

## DEVELOPMENT OF L-BAND RF GUN (III)

Shigeru Kashiwagi<sup>B)</sup>, Ryukou Kato<sup>A)</sup>, Naoya Sugimoto<sup>A)</sup>, Goro Isoyama<sup>#, A)</sup>, Harue Sugiyama<sup>C)</sup>, Hitoshi Hayano<sup>C)</sup>,  
Junji Urakawa<sup>C)</sup>, Tashikazu Takatomi<sup>C)</sup>, Masao Kuriki<sup>D)</sup>,

<sup>A)</sup> Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University  
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

<sup>B)</sup> Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University  
1-2-1 Mikamine, Taihaku-ku, Sendai, Miyagi, 982-0826

<sup>C)</sup> High Energy Accelerator Research Organization  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>D)</sup> Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University  
1-3-2 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8511

### Abstract

We are developing an L-band photocathode RF gun in collaboration with KEK and Hiroshima University. The RF gun will be used not only at Osaka University but also at STF of KEK, so that it can be stably operated at the input RF power of 5 MW with 1 ms duration and a 5 Hz repetition rate, resulting in the average input power of 25 kW. The water-cooling system of the 1.5 cell cavity is designed, which can take the heat with the temperature rise of the cavity body by 5°C at the flow rate of cooling water of 358~723 liter/min. The several parts of the RF cavity are assembled with brazing and the most crucial process is brazing of three main components of the RF cavity into one. The brazing has to be tight and perfect not to allow vacuum leak, while the brazing filler metal must not go out on to the inner surface of the cavity to avoid discharge triggered by the scabrous filler metal on the cavity wall. Test experiments are conducted and a guideline is concluded for such brazing.

## LバンドフォトカソードRF電子銃の開発 (III)

### 1. はじめに

阪大産研Lバンド電子ライナックにおける自由電子レーザー(FEL)やパルスラジオリシス実験などの電子ビーム利用研究の高度化を図るために、大強度かつ高品質(大電荷量・低エミッタンス)電子ビーム生成が可能な周波数が1.3 GHzのLバンドRF電子銃の開発を、平成20年度よりKEK、広大先端研と共同で開始した。本研究開発では、阪大産研のLバンド電子ライナックへ導入するLバンドRF電子銃空洞の設計および製作と並行して、KEKの超伝導加速器試験施設(KEK-STF)でのビーム加速実験に用いるDESYタイプLバンドRF電子銃の開発も行っている。

平成20年には、当時FNALで制作中であった1.5セルのDESY型LバンドRF電子銃の共振周波数と電場比を調整するための準備として、SUPERFISHによる計算機シミュレーション、同軸型入力結合器用導波管-同軸変換器の検討、エミッタンス補正用のコイルの基本設計を行うために計算機シミュレーションによるビーム特性を評価した<sup>[1]</sup>。平成21年度には、新たに製作するRF電子銃空洞の概念設計、特にKEK-STFでも使用できるように25 kWの平均RFパワー入力に耐えられる冷却システムの検討を進めた。FNALで制作中のRF電子銃用空洞を一時的にKEKに持ち込み、共振周波数とセル間の電場強度比を調整した後、冷却水配管を組み込んで完成する

ためにFNALに返送した。このRF電子銃をKEK-STFで使用するためにエミッタンス補正用のソレノイドコイルとビームラインの磁石などの設計と製作を進めた。STFビームラインのビーム特性を最適化するために計算機シミュレーションを行った<sup>[2]</sup>。KEK-STFで使用するDESY型RF電子銃のハイパワー試験の結果は別途報告されるので、本論文ではLバンドRF電子銃の空洞の設計と製作状況を報告する。

### 2. 冷却系の設計

#### 2.1 半定量的検討

平均入力パワー25 kWの大部分はRF空洞での熱損失となる。その際問題となるのは、RF空洞の温度上昇による共振周波数のずれである。共振周波数がQ値で決まるRF空洞のバンド幅を超えると継続的なRFパワー入力ができない。RF空洞の温度変化による共振周波数のずれ $\Delta f$ は、銅の熱膨張による計算値で-21.5 kHz/°CとDESYでの測定値-22 kHz/°Cによく一致する。1.3 GHzの1.5セルRF空洞の無負荷Q値は23,000程度であり、結合度 $\beta$ を1とすると負荷Q値は、 $Q_L = 11,500$ である。これよりRF空洞の許容共振周波数ずれ $\Delta F_Q$ は、 $\Delta F_Q = 1.3 \text{ GHz}/11,500 = 113 \text{ kHz}$ となる。従ってRF空洞の許容最大温度上昇は $\Delta T_{\text{cavity}} = 5.3^\circ\text{C}$ となる。銅から水への熱伝達係数

