

# 高効率極短 FEL パルス生成のための 1.6 セル高周波電子銃の開発 DEVELOPMENT OF 1.6-CELL RF GUN FOR GENERATION OF HIGH EFFICIENCY AND EXTREMELY SHORT FEL PULSE

宮島司<sup>\*A)</sup>, 全炳俊<sup>B)</sup>, 高富俊和<sup>A)</sup>, 福田将史<sup>A)</sup>, 梶田駿汰<sup>B)</sup>, 島田美帆<sup>A)</sup>, 大垣英明<sup>B)</sup>, 羽島良一<sup>C)</sup>  
Tsukasa Miyajima<sup>\*A)</sup>, Heishun Zen<sup>B)</sup>, Takatomi Toshikazu<sup>A)</sup>, Masafumi Fukuda<sup>A)</sup>, Shunta Kajita<sup>B)</sup>, Miho Shimada<sup>A)</sup>,  
Hideaki Ohgaki<sup>B)</sup>, Ryoichi Hajima<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup>KEK, High Energy Accelerator Research Organization

<sup>B)</sup>Institute of Advanced Energy, Kyoto University

<sup>C)</sup>QST, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

## Abstract

A 1.6-cell photocathode RF gun was developed for generation of high efficiency and extremely short FEL pulse in Kyoto University FEL. The requirements of the RF gun are to suppress discharge in long macro-pulse electron beam, which is required FEL oscillator, and to apply dynamic cavity desynchronization (DCD) to achieve high efficiency of FEL. In order to achieve the requirements, electromagnetic field analysis and beam tracking simulation were carried out. In the beam tracking simulation for the DCD operation, 1.4-cell shape and 1.6-cell shape, which were satisfied the requirement to suppress the discharge, were used to investigate the relation between the acceleration phase and the arrival time at the RF gun exit. The simulation results show that the 1.6-cell shape is applicable to the DCD operation. Based on the simulation results, the 1.6-cell photocathode RF gun was designed. After the fabrication of the 1.6-cell RF gun, the resonant frequency and the longitudinal electric field distribution were measured, and the measured results well agreed with the design performance.

## 1. はじめに

Q-LEAP「次世代レーザー・自由電子レーザーで駆動する高繰り返しアト秒光源のための基礎基盤技術の研究」の研究目的は、既設の FEL 装置(日大、京大)を利用し、中赤外の波長領域で数サイクルパルスの生成とこれを利用した高次高調波発生 (higher-order harmonic generation, HHG) を行い、高繰り返し極短パルス光源 (10 MHz 以上) の実現に必要な基礎基盤技術を開拓することである。重要な課題の一つが高効率極短パルス発振を実現することであり、その達成のため、京大 FEL(KU-FEL) では新たな光陰極高周波電子銃を導入する予定である。FEL 引き出し効率を向上させる方法として、バンチ電荷の増強と Dynamic Cavity Desynchronization (DCD) 法 [1, 2] を導入する予定であり、これらの項目を実現することが新たな電子銃の開発目標となる。Figure 1 に KU-FEL の新電子銃およびソレノイド電磁石を含む装置構成図を示す。

新たな電子銃の設計における重要な課題は、放電を抑えた空洞形状とすること、DCD 法を実現可能なことの 2 つである。共振器型 FEL の動作には、長いマクロパルスをもつ電子ビームが必要であるが、マクロパルスが長くなるにつれて、電子ビームを生成・加速する高周波電子銃内部での放電が起こりやすくなる。放電を抑制するには、加速電場を一定に保ちつつ電子銃内部の表面電場を小さくすることが重要となる。また、FEL 発振の早い立ち上がり高い飽和強度の両立には、DCD 法が重要となる。DCD 法において本質的に重要なことは、電子バンチの繰り返し周波数と共振器の往復周波数の相対的

関係を変化させることであり、電子バンチの繰り返し周波数を変化させることで共振器長を変化させるのと同じ効果を与えることが可能である。新たな電子銃では、この動的位相変調を実施可能な空洞形状を採用することが重要となる。

本研究の目的は、京大 FEL(KU-FEL) における使用を想定した、高効率極短パルス中赤外自由電子レーザー生成のための光陰極高周波電子銃を開発すること、動的位相変調に適した電子銃形状の最適化、ビームシミュレーションによる電子ビーム特性の評価である。

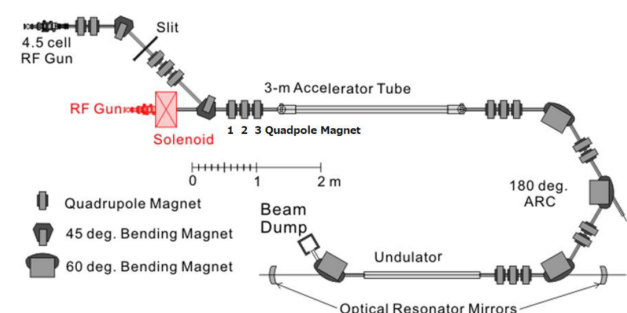


Figure 1: Layout of KU-FEL [3].

