



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	線形加速器用低エミッタンス電子銃の設計
Author(s)	本間, 彰; Homma, A; 沢村, 晃子 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 173, 57-63
Issue Date	1995-05-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42441
Type	departmental bulletin paper
File Information	173_57-64.pdf



線形加速器用低エミッタンス電子銃の設計

本間 彰 沢村 晃子 山崎 初男 中田 勝英
谷田 弘明* 沢村 貞史* 津守 邦彦**

(平成6年12月28日受理)

Design of a Low Emittance Electron Gun for a Linear Accelerator

A. HOMMA, T. SAWAMURA, H. YAMAZAKI, K. NAKATA
H. TANIDA*, S. SAWAMURA* and K. TSUMORI**

(Received December 28, 1994)

Abstract

A test design of a low emittance electron gun for a linear accelerator with a thermionic cathode was made. The configuration of the anode and focusing electrode was determined using the computer simulation program code EGN2. POLYGON, a boundary setting routine, was also utilized. The expected characteristics and beam trajectory of this gun were obtained under a condition of 100 kV accelerating voltage.

The beam current, using a calculated perveance of 1.88×10^{-8} [A/V^{3/2}], is 0.59 [A] with 4.66[mm] beam diameter at the distance of 75[mm] from the cathode surface.

はじめに

線形電子加速器(linear accelerator 以下ライナック)はマイクロ波の電磁エネルギーを利用し光速に近い領域まで電子を加速する装置である。このようにして得られた相対論的電子ビーム(以下単にビーム)は放射線の発生源としてはもとより、高エネルギー物理学、放射線化学等の分野で広く用いられてきた。これらの研究におけるビームの利用は直接、間接的に物質との相互作用が対象となる。これと異なり加速された電子から直接エネルギーを引き出す形式のビームの利用法がある。代表的なものは外部磁場とビームの相互作用によりレーザー光を生成する自由電子レーザーであり近年ライナックを用いた研究の主要な位置を占めている。これらの実験では電子の空間密度を増すことが要求される。これを行うためビームは一般に磁場を用いたレンズで集束、偏向の操作が行われるが、個々の電子の径方向の運動量と座標で構成される位相空間の面積(後述するがこの面積はエミッタンスと定義され単位 $\pi\text{mm-mrad}$ が用いられている)は、ビームが形成された時点で保存量となり、加速や減速を行わない限り一定値を保つ。一般にエミッタ

原子工学科 基礎原子工学講座

* 北大 45 MeV線形加速器研究施設

**住友電気工業株式会社

スの値が小さいほど電子の取り扱いが容易になり収束性の高い良質のビームといえる。

本研究では、近年の加速器利用の動向にあわせビームの質的向上を意図した低エミッタンスの電子銃の設計を試みた。本論文で述べる低エミッタンス電子銃とは少なくとも $10 \text{ } \mu\text{mm-mrad}$ 以下であることを意味している^{1),2)}。

はじめの章で熱電子陰極電子銃とエミッタンスについて概観し、続く章は電極形状決定のために用いる軌道解析コード EGN 2 と境界データ生成用コード POLYGON の動作についてふれ、電子銃設計の手順、説明及び電極形状について述べる。次に、電極形状とこれに基づく設計例を示し、総合特性を評価する。

熱電子陰極電子銃とエミッタンス

電子ビームを発生させる電子銃の電極構造を Fig.1 に示す。今回扱う電子銃は、熱電子陰極電子銃で、加熱した陰極（以下カソード）より放出される熱電子を、カソードと陽極（以下アノード）の間に加速電圧を印加して、電子をアノード孔より引き出す。本研究では加速電圧を 100 kV と想定している。アノード・カソードは 10^{-7} Torr 以上の真空を保持したハウジング内に収納される。カソードとしては市販のカソードグリッドアセンブリ（米国 EIMAC 社製）646 B 型を想定して設計を行った^{3),4)}。

