

シミュレーションによる三極管型熱陰極高周波電子銃における電子ビーム特性に関する研究

NUMERICAL STUDY ON ELECTRON BEAM PROPERTIES IN TRIODE TYPE THERMIONIC RF GUN

三島健太[#], K. Torgasin, 増田開, 犬飼元晴, 奥村健祐, H. Negm, M. Omer,
吉田恭平, 全炳俊, 紀井俊輝, 大垣英明

Kenta Mishima, Torgasin Konstantin, Kai Masuda, Motoharu Inukai, Kensuke Okumura, Hani Negm, Mohamed Omer,
Kyohei Yoshida, Heishun Zen, Toshiteru Kii, Hideaki Ohgaki
Institute of Advanced Energy, Kyoto University

Abstract

The KU-FEL(Kyoto University- Free Electron Laser) facility uses a thermionic 4.5 cell S-band RF gun for electron beam generation. The main disadvantage of using a thermionic RF gun is the back bombardment effect, which causes energy drop in the macro pulse. A triode structure for the RF gun was designed in order to minimize the inherent back-bombardment effect. The additional coaxial RF cavity designed to be installed in the RF gun is equipped with a spacer tuning system to adjust the cavity resonance frequency. However the frequency adjustment by variation of spacer width changes the coaxial cavity geometry and might affect the beam characteristics. In this work we performed numerical studies on electron beam properties in dependence on the triode cavity voltage, the spacer width and phase difference. We confirmed that it is possible to significantly reduce the back-bombardment power and obtain a high peak current more than 200A if we choose the appropriate phase difference regardless of the spacer width.

1. はじめに

京都大学自由電子レーザー (KU-FEL) では、電子源に熱陰極高周波電子銃が採用されている。熱陰極高周波電子銃は、光陰極高周波電子銃に比べて小型で経済的、運転が容易、平均電流が高いという長所がある。

現在 KU-FEL に用いられている熱陰極電子銃は、熱陰極を設置した 1 つの 1/4 波長空胴 (図 1(a)) と、引き出された電子ビームを 9 MeV まで加速する後段の 4 つの半波長空胴の 4.5 空胴からなる。1/4 波長の第一空胴に誘起される高周波電界によって電子が引き出されるが、電子の一部が高周波加速空胴において減速位相に乗って逆加速され陰極に戻ってきてしまい、衝突して陰極を加熱し、その結果マクロパルス長の制限や電子ビームの質の低下を招く (back-bombardment 現象)。この課題を解決し、生成電子ビームの高輝度・長マクロパルス化を実現するために、我々は三極管型熱陰極高周波電子銃の開発を進めている。

三極管型熱陰極高周波電子銃^[1]とは、図 1 に模式図に示すように、既設の 4.5 空胴の前に陰極を備えた独立の同軸共振空胴を設置し、位相・強度とも独立に制御された数十 kW 程度の高周波電力を供給することで、陰極への逆流電子を削減しようとするものである。

これまでに、二次元粒子シミュレーションにより

追加同軸共振空胴と熱陰極付近のウェーネルト電極形状の設計を行った。その結果、逆流電子ビーム電流を 90%削減でき、同時に生成ビームの短バンチ化によりエミッタンスを劣化させることなく高ピーク電流が得られるとの結果を得た^[2]。また、試作機の設計、低電力高周波試験を行った結果、追加共振空胴の共振周波数が 4.5 空胴の動作周波数と大きく異なったため、空胴の再設計と、誤差が生まれた場合のために周波数調整機構を導入した^[2]。

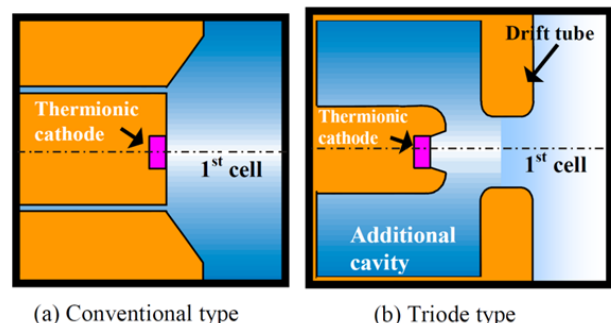


Figure 1: Geometry of triode cavity.

