

# J-PARC RCSにおける ビームコミッショニングの進捗報告

— 大強度・低エミッタンスビームの実現を目指した取り組み —

第14回日本加速器学会年会  
北海道大学 クラーク会館・学術交流会館

2017年8月2日

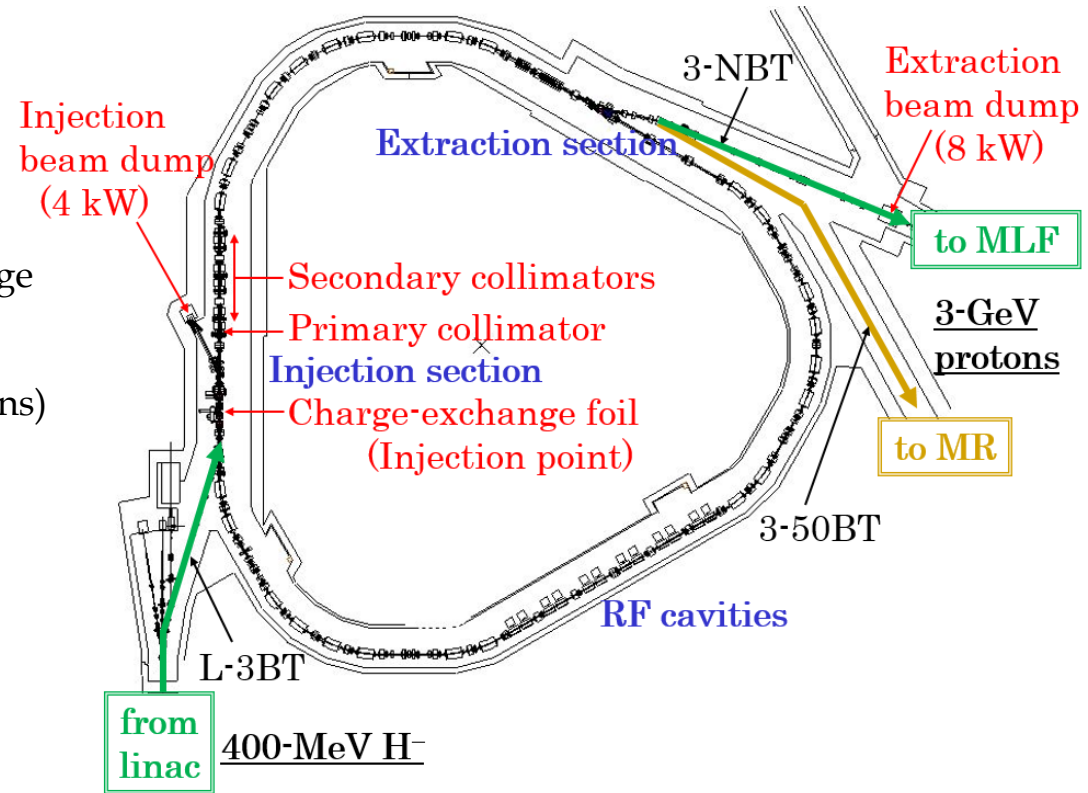
發知 英明、原田 寛之、加藤 新一、岡部 晃大、サハ プラナブ、  
菖蒲田 義博、田村 文彦、谷 教夫、渡辺 泰広、吉本 政弘

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構  
J-PARCセンター 加速器ディビジョン

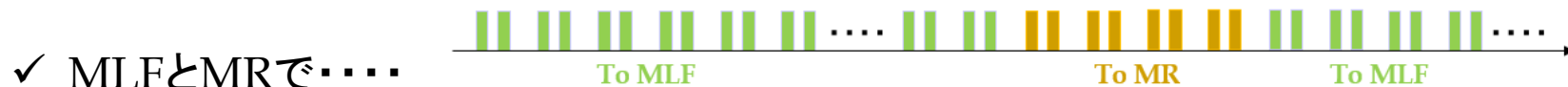
# J-PARC 3-GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS)

Circumference	348.333 m
Superperiodicity	3
Harmonic number	2 (2 bunches)
Injection	Multi-turn, charge-exchange
Injection energy	400 MeV
Injection period	0.5 ms (307 turns)
Injection peak current	50 mA
Extraction energy	3 GeV
Repetition rate	25 Hz
Particles per pulse	$8.33 \times 10^{13}$

**Beam power 1 MW**



ビームの供給先 ⇒ 中性子・ミュオン生成標的 @ MLF: ~93.5%  
 ⇒ MR: ~6.5% (数秒毎に4パルス)



- ✓ MLFとMRで.....  
 運転条件が違う、また、要求されるビームの性質も異なる  
 ⇒ MLF向け・MR向けで、各々運転パラメータの最適化が必要

本日の話題: MR向けビーム運転の最適化を目指した取り組み、進捗状況

# Beam operation to MLF

## 要求事項

RCSビームの殆どはMLFへ供給  
機器の放射化は、MLF向け運転  
でのビーム損失の状況に大きく依存

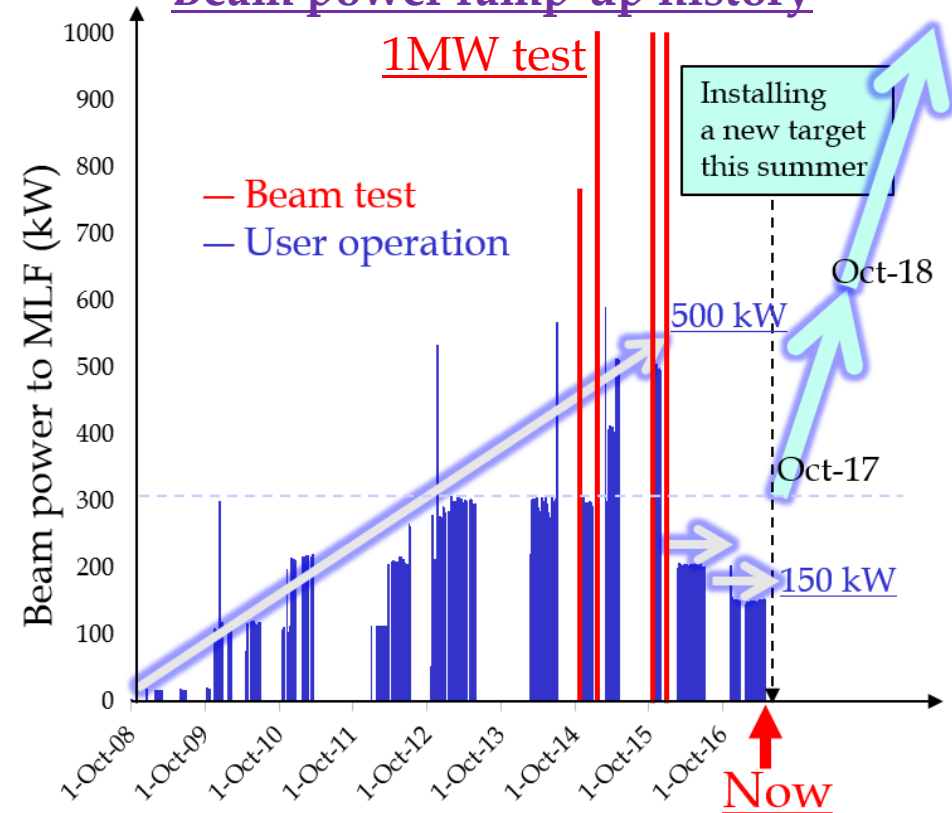
⇒ 十分なビーム損失の低減

中性子生成標的上の衝撃波の緩和：  
標的の十分な寿命(>半年)を  
確保するための必要条件

⇒ 電荷密度の低い  
高エミッタンスのビーム

- ✓ 1 MW ( $\sim 8.3 \times 10^{13}$  ppp) 相当の  
ビーム加速を達成、要求事項も満足
- Wide rangeのペイント入射を導入  
( $\epsilon_{tp} = 200\pi$  mm mrad)
  - ⇒ ビームの高エミッタンス化
  - ⇒  $10^{-3}$ オーダーの低ビーム損失
- ・・・ 昨年の加速器学会で報告済

## Beam power ramp-up history



- ✓ 中性子生成標的の不具合のため、  
利用運転の出力は150 kWに制限
- ✓ 新標的導入後の10月から  
再度、ビーム出力増強予定：  
300 kW ⇒ 600 kW ⇒ 1 MW
- ✓ 加速器単体の大強度試験は順調に進展

# Beam operation to MR

## 要求事項

MRにおけるビーム損失低減と大出力化

⇒ ハローの少ない低エミッタンスビーム  
(MLFの場合とは真逆の要求)

✓ 大強度・低エミッタンスビームの実現を目指してビーム調整・試験を実施

ビーム強度:  $\sim 7.1 \times 10^{13}$  ppp (設計強度の $\sim 85\%$ )

- 入射過程におけるエミッタンス増大の低減
  - 横方向ペイント入射の最適化
- 加速初期・中盤におけるエミッタンス増大の低減
  - チューン・クロマティシティーの最適化
- 加速後半におけるビーム不安定性の抑制
  - バイポーラ六極磁場パターンを用いたクロマティシティー操作

