

## チョーク構造付き超伝導 RF 電子銃(試作 1 号機)の高電界試験

### HIGH GRADIENT TEST OF THE SUPERCONDUCTING RF GUN (PROTOTYPE #1) WITH CHOKE STRUCTURE

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

<sup>A)</sup> KEK: High Energy Accelerator Research Organization

<sup>B)</sup> MHI: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd

<sup>C)</sup> MHI-MS: Mitsubishi Heavy Industries Mechatronics Systems, Ltd

#### Abstract

Superconducting RF (SRF) guns hold the promise to generate high current and low emittance beam. The SRF gun has been developed for the KEK 3GeV ERL project. The prototype #1 cavity was produced to check the RF structure of the accelerating cell, cathode plug and choke cell. Vertical test has been carried out 5 times. The surface peak electric field of the accelerating cell achieved the target performance. The attenuation of the choke cell was determined -30 dB by 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> vertical test. The surface peak electric field with the choke cell and the cathode plug reached 54 MV/m. The Q<sub>0</sub> value was slightly lower than that of the target value  $4.5 \times 10^9$ . The results of vertical tests and discussed in this paper.

#### 1. はじめに

KEK では超伝導電子銃の開発を進めている。ビームパラメータは 3GeV ERL をターゲットとしている。電子銃は HZB で開発が進められている超伝導電子銃形状[1]を参考として電子銃加速セルとカソードプラグ、チョークセル、フォトカソードから構成される。加速セルは SUPERFISH と GPT を用いてバンチ電荷が 80 pC の場合に最小エミッタンス、最小エネルギー広がりを得られるようにカソードセルのテーパ角を調節して設計されている[2]。Table 1 に目標とするビームパラメータと空洞パラメータを示す。

Table 1: Target Parameters

Beam Energy	2 MeV
RF frequency	1.3 GHz
Beam current	100 mA
Normalized Emittance	0.98 mm mrad
Energy Spread	0.09 %
Peak surface electric field	41.9 MV/m
Peak surface Magnetic field	95.2 mT
Geometrical Factor	135.6 Ω
Q <sub>0</sub>	$4.5 \times 10^9$

形状因子が TESLA 空洞の約半分であるのは、初速ゼロの電子を加速するためにセル長さが短いためである。目標 Q<sub>0</sub> 値は表面抵抗を ILC が目標とする  $9 \times 10^9$  とし

<sup>#</sup> konomi@post.kek.jp

た場合を基に計算した値を示した。高電界試験では加速電場の定義が難しいため、最大表面電場で表示する。フォトカソードは背面照射式を採用可能な構造としている。電子銃単体での高電界特性を確認するために電子銃1号機と名付けた空洞を製作した。高電界試験は各構成部品の特性を明らかにするために、各部品を一つずつ付加しながら進めている。これまでに計 5 回の高電界試験を行った。Figure 1 の左写真は 1 回目から 3 回目までの高電界試験時の様子であり、チョークセルを付けていない。4 回目以降は図 1 の右写真のように、カソード側ビームパイプを切断してチョークセルを電子ビーム溶接した。

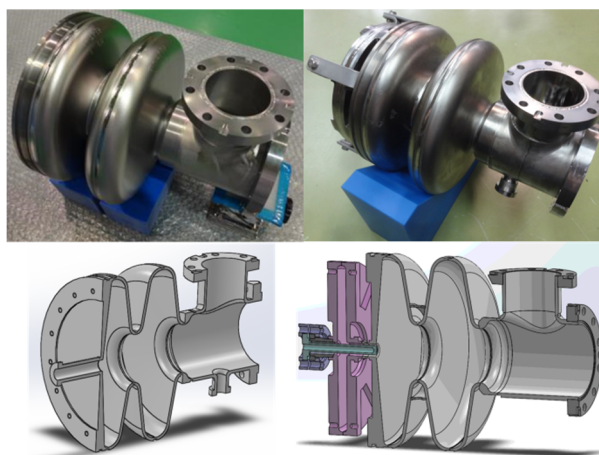


Figure 1: Pictures of SRF gun #1.

