

# 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 RF CHARACTERISTIC MEASUREMENT OF THE MODEL CAVITIES TOWARDS DEVELOPMENT OF C-BAND DISK-LOADED TYPE ACCELERATING STRUCTURE.

櫻井辰幸<sup>#,A)</sup>, 稲垣隆宏<sup>A)</sup>, 恵郷博文<sup>B)</sup>, 安積隆夫<sup>A)</sup>, 三浦禎雄<sup>C)</sup>, 大竹雄次<sup>A)</sup>

Tatsuyuki Sakurai<sup>#,A)</sup>, Takahiro Inagaki<sup>A)</sup>, Hiroyasu Ego<sup>B)</sup>, Takao Miura<sup>A)</sup>, Sadao Miura<sup>C)</sup>, Yuji Otake<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN SPring-8 Center, XFEL R&D Division.

<sup>B)</sup> JASRI, Accelerator Division.

<sup>C)</sup> Mitsubishi Heavy Industries.

## Abstract

We studied on a C-band accelerating structure for the higher pulse rate than 120 pps in SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free electron LAsEr) facility. Due to increase in heat dissipation, the existing choke-mode type accelerating structure has distortions of the cavity diameter 1  $\mu\text{m}$  or more, which shifts the resonant frequency with about -130 kHz. We designed a new C-band disk-loaded type accelerating structure without the complicated choke structures to generate an accelerating gradient of more than 40 MV/m at the pulse rate. A cross sectional shape of iris designed an ellipsoidal curvature to reduce the maximum surface electric field. Thereby, the maximum surface electric field is 20% lower than the existing structure. We made three types of 9-cell model cavity to estimate the RF characteristics and to establish the fabrication process. As a result, the average shunt impedance of the model cavities was 64 M $\Omega$ /m. An accelerating gradient of 42 MV/m will be expected, when an input RF power of 80 MW is fed into the structure.

## 1. はじめに

SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free electron LAsEr) は X 線自由電子レーザー (XFEL) を発生させ、利用実験に提供する施設である。2011 年 6 月に最初の X 線レーザーの発振に成功し<sup>[1]</sup>、2012 年 3 月からは供用運転が開始された。現在 SACLA は実験ユーザーに 5~14 keV の X 線レーザーを 24 時間安定に供給し続けている。

SACLA の主加速器ではチョークモード型 C バンド加速管が 128 本使用され、加速電界 35 MV/m 以上で定常運転を行なっている<sup>[2]</sup>。チョークモード型加速管はリニアコライダー向けにマルチバンチ運転での使用を想定し、ビームによって誘起される HOM (Higher-Order Mode) を減衰させるためのチョーク構造を有している<sup>[3]</sup>。

我々は SACLA の高度化として、加速器の高繰り返し化を検討している。チョークモード型加速管は RF による発熱によって空洞内径が 1  $\mu\text{m}$  程度広がり、それにより共振周波数も 130 kHz 低くなり、高繰り返し運転に不利であることが予想される。またチョーク構造を設けるために加速モードを TM<sub>01-3 $\pi$ /4</sub> モードを選んでいるため、空洞のシャントインピーダンスが低くなること、構造が複雑なため製造コストが高いなどの課題がある。そこで我々は高電界かつ高繰り返し運転に対応したディスクロード型 C バンド加速管の開発を進めている。しかしシミュレーションでは作成出来るメッシュ数に限りがあるため、細かな空洞の寸法 (主に 2b) は定まらない。

本件では新しい加速管の開発に向けて行った 3 種類の 9 セル試作空洞と両端に使用する RF カプラーを試作し、その空洞寸法の決定や、RF 特性測定の結果について報告する。

## 2. ディスクロード型加速管のデザイン

表 1 は新しく設計した C バンドディスクロード型加速管の RF 特性を示す<sup>[4]</sup>。この加速管は加速モードを TM<sub>01-2 $\pi$ /3</sub> の準定勾配進行波型を採用した。これによりシャントインピーダンスは既存のチョークモード型に比べて約 2 割大きくすることができる。さらに、チョーク構造とマイクロ波吸収体を省くことで、加速管の構造が単純となるため、加速管の製作コストの削減も見込まれる。そして構造を単純化したことで、チョークモード型加速管で出来なかったディンプリングによる空洞の調整が行うことが出来るようになった。チョークモード型は空洞内径の削りで周波数のバラつきが  $\pm 0.15$  MHz 以内になるように調整していた。チョークモード型はこの方法で移相がよく合っていたが、加工に要する時間が増えるためコスト増に繋がり、ろう付けによって移相にズレが生じてしまっても、後で調整することが出来ないなどの難点もあった。今回はろう付け後にノードシフト法による移相調整が出来るようになるため、加工時間の短縮やより精密な移相調整が行えるようになる。また RF 高周波源の関係から、加速管の全長やフィリングタイム ( $t_f$ )・減衰定数 ( $\tau$ ) などのパラメーターを既存のものと同程度になるように設計した。

