

# cERL での縦方向バンチ構造測定のための小型偏向空洞の開発 DEVELOPMENT OF A COMPACT DEFLECTING CAVITY TO MEASURE THE LONGITUDINAL BUNCH STRUCTURE IN CERL

内藤 大地 <sup>\*A)</sup>、山本 尚人 <sup>A)</sup>、本田 洋介 <sup>A)</sup>、宮島 司 <sup>A)</sup>  
Daichi Naito <sup>\*A)</sup>, Naoto Ymamoto <sup>A)</sup>, Yosuke Honda <sup>A)</sup>, Tsukasa Miyajima <sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup>High energy accelerator research organization

## Abstract

Recently, the compact energy recovery linac has been generating infrared free-electron laser (infrared-FEL) using the process of self-amplified spontaneous emission. This process starts when an electron bunch is injected into undulators. Passing through the undulators, the infrared-FEL is generated by the stimulated emission from the electrons whose longitudinal density is periodically modulated inside the bunch. Therefore, performance of the infrared-FEL strongly depends on the longitudinal distribution of the electrons at the undulator exit. To improve the performance of the infrared-FEL, we plant to measure the longitudinal distribution by deflecting cavities. The deflecting cavity is required to be position resolution of 10  $\mu\text{m}$  in order to resolve the structure inside the electron bunch. To achieve the requirement, we develop a c-band cavity. In this paper, we report the design of the prototype cavity and progress status of the cavity production.

## 1. はじめに

KEK compact energy recovery linac [1] では波長が 15-20  $\mu\text{m}$  の自己増幅自然放射 (SASE) 型の赤外自由電子レーザー (FEL) の生成を行っている。SASE 型赤外 FEL の生成はアンジュレーターに電子ビームを注入して行う。Figure 1 に SASE 型 FEL の生成概略図を示す。電子は磁場中で放射光を出しながら蛇行する。この時、電子は自分の後方を進む電子による放射光と相互干渉しながら進む。すると電子ビーム中でエネルギー広がり成長する。このエネルギー広がりにより電子ビームの磁場中での軌道が変化して進行方向の分布に疎密ができ (マイクロバンチ化)、誘導放射が起きる。この誘導放射が赤外 FEL となる。

赤外 FEL の単色性や強度を最大化するには電子ビーム中のマイクロバンチ化している領域を最大化するとともに、マイクロバンチの密度低下やマイクロバンチ間隔の不均一化を防がねばならない。これらの現象はアンジュレーター入射時の電子のエネルギー分布やベータatron振動、電子同士の空間電荷効果の影響等により説明される [2]。従ってアンジュレーター通過後のマイクロバンチ構造の変化を直接測定しながらエネルギー広がりやビーム電流等のビームパラメータを調整する事により、赤外 FEL の品質を向上する事が可能となる。そこでマイクロバンチ構造を測定するため、新しい c-band の偏向空洞を開発した。本論文では最初に偏向空洞によるバンチ長測定の測定原理について述べる。次に偏向空洞への要求性能と試作一号機的设计について述べる。最後に試作一号機の製作状況について報告する。

## 2. 偏向空洞を用いたバンチ長測定の原理

偏向空洞を用いたバンチ長測定の概略を Fig. 2 に示す。電子ビームが円筒空洞の中心を通過するタイ

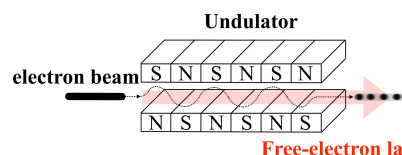


Figure 1: Schematic of the FEL production.

ミングで RF の振幅がゼロになるように TM<sub>1n0</sub> モード (n は整数) の RF を円筒内に励振する。すると電子ビームの前方と後方は RF 電磁場によって反対向きに蹴られ、電子ビーム全体で見ると 90 度回転する事になる。さらに空洞の後方にスクリーンを設置する事で、拡大投影された電子ビームの長手方向の分布を測定する事ができる。拡大された像の位置分解能を  $\sigma_{res}$ 、光速を  $c$ 、素電荷を  $e$ 、電子のエネルギーを  $E$ 、空洞とスクリーン間の距離を  $L$ 、TM<sub>1n0</sub> モードの RF 周波数を  $\omega$ 、シャントインピーダンスを  $R_{sh}$ 、入力電力を  $P$ 、偏向空洞の位置でのビームの横方向の広がりを  $\sigma_{off}$  とおくと、

$$\sigma_{res} = \frac{cE\sigma_{off}}{eL} \frac{1}{\omega\sqrt{PR_{sh}}} \quad (1)$$

