

RF 入力カプラー付きクライオ光陰極高周波電子銃用試験空洞の低温特性

LOW TEMPERATURE PROPERTY OF CRYOGENIC PHOTOCATHODE RF-GUN TEST CAVITY WITH INPUT COUPLER

境武志^{#,A)}, 田中俊成^{A)}, 中尾圭佐^{A)}, 野上杏子^{A)}, 稲垣学^{A)}, 高塚健人^{B)}, 長島涼子^{B)}, 高富俊和^{C)},
福田将史^{C)}, 浦川順治^{C)}, 吉田光宏^{C)}, 佐藤大輔^{D)}, 早川建^{A)}, 早川恭史^{A)}
Takeshi Sakai^{#,A)}, Toshinari Tanaka^{A)}, Keisuke Nakao^{A)}, Kyoko Nogami^{A)}, Manabu Inagaki^{A)}, Kento Takatsuka^{B)},
Ryoko Nagashima^{B)}, Toshikazu Takatomi^{C)}, Masashi Fukuda^{C)}, Junji Urakawa^{C)}, Mitsyhiro Yoshida^{C)},
Daisuke Satoh^{D)}, Ken Hayakawa^{A)}, Yasushi Hayakawa^{A)}

^{A)} Laboratory for Electron Beam Research Application (LEBRA), Nihon University

^{B)} College of Science and Technology (CST), Nihon University

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK

^{D)} Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Abstract

Based on the low-power and low-temperature (20 K) RF properties of the basic 2.6-cell cavity, a new cavity with the RF input coupler consists of a rectangular to circular waveguide converter was fabricated in KEK. A cylindrical coupler has been designed, which consists of a cylindrical waveguide and a mode converter that converts the rectangular TE₁₀ mode to the cylindrical TM₀₁ mode with both of them located on the accelerating cavity central axis. The cavity structure and the dimensions of the rectangular to circular waveguide converter have been designed using the simulation codes SUPERFISH and CST Studio. The RF properties of the cylindrical only part of the 2.6 cell cavity were in good agreement with the result of the CST-STUDIO calculation. However, the behaviors of the S₁₁ and the field distributions in the completed cavity with coupler mode converter have to be analyzed in relation to the non-axisymmetric field in the cylindrical waveguide.

1. はじめに

日本大学では、文部科学省「光・量子融合連携研究開発プログラム」の「光・量子ビーム技術の融合・連携促進のための基盤技術開発」の助成を受けて^[1]、20 K程度まで冷却した高純度銅を用いた2.6セルCバンド(5712 MHz)動作の高周波電子銃製作を行っている^{[2][3]}。これまでにSUPERFISH^[4]を用いて2.6セル空洞形状の最適化、2.6セル試験空洞製作を行い、20 Kにおける低温特性、低電力高周波特性測定などからほぼ計算通りの値が得られていることを確認した^[5]。これらの結果を踏まえ、矩形導波管から円筒空洞への変換入力カプラー付きテスト空洞をCST-STUDIO^[6]を用いて設計製作し、低電力、冷却試験を行った。結合係数、Q値はほぼ計算どおりであったが、共振周波数は予定よりも低く、また軸上電界分布測定では円筒部に非軸対称な磁場が発生していることが確認できた。本発表では、CST-STUDIOを用いたシミュレーション、低電力試験測定結果に関して報告する。

2. カプラー付き試験空洞の設計

2.6セル基本構造空洞における20 K冷却試験の結果を踏まえ、大電力RF入力用の空洞を製作するための試験空洞としてRF入力カプラー付きの低電力

試験空洞をKEKにおいて超精密加工により製作した。本製作での室温での空洞寸法比は、2.6セルの基本構造空洞を用いた冷却試験から得られた共振周波数の変化量をすべて空洞寸法の変化によるとし、kHz単位まで評価した場合を仮定して、室温[23.5 °C]/低温冷却時[20 K] = 1.0033529とした。カプラー部の構造としては、Xバンド加速管の入力カプラーとして使われた長い円筒空洞と矩形導波管からモード変換を行うカプラー構造を採用した^[7]。これにより、加速セルに直接導波管を接続した場合の電磁界を軸対称化するために必要となる複雑な構造や同軸構造の場合に問題となる内部導体の冷却の問題が無くなり、単純な構造で設計が可能である。Figure 1にカプラー付き2.6セル試験空洞の設計断面図を示す。この構造では、円筒部が長くなるため、

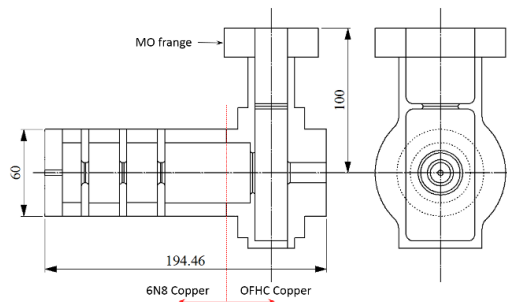


Figure 1: Cross-sectional view of the low power test cavity with the cylindrical input coupler.

