

常伝導高周波加速構造における 革新的技術

阿部 哲郎

<tetsuo.abe@kek.jp>

高エネルギー加速器研究機構(KEK)／加速器研究施設

第41回高エネルギー加速器セミナー-OHO(OHO'24)

2024年9月10日

内容

1. 新しい常伝導電子加速管の製作方式

- 『縦方向分割方式』
- 目的: 高いコストパフォーマンス

2. 金属製空洞を使った、より高い加速周波数の研究開発状況

- 加速器の進化すべき方向？

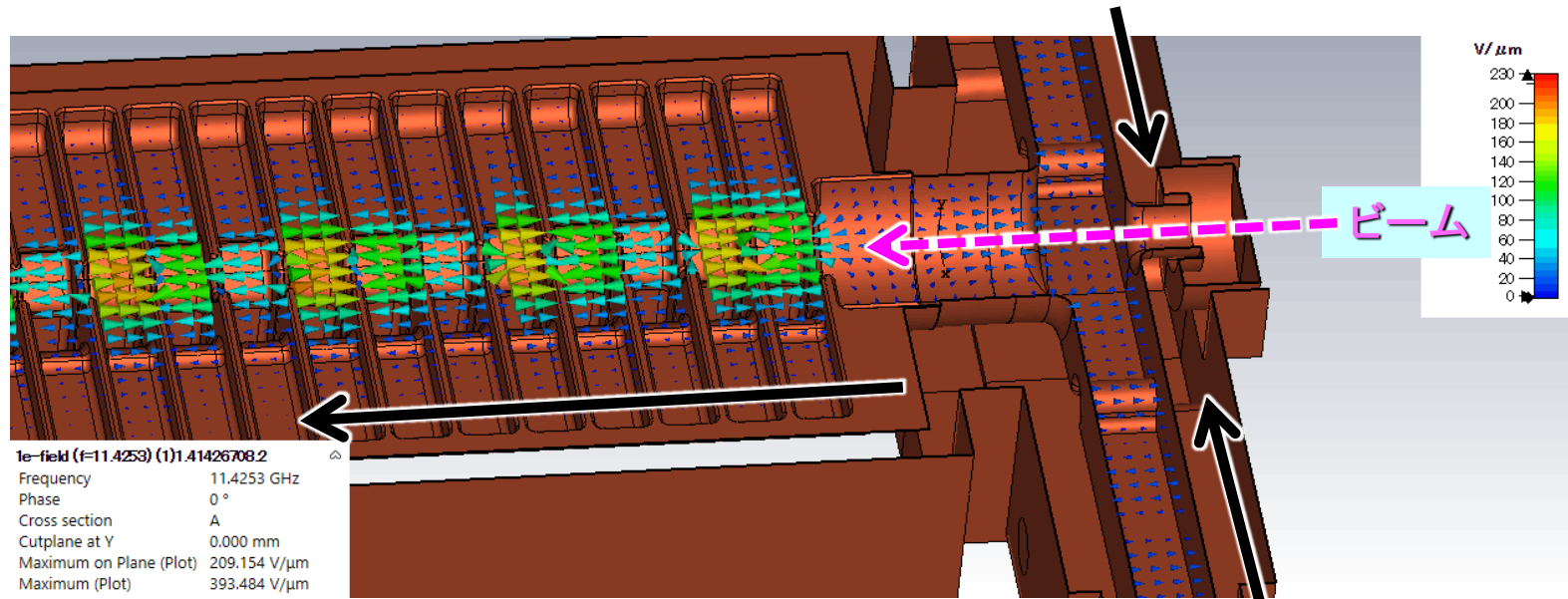
1. 新しい常伝導電子加速管の製作方式

常伝導電子加速管の例

共振周波数: 11.4 GHz

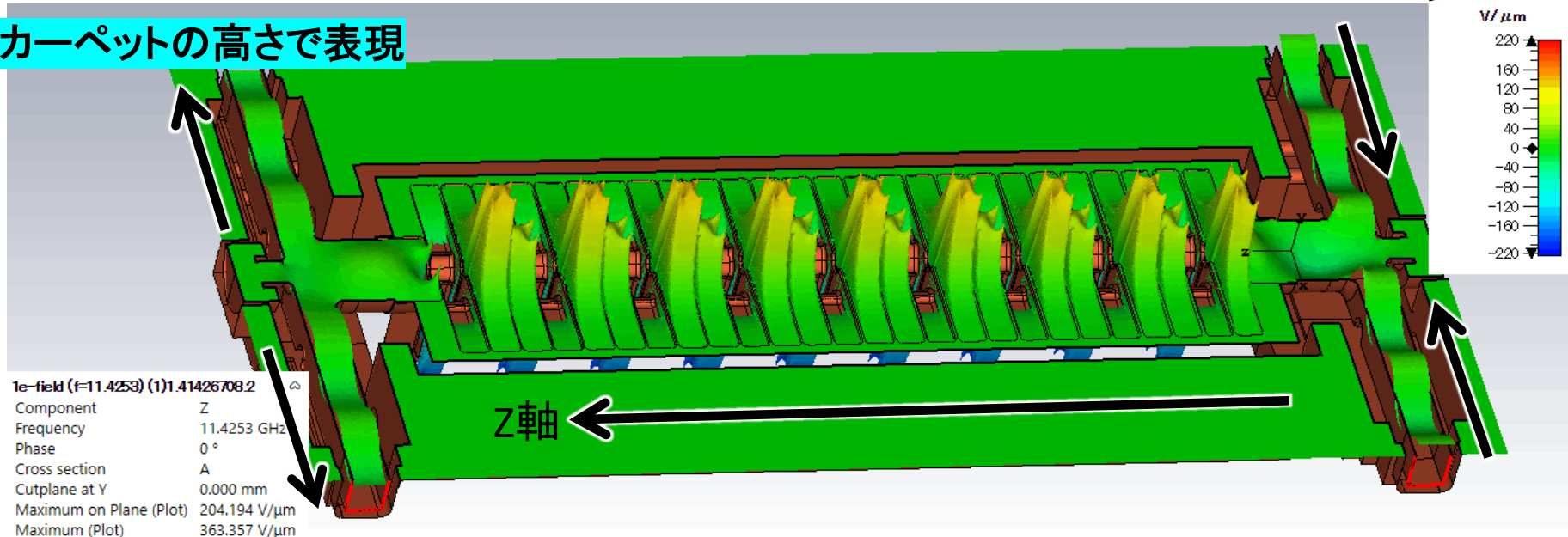
電界ベクトル

単セル空洞がビーム進行方向に連なり、
効率的に加速できる



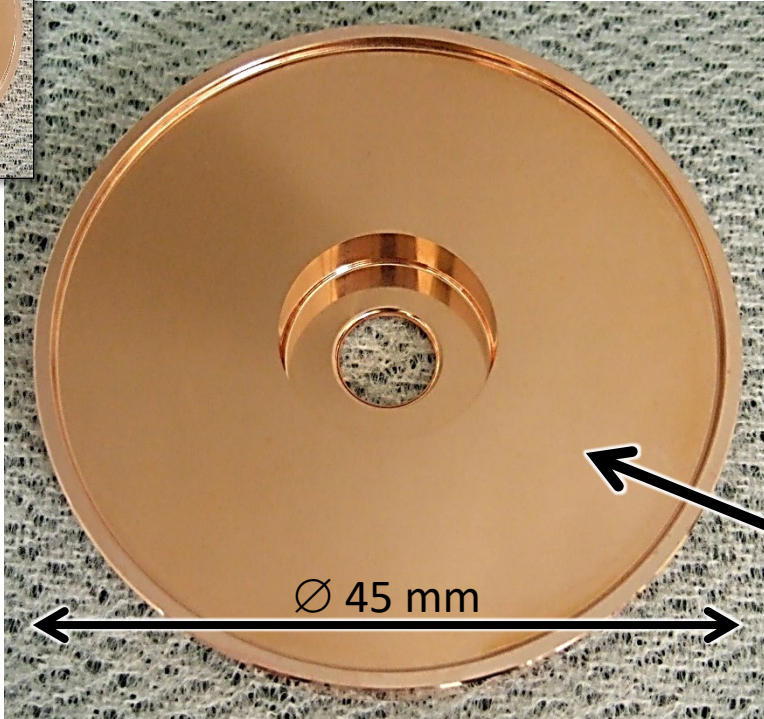
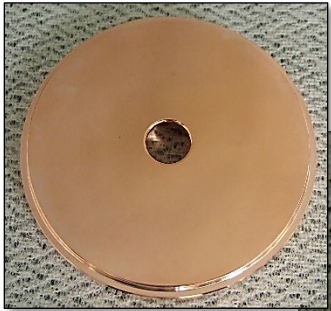
電界ベクトルのZ成分をカーペットの高さで表現

空洞(真空)領域



常伝導電子加速管はどうやって作るのか？

非減衰ディスク



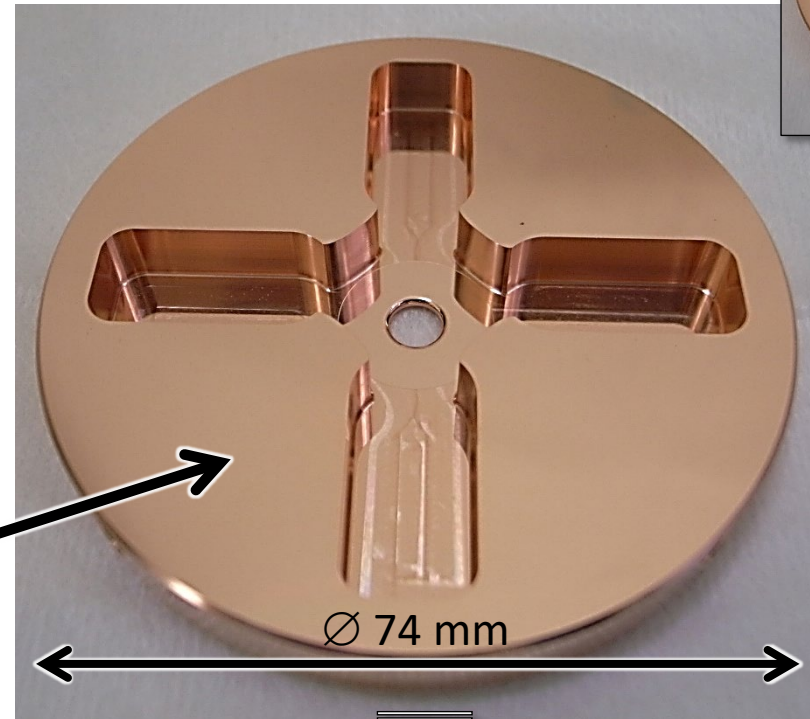
寸法精度: 2~3 μm

平均表面粗さ
 $R_a = 0.1 \mu\text{m}$ 以下

平面度: 1 μm

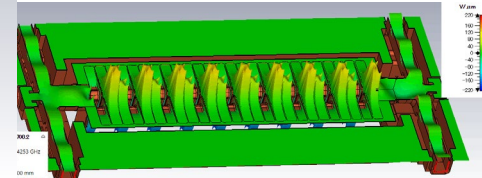
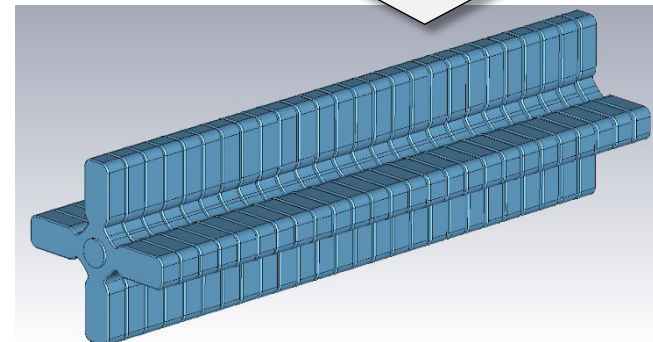
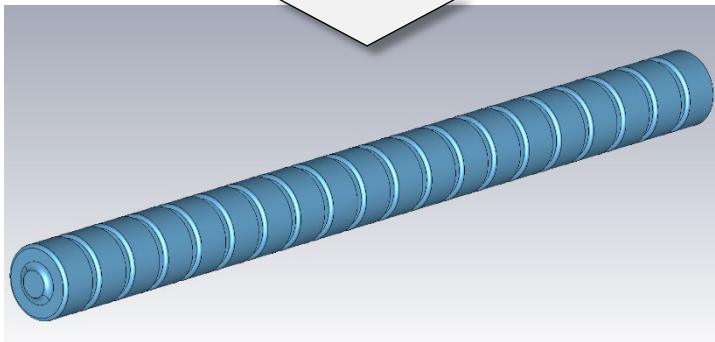
Ø 45 mm

減衰ディスク



Ø 74 mm

←空洞(真空)領域→



KEKの指導・監督の下

ディスクの超精密加工
(国内加工業者)

Xバンド高電界加速管の製作工程 (KEKの場合)

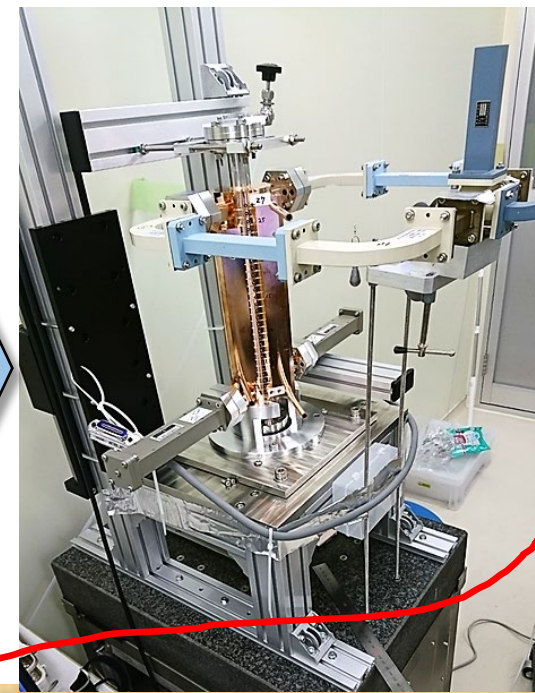
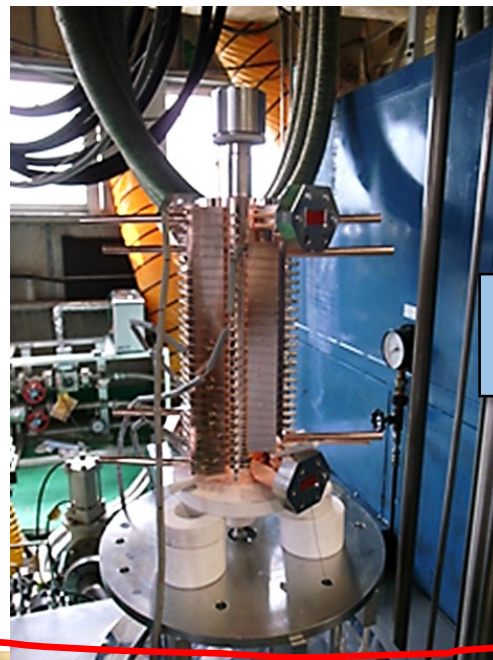
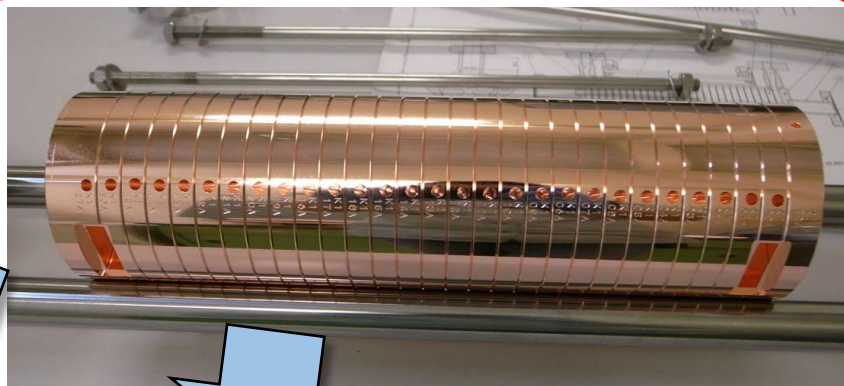
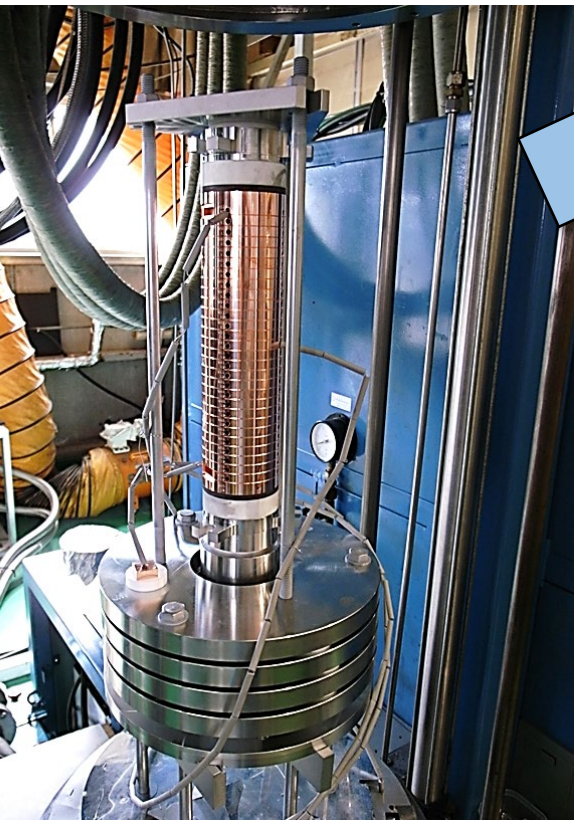
KEK内

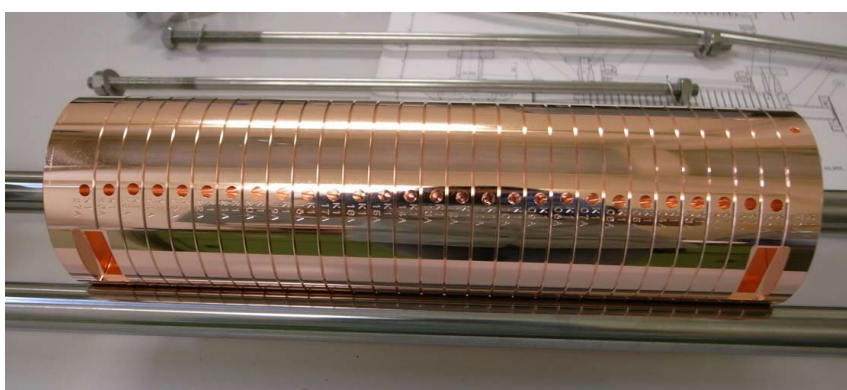
水素炉で拡散接合@1020°C

フランジ等をろう付け

周波数調整

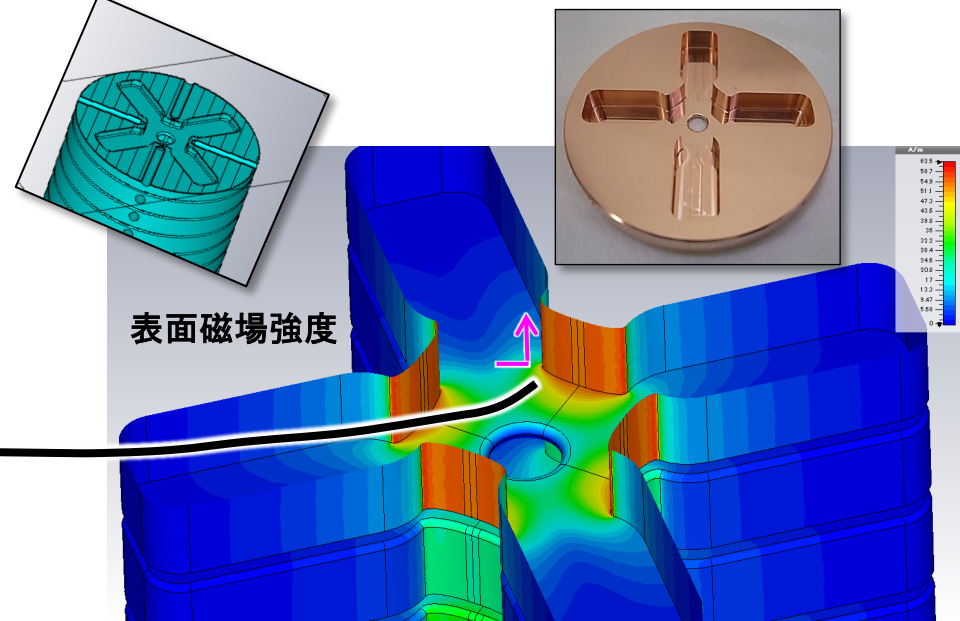
化学研磨



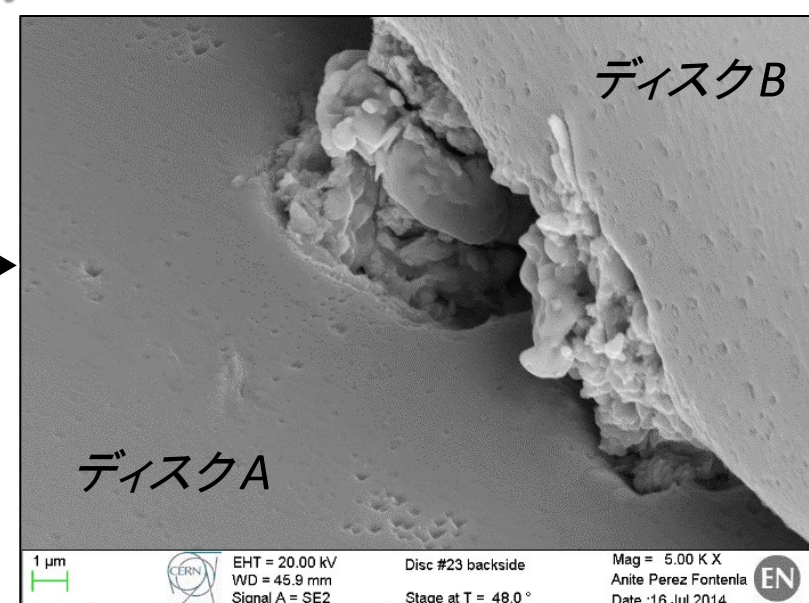
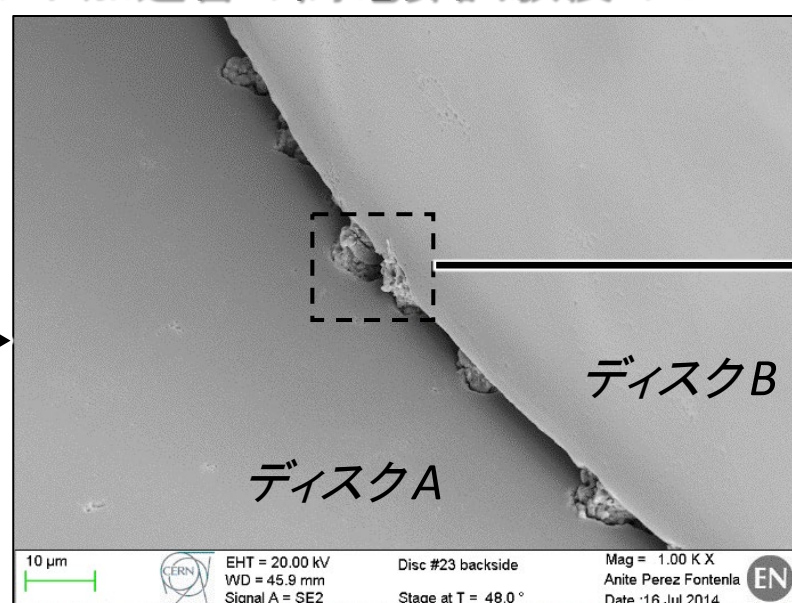
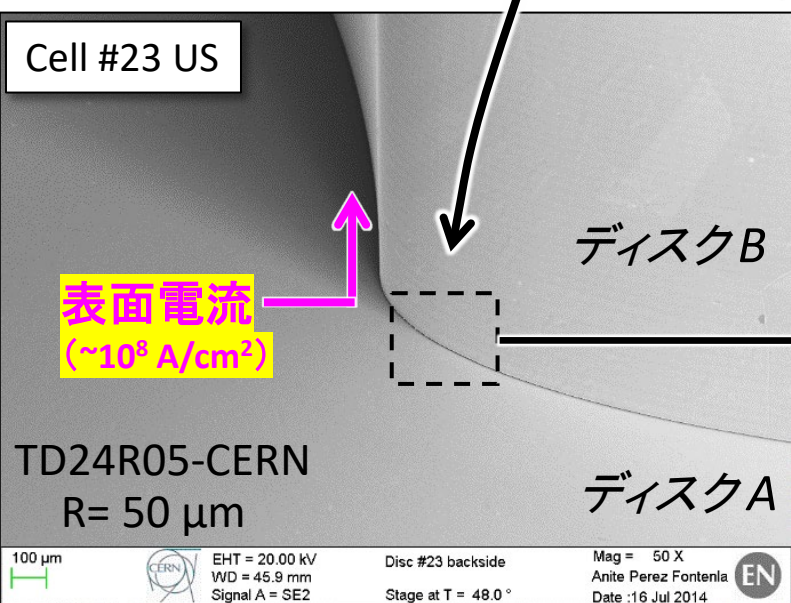


問題点？

- ✓ パーツ数が多い
- ✓ 接合箇所が多い
- ✓ 接合箇所が怪しい？

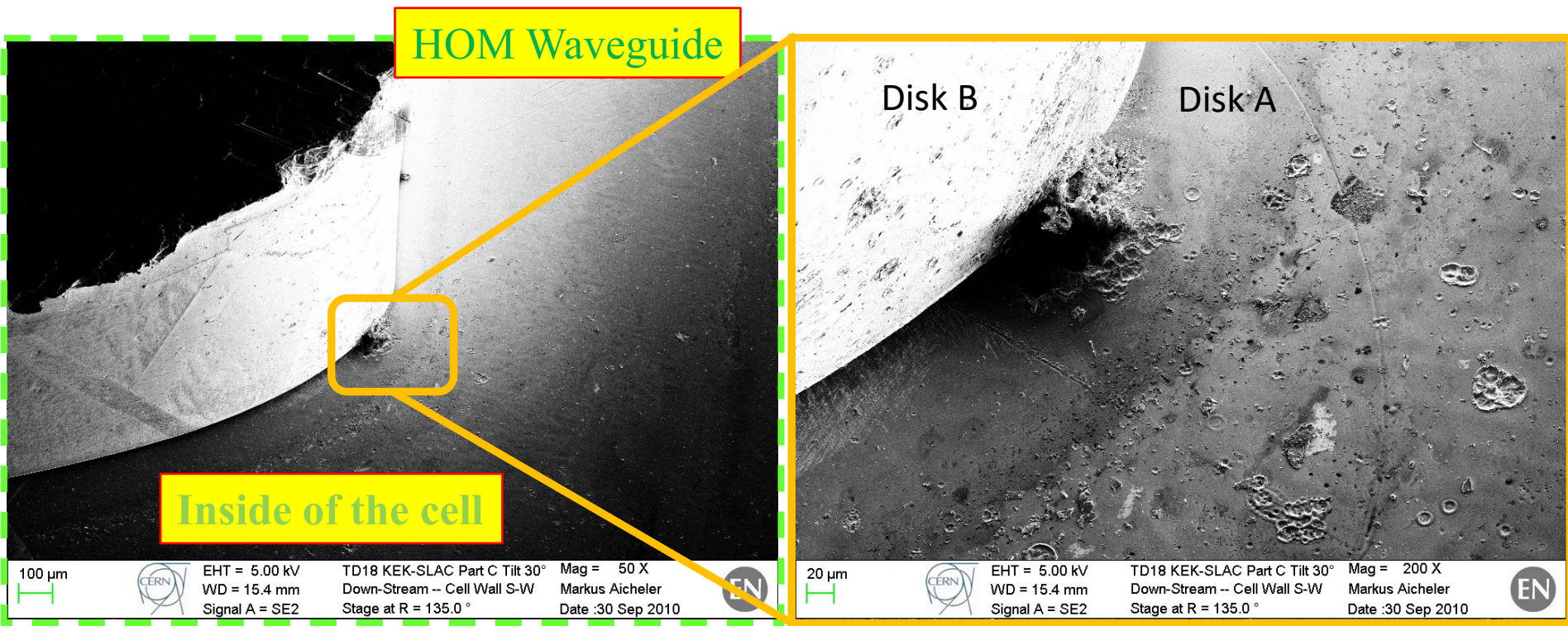


Xバンド加速管の高電界試験後のSEM画像



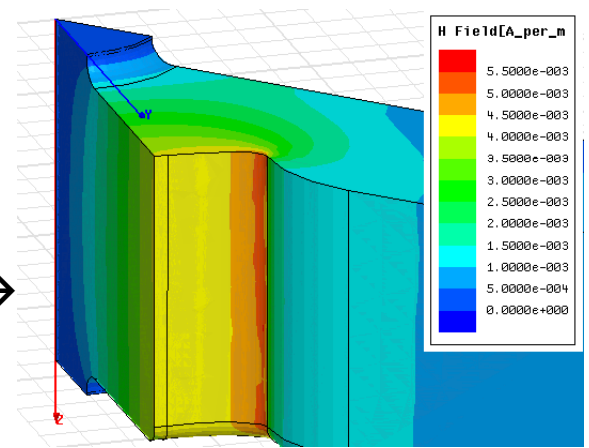
真空封止には成功しても、拡散接合箇所「異物」や「隙間」が見られることがある（これらと高電界性能との相関が明らかになっている訳ではないが）

Postmortem of TD18_Disk



Max. current density
 $2 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ during test

Surface magnetic field →

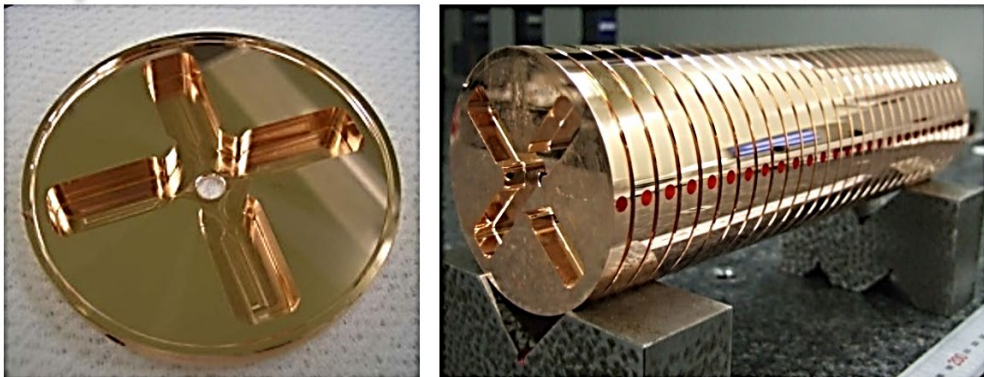


2つの「直交」する加速管製作方式

詳しくは下記参照：
阿部 哲郎 他、「高電界Xバンド単セル試験空洞の
4分割方式による製作」
(第9回日本加速器学会年会、THPS095、2012年)

従来

ディスク積層方式



減衰型ディスク スタックした状態(拡散接合後)

■ 利点

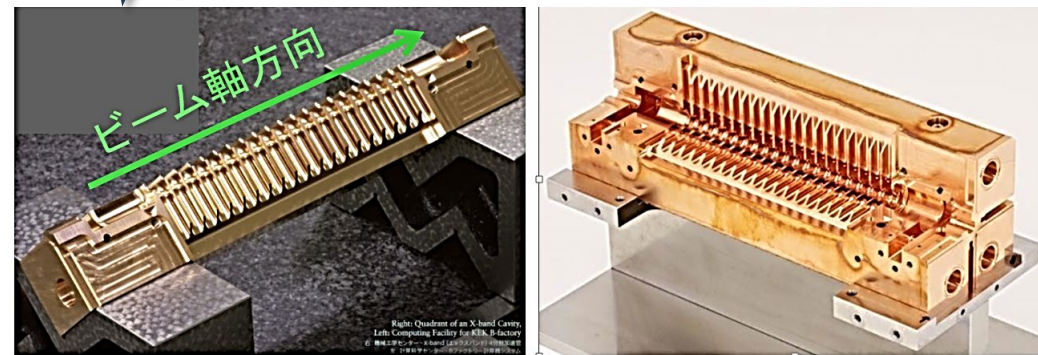
- ✓ 旋盤で主要部分を加工可能
- ✓ 平滑な表面が比較的簡単に得られる($R_a < 100 \text{ nm}$)

■ 欠点

- ✓ ディスクを一枚一枚超精密加工し、慎重に重ねる(数十枚以上)
- ✓ 手間がかかる
- ✓ 加速モードによる表面電流が(多くの)ディスク間接合箇所を渡る

NEW

縦方向分割方式



1個のQuadrant

3個のQuadrants

■ 利点

- ✓ 主要部分のパーツの個数は、セル数に依らず、2個(2分割)または4個(4分割)
- ✓ (5軸の)ミリング加工機で一気に加工可能
- ✓ 組立は比較的容易
→ 大幅なコストダウンの可能性あり
- ✓ 加速モードによる表面電流は、いかなる接合箇所も渡らない
- ✓ 加速フィールドから見えない箇所でも接合できる

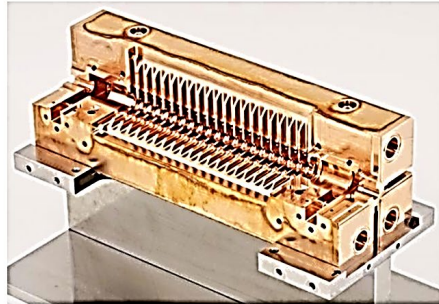
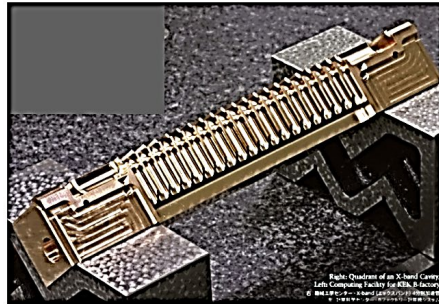
■ 欠点

- ✓ すべてミリング加工なので、表面粗さ大($R_a > 100 \text{ nm}$)
- ✓ 分割部間からの**仮想リーク**の恐れ → 改良版で解決済
- ✓ 分割部の角における**フィールド増大** → 改良版で解決済

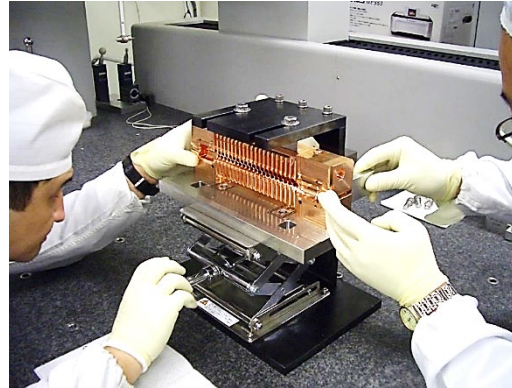
18セルのCLICプロトタイプ加速管(進行波)を4分割型で製作 (2008年、by KEK and SLAC)

