

新型透過型電子顕微鏡のための超伝導高周波加速空洞の開発

THE DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING RF CAVITY FOR A NEW TYPE OF TRANSMISSION ELECTRON MICROSCOPE

東直^{A)}、古屋貴章^{B)}、舟橋義聖^{B)}、上野健治^{B)}、沢辺元明^{B)}、西脇みちる^{B)}、阪井寛志^{B)}
 道園真一郎^{B)}、山本将博^{B)}、榎本収志^{B)}、神谷幸秀^{B)}、栗木雅夫^{C)}、山下了^{D)}
 Nao Higashi^{A)}, Takaaki Furuya^{B)}, Yoshisato Funahashi^{B)}, Kenji Ueno^{B)}, Motoaki Sawabe^{B)}
 Michiru Nishiwaki^{B)}, Hiroshi Sakai^{B)}, Shinichiro Michizono^{B)}, Masahiro Yamamoto^{B)}
 Atsushi Enomoto^{B)}, Yukihide Kamiya^{B)}, Masao Kuriki^{C)}, Satoru Yamashita^{D)}

^{A)}Graduate School of Science, The University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033

^{B)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

^{C)}Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University

1-3-1 Kagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima, 739-8530

^{D)}International Center for Elementary Particle Physics, The University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033

Abstract

We are now developing a new type of transmission electron microscope (TEM) using superconducting RF accelerating cavity. This microscope can have higher voltage than ever. Furthermore there are other advantages, for example more compact facilities, good temporal resolution and so on. For RF acceleration to be applicable to TEM, however, the energy dispersion $\Delta E/E$ must be very small. In case of conventional TEMs, it is $O(10^{-6})$, while is usually larger than $O(10^{-4})$ in accelerators. To obtain such a small $\Delta E/E$, we have designed 2-mode cavity in which two resonant modes are simultaneously excited. This time, we have manufactured this, and conducted vertical tests. We report the differences between existing recipes and ours in manufacturing SC-RF cavity, and the results of the performance tests in detail.

1. はじめに

我々は現在、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) において、RF 加速を採用する透過型電子顕微鏡 (TEM) の開発を行なっている。これは、静電加速を用いる従来 TEM の加速エネルギーを大きく超え、透過力の高い TEM をコンパクトなサイズで実現することを目的とした研究である。さらに本研究は、最新のレーザー技術による光陰極電子銃を採用し、高電圧電子顕微鏡には実現できなかった高時間分解能の獲得が期待される。

我々は既に、文献 [1] にて、2-mode 空洞を採用することで TEM への RF 加速の適用が実現できることを指摘し、さらに基本設計が完了していた 2-mode 空洞の電場分布を用い、GPT による Beam Dynamics Simulation を行い、低エネルギー分散の実現可能性を示した。文献 [2] では、光陰極電子銃の電場分布を用いて、より正確な Beam Dynamics Simulation を行った。また、低エネルギー分散を実現するためには、現在達成されている RF 制御の精度で十分であることを示した。

今回はさらに、製作が完了した 2-mode 空洞の製作方法と、その性能測定の結果について報告する。

2. 2-MODE 空洞の特徴

RF 加速を TEM に採用する際に問題となるのは、振動電場によるエネルギー分散 $\Delta E/E$ の増大である。この結果として、色収差が大きくなり、最終的な位置分解

Table 1: The Design Values of 2-mode Cavity

	TM ₀₁₀	TM ₀₂₀
共振周波数 [GHz]	1.3002	2.5999
Q ₀	1.86 × 10 ⁸	1.00 × 10 ⁸

能が悪化する。従来型の TEM の一般的なエネルギー分散は $O(10^{-6})$ 程度であるが、一般的な加速器におけるエネルギー分散は小さくとも $O(10^{-4})$ である。従って色収差を抑えつつ RF 加速を採用するために、我々は 2-mode 空洞を設計し、製作した。これは基本波の TM₀₁₀ (共振周波数 1.3GHz) とその 2 倍高調波の TM₀₂₀ (共振周波数 2.6GHz) が同時に共振する空洞である。この 2 つの電場