## 2. 動的位相変調に適した空洞形状

高周波電子銃の電磁場設計では、電磁場解析コード Poisson/Superfish を用いて電子銃内部の表面電場の解析を行い、条件を満たす空洞形状候補を定めた。空洞形状候補として、阪大産研の楊金峰氏の作成した楕円形状アイリス型の 1.4 セル、1.6 セル光陰極高周波電子銃 [4] を採用し、それらの図面を元にモデルを作成した。Figure 2

\* tsukasa@post.kek.jp

に 1.4 セル、1.6 セル空洞形状を示す。2 つの空洞形状に対して、電子銃で電子ビームを加速したときのシミュレーションを実施し、動的位相変調が可能かどうかの調査を行った。

動的位相変調に必要な条件は、高周波電子銃の電磁場位相を変調したときに、加速された電子バンチの位相（電子銃からの出射時刻）が変化することである。2 つの空洞形状に対して、エネルギー広がり小さいレーザー入射位相近傍で加速位相をスキャンし、加速位相と出射時刻の間の相関を調査した。シミュレーションでは、粒子トラッキングコードである ASTRA と GPT を使用した。陰極表面電場が 120 MV/m および 95 MV/m の 2 つの条件において計算した。位相変化に対してエネルギーが変動しないように振幅変調を加えることを想定し、各位相で電場強度を調整している。1.4 セル形状の結果を Fig. 3、1.6 セル形状の結果を Fig. 4 に示す。1.4 セル形状は 50~90 度の加速位相においてエネルギー広がり小さいが、この範囲において殆ど加速位相と出射時刻の相関をもたなかった。一方、1.6 セル形状は 0~40 度においてエネルギー広がり小さく、この範囲において -5 ps/20 度程度の相関をもつ結果となった。このことから、1.6 セル形状は高周波電場位相の変調により出射時刻を変調することが可能であり、高効率 FEL 発振に必要な動的位相変調の導入が可能であるが、1.4 セル形状では導入が不可能なことが分かった。動的位相変調が不可欠であることから、電子銃構造として 1.6 セル形状を採用することとした。

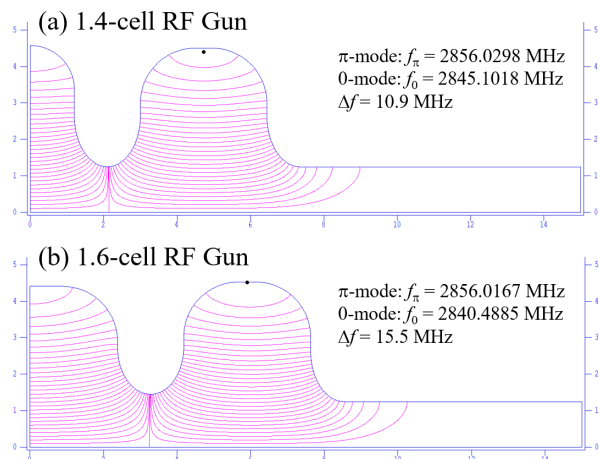


Figure 2: Simulation models of 1.4-cell and 1.6-cell RF guns.

### 3. 光陰極高周波電子銃の製作と性能測定

KEK 共通基盤研究施設機械工作センターにおいて、1.6 セル光陰極高周波電子銃を製作した。製作に向けた詳細設計では、大阪大学産業科学研究所で開発された 1.6 セル高周波電子銃の形状を基にした。製作工程は、空洞本体の切削、仮組と周波数測定による追加工量の決定、追加工、ロウ付けの順となる。Figure 5 (a) に共振周波数測定の写真を示す。仮組と周波数測定では、測定した周波数を 25 °C、真空条件に換算し、目標周波数

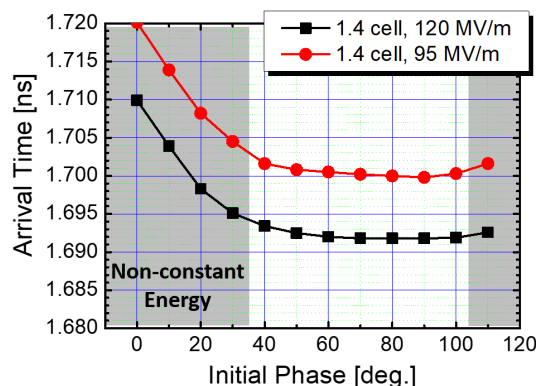


Figure 3: Simulation results of 1.4-cell RF gun.

