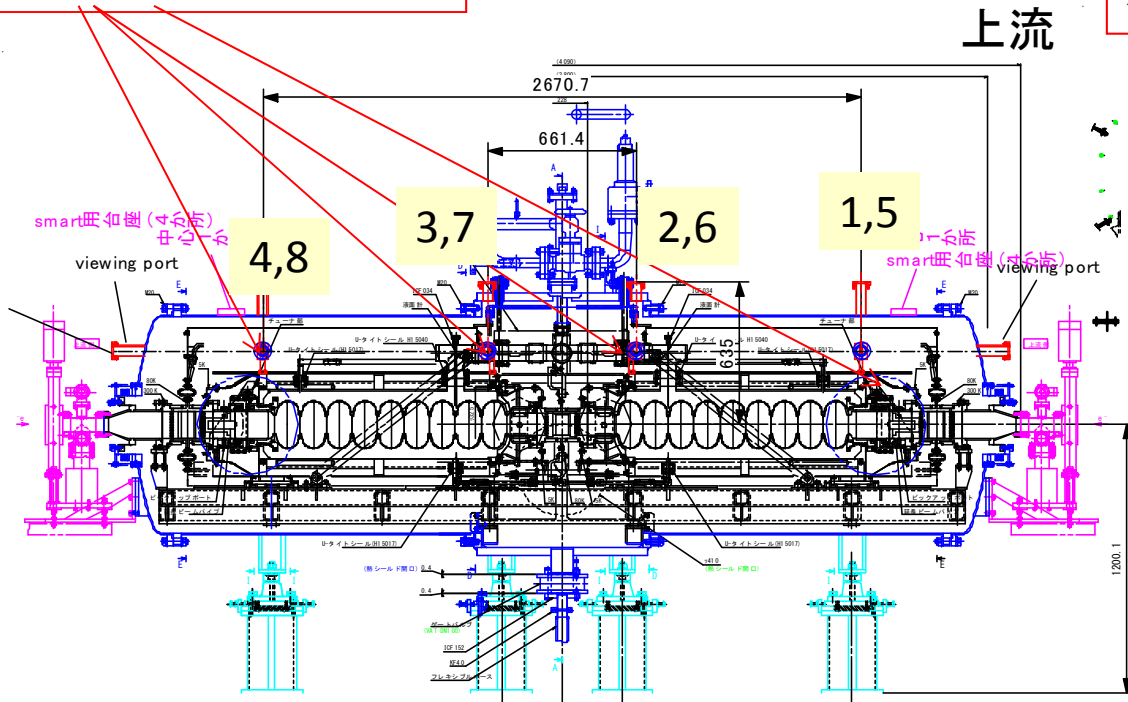
下流空洞にカプラーからpowerを投じる。Pin は4kW程度。



- 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ようである。
- 他の温度分布、上昇の詳細は現在解析中。

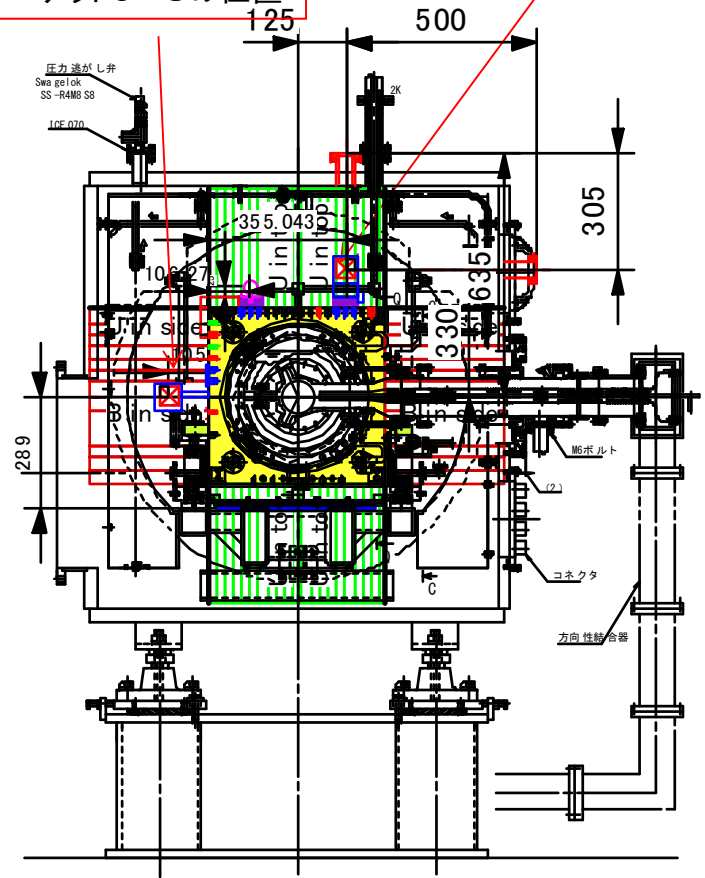
空洞冷却時の動き測定

フレームの上と横に空洞の両端部にターゲットを合計8か所置く。

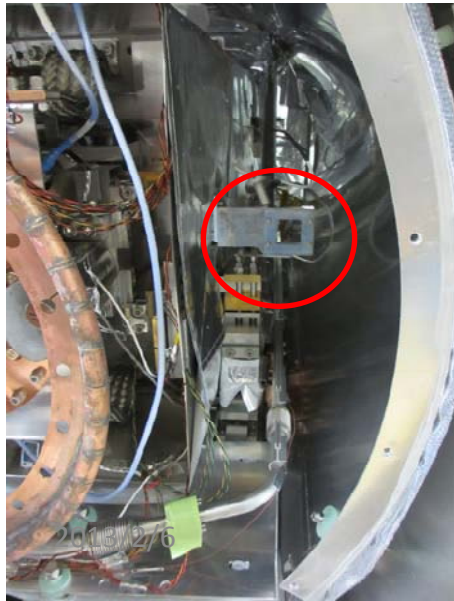


ターゲット5-8の位置

ターゲット1-4の位置



断面 II



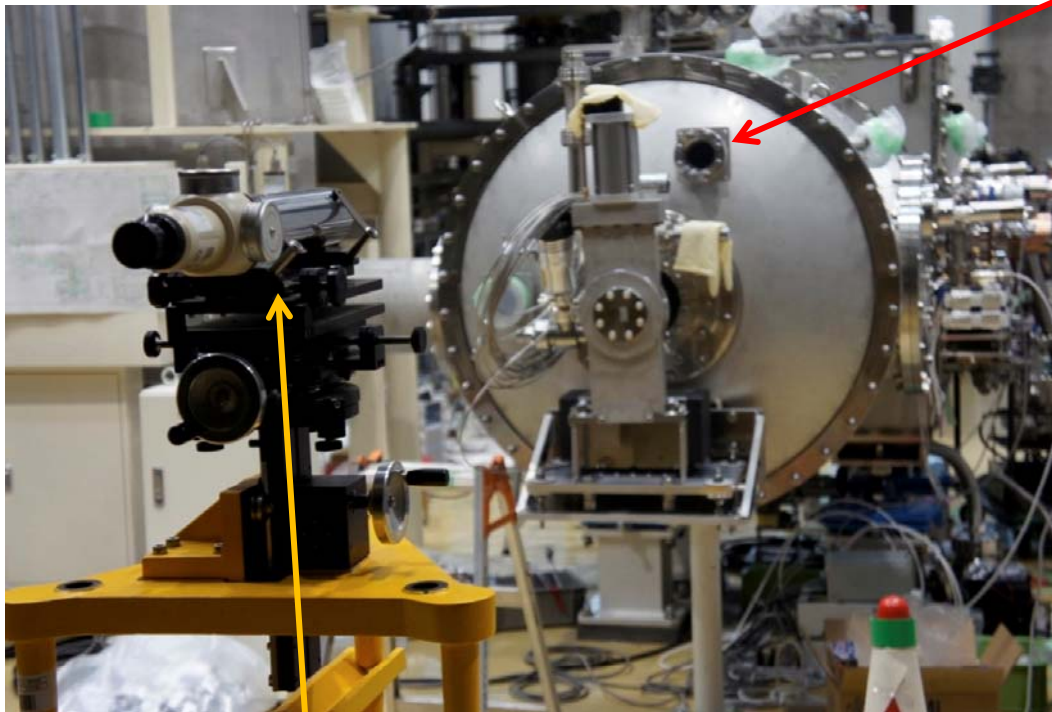
Hiroshi Sakai (ERL検討会)

ターゲットをalignment
 テレスコープで覗き冷却中の
 空洞(フレーム)の動きを
 ターゲットの位置のずれで追
 いかける。

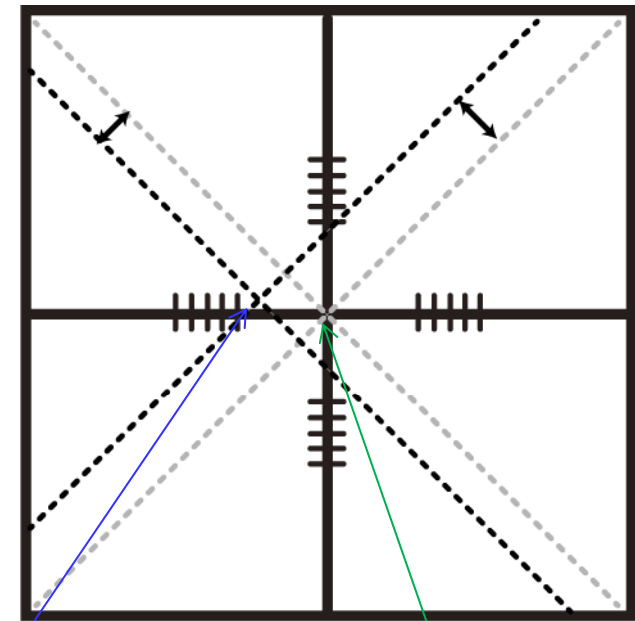
測定 + Target詳細

- ・冷却前に望遠鏡の軸(モジュール前後のターゲットを結ぶライン)を合わせる。
- ・4箇所ターゲット中心と望遠鏡の中心とのずれを読み取る。
- ・望遠鏡の架台には、僅かな水平方向の調整機能と角度の調整機構が付いている。望遠鏡本体の左右にはダイヤルが付いており、これを回すことで、中央のラインが $\pm 1.2\text{mm}$ 移動する。
- ・この機能を用いて、ターゲットの中心と望遠鏡中心の差を測定する。

