

# SuperKEKB 加速器における機械学習を用いた ビーム入射調整の高度化



東大理

加藤 臣之輔

高工研加速器

三塚 岳

# Belle II実験 / SuperKEKB加速器

## Belle II 測定器

生成・崩壊粒子 (B,  $\tau$  など)

$e^-$  (HER)

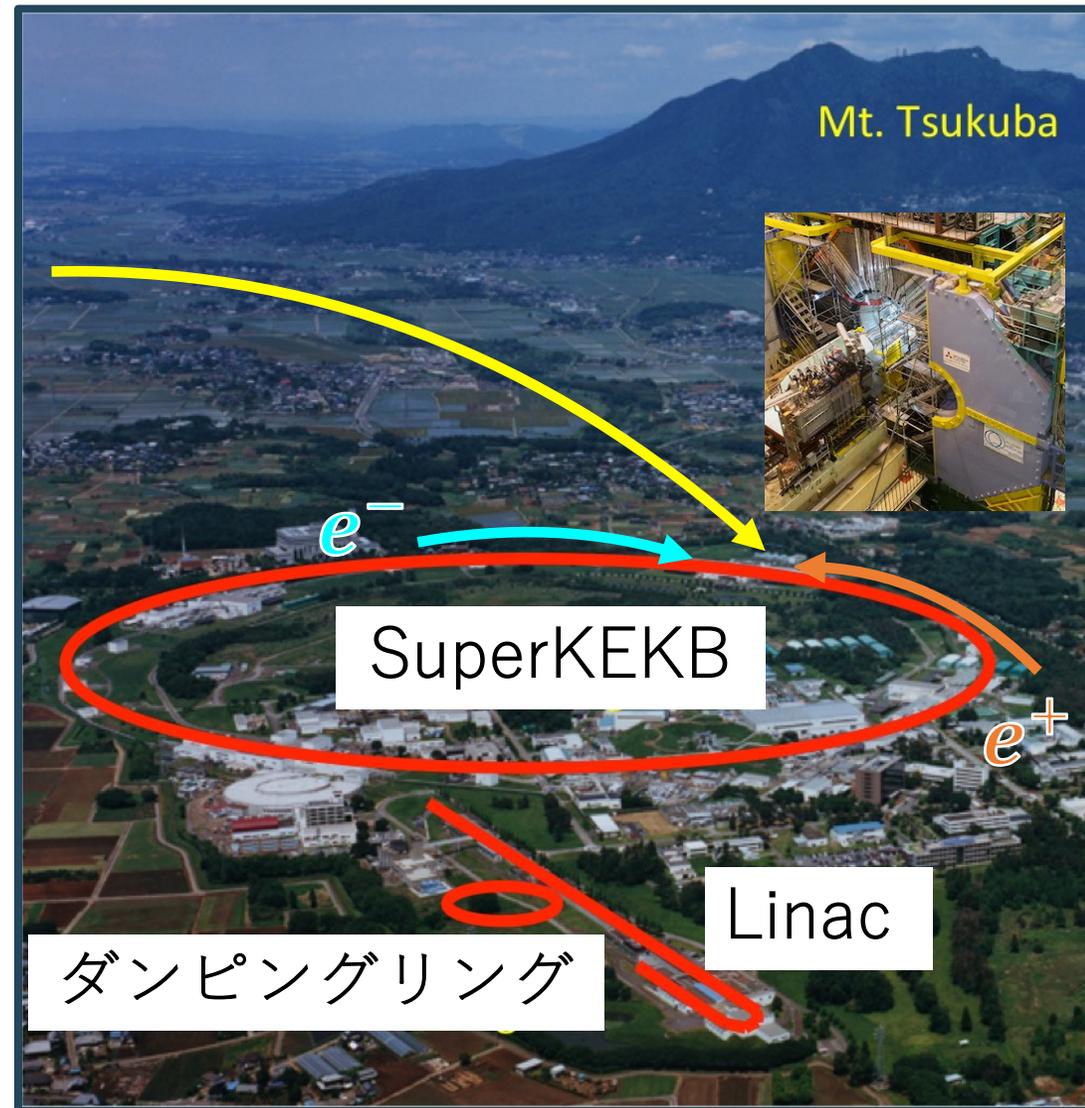
$e^+$  (LER)

