

# コンパクトERLにおける中赤外自由 電子レーザー運転のための入射器の 最適化

田中織雅、宮島司、東直 (KEK)

第18回日本加速器学会年会  
2021年8月12日(木) 10:50 ~ 11:10  
オンライン (Zoom)



# 内容

1. 初めに
2. 入射器最適化
  - ターゲット
  - 課題
  - 重要な注意事項
  - 設定
  - 電子銃電圧対ビーム性能
  - 初期レーザー時間分布の影響
  - 同時最小化
  - 入射部オプティクスデザイン
3. 設計性能と測定結果の比較
  - バンチャー調整
  - オプティクスマッチング
  - オプティクス調整後のビームプロファイル
  - 測定されたビームサイズ
4. まとめ

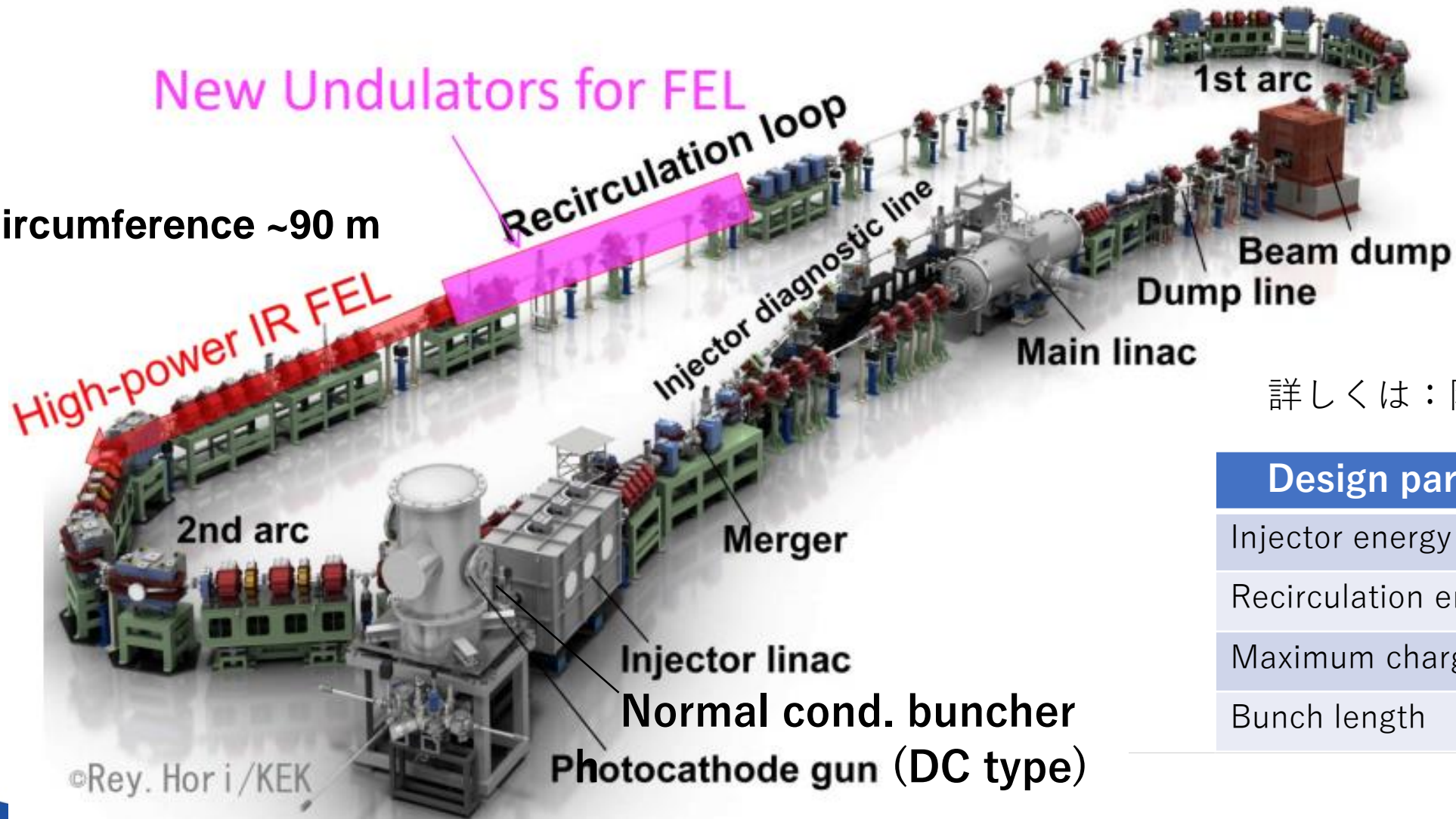


はじめに

cERLを利用した中赤外自由電子レーザー

New Undulators for FEL

Circumference ~90 m

詳しくは：阪井寛志@[MOPOA04](#)

## Design parameters of the cERL

Injector energy	5 MeV
Recirculation energy	17 - 20 MeV
Maximum charge current	60 pC
Bunch length	1-3 ps

©Rey. Hor i / KEK



# 内容

## 1. 初めに

## 2. 入射器最適化

- ターゲット
- 課題
- 重要な注意事項
- 設定
- 電子銃電圧対ビーム性能
- 初期レーザー時間分布の影響
- 同時最小化
- 入射部オプティクスデザイン

## 3. 設計性能と測定結果の比較

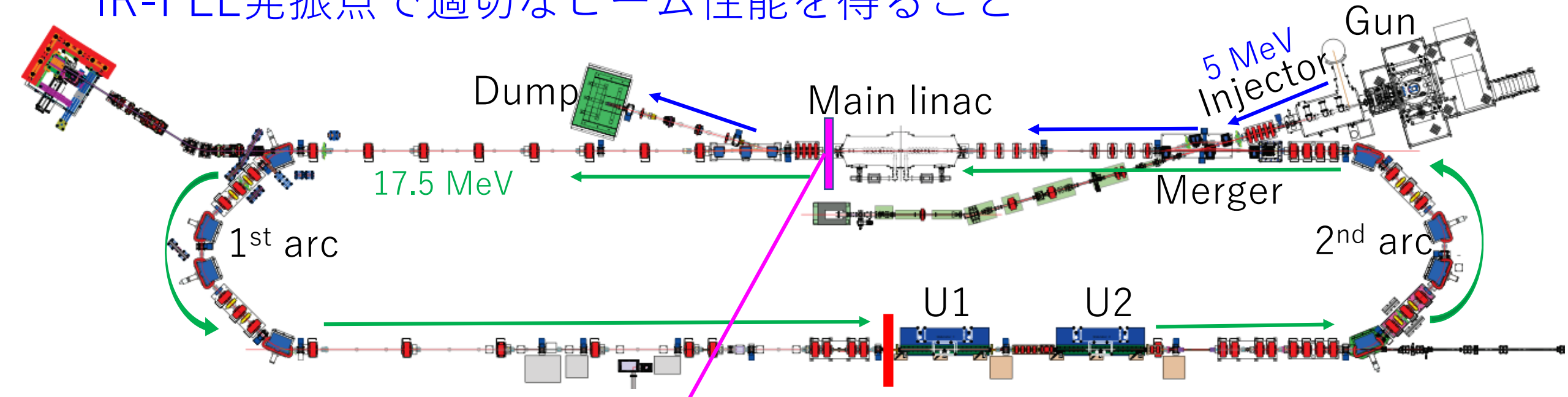
- バンチャー調整
- オプティクスマッチング
- オプティクス調整後のビームプロファイル
- 測定されたビームサイズ

## 4. まとめ



# 入射器最適化

- 目標: 空間電荷効果が支配的な入射器における最適化を行って、IR-FEL発振点で適切なビーム性能を得ること

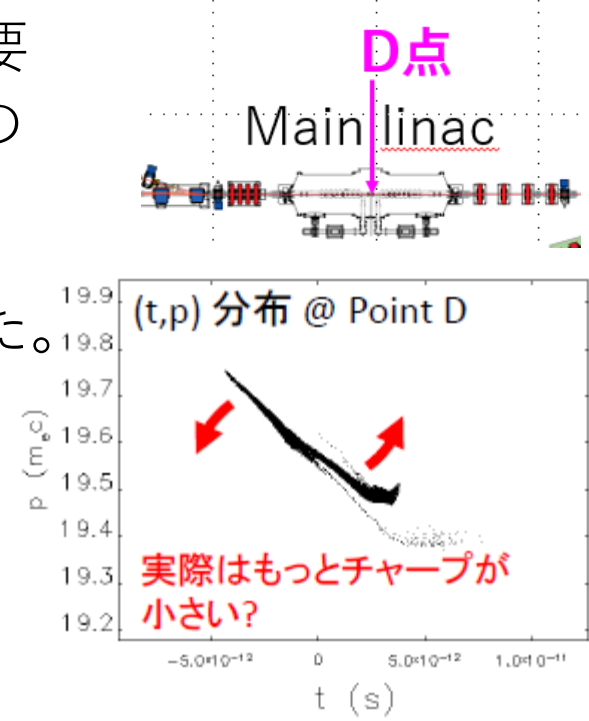


- Target beam performance at the Main linac exit:
  - Bunch charge : 60 pC
  - Bunch length : 2 ps (rms) (The bunch is compressed in the first arc section.)
  - Energy spread : 0.1%
  - Norm. rms emittance :  $< 3 \pi$  mm mrad
- Required beam performance at the U1:
  - Bunch charge : 60 pC
  - Repetition rate : 1.3 GHz
  - Bunch length : 0.5 – 2 ps (FWHM)
  - Energy spread : 0.1%
  - Norm. rms emittance :  $3 \pi$  mm mrad

