

超伝導加速空洞の挑戦

--Compact ERLの空洞開発現状と今後の超伝導空洞の課題と挑戦--

2014年11月22日

高エネルギー加速器研究施設 (KEK)

加速器研究施設 第7系

阪井寛志 on behalf of cERL grp.



cERLに設置された入射器超伝導空洞Cryomodule



cERLに設置された主加速部超伝導空洞Cryomodule 1

内容

(1)Introduction: 超伝導空洞の概要

超伝導空洞の性能を決めるものは？(超伝導を決めるパラメータ)

(2) ERL(Energy Recovery Linac)用超伝導空洞開発

ERLと超伝導空洞(何故ERLに超伝導空洞が必要なのか?)

ERLでの超伝導空洞の開発項目とCompact ERL(cERL)

ERL主加速器超伝導空洞の開発(空洞単体テスト結果)

cERLへinstallとビーム運転

超伝導空洞の問題点と今後の予定。

(3)世界の超伝導空洞開発とERLで培った技術の発展、応用

超伝導空洞を使った世界の加速器

(EURO-XFEL, CEBAF upgradeの現状)

CW-XFEL, さらなる空洞性能向上の展望。ERL-EUV-FEL

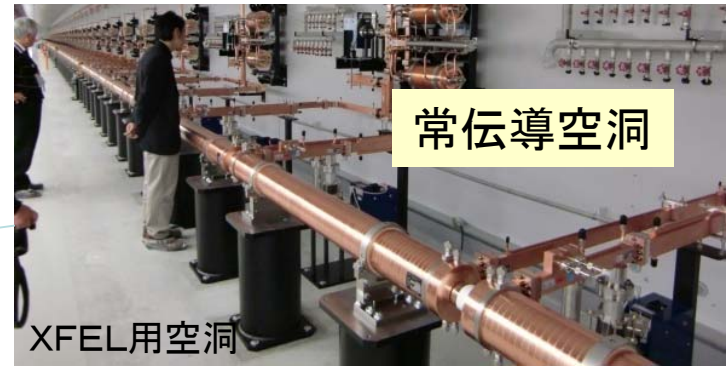
(4)まとめ、感想

急いでいろいろな資料をまとめた分、まとまりが悪い話になりますが、
わからなければ、質問ください。

(1) Introduction

何故、超伝導空洞を使うのか？(メリットは？)

- Cu(常伝導)の表面抵抗
 9mΩ(@常温) ($Q_0 \sim 10^4$)
 20MV/m → 40MWのロス
(CW運転だと空洞が溶ける)
(半分程度は空洞loss)



常伝導では熱負荷が大きくパルス運転でのfield Peakパワーが大きくなるような大電カクライストロンが必要。



- Nbの表面抵抗(超伝導)
 ~500nΩ(@4.2K, 1.3GHz)
 : 20MV/m → 2kWのロス
 (Heでの冷却大変ほぼ不可能)
 ~10nΩ(@2K, 1.3GHz)
 ($Q_0 \sim 10^{10}$) (常伝導の100万倍)
 : 20MV/m → 40Wのロス(loss less)
(エネルギー回収可能)

加速電圧

$$P = \frac{V_c^2}{R/Q * Q_0}$$

空洞壁の Power loss (P)は 空洞のQ値に反比例

加速空洞の形状で決まる因子

ERLやCW運転には超伝導空洞は必須

2Kでの運転がbest



超伝導空洞の表面抵抗

超伝導空洞の場合の表面抵抗: R_s

$$R_s = R_{BCS} + R_{res}$$

$$Q_0 = \frac{\Gamma}{R_s}$$

Γ : geometrical factor

残留表面抵抗: R_{res}

BCS理論による: R_{BCS}

$$R_{BCS} = A \frac{\omega^2}{T} \exp\left(-\frac{\Delta(0)}{k_B T_c} \cdot \frac{T_c}{T}\right)$$

Nb($T_c=9.2K$)においては半実験式が存在。

$$R_s = R_{BCS} + R_{res}$$

$$R_{BCS} = 2 \times 10^{-4} \frac{1}{T} \left(\frac{f}{1.5}\right)^2 \exp\left(-\frac{17.67}{T}\right)$$

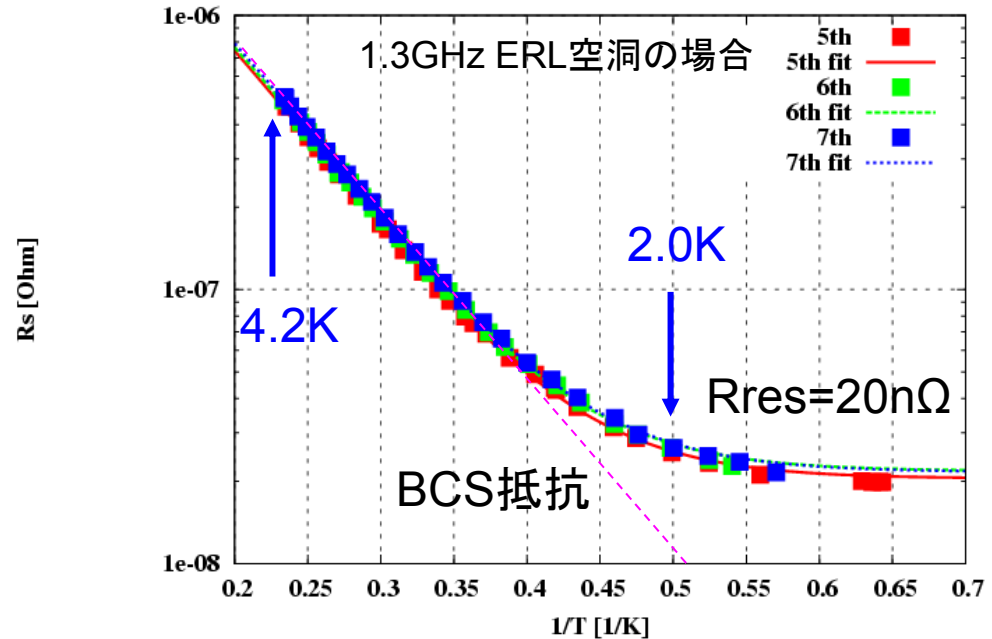
f [GHz], T [K]

f : frequency in GHz

T : temperature in K

$T < T_c/2$

Rs vs 1/T (ERL 9cell 2nd cav 5th&6th&7th measurement)



BCSで抵抗が決まる→周波数を低く。

R_{res} で抵抗が決まる→周波数を高く。

現在は R_{res} で決まっているため、1.3GHz程度を選んでいる。(700MHzくらいがほんまはbestか?)

Rresが決まる要因

①残留磁場による磁場トラップ (<10mG)

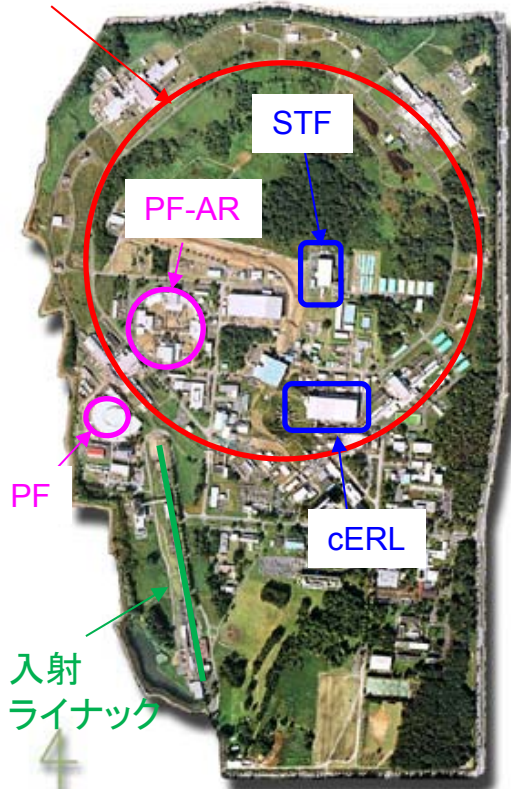
一本の磁束の周囲には $\pi\xi^2$ の常伝導スポットができる。 ξ はコヒーレンス長。その抵抗は R_n

②残留水素、酸素などによる表面劣化など

地磁気を抑え(磁気シールド)、いい表面処理を行う。(後述)

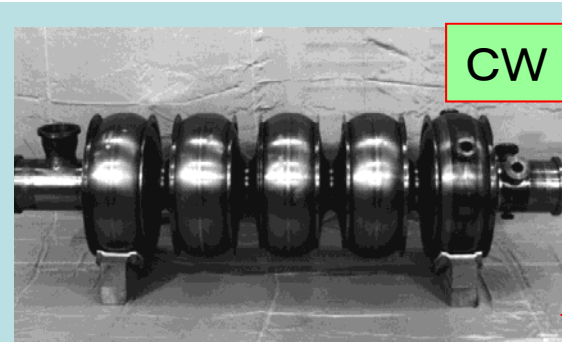
超伝導空洞の開発と実績 in KEK(ビーム運転あり)

(Super)KEKB (周長3km)



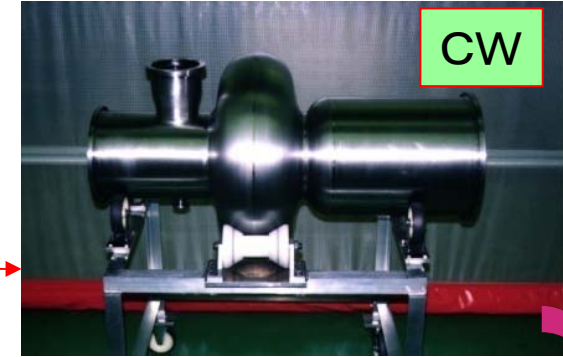
KEKB:素粒子実験衝突型リング
(HER:8GeV, LER 3.5GeV)
STF: ILC超伝導空洞開発用
cERL(Compact ERL):
ERL開発試験棟

PF(2.5GeV),PF-AR(6.5GeV)は放射光リング

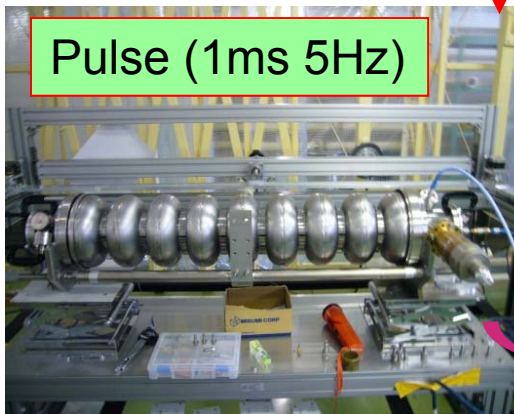


4K TRISTAN(5cell)
500MHz (KEK) (1988)
日本で初めての本格的な
超伝導空洞開発start

空洞はNb製。強度がそれなりにあることと、Tcがそれなりに高い。(Tc=9.2K)



4K KEKB加速空洞(1997)
500MHz **大電流化(1A)**



STF 9cell空洞 (for ILC) (2012)
2K **高加速勾配化**
1.3GHz (目標31.5MV/m)



2K cERL 9cell空洞 (主空洞)(2013)
1.3GHz **大電流、高加速勾配**
(目標100mA,15MV/m)

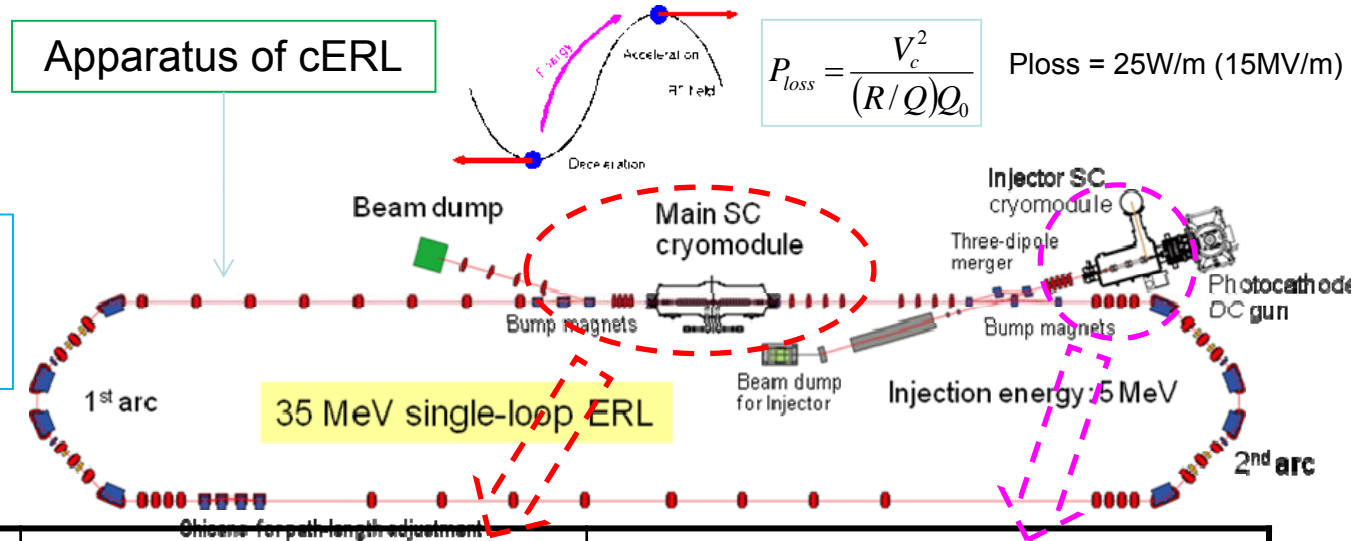
近年は高加速勾配を目指すILC空洞での超伝導空洞の開発が進んでいる(DESYなど)。但し、超伝導空洞の本質は常伝導空洞ではできない**CWで大電流を加速できること**。そのCW加速の魅力を生かすKEKB,ERLの空洞開発も行われ、これらの応用として、第3世代の放射光リングの加速空洞に超伝導空洞が多数設置されている、さらには近年は電子だけではなくprotonやion beamの加速にも需要が高まってきている。->世界の動向は最後に

(2) ERL用超伝導空洞開発: ERLの特徴と超伝導空洞への要求

cERL parameters

Red: initial case

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



	主加速部	入射部
Compact ERL	35MeV(最初) 9セル×2空洞(最初) 15MV/m	5~10MeV 2セル×3空洞 7.4~14.7MV/m
エネルギー回収	あり	なし
高周波電力/空洞	~20kW	(100mA*10MV/6 =)170kW
課題	HOM対策 (HOM-BBU,熱損失)	大電力Input Coupler (CW)、HOM対策も大事

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。

Injector module

2-cell cavity × 3
Double coupler

RF frequency: 1.3 GHz

Input power :

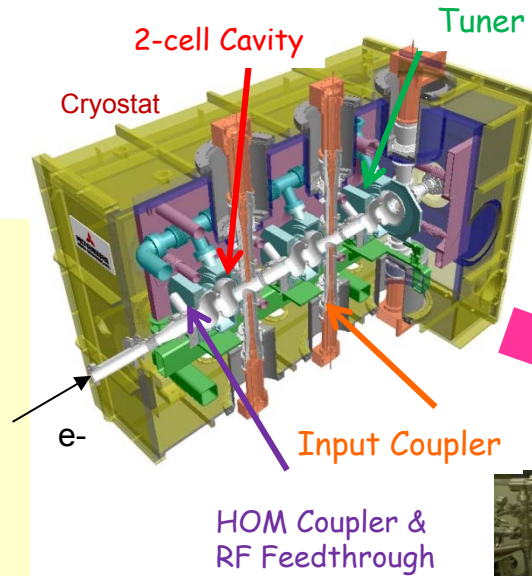
10kW/coupler (10mA, 5MeV)

180kW/coupler (100mA, 10MeV)

E_{acc} : 7.6MV/m (5MeV)

15MV/m (10MeV)

Unloaded-Q: $Q_0 > 1 \times 10^{10}$



空洞の設置状況 & 経緯

大電流対応でinput couplerの開発が必要。
Input couplerによるビームキックの影響をなくすため & カプラーあたりの熱負荷を減らすため doubleで1空洞にパワーをfeed

Assembling in Jun/2012

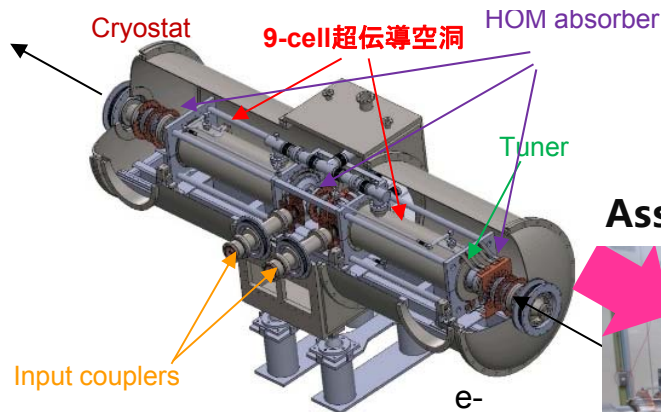


Install in Jul/2012 to cERL
High power test Jan/2013
commissioning Apr/2013

Main linac module

HOM damped (for 100mA BBU suppression)

