

THOB01

# J-PARC MRにおける 三次構造共鳴補正

Compensation of third-order  
structure resonances in J-PARC MR

†安居 孝晃、五十嵐 進、佐藤 洋一、小関 忠

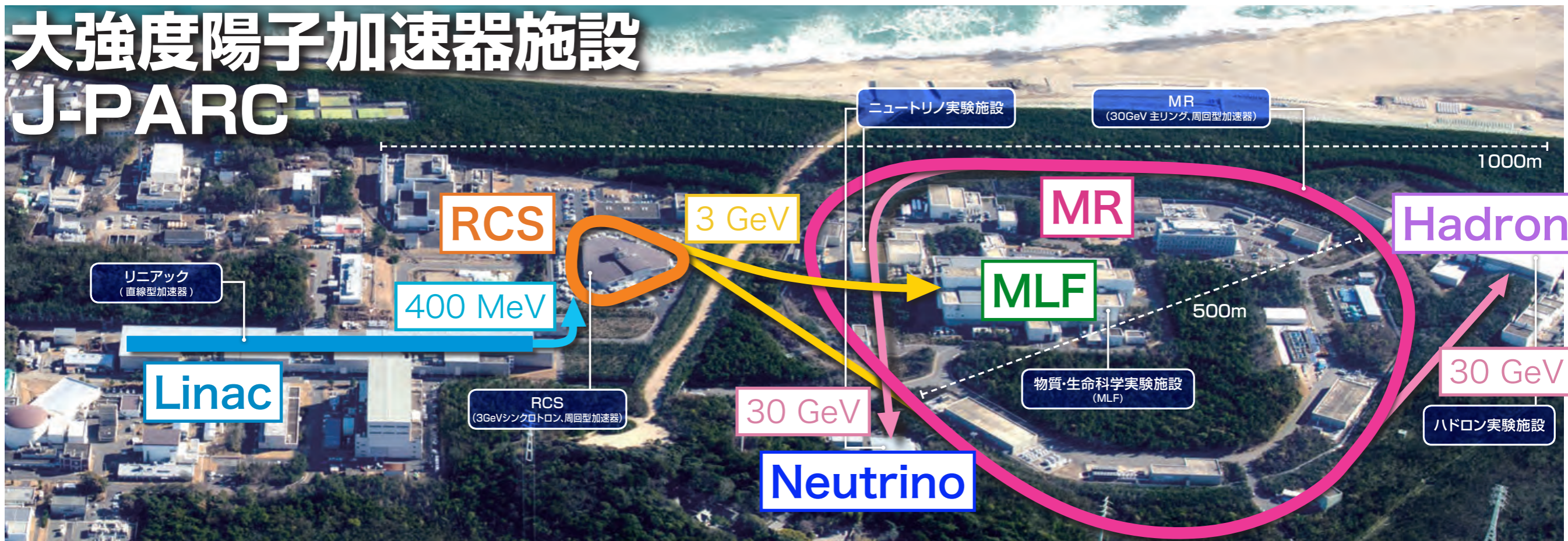
KEK



2021/8/12 第18回日本加速器学会年会

# J-PARC

## 大強度陽子加速器施設 J-PARC



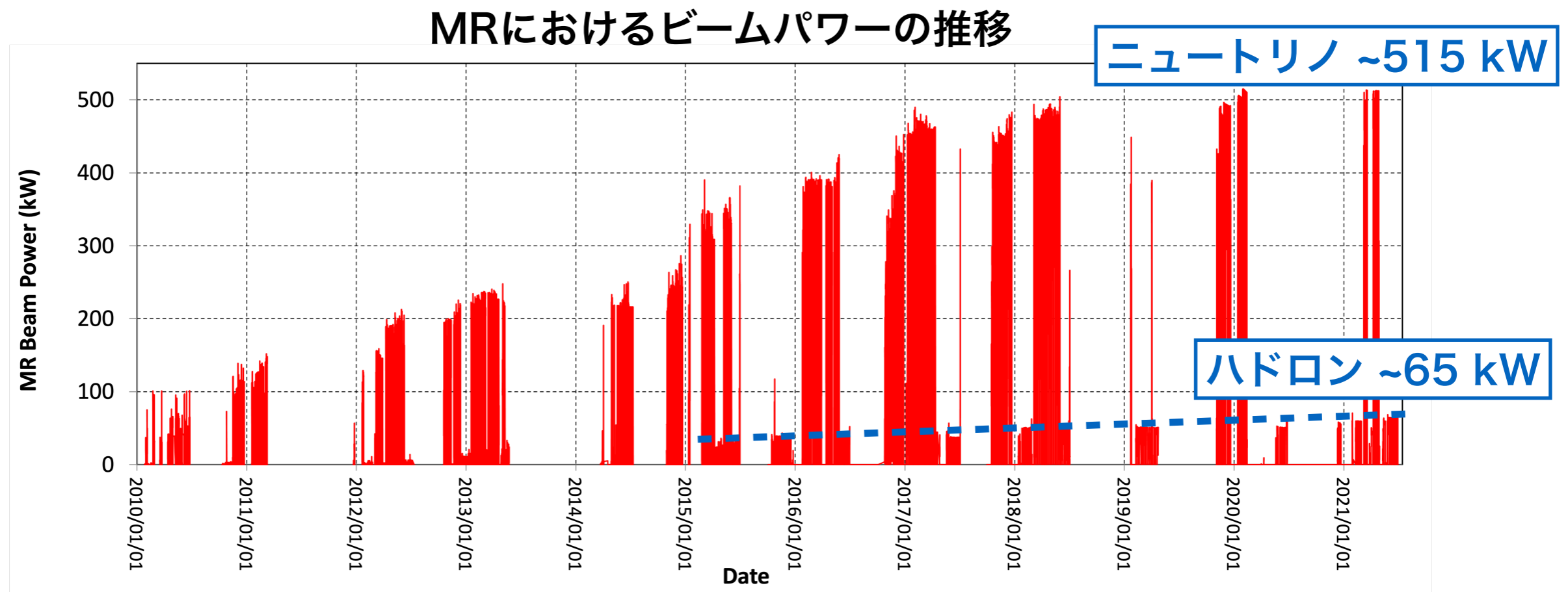
J-PARCは幅広い分野の多目的の研究を行う陽子加速器施設である。

J-PARCはLinac、RCS、MRの3つの大型加速器と、  
実験施設群から成る。

# MR (Main Ring)

MRはニュートリノ/ハドロン実験のため大強度陽子ビームを供給している。

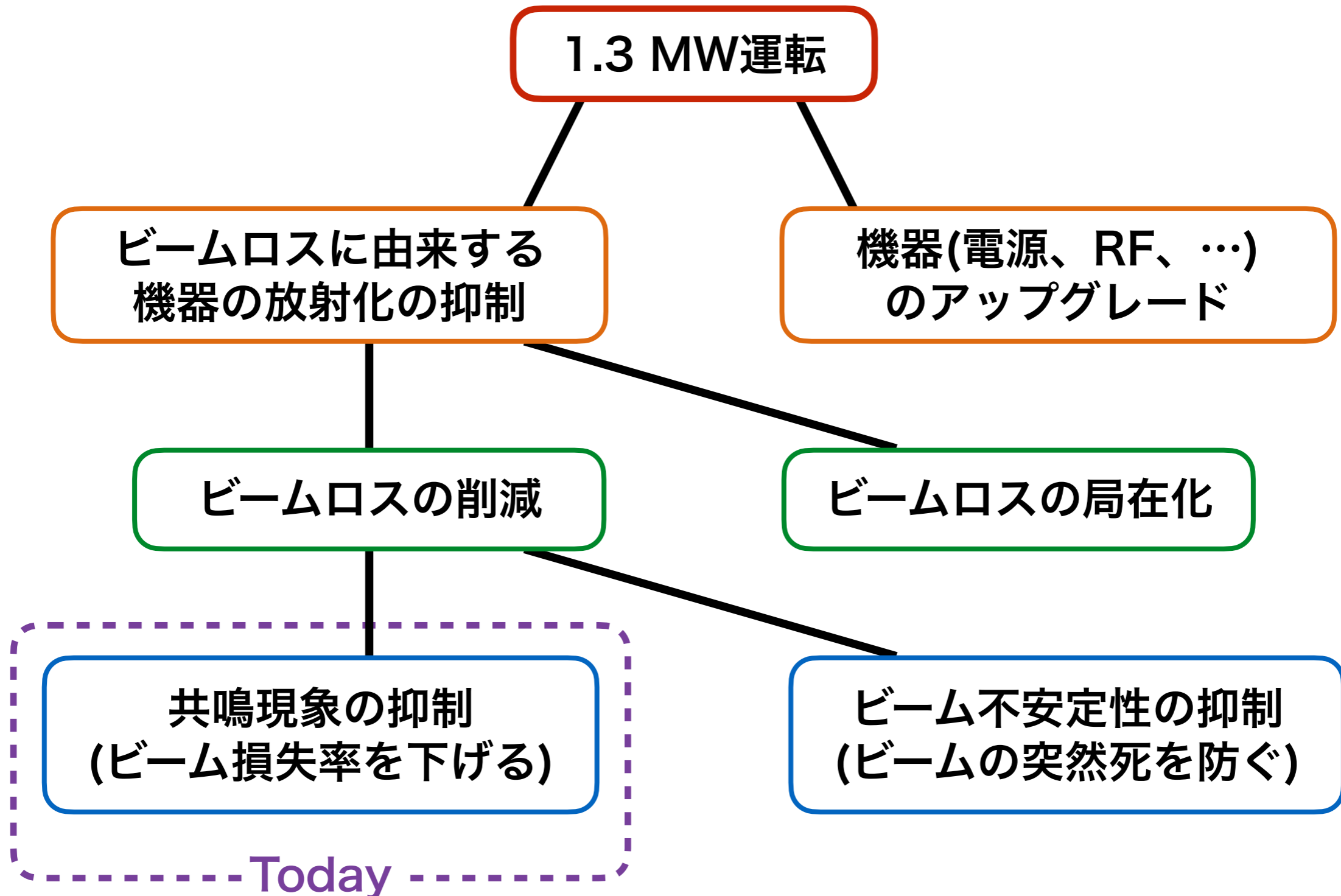
各実験は二次(三次)粒子ビームを用いた大統計物理実験であるため、MRではビームの大強度化・安定化が研究されている。



目標：ニュートリノ利用運転で1.3 MW



# MR大強度化に向けて



# 各共鳴の影響

空間電荷効果以外が励起する  
各共鳴の強さを調べた

アパーチャーサーベイ：  
各チューンにおける  
生き残る粒子の最大アクション

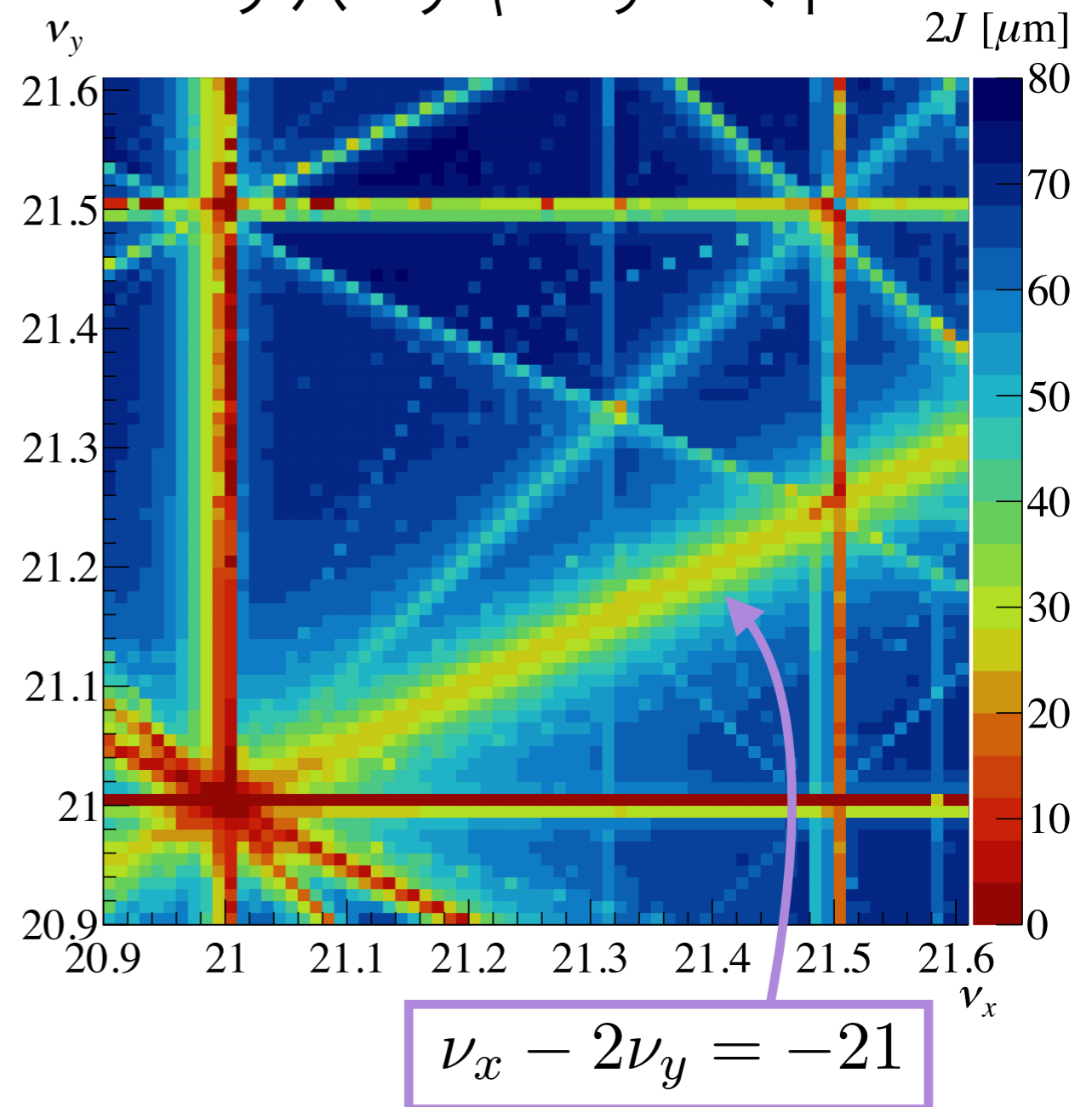
$$q = \sqrt{2J_q \beta_q} \cos \psi_q \quad (q = x, y)$$

**action**

MRは3回対称なので  
六極磁場が励起する  
3次構造共鳴  $\nu_x - 2\nu_y = -21$  が強い

→ これを補正する手法を考えた

ニュートリノ利用運転チューン近傍での  
アパーチャーサーベイ



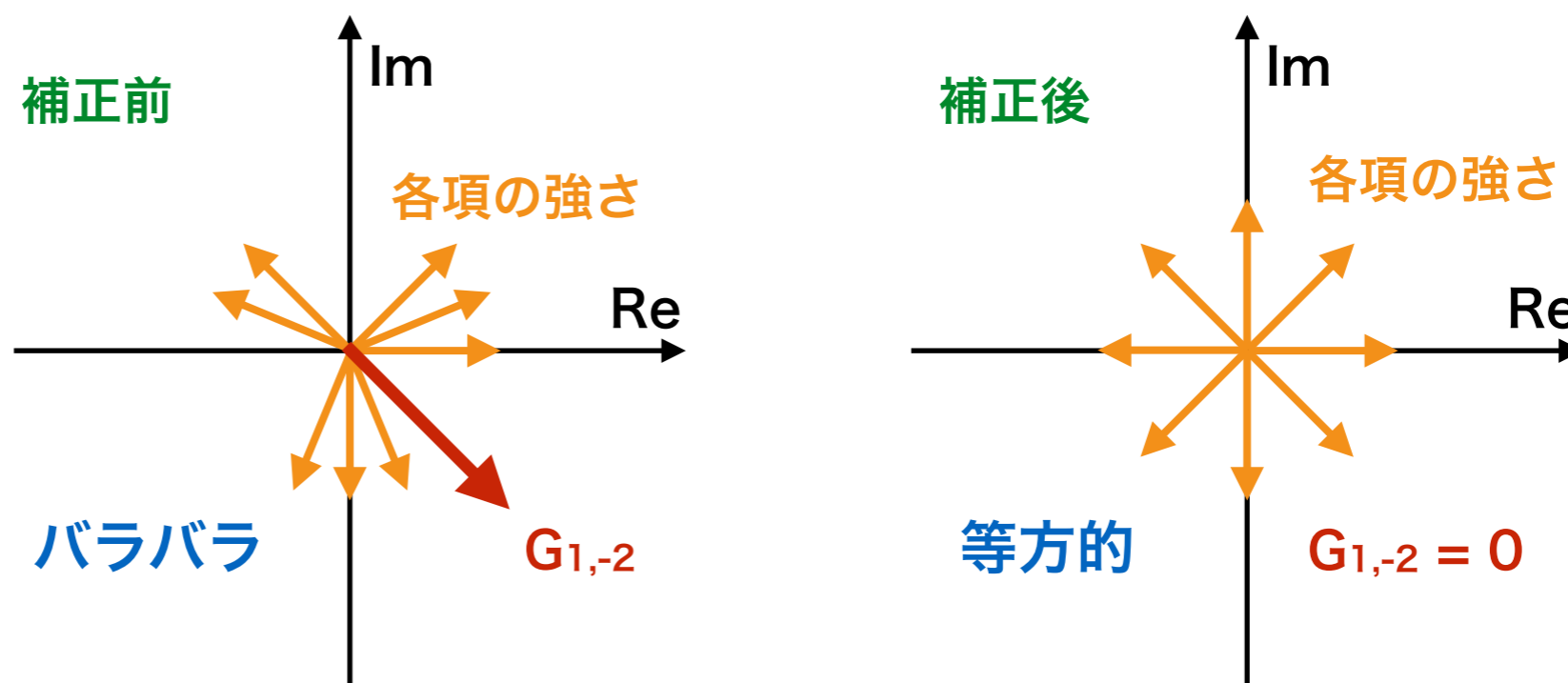
# 補正原理

共鳴の強さ  $G_{1,-2}$  は次のように複素数で表される

$$G_{1,-2} \equiv \oint \beta_x^{1/2} \beta_y \underline{K_2} e^{i(\psi_x - 2\psi_y)} ds \simeq \sum_j \beta_{xj}^{1/2} \beta_{yj} (K_2 \Delta L)_j e^{i(\psi_{xj} - 2\psi_{yj})}$$

六極磁場の強さ     
 同じものが複数ある     
 位相を調整

補正のイメージ：



六極磁石は全て加速器の曲線部にある

曲線部のy方向の位相進み  $\Delta\psi_{arc,y}$  を調整した新しいビーム光学系を考えた

# 補正後の共鳴の影響

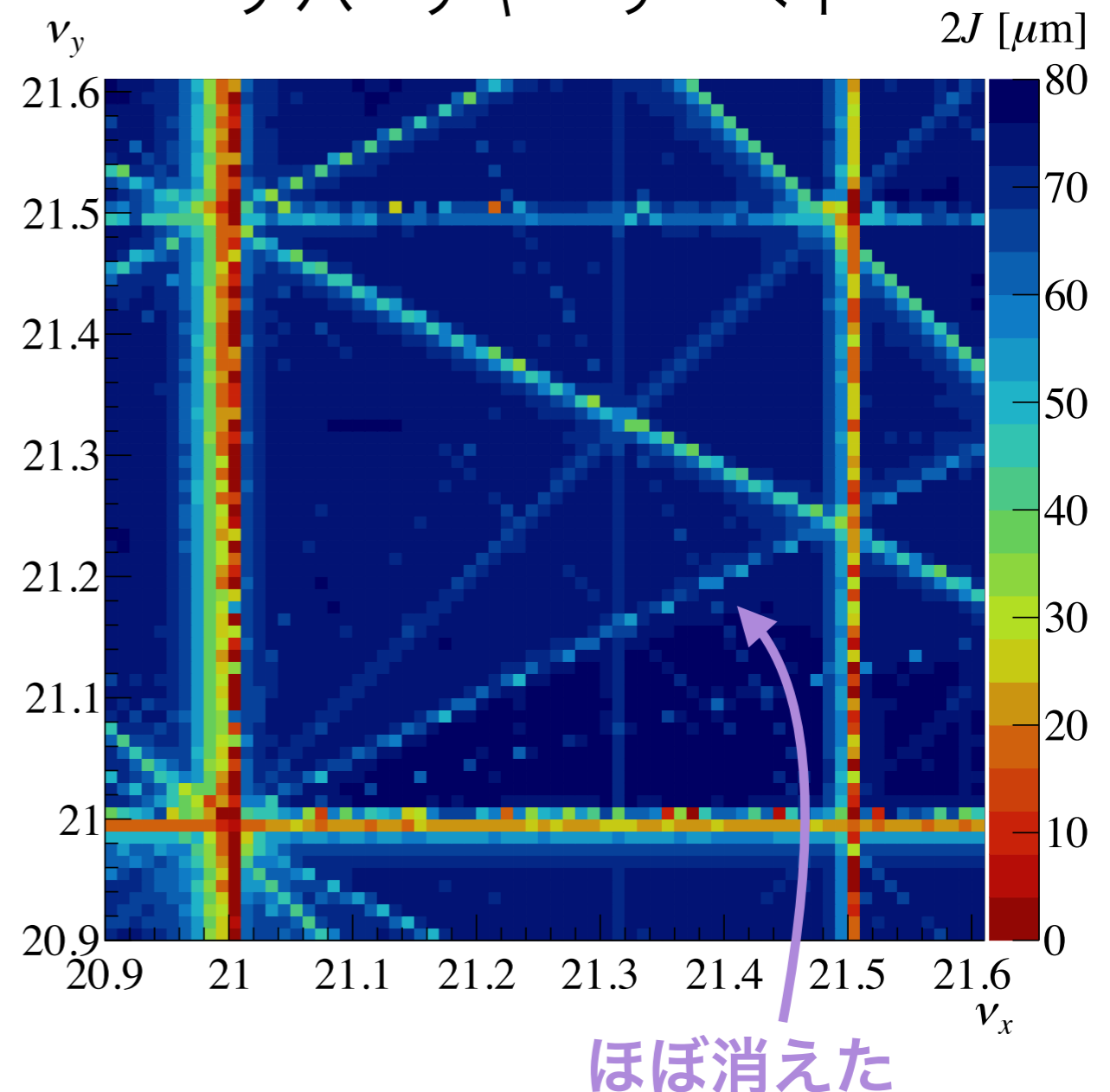
共鳴  $\nu_x - 2\nu_y = -21$  は  
確かに補正された

特長：

- ・ Tuneの変更不要
- ・ Dispersionを直線部に漏らさない
- ・ 入射ビームへの制約なし
- ・ 補正六極等の新しい機器が不要
- ・ 六極磁石電流値を好きに変更可  
(chromaticity調整可)

実験的にも3通りの方法で  
補正を確認した

ニュートリノ利用運転チューン近傍での  
アパーチャーサーベイ



# 共鳴補正の確認実験

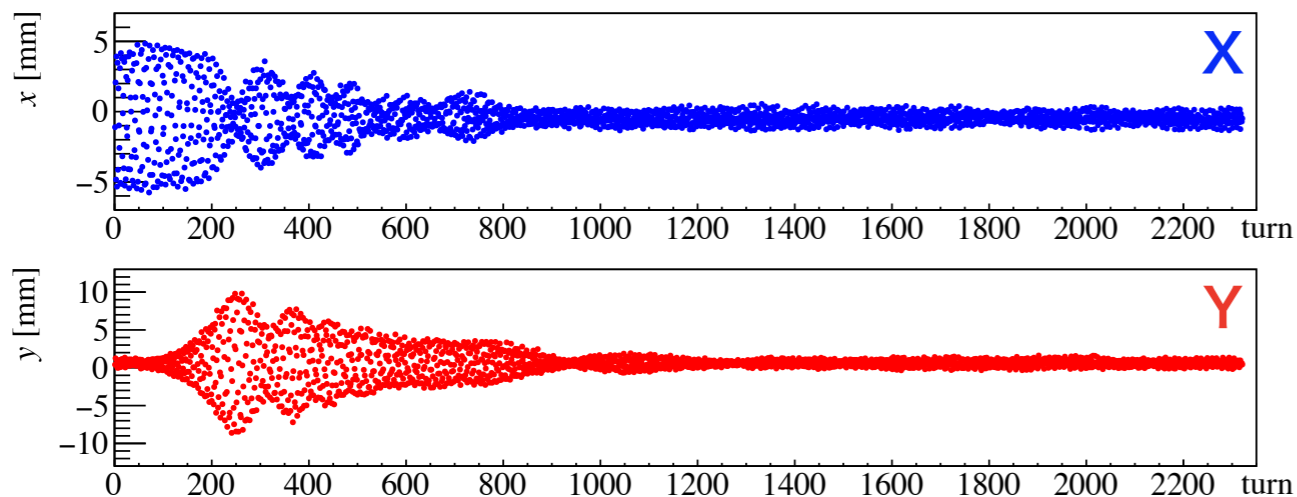
## 1. xyカップリング測定

ビームが共鳴  $\nu_x - 2\nu_y = -21$  の影響を受けると、  
x, y方向のベータトロン振幅の交換が起きる

補正前後で、チューンを共鳴上に乗せ、振幅が交換するか確認した

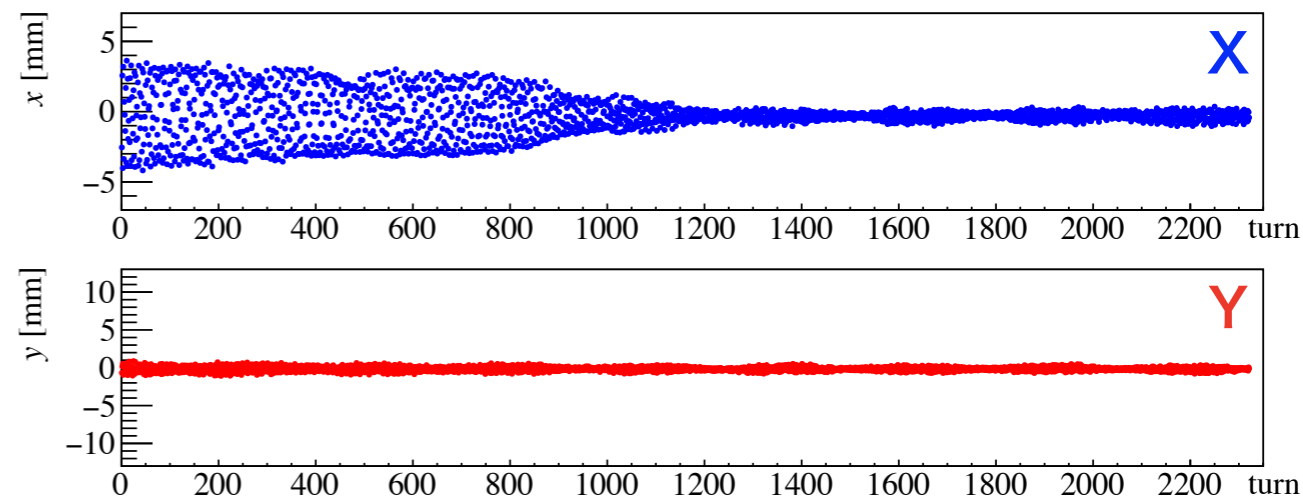
補正前

center position



補正後

center position



交換後はxyカップリングは観測されなくなった



# 共鳴補正の確認実験

## 1. xyカップリング測定

カップリング現象のチューン依存性は大きく、  
電源リップルの影響で同条件の測定にもばらつきが見られた  
同条件で複数回測定し、統計的に解釈した。

Optics	Beam Intensity	Sextupole Strength	Coupled Ratio	
Present Arc	$1.2 \times 10^{12}$ ppb	99%	4/10	(40%)
		95%	5/10	(50%)
	$2.5 \times 10^{12}$ ppb	90%	3/10	(30%)
		74%	17/20	(85%)
New Arc	$2.5 \times 10^{12}$ ppb	74%	0/15	(0%)
		90%	0/10	(0%)

補正後は一切カップリングは観測されなかった

→ 共鳴の補正が確認できた

# 共鳴補正の確認実験

## 1. xyカップリング測定

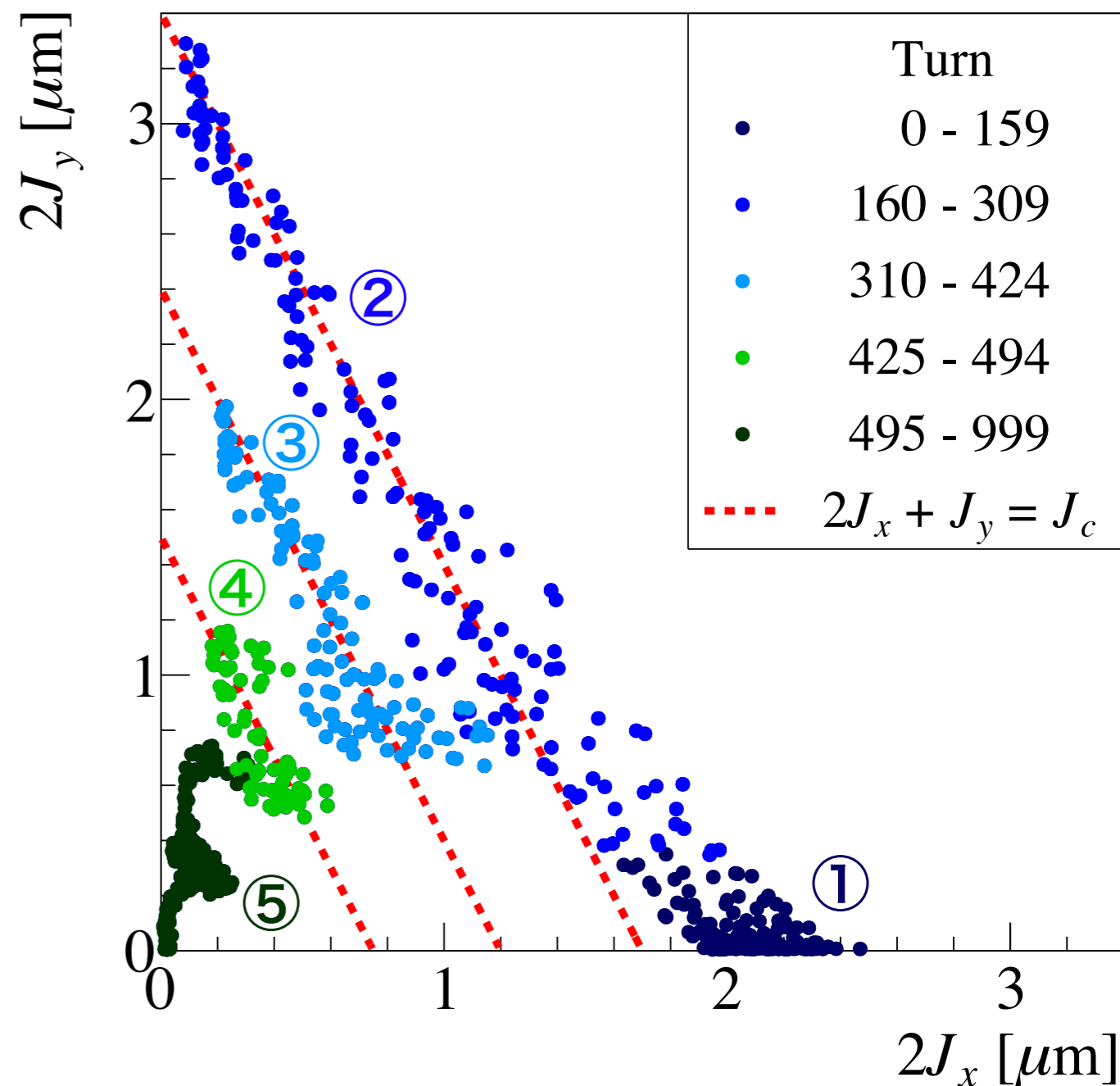
理論的には

共鳴  $\nu_x - 2\nu_y = -21$  の影響で  
 $J_c = 2J_x + J_y$  が保存する

共鳴補正前の振動を解析し、  
 $J_c$  が保存しているか確認した

振動がダンプしているため、  
長い期間では保存していないが、  
短い期間では保存している

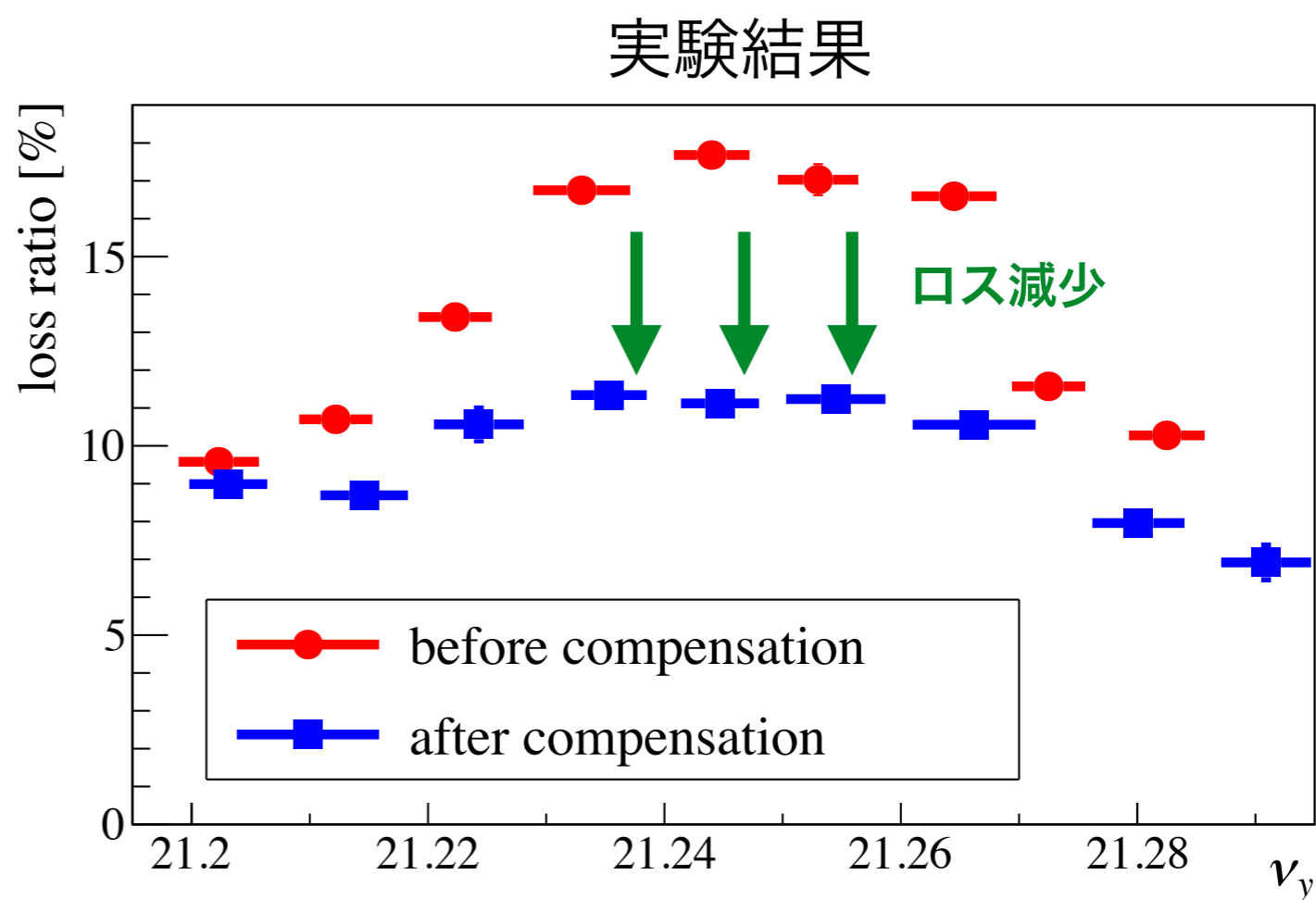
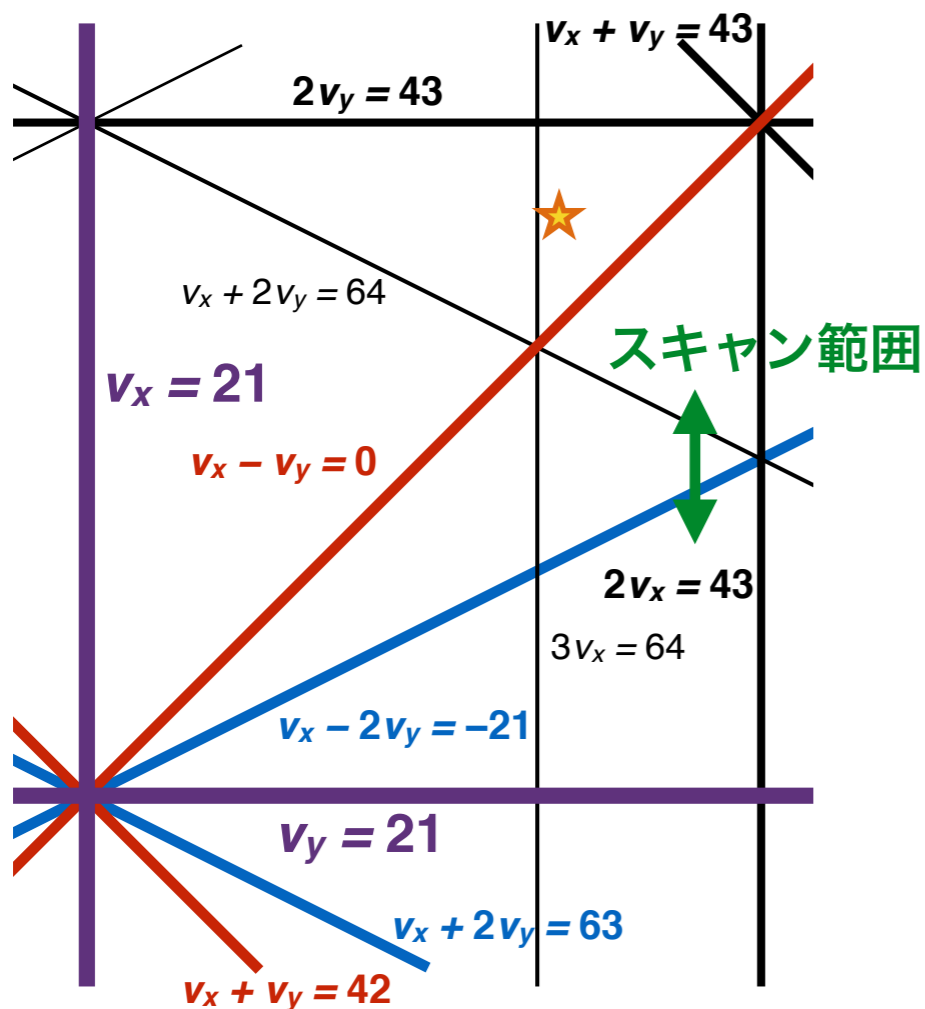
→ 共鳴  $\nu_x - 2\nu_y = -21$  による  
カップリング現象であることを  
確認できた



# 共鳴補正の確認実験

## 2. 共鳴近傍でのロス測定

共鳴近傍のチューンでビームロススキャンを行った



補正によりビームロス減少

共鳴は良く補正された

# 共鳴補正の確認実験

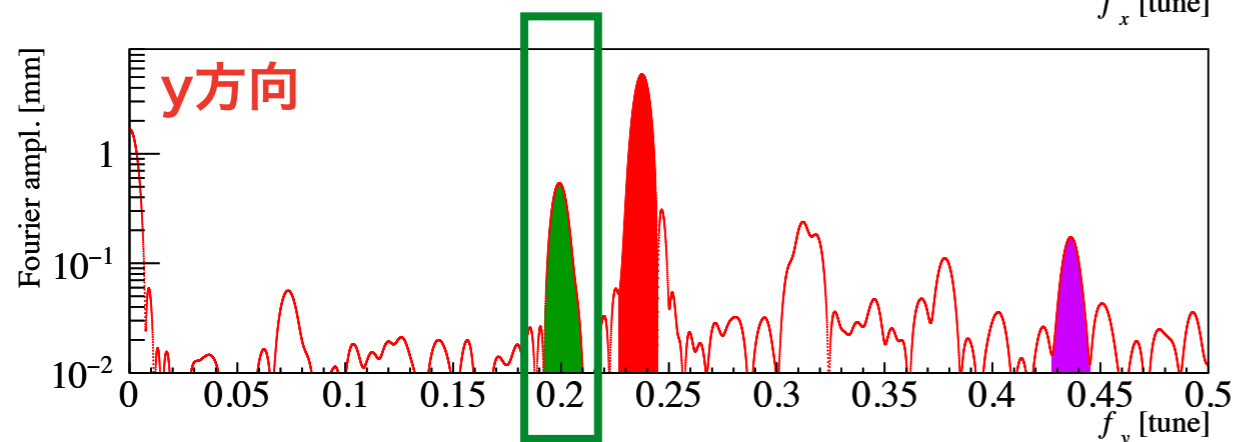
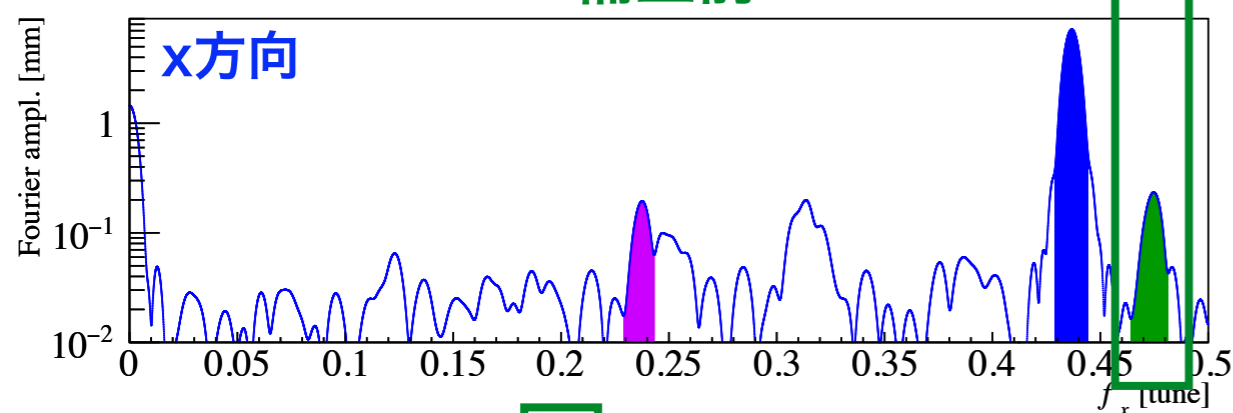
## 3. 周波数解析

重心振動の周波数解析で、チューンの他に共鳴由来のスペクトルが立つ

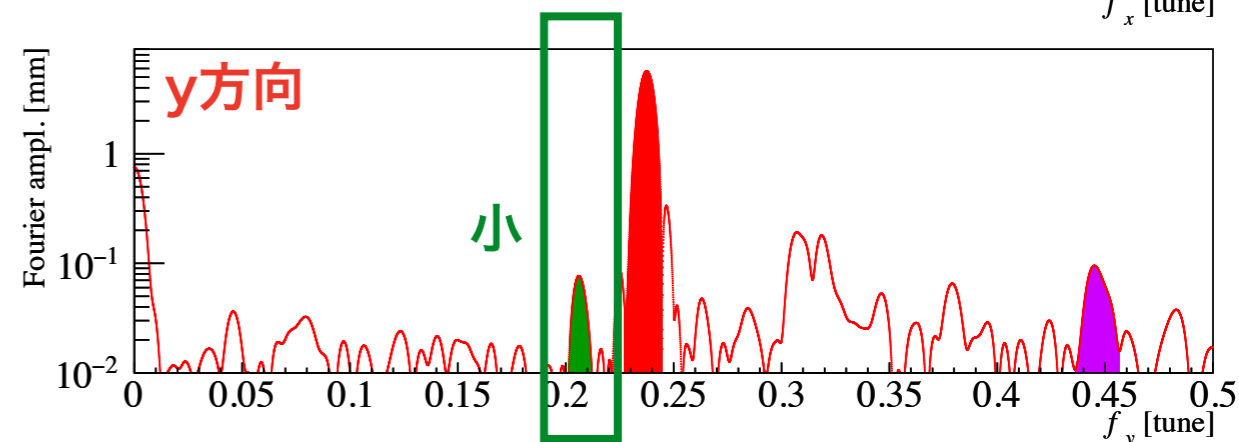
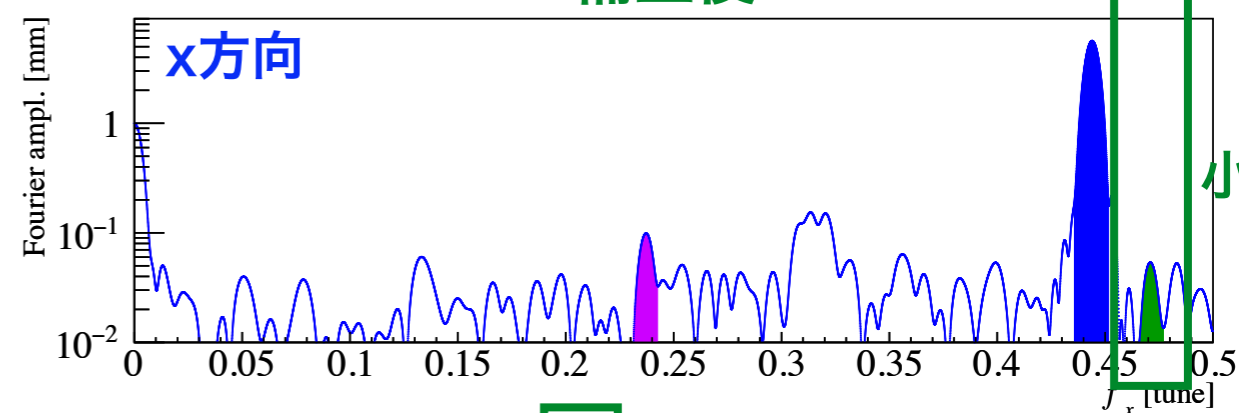
$\nu_x - 2\nu_y = -21$  の場合、**x方向**： $2\nu_y$ 、**y方向**： $\nu_x - \nu_y$  の周波数にピーク

$(\nu_x, \nu_y) = (21.44, 21.24)$  に設定し、256周分の重心振動をフーリエ解析した

補正前



補正後



補正によりピークの高さが低くなった → **共鳴の補正が確認できた**

# まとめ

- ・ J-PARC MRで3次構造共鳴  $\nu_x - 2\nu_y = -21$  を補正する手法を考え、シミュレーションと3つの実験で実証した。
- ・ 補正手法は加速器の曲線部の位相進みを調整したもので、これまでのMRのビーム調整による知見と競合しない。
- ・ ビームの横方向のカップリングを測定し、共鳴を補正するとカップリングが観測されなくなることを確認した。
- ・ 共鳴を跨いでのビームロス測定をして、共鳴補正時にビームロスが明らかに減少することを確認した。
- ・ 重心振動をフーリエ解析することにより、共鳴補正時に共鳴由来のピークが抑制されることを確認した。