#### 2. 加速セルの高電界特性

1 回目の高電界試験では加速セルのみの高電界特

性を調べるために、カソードプラグを取り付けずに測定を行った[3]。空洞の処理は STF 空洞の処理を踏襲している。空洞製作後はまず、空洞内面を化学研磨により 106  $\mu\text{m}$  除去し加工変質層を取り除いた。次に 3 時間 750  $^{\circ}\text{C}$  の真空アニールにより水素脱ガスと加工応力の除去後、電界分布のチューニングをした。最終表面研磨として電解研磨を行った。電解研磨は空洞を縦置きにして空洞内に研磨液を貯め込み、20  $\mu\text{m}$  研磨した。研磨後は超音波洗浄、高圧水洗、組み立て、120  $^{\circ}\text{C} \times 48$  時間ベーキングの順に行った。

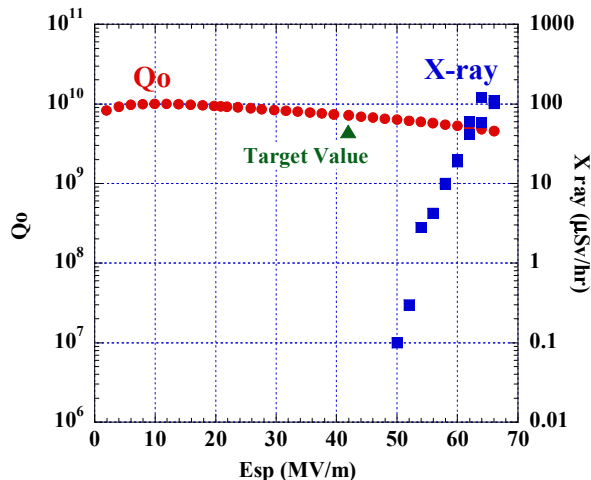


Figure 2: 1st vertical test result.

Figure 2 に 1 回目の高電界試験結果を示す。最大表面電界は 66 MV/m に到達している。フィールドエミッションが最大表面電界 50 MV/m から始まっているものの、目標電界の 41.9 MV/m を満足している。このことから加速セルの表面処理方法に問題が無いことを確かめられた[3]。

### 3. カソードプラグの特性

フォトカソードを設置するためのカソードプラグは加速空洞と強く結合している。CST のシミュレーションから結合度  $Q$  値は  $7.3 \times 10^4$  である。カソードプラグフランジはショートされているため、大半のパワーは反射され実際にカソードプラグで失われるパワーは非常に小さい。2 回目と 3 回目の高電界試験はチョークセルを取り付けずに加速セルにカソードプラグを取り付けて行った。各測定ではフランジ材料を変えており、Figure 3 に各測定でのフランジ構造を示す。

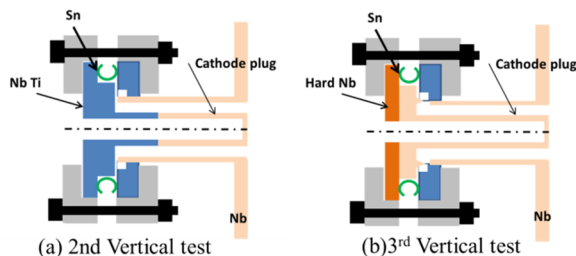


Figure 3: Structure of the cathode plug flanges.