<sup>#</sup> t-sakura@spring8.or.jp

加速管のシャントインピーダンスが大きくなり、加速電界が上がると、空胴の表面電界も大きくなり、放電の確率が上がる恐れがある。それを避けるために、最も表面電界が大きくなるアイリス部の断面形状を楕円にし、表面電界を下げることを行った。図1にアイリス部の模式図と表面電界比 ( $E_p/E_{acc}$ ) の楕円比 ( $B/A$ ) 依存性を示す。アイリスの形状は一般的な円形 ( $B/A = 1.0$ ) から楕円 ( $B/A = 2.0$ ) にすることで  $E_p/E_{acc}$  を 20% 減少させることができる。

ディスクロード型加速管のマルチバンチ運転に向けて、最も大きなビーム不安定性を引き起こす高次モード (HEM11 モード) によるウェイク場が 4.2 nsec 後に到達する後続バンチが到達するまでに減衰するように、ディスク径 ( $2a$ ) 分布を調整した。図2は表1の  $2a$  分布から求めたウェイク場である。これによると最初のバンチが通過して 4.2 nsec 後にウェイク場が約 2% まで減衰することができる。

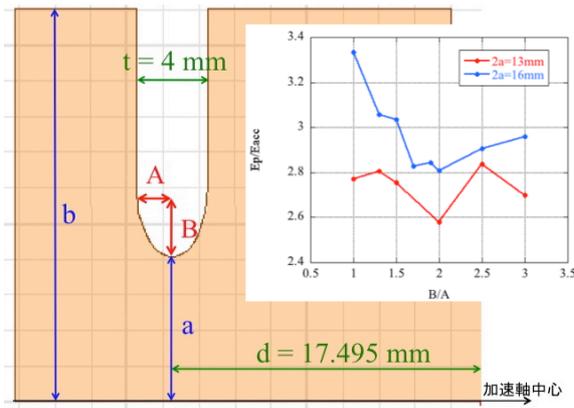


Figure 1: Cross sectional view of the ellipsoidal curved iris shape, and the ratios of the maximum surface electrical field to the on-axis electric field ( $E_p/E_{acc}$ ) depending on the ratio of  $B/A$ . (Blue:)

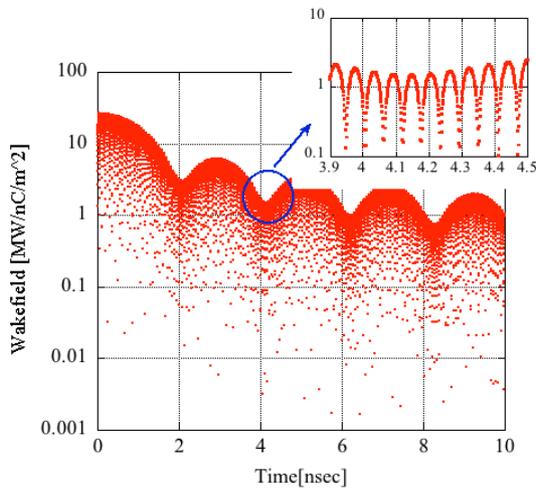


Figure 2: Wakefield envelope of HEM11 mode.

Table 1: Parameter of new C-band disk-loaded accelerating structure

Operation frequency [MHz]	f	5712
Structure type	Quasi-constant gradient (Quasi-CG)	
Resonant mode	TM01- $2\pi/3$	
Total cavity length [m]	L	1.860
Average unloaded Q factor ( $\times 0.95$ )	$Q_0$	8800
Average group velocity	$v_g/c$	0.023
Filling time	$t_F$	290
Attenuation constant	$\tau$	0.59
Average shunt impedance [M $\Omega$ /m]	r	66
Number of cell	N	100
Iris diameter [mm]	$2a$	15.938 ~ 12.107
Cell diameter	$2b$	43.196 ~ 41.869
Disk spacing [mm]	d	17.495
Disk thickness	t	4
Cross sectional shape of iris	Ellipsoidal curvature	

