

KEKにおける超伝導 RF 電子銃の開発状況

DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING RF ELECTRON GUN IN KEK

松田 竜一^{#, A)}, 井上 典亮^{A)}, 許斐 太郎^{B)}, 小林 幸則^{C)}, 山口 誠哉^{C)}, 加古 永治^{C)}
Ryuichi Matsuda^{#, A)}, Fumiaki Inoue^{A)}, Taro Konomi^{B)}, Yukinori Kobayashi^{C)}, Seiya Yamaguchi^{C)}, Eiji Kako^{C)}

^{A)} Mitsubishi Heavy Industries, Ltd

^{B)} Institute of Molecular Science

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

A high-intensity electron gun is required for the next generation ERL or a high power FEL system. KEK started development of a superconducting RF electron gun in addition to the conventional DC electron gun. 1.3 GHz of the resonant frequency, 100 mA of the beam current, and 2 MeV of the energy in the exit of gun are made into the precondition. By combining electromagnetic field analysis and charged particle dynamics analysis, the optimal design of the cavity shape, where the maximum surface electric field of less than 50 MV/m, a low emittance of less than 1 mm mrad, and a low energy spread of less than 0.1 % (2 keV) can be filled with this precondition, was tried. The designed elliptical cavity is a 1.5-cell structure made of Nb material, and the three half cells are manufactured from one common die. Thermo-structural analysis under cryogenic temperature and vacuum environment was also carried out, and the resonance frequency change would be evaluated.

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設定し、独 HZB で開発されている超伝導 RF 電子銃^[1]を参考にして空洞の設計を行った。

一般的に光速に対して速度が遅い電子ビームのエミッタンスは空間電荷効果により増大しやすく、大電流ビームでは特に顕著となるため、可能な限り短距離で光速付近まで加速することが望ましい。DC 電子銃を用いて光速付近まで短距離で加速するには放電限界があり容易ではない。しかしフラットトップの矩形波電圧を与えることにより低エネルギー広がり電子銃を得ることができる。RF 電子銃は DC 電子銃に比べて高電界を得やすく短距離で光速付近まで加速できるため、低エミッタンスビームを得やすい利点がある。また空洞材料を超伝導化することにより空洞表面での発熱を抑制できる。しかし加速電界が周期的に変化するためエネルギー広がりを小さくすることは容易ではなく、空洞内の電界強度、加速開始時の高周波の位相 (初期位相)、空洞形状の最適化が必要である。

今回、超伝導 RF 電子銃の空洞設計では特にエネルギー広がりを小さくすることと、空洞製造時に必要となる金型を 1 つにすることで高性能化と低コスト化を心掛けた。

本報告では開発開始に至った経緯や計画を簡単に紹介し、目標仕様の設定について述べ、電磁場解析と荷電粒子挙動解析コードを用いた空洞内面寸法の設計方法を示す。また製作状況、熱構造解析結果等を紹介する。

2. 超伝導 RF 電子銃の空洞設計

2.1 開発開始の経緯、計画概要目標仕様の設定

超伝導 RF 電子銃は主に米国、ドイツ、中国において次世代 ERL や FEL システムの電子源として開発が進められている。これまで KEK と三菱重工では超伝導加速空洞を開発してきたが超伝導 RF 電子銃の開発経験はない。KEK のプロジェクトとのマッチングを考慮し、超伝導 RF 電子銃の目標仕様設定を行った。

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 号機では最適化された空洞を製作し、別途並行して開発しているカソード^[2]を設置して縦測定を行い、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。

[#]ryuichi_matsuda@mhi.co.jp

2.2 目標仕様の設定

超伝導共振周波数は STF 型超伝導加速空洞に合わせ、1.3 GHz とした。ERL 入射部でのエネルギーは ERL で回収されずビームダンプで熱や放射線となるため低いほうがよい。ここでは RF 電子銃から放出される際のエネルギーを 2 MeV とした。ERL で検討されている運転モードの 1 つから、ビーム電流は平均 100 mA、エミッタンスは 1 mm mrad 以下に設定した。エネルギー広がり電子蓄積リングでの FEL 発振での実績から電子エネルギーの 0.1 % 以下、つまり RF 電子銃の出口でのエネルギー 2 MeV に対して 2 keV 以下とした。

