

日本物理学会第75回年次大会

J-PARC E34実験: ミュオン線形加速器における RFQとIH-DTL間ビーム輸送ラインのデザイン

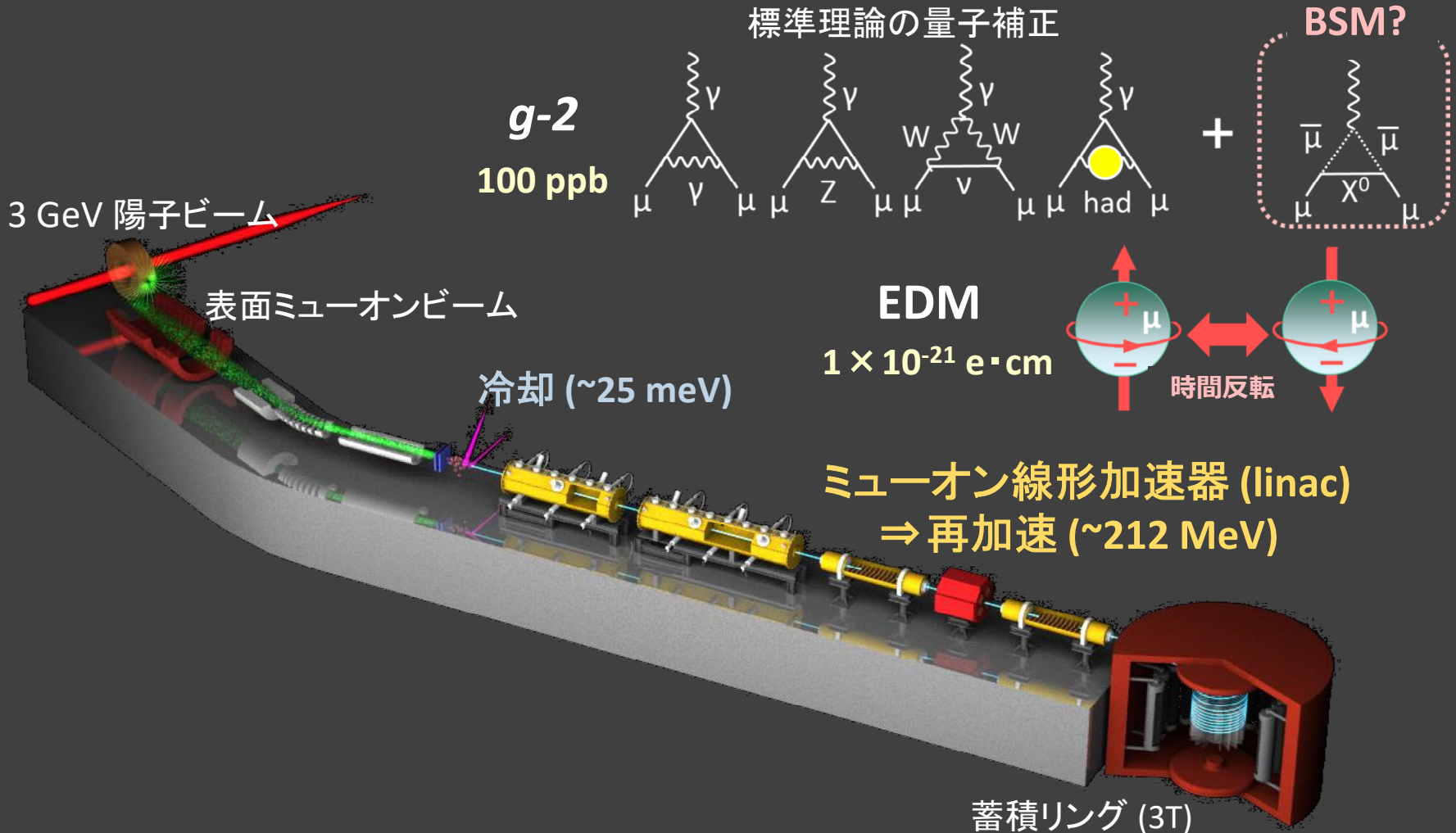
四塚麻衣^A, 飯嶋徹^{A,B}, 飯沼裕美^C, 居波賢二^A, 岩下芳久^D, 岩田佳之^E, Cicek Ersin^F,
大谷将士^G, 河村成肇^G, 北村遼^H, 近藤恭弘^{H,C}, 齊藤直人^I, 須江祐貴^A, 竹内佑甫^J,
中沢雄河^C, 長谷川和男^H, 林崎規託^K, 三部勉^G, 森下卓俊^H, 安田浩昌^K, 山崎高幸^G,
吉田光宏^G, 他J-PARC muon g-2/EDMコラボレーション

^A名大理, ^B名大KMI, ^C茨大理工, ^D京大理, ^E放医研, ^FSiirt大, ^G高工研, ^H原研, ^IJ-PARCセンター,
^J九大理, ^K東工大, ^L東大理

J-PARC muon $g-2$ /EDM 実験

先行研究[1]とは異なる手法でミューオンの超精密測定を目指す

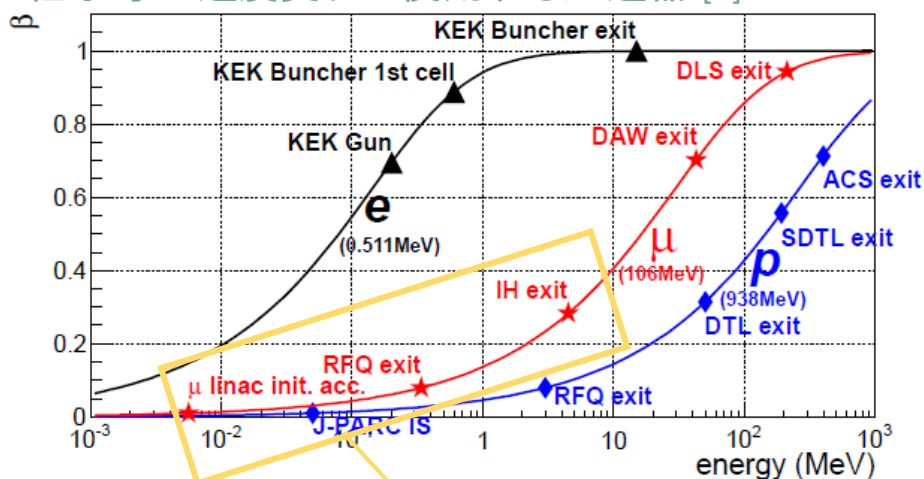
⇒ 冷却→再加速によって生成する低エミッタンスミューオンビームを使用



[1] G.W.Bennett et al., Phys. Rev. D73, 072003(2006)

