

J-PARC 3-50BTラインにおける 光学系の調整

- J-PARC
- 3-50BTライン
- 分散関数測定と調整
- 新たな β 関数測定手法の考案
- β 関数の測定結果
- まとめ

原田寛之^{A)}, 明午伸一郎^{A)}, 白形政司^{B)}, 佐藤洋一^{B)}, 田村文彦^{A)},
手島昌己^{B)}, 橋本義徳^{B)}, 五十嵐進^{B)}, 小関忠^{B)}

^{A)}JAEA/J-PARC, ^{B)} KEK/J-PARC

第10回日本加速器学会年会、2013年8月3日(土)

J-PARC (JAEA & KEK)

400 MeV H^- Linac
[181 MeV at present]

3 GeV Rapid Cycling
Synchrotron (RCS)

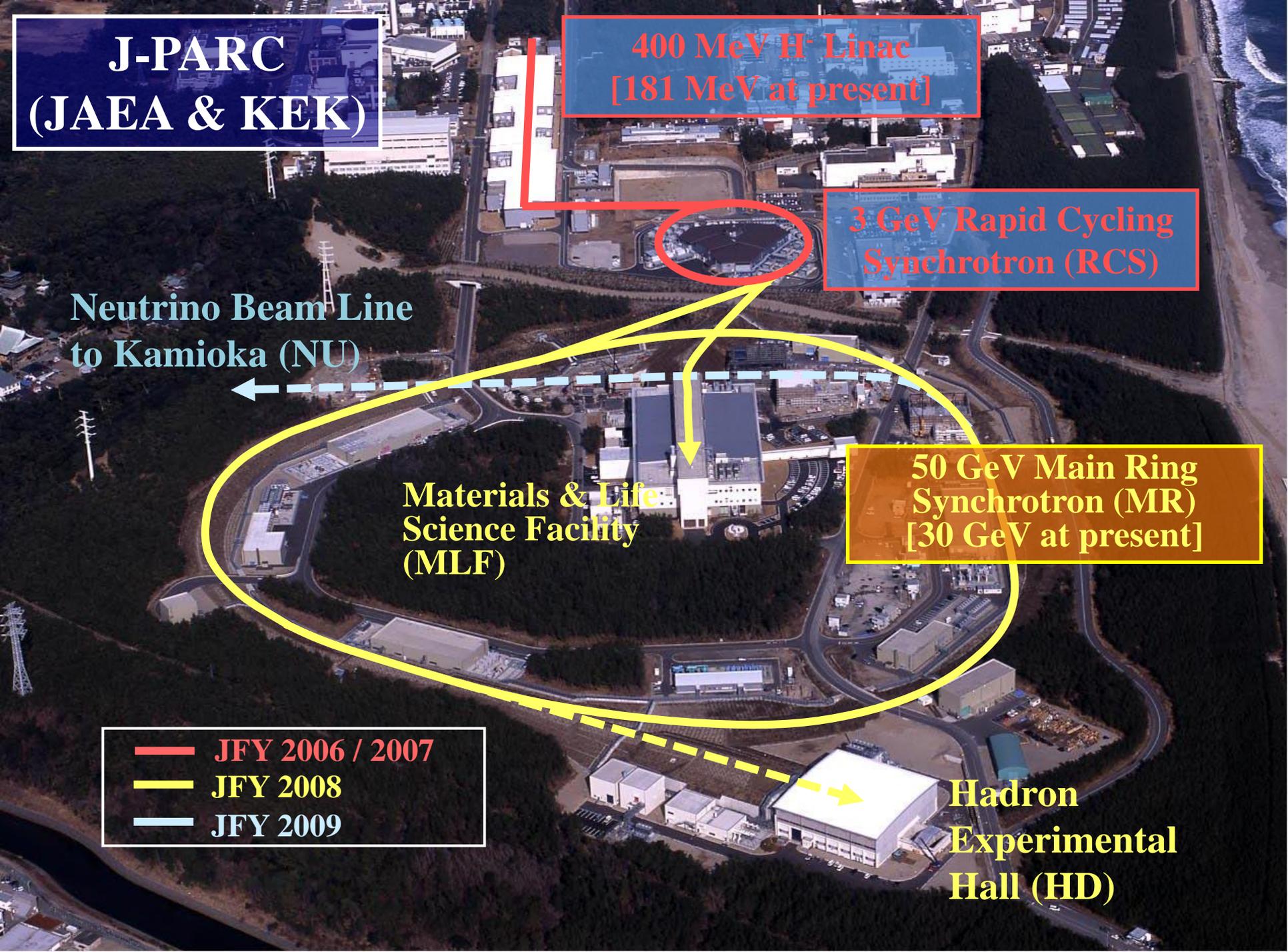
Neutrino Beam Line
to Kamioka (NU)

50 GeV Main Ring
Synchrotron (MR)
[30 GeV at present]

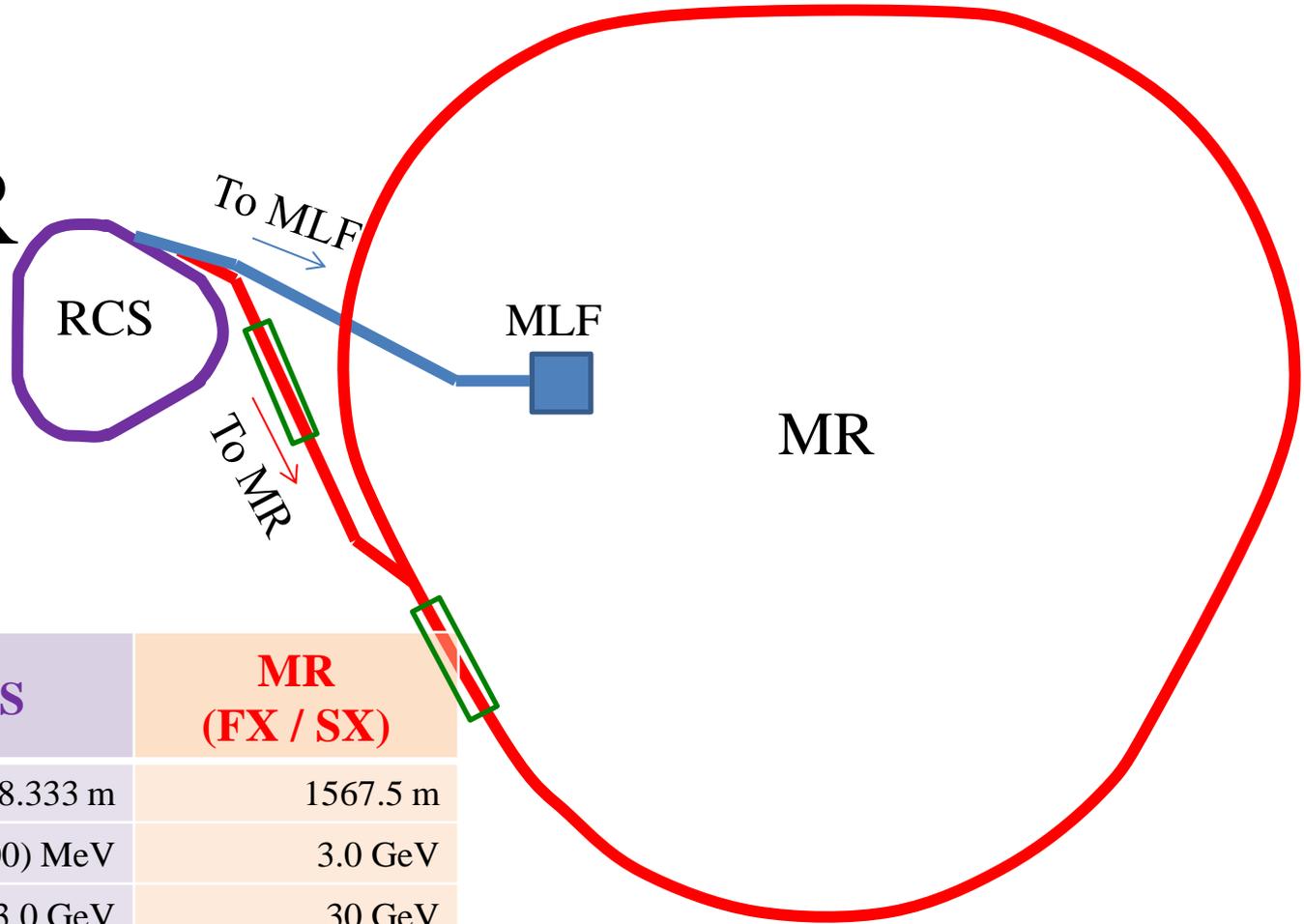
Materials & Life
Science Facility
(MLF)

