J-PARC MRの
ビームコミッショニング

安居 孝晃 (KEK/J-PARC)

ムーンショット目標10

奥野プロジェクトワークショップ

2025年7月10日, 和光

本発表の流れ

1. イントロダクション

2. ビームロス低減のためのメインシナリオ
   2025年5月のビーム試験結果

3. ビームロス低減のための新シナリオ
   “Under 21 optics”

4. まとめ

本発表の流れ

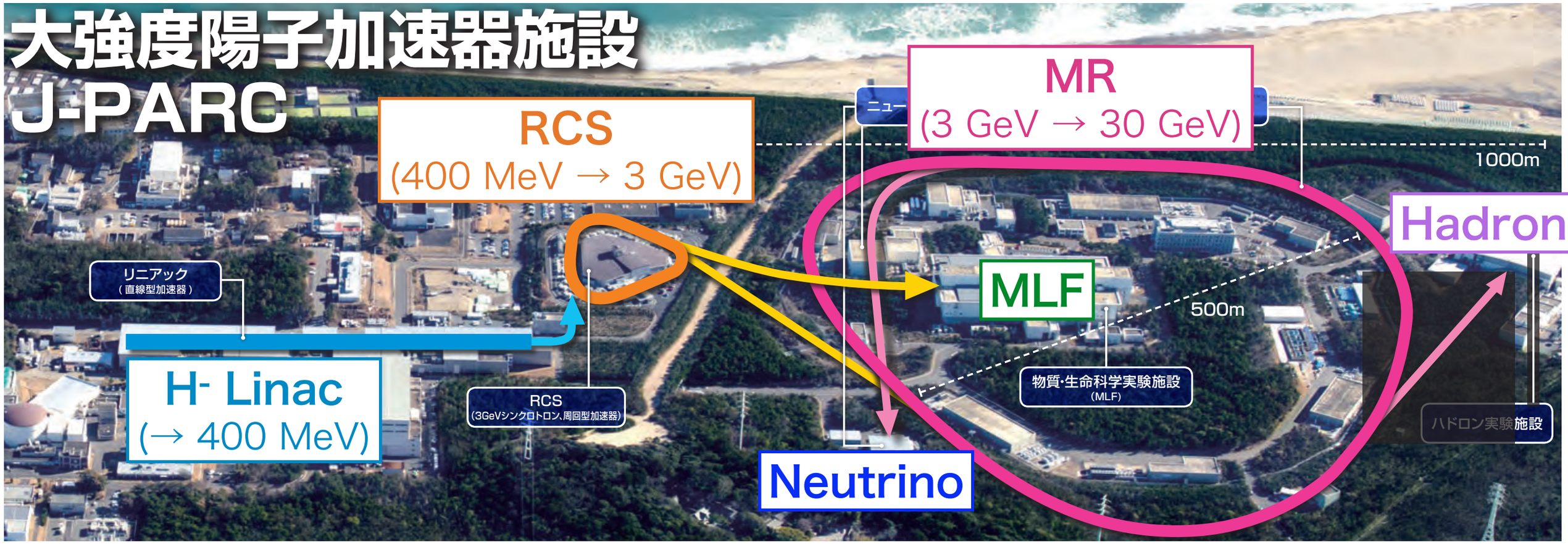
1. イントロダクション

2. ビームロス低減のためのメインシナリオ
　　2025年5月のビーム試験結果

3. ビームロス低減のための新シナリオ
　　“Under 21 optics”

