

京都大学 FEL 装置用 LINAC におけるビームパラメータ測定

林 秀輔、宮迫 敦、高松 輝久、増田 開、紀井 俊輝、
大垣 英明、吉川 潔、山寄 鉄夫
京都大学エネルギー理工学研究所
〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

概要

京都大学で計画している赤外自由電子レーザー装置[1]は、熱陰極型高周波電子銃と進行波型加速管から得られる30-40 MeV 電子ビームと Halbach 型アンジュレータを用いて、波長 3-20 μm での FEL 発振を目指している。今回は、熱陰極高周波電子銃から進行波型加速管までのビームパラメータの測定結果、及び、シミュレーションとの比較について報告を行う。

1 はじめに

赤外域自由電子レーザーは、波長可変・高出力であるため特定の分子反応を選択的に引き起こすことが可能である。この特徴を利用し、生体エネルギーや太陽エネルギーなどの再生可能エネルギーシステムの高効率化に関する研究を行うため、赤外自由電子レーザー装置(KU-FEL)[1]の開発を進めてきた。これまでにシミュレーションによる電子ビームパラメータや FEL 評価[2]を行い、電子銃から加速管までの建設を終え、加速管での加速の許可を待っている状況である。そこで、電子銃から加速管の入口までにおいて、FEL 発振に重要なパラメータであるビームパラメータの測定を行った。また、PARMELA[3]でのシミュレーション結果と測定結果の比較を行った。

2 ビームパラメータ評価

図1のFEL装置の概略図にあるように、KU-FEL装置は電子銃、加速管、輸送系、アンジュレータで構成されている。電子銃は4.5空洞熱陰極型高周波電子銃を用いており、装置の小型化を図りつつ、低エミッタンス、高輝度の電子ビームを生成することが可能である。しかし、逆流電子による悪影響により、現状ではマクロパルス長が3 μsec [4]に制限されている。加速管までのビーム輸送系は、DOG-LEGと呼ばれる形をとっており、2つの45度偏向電磁石及びトリプレット型四重極電磁石が配置されている。また、スリットも配置されており、FEL発振には寄与しない低エネルギー成分を除去している。加速管は有効長2.9mのS-band進行波型であり、20MWの高周波源により最大40MeV程度まで加速可能である。加速された電子は、60度偏向電磁石3台とダブレット型四重極電磁石を配置した180度アークによってバンチ圧縮され、マッチング用トリプレット型四重極電磁石を通過してアンジュレータへと入射される。

ビームパラメータ測定は、電子銃から加速管入口まででビーム電流、エネルギー幅、横方向エミッタンスについて行った。加速管入口でのビーム電流は、5.4MWの時180mAであり、4.5MWの時110mAであった。測定時は、マクロパルス長は2 μsec で、陰極の温度は1258K(表面電流密度10A/m²)に設定した。

