

QUADRANT-TYPE X-BAND SINGLE-CELL STRUCTURE FOR HIGH GRADIENT TESTS

Tetsuo Abe*, Yasuo Higashi, Yoshio Arakida, Toshiyasu Higo, Shuji Matsumoto, Tetsuo Shidara, Toshikazu Takatomi,
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract

We are building a new high-gradient X-band (11.424 GHz) testbench, called “Shield-B,” for basic studies to establish an acceleration technology with 100 MV/m or higher, where various single-cell structures are to be tested. We focus on quadrant-type structures, on which no surface currents associated with magnetic fields flow across cell-to-cell junctions unlike disk-type structures. In this study, we propose a quadrant-type X-band single-cell structure with a heavily damped structure by waveguides, overcoming its issues.

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

1. はじめに

高電界 X バンド加速は、CLIC プロジェクト^[1]のような高エネルギー電子陽電子リニアコライダー等において有望視されている技術である。我々は、100 MV/m 以上の高電界加速管開発のための基礎的試験の一環として、X バンド (11.424 GHz) 単セル空洞試験設備 (「シールド B」と呼んでいる) を準備している (図 1)。ここではまず、図 2(a) にあるような 3 連空洞構造 (Higher-Order-Mode (HOM) 減衰機構無し、通常の無酸素銅クラス 1 材から旋盤加工で製作) を基準空洞として試験する。ここで、図 2 の右側から大電力高周波を投入して π モードの定在波を励振し、中央の試験セルに最も高いフィールドが立つように設計されている。そして、材料、形状、加工方法等を変えた様々な空洞の高電界試験を行い、それらのブレイクダウン率等を比較する。

本研究は、シールド B で今後試験する加速構造の内、CLIC で採用されている HOM 強減衰構造を持つ加速管の最新版 (「TD24R05」^[2, 6] と呼んでいる) を基にした単セル試験空洞 (図 2(b)) に関するものである。単セル試験空洞は、中央の試験セル (最も高いフィールドが立つ) の他、マッチング・セルとエンド・セルから成る 3 連空洞であり、試験セル以外の部分は可能な限り基準空洞 (図 2(a)) と同じにする。TD24R05 は本来「ディスク型」であるが、本研究で扱う構造はその「4 分割方式」版であることが特徴である。

通常、加速管を製作する場合、ディスク型のセルを作り、それらをスタック・接合してひとつの加速管を形成する。ディスク型は旋盤で主要部分を加工出来るため、

- 表面が平滑 (粗さ: 約 30nm P-V)
- 加工によるダメージが浅い (深さ: 1 μ m 以下)

といった利点がある一方、

- セルを一枚一枚製作し、それら数十枚を重ねるため、手間と費用がかかる
- 高周波による表面電流がセル間の接合箇所を渡る

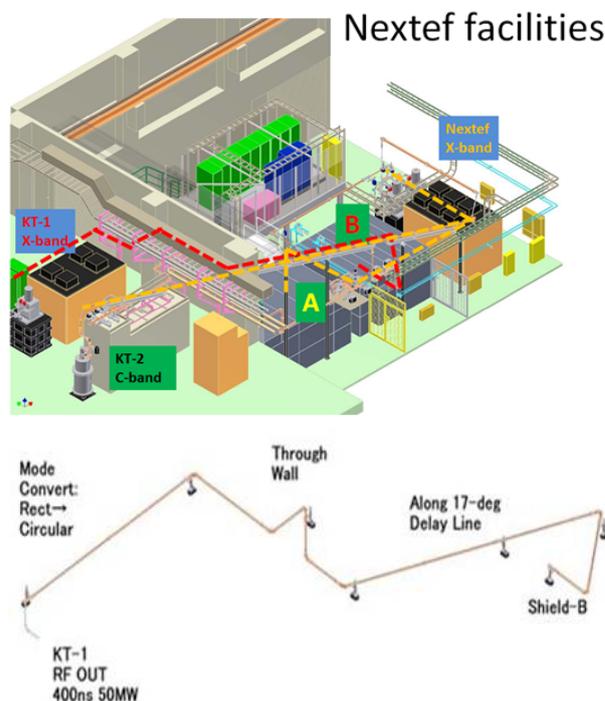


図 1: Nextef 高電界試験施設 (上図) と、新設したシールド B への X バンド大電力ライン (下図)。

という欠点がある。特に、表面電流については、高電界試験後に行った SEM による検査で、ディスク型加速管のセル間接合箇所微小な隙間や、放電によると思われる損傷のあることが確認された^[3]。

