

KEKにおける超伝導電子銃用空洞の高電界試験

VERTICAL TEST OF THE SUPERCONDUCTING RF GUN CAVITY AT KEK

許斐 太郎^{#,A)}, 梅森 健成^{A)}, 加古 永治^{A)}, 小林 幸則^{A)}, 山口 誠哉^{A)}, 松田 竜一^{B)}, 柳澤 剛^{B)},

Taro Konomi^{#,A)}, Kensei Umemori^{A)}, Eiji Kako^{A)}, Yukinori Kobayashi^{A)}, Seiya Yamaguchi^{A)},

Ryuichi Matsuda^{B)}, Takeshi Yanagisawa^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization.

^{B)} Mitsubishi Heavy Industries, Ltd

Abstract

The development of superconducting RF gun has been started at KEK. The performance targets are that average current is 100 mA, normalized emittance is less than $1 \pi \mu\text{m}\cdot\text{rad}$, beam energy is 2 MeV and energy spread is less than 0.1 %. The SRF gun consists of 1.3 GHz and 1.5 cell elliptical cavity and backward illuminated photocathode. The cavity shape was designed by using SUPERFISH and GPT. Prototype #1 cavity was fabricated without choke, cathode plug and photocathode. 1st vertical test was done. The surface peak electric field reached $E_{\text{sp}}=66 \text{ MV/m}$, $Q_0=4.19 \times 10^9$. This meets the target value $E_{\text{sp}}=42 \text{ MV/m}$ $Q_0=4.5 \times 10^9$ sufficiently.

1. はじめに

超伝導電子銃の長所は比較的高電界で連続運転が可能である点である。この特徴から ERL や高繰り返し FEL という大電荷、高繰り返しを必要とする加速器への適用が期待されている。一方、超伝導空洞はマイスナー効果によりカソード直近へ静磁場を持ち込むことができないため、RF 電磁場を最適化する以外に、投影エミッタンスやエネルギー広がりを抑制する手段がない。また、カソードの交換機構で RF 損失を生じないためにはチョーク構造を用いてカソードプラグを仮想短絡する必要がある等、困難だと考えられる点が多い。超伝導 RF 電子銃を先行開発している独 HZB 等の研究成果^[1]を踏まえた上で、KEK が開発を進めている ERL の実績や将来計画に見合うよう超伝導 RF 電子銃の仕様を、Table 1 のように設定した。最大表面電界は連続運転のために十分なマージンを持たせて設定している。

Table 1: Target Parameter of the Superconducting RF Gun

ビームエネルギー	2 MeV
RF 周波数	1.3 GHz
ビーム電流	100 mA
初期ビーム形状	$\phi 2 \text{ mm}$, 10 ps (ピア缶型)
最大表面電界	50 MV/m 以下
投影エミッタンス	1 mm mrad 以下
投影エネルギー広がり	0.1 % 以下
空洞数	1.5 セル

試作機の開発は 3 段階に設定した。第 1 段階では、ビーム仕様を満たす RF 空洞形状を設計し、空洞全体を液体ヘリウムへ浸した高電界試験(縦測定)で評価する。第 2 段階はクライオモジュールに組み込めるように周波数チューナー、RF インพุットカップラー、冷却構造について設計を行う。第 3 段階で、

[#] konomi@post.kek.jp

ビーム引出し試験を行い、ビーム性能を確認する計画である。第 1 段階の空洞設計・製作は完了しており、SUPERFISH で求めた電磁界分布を Figure 1、完成した超伝導空洞の写真を Figure 2、空洞パラメータを Table 2 に示す^[2]。本電子銃空洞は $\beta=0$ から $\beta=0.97$ まで 1.5 セル内で加速するため、 $\beta=1$ 空洞に比べ空洞長さが短く、形状因子が $\beta=1$ 空洞の約半分程度である。目標電界 41.9 MV/m における空洞の表面抵抗を $30 \text{ n}\Omega$ と設定すると、目標 Q_0 値は 4.5×10^9 である。

第 1 段階の電子銃用空洞(試作 1 号機)は最終的に空洞セル、チョーク構造、カソードプラグ、フォトカソードまでを含めた縦測定を計画している。各構造の特性を明らかとするために各構造を一つずつ取り付けていき縦測定を行う。本研究では空洞セル単体の縦測定について述べる。

