

[P8-30]

BEAM CHARACTERISTICS OF FEL LINAC AT NIHON UNIVERSITY II

K.Yokoyama*, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, K.Sato, Y.Hayakawa, I.kawakami, Y.Matsubara, H.Nakazawa*, T.Sakai*, K.Kanno*, S.Anami**, S.Fukuda**, H.Kobayashi**, A.Enomoto**, S.Ohsawa**, S.Yamaguchi** and T.Kamitani**

Atomic Energy Research Institute, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274 -8501 Japan

*College of Science and Technology, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274 -8501 Japan

**High Energy Accelerator Research Organization, KEK
1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801 Japan

Abstract

The transverse emittance of the electron beam from the FEL linac at Nihon University have been estimated by the measurement of the beam size as a function of the strength of a quadrupole magnet at the electron energy of 80 MeV. The normalized emittance in vertical and horizontal directions has been estimated to be 63π mm-mrad and 107π mm-mrad, respectively.

日大 FEL 用リニアックの加速ビーム特性 II

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設^[1]では、紫外線領域における自由電子レーザー (FEL) の発振のために、電子線形加速器の性能改善を行っている。FEL の利得は、電子ビームの尖頭電流、アンジュレーター、電子ビームのエネルギー分散、エミッタンス等の性能に依存する。ここでは、日大 FEL 用電子リニアックの加速器出口でのエミッタンスを測定した結果と加速器入射部^[2]における空間電荷効果を取り入れたビーム輸送シミュレーションの結果を報告する。

2. 測定の原理と方法

粒子ビームのエネルギーが一定のとき、ビーム集束系を用いてエミッタンスを測定できる。ビームの位相空間 (横方向の位置および運動量) における分布が楕円をしていると仮定すると、ビームの半径 r [m] は、その上流に置かれた四極電磁石の磁場の強度 Q [m^{-1}] (ただし、 $Q = \frac{e}{p} \int \frac{dB_y}{dx} dz$) にしたがって双曲線的に変化する。このときビームエミッタンス ε とこの双曲線の極小点 r_{\min} 、漸近線の傾き k ($\equiv Lr_0$) の間に次の関係がある^[3]。

$$\varepsilon = \frac{r_{\min} r_0}{L} = \frac{kr_{\min}}{L^2} \quad (1)$$

ここで L は四極電磁石からビーム径の測定点までの自由空間長、 r_0 は四極電磁石の位置でのビーム半径である。

この原理から、 Q を変えて r を測定することによ

って、ビームエミッタンスを求めることができる^[4]。このとき位相空間上のビーム分布は、自由空間や加速を伴わない集束レンズを通過すると、その面積は保存されて形状のみが変化する。

エミッタンス測定時の幾何学的配置を図 1 に示す。ビームの半径 r の測定には、ビームプロファイルモニター (PM06) 上の電子ビームの断面像を、鏡で望遠鏡に導き拡大して CCD カメラを用いて撮影した。この画像をモノクロのモニターテレビに出力し、デジタルスチルカメラで撮影しパソコンに取り込んで処理した。四極電磁石 1 は、 x 方向又は y 方向のみを励磁した。電流値はそれぞれ約 0.1A づつ変えた。撮影した画像の輝度分布を、電子ビームの密度分布に比例しガウス分布をしていると仮定して 1σ のビーム半径 r を測った。図 2 に画像処理をした写真を示す。写真に写っている蛍光板の目盛りは 3mm 間隔である。

3. 結果

実験の時の電子ビームエネルギーは下流の偏向電磁石で測定して 80MeV であった。この時の各ビーム電流モニターの電流波形を図 3 に示す。CM02 はバンチャー出口で 260mA、CM03 は 4m 加速管入口で 120mA、CM04 は 1 本目の 4m 加速管出口で 80 mA、CM05 は最後の 4m 加速管出口で 80 mA である。測定で得られたビーム半径の変化を最小二乗法で双曲線に近似した結果を図 4 に示す。 y 方向の測定では、四極電磁石 1 のうち中央の 1 台を励磁しているが、 x 方向の測定では、両端の 2 台を励磁し

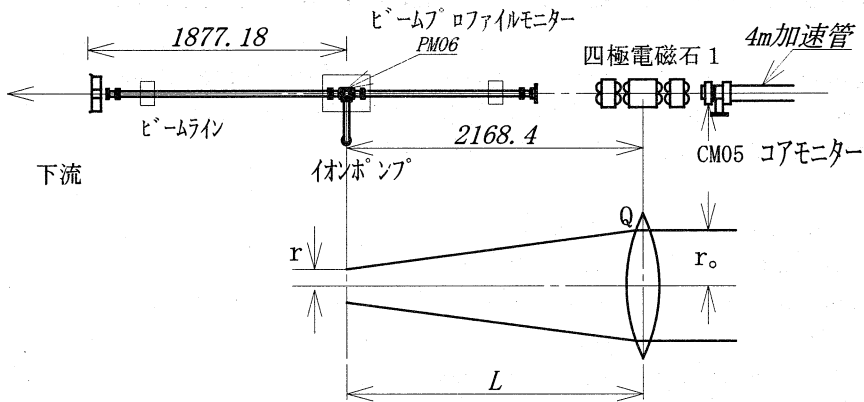


図1. エミッタンスの測定原理と測定時の幾何学的配置

ているので、焦点距離の補正を加えた。この結果 x 方向のエミッタンスは $0.68 \pm 0.09 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 、y 方向のエミッタンスは $0.40 \pm 0.09 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ になった。規格化エミッタンスはそれぞれ $\epsilon_{nx} = 106.6 \pm 13.9 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 、 $\epsilon_{ny} = 63.1 \pm 13.8 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ である。x 方向の規格化エミッタンス ϵ_{nx} は y 方向の規格化エミッタンス ϵ_{ny} より大きい。

