

26<sup>th</sup> ICEPP symposium

# J-PARC muon g-2/EDM 実験 ミュオン線形加速器における ビーム輸送ラインの開発

四塚麻衣<sup>A</sup>, 飯嶋徹<sup>A,B</sup>, 飯沼裕美<sup>C</sup>, 居波賢二<sup>A</sup>, 大谷将士<sup>D</sup>, 河村成肇<sup>D</sup>, 北村遼<sup>E</sup>, 近藤恭弘<sup>E</sup>,  
齊藤直人<sup>F</sup>, 下村浩一郎<sup>D</sup>, 須江祐貴<sup>A</sup>, 竹内佑甫<sup>G</sup>, 中沢雄河<sup>C</sup>, 長谷川和男<sup>E</sup>, ニツ川健太<sup>D</sup>,  
三部勉<sup>D</sup>, 三宅康博<sup>D</sup>, 森下卓俊<sup>E</sup>, 安田浩昌<sup>H</sup>, 山崎高幸<sup>D</sup>,  
他J-PARC muon g-2/EDMコラボレーション

<sup>A</sup>名大理, <sup>B</sup>名大KMI, <sup>C</sup>茨大理, <sup>D</sup>高工研, <sup>E</sup>原研, <sup>F</sup>J-PARCセンター, <sup>G</sup>九大理, <sup>H</sup>東大理

# 目次

## 1. 研究背景

- J-PARC muon g-2/EDM 実験
- ミューオン線形加速器の開発

## 2. ビーム物理の復習

- エミッタンス・Twiss パラメータ
- ビームマッチング

## 3. 低速部ビーム輸送ラインの開発

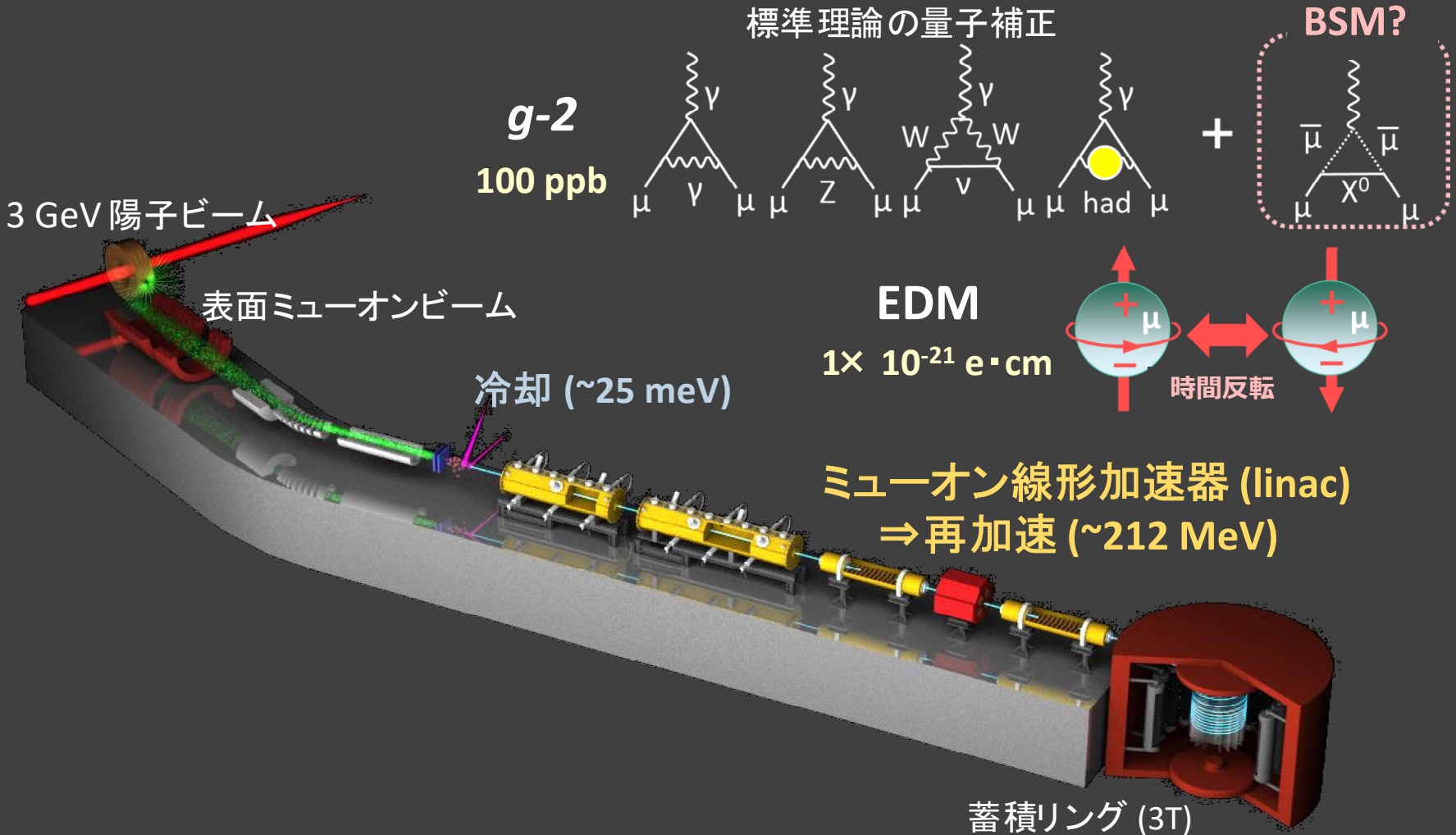
- ビーム輸送ライン
- IH入射条件の評価
- ビーム輸送ラインの基本デザイン
- 縦方向ビームプロファイルモニタの評価

## 4. まとめと展望

# J-PARC muon $g-2$ /EDM 実験

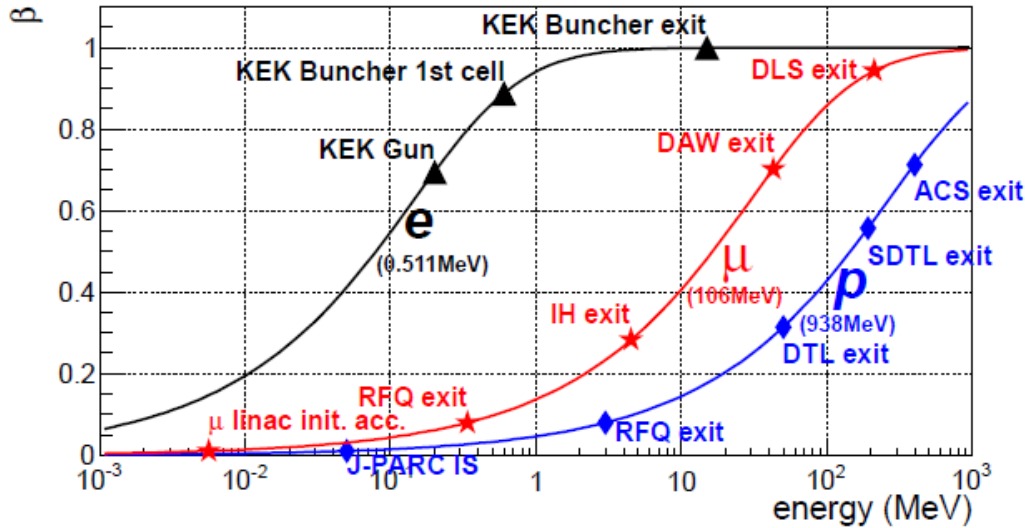
先行研究[1]とは異なる手法でミュオンの超精密測定を目指す

⇒ 冷却→再加速によって生成する低エミッタンスミュオンビームを使用



# ミューオン線形加速器の開発

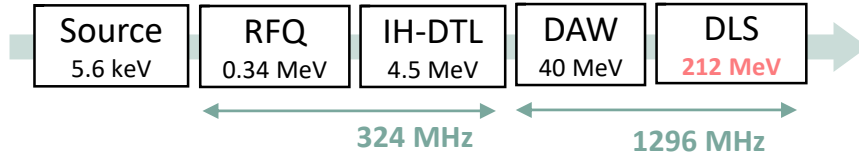
粒子毎の速度変化と使用する加速器 [2]



