

J-PARC Main Ringの 遅い取り出し運転における スピル構造・ビームロス対策と 大強度化への展望

Ryotaro Muto

KEK/J-PARC Acc.

Outline

- ・ 遅い取り出しとは
- ・ J-PARC Main Ringの遅い取り出しの現状と課題
 - **ビームパワーの増強**
 - = **ビームロスの低減**
 - = ビームの不安定化の抑制
 - **ビームの時間構造の平坦化**
- ・ まとめ

J-PARC Main Ringの遅い取り出し

J-PARC

Japan Proton Accelerator Research Complex

400MeV
LINAC

3GeV
RCS

Neutrino
to SK

MLF

遅い取り出し

30 GeV
Main Ring

Hadron
Experimental
Facility

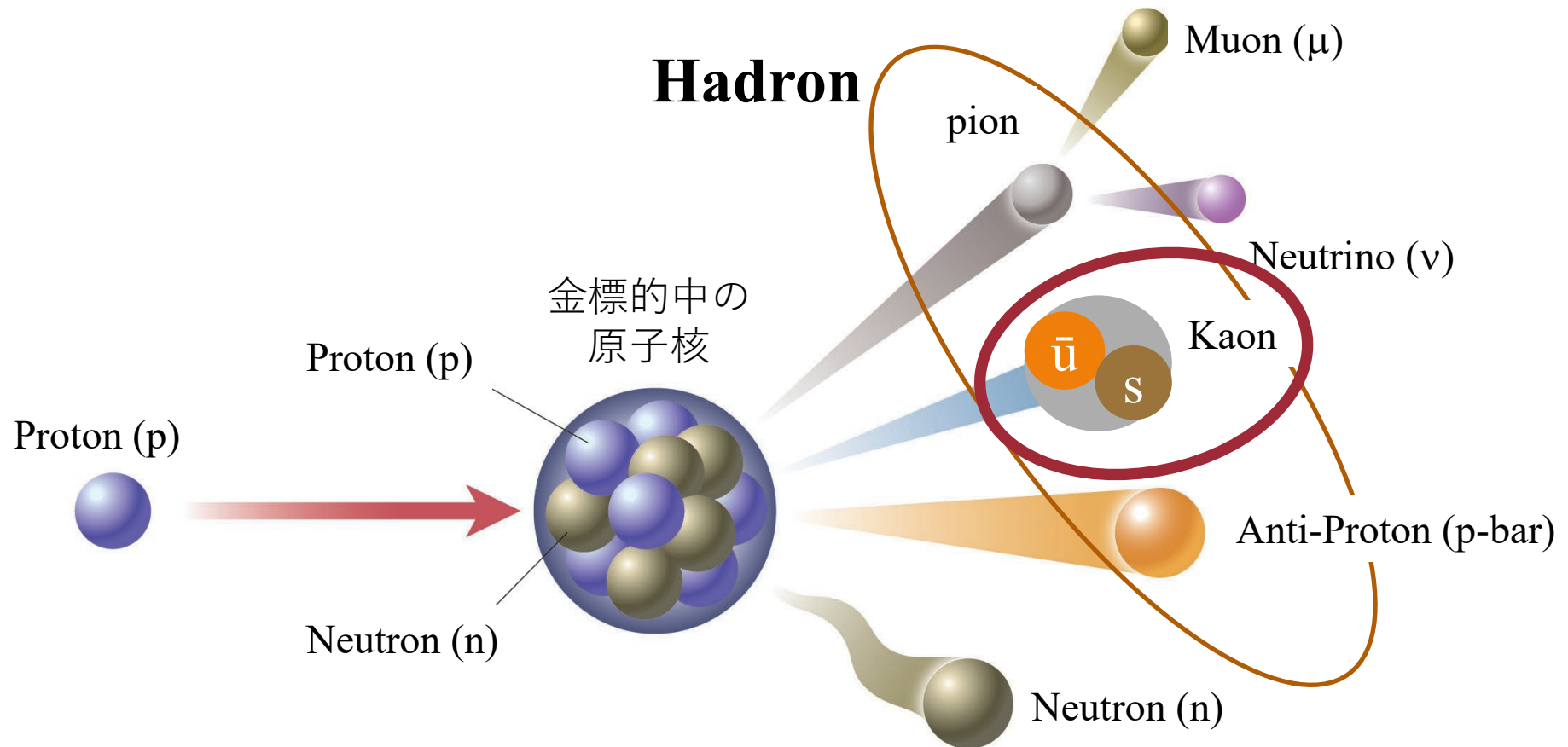
MR Params. in Slow Extraction

Circumference	1567.5 m
Kinetic Energy	30 GeV (or 8 GeV)
Betatron tune	(22.333, 20.78)
Repetition	4.24 sec (from 2024 Mar)
Spill Length	~2 sec

Bird's eye photo
in January 2016

Physics Experiments in the Hadron Experimental Facility

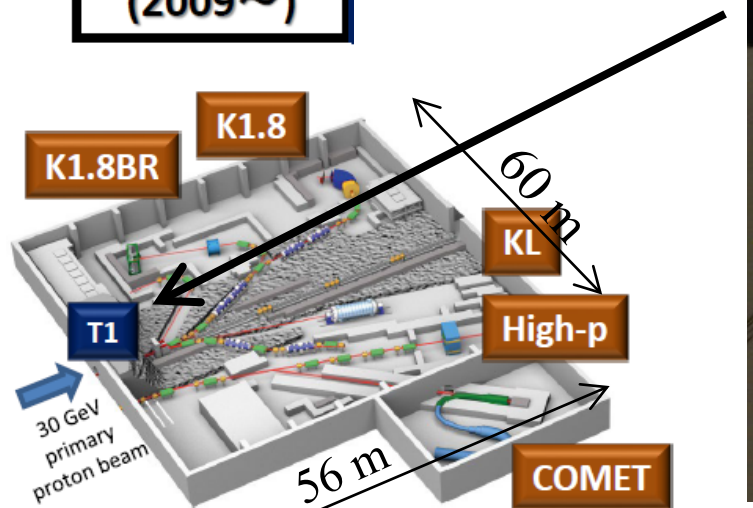
陽子ビームを金標的に照射し、生成される2次粒子(**K中間子** / **π 中間子**)
または**陽子そのもの**をつかって素粒子・原子核実験を行っている



Hadron Experimental Facility & Its Extension Plan

Acceptable
Beam Power:
115 kW

Present HEF
(2009~)



