

高周波空洞技術

加速器学会 技術研修会

8月10日～11日

肥後寿泰 (KEK)

高周波空洞技術 2

製作から運転へ

MOOLT1 技術研修会2

8月11日 大ホール 9:00 - 10:00

肥後寿泰(KEK)

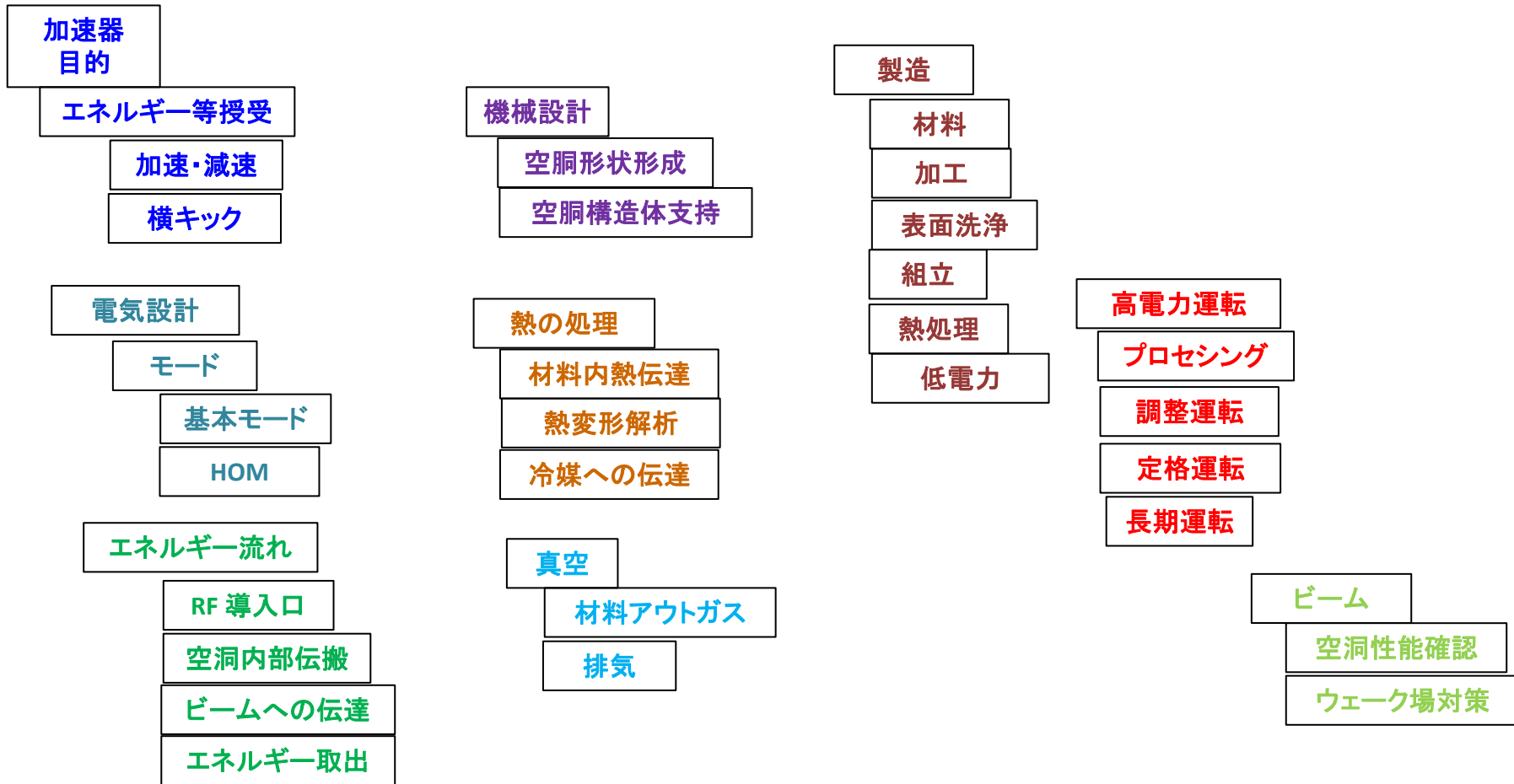
高周波空洞技術 2 内容

- 材料
- 機械加工
- 洗淨
- 組立
- 接合
- チューニング
- 高電力
- ビーム運転
- 長期運転での劣化対策

高周波空洞技術 2: 製作から運転へ

- 第一部で述べた基本設計を元に、高周波加速空洞を製作し、実際に運転するまでの具体的な技術について述べる。
- 材料の選択や調達、各種構成パーツの製作、保管管理、組立前の処理、組立工程、完成検査、更に現地への設置、高電力導入までのプロセッシング過程、更に長期の運転とそれに伴う不具合への対処、等が含まれる。
- 主に電子蓄積リングで用いるCW空洞、及び電子直線加速器で用いる高電界加速管の二つに焦点をあてて述べ、そこから一般的な加速空洞技術を俯瞰できるように解説したい。

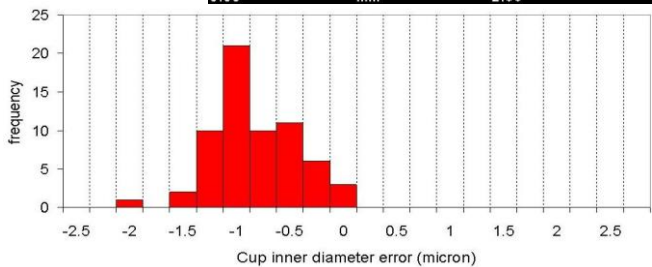
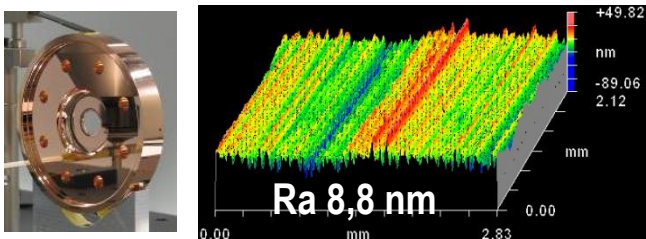
高周波空洞の一生の相互関連技術



Ultra Precise turning machine



Surface quality and tolerances well below the specs. (Specs.: R_a 25 nm and inner diameter $\pm 4\mu\text{m}$)



Brazing stacking provided by a robot



Vacuum brazing furnace installed and operative

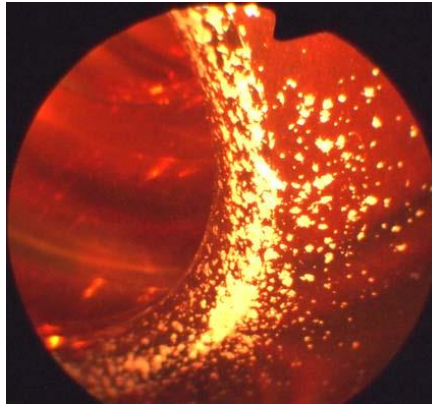


5 axes machine for BOC production (installed and operational)

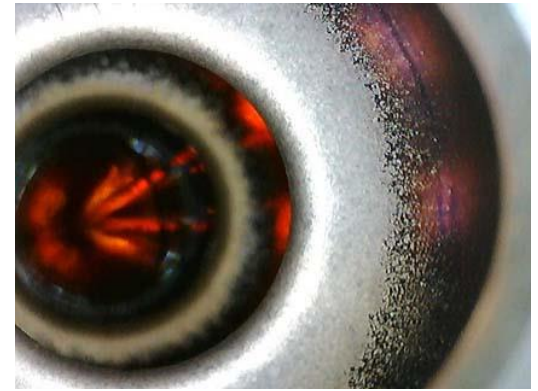
KEKB入射器加速管内部 建設後～30年後(2011年)



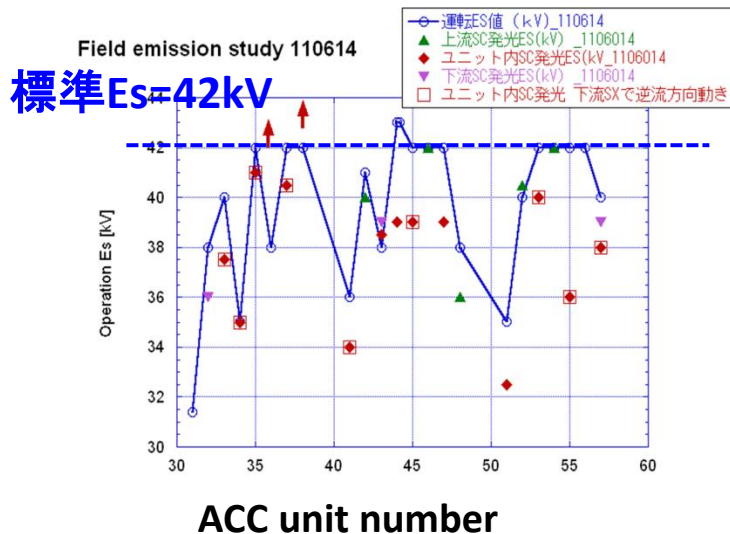
割に良い例



良くある放電痕

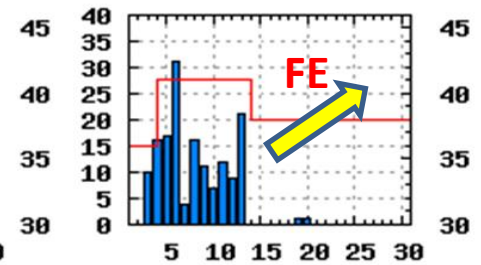
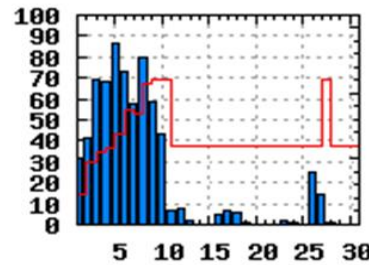


非常に悪化したアイリス



2011年5～6月

加速管放電/日



問題視: 放電頻度、電界放出
今後の悪化を懸念している

空洞構造

- 電氣的表面
 - 閉じ込め
 - 外部からの電磁波導入
 - 外部への電磁波取り出し
- 真空表面
 - アウトガス
 - 排気
- 機械構造体
 - 廃熱
 - 構造支持

設計計算

- まずは手計算をせよ
 - 直感評価
- 2Dシミュレーション
 - 主モード+他のモード理解
 - 結合 等価回路的理解
- 3Dモデリング シミュレーション
 - 必要ならモデルでの検証
- 実機製作

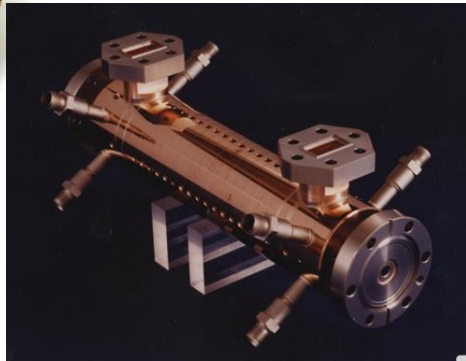
空洞材料 念頭におく特性

- 電気
 - 表面電気伝導度
- 機械
 - 結晶構造、密度、ヤング率、硬さ
 - 熱膨張、歪み
- 熱
 - 熱伝導度、熱膨張率
 - 冷却通路と熱伝達
- 真空
 - 表面吸着ガス、内部吸蔵ガス
 - 表面二次電子放出能

空洞材料選択

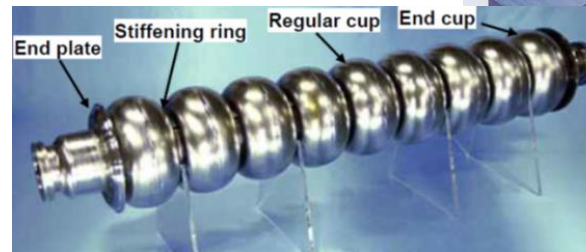
常伝導

- Cu 表面
- Cu、SUS 構造
- Cu, Fe, SUS 熱伝導
 - 冷却水
- SUS 結合



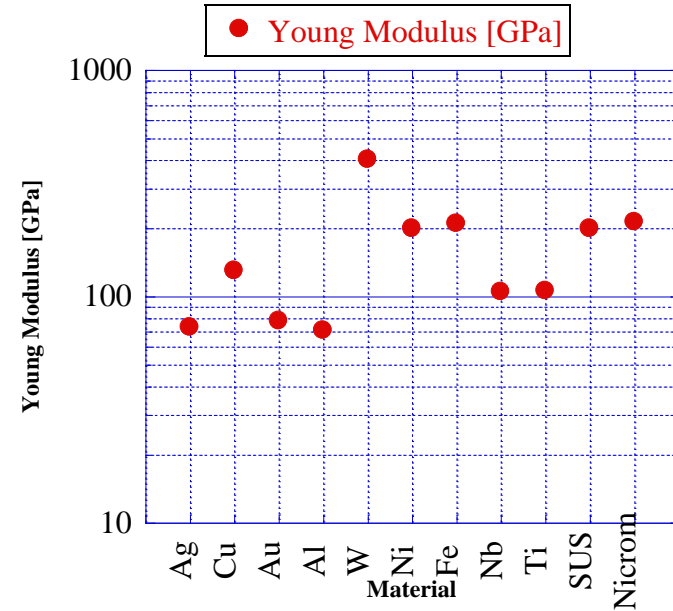
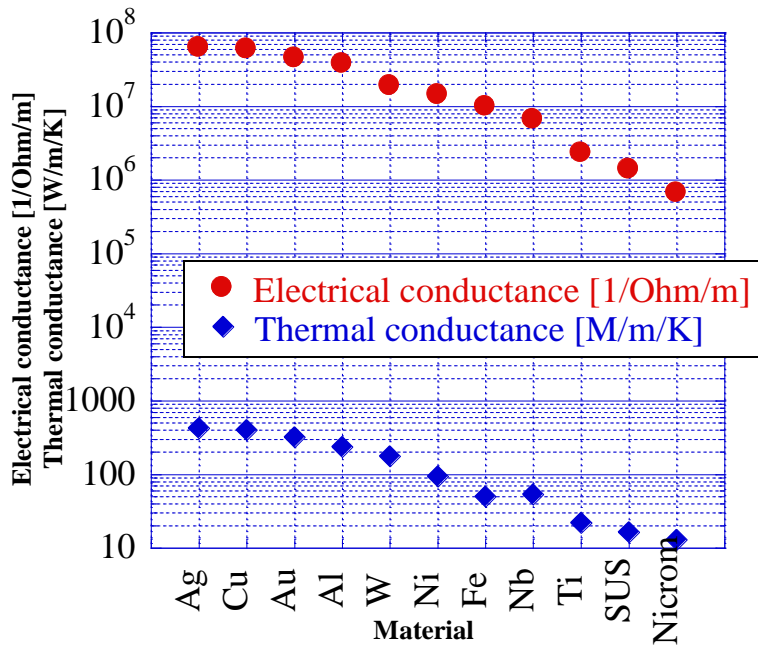
超伝導

- 表面 Nb
- 構造 Nb、SUS、Ti
- 熱伝導 Nb、Cu、SUS
- 液体ヘリウム
- 結合 SUS、Ti



電気伝導と熱伝導

Metal Property



弾性係数 強度 硬さ 熱膨張係数

DC 放電特性

A. Descoedres et al. PRST-AB 12, 032001(2009)

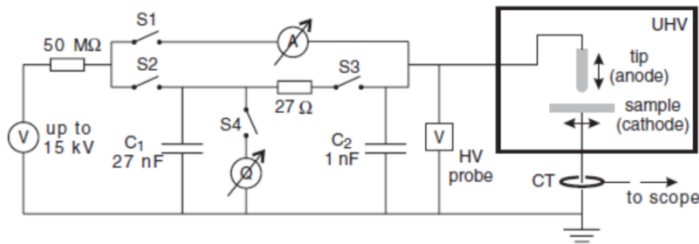


FIG. 1. Schematic drawing of the experimental setup.

