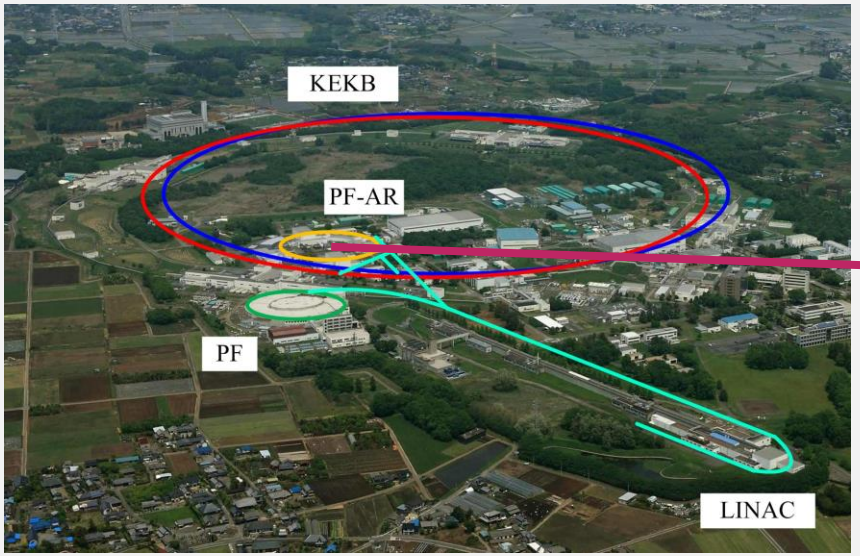
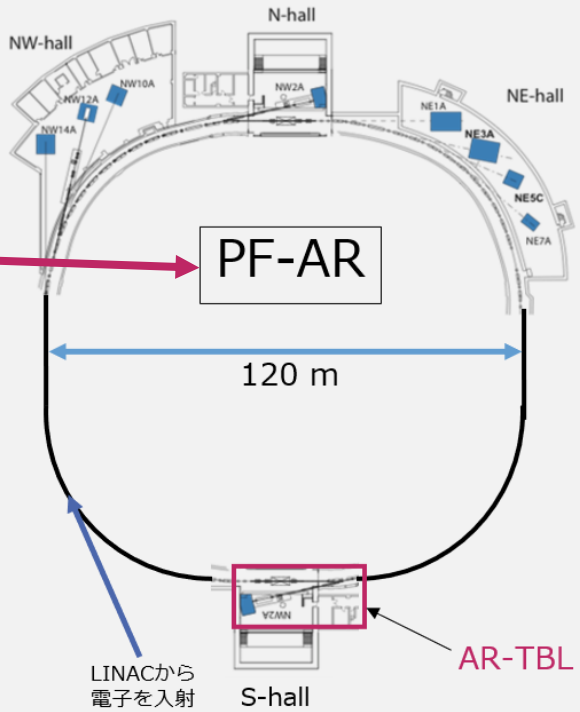
Flavor Physics Workshop 2020

ARテストビームライン建設に向けたビーム輸送シミュレーション

名大理　M1　鷲見一路

ARテストビームライン（AR-TBL）





- PF-AR (Photon Factory Advanced Ring)
  - ８つの放射光実験ステーションが存在
  - 5.0 GeVまたは6.5 GeVの電子を蓄積

新規に**GeVオーダー電子ビームライン**を建設する

✓ ターゲット: カロリメータなどの検出器開発

✓ ビーム運動量: 0.5-5.0 GeV/c

蓄積ビームの安定性が最優先

ARのパラメータ

Beam energy	5.0 or 6.5 GeV
Circumference	377 m
Number of bunches	1
Bunch width	~ 100 ps
Interval	**1.3 us**
Current	**60 mA (仮定)** (~ 5×10^{11} 個)

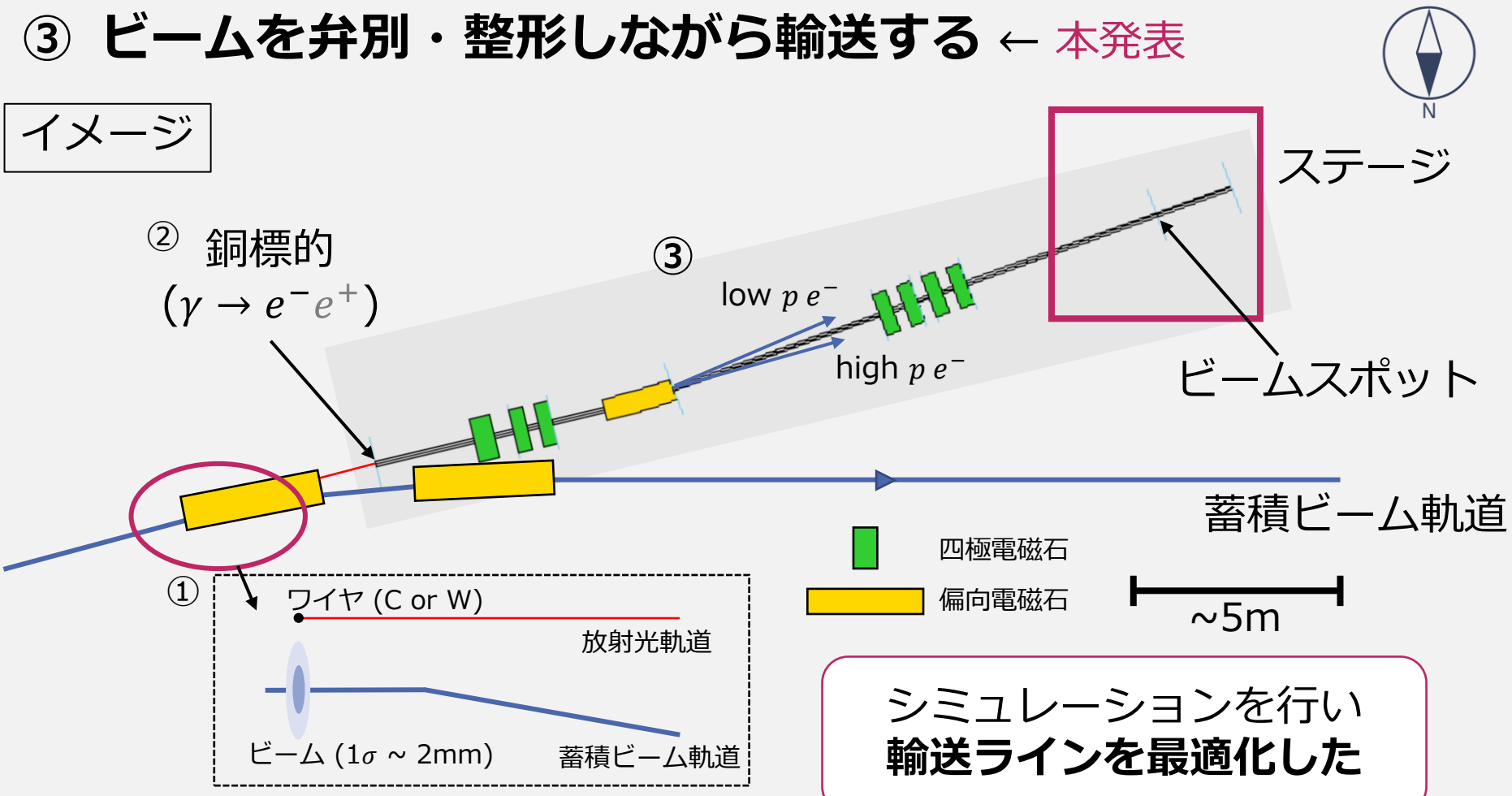
AR-TBLでのビーム生成・輸送

① 蓄積ビームの端にワイヤを置きGeVオーダー放射光を出す

② 銅標的での対生成を利用し放射光を電子に変える

③ **ビームを弁別・整形しながら輸送する** ← 本発表

イメージ



シミュレーションを行い
輸送ラインを最適化した

ビーム生成シミュレーション

輸送するビームはGeant4で生成*

イメージ



1. ワイヤを置く位置付近での蓄積ビームの分布と個数(/s)を再現した
   電子をワイヤ(C, ϕ100um)に当て、放射光を生成する
2. 放射光を銅標的(厚さ10mm)に当て、対生成でできた
   電子を輸送シミュレーションの初期分布とする

※ 蓄積ビーム（AR）エネルギー5 GeV、取り出すビーム運動量(p_0)2 GeV/cの場合で最適化を行った

*ビーム生成シミュレーションは共同研究者（前田朱音(名大理)）が行った

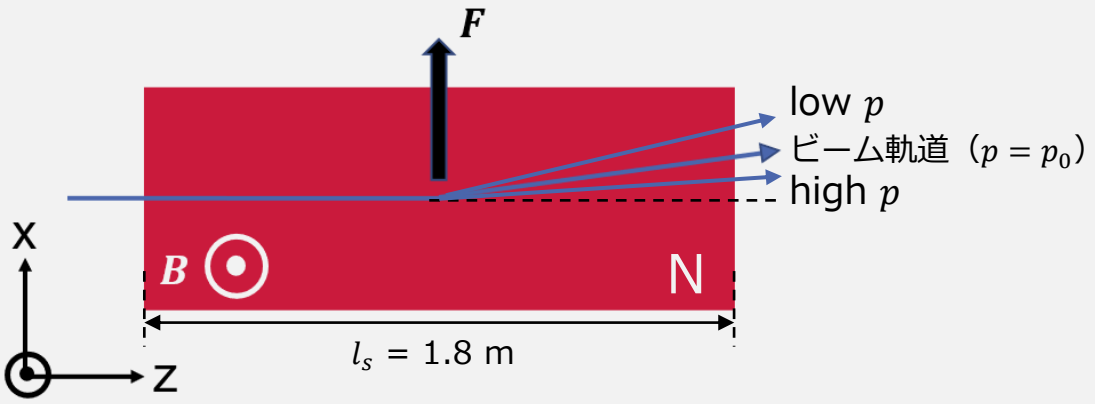
輸送ラインの最適化

- 最適な光学系（＝磁石配置 + 磁石の強さ）
  - 輸送中のビーム損失を極力抑える = ビームレート*最大
  - ビームスポットでビームが絞れている
    = 水平(x)方向は数cm、垂直(y)方向は1cm程度
  - 水平(x)方向の位置と運動量に強い相関がある
    = 位置を測ればその電子の運動量を精度よく知れる
- 輸送ラインの最適化
  - 最適な光学系を得られる電磁石位置の決定
  - 磁石の強さを暫定で決定 -> ビームレートの評価
    （磁石の強さはTBLユーザーが操作可）

