

# 入力カプラー付き 20K C-band 2.6 セル高周波電子銃低電力試験空洞の低温試験

## LOW-TEMPERATURE TEST OF 20 K C-BAND 2.6 CELL RF-GUN TEST CAVITY WITH INPUT COUPLER

境武志<sup>#, A)</sup>, 田中俊成<sup>A)</sup>, 中尾圭佐<sup>A)</sup>, 野上杏子<sup>A)</sup>, 稲垣学<sup>A)</sup>, 高塚健人<sup>B)</sup>, 早川建<sup>A)</sup>, 早川恭史<sup>A)</sup>,  
高富俊和<sup>C)</sup>, 佐藤大輔<sup>C)</sup>, 福田将史<sup>C)</sup>, 吉田光宏<sup>C)</sup>, 照沼信治<sup>C)</sup>, 浦川順治<sup>C)</sup>  
Takeshi Sakai<sup>#, A)</sup>, Toshinari Tanaka<sup>A)</sup>, Keisuke Nakao<sup>A)</sup>, Kyoko Nogami<sup>A)</sup>, Manabu Inagaki<sup>A)</sup>, Kento Takatuka<sup>A)</sup>,  
Ken Hayakawa<sup>A)</sup>, Yasushi Hayakawa<sup>A)</sup>, Toshikazu Takatomi<sup>C)</sup>, Daisuke Satoh<sup>C)</sup>, Masashi Fukuda<sup>C)</sup>,  
Mitsyhiro Yoshida<sup>C)</sup>, Nobuhiro Terunuma<sup>C)</sup>, Junji Urakawa<sup>C)</sup>,

<sup>A)</sup> Laboratory for Electron Beam Research Application (LEBRA), Nihon University

<sup>B)</sup> College of Science and Technology (CST), Nihon University

<sup>C)</sup> High Energy Accelerator Research Organization, KEK

### Abstract

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 TE<sub>10</sub> mode to the cylindrical TM<sub>01</sub> mode with both of them located on the accelerating cavity central axis. In the new cavity, the corners of the pillbox cells have been modified to be rounded off in an optimum shape. The design of the input coupler has also been modified to improve the low VSWR characteristics and the low TE<sub>11</sub>/TM<sub>01</sub> electric field amplitude ratio on the circular waveguide axis. Based on the simulations by Superfish and CST-Studio, a new cold model of a C-band cryocooled photocathode RF gun has been fabricated. The RF properties measured at low-temperature (20 K) have been in good agreement with the simulations. In this paper the RF properties of the C-band 2.6-cell cavity measured at around 20 K are reported.

### 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」[1]の助成を受けて、20K 程度まで冷却した高純度銅による低損失常伝導高周波空洞を用いた C バンド(5712 MHz)動作の高周波電子銃の基礎的開発を平成 25 年度から行ってきた[2][3]。構造としては、矩形導波管から円筒導波管への変換 RF 入力カプラーを備えた 2.6 セルの  $\pi$  モード空洞について検討を行い、これまでにアメリカ国立標準技術研究所 (NIST) による高純度銅材の低温特性データ[4]を考慮し、SUPERFISH[5]、CST-STUDIO[6]、GPT[7]を用いたシミュレーションによって RF 入力カプラー及び空洞形設計を行った。昨年度、2.6 セル空洞の形状変更[8]、カプラー部の非軸対称モードの低減最適化後[9][10]、KEK での超精密加工により空洞製作を行い、室温での低電力測定を行った[11]。低電力試験後、KEK において 20 K での低電力試験を行った。20 K 冷却試験の結果、共振周波数はほぼ CST-STUDIO での設計通りの特性が得られた。本発表では、シミュレーション及び 20 K 冷却時の RF 特性測定結果に関して報告する。

### 2. RF 入力カプラー付き 2.6 セル $\pi$ モード試験空洞

これまでに作製した RF 入力カプラー付きの試験空洞では[2]、円形導波管部に非軸対称なモードが存在して

いることが判明し、カプラー部の矩形導波管、円形導波管部のアイリス寸法を再調整最適化を行い、最適化後は、TE<sub>11</sub> モード成分が大幅に低下し、TM<sub>01</sub> モードに対する軸上電界振幅比が 2%まで減少している[9]。また、2.6 セル空洞に関してはマルチパクタリングを抑えるために球形状の構造に変更し、RF 入力カプラーと空洞を結合した状態で運転周波数 5712 MHz 周辺での TM<sub>010</sub>、TM<sub>011</sub> モードによる影響を避けるため、それぞれ 40MHz 以上離している[11]。

