

C-BAND ACCELERATOR STRUCTURE WITH SMOOTH SHAPE COUPLERS

Takashi Sugimura, Takuya Kamitani, Kazue Yokoyama, Satoshi Ohsawa,
Mitsuo Ikeda, Kazuhisa Kakihara, Toshikazu Takatomi

KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 305-0801

Abstract

A new C-band accelerator structure for the SuperKEKB injector linac is under development. This structure corresponds to an upstream half part in a tandem connection of two structures. In order to suppress an RF breakdown around a coupler iris, a fat and smooth iris is adopted. The coupler dimensions such as an aperture of the iris and a diameter of the coupler cavity are first optimized by computer simulation and then decided by cold model measurements. An amount of coupler offset to retain electromagnetic field symmetry is also decided by simulations. The coupler body is processed by a milling machine. Its rough surface after milling is finished by electro-polishing. This structure will be installed in the beam line of the KEKB injector linac this summer.

角無しカプラーを採用したCバンド加速管

1. はじめに

KEK Bファクトリーの次世代計画“SuperKEKB”^[1]では、電子と陽電子の入射エネルギーを、現行の8.0 GeV/3.5 GeVから3.5 GeV/8.0 GeVに入れ替えることを考えている。現在の陽電子入射は、J型リニアックの前半部で電子を加速し途中に置かれたタングステン標的に当て得られる陽電子をリニアック後半部で3.5 GeVまで加速して行っている。標的後の最大加速エネルギーは4.8 GeV程度であり、SuperKEKB計画の要求に満たない。そこで標的後のリニアックをSバンドからCバンドに替え加速勾配を現状の2倍の42 MV/mとすることで、8.0 GeVの陽電子入射を果たすことを計画し、Cバンドリニアックの開発を行ってきた。2003年夏には1号加速管を完成させ、ビーム加速の結果、目標である42 MV/m以上の加速勾配を達成した。リニアックの運転においては加速管の放電などによるクライストロンのダウン頻度の低減も大きな課題であり、1号加速管では入力カプラー部で起きる放電が主な問題となった。これはカップラーアイリス部が薄いことと、アイリス部に電界方向に段差があることが一因でないかと推測している。現在までの約1年半に渡る運転の結果、1号機の放電頻度は1日あたり2,3回程度以下に減少しているが、2号機以降はカプラー部の放電対策を課題として開発を行ってきた^[2]。

2. 開発方針

この報告の主題である角無しカプラーを採用したCバンド加速管は3号機にあたる。よってここでは1号機、2号機について簡単に説明し、その後3号機の開発方針を述べる。

2.1 1号機 (CKM001)

1号機は開発期間をできるだけ短縮し、ローレベル系まで含めた加速ユニットとしてのビーム試験を早く始めるために、現行のSバンド加速管のほぼ1/2スケールの加速管構造とした。これにより約1年半の開発期間でインストールすることができた。

2.2 2号機 (CKK001)^[3]

2号機は1号機の放電が主に入力カプラー付近で起こることを踏まえ、カプラー構造の改良を行った。カプラーアイリス部の厚みを4 mm程度に厚くし、またアイリス部での電界方向の段差を無くすためにカプラー空洞長を矩形導波管の短辺と同じ長さにした。さらにアイリス部の角を手仕上げではあるが0.1C程度に丸める加工を行った。2005年3月以降テストスタンドでエージングを行ってきたが放電頻度は当初より1日あたり10回程度であり、現在ではすでに1日1回程度まで減少している。

2.3 3号機 (CKK002)

3号機はこれまでの1,2号機と異なり、加速管2本を直列に並べてRFを供給した場合の上流にあたる加速管である。よって、1,2号機に比較してより大電力が供給されることとなり、放電対策がいっそう必要となる。インストールのスケジュールの都合上、3号機の開発期間を短縮する必要があることから上流、下流に同一カプラーを使用できる定インピーダンス加速管とした。2号機の製作上問題点として、1, 構造上アイリス部の角を丸める機械加工が困難であり手仕上げとしているため仕上がりが寸法の再現性が確保できない。2, カプラー空洞長がレギュ

ラーセルと異なることから、カップラーセルの位相進みが $2\pi/3$ とならず、隣接セルとのマッチングをとる工程も必要となった。これらの点を踏まえて3号機の製作方針は次のようになった。

1, カプラーセルの位相進みは $2\pi/3$ とし、カプラー入り口での矩形導波管の短辺をこれにあわせる。レギュラーな導波管とはテーパー導波管を用いて接続する。

2, アイリス部の角はさらに大きく丸め $R=2$ mmとし、厚さは4 mmとする。曲面加工をフライス盤の一筆書きで行い、加工面の交差する線がないエッジのないカプラー空洞内壁とする。

