

# SuperKEKBにおける スキュー六極磁場の試験導入

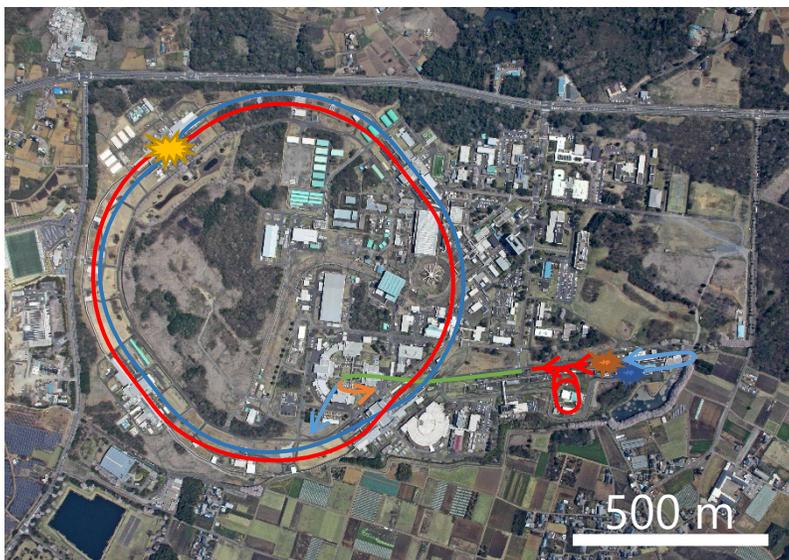
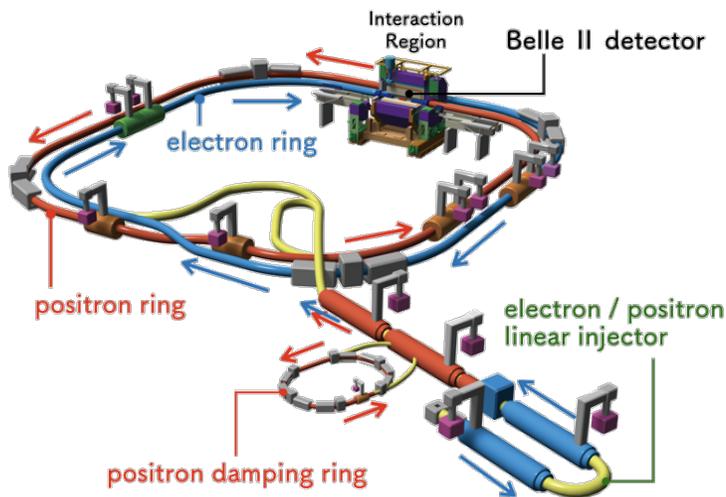
中村 衆<sup>#</sup>, 増澤美佳, 菅原龍平, 植木竜一, 川本崇, 大見和史,  
Zhou Demin, 森田昭夫, 大西幸喜, 杉本寛, 小磯晴代

KEK

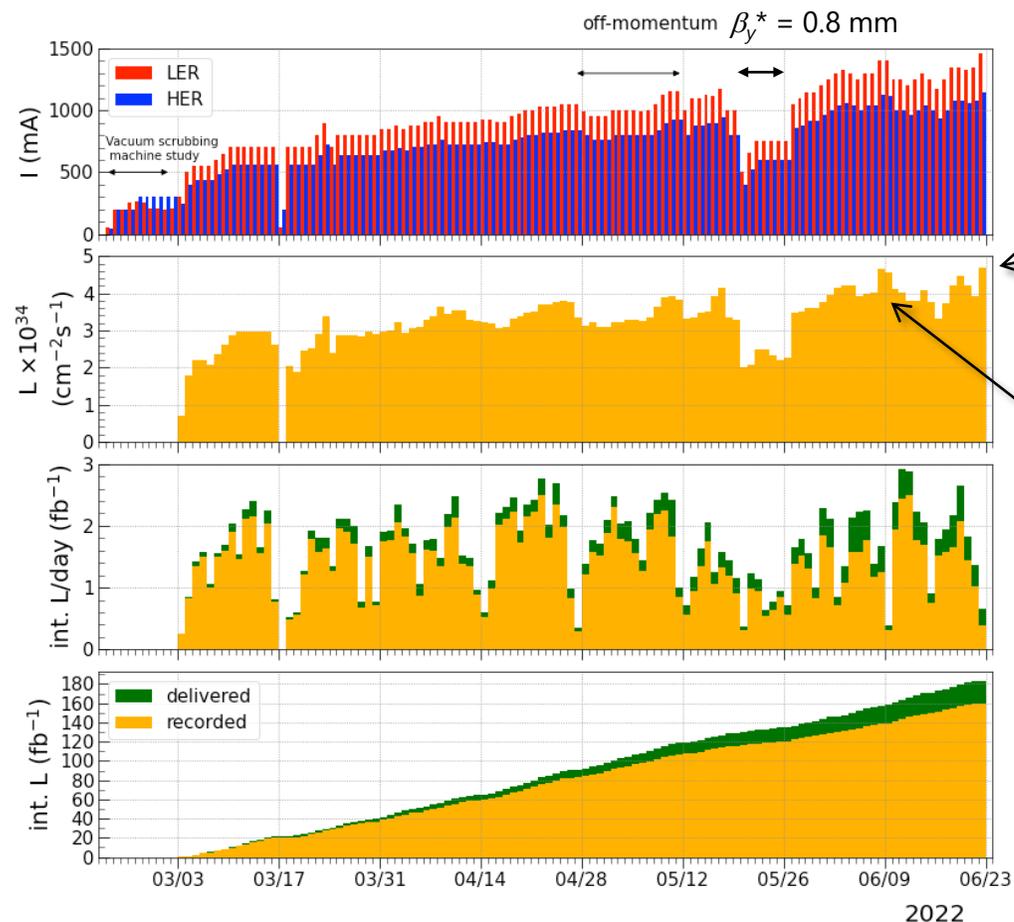
# Contents

1. Introduction
2. Chromatic x-y coupling補正
  - KEKB
  - SuperKEKB
3. 回転機構
4. 回転軸と磁極中心軸
5. ビームコミッショニング
6. Summary

# 1. Introduction



## 2022年2月～6月の運転



**Belle II HV OFF**  
 $4.71 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

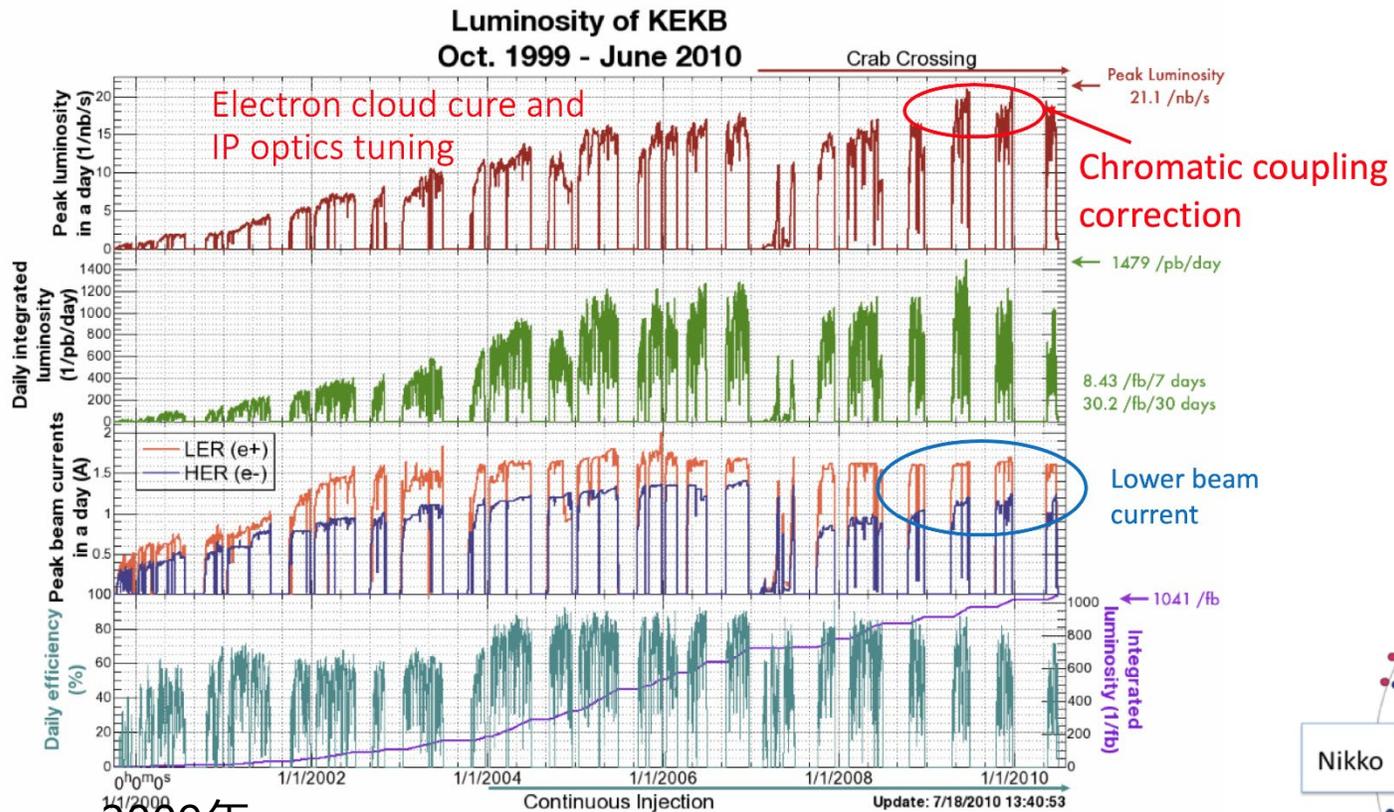
**Belle II HV ON**  
 $4.65 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

