

ナノテラスにおける 蓄積リングビームオプティクス のコミッショニング

小原脩平

上島 考太、保坂 勇志、西森 信行、安積 隆夫、菅 晃一 (QST NanoTerasuセンター)

青木駿堯、芳賀浩一、伊原彰、伊藤優仁、岩下大器、門脇聖弥、小林創、及川治彦、
齋田涼太、櫻庭慶佑、高橋隼也、土山翼、井場 祐人、金浜 蓮人、高橋 滉希、田中 達輝、西原 秀
雄、森谷 佳津貴、吉岡 里紗 (QST、NAT)

住友 博史、山本 龍 (SES)

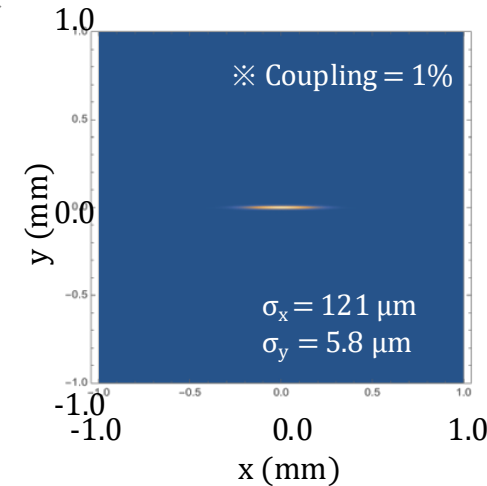
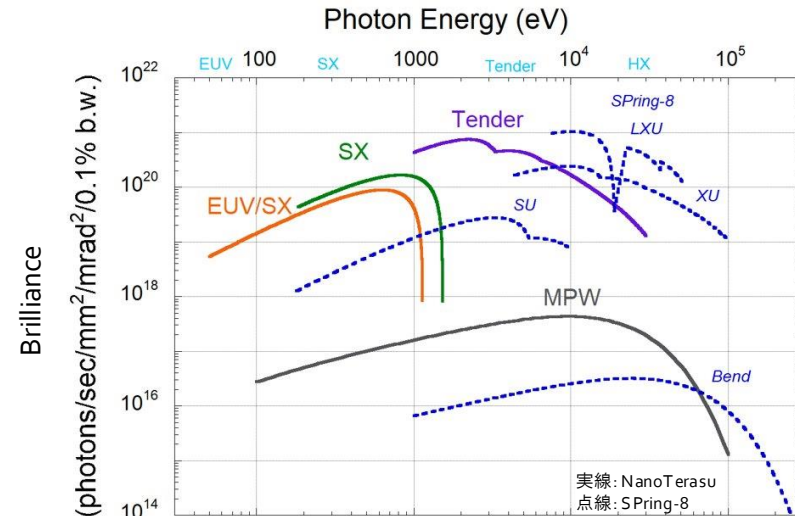
※ 本講演内容に含まれるデータは現在論文投稿中のものです



Photo courtesy of PhoSIC

- 宮城県仙台市東北大学キャンパス内に建設された**3GeV放射光施設**
- **小さいエミッタンスと高い輝度**
- 4-Bend-Achromat Lattice
- 2024年からユーザー運転開始

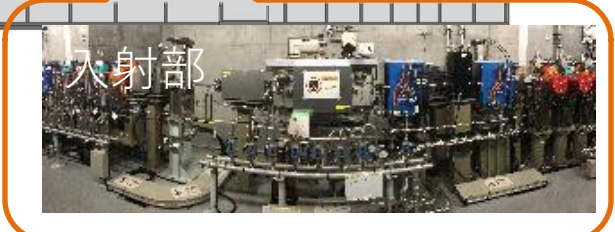
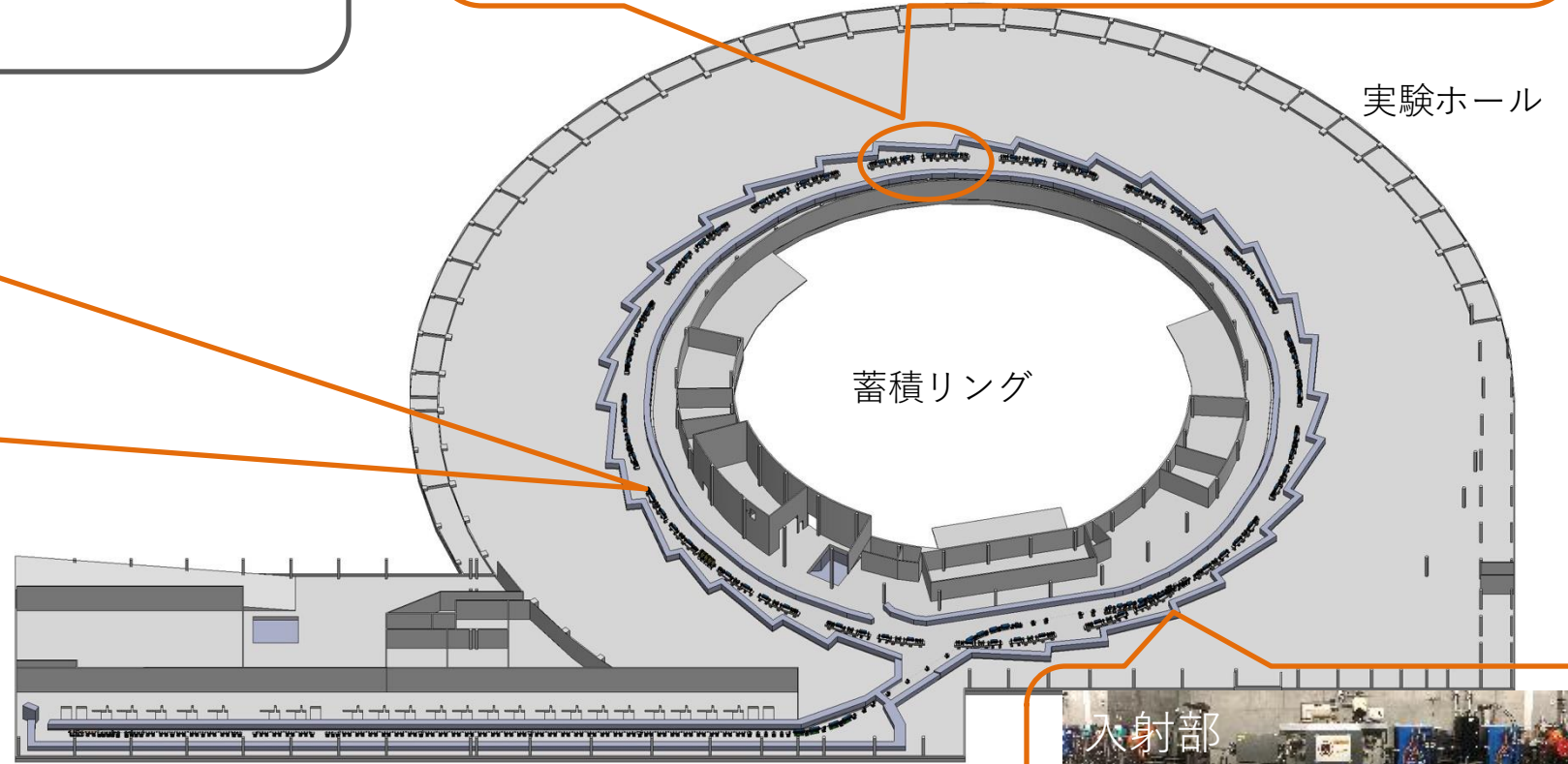
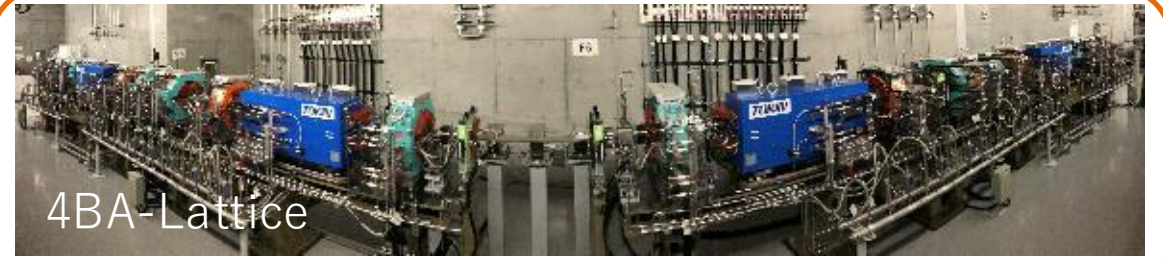
	NanoTerasu	SPring-8
場所	宮城県	兵庫県
電子ビームエネルギー	3 GeV	8 GeV
蓄積電流	400 mA	100 mA
セル数	16	44
リング周長	349 m	1436 m
エミッタンス	1.14 nmrad	2.4 nmrad
消費電力	5 MW	40 MW
最大ビームライン数	28	63
メインのX線	Soft ~ Tender X線	Hard X線