## 発表内容:

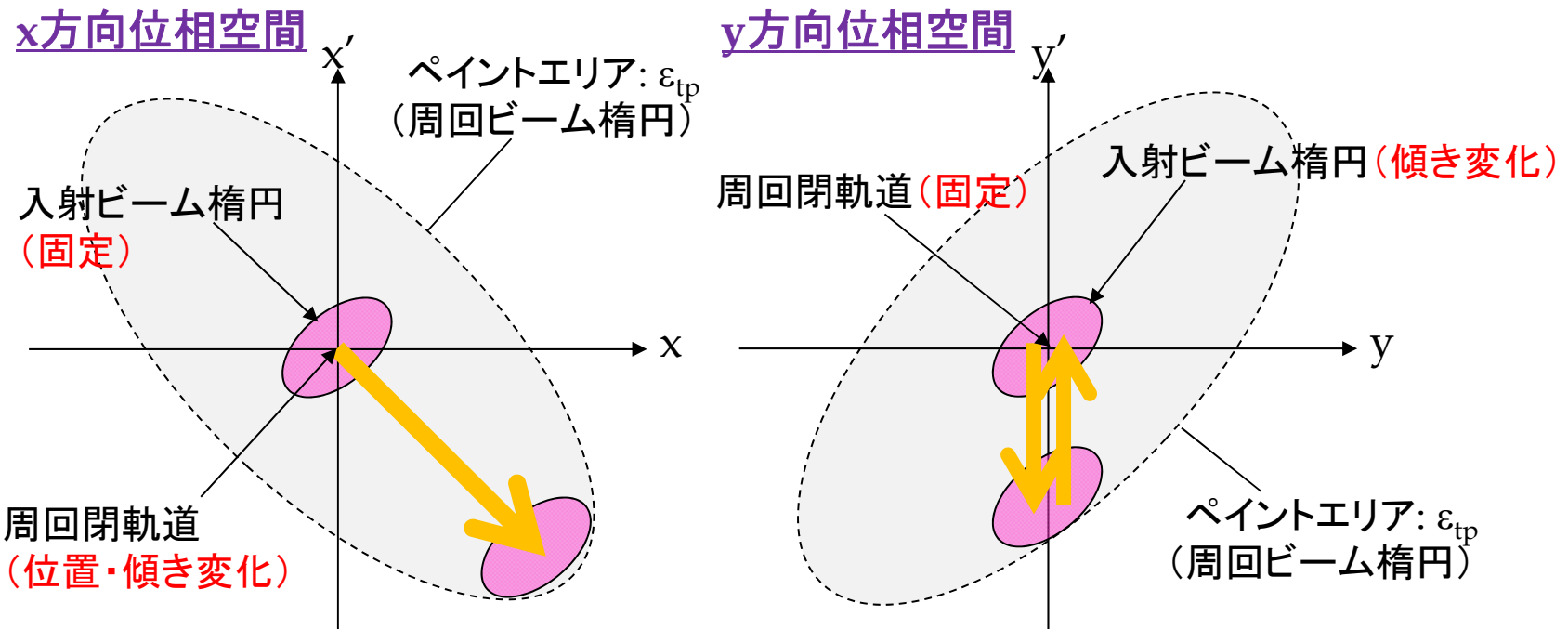
MR向けビーム調整における最近の成果

- 入射過程や加速過程で問題になったエミッタンス増大の発生機構  
(実験結果と数値シミュレーションの比較)
- その低減を目指して行った一連の取り組み 等々

入射過程におけるエミッタンス増大の低減:  
横方向ペイント入射の最適化

# Transverse injection painting

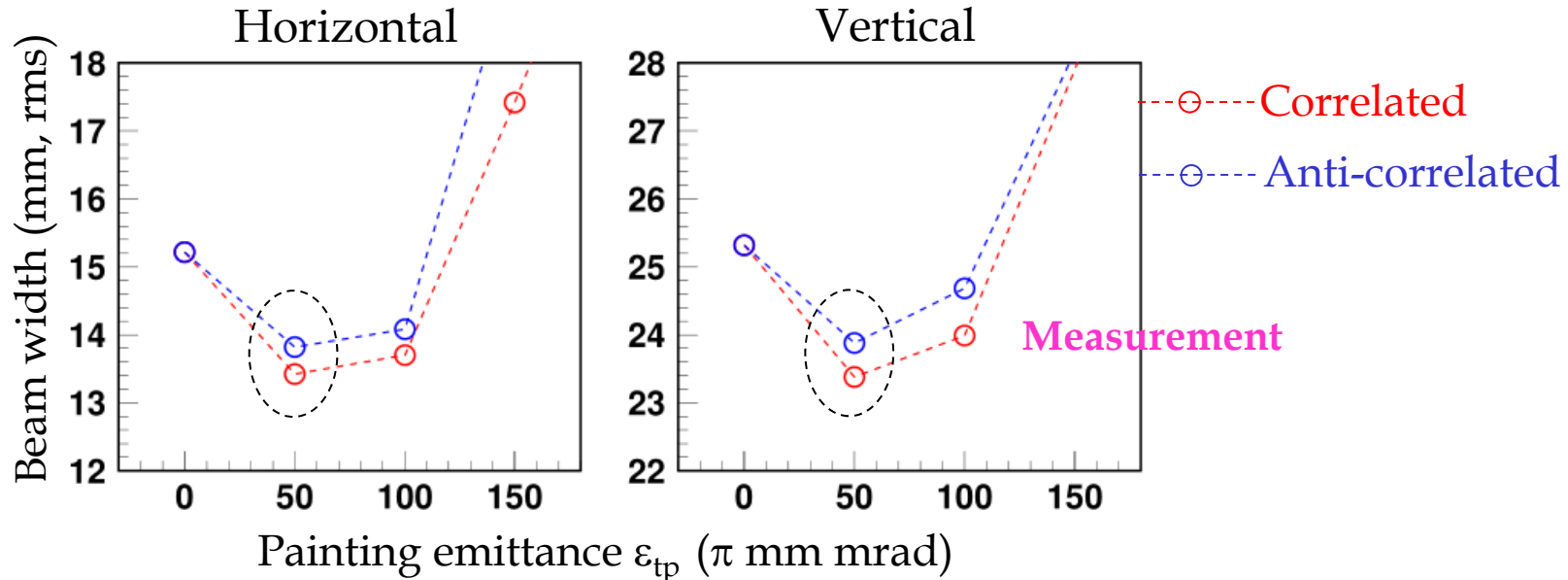
- ✓ 横方向ペイント入射 ⇒ 電荷密度の低減、空間電荷効果の緩和 など
  - 入射ビームと周回ビームの位置や傾きの相対関係を時間的に変化
  - ベータatron振動の振幅を徐々に拡幅
  - 横方向位相空間上の必要な範囲にビーム粒子を一様に分布



Correlated painting..... x空間: 中心⇒外側 y空間: 中心⇒外側  
 Anti-correlated painting... x空間: 中心⇒外側 y空間: 外側⇒中心

## Painting area dependence of beam width

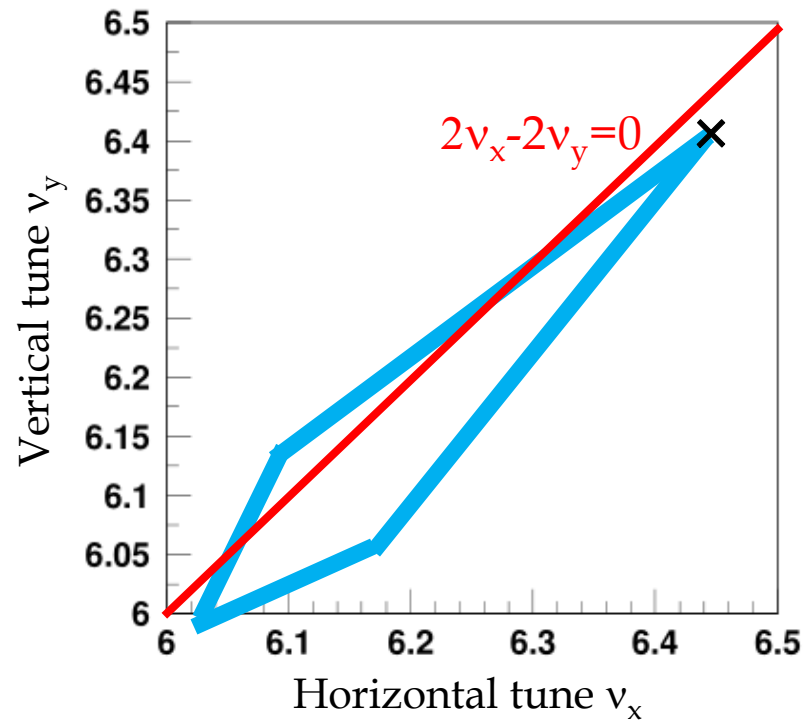
ペイントエリアをパラメータにして測定した入射終了直後のビーム幅 (rms)



- ✓ この依存性は、ペイントエリアの大きさと  
その際に生じる空間電荷由来のエミッタンス増大のバランス関係を反映：  
 $\varepsilon_{tp} \sim 50\pi$  mm mradで両者がバランス  $\Rightarrow$  ビームサイズが最小
- ✓ Correlated paintingの方がより狭いビーム幅を実現  
… この結果は、 $2\nu_x - 2\nu_y = 0$  共鳴の効果을考慮することで理解される

## Effects of the $2v_x - 2v_y = 0$ resonance

RCSの動作点: (6.45, 6.38)



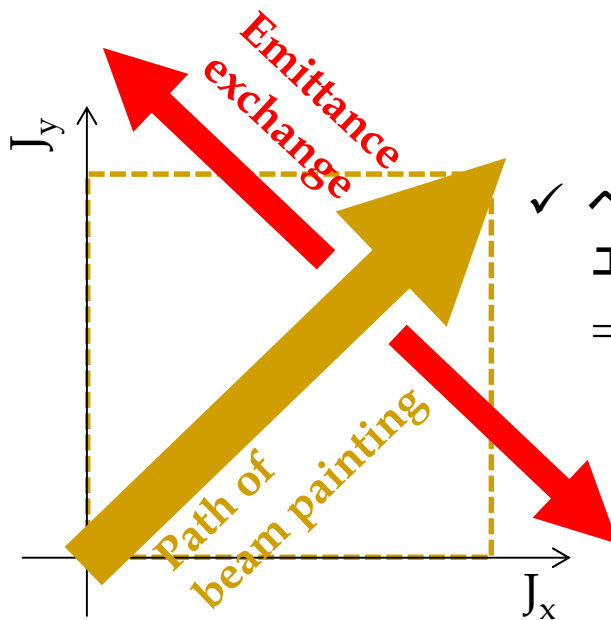
- ✓  $2v_x - 2v_y = 0$ 共鳴:
  - 4次の構造共鳴
  - 空間電荷由来の八極場成分がメインソース
  - x-y間でエミッタンス交換が発生
- ✓ エミッタンス交換は、ペイント入射中に、2つの効果 (1) & (2)を派生する