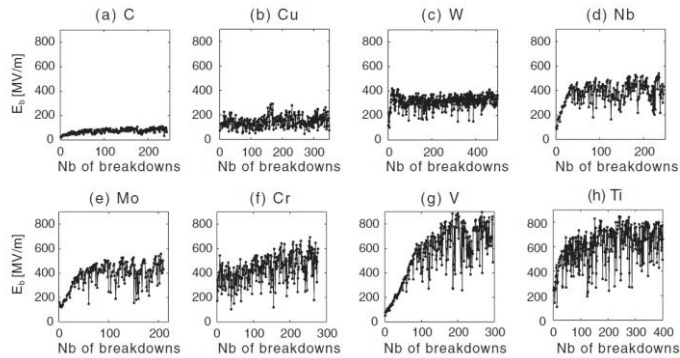
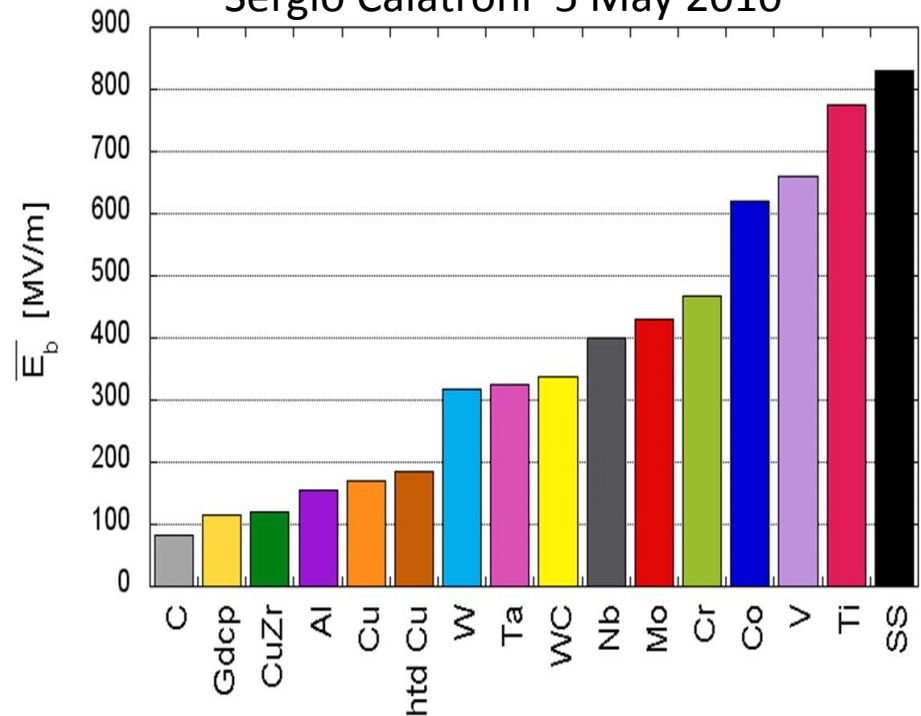


FIG. 2. Conditioning curves of pure metals. The metals are ranked according to their saturated breakdown field.

Sergio Calatroni 5 May 2010



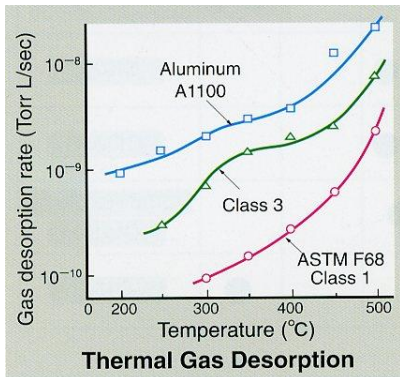
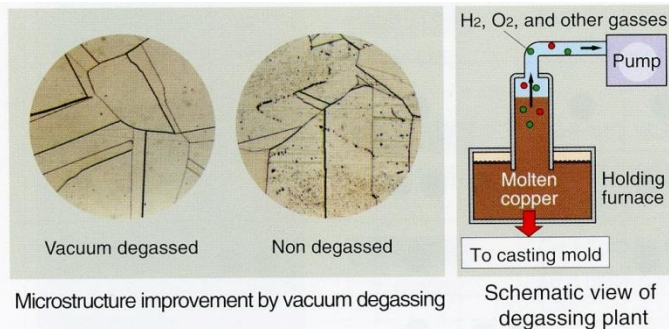
無酸素銅

- 無酸素銅
 - 小林 クラス1 アメリカ標準
 - メーカー 世界 …
 - SLACのお墨付き
 - 三菱・住友・日立(→SHカップー) …
- 銅以外の添加
 - Ag、Zr、アルミナ、……

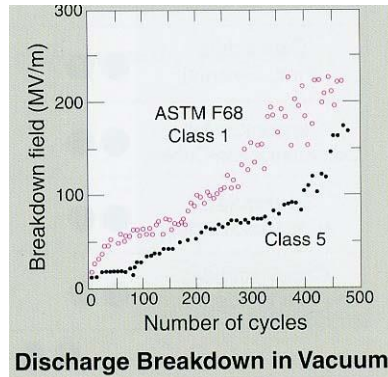
無酸素銅 真空特性

SHカッパー(旧日立電線) & 三菱マテリアル

OFC 日立電線カタログ



小林・斉藤



埼玉大パルスDC試験

三菱マテリアル 組織評価

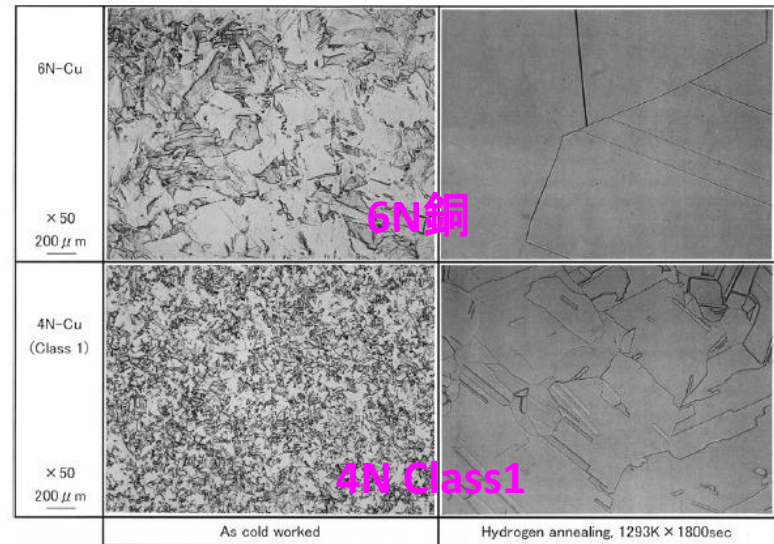
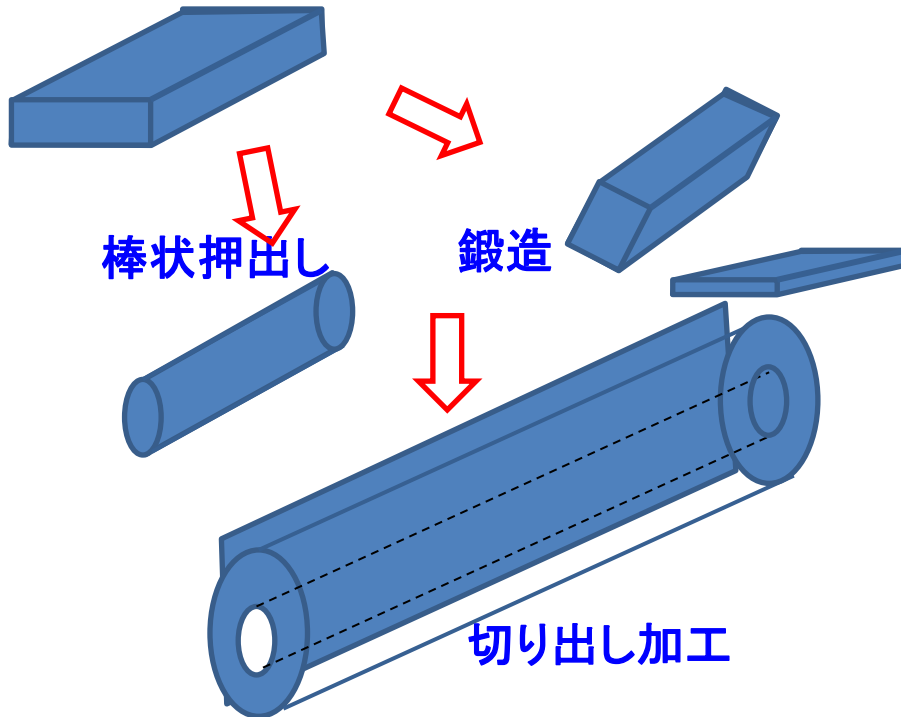


Fig.5 Comparison of microstructures after hydrogen annealing of 6N and 4N copper (ASTM F68-Class1)

製造: ビレット → 熱間引抜き → 冷間鍛造

ビレット



<http://ja.wikipedia.org/wiki/銅>
よりコピー

通常の加速空洞ではビーム通過用穴があり、中心部は用いない。
カプラーセル等、回転対称では無い場所などでの欠陥の問題に注意

結晶欠陥 粒界、ボイド、……

鍛造後の組織検査

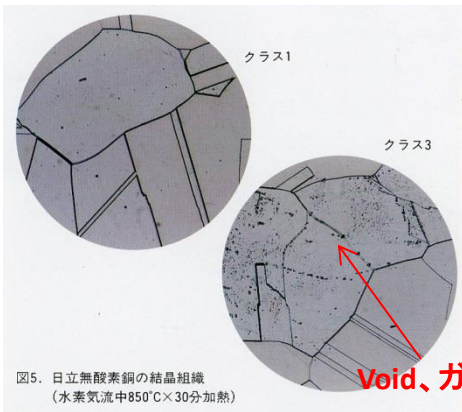
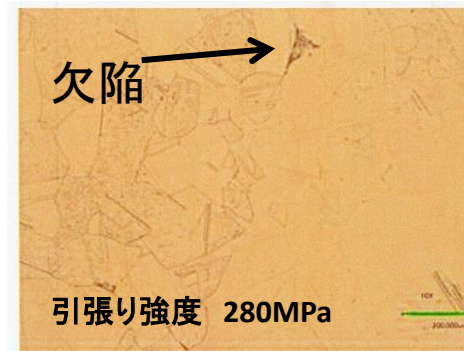


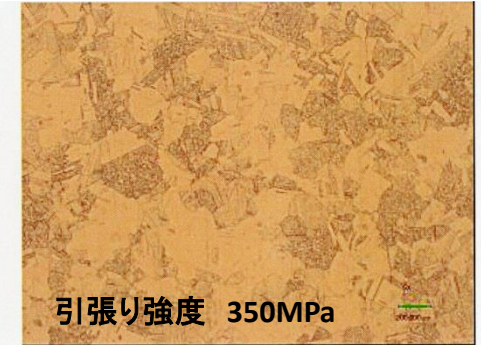
図5. 日立無酸素銅の結晶組織
(水素気流中850°C×30分加熱)

Void、ガス源

日立OFC Class 1, 3



鍛造No.755 断面写真(×100)



鍛造No.841 断面写真(×50)

鍛造不良? 中心部分に起きやすい
→ビームパイプくり抜き形状では問題見えず

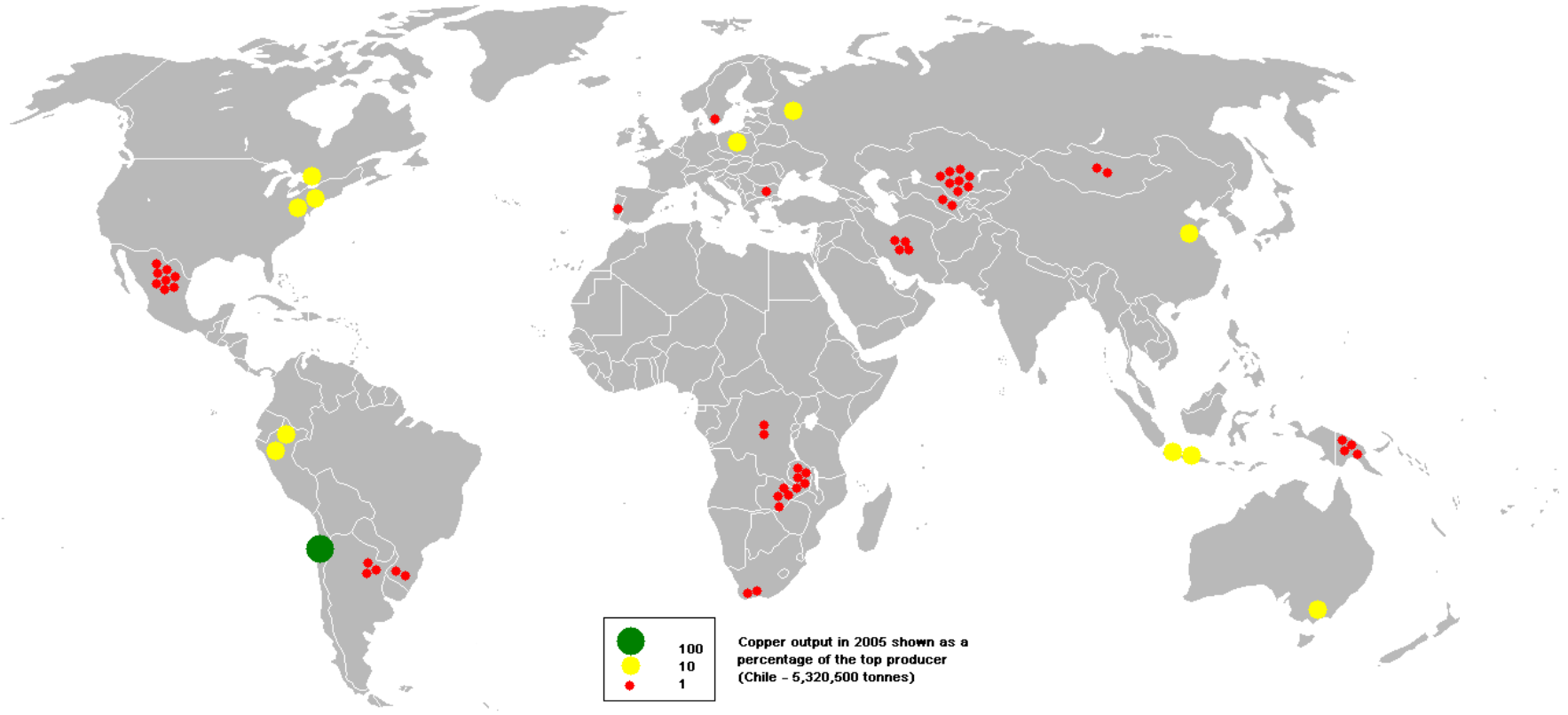
Class 1を用いるのが無難である。が、板材等ではClass-2保証。但し製造方法が変わるわけではない。数十MV/m程度まででは、Class 2でも問題無いようだ。



三菱マテリアル 6N銅

SLACでLC用53cm加速管
(T53VG3N-MC)の中央1/3に隠
し挿入したが、>>50MV/mで、放
電頻度他部分と変わらず(c.
Pearson氏)

銅の生産分布



機械加工

- **加工方法**

- ターニング 加工変質層薄い
- ミリング 表面粗度、加工スピード 漸次改善
- 放電加工 → 後処理大(EP等)

- **回転機構**

- エア、オイル静圧、ベアリング
- 回転速度

- **ツール**

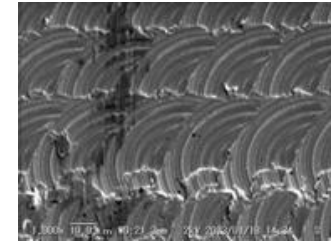
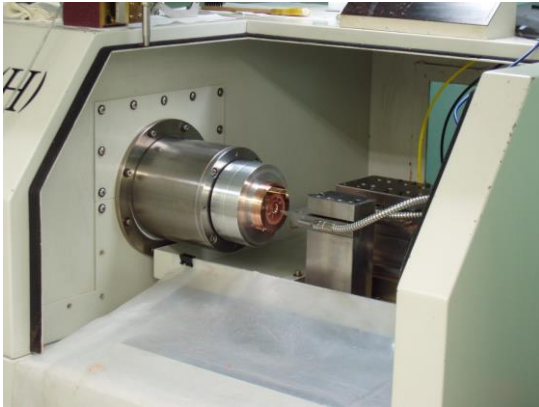
- カーバイド、ダイヤモンド
- 旋盤刃先チップ、エンドミル、ボールエンドミル

