

FROA01

J-PARC MRにおける 高繰り返しビーム試験結果

Results of high repetition beam commissioning
in J-PARC MR



Takaaki Yasui *et al.*
(J-PARC)



第19回日本加速器学会年会, オンライン, 2022/10/21

本発表の流れ

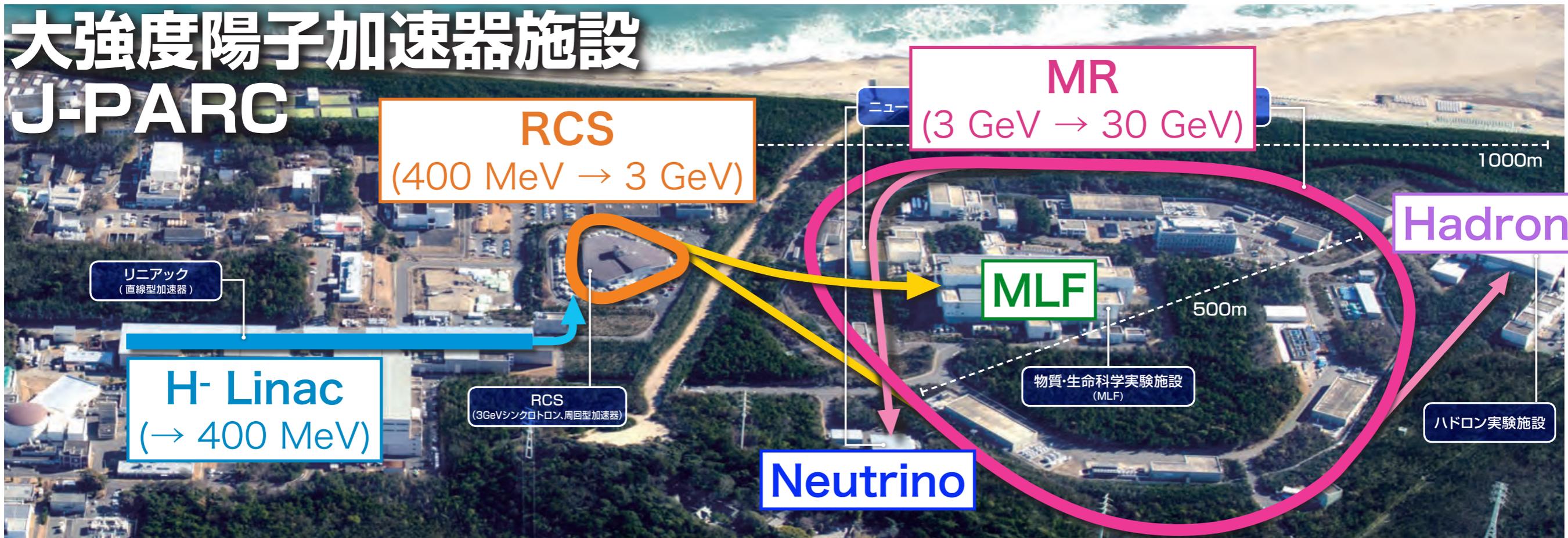
1. イントロダクション
2. 機器アップグレード
3. アップグレード後のビーム試験結果
4. MRの中期計画
5. まとめ

本発表の流れ

1. **イントロダクション**
2. 機器アップグレード
3. アップグレード後のビーム試験結果
4. MRの中期計画
5. まとめ

J-PARC

大強度陽子加速器施設 J-PARC



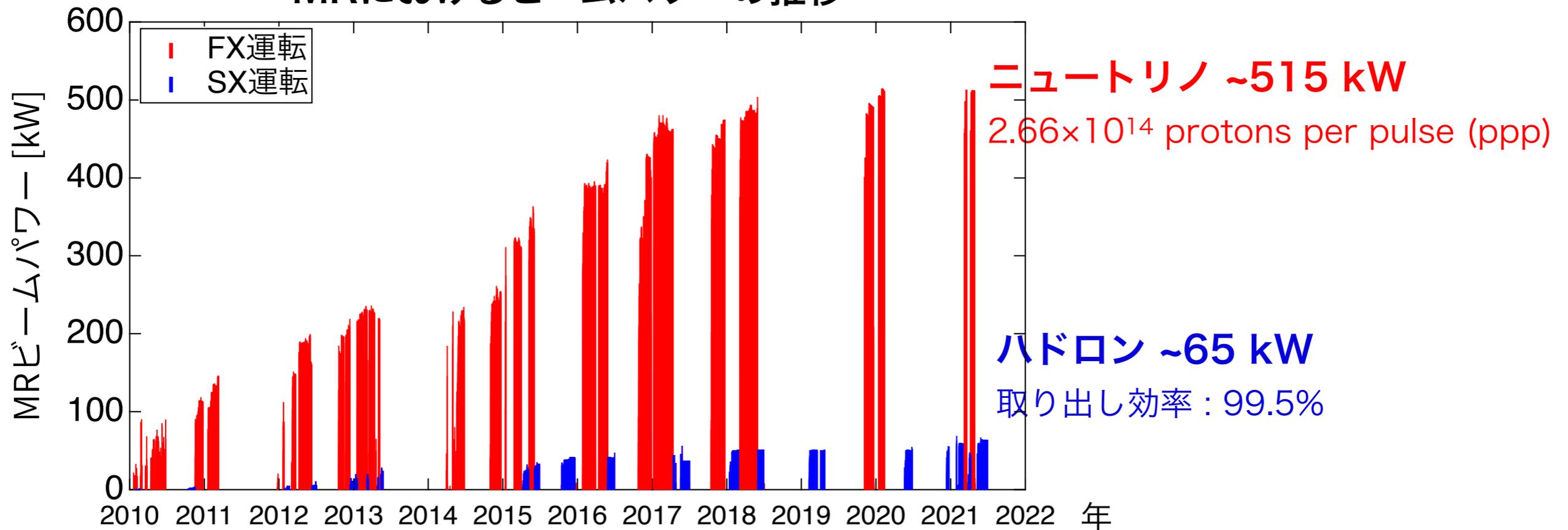
J-PARCは幅広い分野の多目的の研究を行う陽子加速器施設である

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

MR (Main Ring)