## Effects of the $2\nu_x - 2\nu_y = 0$ resonance (1)

- ✓ エミッタンス交換の直接的な作用で生じる付加的なエミッタンス増大
- ✓ Correlated paintingで顕著

### Correlated paintingにおける ペイント入射とエミッタンス交換の幾何学的関係

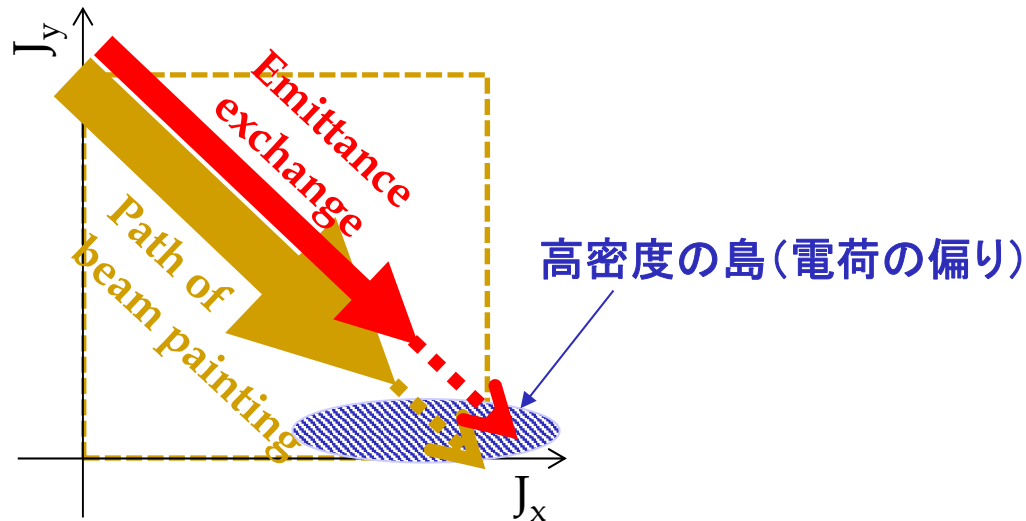


- ✓ ペイントの向きに対して、エミッタンス交換は直交する方向に発生  
⇒エミッタンス交換が生じると、それがそのまま付加的なエミッタンス増大につながる

## Effects of the $2v_x - 2v_y = 0$ resonance (2)

- ✓ エミッタンス交換の二次的作用:  
エミッタンス交換によって引き起こされる  
電荷密度分布の変調によって派生するエミッタンス増大
- ✓ Anti-correlated paintingで顕著

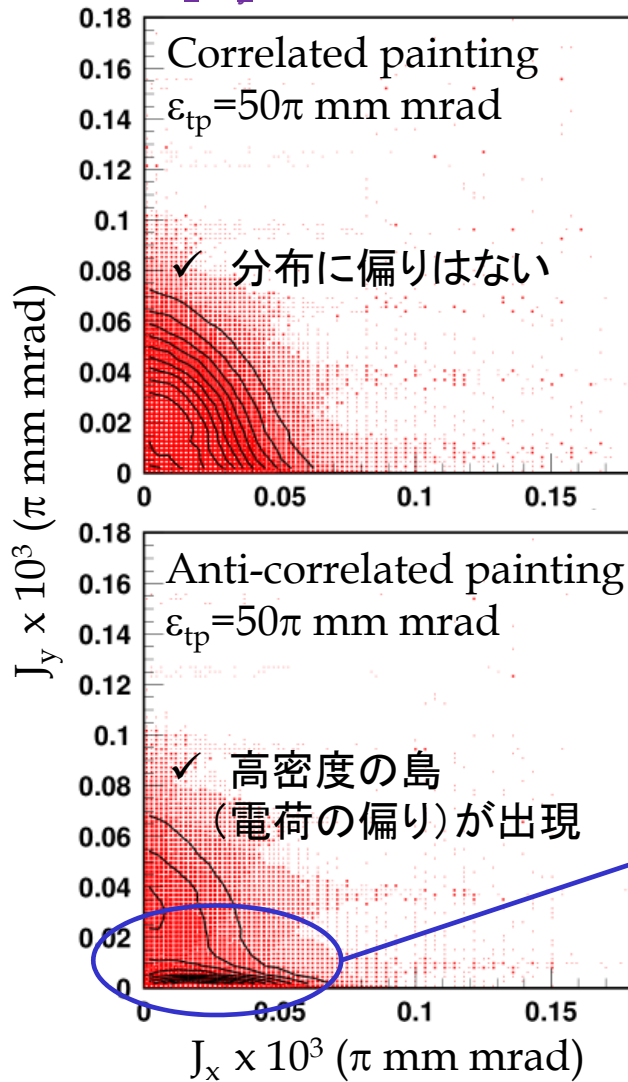
### Anti-correlated paintingにおけるペイント入射とエミッタンス交換の幾何学的関係



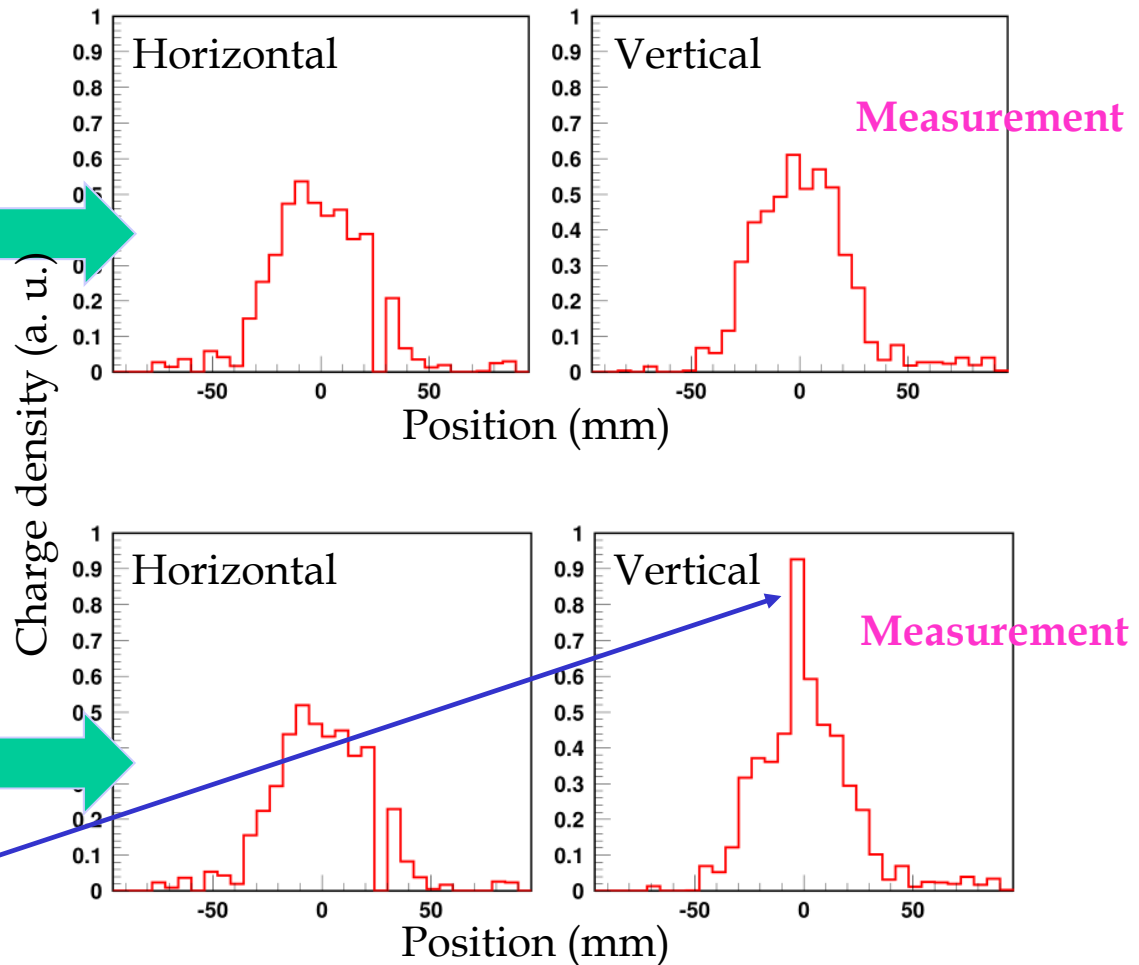
- ✓ ペイントの方向とエミッタンス交換の方向が同じ  
⇒ エミッタンス交換が発生しても、それが直接、  
エミッタンス増大につながることはない
- ✓ しかし、この幾何学的関係は、  
ペイントによる分布形成とエミッタンス交換による分布変動を同調させる  
⇒ 入射後に形成されるビームの電荷密度分布を大きく歪めてしまう