TD18_Quad

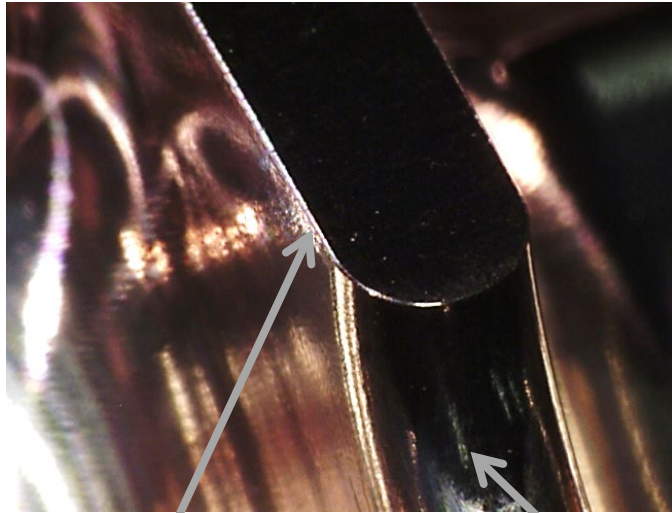
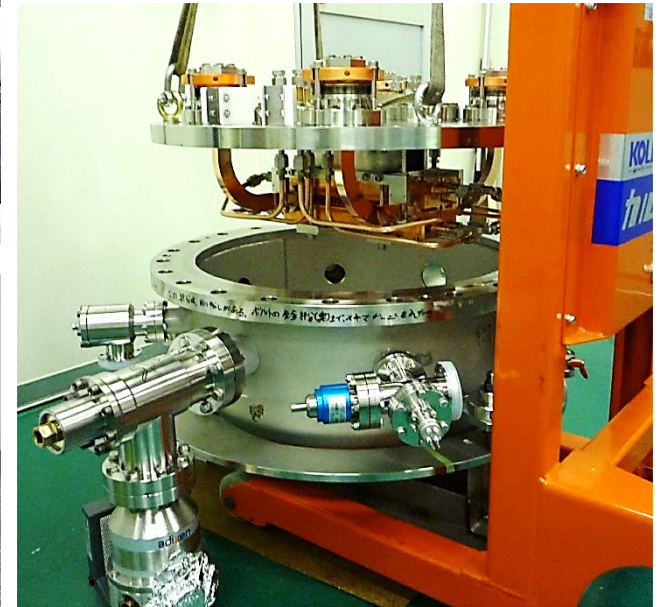
超精密ミリング加工(輪郭度: 5 μm) (加速モード周波数: 11.4 GHz)



超精密アライメント(精度: 5 μm)

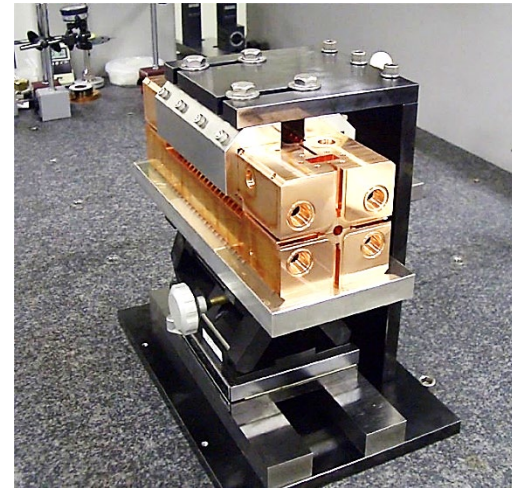


真空容器中へ



R面取り(R50 μm)

アイリス

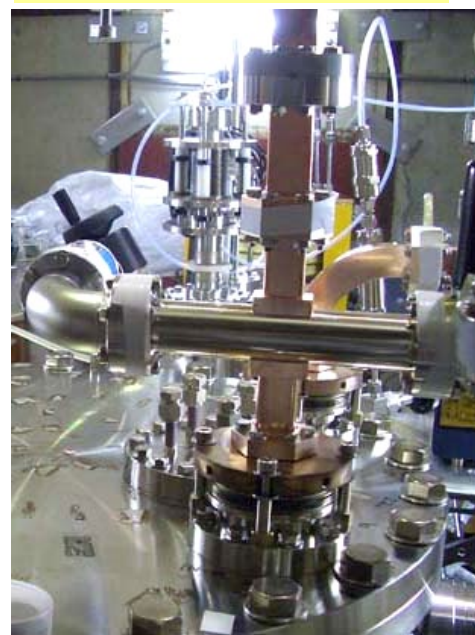


Installed into Nextef1

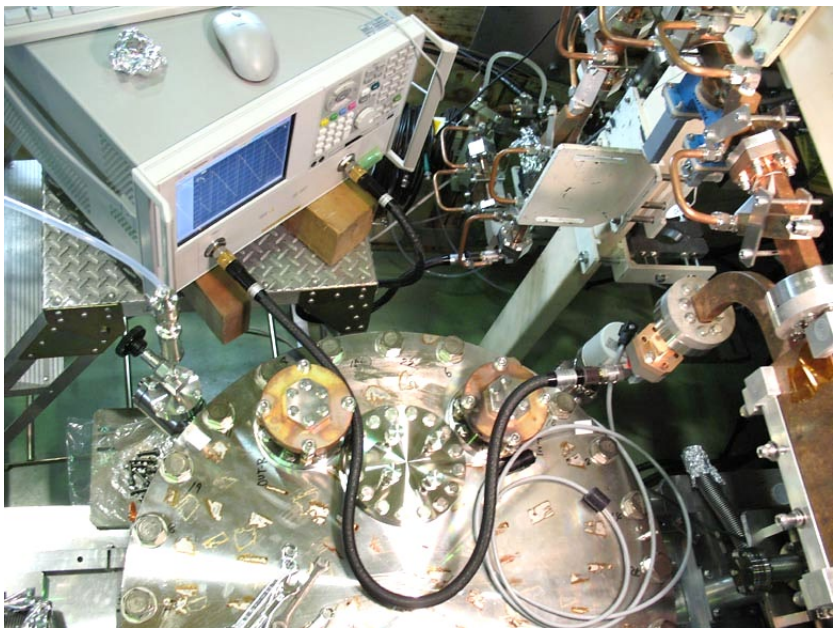
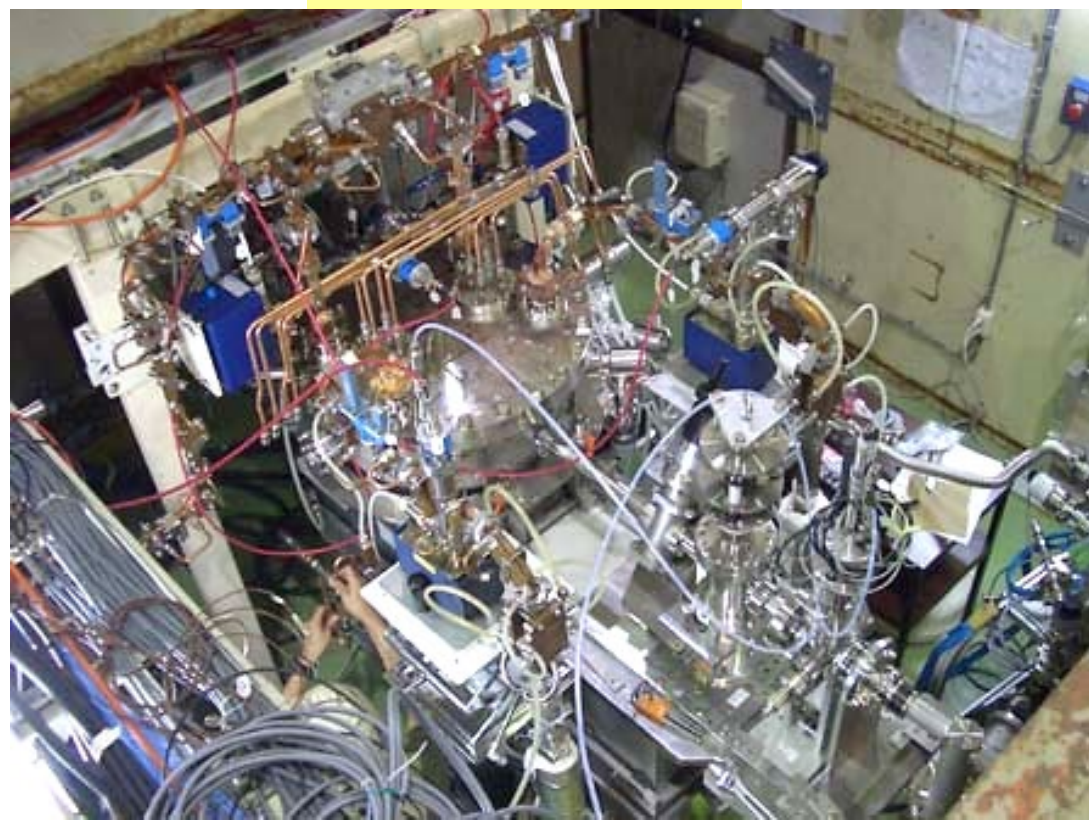
(KEK New X-band Test Facility)

(11.4 GHz)

Input connection

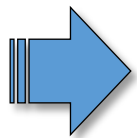
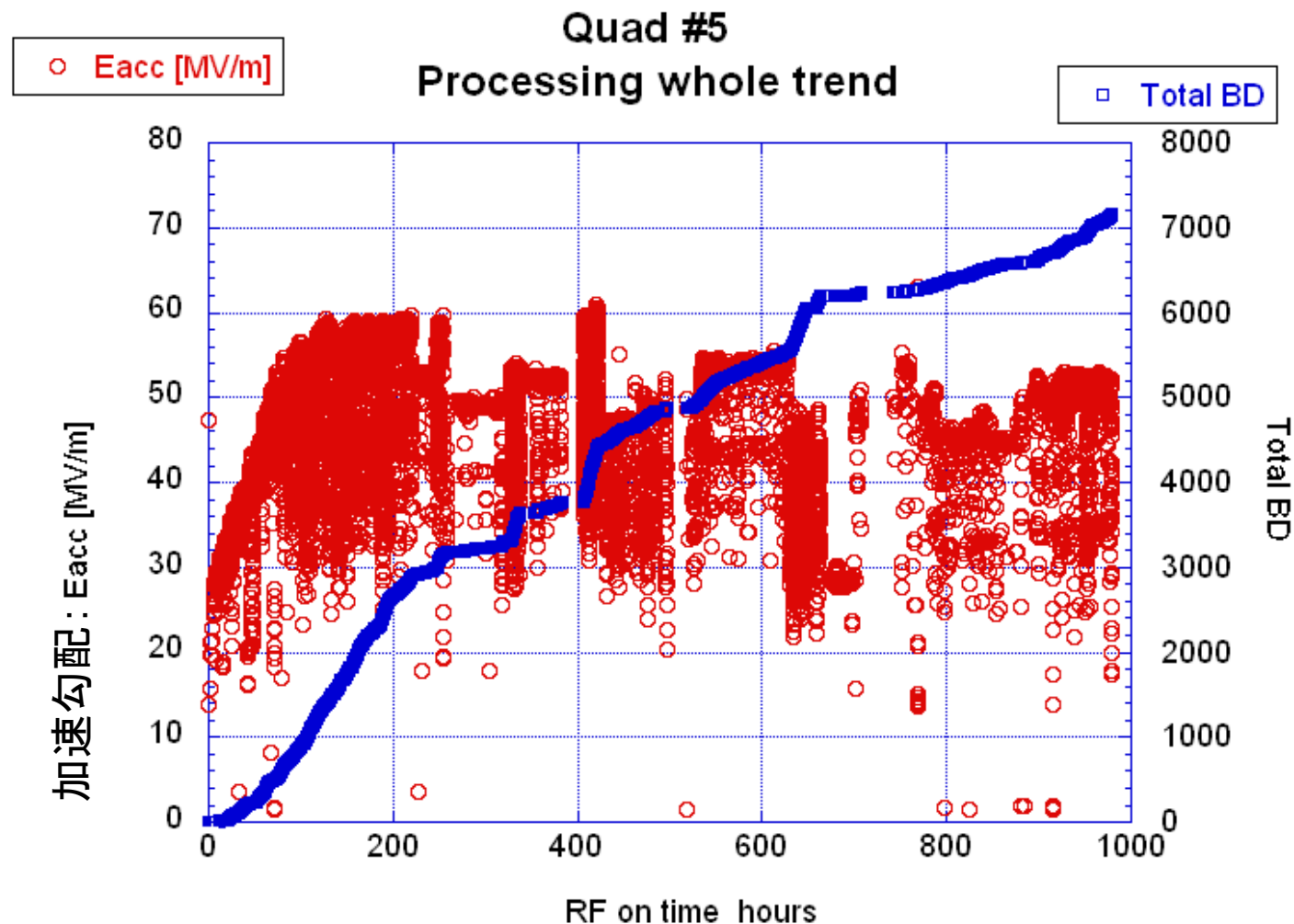


Nextef setup



3dB phase check

TD18_Quadの高電界試験の結果(2009年)



通常は、少なくとも、 $E_{acc} = 100$ MV/m には到達出来るが、
この試験では、 $E_{acc} < 60$ MV/m であり、不調

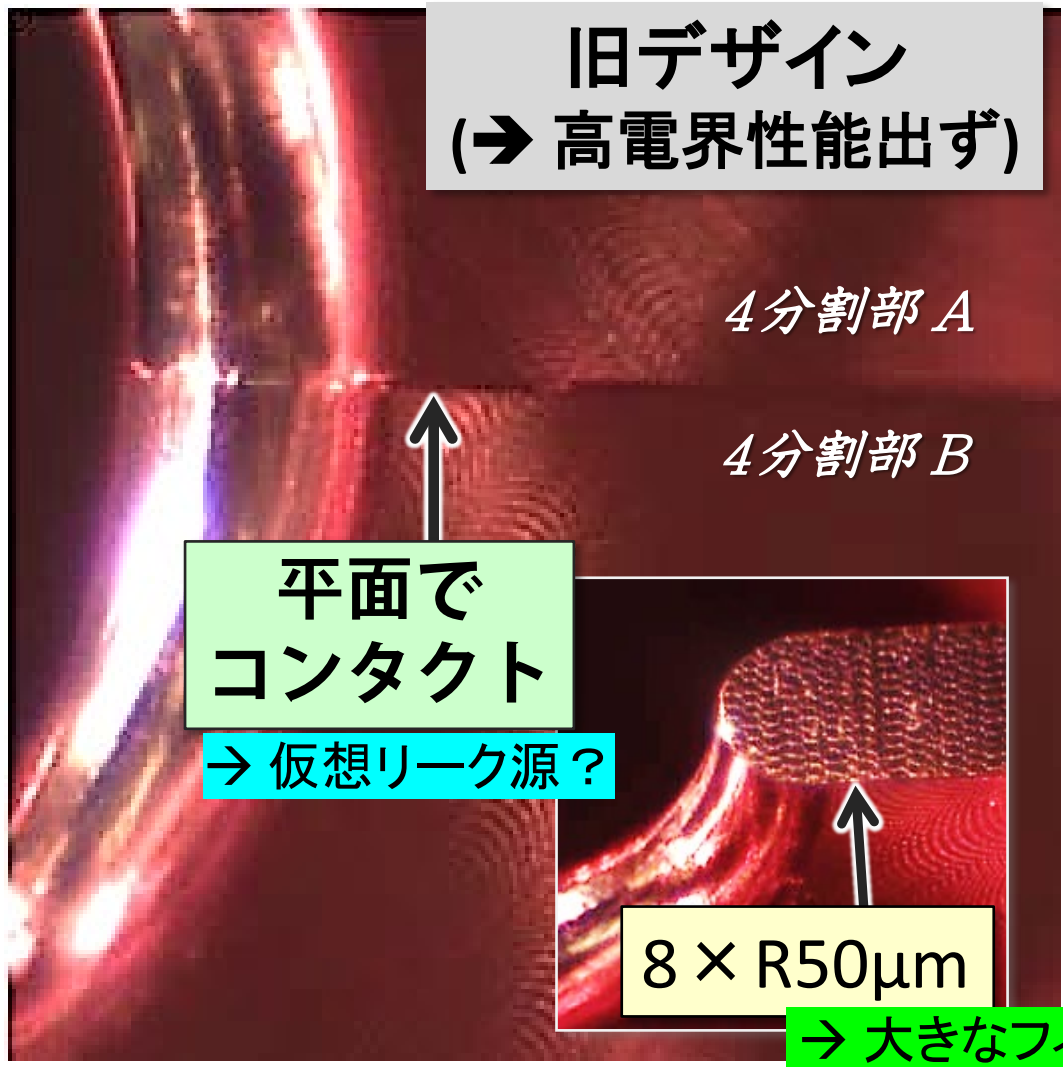
(SLACでは、電解研磨を施して同様の試験を行ったが、結果は同様に悪かった)

DESIGN IMPROVEMENT

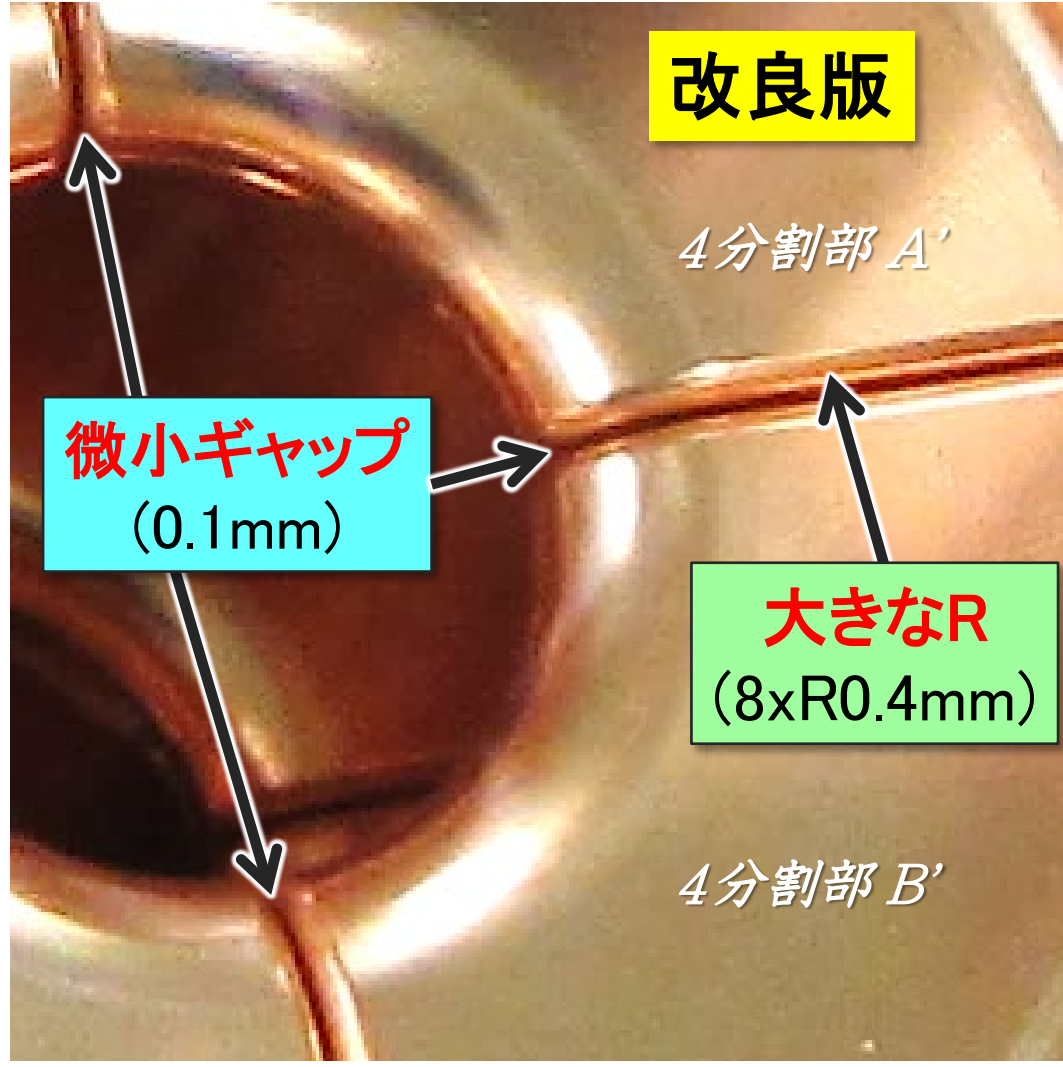
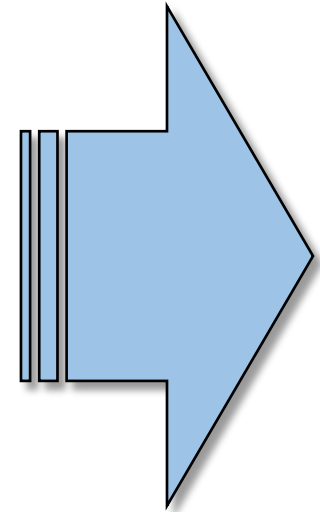
- ✓ 仮想リークの可能性をなくす
- ✓ フィールド増大を抑制する

角部Rとギャップサイズは、フィールド増大とシャントインピーダンスの劣化を最小にするよう同時最適化した:
A) フィールド増大: 25%
B) シャントインピーダンス: -2%

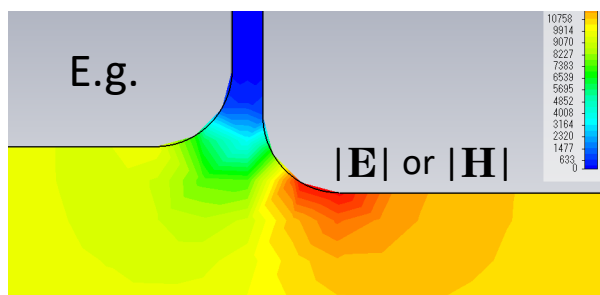
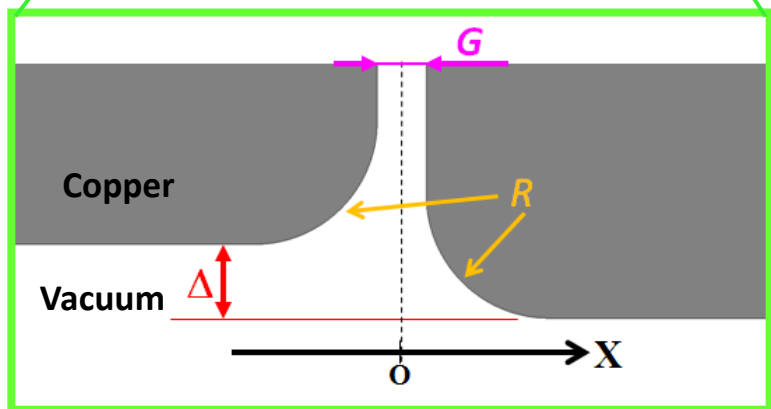
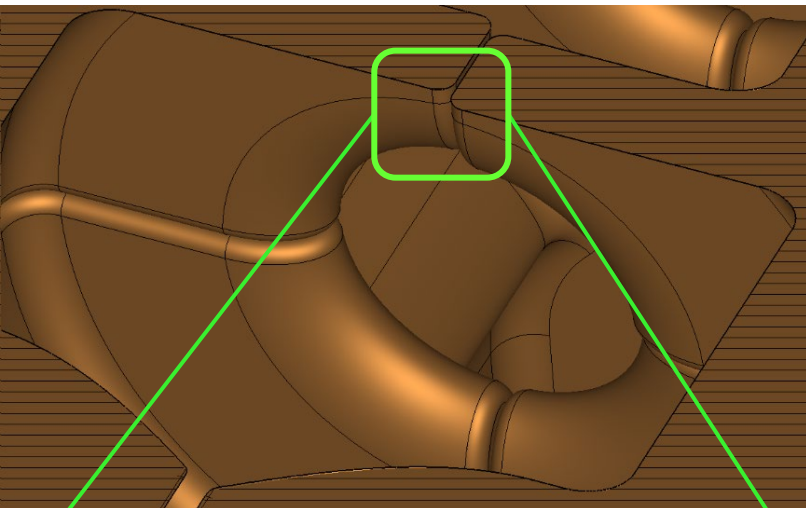
詳しくは下記参照:
[阿部 哲郎 他、「4分割方式による高電界試験用Xバンド単セル空洞の製作」](#)
(第11回日本加速器学会年会、SUP042、2014年)



← アイリス周辺の写真 →

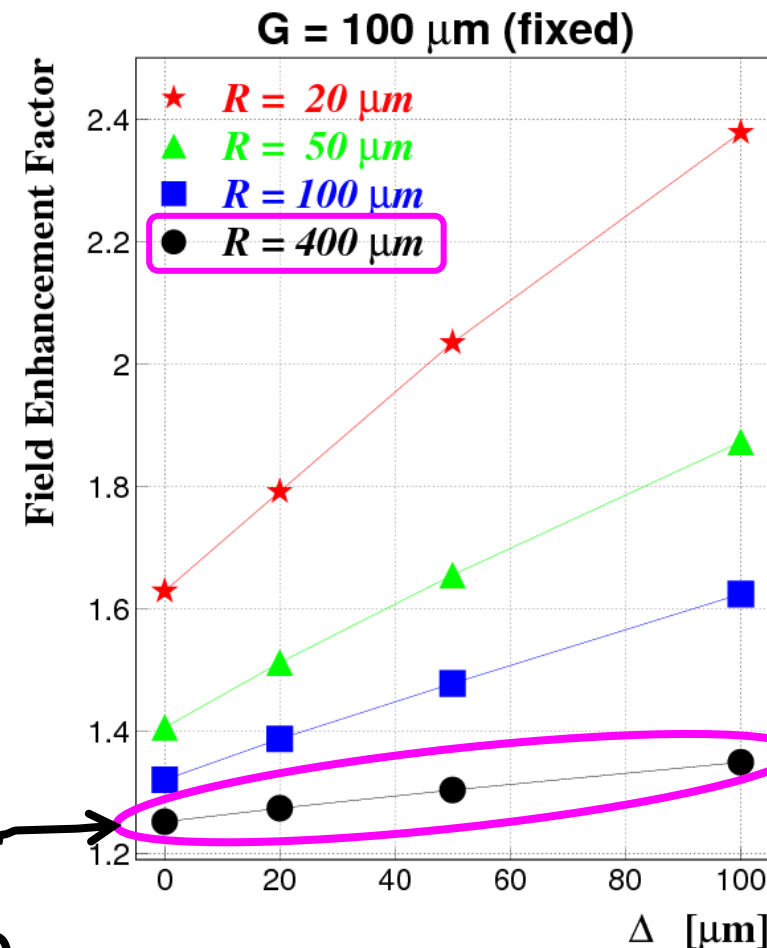
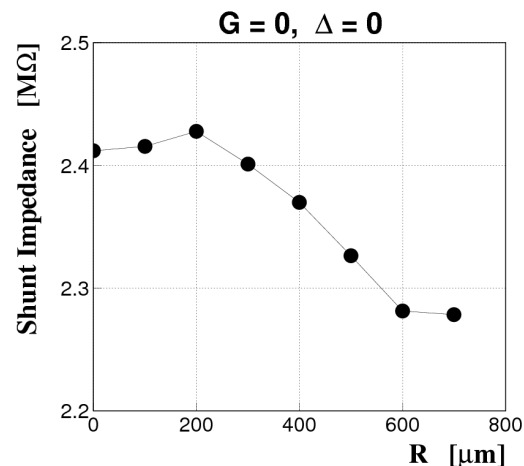
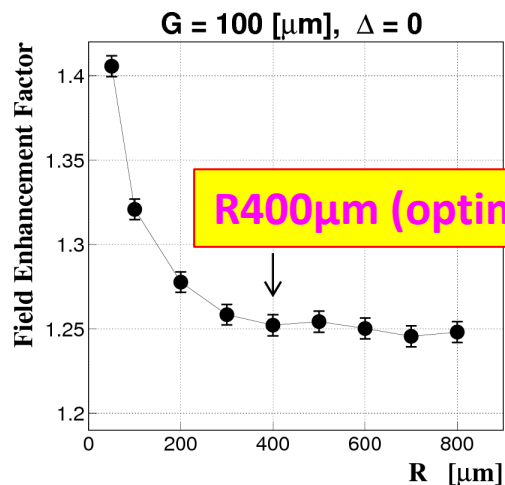


Field enhancements due to misalignment of quadrants



Numerically Calculated by the Floating Random Walk Method with Accuracies Better than 0.5%

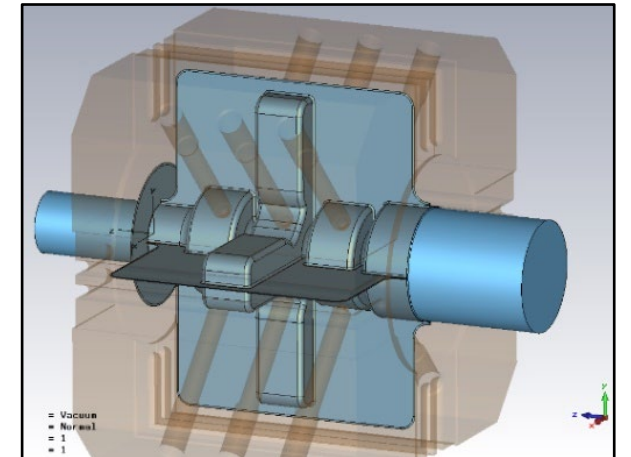
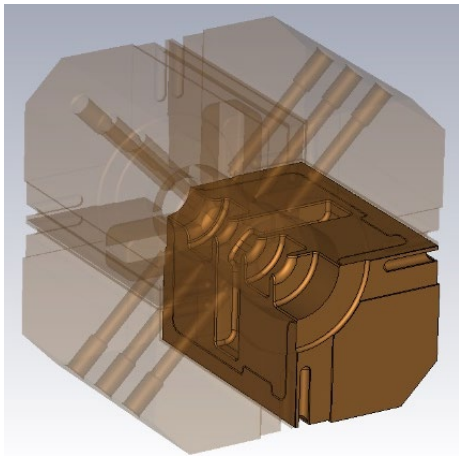
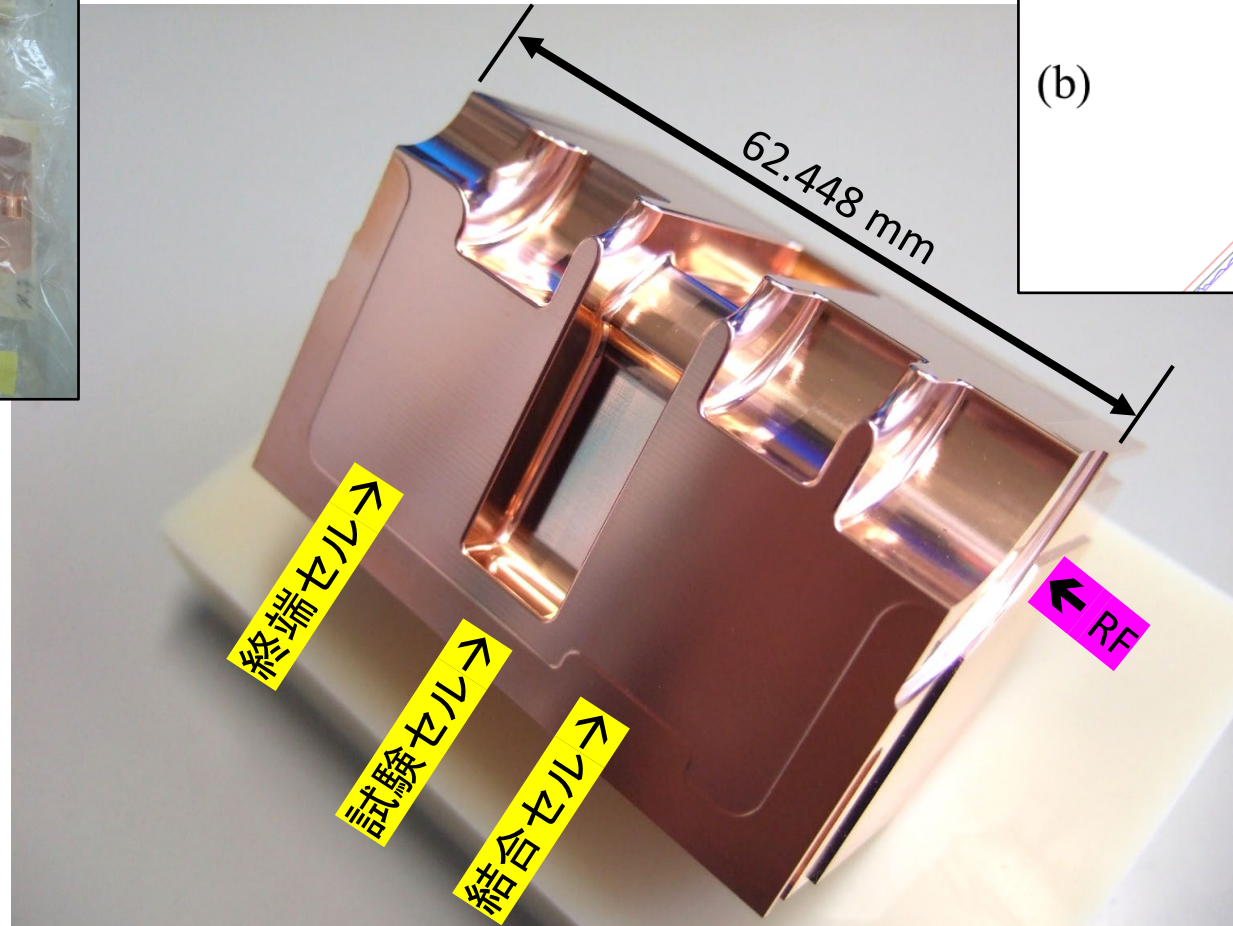
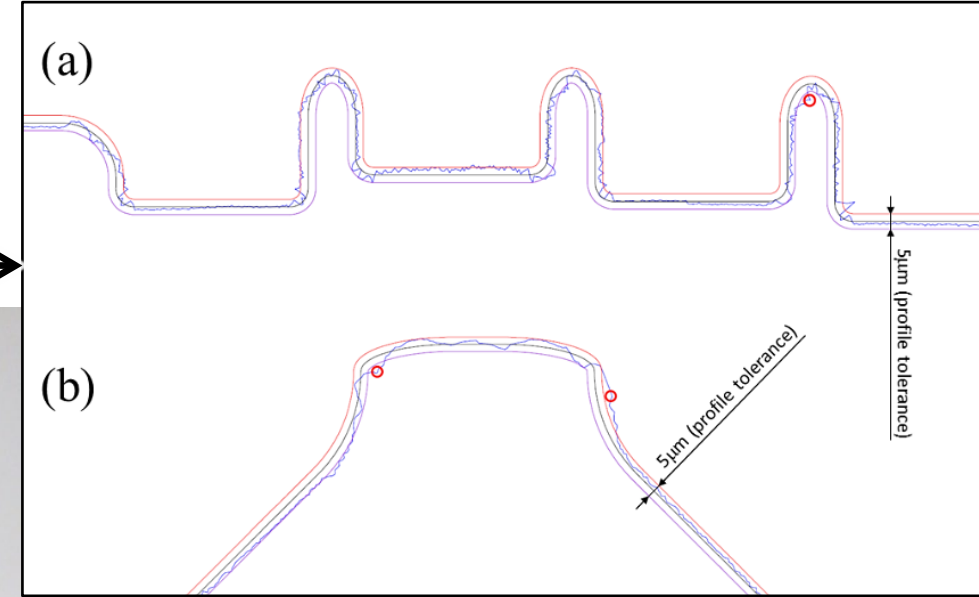
阿部哲郎、「微細構造による導体表面電磁場の変化に関する研究」、第8回日本加速器学会年会、TUPS086 (2011)



高電界試験用の改良縦方向分割方式単セル型定在波空洞(11.4GHz)の製作 (2013~2014年)



- ✓無酸素銅(クラス1)
- ✓5軸の超精密ミリング加工
- ✓表面粗度 $R_z = 1 \mu\text{m}$ 達成
- ✓輪郭度 $5 \mu\text{m}$ を達成

