

空間電荷効果によるエミッタンス低減現象 を活かした電子銃システムの設計

(公財)高輝度光科学研究センター

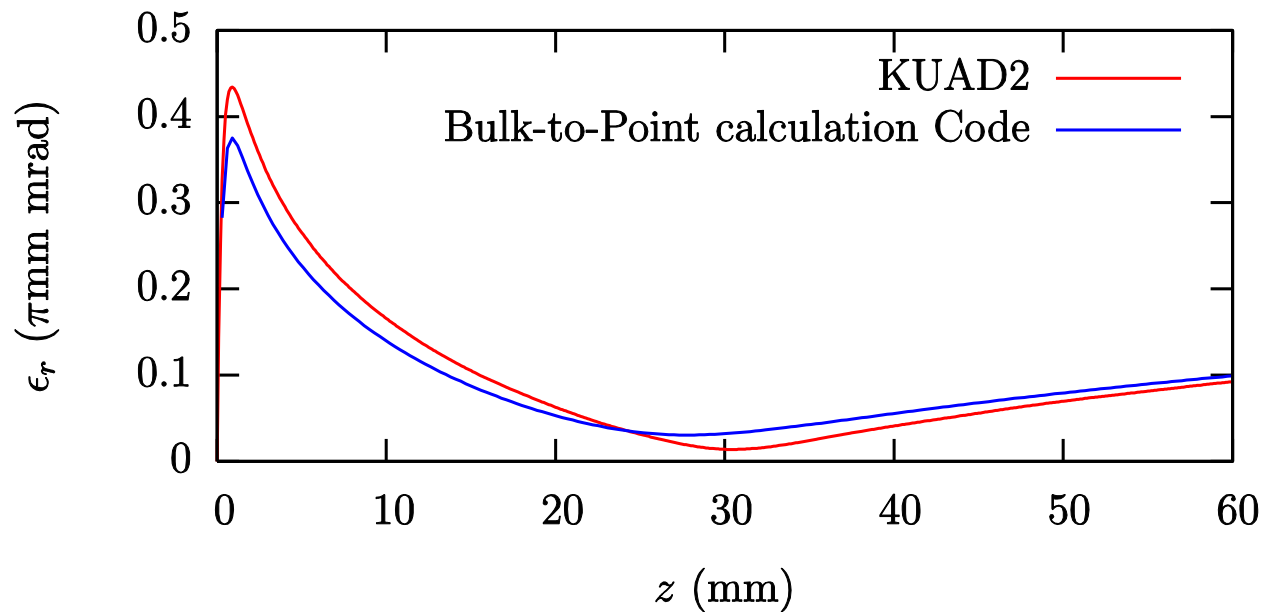
水野 明彦

Contents

1. エミッタンスリダクション計算事例
 - DC連続ビームでの事例
 - RF電子銃空洞におけるパルスビームでの事例
2. ソレノイドコイルによるビームフォーカスとエミッタンスの減少
3. RF電子銃システムでのエミッタンスリダクション計算事例
 - ソレノイド磁場でのビーム集束
 - 加速管によるビーム加速

まとめ

径方向 : $\phi 2 \text{ mm}$ 一様分布
 長手方向 : 40 A/cm^2 一様な連続ビーム
 初期熱エミッタンス : 0 mrad
 理想的な平面カソード
 カソード鏡像効果を考慮
 一様電界 5 MV/m で引き出して加速し続ける

