S バンド加速管の製作

MANUFACTURE OF S-BAND ACCELERATING STRUCTURE

佐治晃弘^{#, A)}, 井原功介^{A)}, 町田成紀^{A)}, 鈴木達也^{A)}, 遠藤克己^{A)}, 肥後壽泰^{B)}, 惠郷博文^{B)}, 榎本嘉範^{B)}, 高富俊和^{B)}

Akihiro Saji^{#, A)}, Kosuke Ihara^{A)}, Akinori Machida^{A)}, Tatsuya Suzuki^{A)}, Katsumi Endo^{A)},

Toshiyasu Higo ^{B)}, Hiroyasu Ego ^{B)}, Yoshinori Enomoto ^{B)}, Toshikazu Takatomi ^{B)},

^{A)} Toyama Co., Ltd.

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

We have been developing a round-cell-shape S-band accelerating structure to replace the deteriorated one being used for SuperKEKB. Currently, we have completed brazing of short regular-cell stacks and the coupler assemblies. In this paper, we report the electrical and mechanical designs, the precision machining of parts, the subassemblies and the ongoing final assembly situation.

1. 序論

SuperKEKB ではいよいよ電子・陽電子の衝突が始ま り、今後高い積分ルミノシティを得るために、入射器には 長期的に安定な運転が望まれている。この入射器は PF、 TRISTAN、KEKB の時代から使用している S バンド 2 m 加速管で構成されているが[1]、長期間運転によりカプ ラー近傍が劣化した事によって、頻繁な真空放電や高 い電界放出が現れる等性能劣化が顕著な加速管が増 えてきた[2]。また最近では、カプラー近傍の接合部劣化 による漏水が毎年複数の加速管に発生しており、空洞内 に漏水する場合も出てきている。このような劣化は最も運 転時間の長い PF タイプの加速管に集中しているので、 それと入替可能な加速管の開発が急務になった[3]。株 式会社トヤマは高エネルギー加速器研究機構(KEK)と 共同でその加速管の開発を推進してきた。本稿では、こ れまで開発してきた加速管の設計及び部品加工から接 合までの製作手順、また全体接合前までの製作状況に ついて報告する。

2. 設計

2.1 加速管特性

開発中のSバンド加速管は、運転周波数2856 MHz (30 °C、真空中)、全長2mの準定電界進行波型加速 管である。加速管の全体図をFig.1に、PFタイプと 比較した主な仕様をTable1に示す。既存の設備へ入 替出来るように加速管の全長、導波管フランジ型と その位置、運転周波数等はPFタイプ加速管に合わせ た。一方最小ビームホール径はPFタイプの最小(A 型~E型の5種類のうちE型)に合わせたので、そ れに付随するフィリングタイムや減衰定数等はPFタ イプ E型に近い値となっている。但し PF タイプと 異なり、レギュラーセルのシリンダー内径隅部を R 形状にして、Q値を高めた結果、加速利得はPFタイ プ平均値と比較して10%程度高くなっている。また 冷却水が真空内に原理的に入らない構造を取るため、 水冷配管を加速管本体に外付け接合することにした。



Figure 1: Schematic of accelerating structure under development.

Table 1: Parameters of Accelerating Structure

	PF タイプ	新加速管
運転周波数 f_a [MHz]	2856	
加速管型式	TM01-2π/3 モード 準定電界進行波型	
運転温度 [℃]	30	
レギュラーセル数 N	54	
ビームホール径 2a [mm]	27.875- 19.700	23.000- 19.730
全長 L[mm]	2066.4	
減衰定数 τ [Neper]	0.302-0.368	0.34
平均シャント インピーダンス <i>R</i> sh [MΩ/m]	57.3-58.3	65.0
<i>Q</i> 值	13,700	15,000
平均群速度 vg/c	0.0137- 0.0113	0.0115
加速長 La [m]	1.889	1.889
フィリングタイム [μs]	0.462-0.558	0.563
加速利得 [MeV/MW ^{1/2}]	7.00-7.58	7.99

