

第20回 加速器学会年会

非破壊型大電流ビームモニタの開発及び性能評価

2023/08/31

株式会社 日立製作所 研究開発グループ
脱炭素エネルギーイノベーションセンタ 電磁応用システム研究部

○足利 沙希子, 永嶋 和也, 青木孝道, 関孝義

- 産業/医療利用の中性子源では、大電流イオンビームが必要
 - 日立製作所では100mA級の単孔連続波(CW)イオン源を開発
 - 適用製品: BNCT用加速器(40mA)・研究用加速器(~100mA)
- 大電流CWビーム(30mA \leq)対応の測定器が必要
 - ビームサイズ・エミッタンス・Twissパラメータ等の測定
 - 破壊型測定では機器発熱・帯電が問題

【研究目的】

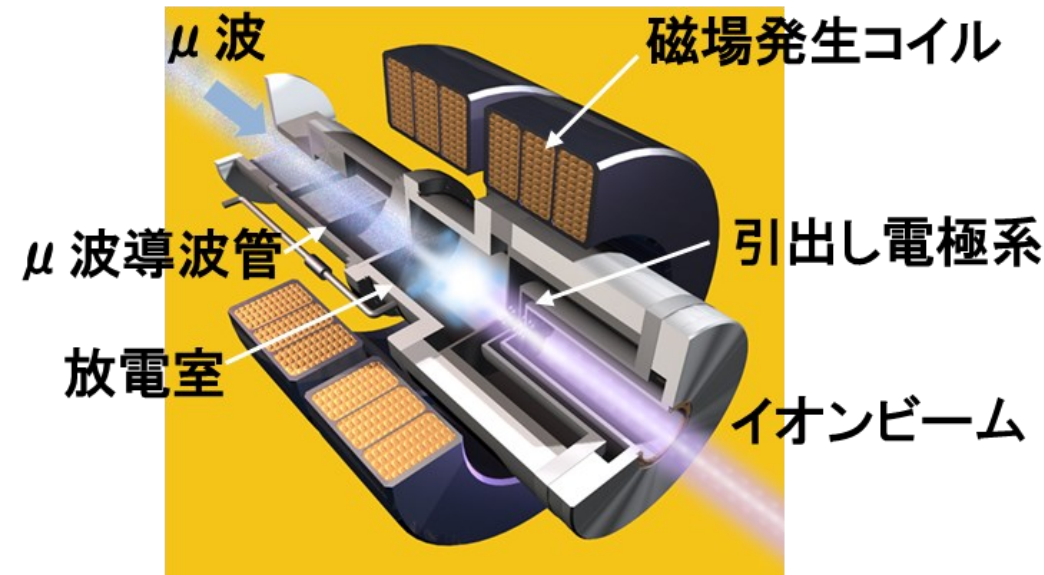
低エネルギー輸送系(LEBT)でのビーム測定・監視

- “非破壊型”ビームモニタ開発

◎ 機器発熱・帯電なし

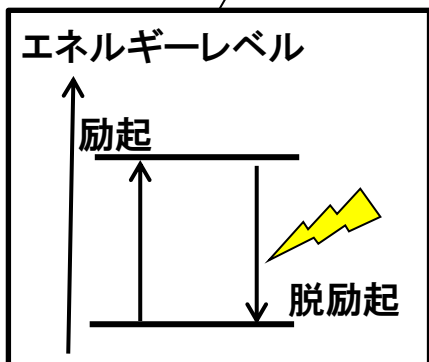
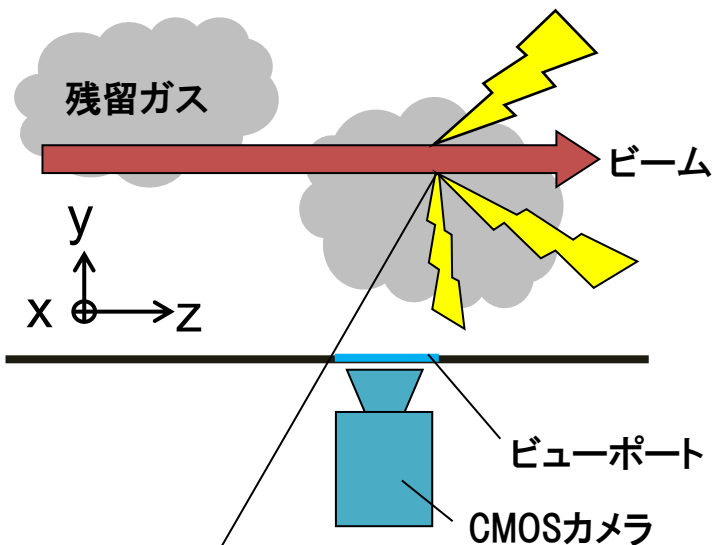
◎ 下流の加速器運転と両立可能

自社開発のECRイオン源



@大電流加速器のLEBT

- ・低真空
 - ・大電流
- ➡ 軌道上に強い蛍光が発生



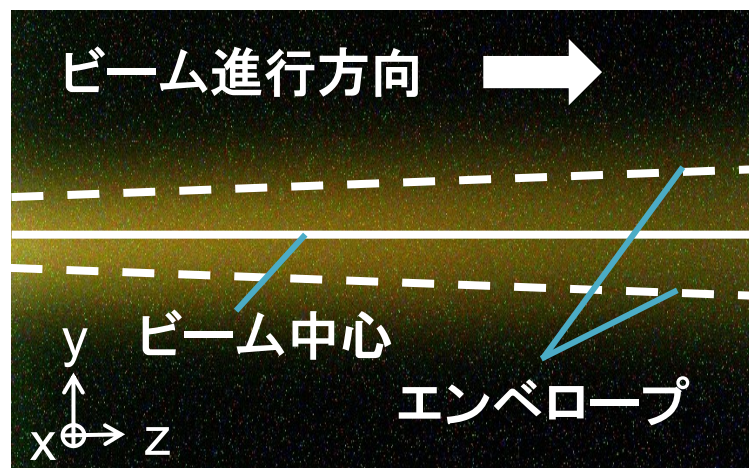
ビーム空間分布取得

- ☑ 中心位置
- ☑ サイズ
(=エンベロップ $\sigma_y(z)$)

蛍光からビーム分布を取得
ビーム進行方向を含む2D測定



“軌道に沿ったビームの変化を検出”



ビームパラメタ取得

- ☑ エミッタンス

エンベロップ方程式の解 $\sigma_y(z)_{sol}$ で測定データをフィット

$$\frac{d^2}{dz^2} \sigma_y(z) = \frac{\epsilon^2}{\sigma_y(z)^3} + \frac{\kappa}{4\sigma_y(z)}$$