7 GeV

4 GeV

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

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

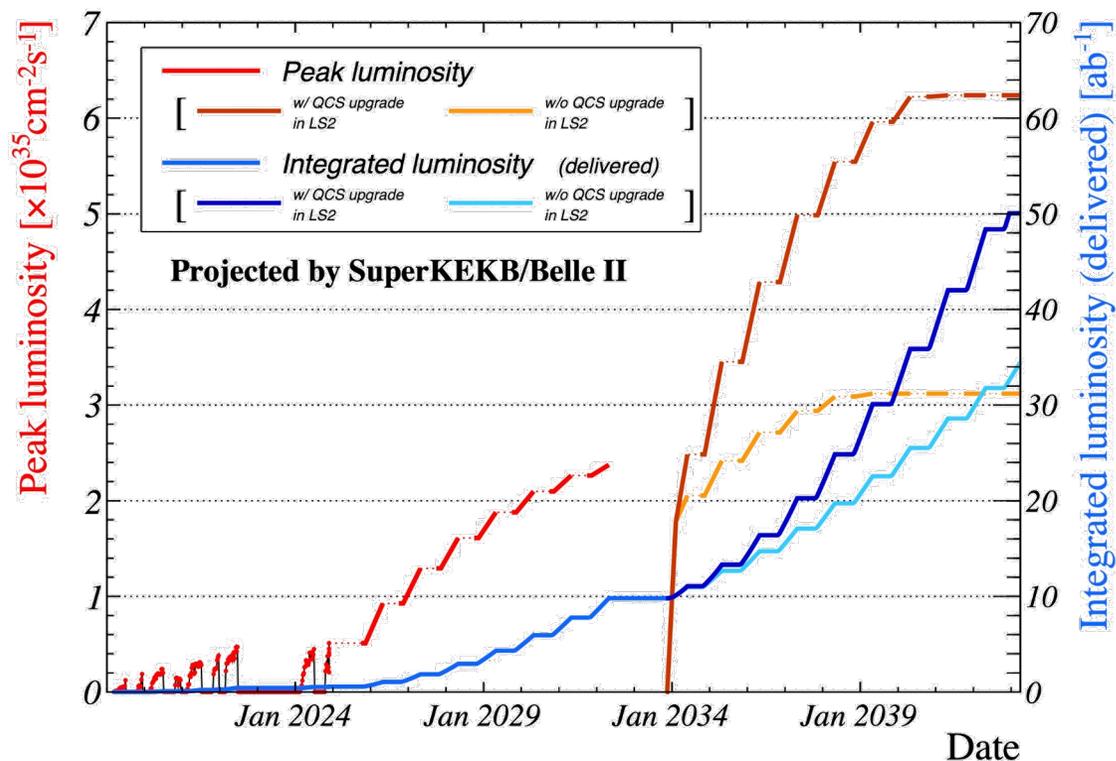


# ルミノシティ

2025年8月時点でのルミノシティ記録

瞬間ルミノシティ  $5.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

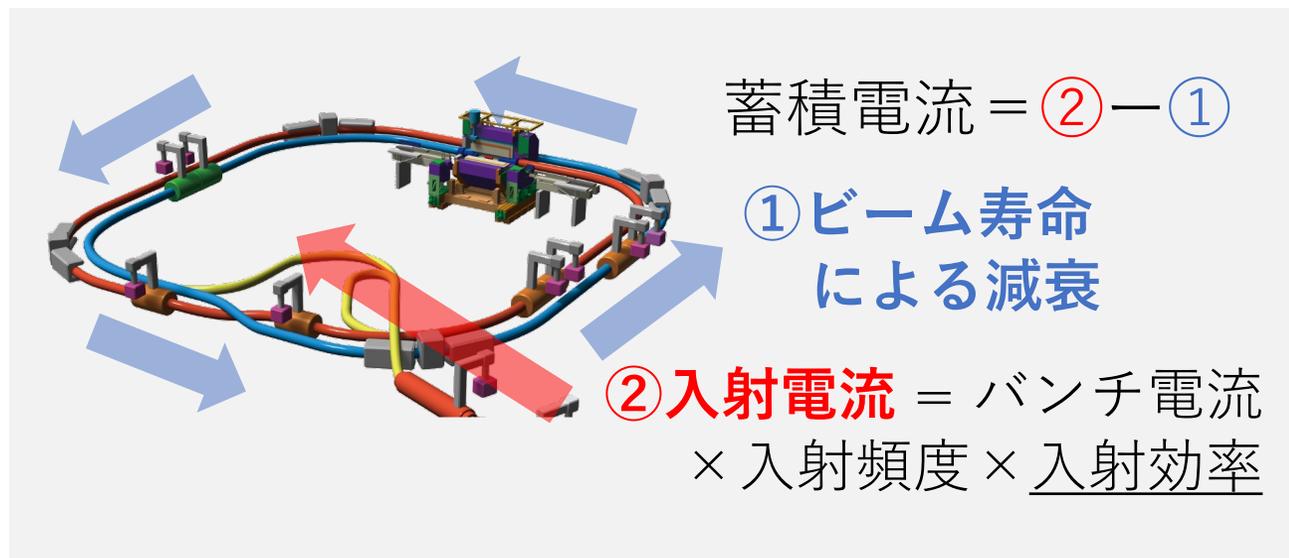
積分ルミノシティ  $575 \text{ fb}^{-1}$



SuperKEKBのルミノシティ目標図

ルミノシティはビームの蓄積電流に比例

$$L \propto \frac{I_+ I_-}{\sigma_x^* \sigma_y^*}$$



入射調整の改善で高ルミノシティ化を目指す！

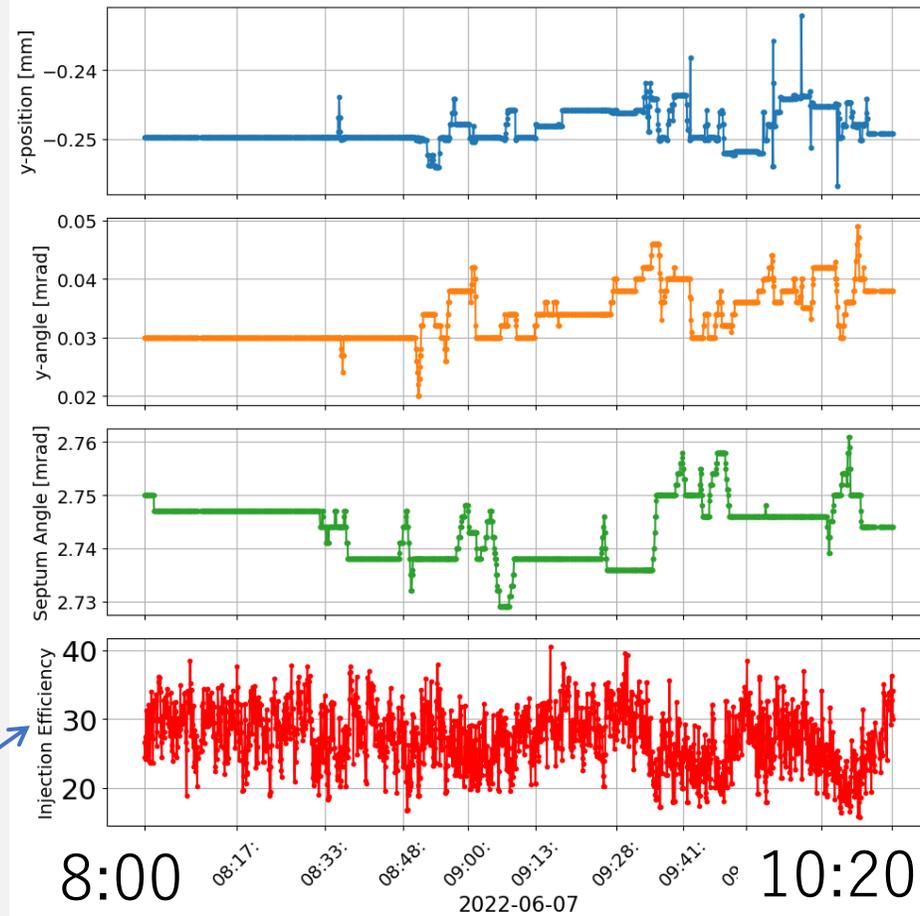
# 手動によるビーム入射調整の難しさ

## ■ 苦勞した事例

入射調整  
パラメータ

入射効率

30%