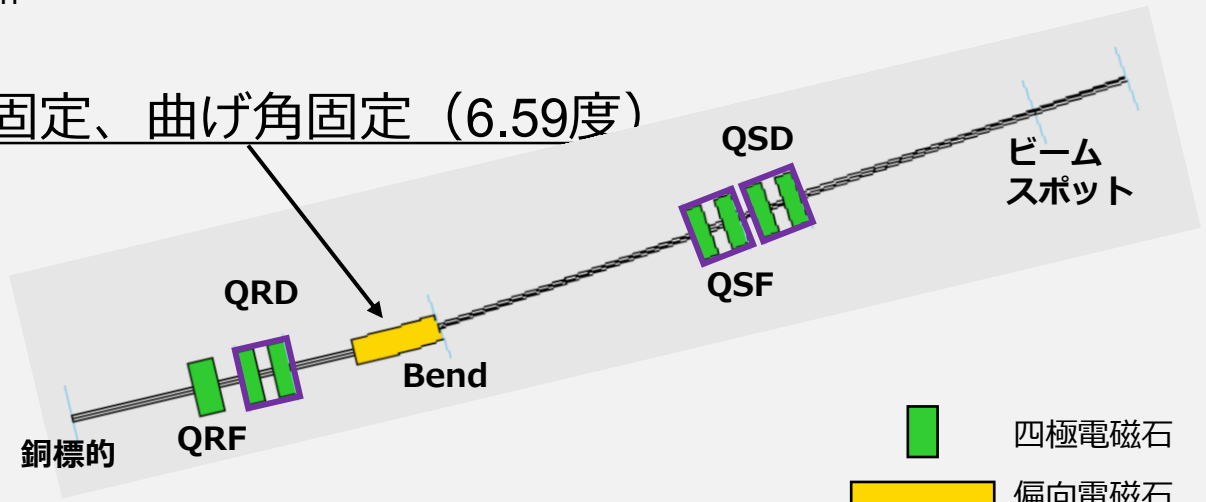
*ビームレート = 電子数/s @ ビームスポット

輸送ライン構成要素 1 / 3

- 偏向(二極)電磁石（Bend）
  - 垂直(y)方向に一様な磁場
  - ビームの**軌道を曲げる**（運動量の差により収差(η_x)が生じる）
  - 収差を利用し、**ビームの運動量を選択**する



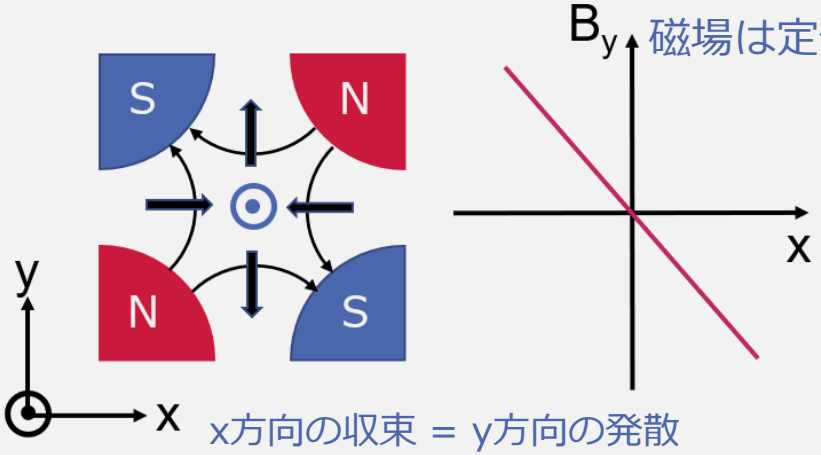
  - 空間的制約から位置固定、曲げ角固定（6.59度）



輸送ライン構成要素2/3

➢四極電磁石

- 凹/凸レンズのようにビームの**収束/発散**を行う



x方向の収束 = y方向の発散

磁場の強さは**K1**

$K1 = -eB'_y l_s / p_0$

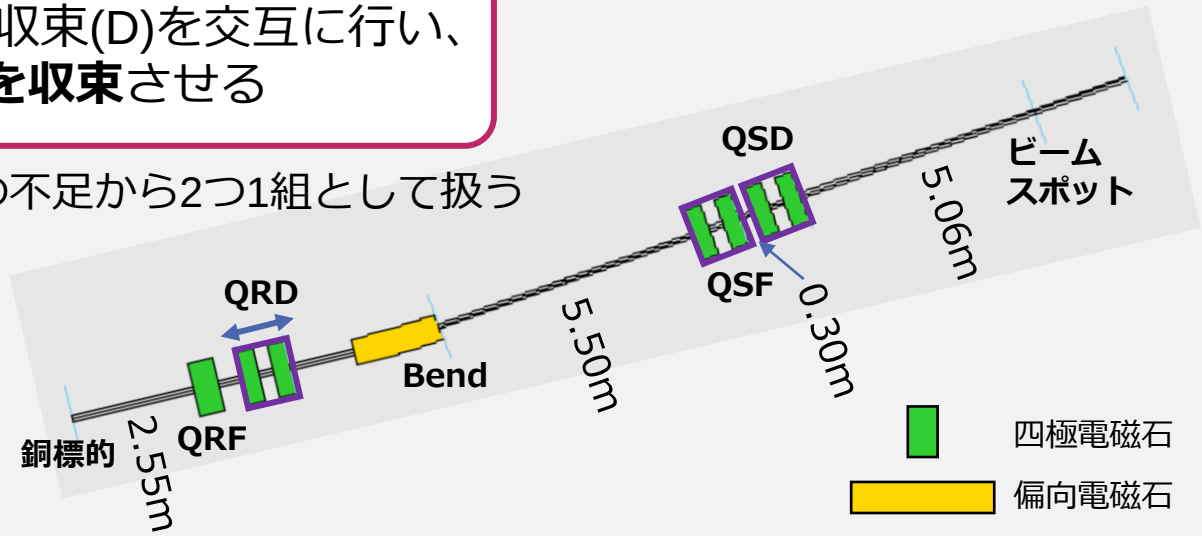
で表す

※ $B'_y = \partial B_y / \partial x$

※ l_s: 四極電磁石のz方向の長さ

x方向の収束(F)とy方向の収束(D)を交互に行い、ビームスポットで**両方向を収束**させる

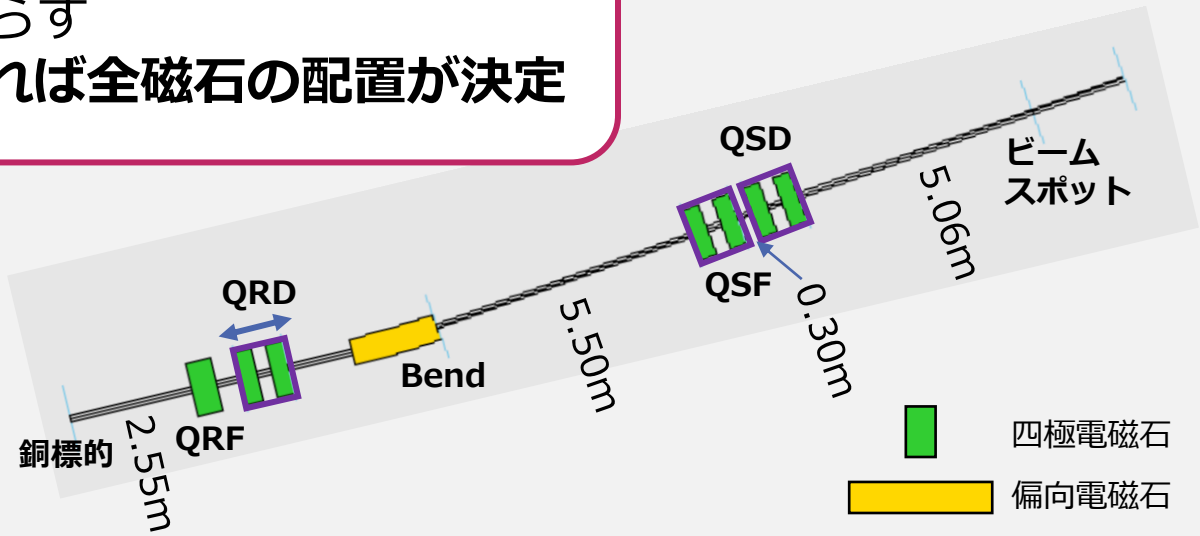
QRF以外については最大K1の不足から2つ1組として扱う



輸送ライン構成要素 3 / 3

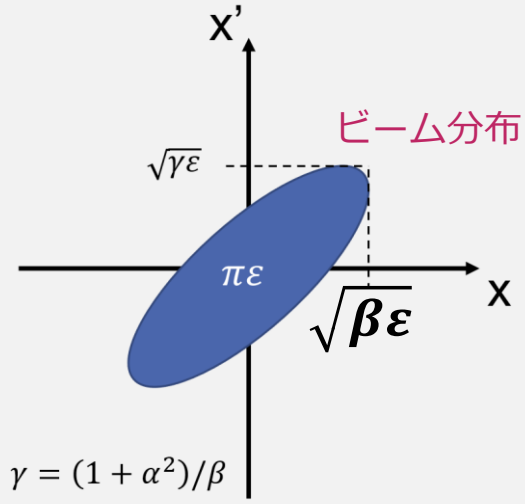
- 四極電磁石のK1 … 各四極電磁石で自由なパラメータ
- 四極電磁石の位置
  - QRF … 空間的制約から位置を固定
  - QRD … QRFとBendの間で位置は自由
  - QSF … Bendにできるだけ近い位置(距離5.5m)で固定
  - QSD … QSFにできるだけ近い位置(距離0.3m)で固定

定性的な考察 + シミュレーションのもと、
あらかじめ自由度を減らす
⇒ **QRDの位置を決めれば全磁石の配置が決定**



転送行列・位相空間

- 各要素での粒子の運動は運動方程式に基づく
  転送行列で計算する
- 位相空間
  - 中心軌道に対する変位: **x, y**
  - 中心軌道と垂直な運動量成分: **x'** = px/pz, **y'** = py/pz
  - ターゲット運動量(p0)とのずれ: **z'** = (pz – p0)/p0
  - 転送行列の計算で粒子の分布はx-x', y-y'平面で楕円を描く



$$\gamma_x x^2 + 2\alpha_x x x' + \beta_x x'^2 = \varepsilon_x$$

Twiss Parameter: α, β, γ
Emittance: ε (ビーム損失がなければ輸送中不変)

