

PHOTO CATHODE RFGUN Cavity の製作

○高富俊和

高エネルギー加速器研究機構 機械工学センター

1 はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)機械工学センターでは、Xバンド加速管の製作に始まりCバンド加速管、高周波電子銃、ビームポジションモニター等に超精密加工を取り入れた技術開発および製作をおこなっている。

KEKの試験加速器施設(ATF)で開発が進められているフォトカソードを用いた高周波電子銃(RFGUN)は、短パルス、低エミッタンスが期待される電子源としてリニアコライダー実験など高品質な電子ビームを必要とする実験応用においても期待されている。このRFGUNの製作にあたっては表面の加工精度を向上させ暗電流を抑えるため、単結晶ダイヤモンド工具を用いた超精密加工が採用された^{[1][2][4]}。

超精密加工で高精度な加工をおこなうためには、変形を伴わない主軸への固定方法や回転精度の向上のため回転バランスの振れを抑えることが重要となるが、RFGUNでは電気的な設計の制約により非回転対象で重量があるなど、高精度な加工をおこなうためには困難な形状を強いられた。試行錯誤の末、BNL型Sバンド1.6セルタイプについては加工方法を確立することができた。

本報では、これらを高精度に加工するために採用した加工方法と加工手順および、空洞共振周波数調整のための差動ネジチューニング機構の開発について報告する。

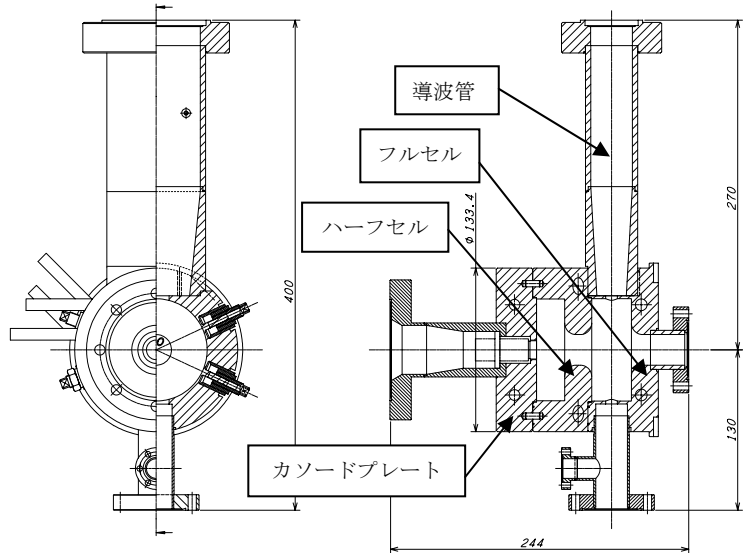


図1. フォトカソードRFGUN全体図

2 RFGUNの概要

RFGUN本体の構成を図1に示す。本体はカソードプレート、ハーフセル、フルセル、導波管により構成される。また、 10^{-7} Pa以下の真空を必要とするため全体を金ロウ付けにより接合する。カソードプレートはロードロックシステムにより真空中でフォトカソードが挿入できる構造となっている。導波管の対面には真空引口があり、それぞれの空洞

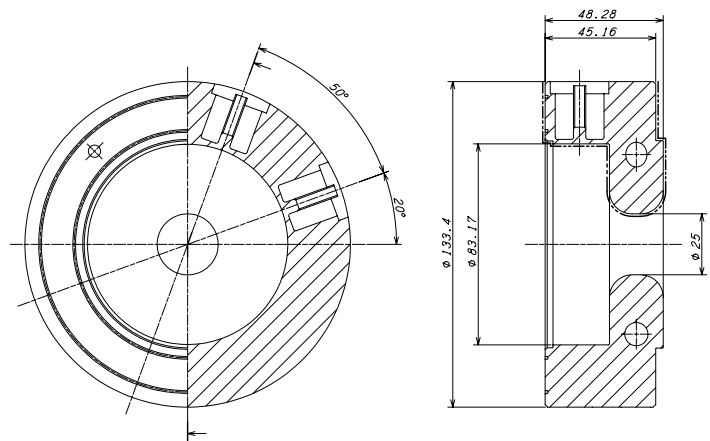


図3. ハーフセル形状

に各4個の周波数調整機構がもうけられている。全長は244mmで高さ方向400mmである。

図2および図3にハーフセル、フルセルの形状を示す。材料には無酸素銅（クラス1 HIP処理材：日立電線）を使用し、ハーフセルは外径が133.4mmで厚さが48.28mm、重量は約4kgである。フルセルは外径が133.4mmで厚さ57.8mm、重量は約5kgである。内径部（空洞部）および端面（接合部）に超精密加工が必要で、輪郭精度および寸法精度は $\pm 0.002\text{mm}$ 以下、面粗度を $Ra0.1\text{mm}$ 以下にする必要がある。また、加工後に周波数を測定し空洞部を追込み加工することで周波数を微調整した。

