

Cバンドディスクロード型加速管の製造

PRODUCTION OF C-BAND DISK-LOADED TYPE CG ACCELERATING STRUCTURE

鈴木大輔^{#, A)}, 三浦禎雄^{A)},
櫻井辰幸^{B)}, 恵郷博文^{C)}, 稲垣隆宏^{B)}, 安積隆夫^{C)} 大竹雄次^{B)}
Daisuke Suzuki^{#, A)}, Sadao Miura^{A)}
Tatsuyuki Sakurai^{B)}, Hiroyasu Ego^{C)}, Takahiro Inagaki^{B)}, Takao Asaka^{C)}, Yuji Otake^{B)}
^{A)} MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.
^{B)} RIKEN
^{C)} JASRI

Abstract

In April 2013, MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. contracted with RIKEN to manufacture six C-band disk-loaded type and constant gradient (CG) accelerating structures for XFEL facility SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free electron LAsER). These structures were newly designed for operation with an acceleration gradient of over 45 MeV/m and a repletion rate of 120 pps by RIKEN.

We report the production and low-power RF properties of these accelerating structures.

1. はじめに

三菱重工業は、2013年4月にCバンドディスクロード型加速管を6本受注し、2013年8月に先行で1本、2014年3月に5本の加速管を理化学研究所に納入した。

理化学研究所では、X線自由レーザー施設SACLAの将来の可能性の一つとして、加速器の高繰り返し運転を可能にする機器を開発している。今回製作したCバンドディスクロード型加速管は、高電界かつ高繰り返し運転への対応、SACLAの主加速部にて採用されているCバンドチョークモード型加速管との互換性、製造コストの低減を目指して、理化学研究所によって設計された。^{[1][2]}

本発表ではCバンドディスクロード型加速管の製造及び低電力RF試験の結果について報告する。

2. 加速管の特徴

Cバンドディスクロード型加速管は、運転周波数5712MHz(30°C、真空中)、全長1.8mの準定加速勾配型加速管である。加速管の全体図を図1、主な要求仕様を表1に示す。

全長、冷却配管の位置、運転周波数、フィリングタイム t_f 、減衰定数 τ は、チョークモード型加速管^{[3][4]}と同程度に設計されており、既存の設備へ据付が可能となっている。チョークモード型加速管からの主な変更点は、レギュラーセルからチョーク構造とマイクロ波吸収体を省いたこと、加速モードが $3/4\pi$ モードから $2/3\pi$ モードに変更となったことが挙げられる。

Table 1: Requirements Specifications of the C-band Disk-loaded Type Accelerating Structure

Items	Requirements specifications
Resonance frequency	5712MHz \pm 0.2MHz
	30°C in vacuum
Coupler type	J-type double-feed coupler
Number of cells	100+2 coupler cell
Total cavity length	1.8m
Structure type	Quasi-constant gradient
Phase shift	$2\pi/3$
Integrated phase error	$\pm 3^\circ$
VSWR	≤ 1.1
Q factor	$8000 \leq$
Attenuation constant τ	0.56
Filling time t_f	270ns
Material of cells	OFC-CLASS1 HIP
Brazing process	Vacuum brazing

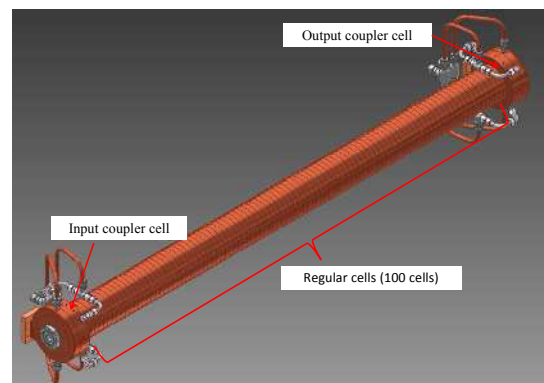


Figure 1: C-band disk-loaded type accelerating structure.

レギュラーセルは、チョーク構造とマイクロ波吸収体を省いたことで、チューニング穴を設け、ろう付け後の移相調整が可能となった。

加速モードを $2/3\pi$ モードに変更したことで、シャントインピーダンスと軸上電界が増加したことに伴い、空洞の表面電界も大きくなり、放電確率が上がることが予測された。最も表面電界の大きくなるビーム孔のエッジは長径と短径の比が 2:1 の楕円に面取りすることで、エッジ部の表面電界を低減している。

3. 製作

3.1 レギュラーセル

レギュラーセルはディスクとシリンダーを分割した構造とすることで、部品の構造を単純化し、加工性を高めた。ディスクのビーム孔は 2 項において述べた通り楕円に面取りした。シリンダーには冷却水用の穴を 8 ヶ所、ディンプリングにてチューニングするための穴を軸対称に 4 ヶ所設けている。ディスク平坦部、ビーム孔部分とシリンダー内径は超精密旋盤による切削加工で鏡面仕上げとしている。なお表面粗さは、ディスク平坦部とシリンダー内径で最大高さ $0.1\mu\text{m}$ 以下、ビーム孔部分で最大高さ $0.3\mu\text{m}$ 以下の精度である。概略図を図 2 に、外観写真を図 3 にそれぞれ示す。

