

京都大学赤外 FEL 装置用 LINAC のビームパラメータ評価

林 秀輔¹、宮迫 敦、紀井 俊輝、増田 開、大垣 英明、吉川 潔、山崎 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 (KU-FEL) 装置は、熱陰極型高周波電子銃と 3 m の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。建設中の装置について PARMELA シミュレーションを行い、アンジュレータ入口で得られるビームパラメータの評価を行ったので報告する。

1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所の FEL 装置は、これまでに、熱陰極型高周波電子銃の設置とビーム加速に成功しており¹⁾、現在 3 m の進行波型加速管とビーム輸送系の設置とそのビームテストを開始している。図 1 に建設中の FEL 装置の概観図を示す。FEL 発振に必要な電子ビームを得るためには、ビーム輸送系や加速管での加速位相の最適化が必要になる。そこで装置の建設と平行して、粒子シミュレーションコード PARMELA²⁾を用いて、アンジュレータ入口で得られる電子ビームのパラメータ評価を行った。

2. KU-FEL 装置

本研究の高周波電子銃は 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。熱陰極型高周波電子銃は、小型で低エミッタンスのビームが生成できる利点があるが、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 ³⁾に制限されている。また、最大エネルギー約 6 MeV、ピーク電流 28.6 A の電子ビームが生成される。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、45 度の偏向電磁石 2 つとトリプレット型四重極電磁石が配置されている。熱陰極型高周波電子銃からの電子ビームには、FEL 発振に寄与せず加速管で余分なエネルギーを消費する低エネルギー成分が多く含まれている。そこでスリットを用いることで、その不要な成分を除去する。

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 つ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。

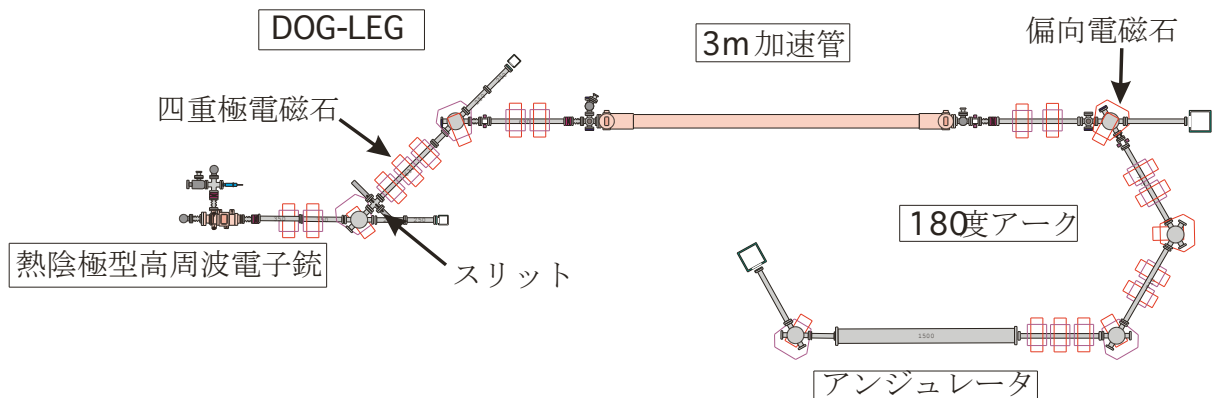


図 1 : FEL 装置の概観図

¹ E-mail: shusuke@iae.kyoto-u.ac.jp

3. シミュレーション

粒子シミュレーションコード PARMELA を用いて行った計算について、電子銃から加速管まで、加速管からアンジュレータに分けて記述する。今回の計算では、電子銃陰極の電流密度を 10 A/cm^2 とし、粒子数を 3000 個でスタートさせた。なお、空間電荷効果は考慮に入っている。

3.1 電子銃から加速管まで

図 2 は、電子銃出口及び加速管入口での電子ビームのエネルギースペクトルを示す。この図より、電子銃出口ではエネルギー幅 $\Delta E/E$ が 3.4 % であったのに対し 5 mm 幅のスリットを通したことにより、低エネルギー電子が遮断され、加速管入口では 1.9 % と狭くなっているものの、FEL の発振に寄与する高エネルギー部分の損失は少ないことが分かる。また図 3 は、電子銃出口及び加速管入口での電子ビームの位相スペクトルを示す。この図より、電子銃出口

