

LOW-POWER TEST AND TUNING OF L-BAND POSITRON CAPTURE ACCELERATING STRUCTURE

Kazuyoshi Saito^{1A)}, Hideaki Nishiuchi^{A)}, Hiroaki Sakurabata^{A)}, Mamoru Watanabe^{A)},
Hideki Omokawa^{A)}, Yoshifumi Hojo^{A)}, Toshiyasu Higo^{B)}, Takuya Kamitani^{B)},
Kazuhiisa Kakihara^{B)}, Shuji Matsumoto^{B)}, Kazue Yokoyama^{B)}, Satoshi Ohsawa^{B)}
^{A)} Hitachi Ltd.

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

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

Abstract

An L-band positron capture accelerating structure was designed and fabricated for the Super-KEKB injector linac, and has been confirmed to be successfully tuned by low-power tests. At first, test cells were fabricated based on the design results reported in the last year's conference, and detailed cell dimensions for production version were determined by evaluating the test cells' performances. Next, the production-version cells were machined and confirmed for their resonant frequencies and/or coupling factors to be within predefined tolerances before brazing. After completing the assembly of the accelerating structure by brazing, the resonant frequency of each cell was adjusted to the designed value by dimple tuning, and the coupling factor was confirmed to meet the specified tolerance by Kyhl method. Finally, radiofrequency performances of the whole accelerating structure were measured, in order to confirm the required characteristics.

陽電子捕獲用Lバンド加速管の製作

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、Bフラ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^[1]。前者は陽電子捕獲効率の向上で実現される。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^[2]。

昨年の本学会では、上記の陽電子捕獲用Lバンド加速管の設計結果と試作セル試験の準備状況を報告した^[3]。今回は試作セルの試験結果、それを反映して製作した実機セルの試験結果、さらにロウ付け接合で加速管全体を組立てた後の低電力調整と性能試験の結果を纏めた。以上の一連の調整・試験により、本加速管に要求される高周波特性が達成できた。

表 1: 加速管の設計仕様

| 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±0.1 °C |
| 加速モード | 2π/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、2μs |
| 加速電場 | 12 MV/m |
| セル長 | 76.977 mm |
| ディスク厚さ | 10 mm |
| ディスク内直径 | 35.002(下流)~39.434(上流) 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) MΩ/m |
| 群速度/光速速度 | 0.388(下流)~0.611(上流) % |
| 充填時間 | 1.3 μs |
| 減衰定数 | 0.26 |
| VSWR | <1.1 |
| セル間位相差 | 120±3° |
| 累積位相誤差 | ±5° |

¹ E-mail: kazuyoshi.saito.pq@hitachi.com

2. 加速管の概要と設計仕様

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。加速電場の設計仕様値は12MV/mと現状のSバンド加速管の現行運転値より低いが、高磁場下でのマルチパクタ等による高周波放電を回避するため短パルス運転が可能ないように、加速管充填時間は $1.5\mu s$ 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。製作した加速管の外観写真を図1に示す。加速管本体はソレノイド電磁石の内側に挿入するため、架台との固定は入出力カップラー端部位置の2点で支持する構造である。

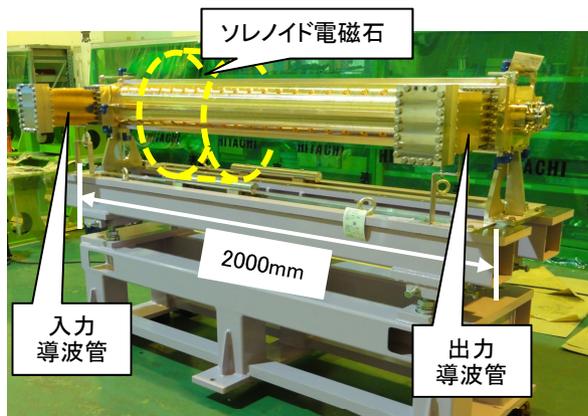


図1: 製作した加速管の外観写真

3. 試作セル試験

セル内面の加工精度の確認、ロウ付け接合の高周波特性への影響把握、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、試作セルの高周波特性の評価試験を実施した。試作セルとして、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。

3.1 カップラーセル

カップラーセルの評価試験ではレギュラーセルと組み合わせ、Kyhl法^[4]で共振周波数と結合係数を測定しながら、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調整した。なお、共振周波数の設計値は入力カップラーセルが1297.087MHzで、出力カップラーセルが1297.484MHzである。また、結合係数を表すKyhl角度の設計値は、入出力カップラーセルとも 120° である。