一方、図 3 に示すような 4 分割方式^[4] (4 分割したひとつを「Quadrant」と呼ぶ) では、

- 表面電流は接合箇所を渡らない
- 5 軸のミリング工作機械を使えば、ひとつの Quadrant (20~30 セル分) を比較的容易に加工でき、組立も簡単で、大幅なコストダウンに繋がる可能性がある

* tetsuo.abe@kek.jp

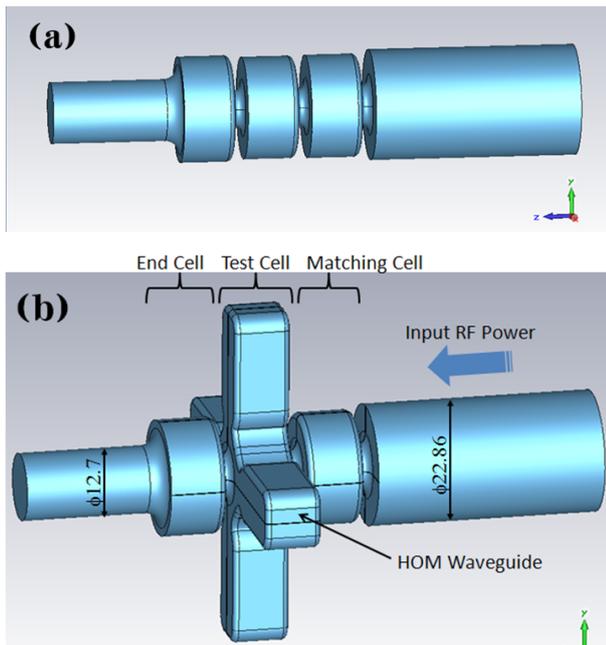


図 2: (a) 単セル試験空洞の基準形。(b) 本研究で扱う構造。青色部分は真空領域を示す。

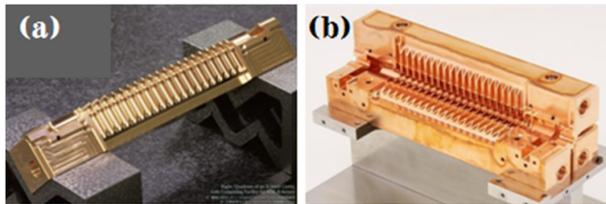


図 3: 4 分割方式の X バンド加速管。(a) 1 本の Quadrant。(b) 3 本の Quadrant を組み合わせた状態。(文献^[4]より)

という利点がある。欠点としては、

- Quadrant 間接合部におけるフィールド増大（次節で説明）
- すべてミリング加工なので、表面粗さ大きく（a few μm P-V）、加工によるダメージが深い（深さ：10~20 μm ）
- 真空封止の方法が確立していない

である。KEK や SLAC 製作の 4 分割方式加速管（「TD18_Quad」^[4]と呼んでいる）を高電界試験したところ、同種のディスク型に比べて半分程度の高周波電力までしか入らなかった^[5]。本研究では、4 分割方式に関する上記欠点を克服する設計・製作法を提案する。

2. QUADRANT 間接合部におけるフィールド増大

Quadrant を突き合わせた際に（図 4(a)）、それらの中に 10 μm 程度の僅かなギャップや段差が発生することは避けられない。また、Quadrant の内表面と接合面の交線部（コーナーエッジ）には R が付く。以前製作した 4 分割方式加速管^[4]では、当該コーナーエッジに対して積極的に 50 μm の R 面取りを行った。これらの微細構

