

KEKにおける超伝導 RF 電子銃 2 号機の横測定試験 HORIZONTAL TEST OF SUPERCONDUCTING RF GUN #2 AT KEK

許斐太郎[#], 井上均, 王旭東, 植木竜一, 梅森健成, 加古永治, 近藤良也, 土屋清澄, 高富俊和,
寺島昭男, 原和文, 細山謙二, 本田洋介, 増澤美佳, Mathieu Omet

Taro Konomi[#], Hitoshi Inoue, X Xudong Wang, Ryuichi Ueki, Kensei Umemori, Eiji Kako, Yoshinari Kondo,
Kiyosumi Tsuchiya, Tomikazu Takatomi, Akio Terashima, Kazufumi Hara, Kenji Hosoyama, Yosuke Honda,
Mika Masuzawa, Mathieu Omet
KEK

Abstract

Superconducting radio-frequency (SRF) electron guns are attractive for delivery of beams at a high bunch repetition rate with a high accelerating field. The SRF gun with 1.5 cell has been developing at KEK to demonstrate fundamental performance. The SRF gun consists of 1.3 GHz SRF gun cavity and multi-alkali photocathode coated on 2 K cathode plug. In the vertical test of the gun cavity, the surface peak electric field and the surface peak magnetic field reached to 75 MV/m and 170 mT, respectively. The SRF gun was installed into the horizontal multipurpose cryostat equipped with a superconducting solenoid, photocathode preparation chamber and beam diagnostic line. The peak surface gradient dropped to 42 MV/m. This was probably due to particulate issued that entered the cavity during assembly. The results in the horizontal test are presented in this paper.

1. はじめに

超伝導 RF 電子銃は高いビーム繰り返しと高電界加速を両立する電子銃であり、CW-FEL 用電子銃をはじめとして世界的に開発が進められている。KEK においても ERL のビームパラメータを元に基礎的な性能実証を行う目的で超伝導 RF 電子銃の設計を開始した。本超伝導 RF 電子銃は 1.3 GHz、1.5 セルのニオブ製超伝導 RF 空洞と 2K まで冷却されるニオブ製カソードプラグから構成される。これまでに超伝導 RF 電子銃空洞単体の試験のために試作 1 号機を製作し、ニオブ空洞の表面処理方法の開発を行い、縦型クライオスタットを使用した高電界試験(縦測定)で、最大表面電界 75 MV/m、最大表面磁場 170 mT を達成した[1]。2017年より試作 1 号機の RF 設計を用いてヘリウムジャケットや周波数チューナーなどを追加し、多目的横型クライオスタットを用いた高電界試験(横測定)及びビーム試験が可能な 2 号機を開発を開始した。

2. KEK 超伝導 RF 電子銃 2 号機

図1に超伝導 RF 電子銃の構造を示す。RF 印加部分は 1.3 GHz、1.5 セルのニオブ製超伝導 RF 加速空洞とニオブ製のカソードプラグ、カソードプラグ側からの RF の漏れ出しを止めるためのチョークセルから構成される。カソードプラグは脱着可能な構造となっており、カソードプラグを保持するホルダーは液体ヘリウムに浸かり、カソードプラグは空洞温度と同じ 2 K まで冷却される。ヘリウムジャケットは超伝導 RF 加速空洞からカソードプラグホルダーまでを覆っており、ジャケットは加速空洞部の長さを調整し周波数を調整するためのベローズと、カソード

