

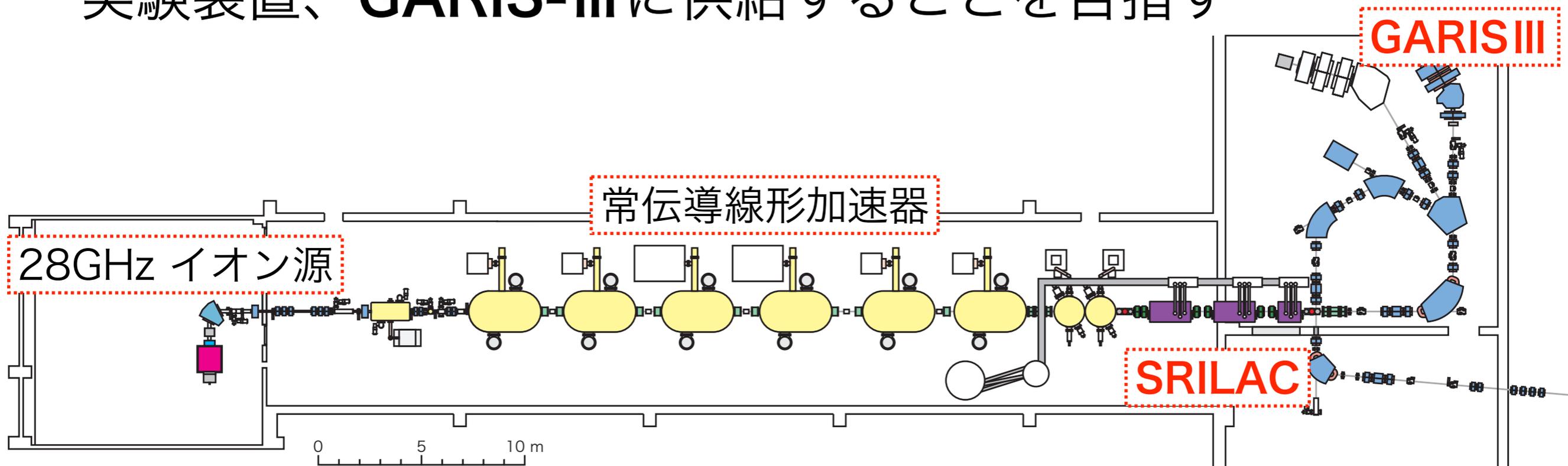
# 理研超伝導線形加速器 ビームラインのための エミッタンス測定及び光学系調整

西 隆博, 内山 暁仁, 上垣外 修一, 坂本 成彦, 長友 傑,  
福西 暢尚, 藤巻 正樹, 渡邊 環, 渡邊 裕

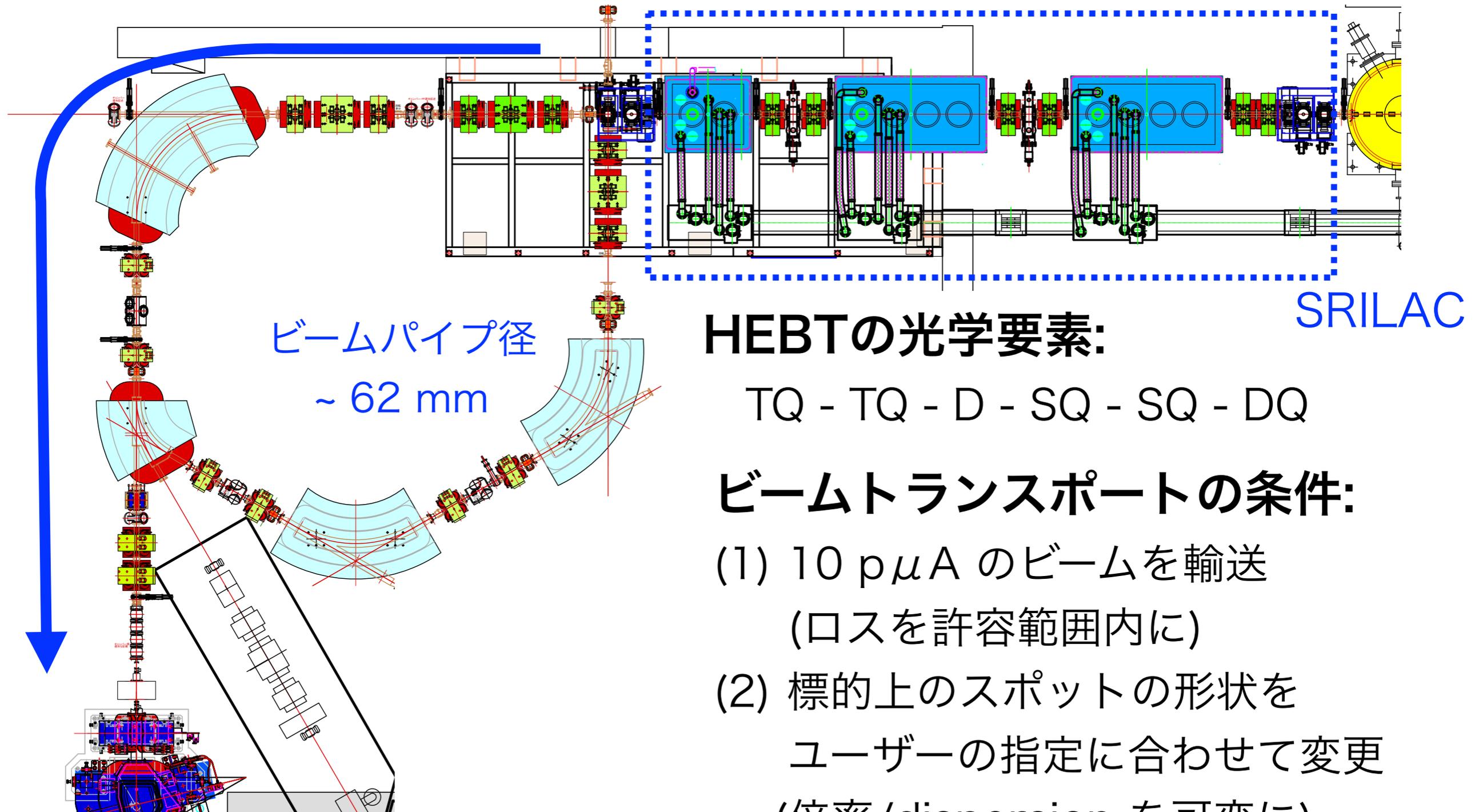
理化学研究所 仁科加速器科学研究センター

# 理研超伝導線形加速器 = SRILAC とは

- ニホニウムに続く新超重元素の発見を目的とした加速器
- 28GHz イオン源及び超伝導空洞を用いたSRILACにより、従来に比べて高エネルギーかつ大強度を実現している
- ~ **6 MeV/u, 10 pμA** の beam を新超重元素発見のための実験装置、**GARIS-III**に供給することを目指す



# SRILAC to GARIS-III ビームライン (High Energy Beam Transfer)



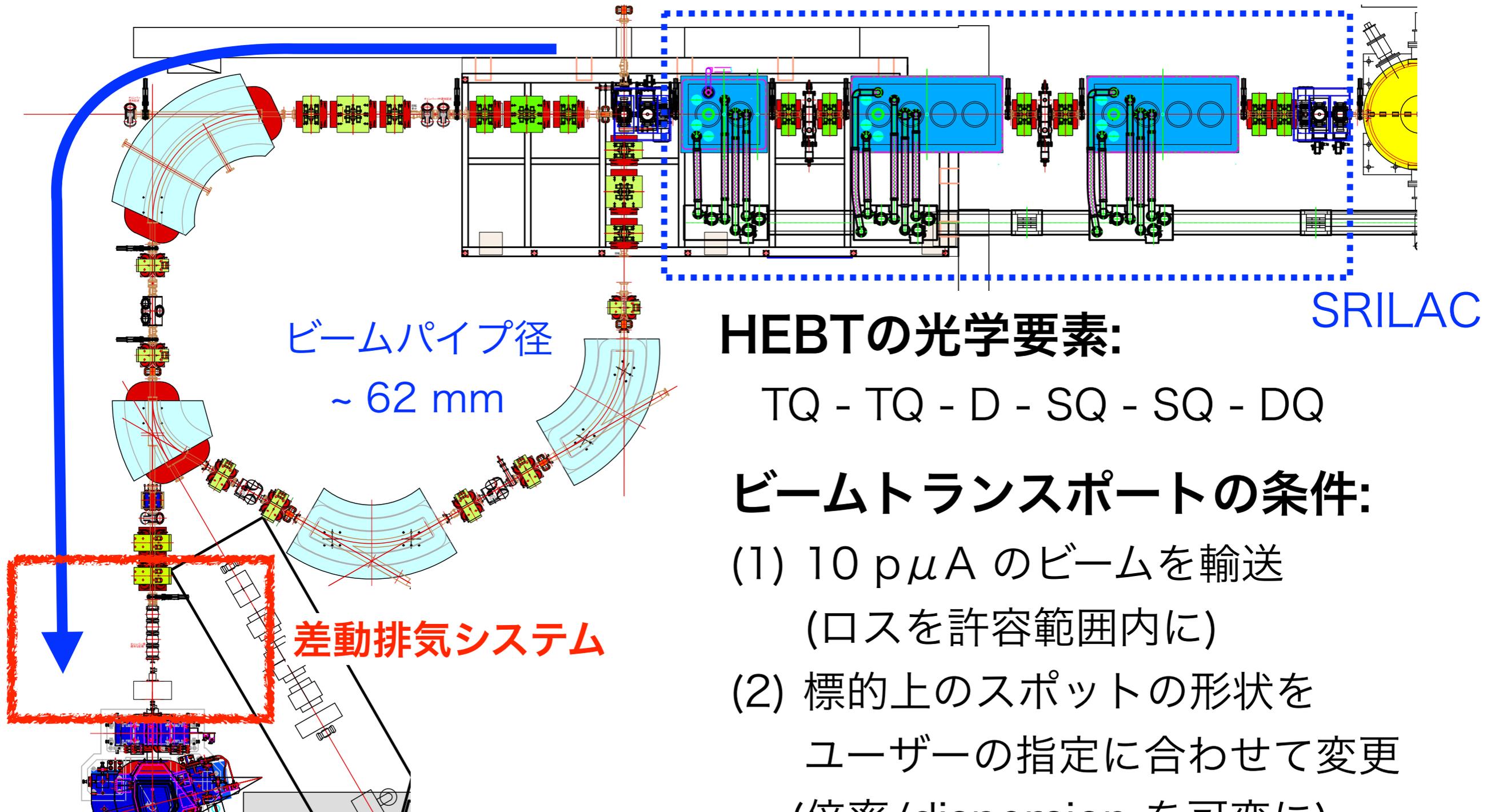
## HEBTの光学要素:

TQ - TQ - D - SQ - SQ - DQ

## ビームトランスポートの条件:

- (1)  $10 \text{ p}\mu\text{A}$  のビームを輸送  
(ロスを許容範囲内に)
- (2) 標的上のスポットの形状を  
ユーザーの指定に合わせて変更  
(倍率/dispersion を可変に)

# SRILAC to GARIS-III ビームライン (High Energy Beam Transfer)



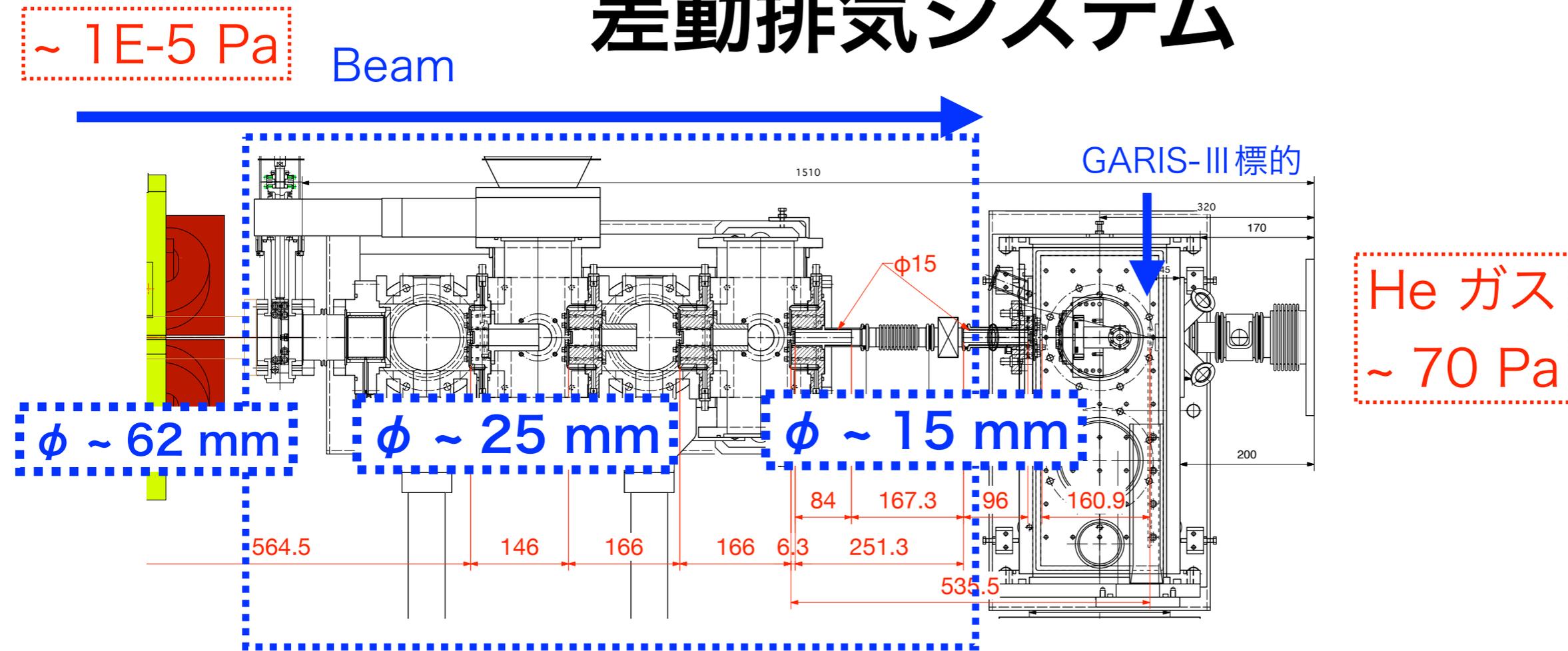
## HEBTの光学要素:

TQ - TQ - D - SQ - SQ - DQ

## ビームトランスポートの条件:

- (1)  $10 \text{ p}\mu\text{A}$  のビームを輸送  
(ロスを許容範囲内に)
- (2) 標的上のスポットの形状を  
ユーザーの指定に合わせて変更  
(倍率/dispersion を可変に)