2時間手動調整を試みるも  
入射効率が改善しない

+

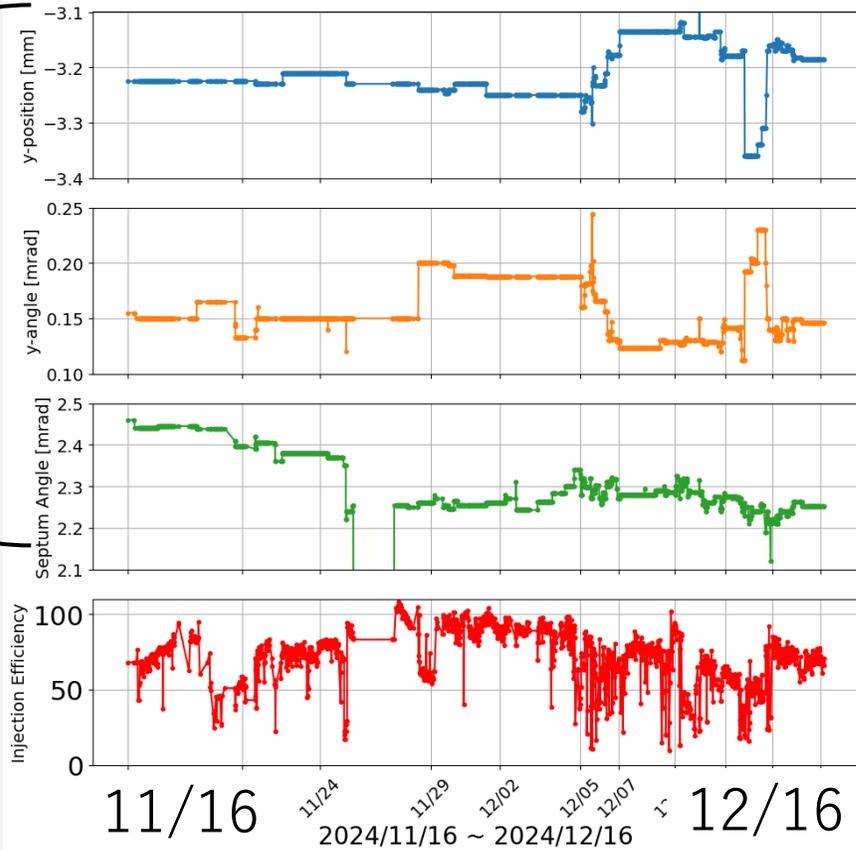
入射調整に経験の  
差が出てしまう

自動入射調整ツールを開発して入射調整作業をタスク化させたい！

# 入射調整の自動化に対する課題

## 課題1：長期的な入射効率の変動

入射調整  
パラメータ

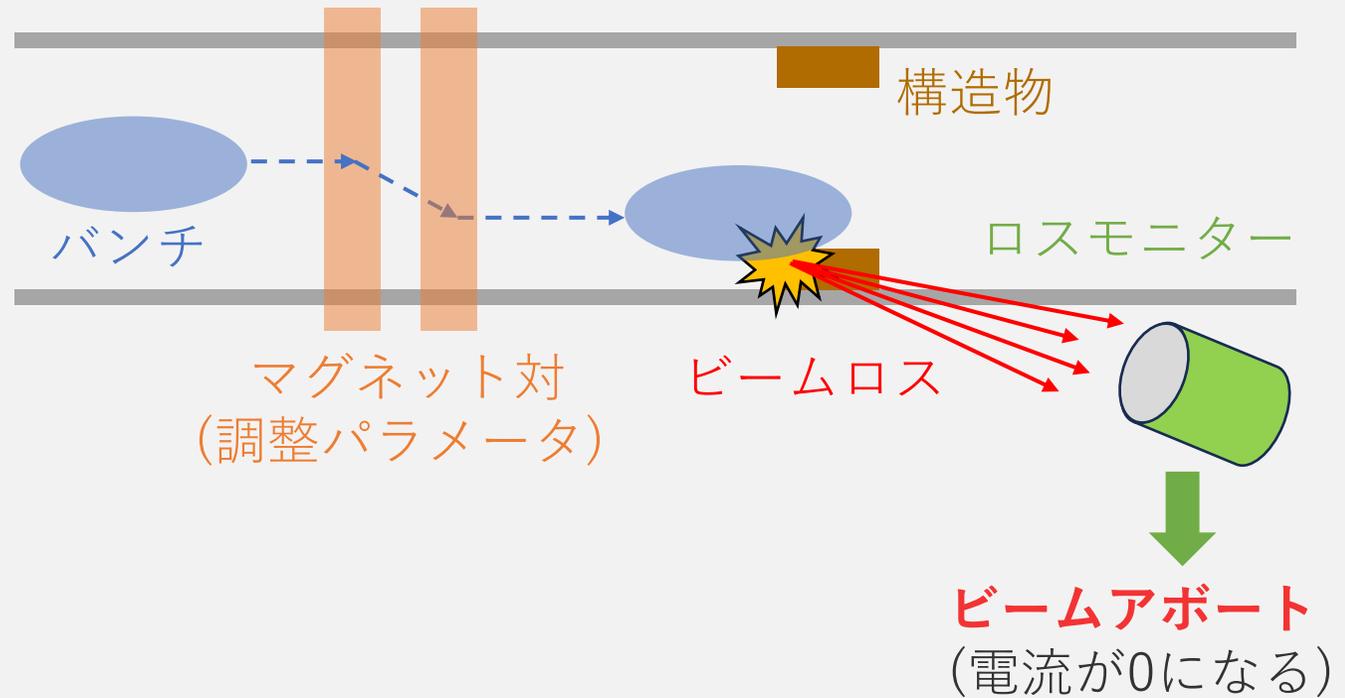


入射  
効率

調整パラメータと入射効率の関係に長期的な再現性がなく、過去のデータを参照できない。

## 課題2：ビームアバート

不適切なマグネットの調整をしてしまった場合

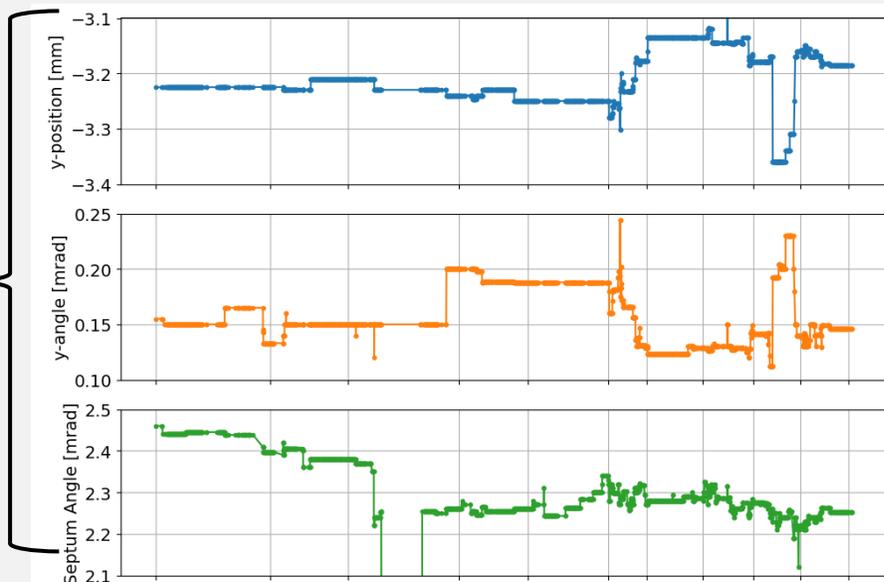


パラメータ空間を自由に探索することはできない。

# 入射調整の自動化に対する課題

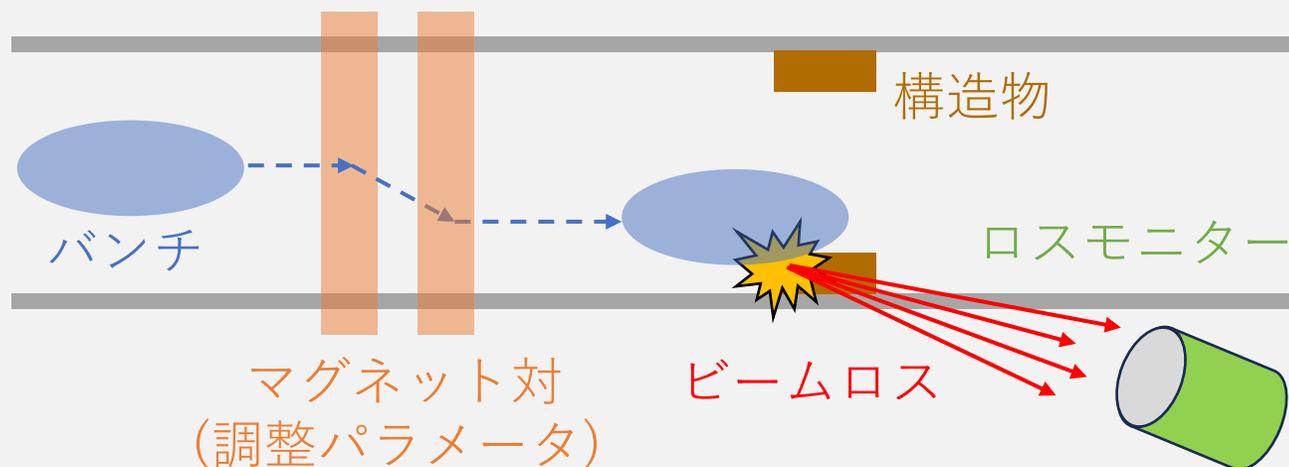
## 課題1：長期的な入射効率の変動

入射調整  
パラメータ



## 課題2：ビームアバート

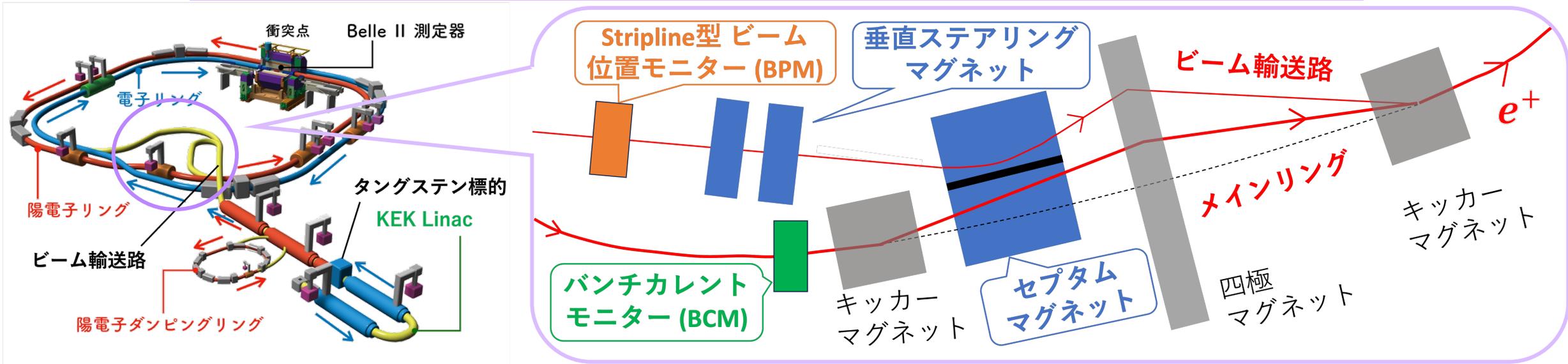
不適切なマグネットの調整をしてしまった場合