となる [3]。したがって  $\omega\sqrt{PR_{sh}}$  を高くする事が位置分解能の向上につながる。

## 3. 偏向空洞に対する要求性能

Figure 3 に cERL の配置図を示す。偏向空洞は 2 台のアンジュレーターの下流に置かれ、10m 後方のスクリーンを用いてバンチ長の測定を行う。位置分解能の要求性能を見積もる際に用いたビームパラメータを Table 1 に示す<sup>1</sup>。マイクロバンチ長は 15  $\mu\text{m}$  程度と短く、これを精度よく測定するには 5  $\mu\text{m}$  程度の高分解能が必要で、設置スペースや予算の関係から

\* daichi.naito@kek.jp

<sup>1</sup> 現在の cERL の運転パラメータとは若干異なる

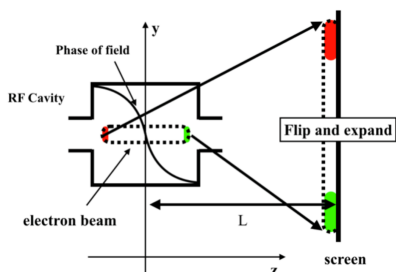


Figure 2: Schematic of the bunch-length measurement.

現実的では無いと予想された。そこで本研究ではバンチ長を精度良く測定し、バンチ内でマイクロバンチ化が起きたかどうかを判別できるよう、 $10\mu\text{m}$  程度の位置分解能を目指すことにした。

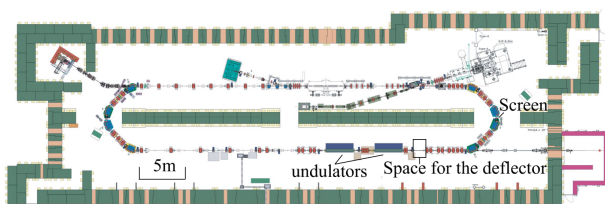


Figure 3: Schematic view of the cERL.

Table 1: Beam Parameters of the cERL

Energy ( $E$ )	20 MeV
Beam size at the undulator exit	$200\ \mu\text{m}$
Bunch length	$150\ \mu\text{m}$
Micro-bunch length	$15\ \mu\text{m}$
Fundamental RF frequency ( $w$ )	1.3 GHz
Beam hole radius	8 mm

次に  $w\sqrt{R_{sh}}$  が最大となる偏向モードを見積もることにした。紙面の都合上詳細は省くが、3次元電磁場シミュレーターである CST [4] の eigen mode solver を用いて cERL で使う場合の最適解として、5.2 GHz の TM110 モードを採用した。使用する電磁場のモードと周波数より、偏向空洞への要求は入力電圧と  $R_{sh}$  の積が  $1.3 \times 10^{11}\ \text{W}\Omega$  以上となった。

#### 4. 偏向空洞の設計

限られた予算の中で要求性能を達成するには RF 入力電源の費用を減らす事が一番効果的である。それには  $R_{sh}$  の低下を防ぐ事が望ましい。そこで導波管を使って大電力を空洞へ投入するのではなく、開口部の小さい N 端子を使って電力を供給することにした。この場合は放電の観点から空洞に 1 kW 程度しか供給できないと予想されたので、1 m の空間に同じ空洞を独立に 12 台並べる事にした。この章ではまず試作空洞の大まかなデザインと性能について説明した後、各要素の設計について詳しく述べる。

Figure 4 に我々が考案した試作空洞の概略図を示す。空洞は RF 電力を入力するループアンテナ、共振周波数をモニターするためのロッドアンテナ、共振周波数を調整するためのチューナー、TM110 モードの x 偏向と y 偏向を分離するためのデカップラーが接続されている。各要素の形状は CST を用いて最適化を行なった。最適化後に CST の eigen mode solver で計算した、試作空洞のパラメータを Table 2 に示す。表に示したとおり試作空洞単体では  $120\ \mu\text{m}$  の位置分解能が達成でき、この空洞を 12 台並べる事で  $10\mu\text{m}$  の位置分解能が達成できると見積もられた。

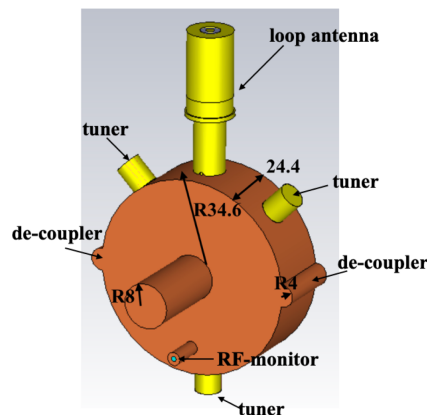


Figure 4: Schematic view of the prototype cavity.