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。



2013/2/6

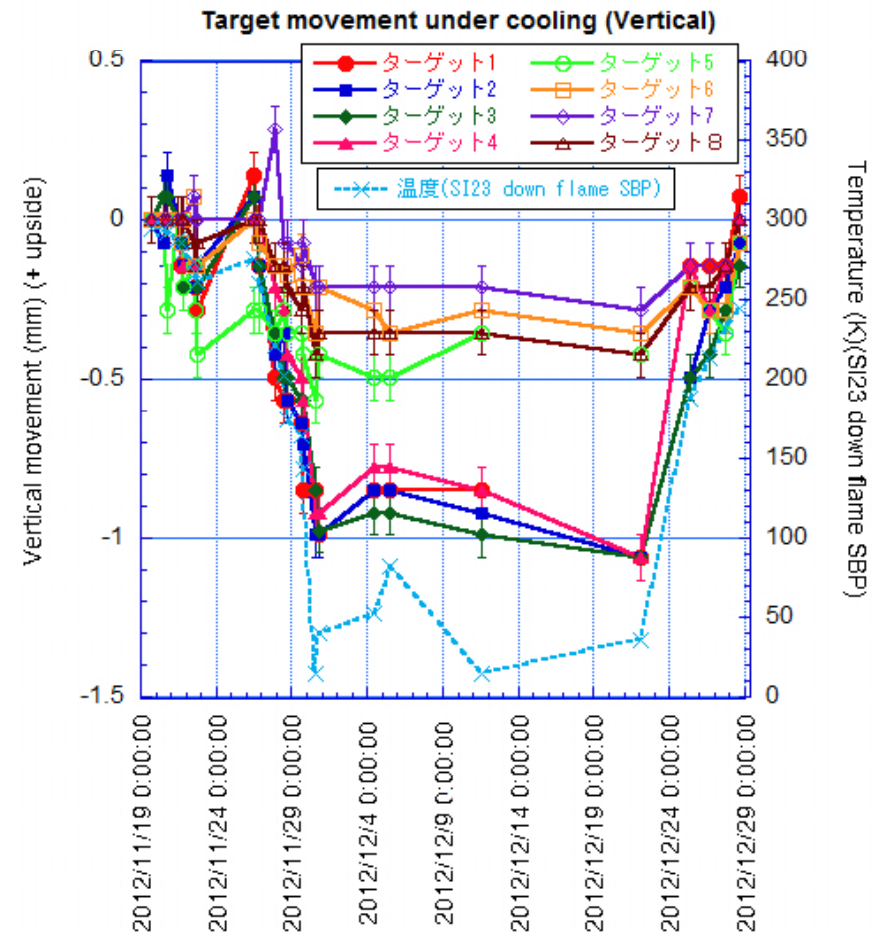
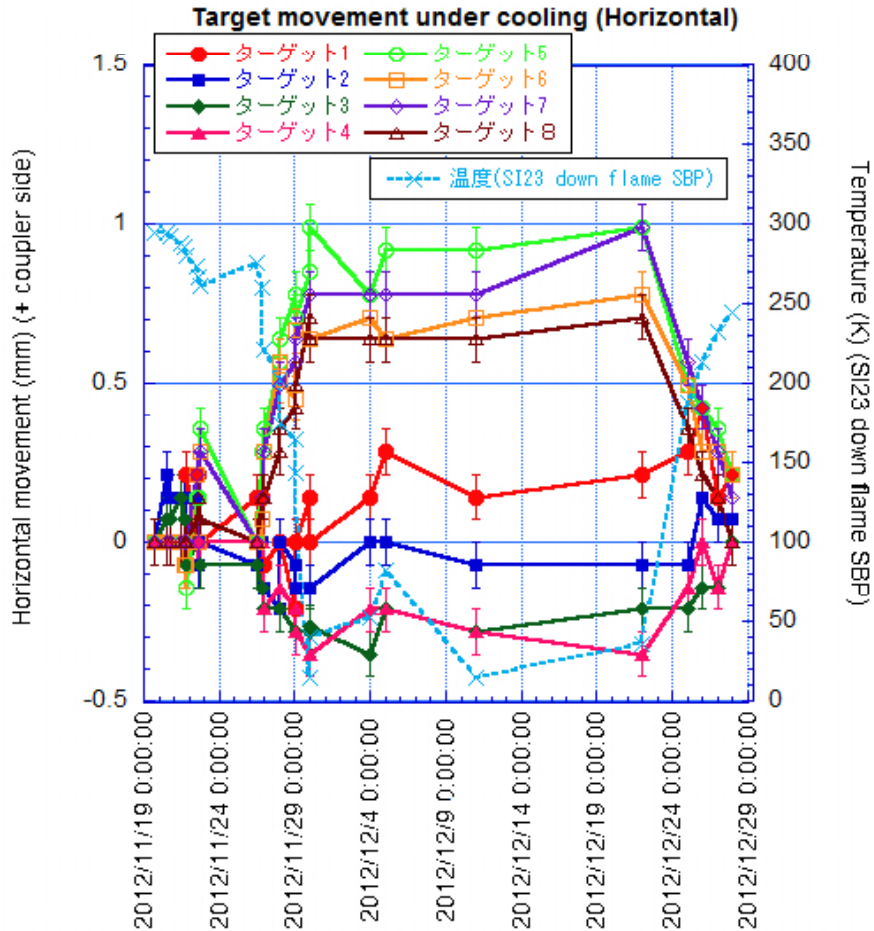
アラインメント望遠鏡

Hiroshi Sakai (EFL検討会)

望遠鏡中心

断熱槽内ターゲット中心

冷却中の空洞の動き



- ・冷却により、フレーム上に置かれたターゲット1-4とターゲット5-8がそれぞれ同じよううごいているのがわかる。
- ・ターゲットの読みから2K冷却中は0.4mm程度動いていると予想される。
- ・常温に戻った時にはターゲットの位置はほぼ元の位置に戻ることも確認された。

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5-8から)	0.39	-0.37

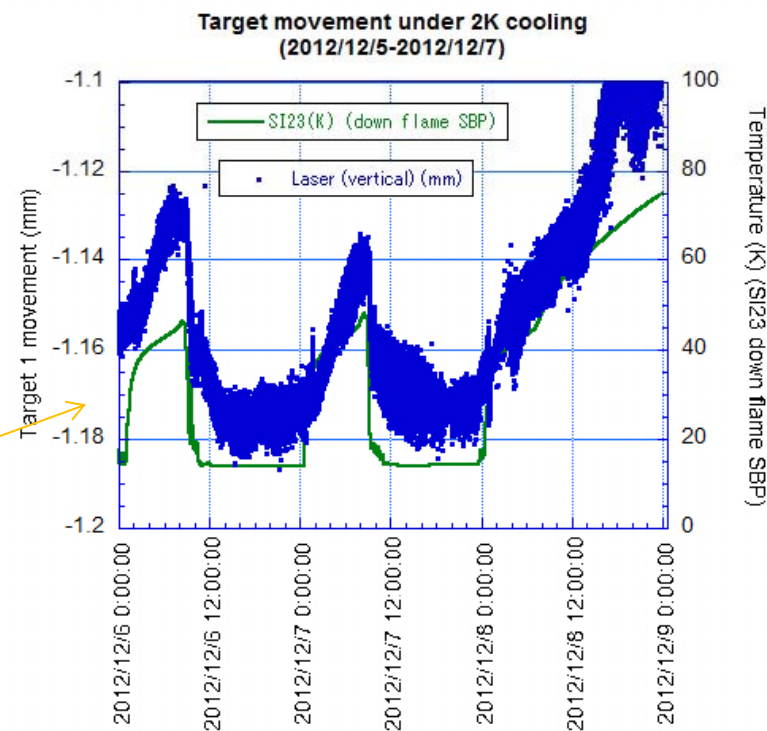
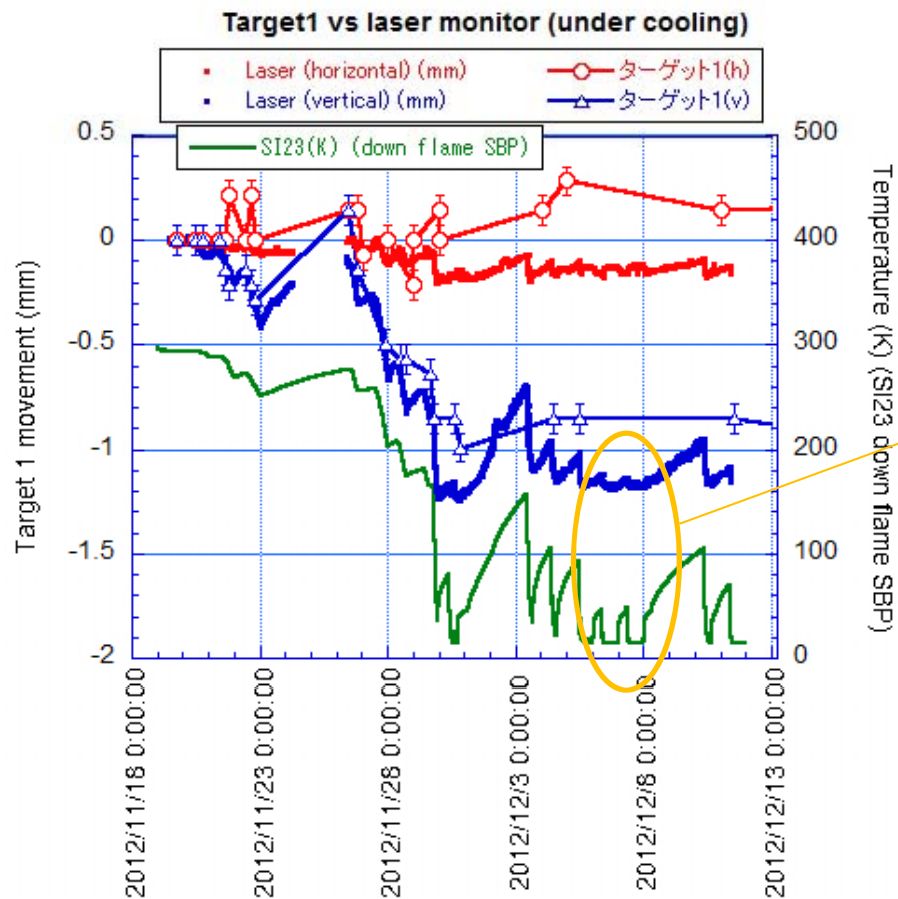
2015/2/8

