

J-PARC 3GeV陽子シンクロトロンにおける 1MW運転時のビーム損失とその低減

日本加速器学会年会
2016年8月8日 @ 千葉市・幕張メッセ・国際会議場

發知 英明

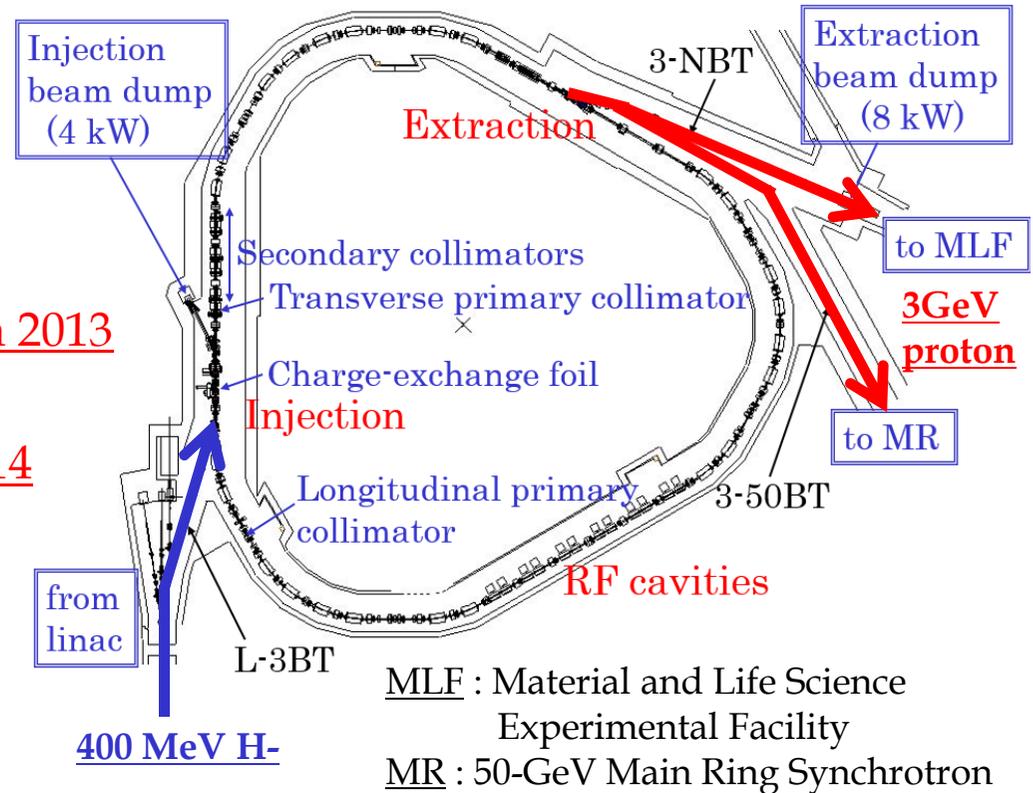
国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
J-PARCセンター 加速器ディビジョン

Contents :

- (1) 設計パラメータ
- (2) ビーム出力の履歴
- (3) 縦方向ビーム損失とその低減
- (4) 横方向ビーム損失とその局所化
- (5) ビーム不安定性とその抑制
- (6) 横方向ペイント入射範囲の拡幅による更なるビーム損失低減
- (7) Summary

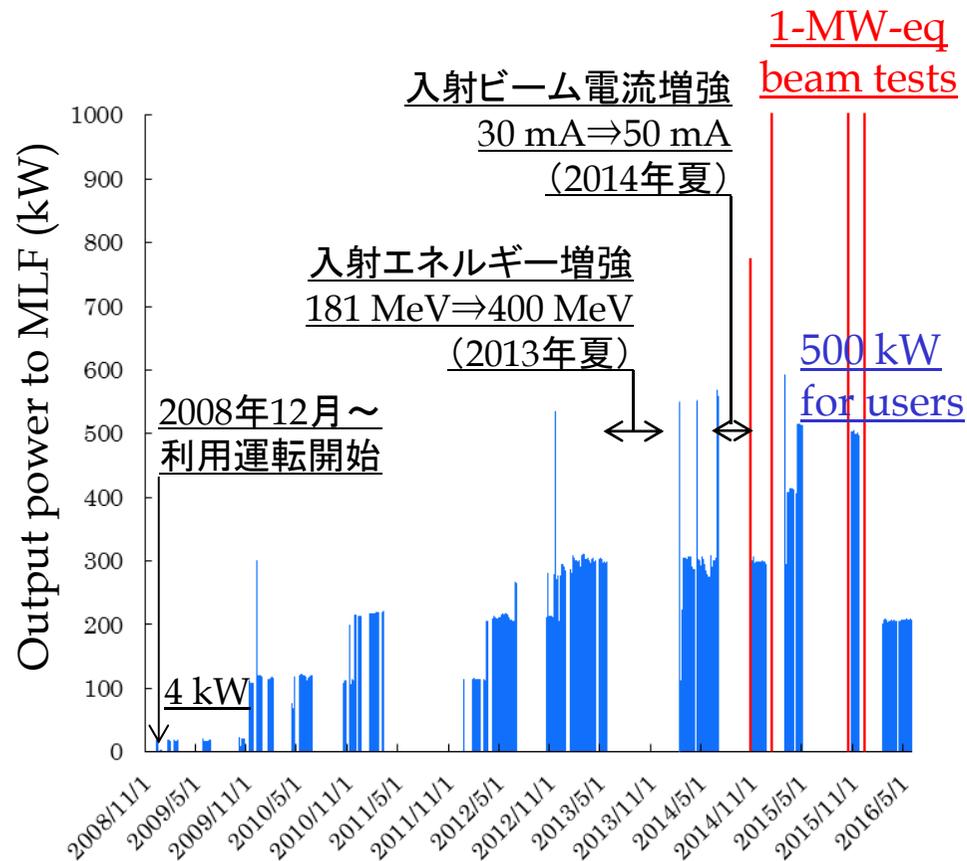
(1) 設計パラメータ

Circumference	348.333 m
Superperiodicity	3
Harmonic number	2
Number of bunches	2
Injection	Multi-turn, Charge-exchange
Injection energy	181 MeV ⇒ <u>400 MeV in 2013</u>
Injection period	0.5 ms (307 turns)
Injection peak current	30 mA ⇒ <u>50 mA in 2014</u>
Extraction energy	3 GeV
Repetition rate	25 Hz
Particles per pulse	5×10^{13} ⇒ <u>8.3×10^{13}</u>
Output beam power	600 kW ⇒ <u>1 MW</u>
Transition gamma	9.14 GeV
Number of dipoles	24
quadrupoles	60 (7 families)
sextupoles	18 (3 families)
steerings	52
RF cavities	12



- ✓ 物質生命科学実験施設(MLF)へのビーム供給とメインリングシンクロトロン(MR)への入射器という2つの役割を持つ
- ✓ 最終的には世界最高レベルの1 MWという大出力でのビーム供給を目指している

(2)ビーム出力の履歴



- ✓ ビーム調整の進展やハードウェア系の増強等に従って着実にビーム出力を増強させている

- ✓ 500 kWの利用運転達成
- ✓ 利用運転と並行して、設計出力1 MWの実現へ向けた大強度試験を定期的実施
- ✓ 2015年1月に1 MWビーム加速達成
- ✓ 1 MW運転時のビーム損失低減を目指した大強度試験を精力的に展開中

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

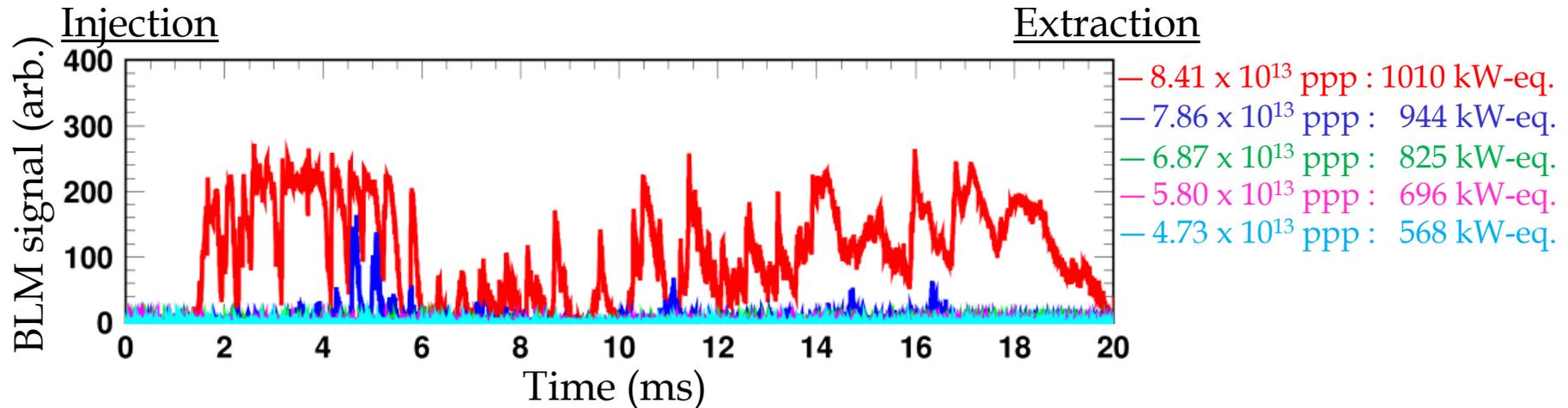


今回の話題:

