

J-PARC RCSにおけるビームコミッショニングの近況報告 － 1-MW設計出力の実現へ向けて －

日本加速器学会年会
2015年8月6日@福井県敦賀市

發知 英明

&

RCSビームコミッショニンググループ

(日本原子力研究開発機構・J-PARCセンター)

内容:

- I. 設計パラメータ
- II. ビーム出力の履歴
- III. ペイント入射によるビーム損失低減
- IV. 1-MW大強度加速試験
- V. 更なるビーム損失低減に向けた取り組み
- VI. まとめ

I. 設計パラメータ

Circumference 348.333 m

Superperiodicity 3

Harmonic number 2

Number of bunches 2

Injection Multi-turn,
Charge-exchange

Injection energy 181 MeV ⇒ 400 MeV in 2013

Injection period 0.5 ms (307 turns)

Injection peak current 30 mA ⇒ 50 mA in 2014

Extraction energy 3 GeV

Repetition rate 25 Hz

Particles per pulse 5×10^{13} ⇒ 8.3×10^{13}

Output beam power 600 kW ⇒ 1 MW

Transition gamma 9.14 GeV

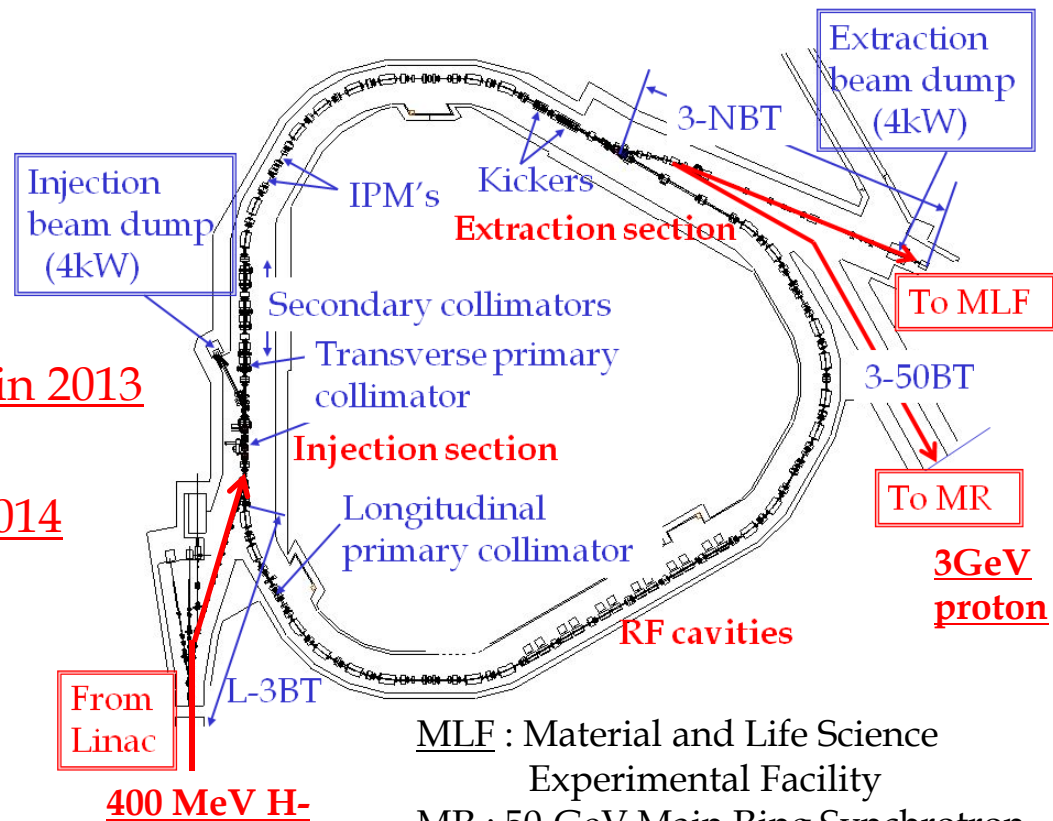
Number of dipoles 24

quadrupoles 60 (7 families)

sextupoles 18 (3 families)

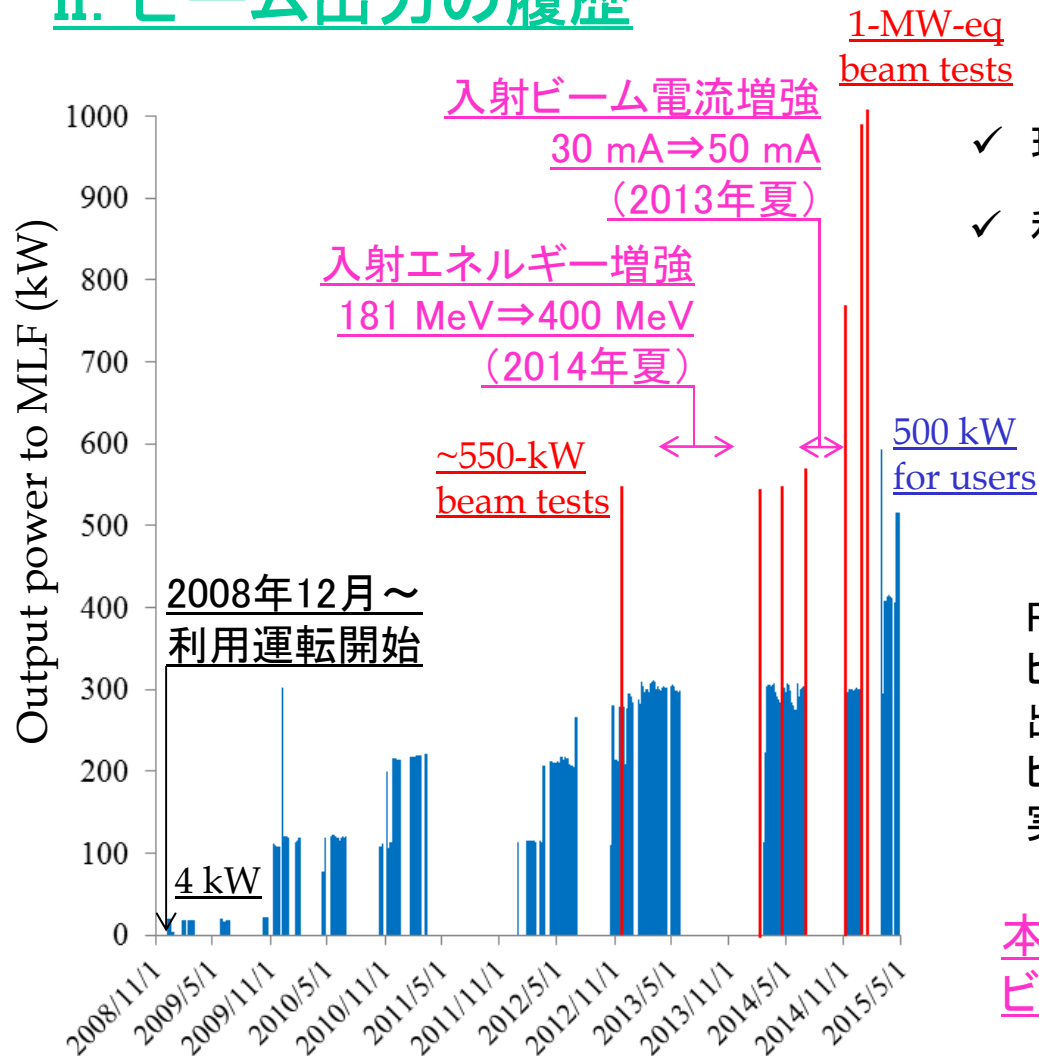
steerings 52

RF cavities 12



- ✓ RCSは、物質生命科学実験施設へのビーム供給とメインリングシンクロトロンへの入射器という2つの役割を持つ
- ✓ 世界最高レベルの1MWという大出力でのビーム供給を目指す

II. ビーム出力の履歴



- ✓ 現在の利用運転における出力は500 kW
- ✓ 利用運転と並行して、設計出力1MWの実現へ向けた大強度試験も定期的を実施
 - ・入射エネルギーの増強前後に
~550 kW相当の大強度加速試験を実施
 - ・入射ビーム電流増強後の昨年10月より
1MW加速試験を開始