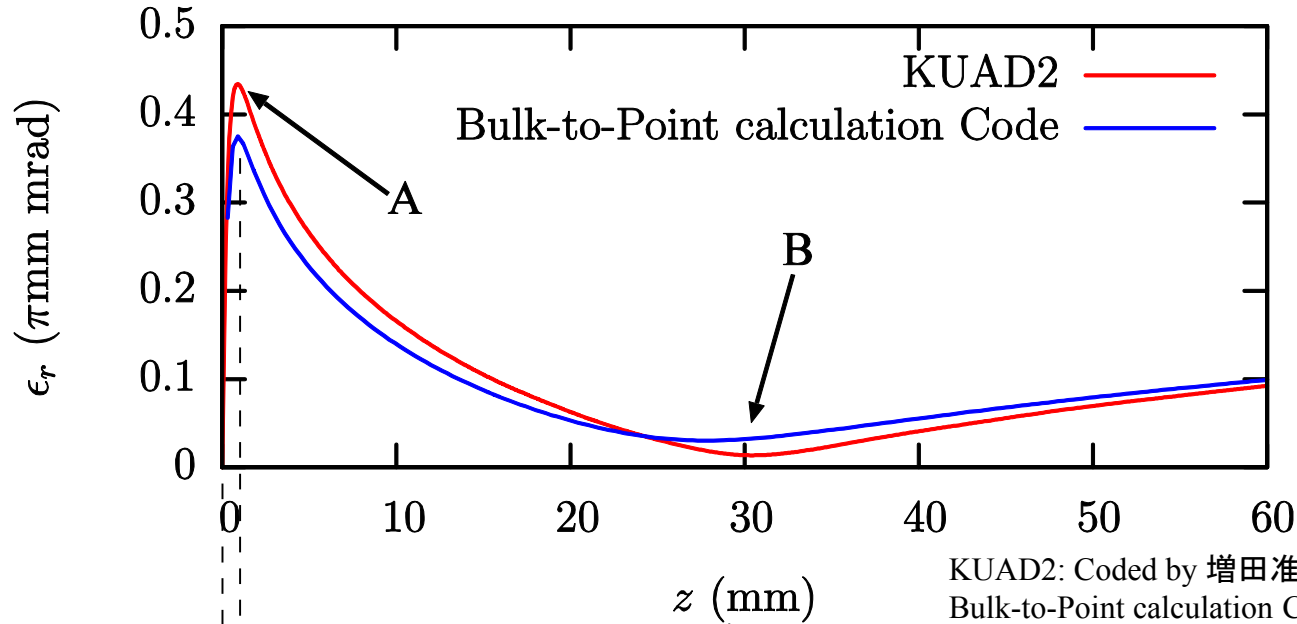


ある位置 z を通過した粒子の積算により z での規格化 rms エミッタンスを算出

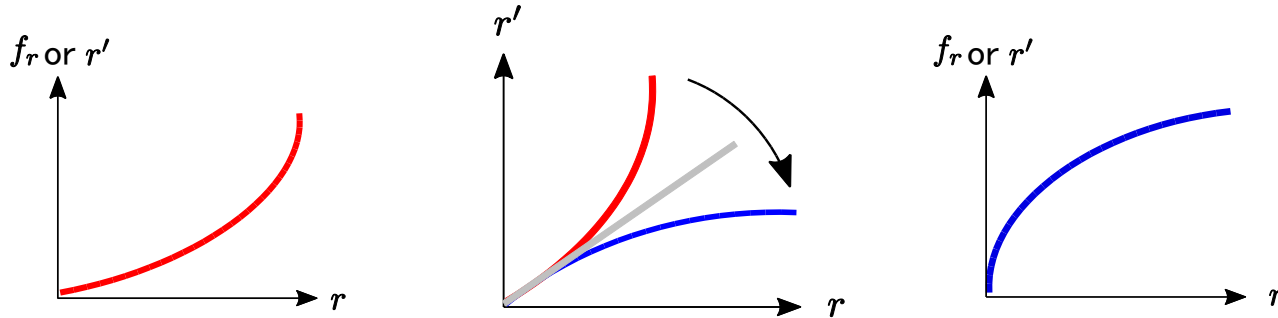
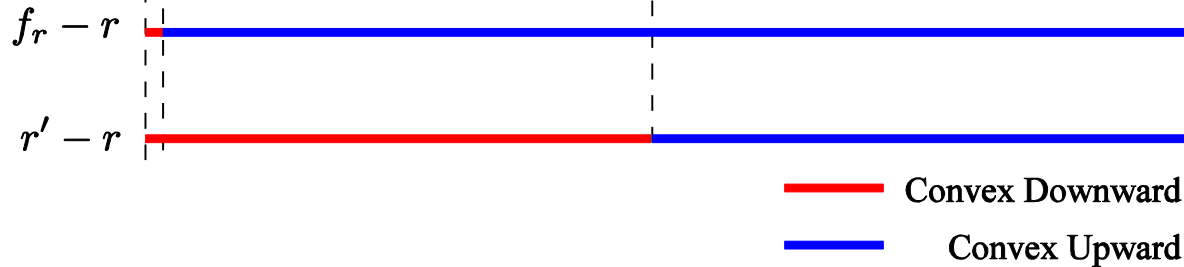
$$\epsilon_r(z) = \sqrt{\langle r^2 \rangle_z \langle (\gamma \beta r')^2 \rangle_z - \langle \gamma \beta r r' \rangle_z^2}$$

リウヴィルの体積とは異なる

→ プロジェクションエミッタンスではなく、スライスエミッタンスに近い



KUAD2: Coded by 増田准教授,京大エネルギー理工学研究所
 Bulk-to-Point calculation Code: Coded by 水野, SPring-8



Reduction of transverse emittance in electron injectors caused by space charge effects

Mizuno, A., Masuda, K., Yamamoto, M.

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:

volume 774, year 2015, pp. 51 - 59

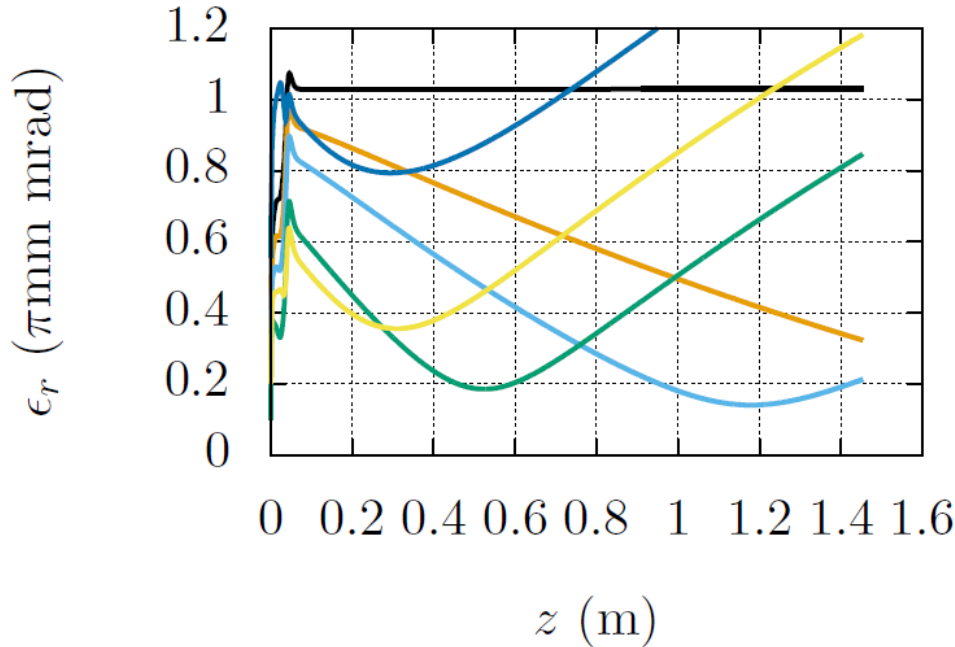
1. エミッタンスリダクション計算事例
 - DC連続ビームでの事例
 - RF電子銃空洞におけるパルスビームでの事例
2. ソレノイドコイルによるビームフォーカスとエミッタンスの減少
3. RF電子銃システムでのエミッタンスリダクション計算事例
 - ソレノイド磁場でのビーム集束
 - 加速管によるビーム加速

まとめ

SPring-8シングルセルRF電子銃空洞

プロジェクションエミッタンスを計算

$$\epsilon_r(\langle z \rangle_t) = \langle \gamma \rangle_t \langle \beta \rangle_t \sqrt{\langle r^2 \rangle_t \langle r'^2 \rangle_t - \langle r \cdot r' \rangle_t^2}$$