# isoyama@sanken.osaka-u.ac.jp

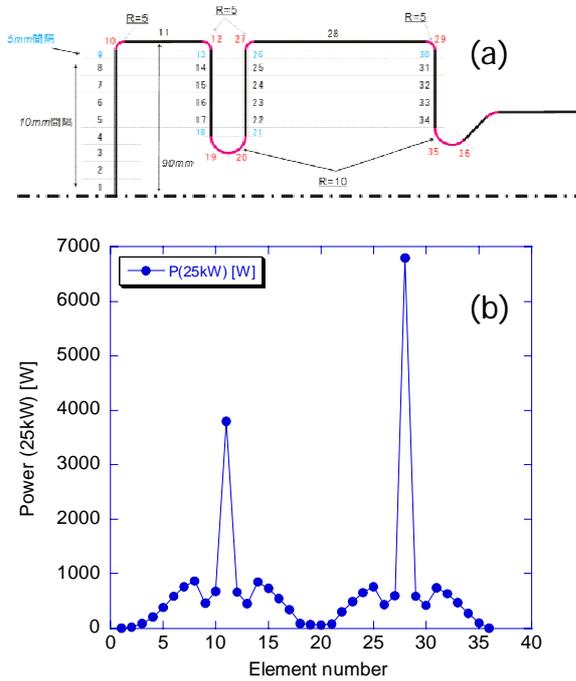


図1 RF空洞の熱発生分布。  
(a)RF空洞の領域分割、(b)パワー分布

hは冷却水路の有効直径が 10~20mmの範囲では 9.8~8.5 kW/(m<sup>2</sup>·K)程度である。従って、銅製のRF空洞から温度差 5°Cで 25 kWのパワーを冷却水で除去するには約 0.5m<sup>2</sup>の銅 - 水の接触面積が必要となる。RF空洞を一様に冷却するには、冷却水の温度上昇が空洞の温度上昇より十分に小さいことが必要である。これを温度差の 10~20 %とすると冷却水の温度上昇は 0.5~1°Cとなる。この冷却水温度上昇で 25 kWのパワーを除去するに必要な冷却水量は

358~723 ℓ /minとなる。冷却水による銅の浸食を防止するには冷却流速が 2 m/sを超えることはできないので、冷却水路の断面積合計は 30~60 cm<sup>2</sup>と大きな値である。

## 2.2 RF 空洞の発熱

1.5 セル RF 空洞の表面パワー損失を、SuperFishを用いて計算した。RF 空洞は軸対称構造を持つので、空洞の内面を図 1 (a) に示すように 26 領域に分けて、RF パワー入力 が 25 kW 時のそれぞれの領域での発熱量を図 1 (b) に示す。2 つのピークは領域 11 と 28 の空洞の半セルとフルセルの胴にあたる部分で、それぞれ約 4 kW と 7 kW の発熱量である。4 か所の端板に相当する部分の発熱量とその分布はほぼ同じであるので、1 端板での発熱量は約 4.7 kW である。

## 2.3 冷却水システムと温度分布

冷却システムの半定量的検討と発熱分布の解析に基づき各部分で発生する熱量をその部分で取り去るように設計した冷却水路を図 2 に示す。銅内の熱伝導を確保するために、水路の幅は 10mm で間隔を 10 mm にする一方、冷却水路の表面積を大きくするために冷却水路の深さを銅部分で 20 mm、端板部分で 25 mm とした。端板部分の冷却水路は銅部分のそれに比べてビーム軸に対する半径が小さいので周長が短い。端板部分の水路が深いのは、この効果を打消して冷却水路の表面積を確保するためである。問題なのは、半セルとフルセルを区切るアイリス部の端板である。アイリス部は、両表面で発熱するにもかかわらず冷却水路を図 2 に示すように 1 水路しか設けることができないので、冷却のための表面積が不足する。水路の表面積を増大するために内面に