RCSのような大強度加速器では、ビーム損失により生じる機器の放射化が、出力強度を制限する最大の要因となるため、ビーム損失の低減がビームの大強度化を実現するうえで最重要の研究課題となる

本トークの主議題: ビーム損失の低減に向けた取り組み

- ✓ ビーム調整の進展、また、入射エネルギーや入射ビーム電流の増強などのハードウェア系のアップグレードに従って、着実にビーム出力を増強させている

III. ペイント入射によるビーム損失低減

ビーム損失の原因:

- 空間電荷効果
- 共鳴現象
- 入射中のフォイル散乱
-等々

空間電荷効果を軽減するために、
入射ビームを横方向及び縦方向の位相空間上に
できる限り広く一様に分布させてビームの空間電荷密度を
低減させるペイント入射法を採用:

- 横方向ペイント入射
- 縦方向ペイント入射

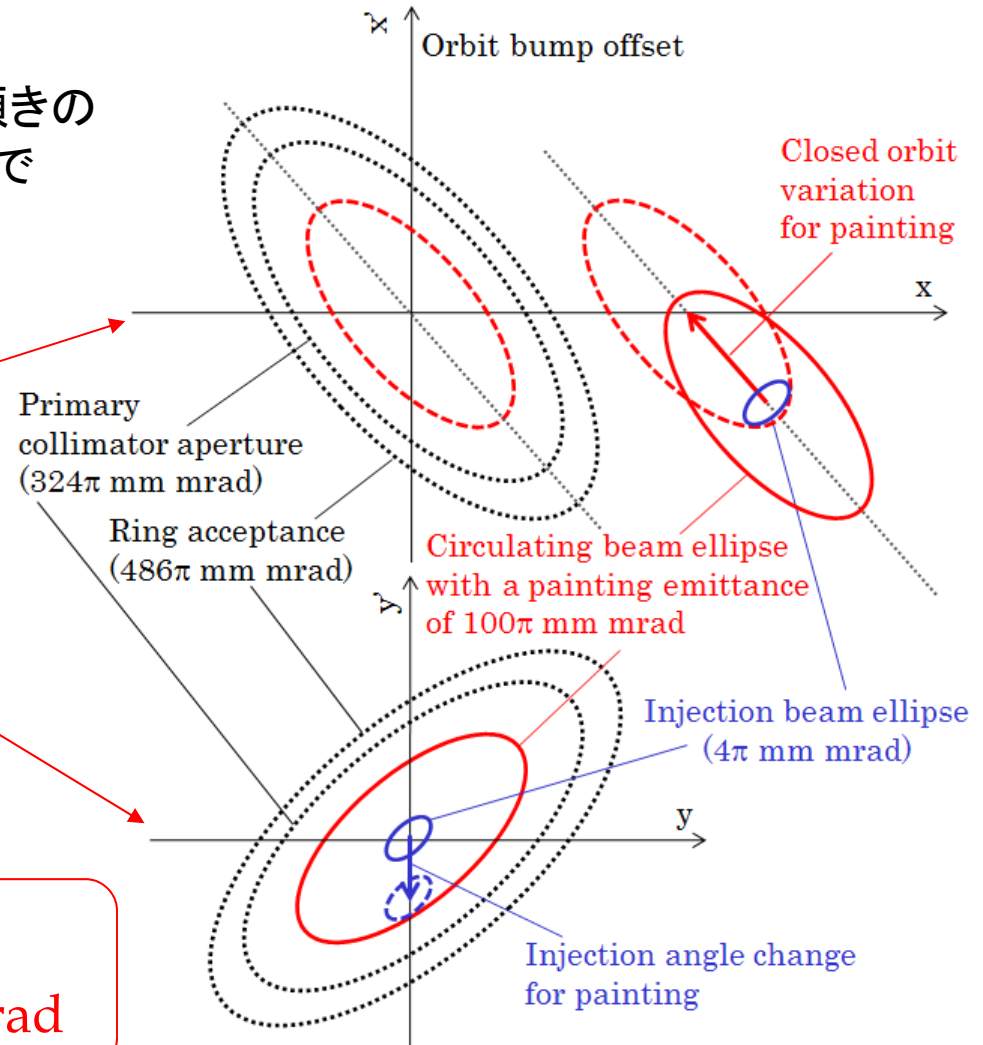
横方向ペイント入射

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させることでベータatron振動の振幅を徐々に大きくし電荷密度の低減を図る

- ◆ 水平方向のペイント入射: 周回ビームの位置と傾きを時間的に変化
- ◆ 垂直方向のペイント入射: 入射ビームの傾きを時間的に変化

Painting area:

$$\varepsilon_{tp} = 100 \pi \text{ mm mrad}$$



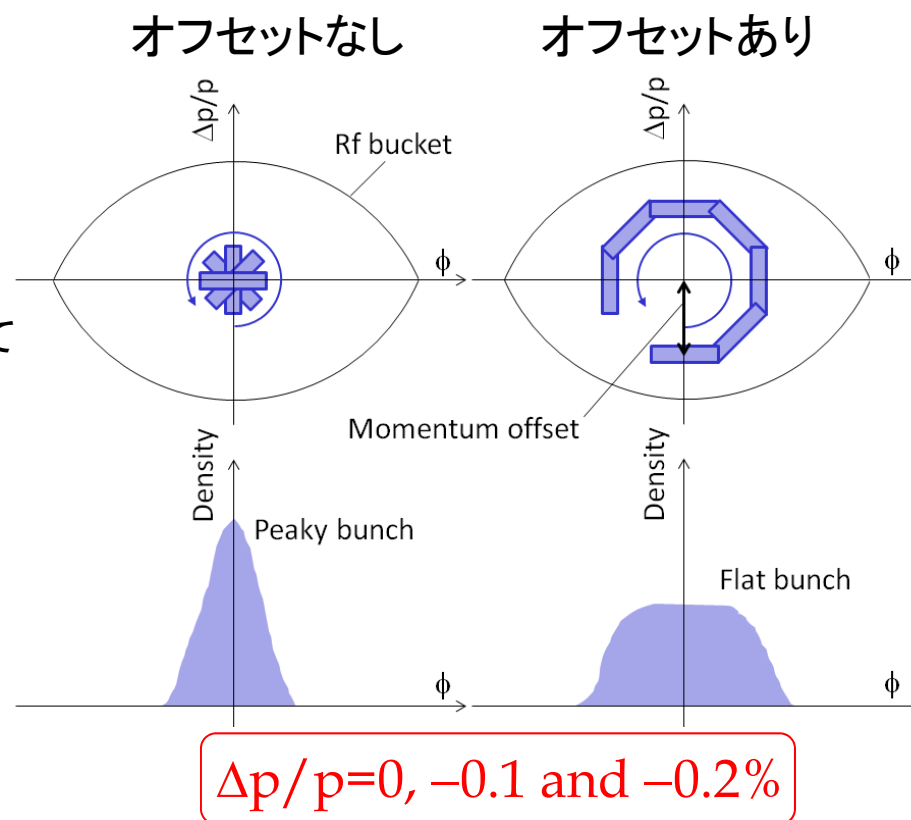
縦方向ペイント入射

[F. Tamura et al, PRST-AB 12, 041001 \(2009\).](#)

[M. Yamamoto et al, NIM., Sect. A 621, 15 \(2010\).](#)

◆ 運動量オフセット入射

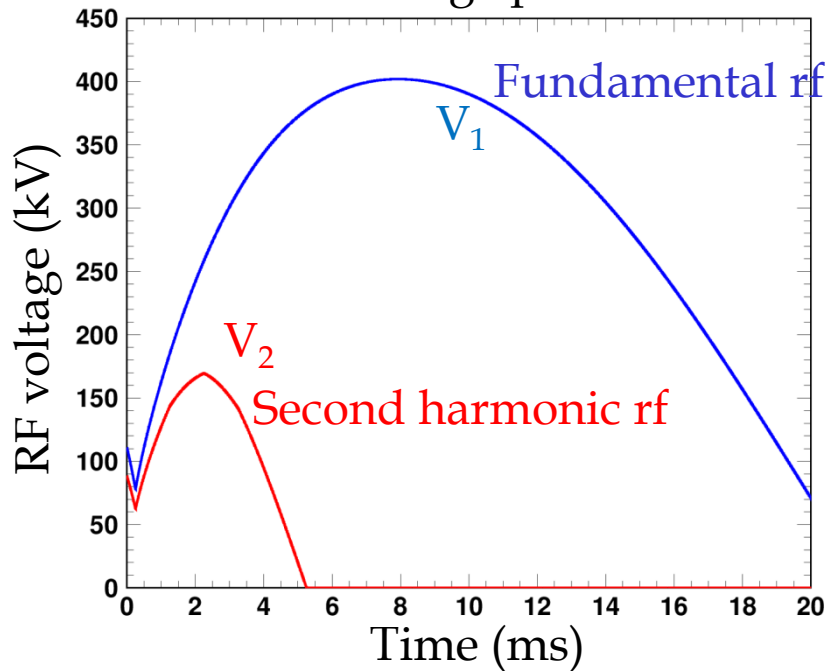
ビーム入射中、RFバケツに対して、
運動量オフセットを付けることで
大きなシンクロトン振動を励起させて
縦方向のビーム分布の平坦化を図る



