

KEK-PFにおけるビームベース測定を用いた 入射効率改善のための研究

平野広太¹、原田健太郎²、長橋進也²、上田明²、
帯名崇²、高井良太²、高木宏之²、東直²、小林幸則²

1: 広島大学

2: 高エネルギー加速器研究機構、KEK

2018年8月10日(金)
第15回加速器学会年会
講演番号: FROL05

1. はじめに
 - ・研究背景・目的
2. 入射パラメータの測定
 - ・ビームベース測定の概要
 - ・入射ビームの測定
 - ・キッカー電磁石の応答測定
3. 入射シミュレーション
 - ・オプティックスの測定
 - ・入射効率の計算
4. まとめ

1-1 背景と目的

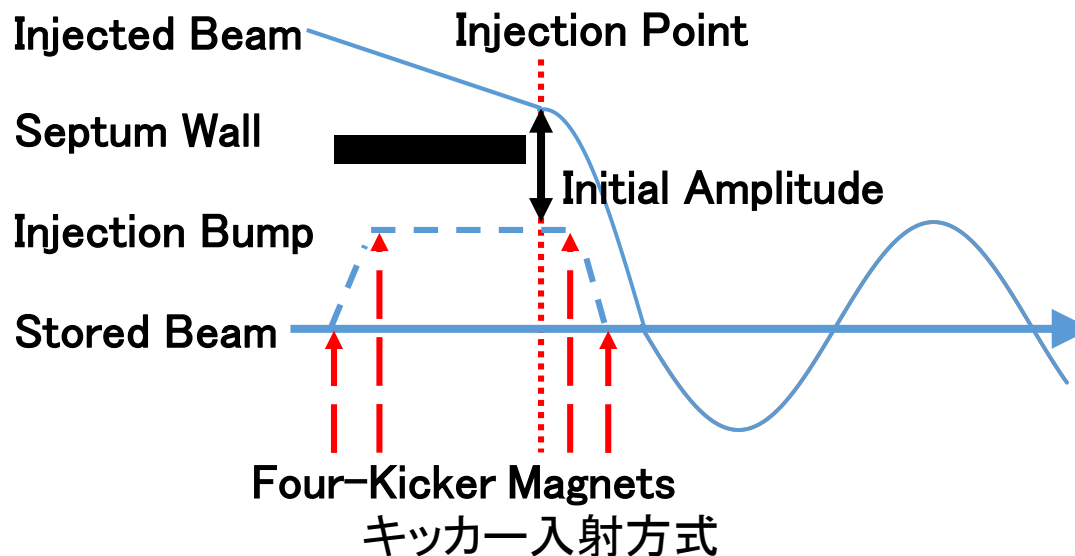
背景

セプトム電磁石のずれ、キッカー電磁石の誤差などが原因となって入射効率の低下の問題となっている

目的

ビームベース測定による、

- ・入射パラメータの測定と調整
- ・入射シミュレーションによる最適なパラメータの探索



1-1 背景と目的

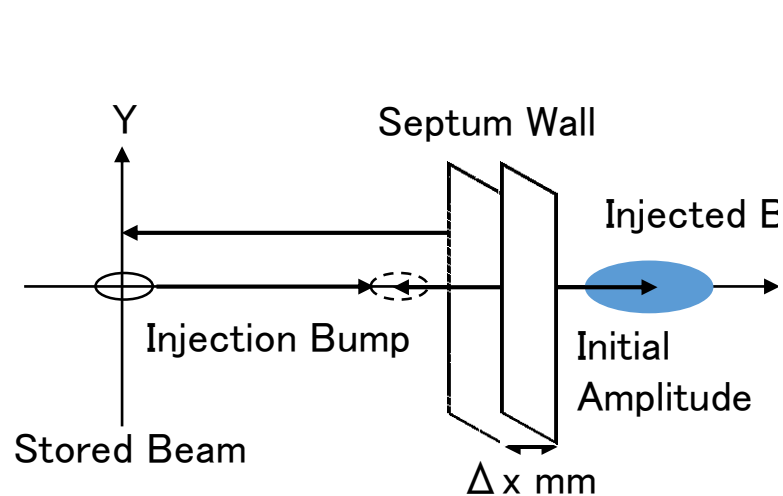
背景