図2に計測体系の写真を示す。カップラーセルとレギュラーセルを鉛直方向に積上げて、上下の押え板により所定の締付力で固定した。テーパ導波管とカップラーセルの接続面には高周波コンタクトを挿入し、真空排気ポートのICFフランジとともに水平方向から押え治具で固定した。カップラーセルの外側の2ヶ所に熱電対を取り付けて温度を監視する

とともに、真空排気ポート側からセル内に乾燥窒素ガスを導入して誘電率を管理した。高周波特性はネットワークアナライザを用いて計測した。

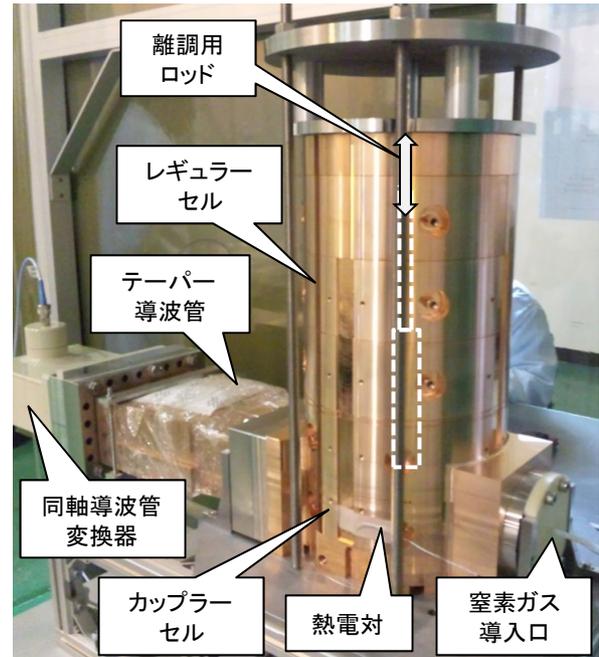
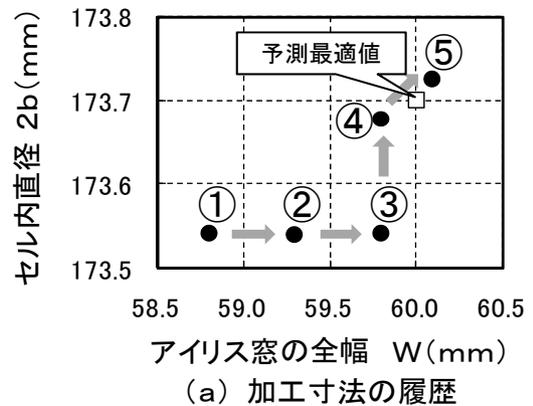
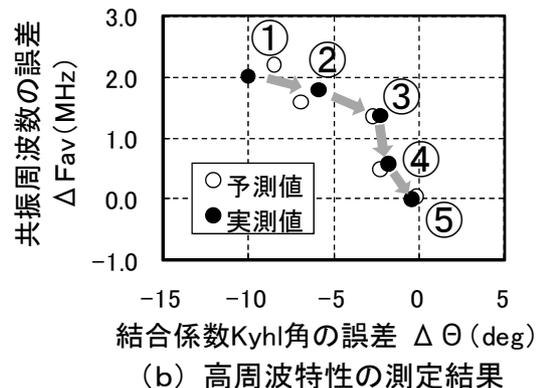


図2: 試作カップラーセルの計測体系の写真



(a) 加工寸法の履歴



(b) 高周波特性の測定結果

図3: 試作入力カップラーセルの追加工調整時の寸法履歴と高周波特性の測定結果

入力カップラーセルの寸法履歴と高周波特性の測定結果をそれぞれ図3 (a)と図3 (b)にプロットした。初期寸法①に加工後、4回の追加工②～⑤で結合係数と共振周波数の目標値を達成すべく、高周波特性を予測してセル寸法の微調整を進めた。その結果、設計段階の3次元電磁場解析コードHFSSによる予測最適値に近いセル寸法⑤で、高周波特性の目標値（共振周波数の誤差： $\pm 0.1\text{MHz}$ 以内、結合係数 K_{yh1} 角の誤差： $\pm 1^\circ$ 以内）を達成した。図3 (b)の高周波特性の予測値①～④は、3次元電磁場解析結果および寸法変化に対する感度係数の計算値に基づき算出した。高周波特性の予測値⑤は、実測値④と測定②～④で求めた感度係数の実測値に基づき算出した。感度係数の計算値と実測値に約10%の相違が生じたが、問題なく高周波特性の目標値を達成できた。

