

# 機械学習を用いた電子陽電子入射器におけるビーム調整と SuperKEKB入射調整へ向けた準備状況



東京大学

加藤 臣之輔

KEK加速器

三塚 岳

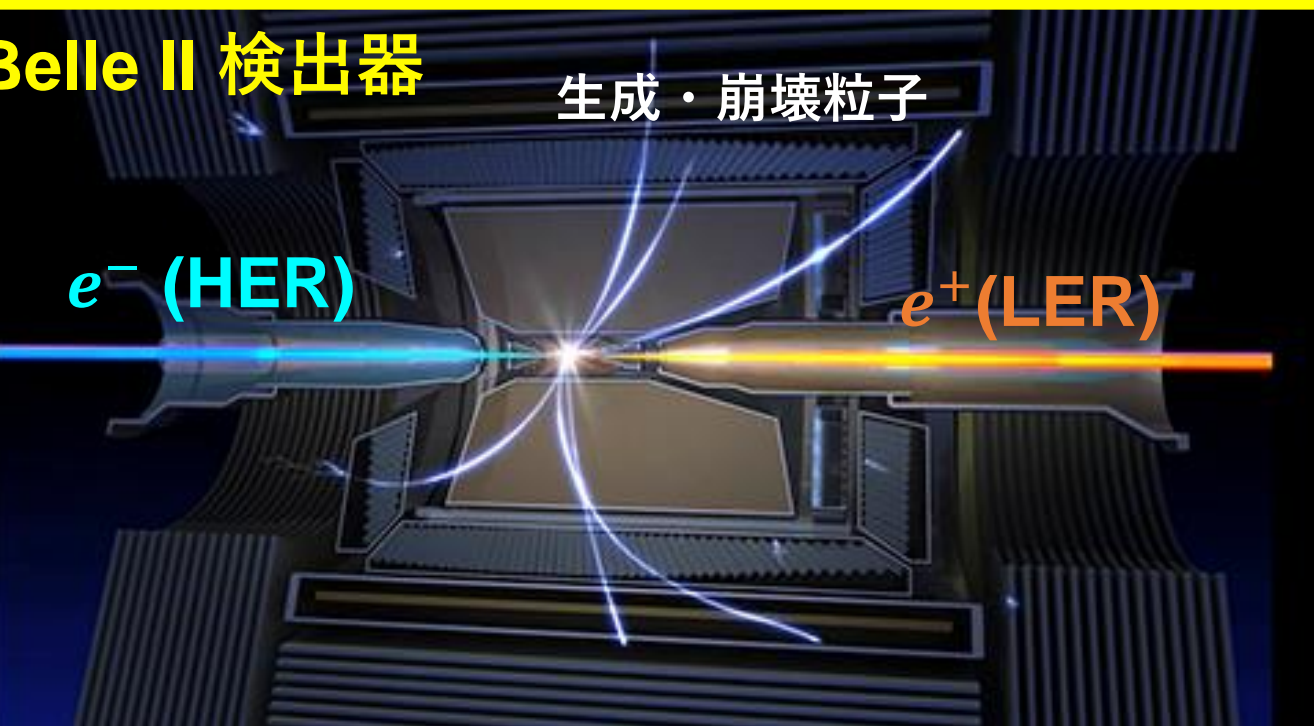
# 新物理の探索にはルミノシティの向上が重要

## Belle II 検出器

生成・崩壊粒子

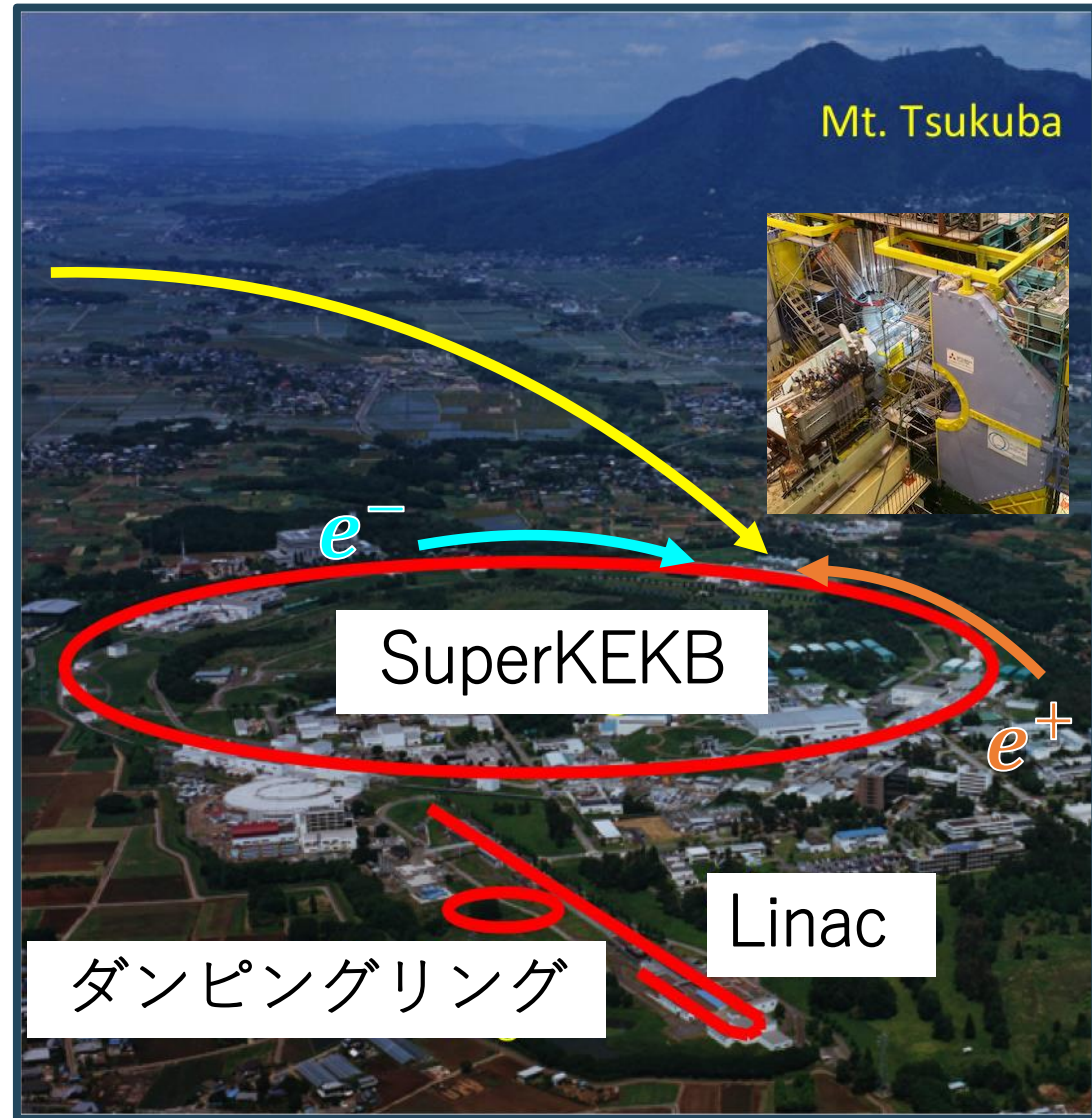
$e^-$  (HER)

$e^+$  (LER)



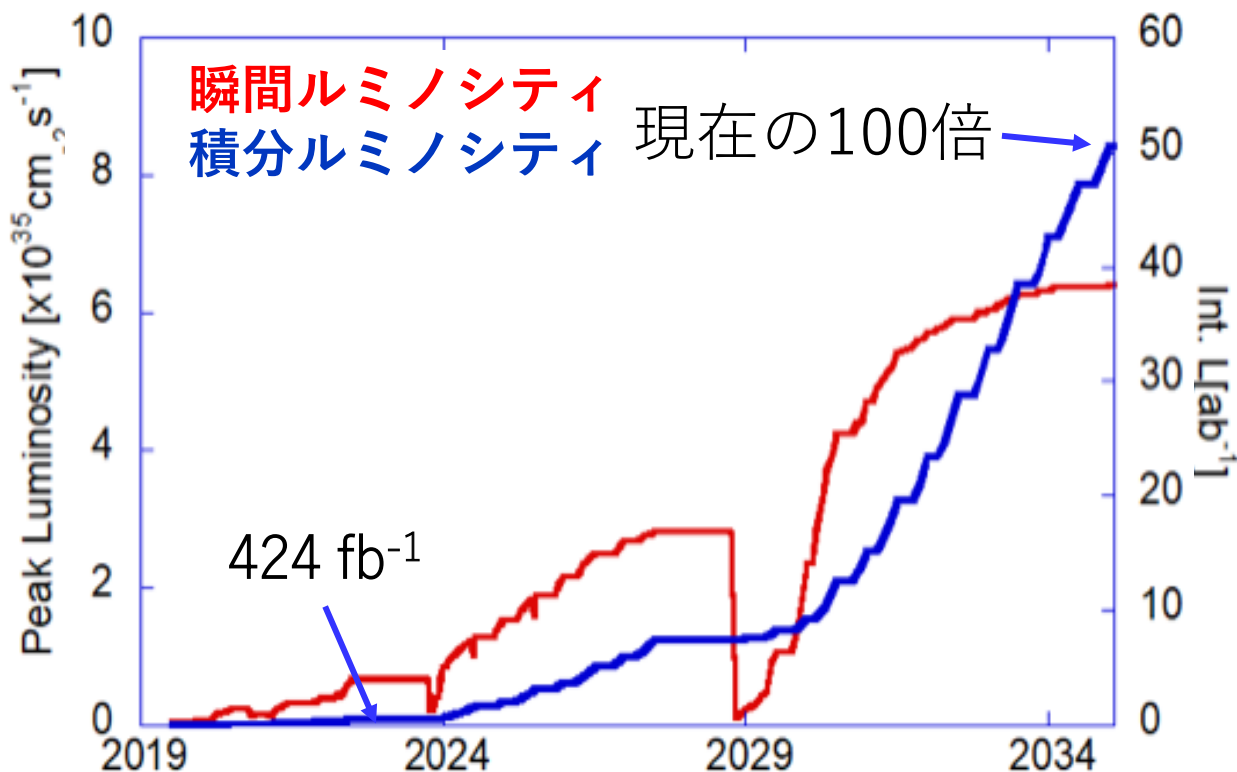
$$N = \sigma [\text{cm}^2] \int L [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}] dt [s]$$