プラグの位置を調整するための 2 重のベローズがついている。周波数チューナーはヘリウムジャケットの外周部に取り付けられている。

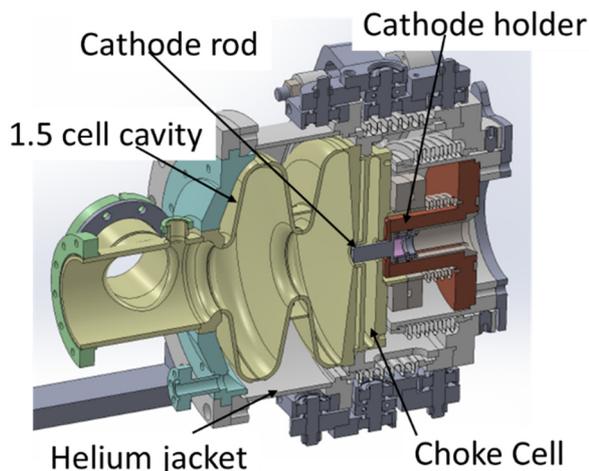


図 1: KEK 超伝導 RF 電子銃 2 号機の構造。

図 2 に超伝導 RF 電子銃の軸上と表面の電磁場分布を示す。超伝導 RF 空洞を静磁場は貫通できないため、加速電場に収束力を持たせることで、ビームサイズを絞る。また、RF の漏れ電場による減速を防ぐために 2 セル目のセル長を短くしている。加速電圧を 2 MV にするために 2 セル目の加速電圧は低く設定している。表 1 に超伝導 RF 電子銃 2 号機の RF パラメータを示す。目標の加速電圧は 2 MV であり、この時の最大表面電場は 41.9 MV/m、最大表面磁場は 92.4 mT である。これはニオブの RF 臨界磁場 180 mT よりも十分に低い。図 3 にカソードプラグの有無での縦測定の結果を示す。カソードプラグが無い場合の縦測定では最大表面電界 75

[#] Current affiliation is Michigan State University (MSU) / Facility for Rare Isotope beams (FRIB), Email address is konomi@frib.msu.edu

MV/m、最大表面磁場 170 mT を達成したが、カソードプラグがある場合は最大加速電界と Q 値はともに低下した。これはチョーク周波数の調整が不十分であったこと、フィールドエミッション (FE) により Q 値が低下しているためである。しかし、FE の開始電界は目標値よりも高いため、十分に使用できると判断し、横測定試験へ移行した。

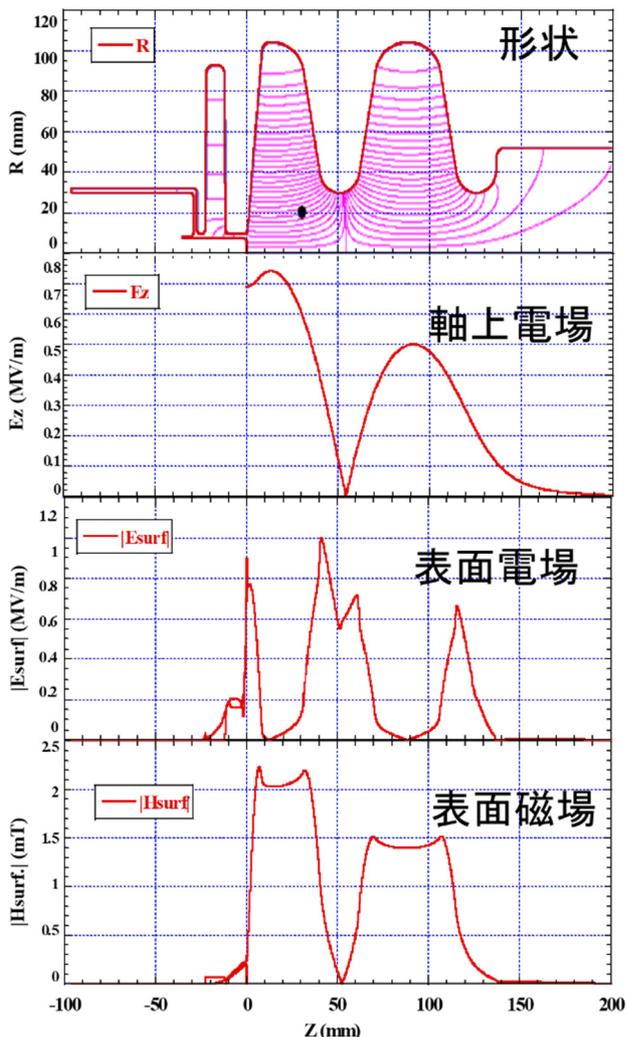


図 2: 超伝導 RF 電子銃の軸上と表面の電磁場分布。

表 1: 超伝導 RF 電子銃 2 号機の RF パラメータ

Parameter	Value
RF frequency	1.3 GHz
Accelerating Voltage (V_c)	2 MV
Geometrical Factor	133.1 Ω
Surface Peak Electric Field (E_{sp}) @ $V_c=2MV$	41.9 MV/m
Surface Peak Magnetic Field (H_{sp}) @ $V_c=2MV$	92.4 mT
H_{sp}/E_{sp}	2.2 mT/(MV/m)
Z_{ESP}^*	241.3

$$*E_{sp} = Z_{ESP} \sqrt{Q_0 P_{loss}}$$

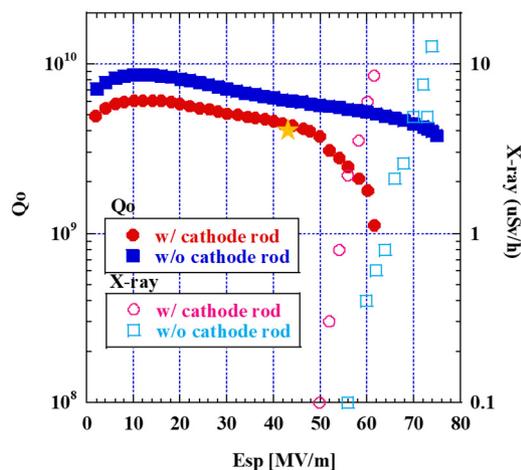


図 3: 超伝導 RF 電子銃の高電界試験結果。

3. 周波数チューナーと磁気シールド

3.1 周波数チューナー

周波数チューナーは 450 kHz の範囲を動かす機械式の粗動と 200 Hz の範囲を動かす piezoelectric 素子を用いた細動の 2 段式になっている。粗動チューナーの概念図を図 4 に示す。点 O は空洞の固定端側に固定されており、点 C が自由端側である。この 2 点間の距離が空洞の長さである。点 O と点 C の中間に位置する点 A を直線 OC よりもややずれて配置することで点 D の移動距離を点 C に伝えている。空洞にはこの構造が空洞の上下に取り付けられていて、点 D は台形ねじに固定されており、断熱真空槽外部から点 D を駆動できる構造となっている。図 5 に周波数チューナーの写真を示す。この構造はヘリウムジャケットに沿って配置できるため、省スペースであり、全長と外径に制約のある横型クライオスタットに適している。図 6 に室温での動作試験結果を示す。横軸は点 D の台形ねじの回転数である。台形ねじのバックラッシュの影響は小さい。粗動チューナーの点 O と空洞の間には piezoelectric 素子が片側に 1 つ、両側で合計 2 つ取り付けられている。

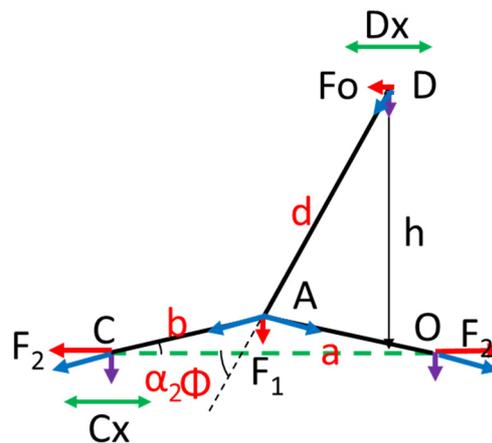


図 4: 粗動周波数チューナーの概念図。

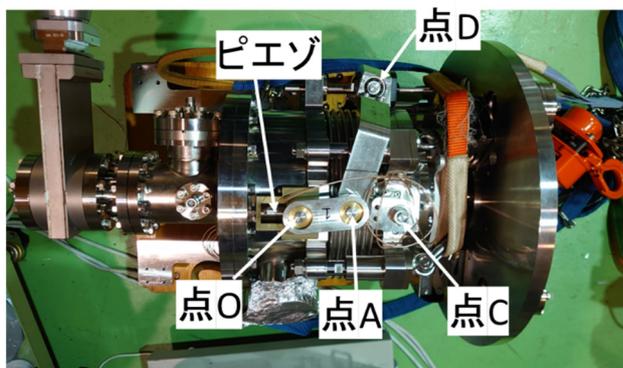


図 5: 周波数チューナー。

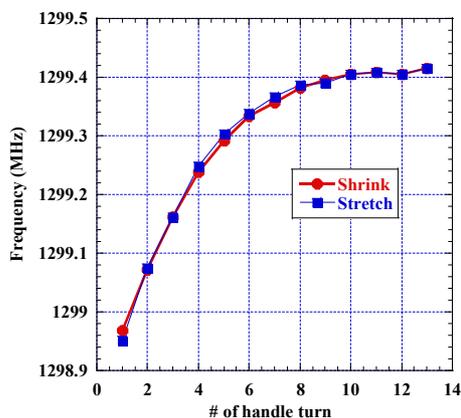


図 6: 室温での粗動周波数チューナー動作試験。

3.2 磁気シールド

図 7 に磁気シールドの配置を示す。ヘリウムジャケットの内側と外側に各 1 層の磁気シールド(オータ製パーマロイ PC)を置くことにより、外部磁場 0.4 Gauss がどの方位にあっても、空洞のニオブ板における残留磁場は 10 mGauss 以下になる。磁気シールドの性能測定では空洞軸上の磁場をビーム軸方向 1 次元の磁気プローブを用いて測定した。磁場分布はシミュレーションと良く合致している。この 2 重の磁気シールドが横測定の Q 値が縦測定よりも高くなった原因の一つだと考えている。

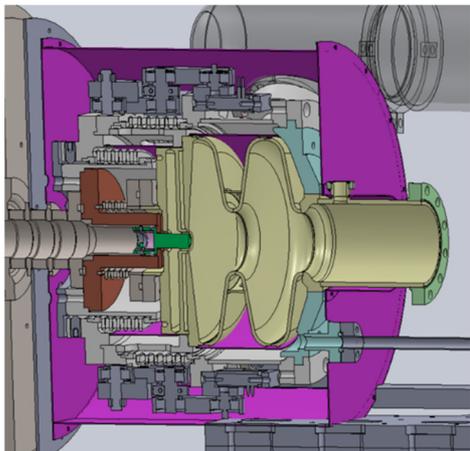


図 7: 磁気シールドの配置。

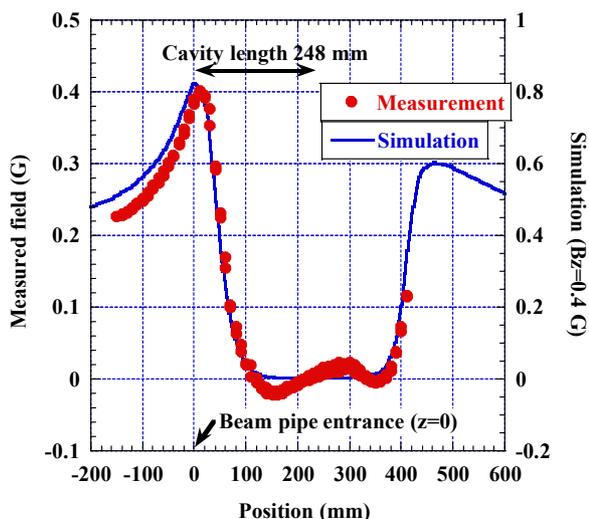


図 8: 空洞ビーム軸上磁場の測定。

4. 横測定準備

4.1 横測定のセットアップ

空洞単体の動作試験からビーム性能評価までを実施するために図 9 に示す多目的の横型テストクライオモジュールを使用した。本モジュールの断熱真空槽内は 2 K の液体ヘリウム 2 相配管、5 K の熱アンカーラインと液体窒素を用いた 80 K の輻射シールドで構成されている。また、1.3 GHz、300 W の RF アンプと LLRF を備える。電子銃空洞はモジュールを横に貫通する形で配置され、モジュール内に超伝導ソレノイド、モジュール外部にフォトカソード成膜チャンバー、90 度偏向電磁石、ビームモニター、励起用レーザーを設置した。

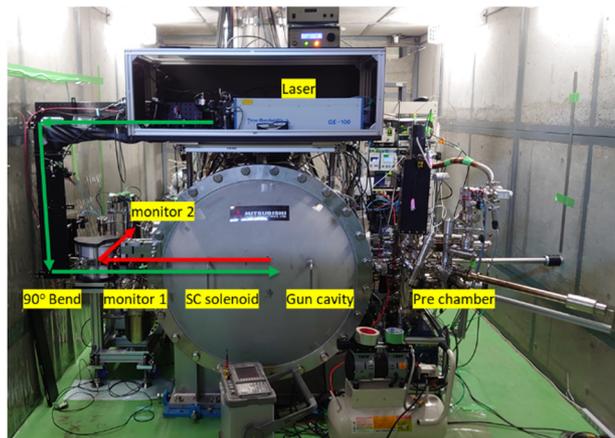


図 9: 横測定のセットアップ。

4.2 フォトカソード成膜チャンバー

フォトカソード成膜チャンバーではニオブ製のカソードプラグを大気から導入し、 K_2CsSb 光電面を製膜後に電子銃空洞に移送する機能を持つ。光電面の成膜はニオブカソードプラグを 530°C に 1 時間保持してヒートクリーニングを行った後、カソードプラグ温度が 100°C 程度に低下した後から行った。図 10 に成膜の一例を示す。最

