

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⁻ 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。

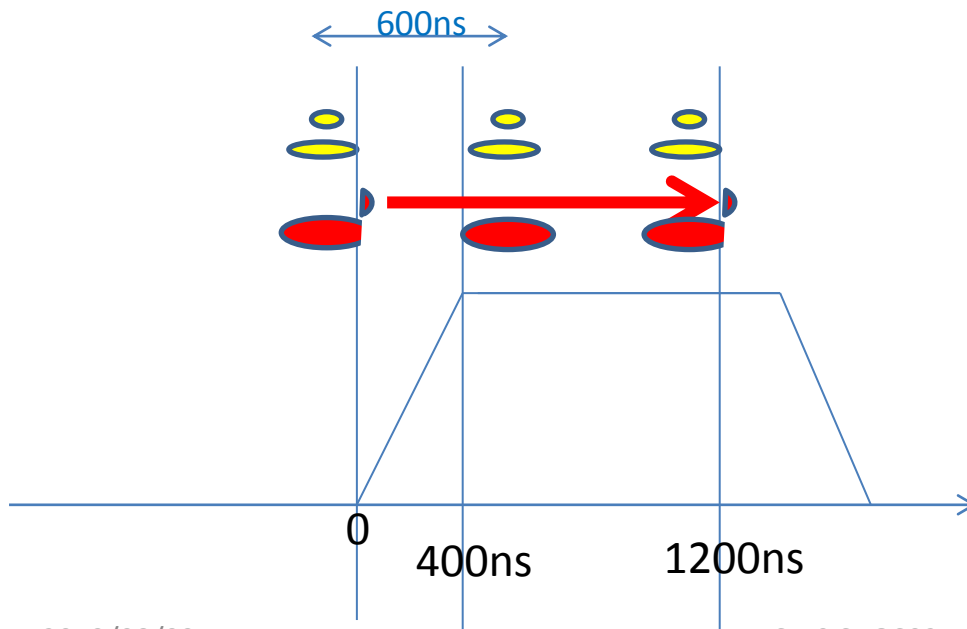
キッカーによるバンチ長の制限

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**。

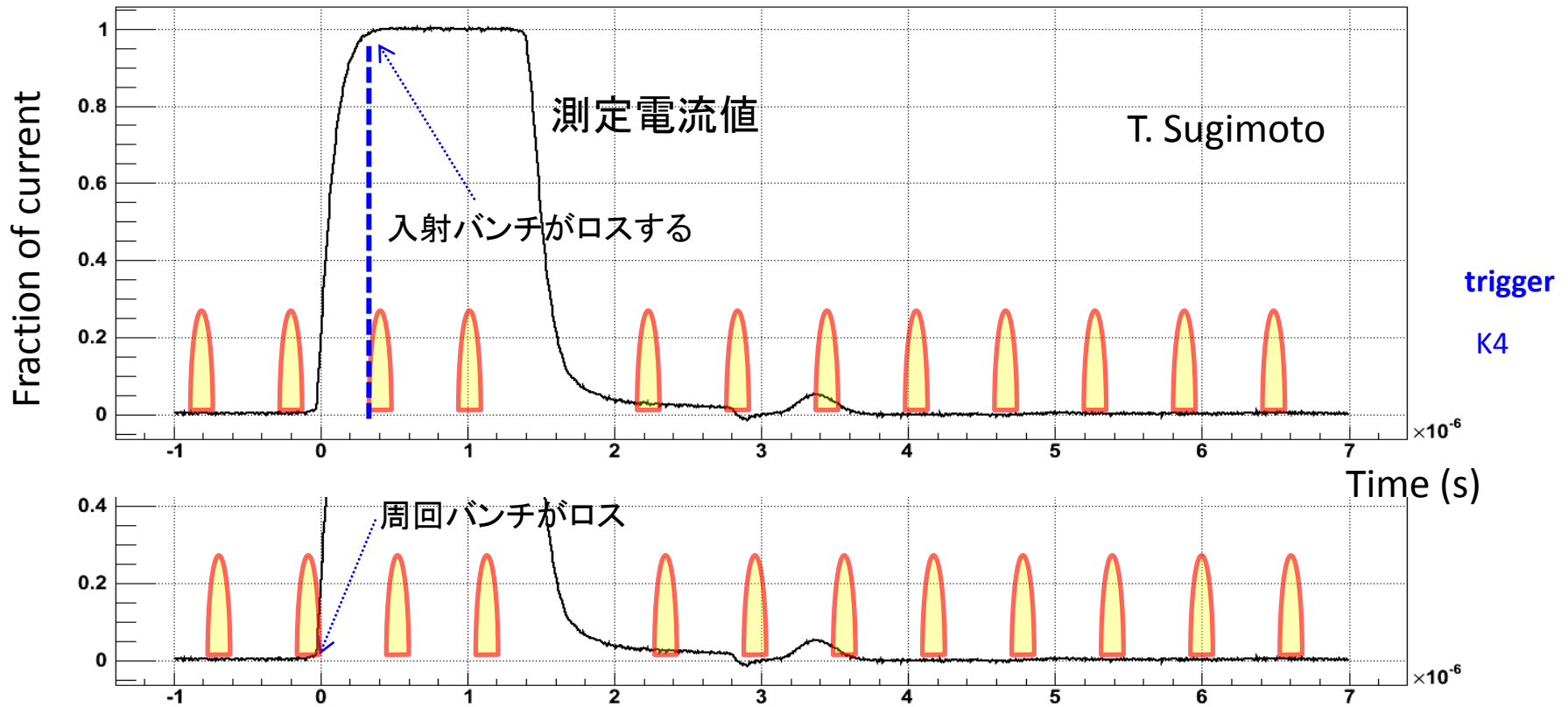
H. Harada

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) ~ 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 ~ 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。

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