# Result of beam profile measurement

入射終了直後の  
( $J_x, J_y$ )の二次元プロット



入射終了直後に測定したビーム分布

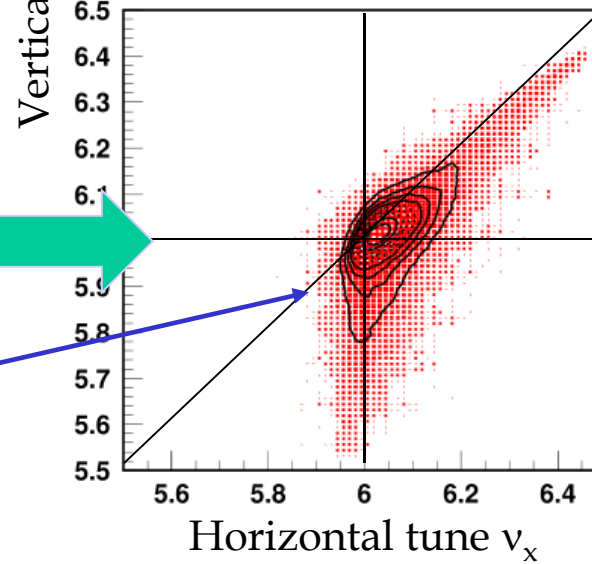
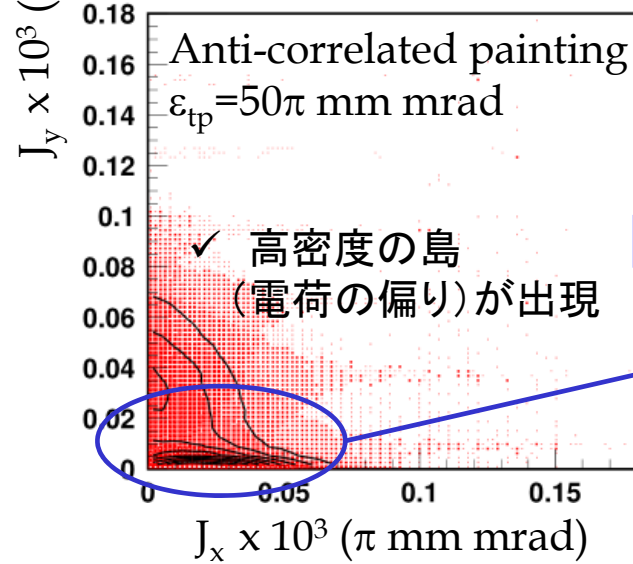
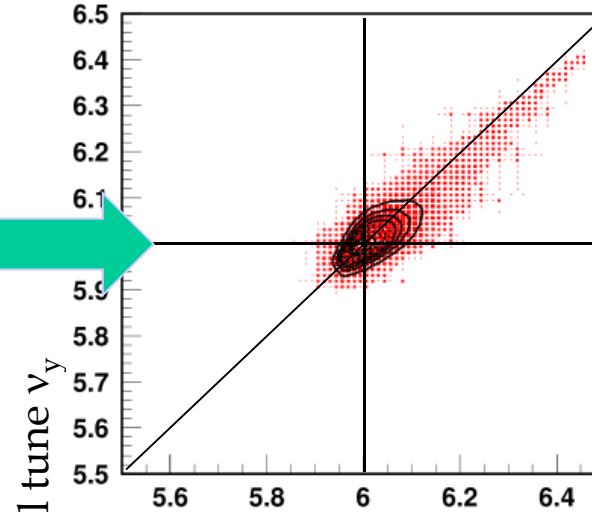
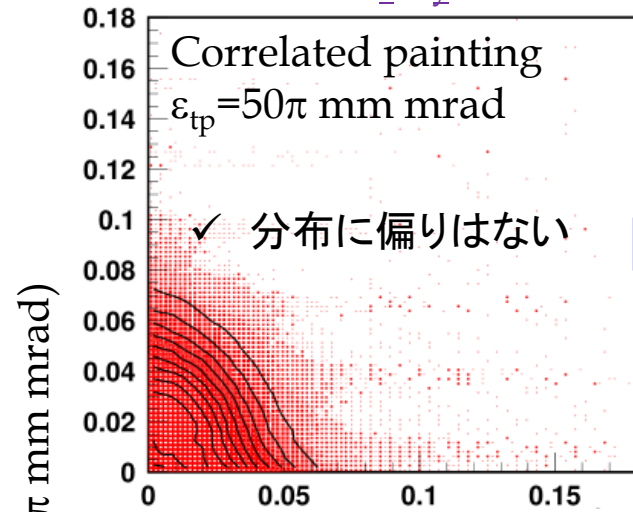


- ✓ 数値シミュレーションで予見された通り、Anti-correlated paintingを用いた場合に、鋭いピーク構造(電荷の偏り)が実際に観測された

# Space charge detuning

入射終了直後の $(J_x, J_y)$ の2次元プロット

入射終了直後のTune footprint



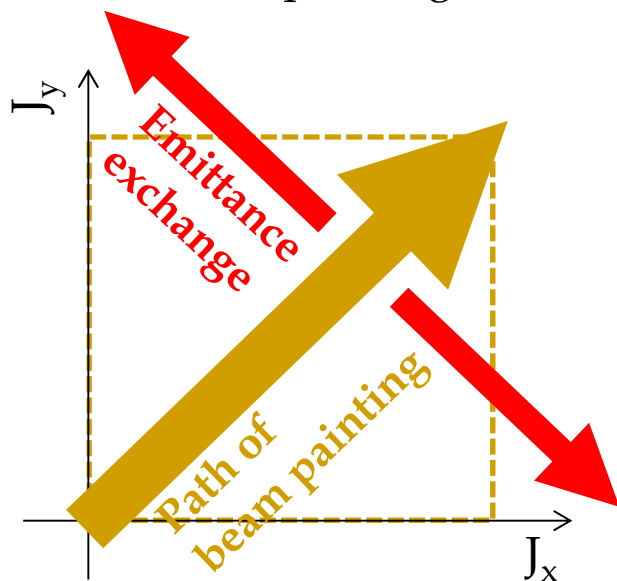
- ✓ Anti-correlated paintingで発生する電荷の偏りは、大きなデチューニングを引き起こし、その後、有意なエミッタンス増大を派生させる

## Correlated painting vs. anti-correlated painting

✓ エミッタンス交換は、ペイント入射中に、2つの効果を派生

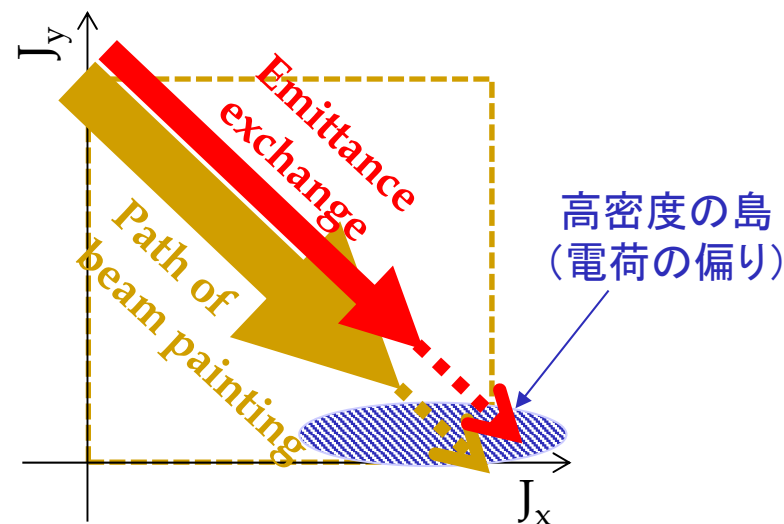
### ◆ 効果 (1):

- ✓ エミッタンス交換の直接的作用で生じる付加的なエミッタンス増大
- ✓ Correlated paintingで顕著



### ◆ 効果 (2):

- ✓ エミッタンス交換が引き起こす電荷密度分布の変調によって派生するエミッタンス増大
- ✓ Anti-correlated paintingで顕著

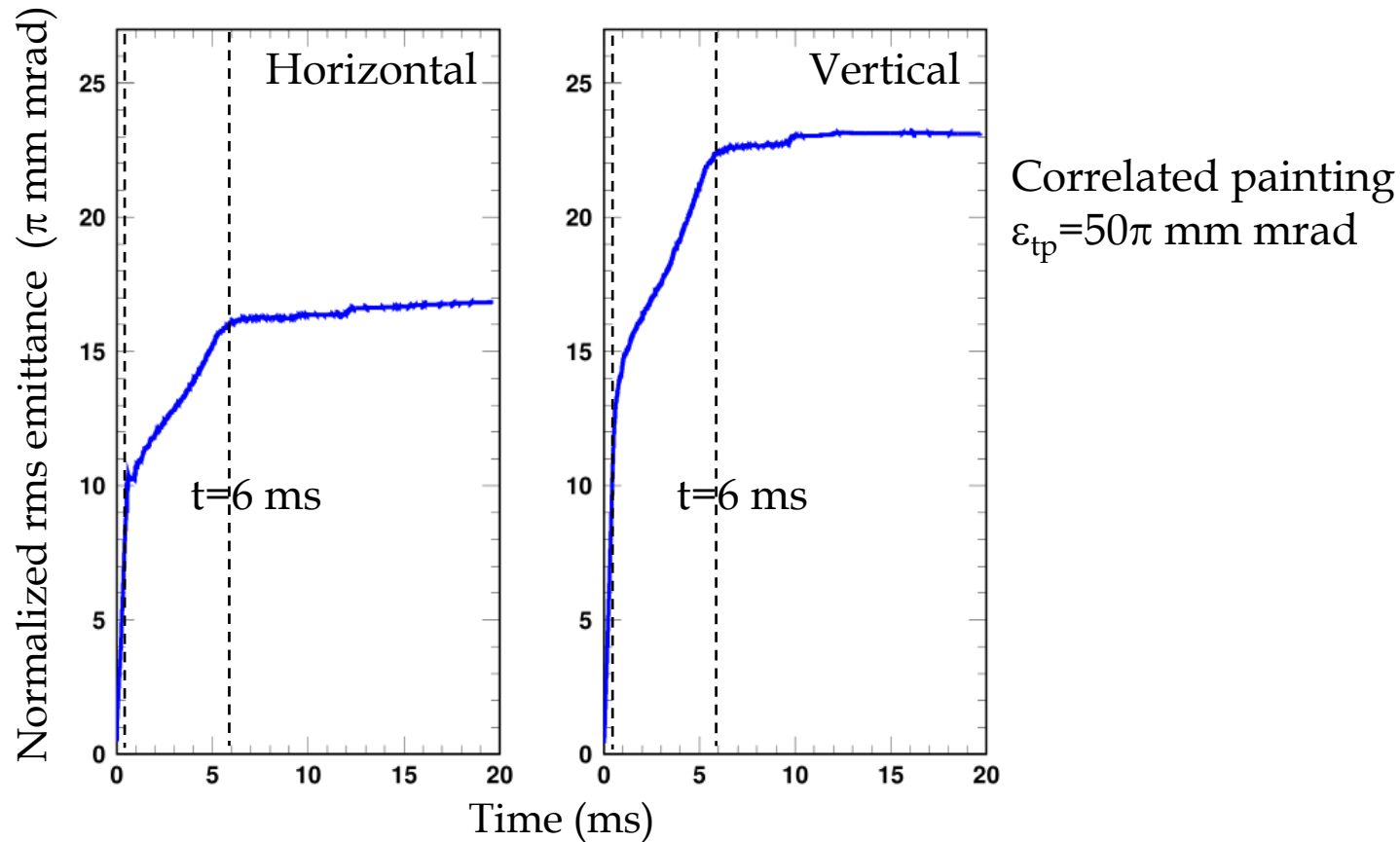


- ✓ 現状の運転条件では、(2)の効果がより重大
- ✓ (2)の影響を回避できるCorrelated paintingの方が、より効果的なエミッタンス低減を導くというのが結論