4. まとめ

J-PARC MR

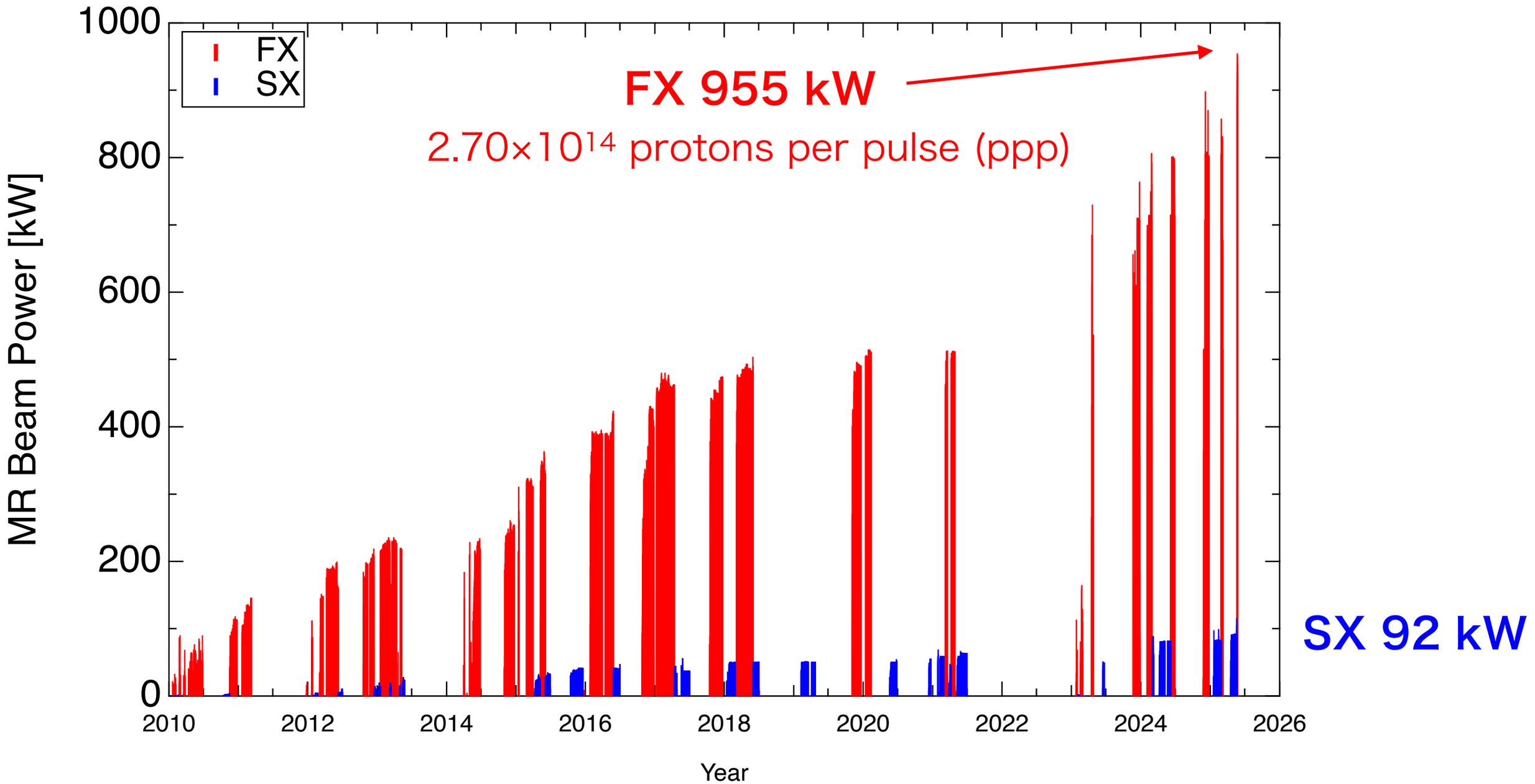


J-PARC MRでは大強度陽子ビームをニュートリノ・ハドロン実験に供給

ニュートリノ運転：速い取り出し(FX), 1.3 MW目標

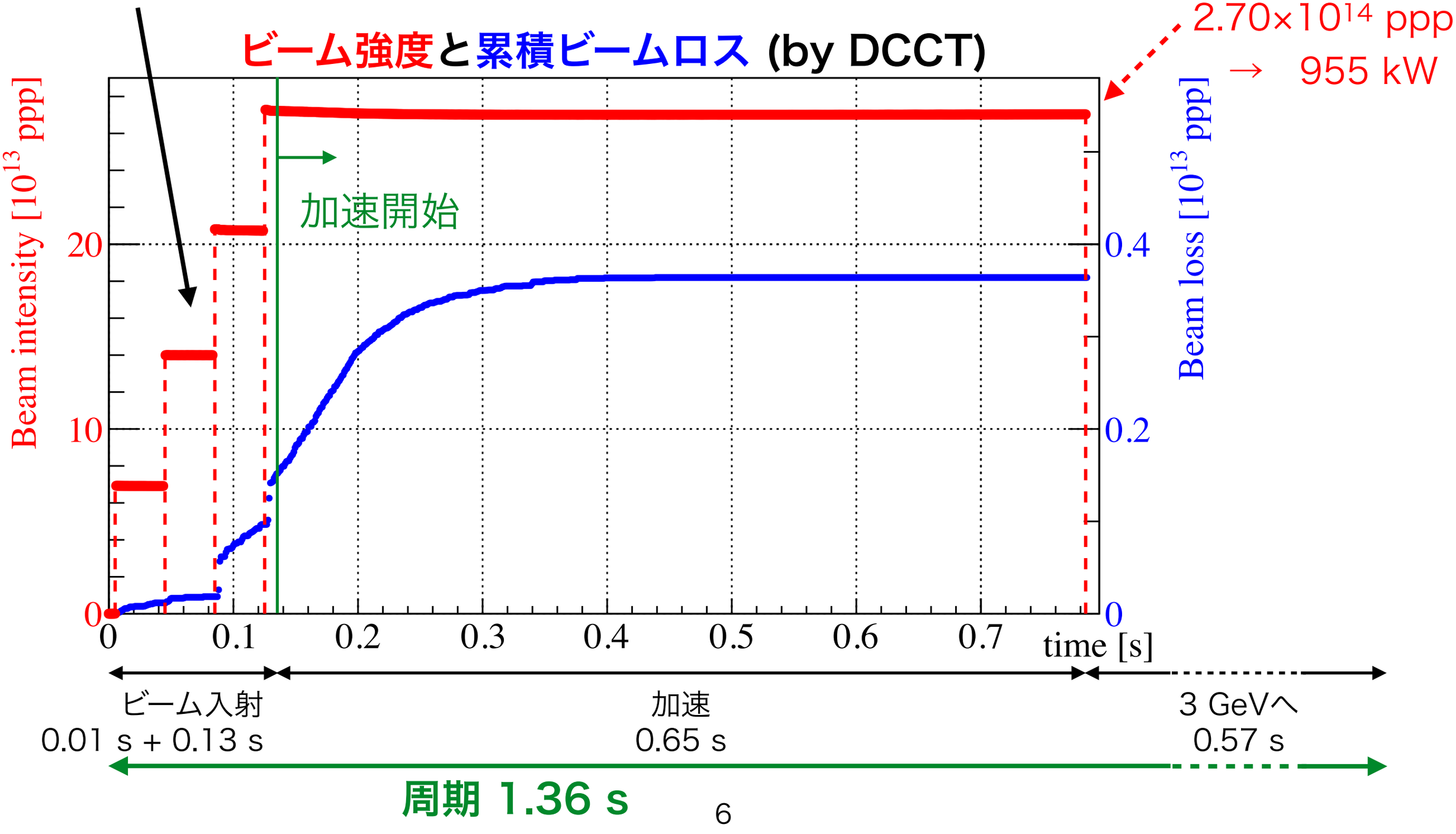
ハドロン運転：　　遅い取り出し(SX), 100 kW目標

MR beam power history



FX 955 kW相当ビーム

入射：2バンチ×4回



ビームパワー増強計画(FX)

Power = Energy(30 GeV) × **Number of protons** / **Cycle time**

JFY2021	515 kW	2.66×10^{14} ppp	2.48 s
JFY2022	長期シャットダウン		
Present	955 kW	2.70×10^{14} ppp	1.36 s
Future	1300 kW	3.3×10^{14} ppp	1.16 s

ppp … protons per pulse

ビーム強度を増強するためには…

- ハードウェアアップグレード
- **ビームロス低減　←――　today’ s talk**
- ビームロスの局所化効率の改善

対称性と共鳴の分類

FX運転において、ビームロスは共鳴によって引き起こされる

<u>MRは3回対称</u>であり、対称性で共鳴 $m\nu_x + n\nu_y = l$ を分類する

	共鳴源が3回対称	**共鳴源が非対称**
主な共鳴源	6極磁場 空間電荷効果	磁場勾配・アライメントエラー (入出射機器の漏れ磁場)
特徴	$l = 3l'$ の共鳴を励起(構造共鳴) $l \neq 3l'$ の共鳴は相殺	l に関係なく励起