# THOB03 入射器最適化

2020年6月と2021年2月～3月の課題

- 入射器のビーム性能：500 kV DCガンの安定した高加速電圧供給が重要
- 課題 1**：2020年11月の誤操作によるトラブルにより、光電面DCガンの電圧が480kV低下した。 **それでも必要なビーム性能を達成できるか？**
- 課題 2**：以前の運転では **バンチ長と横方向エミッタンスの同時最小化** に基づくビーム輸送条件を使用した。FEL光の生成には不十分だった。  
⇒ FEL発振には進行方向ダイナミクスがより重要
  - 今回：バンチ長と縦方向のエミッタンスの最小化に切り替える。**
- 追加のタスク：初期レーザー時間分布の影響を調査
  - 以前の運転：モデルで単一のガウスを使用
  - 今回の運転：7つのガウスパルスのスタック

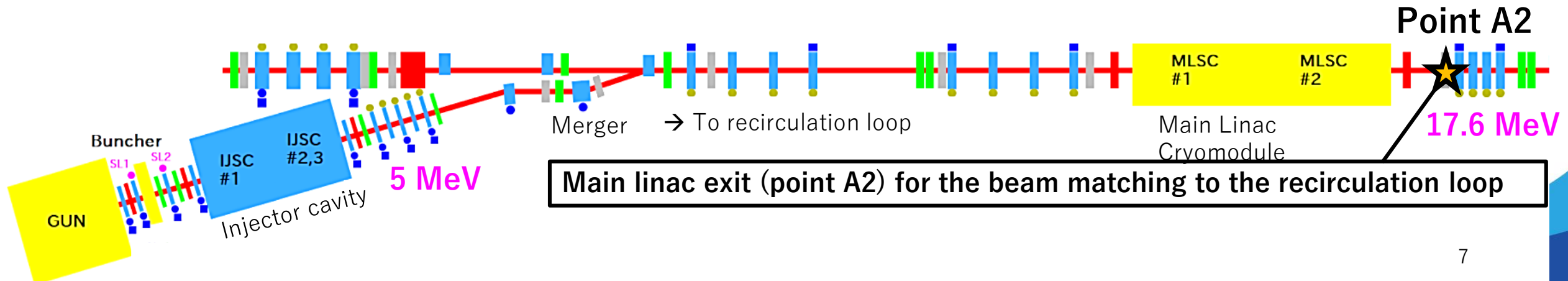


	Jun. 2020 operation	Feb.-Mar. 2021 operation
Electron gun voltage	500 kV	480 kV
Optimization objective	Simultaneous minimization of bunch length and <b>transverse emittance</b>	Simultaneous minimization of bunch length and <b>longitudinal emittance</b>
Initial laser dist.	40 ps FWHM single Gaussian	40 ps FWHM flat-top

# 入射器最適化

## 重要な注意事項

- 入射部と周回部を接続する**マッチングポイント**（A2点）が主空洞（MLSC）の後にあるのはなぜか？
  - 空間電荷効果の影響は、17.6 MeVの点周回部エネルギーで小さいため（入射エネルギーは5 MeVであることに注意）
- なぜ点A2で**粒子分布**を確認するのか？
  - これは、一貫したS2Eシミュレーションを可能にするため。
  - cERLのさまざまなコンポーネントは、さまざまなコード（GPT、ELEGANT、Genesisなど）でシミュレート
  - 加速器モデルと実際のマシンの間のギャップを小さくするため、より良いトラッキングの初期分布が欠かせない



# THOB03 入射器最適化 セットアップ

- 入射器最適化: General Particle Tracer (GPT) with Multi Objective Genetic Algorithm (MOGA)
- Objectives: 主空洞 (MLSC) の出口で、バンチ長さ と 縦方向エミッタンス を同時に最小化。
- MOGAの最適化パラメーター (13変数) は、下のラットェイスにマゼンタで示されている。

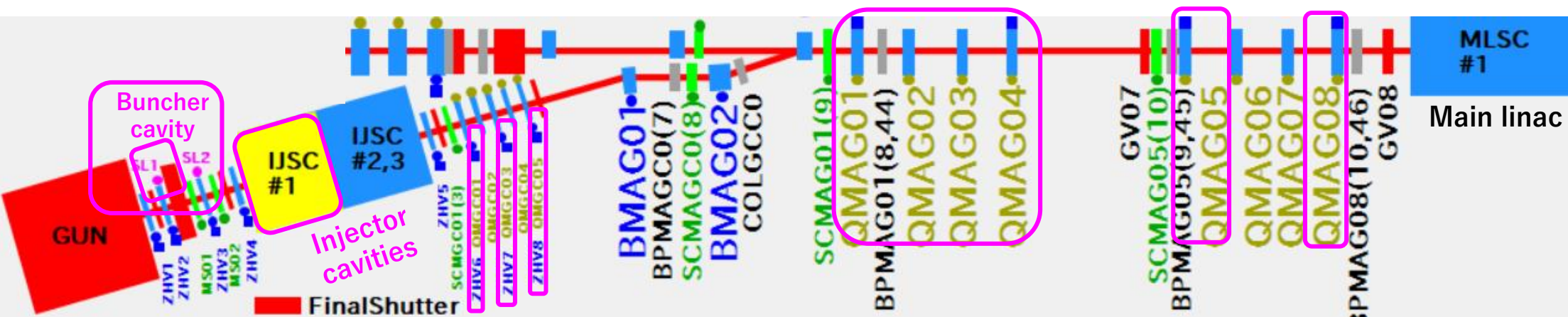
## Constraints

**RMS bunch length**  $< 1.8$  ps

**Transverse rms emittance**  $< 3.0 \pi$  mm mrad

**Betatron function**  $\beta_x < 8.0$  m;  $\beta_y < 20.0$  m

**Alpha function**  $-2.0 < \alpha_x < 0.0$ ;  $-0.5 < \alpha_y < 0.5$

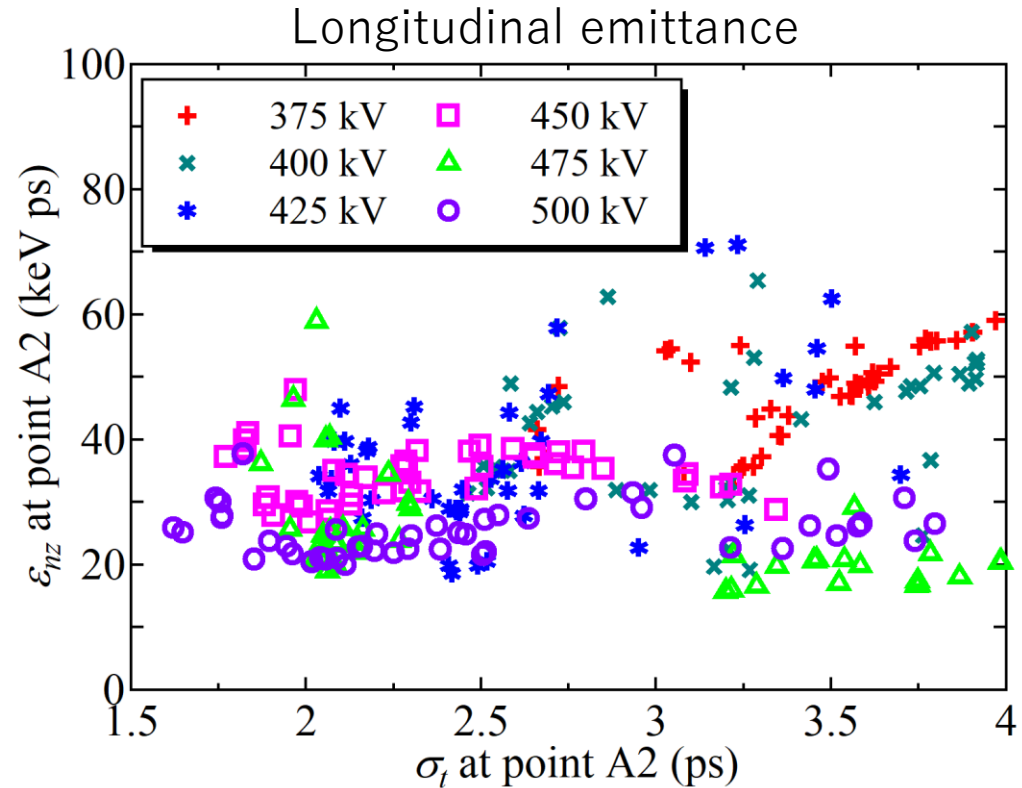
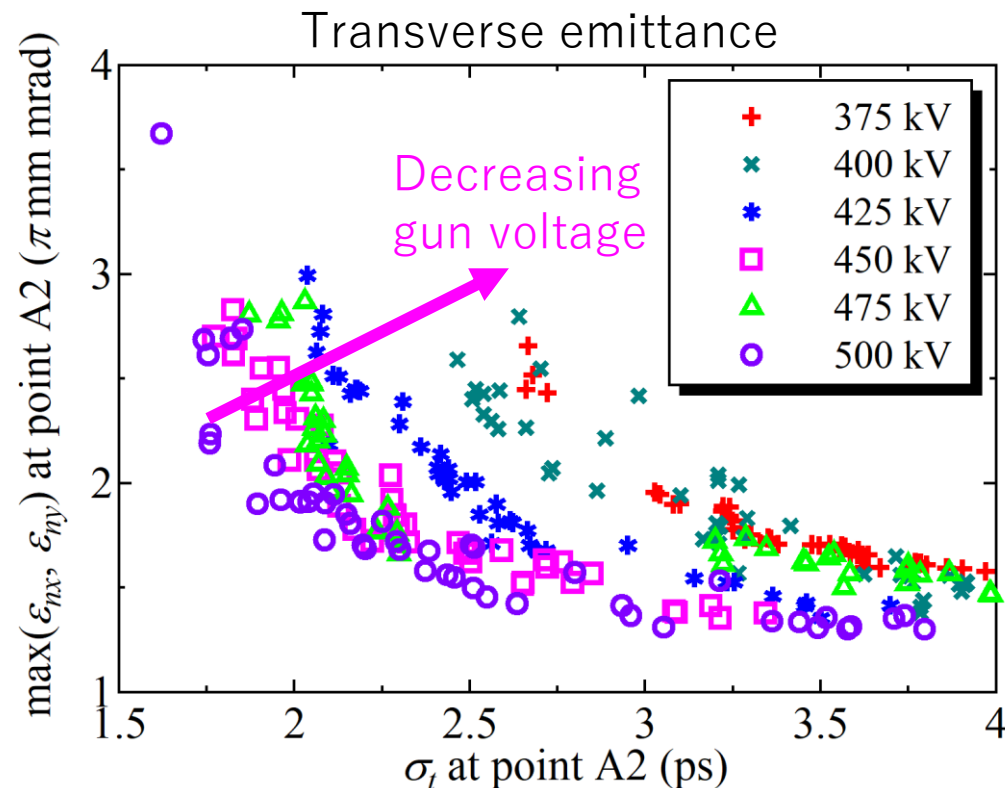




