

DEVELOPMENT OF THE SECOND PROTOTYPE C-BAND ACCELERATOR STRUCTURE FOR SUPERKEKB

Kazue Yokoyama^{1,A)}, Takuya Kamitani^{A)}, Takashi Sugimura^{A)}, Satoshi Ohsawa^{A)},
Kazuhiisa Kakihara^{A)}, Mitsuo Ikeda^{A)}, Toshikazu Takatomi^{B)}

^{A)} Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),

^{B)} Mechanical Engineering Center, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract

Research and development of the C-band accelerating section has been in progress at KEK since 2002. This paper reports on the development of the second prototype accelerating section. Both input/output couplers have a single port and their cell lengths are the same as the waveguide width. The coupler irises are thicker than the first prototype for reducing the rf breakdown at the iris edge. The coupler cavity diameters and the coupling irises were optimized by using the iteration of the rf measurements and the manufacturing which is based on the nodal shift method. The high-power test of the accelerating section at the test stand has been performed for a month. Rf breakdown frequency has been reduced.

SuperKEKB用C-band加速管2号機の開発

1. はじめに

KEKB 入射器では、現在検討中の将来計画 (SuperKEKB) に向けてCバンド加速ユニットのR & Dを行っている[1]。計画では、現在のKEKB入射器の一部をSバンド加速ユニットからCバンド加速ユニットに置き替える。その際、Cバンド加速管では42MV/mの加速勾配が必要とされる。1号機加速管はすでにビームラインにインストールして加速試験を行い、42MV/m以上を達成している。インストール当初は、カップラー付近でのrf放電の問題があったため、別のタイプのカップラーの開発が始められた[2]。本稿では、加速管の試作第2号機の製作およびハイパワーテストの結果について報告する。

2. デザインと製作

Cバンド加速管の仕様を表1に示す。Cバンド加速管はディスクローデッドタイプの $2\pi/3$ -mode進行波型の1m管で、加速勾配は準定電界型をとる。図1に加速管1号機 (CKM001) と加速管2号機 (CKK001) のカップラーデザインを示す。1号機加速管は現在の2m長Sバンド加速管の1/2スケールに基づいてデザインされたため、カップラーのアイリス厚みが1mm程度と薄く、この付近におけるrf放電が問題となった[3]。この問題を解決するためにCKK001では4mmの厚いアイリスデザインにした。CKM001とは異なって、カップラーセル長は導波管幅 (WRJ-5) と同じ長さにして、アイリス部での電界方向の段差をもたない構造にした。CKK001の概略を図2に示す。rf測定用のカップラー付属品は、カップラー寸法を最適化する

前に金ロウ付けする。カップラーとレギュラーセルは銅電鍍で一体化し、ウオータージャケットやフランジなどのアクセサリは、TIG溶接する。最後に、ビームホールの角 R を適切な寸法に修正加工し、ビームホールプランジャーを溶接する。

表1：Cバンド加速管の仕様

運転周波数	5712.000	MHz
運転温度	30.0	°C
セル数	レギュラーセル54個+入力/出力カップラー	
加速管長	962.255 (55cells)	mm
加速管のモード	$2\pi/3$ -mode	
セル長	17.495	mm
ディスク厚み (t)	2.500	mm
アイリス直径 ($2a$)	12.475 ~ 10.450	mm
キャビティ直径 ($2b$)	41.494 ~ 41.010	mm
シャントインピーダンス (r_0)	74.6 ~ 85.1	M Ω /m
Q値	9703 ~ 9676	
群速度 (v_g/c)	1.9 ~ 1.0	%
フィリングタイム	~ 240	ns
アテネーションパラメータ ($\bar{d}$)	~ 0.44	