κ : パービアンス
 ϵ : エミッタンス

- ☑ Twissパラメタ

$$\begin{cases} \beta(z) = \sigma_y(z)^2 / \epsilon \\ \alpha(z) = -\frac{1}{2} \frac{d}{dz} \beta(z) \end{cases}$$

【試験項目】

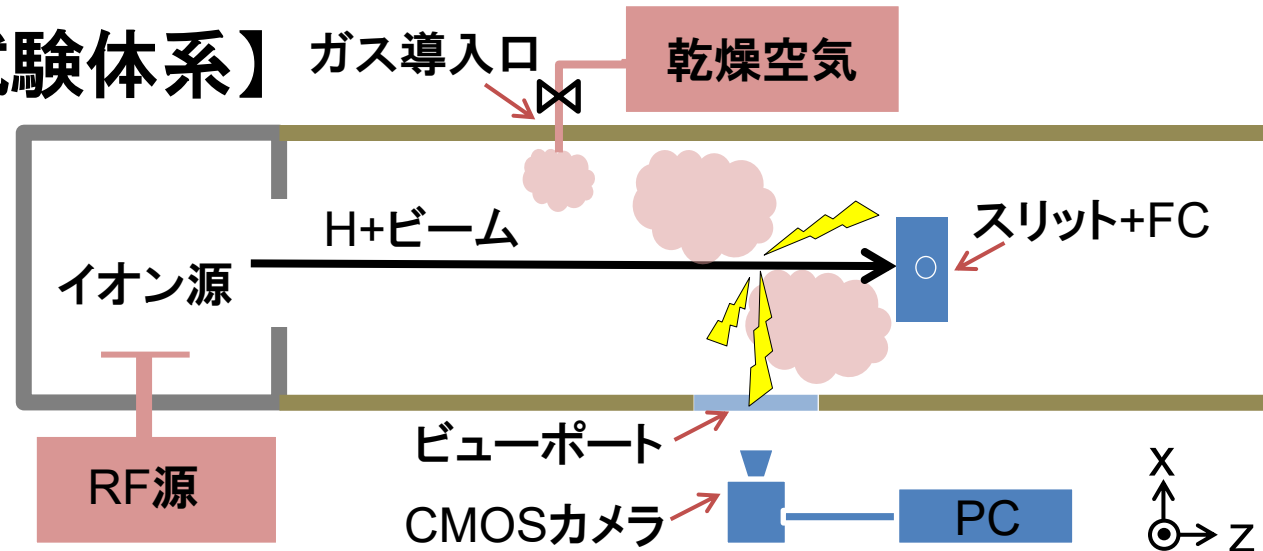
1. モニタ機能実証

- ・モニタによるビーム情報取得
 - ビームサイズ(エンベロープ)
 - エミッタンス・Twissパラメタ
- ・スリットスキャン法の結果との比較

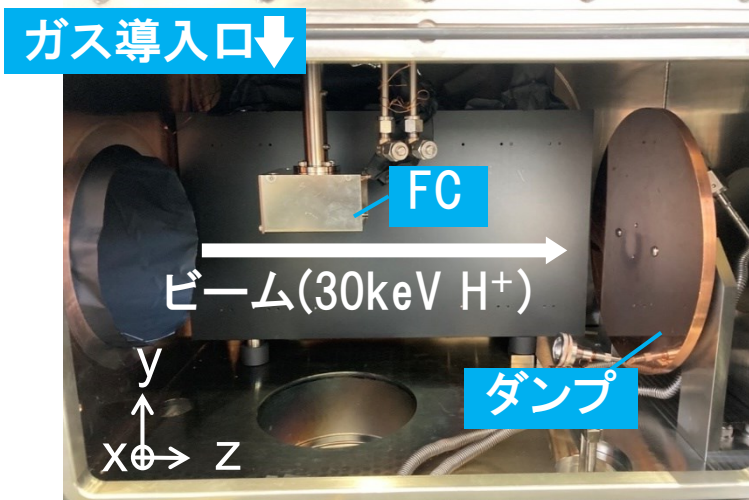
2. モニタ性能評価

- ・要求性能
 - シグナル/ノイズ(S/N) ≥ 1
 - ビームサイズ測定精度 $\leq 0.2\text{mm}$
- ・電流・真空度依存性を評価
 - LEBT環境での実用性を調査
 - 真空度 $\sim 1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$
 - ビーム電流 $30 \text{ mA} \leq$

【試験体系】



試験チャンバ内部の様子



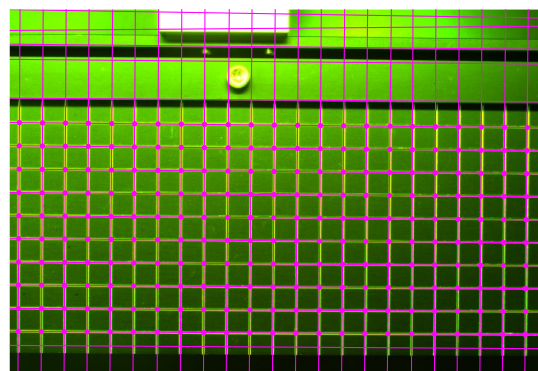
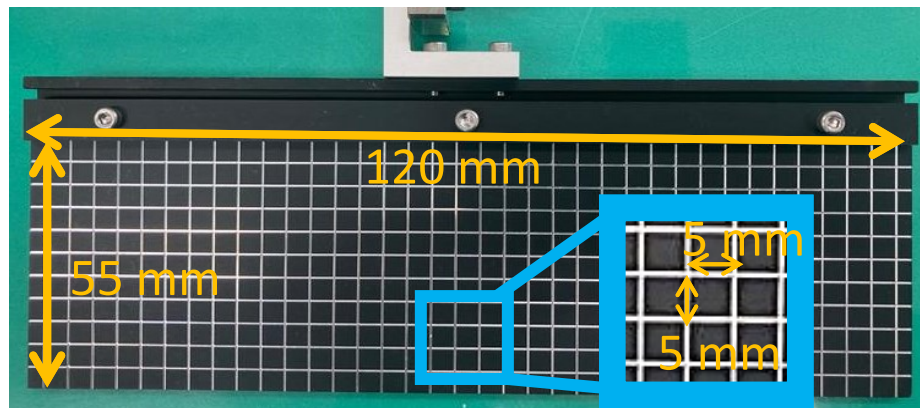
測定条件

※比較測定のためパルス運転

電流	18 - 32 mA
パルス長	200 ms
duty	10%
真空($\times 10^{-3} \text{ Pa}$)	1.5 - 10.2
モニタ露光時間	30 s