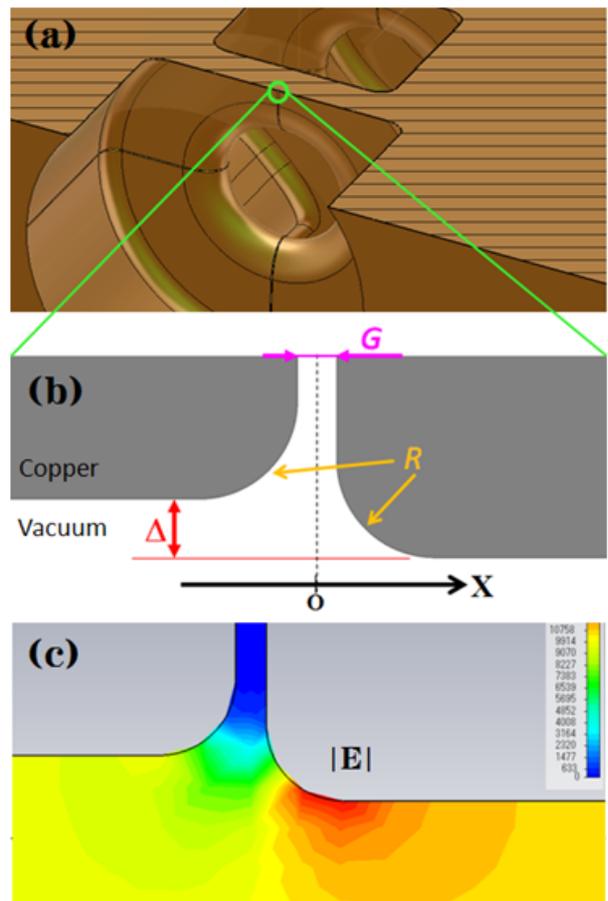


図 4: (a) 4 つの Quadrant を組み合わせた状態。(b) 構造モデル化パラメータ： R 、 G 、 Δ 。(c) フィールド増大の例（ $R = 50 \mu\text{m}$ 、 $G = 20 \mu\text{m}$ 、 $\Delta = 30 \mu\text{m}$ の場合）。

造により、単純な平面に比べて表面フィールドは増大する（図 4(c) 参照）。

このフィールド増大を数値計算するため、図 4(b) にあるような 3 つのパラメータ (R 、 G 、 Δ) を用いて当該微細構造をモデル化した。そして、これを対象にして、静電場近似でのフィールド増大係数（Field Enhancement Factor：最大表面電場を微細構造の無い時の電場で割った比）をフローティング・ランダム・ウォーク（Floating Random Walk。以下、FRW）法で計算した^[7]。結果を図 5 に示す。 $R = 20, 50, 100, 500 \mu\text{m}$ の場合の結果を比べてみて分かることは、

- $G = \Delta = 0$ の場合（完璧な接合に相当）のフィールド増大係数は R に依らない。
- R が G や Δ に比べて大きければ、ギャップ (G) やずれ (Δ) によるフィールド増大は小さい。

である。また、コーナーエッジに $R = 50 \mu\text{m}$ を付けたつもりが（局所的に） $R = 20 \mu\text{m}$ くらいの箇所があり、且つ、 $\Delta = 20 \mu\text{m}$ のずれが出てしまった場合、そこでは 60% もフィールドが増大してしまうことも分かる。

上記計算は平板上に微細構造のある場合であるが、実際の加速管では、電界強度が最も高いアイリス部で円形境界である。そこで、図 6 にあるようなアイリス部を模擬した円形境界（外導体内径は、試験セルのアイリス