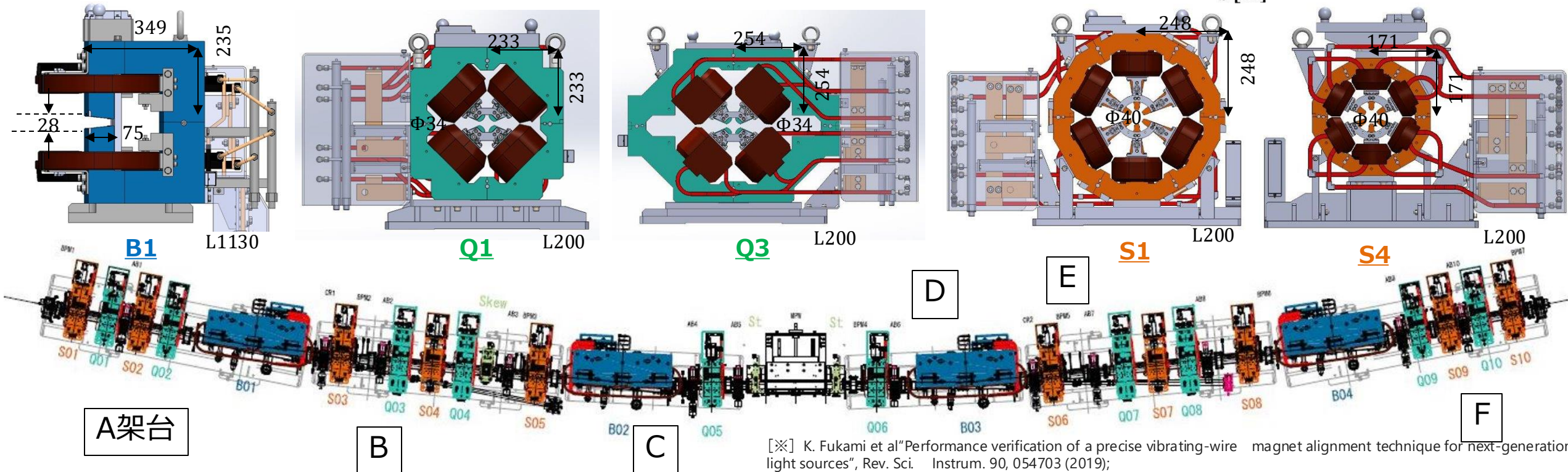
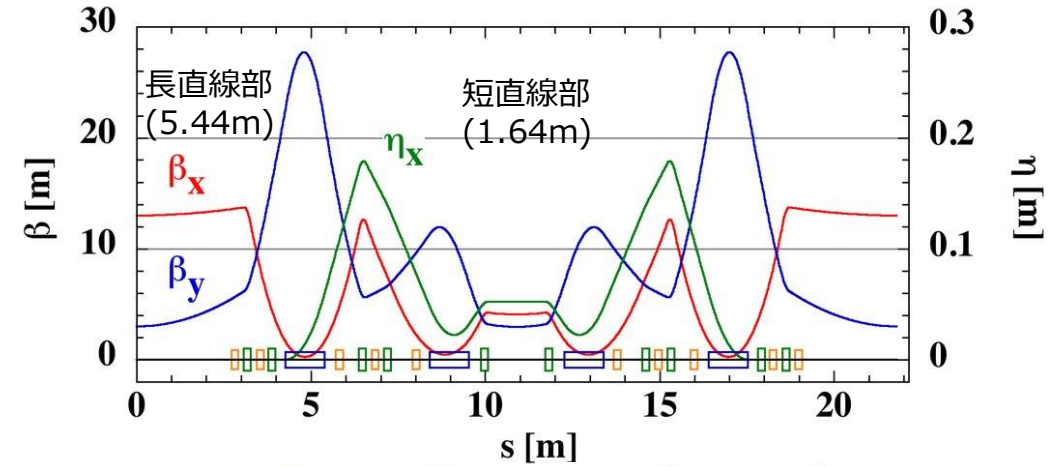
※ デザイン時のsimulationであり、現在のビームプロファイルではありません

加速器としての特徴

- 国内初のMBAラティス
- TM020 HOM減衰 加速空洞
- 透明入射



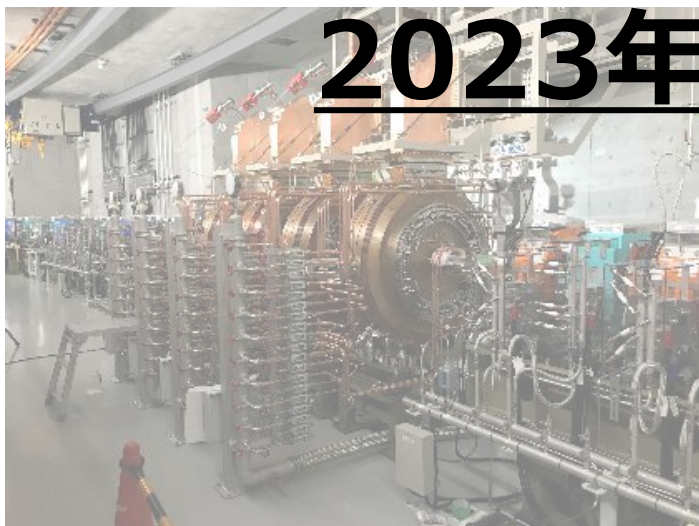
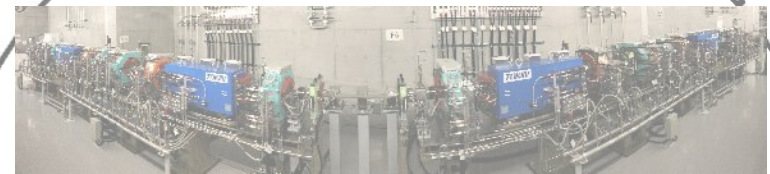
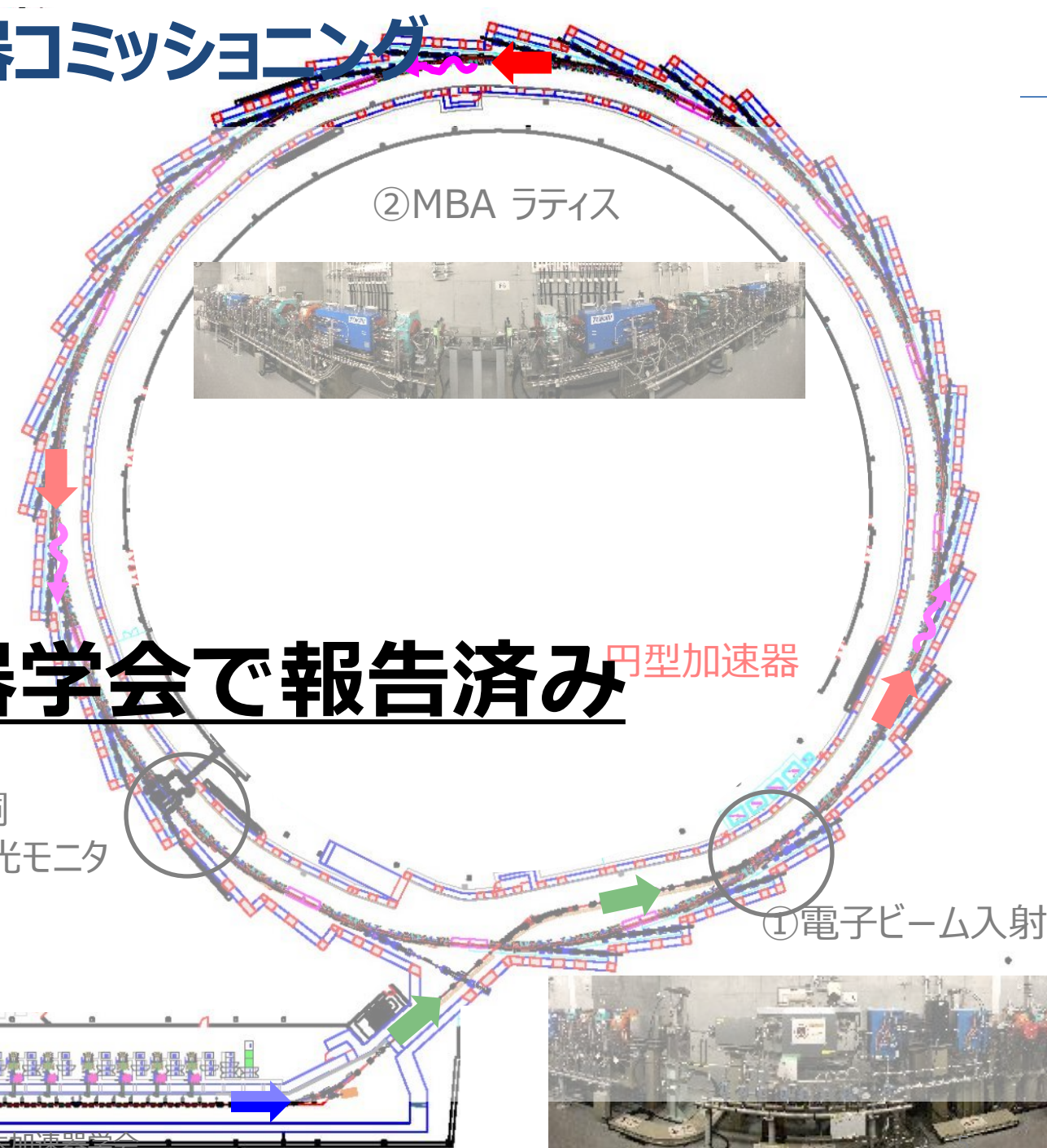
- 4-Bend-Acromat 構造
 - (偏向 × 4 + 四極 × 10 + 六極 × 10) × 16セル
- 架台毎にVWM^[※]で磁場中心をアライメント
- レーザートラッカーを用いてトンネル内に設置



[※] K. Fukami et al "Performance verification of a precise vibrating-wire magnet alignment technique for next-generation light sources", Rev. Sci. Instrum. 90, 054703 (2019);

円型加速器コミッションング

月日	イベント
5月29日	円型加速器へ向けた電子ビーム輸送開始
6月8日	円型加速器へのビーム入射開始 蓄積用加速空洞オフで 300周回 を観測 ※高精度アライメントによる
6月16日	蓄積用加速空洞オンで 電子ビーム蓄積 に成功 電子ビームモニタ用の 放射光 を観測