楕円を表現する$\sqrt{\boldsymbol{\beta}}$(と$\varepsilon$)を**ビームサイズの指標**として使用する

輸送シミュレーション1/2

- ビーム輸送シミュレーションにはSAD (Strategic Accelerator Design)を使用する。
- ビーム輸送シミュレーションの手順1/2
  - 光学系を決める
    - ① $\beta_x, \beta_y, \varepsilon_x, \varepsilon_y$の初期値を与える
    - ② 四極電磁石などでのβ_x, β_yの値をいくつか与える
    - ③ 転送行列を計算し与えたβに合う磁石位置/K1を決定

①

銅標的での電子分布

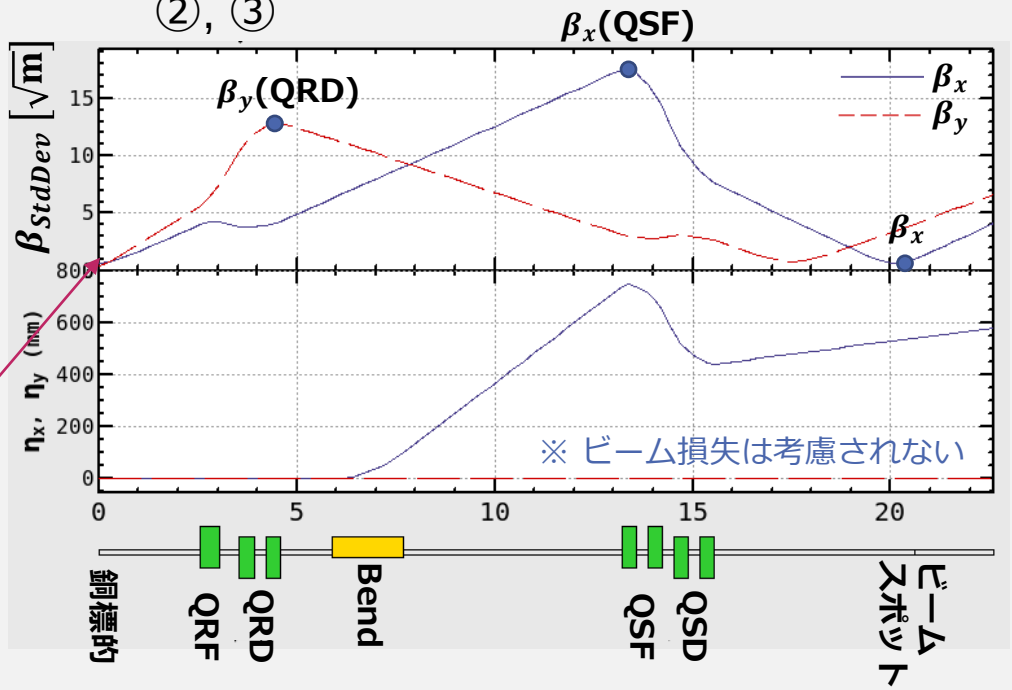
x, y, px/pz, py/pzの標準偏差

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{x'}, \sigma_{y'}$

$\beta_x = \sigma_x/\sigma_{x'}$ $\varepsilon_x = \sigma_x\sigma_{x'}$

$\beta_x, \beta_y, \varepsilon_x, \varepsilon_y$

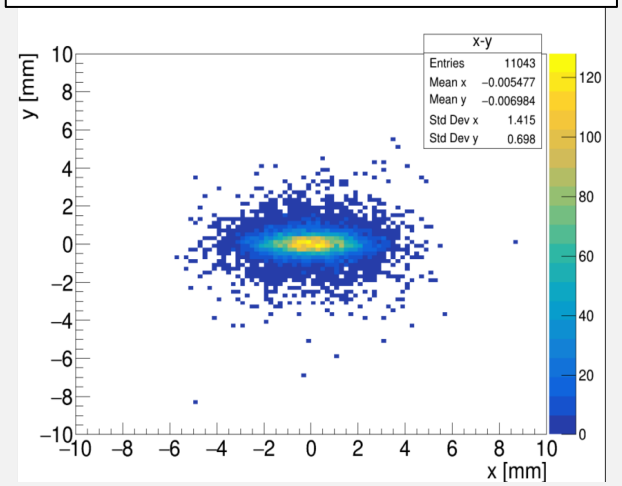
②, ③



輸送シミュレーション2/2

- ビーム輸送シミュレーションの手順2/2
  - 入射電子のそれぞれについて輸送の計算を行う
    - ① 各電子の位相空間に転送行列をかける
    - ② ダクトによるビーム損失を各電磁石で判定する
    - ③ ビームスポットでの電子数/分布を確認する

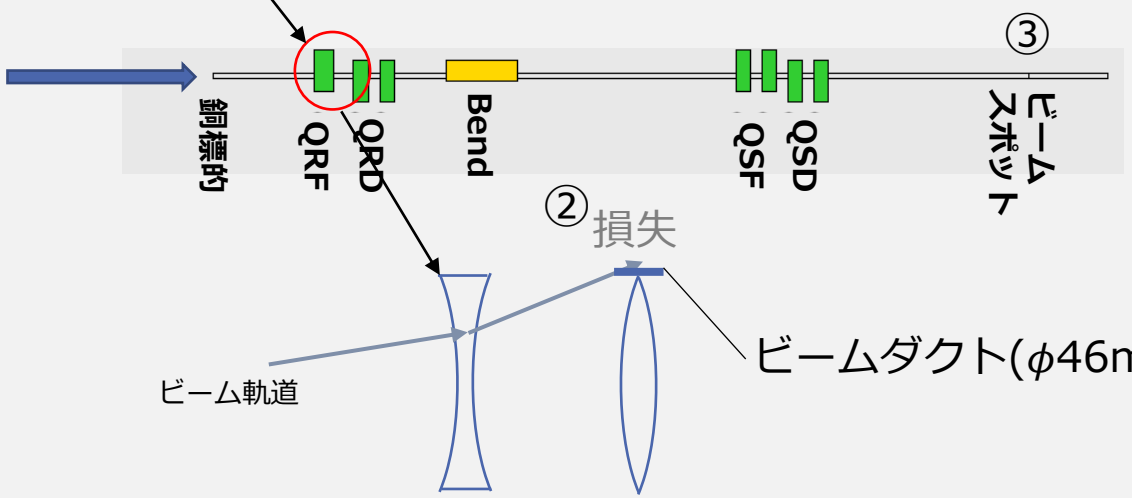
銅標的での電子分布(x-y)



①（例: x成分 at QRF）

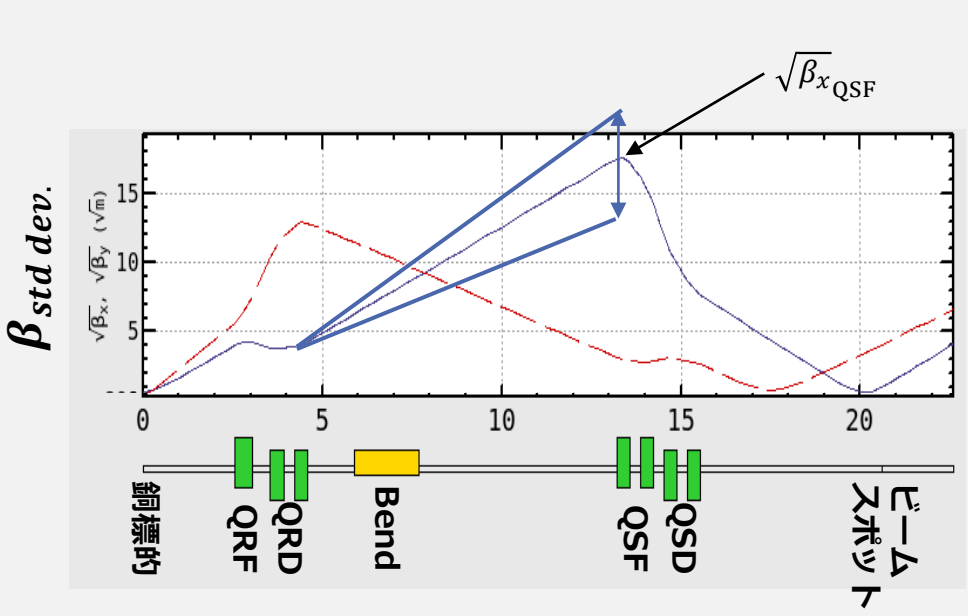
$$\begin{pmatrix} x_2 \\ x_2' \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -K1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_1' \end{pmatrix}$$