- **精度**

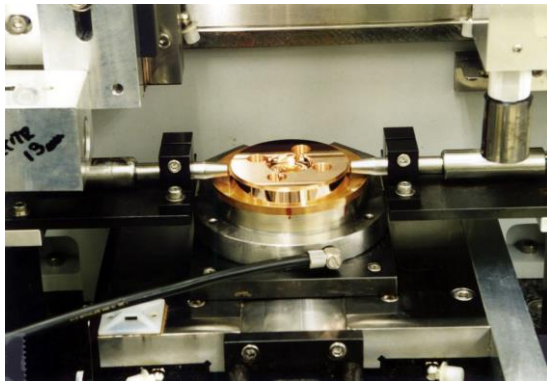
- 位置決め精度、剛性、……
- 刃先の形状計測 μm での計測結構難

精密加工

加速器：絶対寸法・相対寸法 の使い分け、全面加工の必要性



カーバイドツール



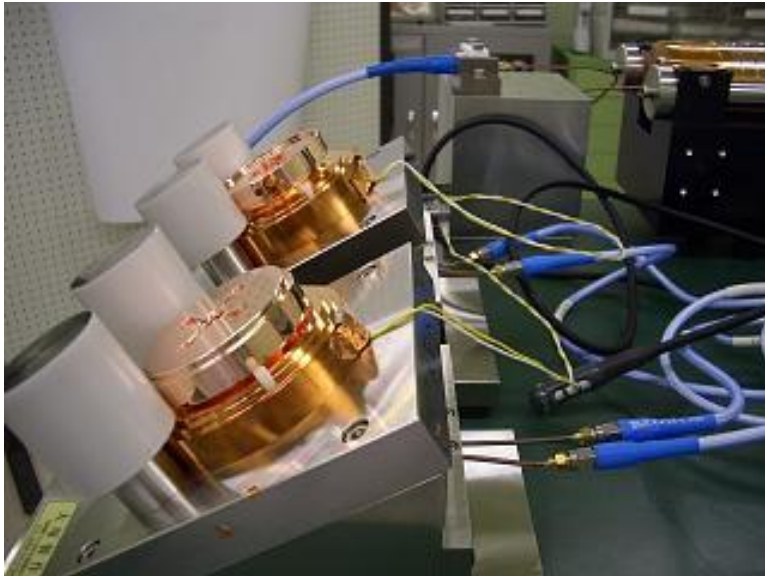
旋盤加工
真空チャック→Z方向基準
半径方向→OD計測



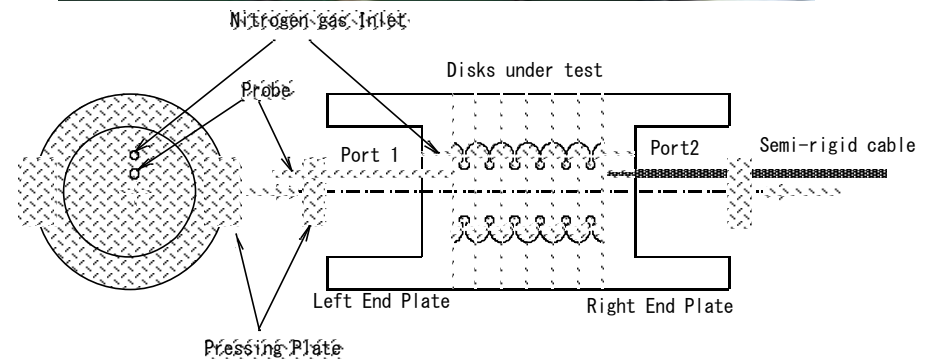
ダイヤモンドリング加工
Ra ~ 6~30nm
加工時間の問題

加工直後の電気チェック(RF-QC)重要

必要に応じて単セル簡便計測

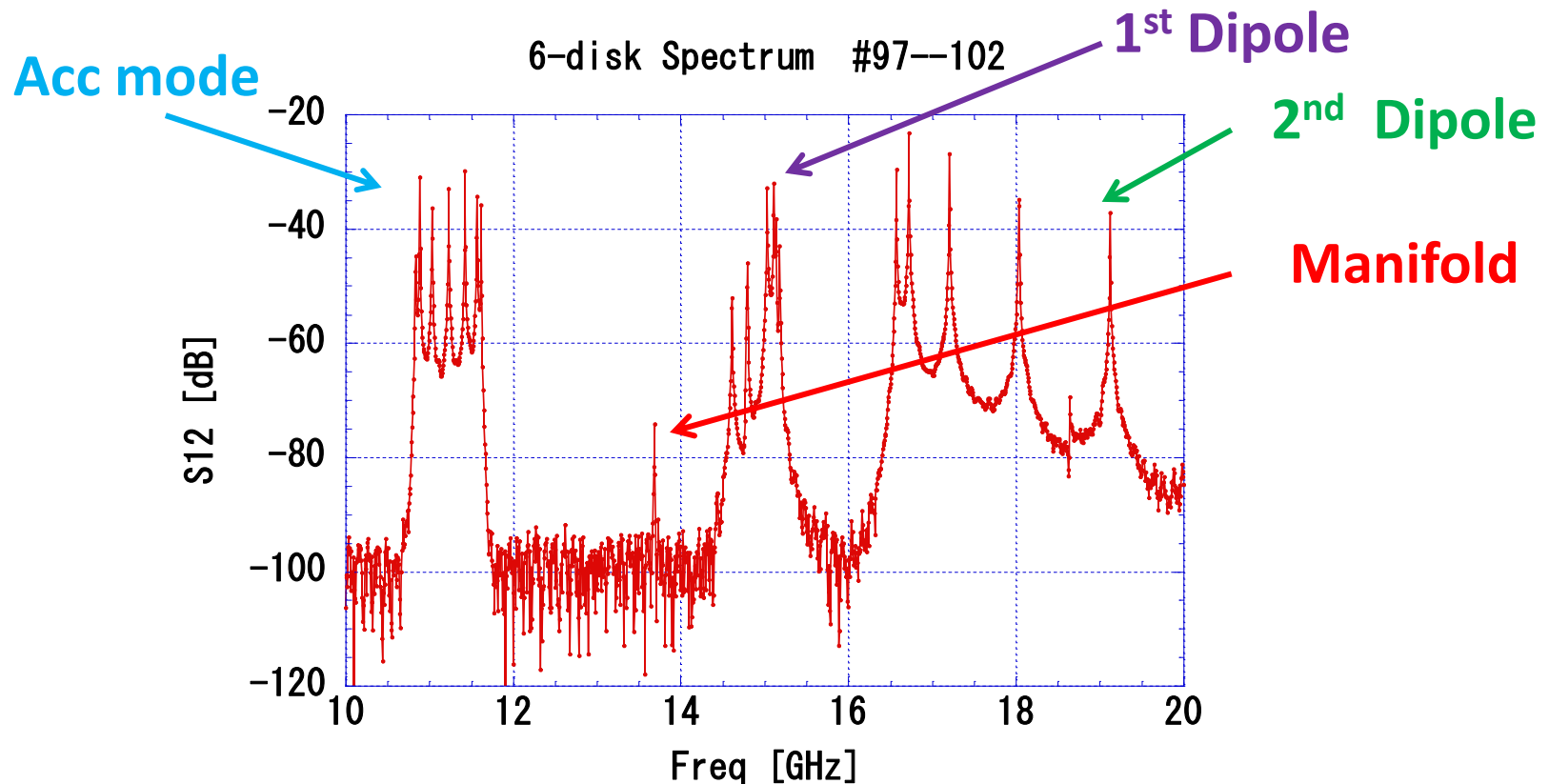


スタック計測



製造の最初でモード、周波数の確認

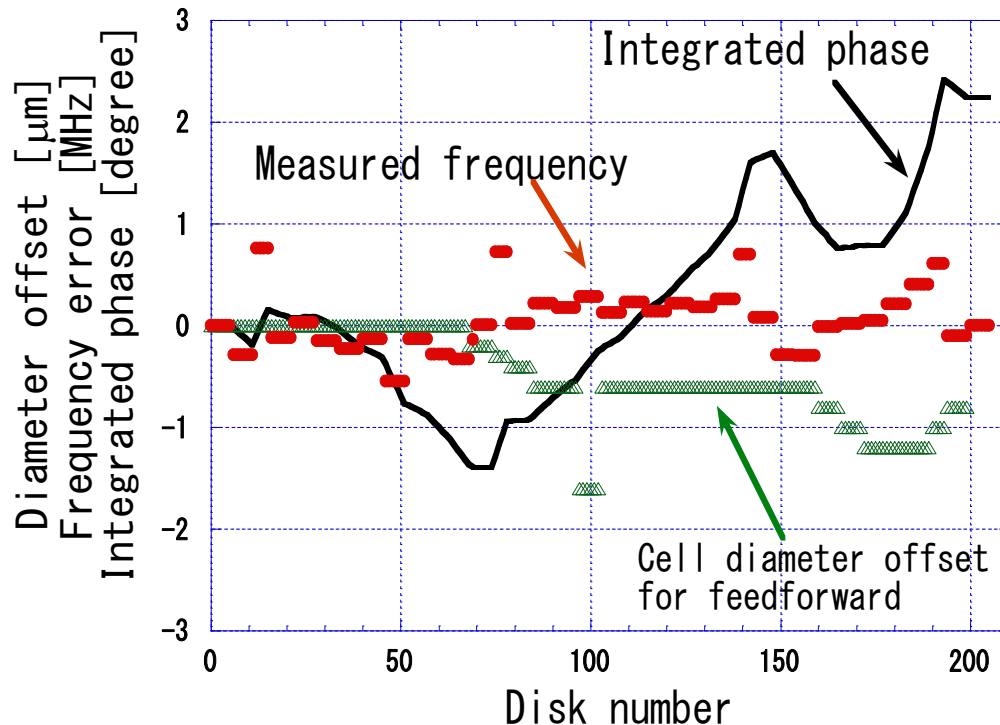
Extract a part along structure and stack 6 identical cells.
Measure dispersion characteristics to confirm the HOM.



RF計測→旋盤加工へのフィードバックも可能

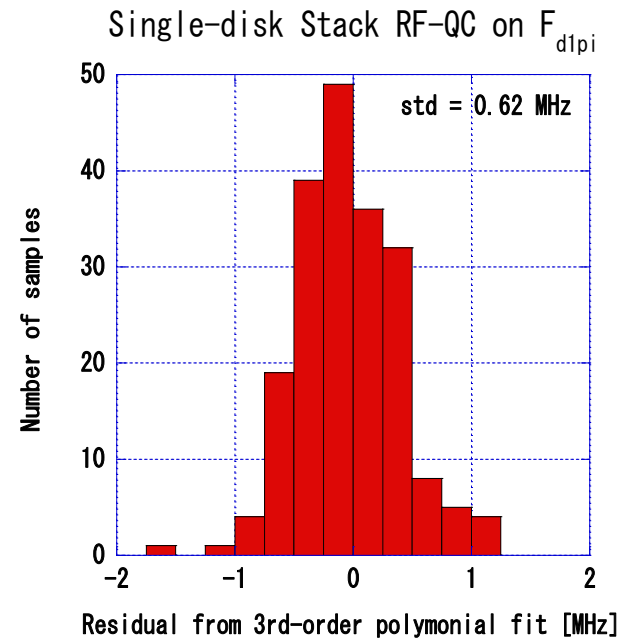
加速モード
先追い補正

$\delta\Phi_0 \sim 3^\circ$
Too good



HOMの精度保持

$\delta F_1 = 0.6 \text{ MHz}$
Too good



The frequency measurement is performed in a simple setup
and offsets are put in NC program easily.

表面変化

- **材料**: 鑄造 → 熱間加工 → 冷間加工
- **成型**: 機械加工
- **表面改質**: 洗淨、エッチング
- **表面保護**: コーティング
- **母材の改質 & 組立**: 高温処理
- **高周波での表面改質**: RFプロセッシング
- **経時劣化**: 長期高電力・ビーム運転

洗浄 エッチング

KEK: 基礎とした工程



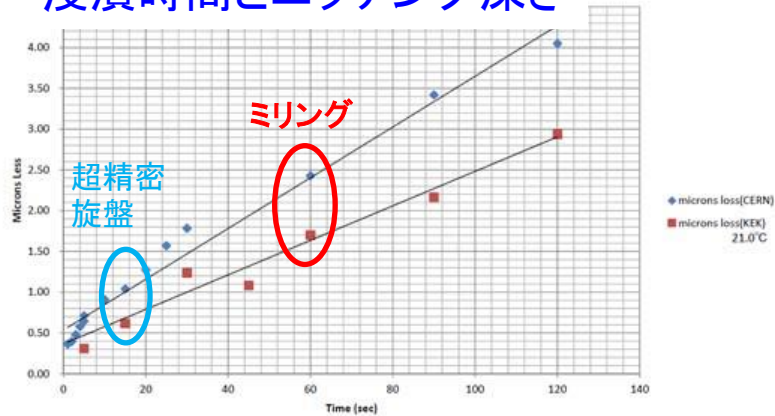
加工変質層の除去
表面汚染の除去



経験ある施設
+
工程の意味把握



浸漬時間とエッチング深さ



パーツ段階の洗浄～組立後の洗浄

• パーツ段階洗浄

- 有機洗浄
 - オイル等
- エッチング
 - SLAC Recipe 模擬
 - 化学洗浄、電解研磨
- 純水リンス
 - アルコール、アセトン等揮発性液に浸漬
- 乾燥
 - 窒素ブロー、窒素雰囲気

洗浄工程

工程	内容	時間
洗浄ジグ取付	水中で取付ける チューニングホール内に水を満たす	
アルカリ脱脂	エスクリーン AL-13 (75g/L, 42°C)	3min
酸洗	塩酸×超純水(50%) 【振動】 一次洗浄(純水 溜め水【振動】) 一次洗浄(純水 シヤワー)	1min
エッチング	エッチング【振動】 一次洗浄(純水 溜め水【振動】) 二次洗浄(純水 シヤワー)	15秒
リンス	ジグ取外し(純水タンク内 チューニングホール内洗浄) 超純水洗浄(超純水 常温) 超純水洗浄(UPA 常温)	0.5min 0.5min
乾燥	ブロー(純窒素G3) 乾燥機(60°C)	5min
保管	デシケータ-保管(純窒素G3置換)	

表面の酸化を防ぐため、リンス工程の見直し

• 組立後の洗浄

- 純粋高圧洗浄
 - 物理的パーティクル取り、化学的効果は??
 - 超伝導の技術として開発 100気圧級
 - Sバンド 無酸素銅空洞へ 数分の一の圧力

組立後の洗浄例 Sバンド2m管試験

五十嵐 KEKB2m加速管試験

表1：3種類の加速管の試験結果.

Type	Time [hours]	Shot [$\times 10^7$]	Maximum average field [MV/m]	Peak dark current [μA]		β	
				up	down	up	down
(1)	572	10.3	40*	569	631	52	53
(2)	811	14.6	45	722	1130	54	55
(3)	356	6.4	45	295	224	68	53

(3) 純水洗浄管

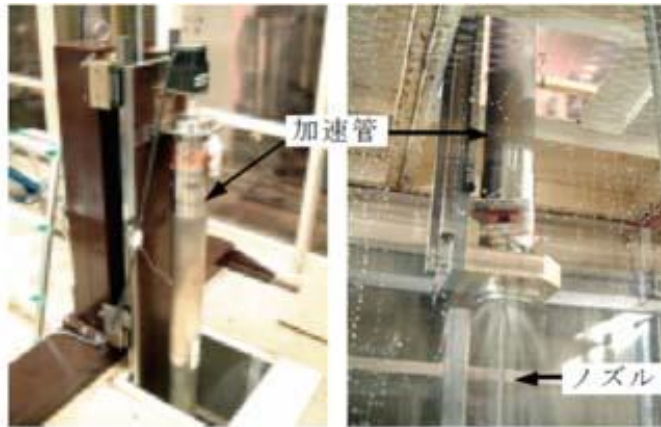
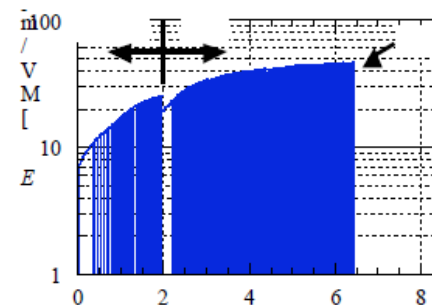
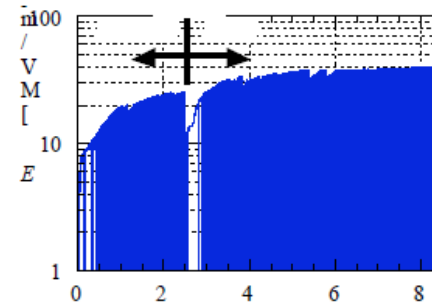
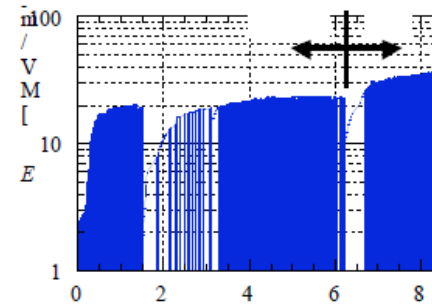


図 1: 2m加速管の超純水高圧洗浄.



速いプロセ
シング立ち
上がり

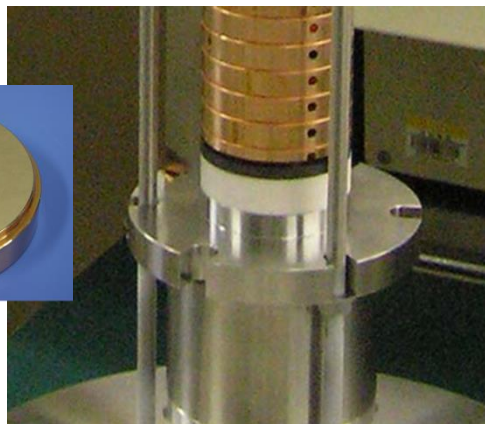
低暗電流

高 β ?