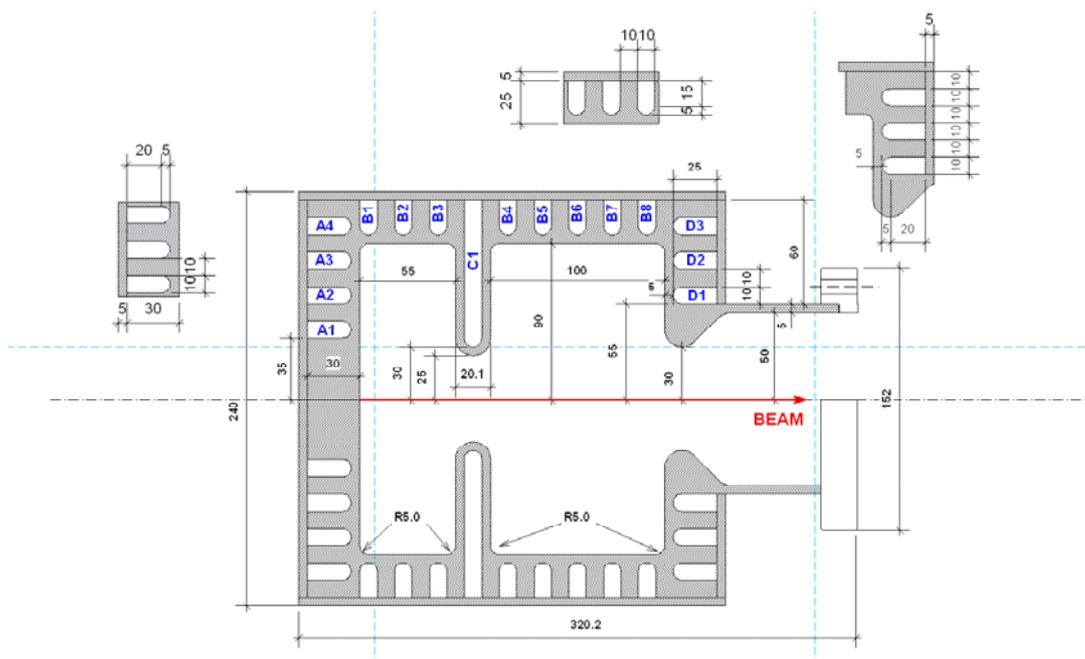


図2 RF 空洞の冷却水路

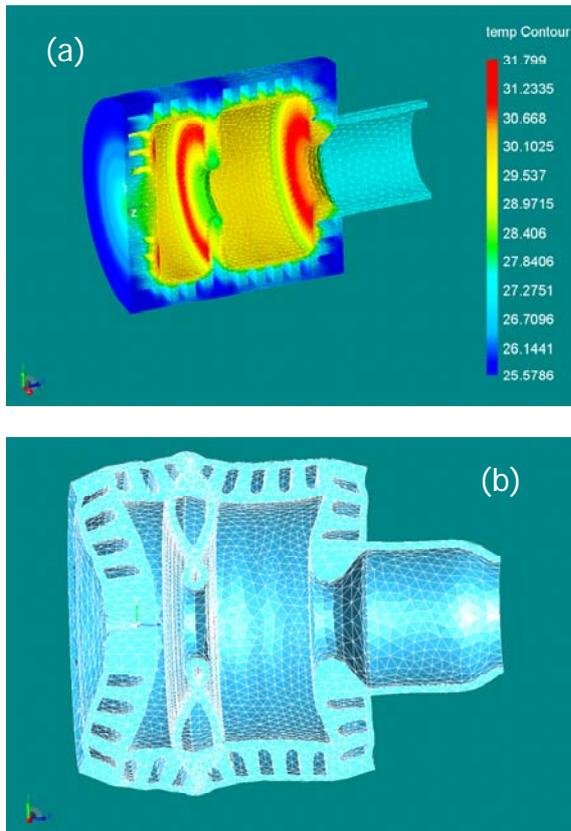


図3 RF 空洞の熱解析

(a) 冷却水水温が 25°Cの時の温度分布。端板部の最大温度上昇は 6.8°C、胴体部は、約 4°C。(b) 熱変形図 (6,800 倍に拡大)。胴体部の熱膨張は 4 μm 程度である。

深さ 1 mm 程度の溝を 1 mm 間隔で掘り、表面積を約 2 倍に増やす。この様な冷却水系に対して 25 kW の RF 入力がある場合の温度分布と RF 空洞の熱膨張による変形を有限要素法で計算した結果を図 3 に示す。変形による共振周波数変化が大きい胴体部内面の温度上昇は約 4°Cである一方、端板部のそれは 6.8°Cに達する部分もある。アイリス部の高温部の範囲は、対向する端板部のそれよりかなり狭いが、この部分の内面を平坦にした場合、温度上昇は、10°Cに達して要求を満たすことができない。RF 空洞各部の温度変化による変形を図 3 (b) に示す。変形量は 6,800 倍に拡大表示しているので、ビーム軸方向空洞長変化は 7 μm 程度、空洞半径方向には約 4 μm の熱変形であり、共振周波数に与える影響は小さい。