[#] saji@toyama-jp.com

PASJ2018 THP048

2.2 レギュラーセル設計

レギュラーセルは、Fig.2に示すディスクとシリンダーの 一体構造にすることで、シリンダー内径(2b径)の両隅に R 形状を設け、Q 値を高めている。R が大きいほど Q 値 は高くなるが、2b径寸法の測定代を残すようR13とした。 2a 径については、フィリングタイムが PF タイプと同程度 になるように考慮しつつ加速勾配が1%程度以内で一定 になるように選定した。軸上平均加速電界と最大表面電 界との比(E_p/E_{acc})は低いほど放電しにくいが、表面電界 はアイリス付近で最も高くなり、アイリスが厚いと Ep/Eaccは 低くなるが、S バンドでは 5 mm より厚くしてもあまり効果 がない事が分かっているので、今回の設計では5mmに 固定した[4]。最上流セル(#01)及び最下流セル(#54)に ついて、アイリス厚み5mm、中央部に0.4mmの直線部 を設け、短径 A は 2.3 mm として、 E_p/E_{acc} を SUPERFISH [5]による計算から求めた。Figure 3 に示す計算の結果、 これが最小になる時の長径 B は 4 mm であった。全セル のアイリス先端をこの楕円形状にして表面電界を低減し た。またディンプリングにて1ヶ所あたり±1 MHz 程度ま でチューニング可能なチューニング箇所を1セルに付き 対称位置にそれぞれ4か所ずつ設けることを基本とした。



Figure 2: Schematic of regular cell shape.



Figure 3: Surface electric field versus large radius of elliptical cross section of beam hole iris.

2.3 カプラー設計

カプラーの概略図をFig.4に示す。高周波の接する場所全てを滑らかに機械加工で形成できる形状とするため カプラー本体は隣接するレギュラーセルの半分を含む一 体構造とした。カプラーセル内径、アイリスサイズ、ステッ プ及び三日月形状は HFSS [6]による 3D-RF シミュレー ション及び試作により決定した。カプラーセル内の電界 軸対称性回復のため、三日月型カットを設けた。導波管 にλ/4のステップマッチング部を設けて、導波管(WRI-32) の短辺とカプラーセルの長さを揃えた。放電を低減する ため、アイリス先端、三日月カットの両端、ステップ角部を R形状にした。カプラーセル内径及びアイリス幅は、後述 する RF 調整加工にて最適値に仕上げる。



Figure 4: Schematic of coupler.

3. 製作

3.1 レギュラーセル

材料には無酸素銅(C1011, Class1)を用いた。空洞内 面及び両端面は精密旋盤による精密加工で仕上げた表 面粗さは Rz 0.1 以内となっており、R 部や楕円部の輪郭 度は 1 μm以内で加工できている(Fig. 5)。ロウ付け後の 最終工程で行うディンプリングによる RF 調整範囲が広い こと及び、工期短縮のため、精密加工後に 2b 径の調整 加工は行わないことにした。全 54 セルのうち、1 セル分 は入出力カプラーに付随するハーフセルとして製作する ため、全 53 セルを製作した。これらの寸法を CMM (Coordinate Measuring Machine)にて測定した結果を Fig. 6 に示す。主要寸法はほぼ加工公差±2μm 以内に 入っていることが確認出来た。



Figure 5: Precision-machined regular cell.

Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan

PASJ2018 THP048



Figure 6: Dimensions of regular cells.

3.2 カプラー

カプラーセル内径及びアイリス幅は、設計値から 0.05 mm 切削代を残した状態にした後、6 ヶの基準空洞を連 結してノーダルシフト法にて RF 測定[7]を実施し、追込 み加工によるカプラー周波数及び位相の調整を行い最 終的に仕上げた(Fig. 7)。この RF 調整完了後、金ロウ及 び銀ロウにて2 段階ロウ付けし(Fig. 8)、その後セルの位 相差を120±1°程度までディンプリングにより調整した。



Figure 7: Coupler body.

Figure 8: Coupler subassembly.