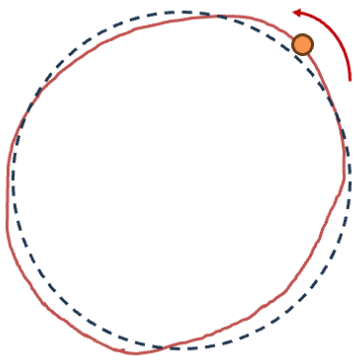
2023年の加速器学会で報告済み



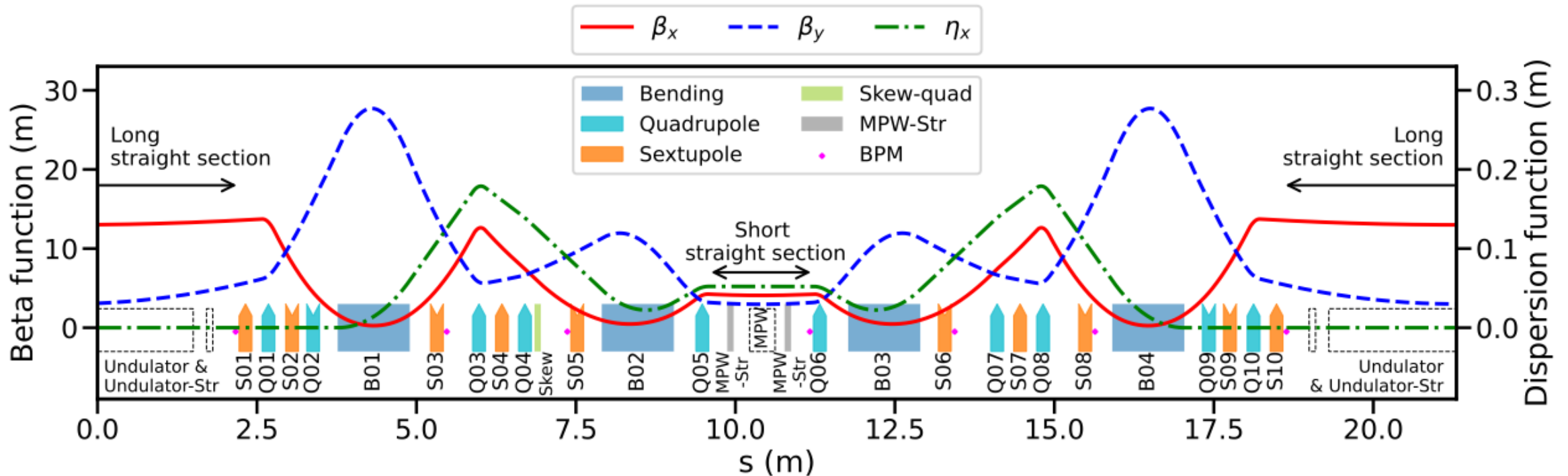
短期間での
200mA蓄積を達成

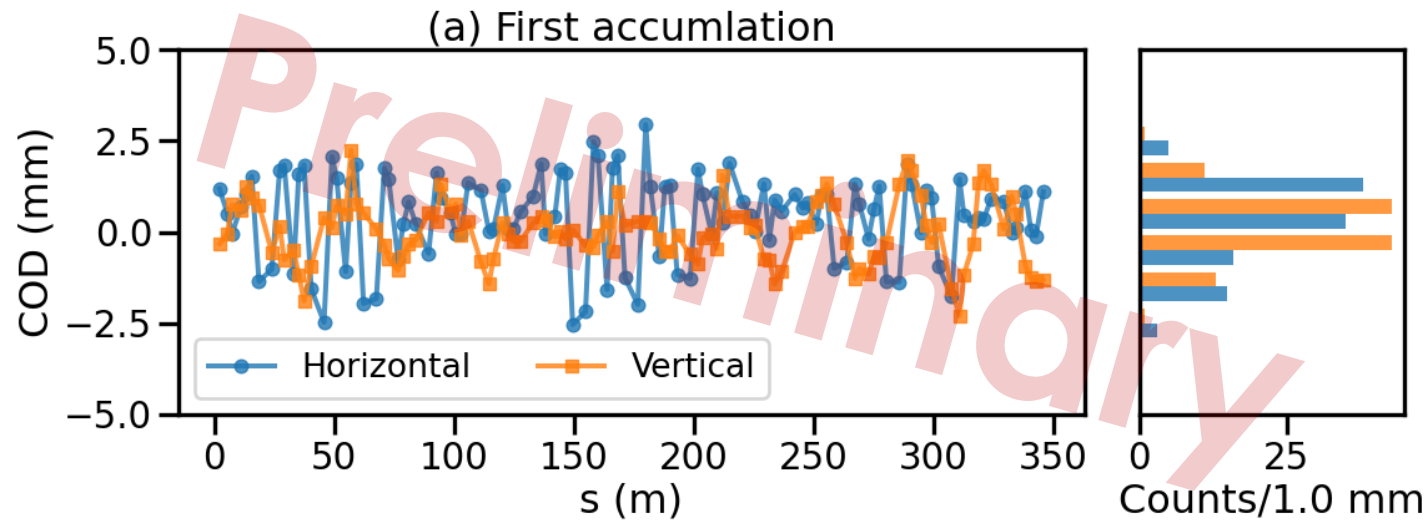


- ① ラフなCOD補正
- ② チューン整数部の推定とチューン補正
- ③ Dispersion(η)補正
- ④ LOCOによる η , β 関数補正



- モニタ
 - 7台のBPM × 16セル = 112台
 - (分散部に3-pole wigglerとXPC)
- Corrector
 - 8台のステアリング磁石 × 16セル = 128台





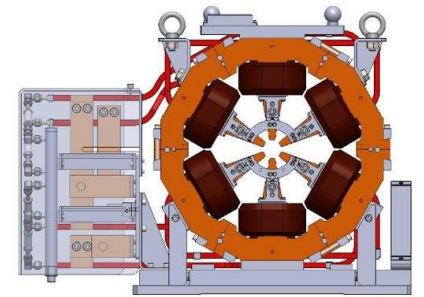
$$\vec{x} = M \cdot \vec{\theta}$$

$$x_m^{cod} = \sum_n R_{m,n} \theta_n$$

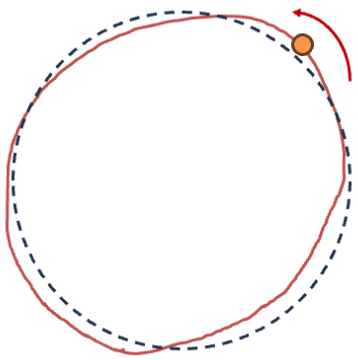
$$R_{m,n} = \frac{\sqrt{\beta_m \beta_n}}{2 \sin(\pi \nu)} \cos(|\psi_m - \psi_n| - \pi \nu)$$

$$M = \begin{pmatrix} R_{1,1} & \cdots & R_{1,128} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{112,1} & \cdots & R_{112,128} \end{pmatrix}$$

- ステアリング磁石 128個、BPM 112個の行列を解いてキック角を推定
- 最大キック角は
 - 6極補助STR = 0.4mrad
 - MPW STR = 0.2mrad
- チューンが半整数ずれていると応答が逆になるため、少しずつ蹴って様子を見た
- 軌道がある程度BPM中心を通るようになるまで補正
- 周長については $\frac{\Delta C}{C} = \alpha_C \left(\frac{\Delta p}{p}\right), \frac{\Delta f}{f} = -\left(\alpha_C - \frac{1}{\gamma^2}\right) \frac{\Delta p}{p}$ からSRRF周波数を用いて調整



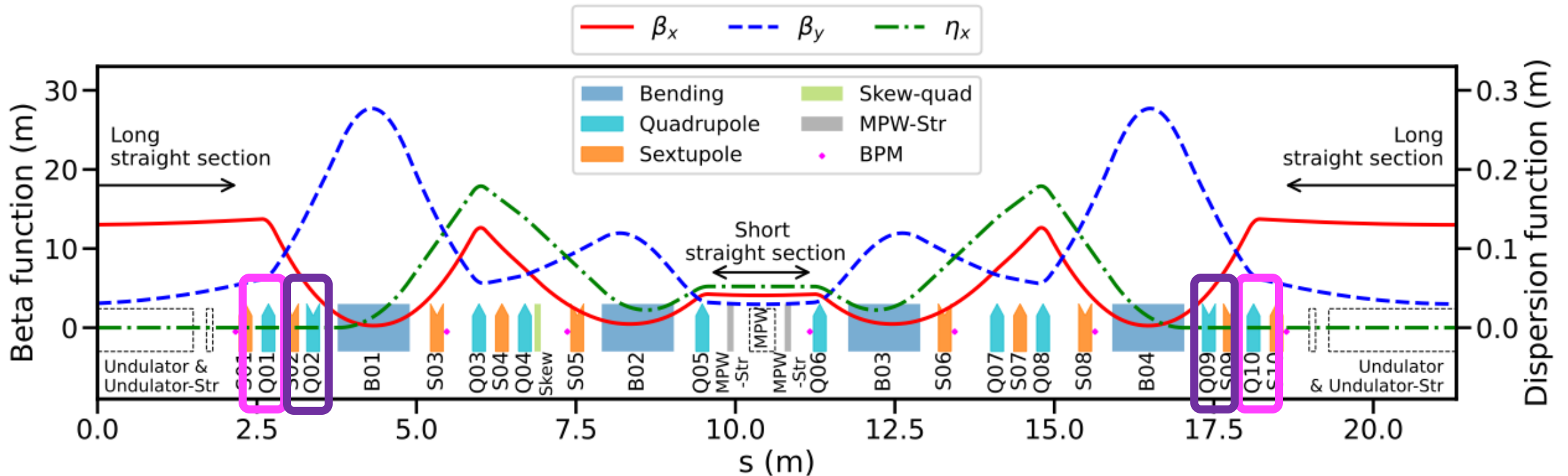
(正直、はじめのうちは応答が合わないなのでどっちに蹴ってるのかよく分からないが、とりあえず全体的に振幅が収まるようにした)