- ◆ ビーム出力の増強過程で顕在化したビーム損失の発生機構やその低減に向けた取り組み
- ◆ RCSにおける1MWビーム調整の進捗状況

(3) 縦方向ビーム損失とその低減

BLM signals in the high dispersion area (arc)



- ✓ 900 kW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 FF調整ができなかったということがこのロスの根本原因



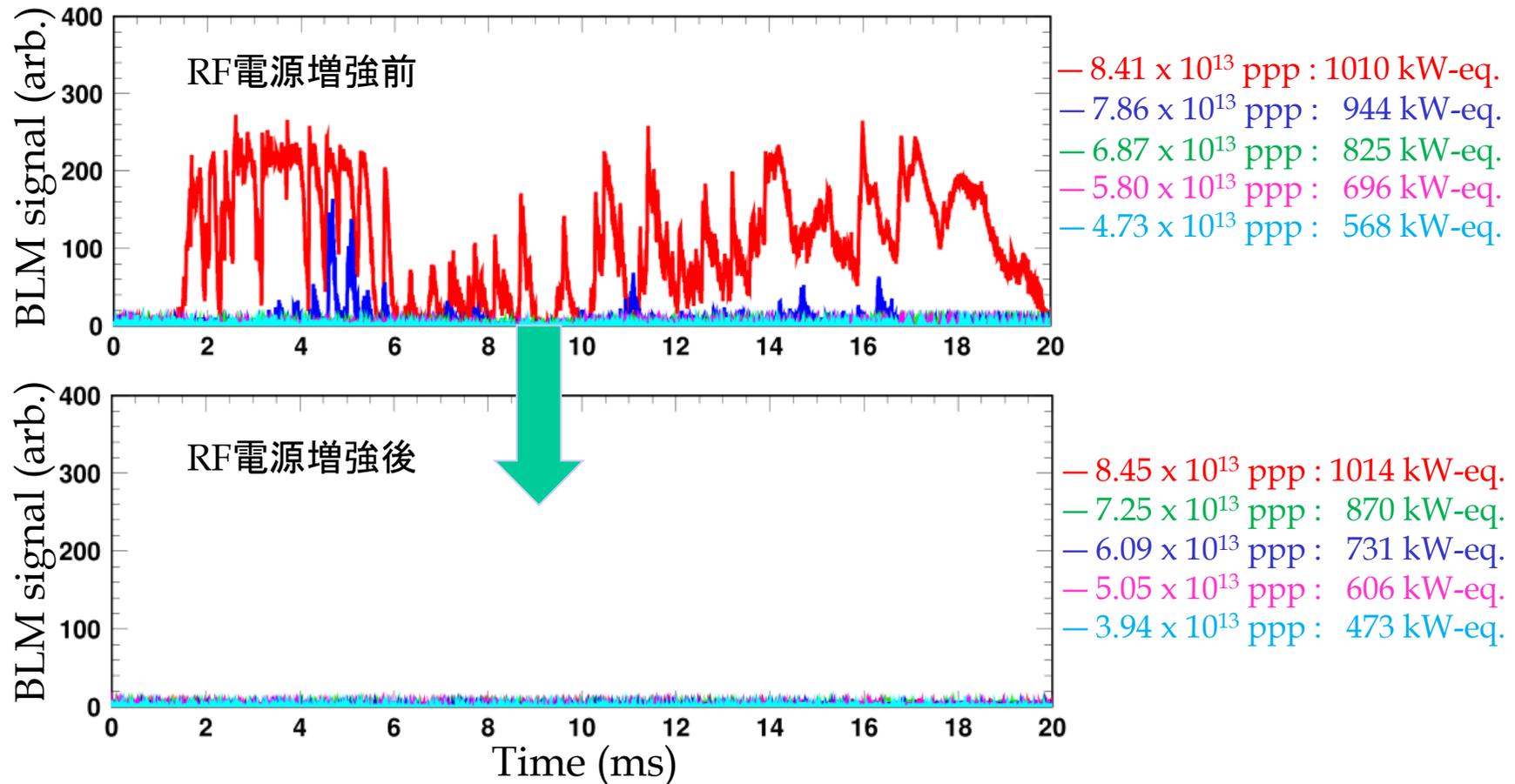
2015年夏 RF電源増強 \Rightarrow 2015年10月 ~ 1MW調整再開

縦方向ビーム損失とその低減

BLM signals in the high dispersion area (arc)

Injection

Extraction

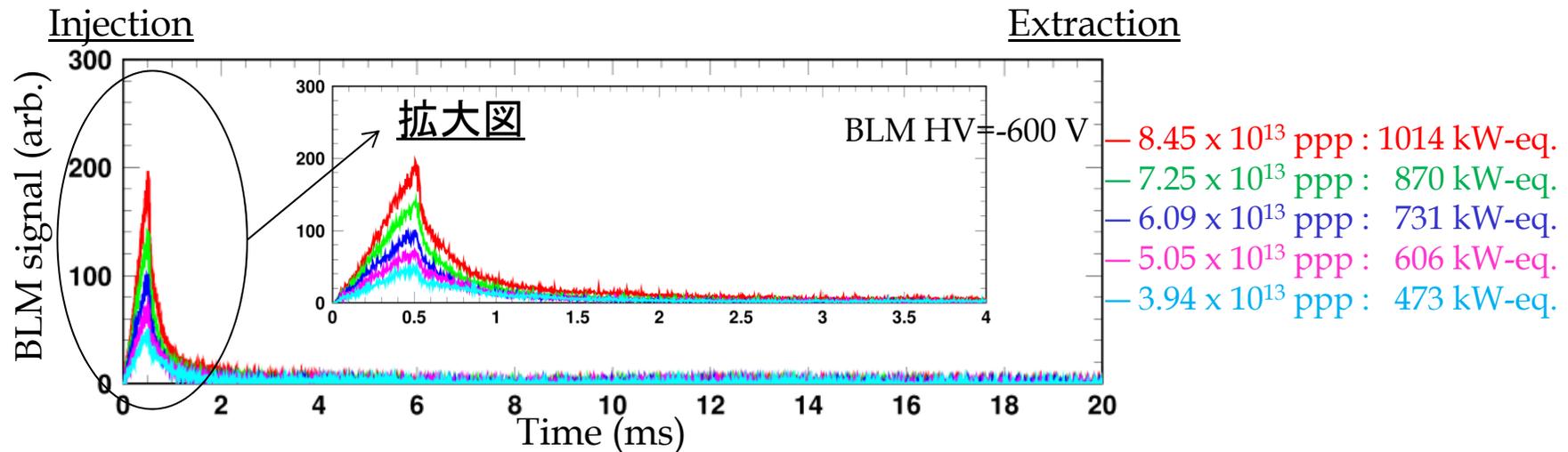


✓ RF電源の増強・FF調整により、縦方向のビーム損失は除去された

(4) 横方向のビーム損失とその局所化

- ✓ 横方向のビーム損失については、その大部分を、分散のない直線部に設置されたコリメータで上手く回収することができた

BLM signals at the collimator section (dispersion-free long straight insertion)



- ✓ コリメータ領域のビーム損失は、入射中の最初の1 ms領域のみに出現し、その量は線形なビーム強度依存性を示す
- ✓ このビーム損失は、入射中の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
- ✓ 1 MWビーム加速の際のビーム損失:<0.1% (133 W) << コリメータ許容限界値:3% (4 kW)
極めて小さなビーム損失で1 MWという大強度ビーム加速を達成したことになる