RF 入力カプラー付きの低電力試験空洞は、これまでと同様に、KEK において超精密加工により製作し、KEK 内で拡散接合、ロー付けを行った。本製作での室温での空洞寸法比に関しては、過去の基礎測定から求めた値を参考に、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 としている。

Figure 1 に製作した RF 入力カプラー付きの 2.6 セル

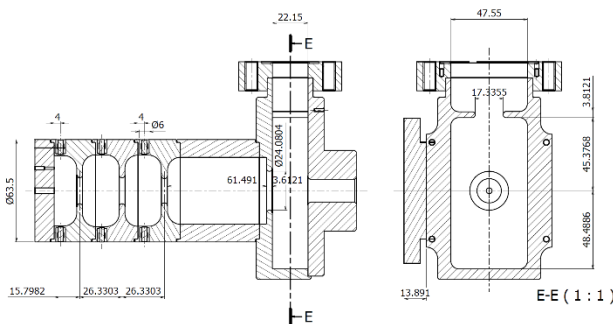


Figure 1: Cross-sectional view of the low power 2.6 cell  $\pi$ -mode test cavity with the cylindrical RF input coupler.

<sup>#</sup> sakai@lebra.nihon-u.ac.jp

$\pi$  モード試験空洞の設計断面図を示す。2.6 セル空洞部分は高純度 6N8 銅材、円形導波管及び矩形導波管の部分には C1011-6N8 無酸素銅、冷凍機ヘッド接続用ベースプレートは C1020 無酸素銅をそれぞれ用いた。また導波管フランジは内側に銅メッキを施している。

RF 入力カプラー付きの試験空洞の主な仕様を Table 1 に示す。各数値は 20 K 時、室温 23.5 °C 時の空洞の表面抵抗値を用いて CST-STUDIO で求めた値を示しており、その他は設計仕様値を示している。

Table 1: Specifications for the 2.6-Cell Cryogenic C-Band Photocathode RF Gun with Input Coupler

RF frequency	5712	MHz
Source peak RF power	4	MW
$Q_0$	73029 @ 20 K	
	13310 @ 296 K	
Shunt impedance	603 @ 20 K	M $\Omega$ /m
	113 @ 297 K	M $\Omega$ /m
Coupling coefficient	19.3 @ 20 K	
	3.52 @ 297 K	
Cavity length	68.2	Mm
RF pulse duration	2	$\mu$ s
RF pulse repetition rate	50	Hz
Maximum field on axis	95	MV/m
Output beam energy	0.73	MW
RF duty factor	0.01	%
Maximum beam charge	0.5	nC/bunch
Laser pulse repetition rate	375	MHz
Laser pulse length	10~20	Ps
Maximum beam energy	3.5	MeV

### 3. RF 入力カプラー付試験空洞冷却試験

#### 3.1 冷却特性測定系

試験空洞に対する 20 K 冷却試験は、これまでの空洞冷却試験と同様に KEK で製作された真空槽を用いて行った。冷凍機にはクライオスタット (Daikin Industries V108C5L) を用いている。Figure 2 に真空チェンバー内に取付けた RF 入力カプラー付き試験空洞の様子を示す。空洞の上部にクライオスタットが設置されており、空洞は空洞と同素材で製作した銅製の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。各プレート間には APIEZON N グリス[12]を塗り、熱伝導を高めている。

冷却中の温度測定には校正済みの LakeShore 製のシリコンダイオードセンサ DT-670 シリーズ[13]を用い、クライオスタットと空洞間のベースプレート、空洞単板の両サイドにそれぞれネジを用いて、計 3 箇所固定した。

共振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真空チェンバー接続部までは潤工社製 JUNFLON(R) MWX021[14]の APC3.5 同軸高周波ケーブルを用いて、真空チェンバーに設けられている N 型の同軸コネクタへ変換接続し、真空チェンバー内ではセミジットケーブルを介し真空仕様の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

ザーの校正には、同軸導波管変換器部分で導波管校正キットを用いて校正を行っている。また校正は、セミジットケーブルも含め行い、矩形導波管部フランジには MO フランジ[15]を用いているが、校正時には MO-円形フランジ変換を使用することで校正作業を行った。

また参考値とするために、2.6 セル空洞の単板中心に SMA コネクタ端子を接続し、セミジットケーブルを介して外へ取り出し、 $S_{21}$  も測定できるようにして測定を行った。