[#] k.mishima@iae.kyoto-u.ac.jp

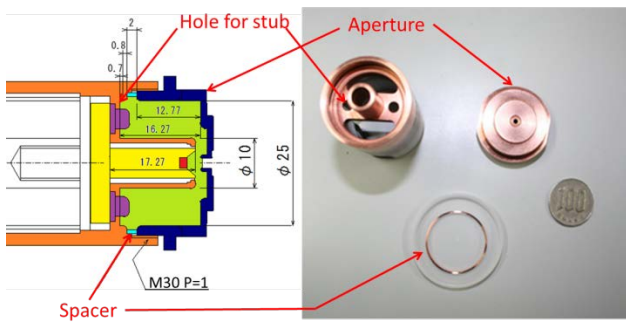


Figure 2: Photo of Triode cavity

周波数調整機構には、スタブと銅スペーサを用いる。図 2 に実際の三極管空洞の断面図および写真を示す。スタブは、空洞にあけた穴から空洞内部に適切な長さのスタブを選択して挿入し共振周波数を調節するというもので、空洞長の制限があるため限度はあるが、実験により最大約 100MHz だけ上昇させることができることがわかっている。スペーサによる調節は、スペーサの厚さを変えることにより空洞長を変化させ共振周波数を調節するというもので、スタブによる調節よりも広い範囲の周波数調整が可能である。また、空洞を開閉できる構造としたことで、陰極位置を微調整できるという利点を併せ持つ。しかしながら、同時に陰極と陽極の間の距離が変化するため、ビーム光学系が変化する。そのため、銅スペーサの厚さに対する電子ビーム特性の依存性を調査する必要がある。

また、現在、この周波数調節機構を導入した改良機に大電力高周波試験とコンディショニングを行っている^[3]。熱陰極を加熱しないコールド試験においては、現在までに空洞電圧は設計値である 30kV を超える約 40kV まで到達できており、間もなくビーム試験を開始する予定である。本報告では、back-bombardment 電力および電子銃からの出力電子ビーム特性の、空洞電圧とスペーサ厚さ各々に対する依存性を二次元粒子シミュレーションにより調査した結果を報告する。

2. 三極管型高周波電子銃の原理と現状

従来の熱陰極高周波電子銃では、back-bombardment 現象が問題となっている。図 3(a)に 1次元モデルによる従来型の電子銃内の電子軌道を示す。左図の縦軸は電子銃の中心軸上の位置を示し、右図の位置に対応している。横軸は時間を表しており、 2π rad で高周波 1 周期となる。図中の曲線の内、黒で表されている方が、電子銃から出ていく電子の軌道を表しており、赤で表されている方が陰極表面に戻り back-bombardment 現象を引き起こす電子の軌道を表している。この図からもわかるように、陰極から引き出された電子の内、高周波の加速位相後半で引き出された電子の多くは、加速されて第 2

空洞に達する前に第 1 空洞の電界が減速位相に変わってしまい、逆加速されて陰極に衝突する。

この逆流電子を削減するために、我々の研究グループでは三極管型高周波電子銃を提案している。三極管型の高周波電子銃は、陰極部分を 4.5 空洞から成る電子銃本体とは別の共振器空洞とし、電子銃本体空洞と独立な位相・電力の高周波電力を供給して独立な電界を誘起する。この陰極付近に誘起された電界で熱陰極から電子を引き出すと同時に集束化し、電子銃本体で本格的に加速を行う。図 3(b)は一次元モデルによる三極管型の電子銃内の電子軌道を示している。なお、この計算ではグリッド電極方式の三極管型高周波電子銃を想定しているため、図中に見られるように、グリッド位置で電界が不連続となっている。この図より、追加の同軸共振空洞によって第 1 空洞に達する位相を制御することにより、加速位相前半に引き出された電子は第 1 空洞の減速電界を受けるものの、上手く加速位相に乗り、逆流電子を削減できることがわかる。また、加速位相後半に引き出され、陰極に戻ってしまう微量の電子は、ギャップを狭めることによりさらに削減できる。