(5)ビーム不安定性とその抑制

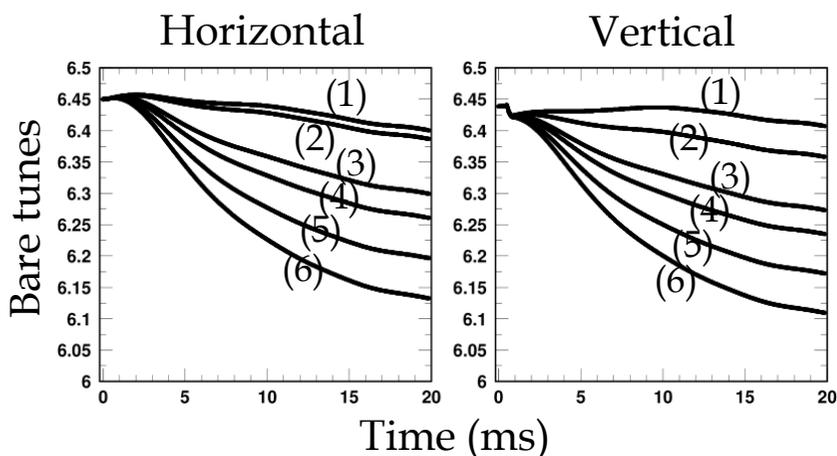
出射パルスキッカーのインピーダンス

⇒ ビーム強度や運転パラメータに依存して重篤なビーム不安定性を引き起こす

安定な運転条件を見出すために、チューンやクロマティシティをノブにした

系統的なビーム不安定性測定を行った

Tune variation used
for the beam instability measurement



✓ 運動量広がり由来したLandau dampingのおかげで、クロマティシティが負方向に大きな値を持つほどビームが安定化

✓ クロマティシティや加速過程のチューンを上手く制御することで、1 MWのビーム強度でも十分にビーム不安定性を抑制できる

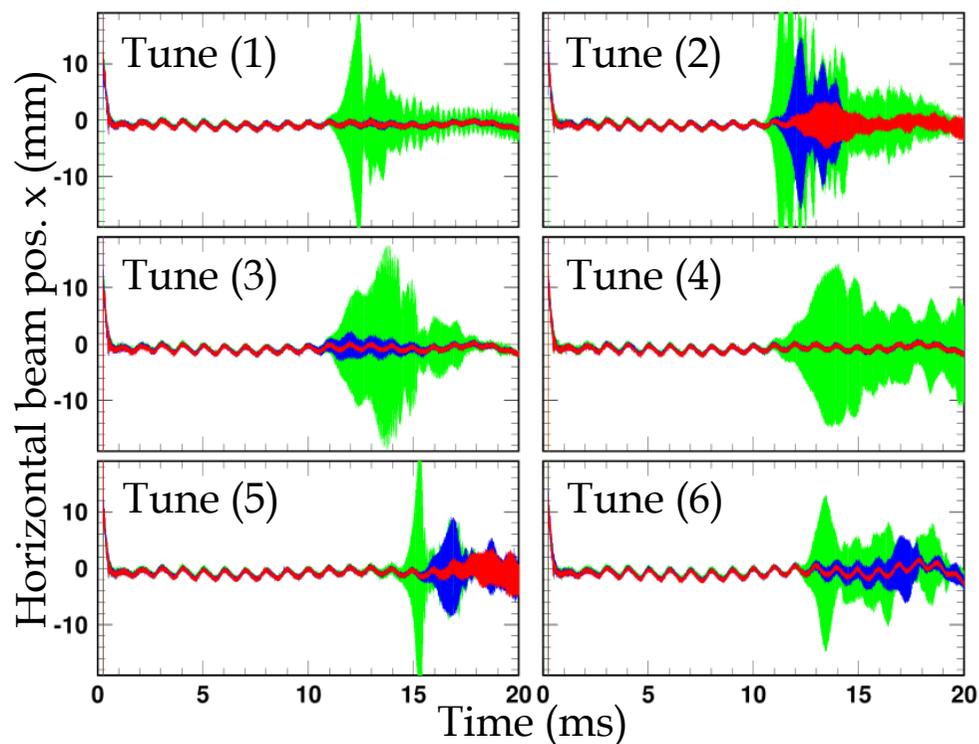
TUOM02(P.K. Saha et al)で詳細を発表予定

Turn-by-turn horizontal beam position

— クロマティシティ@入射: ~0 (六極直流励磁)

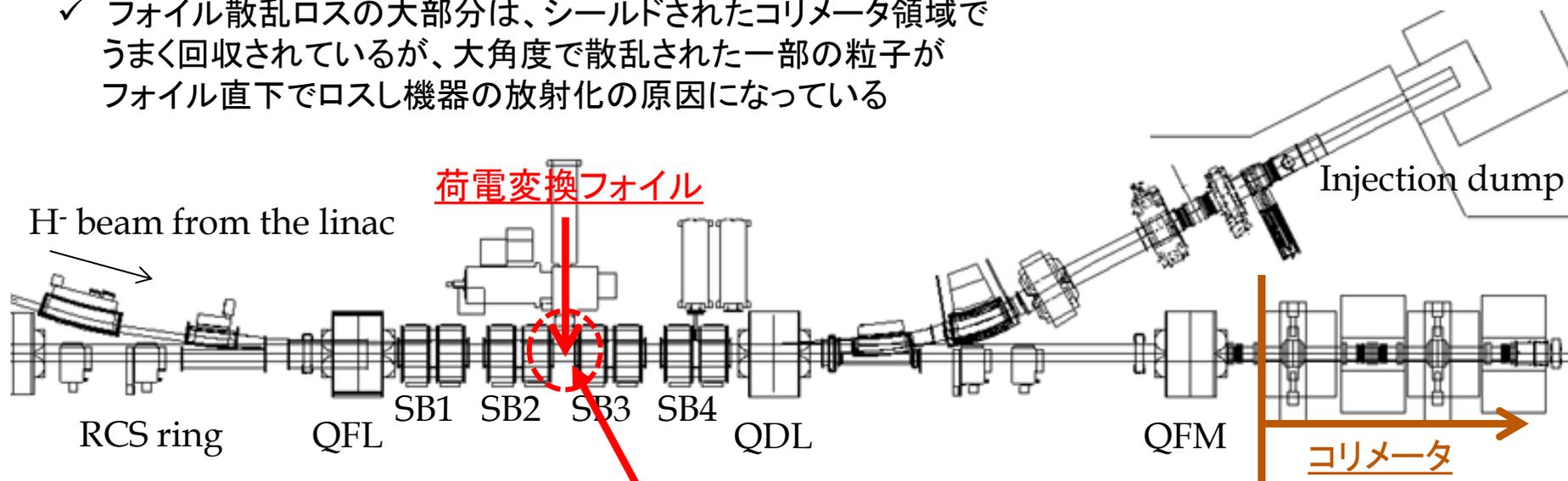
— クロマティシティ@入射: ~-7.5 (六極直流励磁)

— クロマティシティ@全域: ~-10.0 (六極 off)



(6) 横ペイント入射範囲の拡幅による更なるビーム損失低減

- ✓ 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た
- ✓ フォイル散乱ロス的大部分は、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、1 MW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

フォイル散乱ロスの更なる低減が強く求められていた

横方向ペイント入射範囲の更なる拡幅

入射中のフォイルヒット回数の低減

残留線量の低減

RCSにおける横方向ペイント入射

入射中に、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⇒入射ビームを位相空間の必要な範囲に一様に分布させてビームの空間電荷を低減させる手法

空間電荷の低減 + **フォイル散乱回数の低減**

◆ 水平方向のペイント入射:

入射中、周回軌道にローカルバンプを形成し、そのバンプ軌道を時間変化

ペイント範囲の拡幅

⇒周回ビームはより速くフォイルから遠ざかる

⇒ヒット回数の低減

◆ 垂直方向のペイント入射:

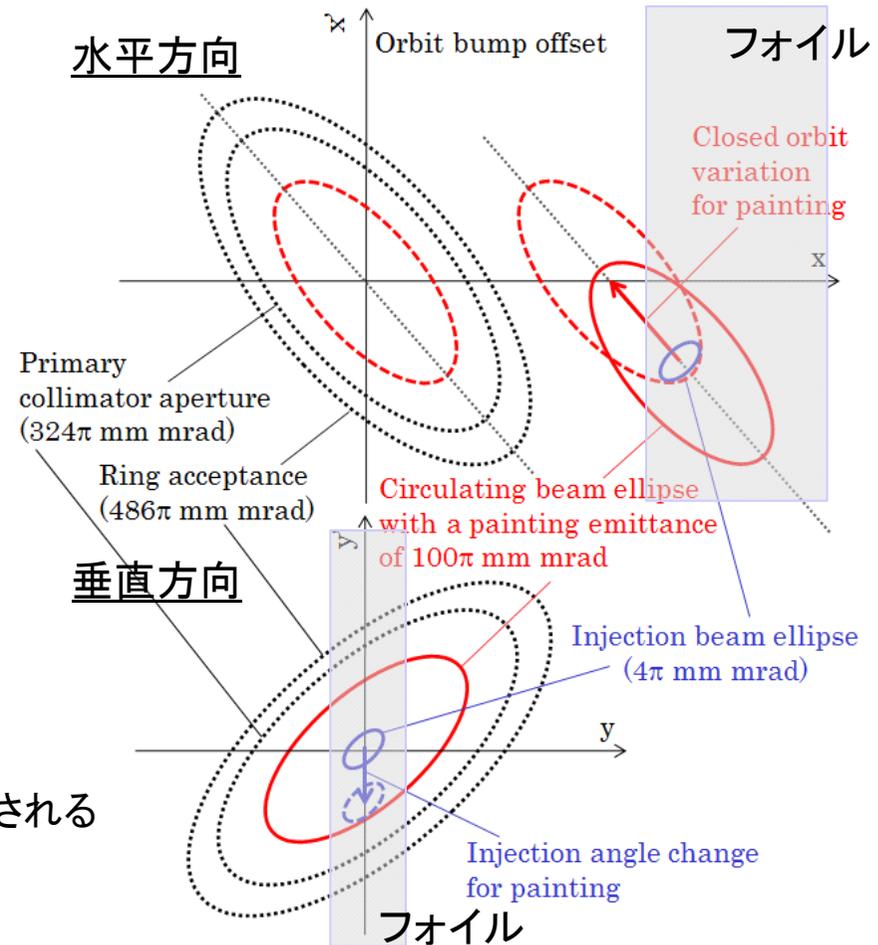
入射ビームの角度を時間変化

ペイント範囲の拡幅

⇒フォイル幅より大きなベータatron振動が励起される

⇒ヒット回数の低減

Painting area (π mm mrad)	Averaged number of foil-hits per particle
100	41
150	25
200	15

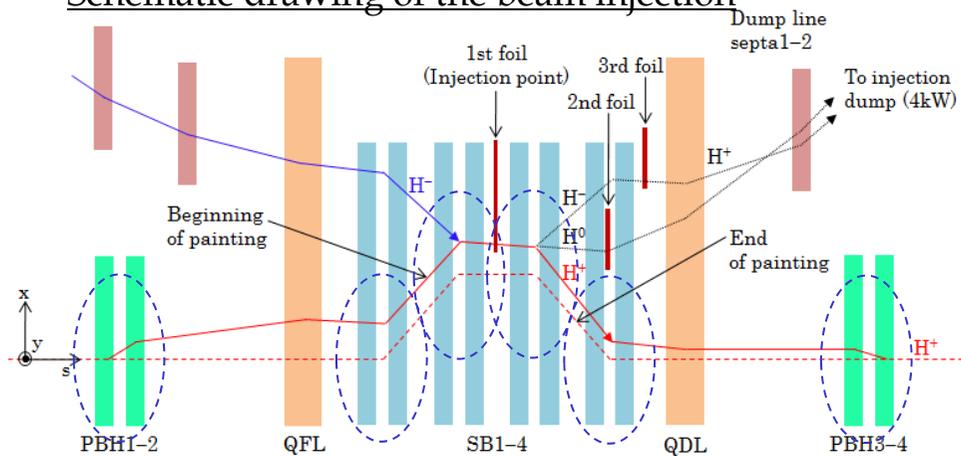


課題:

ペイント範囲を拡幅すると、別種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、この問題の解決が必要

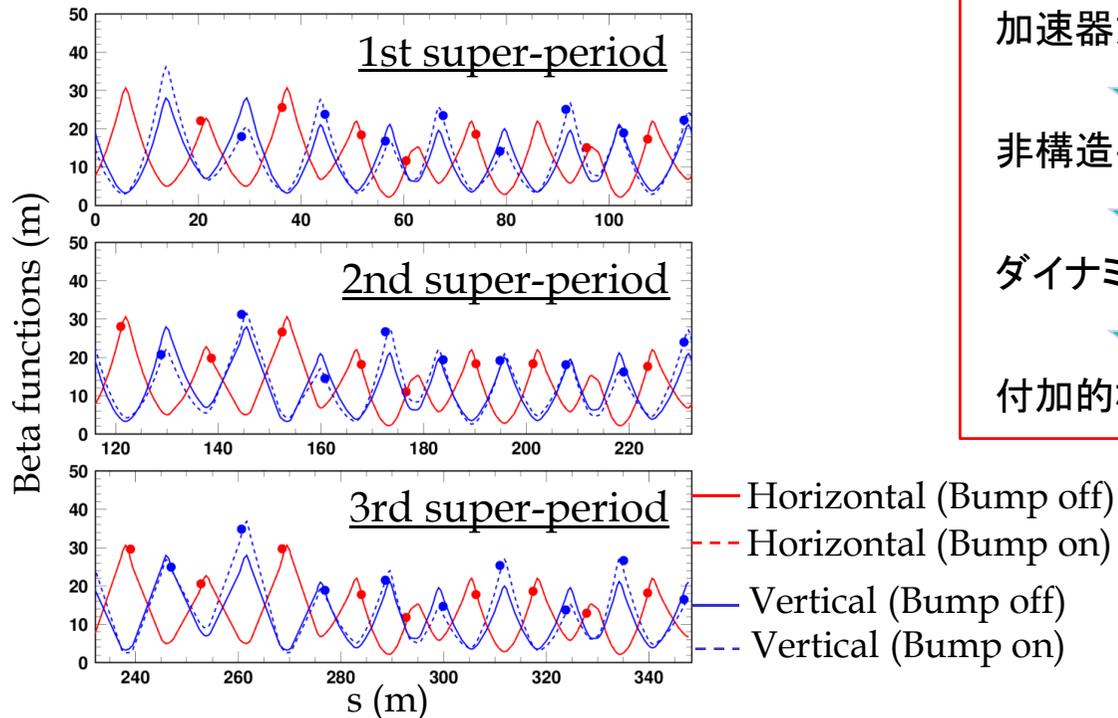
入射バンプ電磁石のエッジ収束によるベータ関数変調

Schematic drawing of the beam injection



- ✓ 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:
 計算機上での検討から、入射バンプ電磁石のエッジ収束に起因していることが判明

Beta function beating caused by the edge focus of the injection bump magnets



入射バンプ電磁石のエッジ収束

↓

ベータ関数を変調

↓

加速器対称性を崩す

↓

非構造共鳴が付加的に励起・エンハンス

↓

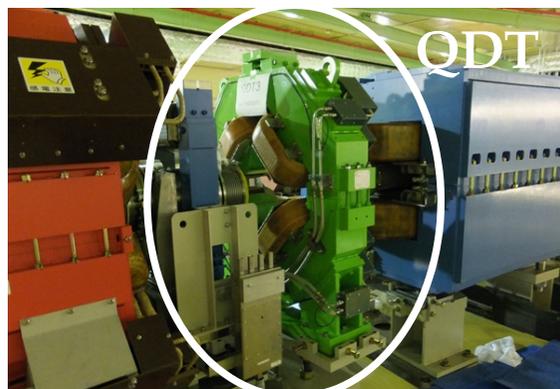
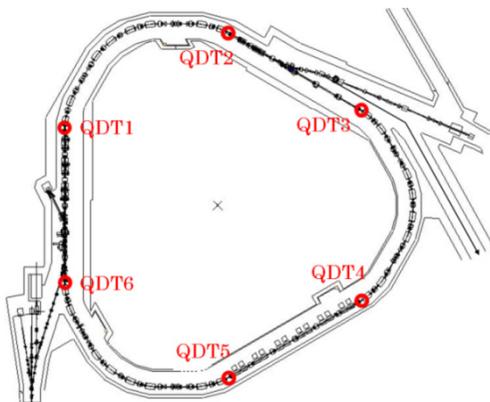
ダイナミックアパーチャの減少

