

## EMITTANCE GROWTH DUE TO SPACE CHARGE FORCE IN AN ERL INJECTION MERGER

Ryoichi Hajima<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> ERL Development Group, Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki 319-1195 Japan.

### Abstract

In a merger of energy-recovery linac, emittance growth is induced by space charge force of both transverse and longitudinal directions. A previous study by the author revealed that the effect of longitudinal space charge force can be compensated by envelope matching. We studied emittance growth and its compensation in a merger for the test ERL under development.

### ERL 入射合流部における空間電荷効果とエミッタンス増大

#### 1. はじめに

ERL は低エミッタンスの電子ビームを大電流で連続加速できる装置であり、入射ビームと周回ビームの合流部は、ERL に特徴的な要素機器である。一般的な ERL では 5-15MeV のエネルギーで入射ビームを合流させるが、この時、入射ビームは偏向軌道（ダイポール磁石を含む）を通るので、いわゆる非慣性系の空間電荷効果（縦方向空間電荷力、コヒーレント放射を含む）によりエミッタンス増大が生じる。

これまでの研究では、合流部の構成（3-dipole、chicane、zigzag、staircase）によるエミッタンス増大の比較、縦方向エミッタンスの影響を補償するエンベロープマッチング法の提案などを行ってきた [1]。本報告では、JAEA/KEK/ISSP が進めている ERL プロジェクトのための合流部の設計と、エミッタンス増大の検討結果について述べる。

#### 2. 縦方向空間電荷によるエミッタンス増大

ERL 合流部のように、運動量分散がゼロでない軌道位置において、バンチ内電子にエネルギー変化（電子相互作用によるエネルギー再配分、または、放射によるエネルギー損失）が生じると、運動量分散がゼロに戻る位置（合流部出口）において分散が閉じないためにエミッタンス増大が生じる。エネルギー変化の原因となるのは、CSR と縦方向空間電荷力である。縦方向空間電荷の効果は、低エネルギー領域でのみ影響が現れ、ERL では入射合流部が対象となる。縦方向空間電荷によるエミッタンス増大が低エミッタンスビームの生成において問題になることは、古くから知られていた [2]。極めて小さな電子ビームエミッタンス（規格化エミッタンスで

0.1mm-mrad）を目標とする ERL においても、この問題は検討すべき課題のひとつである。

合流部（偏向磁石と磁石間ドリフト）におけるエミッタンス増大は、空間電荷分散関数（軌道のみ関数）と、縦方向空間電荷により生じるエネルギー広がり（バンチの関数）の両者に依存し、線形解析から次のように求められる。

$$\varepsilon^2 = (\varepsilon_0 \beta_x + D^2)(\varepsilon_0 \gamma_x + D'^2) - (\varepsilon_0 \alpha_x - DD')^2, \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon_0$ 、 $\varepsilon$  は、合流部前後の非規格化エミッタンス、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  は、合流部出口での Twiss パラメータ、 $(D, D')$  は、空間電荷分散関数の RMS 広がり、空間電荷ポテンシャルの RMS 広がり  $\kappa_{rms}$  を使って

$$(D, D') \equiv \kappa_{rms}(\zeta_x, \zeta'_x), \quad (2)$$

と定義される。線形解析の詳細は以前の報告を参照されたい。[3]

#### 3. ERL 実証機合流部の解析

JAEA、KEK、ISSP 他が共同で建設を進めている ERL 実証機の合流部におけるエミッタンス増大の解析を行う。以前の解析では、入射エネルギー 5 MeV、合流角度 8 度とした時に、バンチ電荷 77 pC、7.7 pC に対して、合流部下流位置での規格化エミッタンスとして 1 mm-mrad、0.1 mm-mrad を得ている。[4]

今回の解析では、入射部の構成を 500 kV 電子銃、バンチャー、2 セル空洞 2 台とした。バンチャー、2 セル空洞の周波数は 1.3 GHz である（図 1）。バンチャーはピルボックスにノーズを追加した単純な形状とした。2 セル空洞は、TESLA 空洞と同一形状とし、ビームパイプ直径は 78 mm とした。2 セル空洞の加速勾配を 10 MV/m（第一空洞）、15 MV/m（第二空洞）としたとき、合流エ