Hiroshi Sato (RI) 検討会

35

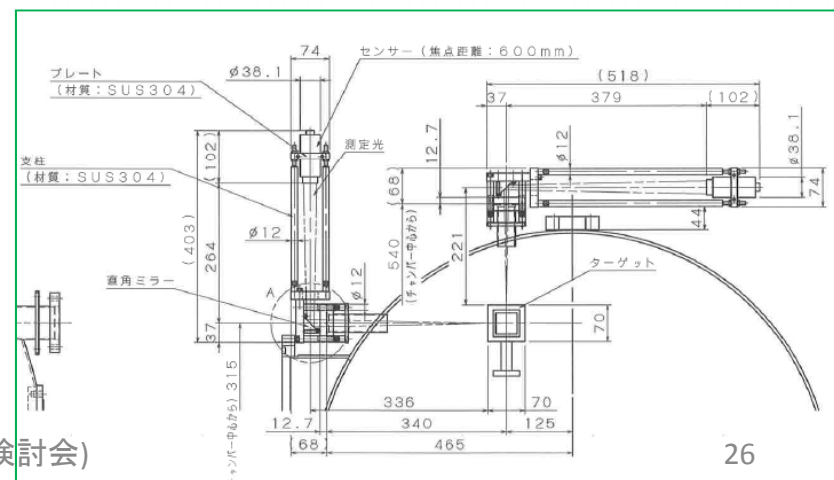
測定の正しさを確認すべく、ターゲット1のみに開発中のレーザー変位計をとりつけ、望遠鏡の読みとの相関、および冷却中の詳細な動きを測定した。

レーザー変位計との比較

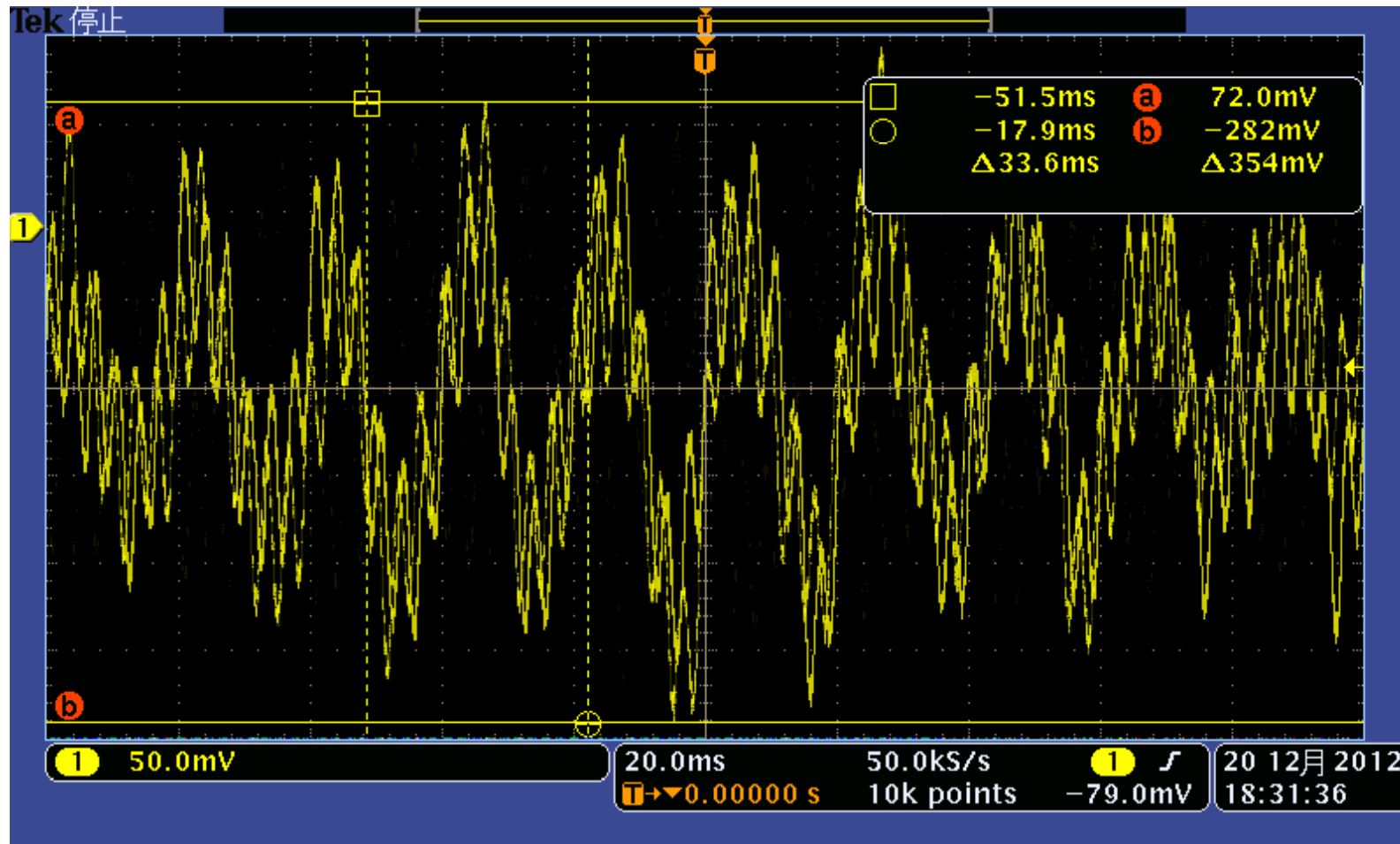


レーザーの動きとターゲットの読みは ±0.1mm程度で一致している。冷却中は少なくともターゲットが ±10um以下で安定であることがわかった。

2013/2/27 Hiroshi Sakai (ERL検討会)



2Kマイクロフォニクス(振動測定)



Low levelのfeedback PLLをoffして、fieldを入れた状態で測定。Pk-pk = 7Hz程度であった(下流)。振動周波数のpeakは34.5Hz, 45.2Hz, 49.3Hz, 98.5Hz, 152Hz。FFT analyzerでもデータを取っており、詳細は解析中。

2013/2/6

Hiroshi Sakai (ERI検討会)

その他

- HOM data 1.3-6.5GHzまで取得。(約400-500 modes分)現在解析中。
- カプラーは15kWまで印加。特に問題はなかった。Heat leak、温度上昇などは現在解析中。
- 空洞真空は上流空洞の真空が1桁高かった。現在調査中。

Summary

- 今年度主空洞クライオモジュールを作成組立。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く、現冷凍機ではkeep不可。
- 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。
- field emission抑制が今後の課題。
- HOM冷却速度の改善が今後の課題。
- 今年後半に再冷却を行い、まずはlow levelの安定化studyを行う。その後、ビーム運転を行う予定。

