

# 機械学習を用いた高強度一次ビームの イオン光学系の自動調整の開発

2021 8/10

理研仁科加速器科学研究センター 西 隆博

その他試験への主な参加者 (敬称略)

岩井 瑛人<sup>a,c</sup>, 内山 暁仁<sup>b</sup>, 清水 陽平<sup>b</sup>, 杉本 崇<sup>a</sup>, 鈴木 宏<sup>b</sup>, 竹田 浩之<sup>b</sup>,  
福田 直樹<sup>b</sup>, 福西 暢尚<sup>b</sup>, 藤井 洋樹<sup>b</sup>, 前坂 比呂和<sup>c</sup>, 吉本 雅浩<sup>b</sup>

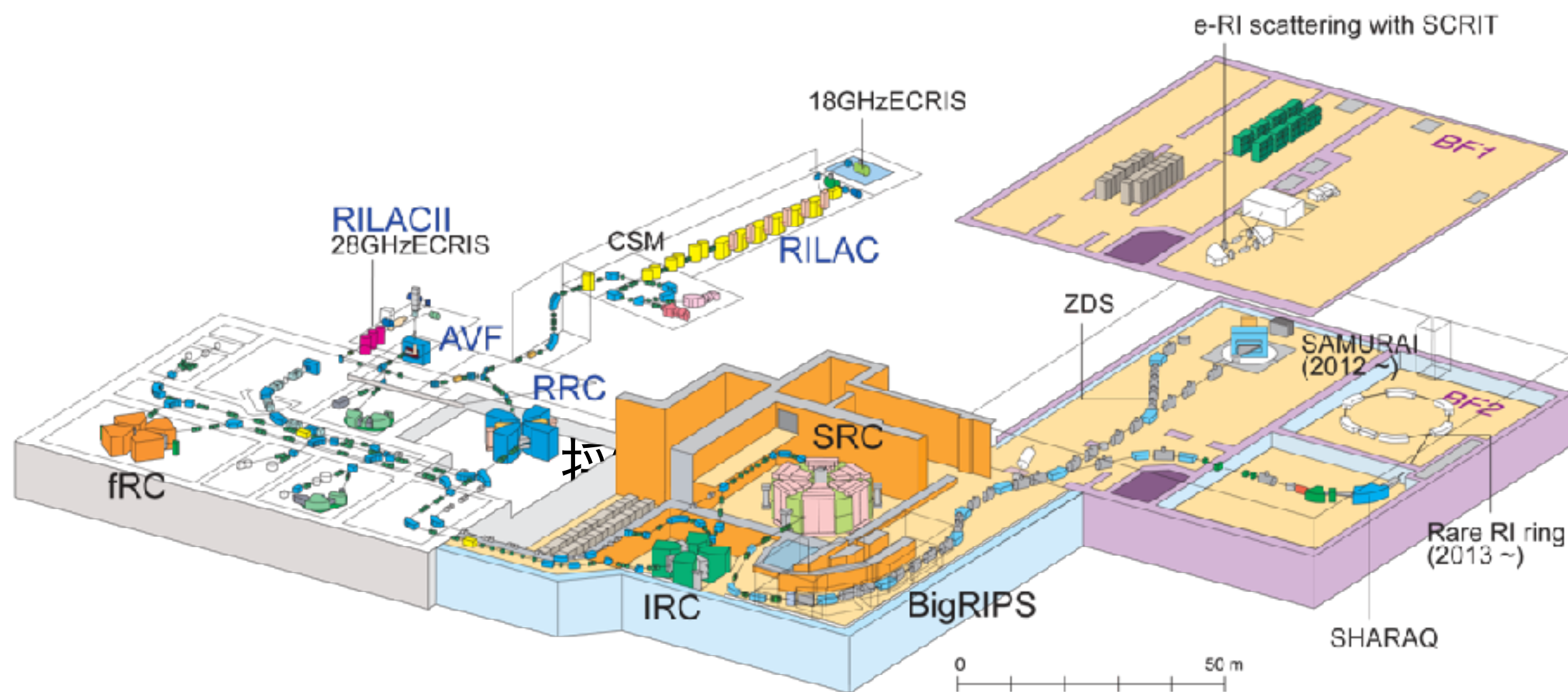
a. 公益財団法人高輝度光科学研究センター

b. 理研仁科加速器科学研究センター

c. 理研放射光科学研究センター

# 理化学研究所 RIBF における高強度一次ビーム

RI ビームファクトリーの俯瞰図



ウランビーム強度 [pnA] の変化

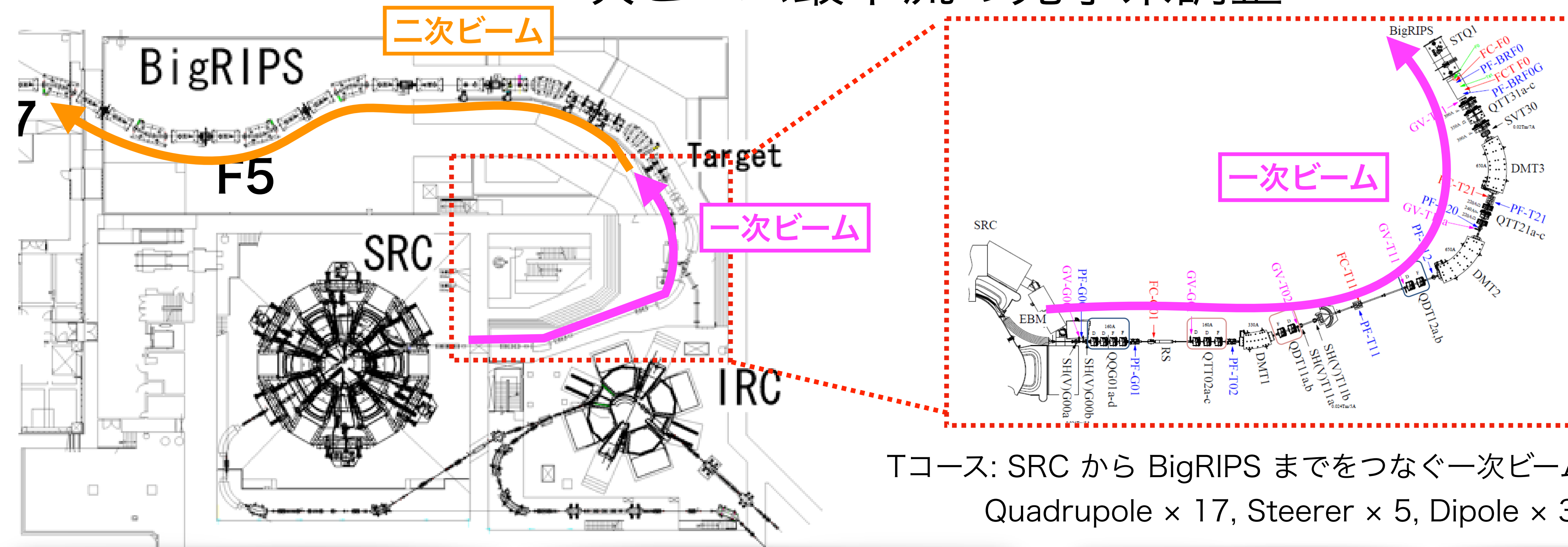


理化学研究所 RIBF は 2006 年より運転を開始し、  
 現在では **100 pnA を超えるウランビーム**を供給することで世界の原子核物理学を牽引している  
 その供給ビーム強度の増加率は年々鈍化している。

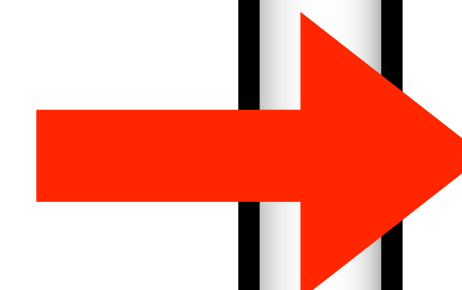
→ 光学系の **(600 を超えるパラメータの)** 手動最適化の限界も一つの要因となっている

# RIBF への機械学習の導入の第一歩

## 一次ビーム最下流の光学系調整



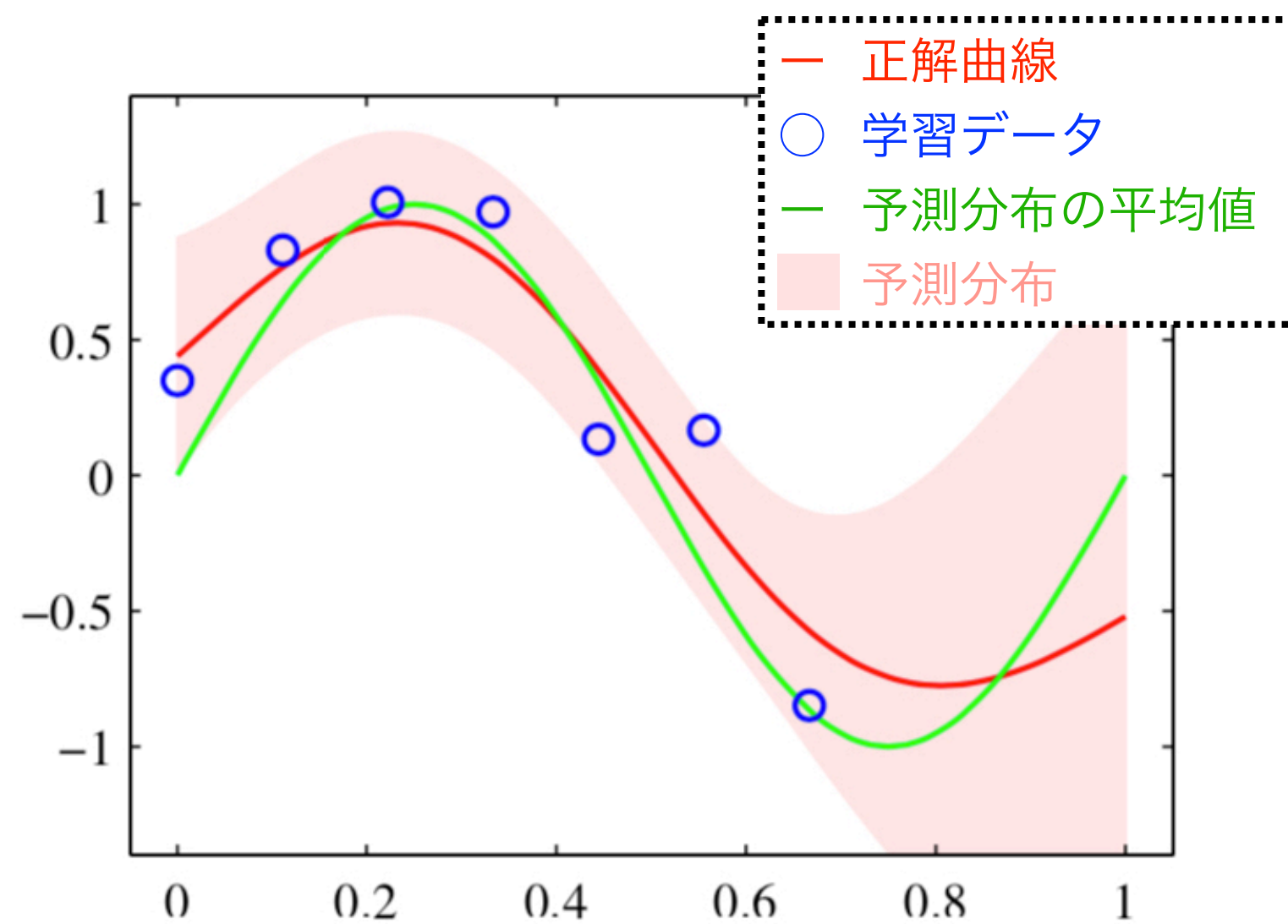
- ・ 下流に Fragment Separator である BigRIPS 豊富な検出器などの情報からデータを集めやすい
- ・ 通常オペレーションの場合、最もロスの大い ウランビームでは通過効率 ~ 90% 程度と見積られる
- ・ 通過効率と小さいスポットを同時に実現することを目指す