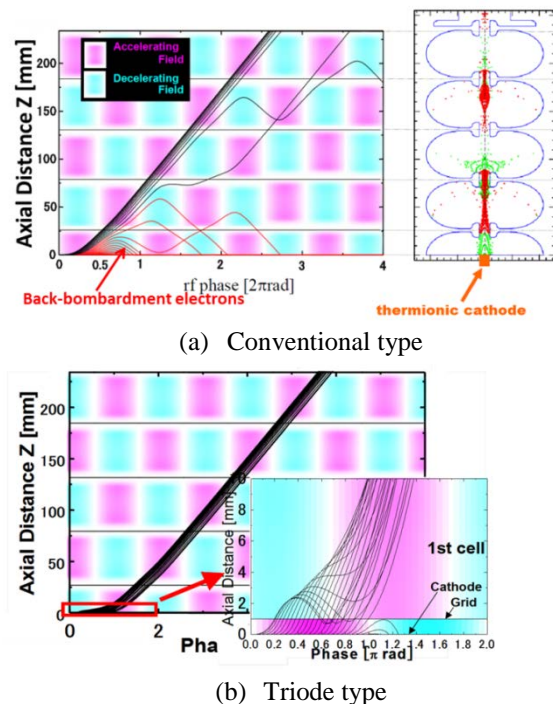


Figure 3: Result of 1D orbital calculation

図 4 に今回の計算に用いた三極管型共振空洞の二次元固有モード計算の典型例を示す。スペーサの厚さを変えることによりギャップが変化するため、最適な位相差はスペーサによってシフトすることが考えられる。また、空洞電圧によっても最適な位相差は同様にシフトすることが予想され、最適な位相差における back-bombardment 電力の削減率も変わる可能性がある。また、低エミッタンス化のために採用

されている陰極付近のウェーネルト構造は、陰極表面電流密度 80A/cm²、空胴電圧 30kV において最適となるように設計されているため^[4]、空胴電圧が低い場合には、横方向エミッタンスの劣化も心配される。

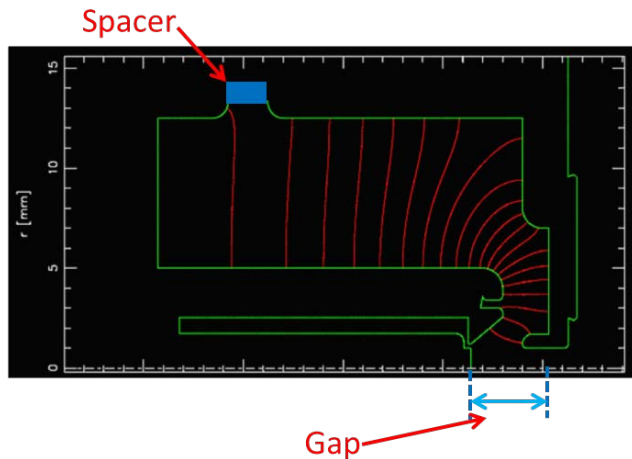


Figure 4: Eigen mode of triode cavity

3. 結果と考察

計算には、粒子軌道シミュレーションコード (KUCODE^[5])を用いた。軸対称を仮定しているため、今回の計算では、追加空胴や熱陰極の横方向のミスアライメントの影響は考慮していない。表 1 に計算に用いたパラメータを示す。

Table 1: Calculation parameter

	Triode	4.5cell
Q ₀	2816	12500
β	5.4	2.79
Cavity voltage	10,20,30kV	11MV

また、表 2 に従来型電子銃の電子ビーム特性と比較するために計算した結果の内の重要な値を示す。

Table 2: Result of calculation(Conventional type)

Total power of back-bombardment electrons P_{back} [kW]	42.9
Peak Current I_{peak} [A]	22
Normalized Transverse Emittance $\epsilon_{r,n}$ [π mm mrad]	1.53
Longitudinal Emittance ϵ_z [psec keV]	0.011
Bunch Charge Q [pC]	59.7