上記の課題に留意した入射調整ツールを作成する。ツールの**目標**は……

- 1. 入射効率の向上：**過去のデータを用いずに入射効率を向上させる。
- 2. 安全性の確保：**ビームアバートを引き起こさず、安全性を担保する。
- 3. 利便性：**オペレータが簡便に操作できる。

# SuperKEKB入射調整



以下のパラメータで機械学習を用いた入射調整を行う。

## ■ 調整パラメータ (3パラメータ)

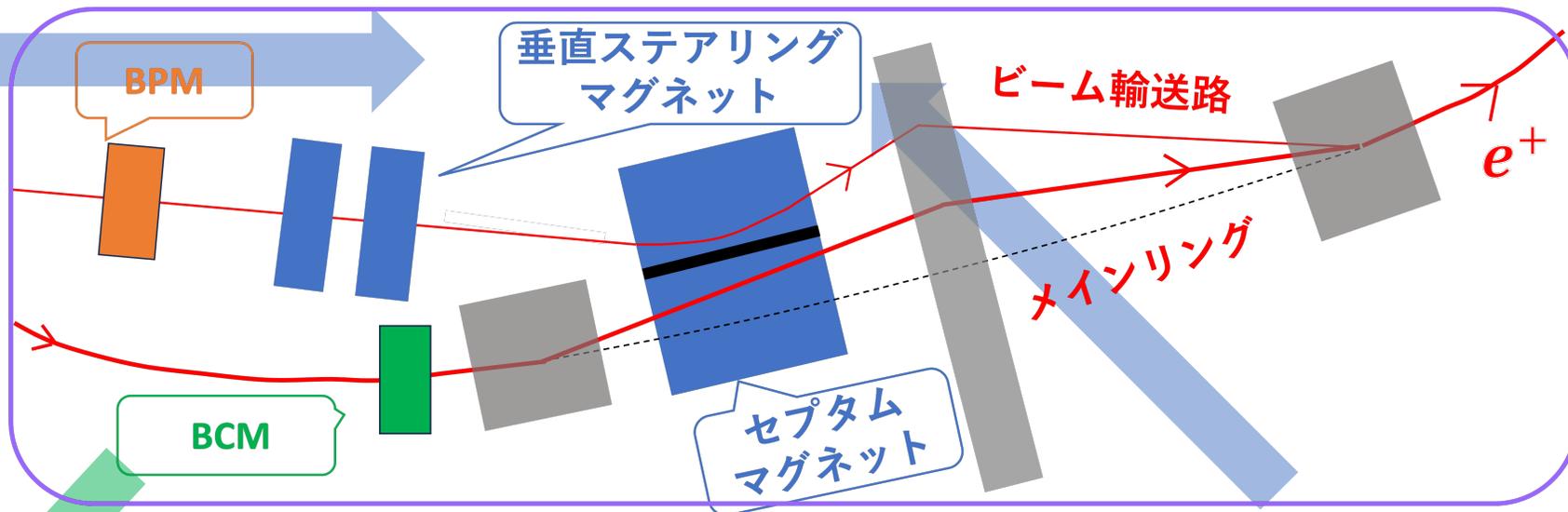
- ① y-position[mm]
  - ② y-angle[mrad]
  - ③ Septum Angle[mrad]
- 垂直ステアリング  
マグネットの変数
- セプタム  
マグネットの変数

## ■ 評価パラメータ

$$\text{入射効率} = \frac{\text{リングで増えた電流(BCMで測定)}}{\text{リングに入れる電流(BPMで測定)}}$$

# 機械学習（ベイズ最適化）による入射調整

① マグネットの  
パラメータに  
初期条件を与える

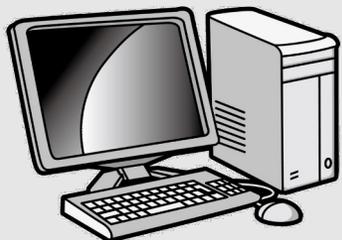


① 入射効率  
を記録

①~③を繰り返す  
(1トライアルと呼ぶ)