# ビーム輸送光学系の制約: 差動排気システム



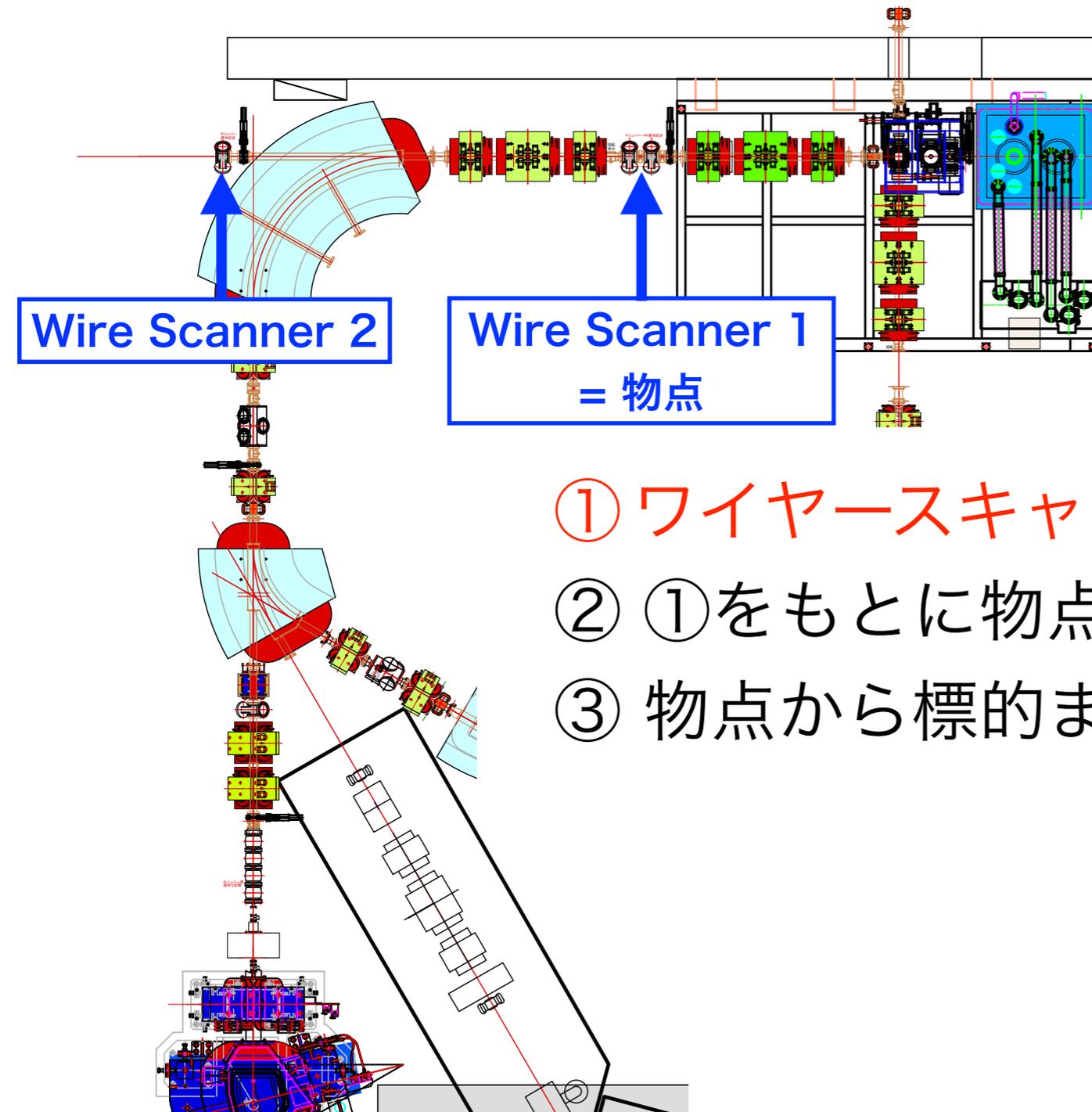
GARIS-III: 標的の下流にヘリウムガスが詰まっている。

→ 差動排気システムで上流ビームラインと結合

→ 最小で  $\phi \sim 15 \text{ mm}$  と細くなったビームパイプを通す必要あり

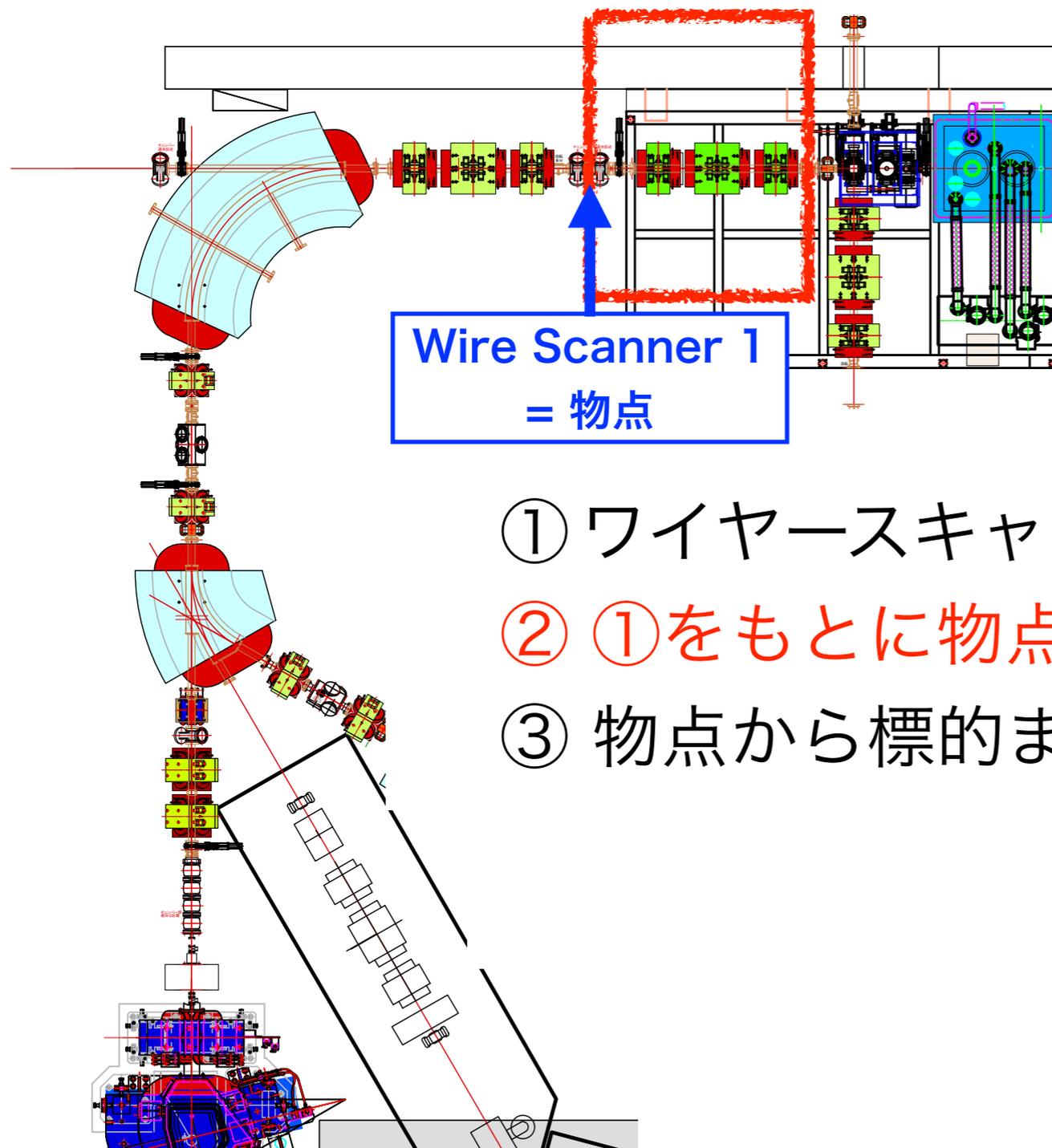
“正しく” ビーム光学系を制御し、 $10 \text{ p}\mu\text{A}$  のビームを  
 $\phi 15 \text{ mm}$  のパイプを通して適切な形状で標的に輸送しなければならない!

# ビーム輸送光学系調整の 3 つのステップ



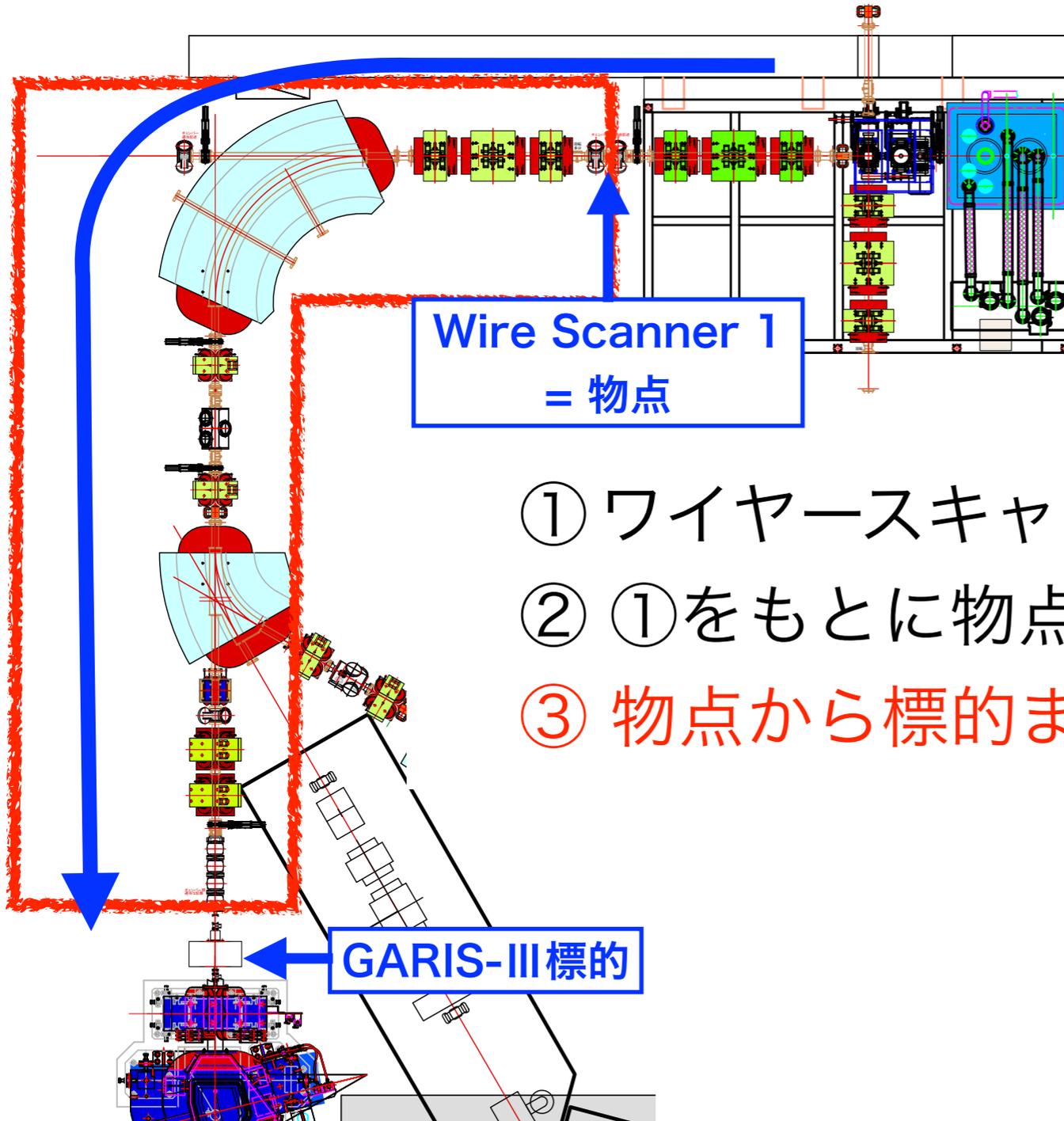
- ① ワイヤースキャナーを用いた位相楕円の測定
- ② ①をもとに物点で位相楕円を正立にする
- ③ 物点から標的までの光学系を調整

# ビーム輸送光学系調整の 3 つのステップ



- ① ワイヤースキャナーを用いた位相楕円の測定
- ② ①をもとに物点で位相楕円を正立にする
- ③ 物点から標的までの光学系を調整

# ビーム輸送光学系調整の 3 つのステップ



- ① ワイヤースキャナーを用いた位相楕円の測定
- ② ①をもとに物点で位相楕円を正立にする
- ③ 物点から標的までの光学系を調整

# これまで行われた SRILAC を用いたビームタイム

(1) SRILAC コミッショニング (2020年1 ~ 3月)

- $\text{Ar}^{13+}$  4 ~ 6 MeV/u
- 最大 ~ 2 pμA

(2) GARIS-III コミッショニング (2020年6 ~ 7月)

- $\text{Ar}^{11+}$  5 MeV/u
- 最大 ~ 0.5 pμA

(3) GARIS-III 予備実験 (2020年7月)