次に、入力カップラーセル本体を付属するビームポートの真空ダクト、入力導波管ポートのM0フランジ、真空排気ポートのICFフランジ、隣接レギュラーセルとロウ付け接合し、その前後の高周波特性の変化を測定した。表2に測定結果を示す。ロウ付け接合により結合係数を表す K_{yh1} 角度が 119.55° から 120.18° に増加し、共振周波数の誤差が -3.8kHz から -67.5kHz に変化した。感度係数の実測値から換算すると、アイリス窓の全幅が $+89\mu\text{m}$ 、セル内直径が $-2.2\mu\text{m}$ だけ変化したことになる。この変形はカップラー本体を形成する銅材とこれに食い込む位置に配置するフランジを形成するステンレス材の熱膨張の差によるものと理解する。因みにフランジをカップラー本体に食い込ませる設計は、挿入するソレノイドの内径を小さくするために不可避である。

表2: 試作入力カップラーセルの高周波特性

| ロウ付け 接合 | 共振周波数 の誤差 | 結合係数 K_{yh1} 角度 |
|------------|-------------------|----------------------|
| 前 | -3.8kHz | 119.55° |
| 後 | -67.5kHz | 120.18° |

同様に、出力カップラーセルに関しても、追加工でセル寸法の最適値を求め、ロウ付け接合の影響も評価した。これらの結果に基づき、実機カップラーセルの加工寸法を決定した。

3.2 レギュラーセル

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した。また、ロウ付け前後の測定結果の比較より、ロウ付け接合の影響を評価した。なお、加速管の実際の運転条件である $2\pi/3$ モードに対する共振周波数の設計値は 1298.1818MHz である。

計測体系に関してはカップラーセルの場合と同様に、レギュラーセルを鉛直方向に積上げて、上下の押え板により所定の締付力で固定した。積み上げたセルの外周2ヶ所に熱電対を取り付けて温度を監視するとともに、セル内に乾燥窒素ガスを導入して誘電率を管理した。高周波特性は上下の端板に設けた

N型コネクタ製のアンテナを用いて、ネットワークアナライザでSパラメータを測定し求めた。

表3: 試作レギュラーセルの高周波特性

| ロウ付け 接合 | 共振周波数の誤差 | |
|------------|-------------------|-------------------|
| | 入力側セル | 出力側セル |
| 前 | $+23.9\text{kHz}$ | $+30.6\text{kHz}$ |
| 後 | $+53.9\text{kHz}$ | $+43.2\text{kHz}$ |

$2\pi/3$ モードの共振周波数をロウ付け前後に測定した結果を、設計値に対する誤差として表3に纏める。入力カップラーに隣接するレギュラーセル（入力側）と出力カップラーに隣接するレギュラーセル（出力側）の測定結果を併記した。ロウ付け接合前の誤差は $+24\sim 30\text{kHz}$ であり、加工精度で決まる $\pm 30\text{kHz}$ 以内に入っている。ロウ付け接合後の誤差は $+43\sim 54\text{kHz}$ であり、ロウ付け接合による影響は $+13\sim 30\text{kHz}$ であった。これらの結果に基づき、実機セルの内径を試作セルに対して、 $+6\mu\text{m}$ だけ大きく加工することに決定した。

4. 実機セル試験

本章では、(1)試作セルの評価結果に基づき設計製作した実機セルのロウ付け接合前の高周波特性の確認試験、(2)ロウ付け接合で全体組立後の実機セルの高周波特性の調整・性能試験、及び加速管全体の高周波特性の性能試験に関して述べる。

4.1 ロウ付け接合前

試作カップラーセルの場合と同様な計測体系で、実機カップラーセルの高周波特性を K_{yh1} 法で測定した。測定結果を表4に纏める。ロウ付け接合の高周波特性への影響（共振周波数の変化 -64kHz 、結合係数 K_{yh1} 角の変化 $+0.63^\circ$ ）を考慮しても、入出力カップラーセルともに、共振周波数と結合係数 K_{yh1} 角が調整前のこの段階での許容誤差 $\pm 0.1\text{MHz}$ 以内、 $\pm 1^\circ$ 以内を満足することが確認できた。