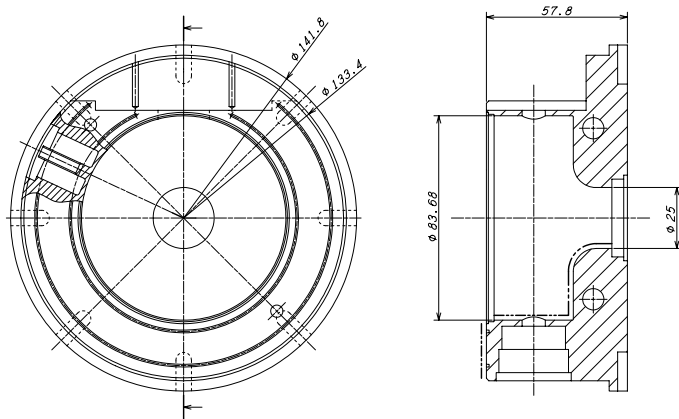


図5. フルセル形状

3 加工要旨

機械工学センターでは、Xバンド加速管ディスクの製作のため超精密加工技術の構築をおこなってきた。Xバンドディスクの加工においては寸法精度で ± 0.5 ミクロン以下、平面度0.5ミクロン以下の高精度な加工が可能となった。しかし、本品は重量的および回転バランス不良等の今までにない誤差要因のため高精度な加工が困難であった。そこで加工方法、加工条件の再検討し製作方法の確立をおこなった。以下に加工要旨について示す

3.1 一次加工（仕上げ前加工）

超精密加工を高精度におこなうためには一次加工（仕上げ前加工）での加工精度や加工歪の軽減が重要となる。主要部の寸法精度は $\pm 0.04\text{mm}$ 以下で極力加工歪が入らない加工方法とした。超精密加工部の仕上げ代として0.1mm残しとした。ただし空洞部内径は調整加工を必要とするため0.5mm残しとした。

3.2 熱処理

一次加工での加工歪除去とSUS部品のろう付けのため、水素炉により一次ろう付けを施した。

3.3 超精密加工

超精密加工機は東芝機械株式会社製のUPL-100のプロトタイプを使用した。構造としては、スピンドルに静圧空気軸受け（エアースピンドル）を用いビルトインモーターにより回転を与えている。エアースピンドルは高精度な回転が得られるが剛性が劣るためビビリが発生しやすい。テーブルの案内には、ニードルローラーを用いたダブルV溝スライドテーブルを使用している。真直度は $0.15\ \mu\text{m}/150\text{mm}$ でニードルローラーの転がりによる変動は $0.02\ \mu\text{m}$ 以下である。



図7. ハーフセル加工風景

加工液には加工部の冷却と切りくずの除去のためケロシンをミスト状にして吹きつけた。ゴミ影響や外部からの熱の流入を抑えるため加工機はクリーンルーム(クラス 1000)のブース内に設置した。温度管理は $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ でおこなっている。制御は FUNAC(ファナック(株)製)15T によりクローズド制御を行い、最小単位は $0.01\ \mu\text{m}$ である。

ワークの固定は面盤に専用の押さえジグで固定する方法を採用した。面盤の接合面はダイヤモンド工具で加工し、寸法基準とするためダイヤモンドと親和性の良いアルミニウムを使用した。工具は先端半径 0.2mm の単結晶ダイヤモンドを使用した。

ハーフセルの加工では両面からの加工が必要となる。また、周波数計測による調整加工のため、機上への繰り返し取付け精度を $2\ \mu\text{m}$ 以下にできる取付けジグを設計した。

フルセルは、導波管取付部に大きく切り欠きを持つため極端に回転バランスが悪くなっている。そのため面盤にバランス重りを取付け、取付け毎に芯振れ量が $0.1\ \mu\text{m}$ 以下となるようにバランス調整をおこなった。

RFGUN の加工で最も苦勞したのがビブリの抑制である。シャンクを自作し工具の剛性を上げ、また加工条件の最適値を選定することで改善をおこなった。回転数は $400\sim 800\text{mm}^{-1}$ 、テーブル送り速度は $2\sim 20\text{mm}/\text{min}$ (最終 $2\text{mm}/\text{min}$)、切り込み量 $2\sim 20\ \mu\text{m}$ (最終 $2\ \mu\text{m}$) で加工状態を見ながら調整した。

3.4 ろう付けによる接合

超精密加工後に本体部(カソードプレート、ハーフセル、フルセル)を水素炉で金ろう付けにより接合する。接合面にロウ溝を切りワイヤーろうを使用した。組立精度を向上させるため接合面も超精密加工をおこない真空漏れを防ぐため全周にロウ溝が切れるように設計した。本体接合後に導波管をロウ付けしする。最後に周波数を確認し導波管チューニングピンをロウ付けする。ロウ付けは超精密加工前を含め4回とし、全て KEK の水素炉を使用した。