- $\text{V}^{13+}$  ~ 6 MeV/u

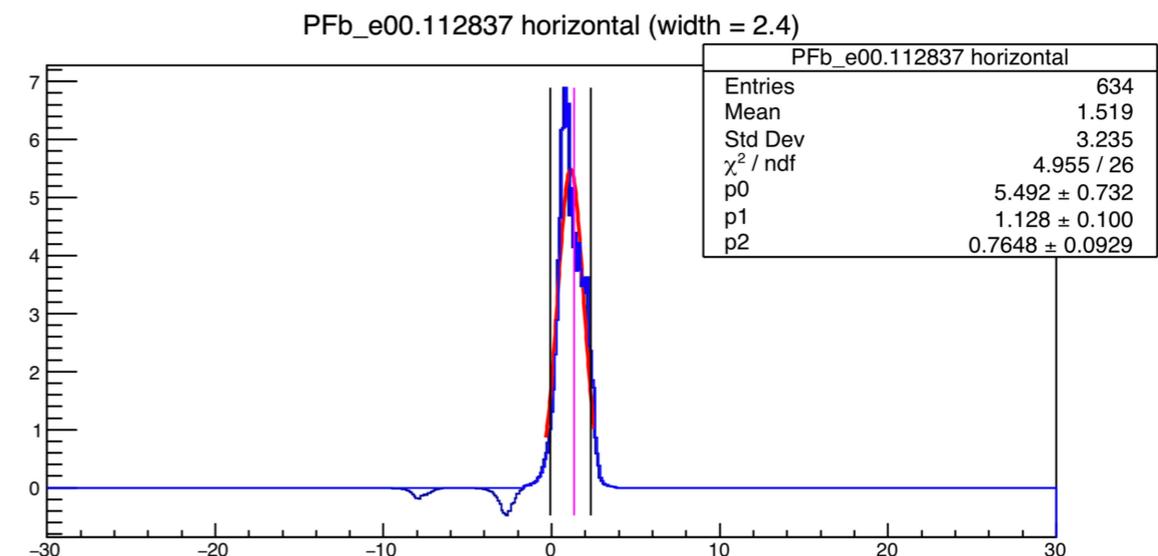
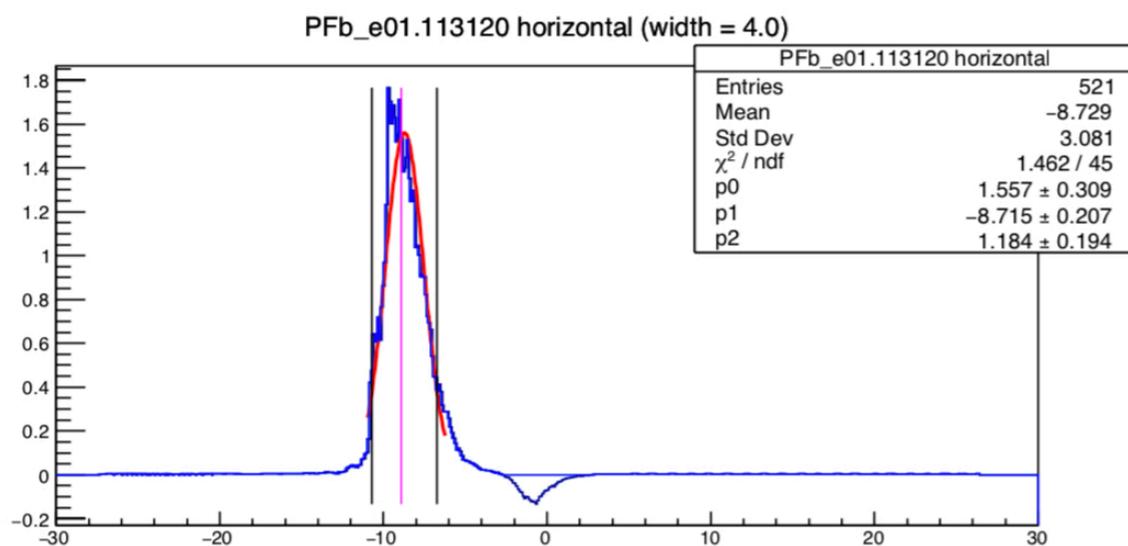
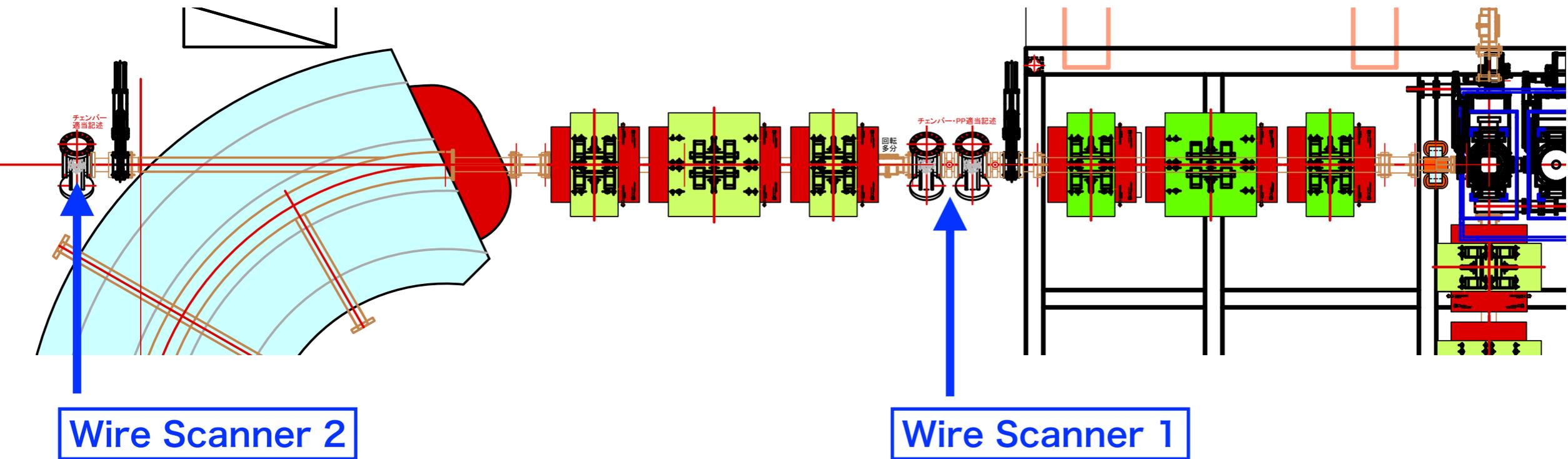
合計 ~ 10 回程度エミッタンス測定を行い、  
それぞれ GARIS-III までの光学系の調整を行った。

※ 詳しくは明日 10:30~ のポスターセッション

“理研超伝導線型加速器SRILACのコミッショニング” (FRPP05)

# ビーム輸送光学系調整の 3 つのステップ

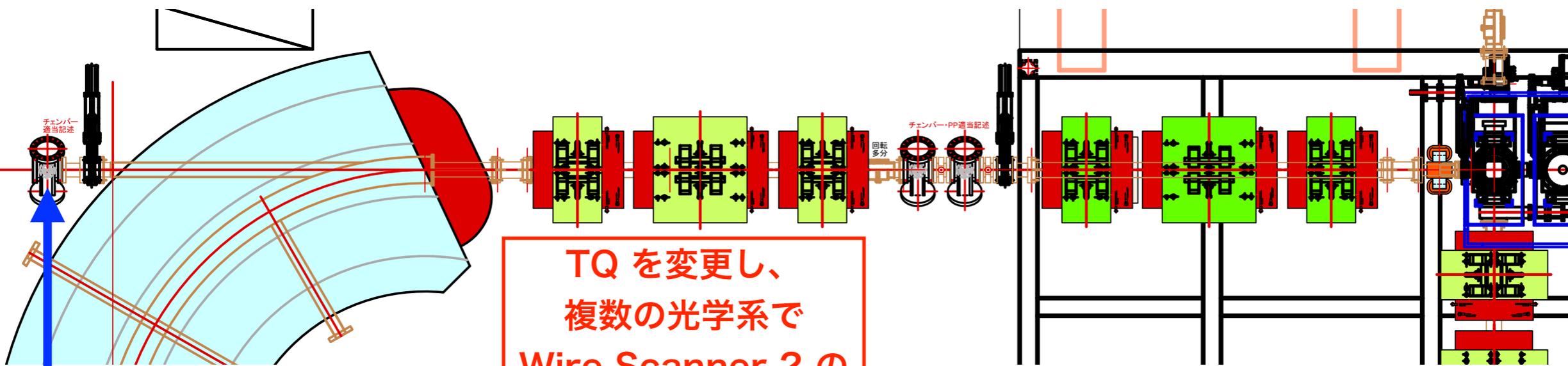
## ① : 位相楕円測定



Horizontal / Vertical 方向のビーム広がり を Wire Scanner (以後WS<sub>1</sub>, 2) で測定

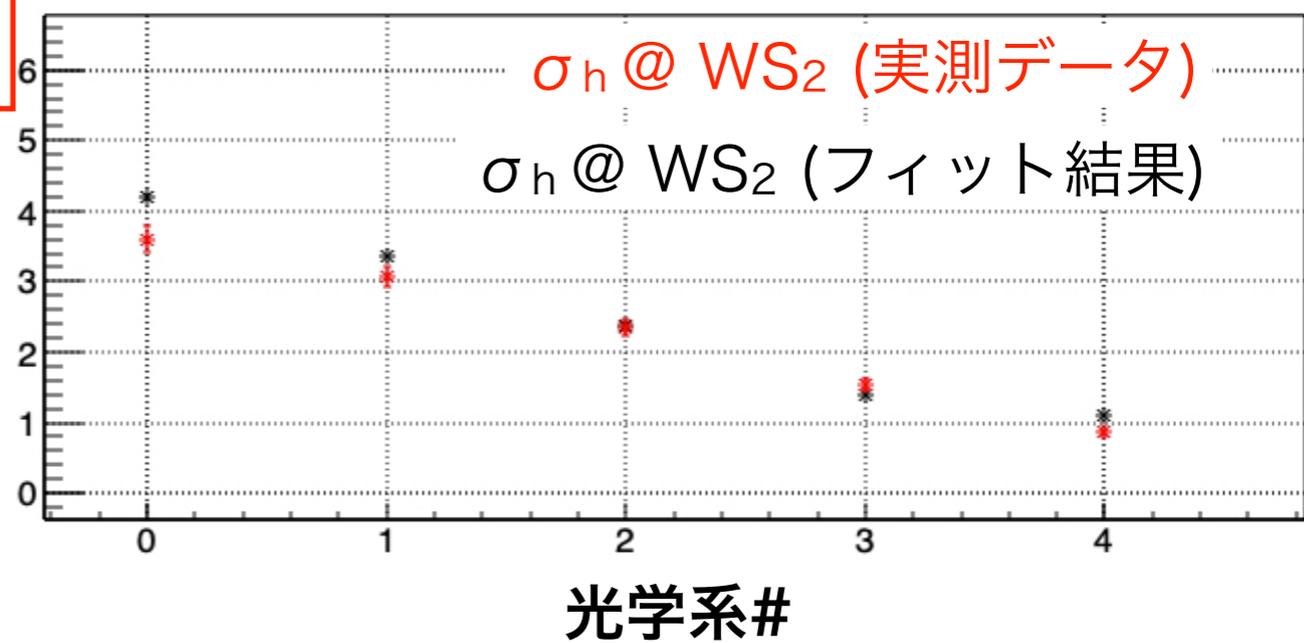
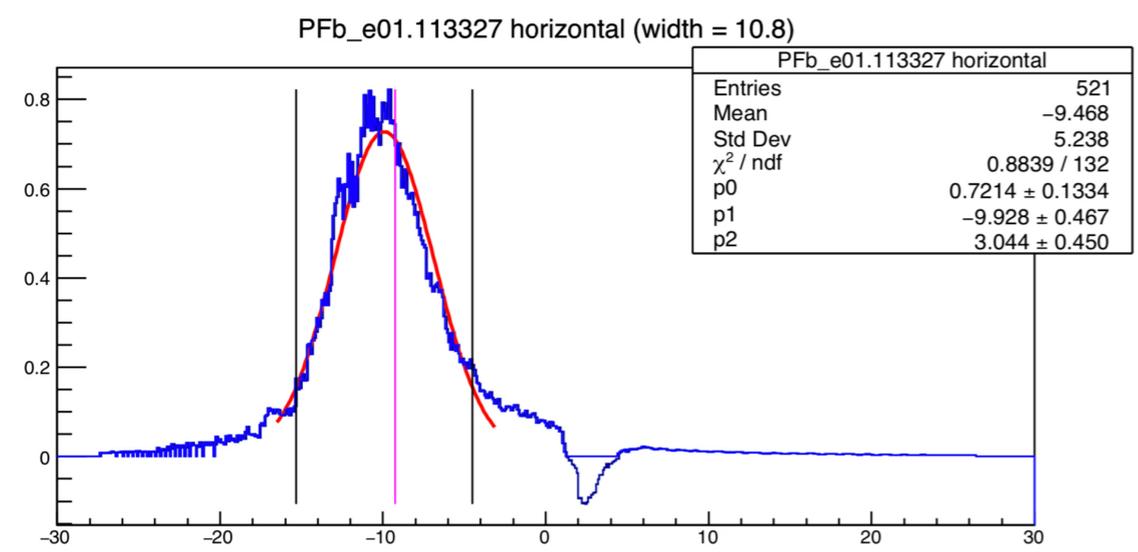
# ビーム輸送光学系調整の 3 つのステップ