加速に伴う速度変化が大きいため、エネルギーに応じて最適な加速手法を使用する必要がある

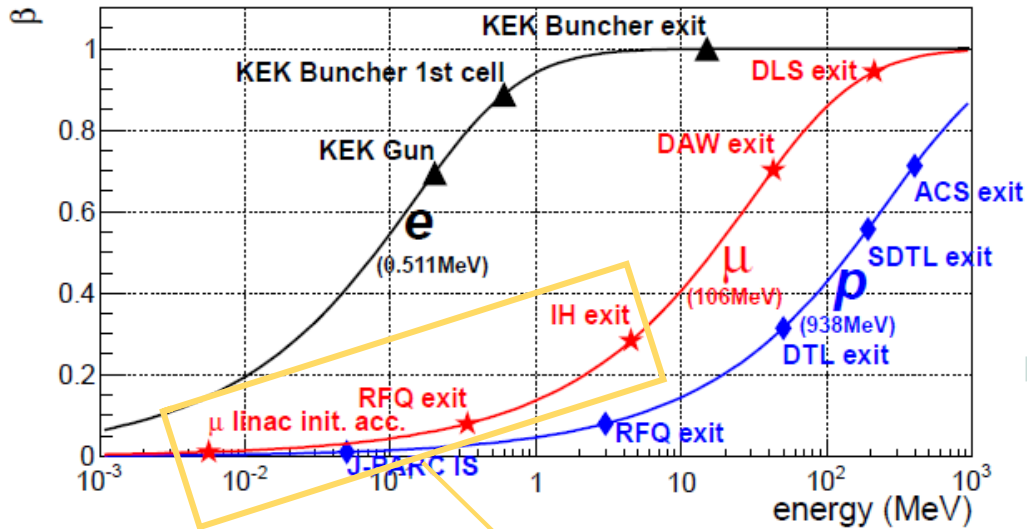
->4種類の高周波線形加速器を用いる

全長~40 m



# ミューオン線形加速器の開発

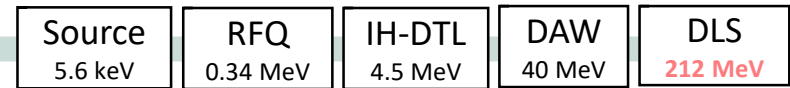
粒子毎の速度変化と使用する加速器 [2]



加速に伴う速度変化が大きい  
ため、エネルギーに応じて最適な  
加速手法を使用する必要がある

->4種類の高周波線形加速器を用いる

全長~40 m



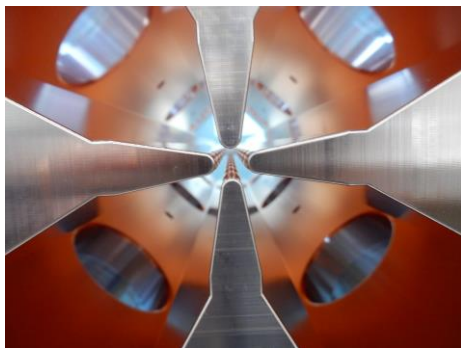
324 MHz

1296 MHz

低速部ミューオン線形加速器 (加速周波数324 MHz)

Radio Frequency Quadrupole [3]

バンチングと初期加速( $\beta=0.01 \rightarrow 0.08$ )



Interdigital H-mode Drift Tube Linac [3]

低速部の加速( $\beta=0.08 \rightarrow 0.27$ )



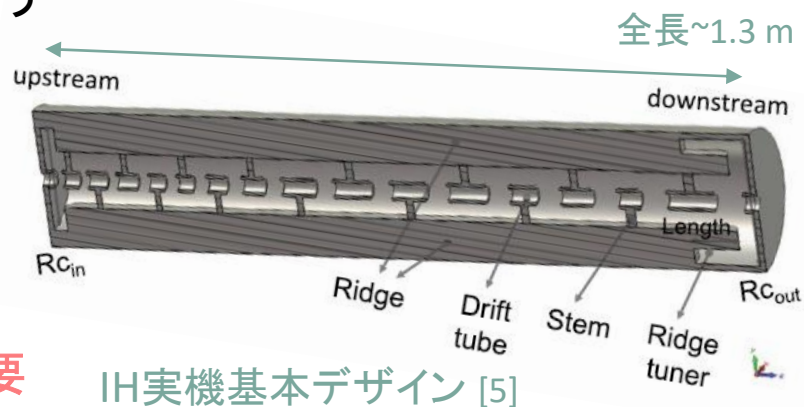
異なる加速器間では  
ビームマッチングが重要

# 低速部加速の課題

IHには非線形力を使用する**APF(=Alternating Phase Focusing)**方式を採用  
->装置の**小型化**、**速やかな加速**が可能

## 特徴と課題

- ・3方向全ての加速と収束を高周波電場のみで行う  
->加速範囲が狭く、**ミスマッチの影響**が大きいと予想される
- ・内部構造が非周期的かつ速度変化が大きい  
->入射条件を**解析的に求めることが不可能**
- ・ミュオン加速実証の先例がない  
->加速ミュオンを検出するための**モニタが必要**



RFQによるミュオン加速の実証[4]とIH実機の基本デザイン[5]は完了

□ APF方式を用いたIHによるミュオン加速を実証する必要がある

->プロトタイプの開発と加速試験の準備 (25<sup>th</sup> ICEPPシンポジウム 茨大理 中沢)

□ RFQ出射ビームをIHの加速範囲に高精度で一致させる必要がある

->**RFQ-IH間のビーム輸送ラインの開発** (本発表)

・輸送ラインのデザイン・ミスマッチによるエミッタンス増加の評価 ・縦方向ビームモニタの開発

# 目次

## 1. 研究背景

- J-PARC muon g-2/EDM 実験
- ミューオン線形加速器の開発

## 2. ビーム物理の復習

- エミッタンス・Twiss パラメータ
- ビームマッチング

## 3. 低速部ビーム輸送ラインの開発

- ビーム輸送ライン
- IH入射条件の評価
- ビーム輸送ラインの基本デザイン
- 縦方向ビームプロファイルモニタの評価

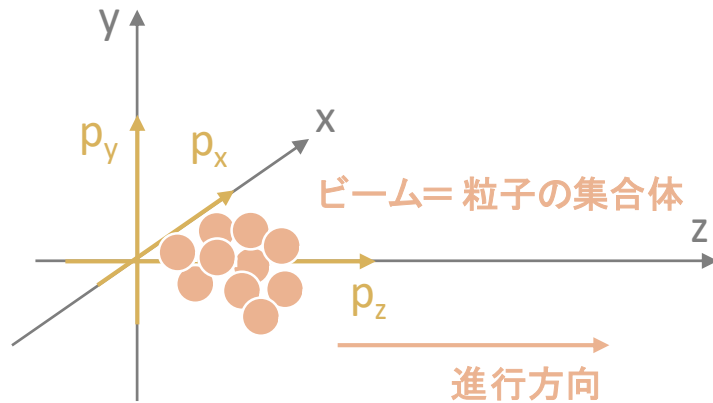
## 4. まとめと展望

# エミッタンス・ Twiss パラメータ

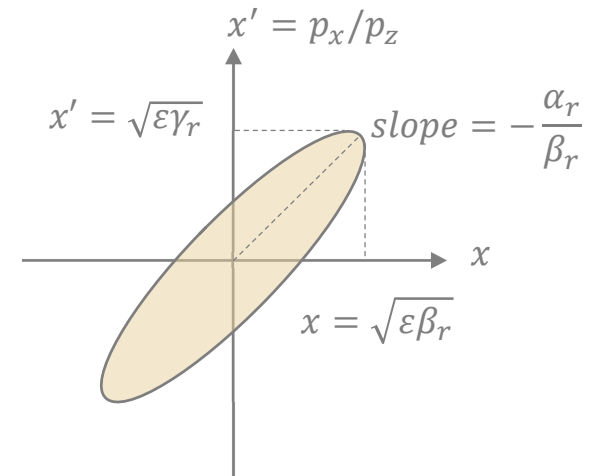
面積に関する物理量規格化エミッタンスを用いてビーム状態の評価を行う

-> 加速に対して不変であるが、ミスマッチにより増加する

6次元位相空間  
(=位置×3+運動量×3)



$x-x'$  位相平面



位相平面のビーム分布 ...  $\gamma_r x^2 + 2\alpha_r x x' + \beta_r x'^2 = \epsilon$

・Twiss パラメータ ...  $\alpha_r, \beta_r, \gamma_r$      $\gamma_r \beta_r - \alpha_r^2 = 1$