9-cell cavity × 2



HOM対策: またHOM damperが100mAにもつかまた15MV/mが安定に立つかが重要。

Assembling in Oct/2012

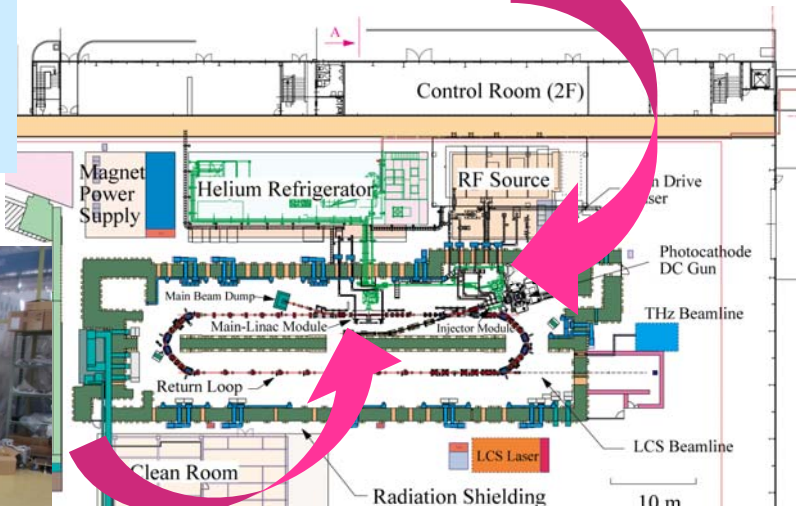


RF frequency: 1.3 GHz

Input power : 20kW CW (SW)

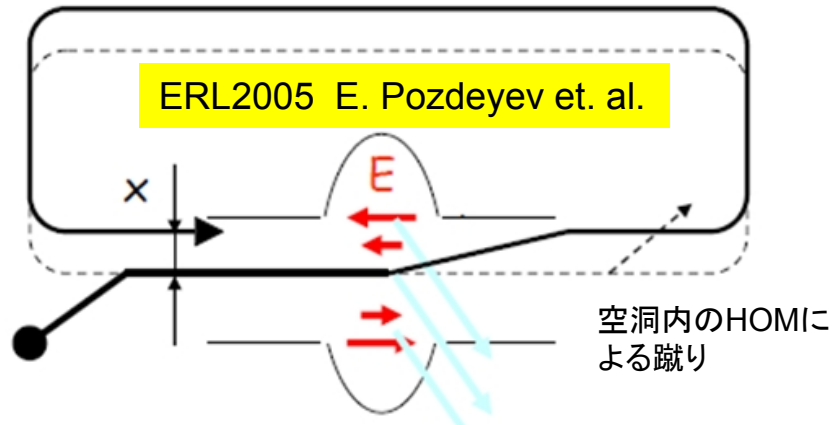
E_{acc} : 15 MV/m (目標)

Unloaded-Q: $Q_0 > 1 \times 10^{10}$



Installed in Oct/2012 to cERL
High power test at Dec/2012
Commissioning Dec/2013

HOM-BBU(Beam Break Up)不安定性 (大電流ERL特有の現象)



1st PASS

$$V(r=a) = V_a \cos(\varphi) = \int E_z^{\max}(r=a) dz \cos(\varphi)$$

$$x' = \frac{V_{\perp}}{V_b} = \frac{-\frac{cV_a}{\omega a} \sin(\varphi)}{V_b}$$

2nd PASS matrix

$$x = m_{12} x'$$

$$\Delta U = -qV_a \cos(\varphi + \omega T_r) \frac{x}{a} + \frac{q}{2} \frac{x^2}{l}$$

※ 最も簡単な場合： 空洞1台、
高次モードも1つのみ

$$\dot{U}_{cav} = \dot{U}_{beam} - P_c = \langle \Delta U_{in} + \Delta U_{out} \rangle \cdot f_b - P_c$$

$$P_c = \frac{V_a^2}{(\omega/c)^2 a^2 \left(\frac{R}{Q}\right) Q_L} \leftarrow \text{HOMの空洞loss}$$

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{V_a^2}{a^2} \left[I_b \frac{m_{12}}{V_b} \frac{c}{\omega} \frac{\sin(\omega T_r)}{2} + \frac{1}{(\omega/c)^2 \left(\frac{R}{Q}\right) Q_L} \right]$$

(dU/dt < 0 が安定条件)

$$I_{th} = \frac{2V_b}{(\omega/c) \left(\frac{R}{Q}\right)_{\text{HOM}} Q_L m_{12} \sin(\omega T_r)}$$

空洞にパワーが増え続けられない電流閾値 (Ith)

Jlabの空洞はこの影響で9mAで原理的にlimit

- 電流閾値の式から、 $m_{12} \sin(\omega T_r)$ をコントロールすればBBUを回避可能
- ただし、これは1空洞の場合。3GeV ERLの場合は全ての空洞でコントロール不可。
- Ithを上げるには、**空洞の高次モードのインピーダンスの減少が必須。**

ERL主リニアック用超伝導空洞：基本設計

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

()はTESLA空洞

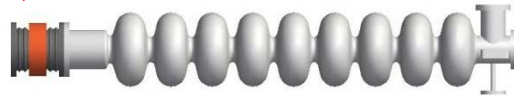
設計のベースはTESLA空洞から

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

TESLA空洞



Model 1



ビームパイプのみ変更(100φ.120φ)

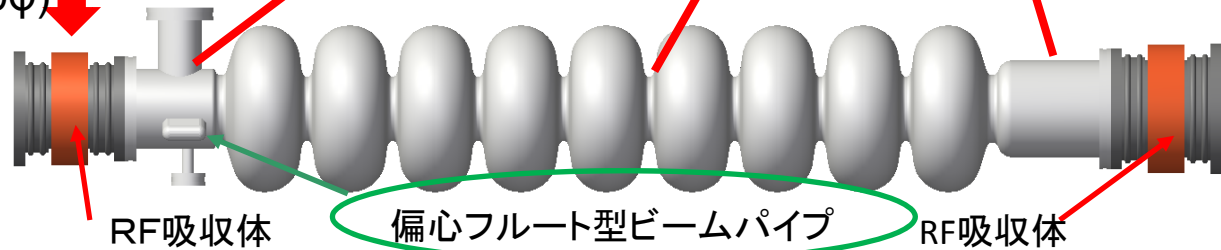
SBP dia.: $\phi 100$
TE11: 1.757 GHz
TM01: 2.295 GHz

Iris dia.: $\phi 80$
TE11: 2.196 GHz
TM01: 2.869 GHz

LBP dia.: $\phi 120$
TE11: 1.464 GHz
TM01: 1.913 GHz

KEK-ERL Model-2空洞

空洞形状も変更
HOMをRF吸収体で吸収

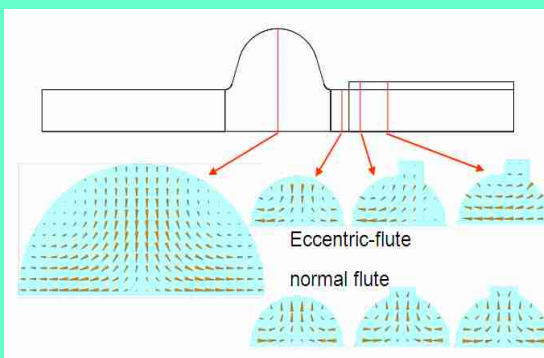


設計方針

- 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



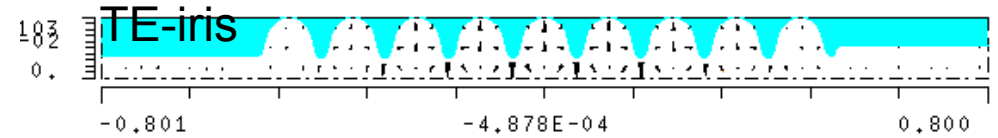
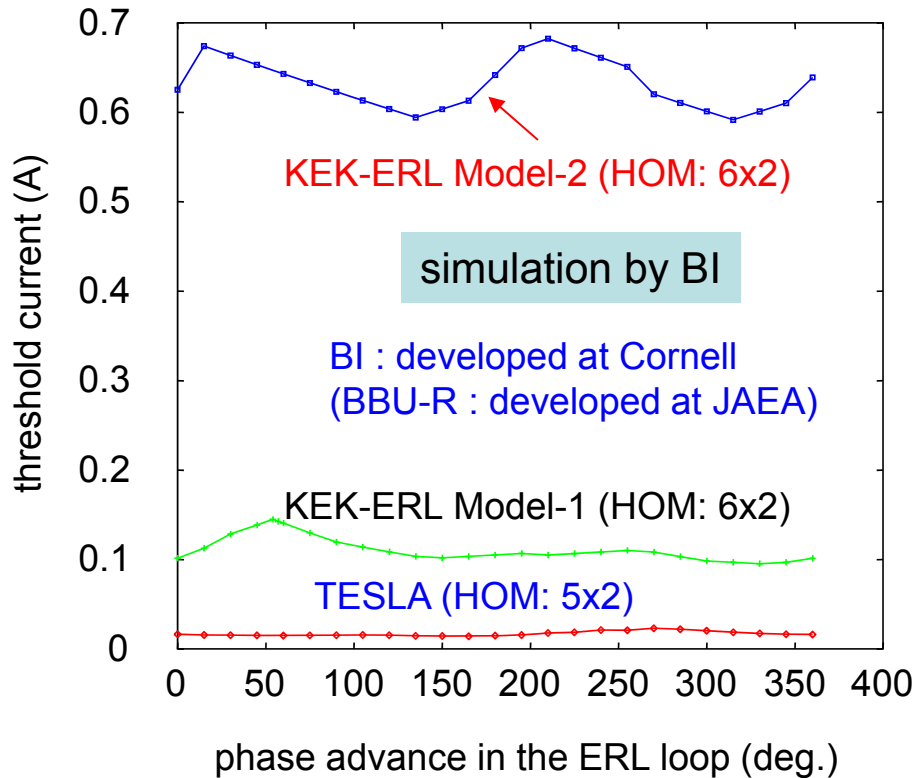
M. Sawamura et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 022003(2010).

設計の結果: HOM-BBU閾値は向上(次節)したが、唯一 E_{pak}/E_{acc} 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)

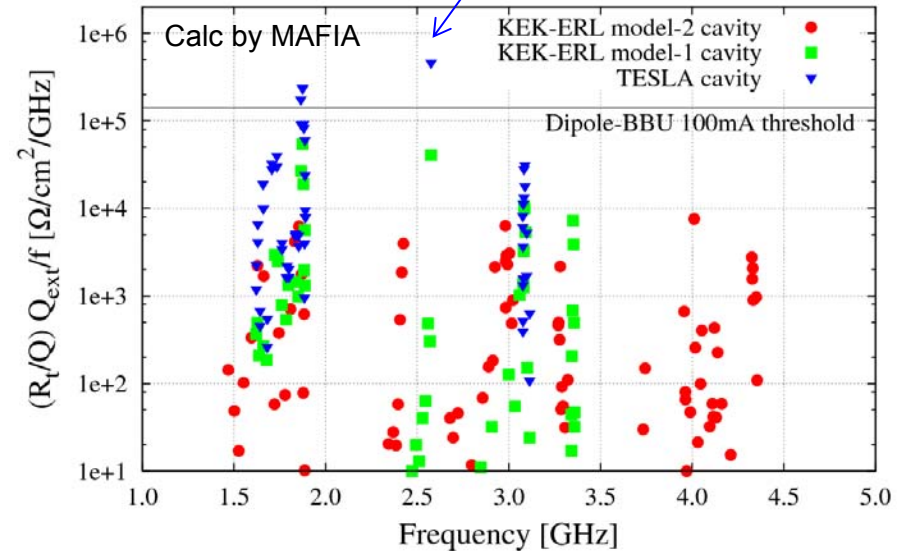
$$E_{inj} = 10 \text{ MeV}, E_{loop} = 5 \text{ GeV}, E_{acc} = 20 \text{ MV/m}$$



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

Dipole mode distribution



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

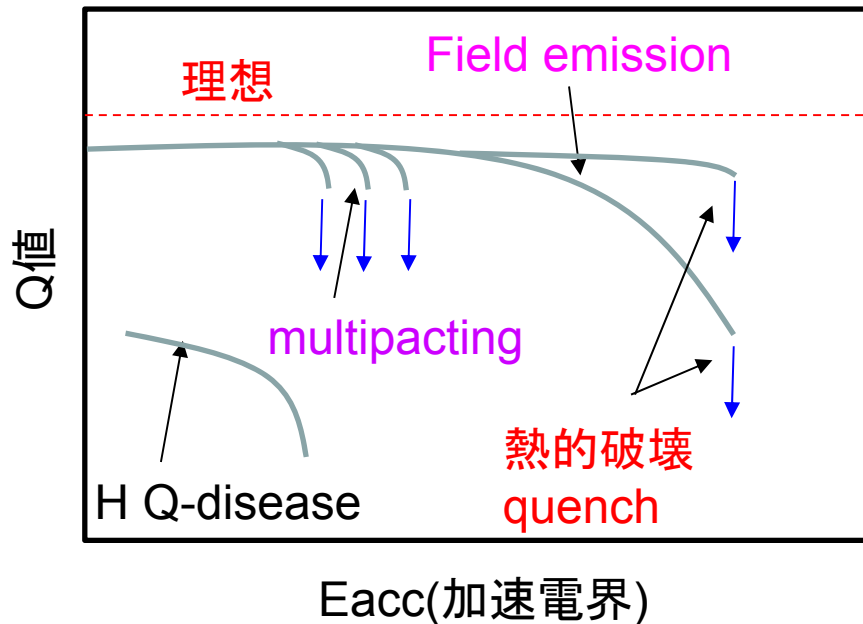
name	空洞形状とビームパイプ形状	Ith (max電流閾値)
KEK-ERL model-2 cavity	New cavity shape + Large beampipe damper	<600mA ○
KEK-ERL model-1 cavity	TESLA cavity shape + Large beampipe damper	<100mA △
TESLA cavity	TESLA cavity shape + Loop-type HOM coupler	<20mA ×

超伝導空洞で電界+Q値をlimitするもの

- 超伝導空洞性能劣化の主な原因(これらを起こさないように。)
 - 局所的な空洞内面欠損などから生じる温度上昇による超伝導状態の破壊(クエンチ) → 表面処理など処理し、縦測定で判断可能。
 - 内面の突起や微小物から生じた電磁放射(field emission)によるQ値劣化またそれによる温度上昇。→ 埃が問題(組立時の問題) 一番の敵(後述)
 - マルチパクティングによる性能劣化。→ 設計上の問題と最初にprocess可

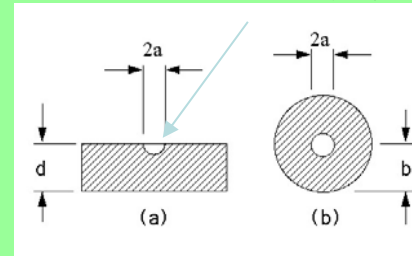
いずれの場合も非常に局所的な(100μm—0.1μmの大きさ)場所から生じる。

測定の評価としてのQ-E curve



超伝導状態の熱的破壊(クエンチ)

角が磁場(表面電流)H増大

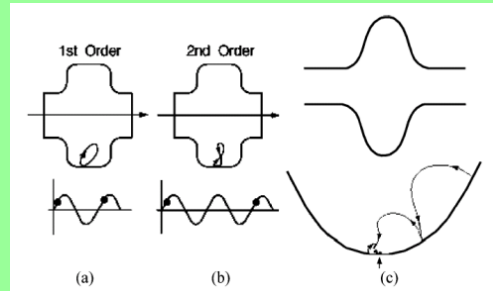


局所的な欠損で磁場をenhance

$$H = \sqrt{\frac{4\kappa(T_a - T_b)}{aR_n}}$$

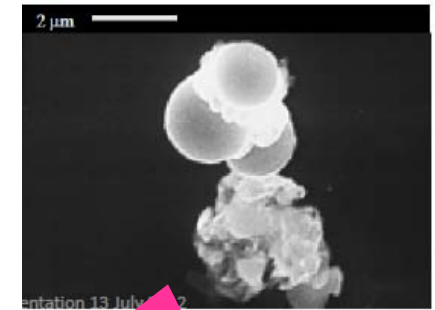
マルチパクティング

Stanfordの2~3 MV/mはこれが原因。対策として、球形形状が提案された(1978年)。大きな効果があった。赤道部付近の2点間MPが残った。

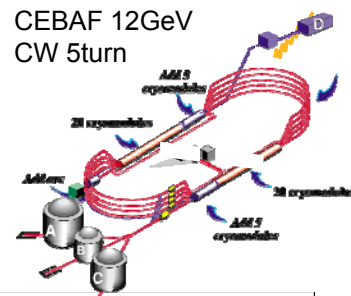


Field emission(電界放出)について

- Field emissionの源は、空洞組立時に、空洞内に入ってしまふ、sub um~数10umレベルのダスト。
 - Emitterから発生する電流値は、ある閾値以上の電界から発生し、空洞内の電界に大きく依存する。
- 縦測定で事前に詳細な放射線(X線)分布を測定し、ゴミ混入により放射線が増えてないかどうかを確認することが重要。