縦方向ペイント入射

$$V_{\text{rf}} = V_1 \sin\phi - V_2 \sin\{2(\phi - \phi_s) + \phi_2\}$$

RF voltage pattern



◆ 2倍高調波電圧の重畳

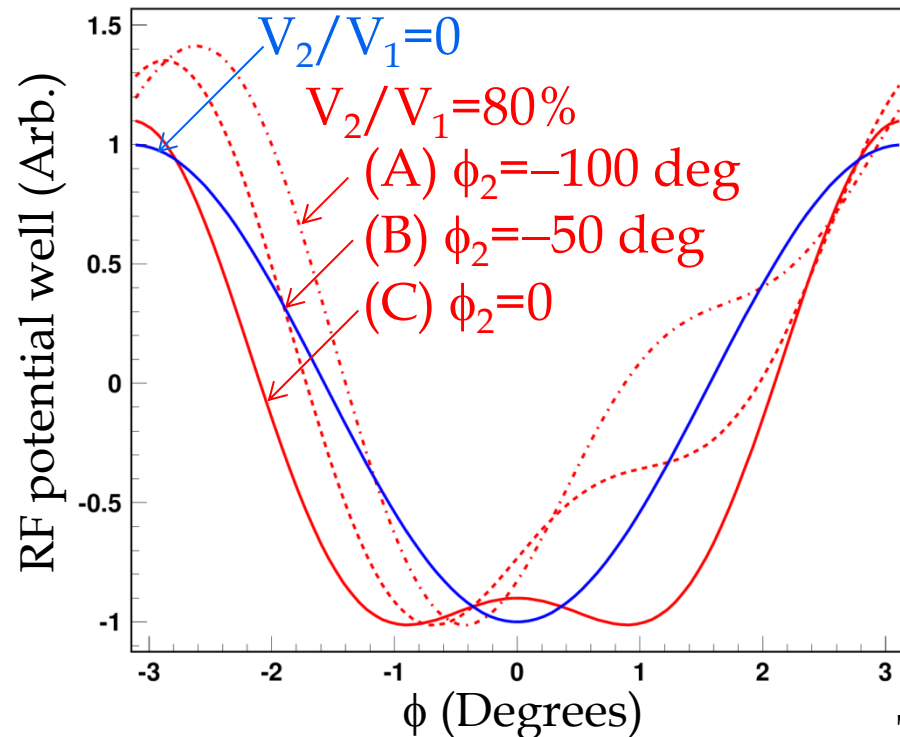
RF基本波の80%の振幅を持つ2倍高調波電圧を重畳してRFポテンシャルの形状を平坦化

$$V_2/V_1 = 80\%$$

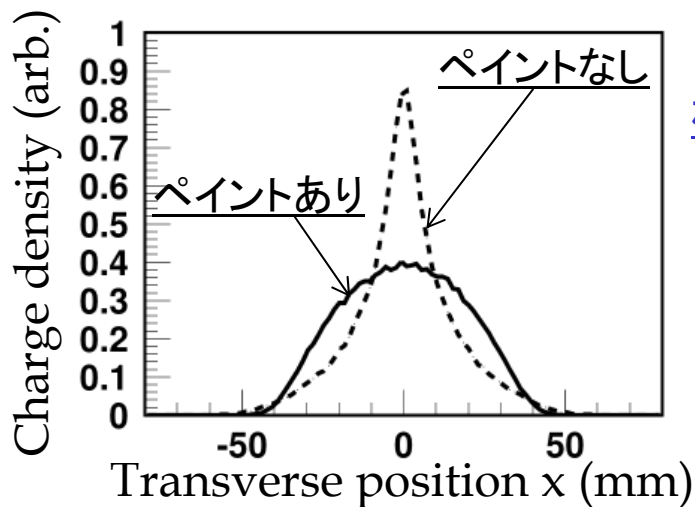
◆ 2倍高調波電圧の位相スイープ

2倍高調波電圧の位相をスイープさせて、RFポテンシャルの形状を入射中に変化

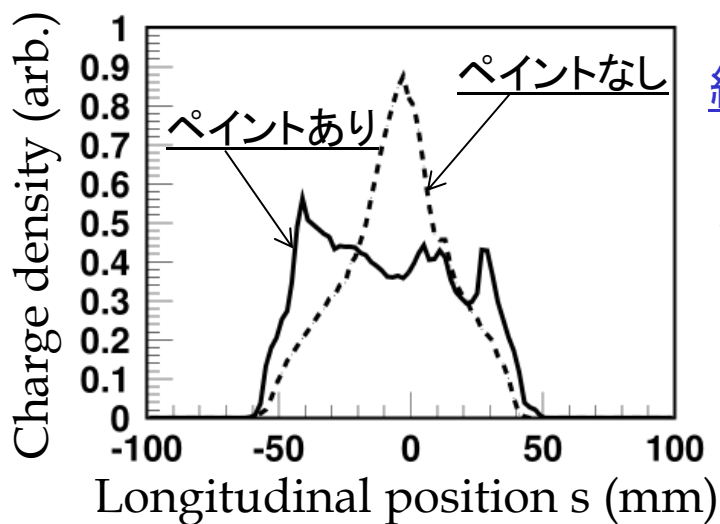
$$\phi_2 = -100 \Rightarrow 0 \text{ deg}$$



ペイント入射による空間電荷密度の低減



横方向分布



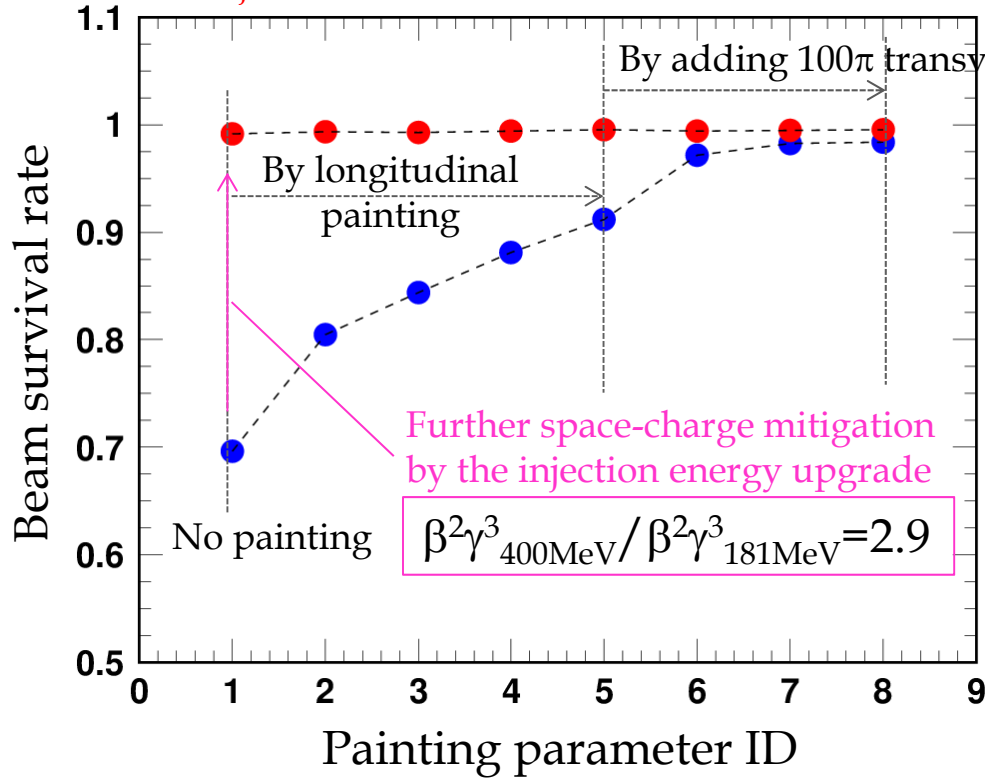
縦方向分布

- ✓ ペイント入射の導入により、空間電荷密度(ピーク値)が低減される

from H. Hotchi et. al., PRST-AB 15, 040402 (2011).

