

## STUDY ON BEAM DYNAMICS IN AN ERL INJECTOR

R. Hajima\*, R. Nagai, T. Nishitani

Free-Electron Laser Laboratory, Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai, Ibaraki 319-1195 Japan

### Abstract

Beam dynamics in an ERL injector are studied. We discuss two major sources of emittance dilution, transverse space charge force and longitudinal space charge force, and review the compensation technics for them. An example design of injector for a future ERL light source is also presented.

## 次世代 ERL 放射光源用入射器のビームダイナミクス解析

### 1. はじめに

原研 FEL グループでは、第3世代放射光源 (SPring-8 など) に代わる次世代放射光源として、エネルギー回収型リニアック (energy-recovery linac; ERL) の基礎研究を進めている。ERL 型放射光源の特性 (輝度、パルス幅など) は、電子銃を含む入射器の電子ビーム特性で大きく左右される。したがって、低エミッタンスかつ大電流ビームを生成できる入射器の開発は、ERL 型次世代放射光源を実現する上で最優先すべき研究課題である。

研究の現状を見渡すと、電子銃の方式として (1) フォトカソード RF 電子銃、(2) フォトカソード DC 電子銃が提案され、基礎研究が重ねられており、また、大電流加速のためのハイパワーカップラーの開発も克服すべき課題としてあげられている。

これらの研究状況を踏まえて、ERL 型次世代放射光源の入射器として、現時点において最も妥当と考えられるのは次のような構成である。フォトカソードとして NEA (negative electron affinity) 表面を有する GaAs を用いた DC 電子銃 (300–750 kV) で生成されるピコ秒の電子パンチを、100 kW 級のカップラーを備えた超電導空洞を連ねた入射加速器で 5–10 MeV まで予備加速した後、偏向磁石を含んだ合流部を経て主加速器へ入射。規格化エミッタンス (RMS) としては、77 pC (100 mA 相当) で 1 mm-mrad、7.7 pC (10 mA 相当) で 0.1 mm-mrad が当面の目標である。

電子銃電圧と入射エネルギーは、建設中の Daresbury-ERLP が 350–500kV/5MeV<sup>[1]</sup>、提案中の Cornell-ERL が 500–750kV/5–10 MeV<sup>[2]</sup>、KEK-ERL (試験器) が 330kV/5MeV<sup>[3]</sup> などの値を選んでいる。建設/運転費用を下げるためには、電子銃電圧、入射エネルギーともに小さい方が望ましいが、エミッタンス増大を抑制するためにはこれらの値は大きい方がよい。コストと性能の両面から妥当な設計を得るためには、エミッタンス増大のメカニズムを正しく把握し、これに対応したエミッタンス補償の方法と、最適設計の戦略を知る必要がある。

本報では、ERL 型次世代放射光源入射器におけるビームダイナミクスの諸問題のうち、エミッタンス増大とパンチ圧縮について議論する。さらに、500kV/5MeV 入射器を例にとり、最適設計の指針に

沿った設計例を示し、エミッタンス補償が適切に働くことを示す。

### 2. パンチ圧縮方式

GaAs カソードでは光電子発生原理的な制約から、10 ps 以下の短いパンチを直接生成することは困難である。一方、主加速器では電子パンチに生じるエネルギー分散を小さくするために、パンチを短くしておく必要がある。例えば、加速後のエネルギー分散  $10^{-4}$  を得るには、パンチ長を加速位相で 1.6 度 (1.3GHz で 3.4 ps) 以内にしなければならない。

入射器におけるパンチ圧縮の方式としては、入射空洞の ponderomotive 圧縮と合流部における磁気圧縮<sup>[4]</sup>、合流後の velocity bunching<sup>[5]</sup>、電子銃直後のバンチャー<sup>[1][2]</sup>などが提案されている。

入射空洞の ponderomotive 圧縮は、加速電界にソレノイド磁場を重ねできない超電導空洞においては、横方向空間電荷、時間依存 RF 電場によるエミッタンス増大を補償することが難しい。磁気圧縮方式は、合流部の  $R_{56}$  を大きく設計しなければならず、偏向角度、磁石間ドリフト長ともに大きくなり、縦方向空間電荷効果を補償するのが困難になる。