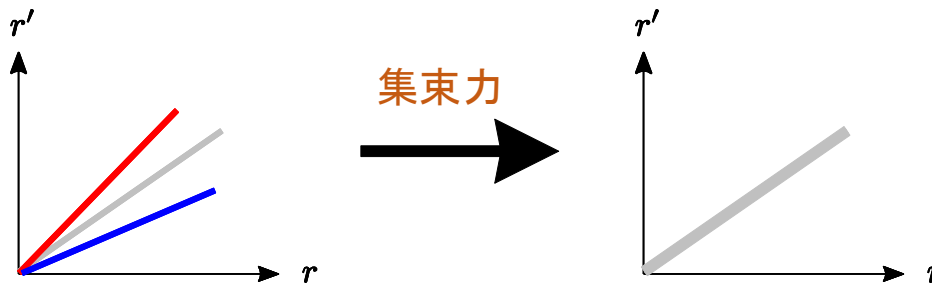


- No charge —
- 10 pC/bunch —
- 20 pC/bunch —
- 50 pC/bunch —
- 0.1 nC/bunch —
- 0.2 nC/bunch —

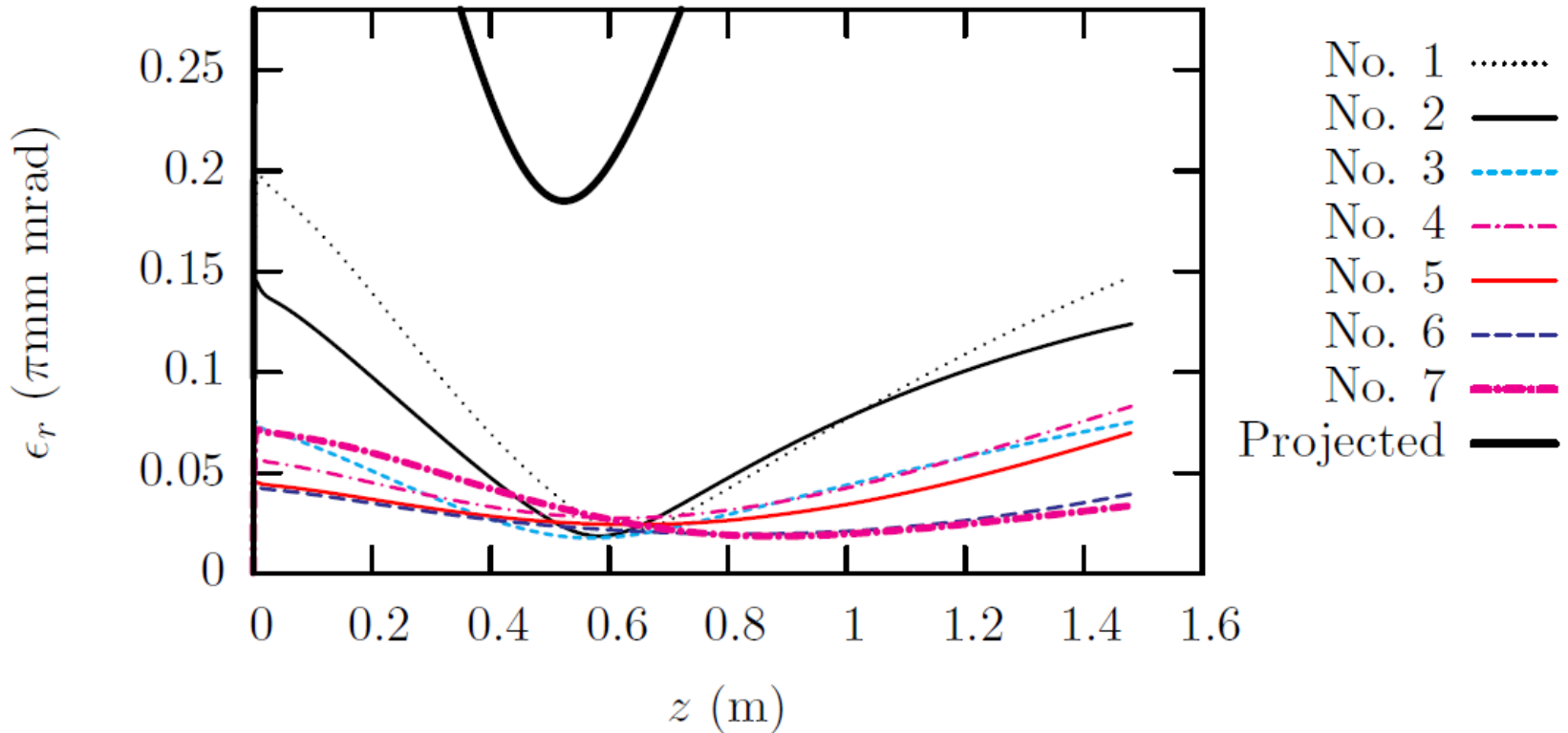
Initial Parameters:

- レーザースポットサイズ : ϕ 1.2mm
- レーザー幅 : 20 ps
- RF初期位相 : 5度
- カソード面最大電界強度 : 157 MV/m
- エネルギー@cavity exit : 3.7 MeV
- (カソード鏡像効果を考慮)