③ パラメータ  
を再設定

ベイズ最適化



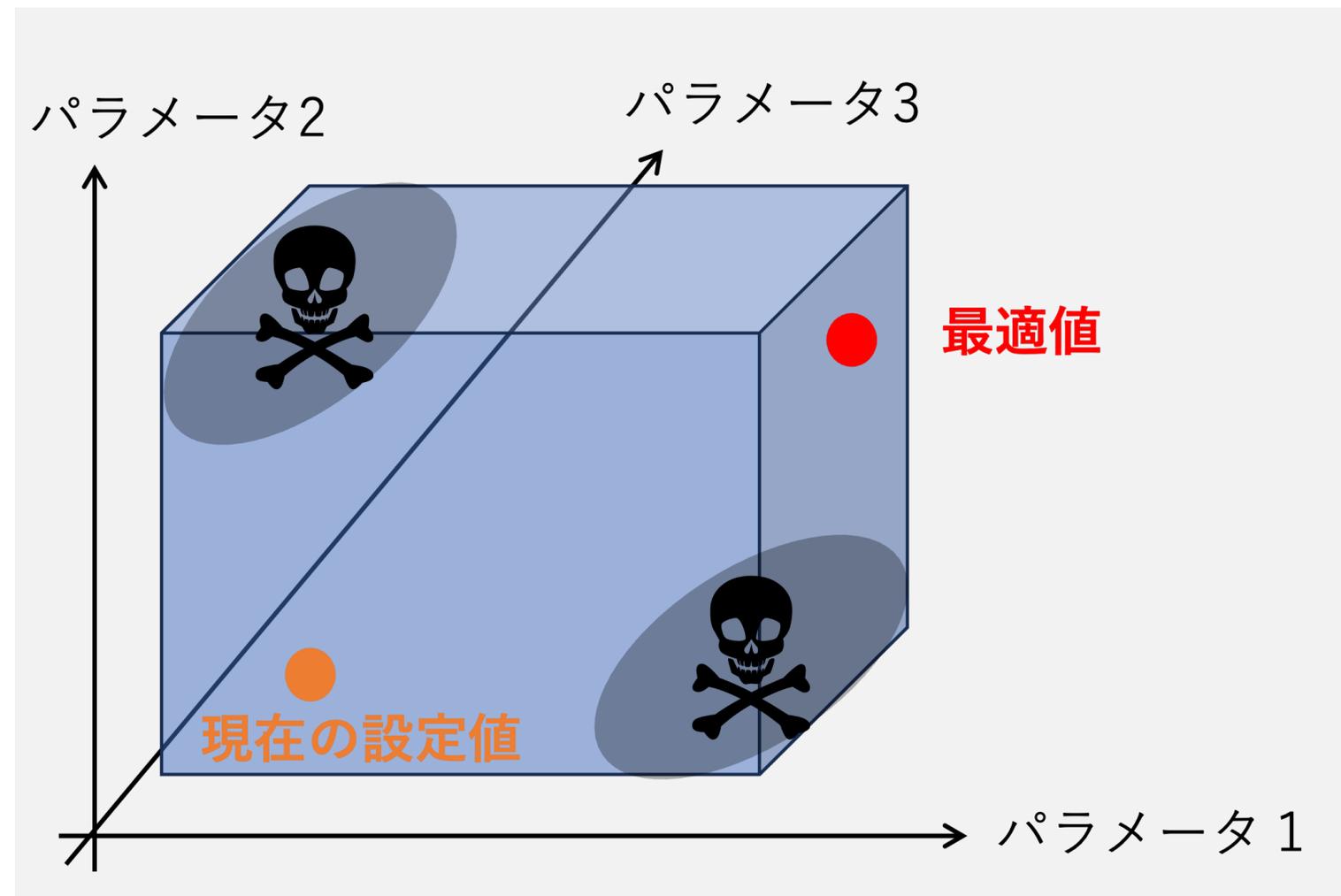
データを更新  
初期条件  $\theta_0 \sim \theta_n \leftrightarrow E$   
トライアル1  $\theta'_0 \sim \theta'_n \leftrightarrow E'$   
⋮  
⋮  
⋮