新物理の探索には統計を溜める必要あり  
→瞬間ルミノシティの向上と長期的安定性を要求



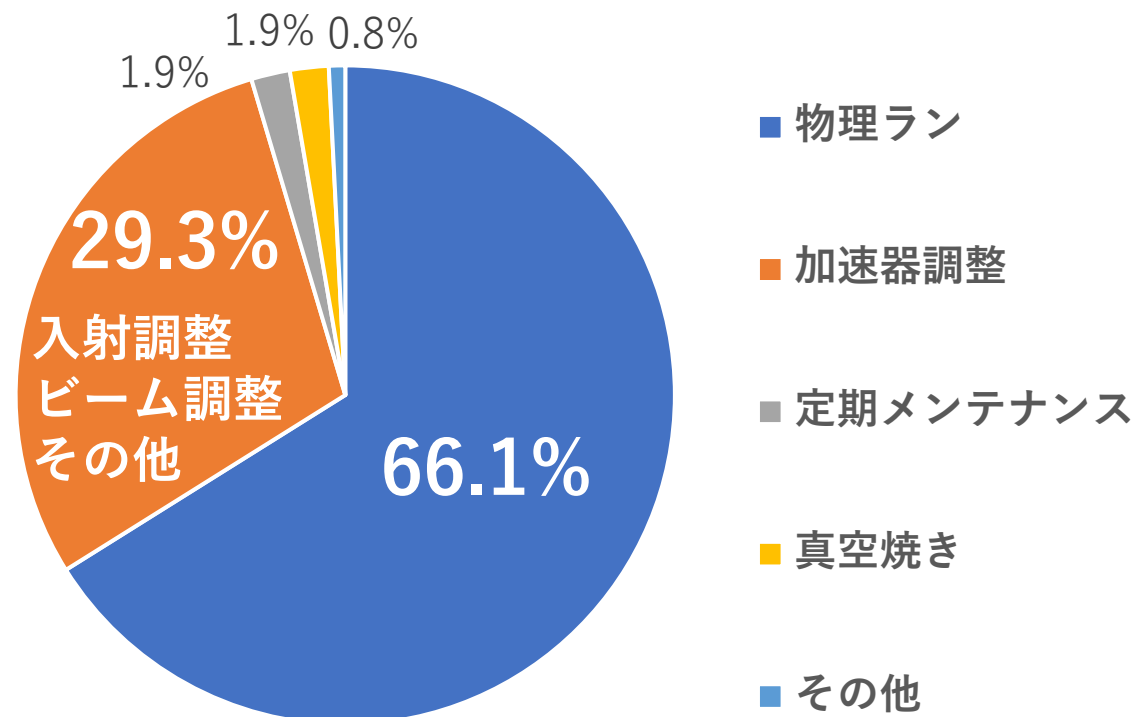
# 機械学習導入のモチベーション

## SuperKEKBのルミノシティ目標グラフ



## Belle II / SuperKEKB 運転状況

(Feb. 21 - Jun. 22, 2022)

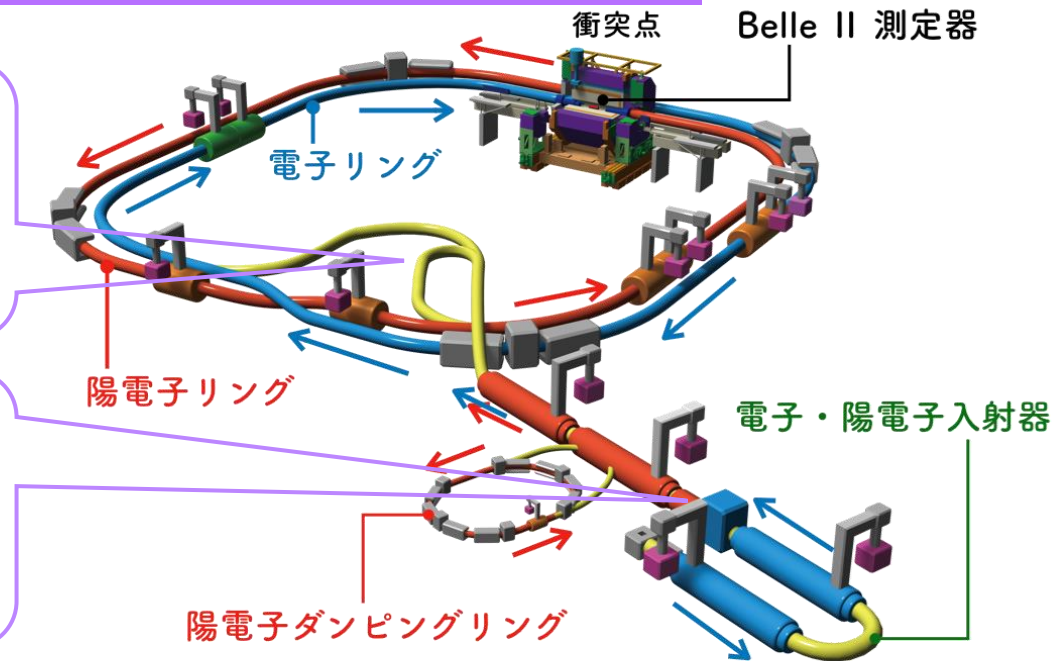


機械学習の導入で**加速器調整**を効率化し**物理ラン**の運転時間向上を目指す

# Linac陽電子ビームスタディ

入射調整 (ML導入で時間短縮が見込める 2024年1月～)  
機械学習を導入して入射効率向上のサポート  
運転オペレーターは通常6パラメータで調整

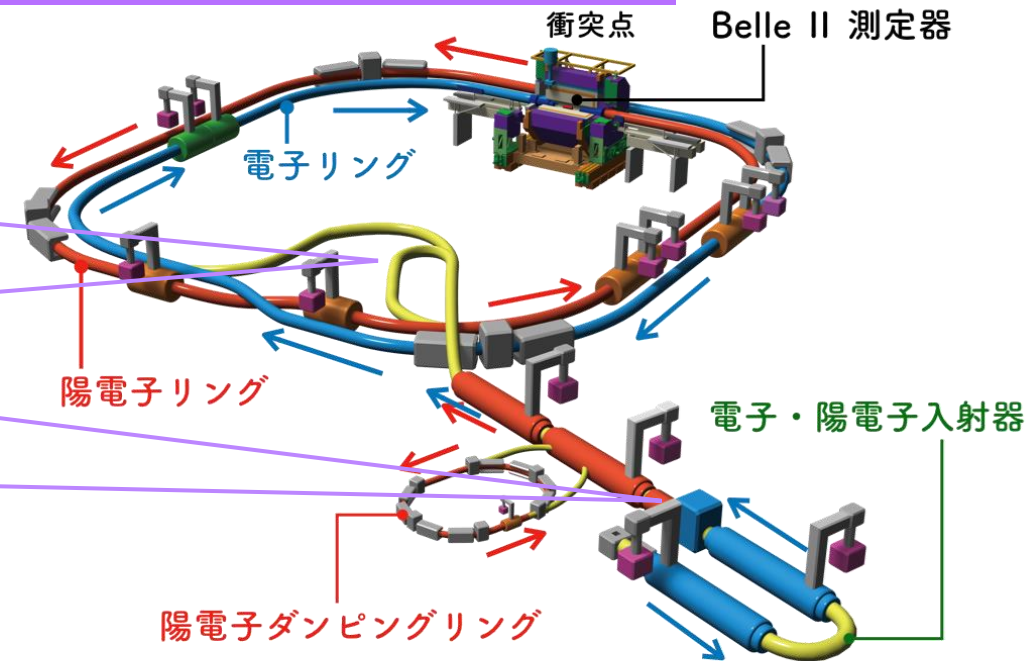
Linac陽電子ビームスタディ (2023年6,7,12月)  
機械学習で陽電子のビーム電荷を最大化  
6パラメータでビーム軌道を調整する



# Linac陽電子ビームスタディ

入射調整 (ML導入で時間短縮が見込める 2024年1月～)  
機械学習を導入して入射効率向上のサポート  
運転オペレーターは通常6パラメータで調整

Linac陽電子ビームスタディ (2023年6,7,12月)  
機械学習で陽電子のビーム電荷を最大化  
6パラメータでビーム軌道を調整する



機械学習について知りたいことは……

- 最適化するのにどれくらいの**時間**がかかるか？
- 最適化アルゴリズムは**どのような性質**を持つか？
- どのパラメータが**重要**なのか？

# 目次

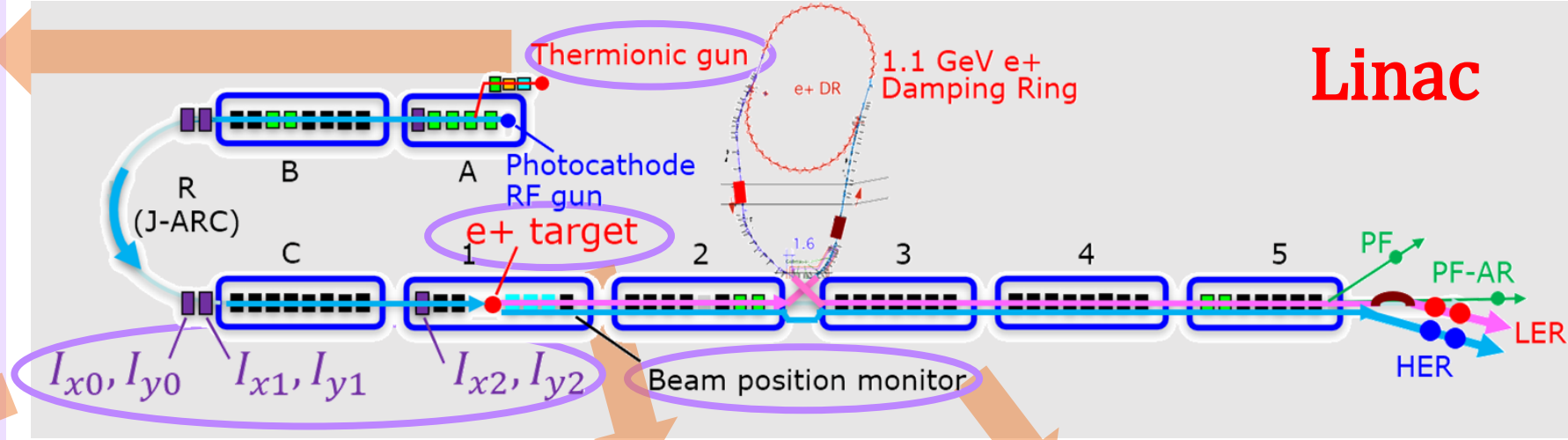
---

- Linac陽電子ビームスタディ(6~7月実施)
  - 実験のセットアップ
  - ベイズ最適化について
  - 測定結果
  - 今後の課題
- ビーム輸送路(Beam Transport line)下流での入射調整へ向けて
- まとめと展望