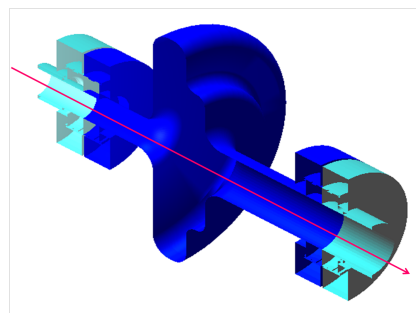
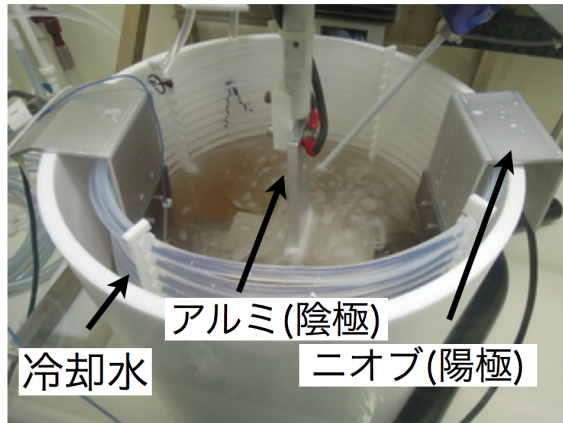


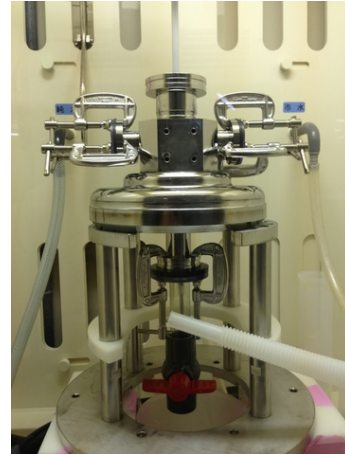
Figure 1: The schematic view of our 2-mode cavity.

Table 2: Required Electric Field for Each Case, 1-mode or 2-mode

	E_{ap} of TM ₀₁₀	E_{ap} of TM ₀₂₀	E	E	E/E
1-mode	9.85MV/m	-	304keV	61.8eV	2.04 10^{-4}
2-mode	8.21MV/m	9.25MV/m	278keV	10.2eV	3.68 10^{-5}



(a) EP



(b) CP

Figure 2: Each setup for EP and CP.

の重ね合わせによって、電子バンチを加速する振動電場のピーク部分を従来よりもフラットにすることができる。さらに今回は超伝導空洞を採用する。これは高電場励起を CW モードでも可能にし、電場を安定的に生成するためである。また、CW モードにより、十分な平均電流値を得ることもできる。この空洞の概念図を Figure1、設計値を Table1 にまとめた。運転は 4.2K 環境下を想定している。現在、KEK にて、原理実証の為の 300kV の加速電圧を持つプロトタイプ TEM を製作している。これは 300kV 従来型 TEM の光学系を再利用し、熱電子銃と加速部を、新たな光陰極電子銃と 2-mode 空洞に置き換えることで、実現する。300kV 加速のために必要な加速性能は、ビーム・ダイナミクスのシミュレーションより、エネルギー分散を最小にするよう求めた (Table2)。ここで E_{ap} は軸上最大電場である。

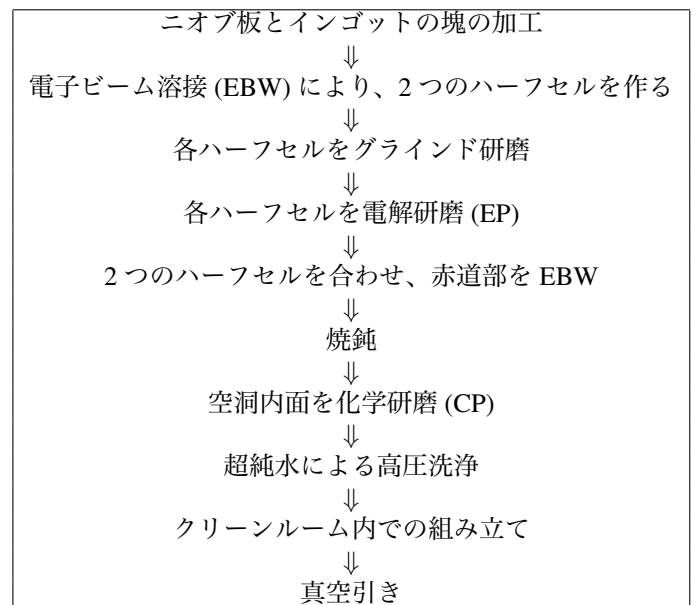
3. 2-MODE 空洞の製作

超伝導空洞空洞の材料として、長年研究が成されてきた純ニオブを、我々も 2-mode 空洞に採用した。製作には KEK が長年培ってきた製作技術と既存の施設を有効に利用した。さらに 2-mode 空洞は特殊な形状を採用しているため、各工程においては改めて最適化を行い、製法の確立を行った。製作過程は Table3 にまとめた。以下、各工程について説明する。

