

Development of a 3.5 cell S-band photocathode RF electron gun*

Tatsuro Aoki^{†A)}, Abhay Deshpande^{B)}, Junji Urakawa^{B)}, Noboru Kudo^{B)}, Kazuyuki Sakaue^{A)}, Tatsuya Suzuki^{A)},
Toshikazu Takatomi^{B)}, Nobuhiro Terunuma^{B)}, Masashi Fukuda^{B)}, Masakazu Washio^{A)},

^{A)} Research Institute for Science and Engineering, Waseda University (RISE)

17 Kikui-cho, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-0044, Japan

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

We have been developing a photocathode rf electron gun. Last year, we succeeded in operating a new design 1.6 cell rf gun cavity with large mode separation of 8.6MHz. ^[1] Encouraging by this success, we designed a 3.5 cell rf gun cavity and start manufacturing. It will produce a high quality electron beam with energy of more than 10 MeV. In order to optimize the operating conditions, we performed beam tracing simulation studies using SUPERFISH and PARMELA. The design of 3.5 cell rf gun cavity, results of simulation studies and current status of 3.5 cell cavity manufacturing will be presented at the conference.

3.5 cell S-band フォトカソード RF 電子銃開発

1. はじめに

レーザーフォトカソード RF 電子銃は小型かつ高品質な電子ビーム源として広く用いられており、短パルス電子源^[2]・円形加速器への入射器^[3]などとして様々な場面で利用されている。我々のグループはこれまでに S-band の 1.6 cell の空洞で構成された電子銃を 10 台以上製作し、現在までに安定に運転することに成功している。昨年度、これまでの 1.6 cell の電子銃構成に代え、モード間隔 (0 モードと π モードの周波数差) の広い電子銃空洞を設計・製作した。その結果、十分なモード間隔である 8.6MHz を得るとともに、暗電流が小さく、Q 値が高いことを確認した。^[4] このモード間隔の広い空洞形状の成功により、より Cell 数の多い空洞の開発が可能であると判断した。空洞今回 Cell 数としては 3.5Cell の空洞を採用した。本空洞ではビームエネルギー 10MeV まで加速することができるため、医療や産業の分野において、今後さらに応用性を広げるものとなる。

今回 RF 電子銃の作製にあたり、シミュレーションコード SUPERFISH を用いて共振周波数が π モードで 2856MHz の 3.5 cell 高周波加速空洞の設計を行い、モードの分離が十分であることを確認した。また、その加速空洞により生成される電子ビームを、シミュレーションコード PARMELA を用いて解析し、電場強度などの最適化を行っている。現在までに従来よりも高品質な電子ビーム生成が可能であることが確認されており、空洞製作もシミュレーションを基に進行している。本講演では、計算機シミュレーションによる空洞設計とその運転状況下での最適化、及び現時点までの空洞製作の状況について報告する。

2. 空洞シミュレーション

はじめに、3.5 cell の加速空洞をもつ RF 電子銃の作製に当たり、空洞内の電磁場解析コードである SUPER-

FISH を用いて、3.5 cell の RF 加速空洞を設計した。

今回ターゲットとしたのは、 π モードでの共振周波数が 2856MHz、Field Balance が 1:1:1 の 3.5 cell 空洞である。以下の図 1 に π モードで共振している 3.5 cell 空洞の形状と電磁場の様子を示す。図中の灰色で塗られた部分が空洞となっており、この構造体を横軸を中心軸として一周させたものが空洞の立体的な形となる。赤線が空洞内での電場の様子である。

