

## DESIGN OF L-BAND POSITRON CAPTURE ACCELERATING STRUCTURE

Kazuyoshi Saito<sup>1A)</sup>, Hideaki Nishiuchi<sup>A)</sup>, Hiroaki Sakurabata<sup>A)</sup>, Mamoru Watanabe<sup>A)</sup>, Hideki Omokawa<sup>A)</sup>,  
Yoshifumi Hojo<sup>A)</sup>, Toshiyasu Higo<sup>B)</sup>, Takuya Kamitani<sup>B)</sup>, Shuji Matsumoto<sup>B)</sup>, Kazue Yokoyama<sup>B)</sup>,  
Takashi Sugimura<sup>B)</sup>, Satoshi Ohsawa<sup>B)</sup>, Kazuhisa Kakihara<sup>B)</sup>, Mitsuo Ikeda<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Hitachi Ltd., Power Systems

7-2-1 Omika-cho, Hitachi-shi, Ibaraki-ken, 319-1221 Japan

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

### Abstract

Super-KEKB project, the upgrade machine succeeding the present KEKB collider, has just started to target at a 40 times higher luminosity of  $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ . The corresponding bunch charge required for positron injection increases by a factor of 4. Therefore an adiabatic matching magnet with stronger solenoid field and L-band accelerating structures with wider beam apertures are being developed in order to improve positron capture efficiency at the downstream of a positron generating target. In this paper, electrical and mechanical design results are described, regarding a 2m-long accelerating structure with the beam aperture of 35mm. It is designed to be set inside solenoid magnets along the beam line. A short filling time of the accelerating structure, 1.3 $\mu\text{s}$ , is realized to suppress RF breakdowns and multipactor discharges under the high magnetic field.

## 陽電子捕獲用Lバンド加速管の設計

### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、Bファクトリのルミノシティを40倍の $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ に増強するSUPER-KEKB計画が進行中である。この目標を達成するにはビーム電流を2倍に増強し、衝突点でのビームサイズを1/20に縮小する必要がある。その際の入射ライナックの課題の1つは、陽電子ビームのバンチ電荷量を現状の4倍、エミッタンスを1/200に性能向上する事である<sup>[1]</sup>。前者は陽電子捕獲効率の向上、後者はダンピングリングの設置<sup>[2]</sup>により実現される。陽電子捕獲効率を向上するためには、陽電子生成用ターゲット直後のソレノイド収束磁場の強度を上げ、下流の収束磁場分布に緩やかな変化で断熱的に接続する必要がある。それとともに、現在のSバンド加速管の代わりにビーム開口孔が大きなLバンド加速管を用いて、生成直後のエミッタンスとエネルギー分散が大きな陽電子ビームを効率良く捕獲し、デバンチしないように初期加速する必要がある。

2010年2月、上記の陽電子捕獲用Lバンド加速管の一台目を日立製作所が受注した。これまでに、レギュラーセル部、カップラーセル部、入出力テーパー導波管の電気設計を完了し、加速管本体およびビームラインに設置する際に必要となる架台も含めた機械設計を進めている。また、それと並行して、入出力カップラーセル及び隣接する上下流のレギュラーセルの試作テストピースを設計製作し、その高

周波特性の評価試験の準備を進めている。本報告では加速管の電気設計結果と機械設計の進捗状況、及び試作テストピースとその試験内容に関して纏めた。

表1 加速管の設計仕様 (【 】内は設計値)