## ① : 位相楕円測定



TQ を変更し、  
複数の光学系で  
Wire Scanner 2 の  
像を測定する。

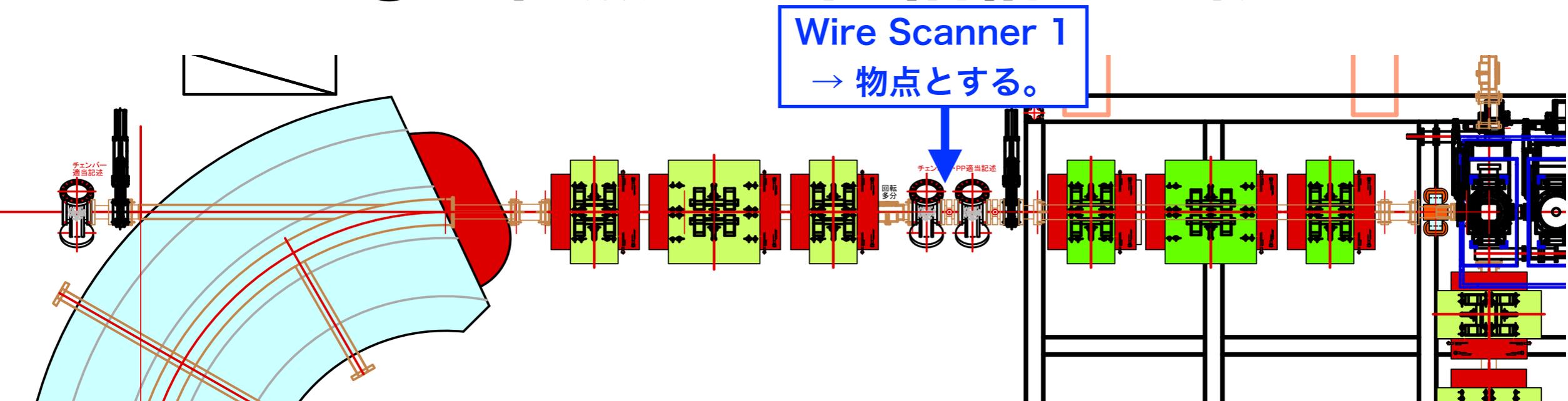
Wire Scanner 2



実測データを再現するWS<sub>1</sub>での位相楕円  
をフィット結果から求める。

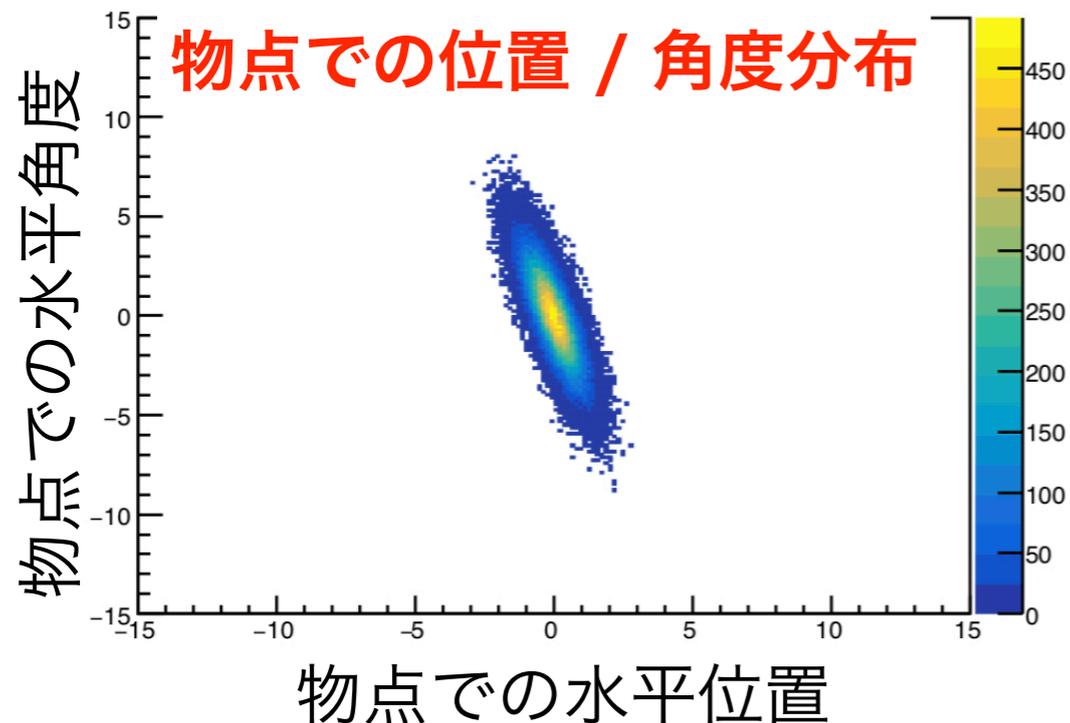
# ビーム輸送光学系調整の 3 つのステップ

## ② : 物点での位相楕円の調整



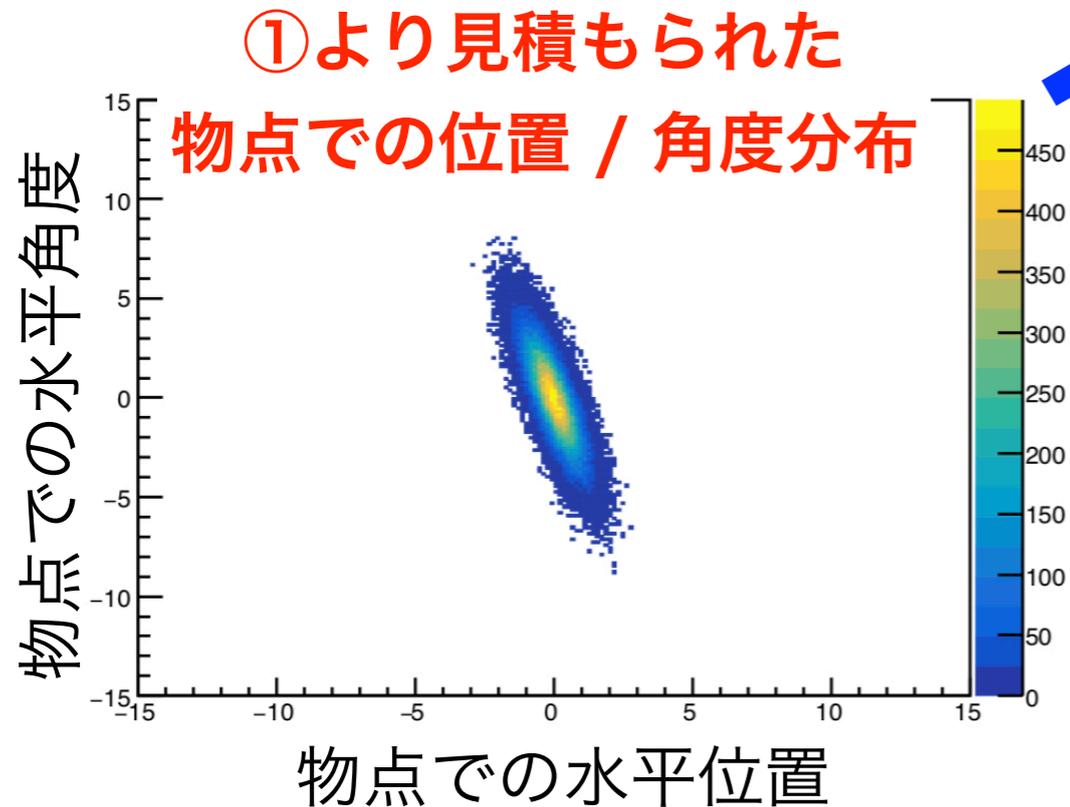
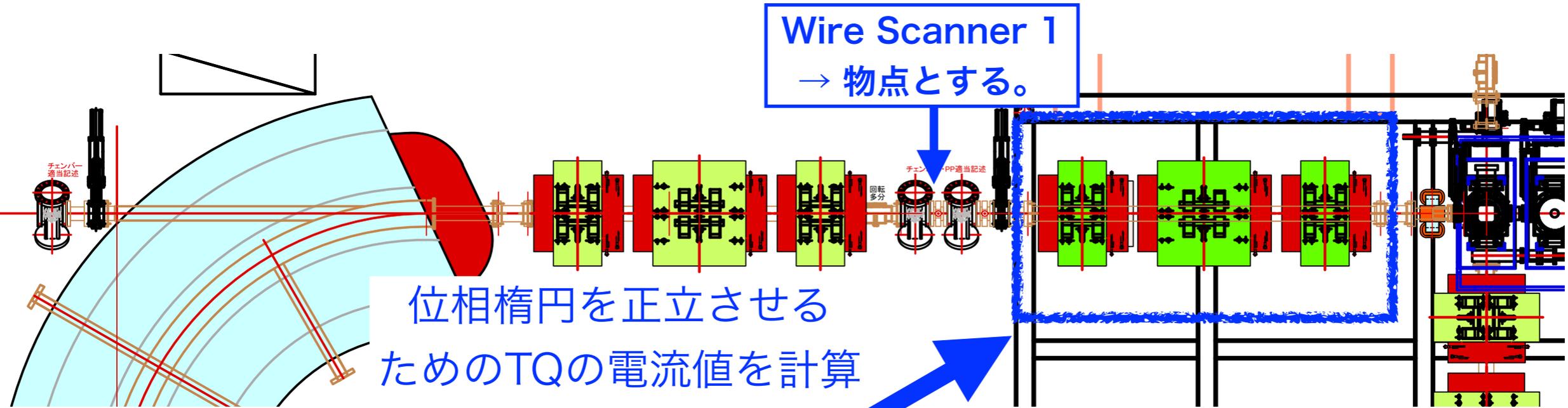
①より見積もられた