予測分布  
を更新

② 入射効率を最大化  
するマグネットの  
パラメータを推定

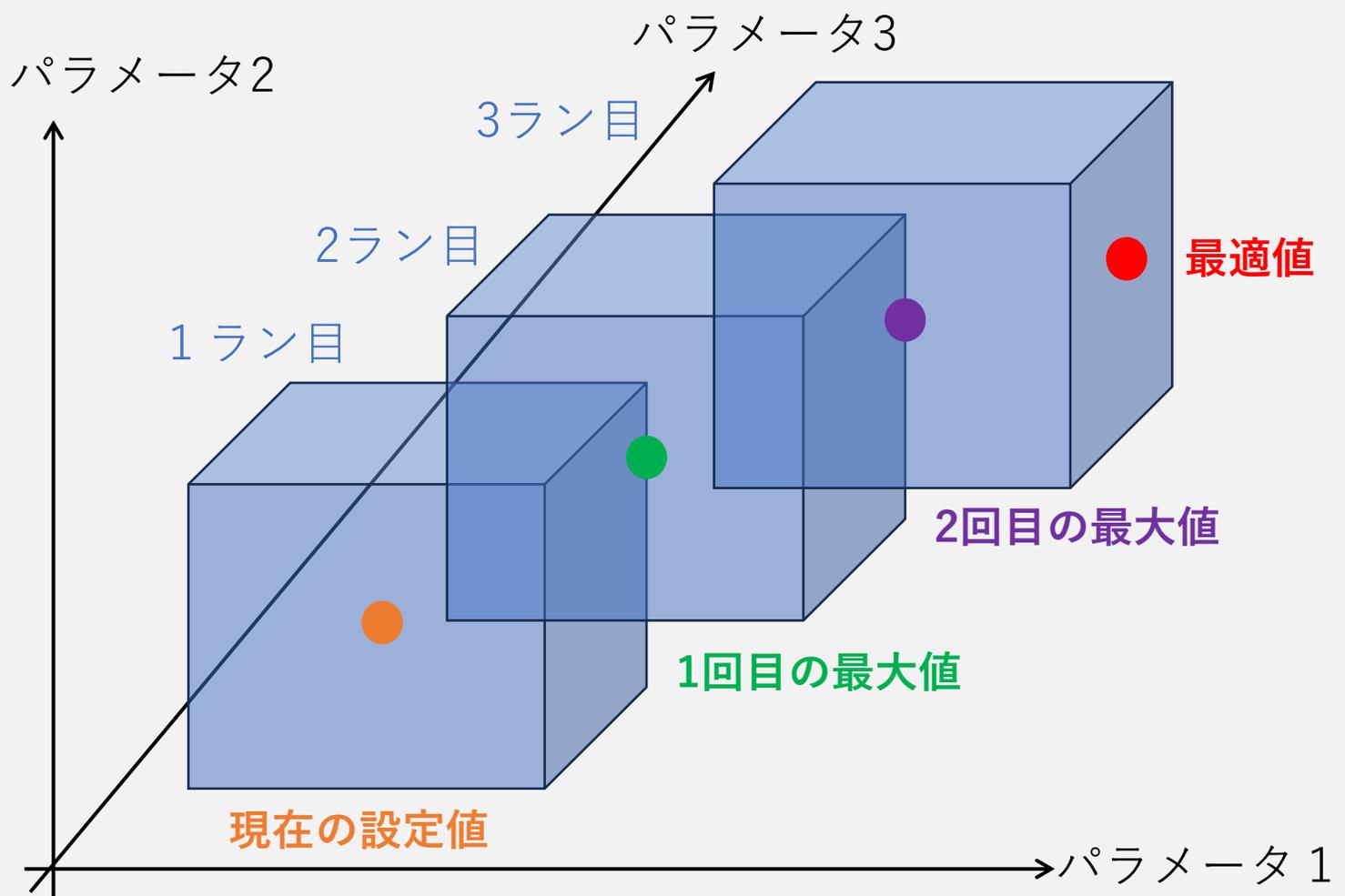
# 安全な最適化のための手法

定義域を大きくとるとビームロスの多い領域が含まれてしまう



# 安全性確保のための最適化手法

## 小分け最適化



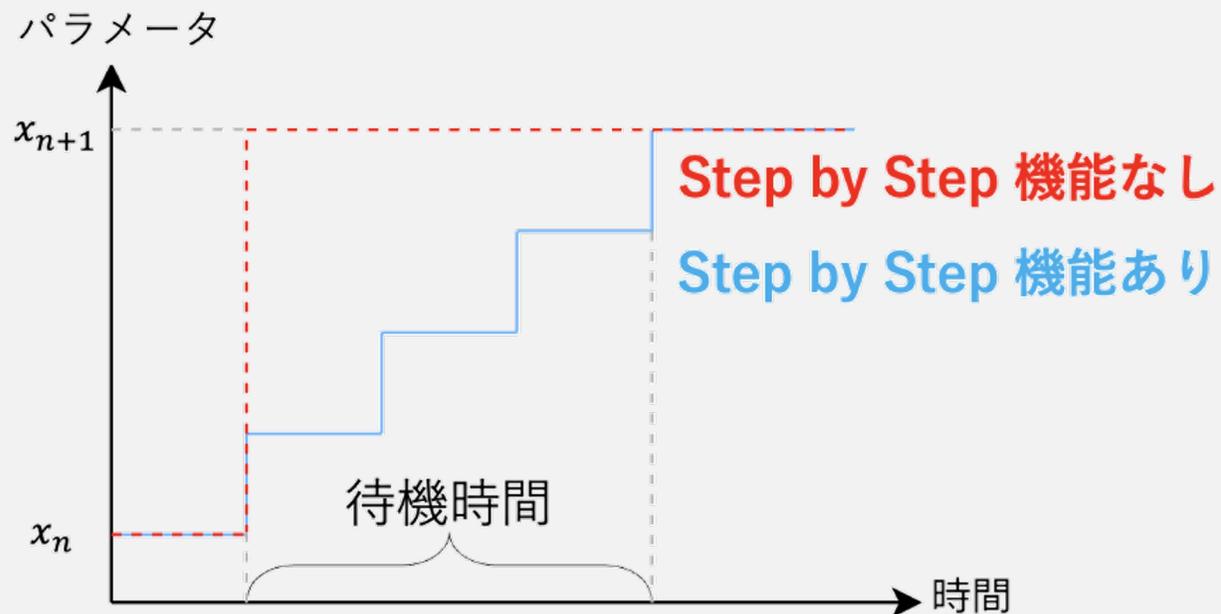
- ビームアバートを避けるため、現在の設定値を中心に小さな定義域で最適化を繰り返す手法
- 入射効率が良い方向に定義域を伸ばしていく。

# 安全性確保のために必要な機能の実装

- パラメータの急激な変動はビームアボートを促す。
- 下記の機能を導入することでアボートを回避し、最適化時間を短縮できる。

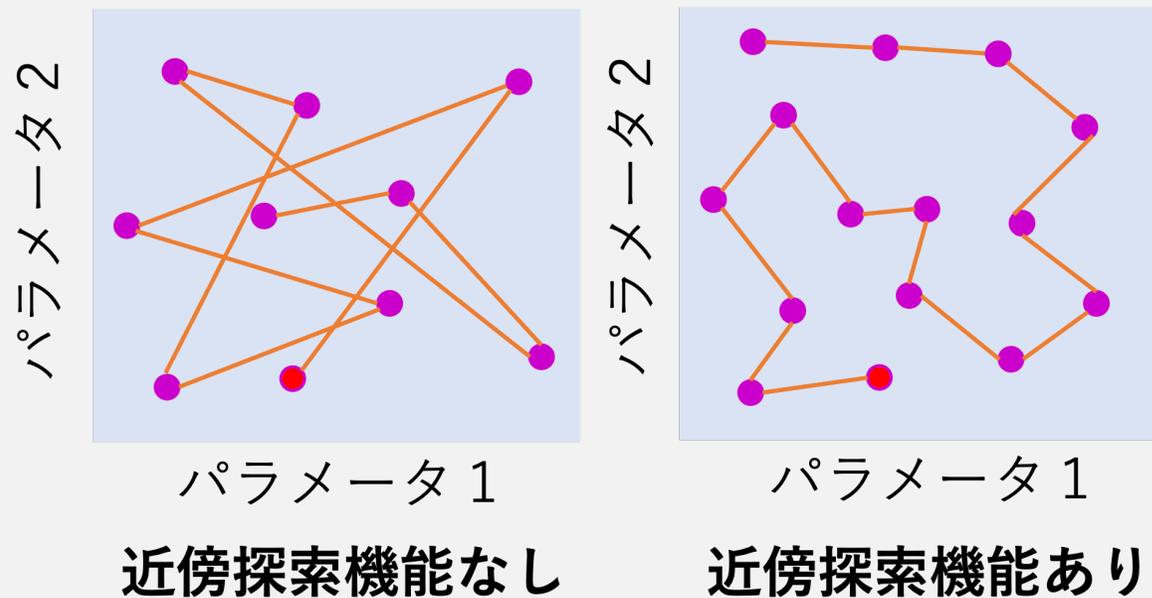
## ■ Step by Step機能

→待機時間は増えるがパラメータの変化幅を小さくできる。



## ■ 近傍探索機能

→Step by Step機能で生じた待機時間を削減することができる。



# 利便性向上のためのGUIの作成

入射調整を簡便に行うことができるツールのGUIを開発した。

The screenshot displays a software interface with three tabs: 'Main Settings', 'Expert Settings 1', and 'Expert Settings 2'. The 'Main Settings' tab is active and contains three sections:

- Parameter settings:** A table with columns for 'Enable/Disable', 'Parameter', 'Present value', 'Min', and 'Max'.

Enable/Disable	Parameter	Present value	Min	Max
<input checked="" type="checkbox"/>	y-position	1.301e-03	1.290e-03	1.310e-03
<input checked="" type="checkbox"/>	y-angle	-1.760e-05	-3.000e-05	-1.000e-05
<input checked="" type="checkbox"/>	Septum angle	8.706e-01	8.600e-01	8.800e-01
- Initialization settings:** Includes buttons for 'Set' and 'Load', and input fields for 'ntrial' (40.0), 'ninit' (10.0), and a file path: '/home/skboper/MLTool/Kato/MLSuperKEKB/Injection/ini/Initialization\_HER.i'. A 'Save' button is also present.
- Optimization buttons:** A row of buttons including 'Start', 'Pause', 'Resume', 'Set the best and Finish', and 'Quit'.