・エミッタンスの定義 ...  $\epsilon = \sqrt{x^2 + x'^2 - \overline{xx'}^2}$

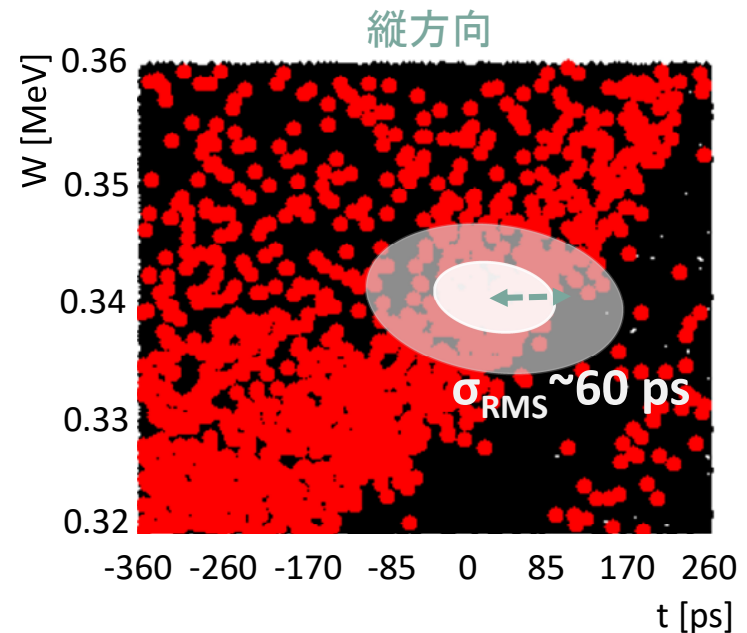
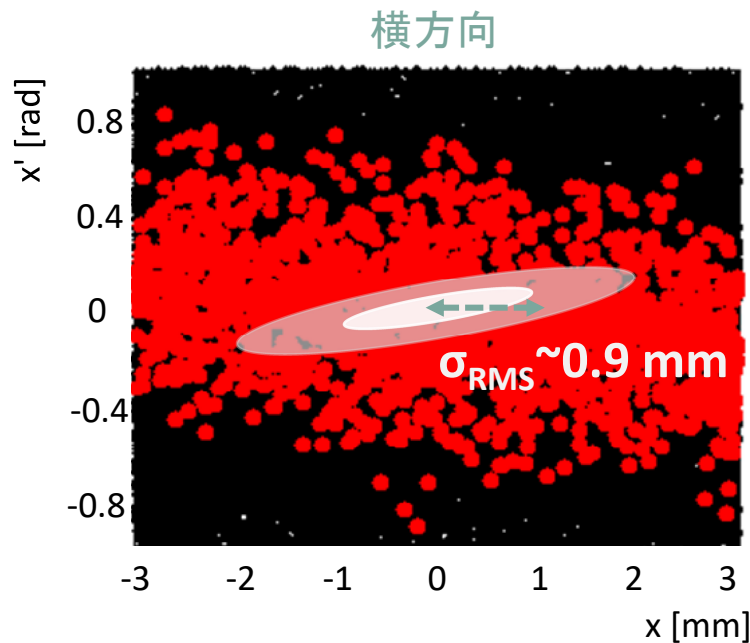
⇒規格化エミッタンス  $\epsilon_{norm} = \epsilon \beta_l \gamma_l$  ( $\beta_l, \gamma_l$  ... ローレンツ因子)



# ビームマッチング

設計されたビームの実現には**加速中のエミッタンス成長の抑制**が重要  
->RFQから出射される**ビームの形状をIHの加速範囲に一致**させる必要がある

RFQ出射ビームとIH入口の加速範囲 (simulation)



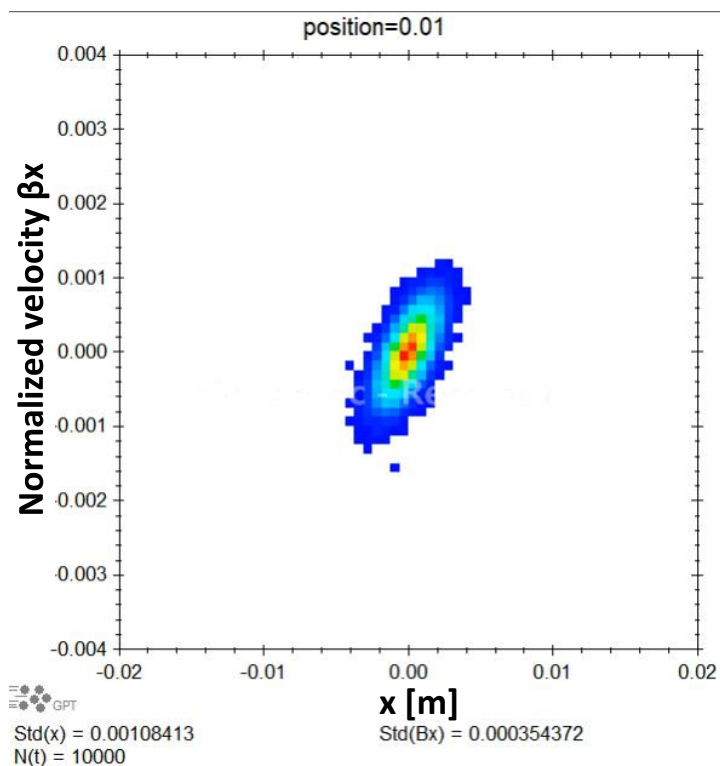
白 RFQから出射されるビームの分布 赤 IHの加速範囲

ビーム進行方向に対して、垂直->横方向 (=x,y)、水平->縦方向 (=z)

