

縦方向分割方式Cバンド 小型加速管の設計・試験

阿部 哲郎, 肥後 壽泰 (高エネルギー加速器研究機構)

木村 優志, 菅野 東明, 重岡 伸之, 原 博史, 比嘉 究作 (三菱重工機械システム株式会社)

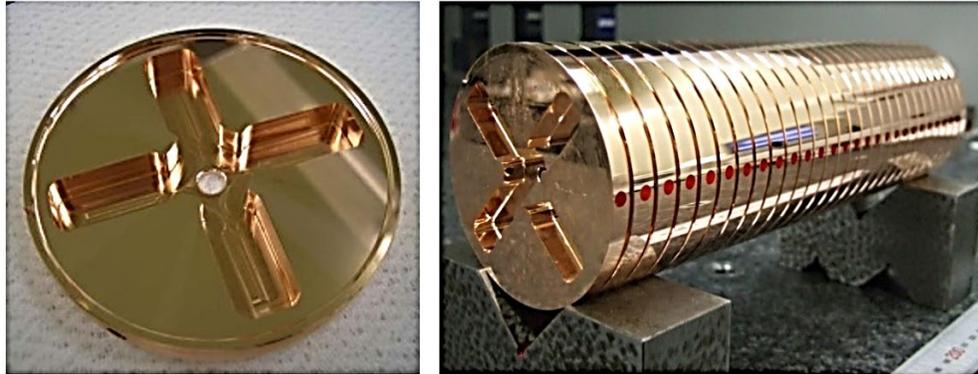
第21回 日本加速器学会年会@山形市

2024年8月2日

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)

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)

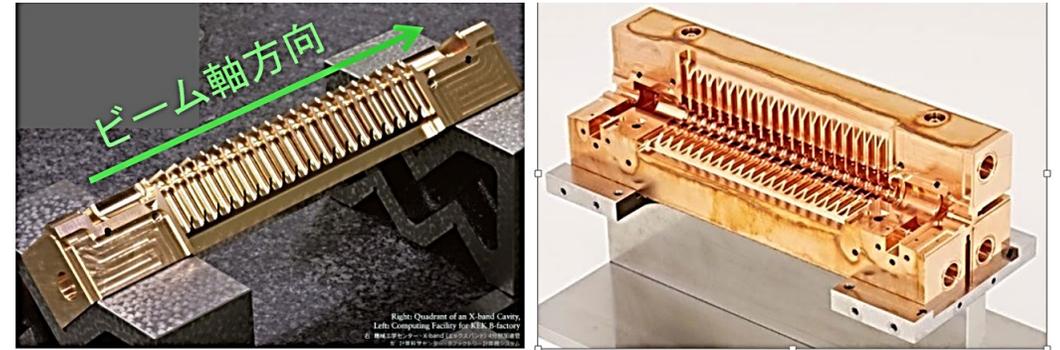
■ 利点

- ✓ 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

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

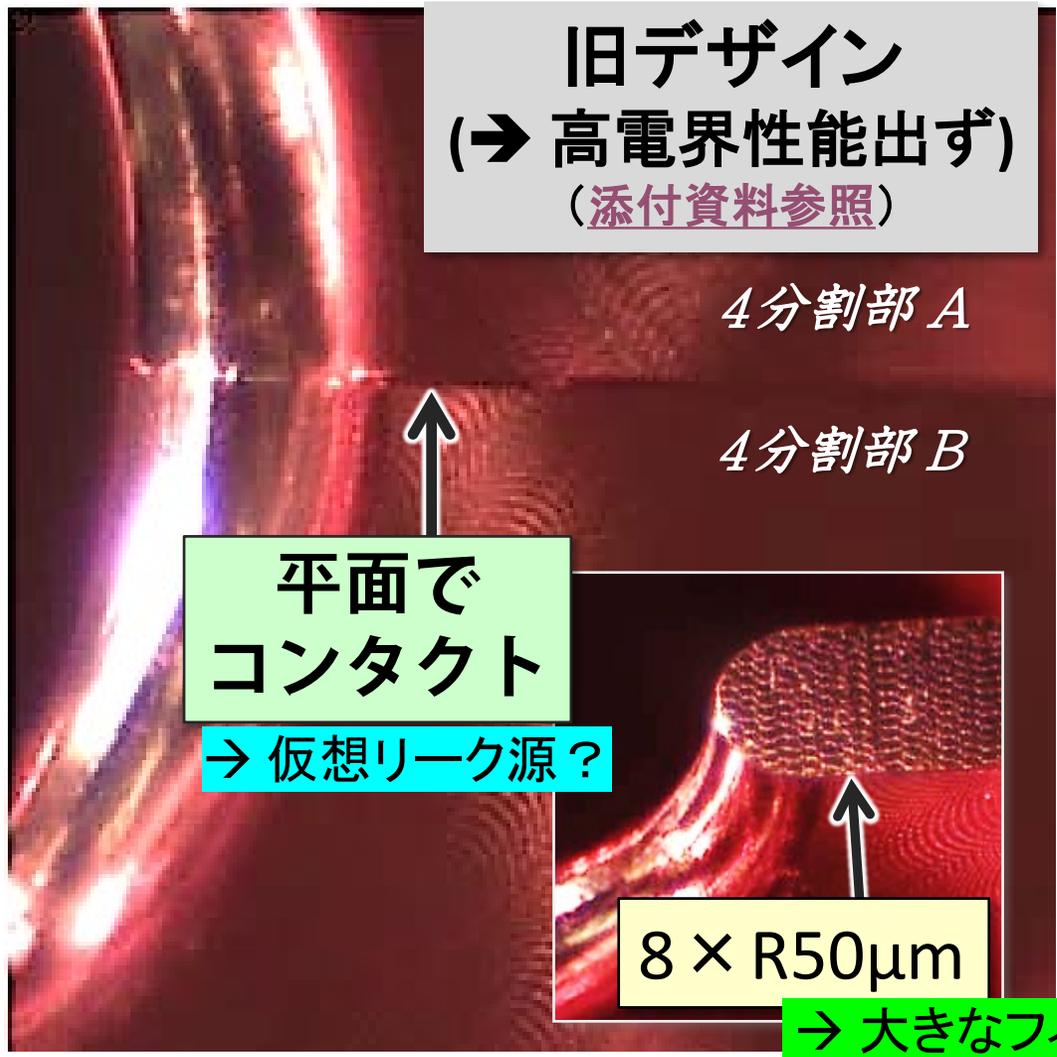
- ✓ すべてミリング加工なので、表面粗さ大($R_a > 100 \text{ nm}$)
- ✓ 分割部間からの**仮想リーク**の恐れ → 改良版で解決済
- ✓ 分割部の角における**フィールド増大** → 改良版でほぼ解決済

DESIGN IMPROVEMENT

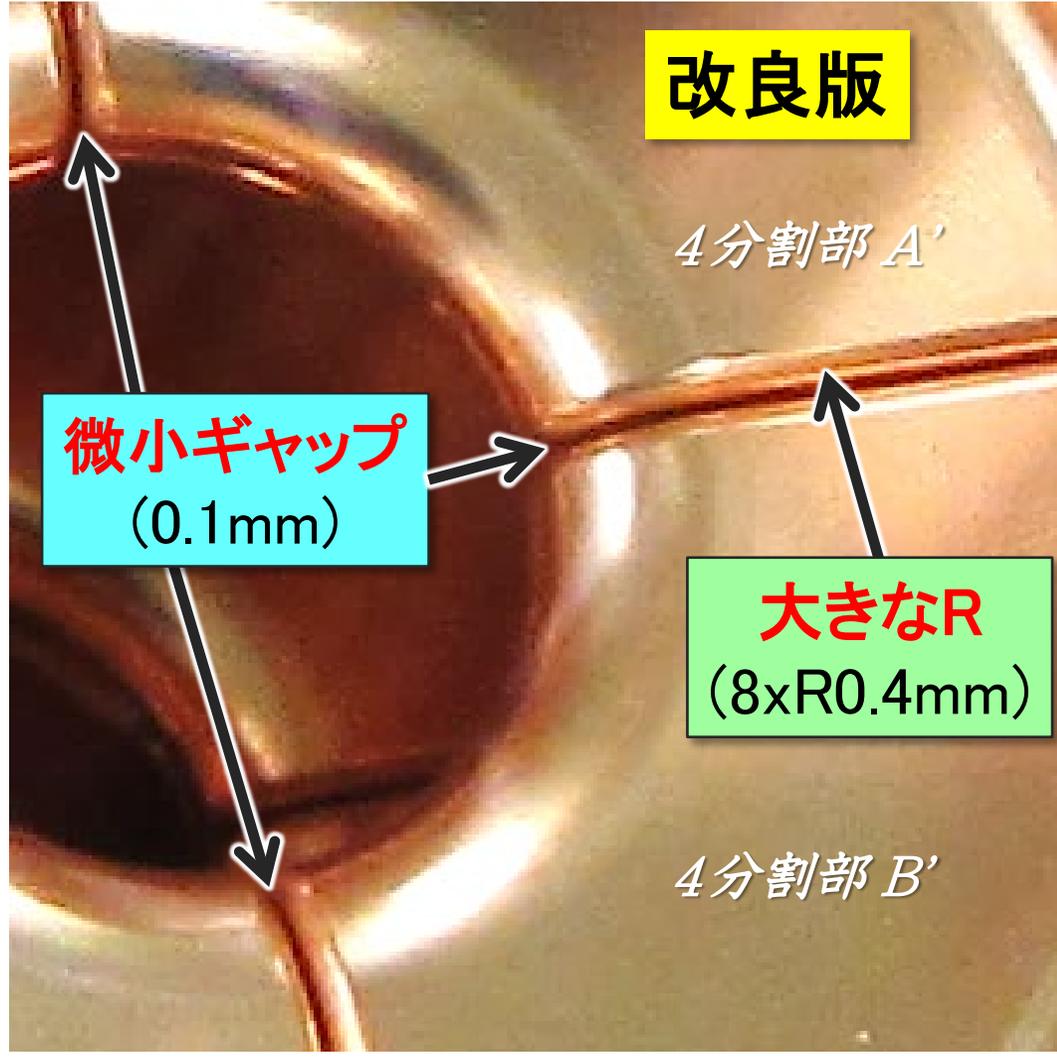
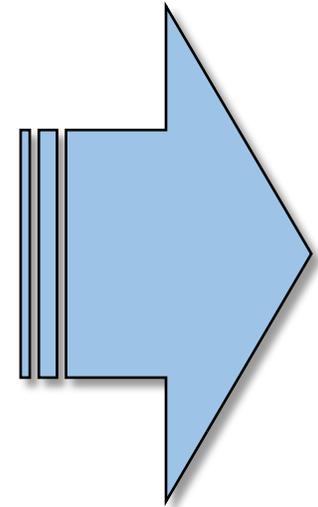
- ✓ 仮想リークの可能性をなくす
- ✓ フィールド増大を抑制する

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 →

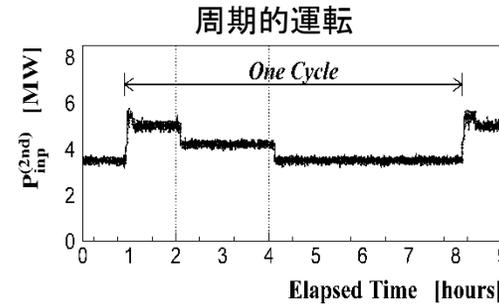
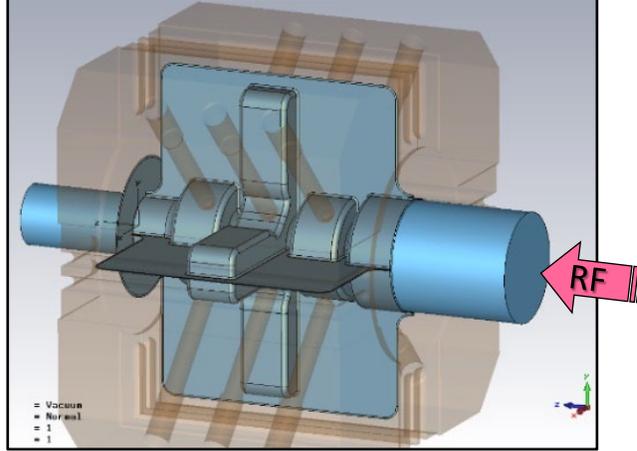
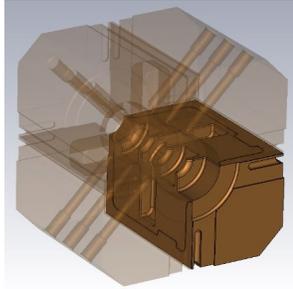


