

# J-PARC Main Ringにおける RF6倍高調波の導入によるビーム強度の増強

~ ビームダイナミックスシミュレーションから ~

佐藤洋一、原圭吾、大森千広、五十嵐進、小関忠

J-PARC KEK

PASJ10 SAOS02 2013/08/03

# 目次

- J-PARC MR概要
- キッカーによるバンチ長の制限
- RF6倍高調波導入の効果
  - 1Dシミュレーション結果紹介
  - 2.5D シミュレーション結果
- まとめ

# J-PARC MR概要

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

3 GeV Rapid Cycling  
Synchrotron (RCS)

Neutrino Beam Line for  
T2K Experiment

K1 Trigger

Materials & Life  
Science Facility  
(MLF)

Main Ring Synchrotron  
(MR)

Hadron  
Experimental  
Hall (HD)

- JFY 2006 / 2007
- JFY 2008
- JFY 2009

400 MeV H<sup>-</sup> Linac  
[181 MeV at present]

3 GeV Rapid Cycling  
Synchrotron (RCS)

Neutrino Beam Line for  
T2K Experiment

K2 Trigger

Materials & Life  
Science Facility  
(MLF)

Main Ring Synchrotron  
(MR)

Hadron  
Experimental  
Hall (HD)

— JFY 2006 / 2007  
— JFY 2008  
— JFY 2009

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

3 GeV Rapid Cycling  
Synchrotron (RCS)

Neutrino Beam Line for  
T2K Experiment

K3 Trigger

Materials & Life  
Science Facility  
(MLF)

Main Ring Synchrotron  
(MR)

Hadron  
Experimental  
Hall (HD)

— JFY 2006 / 2007  
— JFY 2008  
— JFY 2009

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

3 GeV Rapid Cycling  
Synchrotron (RCS)

Neutrino Beam Line for  
T2K Experiment

K4 Trigger

Materials & Life  
Science Facility  
(MLF)

Main Ring Synchrotron  
(MR)

Hadron  
Experimental  
Hall (HD)

- JFY 2006 / 2007
- JFY 2008
- JFY 2009

# ビーム強度増強にむけて

- ビーム強度の増強は空間電荷効果対策が鍵となる。

$$\text{Bunching Factor: } BF = \frac{I_{\text{average}}}{I_{\text{peak}}}$$

$$\Delta V_{\text{SpaceCharge}} = -\frac{n_{\text{total}} r_p}{2\pi\epsilon_{\perp}\beta^2\gamma^3} \frac{1}{BF} \quad \text{一様分布モデルの場合}$$

- バンチ長を伸ばし、ピークカレントを下げれば(BFが上がり)、空間電荷効果の緩和が可能。
- しかし、バンチ長を伸ばしすぎると、RCS取出しキッカー、MR入射キッカーの立ち上がり時間中にビームが掛かってしまい、横方向エミッタンスの広がったビームになってしまう。

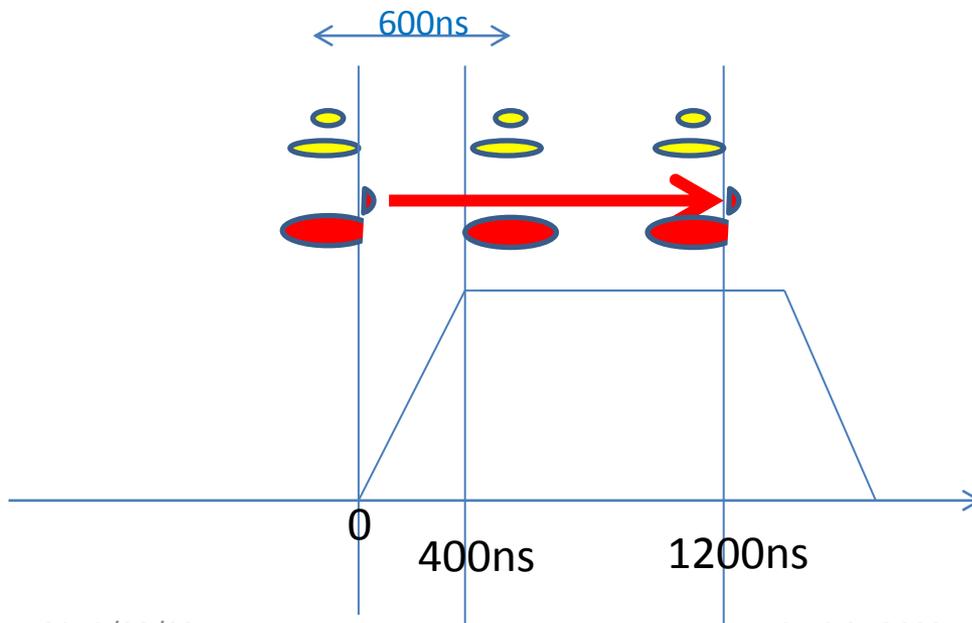
# キッカーによるバンチ長の制限

# RCS取出し現状

- RCS: BF $\sim$ 0.3@3GeVが可能だが、  
その時のバンチ長は270ns (181MeV入射、RCS 300kW)。
- RCS取り出しの**バンチ中心間の時間は600ns**。
- RCS取出しキッカーシステムは**立ち上がり400ns必要**。