- モニタ
 - Bunch-by-bunch Feedback (ただし小数部しか測れない)

$$\begin{pmatrix} \Delta v_x \\ \Delta v_y \end{pmatrix} = \frac{e}{4\pi p} \begin{pmatrix} \beta_{x,F} & \beta_{x,D} \\ -\beta_{y,F} & -\beta_{y,D} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_F \\ K_D \end{pmatrix}$$

- 補正用磁石
 - Q01/Q10シリーズとQ02/Q09シリーズの四極磁石

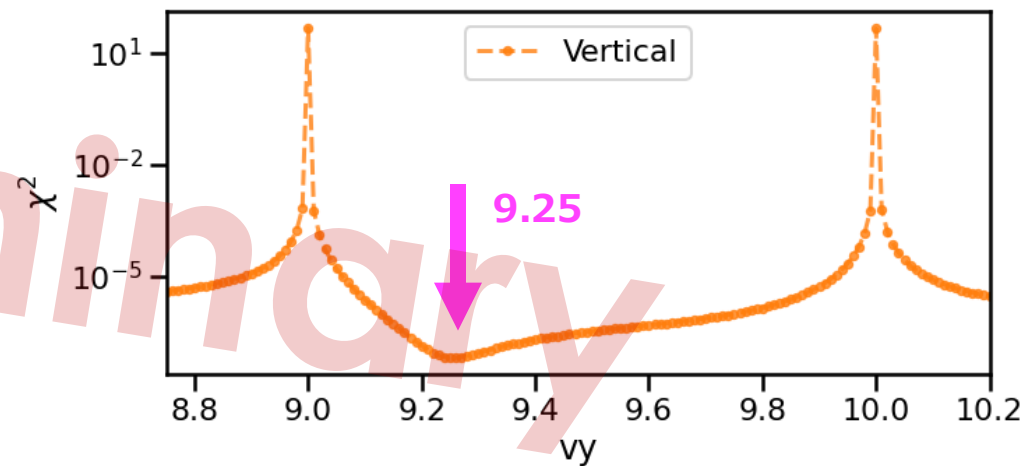
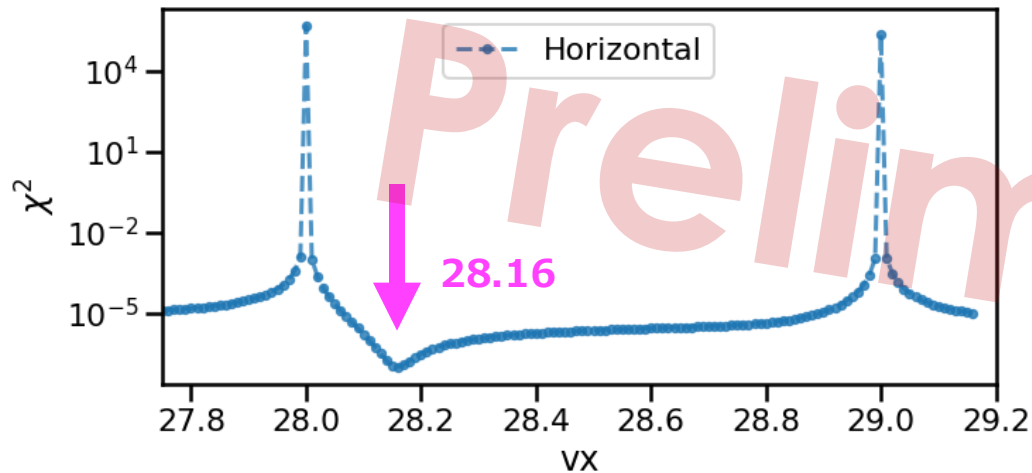


■ COD変化によるチューンの(整数部を含む)推定

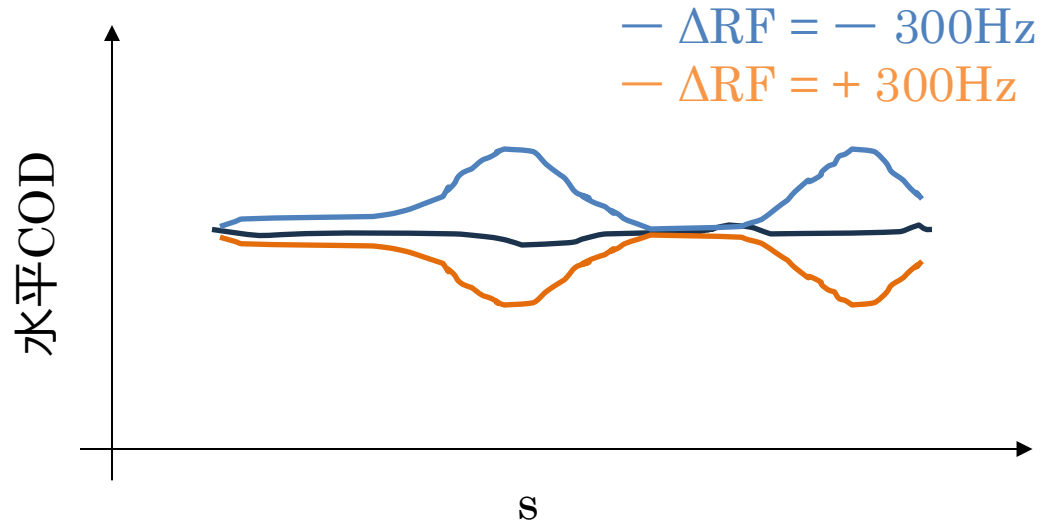
- ステアリング磁石で電子ビームをわざと蹴った
- 「実際に変化したCOD」と、「適当なチューンを仮定して蹴った時のCOD変化予想」を比較した

$$\chi^2 \equiv \sum_m \left(\Delta x_m^{COD} - \Delta x_m^{Model}(v) \right)^2$$

Cf; 設計値 $(v_x, v_y) = (28.17, 9.23)$



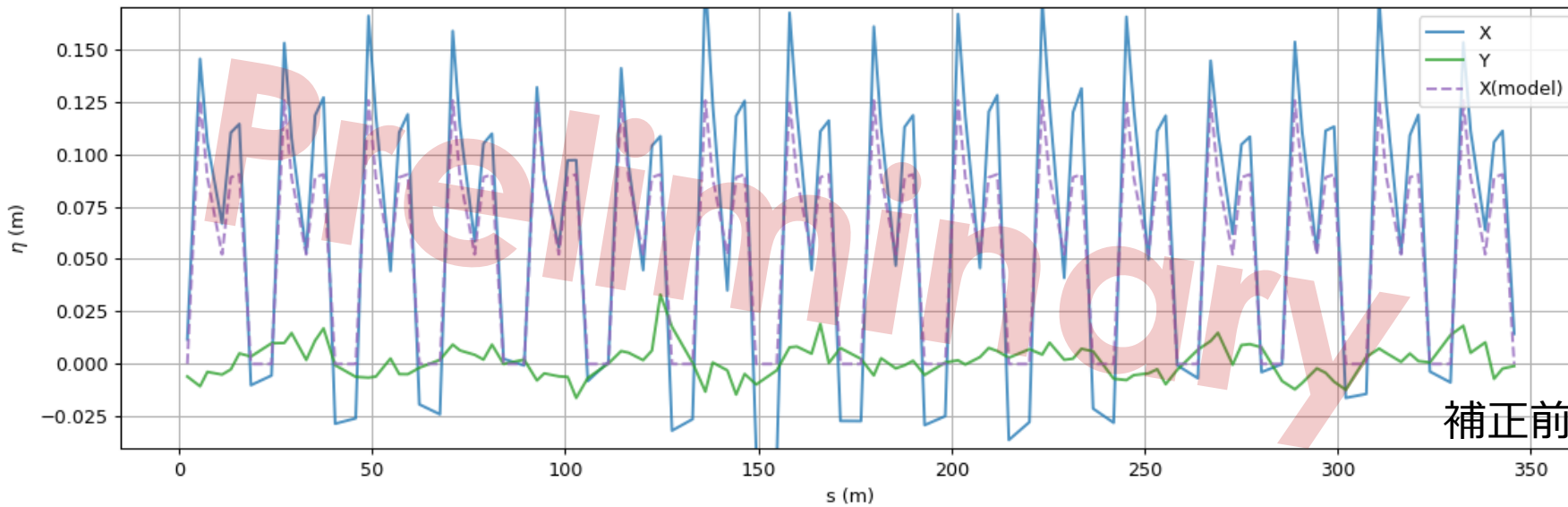
- 半整数のずれはなさそうという確認ができた
- 小数部についてはBBF測定結果とconsistent, 今後はBBFで常時モニタ



RF周波数を振って測定

- ±300Hz変更したときの $\Delta p/p$ 変化は-0.0027

$$\eta = \frac{x^{-300\text{Hz}} - x^{+300\text{Hz}}}{\left(\frac{\Delta p}{p}\right)^{-300\text{Hz}} - \left(\frac{\Delta p}{p}\right)^{+300\text{Hz}}}$$