### 3. RF 空洞のロウ付け試験

Lバンド RF 空洞の基本的構成要素は、RF 空洞本体と、冷却水路の蓋、冷却水出入口部分、同軸型 RF 結合器用真空フランジよりなる。RF 空洞本体と水路の蓋はクラス 1 の無酸素銅を機械加工により削

り出して製作する。冷却水出入口部とフランジは SUS 製である。本体部は、図 2 に示す冷却水路 B2 と B3 の中間、B4 と B5 の中間で 3 つに分けて加工・製作する。冷却水路の蓋に関しては、図 2 に断面を示すパイプと円盤をロウ付けにより本体に接合する。次に共振周波数調整のために空洞内面をわずかに切削した後、RF 空洞本体部 3 部分をロウ付けする。更に、冷却水出入口部分と真空フランジをロウ付けして RF 空洞は完成する。この 3 段階のロウ付けの中で、RF 本体 3 部分のロウ付けが最も重要であるので、接合部の模型を作りロウ付け試験をした。

試作品の図面を図 4 に示す。実機の直径は 230 mm であるが試作品は 70 mm とした。RF 空洞の直径に当たる穴は 180 mm から 20 mm に減るが、ロウ付け部の動径方向の寸法は実機と同じである。空洞の軸を精度良く合わせるために、接合部に 4 mm の段差を持つはめ合い構造にした。RF 空洞の寸法精度を保つためと、空洞内の RF パワーに影響を与えないようにするため、内側に面して一段高い幅 5 mm の部分を面接触とした。接触面の平均面粗さは 2 μm (Ra 2) 程度である。他の面はそこで接触しないように面間の隙間を 30 μm にした。ロウ溝の位置と本数が異なる試作品 F1 から F3 を 3 個作った。ロウ材は、直径 0.8 mm の針金状のパラジウムロウを用いる。ロウ溝は 0.9 mm 角で、図 4 に示すように F1 では上側の直径 60 mm に 1 本、F2 では上側の 50 mm に 1 本、F3 では下側の直径 60 mm と 40 mm に計 2 本の溝を掘る。段差部分の角には、図 4 の拡大図に示すような三日月状の隙間を作る。内側の面にロウがしみ出ると放電など RF 空洞の動作に影響を与えることが懸念されるので、この三日月状の隙間は、上段の接触面にロウが侵入するのを防ぐためのロウ止めである。

3 種類の試作品のロウ溝に直径 0.8 mm のパラジウムロウ線をロウ溝円周全てに置き真空ロウ付けをした。ロウ付けの状態を観察するために試作品を十文字に 4 分割して断面を顕微鏡で観察した。図 5 (a) と (b) にそれぞれ F1 と F3 試作品の顕微鏡写

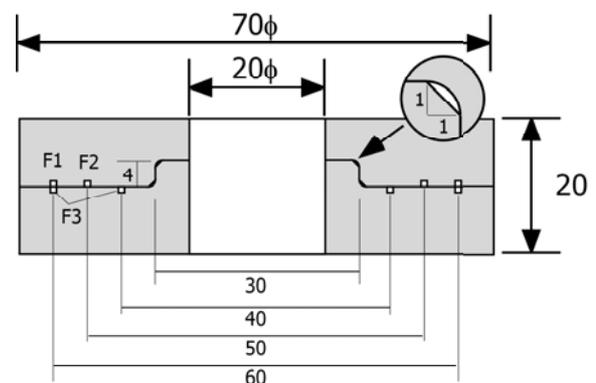


図4 試作品断面図。無酸素銅製のロウ付け試験用試作品は、ロウ溝の位置と数が異なる F1、F2、F3 の 3 個を作成した。ロウ溝の断面は 0.9 mm 角の正方形である。