ペイント入射によるビーム損失低減: 実験結果

- $E_{inj}=181$ MeV, 539 kW-eq. intensity (Run#44, Nov., 2012)
- $E_{inj}=400$ MeV, 553 kW-eq. intensity (Run#54, Apr., 2014)



ID	ϵ_{tp} (π mm mrad)	V_2/V_1 (%)	$\Delta\phi_2$ (deg)	$\Delta p/p$ (%)
1	-	-	-	-
2	100π	-	-	-
3	-	80	-100	-0.0
4	-	80	-100	-0.1
5	-	80	-100	-0.2
6	100π	80	-100	-0.0
7	100π	80	-100	-0.1
8	100π	80	-100	-0.2

- ✓ 入射エネルギー増強前後に実施した一連のビーム試験結果は、ペイント入射や入射エネルギーの増強が期待通り強力に機能したことを明確に示している

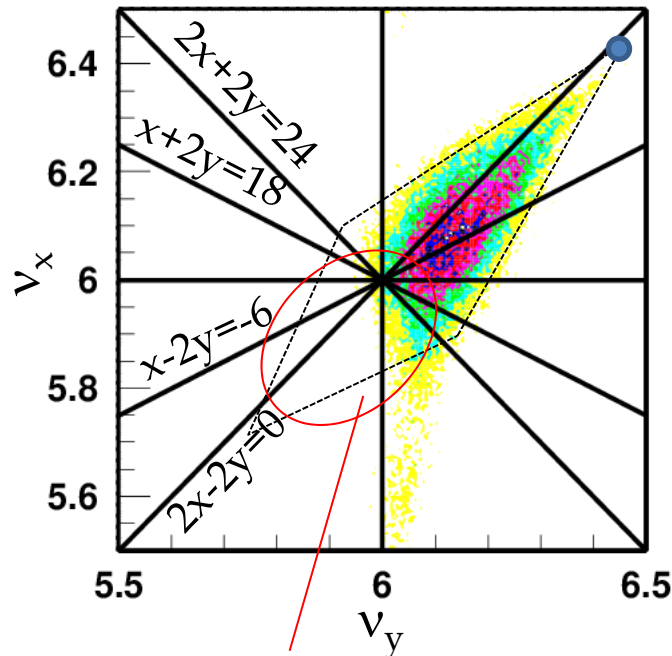
入射終了直後のインコヒーレントチューンシフト

$E_{inj}=181 \text{ MeV}$

ID1

- No transverse painting
- No longitudinal painting

ペイント入射なし

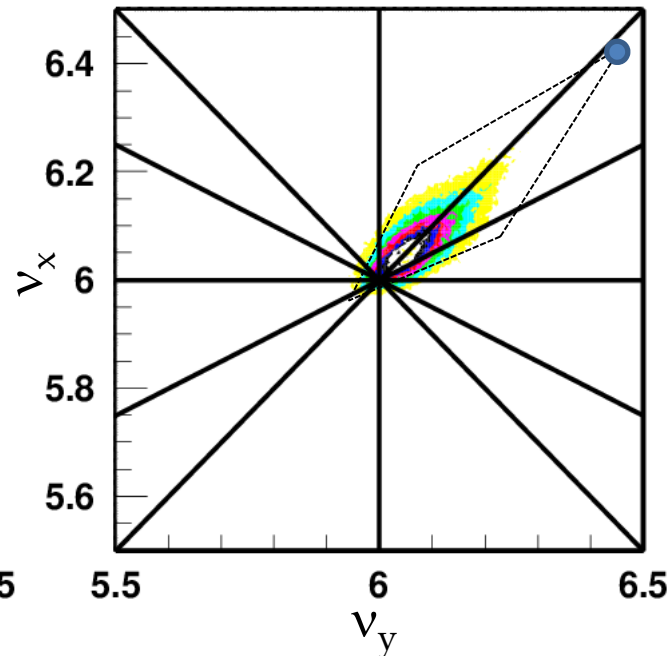


- ・大きなチューンシフトが発生
- ・強い低次の構造共鳴の影響で
ビーム粒子のベータatron振幅が増大
- ・30%という大きなビーム損失の主要原因

ID8

- 100 π transverse painting
- Full longitudinal painting

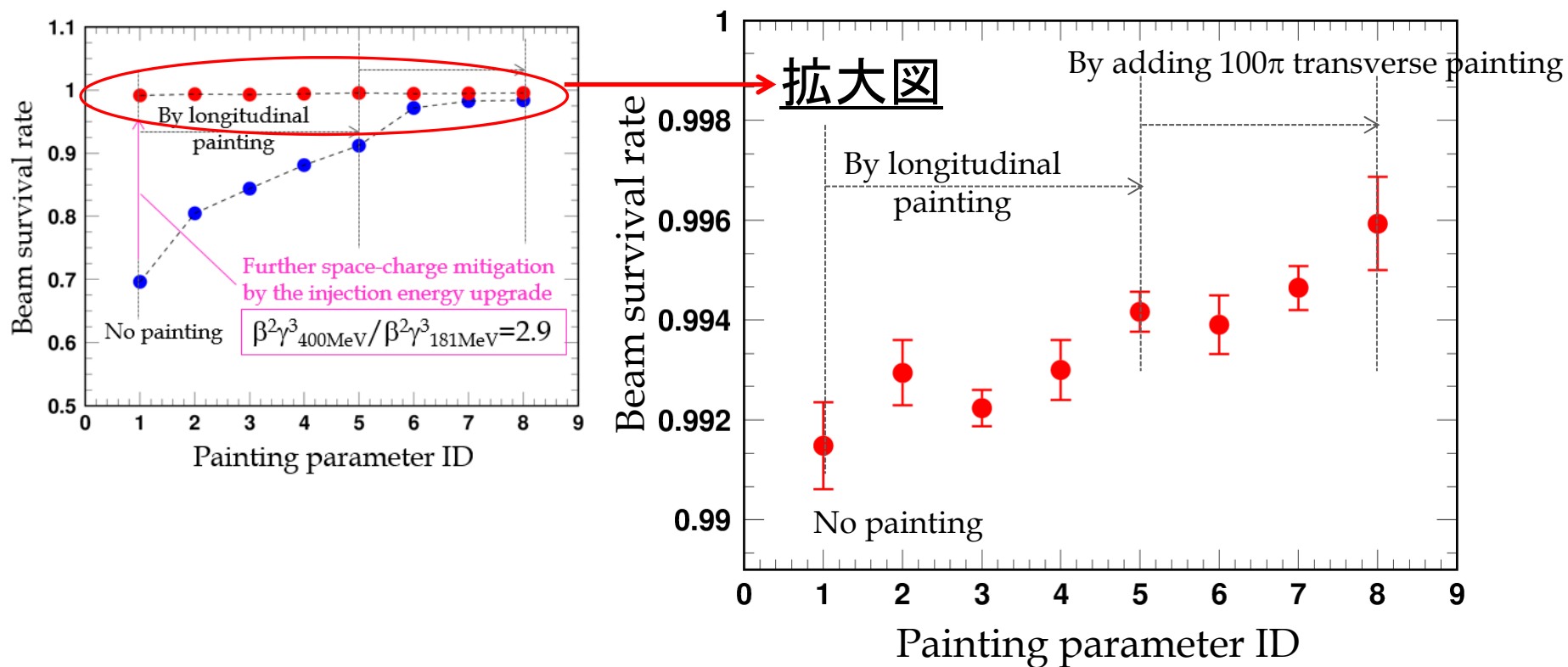
ペイント入射あり



- ・チューンシフトが低減
- ・共鳴の影響が緩和
- ・大幅なビーム損失低減につながった

ペイント入射によるビーム損失低減: 実験結果

● $E_{inj}=400$ MeV, 553 kW-eq. intensity (Run#54, Apr., 2014)