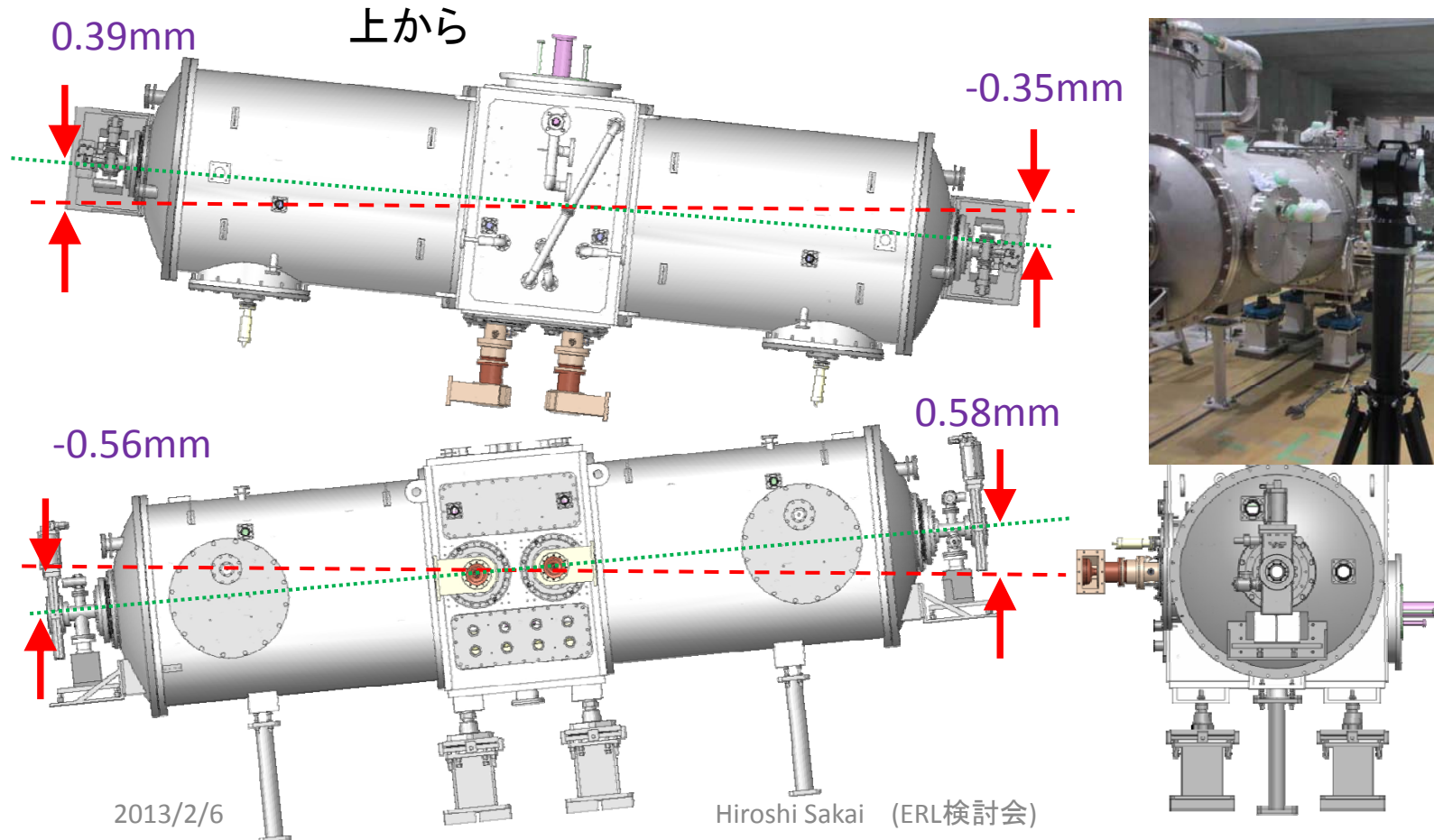
謝辞

- ・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。

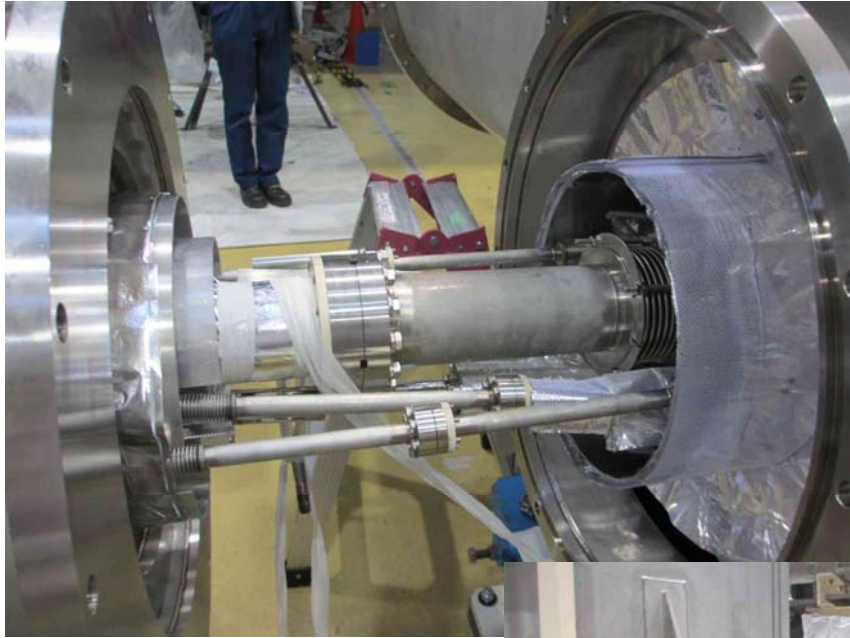
Backup

設置時のアライメント

- まずオートレベル、下げ振り、水準器で位置合わせ
- 中央タワー部を冷凍機接続場所へ設置する
- レーザートラッカーによる微調整



冷凍機への接続



冷凍機に対して、
空洞が±1mm以内に
収まるように設置



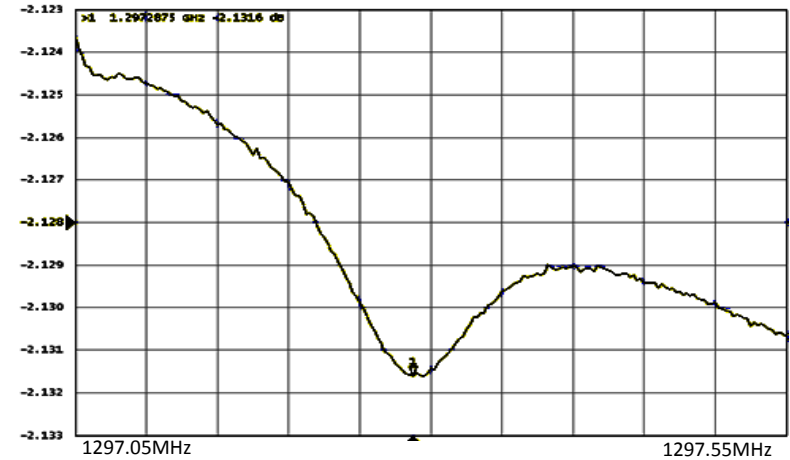
2013/2/6

Hiroshi Sakai (ERL検討会)

34

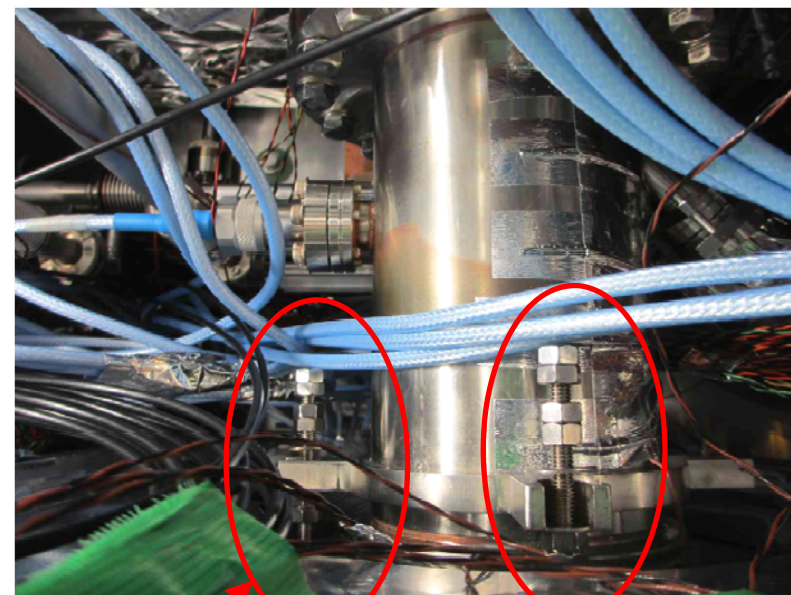
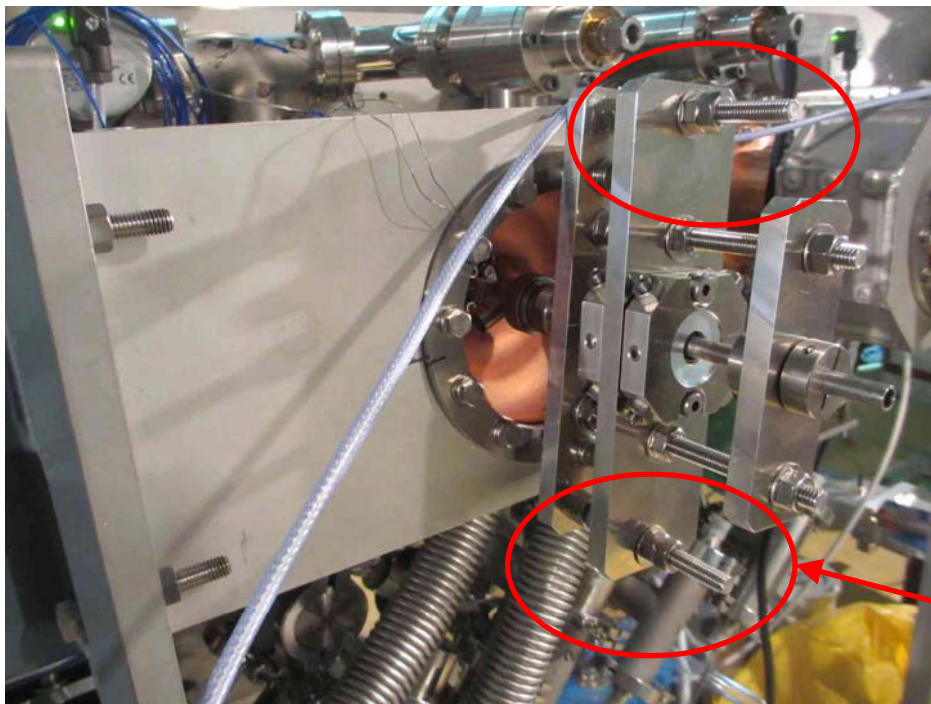
カップラー調整