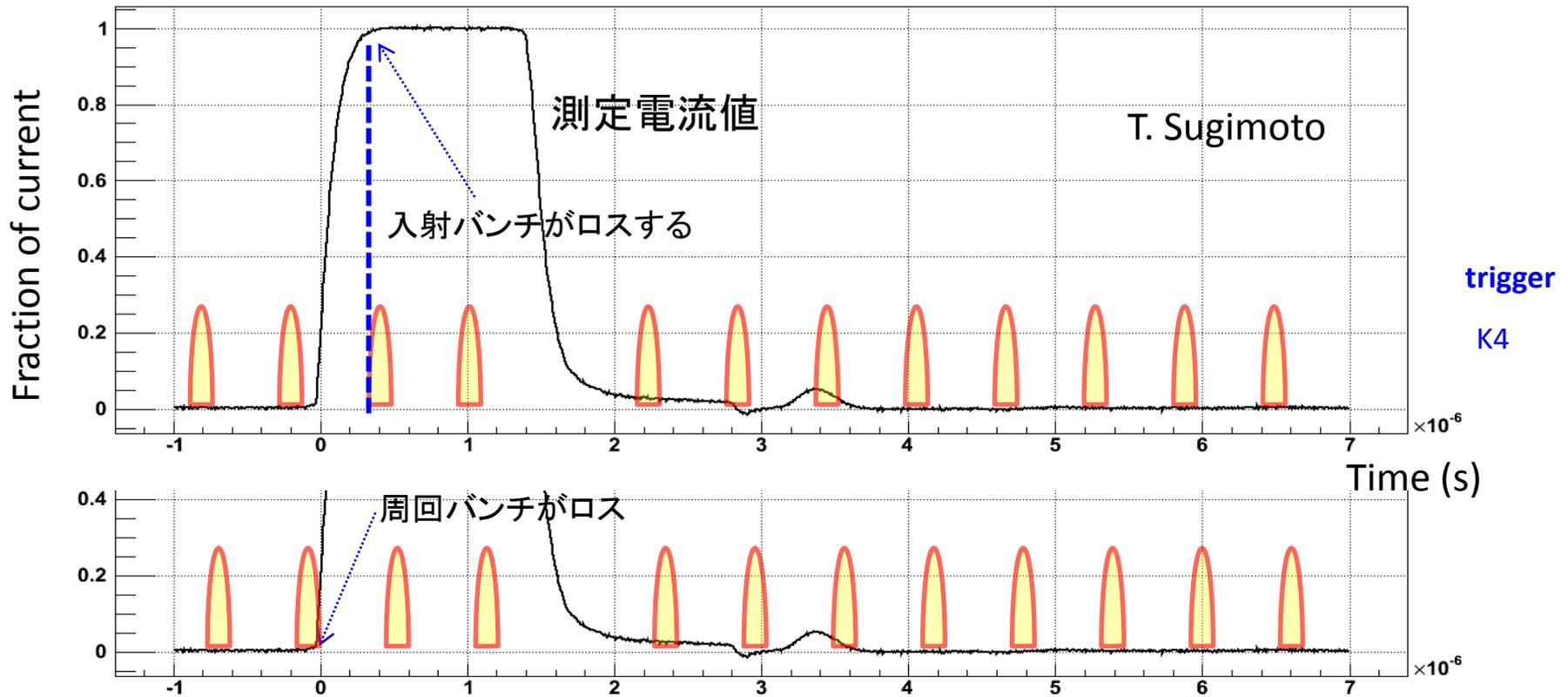
H. Harada

現システムではRCS取出し時バンチ長 < 200ns



270nsでもフラットトップには乗る  
しかしそれでは立ち上がり時に  
1周前の後ろバンチの尾を蹴り、  
大きな振動をもったビーム  
が取出されてしまう。

# MR入射キッカー



現状の立ち上がり時間(含 揺らぎ)  $\sim 420$  ns  
 $\Rightarrow$  (平均)バンチ長  $< 600$  ns  $- 420$  ns =  $180$  ns

MR入射システム増強[1]後の立ち上がり時間  $\sim 270$  ns  
 $\Rightarrow$  (平均)バンチ長  $< 600$  ns  $- 270$  ns =  $330$  ns

[1] K. Fan, et. al. SAOS04,  
S. Fukuoka, et. al. MOOS13

増強後、入射バンチ長  $200$  ns なら、周回バンチ長  $< 460$  ns

# ビーム強度増強にむけて

- ビーム強度の増強は空間電荷効果対策が鍵となる。

$$\text{Bunching Factor: } BF = \frac{I_{\text{average}}}{I_{\text{peak}}}$$

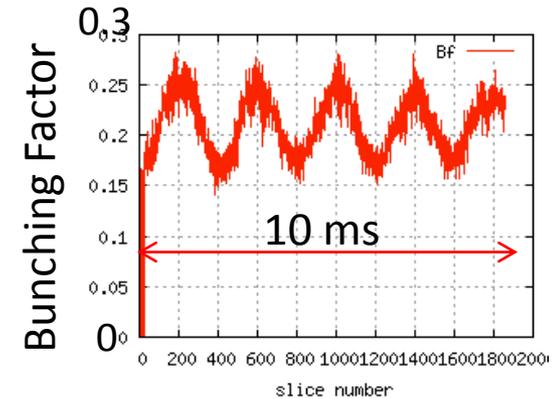
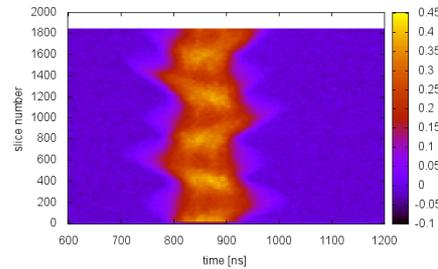
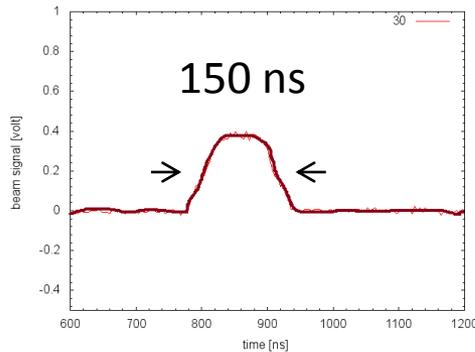
$$\Delta V_{\text{Space Charge}} = -\frac{n_{\text{total}} r_p}{2\pi\epsilon_{\perp}\beta^2\gamma^3} \frac{1}{BF} \quad \text{一様分布モデルの場合}$$

- バンチ長を伸ばし、ピークカレントを下げれば(BFが上がり)、空間電荷効果の緩和が可能。
- MR入射システムアップグレード後は、入射バンチ長が200 nsの制限があっても、周回バンチ長上限460 nsを生かせるはず。

# RF6倍高調波導入の効果

# MRのRF条件

-2013 May User operation: Fundamental only for both RCS ext. and MR



$$V_t = V_o \sin(h_0 \omega_{\text{revs}} t)$$

Near future:

Fundamental + 2nd Harmonic

OR

Fundamental + 2nd Harmonic + 6th Harmonic

$$V_t = V_o \sin(h_0 \omega t) - V_{2\text{nd}} \sin(2h_0 (\omega - \omega_{\text{revs}}) t + \phi_{2\text{nd}}) - V_{6\text{th}} \sin(6h_0 (\omega - \omega_{\text{revs}}) t + \phi_{6\text{th}})$$

Higher harmonic  
検討の結果  
6倍がベスト

K. Hara SUP015

# 1D Simulation

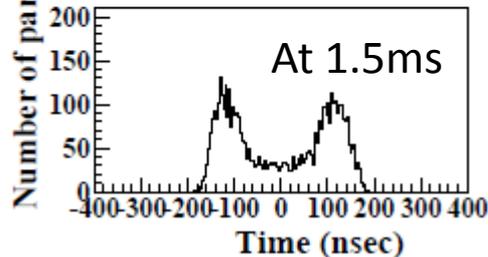
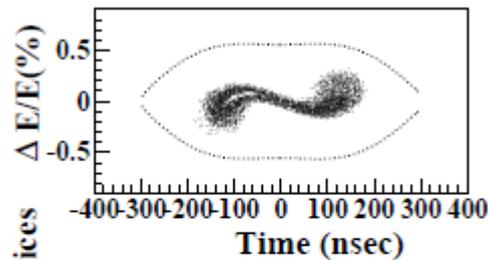
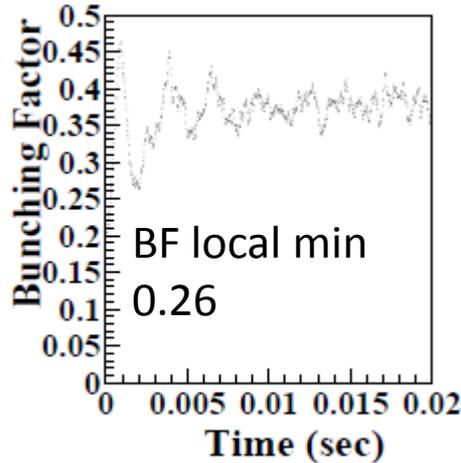
K. Hara SUP015

$$V_t = V_o \sin(h_0 \omega t)$$

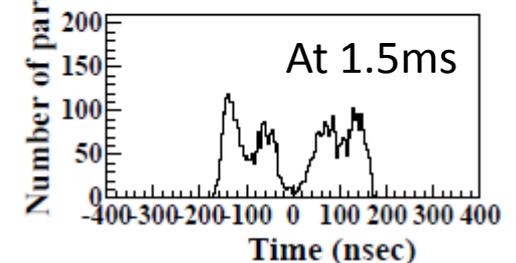
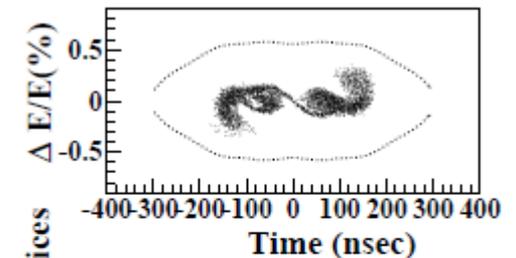
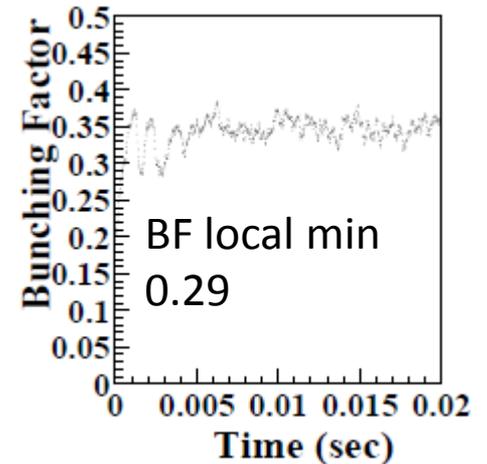
$$-V_{2\text{nd}} \sin(2h_0(\omega - \omega_{\text{revs}})t + \phi_{2\text{nd}})$$

$$-V_{6\text{th}} \sin(6h_0(\omega - \omega_{\text{revs}})t + \phi_{6\text{th}})$$

(2) Fund. + 2nd Only



(6) Fund. + 2nd + 6th



$(V_0, V_{2\text{nd}}, V_{\text{high}})$ $= (100, 70, 35) \text{ kV}$	BF local min.
(1) Fund. Only	0.18
<b>(2) Fund. + 2nd Only</b>	<b>0.26</b>
(3) Fund. + 2nd + 3rd	0.22
(4) Fund. + 2nd + 4th	0.22
(5) Fund. + 2nd + 5th	0.23
<b>(6) Fund. + 2nd + 6th</b>	<b>0.29</b>
(7) Fund. + 2nd + 7th	0.26
(8) Fund. + 2nd + 8th	0.24
(9) Fund. + 2nd + 9th	0.25
(10) Fund. + 2nd + 10th	0.26

# ビーム強度増強にむけて

- ビーム強度の増強は空間電荷効果対策が鍵となる。

$$\text{Bunching Factor: } BF = \frac{I_{\text{average}}}{I_{\text{peak}}}$$

$$\Delta V_{\text{SpaceCharge}} = -\frac{n_{\text{total}} r_p}{2\pi\epsilon_{\perp}\beta^2\gamma^3} \frac{1}{BF} \quad \text{一様分布モデルの場合}$$

- バンチ長を伸ばし、ピークカレントを下げれば(BFが上がり)、空間電荷効果の緩和が可能。
- MR入射システムアップグレード後は、入射バンチ長が200 nsの制限があっても、周回バンチ長上限460 nsを生かせるはず。
- BFを入射後 1.5 msで 0.2 → ~0.3に引き上げることが、6倍高調波の導入で可能[2]。

[2] K. Hara, et. al., SUP015

# 2.5D Simulations

# Simulation code SCTR

- 2.5D PIC CODE developed by K. Ohmi
- The potential solver is based on FACR (Fourier Analysis and Cyclic Reduction) algorithm.
- The boundary is square perfect conducting wall.
- Potential is assumed to be proportional to the line density of the beam.
- Transverse potential is given by solving two-dimensional Poisson equation.

$$\Phi = \frac{N_p r_p}{\beta^2 \gamma^3} \lambda(z) \phi(x, y; s) \quad \Delta_{\perp} \phi = \rho$$

- Space charge is grad of the potential.

$$\frac{\Delta p_x}{\Delta s} = -\frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad \frac{\Delta p_y}{\Delta s} = -\frac{\partial \Phi}{\partial y}, \quad \frac{\Delta p_z}{\Delta s} = -\frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

- $\Delta s < \beta(s) = 4 \sim 30$  m for J-PARC MR  $\rightarrow \Delta s \sim 1$  m.
- Ring Lattice and optics come from

REF: K. Ohmi et al., proceedings of PAC07, 3318 (2007).