# 入射器最適化

## 電子銃電圧とビーム性能

- 電子銃電圧が400kVに低下すると、主空洞出口におけるビーム性能はどれくらい悪化するか？
- 最適化により、450～500kVの範囲のガン電圧でビーム性能に大きな違いは見られなかった。
- ただし、425 kV未満の電圧では、短いバンチ長を維持できなくなる（空間電荷効果）
- 電子銃の調整結果を考慮して、電子銃の運転電圧を**480kV**と決めた

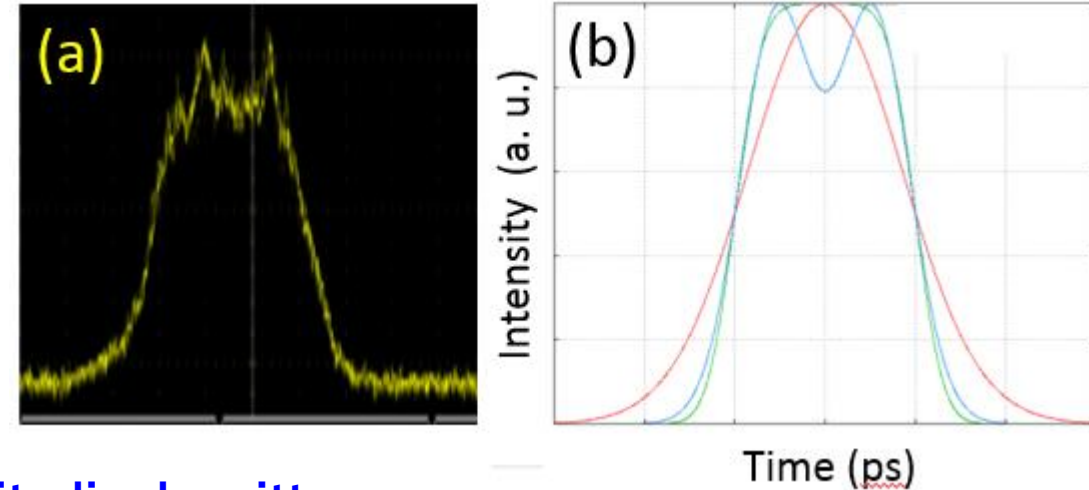


# 入射器最適化

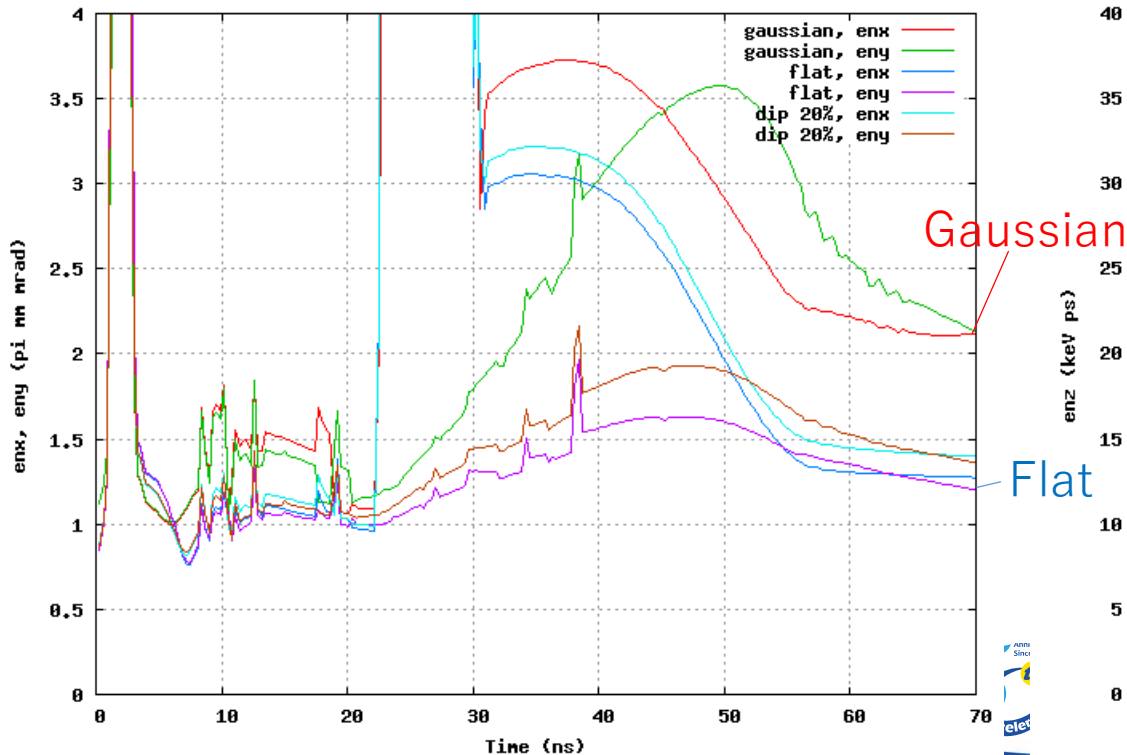
## 初期レーザー時間分布の影響

- シミュレーションで実際のレーザー時間構造を再現するために、3つ分布を調査：
  - 40 ps FWHM single Gaussian;
  - 40 ps FWHM flat;
  - 40 ps FWHM flat with 20% dip.