ミューオン線形加速器とビームマッチング

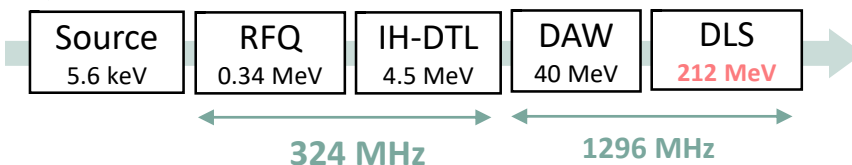
粒子毎の速度変化と使用する加速器 [2]



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ります

->4種類の高周波線形加速器を用いる

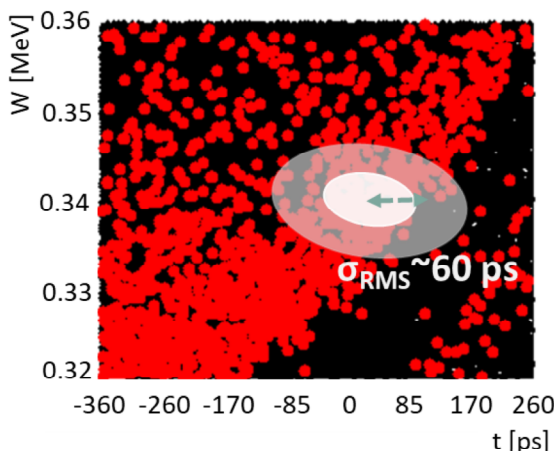
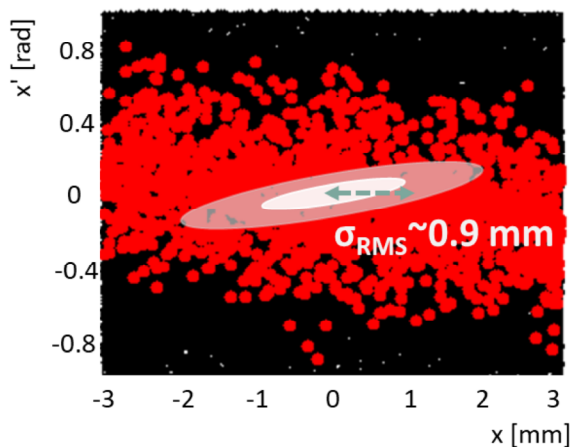
全長~40 m



RFQ出射ビームとIH入口のアクセプタンス(simulation)

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

->異なる加速器間でのビームマッチングをとる必要がある



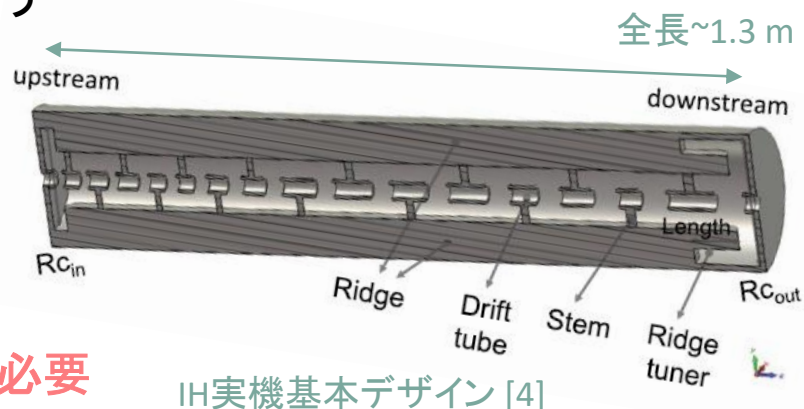
左図
位相平面でのアクセプタンスとビーム分布
白 RFQから出射されるビームの分布
赤 IHのアクセプタンス