delivered:  
 $184 \text{ fb}^{-1}$   
 recorded:  
 $160 \text{ fb}^{-1}$

詳細は  
 ポスター TFP001

# 2. Chromatic x-y coupling補正@KEKB

## KEKBで見られたChromatic couplingの影響



2009年

HERに10対(20台)

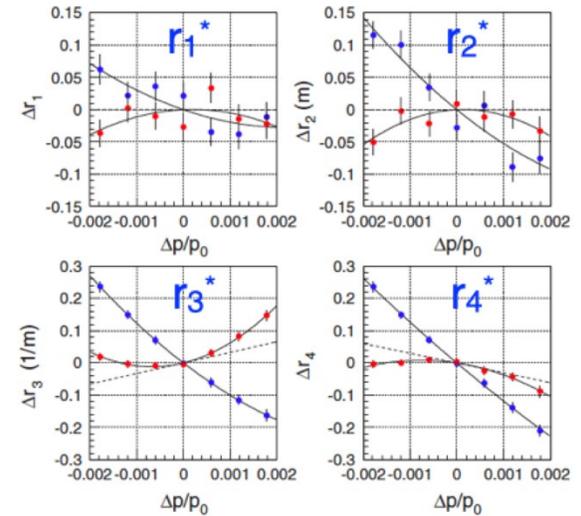
LERに4対(8台)

のスキュー六極電磁石を導入

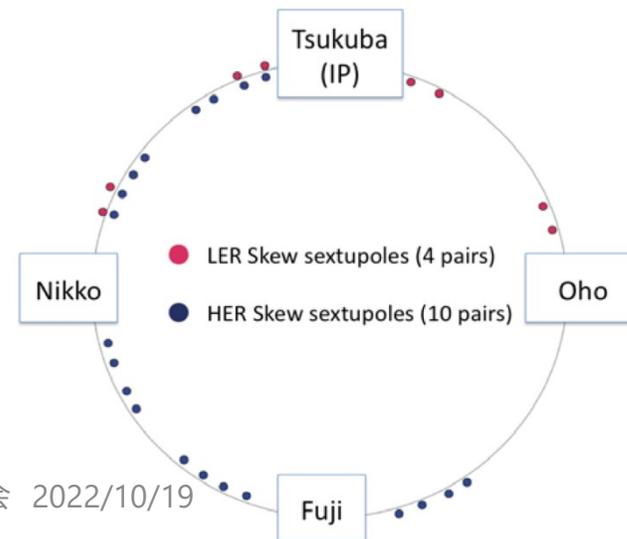
第19回加速器学会年会 2022/10/19

## この時に計測されたChromatic coupling

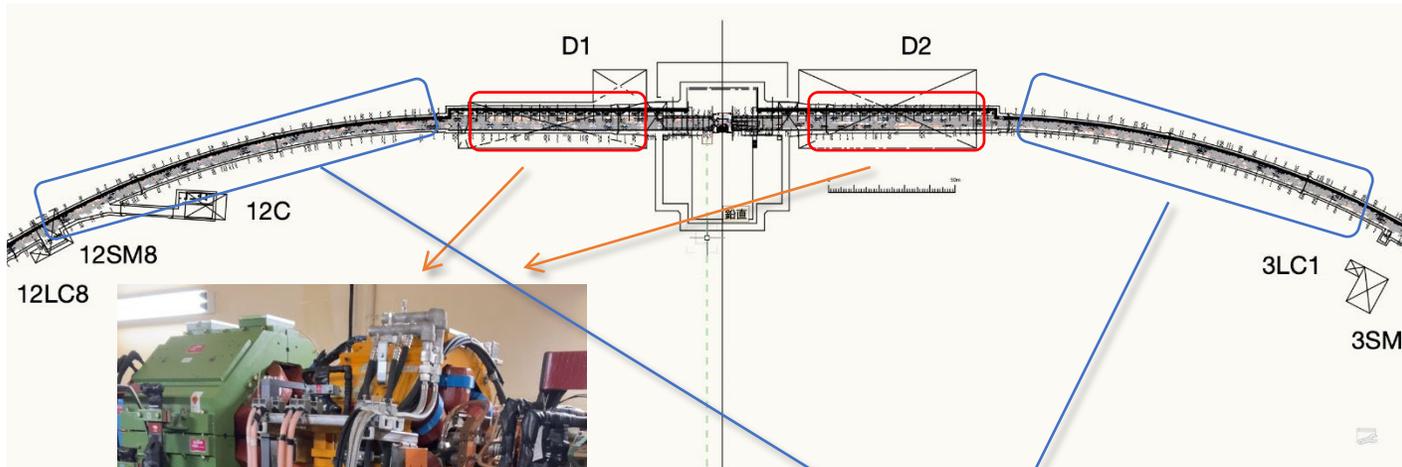
- RF周波数のシフトとして計測されたx-y couplingパラメータ
- 青点は補正前、赤点は補正後
- 補正後にルミノシティは20%増加



Y. Ohnishi et al., PRSTAB 12, 091002(2009)



# 2. Chromatic x-y coupling補正@SuperKEKB



## 衝突点の左右にある六極電磁石(LER)

- 左右12台ずつ、計24台。
- 架台を意図的に傾けることでスキュー六極磁場を作る。
- 傾ける角度は任意に設定できる。
- 傾きは遠隔から操作できる。
- 架台は既存のものより“高く”ならない。

## 2. なぜ磁石を回転させるのか？

□KEKBではHERで20台、LERで8台だったが、SuperKEKBではLERで24台。

- 最終集束の超伝導電磁石群(QCS)において、QC1(LER)がQC1(HER)よりも衝突点に近い。
- Belle II のソレノイド磁場がQC1(LER)付近でキャンセルされない。QC1(HER)付近ではほぼキャンセルされる。