全体ろう付け後に最終的な周波数調整をするため、空洞内径を大きめに加工することで、レギュラーセルの周波数を運転周波数からチューニング代である 2MHz 程度低くオフセットした。

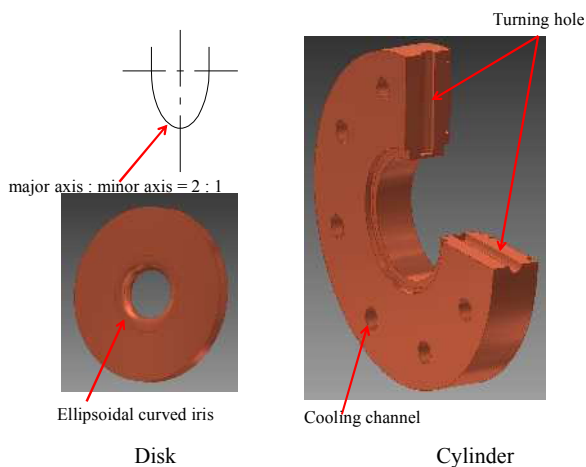


Figure 2: Schematic view of the disk and the cylinder.

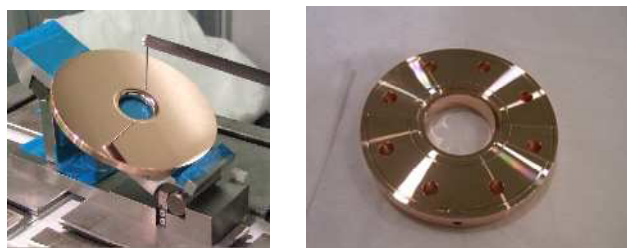


Figure 3: Disk and cylinder.

3.2 カプラー部

ディスクロード型加速管ではチョークモード型加速管と同様に J 型 2 フィード型カプラーが採用されている。カプラー部は、カプラーセル、角フランジ、導波管(WR-187)、ビームフランジで構成されている。概略図を図 4、外観写真を図 5 にそれぞれ示す。

カプラー周波数及び移相は、カプラー部を仮組した状態でノーダルシフト法を用いて RF 測定を実施し、カプラー空洞内径を超精密旋盤にて修正加工を繰り返すことで調整した。図 6 にカプラー部の RF 測定状況を示す。RF 調整が完了したカプラー部は、小型真空炉にてろう付けした。

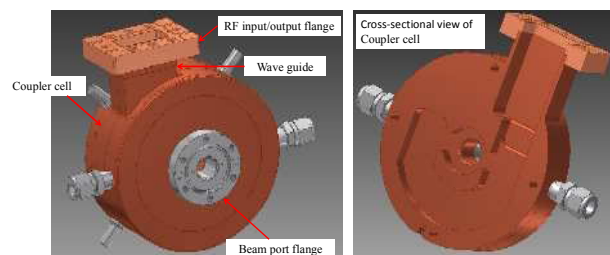


Figure 4: Schematic view of the coupler cell.

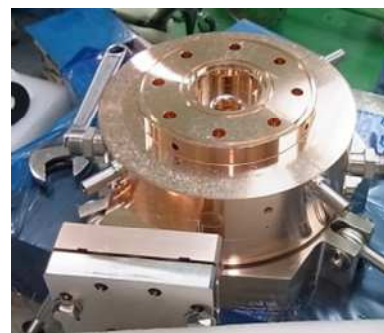


Figure 5: Coupler cell.

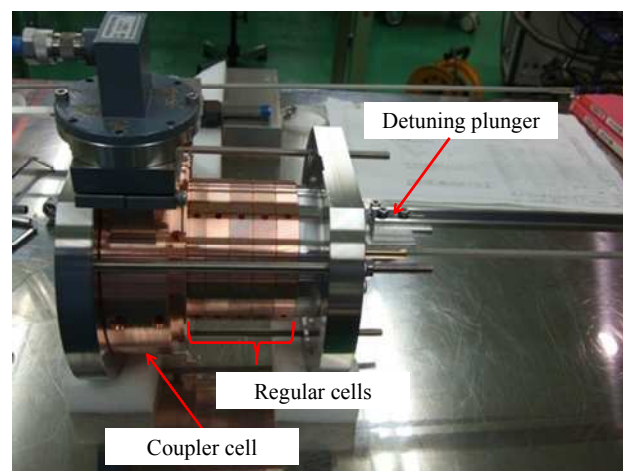


Figure 6: Measurement layout of the coupler cell.