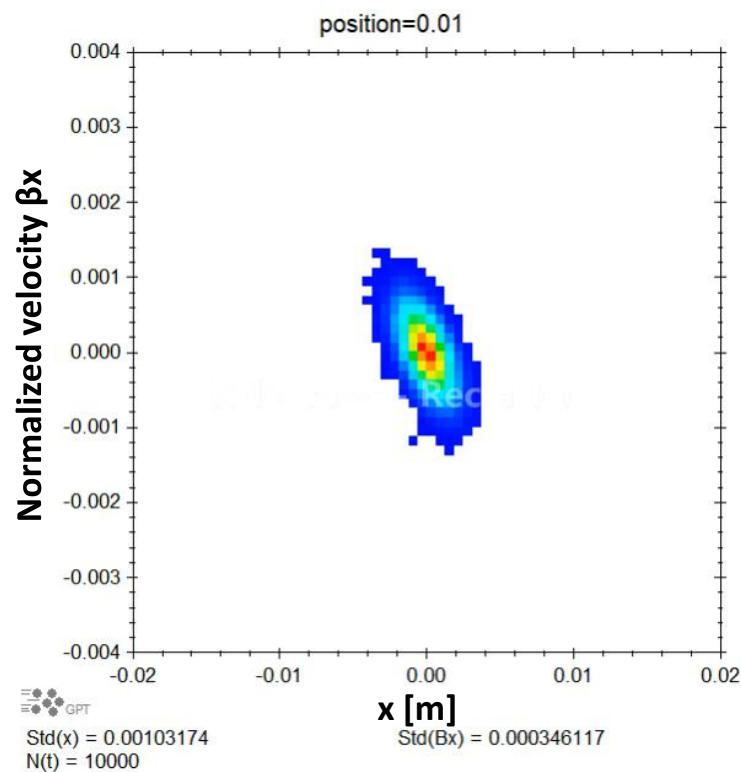
# ビームミスマッチ

ビーム診断ミスや収束力の設定ミスなどが原因で発生する

IH入口での位相平面上の粒子分布



ミスマッチ

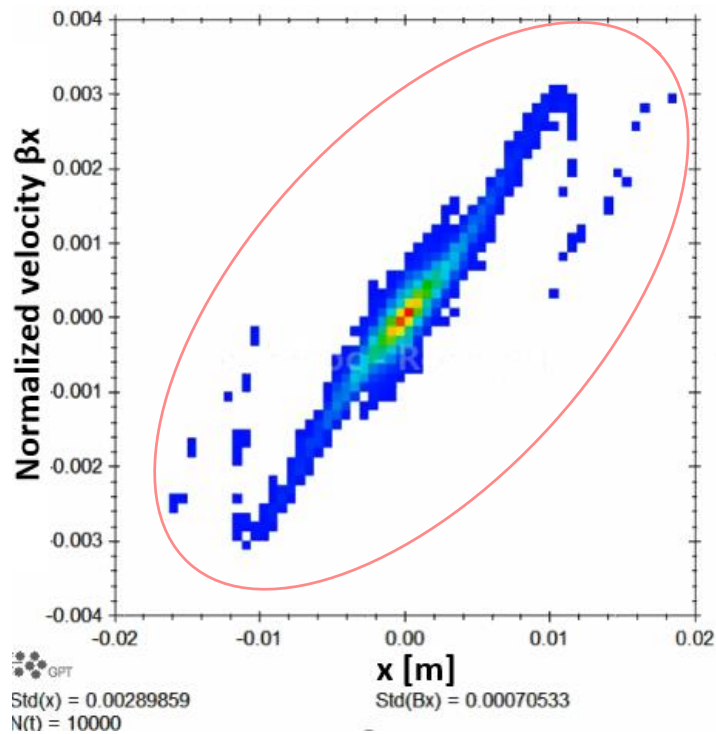


マッチング

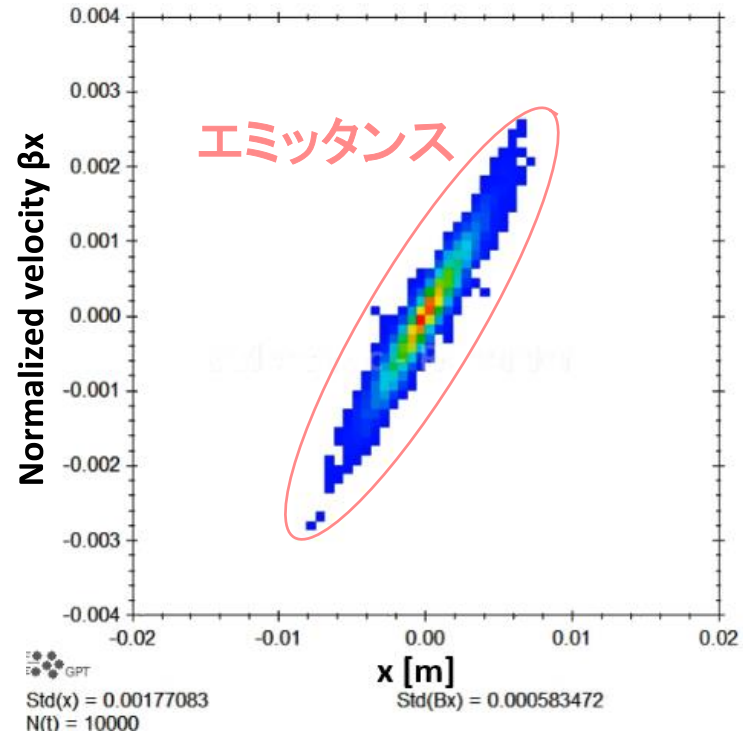
# ビームミスマッチ

ビーム診断ミスや収束力の設定ミスなどが原因で発生する  
->ビームミスマッチが起こると**加速後のエミッタンスが増加する**

IH出口での位相平面上の粒子分布



ミスマッチ  $\Delta\epsilon_x \sim 130\%$



マッチング  $\Delta\epsilon_x \sim 11\%$

# 目次

## 1. 研究背景

- J-PARC muon g-2/EDM 実験
- ミューオン線形加速器の開発

## 2. ビーム物理の復習

- エミッタンス・Twiss パラメータ
- ビームマッチング

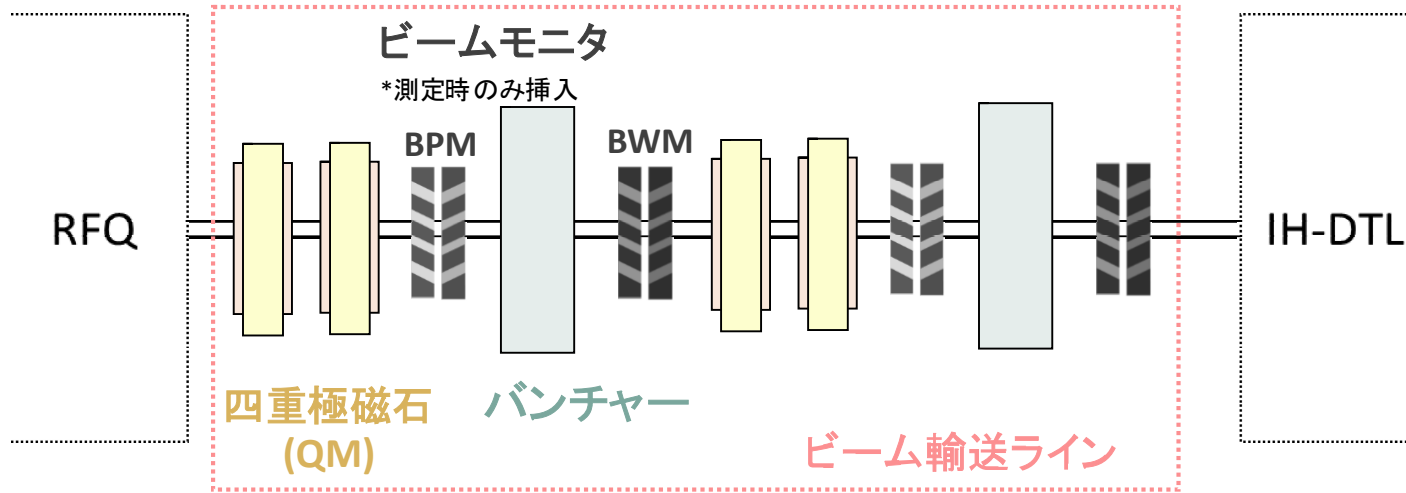
## 3. 低速部ビーム輸送ラインの開発

- ビーム輸送ライン
- IH入射条件の評価
- ビーム輸送ラインの基本デザイン
- 縦方向ビームプロファイルモニタの評価

## 4. まとめと展望

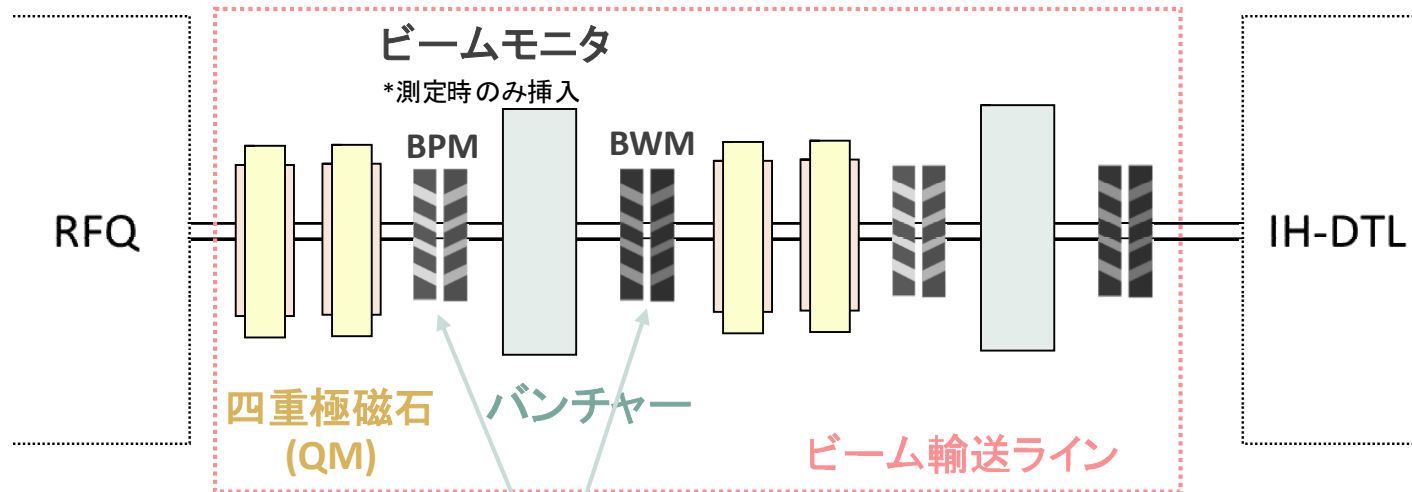
# ビーム輸送ライン

設計されたビーム実現には輸送ラインでのビームマッチングが必要不可欠



# ビーム輸送ライン

設計されたビーム実現には輸送ラインでのビームマッチングが必要不可欠

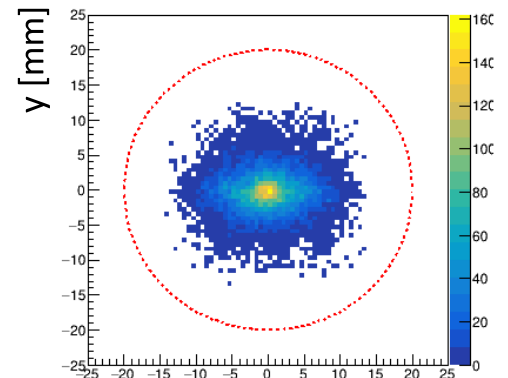


## ビーム診断

RFQから出射されるビームの状態を把握するためモニタでビーム形状を測定する

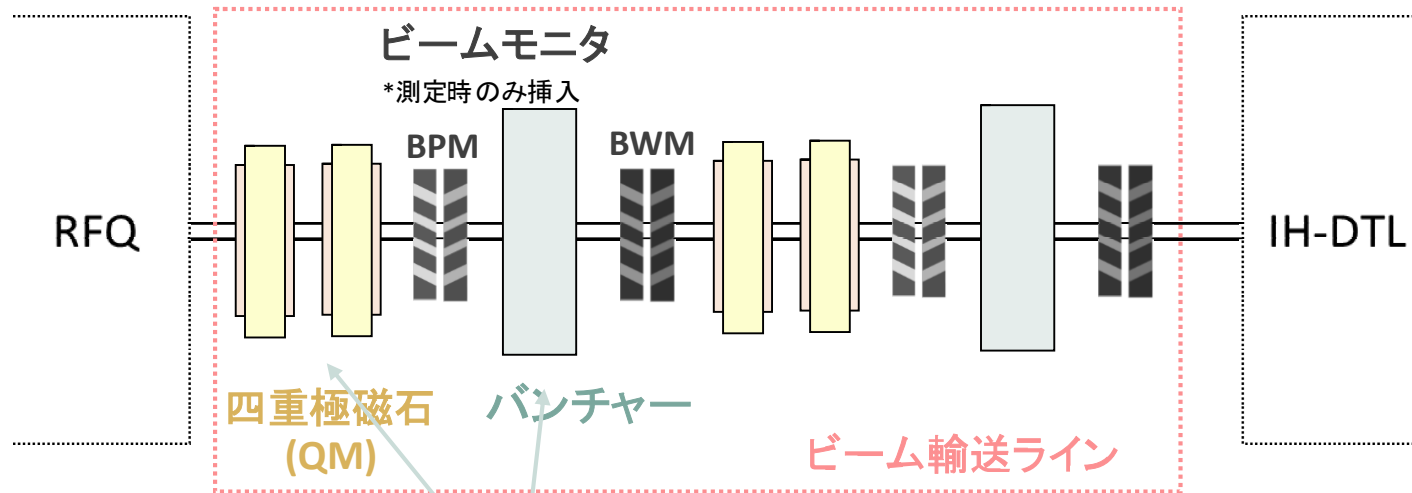
->検出部に**マイクロチャンネルプレート (MCP)**を使用 (後述)