- 挿入長(±5mm)の調整
- $Q_{\text{load}}=1.5 \sim 5.3 \times 10^7$ 上流
 $8.7 \times 10^6 \sim 3.3 \times 10^7$ 下流
 $1 \sim 4 \times 10^7$ (2×10^7 が中心)



設計値

断熱槽内部



位置ストッパー

2012 11

sun	mon	tue	wed	thu	fri	sat
28	29	30	31	1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	1
2	3	4	5	6	7	8

主空洞のlow level及びハイパワーテスト

2013 1

sun	mon	tue	wed	thu	fri	sat
30	31	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31	1	2
3	4	5	6	7	8	9

2012 12 December

sun	mon	tue	wed	thu	fri	sat
25	26	27	28	29	30	1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23 天皇誕生日	24 振替休日	25	26	27	28	29
30	31	1	2	3	4	5

2K Low level測定(tuner, piezo, Qin, Qhom, static loss)

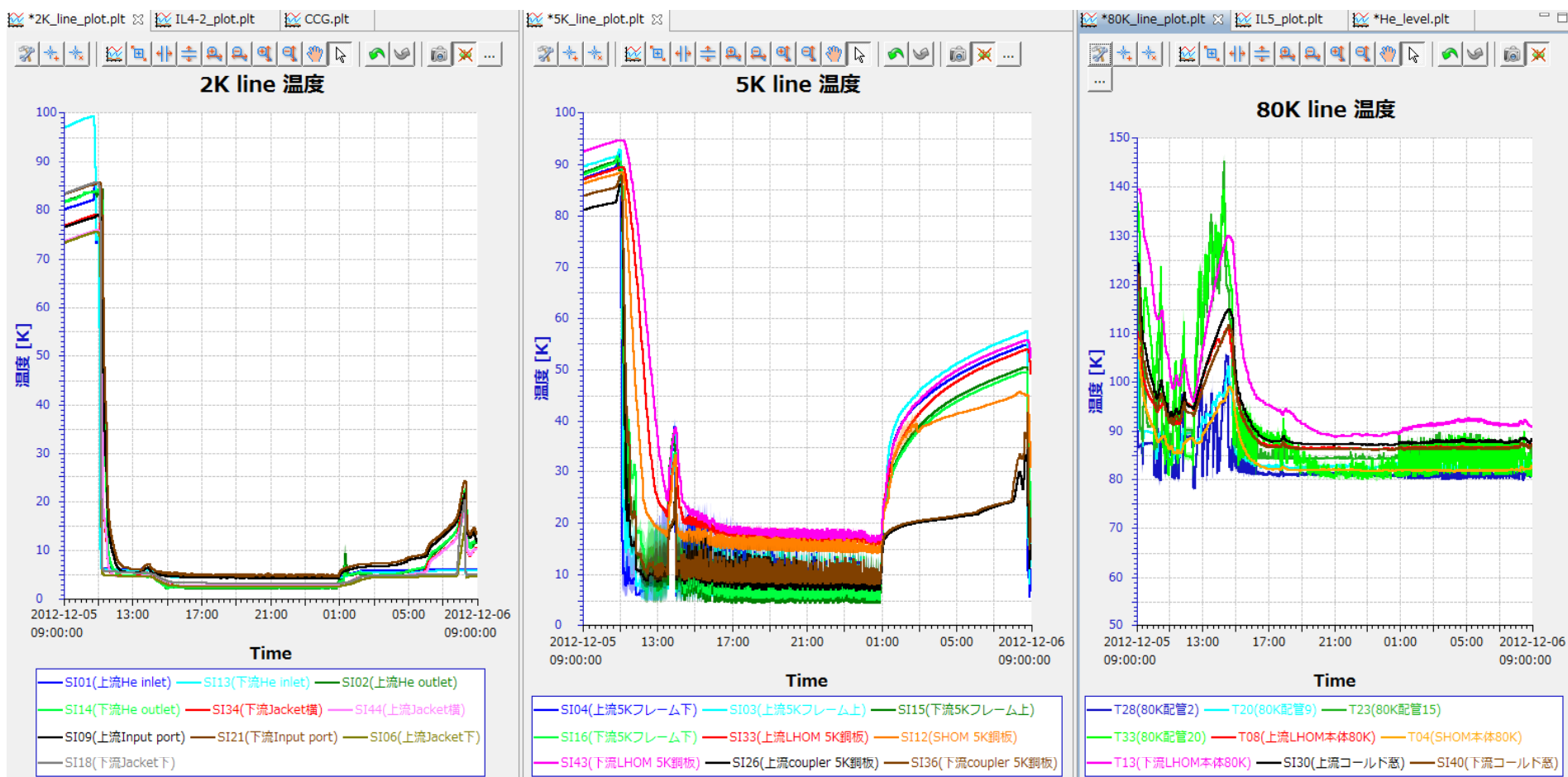
High power test #4 (detune coupler aging, cavity aging, Q0-E)

High power test #3 (detune coupler aging, cavity aging, Q0-E)

Warm up

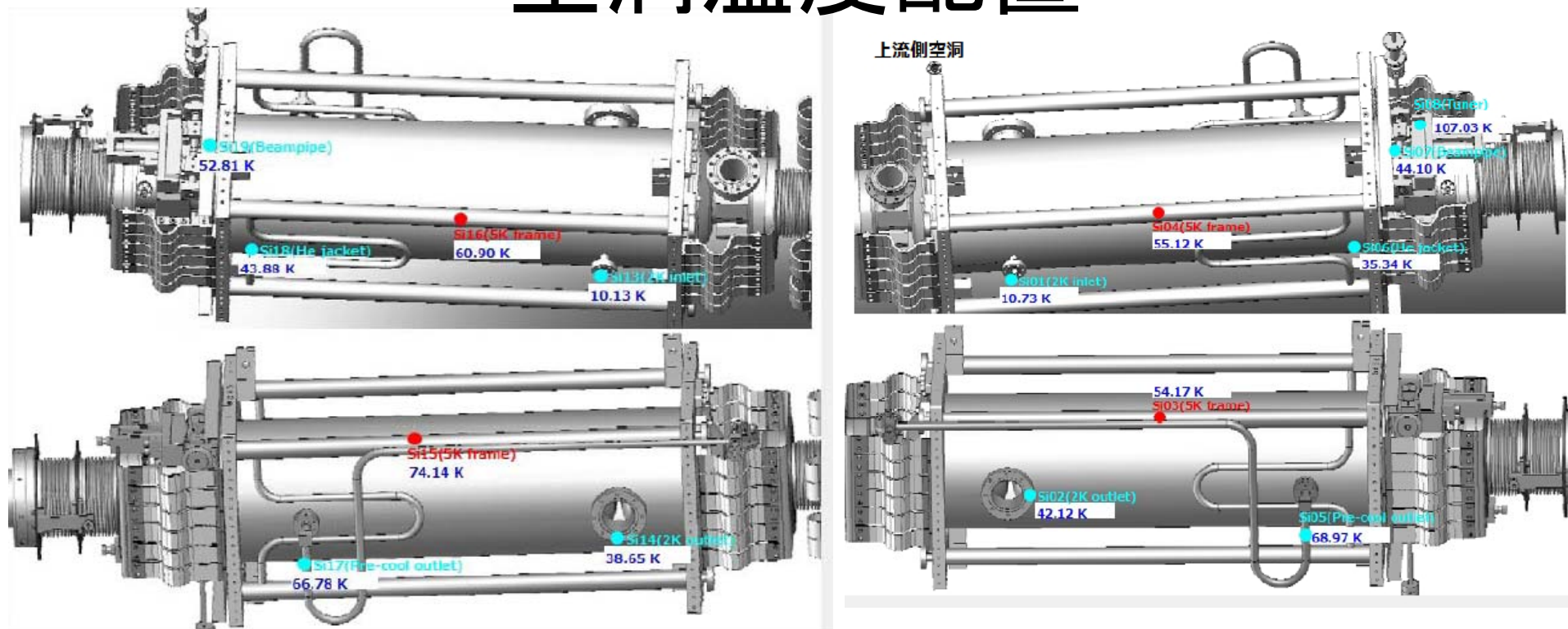
11/30までで2Kへ冷却。12/3の週にlow level測定を行い、12/10からのhigh power testに向けて放射線発生申請装置の手続きを行い、12/7自主検査,12/10放射線Grp.とともに所内検査を行った。12/11から12/21までhigh power testを行った。現在昇温中。

2012/12/5の冷却状況(2K,5K,80K)