組立



インロウ ~10 μ 級



外周Vブロック当て ~1 μ 級

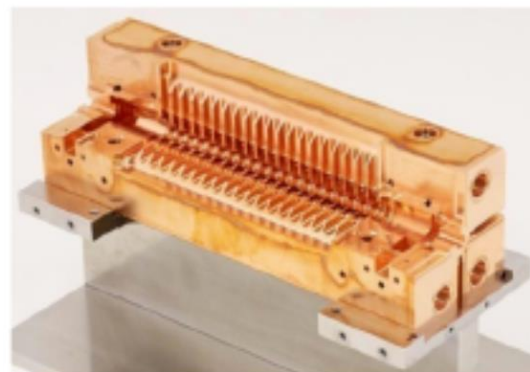


必要に応じて治具を凝れば1ミクロン級は可能

Brazing stacking
provided by a robot



P. Craievich Swiss FEL
HG 2013 Trieste

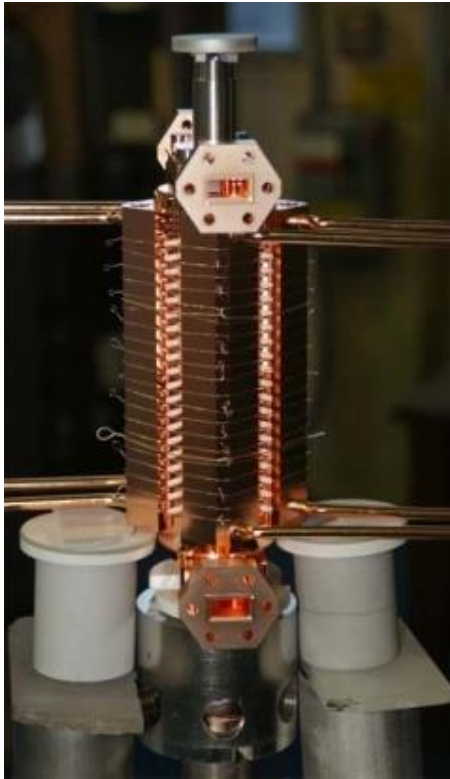


分割 Quad / Half 方式
~数~10 μ m

接合技術 問題が頻繁に発生

- **ろう付け**
 - 水素・真空 標準的
 - 銀ろう、金ろう、その他、In等 低温ろう 可不可??
- **電鑄**
 - 外部のみ固める、運転時のベーク不可
- **拡散接合**
 - 高温(可能)、常温(未開発)
- **溶接**
 - TiG、EBW、Laser・・・
- **クランプ方式**
 - 熱処理無しの材料を使える
 - 真空チェンバー必要

ロウ付け



Brazing

古くから確立されてきた技術
1気圧水素、パーシャルガス、真空
ロウ剤流れ→フロート、スリップ
融点、……溶ける・溶けない

拡散接合

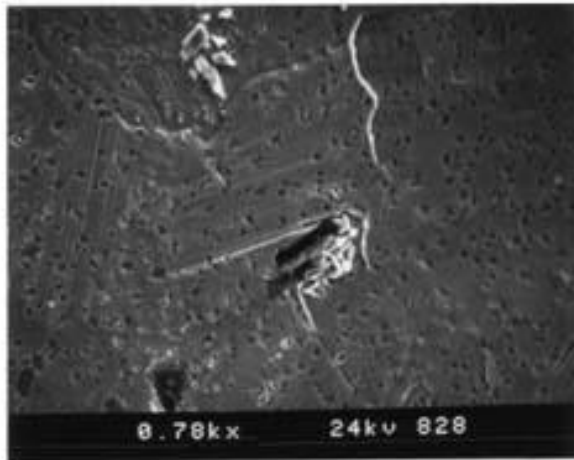


Bonding

加速器には比較的新しい
固相→スリップ無し、
現状 高温拡散、変形にも通ずる
母材改質？

真空炉での表面悪化例

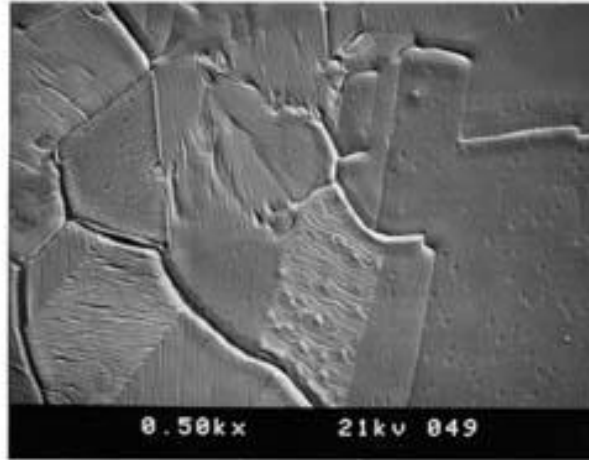
SEM view of samples from vacuum furnaces



As of T53VG5F

Mn、Fe、……等

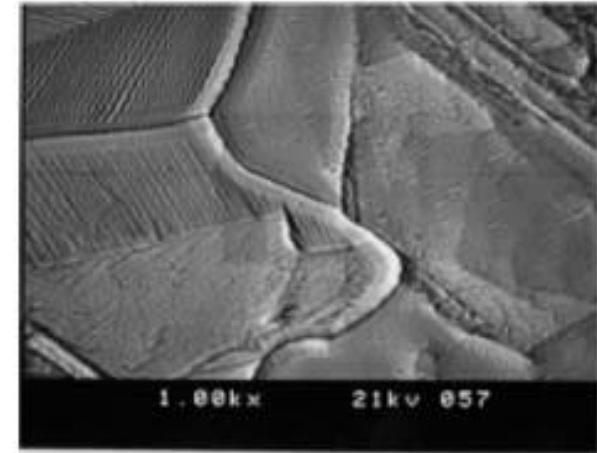
Feb. 2001



After oil DP renewed

正常？

Apr. 2001



Before T53VG3F

IHI @ Kure

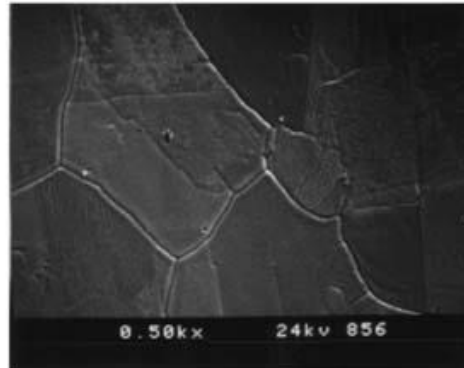
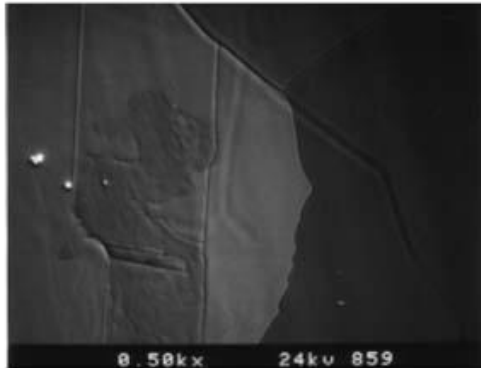
May 2001

結晶成長、粒界顕著、結晶方位 Facet、……
炉壁等からの不純物の飛散注意→炉管理重要

水素炉・・・真空炉

表面なだらか

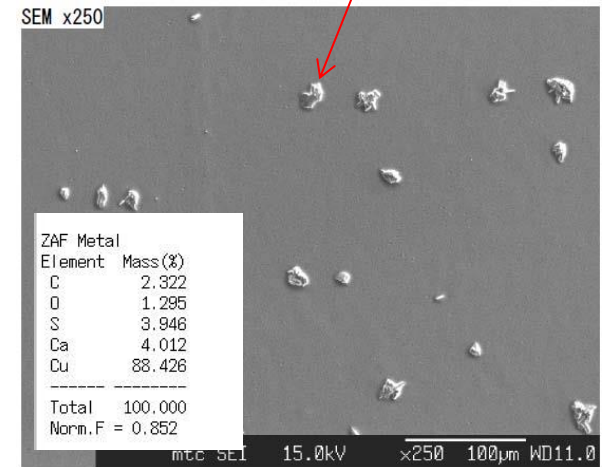
結晶粒界、Facetting



KEK 水素炉
ロウ付け

KEK 真空炉
拡散接合

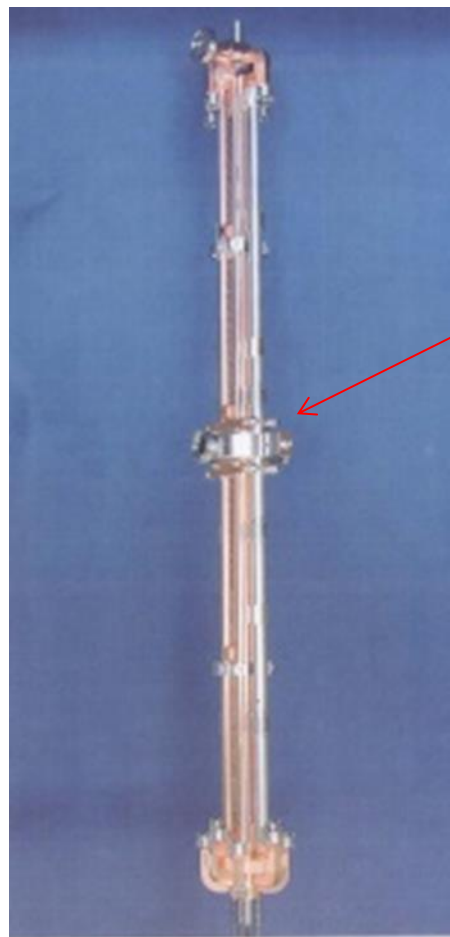
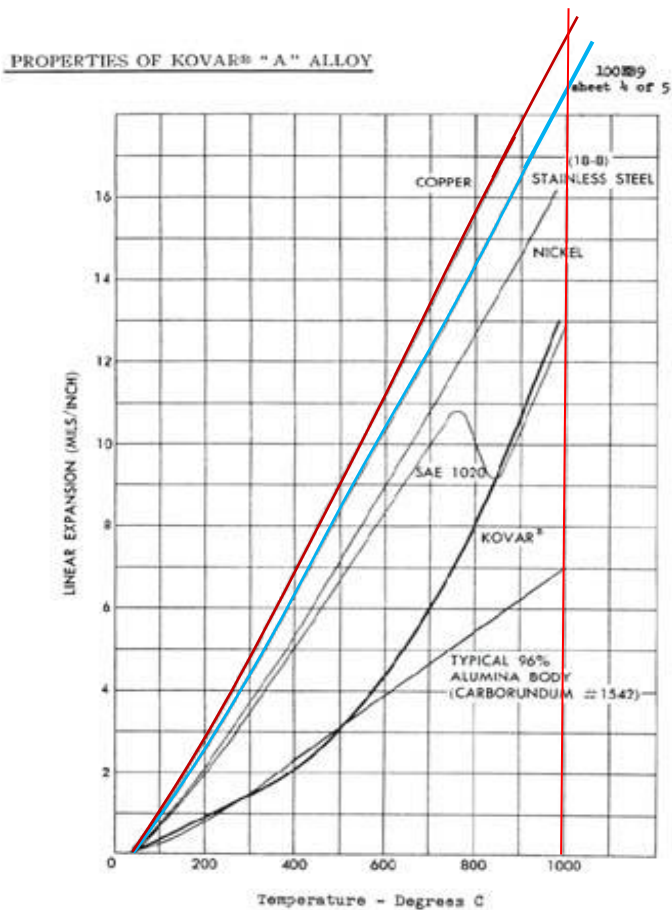
Ti以外の混入



真空炉
Ti Box内サンプル
1040°C 1時間

水素炉(atm, パーシャル) 表面昇華再付着で滑らか、水素露点管理
真空炉 ヒーター、炉壁、炉床からの飛散防止策 要

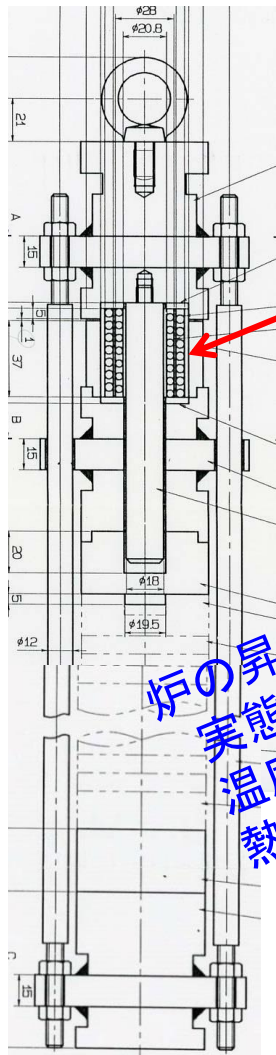
接合失敗例 熱膨張



1000°C
SUSチェンバー
ロウ付け
↓
本体の銅部
φ60mm
50μm級
半径方向に拡大

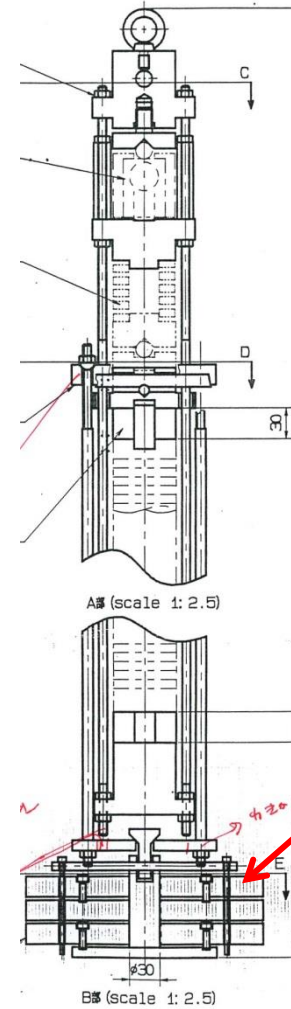
$\Delta T \sim 1000^\circ\text{C} \rightarrow 1.2 \times 10^{-3}$
 $\phi 60\text{mm} \rightarrow 70\mu\text{m}$

接合失敗例 大物の接合



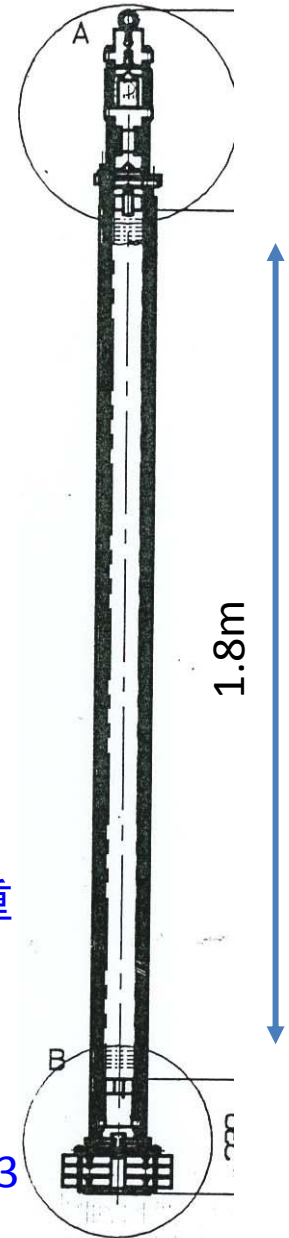
DDS3 Dummy
スプリング破壊

炉の昇温・降温のスピード管理
実態温度と測定温度の違い
温度分布が以外に大きい
熱容量、接合前の熱伝導、……



荷重

DDS3



接合失敗例 端面癒着

Alumina ceramics

→ Graphite Scratch

→ Si_3N_4 3元系、900°C → 癒着 フレア

→ Glassy Carbon

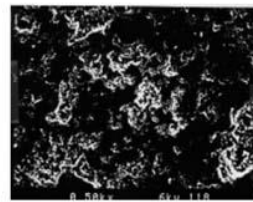
グラファイト

Copper surface mating with graphite block



DB後の端面

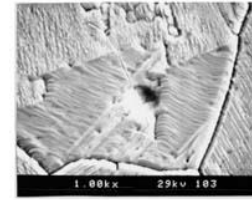
フレア矯正



Diamond-turned
Graphite surface



Kure furnace
end copper surface
mating with
diamond-turned graphite



Kure furnace
end copper
mating
conventional-layer



グラッシー
カーボン



チューニング

- SW

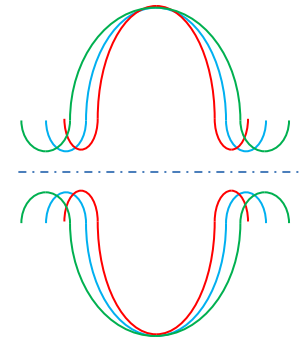
- 空洞周波数計測しながら空洞壁の変形
- 空洞内フィールドのパターンを見ながら、摂動計算に
そって補正方向にしかるべきセルの壁を変形