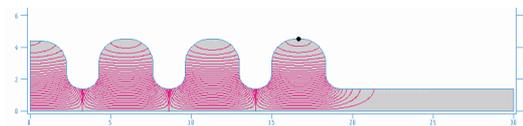


図 1: SUPERFISH による 3.5 cell RF 電子銃シミュレーションの様子

また、電子ビームのビーム軸上での電場強度の様子を図 2 に示す。

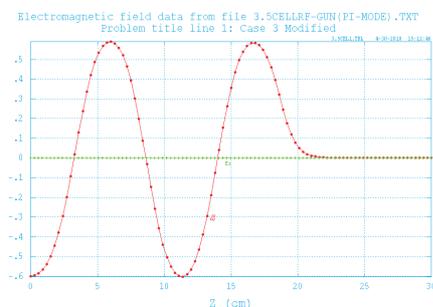


図 2: 3.5 cell 空洞ビーム軸上の電場強度分布

図 1,2 より、 π モードが共振状態にあることが見て取れる。他のモードも解析することにより、空洞の Q 値に対してモード間隔が十分に広いことを確認した。表 1 にシミュレーションによって算出された本空洞のパラメータを示す。

* Work supported by JST Quantum Beam Program

[†] aokitatsuro@ruri.waseda.jp

表 1: 3.5 cell RF 電子銃のパラメータ

π モード共振周波数	2856.01 MHz
$2\pi/3$ モード	2853.51 MHz
$1\pi/3$ モード	2848.32 MHz
0 モード	2843.98 MHz
Q 値	17665.0
R/Q	359.874 Ω

3. ビーム加速シミュレーション

3.5Cell のフォトカソード RF 電子銃空胴は初めての試みであり、ビームの品質として十分なものが得られるか未知な状態である。また、到達加速電界も 1.6Cell 電子銃空胴では経験があるが、3.5Cell では当然未知な状況である。そこで、粒子加速計算コードである PARMELA を用いて、本空胴で加速される電子の様子をシミュレーションした。まず空胴内の電場強度として平坦な分布 (1:1:1) を用いてビームの品質をチェックした。カソード上での電場強度を 50 ~ 120MV/m と変化させ、それぞれのカソード上電場強度に対して加速される電子ビームの電荷量・ビームエネルギーを電子ビームの加速位相ごとにプロットした。図 3 にカソード上での電場強度が 120MV/m のときの位相と電荷量・ビームエネルギーの様子を、図 4 に電場強度と電子ビームエネルギーの関係を示す。図 3 では、電荷量が最大 1nC であると

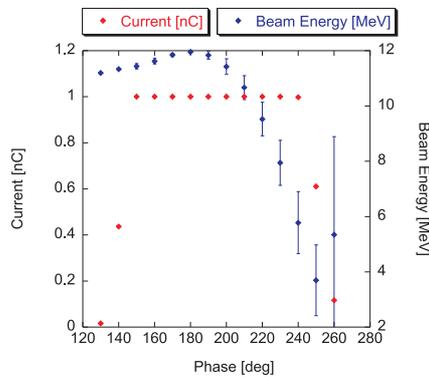


図 3: 3.5 cell 電子銃によって加速された電子ビームの電荷量とエネルギー (カソード上の電場強度:120MV/m)

ビームエネルギーのエラーバーはビームのエネルギー広がりを表す。位相とエネルギーの関係は概ねこれまでの 1.6Cell 電子銃空胴と同じである。通常使用するのは 160 ~ 180 度あたりである。また、電場強度 100MV/m を超えた辺りから電子ビームエネルギーは 10MeV を超える。エミッタンスに関する計算結果は以下の図 5 に示す。1nC という比較的高電荷量の電子ビームではあるが、 5π mmrad を切るエミッタンスが実現できていることが分かる。ただし、初めての空胴であるため、最大加速電界がどこまで到達できるか未知である。そこで、Field Balance をフラットではなく、Half cell と 1st full cell の電場強度を 2nd, 3rd full cell に比べやや強めにするこ