【モニタ校正】

ビーム軌道上に校正用ボードを設置



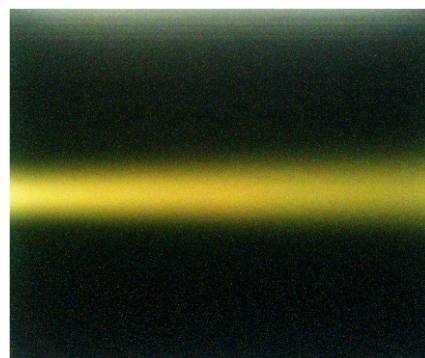
画像解析で
スリット線を検出

画像の1pixelに対応する長さを計測

➡ 47um/pixel

【ノイズ棄却】

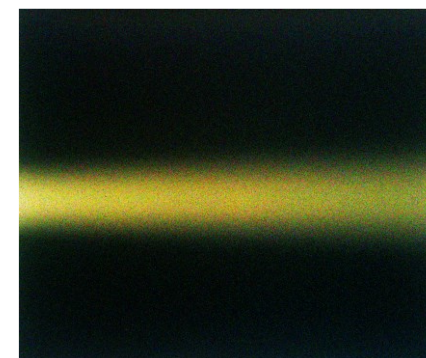
・バックグラウンド
ビームONデータ



ビームOFFデータ



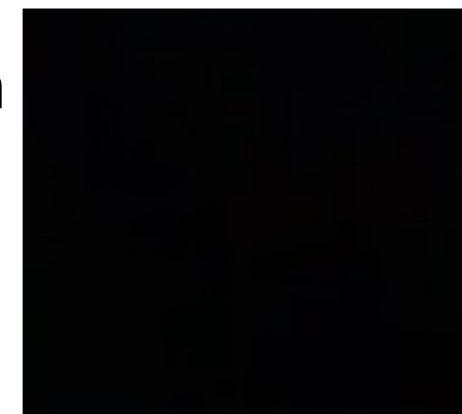
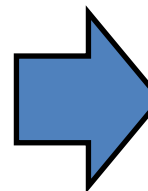
=



・センサノイズ

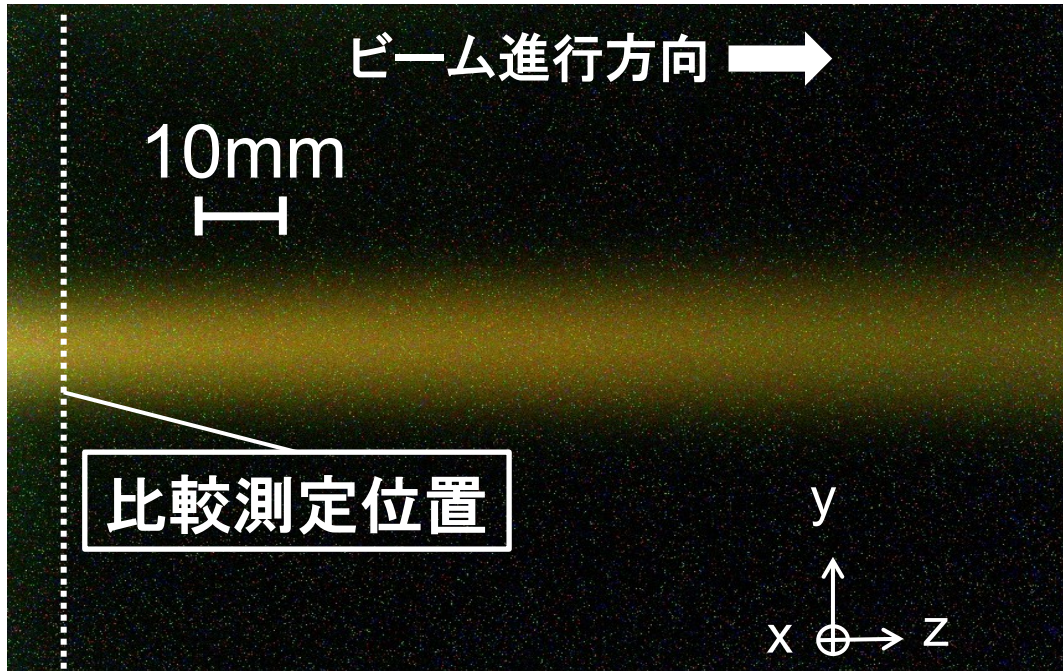


median+smooth
filtering



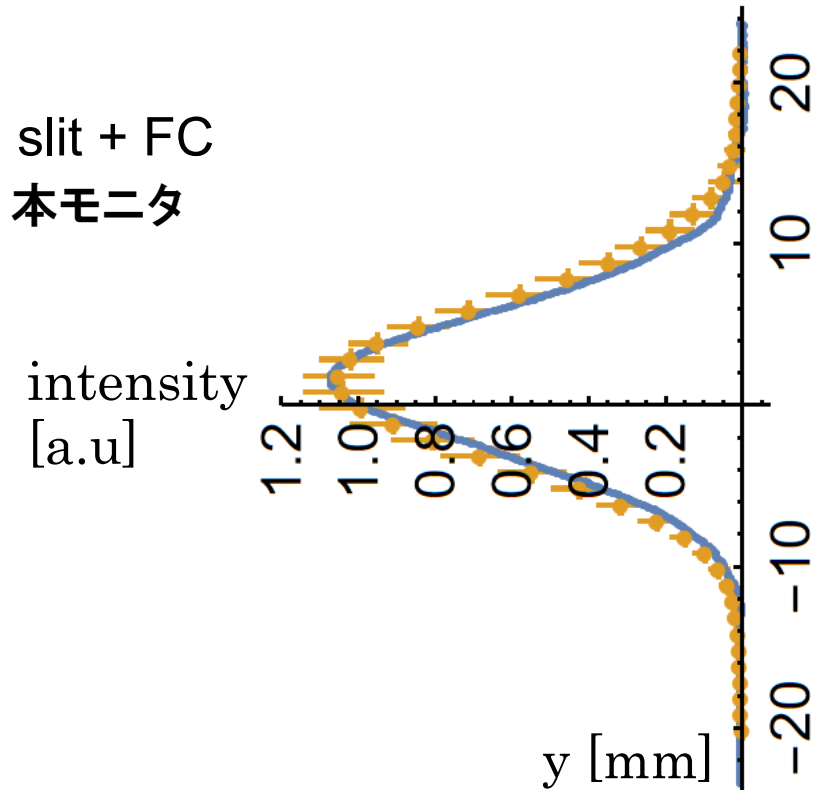
撮影したビーム蛍光画像

(ビーム電流値27mA, 真空度 1.52×10^{-3} Pa)