3.1 電子ビーム溶接 (EBW)

一般に加速空洞の製作には EBW が用いられており、我々も今回それを踏襲した。EBW には溶接ビームの電流値、電圧、フォーカス、溶接部の送り速度など様々な溶接条件がある。KEK では KEKB や ILC、ERL などで培われてきた空洞の溶接条件が存在するが、我々は今回改めて各条件の最適化を行った。特に今回、2つの共振

Table 3: Manufacturing Process of Our 2-mode Cavity



モードを同時に高精度で励起させる 2-mode 空洞を設計した。そのため、機械ノイズに対する強度確保やフィードバック安定化のため、2.8mm 13.0mm という厚い部材を採用し、溶接部では最大 3.1mm の厚みを持つ。そのため、各溶接部において、適切な加速電圧を設定し、EBW を行った。

Table 4: The Result of Vertical Tests

	TM ₀₁₀	TM ₀₂₀
resonant frequency[GHz]	1.2963	2.5851
Q ₀	(1.41 0.45) 10 ⁸	(0.89 0.18) 10 ⁸
E _{ap} [MV/m]	8.75 0.73	7.80 0.33

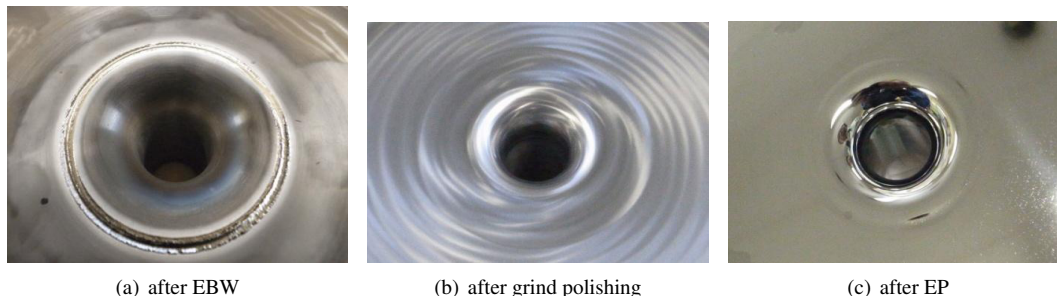


Figure 3: The transition of the surface of 2-mode cavity.

3.2 表面研磨

超伝導空洞では、表面積を減らし電気抵抗を抑えるため、また高電場励起の際における放電を防ぐため、空洞内部を鏡面状態に仕上げる。その方法として、KEKでは化学研磨 (CP) と電解研磨 (EP) があるが、ILC や ERL では EP のみで鏡面に仕上げる。この場合、横倒しにしたニオブ空洞を硫酸とフッ化水素酸からなる EP 液で半分程満たし、ビームパイプに陰極であるアルミ棒を通して EP を行う。しかし我々の空洞のビームパイプ径は比較的小さいので、この手段を取り入れることができなかった。従って我々は、ハーフセルの状態それぞれを EP し、赤道部を溶接した後にさらに CP を行った (Figure2)。研磨の推移を Figure3 に示した。まず EP を行う前にリユーターによるグランド研磨を行い、その上で EP を行った。研磨量は EP が 70 m、CP が 33 m 程度である。

4. 2-MODE 空洞の縦測定

空洞製作後、測定用クライオスタットを用いて縦測定を行い、空洞の加速性能を評価した。また、空洞が持つ 2つの周波数チューナーについての評価も行った。

4.1 周波数チューナー

2-mode 空洞は 2つの周波数チューナーを備えている。1つは全長チューナーで、ネジを締めることにより粗いチューニングが可能である。もう一つは、ピエゾチューナーで、クライオスタット外から周波数を微調整することができる (Figure4)。2-mode 空洞を運転する際には、共振周波数比をなるべく 2 に近づける必要がある。今回、全長チューナーによって、共振周波数比を 1.994 まで近づけることができた。さらにこれを 2 に近づけることが今後の課題である。

4.2 E_{ap} vs Q₀

2-mode 空洞の各モードでの周波数と軸上最大電場 E_{ap}、その際の Q₀ について 4.2K 下で測定を行った。E_{ap} vs Q₀ の推移と、達成値をそれぞれ Figure5、Table4

に示す。E_{ap} と Q₀ の誤差はパワーメーターとオシロスコプの測定精度に起因するものである。この測定の結果、Q₀ は Table1 に近い値を達成していることがわかった。このことから、我々は 2-mode 空洞の製作方法を確立できたと言える。また、E_{ap} についても、Table2 の要求値をほぼ達成している。