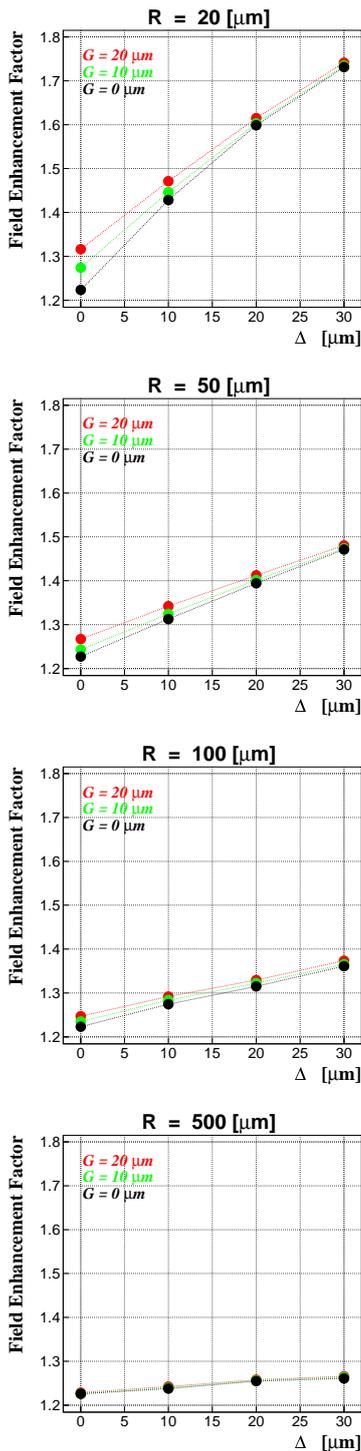


図 5: FRW 法によるフィールド増大係数の計算結果。計算精度 (モンテカルロ統計誤差) は 0.5 %。

開口部径と同じ、7.5 mm) におけるフィールド増大係数を FRW 法で計算した。結果を図 7 に示す。円形境界の場合でもフィールド増大は R に依らないことがわかる ($G = \Delta = 0$ の場合)。

以上の計算結果より、 R 面取りサイズを $R = 400 \sim 500 \mu\text{m}$ 程度まで大きくすれば、フィールド増大を最小限に抑えることができ、且つ、Quadrant 同士のアライ

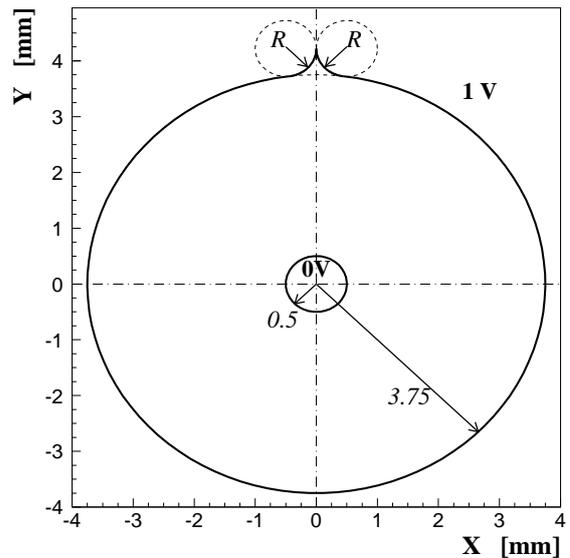


図 6: 円形境界。内導体 (外径: 1.0 mm) と外導体 (内径: 7.5 mm) の静電ポテンシャルを、それぞれ、0V、1V とした。

メント精度や接合面の平面度に関して高い精度を要求する必要もなくなる。しかし、 R を大きくする場合の欠点として、シャント・インピーダンスの劣化がある。図 8 に、CST MICROWAVE STUDIO^[8] (以下、MWS) を使って計算した 3 連空洞全体のシャント・インピーダンスを示す。 R の最終的な値については、下記第 4 節で述べる。

3. 表面処理

4 分割方式では全てミリング加工になるため、加工による表面のダメージが旋盤加工に比べて大きい。そこで、加工後に電界研磨による仕上げ処理を行う。研磨量としては、ミリング加工によるダメージを取り除ける最小量として、 $20 \mu\text{m}$ を考えている。

4. 真空封止

以前に製作した 4 分割方式加速管^[4] では、加速管自体に真空封止の構造は無く、アライメントしてボルト結合した 4 本の Quadrant を真空容器に入れて、高電界試験を行った。本試験空洞では、最外部を電子ビーム溶接することにより真空を封止する。ここで、Quadrant 間接合面からの仮想リークが問題になるかも知れない。その対策として、Quadrant 間に $100 \mu\text{m}$ の微小な隙間をあける (上記の溶接部と突き当て部を除く) 処方を考えている。しかし、この隙間によるフィールド増大が問題になるかも知れない。これを調べたのが、図 9 である。 $G = 100 \mu\text{m}$ の隙間の影響が殆どなくなる最小の R は $400 \mu\text{m}$ であり、これを採用する。