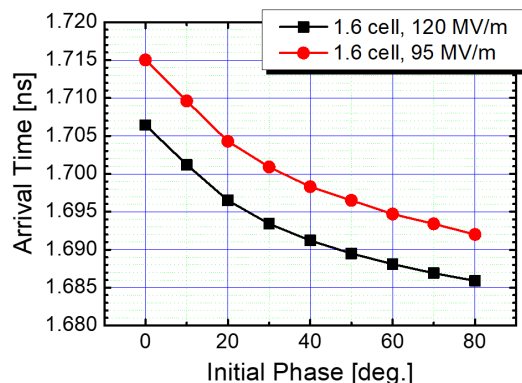


Figure 4: Simulation results of 1.6-cell RF gun.

2841.210 MHz (0-mode)、2856.754 MHz ( $\pi$ -mode) と比較した。Table 1 に切削加工回数と目標周波数との差の履歴を示す。設計時の各セルの半径は 43.790 mm (ハーフセル) と 45.002 mm (フルセル) となっており、Table 1 に追加工毎の半径方向の加工量を示す。1 回目の加工では設計半径に向けて切削し、2 回目、3 回目の加工でそれぞれ Table 1 の  $\Delta r_{\text{half}}$ 、 $\Delta r_{\text{full}}$  分だけ切削し、周波数測定を行っている。今回の電子銃製作では、合計 3 回の切削加工で目標とする周波数範囲に収めることができた。

3 次加工の後には、ロウ付け加工を行った。空洞本体ロウ付け後の性能を確認するために、共振周波数の測定、空洞中心軸上における進行方向電場分布測定とカップリング調整を行った。測定された共振周波数を空洞の使用想定温度 41°C、真空の条件に換算すると、 $\pi$  モード周波数が 2856.004 MHz となり、ほぼ設計通りの周波数になっていることを確認した。進行方向電場分布測定では摂動体として薄いストローを使用し、ストローの位置をスキャンしたときの共振周波数を測定した。Figure 5 (b) に電場分布測定の写真を示す。各位置  $z$  における周波数の変化量より、軸上の進行方向電場  $E_z$  は、

$$\frac{\Delta f(z)}{f} \frac{F_{\text{bead}}}{\omega} = \frac{|E_z(z)|^2}{\omega U} \quad (1)$$

と求めることができる [5]。Figure 6 に進行方向電場分布測定結果を示す。Figure 6 に示すように、製作した電子銃の軸上の電場分布は、シミュレーションによる分布

Table 1: History of Machining and Resonant Frequency:  $\Delta f_0$  and  $\Delta f_\pi$  are differences of frequencies from the targets for 0-mode and  $\pi$ -mode.  $\Delta r_{\text{half}}$  and  $\Delta r_{\text{full}}$  are cutting amounts for radiuses of half-cell and full-cell.

Machining No.	$\Delta f_0$ (MHz)	$\Delta f_\pi$ (MHz)	$\Delta r_{\text{half}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta r_{\text{full}}$ ( $\mu\text{m}$ )
1	10.101	12.920	0	0
2	3.634	3.127	+200	+30
3	0.135	0.089	+71	+26
After brazing	0.024	0.004	-	-

とよく一致している。

導波管上に設置されたチューニングピンの挿入量を変えたときの共振特性を測定した。クリティカルカップリングにした条件の測定結果を  $\beta = 1$  として Q 値を導出した結果、 $Q = 14356 \pm 18$  となった。次に、共振空洞の Q 値を 14356 と固定し、チューニングピンを調整してオーバーカップリングにしたときの共振特性を測定し、カップリング係数を求めた。このときのカップリング係数は  $\beta = 1.21$  であり、これ以上チューニングピンの挿入量を増やしてもカップリング係数が増えなかったため、この位置をチューニングピンの位置として決定した。この位置におけるスミスチャートを Fig. 7 に示す。Figure 7 では、円 1 が  $\pi$ -mode、円 2 が 0-mode となる。

以上の性能測定結果より、製作した電子銃は設計性を達成していることを確認することができた。性能測定後にチューニングピンのロウ付け、冷却水配管のロウ付けを実施した。Figure 8 に完成した電子銃の写真を示す。



Figure 5: Photographs of (a) Resonance frequency measurement and (b) field distribution measurement.