Table 2: Characteristics of the Prototype Cavity

Resonance frequency	5.2 GHz
Unloaded Q	14800
Coupling $\beta$	1
Shunt impedance	0.98 M $\Omega$
Kick voltage at 1 kW input	3.1 kV
Position resolution at 1 kW input	$120\ \mu\text{m}$

##### 4.1 空洞形状の設計

外面形状の最適化には CST の eigen mode solver を用いた。検討した外面形状の例を Fig. 5 に示す。ここでは便宜上、ピルボックス型の空洞をタイプ A、ピルボックス型空洞の外周部を円弧にした空洞をタイプ B、空洞の体積と表面積の比が最大になるように最適化した形状をタイプ C とする。この 3 つに対して CST の eigen mode solver を使って TM110 の  $R_{sh}$  を計算し、比較を行なった。Figure 6 に比較結果を示す。タイプ A に比べてタイプ C では  $R_{sh}$  が 20% 向上しているのがわかる。しかし Eq. (1) から位置分解能は  $\sqrt{R_{sh}}$  に反比例するので、位置分解能の改善は 1 割強しかない。加えて試作空洞は KEK 内で製作する事、KEK 内製では 5 GHz の空洞の製作実績が無い事から、単純な A タイプを採用する事にした。同様の理由から、空洞にノーズコーンをつけて  $R_{sh}$  を改善させる案も見送り、単純なピルボックス型の形状を採用することにした。また空洞の半径は CST

の eigen mode を使って計算したのちに他の要素の設計を行い、最後に Fig. 4 のように全ての要素を組み込んだモデルに対して CST の frequency domain solver による最適化を行なった。最終的な周波数の空洞半径依存性は  $0.1455 \text{ MHz}/\mu\text{m}$  となった。

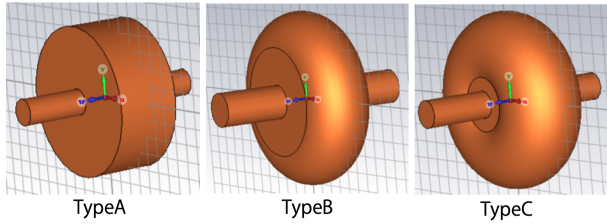


Figure 5: Schematic view of the prototype cavities.

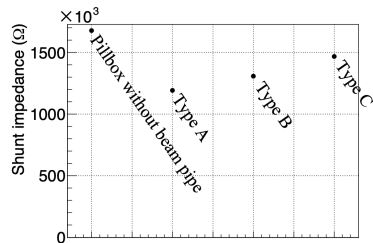


Figure 6: Difference of the shunt impedance.

#### 4.2 入力カプラーの設計

次に RF 電力入力部の設計について説明する。まず N 端子からロッドアンテナもしくはループアンテナを介して電力供給する事を検討した。ロッドアンテナの場合は空洞の端面に穴を開けて電場と結合させる。しかしこの方法ではロッドアンテナとビームパイプを取り付けるポート同士の干渉により、半径 30 mm よりも外側にしかロッドアンテナを挿入できず、TM110 モードを歪ませずに良い RF 結合度を得る事が不可能だと分かった。一方、ループアンテナは空洞の外周部に穴を開けてループアンテナと磁場を結合させる。TM110 モードは空洞外周部で磁場が強くなるので、ループアンテナでの結合が最適である。しかし 5.2 GHz 用の N 端子は存在しなかったため、京セラ株式会社 [5] と共同開発する事にした。

コネクタの設計には CST の Frequency domain solver を用いた。Figure 7 に開発した N 端子型ループアンテナの概略図を示す。まずループアンテナ部の設計、次に真空窓の設計について説明する。製作上の制約からループ部分の径が 1 mm と決まり、この条件の下で端子の先端が空洞外周表面と一致している時に、RF 結合度である  $\beta$  が 1 になるようにループ部の形状を設計した。Figure 8 にこのループアンテナを空洞に取り付け、回転させていった時の RF 結合度  $\beta$  の変化を示す。黒点が CST での計算結果、赤線が  $\cos^2 \theta$  で fitting した結果であり、 $\beta$  の回転依存性が理論的予想と良く一致しているのがわかる。結合度は製作した空洞の Q 値が CST の計算値と違った