ニュートリノ/ハドロン実験は
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

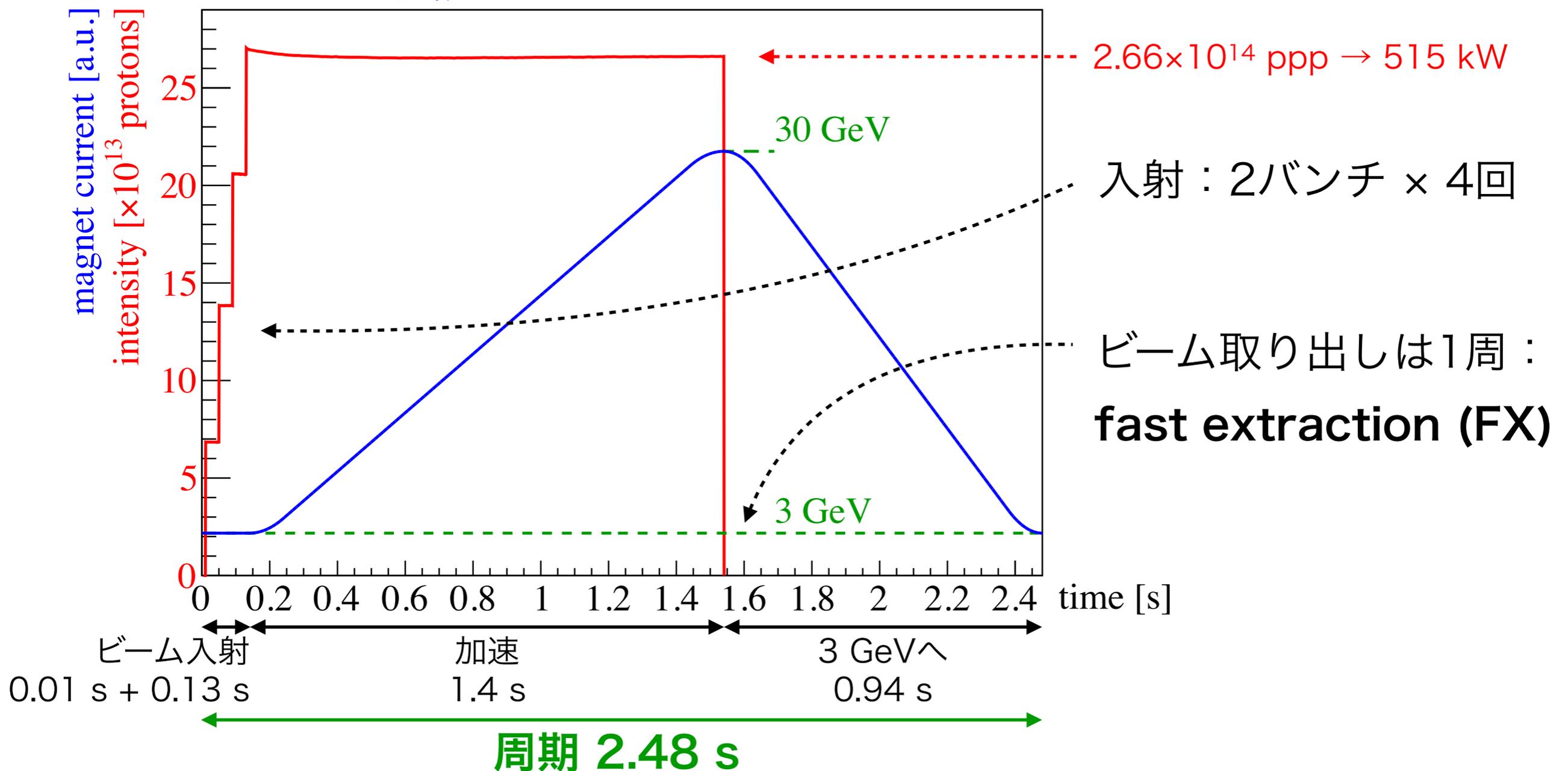
MRにおけるビームパワーの推移



目標：ニュートリノ利用運転で1.3 MW

これまでのニュートリノ利用運転

ビーム強度 (DCCTによる測定)
電磁石のランピングパターン

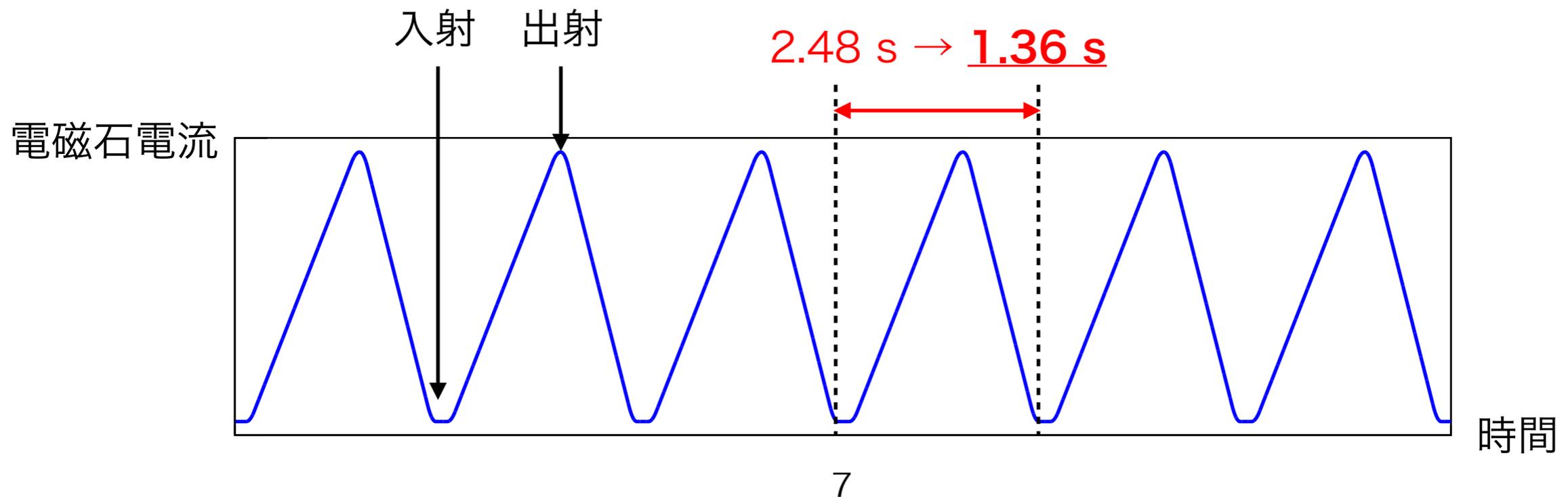


MR大強度化計画

$$\text{ビームパワー} = \frac{\text{エネルギー} \times \text{粒子数}}{\text{繰り返し周期}}$$

30 GeV

2021年度	515 kW	2.66×10^{14} ppp	2.48 s
2023年度	750 kW	2.1×10^{14} ppp	1.36 s
目標	1300 kW	3.3×10^{14} ppp	1.16 s



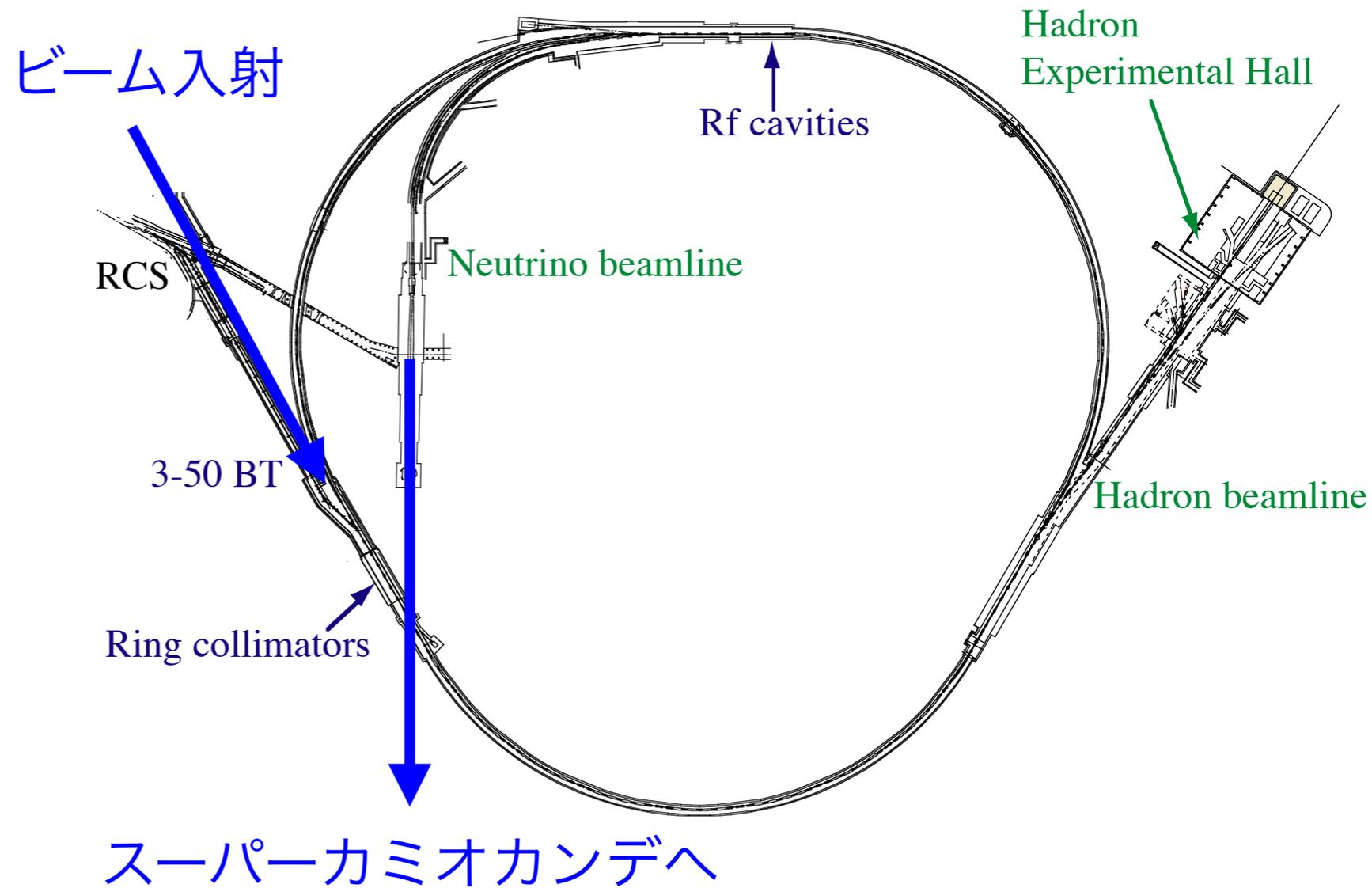
本発表の流れ

1. イントロダクション
- 2. 機器アップグレード**
3. アップグレード後のビーム試験結果
4. MRの中期計画
5. まとめ

機器アップグレード

機器アップグレード内容

1. 主電磁石電源
2. RFシステム
(進行中)
3. FX用セプタム電磁石
4. コリメータシステム
(今夏, 来年度夏)



機器アップグレード

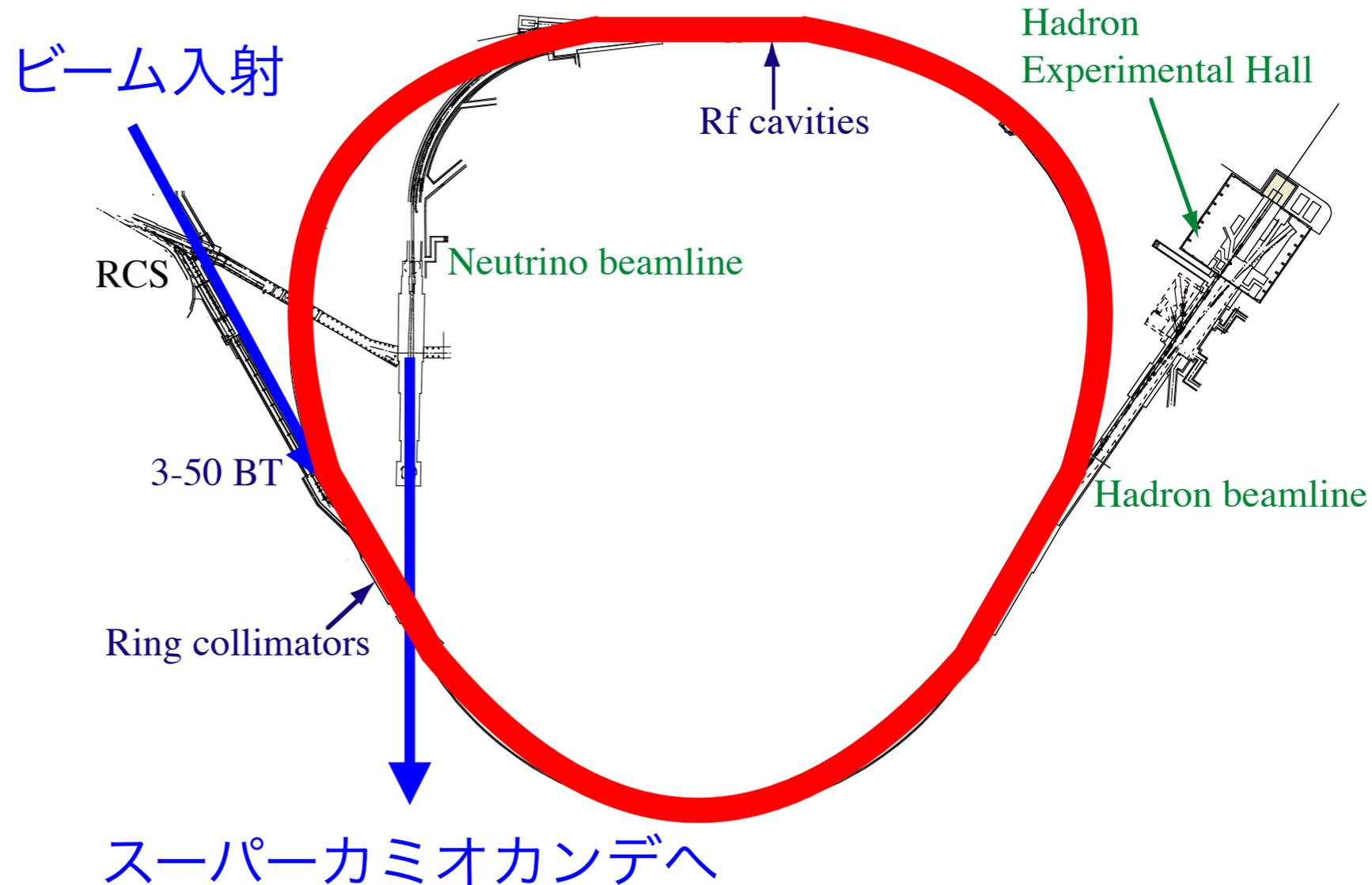
機器アップグレード内容

1. 主電磁石電源

2. RFシステム
(進行中)

3. FX用セプタム電磁石

4. コリメータシステム
(今夏, 来年度夏)



主電磁石電源アップグレード

T. Miura *et al.*, 本学会, TUP039

速い繰り返し周期への対応のため、
主電磁石電源アップグレードが行われた

	ファミリー名	ファミリー数	電磁石の数	アップグレード内容
偏向磁石	BM	6	16 each	コンデンサバンクと共に 電源を新規製作
四極磁石 (曲線部)	QFN	1	48	
	QDN	1	48	
	QFX	1 → 2	48 → 24 each	現行電源を再利用 (ファミリー分割あり)
QDX	1 → 2	27 → 13+14		
四極磁石 (直線部)	QFS	1 → 2	6 → 3 each	
	QDS	1 → 2	6 → 3 each	
	QFT	1 → 2	6 → 3 each	
	QFP	1	6	
	QFR	1	9	
	六極磁石	QDT	1	6
QDR		1	6	
SFA		1	24	
	SDA, SDB	2 → 1	24+24 → 48	