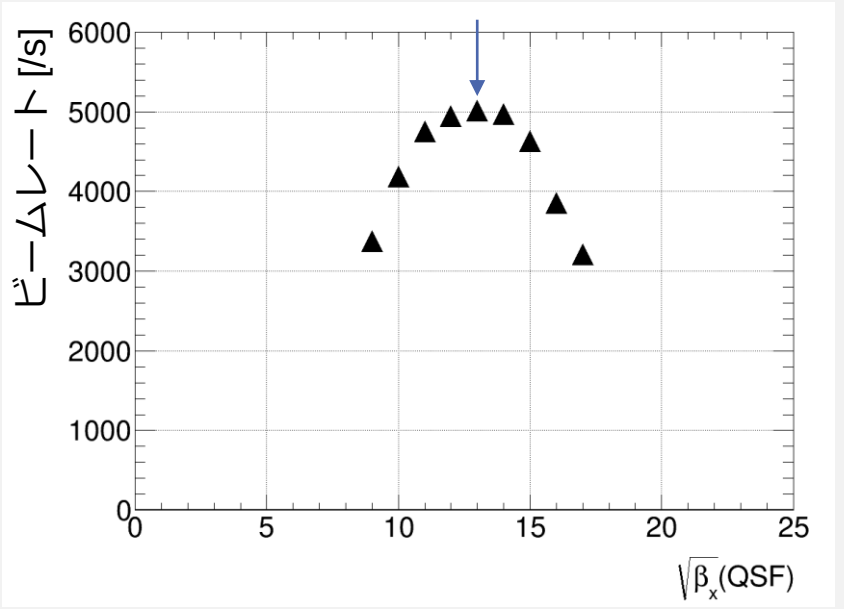
転送行列



光学系のビームレート評価 1 / 2

① β_x(QSF)でスキャンし、ビームレートを評価
（QRDのK1の変化によりβ_x(QSF)が変化する）

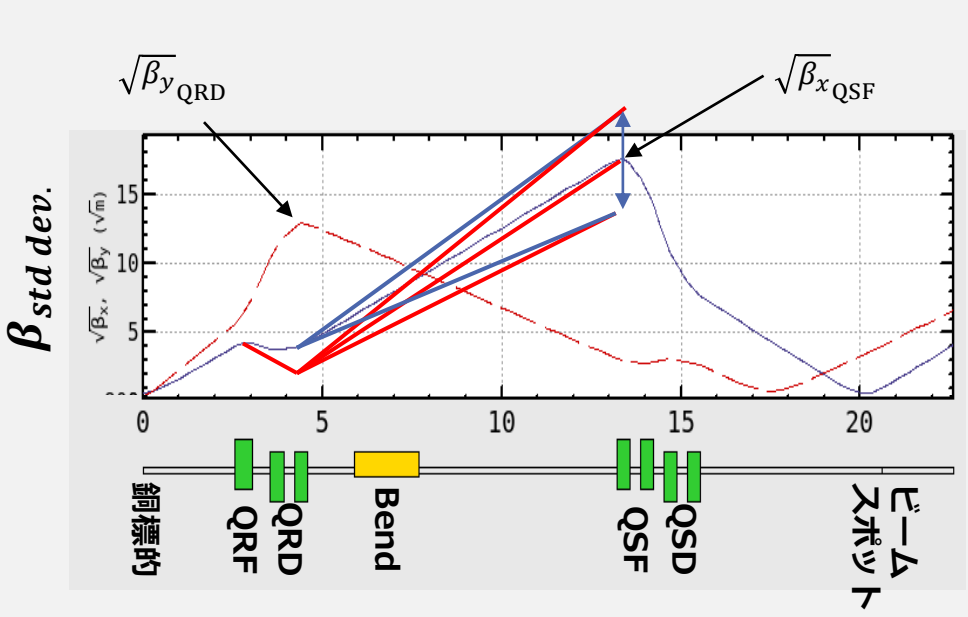


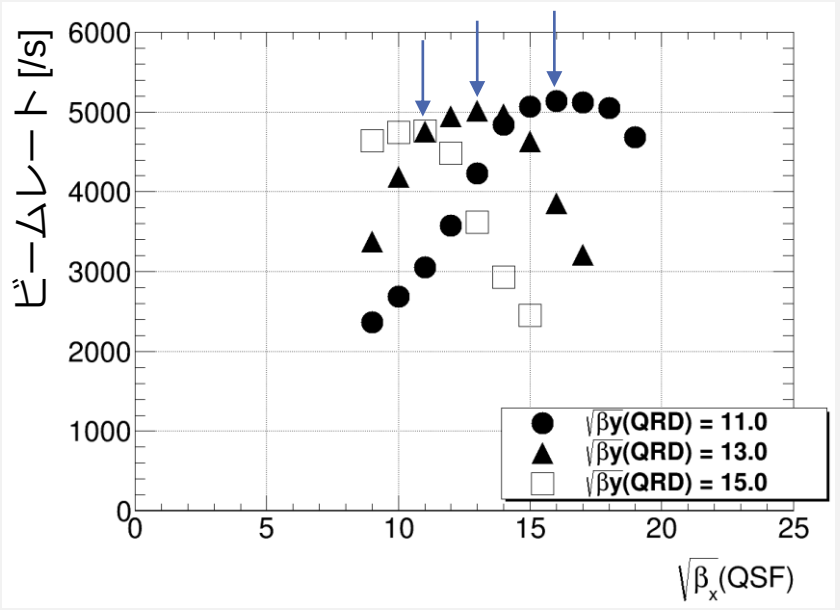


- x方向のビームサイズは小さい方がビーム損失を抑えることが可能
- 過度に小さくするとy方向のビームサイズが効き始め、
  ある値でビームレートは極大値となる

光学系のビームレート評価 2/2

② β_y(QRD)でスキャンし、それぞれの場合で①を行う
（①に追加でQRFのK1とQRDの位置の変化が加わる）



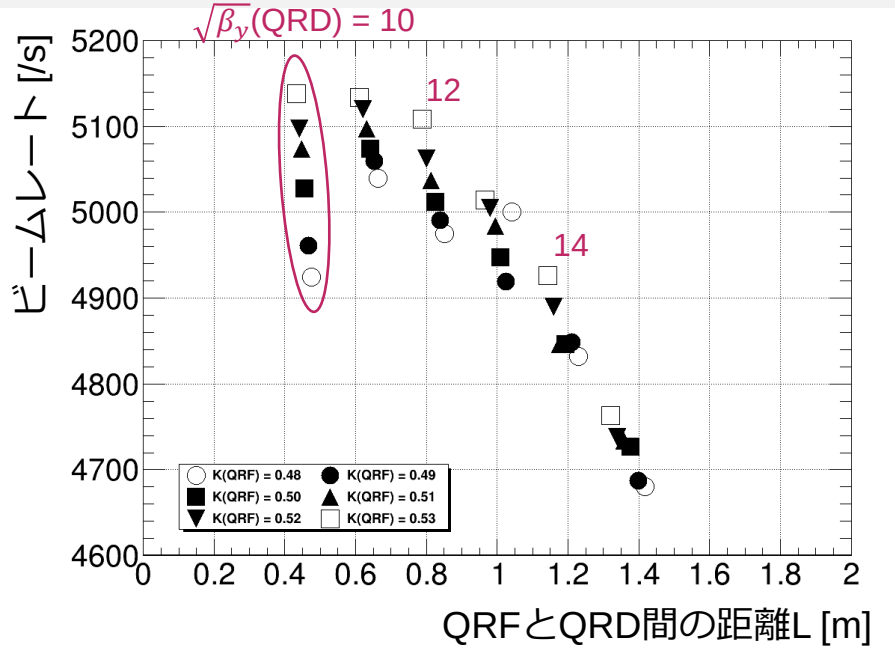


- β_y(QRD)を変えることでBend/QSFでのx/yの関係が変化
- ビームレート極大となるβ_x(QSF)が異なる

ビームレート極大の点を各β_y(QRD)の代表値とする

四極電磁石(QRD)の位置決定 1 / 2

QRDの位置を決めるにあたり、QRFのK1の影響は大きい
⇒ K1(QRF)を変えながら①と②の手順でビームレートを評価



✓ 各まとまりでβ_y(QRD)が同じだがK1が異なる ⇒ Lが変化

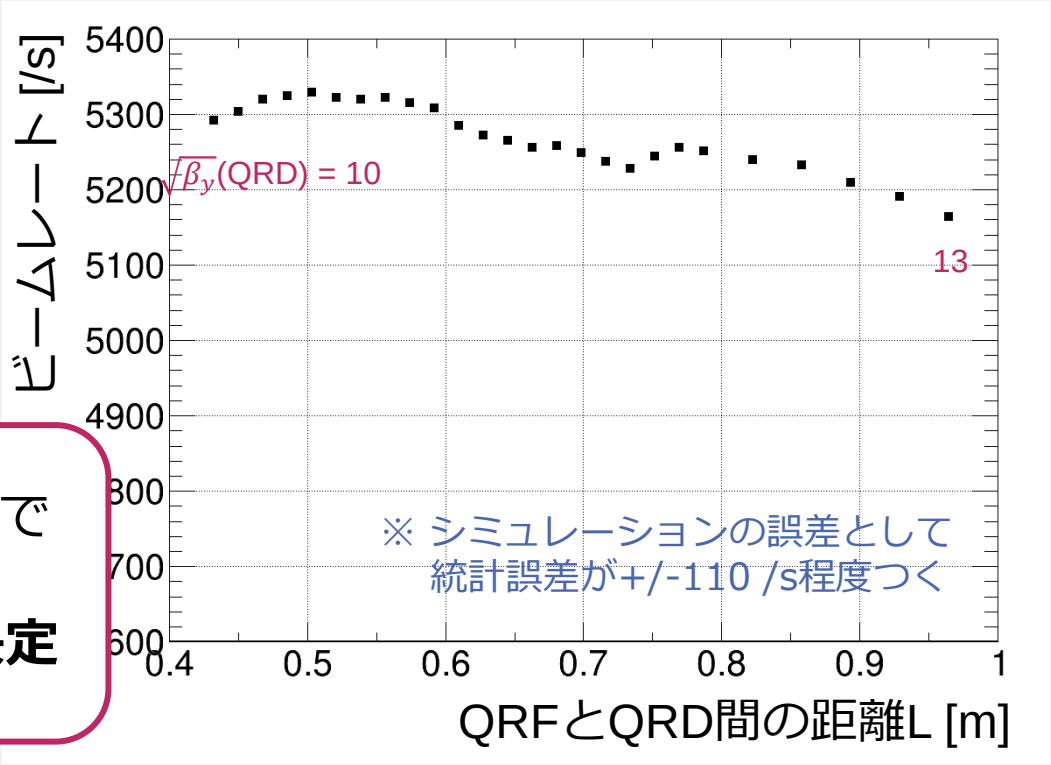
✓ K1(QRF)が大きいほどβ_x(QRD)が小さくなりビーム損失を抑制

K1(QRF) = 0.53 とし、自由度を 1 つ減らす

四極電磁石(QRD)の位置決定 2 / 2

K1(QRF)を0.53で固定した上でQRD位置の決定を試みた
（K1(QRF)の固定により、β_y(QRD)でのスキャン＝QRD位置でのスキャン）

- 自由度:
  L:QRFとQRD間の距離,
  ~~K1(QRF)~~, K1(QRD),
  K1(QSF), K1(QSD)