- ✓ 入射エネルギー増強前後に実施した一連のビーム試験結果は、ペイント入射や入射エネルギーの増強が期待通り強力に機能したことを明確に示している

ペイント入射によるビーム損失低減: 成果の位置づけ

✓ 入射エネルギー増強前に実施した540 kW試験でのビーム損失を1%領域にまで低減できた

ラスレットの式(空間電荷効果の強さの指標):

$$\Delta v = -\frac{r_p n_t}{2\pi\beta^2 \gamma^3 \epsilon B_f}$$

空間電荷効果は、ローレンツ因子の小さい低エネルギー領域ほど顕著となる

実験条件

1MW設計出力運転

1.6MW出力運転

入射エネルギー	181 MeV
粒子数/パルス	4.5x10 ¹³
ビーム出力	540 kW
ラスレット量	1.6

400 MeV
8.3x10 ¹³
1 MW
1.0

400 MeV
13.3x10 ¹³
1.6 MW
1.6

運動学的に等価

ビーム強度は定格の半分程度であるが、入射エネルギーが低いため設計値の1.6倍という強い空間電荷効果が発生

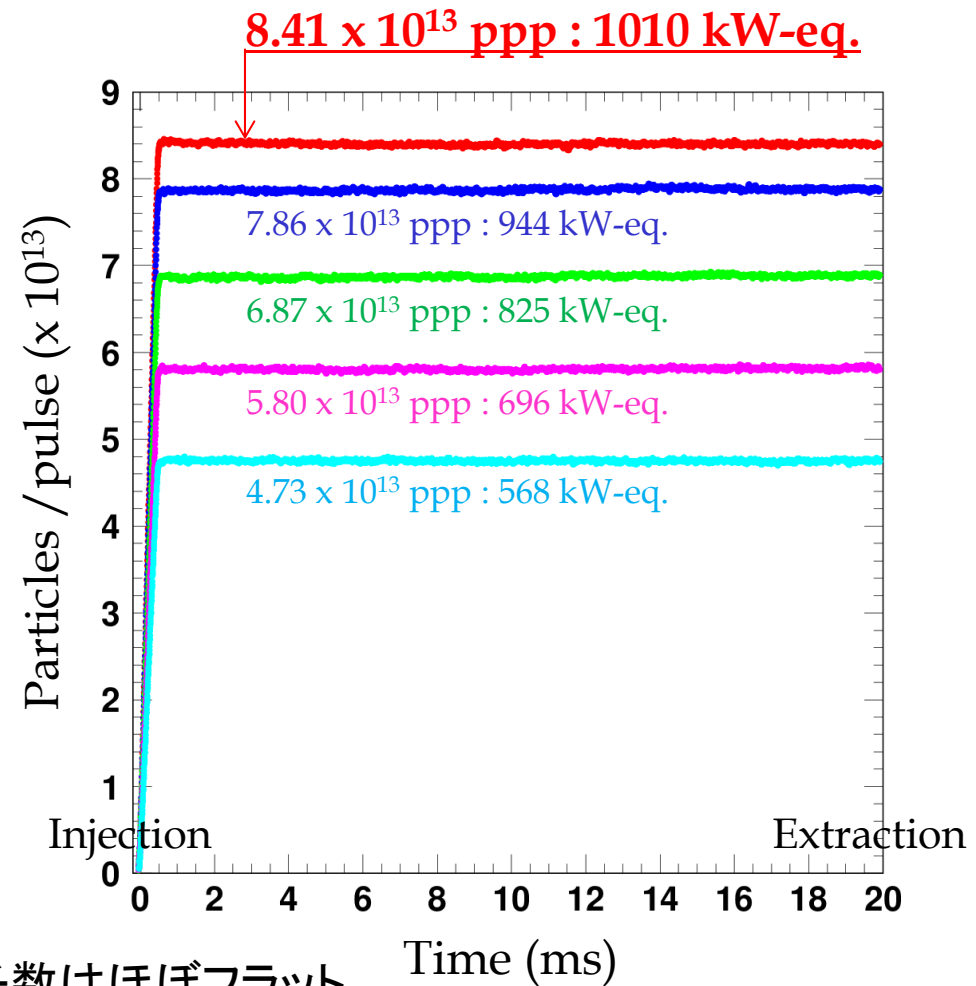
・・・成果の位置づけ:

- * 入射エネルギー増強後の1MW設計出力の実現に目途をつけた
- * 設計出力を上回る1.6 MW以上という更なる大強度化への道を開いた

IV. 1 MW大強度加速試験

- ◆ 2014年 夏
 - ・リニアックのフロントエンド部 (IS&RFQ) の増強
 - ・入射ビームのピーク電流値が設計値へ: 30 mA \Rightarrow 50 mA
- ◆ 2014年10月~
ビーム強度を更に積み上げた大強度ビーム試験を展開
- ◆ 2015年1月10日
1MW相当のビーム加速達成

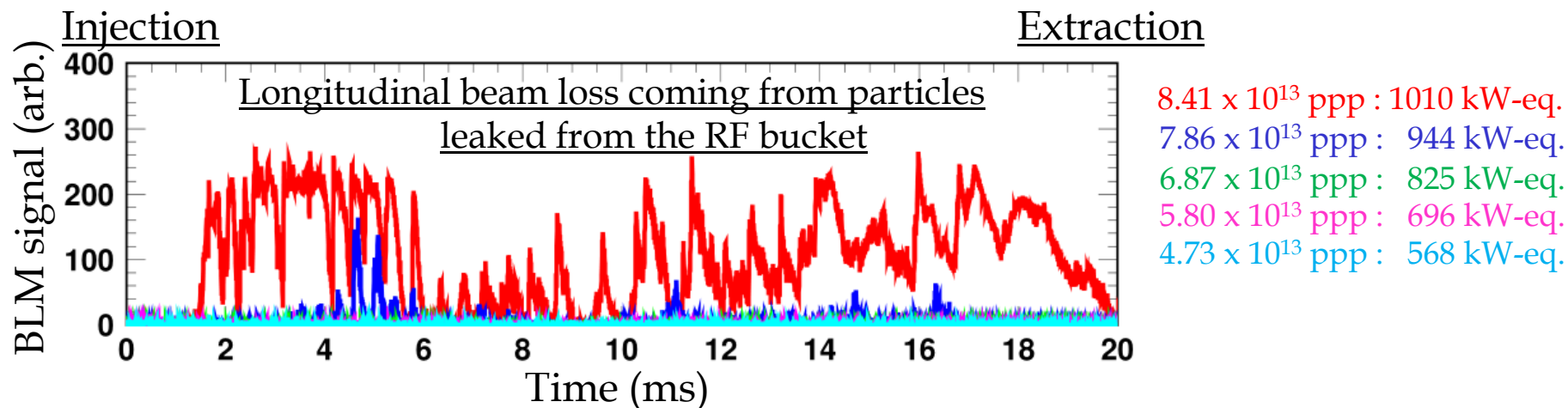
Circulating beam intensity over the 20 ms from injection to extraction measured by CT