機器アップグレード

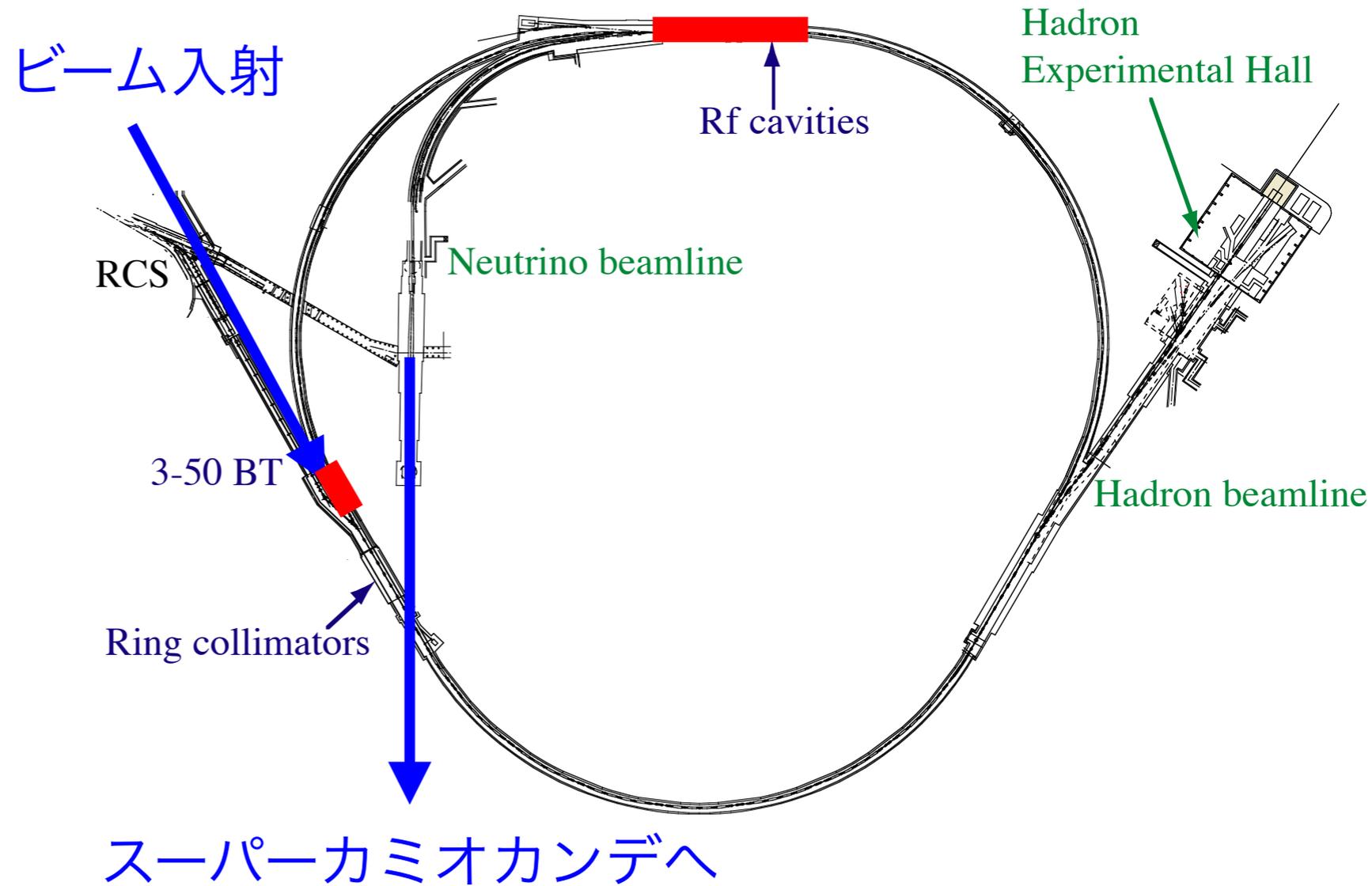
機器アップグレード内容

1. 主電磁石電源

**2. RFシステム
(進行中)**

3. FX用セプタム電磁石

4. コリメータシステム
(今夏, 来年度夏)



RFシステムのアップグレード

より広いハーモニクスを制御できる次世代LLRF制御システムを導入

Y. Sugiyama et al., 本学会, WE0B07

速い繰り返し周期には
より高いRF電圧が必要である

新しいRF空洞



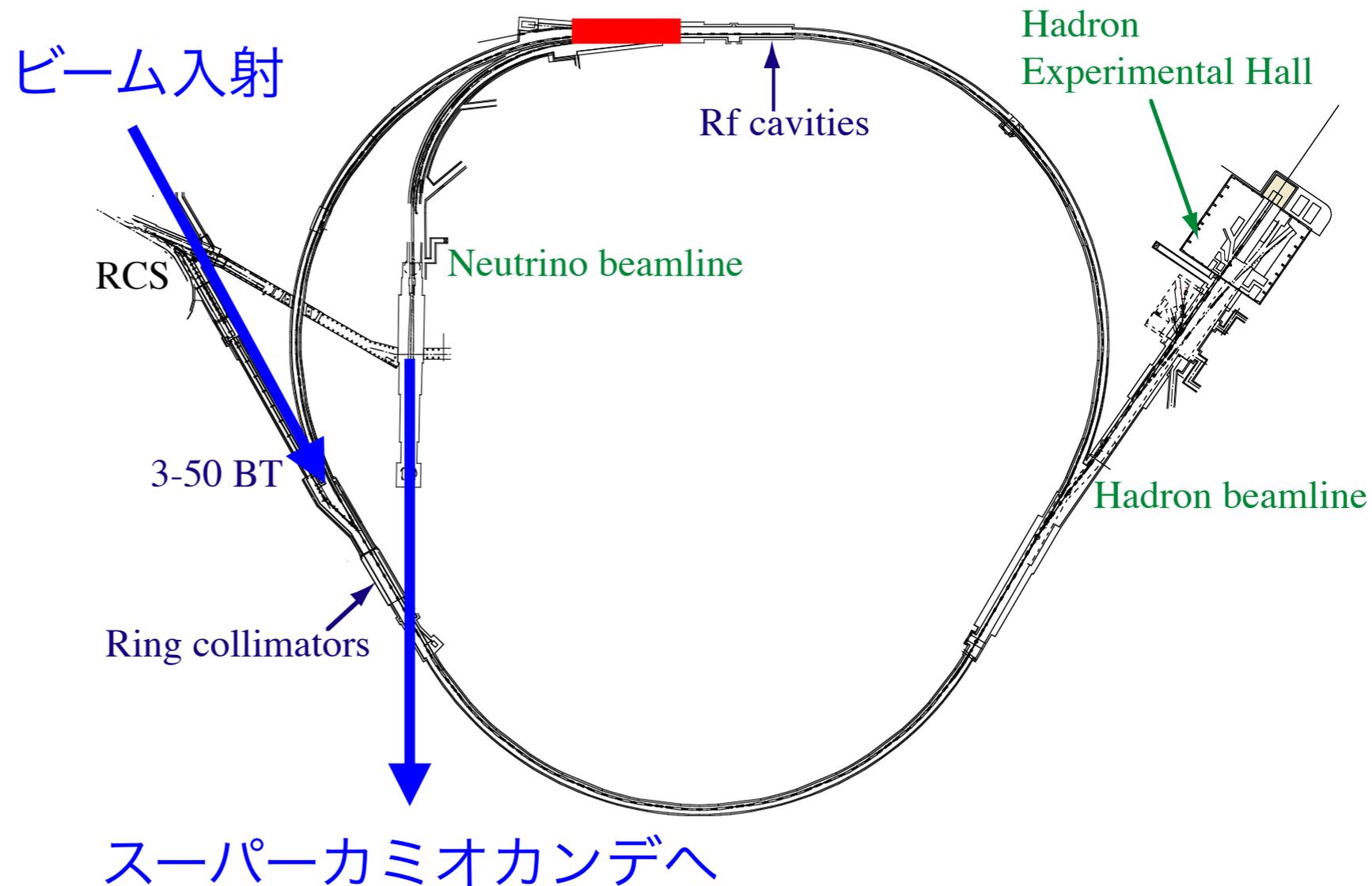
RFシステムのアップグレード計画

	周期	空洞の数		電圧	
		基本波	二倍高調波	基本波	二倍高調波
2021	2.48 s	7	2	300 kV	110 kV
2023	1.36 s	9	2	510 kV	110 kV
2026	1.16 s	11	2	600 kV	110 kV

機器アップグレード

機器アップグレード内容

1. 主電磁石電源
2. RFシステム
(進行中)
- 3. FX用セプタム電磁石**
4. コリメータシステム
(今夏, 来年度夏)



FXセプタム電磁石のアップグレード

高繰り返しへの対応のため、全FXセプタム電磁石が入れ替えられた

新しい低磁場セプタム電磁石には渦電流誘導型が採用された

S. Iwata et al., 本学会, FRP006

全ての新セプタム電磁石に

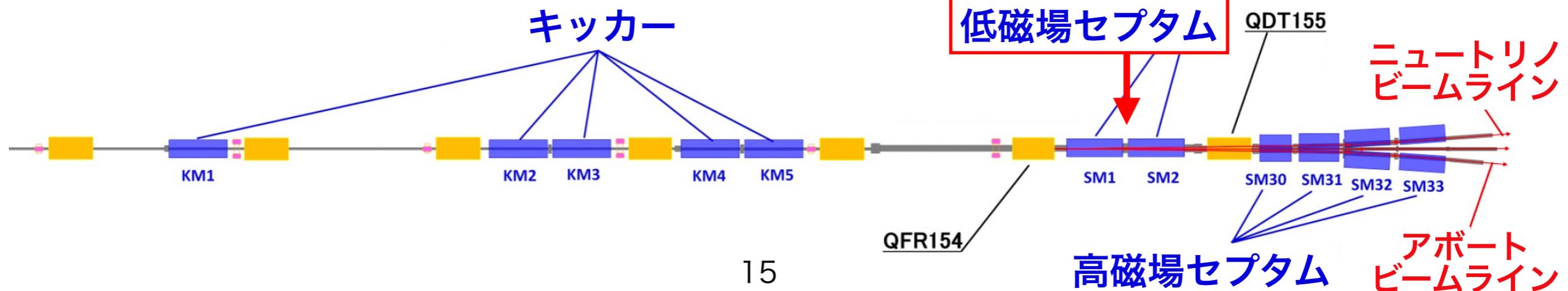
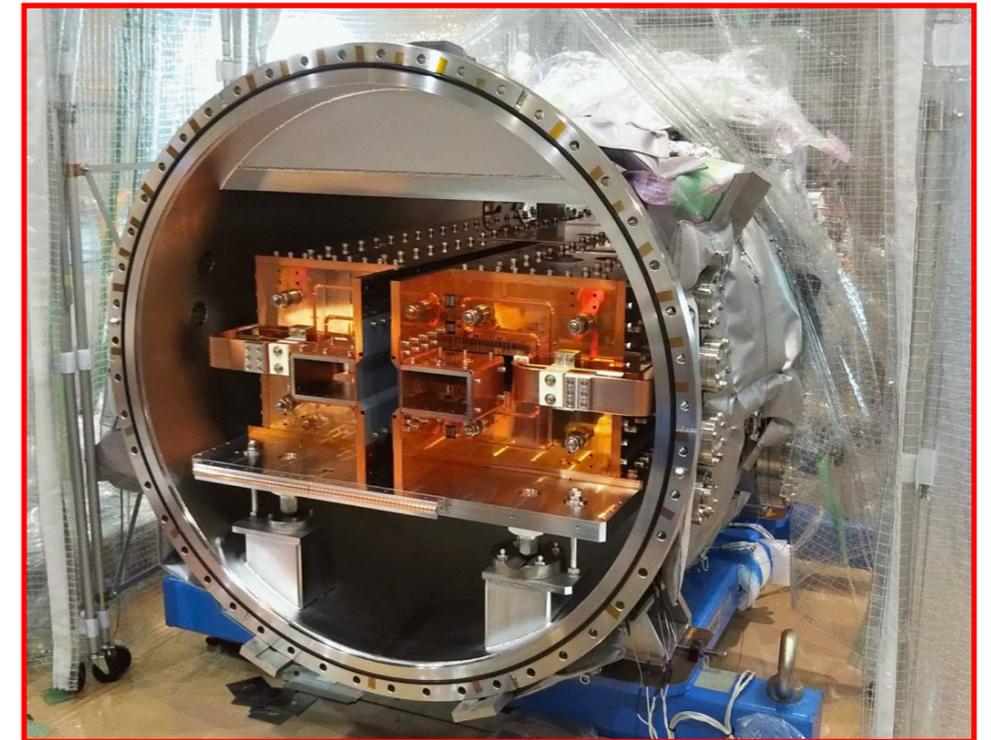
内部シールドを導入することで