Hadron
Experimental
Hall (HD)

- JFY 2006 / 2007
- JFY 2008
- JFY 2009



J-PARC RCS & MR



	RCS	MR (FX / SX)
周長	348.333 m	1567.5 m
入射エネルギー	181 (400) MeV	3.0 GeV
出射エネルギー	3.0 GeV	30 GeV
サイクル	0.04 sec	2.56 / 6.0 sec
設計出力	0.6 (1.0) MW	0.75 / 0.1 MW
物理アパーチャ	$> 486\pi$ mm mrad	$> 81\pi$ mm mrad
コリメータアパーチャ	324π mm mrad	54π mm mrad
コリメータ許容量	4 kW	2 & 2 kW
現在供用出力	0.3 MW	0.22 / 0.02 MW
瞬間最大出力	0.54 MW	

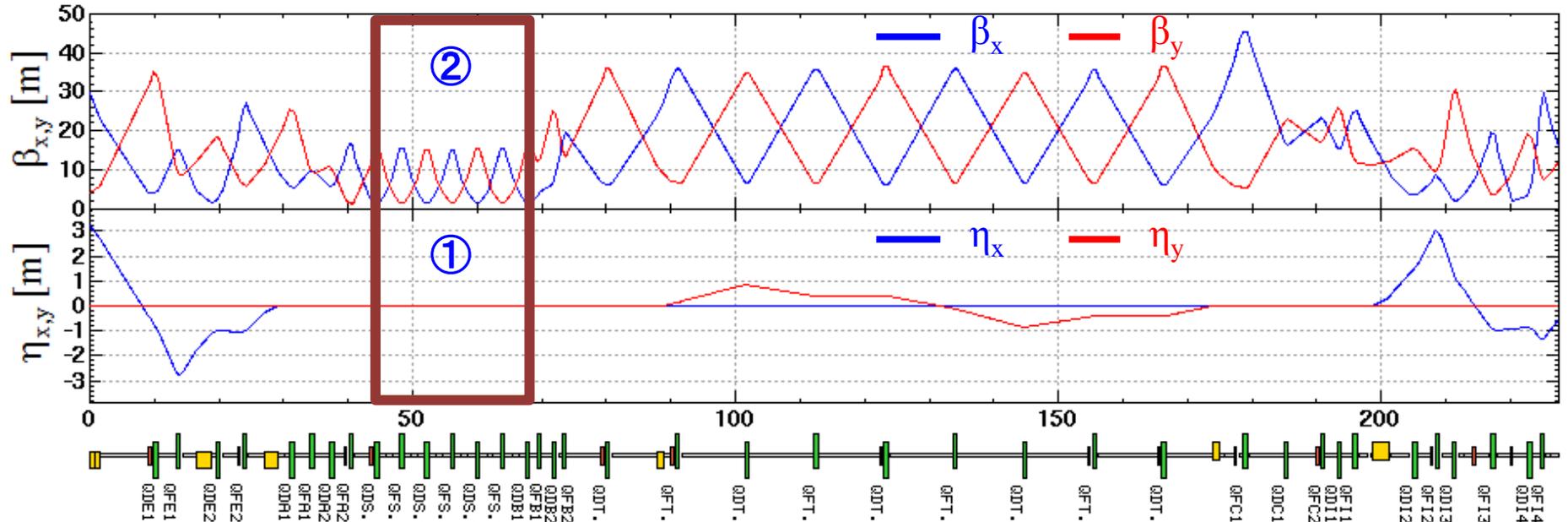
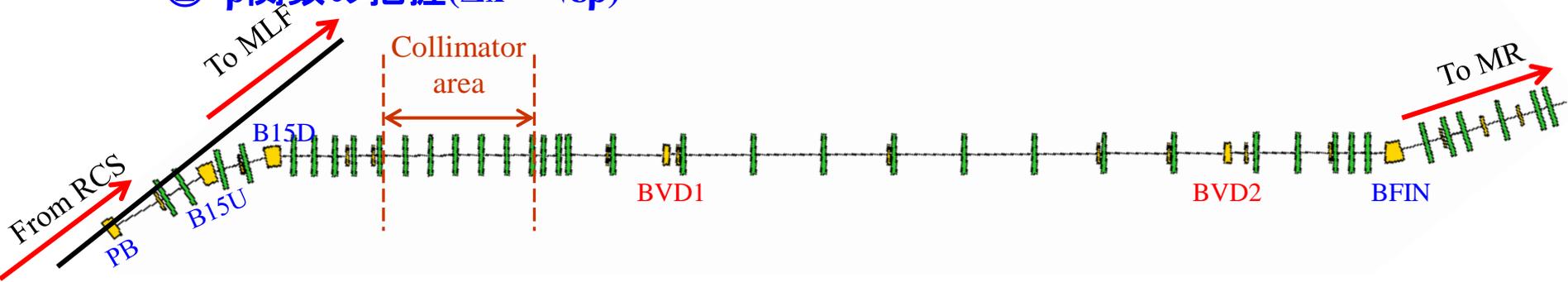
<大強度陽子加速器>

- 空間電荷効果等によりビーム出力に対して非線形にビームロスが増大
- 機器の放射化を防止するため、コリメータでビームロスを局所化
- ビームロスがビーム出力を制限

3-50BTライン

- ✓ ビームロスさせないようにビームサイズをアパーチャ内に輸送
- ✓ 下段の加速器(MR)の入射点で光学系ならびに軌道をマッチング
- ✓ 上段の加速器(RCS)から出射されたビームのハローを所定のエミッタンスまで
コリメータで整形

- ① コリメータ領域での分散関数ゼロ($\Delta x = \eta \Delta p/p$)
- ② β 関数の把握($\Delta x = \sqrt{\epsilon\beta}$)