セプタム電磁石のずれ、キッカー電磁石の誤差などが原因となって入射効率の低下の問題となっている

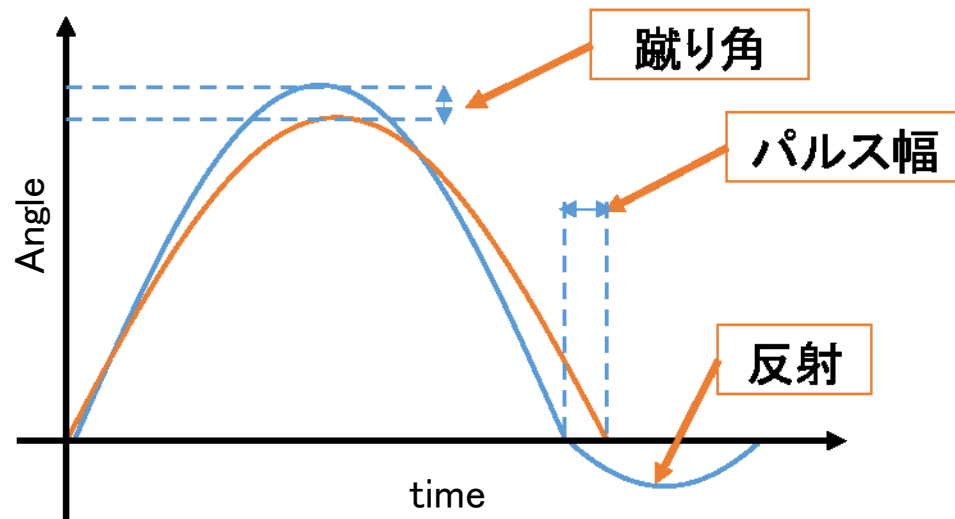
目的

ビームベース測定による、

- ・入射パラメータの測定と調整
- ・入射シミュレーションによる最適なパラメータの探索



セプタム電磁石のずれ

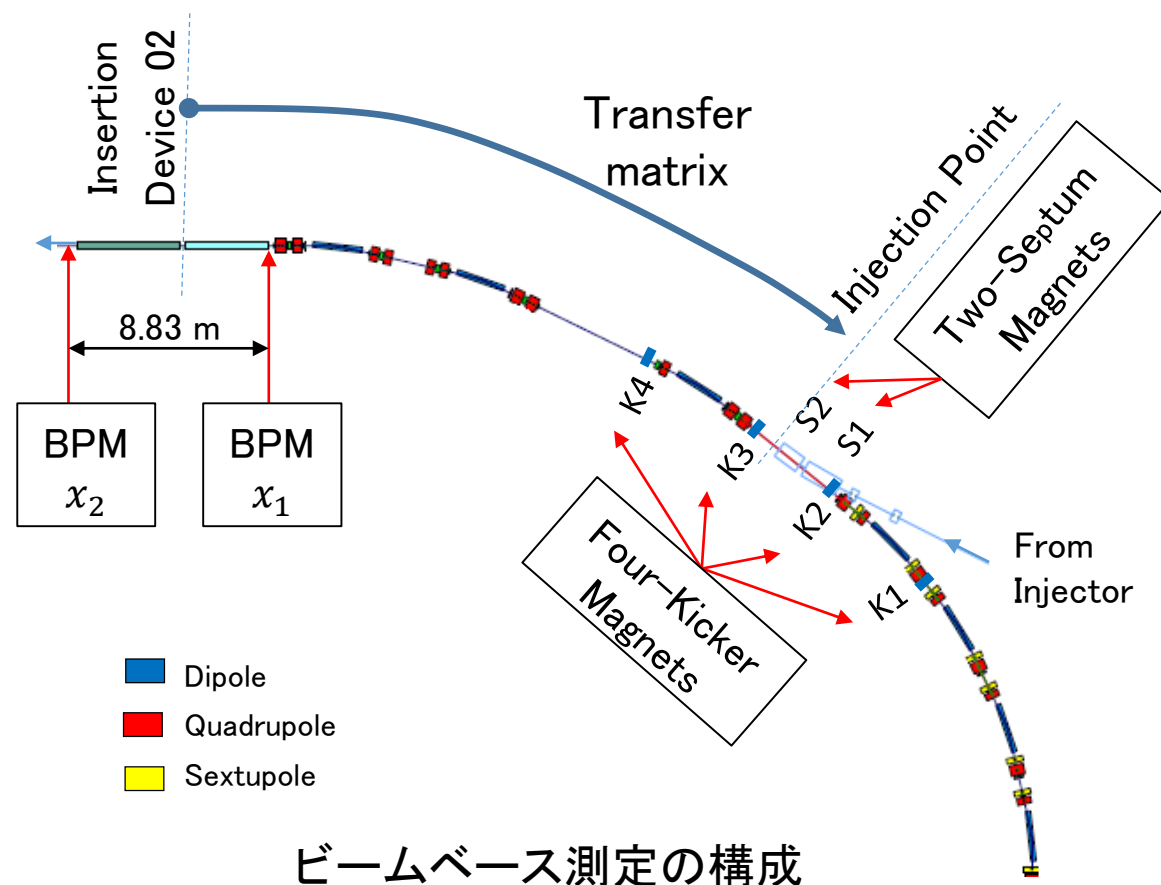


キッカー電磁石の誤差

2-1 ビームベース測定の概要

ビームベース測定

直線部両端の位置情報から中心部の位相空間情報を求め、上流に転送する。
 入射点でのビーム位置関係、キッカー電磁石のパルス波形を調べた。



ビームベース測定の構成

セプタム電磁石の蹴り角

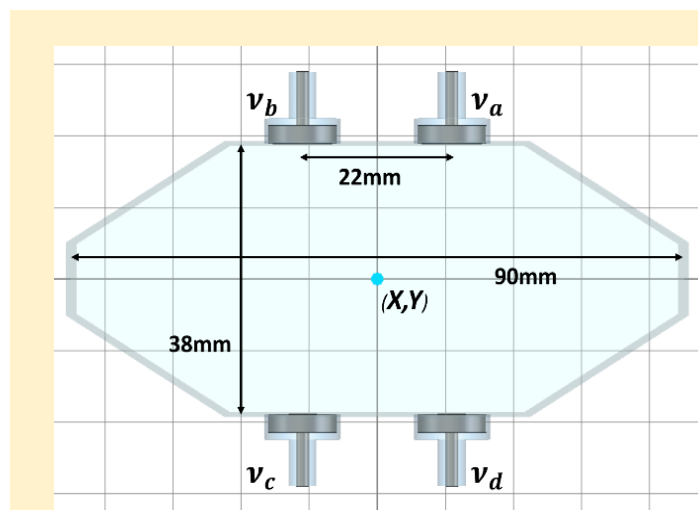
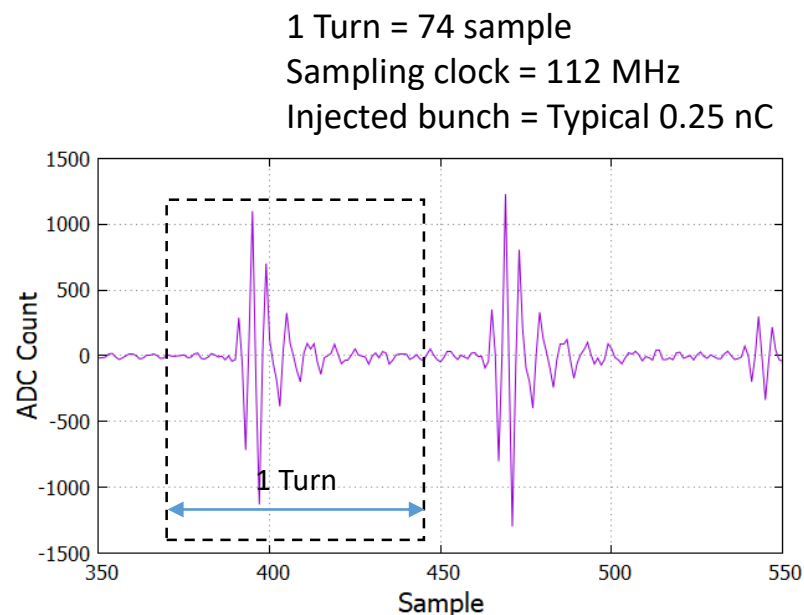
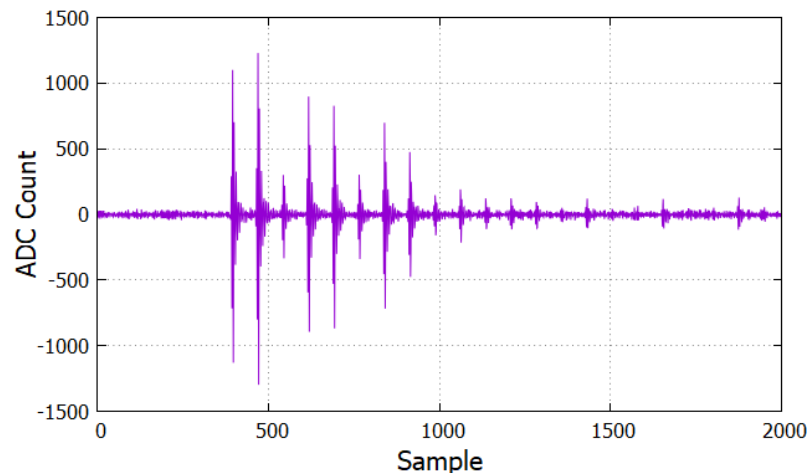
position	設定値		蹴り角-角度
	[mrad]	[A]	[deg]
S1	118.61	5344	6.796
S2	93.69	6281	5.368