合流後の velocity bunching の利点は、長いパンチ (10 ps 以上) のまま入射することで、合流部における空間電荷効果と CSR 効果を小さくできることにあった。最近の研究<sup>[6][7]</sup>で、合流部におけるエミッタンス補償の原理が見つかったので、この方式の利点は小さくなった。

本報で示した設計例では、電子銃直後にバンチャー空洞 (主加速器と同じ周波数) を設置し、これを用いてパンチ圧縮を行う方式を採用した。

### 3. 電子銃直後のエミッタンス増大とその補償

電子銃から予備加速 (5–10 MeV) までのエミッタンス増大の主要なメカニズムは、横方向空間電荷によるパンチの膨張がパンチスライス毎に異なる現象、いわゆる linear emittance growth である。これは、 $(x, x')$ 、 $(y, y')$  位相空間に電子分布の蝶ネクタイ状の変形として現れる。このエミッタンス増大は、ソレノイド磁場によって補償することができる<sup>[8]</sup>。エミッタ

\* E-mail: hajima@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

ス補償を有効に働かせるためには、パンチスライスの混合(縦方向の電子の入れ替わり)が起こらないようにパンチ圧縮を行う必要がある。

#### 4. 合流部におけるエミッタンス増大とその補償

合流部では、別論文<sup>[7]</sup>に詳しく述べたように、縦方向空間電荷力によるエミッタンス増大が問題となる。また、CSRも考慮する必要がある。これらの効果を抑制するには、なるべく浅い角度で合流するのが望ましい。

3つの偏向磁石から構成される合流部(3-dipole merger)では、磁石入口/出口にエッジ角を設けない場合に合流部をアクロマティックにする条件は、軌道半径( $\rho$ )、偏向角度( $\theta$ )、磁石間隔( $L_d$ )が

$$L_d/\rho = \cot \theta - \tan(\theta/2)$$

を満たさなければならない<sup>[9]</sup>。角度を浅くすると磁石間隔が長くなるので空間電荷分散関数が小さくならず、エミッタンス増大の補償が難しいことを意味する。

ところが、2番目磁石に入射エッジ角を与える、さらに、2番目磁石の偏向角度をやや大きくすることで、磁石間隔を短縮する設計が可能である。これに、エンベロープ・マッチングの手法を組み合わせるにより、エミッタンス増大を補償することができる(設計例を参照)。

合流エネルギー( $E_m$ )とエミッタンス増大は、線形解析から $\Delta\epsilon_n \propto E_m^{-1.5}$ のスケール則が求められる。

#### 5. 設計例

ERL放射光源用入射器の設計例を示し、これまで議論してきたエミッタンス補償が有効であることを確認する。

電子銃電圧と入射エネルギーの組合せは、500 kV、5 MeVとした。電子銃には単純なモデルを採用し、カソード、アノードを平行平板(カソード/アノード間隔は50 mm、アノード穴 20 mm)とした。カソード放出電子の時間波形はGaussianとし、NEAカソードの応答特性を考慮して $\sigma_t = 14$  psとした。カソード半径を1.5 mm、放出電子の温度を35 meV<sup>[10]</sup>としたので、熱エミッタンス(RMS)は0.2 mm-mradとなる。

電子銃直後に、二つのソレノイド磁石とバンチャー(1.3 GHz)を置いた。これにより、パンチ圧縮と横方向空間電荷力に起因するエミッタンス増大の補償を行う。

入射用超電導加速器は、3-cell空洞を5台連ね、それぞれ1 MeVずつのエネルギーゲインを得る構成とした(100 mA 加速で100 kW投入)。空洞は、TESLA空洞<sup>[11]</sup>を縮めた形状とした。

合流部は、周回ビームラインと入射加速器クライオスタットが干渉しない範囲で、なるべく浅い角度を選び、8度とした。偏向磁石は、軌道半径1 m、偏向角度15度(1番目、3番目)、22度(2番目)、入射