[#] sakai@lebra.nihon-u.ac.jp

円筒空洞とモード変換部に生じる電磁界が加速空洞部に比べ低く抑えられ、また冷却プレート避け集束コイルの設置も可能となるなど利点がある。矩形導波管の規格はWRJ5、フランジはMOフランジ⁸⁾を採用した。試験空洞製作の際は、2.6セルの加速部は拡散接合で行えるが、カプラー部などの部品の接合過程において変形を生じてしまう可能性があったため、カプラー部はロー付けする方針とし、またこれに加え、カプラー部のサイズが大きくなるため、矩形導波管からカプラー部の円筒の約 1/3 までを通常使用される無酸素銅で製作することとした。

3. 試験空洞のシミュレーション

試験空洞は最初に SUPERFISH を用いて、2.6 セルの加速空洞部の寸法最適化を行い、次にカプラー部の計算モデルと合わせて最終調整を行った。カプラー部は軸対称の構造ではないため、CST-STUDIO を用いて 3 次元計算を行った。矩形導波管の TE₁₀ モードから円筒導波管の TM₀₁ モードに変換する構造は、矩形導波管の端部から管内波長に対して 1.5 λ_g 位置付近にアイリスを設け、定在波を発生させて円筒導波管部のアイリスの位置で軸対称に近い電場分布が得られるように位置と長さ調整を行った。矩形導波管部から円筒導波管への伝送は、VSWR が小さくなるように、矩形導波管部のアイリスの位置、開口幅、円筒導波管部のアイリス開口幅、内径を最適化した。最適化後、VSWR は 1.03 に調整された。カプラー部の調整後、2.6セル加速空洞を接続した条件で空洞全体の共振周波数が 5712 MHz、カプラー部と空洞部の結合係数 β が約 20 になるように調整した。円筒部長さは自由空間波長の 1.25 倍で調整していたが、円筒 TE₁₁₂ モードが π モードの周波数に近い周波数で共振していることが分かったため、100 MHz 程度ずらすため、2.5 mm 縮めて対応した。

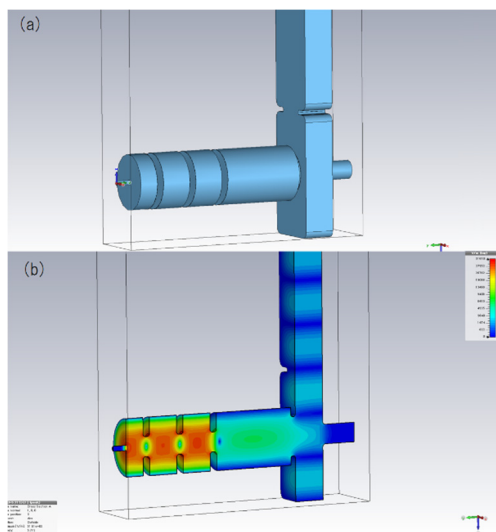


Figure 2: (a) simulation model of the 2.6 cell cavity with coupler, (b) Example of the electric field distribution in the test cavity calculated using CST-Studio.

各部の調整は、円筒部のアイリスで結合係数調整、2.6セル目の空洞径で共振周波数調整し、空洞の各寸法はこれまで同様に、0.1 μm まで調整した。Figure 2 に最適化に用いた計算モデルと、電界分布例を示す。Figure 3 には空洞表面抵抗を室温の場合と 20 K での値に設定した場合の VSWR の比較を示す。Table 1 に室温と 20 K 冷却時のシミュレーションによる RF 特性の比較を示す。ただし、寸法はどちらも 20 K 冷却時の値で行い、表面抵抗のみ変更した場合の結果である。そのため、キャビティー温度 23.5 °C、真空中における設計共振周波数は 5692.91 MHz である。また上で述べたように、円筒導波管部で銅材が変わるため、CST-STUDIO を用いて確認を行ったが、途中で表面抵抗の異なる場合においてもカプラー部の電磁場は加速空洞部に比べて弱いため、特性に大きな変化がないことを確認した。