Twiss parameters and Phase advanced

	K1	K2	K3	K4	ID02	Inj
α_x	-1.79	-0.62	-1.47	-0.66	0.01	-1.08
β_x	3.25	6.02	13.8	3.15	12.0	9.45
$\Delta\phi_x$	8.01	8.29	1.24	0.86	0.00	1.26

2-2 入射ビームの測定

位置情報の導出(入射ビーム)



BPMダクトの断面図

電極間距離

22 mm(H) × 38mm(V)

三次多項式によるビーム位置の計算

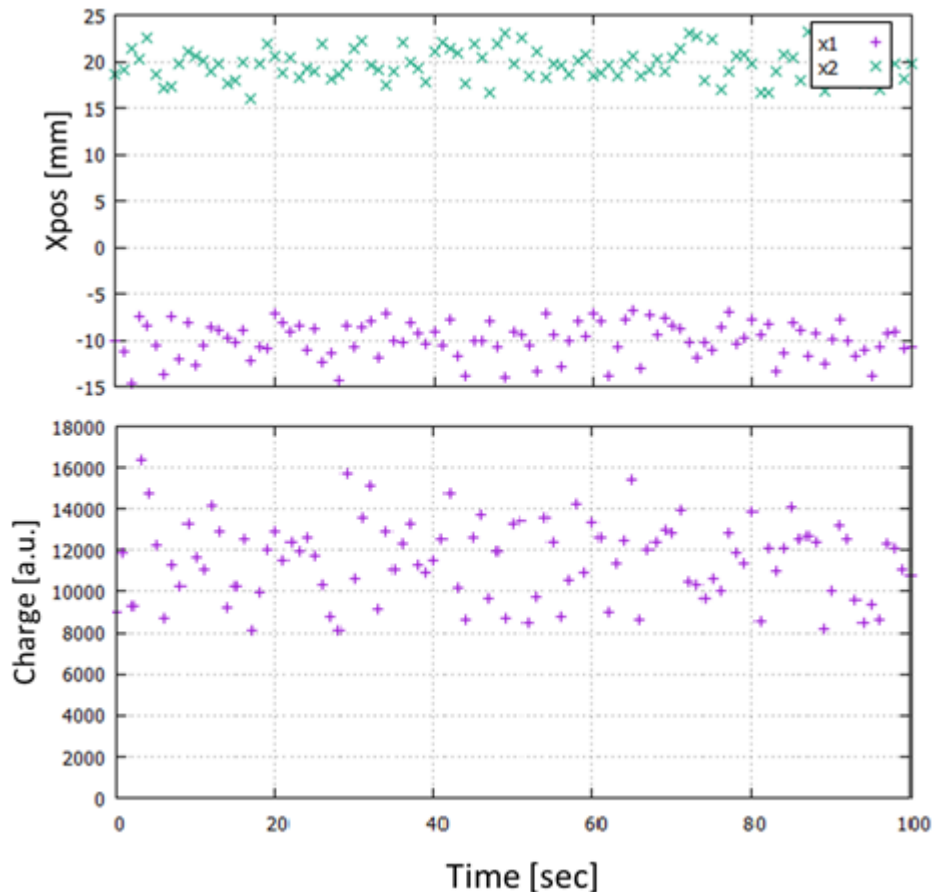
$$x = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 k_x(i, j) U^i V^j$$

Turn-by-Turnのデータ処理

2-2 入射ビームの測定

位置情報の導出

Injection beam
Injected bunch = 0.28 nC, 1 Hz Rep.