表4: 実機カップラーセルのロウ付け接合前の高周波特性

| セル名称 | 共振周波数 の誤差 | 結合係数 K_{yh1} 角度 |
|---------|-----------------|----------------------|
| 入力カップラー | $+59\text{kHz}$ | 119.94° |
| 出力カップラー | $+26\text{kHz}$ | 119.95° |

実機レギュラーセルに関しては、セル毎に空洞を構成した計測体系で、各セルの共振周波数を測定した。その結果、共振周波数の設計値 1298.1818MHz に対する誤差は加工精度で決まる $\pm 30\text{kHz}$ 以内に入っており、ロウ付け接合の影響を考慮しても、調整前のこの段階での許容誤差 $\pm 0.1\text{MHz}$ 以内に収まること確認できた。

4.2 ロウ付け接合後

加速管の調整・性能試験はプランジャーを用いた

計測体系で以下の手順で実施した。

- (1) Kyhl法を用いて、入力カップラーセルの共振周波数が設計値と一致するようにセル壁面の周波数調整部を変形させた後、共振周波数と結合係数Kyhl角が要求精度を満足することを確認。
- (2) 同様にKyhl法を用いて、出力カップラーセルの共振周波数を調整した後、共振周波数と結合係数Kyhl角が要求精度を満足することを確認。
- (3) Nodal-shift法を用い、入力カップラー側から出力カップラー側に向けて逐次、レギュラーセル部の各セルの共振周波数が設計値と一致するようにセル壁面の周波数調整部を変形させ、セル間位相差と累積位相誤差が仕様値を満足することを確認。

図4に計測体系の概念図を示す。加速管は入力カップラーを下側として鉛直方向に設置した体系で試験用架台に固定した。加速管の各セルを離調するプランジヤーには中空円筒形の金属を用いた。プランジヤーは吊り紐に固定し、架台上部のDCモータで駆動した。この際、プランジヤーが加速管内を移動する際に生ずる振動を抑制するため、テンションバーで張力を加えた。また、プランジヤーの位置は架台下部に設けたロータリーエンコーダで計測した。加速管の高周波特性はネットワークアナライザと同軸-導波管変換器を用いて計測した。

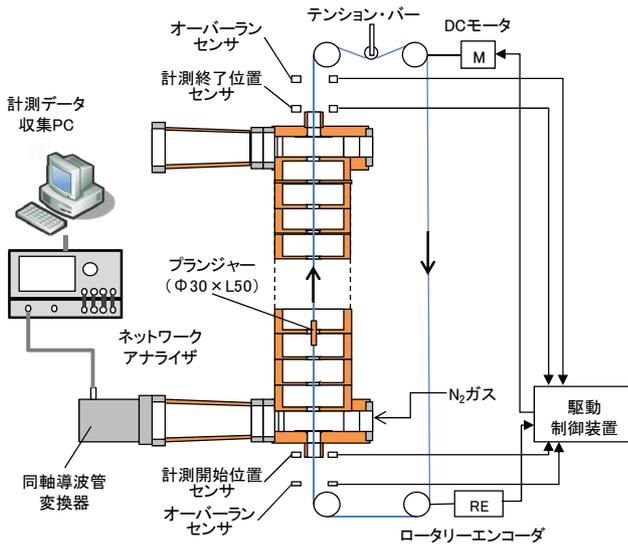


図4: ロウ付け接合で全体組立後の計測体系

Kyhl法を用いた入力カップラーセルの調整・性能試験の際には、プランジヤーの下端面が入力カップラーセルの中央に位置する場合と入力カップラーセルに隣接するレギュラーセルの中央に位置する場合の反射波の位相差から高周波特性を評価した。出力カップラーセルの調整・性能試験の際には、図4においてネットワークアナライザと同軸-導波管変換器を出力テーパ-導波管の方に接続変更し、プランジヤーの上端面が出力カップラーセルの中央に位置する場合と出力カップラーセルに隣接するレギュラーセルの中央に位置する場合の反射波の位相差か

ら同様に高周波特性を評価した。Nodal-shift法によるレギュラーセル部の調整・性能試験の際には、プランジヤーの下端面が各セル中央に位置する場合の反射波の位相差からセル間位相差を算出した。