### 3. 試作空胴の製作と RF 測定

#### 3.1 9セル試作空胴の製作

前述の設計を元に、我々は電気的特性の評価や RF 調整手順の確立をするために、低電力の試作空胴を製作した。試作空胴は内径寸法の異なる 3 種類の 9 セルの定インピーダンス (CI) 型空胴で、それぞれ加速管入口 (Cell 1) ・真ん中 (Cell 51) ・出口 (Cell 100) に相当するアイリス径を用いた。空胴材料は HIP (Hot Isostatic Pressing) 処理を施した日立電線製の電子管用無酸素銅クラス 1 を使用した。空胴はディスク部とセル部を分割して製作し、セル内面とディスク部は超精密旋盤を用いて鏡面加工を施した。図 3 は超精密加工後のディスク部とセル部

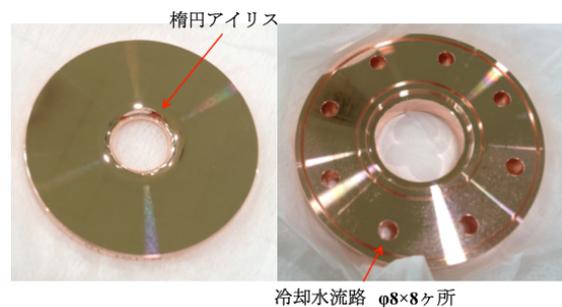


Figure 3: Disk and the cylinder of an accelerating cell.

の写真を示す。そして超精密加工後の平坦部面粗度を三次元測定器で計測した結果、 $0.1 \mu\text{m}$  以下の精度で加工することが出来た。また楕円部面粗度を表面粗さ測定器で測定した。その結果、楕円部の誤差は設計値 $\pm 0.3 \mu\text{m}$  に対して、 $\pm 0.1 \mu\text{m}$  以内に納めることが出来た。試作空洞についても実際と同様の手順で真空ろう付けを行い、接合後にヘリウムリーク試験と冷却水流路の耐圧試験を実施し、製作の手順に問題がないことを確認した。

### 3.2 9セル空洞の共振周波数・Q値の測定

9セル空洞の TM01 モードの共振周波数と Q 値の測定は端板法を用いて行った。端板法は図 4 のように 9 セル空洞の両端にアンテナを取り付け、空洞内



Figure 4: Measurement layout of dispersion curve of the model cavity.

に誘起される TM01 モードの周波数をネットワークアナライザーで測定した。また 9 枚ある同一寸法のセルの 2b 径のバラつきを調べるために管内法による各セルの $\pi/2$ モードの周波数測定を行った。セル内径 (2b 径) は最初、設計値よりも小さめにし、共振周波数の測定結果から 2b 径の修正加工量を求めた。最終的に共振周波数が 5711 MHz になるように 2b 径を削った。真空ろう付け後、セル毎に 4 カ所設けられたディンプリングホールを押すことで、共振周波数が 5712MHz になるように調整を行った。図 5 は修正加工後に行った管内法によって得られた、セル毎の $\pi/2$ モード周波数のバラつきを示す。その結果、周波数のバラつきは $\pm 300\sim 400$  kHz であった。これはセル内径に換算すると $\pm 2\sim 3 \mu\text{m}$  に相当する。

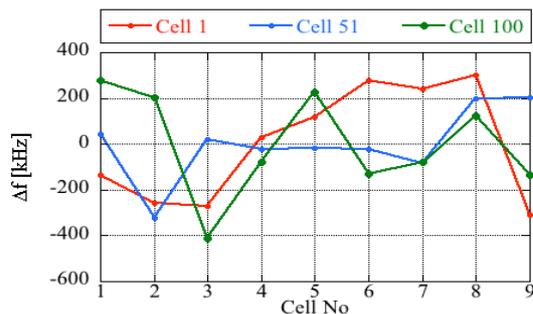


Figure 5: Differential frequency of the each cylinder.

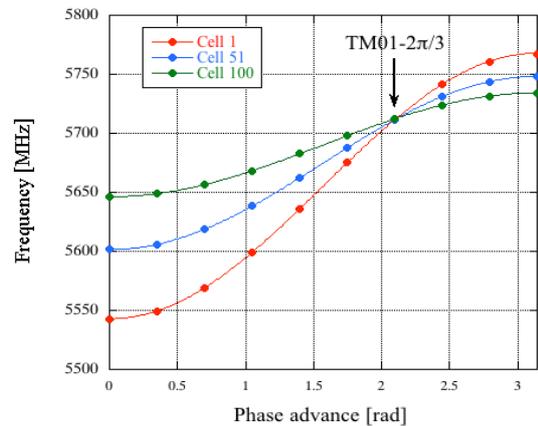


Figure 6: Dispersion curve of the model cavities.