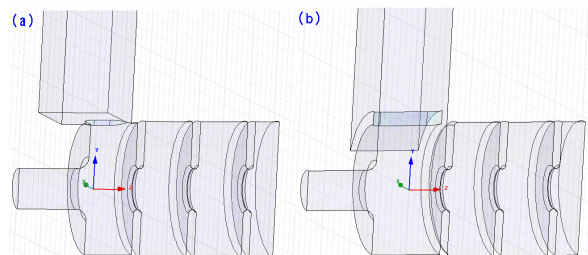


図1：カップラーデザイン。(a) 1号機タイプ (CKM001) (b) 2号機タイプ (CKK001)。

¹ E-mail: kazue.yokoyama@kek.jp

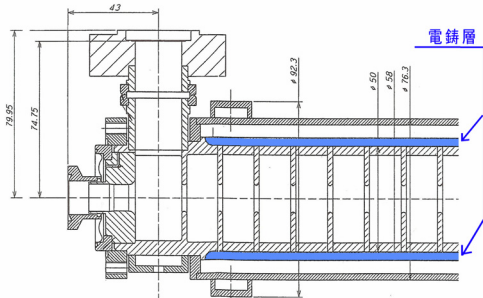


図 2：2号機加速管（CKK001）の概略図。

3. カップラーチューニング

カップラーの初期寸法は、MAFIA-T3™ と HFSS™ を用いて反射特性のシミュレーションから決定した。シミュレーション誤差を考慮して、空洞直径 $2b_c$ とアイリス幅 W はアンダーサイズで製造した。カップラー寸法の最適値を決めるために、入力と出力カップラーは測定用供試体を含めてそれぞれ3つずつ準備した。図3にカップラーとビームホールプランジヤー、rf測定のためのセットアップを示す。6セル基準空洞とカップラーとビームホールプランジヤーを治具によって組み立てる。フェイズアドバンスが図4(a)のようにある程度測定されるまでは、カップラー空洞の共振周波数 f_{res} を測定し、これを頼りに $2b_c$ と W の加工を進めた。この際の目安となる共振周波数は $\pi/2$ モードと $2\pi/3$ モードの平均値で、これは kyhl 法の基本的なアプローチである[4]。しかし、この手順の下では1セルあたりの120度フェイズアドバンスは得られない（図4(b)参照）。カップラー空洞とレギュラーセルがビーム軸に沿って異なった長さを持つため、カップラー空洞のフェイズアドバンスがレギュラーセルと同じでないためである。そこで、カップラー調整で一般的に行われる kyhl 法とは異なったチューニング方法が必要となる。カップラー寸法を最適化する追い込み方法として、以下のような定量化を行った[5]。

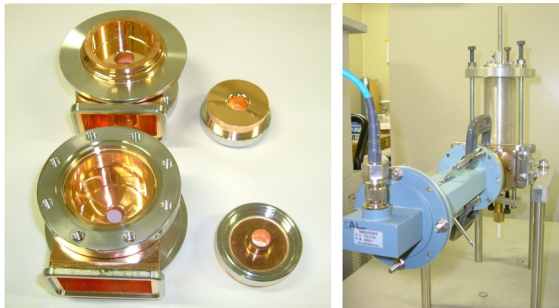


図 3：カップラーとビームホールプランジヤー、rf測定のためのセットアップ。

3.1 カップラー寸法最適化の最終追い込み

適切なカップリングを得るためには、 $2b_c$ と W の組み合わせの最適化が必要になる。 $2b_c$ が W に対して最適であるかどうかを知る簡単な方法がある。テフロンを空洞に挿入すると共振周波数は下がり、ビーム

ホールの角 R を広げると共振周波数は上がる。これらの道具によって、 $2b_c$ サイズを変えたのと同等の共振周波数変化を得ることができる。カップラー隣の第一セル $2b_1$ の直径も適切なカップリングを入手するパラメータとして追加し、これら3個のパラメータの変化に対する120度フェイズアドバンスからの位相差の変化を見積もると、次式のように第一近似で表すことができる。

$$\begin{pmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial\theta_1}{\partial(2b_c)} & \frac{\partial\theta_1}{\partial(2b_1)} & \frac{\partial\theta_1}{\partial(W)} \\ \frac{\partial\theta_2}{\partial(2b_c)} & \frac{\partial\theta_2}{\partial(2b_1)} & \frac{\partial\theta_2}{\partial(W)} \\ \frac{\partial\theta_3}{\partial(2b_c)} & \frac{\partial\theta_3}{\partial(2b_1)} & \frac{\partial\theta_3}{\partial(W)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta 2b_c \\ \Delta 2b_1 \\ \Delta W \end{pmatrix} \quad (1),$$