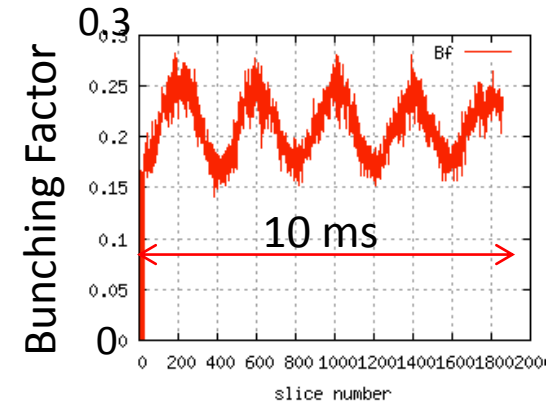
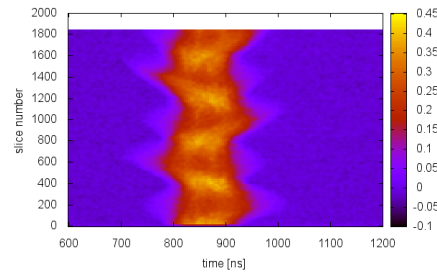
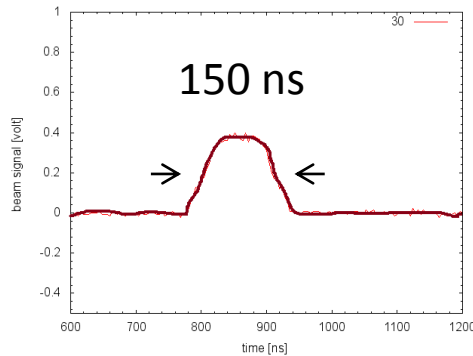
$$\Delta V_{\text{Space Charge}} = -\frac{n_{\text{total}} r_p}{2\pi\epsilon_{\perp}\beta^2\gamma^3} \frac{1}{BF} \quad \text{一様分布モデルの場合}$$

- 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

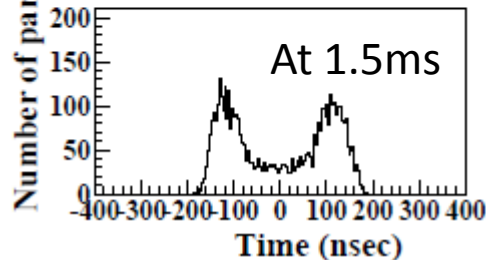
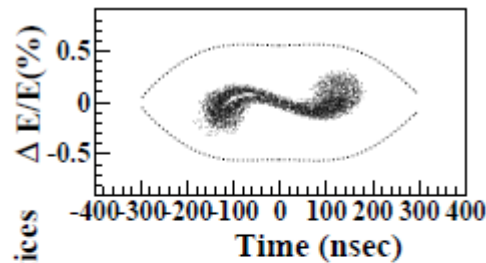
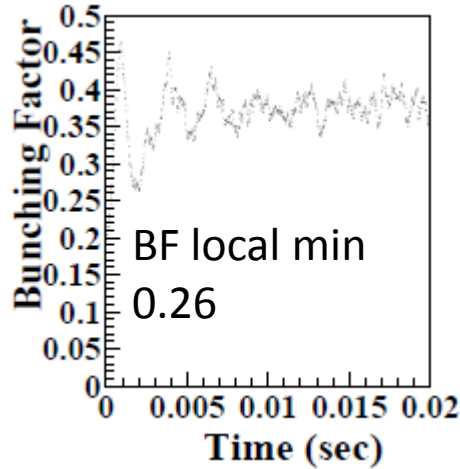
K. Hara SUP015

