

BEAM ENVELOPE ANALYSIS BY TRANSVERSE SPACE CHARGE EFFECT ON TWRR ACCELERATOR STRUCTURE IN PNC

Tōyama S.

Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation(PNC)

4002 Narita, Oarai-machi, Ibaraki-ken 311-13 Japan

ABSTRACT

A high power CW electron linac has been developed so as to accelerate 10 MeV-100 mA beam, and its performance test will be held in a coming year. In the last meeting, the beam broadening was estimated by the coasting beam envelope equation including the space charge term. The envelope equation is modified so as to be able to estimate the envelope when the particles are accelerated in this report. The characteristics of the beam envelope equation is investigated, evaluating the each terms and considering the physical behavior. In order to confirm the non divergence of beam in the accelerator structure for PNC linac, the envelopes are estimate by means of the beam emittance, current and energy. The dominant contribution on the beam broadening comes from the beam emittance which was designed as low as possible in the case of a thermionic cathode.

動燃TWRR加速構造の縦方向空間荷電効果による包絡線解析

1. はじめに

大電流電子線形加速器ではビームを的確な大きさに維持することが重要である。現在動燃で開発を進めている還流型(TWRR)の大電流CW電子線形加速器¹⁾は高い平均電流が望まれるため、ビーム品質のみならず機器の保護の観点からもビーム運動解析は重要である。大電流電子加速のビーム運動では、ウエイクフィールドの効果が大きく空間荷電効果は一般に小さいとされているが、低勾配加速で数MeV付近では両者を考慮した解析が必要である。高エネルギー領域でも特にFELや逆コンプトン散乱装置等の低エミッタンス、高輝度な粒子線が必要な装置では空間荷電効果の寄与が重要である。

前回の報告²⁾では、低勾配電子線形加速器のウエイクフィールド解析結果を空間荷電効果を含む包絡線方程式と組み合わせる評価した。今回の報告では、前回の包絡線方程式を加速系に拡張し、その非線形方程式が表わす包絡線の挙動やTWRR加速器の設計パラメータで高エネルギー領域も含めた数値解析を行い、より現実的なビームの拡がりの上限を評価したので報告する。

2. 基本方程式の導出

通常、z方向を加速方向とする非加速ビーム(コースティングビーム)の運動方程式から円環分布(KV荷電分布)を仮定して導出される相対論的粒子の包絡線方程式は次のように表現される。

$$a'' + K_x a - \frac{\epsilon_x^2}{a^3} = \frac{\xi}{2a}$$

ここでaは包絡線、 K_x 、 e_x 、 ξ は夫々x成分収束パラメータ、x成分ビームエミッタンス及び空間荷電パラメータで、またx、y成分ともビームパラメータは等価とした。ここでのエミッタンスは、rmsではなく位相空間の面積とする。また、

$$\xi = \frac{4q^2 r_0 \lambda}{\beta^2 \gamma^2}$$

で、 λ はバンチ内荷電分布である。ライナックの等加速系の運動方程式を導出すると断熱近似のもとで、相対論的エネルギーに関して $\gamma' = \text{一定(利得)}$

であることを用いて

$$a'' + (K_x + \Delta)a - \frac{\epsilon_{Nx}^2}{a^3} = \frac{\xi_N}{2a},$$

$$\epsilon_N = \beta\gamma\epsilon, \quad \xi_N = \beta\gamma\xi$$

となる。上式で、

$$\Delta = \frac{(\gamma'/\gamma)^2}{4\beta^2\gamma^2}$$

であり、ライナックが無集束で極端に相対論的でない際は、ライナックで相対論的に電子を加速すると包絡線方程式は、以下ようになる。

$$a'' + \Delta a - \frac{\epsilon_{Nx}^2}{a^3} = \frac{\xi_N}{2a}.$$

これは非線形方程式であって、今のところ解析解は知られていないが、大局的挙動は次のように把握出来る。

エミッタンス、空間荷電効果が共に零の際は、上式は通常のビーム輸送式であり、この場合振動解である。エミッタンス項の効果により、単振動のばね定数と距離の三乗に比例するポテンシャルの平衡点が臨界点となる。基本的には、零でないばね定数があると、振動解になるが、振動周期より十分短い距離であれば近似的に成り立つ。これらの包絡線の様子を数値解析の結果として図1. に示す。ここでは、パンチ座標 $s=0$ でウエイスト点としている。

