

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)}, 恵郷博文^{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 on-going 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 2 m 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 Table 1 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。

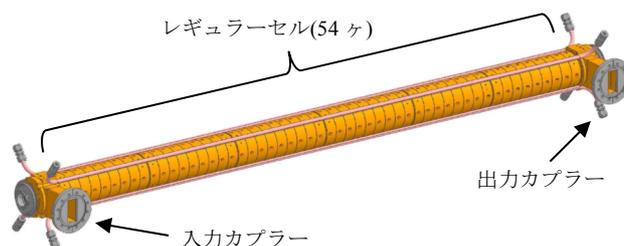


Figure 1: Schematic of accelerating structure under development.

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	TM01-2 π /3 モード 準定電界進行波型	
運転温度 [°C]	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 R_{sh} [M Ω /m]	57.3-58.3	65.0
Q 値	13,700	15,000
平均群速度 v_g/c	0.0137- 0.0113	0.0115
加速長 L_a [m]	1.889	1.889
フィリングタイム [μ s]	0.462-0.558	0.563
加速利得 [MeV/MW ^{1/2}]	7.00-7.58	7.99

[#] saji@toyama-jp.com

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、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 E_p/E_{acc} 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 5 mm 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 5 mm、中央部に 0.4 mm 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。またデインプリングにて 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。

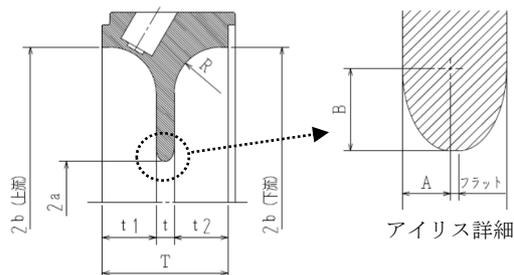


Figure 2: Schematic of regular cell shape.

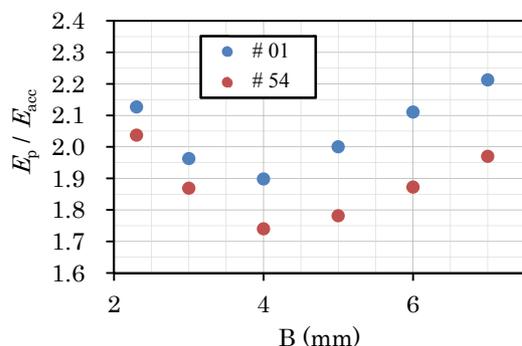


Figure 3: Surface electric field versus large radius of elliptical cross section of beam hole iris.

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 $\lambda/4$ 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。

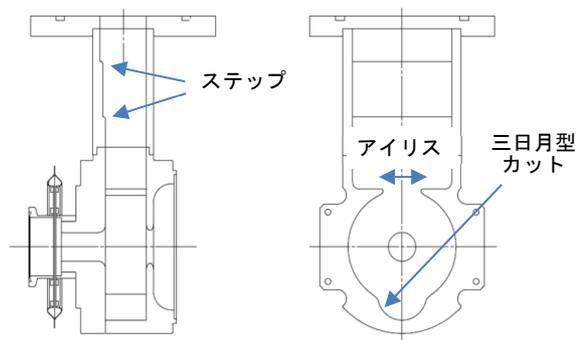


Figure 4: Schematic of coupler.

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 $1 \mu\text{m}$ 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インプリングによる 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 $\pm 2 \mu\text{m}$ 以内に入っていることが確認出来た。



Figure 5: Precision-machined regular cell.

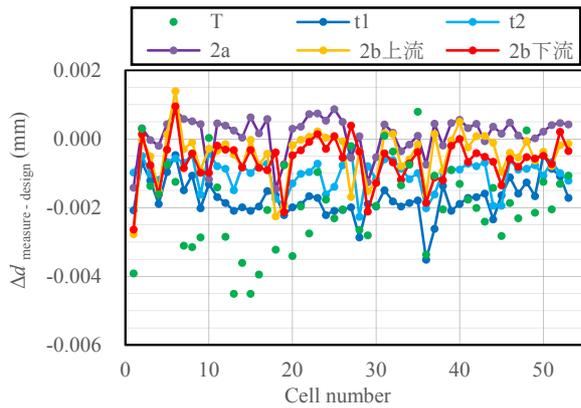


Figure 6: Dimensions of regular cells.

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ドルシフト法にて 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 $120 \pm 1^\circ$ 程度までデインプリングにより調整した。

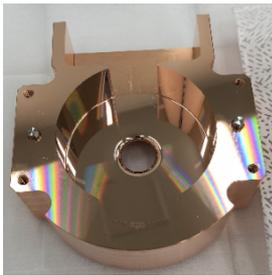


Figure 7: Coupler body.

