

縦方向分割方式 C バンド小型加速管の開発

DEVELOPMENT OF C-BAND COMPACT ACCELERATING STRUCTURE MADE OF LONGITUDINALLY-SPLIT TWO HALVES

木村優志^{#A)}, 菅野東明^{A)}, 重岡伸之^{A)}, 原博史^{A)}, 比嘉究作^{A)}, 阿部哲郎^{B)}

Masashi Kimura^{#A)}, Tomei Sugano^{A)}, Nobuyuki Shigeoka^{A)}, Hiroshi Hara^{A)}, Kyusaku Higa^{A)}, Tetsuo Abe^{B)}

^{A)} Mitsubishi Heavy Industries Machinery System, Ltd.

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

Our 6 MeV medical C-band accelerating structure is assembled using the disk-stacked method, where dozens of oxygen-free copper components are stacked along the beam axis. The design incorporates the side-coupled (SC) structure and the re-entrant structure with an accelerating gap at the center of the cavity. Due to the complicated shape and the large number of components, there are challenges in manufacturing efficiency. On the other hand, the longitudinally-split method divides the structure along a plane including the beam axis, independent of the number of cells, typically into only two halves or four quadrants, which significantly reduces the number of components. Building on the development experience of the quadrant-type X-band accelerating structure in the CLIC project, we have been working on the development of a compact, high-gradient, high-shunt impedance SC-type C-band accelerating structure based on this configuration. In this presentation, we will report the progress of our work, including manufacturing, RF testing, frequency tuning, and beam testing in the actual operating conditions.

1. 概要

1.1 開発の背景と目的

常伝導加速管の製造方式には、無酸素銅製の円筒と円盤の部品をビーム軸方向に周期的に積層しろう付け接合するディスク積層方式などの多数の部品を組み合わせる製造方式が採用されているが、部品点数が多く組立に時間がかかる。当社で製作している産業用 C バンド加速管においても、小型化と高効率化のためサイドカップル型構造 (Side-coupled structure: SC 型構造) を採用しているが、形状が複雑で部品点数が多いため製造効率の観点から課題がある。

一方で、近年 CLIC プロジェクト[1]において、進行波型の X バンド加速管を、ビーム軸を含む平面で分割した形状で一体削り出しを行い製作する製造方法が研究されてきた [2]。本稿ではこれを「縦方向分割方式 (Longitudinally-split method)」と呼称する。ディスク積層方式と比較した縦方向分割方式の利点として、表面電流が接合箇所を渡らない点、部品点数の大幅削減とそれによる組立コスト低減が期待できる点が挙げられ、特に後者の特徴は加速器の産業応用において有用である。

上記背景より、当社の SC 型 C バンド加速管の部品点数削減、組立作業時間削減のため、本加速管への縦方向分割方式の適用を検討した。

1.2 SC 型 C バンド加速管の概要

当社の現行の産業用 SC 型 C バンド加速管の概要を Table 1 に示す。現行製造方式による SC 型加速管を置き換え可能とすることを想定し、縦方向分割方式の適用においても同じ仕様を設定した。

Table 1: Main Specification of the SC-Type C-Band Structure

| | |
|--------------------|--------------------------------------|
| Frequency | 5714 ± 0.5 MHz (25 deg. C in vacuum) |
| Coupling β | 1.4 ~ 2.0 |
| Beam energy | 6 MeV |
| Beam current | > 75 mA |
| Beam Transmittance | > 40 % |
| Beam diameter | 1.5 ~ 2.0 mm |

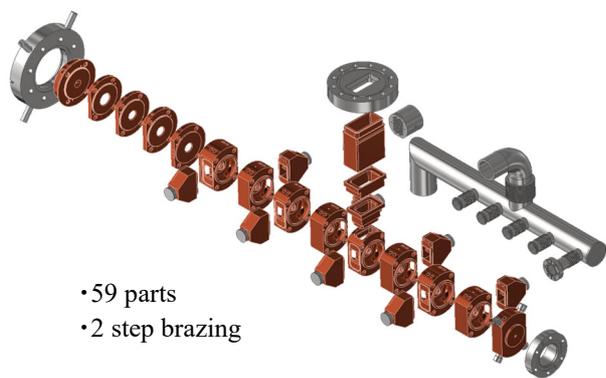
Figure 1 に、現行方式構造および縦方向分割方式構造の比較を示す。本研究で開発中の縦方向分割方式 SC 型 C バンド加速管は、バンチャー (4 セル)、加速セル (9 セル)、結合セル (8 セル)、導波管、真空排気部品から構成され、全長 300 mm 程度のコンパクトな構造である。