低速部加速の課題と開発状況

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

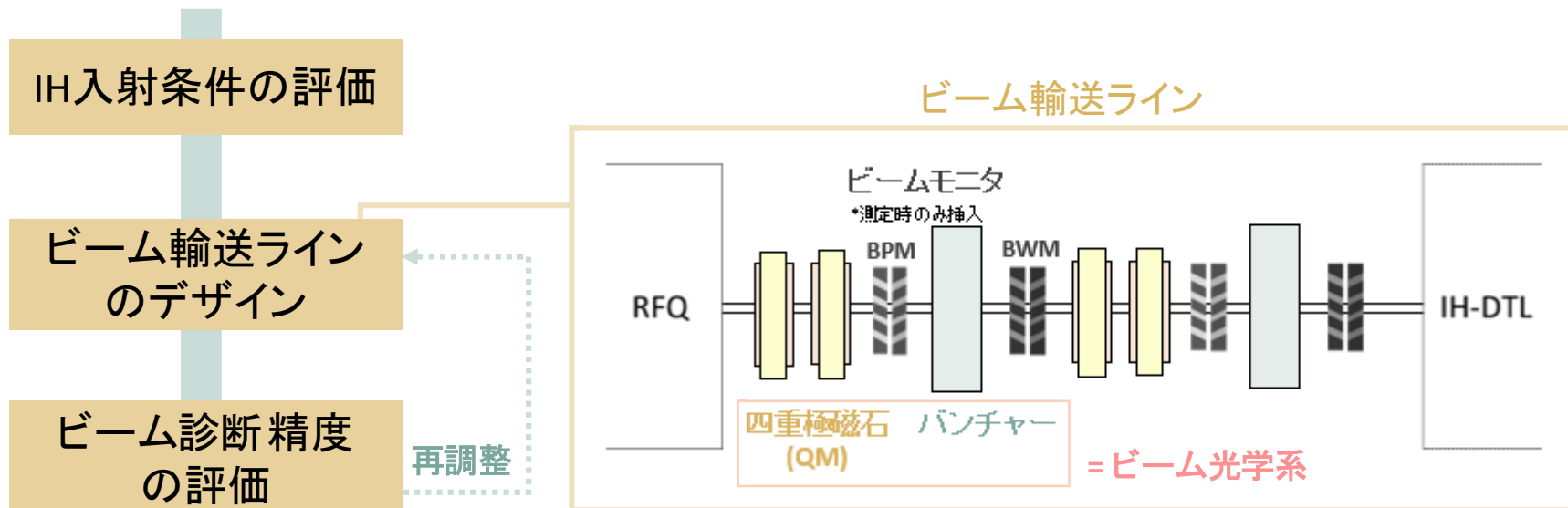
- ・3方向全ての加速と収束を高周波電場のみで行う
->加速範囲が狭く、**ミスマッチの影響**が大きいと予想される
- ・内部構造が非周期的かつ速度変化が大きい
->入射条件を**解析的に求めることが不可能**
- ・ミュオン加速実証の先例がない
->加速ミュオン検出のための**モニタの開発が必要**



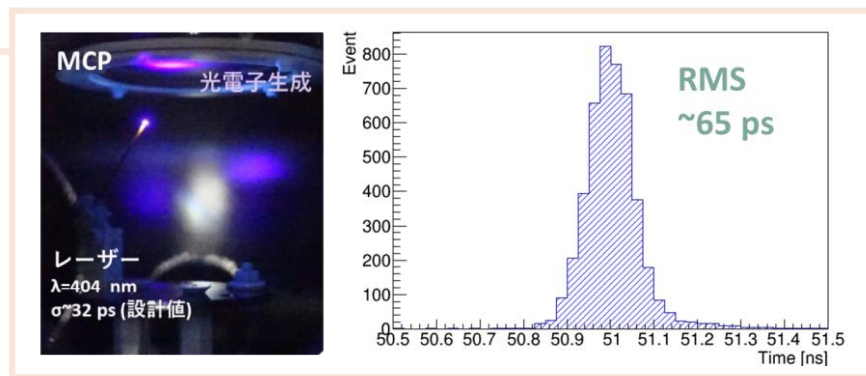
- RFQによるミュオン加速の実証[3]とIH実機の基本デザイン[4]は完了
- APF方式を用いたIHによるミュオン加速を実証する必要がある
->プロトタイプの開発と加速試験に向けた準備 (18pD14-2 茨大理 中沢)
 - RFQ出射ビームをIHの加速範囲に高精度で一致させる必要がある
->**RFQ-IH間のビーム輸送ラインの開発** (本発表)
 - ・ビーム輸送ラインのデザイン・ミスマッチによるエミッタンス増加の評価