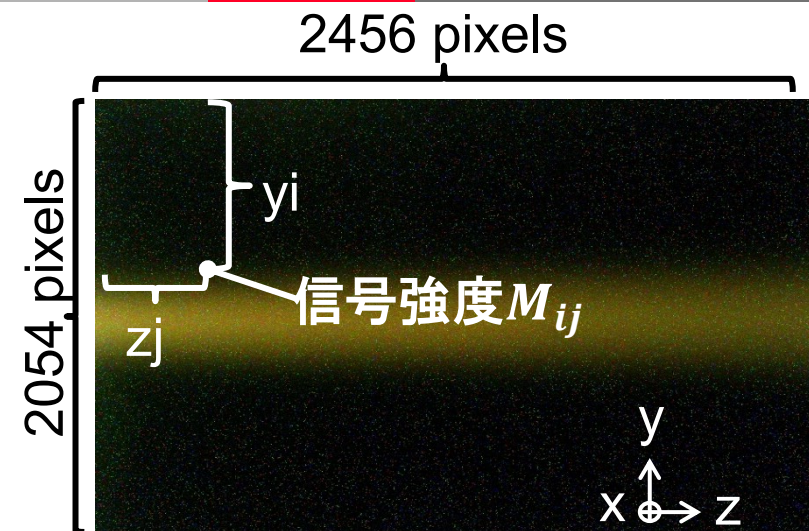
ビームの鉛直方向分布

- slit + FC
- 本モニタ



◎測定したビーム分布はスリットとファラデーカップによる測定結果と一致
→ 軌道上の蛍光の分布からビーム形状を検出可能

◎画像データによりビームの振る舞いを直感的に理解可能



ビーム中心

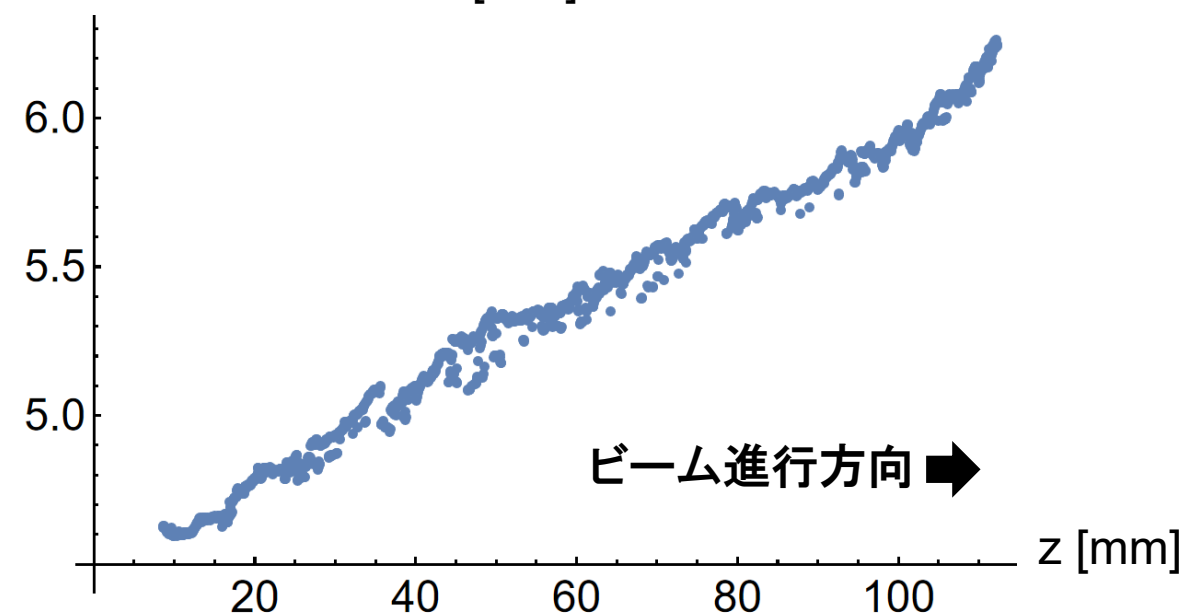
$$\langle y \rangle_j = \frac{\sum_{i=1}^{2054} M_{ij} y_i}{\sum_{i=1}^{2054} M_{ij}}$$

ビームサイズ

$$\sigma_{yj} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2054} M_{ij} (y_i - \langle y \rangle_j)^2}{\sum_{i=1}^{2054} M_{ij}}}$$

M : 画像データ行列(2456x2054)

ビームエンベロープ[mm]



◎エンベロープの検出に成功

◎自由空間中でビームが発散する様子を観測

理論式によりエンベロープデータをフィットしエミッタンスを評価

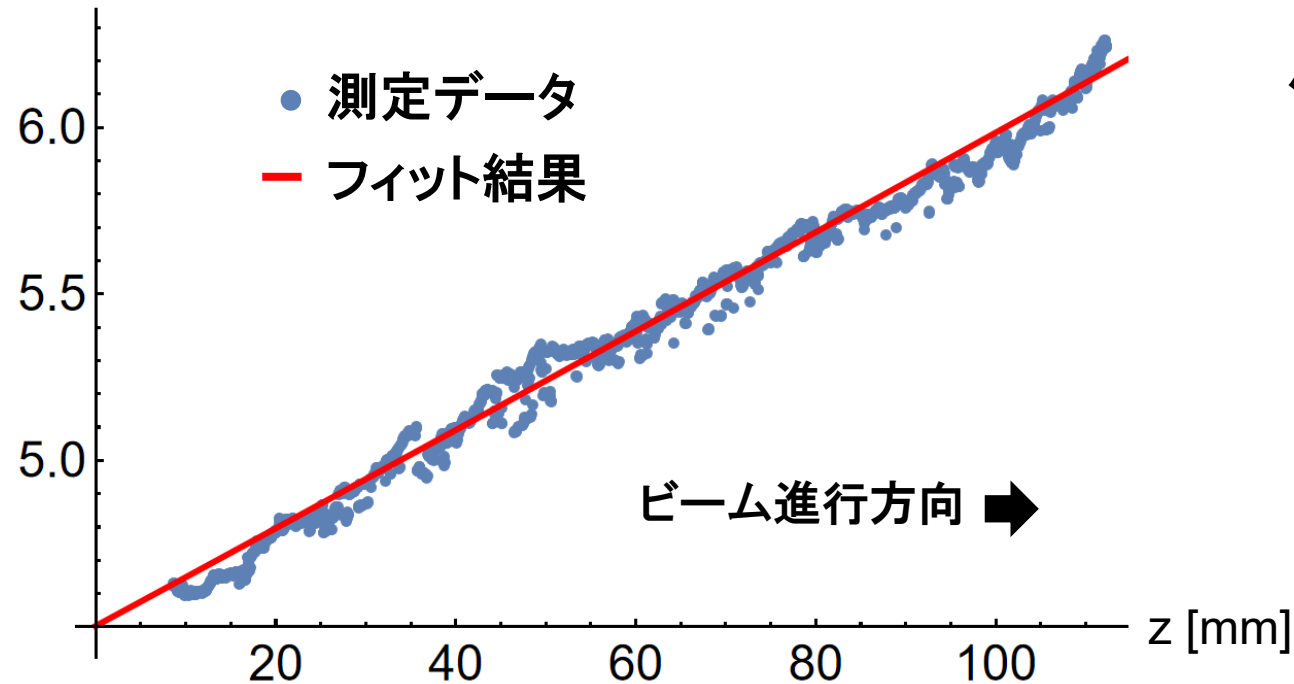
エンベロープ方程式

$$\frac{d^2}{dz^2} \sigma_y(z) = \frac{\epsilon^2}{\sigma_y(z)^3} + \frac{\kappa}{4\sigma_y(z)}$$