また図 6 は周波数調整後に行った端板法測定によって得られた TM01 モードの分散曲線である。得られた分散曲線から空洞の群速度  $v_g/c$  を求めるには

$$\left. \frac{v_g}{c} \right|_{2\pi/3} = \frac{\sqrt{3}\pi dm_2}{c} \quad (1)$$

より得られる。ここで  $d$  はセル間隔、 $m_2$  は分散曲線の近似式

$$f = m_1 - m_2 \cos(\beta d) \quad (2)$$

で表される。表 2 は 3 種類の 9 セル試作空洞をろう付け後し、周波数調整を行った後の Q 値と群速度の実測値を示す。括弧内の数値は HFSS で求めた計算値の 95% の値である。Q 値は端板によって 12% 程度低下することを考慮すると、測定値は計算値の 93% 程度、群速度は計算値と同程度であることが分かった。

Table 2: Measurements of the model cavities.

	Cell 1	Cell 51	Cell 100
2a [mm](30°C 真空換算)	15.938	14.003	12.106
2b [mm](30°C 真空換算)	43.157	42.451	41.834
共振周波数 [MHz] (TM01-2 $\pi$ /3)	5712.145	5712.084	5711.974
Q 値	7400(8970)	8055(8910)	7940(8862)
群速度 $v_g/c$	0.0356(0.0346)	0.0231(0.0226)	0.0139(0.0135)

### 3.3 シャントインピーダンス測定

9 セル試作空洞のシャントインピーダンスを測定はビーズ摂動法を用いて行った。測定に用いた摂動体は直径 2 mm のアルミの球である。これを 9 セル

空洞の中心軸上に沿ってゆっくり動かし、端板の軸中心から 10 mm オフセットさせたところに取り付けたアンテナで TM01 モードの共振周波数の変化を測定した。摂動体の移動量は 0.4 mm/sec とした。図 7 はビーズ摂動法で測定した 9 セル空洞の共振周波数の変化を示す。端板の影響を取り除くために、中央

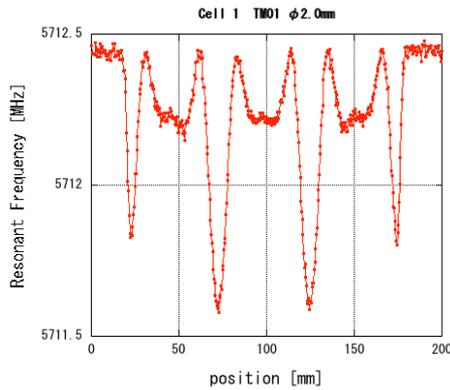


Figure 7: Frequency shift of the model cavity by the bead-pull perturbation method.

の 1 周期分より  $2\pi/3$  モードのフーリエ係数  $A_{2\pi/3}$  を求め、その値から次式を用いてシャントインピーダンスを算出した。

$$r = \frac{A_{2\pi/3}^2 QL}{4\pi^2 \epsilon a^3 f_0} \quad (3)$$

ここで  $Q$  は空洞のクオリティーファクター（設計値を使用）、 $L$  測定空洞長さ、 $\epsilon$  は誘電率、 $a$  は摂動体の半径、 $f_0$  は共振周波数を示す。図 8 に 3 つの試作空洞のシャントインピーダンスの計算値と実測値を示す。その結果、3 つの空洞の平均で 64 MΩ/m となり、表 1 の計算値の約 97% に相当し良好な結果が得られた。

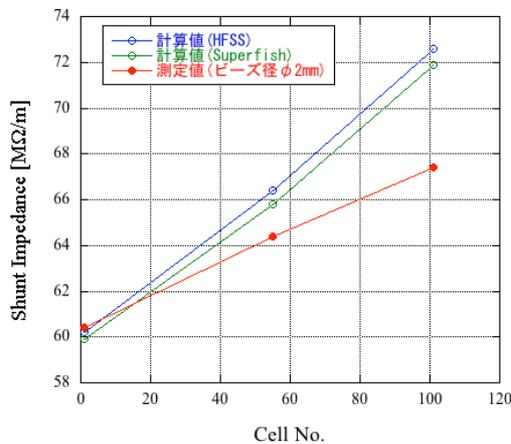


Figure 8: Shunt impedances of the model cavities.