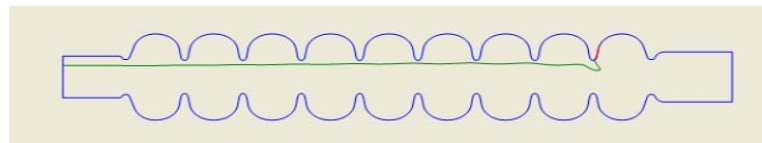
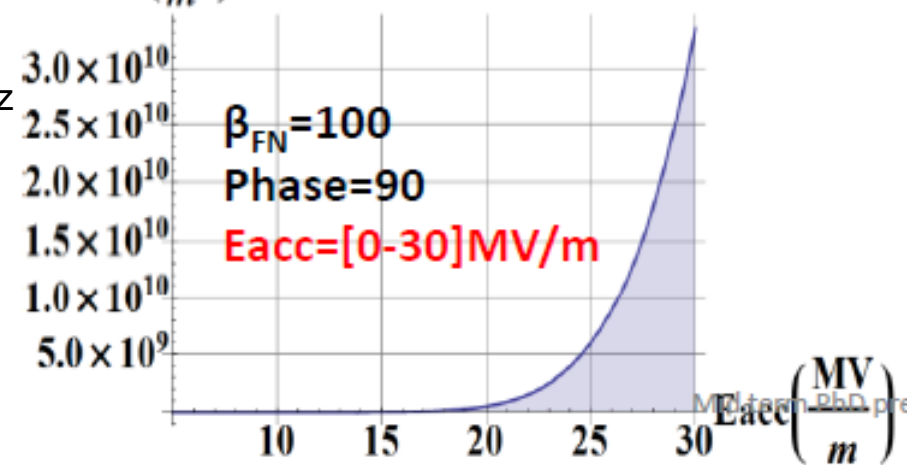
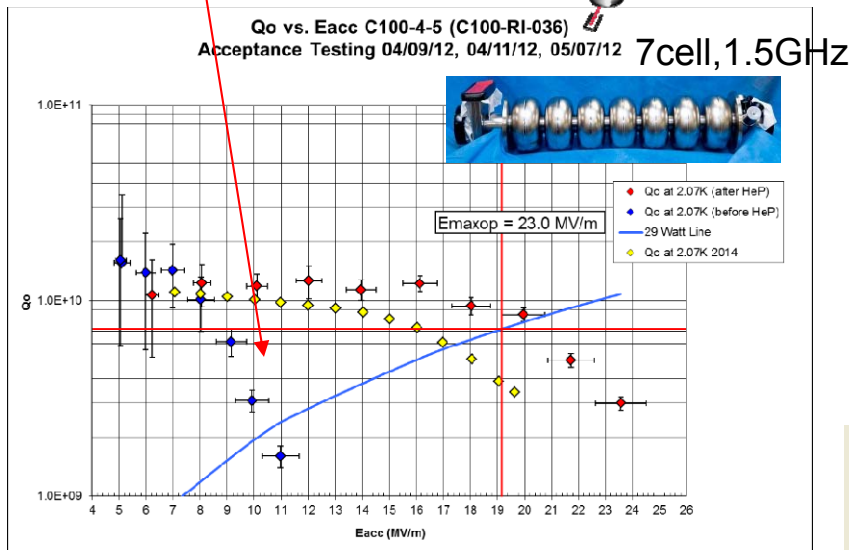


アメリカJlabにあるCEBAFのクライオモジュールの加速空洞の性能評価結果(例)。悪いものは5MV/mからfield emissionにより性能劣化するものもある。



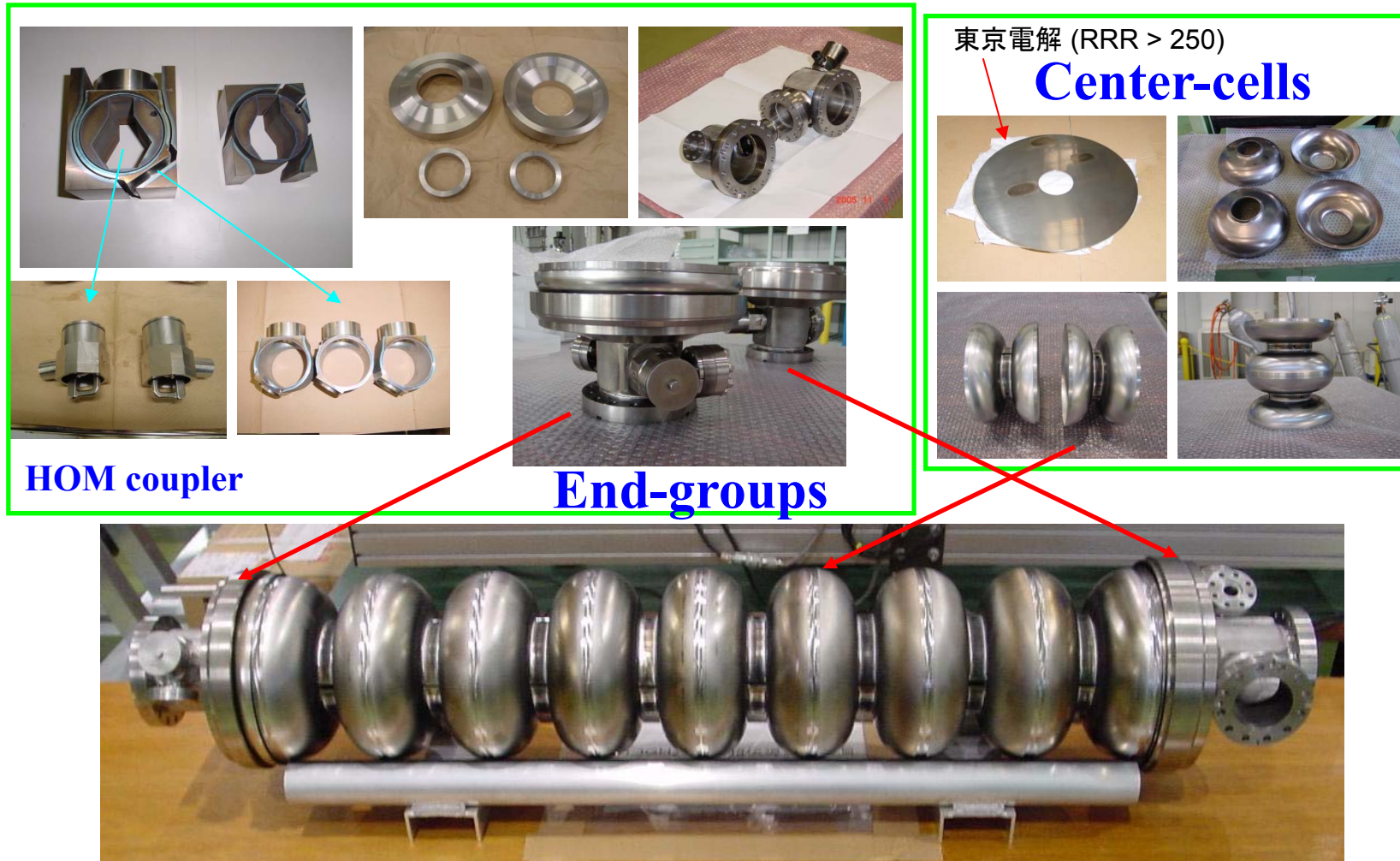
$$J = \frac{A_{FN} (\beta_{FN} E_{surf}(t))^2}{\phi} e^{\frac{-B_{FN} \phi^{1.5}}{(\beta_{FN} E_{surf}(t))}} \left[\frac{A}{m^2} \right]$$

$$J_0 \left(\frac{A}{m^2} \right) \quad \text{Fowler \& Nordheimの式}$$



Cavity fabrication

ILC-STF9cell空洞の例。ダンベルの形に電子ビーム溶接し、最後赤道部を電子ビーム溶接する。純度のいいNbの板材の確保と電子ビーム溶接のできが欠陥を良くする鍵。

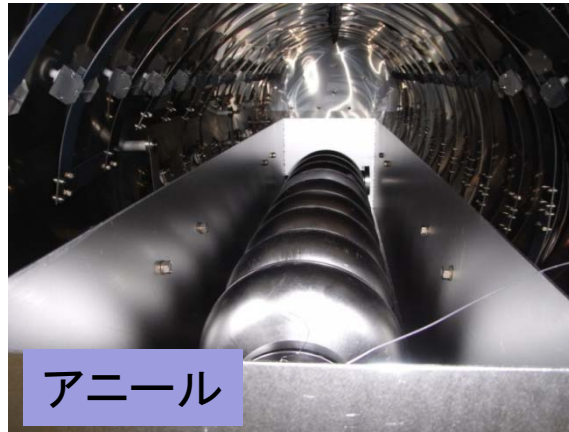


超伝導空洞製作、表面処理 & 組立性能評価 (ERL9cell空洞の例)

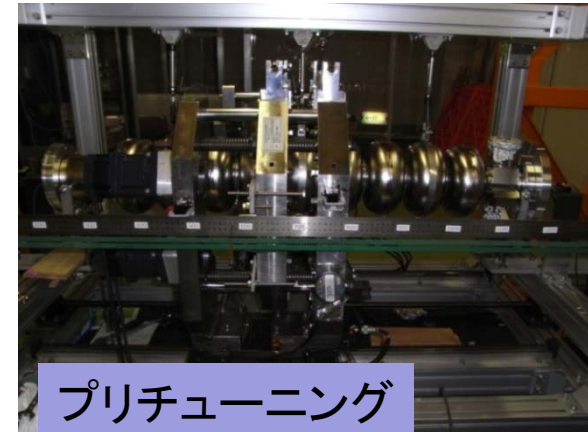
空洞内の埃や欠損をなくす作業が必要。(いい溶接、いい表面処理、いい組立)



電解研磨



アニール



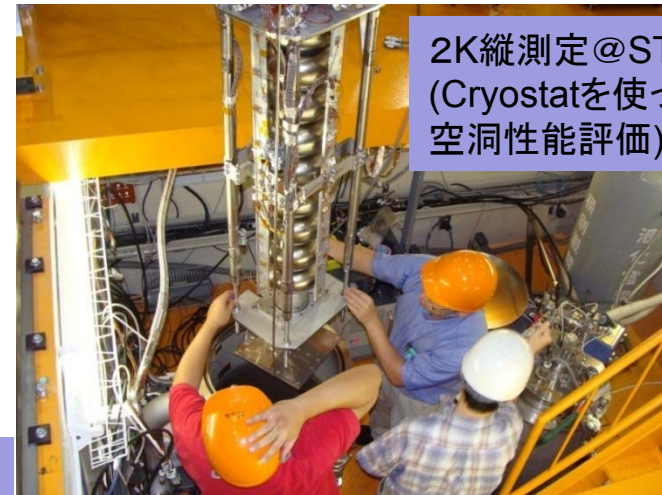
プリチューニング



High pressure rinse(HPR)



空洞アセンブリ@class 10



2K縦測定@STF
(Cryostatを使った
空洞性能評価)

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 → 仕上げ電解研磨(20um)
→ 超音波洗浄(50度,1h) → HPR(8MPa,7h) → アセンブリ → ベーキング(150度,48h) → 縦測定

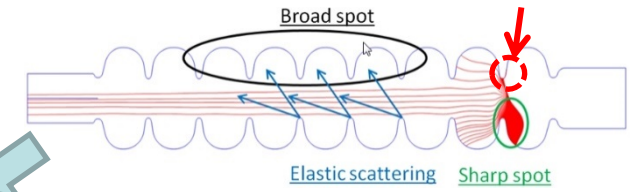
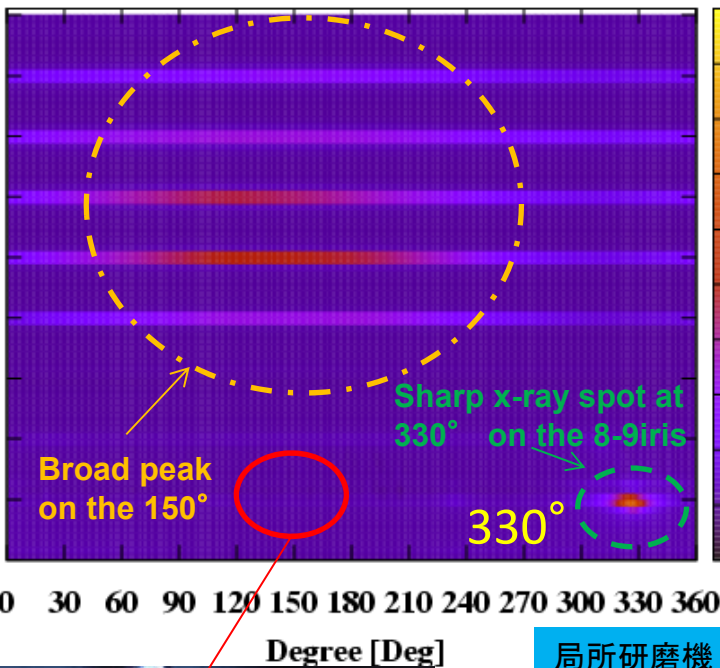
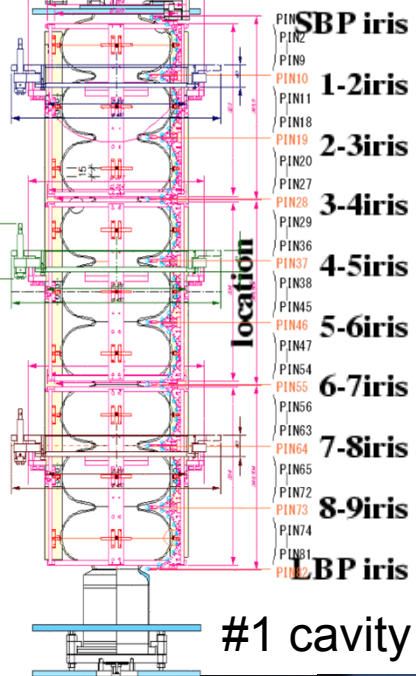
表面処理+組立はほぼSTFで行っている。

Rotating X-ray mapping装置

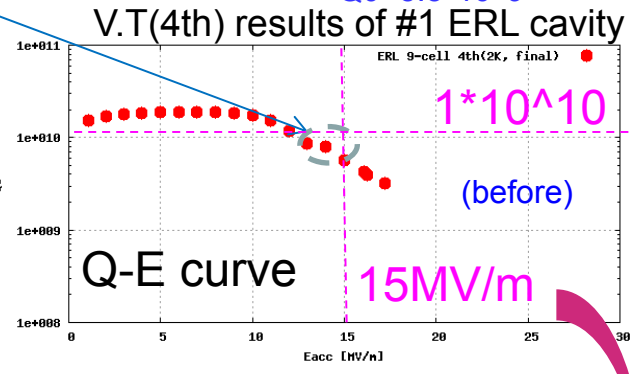
ERL 9cell一号機での縦測定例 (field emissionの回復には?)

Source on iris

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



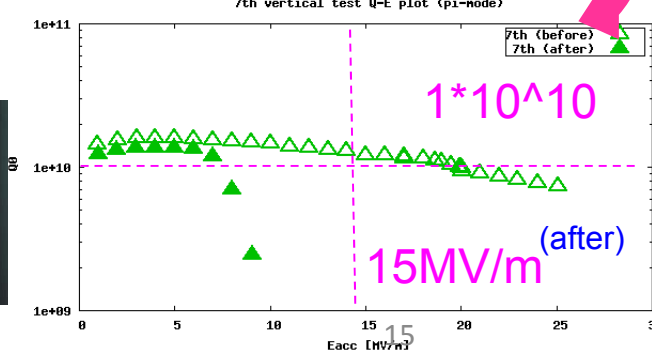
π -mode 13.9MV/m
 $Q_0=5.5 \times 10^9$



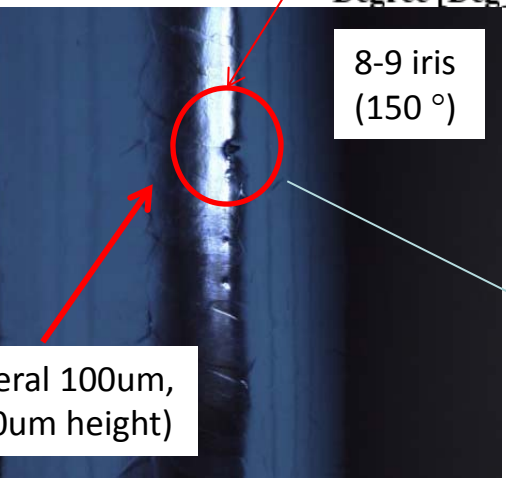
After grinding local dip

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



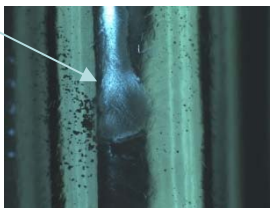
内面検査カメラ



8-9 iris (150°)

tip (ϕ several 100um, several 10um height)

局所研磨機



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

縦測定後の主空洞モジュールアッセンブリ (2012)

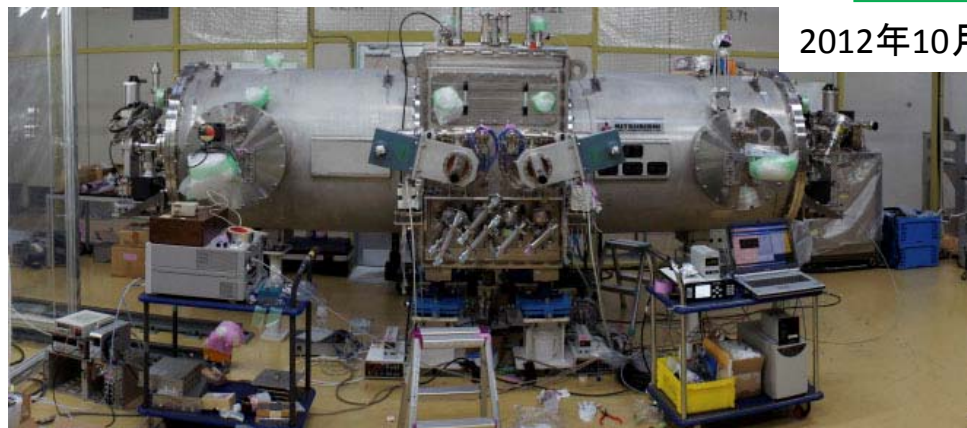
超伝導空洞、HOMダンパー、入力カプラー窓などをクリーン
ルーム(class10)にてアッセンブリ@KEK →ゴミ混入回避のため