- Beam Profile Monitor ...位置構造の測定
- Bunch Width Monitor ...時間構造の測定



# ビーム輸送ライン

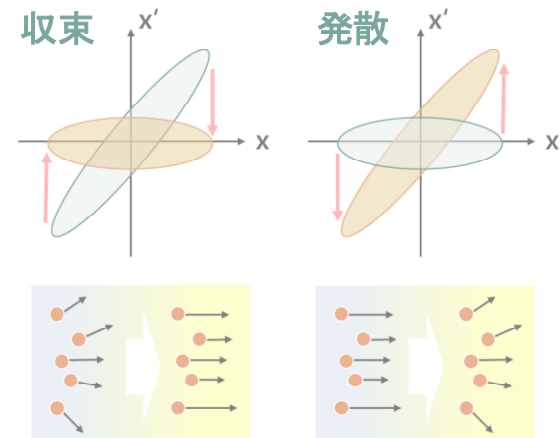
設計されたビーム実現には輸送ラインでのビームマッチングが必要不可欠



## ビーム整形

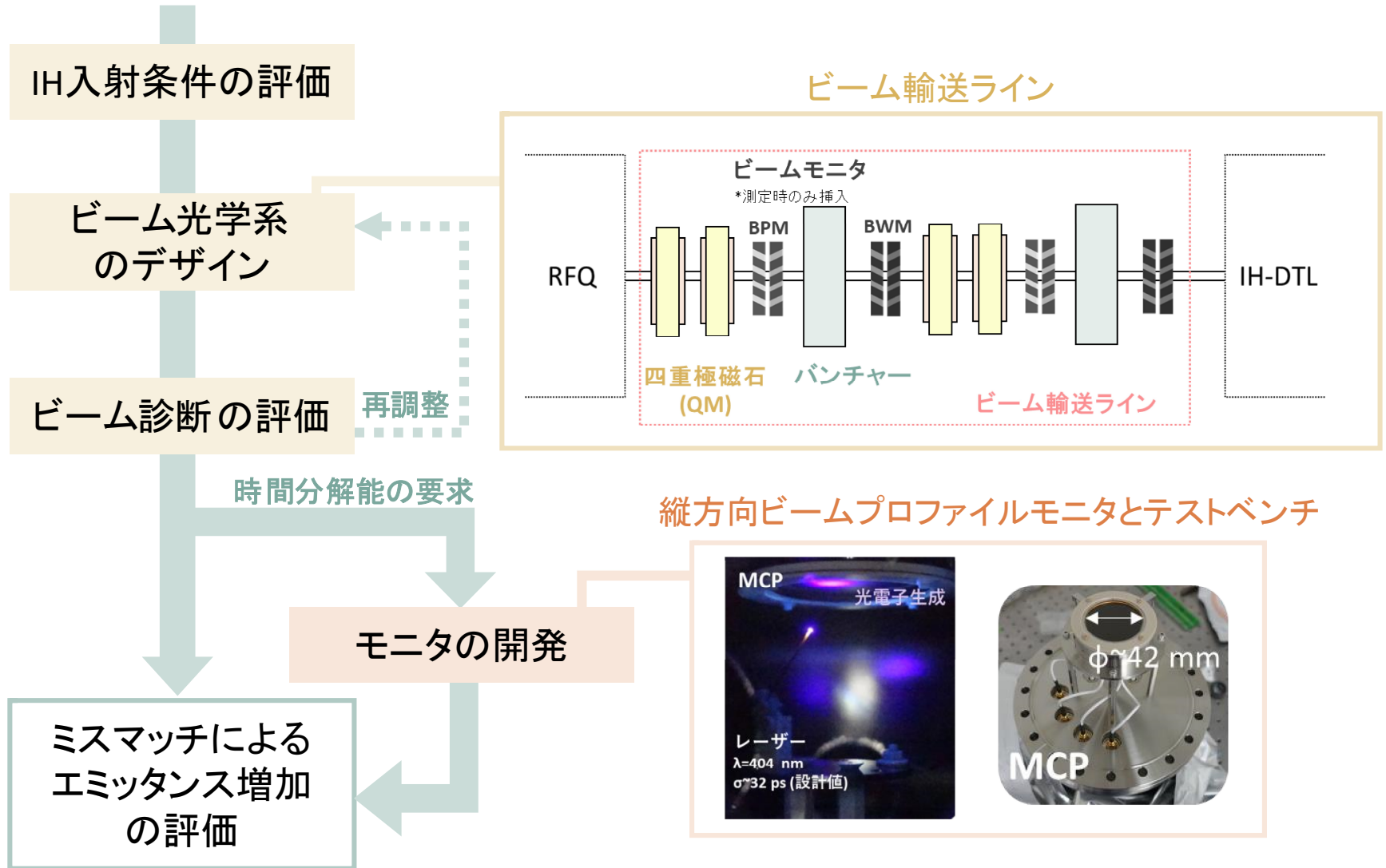
四重極磁石やバンチャーの収束力を調整することでビームの形状を変化させる

- ・四重極磁石...横方向のビーム整形
- ・バンチャー...縦方向のビーム整形

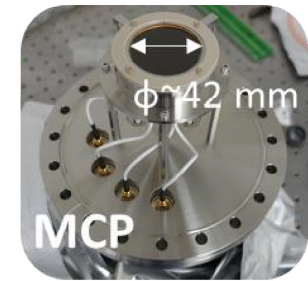


# ビーム輸送ラインの開発

ビーム輸送ラインを開発しミスマッチによるIH加速後のエミッタンス増加を評価



縦方向ビームプロファイルモニタとテストベンチ



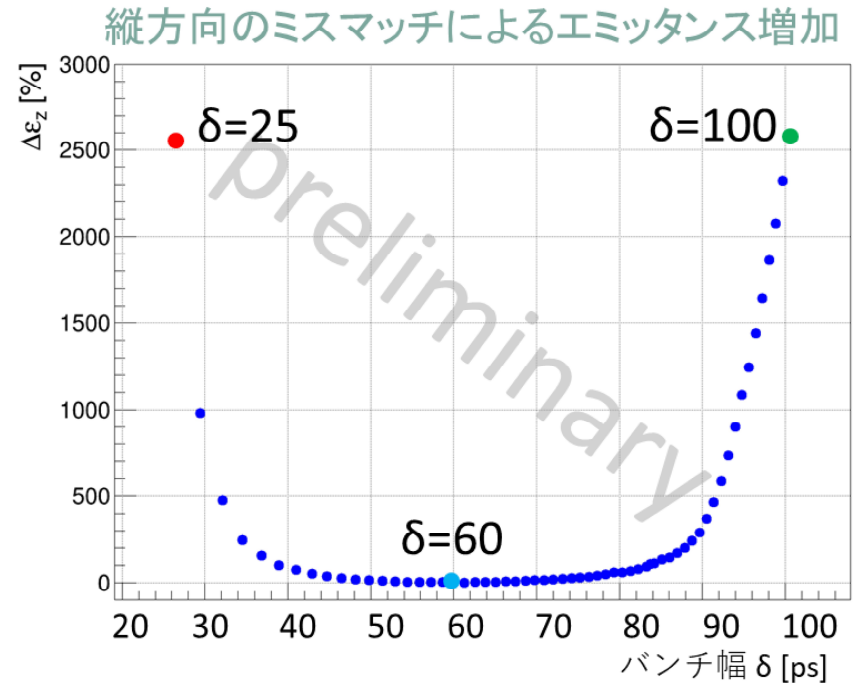
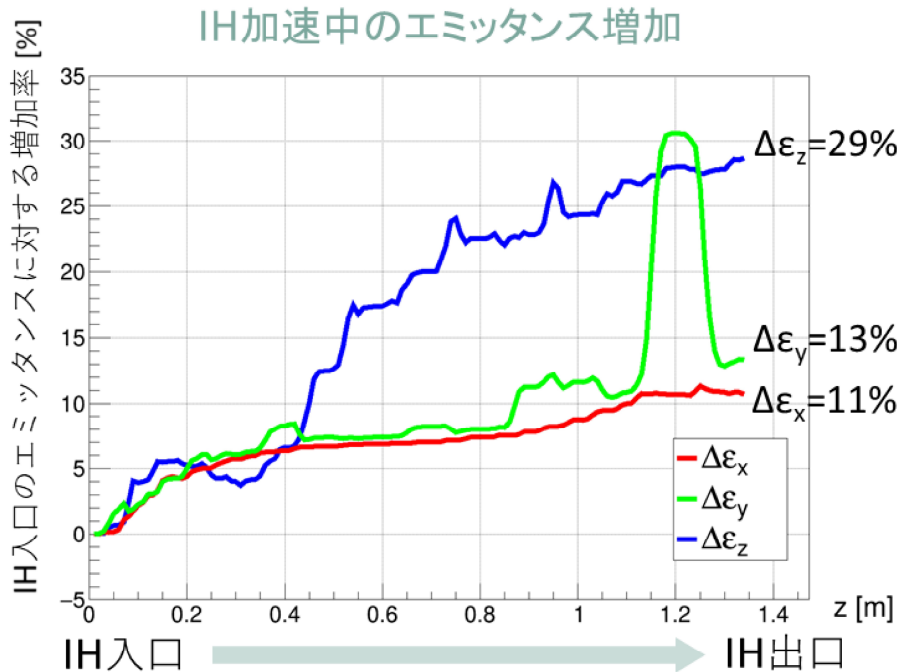