高電界試験の結果を Figure 4 に示す。2 回目と 3 回

目の変更箇所はカソードプラグのフランジ材料を NbTi から純 Nb に変えたことと、カソードプラグフランジにナイフエッジを持たせたことである。これは純ニオブ表面以外での RF ロス防止を狙った物であるが、 $Q$  値は目標の  $4.5 \times 10^9$  に届いておらず、このナイフエッジでは不十分であった。

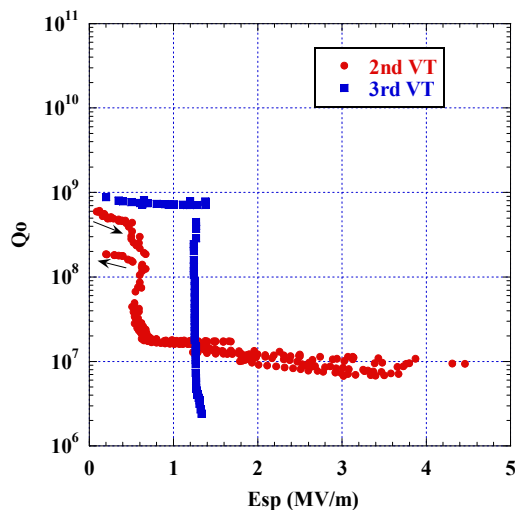


Figure 4: 2nd and 3rd vertical test results.

低電界での  $Q$  値からチョークセルに要求される減衰量が求められる。カソードプラグフランジでの RF 損失を目標  $Q$  値  $4.5 \times 10^9$  の 1% に抑えるためにチョークセルの目標減衰量を -30 dB とした。

### 4. チョークセルの特性

チョークセルは洗浄を容易にするために平行平板形状とした。水洗時に水が抜けるように 1 mm のテーパを付けている。また、チョークセルの強度を確保するために放射線状にリブを付けている。セルは片側ずつ巨大結晶ニオブからの削り出しで製作し、赤道部を電子ビーム溶接する前に化学研磨で 100  $\mu\text{m}$  表面を研磨した。チョークセルのチューニングは加速セルに取り付ける前にを行った。Figure 5 に製作したチョークセルと RF 構造の寸法、周波数調整の様子を示す。

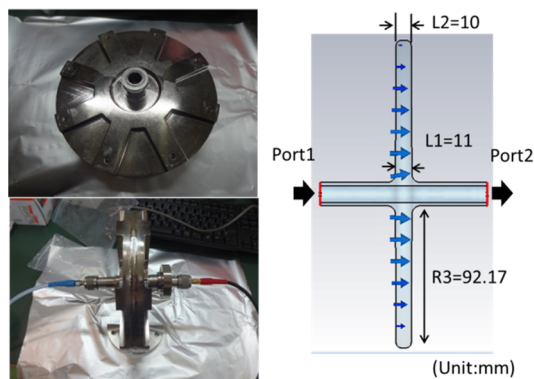


Figure 5: Choke cell structure.

周波数調整は各 Port のフランジ部分を使い押し引きした。セル外周長さ  $L2$  は強度が強いため動かず、セル

根本長さ L1 が変化すると考えられる。この周波数応答について CST を用いてシミュレーションした。Figure 6 に L2 を固定して L1 を変化させた場合の周波数応答と減衰量-30 dBと-50 dBでの周波数幅を示す。周波数の応答と周波数の応答感度は 20 MHz/mm であり、チョークセルに要求する減衰量-30dB での周波数幅は約 20 MHz と見積もられた。製作直後とチューニング後の周波数応答を Figure 7 に示す。チューニングをしていない製作直後の状態であっても目標減衰量-30dB を十分に満足していることが分かる。

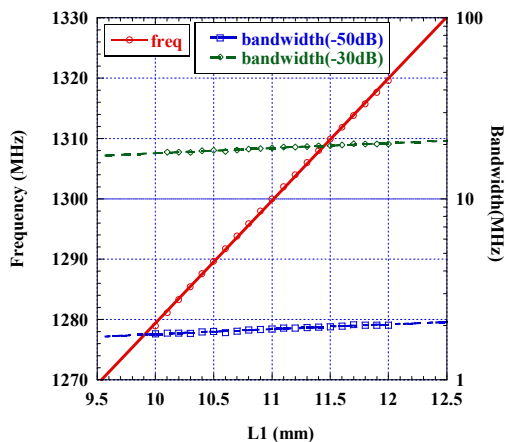


Figure 6: Choke cell tuning simulation.

