

# KEKにおける超伝導 RF 電子銃（試作 2 号機）の開発状況

## DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING RF ELECTRON GUN (PROTOTYPE #2) IN KEK

松田 竜一<sup>#, A)</sup>, 柳澤 剛<sup>A)</sup>, 小林 幸則<sup>B)</sup>, 山口 誠哉<sup>B)</sup>, 加古 永治<sup>B)</sup>, 梅森 健成<sup>B)</sup>, 許斐 太郎<sup>B)</sup>  
Ryuichi Matsuda<sup>#, A)</sup>, Takeshi Yanagisawa<sup>A)</sup>, Yukinori Kobayashi<sup>B)</sup>, Seiya Yamaguchi<sup>B)</sup>, Eiji Kako<sup>B)</sup>,  
Kensei Umemori<sup>B)</sup>, Taro Konomi<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

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

### Abstract

Development of a superconducting RF electron gun (SRFgun) was started in KEK for the high-intensity electron gun which is required for the next generation ERL or a high power FEL system, in addition to the conventional DC electron gun. The preconditions of this SRFgun are 1.3 GHz of the resonant frequency, 100 mA of the beam current, and 2 MeV of the energy in the exit of gun. It was shown that low maximum surface electric field (42 MV/m), low emittance (1 mm mrad) and narrow energy spread (2 keV, 0.1 %) can be obtained by a simulation, and the manufacture situation was shown the last meeting. The manufactured cavity was named prototype #1 and electromagnetic evaluation and vertical test were performed. The result is separately reported by this meeting.

Here, the examining result of prototype #2 which added a high power RF coupler and the choke structure for cathode exchange is reported. It designed in consideration of the structure which attached two coaxial couplers in order to input 200 kW of RF power, the choke structure for making cathode exchange easy, and its manufacturability.

## 1. はじめに

次世代放射光施設に使われる ERL (エネルギー回収型加速器) や高出力 FEL (自由電子レーザー) システムには高輝度かつ低エネルギー広がり電子銃が不可欠である。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では、近い将来必要となる高輝度電子銃向けに、従来の直流高電圧 (DC) 電子銃に加え超伝導 RF 電子銃の開発を開始した。KEK における ERL や FEL の将来計画や実績から電子銃の仕様を、共振周波数 1.3 GHz、出口エネルギー 2 MeV、ビーム電流 100 mA に設定し、独 HZB で開発されている超伝導 RF 電子銃<sup>[1]</sup>を参考にして空洞の設計、製作を行っている。

超伝導 RF 電子銃を開発するには製造や運転調整方法を考慮しながら数多くのパラメータを最適な範囲に収めていく設計が必要である。また最初から電子ビームが出せる空洞を製作するのではなく、段階を追って開発する。試作 1 号機では最適化した空洞を製作し縦測定を行い、空洞の超伝導特性や空洞内を真空として液体ヘリウム温度に冷却した場合の構造評価を行う。カソードは量子効率の高いフォトカソードを想定している。試作 2 号機では RF 入力カプラや HOM カプラ、カソード周辺のチョーク構造、空洞共振周波数調整機構を持つ構造とし、これらの性能を評価する。試作 3 号機では試作 2 号機で明らかとなった課題や改良案を適用し、カソード交換機構やカソード励起用レーザーを備え、電子ビームが出せる実証システムとする。

昨年の加速器学会年会では開発開始に至った経緯

<sup>#</sup> ryuichi\_matsuda@mhi.co.jp

や計画、電磁場解析と荷電粒子挙動解析コードを用いた空洞寸法の独自の設計方法、低コスト化のため空洞製造用の金型を 1 つしたこと、熱構造解析結果による健全性、空洞製作状況等を紹介した。特に解析シミュレーションでは、最大表面電界が低く (42 MV/m)、低エミッタンス (1 mm mrad)、低エネルギー広がり (2 keV, 0.1 %) が得られている<sup>[2]</sup>。空洞は三菱重工で製作し、試作 1 号機として基本的な評価や強電界試験 (縦測定) を KEK で行っており、結果については本会で別途報告する<sup>[3]</sup>。

