

準定電界進行波型Cバンド加速管の製作

MANUFACTURE OF C-BAND ACCELERATOR CAVITIES

植竹卯一朗^{#,A)}, 山口誠哉^{B)}, 高富俊和^{B)}, 山中将^{B)}, 上野健治^{B)}, 舟橋義聖^{B)}, 吉田光宏^{B)},
佐藤勇^{C)}, 新富孝和^{C)}, 佐治晃弘^{A)}, 太田温^{A)}, 畑中宏之^{A)}, 竹中久貴^{A)}, 遠藤克己^{A)}
Uichiro Uetake^{#,A)}, Seiya Yamaguchi^{B)}, Toshikazu Takatomi^{B)}, Masashi Yamanaka^{B)},
Kenji Ueno^{B)}, Yoshisato Funahashi^{B)}, Mitsuhiro Yoshida^{B)}, Isamu Sato^{C)}, Takakazu Shintomi^{C)},
Akihiro Saji^{A)}, Yutaka Ota^{A)}, Hiroyuki Hatanaka^{A)}, Hisataka Takenaka^{A)}, Katsumi Endo^{A)}

^{A)} TOYAMA CO.,Ltd

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

^{C)} Nihon University

Abstract

Toyama Co, Ltd., KEK and Nihon University are developing a quasi-low electric field traveling wave type C band accelerator cavities operating at low temperature. The accelerator cavities are composed of an input coupler, an output coupler and three bodies joined by a diffusion bonding. The accelerator cavities are completed by connecting them with an electron beam welding (EBW). We have finished until the diffusion bonding in this process. The straightness after a diffusion bonding was less than 0.04 mm.

1. はじめに

現在、株式会社トヤマは、KEK及び日本大学と共に、クライオ電子リニアック式小型コヒーレントX線発生装置の開発を行っている。この装置は、X線の放射原理としてパラメトリックX線放射(PXR:parametric X-ray radiation)を採用しており、結晶ターゲットに電子ビームを照射することでX線を生成する。PXRをX線源として利用するためには、75MeVの加速エネルギーが必要となる。またこの装置は、将来的に新たな放射線ガン治療の実現を目指していることから、低放射線発生と小型化がコンセプトとなっている。

これらの要求に応える加速部として、準定電界進行波型Cバンド加速管の製作を進めており、本発表はその製作の経過を報告するものである。

2. 加速管の仕様

加速管の主な要求仕様をTable 1に示す。

この加速管の特徴は、材質に超高純度銅(6N8 Cu)を用い、低温(20K)にて運転することである。超高純度銅は低温にしたとき、電気抵抗が大幅に減少するという特性を持ち、これを活かすことが肝要となる。しかしながら、この材料に応力歪みを加えると、低温時の直流抵抗特性が著しく劣化する。従って、加工応力を残留させたまま一体成形する電鋳方式や、接合に多くの異種金属を用いるろう付けは望ましくない。よって、この加速管の接合方式は拡散接合とした。また今回は、加速管1本を三分割して拡散接合した後に電子ビーム溶接(EBW: Electron beam welding)で繋ぐ方式を採用した。なお、EBWによって生じた応力もアニールによって除去する。

また本装置では、加速管と減速管を導波管で繋ぎ

レゾナントリングを構築することで、少ない入力電力で大きな周回電力を得ようとしている。

Table1: Required specifications of Accelerating Structure.

Structure type	Disk-load type
	Quasi-constant gradient
	Traveling wave structure
Operating temperature	20 [K]
Operation frequency	5712±1 [MHz]
Resonant mode	2π/3
Number of cell	75
Total cavity length	1300 [mm]
Iris diameter	16.000~13.225 [mm]
Cell diameter	42.643~40.760 [mm]
Unloaded Q factor	74200~73500
VSWR	≤1.2
Integrated phase error	±5°
Material of cells	OFC (6N8 Cu)
Monolithic molding method	Diffusion bonding, EBW