一般に**<u>構造共鳴は、非構造共鳴より強い</u>**

チューン拡がりと共鳴

実線：構造共鳴

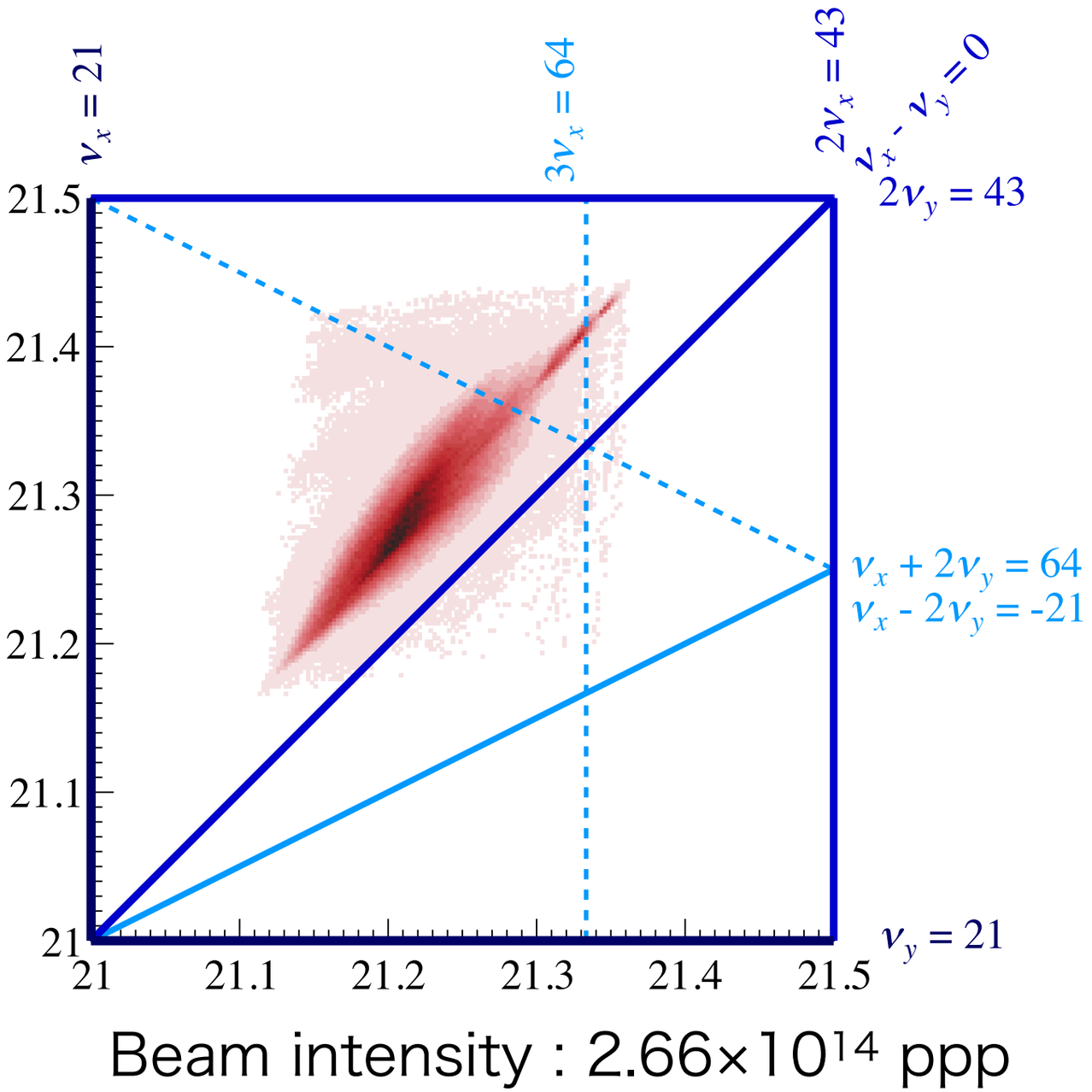
点線：非構造共鳴

赤：入射10 ms後のチューン拡がり

入射直後は倍程度大きい！

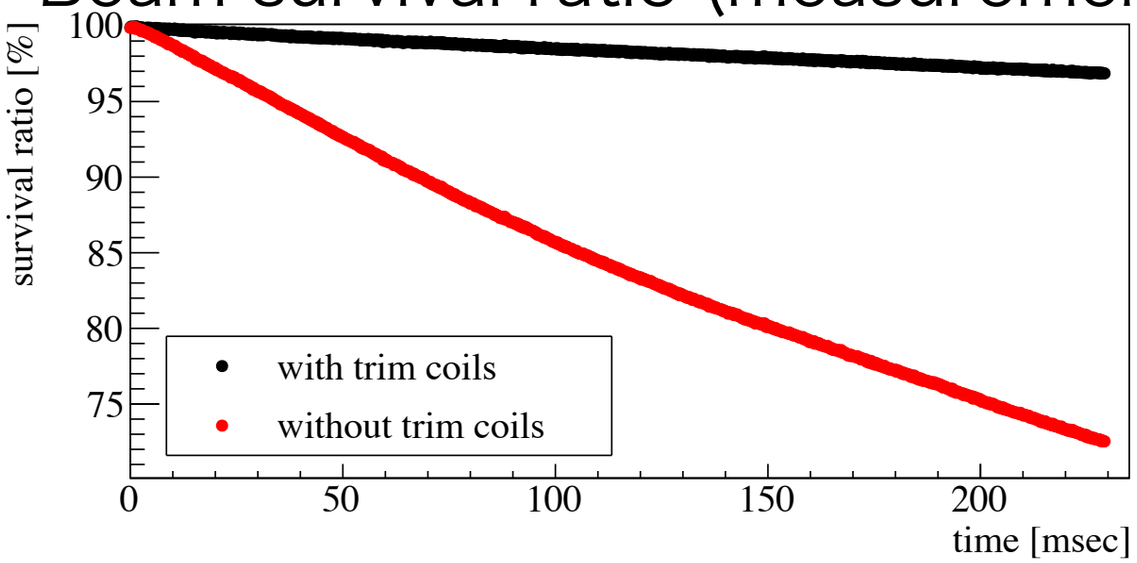
最も強い共鳴は整数共鳴&空間電荷の構造共鳴である$\nu_x = 21$と$\nu_y = 21$

これらを避けると必然的に
六極磁場が励起する3次非構造共鳴
$3\nu_x = 64$と$\nu_x + 2\nu_y = 64$に跨る



3次非構造共鳴の影響と対策

Beam survival ratio (measurement)

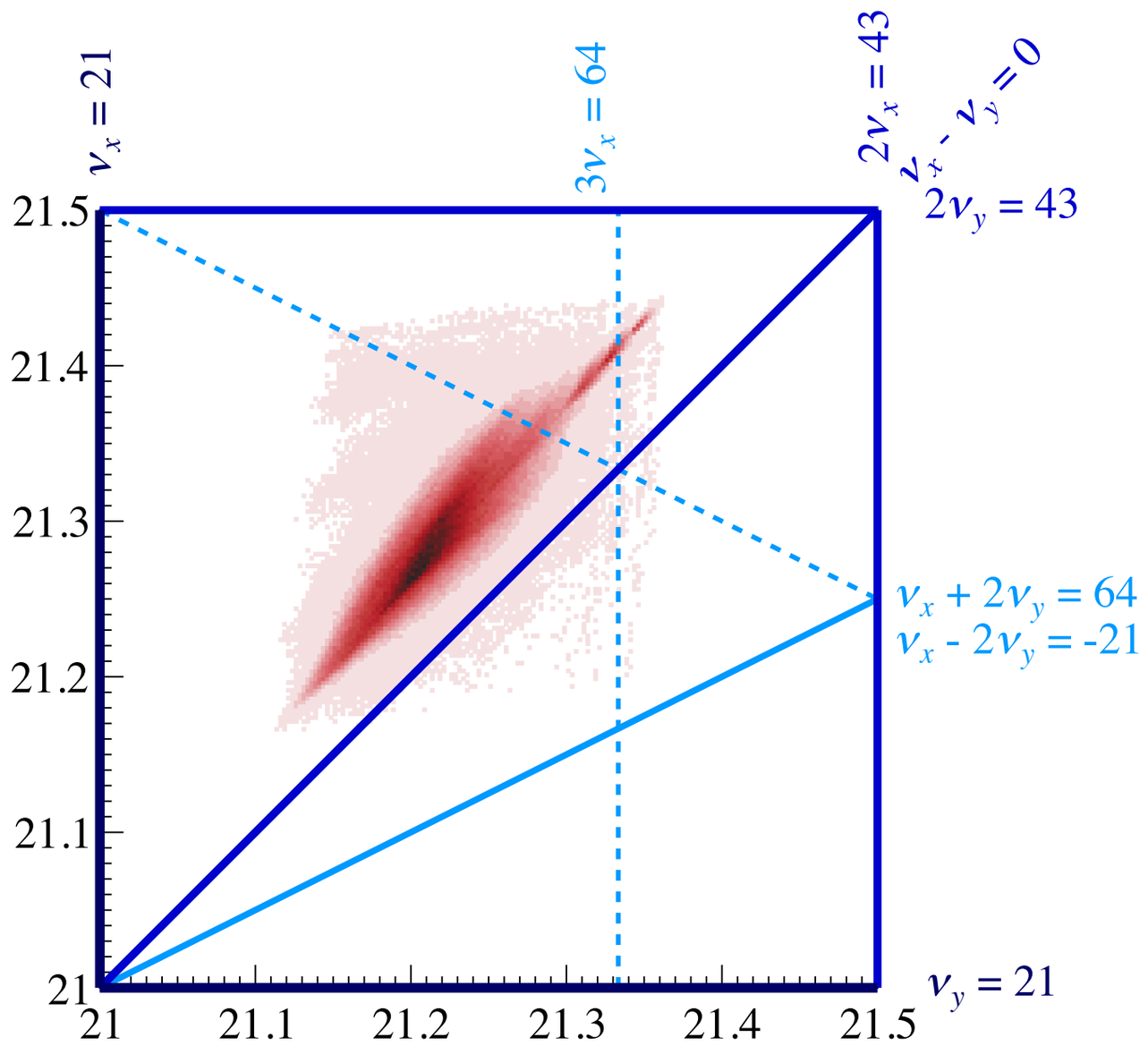


$$G_{3,0,n} = \frac{\sqrt{2}}{24\pi} \oint \beta_x^{3/2} K_2 e^{i[3\chi_x - (3\nu_x - n)\frac{2\pi s}{C}]} \mathrm{d}s,$$

$$G_{1,2,n} = \frac{\sqrt{2}}{8\pi} \oint \beta_x^{1/2} \beta_y K_2 e^{i[\chi_x + 2\chi_y - (\nu_x + 2\nu_y - n)\frac{2\pi s}{C}]} \mathrm{d}s,$$

3次非構造共鳴への対策として
六極磁石に巻かれた補正(トリム)コイルを4ヶ所独立電源で通電

同時補正を実現している



Beam intensity : 2.66×10^{14} ppp

本発表の流れ

1. イントロダクション

2. ビームロス低減のためのメインシナリオ
2025年5月のビーム試験結果

3. ビームロス低減のための新シナリオ
“Under 21 optics”

4. まとめ

共鳴対策シナリオ

構造共鳴対策：位相進みのバランスを変えた”new-arc optics”適用

- 六極磁場が励起する3次構造共鳴$\nu_x - 2\nu_y = -21$を補正

  T. Yasui et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 013G01 (2022)

- 空間電荷が励起する8次構造共鳴$8\nu_y = 171$を抑制

  T. Yasui and Y. Kurimoto, Phys. Rev. Accel. Beams, 25, 121001 (2022)

  - 空間電荷が励起する4次構造共鳴$2\nu_x - 2\nu_y = 0$も弱め

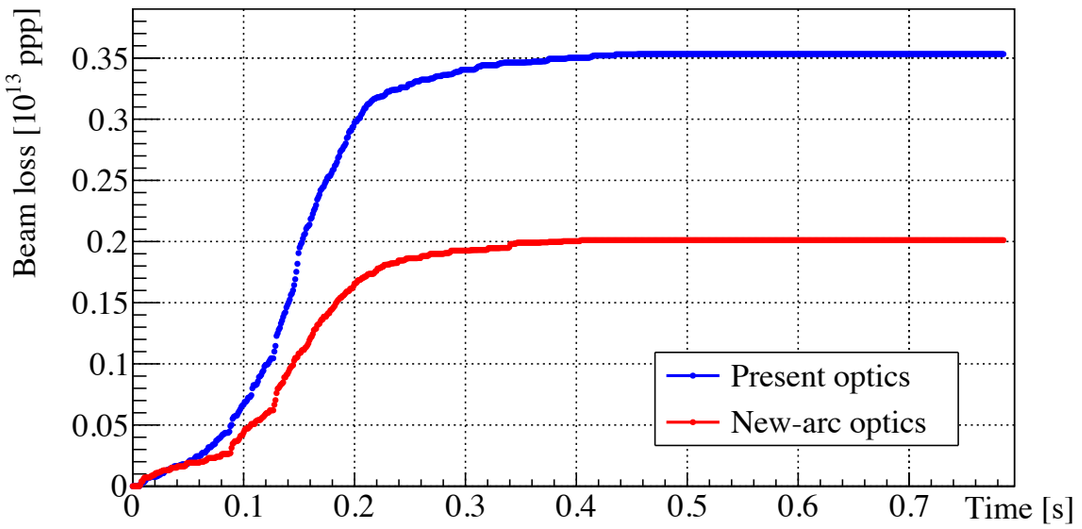
非構造共鳴対策：六極磁石のトリムコイル電源の台数増加

- off-momentum粒子についても3次非構造共鳴補正
- 最終的には六極トリムコイル電源を24台に

2025年5月にビーム試験を実施

2025年5月のビーム試験結果

構造共鳴対策：位相進みのバランスを変えた”new-arc optics”適用



同強度で比較し、new-arc opticsの優位性を確認

次のFX利用運転からはnew-arc opticsを適用予定

非構造共鳴対策：六極磁石のトリムコイル電源の台数増加

六極トリムコイル電源4台→8台としたが、ビームロス変わらず

12台, 24台と増やせば違いが見えるのか…？

本発表の流れ

1. イントロダクション

2. ビームロス低減のためのメインシナリオ
   2025年5月のビーム試験結果

3. ビームロス低減のための新シナリオ
   “Under 21 optics”