本構造では、バンチャー部を除く加速セルおよび結合セルを、ビーム軸を含む平面で 2 分割し、単一ブロックとして加工している。加速セルには、出願中の特許 (PCT/JP2023/023388) に基づくノーズユーン設計を採用しており、現行方式と同等のシャントインピーダンスを保持しつつ、ミリング加工が可能となっている。

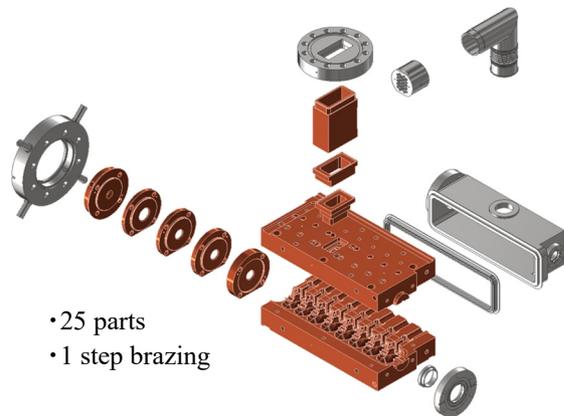
また、銅材コストを削減するため、結合セルは従来の交互配置ではなくビーム軸の片側に集約して配置した¹⁾。その結果、構成部品数は従来設計の 59 個から 25 個へと半減以下に削減された。加えて、ろう付け工程も従来の 2 段階から一括ろう付けに簡略化した。

¹⁾ この変更による横方向キック量を最小化するための設計変更も行った[3]。

[#] masashi.kimura.ck@mhi.com



(a) Disk-stacked method (conventional type)



(b) Longitudinally-split method

Figure 1: Structural comparison of SC-type C-band structures.

2. 開発プロセス

2.1 単セル空洞および5セル空洞

縦方向分割方式 SC 型 C バンド加速管の開発は 2020 年から開始した。初期段階では、単セル空洞および 5 セル空洞を試作し、加速セルおよび結合セルの加工性、ろう付け性、低電力 RF 特性、耐電力性能の検証を行い、RF 設計および構造設計の基本的な成立性を確認した。

単セル空洞の耐電力試験では、テストスタンドの設備制約で決まる最大の投入電力である 150 kW の条件下で、軸上加速電界が約 27 MV/m まで到達した(現行方式の軸上最大電界は 30 MV/m)。耐電力試験の詳細は [3]を参照のこと。

2.2 フルスケール加速管

バンチャー部を含むフルスケール加速管を試作し、製作性、低電力 RF 特性の評価を実施した。設計の詳細は [3]に、製作性評価の詳細は[4]に示されている。低電力 RF 測定については、3 章に記載の通り、シミュレーション結果と良好な一致が得られ、縦方向分割方式が現行方式と同等の RF 性能を有することが確認された。

実機使用環境におけるビーム試験を開始し、一定程度の RF 出力条件下においてビーム加速を確認した。詳細は 4 章に記載している。

3. 低電力 RF 測定

3.1 個別加速セルの RF 測定

ろう付け後におけるチューニング前後の個別加速セルの RF 測定結果を Fig. 2 に示す。加速セルの周波数は、初めにフルスケール加速管がその共振周波数である 5712 MHz となるように調整した (Fig. 2 中の Post-Tuning1)。その後、さらに調整を加え、加速管が運転周波数である 5714 MHz となるようにチューニングを実施した (Post-Tuning2)。

周波数 (25°C、真空換算) および Q_0 値は、シミュレーション結果と良好に一致し、 Q_0 値はシミュレーション値に対して $\pm 5\%$ 以内で合っていた。