K. Ohmi et. al., Proceedings HB2010, 425.

# 入射BF $\sim 0.2$

# 3.3E14ppp

Initial conditions:

(Simpsons results by H. Hotchi)

## RCS 1 MW

BF\_RCSext = 0.2:

bunchL\_RCSexit  $\sim 200$ ns

RCS RF exit: V1=60kV, V2=30kV

MR conditions:

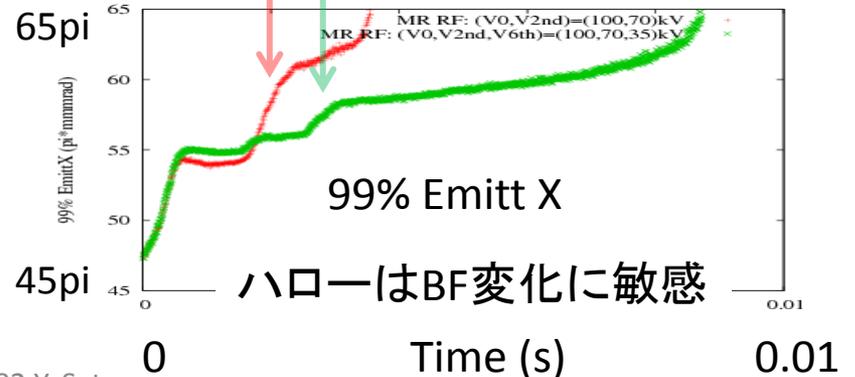
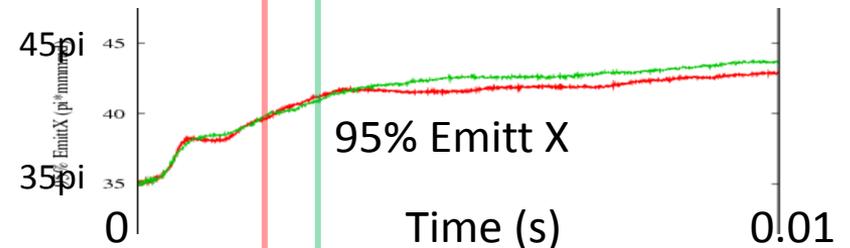
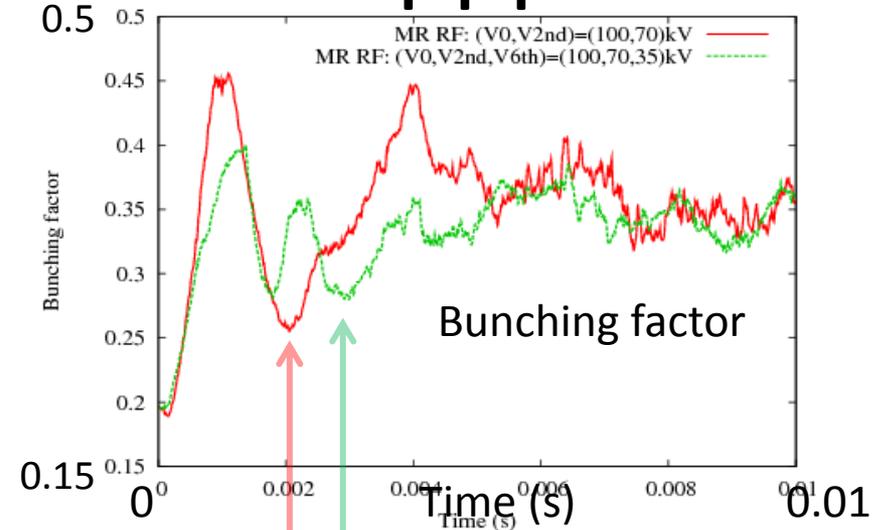
(1) RF基本波+ 2倍高調波

(V0,V2nd)=(100,70) kV

(2) RF基本波+ 2倍高調波+ 6倍高調波

(V0,V2nd,V6th)=(100,70,35) kV

(1),(2)それぞれで、  
エミッタンス増加の抑制に  
最適なRF電圧バランスは検討中



# 入射BF ~0.2

RCS 1 MW,  $3.3E14ppp$ ,  $BF \sim 0.2$   
をMRで受け、オペレーションポイントを  
現在の使用エリア(22.43, 20.76)にした場合、  
Bunching Factorの極小点