本報告では、大電力 RF カプラ及びカソード交換のためのチョーク構造を加えた試作 2 号機についての検討状況を紹介する。RF 電力 200 kW を投入するため 2 本の同軸カプラを取付けた構造、カソード交換が容易で RF 漏洩の少ないチョーク構造について、その製作性も考慮して設計している。

## 2. 超伝導 RF 電子銃用 RF カプラ

### 2.1 外部 Q 値

超伝導空洞において空洞損失 ( $P_0$ ) はビーム電力 ( $P_{beam}$ ) に比べて無視できるほど小さいので RF カプラの外部 Q 値 ( $Q_{in}$ ) は次式で与えられる<sup>[4]</sup>。

$$Q_{in} = Q_L = \frac{(E_{acc} \cdot L_{cavity})^2}{P_{beam} \left( \frac{r}{Q} \right)} \quad (1)$$

ここで  $P_{beam} = I_b \times E_{acc} \times L_{cavity}$  であり、仕様から  $I_b = 0.1$  A、 $E_{acc} \times L_{cavity} = 2$  MV より、 $P_{beam} = 200$  kW である。また軸対称電磁場解析コード SUPEFISH から試作 1 号機の空洞の  $r/Q$  は  $109.6 \Omega$  であった。

よって外部 Q 値は次のように計算される。

$$Q_{in} = Q_L = (2 \text{ MV})^2 / 200 \text{ kW} / 109.6 \Omega = 1.83 \times 10^5 \quad (2)$$

この値は超伝導加速空洞に比べて小さく、バンド幅を十分広くとれるので、超伝導加速空洞のようにオーバーカップルさせる必要はない。

KEK が開発した 1.3 GHz 用同軸型 RF 入力カプラは 100 kW の電力を空洞に入力できる。 $P_{beam} = 200 \text{ kW}$  であるため、100 kW 用 RF カプラ 2 個をビームパイプに対向配置するダブルフィードとする。したがって一方の RF カプラから見た Q 値は 2 倍の  $3.66 \times 10^5$  程度を狙う。

## 2.2 RF カプラ設置位置

同軸型 RF カプラの特性インピーダンス  $50 \Omega$  に合わせ、外部導体内径 60 mm に対し内導体外径は 26.06 mm とする。ダブルフィードとしたが解析では簡易的にシングルフィードとする。解析は CST Studio Suite 2013(CST MICROWAVE STUDIO)を用い、外部 Q 値は固有値解析ソルバーで求めた。

同軸部長さはビーム軸から 300 mm とした。試作 1 号機の形状に RF カプラを組合せた断面形状を Figure 1 に示す。この形状で 1.3 GHz 付近に共振モードがないことを確認している。解析には 4 面体メッシュを使用し、共振周波数等の特性が十分安定するメッシュ数まで増やしている。

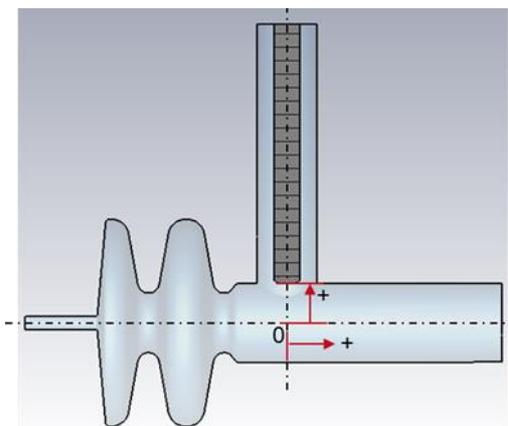


Figure 1: Cross section of initial gun cavity with RF coupler by MICROWAVE STUDIO.

RF カプラの軸はカソードから 188 mm の位置をビーム軸方向の基準位置とする。これは試作 1 号機の排気ポートの位置であった。

内導体 (アンテナ) 先端のビーム軸からの距離と基準位置からの距離をパラメタとして、RF カプラから見た外部 Q 値を求め、その結果を Figure 2 の等高線図にまとめた。横軸はビーム軸方向、縦軸は軸から離れる方向であり、等高線は Q 値が等しい。狙う Q 値  $3.66 \times 10^5$  は赤い実線で示している。等高線の間隔は対数であり  $10^{0.1}$  ごとである。