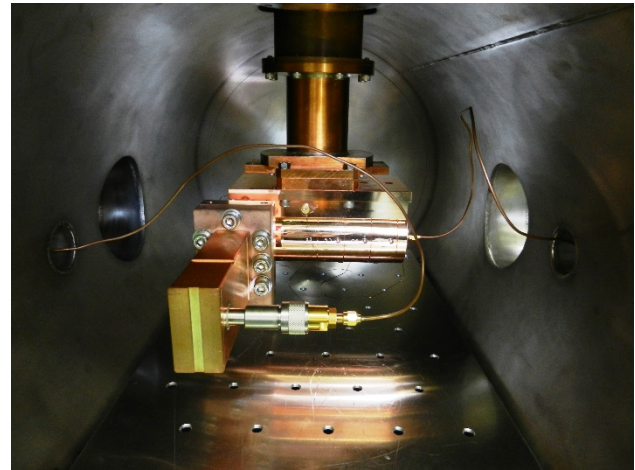


Figure 2: Photograph of the 20 K 2.6 cell cavity with RF input coupler in the vacuum chamber.

#### 3.2 20 K 冷却と低電力測定

RF 入力カプラー付き試験空洞の 20 K 冷却試験は、真空チェンバーを  $1 \times 10^{-4}$  Pa 程度まで真空排気をした後から冷却を開始した。測定時は 3 箇所の各温度、 $\pi$  モード共振周波数、共振周波数周辺数 MHz 周辺の  $S_{11}$ 、 $S_{21}$  波形、スミスチャートを 30 秒間隔でそれぞれ測定した。Figure 3 に室温から 20 K 付近までの空洞冷却時の温度と  $S_{11}$  の共振周波数の変化の様子を示す。空洞は約 4 時間で温度変化が緩やかになり、約 5 時間後、292.69 K から 20.75 K まで冷却された。 $\pi$  モード共振周波数は、5691.551 MHz から 5711.887 MHz まで変化し、ほぼ一定となった。

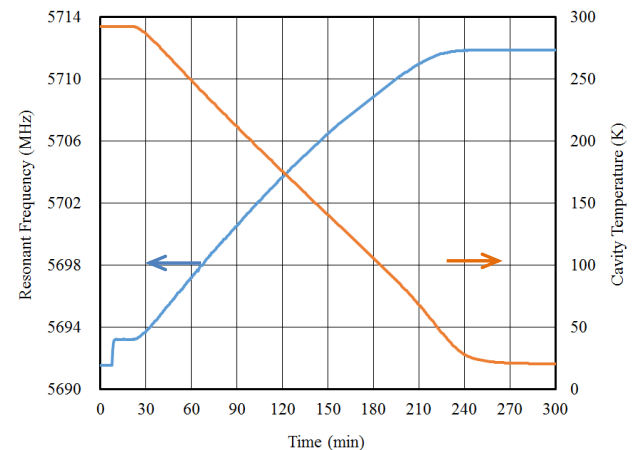


Figure 3: Plot of the cavity temperature and the  $\pi$ -mode resonant frequency ( $S_{11}$ ) as a function of the elapsed time since the beginning of the cooling experiment.

Figure 4-(a)に約 5 時間冷却した後の 20.75 K 時の  $S_{11}$  の波形と冷却途中の 227 K 付近での  $S_{11}$  の波形を示す。測定データは最小二乗法を用いてフィッティングしている。ただし、隣のモードの影響でグラントレベルがリニアではないため、完全にフィッティングできていないが共振周波数近傍では問題なくフィッティングがされている。また、冷却開始前後では測定波形は特に問題なく測定できているが、空洞温度 190~263 K の間には測定波形にノイズが乗った信号を観測した。Figure 4-(b)にキャビティ温度 227 K 時の  $S_{11}$  測定波形を示す。前回の測定時にも冷却過程で似た温度付近で同じような現象は確認できており、同軸導波管変換器などに用いている端子部分の急激な温度変化に伴う歪による接触不良などが原因と考えている。しかしこの温度範囲の波形に関しても共振周波数近傍ではほぼ問題なくフィッティングできている。

また、約 5 時間冷却した 20.75 K 時の解析結果から、無負荷 Q 値が大きくずれていることがわかった。これは冷却前に行ったアナライザー較正に問題があり、測定に大きく影響が出たと思われる。

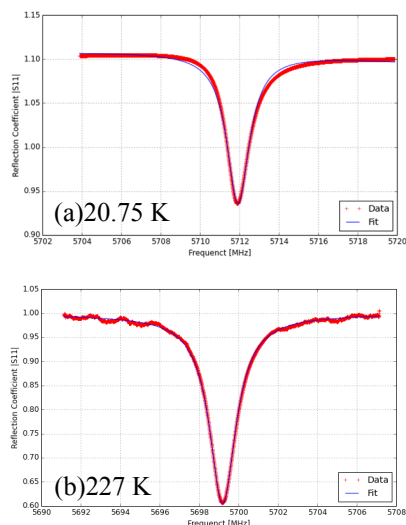


Figure 4: Reflection Coefficient  $|S_{11}|$  spectra measured at the cavity temperature of (a) 20.75 K and (b) 227 K. The signal in (b) reflects an unexpected electromagnetic noise on the line.