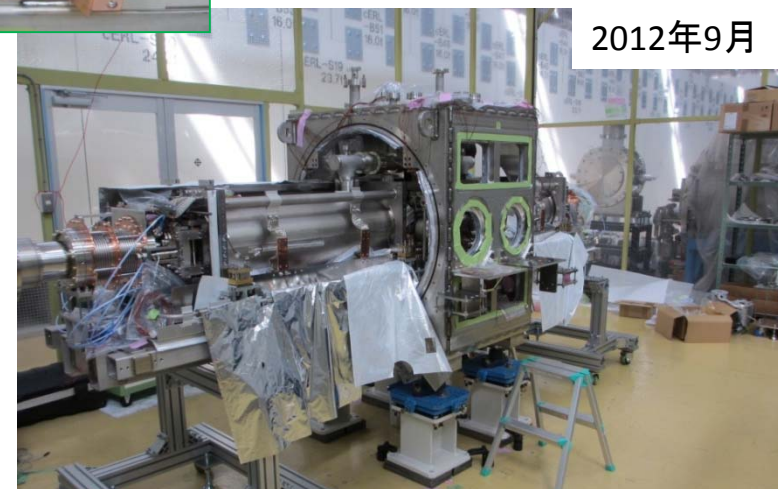
空洞単体での性能確認後、Ar封入した2台の
空洞にHeジャケットを溶接。高圧ガス検査を
行った後にKEKに。



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。

縦測定とモジュール組み込み後の主空洞性能比較(2012年12月) (主空洞 cryomoduleの空洞性能をlimitするもの)

モジュール組立時にゴミが混入した可能性が高い。→組立の改善が必要。



cERL組込用3、4号機9セル空洞

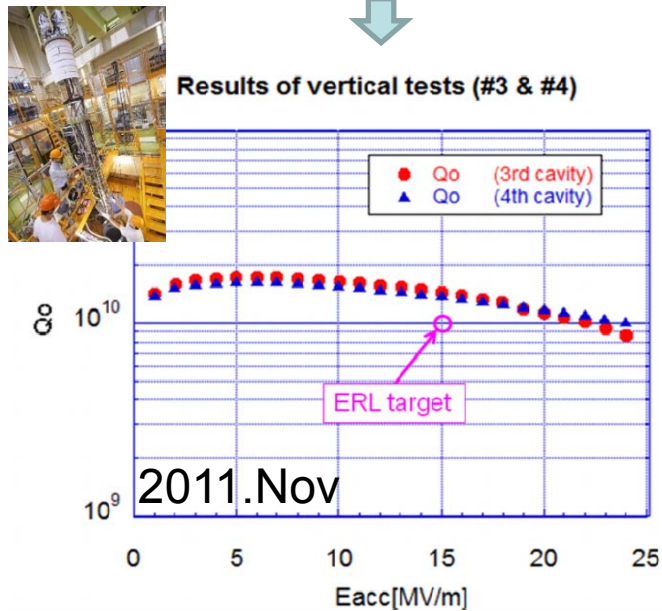


Main linac cryomodule set in cERL

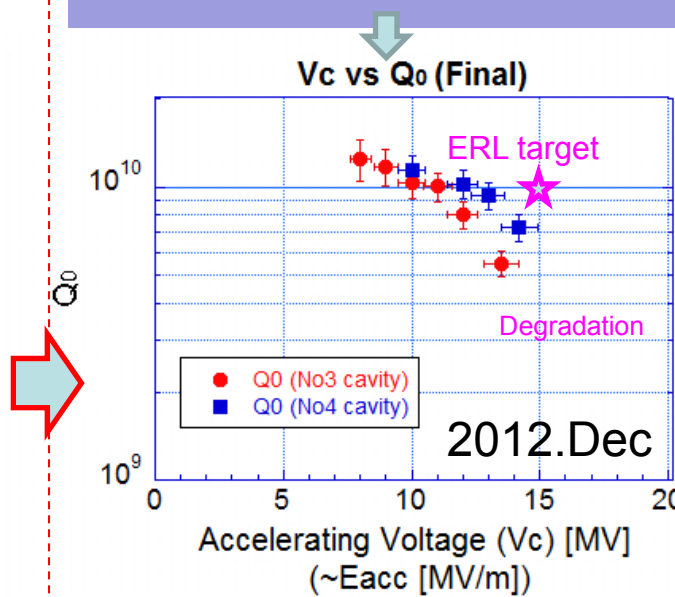
Summary of performance of cryomodule test in 2012

Vc=16 MV was achieved.
Vc=13.5-14 MV could be kept for more than 1 hour
Onset of radiation due to field emission: 8-10 MV/cavity
MV/cavity

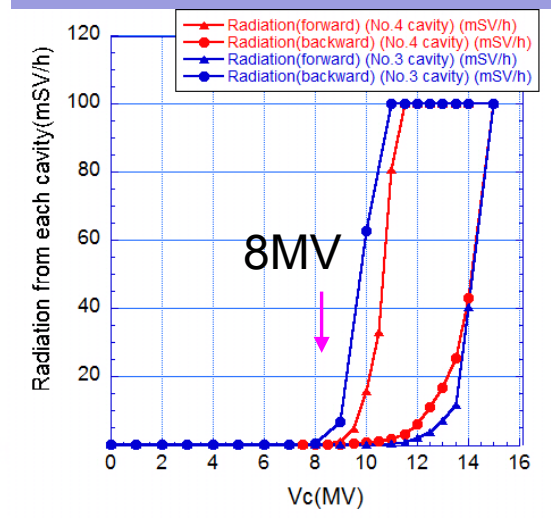
主空洞の運転は8.5MV/cavとする。



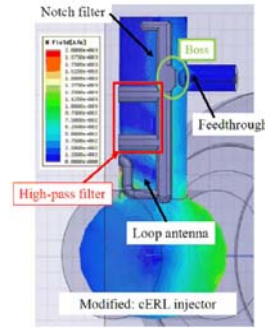
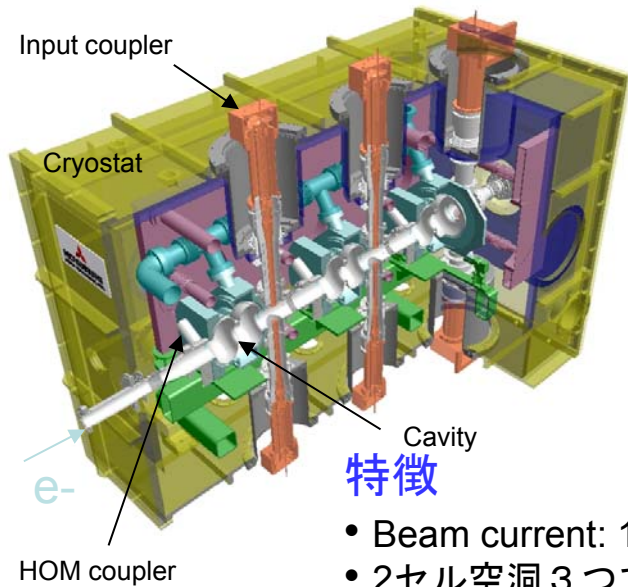
3号機4号機の縦測定結果



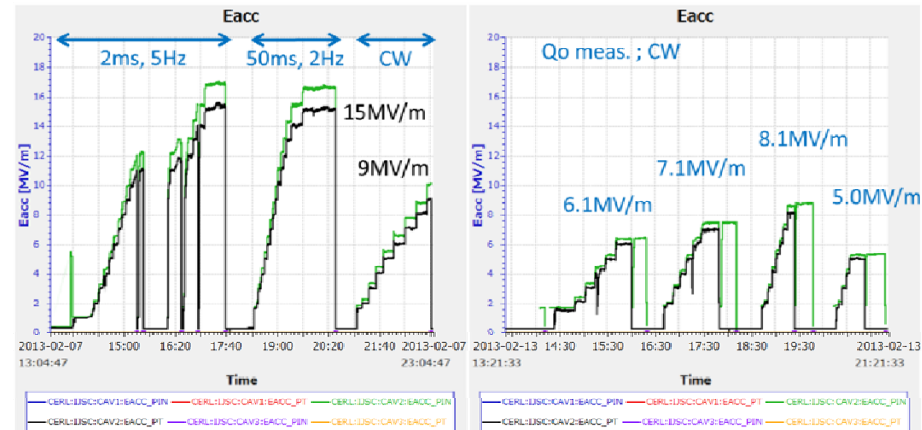
モジュール組み込み後のハイパワーテスト結果 ($V_c = 1.038 \times E_{acc}$)



Processing of Cavity -2 : (2013, Feb. 7-8, 13)



HOM coupler suitable for CW operation



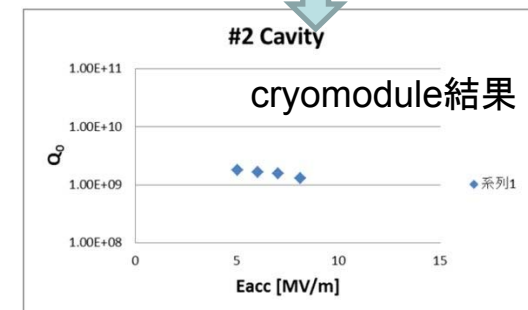
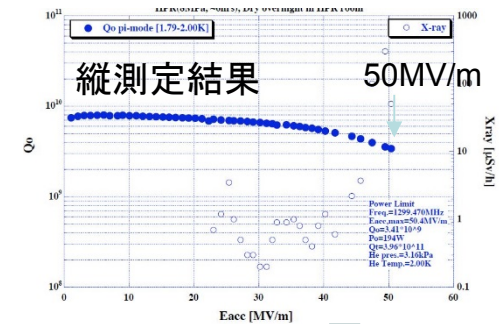
特徴

- Beam current: 10 mA (100 mA in future)
- 2セル空洞3つで5MeVのビーム加速 (7MV/m)
- $Q_0 > 1 \times 10^{10}$
- 2 input couplers/cavity (16kW/coupler at 10mA@15MV/m)
- 大電流対応の5つの改良HOM couplers/cavity

Summary of performance

- パルス運転で $E_{acc} = 15 \text{ MV/m}$ (duty 10%) を実証。
- CW運転で $E_{acc} = 8 \text{ MV/m}$ を実証。
- 縦測定では50MV/mまで高いQ値を実証。その後、Cryomoduleに組込Q値の減少が見られた。原因はHOM couplerの発熱を取る冷却ラインが不十分であるためである。今後、改良が必要。

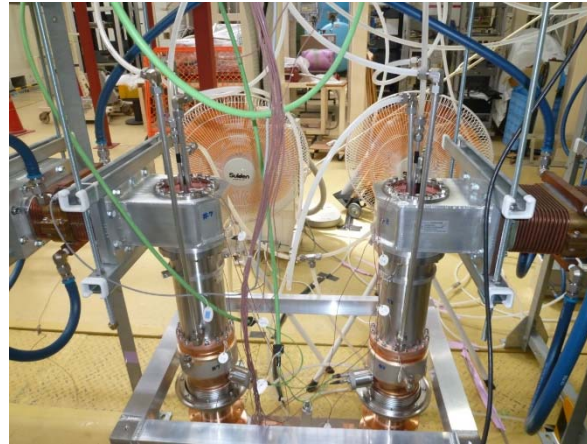
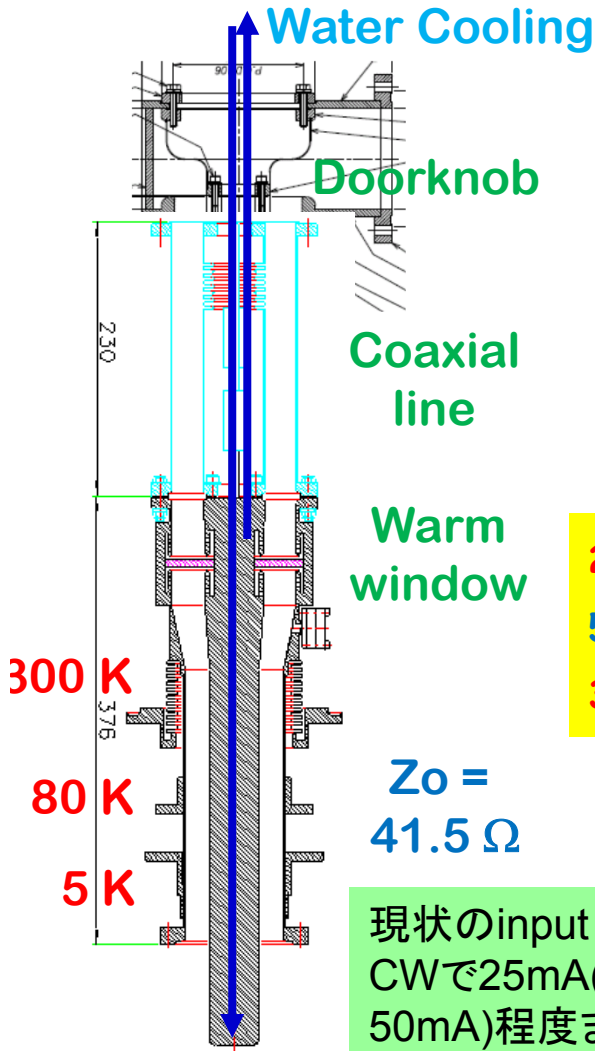
Qo measurement of Cavity -2



ただし、冷凍機としては、cERL運転には問題なし。
 入射部のみのビームテストにて5MeVの加速は可能。(2013年4月～6月)

RF Conditioning of Input Couplers for cERL injector (injector cryomoduleがlimitするもの)

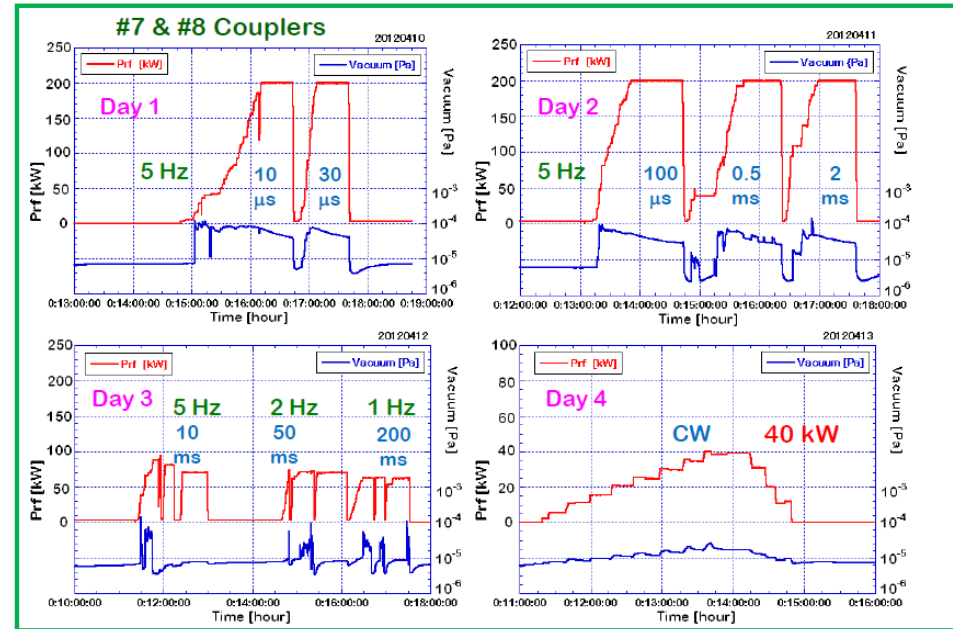
Eiji Kako (KEK, Japan)



200 kW, <2ms,
5Hz (1%)
30~40 kW, CW

$Z_0 = 41.5 \Omega$

現状のinput couplerでは
CWで25mA(2モジュールなら
50mA)程度までは加速可能。
Pulseで200kWまで問題ない
ので、セラミックの問題など
ではなく、熱負荷対策が必要。



周回部ビーム運転開始。加速電圧測定(2013.Dec)

- 主空洞の調整

- MLSC#1,#2をそれぞれ2MVで位相調整し、磁石でエネルギーを確認。(3.37MeV)

