

SASE-FEL 用 500 kV 電子銃のビームシミュレーション

新竹 積^{1,A)}、水野 明彦^{B)}

A) 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大徳 1-1

B) 高輝度光科学研究センター (JASRI/SPring-8)

〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1 丁目 1-1-1

概要

SPring-8 地区にて計画されている軟 X 線領域 SASE-FEL 計画 SCSS (SPring-8 Compact SASE Source) の電子源として、500kV パルス熱電子銃が候補にあがっている。波長 2 nm の FEL 発振に必要な電子ビームにはエネルギー 1 GeV, ピーク電流 2~4 kA, エミッタンス 0.5 ~ 2 π .mm.mrad という極めて高度な特性が要求される。そこで単結晶の CeB₆ カソードから得られる 3 A の電子ビームを 500 kV のパルス高電圧にて引き出し、476 MHz のプレバンチャー空洞にてバンチさせ、476 MHz の単空洞にて 1 MeV に加速、さらに 1428 MHz の Lバンド加速管にて 20MeV に加速して C バンドの主加速器に入射する案が検討されている。本論文は電子銃から L バンド加速管入り口までの入射器のビームシミュレーションについて報告する。

1. はじめに

近年、真空紫外から軟 X 線、さらには X 線領域の高輝度放射光源として SASE 型 (Self-Amplification of Spontaneous Emission) の FEL が注目を集めている。この分野ではドイツ・ハンブルグ DESY 研究所の TESLA グループ、米国シカゴにあるアルゴンヌ国立

研究所の LEUTL グループが先行しており、可視、紫外 (LEUTL 380nm)、真空紫外 (TESLA 80nm) の発振に成功している。

これらの SASE 型 FEL では低エミッタンス、高密度の電子ビームを得ることが発振の絶対必要条件となっており、いずれのプロジェクトにおいてもフォトカソードを用いた RF-GUN が使用されている。また将来計画である SLAC の LCLS プロジェクトにおいても RF-GUN が検討されている。SPring-8 地区にて検討されている SCSS 計画においては、将来の X 線領域への拡張を見込んで、単結晶の熱カソードとパルス高電圧を用いた電子銃が検討されその技術開発が行われている¹⁾。

原理的には単結晶 CeB₆ カソードを用いれば、少なくとも電子銃の近傍において現在考えられる電子銃のなかで最も乱れの少ない低エミッタンスの電子ビームを引き出すことが可能と考えられる。しかし、いかにしてエミッタンスを壊さないようにその高品質の電子ビームをプレバンチャー、バンチャーなどにて数十ピコ秒の短いパルスに圧縮し、主加速器まで持ってゆくかが重要なかぎである。