水平ディスパージョン
 (モデルの水平ディスパージョン)
 垂直ディスパージョン

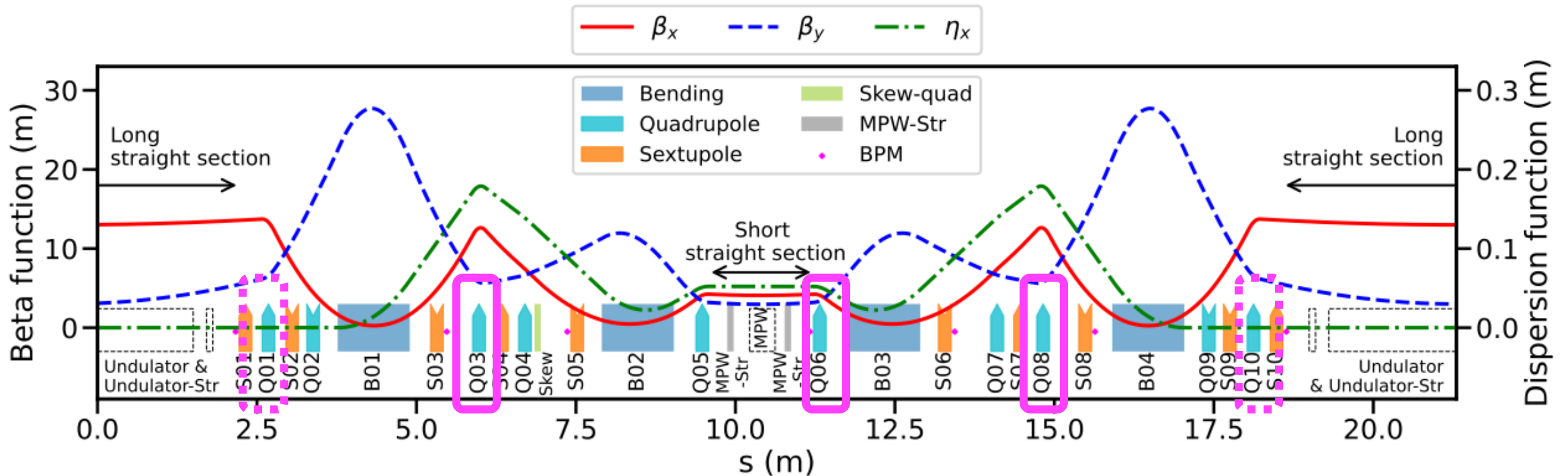
■ Qauxを用いて修正

- Q01, 03, 06, 08, 10には補正用電源が付随
- 5台×16セル=80台
- Q01, Q10はDispersion-Freeなので実質はQ03, 06, 08の3つで補正

$$\vec{\eta} = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{112})^T$$

$$\vec{\theta} = (K_1, K_2, \dots, K_{80})^T$$

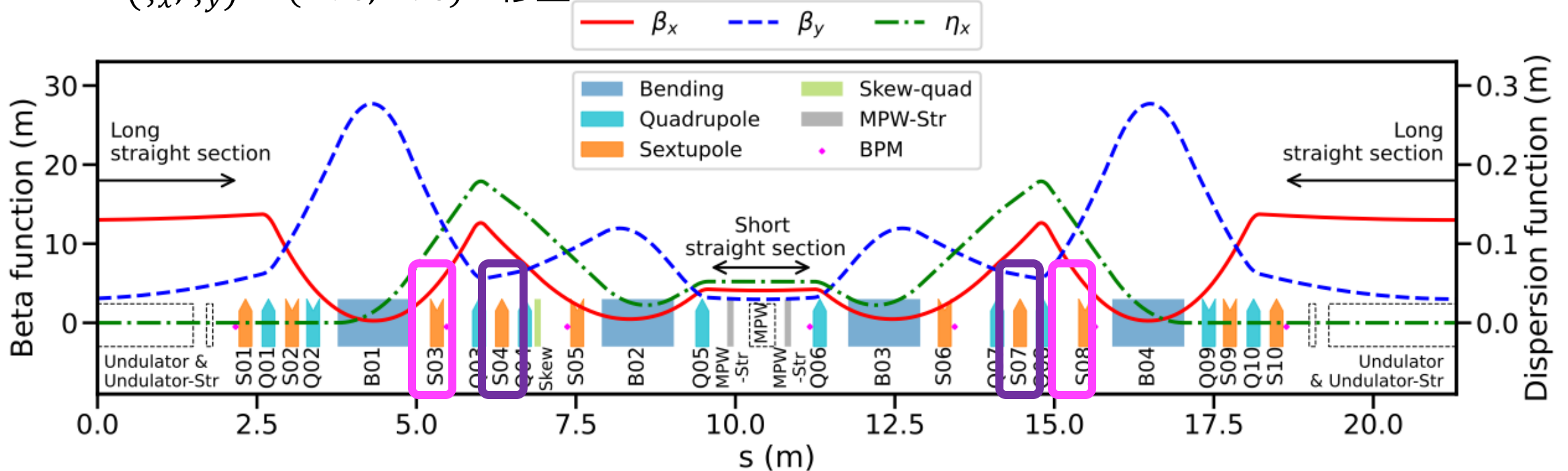
$$R_{m,n} = \frac{\sqrt{\beta_m \beta_n}}{2 \sin(\pi\nu)} \cos(\pi\nu - |\Delta\psi|)$$



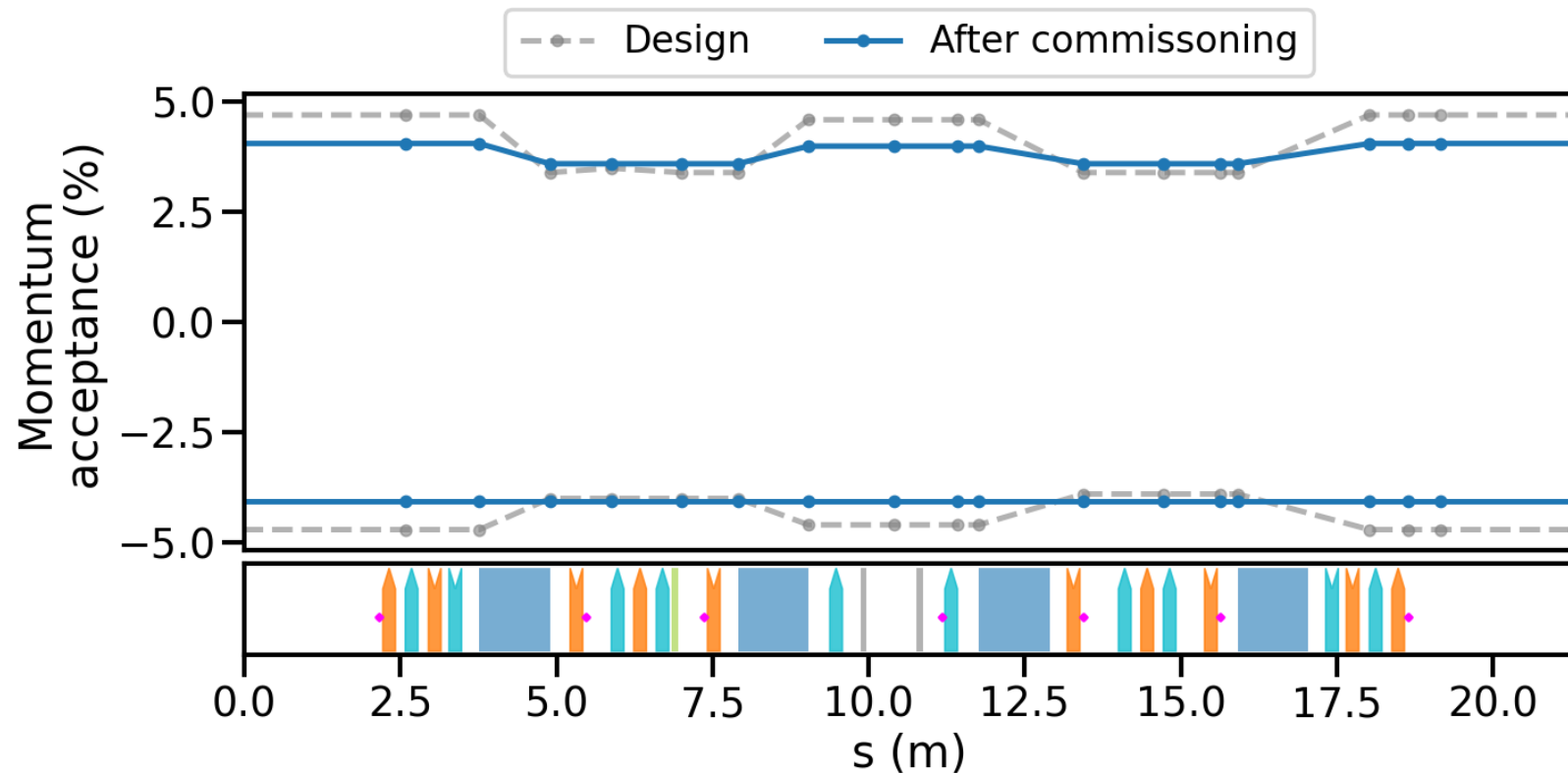
- 周波数を振ったときのチューン変化量から測定 $\Delta\nu = \zeta \frac{\Delta p}{p}$

- 収束発散の6極磁石で補正
$$\begin{pmatrix} \Delta\xi_x \\ \Delta\xi_y \end{pmatrix} = \frac{e}{2\pi p} \begin{pmatrix} \eta_{xF} \beta_{xF} & \eta_{xD} \beta_{xD} \\ -\eta_{xF} \beta_{yF} & -\eta_{xD} \beta_{yD} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_F \\ \lambda_D \end{pmatrix}$$

- 初期値では $\xi_y \sim 0$ となっており、ビーム寿命が短かった
- $(\xi_x, \xi_y) = (1.98, 1.98)$ へ修正



- クロマティシティ $(\xi_x, \xi_y) = (1.38, 1.53) \rightarrow (1.98, 1.98)$ に変更
- SRRF加速電圧を3.2MV(デザイン値) \rightarrow 2.9MVで運転開始
- モーメントムアクセプタンスは最も狭いところで約 $\pm 4\%$ とconsistent