X、Yの位置データ



直線部中心の位相空間情報に計算

$$x_{ID02} = \frac{x_2 + x_1}{2}, \quad x'_{ID02} = \frac{x_2 - x_1}{l}$$

$l = 8.83 [m]$



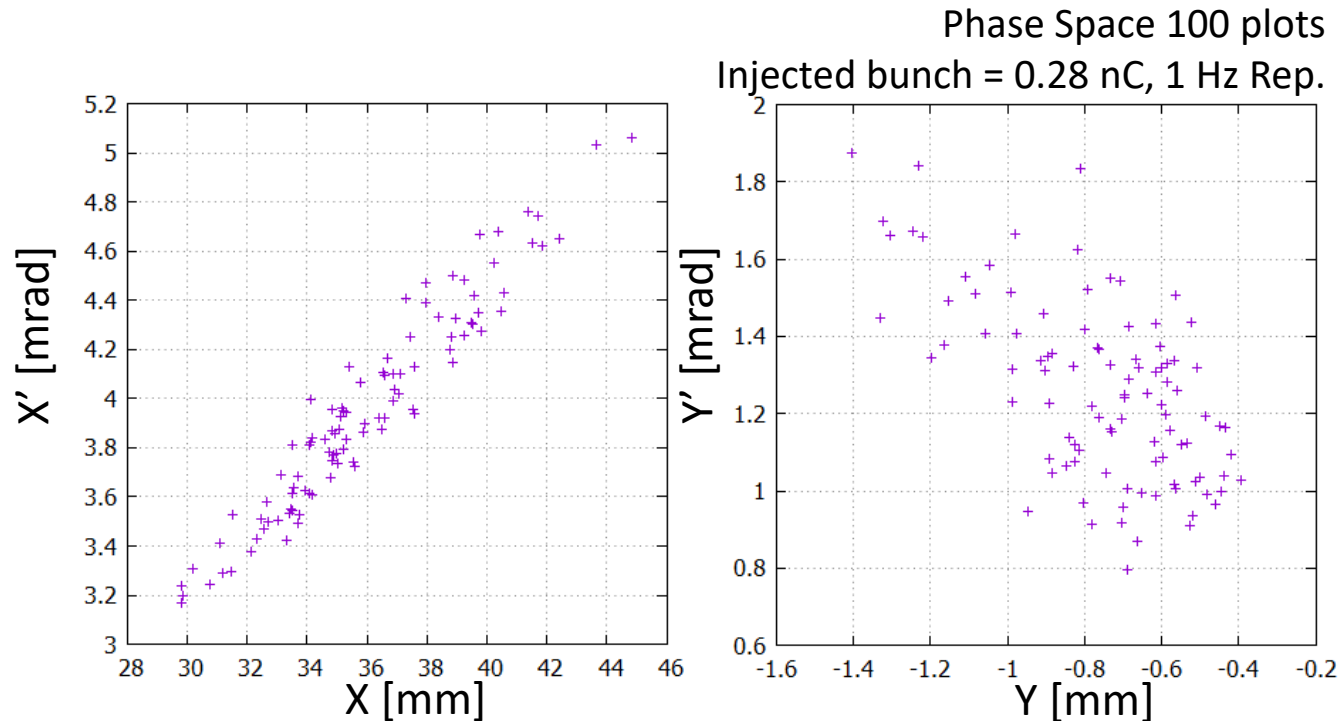
入射点へ転送

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}_{Inj} = M \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}_{ID02}$$

2-2 入射ビームの測定

入射ビームの測定結果

入射バンチを測定してセプタム電磁石出口まで転送して位相空間にプロット。



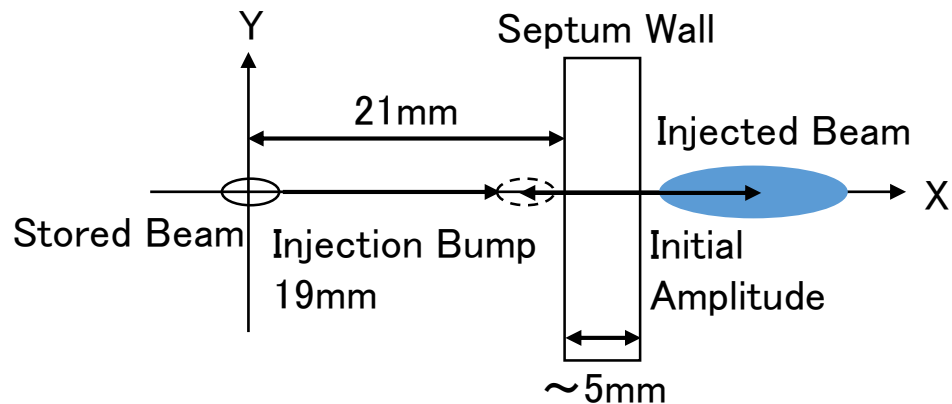
入射ビームの位相空間情報

	position[mm]	angle[mrad]
Horizontal	35.9 ± 3.2	3.95 ± 0.42
Vertical	-0.76 ± 0.23	1.26 ± 0.23

