

cERL入射部の検討状況

2008年12月12日(金)
第28回ERL検討会
放射光研究棟2階会議室

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所
宮島 司

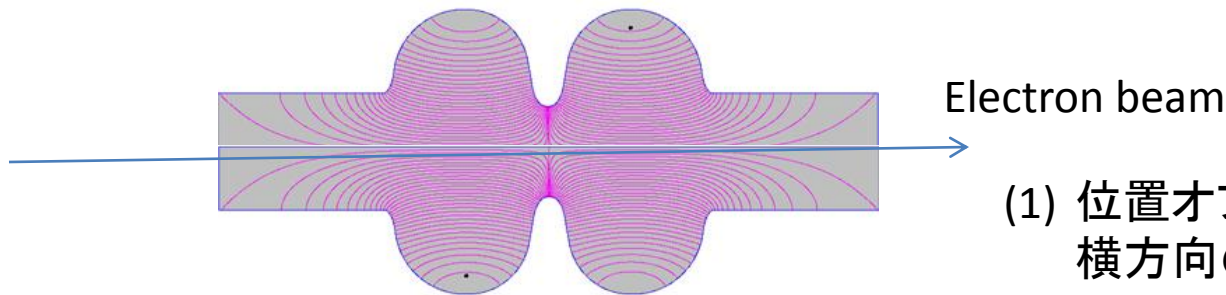
目次

- 入射部超伝導空洞の設置誤差の影響
- 電子銃カソード形状の影響
- cERL入射部の検討状況(武藤、本田、三橋、宮島)
 - 全体配置の検討
 - 機器の検討(ソレノイド電磁石、レーザー導入口、真空ポンプ)
 - モニターの検討
 - 電子銃テスト施設(GTF)の検討(AR南棟)
 - シミュレーション

入射部超伝導空洞の設置誤差の影響

入射部超伝導空洞の設置誤差の影響

- 超伝導空洞の設置誤差(位置と角度)がビームの質(ビーム中心位置、ビームサイズ、エミッタンス)にどの程度影響を与えるか？
- クライオモジュール内での超伝導空洞を設置するときの設置精度を見積もる
- 1台毎の空洞の設置誤差の影響と、全ての空洞に設置誤差がある場合の影響を、空間電荷効果を含んだ粒子トラッキングコード(GPT, General Particle Tracer)を使用して計算した



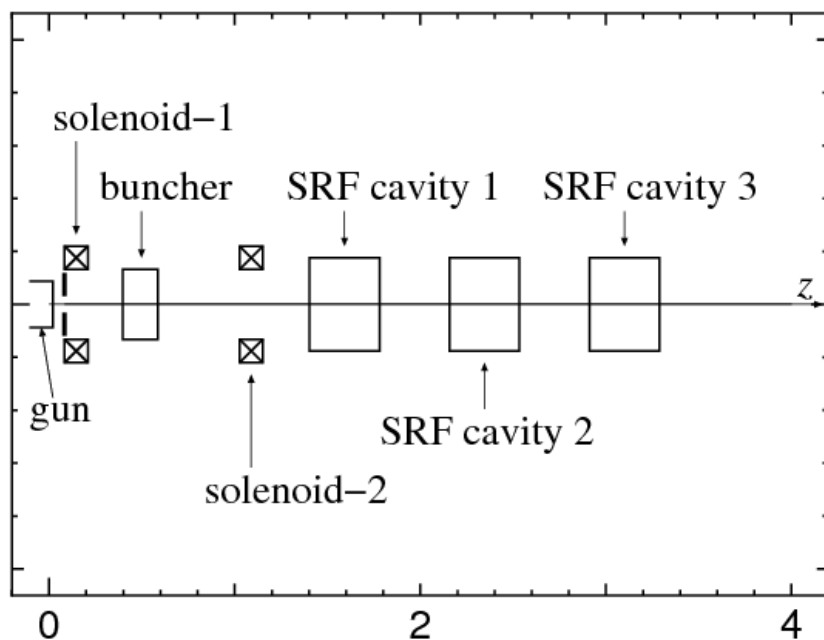
- (1) 位置オフセット: RF電磁場による横方向の収束力が変化
- (2) 角度オフセット: 加速電場の進行方向成分が横方向に回り込む⇒エミッタンス増大

計算用入射器ビームライン

- フォトカソードDC電子銃
- ソレノイド電磁石(2台)
- バンチャー空洞
- 2セル超伝導加速空洞(3台)

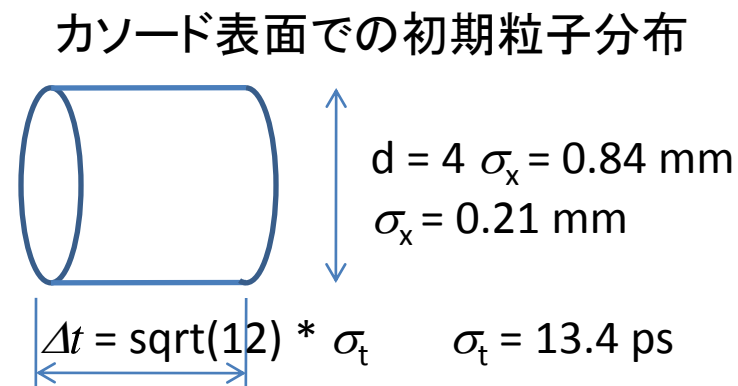
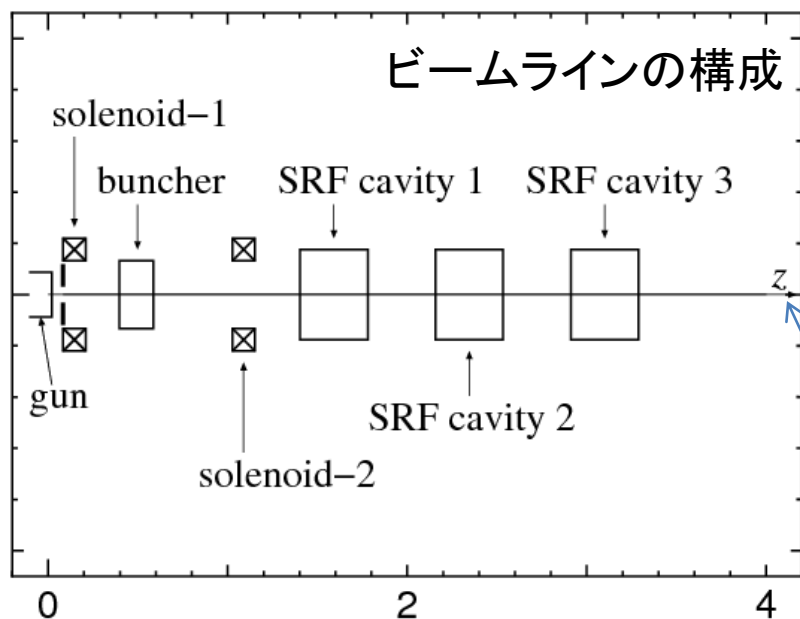
レイアウト

電子銃:	$z = 0 \text{ m}$
ソレノイド1:	$z = 0.15 \text{ m}$
バンチャー空洞:	$z = 0.50 \text{ m}$
ソレノイド2:	$z = 1.08 \text{ m}$
SRF1:	$z = 1.58 \text{ m}$
SRF2:	$z = 2.40 \text{ m}$
SRF3:	$z = 3.22 \text{ m}$
ビーム計測点:	$z = 4.12 \text{ m}$



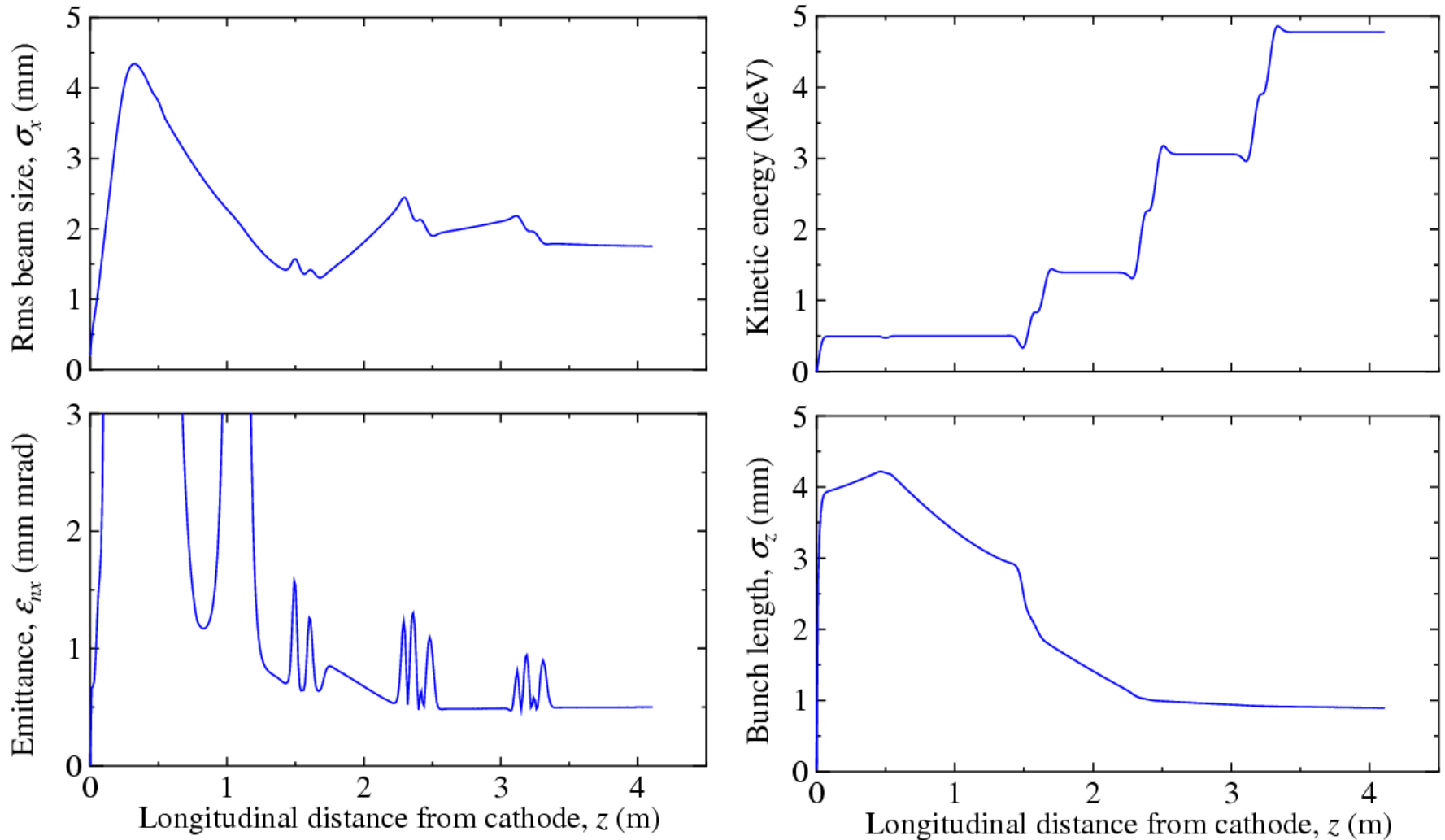
粒子トラッキングによる計算

- 空洞の設置位置と角度のオフセットを与えて、空間電荷効果を含む粒子トラッキング計算によって、その影響を調べる
 - 超伝導空洞出口で、0.5 mm mradのエミッタンスを与えるパラメタを使用
 - GPTを使用(空間電荷効果計算: 3D mesh)
1. 1台の空洞毎に位置と角度オフセットを与え、その影響を計算する
 2. 3台の空洞に位置オフセットと角度オフセットを与え、その影響を計算する