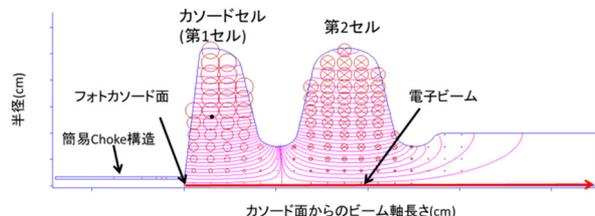


Figure 1: Shape of the Superconducting RF gun#1.

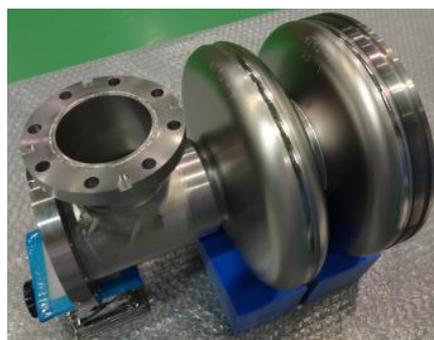


Figure 2: Superconducting RF gun prototype cavity #1.

Table 2: Design Parameter of Superconducting RF Gun

ビームエネルギー	2 MeV
投影エミッタンス	0.98 mm.mrad
投影エネルギー広が り	0.09 % (1.84 keV)
最大表面電場	41.9 MV/m
最大表面磁場	95.2 mT
初期 RF 位相	55°
形状因子	135.6 Ω

2. 試作 1 号機の高電界試験準備

2.1 RF パラメータ

カソードプラグ径はわずか $\phi 10$ mm であり、カソードプラグの有無が空洞パラメータに与える影響は小さい。空洞セル単体の高電界試験結果を得れば他の測定で空洞セルが与える影響をすることができる。カソードプラグの有無による中心軸上電場と空洞パラメータの比較をそれぞれ Figure 3 と Table 3 に示す。空洞パラメータの Z_{Esp} は次式により最大表面電場 E_{sp} を Q_0 値と空洞壁面損失 P_{loss} に関係づけるパラメータである。

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

縦測定では Z_{Esp} を用いて最大表面電界を求めている。

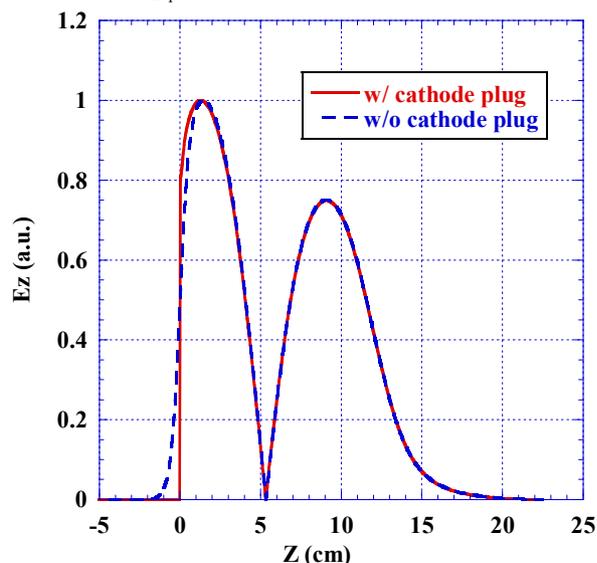


Figure 3: Comparison of the electric field on center axis.

Table 3: Comparison of the Cavity Parameter

	カソードプラグ 有	カソードプラグ 無
周波数	1300.007 MHz	1300.088 MHz
形状因子	135.6 Ω	135.5 Ω
Hp/Ep	2.27 mT/(MV/m)	2.28 mT/(MV/m)
Z_{Esp}	220.80 Ohm ^{0.5} /m	221.95 Ohm ^{0.5} /m