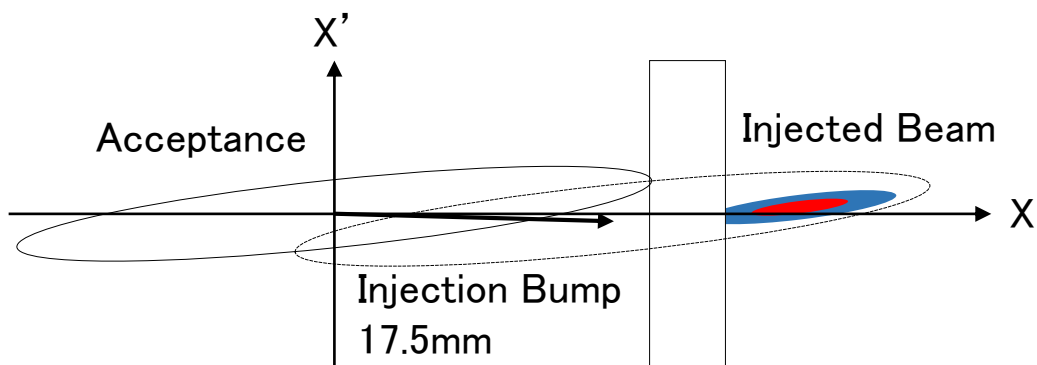
2-2 入射ビームの測定

入射点でのビームの位置関係

入射ビームの位置を蓄積ビームとの相対座標になおす



測量による推定



ビームベース測定の結果

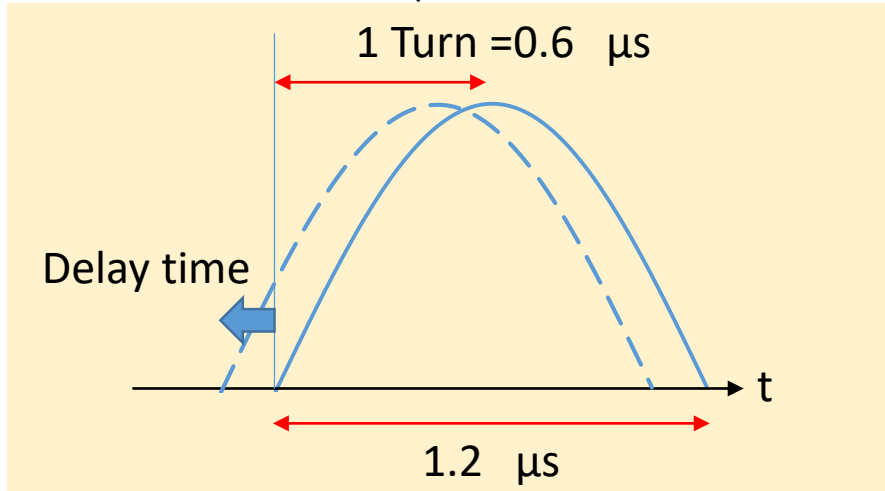
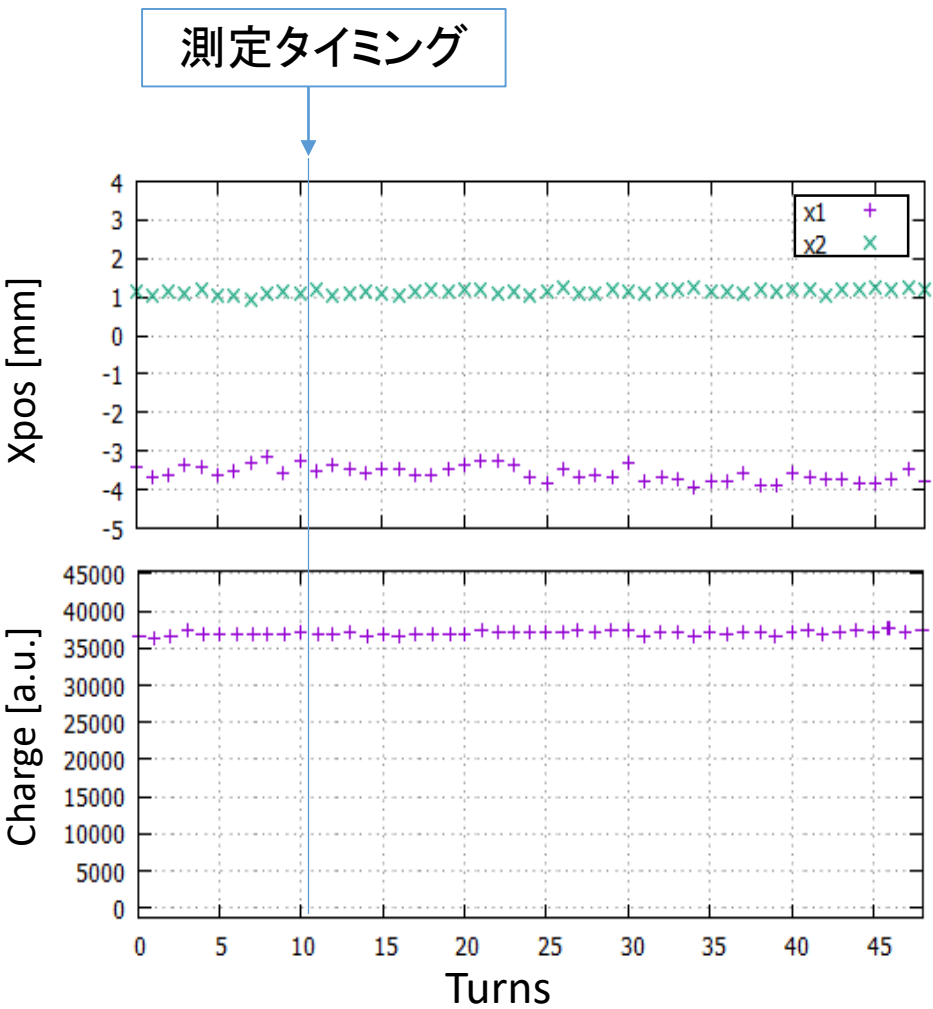
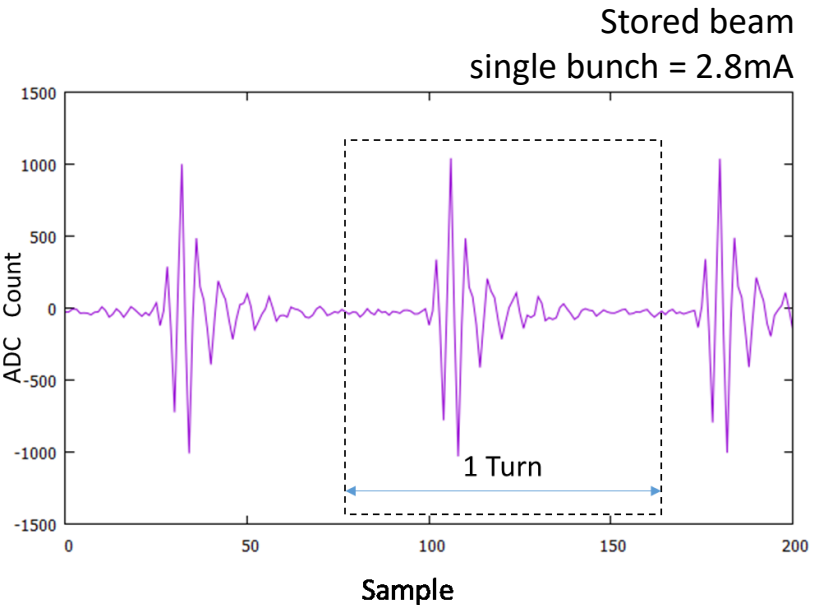
中心軌道との相対座標

	position[mm]	angle[mrad]
Horizontal	30.5 ± 3.2	3.11 ± 0.42
Vertical	0.06 ± 0.23	1.02 ± 0.23

- 測量結果とビームベース測定の結果は一致。
- 水平方向の計算値 (27 mm、2.4 mrad)からずれの傾向を確認。

2-3 キッカー電磁石のビーム応答測定

位置情報の導出(蓄積ビーム)