エミッタンス補償の原理



バンチ内の各スライスエミッタンスの振舞い

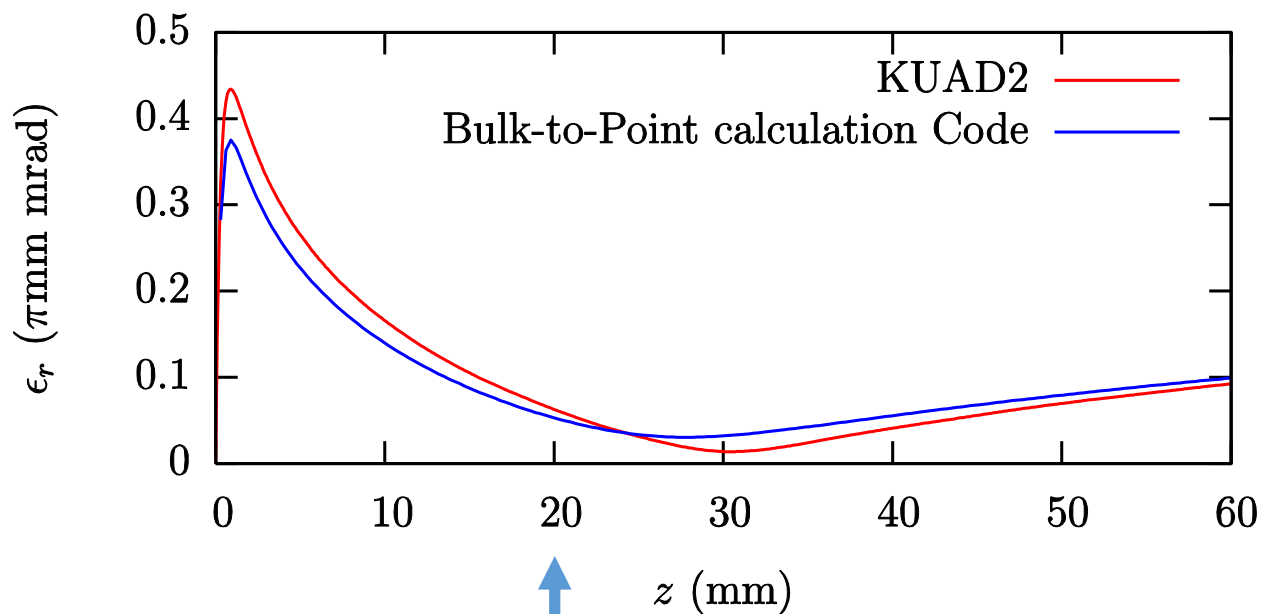


1. エミッタンスリダクション計算事例
 - DC連続ビームでの事例
 - RF電子銃空洞におけるパルスビームでの事例
2. ソレノイドコイルによるビームフォーカスとエミッタンスの減少
3. RF電子銃システムでのエミッタンスリダクション計算事例
 - ソレノイド磁場でのビーム集束
 - 加速管によるビーム加速

まとめ

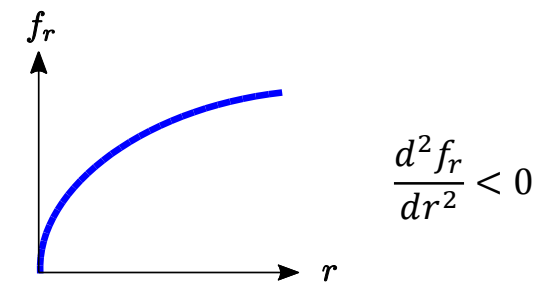
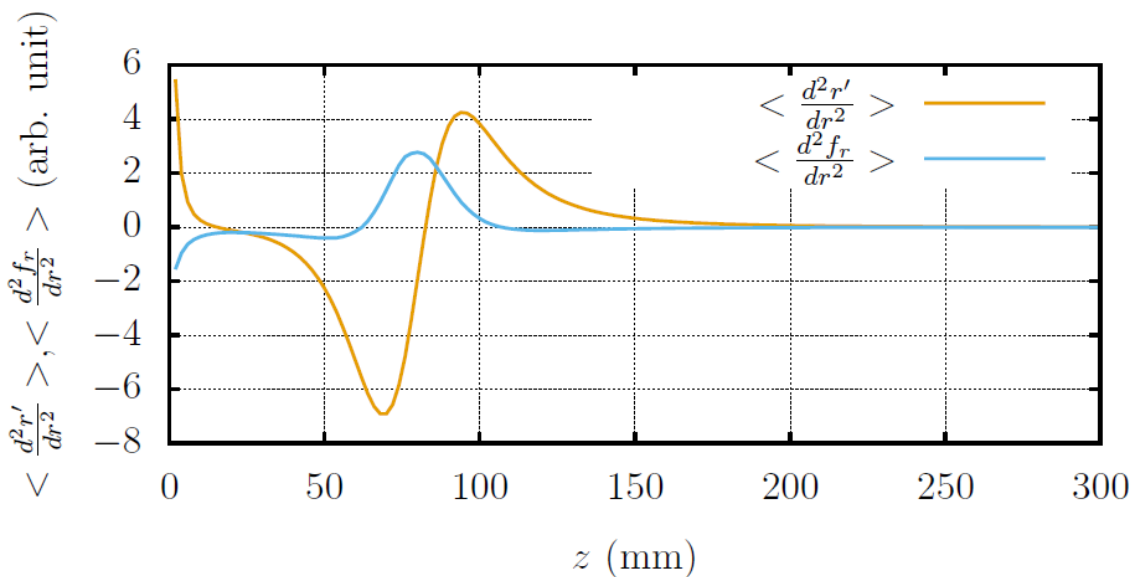
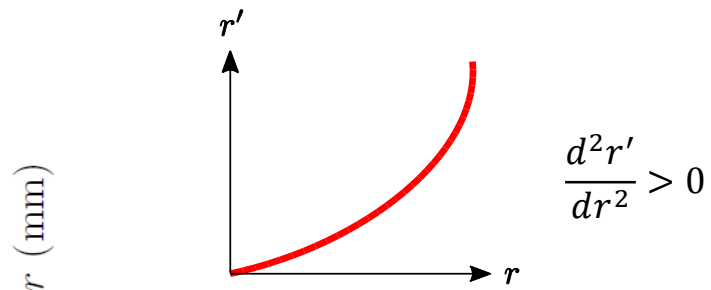
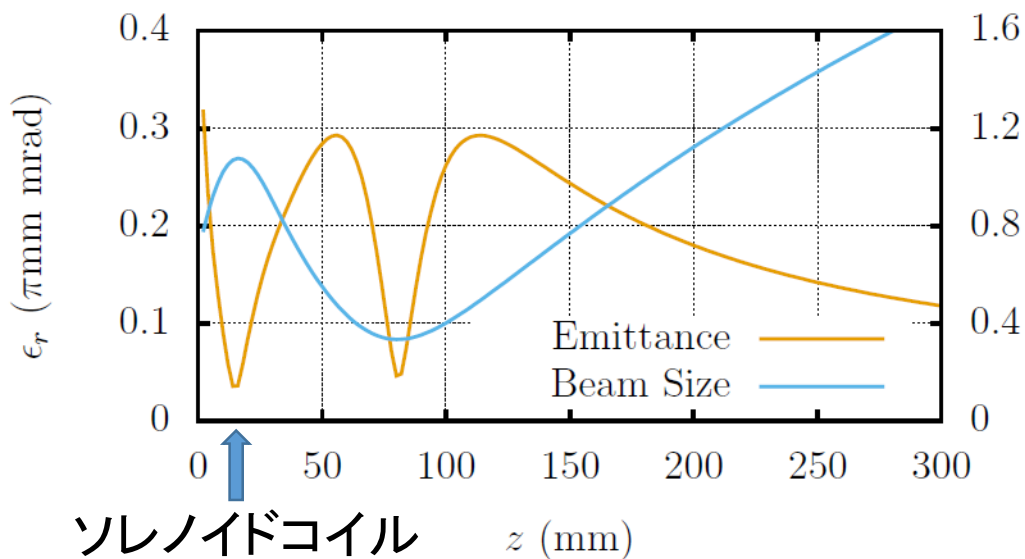
DC連続ビーム