そこで、2次元の PIC コード EMSYS-BUNCH を用いて、電子銃からバンチャーまでのビームシミュレーションを行い、設計の最適化を行っているので報

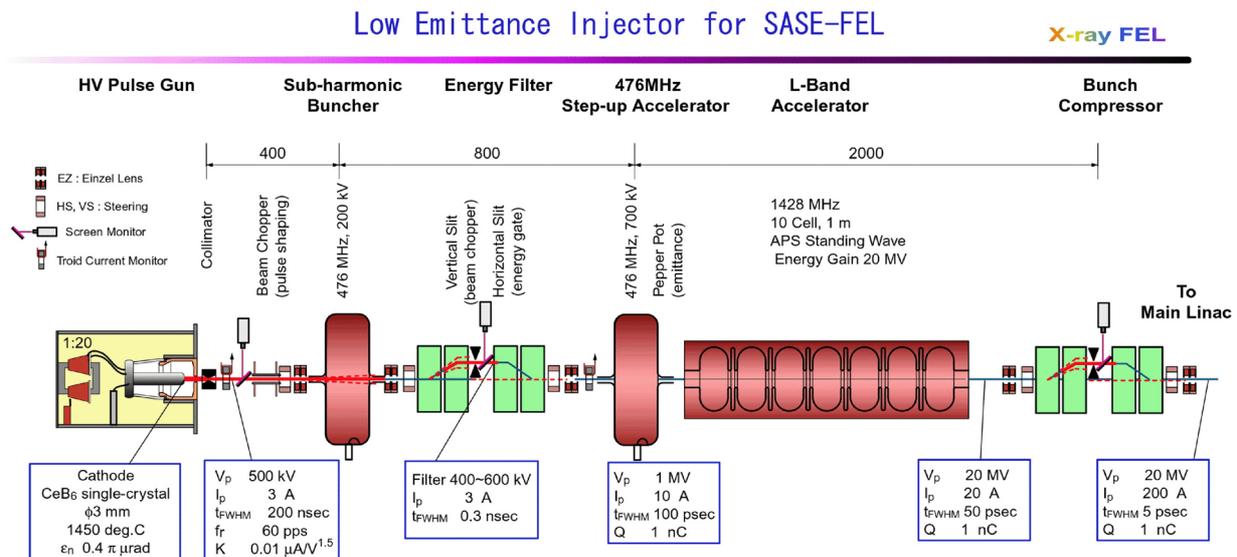


図 1: 低エミッタンス電子入射器(SCSS 向けに検討中)

¹ E-mail: mizuno@spring8.or.jp

告する。また3次元の粒子コードによる解析も同時に進行しており、研究会でのポスター上にて報告の予定である。

2. インジェクターのレイアウト

図1に SASE-FEL 用に検討している電子インジェクターの概略図を示す。単結晶の CeB₆ をもつ直径 3 mm の熱電子銃に 500 kV のパルス高電圧を印加して、ビーム電流 3A を引き出す。

電子銃直後に置いたチョッパーデフレクターに矩形波のパルス電圧を印加して、476 MHz の1周期に相当する 2.1nsec 幅を切り出す。デフレクターはビームを上下方向に偏向させ、下流のエネルギーフィルター内にあるコリメータにて不要な成分を遮断する。

476 MHz のプレバンチャでは、約 200 kV のエネルギー変調を加え、800 mm 程度ドリフトさせてバンチに集群させる。途中にあるエネルギーフィルターによって、必要な部分のビームのみを切り出す。

集群に伴い電流密度が非常に高くなり、空間電荷がつくる半径方向の強い電界によって、ビームが発散しはじめる。これによるエミッタンスの増加をおさえるため、476 MHz の単空洞 (Step-up Accelerator) にて約 600 kV 加速してビームエネルギーを 1 MeV に持ち上げる。空間電荷による発散は、

$$\frac{d^2r}{dz^2} = \frac{E_r}{m_0c^2(\beta\gamma)^3}$$

となり、電子のエネルギーを上げれば急速に発散力が弱くなることがわかる。500keV のビームを 1MeV に加速した場合の空間電荷による発散は約 1/6 に低減され、安定にビームを輸送することが可能となる。

つぎにバンチしたビームを L バンド加速器に入射して 20 MeV 程度加速する。L バンド加速管は定在波型の APS 空洞を検討している。L バンド加速管の入り口ではバンチの長さが 100psec 程度と比較的長い。S バンドでは加速波の曲がりのためにエネルギー分布が発生し、エミッタンスを増大させ、さらにバンチコンプレッサでビームを短くできない。そこで、L バンド加速管を使用することを検討している。詳細は現在、設計中である。

なお、ビームの収束には通常使用されるソレノイドではなく、Einzel レンズを使用している。これは、

- (1) ビームの入射エネルギーが 500 kV と高いために、連続的な収束が必要でないこと。
- (2) 要求されるエミッタンスが小さいために、レンズのアラインメントに高い精度が要求される、

ためである。

表1にインジェクターの目標性能を示す。

表1：電子入射器の目標性能

Beam Energy	20	MeV
Bunch Charge	0.1~1	nC
Emittance	1~1.5	π .mm.mrad
Bunch Length (FWHM)	~5	psec