改良縦方向分割方式の高電界性能の実証 @KEK/Nextef1 (2017年)

Xバンド(11.4GHz)単セル型試験空洞(定在波)

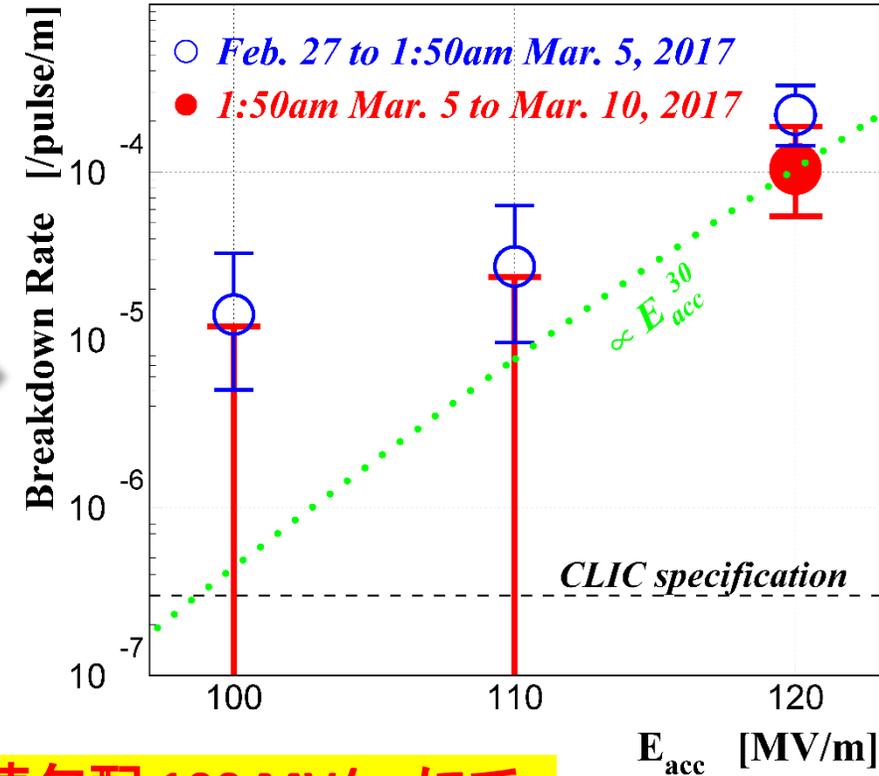
詳しくは下記参照:

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)



大電力RFコンディショニング後の
ブレイクダウン率測定結果

SD1_QUAD-R04G01_K1, 100+150 ns



加速勾配 100 MV/m にて、
リニアコライダー仕様の安定度あり!

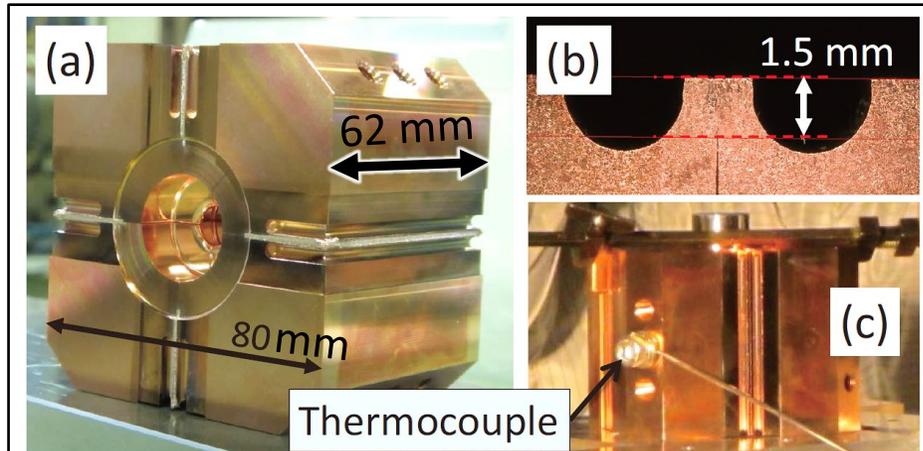
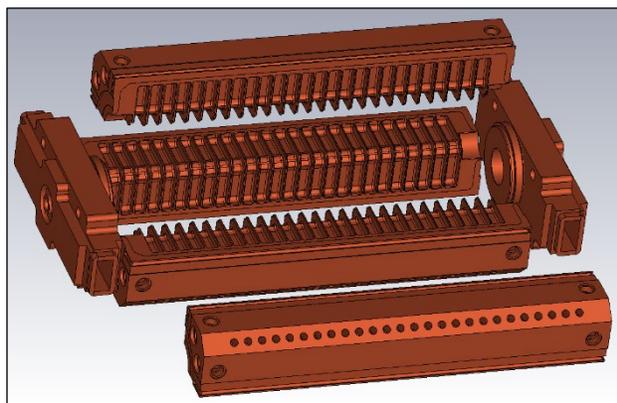


Figure 12: EBW of the quadrants. (a) After the EBW. (b) Welding penetration depth for the EBW conditions described in [13]. (c) A thermocouple is attached.

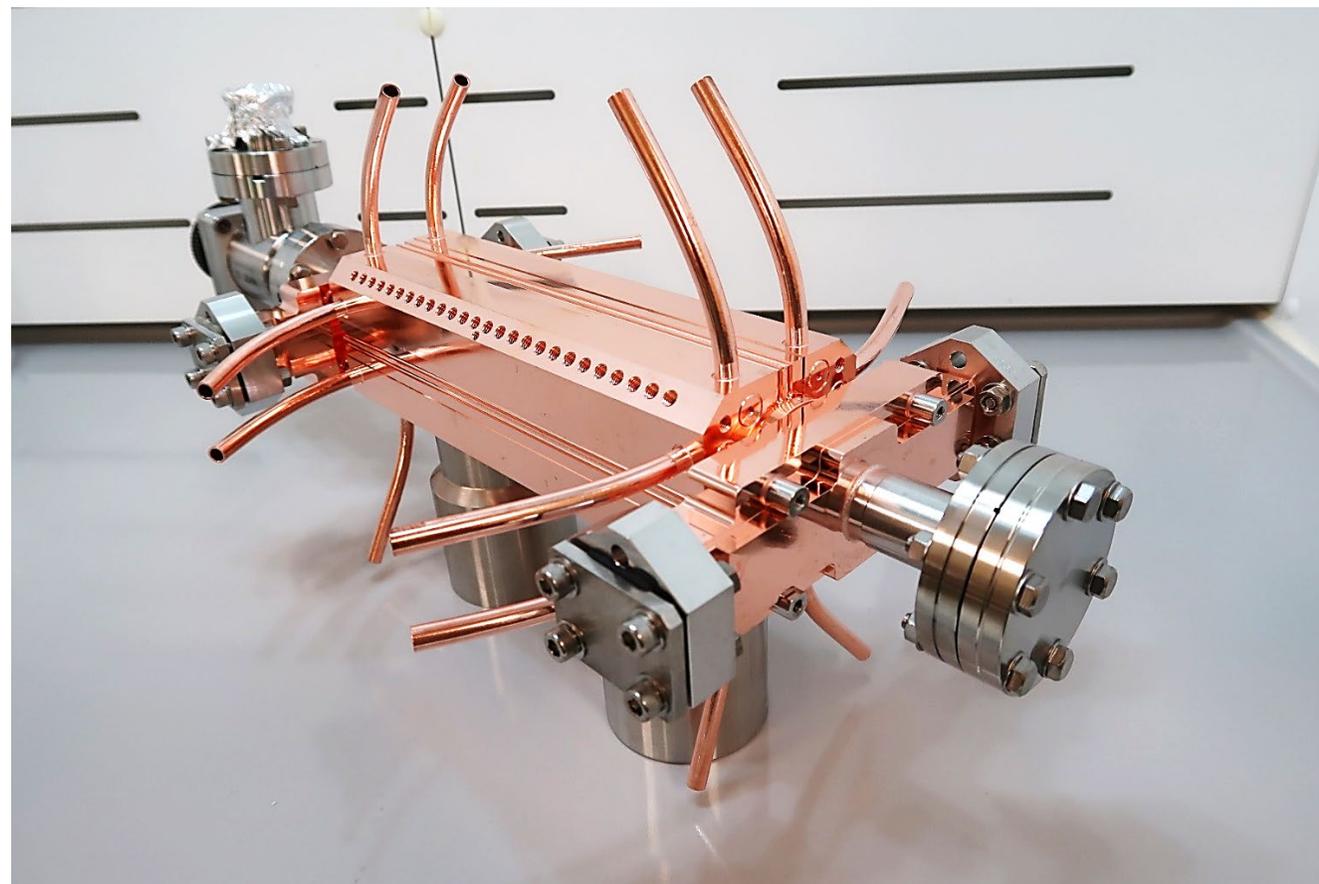
フルスケール加速管 (CLIC用プロトタイプ)を改良縦方向分割方式で製作 (11.4GHz、進行波)

詳しくは下記参照:

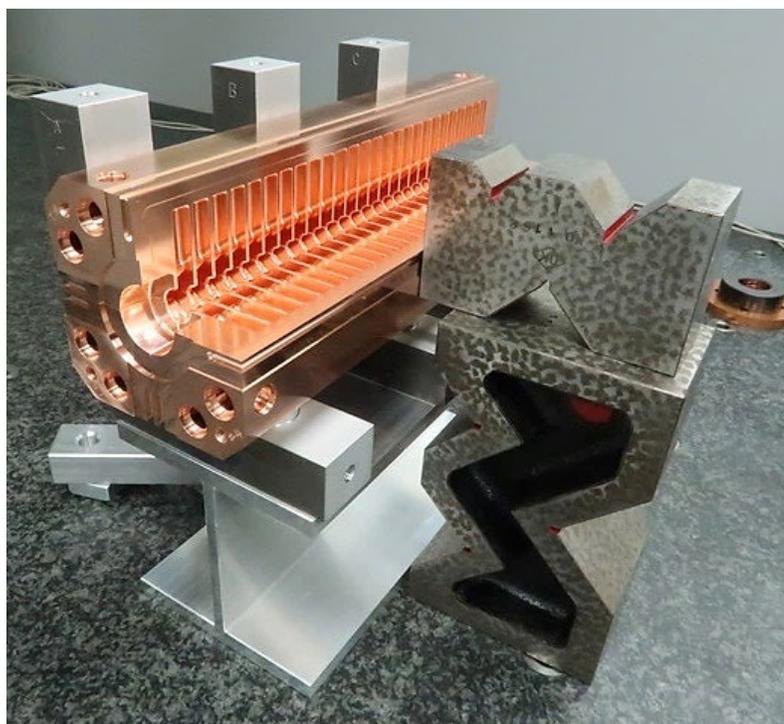
[阿部 哲郎 他、「改良4分割方式Xバンド高電界加速管の製作」
\(第16回日本加速器学会年会、WEOH04, 2019年\)](#)