4. まとめ

さらなるビームロス低減に向けて

六極トリムコイル24台体制はまだではあるが、
メインシナリオの大まかな検証を終えた今、
FX 1.3 MW運転実現に向けて次なるシナリオを考える必要がある。

実測におけるビームロスはシミュレーションよりも明らかに多いため、
このギャップを理解する必要がある。

まずは磁場エラーのない理想的なシミュレーションを行った。
エラーなしシミュレーションでは構造共鳴のみが影響する。

実験ではtuneの微調整には直線部の四極磁石磁場のみを変更する。
シミュレーションでも同じ要領でtune scanを行った。

シミュレーションツール・条件

シミュレーションツール

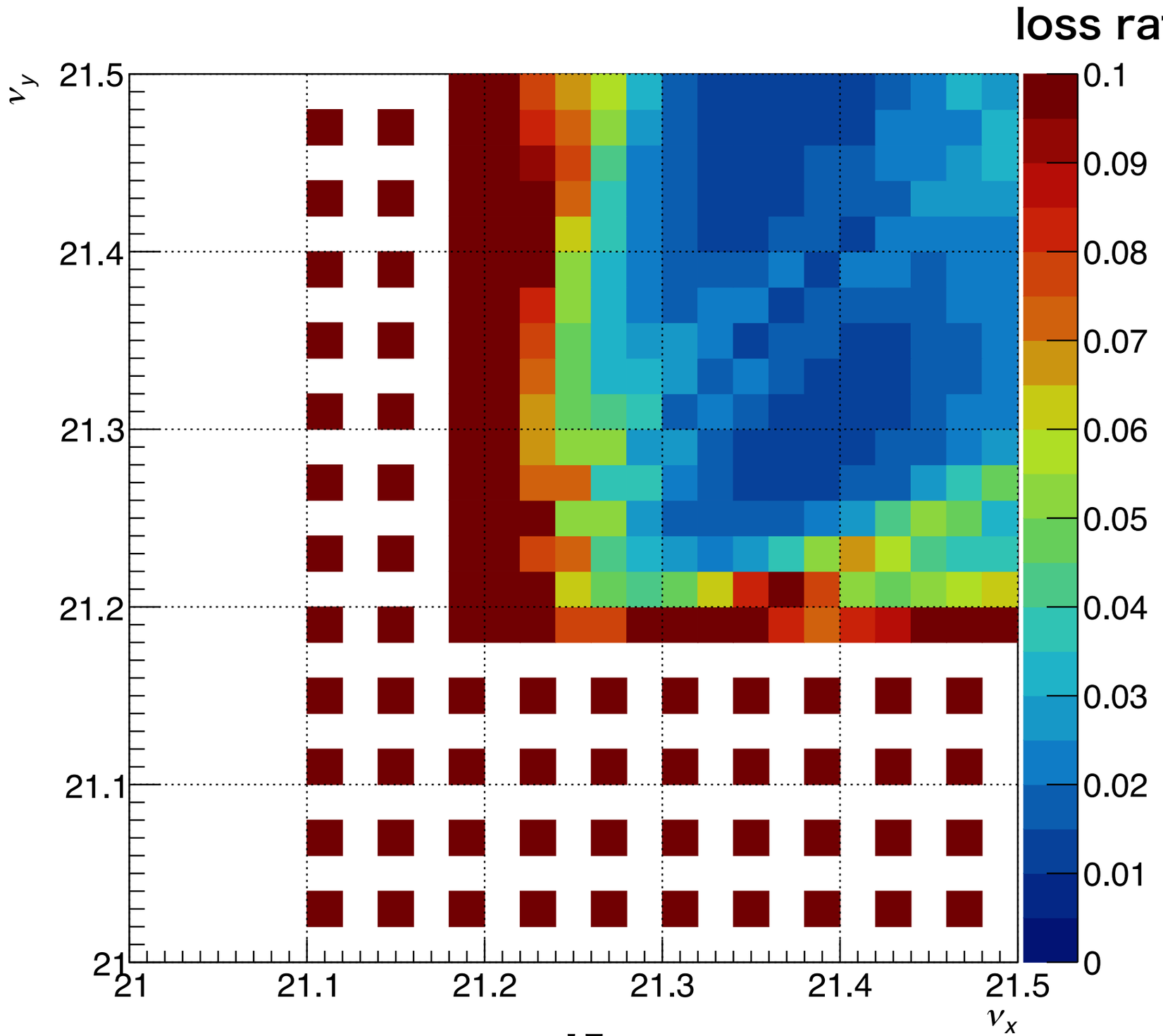
- SCTR (2.5次元 PICコード)
- メッシュ … 数：128×128×128
  サイズ：(0.85 mm, 0.85 mm, 1.37 m)
- 空間電荷の計算間隔：約2 m (ただし四極では約0.5 m)
- マクロ粒子数：$2^{16} \fallingdotseq$ 26万個 (特に記載がない場合)

シミュレーション条件

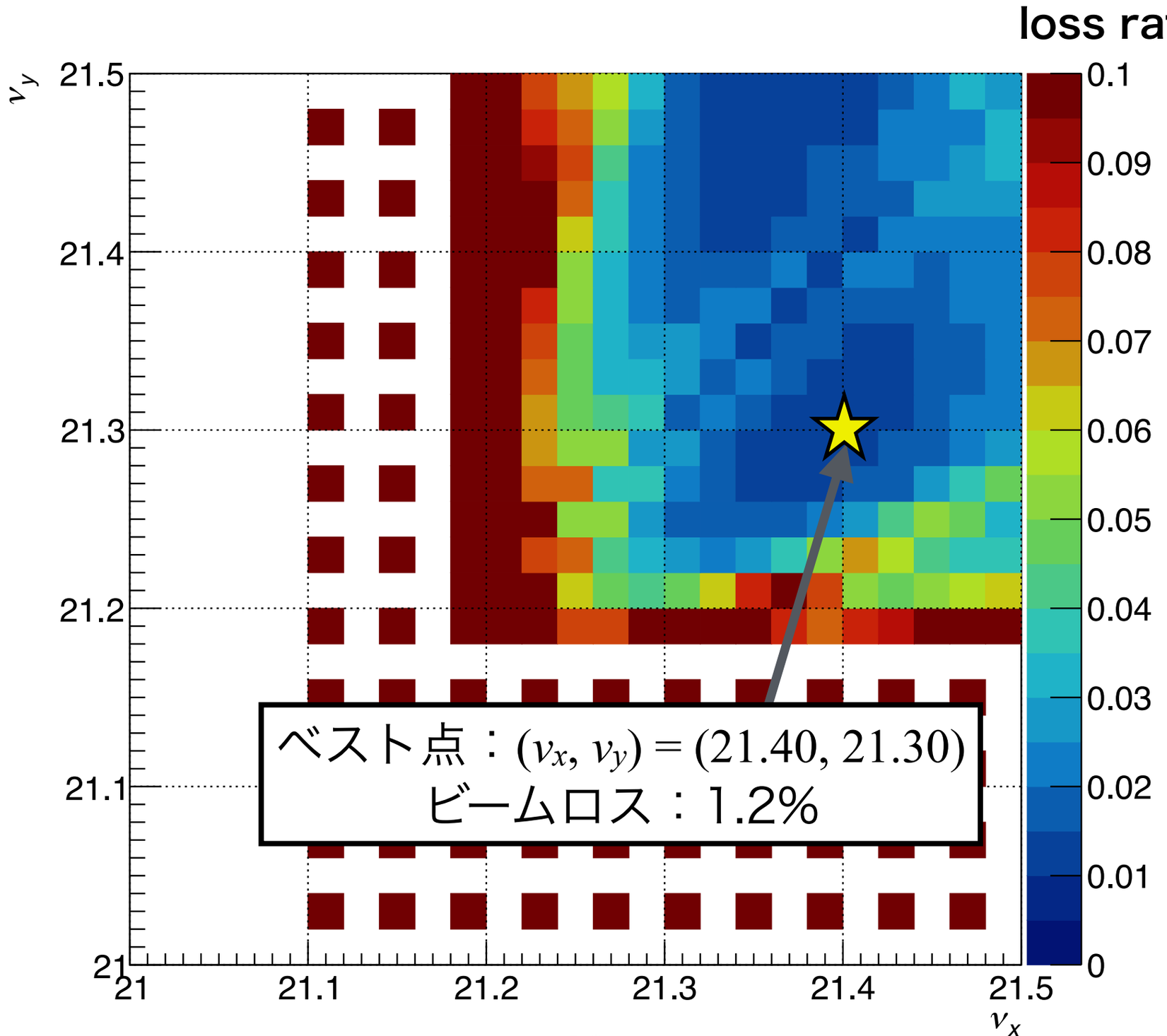
1.3 MW想定で、入射期間130 ms(24100 turn)のビームロスを計算