場合を考慮して少し高めに設計した。そして回転角を  $\beta$  が 1 になるよう調整した上で空洞に溶接する設計とした。

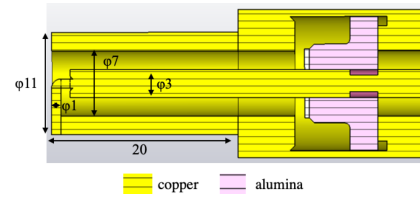


Figure 7: Schematic view of the loop antenna.

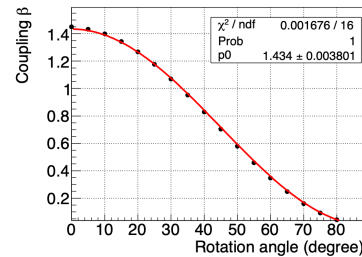


Figure 8: Relation between the coupling beta and rotation angle.

次に真空窓部分の設計について説明する。まず京セラ株式会社ベースとなる構造を提案していただき、それをもとに各部の形状を CST を用いて最適化した。このため本論では真空窓部分の詳細な形状については省く。最適化後の共振周波数と電圧定在波比の関係を図 9 に示す。電圧定在波比は反射係数を表す指標で、1 に近いほど RF を無反射に近い状態で伝送できる。Figure 9 より 5.2 GHz の電圧定在波比を 1.1 と十分小さくする事に成功した。

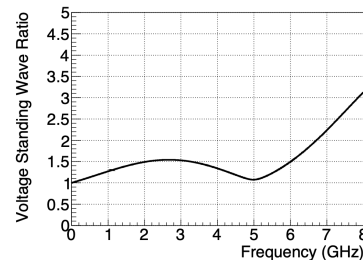


Figure 9: Relation between the VSWR and resonance frequency.

#### 4.3 モニター端子位置の最適化

モニター端子には 2.6 GHz 用に設計された SMA 型ロッドアンテナを採用した。入力電力が 1 kW の時に透過電力が 100 mW になるよう、CST の frequency domain を用いて、空洞端板上の位置とロッドアンテナの長さを選定した。

#### 4.4 周波数チューナーの設計

周波数チューナーに関しては KEK 工作センターで製作実績のある、直径 3 mm のハンマータイプのチューナーで直径 15 mm、厚さ 2 mm の領域を押し引きする構造を採用した。そしてチューナーの位置と個数の最適化を行なった。計算には CST の eigen mode solver を用い、チューナーは直径 12 mm の円筒型の領域が一様に変形すると近似して行なった。チューナー 2 個の場合は Fig. 4 の上二つ、水平方向から見て 45 度と 135 度に設置した時が一番大きく周波数を変化できた。チューナー 3 個の場合はさらに -90 度の位置にもチューナーを配置する事でより大きな周波数変化を達成できる事が分かった。Figure 10 に位置最適化後に全てのチューナーを同時に x 軸に示された量だけ押し引きした時の、TM110 の周波数変化を示す。2 個の場合は 1 mm チューナーを動かすと 5 MHz、3 個の場合は 10 MHz 変化できるという事が分かった。一方で実際のチューナーの稼働範囲は  $\pm 0.2$  mm なので、2 個の場合は  $\pm 1$  MHz、3 個の場合は  $\pm 2$  MHz 変化させられるという結果になった。そこで空洞製作時の周波数変化に十分対応できるように、3 つのチューナーを採用する事とした。

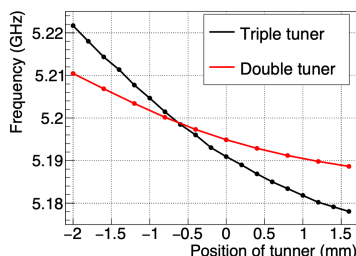


Figure 10: Frequency dependence on the tuner positions.