表5: 実機カップラーセルのロウ付け接合後共振周波数調整前の高周波特性

| セル名称 | 共振周波数の誤差 | 結合係数Kyhl角度 |
|---------|----------|------------|
| 入力カップラー | +81kHz | 120. 20° |
| 出力カップラー | +13kHz | 121. 03° |

表6: 実機カップラーセルのロウ付け接合後共振周波数調整後の高周波特性

| セル名称 | 共振周波数の誤差 | 結合係数Kyhl角度 |
|---------|----------|------------|
| 入力カップラー | +5kHz | 120. 01° |
| 出力カップラー | -2kHz | 120. 20° |

ロウ付け接合後の実機カップラーセルの高周波特性の測定結果を表5に纏める。また、共振周波数を調整した後の高周波特性の測定結果を表6に纏める。ロウ付け接合後の共振周波数は、調整前の許容誤差±0.1MHz以内に収まり、さらにセル壁面の変形による調整後には最終的な許容誤差±0.01MHz以内に収まった。一方、結合係数Kyhl角はロウ付け接合で想定より若干大きめの値に達したが、共振周波数の調整後には許容誤差±1°以内に収まる。この状態は、Kyhl角と反射係数に関する感度の計算評価値 ($|\delta \Gamma / \delta \theta| \sim 0.01/\text{度}$) を考慮すると、電圧定在波比VSWR<1.02を達成していると判断した。入出力カップラーセルともにロウ付け接合後の最終調整で、共振周波数と結合係数が加速管の仕様値VSWR<1.1の達成に必要な要求精度を満足することが確認できた。

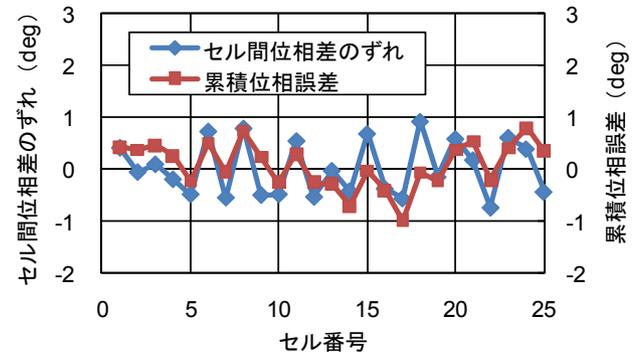


図5: レギュラーセル部の各セルの共振周波数調整後の高周波特性

次に、レギュラーセル部の各セルの共振周波数を同様にセル壁面の変形で調整した結果を図5に示す。セル間位相差は設計仕様値 $120 \pm 3^\circ$ 以内、累積位相誤差も要求仕様値 $\pm 5^\circ$ 以内に十分収まった。

最後に、加速管全体の高周波特性を確認するため、図4においてプランジヤーと吊り紐を撤去し、出力テーパ-導波管側にも同軸-導波管変換器を取り付

ネットワークアナライザと接続した体系で、Sパラメータを測定した。その結果、電圧定在波比VSWR、充填時間、減衰定数などの設計仕様値を満足していることが確認できた。図6にVSWRの計測結果を示す。(a)は入力側からの、(b)は出力側からの計測結果である。入力側と出力側のVSWRはどちらも1.08であり、設計仕様値である1.1以下を達成している。計測時の加速管温度と窒素ガスの誘電率に対する補正を考慮して、運転周波数1298.1818MHzに対応して計測周波数1297.9967MHzでのVSWR値を明記している。