$z = 4.12 \text{ m}$ の位置で、ビームの中心位置、rms ビームサイズ、規格化エミッタンスを計算

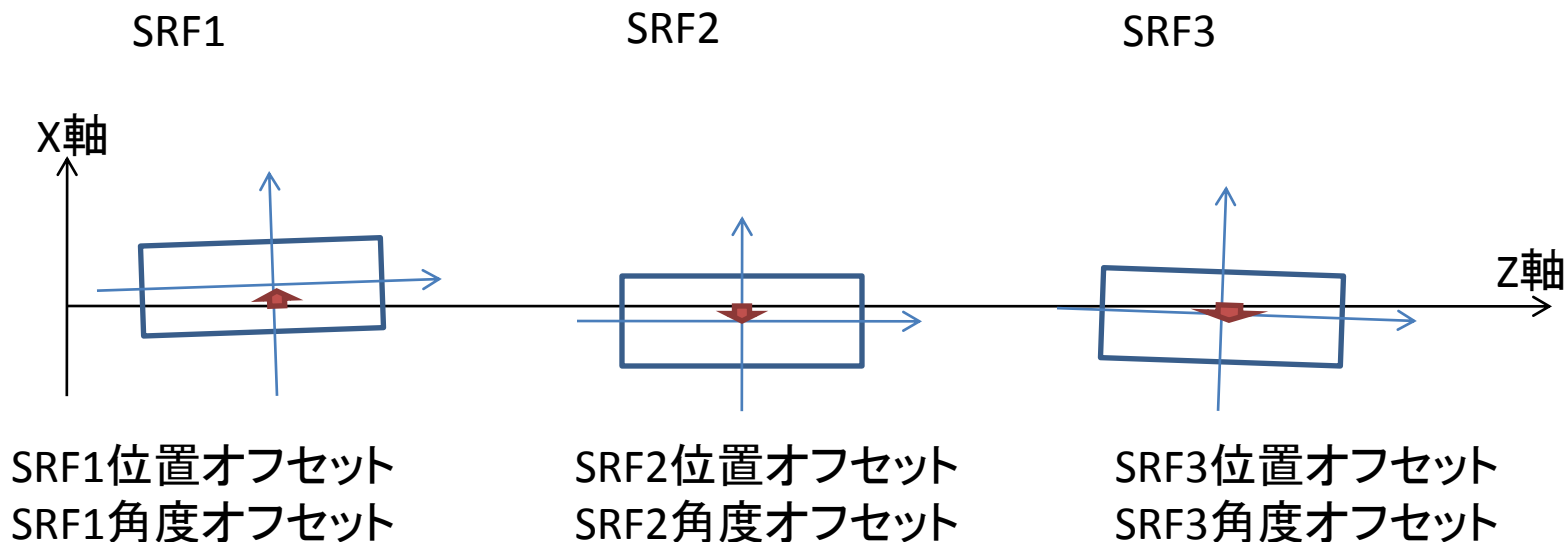
空洞のオフセットがない場合のビームエンベロープ



この状態を基本として、空洞の設置位置と角度をずらした時の影響を計算する

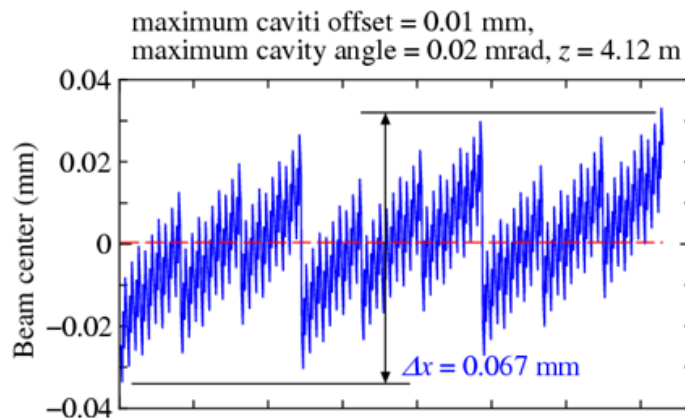
3台の空洞に位置と角度オフセットを与えた場合

- それぞれの空洞に対して、位置オフセットと角度オフセットを与える
- オフセットの与え方: 位置オフセット x と角度オフセット θ を決め、それぞれ $(-x, 0, x)$ と $(-\theta, 0, \theta)$ の3つずつの値を各空洞に設定する
- 設定するパラメタセットの数: $3^6 = 729$ (位置と角度を両方変更した場合)、 $3^3 = 27$ (位置、あるいは角度のみを変更した場合)

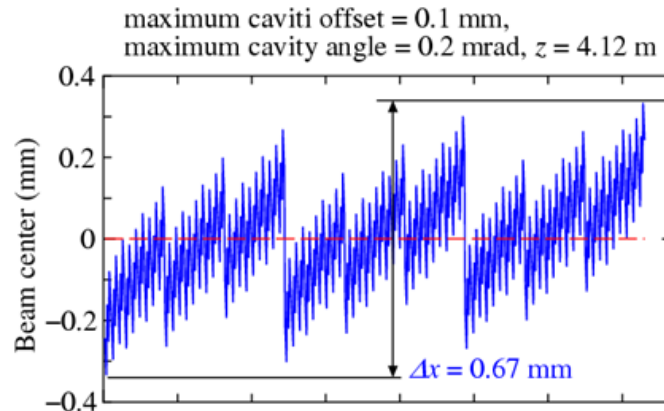


空洞の出口でのビーム位置のずれ (カソードから4.12mの位置)

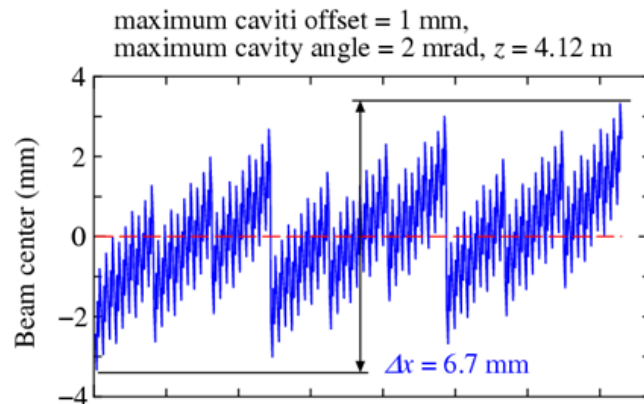
位置オフセット : 0.01 mm
角度オフセット : 0.02 mrad



位置オフセット : 0.1 mm
角度オフセット : 0.2 mrad



位置オフセット : 1 mm
角度オフセット : 2 mrad



横軸はパラメタ番号(1から729)



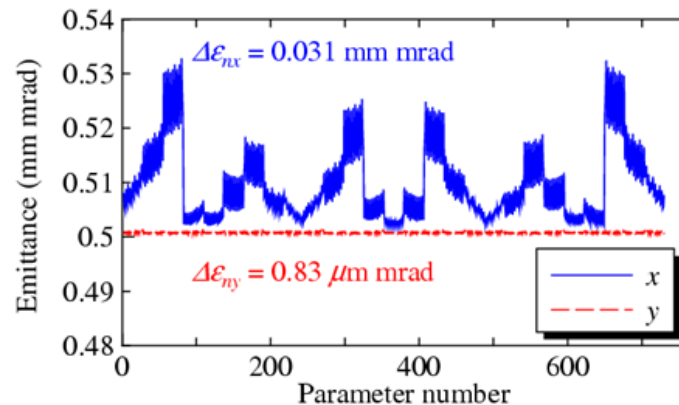
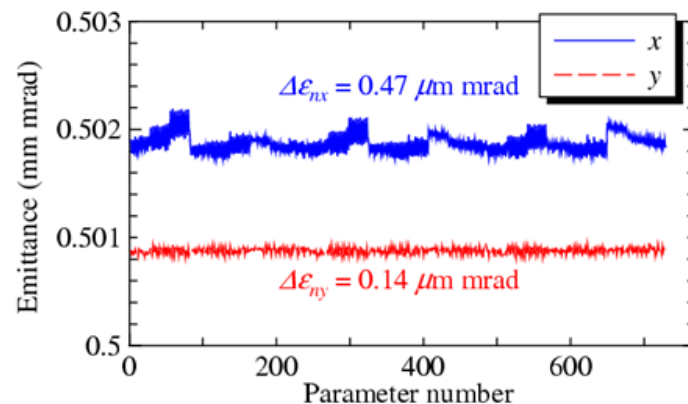
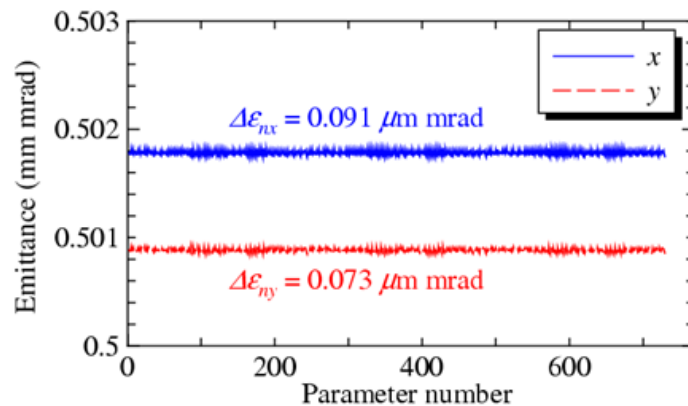
空洞の出口での規格化エミッタンス (カソードから4.12mの位置)

位置オフセット : 0.01 mm
角度オフセット : 0.02 mrad

位置オフセット : 0.1 mm
角度オフセット : 0.2 mrad

位置オフセット : 1 mm
角度オフセット : 2 mrad

横軸はパラメタ番号(1から729)



設置位置誤差の計算結果のまとめ

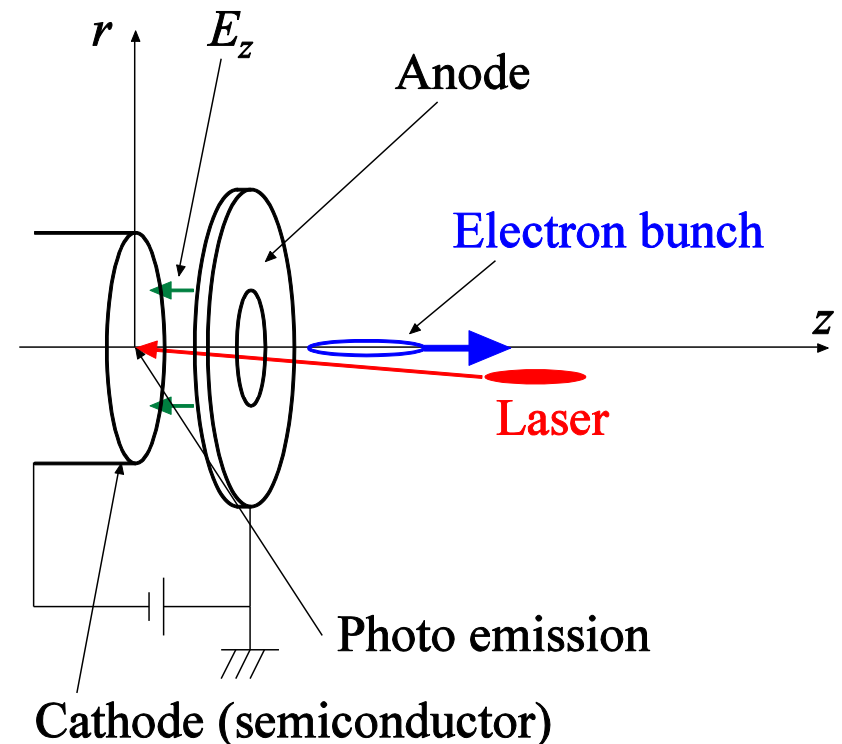
- 水平方向中心位置の変化(最大値)
 - (0.01 mm, 0.02 mrad) : 0.067 mm
 - (0.1 mm, 0.2 mrad) : 0.67 mm
 - (1.0 mm, 2.0 mrad) : 6.7 mm
 - 水平方向ビームサイズの変化(最大値), 1.75 mm に対して
 - (0.01 mm, 0.02 mrad) : 0.074 μm
 - (0.1 mm, 0.2 mrad) : 0.21 μm
 - (1.0 mm, 2.0 mrad) : 1.7 μm
 - エミッタンスの変化(最大値), 0.5 mm mrad に対して
 - (0.01 mm, 0.02 mrad) : 0.091 $\mu\text{m mrad}$
 - (0.1 mm, 0.2 mrad) : 0.00047 mm mrad
 - (1.0 mm, 2.0 mrad) : 0.031 mm mrad
 - バンチ長の変化(最大値), 0.89 mm に対して
 - (0.01 mm, 0.02 mrad) : 0.0056 μm
 - (0.1 mm, 0.2 mrad) : 0.16 μm
 - (1.0 mm, 2.0 mrad) : 1.1 μm
- 水平方向中心位置の変化に最も影響する
ビームサイズ、エミッタンス、バンチ長への影響はそれほど大きくない
- 位置オフセット 0.1 mm,
角度オフセット 0.2 mrad
以下に抑えられれば、水平方向ビーム中心位置のずれは補正可能な値となりそう