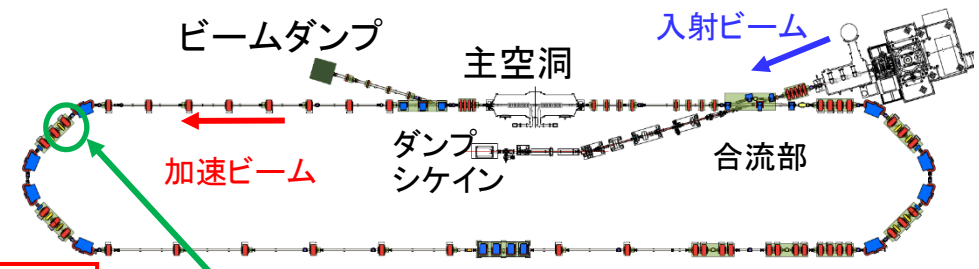
その後、8.35MV,8.36MVに上げる。

偏向電磁石(53A)による測定: +16.6MeV
主空洞による測定: +16.7MeV

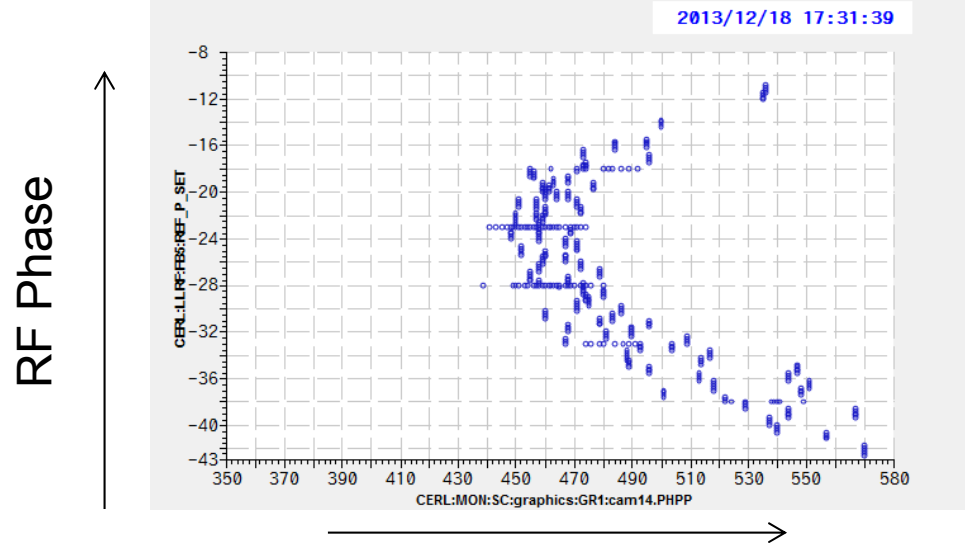
⇒ ほぼ一致

入射ビーム3.37MeV+主加速部16.7MeV=
20MeVに加速に成功。

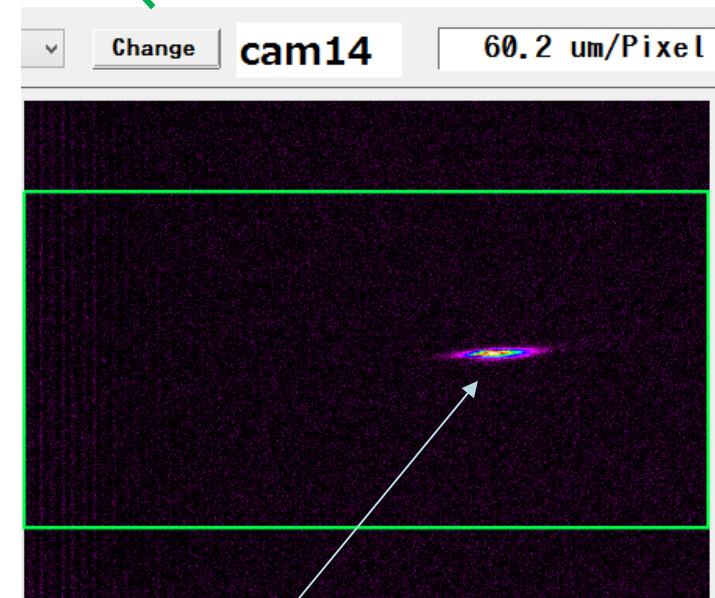
入射ビームエネルギーは合流部の偏向電



スクリーンでのプロフィール



スクリーンでのHorizontal position



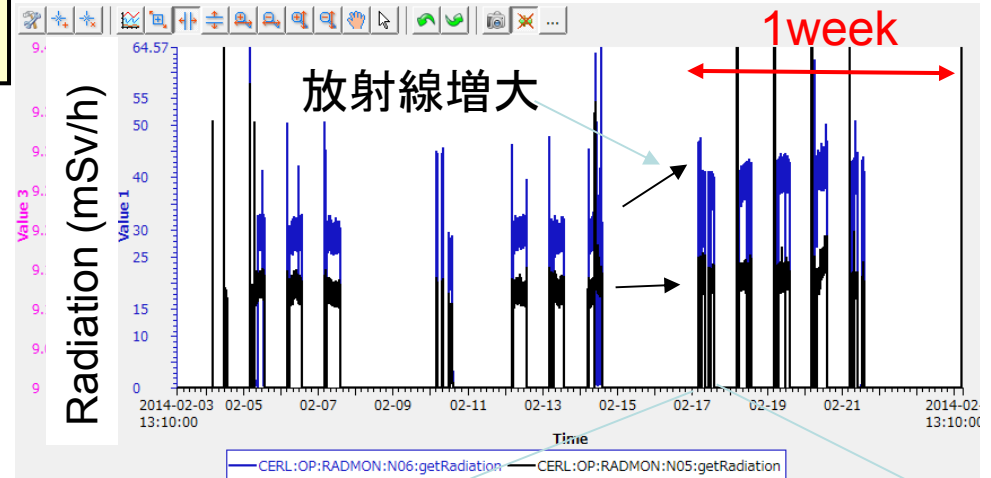
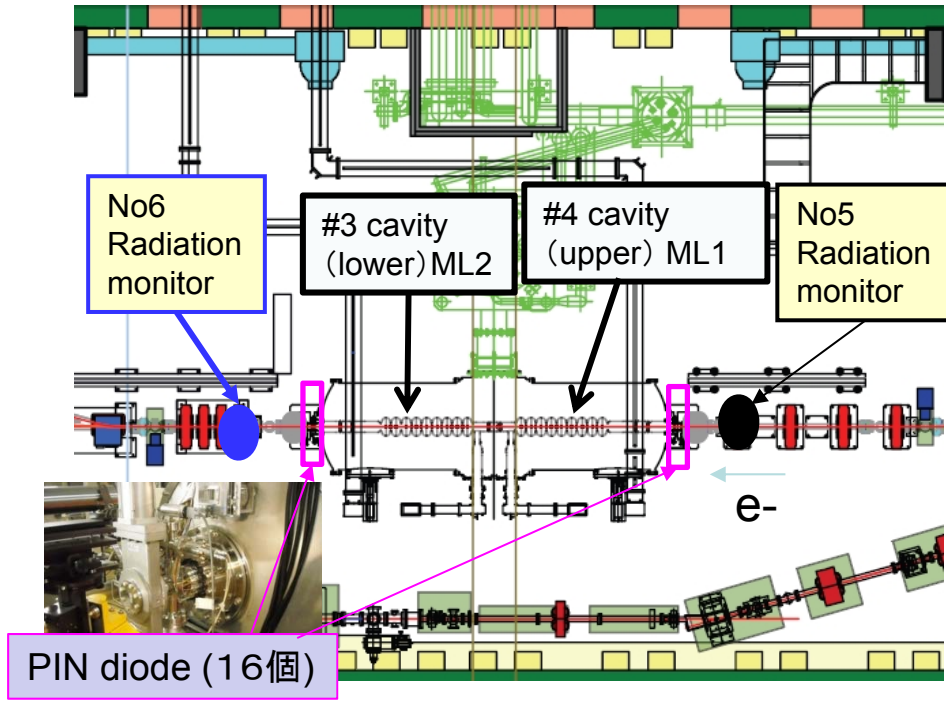
ビームはエネルギーdriftなく安定。

ビーム運転中にfield emissionによるスクリーンへの影響などはなく、安定加速を実現。

長期運転していると超伝導空洞にどんなことが起こったか？(放射線増大現象 & 空洞性能劣化)

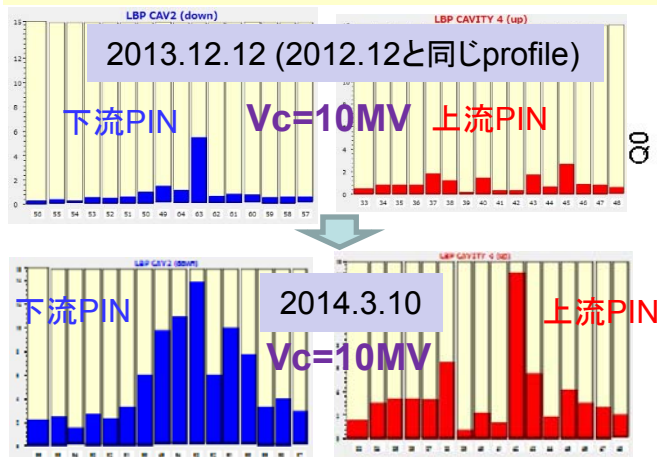
長期運転中のradaition増大による空洞劣化を見るため2つのモニター(**radiation monitor (NaI) (ALOKA)**、**PIN profile monitor**)を radiationの出る空洞の軸方向に常時設置。

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radaitionが増える現象が見られる。

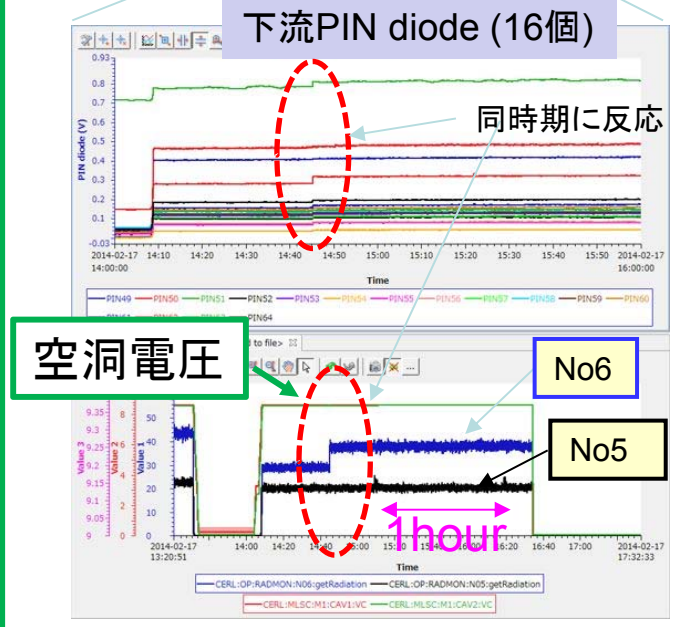
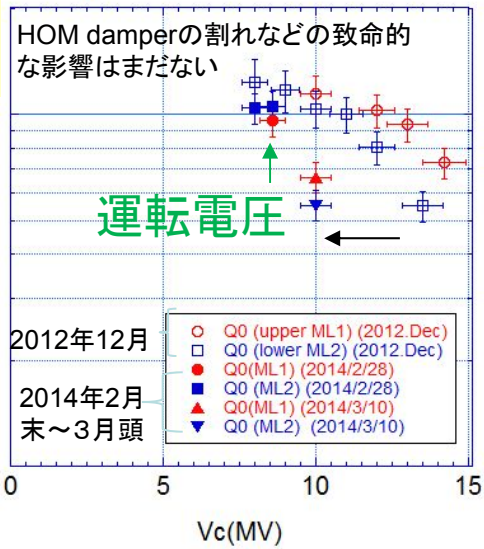


放射線増大以降のQ値測定とPIN profile変化

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

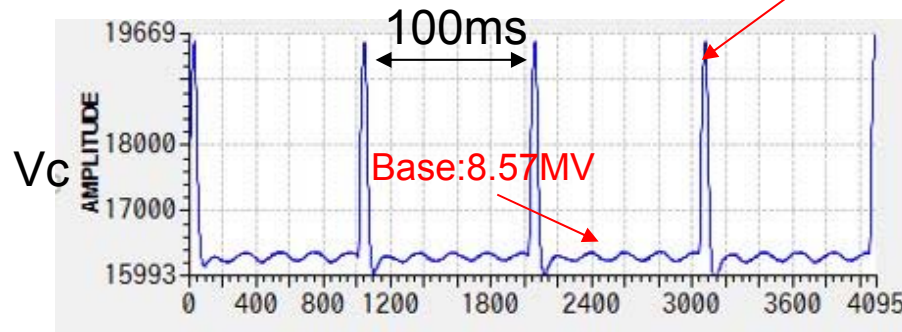


Vc vs Q0 (2012.Dec & 2014.Feb.-Mar.)



運転中の空洞劣化回復メソッド(Pulse aging)

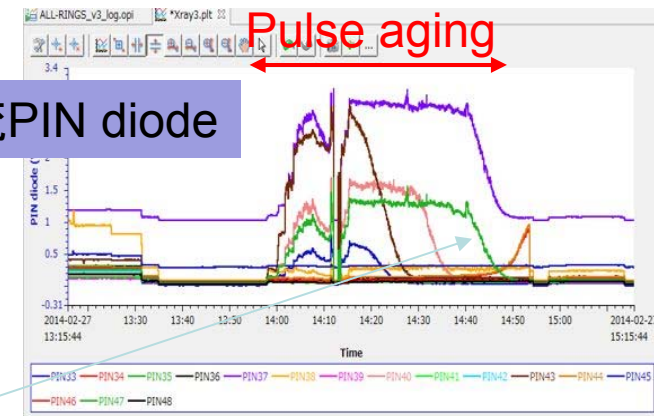
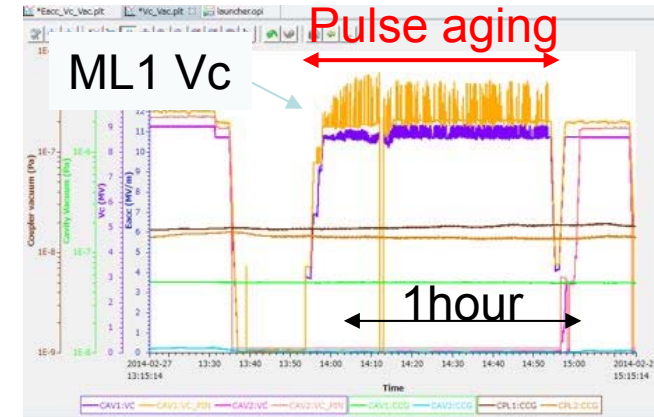
空洞電圧測定波形(digital)(Vc)



一瞬空洞内に高いfieldができる

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。



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)

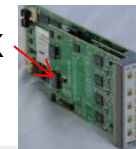
上流radiation(No.5) 38.7mSv/h (2/25 21:00) → 20.48mSv/h (2/26 21:47)

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

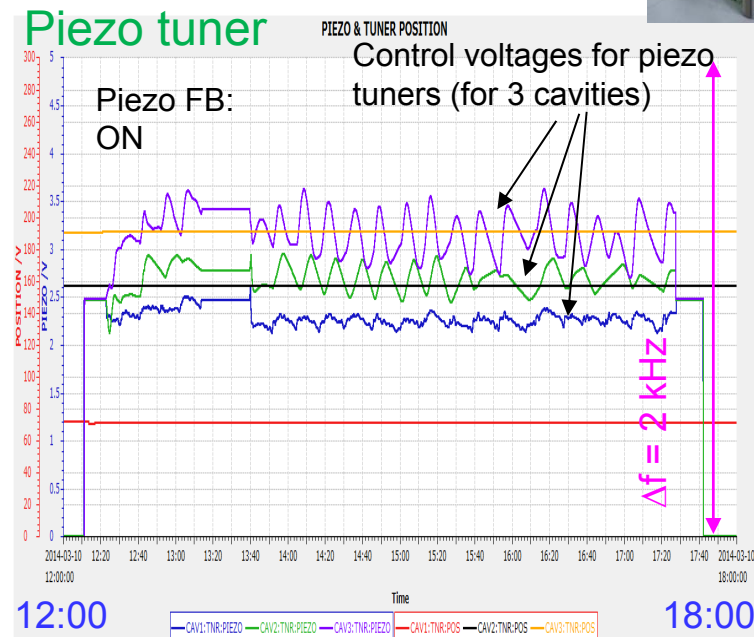
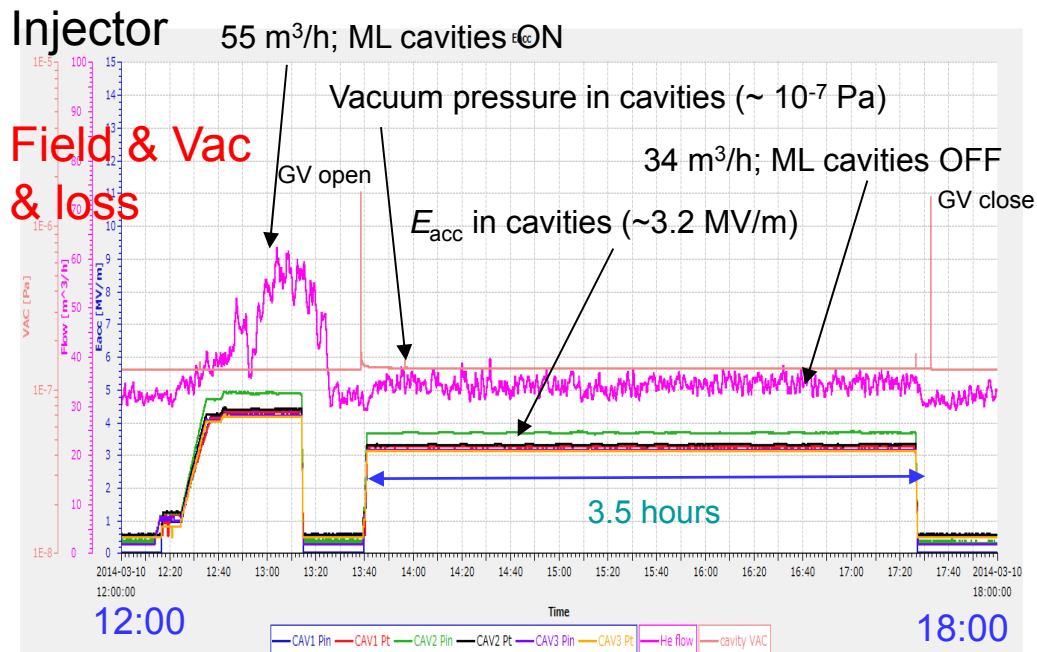
放射線量が半減した。長期運転中の劣化はpulse agingにて現在では対処可能。さらに劣化源をなくすため、空洞内にHeを流し、電場の集中している場所にionをぶつける方法(He processing)を検討中。