分散関数測定

<Knob>

RCSの取り出し運動量 $\Delta p/p_0$

<Monitor>

ビーム重心(x / y)

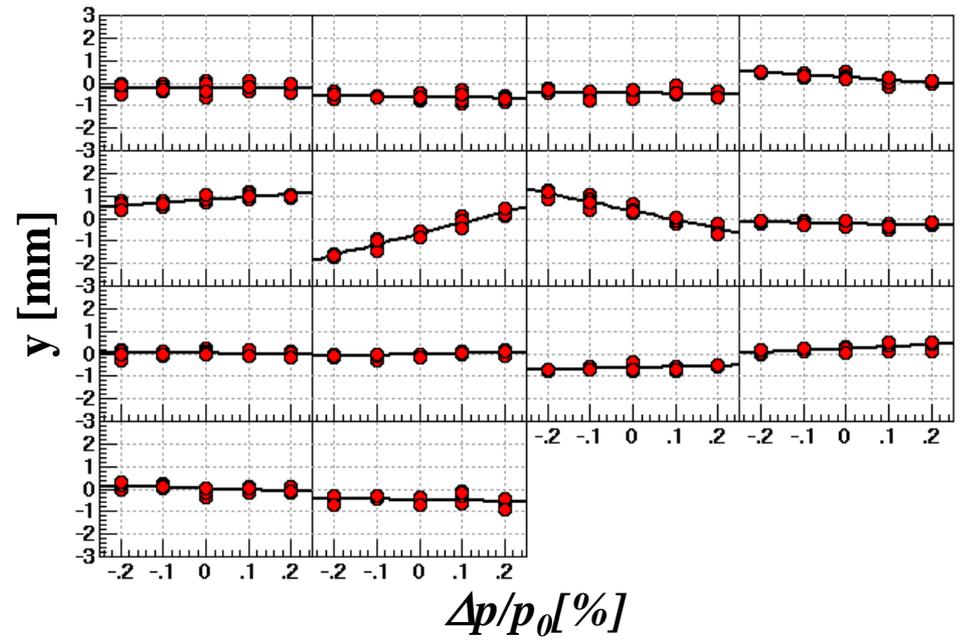
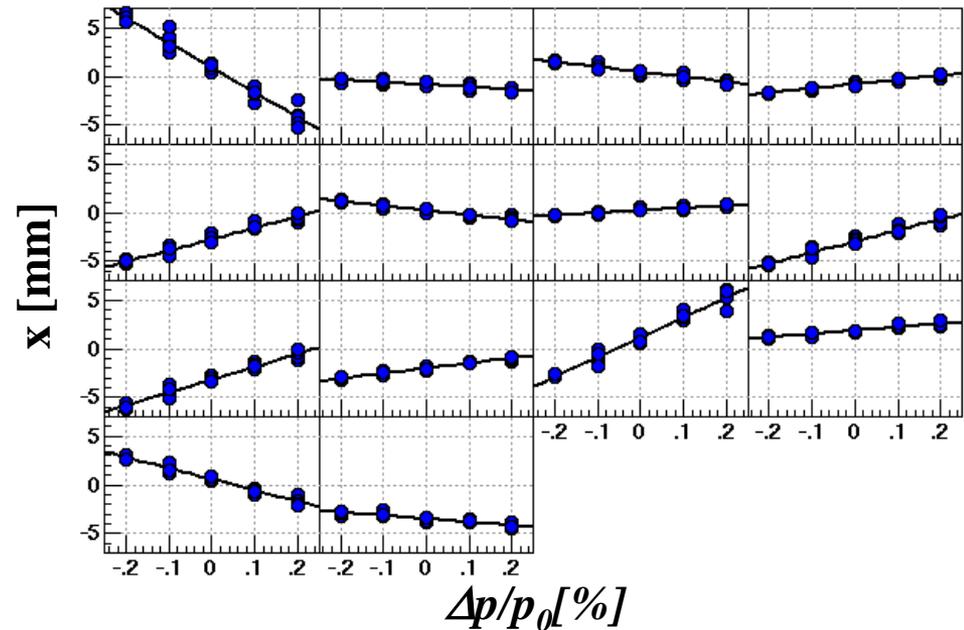
- BPM: 14台
- プロファイルモニタ: 8台

運動量の変化に対するビーム重心の
応答から

$$\eta_x = \frac{\Delta x}{\Delta p / p_0} \quad \eta_y = \frac{\Delta y}{\Delta p / p_0}$$