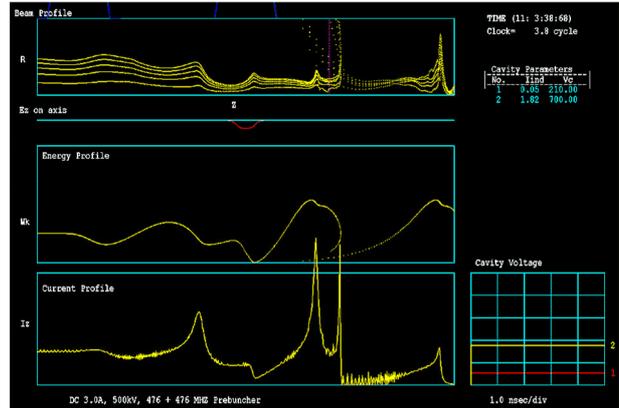


図3：シミュレーション中のビーム軌道。計算領域はR_10 mm x Z_2000 mm の細長い長方形。(r, z)-プロットでは半径方向に 50 倍拡大して表示しており、実際のスケールでは軸方向に 100 mm 進む間にビームの半径 1 mm 程度しか変動しない。

Mesh Size : dr 0.5 mm, dz 4mm. Number of particles : 10000、CPU Time ~600 sec on Pentium-III 800EBMHz, Memory usage 5 MB, Simulated by EMSYS-BUNCH.

3. PIC SIMULATION

3.1 EMSYS—BUNCH について

今回使用した EMSYS-BUNCH は PIC 粒子シミュレーションコードであり、その前身である FCI コードを電子入射器用に拡張したものである。その特徴を列記すると、

- (1) 2-1/2 次元 PIC コード。粒子の運動は 2-1/2 次元の軸対称を仮定。
- (2) Maxwell 方程式を時間積分して空間電荷効果を計算。2 次元軸対称。
- (3) 空洞電界分布は SUPERFISH と等価なコード EMSYS—RF にて解き、これをメッシュ変換して取り込んでいる。
- (4) マルチセルの連結空洞を時間的に解く。空洞の電気的特性 (f_0 , Q_0 , R/Q , k) を読み込んで等価回路を時間積分する。
- (5) 外部磁場は、軸上の値 B_z を Spline 関数によって近似し、それを 2 次元に Taylor 展開。または Pandira などの 2 次元コードのデータを読み込む。
- (6) ビームローディング効果を含む。ビームローディングをエネルギー保存、因果律の保持を守って取り入れて計算。前身である FCI コードはクライストロン解析用に開発されており、モデルの妥当性、信頼性が各種のクライストロン開発を通して実証されている。

3.2 エミッタンス評価の方法

計算の時間、メモリーサイズ等の関係からビームシミュレーションはつぎのように2区間に分けて行うこととした。

- (1) 電子銃の出口から L バンド加速管の入り口まで
- (2) L バンド加速管

今回は時間の関係で L バンド加速管については述べない。

エミッタンスの評価は各区間での入射ビームのエミッタンスはゼロとして、区間内のエミッタンス増加量を計算し、最終的に次のようにそれらを合計して計算することとした。

$$\epsilon = \sqrt{\epsilon_{\text{thermal}}^2 + \epsilon_{\text{gun}}^2 + \epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}$$

ここで $\epsilon_{\text{thermal}}$ は熱によるエミッタンスであり解析的に $0.4 \pi \text{mm.mrad}$ と予測されている。また ϵ_{gun} は電子銃内部でのエミッタンス増加であり、通常なら E-GUN 等を使って計算するところであるが、要求されるエミッタンスがあまりに小さいために E-GUN の計算誤差が支配的となるため、現在これに使用できるコードを開発中。なおカソード直径が加速ギャップに比較してかなり小さいために、エミッタンスの増加は小さいものと予測している。ここでは一応ゼロとして計算を進めた。