- ✓ 入射から出射までの粒子数はほぼフラット
重大なビーム損失を生じさせることなく1MW加速を達成できた

縦方向のビーム損失

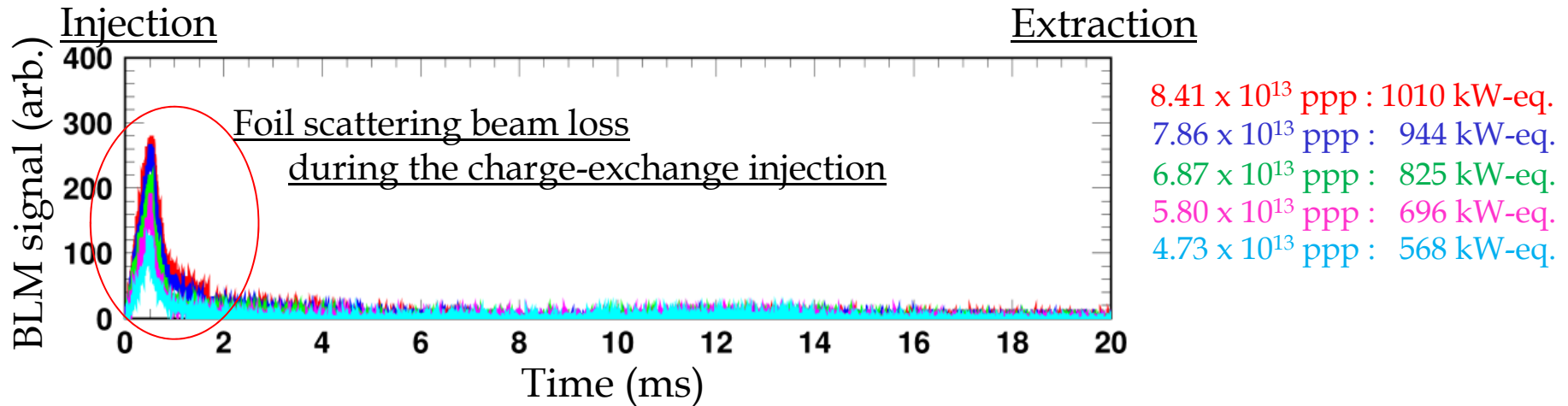
ビームロスモニタ信号@アーク部(分散の高い場所)



- ✓ 900 kW(青&赤)を超えたあたりからビーム損失($\ll 0.1\%$)が発生
- ✓ RFバケツからこぼれたビーム粒子に由来する縦方向のビーム損失で、ビームの大強度化に伴って顕在化するビームローディング効果によって生じるRFバケツの歪みが主原因
- ✓ ビームローディング補償については、FF法を開発して上手く機能させることができているが、この試験当時、RF電源がほぼ上限値に達してしまい、900 kWを超える大強度ビームに関しては十分なRF調整ができなかったということがこのロスの根本原因
- ✓ RF電源の増強作業が現在進行中
作業終了後に予定している10月のビーム試験で、RF電圧の再調整を十分に行えば、このロスは抑え込めると期待

横方向のビーム損失

ビームロスモニタ信号@コリメータ部(分散のない直線部)



- ✓ その他の横方向のビーム損失については、その殆どを、分散のない直線部に設置されたコリメータセクションで上手く回収できている
- ✓ コリメータ領域のビーム損失は、入射中の最初の1ms領域のみ
- ✓ このビーム損失は、ビーム入射に使用している荷電変換フォイル上での散乱現象により生じたもの
- ✓ 空間電荷などに起因したビーム損失については、ペイント入射の導入により、ほぼ最小化できた
- ✓ 1MWビーム加速の際のビーム損失:0.17% << コリメータ許容値:3%
極めて小さなビーム損失で1MWという大強度ビーム加速を達成したことになる
- ✓ RF電源増強後の本年10月に再度1MWビームの調整・試験を行う予定であるが、この1月のビーム試験で設計性能実現への目途をきっちり付けることができた

V. 更なるビーム損失低減へ向けた取り組み

H. Hotchi et al, NIM, Sect. A 778, 102 (2015).

- ✓ 現状、残ったビーム損失の大部分は、入射中のフォイル散乱起源のもの
その他のビーム損失についてはほぼ最小化できる見込みはついた
- ✓ フォイル散乱起源のロスの原因は、シールドされたコリメータ領域でうまく回収されているが、大角度で散乱された一部の粒子がフォイル直下でロスし機器の放射化の原因になっている

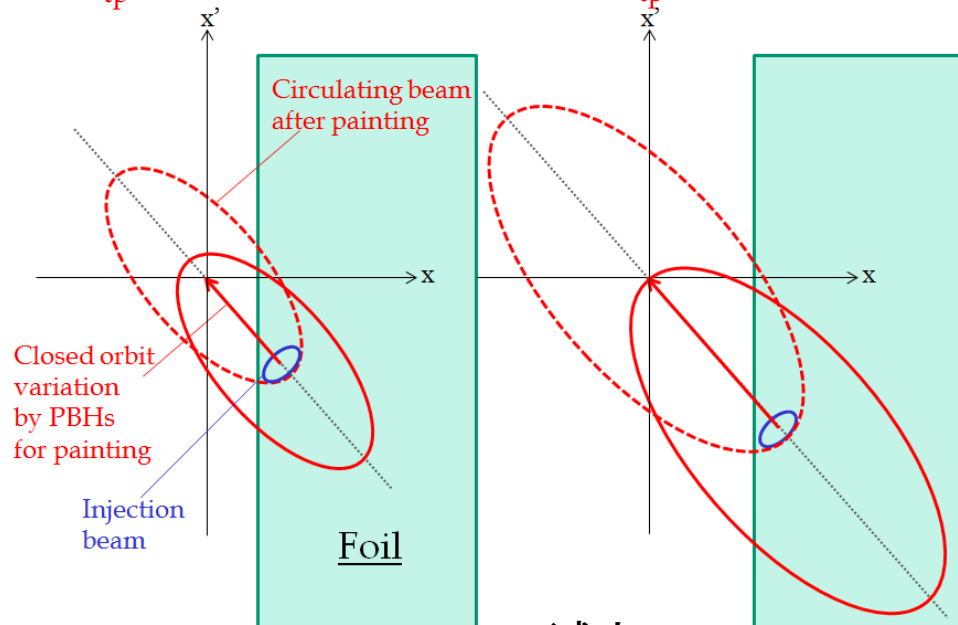
現状のまま、1MWの連続運転を行った場合に

予想されるフォイル近傍の残留線量：~38 mSv/h@チャンバー表面

- ✓ メンテ作業中の被爆を最小化させるという観点から、更なるビーム損失の低減が必要

Present : $\varepsilon_{tp} = 100 \pi \text{ mm mrad}$

$\varepsilon_{tp} = 150 \pi \text{ mm mrad}$



平均フォイルヒット回数: ~42

減少

~27

横方向ペイント範囲の更なる拡幅

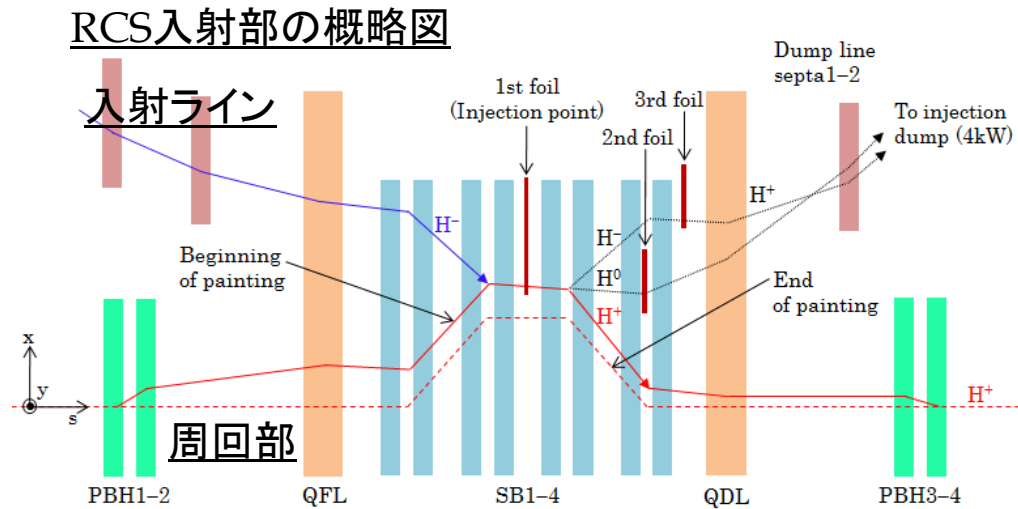
入射中のフォイルヒット回数の低減

残留線量の低減

課題:

現状のままでは、
ペイント範囲を拡幅すると、
別のビーム損失が付加的に発生
...ペイント範囲の拡幅を
実現するには、
この課題の解決が必要

入射バンプ電磁石のエッジ収束



- ✓ RCSでは、入射中、水平方向にバンプ軌道を形成し、それを時間変化させることでペイント入射を行っている
- ✓ この際、このバンプ軌道を形成するために用いている入射バンプ電磁石の出入り口にエッジ収束力が発生