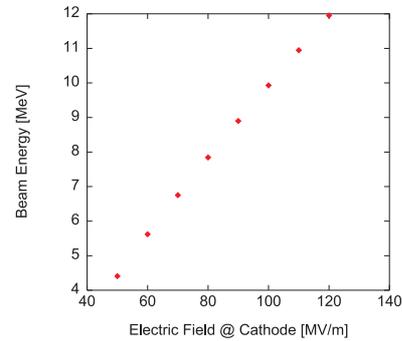


図 4: 電場強度と生成される電子ビームエネルギーの関係

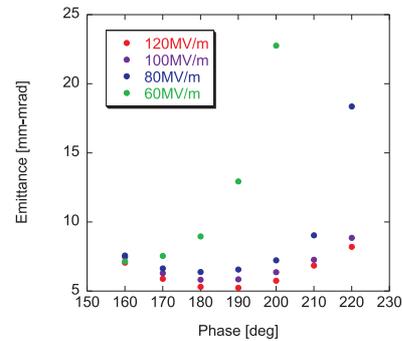


図 5: カソード上表面電界強度 120-60MV/m における Phase と Emittance の関係

間電荷効果によるエミッタンス増大を抑えることを検討した。今回 Filed Balance が 1:1:0.8:0.8 と、1:1:0.6:0.6 の場合においてシミュレーションした。以下の図 6 がその Filed Balance の様子である。

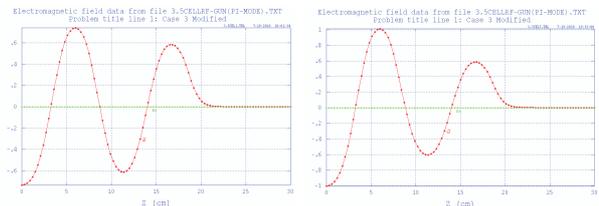


図 6: 左が 1:1:0.8:0.8、右が 1:1:0.6:0.6 の Field Balance

これらの Field Balance を有する加速空胴により加速されたビームの質を見るために、ここでは Emittance により評価した。各 Field Balance でのカソード上での電場強度と Emittance との関係を以下の図 7 に示す。また、それぞれの Field Balance においてのカソード上の電場強度とビームエネルギーの関係を図 8 に示す。これより、同じカソード上の電場強度では Field Balance がフラットのものとは比べ、2nd,3rd full cell の電場強度を落として

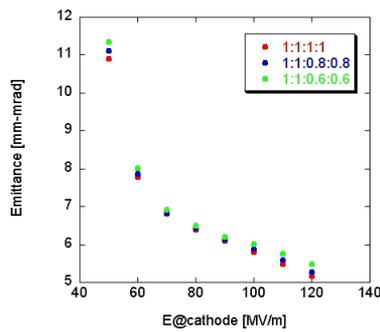


図 7: 各 Filed Balance に対するカソード上の電場強度と Emittance の関係

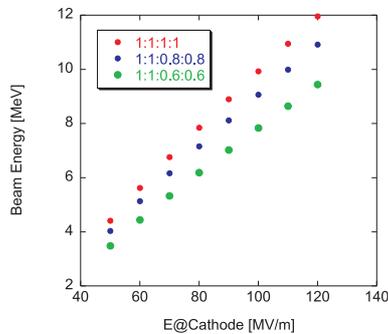


図 8: 各 Field Balance に対するカソード上の電場強度とエネルギーの関係

いるために電子ビームエネルギーは低くなるものの、同エネルギーでは emittance は良くなっていることがわかる。加速空洞より出てきた電子ビームを一定 (8MeV) として Emittance を比べた結果を図 9 に示す。この結果が

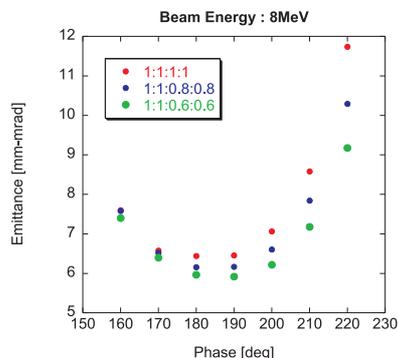


図 9: 電子ビームエネルギーを一定としたときの各 Field Balance における Phase と Emittance の関係

ら、Field Balance がフラットな状態に比べ、1:1:0.8:0.8 や 1:1:0.6:0.6 の方がエミッタンスが小さくなっていることがわかる。これらの結果から Field Balance を最適な状態にすることでより高品質な電子ビームを生成できる