電子銃カソード形状の影響

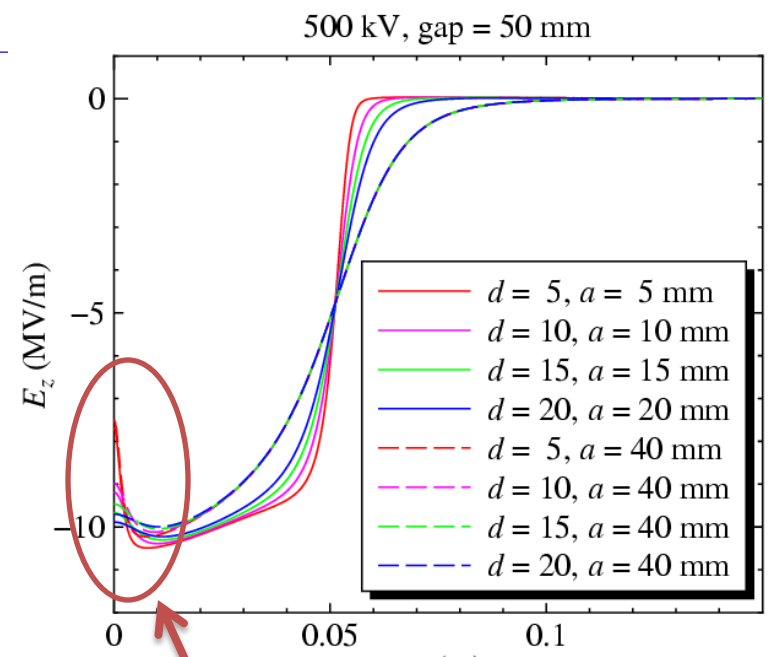
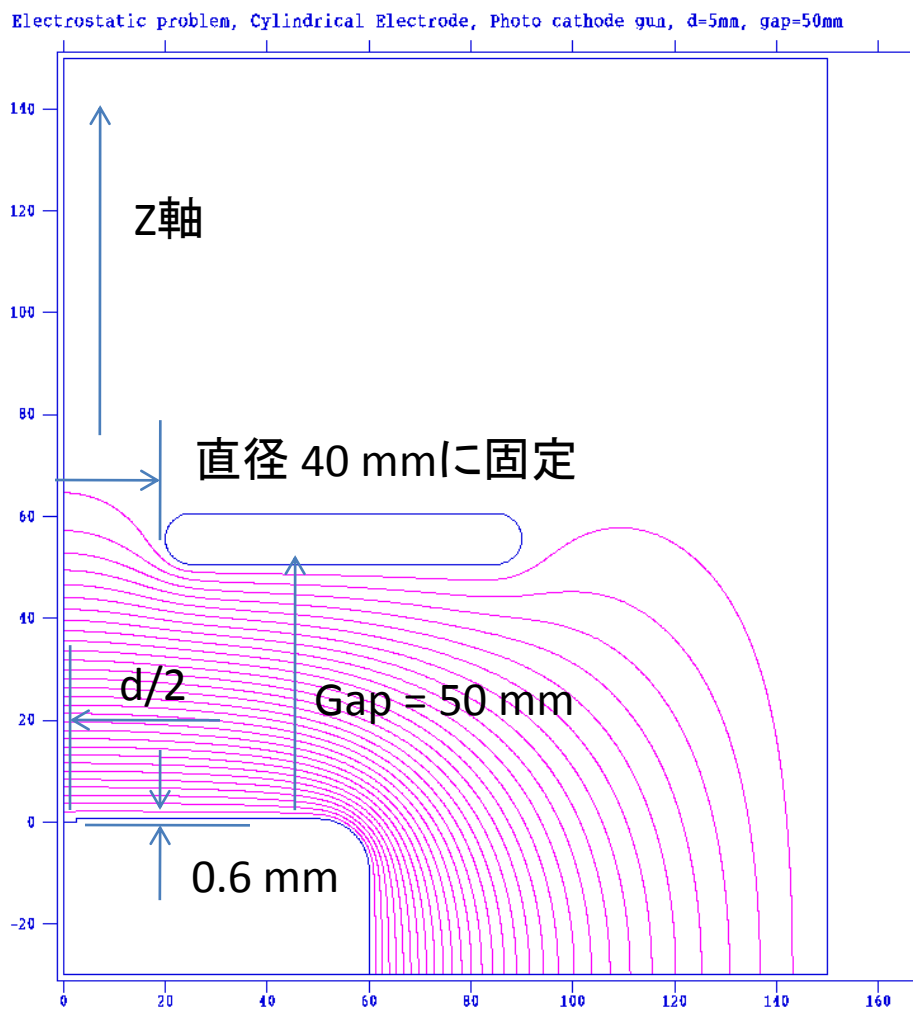
カソードの形状によるビームの質への影響

- 電子銃のカソードの役割:「電子ビームの生成」+「ビームの収束」
- カソード直後ではエネルギーが低いため、空間電荷効果による発散力が強く働く
- これを抑えるために、カソード形状に凹みを与えることによって、電子ビームに収束作用を与えることができる
- 一方、強い収束作用を与えると、小さいエミッタンスは得られるかもしれないが、カソード表面のレーザーの照射位置にビームの性質が敏感になる恐れがある (レーザーの位置が少しずれただけでエミッタンスが増大しては困る)

- ここでは、次のことを調べた
 1. カソードの凹みの直径の大きさによって、どの程度収束力が変化するか？
 2. エミッタンスに与える影響はどの程度か？
 3. レーザーの照射位置の誤差に対しての耐性はどのくらいあるか？