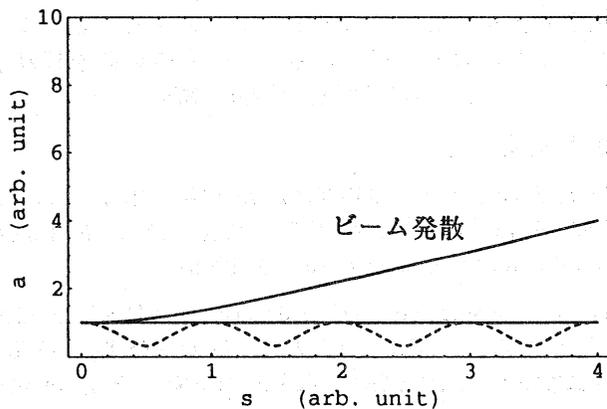


図1. 包絡線方程式の挙動

ここで、点線は平衡点より、振動成分が大きい場合である。計算の暫近的傾向は、空間荷電項がない場合の正確な解析解であるハイパボラ関数に良く一致する。よって、 Δ 、規格化エミッタンス、実効的な空間荷電効果の数値関係で、 Δ による周期が規格化された周期より十分短ければ、この項を無視して良

い。以降では、 $\Delta=0$ として計算する。

実際の電子ビームは、DCビームではなくCWビームであるが、粒子が十分光速に近く飛行距離も短いので、解析では横方向の効果は無視する。

3. 計算結果

実際の数値解析はMathematica 3.0のNDSolveを用いて行った。計算が良い近似を保つことは過去の計算と良く一致することで確かめられている³⁾。動燃TWRR加速器に対する計算は下の表1の場合について行った。ビーム半径は1mmとした。実際の電子銃のエミッタンスはシミュレーションでは凡そ 10π mm mrad⁴⁾であり、ビーム系は凡そ5mmであるが、以下の解析で明らかのように、その際のビームの拡がりほぼエミッタンスだけで決まる。なお、実際の数値はegs単位系で評価する。

表1 計算パラメータ

規格化エミッタンス (mm mrad)	ビーム電流 (A)
E = 10 MeV	
0.1 π	0, 0.1, 10
1.0 π	0, 0.1, 10
E = 100 MeV	
0.1 π	0, 0.1, 10
1.0 π	0, 0.1, 10

10MeVに関して得られた結果を図2、3に、100 MeVに関してを図4、5に示す。各々の図で点線は空間荷電効果を無視した場合を示す。これらの図の横軸は、ウエイスト点 a_0 で規格化されたもので、 $10^4, 10^5$ 拡大で、実際の距離は、1で100m、1000mになる。縦軸は、1mmを基準としたx方向のビーム半径の拡がり比である。

10 MeVの電子ビームの挙動は、エミッタンスが 0.1π mm mradの場合では図2より、200mの飛行距離でビームが2倍程度拡がる。100mAの空間荷電効果は1000mの飛行距離で3.3倍のビーム拡がりの3%相当であることを示している。図3.のエミッタンスが 0.1π mm mradの際は、100mの飛行距離で空間荷電効果は10Aのビームでおよそ5.7%である。方程式の性質より、 10π mm mradの時は、空間荷電効