- 将来的な目標である **1 pμA** の  
 ウランビーム実現には、
- ・ **ビームロスを 1 ~ 0.1 % 程度に抑える**
  - ・ **像は小さく ( $\sigma_h \sim < 1 \text{ mm}$ ) 保つ**
- ことが必要になる。

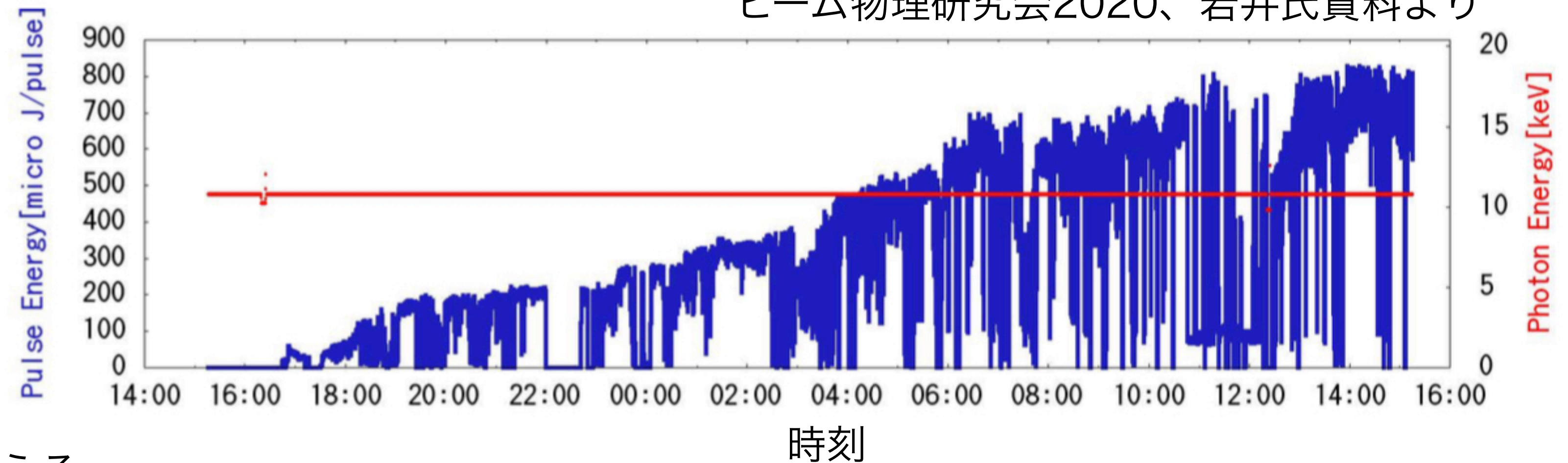
# 機械学習(ガウス過程回帰)を用いた自動調整の例: SACLA

Gaussian Process (ガウス過程回帰)



Gaussian Process を用いた逐次学習による自動調整  
XFEL の強度を最適化した例 (~32パラメータ同時最適化)

ビーム物理研究会2020、岩井氏資料より



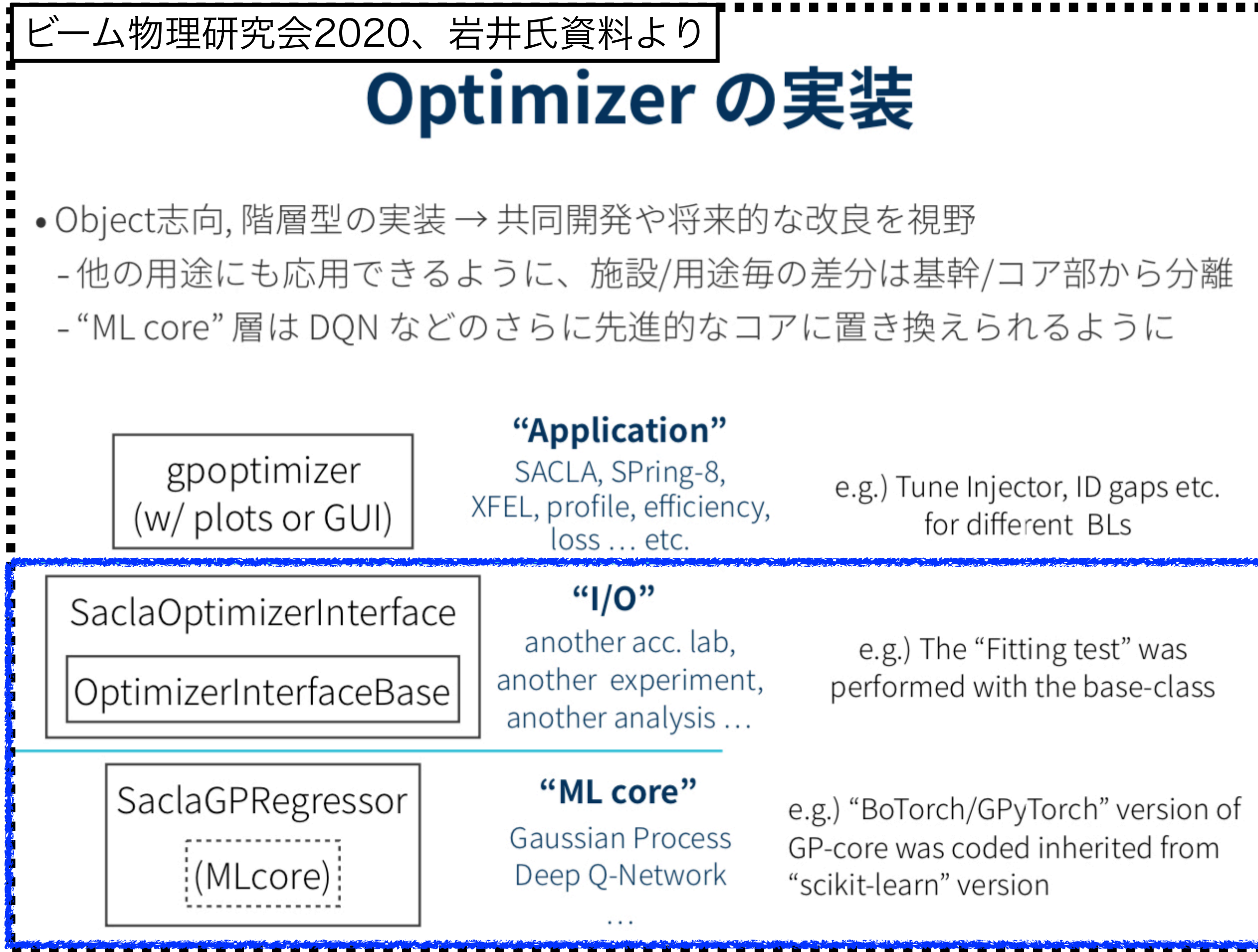
- 誤差、不定性を持つ多次元データを取り扱える
- local min/max にハマりにくい

→ 8/11 加速器制御 岩井氏発表参照 ([WEOB02](#))

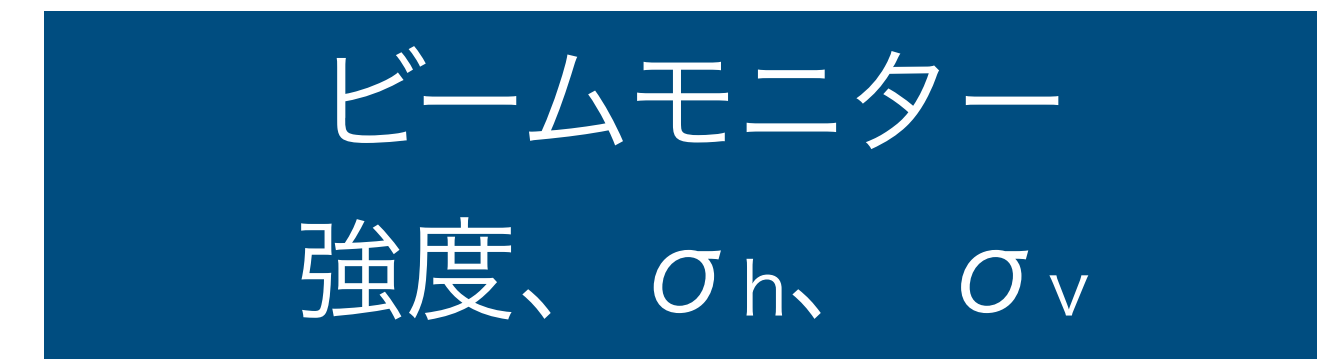
**SACLA@Spring-8 で実用化されている機械学習による自動調整**  
→ RIBF に応用し、将来的な高精度のビーム調整に繋がりたい

# SACLAの自動調整プログラムの RIBF への応用

## SACLA で開発された GP による最適化プログラム



① ビーム状態を観測



epics

② 目的関数を計算

次のパラメータ候補を選定



epics

③ プログラムが計算した電流値をセット

① ~ ③ を繰り返し、目的関数が最大となる  
パラメータを探す

# RIBF における研究ステップ

## 1. 低強度ビームで使える光学系調整システムの構築

- ・まずは安全サイドで…
- ・これまでマニュアル調整の指標でもあったビューワー(蛍光標的)を利用

## 2. 大強度ビームにも使える指標の開発

- ・ RIBF では強度を変えるのにアテネータを使用  
→ 空間電荷効果などによりビームの質が変わってしまう。
- ・ 大強度ビームでも使えるモニターとして、荷電変換粒子を用いる手法を考案、テスト

## これまでに行ってきたテスト実験

### 1. 低強度ビームで使える光学系調整システムの構築

(1) 2020年10月: ガウシアンプロセスの初のテスト (~12 h)

### 2. 大強度ビームにも使える指標の開発

(2) 2020年12月: Zn を用いたテスト (~ 6 h)