加速初期から中盤におけるエミッタンス増大の低減：  
チューン・クロマティシティーの最適化

## Emittance growth after injection

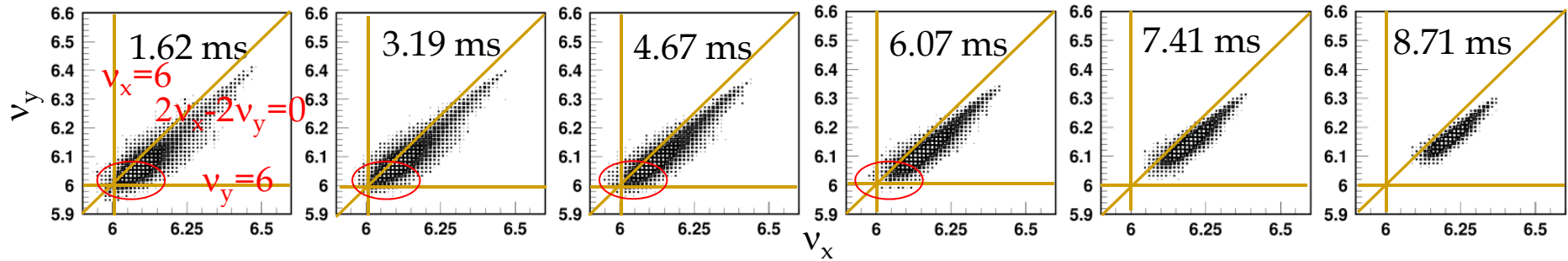
加速過程全域20 msに亘るビームエミッタンスの時間依存性



- ✓ 入射後の加速初期から中盤(最初の6 ms領域)で、有意なエミッタンス増大が発生

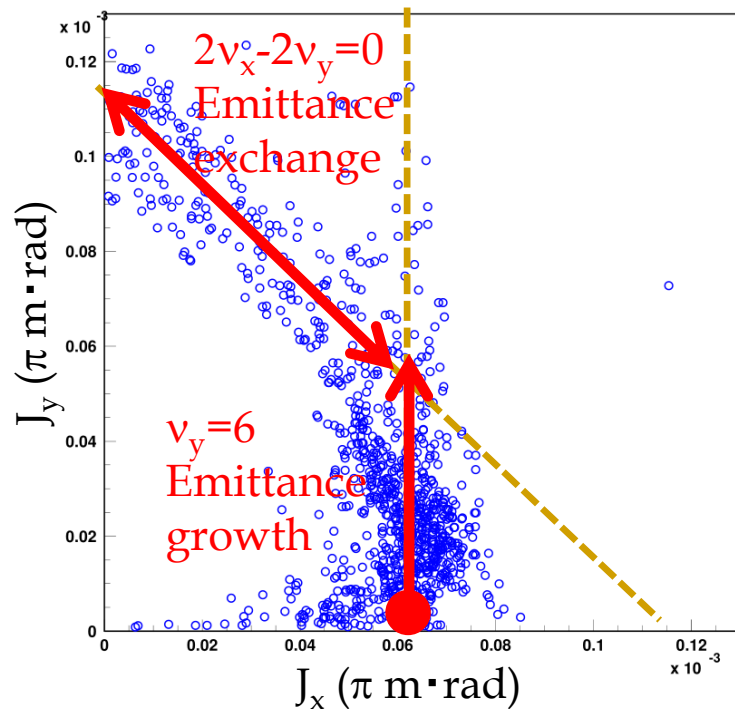
# Mechanism of emittance growth

## 加速の初期から中盤まで(1.6-8.7 ms領域)のTune footprint



✓ エミッタンス増大の主原因： $2v_x - 2v_y = 0$  &  $v_{x,y} = 6$

## $(J_x, J_y)$ の2次元プロット: エミッタンス増大する粒子の一粒運動(turn-by-turn plot)



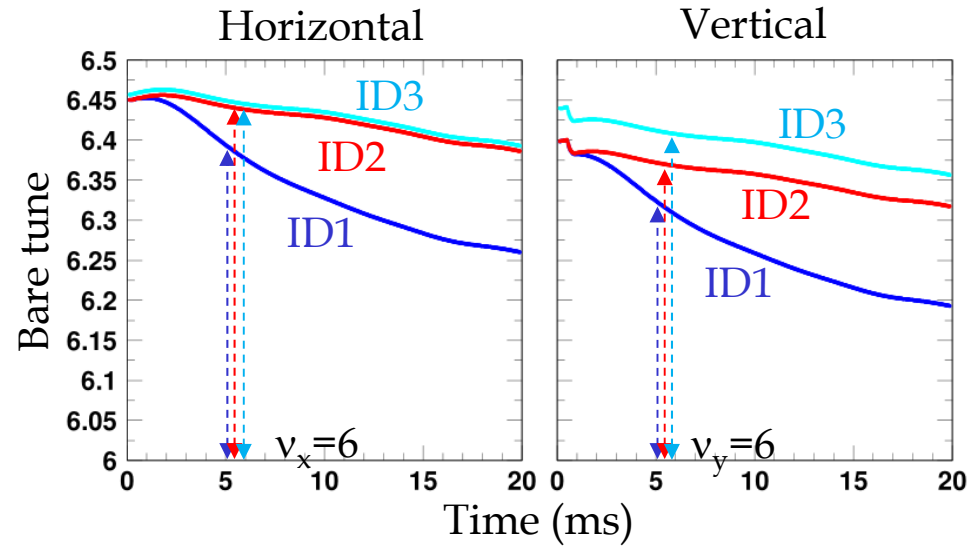
- ✓ x方向も、 $v_{x,y} = 6$  &  $2v_x - 2v_y = 0$ の組合せで同様のエミッタンス増大が発生
- ✓ 現在の動作点では、 $2v_x - 2v_y = 0$ 共鳴を完全に回避することは難しい
- ✓  $v_{x,y} = 6$ については、チューンやクロマティシティーを動的にコントロールすることで回避可能
- ✓  $v_{x,y} = 6$ が引き起こすエミッタンス増大の低減を目指してビーム調整を行った



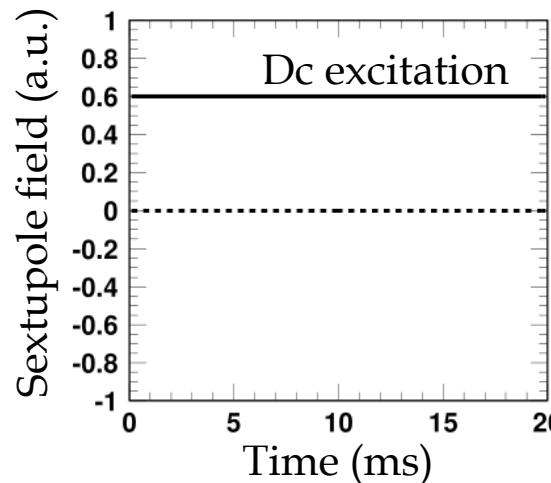
# Operational parameters tested for emittance mitigation

IDs	Bare tune	Chromaticity correction
A	ID1	OFF
...	オリジナルパラメータ	
B	<u>ID2</u>	OFF
...	整数までの距離を稼ぐために チューンをID1からID2に変更	
C	ID2	<u>ON</u>
...	クロマティックチューンスプレッドを小さく抑えるために 六極電磁石を直流励磁して クロマティシティー補正を導入	
D	<u>ID3</u>	ON
...	チューンをID2からID3に変更、 y方向のチューンを更に上方へ	