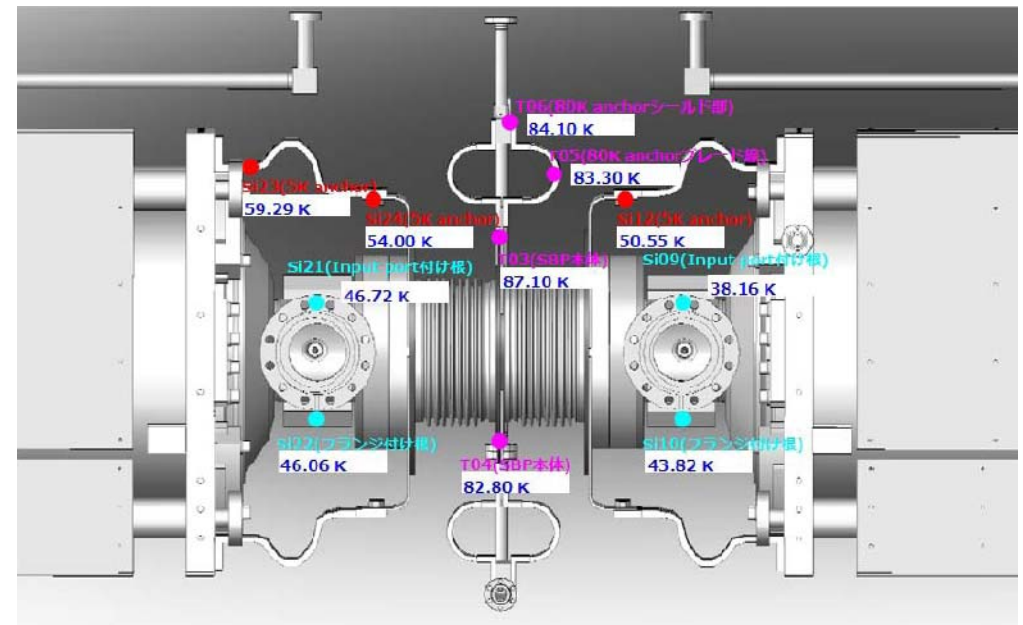
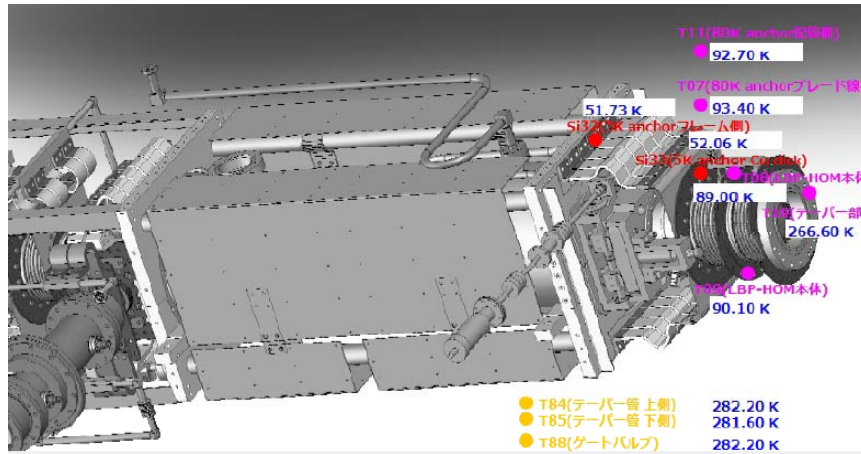
以降2Kまで到達。週末、夜間とも24時間中80Kをkeepすることになった。

空洞温度配置

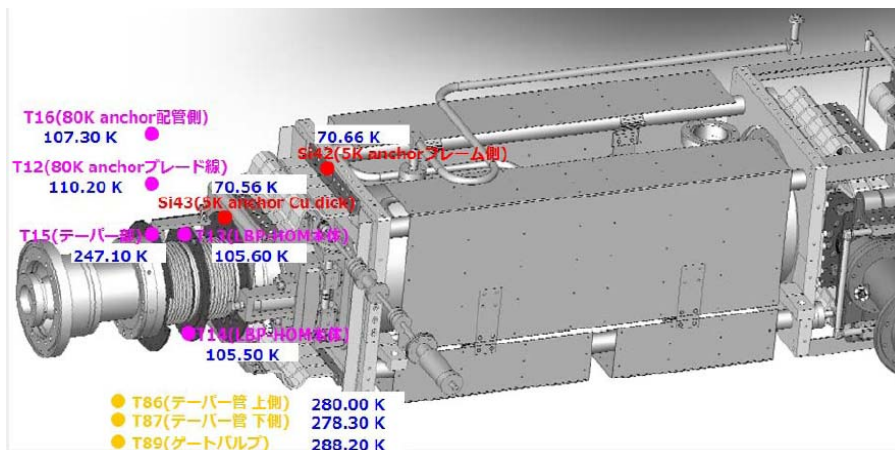


HOM damper温度配置

上流



中心



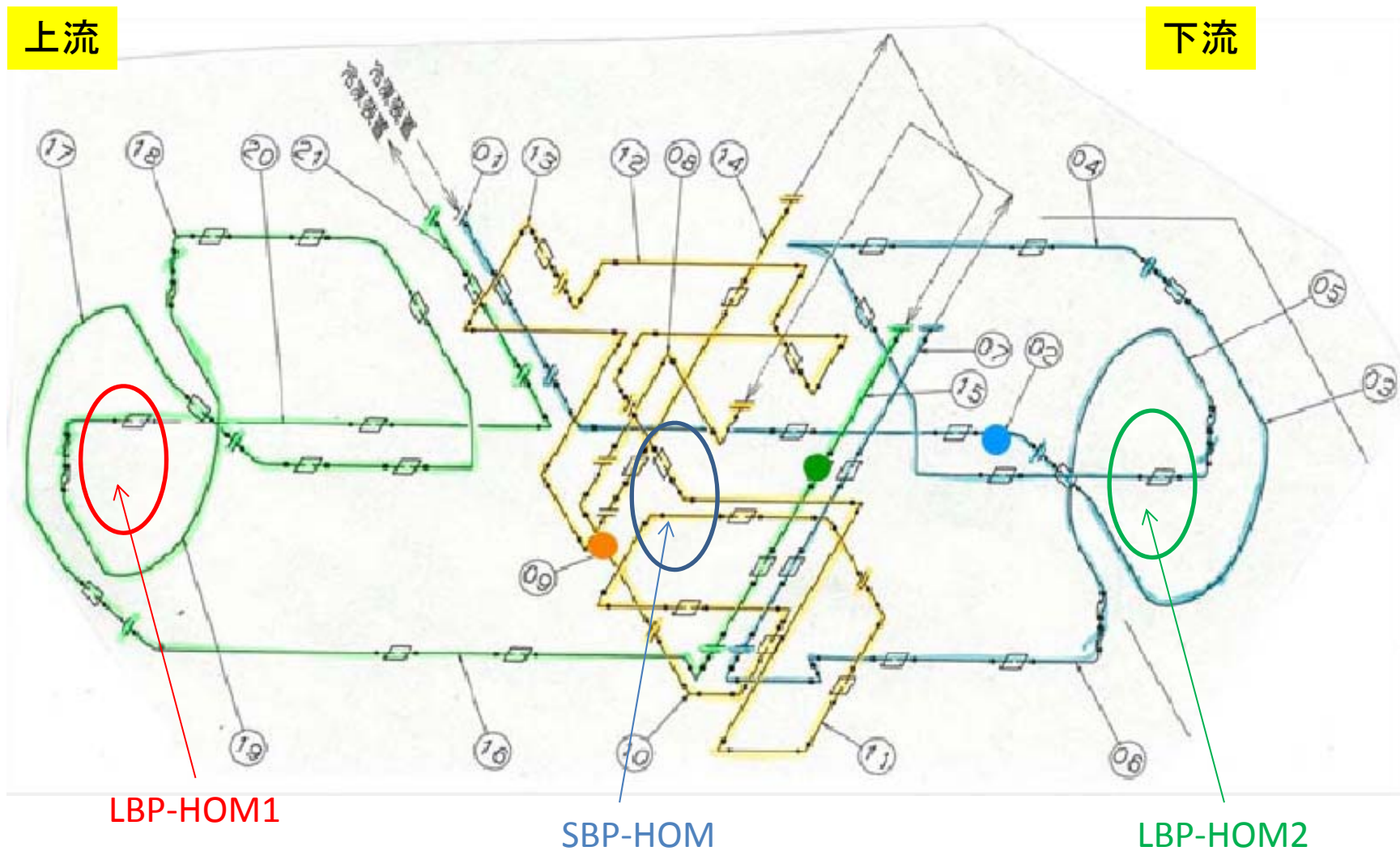
下流

2013/2/6

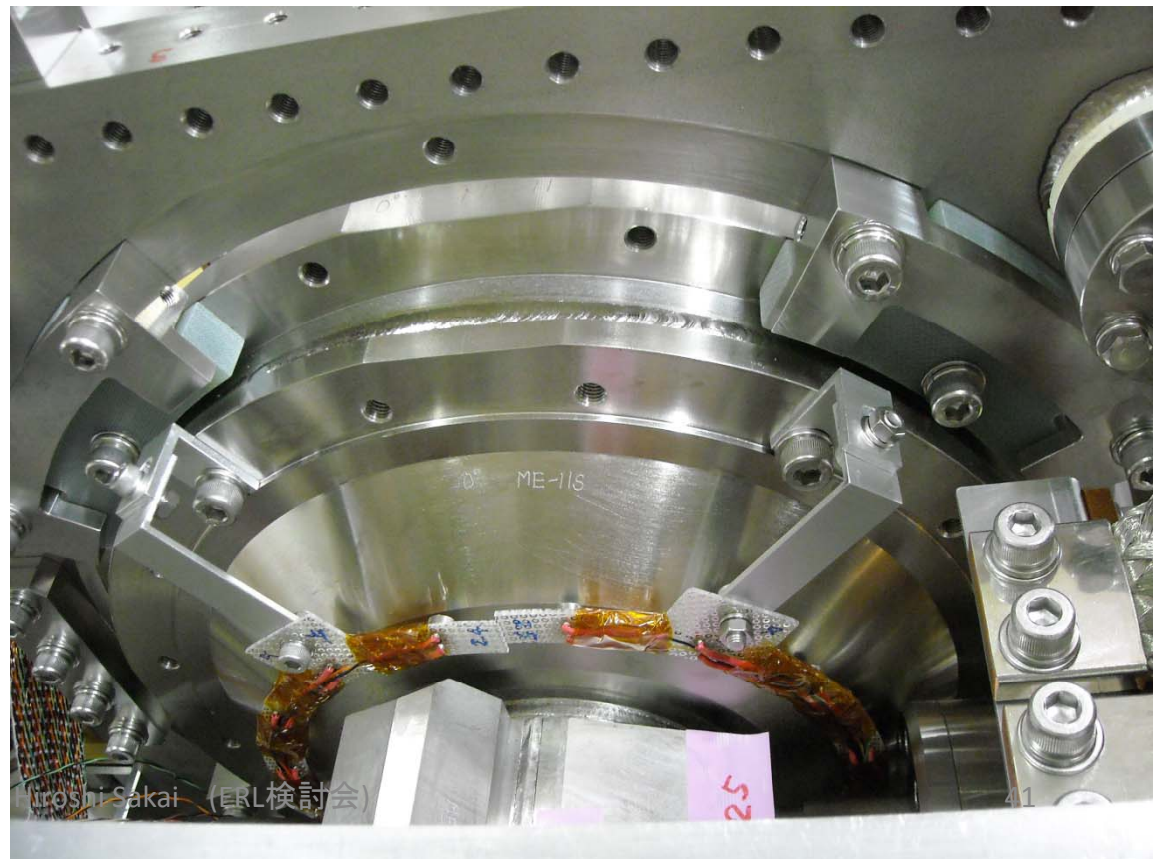
Hiroshi Sakai (ERL検討会)