① COD補正, 周長補正

② チューン補正

➤ ここを繰り返して
 β 関数以外をほとんど合わせる

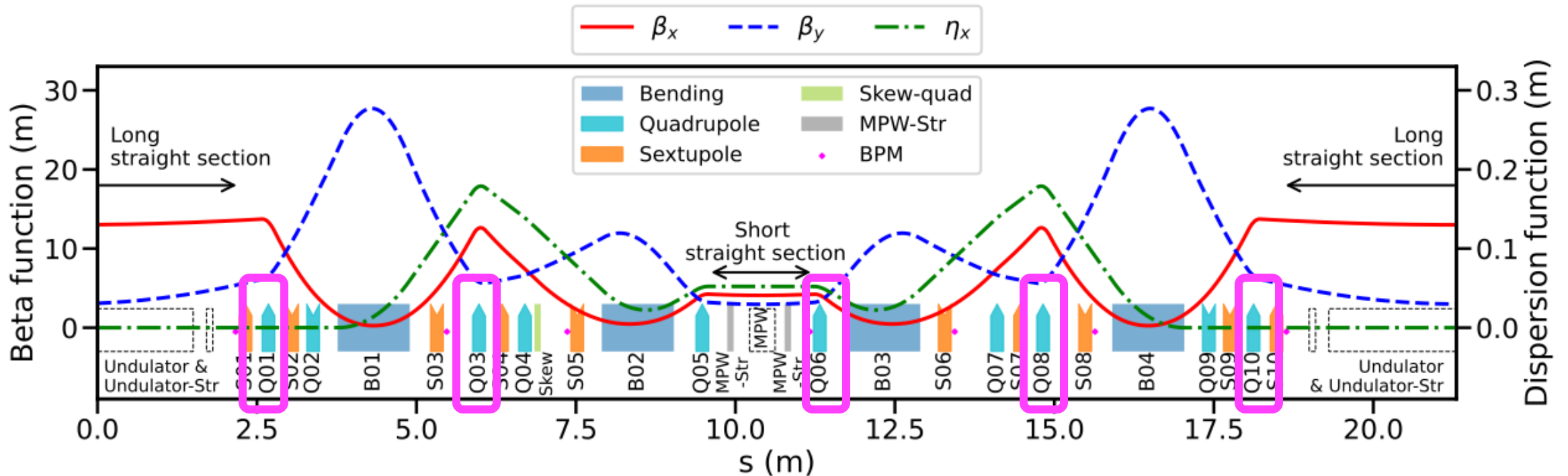
③ Dispersion(η)補正

④ LOCOによる η , β 関数補正

■ Qauxを用いて修正?

- Q01, 03, 06, 08, 10には補正用電源が付随
- 1セル5台もあればβxβy関数は調整できそう
 - → チューンもディスパージョンも変わってしまう
- Qauxを動かした時のチューン変化からβ関数は見積もれるが補正はどうする?

$$\beta = \frac{4\pi\Delta\nu}{\Delta K}$$



- 全ステアリング磁石を蹴って応答関数を測定
- 計算モデルとの応答関数の差分は四極磁石のエラーにあると仮定して、現実の応答を最も説明できるエラーを計算

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} R_{ij}^{hh} & 0 \\ 0 & R_{ij}^{vv} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \end{pmatrix}_j = M \begin{pmatrix} \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \end{pmatrix}_j$$

j番目のステアリング磁石で水平(h)に蹴った時にi番目のBPMが観測した水平(h)に動いた量

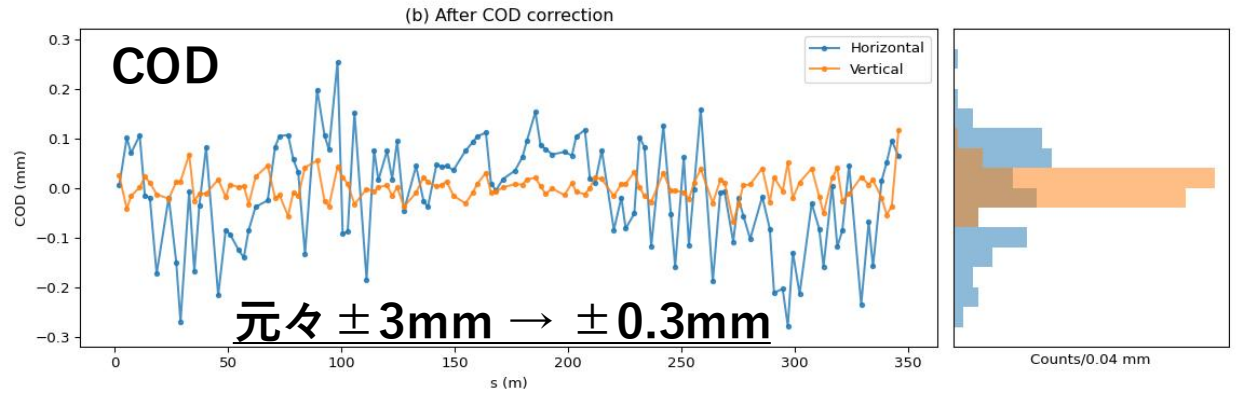
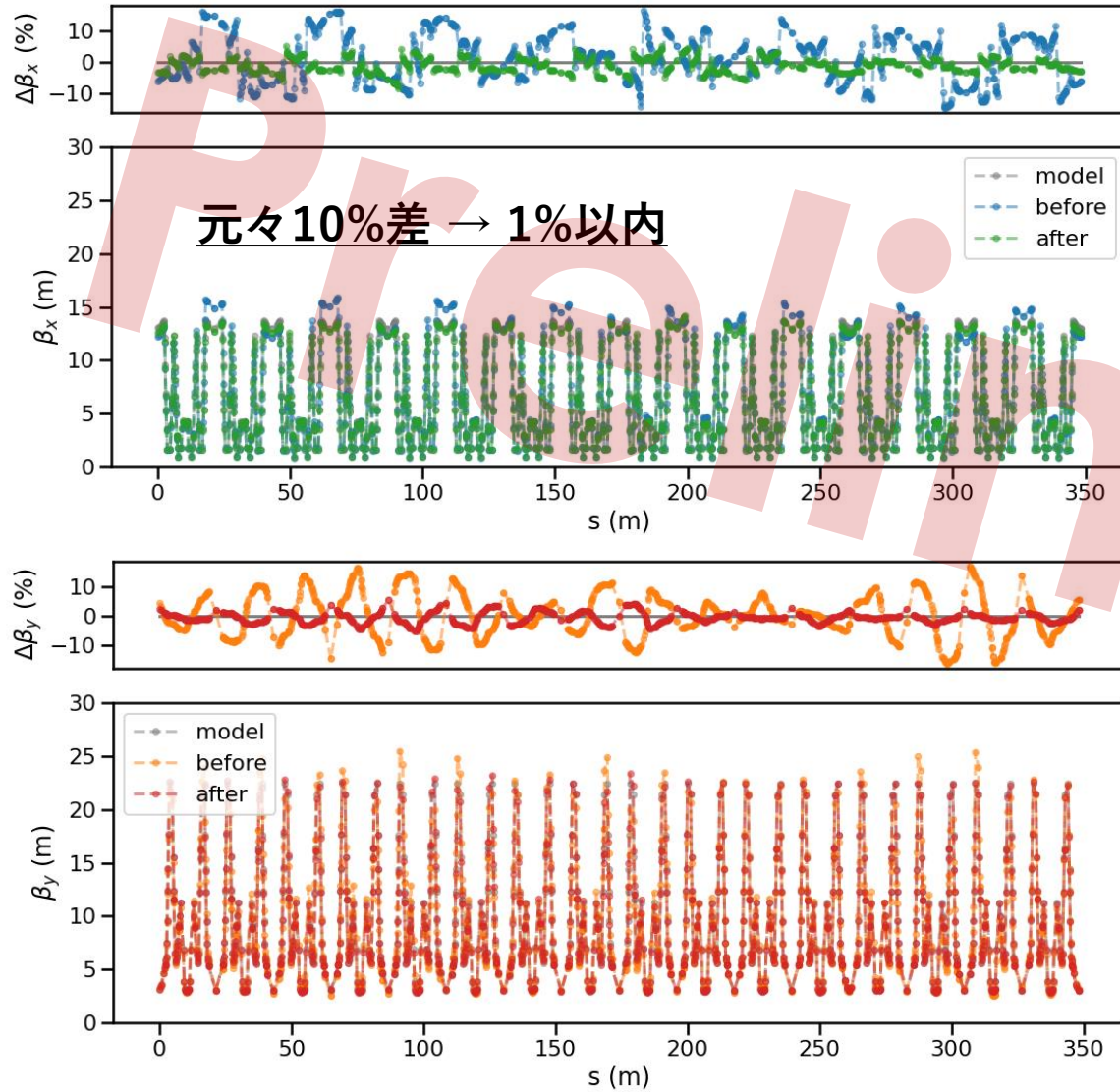
全N個あるうちn番目の4極磁石の磁場強度誤差によって生じる、 R_{ij}^{hh} への追加項

$$M \rightarrow \tilde{M} = \begin{pmatrix} R_{ij}^{hh} + \sum_n^N \frac{\partial R_{ij}^{hh}}{\partial k_n} \Delta k_n & \sum_n^N R_{in}^h R_{nj}^v \Delta \hat{k}_n \\ \sum_n^N R_{in}^v R_{nj}^h \Delta \hat{k}_n & R_{ij}^{vv} + \sum_n^N \frac{\partial R_{ij}^{vv}}{\partial k_n} \Delta k_n \end{pmatrix}$$