入射バンプ電磁石のエッジ収束



ベータ関数に変調



加速器対称性が歪む



ランダム共鳴が励起

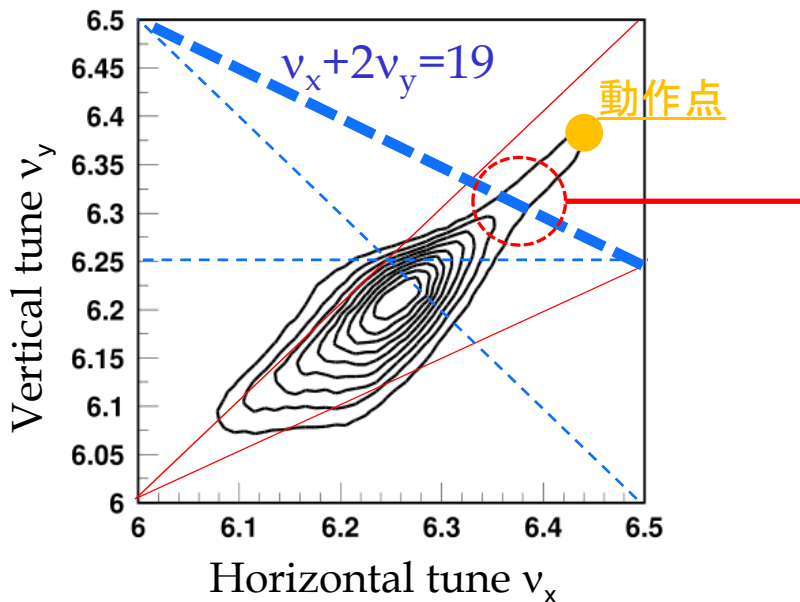


付加的なビーム損失発生

エッジ収束の効果: 非構造共鳴

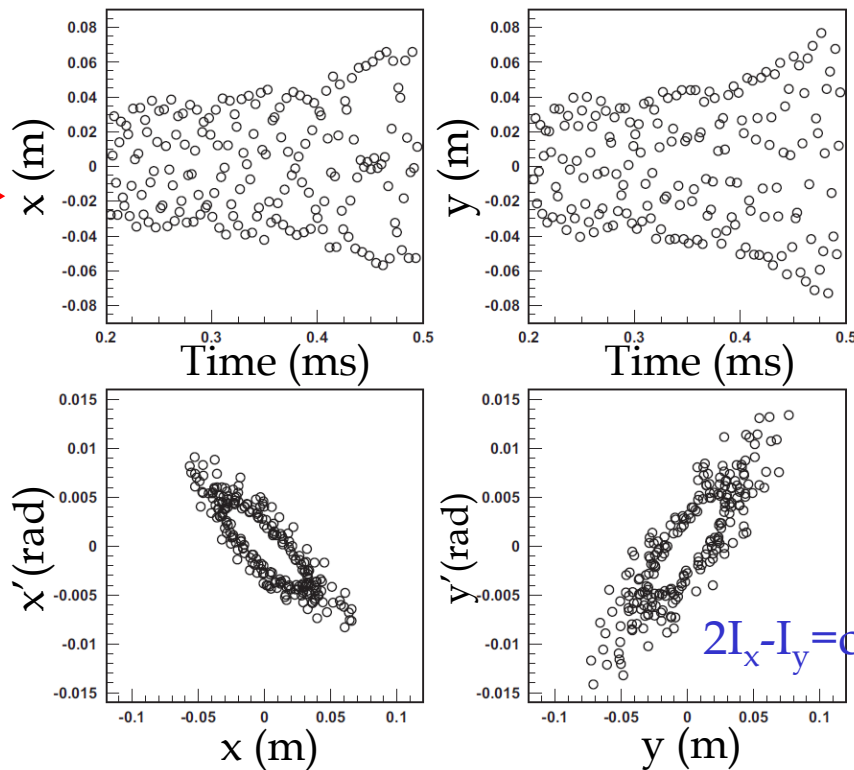
チューンダイアグラム(4次まで)

$\nu_x + 2\nu_y$ 和共鳴の効果 (インコヒーレント振動の様子)



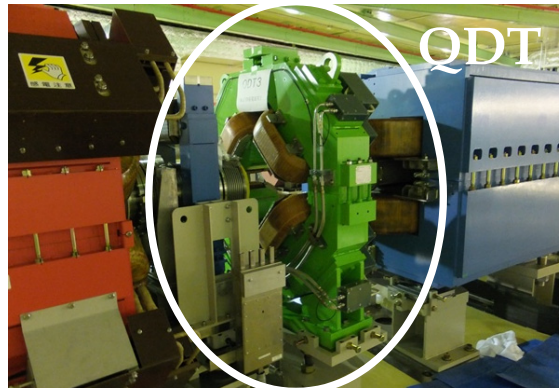
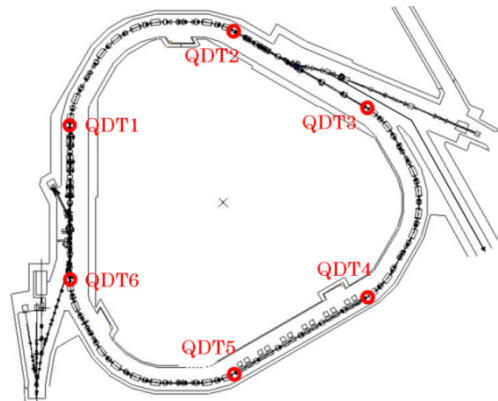
— 構造共鳴
 - - - エッジ収束によって
 加速器の対称性が崩された場合に
 付加的に励起される非構造共鳴

- ✓ 現状の運転条件では、3次共鳴 $\nu_x + 2\nu_y = 19$ が特に強くビームに作用している



- ✓ ビーム粒子がこの共鳴に近づくと、x方向・y方向共にエミッタンス増大が引き起こされる
- ✓ x方向のエミッタンス増大に対し、2倍の比率でより大きなエミッタンス増大がy方向に発生
- ✓ y方向の大きなエミッタンス増大が、ペイント範囲を拡幅した際に発生する付加的なビーム損失の主原因