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

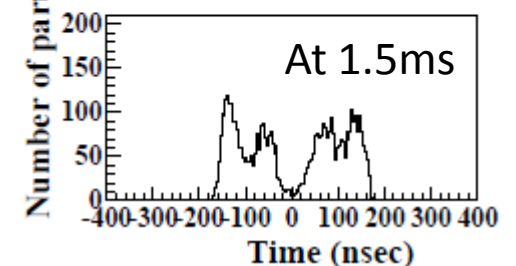
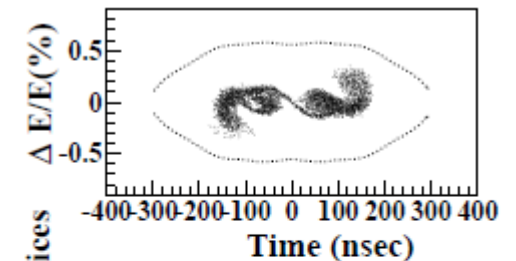
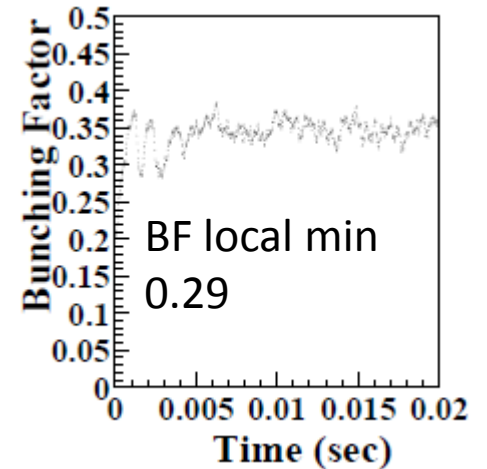
$$-V_{2\text{nd}} \sin(2h_0(\omega - \omega_{\text{revs}})t + \phi_{2\text{nd}})$$

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

(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
(2) Fund. + 2nd Only	0.26
(3) Fund. + 2nd + 3rd	0.22
(4) Fund. + 2nd + 4th	0.22
(5) Fund. + 2nd + 5th	0.23
(6) Fund. + 2nd + 6th	0.29
(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 ~ 0.2

3.3E14ppp

Initial conditions:

(Simpsons results by H. Hotchi)

RCS 1 MW

BF_RCSext = 0.2:

bunchL_RCSexit ~ 200 ns

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

MR conditions:

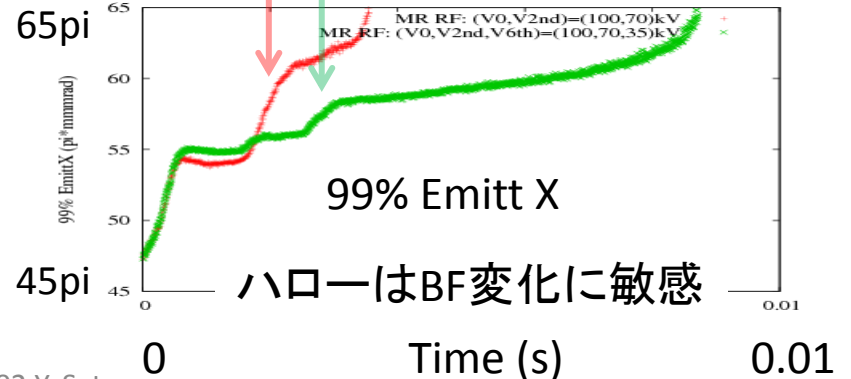
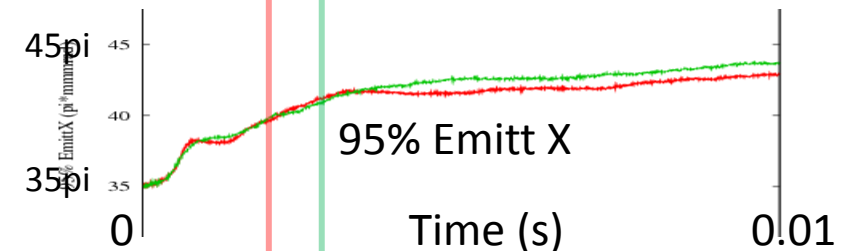
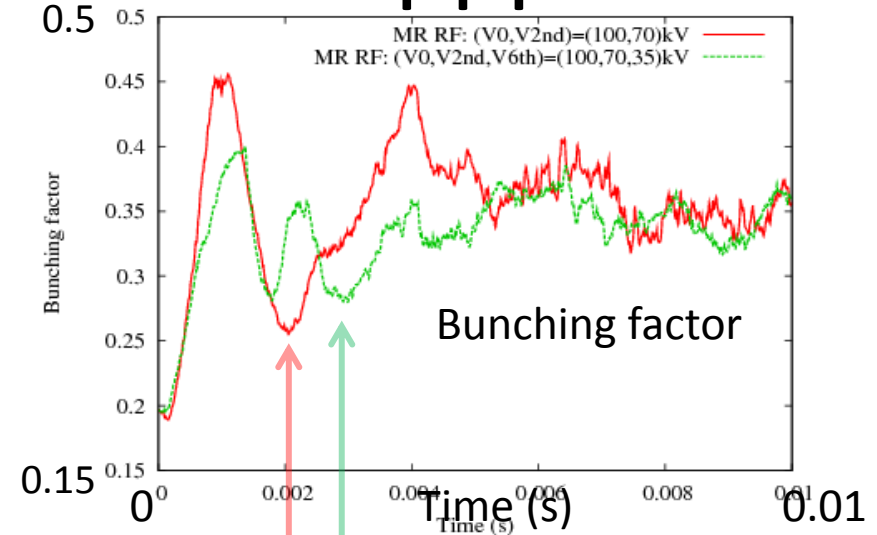
(1) RF基本波+ 2倍高調波