ここで、 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 はそれぞれのセル間の位相進みを、 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 、 $\Delta\theta_3$ はそれぞれ120度からの位相のずれを、 $\Delta 2b_c$ 、 $\Delta 2b_1$ 、 ΔW がそれぞれ削り量を表す。加工可能な範囲になるという条件のもとで、 θ_1 、 θ_3 のみを考慮した式(1)を解くことによって各寸法の修正加工量を見積もった。図4にノードルシフトの結果を、図5は入力/出力カップラー寸法の履歴を示す。図4(c)は、この手順でカップラー寸法の最適化を進め、120度フェイズアドバンスがとれたノードルシフトの結果である。6セル基準空洞でのカップラー調整終了後、加速空洞（54セル）の内部直径の寸法を決め、目標周波数でノードルシフトが120度フェイズアドバンスになるようにした。一般に、電鍍応力によって周波数は変化するので、6セルで電鍍試験を行い、変化量分を考慮して目標周波数を決める。レギュラーセルの最適化完了後の結果を図4(d)に示す。目標周波数における1セルあたりの120度フェイズアドバンスが得られている。

3.2 加速管製造過程におけるVSWRの変化

電鍍の前後の周波数に対する加速管の電圧定在波比 (VSWR) の測定結果を図6に示す。この結果、VSWR が最小である周波数がシフトしていることがわかる。電鍍時にはカップラーと54セルをスタックして推力をかけるが、この際にカップラーの変形を起こしたのではないと思われる。この周波数シフトを補正するためにビームホール角 R 寸法の最適化を行い溶接を行った結果、周波数シフトは改善した（図7参照）。

VSWRは1.4以下が望ましい。加速管製造の仕上げ過程では、アクセサリー等の溶接の際に熱応力のためにVSWRが変化する。そこで、TIG溶接を行う際に、VSWRとカップラーの表面温度をモニターして、温度が上がり過ぎないように時間を空けるなどの配慮をした。しかし、VSWRは悪化したので、ビームホール角 R を修正した後、ビームホールプランジヤーを溶接した。VSWRの最終的な結果を図7に示す。図6で見られたような周波数シフトは、ビームホール角 R の修正加工によって改善されている。目標周波数（大気中5710.6GHz）におけるVSWRは1.4以下であるが、帯域幅は電鍍前に比べて狭くなっている。

4. HIGH-POWER 試験の結果

加速管2号機をテストスタンドにインストールし、エージングを約1カ月間行った。この際、帯域幅を広げるために5スタブチューナーを使用した。図8に5スタブチューナーを使用する前後のVSWRを示す。帯域幅は改善され、目標周波数において1.13のVSWRが得られた。エージングの結果($\sim 1.1 \times 10^8$ ショット)、rfパワー約43MWでパルス幅500ns、繰り返し50Hzの条件で、rfダウン頻度は1日数回程度にエージングされた。これは、Cバンド加速管の実用機として、十分な性能である。加速管2号機は、今夏に他の加速管3本とともにビームラインに設置され、ビーム加速テストを行う予定である。