κ : パービアンズ

ϵ : エミッタンス

ビームエンベロープ[mm]



パービアンズ $\kappa = 1.12 \times 10^{-5}$

エミッタンス

$\epsilon = 11.71\pi \text{ mm mrad.}$

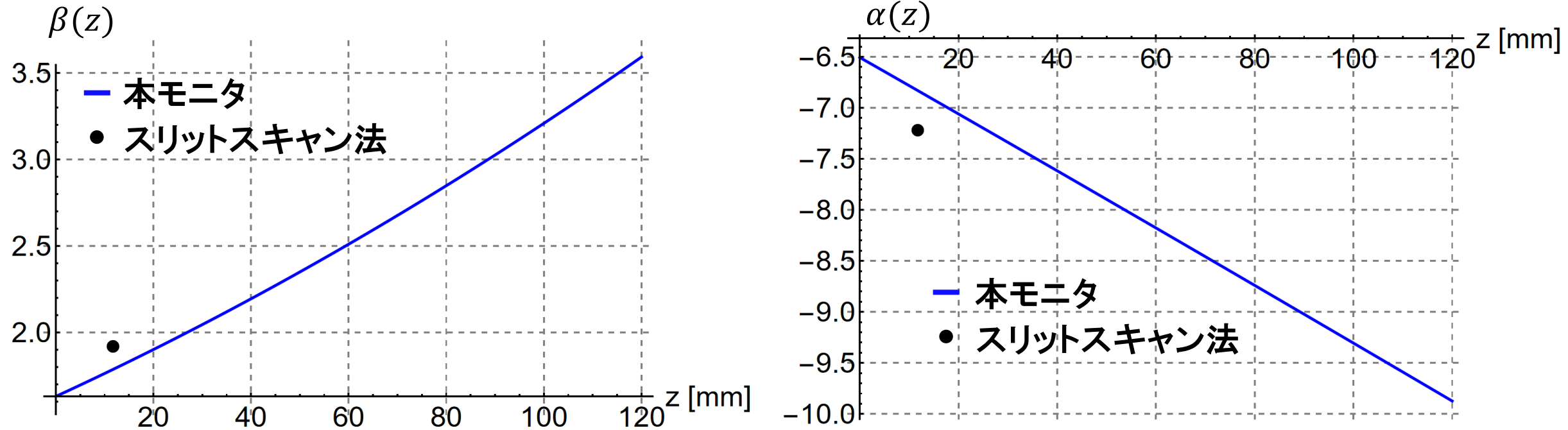
⇔スリットスキャン法による比較測定値:
 $12.12 \pi \text{ mm mrad.}$

一般的な測定手法と4.5%の精度で一致

取得したエンベロープ関数 $\sigma_y(z)$ ・エミッタンスよりTwissパラメタ($\alpha(z)$, $\beta(z)$)を評価

$$\beta(z) = \sigma_y(z)^2 / \epsilon$$

$$\alpha(z) = -\frac{1}{2} \frac{d}{dz} \beta(z)$$

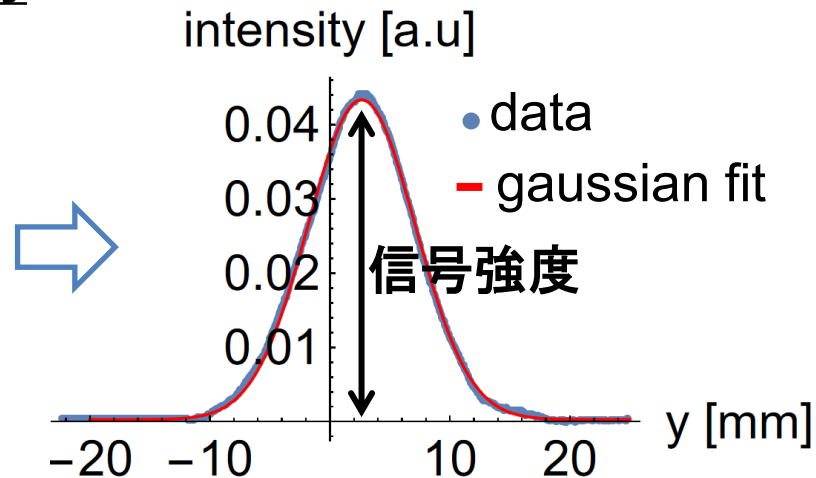
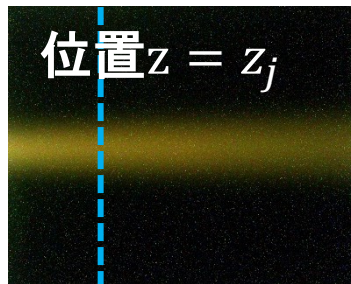


スリット法による測定結果と $\beta(z)$ 6.7%、 $\alpha(z)$ 1.7%の精度で一致
”エンベロープ検出に基づくビームパラメタの非破壊測定を実証“