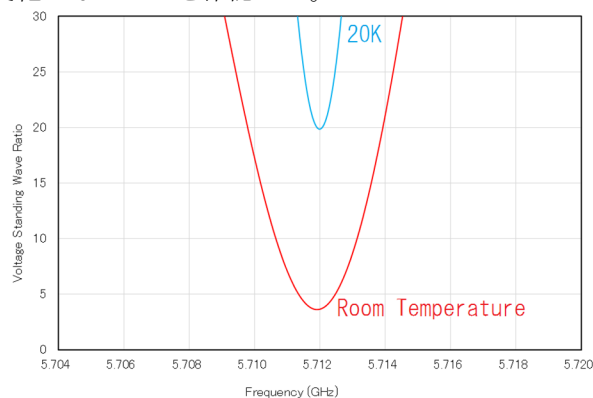


Figure 3: Comparison of the VSWR between the room temperature and 20 K with the CST-STUDIO.

Table 1: Results of the Simulation at Room Temperature and 20 K

	Rs (Room temp.)	Rs (20 K)
RF frequency [MHz]	5711.91*	5712.00
VSWR	3.61	19.985
Q ₀	11500	64600
Q _L	2500	3100
Buildup Time [ns]	139	173

*Dimensions of the room temperature is set to the same as 20 K, therefore design frequency is 5692.91 MHz.

4. カプラー付き試験空洞低電力試験

4.1 室温における低電力試験

試験空洞のシミュレーションで各寸法を決定後、KEK において超精密加工を行い、2.6 セル空洞部の周波数特性確認後、KEK 内で拡散接合、ロー付けを行い、カプラー付きの 2.6 セル試験空洞を製作した。周波数測定はキーサイト・テクノロジー社製のネットワークアナライザー E5071C を用いた。ネットワークアナライザーからの出力 RF は、APC3.5 同軸ケーブルから N 型の同軸コネクタへ変換し、さらに同軸導波管変換器を通して矩形導波管へ入力される。ネットワークアナライザーの較正は、電場分布測定

時、冷却測定時に関しては E-cal 較正キットを用いた。また S_{11} 測定時は、シミュレーションの条件と合わせるため、同軸導波管変換器部分で導波管較正キットを用いて較正を行った。ただし、MO フランジと円形フランジ変換を持ち合わせていないため、誤差を多少含んだ較正となっている。

Figure 4 に軸上の電界分布測定結果を示す。測定中の温度、湿度、キャビティー温度、気圧による測定前後の周波数のドリフトの影響を避けるために、ステップ間隔 0.5 mm でキャビティー中心軸上の測定を高速で 10 回行い、さらに波形はスムージングをかけ測定し、その平均値をプロットした。点線は測定で得られた値であり、実線は CST-STUDIO による電場分布振幅の計算結果で、2.6 セル目の空洞部中のピーク値で規格化している。この結果より、2.6セル空洞部では特に大きな問題も無く、ほぼ計算通りの分布が得られていることが分かるが、円筒導波管部分では、軸上に磁界が生じている事が示唆される分布が見られた。円筒部の分布の様子より、 TM_{01} モードの他に、非軸対称の TE_{11} モード成分が大きく混在していると考えられる。

Figure 5 に電圧反射係数 S_{11} の分布測定結果を示す。青い曲線は 2.6 セル空洞とカップラー全体に対する S_{11} の測定結果、赤い曲線は 2.6 セル空洞部分に細い銅パイプを挿入することで TM_{01} モードを離調し、円筒導波管までの部分に対する S_{11} の結果である。Figure 5-(a) は測定値、(b) は CST-STUDIO での同条件でのシミュレーション結果を示したものである。2.6セル空洞部分には TM_{01} モードの 0、 $\pi/2$ 、 π モードの各ピークがあり、5800 MHz 付近には TE_{112} モードがあることが電界分布と計算結果から確認された。また、測定結果には全体的にオフセットが有ることが分かるが、これは先に述べたように、導波管較正時に簡易較正を行った測定のために発生している。簡易較正による誤差の影響も含まれてはいるが、このずれの分を補正、規格化し導波管とカップラー部の結合係数を求めると $\beta = 3.73$ であった。同様に Q 値を求めると Q_L は 2461 となっており、これより Q_0 は 11640 となった。これらの結果は Table 1 に示した CST-STUDIO で求めていた計算結果に非常に良く一致している。

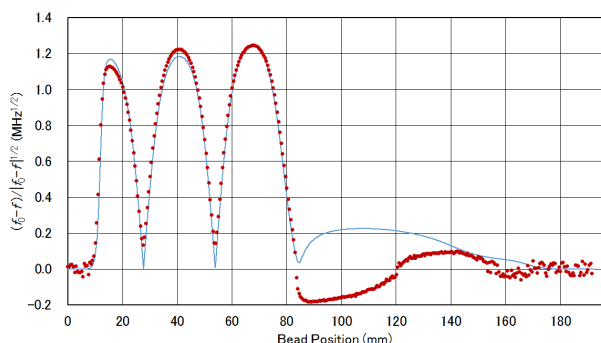


Figure 4: The results of the π -mode field by the bead-pull measurement and the calculation of CST-Studio, respectively. The solid curve is the calculation using CST-Studio.