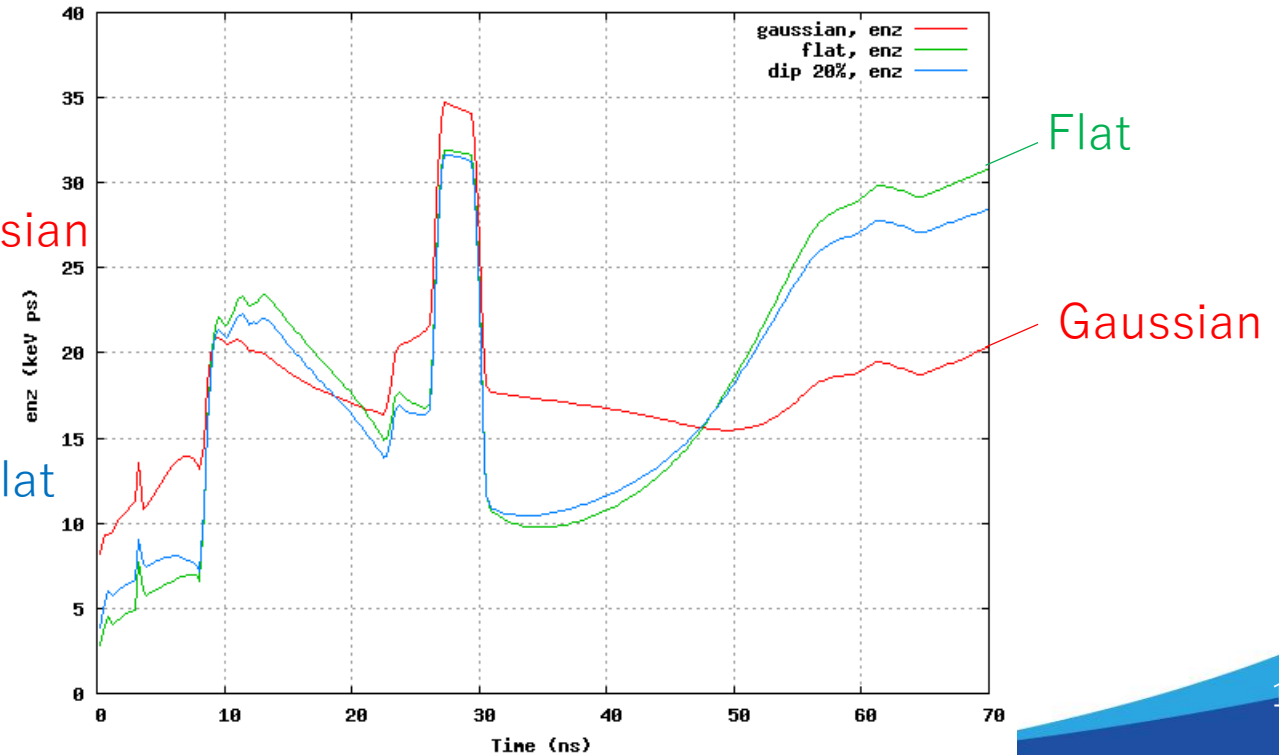
### Real laser pulse



### Transverse emittance

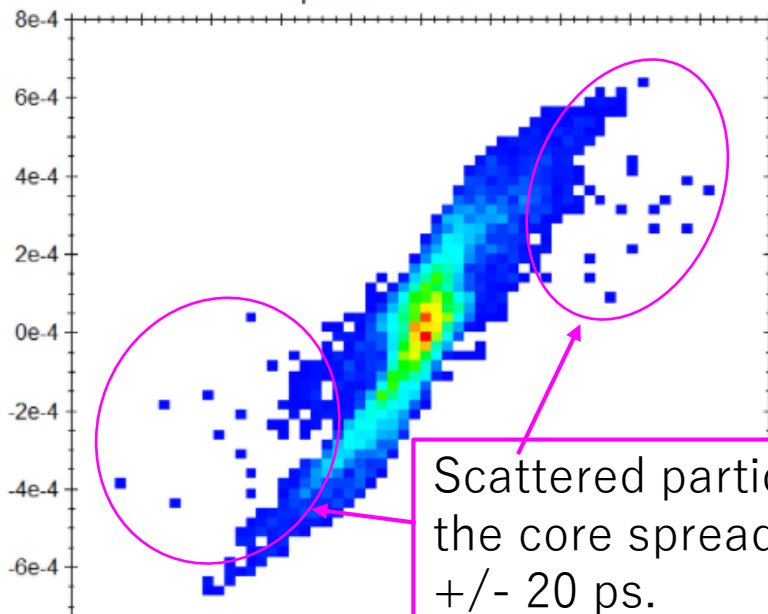


### Longitudinal emittance



Gaussian distribution, FWHM 40 ps, 2.0 ps at point A2

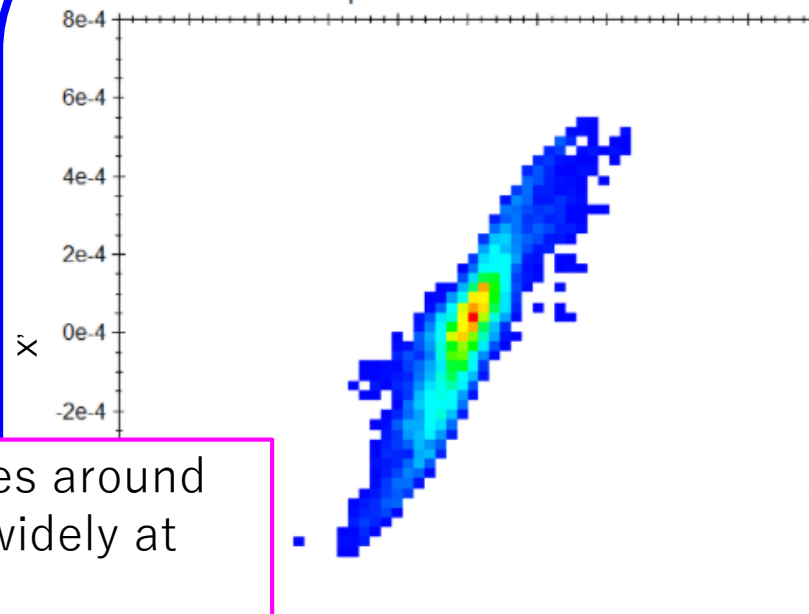
position=11.705



Scattered particles around the core spread widely at +/- 20 ps.