2.3 空洞設計

ここでは試作 1 号機の空洞寸法の設計手順を紹介する。

予め単空洞で様々なパラメタの感度解析を行った結果、電子ビーム特性に大きく影響するのは、カソードを設置する側の空洞面の傾斜、カソード周りの構造、空洞長であり、空洞出口のアイリス部の構造は比較的感度が低いことが分かっている。空洞で放電が起きない最大表面電界 E_{sp} を 50 MV/m 以下と設定している。単空洞では E_{sp} を満たすことができないが、少なくとも 1 つの空洞を追加するとよいと予想できた。コスト面からも空洞数は少ないほうがよい。

従来から超伝導加速空洞では空洞の半分（ハーフセル）ごとに Nb 材料の円板をお椀状にプレス加工して製造している。プレス加工用の金型は、通常端部と中央部分の 2 種類必要である。多空洞の RF 電子銃においても金型数は少ないほうが都合がよい。追加する空洞形状を既存の超伝導加速空洞と同形状とする案も検討したが、速度が遅い電子ビームを扱う RF 電子銃では空洞長がビーム特性に大きく影響する。そこで図 1 のようにカソードのある空洞の下流側のハーフセルと、追加する 1 空洞に用いる 2 つのハーフセルの合計 3 つのハーフセルを、1 つの共通金型で製作することとした。空洞のカソードを取付ける側は Nb ブロックを削り出して製作する。

アイリス部分の形状や共通ハーフセル断面の傾きは、電子ビーム溶接等の条件が既知である従来の超伝導加速空洞の形状から大きく変わらない範囲で寸法を設定した。アイリス径は小さいほど高い Q 値を得ることができることを考慮して 60 mm とした。カソード付近の構造は空洞形状と独立に扱うことができ、単空洞検討段階に検討した形状を用いた。

この段階で検討すべきパラメタは、2 つの空洞それぞれの空洞長、カソード面の傾きの 3 つに絞られる。第 1 空洞の長さはカソード面赤道部の楕円形状で調節可能であり、ここでの検討ではパラメタを置き換えている。パラメタを変更しても共振周波数が変化しないようハーフセル赤道部の楕円形状を毎回調整している。

カソードのある第 1 空洞と追加した第 2 空洞の中心軸上での電界強度の比率も重要な指標である。低エミッタンスビームを得るには短時間のうちに光速

近くまで加速するとよく、第 1 空洞の軸上電界を強くするとよいが、同時に第 1 空洞内の最大電界強度 E_{sp} も強くなるため最適化が必要である。電界強度比は前記 3 つのパラメタを変化させると結果として変化する。

よって空洞形状に関しては、これら 3 つのパラメタの変更可能な範囲を定め、ビーム特性の目標仕様と表面電界強度の上限 E_{sp} を満たすパラメタスタディを行えばよい。

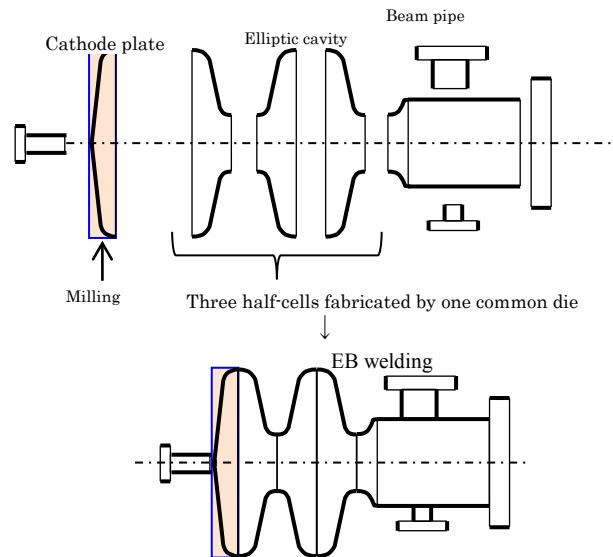


Figure 1: Cavity manufacturing.