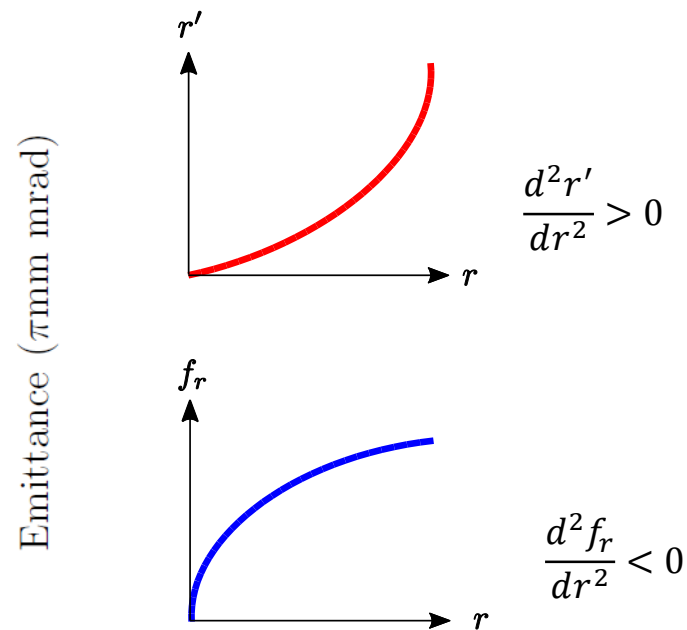
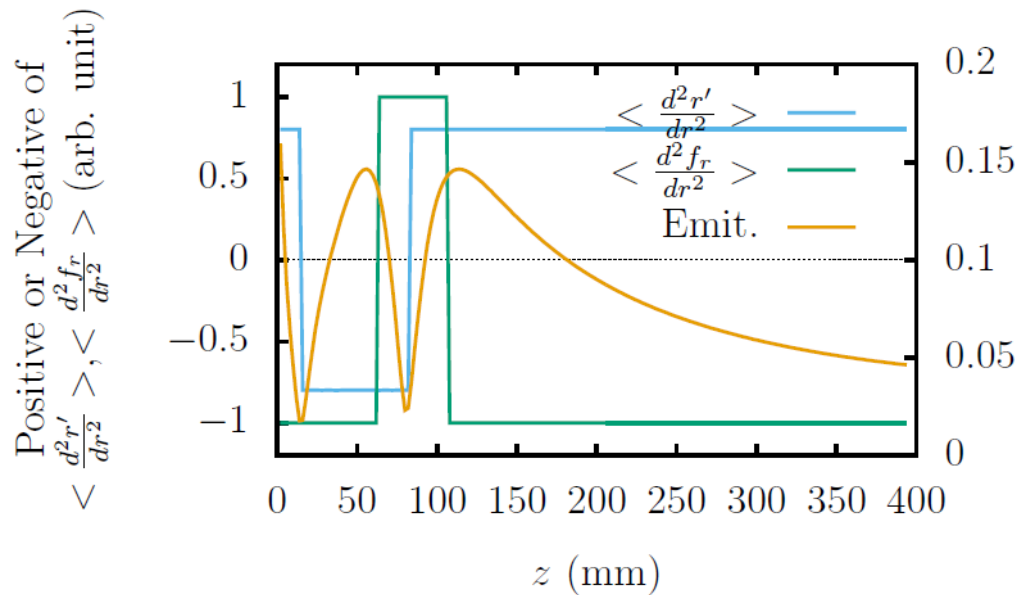
径方向 : $\phi 2 \text{ mm}$ 一様分布
長手方向 : 40 A/cm^2 一様な連続ビーム
初期熱エミッタンス : 0 mrad
理想的な平面カソード
カソード鏡像効果を考慮
一様電界 5 MV/m で引き出して加速し続ける



ソレノイドコイル

ソレノイド磁場でDC連続ビームを集束





ビームを集束すると、横方向電荷密度分布が変化し、 $\frac{d^2 f_r}{dr^2}$ の正負が変化することからエミッタンスの増減が起こる

1. エミッタンスリダクション計算事例
 - DC連続ビームでの事例
 - RF電子銃空胴におけるパルスビームでの事例
2. ソレノイドコイルによるビームフォーカスとエミッタンスの減少
3. RF電子銃システムでのエミッタンスリダクション計算事例
 - ソレノイド磁場でのビーム集束
 - 加速管によるビーム加速