$$\text{signal/noise} = (\text{beam on時の信号強度の平均}) / (\text{beam off時の信号の分散})$$

Signal 評価

beam on 時の信号

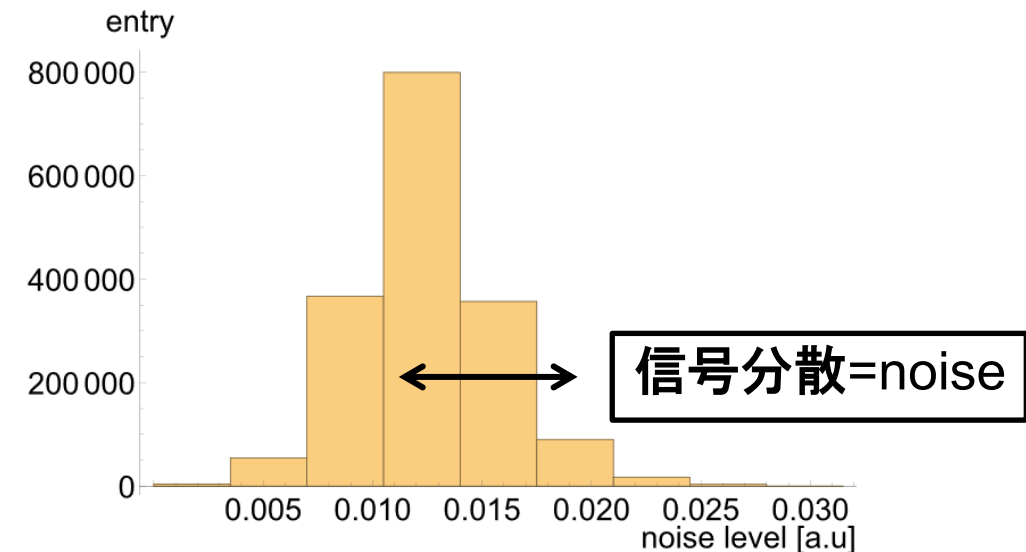
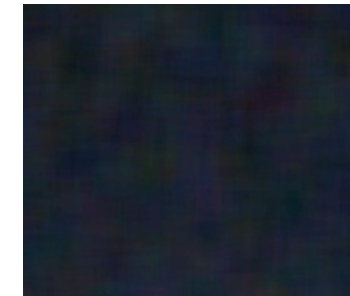


実用上はCWビームの測定を想定
※今回duty10%のパルスビームを使用

信号強度平均x10=signal

Noise 評価

beam off 時の信号

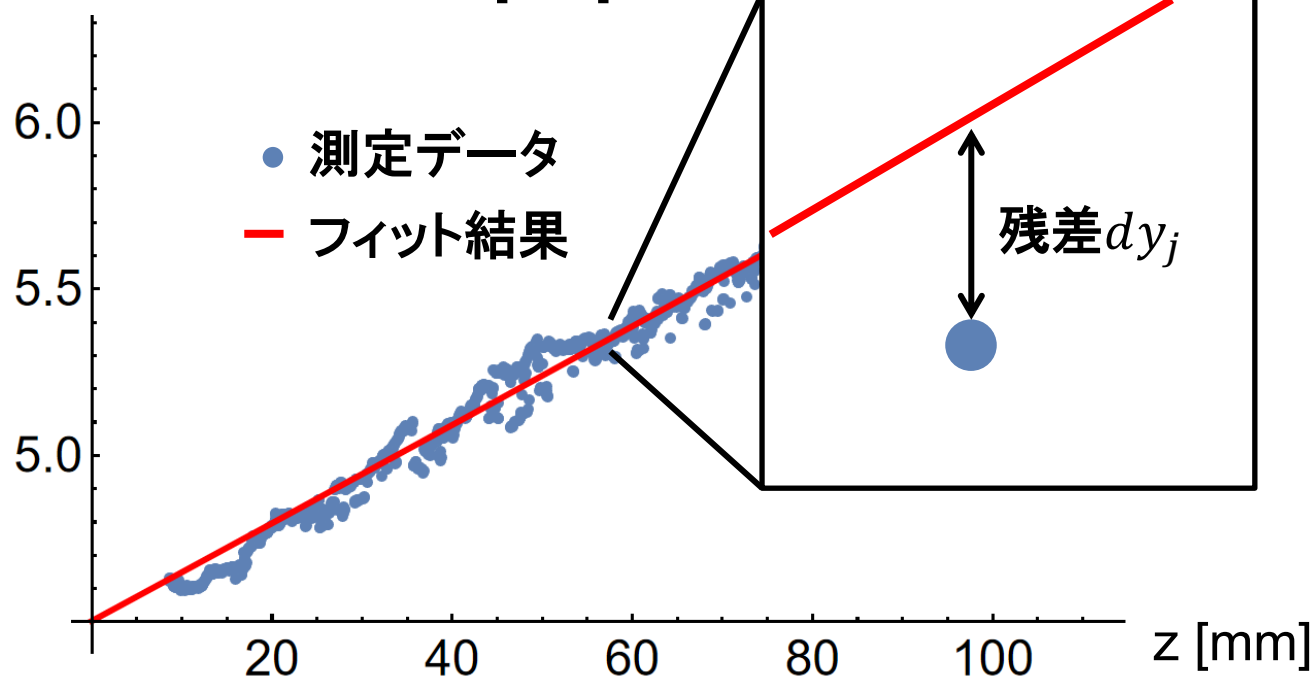


測定精度 $\sigma_{err} = \sqrt{\sum_{j=1}^{2456} (\sigma_y(z_j)_{sol} - \sigma_{yj})^2}$

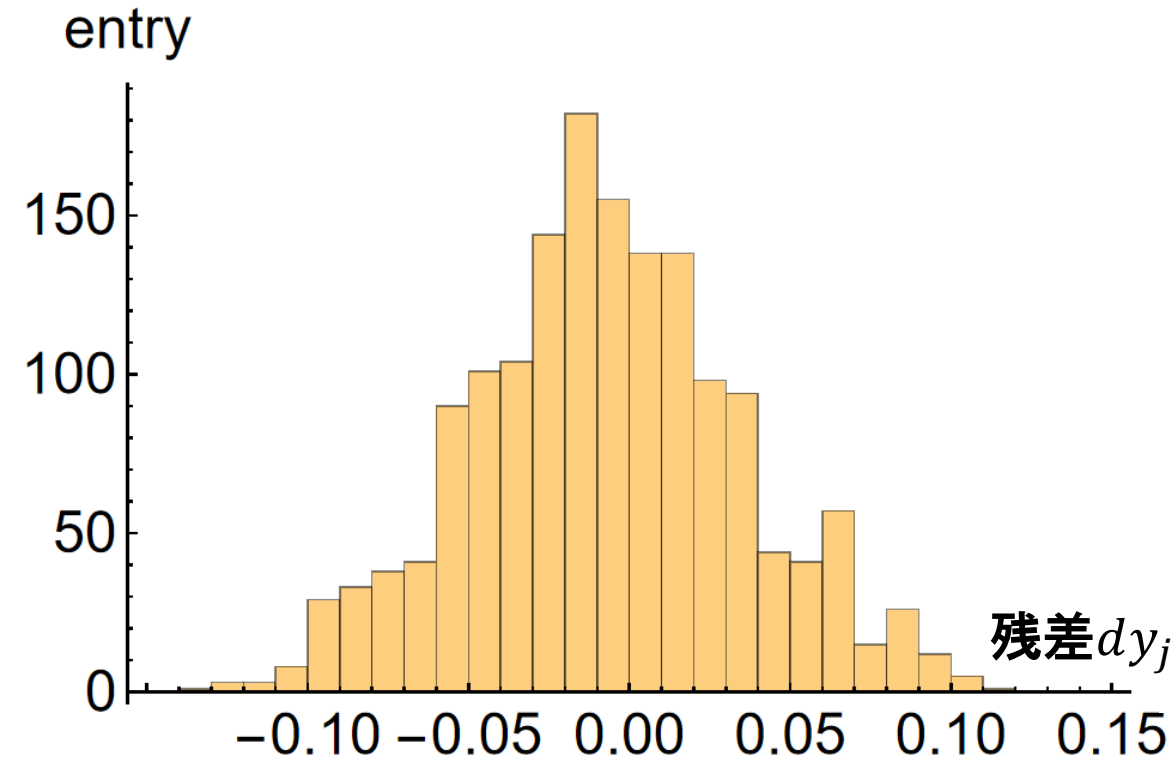
$\sigma_y(z_j)$:エンベロープ方程式の解

σ_{yj} :測定データ

ビームエンベロープ[mm]