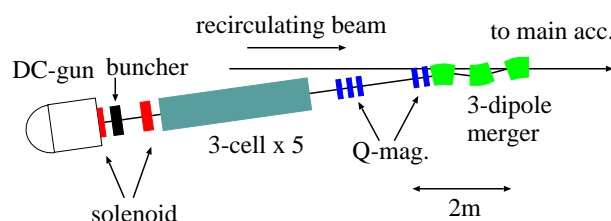


図1: ERL入射器の設計例

エッジ角は、0度(1番目、3番目)、-20度(2番目)、磁石間のドリフトは31.6 cmである。

入射用超電導加速器から合流部へのエンベロープマッチング(合流部のエミッタンス補償)のために、5台の四極磁石を設置する。周回軌道と干渉する四極磁石は水平方向に開口をもつ形状とする(蓄積リングで用いられているのと同様)。周回ビームと入射ビームのエネルギー比は1000倍程度(5 GeV/5 MeV)あるので、偏向磁石および四極磁石の洩れ磁場が周回ビームに与える擾乱は無視できる。以上の構成を持つ入射器を図1に示す。

設計の手順は以下の通りである。

1. 所定のパンチ長(~3 ps)が得られるように、バンチャーの電圧と位相、3-cellの位相を決める。
2. 合流部手前でエミッタンスが最小となるように、2台のソレノイドの値を決める(横方向空間電荷によるエミッタンス増大の補償)
3. 合流部通過後のエミッタンスが最小となるようなエンベロープを線形解析で求めておき、これを初期値にして、5台の四極磁石の値を調整する(縦方向空間電荷によるエミッタンス増大の補償)
4. 最終エミッタンスが小さくなるように、再度、ソレノイド磁場を調整する。

設計計算は、PARMELA<sup>[12]</sup>を用いた。電子銃と加速空洞の電界はPOISSON、SUPERFISH<sup>[13]</sup>で求めた。設計では、複数のパラメータを変えながら最適な値を探査する必要がある。このために、Perlによるwrapper scriptとJAVAによるpost processorを作成し、PARMELAと組み合わせることで、半自動で最適解が得られるようにした。最適化手法は、単純スキャンと滑降シンプレックス法(Nelder-Mead)<sup>[14]</sup>を組み込んだ。

エミッタンスが最小になるように最適化した時の、PARMELA計算結果を図2、3に示す。72 MeV加速位置(9-cell x 5台通過後)において、 $\epsilon_{n,x} = 0.75$  mm-mrad、 $\epsilon_{n,y} = 0.76$  mm-mrad、 $\epsilon_z = 38$  deg-keV、 $\sigma_t = 1.5$  deg(3.2 ps)、 $\sigma_E = 24$  keVなどの値が得られた。図2では、ソレノイド磁場によるエミッタンス補償の様子が示されている。

また、図4には、合流部におけるエミッタンス補償を行うためのエンベロープマッチングの過程として、四極磁場の最適化の様子を示す。磁場の組合せでエミッタンスが変化するのがわかる。

合流部におけるCSRによるエミッタンス増大は、elegant<sup>[15]</sup>を用いて別途計算したところ、 $\Delta\epsilon_n \sim$

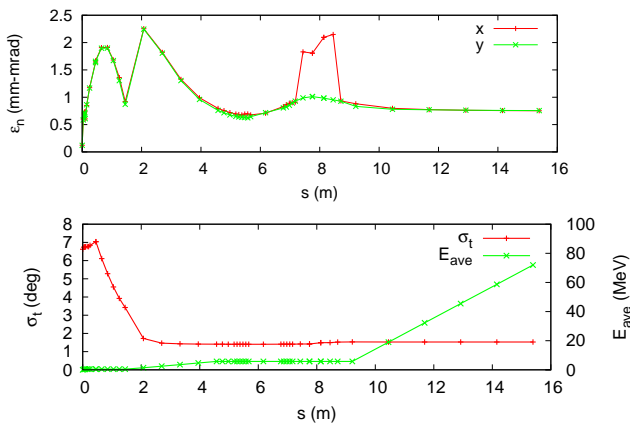


図 2: PARMELA 計算結果: 軌道に沿った規格化エミッタンスとバンチ長、エネルギー

0.08 mm-mrad であった。磁石間隔が短い 3-dipole merger では、空間電荷によるエミッタンス増大と CSR によるエミッタンス増大を同時に補償できることが、線形解析から導出できる。本設計例もこのような条件を満たしていると考えられる。