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



医療用Cバンド小型加速管への応用

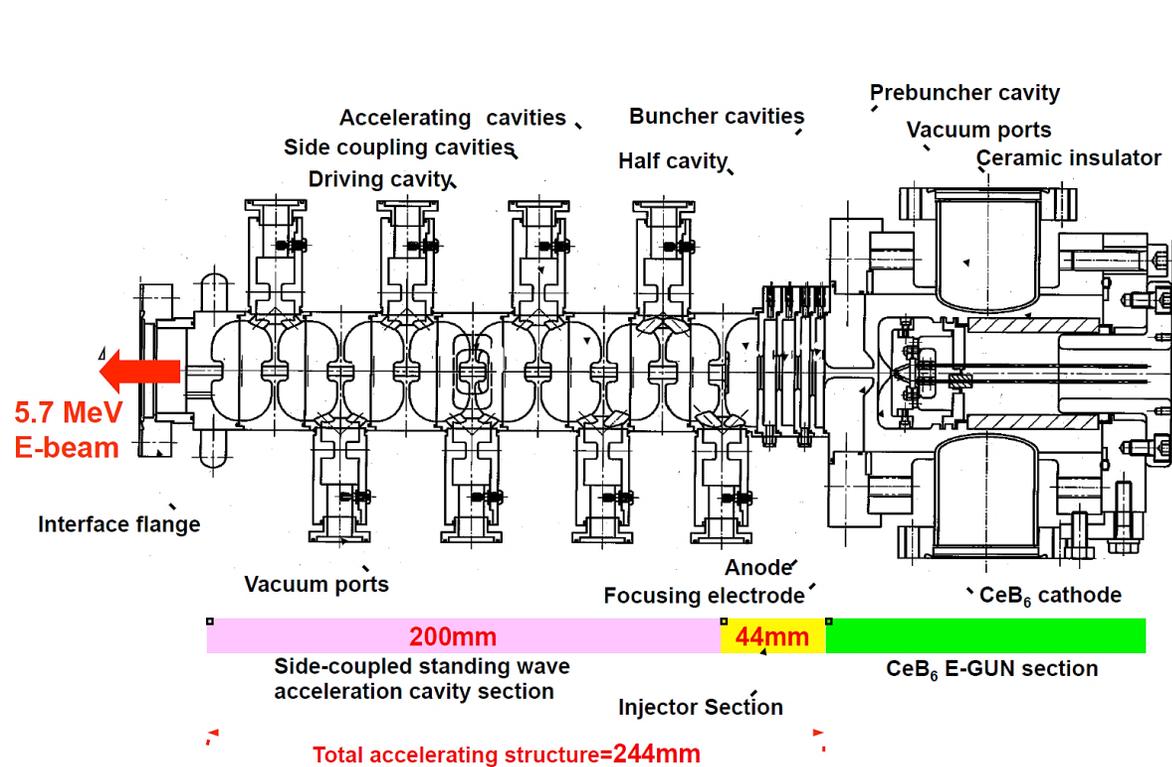
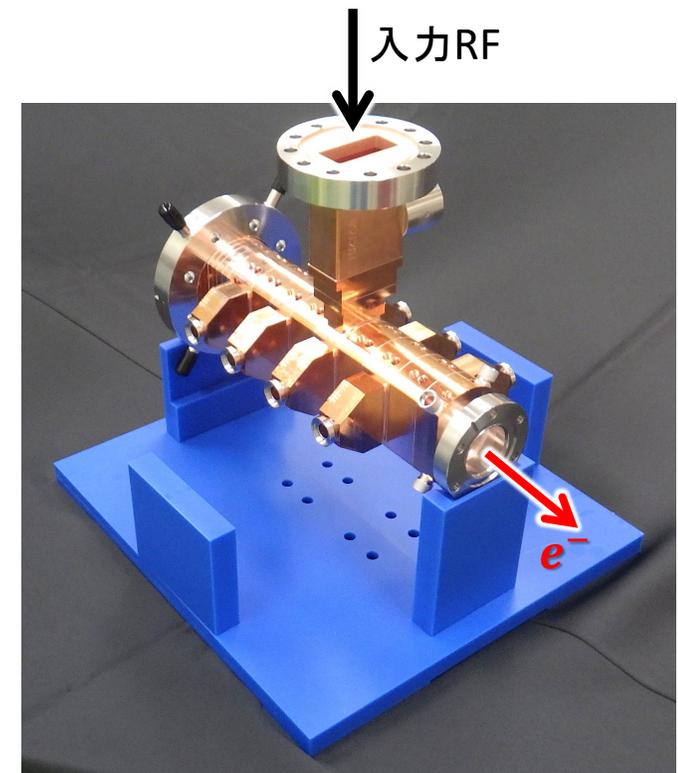


図 4.5 加速管の全体構成図

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/oho/oho12/oho12_txt/9%20kamino_mhi%2020120820.pdf

- ✓ 周波数: 5.71 GHz
- ✓ 入力結合度: 1.4 ~ 2.0
- ✓ 入力RF電力: ~3 MW
- ✓ 最終ビームエネルギー: ~6 MeV
- ✓ ビーム電流(peak): 75 mA 以上
- ✓ ビーム透過率: 40% 以上
- ✓ ビーム径: \varnothing 1.5 ~ 2.0 mm

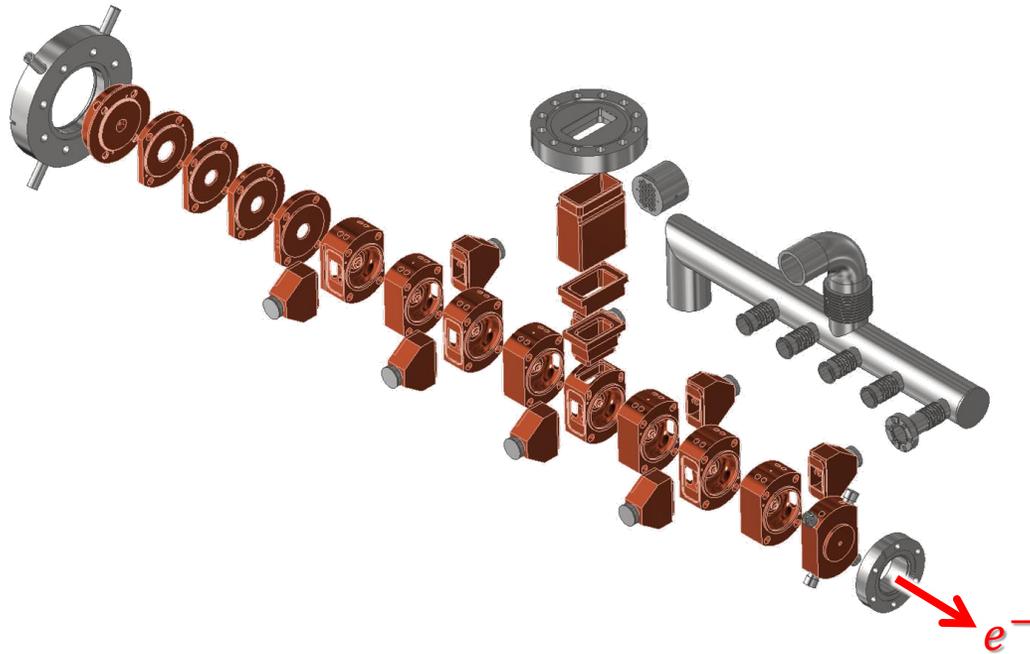


- サイドカップル構造
- 放射線治療装置のガントリーにインストール

縦方向分割方式は、複雑なサイドカップル加速管の製作に向いているか？

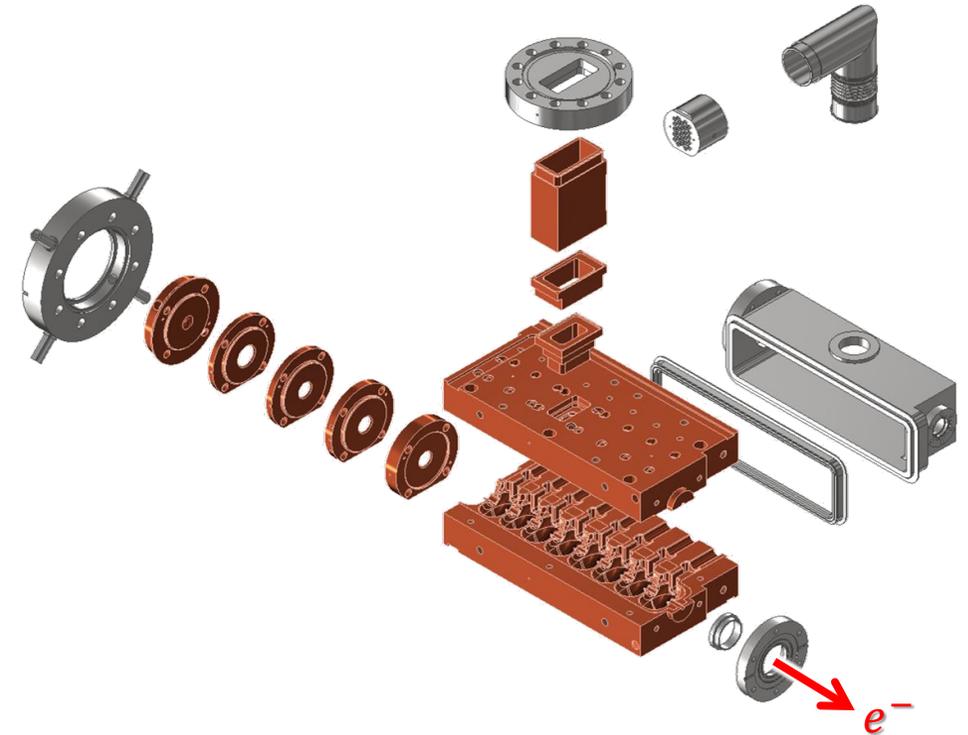
従来 vs. 新型

ディスク積層方式
(パーツ数: **59個**)