空洞の軸上を通る電子ビームに、RF カプラに起因する電界が影響しないようにするには、目安として内導体先端を軸から 20mm 以上離れたほうがよい。

しかしこの場合、RF カプラを空洞側に近付ける方向であり、ビームパイプと空洞を繋ぐレデューサと干渉し製作困難となる。RF カプラが空洞から遠いと大電流加速ができない。等高線は同条件で加速可能なビーム電流でもある。

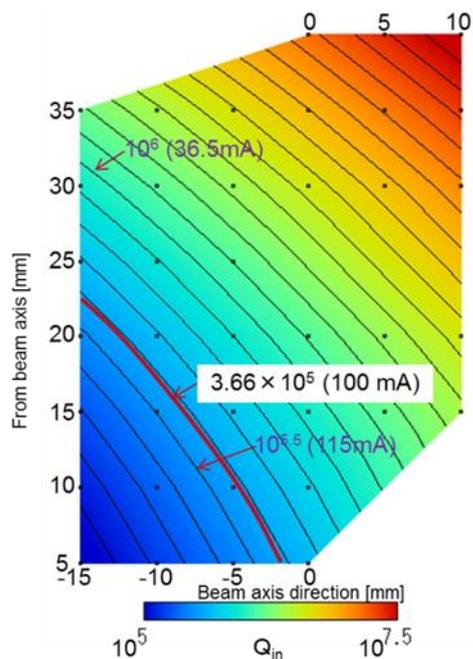


Figure 2: Contour of  $Q_{in}$  of antenna tip position.

RF カプラの製作性を考慮して基準位置から空洞側に 5 mm の位置に固定し、ビームパイプ径とアンテナ先端のビーム軸からの距離をパラメタとして同様に Q 値を求めた。結果を Figure 3 に示す。

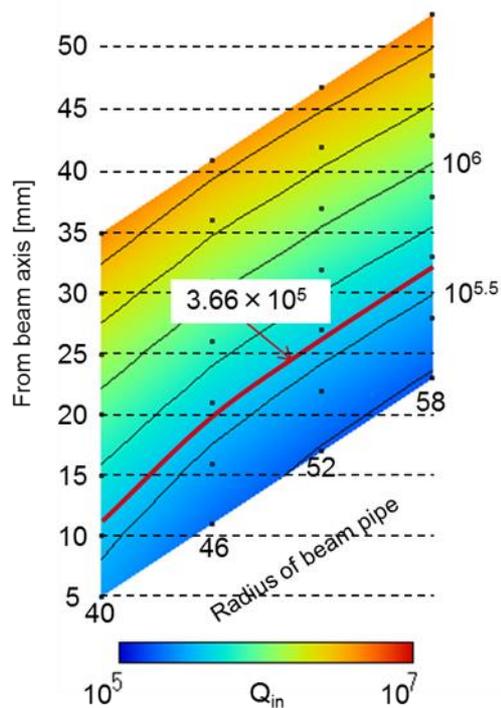


Figure 3: Contour of  $Q_{in}$  of normal antenna tip position and beam pipe radius.

アンテナ先端をビーム軸から 20 mm 以上離すには 46 mm 以上のビームパイプ半径が必要であることが分かる。なお等高線の間隔は対数であり Figure 3、Figure 4 とも  $10^{0.25}$  ごとである。

### 2.3 アンテナ先端の拡大

アンテナ先端に丸みを帯びた円錐台を取付けたところ Q 値が下がることが分かった。同様に結果を Figure 4 に示す。図中の赤丸は今回採用した点を示しており、ビームパイプ半径が 52 mm、アンテナ先端位置がビーム軸から 30 mm であり、所定の Q 値がある。

