

自由電子レーザー装置における使用済み電子ビームのエネルギー回収に関する粒子シミュレーション

松村 慎也¹、増田 開、紀井俊輝、長崎百伸、山崎鉄夫、吉川 潔
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

我々は電子 beam を用いた FEL 等放射光の産業用の小型簡便な発生装置の開発を目指しており、現在主に熱陰極 RF 電子銃について研究を進めている。

そこで今後加速管を導入するために、same-cell エネルギー回収を行った場合の電子 beam に対する影響を粒子シミュレーションの形で計算した。

1. はじめに

FEL 装置における電力利用効率の向上のため、また使用済み電子の安全な処理のため、必要な電子の加速を行いつつ使用済み電子を減速し、その運動エネルギーを電磁波エネルギーとして回収することが望ましい。とくに same-cell による使用済み電子の減速により、加速管の台数を増やすことなく

使用済み電子 beam のもつ高品位電力を直接に加速用高周波電力として再利用できる。beam ダンプでの電子のエネルギーが下がる

ことにより生じる X 線・中性子線が激減する。それにより装置全体の放射線遮蔽設備が軽減できる。

使用済み電子から高周波電力を回収して加速に利用することにより高周波電源が小規模化できる。

beam 軌道がずれる等の事故時での装置の損傷も高周波電源が小規模化されることにより小さく制限される。

等の利点が得られ、小型性、安全性、経済性などが重要となる産業向け装置では特に必要な技術である。この実験はすでに L バンド (1.497GHz) では米国 Thomas Jefferson 研究所で成功しており^[1]、日本原子力研究所でも同様のものが計画されている^[2]。しかし加速器としては S バンドなど、より高い周波数のものが普及しており加速性能としても良いが、より高い周波数においては使用済み電子の入射と高周波電界との位相差が与える影響もより大きくなると予想される。S バンドでは常電導空洞が用いられるため消費電力の効率改善はさほど期待できないとして