3.2 第1区間:電子銃出口からLバンド加速管入り口まで

第1区間のシミュレーションを行った。図3にシミュレーション途中のビーム軌道をしめす。上から順に (r,z)断面のビームプロファイル、エネルギープロファイル、電流分布であり、プレバンチャーにてエネルギー変調された電子ビームが下流の step-up accelerator の場所で非常に短いバンチに集群されていることがわかる。

図4はLバンド加速管の入り口でのエミッタンスプロットであり、規格化エミッタンスの増分 $\epsilon_1 = 0.68 \pi \text{mm.mrad}$ が得られている。パルス幅は 78 psec、電荷量は 1.07 nC が得られている。

ここまでの全エミッタンスは熱エミッタンスを加えて

$$\epsilon = 0.79 \pi \text{mm.mrad}$$

であり、目標のエミッタンスを越えていない。

4. 今後の計画

第1区間についてビームシミュレーションを行ったが、PIC コード特有の精度上の問題(例えば粒子がメッシュを横切るときに発生するノイズとか、非常に短いバンチに対する空間電荷波の分散の影響)が

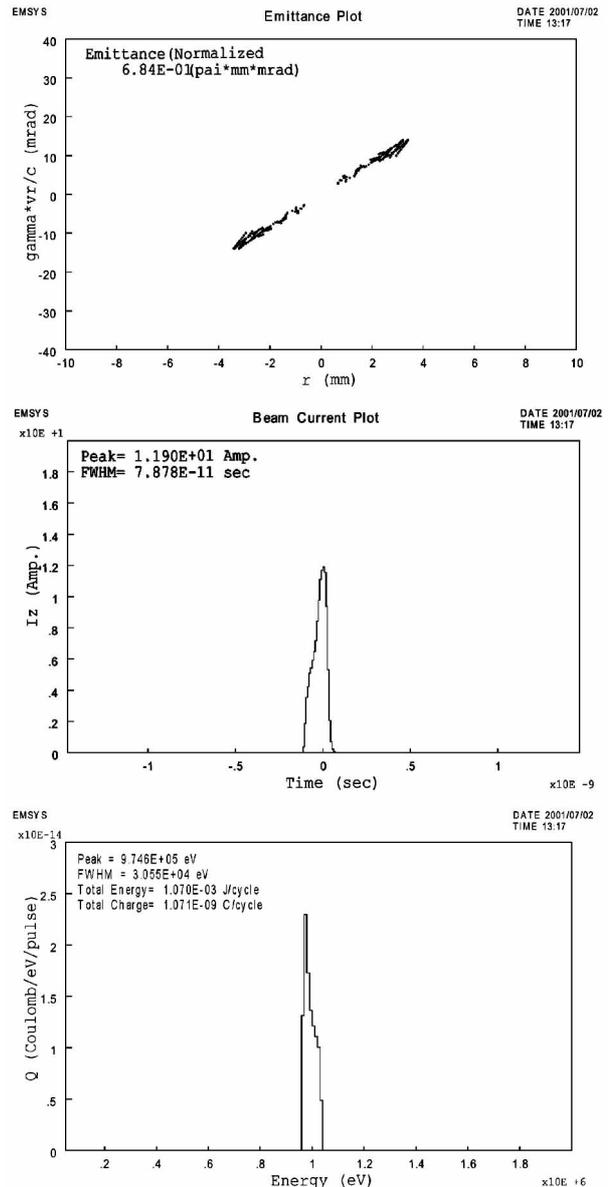


図4 : Lバンド加速管入り口。
エミッタンス $\epsilon_1 = 0.68 \pi \text{mm.mrad}$ 。
(エネルギー幅 940~1040keV)

あるため、空間をメッシュに切らずに粒子相互の空間電荷力を計算するコードを整備中であり、これを用いた計算を第2区間を含めて行い、電子入射器の性能を評価したい。

参考文献

- [1] 渡川和晃、「軟X線自由電子レーザーに用いる熱カソード型高電圧パルス電子銃の開発」本研究会
- [2] T. Shintake, "Recent Status of FCI", LINAC96, Proc. Int. Linear Accelerator Conference, Geneva Aug. 1996