ローカルクリーンブースを設置し組立を行っている。1 回目と 5 回目の横測定では空洞の組立手順、冷却手順の確認を行い、高電界試験は行っていない。2 回目から 4 回目までの高電界試験では RF 入力ポートの結合は 4×10^9 に設置した。これは 2 K での空洞との結合度が 1 程度になるようにし、高電界での正確な測定を目指したためである。6 回目高電界試験では RF 入力ポートのアンテナを短く調整し、入力ポートの結合度を 7×10^7 に変更した。これはビーム運転を考慮に入れ、加速電磁場の安定化を狙ったためである。

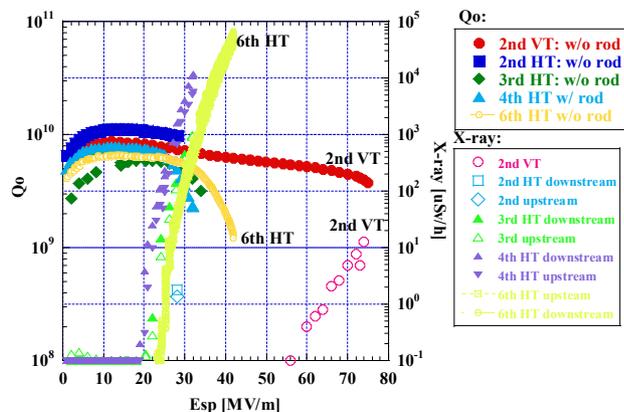


図 14: 横測定試験結果。

高電界を達成するために、2 回目、3 回目、6 回目の冷却試験前に空洞を分解し、HPR を行った後に再度横型クライオモジュールに組み込みを行った。しかし、表面電界が数 kV/m 程度の低電界でのマルチパッキングがすべての横測定において観測された。これは 2 時間程度の RF プロセスによって取り除くことができたが、縦測定では観測されなかった現象である。最大到達電界は図 14 に示すように、フィールドエミッションまたは低電界でのクエンチにより $E_{sp}=20-30$ MV/m で制限された。最大表面電界を押し上げるために、繰り返し空洞を完全に分解し HPR を行ったものの、克服することができていない。縦測定と異なる点は空洞に付属する部品点数が大きく増えたことと、ローカルクリーンブースを用いた横モジュールへの組み込み作業であり、組立方法に問題があると考えられ、今後の解決すべき課題である。

6. まとめ

超伝導 RF 電子銃の基本的な性能評価のために KEK 超伝導 RF 電子銃 2 号機を製作した。超伝導空洞で高電界を達成するには FE の抑制が重要である。電子銃空洞単体の VT では適切に高压水洗を行うことで、目標値に到達することができた。しかし、横試験のための組立では複雑な組立作業が必要であり、大幅に性能が低下した。適切な組立手順を確立することが重要である。また、カソードプラグを清浄に保つ方法の確立も課題である。また、ビーム試験を目指し電子銃性能評価のための機器準備を進めている。フォトカソードの寿命が短いという課題は残るが、超伝導ソレノイド、90 度偏向電磁石などの個別性能評価は完了した。これらの装置はミシガン州立大学に移送後再組立を行い、ビーム性能評価試験を続ける予定である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、装置の組立てと実験を行った NAT 株式会社の今田信一様、菊池祐亮様に深謝いたします。大阪大学 楊金峰 准教授には実験への協力と適切なご助言を賜り、深謝いたします。

参考文献

- [1] T. Konomi *et al.*, “Development of High Intensity, High Brightness, CW SRF Gun with Bi-alkali photocathode”, SRF 2019, FRCAB4.
- [2] 植木竜一 他, 「超伝導 RF 電子銃のエネルギー測定のための 90 度偏向電磁石の製作と磁場測定」、本学会 WEPS038.