これまでリングの3回対称性を悪化させていた

漏れ四極磁場を従来の1/10以下に

抑えることに成功した

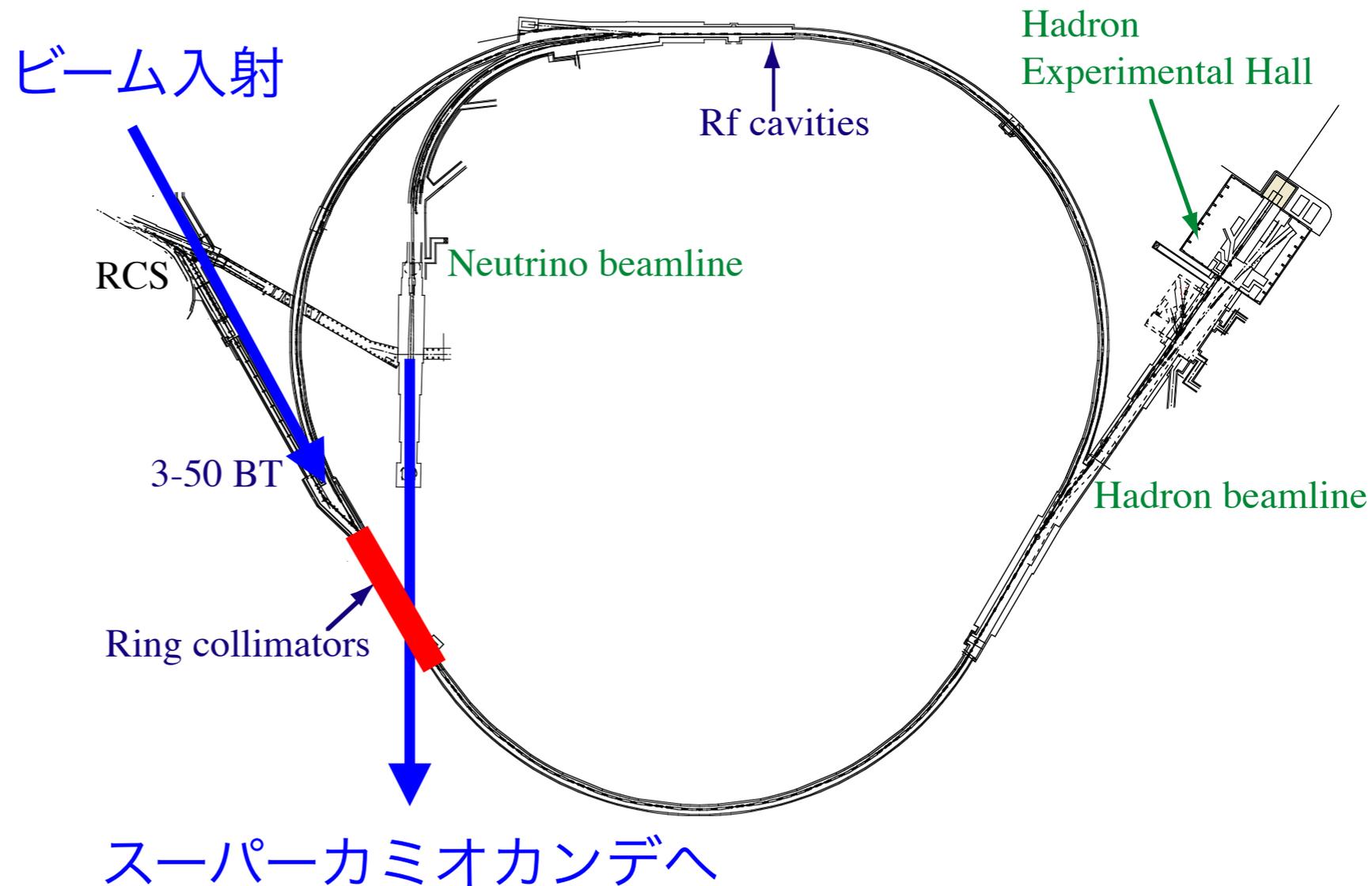
T. Shibata et al., 本学会, FROB12



機器アップグレード

機器アップグレード内容

1. 主電磁石電源
2. RFシステム
(進行中)
3. FX用セプタム電磁石
- 4. コリメータシステム
(今夏, 来年度夏)**



ビームロスへの制約

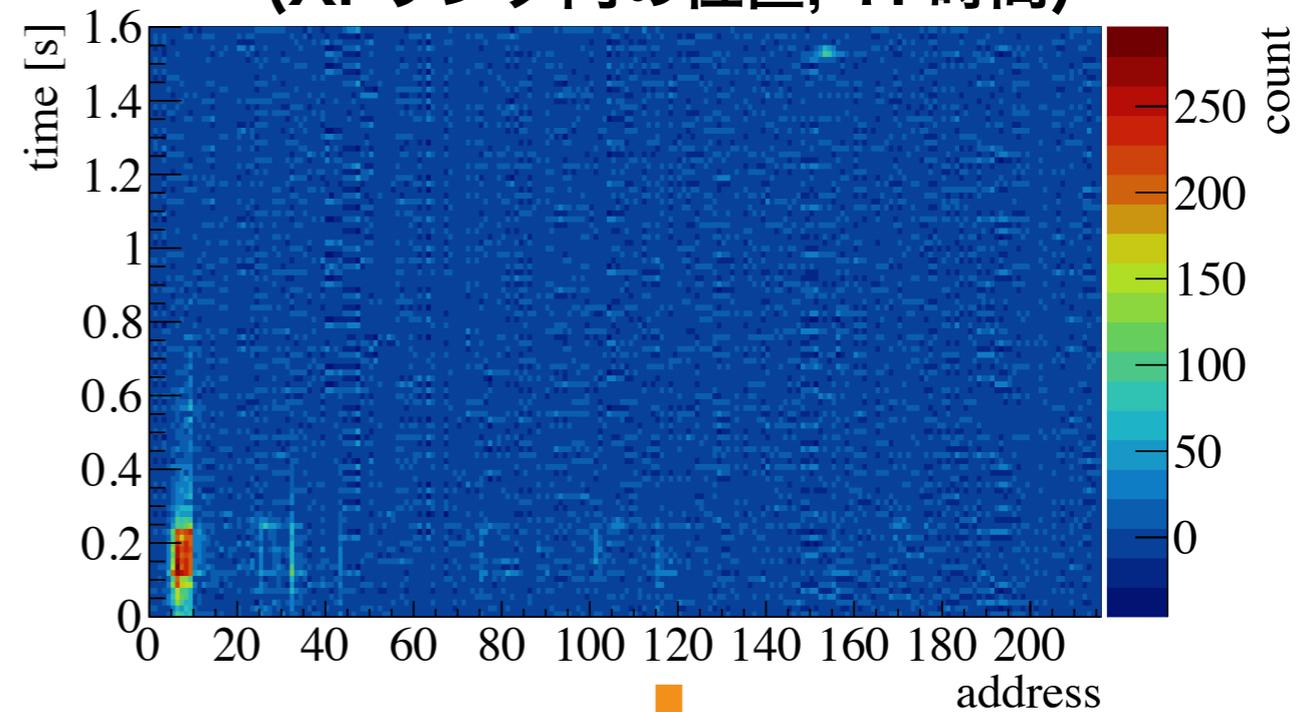
コリメータを設置することで
ビームロスを局所化し、
非コリメータエリアの線量を
低く抑えている

ビームロスへの制約

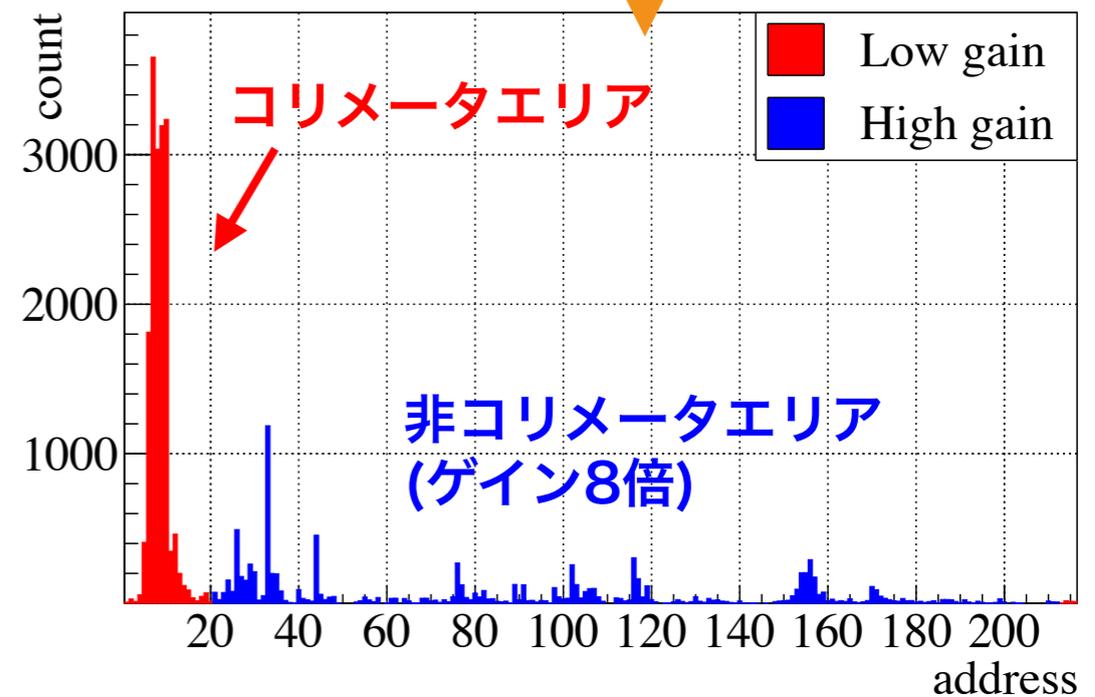
非コリメータエリアにおいて
手作業でメンテナンスできる線量

(※典型的には10 $\mu\text{Sv/h}$ 以下になっている)

ビームロスカウント (by 比例計数管)
(X: リング内の位置, Y: 時間)



時間方向に積分

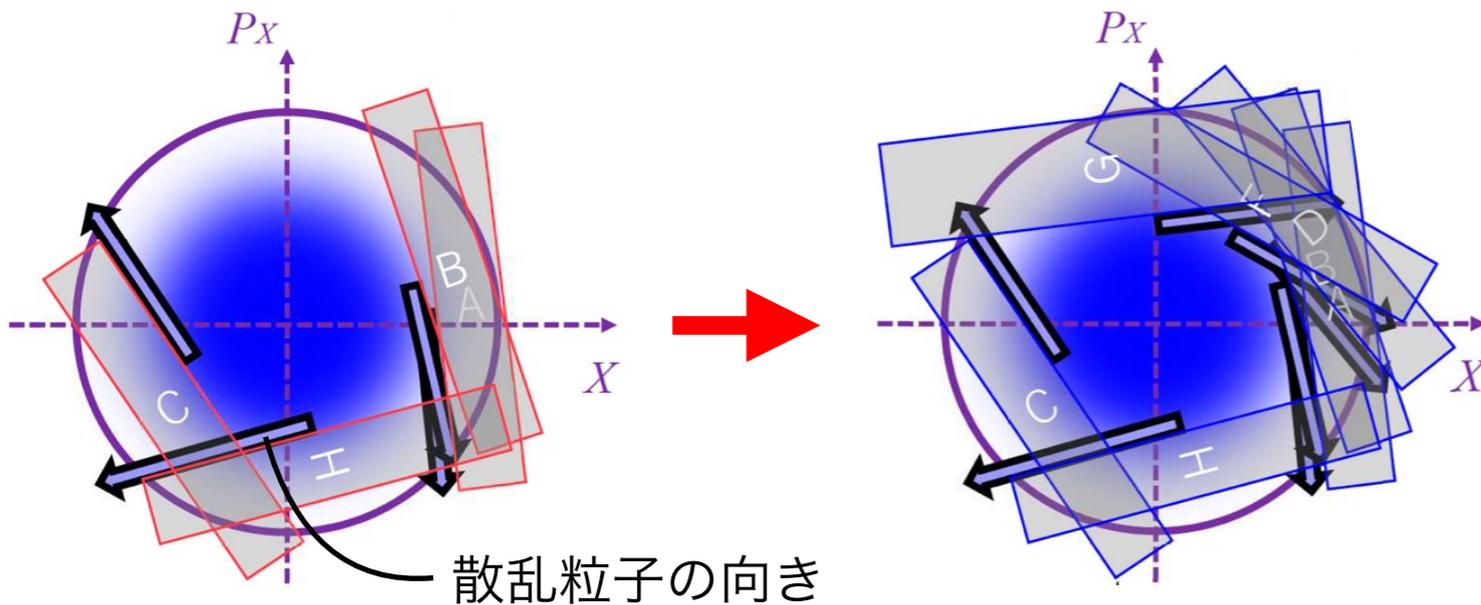


コリメータアップグレード

繰り返し周期が短くなると、単位時間あたりのロスも増えてしまう

	周期	コリメータ数	コリメータ容量	ビームロス
~2021年度	2.48 s	4	2.0 kW	0.8 kW
2022年度	1.36 s	6	3.0 kW	? kW
2023年度~	1.36 s	7	3.5 kW	? kW

M. Shirakata *et al.*, 本学会, THP017



2021年度以前

2023年度以降 18



新コリメータ(赤)

本発表の流れ

1. イントロダクション
2. 機器アップグレード
- 3. アップグレード後のビーム試験結果**
4. MRの中期計画
5. まとめ

ビーム試験スケジュール・内容



ビーム試験は6月に1週間、DC 1.36 s周期で行われた

ビーム試験内容：

- ・ ビーム光学系の調整
- ・ ハードウェア性能評価 (主電磁石電源, LLRF, FXセプタム電磁石)
- ・ 大強度試験

S. Iwata *et al.*, 本学会, FRP006

T. Shibata *et al.*, 本学会, FROB12

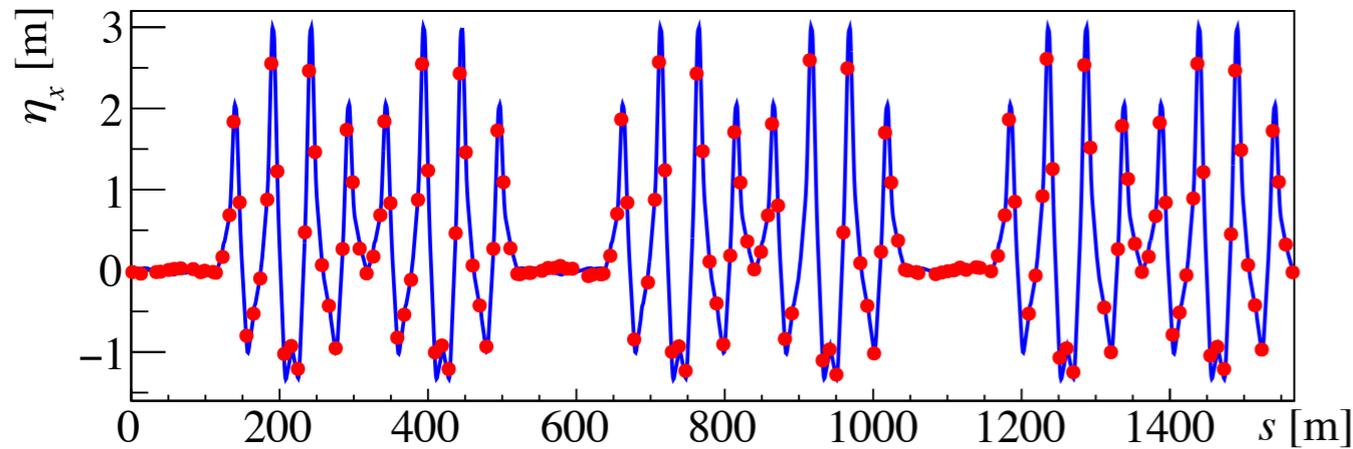
Y. Sugiyama *et al.*, 本学会, WE0B07

ビーム光学系調整

チューン

	モデル	測定
x方向	21.35	21.3523 ± 0.0033
y方向	21.43	21.4313 ± 0.0039

ディスページョン (モデル・測定)

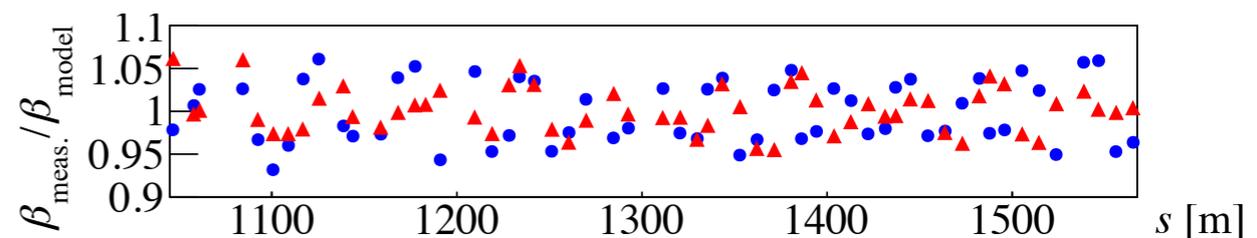
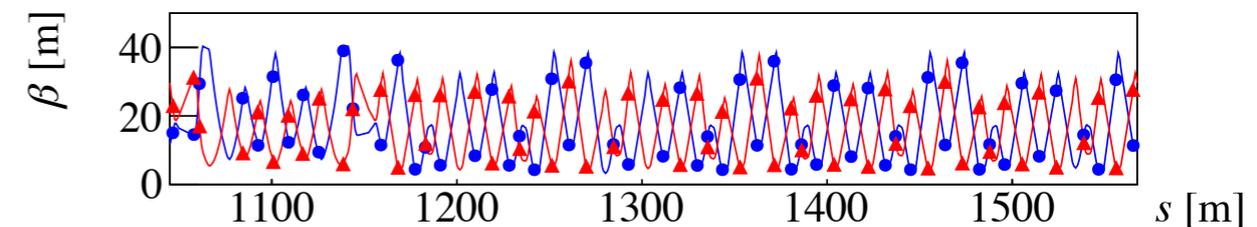
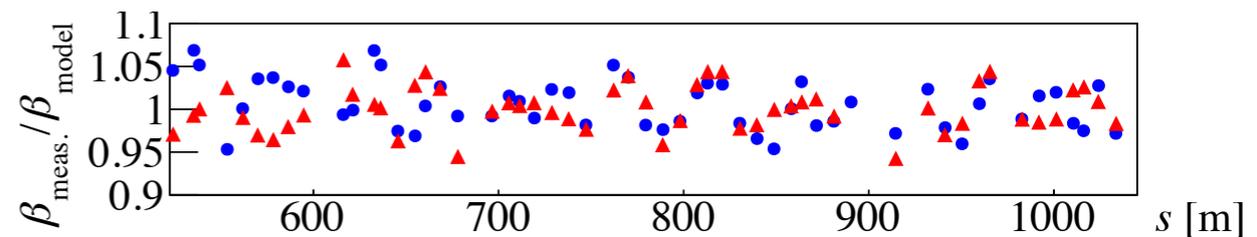
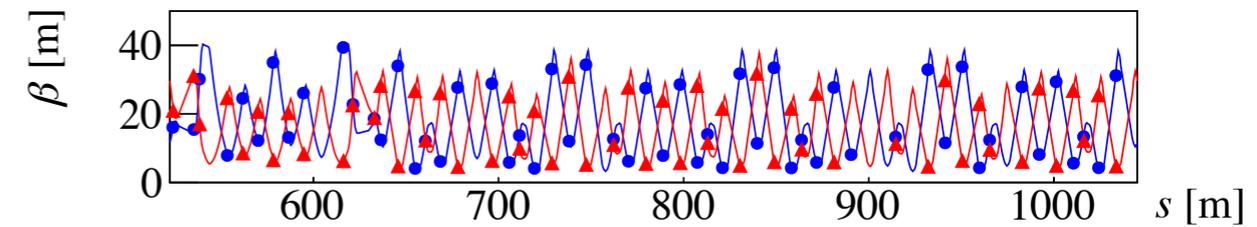
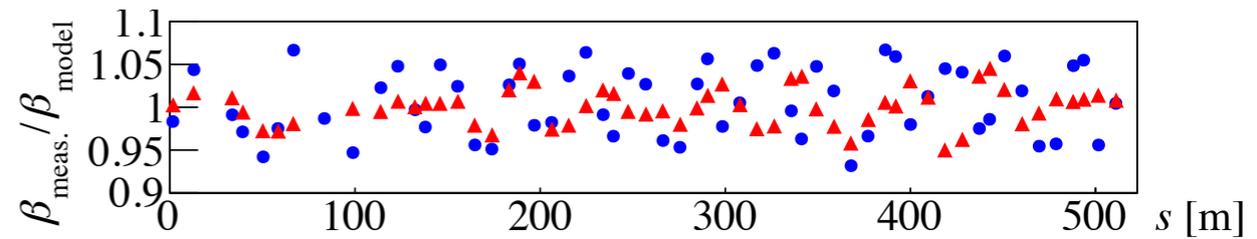
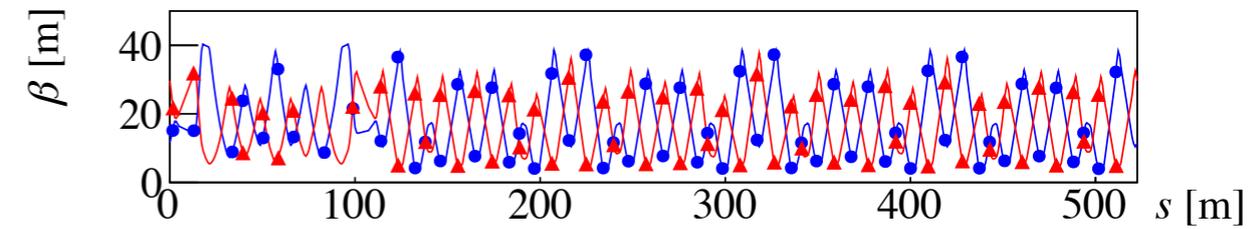