項目	設計仕様
構造・加速方式	ディスク装荷・進行波型、定加速勾配方式
運転周波数	1298.1818 MHz
運転温度	30 $\pm$ 0.1 $^{\circ}\text{C}$
加速モード	2 $\pi$ /3 rad/cell
有効加速長	2 m
セル数	カップラーセル2+レギュラーセル24
入力高周波電力	15 MW、2 $\mu\text{s}$
加速電場	>10 MV/m 【12 MV/m】
漏波電磁場	<-60 dB 【真空排気ポート:-65 dB】
セル長	76.977 mm
ディスク厚み	10 mm
ディスク内直径	>35 mm 【35.002 ~ 39.434 mm】
シリンダ内直径	178.534(下流) ~ 179.145(上流) mm
Q値	20650(下流) ~ 20670(上流)
シャントインピーダンス	47.58(下流) ~ 45.72(上流) M $\Omega$ /m
群速度/光速速度	0.388(下流) ~ 0.611(上流) %
充填時間	<1.5 $\mu\text{s}$ 【1.3 $\mu\text{s}$ 】
減衰定数	0.26
VSWR	<1.2 【1.1】

<sup>1</sup> E-mail: kazuyoshi.saito.pq@hitachi.com

## 2. 加速管の電気設計

陽電子捕獲用Lバンド加速管の設計仕様を表1に示す。本加速管は運転周波数1298.1818MHz、加速モード $2\pi/3$ 、カップラーを含めた全セル数26で全長2mの定加速勾配型の進行波加速管である。加速電場の設計値は10MV/m以上であるが、高磁場下でのマルチパクタによる高周波放電を回避する短パルス運転が可能ないように、加速管充填時間は $1.5\mu\text{s}$ 以下に抑えた。また、ビーム開口孔としてディスク内直径を35mm以上に設計し、陽電子ビームに対して大きなアクセプタンスを確保した。

### 2.1 レギュラーセル部

ディスク厚みは10mmに固定した。まず、2次元軸対称電磁場解析コードSUPERFISH<sup>[3]</sup>を用い、無限周期境界条件下でディスク内直径の関数として、シリンダ内直径、群速度、Q値、シャントインピーダンスを求めた。これにより、セル毎にディスク内直径に対してシャントインピーダンスと高周波消費電力、更に加速電場が算出できる。次に、加速電場の初期値を仮定して、セル全体が定加速勾配になるように各セルのディスク内直径を逆算する。最後に、入力高周波電力15MW、ディスク内直径35mm以上、加速管充填時間が $1.5\mu\text{s}$ 以下の条件下で加速電場を最大化し、ディスク内直径の関数として各セルのパラメータを決定した。得られた各セルの設計パラメータを図1に示す。15MW入力時の加速電場が12MV/m、充填時間 $1.3\mu\text{s}$ 、減衰定数0.26の加速管が設計できた。

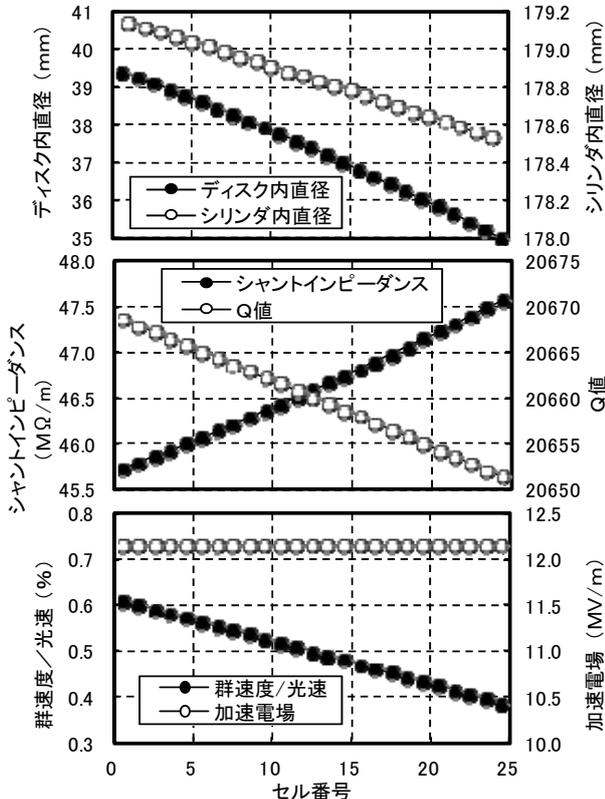


図1 レギュラーセルの設計パラメータ

また、異なる二つの境界条件で得られる定在波電磁場を線形結合して進行波を評価し、ディスク内径側の曲率半径5mmの先端部付近に生ずる最大表面電場と加速電界の比が最大2.1に収まることを確認した。