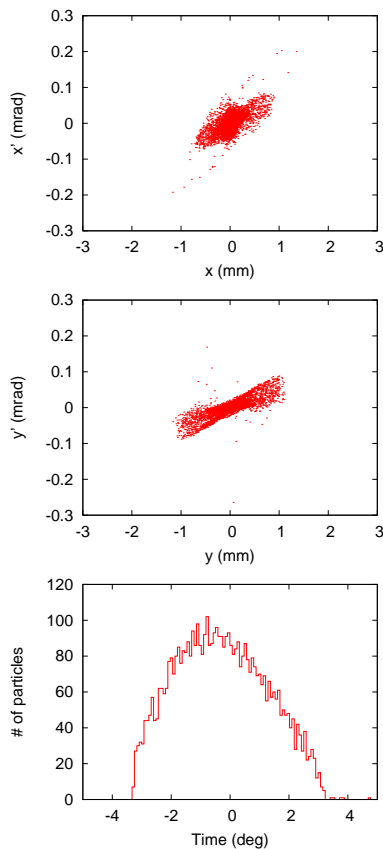


図 3: PARMELA 計算結果: 72 MeV 位置での  $(x, x')$   $(y, y')$  位相空間の電子分布とバンチ波形

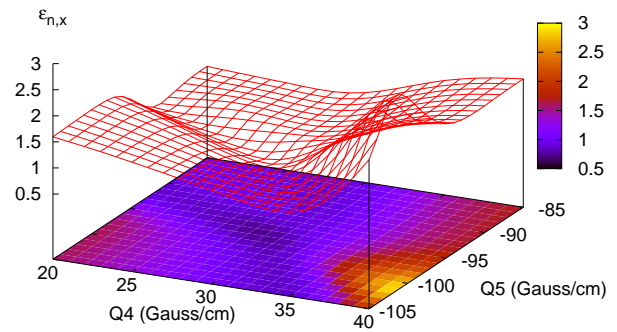


図 4: PARMELA 計算結果: 四極磁場 (Q4, Q5) の最適化

## 6. まとめ

ERL 型次世代放射光源の入射器におけるビームダイナミクスとして、バンチ圧縮方式、エミッタンス増大のメカニズムとその補償方法を整理した。電子銃 500 kV、入射エネルギー 5 MeV の入射器を例にとり、最適設計を得る手順を示した。77 pC の電荷量 (100 mA 相当) に対して、主加速器位置で 0.75 mm-mrad の規格化エミッタンス (RMS) が得られた。

本研究の一部は、日本学術振興会の科研費基盤研究 (B) 15360507 の助成を得て行われた。

## 参考文献

- [1] 4GLS Daresbury, <http://www.4gls.ac.uk/>
- [2] I.V. Bazarov, C.K. Sinclair, Proc. PAC-2003, p.2062 (2003).
- [3] 山崎淳 他, Proc. 14th Symp. on Acc. Sci. and Tech., p.392 (2003).
- [4] S.M. Gruner, M. Tigner, CHESS Tech. Memo 01-003, Cornell Univ. (2001).
- [5] 羽島良一, 峰原英介, Proc. 27th Linear Acc. Meeting in Japan, p.169 (2002).
- [6] R. Hajima, Jpn. J. Appl. Phys. 42, L974-L976 (2003).
- [7] R. Hajima, "Emittance Compensation in an ERL Merger", in these proceedings.
- [8] B.E. Carlsten, Nucl. Instr. Meth. A285, p.313 (1989); S.G. Anderson, J.B. Rosenzweig, PRST-AB 3, 094201 (2000).
- [9] H. Liu, D. Neuffer, Proc. PAC-95, p.1864 (1995).
- [10] B.M. Dunham et al., Proc. PAC-95, p.1027 (1995).
- [11] B. Aune et al., Phys. Rev. ST-AB 3 (2000) 092001.
- [12] PARMELA ver. 3.34; L.M. Young, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-96-1835.
- [13] POISSON SUPERFISH ver. 6.12; J.H. Billen and L.M. Young, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-96-1834.
- [14] W.H. Press et al., "Numerical Recipes in C second edition", Cambridge University Press (1992), p.408.
- [15] ELEGANT version 14.8, Nov. 26, 2002; M. Borland: Argonne National Laboratory Advanced Photon Source Report No. LS-287 (2000).