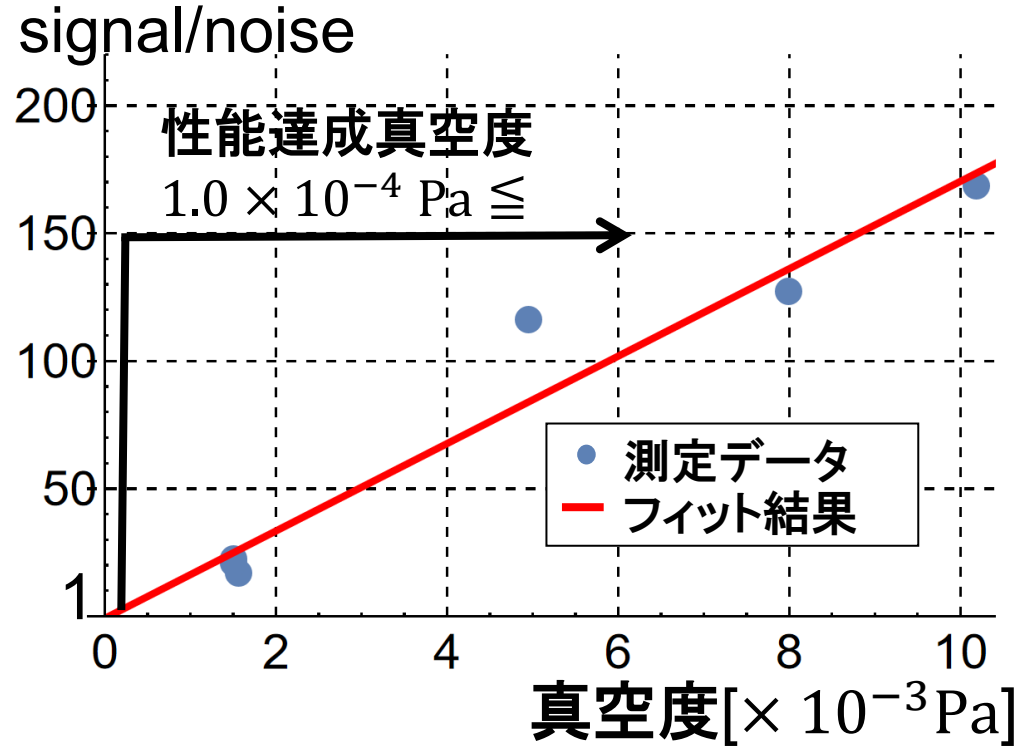


Fit残差の分布

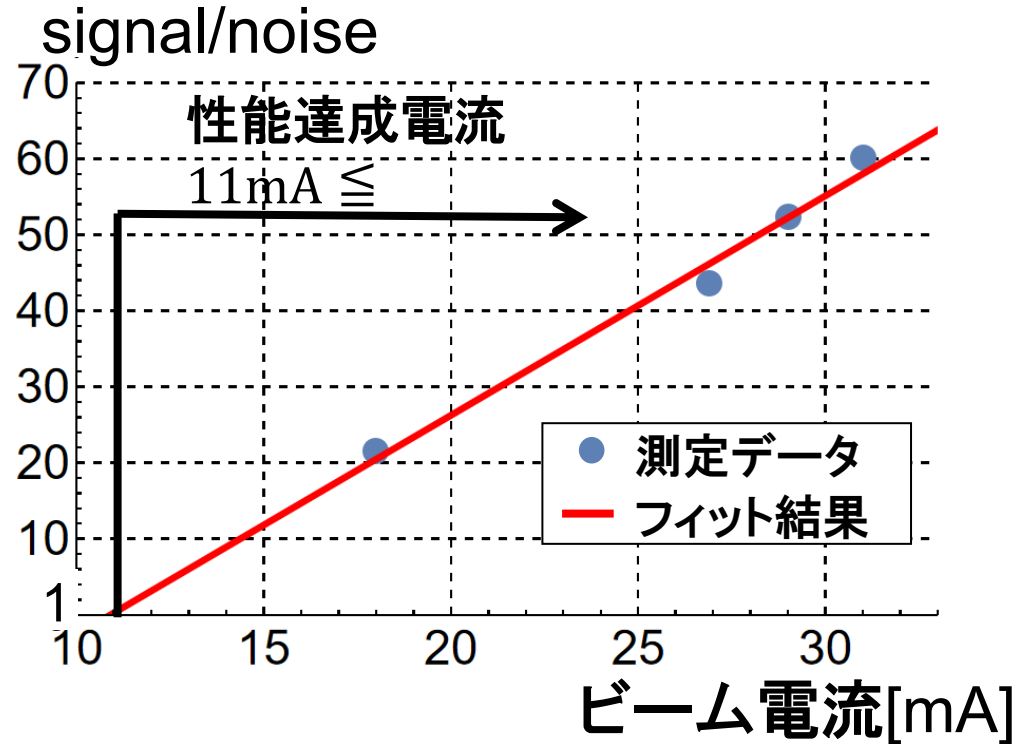


【signal/noiseの環境依存性】

真空度依存性@ビーム27mA



電流値依存性@真空度 $1.5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$



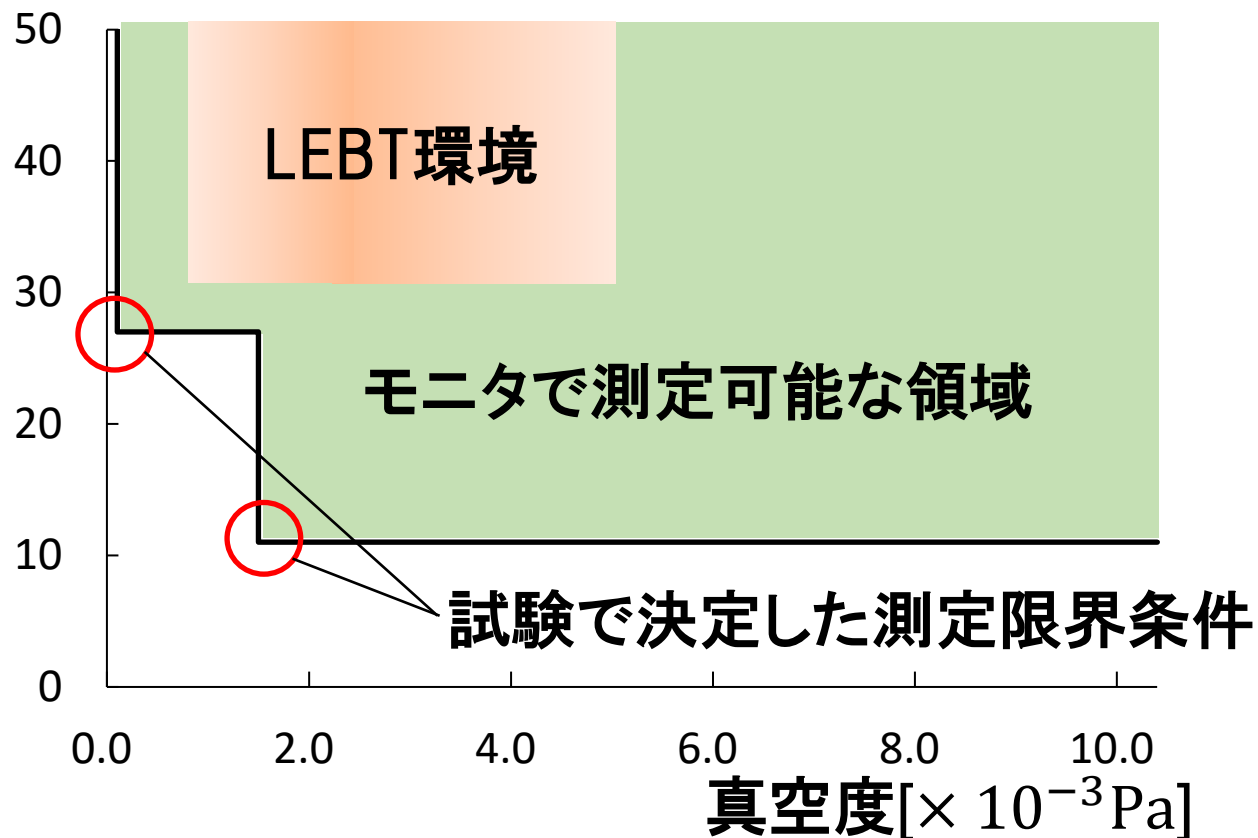
【ビームサイズ測定精度】

◎全測定条件で測定精度 $\leq 84 \mu\text{m}$ を達成

- モニタ校正の結果 $47 \mu\text{m}/\text{pixel} \Rightarrow$ 測定精度にカメラ画素数及び測定距離が影響

モニタが要求性能を満たすチャンバ真空度・ビーム電流領域

ビーム電流[mA]



要求性能

-シグナル/ノイズ(S/N) ≥ 1

-ビームサイズ測定精度 ≤ 0.2 mm