Gun の形状と1次元電場分布

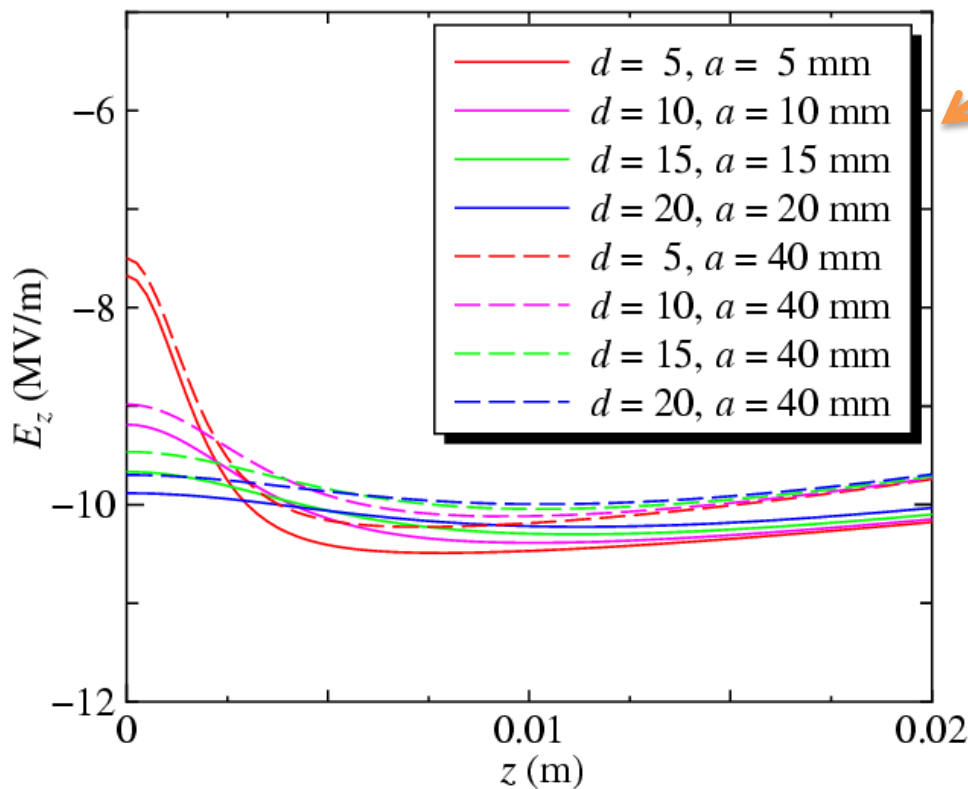


z軸上の1次元電場分布

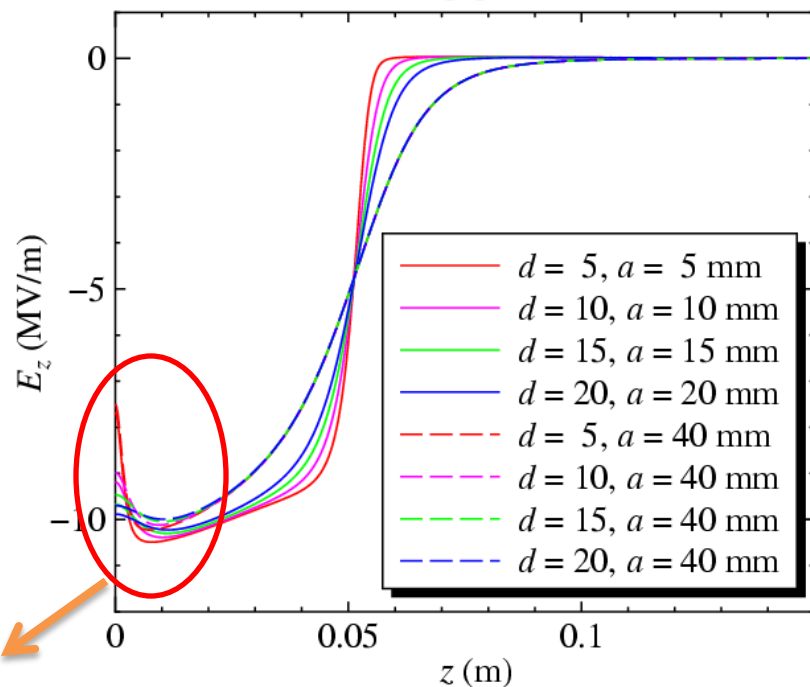
カソード凹みの直径の影響はここに現れる

カソード近傍の拡大図

500 kV, gap = 50 mm



500 kV, gap = 50 mm

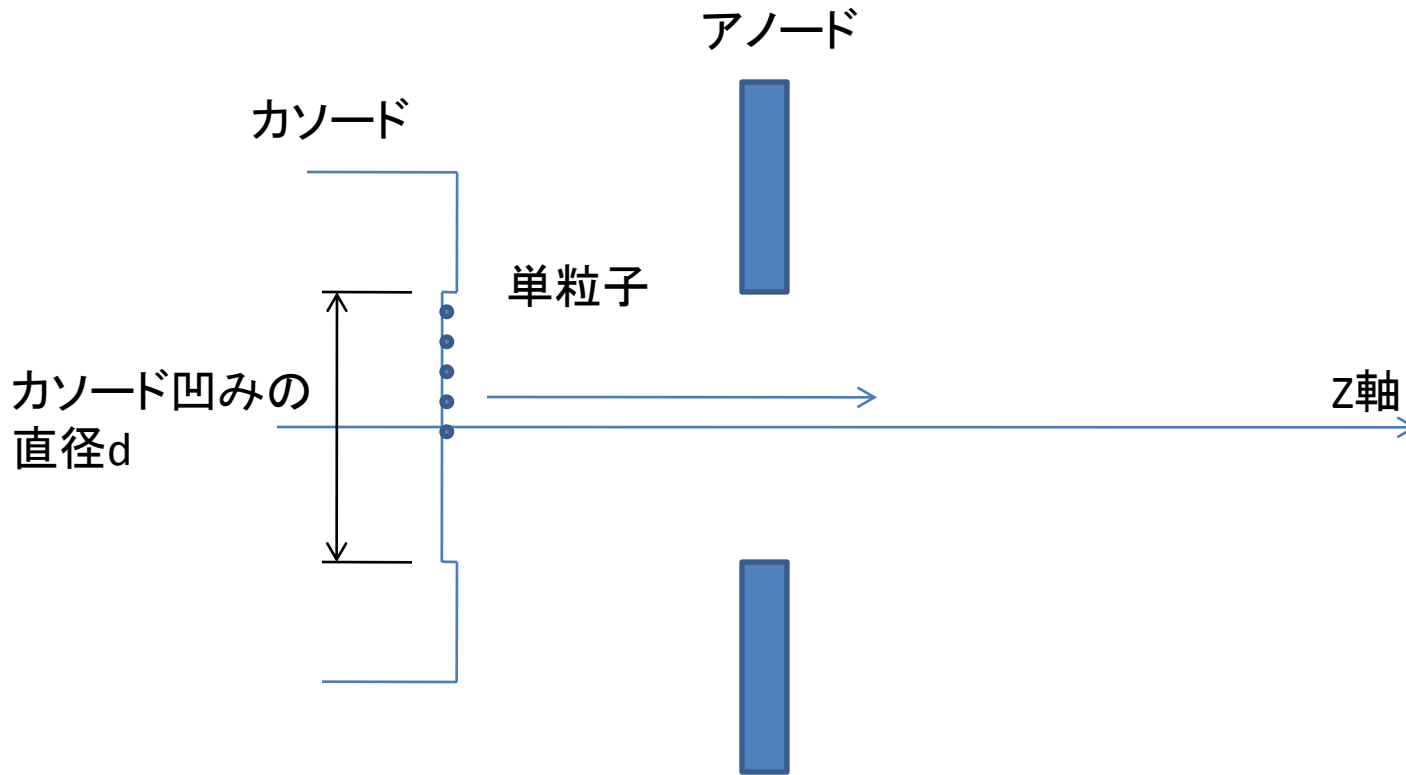


カソードの凹みの直径の影響

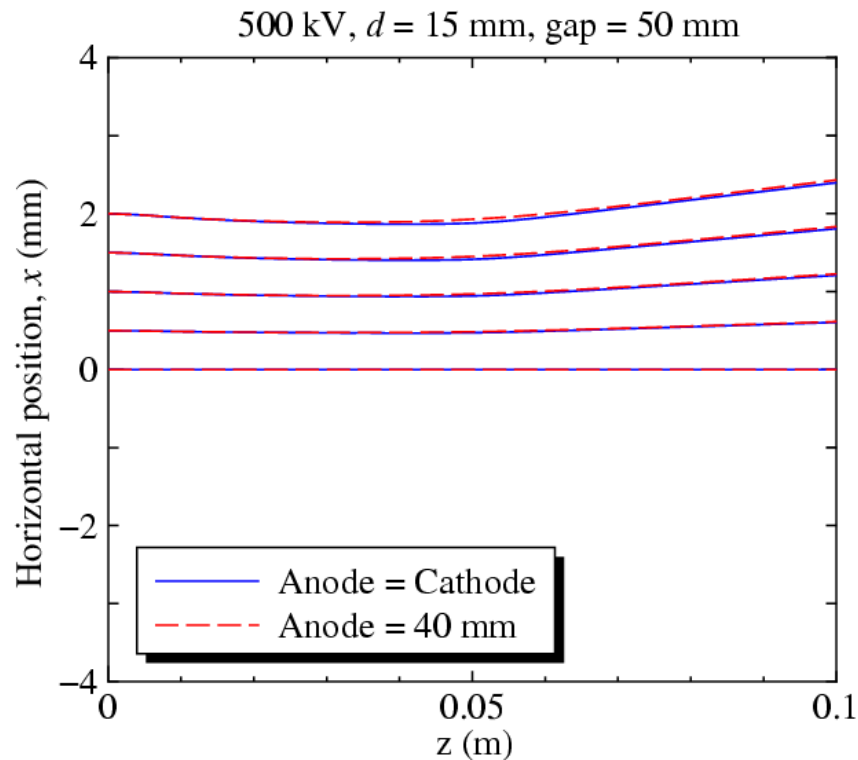
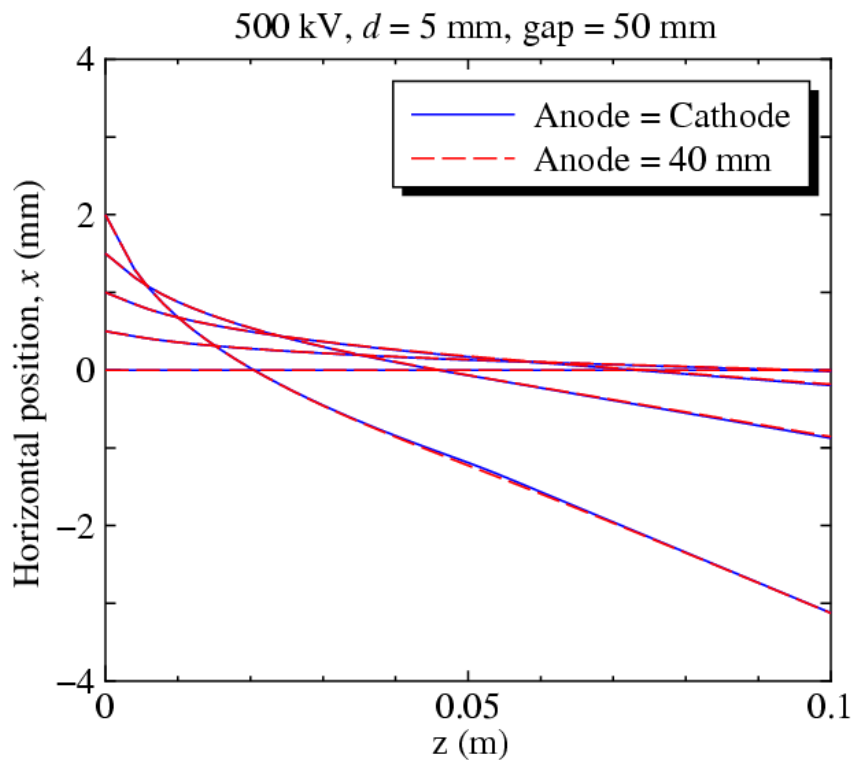
- (1) 凹みの直径が小さい方が、カソード直後の電場の変化量(dE/dz)が大きくなる
- (2) dE/dz が大きい方が収束力が強くなる \Rightarrow dが小さい方が強い収束力になるはず

単粒子のトラッキングでこれを検証する

単粒子のトラッキング



カソード表面に単粒子をオフセットさせて配置
電子銃の作る電場の下での軌道を計算
粒子間の空間電荷効果はなし、ソレノイド磁場もなし
カソード表面から、 $z=0.1$ m まで計算



カソードの凹み直径 $d = 5$ mm

強い収束力が働く

電子銃の中で過収束になる

カソードの凹み直径 $d = 15$ mm

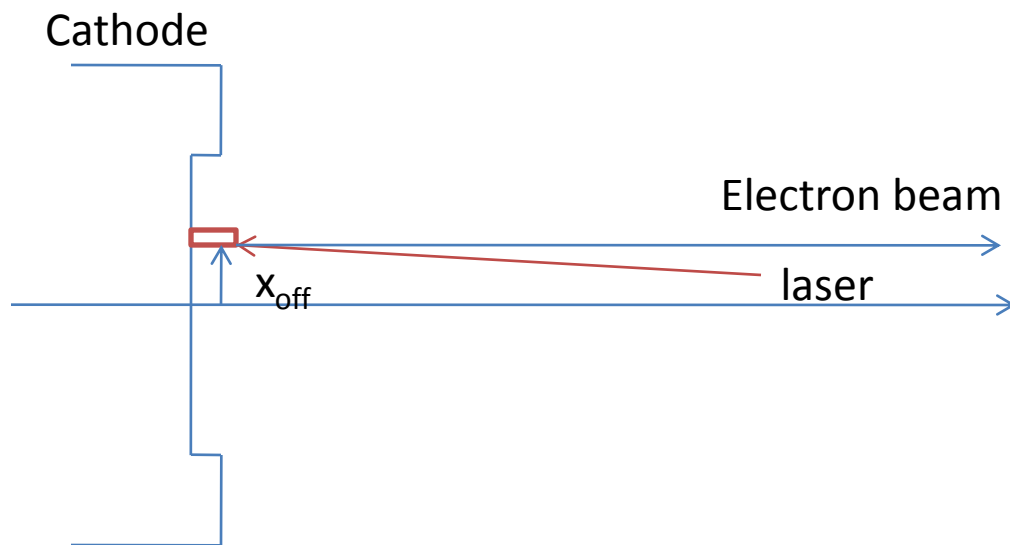
$d = 5$ mmの場合に比べて、収束力は弱くなる



カソード凹みの直径が小さい方が、カソード直後の収束力が強いことを確認できた
では、エミッタンスに対する影響は？

レーザー位置のオフセットの影響

- 最小ビームサイズを与えるソレノイドの強さに対して、レーザー照射位置が変化したときの影響を計算する
- カソード表面でレーザー照射位置をずらしながら、 $z = 1.0 \text{ m}$ の位置で、ビームの中心位置、ビームサイズ、規格化エミッタンスを計算する



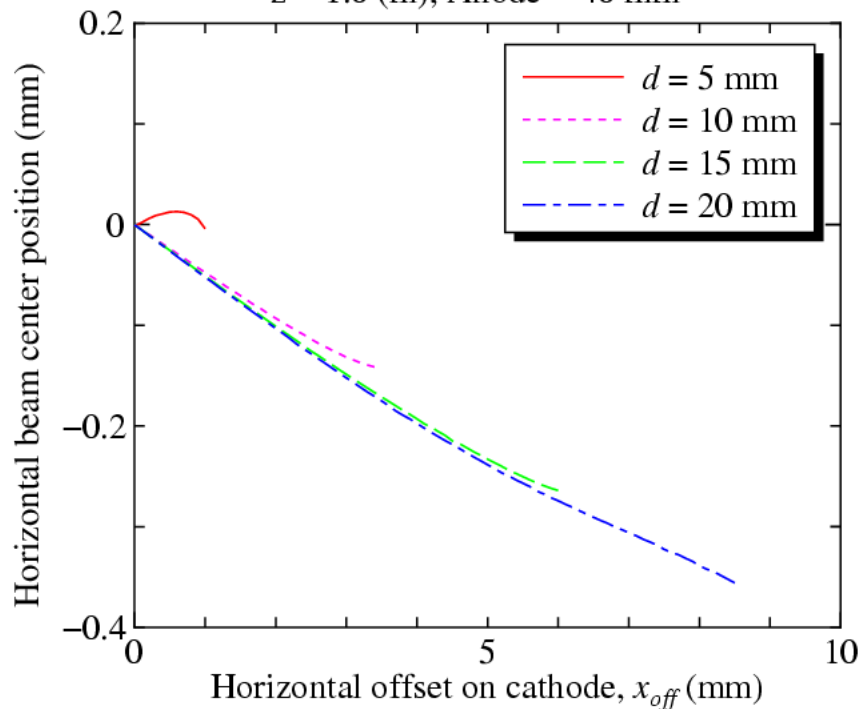
最小ビームサイズを与えるソレノイドの強さ

- (1) $d = 5 \text{ mm}$: $\text{sol} = 0.039 \text{ (T)}$
 $x_{\text{rms}} = 0.605 \text{ mm}$
- (2) $d = 10 \text{ mm}$: $\text{sol} = 0.037 \text{ (T)}$
 $x_{\text{rms}} = 0.363 \text{ mm}$
- (3) $d = 15 \text{ mm}$: $\text{sol} = 0.037 \text{ (T)}$
 $x_{\text{rms}} = 0.306 \text{ mm}$
- (4) $d = 20 \text{ mm}$: $\text{sol} = 0.037 \text{ (T)}$
 $x_{\text{rms}} = 0.281 \text{ mm}$