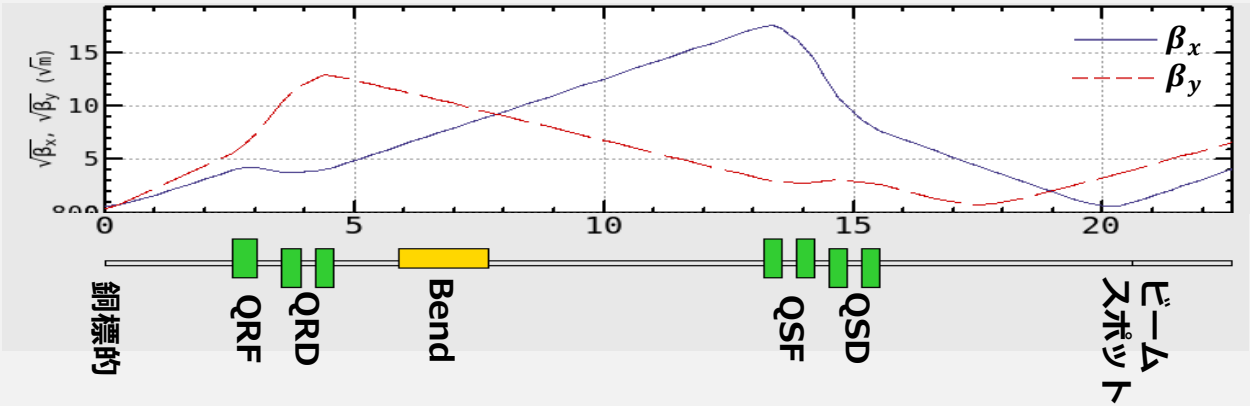


ビームレートはL = 0.5 m付近で
なだらかなピーク
⇒ 磁石位置は**L = 0.5 m と決定**

各四極電磁石のK1もL = 0.5 m の光学系の値と暫定で決め、<u>最適化したビームライン</u>とする

最適化したビームライン 1/2

- 最適化したビームラインの磁石配置とβ_x, β_yの変化

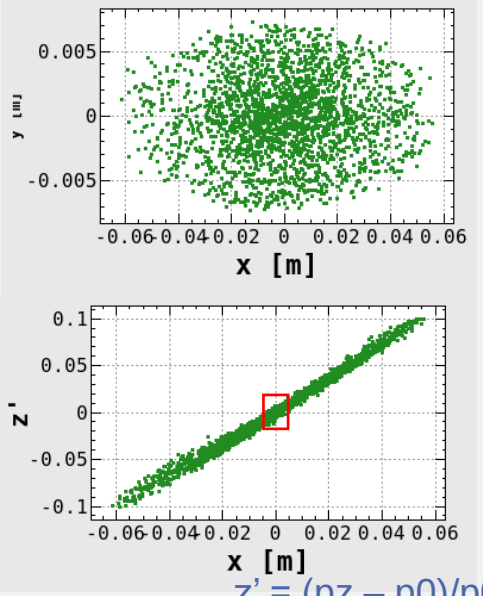


決定されたパラメータ

L	0.50 m
K1(QRF)	0.53 /m
K1(QRD)	- 0.279 /m
K1(QSF)	0.275 /m
K1(QSD)	- 0.308 /m

- ビームスポットでの電子分布（AR: 5GeV, Beam: 2GeV/c）

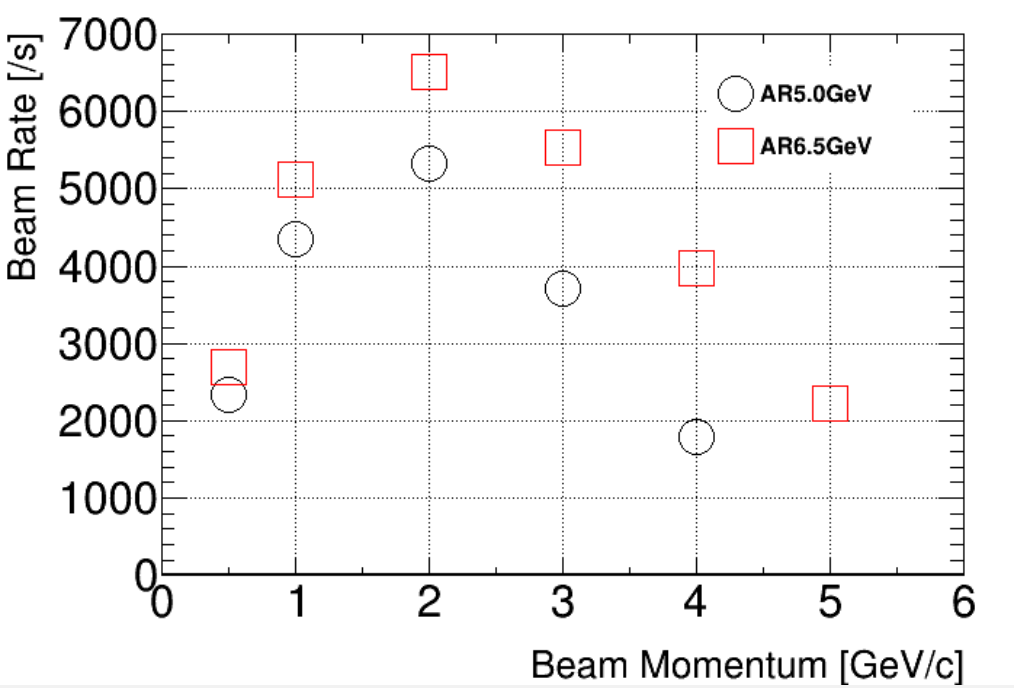
ビームレート	5329 /s
ビームサイズ: x (標準偏差)	22.1 mm
ビームサイズ: y (標準偏差)	3.2 mm
相関係数: $\rho_{xz'}$	0.995
運動量分散: $w_{z'}$ (標準偏差)	0.59 % (@ x = 0±5 mm)



z' = (pz – p0)/p0

最適化したビームライン2/2

- 2.0GeV/cで最適化したビームラインで
  各蓄積ビームエネルギー/各運動量のビームを輸送



※ ワイヤ位置の違いによる軌道のずれは考慮されていない

最大で6500 /s のビームレートが得られると概算
電子が少ない高運動量ビームでも2000 /s 程度

まとめ

- AR-TBLは建設に向け各部分の準備が進行中
- 輸送シミュレーションを行い、
  - ビームレートが高い（5300 /s）
  - ビームスポットで絞り込む（22mm x 3mm）
  - 位置と運動量の相関が強い（標準偏差 = 0.6% @ x = 0±5mm）

  磁石配置/光学系を決定（AR: 5GeV, Beam: 2GeV/*c*）
- **決定した磁石配置をもとに**ビームラインを建設
- 各運動量のビームで得られるレートを概算