**0.26** or **0.29**

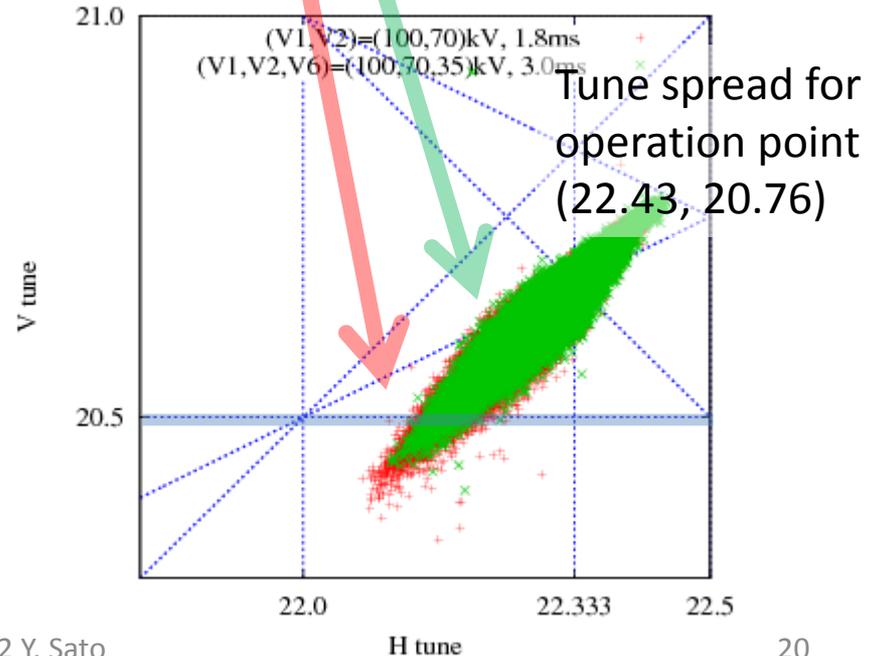
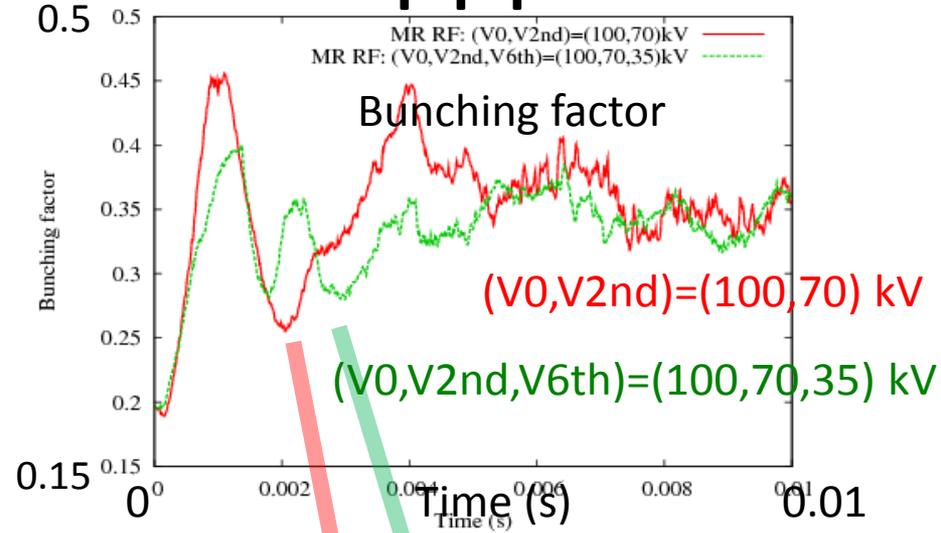
ではTune広がり、Half resonanceに  
掛かる。

ただし、いずれの場合も  
この条件でMR conditions: 65pi cutでは  
 $3.3E14ppp$ のビームは

Inj loss >2%, Total loss ~3%  
となり、メンテナンス性が厳しい。  
Total loss ~2%程度に抑えたい。

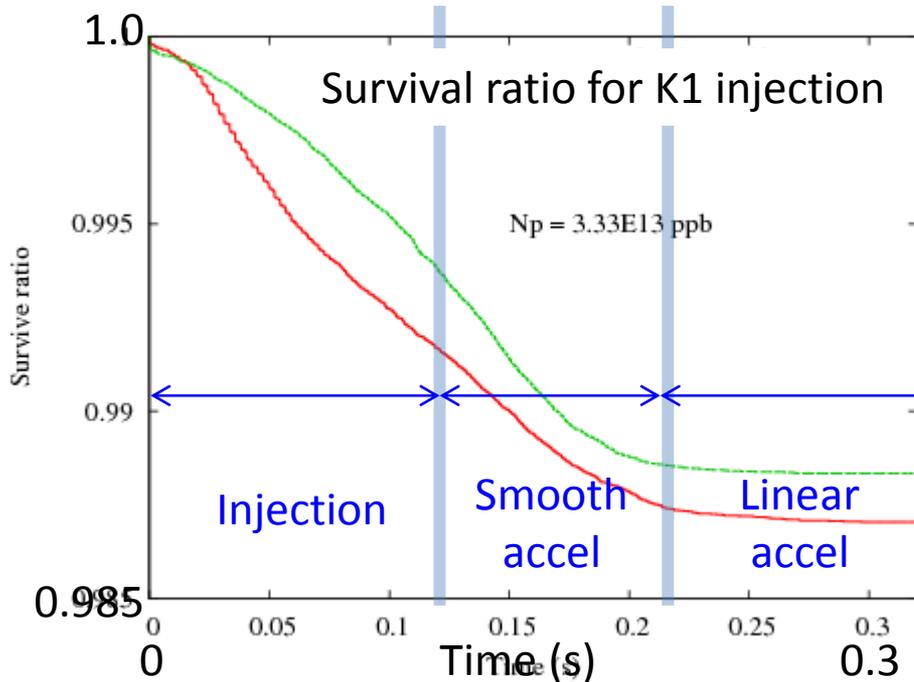
MR conditions: 65pi cut,  
Alignment errors, measured multipole,  
Sum resonance corrected (we have Skew Qs)

# $3.3E14ppp$



# 入射BF ~0.2

# 2.6E14ppp



MR conditions: 65pi cut,  
Alignment errors, measured multipole,  
Sum resonance corrected (we have Skew Qs)

RF基本波100 kV  
2倍高調波70 kV

RF基本波100 kV ->240 kV  
2倍高調波70 kV  
6倍高調波35 kV

2.6E14ppp, 2.4s cycle, 1.4s accel  
BT 1.2 kW loss,  
MR 525kW, 65pi cut  
MR 0.49 kW loss  
MR 0.42kW loss