ビームの中心位置の変化

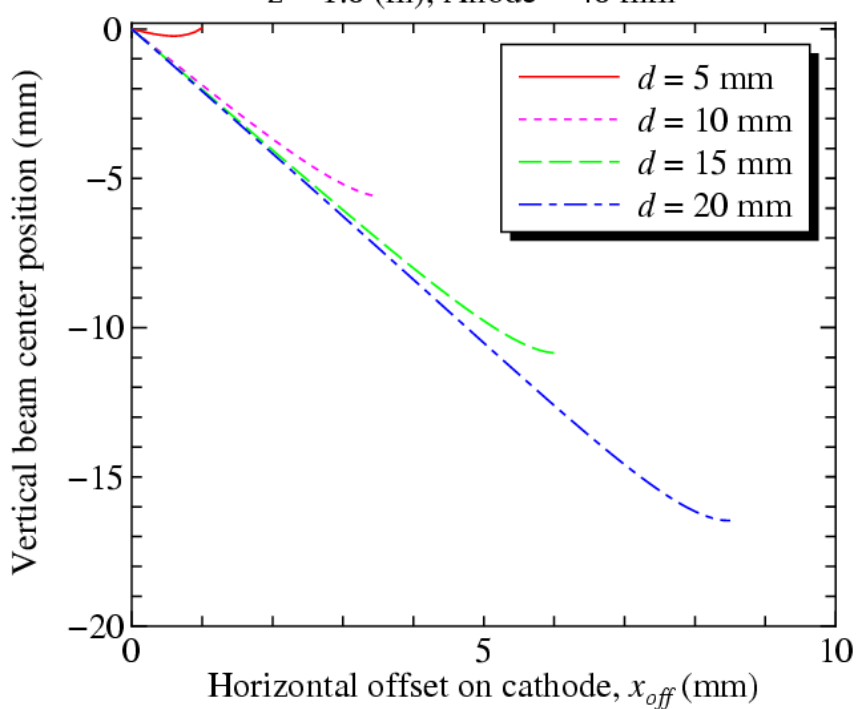
水平方向

$z = 1.0$ (m), Anode = 40 mm



垂直方向

$z = 1.0$ (m), Anode = 40 mm

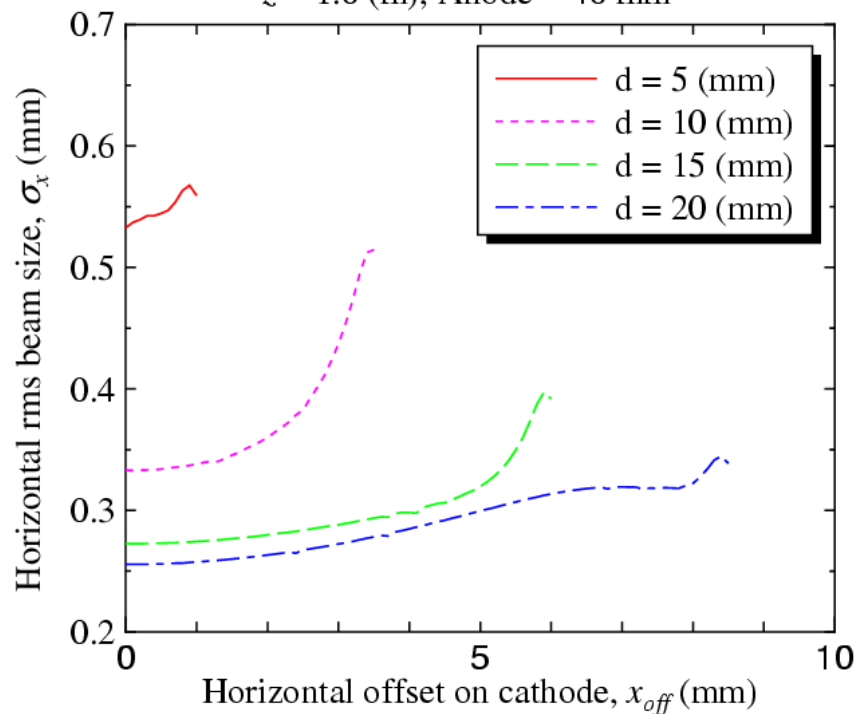


レーザー照射位置の水平方向のずれは、 $z = 1.0$ mの位置で大きく垂直方向に回り込む(ソレノイド磁場による回転の影響)

ビームサイズの変化

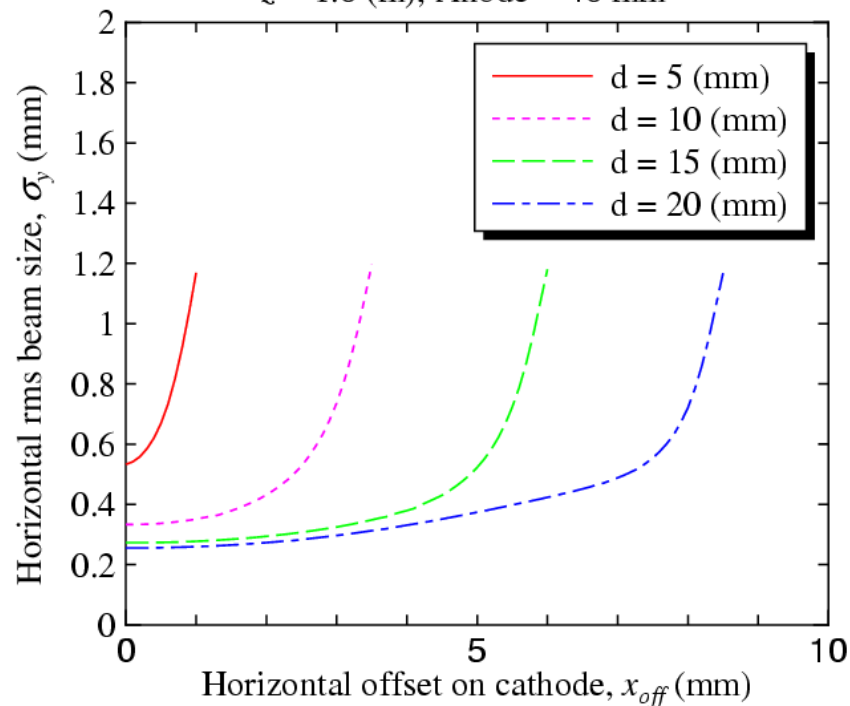
水平方向

$z = 1.0$ (m), Anode = 40 mm



垂直方向

$z = 1.0$ (m), Anode = 40 mm



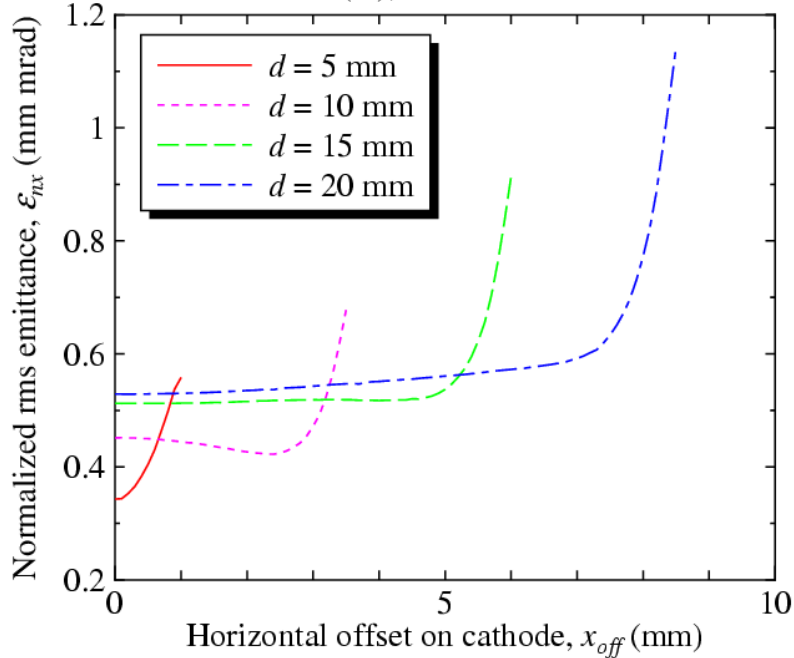
凹み直径が小さい方が、小さいレーザー照射位置のオフセットでも急激にビームサイズが増大する

この影響は水平方向よりも垂直方向に顕著に現れる

規格化エミッタンスの変化

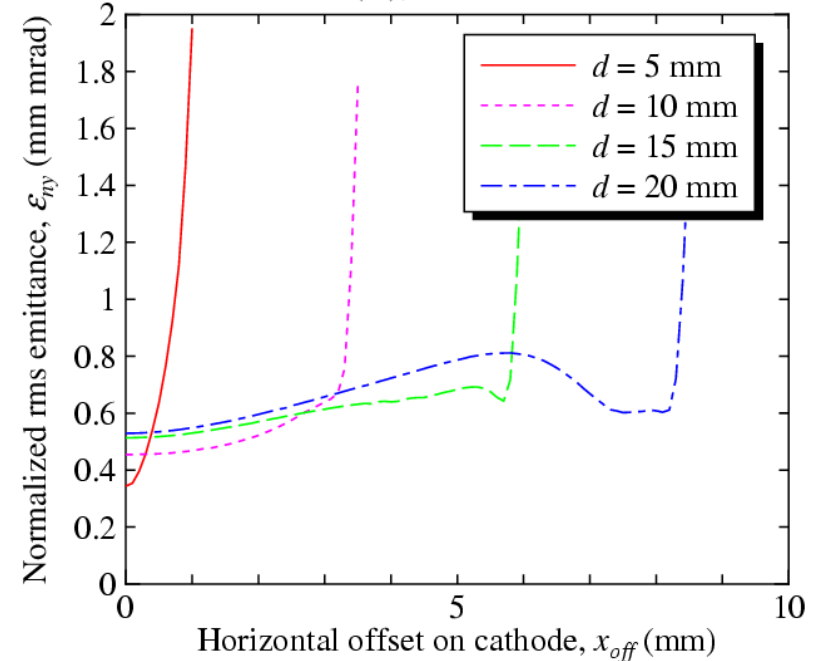
水平方向

$z = 1.0$ (m), Anode = 40 mm



垂直方向

$z = 1.0$ (m), Anode = 40 mm



エミッタンスは、凹み直径が小さい方がレーザー照射位置がずれた時急激に増大する
水平方向よりも垂直方向の方がこの影響が顕著に現れる

まとめ

- カソード凹みの直径を変更して、Poisson/Superfishを用いて2次元電場分布を作成した。
- カソード凹みの直径が小さい方が、カソード直後で電場の変化が急に生じる(収束力が強く働く)
- Gun + Solenoid ビームラインで、初期ビーム分布のビームに対して、ビームサイズ、規格化エミッタンスを計算し、ソレノイドスキャンを行った。
- 凹み直径が小さい方が、良いエミッタンスを与えることを確認した。
- 最小ビームサイズを与えるソレノイドの強さに対して、レーザー照射位置がずれたときの影響を計算した。
- 照射位置のずれの影響は、規格化エミッタンスに顕著に現れた。凹み直径が小さい場合には、少しずれただけでも急激にエミッタンスが増大する。
- この影響は、レーザー照射位置をずらした水平方向よりも垂直方向に顕著に現れる。これは、ソレノイド磁場による回転の影響と考えられる。
- 最小エミッタンスを求めるには、凹み直径を小さくした方がよさそうだが、照射位置のずれに対して非常に敏感であり、実際の運転の際には調整が大変そう。
- これらのことを考慮して、凹み直径15 mmを採用することとした