2.2 高電界試験のための処理内容

空洞製作後から縦測定までの処理は $\beta=1$ 空洞の処理内容を踏襲している。まず空洞製作後の空洞内面を 106 μ m 除去し純ニオブ表面を出す化学研磨を行った。化学研磨液は HF:HNO₃:H₂PO₄=1:1:2 の容積比で混ぜた酸を用いた。化学研磨液は空洞内に貯め込み、均一に研磨するため攪拌棒を用いている。次に真空炉で 750°C、3 時間の熱処理を行いニオブ内の水素除去と加工応力の除去後、電界分布のチューニングを行っている。チューニングは電場強度をビーズ法で測定しながら、カソードセルを固定した状態で第 2 セルのみを伸縮させている。最終的にカソードセルと第 2 セルの中心軸上最大電場の強度比が設計値から 1%以内のズレに収めることができた。Figure 4 にチューニング前後の中心軸上電磁場強度分布と設計値を示している。

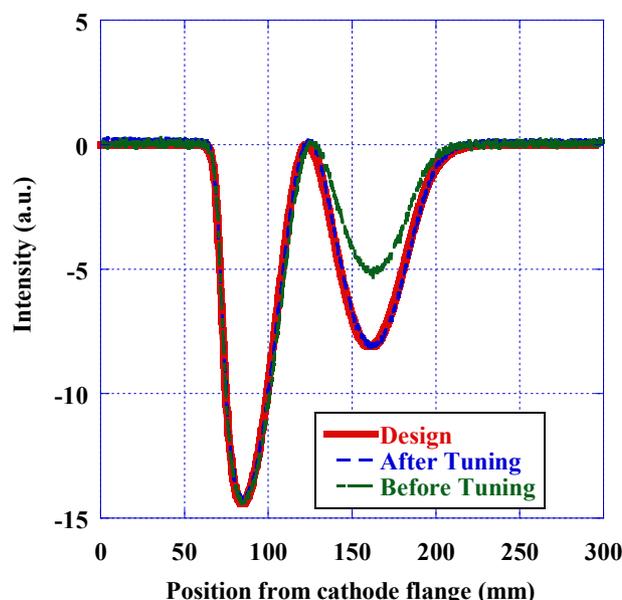


Figure 4: Power distribution of the electric field.

最終表面研磨として電界研磨により 20 μ m 除去した。電解研磨液は 98%濃度の硫酸と 48%濃度のフッ酸を 10:1 で混ぜた溶液である。電解研磨は化学研磨と同様に研磨液を空洞内に貯め込み行った。空洞内体積は 3.2 L であり、空洞の内表面積は 1979cm² である。良研磨を維持できる電界研磨液の Nb 含有量は 9g/L とされているため、研磨液は 10 μ m 研磨毎に交換した。陰極は純アルミ板を切り出して使用しており、攪拌機能を備えるために羽根状に加工している。研磨作業中は常に電極は回転運動を行っている。

Figure 5 にアルミ陰極と模式図を示す。通常研磨は常時通電し行うが、研磨液量が多く発生した水素泡が空洞から溢れないようにするため、研磨は 1 分毎に通電し水素泡の発生を抑制する方法をとった。研磨電流は 50A、25V であった。研磨量は積算電流より換算している。研磨後にアルミ陰極を引き抜こうとした際にアルミ電極を昇降回転運動させている装置が誤作動を起こし、陰極がカソードセルにぶつか

り傷をつけるトラブルを起こした。次回からはこのトラブルを起こさないために空洞内にアルミ陰極を置いた時点で機械的ストッパーを取り付けて対処する。

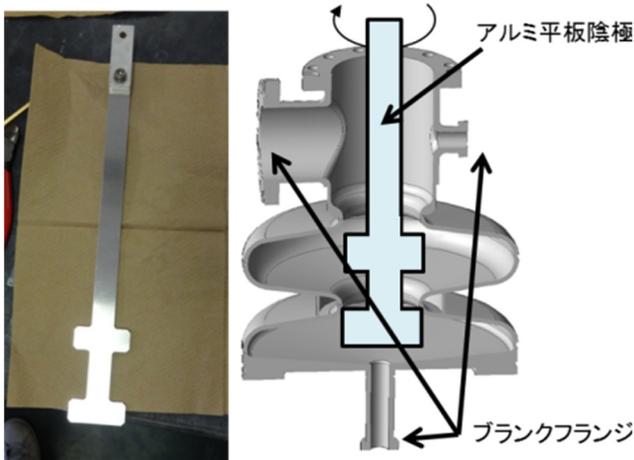


Figure 5: Pure aluminum cathode and setting of electro polishing.