### 2.2 カップラーセル部

カップラーセルは入出力導波管とインピーダンス整合を実現するとともに、加速管内の真空排気の為に導波管と反対側に真空排気ポートを設ける。そこで、3次元電磁場解析コードHFSS<sup>[4]</sup>を用いて、カップラーセルの構造とパラメータを決定した。図2に設計結果の入力カップラーセルの断面を示す。入力導波管との結合用アイリス窓の幅60mmとセル内直径173.82mmは、Kyh1法<sup>[5,6]</sup>を用いて最適化した。アイリス窓のノーズ部の曲率半径9mmは、Cバンド加速管での実績<sup>[7-9]</sup>に基づき周波数でスケールして決定した。また、真空排気のコンダクタンス50L/s以上を維持しつつ、セル内の電磁場分布の対称性の改善と真空排気ポートへの漏洩電磁場強度を-60dB以下に抑制可能な構造を検討した。その結果、真空排気ポートのアイリス窓の幅を導波管側と同じ60mmに設計し、その下流でテーパ状に幅22mmまで縮小して断面積(22mm×67mm)で長さ40mmの矩形ダクトを形成する構造を採用した。同様に出力カップラーセルを設計した結果、アイリス窓の幅は56mm、セル内直径は174.25mmとなった。

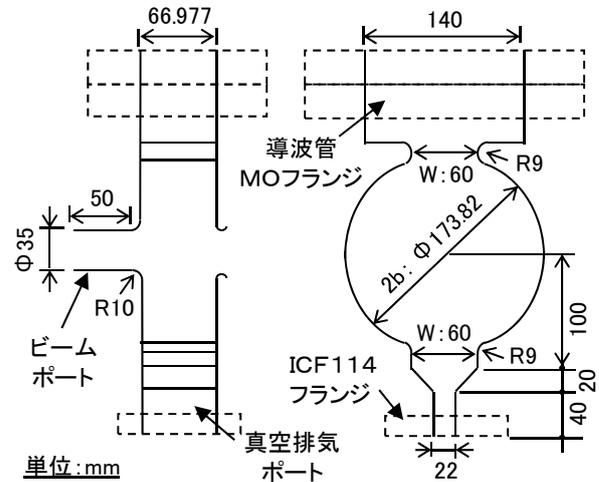


図2 設計結果の入力カップラーセルの断面

次に、カップラーセルの高周波伝播特性をHFSSで解析し評価した。図3に解析体系を示す。入力カップラーセル、隣接するレギュラー第1セルを3セル分、更に入力カップラーセルと同形の出力カップラーセルを配置して、入力カップラーセルの高周波伝播特性を評価した。図4に解析結果を示す。反射特性S11を見ると、運転周波数1298.2MHzにおいてS11は-20dBでVSWRは1.2である。ただし、解析体系にはレギュラーセルが3セルしか配置されていないため、反射による定在波の影響が大きく現れており、実際の24セルではVSWRは1.1程度に低減できると考える。残る反射係数0.05程度は、製作最終段階の

ディンプルチューニングで抑制する。透過特性S21を見ると、周波数範囲1295~1300MHzにわたり十分に広帯域化できていることが確認できる。透過特性S31は真空排気ポートへの漏洩電磁場強度であり、設計仕様値の-60dB以下を満足する-65dBを示している。同様に、出力カップラーセルの高周波伝播特性を評価して問題ないことを確認した。