物点での位置 / 角度分布



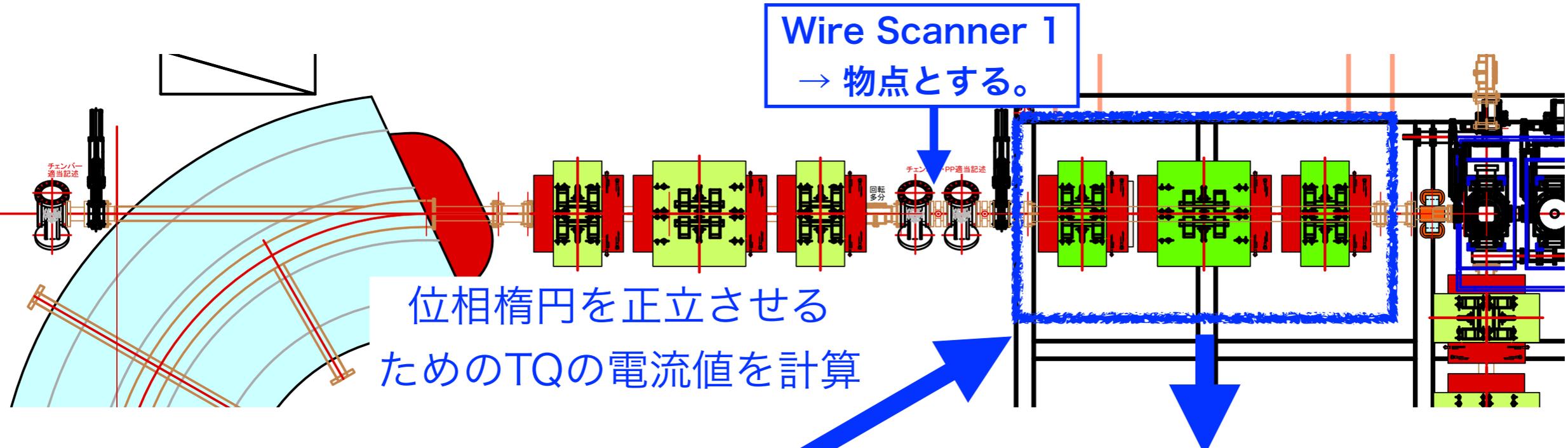
# ビーム輸送光学系調整の 3 つのステップ

## ② : 物点での位相楕円の調整



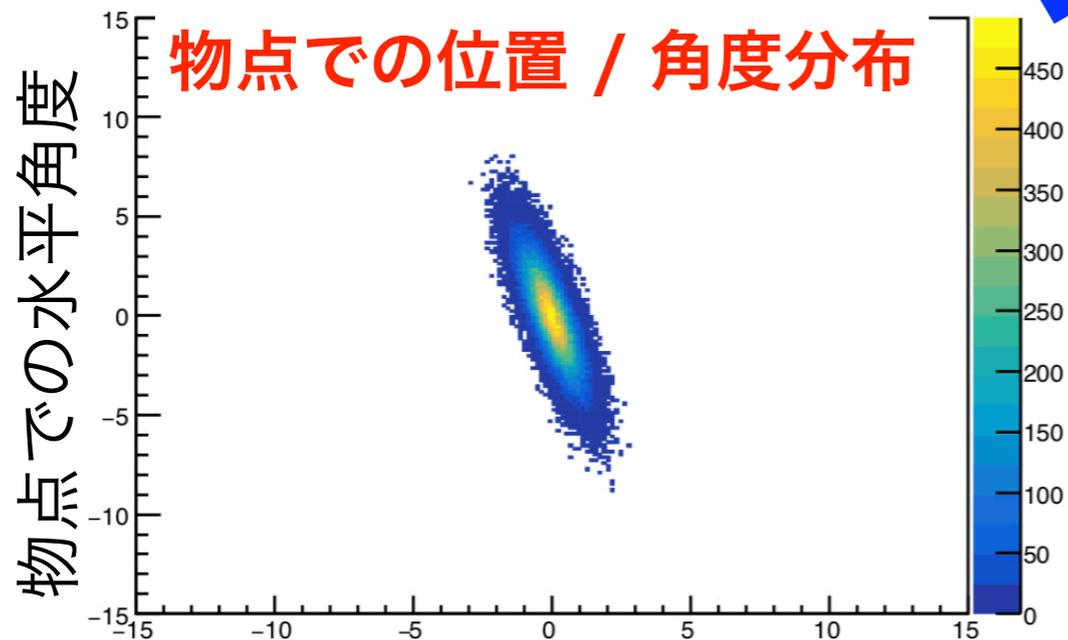
# ビーム輸送光学系調整の 3 つのステップ

## ② : 物点での位相楕円の調整



①より見積もられた

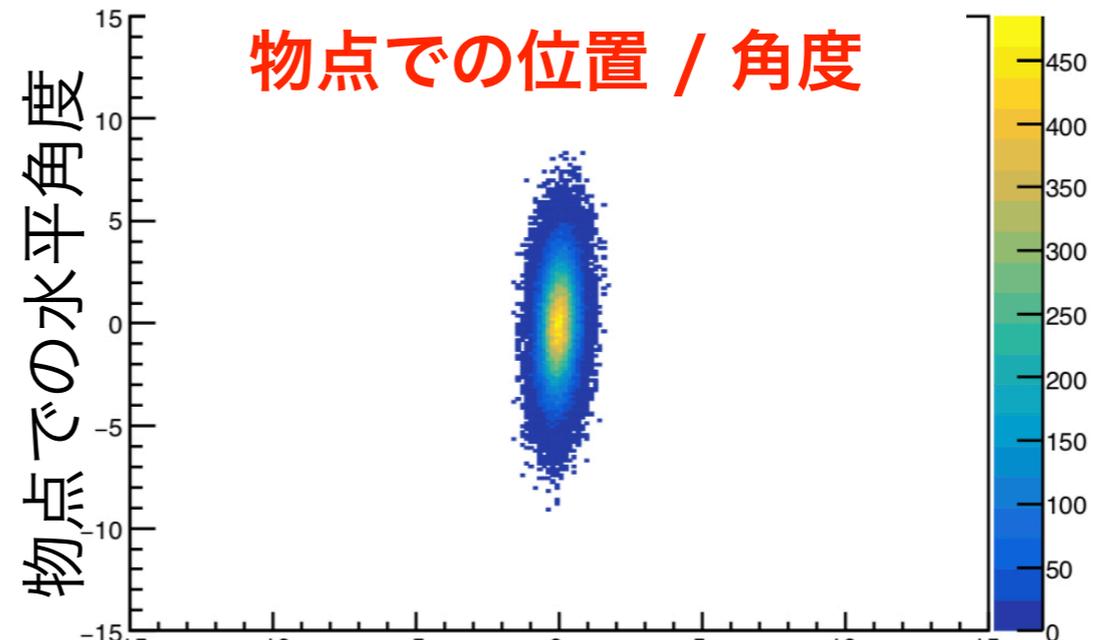
物点での位置 / 角度分布



物点での水平位置

TQ を調整後見積もられた

物点での位置 / 角度



物点での水平位置

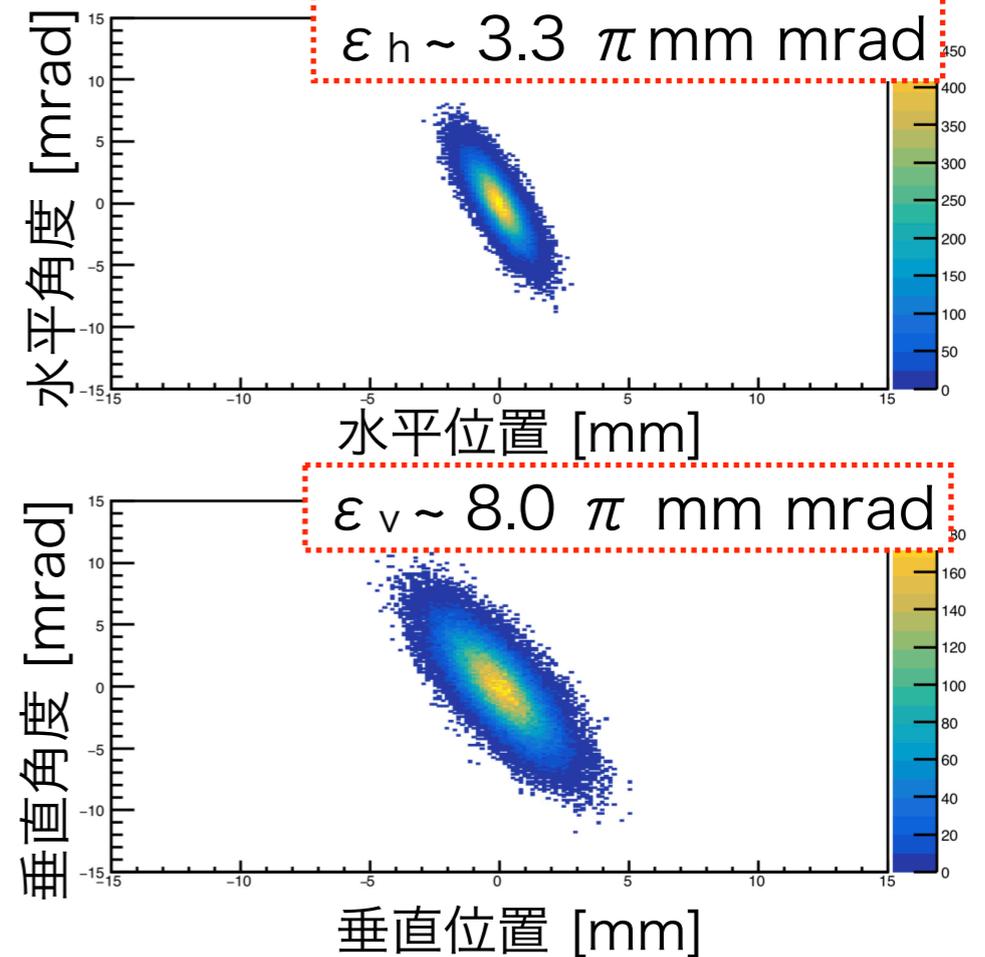
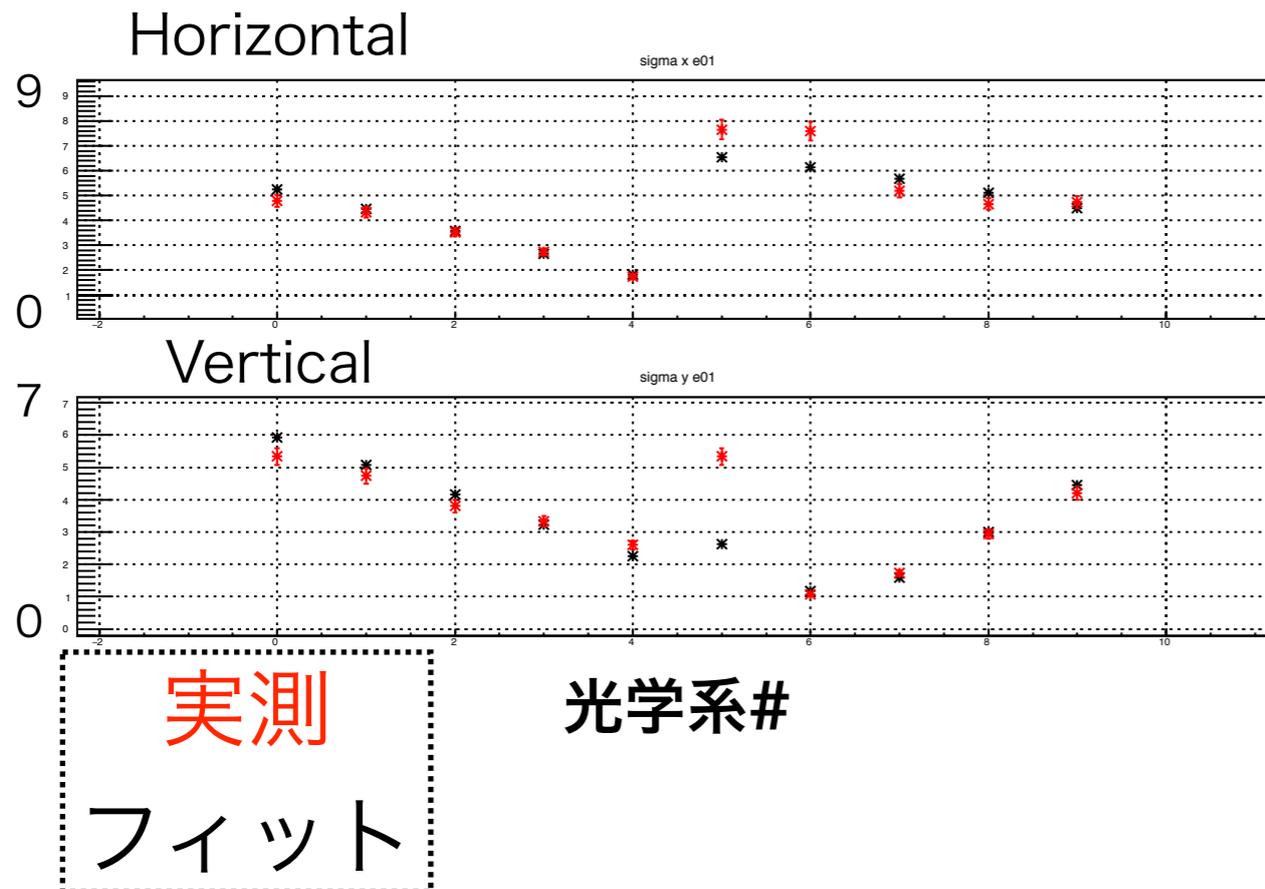
# 位相楕円測定データ (位相楕円を正立させる前後)

(2) GARIS III コミッショニング (2020年6 ~ 7月)

下流で測定した像の幅

位相楕円調整前

フィットパラメータから予測される  
上流 WS における像



10種の光学系での測定と、位相楕円の推定  
→ 予め用意したプログラムにより 30 分程度で完了

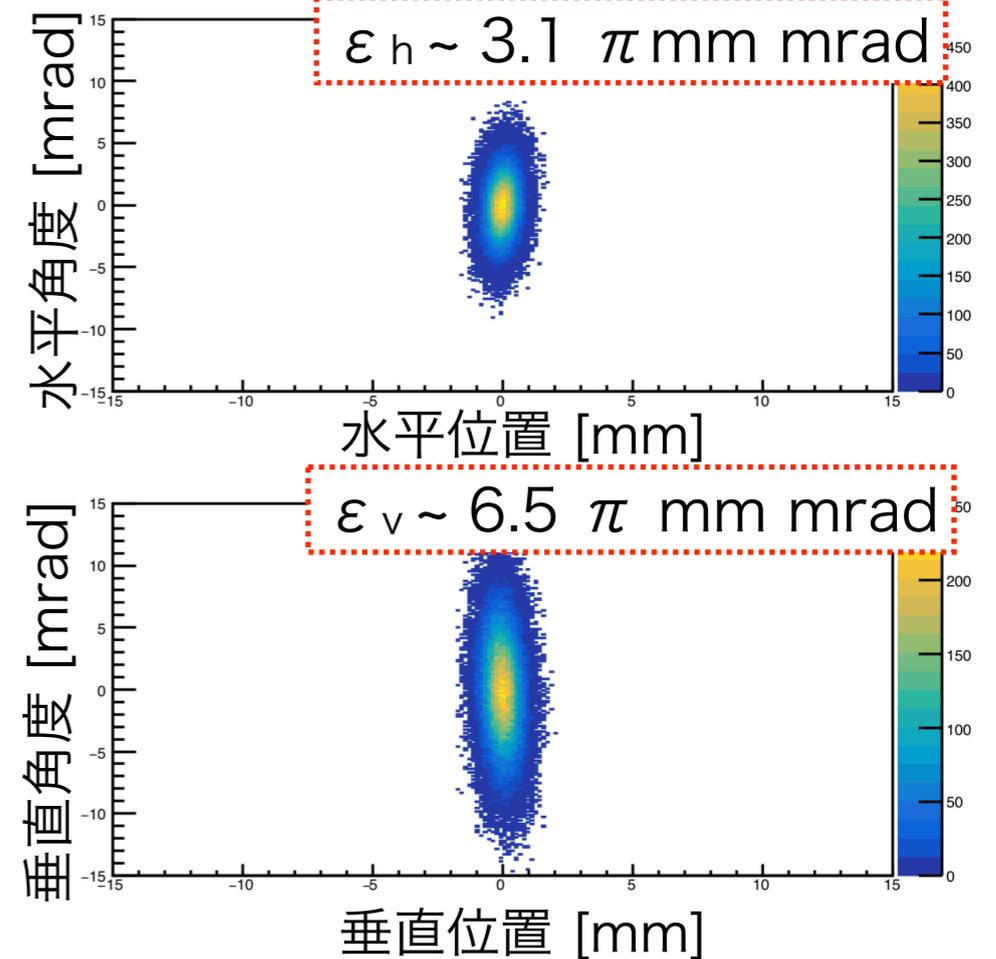
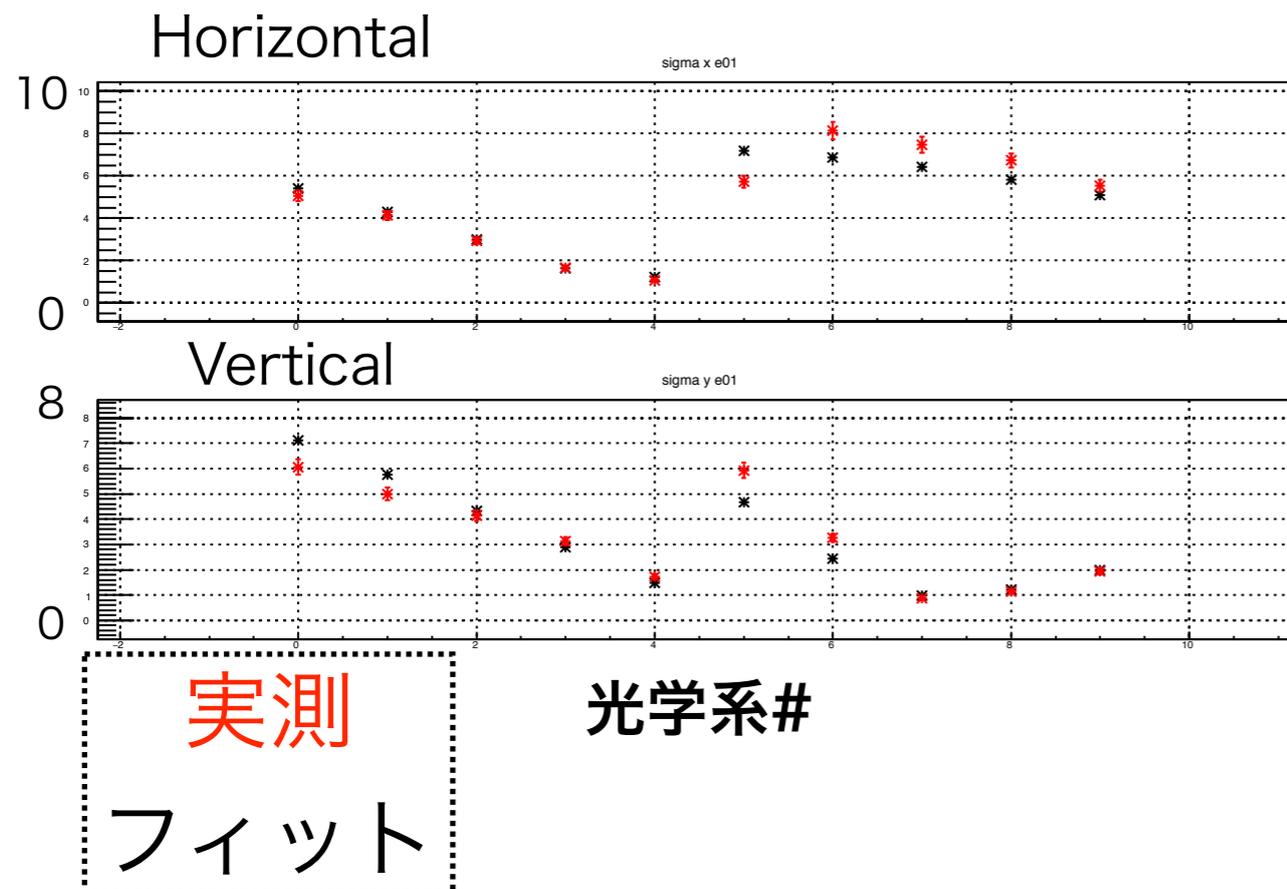
# 位相楕円測定データ (位相楕円を正立させる前後)

(2) GARIS III コミッショニング (2020年6 ~ 7月)

位相楕円調整後

フィットパラメータから予測される  
上流 WS における像

下流で測定した像の幅



位相楕円を正立させられた  
エミッタンスも ~ 20 % 以内で一致

# エミッタンス測定データまとめ

※  $\varepsilon$  は全て 4 rms に対応

イオン	Energy [MeV/u]	$\varepsilon_h @ e00$ [ $\pi$ mm mrad]	$\varepsilon_v @ e00$ [ $\pi$ mm mrad]	$\varepsilon_h @$ RFQ 入り口 [ $\pi$ mm mrad]	$\varepsilon_h @$ RFQ 入り口 [ $\pi$ mm mrad]	
Ar <sup>13+</sup>	4	3.6	2.7	—	—	
Ar <sup>13+</sup>	4	5.5	2.7	—	—	↓ イオン源再調整
Ar <sup>13+</sup>	6	3.9	2.3	—	—	↓ 加速
Ar <sup>13+</sup>	6	4.0	6.0	34.2	41.2	↓ スリット調整
Ar <sup>13+</sup>	4	4.7	6.8	92.9	83.2	↓ イオン源再調整
Ar <sup>13+</sup>	6	3.6	4.3	—	—	↓ 加速
Ar <sup>13+</sup>	6	3.2	3.2	99.3	63.5	↓ イオン源再調整
Ar <sup>11+</sup>	5	3.1	6.5	—	—	↓ イオン源変更
Ar <sup>11+</sup>	5	2.2	1.6	—	—	↓ イオン源再調整
V <sup>13+</sup>	6	5.9	4.5	84.1	66.4	↓ イオン源変更