⇒LERで、より強いスキュー六極磁場が補正に必要

□スキュー六極電磁石の新設ではなく、六極電磁石を回転させる。

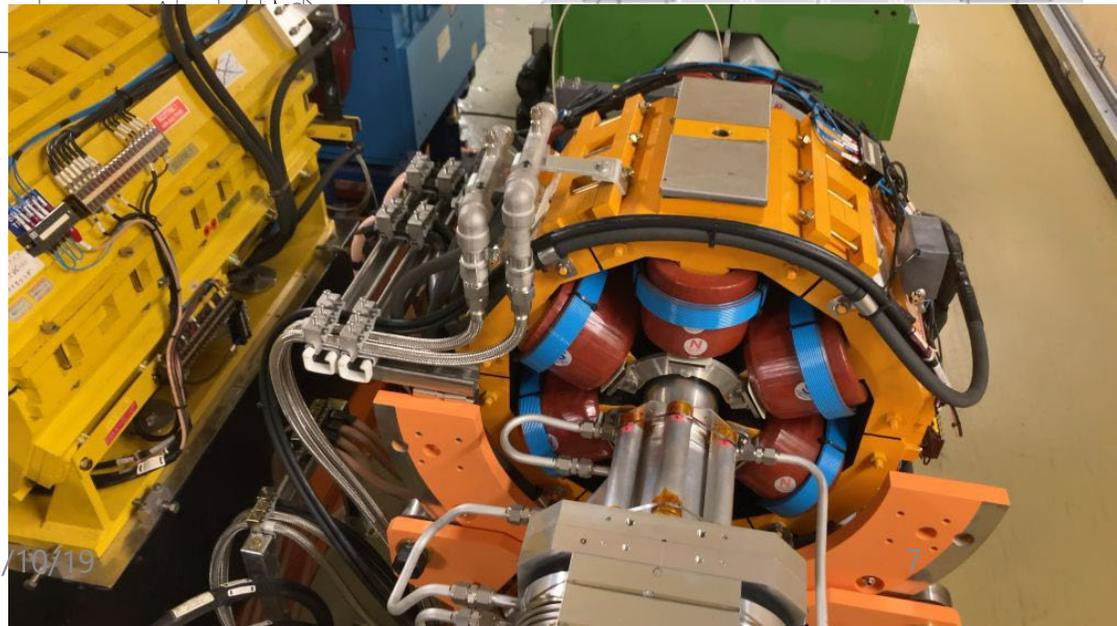
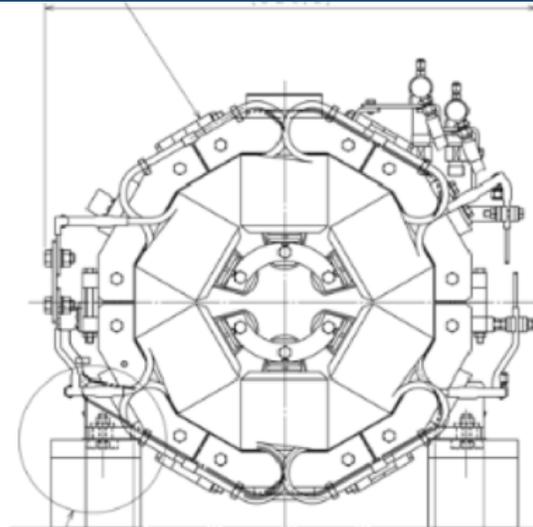
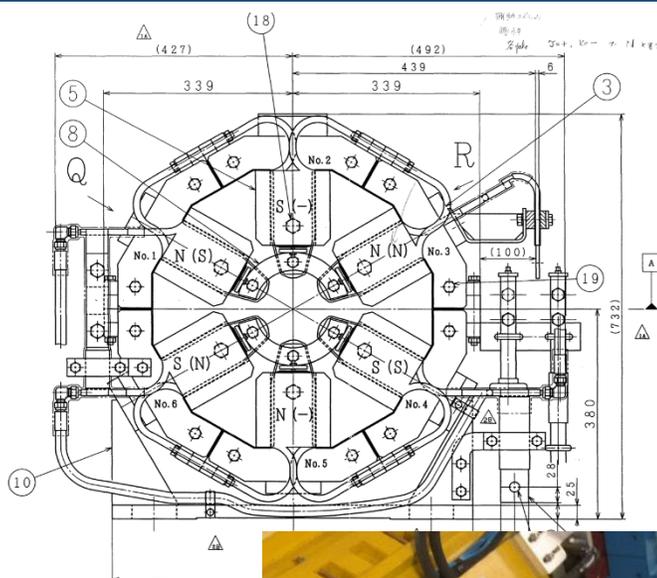
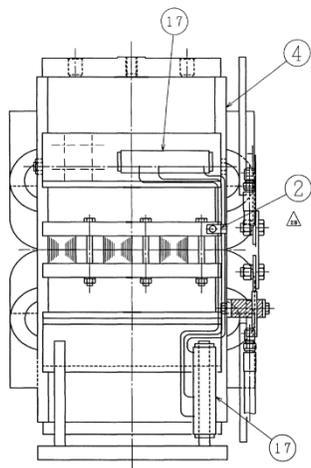
- LERではダイナミックアパーチャーによる制限が問題になりそう。  
→スキュー六極電磁石のペアは、入れ子にならない配置(non-interleaved)で置きたい。
- 衝突点付近に追加で磁石を入れるスペースが無い。

⇒元々ある六極電磁石を回転させる

# 3. コンパクトな回転機構

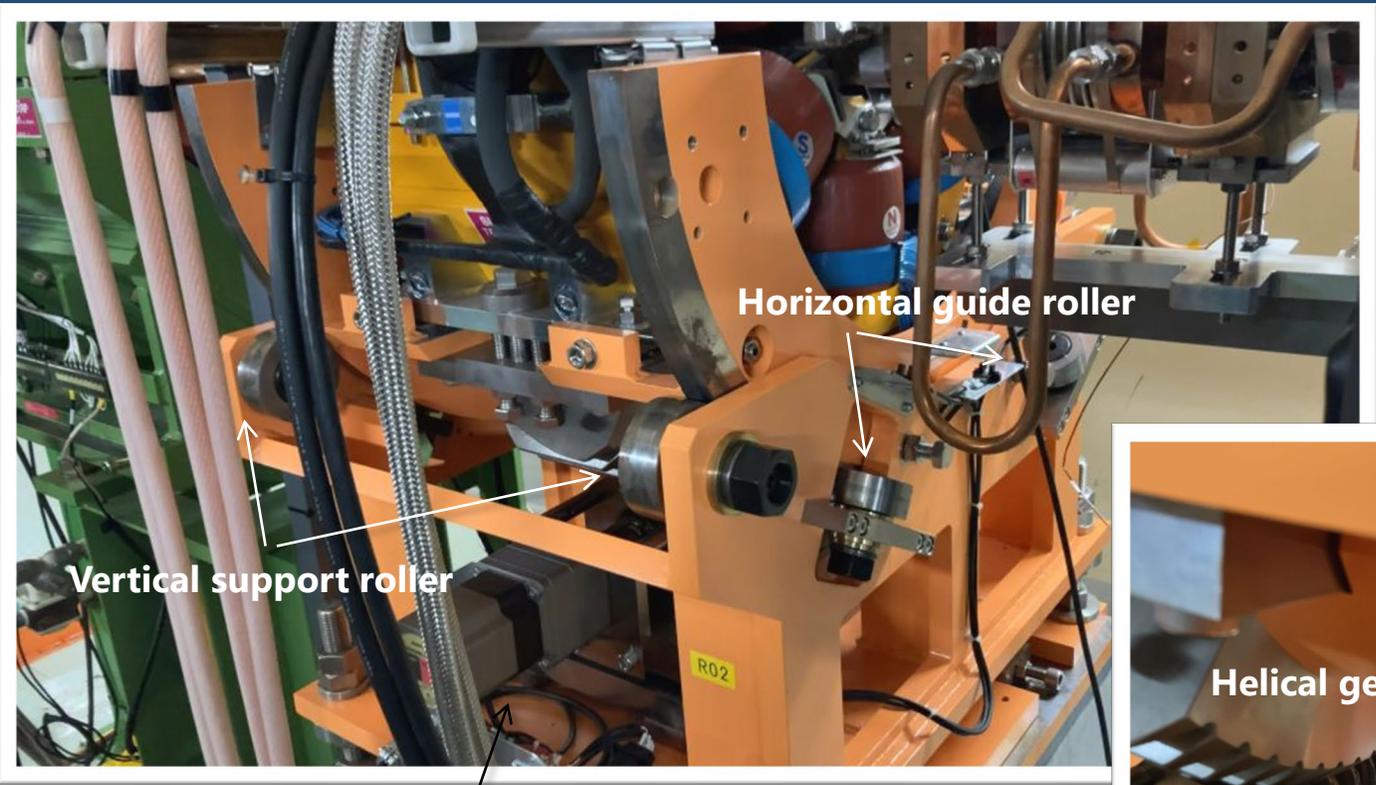
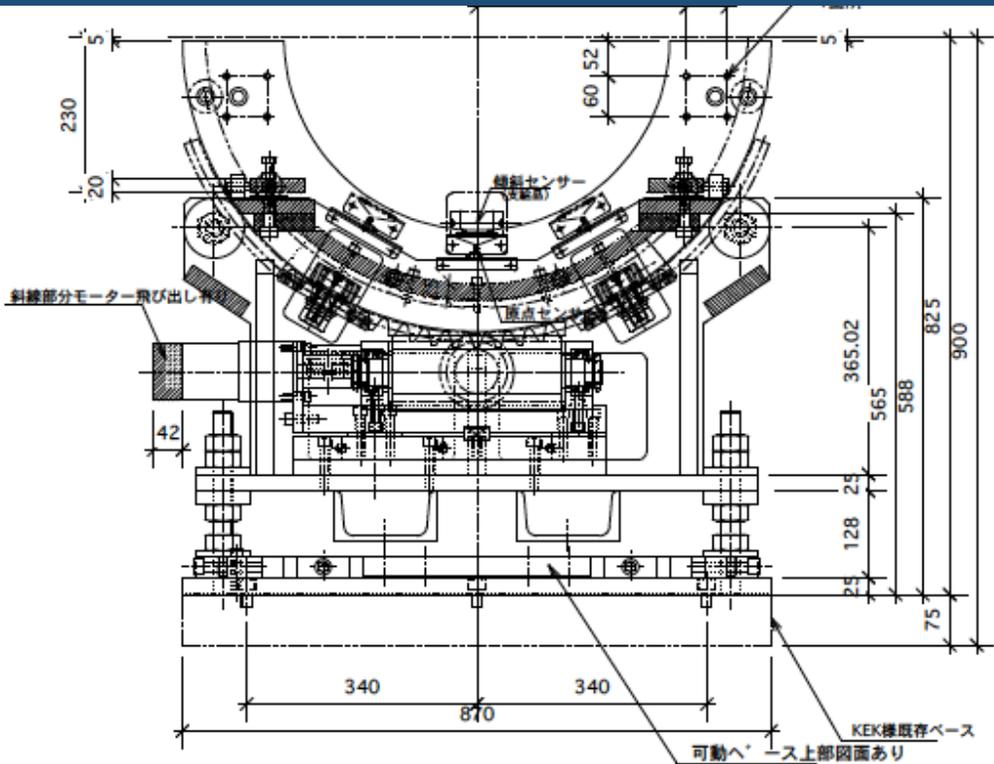
## 六極電磁石の諸元