2.4 ビーム特性の評価方法

2 次元軸対称高周波電磁界を扱える解析コード SUPERFISH ver.7.17 を用いて空洞内の電磁界解析を行い、そこで得られた電子ビームが通過する領域の電磁界分布を荷電粒子解析コード GPT ver.3.10 にインポートしてカソードから放出された電子が空洞出口に至った時のビーム特性を求めた。

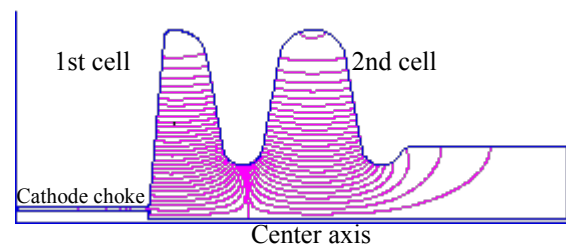


Figure 2: RF electromagnetic analysis by SUPERFISH.

GPT での解析において、ビーム径はカソード表面における電界強度の径方向分布がほぼフラットとなる領域を選び ϕ_2 とした。フォトカソード励起レーザーのパルス幅は 10 ps とし、初期のエネルギー分布幅として 0.4 eV を与えている。仮想粒子数は 1,000 個とし、空間及びエネルギー分布は均等分布としている。GPT には数種類の空間電荷効果計算

ルーチンがあるがここでは spacecharge3D を使用している。

共振周波数を 1.3 GHz に調整した RF 電子銃の空洞形状において、横軸を空洞内の電界強度、縦軸を初期位相とした座標の各点において、RF 電子銃出口でのエネルギー(KE)、エネルギー広がり(ΔKE)、エミッタンス(ϵ)の値をそれぞれプロットし、これから等高線図を作図する (図 3)。

出口エネルギー KE を示す図 3(a)では 2 MeV を得ることができる関係が 1 本の曲線で示される。エネルギー広がり ΔKE を示す図 3(b)でも ΔKE が最小となる関係が 1 本の曲線で示される (黄色実線)。この交点が出口エネルギー 2 MeV でありかつ最小のエネルギー広がりとなる初期位相と電界強度のピンポイントの座標である。この座標からエミッタンス ϵ は一意に求められる。

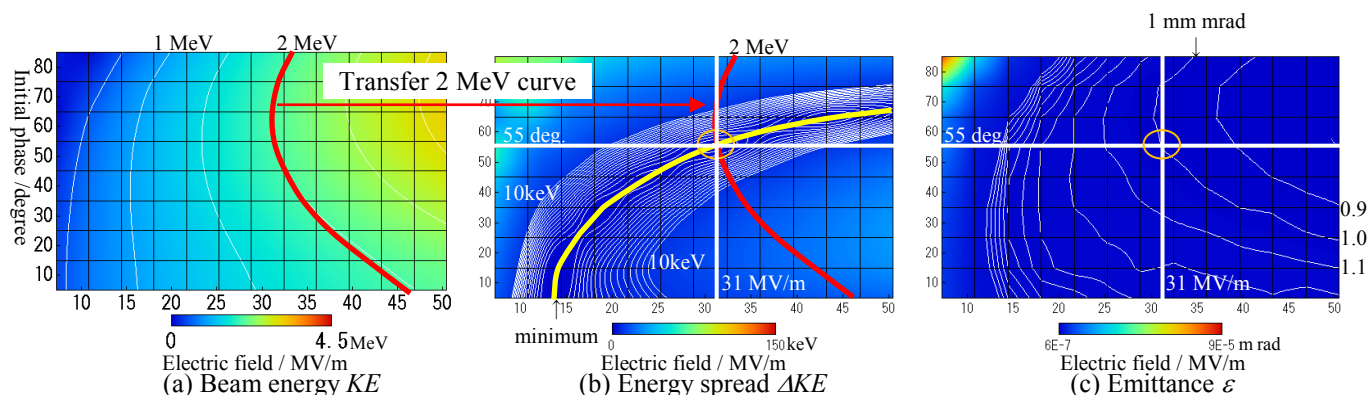


Figure 3: Contour map of beam specifications at cavity exit.