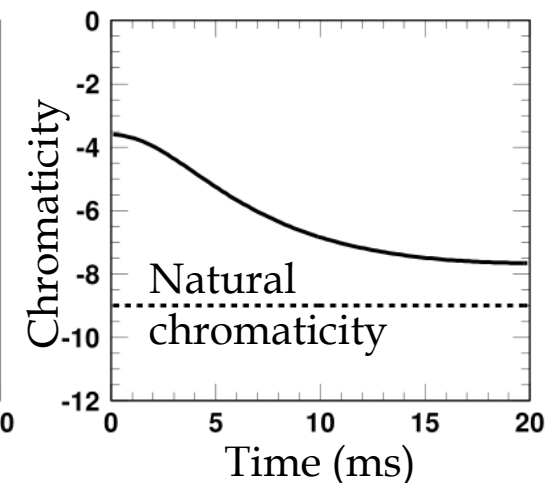
加速全域 20msに亘るベアチューンの変化



六極磁場パターン



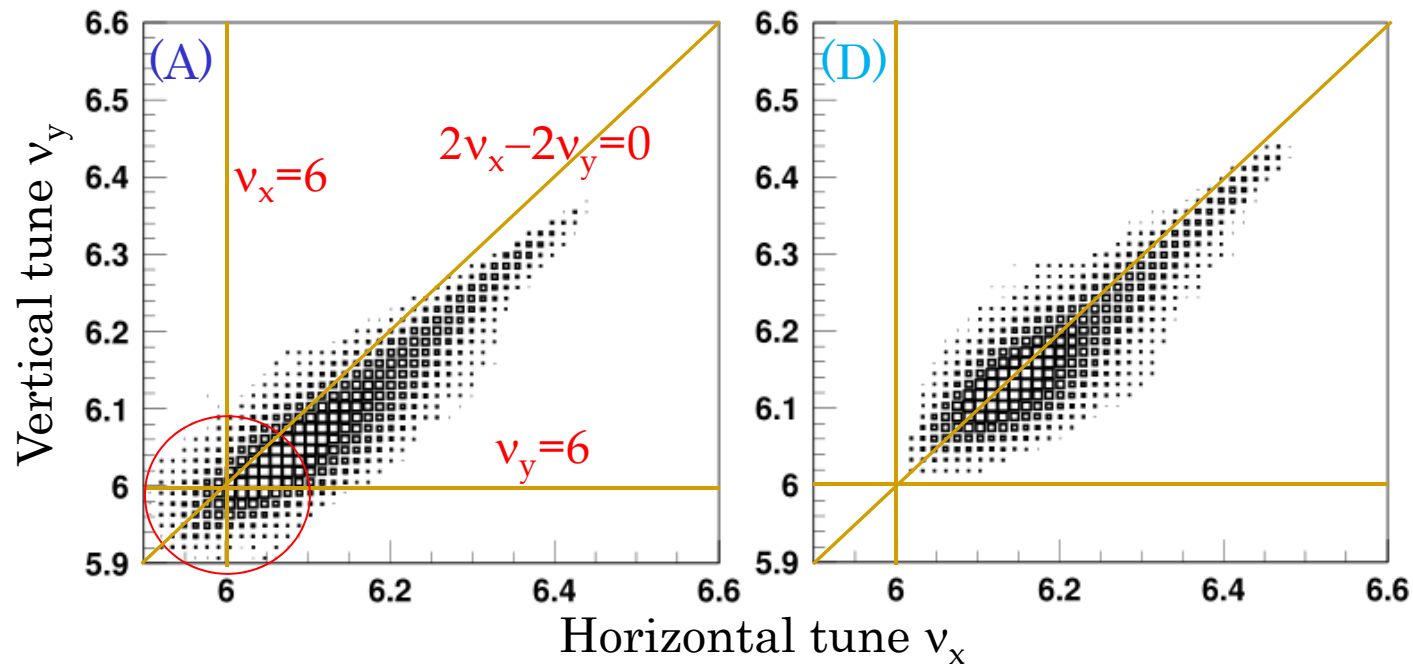
クロマティシティー



✓ ビーム粒子と整数のセパレーションを改善するために、(A)から(D)へとパラメータを段階的に修正

## Separation of beam particles from $\nu_{x,y}=6$

Tune footprint @ 4.67 ms

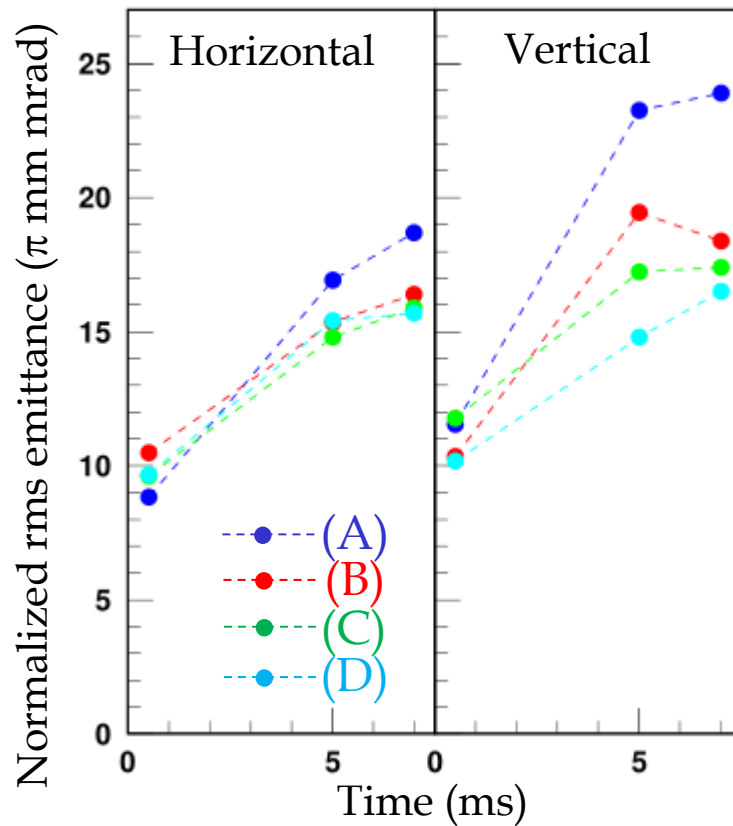


- ✓ ビーム粒子と整数とのセパレーションは、(A)から(D)へのパラメータ変更で順次改善されいく

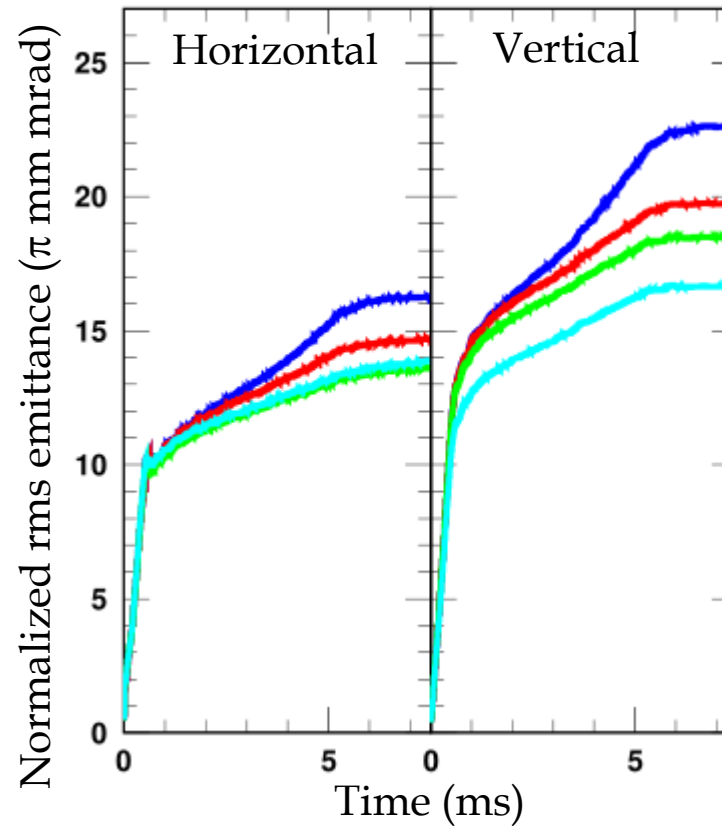
# Result of emittance measurement

## 最初の7 ms領域におけるビームエミッタンスの時間依存性

### Measurement



### Numerical simulation



- ✓ 数値シミュレーションで予見された通り、(A)から(D)の順にエミッタンス増大は低減された、が...
- ✓ (C)や(D)といった新たなパラメータを実際の運転に導入するには、もう一つ解決しなければならない問題が残っていた ⇒ 加速後半のビーム不安定性

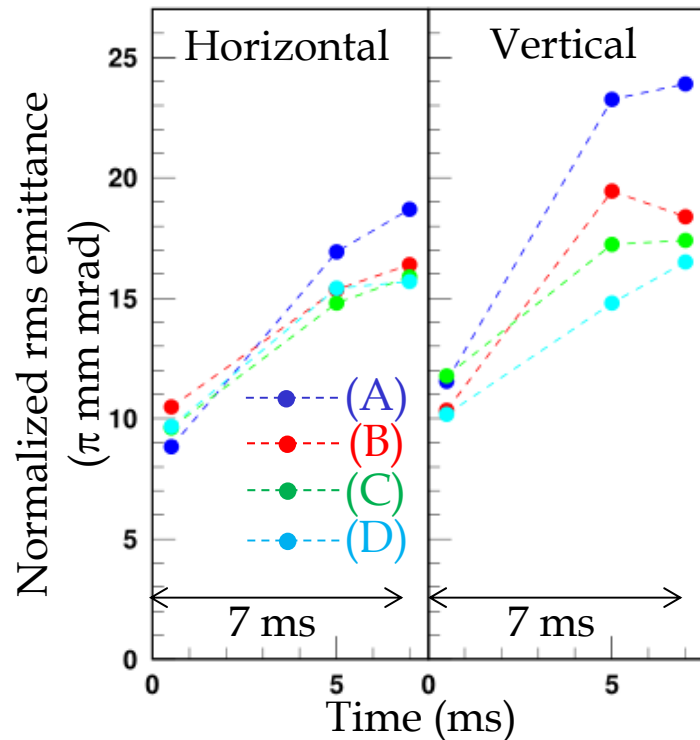
加速後半におけるビーム不安定性の抑制：  
バイポーラ六極磁場パターンを用いたクロマティシティー操作