- TW

- ビード、プランジャーでのセル間の位相進み計測
- 周波数の誤差を評価し、これを減少させる
- マッチング等に必要なた反射ベクトルを生成するための
の下流セルのミスマッチ

摂動

$$\frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0^2} = \int_{\delta V} (H^2 - E^2) dV$$

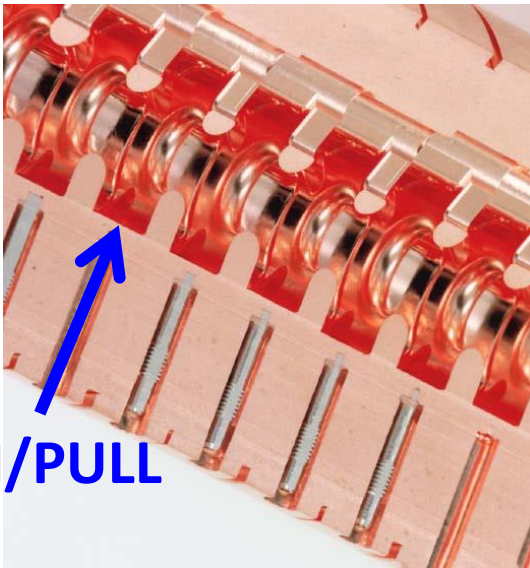


SCC cavity tuning

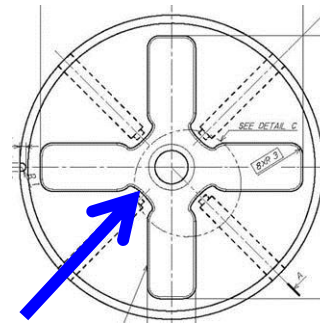
Blue nominal freq

Freq up green

Freq down red



PUSH/PULL



Dimple tuning

微小反射とチューニング

Express wave propagation

$$V_k = \begin{cases} 1e^{-k(j\theta+\Gamma)} + Re^{-2m(j\theta+\Gamma)} e^{k(j\theta+\Gamma)} & \text{for } k \leq m \\ Te^{-k(j\theta+\Gamma)} & \text{for } k > m \end{cases}$$

From continuity at m-th cell, $T = 1 + R$

From coupled resonator model,

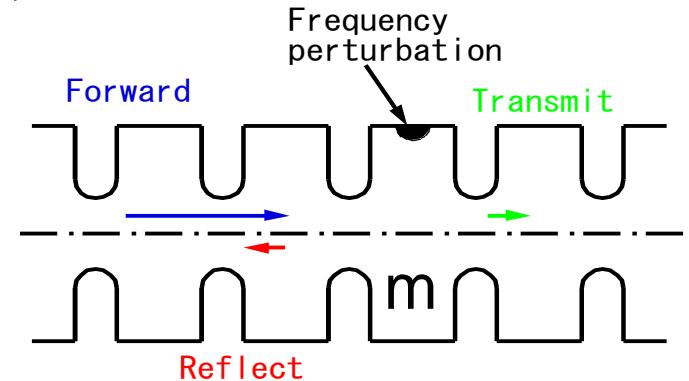
$$(\delta\omega_m^2 + \omega_m^2 - \omega^2 + j\frac{\omega\omega_m}{Q_m})V_m = \frac{1}{2}\omega_m^2(k_{m-1/2}V_{m-1} + k_{m+1/2}V_{m+1})$$

Finally reflection from cell m becomes,

$$R = \frac{\delta\omega_m^2 / \omega_m^2}{\delta\omega_m^2 / \omega_m^2 + k_{m-1/2}(\Gamma \cos\theta + j \sin\theta)}$$

Assume; loss-less TW with $2\pi/3$ mode, $k \sim 0.02$, $\delta\omega^2/\omega^2 \sim 10^{-4}$

$$R \approx \frac{\delta\omega_m^2 / \omega_m^2}{k_{m-1/2} \sin\theta} \approx \frac{10^{-4}}{0.02(\sqrt{3}/2)} \approx 10^{-2}$$



Γ : 減衰項=0 (Loss less)

→ R: インダクティブ

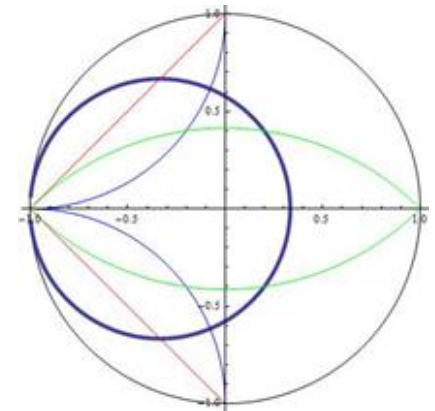
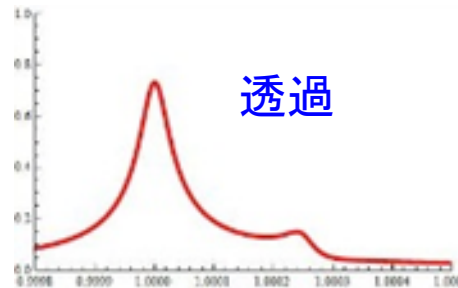
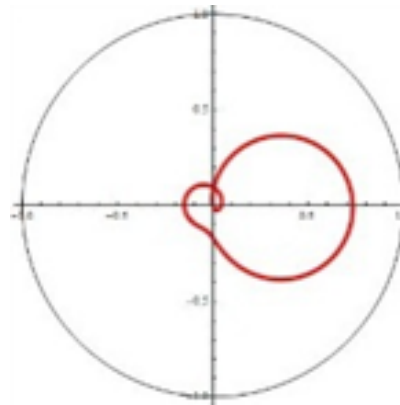
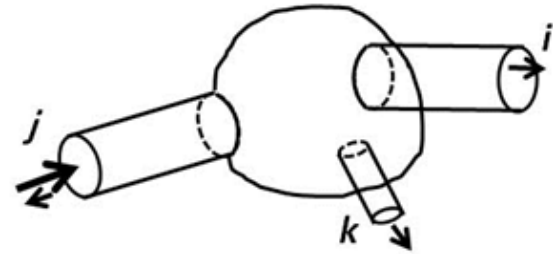
→ 反射位相決まる

→ セル位置変えて位相調節

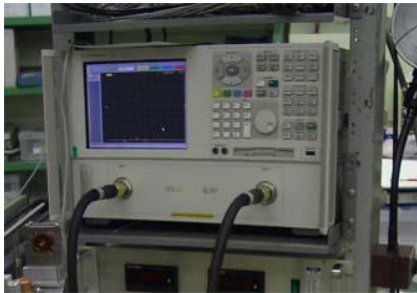
反射作するために必要な
デチューニング量の見積

空洞の測定

- 今 : Network analyzer
 - S-parameter
- 昔 : Slotted line 計測
 - VSWR
- Plots
 - Smith chart
 - 反射平面



Sパラ計測 Network Analyzer 昨今



Slotted line & Crystal



Scalar NA



Vector NA 8510 数段ラックマウント



TRL Calibration 12パラメータ



Portable 8720



周波数精度 10^{-7}



Windows based 5230



N-port



Q値 計測

- 周波数ドメイン

- NA出現で容易
- 幅、位相進み

$$T(f) = \frac{4\beta_1\beta_2}{(1+\beta_1+\beta_2)^2} \frac{1}{(1+4Q_L^2\delta^2)}$$

$$\delta \equiv \frac{f-f_0}{f_0}$$

- 時間ドメイン(減衰)

- $Q \sim 10$ 、 $Q \gg 10^8$ の場合
- RF計測
- ビーム励起

$$W(t) = \sum_{\omega} \left(a_{\omega} \cdot e^{-\omega t/2Q_L} \cdot e^{j\omega t} \right)$$

- Slater tuning curve

- $Q \sim 10$

$$\tan \frac{2\pi d}{\lambda_g} = \sum_a \frac{1/Q_{ext,c}}{(\omega/\omega_a - \omega_a/\omega)}$$

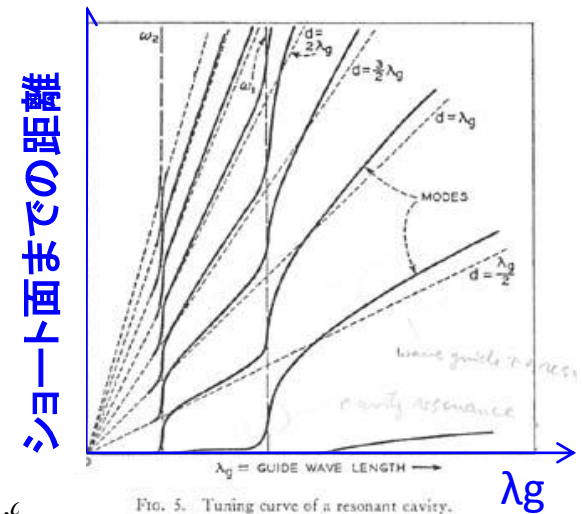
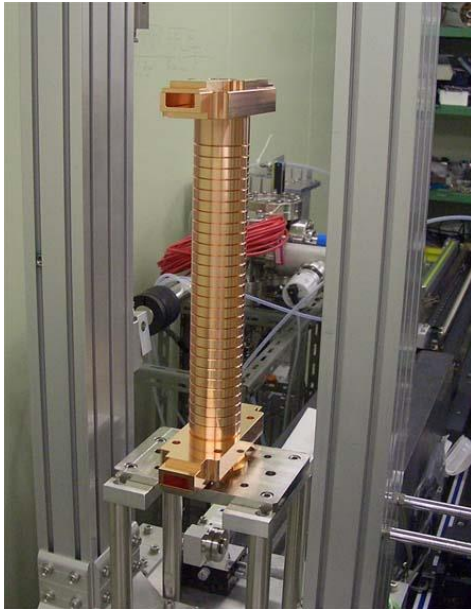
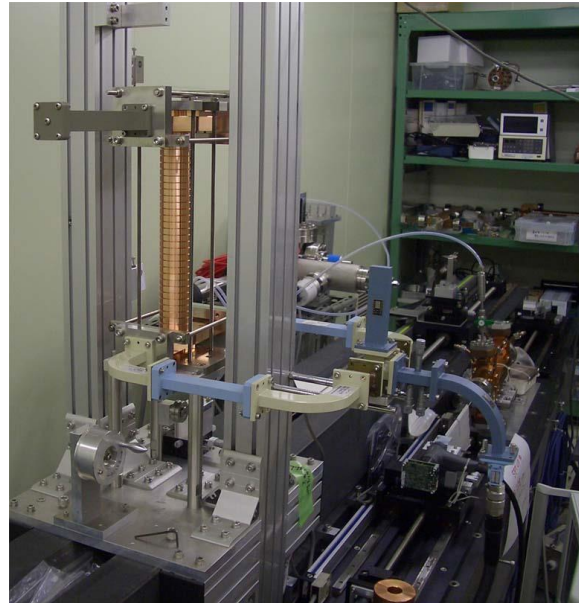


FIG. 5. Tuning curve of a resonant cavity.

組立 接合前、接合後チューニング時 RF特性のSパラ計測



スタック
+
クランプ
+
仮カプラー等

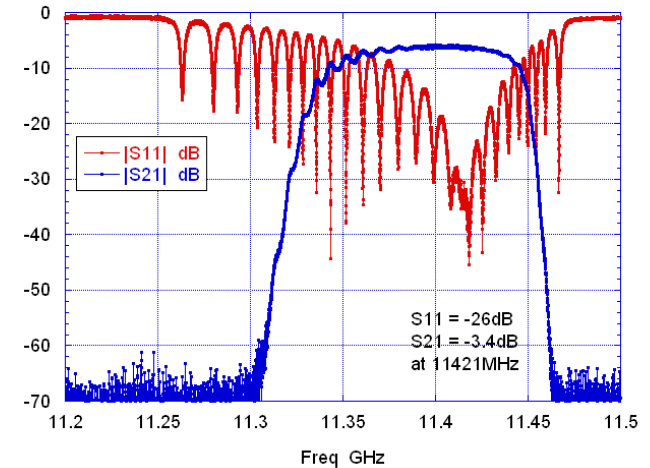


空気/窒素ガス中
低電力ロード
結合回路
摂動子
.....

反射、透過 特性

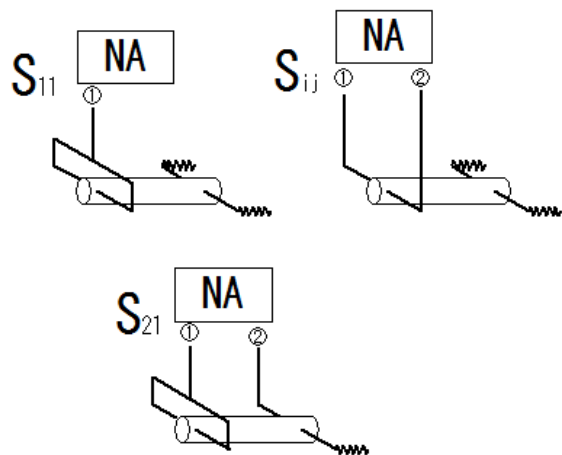
T24_SLAC-KEK_#1(A)_S11_S21

Meas. in air with T_{wall}=21.5C, H=20%

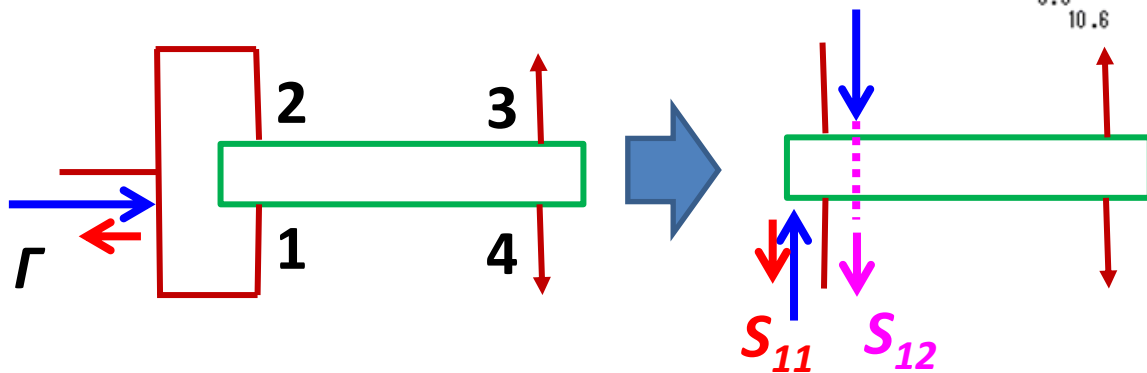


091229

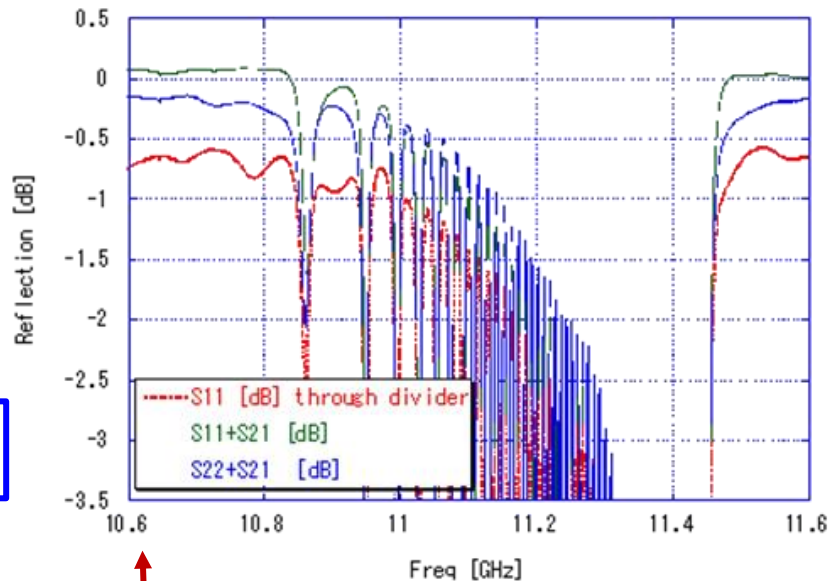
対称性を持つマルチポートデバイスの 2ポートNA計測



$$\Gamma = S_{11} + S_{12} = S_{22} + S_{21}$$



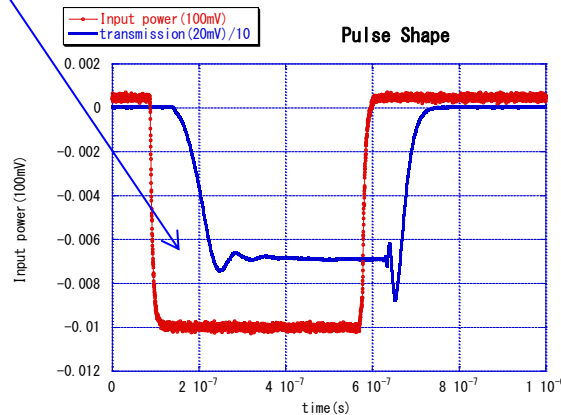
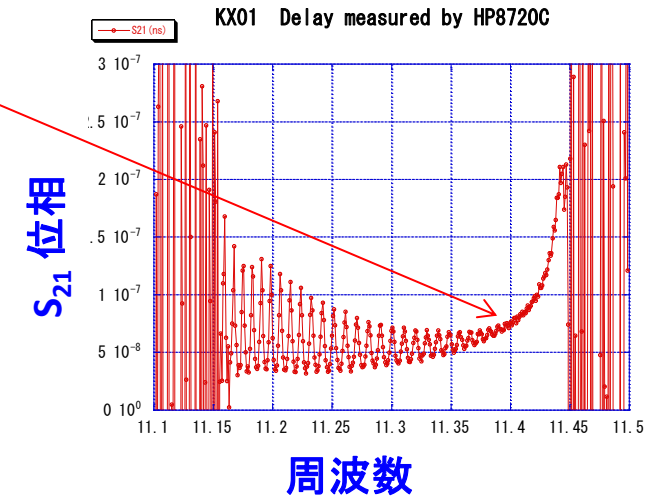
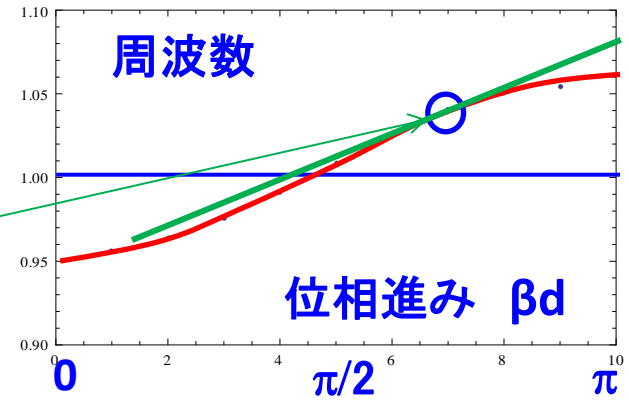
KX02 Input Coupler Matching