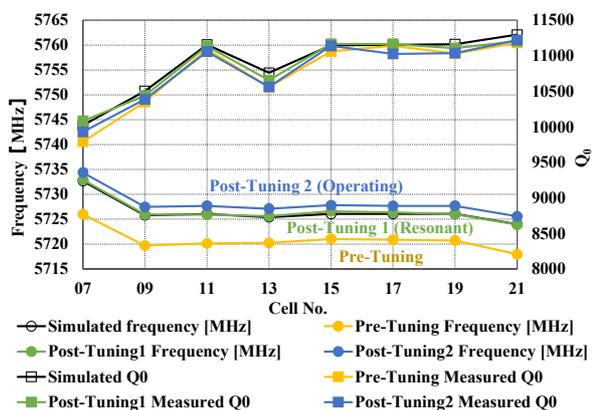


Figure 2: Results of the low-power RF test for individual accelerating cell.

3.2 フルスケール加速管の RF 測定

フルスケール加速管の RF 測定結果を Table 2 に示す。個別加速セルの測定と同様に、共振周波数測定値 (Table 2 の Measured after tuning (resonant)) は初期チューニング段階での値を、運転周波数測定値 (Table 2 の Measured after tuning (operating)) は仕様を満たすために最終調整された値を示している。

測定された Q_0 値は、シミュレーション値に対して 1% 以内で合っていた。

Table 2: Results of the Low-power RF Test for the Full-scale Structure

| Item | Frequency [MHz] | Q_0 |
|-----------------------------------|-----------------|-------|
| Simulated (resonant) | 5711.94 | 10087 |
| Measured after tuning (resonant) | 5712.06 | 10031 |
| Measured after tuning (operating) | 5713.53 | 10006 |

3.3 ビーズ測定

ろう付け後 (チューニング後) のフルスケール加速管に対して、ビーズ法による軸上加速電界測定を実施した。Figure 3 に $\phi 1.5$ mm のビーズを用いて測定した軸上電界分布を示す。測定された電界分布はシミュレーション

による分布とよく一致している結果が得られた。

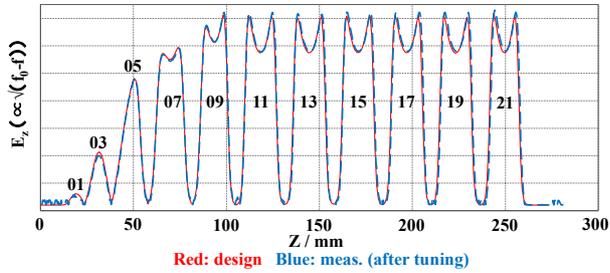


Figure 3: Results of the bead-pull measurement for the longitudinally-split method.

4. 実機使用環境における検証試験

4.1 ビーム試験

Figure 4 に実機使用環境でのビーム試験体系を示す。図には示していないが、ターゲット下流 1 m の位置に X 線検出器を設置している。

ビーム試験は設備利用期間の制約により、GUN OFF 状態で入力 RF パワーが 3 MW に達した後、通常手順よりも早い段階で GUN ON を実施した。その時点での測定結果を Table 3 に示す。

今回の暫定試験では、パルス幅および繰り返し周波数はいずれも定格値未満ではあるものの、現行方式における定格投入電力 (3 MW) の約半分に相当する 1.5 MW まで RF パワーを投入することができた。このとき、ターゲット電流として 37.6 mA が観測され、一定程度のビーム加速が確認された。PIC シミュレーション[5]によると、1.5 MW におけるターゲット電流は 39 mA であり、測定結果と良好に一致している。

