## 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"<sup>[1]</sup> 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<sup>[2]</sup>。

### 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)<sup>[3]</sup>

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ったことから 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号管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、カプラーセルの位相進 みが2π/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2π/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, 旋盤加工に比ベ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 きさを変えて調整する。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 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行えないことに 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 ーレギュラーセルー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<sub>11</sub>)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 ダル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2π/3に近付くように最適化し 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



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2π/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 ホールプランジャ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=20.33mm, W/2=8.9 mm, R=3.5 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 π/2モードと2π/3モードを示す マーカーのなす角が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。スペ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。最終のスペー 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ャ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

- 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