電子銃に要求される性能のうちで特に重要なものに、平行性のよいビームを加速管に供給することがあげられる。ビームの平行性がよければ、磁場レンズなどのビーム集束系を少数に抑えることが可能となり、安定性の高いビーム輸送が可能となる。粒子ビームの平行性も含めてビームの性質を定量的に表すために導入される量がエミッタンスである。エミッタンスとは、ビームを構成する電子の運動量と座標で構成する位相空間内で占める面積に相当する量で定義され、リュービルの定理によって保存される量である。ビームが円筒対称の場合、ビーム中の各粒子のビームの中心軸からの半径方向への変位 r と半径方向の運動量 Pr によって作られる位相空間で、ビームが占める面積がエミッタンスに相当する。エミッタンスが保存量であるため、ビームを収束すると径方向の運動量が増大しその直後のビームは発散性の強いビームとなり、また発散性の小さなビームとするためにはビームを絞り込むことができないことを意味している。 Pr の代わりに Pr とビームの中心軸方向の運動量 Pz の比 $r' = Pr/Pz = dr/dz$ を用い、 r と r' で作られる位相空間でビームが占める面積を用いてエミッタンスを定義することもできる。（EGN で求めることのできるエミッタンスに相当）また、ビームが加速されるにつれ Pz が増大するとエミッタンスは小さくなるため、異なるエネルギーのビームの質を比較するのに不便である。従って、本論文ではビームのエネルギーで規格化した規格化エミッタンスという量を用いる^{5),6)}。

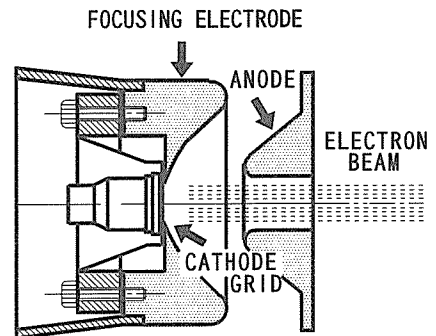


Fig. 1 Electrode structure of an electron gun.

電極形状の決定

a) 軌道解析コード EGN 2 と境界データ作成コード POLYGON

電極形状決定にあたっては SLAC で開発された軌道解析コード EGN 2 を用いた⁷⁾。このコードは、与えられた境界条件のもとで円筒対称 2 次元の Poisson 方程式を有限差分法により解き、電子軌道等を計算することができる。境界入力には境界設定をサポートする EGN 2 専用の境界設定プログラム POLYGON を用いた。これにより一つの境界形状を指定するための座標データの点数が減り、また部分的に形状を変えることも容易となり、データ取得の時間短縮が可能となる。電子軌道解析を行うプロセスは、はじめに POLYGON によって境界の入力を行うと同時に EGN 2 の起動条件を設定する。起動した EGN 2 はラプラス方程式を解き、計算領域にポテンシャル分布を与える。続いて電子軌道方程式を解き空間電荷を与え、更に Poisson 方程式を解いてポテンシャル分布を修正する。解が収束していれば結果を出力するが、解が収束していない場合は収束するまで計算を繰り返す。このようにして得られた電子軌道から r' と r を求めエミッタンスを算出する。

b) 電極形状のパラメータ化

Fig.2 は解析に用いる電子銃の電極構造の断面 (円筒対称上半分) を示す。カソードは平面型熱放出カソードで有効径は 8 mm を想定している (先に述べた 646 B 型カソードグリッドアセンブリに対応する)。平面型カソードであるためにピアス型電子銃 (凹面型状のカソードを有する) のようにビームを自己収束させる作用がなく、空間電荷効果やアノード孔の発散レンズ効果によるビームの発散を抑えることができない。そこでビームの収束作用を持たせるためにフォーカス電極を用いた。また、アノード孔に入り込むポテンシャル線を軽減させアノード孔入射時のビーム発散の影響を減少させるためアノード面に 45° のアノードノーズを設けた。電極形状の決定のために以下のパラメータを採用した。フォーカス電極におけるカソードの外径部 a と b が作る面の角度 θ 、アノード孔 ϕ_a 、フォーカス電極とアノードノーズの距離 D_{fa} 、アノードノーズの曲率半径 C の 4 つである。この設定においては θ は約 55° から 90° まで変化させることができ、また D_{fa} の下限は絶縁耐圧を考慮して 39 mm とした。これらのパラメータはエミッタンス最小の条件で決定される。カソード面から放出された電子はアノードとカソードの形状で決まるポテンシャル分布に従った軌道を描く。今回の設計では熱運動によって与えられる電子の初速度成分を無視することにした。これによってカソード面から放出した電子はカソード近傍の電場のみで初速度が決まることになる。この初速度はその後の軌道に大きな影響を与えるものと考えられる。そこで今回は最初にフォーカス電極の形状を決定し、その後アノード孔→アノードノーズ及びアノード・フォーカス電極間の形状の順で絞り込みを行った。

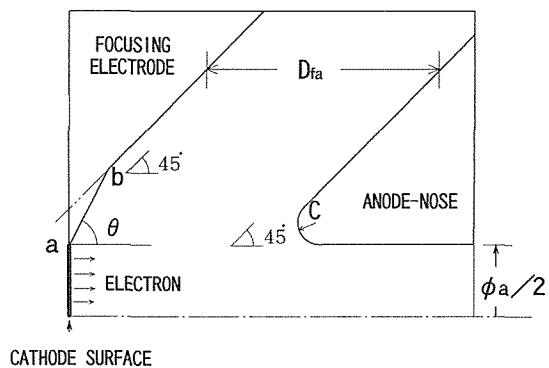


Fig. 2 Geometry of anode and focusing electrode for the design of a low emittance electron gun.

c) 軌道解析による結果

1) θ の決定

Fig.3はアノード孔 ϕ_a をパラメータとしたときの θ とエミッタンスの関係を示したものである。この結果から $\theta=70^\circ$ 近傍でエミッタンスの極小値がみられ、この値は ϕ_a に依存しないことがわかる。 θ が85度以上で極小値よりもエミッタンスの値が低くなっているが、ビームフォーカスにおけるピアスの理論と比較して対応が得られていない。 $\theta=70^\circ$ はその理論値 67.5° と接近しているため、今回は $\theta=70^\circ$ を採用することにした⁸⁾。

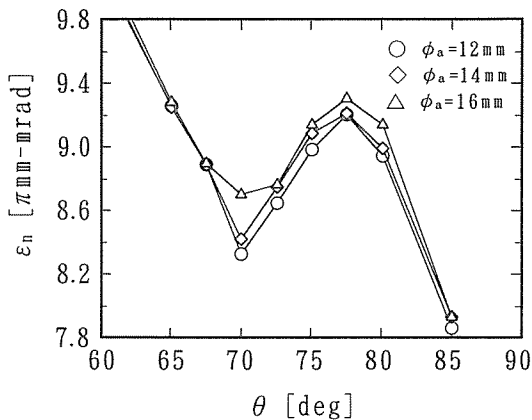


Fig. 3 Plot of emittance ϵ_n vs opening angle θ of the focusing electrode. The parameters are the diameter of the anode aperture ϕ_a . The distance between the focusing electrode and the anode-nose, $D_{fa}=39$ mm.

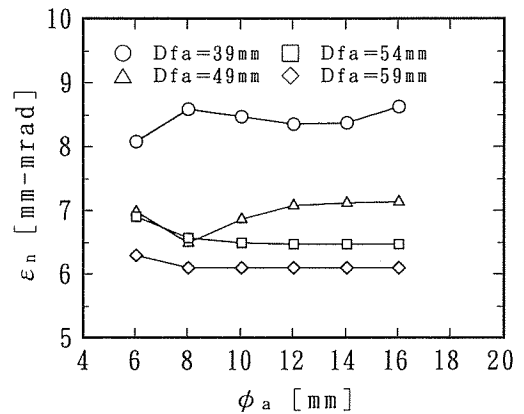


Fig. 4 Plot of emittance ϵ_n vs diameter of the anode aperture ϕ_a . The parameters are the distances between the focusing electrode and the anode-nose, D_{fa} . The opening angle of the focusing electrode $\theta=70^\circ$.

2) ϕ_a の決定

Fig.4は $\theta=70^\circ$ のもとでアノード孔 ϕ_a によるエミッタンスの関係を示したものである。パラメータは電極間距離 D_{fa} である。 D_{fa} が大きくなるとエミッタンスは低下し、 ϕ_a による変化も小さくなるのがわかる。この結果から ϕ_a は8 mmから12 mmが望ましいと思われる。以下 $\phi_a=12$ mmを採用し計算を進める。

3) アノード形状の決定

パラメータ $\theta=70^\circ$ 、 $\phi_a=12$ mmとしてアノードノーズの曲率半径 C を変えたときのエミッタンスをFig.5に示す。パラメータは電極間距離 D_{fa} である。ここでも D_{fa} が増大するとエミッタンスは低下する傾向が得られた。しかし、 C の値を大きくし過ぎるとアノードノーズの構造が大きく変わってしまうので、その影響を考慮に入れる必要がでてくる。アノードノーズの曲率半径 $C=9$ mmを得る。

4) D_{fa} の決定

以上で $\theta=70^\circ$ 、 $\phi_a=12$ mm、 $C=9$ mmとパラメータの絞り込みを行った。残るパラメータ D_{fa} を決定するためにアノード出口でのビーム軸からの距離 r に対するビームの発散角 dr/dz の関

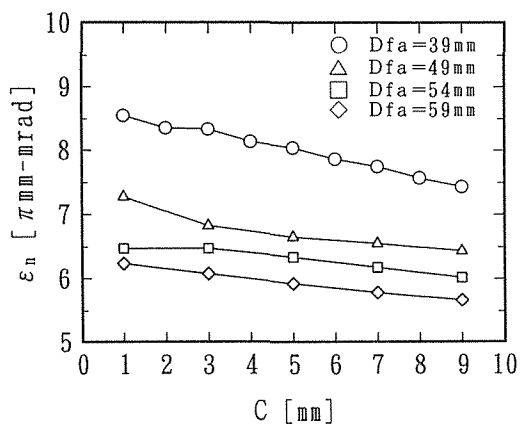


Fig. 5 Plot of emittance ϵ_n vs the radius of curvature of the anode-nose C . The parameters are the distances between the focusing electrode and the anode-nose, Dfa . The opening angle of the focusing electrode $\theta=70^\circ$ and the anode aperture diameter $\phi_a=12\text{mm}$.

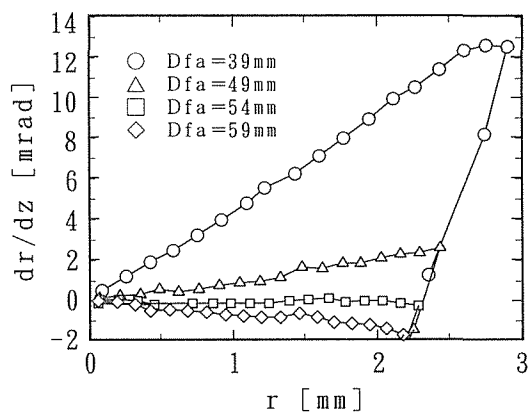


Fig. 6 Plot of divergence angle of the beam trajectory vs beam radius r . The parameters are the distances between the focusing electrode and the anode-nose, Dfa .

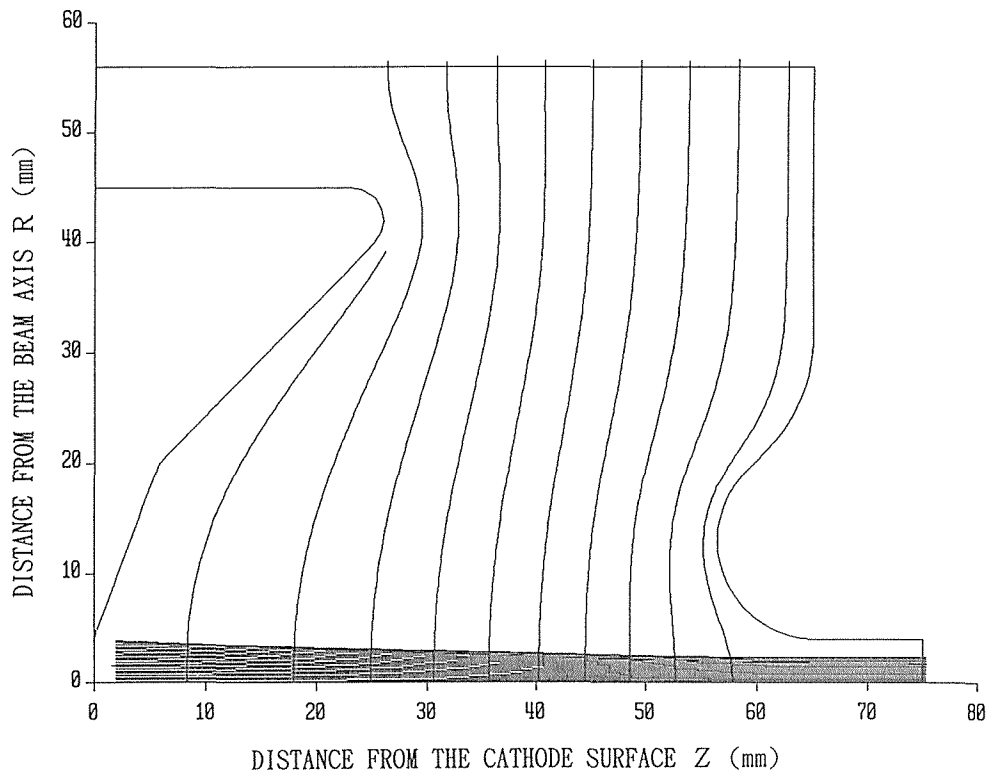


Fig. 7 Equipotential lines and beam trajectories calculated by EGN2 for determined parameters $\theta=70^\circ$, $\phi_a=8\text{mm}$, $C=9\text{mm}$, $Dfa=54\text{mm}$.