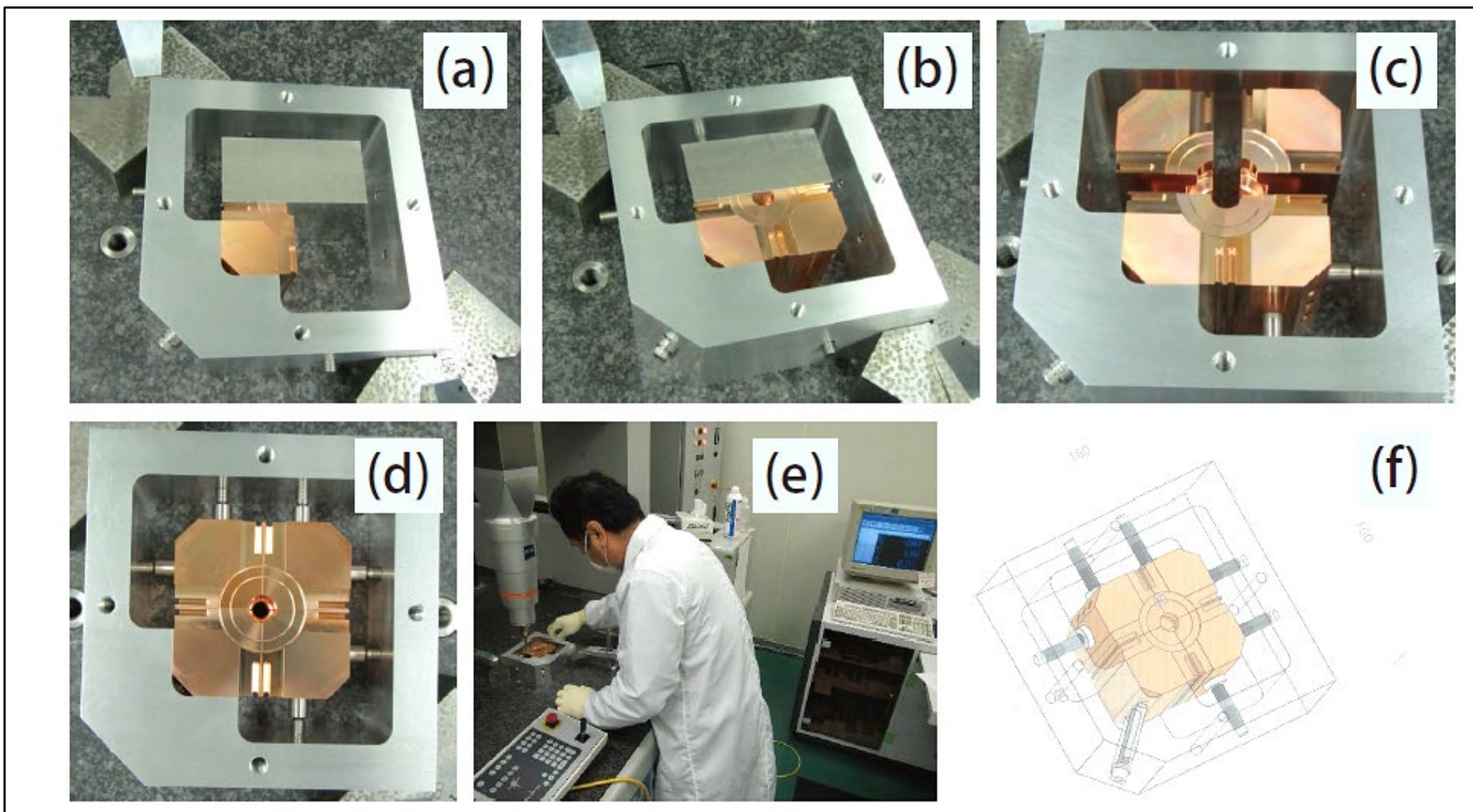


超精密組立

組立精度：10 μm 達成！

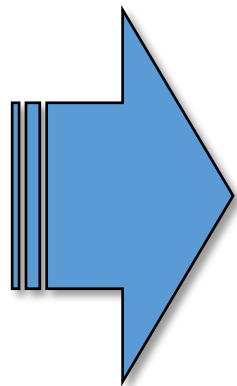
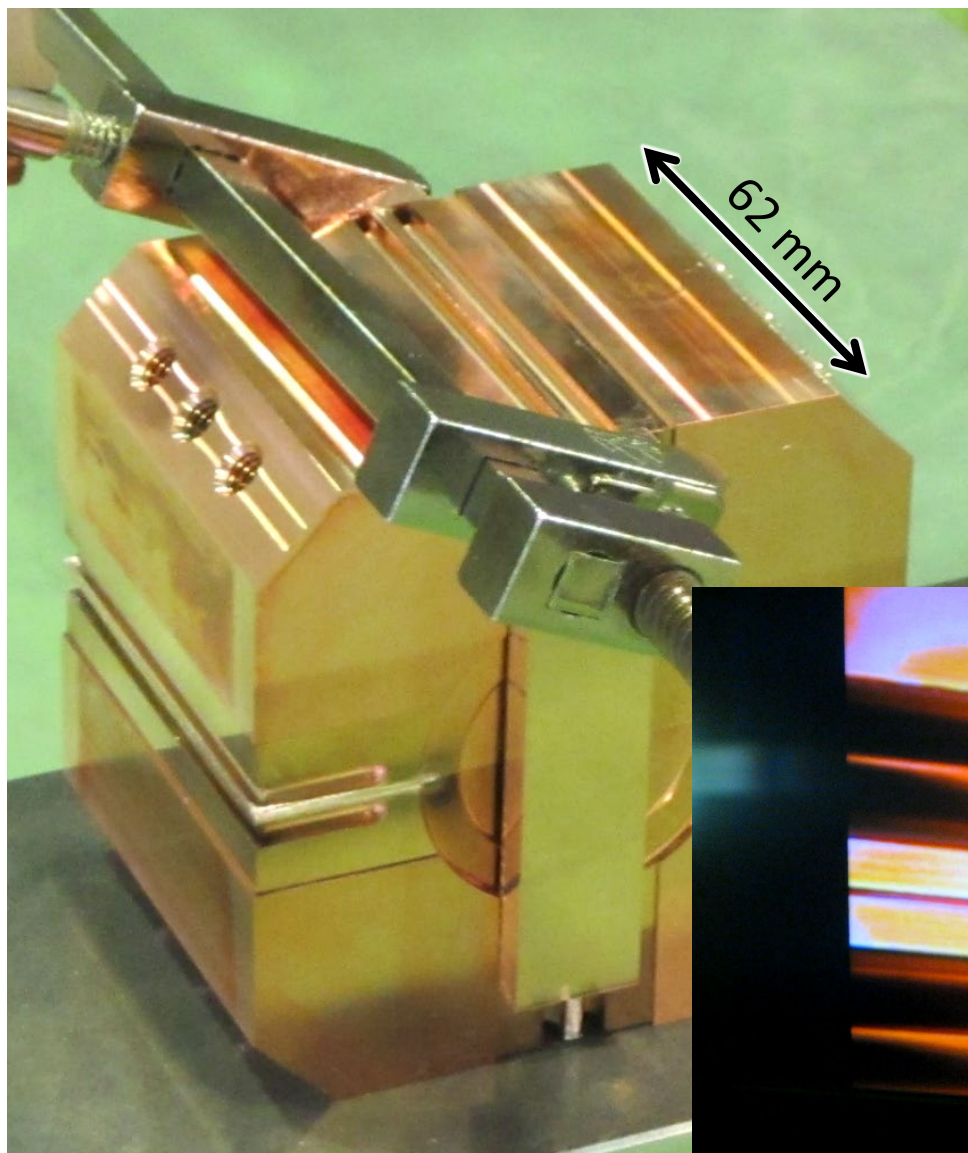
For details, see
[T. Abe et al., "Basic Study on High-Gradient Accelerating Structures at KEK/Nextef," in Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 2015 \(Paper ID: WEP060\).](#)

作業者：高富 俊和 氏 (KEK 機械工学センター)

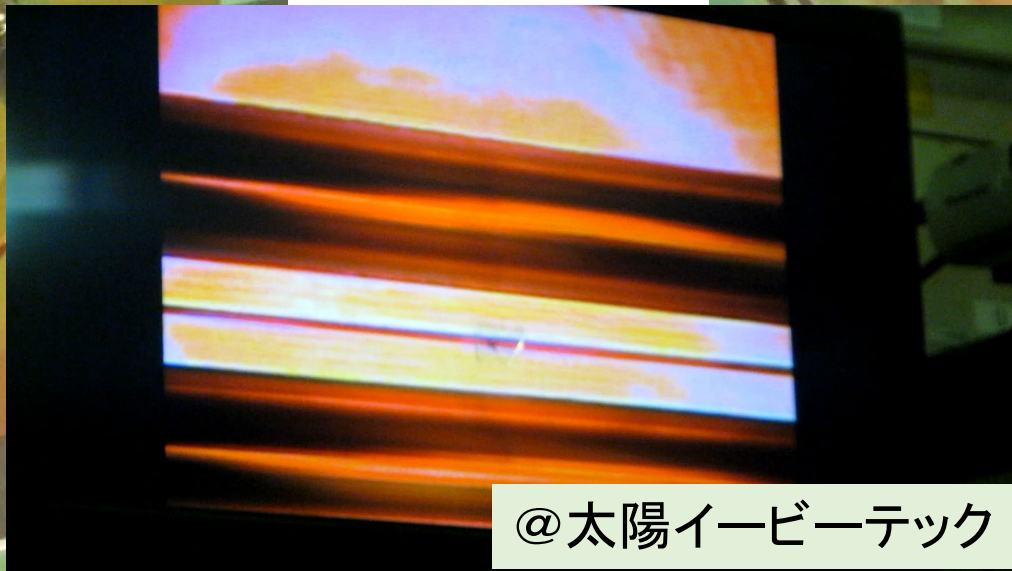
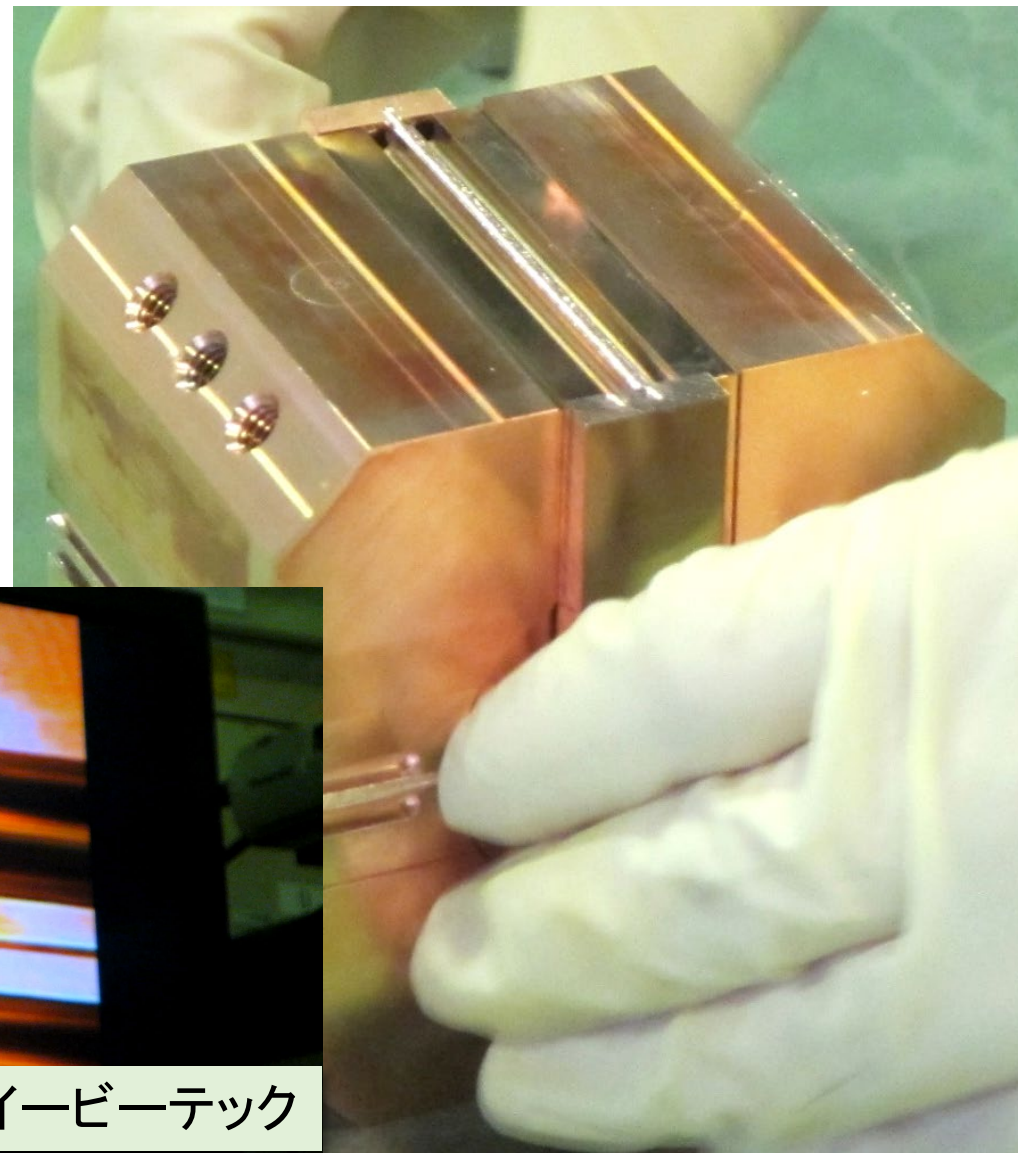


電子ビーム溶接

Before

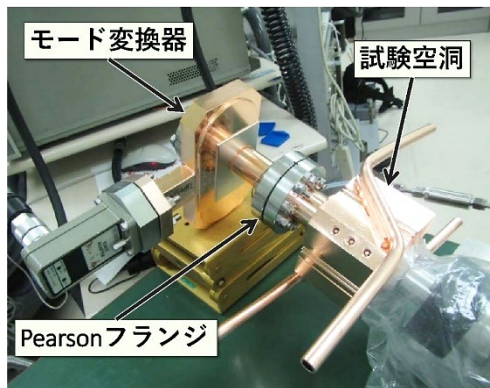


After



@太陽イービーテック

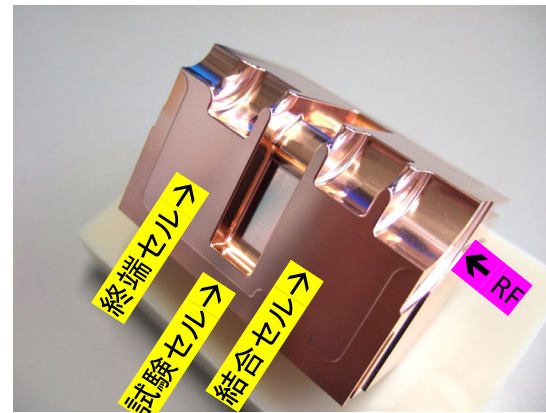
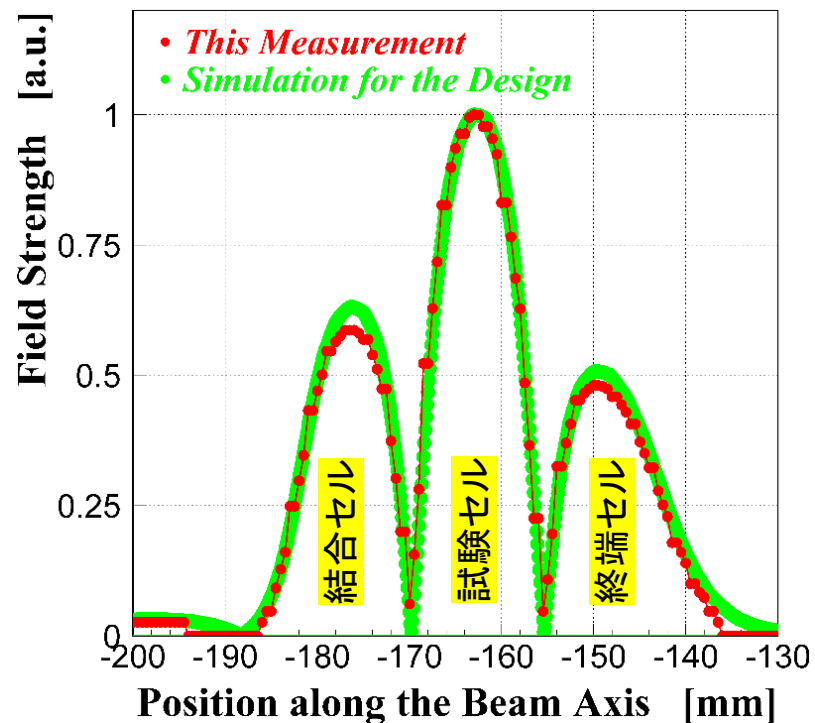
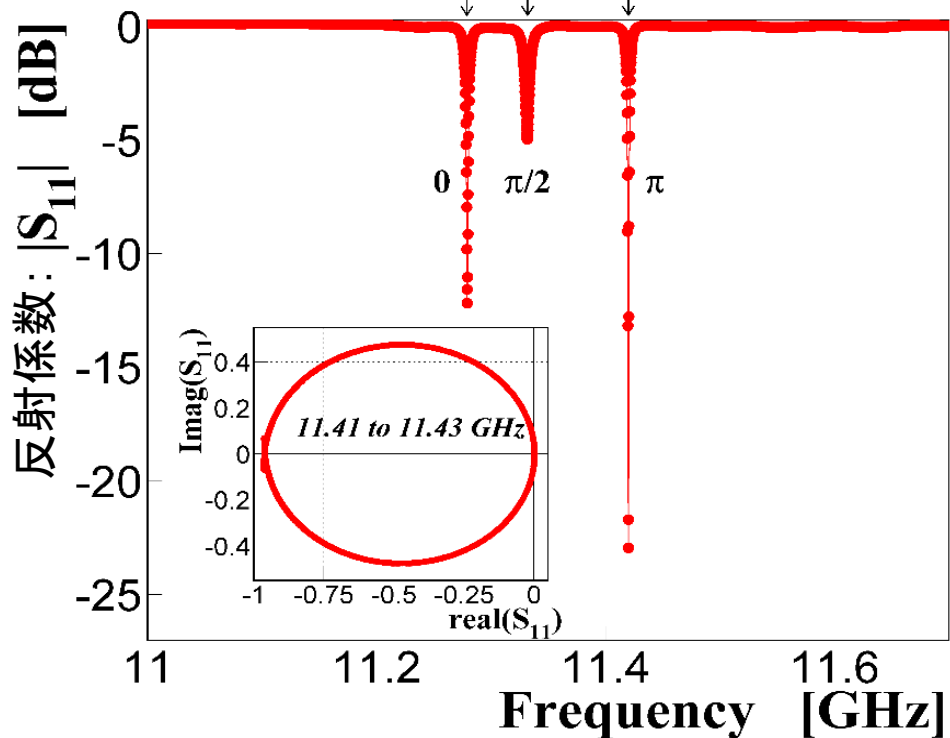
ローパワーRF測定の結果



- ✓ デザイン通り
- ✓ チューニング無しで高電界試験へ



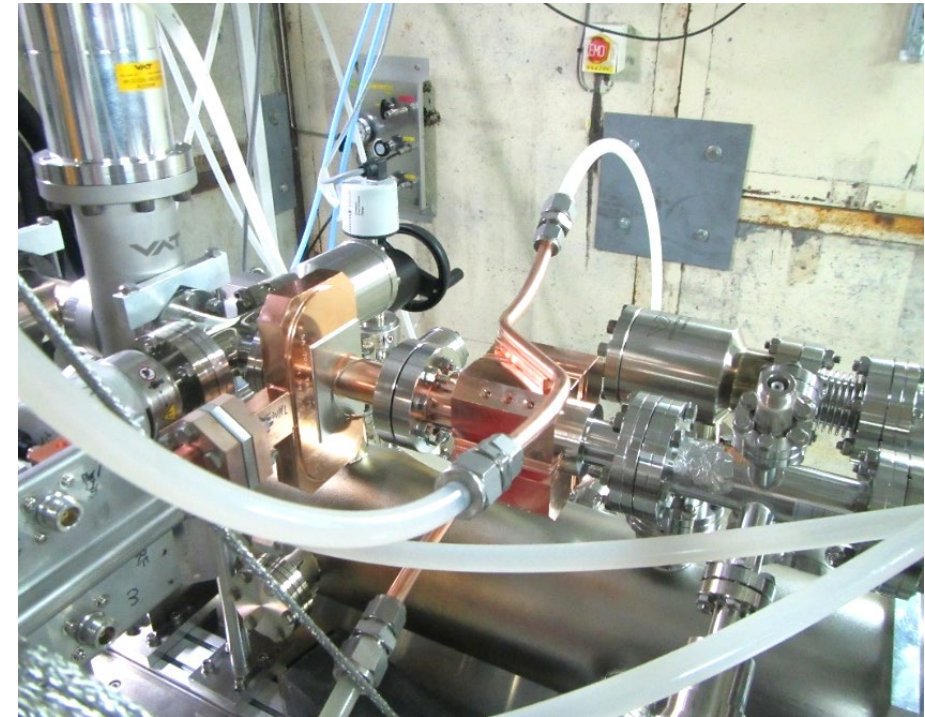
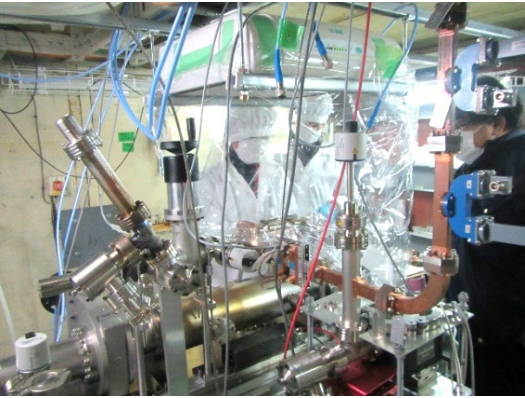
ビードプル法で測定した
軸上の加速フィールド分布↓



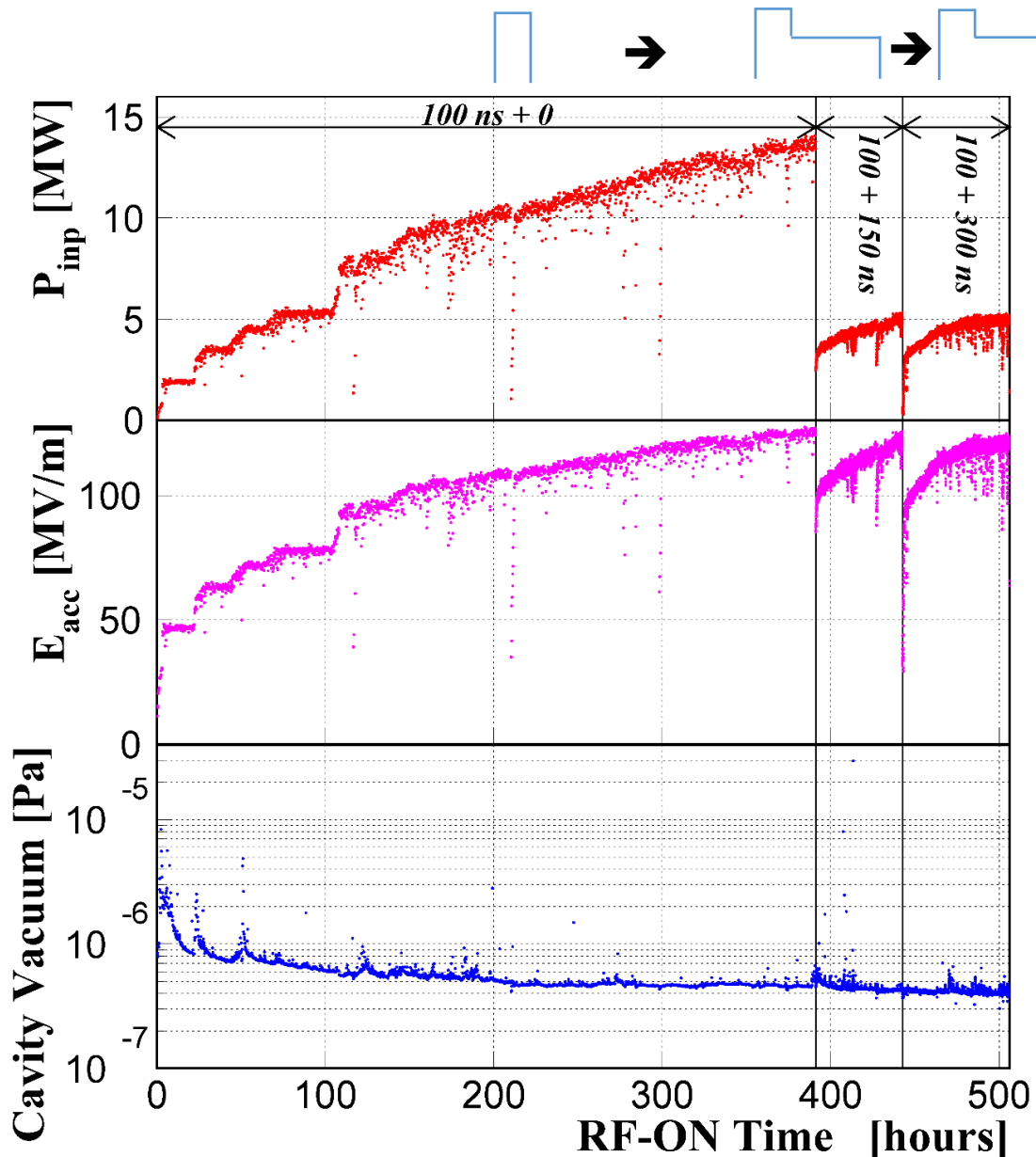
テストスタンド (Nextef1 / Shield-B) へインストール

Jan. 23, 2017

クリーンな環境でインストール作業

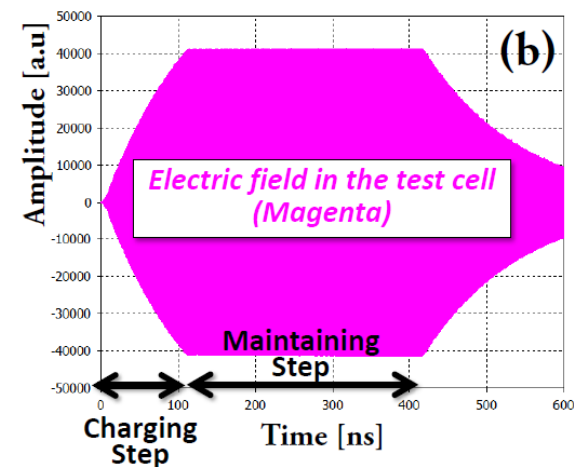
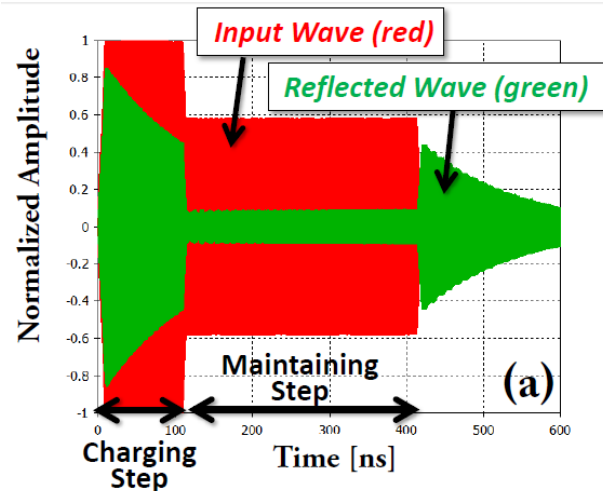


大電力RFコンディショニング履歴



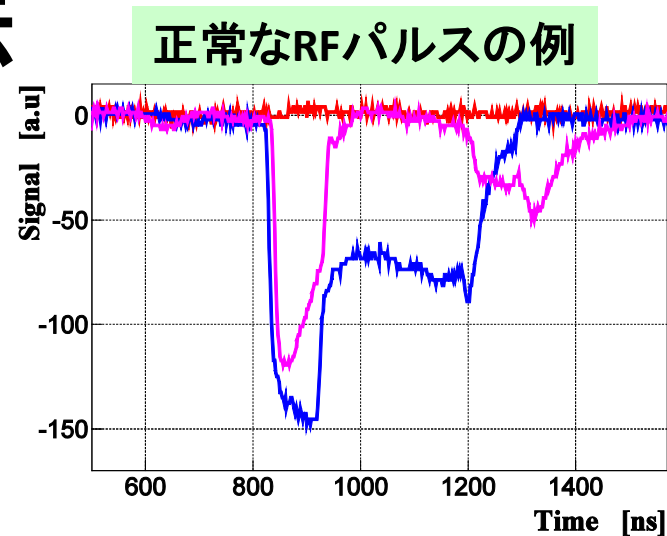
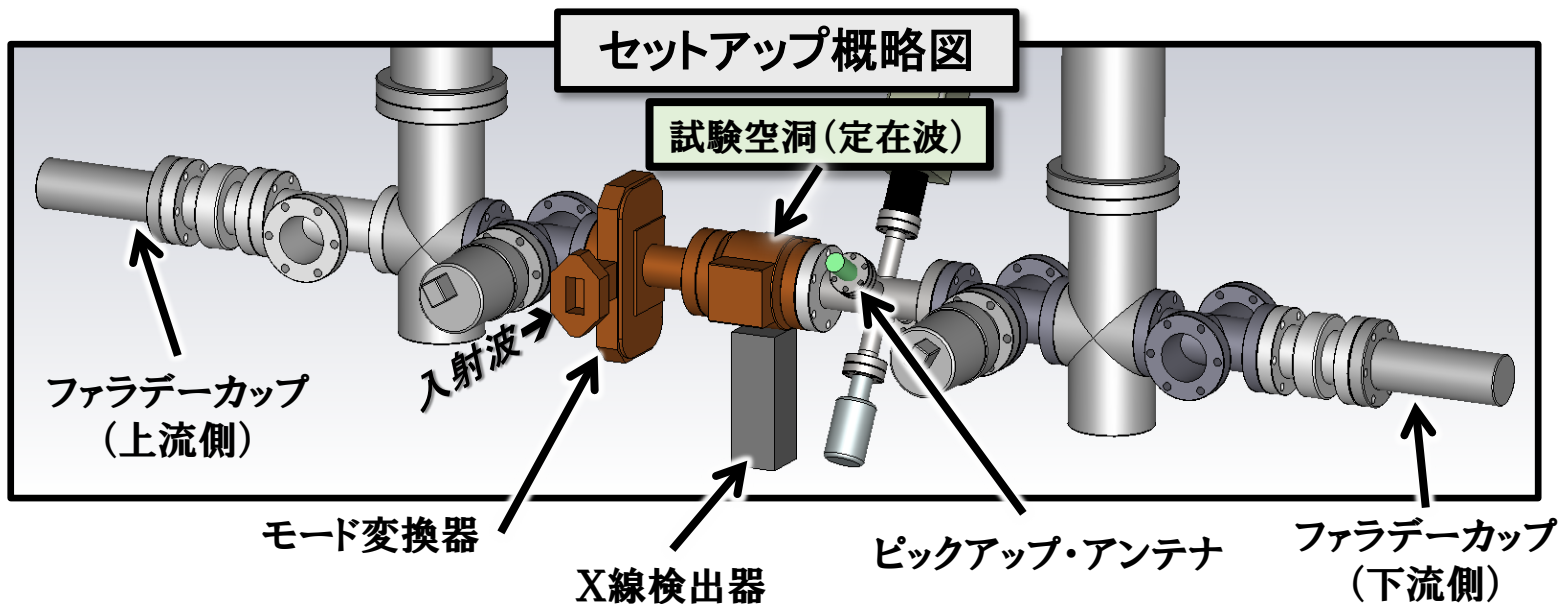
$E_{acc} = 125$ MV/m まで

問題なくコンディショニング出来た！



(もっと上まで行けたが、
試験期間の都合で、
ここまでとなった)

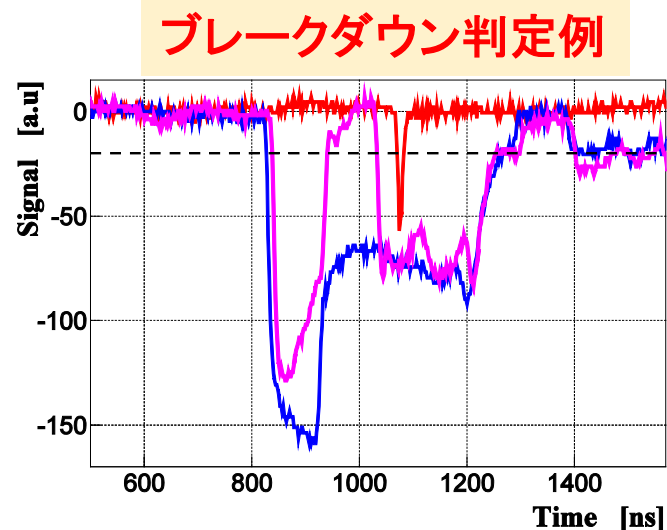
ブレークダウン(真空放電)の検出法



- 入射波 (青色)
- 反射波 (紫色)
- 上流側カレント (赤色)

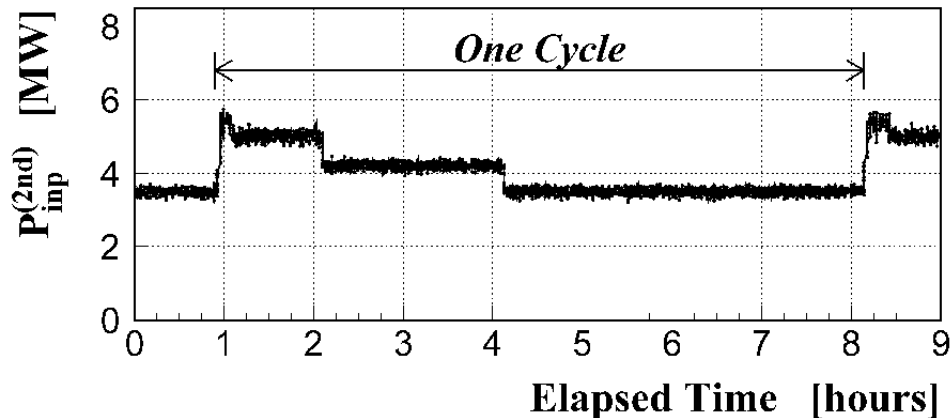
- ファラデーカップに閾値を超える信号がある
- 反射波形に異常がある

- ✓ 2つの独立した方法で、ブレークダウン検出数の違いは1割程度
- ✓ ブレークダウンイン率の正確な測定を実現



(大電力RFコンディショニング後の)ブレークダウン率測定結果@KEK/Nextef1(2017年)