(3) 2021年 5月: Uを用いたテスト (~ 12 h)

# 低強度ビームで使える光学系調整システムの構築

## 第一回テストの光学調整の概念図

(1) Tコースのパラメータ

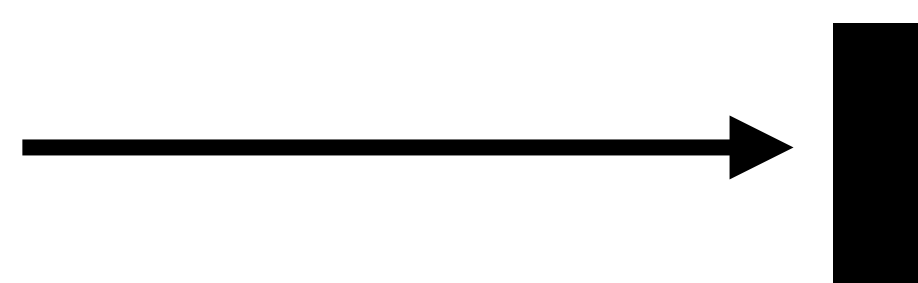
(Q / Steerer) を  
Epics を通じて変更

(2) ビューワーで測定

画像解析から強度/スポットサイズを推定

(3) 目的関数を計算

GPで次のパラメータを決定



ImageJ を使用



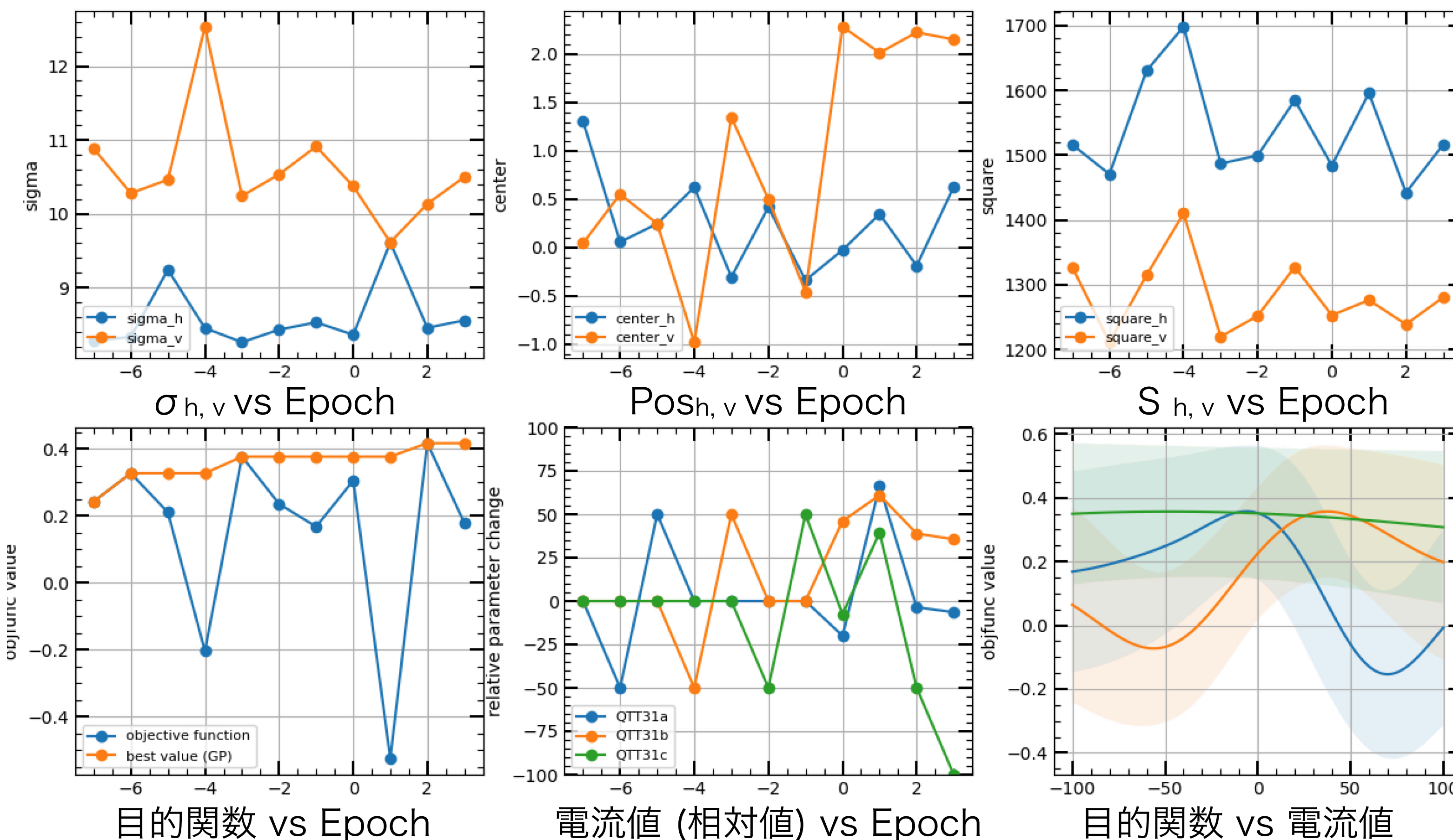
(1) ~ (3) を繰り返して  
最適な電流値を探す



# 低強度ビームで使える光学系調整システムの構築

## 第一回テストの各指標の変化

2020年10月24日 21:00 ~ 25日 9:00 にかけて行われた実証テスト



人の手で調整した後、さらに通過効率を上げつつ像を細くできるのかをテスト

### 実験条件

- ・ ビーム強度: 0.001 enA
- ・ 3 ~ 7 変数 (四重極電磁石)

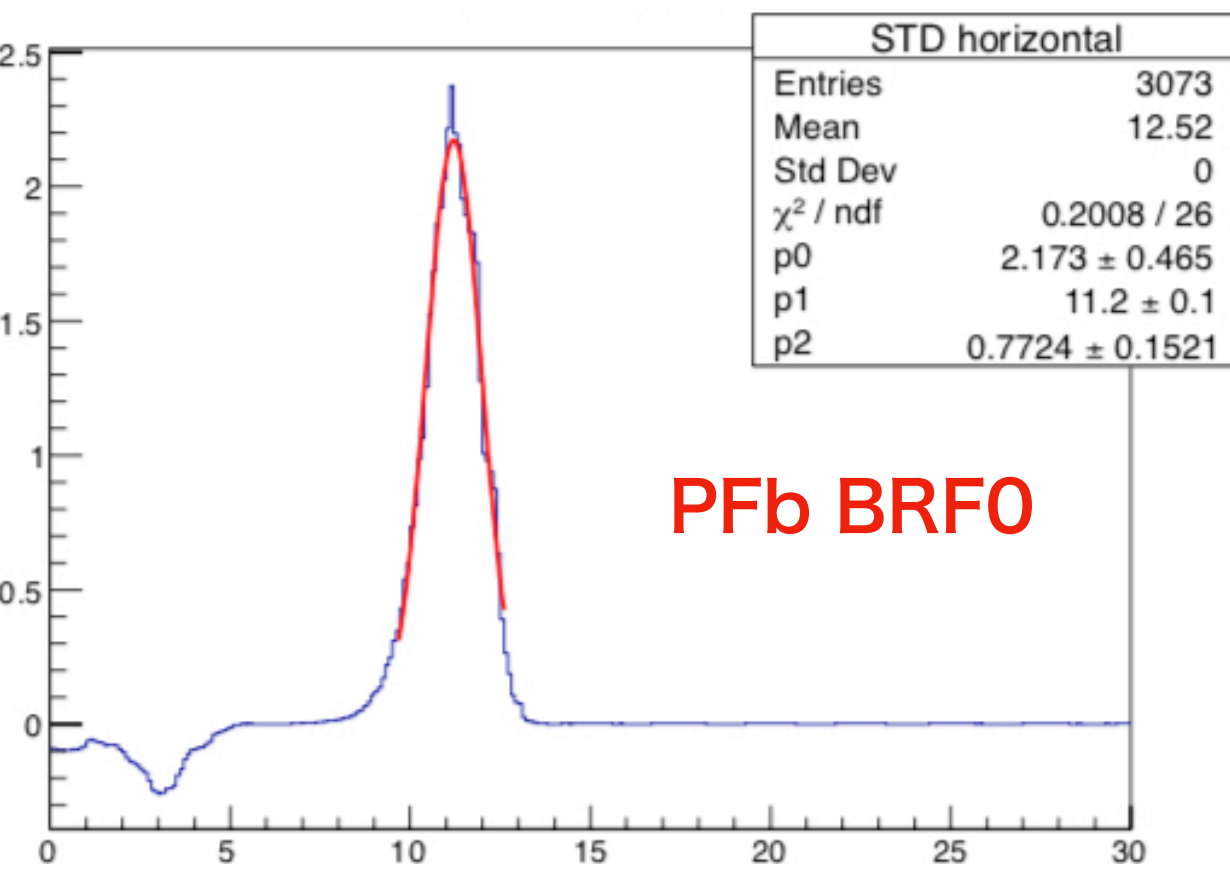
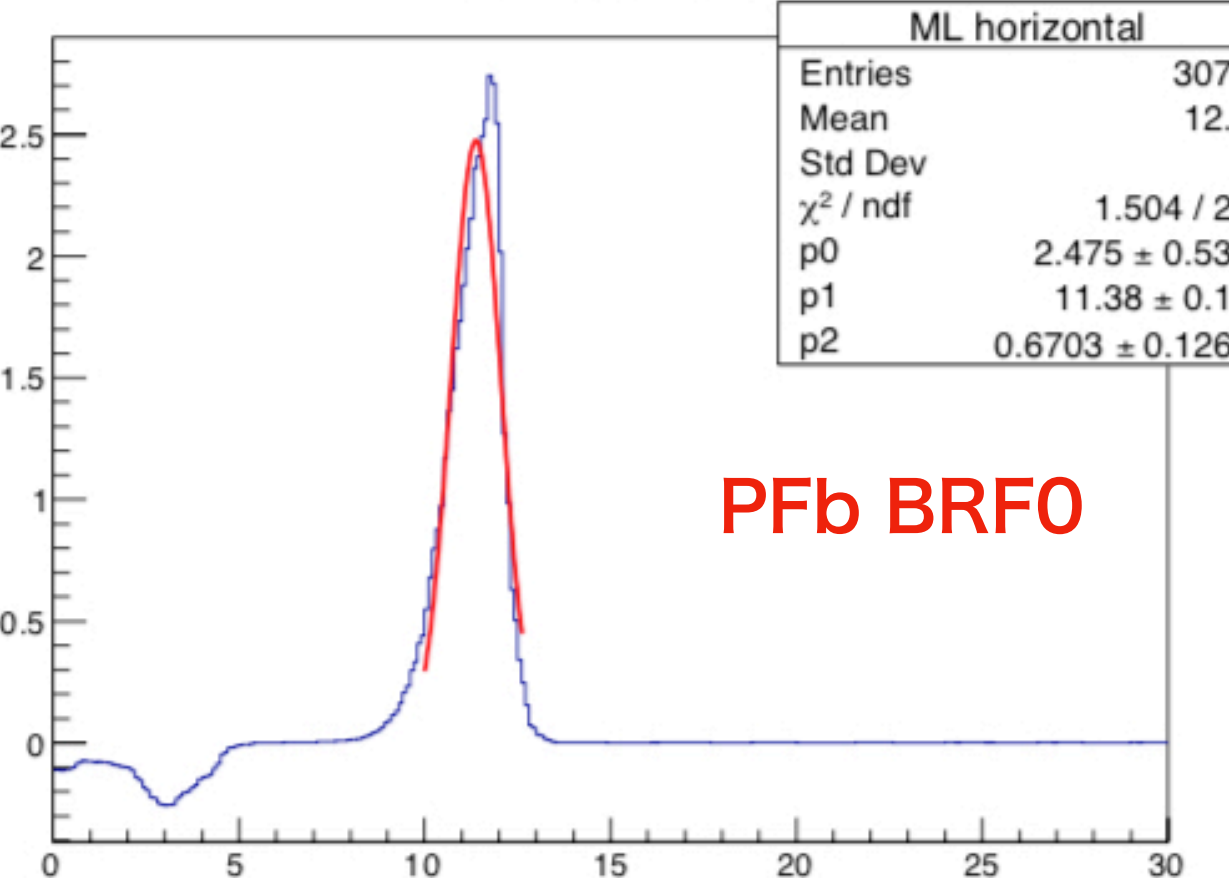
~ 5 分程度で結果がほぼ収束 (1 試行あたり 1 秒)