- $\varepsilon$  : 1.6 ~ 6.8  $\pi$  mm mrad → 条件によって値はばらつく。

# エミッタンス測定データまとめ

※  $\varepsilon$  は全て 4 rms に対応

イオン	Energy [MeV/u]	$\varepsilon_h$ @ e00 [ $\pi$ mm mrad]	$\varepsilon_v$ @ e00 [ $\pi$ mm mrad]	$\varepsilon_h$ @ RFQ 入り口 [ $\pi$ mm mrad]	$\varepsilon_h$ @ RFQ 入り口 [ $\pi$ mm mrad]	
Ar <sup>13+</sup>	4	3.6	2.7		—	
Ar <sup>13+</sup>	4	5.5	2.7		—	↓ イオン源再調整
Ar <sup>13+</sup>	6	3.9	2.3	←→ 4.2 / 2.1	—	↓ 加速
Ar <sup>13+</sup>	6	4.0	6.0	34.2	41.2	↓ スリット調整
Ar <sup>13+</sup>	4	4.7	6.8		83.2	↓ イオン源再調整
Ar <sup>13+</sup>	6	3.6	4.3	←→ 3.6 / 5.2	—	↓ 加速
Ar <sup>13+</sup>	6	3.2	3.2	99.3	63.5	↓ イオン源再調整
Ar <sup>11+</sup>	5	3.1	6.5	—	—	↓ イオン源変更
Ar <sup>11+</sup>	5	2.2	1.6	—	—	↓ イオン源再調整
V <sup>13+</sup>	6	5.9	4.5	84.1	66.4	↓ イオン源変更

- $\varepsilon$  : 1.6 ~ 6.8  $\pi$  mm mrad → 条件によって値はばらつく。
- SRILACの加速による  $\varepsilon$  の変化はおおよそ計算通り

# エミッタンス測定データまとめ

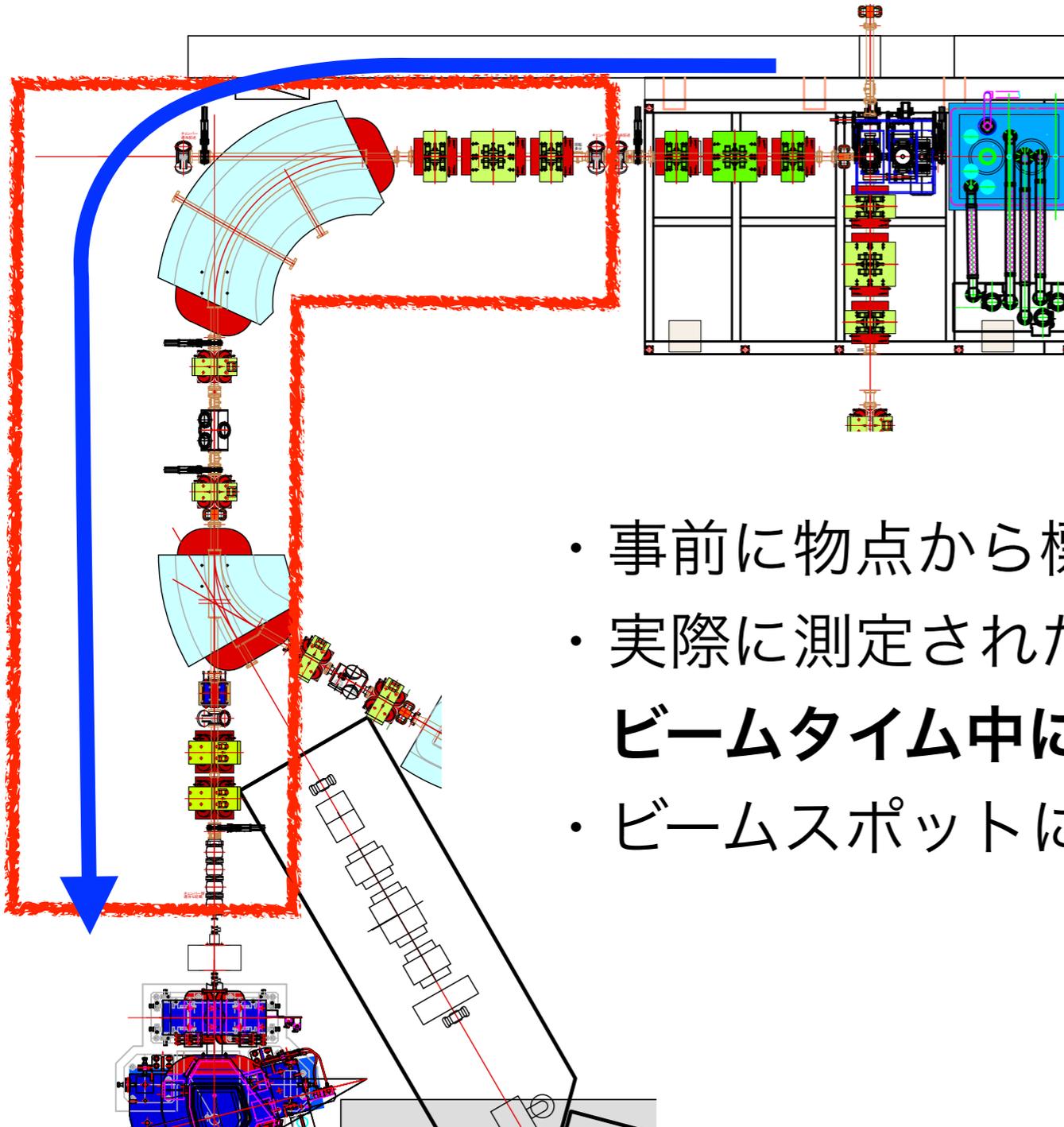
※  $\varepsilon$  は全て 4 rms に対応

イオン	Energy [MeV/u]	$\varepsilon_h$ @ e00 [ $\pi$ mm mrad]	$\varepsilon_v$ @ e00 [ $\pi$ mm mrad]	$\varepsilon_h$ @ RFQ 入り口 [ $\pi$ mm mrad]	$\varepsilon_h$ @ RFQ 入り口 [ $\pi$ mm mrad]	
Ar <sup>13+</sup>	4	3.6	2.7	—	—	
Ar <sup>13+</sup>	4	5.5	2.7	—	—	↓ イオン源再調整
Ar <sup>13+</sup>	6	RFQ 入り口 (~ 3 keV/u) の $\varepsilon$ から予測される値		—	—	↓ 加速
Ar <sup>13+</sup>	6	4.0 0.8	6.0 1.0	34.2	41.2	↓ スリット調整
Ar <sup>13+</sup>	4	4.7 2.8	6.8 2.5	92.9	83.2	↓ イオン源再調整
Ar <sup>13+</sup>	6	3.6	4.3	—	—	↓ 加速
Ar <sup>13+</sup>	6	3.2 2.3	3.2 1.5	99.3	63.5	↓ イオン源再調整
Ar <sup>11+</sup>	5	3.1	6.5	—	—	↓ イオン源変更
Ar <sup>11+</sup>	5	2.2	1.6	—	—	↓ イオン源再調整
V <sup>13+</sup>	6	5.9 1.9	4.5 1.6	84.1	66.4	↓ イオン源変更

- $\varepsilon$  : 1.6 ~ 6.8  $\pi$  mm mrad → 条件によって値はばらつく。
- SRILACの加速による  $\varepsilon$  の変化はおおよそ計算通り
- 上流ペッパーポットで計測した値と比べて 1.5 ~ 6 倍に増大  
→ emittance growth が見られる。詳細は解析中。

# ビーム輸送光学系調整の 3 つのステップ

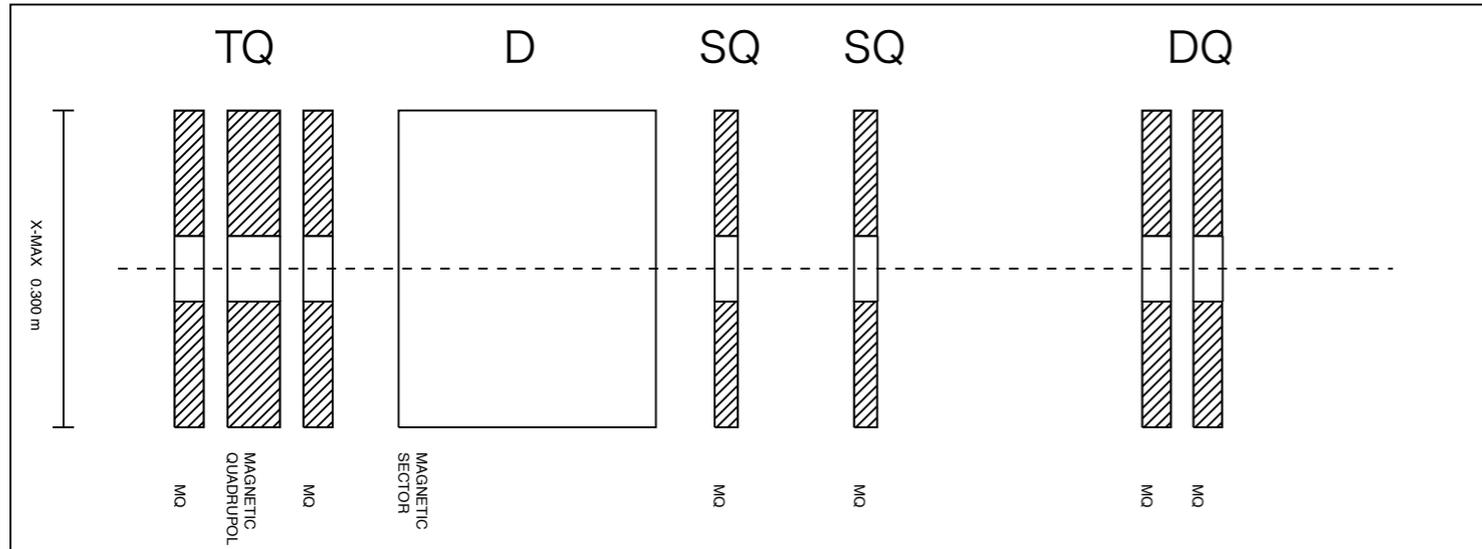
## ③ : 輸送光学系の最適化



- ・ 事前に物点から標的までの基本となる光学系を設計
- ・ 実際に測定された位相楕円や実験条件に合わせて  
**ビームタイム中にその場で再フィット**
- ・ ビームスポットにあるビューワーを見ながら微調整

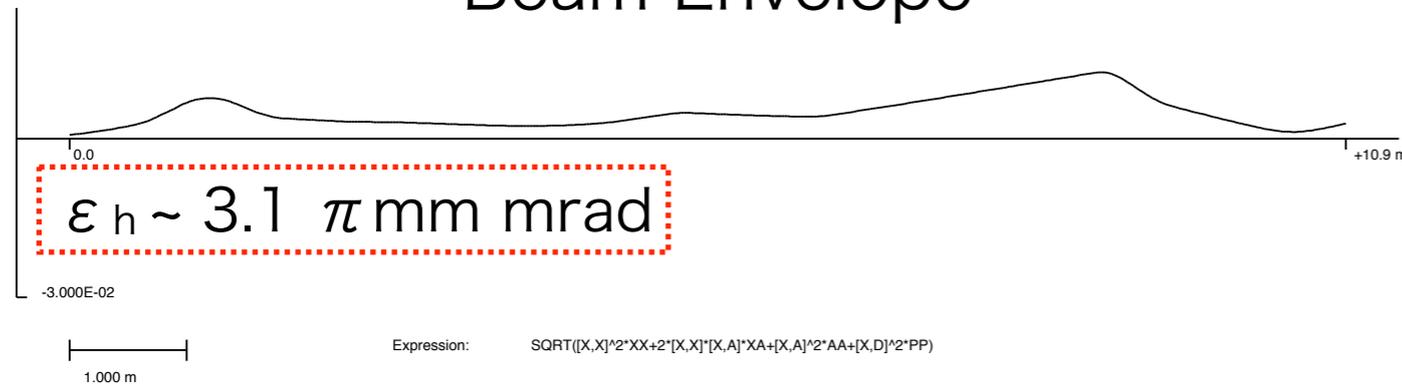
# 輸送光学系の最適化の例 ①

計算結果 (計算コード: GICOSY)