Flat distribution, FWHM 40 ps, 2.0 ps at point A2

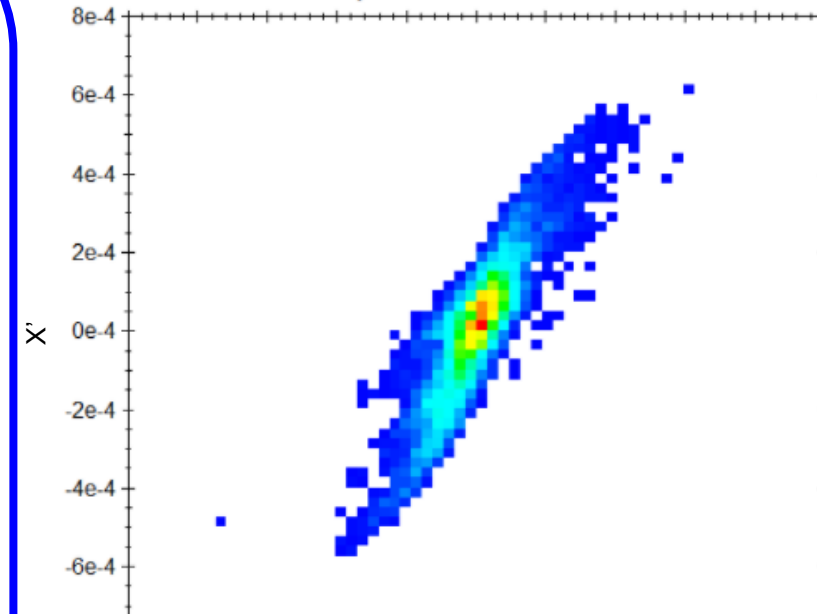
position=11.705



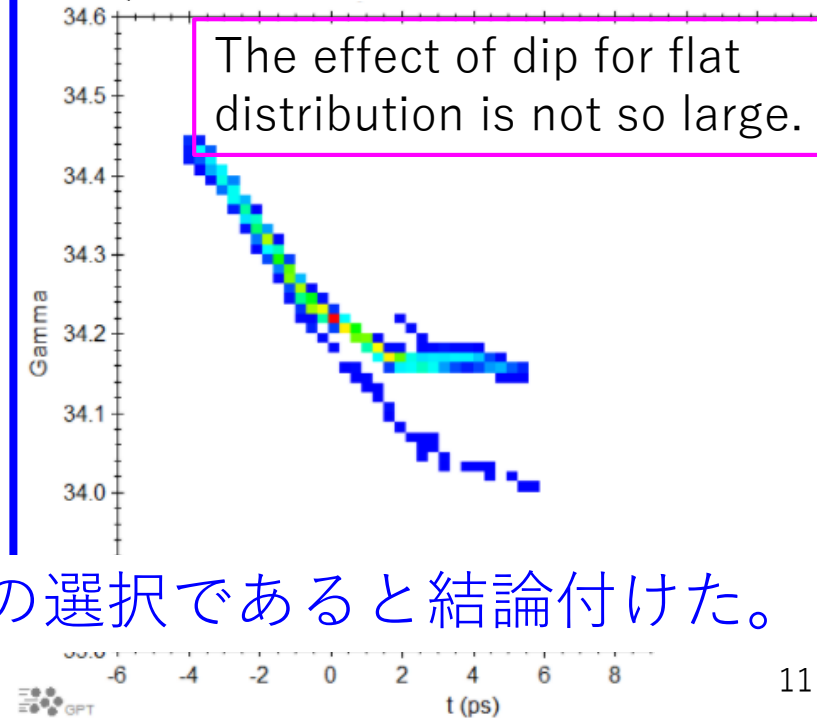
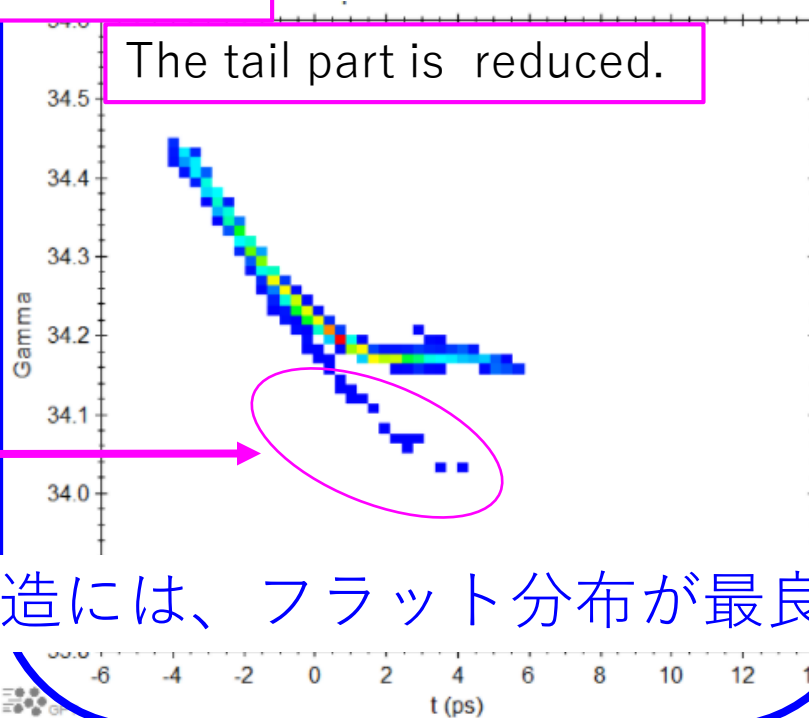
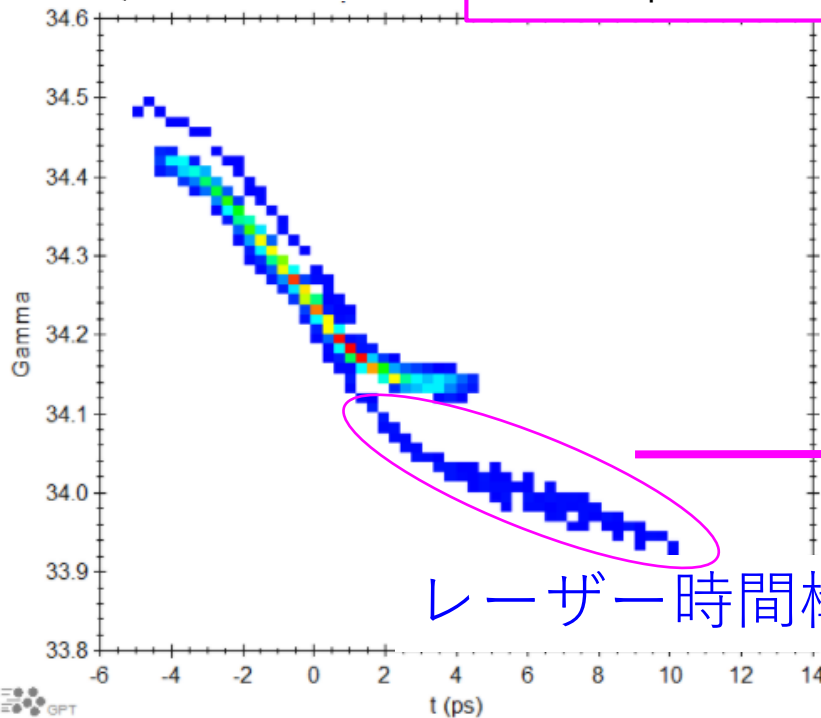
The tail part is reduced.

Flat with 20 % dip distribution, FWHM 40 ps, 2.0 ps at point A2

position=11.705



The effect of dip for flat distribution is not so large.



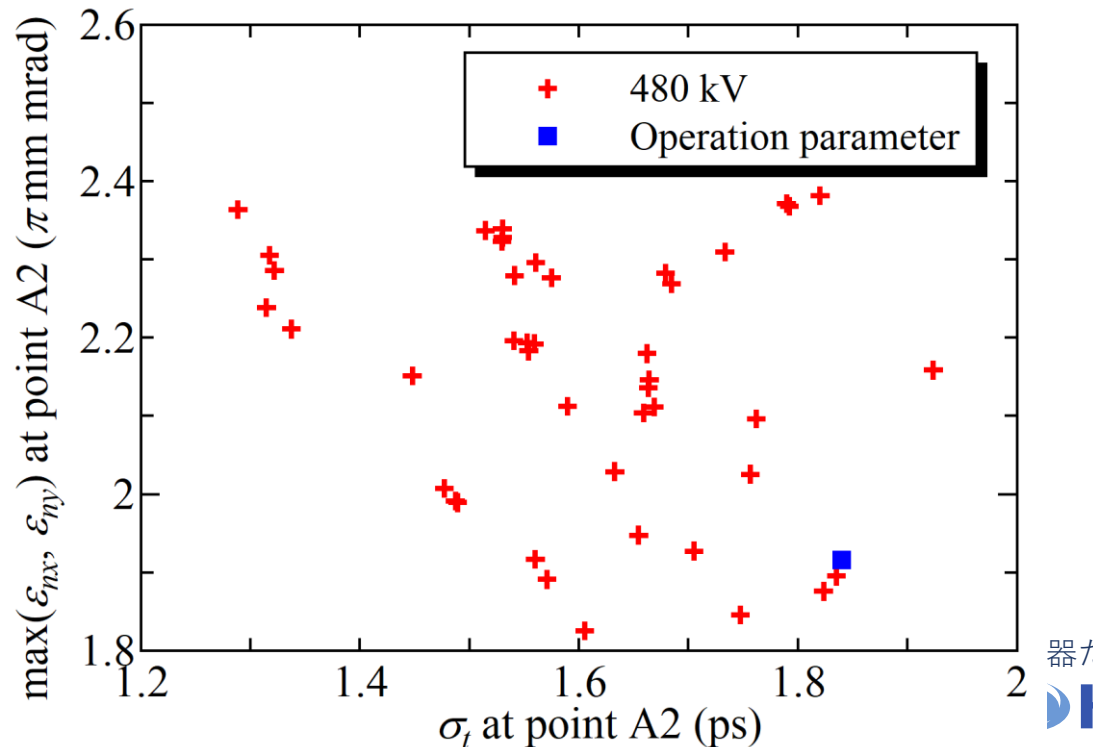
レーザー時間構造には、フラット分布が最良の選択であると結論付けた。

# 入射器最適化

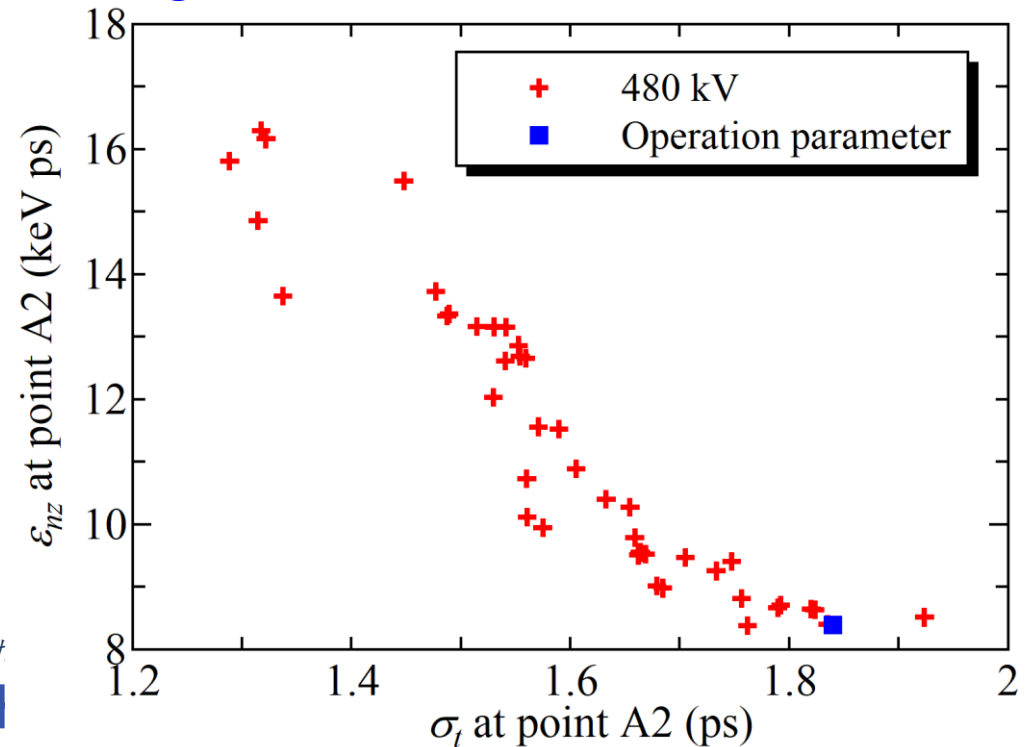
480kVでのバンチ長と縦方向エミッタンスの同時最小化の結果

- Population size: 50個の入射器設定
- 1つの設定から、マッチング点A2におけるバンチ長、横方向エミッタンス、および縦方向エミッタンス等を計算
- **青い四角**：バンチ長は1.8 ps、横方向エミッタンスは $1.9 \pi \text{ mm mrad}$ 、縦方向エミッタンスは8.4 keV ps。