P_{back} は back-bombardment 電力、 I_{peak} はピーク電流、 $\epsilon_{r,n}$ は横方向エミッタンス、 ϵ_z は縦方向エミッタンス、 Q はバンチ当りの電荷量である。どの条件においても陰極半径は 1mm、陰極表面電流密度は 80A/cm² とした。また、エミッタンスおよび電荷量は、電子銃

出口での生成ビームのうち、エネルギー幅 $\Delta E_k/E_k \approx 3\%$ に含まれる電子から算出した。

以上より、ウェーネルト構造の設計値における電子ビーム特性を調査すると共に、空胴電圧、位相差、スペーサ厚さが電子ビーム特性、特に重要とされるピーク電流と横方向エミッタンスに与える影響について調査した。

3.1 電子ビーム特性の空胴電力依存性

従来型と比較して P_{back} を 80%以上削減できる条件における電子ビーム特性について調査した。図 5 に P_{back} の空胴電圧および ϕ に対する依存性を示す。

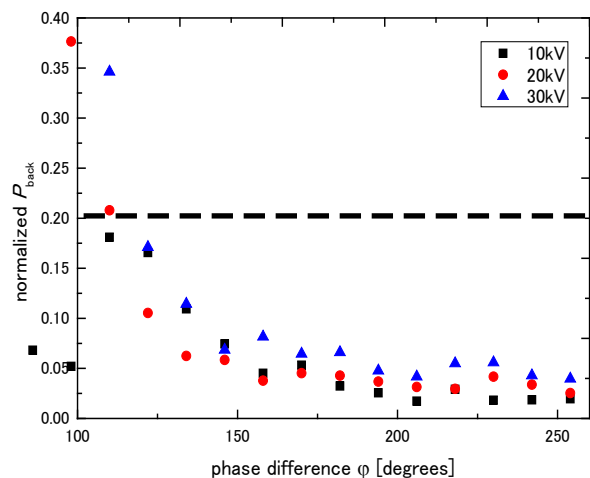


Figure 5: Dependence of P_{back} on ϕ (2.0mm spacer)

従来型電子銃の back-bombardment 電力により規格化してある。また、三極管型共振空胴はスペーサの厚さ 2mm として設計してあるため、ここではスペーサ厚さを 2mm として計算を行った。これより、従来型と比較して P_{back} を 80%以上削減するためには、どの空胴電圧においても位相差が 122 度よりも大きいことが条件であった。空胴電圧が低い 10kV においても、 P_{back} を削減することができることが分かった。また、空胴電圧によって P_{back} を最も削減することができる位相差はシフトすることが予想されたが、この結果からは確認できなかった。

図 6 に I_{peak} 、 Q の空胴電圧および位相差 ϕ に対する依存性を示す。ピーク電流の計算結果より、空胴電圧が 10kV においては高いピーク電流を得られないことがわかった。20、30kV においては従来型のピーク電流と比べて高い値をとる ϕ が存在し、特に 30kV では ϕ が 152 度の周辺で 200A を超える高いピーク電流が得られる。また、電荷の計算結果からも見て取れるように、空胴電圧が低くなるにつれて、ピーク電流および電荷が極大値を取る ϕ が大きくなり、その極大値は小さくなることを確認できる。これは三極管空胴に誘起する電界が小さくなるにつれて第 1 空胴に入射するのに必要な時間が長くなることと、空間電荷制限により陰極表面の電流密度が低下したことによる。