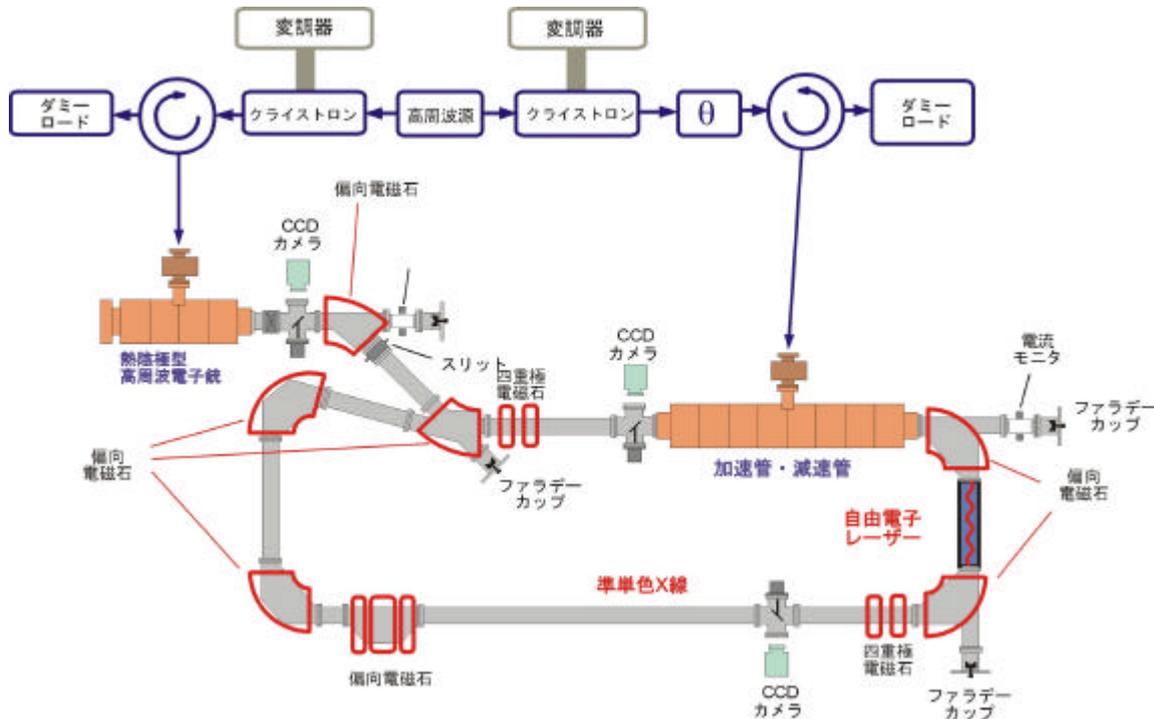


図1: 電子ビーム再入射機構(現在検討中)

¹ E-mail: shinya@iae.kyoto-u.ac.jp

も、加速管出口の使用済み電子ビームのエネルギーは下げられるため、は十分期待できる。

また電子銃出力を下げるにより全体の効率改善が可能であるが、同時にビームが低エネルギー時に光速から離れ管内でうまく加速、減速されなくなることも懸念される。これを防ぐためには各空胴をビームの速度に合わせて設計するのが簡単で効果的であり、そのために再入射ビームを対向する方向から入射することで、空胴ごとのビーム速度をほぼ等しくできる。しかしビームが交差することにより加速ビームの質に影響を与えることも考えられる。

以上について計算により評価したので報告したい。

2. 計算方法及び条件

まず本研究で取り組む装置系全体の概略を図 1 に示す。本研究では加速管に再入射する電子ビームによる加速・再入射電子ビームへの影響を求めることが目的であるから、図中の電子銃と加速管以外の偏向電磁石、ドリフトチューブ、アンジュレータ等による影響は必要があれば典型値を与えるだけにとどめる。

今回の電子銃及び加速管内の電子ビームの軌道計算は KUBLAI(または KUFCI と呼ぶ)コード^[3]による PIC 粒子シミュレーションであり、もとはクライストロン解析用として増田氏により開発されたものを電子銃及び加速管用に拡張したものである。その特長を列記すると、

軸対称二次元・時間依存 PIC コード。

高周波源により空胴内に誘導される電磁界は入力周波数に最も近い共振周波数の軸対称 TM モードとし、それは基本モードに比べて高次のモードが十分小さく無視できるとする。

空胴に誘導される電圧は Port 近似によって RF 源による成分と電子ビームによる成分から計算し、空間電荷効果も self-consistent に含める。

空胴に誘導される固有モードの計算は別のコードで行い、メッシュ変換して取り込む。

電子銃については現在このグループで用いている装置の寸法、動作条件^[4]でシミュレーションを行う。その結果を加速管に入射する加速電子の初期パラメータとする。RF により空胴に誘起される電圧の波高値は固定で、ビームローディングによる RF 源への影響は計算に入れないとする。また、加速管への再入射電子ビームのパラメータは加速管での加速電子ビームの計算結果より与えるが、当然加速電子ビームは再入射電子ビームの有無・状態に影響されると予想されるので、加速管への再入射シミュレーションは再入射ビームの初期値を加速電子の計算結果で修正しながら、計算回数に対して結果が必要な精度に収束するまで必要な回数だけ繰り返す。アンジュレータ通過に伴うビームへの影響は、(ピークエネルギー) \times 0.9、(エネルギー幅) \times 2.0 で与えるとした。

