

## 2.6 セル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 2.6-CELL CRYOGENIC PHOTOCATHODE RF-GUN TEST CAVITY

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>, 長島涼子<sup>B)</sup>, 高富俊和<sup>C)</sup>,  
福田将史<sup>C)</sup>, 浦川順治<sup>C)</sup>, 吉田光宏<sup>C)</sup>, 佐藤大輔<sup>D)</sup>, 早川建<sup>A)</sup>, 早川恭史<sup>A)</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 Takatsuka<sup>B)</sup>,  
Ryoko Nagashima<sup>B)</sup>, Toshikazu Takatomi<sup>C)</sup>, Masashi Fukuda<sup>C)</sup>, Junji Urakawa<sup>C)</sup>, Mitsyhiro Yoshida<sup>C)</sup>,  
Daisuke Satoh<sup>D)</sup>, Ken Hayakawa<sup>A)</sup>, Yasushi Hayakawa<sup>A)</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

<sup>D)</sup> Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

#### Abstract

A cryogenic C-band 2.6-cell 20 K photocathode RF gun is under development at Nihon University for the future possibility of use in a compact linac-driven X-ray source at KEK. In order to investigate the 20 K properties of the cavity, a 2.6-cell  $\pi$ -mode test cavity was fabricated in KEK with ultra-precision machining and diffusion bonding techniques. The  $\pi$ -mode resonant frequency has increased from 5692.67 MHz to 5711.76 MHz by the cooling of the cavity from about 300 K to 20 K, the increase being about 190 kHz greater than the calculation using the linear expansion coefficients from National Institute of Standards and Technology, NIST. The unloaded Q-value at 21 K has been 5.65 times as high as that at room temperature, which is fairly in agreement with which predicted by the theory of the anomalous skin effect. 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

日本大学では平成 25 年度から、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、KEK の加速器を用いたコンパクト X 線源用に向け<sup>[1]</sup>、20 K 程度まで冷却した高純度の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開発を行っている。キャビティー構造は 2.6 セルの  $\pi$  モード空洞について検討を行い、SUPERFISH<sup>[2]</sup>によるシミュレーションによって空洞形状最適化、アメリカ国立標準技術研究所 (NIST) による高純度銅材の冷却特性データを考慮し、KEK において超精密加工により試作空洞を製作した。室温での RF 特性試験後、拡散接合後を行い 20 K 冷却温度特性、低電力高周波特性測定を行った。低電力試験の結果、空洞の無負荷 Q 値、共振周波数共に計算通りの値が得られていることを確認した。本発表では、試験空洞の 20 K 冷却時の測定結果に関して報告する。

#### 2. 2.6 セル試験空洞

キャビティー構造としては 2.6 セルの  $\pi$  モード空洞について検討を行っている。昨年度までに高純度銅材 6N8 (残留抵抗比 RRR3000 以上) を用いて室温時の空洞基本特性を測定した<sup>[3]</sup>。Table 1 に 2.6 セル  $\pi$

モード空洞の主な仕様を示す。SUPERFISH を用いて空洞形状最適化を行い、冷却時の高周波空洞の各寸法を決定している。室温での基本特性測定後、KEK 内の水素炉において拡散接合を行った。拡散接合で組み上げた空洞の断面図を Figure 1 に示す<sup>[4]</sup>。

Table 1: Specifications for the 2.6-cell Cryogenic C-band Photocathode RF Gun

RF frequency	5712	MHz
Source peak RF power	4	MW
$Q_0$	60000 @ 20 K 11000 @ 293 K	
Shunt impedance	550 @ 20 K 103 @ 293 K	M $\Omega$ /m M $\Omega$ /m
Coupling coefficient	20	
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

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

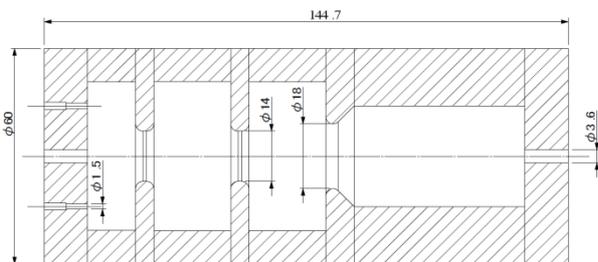


Figure 1: Cross-sectional view of the 2.6 cell 20 K cryogenic test cavity.