↓

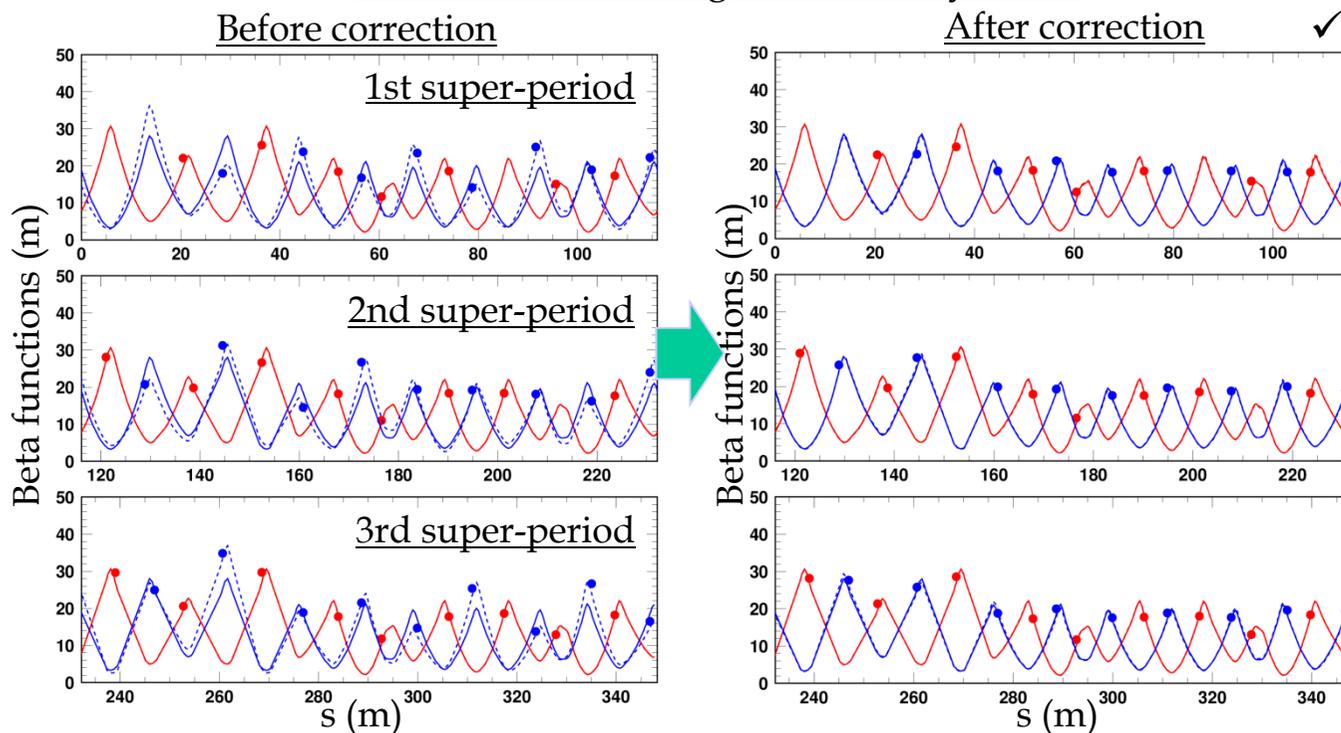
付加的なビーム損失発生

ベータ関数変調の補正: 補正四極電磁石(QDTs)の導入

- ✓ 計算機上での検討を踏まえ、ベータ関数変調を補正するための6台の補正四極電磁石(QDT)を追加設置



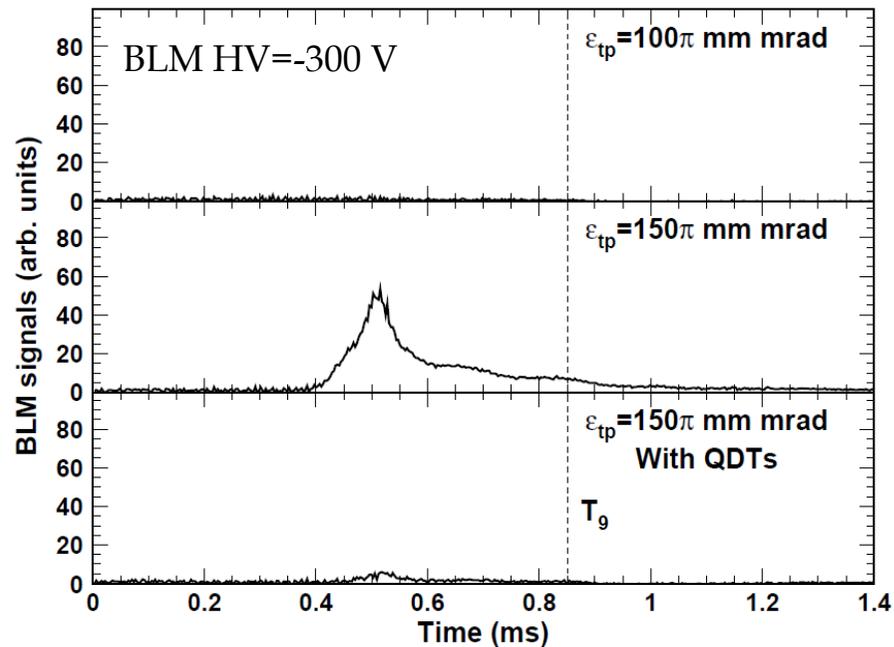
Beta function beating correction by QDTs



- ✓ エッジ収束により発生したy方向のベータ関数変調は、新規導入した6台のQDTsで上手く補正された

QDTsを用いた850-kWビーム試験

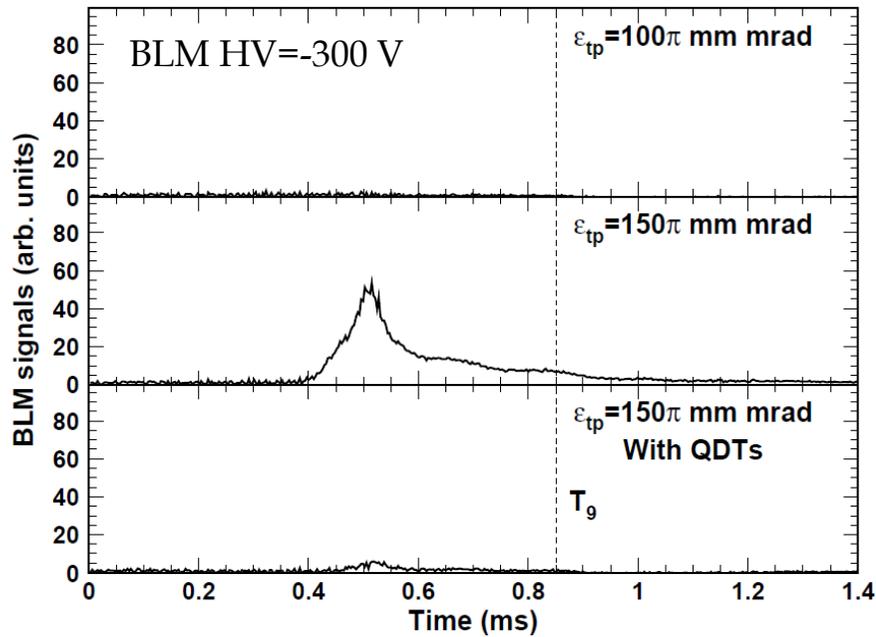
BLM signals at the collimator section



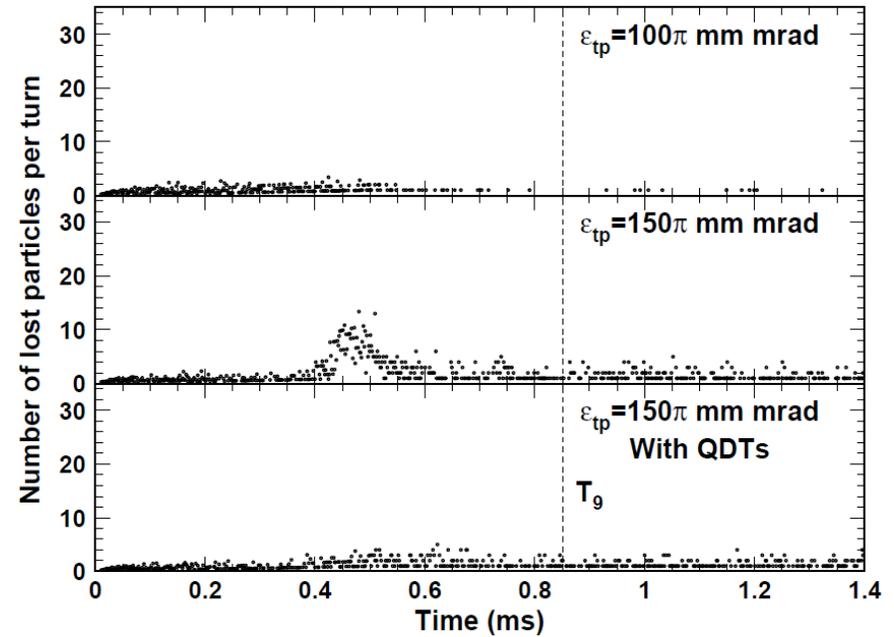
- ✓ ペイント範囲を拡幅すると($100 \Rightarrow 150\pi$ mm rad)、有意なビーム損失が発生
- ✓ QDTsを導入することで、期待通りに、そのビーム損失をほぼ最小化することができた

測定結果 vs 計算結果

◆ Measurement
(BLM signals at the collimator section)