cERL入射部の検討状況

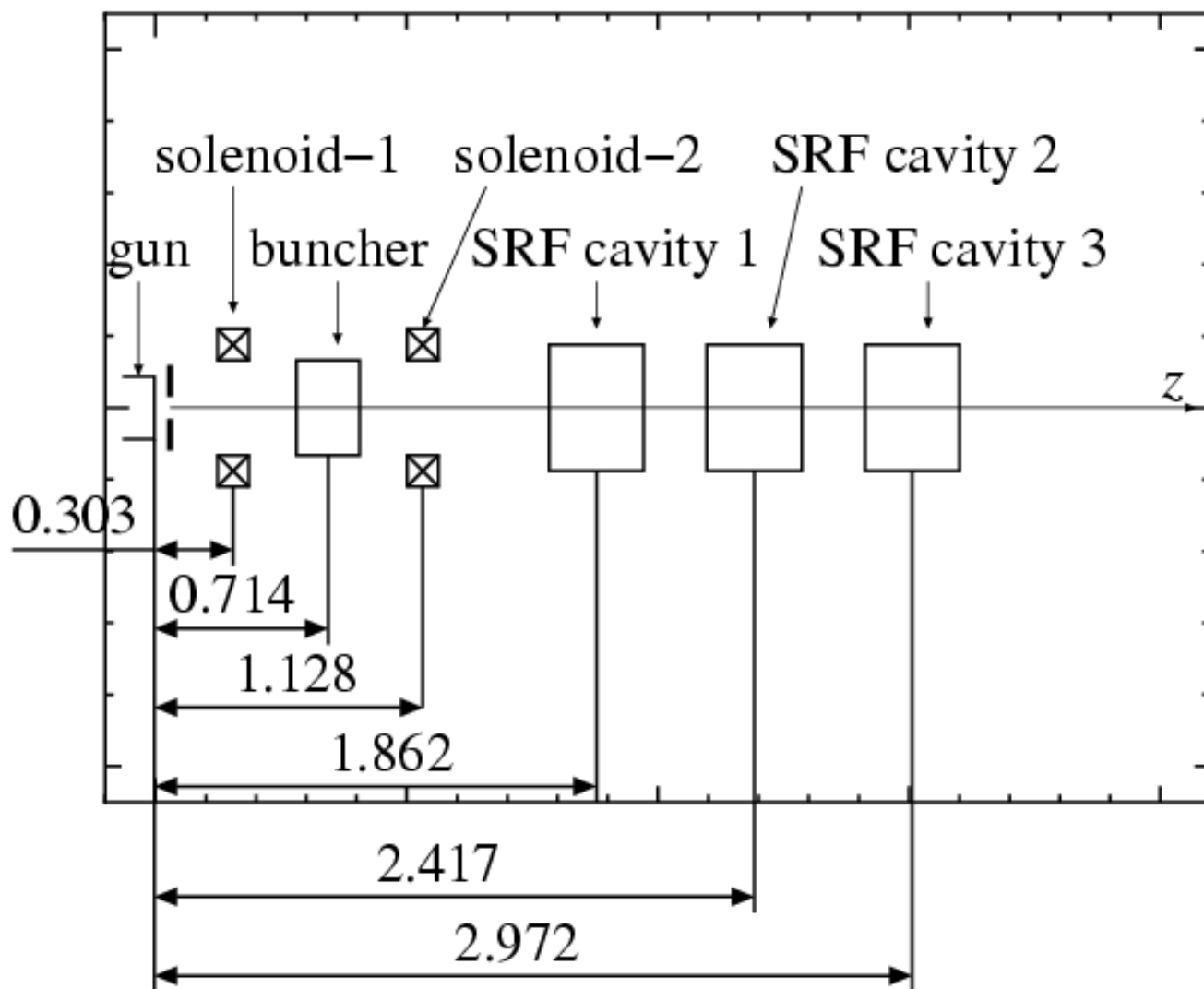
cERL入射部の検討

- cERL入射部の具体的な検討を開始した
- 週に1度、打ち合わせを開催
- 検討を開始した項目(武藤、本田、三橋、宮島)
 - 全体配置:超伝導空洞手前までコーネル大学の配置を第一次案とする(シミュレーションで電子銃に合わせた位置の最適化を行う)
 - ソレノイド電磁石(来年度のJST予算のJAEA分でJAEAが製作予定、武藤さんが設計中)
 - BPM
 - スクリーンモニター
 - レーザー導入チェンバー
 - レーザーテスト(環境を整える必要がある)
 - 真空(ポンプの位置が制限されるが十分な排気速度が得られるか?)
 - AR南棟でのGunから超伝導空洞手前までのビームラインでのテスト、電子銃テスト施設(GTF)の検討(本田さん)

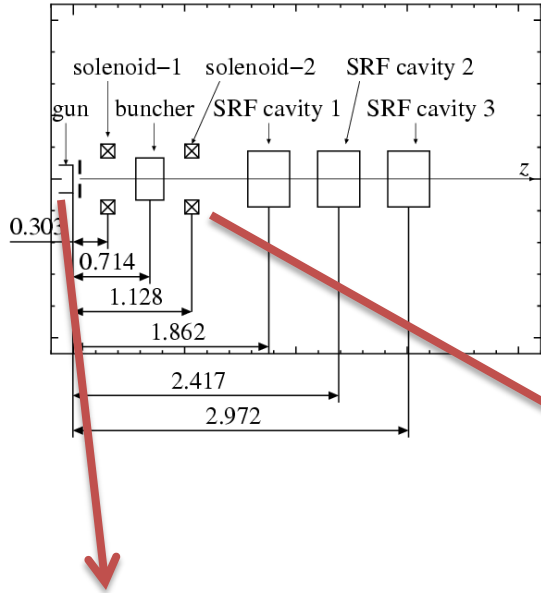
入射器のレイアウト

- 超伝導空洞まで:コーネル大学の配置を第一案とする
- クライオモジュール部:野口さんから頂いた図面を基に空洞を配置
- この基本配置の下で、GPTを用いたシミュレーションを開始した
- シミュレーションの目的
 - 小さいエミッタンス、短いバンチ長を与えるパラメタの探索
 - 機器配置の最適化(ソレノイド、バンチャー空洞の位置)

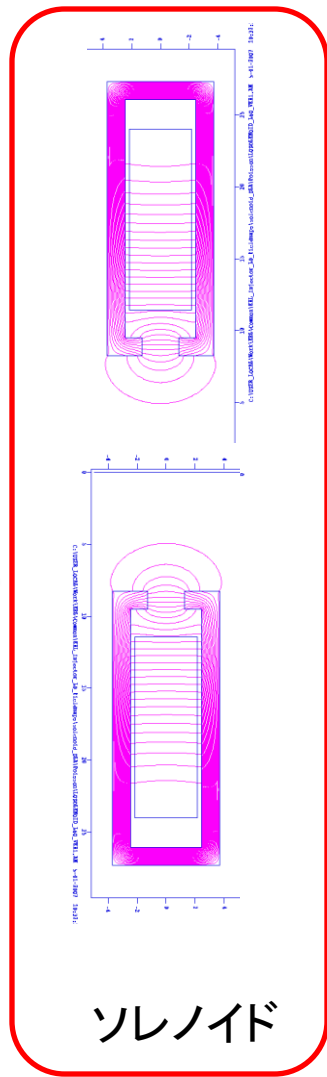
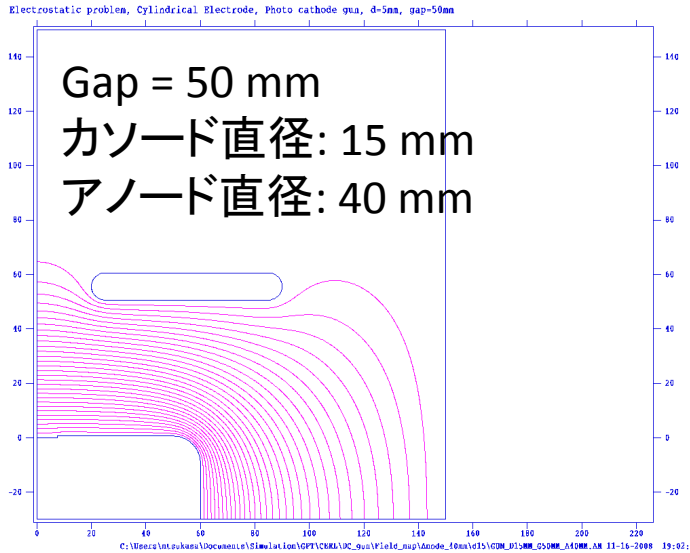
CERL injector design 1, 2008/11/28



CERL injector design 1, 2008/11/28

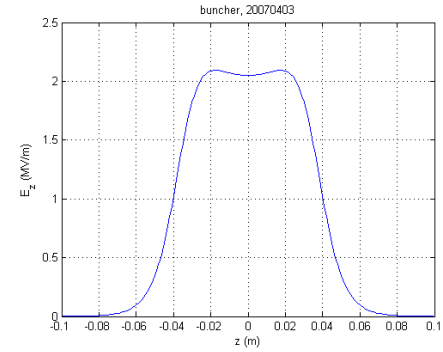


DC電子銃

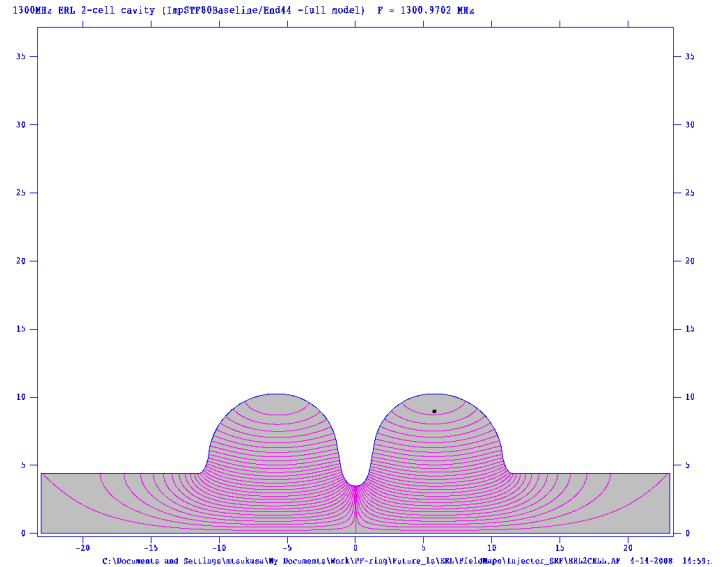


ソレノイド

バンチャー空洞の電場分布



超伝導空洞



シミュレーションのステップ

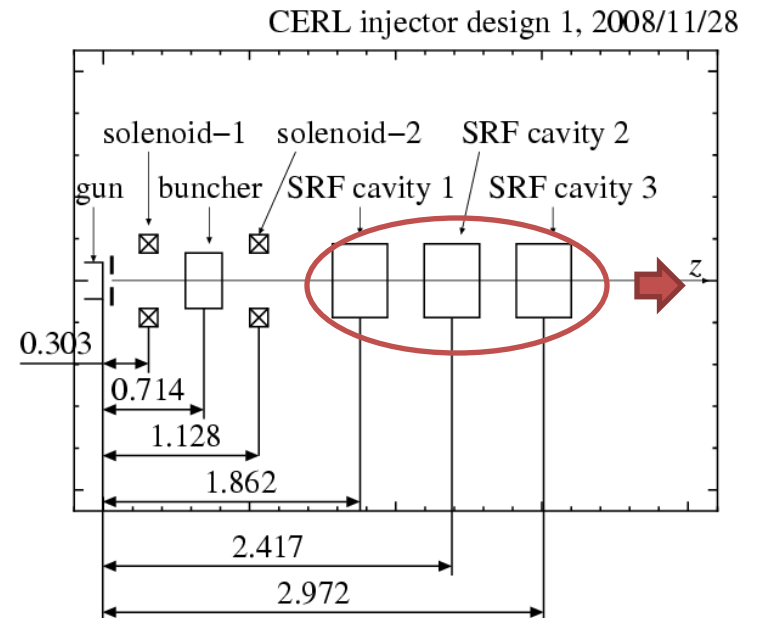
1. 超伝導空洞出口までの計算(機器配置は固定)
2. 超伝導空洞出口までの計算(機器配置を可変)
3. 超伝導空洞出口までの計算(各機器の設置誤差の影響の評価)
4. 合流部での計算(3つの角度について計算)
5. 電子銃から合流部出口までの計算
6. 電子銃から周回部空洞出口までの計算

計算の現状 (2008年12月11日)

- 「2. 超伝導空洞出口までの計算 (機器配置を可変)」の計算途中
- マクロ粒子数: 5k
- バンチ電荷: -80pC
- 初期粒子分布: ビア缶分布
- 初期エミッタンス: $kT = 35 \text{ meV}$
- $z = 4.5 \text{ m}$ の位置で物理量を計算

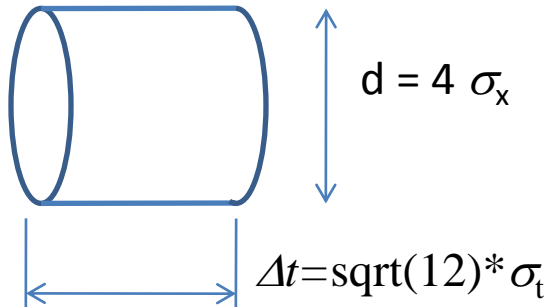
最適化計算では、二通りのクライオモジュールの位置で計算

- (1) 上記の配置 ($Dz = 0 \text{ m}$)
- (2) 上記の配置からクライオモジュールを0.5m後方にずらす ($Dz = 0.5 \text{ m}$)



初期分布とパラメタ可変範囲

カソード表面での初期粒子分布: ビア缶



パラメタ可変範囲

- ビームサイズ: 0.1 to 2.0 mm
- レーザーパルス長: 5 to 30 ps
- ソレノイド1の磁場: 0.01 to 0.1 T
- ソレノイド2の磁場: 0.01 to 0.1 T
- バンチャー空洞の加速電場: 0.1 to 3.0 MV/m
- 1番目SRFの加速電場: 5 to 15 MV/m
- 2番目SRFの加速電場: 10 to 15 MV/m
- 3番目SRFの加速電場: 15 MV/m (固定)
- バンチャー空洞の位相: -90度
- 1番目SRFの位相: -60 to 10度
- 2番目SRFの位相: -30 to 10度
- 3番目SRFの位相: -10 to 10度
- ソレノイド1の中心位置: 0.3 to 0.4 m
- ソレノイド2の中心位置: 1.128 to 1.228 m
- バンチャー空洞の中心位置: 0.704 to 0.724 m