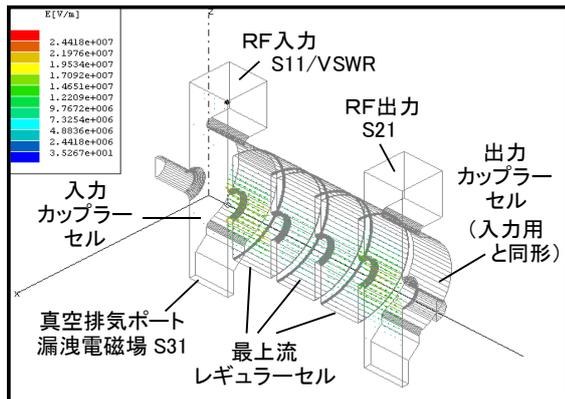


図3 入力カップラーの高周波伝播特性の解析体系

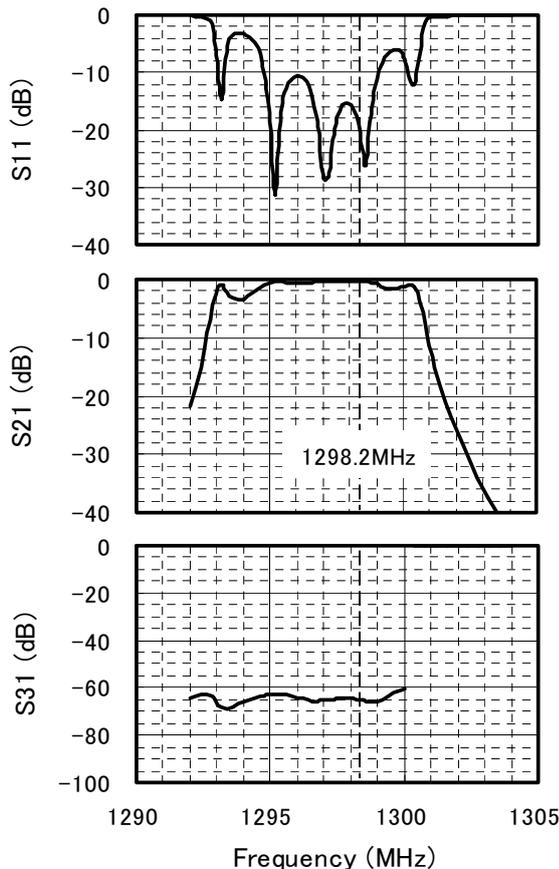


図4 入力カップラーの高周波伝播特性の解析結果

最後に、カップラーセル内の電磁場分布の対称性を評価した。図3の解析体系で求めた入力カップラーセル内の電磁場分布を図5に示す。比較のため真空排気ポートが無い場合の電磁場分布も示した。

真空排気ポートが無い場合には電磁場分布の中心が導波管側に9mmずれるが、真空排気ポートの存在で電磁場分布の中心のずれが1mmに低減する。また、 $|E_z(x=10\text{mm}) - E_z(x=-10\text{mm})| / E_z(x=0\text{mm})$  で定義した電磁場分布の非対称度は、真空ポートの存在で2.3%から0.4%に改善する。この程度に改善できれば実用上は問題ないと判断した。なお、電磁場位相に関しては真空排気ポートによる改善効果は無いが、電磁場位相の非対称度ははもともと1°以内に十分収まっており問題ない。