5. 電気的設計

高電界試験を行う際の π モード周波数を 11.424 GHz に合わせるため、図 10(a) にある構造パラメータ「 b 」を調整した (他は固定)。ここで、MWS とその曲面 4

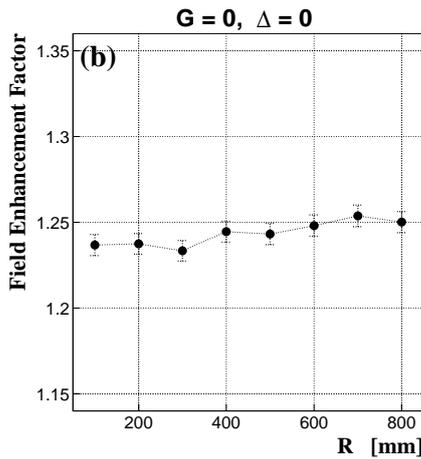
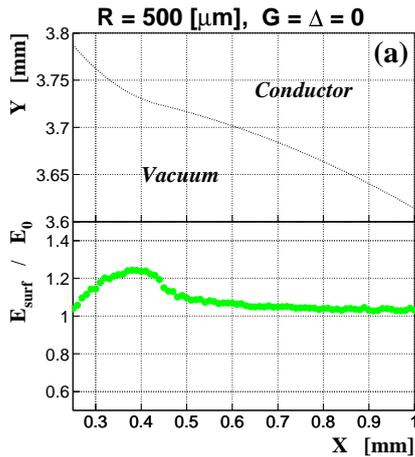


図 7: 円形境界 (図 6) における、(a) 外導体内表面電場 (E_{surf}) 増大の例 ($R = 500 \mu\text{m}$, $G = \Delta = 0$ の場合) 及び、(b) R の関数としてのフィールド増大係数。計算精度 (モンテカルロ統計誤差) は 0.5%。 E_0 は微細構造無し ($R = G = \Delta = 0$) の場合の外導体内表面電場。

面体メッシュ (図 10(b)) を使って固有モードを求め、Slater の同調曲線法^[9] によりモード周波数を精密に求めた (例えば、文献^[10] 参照)。計算結果を図 11 に示す ($b = 9.186 \text{ mm}$ を採用)。また、この最終的なデザインでの電磁場強度分布を図 12 に示す。

6. 製作工程

まず、図 13 に示すような Quadrant の加工等を行う：

- (a) 無酸素銅クラス 1 材の丸棒から切り出す。
- (b) ワイヤ放電加工により 4 分割する。
- (c) 精密アライメント・固定機構を備えた 5 軸のミリング加工機 (ダイヤモンド・コーティングを施したボールエンドミリング) にて Quadrant の形状を形成する。
- (d) 電界研磨を行い、ひとつの Quadrant が完成。