# Beam instability

- ✓ ビーム出射に用いているパルスキッカーが支配的なインピーダンスソース
- ✓ チューンやクロマチシティー等のパラメータに依存してビーム不安定性を引き起こす

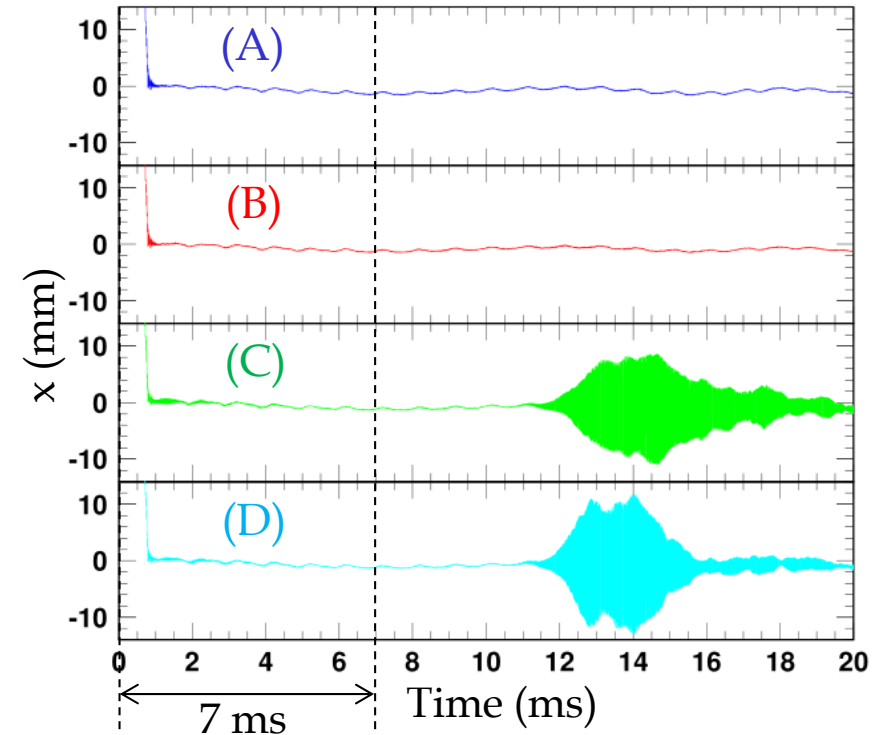
最初の7 ms領域における  
ビームエミッタンスの時間依存性

Measurement



加速全域 20 msに亘るビーム重心(x)の様子

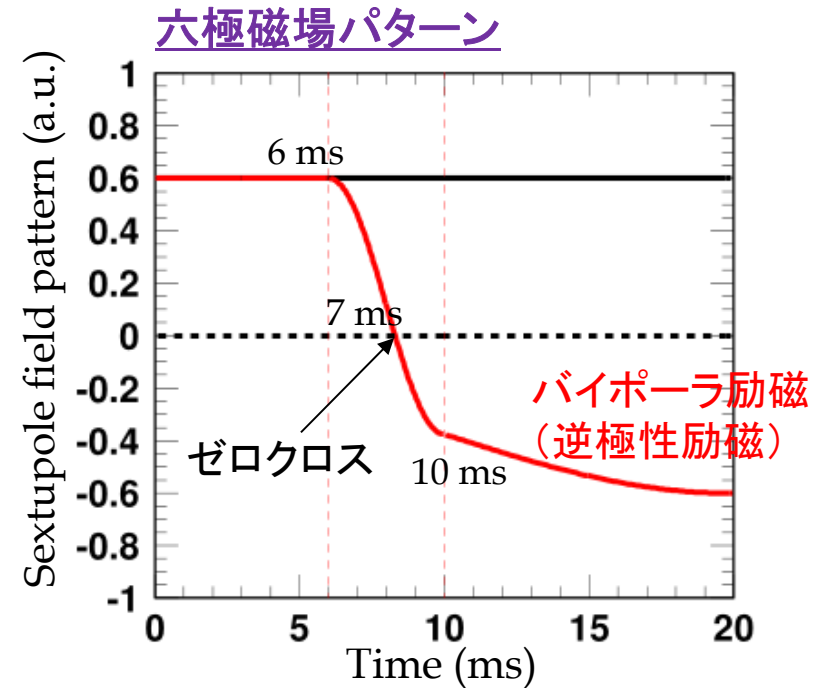
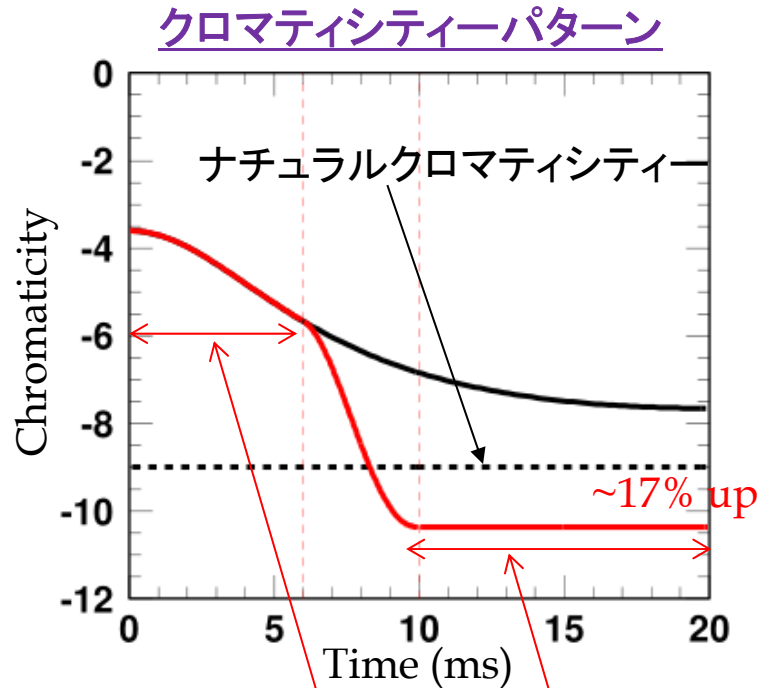
Measurement



- ✓ (C)や(D)は、加速初期から中盤のエミッタンス増大を低減するのに有効なパラメータだが、加速後半の10 ms以降でビーム不安定性をエンハンスしてしまう

# Practical solution to beam instability

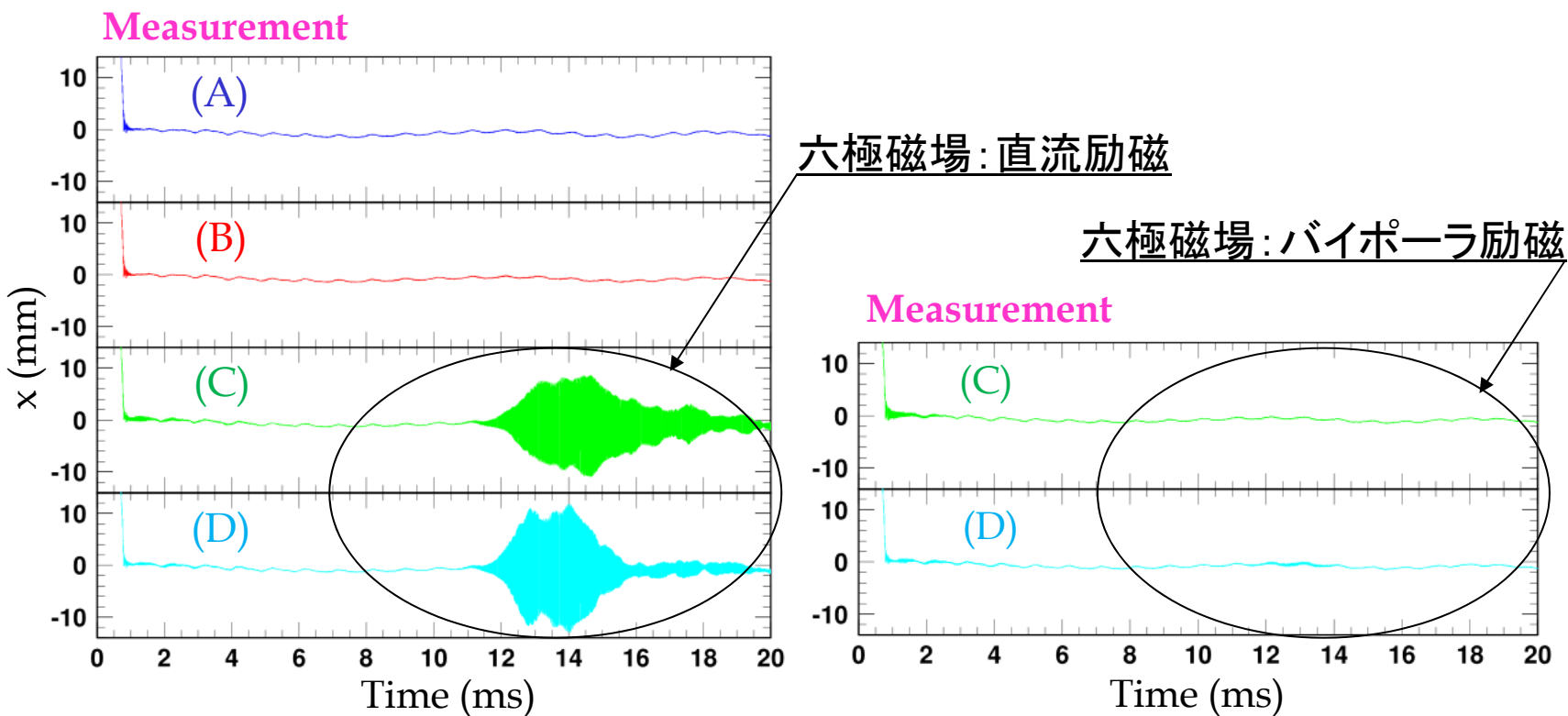
- ✓ ビーム不安定性が現れる加速後半でのクロマティシティーを負方向に大きくとる：  
運動量広がり由来のデチューニング ⇒ ランダウ減衰 ⇒ ビームを安定化



- ✓ 六極磁場を直流励磁してクロマティシティーを小さく抑えておく  
⇒この時間領域で発生するエミッタンス増大を低減
- ✓ 逆極性で六極磁場を立ち上げ、加速後半の10 ms以降でのクロマティシティーをナチュラルクロマティシティーの1.17倍程度にまで増加  
⇒この時間領域で発生するビーム不安定性を抑制
- ✓ こうしたゼロクロスに伴うバイポーラ励磁を実現するために、  
昨夏のメンテ期間に六極電磁石電源の改良