3.3 ロウ付け

加速管全体のロウ付けでは、セル53ヶを6分割とした ユニットまで銀ロウにてロウ付けし、その後上下流のカプ ラーを加えた計 8 ユニットをインジウムを含む銀ロウ材 (TK-671)にて一体化ロウ付けを行い(Fig. 9)、最後に上 記より液相点の低いインジウムロウ材を用いて水冷配管 の外付け接合を行う。一体化ロウ付けに用いるロウ材の 接合試験をしたところ、接合部両側へ200 µm幅にロウ材 が筋目上に流れていることを確認したが、セル内表面全 体に飛散していることは無いことも確認できた。SEM で 観察できる厚さから類推してロウ材の厚さはミクロンオー ダー以上であること、また一部にはインジウムが検出され た場所もあって、セル内表面にインジウムが存在する可 能性があると認識している(Fig. 10)。カプラーを含む全 ユニットを一体化する最終ロウ付けでは、横型炉内で外 力として軸力を必要としない状態での接合を可能にする ため、接合部を局所的に固定しておく必要があり TIG 溶 接で円周上を部分的に固定した。



Figure 9: Configuration for final assembly.



Figure 10: Element mapping after brazing for final assembly.

3.4 低電力 RF 試験

精密加工後及び 9 セルロウ付け後に行った RF 測定 結果を Fig. 11 から Fig. 14 に示す。いずれも測定周波数 を真空中、30 ℃に換算した結果である。VSWR の測定 では、良好な結果が得られた。ビーズ測定では、ステン レス製直径 3 mm のビーズを用い、1 mm 間隔で測定し た。精密加工後でのビーズ測定結果では、No54 セル付 近で反射率が大きく落ち位相が大きくずれたが、加速管 を立てた状態で接触不良が起きたことが原因と考えてい る。その後の 9 セルロウ付け後では改善した。Figure 13 に示す9セルロウ付け後の加速成分 an に対する反射成 分 bnの比[8]については、未接合部がやや高いが、全体 的には低く抑えられており良好な結果が得られた。 Figure 14に示す9セルロウ付け後の累積位相誤差から、 共振周波数が運転周波数から0.1 MHz 程度高い事が分 かるが、これはディンプリングによるチューニングにより調 整可能な範囲内である。



Figure 11: Input and output matching after the unit brazing.

PASJ2018 THP048



Figure 12: Bead-pull results at 2856 MHz in correction;

(a) with stacked precision machined cells,

(b) after brazing 9-cell stacks.



Figure 13: Bead-pull measurements, yellow and orange symbols indicate local reflection.



Figure 14: Accumulated phase-advance error.

4. まとめ

慎重に製作を進め、現在一体化接合前まで完了し、 要求仕様に対してRFチューニング可能な範囲で製作が 進んでいる。今後、一体化ロウ付け及び水冷配管ロウ付 け、ロウ付けによる曲がり矯正作業を経てRFチューニン グを行い完成に至る予定である。

謝辞

KEK 放射線科学センターの平雅文氏にロウ材の接合 試験片の分析を頂きました。深く感謝致します。

参考文献

- I. Sato *et al.*, "Design report on PF Injector linac Upgrade for KEKB", KEK Report 95-18, in Japanese.
- [2] T. Higo *et al.*, "Surface Inspection and High Gradient Performance of S-Band Accelerator Tubes used for 20-30 Years at KEK", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, TUP016, p.853.
- [3] H. Ego, "Accelerating Structure", 22nd KEKB Accelerator Review Committee, KEK, March 2018; http://wwwkekb.kek.jp/MAC/2018/
- [4] 山口誠哉, "加速管·立体回路", OHO'02, 5 章(2002).
- [5] K. Halbach, and R. F. Holsinger. "SUPERFISH-a computer program for evaluation of RF cavities with cylindrical symmetry." Particle Accelerators 7.4 (1976) 213-222.
- [6] HFSS (High Frequency Structure Simulator); https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss/
- [7] 三浦禎雄,"進行波加速管の精密インピーダンス調整方法",博士論文,総合研究大学院大学 (2006).
- [8] T. Khabiboulline *et al.*, Internal Report DESYM-95-02 (1995).