### 3.4 入力カプラーの測定

入力カプラー部は C バンドチョークモード型加速管でも使用した J 型カプラー [5] を採用した。隣接する空洞径がチョーク型と異なるため、カプラー部を試作しカプラーアイリス幅とカプラー周波数の調整を行った。カプラー周波数と移相の測定はノードルシフト法を用いて行った。図 9 はカプラー調整時の測定のセットアップを示す。カプラーに試作空

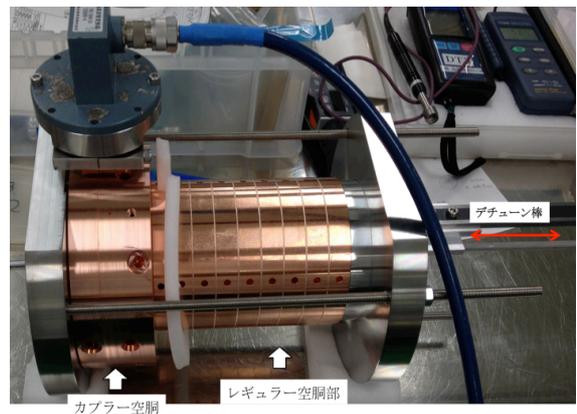


Figure 9: Layout of the input/output coupler tuning

洞を接続し、試作空洞側からデチューン棒を挿入する。まずカプラー空洞をデチューンして基準位相を測定し、そして隣接する第 1 空洞をデチューンした際に、移相シフトが  $180^\circ$  となる周波数をカプラー周波数とし、次にカプラー周波数での移相シフト量を測定した。そしてカプラー空洞内径とアイリス幅を修正加工して最適値になるように調整を行った。図 10 は上下流カプラーのアイリス幅を修正した際のカプラー空洞-第 1 空洞間の移相の変化を示す。計算値は HFSS を用いてシミュレーションで求めた値である。その結果 2 回の修正加工によって上流・下流側共に移相  $120^\circ$  となるようにカプラーを調整することが出来た。その後真空ろう付けで接合し、再度移相シフトを測定したがろう付け前後で  $0.5^\circ$  以下の変化であった。

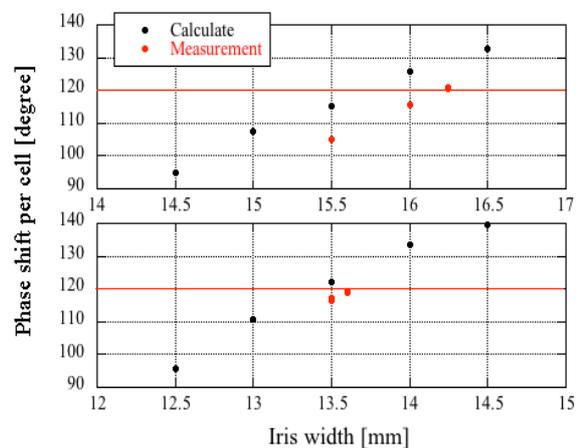


Figure 10: Phase shift per cell depend on the coupler iris width

## 4 まとめ

我々は SACLA 高度化に向けて、高電界・高繰り返しに対応し、製造コストの低減を目指した C バンドディスクロード型加速管の製作に向けて低電力測定用の 9 セル試作空洞と入出力カップラーの製作を行い、RF 特性の実測と製作過程の確立に向けた開発を行った。その結果、9 セル試作空洞のシャントインピーダンス実測値の平均は  $64 \text{ M}\Omega/\text{m}$  と良好な結果が得られた。また 3 つの試作空洞の Q 値や群速度についても、計算値と比較して良い値が得られたことから、加速管の電氣的性能について問題ないことが確認できた。また楕円アイリス部の加工や真空ろう付けによる接合、ディンプリングによる共振周波数調整等の製作工程についても問題なく行えることが分かった。これらのことから C バンドディスクロード型加速管の製作に向けての目処が着いたと言える。現在 1.8m の実機の製作を行っており、秋には大電力試験を行うことを予定している。

## 参考文献

- [1] H. Tanaka.et.al., "A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-Angstrom wavelength region" Nature photonics 6 (2012) 540-544.
- [2] T. Shintake et al., "The choke mode cavity." J. J. Appl. Phys. 31 (1992) L1567.
- [3] T.Inagaki.et.al, "High gradient operation of 8 GeV C-band accelerator in SACLA", Proc. of LINAC2012.
- [4] T.Sakurai.et.al, "Design of a C-band disk-loaded type accelerating structure for a higher pulse repetition in the SACLA accelerator." Proc. of LINAC2012.
- [5] H.Matsumoto.et.al, "Fabrication of the C-band (5712MHz) Choke-Mode Type Damping Accelerating Structure.", Proc. of the 24<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan.