

# 電子銃の低エミッタンス化による入射部の高度化

菅野 浩一<sup>1,A)</sup>、佐藤 勇<sup>B)</sup>、佐藤 和男<sup>B)</sup>、早川 建<sup>B)</sup>、田中 俊成<sup>B)</sup>、早川 恭史<sup>B)</sup>、横山 和枝<sup>A)</sup>、境 武志<sup>A)</sup>、石渡 謙一郎<sup>A)</sup>、猪川弘康<sup>A)</sup>、中村吉宏<sup>A)</sup>、中尾 圭佐<sup>A)</sup>、橋本 英子<sup>A)</sup>、藤岡 一雅<sup>A)</sup>、村上 琢哉<sup>A)</sup>、道園 真一郎<sup>C)</sup>、大沢 哲<sup>C)</sup>、福田 茂樹<sup>C)</sup>、諏訪田 剛<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> 日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

<sup>B)</sup> 日本大学原子力研究所 電子線利用研究施設

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

<sup>C)</sup> 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

## 概要

自由電子レーザー用 125MeV 電子線形加速器に用いていた DC 電子銃に関して相対論的電子軌道解析コード EGUN を用いて解析を行い、ウェーネルト電極による集束が強すぎると結論した。そこで laminar ビームが得られるように再び EGUN を用いて電子軌道シミュレーションによる電極形状の最適化を行い、低エミッタンス化をはかるため電子放出面積が小さいカソードを取り付けた新電子銃を製作した。そして、新電子銃から放出されるビームと加速後のビームのエミッタンス測定を行った。その結果、新電子銃から得られる電子ビームのエミッタンスは旧電子銃より小さくなっている事がわかった。

## 1. はじめに

自由電子レーザーを発振させるために日本大学原子力研究所電子線利用研究施設ではクライストロンの高出力化・長パルス化・位相安定化、電子ビームの低エミッタンス化、ビーム診断法の開発など加速器の高度化を進めてきた。その結果、FEL の微細な調整が可能になった。そして、2001 年 5 月に波長 1.5 $\mu\text{m}$  の赤外 FEL 発振に成功し、6 月現在においては、およそ 1kW の尖頭出力を得ることができた。加速器の入射部は電子ビームの資質を大きく左右する。特にエミッタンスは電子銃の性能に強く依存するパラメータである。そこで、電子銃の高度化を行うことで電子ビームの低エミッタンス化・平行化を図った。本施設では可視～紫外領域の FEL 発振もめざしているため、特に低エミッタンスの電子ビームが要求される。ここでは電子銃高度化の詳細とエミッタンス測定の結果について報告する。

## 2. 電子銃電子軌道計算

本施設では 100kV 熱陰極 DC 電子銃に、電子放出面積が 1.0 $\text{cm}^2$  でグリッド-カソード間距離が 0.2mm の EIMAC Y646E カソードを用いてピーク 400mA、

パルス幅 20 $\mu\text{s}$  のビーム電流を引き出している。この電子銃から得られる電子ビームの電子軌道計算は空間電荷効果を考慮し、EGUN<sup>[1]</sup>を用いて行った。このケースではグリッドから電子を放出していると仮定している。その計算結果を図 1 に示す。図 1 のカソード位置より  $z=140\text{mm}$  の位置にマグネティックレンズが設置されている。この場合、ウェーネルト電極による電子ビームの集束が強すぎ、集束点がアノード付近にある。そのため、ビームがマグネティックレンズを通る時、ビーム径はカソード径より大きくなってしまふと推測できる<sup>[2]</sup>。そこで、図 2 のように再び EGUN を用いて適切な集束力になるようにウェーネルト電極の傾斜をなだらかにした。また、低エミッタンス化を図るため、電子放出面積が 0.5 $\text{cm}^2$  と小さい EIMAC Y646B を使用すると仮定して計算した。その結果、目的としていた平行ビームが得られることが明らかになった。グリッドカソード間距離は Y646E と同様に 0.2mm であり、ウェーネルト電極は製作が容易な形状にした。

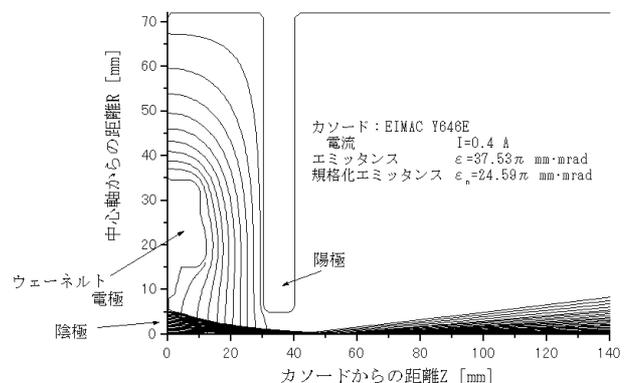


図 1 : 旧電子銃に関する電子軌道計算結果。

<sup>1</sup> E-mail: tekkamen@lebra.nihon-u.ac.jp

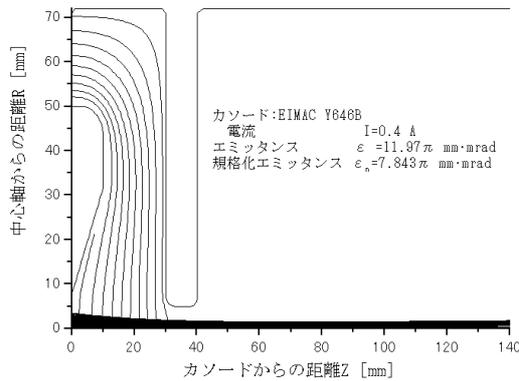


図2：新電子銃に関する電子軌道計算結果。

### 3. 電子銃の製作

EGUN を用いて最適化したウェーネルト電極形状を取り入れた新電子銃を製作した。図3にはEIMAC Y646B カソードを取り付けた新電子銃の写真を示す。



図3：電子銃ウェーネルト電極形状。左が新電子銃、右が旧電子銃。

### 4. 電子銃下流に於けるエミッタンス測定

新旧の電子銃から放出されるビームの質を比較することを試み、入射部に於けるエミッタンス測定を行った<sup>[3]</sup>。本測定ではエミッタンス位相空間上の電子の分布をマグネティックレンズによって変化させ、ワイヤースキャナーを用いてその分布の大きさを測定した。測定はマグネティックレンズの磁場強度  $Q$  とビームの半径の関係から twiss パラメータの値を求めてエミッタンスの値を評価した。磁場強度  $Q$  は近軸軌道方程式より得られ<sup>[4]</sup>、式(1)で表される。ただし、マグネティックレンズを thin レンズと仮定している。

$$Q = \frac{e^2}{4m_0^2(\gamma^2 - 1)c^2} \int_0^L B(z)^2 dz \quad (1)$$

ここで、 $e$  は電荷素量、 $m_0$  は電子の静止質量、 $\gamma$  はローレンツ因子、 $c$  は光速、 $L$  は磁場の実効長、 $B(Z)$  はマグネティックレンズが作り出す軸上の磁場を表す。ワイヤースキャナーには  $0.1\text{mm}\phi$  のタングステンワイヤーを張り、約  $52\text{V}$  のバイアスをかけている。測定に使用するマグネティックレンズがつくる磁場

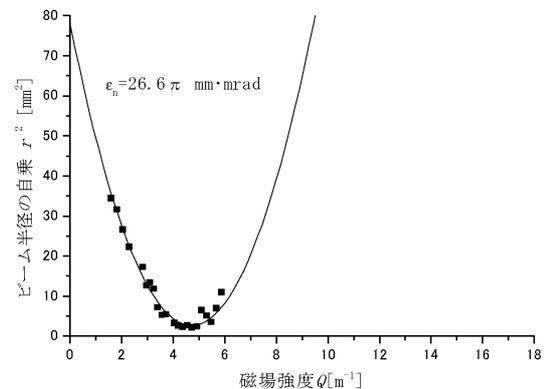
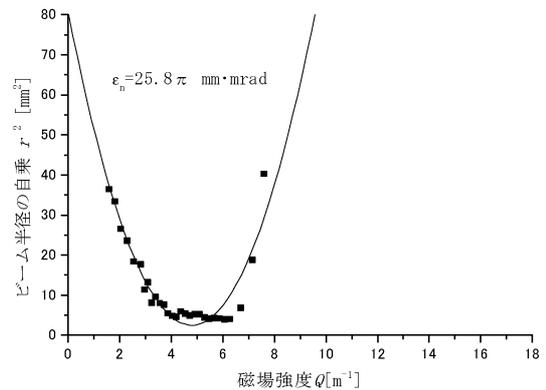


図4：旧電子銃のエミッタンス測定結果。上に水平方向、下に鉛直方向の測定結果を示す。放出電流は  $150\text{mA}$

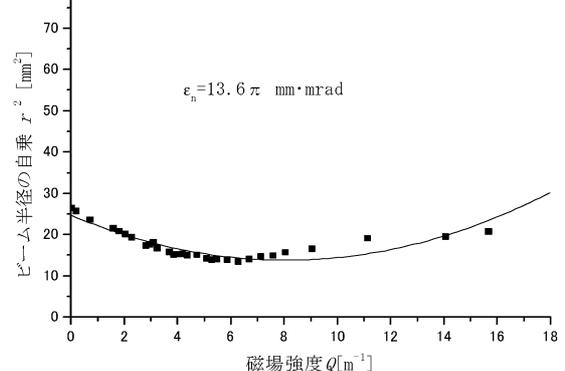
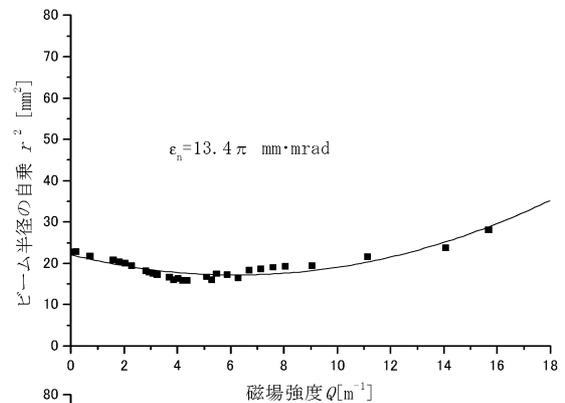


図5：新電子銃のエミッタンス測定結果。上に水平方向、下に鉛直方向の測定結果を示す。放出電流は  $170\text{mA}$

ピークの位置は電子銃カソードからビーム進行方向に42.2cm、ワイヤースキャナーのワイヤーは69.2cmの位置に設置されている。図4、5にマグネティックレンズの集束力に対するビーム半径の測定結果と最小自乗法より求めた規格化エミッタンス $\epsilon_n$ の値を示す。しかし、重みをつけていない。新電子銃では旧電子銃より約51%に規格化エミッタンスが小さくなった。これより、電子銃の改良による入射器の高度化がなされたと考えられる。

## 5. 加速後のエミッタンス測定

次に加速器終端より下流でエミッタンス測定を行い、入射器の高度化によって加速器から得られる電子ビームの低エミッタンス化が実現できたかを調べた。測定方法は入射部に於けるエミッタンス測定と同じだが、エミッタンス位相空間上の電子の分布を変化には四極電磁石を用いている。表1に $\chi^2$ フィッティングを行って得られたエミッタンスの値を示す。これより、入射器の高度化の結果、加速電子ビームの低エミッタンス化がなされたと考えられる。また、入射器に於けるエミッタンス測定と同様に最小自乗法によるエミッタンスの評価も行った。図6にビーム径測定結果と最小自乗法を用いて得られた規格化エミッタンス $\epsilon_n$ の値を示す。この計算では水平方向のエミッタンスは非常に大きくなってしまっていることになる。これは、測定時において四極電磁石を通る電子ビームの断面が楕円であるためと考えられる。また、本測定では極性を変えることで集束方向を切り替えており、鉛直方向のビーム径測定の後に極性を切り替え、水平方向の測定を行った。そのため、水平方向のエミッタンス測定に影響が出たと考えられる。

## 6. まとめ

EGUN を用いてウェーネルト電極形状の最適化を行い、エミッタンスが小さく laminar ビームを得られる電子銃を製作した。入射部での規格化エミッタンスを測定した所、新電子銃では旧電子銃と比較して半分程度に小さくなっていることがわかった。その入射部の高度化によって加速器から得られる電子ビームのエミッタンスも小さくなったことが測定からわかった。しかし、水平方向のエミッタンスは非常に大きい値が得られた。これはビームの調整が完全になされていなかったことと鉛直方向のエミッタンス測定から四極電磁石の極性を変える事で水平方向の測定に移したことによると考えられ、再度測定をする。

入射部のエミッタンス測定にはマグネティックレンズを使用した。そして、エミッタンスはEGUNによる計算値と合う測定結果が得られた。これより、入射部でのビームのエミッタンス測定には、マグネティックレンズを使えば、四極電磁石と同様の方法でエミッタンスの測定が可能であると考えられる。

表1：エミッタンス測定結果  
( $\chi^2$ フィッティングによる計算)

入射器高度化後	
加速エネルギー	86.8MeV
規格化エミッタンス	
水平方向	32.8 $\pi$ mm $\cdot$ mrad
鉛直方向	16.3 $\pi$ mm $\cdot$ mrad
入射器高度化前	
加速エネルギー	96MeV
規格化エミッタンス	
水平方向	66.13 $\pi$ mm $\cdot$ mrad
鉛直方向	63.6 $\pi$ mm $\cdot$ mrad

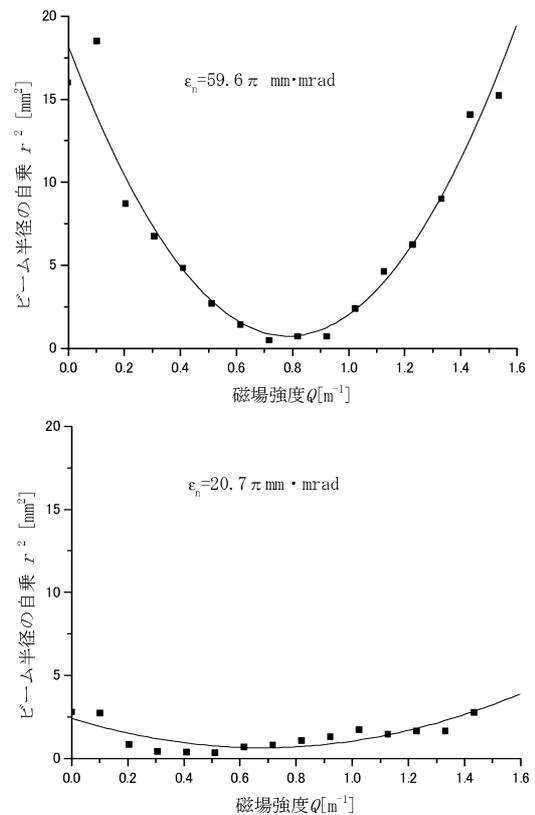


図6：入射器高度化後の加速器下流に於けるエミッタンス測定結果。実線は最小自乗法により求めた時の相関を示す。上に水平方向、下に鉛直方向の測定結果を示す。

## 参考文献

- [1] W.B.Herrmansfeldt, "EGUN –an electron optics and gun design program" slac report 331 1988
- [2] K.Kanno, et al., "ANALYSIS OF THERMIONIC DC ELECTRON GUN FOR 125 MeV LINAC" Proceedings of the 25<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July. 12-14, 2000, p168-170
- [3] 酒井文雄, "RF ガンのエミッタンス測定", Proceedings of the Workshop on "Precise Measurement of Electron Beam Emittances", 1997, p266-p271
- [4] 電気学会, 電気学会大学講座 電子・イオンビーム工学、オーム社、p109-p110