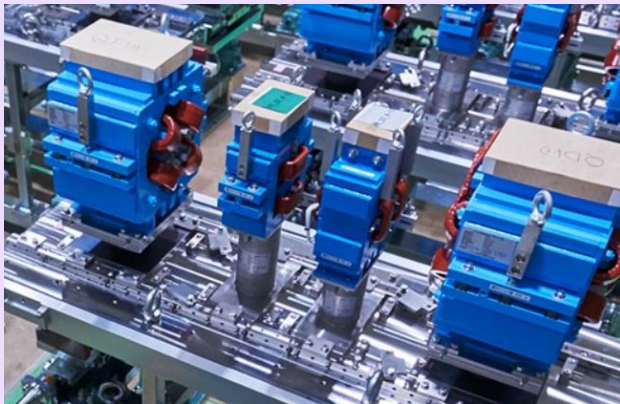
# 本実験で重要な機材

## 熱電子銃

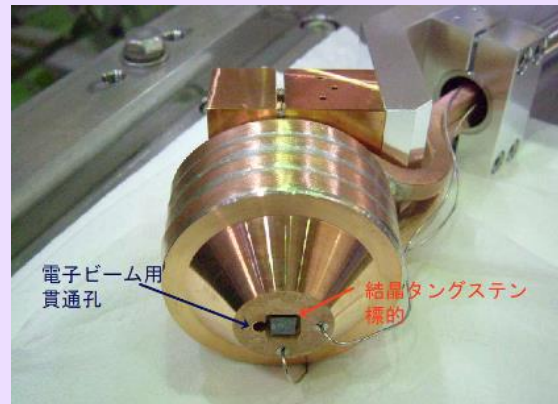
( $e^+$ 生成用の $e^-$ ビームを生成)



パルスステアリングマグネット  
(ビーム軌道を調整)



タングステン標的  
(陽電子を生成)



ビーム位置モニター  
(電荷を測定)



# 機械学習(ベイズ最適化)による電荷最大化

## 調整パラメータ

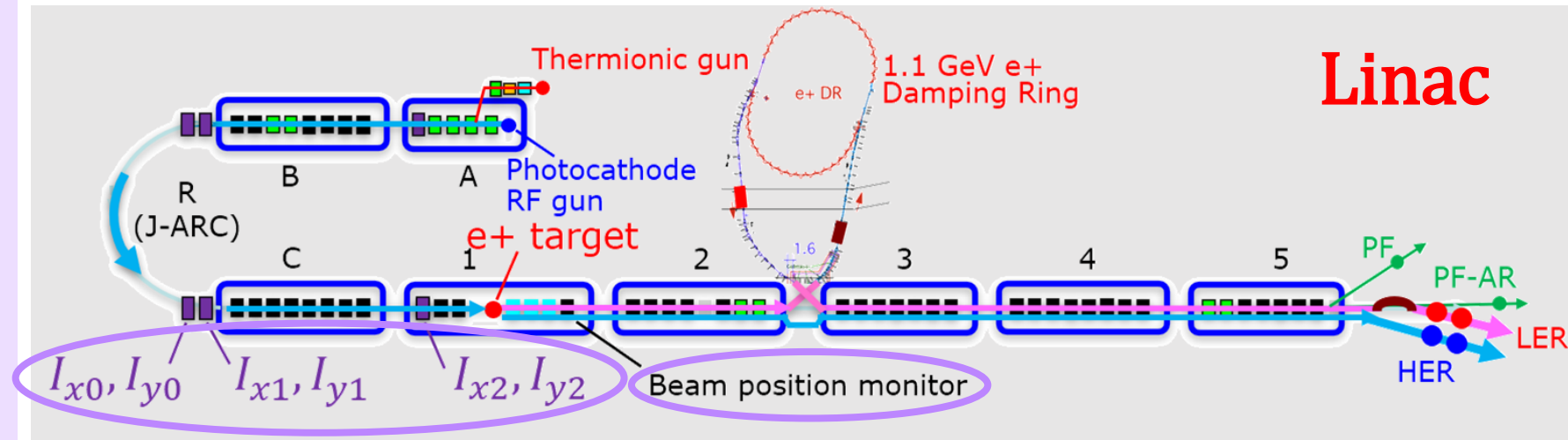
6つのステアリング

マグネットの印加電流:

$I_{x0}, I_{y0}, I_{x1}, I_{y1}, I_{x2}, I_{y2}$  (A)

## 評価パラメータ

ビーム位置モニターで測定したビーム電荷:  $Q$  (nC)





# 機械学習(ベイズ最適化)による電荷最大化

## 調整パラメータ

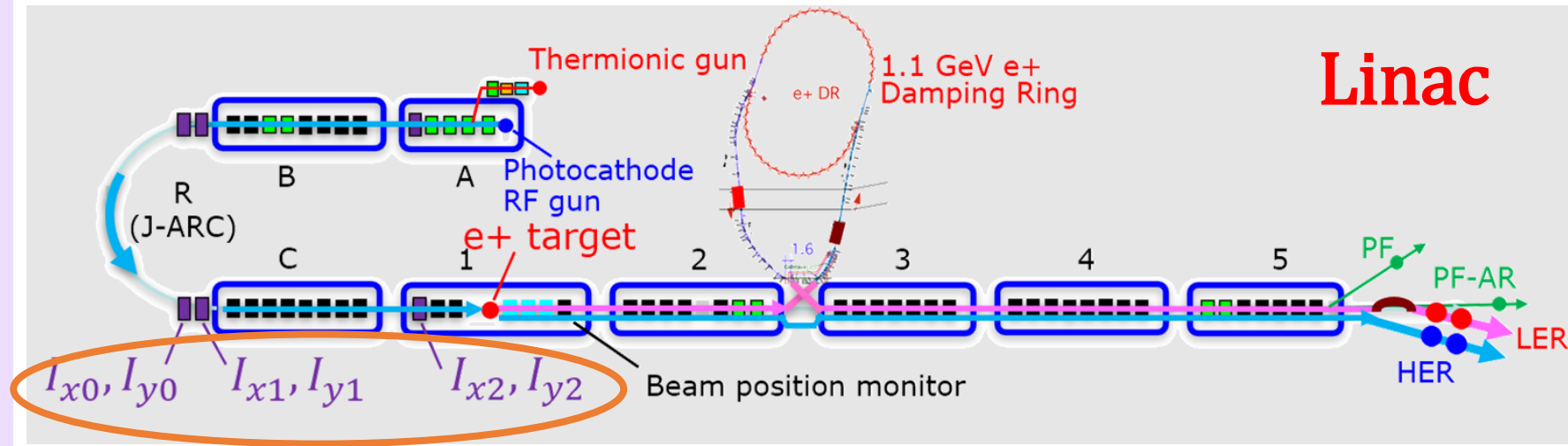
6つのステアリング

マグネットの印加電流:

$I_{x0}, I_{y0}, I_{x1}, I_{y1}, I_{x2}, I_{y2}$  (A)

## 評価パラメータ

ビーム位置モニターで測定したビーム電荷:  $Q$  (nC)



①電流値に適当な乱数を与える

ベイズ最適化(Xopt)



# 機械学習(ベイズ最適化)による電荷最大化

## 調整パラメータ

6つのステアリング

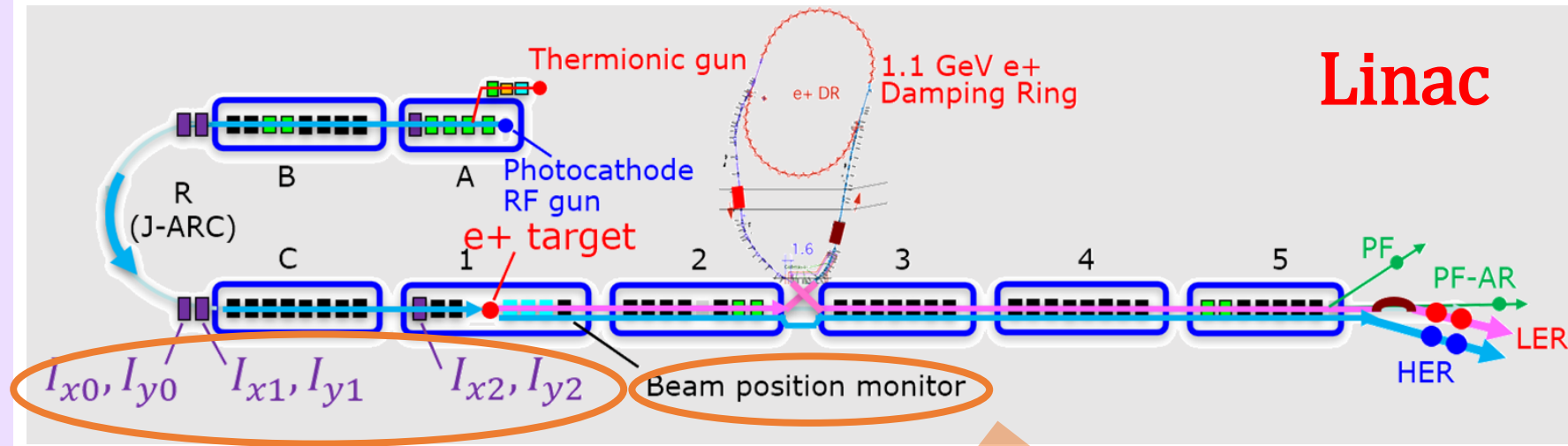
マグネットの印加電流:

$I_{x0}, I_{y0}, I_{x1}, I_{y1}, I_{x2}, I_{y2}$  (A)

## 評価パラメータ

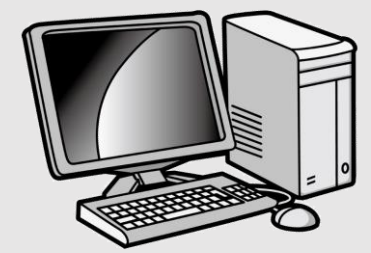
ビーム位置モニターで測定したビーム電荷:  $Q$  (nC)

① 電流値に適切な乱数を与える



① ビーム電荷を記録

ベイズ最適化(Xopt)



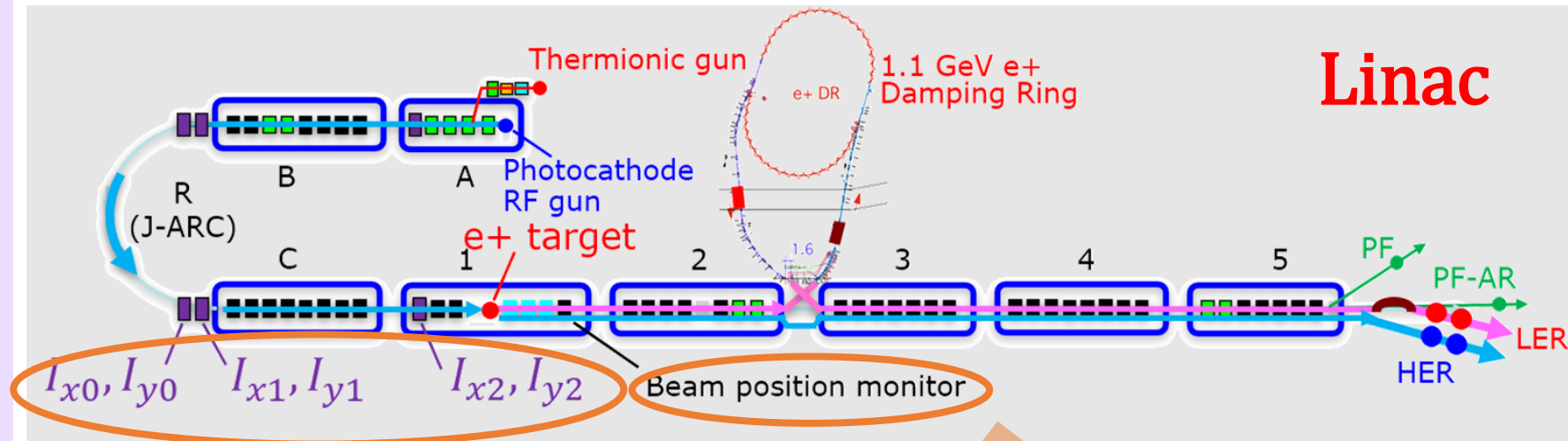
# 機械学習(ベイズ最適化)による電荷最大化

## 調整パラメータ

6つのステアリング  
マグネットの印加電流:  
 $I_{x0}, I_{y0}, I_{x1}, I_{y1}, I_{x2}, I_{y2}$  (A)

## 評価パラメータ

ビーム位置モニターで測  
定したビーム電荷:  $Q$  (nC)



①ビーム電荷  
を記録

②ビーム電荷を最大  
化するマグネットの  
印加電流を推定

獲得関数  
(次ページ詳細)

データを蓄積  
Trial1  $I_{x0} \sim I_{y2} \leftrightarrow Q$

ベイズ最適化(Xopt)

# 機械学習(ベイズ最適化)による電荷最大化

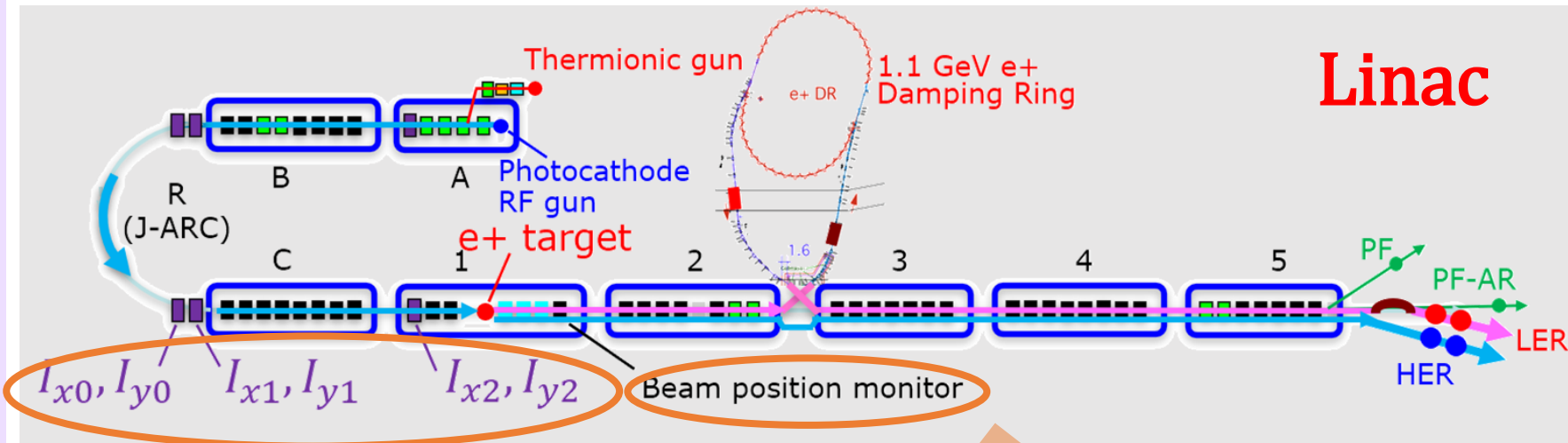
## 調整パラメータ

6つのステアリング  
マグネットの印加電流:  
 $I_{x0}, I_{y0}, I_{x1}, I_{y1}, I_{x2}, I_{y2}$  (A)

## 評価パラメータ

ビーム位置モニターで測  
定したビーム電荷:  $Q$  (nC)

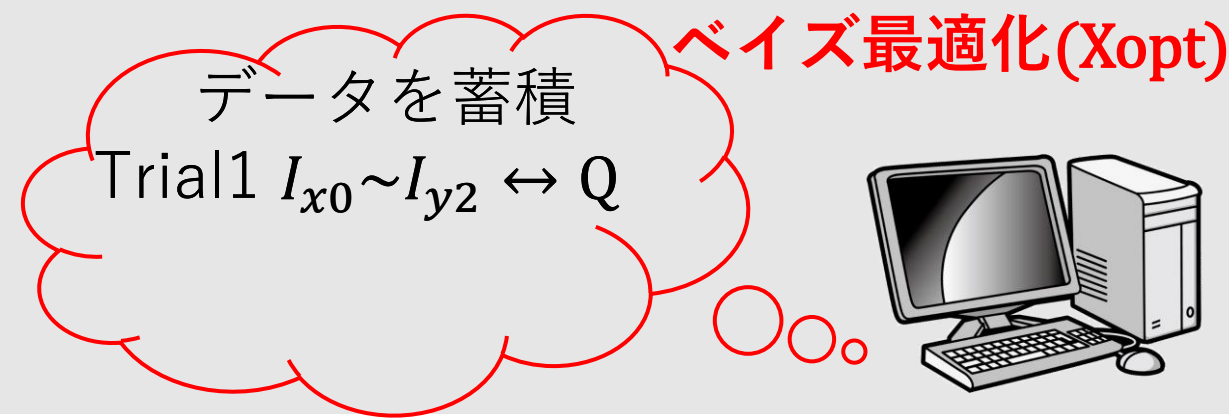
②ビーム電荷を最大  
化するマグネットの  
印加電流を推定



③電流値  
を設定

①ビーム電荷  
を記録

獲得関数  
(次ページ詳細)



# 機械学習(ベイズ最適化)による電荷最大化

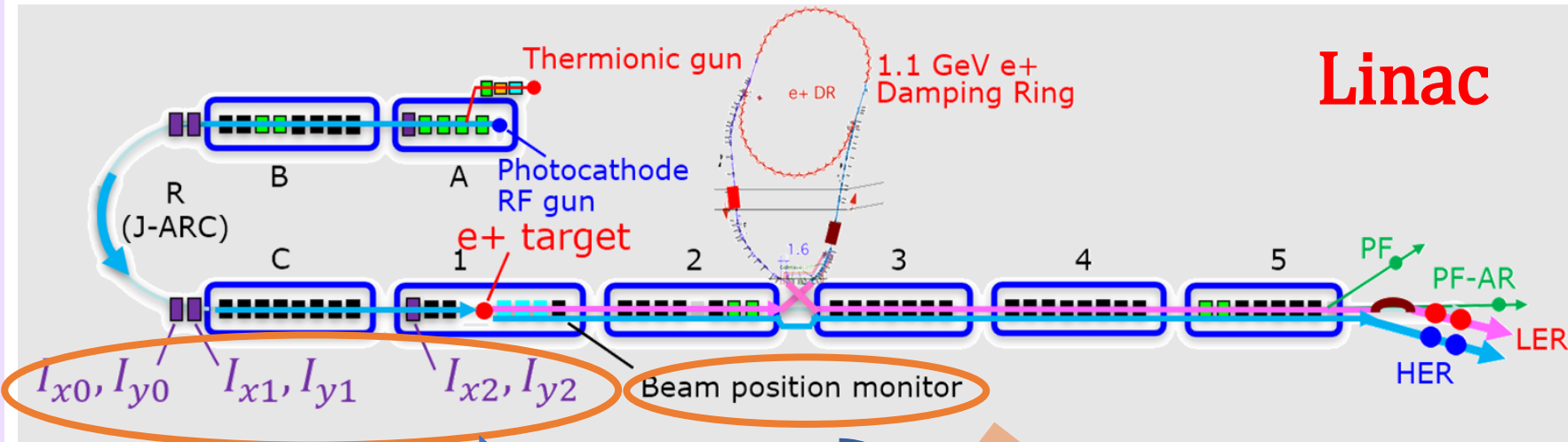
## 調整パラメータ

6つのステアリング  
マグネットの印加電流:  
 $I_{x0}, I_{y0}, I_{x1}, I_{y1}, I_{x2}, I_{y2}$  (A)