ビーム輸送ライン開発の流れ

TRACE3D, PARMILAを用いてデザインを、GPTを用いて加速シミュレーションを行う

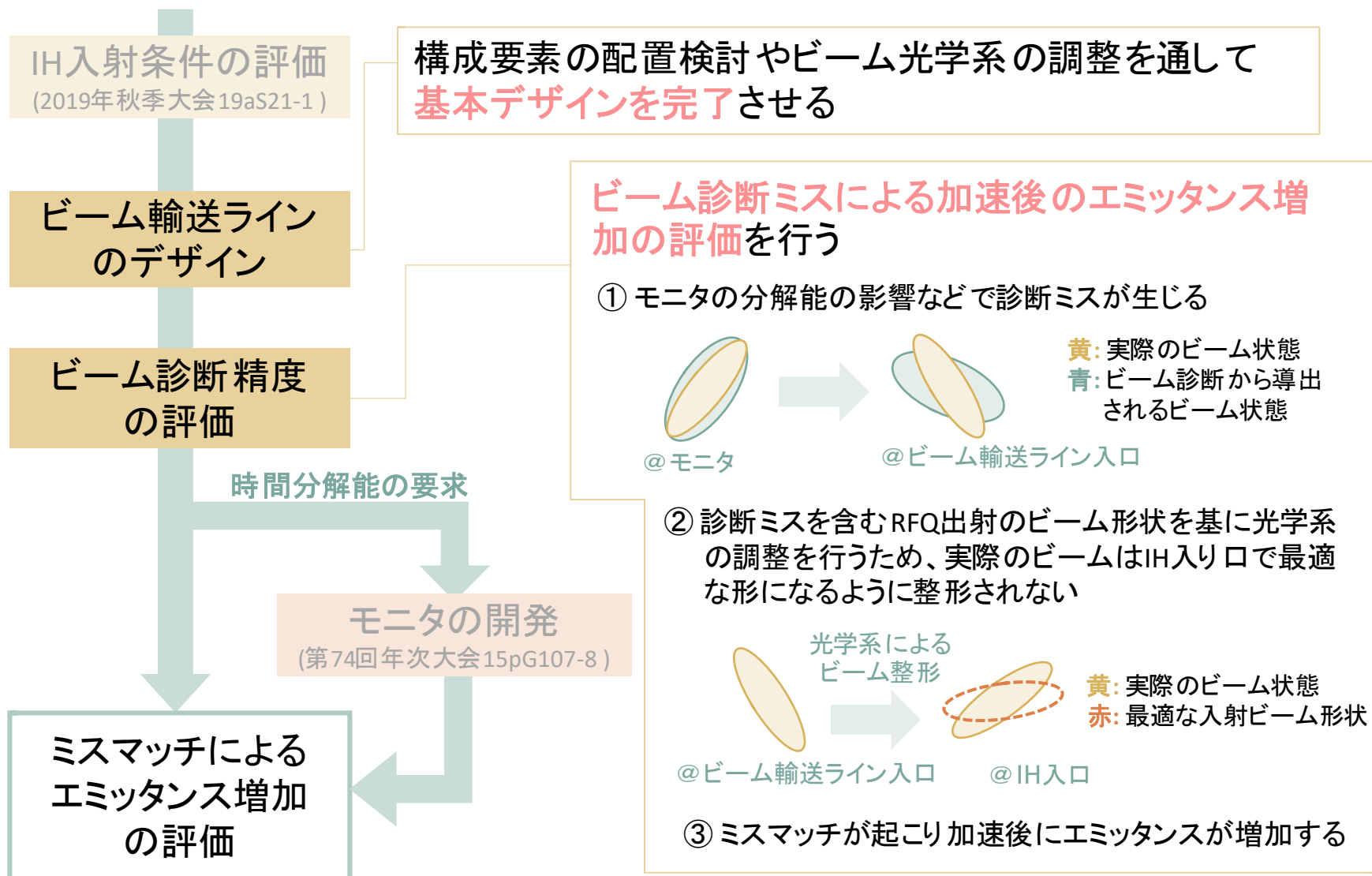


縦方向ビームプロファイルモニタとテストベンチ



ミスマッチによるエミッタンス増加の評価

“ビーム輸送ラインでのミスマッチの影響によるIH加速後のエミッタンス増加の評価”が目標



ビーム輸送ラインのデザイン

転送行列の計算(TRACE3D)よりビーム輸送ラインのデザインを行う

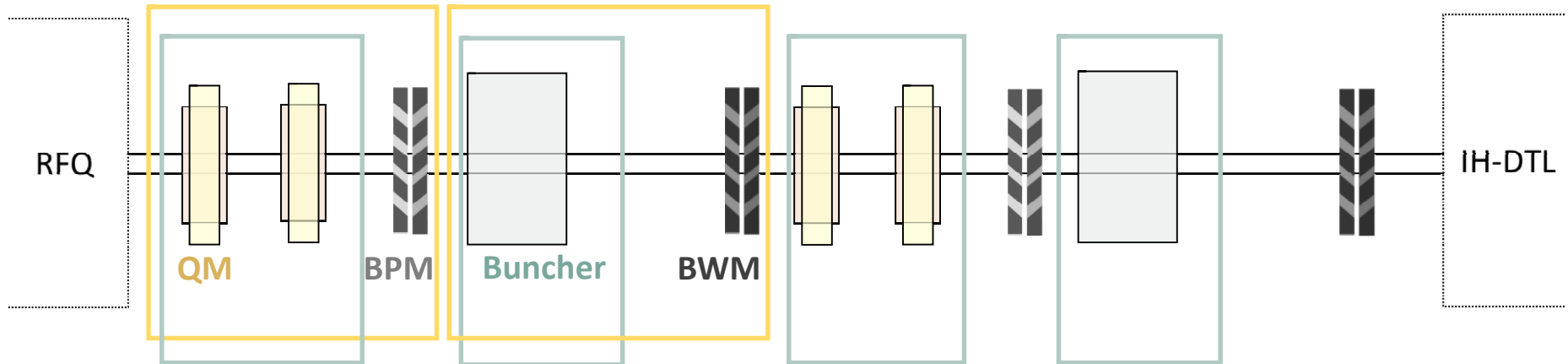
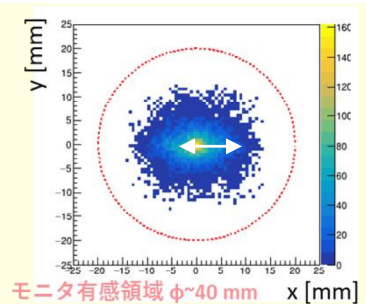
1. 四重極磁石・バンチャー・モニタの個数・配置を検討

-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

検出部に**マイクロチャンネルプレート(MCP)**を使用したモニタを輸送ラインに挿入して測定

- ・Beam Profile Monitor (BPM) ...位置構造の測定
- ・Bunch Width Monitor (BWM) ...時間構造の測定



ビーム整形

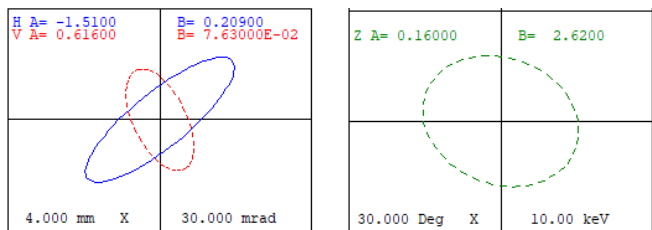
- ・四重極磁石 (QM) ...強収束の原理より横方向のビーム整形を行う
- ・バンチャー ...位相安定性原理より縦方向のビーム整形を行う