# 低強度ビームで使える光学系調整システムの構築

## 第一回テストの結果

2020年10月24日 21:00 ~ 25日 9:00 にかけて行われた実証テスト

Manual / Manual + GP の結果を大強度ビームで比較

	Manual Optimization	Manual + GP Optimization
FC <sub>上流</sub> [eμA]	7.20	7.8
Beam Dump [eμA]	7.25	8.0
比 (BD/FC <sub>上流</sub> )※	1.01	1.03
Wire Scanner の像	 <p>STD horizontal</p> <p>Entries 3073 Mean 12.52 Std Dev 0 <math>\chi^2 / \text{ndf}</math> 0.2008 / 26 p0 2.173 ± 0.465 p1 11.2 ± 0.1 p2 0.7724 ± 0.1521</p> <p>PFb BRFO</p>	 <p>ML horizontal</p> <p>Entries 3073 Mean 12.8 Std Dev 0 <math>\chi^2 / \text{ndf}</math> 1.504 / 23 p0 2.475 ± 0.530 p1 11.38 ± 0.13 p2 0.6703 ± 0.1266</p> <p>PFb BRFO</p>

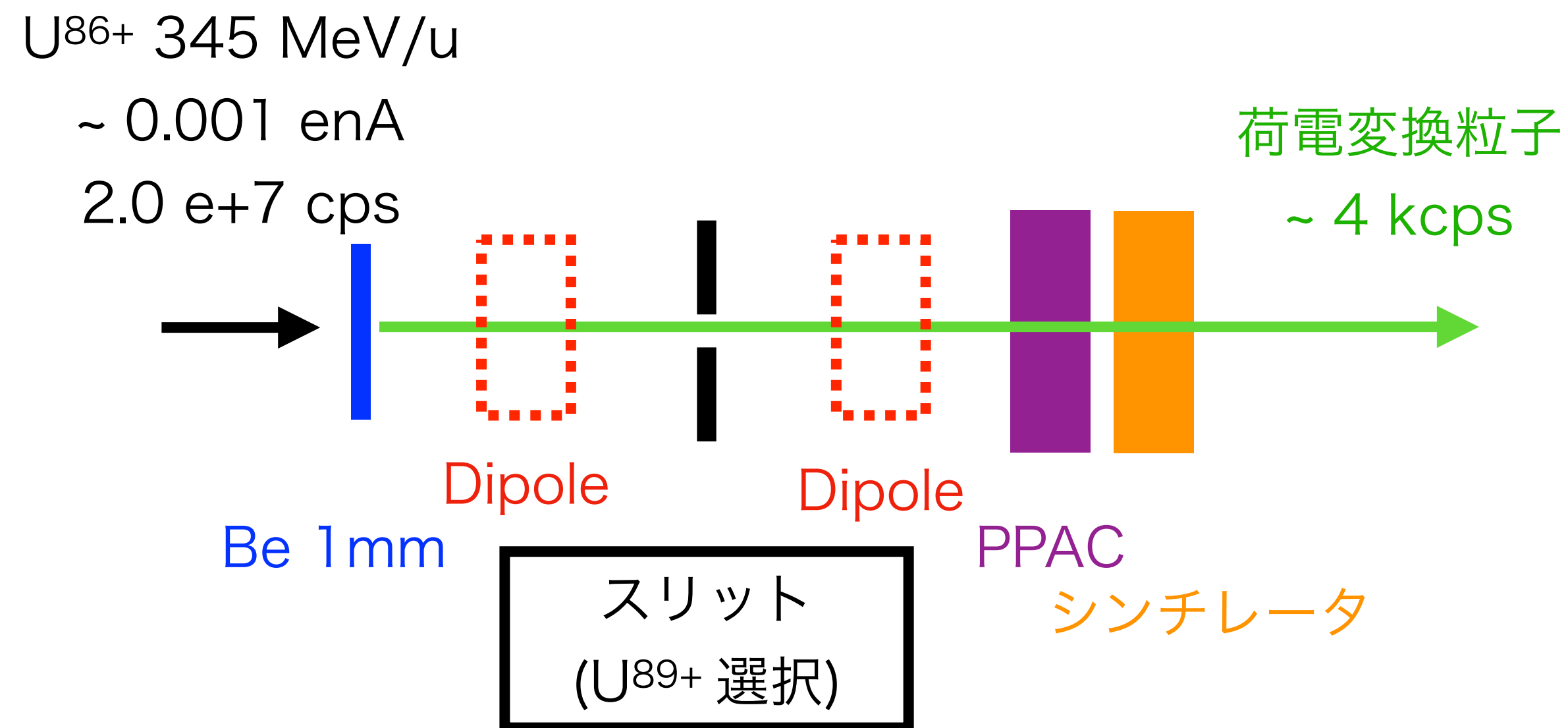
※ Calibration 不足 / 電子が逃げるなどの原因で値が 1 を超えている。相対値のみに意味がある。

• 通過効率 ↗ 2%  
 • ビーム幅 ↘ 13%  
 初めてのテストながら  
 ビーム幅を下げつつ通過効率  
 を向上させることに成功！

✓ 低強度ビームに対する最適化手法の確立

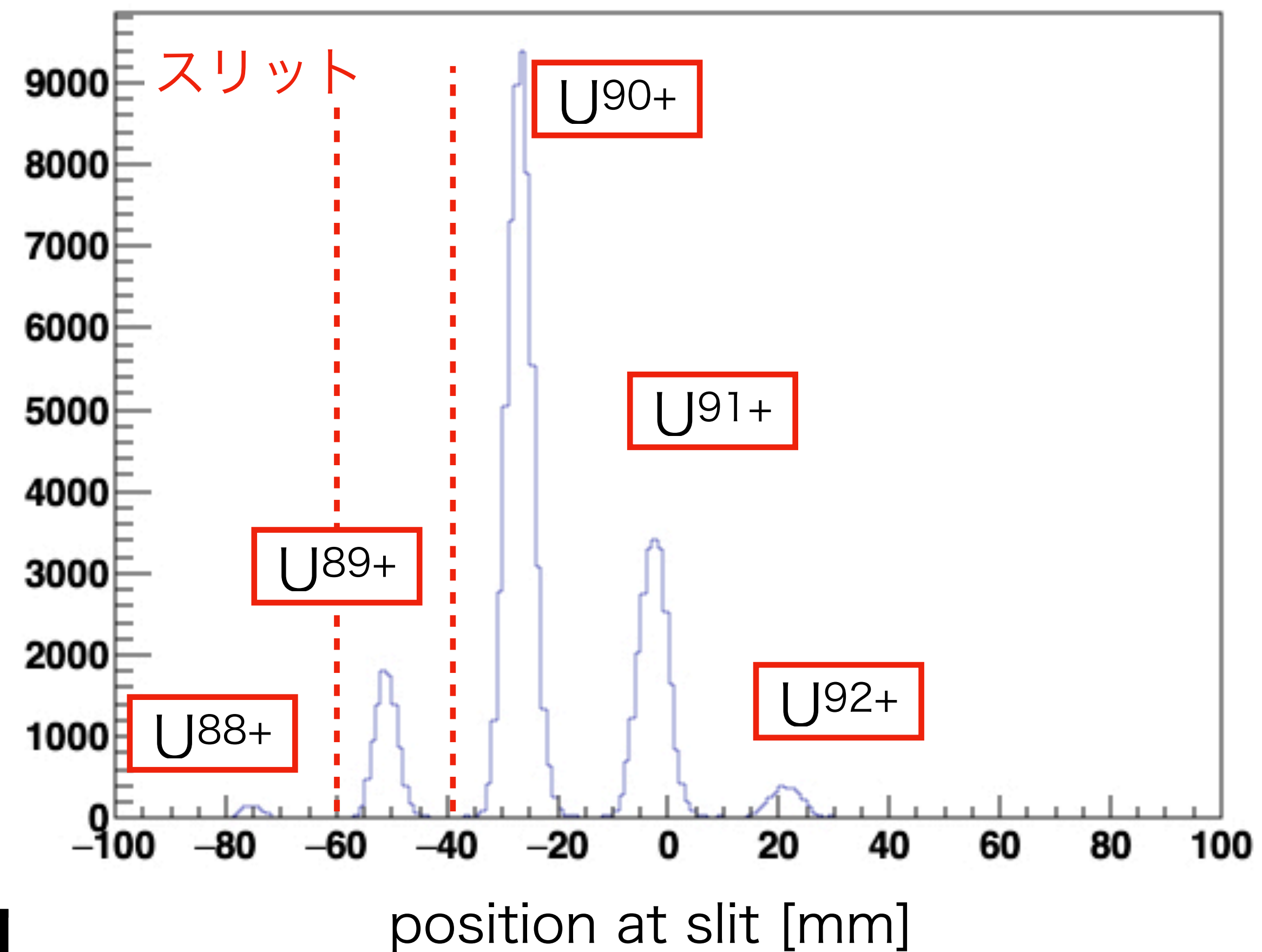
# 大強度ビームにも使える指標の開発: 荷電変換粒子

PPAC (位置検出器) / シンチレータ  
で荷電変換粒子を測定



Be 1 mm の標的によって低強度化された荷電変換粒子を下流検出器で測定

スリット位置での荷電粒子分布



	1次ビーム量	Bρ	期待される
U <sup>89+</sup>	0.001 enA	7.55 Tm	4 kcps
U <sup>88+</sup>	0.03 enA	7.63 Tm	4 kcps
U <sup>87+</sup>	10 enA	7.72 Tm	3 kcps