## 評価パラメータ

ビーム位置モニターで測定したビーム電荷:  $Q$  (nC)

②ビーム電荷を最大化するマグネットの印加電流を推定

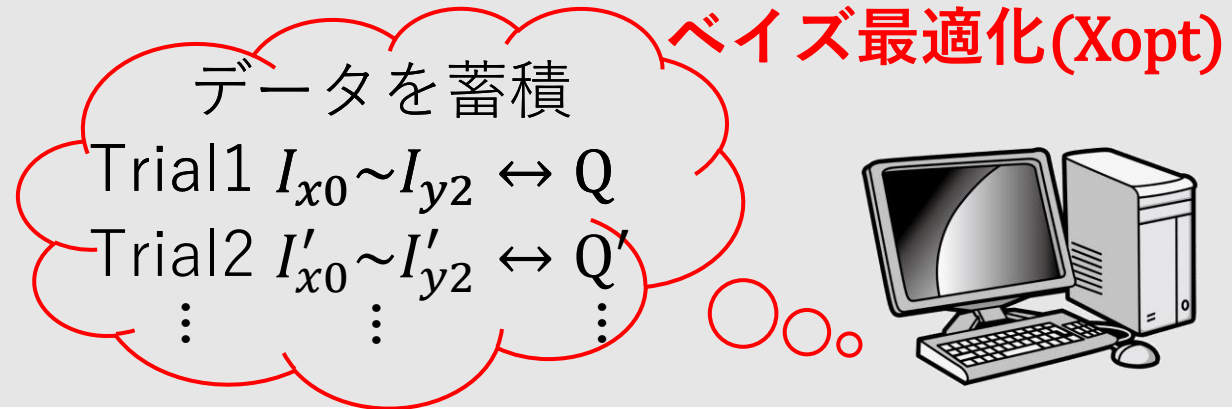


③電流値を設定

繰り返す  
(1トライアル)

①ビーム電荷を記録

獲得関数  
(次ページ詳細)

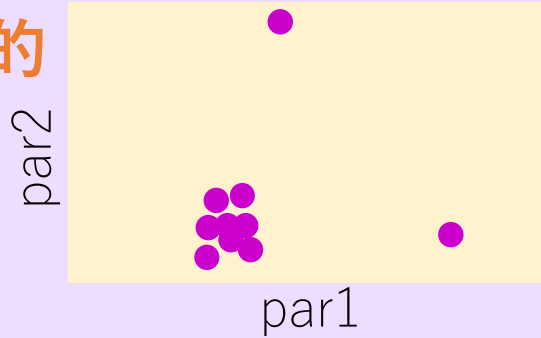


# ベイズ最適化における獲得関数

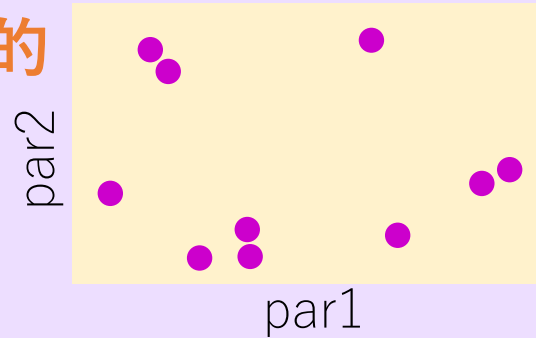
- 獲得関数 ベイズ最適化の性質を決める関数

例:2次元パラメータ空間 ( ●:設定パラメータ値)

活用的



探索的



活用的過ぎると……

→局所的最大に  
陥る可能性大

探索的過ぎると……

→不要な場所を探索

**UCB(Upper Confidence Bound)**

$$UCB(\mathbf{x}) = \mu(\mathbf{x}) + \beta^{\frac{1}{2}} \cdot \sigma(\mathbf{x})$$

$\mu(\mathbf{x})$ は活用、 $\sigma(\mathbf{x})$ は探索に向かう成分  
ハイパーパラメータ  $\beta$ 、大きいほど探索的に

**EI(Expected Improvement)**

ベイズ最適化においてスタンダードな  
獲得関数

**今回はこの二つの獲得関数の性能を比較**

# $e^+$ ビーム最適化の実験詳細

| 獲得関数               | 日時   |             |
|--------------------|------|-------------|
| UCB( $\beta = 2$ ) | 6/14 | 19:15~20:00 |
| EI                 | 6/14 | 20:15~21:00 |



実験の様子 (KEK, 入射器コントロール棟)

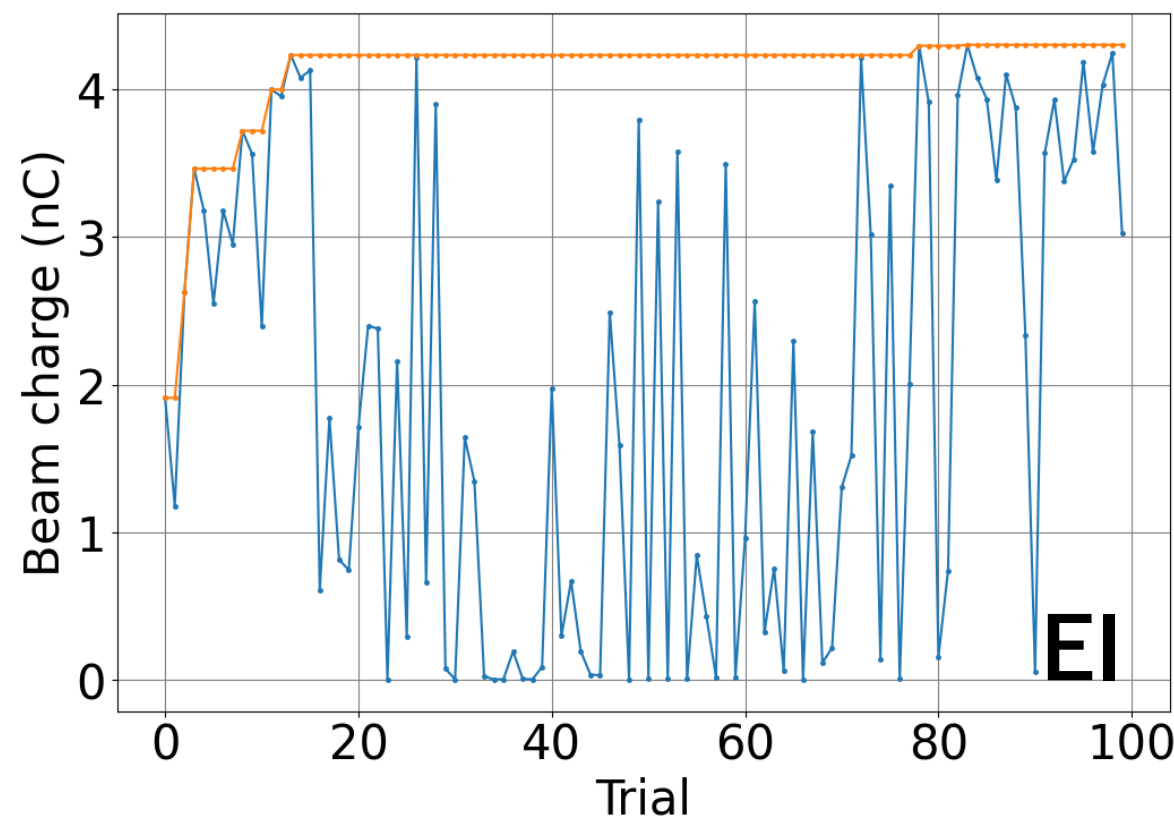
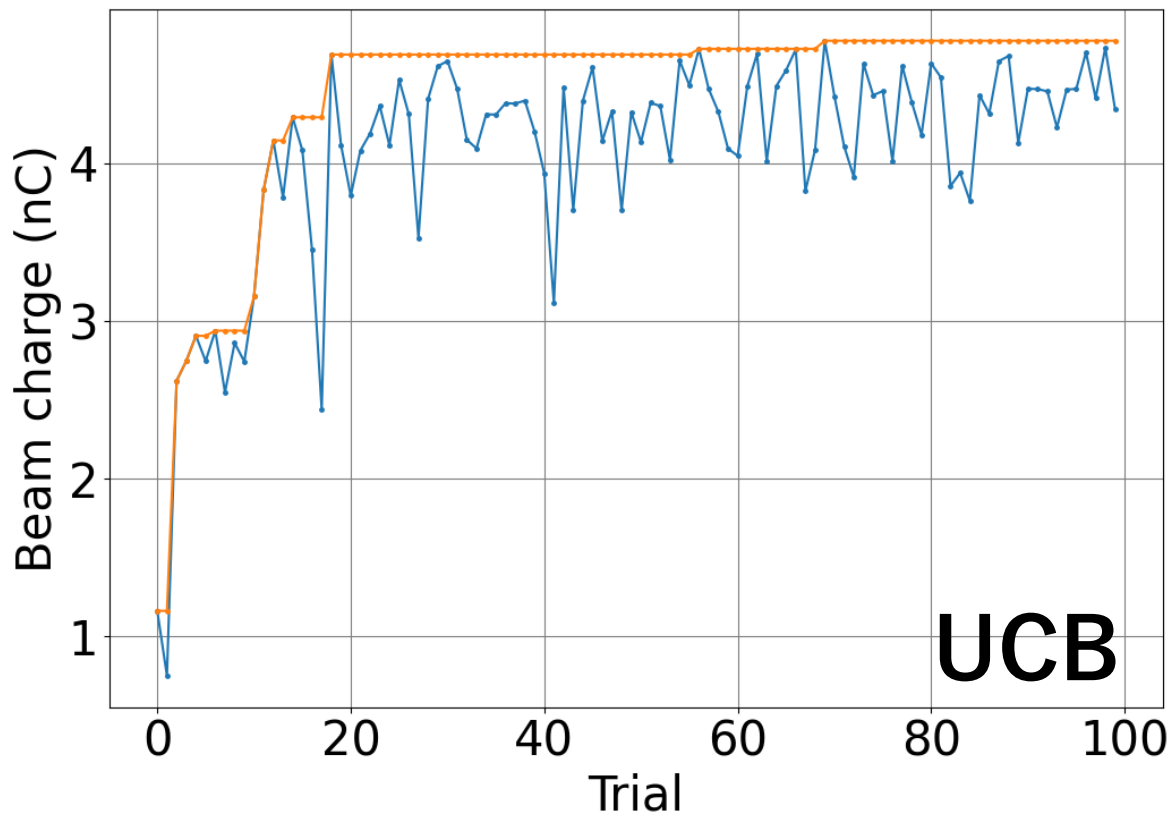
- ベイズ最適化で**100トライアル**を1ランとして**5ラン**ずつ測定した
- 次ページ以降では**UCB( $\beta = 2$ )**と**EI**の比較を行う
- パラメータの初期値は安全な定義域内の**乱数**を与えた
- 1ランにかかる時間は**10分弱**
- この日のオペレーターの調整値は**4.6 nC**
- このスタディではXopt(SLAC加速器グループが作成したベイズ最適化パッケージ)を使用した