(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~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**

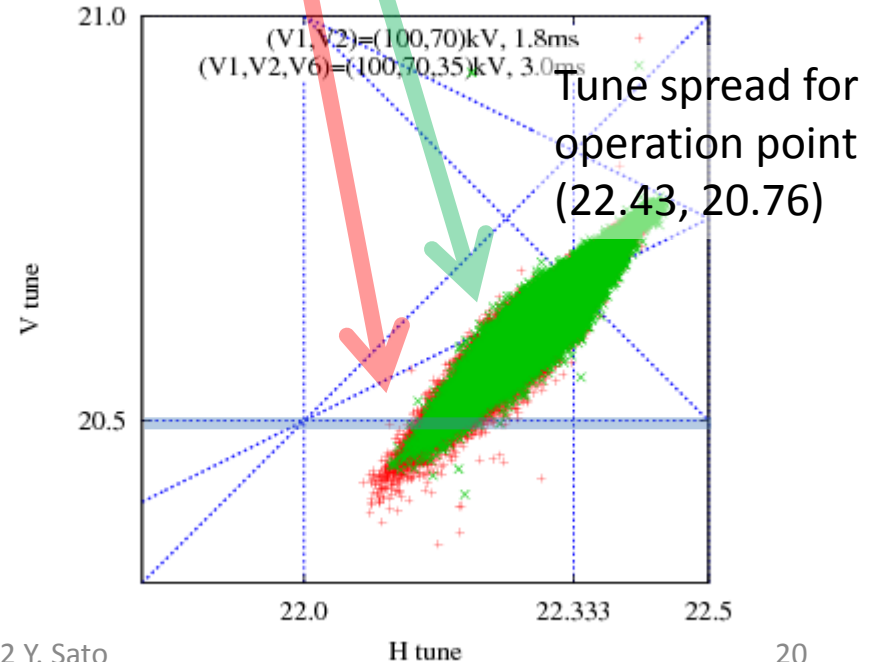
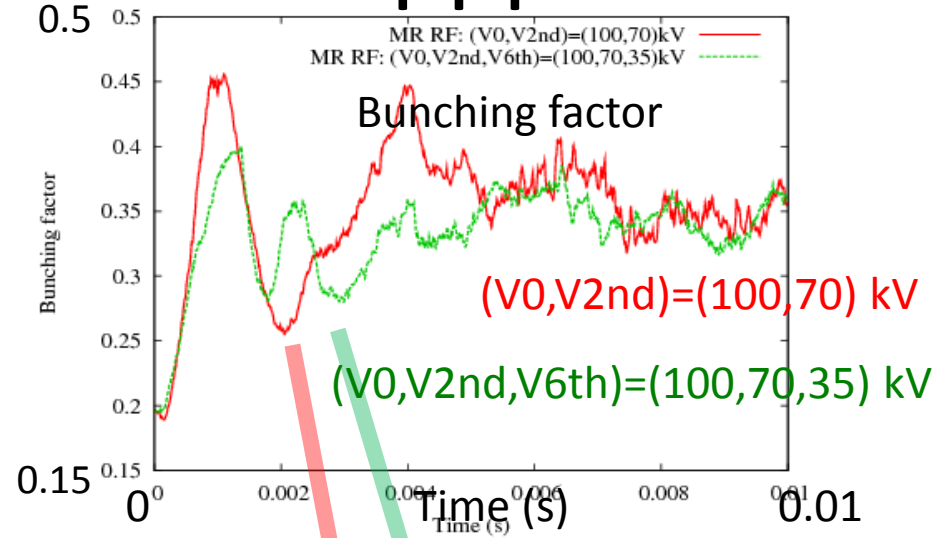
ではTune広がり、Half resonanceに
掛かる。