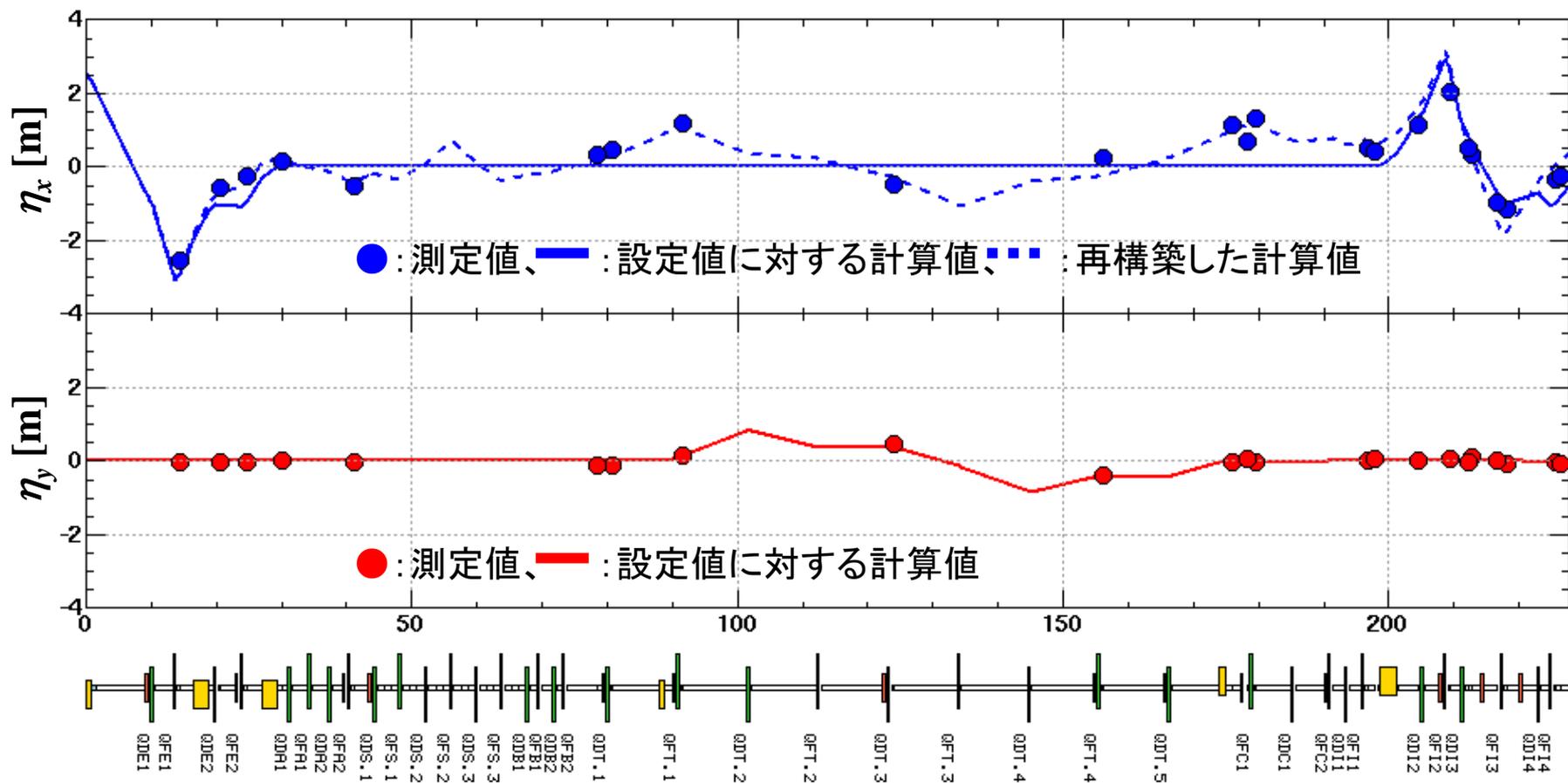
分散関数(η_x or η_y)を測定した

BPM14台



分散関数測定と補正量導出

- ✓ 水平方向の分散関数(η_x)において計算値(実線)と測定値(点)で大きな差が生じた
- ✓ 最上流の4箇所(ODE1, QFE1, QDE2, QFE2)の測定点と4台の四極電磁石を用いて計算モデル内で再構築(点線)ノブ: QDE1, QFE1, QDE2, QFE2の電流値、モニタ: 4箇所の分散関数測定値



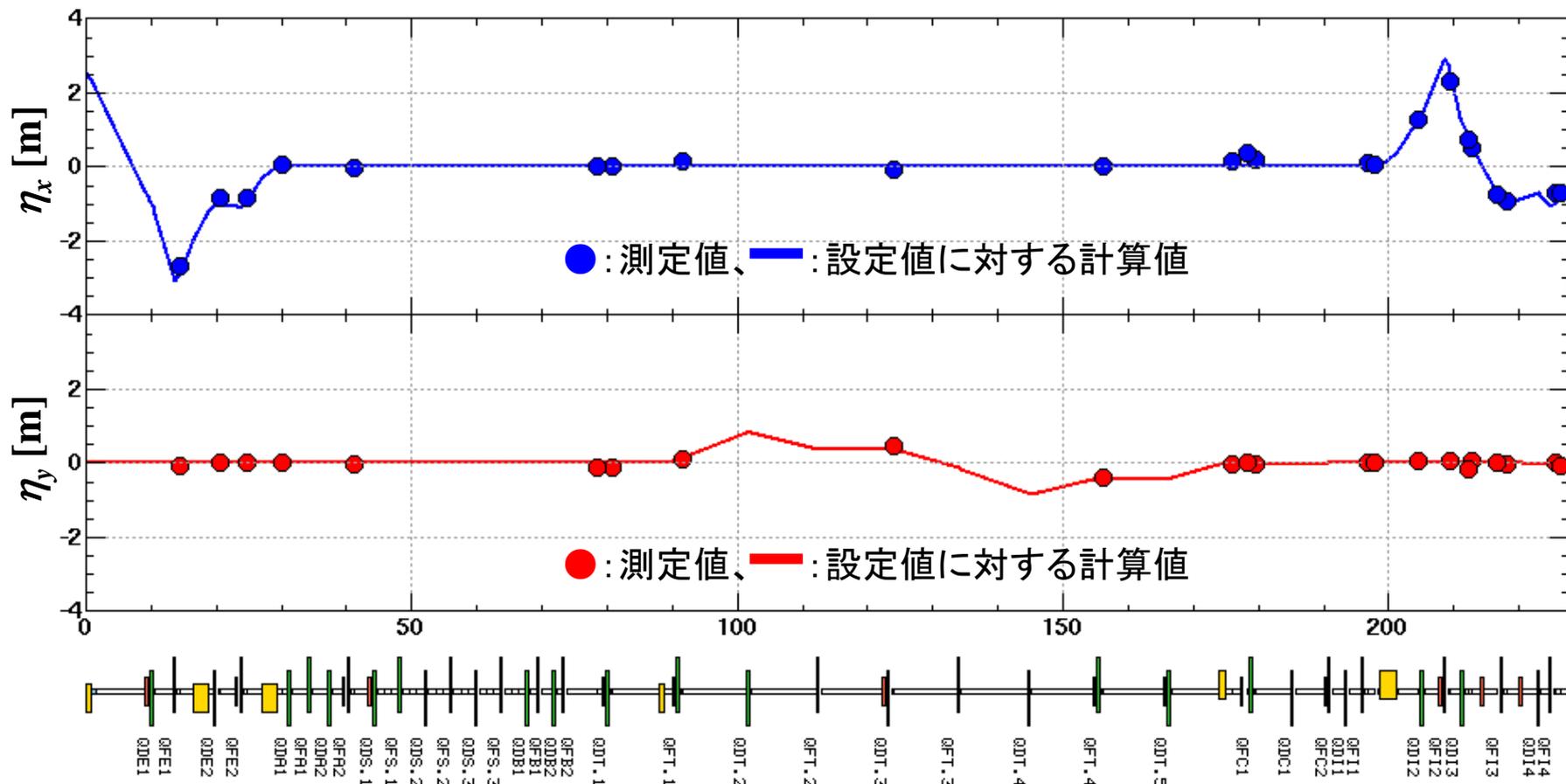
補正後、分散関数測定

4台の四極電磁石の補正量

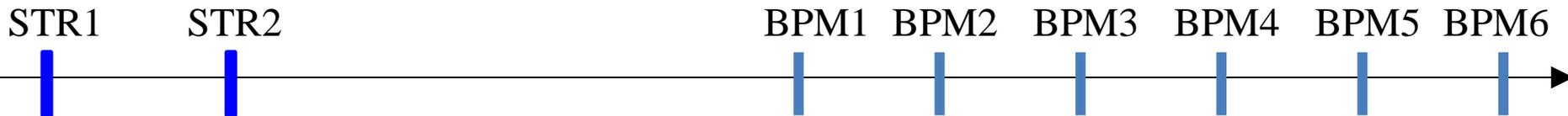
QDE1:109.8%, QFE1:94.1%, QDE2:94.2%, QFE2:99.8%

補正によってライン全体における計算値と測定値が概ね一致

⇒ コリメータ領域における分散関数をゼロにした



β関数の新たな測定手法(1)



輸送ラインにおける輸送行列Mとビームの位置xと傾きx'は、

$$\begin{pmatrix} x_m \\ x'_m \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{pmatrix} \quad M(S_1 | S_m) = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \quad m_{12} = \sqrt{\beta_1 \beta_m} \sin(\phi_{1m})$$