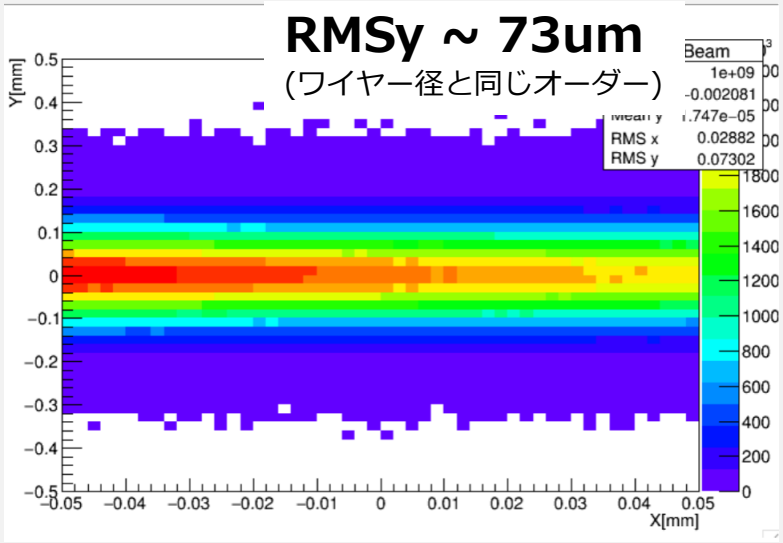
□ 展望

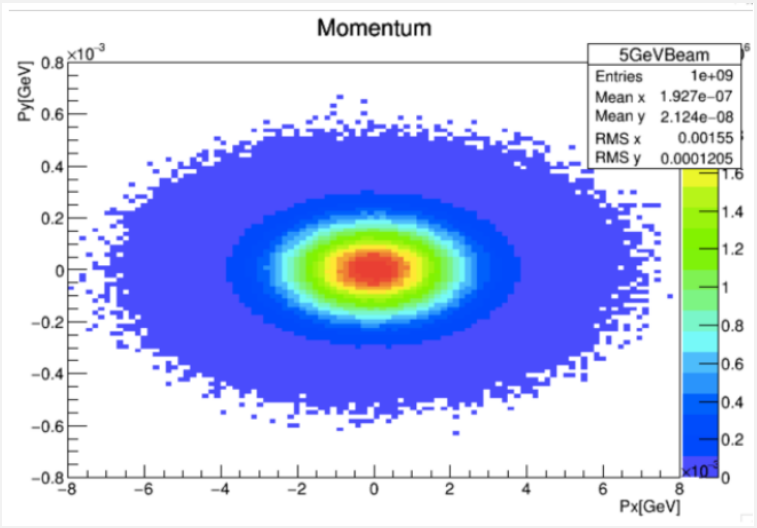
- K1変更によるビームレート/サイズ変化の検証
- コリメータの挿入

Backup

ビーム生成シミュレーション

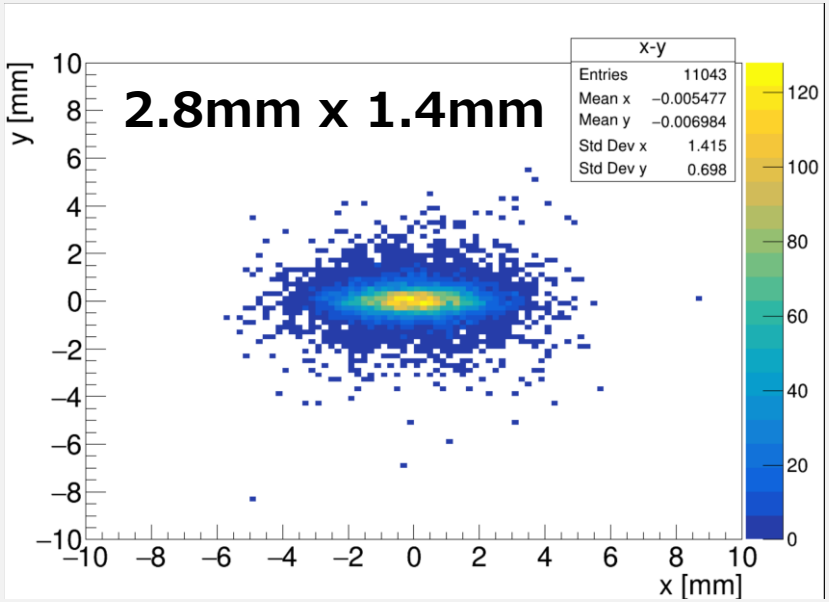
- 蓄積ビームの分布

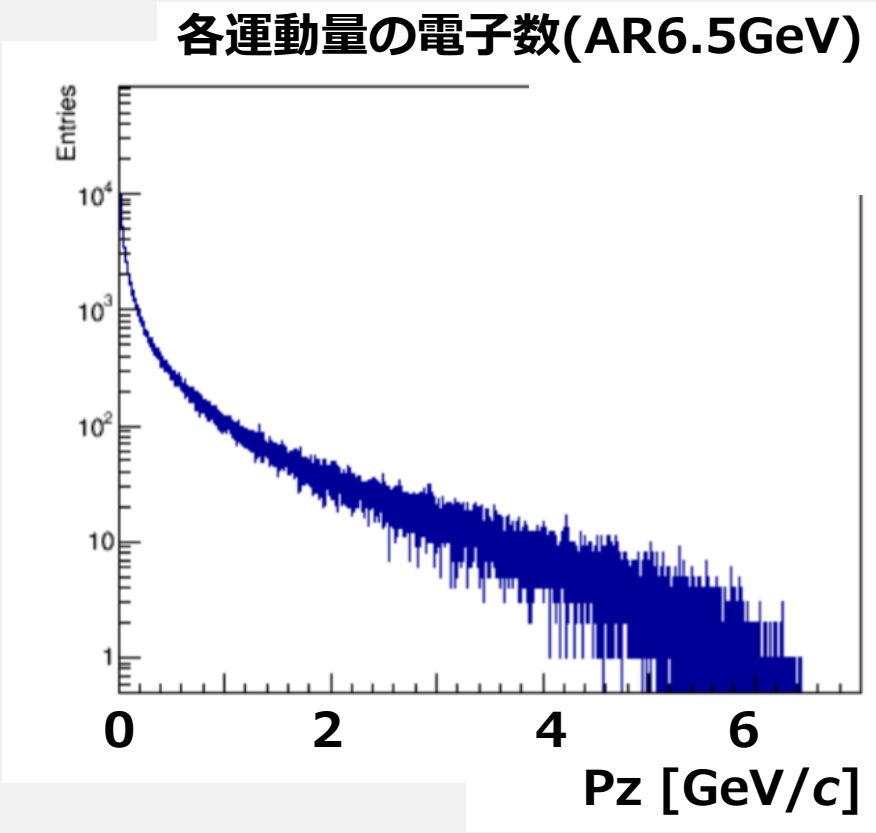




ビーム生成シミュレーション

- 銅標的で変換された電子の分布



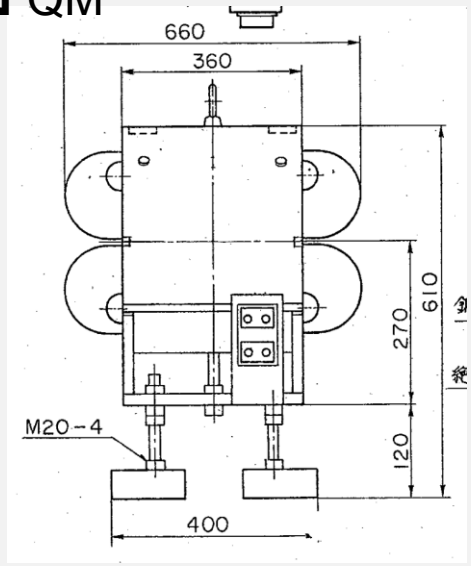


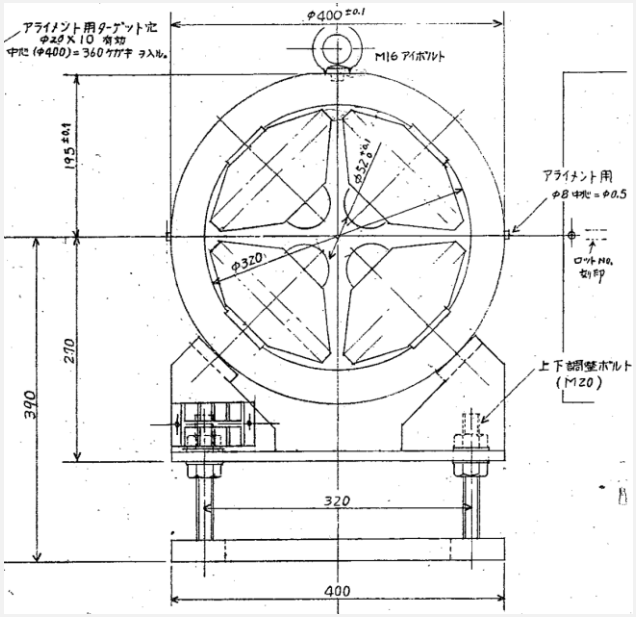
ビーム生成シミュレーション

p0	StdDev_x [mm]	StdDev_y [mm]	StdDev_x' [mrad]	StdDev_y' [mrad]
0.5	1.43	0.73	15.0	15.1
1.0	1.42	0.69	7.98	7.85
2.0	1.41	0.70	3.91	3.93
3.0	1.43	0.69	2.60	2.68
4.0	1.39	0.69	1.85	1.91

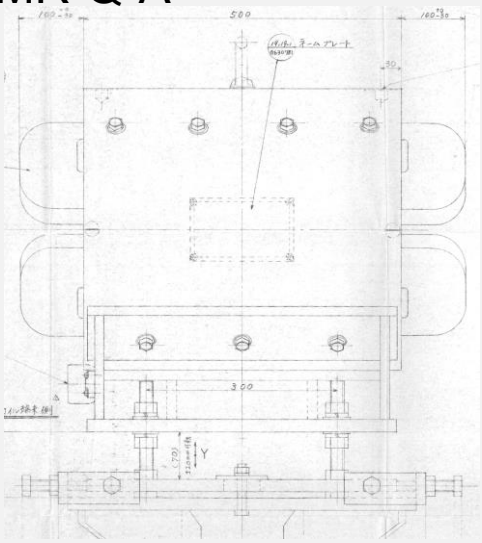
Magnets

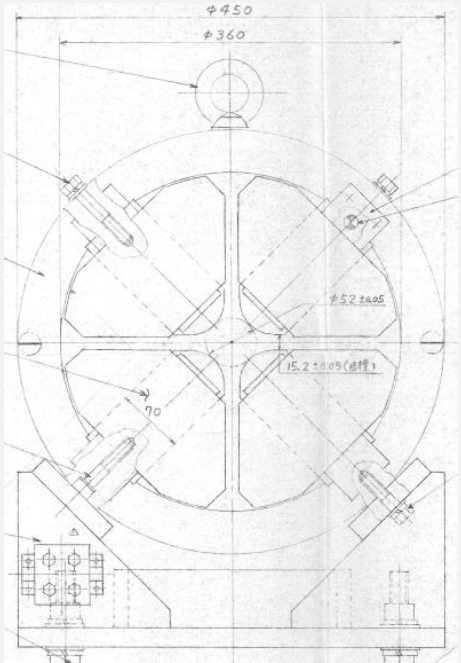
QM



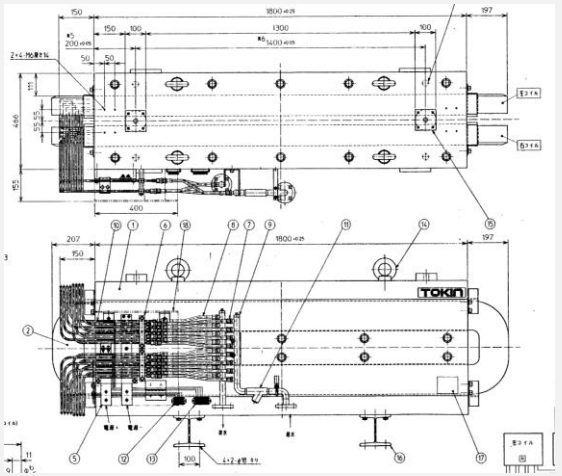


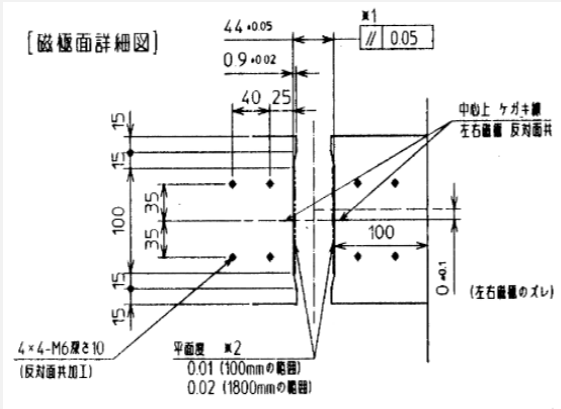
MR-Q-A





Dipole





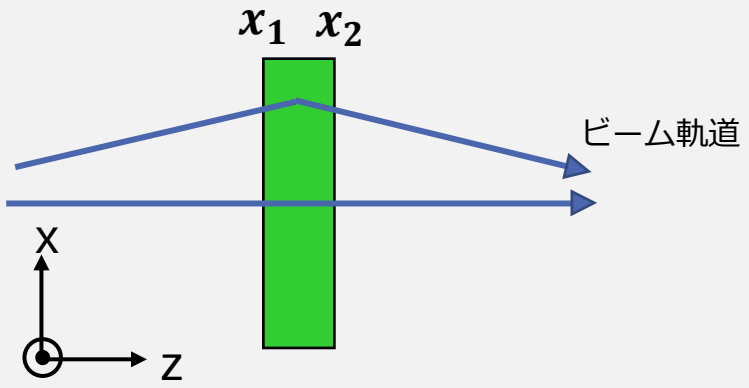
位相空間・転送行列

➢転送行列

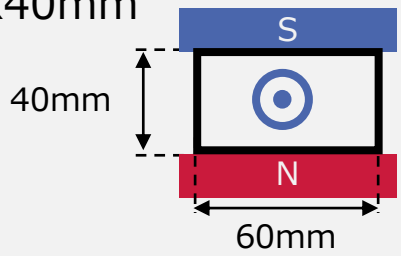
- 各要素による粒子の位置/方向の変化は行列で計算

転送行列（例: 四極電磁石x方向収束）

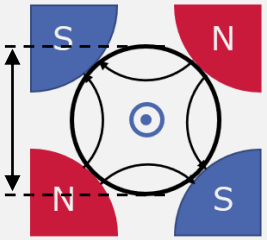
$$\begin{pmatrix} x_2 \\ x_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\sqrt{K1 l_s} & \sqrt{l_s/K1}\sin\sqrt{K1 l_s} \\ -\sqrt{K1/l_s}\sin\sqrt{K1 l_s} & \cos\sqrt{K1 l_s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_1' \end{pmatrix}$$