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。

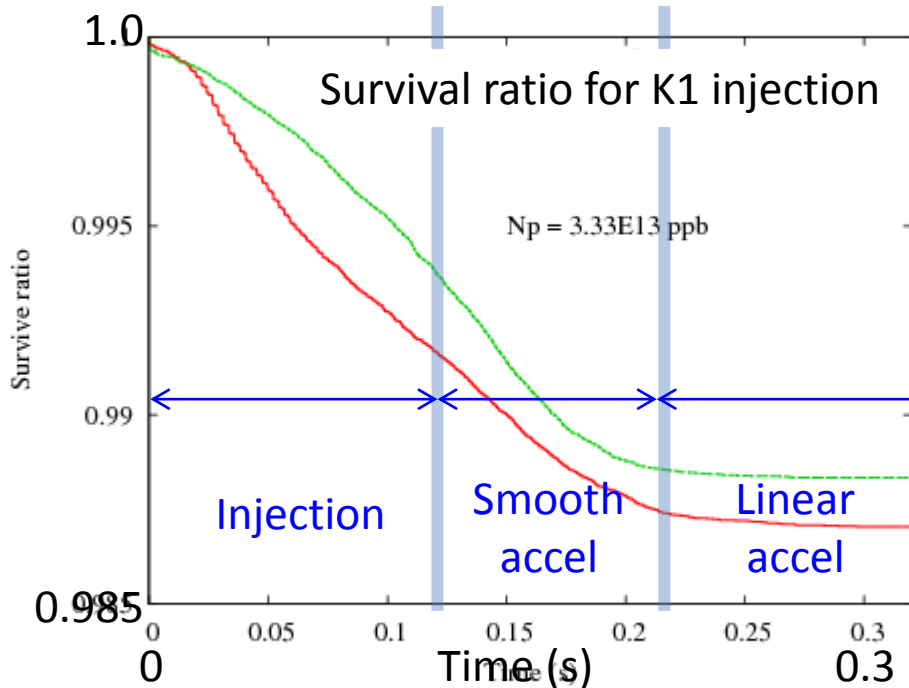
MR conditions: 65pi cut,
Alignment errors, measured multipole,
Sum resonance corrected (we have Skew Qs)

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

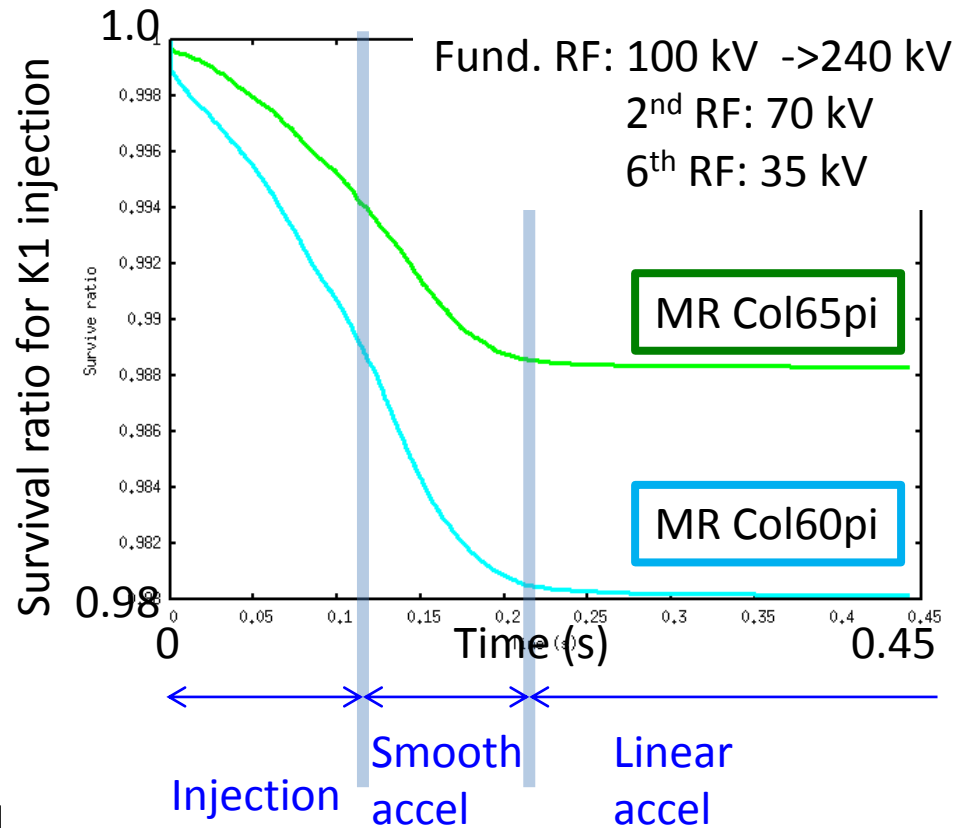
MRコリメータ容量3.5 kW (2013 Fall -)