ビーム輸送ラインのデザイン

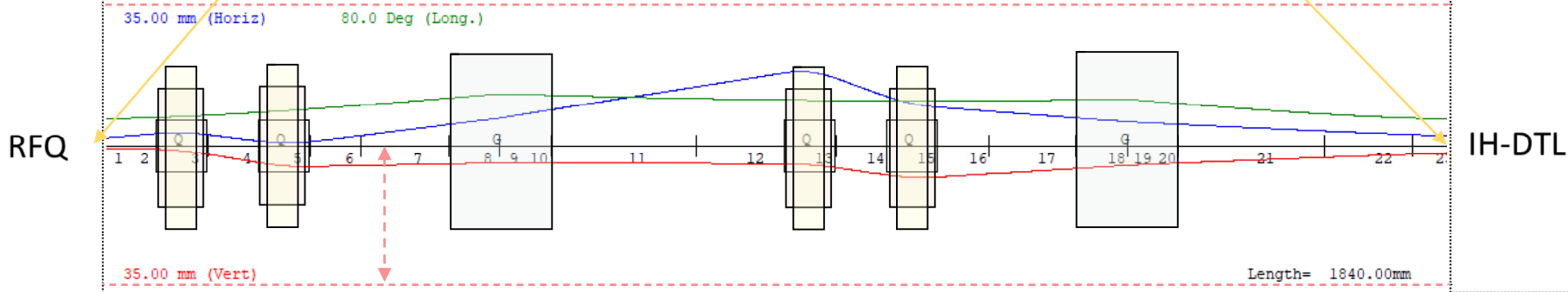
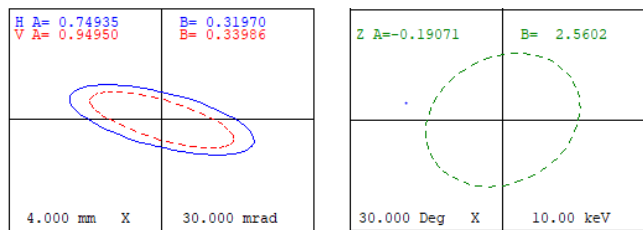
転送行列の計算(TRACE3D)よりビーム輸送ラインのデザインを行う

2. ビーム光学系(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 ($\phi \sim 35$ mm)

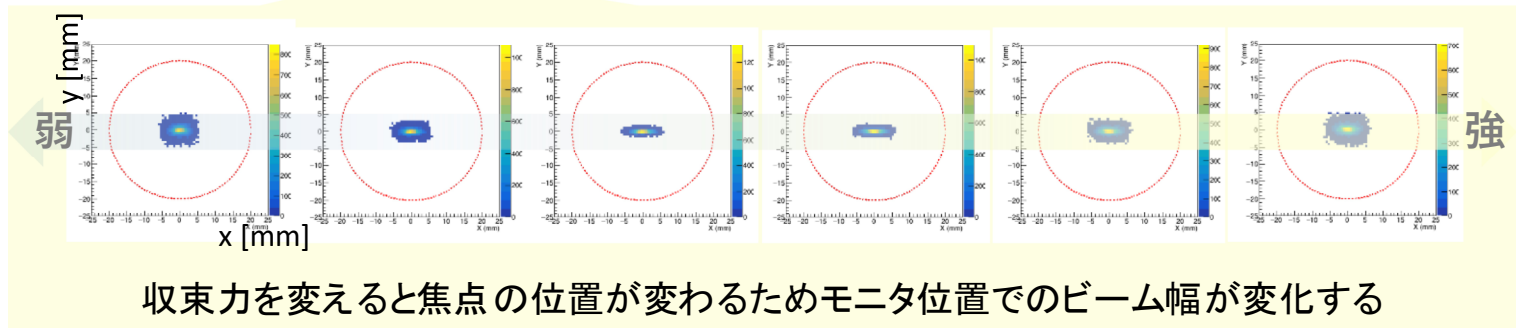
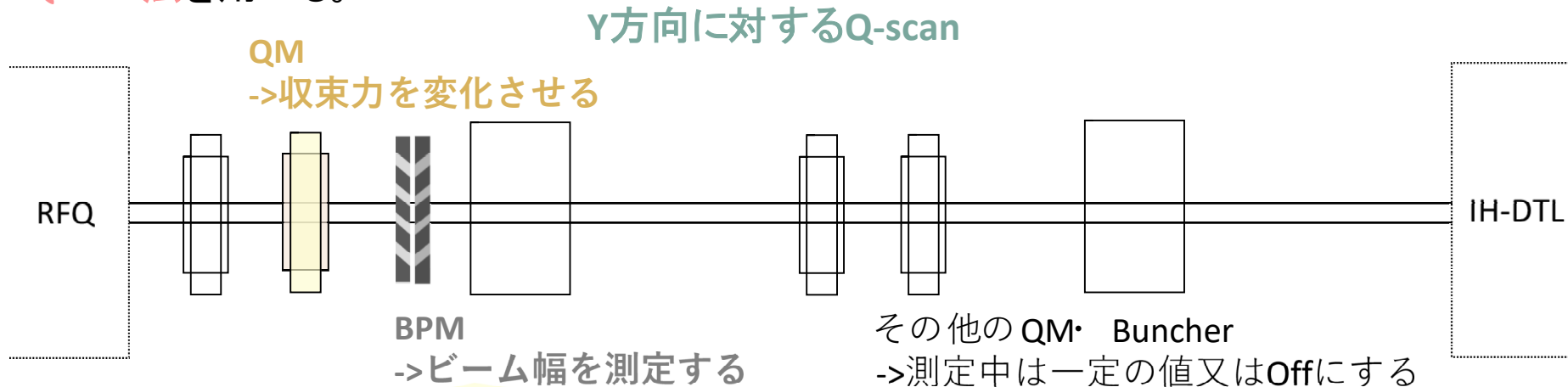
青 x方向 赤 y方向 緑 z方向