その後、4 本の Quadrant の組立と電子ビーム溶接 (真空封止) を行う。最後に、ダクトとフランジを溶接、または、ろう付けする (図 14)。

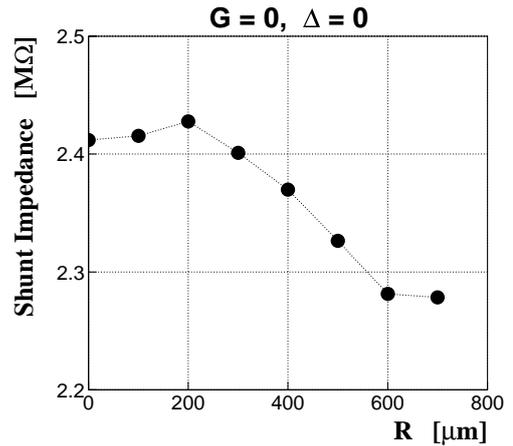


図 8: R 面取りサイズの関数としてのシャント・インピーダンス ($G = \Delta = 0$ の場合)。

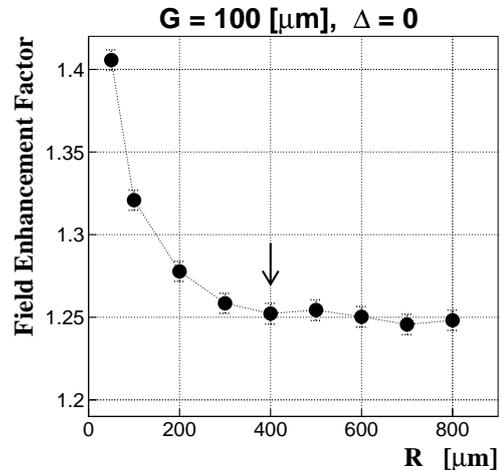


図 9: $G = 100 \mu\text{m}$ の隙間がある場合のフィールド増大係数。矢印は採用した R 値を示す。

7. まとめ

我々は、X バンド (11.424GHz) 加速管による 100 MV/m 以上の高電界加速技術の確立を目指している。そのための基礎試験の一環として、単セル空洞試験を行う。本報告で、試験を行う様々な構造の内、4 分割方式の HOM 強減衰構造付試験空洞の設計・製法について、下記の提案を行った：