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



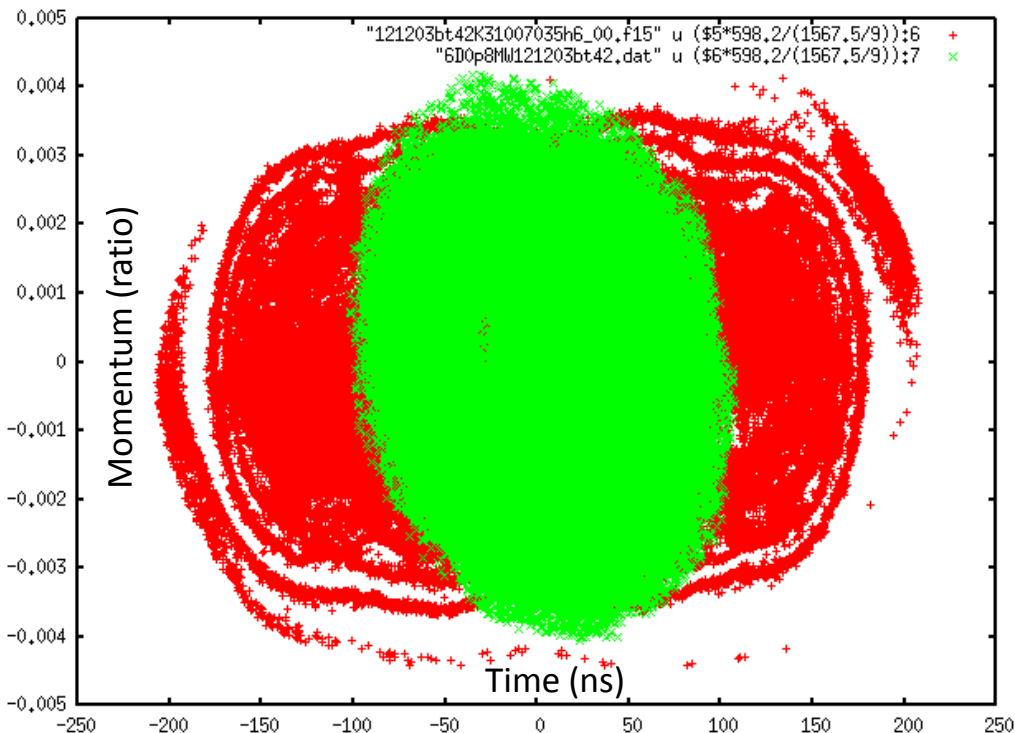
2.4s cycle , 2.6E14ppp, BT 1.2 kW loss (BT Col.42pi)

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



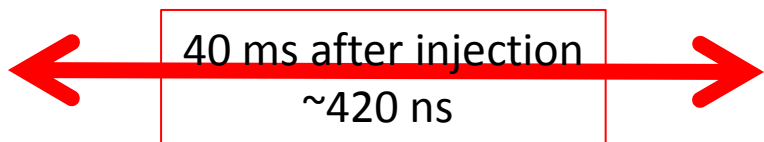
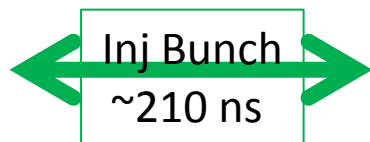
RCS 800 kW

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 ~ 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 ~ 200 ns, BF ~ 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 ~ 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, $BF_{RC\text{Sext}} \sim 0.2$