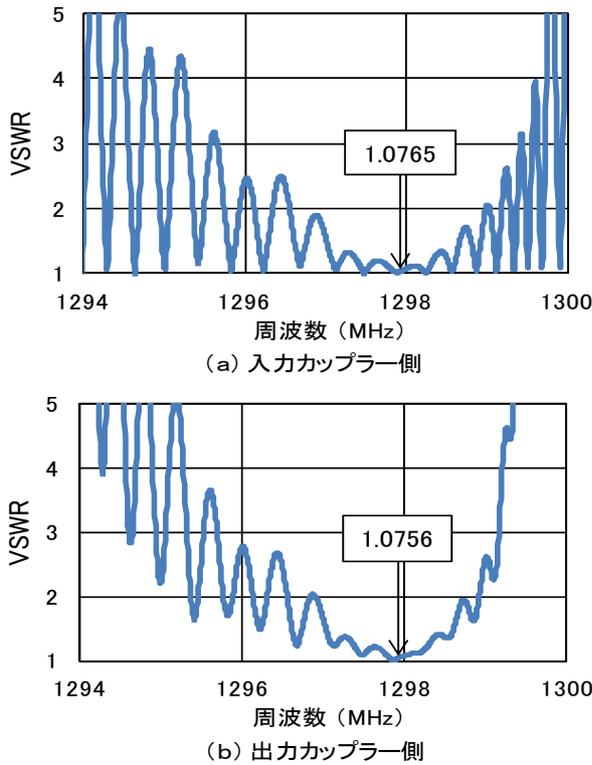


図6: 電圧定在波比VSWRの測定結果

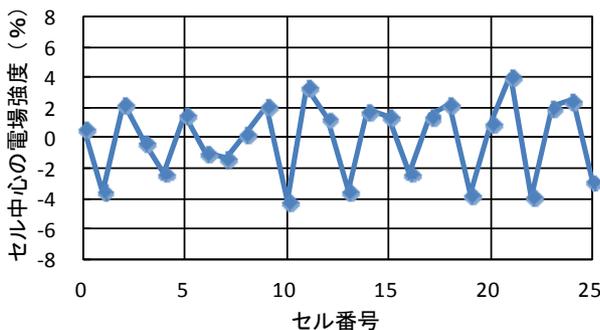


図7: 各セル中心の電場強度相対値の測定結果

また、図4の計測体系でプランジャーをビーズに換えて非共振摂動理論に基づき、各セル中心の電場強度の相対値を測定した結果、図7に示すように、一様度±4%以内に収まった。リップルは3セル毎に繰り返すパターンが主であり、出力カップラー又はその下流からの影響であり、これを分析してカップラーセル付近のセル周波数調整を行えば、これらを

抑制できると考えるが、今回は時間の制約があり、仕様値VSWR<1.1を満足していたため、この調整は実施しなかった。また、上流に向かって多少3セル毎のリップルからずれており、これは本体部分の微小な反射が重畳されてできていると思われる。これもセル周波数調整を進めれば抑制できるはずであるが、今回は上記同様の理由で実施しなかった。

5. まとめ

Super-KEKB入射ライナックの陽電子捕獲用Lバンド加速管を設計製作した。各セルの高周波特性を以下の手順で調整し、加速管の設計仕様値を達成した。

- (1) 試作セルの評価試験で高周波特性を測定し、セル内面の加工精度の確認、ロウ付け接合の影響把握、カップラーのアイリス窓幅とセル内直径の最適化調整を実施。
- (2) 試作セルの試験結果に基づき実機カップラーセルを製作し、Kyh1法で高周波特性を測定。ロウ付け接合前の要求精度である共振周波数の許容誤差±0.1MHz以内と結合係数Kyh1角の許容誤差±1°以内に収まることを確認。
- (3) 試作セルの試験結果に基づき実機レギュラーセルを製作し、各セルの共振周波数を測定。ロウ付け接合前の要求精度である共振周波数の許容誤差±0.1MHz以内に十分収まることを確認。
- (4) ロウ付け接合で加速管全体を組立てた後、カップラーセルの壁面変形で共振周波数を調整して許容誤差±0.01MHz以内で設計値に一致させ、結合係数Kyh1角も設計値に対して許容誤差±1°以内を満足することを確認。
- (5) レギュラーセル部の各セルの共振周波数が設計値と一致するようにセル壁面変形で調整し、セル間位相差が $120 \pm 3^\circ$ 以内、累積位相誤差が±5°以内の設計仕様値を満足することを確認。
- (6) セル間位相差調整後に加速管全体の高周波特性を測定し、その他の設計仕様値の達成を確認。反射特性に関しては、入出力ケーパー導波管から測定した電圧定在波比VSWRがともに1.08で、設計仕様値の1.1以下を達成。

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] 紙谷琢哉, 他, "SuperKEKBに向けたKEKB入射ライナックの改造計画", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Japan, Aug. 4-6, 2010, pp. 144-147.
- [3] 齋藤一義, 他, "陽電子捕獲用Lバンド加速管の設計", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Japan, Aug. 4-6, 2010, pp. 532-536.
- [4] 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.