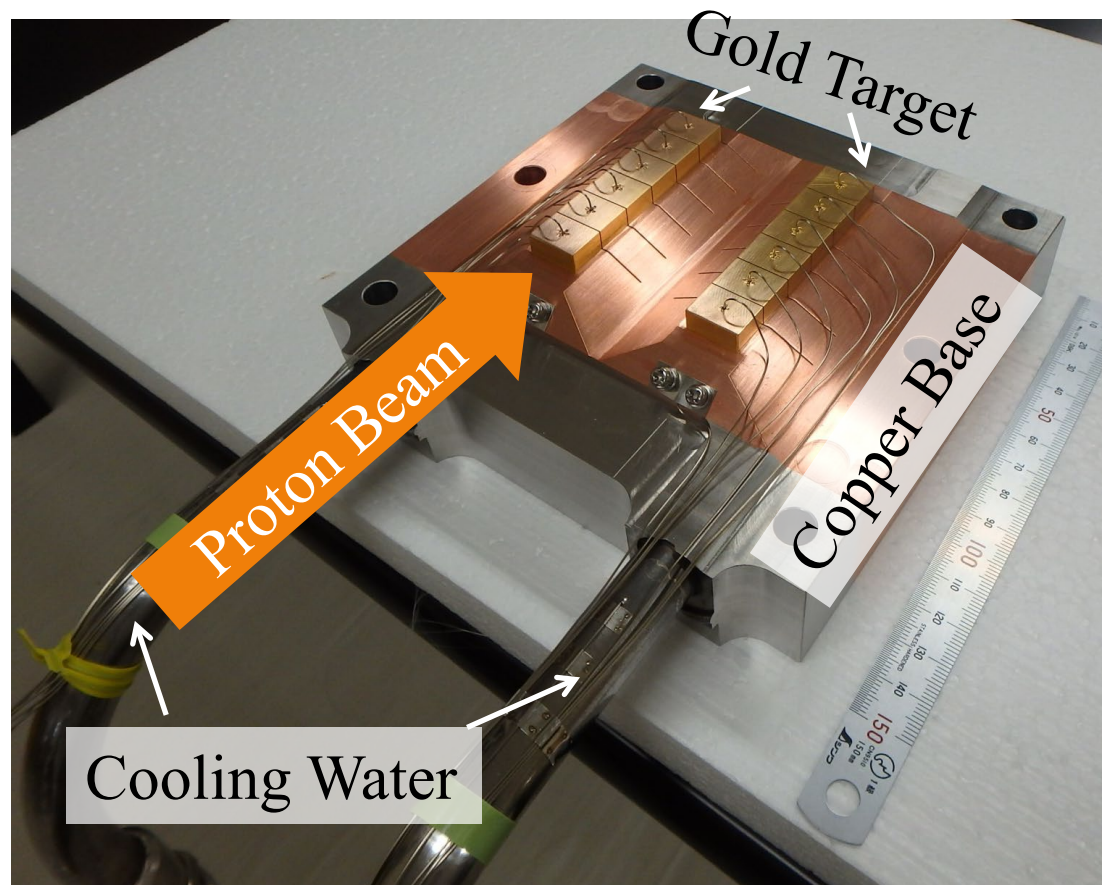
1 production target (T1)

1 secondary-charged beamline (K1.8/K1.8BR)

1 neutral beamline (KL)

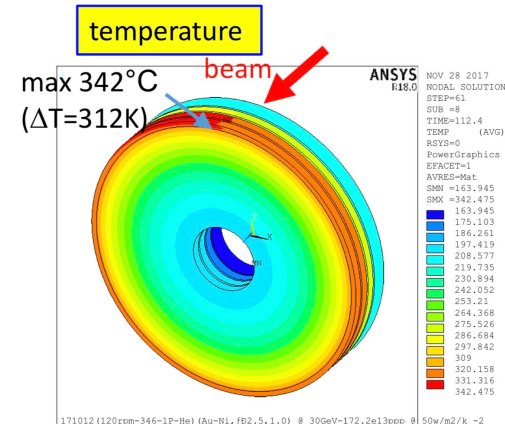
1 primary beamline (High-p)

1 muon beamline (COMET)



New Production Target
(under development)

He gas cooled (assuming 50 W/m²/K)



Acceptable
Beam Power: >150kW

どんなビームが必要か

大強度の陽子ビーム

たくさんK中間子をつくりたい!

ビームロスの低減

ビームの不安定化の抑制

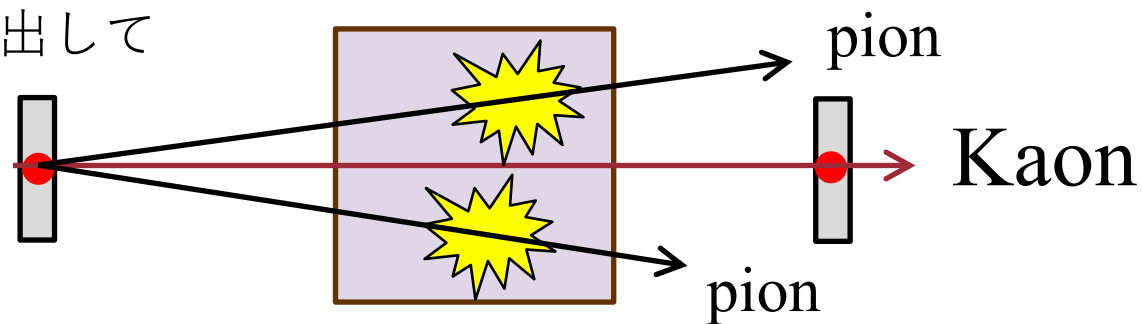
約2秒間にわたる“遅い取り出し”

発生した中間子を1個1個、何の粒子か識別(PID)し、
運動量をはかりたい(磁石の前後での位置を検出してtracking)