# IH入射条件の評価

ルンゲクッタ法による粒子トラッキングシミュレーション(General Particle Tracer)

- ・IH電磁場の見積りは有限要素法による電磁場計算(CST MW Studio)を使用
- ・入射ビームの形状(エミッタンス一定)を出射エミッタンスが最小となるよう調整

->出射エミッタンスの最小値は実験の**要求値 $\epsilon_{x,y} < 0.5 \pi \text{ mm mrad}$ を下回る**



**縦方向のミスマッチの影響が深刻**である (IHの加速特性が原因と考えられる)

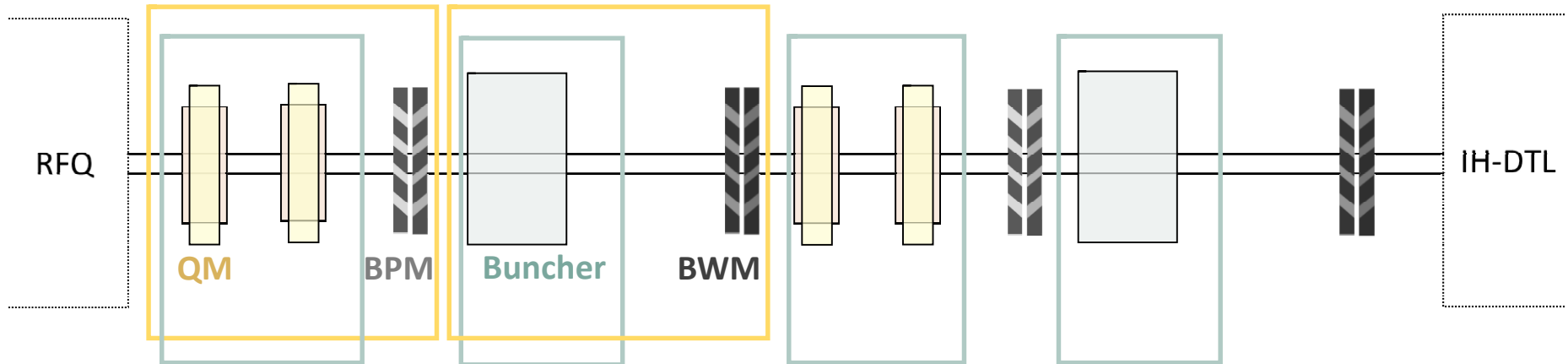
# ビーム光学系のデザイン

転送行列の計算より輸送ラインのデザインを行う

## 1. 四重極磁石・バンチャー・モニタの個数・配置を検討

- ビーム診断・ビーム整形・空洞調整を可能とするように配置

ビーム診断に使用



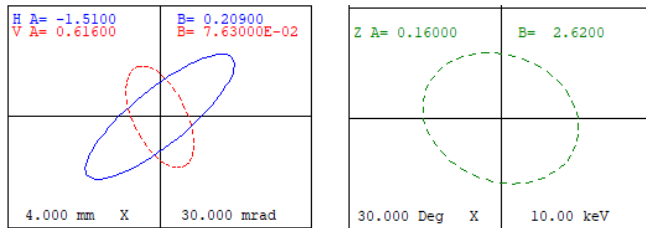
ビーム整形に使用

# ビーム光学系のデザイン

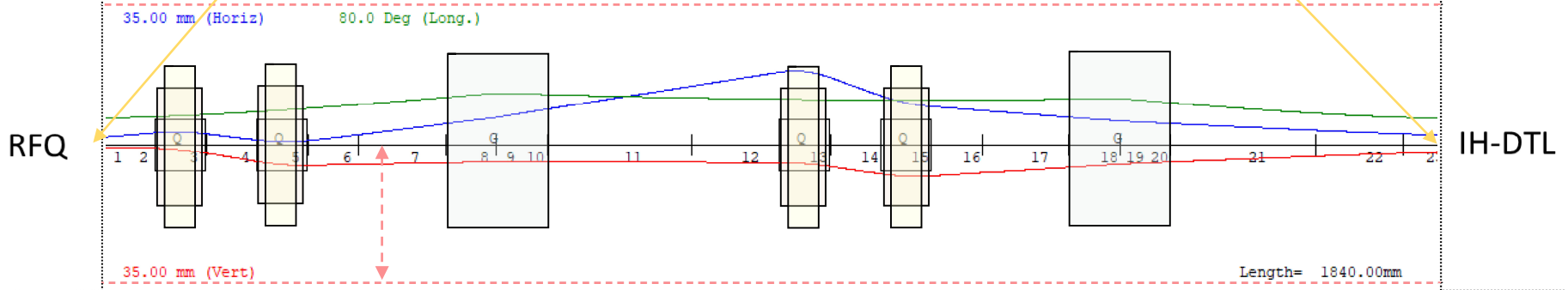
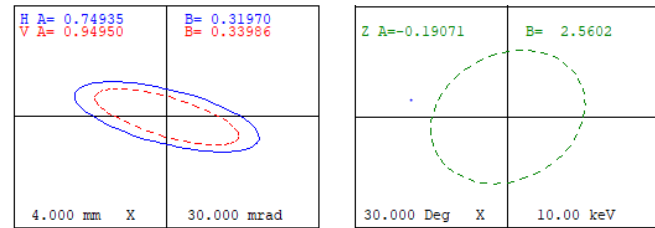
転送行列の計算より輸送ラインのデザインを行う

## 2. 四重極磁石・バンチャーの収束力を最適化 (->必要に応じて1.に戻る)

RFQ出射のビーム状態



IH入射のビーム状態



ビームパイプ (φ~35 mm)