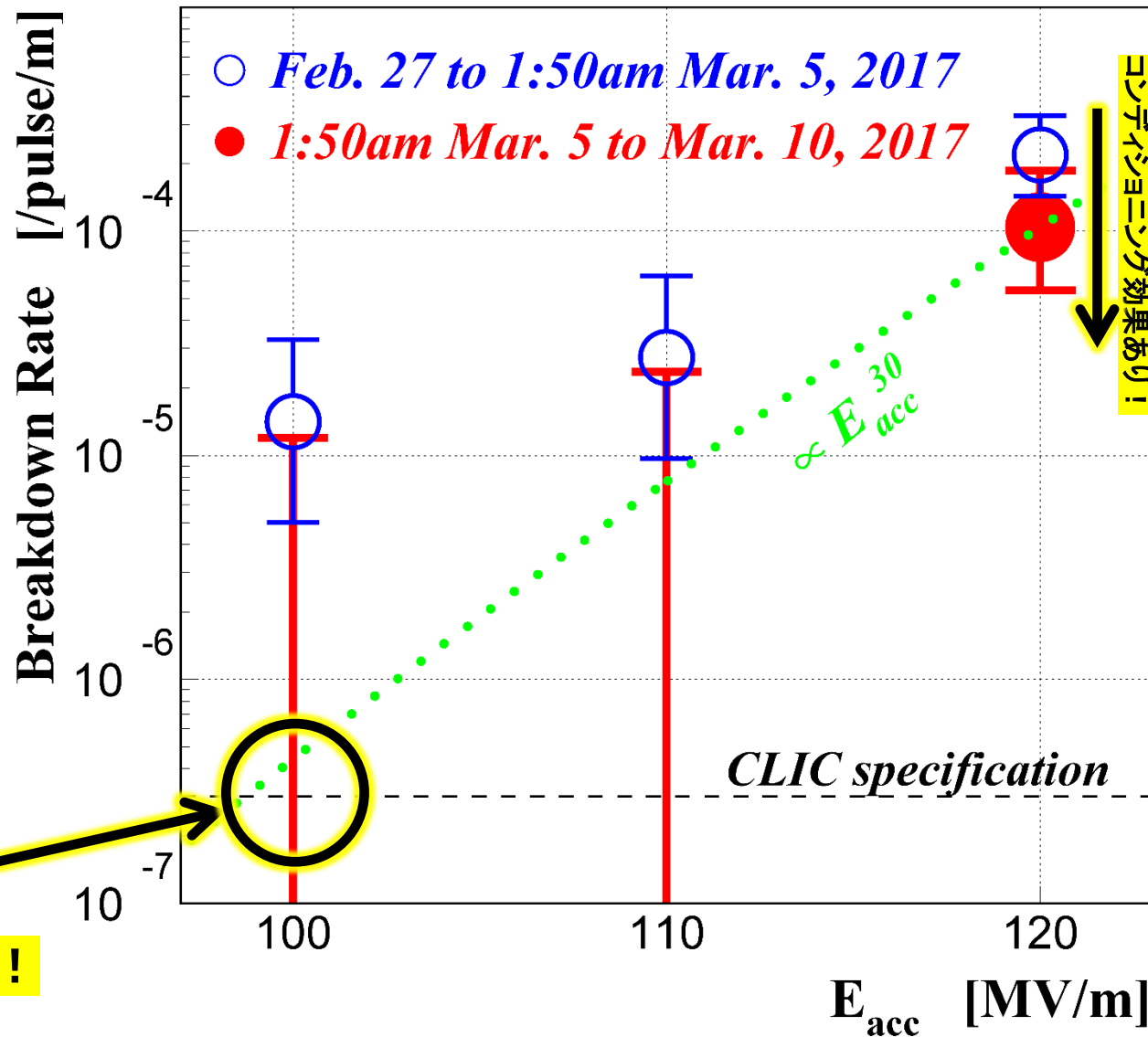
SD1_QUAD-R04G01_K1, 100+150 ns



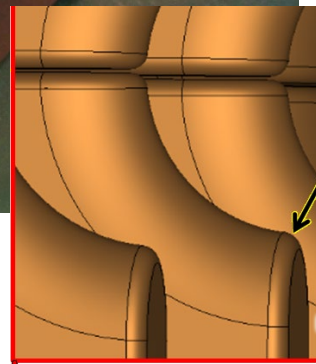
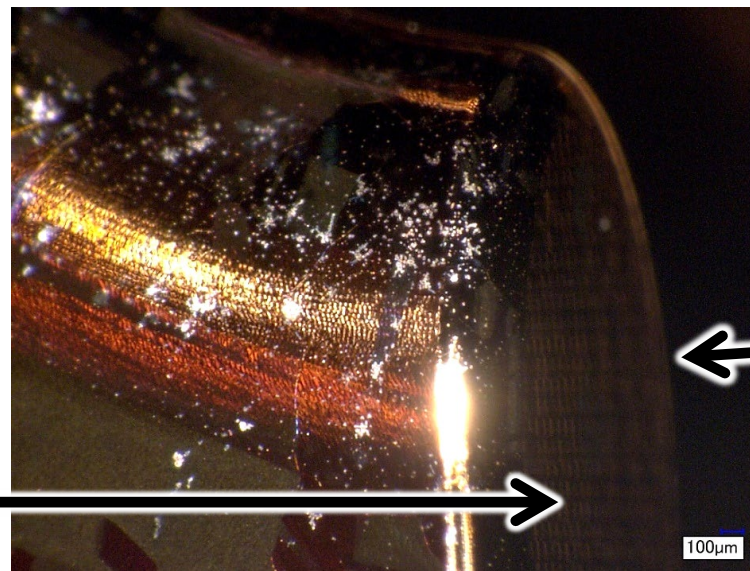
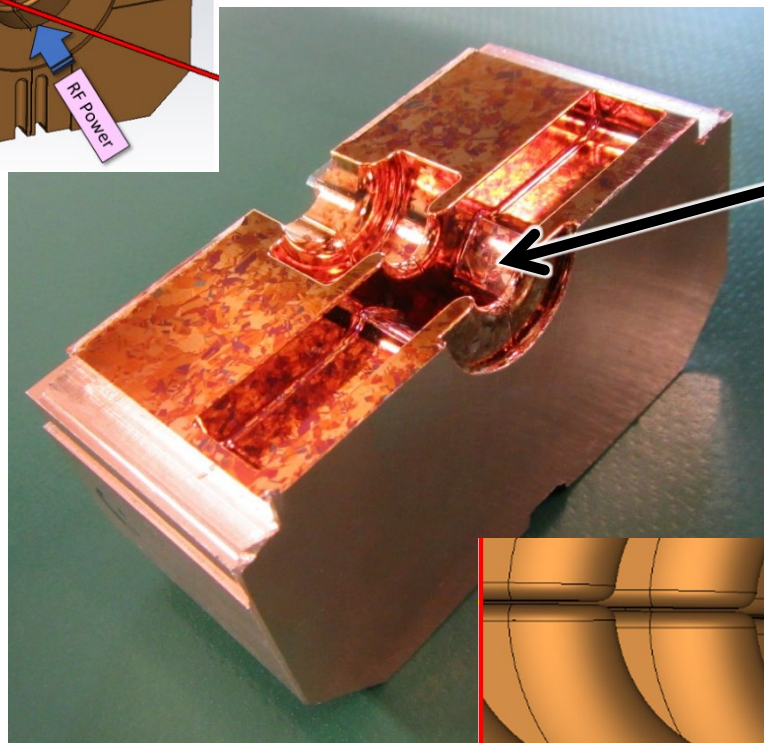
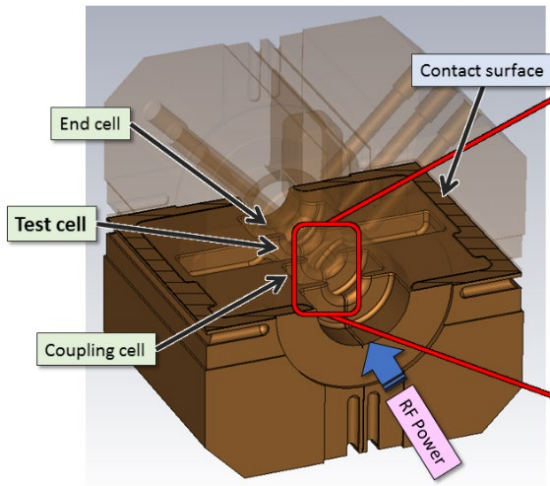
詳しくは下記参照:

[阿部 哲郎 他、「4分割方式Xバンド単セル型空洞の高電界試験の結果」\(第14回日本加速器学会年会、WEP039、2017年\)](#)

加速勾配 100 MV/m にて、
常伝導リニアコライダーCLIC
のスペックを満たせる可能性あり!



高電界試験後の検査

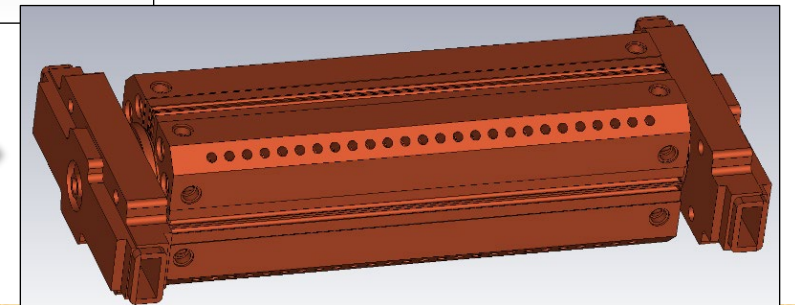
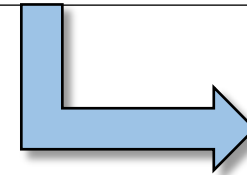
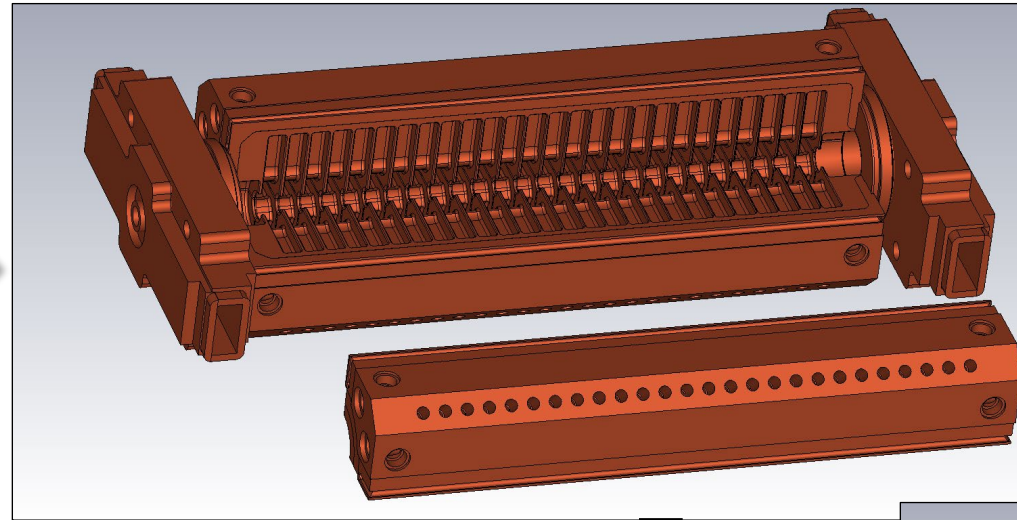
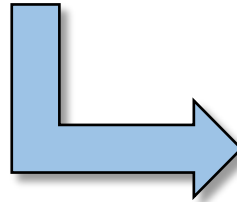
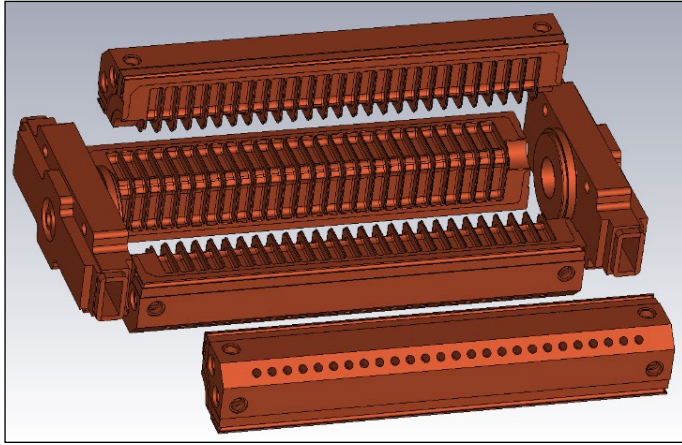


0.1 mm ギャップ内は
無傷

0.1 mm の微小ギャップは
問題ない
(但し、ビーム無し)

➔ 改良縦方向分割方式の基本的性能の実証はできた

改良4分割方式の完全な原理実証のため、 24セルのCLICプロトタイプ加速管(進行波)を製作

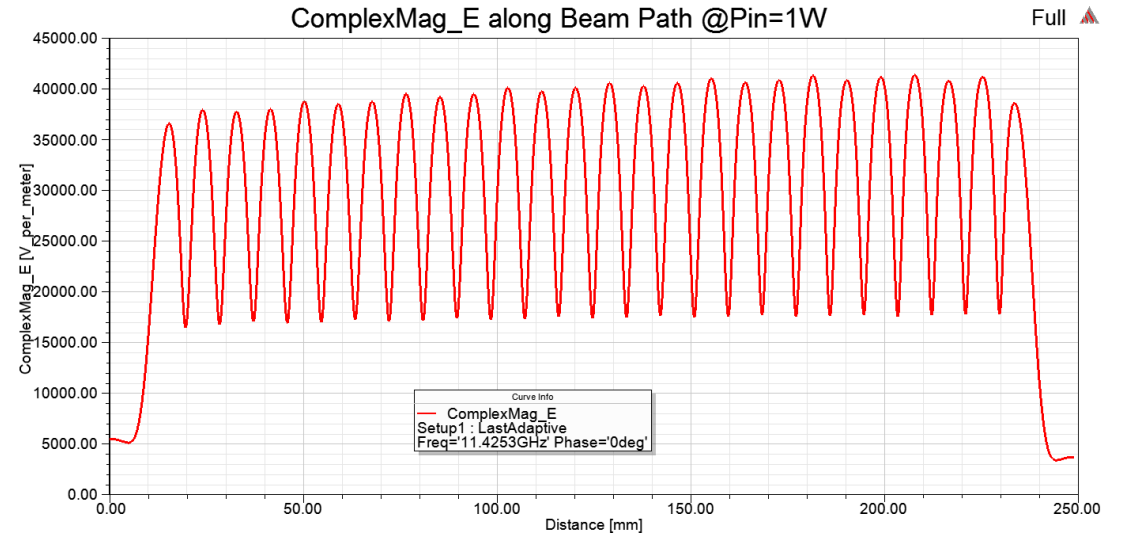
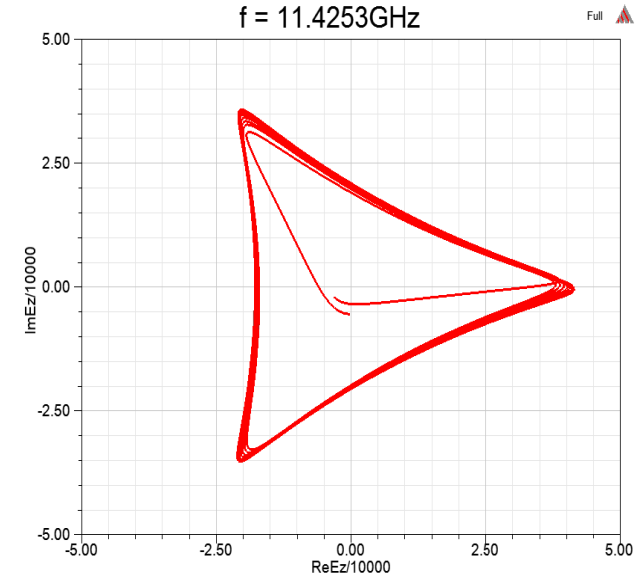
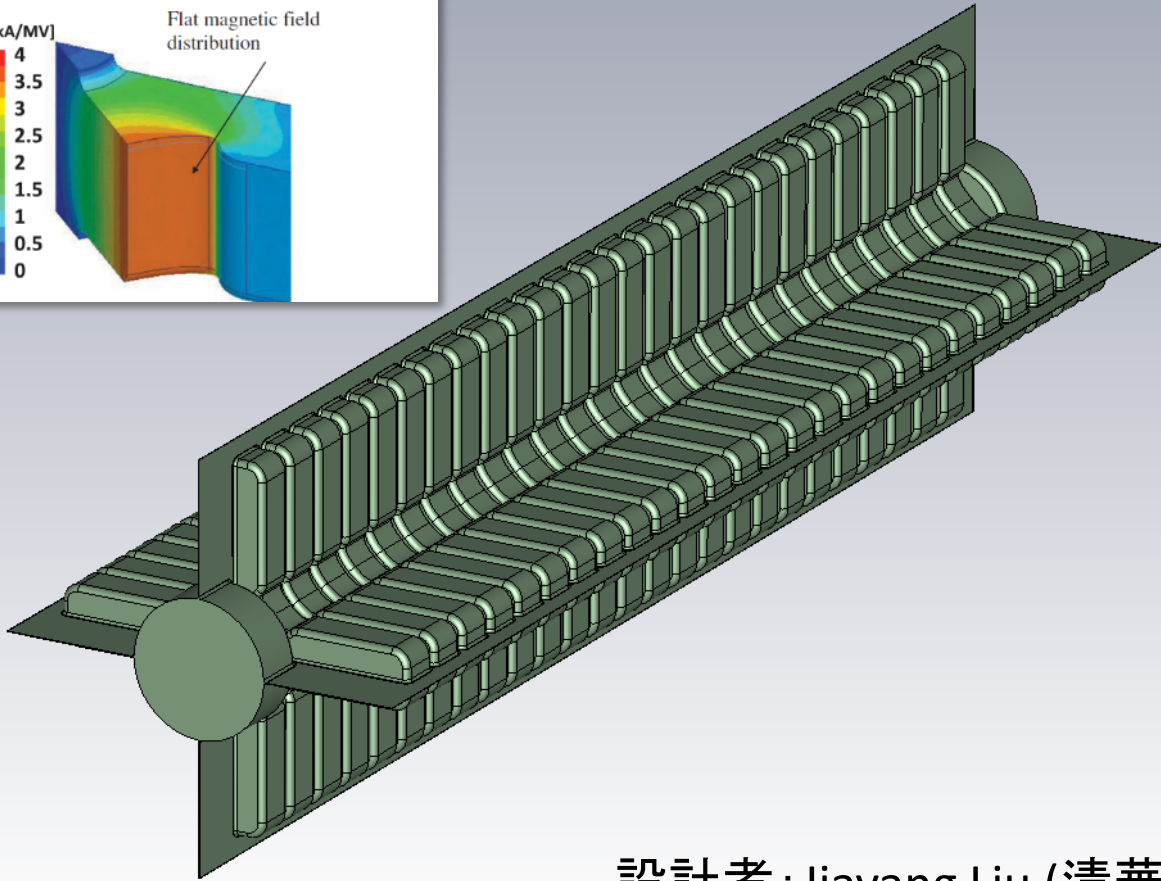
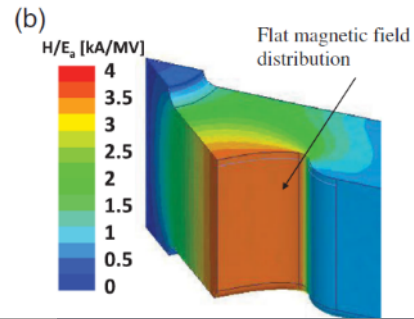
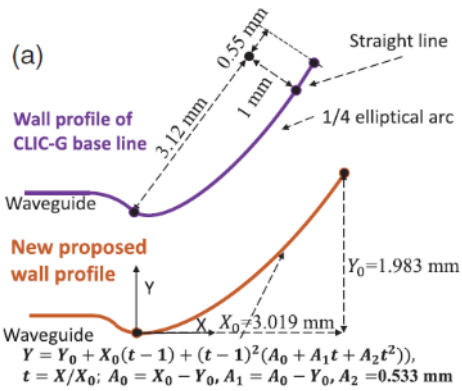


「CLIC-G*」に基づく電気設計

GLIC-G* の詳細は、下記参照:

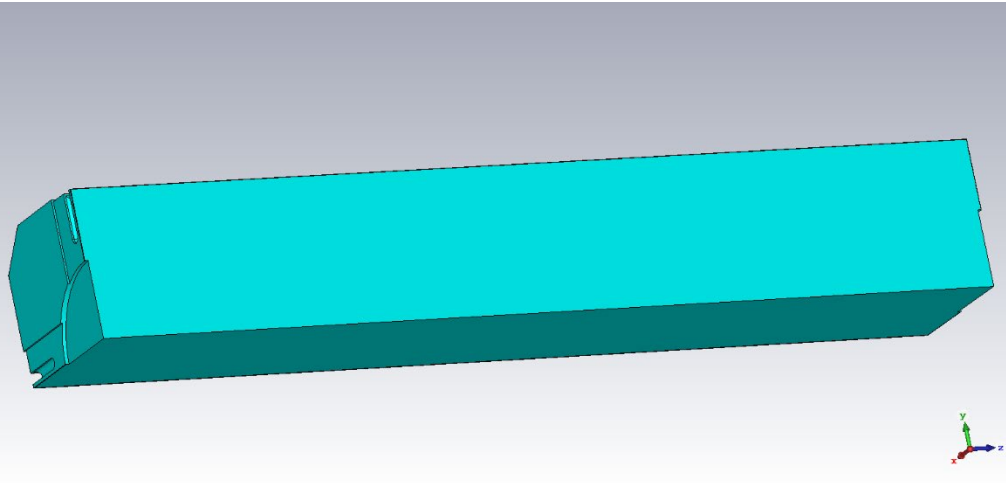
[Hao Zha and Alexej Grudiev, "Design and Optimization of Compact Linear Collider Main linac Accelerating Structure", Phys. Rev. Accel. Beams **19**, 111003 \(2016\).](#)

(加速モード周波数: 11.4 GHz)

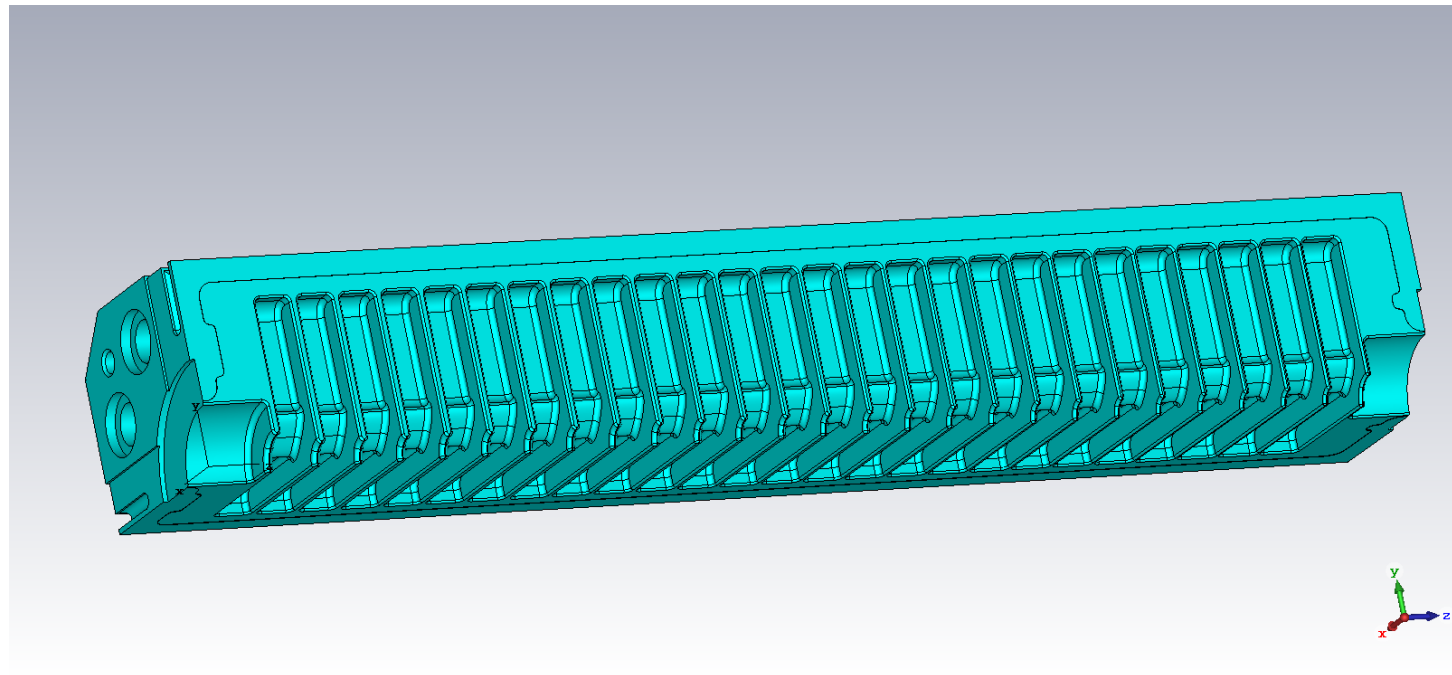
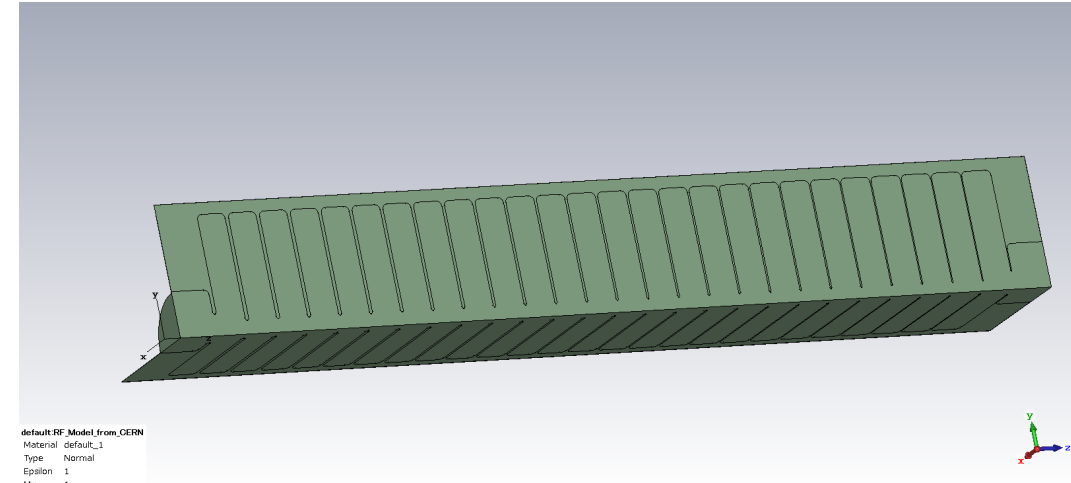


設計者: Jiayang Liu (清華大学)、Alexej Grudiev (CERN)

製作図面(3D)

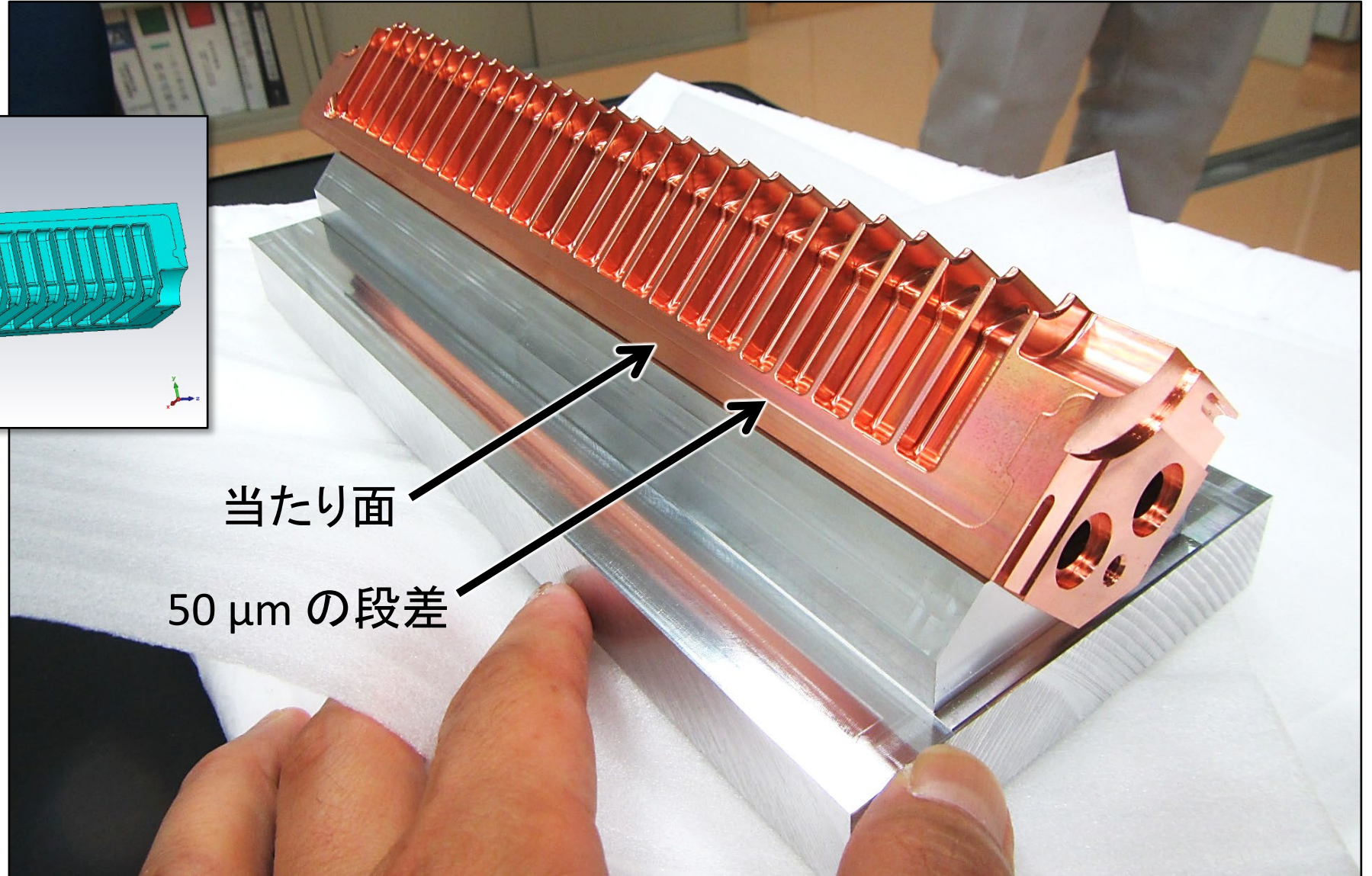
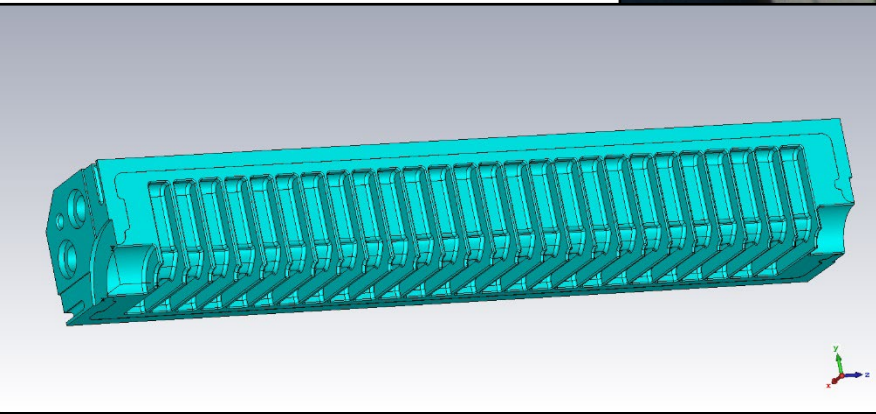


minus



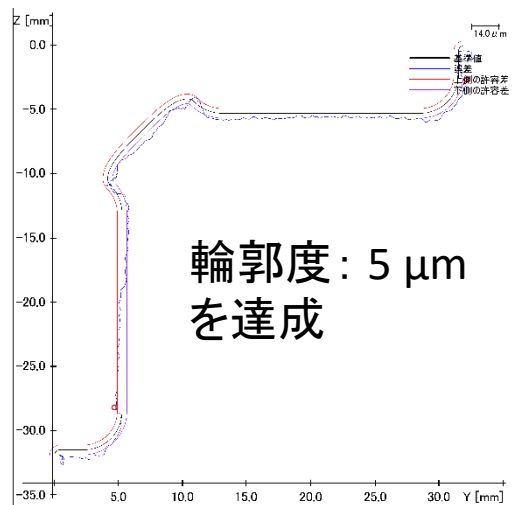
超精密ミリング加工

加工者: [ユー・コーポレーション](#)

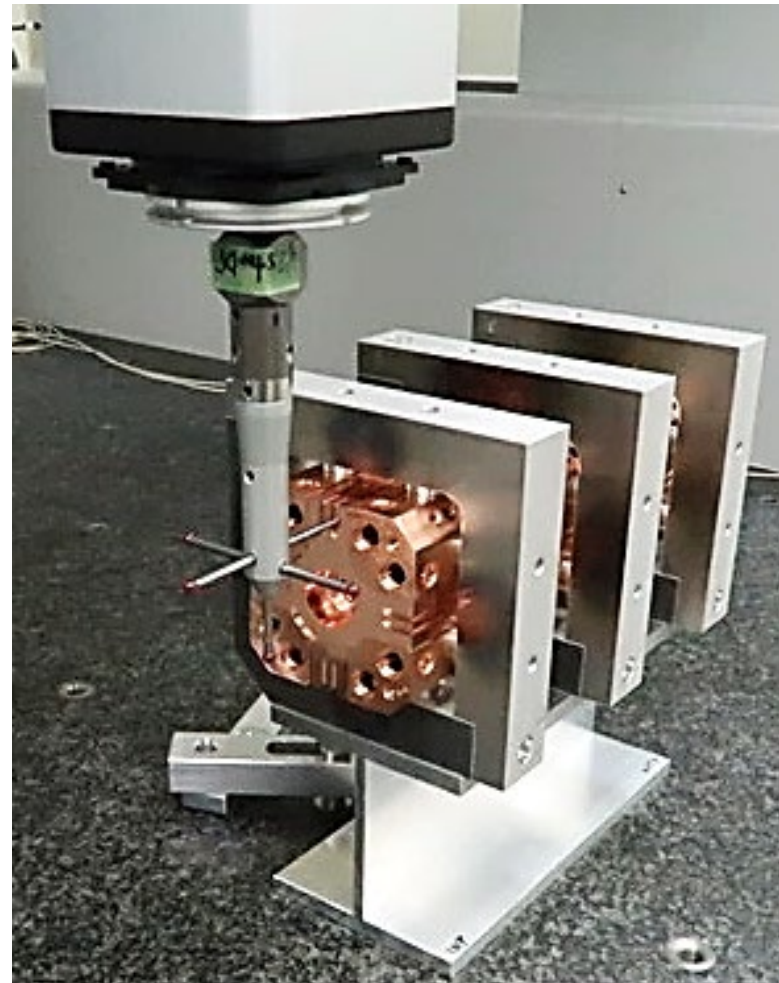
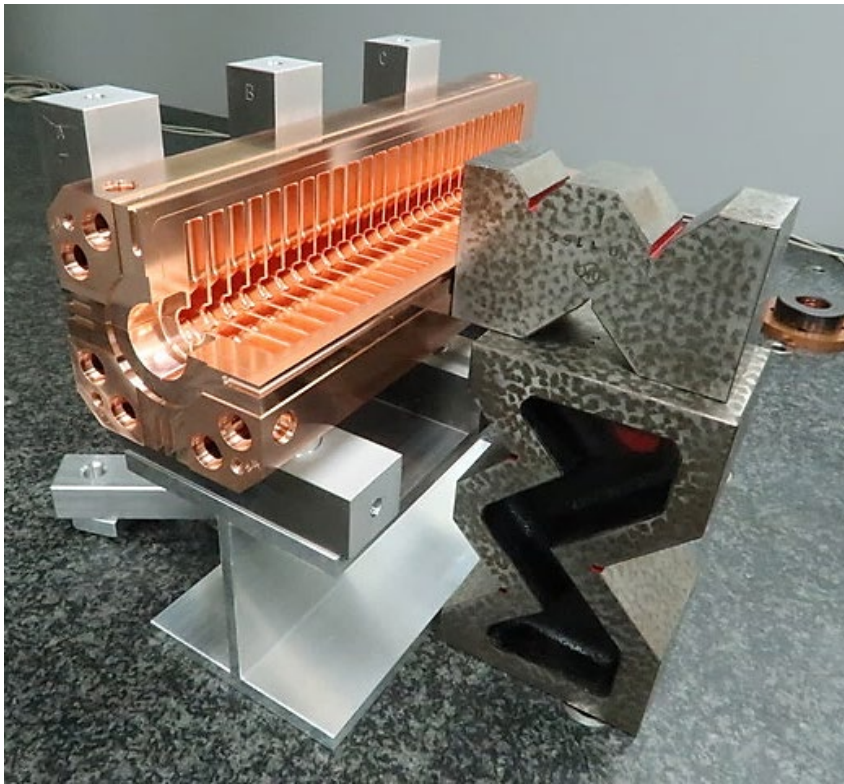


当たり面

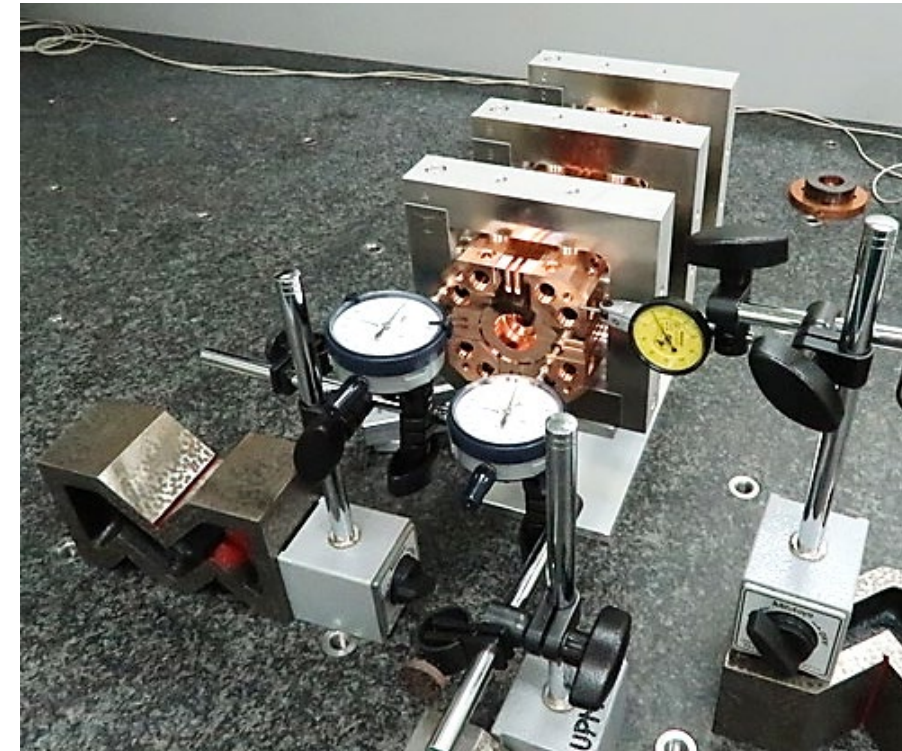
50 μm の段差



5 μm の精度で組立



(CMMを使用)