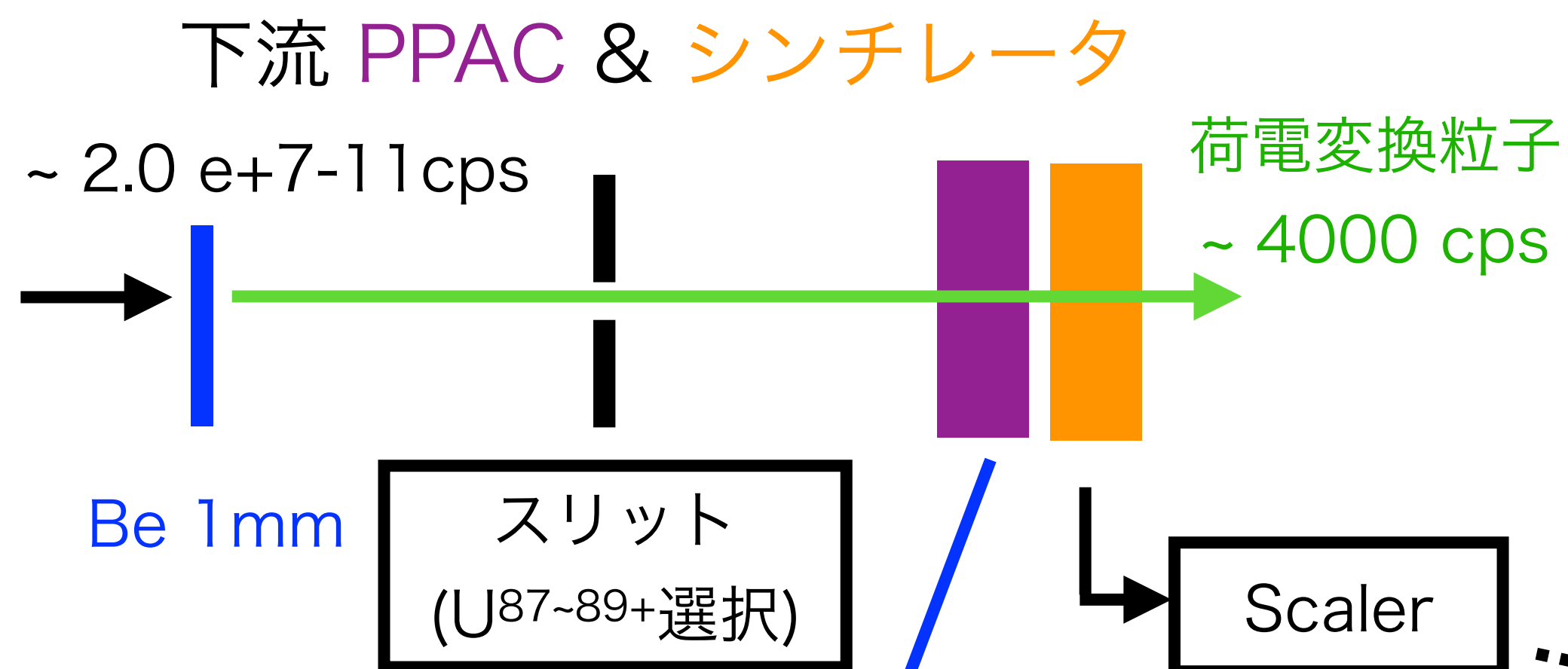
# 大強度ビームにも使える指標の開発

## 大強度ビーム用の光学調整の概念図

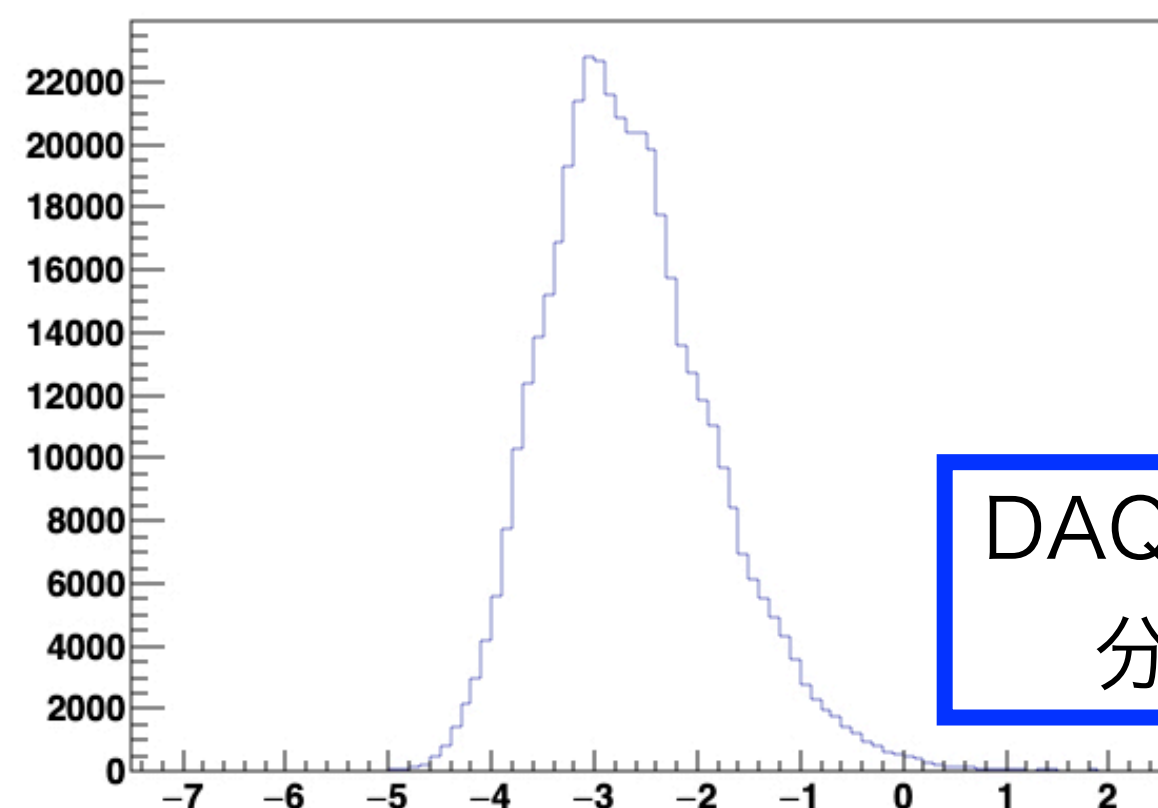
(1) Tコースのパラメータ  
(Q / Steerer) を  
Epics を通して変更

(2) モニターで測定

(3) 目的関数を計算  
GPで次のパラメータを決定



Gaussian Process



(1) ~ (3) を繰り返して  
最適な電流値を探す

# 大強度ビームにも使える指標の開発

## 第二回、第三回テストの概念図

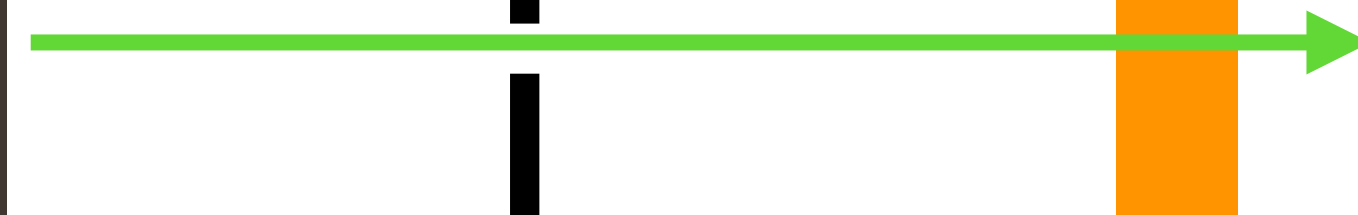
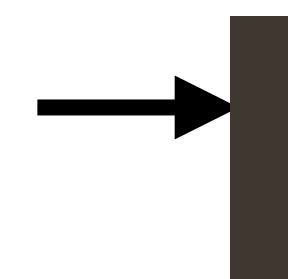
(1) Tコースのパラメータ  
(Q / Steerer) を  
Epics を通して変更



(2) モニターで測定

ビューワー & 下流 シンチレータ

~ 2.0 e+7 cps



スリット  
(U88+選択)