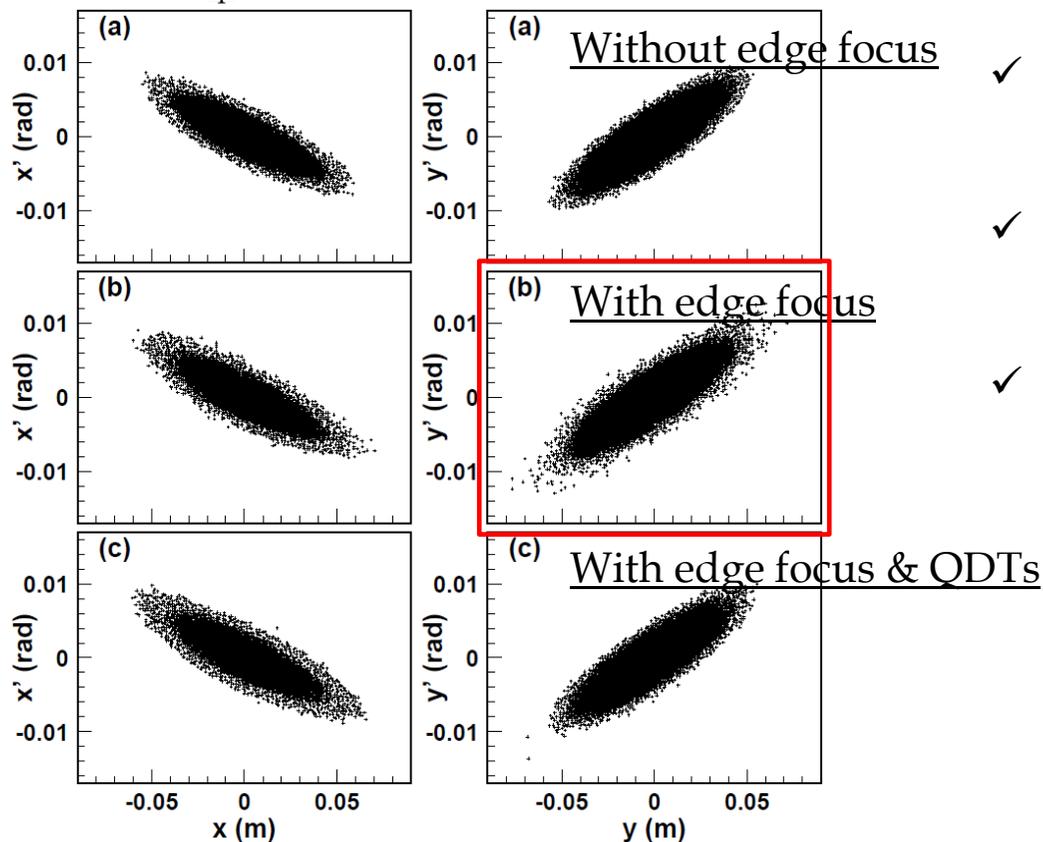
◆ Numerical simulation



- ✓ 実験結果は、数値シミュレーションで上手く再現された
- ✓ 計算結果を用いて、より詳細なビーム損失の発生メカニズムを議論した

エッジ収束によるハロー生成

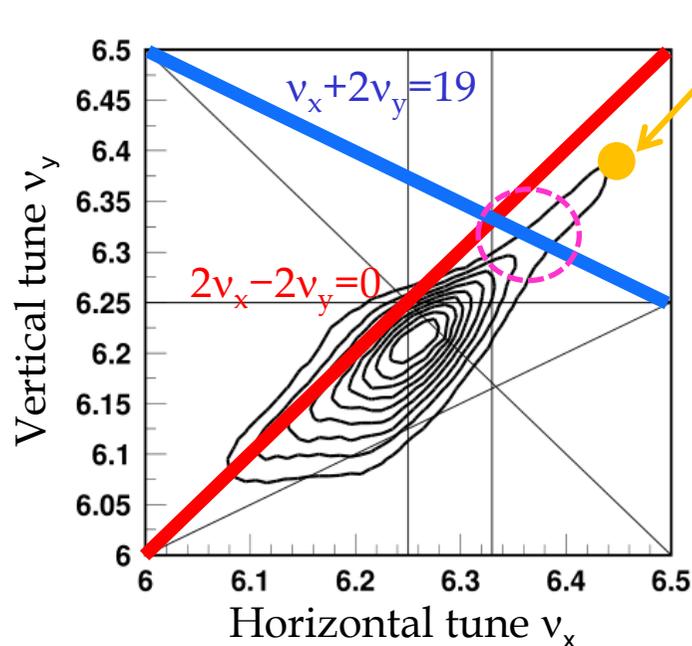
Transverse phase space coordinates
at the end of injection calculated
with $\varepsilon_{ip}=150\pi$ mm mrad



- ✓ エッジ収束がy方向に大きなビームハローを生成
- ✓ このハローが観測されたビーム損失の主原因
- ✓ QDTsを導入することでハロー生成は軽減され、ビーム損失低減につながった

ハローの発生メカニズム

- ✓ 数値シミュレーションから、ハロー生成は、主として以下の2つの共鳴によって引き起こされていることが判明



Operating bare tunes : (6.45, 6.38)

◆ $v_x + 2v_y = 19$ (非構造共鳴)

- クロマティシティー補正用の六極電磁石や偏向電磁石に内在する六極磁場成分が主ソース
エッジ収束で加速器の対称性が崩れた際に出現

- 和共鳴

- $2I_x - I_y = \text{一定}$

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を
y方向に引き起こす

◆ $2v_x - 2v_y = 0$ (構造共鳴)

- 六極磁場の2次効果や空間電荷八極成分が主ソース

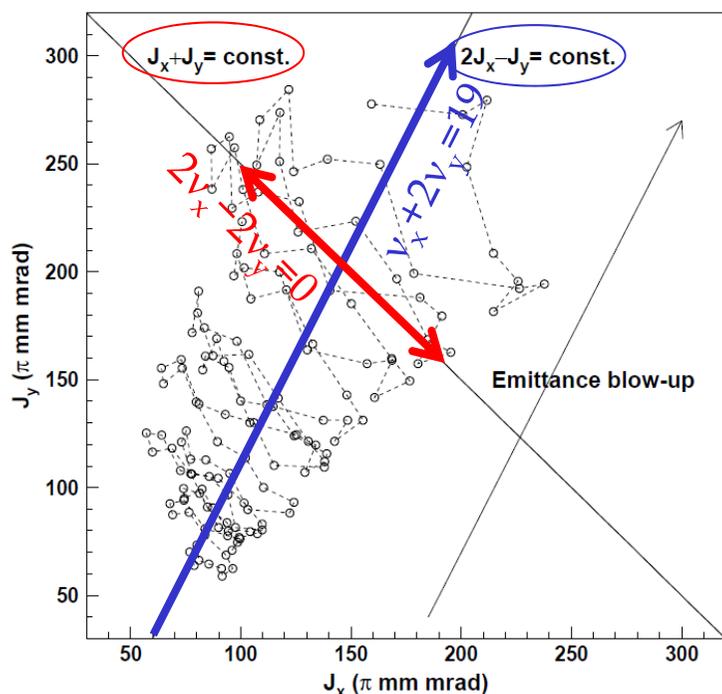
- 差共鳴

- $I_x + I_y = \text{一定}$

x方向とy方向のエミッタンス交換が発生する

ハロー粒子の典型的な一粒子運動

2D plot of turn-by-turn betatron actions for a beam halo particle



◆ $v_x + 2v_y = 19$ 共鳴

⇒ $2J_x - J_y = \text{const.}$ に沿って発生しているエミッタンス増大

◆ $2v_x - 2v_y = 0$ 共鳴

⇒ $J_x + J_y = \text{const.}$ と平行な方向に発生しているエミッタンス交換振動

- ✓ ハロー粒子の殆どが左図のような一粒子運動を通して生成されている
- ✓ $v_x + 2v_y = 19$ 共鳴によるエミッタンス増大がよりCritical この共鳴の効果で生成されるy方向のより大きなビームハローが、ロスの直接的な原因になっている
- ✓ QDTsを用いてエッジ効果を補正し、加速器の対称性を回復させた結果、この非構造共鳴の効果が軽減されてロス低減につながった

この解析から得られたもう一つの知見

- ✓ QDTsを用いて $v_x + 2v_y = 19$ 共鳴の効果を低減するだけでなく、エミッタンス交換の影響を同時に軽減できれば、ペイント範囲の更なる拡幅が実現できる可能性あり

150π ⇒ 200π mm mrad ??