電子ビーム溶接 (EBW) による接合

ディスク積層方式でも可能だが、困難

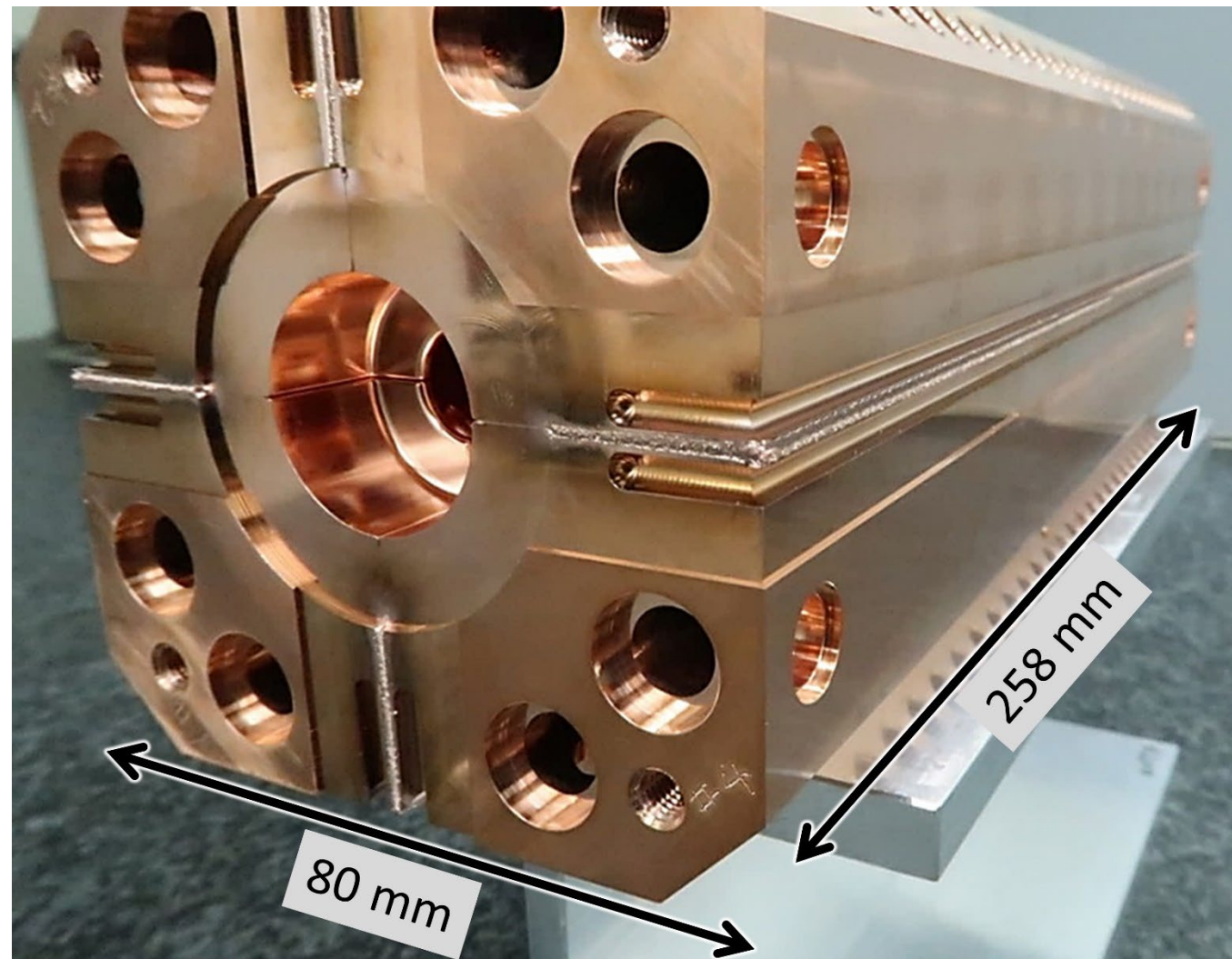
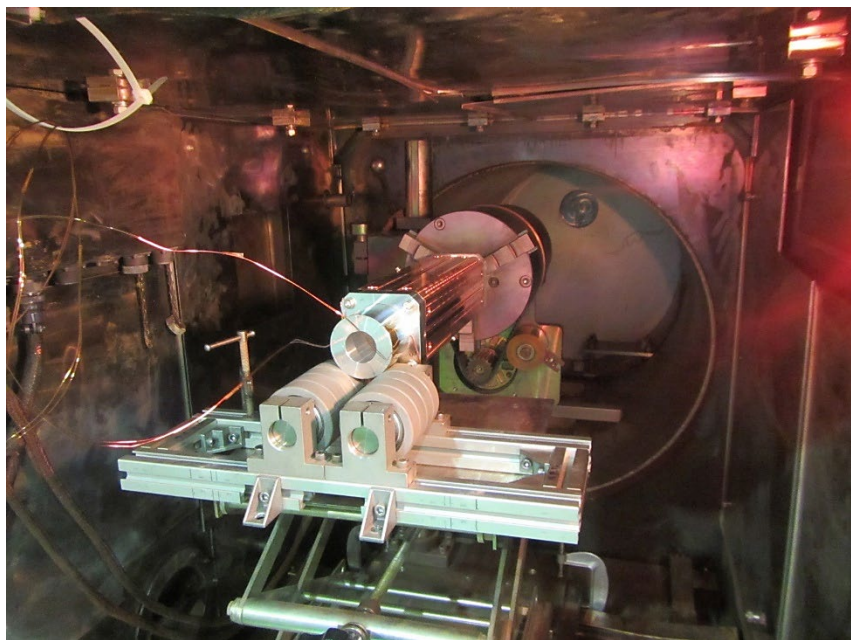
溶接者: [太陽イービーテック](#)

本溶接の条件

- ・加速電圧: 150 kV
- ・ビーム電流: 10 mA
- ・送りスピード: 750 mm/min
- ・フォーカスポイント: 20 mm 上

- ➔ 溶け込み深さ: 約 1.5 mm
- ➔ 物温上昇: 最高 25°C

↓EBW完了後

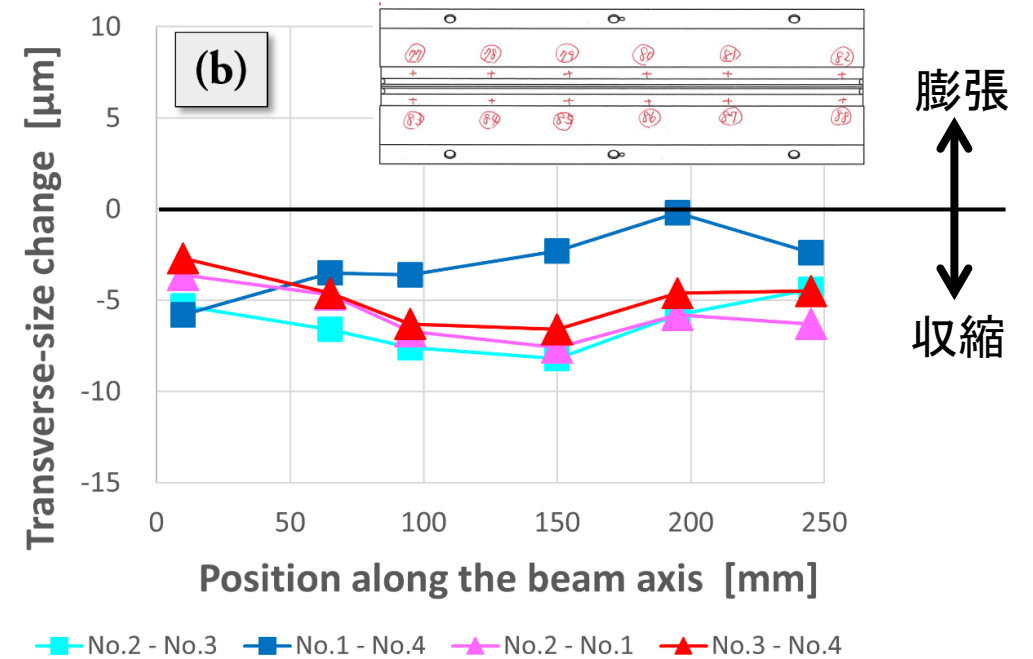
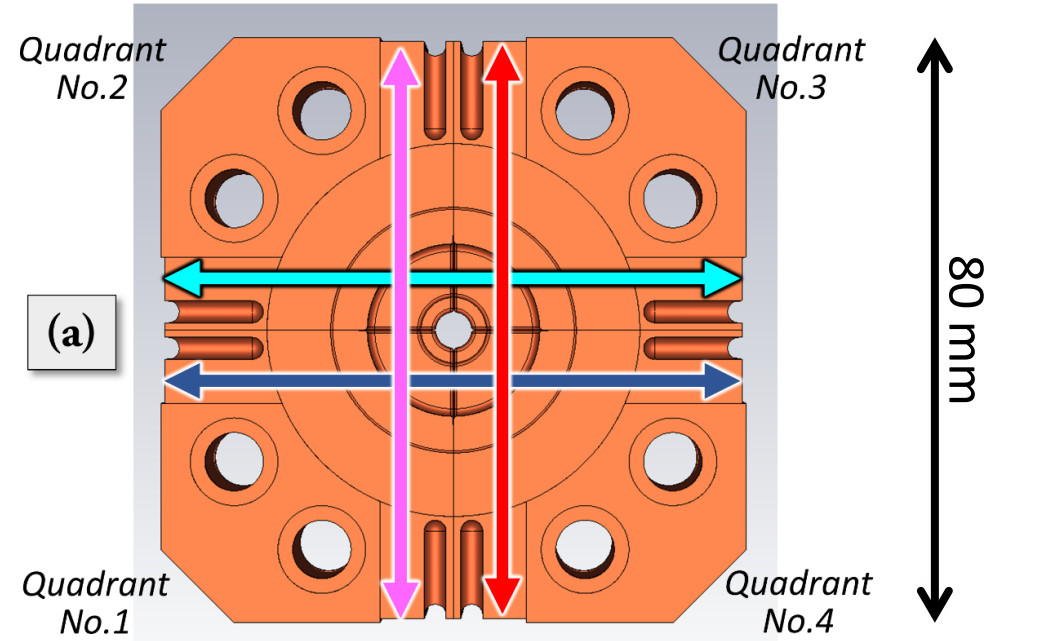


EBWによる直角方向サイズの変化を測定

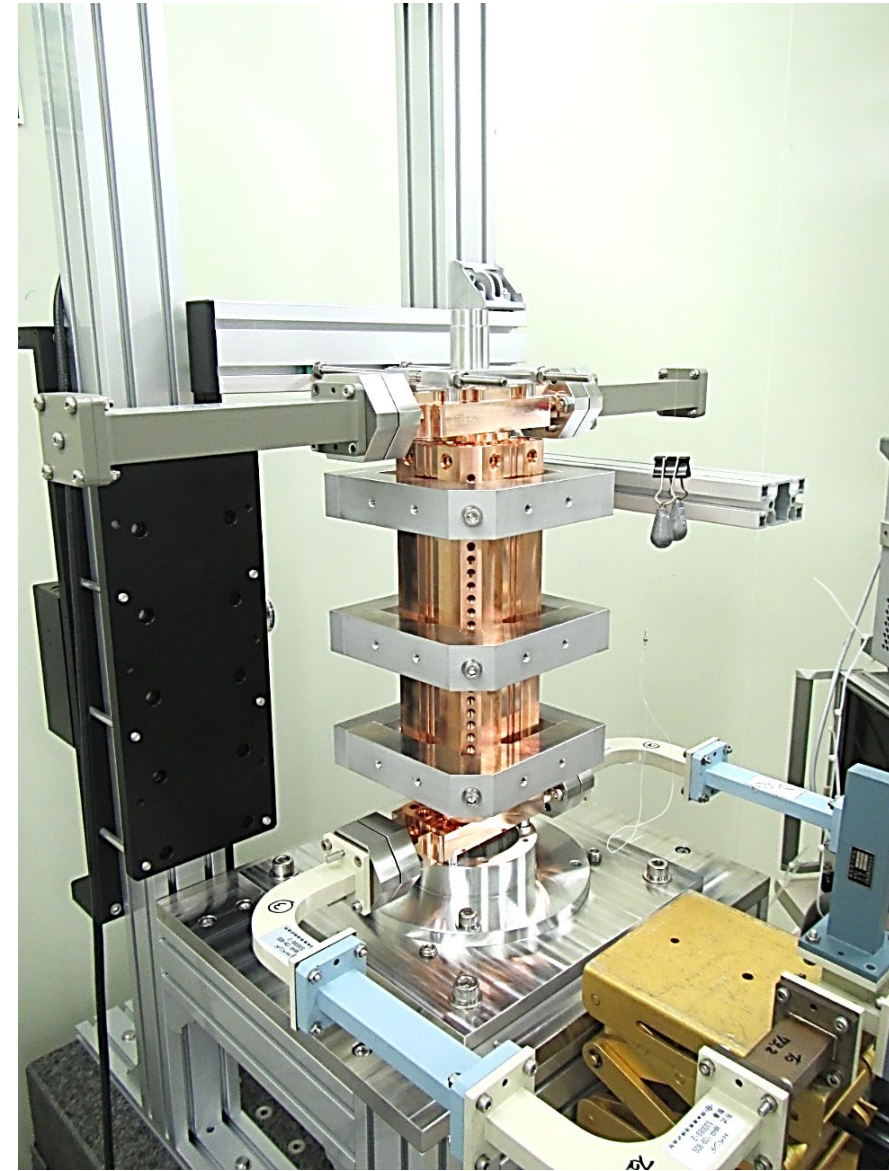
測定器: カール ツァイス UPMC 850 CARAT



- ✓ 平均で 5 μm の縮み
- ✓ ばらつきは 2~3 μm

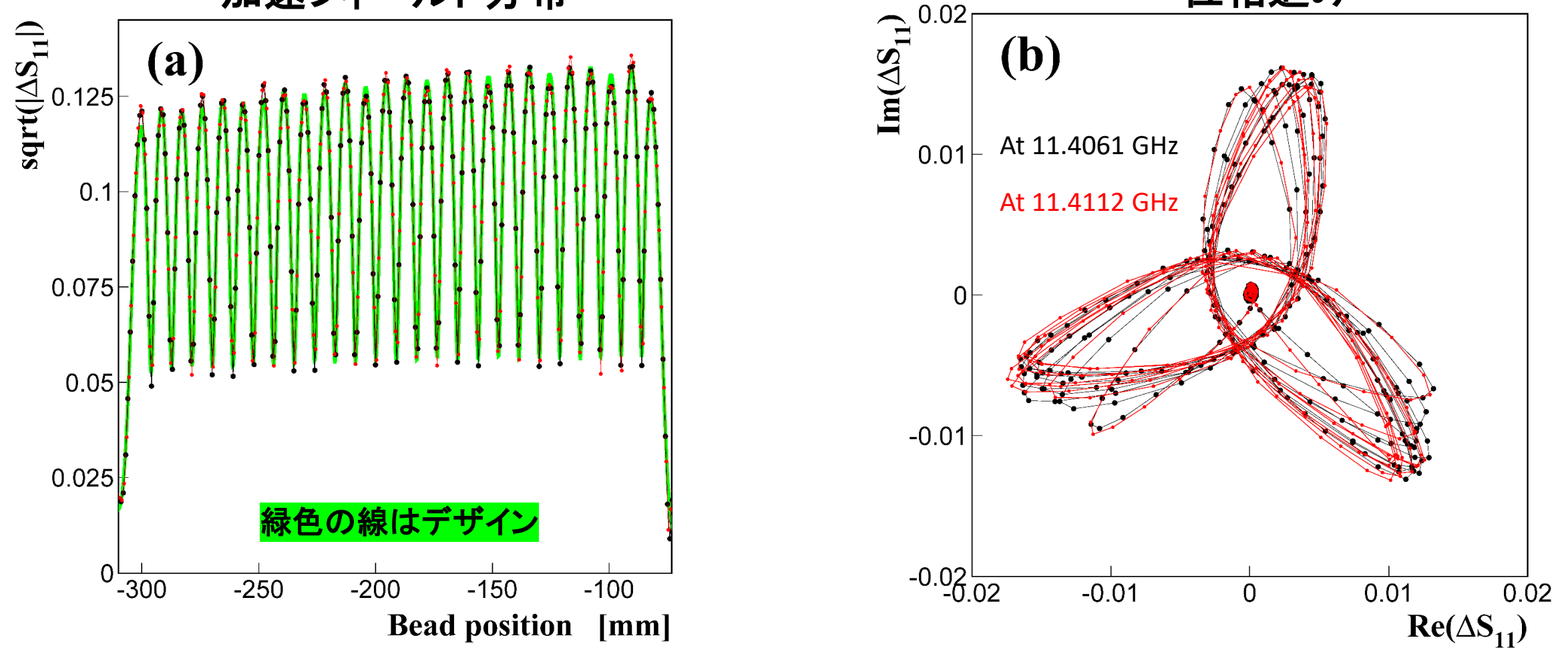


低電力RF測定の設定アップ



【RF測定結果1】EBWの前(黒)と後(赤)

加速フィールド分布 (周波数チューニングはまだ行ってない) 位相進み



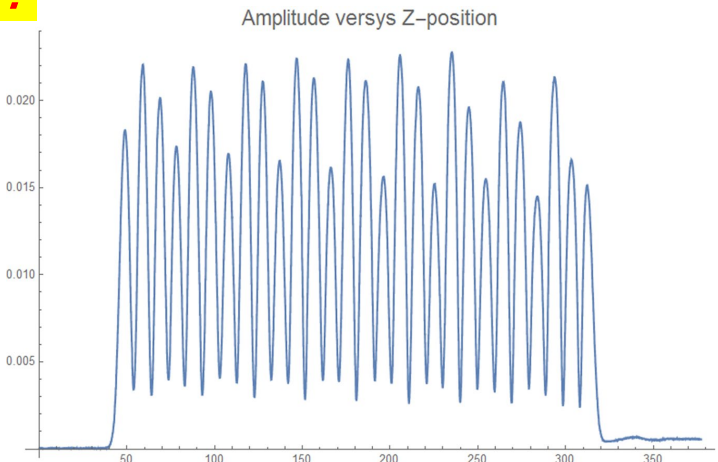
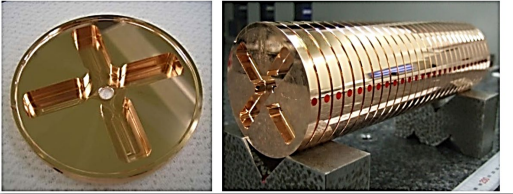
- ✓ EBW前後で大きな変化なし
- ✓ 周波数チューニング前で設計値に近い

【参考】導波管型HOM減衰構造のあるCLICプロトタイプ加速管(Xバンド進行波)の加速電界強度分布の測定結果(周波数調整前)

ディスク積層方式

大きな定在波成分あり!

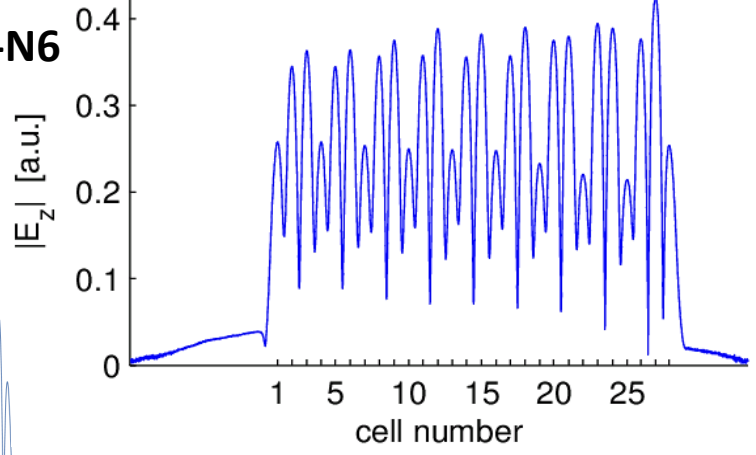
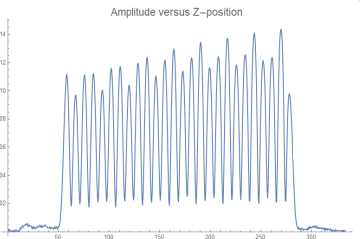
TD26CC-K1



TD26-CLEX-N6

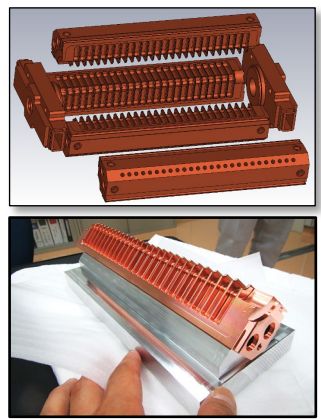
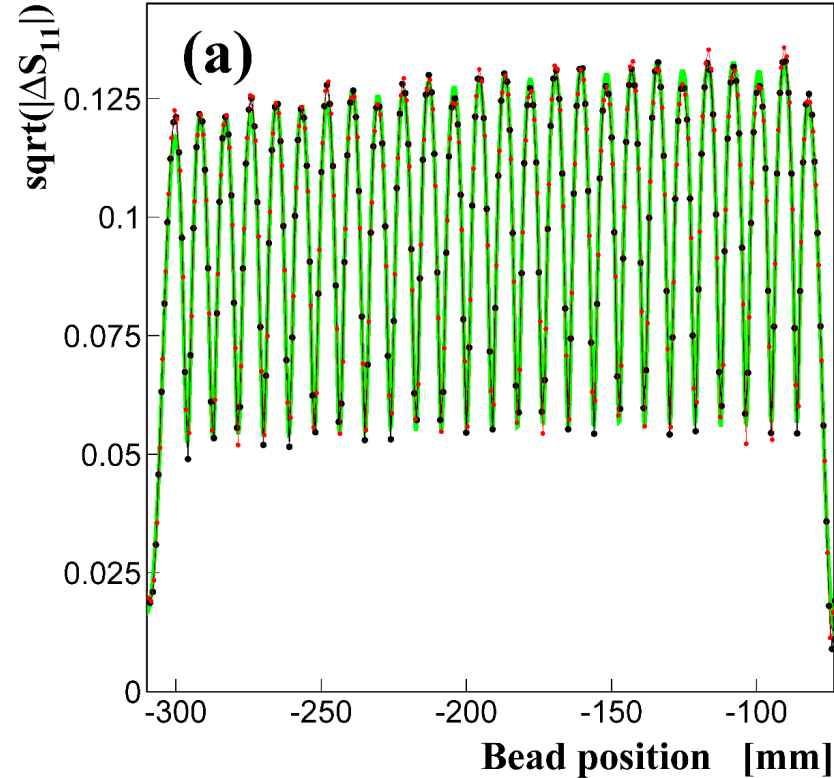
非減衰で定在波成分が比較的小さいのは、構造の複雑性と関係しているか?

T24-K1



縦方向分割方式

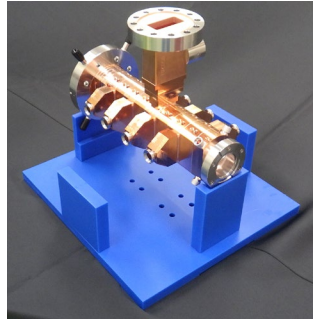
TD24R10_QUAD-R04G01_K1



- 電子ビーム溶接前の測定結果 --- 設計値
- 電子ビーム溶接後の測定結果(周波数調整前)

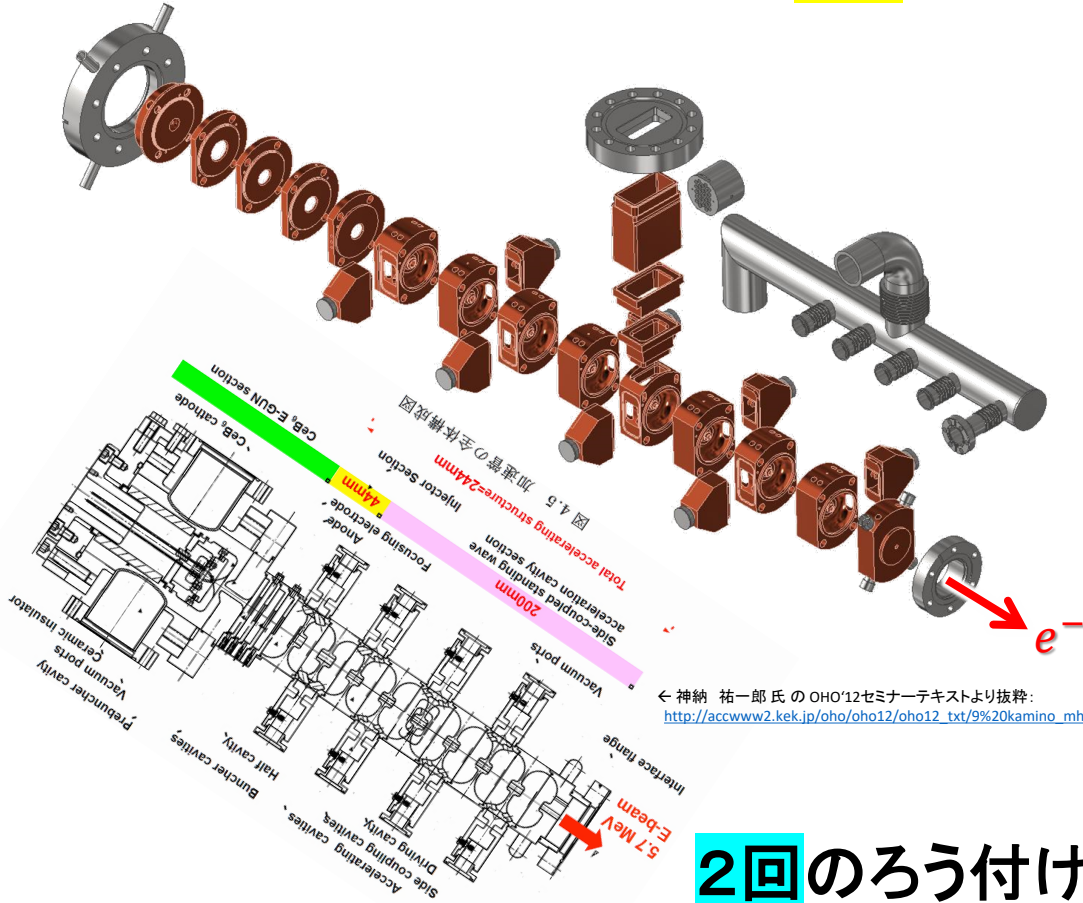
定在波成分は殆どなく、測定値は設計値とよく合っている!

同様の現象は、Cバンド小型加速管開発でもあった



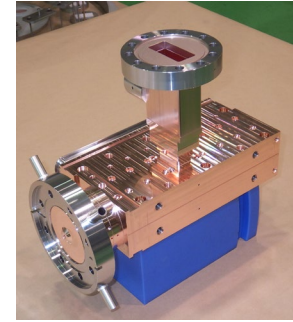
サイド・カップル型定在波管で、**構造が複雑**

ディスク積層方式
(パーツ数: **59個**)

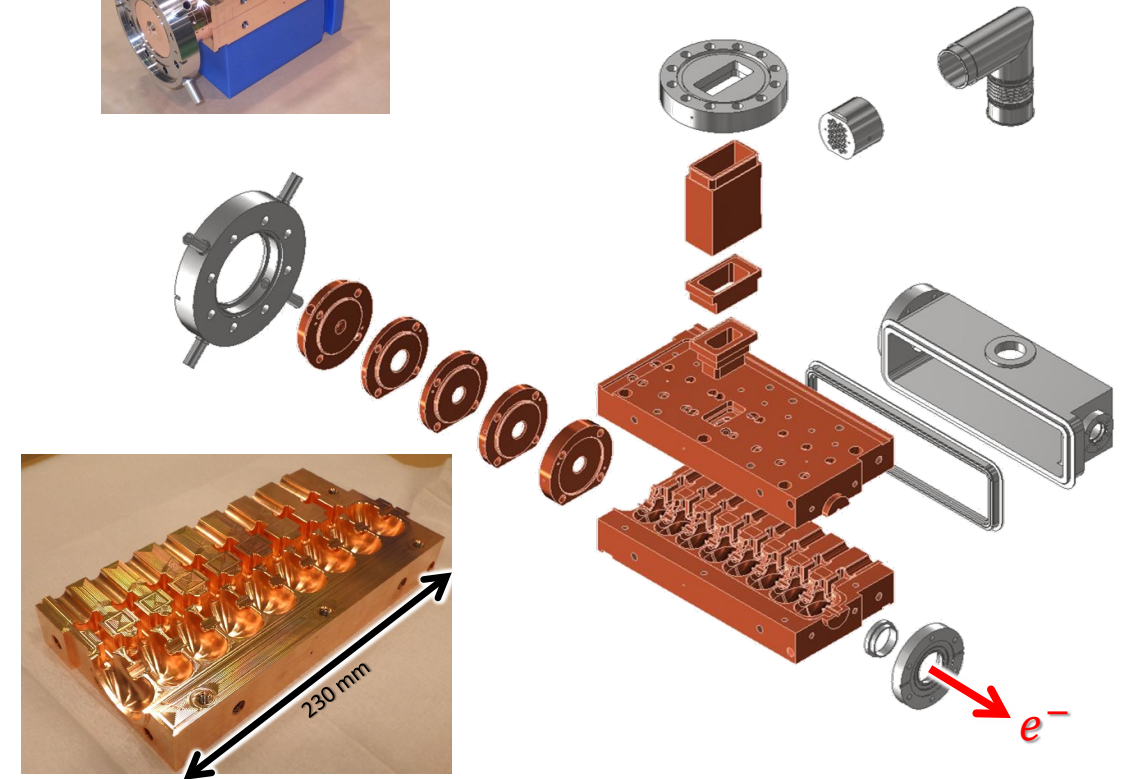


← 神納 祐一郎氏のOHO'12セミナーテキストより抜粋:
http://accwww2.kek.jp/ofo/ofo12/ofo12_txt/9%20kamino_mhi%2020120820.pdf

2回のろう付けで接合



縦方向分割方式
(パーツ数: **25個**)



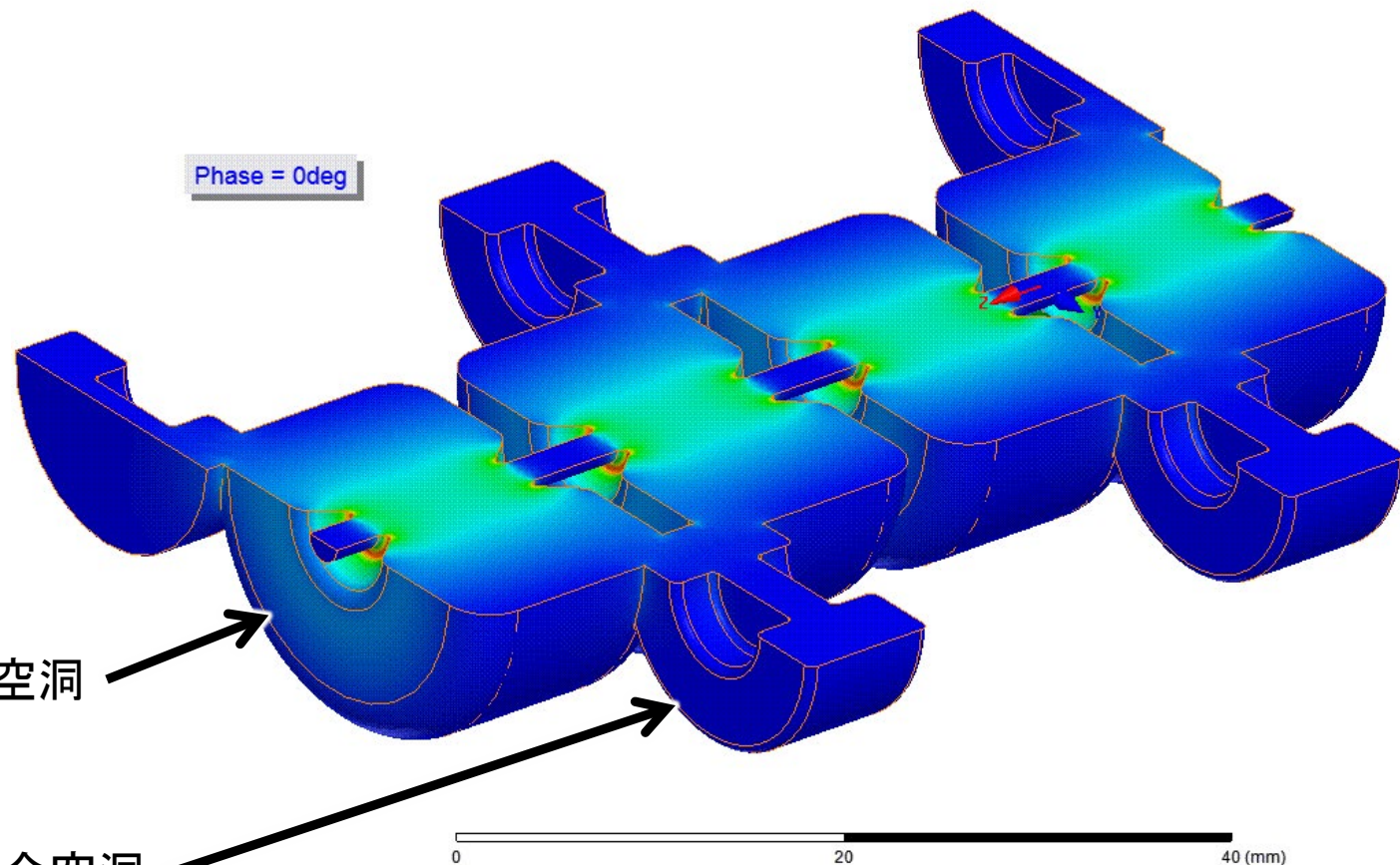
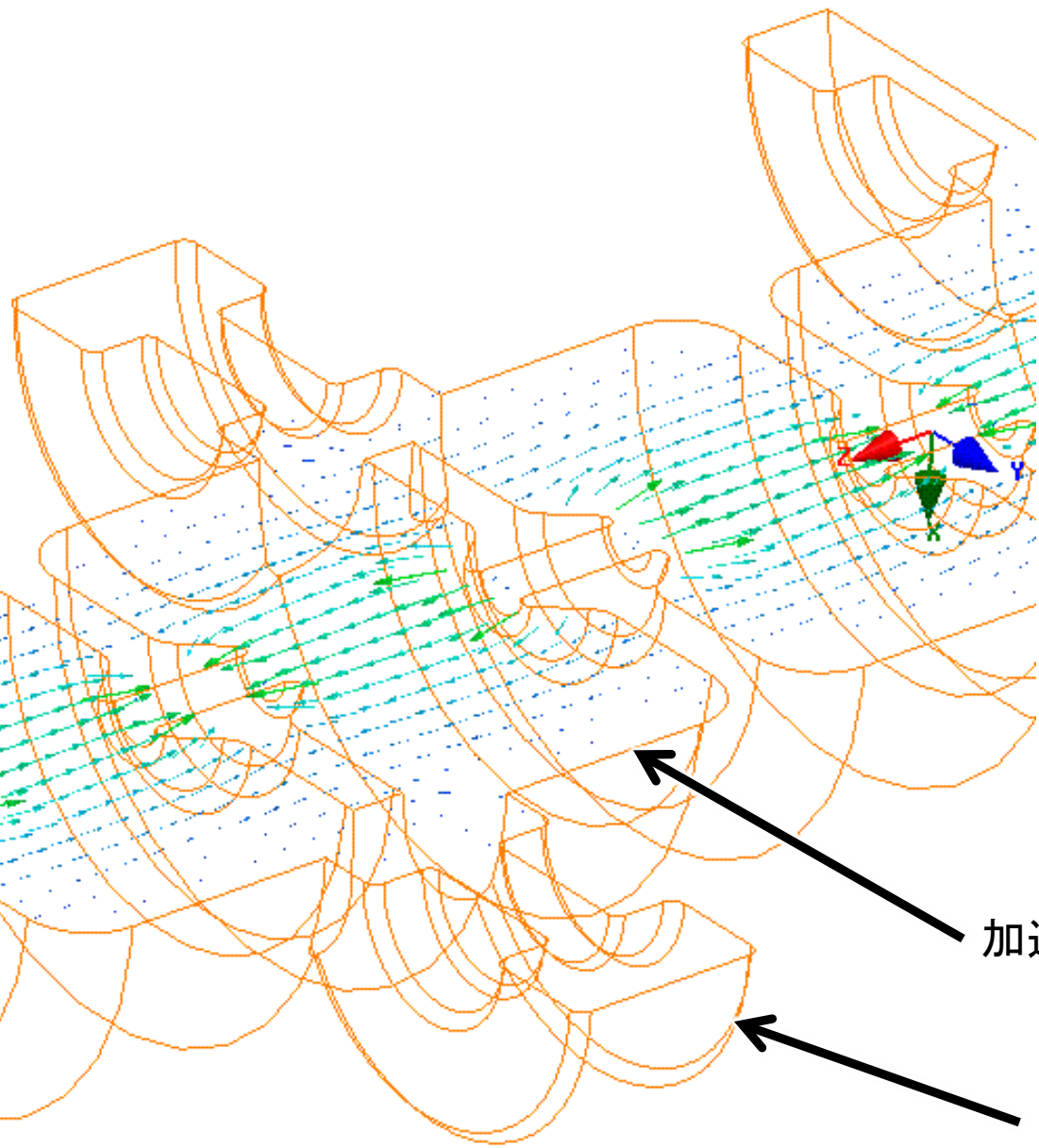
1回のろう付けで接合