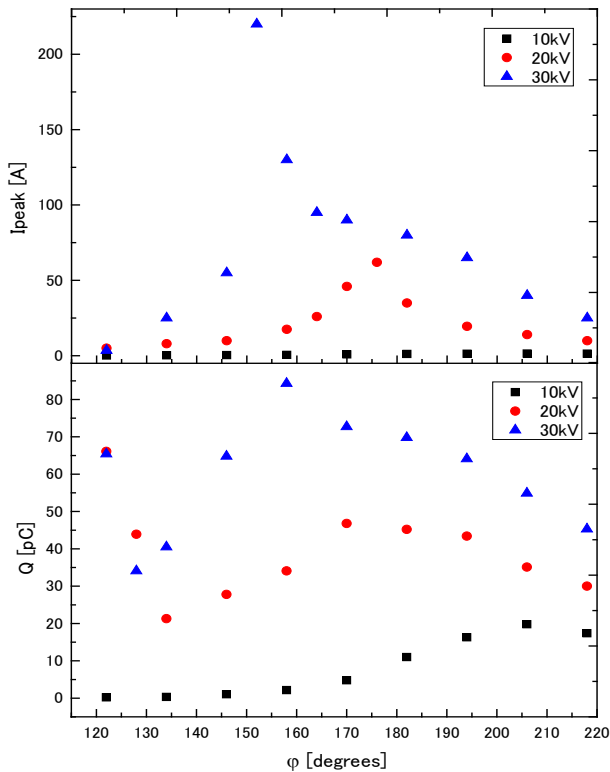


Figure 6: Dependence of I_{peak} and Q on ϕ (2.0mm spacer)

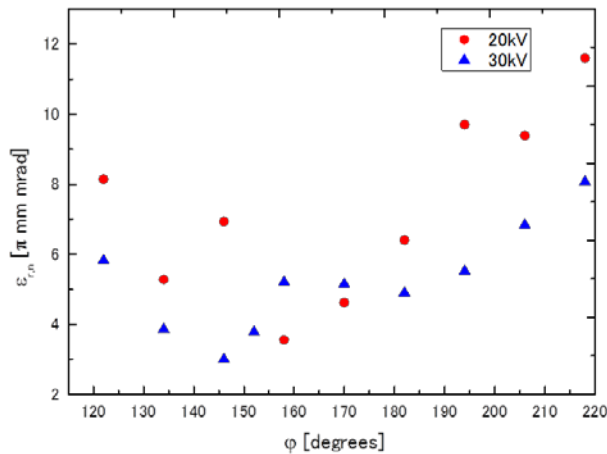


Figure 7: Dependence of $\epsilon_{r,n}$ on ϕ (2.0mm spacer)

次に、図 7 に $\epsilon_{r,n}$ の空胴電圧および ϕ に対する依存性を示す。高いピーク電流を得られない空胴電圧 10kV の計算結果は載せていない。これより、計算誤差により多少データにバラつきが見られるが、空胴電圧が高くなると、小さい横エミッタンスを得られる ϕ の幅が大きくなることがわかる。また、空胴電圧が 30kV の条件では、適切な ϕ を選ぶことにより、小さい横エミッタンスでかつ高いピーク電流での運転が可能であると言える。すなわち、空胴電圧

30kV の条件では、 $\epsilon_{r,n}$ 、 I_{peak} 両方で 150 度周辺でピークとなる。20kV の条件では、少しピークがずれている。これはウェーネルト構造が空胴電圧 30kV において最適となるように設計されていることによると思われる。また、従来型電子銃の $\epsilon_{r,n}$ と比較すると、どの位相差においても大きい値となっている。しかしながら適切な ϕ において I_{peak} は従来型よりも高い値を示しており、この程度の $\epsilon_{r,n}$ は許容範囲と言える。

最後に、空胴電圧 20、30kV の最適な位相差 ϕ における P_{back} 、 I_{peak} 、 Q 、 $\epsilon_{r,n}$ を、表 3 に示す。

Table 3: Results in 2.0mm spacer

	20kV	30kV
ϕ [degrees]	176	152
P_{back} [kW]	1.85	4.02
I_{peak} [A]	62	220
Q [pC]	39.1	78.9
$\epsilon_{r,n}$ [π mm mrad]	4.57	3.78

これらの ϕ は I_{peak} が大きくなることを優先して選んだ。

3.2 電子ビーム特性のスペーサ厚さ依存性

スペーサ厚さ 1.6mm についても同様の調査を行った。この場合の空胴電圧 20、30kV の最適な位相差 ϕ における P_{back} 、 I_{peak} 、 Q 、 $\epsilon_{r,n}$ を、表 4 に示す。