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

ビーム診断精度の評価

ビーム診断には収束力とビーム幅の関係からエミッタンスとtwissパラメータを導出する
Q-scan法を用いる。



・測定結果に対して以下2通りの場合について評価

- モニタの分解能の影響を除く

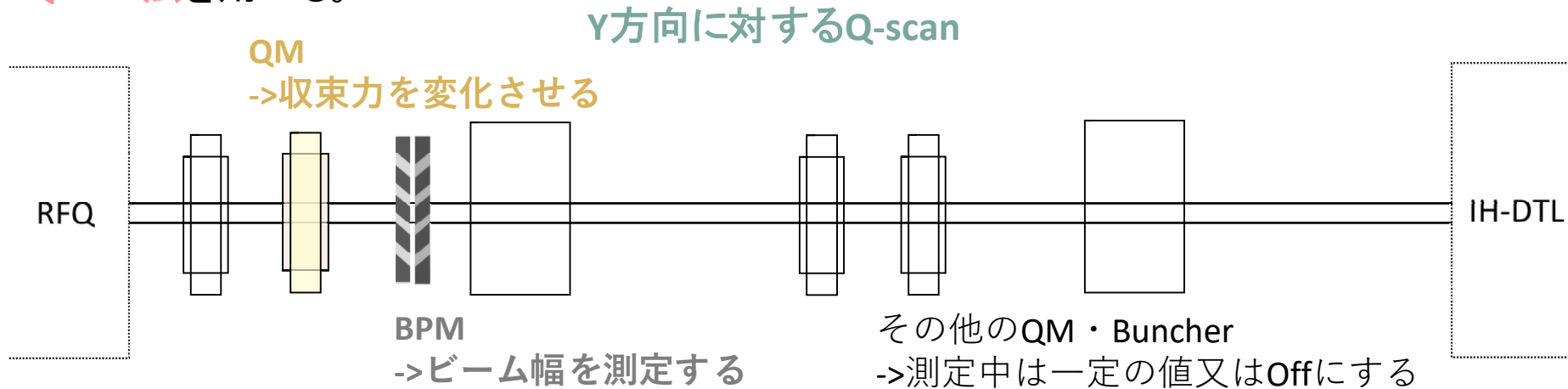
$$\sigma_{\text{measurement}}^2 = \sigma_{\text{simulation}}^2$$

- モニタの分解能の影響を含む

$$\sigma_{\text{measurement}}^2 = \sigma_{\text{simulation}}^2 + \sigma_{\text{monitor resolution}}^2$$

ビーム診断精度の評価

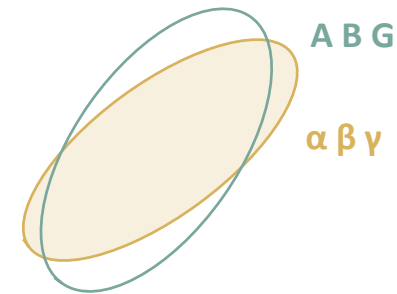
ビーム診断には収束力とビーム幅の関係からエミッタンスとtwissパラメータを導出する
Q-scan法を用いる。



加速後のエミッタンス増加に影響するミスマッチの指標として**ミスマッチファクター**を用いる

ミスマッチファクター (M)

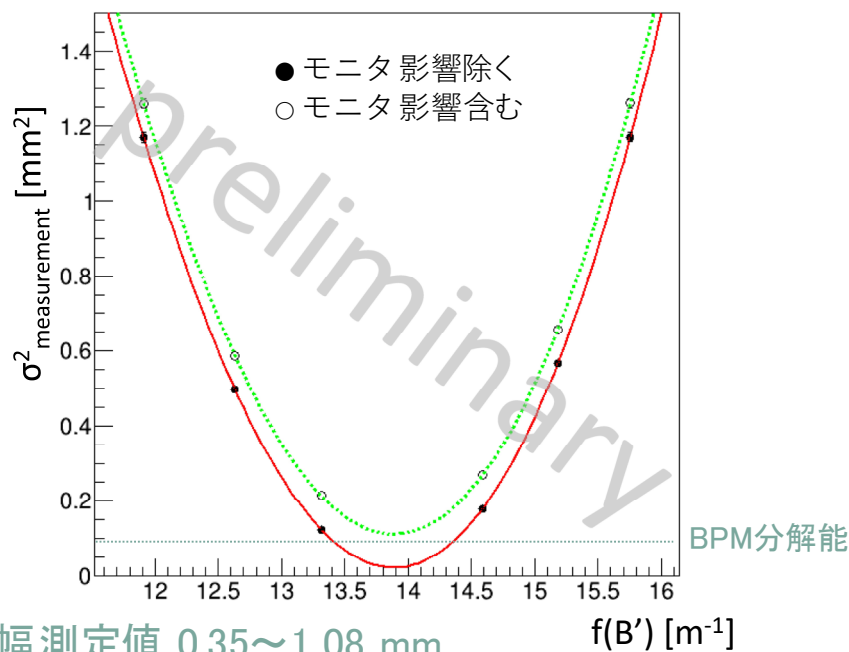
... 理想的なビーム($\alpha \beta \gamma$ で定義)に対して別のビーム(A,B,Gで定義)の大きさがどれくらいずれるかを示す量
2つの楕円のtwissパラメータから定義される
ex) $M=0.1$ のときビームサイズは10%大きくなり得る