MRロスがメンテナンス性の  
許容範囲にある。  
ただし、コリメータをより閉めた  
検討も必要。

# MR コリメータの影響

## MRコリメータの運用方針

MRでのロスをコリメータエリアに集中させることで、放射化の影響を局在化させる。

局在化を確保した上でコリメータエリア自体の放射化を抑えるべく全ロス量を抑制する。

MRアクセプタンス81pi

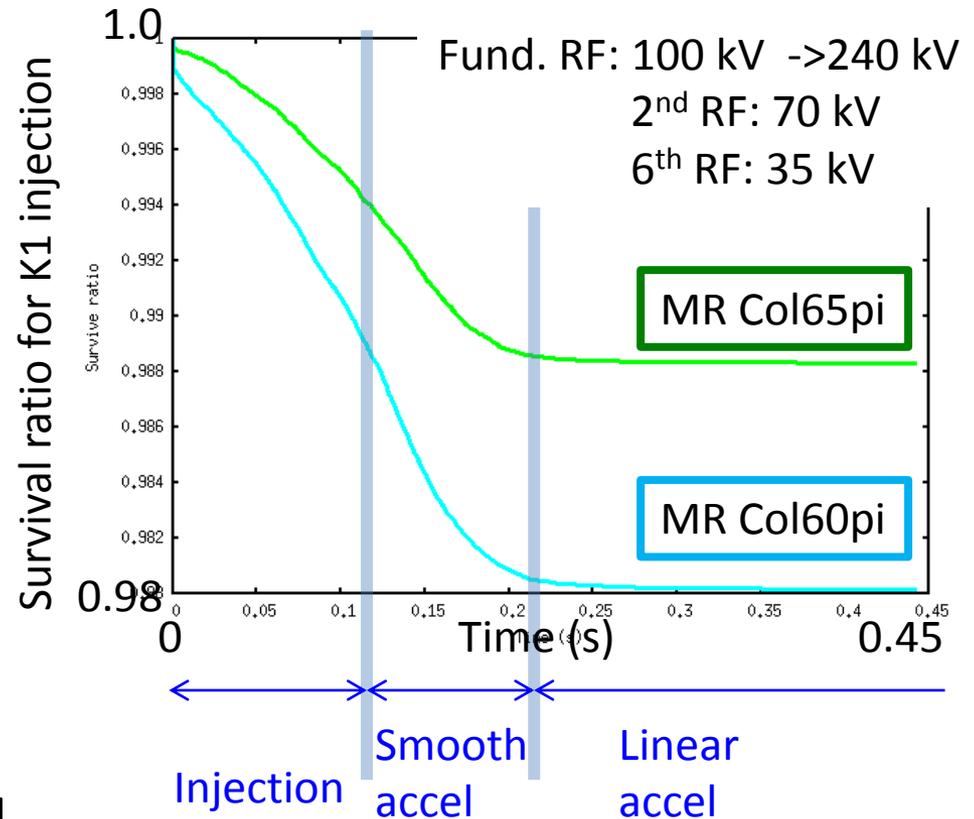
MRコリメータ容量3.5 kW (2013 Fall -)

ロス量と線量の相関は現在スタディ中[3]。

[3] K Satou SAP084

メンテナンス性から~ 1kWロス  
MR Col. 50pi ~ 65piでの運用を  
想定している。

2013/08/03



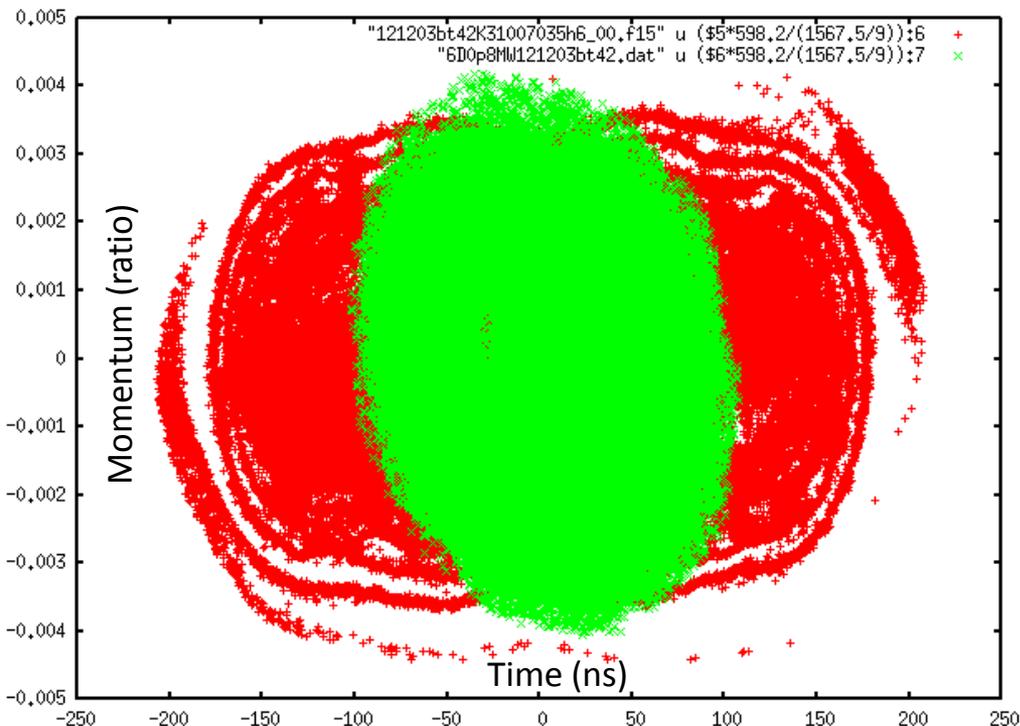
**2.4s cycle , 2.6E14ppp, BT 1.2 kW loss (BT Col.42pi)**

**MR 525 kW**

**MR Col.65pi: total loss ~0.8% i.e. 0.42 kW for 2.4s cycle**

**MR Col.60pi: total loss ~1.8% i.e. 0.96 kW for 2.4s cycle**

# Injected bunch vs. circulating bunch



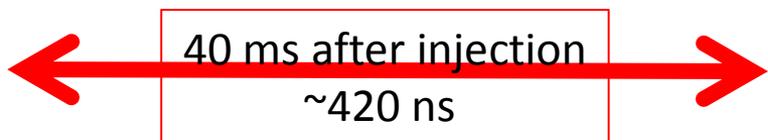
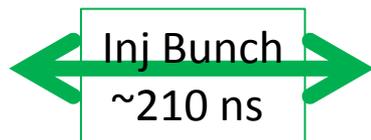
RCS 800 kW