Bore radius	56 mm
Lamination length	300 mm
Magnet weight	~700 kg
Strength	340 T/m <sup>2</sup>
Max. current	425 A

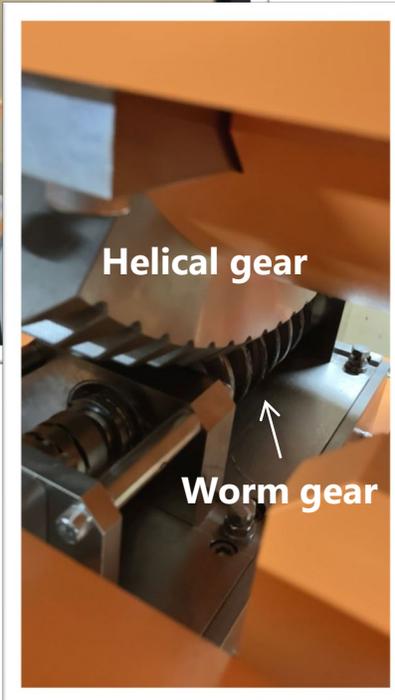


- ❑ 既設の(KEKBで使用していた)六極電磁石を使用する。
  - ❑ そのままでは回転時に干渉する箇所がある。
    - LERとHERが近接している(設置場所の制限)。
- ⇒磁石のブスバー、マニホールドを改造することで磁石をコンパクトに。

# 3. 回転機構の詳細



Pulse motor

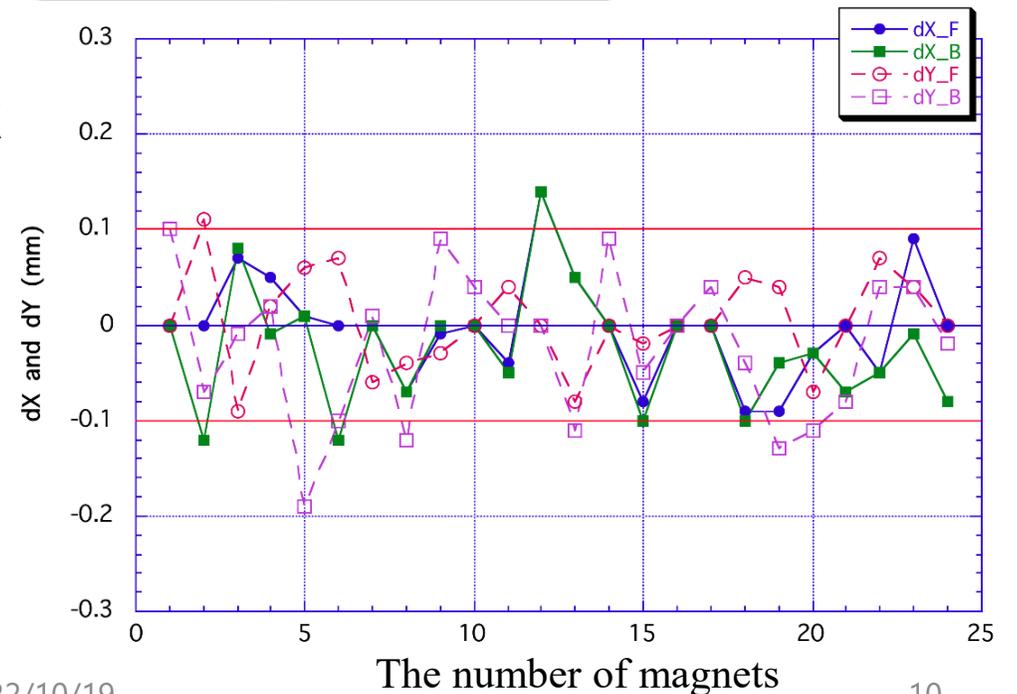


- ❑ 回転角は±30度 → 完全なスキュー六極磁石
- ❑ パルスモーターでウォームギアを回転させ、それと噛み合ったヘリカルギアで回転させる。
- ❑ 水平と垂直方向はローラーでサポートする。
- ❑ 3672000パルスで約32度(558mrad)の回転に相当する(~0.2 μrad/pulse)。

# 4. 回転軸と磁極中心の合わせ



1. 対向する磁極間の隙間にベリリウム銅合金のワイヤー(直径0.1mm)を張り、交点を磁極中心とする。
  2. 回転六極電磁石を3基のレベリングブロックに置き、回転架台上面が水平になるように調整する。
  3. 六極電磁石上面のアラインメント基準座が水平となるように電磁石支持ボルトを調整する。
  4. セオドライト(ライカ製E2)の光軸を、電磁石前面と後面のワイヤー交点に合わせる(座標系の原点)。
  5. 回転架台を+30°回転させてワイヤー交点の座標を計測。
  6. 回転架台を-30°回転させてワイヤー交点の座標を計測。
  7. 回転軸と磁極軸のズレを位置調整ボルトで調整する。
2. ~ 7. を数回繰り返すとズレ量はおおむね0.1mm以下になった。



# 5. ビームコミッショニング@LER

- 衝突点の垂直方向ベータ関数は  $\beta_y^* = 1$  mm。
- LERの単独ビームで垂直方向エミッタンス $\varepsilon_y$ を観測する。
- モデル計算をもとに、回転六極電磁石でChromatic x-y coupling補正を実施した状態を基準とする。
- 局所的なx-y couplingを表す量としてXY結合行列 $R$ を以下のように定義して、今回は $r_1'$ と $r_2'$ でパラメータサーチを実施した。
- 基準からの変化量を $\Delta r_1'$ として、+1, -1, -2での $\varepsilon_y$ を観測した。

$$R = \begin{pmatrix} \mu & 0 & -r_4 & r_2 \\ 0 & \mu & r_3 & -r_1 \\ r_1 & r_2 & \mu & 0 \\ r_3 & r_4 & 0 & \mu \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} u \\ p_u \\ v \\ p_v \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} x \\ p_x \\ y \\ p_y \end{pmatrix}, \quad \mu^2 + (r_1 r_4 - r_2 r_3) = 1$$

$$\partial r_1 / \partial \delta = r_1' \quad (\delta = \Delta p / p)$$

# 5. ビームコミッショニング@LER

右図は8ペア(16台)分の回転角を表す。

$\Delta r_1' = 0 \rightarrow +1$ の変位は1kHzでモーターを駆動し、  
 $\Delta r_1' = 0 \rightarrow +1$ の変位は10kHzで駆動した。