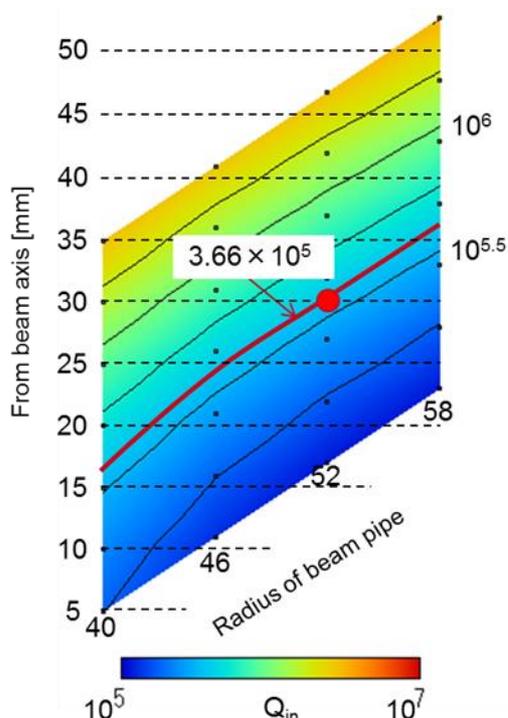


Figure 4: Contour of  $Q_{in}$  of large antenna tip position and beam pipe radius.

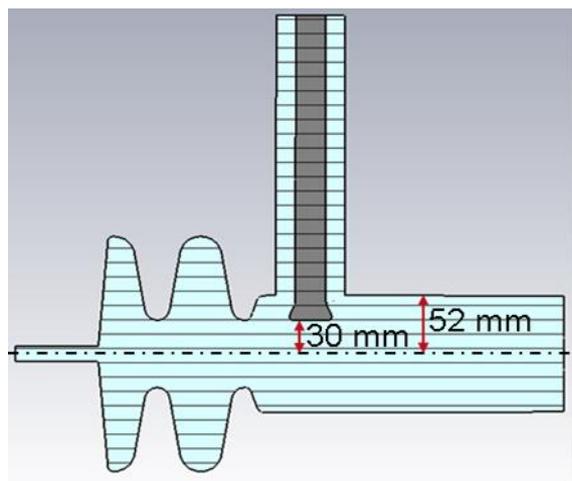


Figure 5: Cross section of modified gun cavity with RF coupler by MICROWAVE STUDIO.

Figure 5 はここまでの検討結果を反映した空洞断面図である。実際はダブルフィードであるので下側にも RF カプラが取りつく。Figure 1 と比べるとビームパイプが大きくなっているが、共振周波数はほとんど変化していない。ビーム特性への影響もないことを確認している。

## 3. カソード周辺のチョーク構造

### 3.1 必要性

カソードには量子効率の高いマルチアルカリのフォトカソードを使用する予定であるが、劣化しやすく交換が必要となる。カソード部分のみを容易に交換できる構造には確実な熱的、電気的な接触は望めない。電気的な接触が不完全であると RF が漏洩し、RF 特性が悪化する。したがって交換用カソード部品と空洞の接触部の電気的な影響が無視できるようなチョーク構造が必要となる。

### 3.2 円盤型チョーク空洞モデル

カソード付近に設置しやすい単純なチョーク構造として Figure 6 に示す円盤モデルを検討することとした。中心軸は同軸構造であり、内導体がカソードロッドを想定している。RF 同軸管の一方からもう一方に通過するとして、その S パラメタ ( $S_{21}$ ) を MICROWAVE STUDIO で解析した。

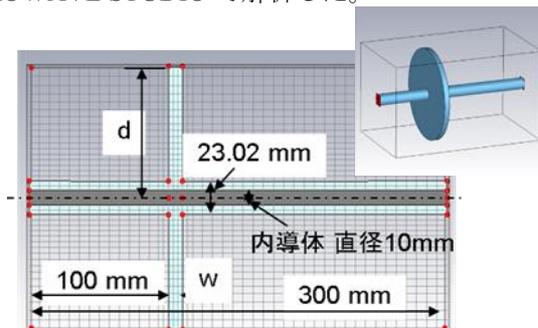


Figure 6: Cross section of disk type choke cavity and coaxial RF wave guide by MICROWAVE STUDIO.

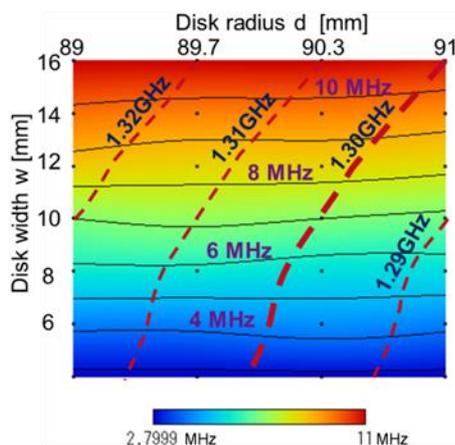


Figure 7: Contour of band width and resonant frequency of disk type choke cavity shape parameters.

