

Measurement of the electron beam for IR-FEL at Kyoto University

Shio Murakami, Heishun Zen, Kazushi Hayakawa, Toshiteru Kii, Kai Masuda, Hideaki Ohgaki, Kiyoshi Yoshikawa, Tetsuo Yamazaki

Institute of Advanced Energy, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

Abstract

The linear accelerator which consists of a thermionic RF gun and a 3-m accelerator tube is under construction aiming at the 3 - 20 μm FEL oscillation by wavelength. Now, construction of the accelerator is almost finished and we successfully accelerated the electronic beam of 30MeV. Characteristic measurements were performed for the electronic beam after acceleration. Beam emittance was measured by using computer tomography.

京大赤外自由電子レーザー用電子ビームの特性評価

1. はじめに

自由電子レーザー (FEL) の発振のためには高品質な電子ビームが必要である。そのため加速器の設定はもとより、実際の装置がどのような電子ビームを発生しているかを正確に測定する必要がある。我々のグループでは3~20 μm のFELの発振をめざして直線加速器を建設中であり、今回加速管までの加速に成功した。そこで加速管前後の電子ビームの特性のうち、エネルギー、エネルギー広がり、横方向エミッタンスの測定を行った。また横方向エミッタンスについては従来の方法では正確に測定できないため、計算器トモグラフィを用いた2種類の手法、代数的再構成法 (ART法) ^{[1][2]} およびフィルタ補正逆投影法 (FBP法) ^{[2][3]}、を導入しそれぞれの方法での再構成の検討を行ったうえで、実際の電子ビームについて測定を行った。

2. KU-FEL装置

実験装置の概略図を図1に示す。本研究では高周波電子銃は4.5空洞の熱陰極型高周波電子銃を使用し2856 MHz(S-band)の周波数で駆動している^[4]。電

子銃出口において最大マクロパルス長6 μsec 、最大エネルギー約11 MeV電子ビームが生成されるようになっている^[5]。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、45度の偏向電磁石2台とトリプレット型四重極電磁石が配置されている。

加速管はS-bandで駆動し、有効長2.9 mであり、20 MWの高周波源により最大40 MeV程度まで加速可能である。加速された電子は、60度の偏向電磁石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が行われ、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。

3. FBP法及びART法の検証

FBP法とART法を用いた再構成ソフトウェアは当研究グループで開発してきたもの^[6]であり、FBP法はVisual Basicにより、ART法はLabViewを用いてそれぞれ作成した。そこでFBP法及びART法の再現性について、ガウス分布とは大きく異なるドーナツ型をモデルとして検証した。図2から図4は元の画像、FBP法による再構成図、ART法による再構成図を3次元で表した図である。この図より、ART法と比べ