謝辞

三菱重工業（株）の飯野陽弼氏には加速管製作にあたり多大なるご協力をいただきました。著者一同深く感謝致します。

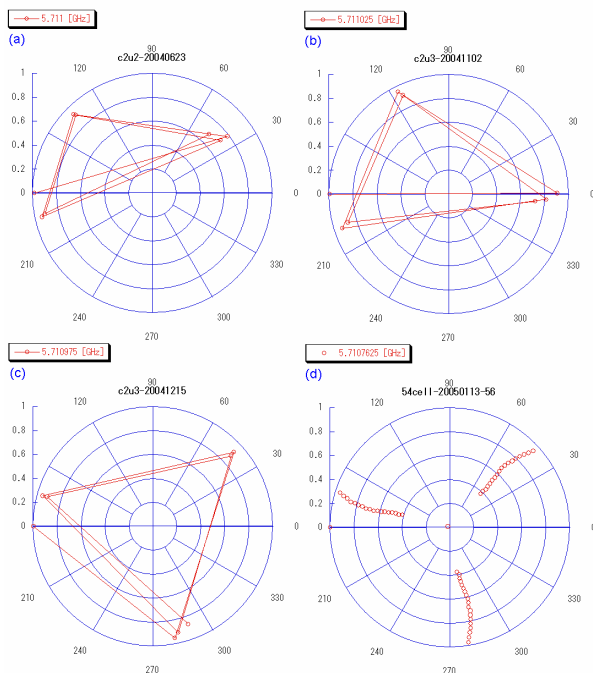


図4：ノードルシフトの結果。(a)、(b)はカップラー空洞の共振周波数を目安にした加工過程、(c)最終追い込み過程、(d)54セルでの最終測定。

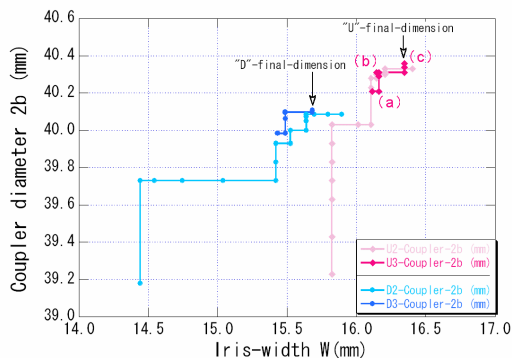


図5：カップラー寸法加工歴。U3（上流カップラー）、D3（下流カップラー）を実機に用いた。

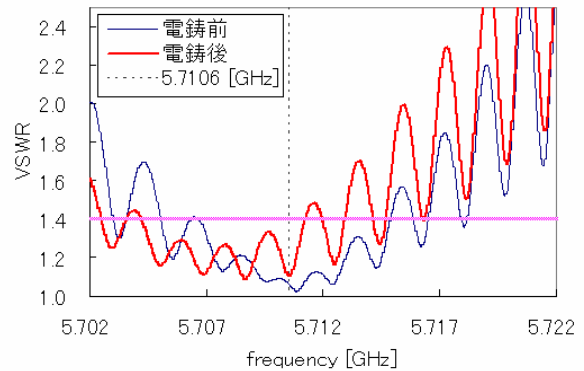


図6：電鍍前後のVSWRの変化。

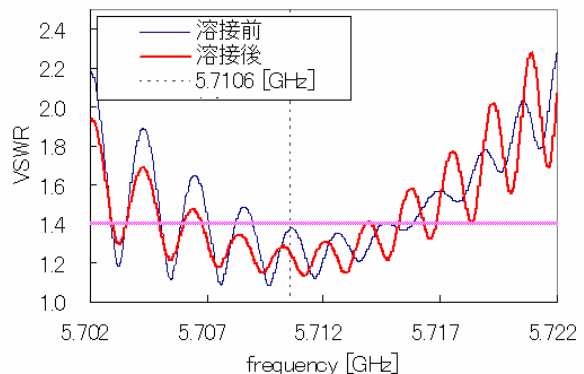


図7：ビームホール溶接前後のVSWRの変化。（溶接前のデータはビームホール角 R 修正加工済み。）

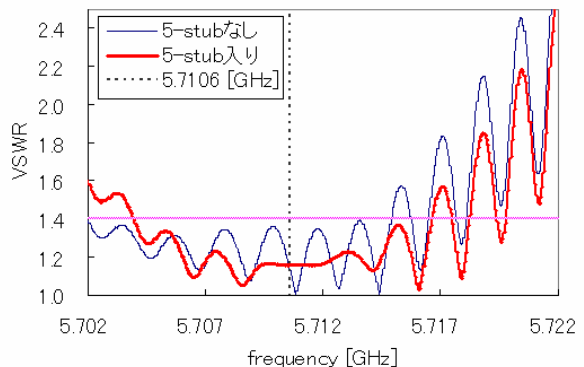


図8：5スタブチューナーによるVSWRの改善。

参考文献

- [1] T. Kamitani, et al., "R&D status of the C-band Accelerating Section for SuperKEKB", in these proceedings.
- [2] T. Sugimura, et al., "C-band accelerator structure with smooth shape couplers", in these proceedings.
- [3] T. Kamitani et al., "Development of C-band Accelerating Section for SuperKEKB", Proceedings of LINAC 2004, Lübeck, Germany, Aug, 2004, pp663-665.
- [4] E. Westbrook, "Waveguides to the Disk-Loaded Accelerator Structure Operating in the $2\pi/3$ Mode", SLAC-TN-63-103.1963. Slac-TN-63-103, 1963.
- [5] K. Yokoyama et al., "Coupler Matching Techniques for C-Band Accelerating Section", Proceedings of PAC05 (May 16-20, 2005, Knoxville, Tennessee, USA), to be published.