荷電変換粒子  
~ 4000 cps

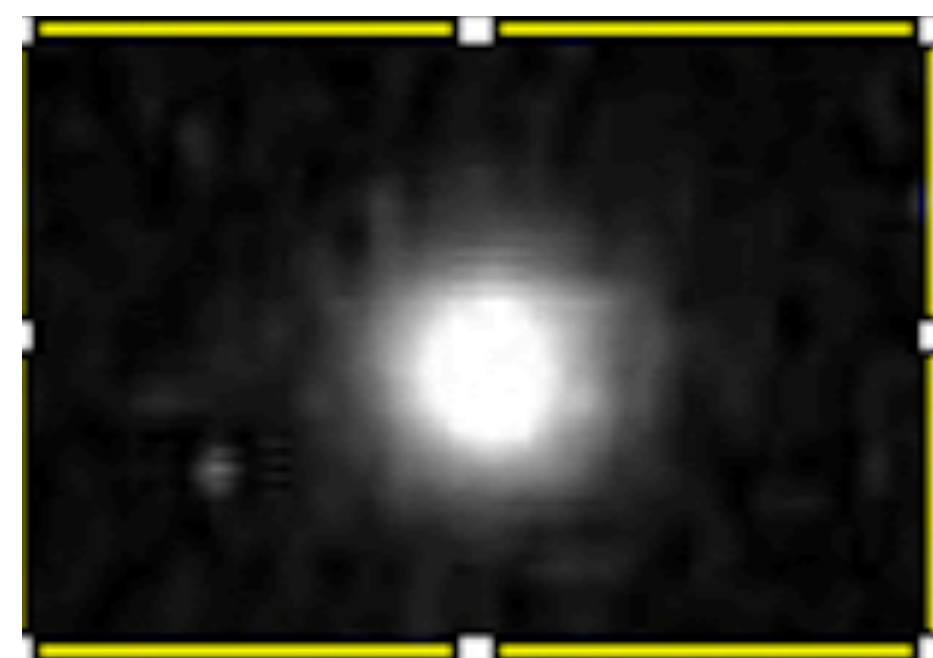


Scaler

Epics

(3) 目的関数を計算  
GPで次のパラメータを決定

Gaussian Process



(1) ~ (3) を繰り返して  
最適な電流値を探す

# 大強度ビームにも使える指標の開発

## 第二回テストで見つかった問題

2020年12月に行われた実証テスト

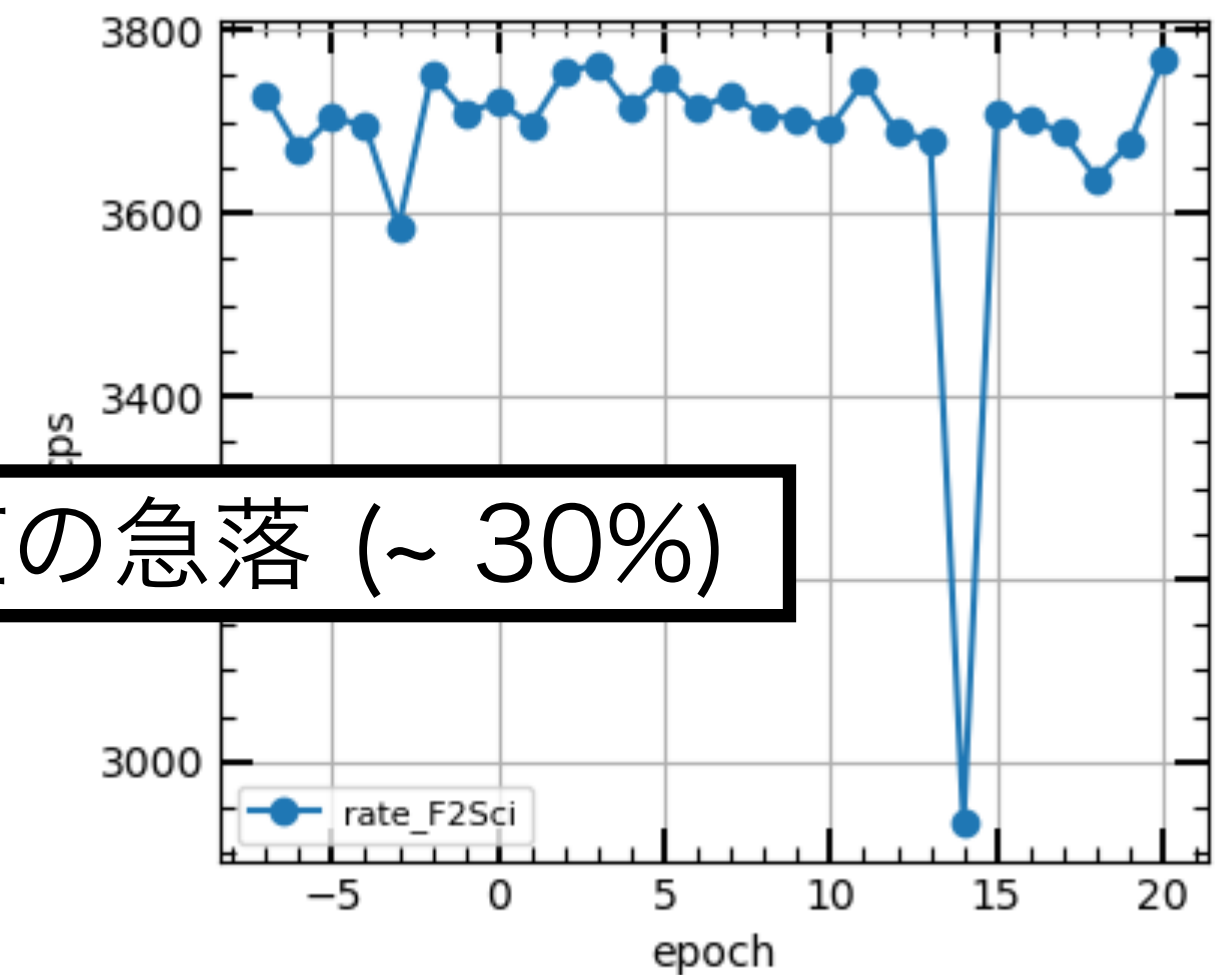
テストで見つかった問題:

- ビームの強度の急落が時折見られる (数分に1度?)。
  - EDCなどの放電が原因と思われる。
- ビームの強度の長期トレンド (~ 10分) が見える。

→ プログラムの改良によって対処

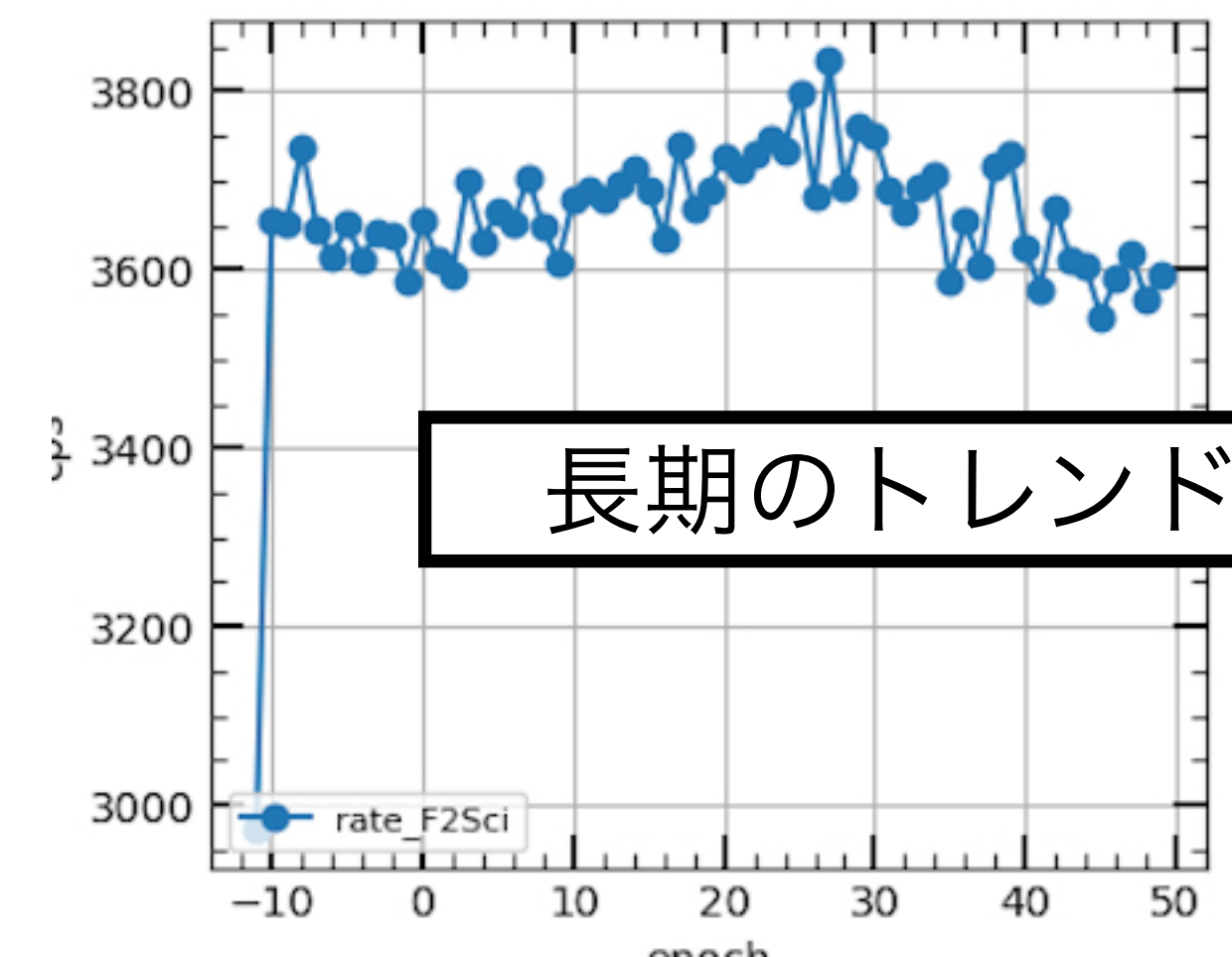
- (1) シンチレータによる粒子の count を 1 秒 × 5 行い、その分散が大きい場合には再測定
- (2) 常に初期パラメータと新しいパラメータを交互に適応測定値の比からパラメータを評価する。

問題 ①



値の急落 (~ 30%)

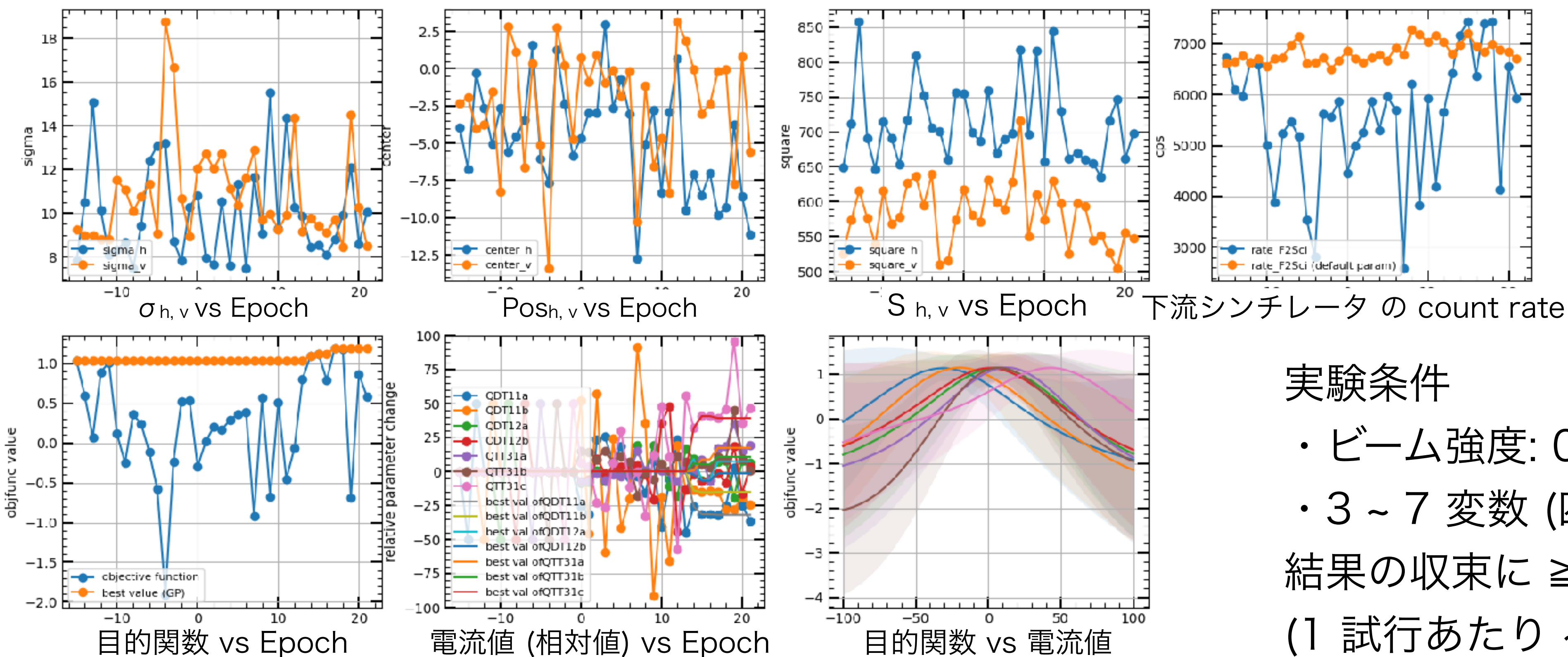
問題 ②



長期のトレンド

# 大強度ビームにも使える指標の開発

## 第三回テストの各指標の変化



### 実験条件

- ・ ビーム強度: 0.001 enA
  - ・ 3 ~ 7 変数 (四重極電磁石/ Steerer)
- 結果の収束に  $\geq 20$  分  
(1 試行あたり ~ 20 秒)