3. 加速管製作試験

実機の製作上の問題把握とその解決に向けて、チューニング機構の動作試験、カップラー試作、拡散接合試験、EBW試験を行った。

3.1 チューニング機構の動作試験

通常周波数のマッチングは、スペーサの内径寸法(2b)の調整加工によって行われる。しかしこの調整は、接合後には行えない。今回、4か所のチュー

チューニング機構を設けた3セル空洞(材質:C1011)を試作した(Figure1)。この効果を測定した結果、接合後の調整代は約1MHzであった。

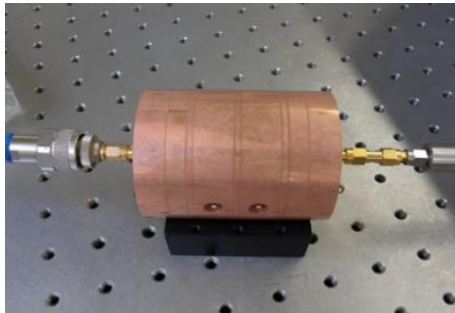


Figure 1: 3-cell cavities.

3.2 カプラー試作

カプラーは、本体、第1セルを有するカバー、導波管と接続するA-DESYフランジ、パイプから構成されている(Figure2)。カプラーの周波数及び位相の調整は、仮組みにてKyhl法を用いてのRF測定及び調整加工により、 $2b$ 、 w の寸法を決定した。また、接合による周波数と位相の変化については、試験1のチューニング機構により、調整が可能であると推測された。

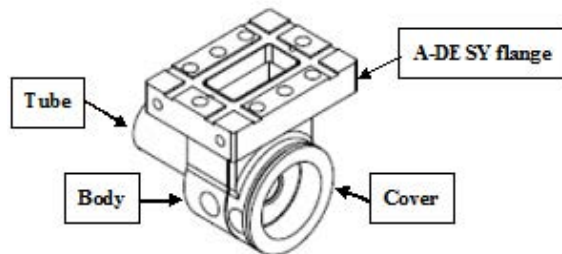


Figure 2: 3D model of the coupler cell.

3.3 拡散接合試験

ここでは、27セルからなるC1020製の長尺空洞を拡散接合させた。接合後の長尺空洞のそり量をFigure3に示す。長尺空洞中央部で0.2mmというそり量となった。今後、長尺空洞の拡散接合時の治具の見直しなどでそり量を低減していくこととした。

3.4 試験4「EBW試験」

拡散接合された加速管同士及び加速管とカプラーは、EBWで接合する。EBWに伴う変形は最大で約 $30\mu\text{m}$ であった(Figure4)。これに伴う周波数の変化も、チューニング機構により調整する。

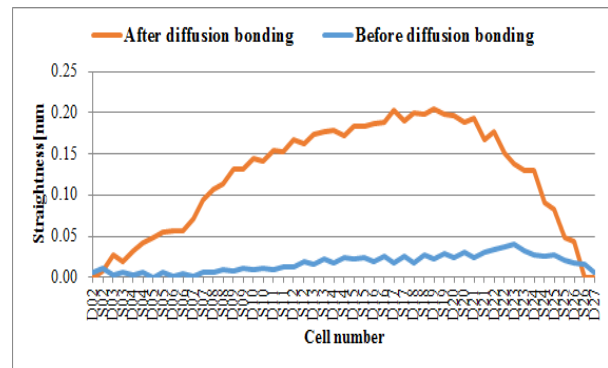


Figure 3: Straightness Test4.

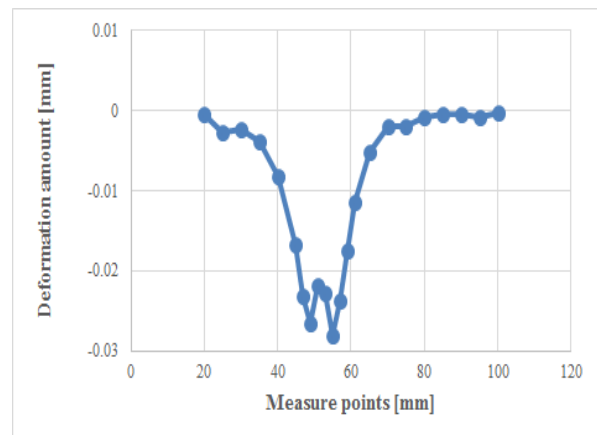


Figure 4: EBW deformation amount.