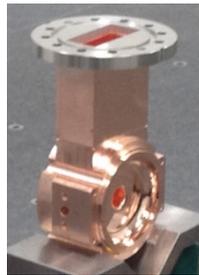


Figure 8: Coupler subassembly.

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 ユニー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 $200 \mu\text{m}$ 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.

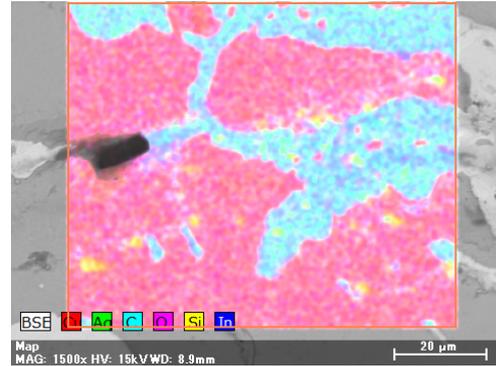


Figure 10: Element mapping after brazing for final assembly.

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°C 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 a_n に対する反射成分 b_n 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、これはデイ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。

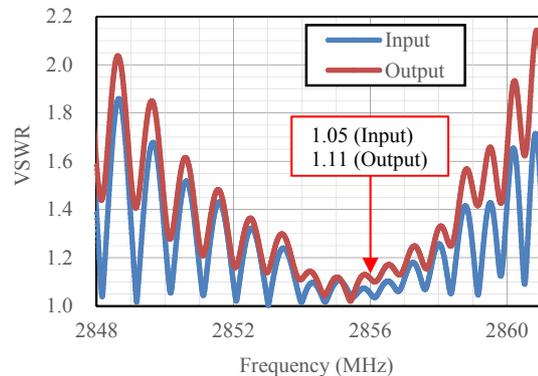


Figure 11: Input and output matching after the unit brazing.

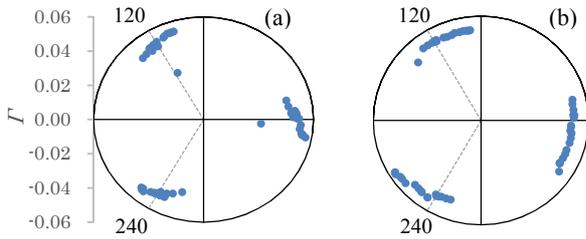


Figure 12: Bead-pull results at 2856 MHz in correction;
(a) with stacked precision machined cells,
(b) after brazing 9-cell stacks.

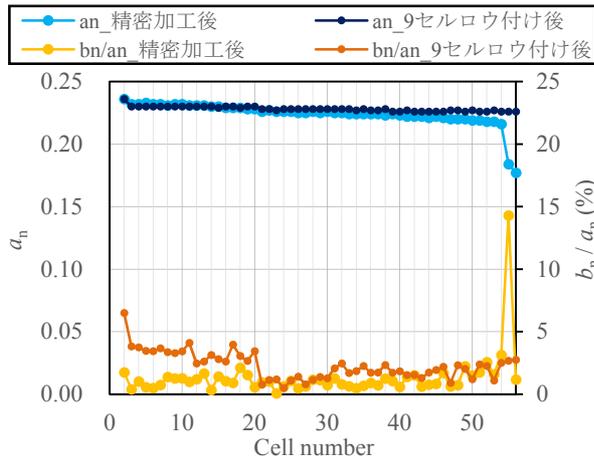


Figure 13: Bead-pull measurements, yellow and orange symbols indicate local reflection.

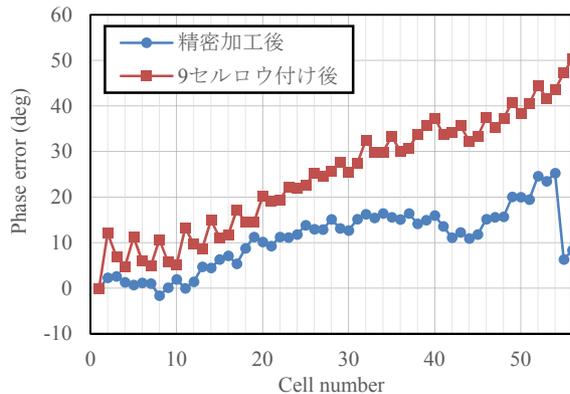


Figure 14: Accumulated phase-advance error.

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

- [1] 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://www.kekb.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).