青 x方向 赤 y方向 緑 z方向

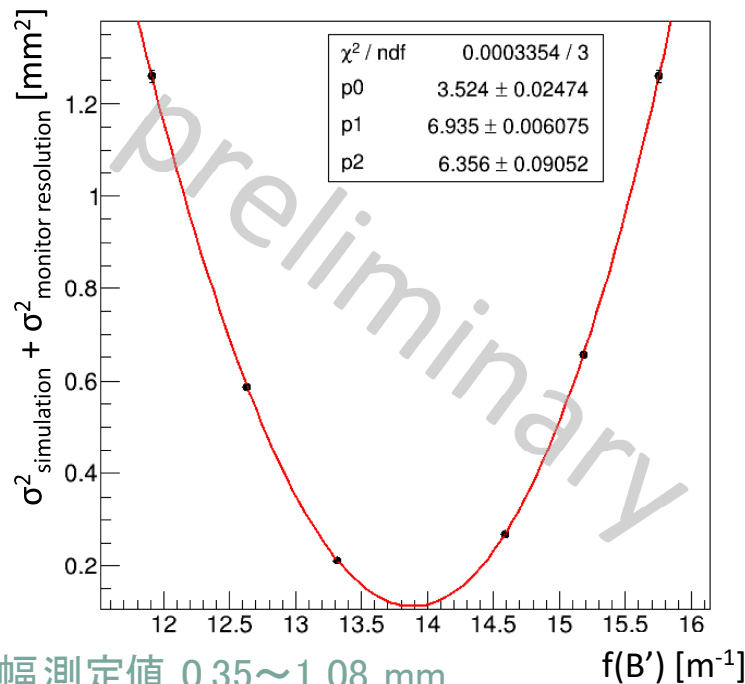
## 3. IH加速後のエミッタンスの評価

->ビーム輸送ラインでのマッチング由来の増加は起きていないことを確認

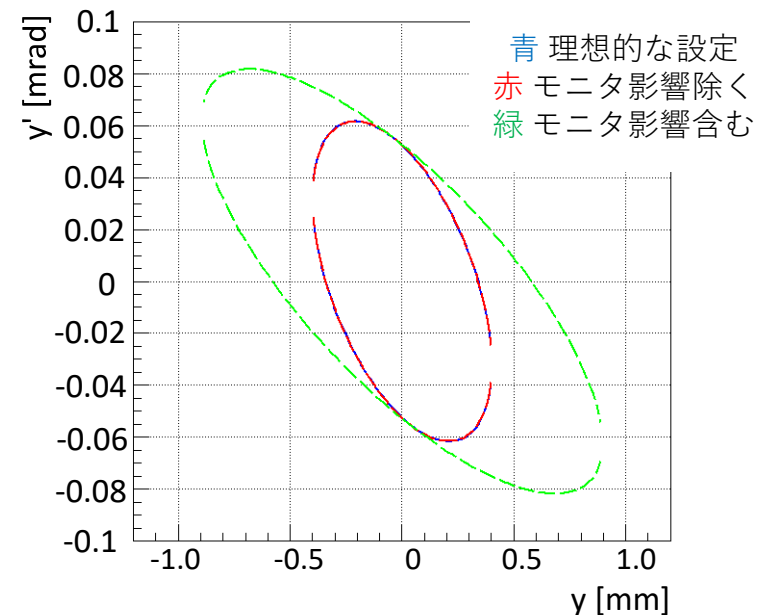
# ビーム診断の評価

- ・モニタで測定したビーム幅と設定された収束力の関係から、ビーム輸送ライン入口でのビーム状態を診断する。
- ・測定結果に対して以下2通りの場合について評価 (BPM分解能 $\sim 0.3$  mm (後述))
  - モニタの分解能の影響を除く  $\sigma^2_{\text{beam width}} = \sigma^2_{\text{simulation}}$
  - モニタの分解能の影響を含む  $\sigma^2_{\text{beam width}} = \sigma^2_{\text{simulation}} + \sigma^2_{\text{monitor resolution}}$

ビーム幅と収束力の関係  
(モニタ分解能の影響含む場合)



診断ミスによるビーム形状の違い  
(輸送ライン入口)



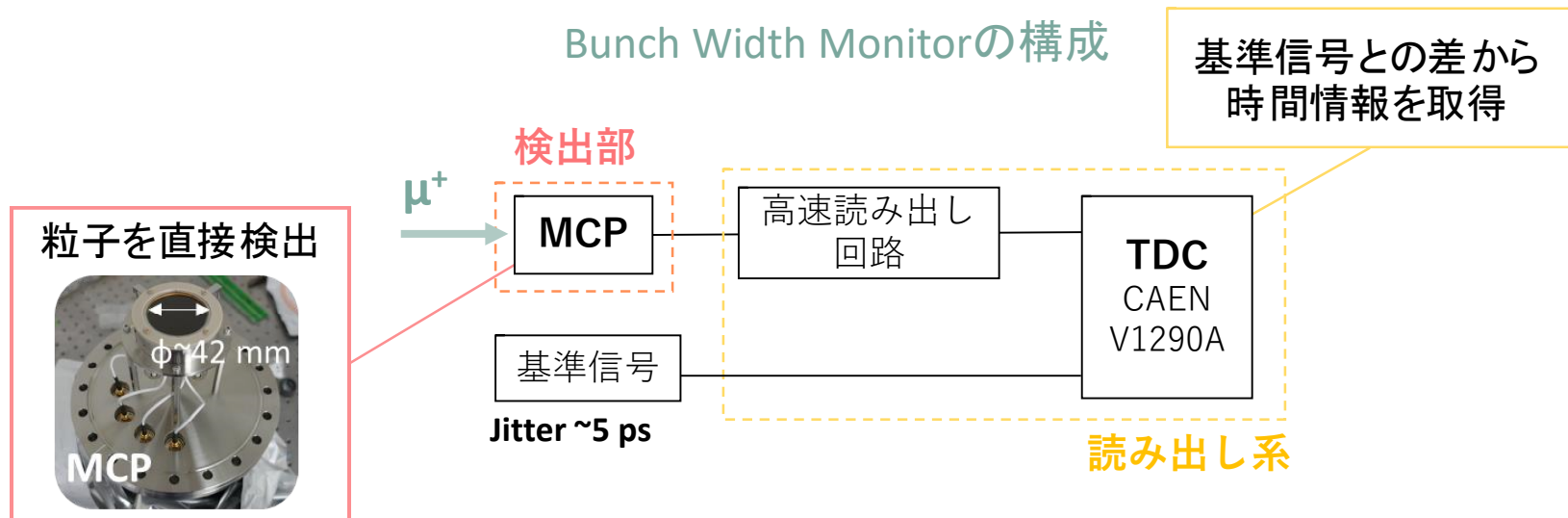
ビーム診断ミスによる不一致は50%

# 加速ミュオン用モニタの開発

高い時間応答性とシングルミュオンの検出が可能であるMCPを用いたモニタを開発

- ・位置構造の測定→Beam Profile Monitor [6] (SNUを中心に開発)
  - CCDカメラを用いて信号を読み出しを行う
  - 2016年に性能試験、2017年に加速 $\mu^-$ 横方向プロファイル測定を行う
- ・時間構造の測定→Bunch Width Monitor [7] (名大を中心に開発)
  - 高速読み出し回路とTDC(CAEN V1290A)を用いて高時間分解能(40 ps以下)達成を目指す
  - 2018年に加速 $\mu^-$ 縦方向プロファイル測定を行う

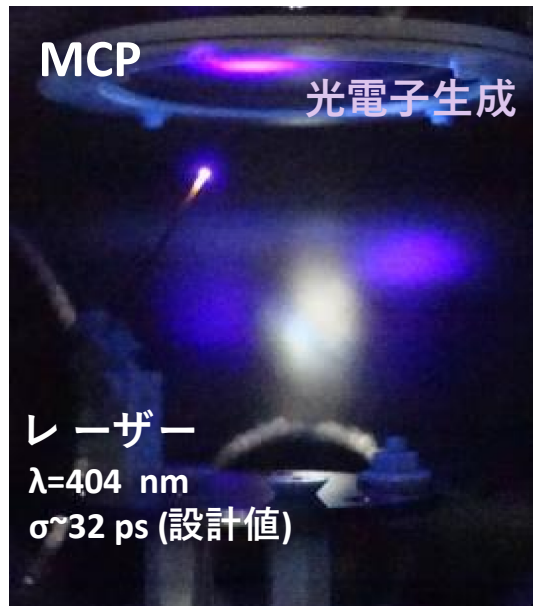
## Bunch Width Monitorの構成



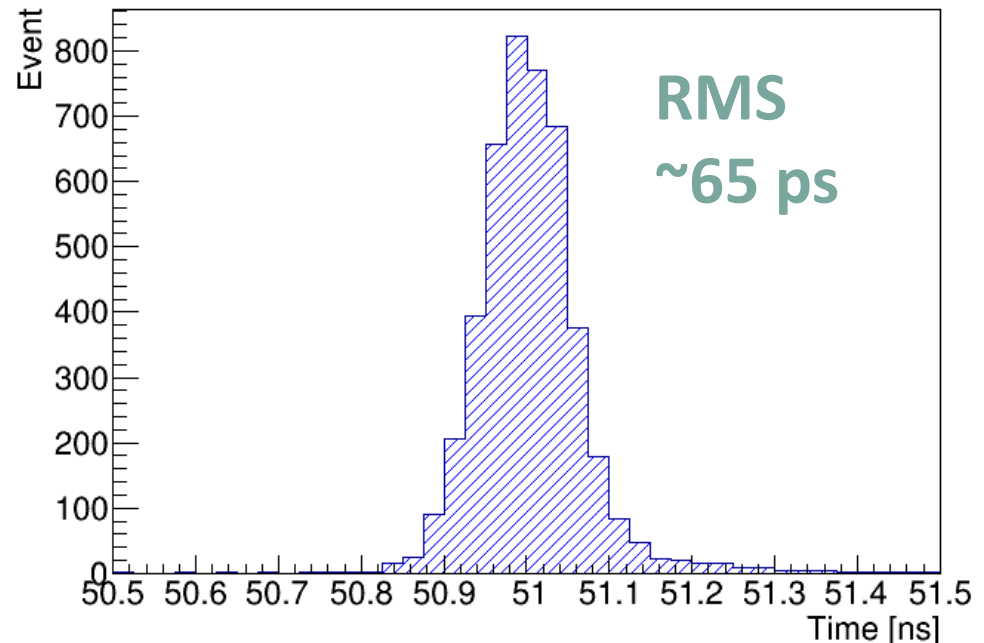
# BWM性能評価結果

ピコ秒パルスレーザーを用いたテストベンチで性能評価を行う  
->時間分解能 **RMS~65 ps** を保証 (但しレーザーの不定性を含む)