取り出されるビーム強度が高いとPIDを間違えたり、
イベントが重なってtrackingができなくなったりする

ビーム強度の時間変動なくフラットにビームを取り出して
大強度Kビームを最大限に利用した実験をしたい

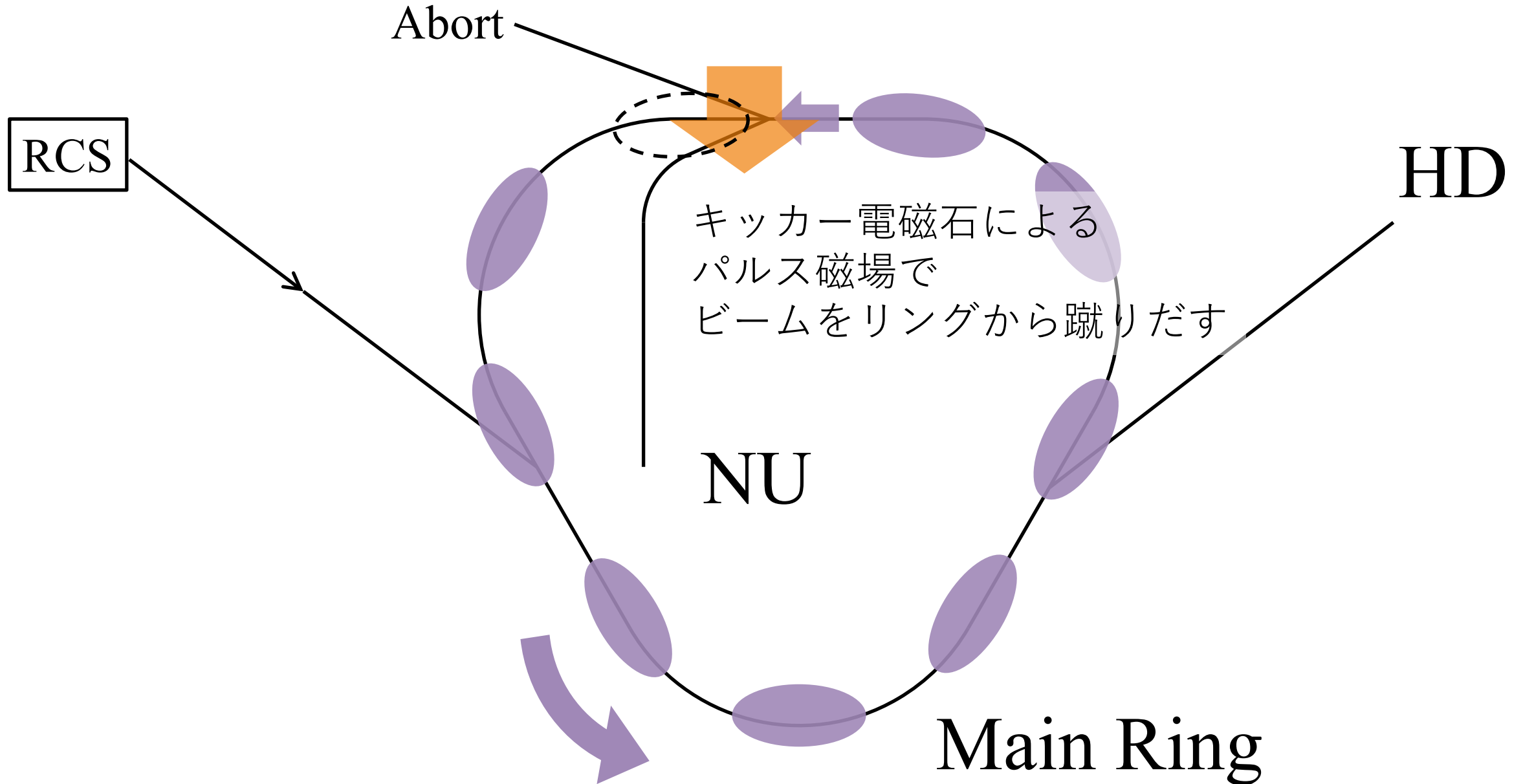
ビーム強度の時間変動の平坦化
(スピン制御)