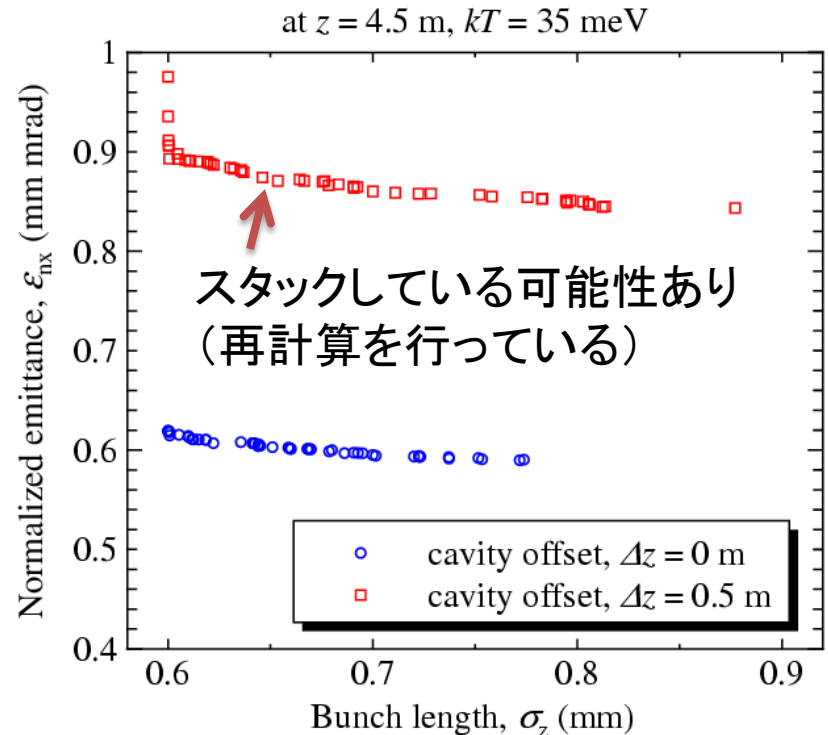
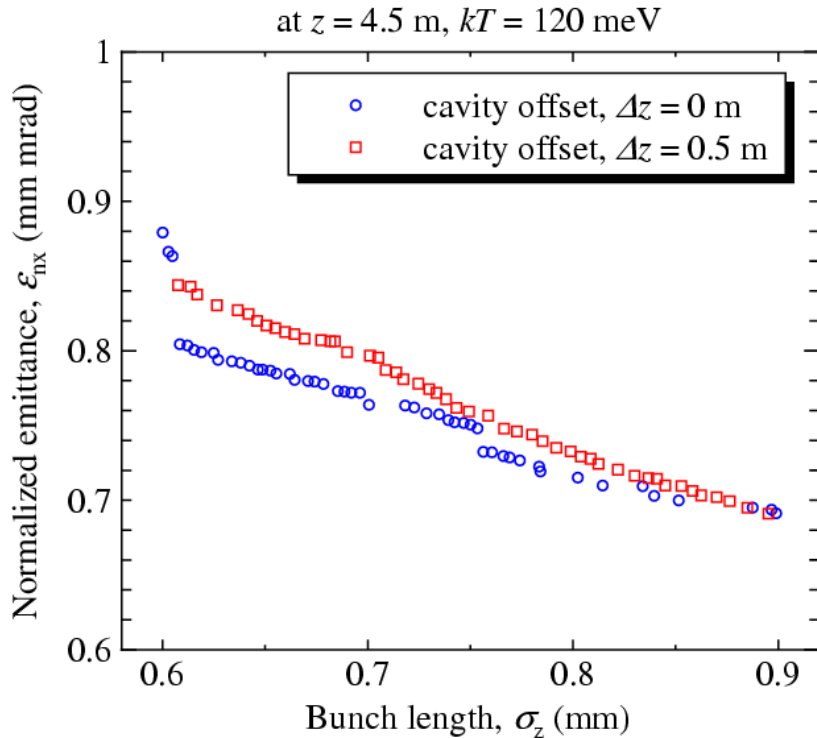
加速空洞の位相の定義

すべて、最大加速を与える位相からのオフセットとして与える

-90であれば、最大加速を与える位相から-90度とする

Emittance vs. bunch length

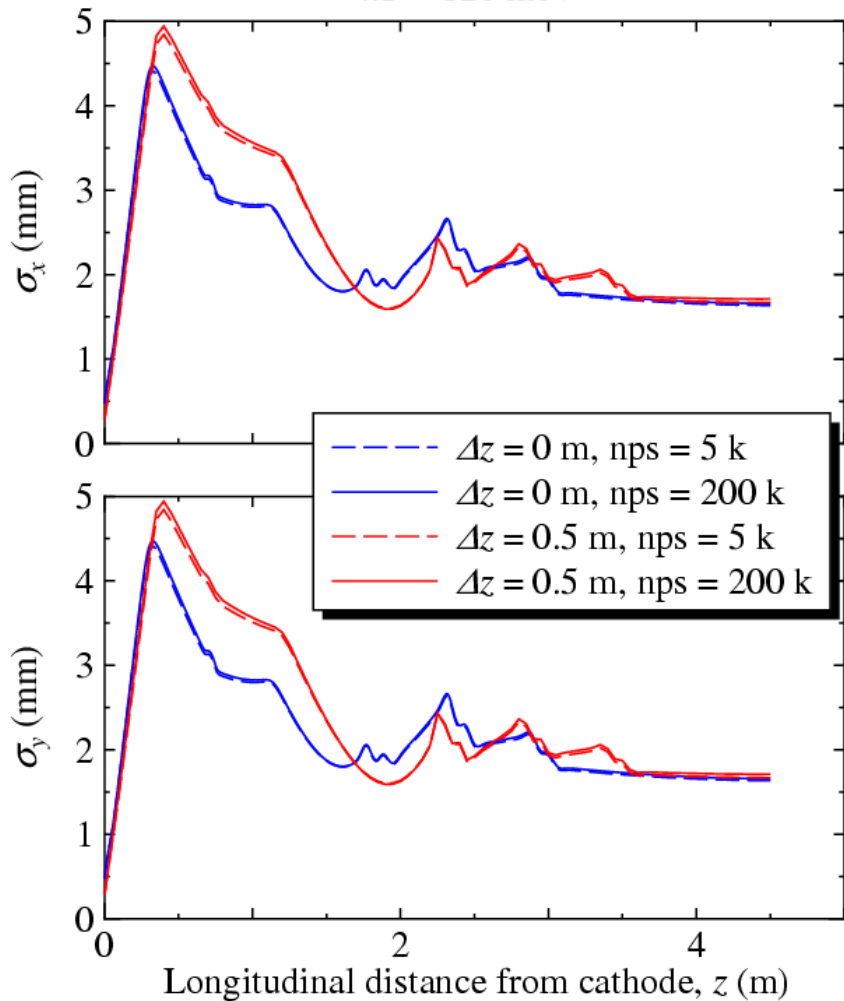
超伝導空洞の後の位置で計算(カソードから4.5mの位置)



空洞の進行方向位置をずらさない方が、小さいエミッタンスを与えそうだが、その影響はそれほど大きくないかもしれない
(空洞を後方にずらしても大丈夫そう)