20MeV運転時の入射器 & 主空洞の運転状況と長期安定性

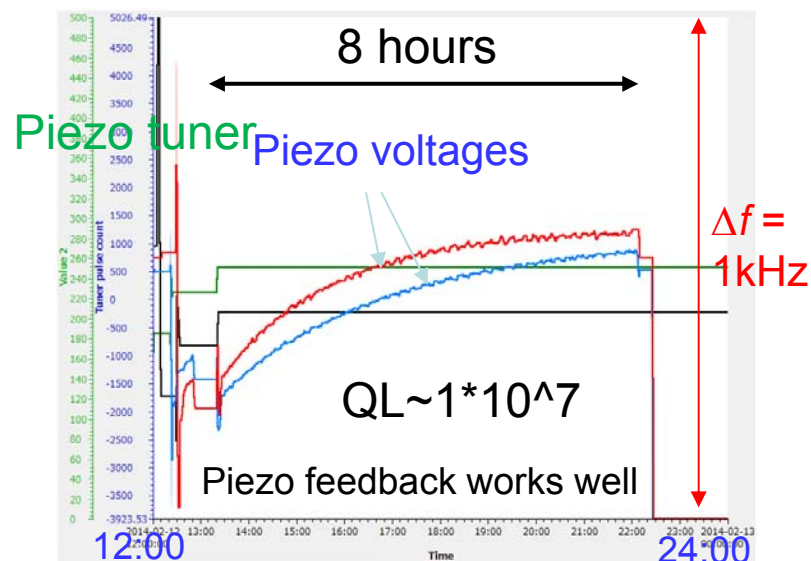
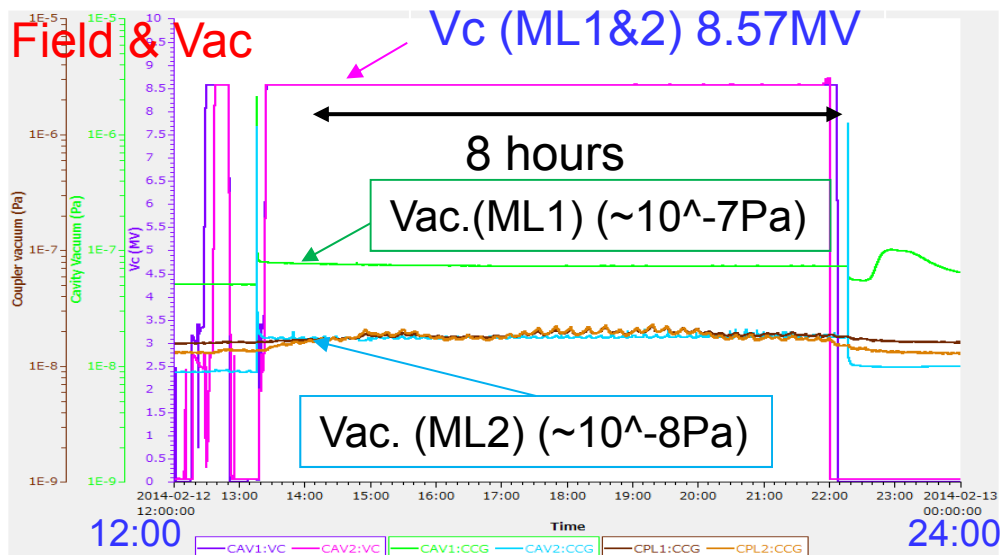
FPGA
Virtex5-FX



入射器 & 主空洞とも20MeV運転時にVcが安定に運転可能。入射器はNo tripであった。



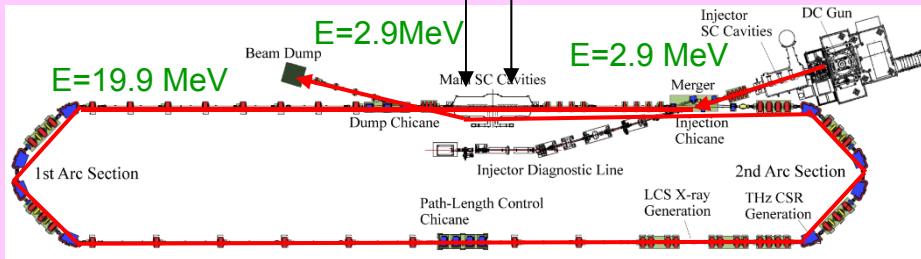
Main linac 主空洞では6月末にビームダンプの真空悪化によるtripあり(ML2)。また、HGで振動によるITLが幾度かあり。(3回/14weeks)



Recirculation of CW beams (6.5 uA) Confirmation of Energy Recovery in the Main-Linac

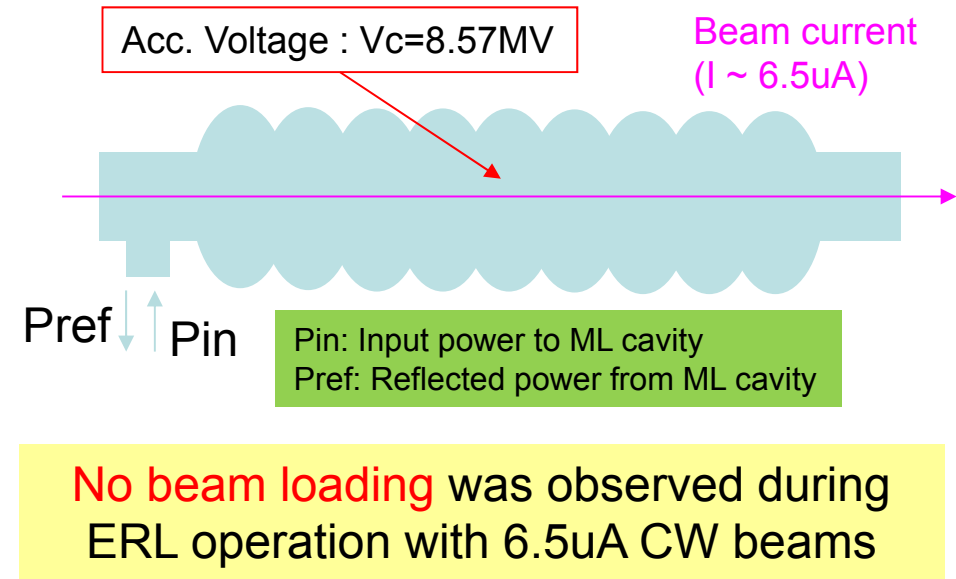
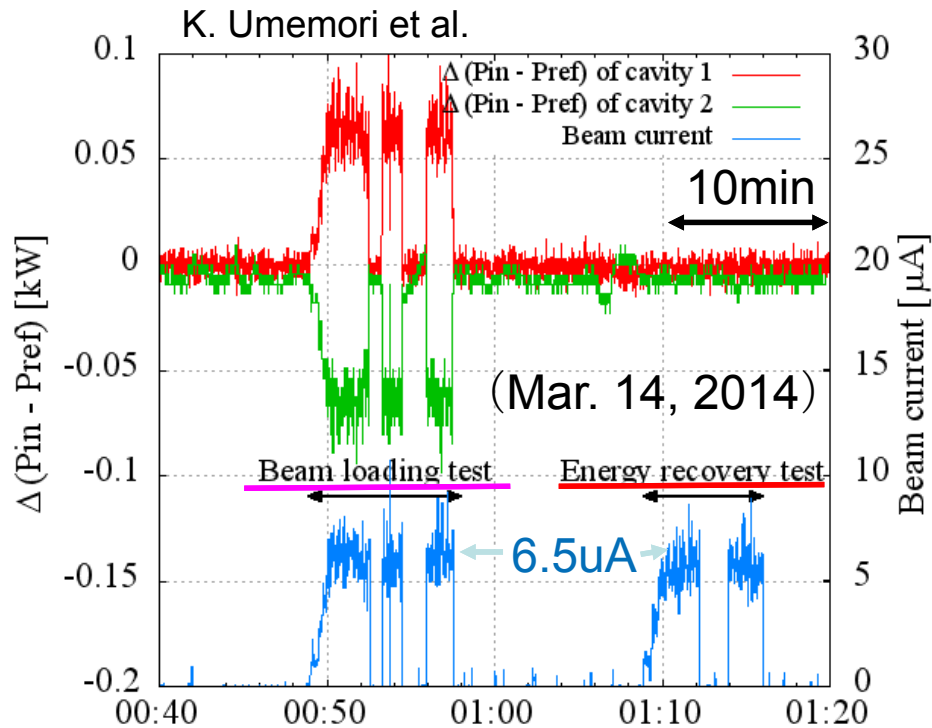
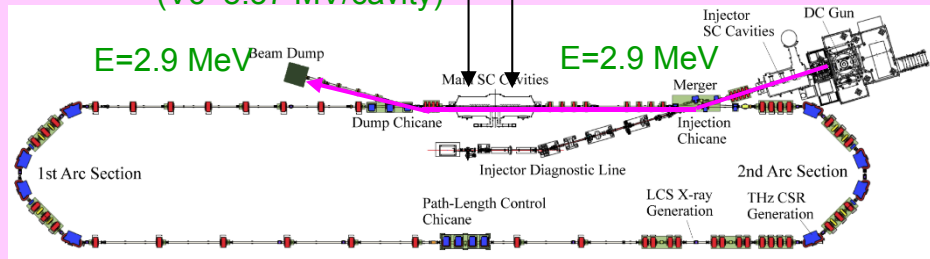
ERL operation

Cavity 1 and 2: acceleration (1st passage)
and deceleration (2nd passage)



Non-ERL operation (beam loading test)

Cavity 2: deceleration (Vc=8.57 MV/cavity)
Cavity 1: acceleration (Vc=8.57 MV/cavity)



Energy recovery worked well in cERL

(3)超伝導空洞の利用
(大きな超伝導空洞を用いた加速器)
--cERLで培った技術の応用と発展--

ここからは色々なprojectについての話。EURO-XFEL, CEBAF, LCLS-IIなどは2014年9月に行われたLINAC14の発表を基にしております。

EURO-XFELの超伝導空洞の状況(空洞の大量生産)

Das Röntgenlaserprojekt European XFEL
The X-ray laser project European XFEL

先行機 FLASH

Accelerator module

Schenefeld (Kreis Pinneberg)

Schleswig-Holstein

Hamburg

Usaarten Born

FLASH

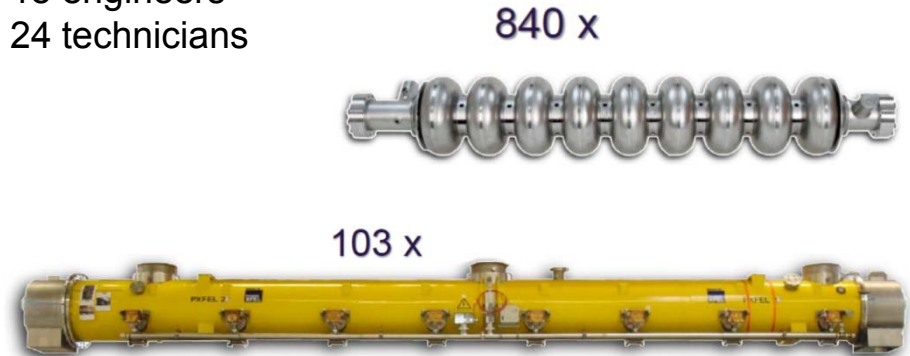
PETRA

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

HERA

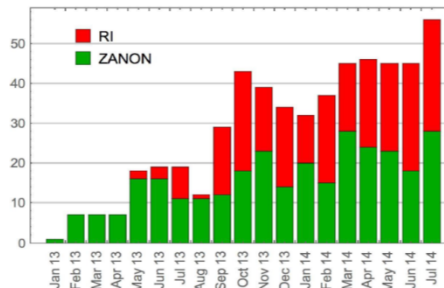
超電導リナック 1.3 GHz
Linear Colliderで培った技術を使用。
エネルギー: 17.5 GeV
全長: 3.5 km 8空洞×100モジュール
パンチ構造: 最大2700パンチ(600 μs)×10 Hz
2015年運転開始予定 2016年

For Cavities and Cryomodules tests are involved :
AMTF Technical Coordinator
18 engineers
24 technicians



European XFEL Cavity Testing Vertical acceptance tests (Status Jul 31, 2014)

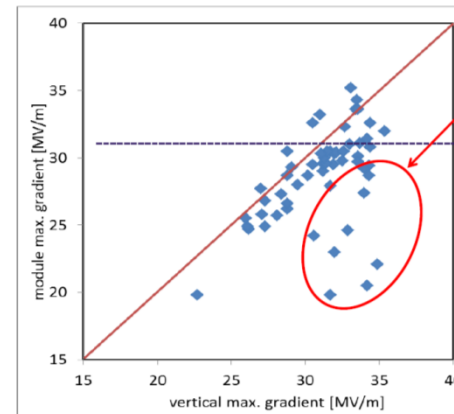
- Analysis of vertical acceptance tests includes
 - Series Cavities + "ILC HiGrade"-Cavities
 - NO infrastructure commissioning tests
- So far delivered: 404 cavities
- Total RF tested: 382 cavities



Average:
> 9 tests per week
since Oct 2013
(full operation of AMTF)

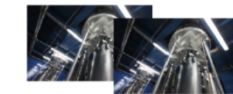
European XFEL Cryomodule testing Vertical vs. module performance

- Comparison of maximum vertical vs. module gradient



Few cavities show significant performance reduction

From individual max. gradient



to operational module gradient:

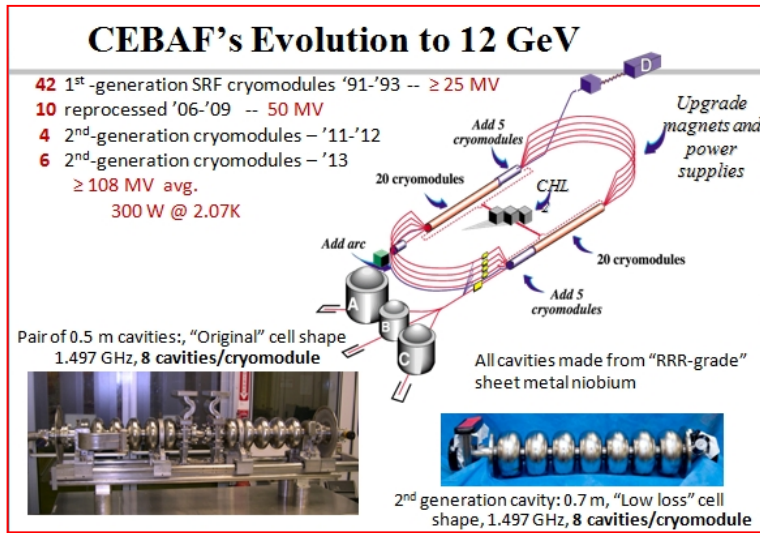


~20% reduction

(2014年夏)20%の空洞がcryomodule testではVTより低いgradientでlimitしている。原因は解析中。
→35%はfield emission あとはthermal BDらしい。

CEBAF upgradeの超伝導空洞の状況(空洞の大量生産)

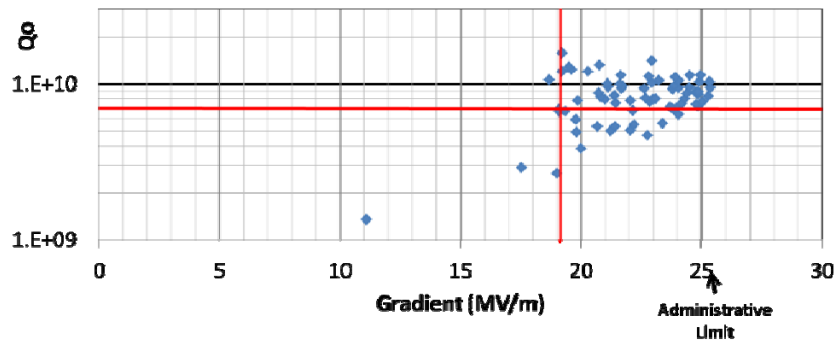
Early Commissioning Experience and Future Plans for 12 GeV CEBAF (1)
 Michael Spata (Center for The Advanced Studies of Accelerators)



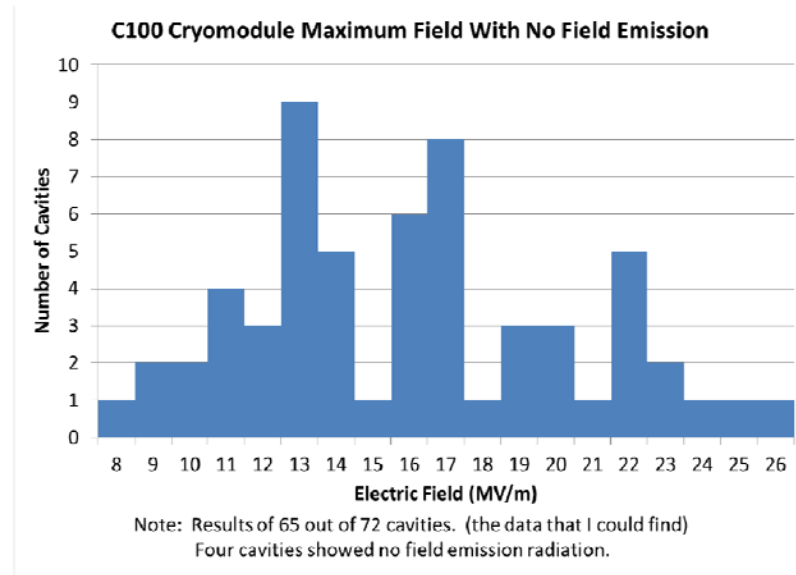
- The LL-shape was chosen because of ~20% lower P_{wall} than HG-shape