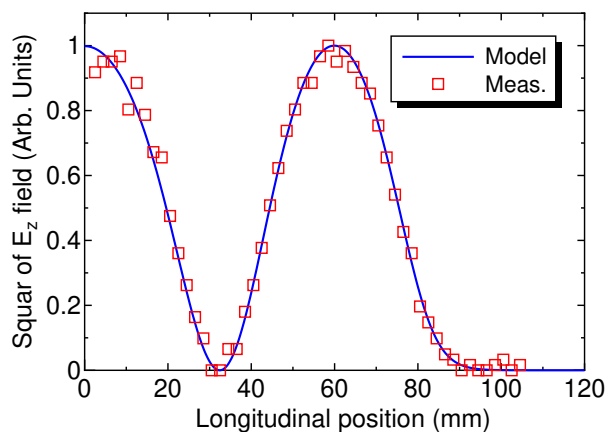


Figure 6: Measurement result of longitudinal electric field distribution on the center axis of 1.6-cell RF gun.

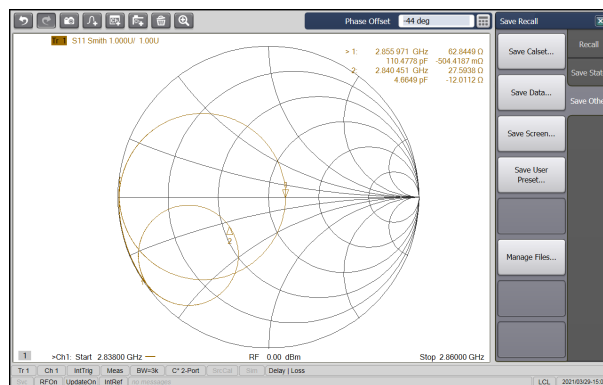


Figure 7: Smith chart after coupling tuning.

#### 4. ビームシミュレーション

KU-FEL に今回製作した電子銃を設置したときの電子ビーム特性を評価するために、加速管を含むビームシミュレーションを実施した [3]。ビームシミュレーションでは、1.6 セル高周波電子銃の陰極から既存の光陰極励起レーザ (半値幅 5.6 ps) で励起し、総電荷量 1 nC の電子ビームを発生させた場合のビーム特性を予測した。シミュレーションには空間電荷効果を含む粒子トラッキングコード GPT を用いた。

KU-FEL では S バンドの進行波加速管を用いて 1.6 セル高周波電子銃から生成された電子ビームを追加加速する。その後、Fig. 1 に示すアーク部において磁気バンチ圧縮により、バンチ圧縮したビームをアンジュレータへと輸送する。加速直後の電子ビーム特性を予測するた

め、アーク部によるバンチ圧縮前の加速管出口 (運動エネルギー 28.5 MeV) のビーム特性についてシミュレーションによる解析を行った。ビーム輸送条件を最適化した結果、RMS バンチ長 2.1 ps、規格化 RMS エミッタンス  $4.1 \pi \text{mm-mrad}$ 、RMS エネルギー幅 0.6 %、ピーク電流 200 A というビーム特性を得た。光陰極表面から加速管出口までの RMS バンチ長の時間変化を Fig. 9、規格化 RMS エミッタンスの時間変化を Fig. 10 に示す。アーク部におけるバンチ圧縮前でも、既存の 4.5 セル高周波電子銃の光陰極運転で得られるピーク電流 120 A よりも、新たに製作した電子銃では 1.7 倍程度大きなピーク電流が得られている。さらに、エミッタンスおよびエネルギー幅はバンチ電荷量が 1 nC に増えたにも関わらず、

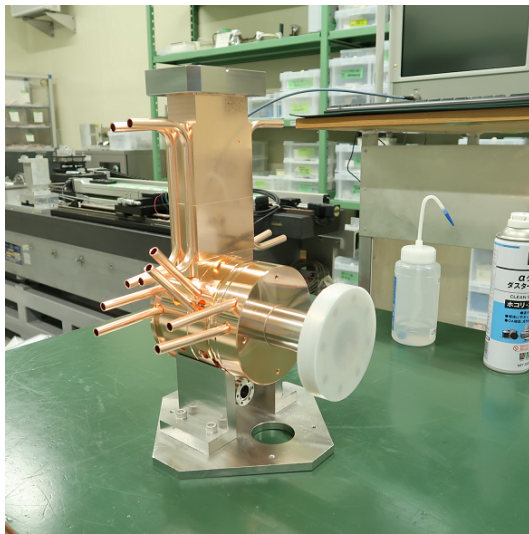


Figure 8: Photograph of 1.6-cell RF gun.