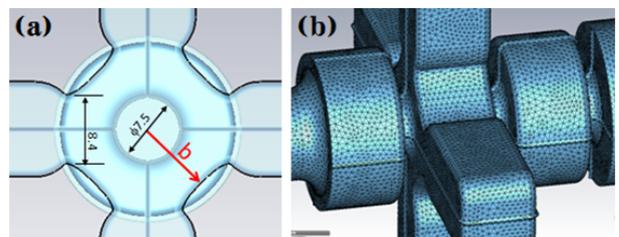


図 10: (a) 構造パラメータ b 。(b) 曲面 4 面体メッシュ。

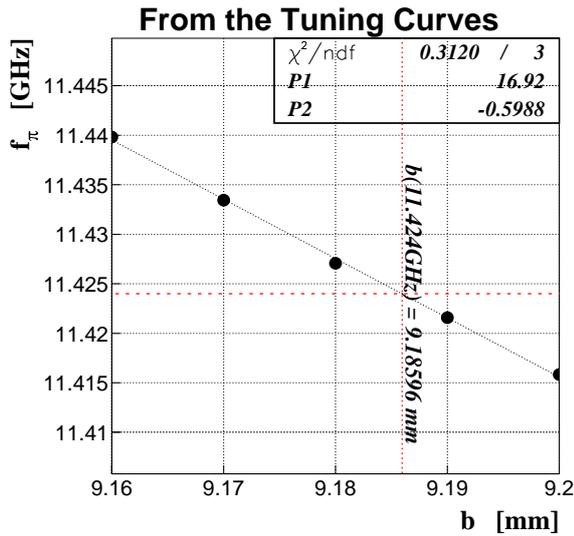


図 11: 構造パラメータ b の関数としての π モード周波数。

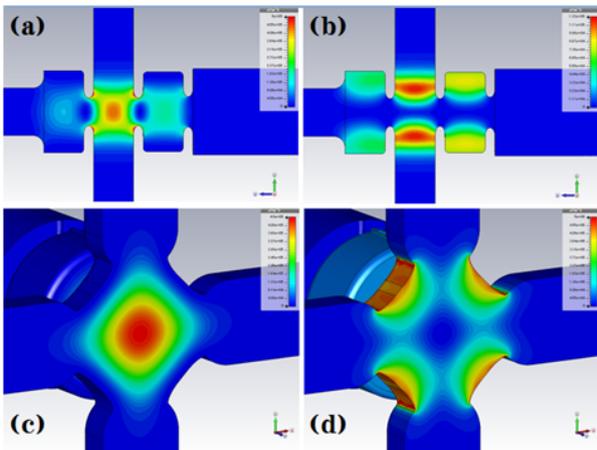


図 12: π モード (11.424 GHz) の電磁場強度分布。(a) と (c) は電場強度。(b) と (d) は磁場強度。

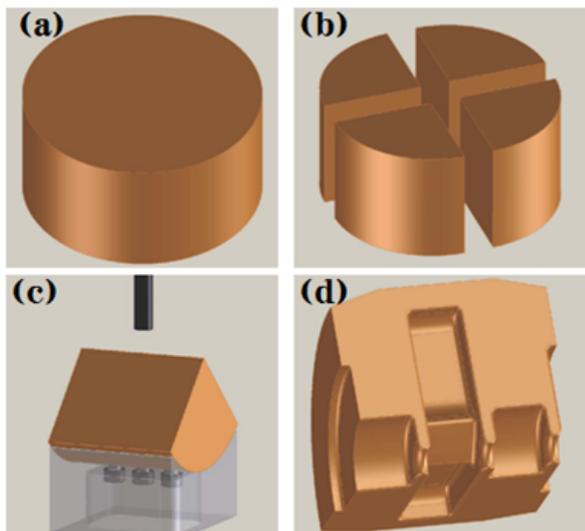


図 13: Quadrant の加工。

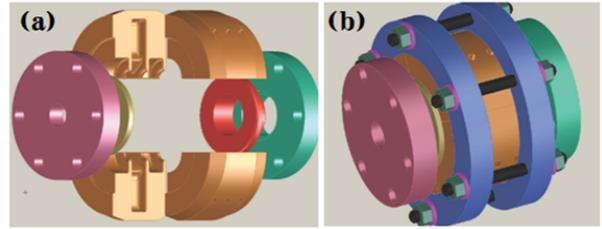


図 14: 4 分割方式の単セル試験空洞の組立。(a) 各パーツ。(b) 組立完成図。

- Quadrant のコーナーエッジに大きな R 面取り ($R = 400 \mu\text{m}$) を付けることによる局所フィールド増大の軽減
- 電界研磨による表面処理
- 電子ビーム溶接による真空封止
- Quadrant 間接合部に $100 \mu\text{m}$ の隙間をあげ、仮想リークを防ぐ

本試験構造に対して、単セル空洞試験施設「シールド B」にて高電界試験を行う。そして、ブレイクダウン率等に関して基準空洞等と比較し(特に、HOM 減衰構造有り・無し、ディスク型・4 分割方式) その性能を実証する。

参考文献

- [1] <http://project-clic-cdr.web.cern.ch/project-CLIC-CDR/>
- [2] 高富 俊和, 「X バンド加速管 (TD24R05 タイプ) の製作」, 第 12 回高エネ研メカ・ワークショップ (Poster ID:CM11-P19)
- [3] M. Aicherer, CERN EDMS, “TD18 post-mortem SEM observation: Update,” presentation at CERN, 10 Nov. 2010.
- [4] T. Higo, Y. Higashi, H. Kawamata, T. T. Takatomi, K. Ueno, Y. Watanabe, K. Yokoyama and A. Grudiev *et al.*, “Fabrication of a Quadrant-type Accelerator Structure for CLIC,” Conf. Proc. C **0806233**, WEPP084 (2008).
- [5] T. Higo, “KEK Activities on CLIC X-band Accelerating Structures,” Mini-Workshop on CLIC X-band Structure R&D at Tsinghua University (2010).
- [6] Toshiyasu Higo, Tetsuo Abe, Shigeki Fukuda, Yasuo Higashi, Shuji Matsumoto, Toshikazu Takatomi, Kenji Ueno, Kazue Yokoyama, “Advancement of High Gradient Study at 100MV/m Range,” presented at the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 2011 (Paper ID: TUPS129).
- [7] T. Abe, “Study of Surface Field Enhancements due to Fine Structures,” presented at the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 2011 (Paper ID: TUPS086).
- [8] <http://www.cst.com/>
- [9] J. C. Slater, “Microwave Electronics.”
- [10] T. Abe, T. Kageyama, H. Sakai, Y. Takeuchi and K. Yoshino, “RF Accelerating Structure for the Damping Ring of the SuperKEKB Injector,” *In the Proceedings of 1st International Particle Accelerator Conference: IPAC'10, 2010* (Paper ID: WEPE087).