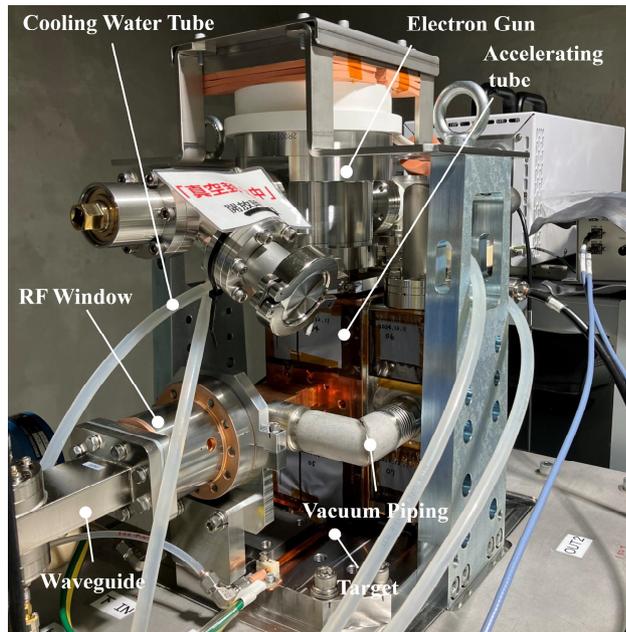


Figure 4: Beam test setup in the operational environment.

Table 3: Measurement Results During Beam Test

| Item | Longitudinally-split (this work) | Full-power (conventional) |
|------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Pulse width | 2 μ s | 4 μ s |
| Pulse repetition | 10 pps | 390 pps |
| Klystron voltage | 110 kV | 125 kV |
| Input RF power | Approx. 1.5 MW | Approx. 3 MW |
| Gun current | 120 mA | 150 mA |
| Target current | 37.6 mA | 75 mA |
| Transmission | 31.3 % | > 40 % |

4.2 ビーム試験直前の RF コンディショニング経過

Figure 5 は縦方向分割方式とディスク積層方式 (現行方式) のコンディショニング進行状況を比較したものである。パルス積算数が約 60 万回に達するまでは両方式で進行速度に大きな差は見られなかったが、それ以降は縦方向分割方式の進行が遅れる傾向が確認された。到達電力が 3 MW に達するまでの時間は、縦方向分割方式では現行方式の約 1.3 倍を要した。要因としては、縦方向分割方式におけるピーク表面電磁界の高さや内表面の面粗度の影響が考えられ、今後の改善検討項目である。

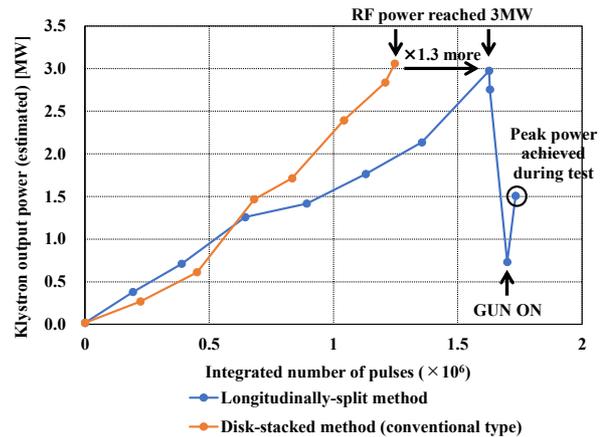


Figure 5: Comparison of RF conditioning between the conventional and longitudinally-split structures.

4.3 放射線量測定

遮蔽構造の今後の検討および評価を目的として、加速管表面に貼付した Gafchromic フィルムを用いて、GUN ON 時における放射線量を測定した。使用したフィルムは Ashland 社製 EBT3 であり、対応線量範囲は 0.01 ~ 10 Gy、エネルギー応答範囲は 100 keV ~ 数 MeV である。

Figure 6 に、フィルムの貼付位置、取得したフィルム画像、およびスキャン画像から得られた線量分布マップを示す。上流側に貼付したフィルムでは色の変化はほとんど認められず、線量は 0.2 Gy 以下と推定される。

一方、下流側に設置したフィルムでは、ターゲットに近づくにつれて色の変化が顕著となり、特にチューニング

穴付近においては、周辺部と比較して数倍に相当する約 2~3 Gy の線量が確認された。この結果は、チューニング穴の構造が放射線の放出経路となっていることを示している。また、上流側に比べて下流側の線量が有意に高いことから、加速された電子ビームによる制動放射線の主な発生位置がターゲット近傍であることも整合している。現時点での運転条件は定格に対して限定的であり、放射線源強度としてはまだ初期評価段階にあるが、定格運転時の漏洩線量分布を事前に推定するうえで有用な知見を得たといえる。