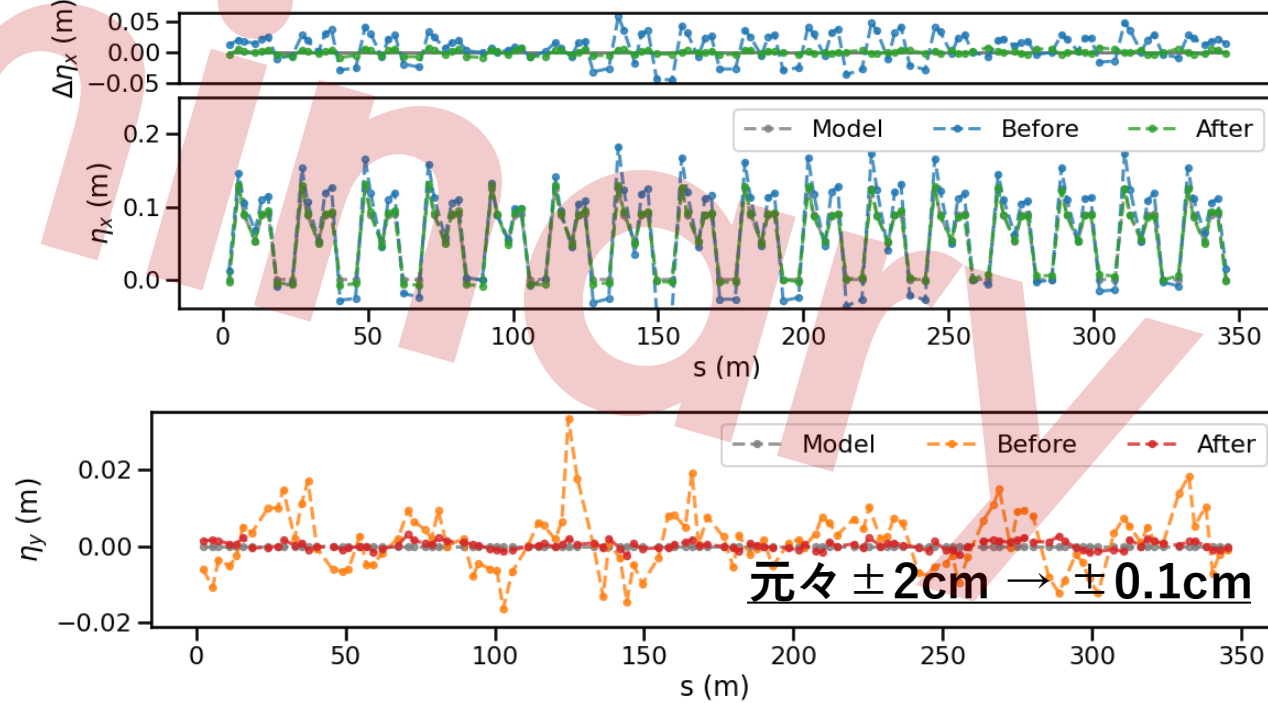
全N個あるうちn番目の4極磁石の回転誤差によって生じる、j番目のステアリング磁石で水平(h)に蹴った時にi番目のBPMが観測した垂直(v)に動いた量

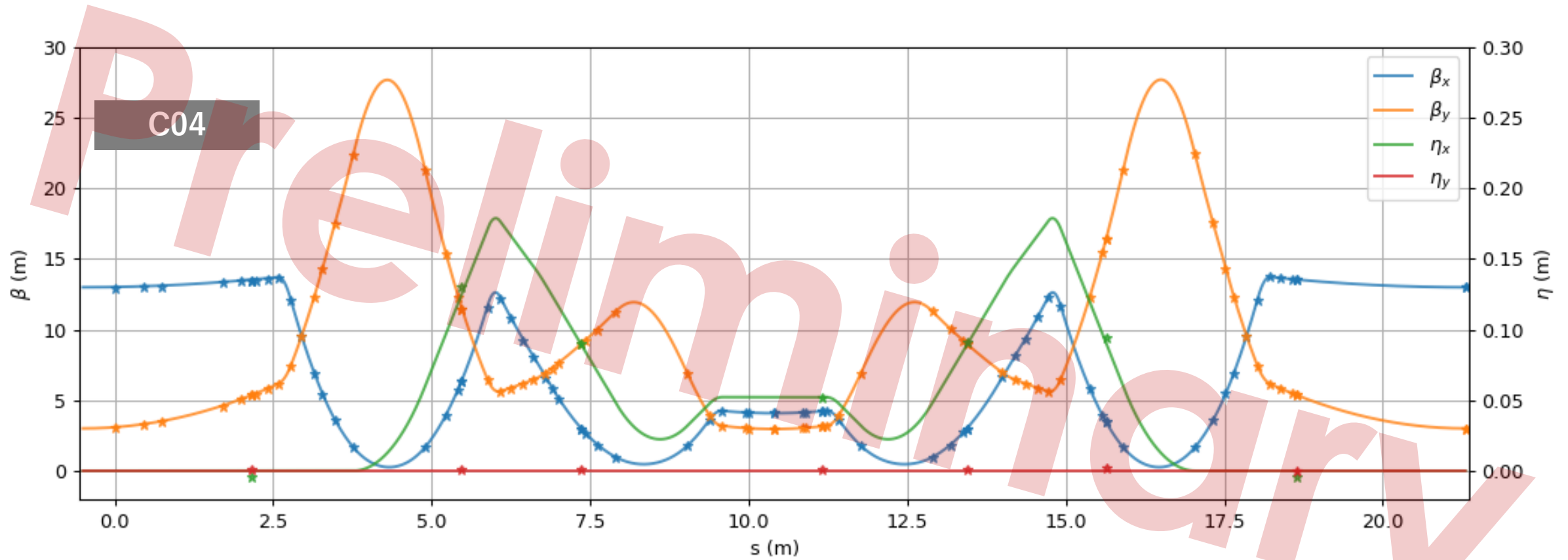
- 実応答の説明がつくエラーを推定し、そのエラー分だけQauxで強度を補正
- (実際には磁石強度、磁石回転、BPM回転などの誤差も振りまいたが、今回のコミッショニングでは評価のみで補正は行っていない)

ベータ関数



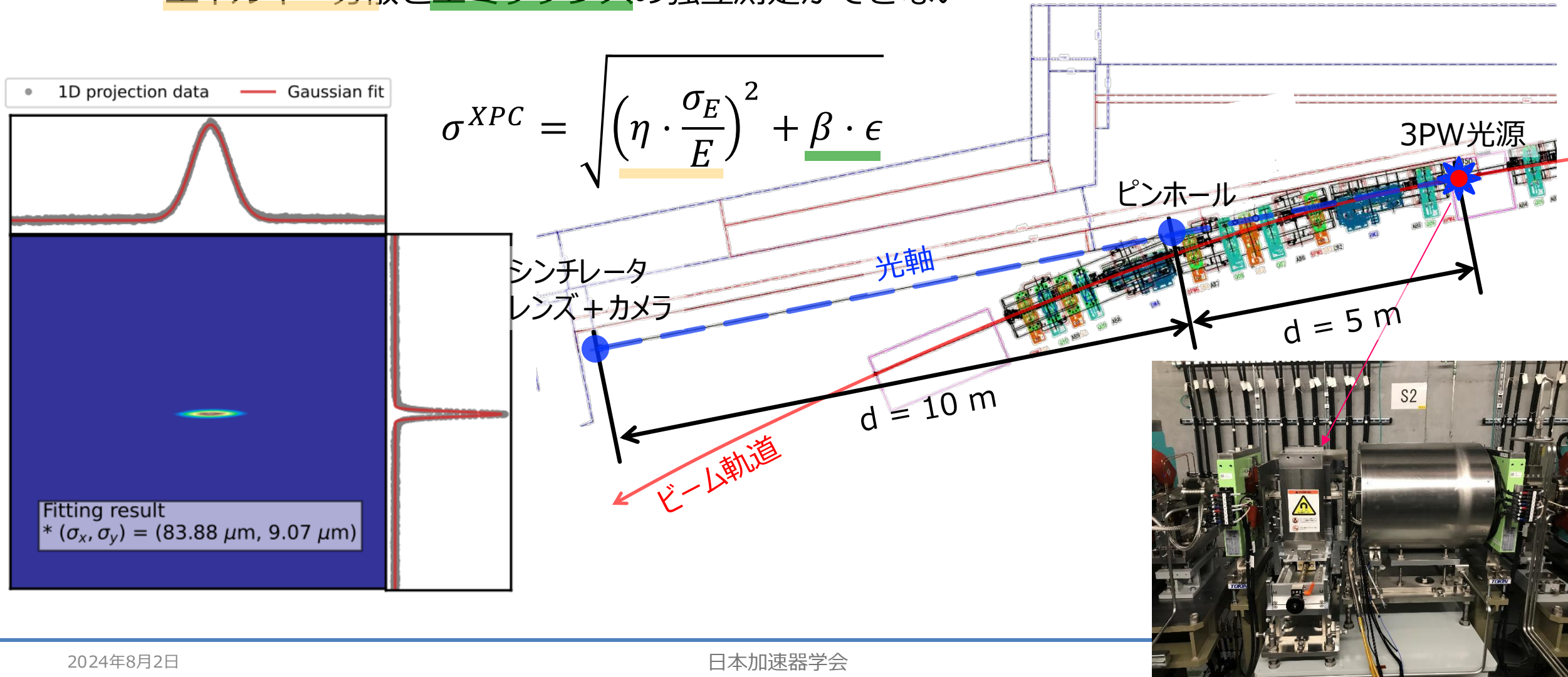
ディスページョン





※ 補正前後の β/η とモデルとの比較をC04について描画

- 3PWからの硬X線像をX線ピンホールカメラ (XPC) で撮像
 - 短直線部(Dispersion section)に設置されているため、エネルギー分散とエミッタンスの独立測定ができない



$$\sigma^{XPC} = \sqrt{\left(\eta \cdot \frac{\sigma_E}{E}\right)^2 + \beta \cdot \epsilon}$$