4. 加速管製作

4.1 カプラー製作

加減速管用のカプラーとして、カプラー試作で明らかになった $2b$ 、 w の寸法で上流側と下流側をそれぞれ2ヶ製作した。各々のカプラーの完成に至るまでの周波数と位相の推移について、上流側をFigure5に、下流側をFigure6に記す。

4.2 接合前RF測定、調整加工

加速管本体の周波数は、カプラー、ディスク、スペーサを仮組みした状態でのノードシフト法によるRF測定と、超精密旋盤にてスペーサの $2b$ の調整加工を繰り返すことで調整した。なお、20Kのときに運転周波数5712MHzとなるように、測定時の環境に応じて周波数に補正をかけている。

Figure7~9にRF測定結果を記す。位相の流れる方向から、運転周波数よりも約0.35MHz低い周波数にマッチングしており、位相の偏差は 11.6° であった。なお、このズレについては、クライストロンからの出力を調整することで対処できる見込みである。

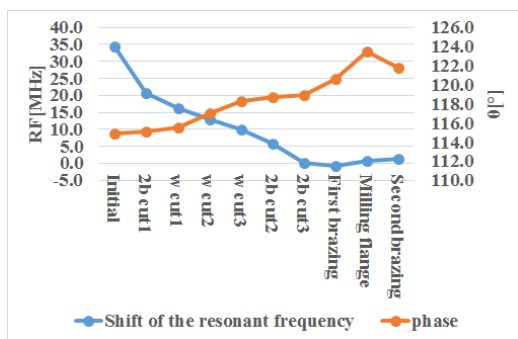


Figure 5: Input coupler frequency and phase.

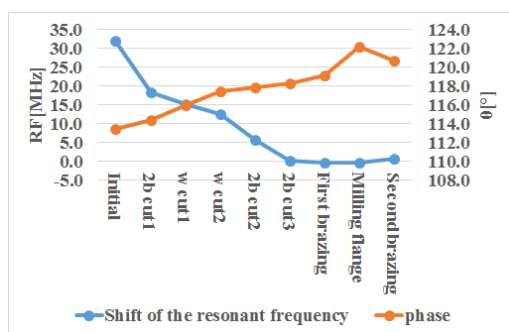


Figure 6: Output coupler frequency and phase.

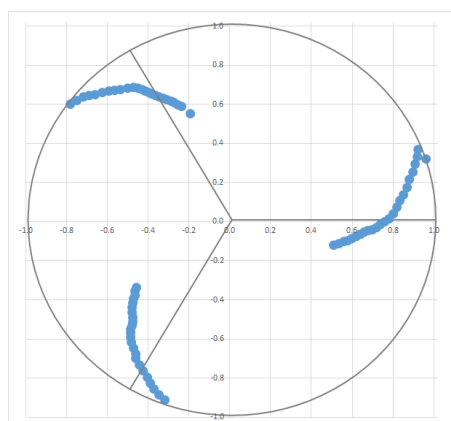


Figure 7: Nodalshift (before bonding).

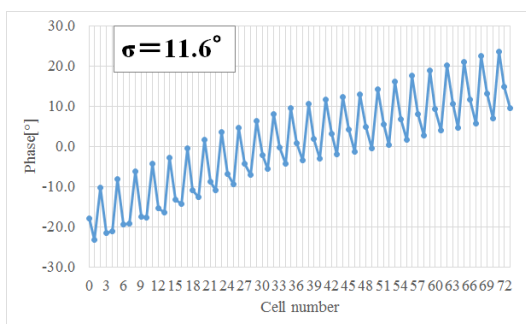


Figure 6: Output coupler frequency and phase.

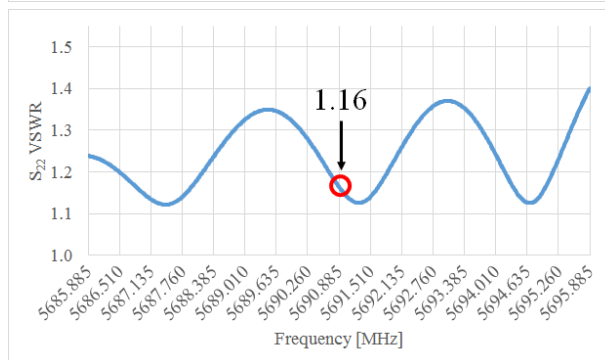
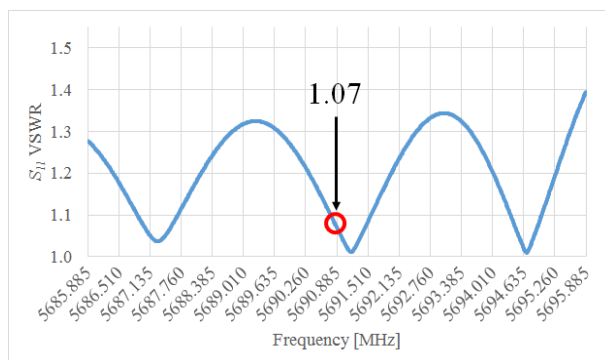