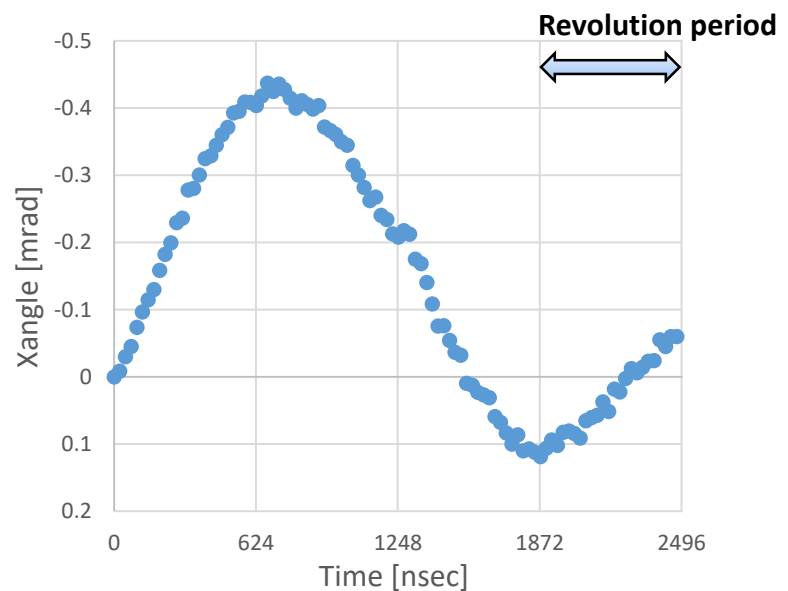
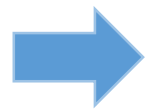
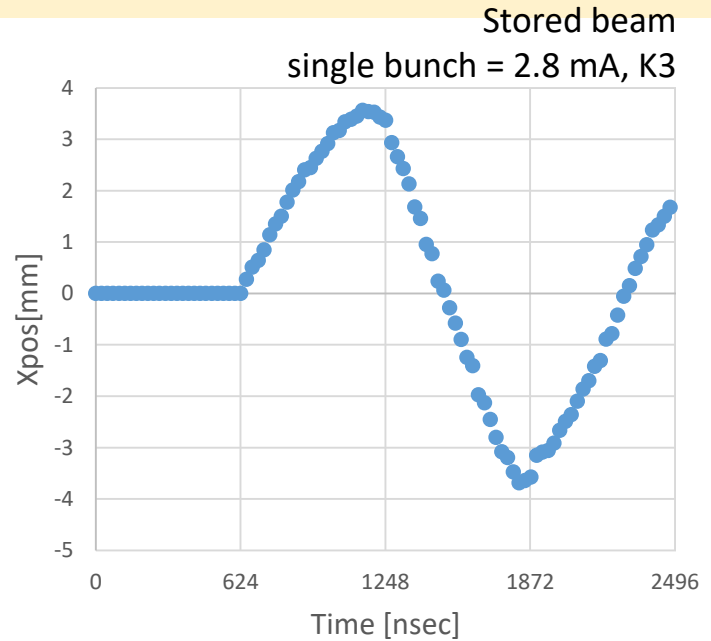
2-3 キッカー電磁石のビーム応答測定

キッカーパルス波形の再構築

キッカー電磁石を励磁して蓄積ビームの振動を測定。直線部の情報から蹴り角を導出、パルスのタイミングを遅延時間方向に掃引した結果からパルス波形に再構築する。

・パルス波形の計算

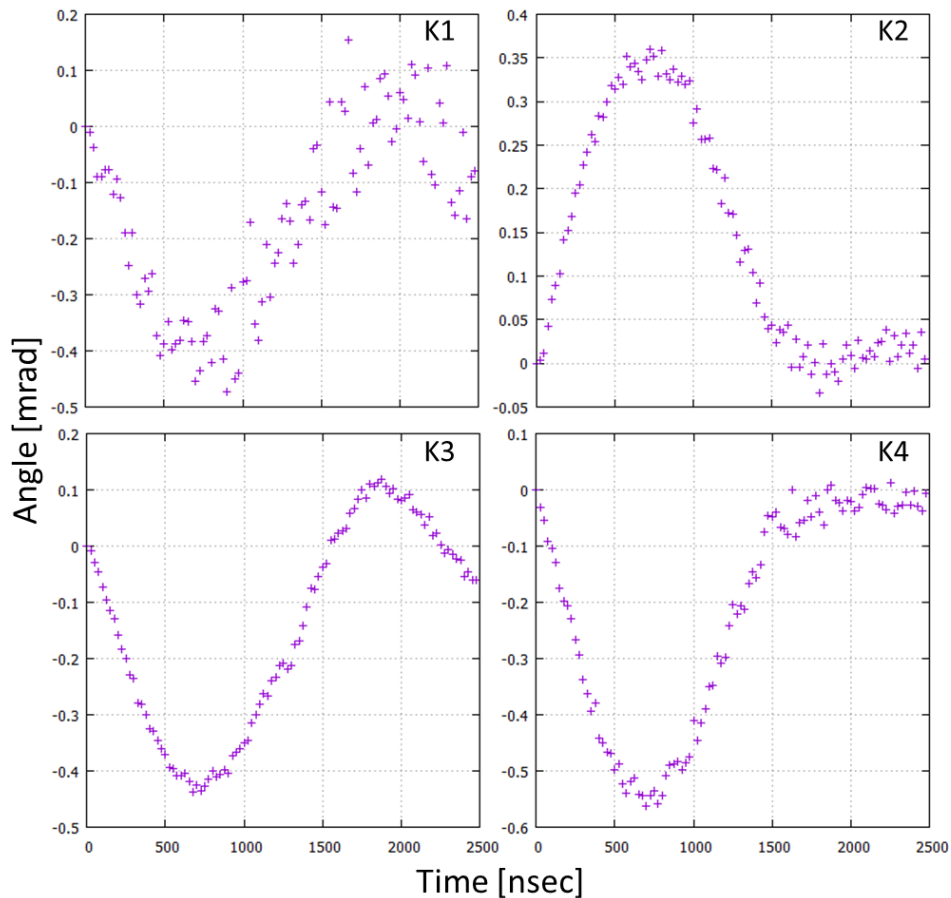
$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ x'_{n+1} \end{pmatrix}_{BPM} = \begin{cases} M_{BK} \left\{ M_{KB} \begin{pmatrix} x_n \\ x'_n \end{pmatrix}_{BPM} + \begin{pmatrix} 0 \\ \theta(t) \end{pmatrix}_{Kicker} \right\} & : \theta(t) \neq 0 \\ M_C^n \begin{pmatrix} x_n \\ x'_n \end{pmatrix}_{BPM} & : \theta(t) = 0 \end{cases}$$