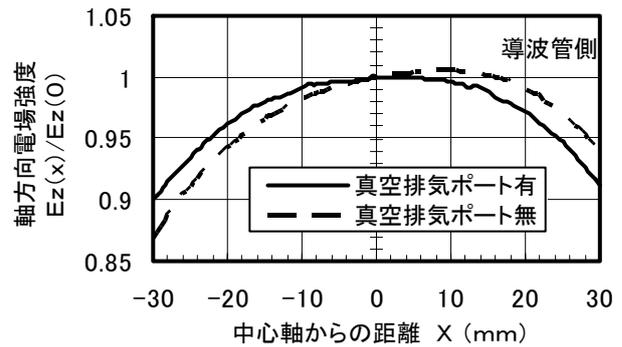


図5 入力カップラーセル内の電磁場分布

### 2.3 入出力テーパ導波管

Kyhl法が適用可能である等の設計の簡便性も考慮し、カップラーセルはレギュラーセルと同じ長さに設計している。したがって、カップラーセルに段差なく直接接続できる導波管サイズは内法が66.98mm×140mmであり、Lバンドの標準規格の導波管WR650(内法:82.55mm×165.10mm)に接続するためには、テーパ導波管が必要である。カップラーセル調整に与える影響を十分小さくするためには、テーパ導波管のVSWRを1.015以下に設計する必要がある。一方、本加速管を設置するビームライン周辺の空間的制約により、両端フランジ長70mmを含めて全長を350mm以下に制限する必要があった。HFSSで解析した結果、図6に示すようにテーパ長265mm(全長335mm)で上記条件を満足する設計が可能であることが分かった。

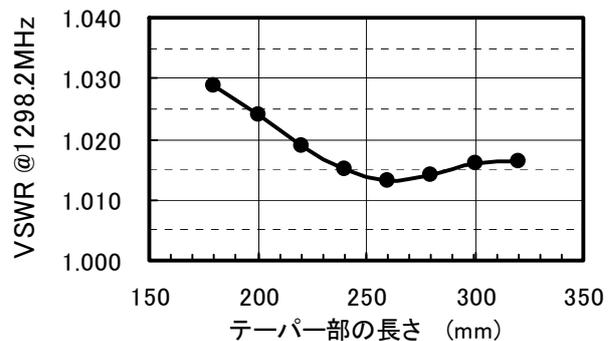


図6 テーパ導波管の反射特性の解析結果

### 3. 加速管の機械設計

現在、加速管本体およびビームラインに設置する際に必要となる架台も含めた機械設計を進めている。ビームライン上に設置した際にソレノイド電磁石の内側に挿入が可能なように、加速管本体とその支持構造を直径350mm以内に収めることが必要である。図7に加速管本体の構成を示す。以下、その主要部の機械設計の概要を述べる。

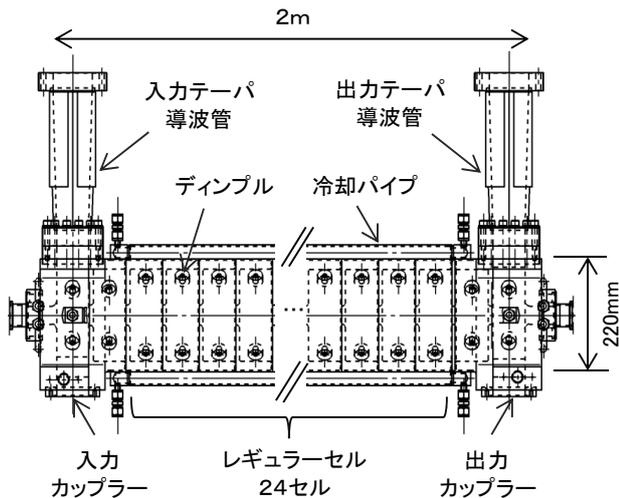


図7 加速管本体の構成

#### 3.1 レギュラーセル部

セルの材質は、無酸素銅クラス1を使用する。レギュラーセル部は、上流から下流に向かって変化する約180mmの内直径に対して外直径220mmと20mm程度の肉厚により、比較的軽量であるが2mの全長の2点支持に対しても十分な剛性を持っている。冷却水路は外周に長手方向にロウ付けする4系統の無酸素銅製の冷却パイプで形成し、余裕を見た想定最大電力損失2kWに対して加速管外表面の長手方向にわたる温度差が1℃以内になるよう除熱する。レギュラーセルは、ディスクとシリンダを一体化したカップ型の構造で無酸素銅材から削り出し、外周を仕上げた後に鏡面加工により内面を0.1Raよりも良い面粗度に仕上げる。鏡面加工されたカップ型のレギュラーセル22セルを事前にロウ付けされたカップラーセル部と同時にロウ付けにより接合し2mの完成品となる。各セルは周方向に4箇所、セルの共振周波数調整用に内壁面を外部から塑性変形させることができるディンプル構造を持ち、押し引き両方向に調整が可能な構造となっている。