# Experimental result with a bipolar excitation of sextupole field

加速全域 20 msに亘るビーム重心(x)の様子



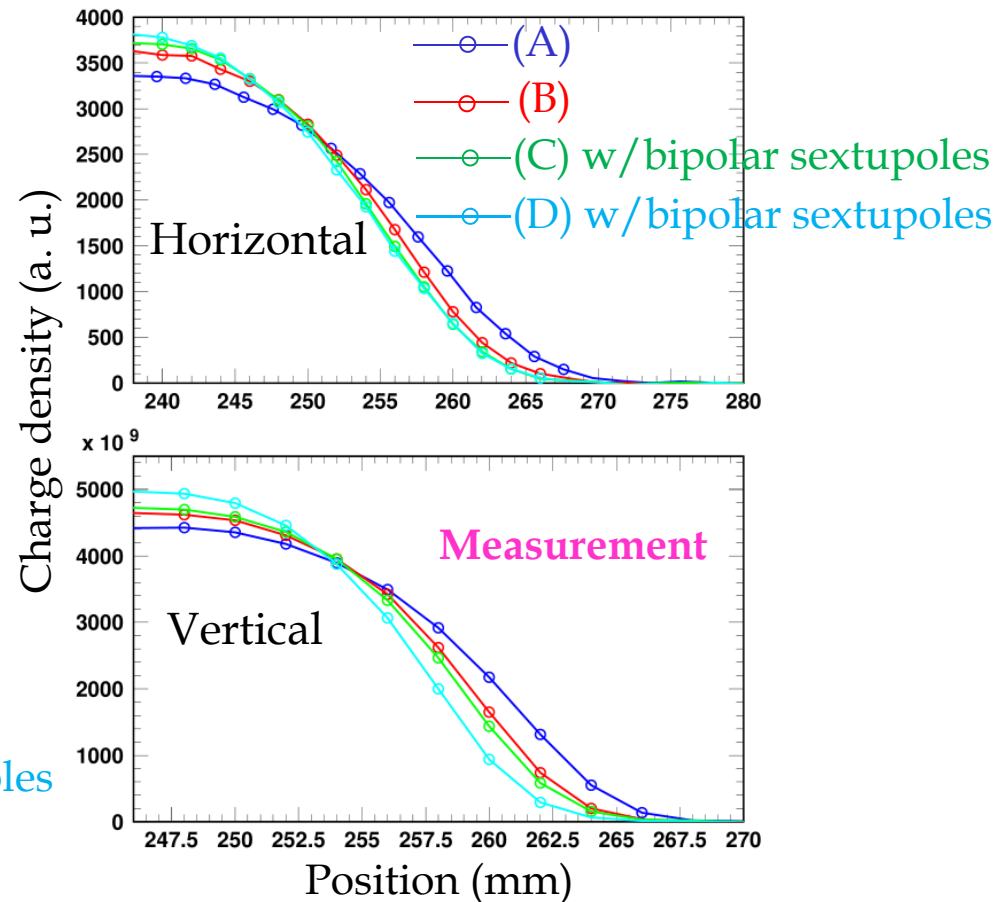
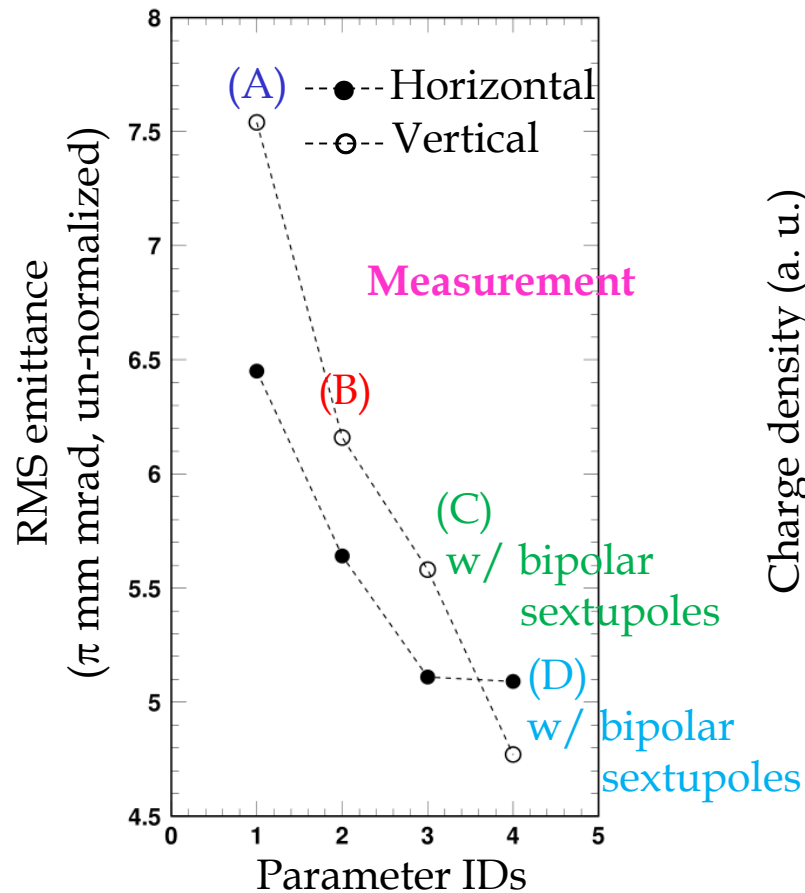
- ✓ 六極磁場をバイポーラ励磁することで、  
目論見通り、ビーム不安定性を抑制することができた

## 結果



# Results of extraction beam emittance & profile measurements

## 3 GeV出射後のビームエミッタンス(rms) $\times 10^9$ 3 GeV出射後のビームプロファイル



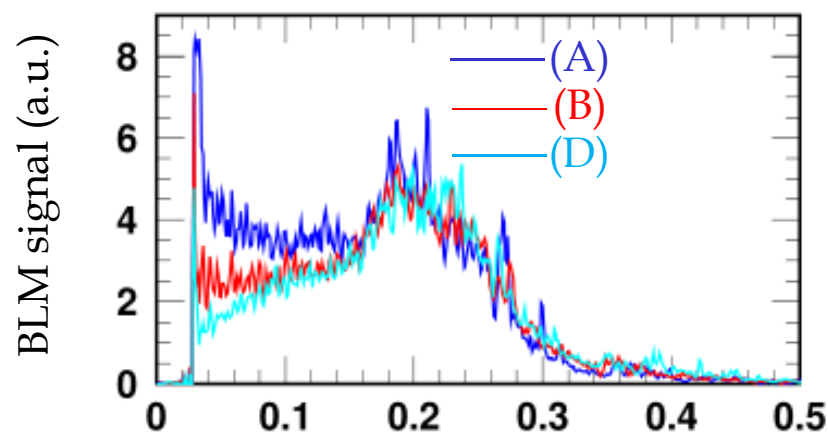
- ✓ 一連の調整により、出射ビームのエミッタンスを、テール領域を含めて、期待通りに大幅低減できた: (A)  $\Rightarrow$  (D) で25%~35%減少  
(加速初期から中盤において達成されたエミッタンス増大の低減を反映した結果)

## RCS parameter dependence of MR beam loss

- ✓ 一連のビーム調整終了後、MRへビーム入射を行って、MRにおけるビーム損失の状況を確認

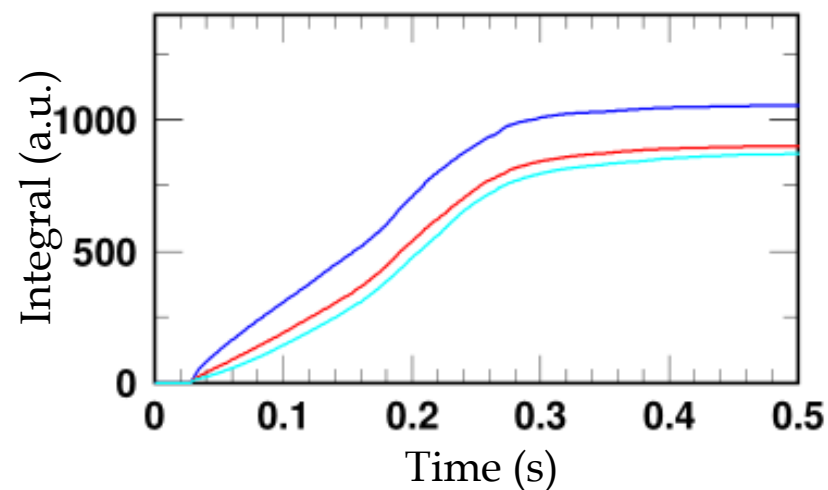
### MRコリメータ領域のBLM信号値

#### Measurement



- (A)⇒(B): MRビーム損失: ~20%減少
- (B)⇒(D): MRビーム損失: ~4%減少

- ✓ RCS由来のビーム損失は、パラメータ(D)でほぼ最小化
- ✓ 入射ビームとして十分なクオリティー



- ✓ 現在、MRは、パラメータ(D)でビーム調整を順次進めている
- ✓ 着実にビーム出力を増強：  
現在までに、New recordとなる  
470 kWでの利用運転 (for NU実験) を達成

## まとめ

- ✓ この一年、J-PARC RCSでは、MRから要求される大強度かつ低エミッタンスのビームを実現するためのビーム調整を精力的に展開してきた
- ✓ 実験結果と数値シミュレーションの詳細比較を行って、観測されたエミッタンス増大の発生機構を明らかにすると共に、その低減に成功した
  - Correlated paintingを導入することで、エミッタンス交換によって生じる電荷の偏りの影響を回避すると共に、そのペイントエミッタンスの最適化を行って、入射中のエミッタンス増大を最小化
  - また、加速過程のチューンやクロマティシティーを動的に制御することで、加速初期から中盤で発生していたエミッタンス増大を低減させると共に、加速後半で出現したビーム不安定性を抑制
- ✓ 今後、ビーム強度を更に増強した場合、更なるエミッタンス低減がMRから要求される可能性が高いため、今後も、ペイント入射の更なる最適化を追求するなど、MR向けのビーム調整を継続的に行って、一層のエミッタンス低減を目指す予定