2-3 キッカー電磁石のビーム応答測定

キッカーパルス波形の測定結果

Stored beam
Kick angle 0.4 mrad



ベータ関数と位相進み

	K1	K2	K3	K4	ID02
β_x	3.25	6.02	13.8	3.15	12.0
$\Delta\varphi_x$	8.01	8.29	1.24	0.86	0.00

*K1はID01から再構築

キッカー電磁石の蹴り角とパルス長(0-0)

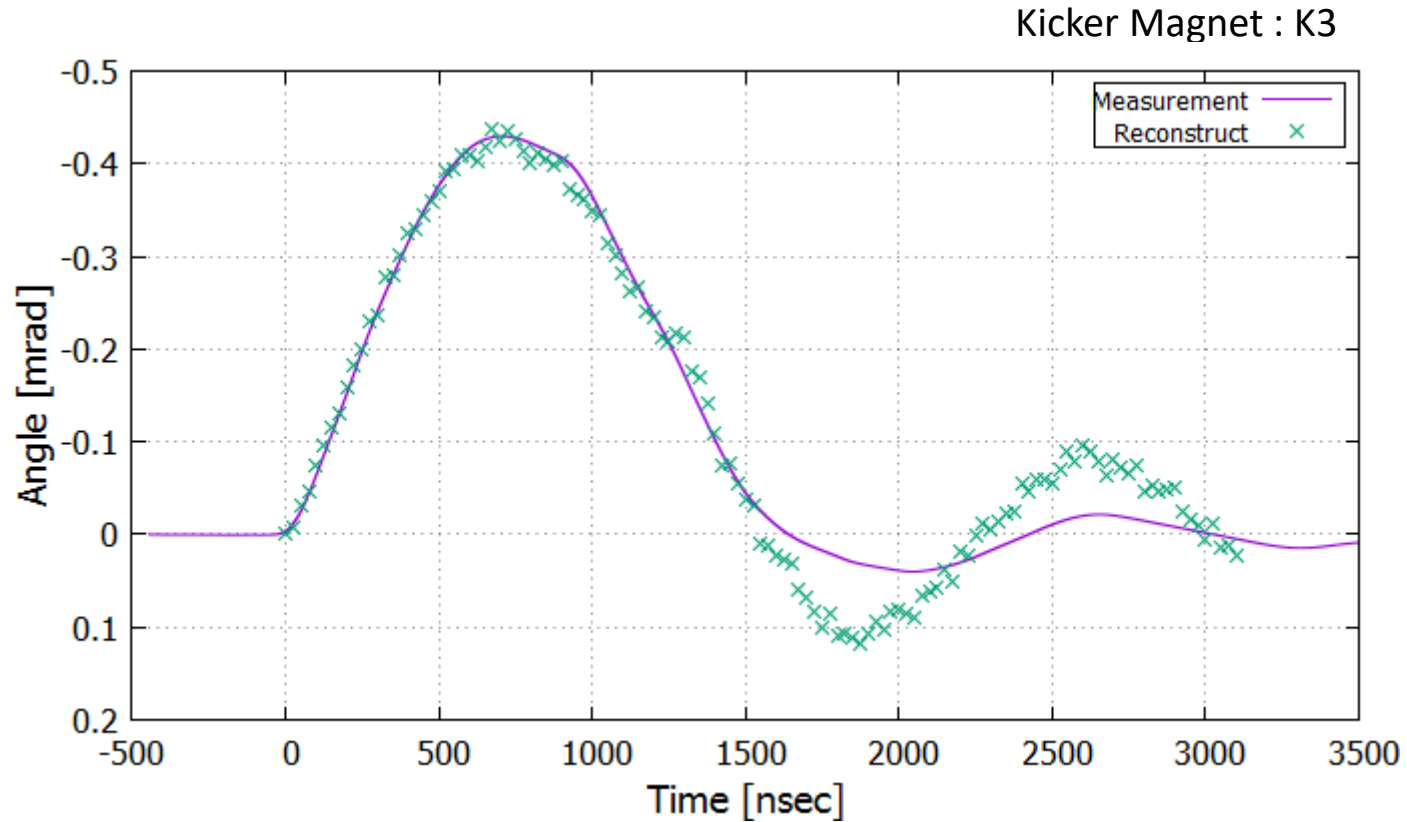
	K1	K2	K3	K4
Kick angle [mrad]	-0.414	0.351	-0.452	-0.539
Pulse length [nsec]	1550	1625	1575	1625

- パルスの波形から電流値-蹴り角の校正を実施、振幅の高さやタイミングを調整。

2-3 キッカー電磁石のビーム応答測定

磁場測定との比較

リングからキッカー電磁石K3を取り出して磁場測定を行った結果とビームの応答からパルス波形を再構築した結果を比較。



- 磁場測定とビームベース測定は1500 nsecまで一致
- パルス幅とアンダーシュートの部分が異なる

3-1 入射シミュレーション

多粒子トラッキング(設計モデル)