3.3 全体ろう付け・チューニング

カプラー部、ディスク、シリンダーを積層し、大型真空炉にてろう付けした。図 7 に全体ろう付けの状況を示す。ろう付け後は、ノードルシフト法を用いて移相を測定し、3.1 項で述べたチューニング穴をディンプリングすることで 1 空洞毎の移相が 120° となるようにチューニングした。測定精度及び RF 測定の精度を向上させるため、空調により $\pm 0.5^\circ\text{C}$ に室温を温調した部屋でチューニングを実施した。加えて精密チラーにより $\pm 0.05^\circ\text{C}$ に温調した冷却水を加速管に流すことで、チューニング中の加速管の温度分布を全長で 0.05°C 以内に抑えた。

チューニング完了後、確認のためにビーズプル法を用いて移相を測定し、必要に応じて再チューニングを行った。

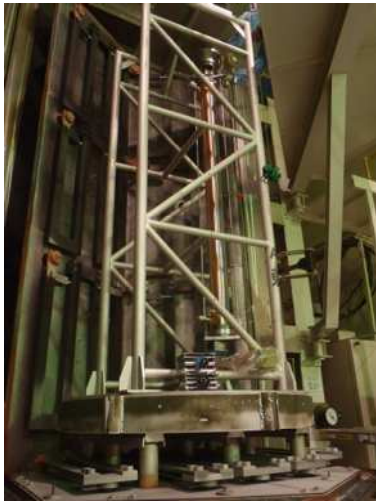


Figure 7: Vacuum brazing layout of the accelerating structure.

3.4 低電力 RF 試験結果

チューニングが完了した加速管の累積移相誤差、加速モードにおける Q 値、VSWR、減衰パラメータ τ 、フィリングタイムを測定した。その結果を表 2 に示す。

ろう付け時に荷重の高い下流側の周波数が大きく変化したため、チューニング後の移相精度が悪化することが予想された。これを低減させるために下流側ではビーズプル法を用いてチューニング^[4]し、各セルの反射成分を小さくしつつ、チューニング後の移相精度の悪化を最小限に抑えた。1 号機では累積移相誤差 3.2° と僅かに要求仕様から外れてしまい、2 号機では要求仕様を満たしてはいるものの VSWR1.09 と RF 特性の調整精度が低かった。しかし、3 号機以降は RF 特性の調整精度が向上し、累積移相誤差は 2.8° 以下、VSWR1.05 以下で調整できた。参考として図 8 に 3 号機の累積移相誤差の測定結果を示す。

Table 2: Results of the Low Power RF Test

Items	#001	#002	#003	#004	#005	#006
Resonance frequency[MHz]	5712	5712.02	5712	5712	5712	5712
Integrated phase error[deg]	3.2	2.8	2.7	2.8	2.8	2.8
Input VSWR	1.02	1.09	1.01	1.04	1.03	1.05
Attenuation constant τ	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.55
Filling time t_f [ns]	273	271	273	269	272	272
Q factor	8981	8969	9023	8944	8979	8950

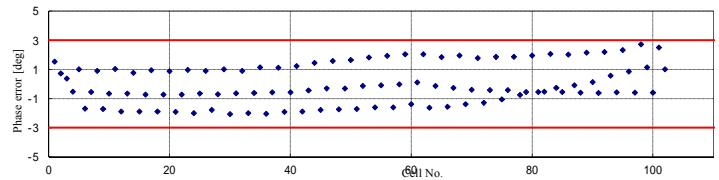


Figure 8: Results of the integrated phase error.

4. 大電力 RF 試験結果

先行で納入した 1 号機は、SACLA 内のテストベンチにて理化学研究所により大電力 RF 試験実施済みであり、RF パルス幅 $0.5 \mu\text{s}$ 、繰り返し 60pps において最大で軸上電界 50.1MV/m に到達した。そして軸上電界 42MV/m 以下では、放電等により停止することなく 24 時間以上の連続運転に成功している。また繰り返し 120pps での運転も実施され、高繰り返し運転に伴う熱的影響はないことが確認されている。(本加速管の大電力試験については理化学研究所 櫻井先生より「C バンドディスクロード型加速管の大電力 RF 試験」にて報告あり。)

5. まとめ

高電界・高繰り返しに対応した C バンドディスクロード型加速管を 6 台製作し、加速管の低電力 RF 試験を実施した。1 号機は要求仕様を僅かに外れたが、2 号機以降は要求仕様を満足した加速管を製作したことからディスクロード型加速管の製作方法が確立したと言える。

参考文献

- [1] T. Sakurai et al., "DESIGN OF A C-BAND DISK-LOADED TYPE ACCELERATING STRUCTURE FOR A HIGHER PULSE REPETITION RATE IN THE SACLA ACCELERATOR", Proceedings of LINAC2012.
- [2] T. Sakurai et al., "C バンドディスクロード型加速管の開発に向けた試作空洞の RF 特性測定", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2013 help.htm
- [3] T. Shintake. "The Chork Mode Cavity", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 31 (1992) pp.L1567-L1570, Part2, No.11A, 1 Nov. 1992.
- [4] S. Miura et al., "C バンドチョークモード型加速管の製作", Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2003.
- [4] T.Khabiboulline, et al., "A New Tuning Method for Travelling Wave Structures", 1996 IEEE.