#### 4.5 モードデカップラーの設計

TM110 モードは電子ビームの進行に対して磁場が鉛直方向に励磁される y 偏向と水平方向に励磁される x 偏向がある。バンチ長測定には y 偏向モードを用いるが、ここに x 偏向が混じると測定精度が悪くなってしまふ。そこで、x 偏向と y 偏向を完全に分離するため、Fig. 4 に示したように空洞の側面に円弧を取り付けた。TM110 の y 偏向はこの部分で磁場が最低となるため全く影響を受けない。一方で x 偏向はこの部分で磁場が最大となるので、円弧があると大きく磁場分布が歪み共振周波数が変化する。横軸をデカップラーの半径、縦軸に x 偏向と y 偏向の共振周波数の差をとった図を Fig. 11 に示す。この図から x 偏向と y 偏向の差が 10 MHz となるようにデカップラーの半径を 4 mm に決定した。

デカップラーにはもう一つ重要な役割がある。それはチューナーの押し込み量が非対称になった時、TM110 の偏向面が傾くのを防ぐ事である。そこで 3 つのチューナーのうち、一つだけを 0.2 mm 押し込んだ時の空洞中心での磁場分布を評価した。Figure 12

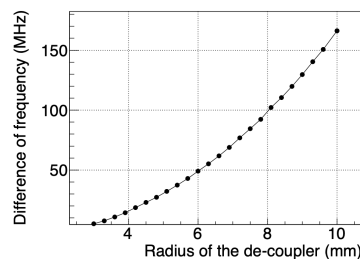


Figure 11: Frequency difference between x-deflecting mod and y-deflecting mod.

に横軸に水平方向の位置を、縦軸に空洞中心の磁場と各点での磁場の比をとった結果を示す。黒線のデカップラーが無い場合と比べて赤のデカップラーありの場合の方が磁場の変形が少ない事、変形量が小さく問題ない事が確認できた。

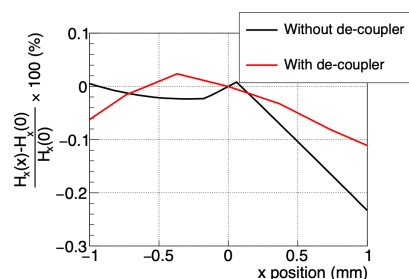


Figure 12: Distortion of the magnetic field.

#### 4.6 空洞の製作

上述の計算結果をもとに KEK 機械工作センターに依頼して設計した試作空洞の製作図面を Fig. 13 に示す。空洞本体の半径は TM110 の周波数が 5.2 GHz から 10 MHz 程度大きくなるように、設計値よりも 70  $\mu$ m 程度大きくしている。これはあくまで CST の計算は概算値と考え、実測に基づいて空洞の半径を決定するためである。空洞本体は 3 パーツに別れており、ろう付けで接合する構造とした。入力カップラーとモニター端子は専用の台座を空洞にろう付けしたのち、それぞれの端子を台座に溶接する構造とした。ビームパイプ、チューナーヘッドは空洞にろう付けされる構造とした。令和元年には空洞本体の金属加工、入力カップラーとモニター端子の製造を行なった。

### 5. 試作空洞の製作状況

令和 2 年度は空洞の周波数を 5.2 GHz にするため、3 度に分けて空洞内部の切削を行なった。試作機の写真を Fig. 14 に示す。図のように 3 パーツを重ねたのちに専用のジグで押しえつけ、空気中で周波数の測定を行なった。測定では入力カップラー、モニター端子をネットワークアナライザーに繋ぎ、空洞側は手で押しえつけて固定した。この時、入力カップラーの回転角は RF 結合度が最大となる位置で固定した。そして透過法を用いて各端子の外部 Q 値や

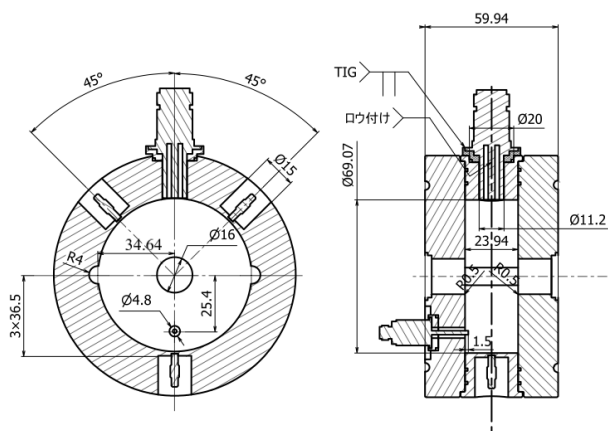


Figure 13: Drawing of the prototype cavity.