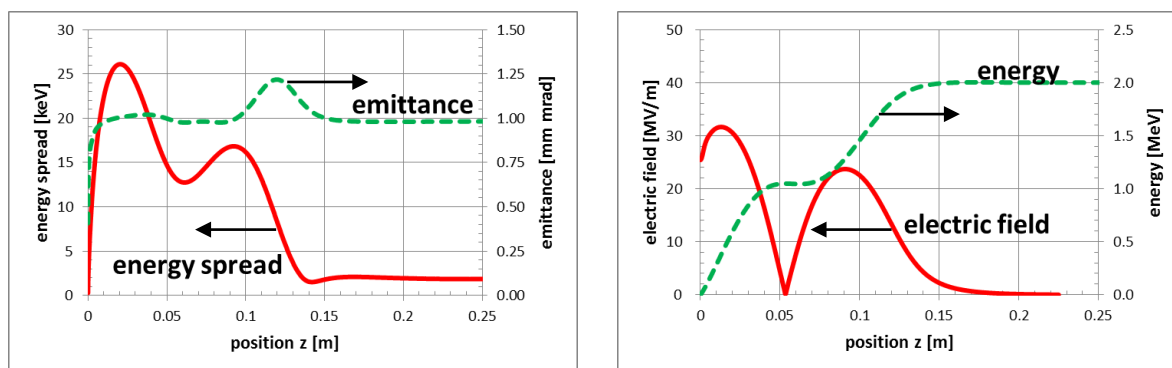


Figure 4: Beam dynamics in RF cavity and electric field profile on axis.

3. 試作 1 号機の製作

3.1 熱構造解析

試作 1 号機では、最適化した内面形状を Nb 材で実際に製作し、製作性の確認、縦測定による評価を実施する。液体ヘリウム温度、空洞内は真空状態、縦測定時の拘束条件における空洞変形量、強度評価のため汎用構造解析コード ABAQUS ver.6.8-4 を用

いて弾性応力解析を行った。その結果発生応力は許容限界内であり、座屈に対しても十分な強度を有することを確認した。図 5 に応力コンター図と変形モード図を示す。

2.5 最適化した空洞形状でのビーム挙動

試作 1 空洞寸法パラメータを変化させる毎に算出すべき一組の ΔKE 、 ϵ 、 E_{sp} は、2.4 項の方法を用いると容易に求められる。2.3 項では空洞寸法パラメータを 3 つに絞っている。パラメータスタディを行い、 ΔKE 、 ϵ 、 E_{sp} の仕様を同時に満たす空洞寸法を選定した。この時の空洞内におけるビーム特性と軸上電界強度の変化を図 4 に示す。空洞内でエミッタンスやエネルギー広がり大きく変化していたことが分かる。

変形前後の形状を SUPERFISH で電磁場解析したところ、変形後の共振周波数は変形前と比べて 0.1 % (1.3 MHz) 増加することが判った。次期設計では変形寸法を考慮し、設計形状に反映させる。