- 入射強度：4.34×10^{13} ppb (シングルバンチ)
- 入射横エミッタンス (ε x, ε y) = (5.13π, 5.39π) mm mrad
- 入射横方向分布：ガウシアンビームを59π mm mradでカット
- 入射バンチングファクター = 0.2
- MRコリメータ：HVとも60π mm mrad, 散乱なし

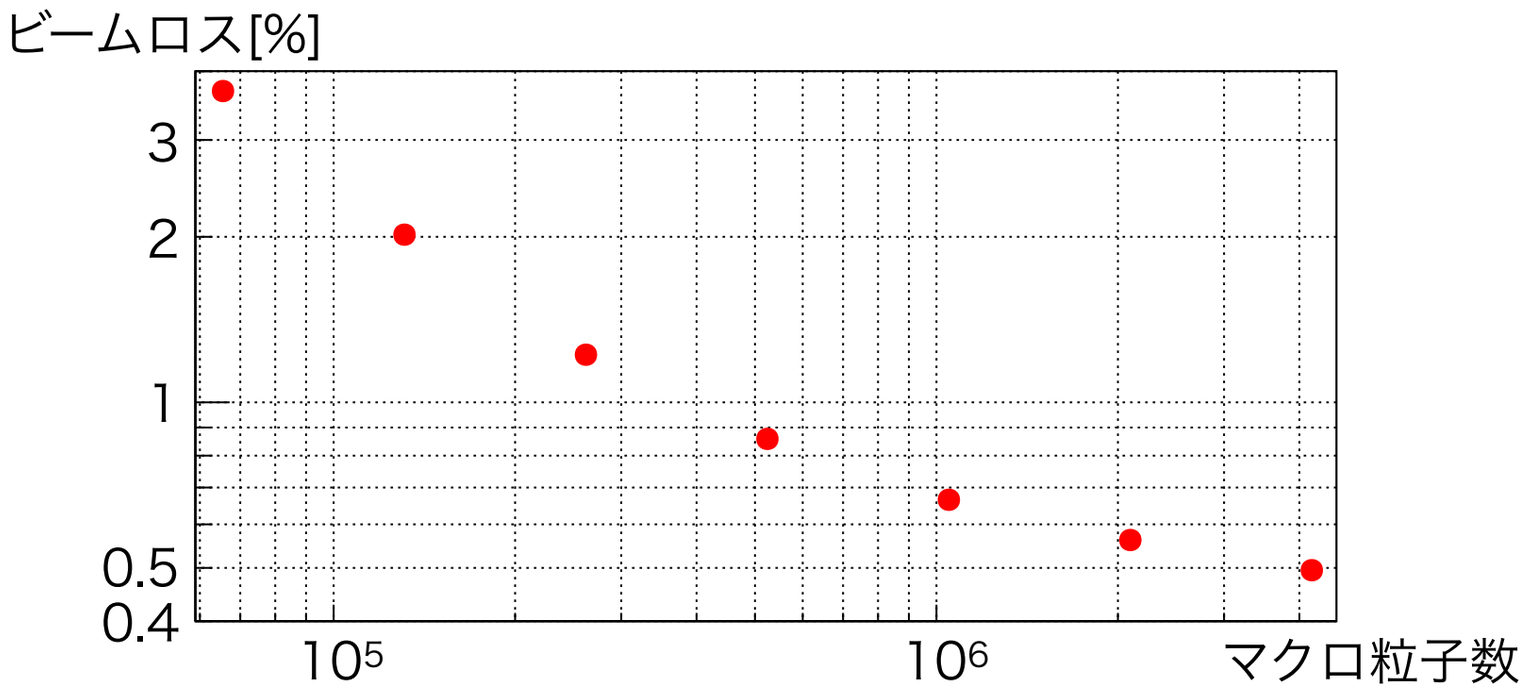
New-arc optics (磁場エラーなし)



New-arc optics (磁場エラーなし)



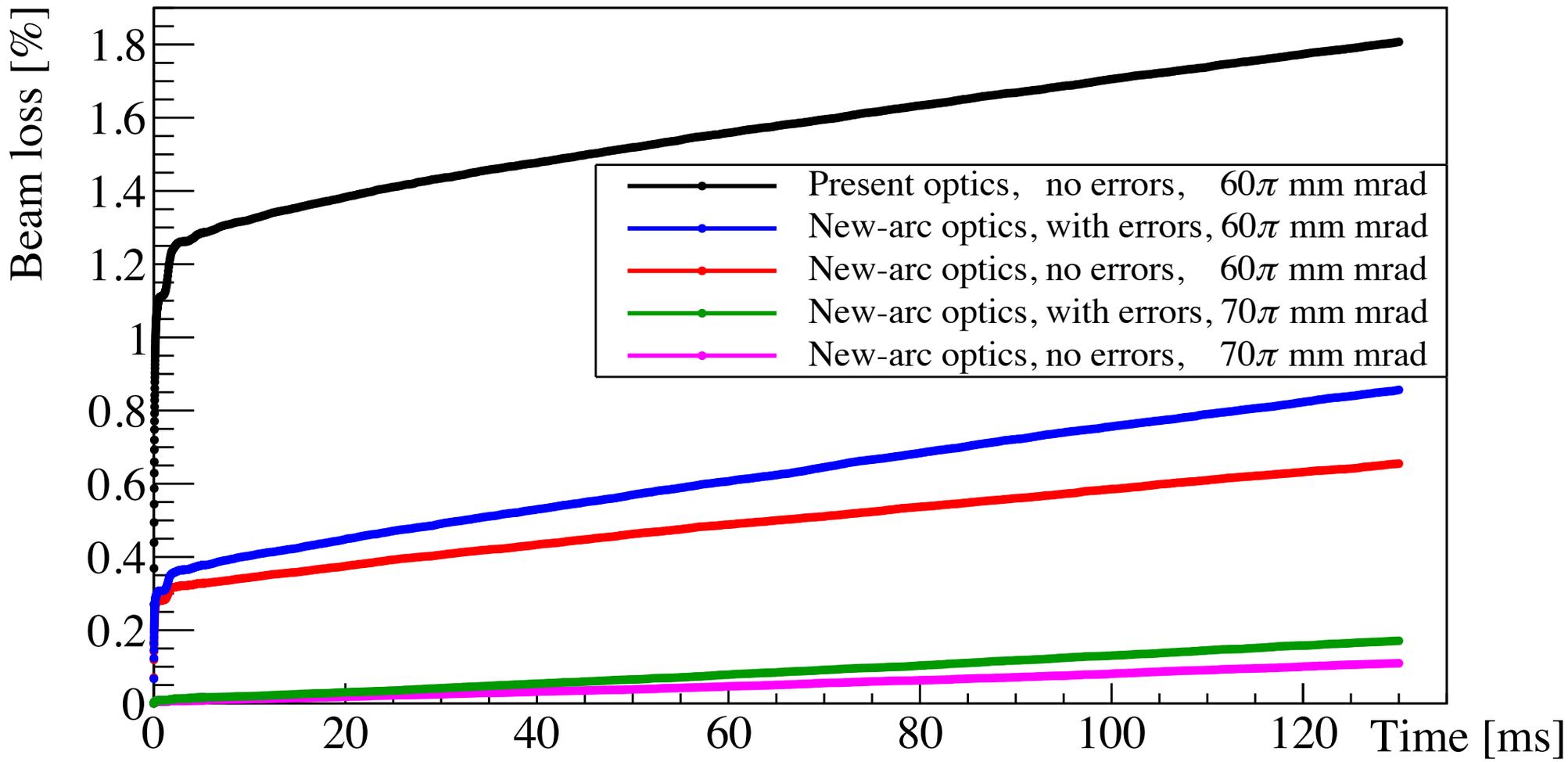
マクロ粒子数依存性



マクロ粒子数26万個では1.2%ロスであったが、
実は400万個に増やせばビームロスは0.5%未満にまで減る。
これは既に1.3 MW運転でもacceptableなレベルである。