Transverse emittance at the Main Linac exit



Longitudinal emittance at the Main Linac exit



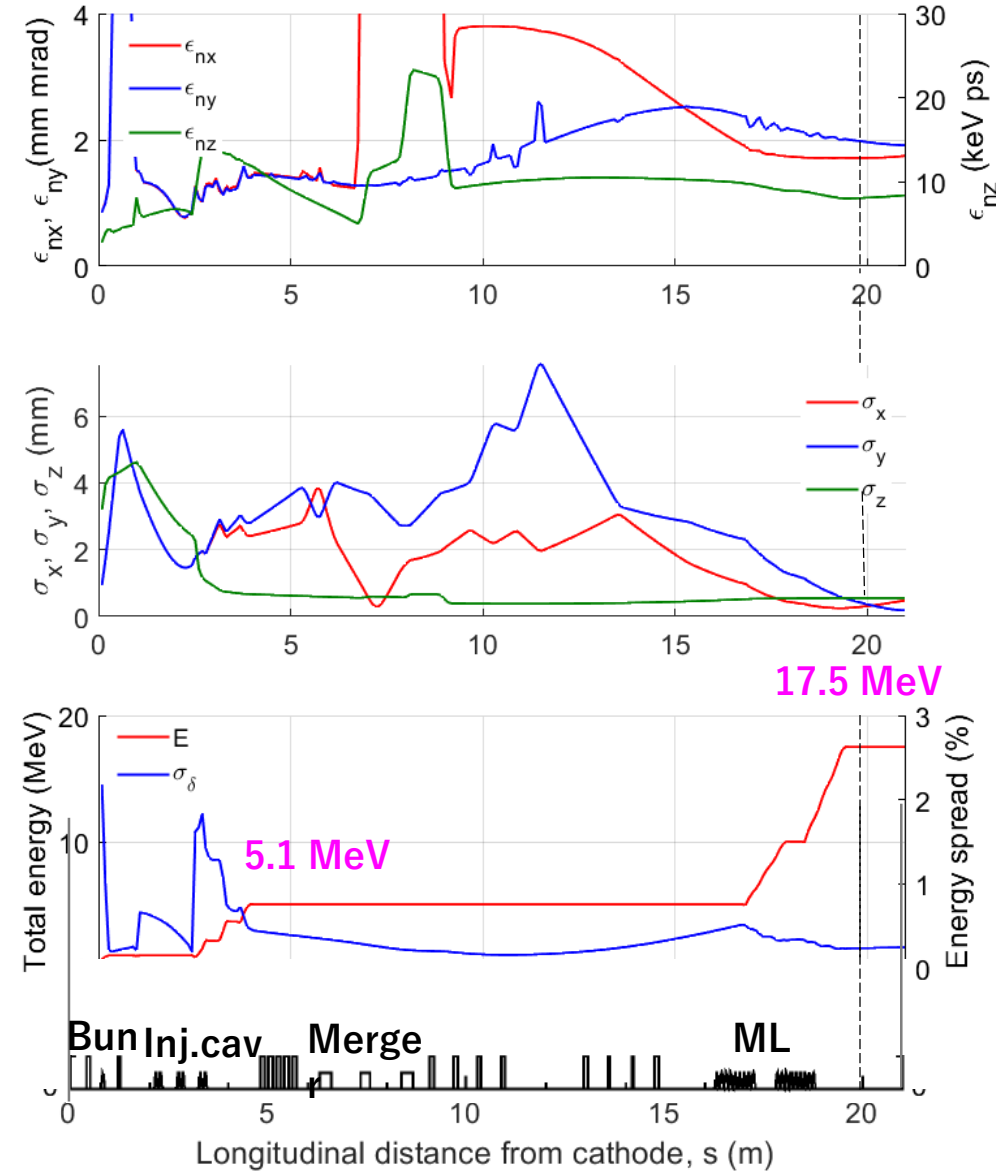


# THOB03 入射器最適化

## 入射器オプティックスデザイン

- 2021年2月～3月の運転パラメータ：
  - Electron gun voltage: 480 kV.
  - Injector energy: 5.1 MeV.
  - Bunch charge: 60 pC.
  - Laser time structure: flat, FWHM 40 ps.
  - Laser XY distribution: radial Gaussian (rms = 1.191 mm) + 2 mm pinhole.
- 主空洞の出口における設計ビーム性能：
  - Normalized rms transverse emittance  $\epsilon_{nx}$ ,  $\epsilon_{ny}$  : 1.74, 1.92  $\pi$  mm mrad.
  - Normalized rms longitudinal emittance  $\epsilon_{nz}$  : 8.4 keV ps.
  - RMS transverse beam size  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  : 0.69, 0.35 mm.
  - RMS bunch length  $\sigma_z$  : 1.8 ps.
  - RMS energy spread : 0.25%.
  - $\beta_x = 4.26$  m;  $\beta_y = 0.61$  m.
  - $\alpha_x = -1.82$ ;  $\alpha_y = 0.16$ .

### Time evolution for FEL production, nps = 10k, Q = 60 pC ML exit



# 内容

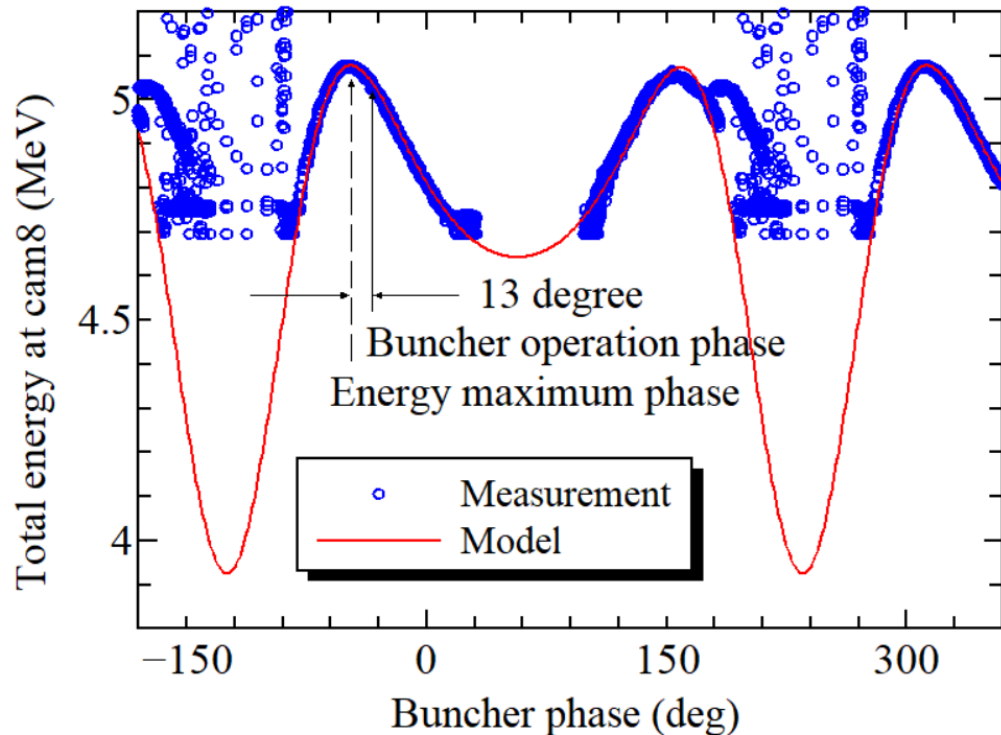
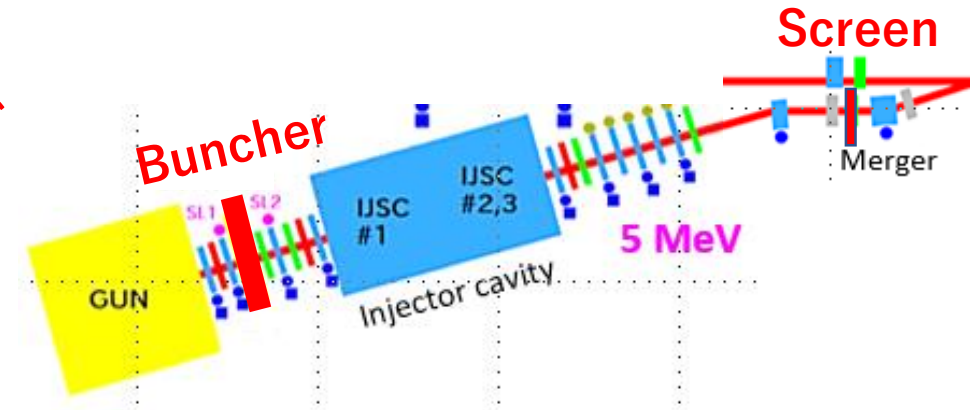
1. 初めに
2. 入射器最適化
  - ターゲット
  - 課題
  - 重要な注意事項
  - 設定
  - 電子銃電圧対ビーム性能
  - 初期レーザー時間分布の影響
  - 同時最小化
  - 入射部オプティクスデザイン
3. 設計性能と測定結果の比較
  - バンチャー調整
  - オプティクスマッチング
  - オプティクス調整後のビームプロファイル
  - 測定されたビームサイズ
4. まとめ