テスト空洞は、2.6セル空洞とカプラー用の外壁から構成されている。また摂動法を用いた空洞中心部の電界分布測定用に空洞の単板に直径 3.6 mm、中心軸から 14 mm の位置にアンテナ挿入用の測定用穴を設けている。

### 3. 試験空洞の 20 K 冷却測定

#### 3.1 空洞冷却測定系

拡散接合後の空洞の 20 K 冷却試験は、KEK の真空槽とクライオスタット (Daikin Industries V108C5L) を用いて行った。真空槽への空洞設置時のセットアップの様子を Figure 2 に示す。空洞は空洞と同素材で製作し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。各プレート間には APIEZON グリス<sup>[5]</sup>を塗り、熱伝導を高めている。空洞には 0.6 セル空洞部の単板中心穴からアンテナを挿入し RF を入力した。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<sup>[6]</sup>を用い、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 E5071C を用いた。冷却実験時は、空洞の両サイド単板に温度センサーをそれぞれネジで固定し、2 カ所からモニターし、それぞれの空洞温度、 $\pi$ モード共振周波数、共振周波数周辺の  $S_{11}$  波形を 5 秒間隔で測定した。

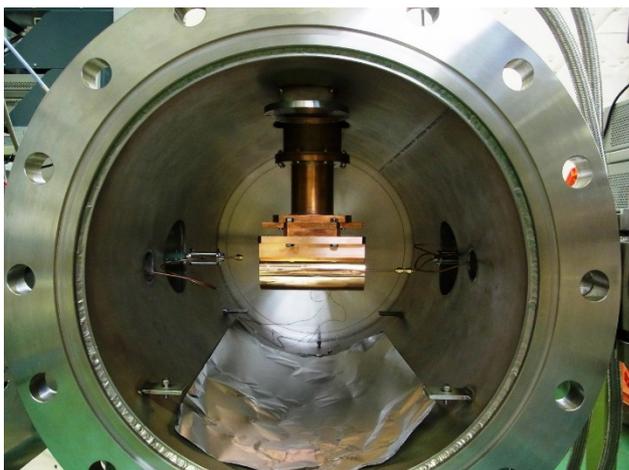


Figure 2: Setup of the 20 K 2.6-cell test cavity in the vacuum chamber with the cryogenic cooling system.

#### 3.2 共振周波数の温度依存測定

試験用真空層を真空排気し、十分真空度が良くなった事を確認してから、まず冷却前の状態で共振周波数の確認を行った。 $\pi$ モード共振周波数は 23.5 °C 換算で 5692.67 MHz を確認し、冷却を開始した。冷却は 21.27 K まで測定を行い、共振周波数は 5711.76 MHz となった。この温度周辺では OFHC 銅の収縮が  $10^{-6}$  以下となるため、共振周波数はほぼ変わらない。Figure 3-(a)に  $\pi$ モード共振周波数の温度依存性、Figure 3-(b)に 23.5 °C を基準にした空洞冷却過程で求めた  $\pi$ モード共振周波数測定値と NIST<sup>[7]</sup>の計算式に基づいた線膨張係数から求めた推定値との差を示す。Figure 3-(a)には比較のため NIST の計算式に基づいた結果も示している。NIST の計算式に基づけば、21 K 周辺では約 5711.57 MHz になるが、本測定では約 190 kHz 高い周波数を示した。Figure 3-(b)からこの差は空洞温度が 210 K 以下から直線的に差が拡大しており、空洞温度 40 K 以下で差が約 190 kHz に近づいていることが分かった。

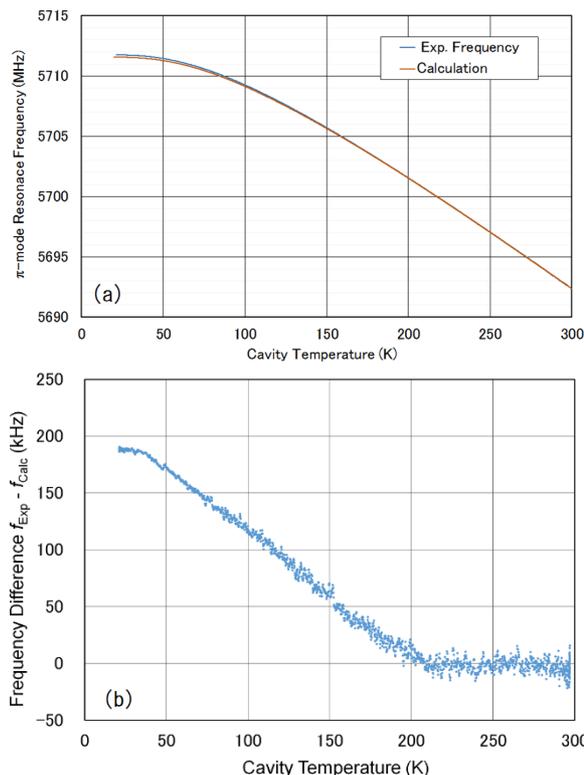


Figure 3: (a) Comparison of the temperature dependence of the resonant frequency between the experimental result and the calculation from NIST, (b) the frequency difference between the experimental and the calculation results.