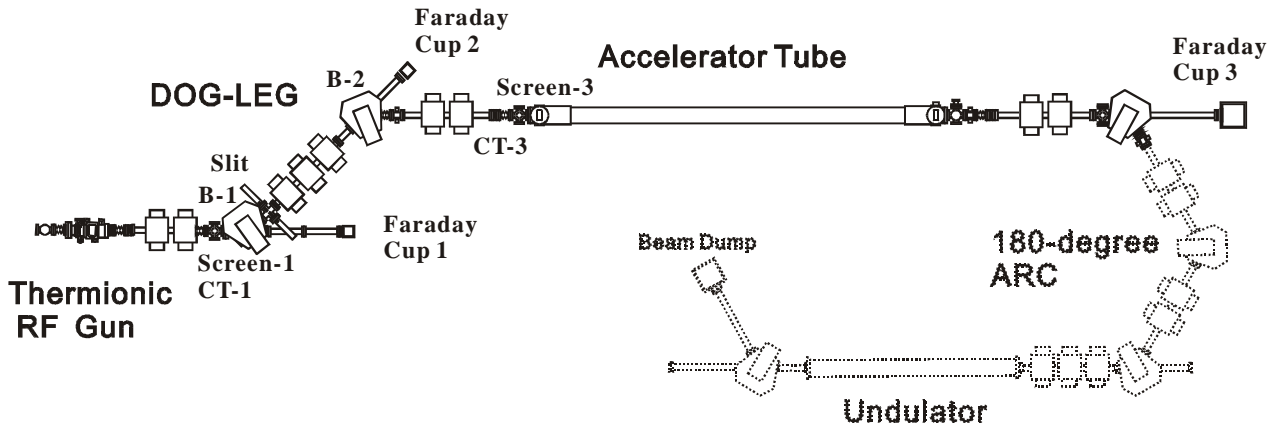


図1. KU-FEL装置の概略図

2.1 エネルギー幅

電子銃から生成された電子ビームのエネルギー幅は偏向電磁石(図 1 B-1)とファラデーカップ(図 1 Faraday cup2)を用いて測定した。高周波入力電力が 4.5 MW で電子銃での電子ビームのエネルギースペクトル測定結果は図 2a)の実線(FC2 exp.)のようになり、エネルギー幅は 10%であった。また、図 2 a)の点線(FC2 calc.)は偏向電磁石を通過させたあとのファラデーカップでの電子ビームのエネルギースペクトルを PARMELA により計算した結果である。シミュレーション結果(FC2 calc.)は、測定結果と比較してよく一致していることが見て取れる。

同じ高周波入力電力でスリットを通し加速管に入射するエネルギー幅を偏向電磁石(図 1 B-2)と CT(図 1 CT-3)を用いて測定した。測定結果は図 2b)の実線(CT3 exp.)のようになり、エネルギー幅は 4.0%であった。これもシミュレーション(CT3 calc.)と比較してよく一致している。

次に、高周波入力電力を 5.4 MW に上げて、電子銃での電子ビームのエネルギー幅の測定を行った。高周波入力電力を上げると、陰極より発生した熱電子がより高い電界によって加速するため、空間電荷効果の影響が減少し、PARMELA によるシミュレーションでは、エネルギー幅($dE/E = 6.2\%$)は狭くなる。しかし、実際に測定すると図 3の実線のように、エネルギー幅が 10%から 14%へと広がった。その原因としては、逆流電子の陰極への衝突が挙げられる。エネルギー分布の時間依存性を測定すると、図 3のように逆流電子の影響が少ない前半(0-1 μ sec)では高エネルギーの電子が支配的であり、エネルギー幅は PARMELA のシミュレーション結果($dE/E = 6.2\%$)に一致している。そして、逆流電子の影響が大きい後半(1-2 μ sec)では、低エネルギーの電子が支配的であることが分かった。

2.2 横方向エミッタンス

より詳細な位相空間の情報を得ることが可能な、トモグラフィ技術を応用したエミッタンスの測定方法が開発されている[5]。この方法は、位相空間分布がガウス分布でない熱陰極型高周波電子銃からの電子ビームにも適用可能である。しかし、電子ビームのエネルギー幅、四重極電磁石による回転幅の制限がある場合は、実際の値と測定値の間に誤差が生じる。エネルギー幅による誤差は、四重極電磁石によってスキャンして投影像を取得するためであり、エネルギー幅 10%程に対して、誤差は 5%程度である。また、回転幅は、四重極電磁石の最大磁場勾配、蛍光板のサイズ、四重極電磁石と蛍光板の距離で制限され、回転角を 0.5π 観察して再構成した場合に誤差は 50%程度生じる[6]。現在の装置配置では Sreen-1,3 とともに、スキャンさせる四重極電磁石と蛍光板までの距離が近いので、回転角がそれぞれ水平方向で 0.4π 、垂直方向で 0.2π 程度しか観察できなかった。そのため垂直方向の再構成電子分布図にはより大きな誤差が予想される。