Xopt: [<https://github.com/ChristopherMayes/Xopt>]

# 最適化の結果(1回のラン)

青色: 各トライアルでのビーム電荷

オレンジ: Peak hold (その時点での最大値)



UCBはPeak hold付近に張り付く傾向(活用的)

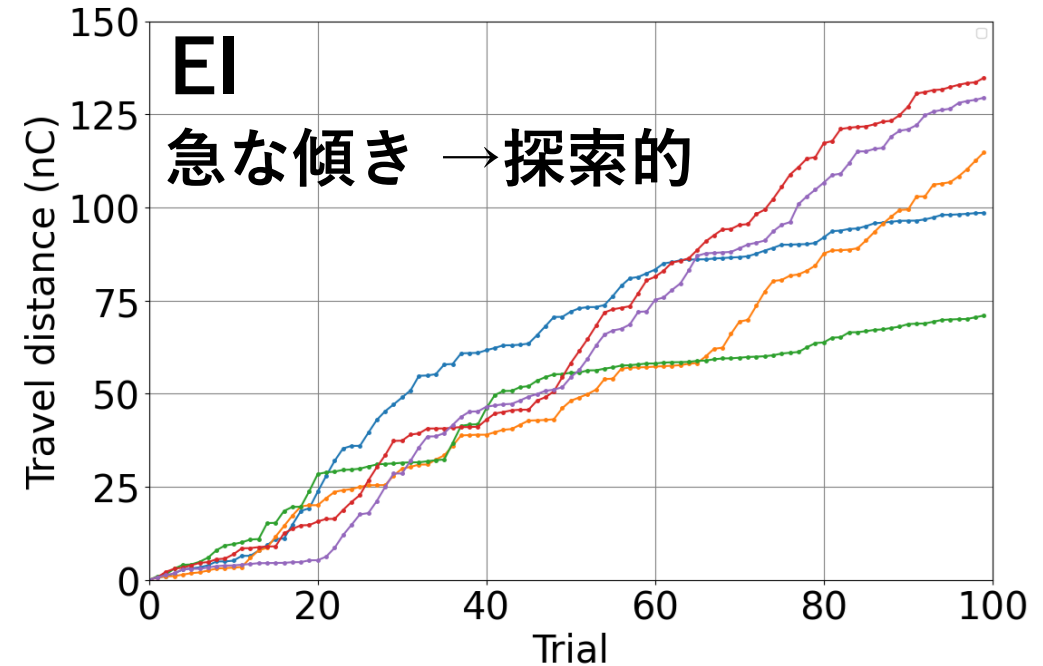
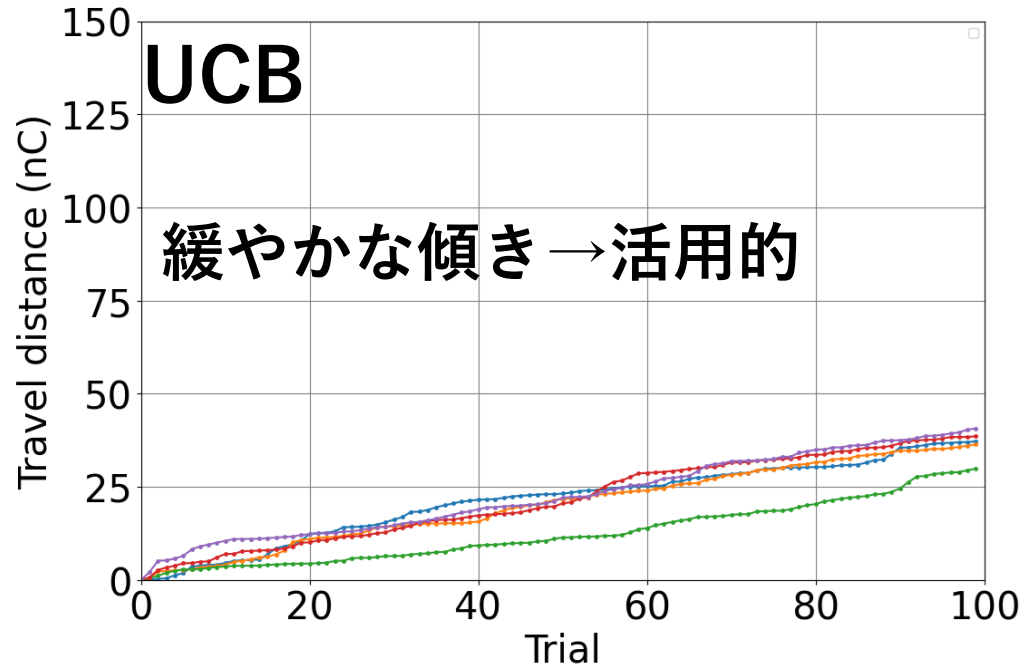
EIはいろんな領域を探しに行き、電荷の上下が激しい(探索的)



# Travel distance(5回のラン)

Travel distance  $Q_{td} = \sum_{t=1}^{t'} |q_t - q_{t-1}|$  (前の電荷からどれだけ変化したか?)