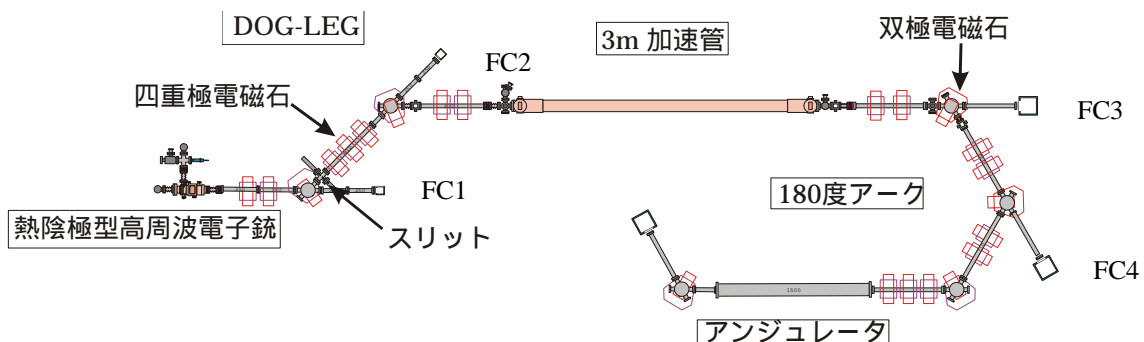


図1: FEL装置の概観図

てFBP法では、再構成した形にスパイク状のノイズが認められるとともに放射状のバックグラウンドが現れた。

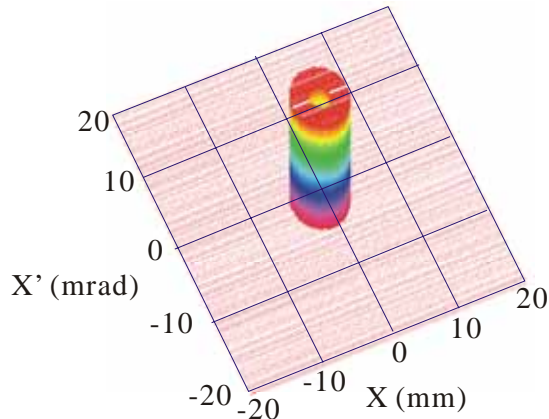


図2 ドーナツ型の元画像

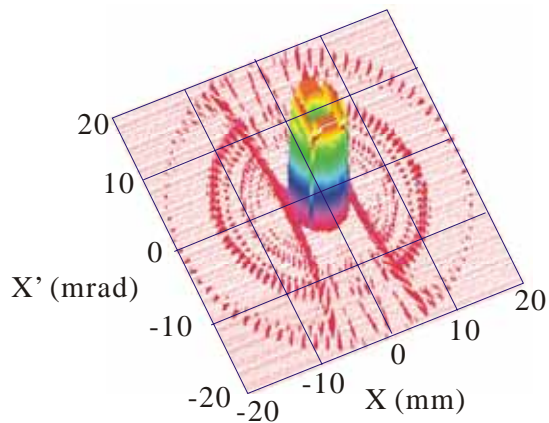


図3 FBP法でのドーナツ型の再構成図

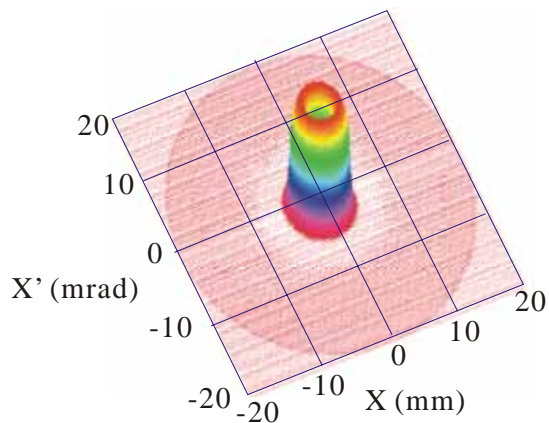


図4 ART法でのドーナツ型の再構成図

表1 エミッタンス値の比較

元の画像	1.08 $\pi\text{mm-mrad}$
FBP法	4.93 $\pi\text{mm-mrad}$
ART法	1.53 $\pi\text{mm-mrad}$

表1はそれぞれの再構成図のエミッタンスをとって比較した結果である。表1より、エミッタンスの絶対値でもART法の方が優れているといえる。これらのことから非ガウス分布の対象に関して、ART法の方が再現性が高いことがいえる。なお、エミッタンス値が両構成した像でそれぞれ大きくなっているのは、バックグラウンドをすべて含めて計算を行ったためであり、適切なバックグラウンドの除去を行うことで両手法とも元画像に等しい値を得ることができた。

今回計算機トモグラフィに用いたコンピュータはCPU 800MHz、RAM 128MBであり、投影数40枚の再構成を行った場合、FBP法では5分程度、ART法では40分程度の時間がかかった。

以上のことより、位相空間分布の正確な情報を得る場合はART法を、実験中リアルタイムで情報を得る場合はFBP法を利用するということが考えられる。

4. 実験

実験では半径1 mmの含浸型陰極を使用し、陰極表面温度1055 K、電子銃に投入した高周波はパルス幅2 μsec 、入力電力4 MW、加速管への入力パルス幅6 μsec 、入力電力10 MWで測定を行った。

ビーム電流は直線ビームライン末端のファラデーカップ (FC1及びFC3) を用いて測定し、ビームエネルギーは双極電磁石とビームライン末端のファラデーカップ (FC2及びFC4) を用いて測定した。

電子銃出口及び加速管出口でのビームパラメータを表2に示す。表2より電子銃出口と比べて加速管出口において、平均電流が460 mAから48 mAと大きく減少しているが、エネルギー半値幅が20.9 %から0.36 %と大きく減少していることが分かる。

図5に加速管出口での、電子銃陰極に (sweep用) 外部磁場を印加していない場合及び800 AT印加した場合のエネルギースペクトルを示す。外部磁場は、高周波電子銃の電子が陰極に衝突する back-bombardment現象を低減するためのものである^[5]。図5より、外部磁場を印加した場合は、しない場合と比べてエネルギー半値幅が0.36 %から1.5 %と、広がっていることが分かる。

エミッタンスは以下のようにして求めた。まずエネルギーから電子ビームの位相平面上で等間隔の回転角を取るように四重極電磁石の駆動電流を計算しておき、各駆動電流のときのビームプロファイルをCCDカメラで記録する。その投影像を計算機トモグラフィ法で再構成を行い、位相平面上の電子密度分布を求めた。エミッタンスは再構成図における面積を計算することにより求めた。今回の実験では、投影数35枚、回転幅0.8 πrad 間の測定を行った。