高周波入力電力 4.5 MW のとき電子銃直後の水平方向、垂直方向のエミッタンスをトモグラフィ法で測定した。ビームプロファイルモニタ上流の四重極電磁石の電流を変えることにより、位相平面上で電子ビームが回転するので、蛍光板と CCD カメラ(図 1 Screen-1)を用いて、ビームプロファイルをとる。位相平面での電子密度分布図を再構成

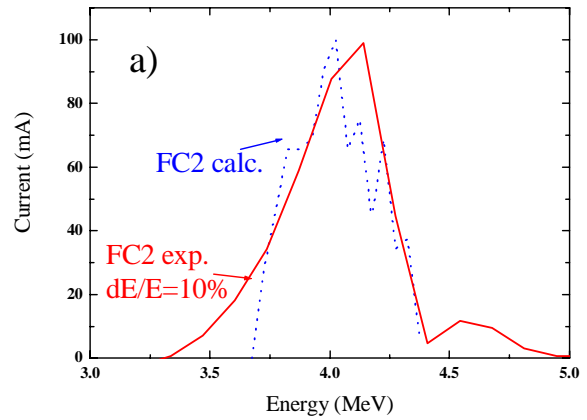


図 2 a) 電子銃の電子ビームのエネルギースペクトル (4.5 MW)

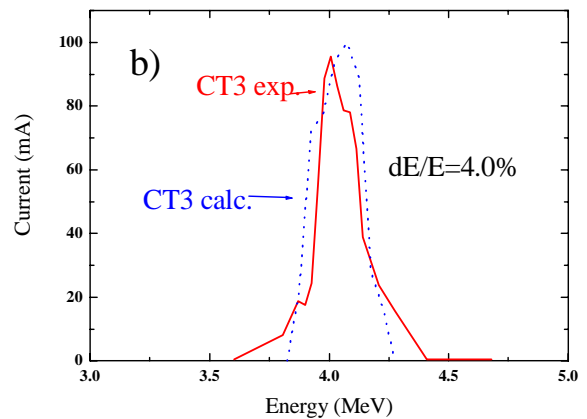


図 2 b) 加速管に入射する電子ビームのエネルギースペクトル (4.5 MW)

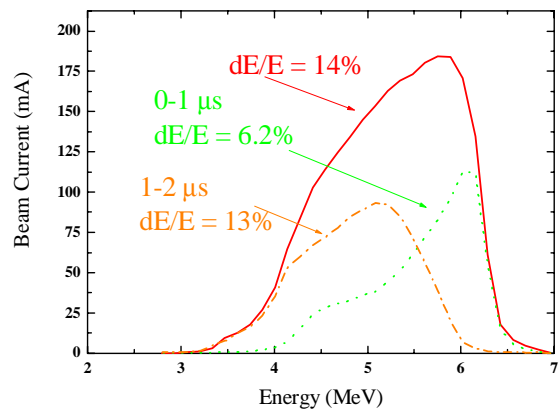


図 3 電子銃からの電子ビームのエネルギースペクトル (5.4 MW)

表 1 電子銃での Unnormalized emittance ($\pi\text{mm-mrad}$)

Gun RF input	direction	Measurement		Simulation
		Tomography	Quadratic fit	
4.5 MW	horizontal	7.5	5.3	7.51
	vertical	15.3	27.2	21.7
5.4 MW	horizontal	7.2	4.1	3.3
	vertical	10.3	34.6	11.8

するため、40 枚の画像データを取得した。図 4 は、水平方向の再構成した位相平面での電子分布図である。回転角を完全にカバーしているわけではないが、比較的きれいな図を得ることができた。また確認のため、四重極電磁石でスキャンした結果を 2 次関数フィットし、エミッタンスを導く従来の測定も行った。その結果とシミュレーション結果を合わせて表 1 に示す。表 1 を見るとわかるように、高周波入力電力 4.5 MW のときに関しては、観測できた回転角が狭い（特に垂直方向）ことを考慮すると、2 つの方法ともにシミュレーションと比較的良く一致しているといえる。