様々な条件で最適化 / 最適化にかかる時間は増えたものの、  
 ~ 7 parameter までの同時最適化を安定して行えることを確認。

## Faraday Cup を用いた通過効率の比較

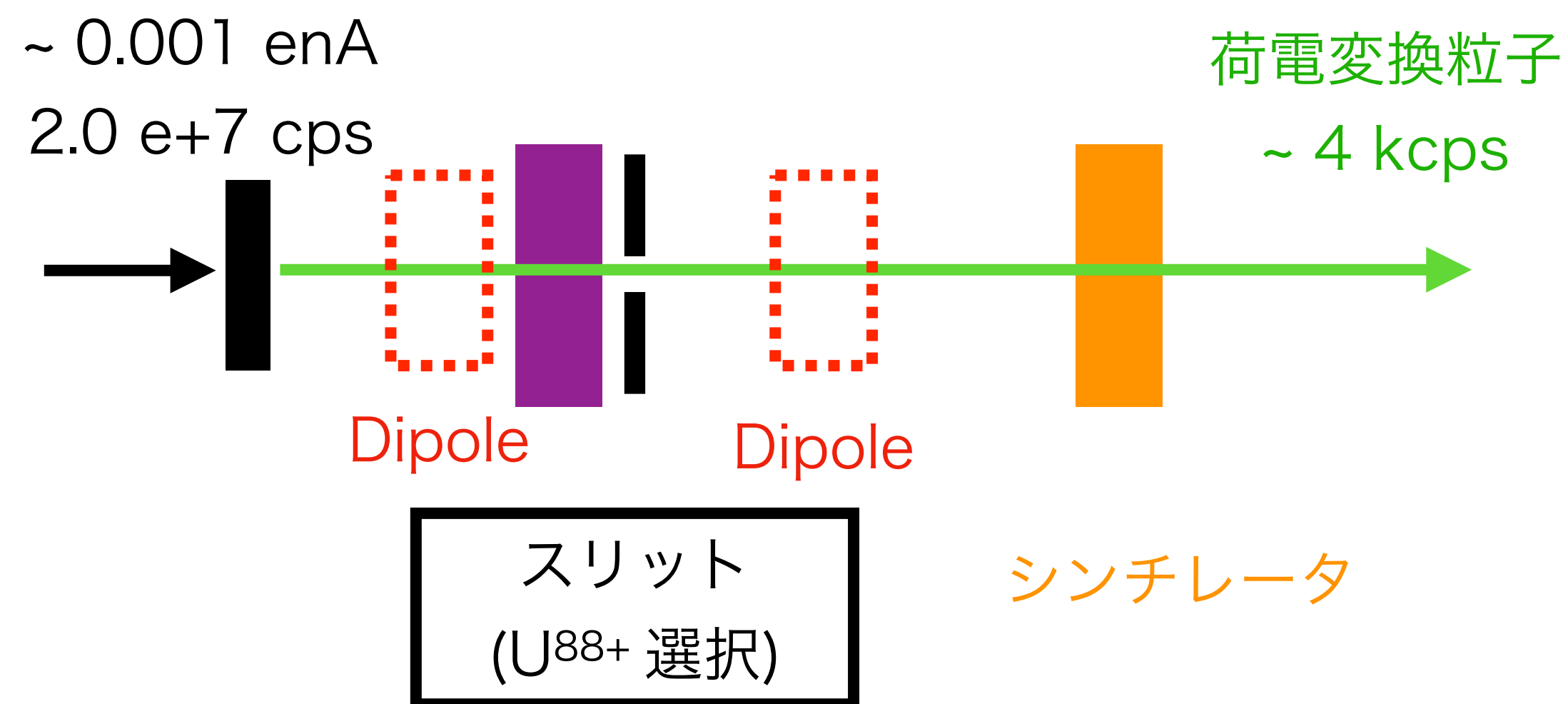
	FC G01 [enA]	F0 beam dump [enA]	比
default	6000	6250	1.04
GP optimized	6000	5650	0.94