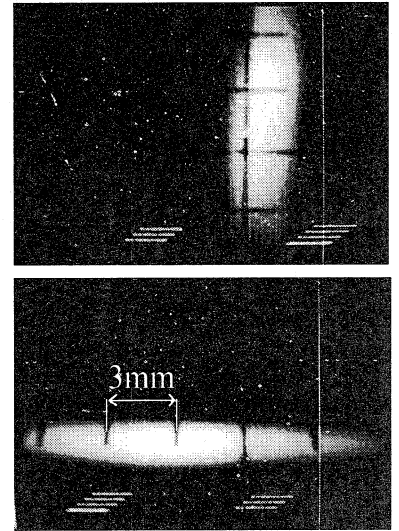


図2. ビームプロファイルモニター写真。x 方向を励磁したとき(上)、および y 方向を励磁したとき(下)。(エネルギー 80 MeV)

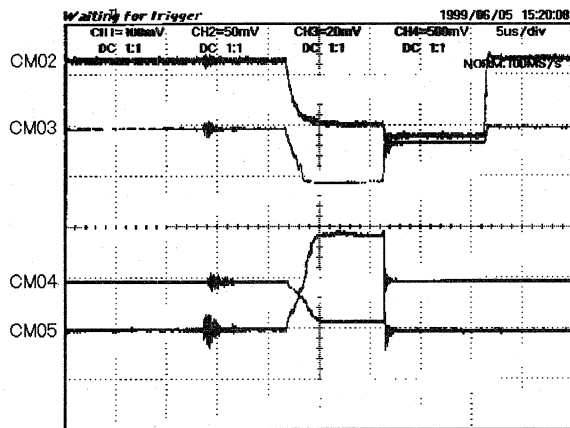


図3. コアモニターによる電流波形。

スケール: CM02 : 200mA/div, CM04 : 40mA/div,
CM03, CM05 : 100mA/div, 横軸 : 5 μ sec/div

4. 入射部における空間電荷効果の影響

加速器入射部において空間電荷効果をデスクモデル^[5]で取り入れて行った電子ビーム輸送シミュレーションの結果を図5に示す。ただし、空間電荷効果の影響がはっきり見えるようにビームローディングの効果を除いて計算した。縦軸はRFに対する電子の位相を表わし、横軸は順にプリバンチャー、ドリフトスペース、バンチャー内での電子の位置を表わす。DC電子銃から取り出されたビームは、バンチャーの入口付近でバンチが形成され、その後光速に近づく。シミュレーションでは、電子銃からの電子ビームを実際の運転時の取り出し電流 400mA に合わせて計算した場合は、進行方向のバンチの形成には空間電荷効果の影響はほとんど見られない。

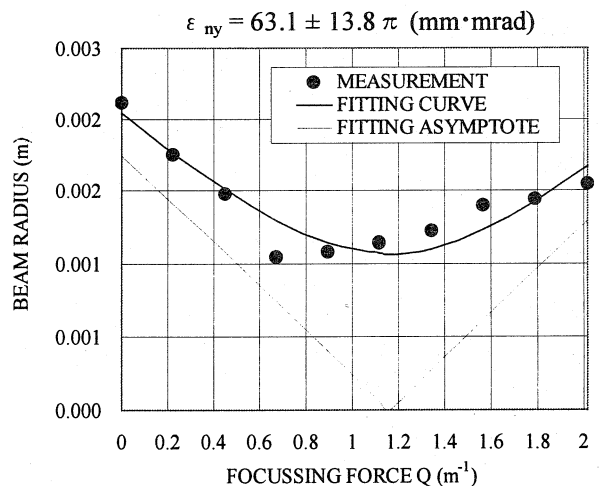
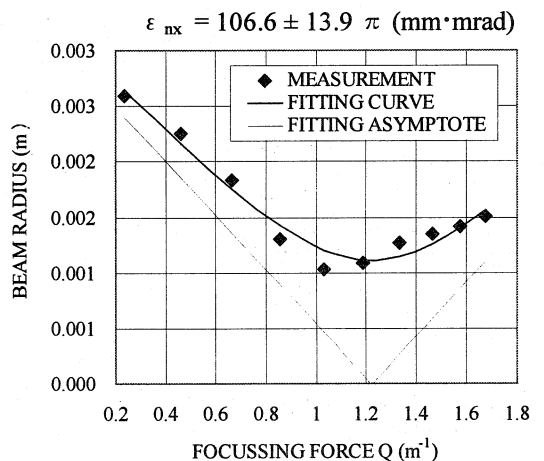