Correlated paintingの代わりに、
Anti-correlated paintingの導入を検討

Anti-correlated paintingの導入

◆ Correlated painting:

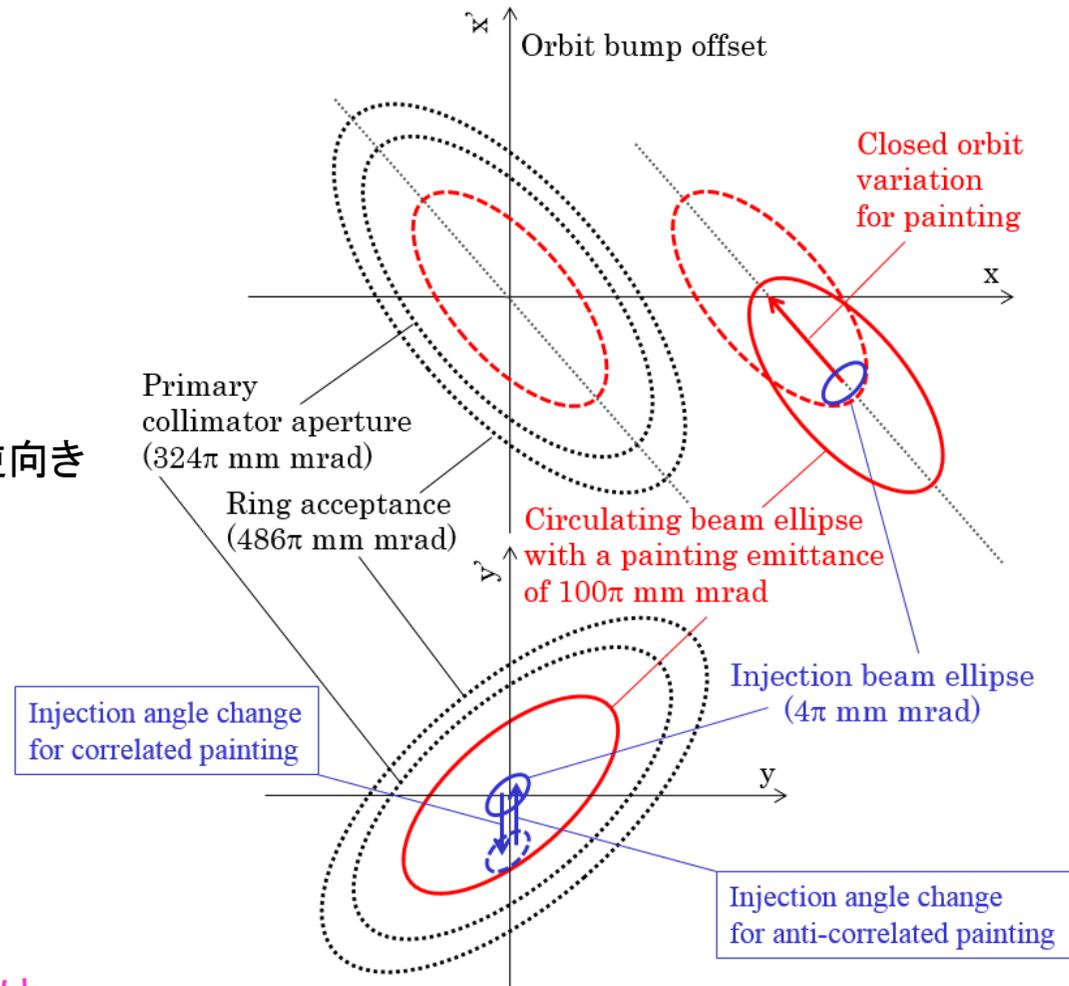
x方向: 中心⇒外側
y方向: 中心⇒外側

◆ Anti-correlated painting:

y方向のペイント過程が逆向き



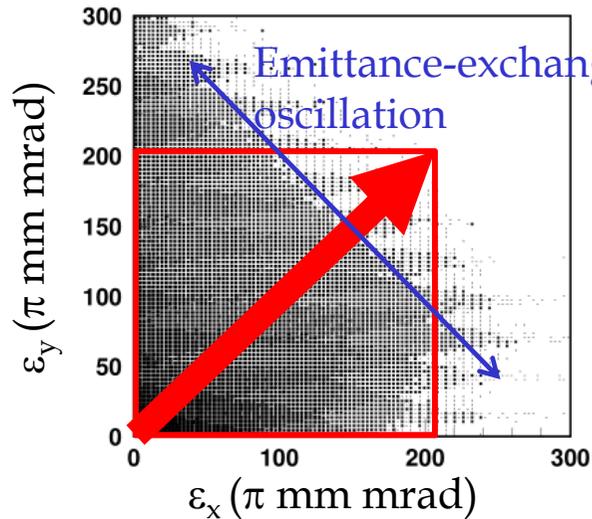
x方向: 中心⇒外側
y方向: 外側⇒中心



✓ Anti-correlated paintingは、
エミッタンス交換の影響を軽減するうえで幾つかの利点を持つ

Correlated painting vs Anti-correlated painting

◆ Correlated painting

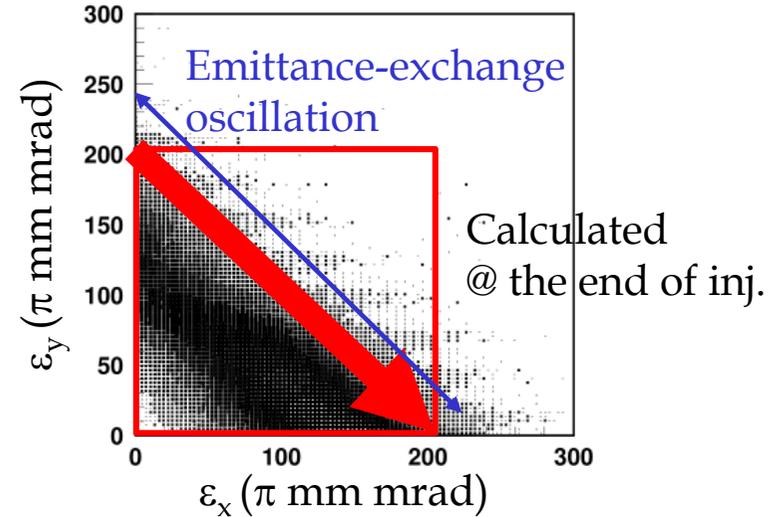


- ✓ ペイントとエミッタンス交換振動の方向が直交



エミッタンス交換が、直接、
ビームエミッタンスの増大につながる

◆ Anti-correlated painting



- ✓ ペイントとエミッタンス交換振動の方向が同じ



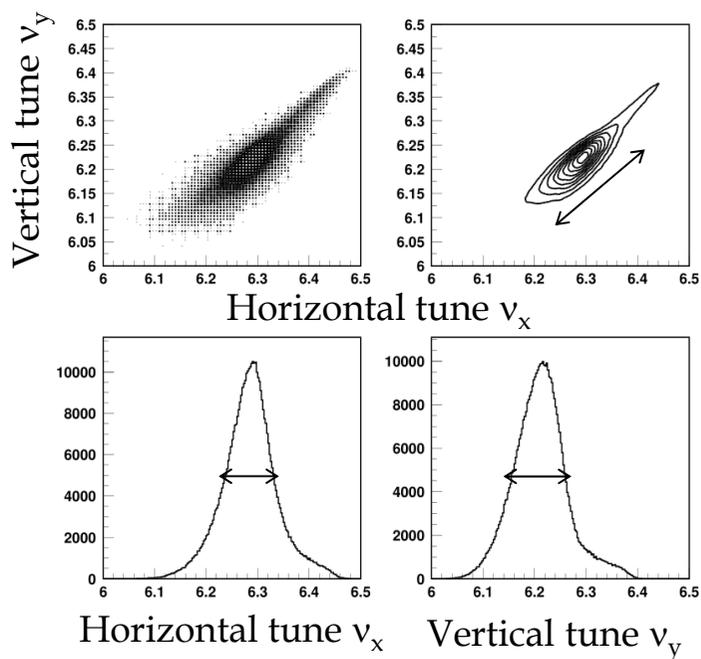
エミッタンス交換が発生しても、
ビームエミッタンスの増大につながらない

- ✓ Anti-correlated painting は、エミッタンス交換の影響を受けにくい

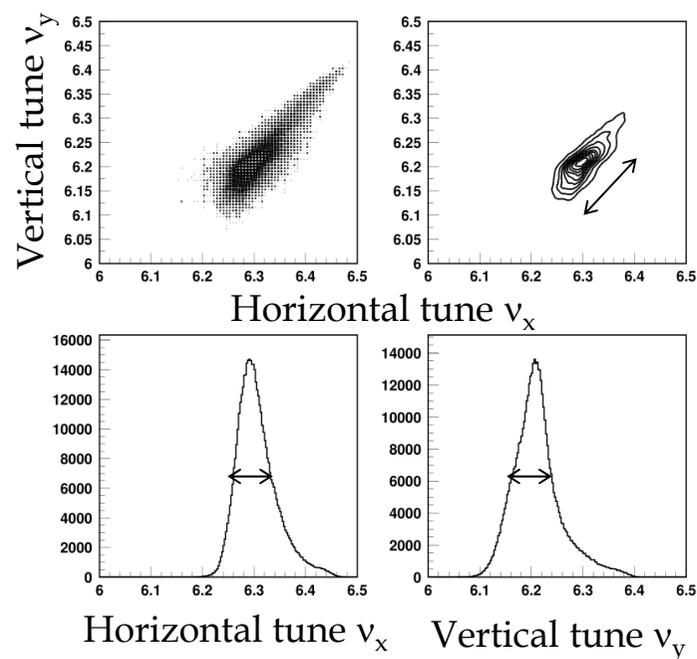
Correlated painting vs Anti-correlated painting