真空ダクト
内径60x40mm

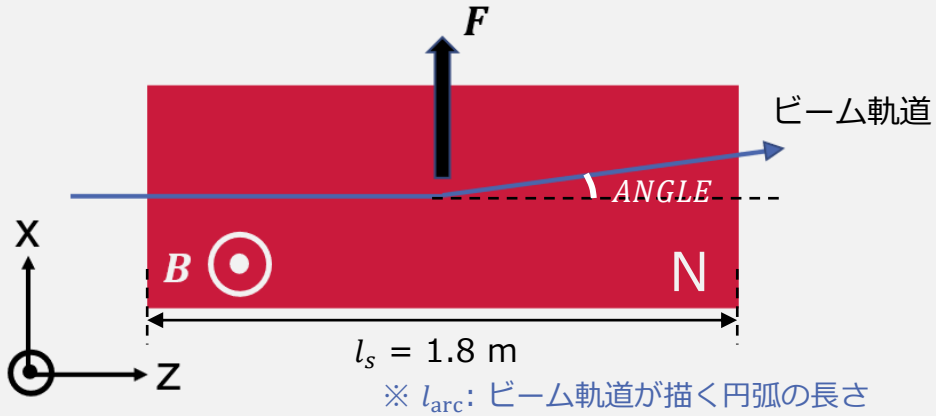


真空ダクト
内径ϕ46mm



輸送ライン構成要素 1 / 3

- 偏向(二極)電磁石（Bend）
  - 垂直(y)方向に一様な磁場
  - ビームの**軌道を曲げる**（運動量の差により収差(η_x)が生じる）



磁場の強さは曲げ角

$$ANGLE = eB_y l_{arc}/p_0$$

で表す

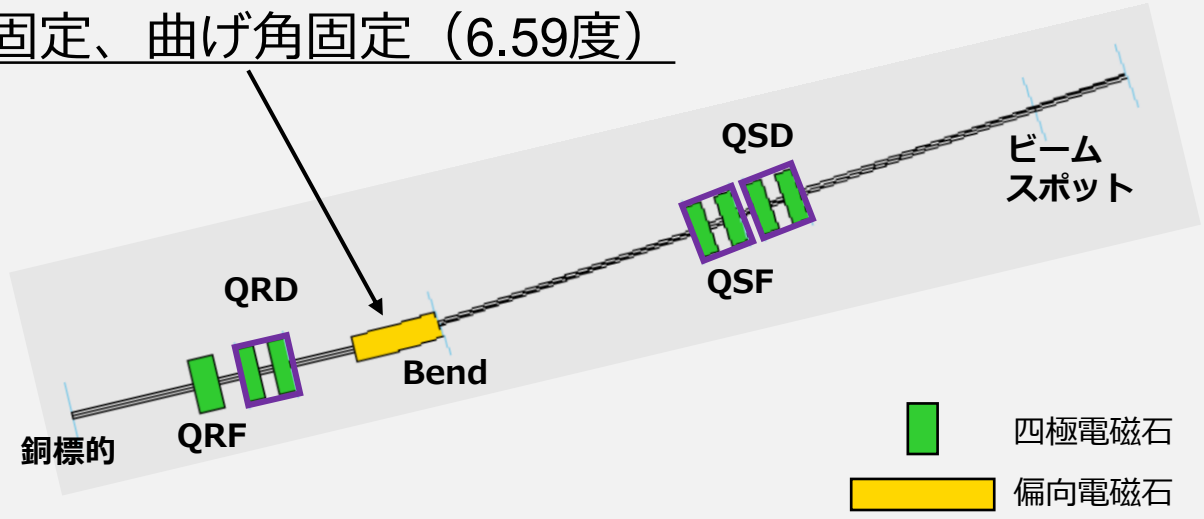
偏向電磁石による収差は

η_xで表し、ビームサイズには

$$\sigma_x \sim \eta_x \sigma_\delta$$

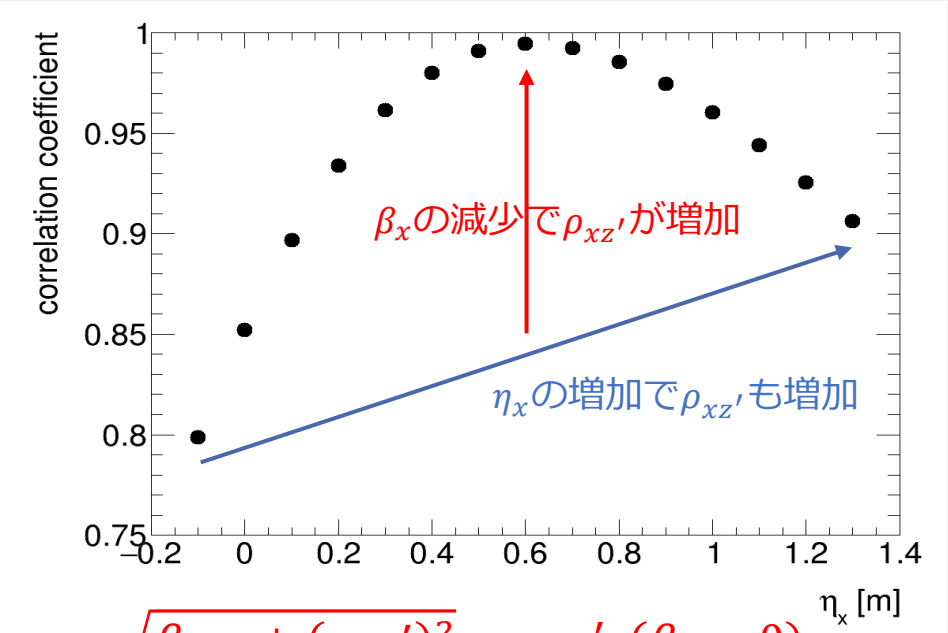
で効く（$\sigma_\delta = \sigma_{\Delta p}/p_0$）

- 空間的制約から位置固定、曲げ角固定（6.59度）



$\rho_{xz'}$と$w_{z'}$の評価

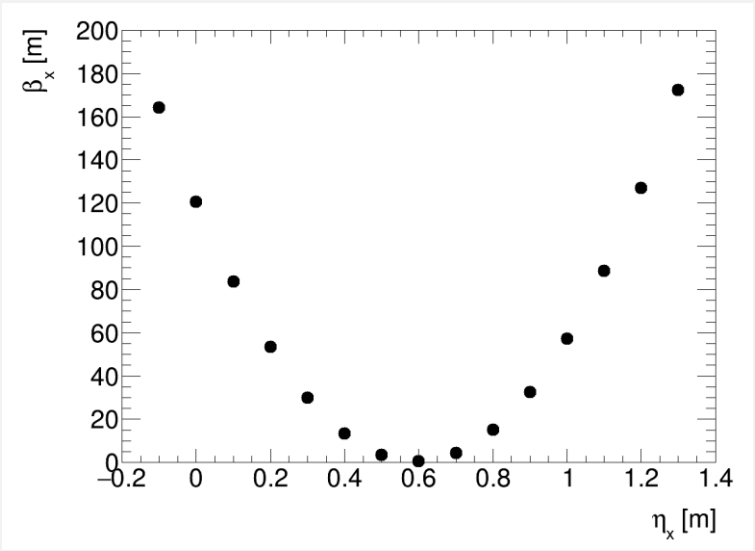
- 相関係数$\rho_{xz'}$
  - $\eta_x \sim 0.6$でピーク
  - η_xの増加と$\rho_{xz'}$の増加に正の相関がある
  - その一方で β_x の影響も大きく、$\beta_x \sim 0$で$\rho_{xz'}$最大となる



$$\sigma_x = \sqrt{\beta_x \varepsilon_x + (\eta_x z')^2} \sim \eta_x z' \quad (\beta_x \sim 0)$$

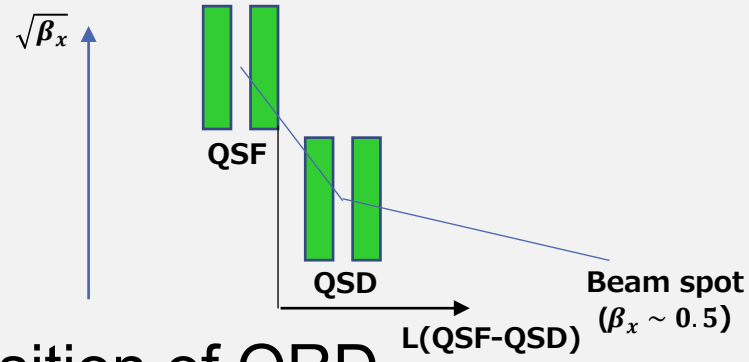
- z'の幅$w_{z'}$
  - $w_{z'}$は$\rho_{xz'}$が最大のところで最も小さくなる
  - $\eta_x \sim 0.6$ で $w_{z'} \sim 0.56\%$