今後は、フィルム測定結果と PHITS 等による放射線輸送シミュレーションとの比較を通じて、現行遮蔽構造に対する改善の可能性について検討を行う予定である。

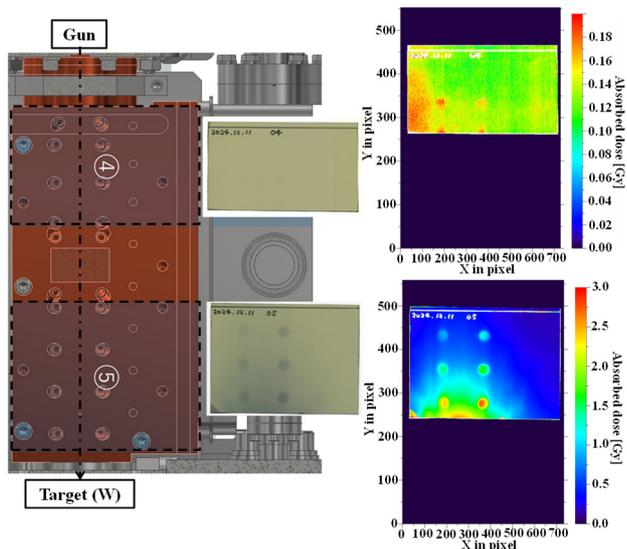


Figure 6: Gafchromic film positions and measured radiation dose distribution.

5. まとめと今後の展望

5.1 まとめ

縦方向分割方式を適用した SC 型 C バンド加速管について、単セルおよび 5 セル空洞による基礎試験、ならびにフルスケール加速管による低電力 RF 試験を通じて、構造的な成立性および従来方式と同等の RF 性能を確認した。さらに、実機使用環境において定格電力の約半分の条件下でターゲット電流を観測し、一定程度のビーム加速性能が得られることを確認した。あわせて、加速管表面に貼付したガフクロミックフィルムにより放射線量分布を測定し、チューニング穴周辺に局所的な高線量領域が存在することを確認した。この測定結果は、今後の遮蔽構造の検討および対策の要否判断に有用な情

報を提供するものと考えられる。

5.2 今後の展望

今後は以下に示す実機使用環境での試験および製造コスト評価を実施し、市場投入を目指す。

- 実機使用環境における各種試験の継続
 - ビーム試験の継続(特に、定格の 3 MW まで)
 - エネルギースペクトル測定
 - 線量分布および漏洩 X 線量の測定
- 製造方式変更によるコスト評価
 - 製作コストの比較検討
 - コンディショニング時間の増加による運転コストへの影響評価

謝辞

本開発においてご指導とご支援を賜りました高エネルギー加速器研究機構の肥後壽泰 名誉教授、東保男ダイヤモンドフェローに厚く御礼申し上げます。耐電力試験の実施に際しては、テストスタンドをご提供いただきました高エネルギー加速器研究機構の吉田光宏 教授にも深く感謝申し上げます。また、Gafchromic フィルムを使った放射線測定では、高エネルギー加速器研究機構の田中窓香 技師、岩瀬広 准教授に測定方法の手ほどきと校正データのご提供をいただきましたので、御礼申し上げます。

参考文献

- [1] M. Aicheler *et al.*, “A Multi-TeV Linear Collider based on CLIC Technology: CLIC Conceptual Design Report”, CERN, Geneva, Switzerland, Rep. CERN-2012-007, 2012.
- [2] T. Abe *et al.*, “Fabrication of Improved Quadrant-Type X-Band High-Gradient Accelerating Structure”, in Proc. 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ’19), Kyoto, Japan, Jul.-Aug. 2019, paper WEOH04, pp. 22-26.
- [3] T. Abe *et al.*, “Design and Test of C-band Compact Accelerating Structure made of Longitudinally-Split Two Halves”, in Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ’24), Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, FROT05, pp. 151-155.
- [4] M. Kimura *et al.*, “Fabrication of C-band Compact Accelerating Structure made of Longitudinally-split two halves”, in Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ’24), Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, FRP042, pp. 955-958.
- [5] T. Abe, “Longitudinally-split side-coupled high-shunt-impedance C-band structure fabricated in two halves” presented at the 16th Workshop on Breakdown Science and High Gradient Accelerator Technology (HG2025) Merida, Yucatan, Mexico, Mar. 2025.