MR RF(V1,V2,V6)=(100,70,35) kV

入射ビームのバンチ長  
周回ビームのバンチ長  
の平均が $\sim 320$  ns

MR入射キッカーが280 ns  
で立ち上がれば  
ビームが横方向に余計に  
蹴られずに済む。

キッカー増強後は目標  
立ち上がり 270 ns



周回ビームのバンチ長は  
入射後40~120 msでほぼ同じ

# まとめ

- MR入射時に、現状でバンチ長  $\sim 200$  ns, BF  $\sim 0.2$  の制限がある。MR入射システムアップグレード後、既存の基本波RF、2倍高調波RFに加え、6倍高調波RFを新規導入すれば、入射直後でBFを $0.2 \rightarrow 0.3$ 引き上げ、空間電荷効果を緩和できる。  
⇒ 2.5Dシミュレーションで、エミッタンス増加抑制を確認した。
- $2.6E14$ ppp, 2.4s繰り返しでMR  $\sim 530$  kW運転が期待できる。

# REFERENCES

# Robustness for injection timing

入射時のバンチタイミング  
をRF中心から  
+20ns, +40ns, +60ns  
ずらしたときのロスへの影響をみた。

MR 525 kW運転で  
+100 W, +240W, +450W  
ロス増加の影響が予想される。

## Conditions:

RCS 800 kW,  $BF_{RC\text{Sext}} \sim 0.2$

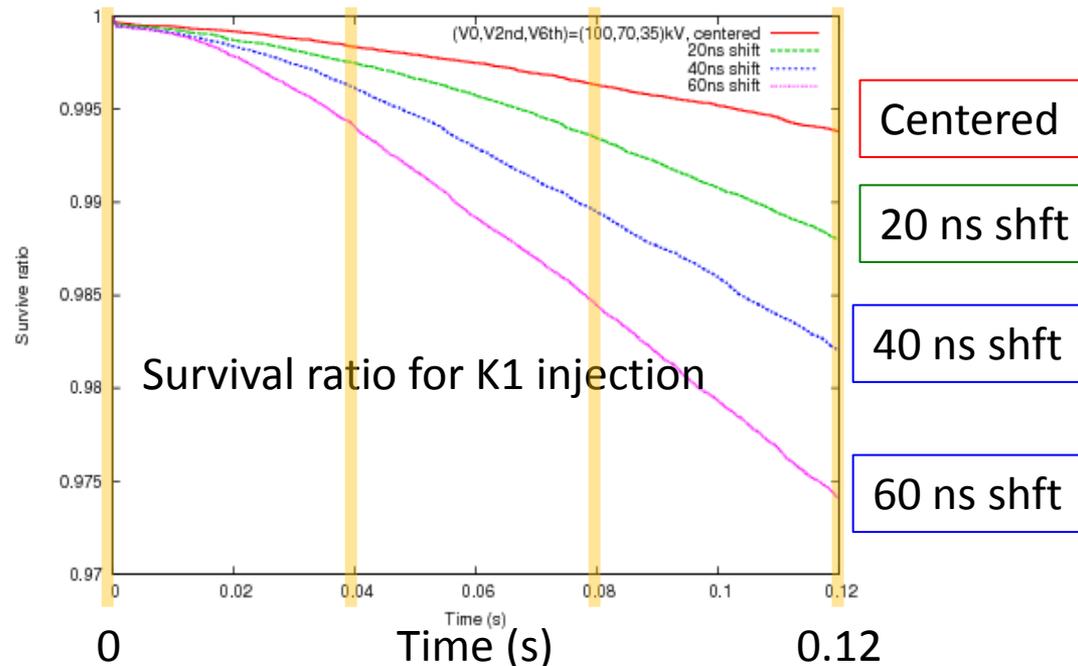
MR RF

Fund. RF: 100 kV

2<sup>nd</sup> RF: 70 kV

6<sup>th</sup> RF: 35 kV

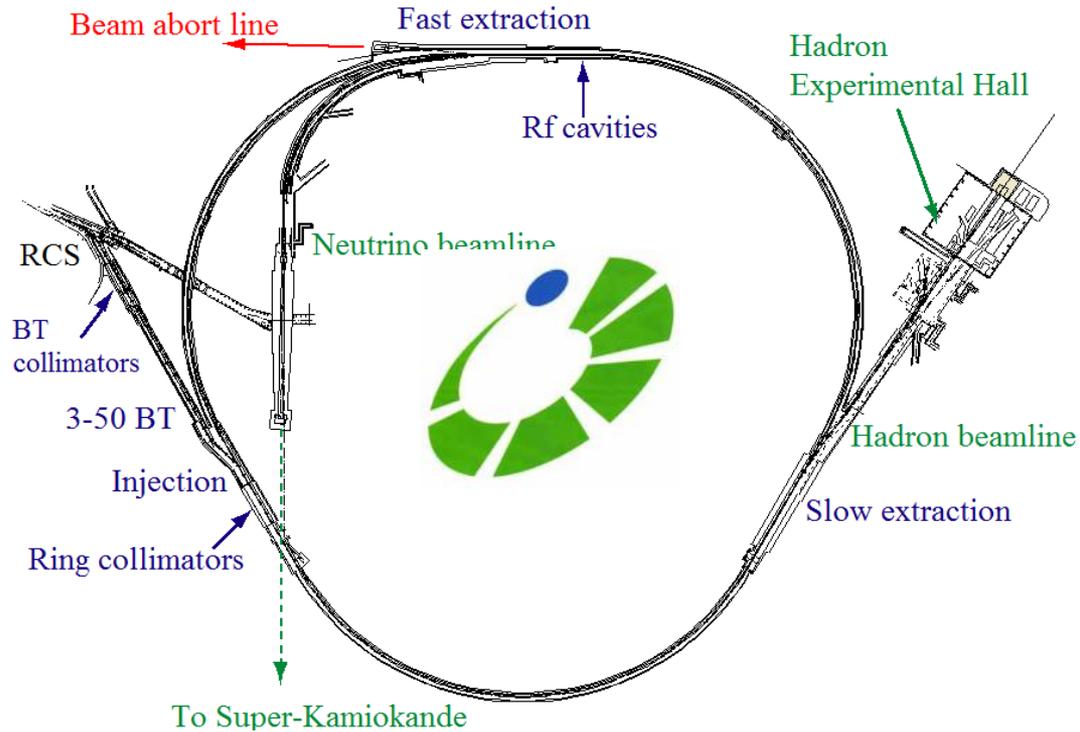
MR Colli. 65 pi cut



現状MR230 kW運転での入射タイミングゆれは  
周回バンチ数によって異なり、10~50 ns。  
⇒4回入射(8バンチ)平均で20 ns程度に抑えたい。

# J-PARC MR Parameters

Circumference	1567.5 m
Superperiodicity	3
Injection energy	3 GeV
Extraction energy	30 GeV (1 <sup>st</sup> phase)
Harmonic number	9
Number of bunches	8
Transition $\gamma$	$j$ 31.7