実測では、この8割の強度で～1%のビームロス
磁場エラーが励起する非構造共鳴がビームロスの主要因？

100万マクロ粒子シミュレーション



時間変動しない一定の磁場エラーを考えると影響は大きくない

実際トリム六極電源を4台→8台に増やしてもロスは減らなかった

しかし実際には主電磁石の電源には電流リップルがある

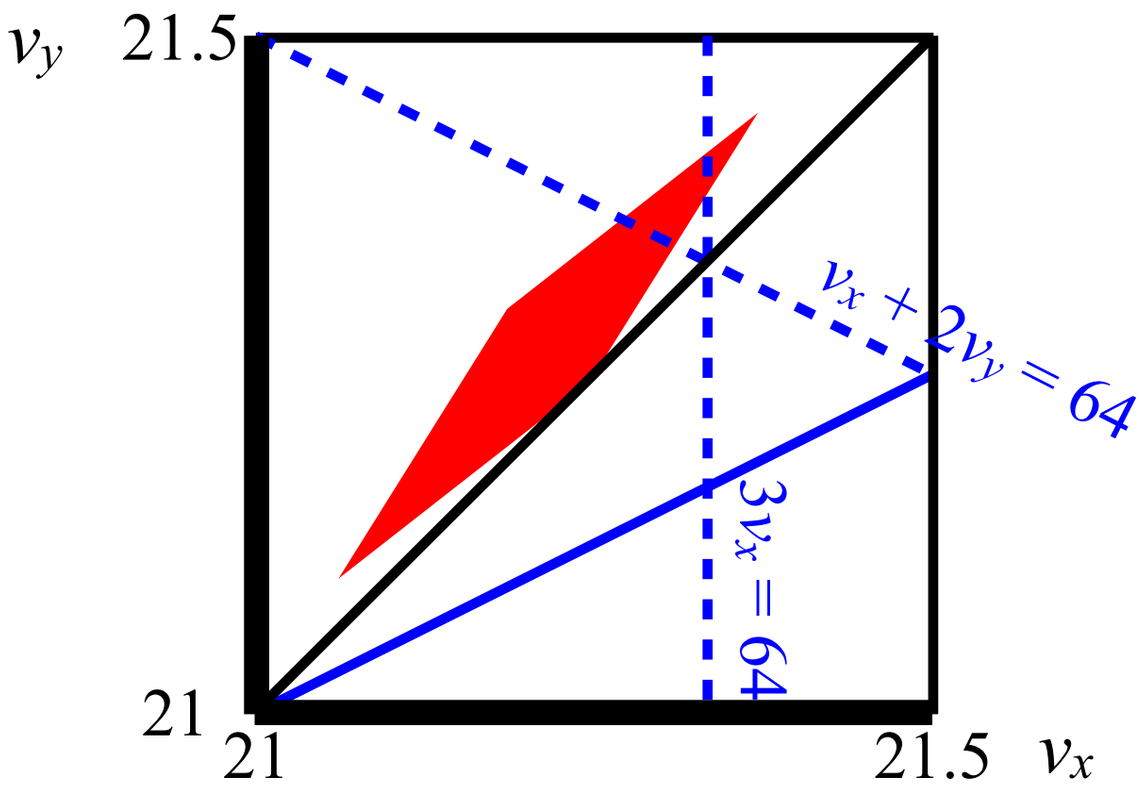
→　非構造共鳴の強さも時間変動してビームロスに繋がっている？

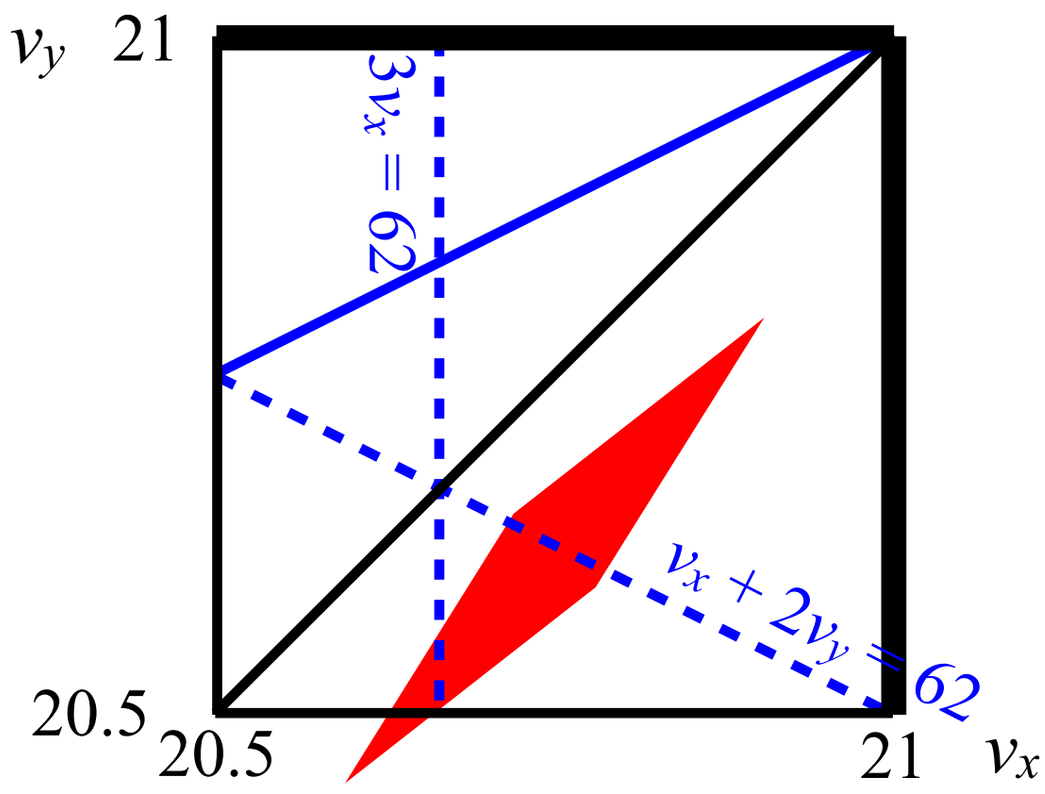
Under 21 optics

主電磁石電源の電流リップルによって3次共鳴の強さが変動する場合、
トリム六極電源を増設しても共鳴補正できない。

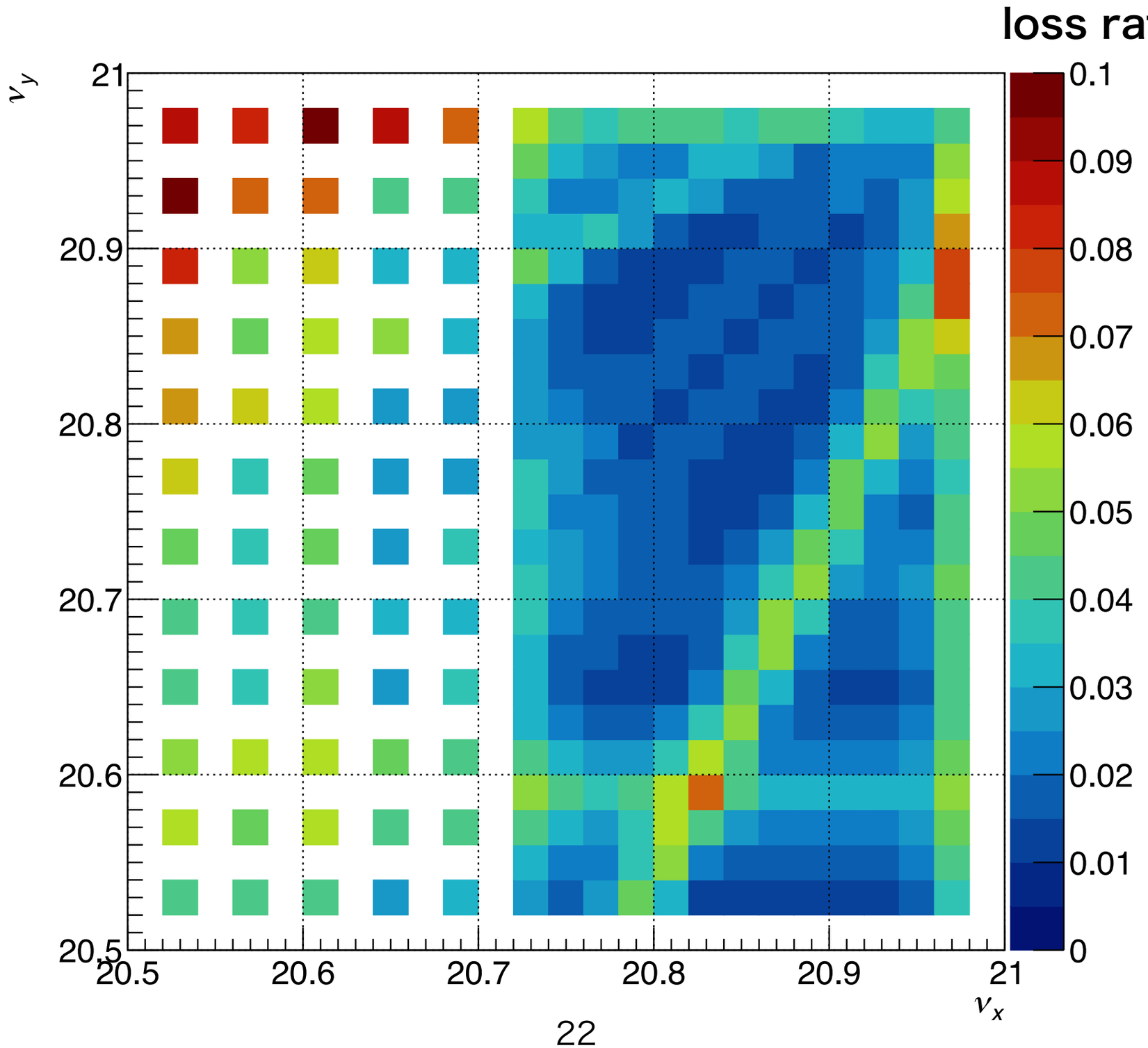
しかし$21 < \nu_x, \nu_y < 21.5$領域は$\nu_x = 21$や$\nu_y = 21$が強いため$\nu_x, \nu_y > 21.25$