3.5 空洞共振周波数調整機構の改善

空洞部には共振周波数の調整のため周波数調整機構が必要となる。従来のものは空洞内壁に穴をあけシリンダーを上下させるタイプと、ヘリコフレックスの締め付け量で調整するなど、非常に複雑で空洞の Q 値や製作コスト面で不利であった。そこで差動ネジ機構により空洞内壁を変形させることでチューニングをおこなう周波数調整機構を開発した。図 5 に差動ネジチューニング機構を示す。調整ネジの内外径に切られたネジのピッチ差により引きネジを上下させ、空洞内壁を押し引きすることで空洞のチューニングをおこなう。これにより空洞内壁に穴をあける必要がないため Q 値を向上させ、小型で単純な構造のため少スペースに取り付け可能でコストも軽減できる。

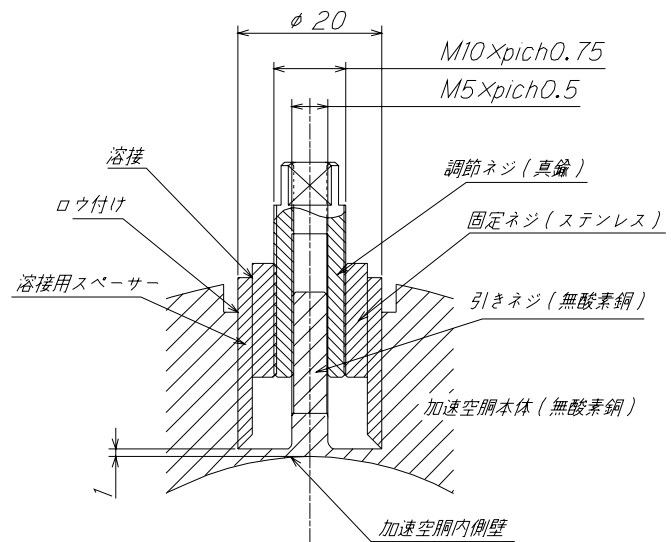


図 9. 差動ネジチューニング機構

4 加工結果、まとめ

KEK では平成 12 年より ATF および各大学、研究所用として計 10 台の RFGUN を製作してきた。当初は加工機への取付け方法や加工時に発生するビビリに悩まされたが、試行錯誤の末 BNL 型 S バンド 1.6 セルタイプについては製作方法を確立することができた。また、暗電流についても超精密加工をおこなうことで従来の同型の RFGUN と比較して約 1/10 まで減らすことができた^[4]。これは運転には問題ないレベルであり、現在 ATF にて通常のビーム実験に使用されている。

今後はさらに高いエネルギーまで加速が可能な 3.5 セルタイプの開発を進める。

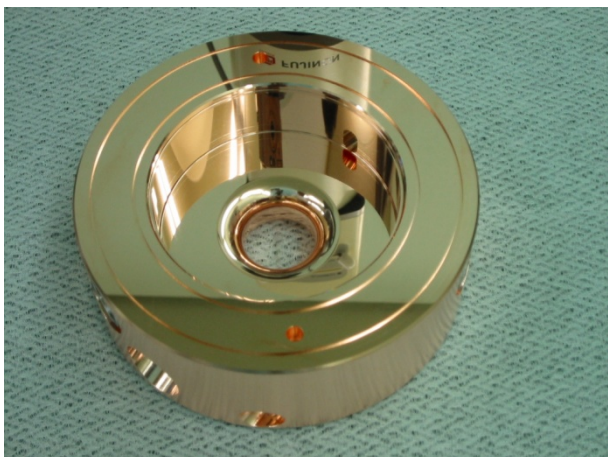


図 11. 超精密加工後のハーフセル



図 13. フォトカソード RFGUN 完成

参考文献

- [1] 照沼信浩、他、“フォトカソード EF 電子銃カソードロードロックシステム”、第 27 回リニアック技術研究会、平成 14 年 8 月
- [2] 長谷川豪志、他、“ATF におけるマルチバンチ RFGun を用いた実験” 第 27 回リニアック技術研究会、平成 14 年 8 月
- [3] 柏木茂、他、“早稲田大学コンパクト加速器システムの現状” 第 27 回リニアック技術研究会、平成 14 年 8 月
- [4] 照沼信浩、他、“ATF における Cs-Te フォトカソードによる電子ビーム生成”、第 28 回リニアック技術研究会、平成 15 年 7 月
- [5] 高富俊和、“PHOTO CATHODE RFGUN Cavity の超精密加工”、第 8 回高エネ研メカ・ワークショップ、平成 19 年 4 月
- [6] 鈴木達也、他、“早稲田大学フォトカソード RF 電子銃の現状とその利用研究”、第 6 回高周波電子銃研究会、平成 20 年 10 月