# 設計性能と測定結果の比較

## バンチャー空洞の位相調整

- 注意：入射器の目標は、適切なビームを生成し、IR-FEL光生成のためにアンジュレーター入口に輸送することである。
- 位相調整：空間電荷効果なしの単一粒子の運動で近似できる条件で調整（1pCのバンチ電荷）



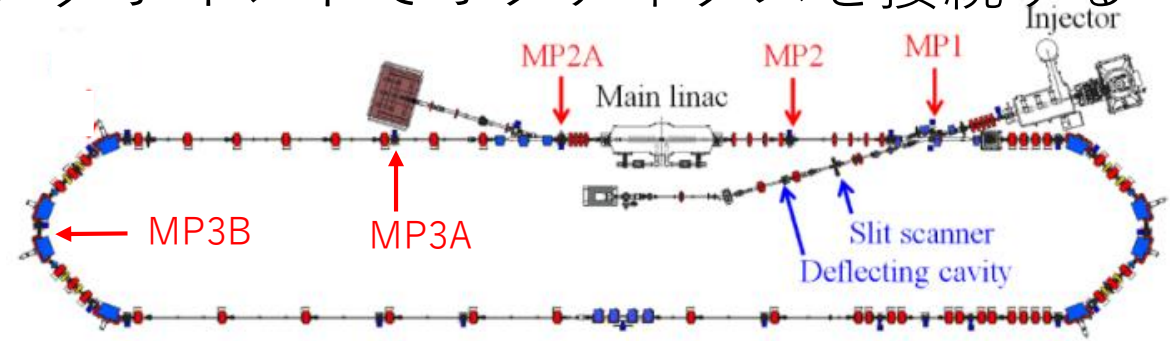
- 縦方向ダイナミクスを調整するために、バンチャー相に対するエネルギー応答を測定した。
- ビームエネルギーは、合流部にあるスクリーンで測定された。
- 加速電圧と位相を微調整した後、測定された応答は設計応答とほぼ一致した。
- 次に、バンチ電荷を60 pCに上げて、空間電荷効果込みの調整を行う。

加速器だから見える世界。

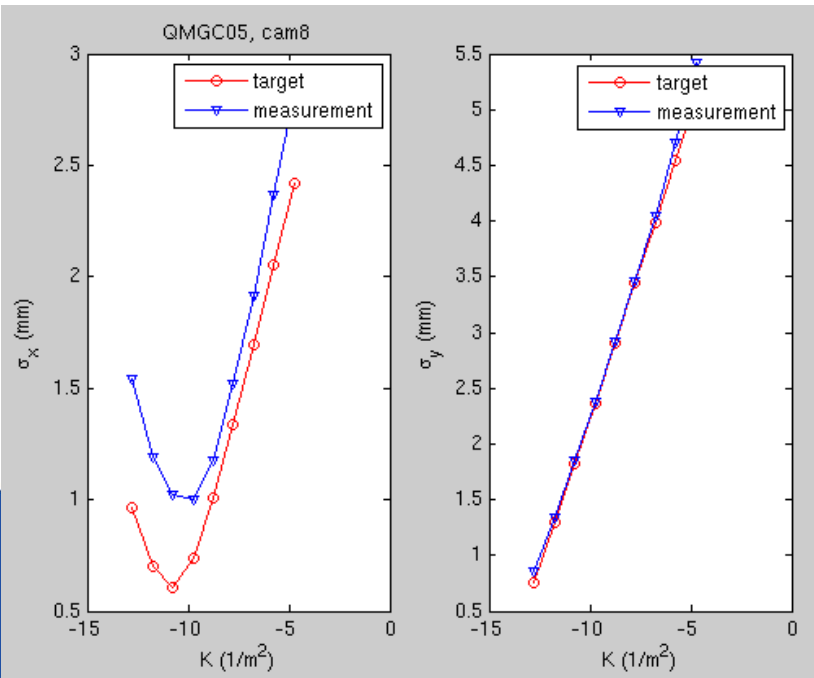
# THOB03 設計性能と測定結果の比較

## オプティクスマッチングの結果（空間電荷効果あり）

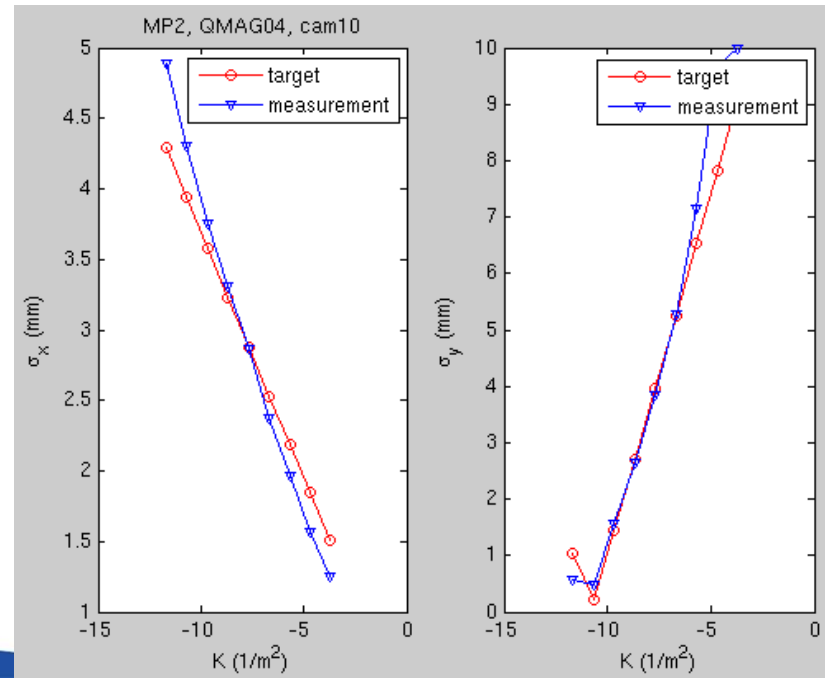
- **目標:** 空間電荷効果ありの条件で、各マッチングポイントでオプティクスを接続する
- 調整により、差異は初期状態よりもはるかに小さくなった。
- 実際のエミッタンスは設計値と異なる可能性があるため、わずかな差異が残っている。



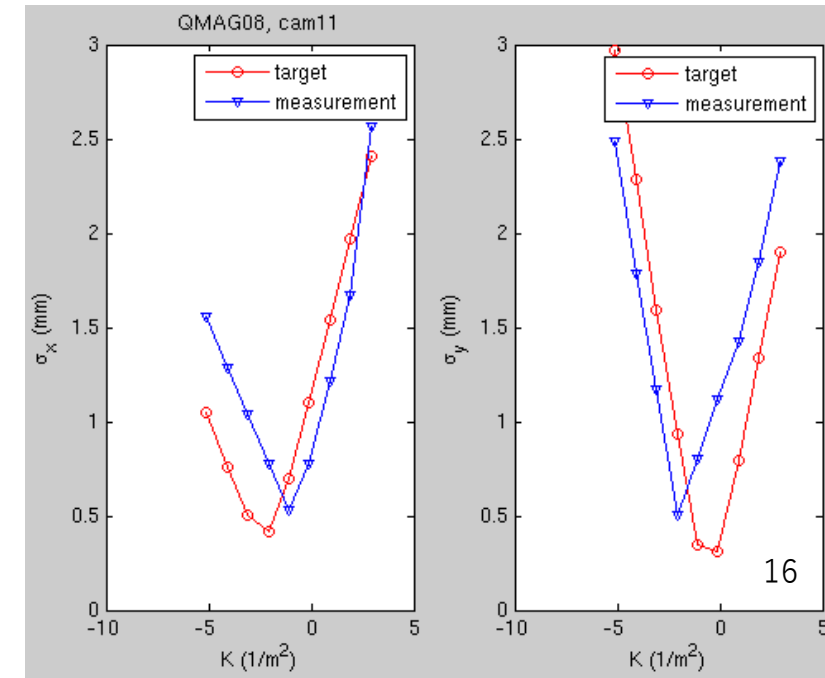
2/25@MP1(cam8)



2/25@MP2(cam10)