表2 電子銃出口及び加速管出口でのビームパラメータ

	電子銃出口	加速管出口
エネルギー (MeV)	10.3	30.7
平均電流 (mA)	460	48
エネルギー半値幅 (%)	20.9	0.36

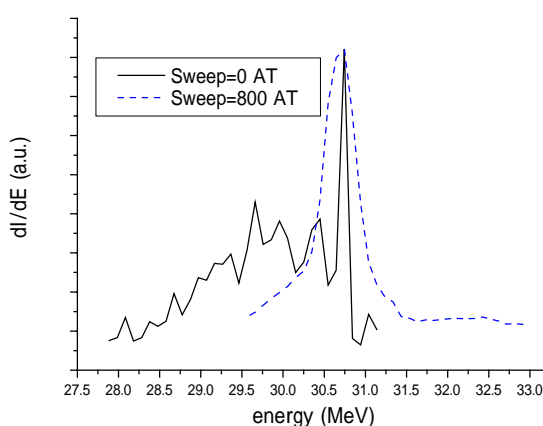


図5 加速管出口でのエネルギースペクトル

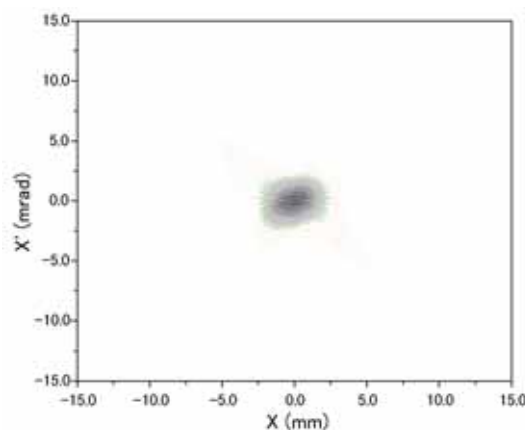


図6 位相平面分布

表3 ART法によるエミッタンス(π mm-mrad)

		X方向	Y方向
GUN	Sweep=0A	1.84	1.96
	Sweep=800AT	1.86	1.79
ACC	Sweep=0A	1.30	1.17
	Sweep=800AT	1.55	1.70

図6にART法による外部磁場を印加しない場合の加速管出口での水平方向の位相平面分布を示す。表3にART法での電子銃出口 (GUN) 及び加速管出口 (ACC) における、電子銃に外部磁場を印加しない場合及び800AT印加した場合の、水平及び鉛直方向のエミッタンス値を示す。表3から電子銃出口及び加速管出口において、外部磁場印加の影響は大きくないことが分かる。

5. 結果

熱陰極型高周波電子銃と3 m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 μ mでのFEL発振を目指して建設を行っているKU-FEL装置の電子ビームについて特性評価を行った。ビームエミッタンスに関しては、2種類の計算器トモグラフィを用いた新しい手法を導入し、検証を行ったのち測定を行った。

加速実験の結果、電子ビームのエネルギーは電子銃出口で10.3 MeV、加速管出口で30.7 MeVであった。平均電流が電子銃出口と比べて加速管出口において、460 mAから48 mAと大きく減少したが、エネルギー半値幅0.36 %の、エネルギーのまとまったビームが得られた。また外部磁場を印加した場合は、しない場合と比べてエネルギー半値幅が広がった。

エミッタンス測定に関して、FBP法よりART法のほうが再現性は良いが、計算時間に関してはFBP法の方が早く、リアルタイムでの情報を得るのに適している事が分かった。また測定の結果、電子銃出口及び加速管出口でのエミッタンスは、外部磁場を印加した影響が大きいことが分かった。

6. おわりに

今後、シミュレーションを行うことにより、今回の実験から得られたビームパラメータと比較し、ビーム輸送系と光学系の最適化を行い、FEL装置建設を進めていく予定である。

参考文献

- [1] 尾川浩一, 「ECTにおける反復的画像再構成」日本放射線技術学会雑誌第56巻第7号890-891
- [2] Thorarn Bjarnason, Image Reconstruction From Sinograms, EECE771Y, 2003
- [3] 斎藤恒夫, 画像処理アルゴリズム(近代科学社, 1993)6章, 7章
- [4] H. Ohgaki, I. Tometaka, K. Yamane, T. Kii, K. Masuda, K. Yoshikawa, and T. Yamazaki: Nucl. Instr. Meth, A507 (2003) 150-153.
- [5] K. Hayakawa, et al. these proc.
- [6] 高松輝久, 京都大学工学部電気電子工学科学士論文(2002)