詳しくは、下記参照:
阿部 哲郎 他、「縦方向分割方式Cバンド小型加速管の設計・試験」、第21回日本加速器学会年会、FROT05 (2023年8月)

サイドカップル型定在波管の加速モード電界

(Valery Dolgashev (SLAC), presented at HG2023 より抜粋)

- ✓ 全体は $\pi/2$ モード
- ✓ 脇にある結合空洞は節となっている(フィールドは殆どない)
- ✓ ビームからは(効率のよい) π モードに見える



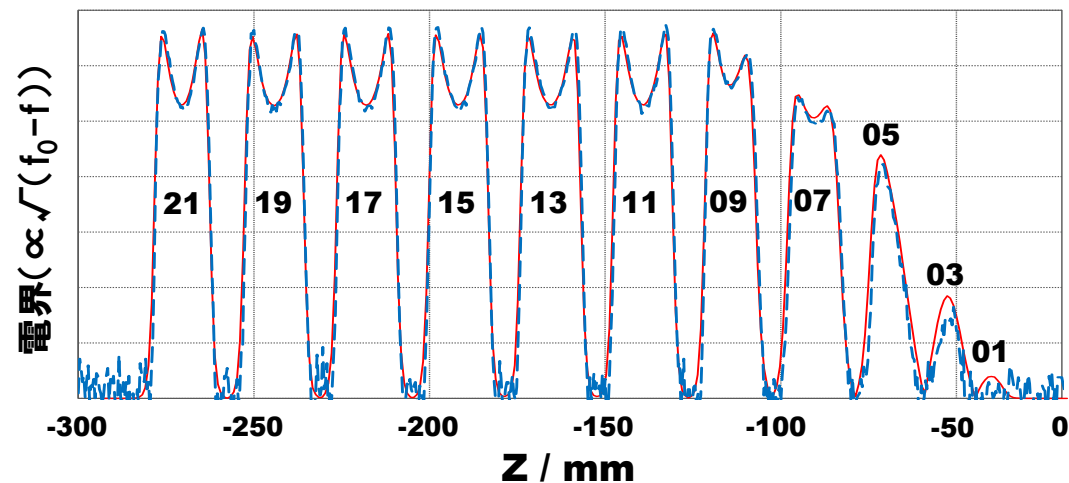
加速空洞

結合空洞

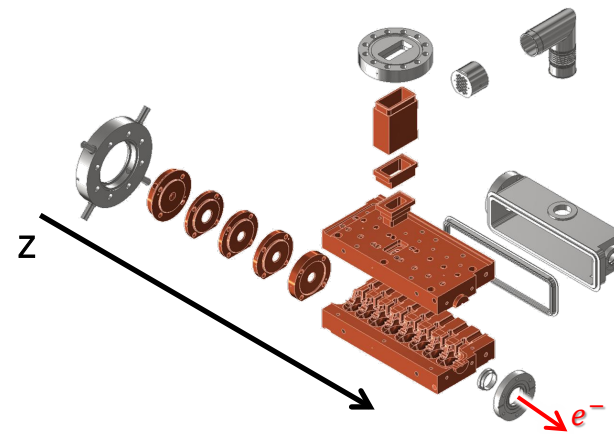
Cバンド小型加速管の加速電界強度分布の測定結果

詳しくは、下記参照：
木村 優志 他、「縦方向分割方式Cバンド小型加速管の製作」、第21回日本加速器学会年会、FRP042(2023年8月)

縦方向分割方式

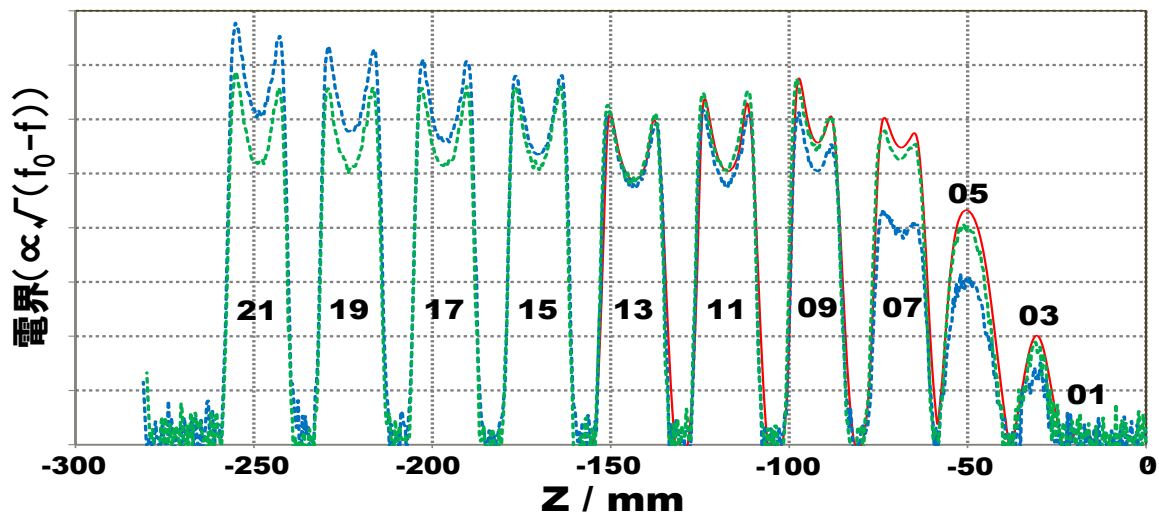


赤：設計値 青：測定値（ろう付け後）

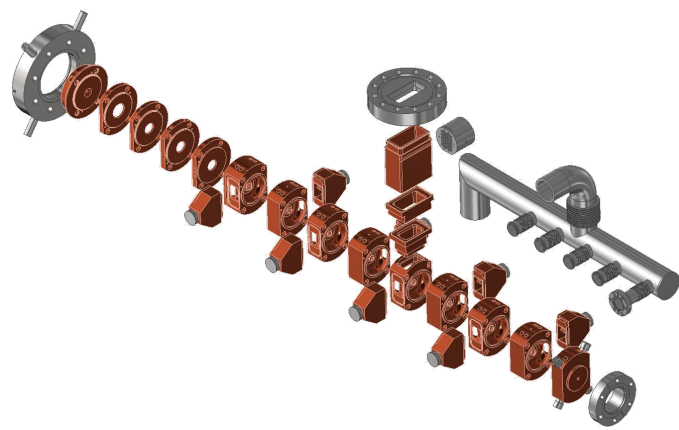


周波数調整前でも、測定値は設計値とよく合っている！

ディスク積層方式



赤：設計値 青：測定値（ろう付け後）
緑：測定値（チューニング後）

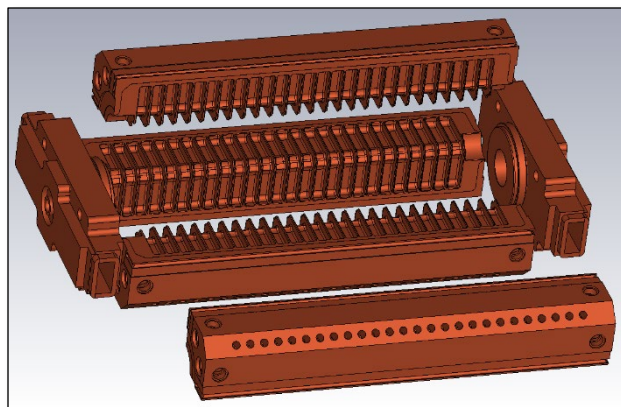


周波数調整前では、測定値と設計値に乖離あり！

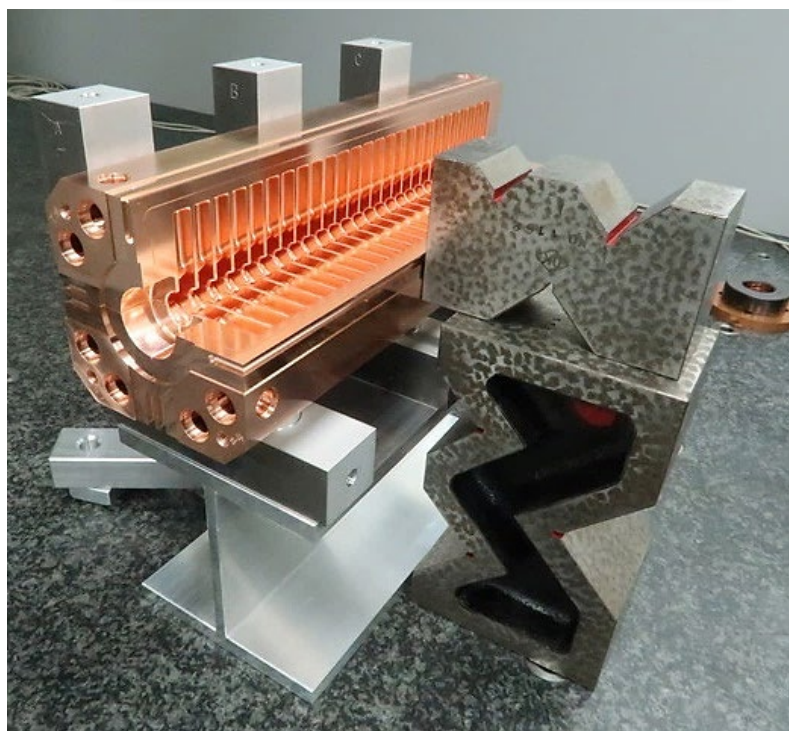
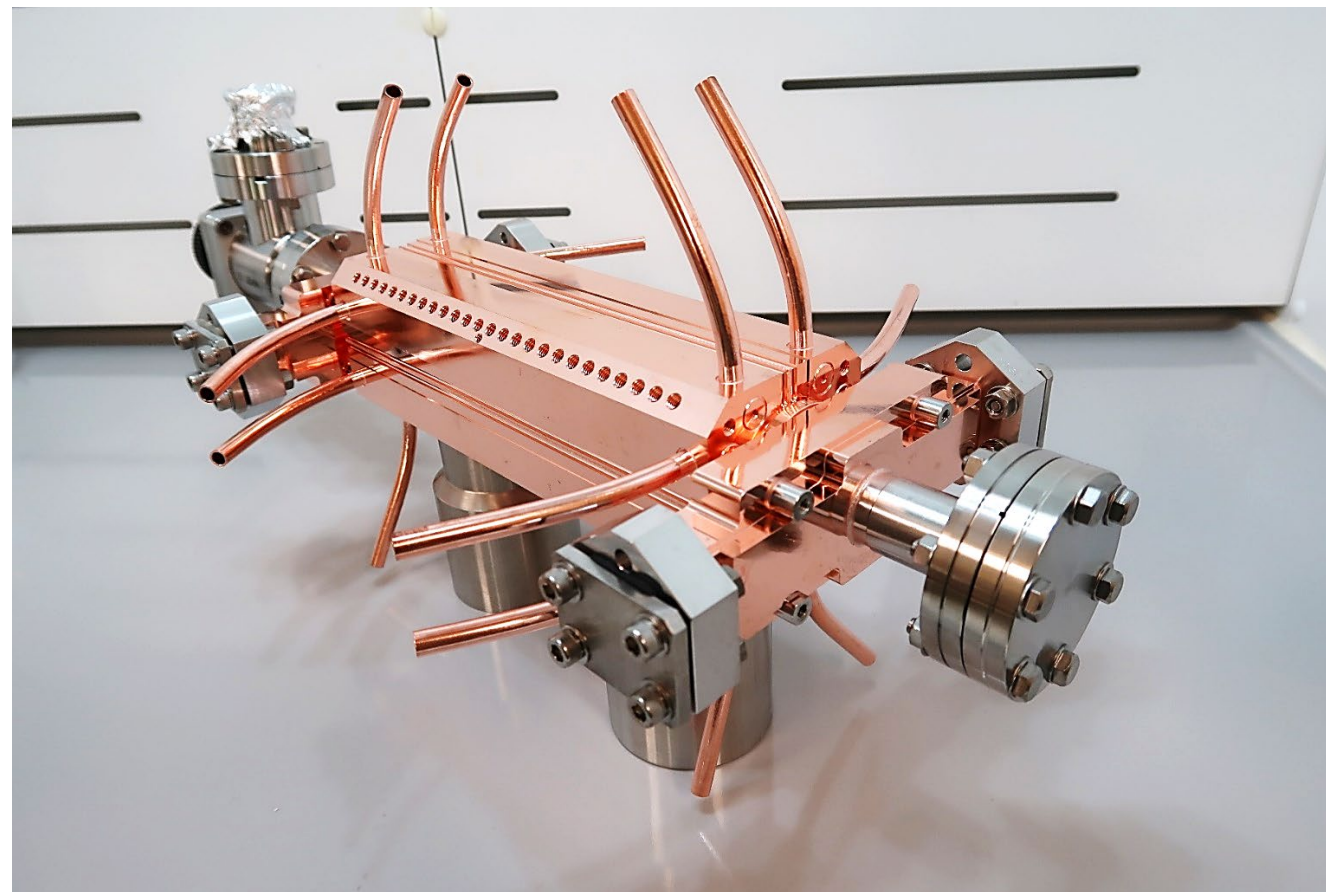
フルスケール加速管 (CLIC用プロトタイプ)を改良縦方向分割方式で製作 (11.4GHz、進行波)

詳しくは下記参照:

[阿部 哲郎 他、「改良4分割方式Xバンド高電界加速管の製作」
\(第16回日本加速器学会年会、WEOH04, 2019年\)](#)

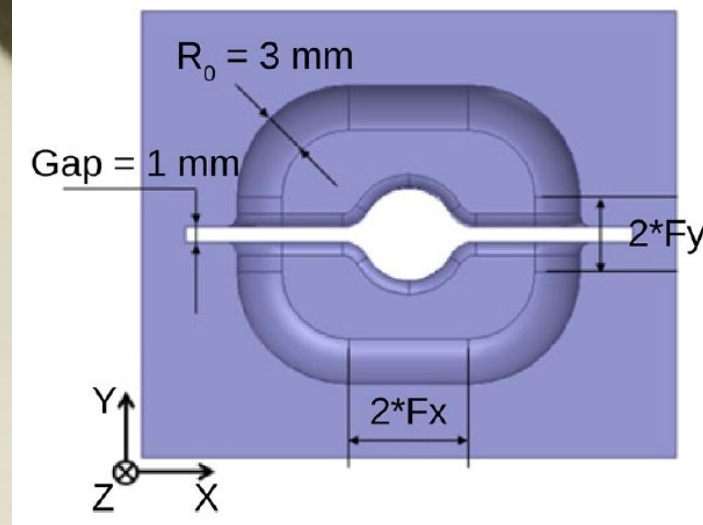
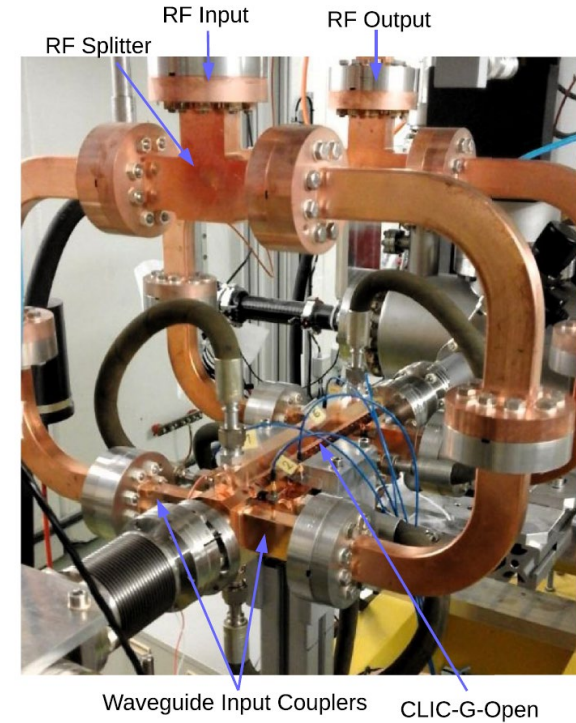


TD24R10_QUAD-R04G01_K1



- ✓ 製作は完了
- ✓ Nextef1の火災により、高電界試験は未実施のまま

縦方向分割の例1：CLIC用加速管



- 周波数：11.994 GHz
- 2分割間のギャップは1mmと大きい
- CERN/CLICのXバンド高電界試験スタンド (Xbox-2) で試験
 - 従来のディスク積層方式加速管並みの性能が出た(若干、ディスク積層方式より悪い?)
- ギャップが大きいのがよくないか？

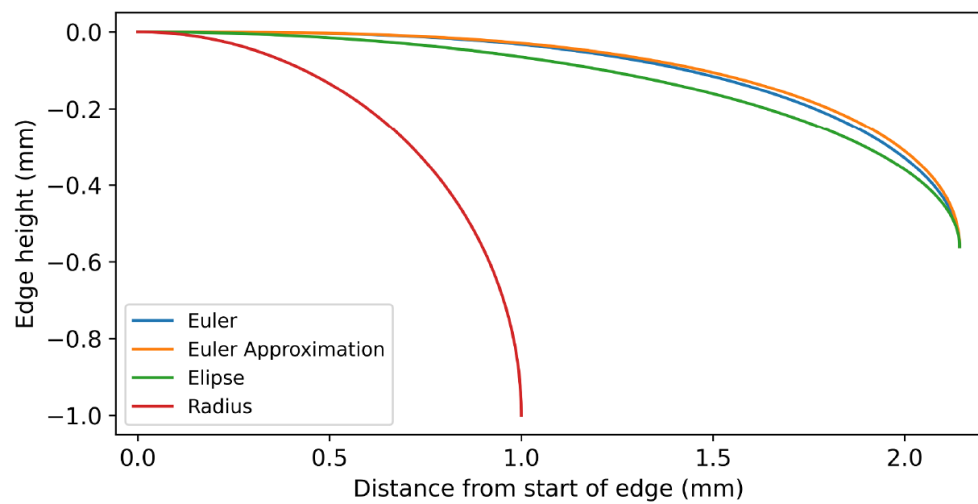


Figure 2.18: Physical shape of edges for Euler spiral, Euler spiral approximation, ellipse and a 1 mm radius.

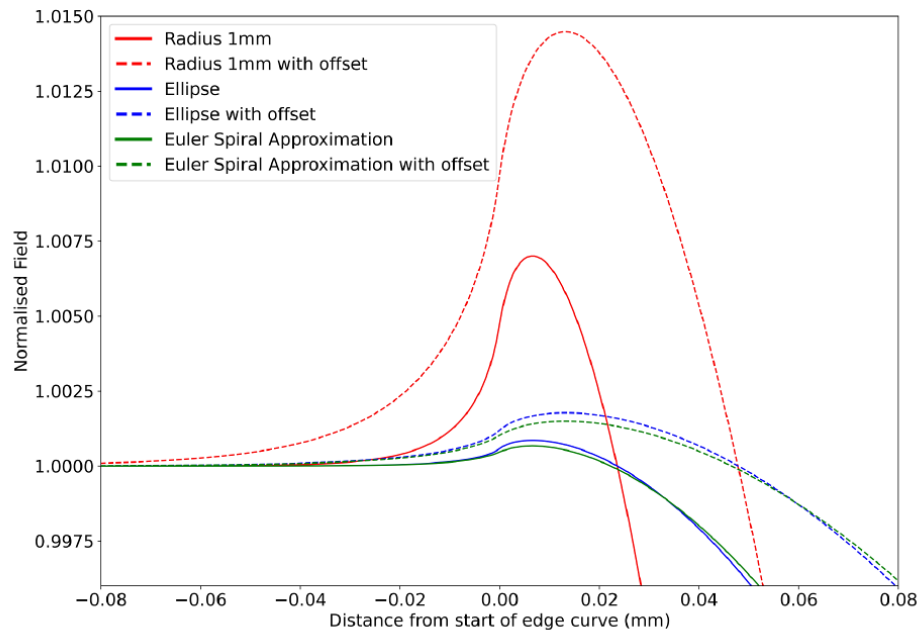


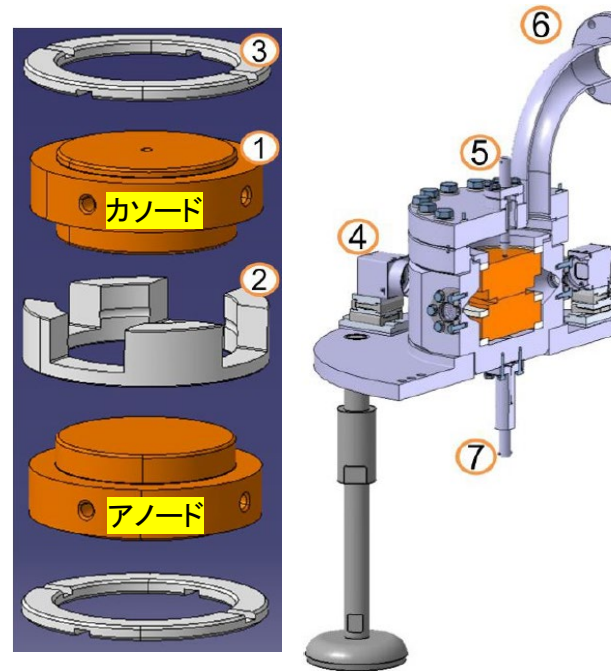
Figure 2.19: Normalised electric field on the anode for electrodes the same size and with an offset of 0.5 mm to replicate a small anode to large cathode for the different edge shapes, Euler spiral approximation, ellipse and a 1 mm radius.

【角部におけるフィールド増大を抑制する形状】 楕円 や クロソイド曲線(オイラー螺旋)

(曲率が一定割合で変化する曲線)

Extracted from:

[R. Peacock: "Experimental Investigation of Vacuum Breakdown Triggering Mechanisms in a DC Electrode System", PhD thesis, Lancaster University \(2023\).](#)



- 分割角部におけるフィールド増大は、0.1%のレベルまで抑えることができる
- 但し、一般的に、複雑に入り組んだ曲面は、不具合発生リスクあり
 - ソリッドモデル作成時
 - NC加工にデータを渡す時

縦方向分割の例2: C³ (Cool Copper Collider)用加速管

SLAC-PUB-17629

November 1, 2021

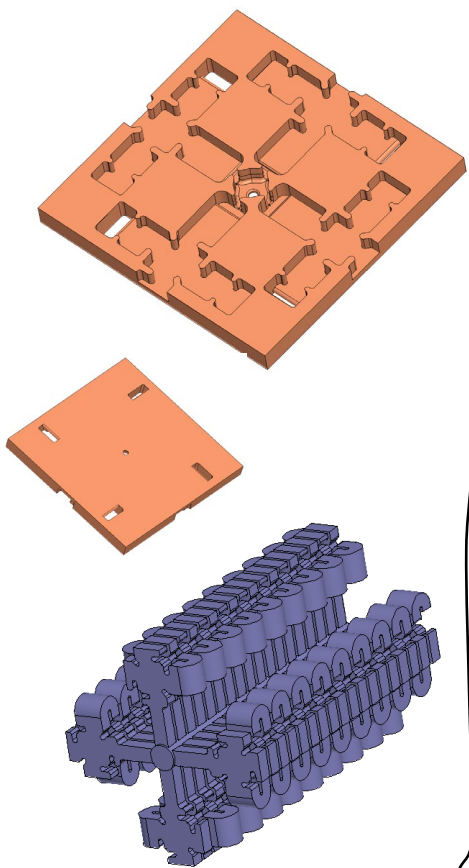
<https://arxiv.org/abs/2110.15800>

Submitted on 27 Oct 2021

1m長のDCS (Distributed-Coupling Structure) 加速管を2分割型の縦方向分割方式で製作

C³: A "Cool" Route to the Higgs Boson and Beyond

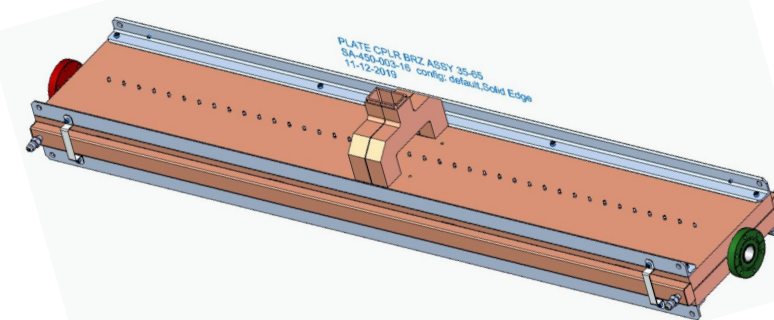
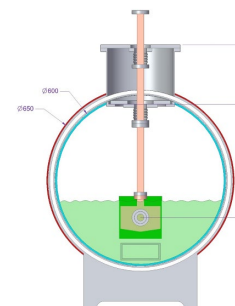
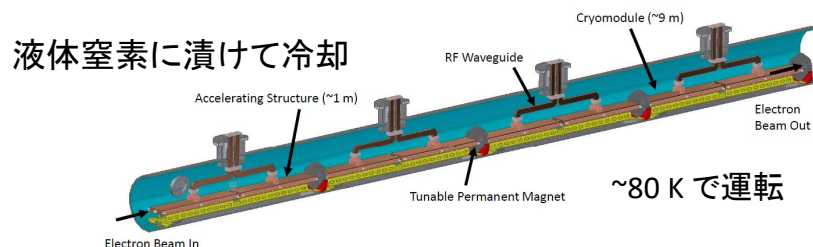
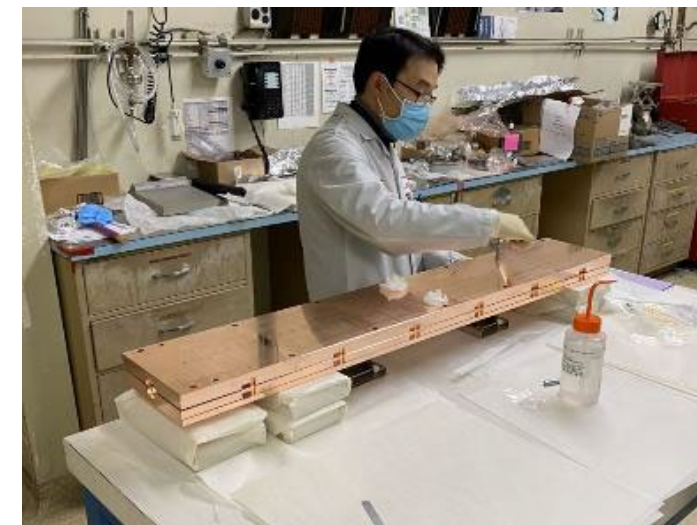
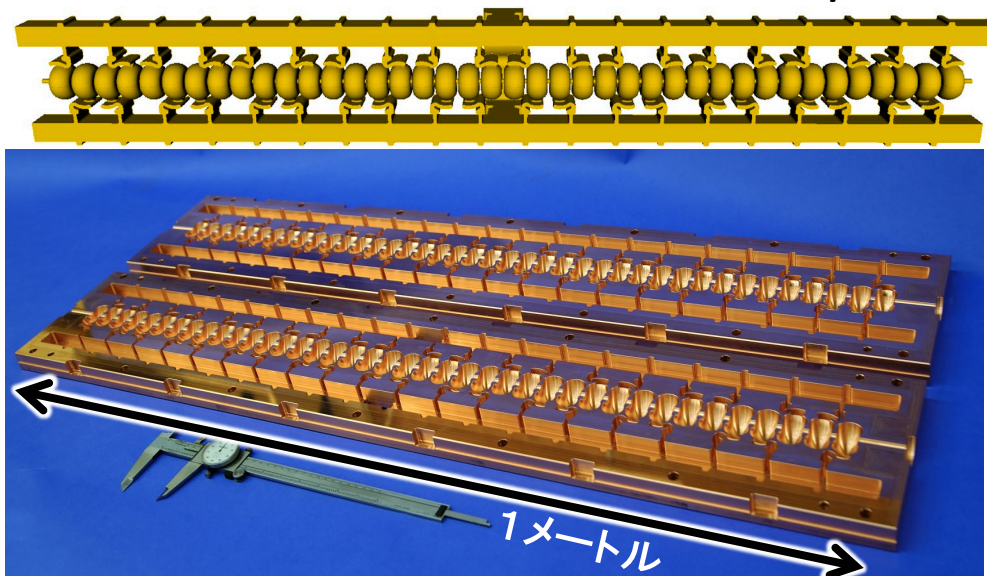
昔のディスク積層方式
のDCS加速管のディスク



Distributed-Coupling Structure (DCS)

Cバンド40セル加速管

(高いシャントインピーダンス: ~300 MΩ/m)



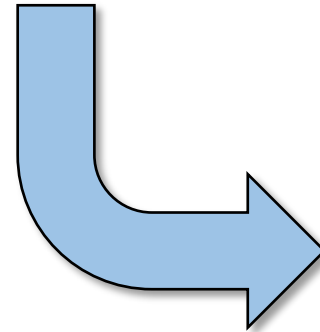
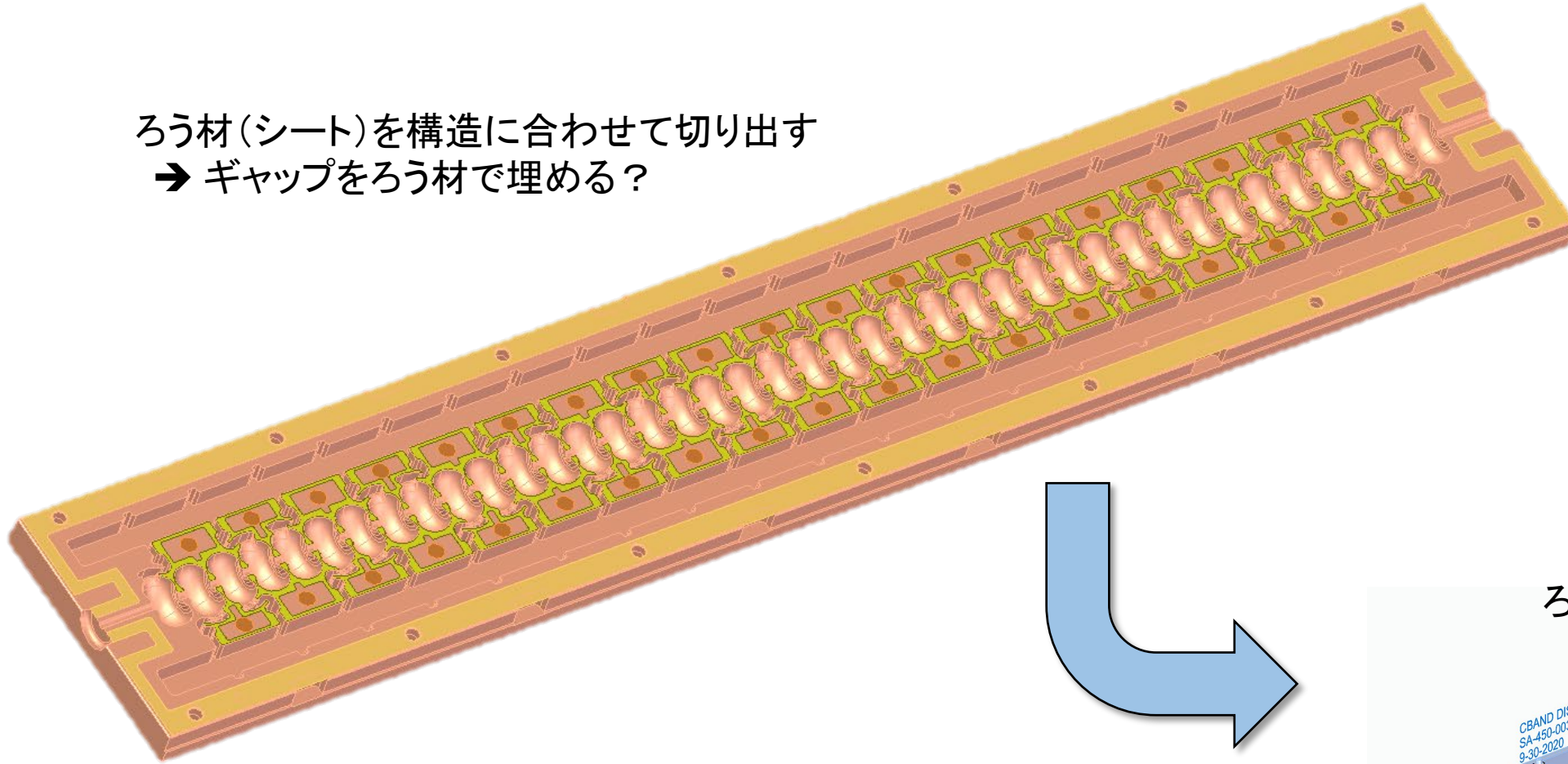
(具体的な技術課題は、Demonstration facilityにて実証予定)

Jeff Neilson, SLAC, 2011

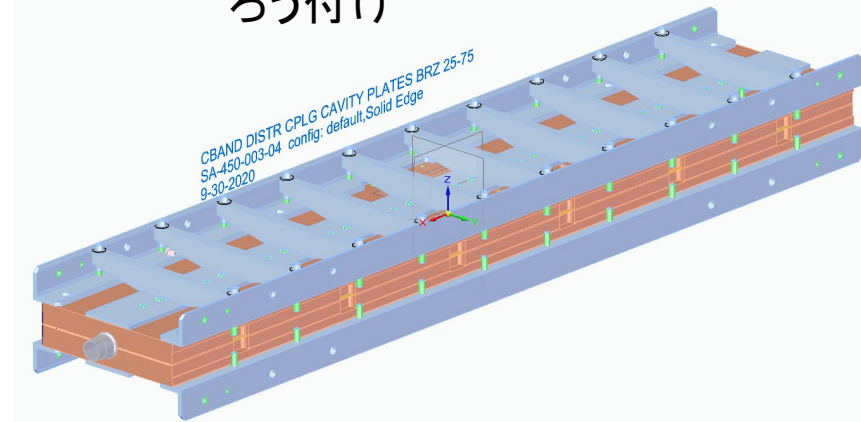
C³加速器開発状況：2分割部のろう付け

LCWS2024ワークショップより抜粋：<https://agenda.linearcollider.org/event/10134/contributions/54546/>