テストベンチでの測定



時間分解能の評価結果



- 展望 □レーザー由来の不定性を差し引くため性能評価
- 位置校正によるチャンネル毎の特性を理解
- 時間分解能向上にむけた読み出し系の改良

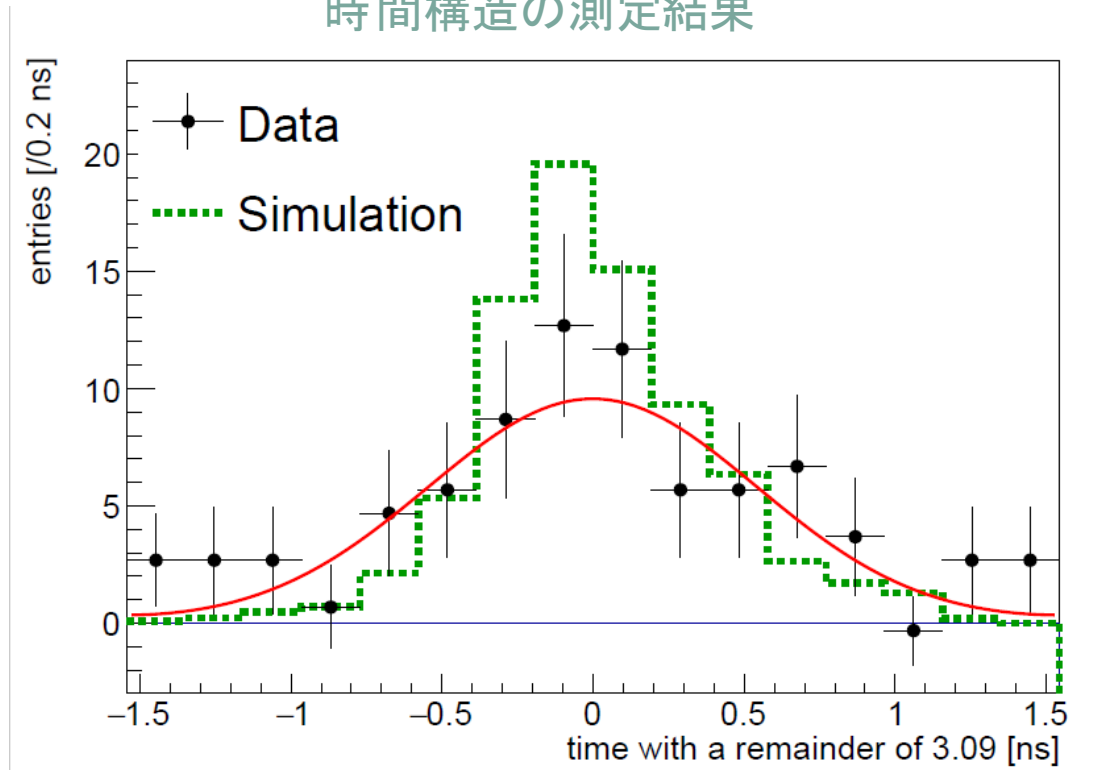
# 縦方向プロフィール測定

RFQによって89 keVまで加速された負ミューオニウム( $\text{Mu}^-$ )を測定

@J-PARC MLF D2エリア

->開発したBWMを使用して **$0.54 \pm 0.11$  ns**の加速 $\text{Mu}^-$ バンチの測定に成功

時間構造の測定結果



PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMSに論文が採択! [7]

# 横方向ビーム診断ミスの影響の見積もり

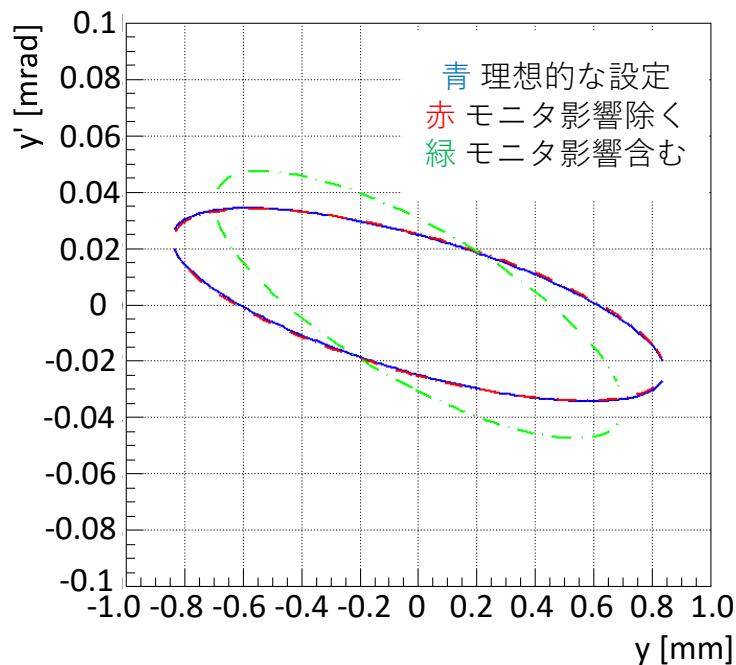
・診断結果を基に整形されたビームのミスマッチによるエミッタンス増加は

-横方向 5%以下

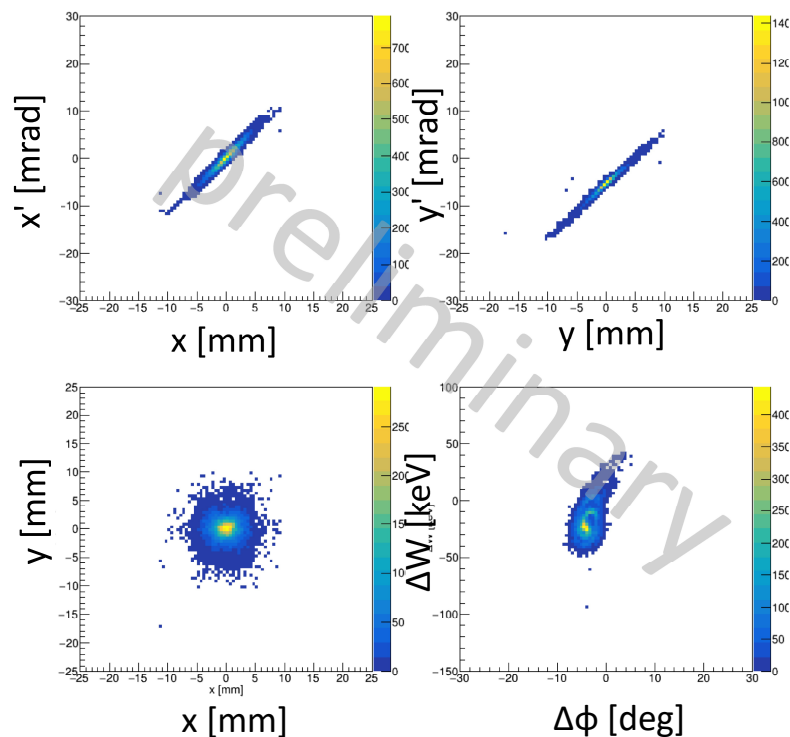
-縦方向 33%

->横方向の診断ミスによるエミッタンス増加の影響は小さい

整形ミスによるビーム形状の違い  
(IH入口)



IH出口での粒子分布  
(モニタ分解能の影響含む)





# まとめと展望

J-PARC muon g-2/EDM実験で低エミッタンスミューオンビーム実現のために、RFQ-IH間のビーム輸送ラインの開発を行っている。

- ☑ IH入射条件の評価を行い、ミスマッチによるエミッタンス増加の影響について調べた。懸念していた通り縦方向について増加率が大きいことがわかった。
- ☑ ビーム光学系の基本デザインを行い、診断ミスによるエミッタンス増加の影響について評価した。横方向の診断ミスによる影響は小さいと言える。
- ☑ ビーム診断のために必要となる高時間分解能ビームプロファイルモニタを開発した。現在の評価測定ではRMSで65 psである。

今後は、

- 縦方向についてもビーム診断の評価を行い、モニタの分解能に由来する診断ミスによるエミッタンス増加の影響について評価を行う予定である。
- 評価結果を踏まえたモニタの性能向上を検討している。  
⇒ 現在レーザーの性能評価とより分解能のよいTDCへの変更を考えている。

# Backup