まとめ

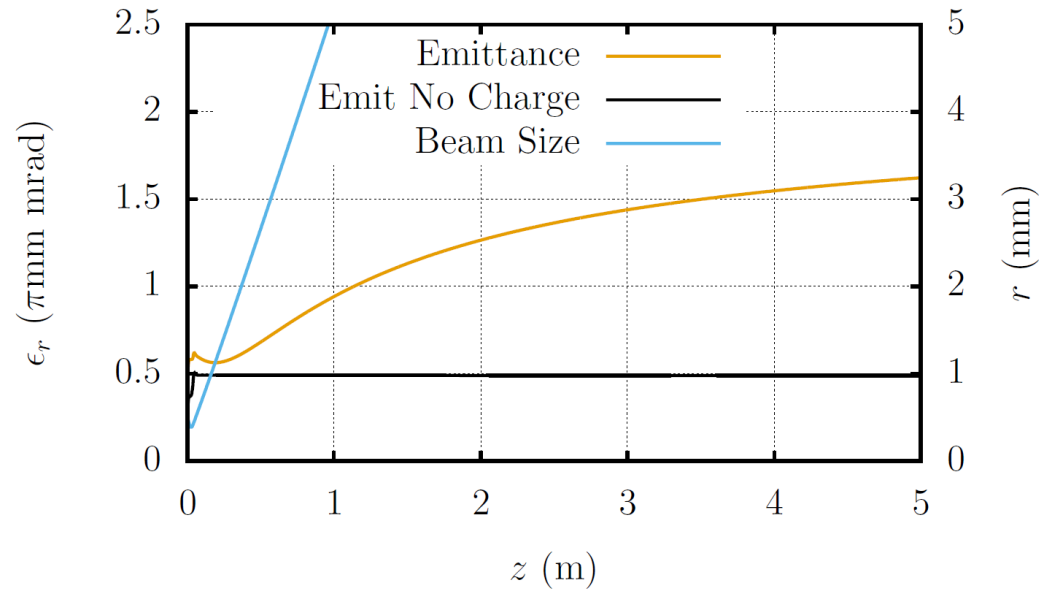
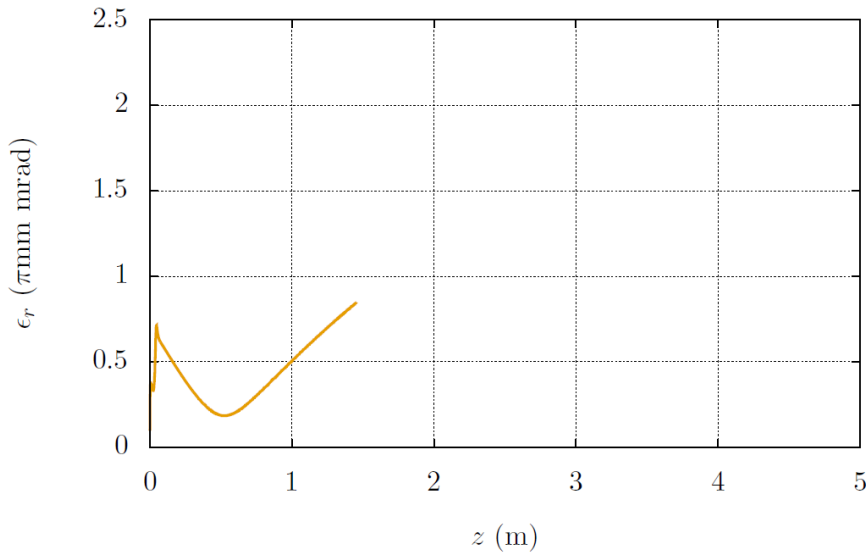
Initial Parameters:

レーザースポットサイズ : ϕ 1.2mm
レーザー幅 : 20 ps
バンチあたりの電荷 : 50 pC/bunch
RF初期位相 : 5度
カソード面最大電界強度 : 157 MV/m
エネルギー@cavity exit : 3.7 MeV
(カソード鏡像効果を考慮)

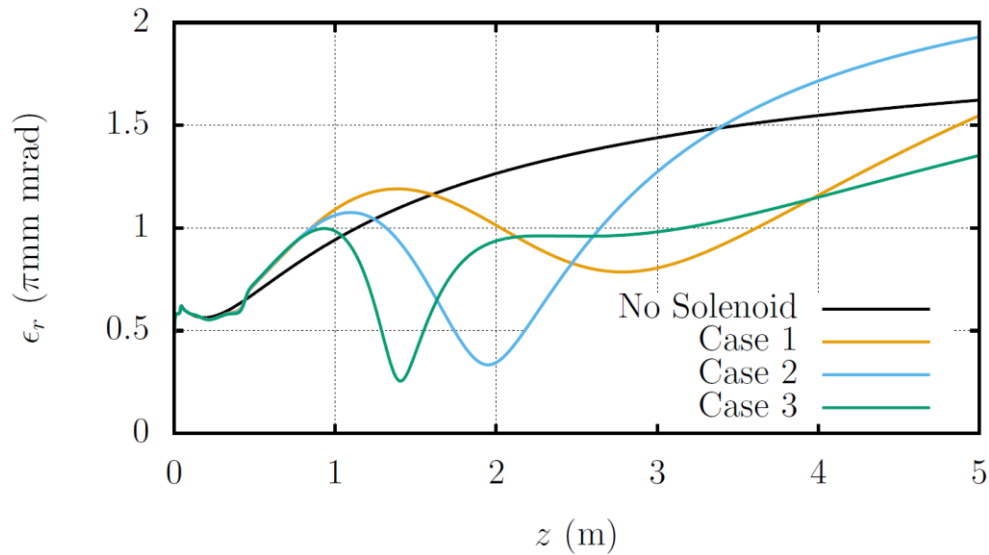


Initial Parameters:

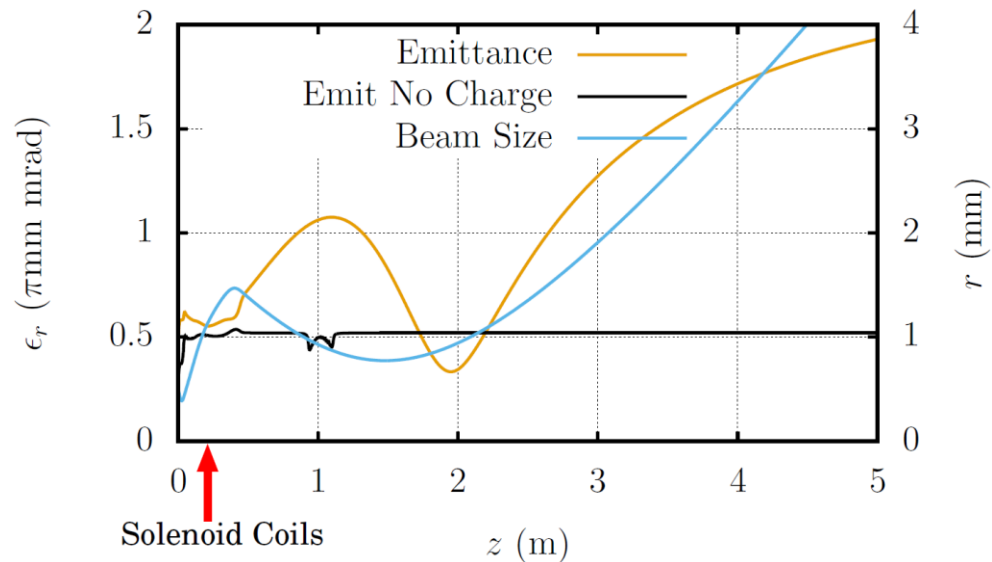
レーザースポットサイズ : ϕ 1.4mm
レーザー幅 : 9 ps
バンチあたりの電荷 : 50 pC/bunch
RF初期位相 : 5度
カソード面最大電界強度 : 157 MV/m
エネルギー@cavity exit : 3.7 MeV
(カソード鏡像効果を考慮)