通過効率が減少していた！ → **目標関数が適切ではなかった。**



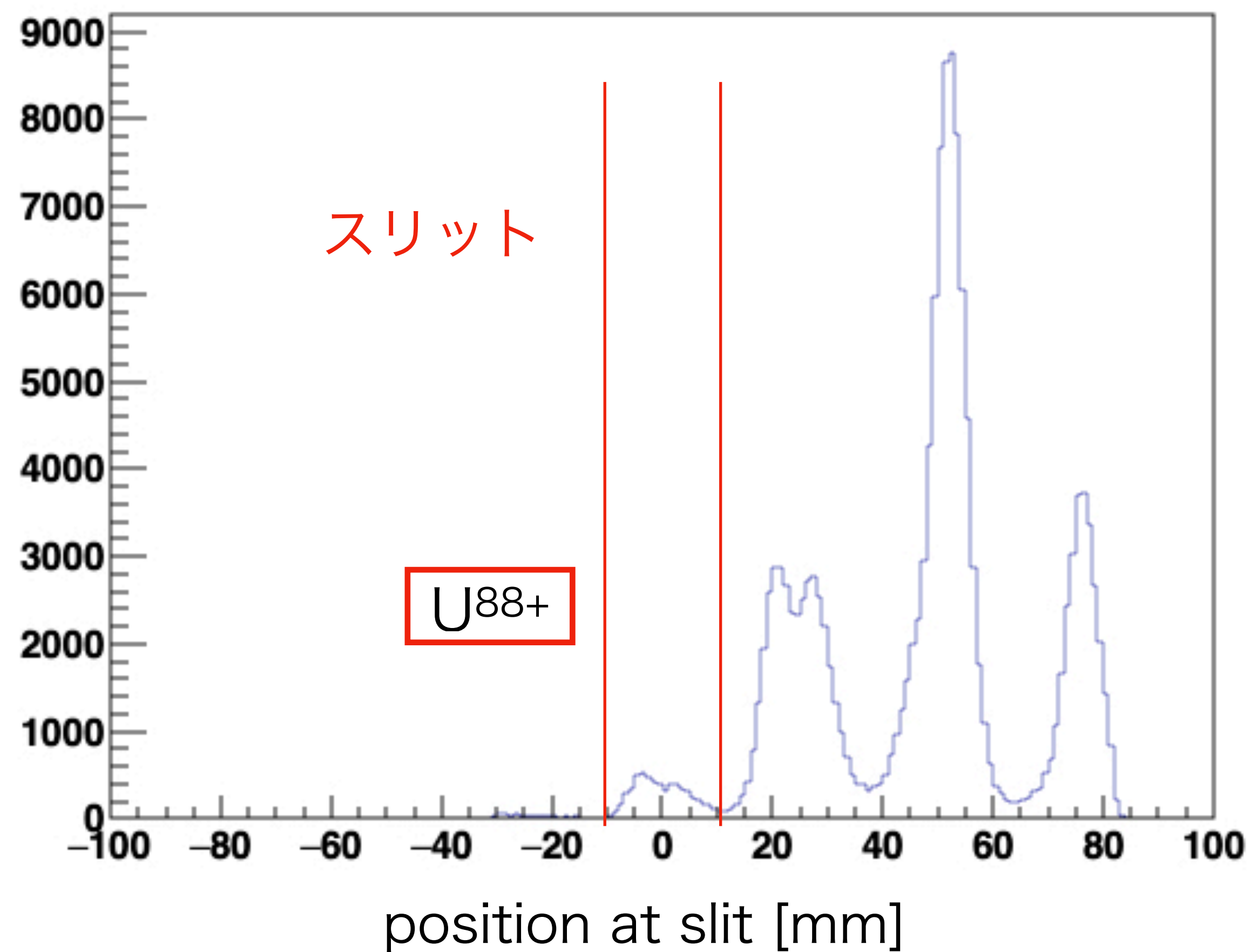
# 目的関数の再検証: スリット位置での粒子の位置分布

PPAC (位置検出器) / シンチレータ  
で荷電変換粒子を測定



Be 1 mm の代わりにビューワーで荷電変換  
→ ビューワーの厚さの非一様性によって  
スリットでの運動量広がりが倍以上に

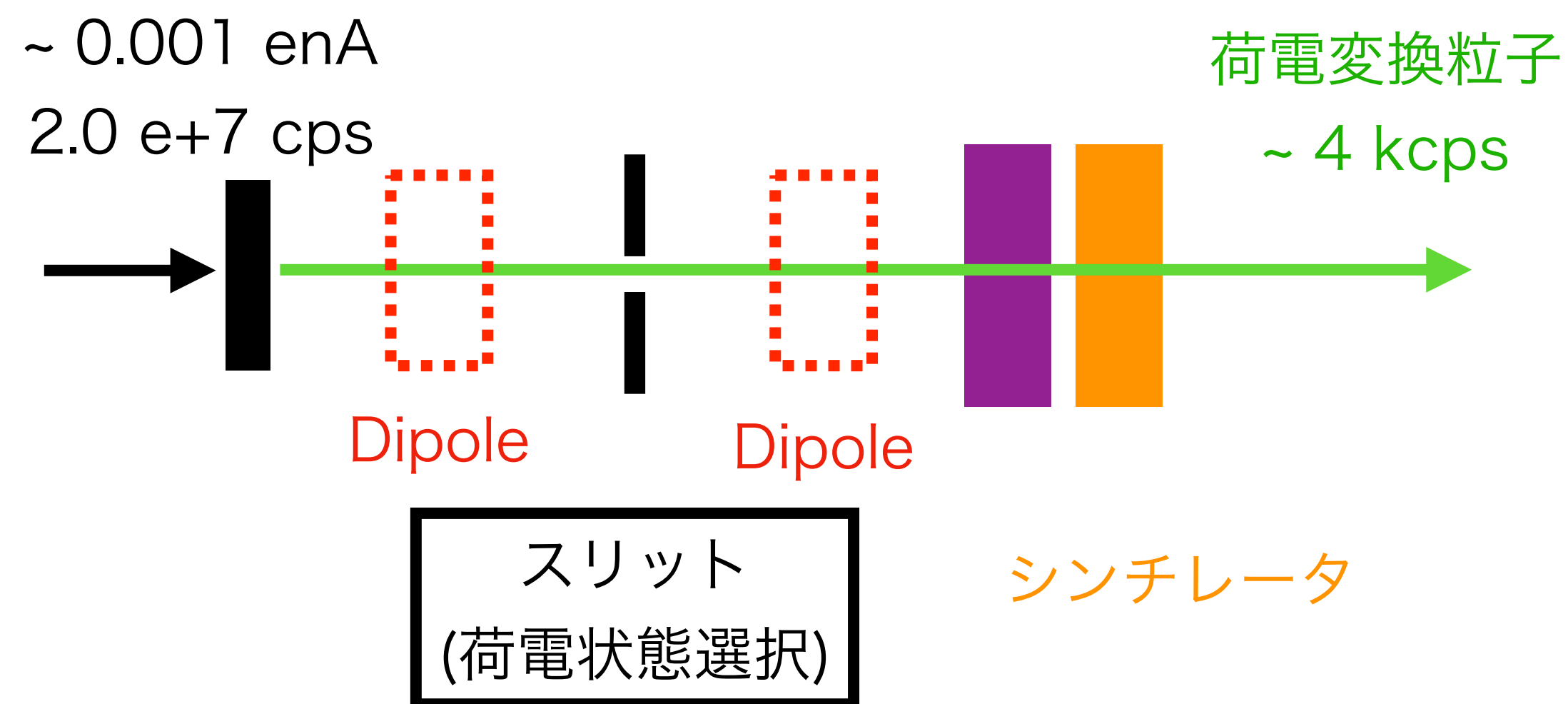
スリット位置での荷電粒子分布



# 目的関数の再検証: シンチレータ位置での粒子の位置分布

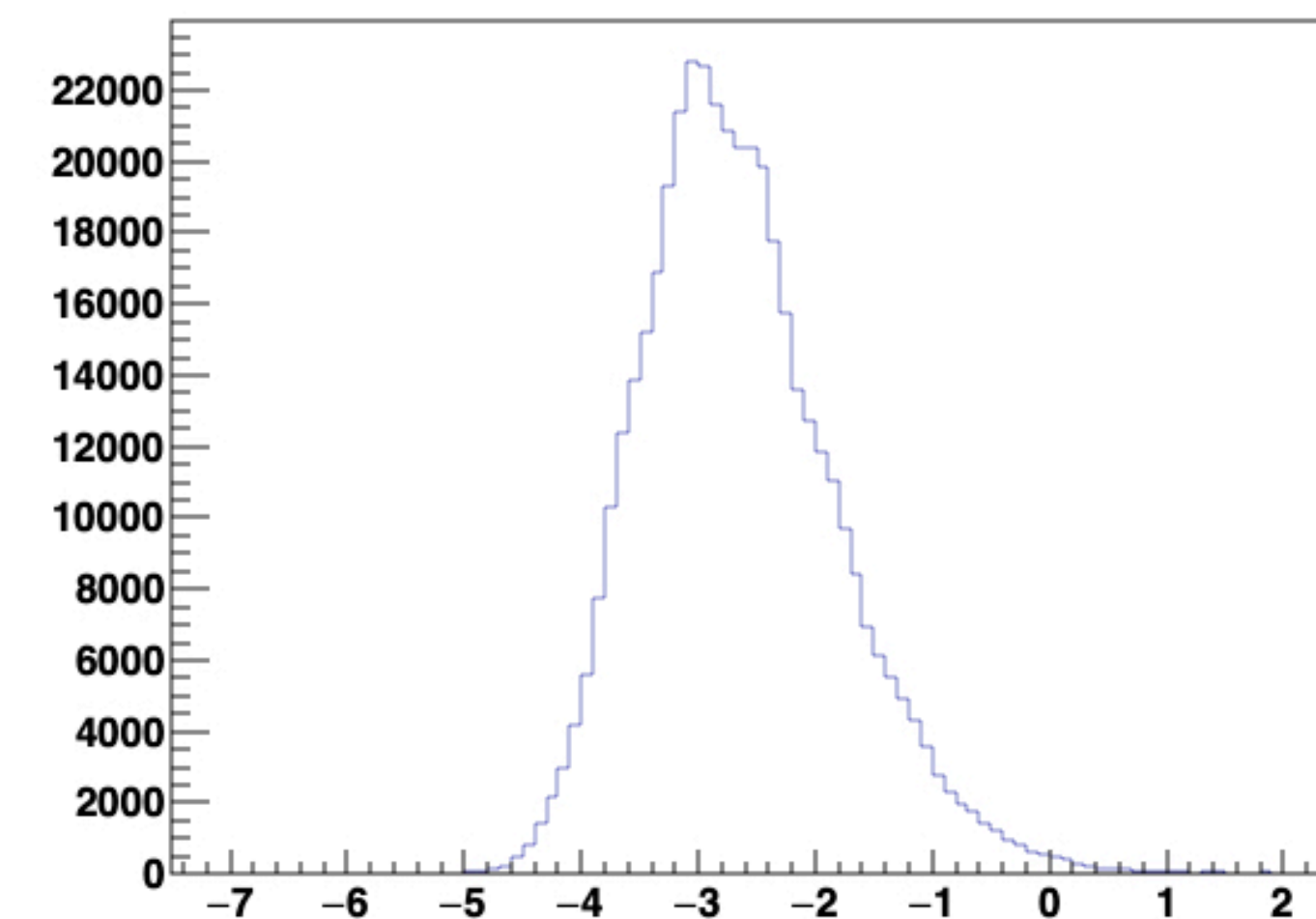
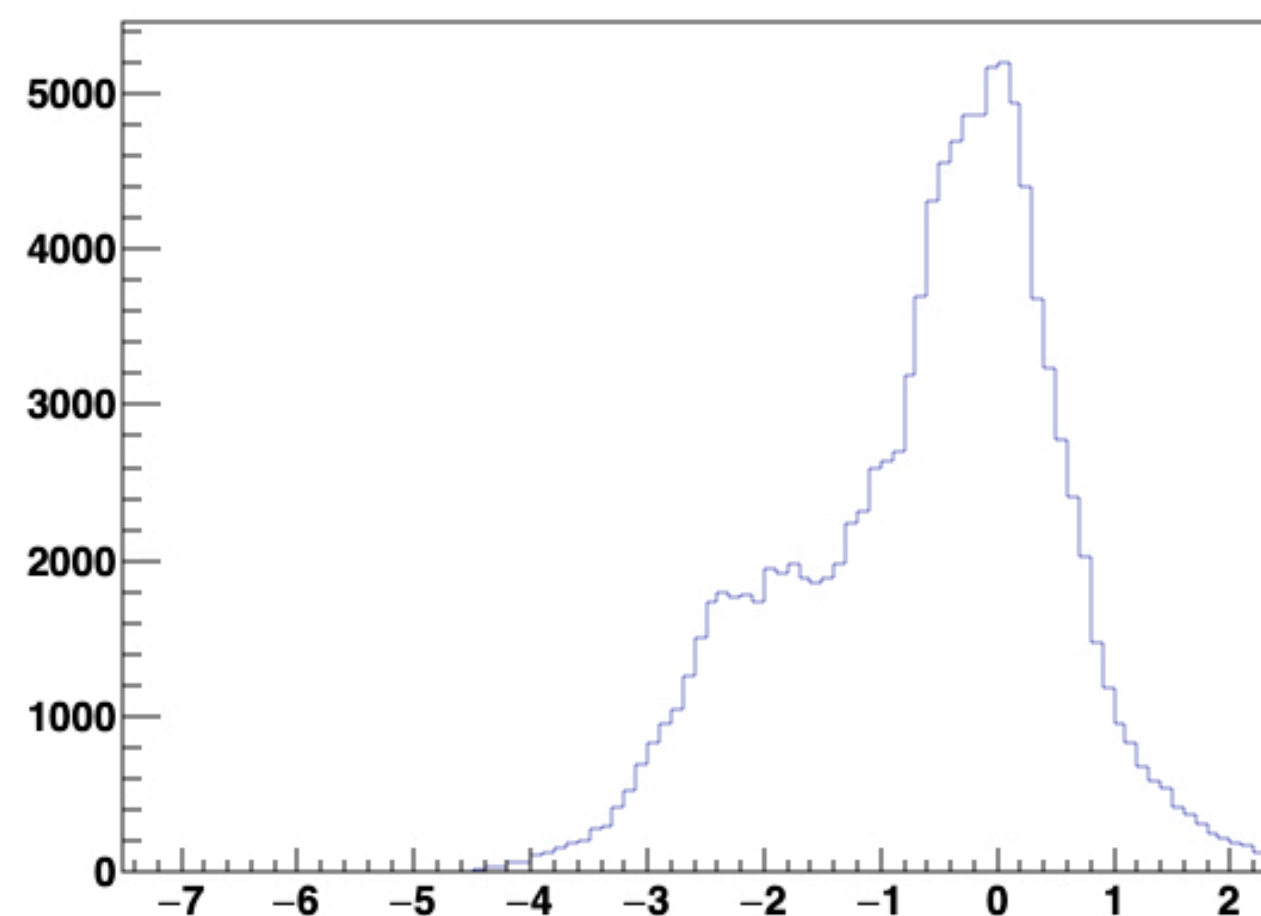
PPAC (位置検出器) / シンチレータ  
で荷電変換粒子を測定

シンチレータ位置でのスリットを通過押した粒子分布  
(PPAC で測定)



初期パラメータ

GP 最適化パラメータ



position at Scintillator [mm]

ビーム軸がずれたことでスリットの通り方が変わったことが原因か？  
 (Qしか変更してないのだが、**軸が出ていない**ためにビーム軸に影響した模様)  
 → 精度の良い軸だし手法の開発  
**ビューワーを用いない測定手法で多少の軸ズレに影響されないようにする。**

## これまでの最適化テストの結果まとめ

	標的	モニター	最適化にかかる時間	これまでの実績	高強度ビーム対応
第一回テスト	蛍光標的 + beam stopper	ビューワー	~ 5分	◎	×
第二、三回テスト	蛍光標的 + Be 1mm	ビューワー + 下流シンチレータ	~ 20分	△	△
次回テスト	Be 1mm	下流位置検出器 + 下流シンチレータ	~ 20分 (?)	???	○

**高強度ビームに応用可能な手法の開発**  
→ **次回テストでの有効性の実証を目指す**

## まとめと今後の方針

- 理研RIBF において、将来的な高強度ビームをより高精度で取り扱うために機械学習を用いたビーム制御のための研究を始めている。
- 第一歩として、二次ビーム生成標的直前のビームラインに Spring-8 SACLA で開発されたガウシアンプロセスによる自動最適化システムを導入した。
- ビューワーの画像解析を用いることで、低強度ビームに対する光学系最適化は一定の成功をみせた。
- 高強度ビームにも用いることが出来る荷電変換ビームを用いた手法は開発中。課題は判明したので、それらを克服した手法を今後試していく予定。