Typical tune	22.40, 20.76 (FX) 22.30, 20.78 (SX)
Repetition rate	$\sim$ 0.3 Hz
Physical aperture	$81\pi$ mm-mrad
Transverse emittance	
At injection	$54\pi$ mm-mrad
At extraction	$10\pi$ mm-mrad (30 GeV)
Collimator capacity	2 kW
Beam power	0.75 MW



3 dispersion free straight sections (116 m)

Ins A: Injection, Collimator

Ins B: **Slow Extraction** to Hadron Exp Hall

Ins C: **Fast Extraction** to Neutrino Beamline

速い取出しでは、リング1周時間( $\sim 5$  us)で全てのビームがニュートリノビームラインに取出される。

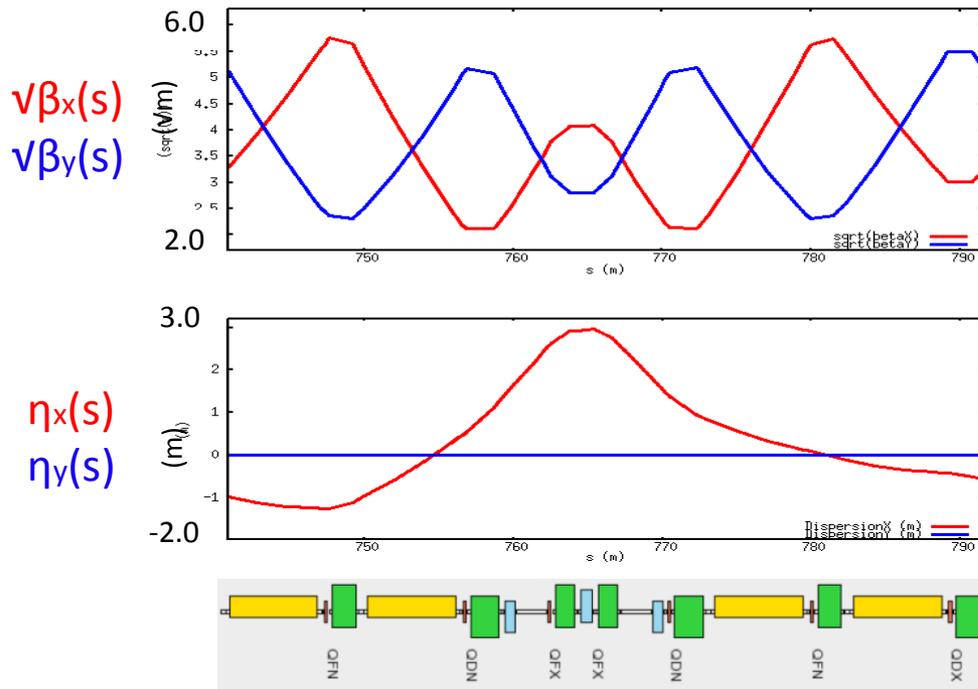
# MR Lattice

Imaginary Gamma Lattice to keep  $\phi_s < \pi/2$  during acceleration

$$\frac{\Delta T}{T} / \frac{\Delta p}{p} = \left( \frac{1}{\gamma_T^2} - \frac{1}{\gamma^2} \right) < 0 \quad \text{for } \gamma_T^2 < 0 \quad \text{where} \quad \Delta C = \left( \oint \left( \frac{\eta(s)}{\rho} \right) ds \right) \frac{\Delta p}{p} \equiv \frac{C}{\gamma_T^2} \frac{\Delta p}{p}$$

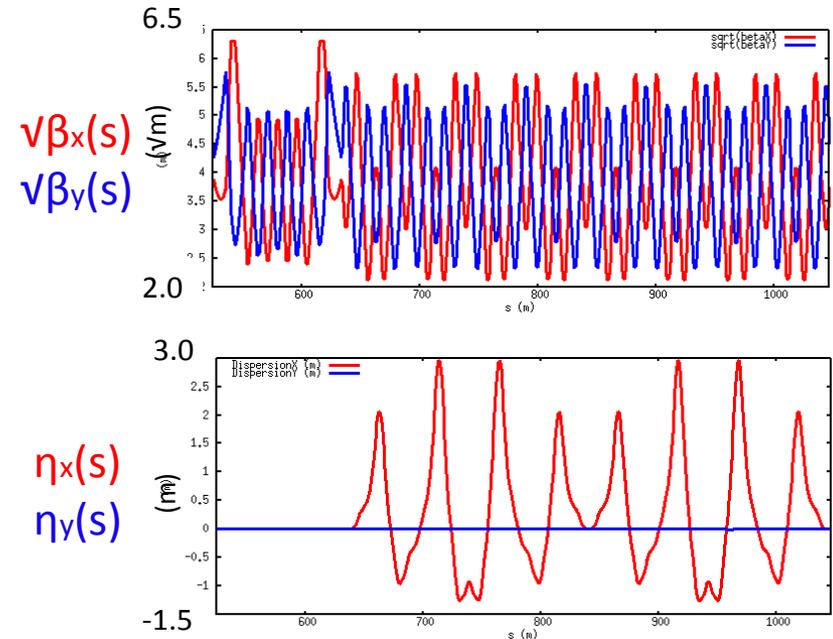
Slippage

Dispersion function  $\eta(s)$   
modulated by missing-bend structure



Phase advance

$6\pi / \text{Arc} : 2\pi * \text{Integer}$  for Achromat



Super-period B (Insertion B + Arc B)