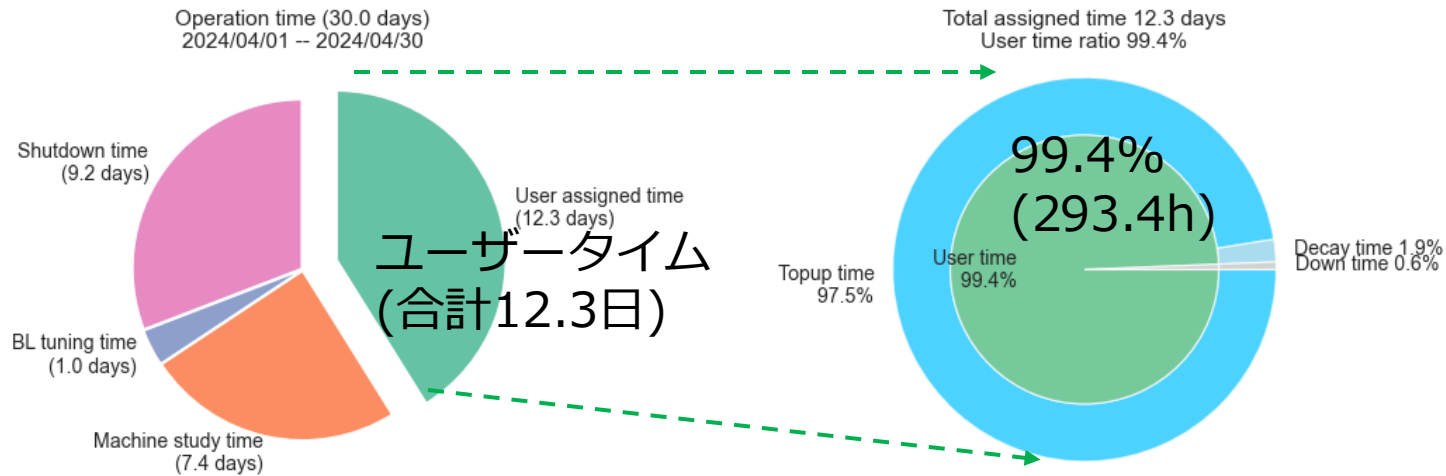
	デザイン値	2024年4月運転時
電子ビームエネルギー	2.998 GeV	(3 GeV)
周長	348.843 m	348.843 m
蓄積電流値	400 mA	~ 200 mA
ベータatronチューン (ν_x, ν_y)	(28.17, 9.23)	(28.17 ± 0.01, 9.23 ± 0.01)
クロマティシティ (ξ_x, ξ_y)	(1.38, 1.53)	(1.98, 1.98)
長直線部でのβ関数 (β_x, β_y)	(13.0 m, 3.0 m)	(13.0 ± 0.3 m, 3.0 ± 0.05 m)
長直線部でのη関数 (η_x, η_y)	(0.0 m, 0.0 m)	(0.0 ± 0.004 m, 0.0 ± 0.001m)
短直線部でのβ関数 (β_x, β_y)	(4.1 m, 3.0 m)	(4.1 ± 0.1 m, 3.0 ± 0.05 m)
短直線部でのη関数 (η_x, η_y)	(0.05 m, 0.00 m)	(0.05 ± 0.004 m, 0.00 ± 0.001m)
CODの分散 ($\sigma_x^{COD}, \sigma_y^{COD}$)	(0 mm, 0 mm)	(±0.11 mm, ±0.03 mm)
エミッタンス (ϵ_x, ϵ_y)	(1.14 nm rad, 0.01 nm rad)	(1.14 nm rad*, 0.02 nm rad)
カップリング	1%	2.1%
エネルギー分散 (σ_E/E)	0.0843%	(0.0972 ± 0.0161)%*
バンチ長 (σ_b)	2.92 mm	3.3 mm
Filling Pattern	-- (最大592バケット)	0—400 (400バケットまで平積み)
電子寿命	--	~10hr @ 200 mA



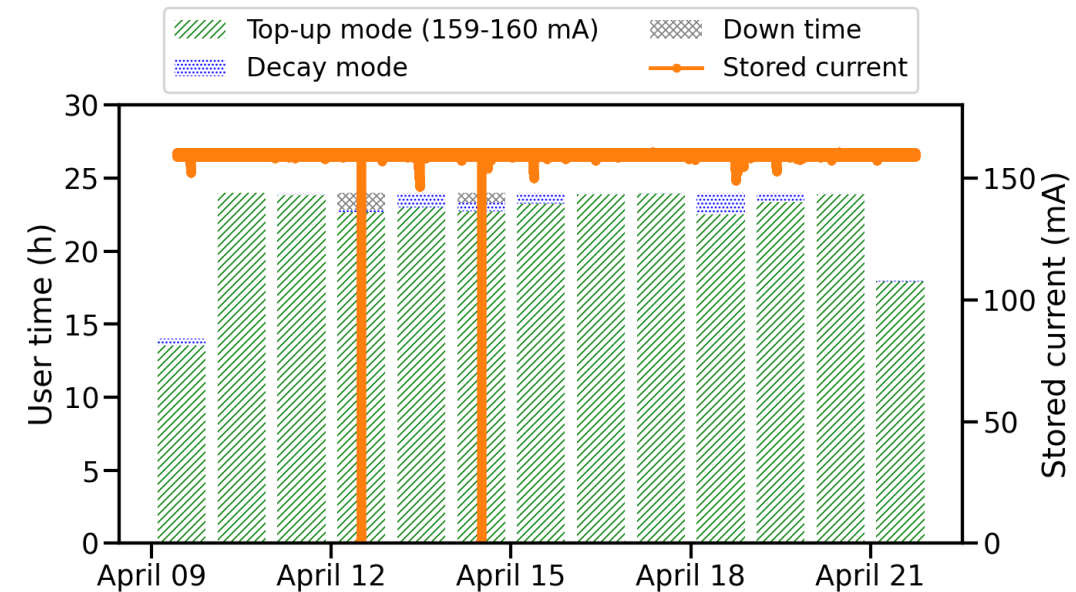
約半年でほぼ設計値通りの値を再現

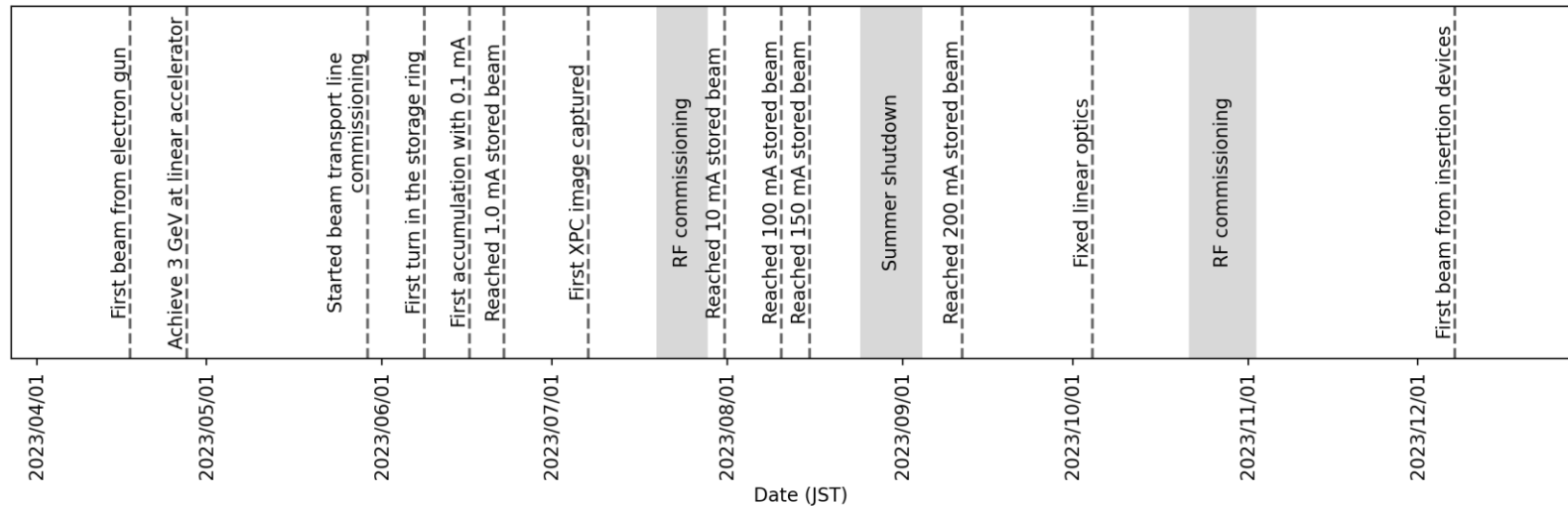
※エミッタンスがデザイン値と仮定したときのエネルギー分散を表示

2024.04.09 ~ 2024.04.21



- 99%のユーザータイムを提供 (SRRF反射によりビームアボート)
- 97%は159-160mAのトップアップ運転で提供





- ◆ 2023.05.29; 蓄積リングが管理区域に
- ◆ 2023.06.08; 蓄積リングで電子ビーム300周回
- ◆ 2023.06.16; 蓄積リングで電子ビーム蓄積達成 0.1mA
- ◆ 2023.06.21; 蓄積電流 0.5mA
- ◆ 2023.06.23; 蓄積電流 2.5mA
- ◆ 2023.07.07; XPCで初観測
- ◆ 2023.07.31; 蓄積電流 10mA
- ◆ 2023.08.10; 蓄積電流 100mA
- ◆ 2023.09.11; 蓄積電流 200mA
- ◆ 2023.10.04; ほぼ設計値のOpticsを再現

- ◆ 2024.04.09; ユーザー運転を開始

本講演内容について論文を投稿中
<https://arxiv.org/pdf/2407.08925>