◎大電流加速器のLEBTでの
ビーム測定・監視を実現

- * 日立製作所では100mA級の単孔連続波(CW) イオン源を開発
 - 大電流ビーム測定に特化したモニタの開発が必要不可欠
- * 非破壊型大電流ビームプロフィールモニタを開発
 - ・30keV H⁺ビームによるモニタ試験
 - ビーム分布・エミッタンス・Twissパラメータ測定
 - スリットスキャン法による測定と5%前後の精度で一致
 - モニタ性能のビーム電流・真空度依存性を評価
 - 真空度 1.0×10^{-4} Pa、電流11mA以上の条件でビーム検出可能
- * 中性子源用大電流加速器のLEBTに適用可能なモニタを実現

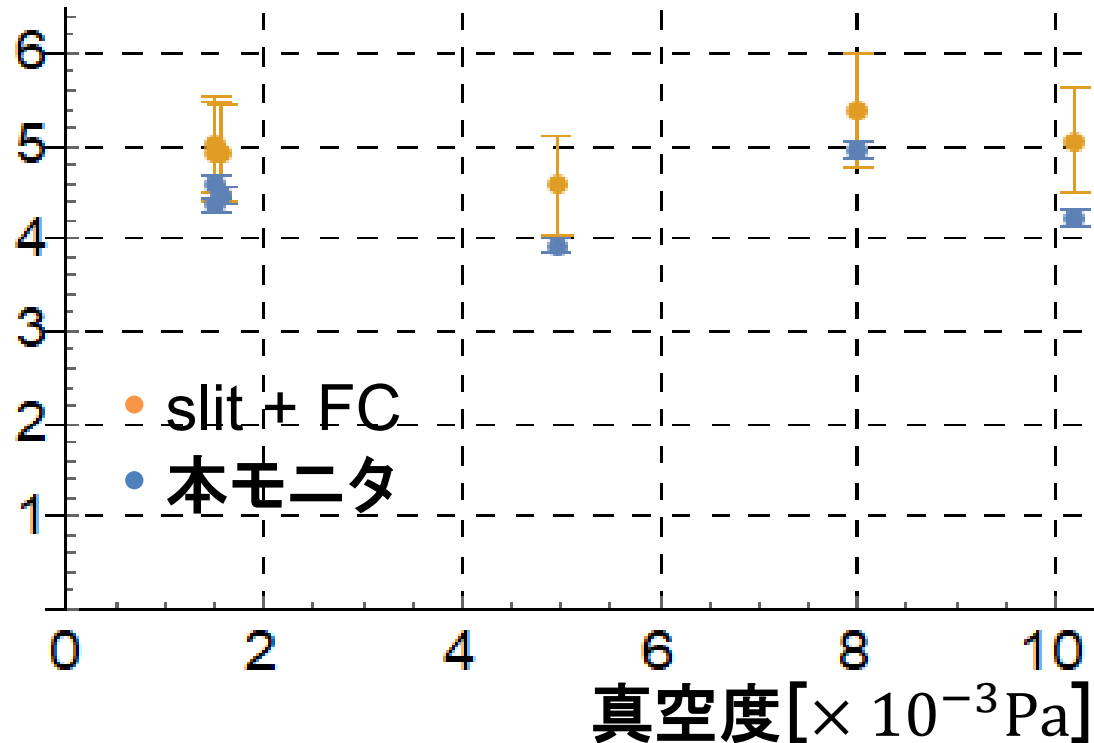


Hitachi Social Innovation is
POWERING GOOD

各測定条件におけるRMSビームサイズ

真空度依存性

ビームサイズ[mm]



ビーム電流値依存性

ビームサイズ[mm]