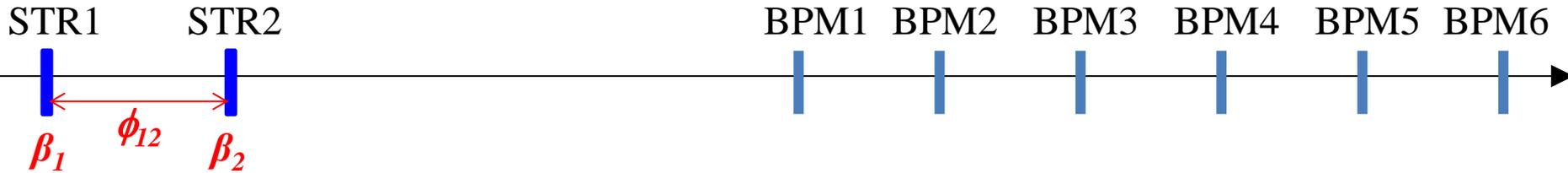
ステアリング等による蹴り角 $\Delta x'$ に対するモニタでのビーム重心の変動 Δx は、

$$\begin{aligned} \Delta x_{1m} &= \sqrt{\beta_1 \beta_m} \sin(\phi_{1m}) \Delta x'_1 & \Delta x_{2m} &= \sqrt{\beta_2 \beta_m} \sin(\phi_{2m}) \Delta x'_2 \\ \frac{\Delta x_{1m}}{\Delta x'_1} \frac{1}{\sqrt{\beta_1}} &= \sqrt{\beta_m} \sin(\phi_{1m}) & \frac{\Delta x_{2m}}{\Delta x'_2} \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} &= \sqrt{\beta_m} \sin(\phi_{2m}) \end{aligned}$$

$\Delta \phi_{1m} = \phi_{12} + \phi_{2m}$ の関係を代入し、整理すると

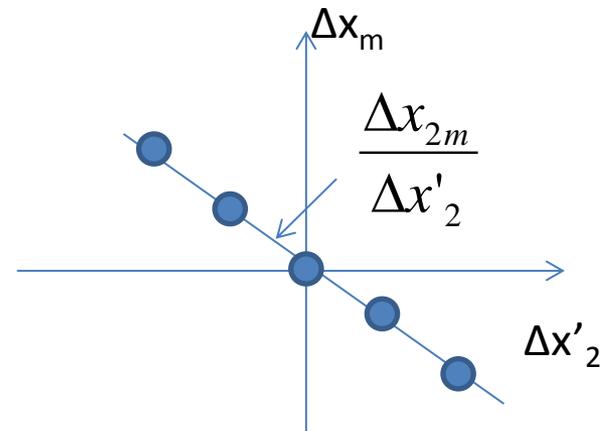
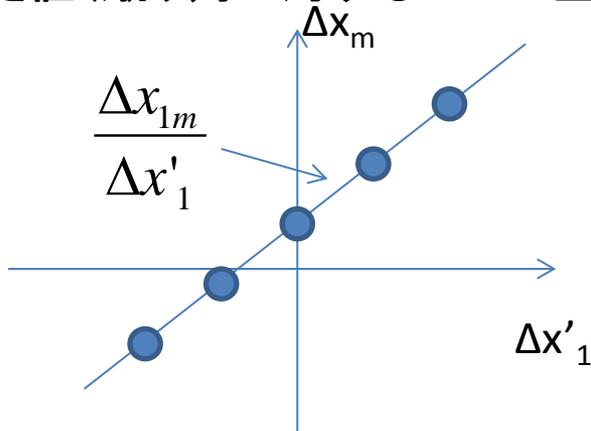
$$\beta_m = \left\{ \frac{\frac{\Delta x_{1m}}{\Delta x'_1} \frac{1}{\sqrt{\beta_1}} - \frac{\Delta x_{2m}}{\Delta x'_2} \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} \cos(\phi_{12})}{\pm \sin(\phi_{12})} \right\}^2 + \left(\frac{\Delta x_{2m}}{\Delta x'_2} \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} \right)^2$$

β関数の新たな測定手法(2)

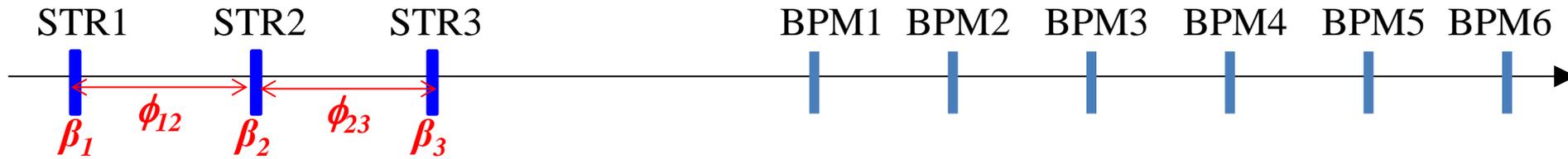


$$\beta_m = \left\{ \frac{\frac{\Delta x_{1m}}{\Delta x'_1} \frac{1}{\sqrt{\beta_1}} - \frac{\Delta x_{2m}}{\Delta x'_2} \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} \cos(\phi_{12})}{\pm \sin(\phi_{12})} \right\}^2 + \left(\frac{\Delta x_{2m}}{\Delta x'_2} \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} \right)^2$$

➤ 測定値(蹴り角に対するビーム重心の応答)



“3ステアリング・フィッティング法”



$$\beta_m = \left\{ \frac{\frac{\Delta x_{1m}}{\Delta x'_1} \frac{1}{\sqrt{\beta_1}} - \frac{\Delta x_{2m}}{\Delta x'_2} \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} \cos(\phi_{12})}{\pm \sin(\phi_{12})} \right\}^2 + \left(\frac{\Delta x_{2m}}{\Delta x'_2} \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} \right)^2$$

3台のステアリングがあれば、3組のステアリングペアを選択することができる。それらは

$$\frac{\Delta x_{1m}}{\Delta x'_1} \frac{1}{\sqrt{\beta_1}} \sin(\phi_{23}) + \frac{\Delta x_{3m}}{\Delta x'_3} \frac{1}{\sqrt{\beta_3}} \sin(\phi_{12}) - \frac{\Delta x_{2m}}{\Delta x'_2} \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} \sin(\phi_{13}) = 0$$

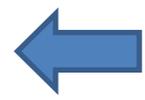
の関係式を満たす。パラメータに真値とのずれがあった場合、

$$\beta_1' = \beta_1 + \Delta\beta_1, \quad \beta_2' = \beta_2 + \Delta\beta_2, \quad \beta_3' = \beta_3 + \Delta\beta_3,$$

$$\phi_{12}' = \phi_{12} + \Delta\phi_{12}, \quad \phi_{23}' = \phi_{23} + \Delta\phi_{23}, \quad \phi_{13}' = \phi_{13} + \Delta\phi_{13},$$

$$\frac{\Delta x_{1m}}{\Delta x'_1} \frac{1}{\sqrt{\beta_1'}} \sin(\phi_{23}') + \frac{\Delta x_{3m}}{\Delta x'_3} \frac{1}{\sqrt{\beta_3'}} \sin(\phi_{12}') - \frac{\Delta x_{2m}}{\Delta x'_2} \frac{1}{\sqrt{\beta_2'}} \sin(\phi_{13}') = A_m$$