Figure 9: VSWR (before bonding).

4.3 拡散接合

周波数の調整を終えた加速管本体を、三分割して順次拡散接合をしていく。

先述した拡散接合試験の結果を踏まえ、治具の改良を行って 1 本目の拡散接合に臨んだが、加速管と治具との接触部にズレが生じたために、応力の集中した箇所が座屈し (Figure 10)、さらにディスクとスペーサのズレ、全体的な曲がりが生じた。

検証の結果、真空炉の振動に原因があることが判明した。2、3 本目は真空炉を変更した結果、真直度は $30\mu\text{m}$ 以下となった (Figure 11)。

一本目の加速管については、周波数と位相に大きな影響がなかった (後述 4.4) ため、座屈した箇所を修正して使用することとした。

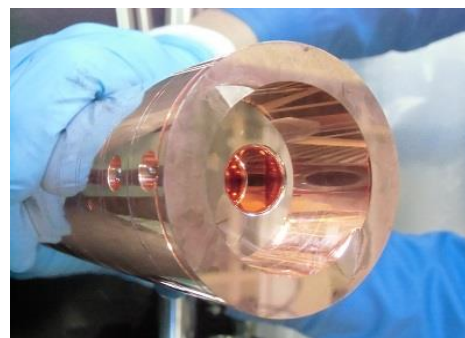


Figure 10: Main body 1/3 (after diffusion bonding) .

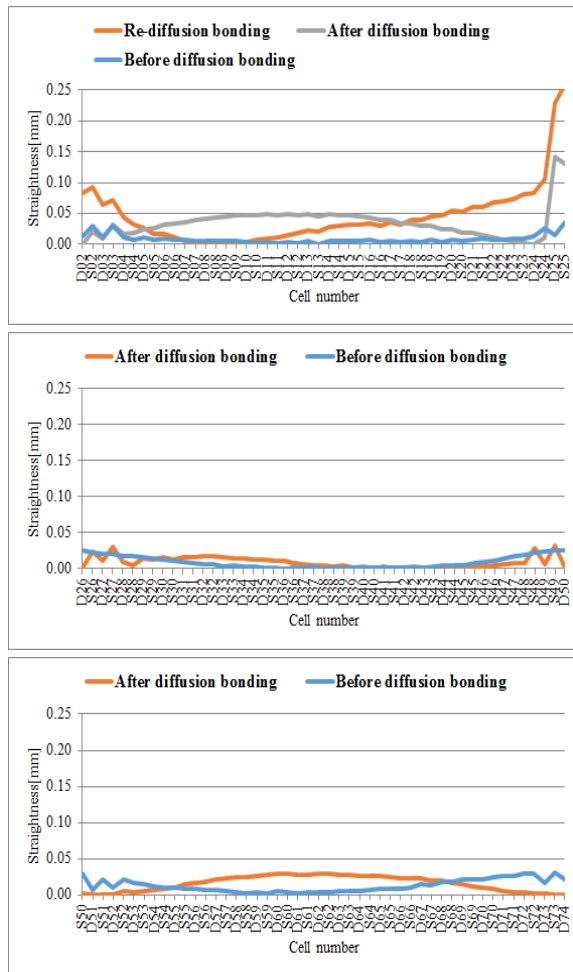


Figure 11: Phase (before bonding).