ベータ関数変調の補正: 補正四極電磁石(6台)の追加設置



ベータ関数変調の補正



加速器対称性の回復



ランダム共鳴の低減

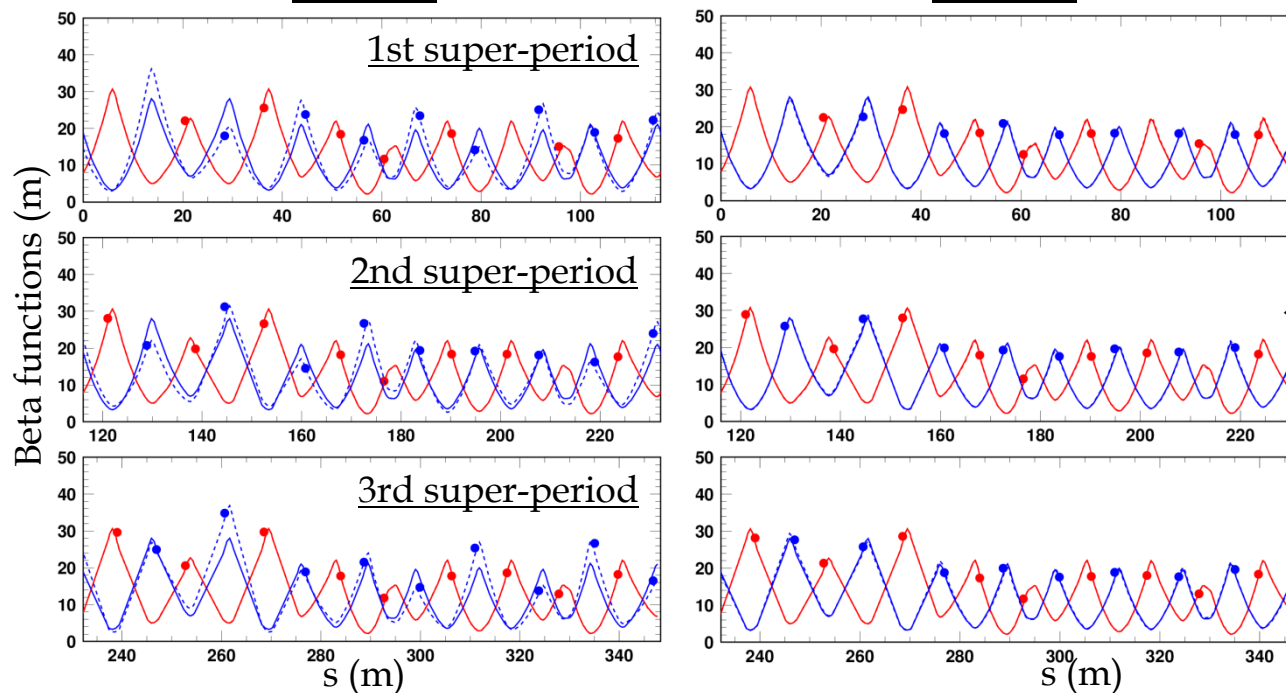


付加的なビーム損失の抑制

ベータ関数補正の試験結果

補正前

補正後

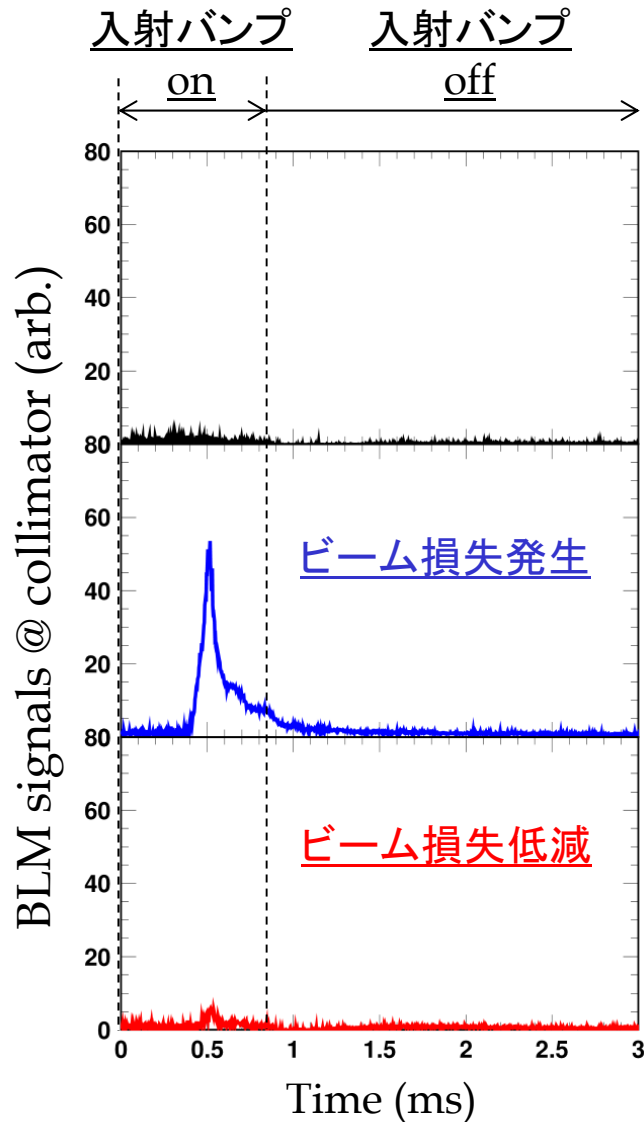


- Horizontal (入射バンプ off)
- - - Horizontal (入射バンプ on)
- Vertical (入射バンプ off)
- - - Vertical (入射バンプ on)

✓ 新規導入した6台の補正四極電磁石を用い、ベータ関数変調を上手く補正できた

補正四極電磁石によるビーム損失低減: 本年6月のビーム試験結果

ビームロスモニタ信号@コリメータ部(分散のない直線部)



ペイント範囲
: 100π mm mrad

Run#63 (June, 2015)
入射エネルギー: 400 MeV
ビーム強度: 850 kW-eq.

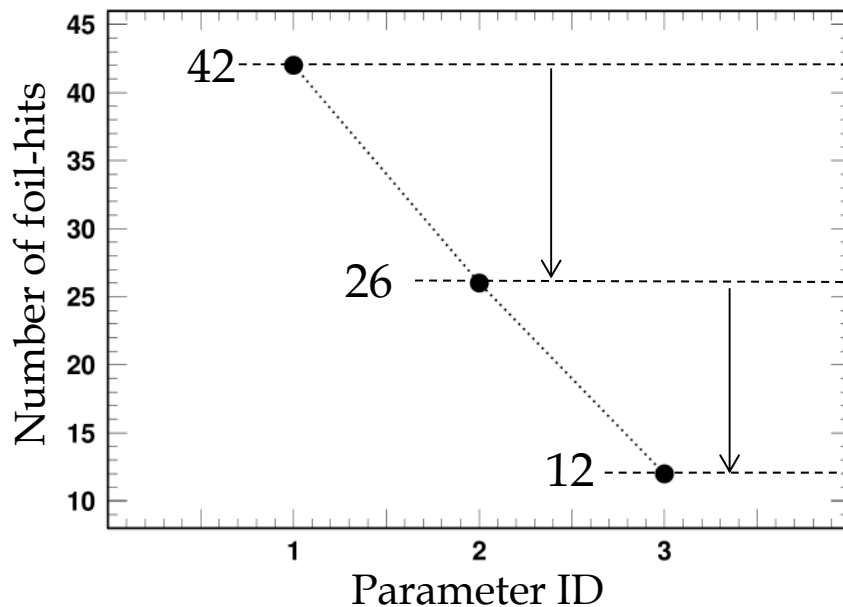
ペイント範囲
: 150π mm mrad

- ✓ 補正四極電磁石の導入により、ペイント範囲を拡幅した際の付加的なビーム損失をほぼ最小化できた

ペイント範囲
: 150π mm mrad
+ 補正四極導入

foil scattering reduction

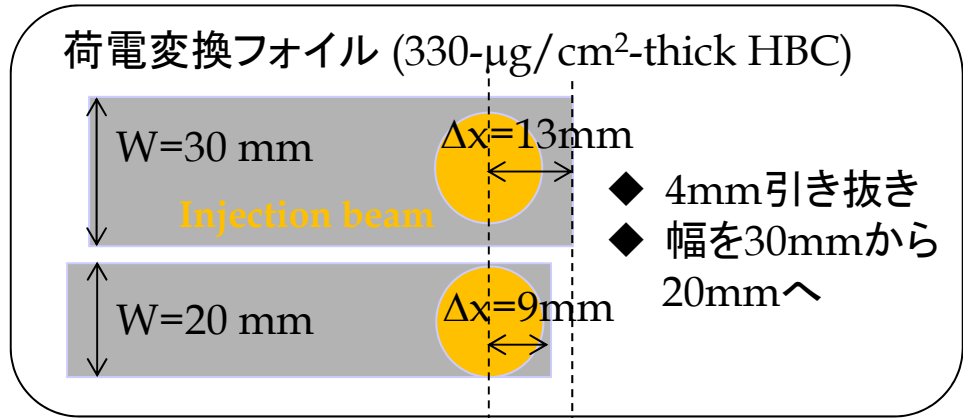
Average foil hit rate per particle



Foil: $\Delta x=13$ mm, $W=30$ mm
Paint range: 100π mm mrad

Foil: $\Delta x=13$ mm, $W=30$ mm
Paint range: 150π mm mrad

Foil: $\Delta x=9$ mm, $W=20$ mm
Paint range: 150π mm mrad



Paint range expansion
+ foil size/position adjustment by...

- ✓ foil hit rate is reduced to ~1/4 of previous
- ✓ 1-MW operation residual dose at foil position, 38 mSv/h \Rightarrow <10 mSv/h; can be significantly reduced;

VI. まとめ

- ◆ 本年1月に1MW相当の大強度ビーム加速を達成した
- ◆ RF電源の不足により、縦方向のビーム損失が僅かながら残っているが、ビーム損失の主成分である空間電荷効果に起因する部分については、ペイント入射の導入によりほぼ最小化できた
- ◆ 縦方向のビーム損失以外で、現状残っているビーム損失は、入射中のフォイル散乱に起因したものであるが、そのロスに関しても、新規導入した補正四極電磁石を用いてペイント範囲の拡幅を実現させた結果、大幅低減させることに成功した
- ◆ これまでの一連のビーム調整・試験により、許容範囲内のビーム損失で、1MWの連続運転を実現できる見通しは概ね付いた
- ◆ RF電源増強後の本年10月に、再度、1MWのfine tuningを実施する予定