- Dividerの広帯域での mismatchが見えてしまう
- 中心周波数部分は再現できる

群速度

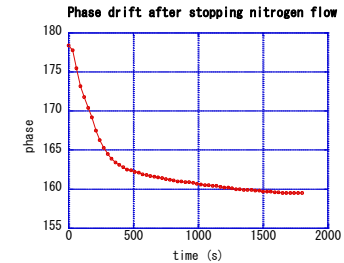
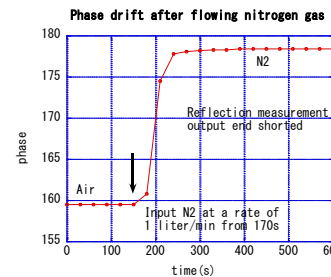
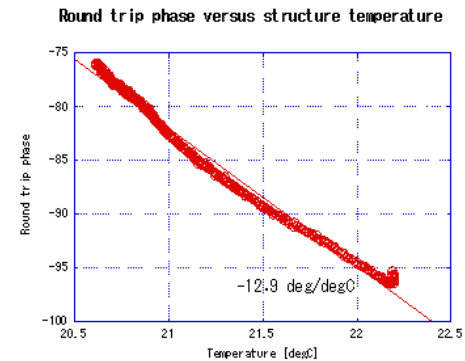
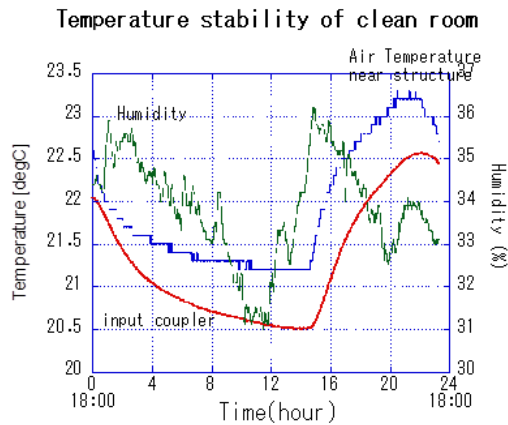
- 分散関係
 - SW 分散関係 $\delta\omega/\delta\phi$
 - TW NA $\delta\phi/\delta\omega$
- 加速管充填時間計測
 - TW 時間遅れ



注意：計測環境の制御（特に位相計測時）

$$F_{operation} = F_{measurement} \times \left\{ 1 + \alpha \times (T - 45) + \frac{\epsilon - 1}{2} \times \frac{20 + 273}{T + 273} \right\},$$

$$\frac{d\Phi^{RoundTrip}}{dT} = 4 \cdot \tau \cdot Q \cdot \alpha = 14 \text{ deg ree / deg C}$$



温度、湿度、気圧、窒素フローレート、……クリーンネス

内部電磁界分布の摂動計測

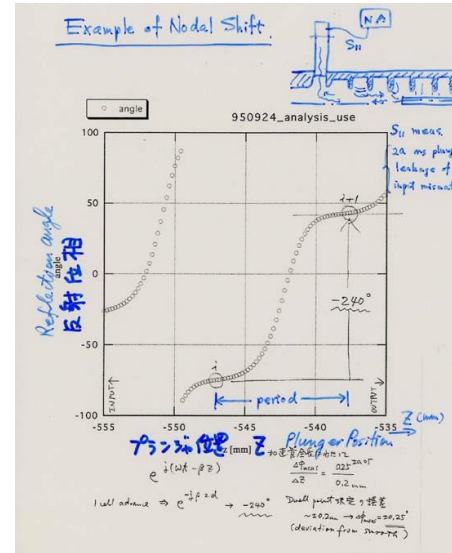
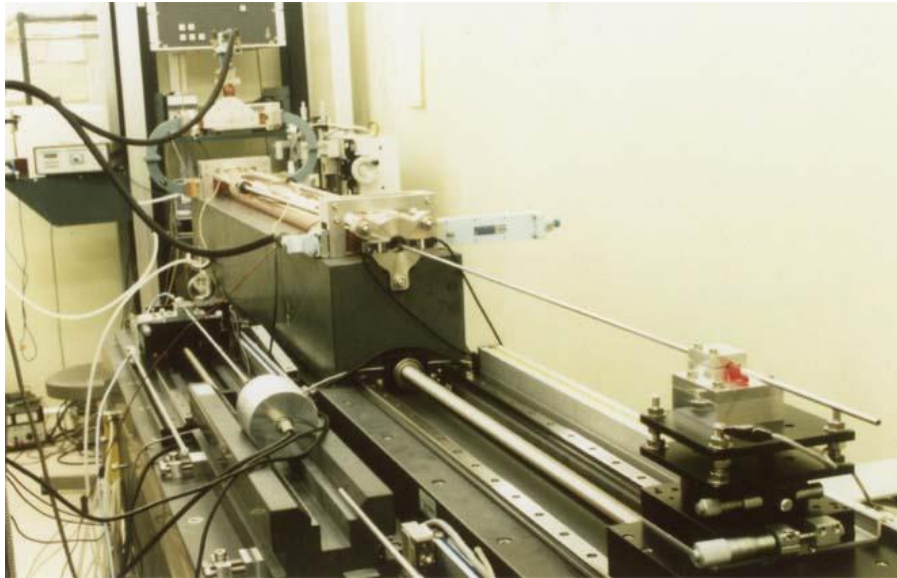
- ビードプル

- 糸 + 摂動体
- 計測量 電磁場²
- SW: 周波数変化
- TW: 反射係数変化

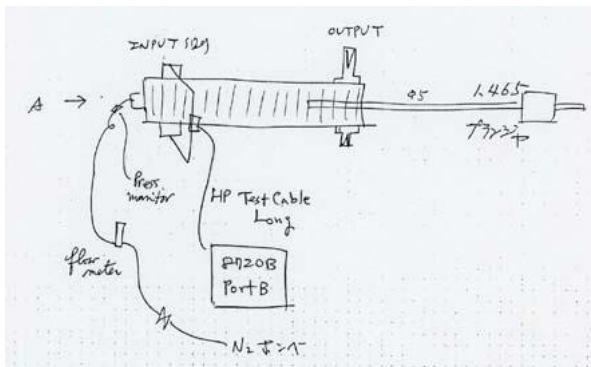
- プランジャー

- 金属棒差し込み → セルデチューン
- SW: 両端境界条件 ← → デチューンセル
- TW: Nodal shift法 ← → 直前での反射位相

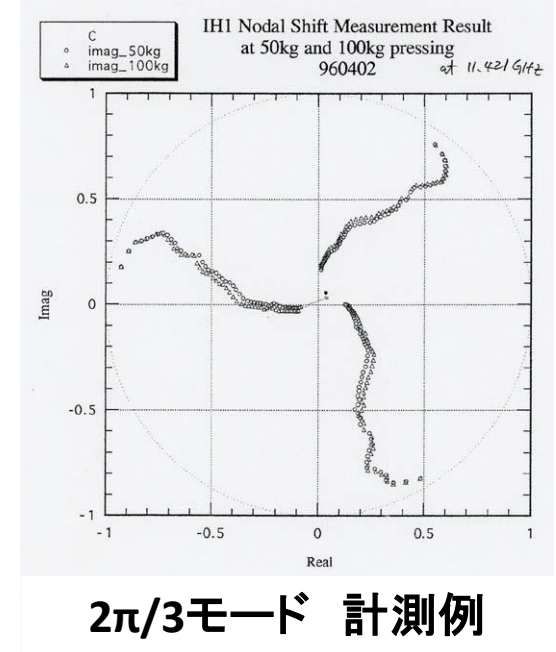
プランジヤー



縛付圧 依存性

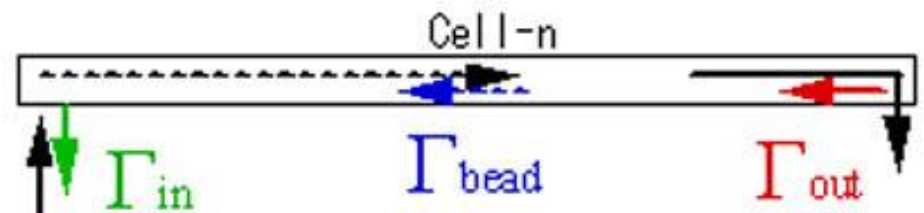
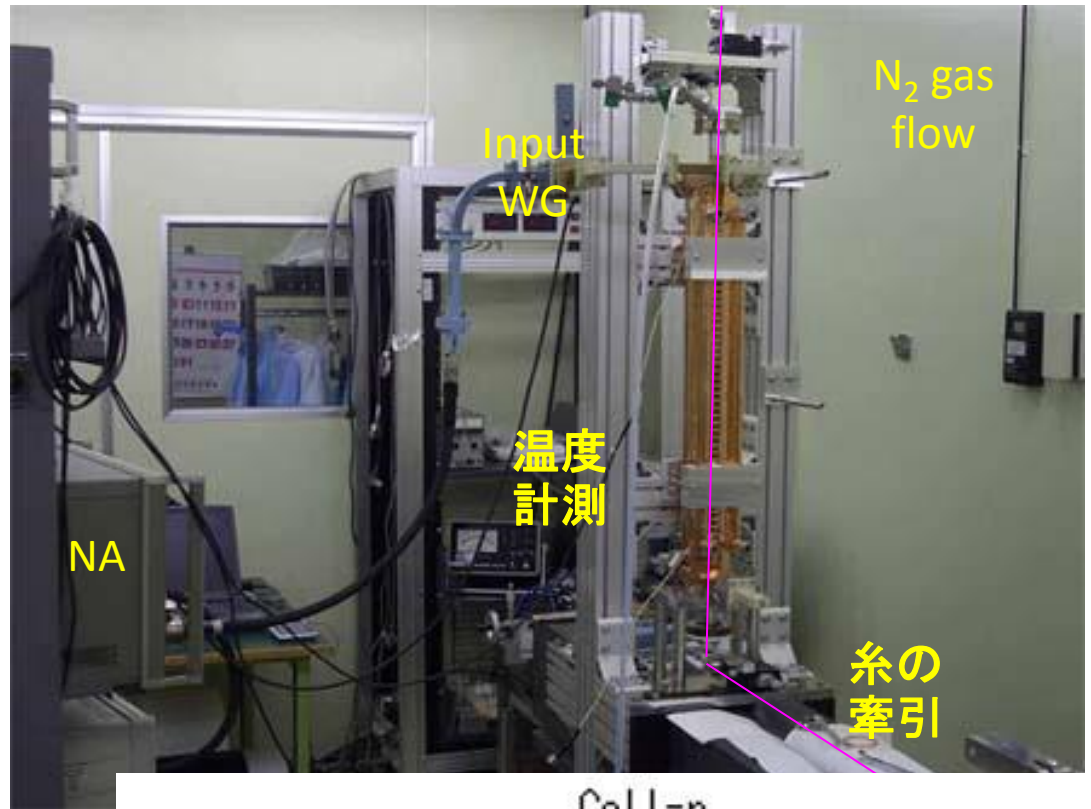
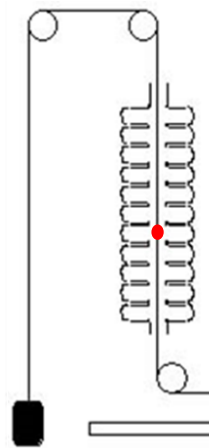
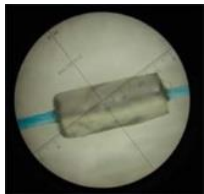
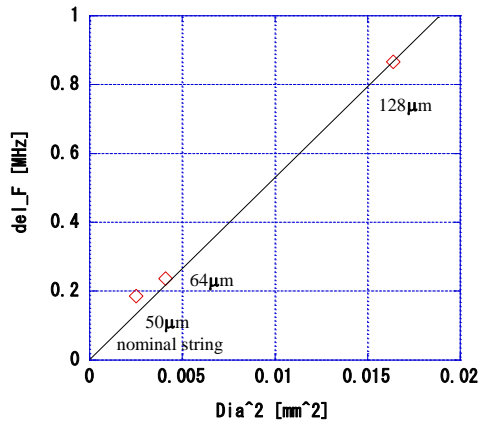


Pro
クリーン化容易
Con
デチューン鈍い
(@vg大)



ビードプル

糸による周波数変化



$$\Gamma_{Measure}^n = \Gamma_{Input} + e^{j2n\gamma} \epsilon E^n + \Gamma_{Output} \cdot e^{j2N\gamma}$$

ビードによる計測の基礎

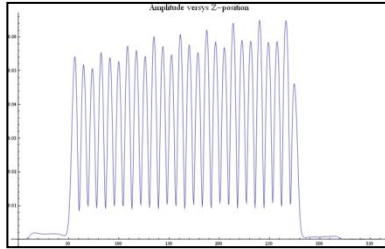
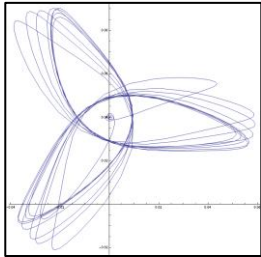
- SW

- ビードによる周辺電磁場の摂動→周波数(位相)の変化
- Slater perturbation定式化
- ビード形状効果 → 単なる無摂動の体積積分では無く、周辺の場の変化によること注意