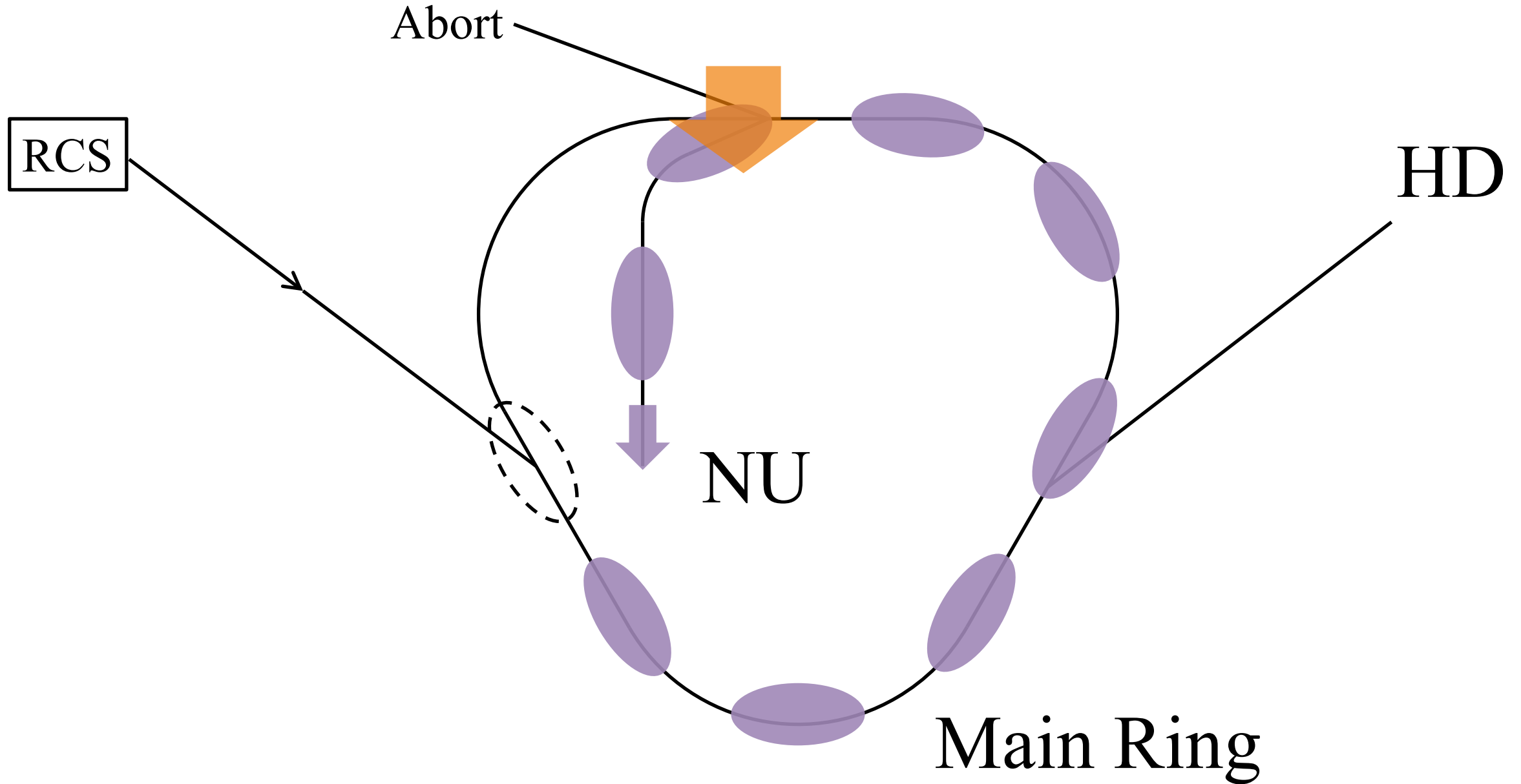
Aerogel Cherenkov Detector

遅い取り出しのやり方

速い取り出し

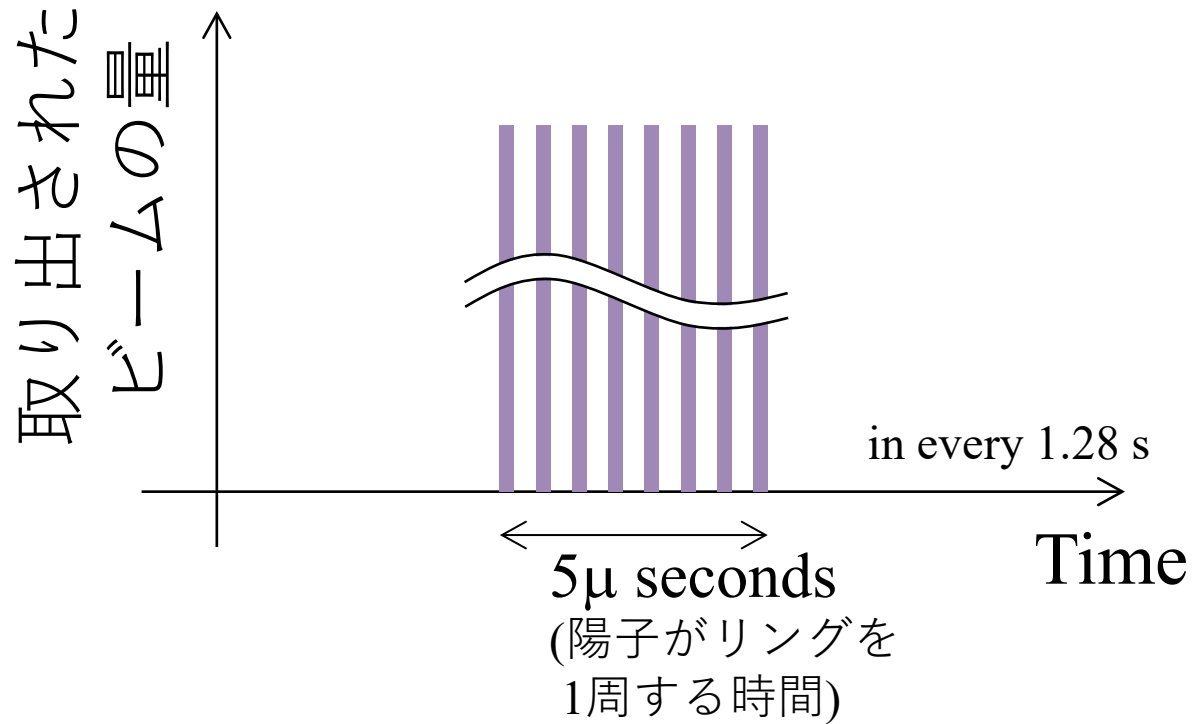


速い取り出し