ろう材(シート)を構造に合わせて切り出す
→ ギャップをろう材で埋める？



ろう付け



2. より高い加速周波数へ

【RF空洞の基礎知識1】空洞共振器の Q_0 値 (内部 Q 値 や 無負荷 Q 値 とも言う) (Internal Q-value) (Unloaded Q-value)

$$Q_0 = \omega_0 \frac{U}{P_{wall}} \quad (\omega_0: \text{モード周波数})$$

- ✓ モードごとに定義される無次元量
- ✓ Q_0 値が大きい程、より多くのマイクロ波エネルギーを蓄えることができるので、加速空洞としては高い性能になる
- ✓ 加速モード(TM₀₁₀)の Q_0 値の具体例
 - 金属製常伝導空洞: 数千から数万
 - 超伝導空洞: $\sim 10^{10}$

貯蔵エネルギー: U

$$U = \frac{\epsilon}{2} \int_{cavity} dV |\vec{E}|^2$$

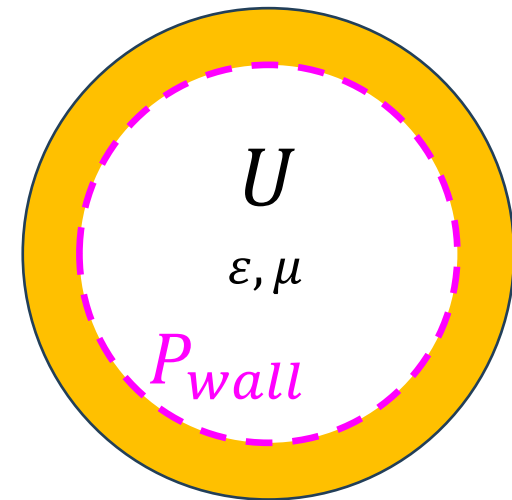
$$= \frac{\mu}{2} \int_{cavity} dV |\vec{H}|^2 \quad (\vec{E}, \vec{H} : \text{時間的なピーク値})$$

壁面損失パワー: P_{wall}

$$P_{wall} = R_s \frac{1}{2} \int_{cavity} dS |\vec{H}|^2$$

$$= \frac{\rho_{dc}}{\delta_{skin}} \frac{1}{2} \int_{cavity} dS |\vec{H}|^2$$

($R_s = \rho_{dc} / \delta_{skin}$: 空洞を形成する金属の高周波表皮抵抗)
(「空洞」とも言う)



【RF空洞の基礎知識2】様々なQ値

Q値 (quality factor) : $Q = \omega \frac{U}{P_{??}}$ (固有モードごとに定義)

ω : モード角周波数
 U : 空洞内に蓄えられる電磁場エネルギー

内部Q値: $Q_0 = \omega \frac{U}{P_{wall}}$ (P_{wall} : 空洞内表面での壁面損失パワー) (←空洞内表面の抵抗、欠陥に依存)
 (または無負荷Q値) (→ 加速モードの Q_0 値が高い程、加速効率が高い)

外部Q値: $Q_{ext} = \omega \frac{U}{P_{ext}}$ (P_{ext} : 空洞から外部負荷への放出パワー) (←外部負荷との結合度に関係)

負荷Q値: $Q_L = \omega \frac{U}{(P_{wall} + P_{ext})}$

$$\Rightarrow \frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{ext}}$$

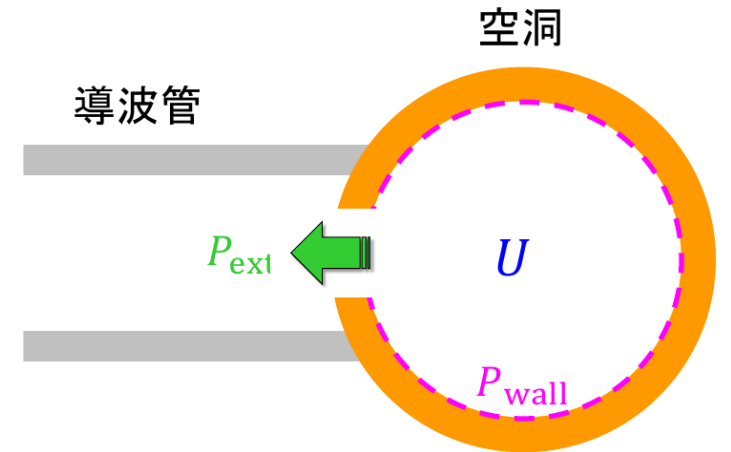


図 20 空洞内電磁場を励振するために空洞側面に導波管を付けた状態の模式図。

【RF空洞の基礎知識3】Fill(ing) time

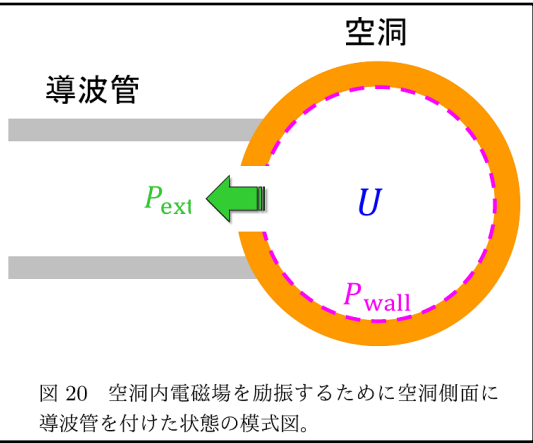


図 20 空洞内電磁場を励振するために空洞側面に導波管を付けた状態の模式図。

例: 高周波源(クライストロン)が緊急停止した時の SuperKEKB/DR用加速空洞のピックアップ信号(緑色)(実験データ)

- ✓ 赤色破線は包絡線
- ✓ 509 MHz, $Q_L=13000 \rightarrow T_f = 8 \mu\text{s}$

加速空洞内に加速フィールドを励振する場合

空洞への給電をいきなり切った場合、

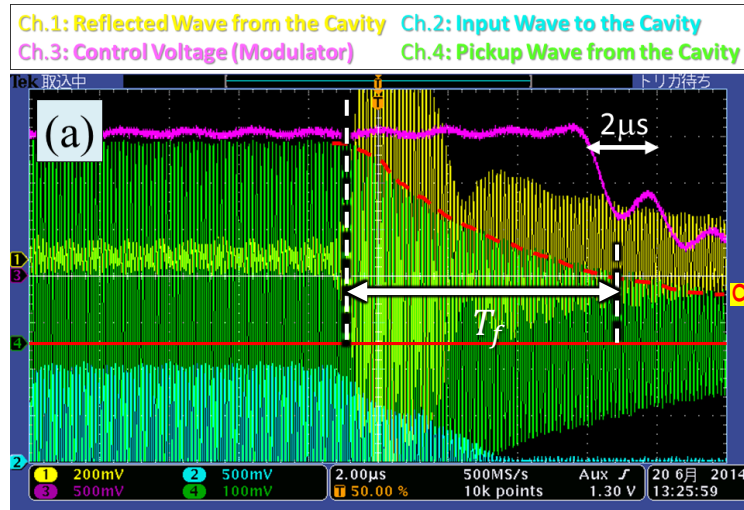
$$\begin{aligned} \frac{dU}{dt} &= -(P_{wall} + P_{ext}) \\ &= -\omega \left(\frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{ext}} \right) U \\ &= -\frac{\omega}{Q_L} U \end{aligned}$$

Fill(ing) Time

$$U = U_0 e^{-\frac{\omega}{Q_L} t}$$

$$T_f = \frac{2Q_L}{\omega}$$

$$F = F_0 e^{-\frac{\omega}{2Q_L} t} = F_0 e^{-\frac{t}{T_f}}$$

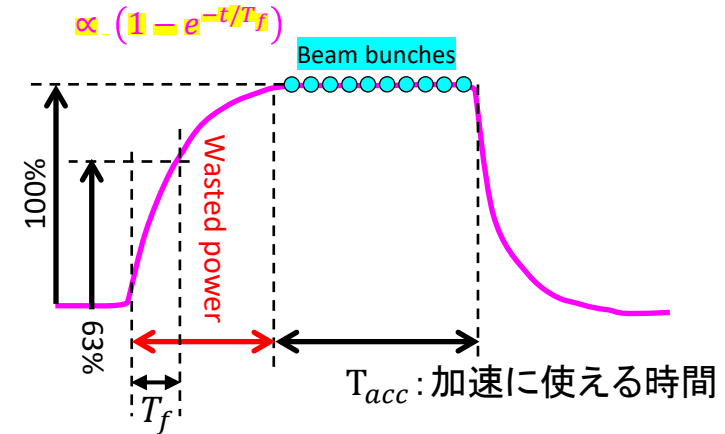


ピックアップ・アンテナ →



空洞内フィールド強度が 1/e (=37%) まで落ちる時間

Q値の測定に使われることがある(特に超伝導空洞)



空洞内フィールド強度が (1-1/e) (=63%) まで上がる時間

- ✓ Q値が高いとビーム加速できるまでに時間がかかってしまう
- ✓ 周波数が高い程、fill timeは短い ($T_f \propto \text{freq}^{-3/2}$)

→ たとえQ値が高くても、周波数を上げれば fill time を短くできる

(本題に戻って、) なぜ常伝導加速器で高い周波数か？

$$\frac{R_{sh}}{L} = \frac{|V_c|^2}{P_{wall}} \frac{1}{L} = \frac{\left| \int_0^L dz E_z(\vec{x}) e^{-i\omega \frac{z}{c}} \right|^2 / L}{\frac{R_s}{2} \int_{cavity} dS |\vec{H}(\vec{x})|^2}$$

1. 加速器がコンパクトになる

$$V = \sqrt{RP}$$

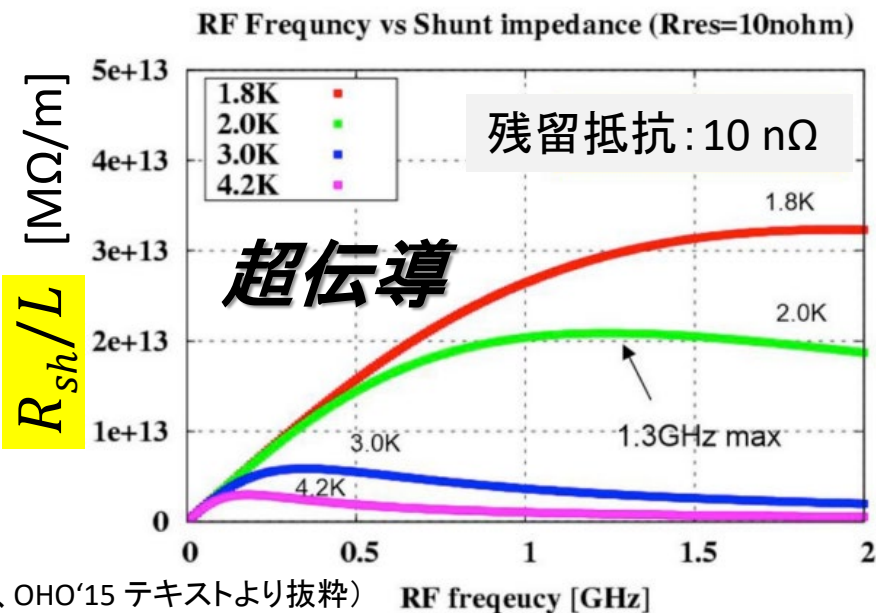
2. 加速効率が上がる

$$\text{(加速勾配)} = \sqrt{\frac{R_{sh}}{L} \frac{\text{(入力電力)}}{L}}$$

高周波表面抵抗

$$\begin{cases} R_s = \rho_{dc} / \delta_{skin} = \sqrt{\pi \mu \rho_{dc} f} & \text{(常伝導)} \\ R_s = R_{BCS} + R_{res} & \text{(超伝導)} \\ R_{BCS} \propto f^2 & \text{(ニオブ)} \end{cases}$$

- 加速効率を表す「単位長さあたりのシャント・インピーダンス (R_{sh}/L)」の周波数 (f) 依存性:



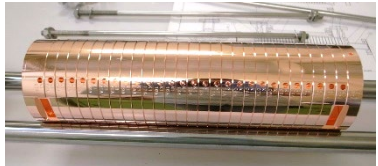
常伝導

$$R_{sh}/L \propto \sqrt{f}$$

周波数を上げれば上げる程、加速効率が上がる！

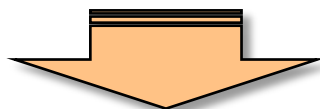
(但し、異常表皮効果が効く 500 GHz 以上ではこの限りではない)

加速効率最大になる周波数が存在する！

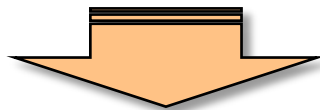


加速周波数帯域

- Sバンド (2~4 GHz、波長: 7.5~15 cm)
 - これまでの主流 (KEK電子陽電子入射器など)
 - 運転加速勾配の例: ~20 MV/m @ KEK電子陽電子入射器



- Cバンド (4~8 GHz、波長: 3.7~7.5 cm)
 - 近年、世界中で花盛り (SACLA, ナノテラス, SwissFEL, SXFEL など)
 - 運転加速勾配の例: ~38 MV/m @ SACLA



- Xバンド (8~12 GHz、波長: 2.5~3.7 cm)
 - 大型加速器 (実機) の運転で使用された実績はない
 - CERNの常伝導リニアコライダー計画 [CLIC](#) で採用
 - 運転加速勾配: 72~100 MV/m (CLICの仕様)

Sバンド (2.856 GHz)
のディスク1枚



Cバンド (5.712 GHz)
のディスク1枚



Xバンド (11.424 GHz)
のディスク1枚



加速器の大幅な小型化

(KEK 電子陽電子入射器の地下加速器トンネル内にて撮影)

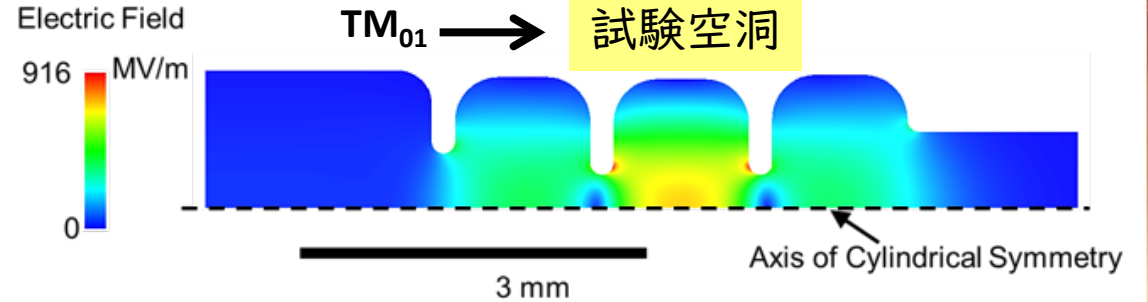


どちらも、加速管1本で電子ビームを 40 MeV (定格) 加速

さらなる高い加速周波数への挑戦

米国SLAC国立加速器研究所が製作した110 GHz 加速試験構造

モード変換部 (TE₁₁ → TM₀₁)



Diffusion Bonded
Isolated + Limited Braze Foil

ホーンカップラー

110 GHz single cell accelerator cavity

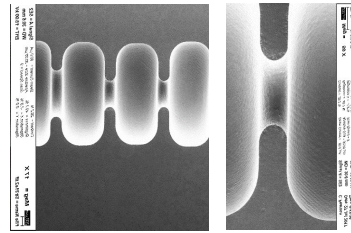
Iris thickness [mm]	0.2
Quality factor Q ₀	3200
Shunt impedance [MΩ/m]	360
E _{surface} /E _{acc}	2.27
Gradient E _{acc} [MV/m]	404
Pulsed heating [°C]	70
Fill time [ns]	5

(Fill time) ∝ f^{-3/2}

110 GHz

ガウシアン・ビーム

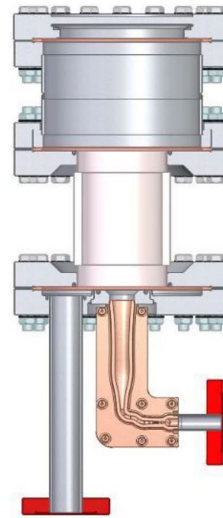
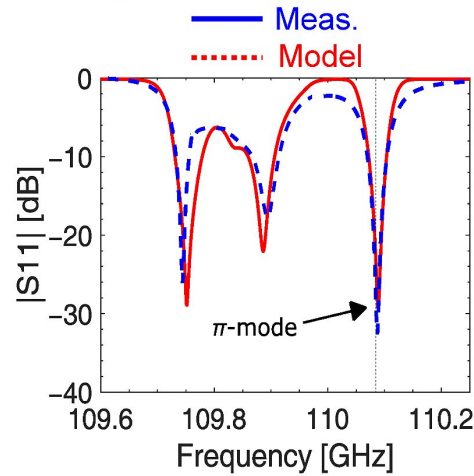
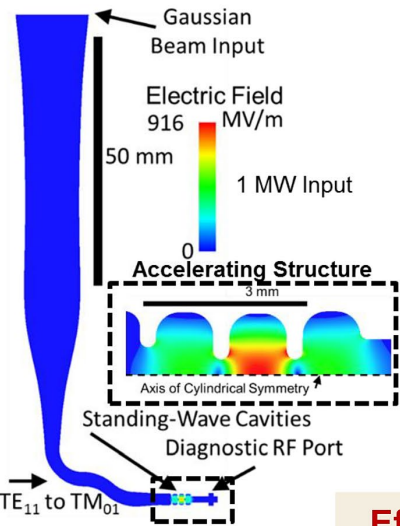
試験空洞



110 GHz 加速試験構造の高電界試験@米国MIT

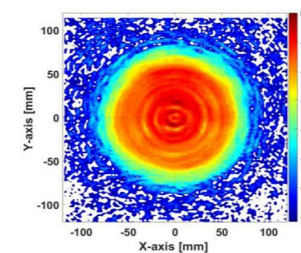
Efficient Excitation of THz Accelerating Structures Using Quasi-Optical Coupling of rf Power

Free-space Gaussian beam coupled to structure
>90% efficiency

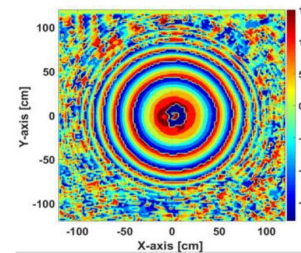


SLAC

Measured Amplitude



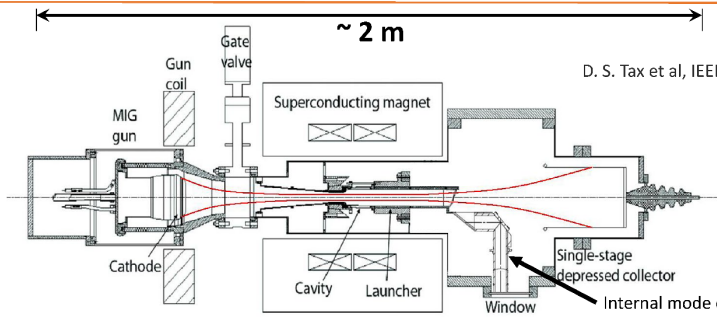
Measured Phase



Efficient coupling into narrow-band accelerating structures to avoid lossy waveguides

6

Megawatt 110 GHz Gyrotron at MIT



D. S. Tax et al, IEEE-TPS, 2014

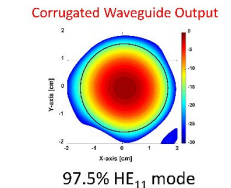
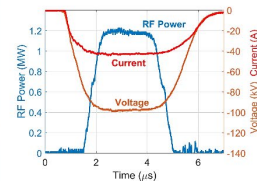
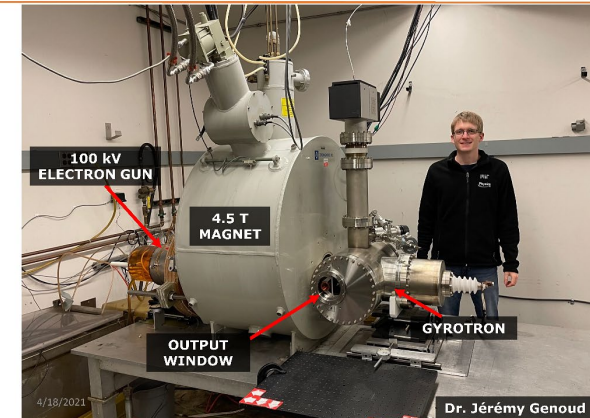
- Frequency = 110 GHz
- Voltage = 96 kV
- Operating mode: $TE_{22,6}$
- B = 4.4 T
- Power = 1.25 MW
- Current = 40 A
- Pulse length = 3 μ s
- $\alpha = 1.4$

4/18/2021

9

↑ [HG2021](#) における [S. Jawla 氏の発表スライド](#) より抜粋↓

Megawatt 110 GHz Gyrotron at MIT



4/18/2021

Dr. Jérémy Genoud

10

高電界加速の国際ワークショップHG2021 におけるM. Othman 氏の発表スライドより抜粋↑

- ✓ 加速勾配 230 MV/m (ILCの約7倍)まで達した
- ✓ ジャイロトロンを使った試験方法に困難があり停滞
- ✓ **高い周波数の加速構造の開発では、大電力マイクロ波源が重要**

High Gradient Measurements at 110 GHz

高電界加速の国際ワークショップHG2021 におけるM. Othman 氏の発表スライドより抜粋



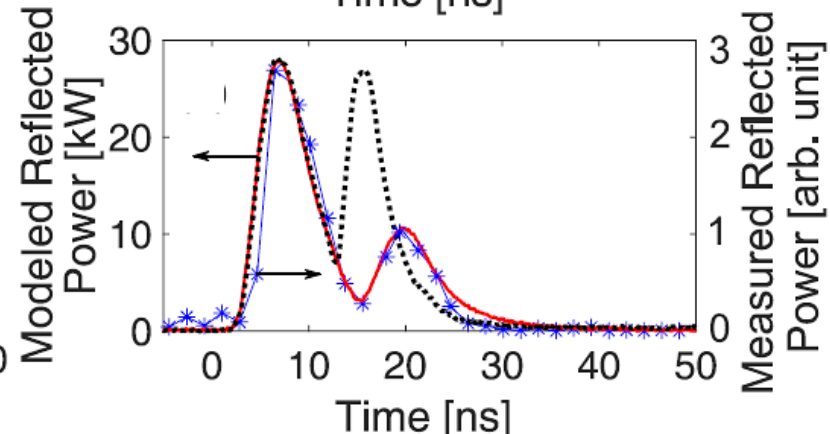
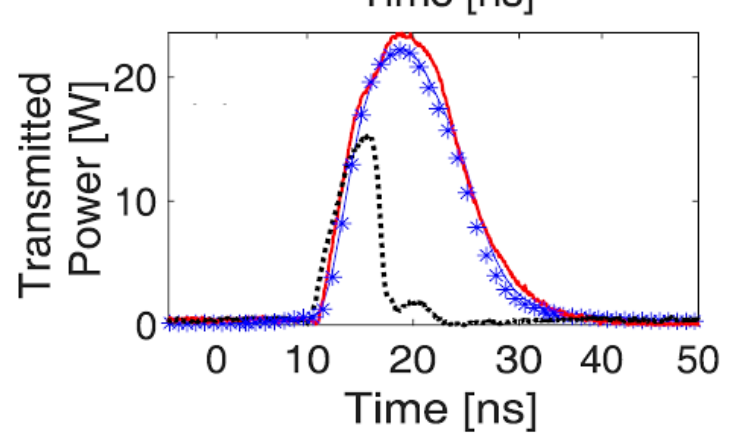
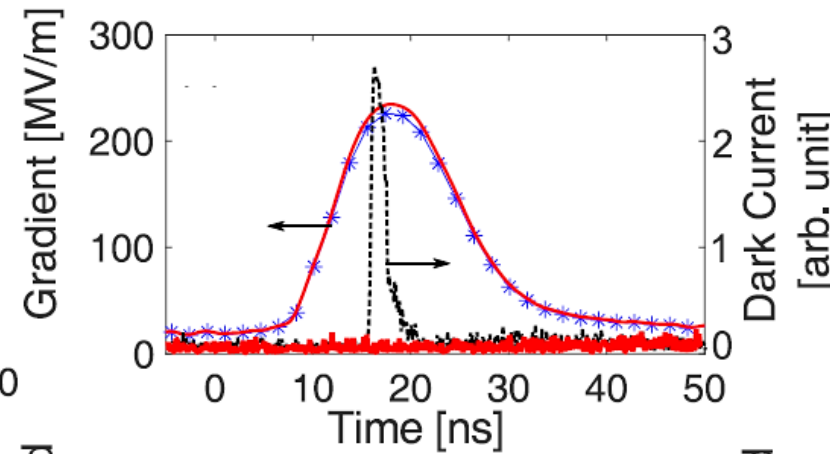
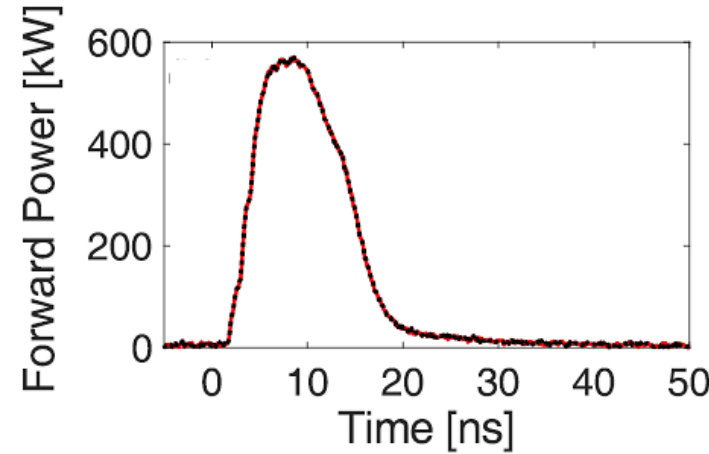
Highest Gradient at 570 kW @ 11 ns

- Peak gradient **230 MV/m**
- Peak surface field **> 520 MV/m**
- Peak pulse surface heating **< 40 °C** indicating no damage

— Measured (No rf breakdown)

* Modeled (No rf breakdown)

..... Measured (at rf breakdown)



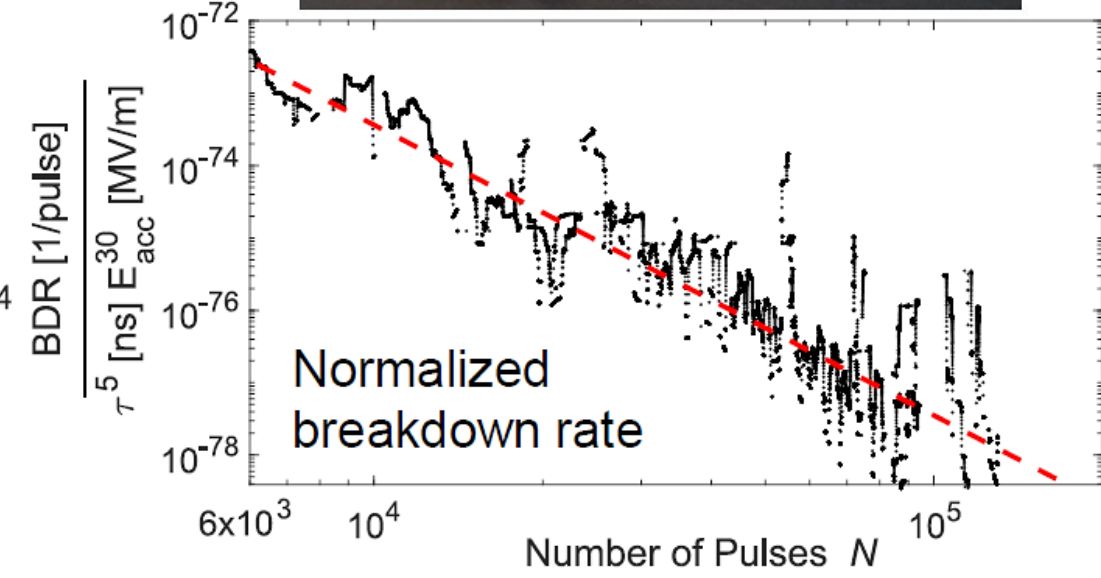
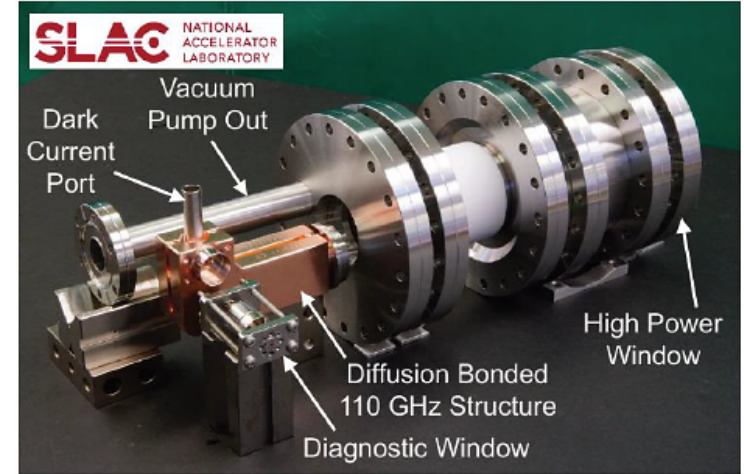
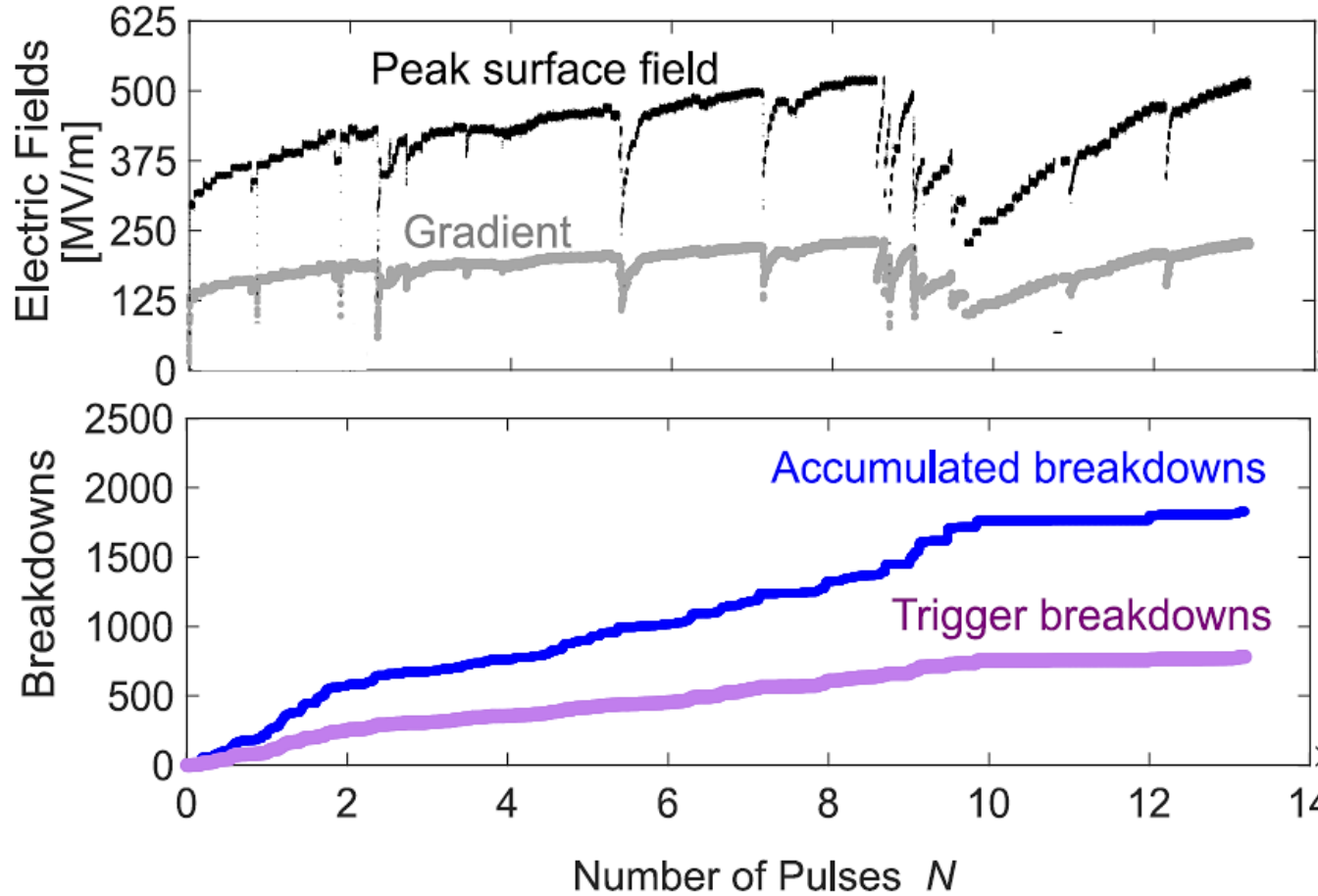
Breakdown Properties

- Breakdown is detected through **pulse shortening** and detection of **dark current emission**
- No field emission detected in normal operation

Reliable measurements of high gradient and rf pulses is crucial

Processing Timeline: Gradient of 230 MV/m at 10^5 Pulses

高電界加速の国際ワークショップHG2021におけるM. Othman 氏の発表スライドより抜粋



Othman et al., *Appl. Phys Lett.* 117(7) 073502 (2020).