真を示す。左側が試作品内側で右側が外側である。F1 の断面写真を見るとロウ溝にロウは残っておらず空である。外側下段のロウ付け面にロウは均一に分布して良く接合している。他方、上下の三日月状の空間にロウは見られないが、内側上段への立ち上り面と内側上段の接合面にもロウは均一に分布して良く接合している。この状況は、残りの3断面も同様であり、三日月状の隙間は、ロウの流れ止めとしては機能しないことが分かった。ここには示さないが F2 の試作品の状態も F1 と同様である。図5 (b) に示す F3 の断面では状況は異なる。外側下段の下側にある2本のロウ溝は空であるが、三日月状の隙間はロウで埋まっている。外側と内側、立ち上り部の接合面は全てロウで満ちている。他の3断面の内、2断面はこれと同様であるが、1面は三日月状の空間にロウは見られない。

試作品の内側上段部の面間距離をゼロ、外側下段部と立ち上がり部の面間距離を  $30\ \mu\text{m}$  として、試作品のロウ溝や三日月型の隙間を除く部分に必要なロウ材の量を見積もると  $106\ \text{mm}^3$  になるが、これに対して F1 で使用したロウ材の量は  $90\%$ 、F2 で  $79\%$ 、F3 で  $158\%$  である。F1 と F2 では、ロウ材が不足するはずであるが、断面写真を見る限り接合面を十分満たしている。F3 のロウ材は約 6 割過多であり、これが三日月型空隙の一部を埋めていると考えられる。

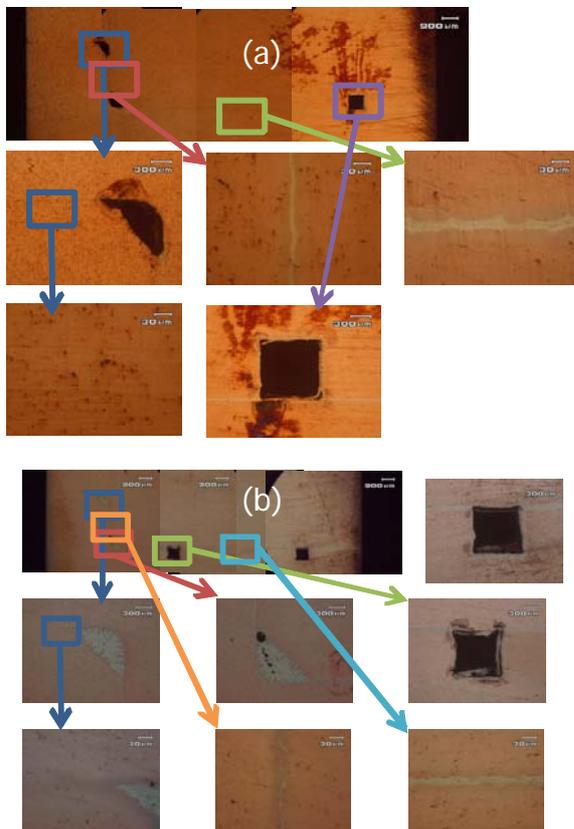


図5 ロウ付け試作品断面の顕微鏡写真  
左：内、右：面 (a)試作品 F1 断面 (b)F3 断面図。

断面写真の観察で内側を含む全ての面にロウが行渡っているのが分かったので、接合面から外側内面と外面へのしみ出し状況を、接触型の表面粗さ計で計測した。図6に試作品 F1 から F3 の接合面の計測結果を示す。上段は外側面、下段は内側面である。F1 は青線、F2 は緑線、F3 は赤線で表面の凹凸を示す。試作品は、はめ合い部の遊びにより接合部左右の高さが少し異なるので、接合部で測定曲線を切断して左右の高さを合わせた。接合面の内側と外側の角は半径  $0.2\ \text{mm}$  で面取りがあるので、それを黒丸で描き加えた。外側の面間隔は  $30\ \mu\text{m}$  程度であるので、その幅を持つ四角形を接合部に描いた。他方、下段に示す内側の接触面間は  $2\ \mu\text{m}$  であるので、ここではゼロとして面取り  $2\ \mu\text{m}$  を接触している。外側の測定では、F1 と F2 の測定結果は一致して、接合面間隔と同程度であるが、F3 のそれはより広い範囲にしみ出している。内側の計測結果では、F1 から F3 の測定結果が一致している。接合面の底が試料に共通して見られるが、これは表面粗さ計の探針の大きさによる制限と考えられる。ロウのしみ出しは、有ったとしてもこの測定限界以下であると考えられる。