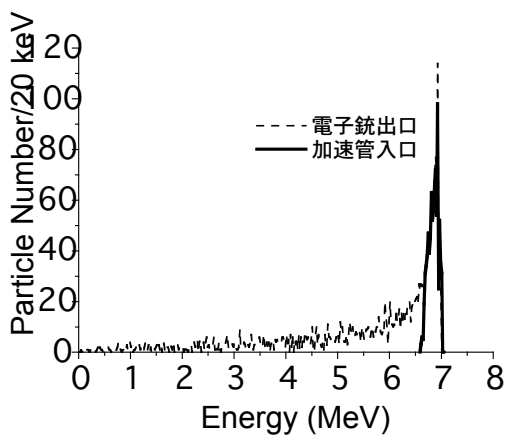


図 2：電子銃出口と加速管入口でのエネルギースペクトル

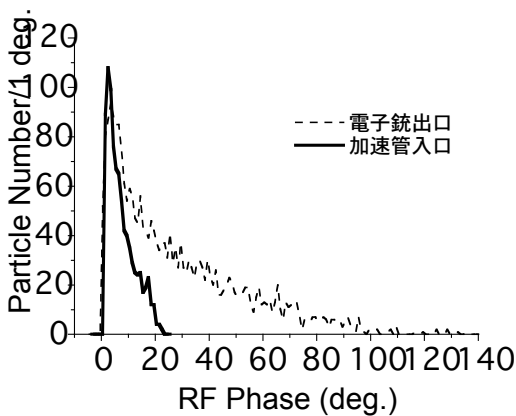


図 3：電子銃出口と加速管入口での位相スペクトル

では 12 度（半値）であった位相幅が、加速管入口では 6.4 度になっており、バンチ圧縮されていることがわかる。

3.2 加速管からアンジュレータまで

表 1 に、加速管及び高周波源のパラメータを示す。電子ビームのエネルギーは FEL の発振波長やゲインに影響を及ぼす。よって、装置評価の為にはエネルギーの異なる電子ビームのパラメータが必要である。従って、今回加速管にかかる電場勾配を 6、8、10 MV/m の 3 通り選んで計算を行った。高周波の加速位相は、180 度アークでのバンチ圧縮を考慮して、最高加速の得られる 0 度から少しずらした 2.5 度をとっている。そのとき加速された電子の平均エネルギーはそれぞれ 24.6、30.5、36.4 MeV となった。図 4~6 には、それぞれの電場勾配に対して行った計算のうち、36.4 MeV でのエネルギースペクトル、位相スペクトル、エネルギーと位相の相関のみを示す。

図 4 より加速管出口とアンジュレータ入口それぞれにおいてエネルギー幅については 0.47 % から 0.40 % とほとんど変化がないのに対して、図 5 から位相の広がりについては半値振幅で 5.1 度から 1.8 度へと圧縮されていることがわかる。一方、図 6 から明らかのように 180 度アークを通ることによってアンジュレータ入口では、広い範囲の位相に渡って電子が存在していることがわかる。しかし、その数は相対的に少なく、また、高エネルギーの電子は位相スペクトルのピークに集中しているため FEL 発振の際に与える影響は小さいと考えられる。

表 1 加速管，高周波源のパラメータ

加速管	
周波数	2856 MHz
構造	定勾配
モード	2/3 π
有効長	2.9 m
ディスク内径	25.00 ~ 21.84 mm \square
高周波源	
クライストロン	三菱 PV-3030
ピーク出力	20 MW
マクロパルス幅	< 10 \square sec
パルス繰返し	\leq 10 pps
クライストロン電源	
パルス幅	< 10 \square sec
リップル	< 0.3 % p-p