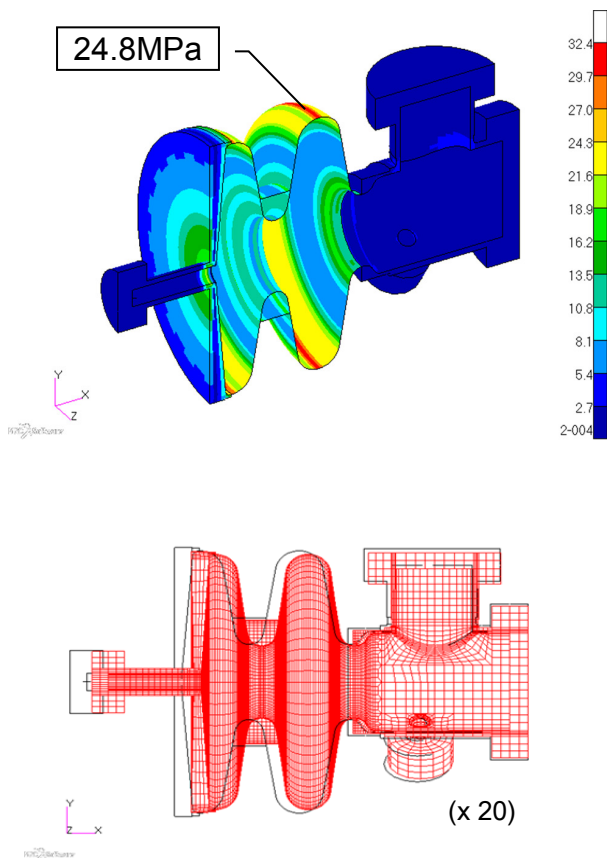
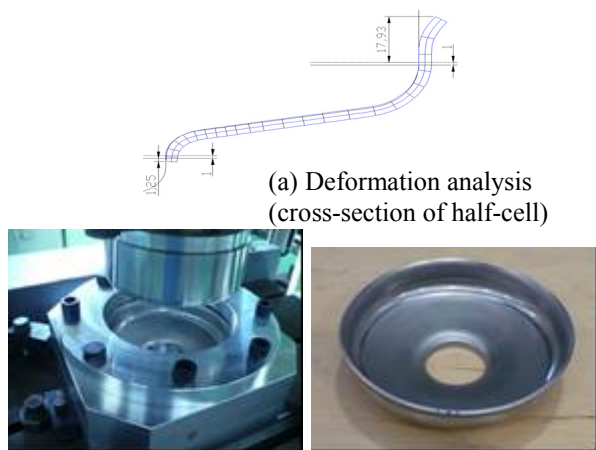


Figure 5: Contour of stress and deformation mode of RF cavity under vertical test condition.



(b) Set-up of dies at press machine (c) Nb half-cell

Figure 6: Press deformation of half-cell.

3.2 プレス加工のための変形解析

Nb 材の円盤をプレス加工してハーフセルを製作した。2 章で検討した空洞形状を実現するため変形解析コード LS-DYNA によりスプリングバックを考慮したプレス成型解析を行い、金型を設計、製作した。解析例、プレス加工の様子、成形品を図 6 に示す。

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向けに、従来の DC 電子銃に加え超伝導 RF 電子銃の開発を開始した。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、空洞内で放電が起きない最大表面電界 (50 MV/m 以下)、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) を得ることができる空洞形状を、電磁場解析と荷電粒子挙動解析を組合せ、1.5 空洞の楕円空洞を最適設計した。この空洞は 3 つのハーフセルを共通の金型 1 台から製作可能である。

試作 1 号機として金型から Nb 材によるハーフセルを製作した。また極低温、真空環境下における熱構造解析も実施し、変形やその前後の共振周波数変化も評価した。今後は製作したハーフセルを組立て、カソードポートに別途開発中のカソード材料を取付けた状態で縦測定を行い、超伝導空洞としての特性を評価する。

試作 2 号機では RF 入力カプラやカソード取付構造周辺等の設計検討を進めている。

参考文献

- [1] <https://www.jlab.org/indico/getFile.py/access?contribId=45&sessionId=10&resId=0&materialId=slides&confId=24>
- [2] Ryo Inagaki et al., 「背面照射型透明超伝導マルチアルカリフォトカソードの初期エミッタンス測定」, 第 11 回日本加速器学会年会 SAP031