以降、磁石配置の最適化で光学系を作成する際は、条件として
$\beta_x \sim 0$ at ビームスポット
を入れる。

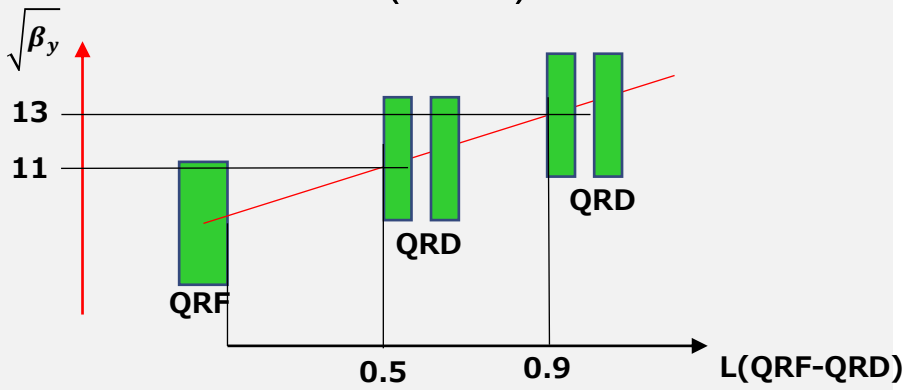


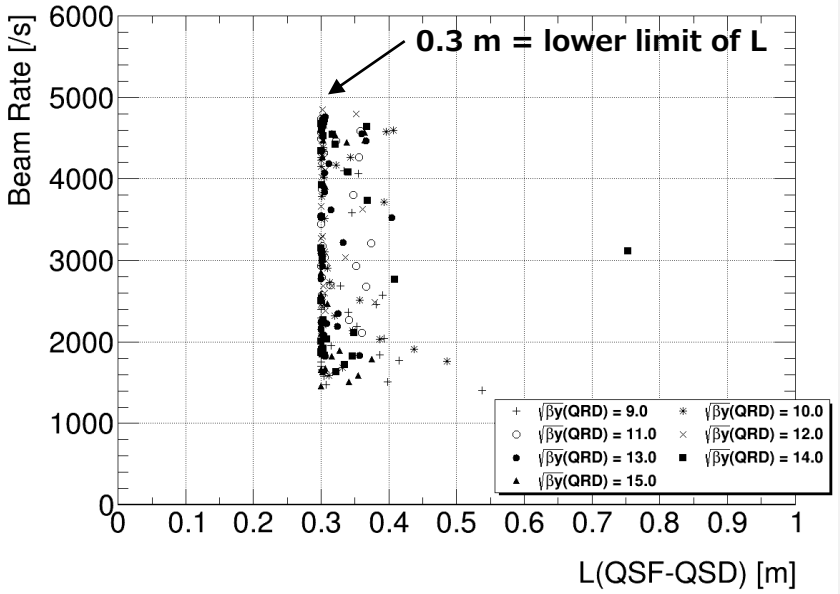
磁石の位置とビームレート

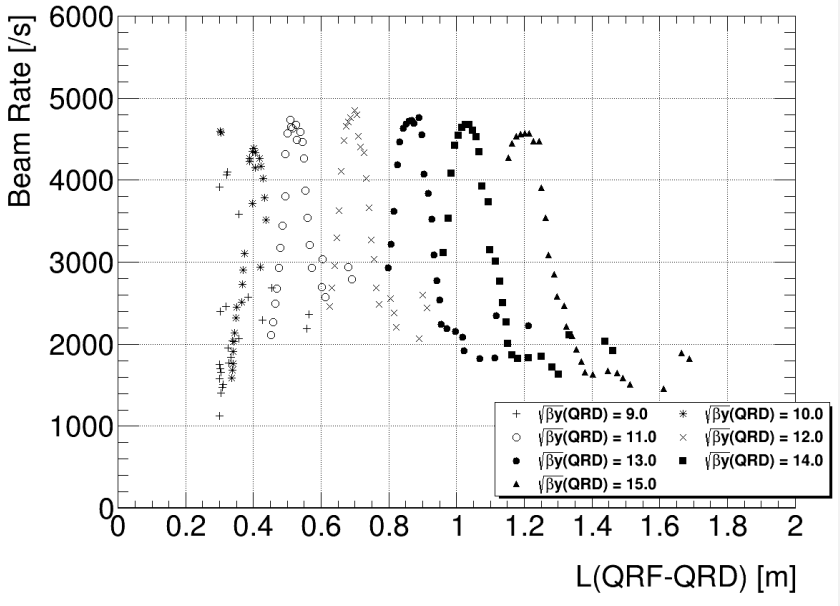
- Position of QSD
  - L tend to be set as 0.3m
    -> fixed as **0.3m**



- Position of QRD
  - β_y(QRD) and L have correlation
    = optimal K1 value may exist
    $\Longrightarrow$ check K1(QRF)

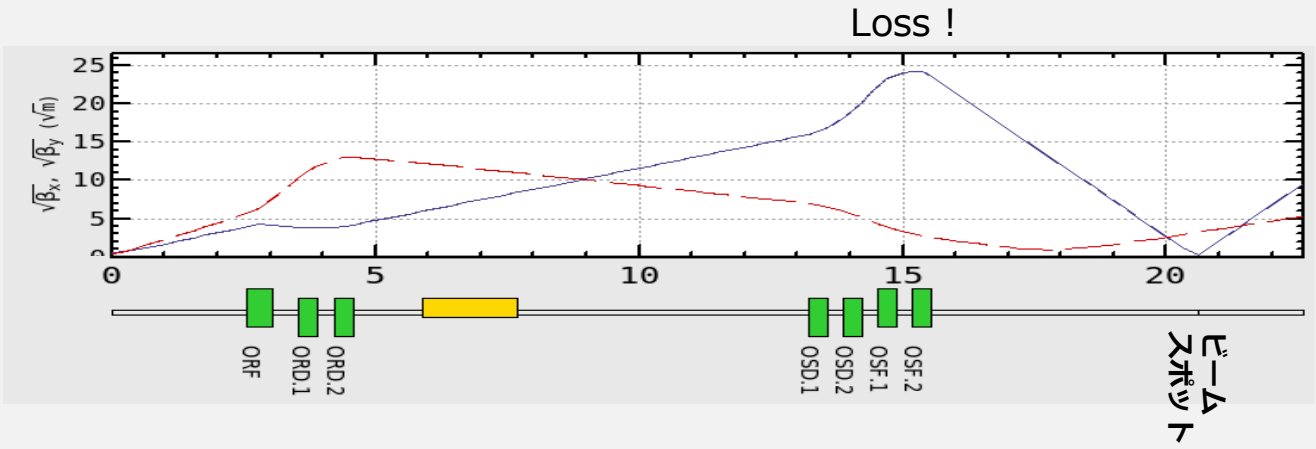






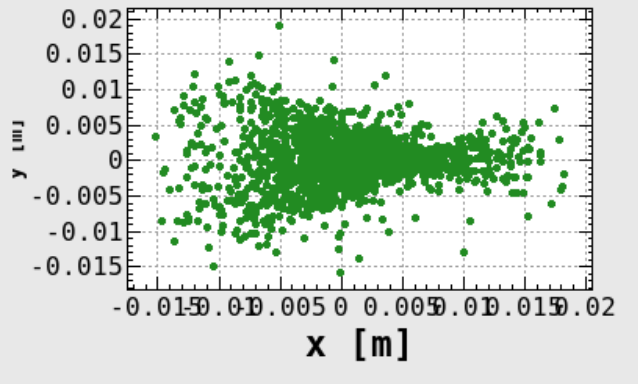
QSの極性の入れ替え

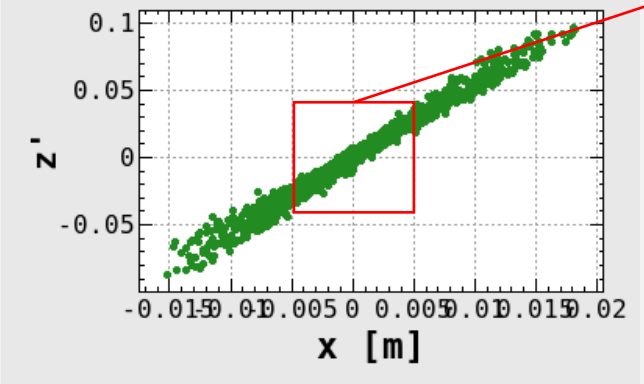
- QRDのK値を変え、ビームスポットでy方向が発散しないようにした



StdDev_x = **6.0 mm**

StdDev_y = 4.0 mm

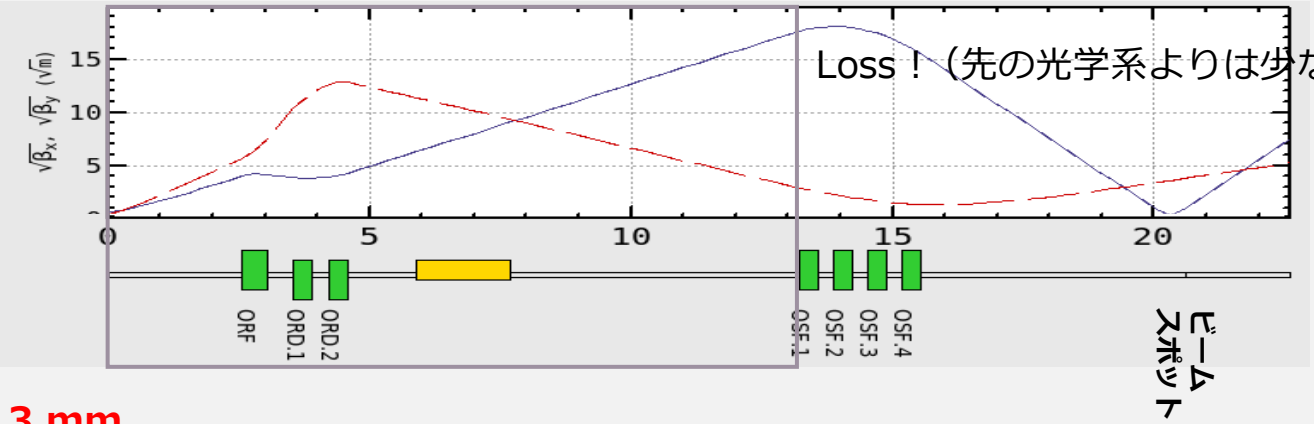




ビームレート: **3413 /s**

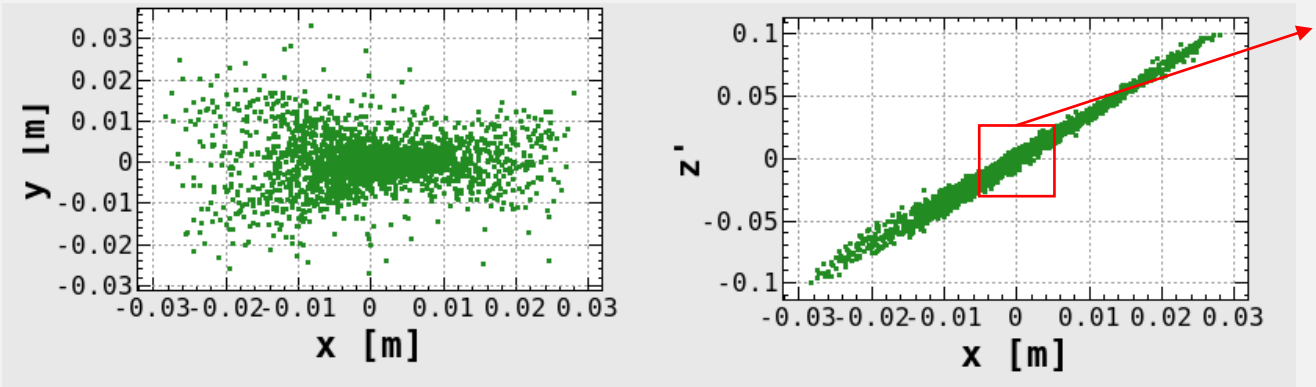
QSの極性の入れ替え

- QSDのK値を変更
  - そもそもQSDの位置でy方向の収束をする必要はあまりない
    -> （極端な例だが）QSDもx方向の収束にしてみては？



StdDev_x = **10.3 mm**

StdDev_y = 6.6 mm



ビームレート: **4892 /s**