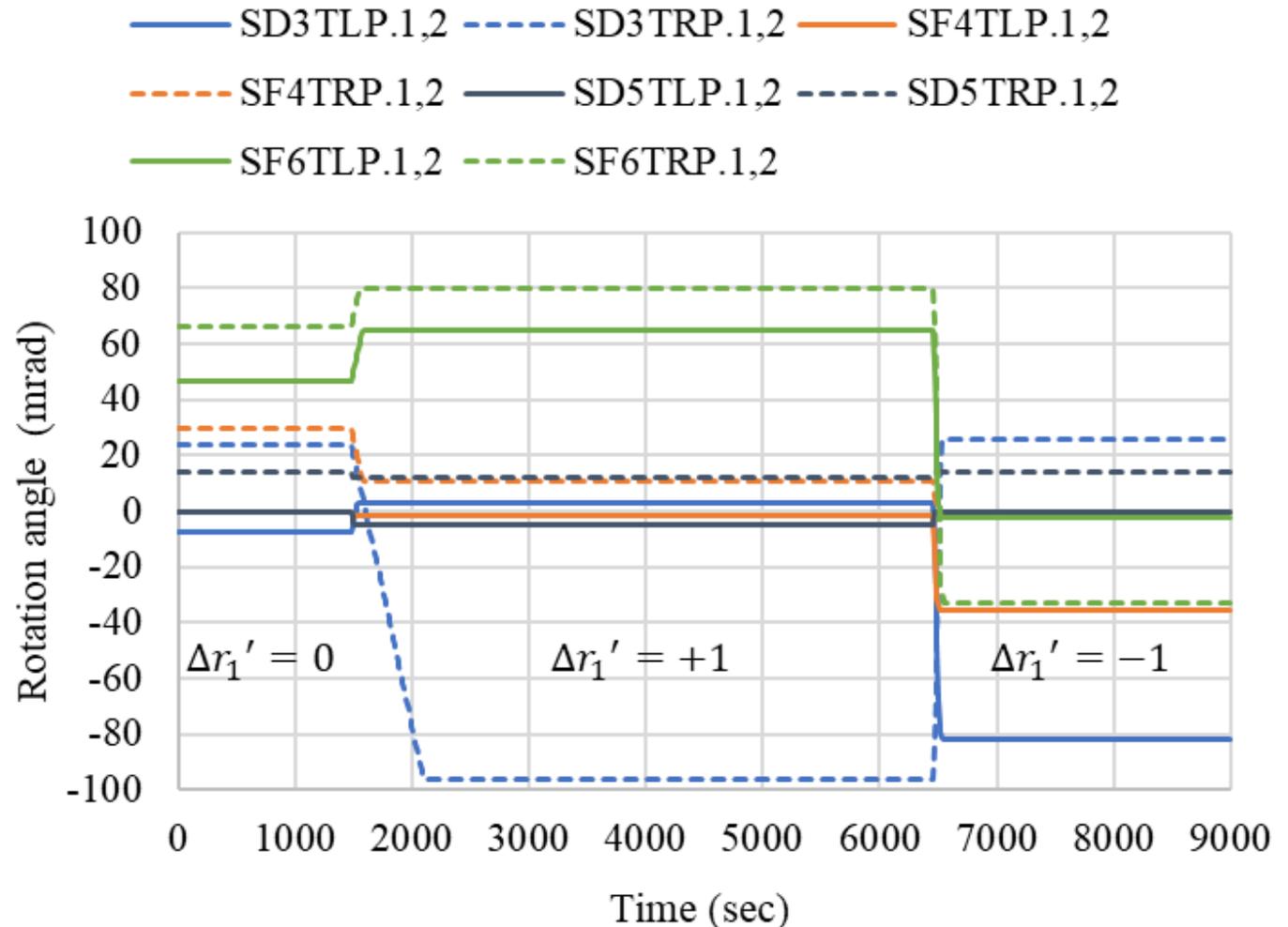
最も大きな回転角は約100mrad(5.7°)。

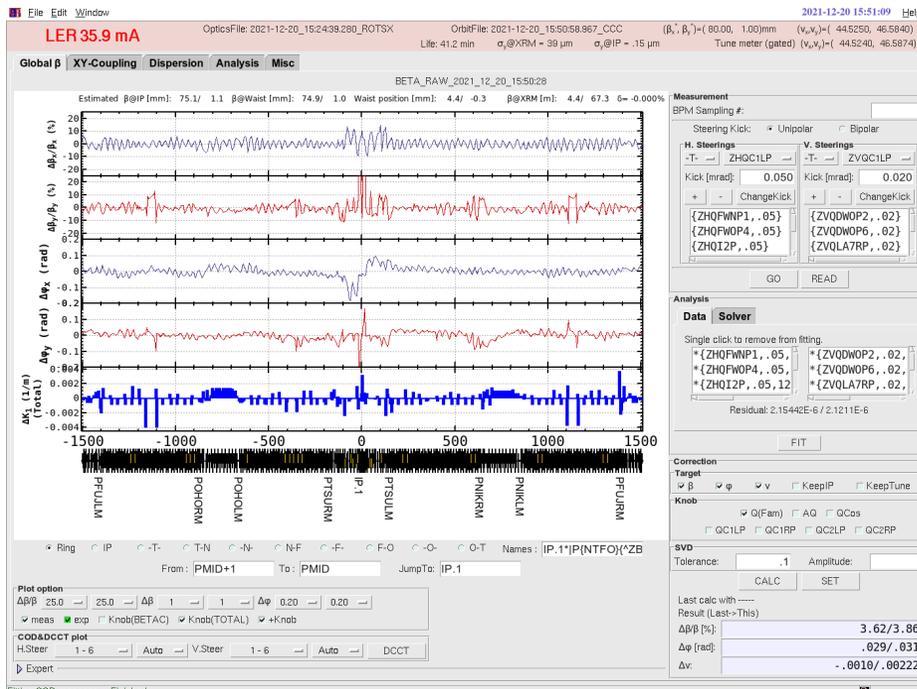
$\Delta r_1' = +1$ の時と、 $\Delta r_1' = -1$ の時にそれぞれ、beta-beat を x-y coupling を計測し、大きく悪化していない事を確認した。

$\Delta r_1' = +1$ の時と、 $\Delta r_1' = -1$ の時とで、問題なく入射できた。

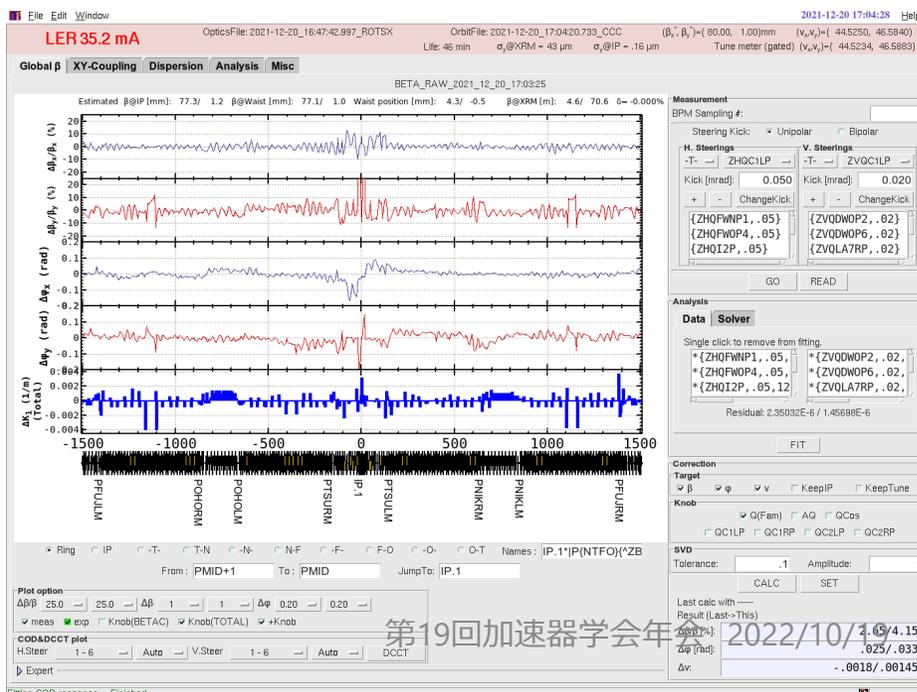
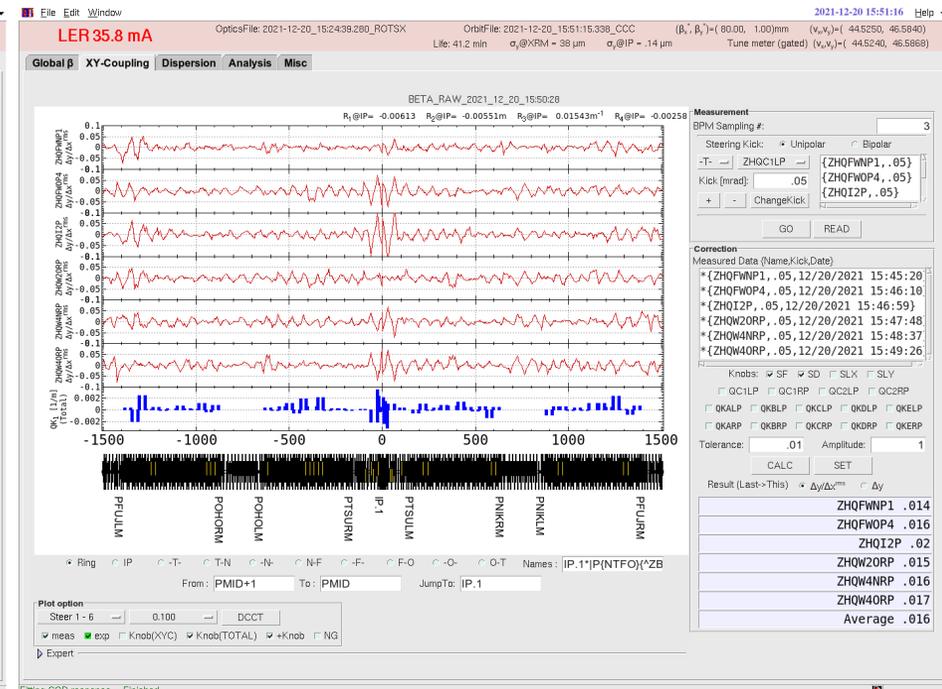
ここでの回転角の変更は、ビームが無い状態で行ったが、コミッショニングの最後に小電流のビームを蓄積した状態で回転角の変更を行った。