図4. 四極電磁石の励磁によるビーム半径の変化。加速器出口の x 方向のビーム半径の変化(上)と y 方向のビーム半径の変化(下)。

このシミュレーションに用いた加速パラメーターを表1に示す。計算ではリニアックの実際の加速に近い条件を選んで行った。電子銃からのビーム電流を2.0Aにして計算した場合は図5の下の図で示すように空間電荷効果の影響がDRIFT1で顕著に表れている。

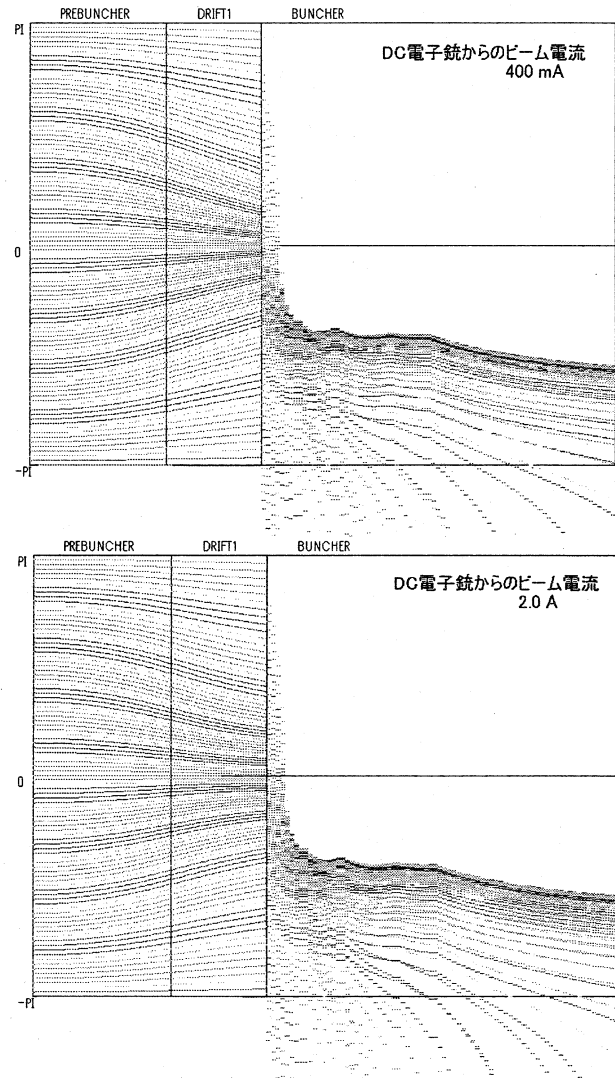


図5. 空間電荷効果を取り入れた入射部におけるビーム輸送シミュレーション

表1. シミュレーションに用いた加速器入射部の主なパラメーター

加速周波数	2856.00	MHz
直流電子銃電圧	100.0	kV
電子銃からのビーム電流	0.40	A
プリバンチャー入力電力	0.5	kW
バンチャー入力電力	2.6	MW

5. まとめ

これまでの計算解析と測定結果から、日本大学電子線利用研究施設の自由電子レーザー用電子線形加速器の加速ビーム特性^[6]について以下のことが分かった。

アンジュレーター^[7]に入射する電子ビームのy方向のエミッタンスは約 0.4π mm-mrad, x方向のエミッタンスは約 0.7π mm-mradであった。

しかし、例えば波長500nmの光と電子ビームが効率よく相互作用するエミッタンスは 0.16π mm-mrad以下である。日大の電子線形加速器は性能の改善を行っているが、電子ビームのエミッタンスを1/2以下に小さくすることが今後の重要な課題と考えられる。今回の実験結果を他施設の加速器のビーム特性と比較すると、FELにおける可視光500nm発振の可能性はあるが最終目的である紫外線領域(300nm)の発振を目指すには、電子ビームの性能を今以上に良くしなければならない。シミュレーション結果から予想されることは、電子ビームがバンチャーに入ってからすぐのところではバンチが形成されるので、電荷密度が極端に大きくなり、エミッタンスを悪くしている可能性が高い。

電子ビームをバンチさせると空間電荷効果により横方向に広がる性質があるため、一般にエミッタンスが悪化する。エネルギーが高くなると空間電荷効果が小さくなるため、エミッタンスはバンチを形成する入射部でほぼ決まると考えられる。

参考文献

- [1] I.Sato et al., Proc. of this Meeting.
- [2] T.Tanaka et al., Proc. of 23rd Linear Accelerator Meeting. In Japan, (1998) 163.
- [3] Karl L.Brown et al, SLAC-75, Rev.3 (1972) 104.
- [4] A.Enomoto et al., Proc. of 10th Linear Accelerator Meeting in Japan, (1985) 1.
- [5] G.W.Peterson et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-16 (1969) 214.
- [6] K.Yokoyama et al., Proc. of 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan, (1998) 199.
- [7] H.Nakazawa et al., Proc. of 23rd Linear Accelerator Meeting In Japan, (1998) 84.