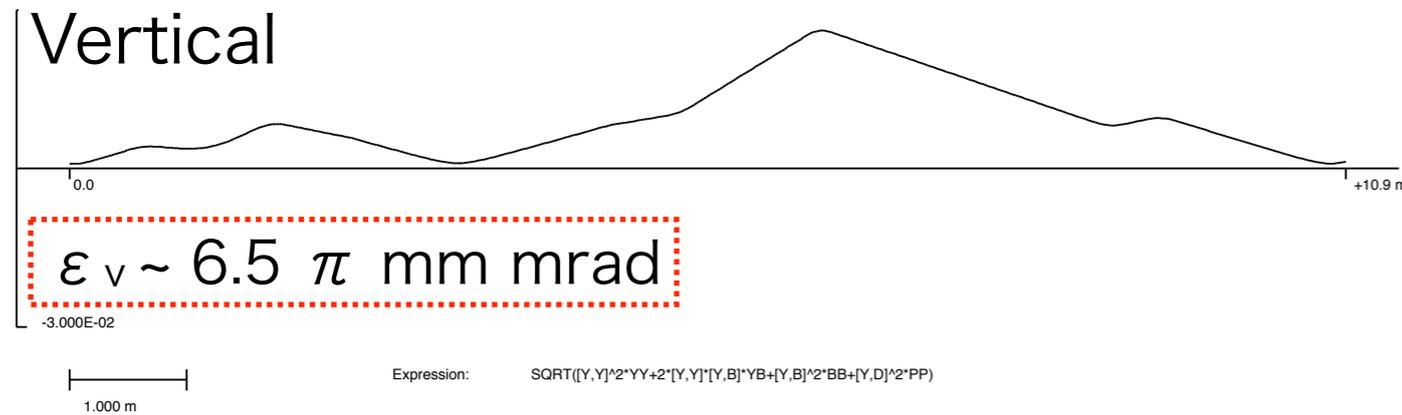


位相楕円の調整後、  
標的で**水平楕円**となるように  
調整した光学系

## Horizontal Beam Envelope

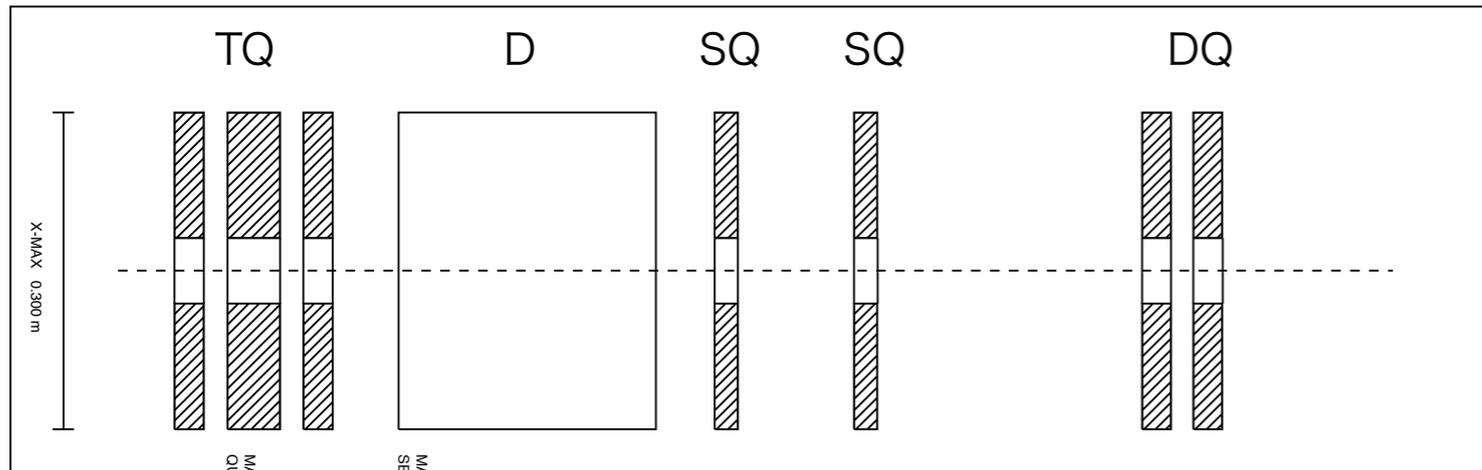


## Vertical



# 輸送光学系の最適化の例 ①

計算結果 (計算コード: GICOSY)

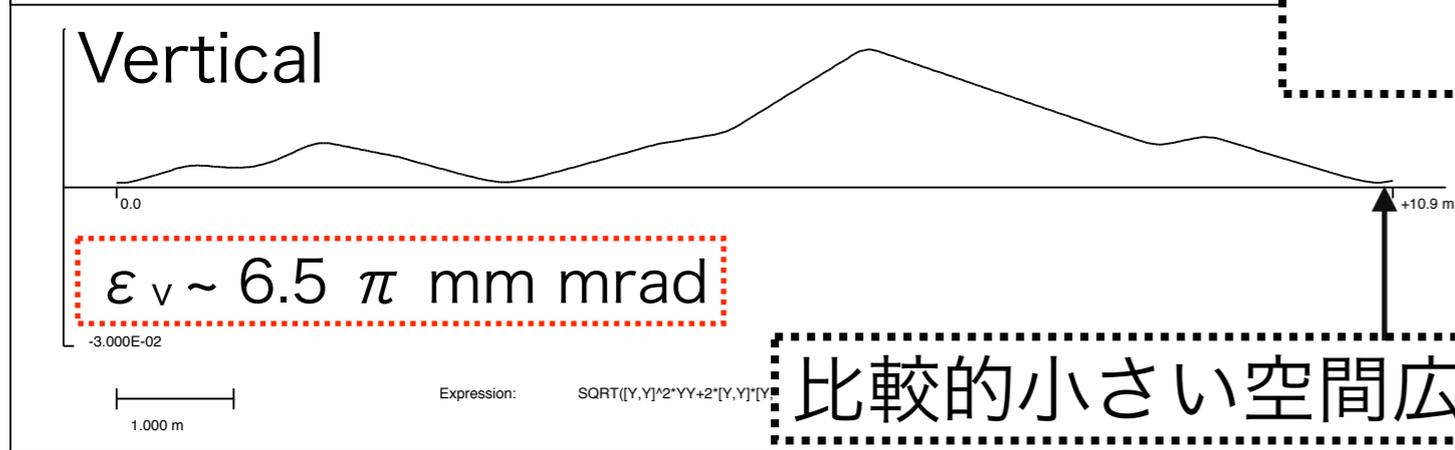


位相楕円の調整後、  
標的で**水平楕円**となるように  
調整した光学系

比較的広い空間広がり (標的の熱対策)



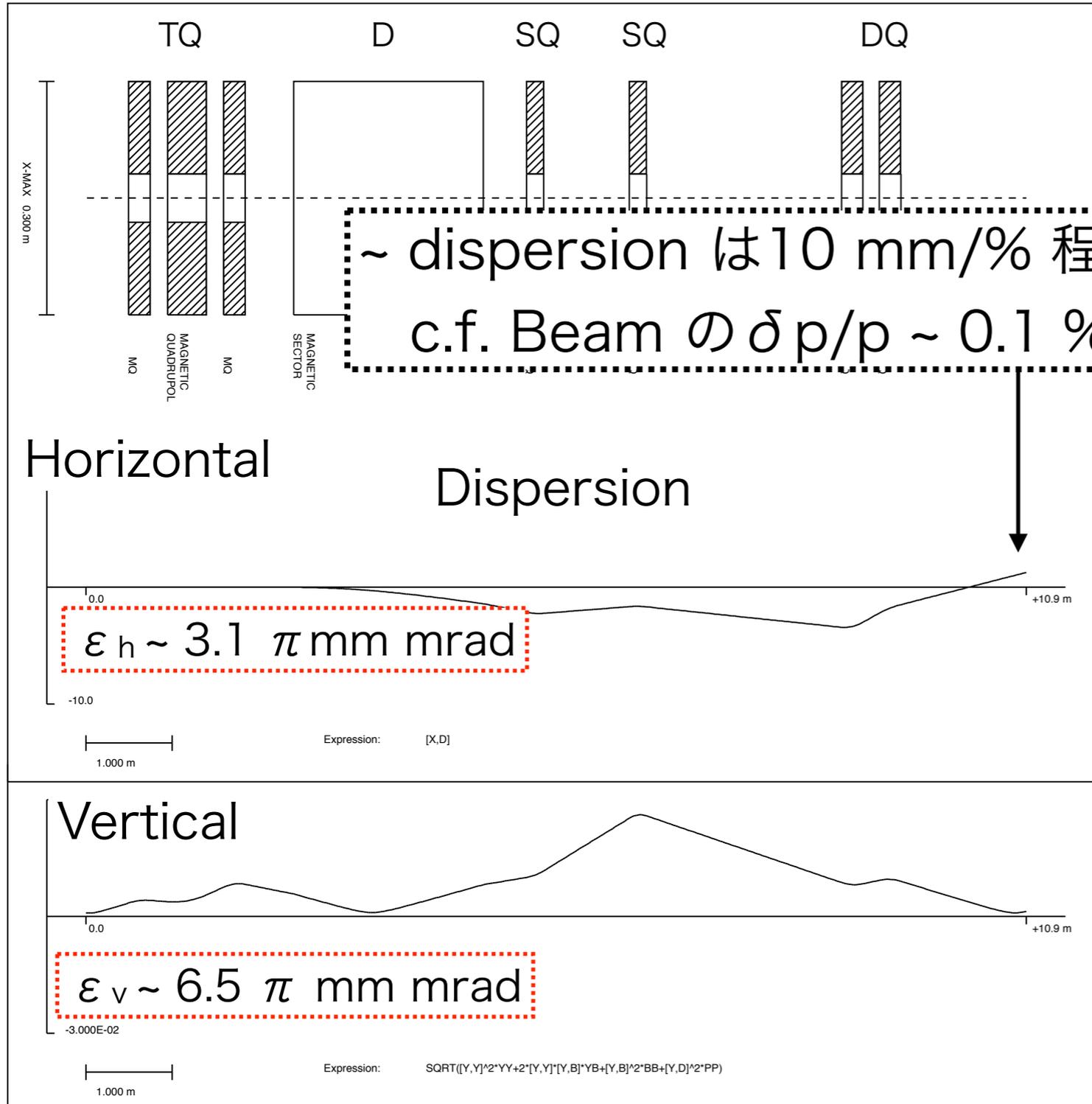
標的ではなく、差動排気システム  
で最も細くなる。



比較的小さい空間広がり

# 輸送光学系の最適化の例 ①

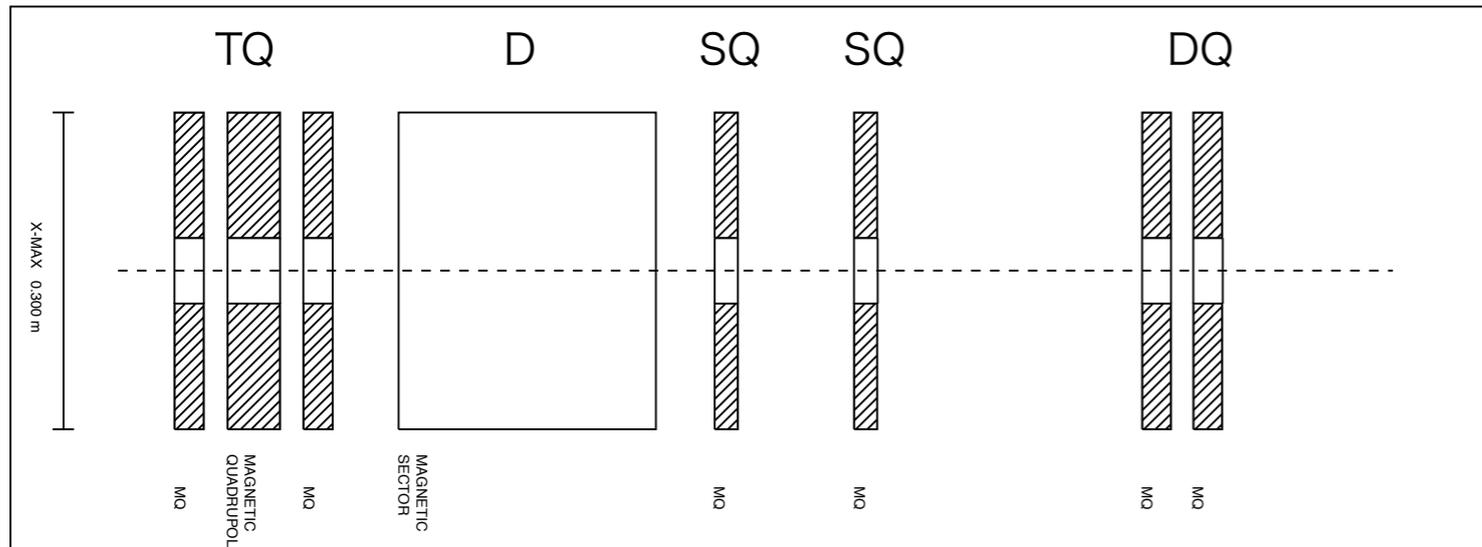
計算結果 (計算コード: GICOSY)



位相楕円の調整後、  
標的で**水平楕円**となるように  
調整した光学系

# 輸送光学系の最適化の例 ①

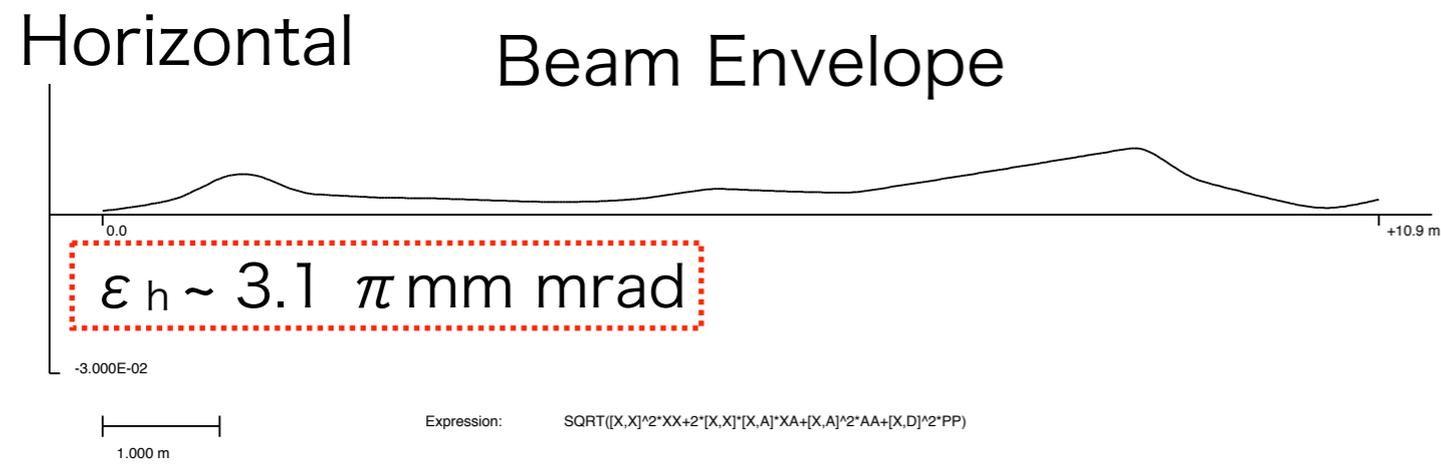
計算結果 (計算コード: GICOSY)