3. シミュレーション結果

3.1 電子銃

電子銃は熱陰極型 S バンド動作であり、加速空胴は 4.5 個もつ。シミュレーションによる電子銃内の RF 電界強度、電子の位置、エネルギーを図 2 に示す。

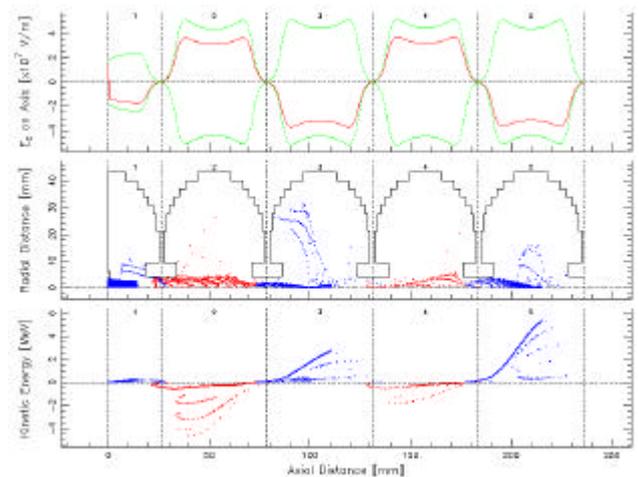


図 2：電子銃内のビーム軌道ほか

Mesh size : dr 1.0~5.0mm, dz 1.5~3.0mm.

Number of particles : 10030.

CPU time : ~3hrs on SUN Sparc20

計算領域はおおよそ $r_{\text{max}}=40\text{mm}$ \times $z_{\text{max}}=230\text{mm}$ 。赤色の粒子は逆加速電子である。

この出力電子ビームのうち運動量で 95% 以下の不要な成分をスリットで遮断し加速管以降へ利用しないとして、その出力ビームの性能を表 1 に示す。

表 1：電子銃出力ビームの性能

Beam voltage	5.499	MeV
Beam charge	88.92	pC
Beam power	1.398	MW
Emittance	2.576	$\pi\text{mm-mrad}$
Bunch length	2	ps
Peak current	30.812	A

3.2 加速管

加速管は単純なディスクロード型のものとする。定在波 S バンド、20cell、1m を想定している。高周波による管内の最大電界強度は 0.5MV/cell とする。各空胴の設計値は全セル共通で内径 40.2490mm、ディスク間隔 52.4868mm、ディスク厚さ 3.0000mm で、加速管全長は 1049.7360mm である。

再入射ビームを同じ方向から入射した時のシミュレーションによる加速管出口付近の RF 電界強度、電子の位置、エネルギーを図 3 に示す。赤色の粒子は再入射電子ビームである。二段目の r - z プロットでは r 方向を 4 倍に拡大している。

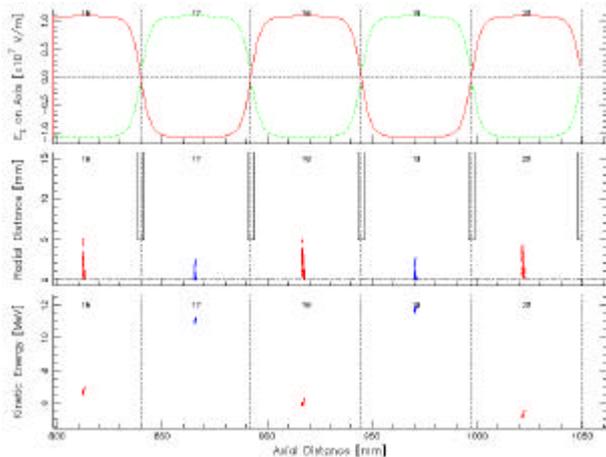
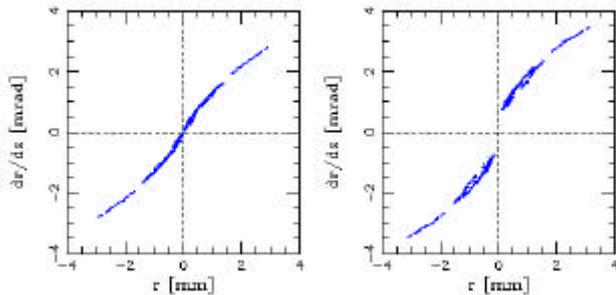