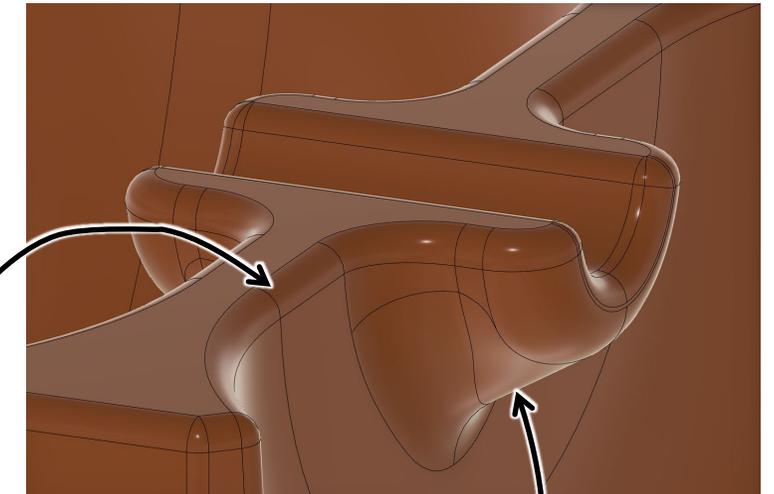
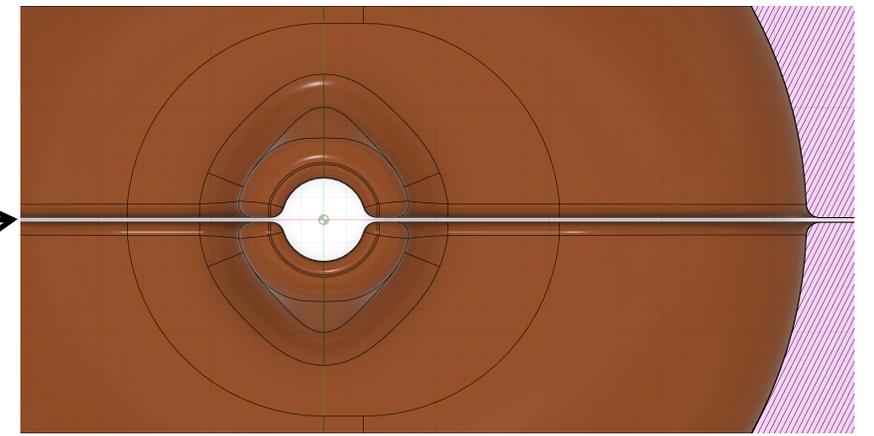
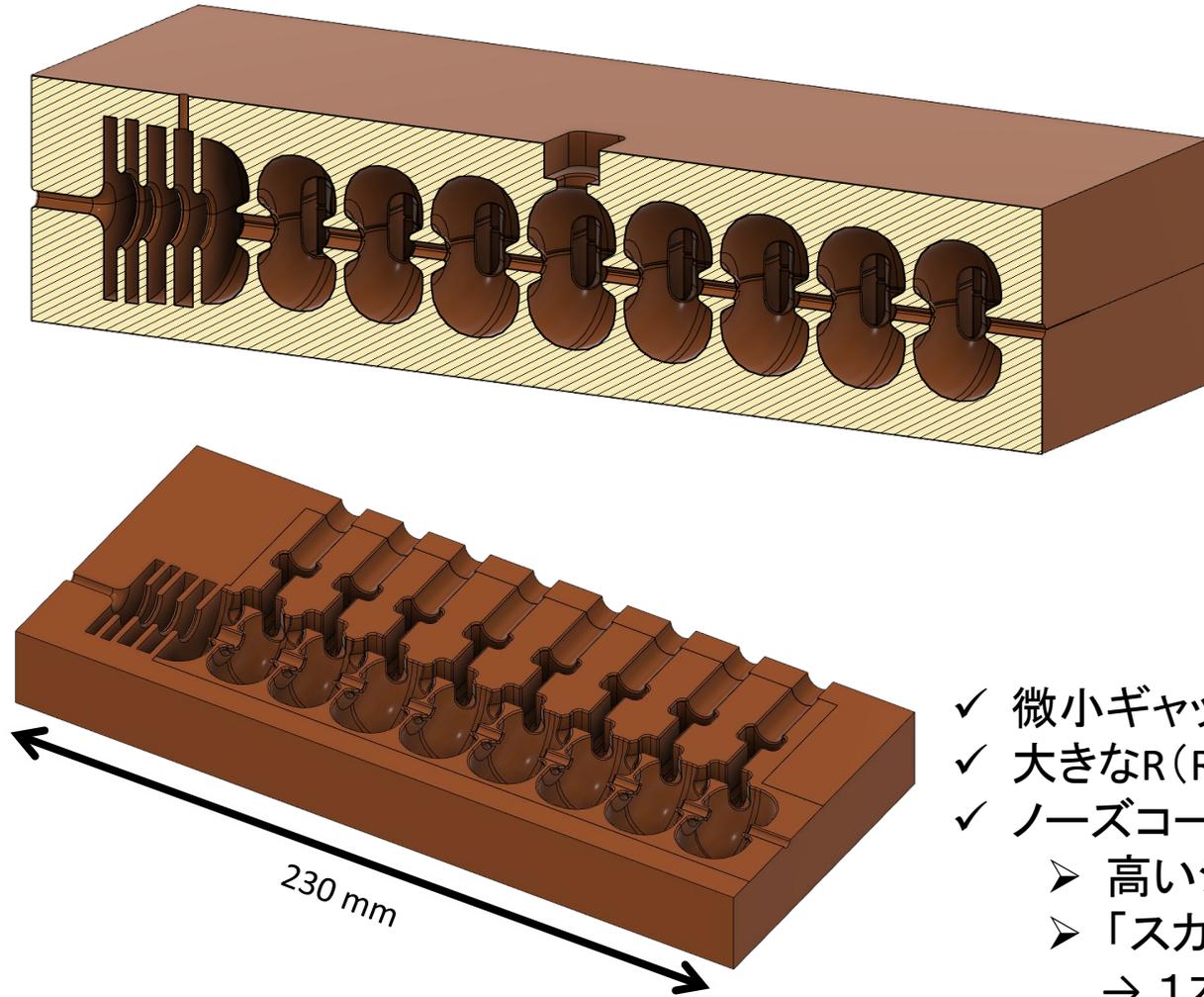
2回のろう付けで接合

縦方向分割方式
(パーツ数: **25個**)



1回のろう付けで接合

新設計の特徴



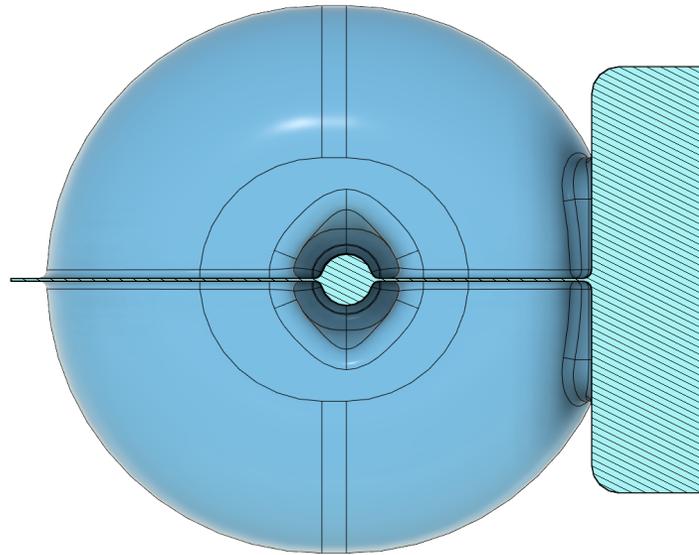
- ✓ 微小ギャップ (0.2 mm)
- ✓ 大きなR (R0.6mm)
- ✓ ノーズコーン
 - 高いシャント・インピーダンス
 - 「スカート」構造により効率的な加工を実現
 - 1本のツールで超精密ミリング加工可能
 - シャント・インピーダンスの劣化は殆どなし (< 0.1%)
- ✓ 全ての結合空洞を片側に揃えて材料節約

特許出願中
(PCT/JP2023/023388)

加速モードによる偏向

<進行方向成分の横方向分布非対称性への対策>

- ✓ 加速セルの断面形状変更: 円 → レーストラック
- ✓ ビーム軸はセル中心からオフセット



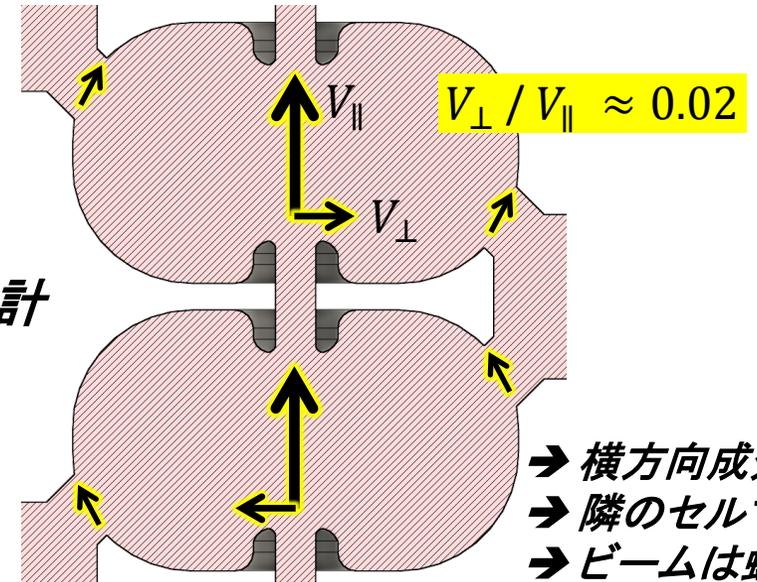
- 進行方向成分の振幅をビーム軸に関して対称にした
- 進行方向成分の位相はビーム軸に関して対称ではないが、偏向成分は小さい

$$V_{\perp} / V_{\parallel} \approx 2 \times 10^{-5}$$

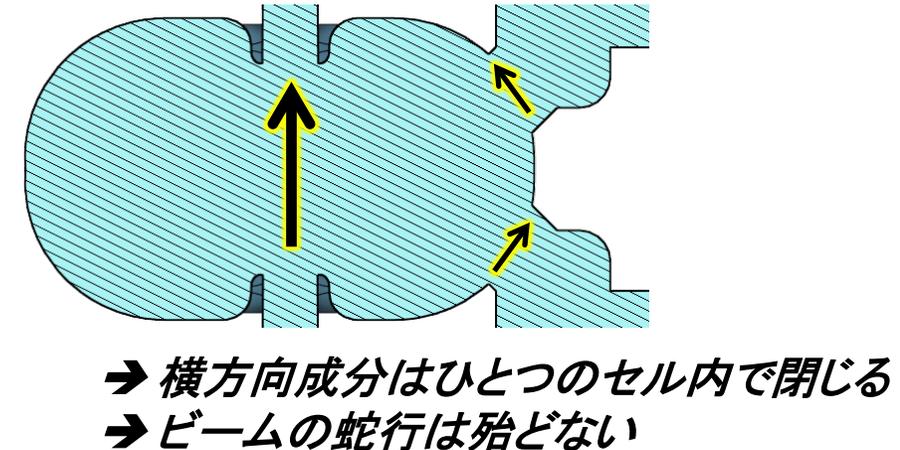
(50cm程の長さの小型加速器では問題なし)

<横方向成分>

従来設計



新設計



先行開発との比較

ISSN 1063-7788, Physics of Atomic Nuclei, 2021, Vol. 84, No. 10, pp. 1743–1747. © Pleiades Publishing, Ltd., 2021.

ACCELERATORS OF CHARGED PARTICLES
FOR NUCLEAR TECHNOLOGIES

Electron Accelerator for Replacement of Radioactive Sources in Insect Sterilization Facilities

S. V. Kutsaev^{a,*}, R. Agustsson^a, R. Berry^a, S. Boucher^a, and A. Yu. Smirnov^a

^a RadiaBeam Technologies, Santa Monica, CA 90404, USA

*e-mail: kutsaev@radiabeam.com

Received June 28, 2021; revised July 9, 2021; accepted July 19, 2021

米国RadiaBeam社

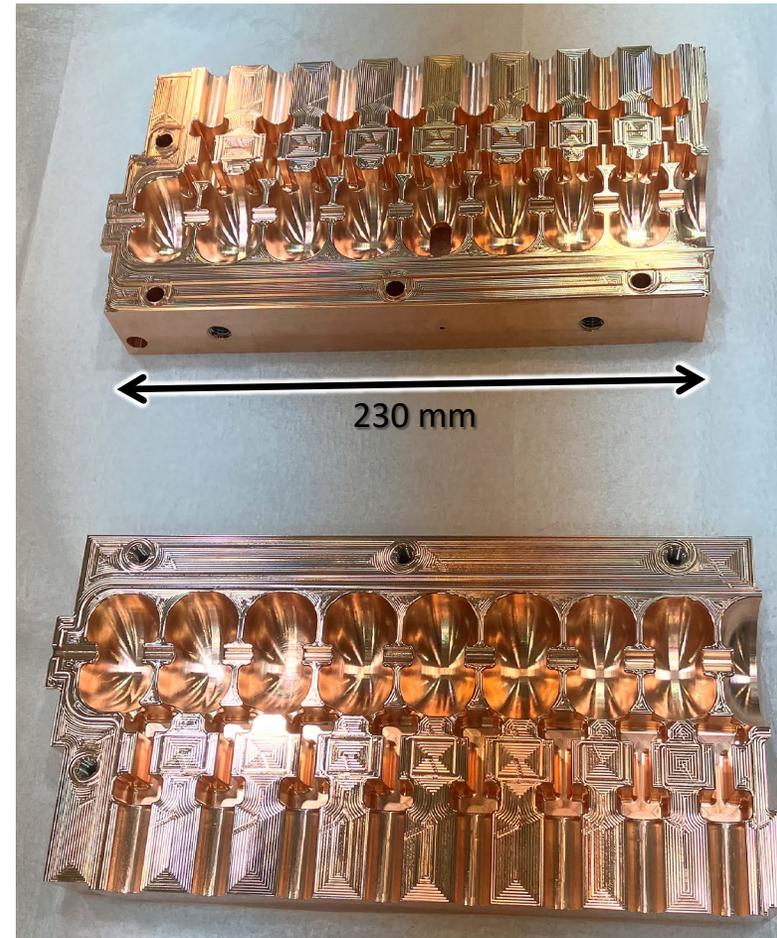


For $\beta=1$ cells

$$\frac{R_{sh}}{L} = 124.3 \text{ M}\Omega/\text{m}$$

at 9.3 GHz (X-band)