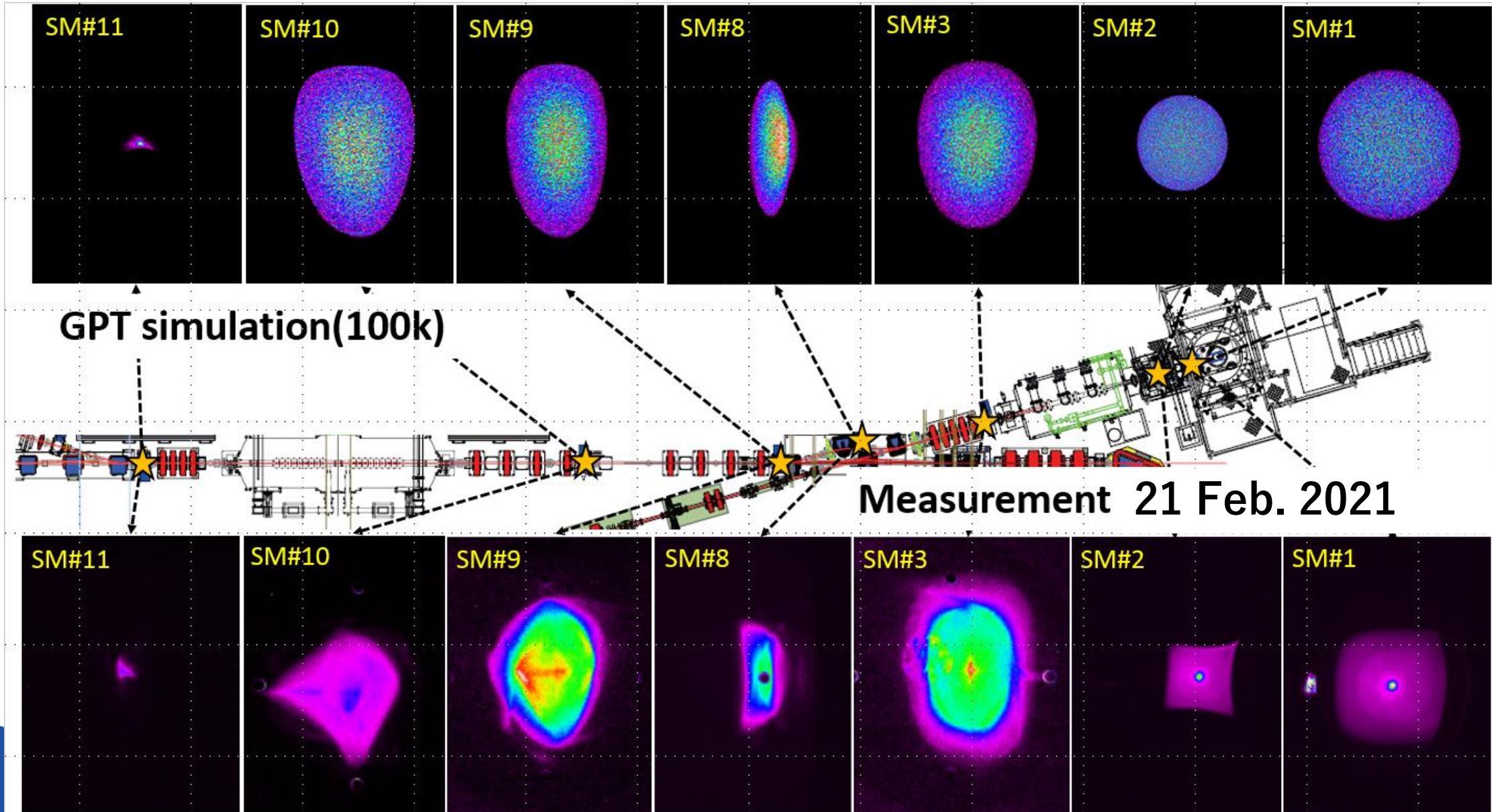
2/25@MP2A(cam11)





## オペティックス調整後のビームプロファイル

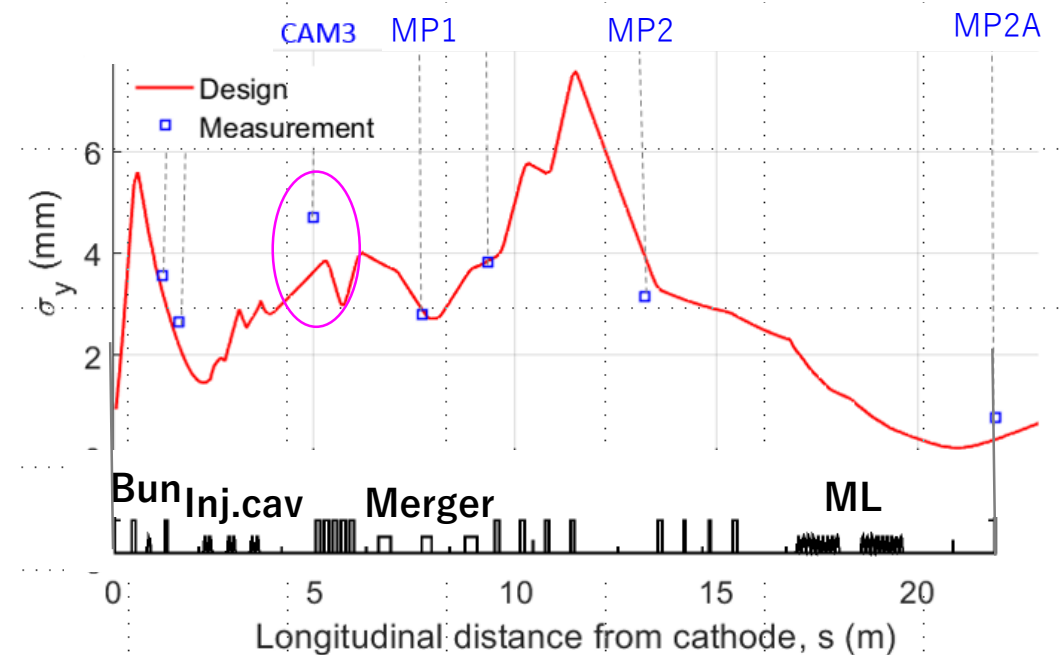
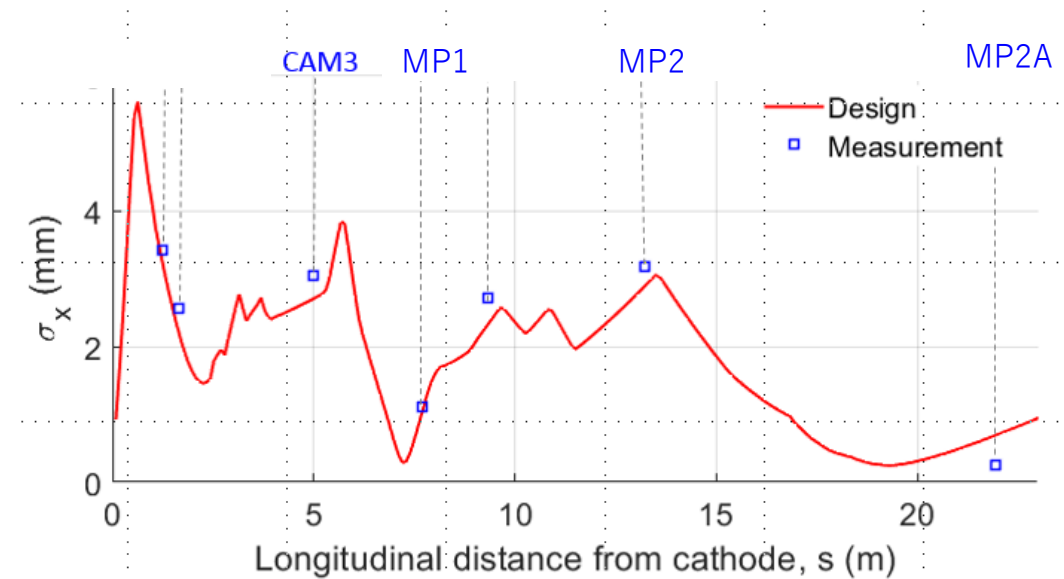
Note! Scales of simulation and actual measurement were matched



# 設計性能と測定結果の比較

## 測定されたビームサイズ

- 測定されたビームサイズは、入射器出口(Cam3)を除いて、設計ビームサイズとよく一致している。
- Cam3での垂直ビームサイズの偏差の理由はまだ不明である（モデルには空洞カプラーの効果を取り込み済み）。
- 励起レーザーの時間構造を含む空間電荷効果を調べる必要がある。
- これらの問題は次の研究トピック



# まとめ

- 入射器の最適化により、主空洞の出口で適切なビーム性能を達成した：
  - 電子銃の電圧480kV；
  - レーザーの初期時間分布40psFWHMフラットトップ；
  - 主空洞クライオモジュールの出口でのバンチ長さと同軸方向エミッタンスの同時最小化。
- 設計性能と測定結果を比較すると、横方向の動きがよく一致していることの確認が出来た。ただし、周回部のアーク部で測定した縦方向の動きは、予想通り行かなかった。その原因を調べる研究結果は田中オリガ@TUP023のポスターにまとめている。
- 設計通り入射部のビーム調整が出来たのおかげで、2021年2～3月に、最終的に1電子バンチあたり約5.8nJのFELパルスエネルギーを達成することができた（阪井寛志@MOPOA04を参照）。