$E_{acc} = 19.2 \text{ MV/m}$ with $Q_0 \geq 8 \times 10^9$ at 2.07 K in CW operation

JlabのCEBAF: 12GeVビームを提供、原子核実験で5turnで12GeVまで加速のupgradeがおわり、2013年末にC100という8個入りcryomoduleが10個追加され、いよいよビーム運転開始。



Jlab C100 moduleでのcryomodule測定の結果。割とrequirementに近い値を達成。



但し、Jlab C100 moduleでのcryomodule測定の結果。Field emission onsetの分布は幅広い。Field emissionはやはり問題。

CW-linacでのXFEL計画(提案)



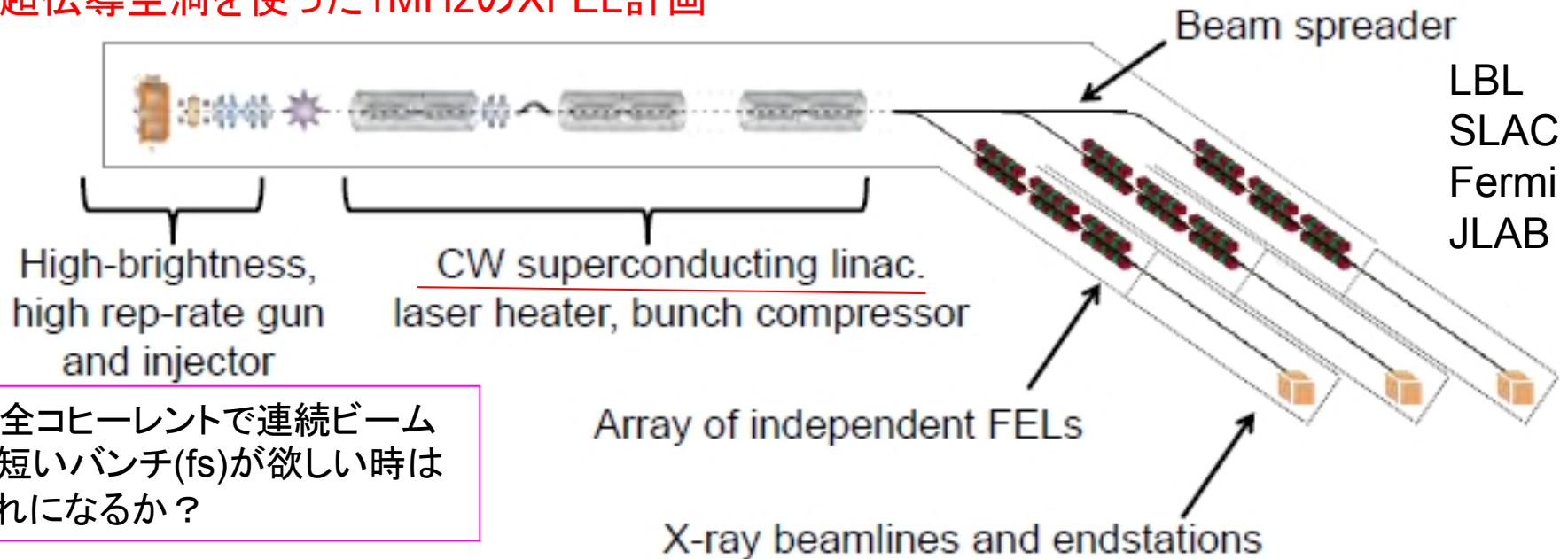
Next Generation Light Source - Unique Capabilities

- 1.8 GeV CW SC LINAC
- 3 FELs (seeded, 2 color, SASE) 280 eV – 1.2 keV

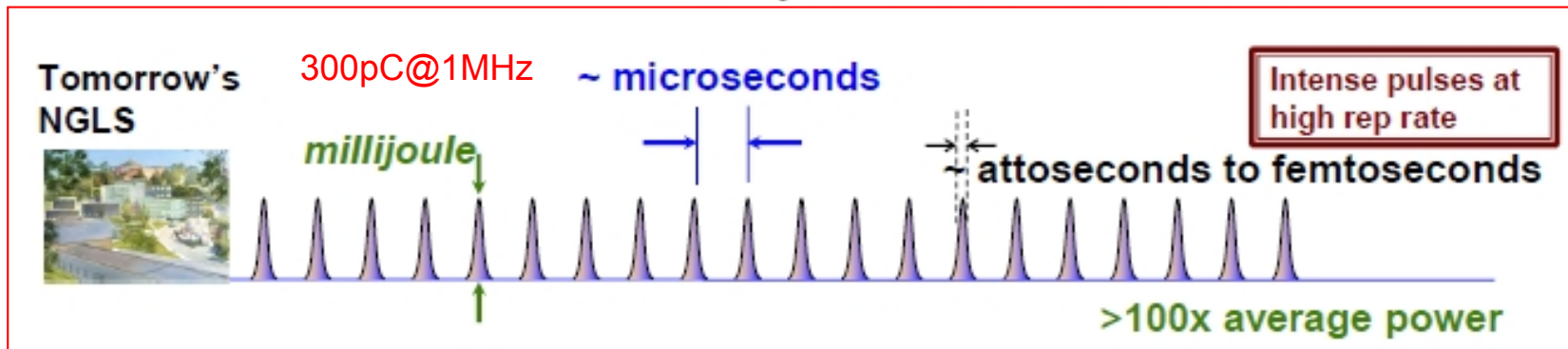
詳しくは<http://www.lbl.gov/ngls/>

J.N. Corlett,
IPAC2012 proceedings, p1762

CW超伝導空洞を使った1MHzのXFEL計画



完全コヒーレントで連続ビームで短いバンチ(fs)が欲しい時はこれになるか？



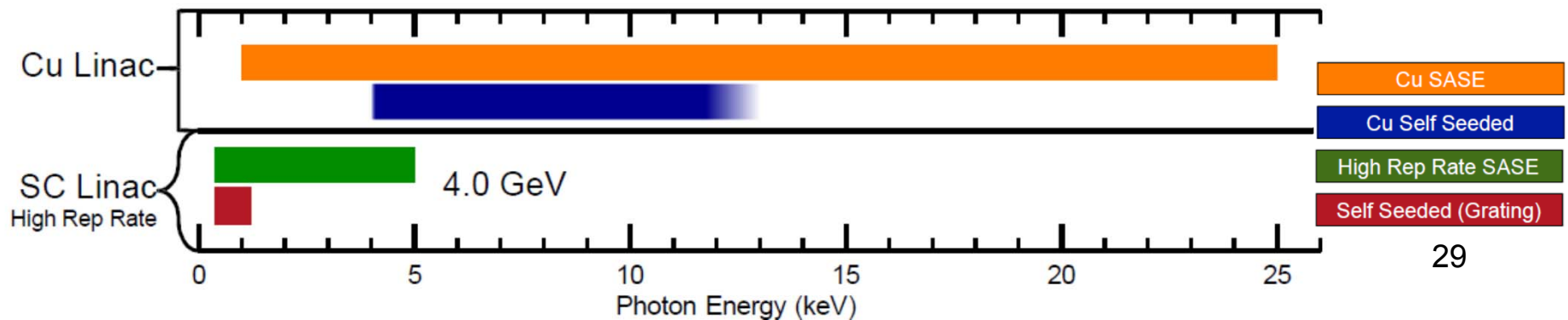
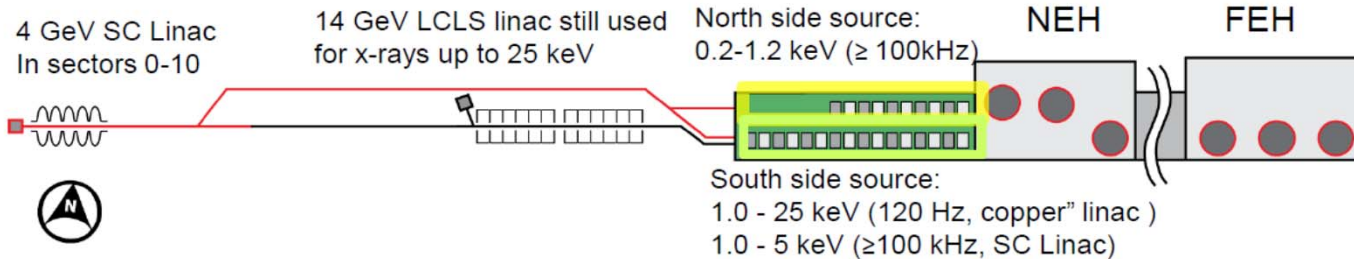
LCLS-II

4GeVで現在LCLS-II(SLAC)が具体的に予算が付き動き始めた。(2013,8月)

A New LCLS-II Project Redesigned in Response to BESAC

Accelerator	Superconducting linac: 4 GeV
Undulators in existing LCLS-I Tunnel	New variable gap (north) New variable gap (south), replaces existing fixed-gap und.
Instruments	Re-purpose existing instruments (instrument and detector upgrades needed to fully exploit)

全米でサポート



LCLS-II SRF linac requirement

LCLS-II SRF Linac


FermiとJLABが担当

- 4 GeV 'up to 300 micro-Amp' CW superconducting linac based on TESLA / ILC / E-XFEL 1.3 GHz technology

CEBAFより要求が高い。

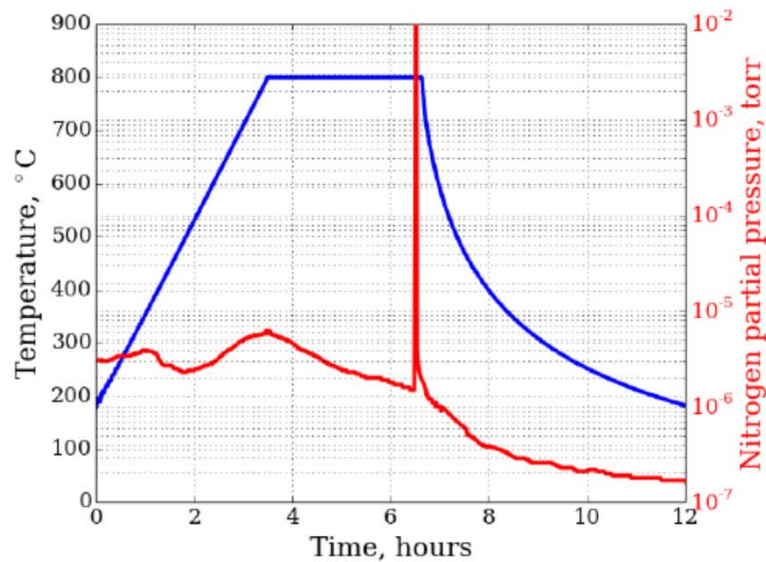
要求: 16MV/m : Q0 > 2.7x10¹⁰ (!) <- 冷凍機の制限による

Key topics:

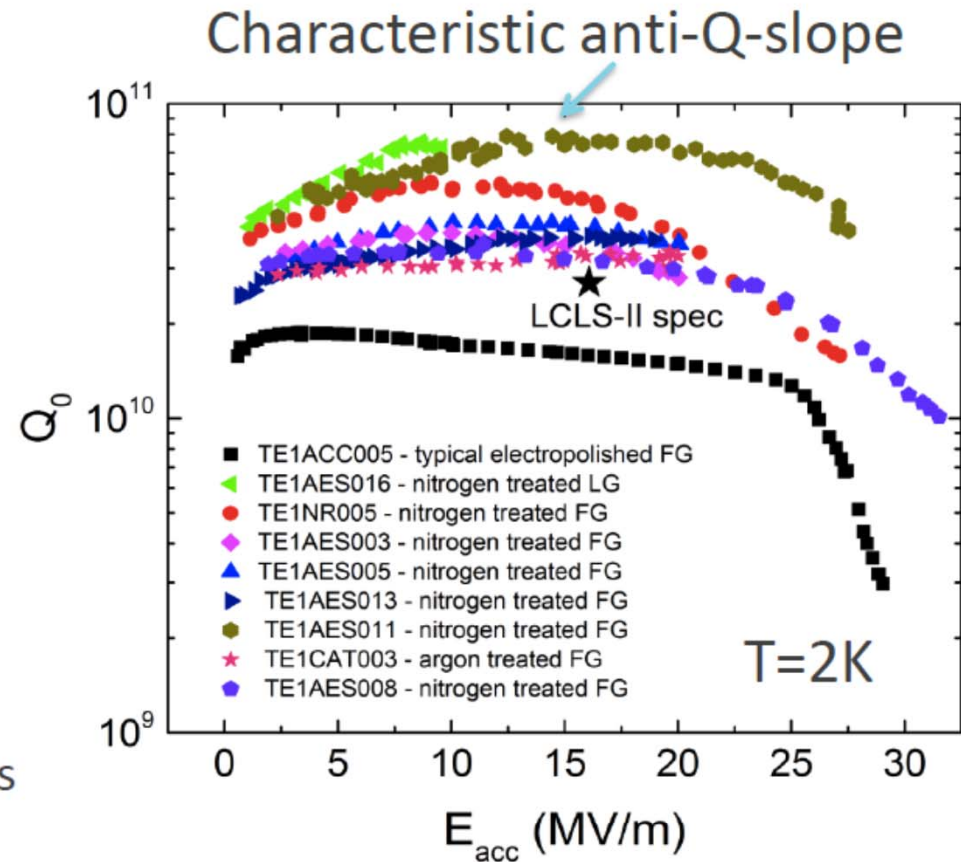
- Cavity process for high-Q0 production  N2 doping
- CW cryomodule design and operations scheme for 110 W @ 2K / CM (or better)
- Industrial capability for 1) dressed-processed-cavity, 2) coupler, and 3) vacuum-vessel/cold-mass production
- Single RF-source single-cavity
- Jlab Cryoplant CHL-2 (12 GeV Upgrade) adapted for SLAC₃₀

High Q approach N2 doping

Breakthrough in quality factor: nitrogen doping



- Injection of small nitrogen partial pressure at the end of 800C degassing followed by several ums of EP-> drastic increase in Q
- Reproduced on tens of 1- and 9-cell cavities at FNAL

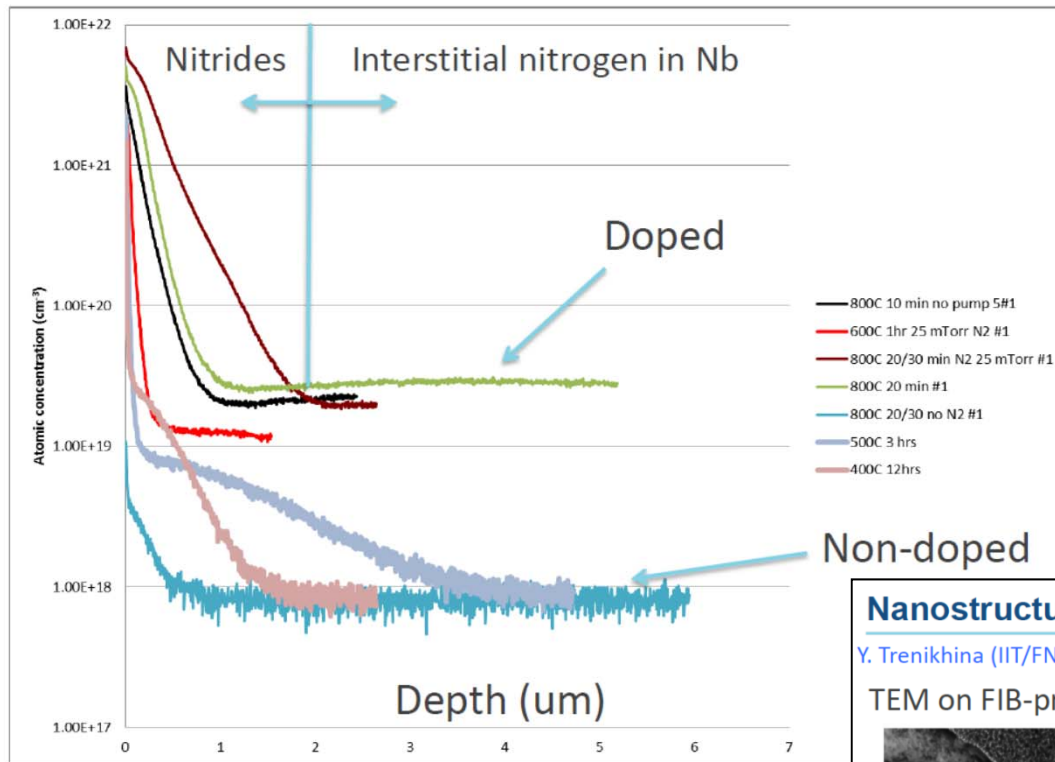


画期的

Q_0 $1 \times 10^{10} \rightarrow (3 \sim 10) \times 10^{10}$

A. Grassellino et al, 2013 Supercond. Sci. Technol. **26** 102001 (Rapid Communication) 31

What does N treatment do? N depth profiles by SIMS



High Q reason of N2 dopping

物性や表面よくしている方は是非教えてください。

N2 dopすることで空洞内面までN2 richになる。そのせいかわからないが、Niobium hydrideがなくなり、Rresのロス成分が少なくなる。但し、まだ詳細は分かっていない。