3, 旋盤加工に比べフライス加工では表面粗度が大きくなるので、機械加工後、電解研磨処理 (EP) を行う。EPによる研磨量を見込んで機械加工寸法を決定する。

4, EP研磨等で生じるカプラー空洞の直径の変化によるRF特性の悪化は最終工程でビームホールプランジャーを溶接する際にビームホールの角のRの大きさを調整する。アイリス部の変化によるRF特性の変化は空洞の直径の変化に比べ1/10程度であるので、無視出来るものとする。

5, ローパワー試作カプラーによる実機の寸法決定については1,2号機のように加工と測定を繰り返して最適化を行うのではなく、RFシミュレーションに基づき決定された寸法に近い寸法を持つモデルをいくつか製作し、その測定結果から内挿 (外挿) によって決定する。これは開発期間短縮のためと、フライス盤の一筆書きによる仕上げを行うために追加加工による形状の変更には自ずと制限があり加工と測定の繰り返しによる最適化が自由に出来ないことによる。

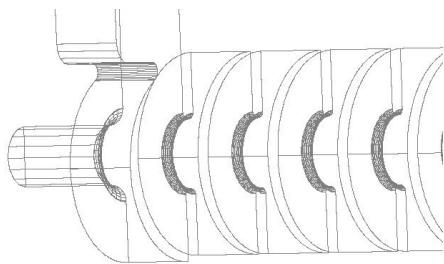


図1 3号機ワイヤーフレームモデル 導波管からアイリス部にかけてエッジの無い形状となっている。

3. シミュレーションによる形状決定

カップラー空洞直径 (2b) とアイリス幅 (W) およびアイリスによる電磁場の非対称性回復のためのカップラー空洞のオフセット量を決定するためにAnsoft HFSS8.5を用いたシミュレーションによる最適化を行った。このシミュレーションには2種類のモデルを用意した。第1のモデルはカップラー空洞-レギュラーセル-カプラー空洞とつないだ3セル

の空洞でありこのモデルを用いて入力カプラーの反射特性 (S_{11}) の最適化を行った。第2のモデルは、カプラー空洞とレギュラーセル6個をつなげたもので (図1参照)、各空洞に離調棒を入れ、それぞれの反射特性からセルごとの位相進みを測定するノードシフト測定法のシミュレーションを行った。これにより位相進み量が $2\pi/3$ に近づくように最適化した。それぞれのシミュレーションは $w/2$ と b の2個のパラメータの組み合わせを変えながら行った。結果を図2に示す。

どちらの結果においても $b=20.380$ mm、 $w/2=8.9$ mm付近で良好な結果が得られていることから、これらをローパワー試作カプラーの目標寸法とした。

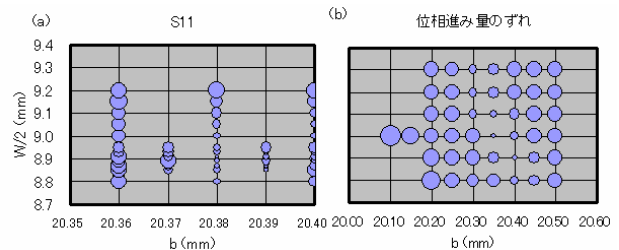


図2 HFSSシミュレーション結果 (a)反射特性 (b) 各セルの位相進みの $2\pi/3$ からのずれの和 いずれも円が小さいほど理想値に近いことを示す。ビームホールの角Rは3.5 mmで計算。

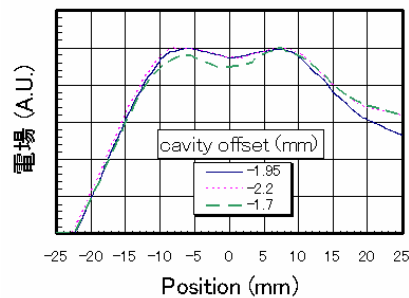


図3 カプラー空洞内電場強度 横軸は導波管中心線に沿った座標で、0 mmの位置がビーム中心となる。20 mm付近にアイリスがある。

カプラー空洞内電磁場はアイリス部の影響でビーム軸に対する対称性が損なわれている。この非対称性はビームにたいし横方向のキックを与えることになり好ましくない。3号機では、カプラー空洞をアイリスとはビーム軸に対し反対方向にずらすことで補正を行うこととした。オフセット量を変えながらカップラー空洞内の電場をHFSSにより計算し最適化を行った。図3に結果を示す。これらのシミュレーション結果からオフセット量は-1.95 mmとした。

4. ローパワー試作カプラー

ローパワー試作カプラーは $b=20.33$ mm、 20.43 mm、 $w/2=8.65$ mm、 8.90 mm、 9.15 mmをそれぞれ組み合わせた6種類を製作し、それに組み合わせるビーム