共振周波数に関しては、CST-STUDIO の計算では、20 K で 5712 MHz で共振するように設計し、空洞寸法比 1.0033529 を用いると、室温 23.5 °C では 5692.91 MHz であるが、600 kHz 以上低くなっていることが確認された。また、円筒導波管部分の軸上に磁界が強く生じている事が示唆されたが、較正を正確に行い精密な測定が必要と思われる。また円筒部での TE_{11} モードの成分を大幅に減少させるように矩形導波管から円筒導波管へのモード変換器部分の構造について再設計を行っており、詳細な解析を進めている^[9]。

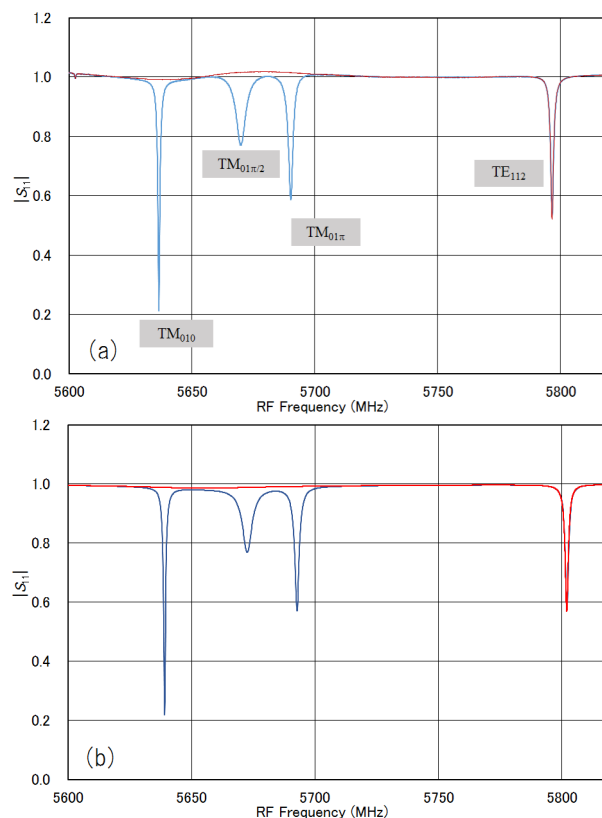


Figure 5: (a) Plot of the $|S_{11}|$ distribution. The red curve was observed by detuning the 2.6-cell cavity. (b) Result of the CST-STUDIO simulation.

4.2 20 K 冷却時の低電力試験

室温での低電力試験後、20 K 冷却試験を行った。冷却試験は、前回同様に KEK の真空槽とクライオスタット (Daikin Industries V108C5L) を用いて行い、空洞はロー付けされたベースプレートにクライオスタットヘッド接続用の調整プレートを介して固定した。調整プレートとキャビティー間には APIEZON N グリス^[10]を塗り、熱伝導を高めた。入力 RF は同軸導波管変換器を通して矩形導波管へ入力した。温度は較正済みの LakeShore 製のシリコンダイオードセンサ DT-670 シリーズ^[11]を用いた。しかし空洞表面の加工の問題で、温度センサーの固定がうまくできなかったため、冷却実験時は、空洞の両サイド単板にカプトンテープで温度センサーをそれぞれ固定した。RF 測定では、低電力試験と同様のネットワーク

アナライザーを用い、較正はE-cal較正キットを用いて行った。測定時は空洞温度、 π モード共振周波数、共振周波数周辺の S_{11} 、 S_{21} 、スミスチャートを5秒間隔で測定した。Figure 6に室温から20 Kまでの空洞冷却時の様子を示す。時間経過と共に温度が低下しているが冷却開始3時間後に温センサーが剥離してしまい、正確に測れなくなり、温度は参考値とした。 π モード共振周波数は室温23.5°C換算時で5692.27 MHzであったが、4時間弱の冷却後には5711.38 MHz付近でほぼ一定となり、温度は確認できなかったが、およそ20 Kまで冷却されたと判断した。室温での測定結果と同様に、20 K冷却後も設計周波数の5712 MHzに比べ約600 kHz低いことが確認できた。