更に蛍光板と CCD カメラ（図 1 Screen-3）を用いて、加速管入口でのエミッタンスも測定した。シミュレーションでは、水平方向 3.8 $\pi\text{mm-mrad}$ 、垂直方向 0.88 $\pi\text{mm-mrad}$ と小さな値になった。しかし、トモグラフィの測定結果は水平方向 13.6 $\pi\text{mm-mrad}$ 、垂直方向 9.3 $\pi\text{mm-mrad}$ となり、シミュレーションと大きく異なった。これは、回転幅の制限以外に、蛍光板に書いたグリッドの線が太く濃かったため、正確なビームプロファイルを得ることができなかったためと考えられる。

次に電子銃におけるエミッタンスの高周波入力電力依存性に関して測定を行った。表 1 のように高周波入力電力を 5.4 MW に上げるとシミュレーションの結果では、エミッタンスは良くなる。しかし、測定結果は表 1 のようにシミュレーションとは大きく異なる。これは、5.4 MW では逆流電子の影響が大きいためと考えられる。2. 1 節で述べたとおり逆流電子の影響が大きくなることでエネルギー幅が広がる。そのため、蛍光板により多くの種類のエネルギーを持つ電子すべてを投影していることになるためである。

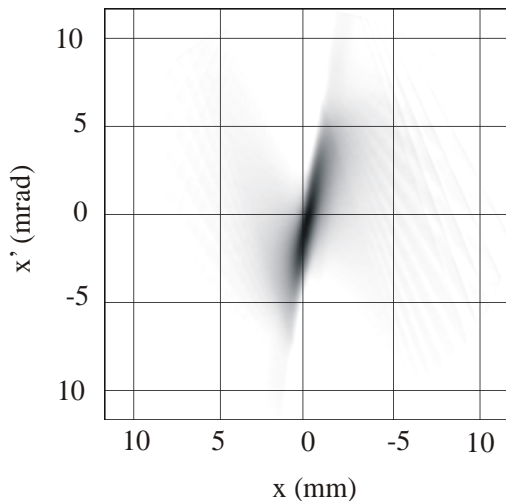


図 4 再構成した位相平面での電子分布図（水平方向、入射電力 4.5 MW のとき）

3 まとめ

電子銃から加速管入口までの電子ビームパラメータ（エネルギー幅、横方向エミッタンス）の測定を行った。加速管入口ではエネルギー幅 5 %程度で 100 mA 以上のビーム電流を得ることができた。また、トモグラフィ法によるエミッタンス測定では、高周波入力電力 4.5 MW で電子銃直後での電子ビームは水平方向 8 $\pi\text{mm-mrad}$ 、垂直方向 15 $\pi\text{mm-mrad}$ であるという結果を得た。PARMELA によるシミュレーション結果と測定結果の比較では、高周波入力電力 4.5 MW での結果はよく一致していたが、高周波入力電力 5.4 MW での結果は、一致しなかった。これは、入力電力の増加に伴い、逆流電子の影響が大きくなったためだと考えられる。

参考文献

- [1] T. Yamazaki et al., Free Electron Laser 2001, (2002) II-13.
- [2] H. Ohgaki et al., Nucl. Instr. and Meth., A507 (2003) 150.
- [3] L. M. Young, J. H. Billen, PARMELA, LA-UR-96-1835, 2001.
- [4] T. Kii et al., Nucl. Instr. & Meth, A475 (2001) 588.
- [5] C. B. McKee et al., Nucl. Instr. and Meth., A358 (1995) 264; X. Qiu et al., Phys. Rev. Let. 76 No.20 (1996) 3723.
- [6] 高松 輝久 学士論文 “トモグラフィの応用による相対論的電子ビームの横方向位相平面分布の解析”