図 3 : 加速管出口直前のビーム軌道ほか
 Mesh size : dr 0.2~3.0mm, dz 0.3~1.5mm.
 Number of particles : 9650.
 CPU time : ~3hrs on SUN Sparc20

次に再入射ビームを加速ビームに並走及び対向する方向から加速管に入射した場合における、加速ビームの位相平面図を図 4 に、性能を表 2 に示す。



$\epsilon_{n,rms} = 2.35 \pi \text{mm-mrad}$ $\epsilon_{n,rms} = 7.42 \pi \text{mm-mrad}$
 (a) 並走方向入射時 (b) 対向方向入射時

図 4 : 加速管出力ビームの位相平面図

表 2 : 加速管出力ビームの性能
 (a) 並走方向入射時

Beam voltage	12.253	MeV
Energy half width	0.2962	MeV
Beam power	3.1260	MW
Peak current	30.928	A
Average current	255.11	mA

(b) 対向方向入射時

Beam voltage	12.260	MeV
Energy half width	0.2936	MeV
Beam power	3.1274	MW
Peak current	30.928	A
Average current	255.11	mA

図 4 よりビームが交差することによる加速ビームのエミッタンスへの影響が認められる。しかし表 2

に見られるように影響を受けないパラメータもあることが分かった。

次に RF 電磁界からビームに供給される電力を図 5 に示す。三角の印は対向方向から再入射した結果である。ここで、加速ビームに供給される電力は各空胴あたり 0.0893~0.0895MW である。

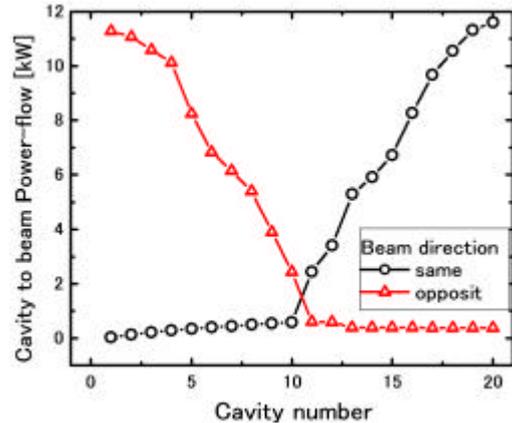


図 5 : 空胴ごとのビーム加速電力分布

この図より、ビームの再入射によって確かにすべての空胴で RF 電力の消費が抑えられている。またこの図より並走入射、対向入射とも再入射ビームが光速から離れるほど RF 消費電力が大きくなっている。これはすべての空胴を位相速度=光速 c で設計したため、とくに再入射ビームの速度が $\beta \sim 0.995$ に近づくにつれて RF 電磁界との位相ずれが激しくなるため生じたと考えられる。

3 . 結論

加速ビームに対する悪影響はあるが、図 5 から対向入射時ではディスク間隔の最適化を行い、加速ビームの入射タイミングを最適加速時から意図的にずらし各空胴の両ビーム間のパワーバランスを取る事で、RF 電磁界 ビーム間のエネルギー伝達効率を並走入射時よりも改善でき、空胴間のパワーフローをより小さくできる可能性がある。今後の課題として、この可能性を検証するために対向入射時の位相速度に合わせた各空胴の設計が必要だと思われる。

参考文献

- [1] G.R.Neil, et al., "First operation of an FEL in same-cell energy recovery mode" Proceedings of Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A445 (2000) 192-196.
- [2] Ryoichi Hajima, et al., "Design of energy-recovery transport for the JAERI FEL driven by a superconducting linac" Proceedings of Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A445 (2000) 384-388.
- [3] K.Masuda, PHD thesis, Dept. of Engineering, Kyoto University (1998).
- [4] Y.Yamamoto, et al., "Simulations of electron backstreaming in a microwave thermionic gun" Proceedings of Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A393 (1997) 443-446