Figure 7は円盤径  $d$  と円盤幅  $w$  に対して-30 dB のバンド幅の等高線図上に、共振周波数が等しいラインを重ねたものである。バンド幅は円盤幅  $w$  が大きいほど広がるが、円盤径  $d$  には依存していない。円盤径の共振周波数に対する感度と熱膨張を考慮した径方向の工作精度、内部洗浄の容易さから必要なバンド幅に相当する円盤幅  $w$  を決め、共振周波数が1.3 GHz となる円盤径  $d$  を決めるとよいことが判る。

### 3.3 チョーク空洞付 RF 電子銃

円盤型チョーク空洞の設計方法が判ったので、RF 電子銃空洞と組合せて、各パラメタのビーム特性への影響を確認した。Figure 8 は SUPERFISH による空洞断面の上半分である。図中の黄色くハッチングした項目がパラメタであり、範囲は次の通りである。図で①チョーク空洞右面からカソードまで(position 5~15 mm)、②チョーク空洞左面からカソードロッドのフランジまで(rod length 0~50 mm)、③カソードロッド径(rod size 10~30mm)、④カソードロッドと隙間(gap 2~6 mm)。

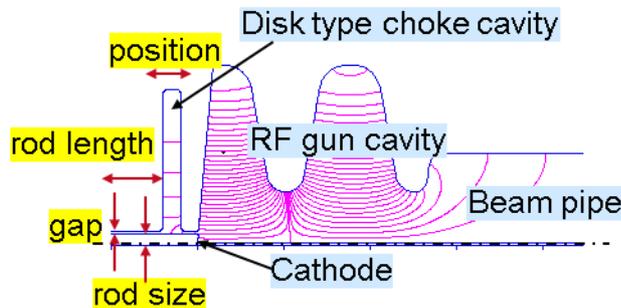


Figure 8: Cross section of RF gun cavity with choke cavity by SUPERFISH.

SUPERFISH と荷電粒子解析コード GPT を組合せて共振周波数 1.3 GHz、出口エネルギーを 2 MeV、ビーム電流を 100 mA の設定におけるビーム特性と最大表面電界強度を求めた。各パラメタとその範囲のすべての条件でビーム特性はチョーク空洞が無い場合と大差なく、目標値である低エミッタンス (1 mm mrad 以下)、低エネルギー拡がり (0.1 % (2 keV) 以下) を満たした。最大表面電界はカソードロッド径や隙間が大きい時にカソード付近で 47 MV/m となったが、これも空洞内で放電が起きない最大表面電界 (50 MV/m 以下) を満たしている。

この解析により、カソード周辺の設計自由度が大きいことが判った。

## 4. まとめ、今後の展開について

KEK では次世代 ERL や FEL システムに必要な高輝度電子銃候補の 1 つとして超伝導 RF 電子銃の開発している。昨年の加速器学会では共振周波数 1.3 GHz、出口エネルギーを 2 MeV、ビーム電流を 100 mA に設定し、最大表面電界 (42 MV/m)、低エミッタンス (1 mm mrad)、低エネルギー拡がり

(0.1 % (2 keV)) を満たす空洞形状を設計し、試作 1 号機として製作を開始したことを報告した。

試作 2 号機では大電力 RF カプラ、カソード交換機構のある超伝導 RF 電子銃を製作し、性能評価することを目指しており、今回は RF カプラの設計、カソード交換構造に必要なチョーク空洞の設計を行い、今後の製作図面作成に必要な知見を得ることができた。カソード交換手段、効率的な冷却、組立、評価が可能な構造の機械設計を進めていく。

## 参考文献

- [1] J. Knobloch, "SRF Photoinjector development for BERLinPro", TTC2012.
- [2] Ryuichi Matsuda et al., 「KEK における超伝導 RF 電子銃の開発状況」, 第 11 回日本加速器学会年会 MOOL13.
- [3] Taro Konomi et al., 「KEK における超伝導電子銃用空洞の高電界試験」, 第 12 回日本加速器学会年会 WEOM03.
- [4] Eiji Kako, 「超伝導加速空洞の高周波設計」, OHO'06 (2006).