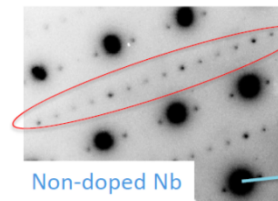
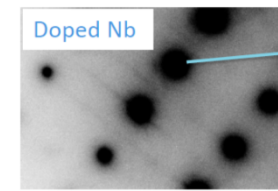
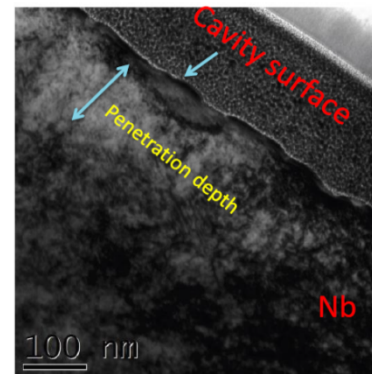
Exciting time in SRF

Nanostructural studies provide first clues

Y. Trenikhina (IIT/FNAL), A. Romanenko – to be published

TEM on FIB-prepared cutouts

Electron diffraction patterns from the penetration depth taken at 94K reveal the difference



Nb lattice

Secondary diffraction peaks appear signalling the formation of lossy niobium hydrides

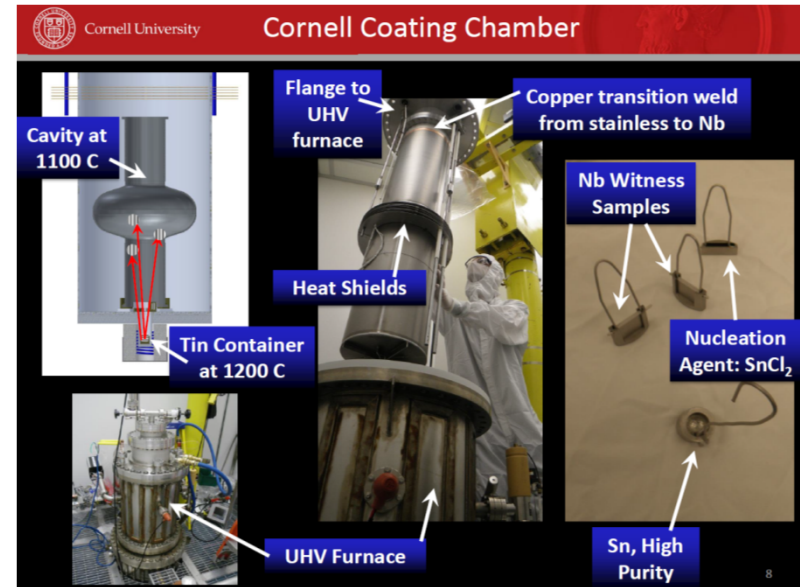
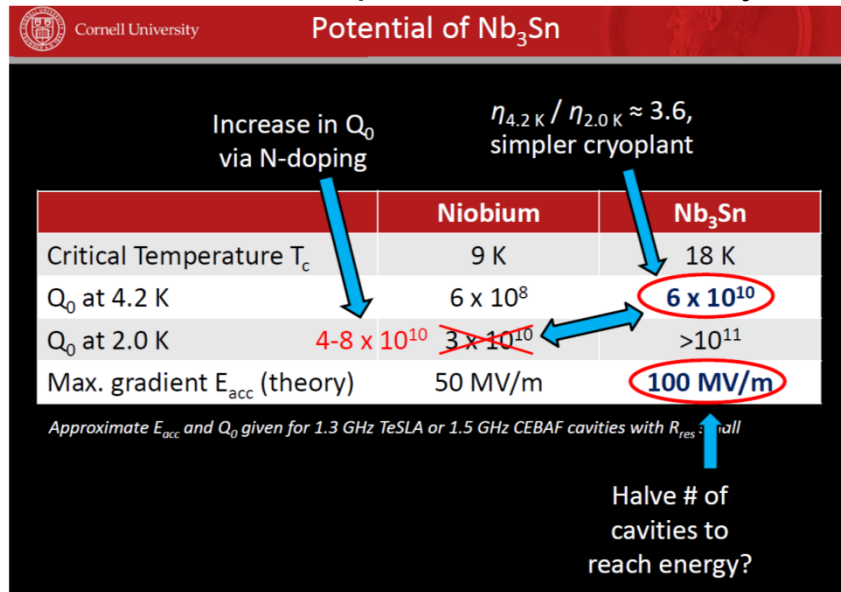
Nb lattice

- Hydrides may be the cause of the medium and high field Q slopes [see A. Romanenko, F. Barkov, L. D. Cooley, A. Grassellino, 2013 Supercond. Sci. Technol. 26 035003]
- Nitrogen doping may fully trap hydrogen => only intrinsic Nb behavior is then manifested?

material 開発 (Nb3Sn) – Present Status and Potential as an Alternative SRF Material

S. Posen and M. Liepe, Cornell University

SRF New materialの最近の進展の1例(わかる範囲で)



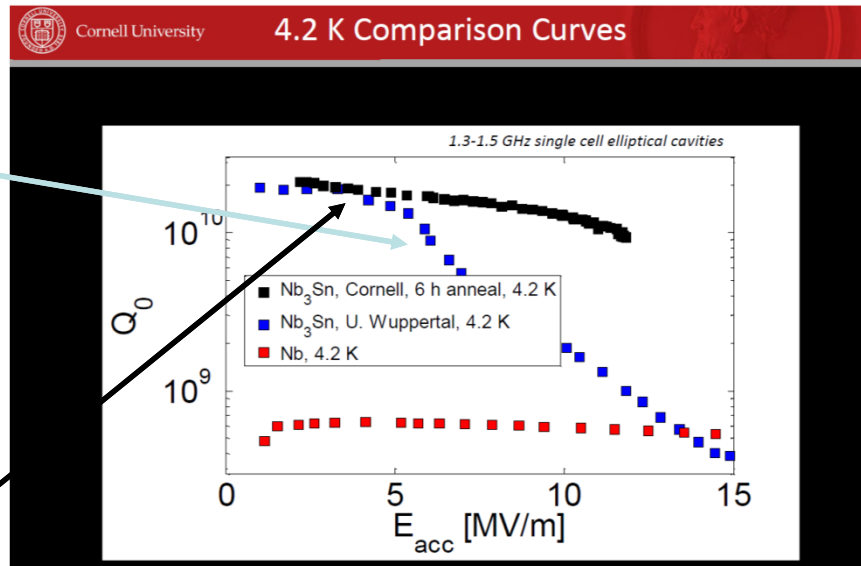
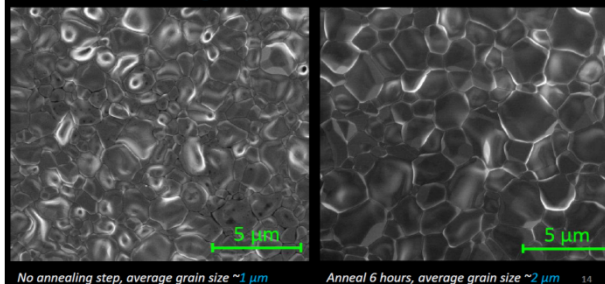
Pioneering work at Siemens AG, U. Wuppertal, K.F. Karlsruhe, SLAC, Cornell U., Jefferson Lab, and CERN

- U. Wuppertal: (1990年代??)
- Very small Rs values in Nb3Sn cavities
- Strong Q-slope, cause uncertain

6 hours annealing after Sn coating @Cornell

Lossはcrystal間のboundaryで起こっていた可能性が高いので、annealして結晶の大きさを増やした。

- Found could grow grains by factor of ~2 while maintaining desired stoichiometry by modifying Wuppertal recipe
- Extra annealing step: Furnace at 1100 C, but tin heater off



Annealingにより今までQ slopeが見られたのがなくなった。
4.2Kで1*10¹⁰@10MV/m。 --> Nb3Sn promising material

EUV光源としてのERL-FELの検討

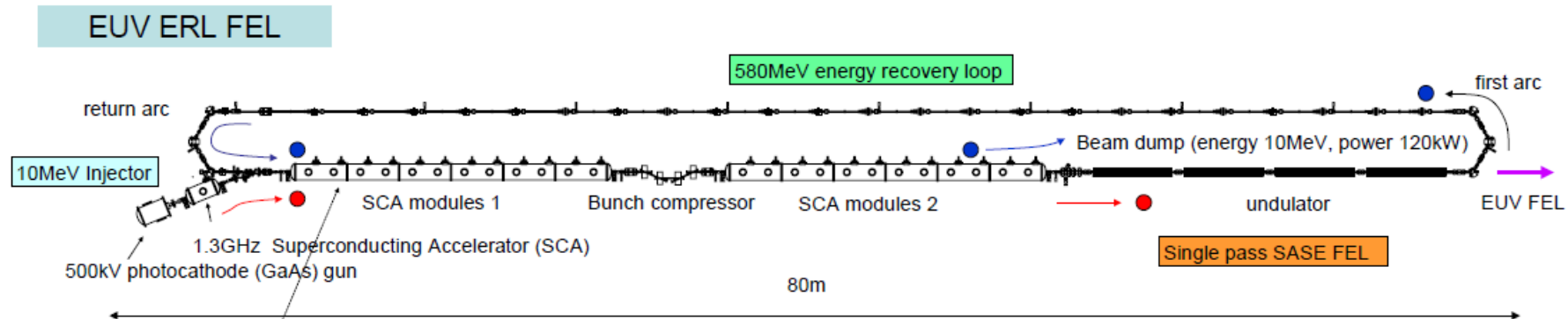
Proc. of ARTA 2007, Tokyo

Energy-Recovery Linac-based Free-Electron Lasers for EUV Lithography

Eisuke J. Minehara, Nobuyuki Nishimori and Ryoichi Hajima

ERL group, Advanced Photon Source Development Unit, Japan Atomic Energy Research Agency(JAEA)
2-4 Shirakata-shirane, Tokai, Naka, Ibaraki 319-1195 JAPAN

Abstract The free-electron laser (FEL) at Hamburg (FLASH) has demonstrated FEL lasing at 13.5nm with the average power of 0.2W recently. Enhancement of the EUV-FEL power up to “multi-kW” is possible by utilizing Energy-Recovery Linac (ERL) technology. Since the ERL enables one to accelerate a high-power electron beam with a small capacity of RF sources, it is a suitable device for high-power FELs. The ERL will become a mature technology very near future. High-power ERL-FELs in the wavelength of infrared have been operated in US, Japan and Russia. Next-generation X-ray light sources relying on ERLs are also proposed in US, Japan and UK. We present a design of EUV-FEL utilizing a 580-MeV ERL. All the needed components will be available from the JAEA-KEK ERL project for a next-generation light source.



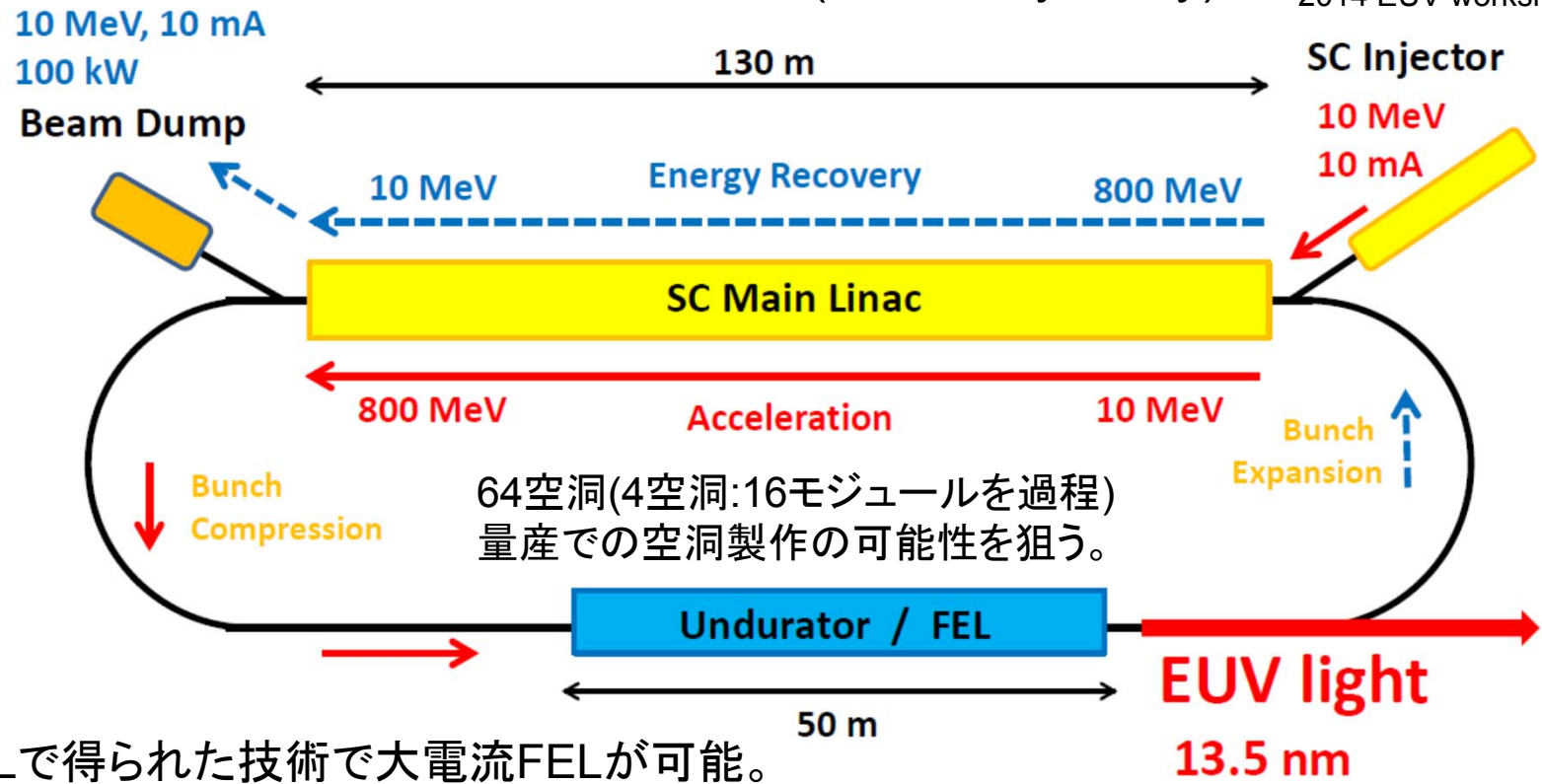
1GeVクラスのERLだが、FELに特化して運転(one user向け)。JlabのFELマシンをもっとupgradeしたもの。Flashではpulse 運転だが、ERLで大電流化が可能になるので、kW以上のEUV光が出る。(現状数十W LPP)



近年の半導体業界からの要求が非常に大きく、EUV光源の世界が変わるかもしれない。

ERL for EUV-FEL (Feasibility study)

E.Kako et al.,
2014 EUV workshop (ダブリン)



cERLで得られた技術で大電流FELが可能。

<得られた現実的な加速器パラメータ>
 加速エネルギー: 800 MeV
 バunch電荷: 100 pC
 繰り返し周波数: 81.25 MHz
 平均電流: 8.125 mA
 (規格化)エミッタンス: 0.8 mm²·mrad
 アンジュレータギャップ: 10 mm
EUV光の平均パワー: 12 kW

<フィージビリティ>
 入射部: cERLで実現可能範囲、コーネル[米国]で、すでにほぼ実現。
 主加速部: 12MV/mの加速勾配、試作は必要だが現実的。
 バunch圧縮機構: cERLでテスト
 アンジュレーター: テーパーアンジュレーターを使用
 発熱問題: アンジュレーターダクトの冷却
 ビームダンプ: 100kWは問題なし
 ビームロス: 第2アーク部のダクト形状

まとめ

- 2006年からcERLの開発を続けようやく低エミッタンスビーム**加速を実現**し、さらに6.5uAですが、CWビームの**エネルギー回収**を実現にまでもっていきました。今後は大電流でのこの安定加速の実現とビーム増強が鍵です。
- 超伝導空洞は**加速までの試験は大変**ですが、類を見ない**CWで大電流ビームの加速**を実現可能なのが魅力の全てです。しかし、日本ではこれだけ複雑な加速器の開発は今の処残念ながら、**KEK**でしかほぼやってません。→**他所も開発はできるはず**。
- 現在の処、大電流に向けて、**ハイパワーで持つコンポーネントの開発**が重要です。(10mAまでは問題なし。)また空洞性能としては残念ながら、**field emission**というのが**最大の敵**であります。これは今までの超伝導空洞開発の永遠のテーマであります。この回復ができるかというのは現状の大きなテーマですが、これが回復すれば、**世界の超伝導空洞は制覇**できます。但し、かなり地味な作業です。
- 我々の**超伝導空洞のテーマ**は今のところ、もう一度いうと
 - 超伝導空洞で今よりもさらに高いQ値の空洞開発と実現。
 - 大電流運転に備えた空洞、インプットカプラー(入射器)HOMdamper(主空洞)の改良も大きなテーマ
 - ビーム運転中の空洞性能劣化回復に向けて(He proessの実施)などが具体的なテーマです。(これに本当は量産化が入ります。)
- 最近ではCW-SRFの発展で**CW-XFEL**や**ERL-EUV-FEL**の展開が見られており、今後は、**このような超伝導空洞の発展に伴って、大電流ビーム加速可能な次世代の加速器が展開されていくことが予想され、期待されているのではないのでしょうか？**

謝辞

- 長年にわたり、ERLの光源検討の元、ERLの試験加速器であるCompact ERLの具体化が行われ、KEKの皆様含め、多くの皆様のご支援のもと、2013年末にCompact ERLの建設と、commissioning、そしてエネルギー回収の実現までたどり着くことができました。
- 今まで多くの設計、建設に携わっていただいた多くの皆様に感謝いたします。