本開発加速管



For $\beta=1$ cells

$$\frac{R_{sh}}{L} = \sim 140 \text{ M}\Omega/\text{m}$$

at 5.7 GHz (C-band)



$$\frac{R_{sh}}{L} = \sim 180 \text{ M}\Omega/\text{m}$$

at 9.3 GHz (X-band)

より高いシャント・インピーダンス

新設計の高電界性能の実証 (単セル空洞の高電界試験)

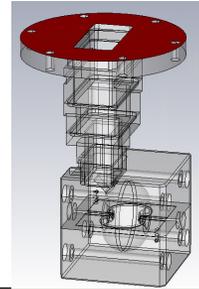
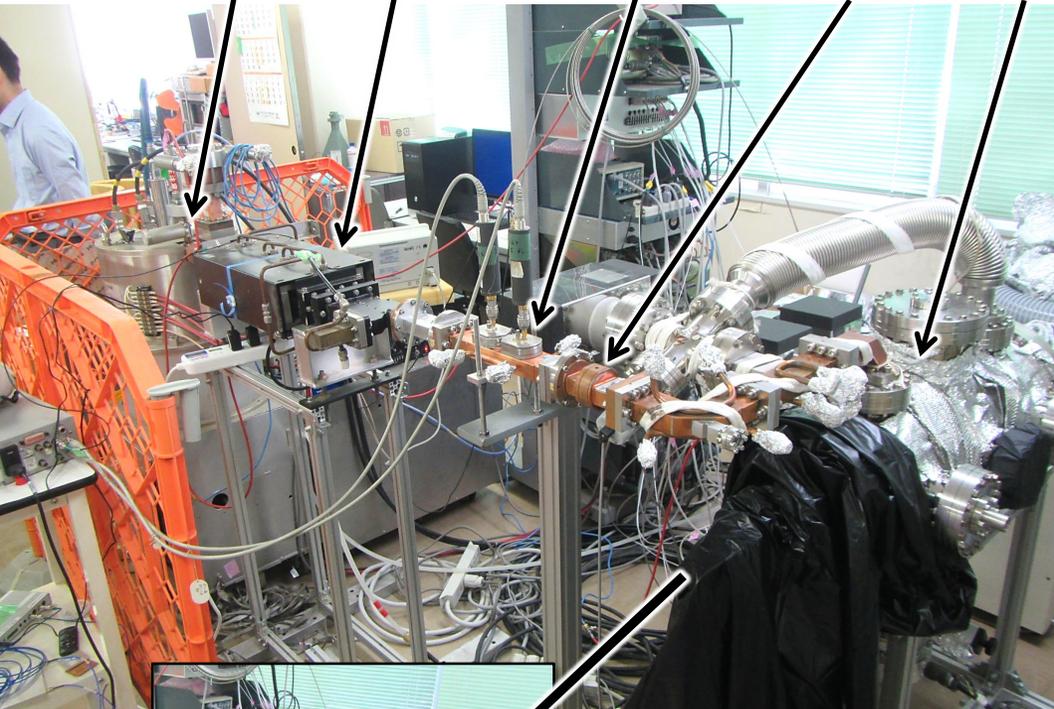
150 kW (max) Cバンド・クライストロン
(4 μ s, 40 Hz)

サーキュレータ 方向性結合器 RF窓 真空容器

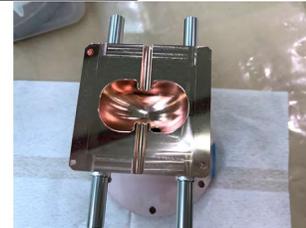
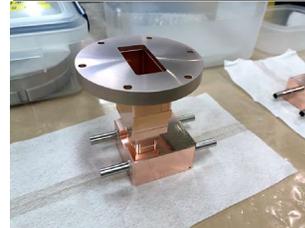
(協力: 吉田 光宏 氏 (KEK加速器))

表面電磁界強度 @ $P_{inp} = 150$ kW

($\Leftrightarrow E_{acc} \sim 27$ MV/m)

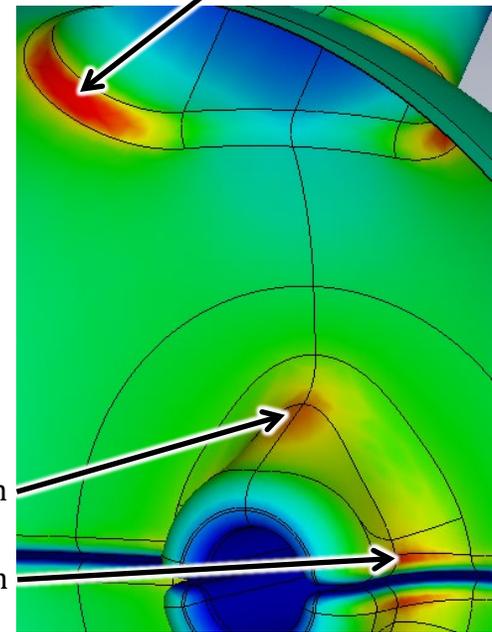
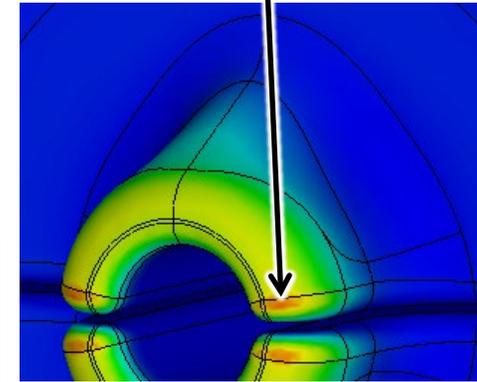


- ✓ $R_a \approx 0.6 \mu\text{m}$
- ✓ $Q_0(\text{meas})/Q_0(\text{sim}) = 99.9\%$
- ✓ 達成輪郭度: $\sim 20 \mu\text{m}$



$E_{surf}^{(max)} \sim 170$ MV/m

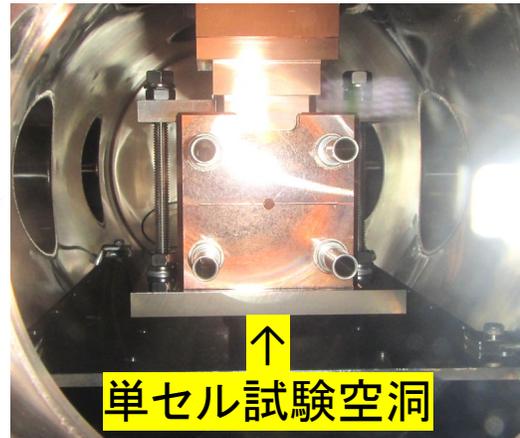
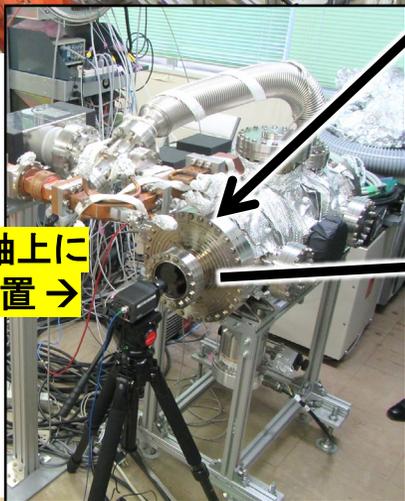
$H_{surf}^{(max)} \sim 140$ kA/m



$H_{surf} \sim 120$ kA/m

$H_{surf} \sim 130$ kA/m

ビーム軸上に
カメラ設置 \rightarrow



↑
単セル試験空洞



開発チームのコアメンバー

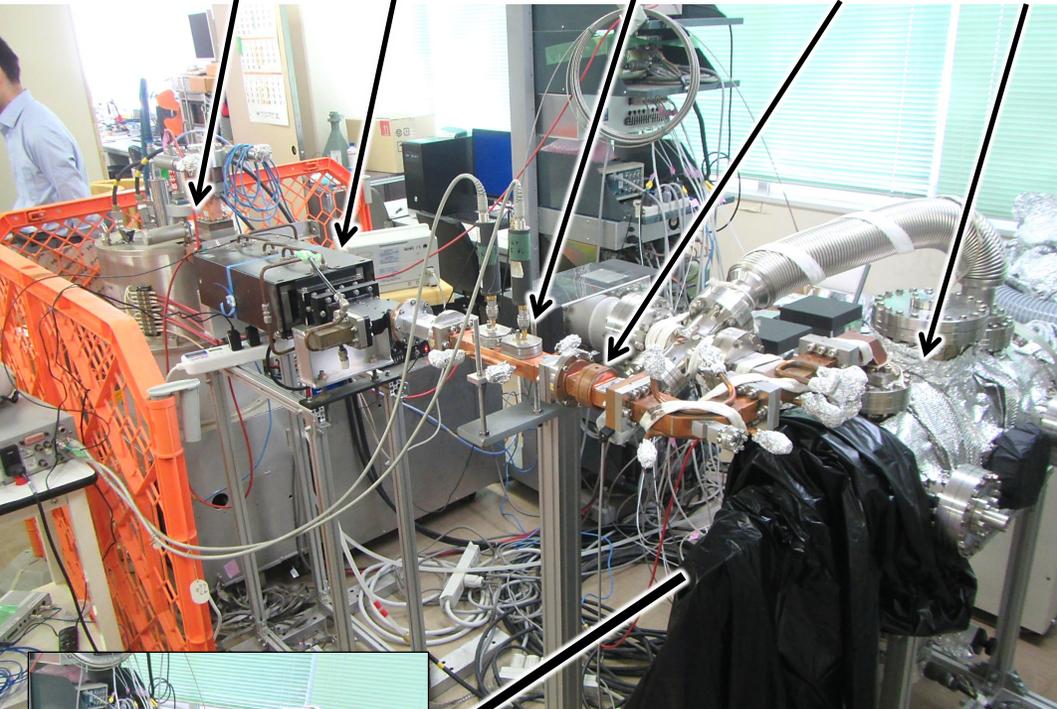


木村 優志、重岡 伸之 (MHI-MS)