→ビームアボートやビームロスが発生せず。

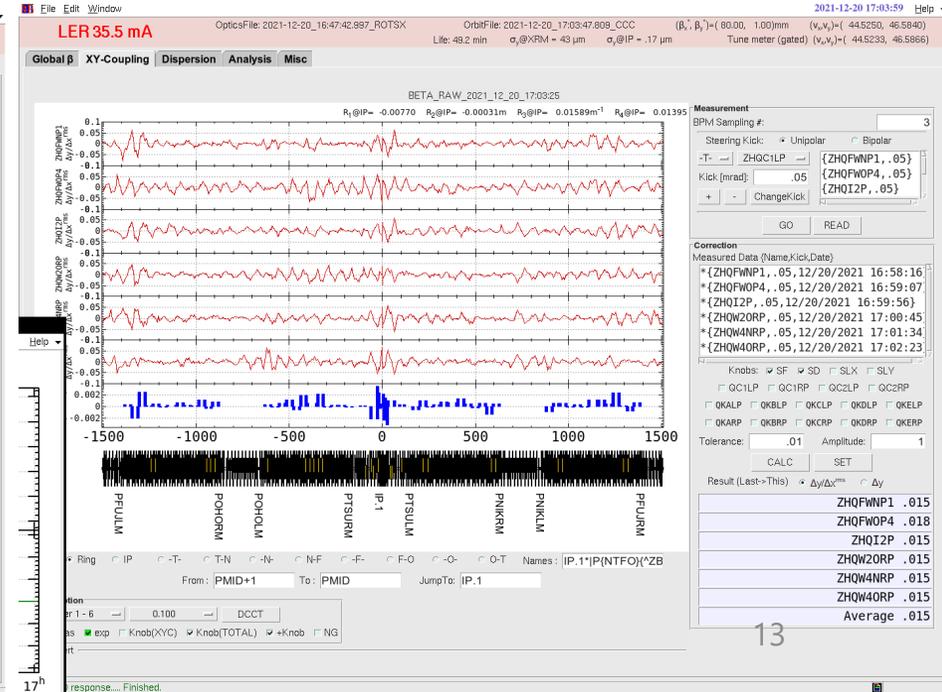




$$\Delta r_1' = +1$$



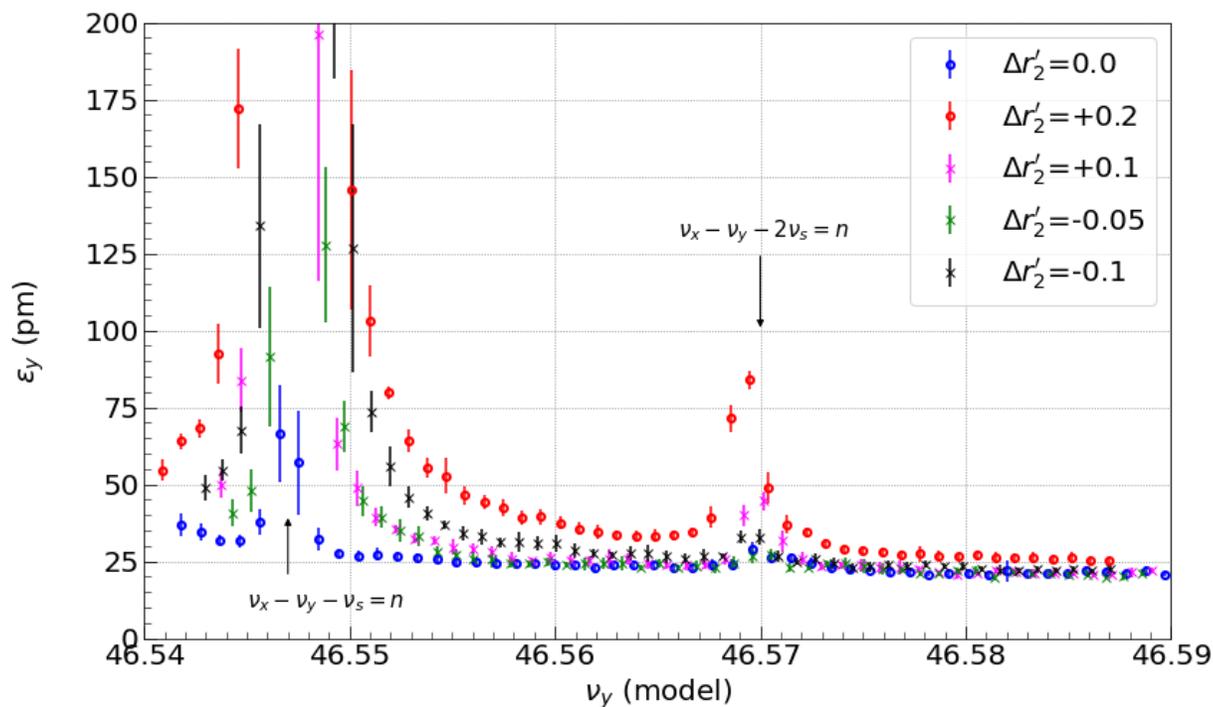
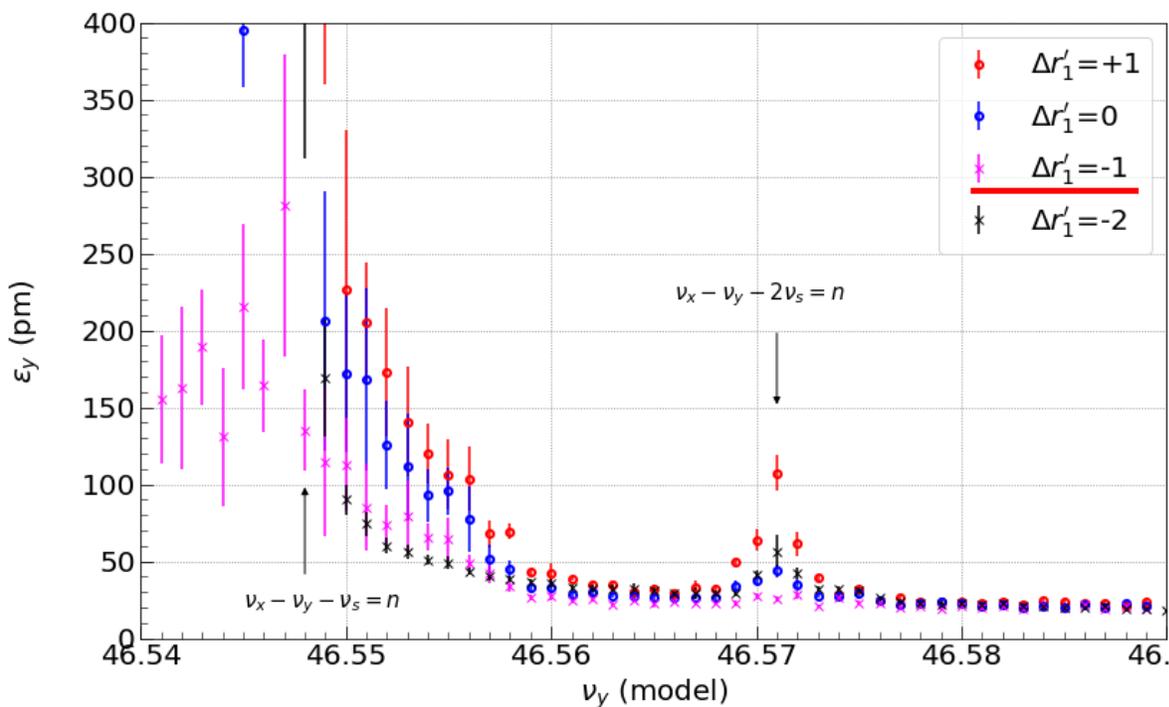
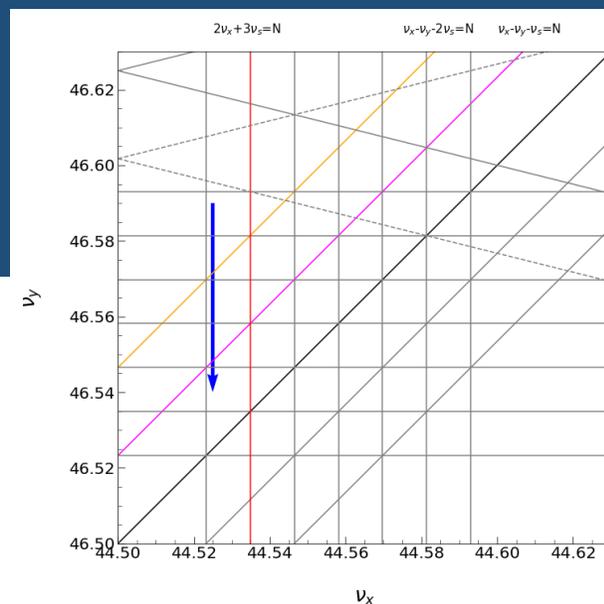
$$\Delta r_1' = -1$$