入射効率の計算は、粒子を生成して放射減衰のスケールまでトラッキングする。
アパーチャーを超えた場合、粒子は失われる。

計算条件1

- ・アパーチャー

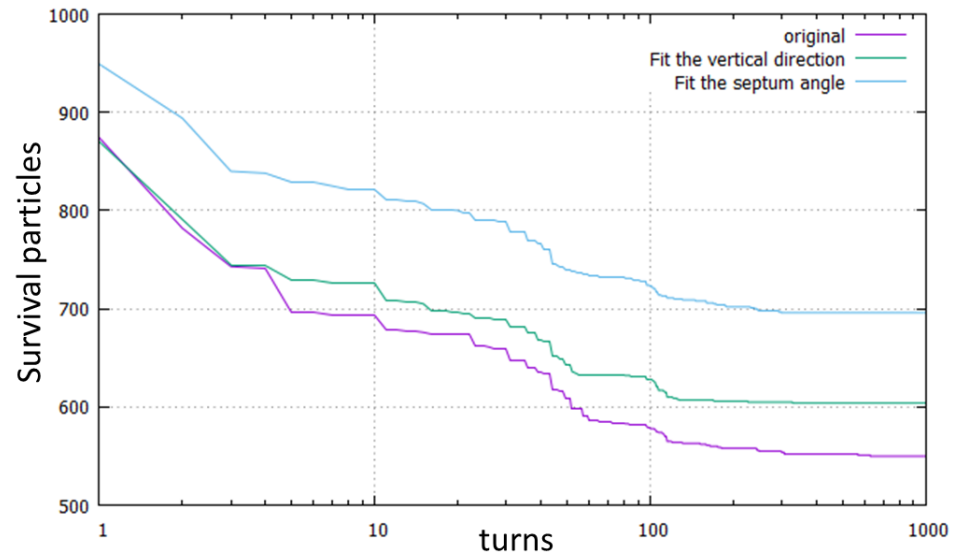
Position	Aperture [mm]		Betatron function [m]
	x	y	Design
ID16	-	7.5	5.00
ID14	16	-	7.96
SEPTUM	21	-	9.44

- ・生成粒子

ビームベースの測定結果

- ・シングルキック

計算結果



3-1 入射シミュレーション

Opticsの測定

・LOCOモデル

蓄積リングの補正電磁石を微小な角度で蹴り、BPMで観測される振動の応答行列から加速器パラメータを推定する手法。推定は軌道レスポンスと実測のレスポンスの残差が最小となるように加速器パラメータをフィッティングして行う。

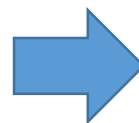
$$\chi^2 = \sum_{i,j} \frac{(R_{mod,ij} - R_{meas,ij})^2}{\sigma_i^2}$$

i : BPM
 j : Steering magnet
 σ : BPM noise level

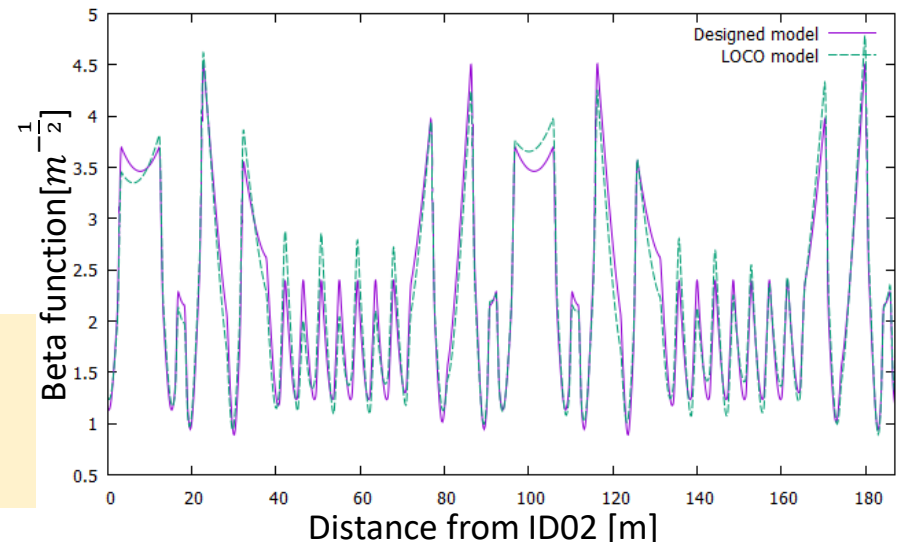
LOCOパラメータ

name		Number
Horizontal	mrad/A	28
Vertical	mrad/A	42
K-quadrupole.	m^{-2}	72
Momentum compaction	-	
Skew-quad.	mrad	14

Fitting



収束
5.10 $\mu\text{m(H)}$
2.87 $\mu\text{m(V)}$



3-2 入射シミュレーション

多粒子トラッキング (LOCOモデル)

計算条件2

- ・アパーチャー

Position	Aperture [mm]		β [m]	
	x	y	LOCO	X
ID16	-	7.5	5.07	
ID14	16	-	6.15	5.67→6.45
SEPTUM	21	-	11.71	6.50→5.84

- ・入射粒子

入射ビームの測定結果を使用

- ・マルチキック
- ・Optics (LOCOモデル)

- 入射効率 計算値: 31.8~57.3 % 測定値: 25.0~52.7 % (20180706)
- 水平方向のアパーチャーで粒子を落とす。
- K1のマルチキックで入射の振幅は小さくなる。

計算結果

- ・Design Optics

	Single Kick	Multi Kick
Original	<u>55.0</u>	57.4
Fix the vertical	<u>60.4</u>	62.1
Fix the septum angle	<u>69.6</u>	62.5

- ・LOCOモデル

	Single Kick	Multi Kick
Original	25.8	<u>31.8</u>
Fix the vertical	49.2	<u>55.6</u>
Fix the septum angle	63.4	<u>57.3</u>

4 まとめ

まとめ

PFリングにおいて問題であった入射効率の低下の問題を、ビームの応答から原因を調べ、入射ビームの位相空間情報の特定やキッカー電磁石の校正を行った。

入射パラメータの測定

- 入射ビームの位相空間情報を得た
- キッカー電磁石の振幅、タイミングの情報を得て、バンプの問題を確認した

入射シミュレーション

- 現在の入射効率は計算値範囲内(31.8~57.6%)に存在する
- 入射効率低下の大きな原因は水平方向のずれである

今後の展望

- キッカー電磁石K1のパルス波形を再測定
- セプタム電磁石の設計に反映
- 測定で得た結果のシミュレーションから入射の最適化