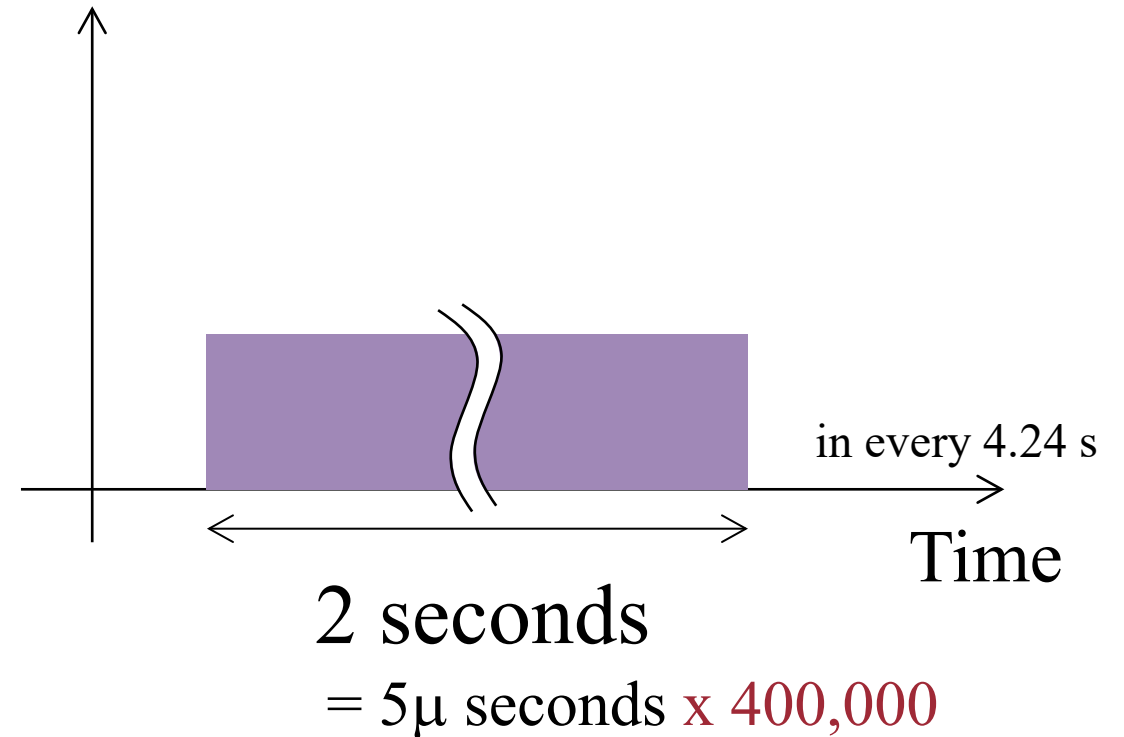


取り出しビームの時間構造

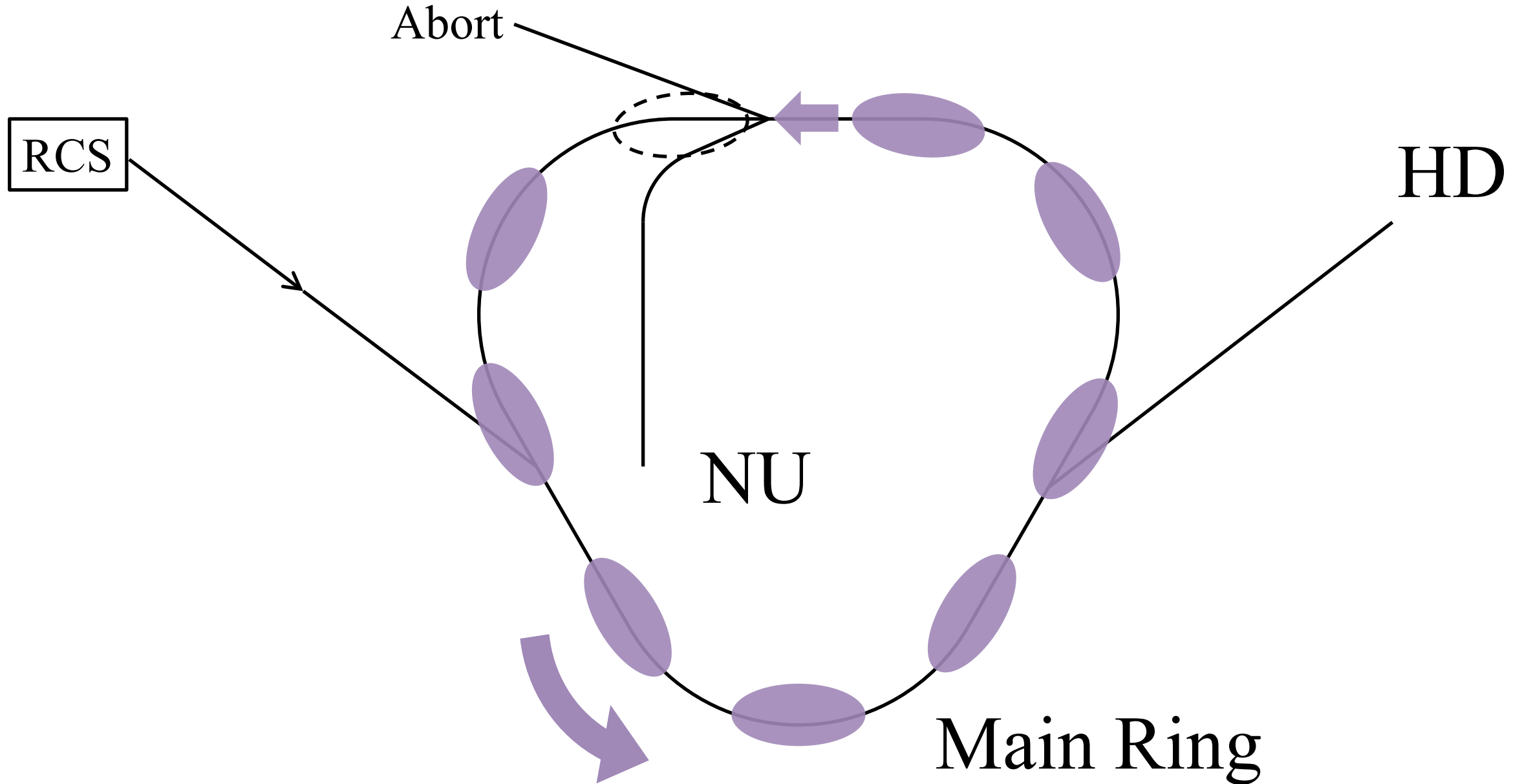
FX (Fast Extraction)



SX (Slow Extraction)



遅い取り出し



遅い取り出し

Abort

RCS

