

減衰離散型 (HDDS) セルの精密製作技術

肥後 寿泰¹、上野 健治、川又 弘志、工藤 昇、久米 達也、高田 耕治、高富 俊和、
峠 暢一、東 憲男、東 保男、人見 宣輝、舟橋 義聖、両角 祐一、渡辺 勇一
高エネルギー加速器研究機構
〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

概要

リニアコライダー主線形加速器を構成するXバンド加速管は、ウェーク場を充分抑制した上で、50MV/mの高電界加速を実現する必要がある。このため現在の設計では、ビームホール径を大きく保ったまま加速モードの群速度を低く抑えるように $5\pi/6$ モードを採用し、更にHOM減衰用のマニフォルドとそれへの結合を実現するカップリングスリットを有するセル構造を採用している。本稿では、現在の高電界特性をふまえたケアを念頭に置きつつ、しかもマルチバンチウェーク場抑制に必要な精密セル製作の現状を述べる。

1. はじめに

リニアコライダー計画「GLC」^[1]では、主線形加速器の加速構造として、11.4GHzの進行波型加速管を採用している。高い加速電界を得られるよう高い周波数を採用しているため構造が小さくウェーク場対策が重要である。GLCではシングルバンチウェーク場対策は $10\mu\text{m}$ 級のアラインメントを実現しBNSダンピングを効かせることにより、ビームホール径は $a/\lambda = 0.17 \sim 0.18$ 程度で設計できている。

これに対してマルチバンチウェーク場抑制は、高次モードの周波数を離散させ軽いダンピング構造を付加することで実現する。このセルをHDDSセルと呼ぶが、4頭文字は各々、H:高位相すすみ型(150度/セル)、D:減衰型、D:周波数離散型、S:加速管を表している。正確な周波数制御と3D形状加工が必要になるが、高電界運転と安価な量産とが双方実現されることが必要である。

本稿では、HDDSセルに必要な特性とその加工方法を述べ、実際に製作された初期のセルの特性を示して今後の開発研究の方向を議論する。

2. HDDSセル

現在はHDDSセル開発は高電界特性の確率が第一優先で進めている。従って、効率を少々犠牲にしてセルのカップ形状の円筒部分を片側によせてディンブルチューニング機構を付加し、周波数の精度を若干甘くしている。設計図の一部を図1に示した。

4カ所に2mm幅程度の放射状のスリットを有し、TM11型のダイポールモードをマニフォルドと称する円形の穴に導き、これを通して引き出した高次モードを伝送・ダンプする。45度方向外周部にノッ

チを設け、表裏の加工位置あわせに用いるとともに、接合時のセル間回転アラインメントに用いる。開発のスピードアップのため、セル間のアラインメントは印籠構造してある。スリットの詳細図を図2に示した。スリットは、加速モードのQ値の減少をなるべく小さくするために半径方向に沿って末広がりの設計とする。

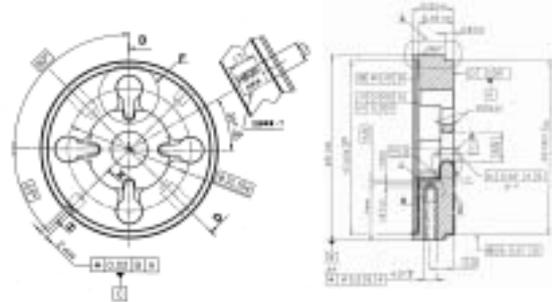


図1 HDDSセル形状

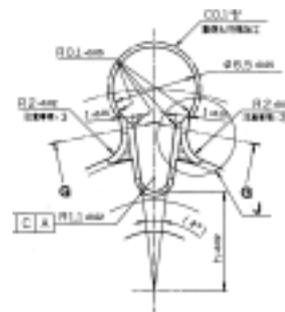


図2 スリット・マニフォルド形状詳細

3. 実現すべき特性

3.1 高電界特性のための継ぎ目の稜線

トポロジカルに同様の構造を持つ加速管(DDS3)の高電界試験では、非常に長いプロセッシング時間を必要とし、また50MV/mでの運転も必要なパルス幅400nsに辿り着かないことを経験した^[2]。このDDS3では、同じようにスリット、マニフォルドを有するのであるが、セルの3D加工の後、エッジに丸みを持たせることなく超精密加工で形成されるシャープエッジを維持したまま製作され、競る洗浄時にエッチングを施さないでエッジの鈍化が行われなかった。このため、図3に示すような局所的磁場増大が、微小領域ではあるが非常に大きい増大を生み、パル

¹ E-mail: toshiyasu.higo@kek.jp

ス内の局所温度上昇は数百度に至っていたかもしれない。これが放電の種を作っていた可能性があるため、今回のHDDSセルでは、図3に赤く示す本質的に磁場増大の避けられない場所に注意し、この場所での更なる増大をなくすことに努力した。