ソレノイド磁場でビームを集束する



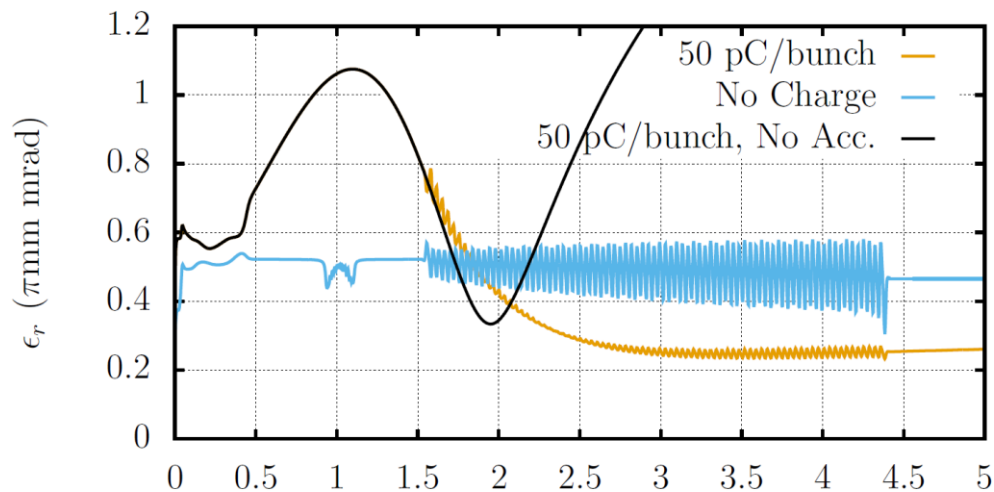
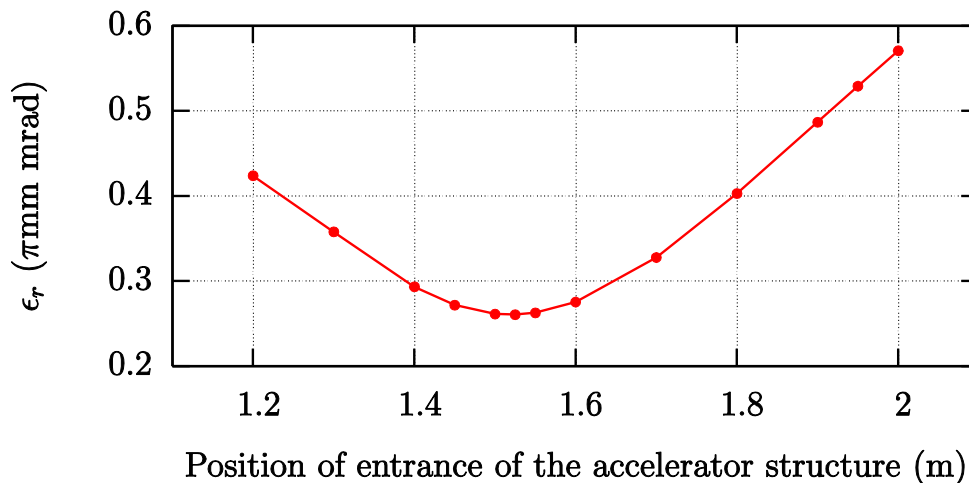
ソレノイド磁場により、エミッタンスが最小値を示す位置を調整可能



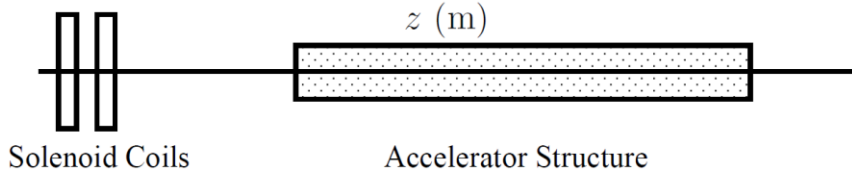
1. エミッタンスリダクション計算事例
 - DC連続ビームでの事例
 - RF電子銃空胴におけるパルスビームでの事例
2. ソレノイドコイルによるビームフォーカスとエミッタンスの減少
3. RF電子銃システムでのエミッタンスリダクション計算事例
 - ソレノイド磁場でのビーム集束
 - 加速管によるビーム加速