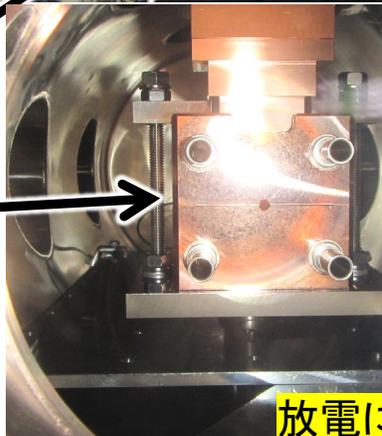
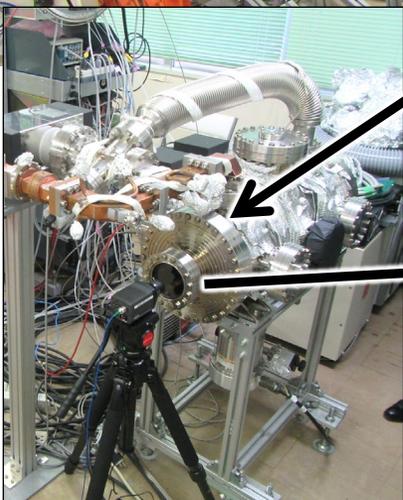
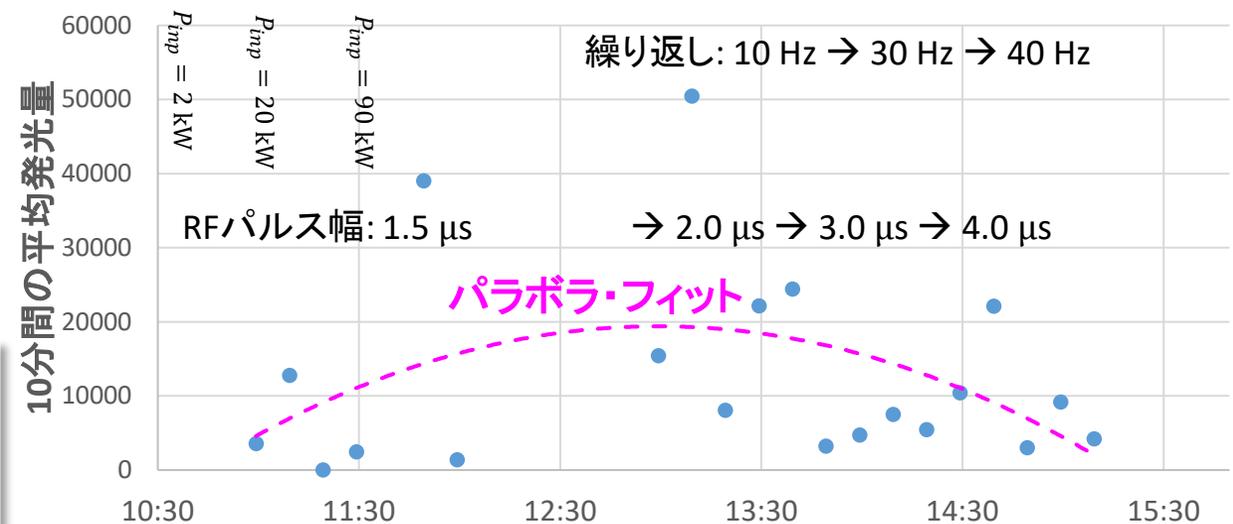
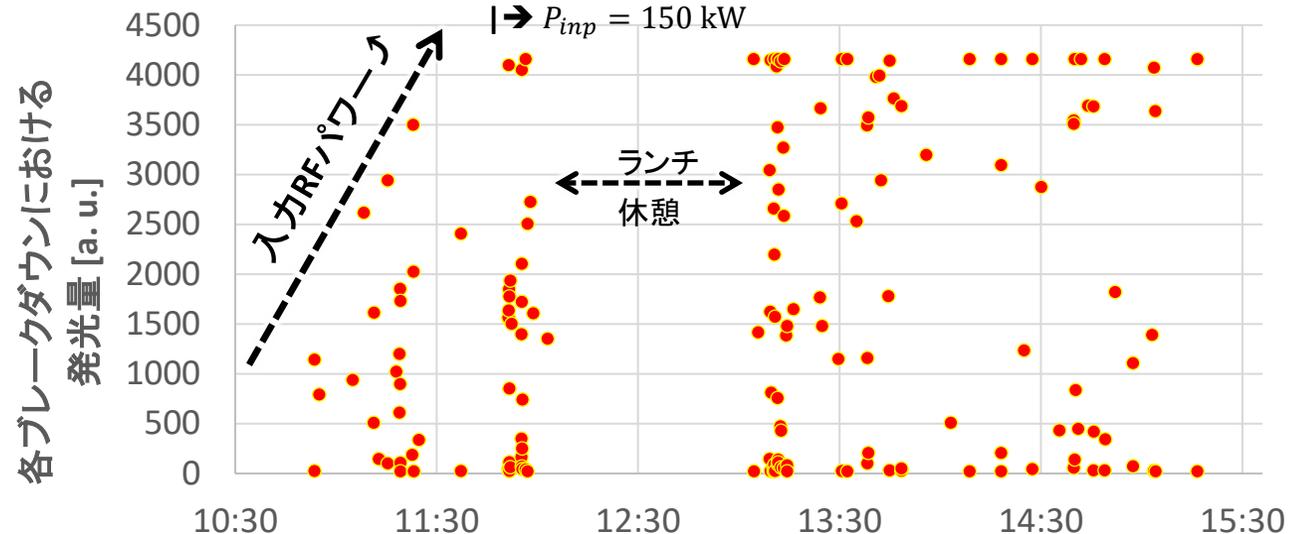
単セル空洞の高電界試験の結果

150kW Cバンド・クライストロン

サーキュレータ 方向性結合器 RF窓 真空容器



大電力RFコンディショニング履歴(1日)



放電による発光を映像として記録

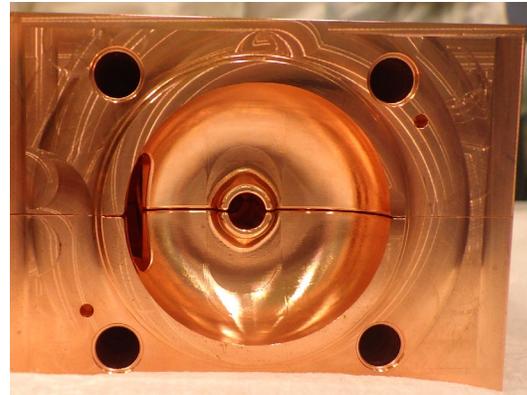
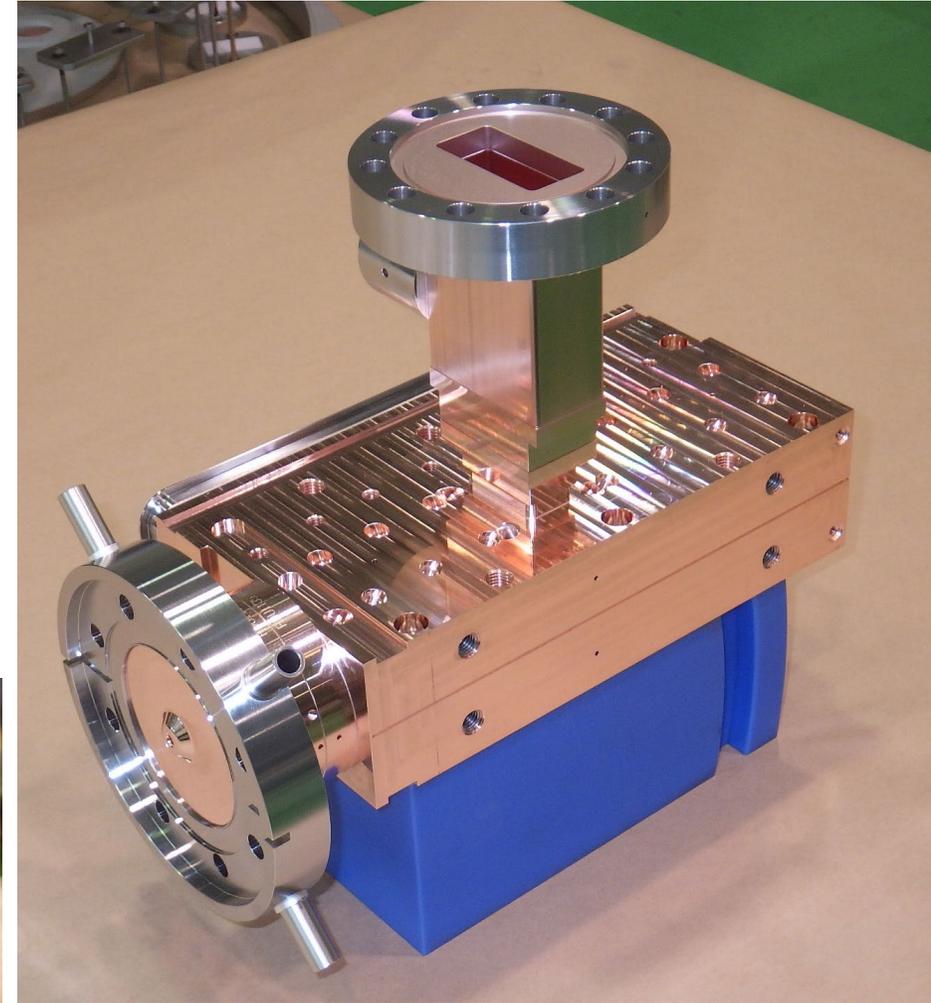
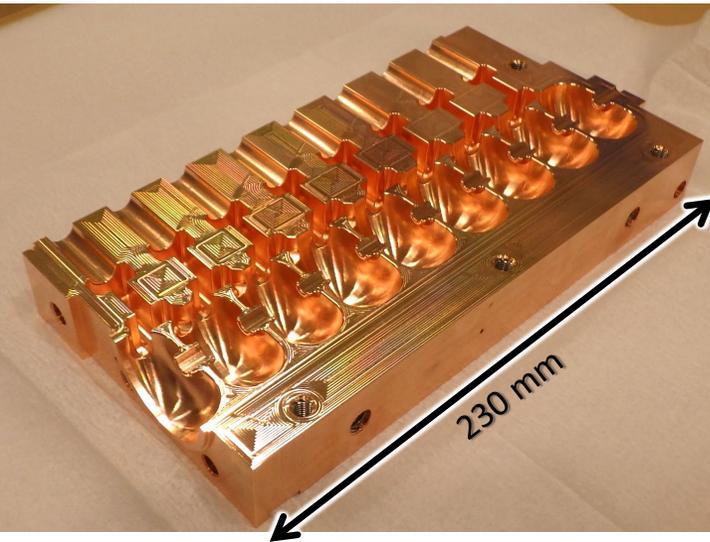
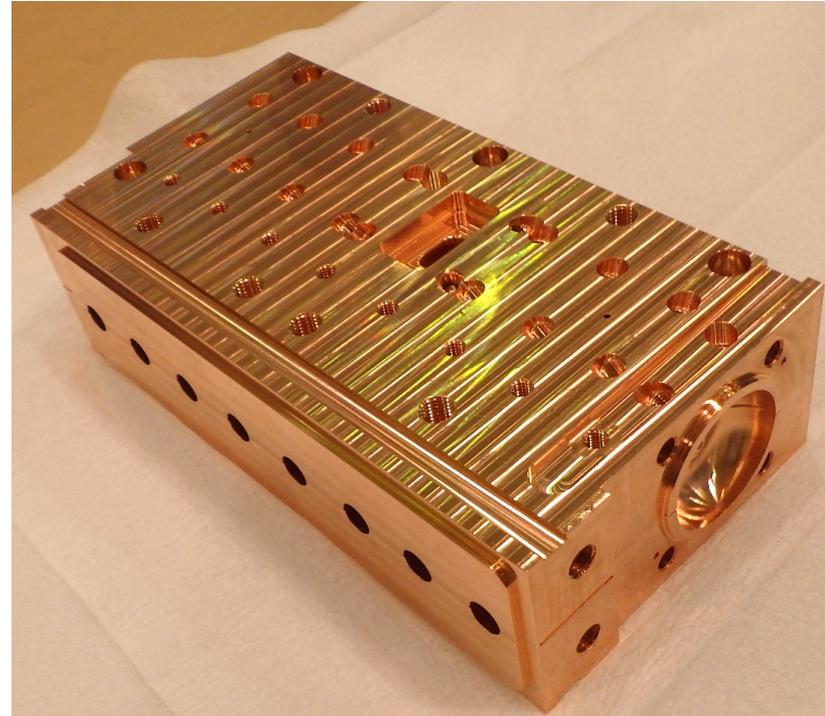
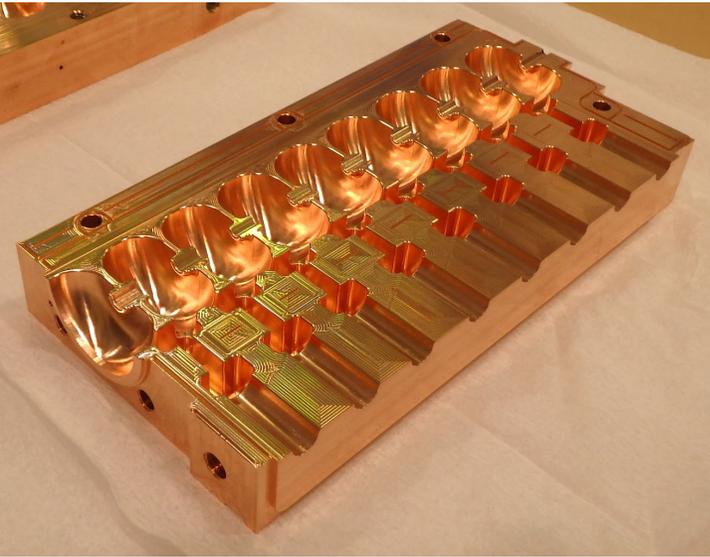
繰り返しを上げ、RFパルス幅をのばしても、10分間の平均発光量は増えない(むしろ減っている?)