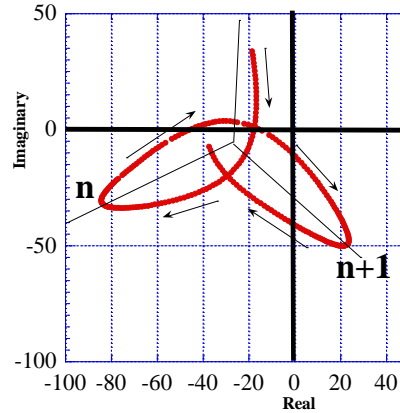
- TW

- ビードによる電磁波の散乱
- Non-resonant perturbation theory

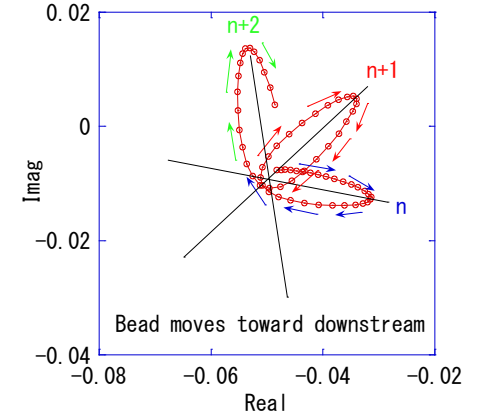
ビードプル 計測例



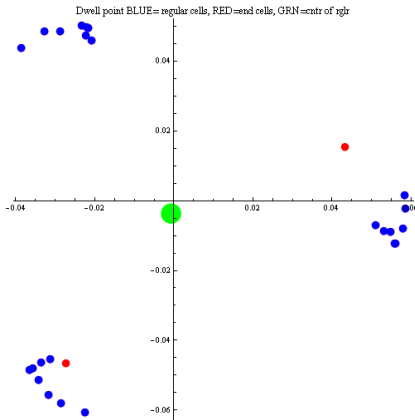
2π/3モード



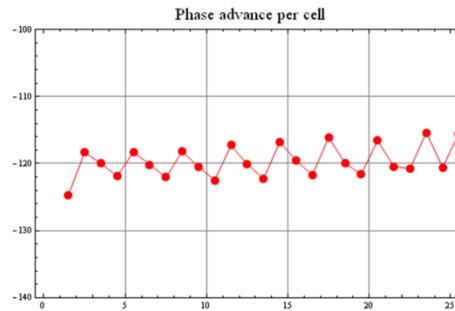
5π/6モード



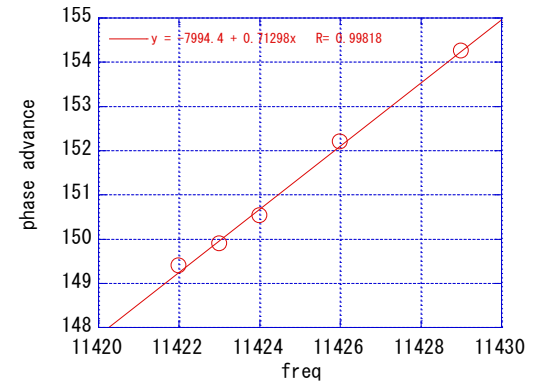
Dwell pointでの複素反射係数



セル毎の位相進み



位相進みの周波数依存性

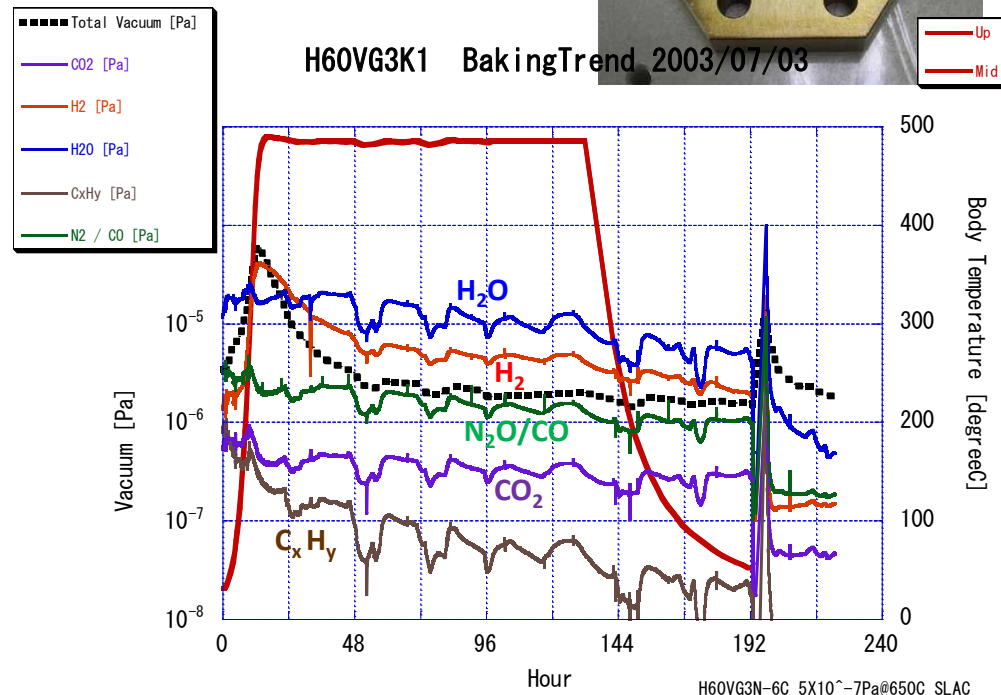
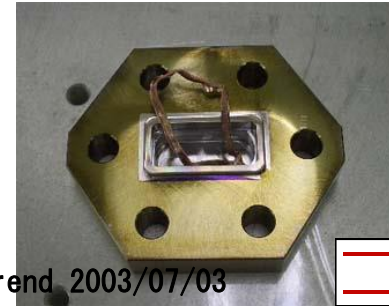


ベーキング 効果、努力



SLAC 650°C
~2週間
VACベーキング
VAC缶内に設置

二重排気
500°C弱、>1週間
ガスケット問題
水素1桁程度!?

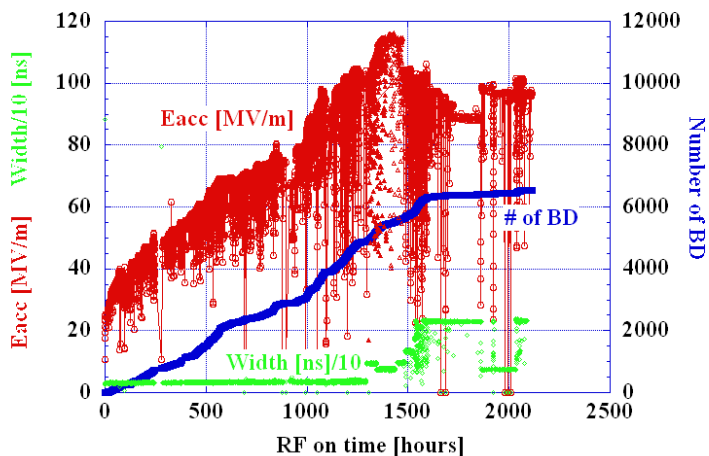


プロセッシング & キーワード

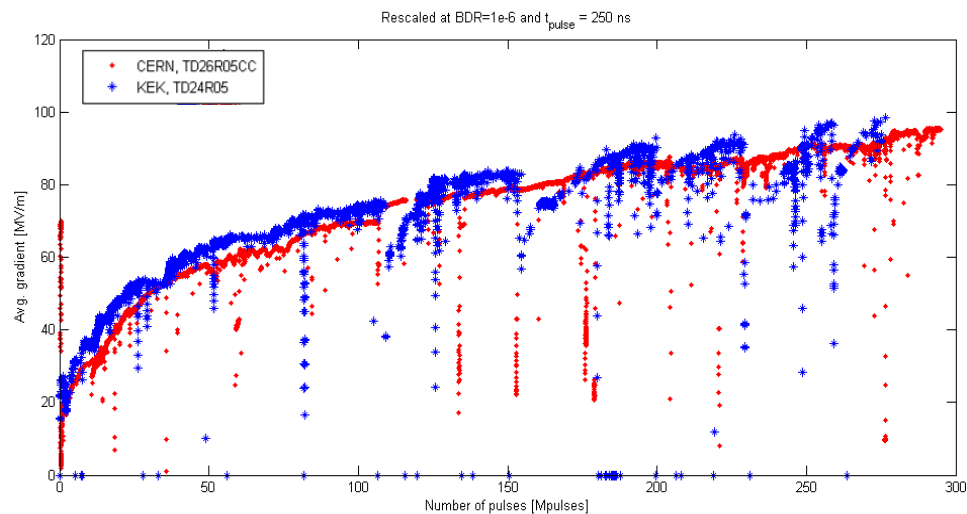
$$BDR \propto E^{30} t_{pulse}^5$$

$$E \propto BDR^{\frac{1}{30}} t_{pulse}^{-\frac{1}{6}}$$

TD18_#2 whole processing trend

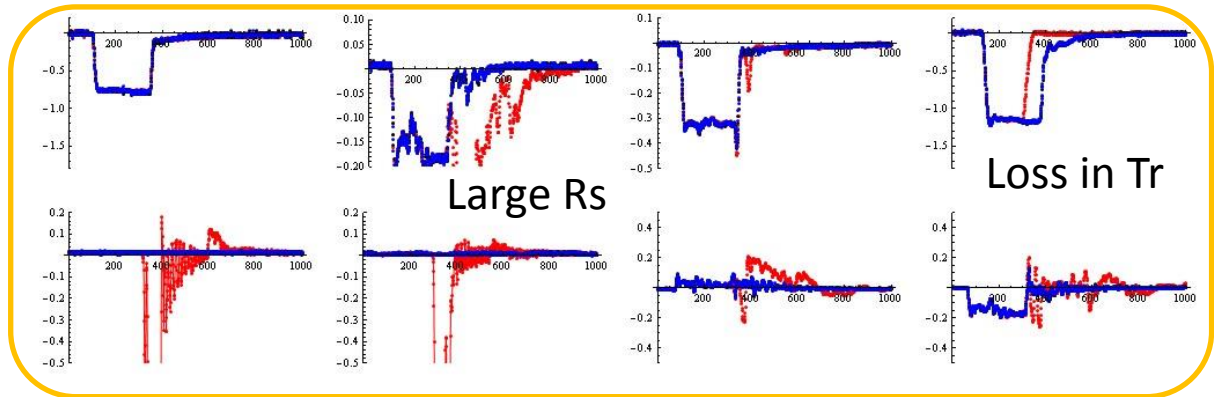
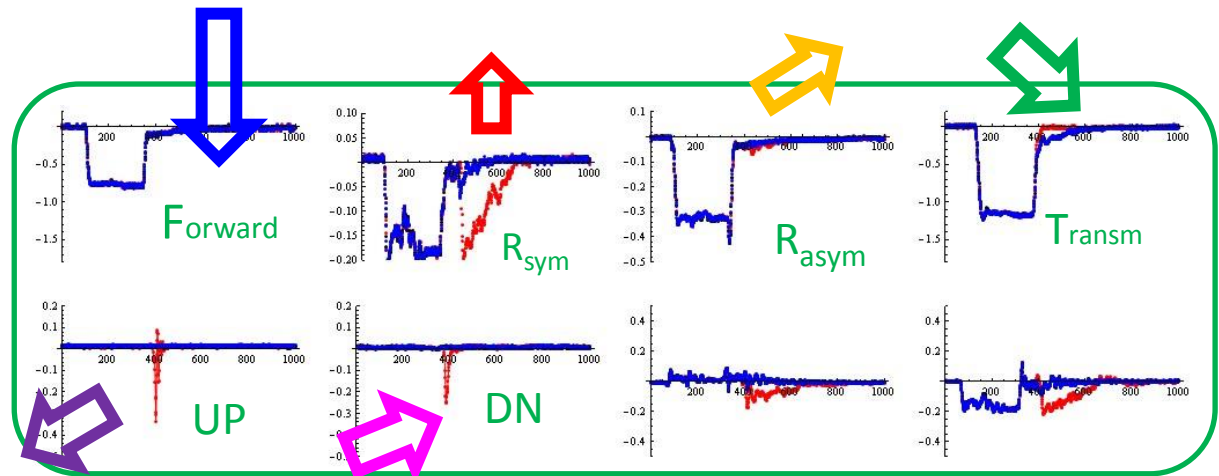
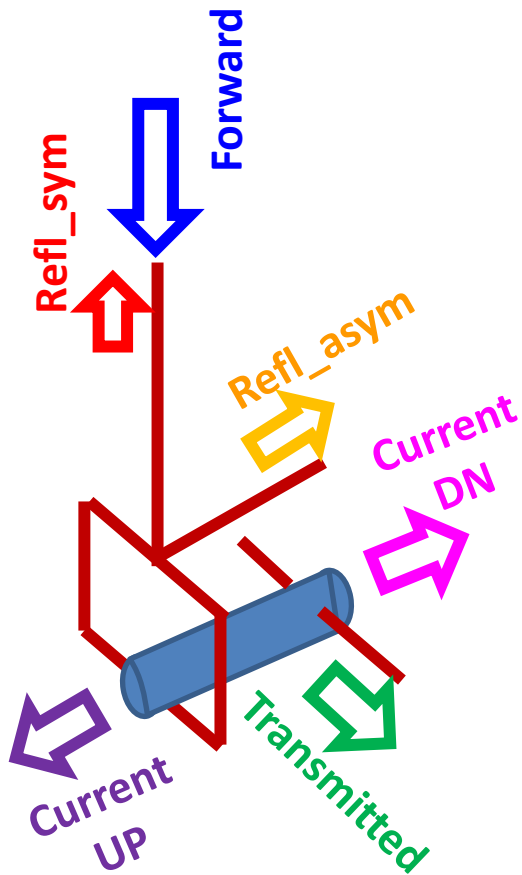


パルス幅 放電回数 加速電界



パルス数

放電時 RF&電流 パルス波形



電界エネルギー吸収とSc

A. GRUDIEV, S. CALATRONI, AND W. WUENSCH

Phys. Rev. ST Accel. Beams **12**, 102001 (2009)

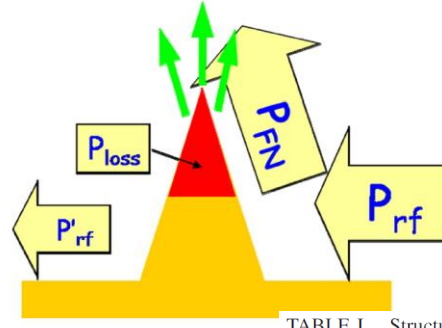
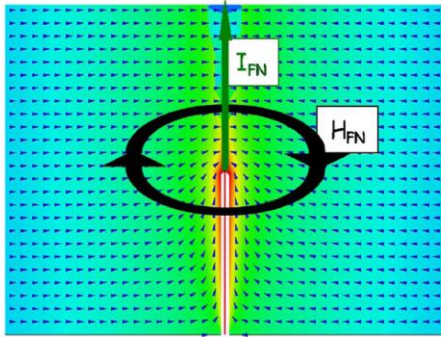
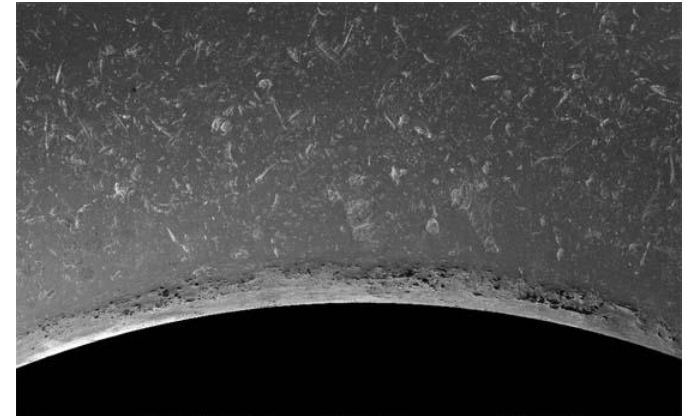
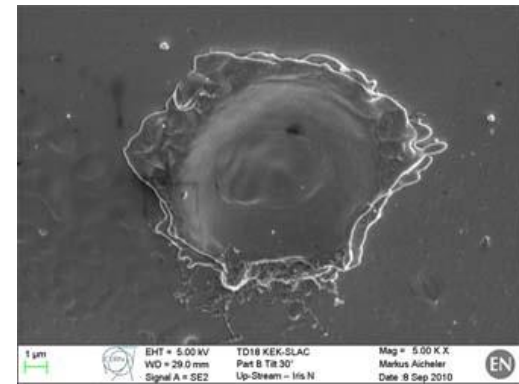


FIG. 3. (Color online) Visualization of the



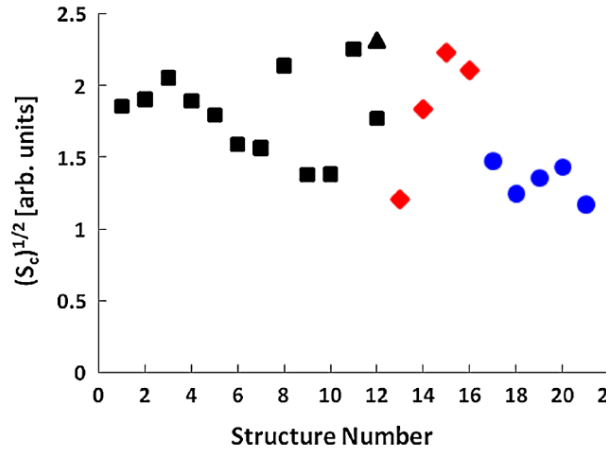
100 μm EHT = 5.00 kV TD18 KEK-SLAC Part B Tilt 30° Mag = 50 X
Signal A = SE2 Up-Stream - Iris N Markus Aicheler Date : 8 Sep 2010



1 μm EHT = 5.00 kV TD18 KEK-SLAC Part B Tilt 30° Mag = 5.00 K X
Signal A = SE2 Up-Stream - Iris N Markus Aicheler Date : 8 Sep 2010