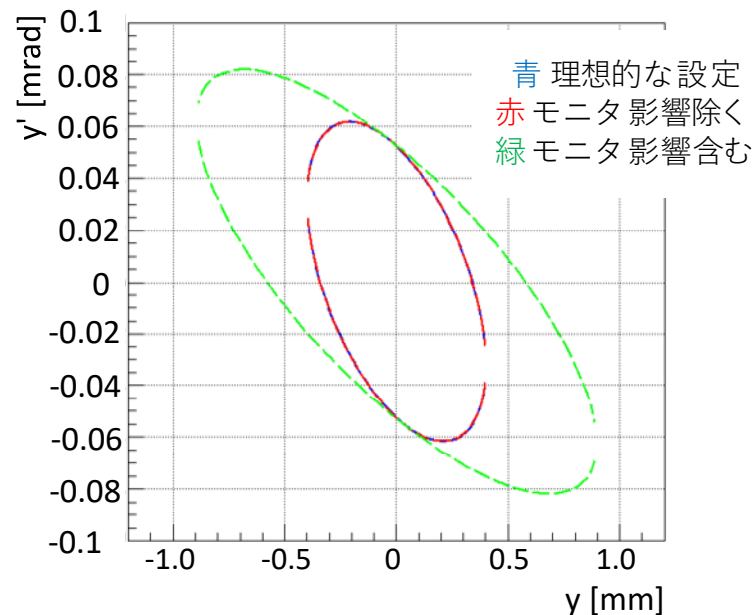
この他に、ビームに対するアクセプタンスの大きさ等も影響する

横方向診断ミスによる不一致の見積もり

ビーム幅と収束力の関係



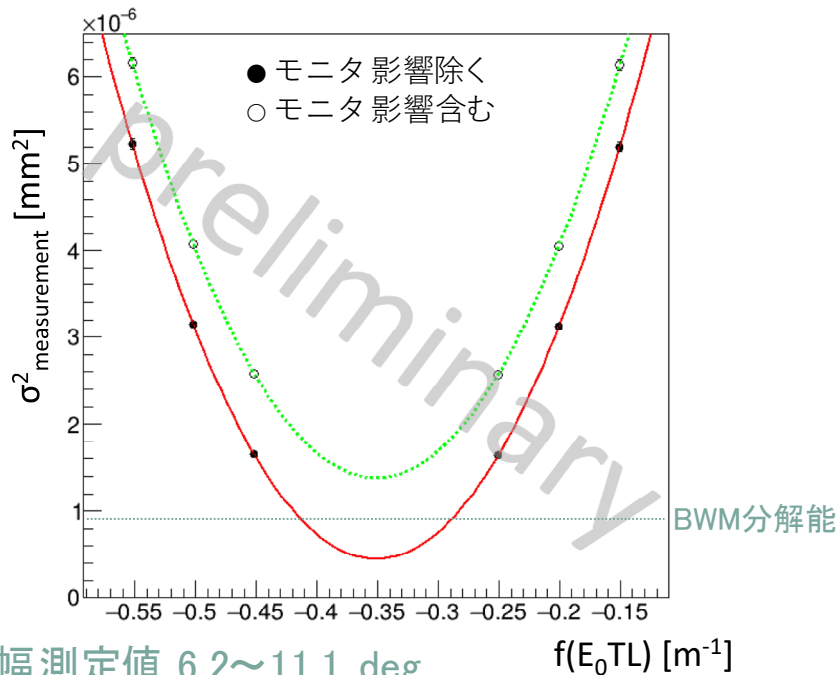
診断ミスによるビーム形状の違い (輸送ライン入口)



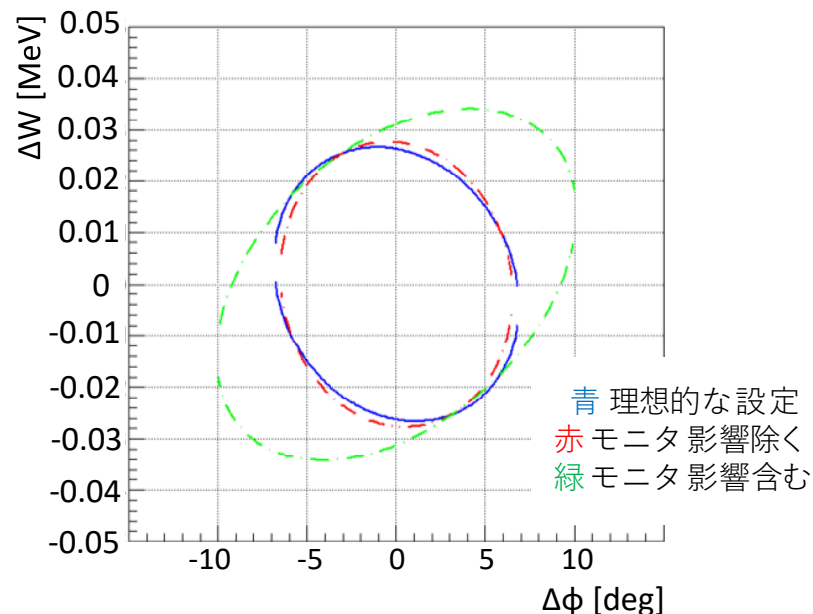
- ・開発されたBPMの性能[5]を参照して**分解能0.3 mm**の場合に対して評価を行う
- ・横方向の診断ミスによるビームサイズの不一致はミスマッチファクターから評価を行うと、
 - モニタの影響除く場合(右図赤の楕円) ~0%
 - モニタの影響を含む場合(右図緑の楕円) **50%**
- ・ビーム幅の最小値がモニタ分解能よりも小さいため、モニタの影響を含む場合はエミッタンスが大きく見積もられる(右図緑の楕円)

縦方向診断ミスによる不一致の見積もり

ビーム幅と収束力の関係



診断ミスによるビーム形状の違い (輸送ライン入口)



- ・加速周波数324 MHzの1%程度である**分解能40 ps (~4.7 deg)**の場合に対して評価を行う
- ・縦方向の診断ミスによるビームサイズの不一致はミスマッチファクターから評価を行うと、
 - モニタの影響除く場合(右図赤の楕円) ~7%
 - モニタの影響を含む場合(右図緑の楕円) **36%**
- ・ビーム幅の最小値がモニタ分解能よりも小さいため、モニタの影響を含む場合はエミッタンスが大きく見積もられる(右図緑の楕円)