係を調べてみた。Fig.6 にこの結果を示した。Dfa が 54 mm より大きいところではアノード出口でビームの発散角が負となり、ビームが交差してしまう。交差したビームは磁場レンズ等による制御が難しく、取り扱いにおいては平行であることが望ましいので、Dfa は 54 mm 以下を採用することとした。

電子銃の総合特性

計算結果より電極形状 θ を 70° 、アノード孔 ϕ_a を 8 mm、アノードノーズの曲率半径 C を 9 mm、電極間距離 D_{fa} を 54 mm としたときに加速電圧（アノード電圧）100 kV として予想される電子の軌道を Fig.7 に示す。エミッタンスは $6 \pi\text{mm-mrad}$ と求められた。また、この電極形状において加速電圧を変えたときの電流値の関係をみた (Fig.8 参照)。ビーム電流は二極管におけるラングミュアの式 $I = GV^{3/2}$ に従って増加する。ここで G はパービアンズであり電極形状によって決まる値である。Fig.8 からは $G = 1.88 \times 10^{-8} \text{A/V}^{3/2}$ と決まった。これらの結果を Table.1 に示す。

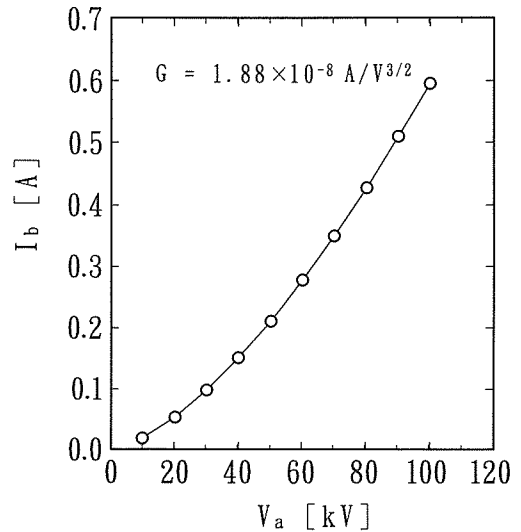


Fig. 8 Plot of current vs anode voltage. The gun is operated in the space-charge limited condition.

Table. 1 Characteristics of the electron gun.

Anode Voltage	100	[kV]
Beam emittance	6.00	[$\pi\text{mm-mrad}$]
Beam current	0.59	[A]
Beam diameter	4.66	[mm]
Gun perveance	1.88	[$\times 10^{-8} \text{A/V}^{3/2}$]

おわりに

軌道解析コード EGN 2 を用いて線形加速器用低エミッタンス電子銃の設計を試みた。今回の設計ではフォーカス電極の形状、アノード孔、アノードノーズ及びアノード・フォーカス電極間の形状の順でパラメータの決定を行った。異なった手順によるパラメータの絞り込みについては更に検討が要されると思われる。ピアスの理論との対応が得られたところで結論を出すにいった。

得られたエミッタンスは $6.00 \pi\text{mm-mrad}$ であり、はじめに目標とした値を得ることができた。しかし、今回の設計ではカソードからの熱電子放出の初速度分布による効果は考慮されていない。また実際の電子銃における制御グリッドの引き出し特性なども含めるとエミッタンスは更

に増加するものと考えられる。

比較のため一例として北大ライナックで使用している電子銃と同様の構造をもつ電子銃（この電子銃は自己集束特性を有するピアス型電子銃でカソード面は凹型をしている）についてエミッタンス等の計算を行った。得られた結果は $35.4 \mu\text{mm-mrad}$ となり今回の設計した電子銃のエミッタンス値を上回る結果が示された。

参考文献

- 1) S. Benson et al., "The Stanford MARK III infrared free electron laser" Nucl. Instr. and Meth. A250 (1986) 39.
- 2) M. Castellano et al., "Commissioning and performance of a low emittance, long pulse electron gun for the superconducting linac LISA" Nucl. Instr. and Meth. A332 (1993) 354.
- 3) R. F. Koontz, "CID THERMIONIC GUN SYSTEM" SLAC-PUB-2824 DE82-005080, 982).
- 4) J.S. Fraser et al., "High-Brightness Injectors for RF-Driven Free-Eltron Lasers" IEEE J. Quantum Electron., Vol. QE-23, 1489 (1987).
- 5) 大沢 哲, "電子銃", OHO'90 高エネルギー加速器セミナー, Aug., 1990.
- 6) 例えば, 熊谷他, 編著 実験物理学講座「加速器」, 共立出版 第5章
- 7) W.B. Herrmannsfeldt, "EGUN-AN ELECTRON OPTICS AND GUN DESIGN PROGRAM" SLAC-331 UC-28(A), (1988).
- 8) J. W. Gewartowski et al., "Principles of Electron Tubes" D. VAN NOSTRD COMPANY, Inc. (1965).