SuperKEKB制御システムに実装済

# 運用のセットアップ

2024年11, 12月にLER ( $e^+$ リング) で21ラン、 HER ( $e^-$ リング) で19ランを運用した。

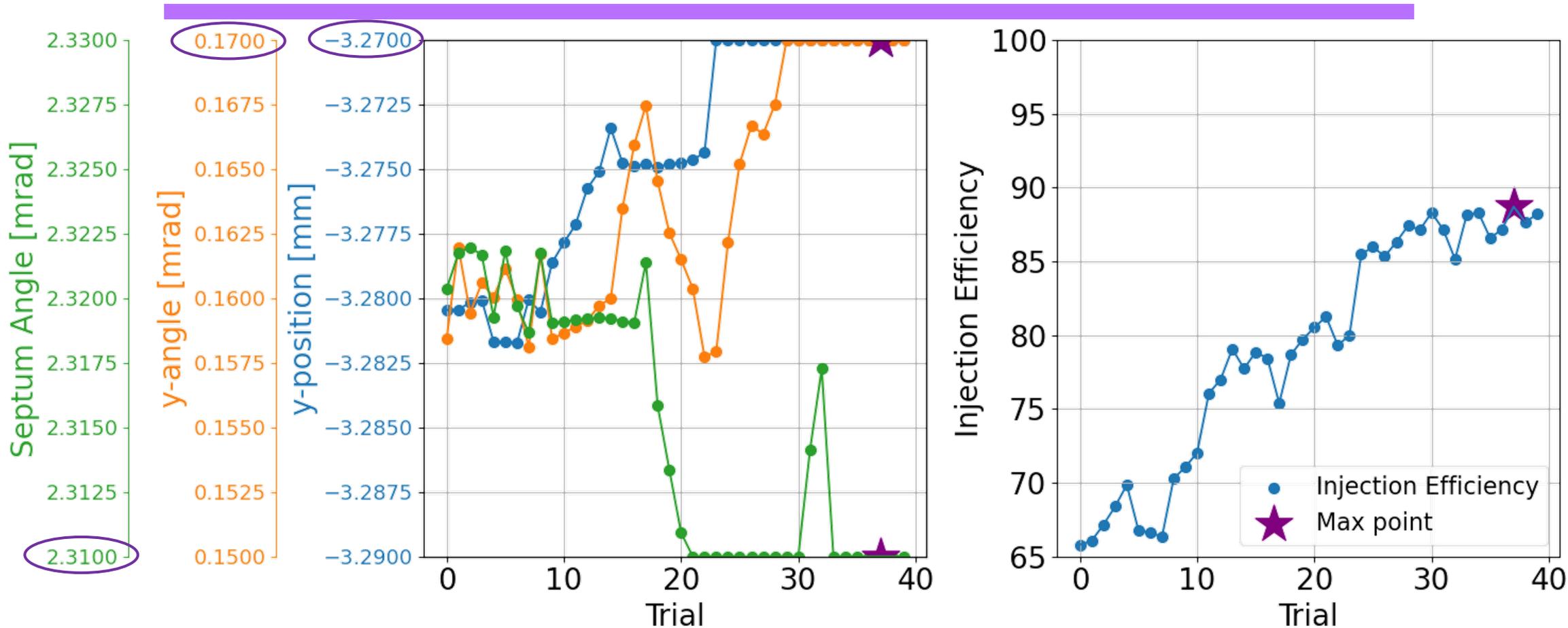
## 共通条件

- 40トライアル (初期条件: 10トライアル + 最適化: 30トライアル) を1ランとする。
- 初期条件は定義域の上下10%内でランダムに生成した点を用いた。
- ほとんどのランはビーム衝突運転中 (Belle II データ取得時) にて入射調整を行なっている。
- 1ランにかかる時間は25分程度である。

調整パラメータ	y-position	y-angle	Septum Angle
1秒あたりに動かす幅	0.0015 mm	0.0015 mrad	0.0015 mrad
1ランの定義域の幅	$\pm 0.01$ mm	$\pm 0.01$ mrad	$\pm 0.01$ mrad

手動調整での変化幅  
は $\pm 0.02 \sim 0.03$ ぐらい

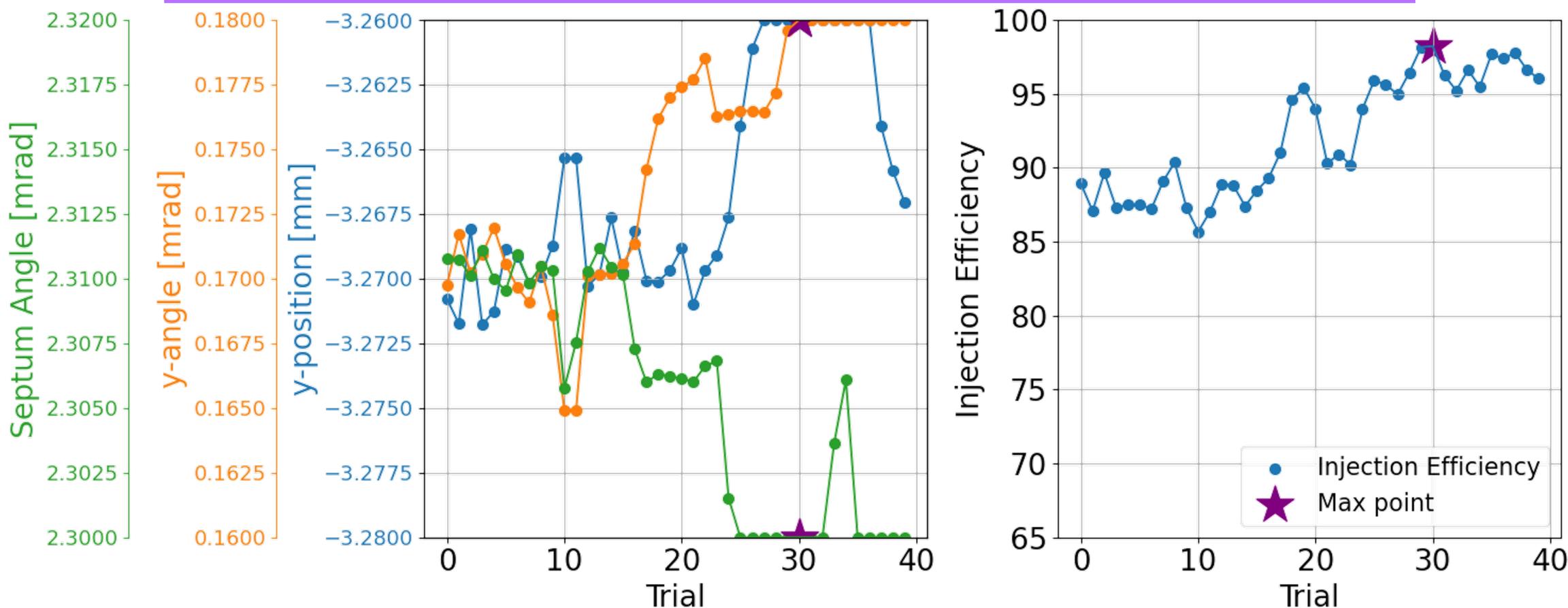
# 運用の一例 (12月5日 $e^+$ リング最適化 1ラン目)



トライアルごとのパラメータ変化と入射効率 (1ラン目)