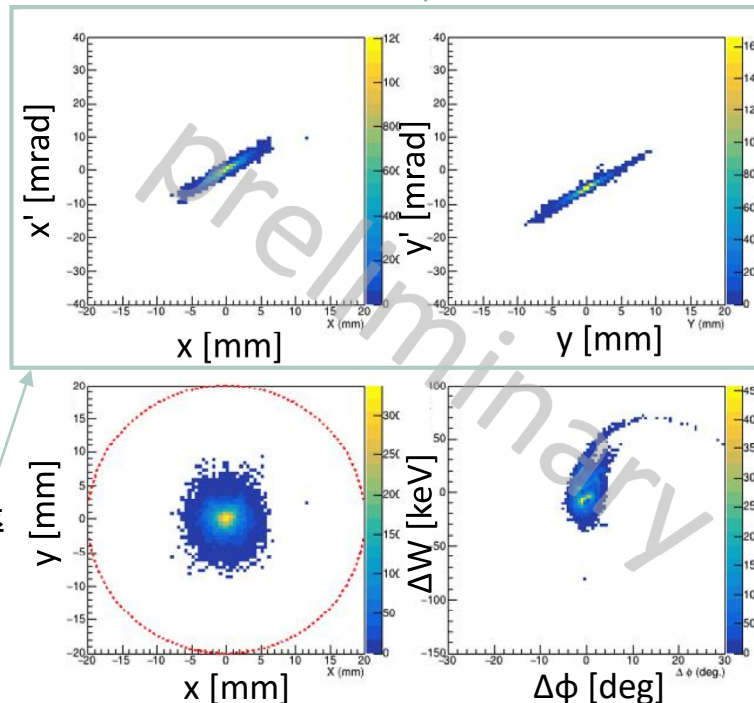
ビーム診断ミスの影響の見積もり

RFQ出射ビームに対して**最大50%の診断ミス**を含む結果を基にビーム整形を行い、ミスマッチによるエミッタンス増加を見積もった。

理想的な場合に対するIH出口でのエミッタンス

	理想的な条件の場合	モニタ影響除く場合	モニタ影響含む場合
ϵ_x π mm mrad	0.337	0.338 (~100%)	0.347 (103%)
ϵ_y π mm mrad	0.192	0.194 (101%)	0.194 (101%)
ϵ_z π deg MeV	0.0189	0.0196 (104%)	0.0351 (186%)

IH出口での粒子分布 (モニタの影響含む場合)



()内は理想的な条件でのIH加速後のエミッタンスに対する比率

横方向については中心から外れた粒子が少なく、105%以下の結果に齟齬はないと思われる

- ・分解能0.3 mmのBPMを用いた場合の診断ミスによって増加する横方向のエミッタンスは蓄積リングへのインジェクションからの要求 $\epsilon_{x,y} < 0.5 \pi$ mm mrad を満たす
->BPMの分解能は**現在達成されている0.3 mm**で十分であると考えられる

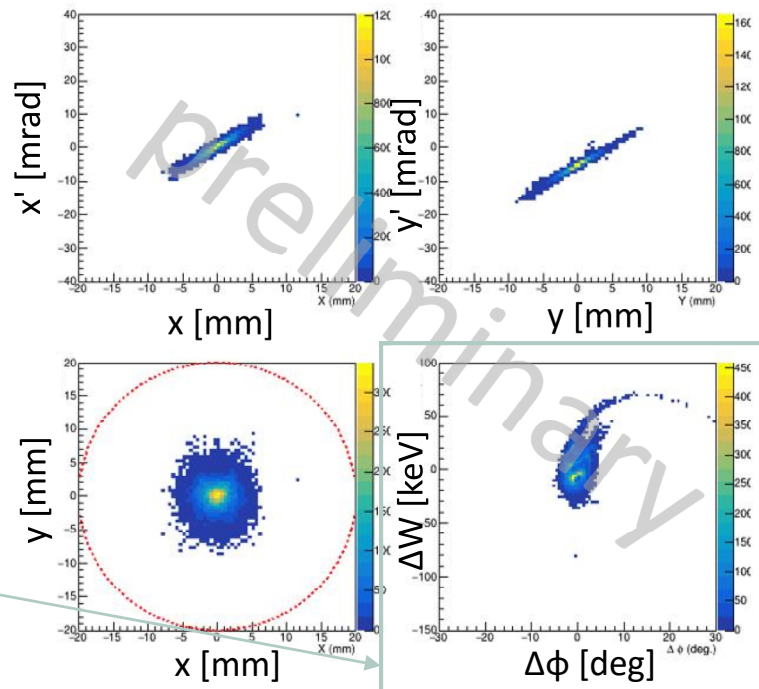
ビーム診断ミスの影響の見積もり

RFQ出射ビームに対して**最大50%の診断ミス**を含む結果を基にビーム整形を行い、ミスマッチによるエミッタンス増加を見積もった。

理想的な場合に対するIH出口でのエミッタンス

IH出口での粒子分布 (モニタの影響含む場合)

	理想的な条件の場合	モニタ影響除く場合	モニタ影響含む場合
ϵ_x π mm mrad	0.337	0.338 (~100%)	0.347 (103%)
ϵ_y π mm mrad	0.192	0.194 (101%)	0.194 (101%)
ϵ_z π deg MeV	0.0189	0.0196 (104%)	0.0351 (186%)



()内は理想的な条件でのIH加速後のエミッタンスに対する比率

下流のビームラインではロスになると考えられる
テール成分は全体の0.2% ->透過率に影響なし

・分解能40 psのBWMを用いた場合の診断ミスによって増加する縦方向のエミッタンスは蓄積リングへのインジェクションからの要求**140%を満たさない**

->テール成分を除いて評価を行うと $\epsilon_z = 0.0222 \pi$ deg MeV (117%)となり、

BWM分解能のみの寄与を考慮すれば本設計で**要求を満たす**

まとめと展望

J-PARC muon g-2/EDM実験で低エミッタンスミュ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。

- ☑ 最適化したIH入射条件を基に、ビーム輸送ラインの基本デザインを行った。
⇒ビーム輸送ラインでのマッチングに由来するエミッタンス増加は起きていないことを確認した。
- ☑ ビーム診断ミスによるIH加速後のエミッタンス増加の影響について評価した。
⇒下流のビームラインでのロス成分を除いた場合、診断ミスの影響によって増加するIH加速後のエミッタンスは実験の要求を満たす。

展望

- BWMへの要求精度決定のため、より詳細な検証を行う。
⇒加速空洞やバンチャーの空洞調整について評価を行い、調整ミスによるエミッタンス増加の影響を見積もる。
- 評価結果を踏まえBWMの性能向上を行う。
⇒位置校正による特性の理解や、より分解能のよいTDCへの変更を検討している。