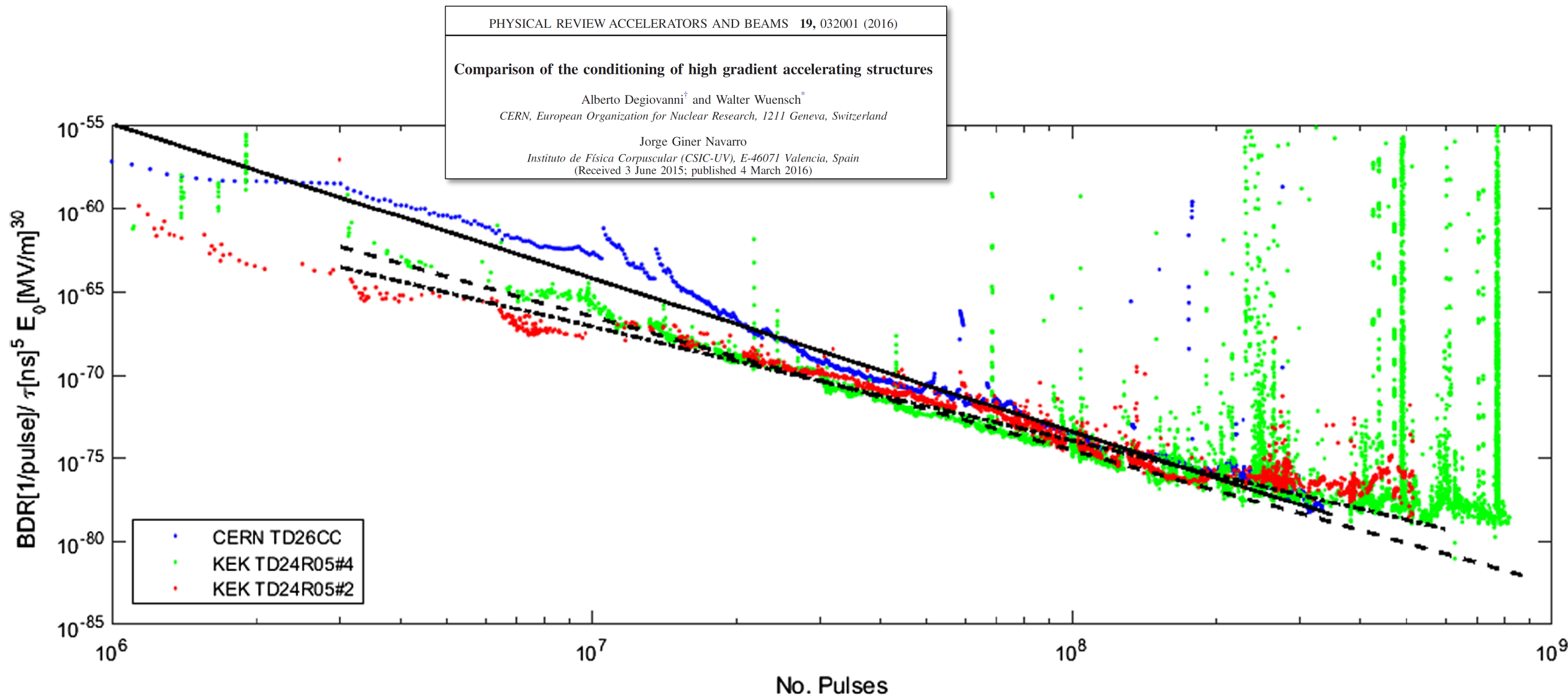
Rapid processing of the cavity is essential for high gradient applications

110 GHz 試験空洞の高電界試験の結果に関する(阿部の)考察

- BDR in the last 10^3 pulses from 1.5×10^5 pulses at $E_{acc} = 230$ MV/m is ~ 1 /pulse/m .
 - まだコンディショニングの余地はあるとのこと
 - CLIC用Xバンド加速管の大電力コンディショニングでは、数百万パルス以上
 - 最高1Hz運転なので、これ以上の統計は難しい
- CLIC用加速管のBDR仕様値は、 3×10^{-7} /pulse/m at $E_{acc} = 100$ MV/m for (パルス幅) = 180 ns (矩形パルス相当)と比較
 - Xバンド高電界加速管のBDRのスケーリング則: $BDR \propto (E_{acc})^{30} \times (\text{パルス幅})^5$
 - $E_{acc} = 230$ MV/m では、CLICのBDR仕様値は ~ 20000 /pulse/m
 - 110GHzの上記BDRは、 $E_{acc} = 230$ MV/m の加速勾配にしては、かなり低い？

(BDR : BreakDown Rate)

CLIC用Xバンド高電界加速管の大電力RFコンディショニング例



(BDR : BreakDown Rate)

300 GHz 加速試験構造

(前述の110GHz構造の相似形)



G Band Accelerator Structure and Mode Converter

SLAC

G Band Single Cell Accelerator Cavity

Iris aperture radius	104 μm ($\sim\lambda/10$)
σ copper (300 GHz)	4.8×10^7 S/m
Skin depth (300 GHz)	0.13 μm
Phase. advance/cell	180 deg.
Q_0	~ 3000 (←近い将来、測定予定)
Shunt impedance	~ 600 M Ω /m (←近い将来、測定予定)
Steady state gradient	~ 350 MV/m at 100 kW dissipated power
Fill time	1.6 ns

$$R_{sh}/L \propto \sqrt{f}$$

非常に高いシャントインピーダンス →

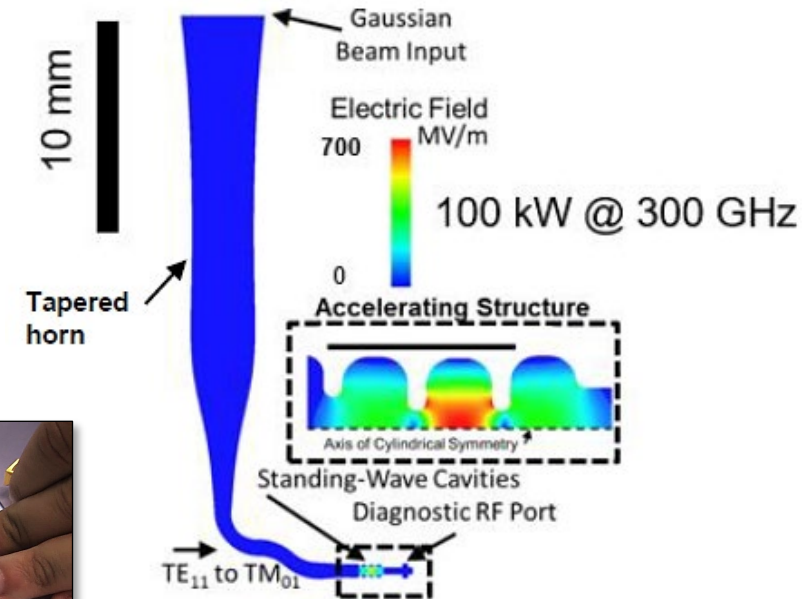
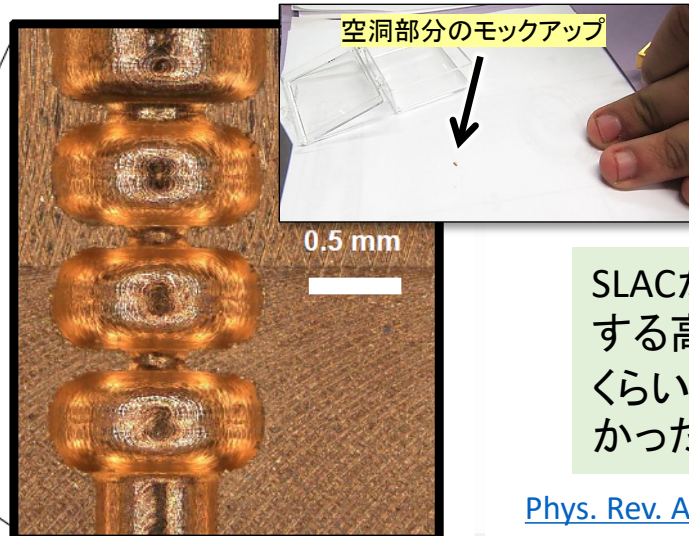
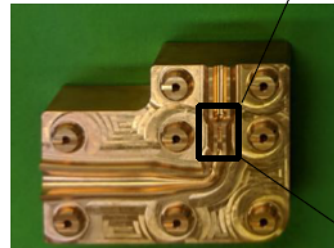
非常に短い充填時間 →

$$(\text{Fill time}) \propto f^{-3/2}$$

(→RFパルス幅が短いので、低いパルス加熱温度
→低いブレークダウン率が期待できる)

ブレークダウン率と強い相関のある
パルス加熱による内表面温度上昇は、
Xバンドの場合の1/10

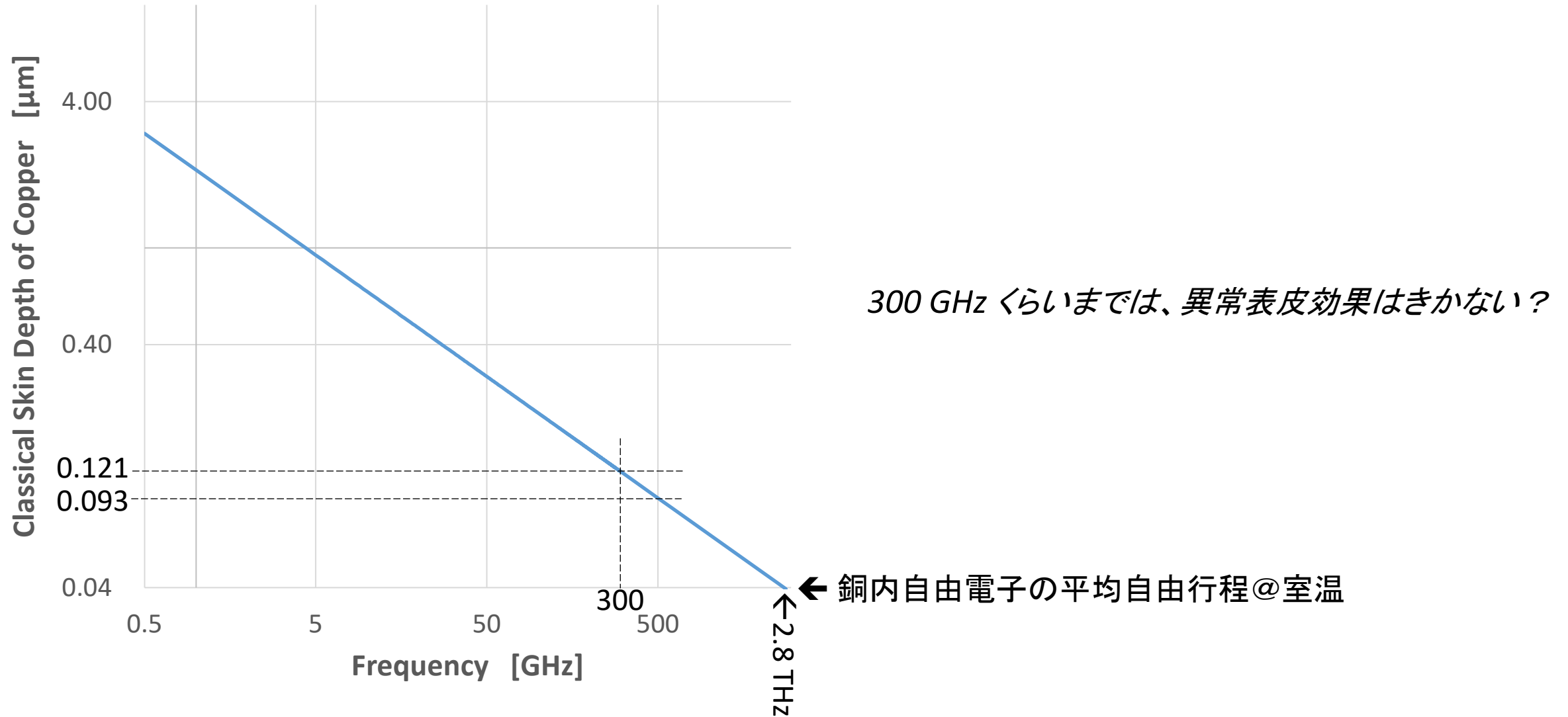
Fabricated G band
Structure (EDM)



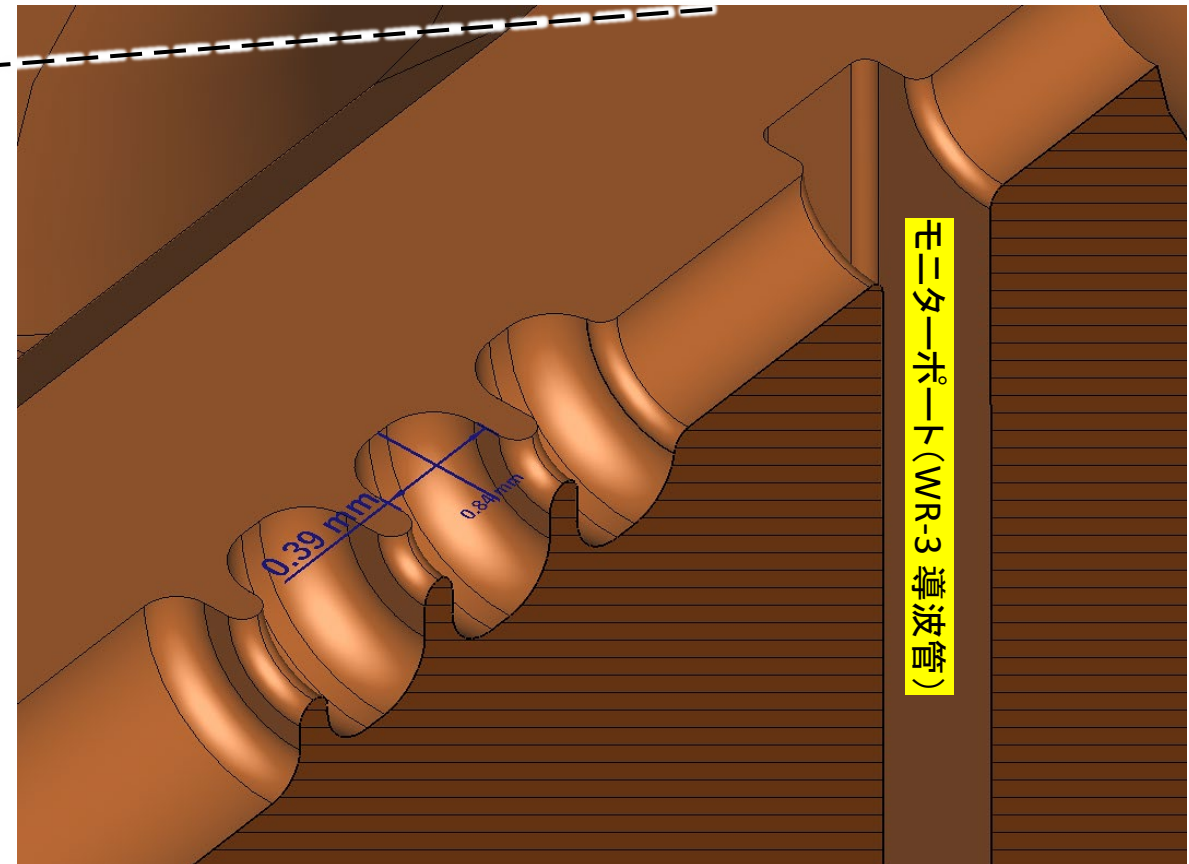
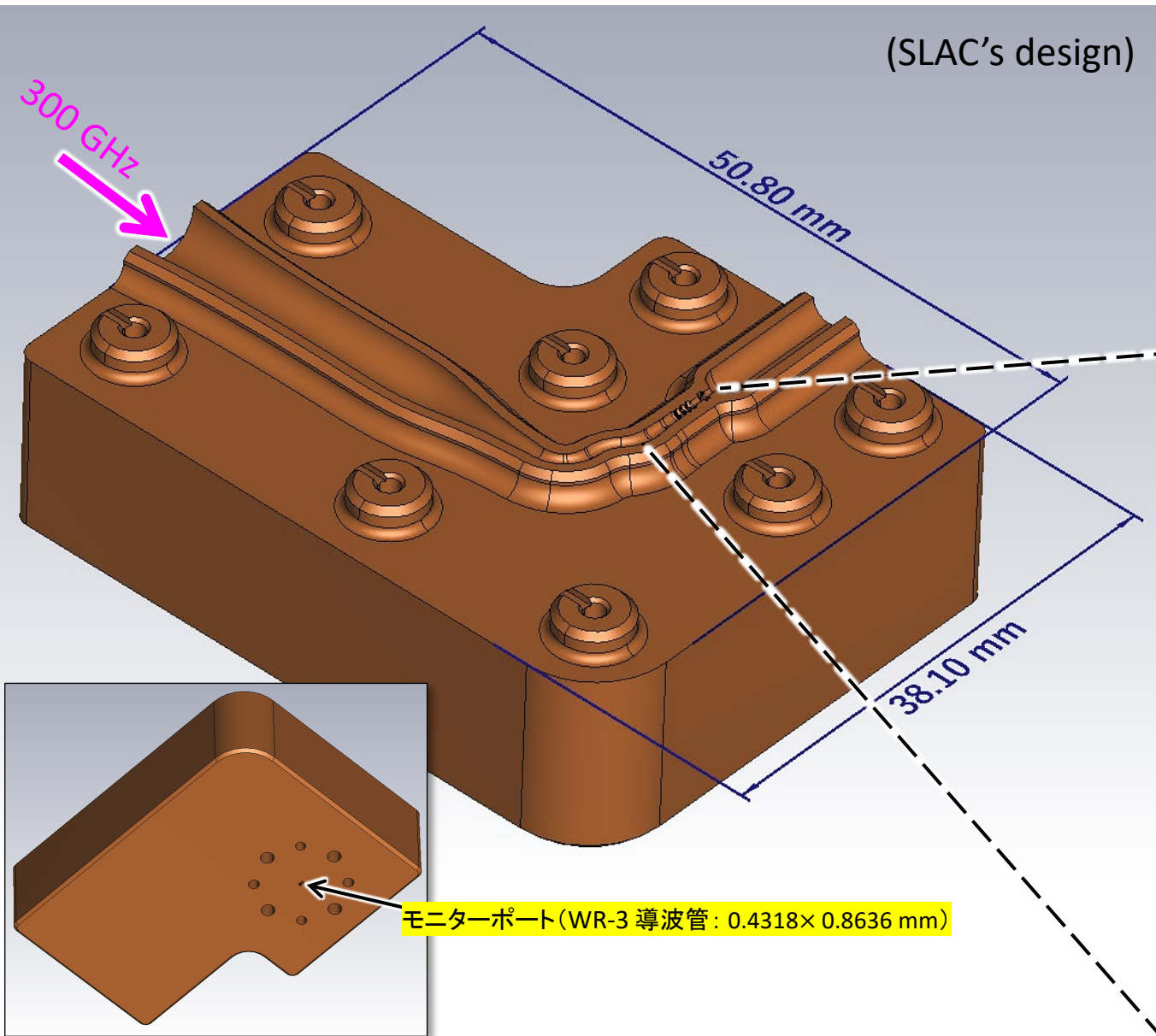
SLACが120~140GHz加速構造にビームを入射
する高電界試験を行い、加速勾配 300 MV/m
くらいまでは、銅表面の破壊は無いことがわ
かった

[Phys. Rev. Accel. Beams 19, 011301 – Published 6 January, 2016](https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.19.011301)

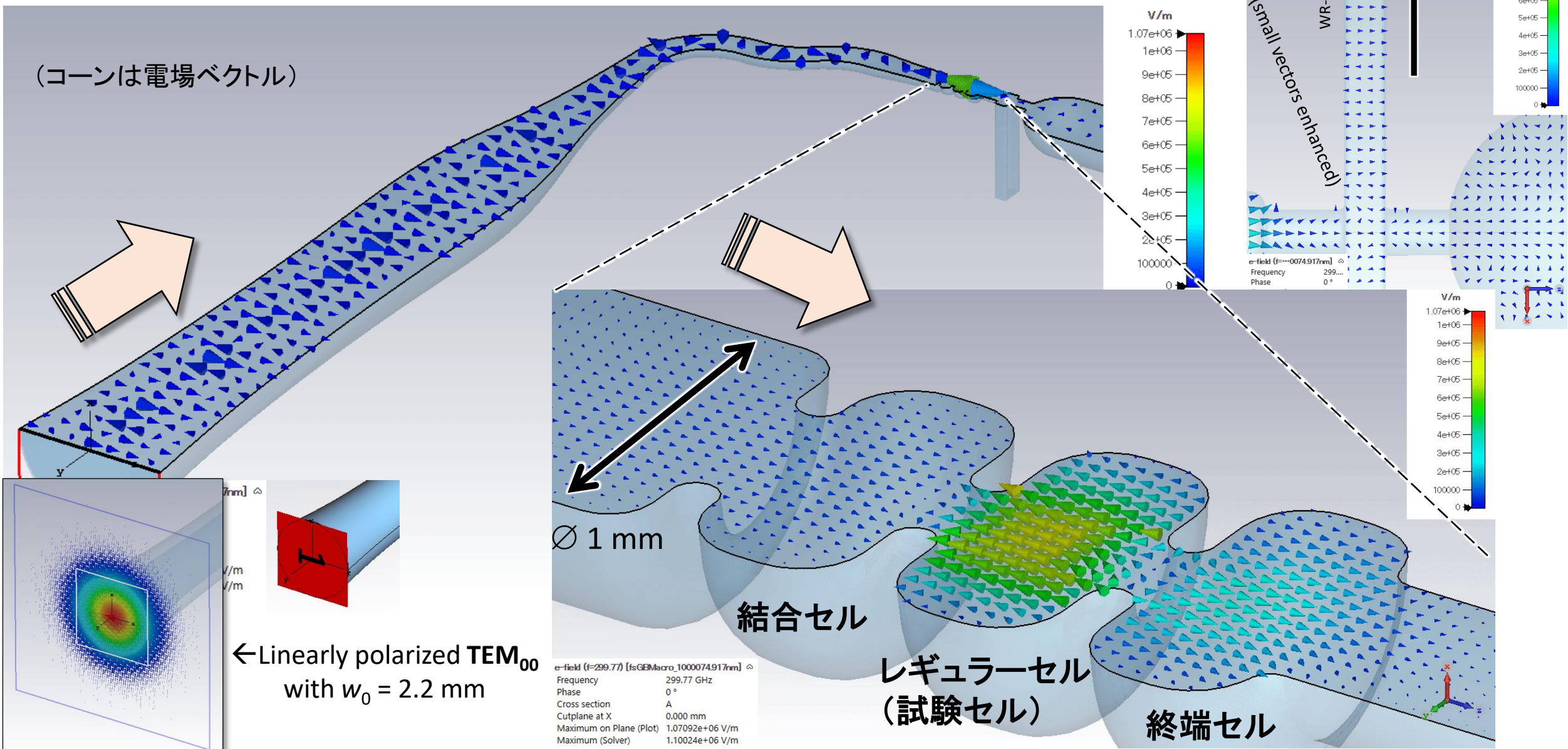
銅の Skin depth と自由電子の平均自由行程



300 GHz 金属製加速空洞

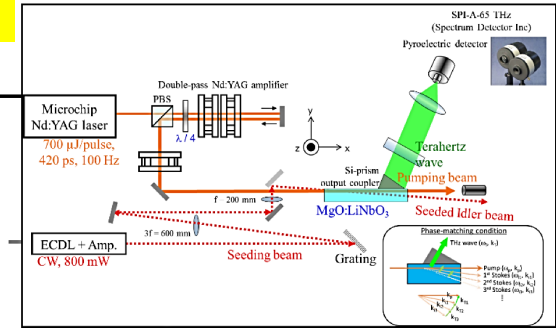
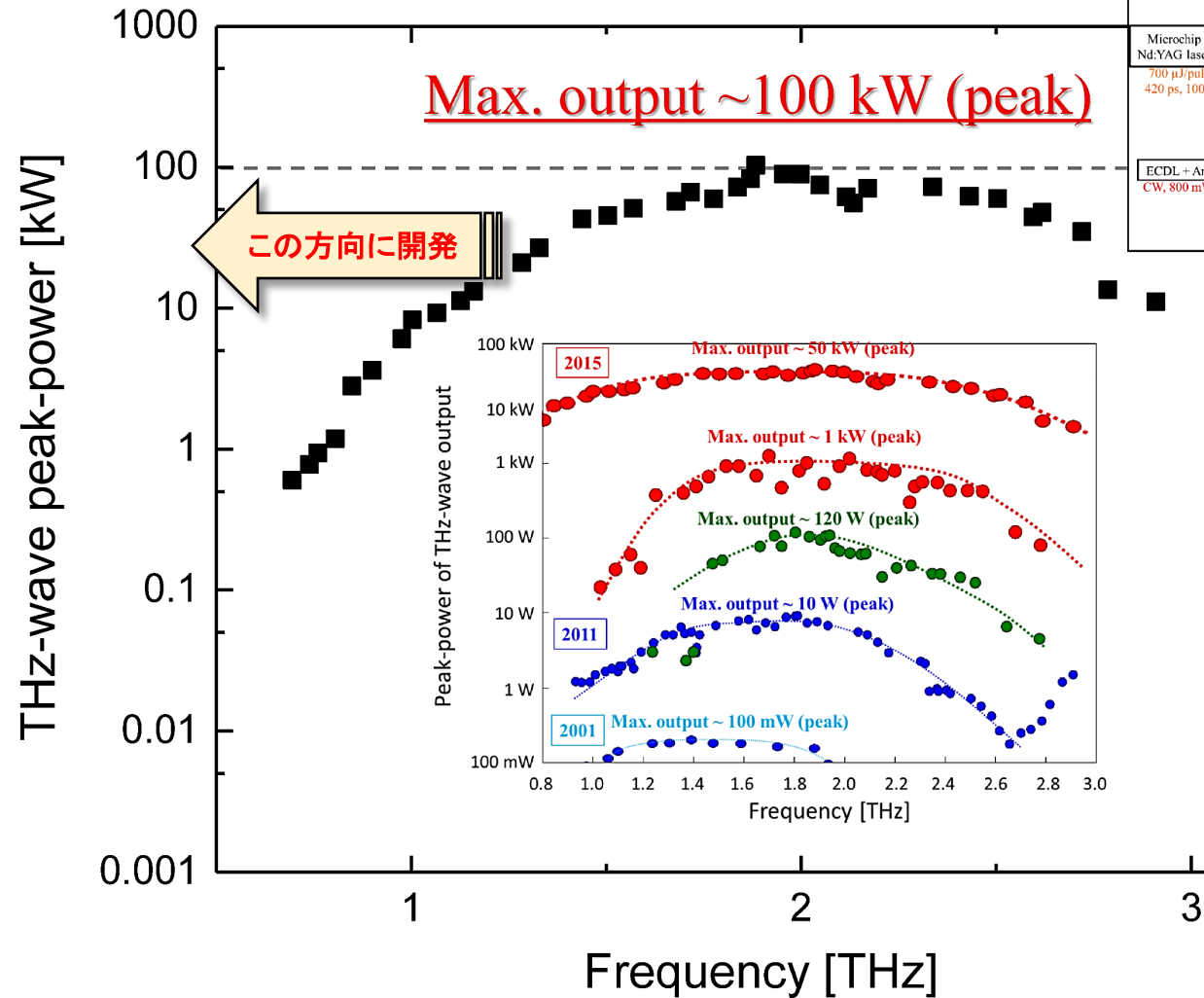


第一原理電磁場シミュレーション @ 300 GHz



レーザー駆動テラヘルツ光源

20年で出力が6桁も上がっている急成長分野！



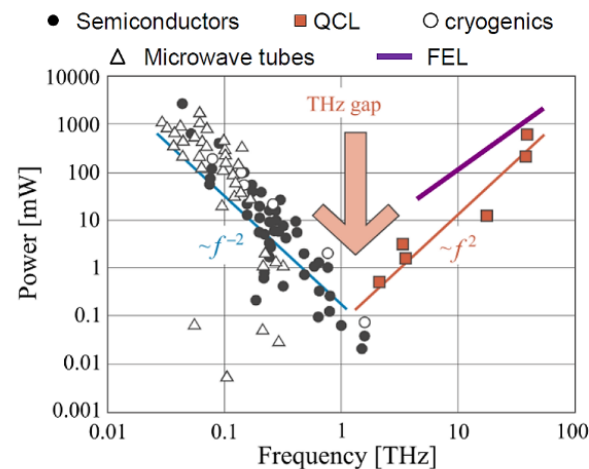
新技術説明会

社会実装に向けたテラヘルツ波長変換技術の新時代

理化学研究所 量子工学研究センター
テラヘルツ光源研究チーム
チームリーダー 南出 泰亜

加速器を使ったテラヘルツ光源級の出力が卓上で得られる時代！

高電界加速の国際ワークショップHG2021における M. Othman 氏の発表スライドより抜粋↓

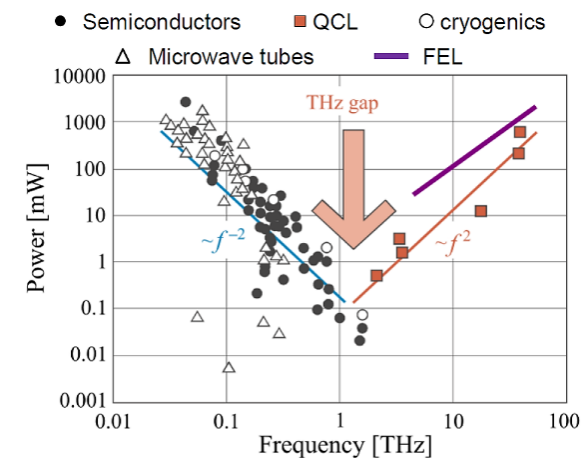


Nature Photonics. 1 (2), (2007)
Science 318 (2007)
J Phys. D: Appl. Phys. 50.4 (2017)

小型化のデメリット

- 加速構造が小さくなり、製作が難しくなる
 - 近年の超精密加工技術では、ミクロンオーダーの加工精度の達成は難しくなくなっている
- 加速器のアライメントやビーム制御等における要求精度が高くなる
- 大電力波源の開発が必要
 - より高い周波数では、(加速器でよく使う)電子管ベースの大電力マイクロ波源の出力は落ちる($\propto 1/f^2$)
 - 数百GHz(サブテラヘルツ)まで行けば、レーザー駆動の大電力光源が使える
 - 『サブテラヘルツ加速器』

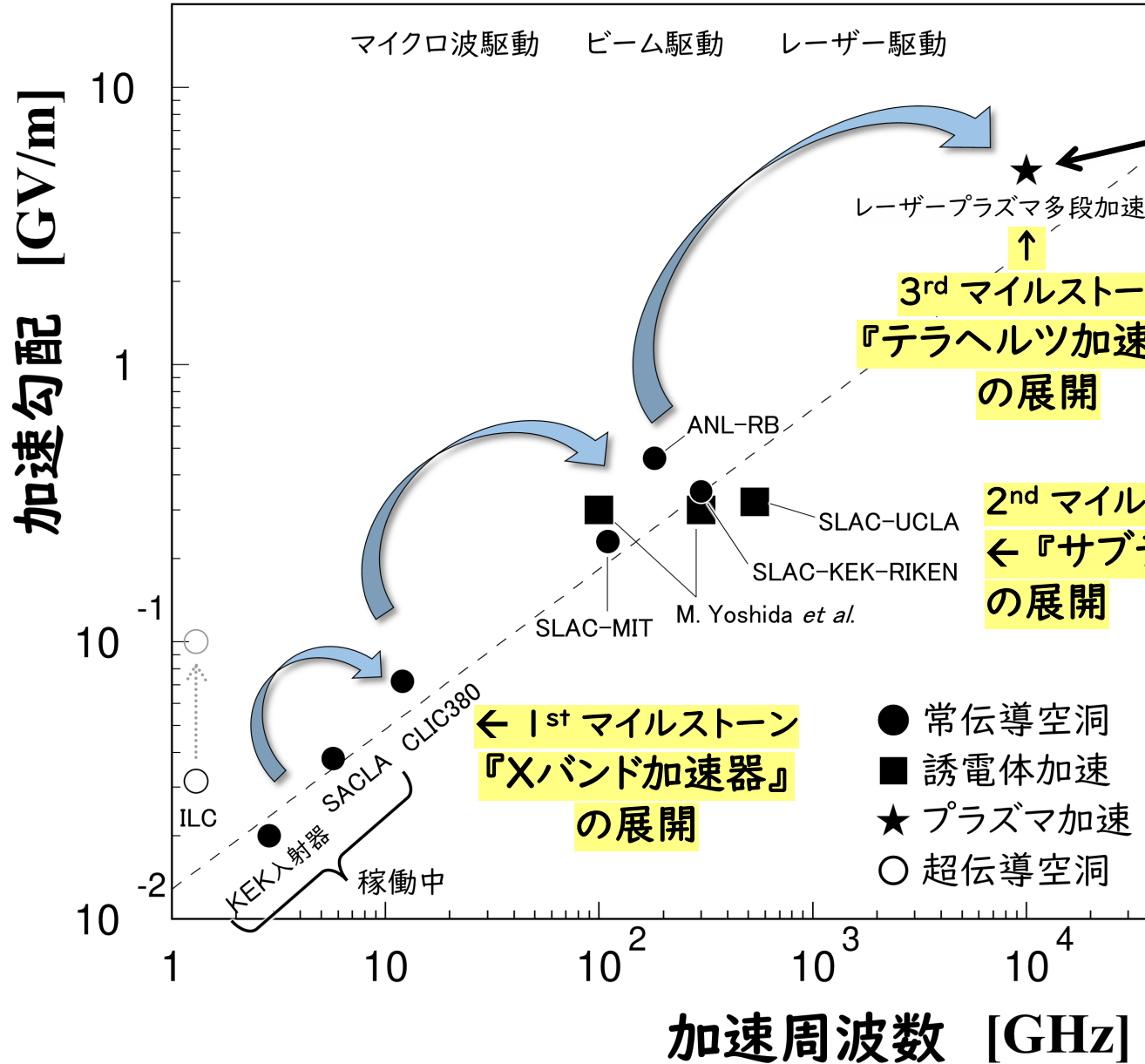
[高電界加速の国際ワークショップHG2021](#) における
[M. Othman 氏の発表スライド](#)より抜粋↓



Nature Photonics. 1 (2), (2007)
Science 318 (2007)
J Phys. D: Appl. Phys. 50.4 (2017)

高エネルギー高電界加速技術の展望(予想図)

(設計値, 目標値, または 達成値)



比較的安定して電子を加速できるプラズマ共振数と集光光学系を含む平均加速勾配

下記の加速器関連技術を磨きつつ、周波数と加速勾配を桁で上げていく:

- a. ビーム軌道の精密制御
- b. ビームの精密測定・診断
- c. 加速器コンポーネントの精密アライメント
- d. バンチ圧縮
- e. ウェーク場の抑制・除去法
- f. 低エミッタンスの維持
- g. 大電流加速に伴う諸問題の解決法
- h. 等

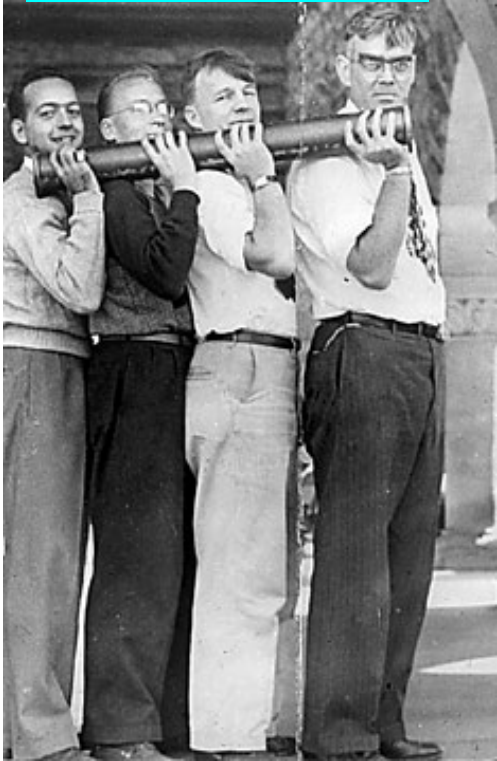
- ✓ 各世代の革新的加速構造のR&Dを全て推進
 - 場合によっては、随時、小展開
- ✓ 時が来たら、各世代の技術で加速器を大展開
 - Step by step

**高エネルギー高電界加速器の
進化すべき方向**

高エネルギー・高電界電子加速技術は進化を遂げるか？

Mark I 加速器@スタンフォード(1946年)

Sバンド・ディスクロード型加速管

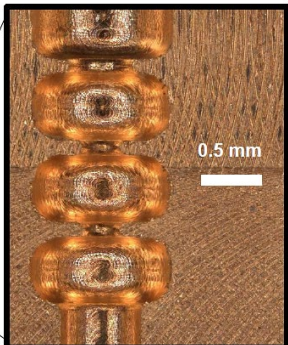
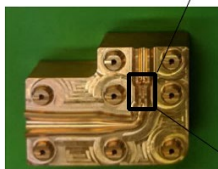


スタンフォード大学のMark I 加速器用Sバンド加速管を担ぐ4人。一番右がWilliam W. Hansen 教授で、その左の3名は彼の大学院生。この1本の加速管で1MeV(1000 keV)以上加速できる。SLAC Archives, ARC127 より抜粋。

サブテラヘルツ加速器



例



+75年

×1 周波数

×4 周波数

×~30 周波数

×~50 周波数

KEK入射器用Sバンド・ディスクロード型加速管(2021年)(近年、新規製作)



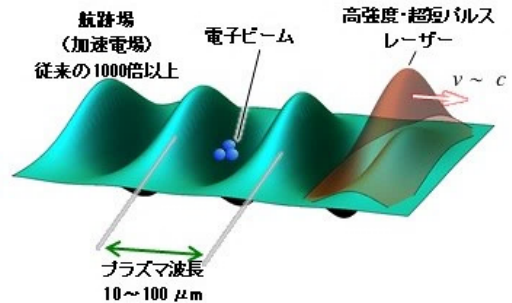
【従来】Sバンド加速管($f=2.856\text{GHz}$, $L=2\text{m/本}$)

【近未来】Xバンド加速管($f=11.424\text{GHz}$, $L=30\text{cm/本}$)

CLIC用プロトタイプ加速管

テラヘルツ加速器

例



「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」プロジェクトより

- ✓ 今こそ飛躍して大きく進化
- ✓ 加速器の超小型化は、医療・産業分野にも革新をもたらす

常伝導金属空洞製サブテラヘルツ加速器の特徴

- 超小型(でも製作可能)、高い加速効率
 - 500 GHzを超えると製作性や加速効率の観点から得をしない
- 既存の加速器との親和性あり
 - 従来のマイクロ波加速の延長上の技術
 - 既存の加速器で可能なことは(原理的には)可能なはず
 - 例: 高いコンディショニング効果(コンディショニングでブレークダウン率を下げるができる)
- レーザー駆動のテラヘルツ光源が使える
 - 大電力レーザーの技術は日進月歩
- 6G通信では 300 GHz帯も使われる予定
- Xバンドからテラヘルツ加速器(数十テラヘルツ帯)への橋渡しとなる

未来を切り開く加速器!