$$\chi^2 = \sum_{m=1}^M (A_m)^2 \quad M: \text{モニタ数}$$



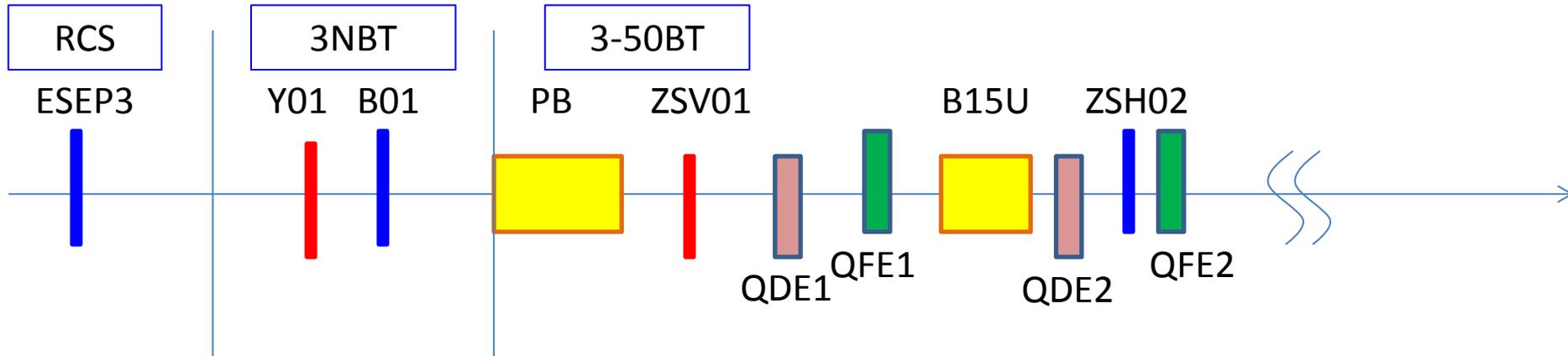
χ^2 が最小値 ~ 0 となるように5つのパラメータ(β, ϕ)を測定の応答($\Delta x / \Delta x'$)から見積もる

新たなβ関数測定手法の特徴

$$\beta_m = \left\{ \frac{\frac{\Delta x_{1m}}{\Delta x'_1} \frac{1}{\sqrt{\beta_1}} - \frac{\Delta x_{2m}}{\Delta x'_2} \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} \cos(\phi_{12})}{\pm \sin(\phi_{12})} \right\}^2 + \left(\frac{\Delta x_{2m}}{\Delta x'_2} \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} \right)^2$$
$$\frac{\Delta x_{1m}}{\Delta x'_1} \frac{1}{\sqrt{\beta_1}} \sin(\phi_{23}) + \frac{\Delta x_{3m}}{\Delta x'_3} \frac{1}{\sqrt{\beta_3}} \sin(\phi_{12}) - \frac{\Delta x_{2m}}{\Delta x'_2} \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} \sin(\phi_{13}) = 0$$

- ✓ ビーム幅の測定値は用いず、ビーム重心の測定値のみを用いるため、分散関数などの影響がない。
- ✓ プロファイルモニタのみならずBPMにおいても測定可能である。
- ✓ 蹴り角に対するビーム重心の応答は線形であり解析が容易である。
- ✓ 測定値の系統的な誤差となる電磁石の蹴り角の不定性は容易に求められる。
- ✓ 3台以上の電磁石があれば、電磁石の蹴り角に対するビーム重心の応答のみ測定すれば良い。

3-50BTラインにおける β 関数測定



β 関数測定

<Knob>

水平方向3台(STR1: **ESEP3**, STR2 : **B01**, STR3 : **PB**)

垂直方向2台(STR1 : **Y01**, STR2 : **ZSV01**)

※ 垂直方向は2台しかないため、“3ステアリング・フィッティング法は使えない。”

<Monitor>

ビーム位置検出器(BPM): 14台

ビームプロファイルモニタ(PM): 8台

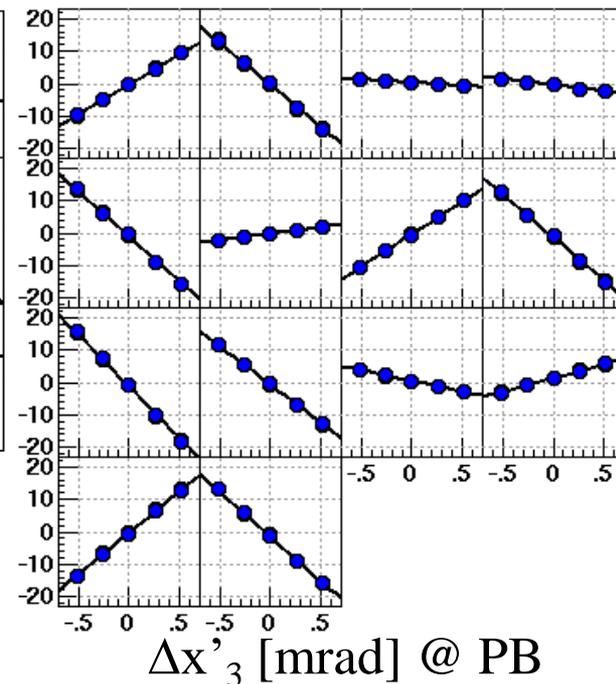
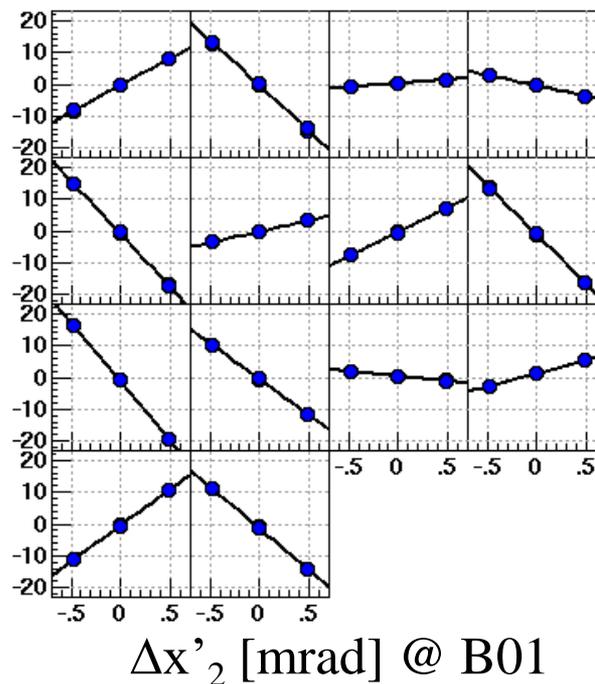
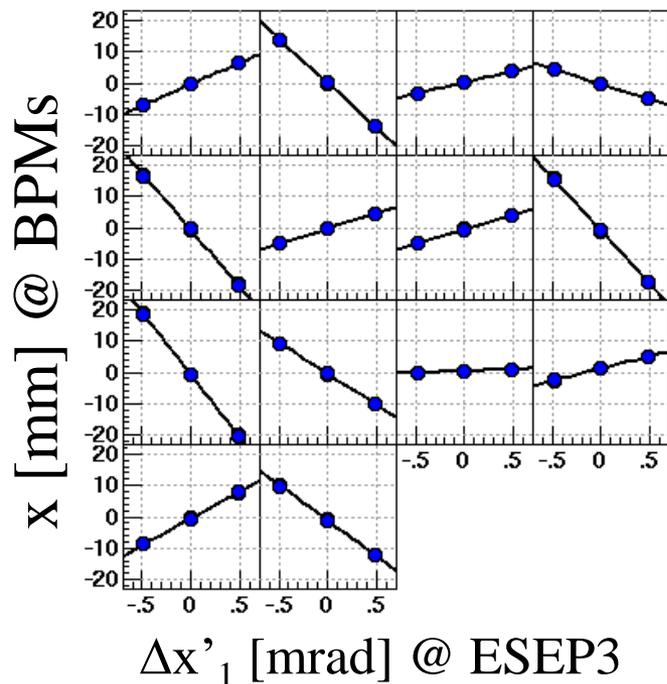
測定結果(x/ $\Delta x'$)

$$\beta_m = \left\{ \frac{\frac{\Delta x_{1m}}{\Delta x'_1} \frac{1}{\sqrt{\beta_1}} - \frac{\Delta x_{2m}}{\Delta x'_2} \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} \cos(\phi_{12})}{\pm \sin(\phi_{12})} \right\}^2 + \left(\frac{\Delta x_{2m}}{\Delta x'_2} \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} \right)^2$$