→ たった1日でコンディショニング効果あり!

フルスケール・プロトタイプ加速管の製作(2024年)

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」、本年会ポスター発表、FRP042



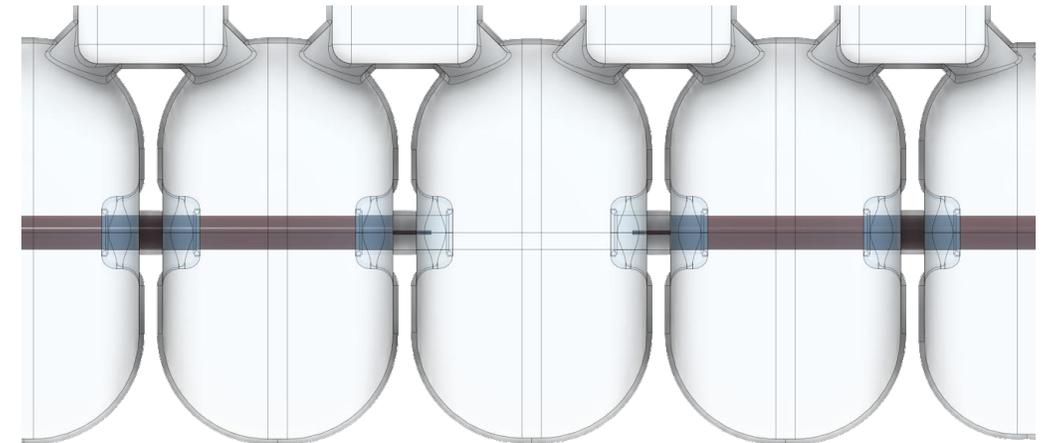
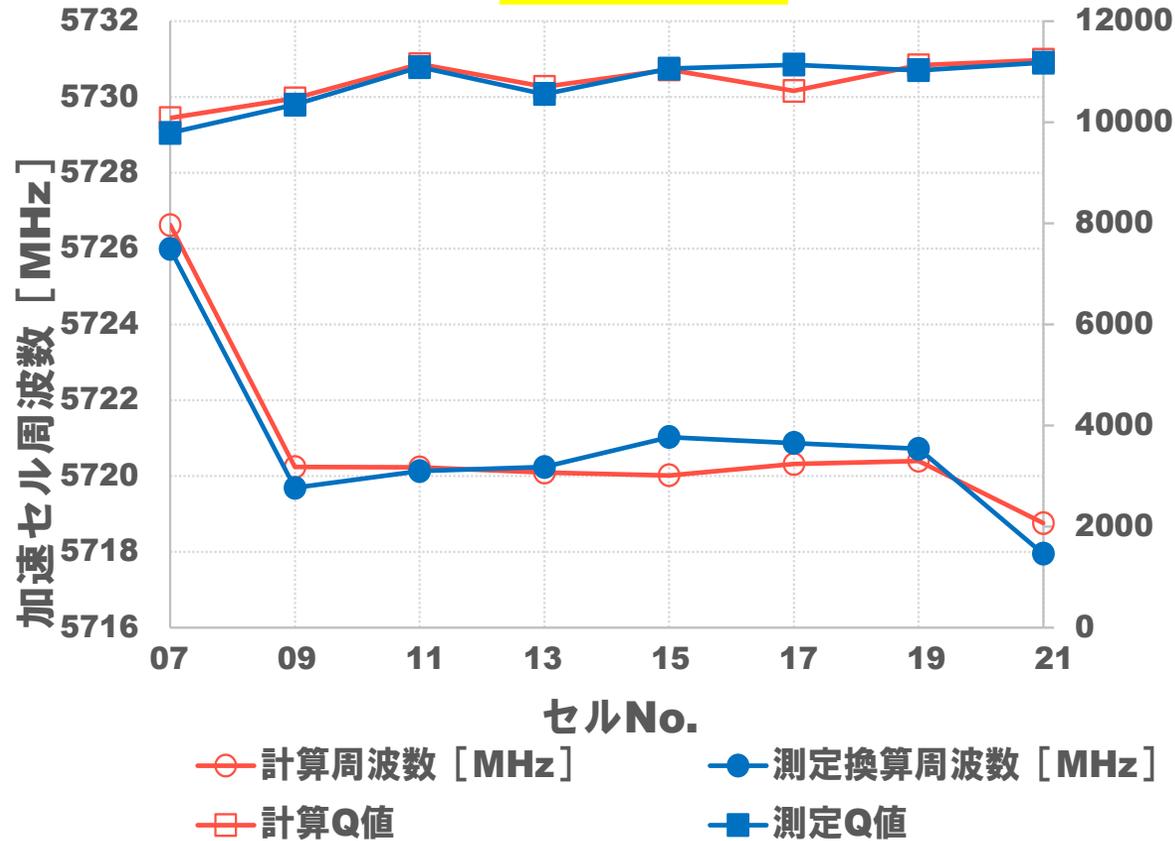
加速セルの周波数測定結果

詳しくは、下記参照:

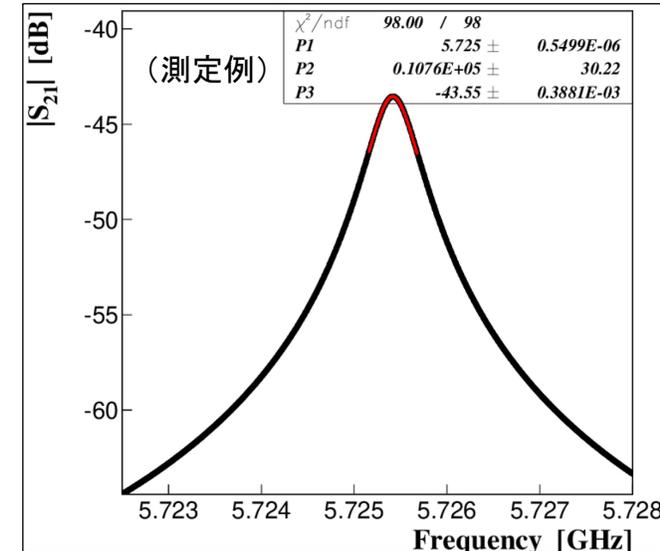
木村 優志 他、「縦方向分割方式Cバンド小型加速管の製作」、本年会ポスター発表、FRP042

✓ ろう付け後

✓ 周波数調整前



- ✓ 上下流から軸上アンテナを挿入
- ✓ 結合空洞はデチューン
- ✓ $|S_{21}|$ ピークの周波数と幅を測定

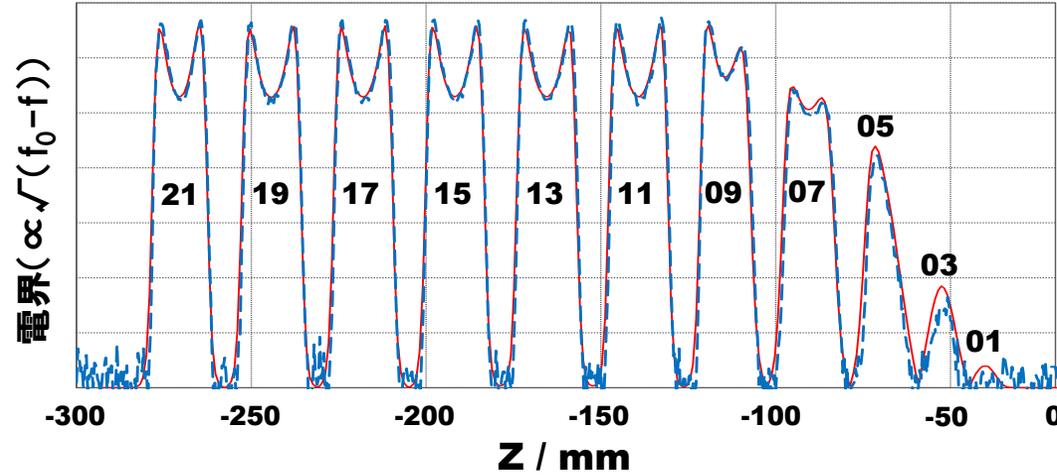


設計値とよく合っている

(周波数調整前の設計値)

ビードプル法による加速電界強度分布の測定結果

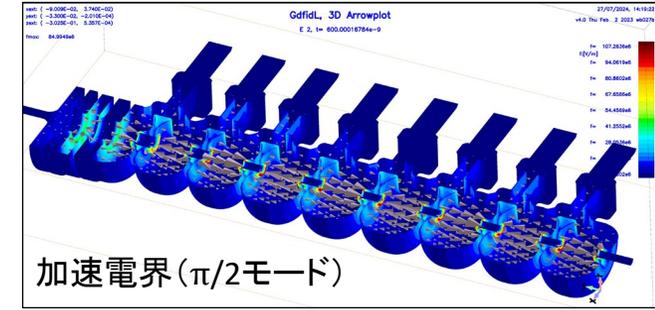
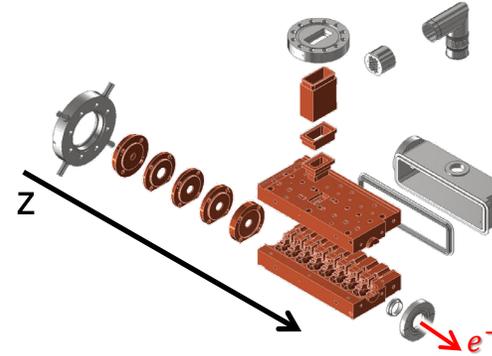
縦方向分割方式