ロウ付け試験と一般論より、以下のことが分かる。

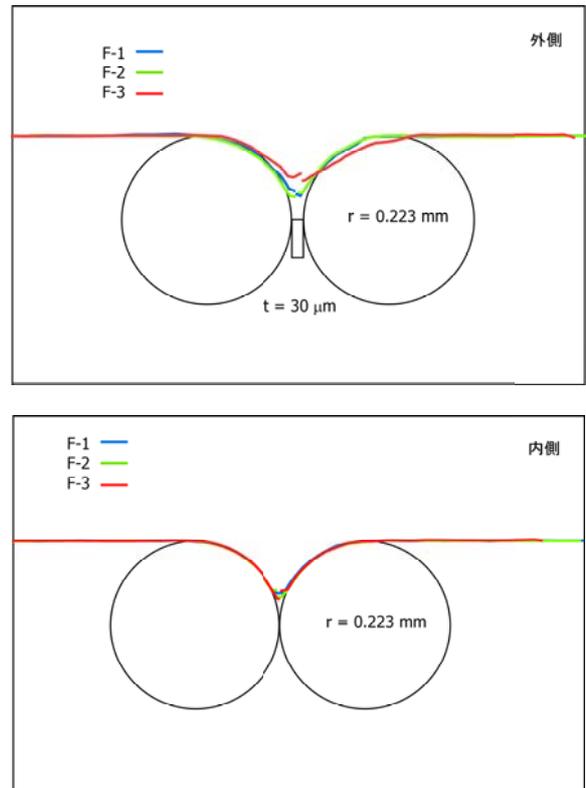


図6 表面粗さ計によるロウ付け接合面の観察  
試作品 F1 と F2、F3 に対する測定結果：上段は外側、下段は内側接合面。接合面角は半径  $0.2\ \text{mm}$  で面取りがあるので、測定結果に合うように半径  $0.223\ \text{mm}$  の円を書き加えた。外側接合面は約  $30\ \mu\text{m}$  の間隔があるのでそれと同じ厚みを持つ四角形も描いた。

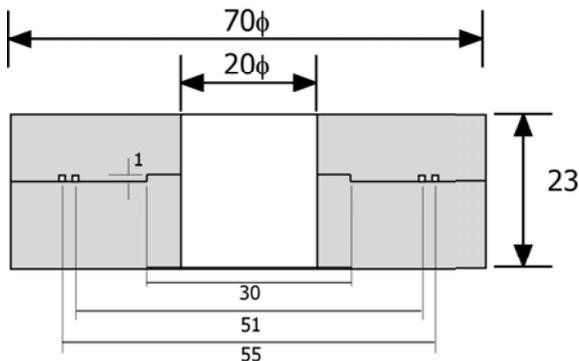


図7 新方式によるロウ付け試作品の断面図

- ロウ材は毛細管現象で接合面の隙間を埋めるので、隙間が狭いほどロウがよく流れる。
- ロウ溝にロウ材は残らない。
- 接合面外へのロウのはみ出しは、接合面間の間隔の程度である。
- ロウ材を過剰に使用すると外側へのはみ出しも増える。
- ロウ止め空隙は機能せず、ロウの流れを止めることはできない。

これらの知見より RF 空洞内部へのロウのしみ出しをできるだけ少なくするために以下のような手法で RF 空洞のロウ付けをする。

- 内側上段の接合面を、単結晶ダイヤモンドバイトを使用して鏡面加工し、機械加工精度を  $0.2 \mu\text{m}$  (Ra0.2) とする。
- 接合面の段差を  $1 \text{ mm}$  にして RF 空洞の中心軸

を決めるためのはめ合いに使用する。

- 3次元測定器を用いてロウ付け面の寸法を正確に測定して必要なロウ材の量を精度良く見積もる。
- ロウ溝は左右均等にロウが流れ出る位置に設ける。ロウ溝が 1 本では隙間を全て埋める不足するので、約  $1 \text{ mm}$  の間隔で上部に 2 本掘る。見積もりより少し増量したロウ線を適当な長さに切断して均等にロウ溝に置く。

この指針に基づいた試作品の断面図を図 7 に示す。この試作品にロウ材の量を、100 % と 120%、160 % 入れてロウ付け試験を再度行う。

## 謝辞

L バンド RF 電子銃の設計と製作はコミヤマエレクトロンが行っている。ここで示した RF 空洞の熱計算やロウ付け試験もコミヤマエレクトロンにより行われた。

## 参考文献

- [1] S.Kashiwagi, et al., "Development of L-band RF photocathode gun", Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan (August 6-8, 2008, Higashihiroshima, Japan), pp. 984
- [2] S.Kashiwagi, et al., "Development of L-band RF photocathode gun (II)", Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, (August 7-7, 2009, Tokai, Japan), pp. 885