Table 4: Results in 1.6mm spacer

	20kV	30kV
ϕ [degrees]	158	140
P_{back} [kW]	2.10	3.48
I_{peak} [A]	60	220
Q [pC]	66.8	74.0
$\epsilon_{r,n}$ [π mm mrad]	5.74	4.27

表 3 と比較して、各々の空胴電圧において最適な ϕ は小さくなる。これは、ギャップが短くなるためであると考えられる。また、同等の I_{peak} を得ることができるが、 $\epsilon_{r,n}$ は大きくなった。

また、図 8 に、 I_{peak} の空胴電圧および位相差 ϕ に対する依存性を示す。図 6 の I_{peak} と比較して、比較的高い I_{peak} を得ることができる ϕ の幅が広がっていることがわかる。これより、スペーサ厚さを短くすると、実際の運転においては高い I_{peak} を得やすいということがわかった。これは、陰極表面での電界強度が空胴電圧 30kV においてスペーサ厚さ 2.0mm の場合の 5.8MV/m に対し、スペーサ厚さ 1.6mm では 7.4MV/m と変化し、ギャップが短い条件の方が電子が引き出されやすいからであると考えられる。

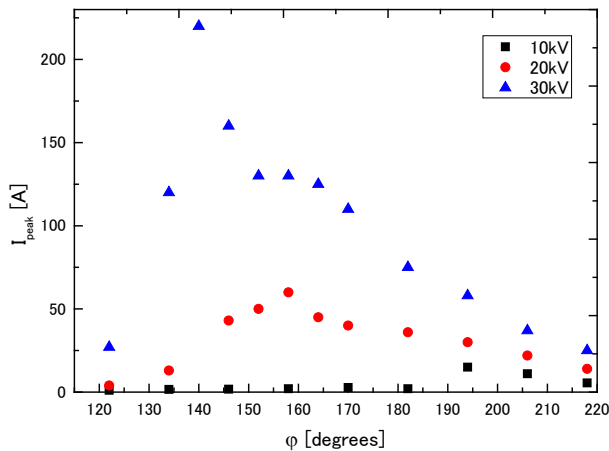


Figure 8: Dependence of I_{peak} on ϕ (1.6mm spacer)

4. まとめ

三極管型熱陰極高周波電子銃のビーム試験を行うにあたり、空洞電圧、位相差、スペーサ厚さが電子ビーム特性に与える影響について調査した。ウェーネルト構造の設計値において適切な位相差を選ぶと back-bombardment 電力を大幅に削減でき、適切な位相差において、200A を超える高いピーク電流を得ることができる。三極管空洞の空洞電圧が当初の設計値である 30kV よりも低い場合でも、適切な位相差においては従来型電子銃と比べて back-bombardment 電力を大幅に削減でき、比較的高いピーク電流を得ることができる。スペーサの厚さを変更すると、位相差は推移し、同等のピーク電流を得ることができるが、横方向エミッタンスは少し増加する。

参考文献

- [1] K. Kanno, et al., “Design of Back-bombardment-less Thermionic RF gun”, Japanese Journal of Applied Physics Vol. 41 Suppl. 41-1 (2002) 62-64
- [2] K. Masuda, et al., “Development of Thermionic Triode RF Gun”, Proceedings of 31st International Free Electron Laser Conference, Liverpool, UK, Aug. 23-28, 2009
- [3] K Torgasin, et al., “COLD TEST OF THE COAXIAL CAVITY FOR THERMIONIC TRIODE TYPE RF GUN”, Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, May. 12-17, 2013
- [4] T Shiiyama, et al., “A TRIODE-TYPE THERMIONIC RF GUN FOR DRASTIC REDUCTION OF BACK-STREAMING ELECTRONS”, Proceedings of FEL 2007, Novosibirsk, Russia, Aug. 26-31, 2007
- [5] K Masuda : Ph. D Thesis, Dept. of Engineering, Kyoto Univ(1998)