#### 4. まとめ

新しく作製した 2.6 セル空洞でのマルチパクティングを抑えるために球形状の構造に変更し且つ、 $TM_{01}$  モードに対する  $TE_{11}$  モード軸上電界振幅比が 2%まで減少させた RF 入力カプラー付きの 2.6 セル試験空洞の 20 K 冷却と低電力測定試験を行った。KEK で行った冷却試験の結果、約 5 時間後、室温から 20.75 K まで冷却され、 $\pi$  モード共振周波数は、5711.887 MHz であった。また  $S_{11}$  の波形から Q 値が大きくずれていることがわかった。この原因としては、測定前の較正がうまくできていなかったことに由来していると思われる。

今後の課題として、冷却過程で端子部分の急激な温

度変化に伴う歪が原因と思われるノイズ信号に関しては、現在製作中の熱流入を抑制するステンレス製温度勾配導波管(導波管内面に数 $\mu\text{m}$  銅メッキ)を用いることで抑えられると考えており、新しく構築中の冷却システムでは発生しにくくなると期待される。また 20 K 冷却時の Q 値のずれに関しても、測定時の較正方法を見直し、新しい冷却システム構築後、再度測定を行う予定である。

#### 謝辞

本研究開発は、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.*, "Low Temperature Property of Cryogenic Photocathode RF-gun Test Cavity with Input Coupler", Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 5-7, 2015, Tsuruga, Japan, pp. 1109-1112; [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP0/THP057.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP0/THP057.pdf)
- [3] T. Sakai *et al.*, "Low Temperature Property of 2.6-CELL Cryogenic Photocathode RF-gun Test Cavity", Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 5-7, 2015, Tsuruga, Japan, pp. 1113-1115; [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP0/THP058.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP0/THP058.pdf)
- [4] J. H. Billen and L. M. Young, LA-UR-96-1834 (2006), Los Alamos National Laboratory; [http://laacg.lanl.gov/laacg/services/download\\_sf.phtml](http://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml)
- [5] アメリカ国立標準技術研究所 NIST データベース; [http://cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/OFHC%20Copper/OFHC\\_Copper\\_rev.htm](http://cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/OFHC%20Copper/OFHC_Copper_rev.htm)
- [6] CST Studio Suite TM, CST AG, Germany; <https://www.cst.com/>
- [7] S.B. van der Geer, M.J. de Loos, The General Particle Tracer code; <http://www.pulsar.nl/gpt/>
- [8] K. Nakao *et al.*, "Simulation of Electromagnetic Field for 20K Cooled Photocathode RF Gun", Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 5-7, 2015, Tsuruga, Japan, pp. 596-599; [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2015/proceedings/PDF/WEP0/WEP057.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/WEP0/WEP057.pdf)
- [9] K. Takatsuka *et al.*, "Simulation of RF-input Coupler Structure for Cryogenic Photocathode RF-gun", Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 5-7, 2015, Tsuruga, Japan, pp. 600-603; [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2015/proceedings/PDF/WEP0/WEP058.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/WEP0/WEP058.pdf)
- [10] T. Tanaka *et al.*, "Optimization of C-band RF Input Coupler as a Mode Converter for 20-K Cryocooled Photocathode RF Gun", Proceedings of IPAC'14, Busan, Korea (2015) p.2638-2640; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/wepmy038.pdf>
- [11] T. Tanaka *et al.*, "Cold Model Cavity for 20-K Cryocooled C-band Photocathode RF Gun", Proceedings of IPAC'14, Busan, Korea (2015) p.2635-2637; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/wepmy037.pdf>
- [12] <http://www.apiezon.com/products/vacuum-greases/n-grease>
- [13] <http://www.toyo.co.jp/material/products/detail/id=1924>
- [14] <http://www.junkosha.co.jp/english/products/cable/c06.html>
- [15] [http://mo-ohtsuka.co.jp/features\\_of\\_moflange.html](http://mo-ohtsuka.co.jp/features_of_moflange.html)