ホールプランジヤーをビームホールのRを2.0~7.0 mmまで1 mmずつ変えたものと標準とする3.5mmのもの計7種類を用意した。当初これらの組み合わせをそれぞれキール法とノーダルシフト法で測定し、結果の良好な組み合わせからの内挿で実機最終寸法を決定する予定であった。偶然にも組み合わせの中に良好な特性を持つものがあったのでこれを最終寸法とした。図4はこの $b=20.33\text{mm}$, $W/2=8.9\text{mm}$, $R=3.5\text{mm}$ の組み合わせのときの測定結果を示している。

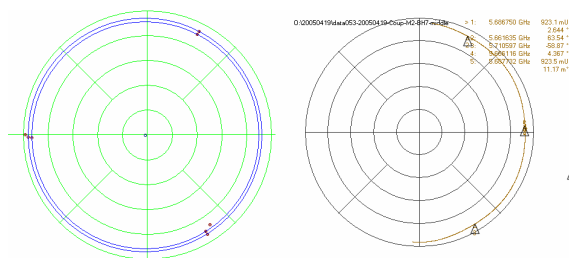


図4 左：ノーダルシフト測定結果 セルごとの位相進みが120度に並んでいる。 右：キール法測定結果 $\pi/2$ モードと $2\pi/3$ モードを示すマーカのなす角が120度となっている。

5. 実機製作

5.1 カプラー

1,2号機では空洞部は超精密旋盤で加工し、アイリス部のみフライス盤で加工を行った。この工法ではアイリス部の角を丸めることが困難であり機械加工はあきらめ手作業による仕上げを行った。3号機では機械加工により角が丸められるよう、カプラーは空洞部を無酸素銅からフライス加工で削り出し、端板をロウ付けで接合する工法をとった。ただフライス加工の表面粗度は超精密旋盤加工に比べ大きいので、加工後約30 μm の電解研磨処理を行った。図5に、加工中のカプラーの様子を示す。

5.2 レギュラーセル

レギュラーセルは定インピーダンス構造とした。ディスクの内径は14.5 mmであり、群速度は光速の3%程度となる。この加速管は1号機の上流に設置され導波管でタンデム接続されることとなる。この上流タイプのレギュラーセルを加工するのは今回が最初であったが下流タイプの加工プロセスと同様に行い問題は生じなかった。スパーサーについては内径を20 μm 小さく加工しRF測定後、予想追加工量の半分だけ削り予想通りであることをもう一度測定により確認し最終仕上げ加工を行った。最終のスパーサー内径は42.111 mmである。

5.3 各部接合

カプラーとレギュラーセルは厚さ約4 mmの電鋳により一体化を行った。電鋳応力は電流密度の増大

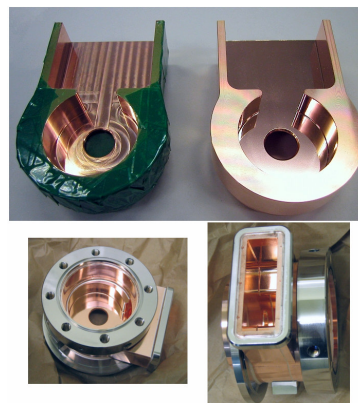


図5 上左：EP前のカプラー 上右：EP後のカプラー カッターマークが消えているのが分かる。下：ロウ付け後のカプラー

にともない大きくなるので、電流密度を下げて電鋳を行う低速電鋳法を採用した。これは2号機と同様である。電鋳はほぼ2週間かけて行った。電鋳後の加速管本体に冷却水ジャケット、RFフランジおよびビームホールプランジヤーを結合する作業は現在進行中である。これらの作業は6月中には完了し大電力RFによるエージングを行った後、夏にはビームラインにインストールする予定である。

6. まとめ

SuperKEKBの入射用Cバンド加速ユニット開発において初めての上流タイプの加速管製作を行っている。この加速管はより進んだ放電対策として角のないカプラー構造を採用した。カプラーの寸法はシミュレーションと試作カプラーの測定により決定した。加工法としてフライス盤によるエッジのない機械加工とEP処理を用いた。この加速管はまもなく完成し今夏にはビームラインにインストールされる。

謝辞

三菱重工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。著者一同最大限の感謝をここに表します。

参考文献

- [1] J. W. Flanagan, Y. Ohnishi, et al., Letter of Intent for KEK Super B Factory, Part III: Accelerator Design, KEK Report 04-4
- [2] T. Kamitani, et al., "R and D Status of C-Band Accelerating Section for SuperKEKB", Proceedings of Particle Accelerator Conference, May 16-20, 2005, in printing
- [3] K. Yokoyama, et al., "Coupler Matching Techniques for C-Band Accelerating Section", Proceedings of Particle Accelerator Conference, May 16-20, 2005, in printing