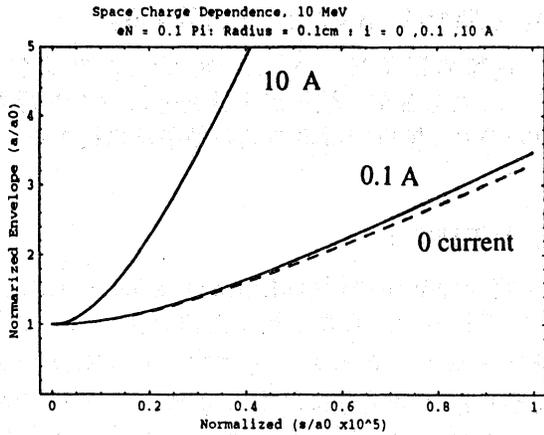


図2. 10MeV-0.1 π エミッタンスの際の包絡線の空間荷電効果

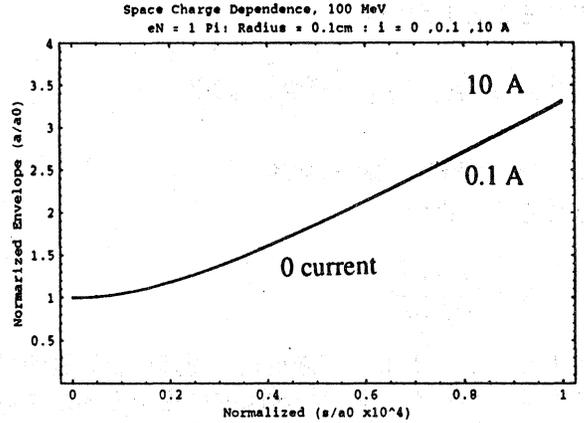


図5. 100MeV- π エミッタンスの際の包絡線の空間荷電効果

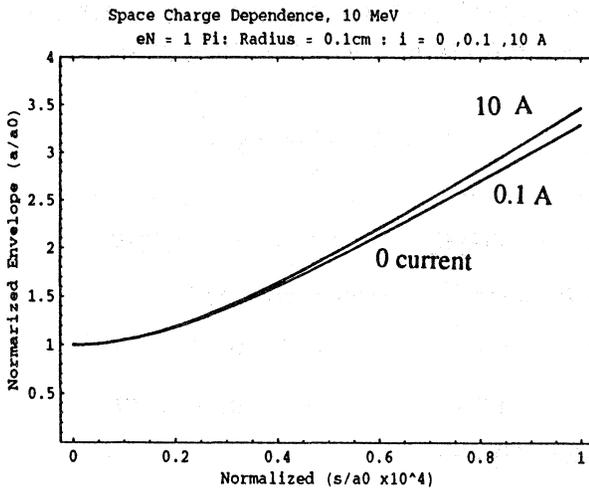


図3. 10MeV- π エミッタンスの際の包絡線の空間荷電効果

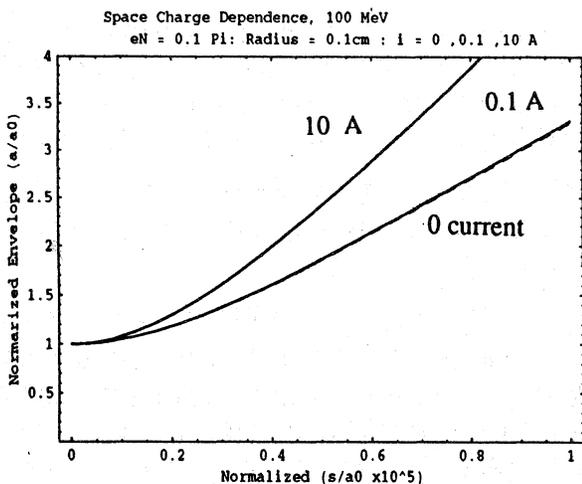


図4. 100MeV-0.1 π エミッタンスの際の包絡線の空間荷電効果

果は、0.57%程度になる。よって、100 mA -10 π mm mrad の空間荷電効果はビームの拡がりに寄与しない。

図4、5に見られる100 MeV の場合は断熱ダンピングのように、空間荷電効果は γ が大きくなるに従い小さくなる。 π mm mrad の場合は10 A までは殆どエミッタンスでビームの拡がりが決まっている。

4. まとめ

10 MeV のTWRR加速構造では、空間荷電効果による縦方向のビーム拡がりは、10 A 程度まで無視できる。高エネルギーでは、電子銃付近ではほぼビーム拡がりが決まる。低エミッタンスビームはビーム径を変えないので、ビームキャッチャの負荷を軽減するために、ビーム発散系が重要になる。

参考文献

- 1) T. Emoto *et al*; "STATUS OF PNC HIGH POWER CW ELECTRON LINAC," Proc. of 21th Linear Accelerator Meeting in Japan, 23 (1996)
- 2) S. Tōyama and H. Takahashi; "WAKE FIELD ANALYSIS FOR LOW GRADIENT TWRR ACCELERATOR STRUCTURE IN PNC," Proc. of 21th Linear Accelerator Meeting in Japan, 302 (1994)
- 3) A.W.Chao ; "Phsics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators," JOHN WILEY & SONS,INC., p31, (1993)
- 4) Y.Yamazaki and M.Nomura ; " THE ELECTRON GUN FOR PNC CW LINAC," Proc. of 1994 International Linac Conference, p129, (1994)