#### 3.2 カップラーセル部

セルの材質は、レギュラーセル部と同じ無酸素銅クラス1を使用する。カップラーセル部は、導波管取付け部を持つ必要があるため、カップラーに隣接するレギュラーセル1セルを含む構造となっており、加工に都合の良い複数の部品に分割された無酸素銅

材のセル部品、および、導波管フランジと真空フランジから構成される。これらの部品をロウ付けにより接合することによりカップラーセル部が完成する。この後のレギュラーセル部とのロウ付けは上記の通りである。冷却水路はレギュラーセル部の冷却パイプを可能な限り延長するが、導波管ポートと真空排気ポートのため、端部が十分に除熱できない可能性がある。このため、カップラーのビームポート側端面にもレギュラーセル部とは別系統の冷却水路を設けることによりレギュラーセル部との温度差を1℃以内になるよう除熱する。カップラーセル部は、外周、導波管ポートおよび真空排気ポートを一次加工で仕上げた後にセル内壁面を0.1Raよりも良い面粗度に仕上げる。カップラーセルもレギュラーセルと同様に周方向4箇所共振周波数調整用のディンプル構造を持つ。本加速管は陽電子捕獲用でありソレノイド電磁石中に挿入して設置する必要があるため、据付時の最大張り出しはビーム軸を中心として直径350mm以内に納める必要がある。このため、2.3節で述べたテーパ状の変換導波管も導波管フランジにより本体とは分離可能な構造となっている。導波管フランジは全てM0フランジ<sup>[10]</sup>である。

### 4. 試作テストピースと試験内容

セル内面の加工精度の評価、ロウ付けの共振周波数への影響把握、実測によるカップラーのアイリス窓幅とセル内直径の最適化を目的に、試作テストピースでの高周波特性の評価試験を実施する。評価試験の結果は実機加速管設計に反映される。試作テストピースとして、入出力カップラーを各1セル、それと隣接するレギュラーセルを各5セル設計製作した。

レギュラーセルの評価試験では、セル数やセルの組合せを変えながら各励振モードの共振周波数やQ値を測定し、セル内面の加工精度を評価する。また、ロウ付け前後の測定結果の比較より、ロウ付けの影響を把握する。一方、カップラーセルの評価試験では、図8に示す試験体系でレギュラーセルと組み合わせ、Kyh1法で共振周波数と結合係数を評価しながら