STR1の蹴り角に対する
BPMでの検出ビーム重心

STR2の蹴り角に対する
BPMでの検出ビーム重心

STR3の蹴り角に対する
BPMでの検出ビーム重心



“3ステアリング・フィッティング法”による β や ϕ の見積もり(水平方向のみ)

$$\frac{\Delta x_{1m}}{\Delta x'_1} \frac{1}{\sqrt{\beta_1}} \sin(\phi_{23}) + \frac{\Delta x_{3m}}{\Delta x'_3} \frac{1}{\sqrt{\beta_3}} \sin(\phi_{12}) - \frac{\Delta x_{2m}}{\Delta x'_2} \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} \sin(\phi_{13}) = 0$$

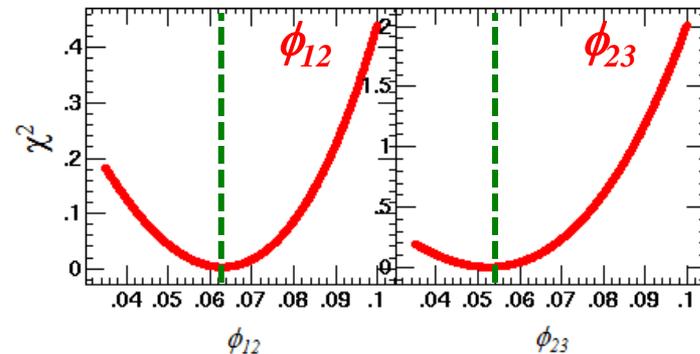
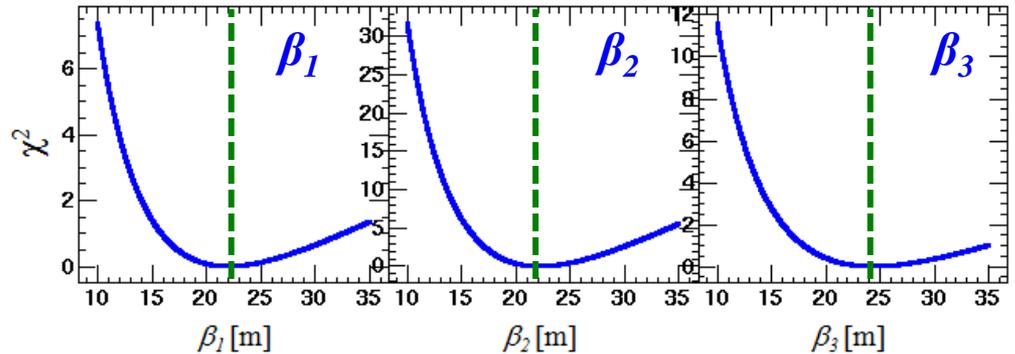
○ 測定された蹴り角に対する
ビーム重心の応答

$$\beta_1' = \beta_1 + \Delta\beta_1, \quad \beta_2' = \beta_2 + \Delta\beta_2, \quad \beta_3' = \beta_3 + \Delta\beta_3,$$

$$\phi_{12}' = \phi_{12} + \Delta\phi_{12}, \quad \phi_{23}' = \phi_{23} + \Delta\phi_{23}, \quad \phi_{13}' = \phi_{13} + \Delta\phi_{13},$$

$$\frac{\Delta x_{1mi}}{\Delta x'_1} \frac{1}{\sqrt{\beta_1'}} \sin(\phi_{23}') - \frac{\Delta x_{3mi}}{\Delta x'_3} \frac{1}{\sqrt{\beta_3'}} \sin(\phi_{12}') - \frac{\Delta x_{2mi}}{\Delta x'_2} \frac{1}{\sqrt{\beta_2'}} \sin(\phi_{13}') = A_m$$

$$\chi^2 = \sum_{m=1}^{14} (A_m)^2 \quad \text{BPM数: 14台}$$



それぞれの係数を振りつつ、 χ^2 を求め、その最小値 ~ 0 となるような各々の係数($\beta_1, \beta_2, \beta_3, \phi_{12}, \phi_{23}$)の最適値を導出した。

β測定時、STRsでのβとSTR間の位相差

Parameter	Calculated Value	Estimated Value
$\beta_x@STR1$ [m]	22.51	22.01
$\beta_x@STR2$ [m]	21.52	22.14
$\beta_x@STR3$ [m]	25.35	24.37
$\Delta\phi_x$ (STR1-STR2)	0.0600	0.0629
$\Delta\phi_x$ (STR1-STR3)	0.1063	0.1155
$\Delta\phi_x$ (STR2-STR3)	0.0463	0.0526

* 垂直方向に関しては計算値を使わざるを得ない。

計算値

予想値 “3ステアリング・フィッティング法”