にしないといけない $\rightarrow$ $3\nu_x = 64$と$\nu_x + 2\nu_y = 64$を避けられない。

一方$20.5 < \nu_x, \nu_y < 21$領域はあまり強い共鳴はなさそうで、
3次非構造共鳴も$\nu_x + 2\nu_y = 62$のケアだけで良い?

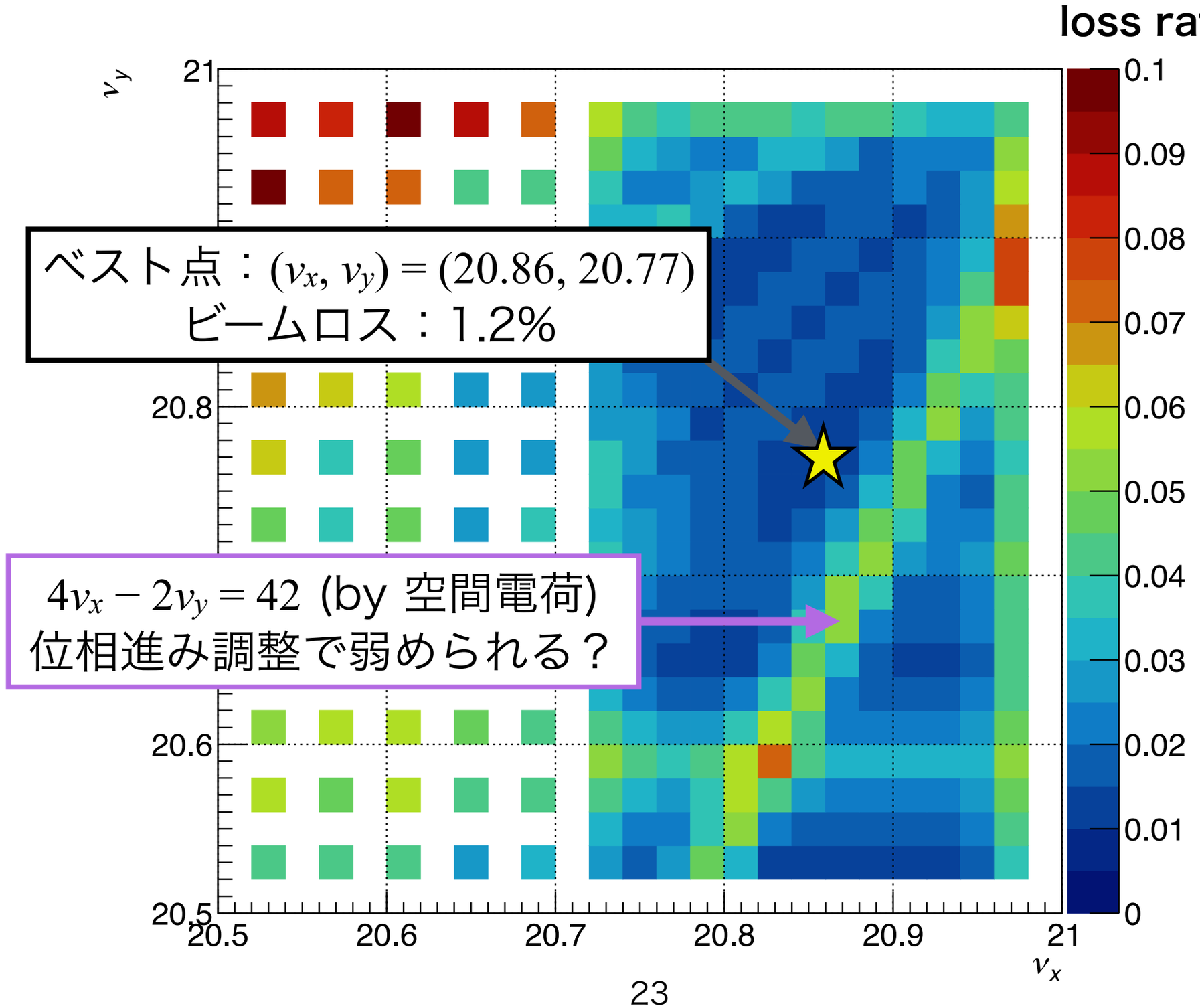




Under 21 optics (磁場エラーなし)



Under 21 optics (磁場エラーなし)



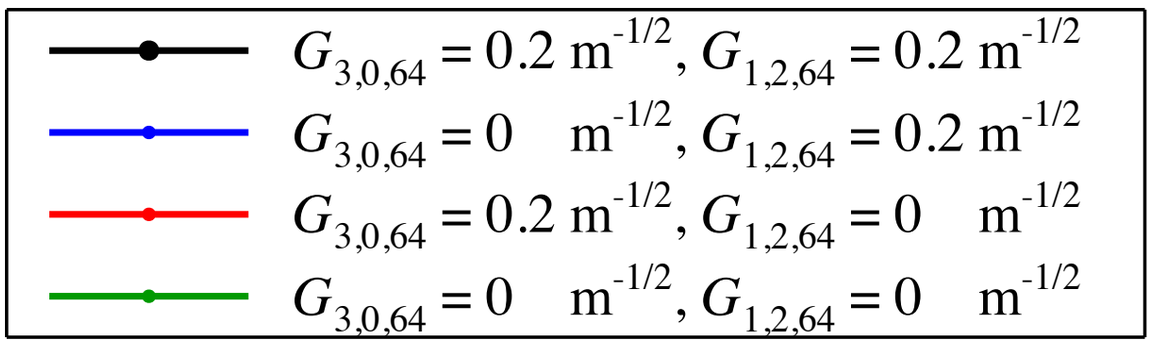
3次非構造共鳴の影響

$21 < \nu_x, \nu_y < 21.5$領域については、3次共鳴の強さは
六極のトリムコイルに流している電流を用いて計算していた。

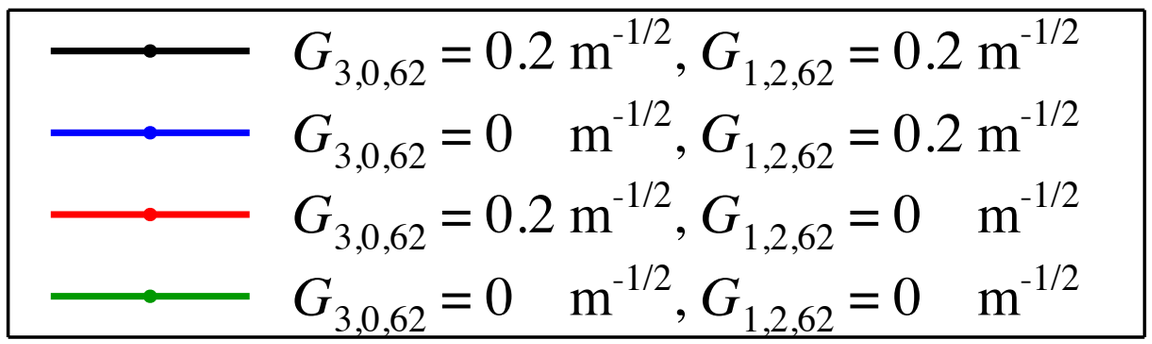
しかし$20.5 < \nu_x, \nu_y < 21$領域についてはデータがない。