$Q_{td}$  は獲得関数がどの程度活用的または探索的かを表す



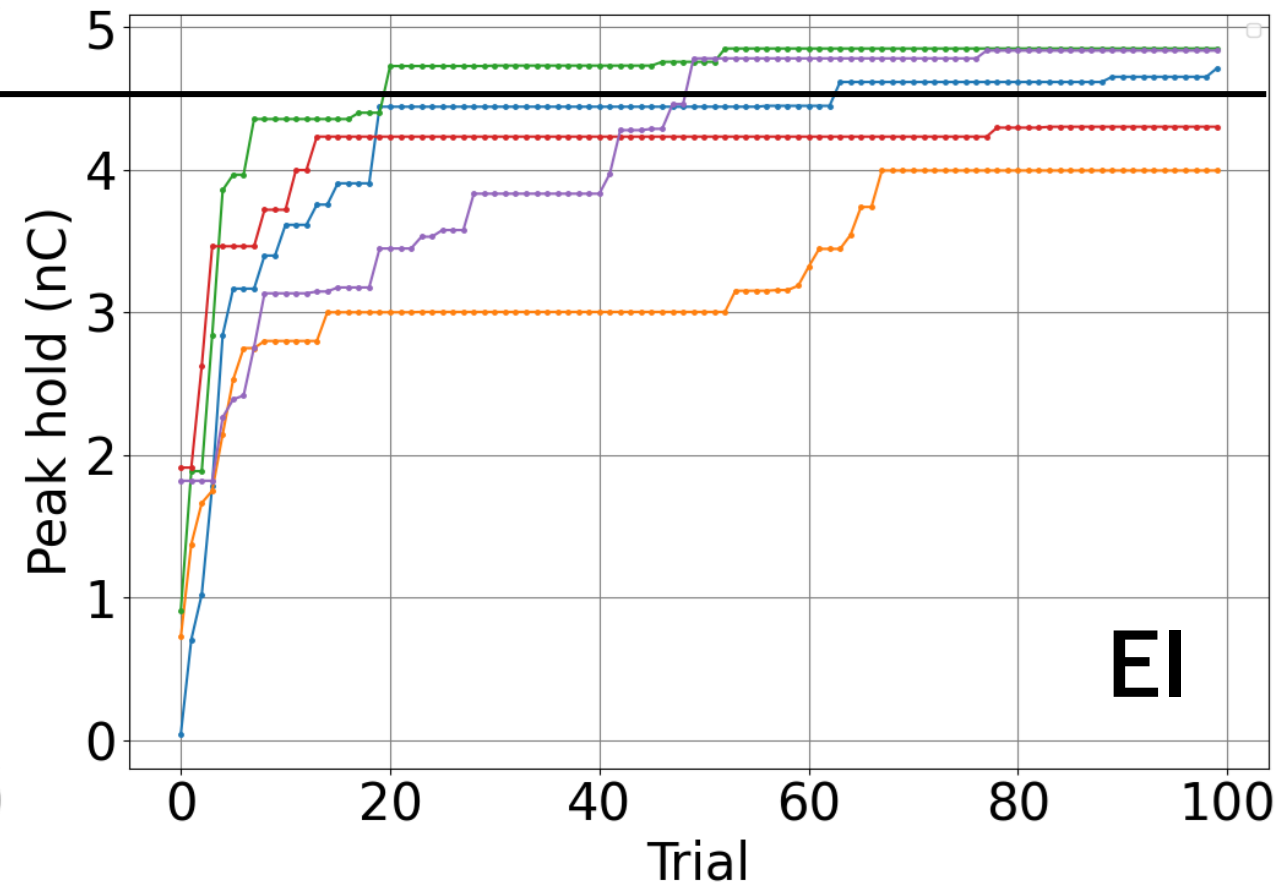
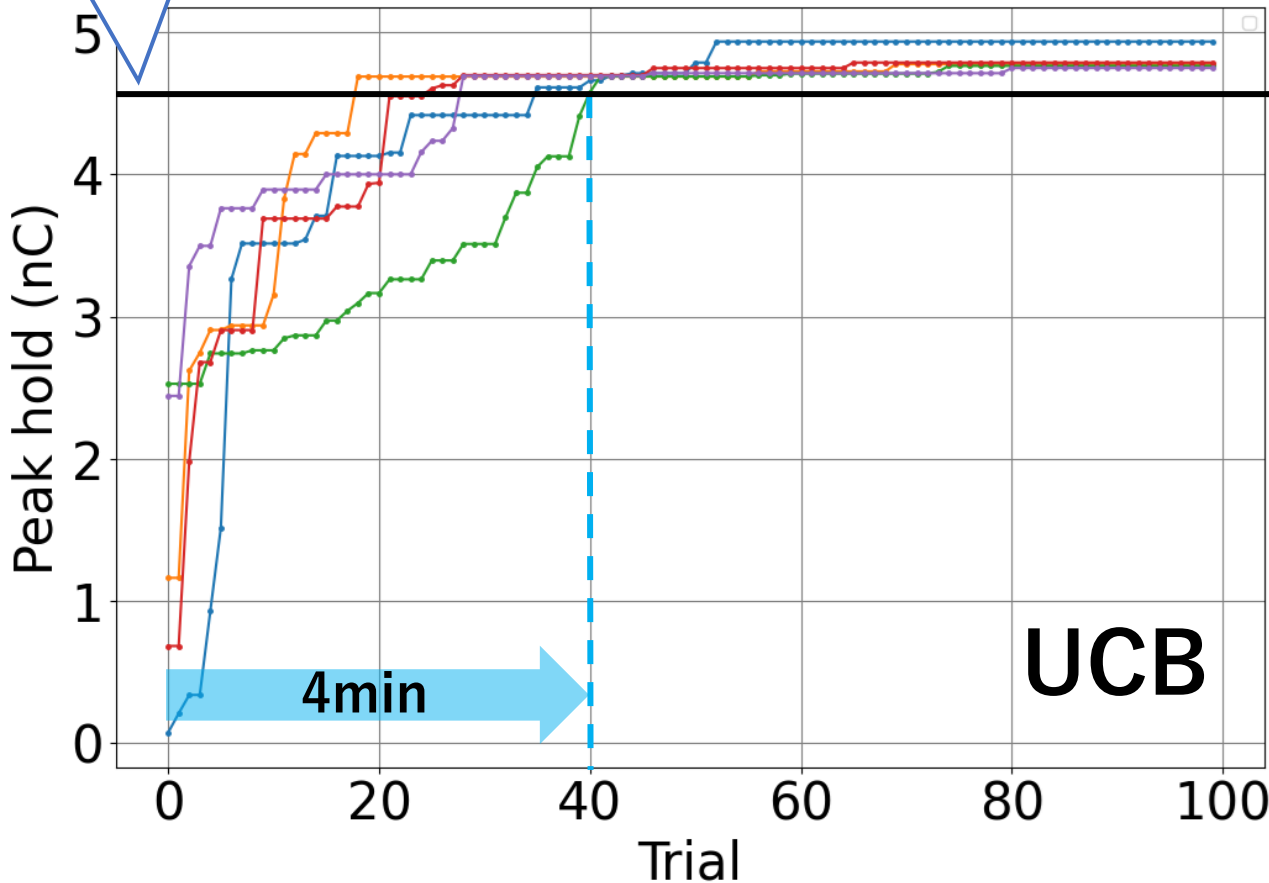
5ラン全てで、UCBは活用的、EIは探索的であることが見て取れる

結論①

獲得関数の性質が判明し、今後の調整ではパラメータに応じて適切な獲得関数を選択できるようになった

# Peak holdの比較(5回のラン)

オペレーターの  
調整値(6/14)  
4.6nC



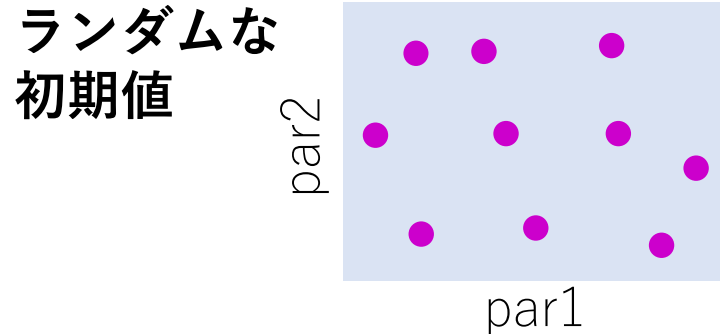
結論②

Linacの陽電子ビーム電荷最大化における最適化速度はUCBが優れている  
ツールアシストで熟練オペレータと同等の調整が期待できる

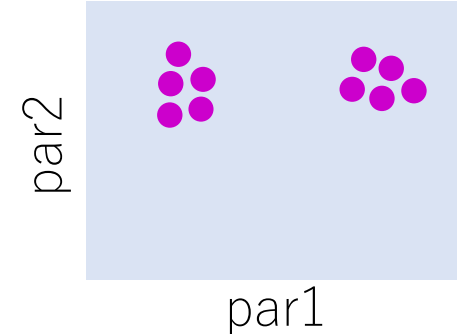
# 12月 linac studyに向けた改善点

- 過去の最適値の利用

→ 前回のデータを用いて最適化をスタートできれば、調整時間の短縮が見込める。



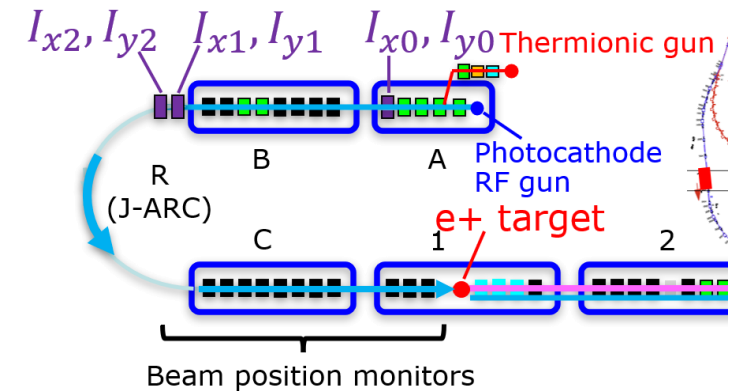
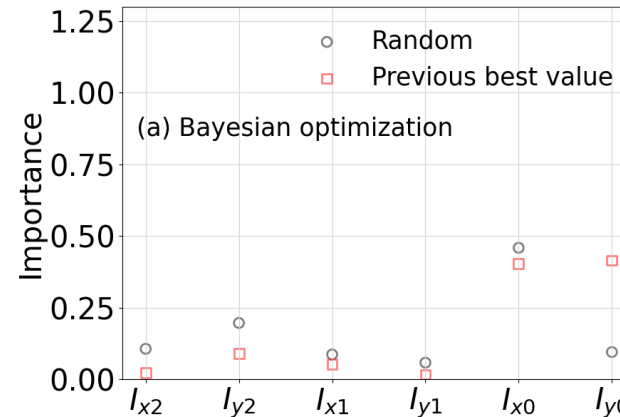
前回の値を参照した初期値



- パラメータの重要度を数値化するアルゴリズムを導入 (fANOVA [Hutter, ICML 2014])

Linac上流で行われた6パラメータ調整スタディ(三塚さん)

それぞれのマグネットの重要度を出すことができる



12月の linac study で検証予定

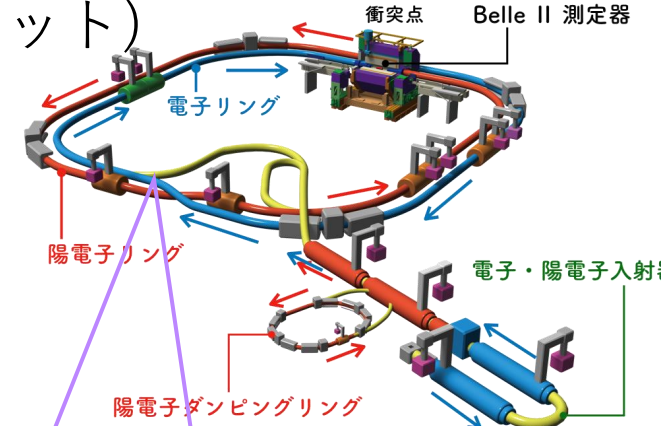
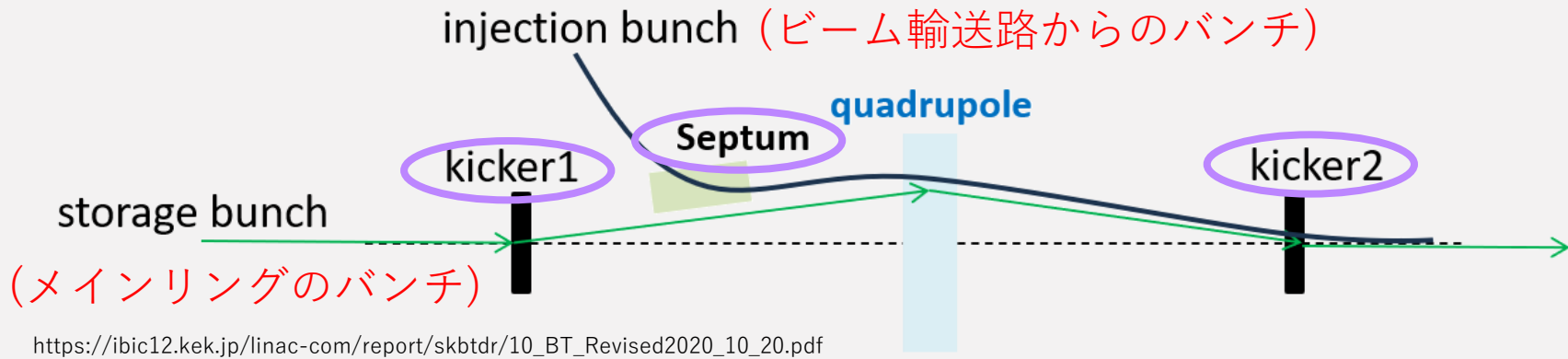
# 目次