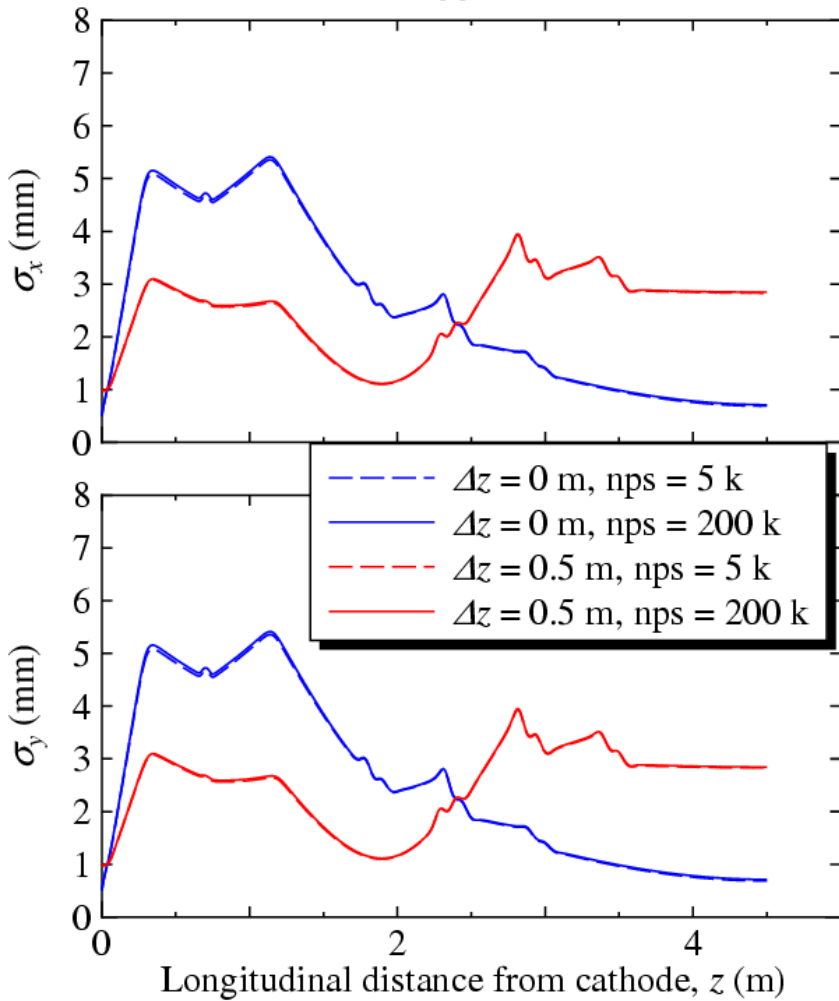
横方向ビームサイズ

$kT = 120 \text{ meV}$



1番目のソレノイドで最大値
ビーム直径で、20mm程度

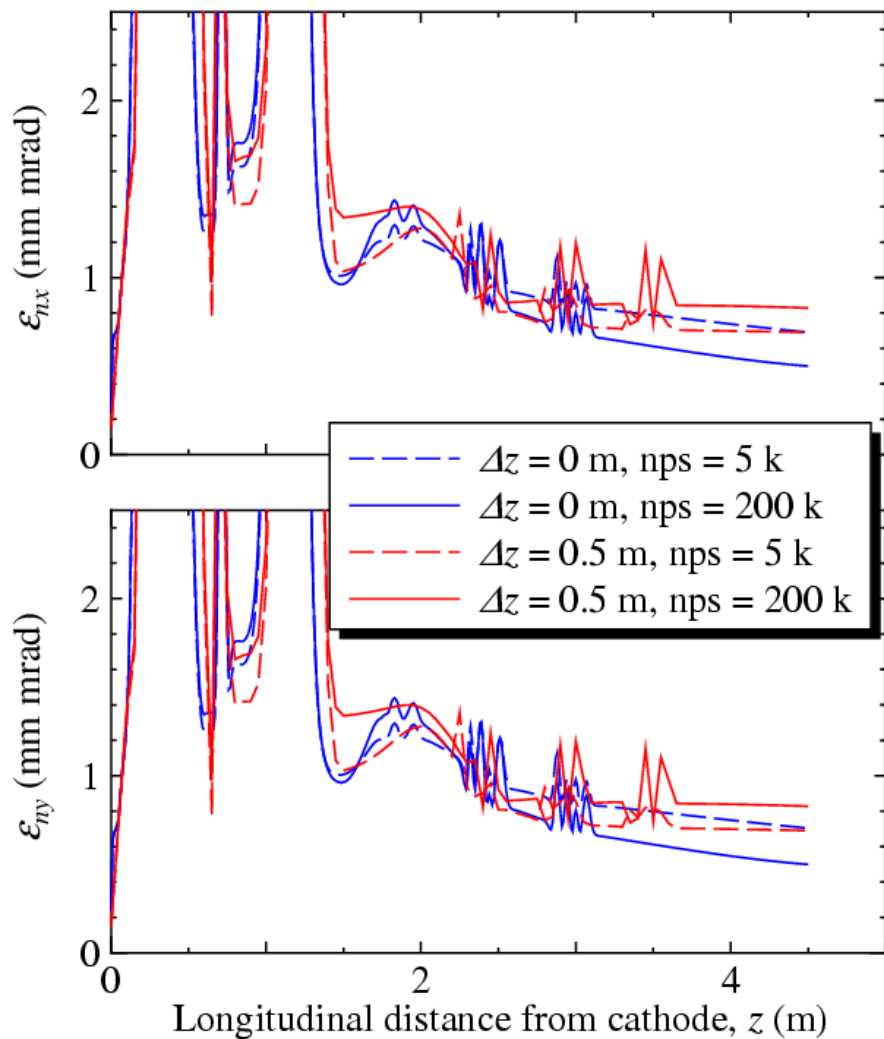
$kT = 35 \text{ meV}$



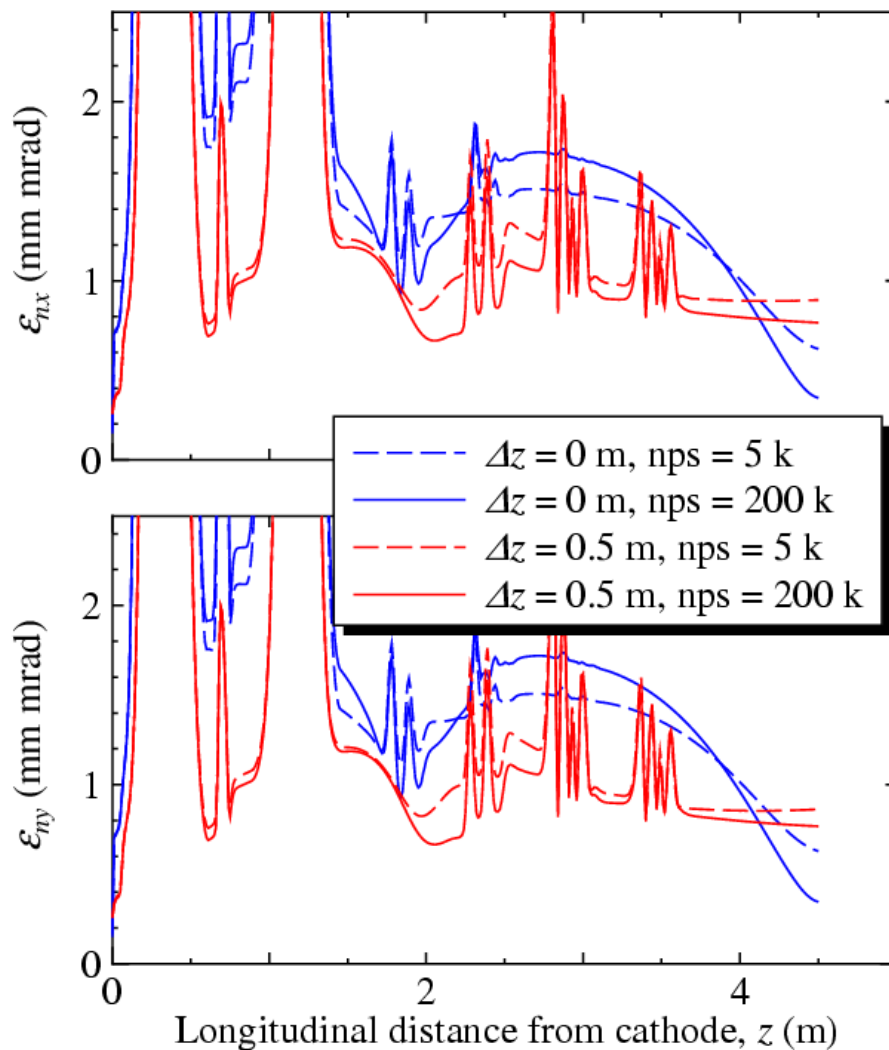
2番目のソレノイドで最大値
ビーム直径で、22mm程度

規格化エミッタンス

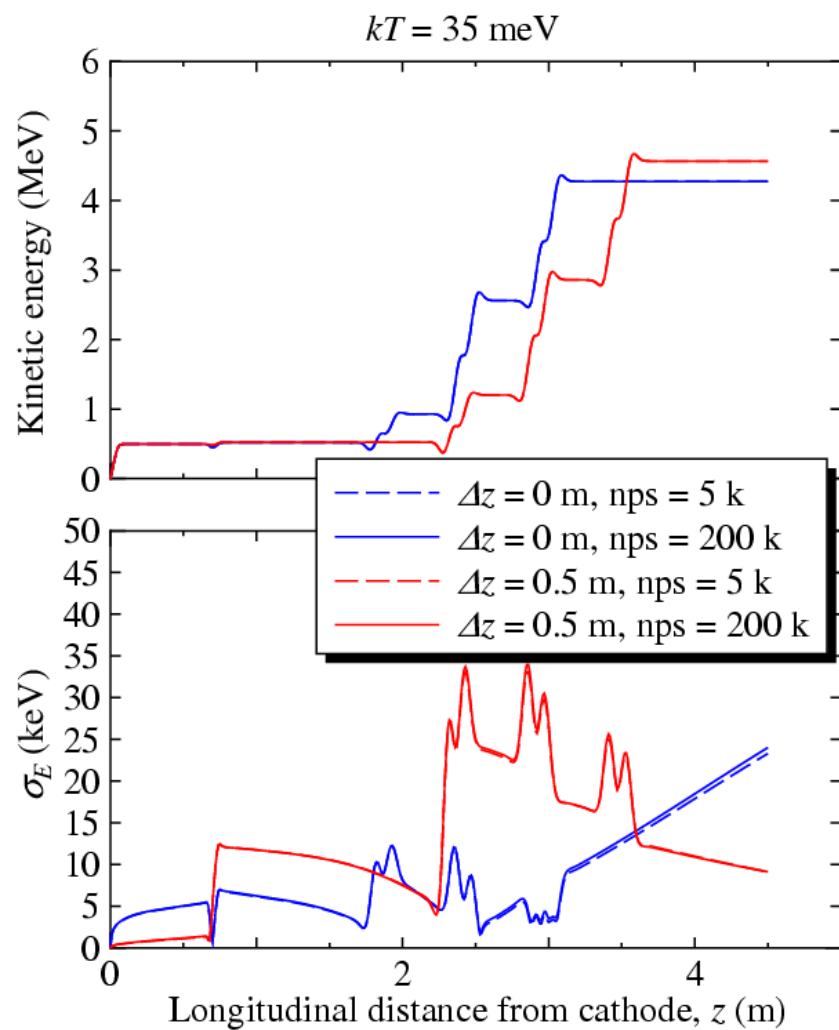
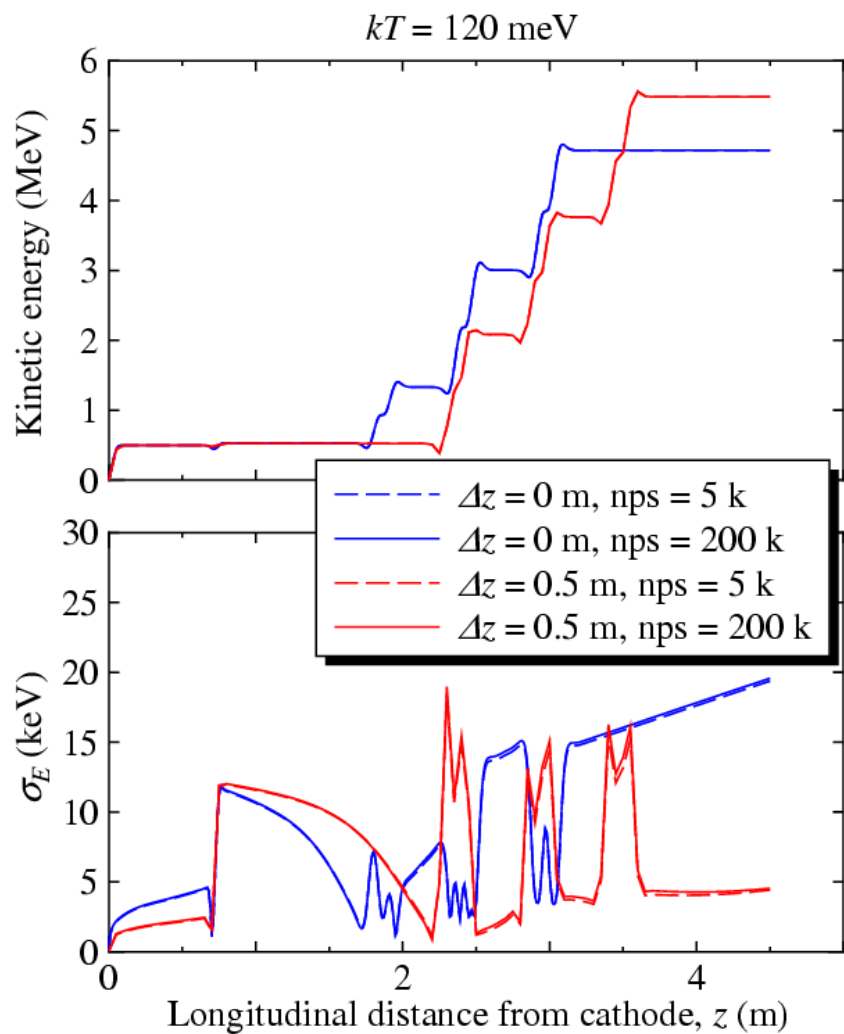
$kT = 120 \text{ meV}$



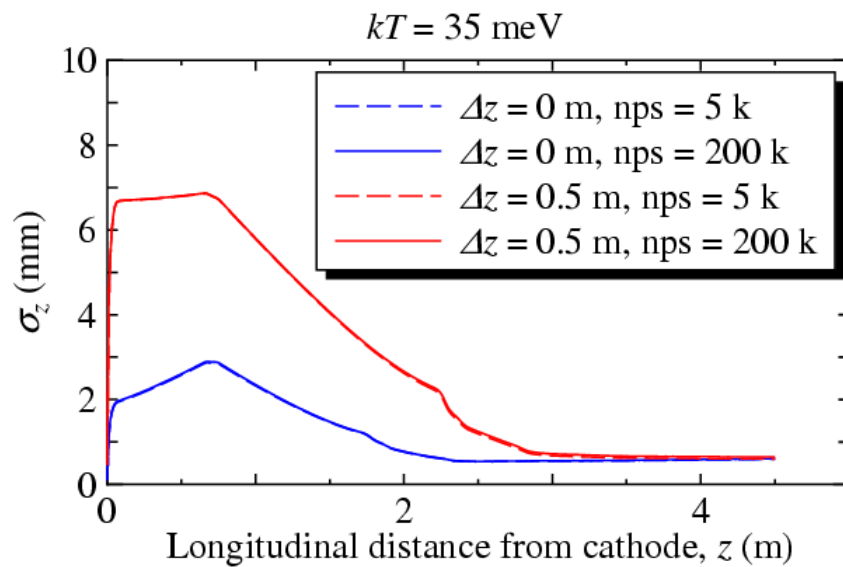
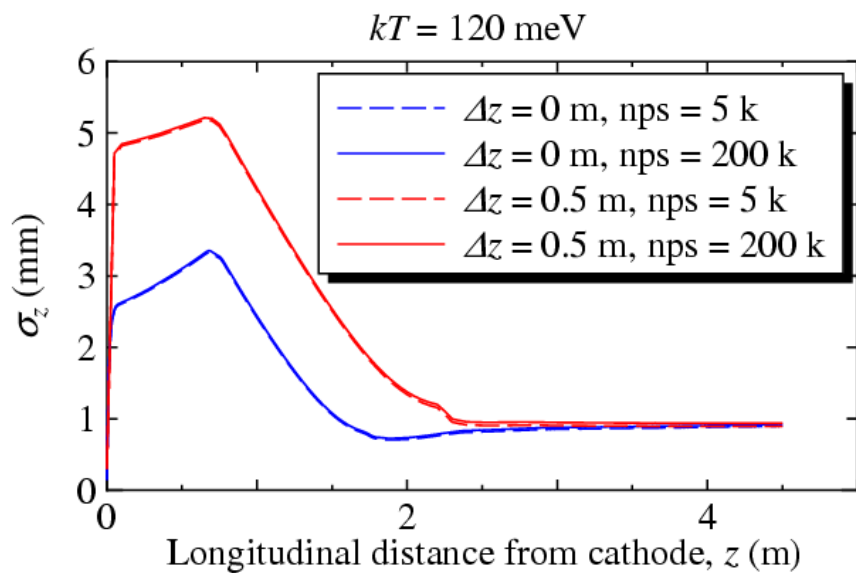
$kT = 35 \text{ meV}$



運動エネルギーとエネルギー拡がり



バンチ長



まとめ

- 現在、新しい入射器レイアウトでビームシミュレーションを開始した
- 現在、機器の位置可変で最小エミッタンスを実現するパラメタの探索を行っている
- 現状では、 $z=4.5\text{m}$ で 0.6 mm mrad ($\text{stdz} = 0.6\text{ mm}$ で) (この値はまだ大きい)
- この計算が終了次第、次のステップ「3.超伝導空洞出口までの計算(各機器の設置誤差の影響の評価)」に移る

課題

- 超伝導空洞手前までのテストビームラインの設計 (GTF用ビームラインの設計)
- 入射部専用のビームダンプの設置
- バンチャー空洞の設計
- モニターの設置位置の決定
- など...