39

80K配管とりまわし

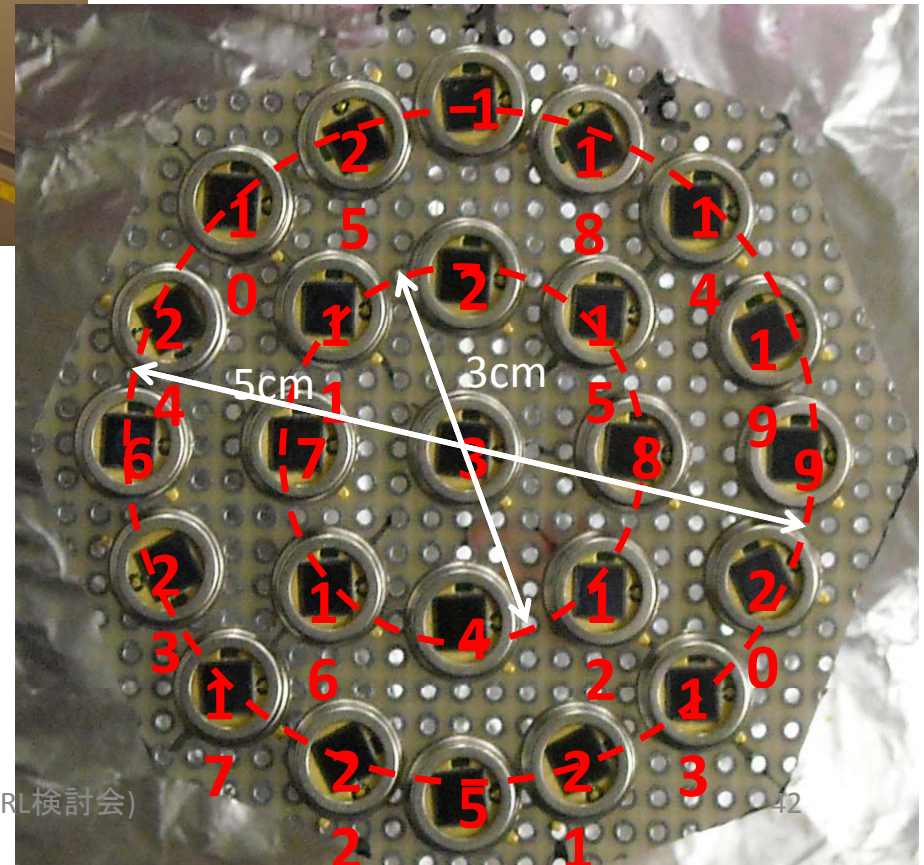
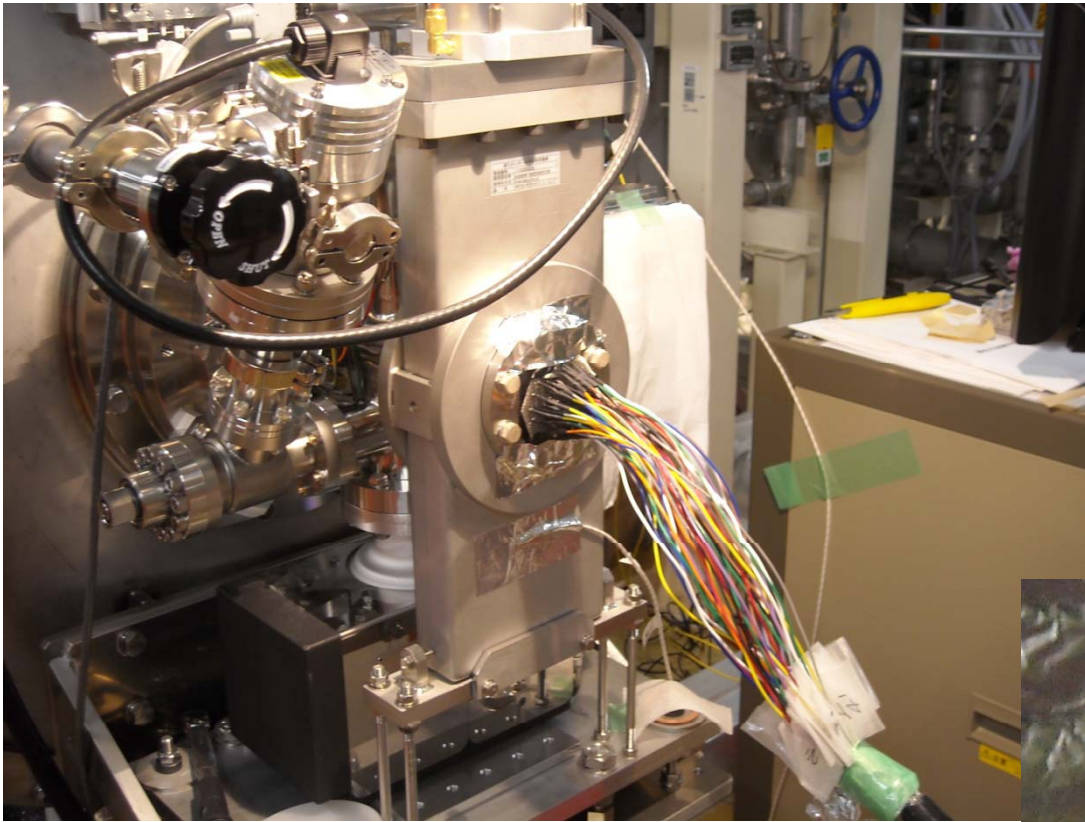