HD

まず
加速のための
RFをOFFにする
(デバンチ)

ここでおこる
ビームの不安定化の対処
→杉山さんのトーク

NU

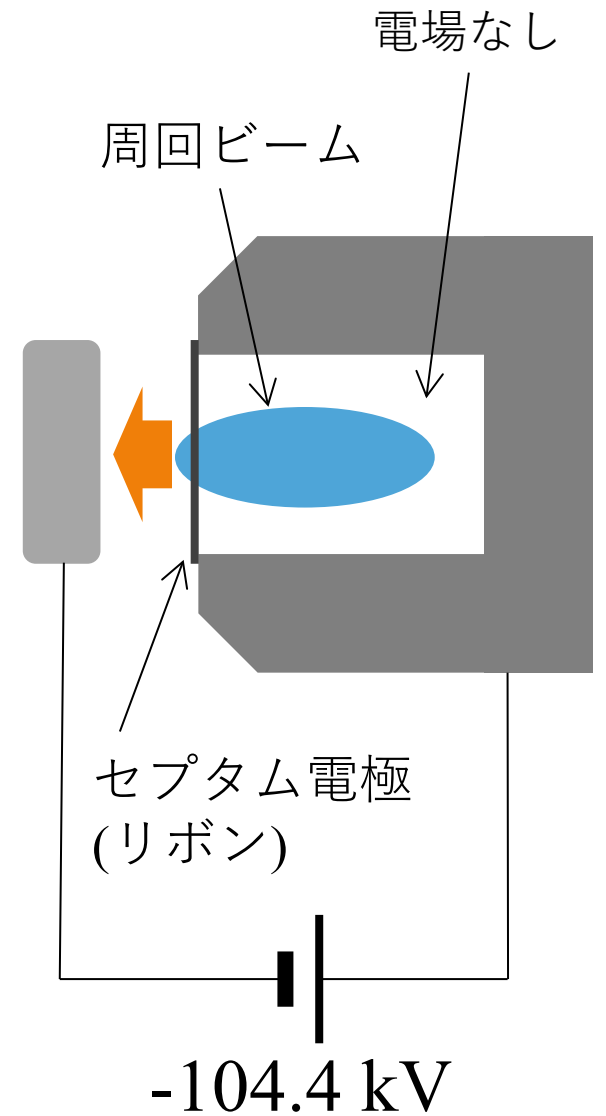
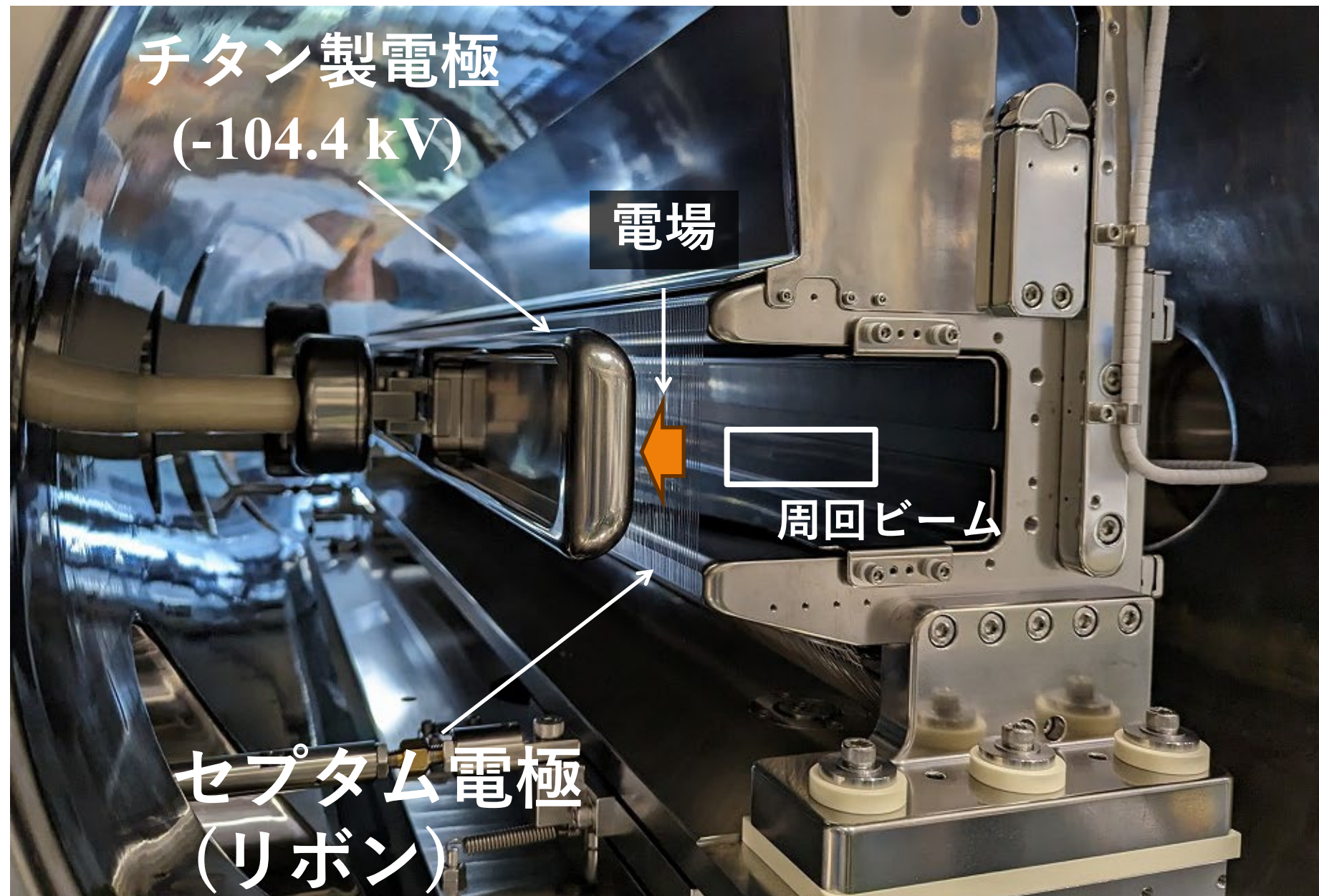
Main Ring