これらの場所は、2カ所とも旋盤加工面とミリング加工面の合流する場所であり、工作上セッティング合わせの精度が要求される所である。

これらの合流する稜線の角度で制限することにした。導波管からカプラーに入る部分のアイリス部での磁場増大の評価では、エッチング処理による稜線の丸みが5ミクロン程度を見込めることを考慮すると角度5度で磁場が約50%増しにおさまることが分かっている^[3]。そこで、(a)部はそれを基準に、(b)部はエリアが小さいことと加工上ツール端をテーパに形成して達成することに関連して若干大きい値とし、それぞれ表1のように決めた。これらの値は高電界試験結果によりフィードバックすべきものである。(c)は通常旋盤加工の継ぎ目であり十分よい精度で加工できるはずであり目安としてこの値を設定した。

表1 継ぎ目角度仕様と実機セル測定値

| 場所 | 仕様 | 測定角度 |
|--------------------|-------|------|
| (a) “2b—r2” * | < 5° | 3—4° |
| (b) “r0.5—flat” | < 12° | 7—9° |
| (c) “ellipse—flat” | < 1° | < 1° |

3.2 ウェーク抑制のための周波数制御に必要な寸法精度

加速モードの平均値はビームとの位相スリップに関連して1MHzより十分よい精度で製作する必要がある。現在試作中の加速管は高電界特性を見極めるために迅速な製作を要求されているため、現状ではチューニング機構を付加してあり加速モード周波数F0は±20MHz程度のチューニングが可能である。従って、加速モードのみのためにはせいぜい±10MHz程度をめざしておけばよい。しかし、マルチバンチウェーク場抑制には最低周波数のTM11モード周波数F1の制御が必要で、許容されるばらつきはf₁で5MHz程度である^[4]。これは上記の加速モード周波数制御では実現不可能である。そこで、セル加工段階での加速モード周波数ばらつきを3MHz以内とし、加速モードのチューニングをとった際にF1の誤差がその2倍程度におさまるので f₁の条件が満足されるように考える。

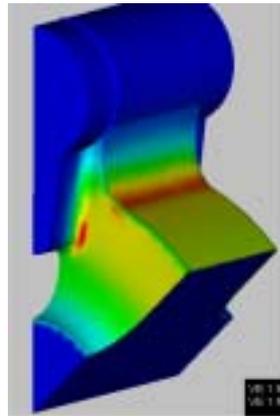


図3 磁場分布

このためには、表2に示す周波数感度^[5]を考慮し、加工誤差が表3の公差内に入れば、最悪でもF₀、F₁ともに4MHzにおさまることができるようにする。ここで、a、bは同時加工を想定できるので(a-b)誤差は十分小さくできると考えている。

表2 周波数感度

| 感度 (MHz/μm) | F0_5π/6 | F1_π |
|-------------|---------|------|
| F/ a | 0.4 | -0.3 |
| F/ b | -1.2 | -1.2 |
| F/ W3 | -0.2 | -0.2 |

表3 寸法公差

| 寸法公差 | 将来仕様μm | 今回公差μm |
|--------|--------|--------|
| δa | 1 | 10 |
| δb | 1 | 10 |
| δ(a-b) | <<1 | - |
| δW3 | 20 | 40 |

4. 加工の実際と結果

SLACとの共同研究において、60cm管と75cm管のセルを製作したが、そこでは3.1節の稜線に関する公差は達成するが、3.2節の寸法公差は気にせず高電界試験に必要な加速管を迅速に提供することにした。ただし、3.2節に関する3D加工に関する基礎データをできるだけ収集することにした。本章ではこの経験を報告する。

4.1 加工

3.1節仕様のセル製作に関する現状の加工工程は、無酸素銅の切断 粗加工 アニール 旋盤中仕上げ ミリング加工仕上げ 仕上げ旋盤加工のフローをとっている。特に稜線の角度公差の実現に関しては、(a)部はミリングツールを接点より手前100μmでセルの半径より若干小さい半径で逃げる加工パスをとることにより有限の角度ではあるが、仕様角度5度は十分達成できるようになった^[7]。加工セルを2分割し、ダイヤモンドスタイラスにて触診式の形状測定をした例を図4に示したが、この例は初期のセルでここに記述したツールパスをとらなかった場合の悪い例で、角度の確認がよくできることを示した。実機120セル以上の加工では10セル程度のサンプリングで5度を超えるものがないことを確認している。

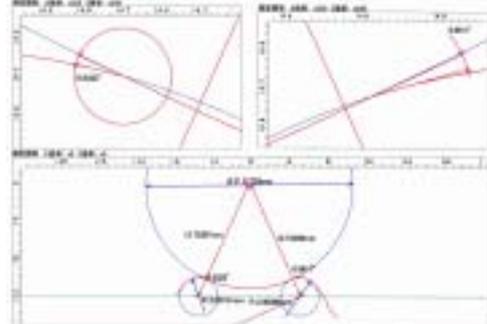


図4 (a)部の断面形状測定例

(b)部の角度はすべてのセルを測定し問題ないことを確認したが、典型例を図5に示した。ツール端に8度のテーパを設け、この部分と平面部分が交差するように位置調整を行うことにより実現できる。