$$|\eta_{x, \text{straight}}| < 65 \text{ mm}$$

$$\left(\text{RMS} \left[\frac{\beta_{x, \text{meas.}}}{\beta_{x, \text{model}}} \right], \text{RMS} \left[\frac{\beta_{y, \text{meas.}}}{\beta_{y, \text{model}}} \right] \right) = (3.5\%, 2.5\%)$$

従来と同等の精度にまで合わせ込んだ

ベータatron関数 (水平・鉛直)

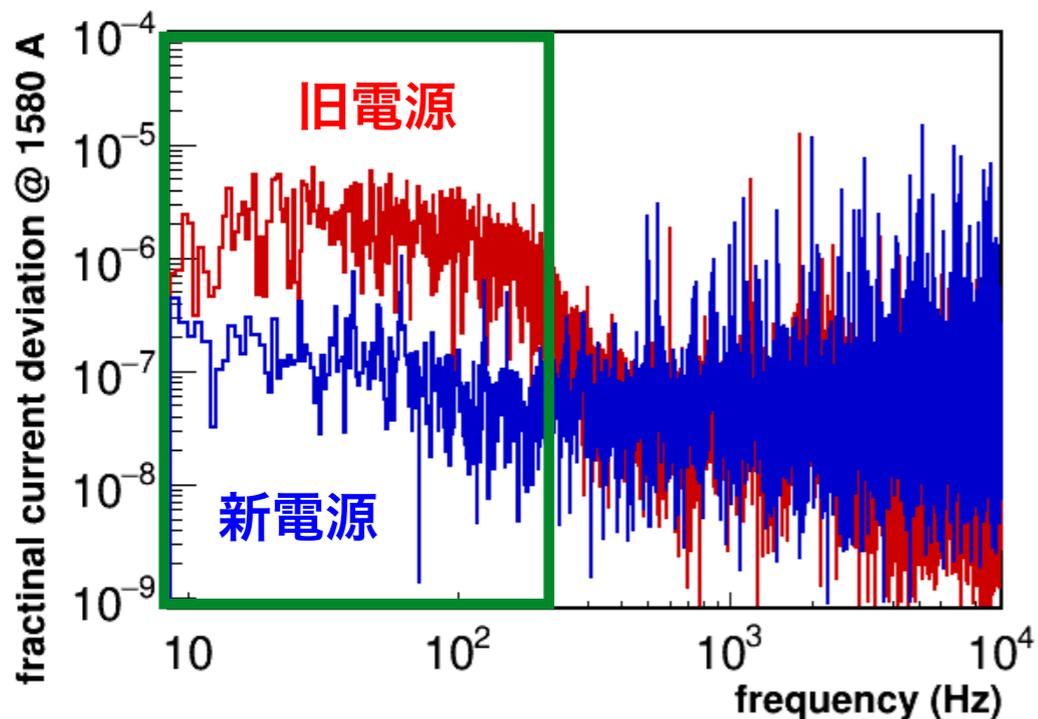


リップル測定

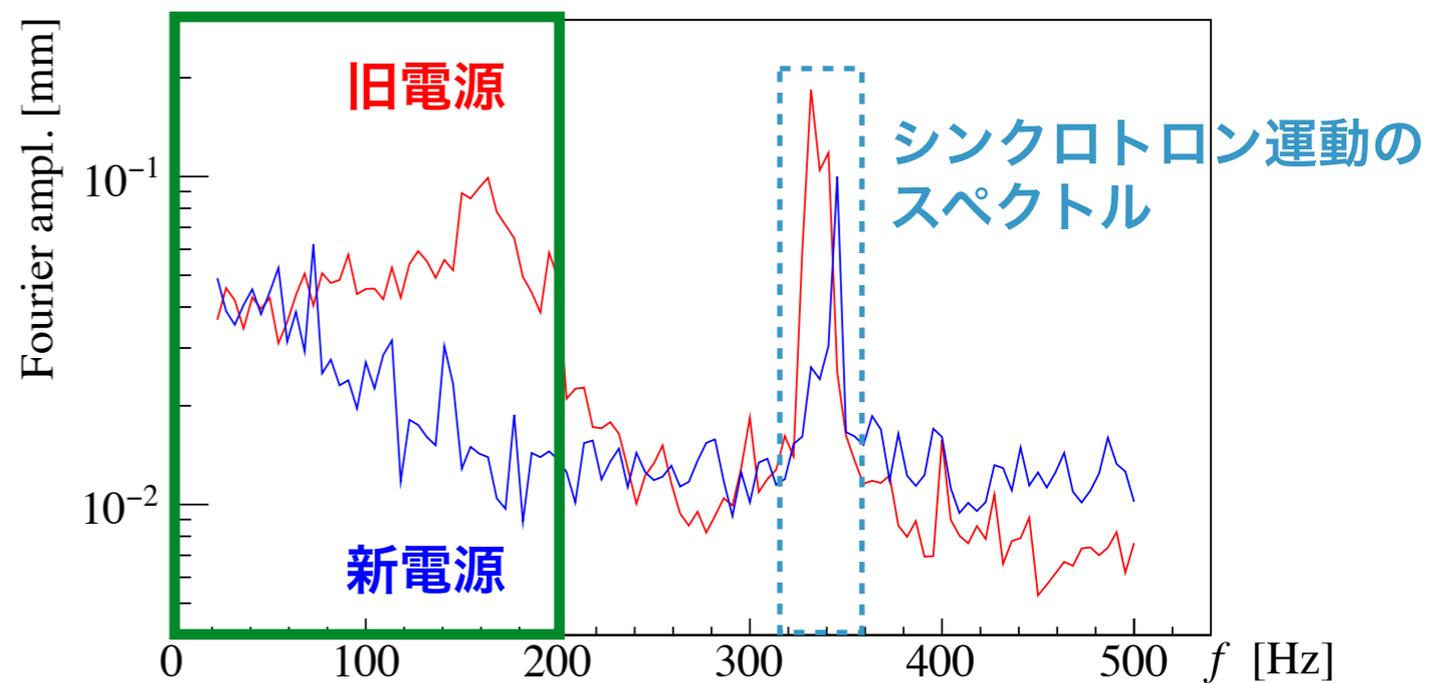
新しい偏向電磁石電源では、電流の200 Hz以下の周波数帯域のリップルが従来の1/10に抑えられている(左下)

高ディスパージョン位置でのビームのx方向振動をフーリエ解析することでビームベースでもリップル低減を確認できた(右下)

偏向電磁石電源の電流リップル



ビームで測定したリップル



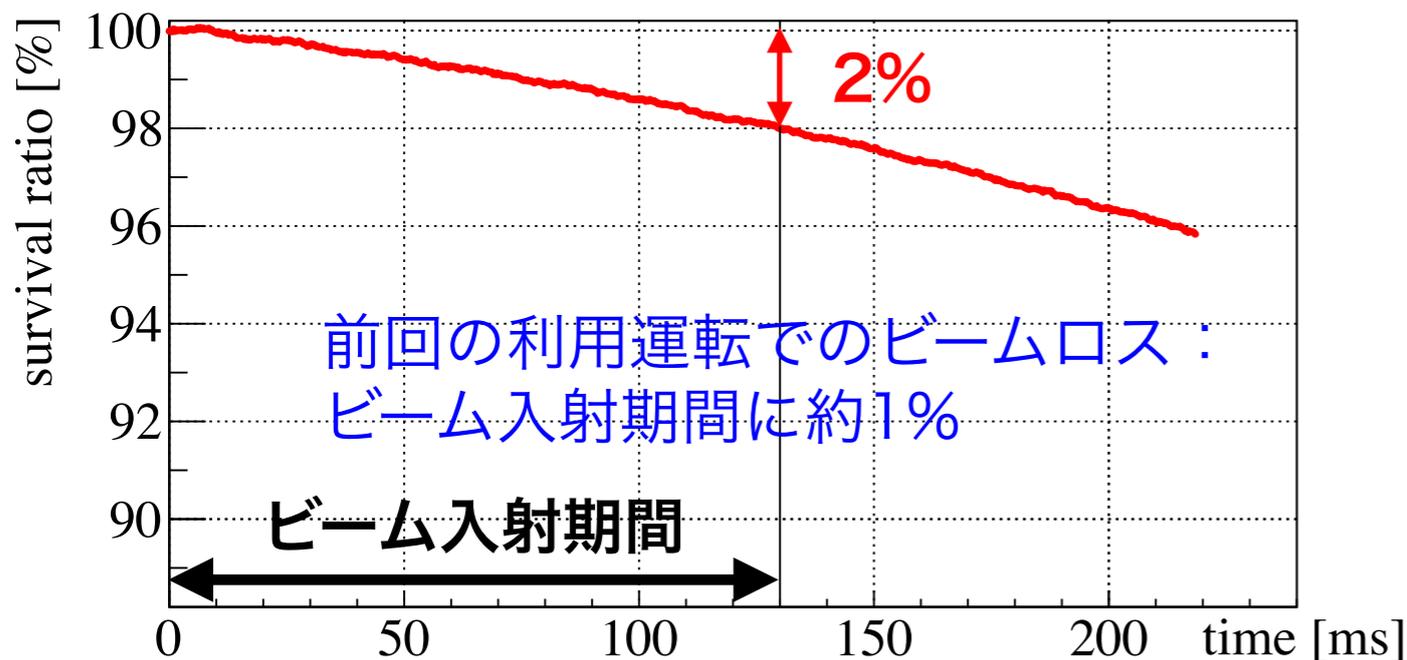
**T. Shimogawa *et al.*,
in *Proc. IPAC'19*, pp. 1266-1268.**