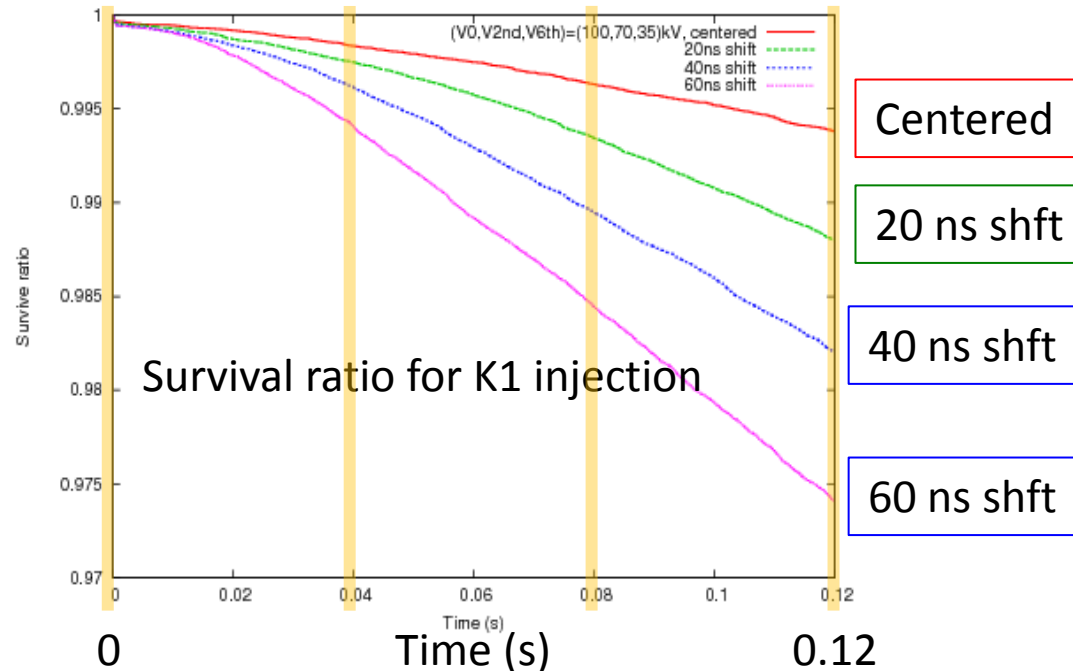
MR RF

Fund. RF: 100 kV

2nd RF: 70 kV

6th 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 st phase)
Harmonic number	9
Number of bunches	8
Transition γ	j 31.7
Typical tune	22.40, 20.76 (FX) 22.30, 20.78 (SX)
Repetition rate	\sim 0.3 Hz
Physical aperture	81π mm-mrad
Transverse emittance	
At injection	54π mm-mrad
At extraction	10π mm-mrad (30 GeV)

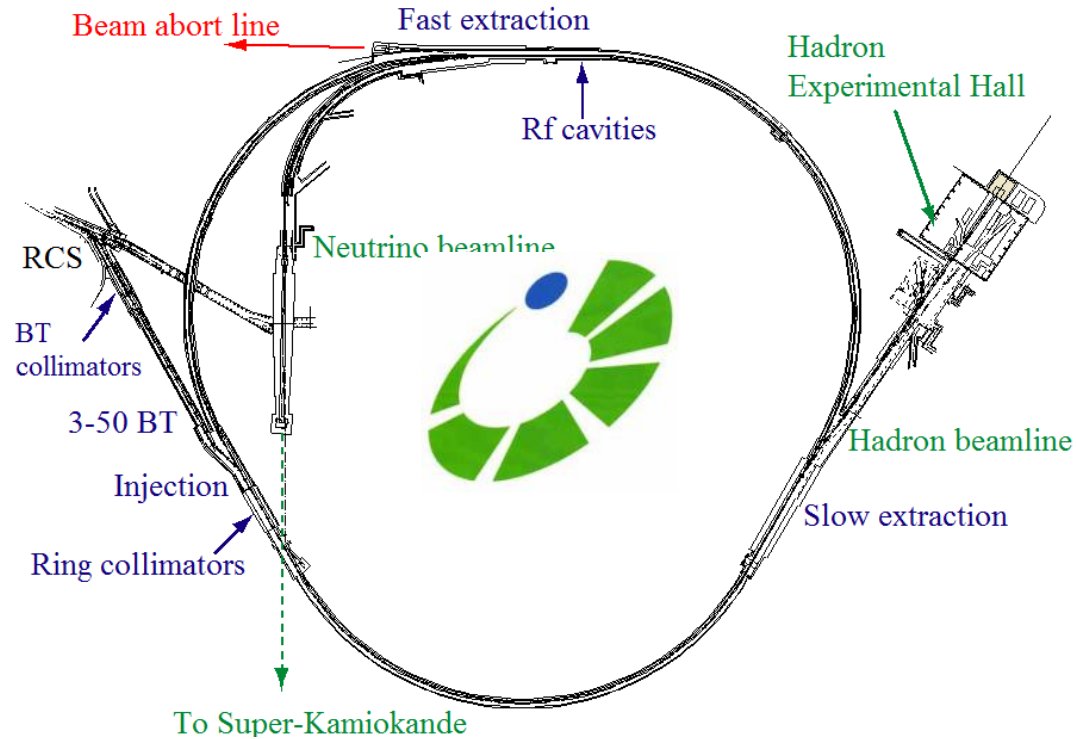
Collimator capacity	2 kW
Beam power	0.75 MW