ほぼ同程度であった。アーク部でさらにバンチ長を圧縮し、ピーク電流を増大可能であることを考えると、この1.6セル光陰極高周波電子銃を用いることで、KU-FELにおいてこれまで得られている変換効率を上回る大強度超短パルス中赤外光を発生可能であることが明らかとなった。

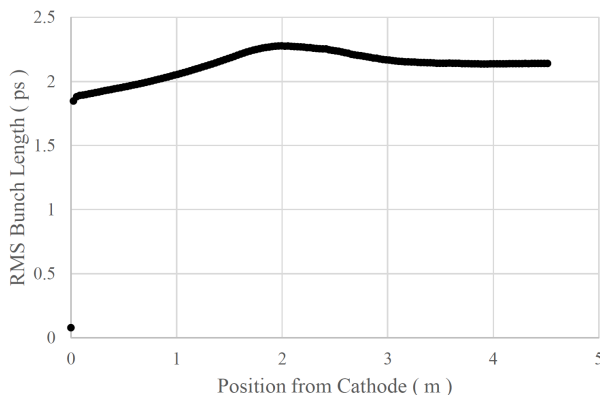


Figure 9: RMS bunch length from cathode to the exit of S-band accelerator tube [3].

## 5. まとめ

京大 FEL(KU-FEL) の FEL 引き出し効率向上のために、新たな光陰極高周波電子銃を開発した。新たな電子銃への要求は、既設の電子銃に比べて高いバンチ電荷を実現できること、FEL 発振の早い立ち上がりと高い飽和強度の両立のために DCD 法を導入可能であることである。DCD 法が導入可能であるか調査するために、1.4セル形状と1.6セル形状に対して、高周波電子銃の電磁場位相を変調したときに、加速された電子バンチの位相(出射時刻)がどのように変化するかについてシミュレーションを実施した。1.6セル形状では20度の位相変調で凡そ $-5$  ps 出射時刻が変化し、動的位相変調を実現可能であることを確認した。この結果より、電子銃形状とし

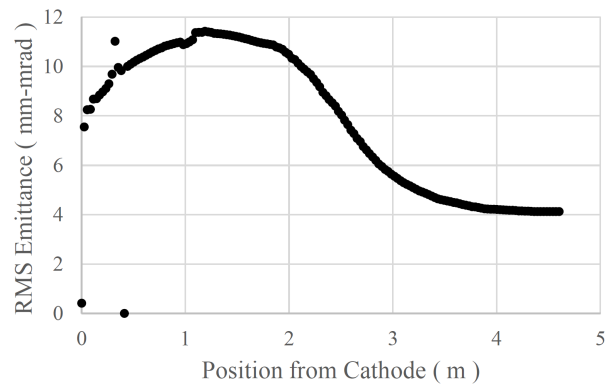


Figure 10: Normalized RMS emittance from cathode to the exit of S-band accelerator tube [3].

て1.6セル形状を採用した。KEK 共通基盤研究施設機械工作センターにおいて1.6セル高周波光陰極電子銃を製作した。製作した電子銃の性能評価を実施し、共振周波数、進行方向電磁場分布ともほぼ設計通りになっていることを確認した。新たな電子銃を用いた KU-FEL のビームシミュレーションを実施し、加速管出口においてピーク電流が現状の1.7倍程度になることを確認した。

## 謝辞

阪大産研の楊金峰氏から以前に製作した1.6セルおよび1.4セル高周波電子銃の設計および製作時の情報提供を頂いた。ここに感謝の意を表したい。本研究は文部科学省の光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP、JPMXS0118070271)によるものである。

## 参考文献

- [1] R.J. Bakker *et al.*, Phys. Rev. E **48**, R3256(R) (1993).
- [2] H. Zen *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **23**, 070701 (2020).
- [3] 梶田駿汰, “KU-FEL 加速器の光陰極高周波電子銃導入に向けたシミュレーション”, 修士学位论文, 京都大学大学院 (2021).
- [4] Jinfeng Yang *et al.*, “Development of rf gun for ultrafast electron microscopy”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan, pp. 197-199.
- [5] Haipeng Wang and Jiquan Guo, “Bead-pulling Measurement Principle and Technique Used for the SRF Cavities at Jlab”, US Particle Accelerator School, SRF Practices and Hands-on Measurements.