5. まとめと今後の予定

現在我々は KEK において SC-RF TEM の 300kV プロトタイプを製作中であり、今回その技術的根幹を成す 2-mode 空洞の製作とその性能評価を行った。製作については特殊な形状を鑑み、KEK で培われてきた経験を生かしつつ、新たな手法や条件を採用した。測定の結果、設計値をほぼ達成する結果となり、製作方法は確立できたと言える。

現在、光陰極電子銃の製作が進行中であり、ビーム試験が本年度中に行われる予定である。また、2-mode 空洞の共振周波数比が現在 1.994 であり、これをさらに 2 に近付けるために、空洞に新たなニオブ治具を溶接し、塑性変形させることを目指している。

参考文献

- [1] M. Kuriki, et al., "EXTREMELY LOW ENERGY SPREAD BEAM GENERATION BY DUAL MODE SUPERCONDUCTING ACCELERATOR", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 1-3, 2011, Tsukuba, Japan)
- [2] N. Higashi, et al., "The Development of New Electron Microscope Using Superconductive RF Acceleration", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 8-10, 2012, Osaka, Japan)

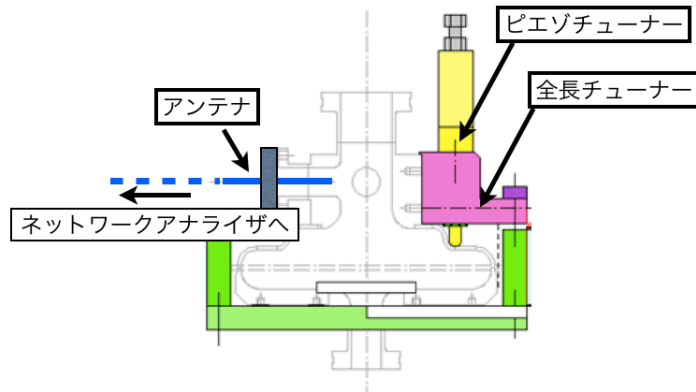
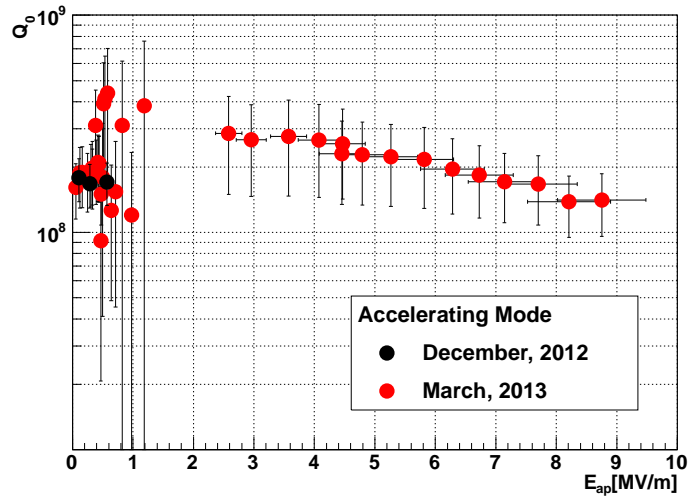
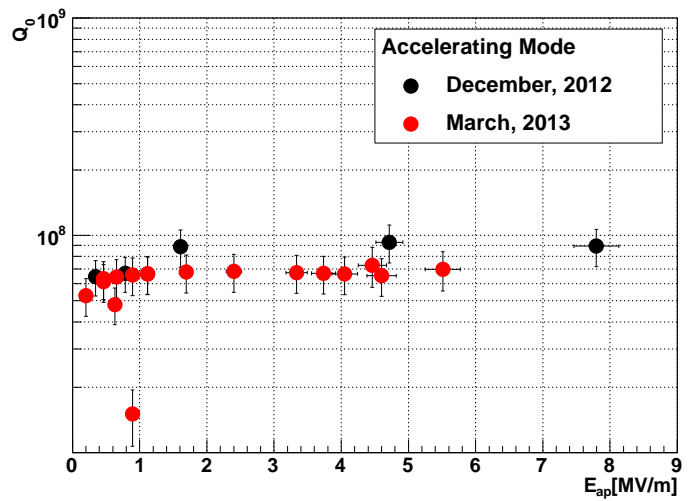


Figure 4: Two tuners provided with 2-mode cavity.



(a) TM_{010}



(b) TM_{020}

Figure 5: The results of E_{ap} vs Q_0