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(~ 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。

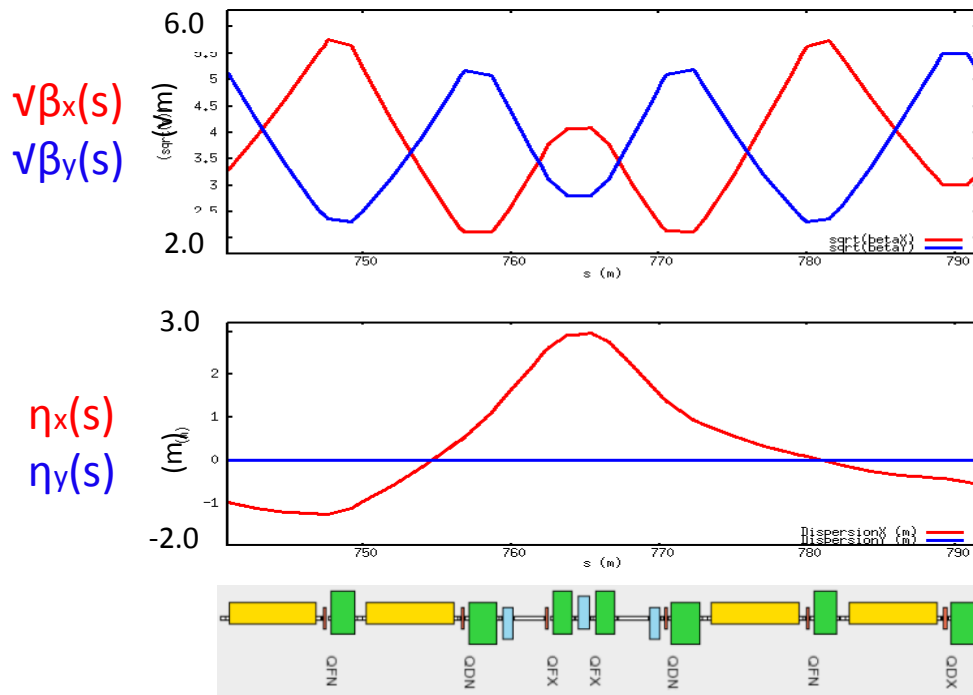
MR Lattice

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

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

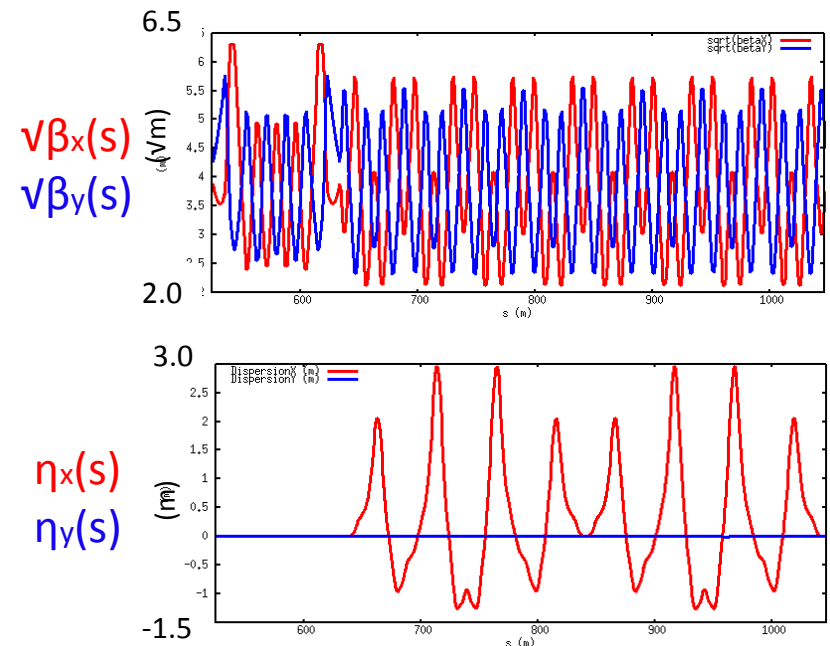
Slippage

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)