大強度ビームロス調整

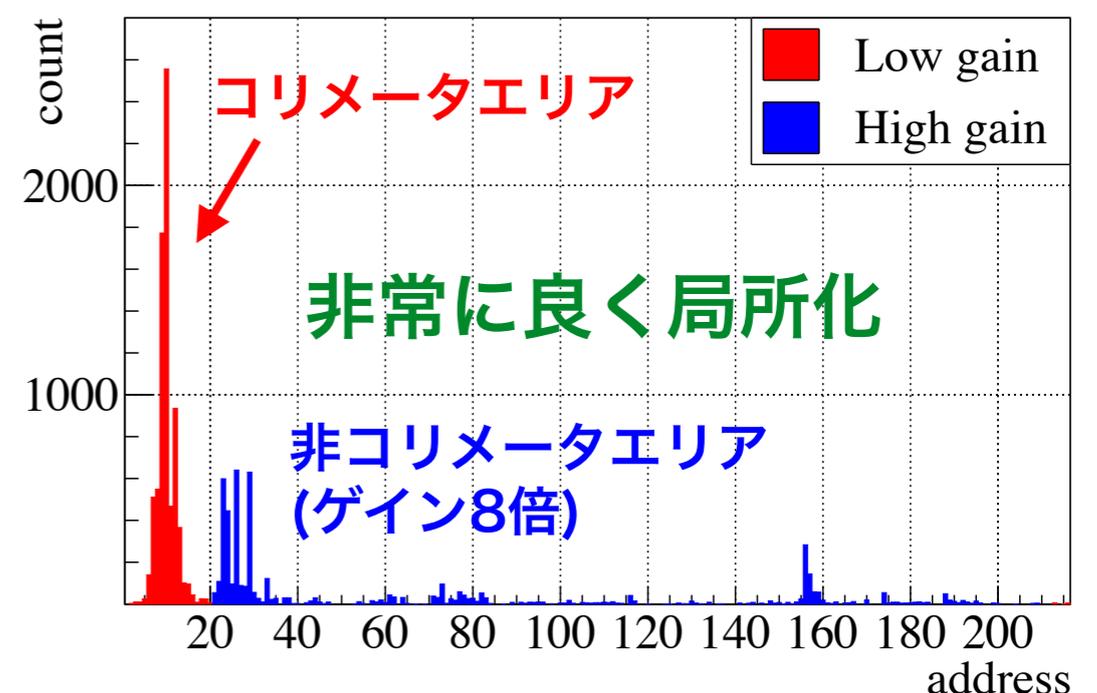
DC 1.36 s周期通電、2バンチ・強度 2.7×10^{13} ppbビームで行った
ビーム入射期間のロスは悪化しているが、
ビームロスは非常に良くコリメータエリアに局所化されている

→ 740 kW運転に必要な光学検証が確立された

ビーム生存率測定 (by DCCT)



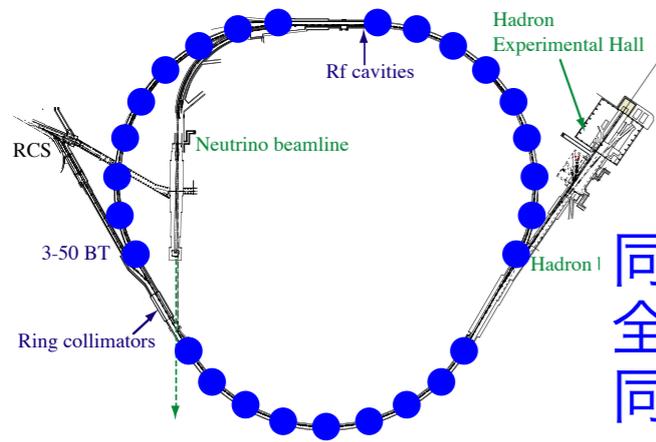
リング全周のロスカウント (by 比例計数管)



3回対称性の悪化の原因

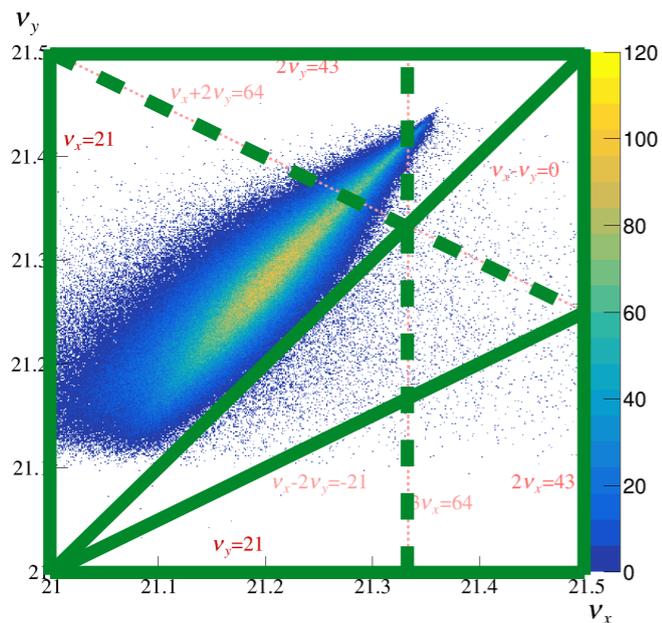
ビームロスが増えてしまった原因は
 いくつかの四極磁石ファミリーを分割したことによる
 リングの3回対称性の悪化にあると考えられる