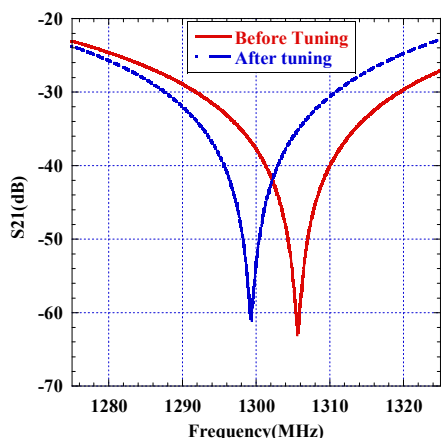


Figure 7: Transmission coefficient of choke cell.

## 5. チョークセルを含めた高電界試験結果

チョークセルはチューニング後に加速セルに EBW で溶接された。表面処理は 1 回目の高電界試験時と同様の方法で行った。4 回目の測定結果を Figure 8 に示す。最大表面電界は 32 MV/m まで到達したが、20 MV/m から強いフィールドエミッションによって Q 値が大きく減少し、32 MV/m を超えるとクエンチが起こった。3 MV/m 付近でマルチパッキングによって Q 値がドロップした。カソードプラグフランジに取り付けた温度計は 3MV/m 付近で Q 値がドロップした時と、32 MV/m でクエンチした時に反応した。この時の様子を Figure 9 に示す。横

軸は時間であり、最上列の図から順にフランジに取り付けた温度センサーの変化、ピックアップパワー、反射パワー、入力パワーを表す。青線の時間でチョークセルの短絡が起こり、空洞とカップラーのマッチングが取れなくなったために反射パワーが変化していることと、チョークを透過して RF がカソードロッドフランジにまで到達していることが分かる。このことから、チョークセル又はカソードプラグ同軸部でマルチパッキングとフィールドエミッションが生じチョークがショートされたため、カソードプラグフランジまで RF が漏れ出したと考えられる。

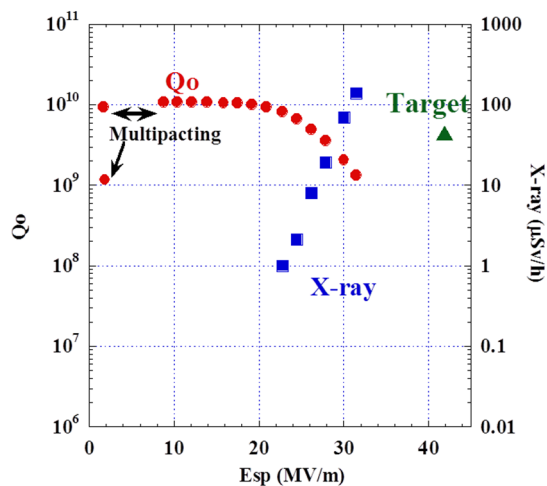


Figure 8: 4th Vertical test result.

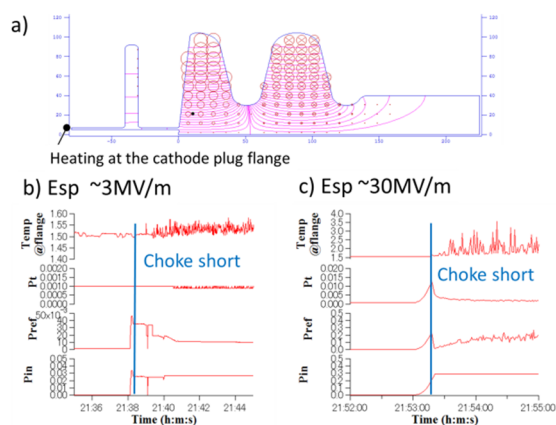


Figure 9: Heating of cathode plug flange. a) RF distribution and heating location, b) Esp~3MV/m, c)Esp~30MV/m.