---

- Linac陽電子ビームスタディ(6~7月実施)
  - 実験のセットアップ
  - ベイズ最適化について
  - 測定結果
  - 今後の課題
- ビーム輸送路(Beam Transport line)下流での入射調整へ向けて
- まとめと展望

# ビーム輸送路下流での入射調整

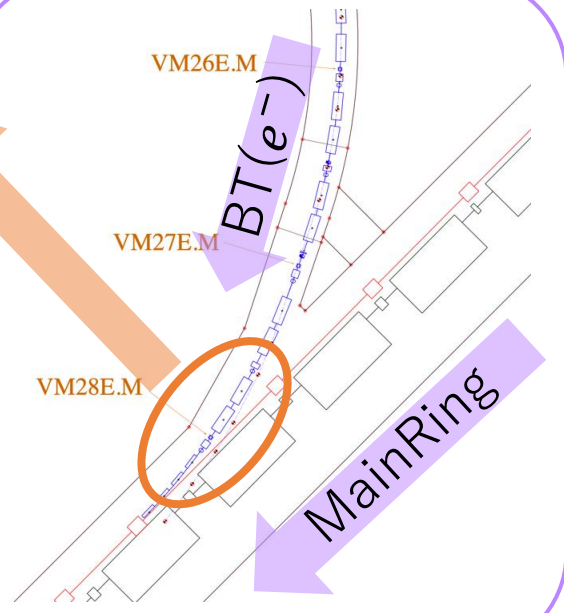
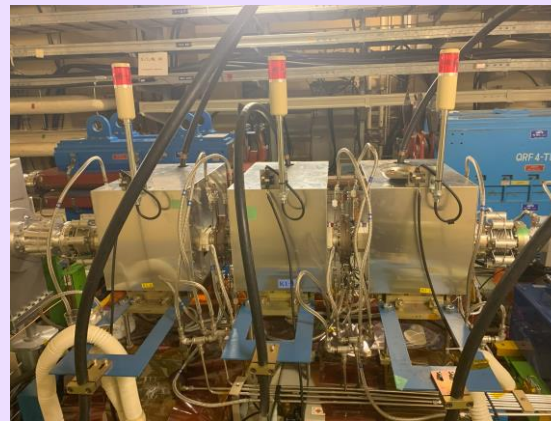
- DCステアリングマグネット、セプタムマグネット、(キッカーマグネット)をそれぞれ2個(計4～6個)を使用、DCCTでビーム電流を測定。



## セプタムマグネット



## キッカーマグネット



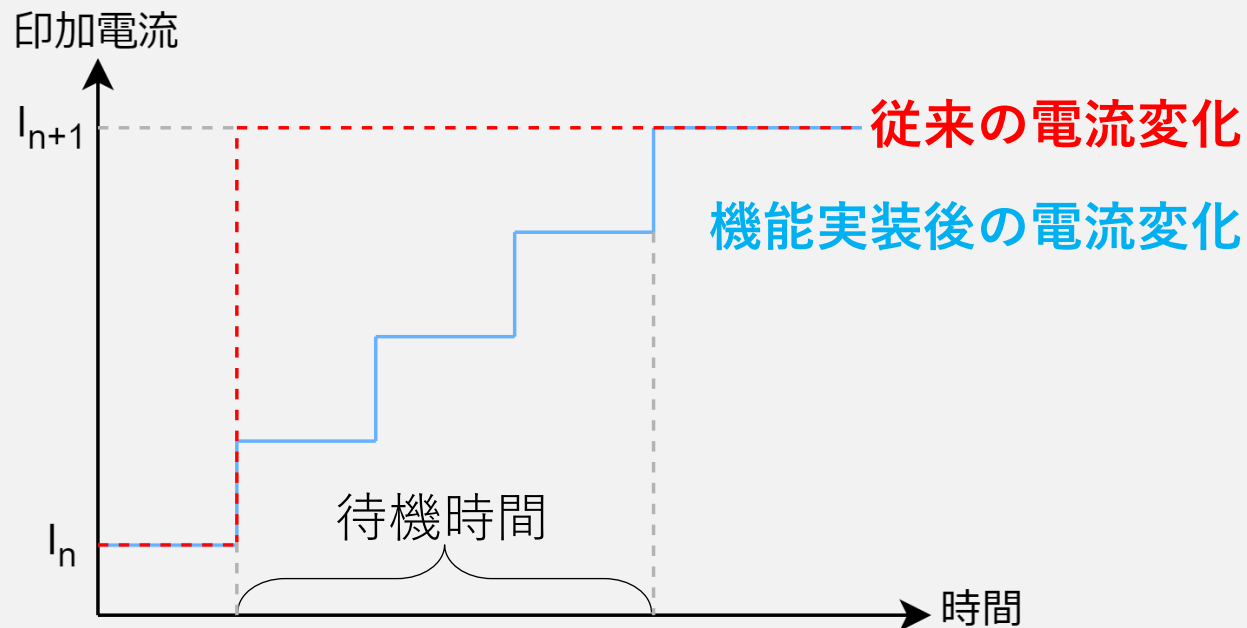
# 入射調整に向けた改良

前ページのマグネットは急に電流値を大きく変えてはいけない。(磁場が変化に追従できない。)

➡ パラメータの調整に工夫が必要

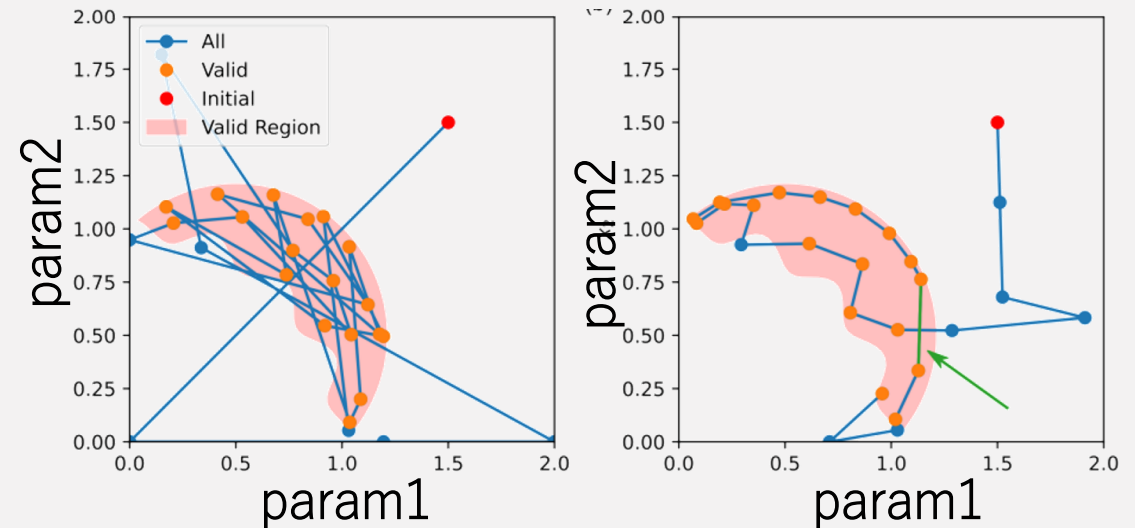
➤ 段階的に値を変化させる機能を実装

→ 待機時間は増えるが電流の変化幅を小さくできる



➤ 一筆書き機能を実装中

→ 待機時間の削減が期待される



一筆書き機能なし

一筆書き機能あり

(Ryan, 2021, [https://ml4physicalsciences.github.io/2021/files/NeurIPS\\_ML4PS\\_2021\\_82.pdf](https://ml4physicalsciences.github.io/2021/files/NeurIPS_ML4PS_2021_82.pdf))

# まとめと展望

- Linacにある陽電子生成用の電子ビームを軌道調整し、ベイズ最適化で陽電子のビーム電荷を最大化するスタディを行った。
- Xoptにおいて複数の獲得関数を比較した結果、EIは探索的、UCBは活用的な傾向が判明し、電荷最大化においては最適化速度でUCBが優れていることが判明した。
- この実験での改善点を踏まえて12月に再びLinac studyを実施しつつ、BTにおける入射調整に向けた検証を行う予定である。

| 日付        | 作業目標   |
|-----------|--|
| ~2023年12月 | i. 入射調整に必要な機能を実装(上述)<br>ii. GUIを実装                           |
| 2024年1月~  | i. 以上をLER( $e^+$ )でスタディ                                      |
| ~2024年3月  | i. 入射調整ツールを標準ツールとして採用(できるレベルに仕上げる)<br>ii. コリメータ調整手習い         |
| ~2024年6月  | i. 入射調整にBelle II 検出器のバックグラウンド情報を加える<br>ii. 可能ならばコリメータ調整ツール着手 |