遅い取り出し — かつらむきのようにビームを削り出す

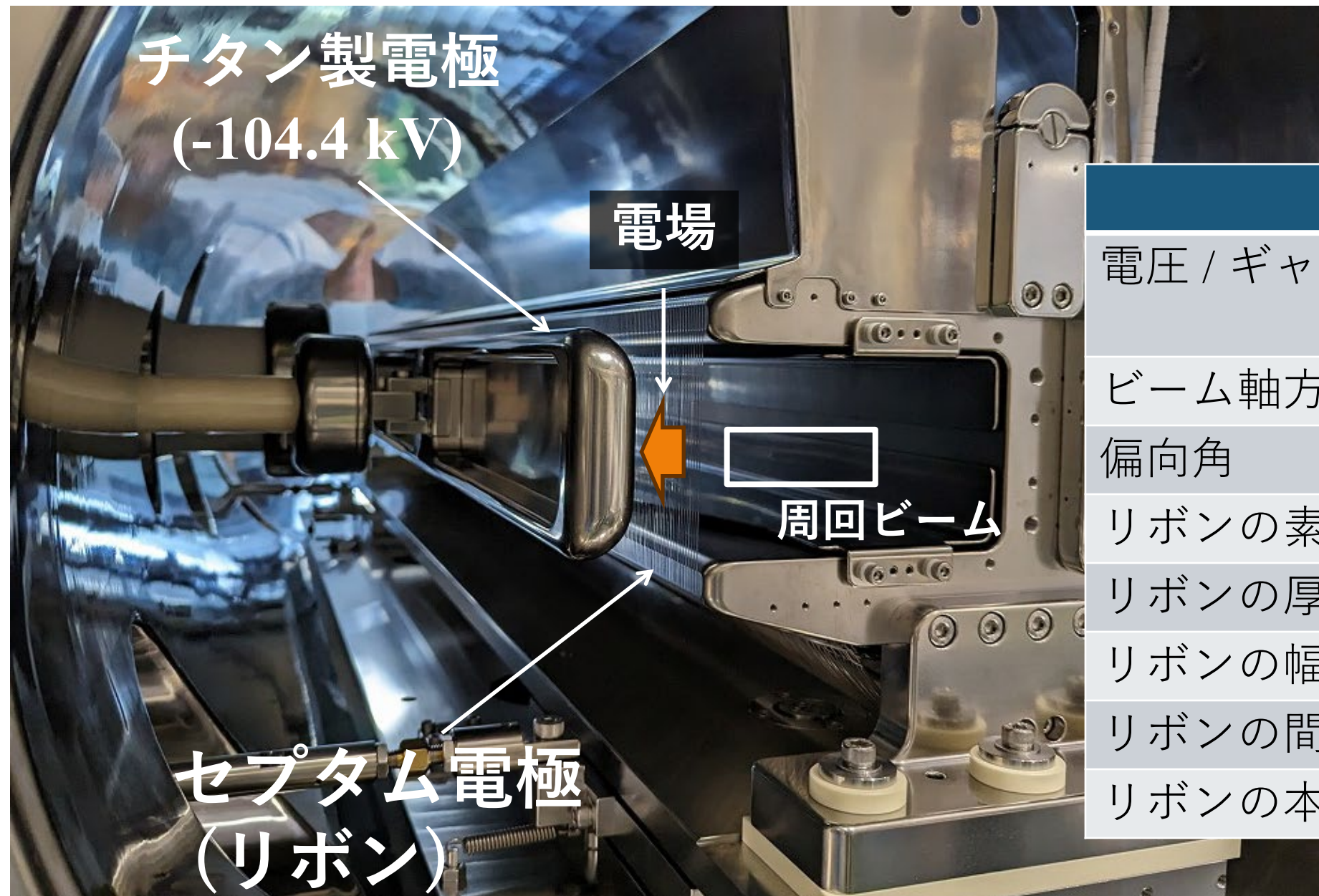


かつらむき

静電セプタム - ビームを削り出す包丁

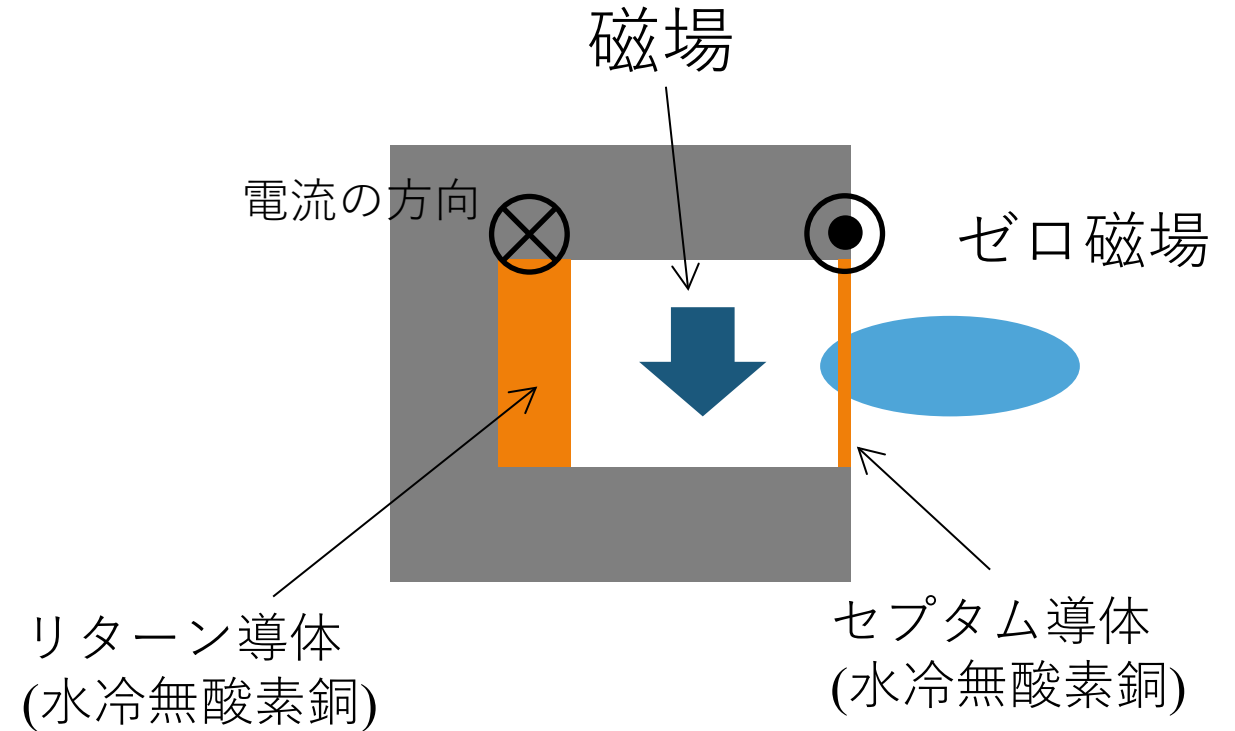
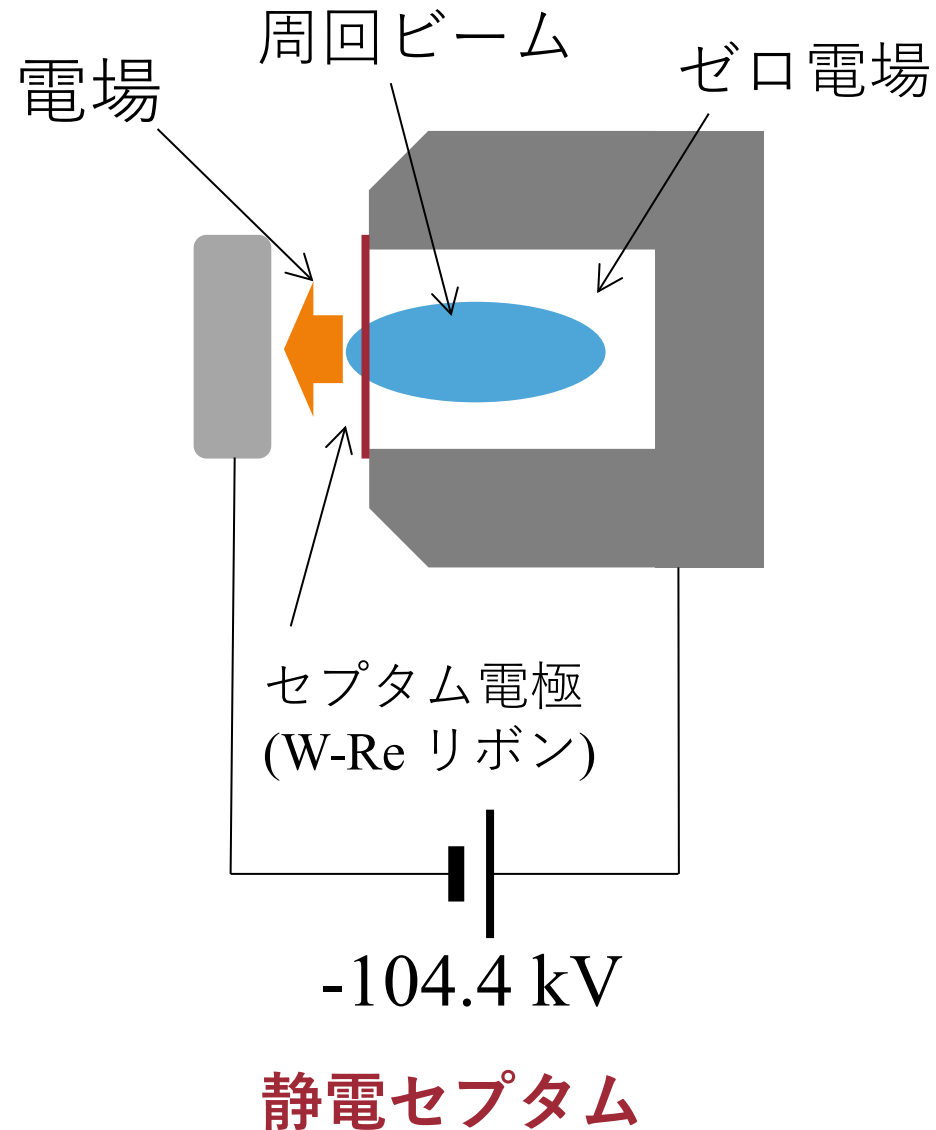