そこでそれぞれ共鳴の強さが以下になるようなtoy modelを構築した。

$(\nu_x, \nu_y) = (21.40, 21.30)$
$(21 < \nu_x, \nu_y < 21.5$領域のベスト$)$

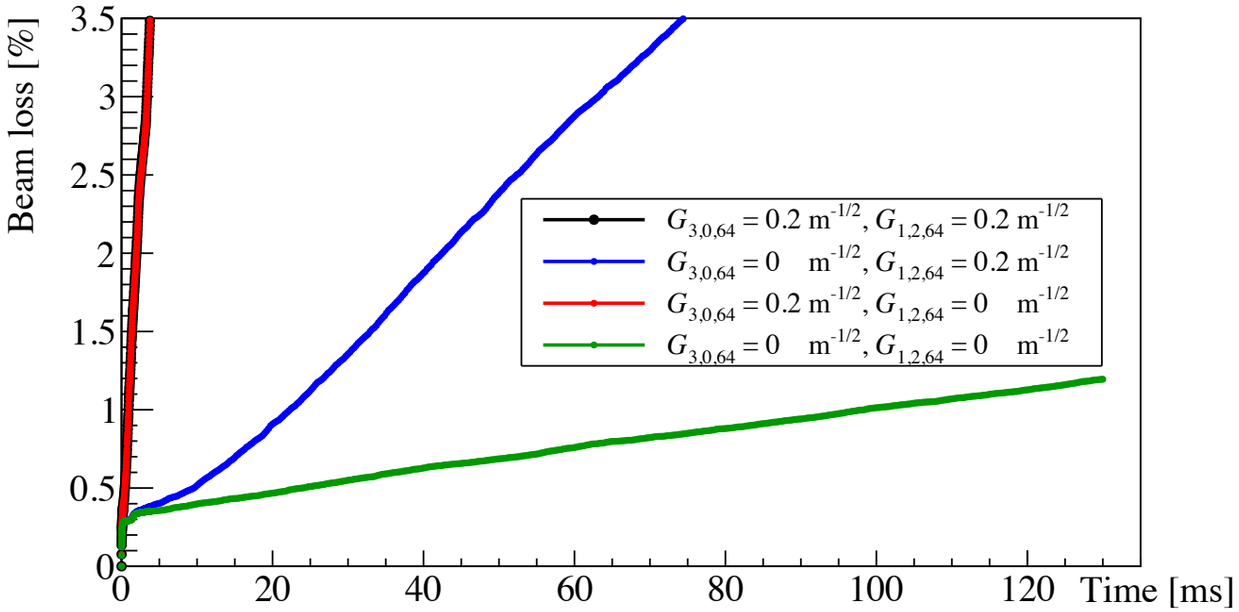


$(\nu_x, \nu_y) = (20.86, 20.77)$
$(20.5 < \nu_x, \nu_y < 21$領域のベスト$)$

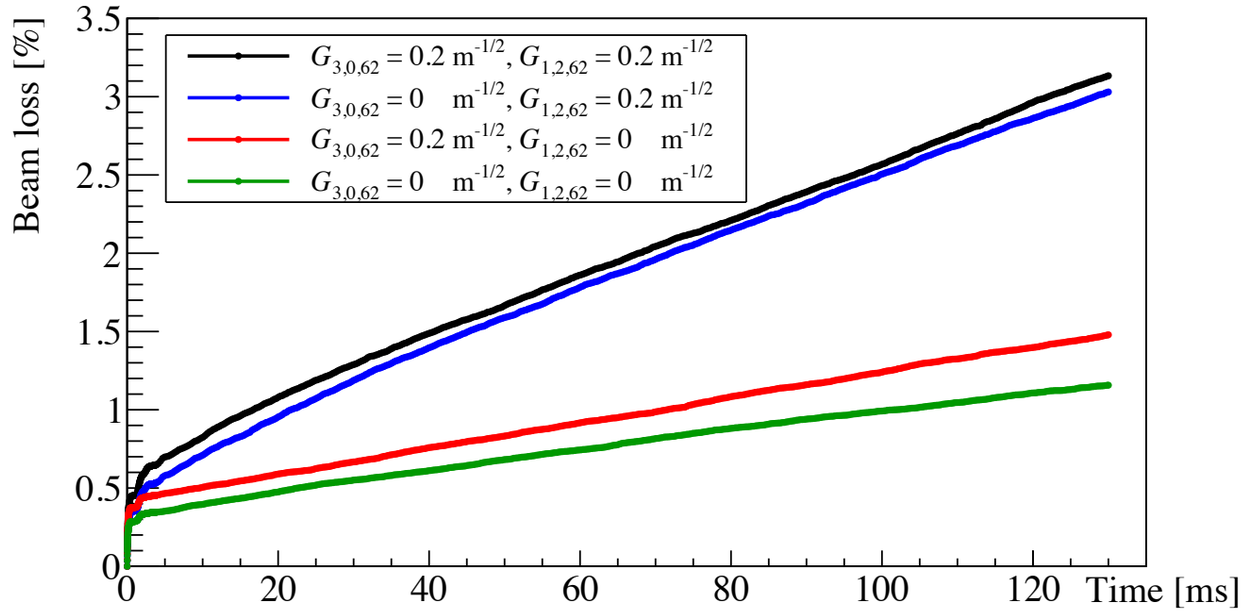


ビームロス比較

$(\nu_x, \nu_y) = (21.40, 21.30)$



$(\nu_x, \nu_y) = (20.86, 20.77)$



$21 < \nu_x, \nu_y < 21.5$領域では$3\nu_x = 64$の影響が絶大

$\nu_x + 2\nu_y = 64$も$\nu_x + 2\nu_y = 62$より影響が大きい

$3\nu_x = 62$の影響は限定的

→　これらは全て共鳴からの距離で説明がつく

Under 21 optics考察

エラーなしシミュレーションの結果から、
$(\nu_x, \nu_y) = (21.40, 21.30)$と$(\nu_x, \nu_y) = (20.86, 20.77)$とで
構造共鳴の影響はほとんど変わらないことが分かった。

しかし3次非構造共鳴については明らかに$(\nu_x, \nu_y) = (20.86, 20.77)$優位。

$21 < \nu_x, \nu_y < 21.5$領域でトリム六極電源増設が必要となるのは
元々の3次非構造共鳴の影響が大きいからで、
$20.5 < \nu_x, \nu_y < 21$領域では増設は不要と考えられる(せいぜい+2台)

$20.5 < \nu_x, \nu_y < 21$領域ではリップルによる共鳴の強さの変動にも強い

今後通電できるパタンの模索を行い、ビーム試験で検証予定

本発表の流れ

1. イントロダクション

2. ビームロス低減のためのメインシナリオ
   2025年5月のビーム試験結果

3. ビームロス低減のための新シナリオ
   “Under 21 optics”

4. まとめ

まとめ

構造共鳴対策として”new-arc optics”を採用した結果、
ビームロス低減をビーム試験で確認した。
しかしFX 1.3 MWの実現にはさらなる共鳴対策が必要。

磁場エラーなしシミュレーション(マクロ粒子数400万)では
1.3 MW相当の強度でも入射期間のビームロスは0.5%未満なので、
実測でのビームロスは非構造共鳴由来の可能性が高い。

チューンを$20.5 < \nu_x, \nu_y < 21$領域に下げることで、
構造共鳴の影響は同程度に抑えつつ3次非構造共鳴を避けられる。
主電磁石電源の電流リップルにも強い。