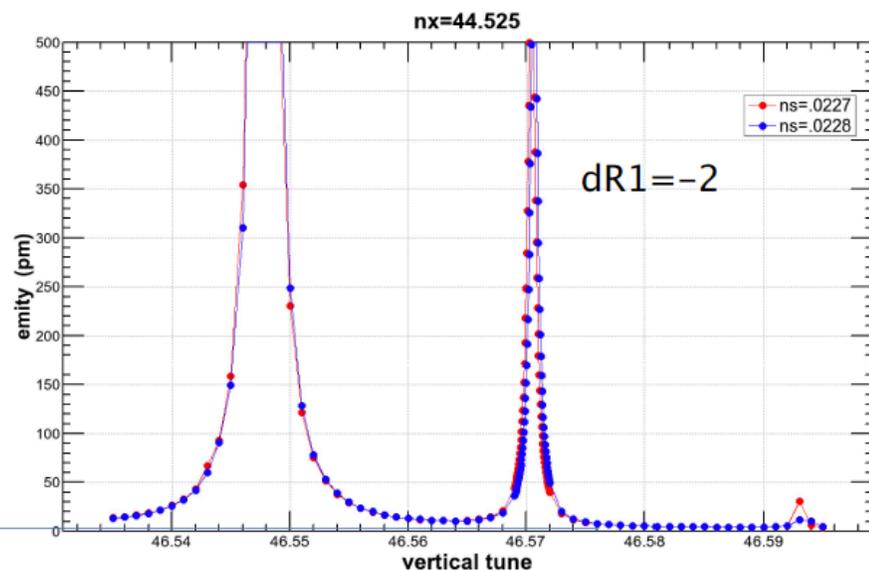
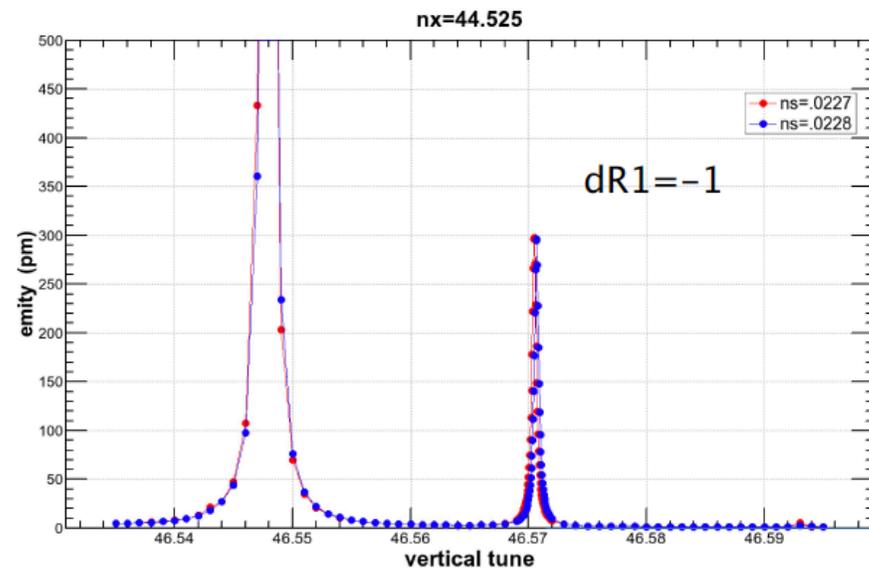
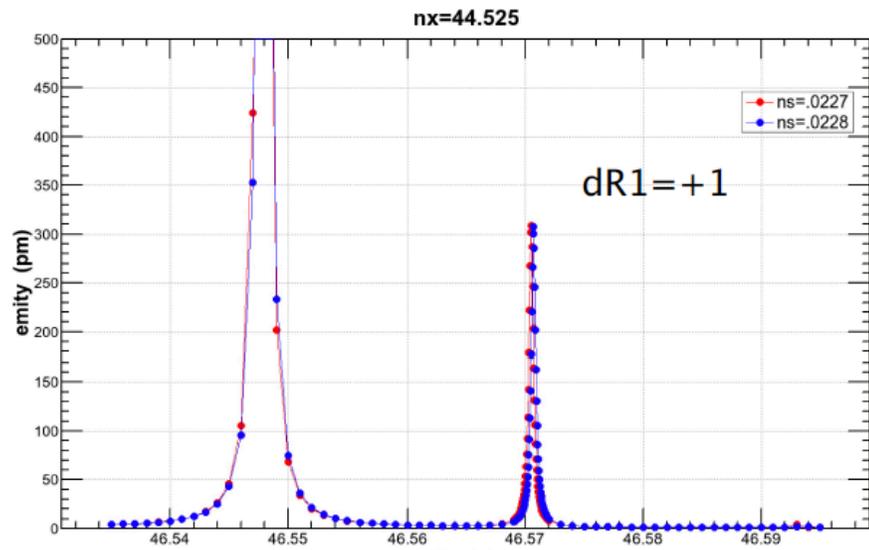
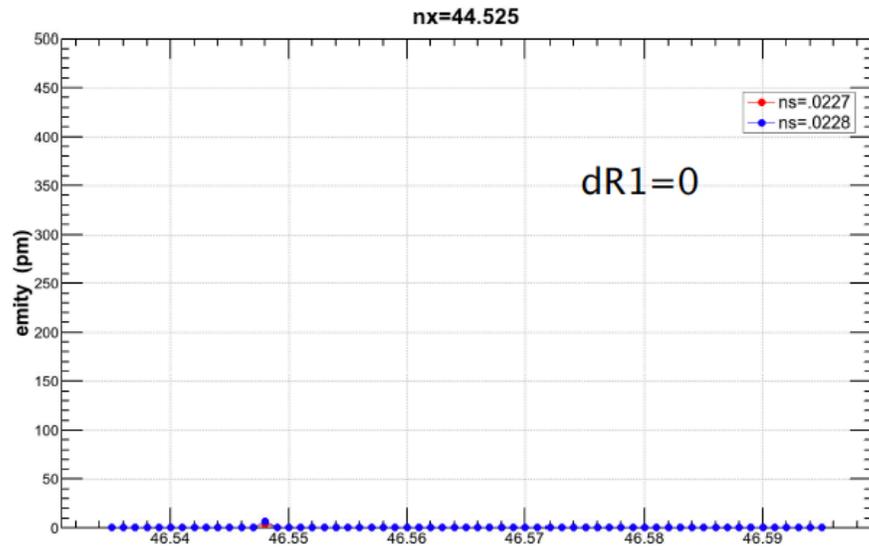
# 5. ビームコミッショニング@LER