位相楕円の調整後、  
標的で**水平楕円**となるように  
調整した光学系

スポット画像

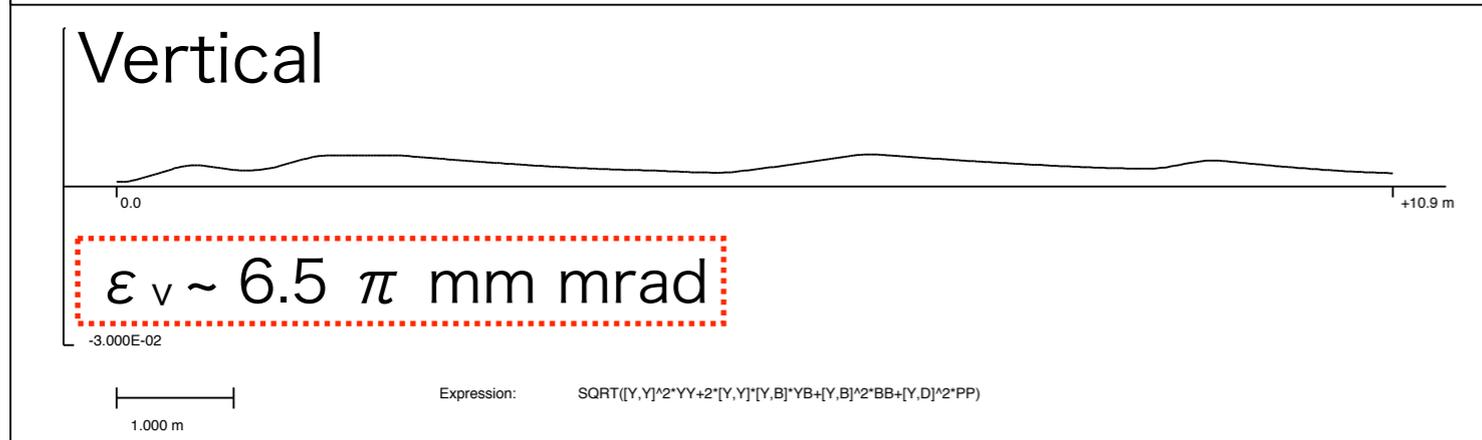
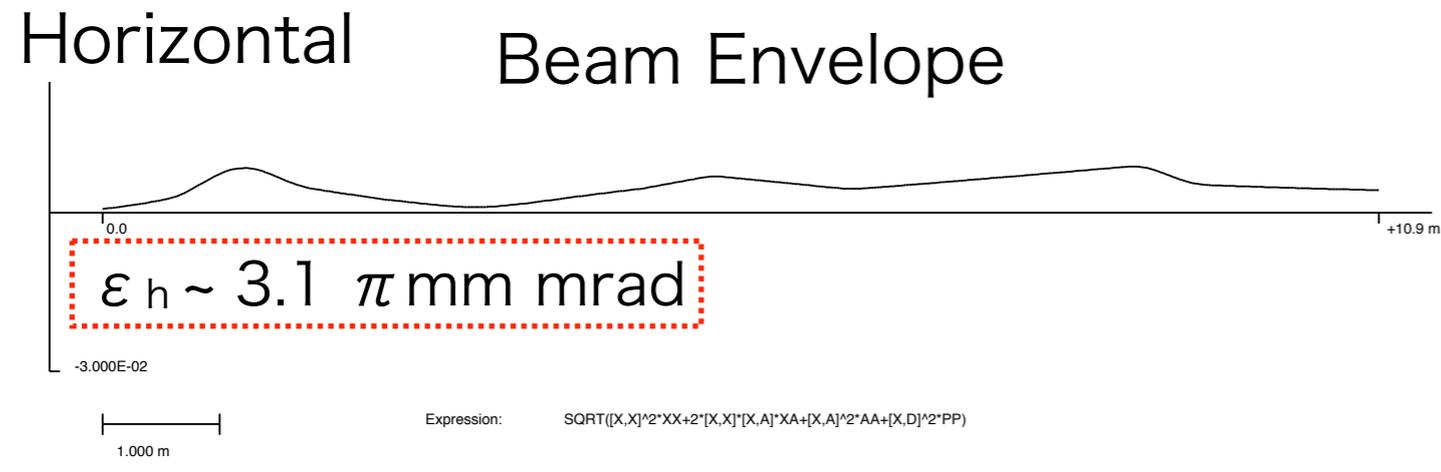
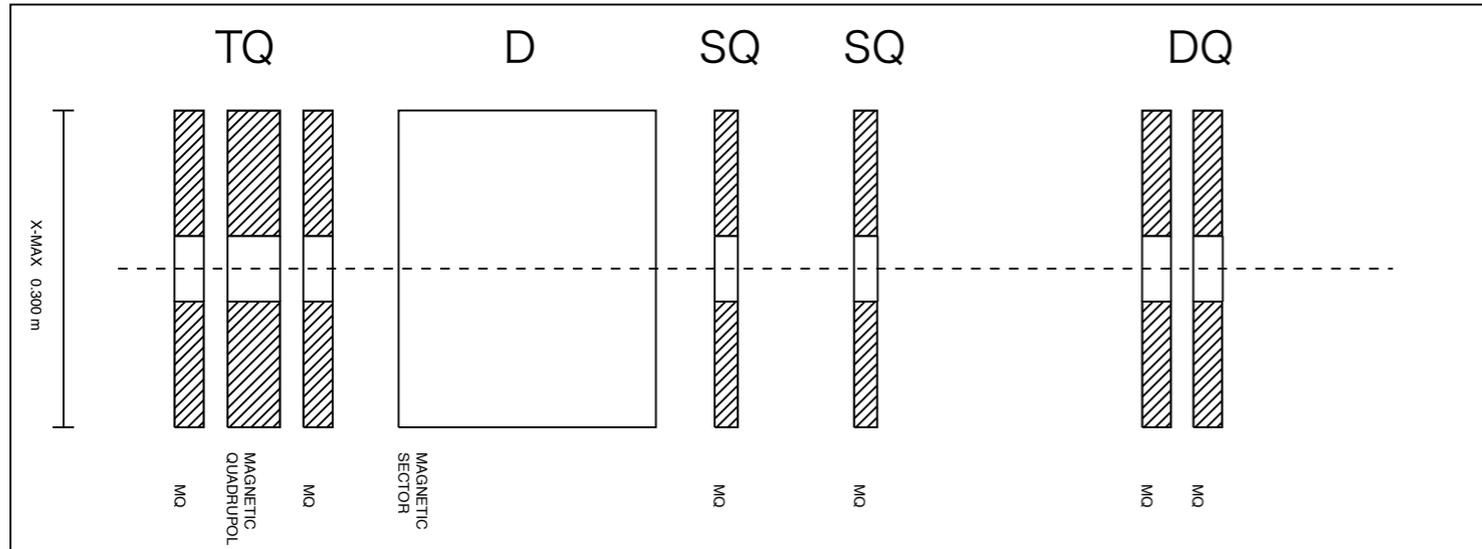
@ GARIS III 標的 (CCDカメラ)



ビームロス < a few %  
(FCによる計測)

# 輸送光学系の最適化の例 ②

計算結果 (計算コード: GICOSY)



位相楕円の調整後、  
標的で円となるように  
調整した光学系

スポット画像

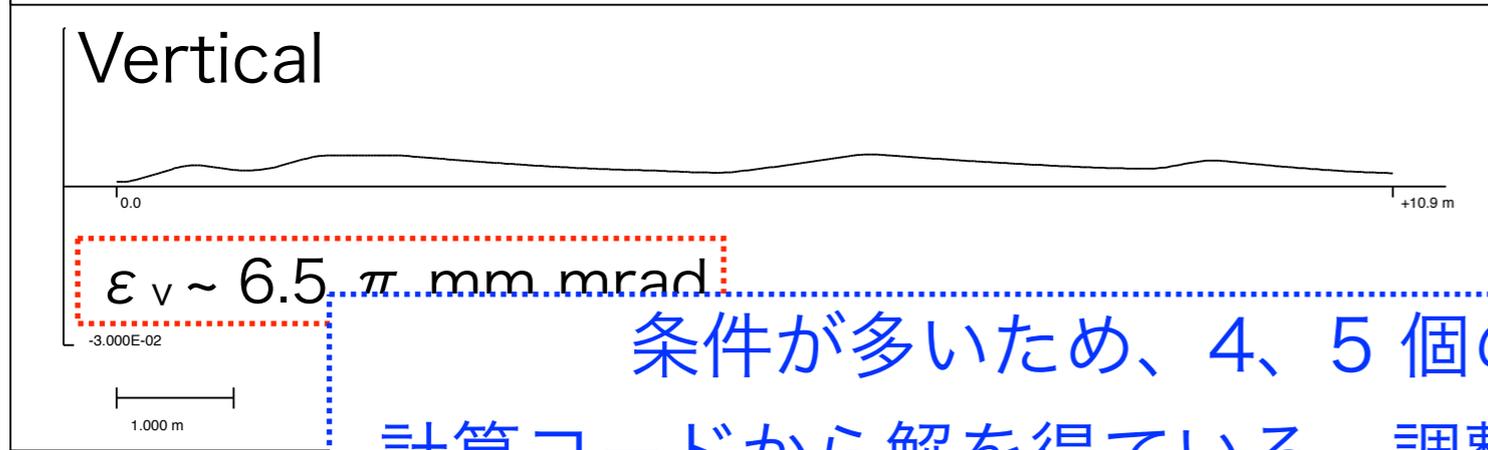
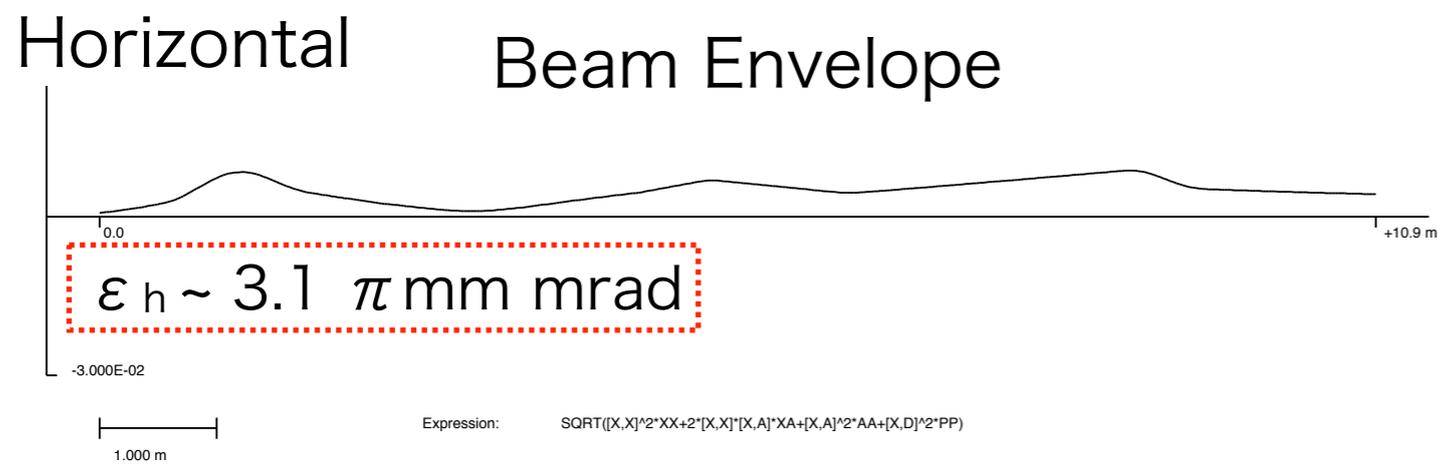
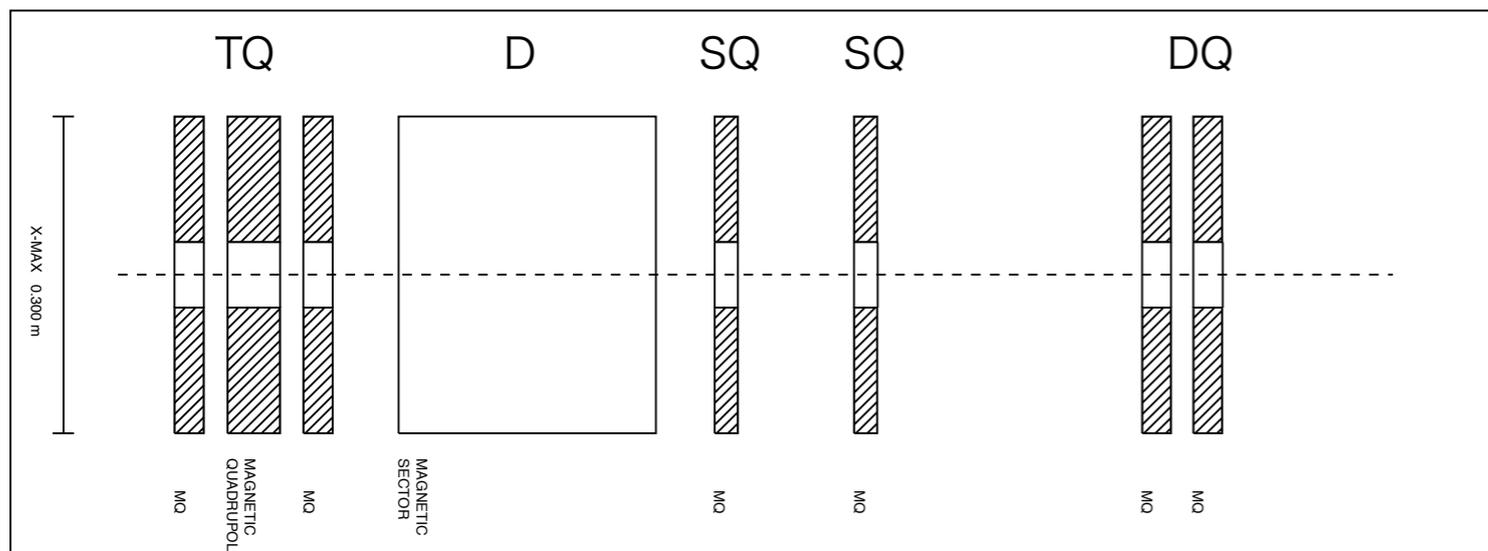
@ GARIS III 標的 (CCDカメラ)



ビームロス < a few %  
(FCによる計測)

# 輸送光学系の最適化の例 ②

計算結果 (計算コード: GICOSY)



位相楕円の調整後、  
標的で円となるように  
調整した光学系

スポット画像

@ GARIS III 標的 (CCDカメラ)



条件が多いため、4、5 個の Q を動かして  
計算コードから解を得ている。調整は数時間程度で完了。

ew %  
(F値による計測)

# まとめ

- 理化学研究所において、新超重元素探索に向けて超伝導線形加速器 (SRILAC) および GARIS III のコミッショニングが行われた。
- SRILAC から GARIS-III まで、大強度ビームを最小のロスで輸送するために位相楕円の測定と光学系調整を行った。
- 位相楕円に合わせて光学系を最適化することにより、ビームロスを数%に抑えつつ標的上での像のコントロールに成功
- 各解析などを自動化することにより、位相楕円の測定に~30分、光学系の調整を含めて ~ 数時間で GARIS-III までの調整が完了
- 新超重元素探索実験が問題なくスタートできた

# 課題とこれからの方針

- 強度の向上に合わせてエミッタンスが大きくなることが予想される  
→ より厳しい条件下でのビーム輸送のコントロール
- BPM などの非破壊検出器による新たなエミッタンス測定法の開発
  - ※ BPMについて、詳しくは明日10:30 ~ のポスターセッション  
“理研超伝導リニアック用ビームエネルギー・位置モニターのコミッショニング” (FRPP20)
- GUIを整備し、誰でも簡単にエミッタンス測定から光学系の調整まで出来るようにする。