電解研磨後は超純水で洗浄した。洗浄水が乾かないうちに 51°Cに熱した超音波槽で 15 分間超音波脱脂洗浄を行った。

最終表面処理として高圧水洗を行った。洗浄ノズルはカソードセル周辺と短いセル長の空洞を洗浄するためにノズル角度を先端から 5°、70°、90°、110° に設置している。製作したノズルを Figure 6 に示す。組み立てはクラス 10 のクリーンルームで行い、ベーキングは 130°C を 44 時間保持した。



Figure 6 : High pressure rinsing nozzle.

3. 試作 1 号機の高電界試験

高電界試験は最大表面電界 $E_{sp}=66\text{MV/m}$ 、 $Q_0=4.31 \times 10^9$ まで到達しクエンチで終了した(Figure 7)。発熱箇所はカソードセル赤道部であった。途中 $E_{sp}=60\text{MV/m}$ でプロセスが生じたが無事プロセスアウトしている。フィールドエミッションは

$E_{sp}=50\text{MV/m}$ から始まっているが、目標電界 $E_{ps}=41.9\text{MV/m}$ 、 $Q_0=4.5 \times 10^9$ ではフィールドエミッションは起きていない。目標電界付近での測定結果は $E_{sp}=42\text{MV/m}$ 、 $Q_0=7.15 \times 10^9$ であった。空洞単体ではフィールドエミッションなしで目標性能を十分に達成していることが示された。

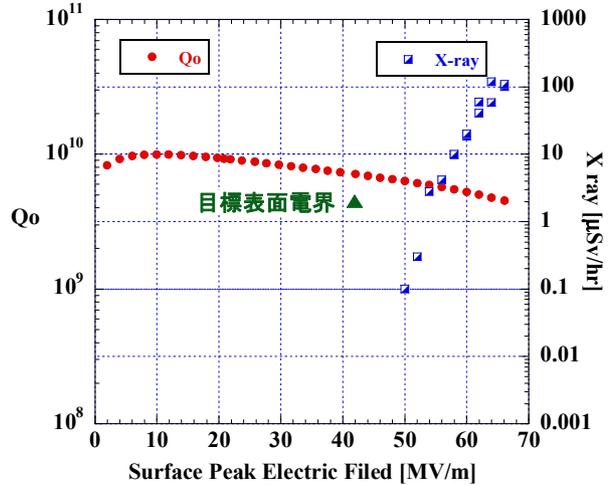


Figure 7: 1st vertical test result.

高電界試験後に空洞内面を観察したところカソードセル周辺に Figure 8 に示す変色があった。変色の原因として考えられることはフィールドエミッションであるが、フィールドエMISSIONの大きな空洞であっても変色が確認されたことは無くフィールドエMISSIONが原因とは考えにくい。また電界研磨終了時にアルミ陰極が空洞に当たり生じた傷を見ることもできた。変色の原因は今後の縦測定でセンサー密度を増して明らかにしていく

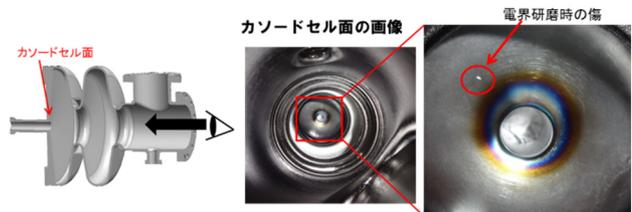


Figure 8: Inside view of cathode cell after 1st vertical test.

4. まとめ、今後の展開について

超伝導電子銃試作 1 号機の製作が完了し最初の縦測定を行った。チョーク、カソードプラグ、フォトカソードを付けずに空洞セル単体での高電界特性を見るためである。縦測定の結果は目標最大表面電界・ Q_0 値をフィールドエMISSIONなしで達成できることを示している。今後チョーク、カソードプラグ、フォトカソードを順次取り付けて縦測定を実施していく計画である。

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.