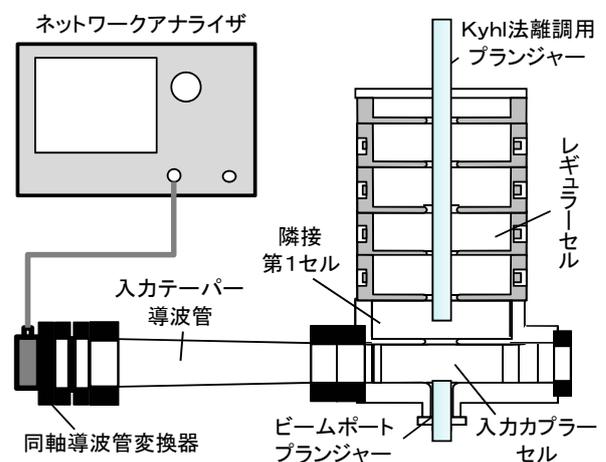


図8 試作カップラーセルの試験体系

ら、セルの追加工によりアイリス窓幅とセル内直径を最適化する。

カップラーセルの初期寸法は追加工が可能のように、HFSSで求めた感度係数に基づき、アイリス窓幅とセル内直径とも所定量だけ小さめに設計している。そのため、初期寸法の近傍では共振周波数が最適値である $2\pi/3$ モードと $\pi/2$ モードの平均周波数から2 MHz程度ずれており、Kyhl法で精度良く結合係数を評価できない。そこで、図8に示すように、ビームポートに同調用プランジヤーを挿入し共振周波数のずれを補正できる構成に設計した。プランジヤー挿入による外乱でカップラーセルの蓄積エネルギー(R/Q)が変化し結合係数の測定精度が悪化する懸念があったが、HFSSによる解析の結果、周波数補正量2 MHz程度ならば結合係数に関するKyhl角度の誤差は $2^\circ$ 以内に十分収まることが分かった。初期寸法近傍でこの程度の誤差が存在することを認識して追加工を進めれば、実用的に問題ないと判断した。

## 5. まとめ

SUPER-KEKB入射ライナックの陽電子捕獲用Lバンド加速管の2 m長プロトタイプ機を設計した。

- (1) 陽電子捕獲効率向上のためディスク内直径が35mm以上、高磁場下での高周波放電を回避する短パルス運転が可能ないように加速管充填時間が $1.5\mu\text{s}$ 以下の条件で、15MW入力での加速電場が12MV/m、充填時間 $1.3\mu\text{s}$ 、減衰定数0.26の定加速勾配型の進行波加速管を設計。
- (2) 3次元電磁場解析コードHFSSでカップラーセルと入出力テーバー導波管を設計し、チューニングで抑制可能な反射レベルであるVSWR1.1程度を達成。また、カップラーセルの電磁場分布の対称性を改善し、真空排気ポートの漏洩電磁場強度を-65dBに抑制可能なセル構造を設計。
- (3) レギュラー部はセル毎にディスクとシリンダを一体化した構造で精密加工し、セル間でロウ付けする構成を採用。各セルには一部壁面の押し引きで共振周波数の微調整が可能なディンプルを具備。加速管本体と支持構造は直径350mm以内に収め、ビームライン上に設置してソレノイド電磁石の内側に挿入可能な構造で設計。

また、実機加速管の製作前に試作テストピースを用いた高周波特性の評価試験を計画。追加工前の初期寸法でのカップラーセルのマッチングを、Kyhl法で精度良く評価できる方法を考案した。

## 参考文献

- [1] T. Sugimura, et al., "The Linac Upgrade Plan for Super-KEKB", Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, 2010, pp. 4290-4292.
- [2] M. Kikuchi, et al., "Design of Positron Damping Ring for Super-KEKB", Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, 2010, pp. 1641-1643.
- [3] K. Halbach and R. F. Holsinger, "SUPERFISH- A Computer Program for Evaluation of RF Cavities with Cylindrical Symmetry," Particle Accelerators 7 (1976) 2 13-222.
- [4] <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>
- [5] E. Westbrook, "Microwave Impedance Matching of Feed Waveguides to the Disk-Loaded Accelerator Structure Operating in the  $2\pi/3$  Mode", SLAC-TN-63-103, 1963.
- [6] M. Chanudet, "Matching of the Coupler Cavity to Travelling Wave Structures at any Operating Mode", LAL/RT 93-06, 1993.
- [7] T. Kamitani, et al, "R&D status of C-band Accelerating Section for Super-KEKB", Proceedings of PAC'05, Knoxville, Tennessee, USA, 2005, pp. 1233-1235.
- [8] K. Yokoyama, et al, "Coupler Matching Techniques for C-Band Accelerating Section", Proceedings of PAC'05, Knoxville, Tennessee, USA, 2005, pp. 1431-1433.
- [9] T. Kamitani, et al, "Super-KEKB計画のためのCバンド加速管開発の現状", Proceedings of the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Miyagi, Japan, 2006.
- [10] <http://mo-ohtsuka.co.jp/moflange/mokatalog.pdf>