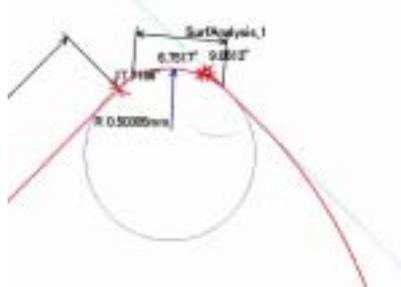


図5 (b)部継ぎ目

4.2 3D寸法結果

3.2節の方法をとる場合に周波数の制御公差が厳しくなることを想定し、その折りに問題になりそうな3D加工部分の精度に関して今回のセル製作における測定結果を述べる。2D部分に関しては将来的には超精密加工を予想しており、精度の実現には問題ないと考えている。図6に、75CM管の67セル制作時のW3寸法(図2における円形マニホールドとセル間のR2の壁間距離)結果を示した。この寸法は、周波数感度が高く、今回は $\pm 40 \mu\text{m}$ を許しているが、将来的には $\pm 20 \mu\text{m}$ を想定するものである。図より分かるように、現状の加工でもおいて既に仕様を満たしており、大きな誤差をもつ少数セルの管理することで現状の延長線上で将来的な要求も十分対応可能であると判断できた。他の3D形状もほぼこのレベルに達していることを確認している。

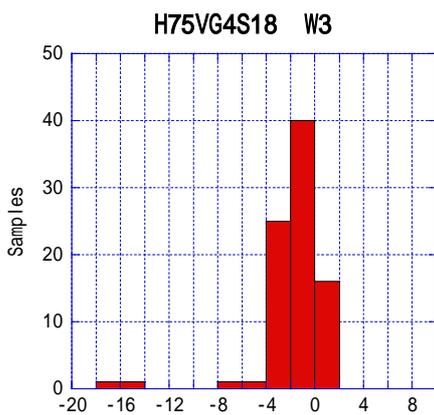


図6 W3寸法の誤差分布

4.3 周波数制御結果

今回製作したセルの個々の周波数情報を得るために、セルを伏せて平面上に置き、平面との間にできる空洞の周波数を測定した結果を図7に示した。この共振モードは特にセルの径に大きく依存するが、

3D形状にもよる。図6に見るように3Dのばらつきが小さいこと、及びaやbの寸法制御も $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 程度におさまっていることが推定される。従って、3.2節の周波数精度を維持するための寸法管理は十分可能であることが分かった。

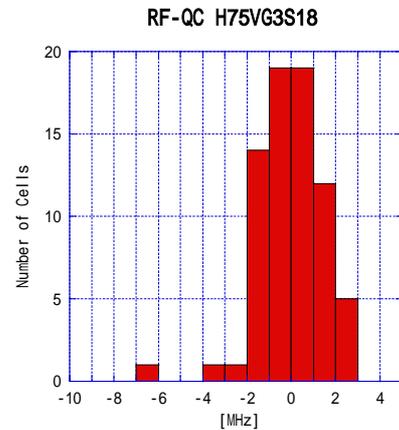


図7 周波数測定 ばらつきについて

5 . 高電界試験現状

SLACにおいて60cm加速管の中央部に今回報告したものと同様の加工セルを6セル挿入した加速管、H60VG3N-6C、の高電界試験を行った。リニアコライダー仕様の加速フィールド(400ns, 65MV/m)での運転はほぼ可能であり、特に3D形状による特性の劣化は観測されていない^[6]ので、本報告での加工方法が通用するものと考えている。

6 . 議論

今回の制作セル経験をもとに、今後ウェーク場の抑制を取り入れた加速管のセル制作を行い、3.2節の周波数制御の方式を確認する必要がある。

参考文献

- [1] GLC Project Report (Road Map), <http://lcdev.kek.jp/ProjReport/>
- [2] C. Adolphsen, NLC Machine Advisory Committee, 2002, <http://www-project.slac.stanford.edu/lc/local/MAC/MAY2002/MAC2002.htm>
- [3] T. Higo, NLC Collaboration meeting, SLAC, 2002.
- [4] R. Jones, ISG-X, SLAC, 2003, http://www-project.slac.stanford.edu/lc/ilc/ISG_Meetings/ISG10/nlcisg10.htm
- [5] Y. Morozumi, ibid.
- [6] S. Doebert, ibid.
- [7] T. Higo et al., "First HDDS cell fabrication for replacing middle part of H60VG3N", GLCX-NOTE 005, Jan. 2003 and URL: <http://lcdev.kek.jp/TechNotes/>