周波数を測定した。

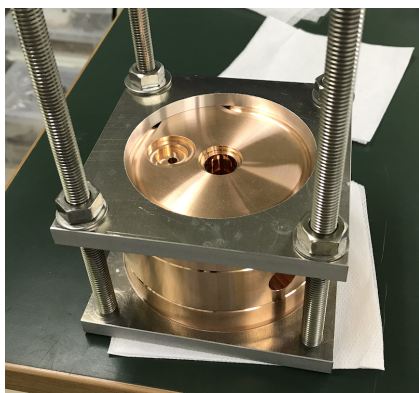


Figure 14: Photo of the prototype cavity.

Table 3 に調整削りを行う前の実測値と CST での計算結果の比較を示す。無負荷 Q 値以外はシミュレーションと実測値がよく一致しており、設計通りの性能が達成できている事が確認できた。無負荷 Q 値の違いはまだろう付けされておらず、電気的接触が弱い事が原因だと考えている。

Table 3: Comparison of the Cavity Parameters between the CST and the Measurement

Parameters	CST	Measurement
Frequency (GHz)	5.2105	5.2097
Unloaded Q	14125	11175
External Q (input coupler)	9378	9046
External Q (monitor)	24340	23578

次に空洞半径の削り量とそれによる周波数の変化 ( $\Delta f$ ) を Table 4 に示す。削り幅に対して CST から予想される周波数変化と測定結果は概ね一致し、想定通りに空洞半径を調整する事ができた。その後モニター端子のロッドアンテナの長さも調整し、最終的な周波数は 23.2°C で 5.19905 GHz となった。この周

波数はろう付け後に真空、35°C の環境で使う場合に 5.2 GHz になるように決定した。現在は完成した空洞のろう付けを行なっている。

Table 4: Comparison of the Frequency Change between the CST and the Measurement

Cut of radius	$\Delta f$ (CST)	$\Delta f$ (Measured)
$32^{+2}_{-2.5} \mu\text{m}$	$-4.66^{+0.29}_{-0.36}$ MHz	-5.1 MHz
$30^{+0.5}_{-0.5} \mu\text{m}$	$-4.37^{+0.07}_{-0.07}$ MHz	-4.2 MHz
$9^{+0.5}_{-0.5} \mu\text{m}$	$-1.17^{+0.07}_{-0.07}$ MHz	-1.15 MHz

## 6. まとめと今後

cERL での FEL 高度化のため、バンチ構造を測定するための偏向空洞を開発した。偏向空洞はバンチ長 150  $\mu\text{m}$ 、マイクロバンチ長 15  $\mu\text{m}$  に対して 10  $\mu\text{m}$  の位置分解を目指した。そのために 5.2 GHz の TM110 空洞を 1 m の領域に 12 台並べる事にした。空洞形状の最適化や入力カップラーの設計を経て、試作空洞 1 台を製造した。ろう付け前の空洞の性能はシミュレーションでの予測値とよく一致しており、設計通りの性能が達成できている事が確認できた。今後は空洞のろう付け、周波数の最終確認、ビーズ法による磁場測定を行う。

次にバンチ長実測のための準備状況について述べる。要求性能の見積もりではスクリーンまでの光学系や wake field の影響によるビームの広がりを無視した。そこでこれらがバンチ長測定に及ぼす影響の評価が必要である。特に現在は RF 入力用の AMP 調達の資金的目処が立っておらず、空洞と AMP の数とそれに応じて達成できる位置分解能を詳細に見積もる必要がある。これによりまずは必要最低限の AMP 購入の資金調達を目指す。

## 謝辞

この研究は日米科学技術協力事業により助成を受けたので、ここに謝辞を述べる。試作空洞の機械設計、ならびに組み立てとろう付けは KEK 機械工学センターの高富氏に行なっていただいたので、ここに謝辞を述べる。

## 参考文献

- [1] M. Akemoto *et al.*, “Construction and commissioning of the compact energy-recovery linac at KEK”, *Nuclear Instruments and Methods A*, **877**, 2018, pp. 197-219.
- [2] E.L. Saldin, E.A. Schneidmiller and M.V. Yurkov, “The physics of free electron lasers. An introduction”, *Physics Reports*, **266**, 4, 1995, pp. 187-327.
- [3] D. Alesini, “Rf Deflector Based Sub-Ps Beam Diagnostics: Application to Fel and Advanced Accelerators”, *International Journal of Modern Physics A*, **22**, 2007.
- [4] <https://www.3ds.com>
- [5] <https://www.kyocera.co.jp>