Q値や結合係数に関しては、冷却中の測定波形に問題があったため、誤差も大きく、参考値とし、今後温度センサー設置の問題を改善後、冷却試験を含め、再測定を行う予定である。

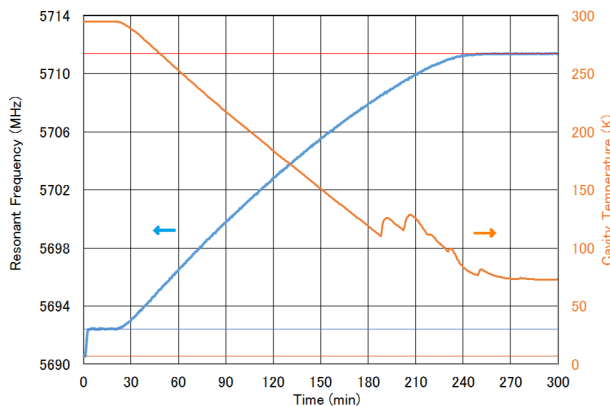


Figure 6: Plot of the cavity temperature and the π -mode resonant frequency as a function of the time from a refrigerator start time point.

5. まとめ

2.6セル基本構造空洞における20 K冷却試験の結果を踏まえ、RF入力カプラー付きの低電力試験空洞をKEKにおいて製作した。製作したカプラー付き空洞を用い、室温、20 Kでの低電力試験を行った。測定の結果、室温での導波管とカプラー部の結合係数、無負荷 Q_0 はCST-STUDIOで求めた結果に良く一致した。しかし電場分布の測定において、軸上に磁界が生じている事が示唆される分布が見られ、円筒部には TM_{01} モードの他に、非軸対称の TE_{11} モード成分が大きく混在していると考えられた。これらの結果はシミュレーションからは見られなかったため、

再度詳細な測定と、カプラーを構成している矩形導波管から円筒導波管へのモード変換部分の構造に関してさらに詳細な解析が必要であり、現在進めている。

20 K冷却測定では、温度センサーの取り付けに関して問題があり、測定中に剥離し正確に測れなくなってしまうが、5711.38 MHz付近でほぼ一定となった。これは設計値に比べ、およそ600 kHz低くなったが、室温での結合係数やQ値が良く一致していることなどから、空洞への温度センサー設置方法の改善後、さらに詳細な測定を行う予定である。

2.6セル空洞表面のピーク磁場強度を低減した空洞の検討を行っており^[12]、カプラーの最適化を含め、大電力RF入力用空洞の製作を予定している。

謝辞

この研究開発は、文部科学省「光・量子融合連携研究開発プログラム」の「光・量子ビーム技術の融合・連携促進のための基盤技術開発」の助成を受けて行いました。

参考文献

- [1] M. Fukuda et al., NA-PAC13, Pasadena, USA (2013) p.589; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/PAC2013/papers/tupma01.pdf>
- [2] T. Sakai et al., "CHARACTERISTICS OF TEST CAVITY FOR CRYOGENIC PHOTOCATHODE RF-GUN", Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 9-11, 2014, Aomori, Japan, pp. 548-551, http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SAP0/SAP034.pdf
- [3] T. Tanaka et al., Proceedings of IPAC'14, Dresden, Germany (2014) p.658; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/mopri030.pdf>
- [4] http://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml
- [5] T. Sakai et al., "LOW TEMPERATURE PROPERTY OF 2.6-CELL CRYOGENIC PHOTOCATHODE RF-GUN TEST CAVITY", TUP058, these proceedings.
- [6] <https://www.cst.com/>
- [7] Y. Taniguchi et al., Proceeding of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Higashihiroshima, Japan (2008) p.954; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj5_lam33/contents/PDF/TP/TP115.pdf
- [8] http://mo-ohtsuka.co.jp/features_of_moflange.html
- [9] K. Takatuka et al., "Simulation of RF-input Coupler Structure for Cryogenic Photocathode RF-gun", WEP058, these proceedings.
- [10] <http://www.apiezon.com/products/vacuum-greases/n-grease>
- [11] <https://www.toyo.co.jp/lakeshore/sensor/silicon/>
- [12] K. Nakao et al., "Simulation of Electromagnetic Field for 20K Cooled Photocathode RF Gun", WEP057, these proceedings.