チョークセル周辺の表面処理を強化することで高電界化を目指した。5 回目の高電界試験では、チョークセルとカソードプラグビームパイプを電解研磨するために STF 棟の横型電解研磨装置を用いた。電極とカソードプラグビームパイプ間の距離が近いことを考慮して、電流密度は約 30 mA/cm<sup>2</sup> に調節し、20 μm の研磨を行った。高圧水洗の方法も変更し、

チョークセルだけを洗浄するための専用ノズルを製作した。また、3 MV/m 付近でのマルチパッキングの発生場所であると考えたので、これを確認するために、カソードプラグの外径を直径 10 mm から 8 mm に削り、カソードプラグビームパイプとカソードプラグ間の距離を 2 mm から 3 mm に変えた。これによりマルチパッキングの発生電界が 2 MV/m 程度まで下がると考えられる。表面処理では電解研磨により 10  $\mu$ m 研磨を行った。チョークセルでの減衰量はカソードプラグ径を変更した後も -30 dB 以下の目標を満たしており Qo 値に影響を与えない。

Figure 10 に 5 回目の高電界試験結果を示す。最大表面電界は 54 MV/m まで向上したが、フィールドエミッションは 30 MV/m から始まり、目標 Q 値は達成できなかった。マルチパッキングは 1.5 MV/m 付近で観測された。このことから、低電界でのマルチパッキングはカソードプラグ同軸部で起きていることが確認できた。また、チョークセル周辺の電解研磨と高圧水洗が有効であることが分かった。組み立て時にカソードプラグの高圧水洗を行っていなかったため、カソードプラグに付着したゴミがフィールドエミッションの原因の一つであると推測している。

は更に表面処理を強化していくつもりである。特にカソードプラグに対して高圧水洗を行っていないため、次の試験ではカソードプラグを電子銃空洞に組み込んだ状態で高圧水洗を行うことを考えている。

## 参考文献

- [1] M. Schmeißer *et al.*, “Results from beam commissioning of an SRF plug-gun cavity photoinjector”, Proceedings of IPAC 2013, Shanghai, China, (2013), MOPFI002.
- [2] R. Matsuda *et al.*, “Development of superconducting RF electron gun in KEK”, Proceedings of the 11th Particle Accelerator Society Meeting in Japan, Aug. (2014). THP046.
- [3] T. Konomi *et al.*, “Vertical test of the superconducting RF gun cavity at KEK”, Proceedings of the 12th Particle Accelerator Society Meeting in Japan, Aug. (2015). WEOM03.

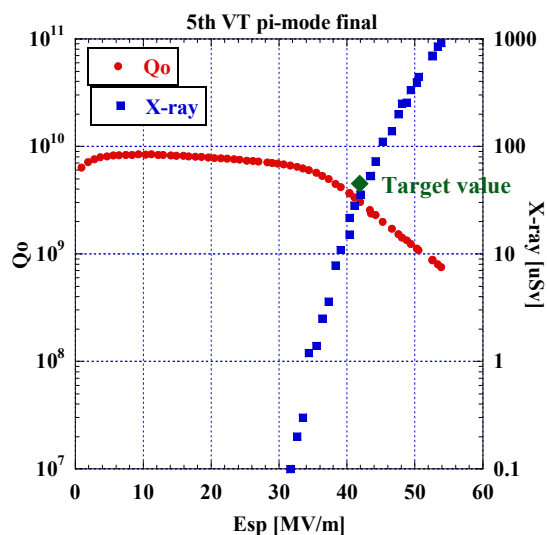


Figure 10: 5th Vertical test results.

## 6. まとめ

超伝導電子銃の加速空洞単体での高電界特性を評価するため、試作空洞 1 号機を製作した。目標とする最大表面電界は 41.9MV/m である。加速セル単体の高電界試験では 66 MV/m まで到達して目標を満足することを確認できた。チョークセルとカソードプラグを取り付けた 5 回目の高電界試験では 54 MV/m まで到達したが、フィールドエミッションにより目標の Q 値を達成できていない。しかしチョークセル周辺にフィールドエミッションの原因があることが明らかとなっており、今後の試験で