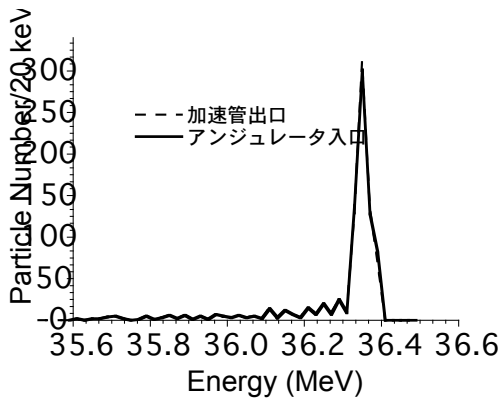


図 4 : 加速管出口及びアンジュレータ入口での電子ビームのエネルギースペクトル (36.4 MeV)

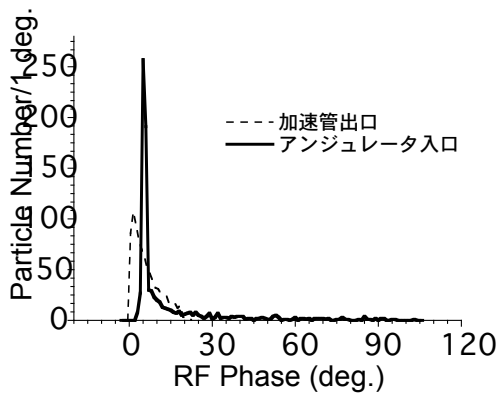


図 5 : 加速管出口及びアンジュレータ入口での電子ビームの位相スペクトル (36.4 MeV)

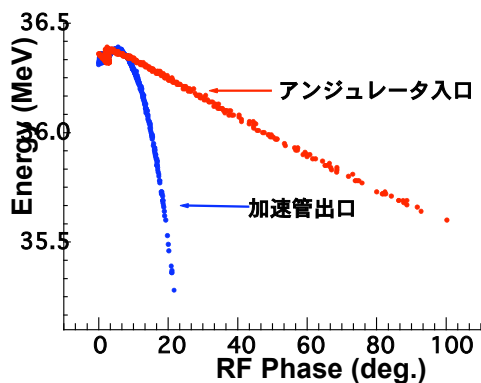


図 6 : 加速管出口及びアンジュレータ入口での電子ビームの位相とエネルギーの相関 (36.4 MeV)

表 2 に、加速管の加速電場 6、8、10 MV/m の場合のアンジュレータ入口でのビームパラメータを示す。これより、24.6~36.4 MeV の範囲で、ピーク電流 40 A 以上、エネルギー幅 0.4 % 程度の電子ビームが得られることが分かる。

表 2 アンジュレータ入口でのビームパラメータ

加速電場(MV/m)	6	8	10
エネルギー(MeV)	24.6	30.5	36.4
ピーク電流(A)	45.8	57.3	40.0
規格化エミッタンス x($\mu\text{mm-mrad}$)	7.84	10.7	11.3
規格化エミッタンス y($\mu\text{mm-mrad}$)	6.19	9.21	10.1
エネルギー幅(%)	0.27	0.32	0.40
X 方向ビーム半径(RMS) (mm)	1.43	1.38	1.32
Y 方向ビーム半径(RMS) (mm)	1.58	2.39	1.66

4. 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 μm での FEL 発振を目指して建設を行っている KU-FEL 装置に対し、粒子シミュレーションコード PARMELA を用いて、アンジュレータ入口で得られる電子ビームのパラメータ評価を行った。加速管での高周波位相や、180 度アークのパラメータ調整を行う事により、24.6~36.4 MeV の範囲で、ピーク電流 40 A 以上、エネルギー幅 0.4 % 程度の電子ビームが得られることが確かめられた。

5. おわりに

今後、実際の装置を用いてビームパラメータの測定を行い、今回シミュレーションで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] T.Yamazaki, et al: Free Electron Laser 2001,(2002) II-13.
- [2] James H.Billen Loyd M.Young.PARMELA,chapter LA-UR-96-1835.2002.
- [3] T. Kii, T. Yamaguchi, R. Ikeda, Z. Dong, K. Masuda, H. Toku, K. Yoshikawa, and T. Yamazaki: Nucl. Instr. & Meth, **A475** (2001) 588.