ことがわかった。空洞完成後に RF エージングを行い、到達できる電界強度が小さい場合にはこのようなフラットでない Field Balance を用いてビームエミッタンスを最適化することを予定している。

4. 3.5 CELL RF 電子銃作製の現状

現在すでに 3.5 cell RF 電子銃の製作は最終段階に入っており、最後のロウ付けとフランジの溶接を残すのみとなっている。1 次加工終了後の 3.5cell 電子銃の概観を図 10 に示す。これまで、空洞の周波数や Field Balance

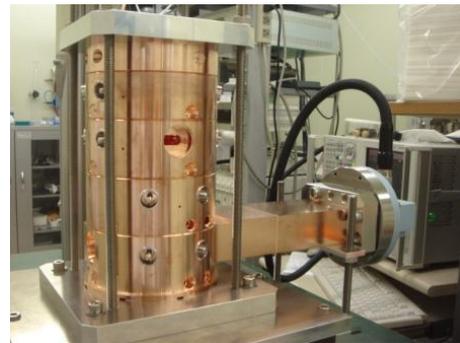


図 10: 1 次加工終了後における 3.5 cell RF 電子銃の概観

を調整するために空洞の切削と共振周波数測定・Field Balance 測定を繰り返してきた。以下に 1 次加工終了後のモード別の共振周波数、cell 別の共振周波数を、シミュレーションにより求めたターゲットとなる値とともに、表 2,3 に示す。表の上側の値が周波数測定により得ら

表 2: モード別共振周波数

	π	$2\pi/3$	$\pi/3$	0
Measurement [MHz]	2855.9	2853.0	2848.2	2843.8
Target [MHz]	2856.0	2853.5	2848.4	2844.0

表 3: cell 別共振周波数

	Half cell	1st full cell	2nd	3rd
Meas [MHz]	2849.6	2849.6	2850.1	2852.3
Target [MHz]	2850.3	2849.3	2849.3	2852.4

れた値で、下側の値がシミュレーションにより求めた π モードで共振周波数 2856MHz、Field Balance がフラットとなるときの値である。Field Balance の調整は完成後に RF チューナで行うことが可能であるため、ターゲットとしてはフラットな分布とした。

また、Bead 測定法により 3.5 cell 空洞内の Field Balance を測定した。結果を図 11 に示す。

これらの結果からかなり再現よく加工と計算が一致しているのがわかる。残すところロウ付け後の最終調整にて詳細な共振周波数及びターゲットとする Field Balance に調整する。

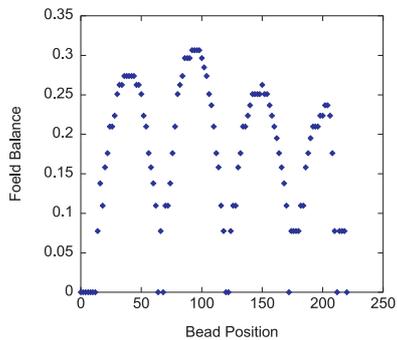


図 11: Bead 測定方により得られた Field Balance (右から左に向かって Half cell 3rd full cell)

5. まとめと今後

我々のグループでは、より高いエネルギーの電子ビームを電子銃で生成するため、3.5 cell フォトカソード RF 電子銃を作製している。シミュレーションにおいて、フィールドバランスを変えた場合のビームパラメータを計算し、カソード上表面電界強度次第では、後方 cell の電場強度を下げた方が良かったことがわかった。3.5 cell RF 電子銃は現在作製中であり、9 月頭頃完成予定である。

その後のエージングやビーム運転において、カソード上表面電界強度次第では今回行ったシミュレーションを指針として後方 cell の電場強度を下げ、ビーム品質の最適化を行っていく予定である。

参考文献

- [1] Abhay Deshpande et al., Proceedings of IPAC'10, TH-PEC026.
- [2] Kazuyuki Sakaue et al., Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2010, THPS105.
- [3] N.Terunuma et al., Nucl. Instr. and Meth. A 613 (2010), p. 1.
- [4] Abhay Deshpande, Nucl. Instr. and Meth. A 600 (2009), p. 361.