\*E-mail: hajima.ryoichi@jaea.go.jp

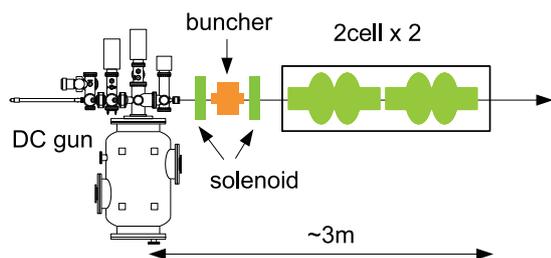


図 1: 入射部の構成：500kV DC 電子銃、バンチャー、2セル 2 空洞

エネルギーは 7 MeV となる。第一空洞の加速勾配を低くしているのは、入り口フリンジフィールドによるエミッタンス増大を抑止するためである。入り口ビームパイプ径を変化させることで、フリンジの染み出しが変わるので、エミッタンスを小さくできる可能性があるが、これは今後の課題とする。

さらに、バンチ電荷 100 pC、カソードでの初期エミッタンスとバンチ長を 0.3 mm-mrad、17 ps (rms) とし、入射部出口で 3.3 ps (rms) となるような運転パラメータを選んだ。多変数最適化の手法 [4] を用いて、2セル空洞の下流 2 m の位置でエミッタンスが最小になるように、ソレノイドを最適化した。図 2 に、入射部の計算結果として、エミッタンス、ビーム径、バンチ長、エネルギーをプロットした結果を示す。エミッタンスが最小となる位置で、規格化エミッタンスは 0.85 mm-mrad である (x, y 同一)。

合流部は、3 台の偏向磁石で構成されるアクロマティックベンディングである。3 台の偏向磁石の軌道半径は 1 m、中央の偏向磁石のみエッジ角 (-20 度) が設けてある。case-1 は過去の設計 [4] と同様の合流角度 (15-22+15=8 度) の場合である。case-2、case-3 は合流角度が大きくなるように、B1 と B3 の変更角度を大きくした設計である (表 1)。図 4 は、水平方向の運動量分散関数 ( $\eta$ ) と縦方向空間電荷による分散関数 ( $\zeta$ ) の計算結果である。合流部出口で  $\zeta$  が非ゼロの値をもつことから、エミッタンス増大が存在することがわかる。合流角度が大きいくほど ( $\zeta, \zeta'$ ) の値が大きいく、エミッタンス増大も大きいくと予想される。合流部出口における ( $\zeta, \zeta'$ ) の値は、case-1 = (-0.125 m<sup>2</sup>, 0.144 m)、case-2 = (-0.185 m<sup>2</sup>, 0.252 m)、case-3 = (-0.233 m<sup>2</sup>, 0.373 m) である。

エミッタンス増大を抑止するには、合流部出口において  $\zeta$  と  $\beta_x$  の位相を一致させる (エンベロープマッチング) が有効である。2セル空洞から合流部までの間に、5 台の四極磁石 (トリプレット+ダブレット) を配

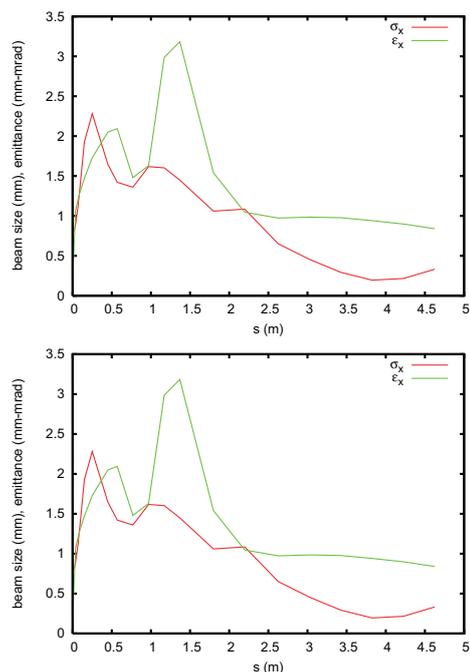


図 2: 入射部のみ (合流部を含まない) ビームダイナミクスの解析。RMS ビーム径、規格化エミッタンス、RMS バンチ長、エネルギー。

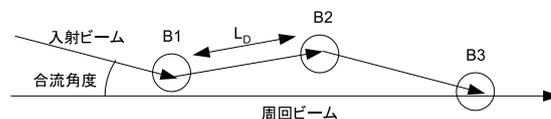


図 3: 合流部の構成

置し、エンベロープマッチングの条件を満たす収束系を実現した。数値解析では、エンベロープマッチングの条件を初期値にして、エンベロープの最適化 (ソレノイド、四極磁石の最適化) を行った。図 5 に PARMELA によるエミッタンスの計算結果を示す。規格化エミッタンスの値 (x/y) は、合流角度 8 度の時 0.95/1.06、12 度のとき 1.04/1.07、16 度のとき 1.16/1.22 となった (値は mm-mrad)。y 方向にエミッタンスが大きくなっているのは、合流部における y 方向のエンベロープが最適化されていないため、改善の余地があると考えられる。