#### 3.3 Q 値の温度依存測定

空洞冷却中に測定された  $S_{11}$  の分布データから Q 値を求めた。冷却開始前の真空槽内に設置された空洞に関して、室温 (297.06 K) では共振周波数は 5692.638 MHz、無負荷 Q 値が 11465 であった。冷却後の変化があまり見られなくなった空洞温度 21.27 K

では、共振周波数 5711.76 MHz、無負荷 Q 値は 64650 となり、5.65 倍に増加した。Figure 4 に空洞の冷却により銅の表面抵抗が低下し、これに従って空洞の Q 値が増大する様子を冷却時の全データに対して解析した結果を示す。解析は以下の式(1)を用いて、変数を  $A$ 、 $Q_L$ 、 $f_0$ 、 $a$ 、 $b$  とし、最小二乗法を用い、フィッティングを行った。

$$|S_{11}| = (af + b) \sqrt{1 - \frac{A}{1 + \left(\frac{2Q_L}{f_0}\right)^2 (f - f_0)^2}} \quad (1)$$

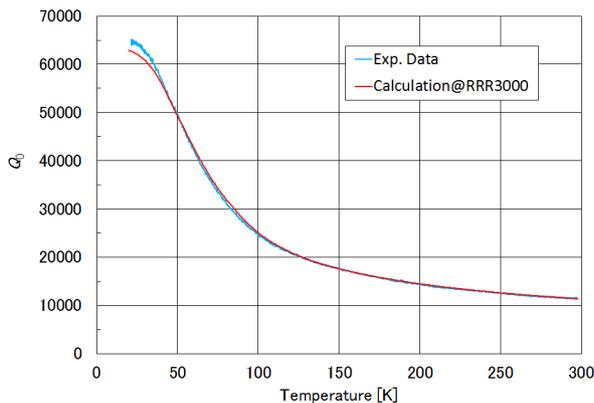


Figure 4: Comparison of the temperature dependence of the unloaded Q values from the  $S_{11}$  data accumulated during the cooling experiments. The red curve shows the predicted values based on the anomalous skin effect<sup>[7]</sup>.

Figure 4 の無負荷 Q 値は、式(1)の補正データから求めた  $Q_L$  から  $Q_0$  に換算して表示しており、さらに比較のため、Reuter らの異常表皮効果理論<sup>[8]</sup>による表面抵抗値の温度変化から求めた無負荷 Q 値も示した。異常表皮効果の計算結果は RRR3000 銅材を仮定して求めた値である。空洞温度 100 K 周辺で多少ずれが見られるが、ほぼ 40 K 付近までは異常表皮効果による表面抵抗値に基づく Q 値が測定結果を再現していることが分かる。また 40 K 以下の低温領域では、測定結果は数%高い値を示している。Table 2 に空洞冷却時の RF 特性結果をまとめた。ただし、21 K における共振周波数の計算値は 23.5 °C で得られた測定値から線膨張率により推定した値である。

Table 2: The  $\pi$ -mode Resonant Frequencies and the Unloaded Q-value Resulted from the Experiment and the Calculation

	Experiment	calculation
Frequency@23.5 °C [MHz]	5692.67	5692.97
@21 K [MHz]	5711.76	5711.57*
Unloaded Q@23.5 °C	11465	11400
@21 K	64650	62920

\*Estimation based on the experimental values obtained at 23.5 °C.

#### 4. まとめ

拡散接合後の 2.6 セル試験空洞を用い、20 K 冷却

試験を行った。21.27 K まで冷却測定を行い、共振周波数は 5711.76 MHz となった。NIST の計算式に基づいた 21 K 周辺での周波数は約 5711.57 MHz となるが、この周波数と比較すると、本測定では約 190 kHz 高い周波数を示していた。この差の原因としては、周波数変化の推定に用いた NIST の計算式における銅の線膨張率の精度が十分ではない可能性が考えられる。その他に、空洞設計に用いた SUPERFISH の計算では、空洞寸法のみで周波数を決定したが、無酸素銅の表面抵抗の違いにおける空洞での損失の減少なども考慮する必要があるため、表面抵抗の違いも含めた 3 次元計算で詳細な検討が必要であると考えられる。

また、Q 値の温度依存測定では、空洞温度 21.27 K 時に、無負荷 Q 値は 64650 となり、室温 (297.06 K) 時に比べ、5.65 倍に増加することが確認できた。Reuter による異常表皮効果理論における表面抵抗値の温度変化から求めた無負荷 Q 値との比較からも、40 K 以下での低温時では測定値のほうが数%高めの値を示したが、ほぼ測定結果を再現していることが確認できた。これらの結果から、拡散接合により空洞を製作することで接合部に合金領域ができないため、低温時での銅材料の特性劣化への影響が非常に小さくなり、Q 値に関してはほぼ計算通りの特性が期待できるといえる。

今後は本結果に基づき、本空洞に RF 入力用の結合空洞を接続した試験空洞の検討を行う。

#### 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] [http://laacg.lanl.gov/laacg/services/download\\_sf.phtml](http://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml)
- [3] 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](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SAP0/SAP034.pdf)
- [4] T. Tanaka et al., Proceedings of IPAC'14, Dresden, Germany (2014) p.658; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/mopri030.pdf>
- [5] <http://www.apiezon.com/products/vacuum-greases/n-grease>
- [6] <https://www.toyo.co.jp/lakeshore/sensor/silicon/>
- [7] 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)
- [8] G. E. H. Reuter and E. H. Sondheimer: "The Theory of the Anomalous Skin Effect in Metals", Proc. the Royal Society of London A, Mathematical and Physical Sciences, 195, 1042(1948), pp. 336-364.