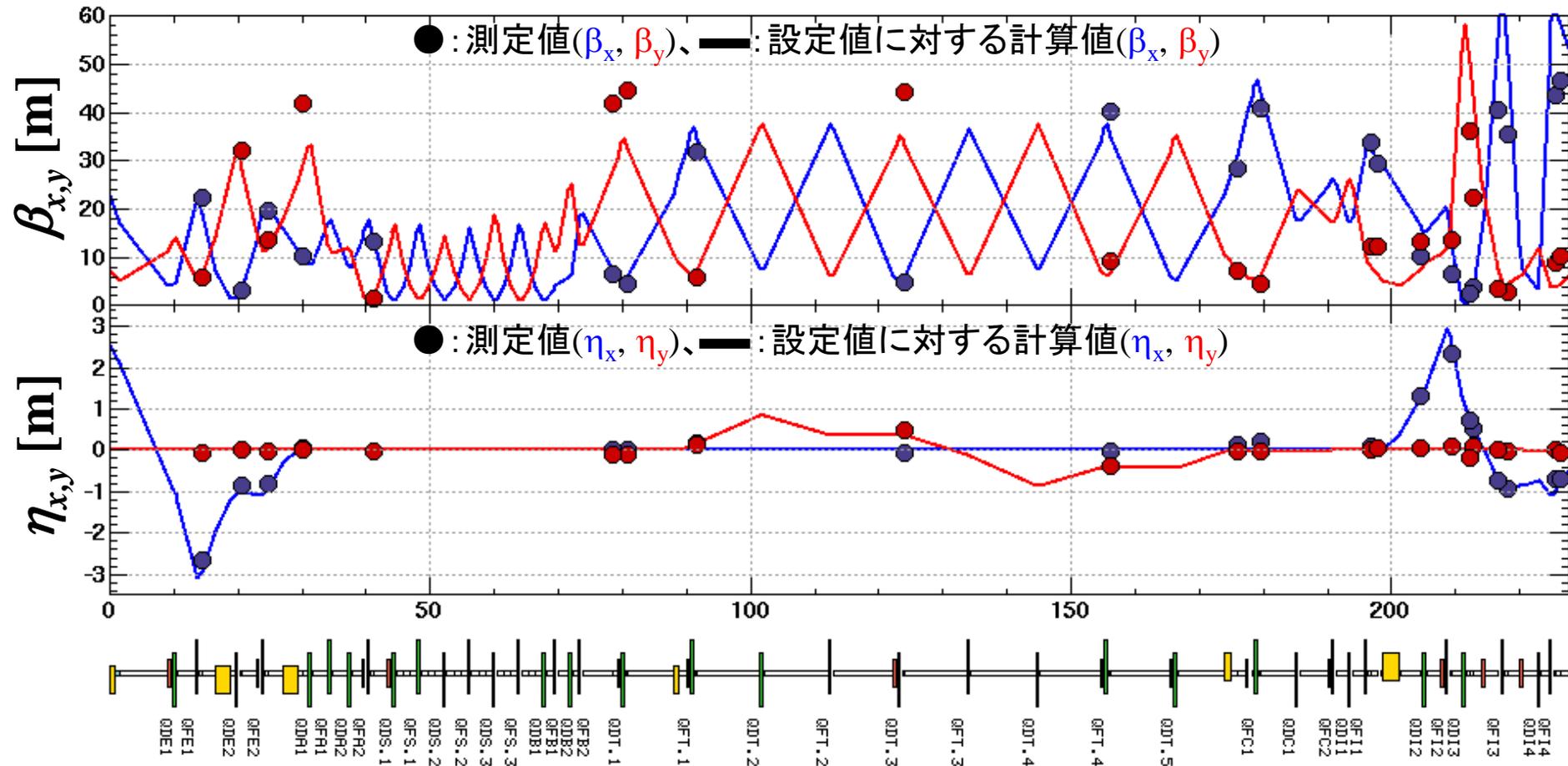
β測定結果

Monitor	β_x [m] by STR1-2	β_x [m] by STR1-3	β_x [m] by STR2-3
BPM1	13.54 ± 0.22	10.67 ± 0.04	12.22 ± 0.35
BPM2	35.44 ± 0.77	33.63 ± 0.14	51.34 ± 2.15
BPM5	53.56 ± 0.96	55.82 ± 0.25	84.74 ± 2.99
BPM1	13.94 ± 0.22	14.14 ± 0.05	14.14 ± 0.28
BPM2	37.70 ± 0.76	37.29 ± 0.13	38.56 ± 1.13
BPM5	57.43 ± 0.93	57.43 ± 0.22	58.57 ± 1.46

計算値より導出したβ

予想値より導出したβ

分散関数補正後、 分散関数測定と β 関数測定



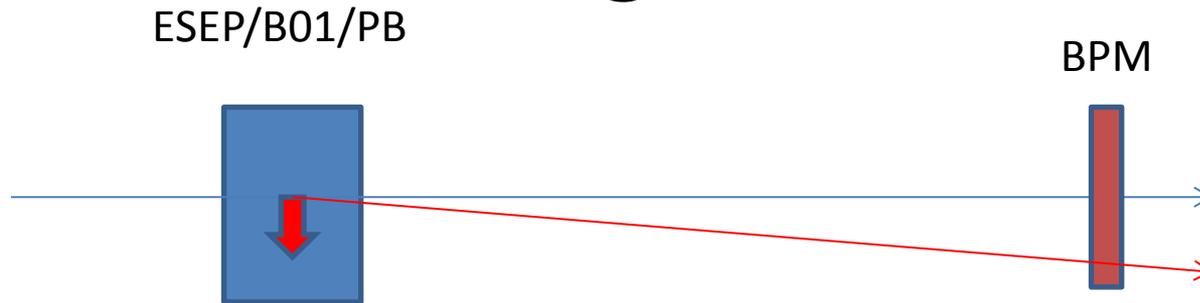
- ✓ 垂直方向の測定された β 関数は「参考値」でしかない
- ✓ 水平方向の測定された β 関数は計算値と概ね一致

まとめ

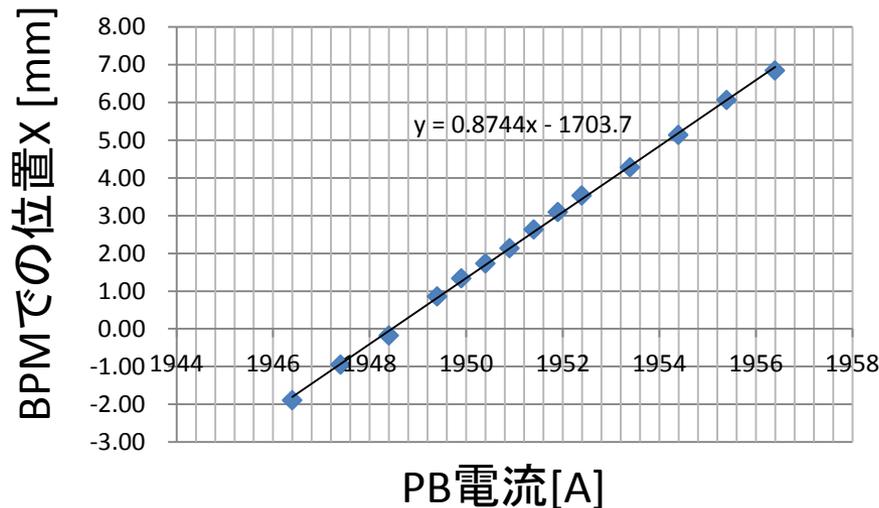
- J-PARC MRにおけるビーム出力増強に向けて3-50BTラインのコリメータによるビーム整形は重要である。
- 3-50BTラインにおけるコリメータの性能を十分に発揮するためには、コリメータ領域の「分散関数をゼロ」に調整し、「 β 関数を把握」しなければならない。
- 分散関数の測定を行い、モデル計算に基づいた調整手法を確立した。
- 新たな β 関数測定手法と“3ステアリング・フィッティング法”を考案ならびに確立した。水平方向に関しては把握できた。
- 今後、新規モニタや垂直方向のステアリングを追加し、ライン全体における光学系の理解やモデル計算に基づく制御を実現させる。
- RCSからの取り出しビームのハローを定量的に議論可能となるため、様々なパラメータの最適化を行い、ビームハローの低減を目指す。

Back up

Fudge Factor estimation of steering magnets



1. SteeringとBPMの間のQMをOFFして、蹴り角 θ に対する位置 x の応答を測定
2. SteeringとBPMの位置 s と上記1での応答より蹴り角のFudge Factorを測定



STR Name	Fudge Factor
ESEP3@3N	0.970
B01@3N	0.961
PB@3-50	0.880
Y01@3N	1.066
STR1@3-50	1.062

0.29283[mrad/A] \Rightarrow 0.25762[mrad/A]