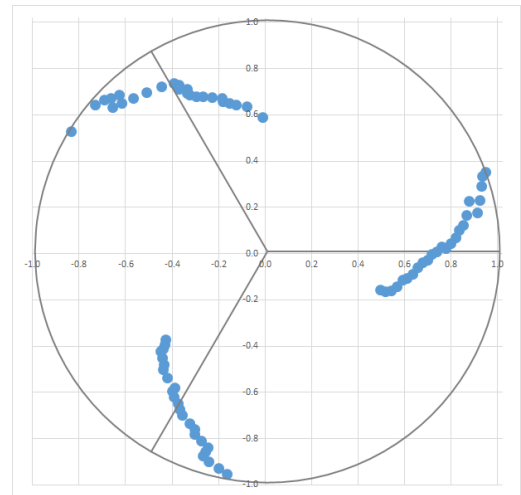


Figure 12: Nodalshift (after bonding).

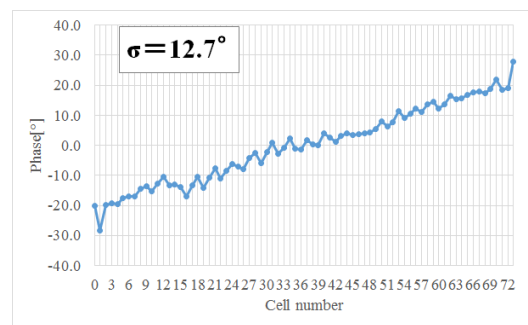


Figure 13: Phase (after bonding).

4.4 接合後 RF 測定

拡散接合後の RF 測定の結果を Figure 12~14 に記す。接合前同様、運転周波数よりも低い周波数にマッチングしており、運転周波数とのズレは 0.45MHz、そのときの位相の偏差は 12.7° であった。VSWR が悪化しているが、この原因は 1 本目の拡散接合時に生じたディスクのズレが原因であると推測される。

5. まとめ及び今後の予定

クライオ電子リニアック式小型コヒーレント X 線発生装置に必要な加速部として、低温環境下で応力歪みを抑えた加速管・減速管の計 2 本の製作が求められ、加速管の製作中である。

本加速管の製作で重要となる拡散接合による一体化は、今後安定して製作できる目途が立った。

今後は、EBW により加速管本体 3 本とカップラーを接合し、低電力試験、低温試験、大電力試験を進めていく予定である。

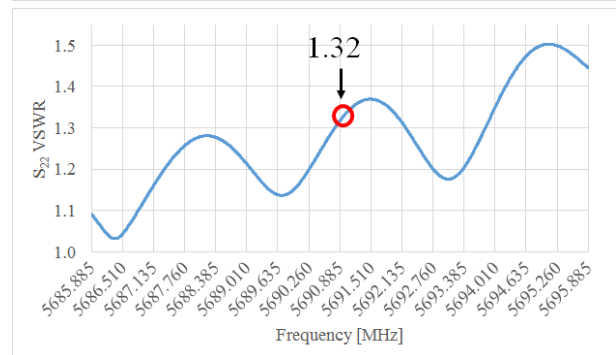
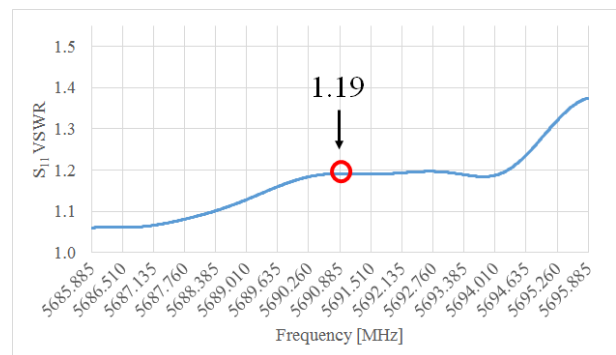


Figure 14: VSWR (after bonding).

参考文献

- [1] I.Sato, et al., “Development of coherent X-ray source based on cryogenic electron linac”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 9-11, 2014, Aomori, Japan).
- [2] Y.Igarashi, et al., “RF Characteristics of Accelerator Units for KEKB Injector Linac Upgrade”, KEK Report 98-12 January 1999.
- [3] S.Yamaguchi, “5.加速管・立体回路”, OHO, 2002.
- [4] T.Hashirano, et al., “Manufacture of a C-band RF Deflector for XFEL/Spring-8”SACLA””, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 1-3 2011, Tsukuba, Japan).
- [5] T.Kamitani, et al., “SuperKEKB 計画のための C バンド加速管開発の現状”, The 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, November 2003.