まとめ

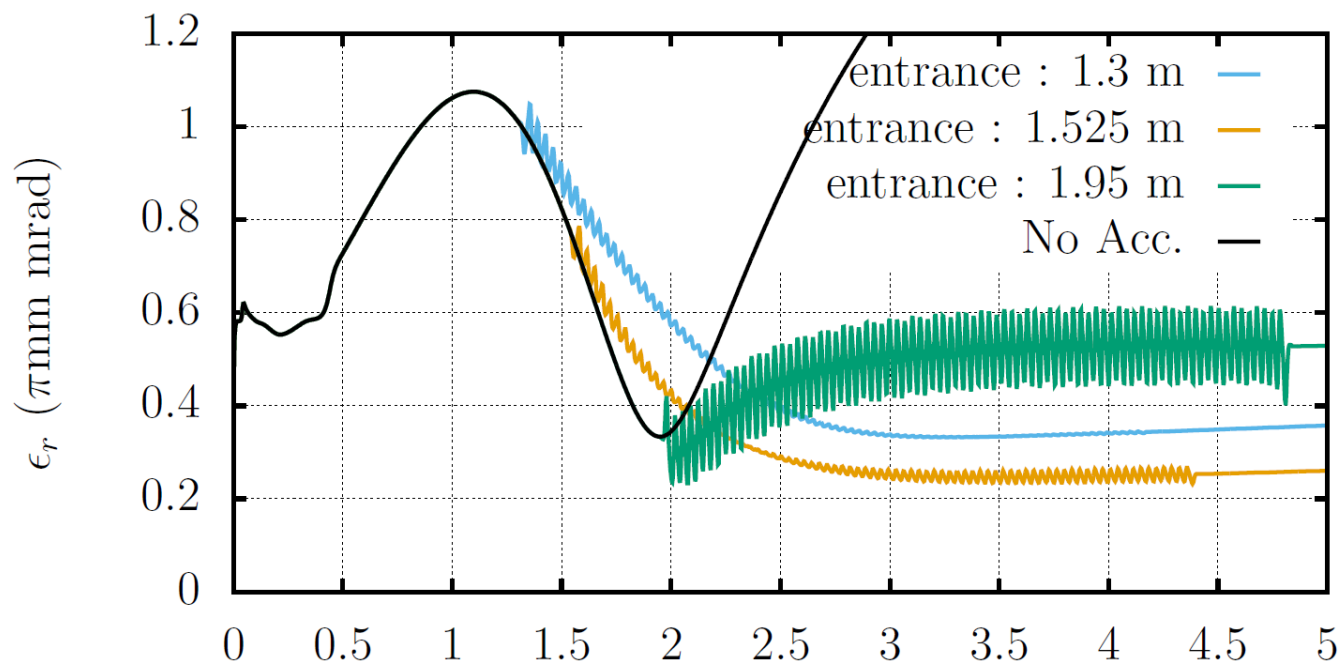
エミッタンスの加速管位置への依存性



加速管入口
 $z = 1.525\text{m} \rightarrow$ エミッタンス $0.26 \pi\text{mm mrad}$



加速管の位置とエミッタンスの振舞い

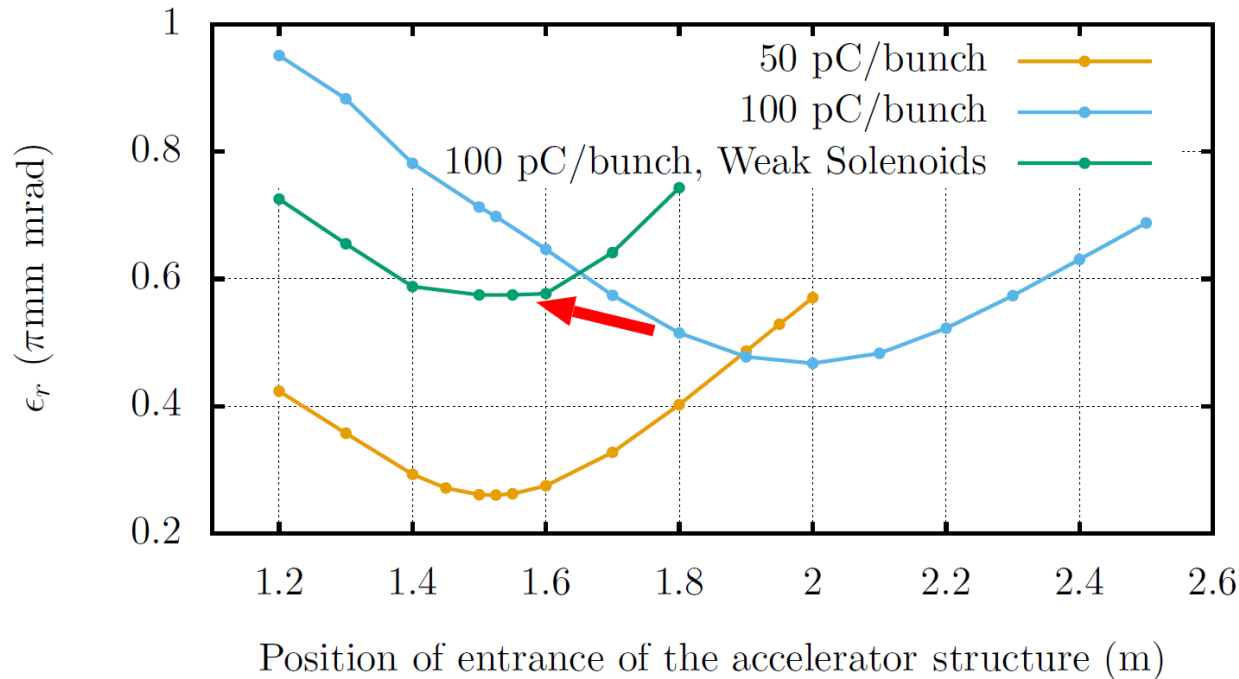


- エミッタンスの低減は空間電荷効果強度に依存する
- 加速管は、空間電荷効果の強度をコントロールできる



エミッタンス最小点を加速管入口とするのではなく、エミッタンスが減少する途中を入口とするのが良い

ビーム電荷量が変化した場合



電荷量が変化した場合でも、ソレノイドコイルの集束力を調整することで、エミッタンス最小となる加速管位置を電荷量変化前と同一にすることが可能

まとめ

- 空間電荷効果によるエミッタンス低減現象を用いた電子銃システムが設計可能であることを示した。(r-エミッタンスが $0.26 \pi \text{ mm mrad}$)
 - ビームを集束すると、径方向電荷密度分布が変化することによって、エミッタンスの増減が起こる。
 - RF電子銃空洞直後にソレノイドコイル等のビーム集束デバイスを設置すれば、デバイス後方でエミッタンスを低減させることが出来る。
 - 集束デバイス後方の加速管入口は、エミッタンス最小点に設定するのではなく、エミッタンスが減少している途中に設定する必要がある。
 - 加速管設置の最適位置は、電荷量によって変化するが、集束力を調整することによって、最適位置の調整も可能である。
- 本電子銃システムでのエミッタンスの低減は、集束系によるエミッタンス補償とは根本的に異なるものである。