SBP PIN DIODES



2013/2/6

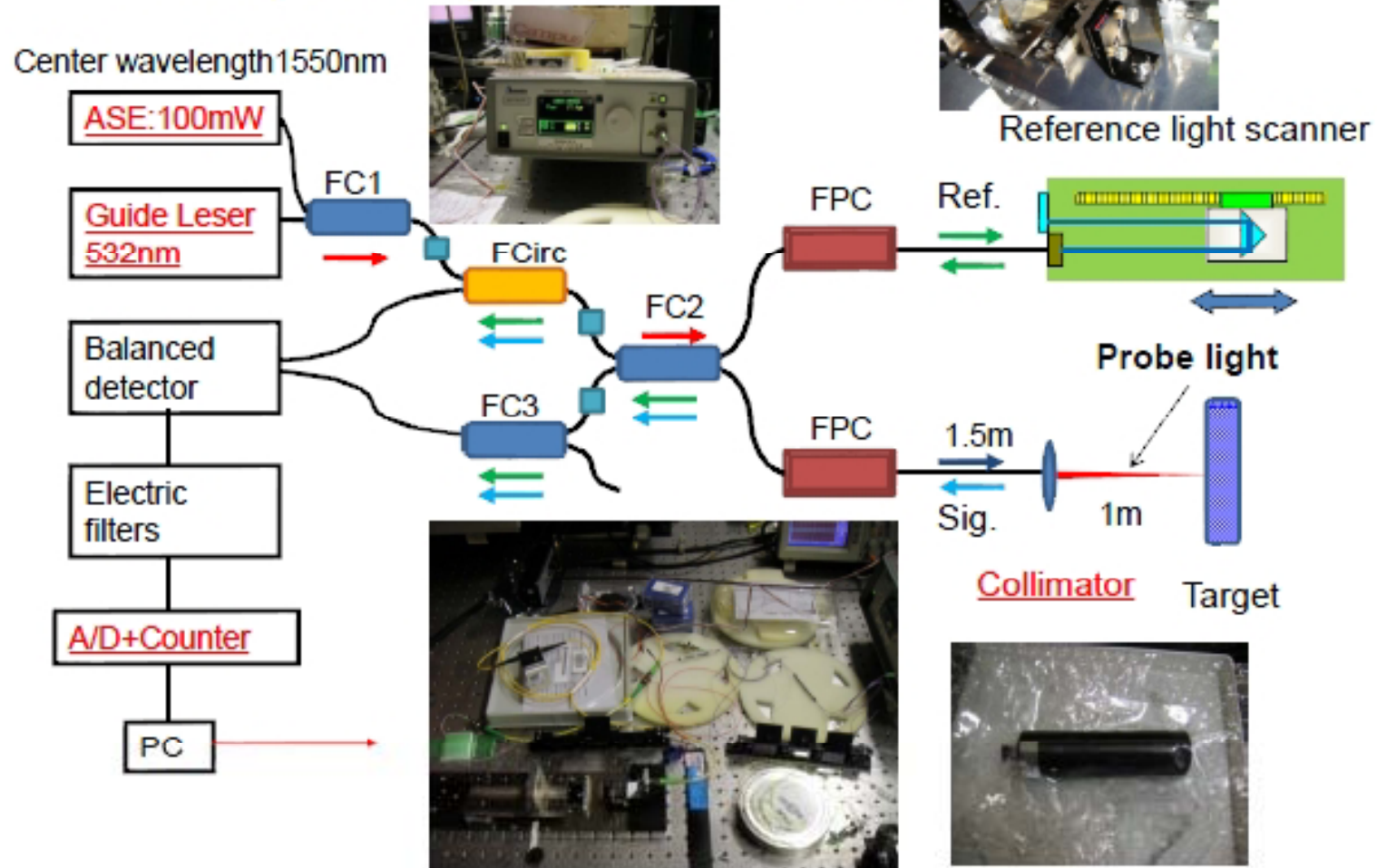
Profile monitor



Laserを用いた精密位置測定装置

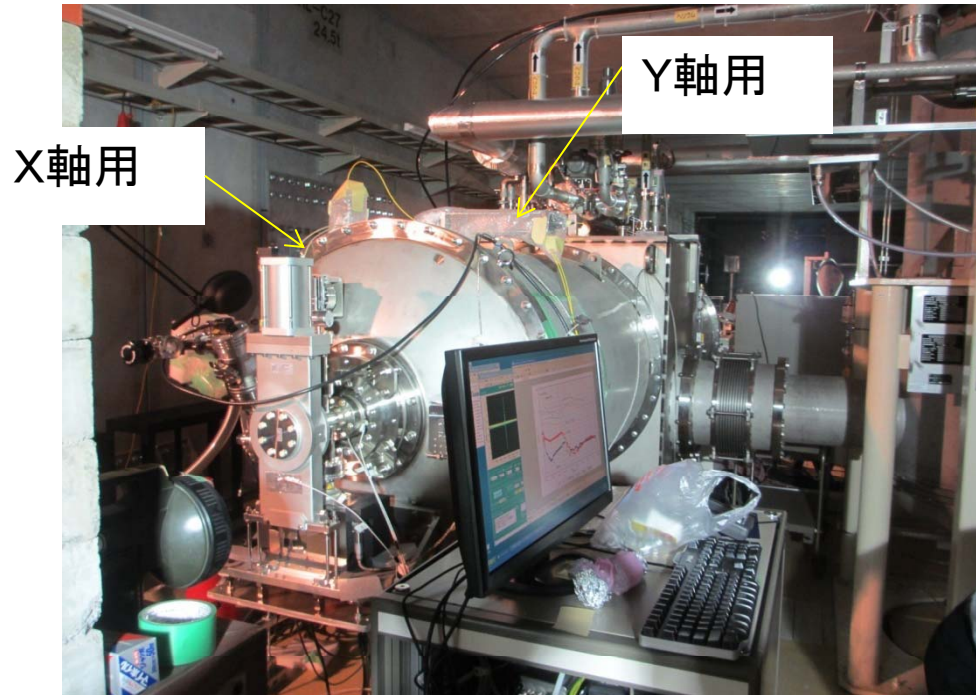
2011/10/4

2. Optical system illustration

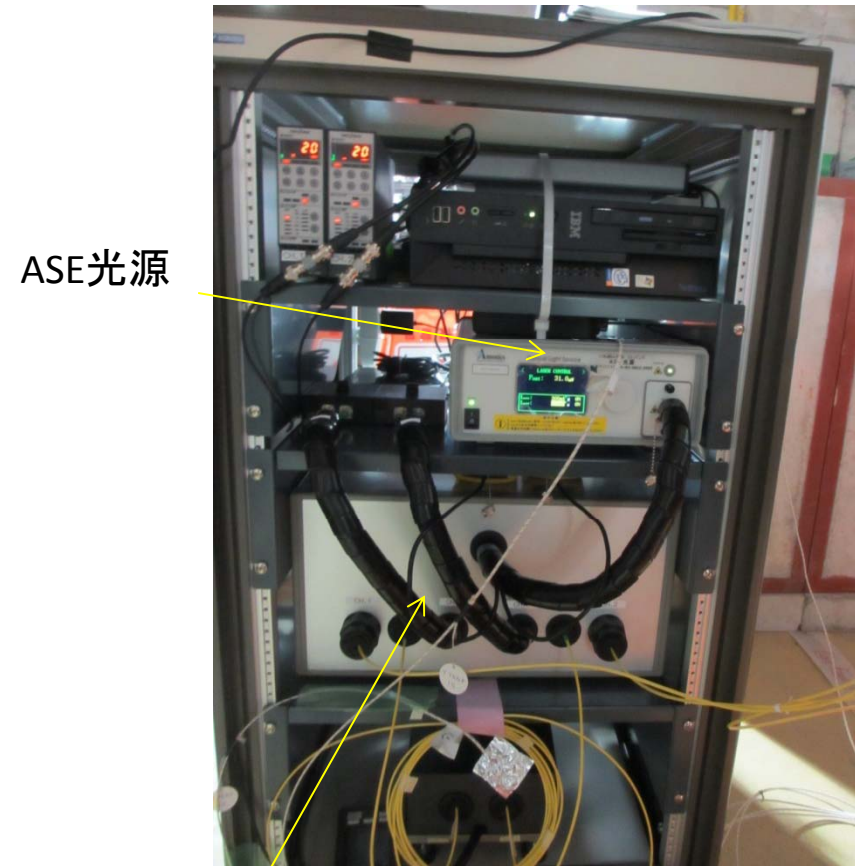
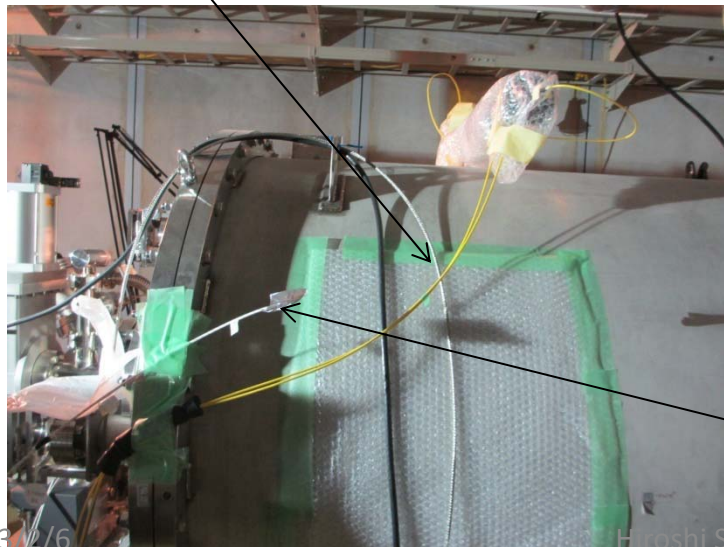


T.Aoto

Laser変位計 Setup(写真)



モニター用ファイバー(3m)



参照光用ファイバー(熱電対も入っている。)

断熱槽上部熱電対

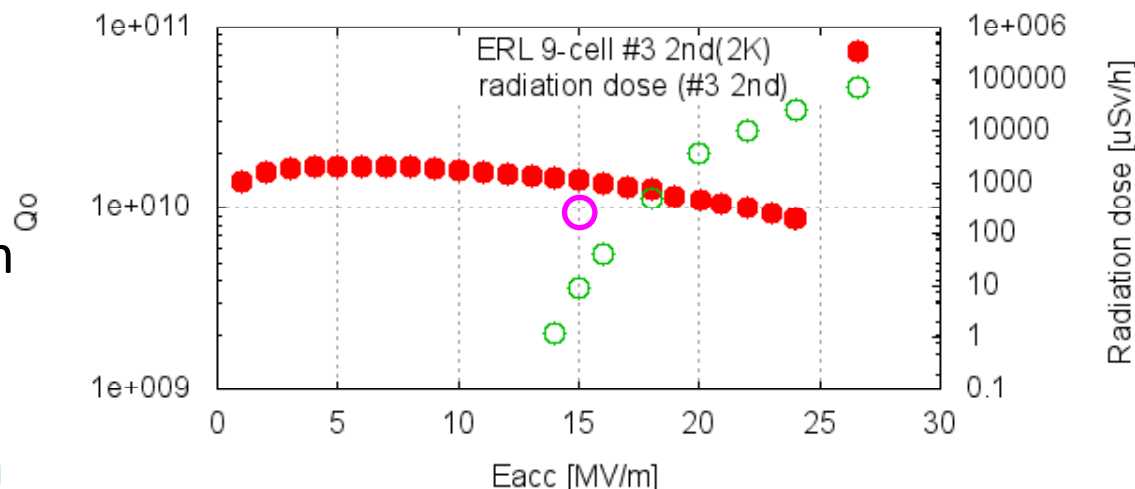
ファイバーは温度補償用ファイバーを使用

Results of vertical tests(2011年度)

昨年度はcERL用に2台の空洞を作成し、縦測定で性能評価を行った。
 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 $Q_0 > 1 \times 10^{10}$ を達成した。

ERL 9-cell #3 cavity

- Field reached to 25 MV/m
- No limitation up to 25 MV/m
- $Q > 1e10@15MV/m$
- Satisfied cERL specification
- X-ray onset around 14 MV/m



ERL 9-cell #4 cavity

- Field reached to 25 MV/m
- No limitation up to 25 MV/m
- $Q > 1e10@15MV/m$
- Satisfied cERL specification
- X-ray onset around 22 MV/m