アップグレード前



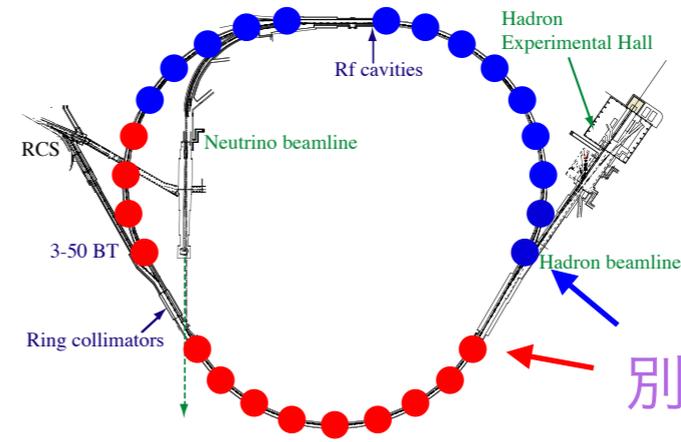
四極ファミリー
 QDXの例

同じファミリーの
 全ての四極電磁石は
 同じ電源で通電



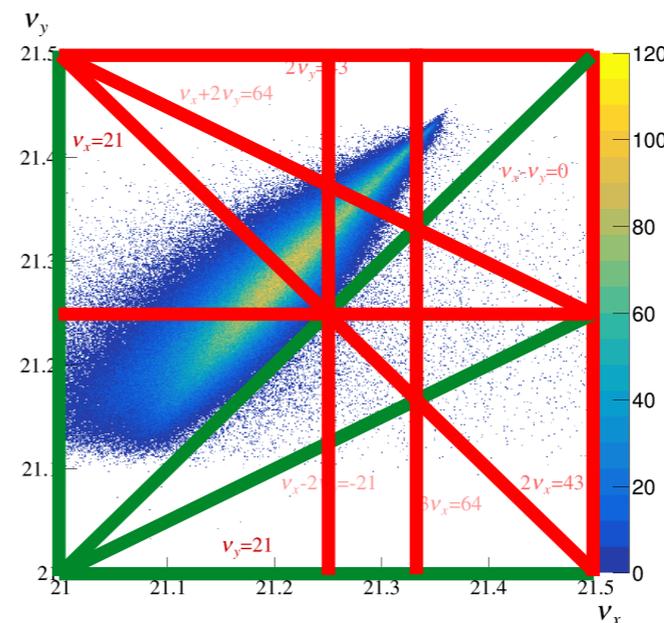
緑線：
 強い共鳴

アップグレード後



分割！

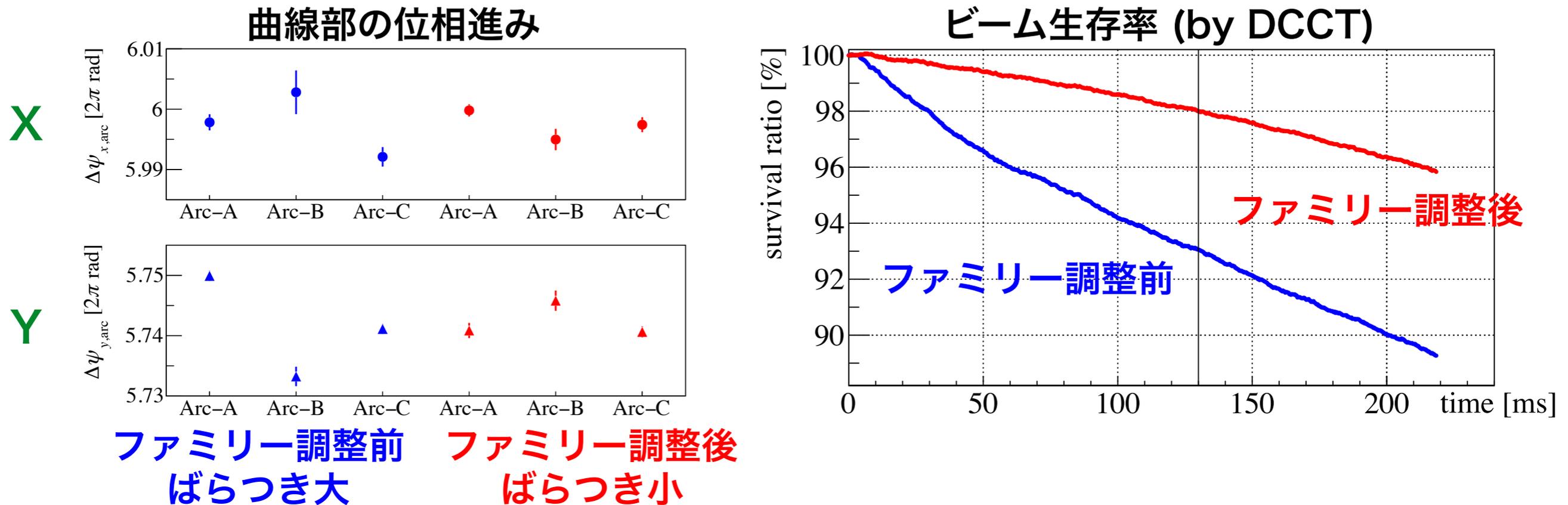
別電源で通電



赤線：
 強化される共鳴

3回対称性の悪化の影響

3回対称性の悪化の影響は、
曲線部のファミリー調整前後の測定を比較することで検証された



位相進みよりファミリー間の磁場ずれは0.5%→0.1%と試算された

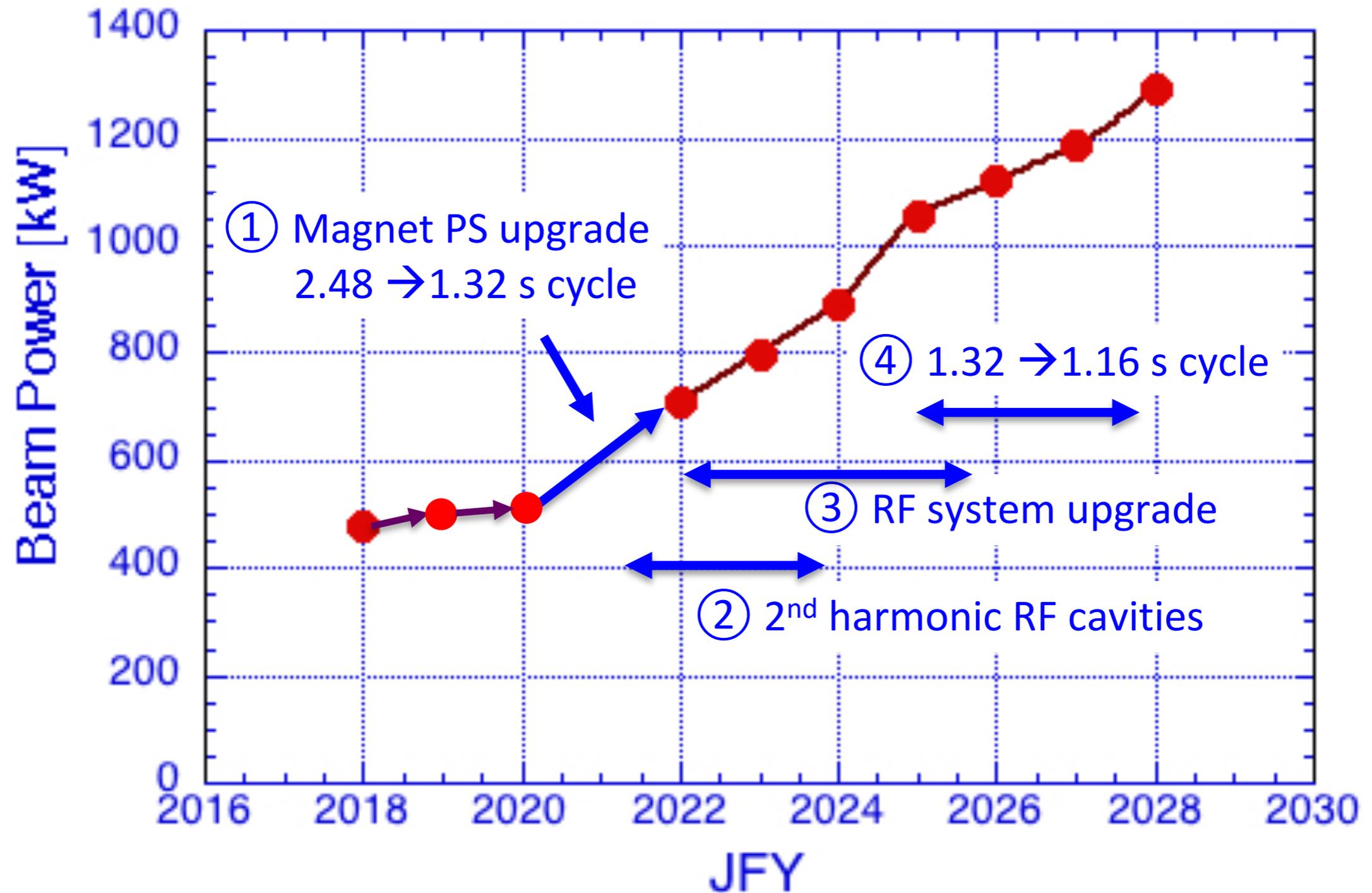
位相調整を追い込むことでビームロスが減らせるだろう

このために補正四極磁場を複数箇所に追加できるよう検討中

本発表の流れ

1. イントロダクション
2. 機器アップグレード
3. アップグレード後のビーム試験結果
- 4. MRの中期計画**
5. まとめ

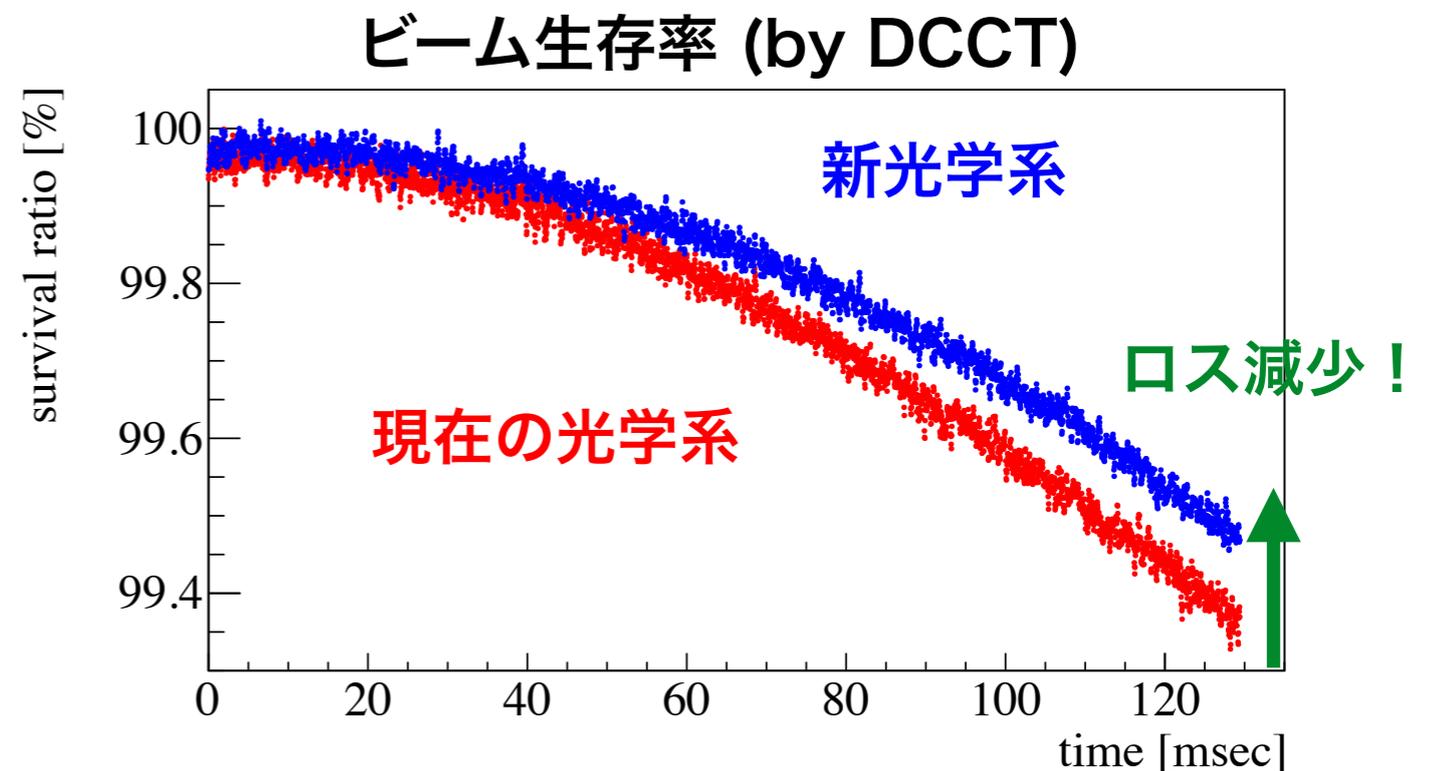
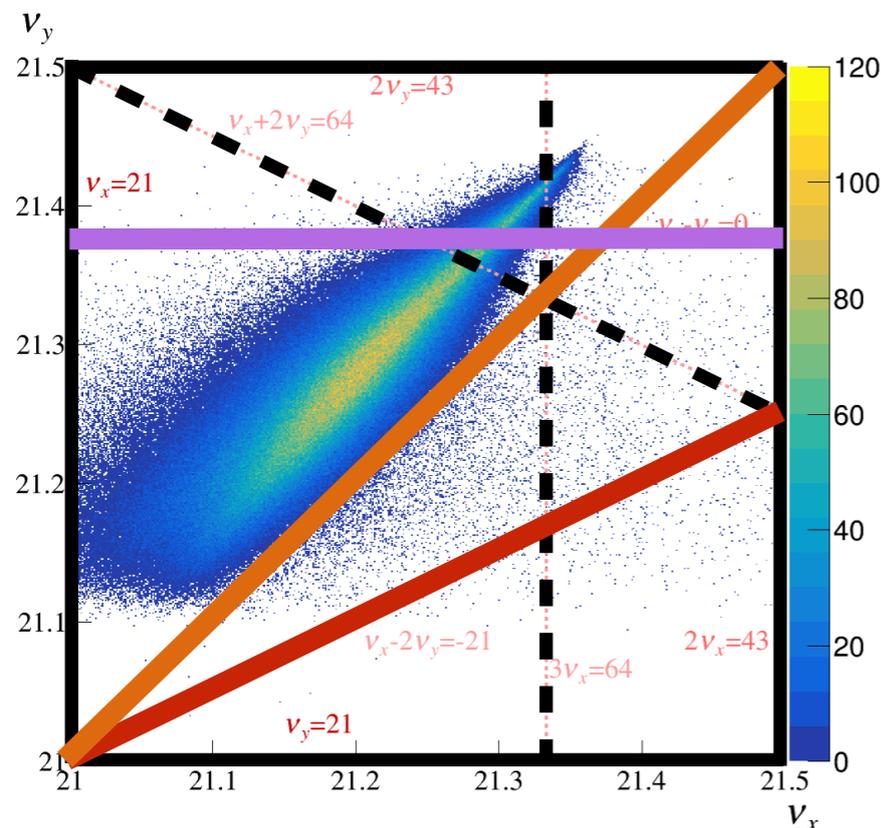
パワーアップグレード計画



新光光学系によるビームロス低減

複数の構造共鳴を補正・抑制できる新しいビーム光学系の
利用運転への採用も計画している

- $\nu_x - 2\nu_y = -21$ (六極磁場由来) T. Yasui *et al.*, PTEP **2022**, 013G01 (2022)
- $2\nu_x - 2\nu_y = 0$ (空間電荷効果由来)
- $8\nu_y = 171$ (空間電荷効果由来)



本発表の流れ

1. イントロダクション
2. 機器アップグレード
3. アップグレード後のビーム試験結果
4. MRの中期計画
- 5. まとめ**

まとめ

FX利用運転1.3 MW実現のため、MRでは

- ・ 主電磁石電源
- ・ RFシステム (進行中)
- ・ FXセプタム電磁石
- ・ コリメータシステム (今夏・来年度夏)

をアップグレードし、ビーム試験で性能評価を行った

740 kW運転に必要な光学検証が確立された

四極磁石のファミリー分割は3回対象性を悪化させ、ビームロスが増えた
位相調整を追い込むことでロス削減を目指す

2028年度に1.3 MWに到達する計画は概ね予定通り進んでいる