	B1,B3	B2	$L_D$
case 1	15 deg.	-22 deg.	31.4 cm
case 2	17 deg.	-22 deg.	45.1 cm
case 3	19 deg.	-22 deg.	55.4 cm

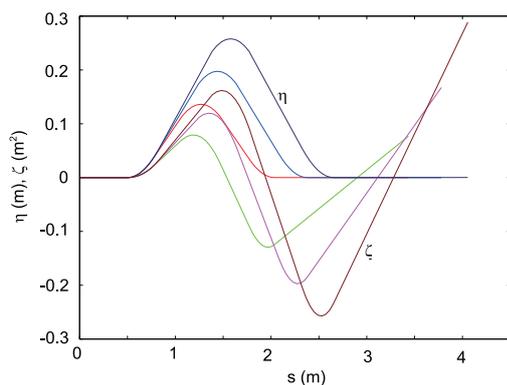


図 4: 合流部の分散関数。3 種類の合流角度について重ねてプロットしている。

#### 4. まとめ

ERL 合流部におけるエミッタンス増大とその抑制について述べた。JAEA、KEK 他で建設を進めている ERL 実証機の合流部として、合流角度の異なる 3 種の構成を取り上げ、エミッタンス増大の解析を行った。バンチ電荷 100 pC、バンチ長 3.3 ps の場合、最適化を施した入射部、合流部の構成では、合流角度 8-16 度に対して、x 方向のエミッタンス増大は 12-36%であった。

本研究の一部は、科研費基盤 (C)18560806 の成果である。

#### 参考文献

- [1] V.N. Litvinenko, R. Hajima and D. Kayran, Nucl. Instr. Meth. A557, 165-175 (2006).
- [2] B.E. Carlsten et al., IEEE Quantum Electronics 27, 2580 (1991).
- [3] 羽島, ERL 入射合流部におけるエミッタンス増大とその補償, 第 29 回リニアック研究会論文集 (2004).
- [4] R. Hajima and R. Nagai, Nucl. Instr. Meth. A557, 103-105 (2006).

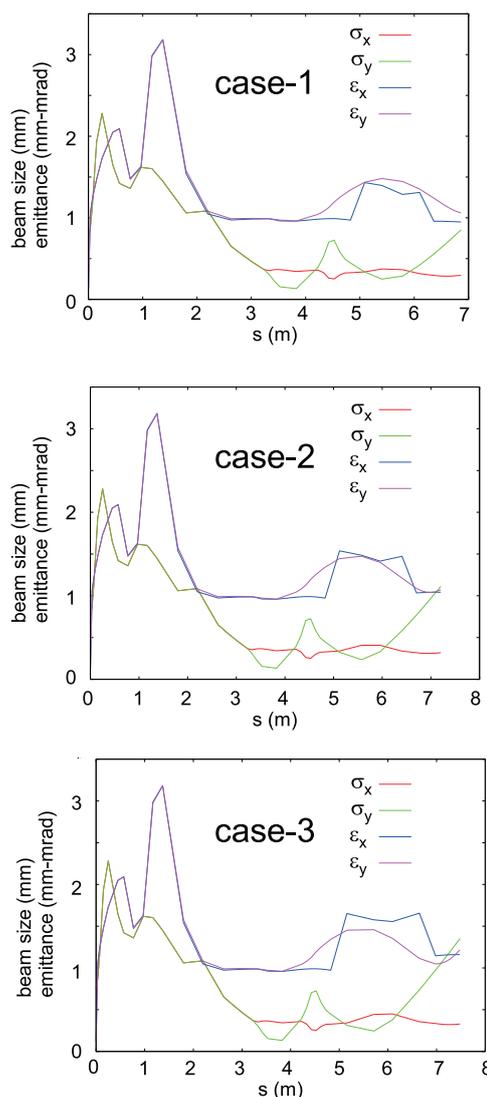


図 5: 合流部を含めたエミッタンスの計算結果。合流角度は: case-1=8 度、case-2=12 度、case-3=16 度である。