赤：設計値 青：測定値（ろう付け後）

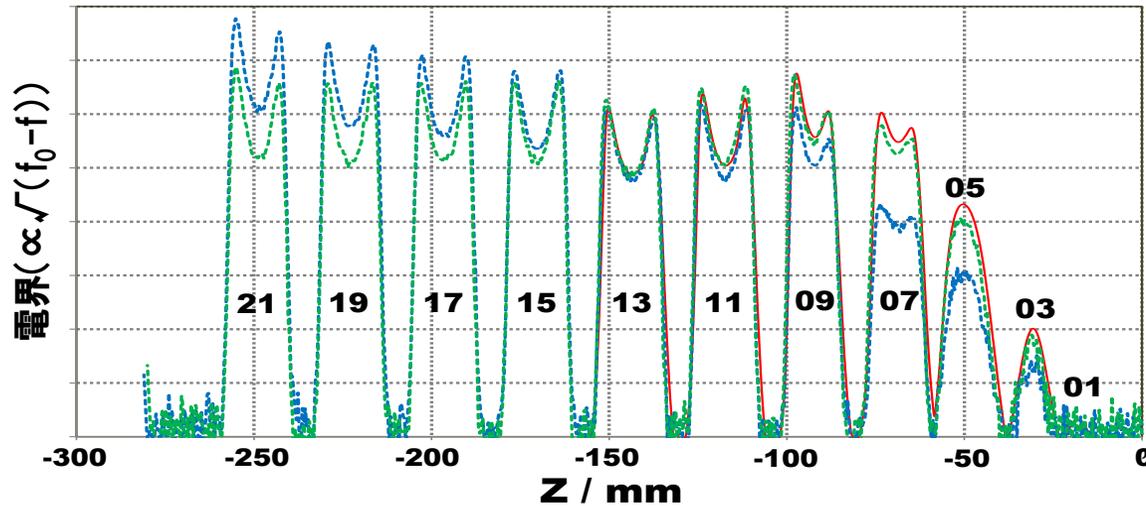
詳しくは、下記参照：

木村 優志 他、「縦方向分割方式Cバンド小型加速管の製作」、本年会ポスター発表、FRP042

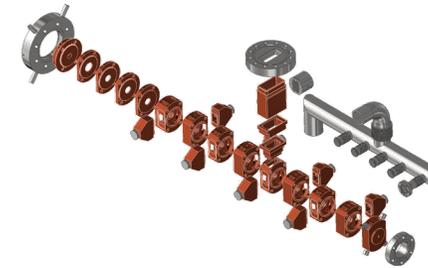


周波数調整前でも、測定値は設計値とよく合っている！

従来方式



赤：設計値 青：測定値（ろう付け後）
緑：測定値（チューニング後）

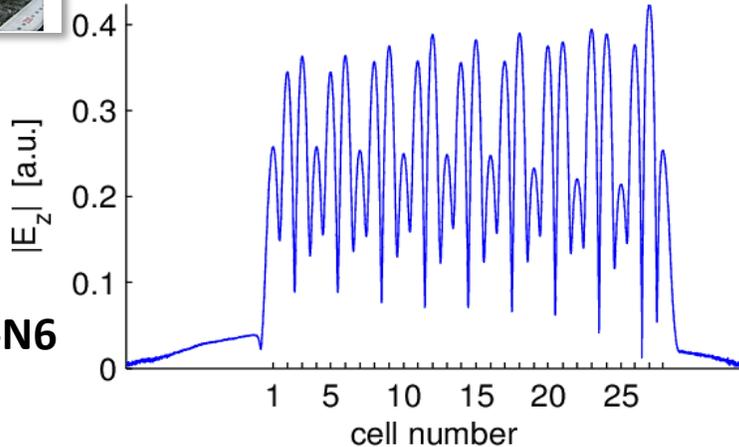
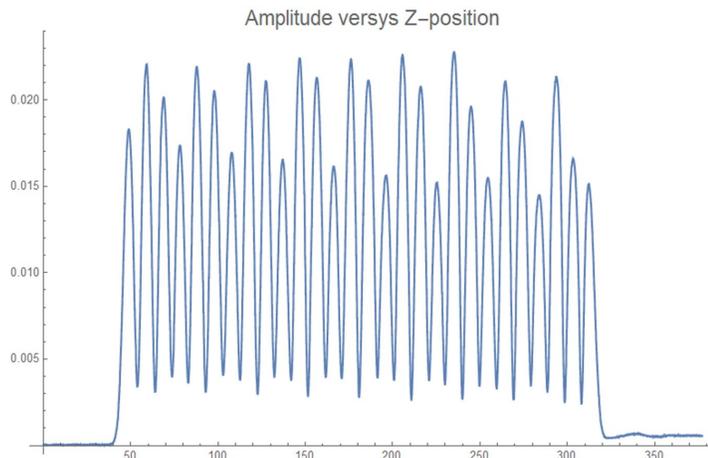
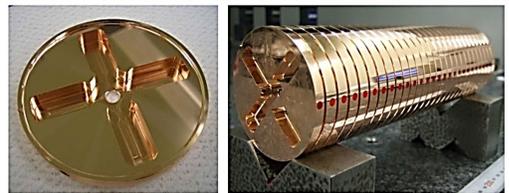


周波数調整前では、測定値と設計値に乖離あり！

【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

TD26CC-K1

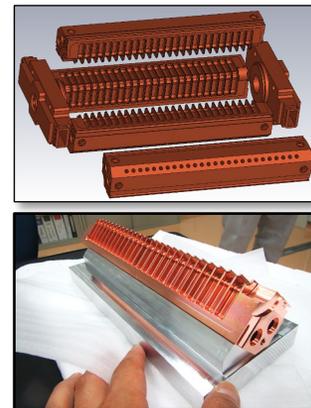
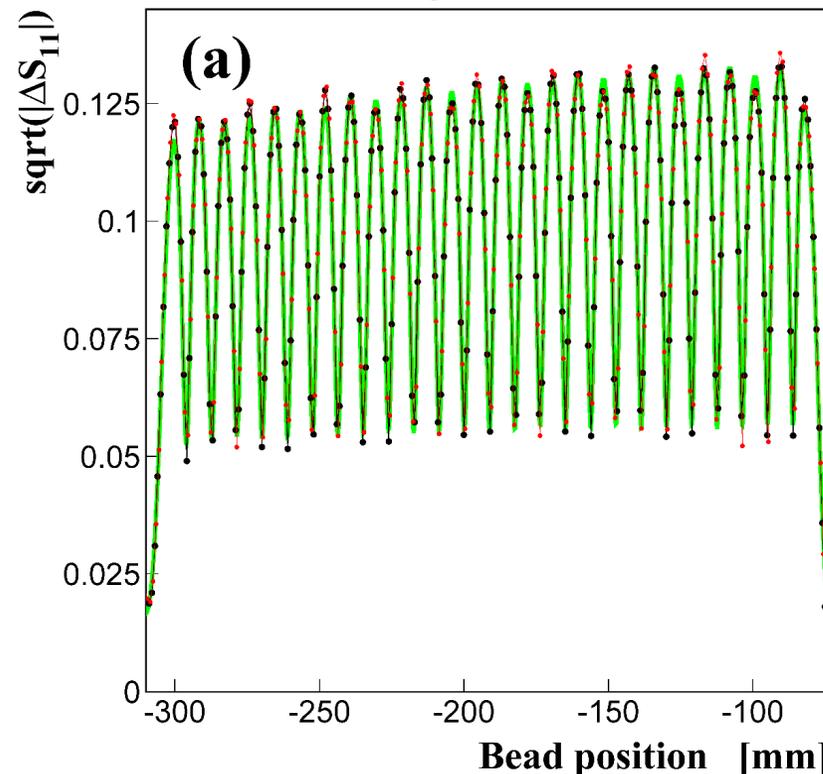


TD26-CLEX-N6

大きな定在波成分あり!

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!

まとめと予定

■ 縦方向分割方式をXバンドにて(ほぼ)確立

- 単セル型空洞で高電界性能を実証
- フルスケール加速管を問題なく製作(高電界試験はペンディング中)

■ 縦方向分割方式を医療用Cバンド小型加速管に応用

- 単セル空洞で高電界性能を実証
- フルスケール加速管プロトタイプ1号機を問題なく製作
- 加速電界強度分布は、周波数調整前でも、設計値とよく合っている
 - CLICプロトタイプ加速管の製作でも見られた傾向
 - 縦方向分割方式の優位性か？
- 今後の予定(フルスケール加速管プロトタイプ1号機)
 - ① 周波数調整、及び陪周期構造における合流条件成立状況の確認(今夏)
 - ② ビーム試験(今年度)
 - ビームエネルギーや放射線量等を測定
 - プロトタイプ2号機へフィードバック

■ 縦方向分割方式によるサステナビリティ向上効果を定量的に評価

- (ほぼ)同じ仕様の加速管を従来のディスク積層方式と新しい縦方向分割方式で比較できる
 - ろう付け回数の削減は達成済み

ご清聴、ありがとうございました

より詳しい話を、今年のKEK/OHOセミナーにて講義いたします



<https://conference-indico.kek.jp/event/269/>

第41回 高エネルギー加速器セミナー

OHO'24

新奇・革新的な加速技術

2024年 9月 10日(火) ▶ 13日(金)

現地 + オンライン開催



Tuesday, September 10, 2024	
9:00 AM	受付
9:40 AM	開会の辞
9:50 AM	イントロダクション - 阿部 哲郎 (KEK)
10:30 AM	休憩
10:40 AM	常伝導高周波加速構造における革新的技術 (1) - 阿部 哲郎 (KEK)
11:40 AM	昼休み
1:00 PM	常伝導高周波加速構造における革新的技術 (2) - 阿部 哲郎 (KEK)
2:00 PM	休憩

- ✓ 参加費無料
- ✓ 登録者にはZoomリンク送付
- ✓ 受付締切: 8月23日(金)

⋮

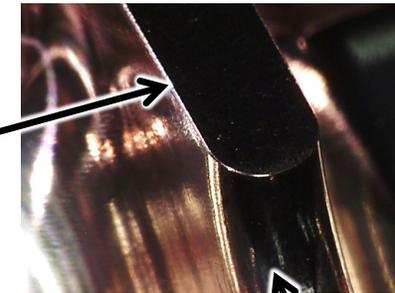
添付資料

【添付資料】

旧縦方向分割方式CLICプロタイプ加速管 (TD18_QUAD) の高電界試験 @ KEK/Nextef1 (2009年)

←
BACK

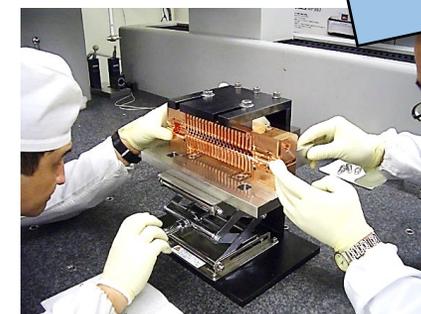
超精密ミリング加工 (達成輪郭度: 5 μm)



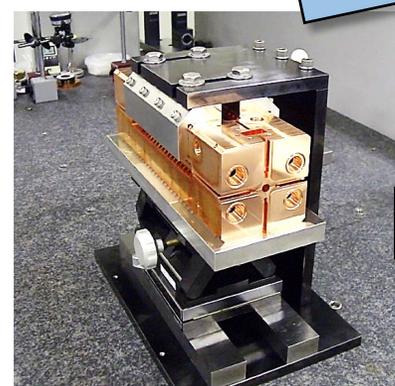
R50μm

アイリス

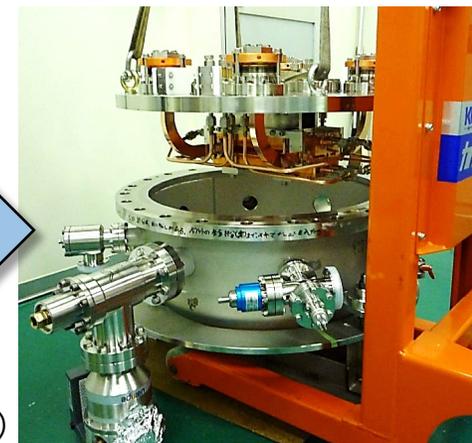
精密アライメント (5 μm)



真空容器へ入れる



4分割部は接合せず (クランプのみ)



Quad #5 Processing whole trend

○ Eacc [MV/m]

□ Total BD