**入射効率が66% → 88%に向上した**

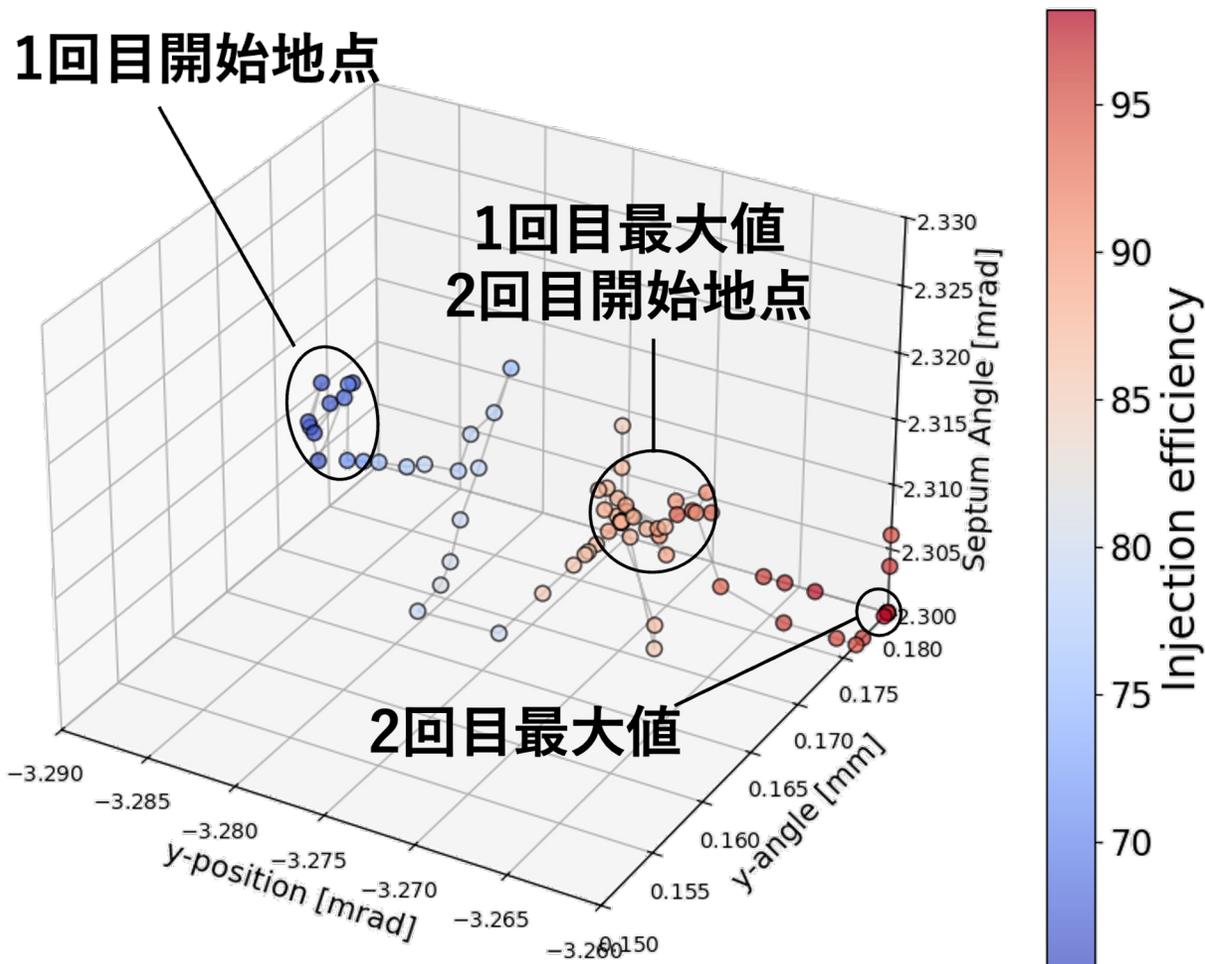
# 運用の一例 (12月5日 $e^+$ リング最適化 2ラン目)



トライアルごとのパラメータ変化と入射効率 (2ラン目)

**入射効率が88% → 98%に向上した**

# 運用の一例 (12月5日 $e^+$ リング最適化)



2回のランを合計した3次元プロット

- 2回のランで入射効率が66%→98%に向上した。
- 入射効率の向上によって蓄積電流が増大し、瞬間ルミノシティも向上した。

LER 蓄積電流	HER 蓄積電流	瞬間ルミノシティ
1000 mA	800 mA	$2.01 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
1300 mA	1140 mA	$3.44 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

全21ラン

# 運用実績 (LER)

入射効率の測定の  
標準偏差は2.3%

番号	測定日	最適化回数	調整前/後 入射効率	入射効率 向上量
1	11月15日	2	86.3% / 90.8%	4.5%
2	12月05日	3	65.8% / 98.2%	<b>32.4%</b>
3	12月06日	2	71.9% / 76.9%	5.0%
4	12月11日	3	61.7% / 64.4%	2.7%
5	12月13日	5	77.5% / 82.0%	4.5%
6	12月14日	2	69.0% / 77.8%	<b>8.8%</b>
7	12月17日	1	59.8% / 69.1%	<b>9.3%</b>
8	12月25日	3	54.5% / 68.4%	<b>13.9%</b>

8日の運用の内、**4日間は入射効率を有意 ( $3\sigma = 7.0\%$ 以上) に向上させることができた**

全19ラン

# 運用実績 (HER)

入射効率の測定の  
標準偏差は2.5%

番号	測定日	最適化回数	調整前/後 入射効率	入射効率 向上量
1	11月14日	3	59.4% / 70.2%	<b>10.8%</b>
2	11月17日	2	20.7% / 26.8%	6.1%
3	12月07日	9	68.2% / 71.1%	2.9%
4	12月14日	5	58.4% / 68.5%	<b>10.1%</b>

4日の運用の内、**2日間は入射効率を有意 ( $3\sigma = 7.5\%$ 以上) に向上させることができた**

# 運用実績

- LERでの21ラン、 HERでの19ラン、 合計40ランの結果、
  - 両リングにて、実施日のうち半数で有意な向上が確認された。
  - 調整後に調整前よりも入射効率が低くなることはなかった。
  - 入射由来のビームアボートは一回もなかった。
  - 職員やオペレータが単独でGUIを用いて入射調整ツールを運用できた。

**入射効率の向上** : 過去のデータを用いずに入射効率を向上させる能力を有すること。

**安全性の確保** : ビームアボートを引き起こさず、安全性が担保されていること。

**利便性** : オペレータが直感的かつ簡便に操作できること。

**3つの目標を全て達成することができた**

# まとめと展望

## ◆まとめ

- 機械学習（ベイズ最適化）を用いたSuperKEKB加速器の入射調整ツールを開発した。
- 入射調整ツールの運用の結果は、
  - ①両リングの運用の半数において入射効率が有意に向上した。
  - ②入射調整ツールは高い安全性を有する。
  - ③入射調整ツールは利便性を有する。
- **ビーム衝突運転中に機械学習を用いた入射調整は世界で初めての事例である。**

## ◆展望

- 調整パラメータを追加して、最適化性能を向上させる。
- ビームロス値を参照しながら入射効率の最適化を行う。（制限つき最適化）

# Backup

---