- ✓ Anti-correlated painting はKV-likeな分布を作る
 ⇒空間電荷の非線形成分、特に、 $2\nu_x-2\nu_y$ 共鳴の主ソースである
 八極成分を低減できるので、共鳴それ自身の強度を緩和できる

◆ Correlated painting



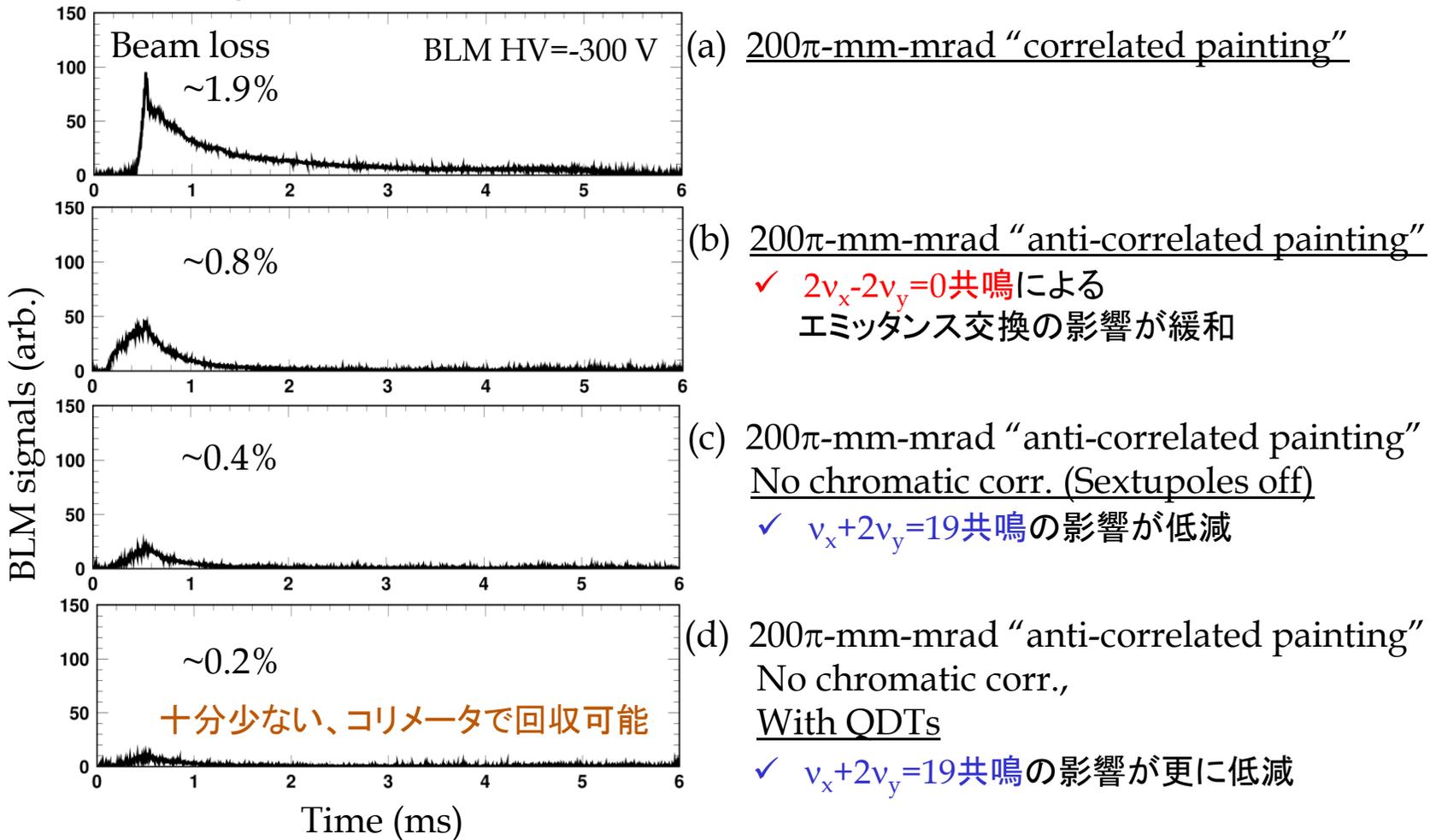
◆ Anti-correlated painting



以上の考察を踏まえ、1 MWビームを使って更なるペイント範囲の拡幅を試みた
 200π mm mradペイントを試した

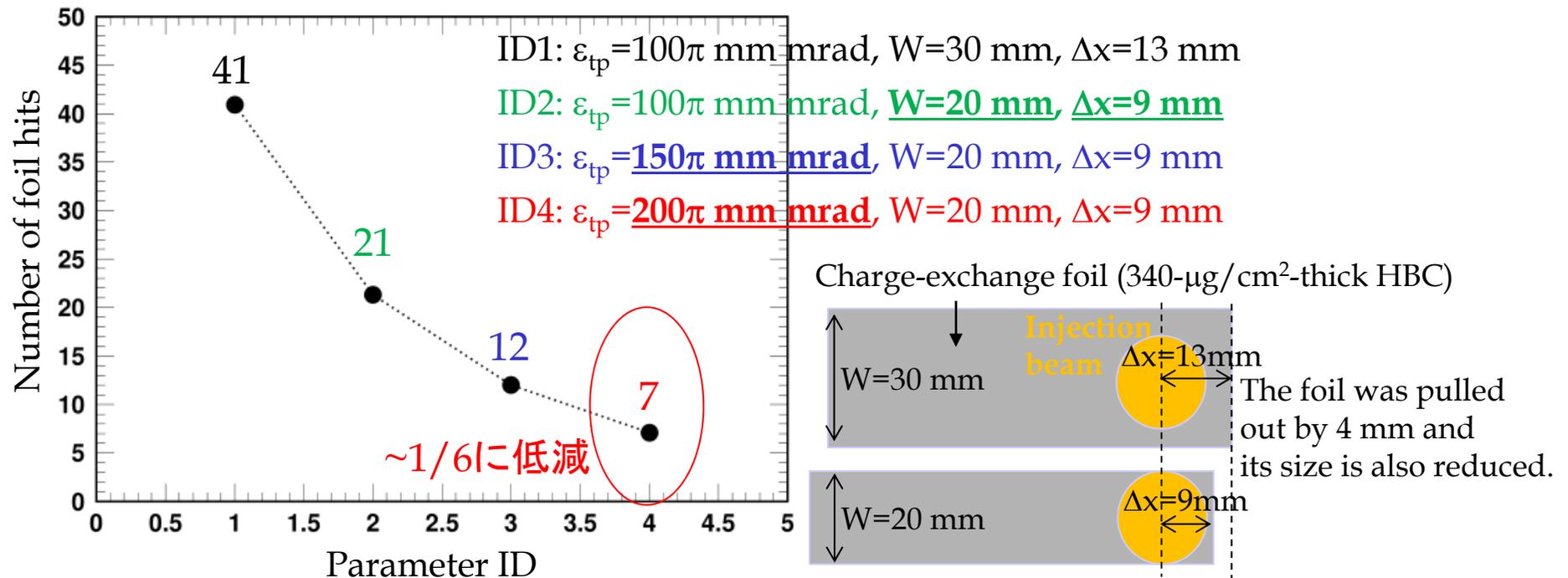
1 MW試験 : 200 π -mm-radペイント入射の実現

BLM signals at the collimator section



- ✓ QDTsとAnti-correlated paintingを併用することで、
 付加的なビーム損失を抑制しつつペイント範囲を2倍に拡幅できた
- ✓ フォイル上での大角度散乱に由来したコリメータで回収不可能な
 ビーム損失成分を大幅低減できる見通しがたった

foil hit 回数の低減



- ✓ ペイント範囲の拡幅およびフォイルのサイズや位置の再調整により、フォイル散乱回数は~1/6に大幅低減された
- ✓ フォイル近傍の残留線量は、1 MWの連続運転を行った場合でも、十分許容範囲と言えるレベル ($\ll 10\text{mSv/h}$)にまで抑え込める見通しが立った

(7) Summary

- ◆ RF陽極電源増強後の2015年10月から1MWビーム調整を再開した
- ◆ その後に取り組んだ一連のビーム調整により、
1 MW運転時のビーム損失は、十分に許容範囲内と言えるレベルにまで大幅低減された
- ◆ 現在、MLFの中性子生成標的の不具合により、
利用運転時のビーム出力は200 kWに制限されているが、
RCSのビームコミッショニングは、1 MW設計出力での連続運転の実現に向かって着実に進展している
- ◆ 今後は、ロス低減だけでなく、ビーム品質の向上等も考慮した
ビーム調整を継続していく予定