## $\Delta r_1'$ と $\Delta r_2'$ でパラメータサーチを行った結果

垂直チューン  $\nu_y$  で46.54から46.59の範囲でサーベイを行った。  
途中で、一次と二次のSynchro-beta coupling共鳴を横切る。



# Simulation (H. Koiso)

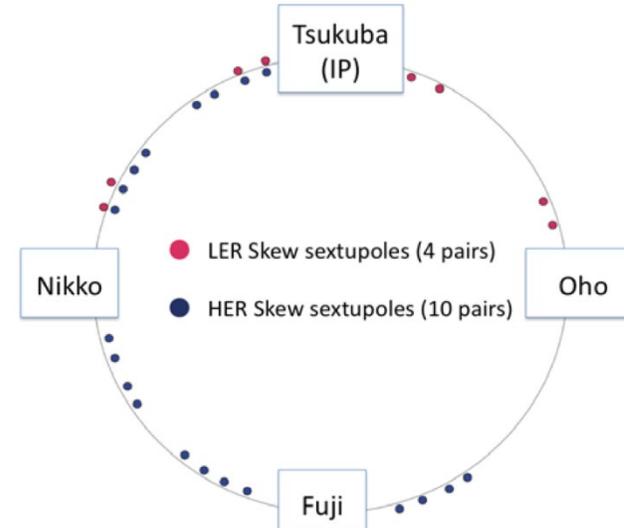
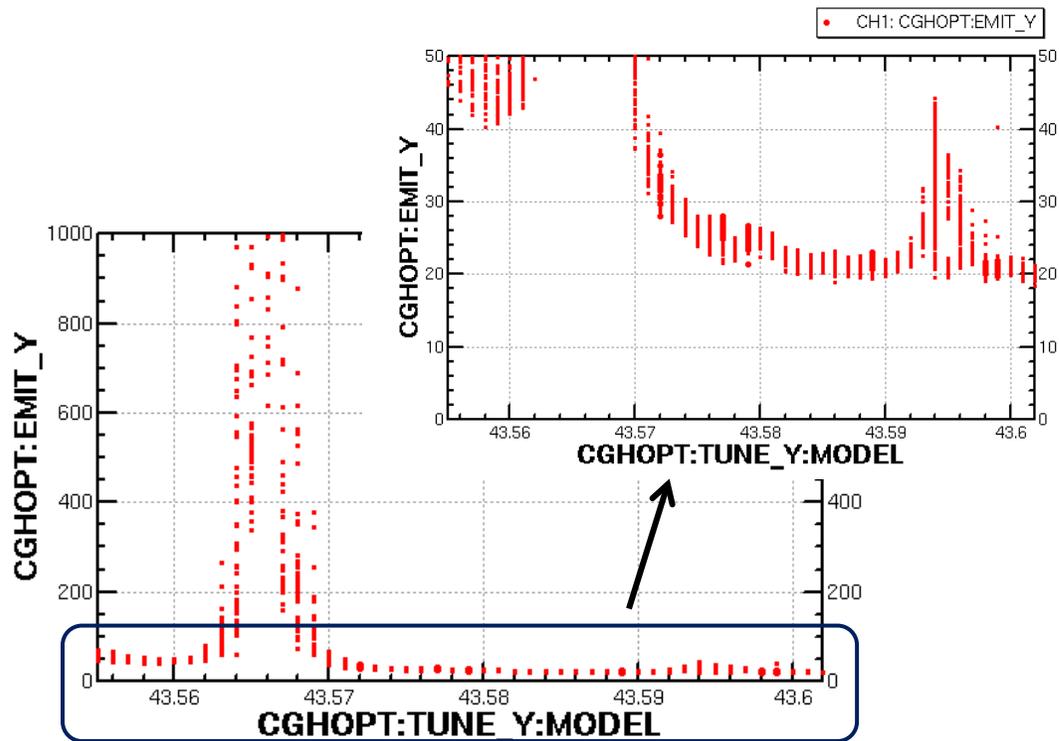


## モデル計算では、

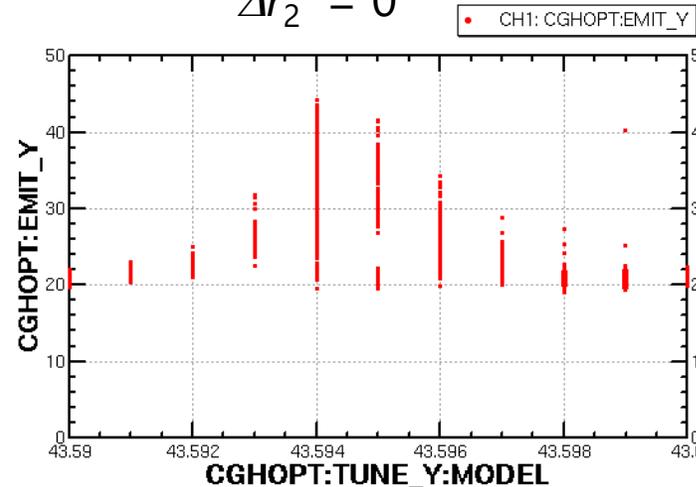
- $dR1=0$ でChromatic x-y couplingがほぼ完全に補正できる。
- $dR1=+1$ と $-1$ は対称。
- 分解能が高いので、Chromatic x-y couplingによるエミタンス増大のピークが高く見える。

# 5. ビームコミッショニング@HER

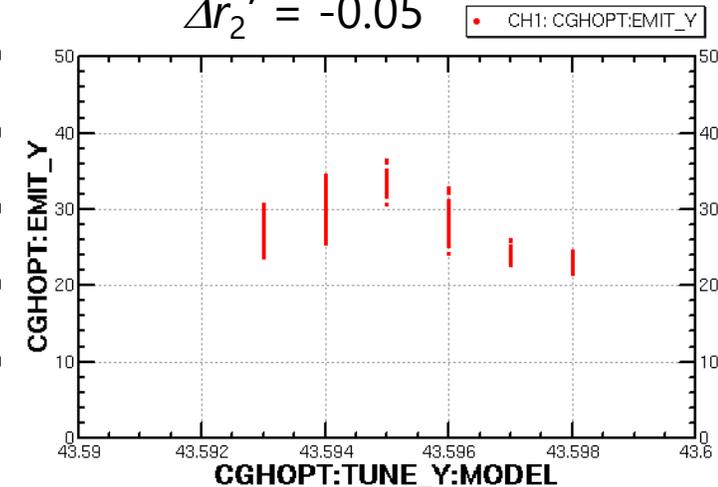
KEKBで運用した10ペア(20台)のスキュー六極電磁石の内、8ペア(16台)が稼働できたため、試験的に $\Delta r_2'$ のビーム試験を行った。



$$\Delta r_2' = 0$$



$$\Delta r_2' = -0.05$$



# 6. Summary

- SuperKEKBのLERに導入した回転六極電磁石によって、はじめてChromatic x-y coupling補正を行った。
- 回転六極電磁石は、既存の六極電磁石を回転架台に据え付けたもので、 $\pm 30$ 度の範囲で六極磁石を傾けることができる。
- 回転軸と磁極の中心軸は約0.1mm以内で合わせた。
- この補正による、ビーム入射や光学系への悪影響は見られなかった。
- この補正によって、一次と二次のSynchro-beta coupling共鳴によるエミッタンス増大の影響を制御できた。
- HERのスキュー六極電磁石によるChromatic x-y coupling補正の試験を行った。
- 現状のスキュー六極電磁石では磁場強度が足りないことが明らかなので、必要な磁場強度を出せる磁石が必要である。