Iris近傍
ピット状放電痕

M. Aicheler, IWLC2011

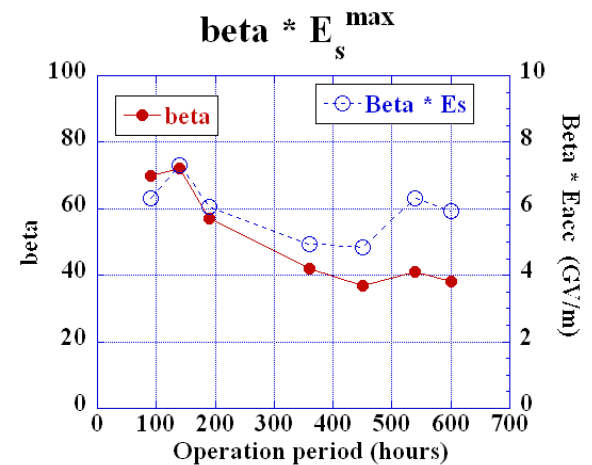
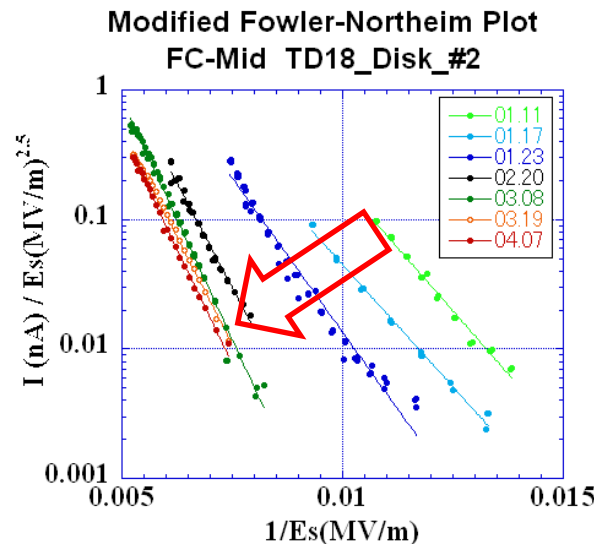
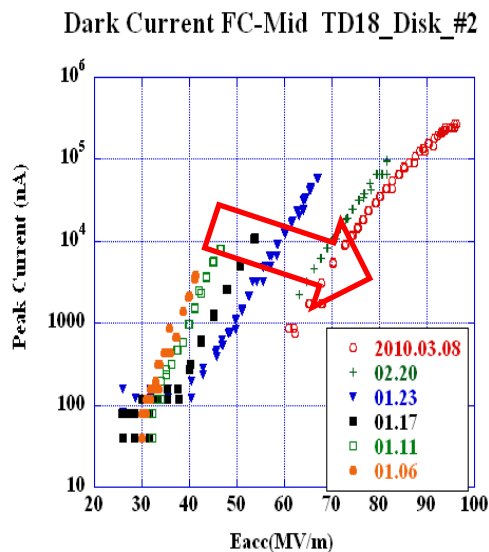


Grudiev PRST-AB 12 (2009)

TABLE I. Structure parameters used in the analysis. From left to right: structure number used for identification later on in the paper, name with the reference, frequency f , rf phase advance per cell $\Delta\phi$, group velocity normalized to the speed of light v_g/c , and structure length L .

N	Name	f [GHz]	$\Delta\phi$ [°]	v_g/c [%]	L [m]
1	DDS1 [3]	11.424	120	11.7-3	1.8
2	T53vg5R [3]	11.424	120	5.0-3.3	0.53
3	T53vg3MC [3]	11.424	120	3.3-1.6	0.53
4	H90vg3 [3]	11.424	150	3.1-1.9	0.9
5	H60vg3 [3]	11.424	150	3-1.2	0.6
6	H60vg3S18 [3,4]	11.424	150	3.3-1.2	0.6
7	H60vg3S17 [3,4]	11.424	150	3.6-1.0	0.6
8	H75vg4S18 [3]	11.424	150	4.0-1	0.75
9	H60vg4S17 [3,4]	11.424	150	4.5-1	0.6
10	HDX11 [5]	11.424	60	5.1	0.05
11	CLIC-X-band [6]	11.424	120	1.1	0.23
12	T18vg2.6 [7]	11.424	120	2.6-1.0	0.18
13	SW20a3.75 [3]	11.424	180	0	0.2
14	SW1a5.65t4.6 [8]	11.424	180	0	0.013
15	SW1a3.75t2.6 [8]	11.424	180	0	0.013
16	SW1a3.75t1.66 [8]	11.424	180	0	0.013
17	$2\pi/3$ [9]	29.985	120	4.7	0.1
18	$\pi/2$ [10]	29.985	90	7.4	0.1
19	HDS60 [11]	29.985	60	8.0-5.1	0.1
20	HDS60-Back [11]	29.985	60	5.1-8.0	0.1
21	PETS9mm [12]	29.985	120	39.8	0.4

暗電流 と 電界増倍係数 β

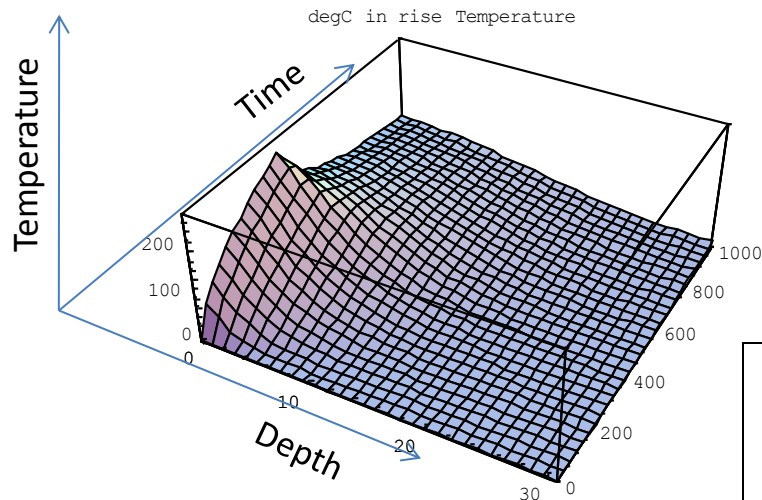


暗電流 次第に減少 β 多少減少?
 $\beta * E_s^{\max} \sim 5 \sim 7 \text{ GV/m}$ 電界蒸発フィールドに匹敵
 つまりこれが限界か?

磁場 → 電流 → パルス温度上昇

Surface heating and heat diffusion into body.

$$\frac{\partial}{\partial t} u(x,t) - \kappa^2 u(x,t) = \frac{P_w(x,t)}{c_p \rho}$$



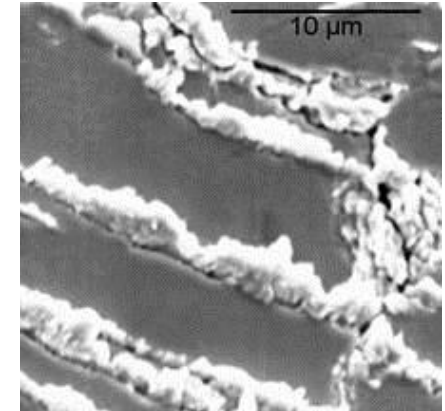
$$\Delta T = \frac{1}{2} R_s |H_s|^2 \frac{2\sqrt{T_p}}{\rho c_\epsilon \sqrt{\pi \alpha_d}}$$

Pritzka Thesis, p99, SLAC-Report 577.

Cu
 Rs=27.85mΩ
 Hs=1MA/m
 Tp=400ns=4*10⁻⁷
 ρ=8.93 10³ kg/m³
 Cε=380 J/kg/K
 αd=k/ρcε= m²/s
 k=401 W/m/K

 ΔT=270degC

金属疲労

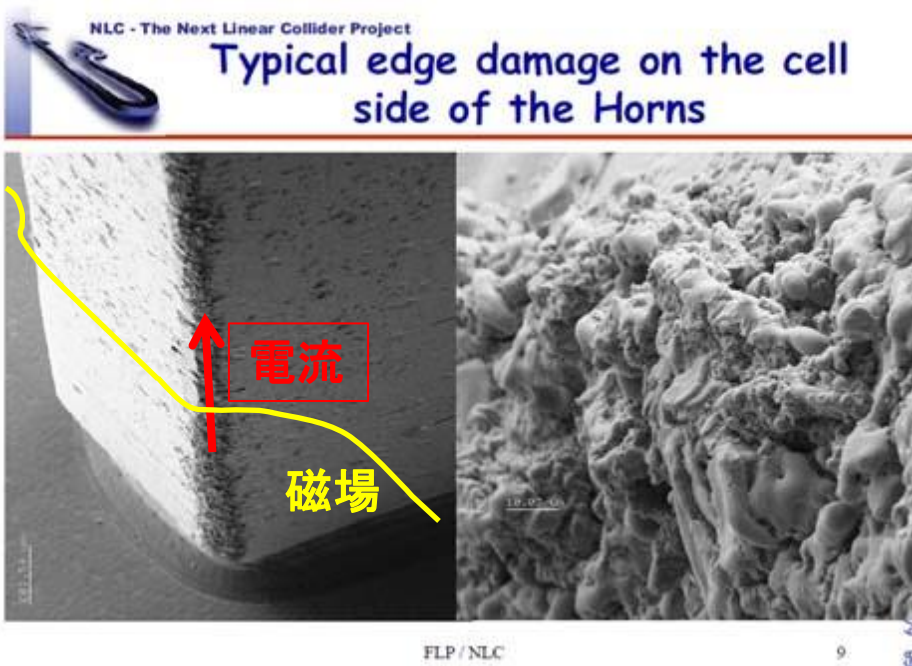


V. Dolgashev and L. Laurent, AAS08

これらが放電
トリガー？

シャープエッジ → 表面電流の増倍

これまでも入力カプラー等で生じていた。



F. Le Pinpec, ISG8, 2002, SLAC

11GHz →

表面

$$\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \approx 0.5\mu m$$

400ns →

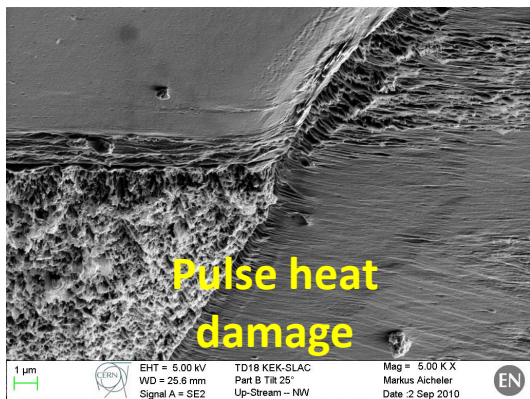
拡散

$$2\sqrt{Dt} \approx 10\mu m$$

表面電流が1MA/m 級に近づくと問題が顕著になる。
それまではBDRの上昇程度に見えてくる？

100万～1000万パルスに一回級の放電発生へのトリガー

金属疲労
結晶方位 Facetting



Inclusion of foreign materials

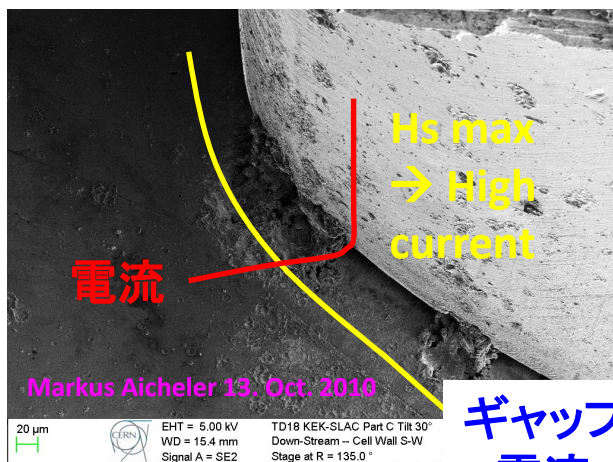
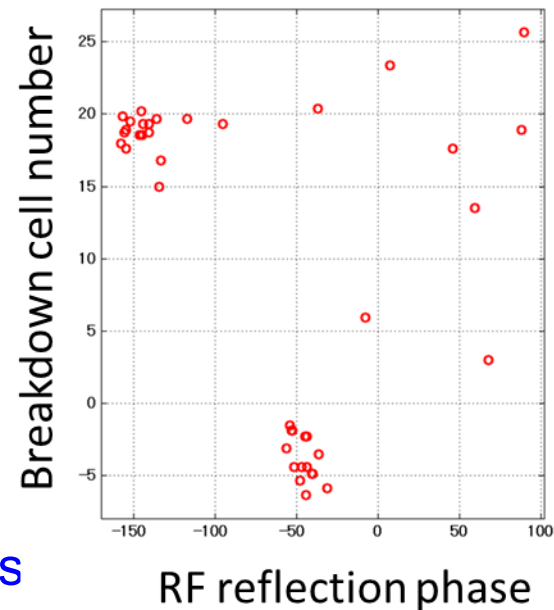
High magnetic field triggered surface damage

Evolution from material defects

Other mechanism??

Hot spots

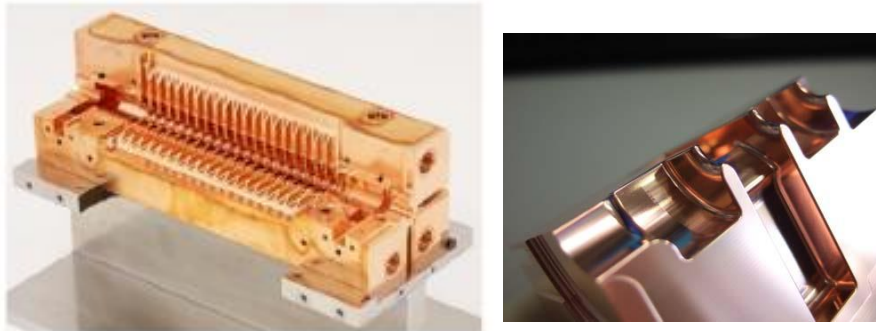
Breakdown cell location



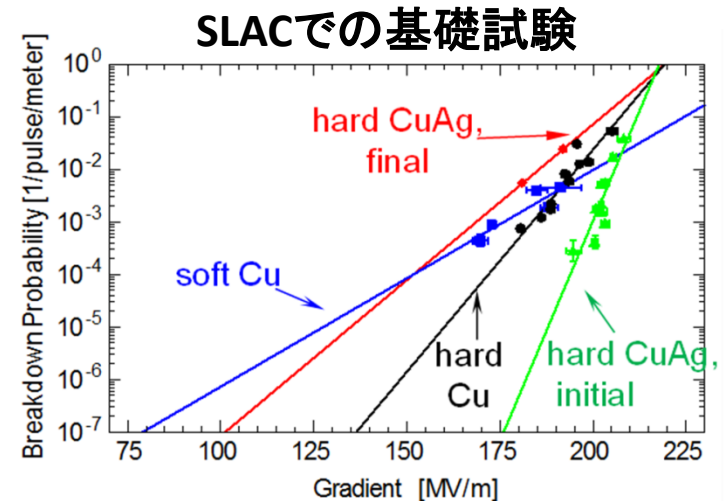
ギャップ?
電流、微少放電?

Electromigration?

高電界加速への検討課題



表面電流を切るギャップ無し
精密リングは日進月歩



硬い、熱処理無し、Ag入り銅……
対疲労→対放電改善するか？

X-band TW Linac

80MV/m級 現在技術で実現可能

100MV/m超 材料、表面、形状の改善が必要

150MV/m超 ??????

私の参考文献

- マイクロウェーブ一般
 - C. G. Montgomery, “Technique of Microwave measurements” , MIT series 11, (1947)
 - E. L. Ginzton, “Microwave measurement” (1957)
 - J. C. Slater “Microwave Electronics”
- 線形加速器
 - The Blue Book: “The Stanford Two-Mile Accelerator”,
<http://www.slac.stanford.edu/library/2MileAccelerator/2mile.htm>
- 電磁場計測とチューニング
 - C. W. Steel et al., “A nonresonant Perturbation Theory”, IEEE Trans. MTT-14, N0.2, (1966)
 - D. Whittum, “Introduction of Electrodynamics for Microwave Linear Accelerators”, Frontiers of Accelerator Technology, Proc. US-CERN-Japan Acc. School, (1996)
 - T. Khabicoulline et al., DESY M-95-02, (1995)

高周波空洞技術の研修会の終わりに

- Professor Perry Baker Wilson

- one of the accelerator physics pioneers at Stanford and SLAC, died on November 30, 2013 in Redwood City, Calif. at age 86.

- WW-II、HEPL、SLAC.....

- SC RF Cavity

- Ring RF cavities、SLED、...

- SLAC Linear accelerator → Linear colli

- Cavity → Vacuum discharge under high gradient

- ご冥福を祈り、高周波空洞技術の更なる発展を願って講演の終わりとします。