静電セプタム – ビームを削り出す包丁



	ESS1,2
電圧 / ギャップ	104 kV / 25 mm = 4.2 MV/m
ビーム軸方向長さ	1.5 m
偏向角	- 0.2 mrad
リボンの素材	W-26 Re
リボンの厚さ	30 μ m
リボンの幅	1 mm
リボンの間隔	3 mm
リボンの本数	495

なぜ電場をつかうのか

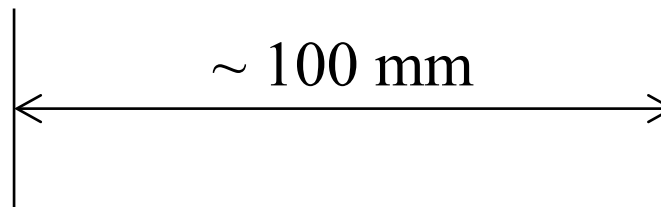
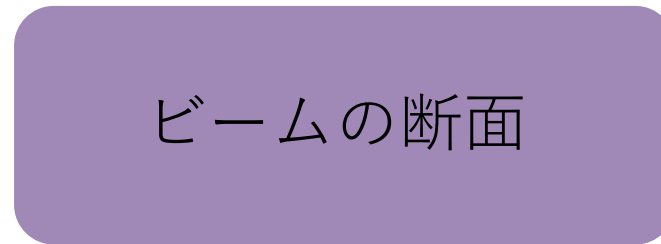
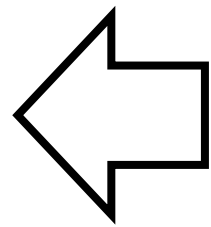
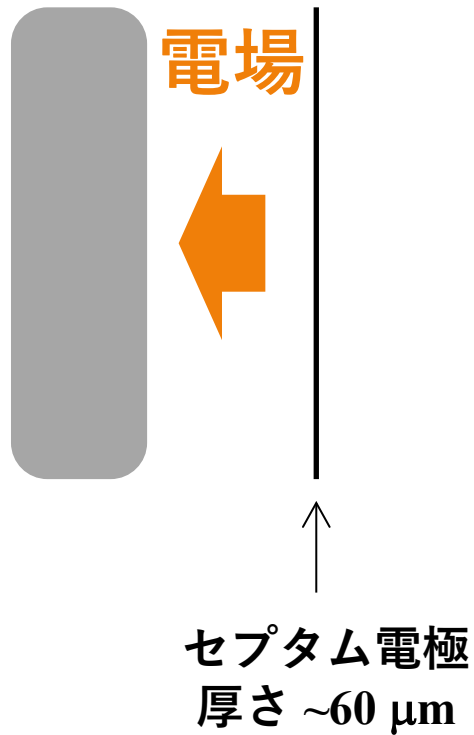


セプタム電磁石

- セプタム導体を 1 mm 以下の厚さにするのは難しい
- ~ 3000A の電流 → 水冷
 - 磁場による外向きの力に耐えられる強度が必要

どのようにビームを電場領域に送り込むか

静電セプタム



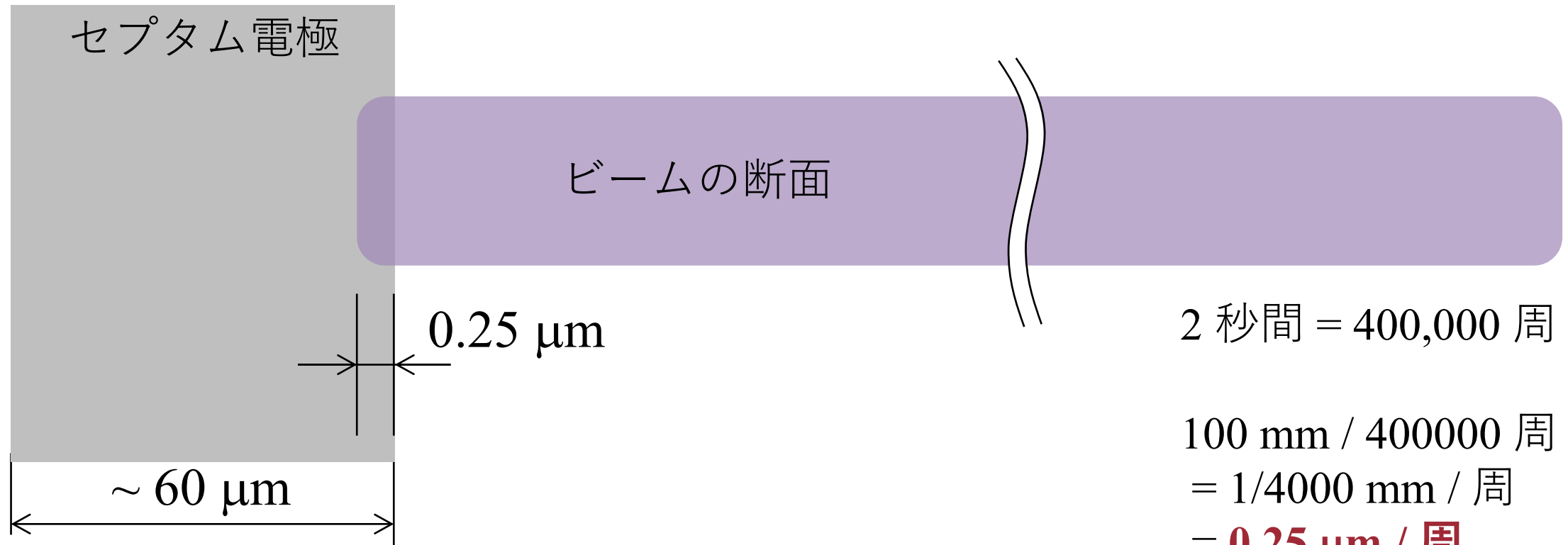
ビームをゆっくりと2秒間かけてセプタム電極のほうに動かしていくとどうなるか

$$2 \text{ 秒間} = 400,000 \text{ 周}$$

$$\begin{aligned} 100 \text{ mm} / 400000 \text{ 周} \\ = 1/4000 \text{ mm} / \text{周} \\ = \mathbf{0.25 \mu\text{m} / \text{周}} \end{aligned}$$

どのようにビームを電場領域に送り込むか

ビームをゆっくりと2秒間かけてセプタム電極のほうに動かしていくとどうなるか



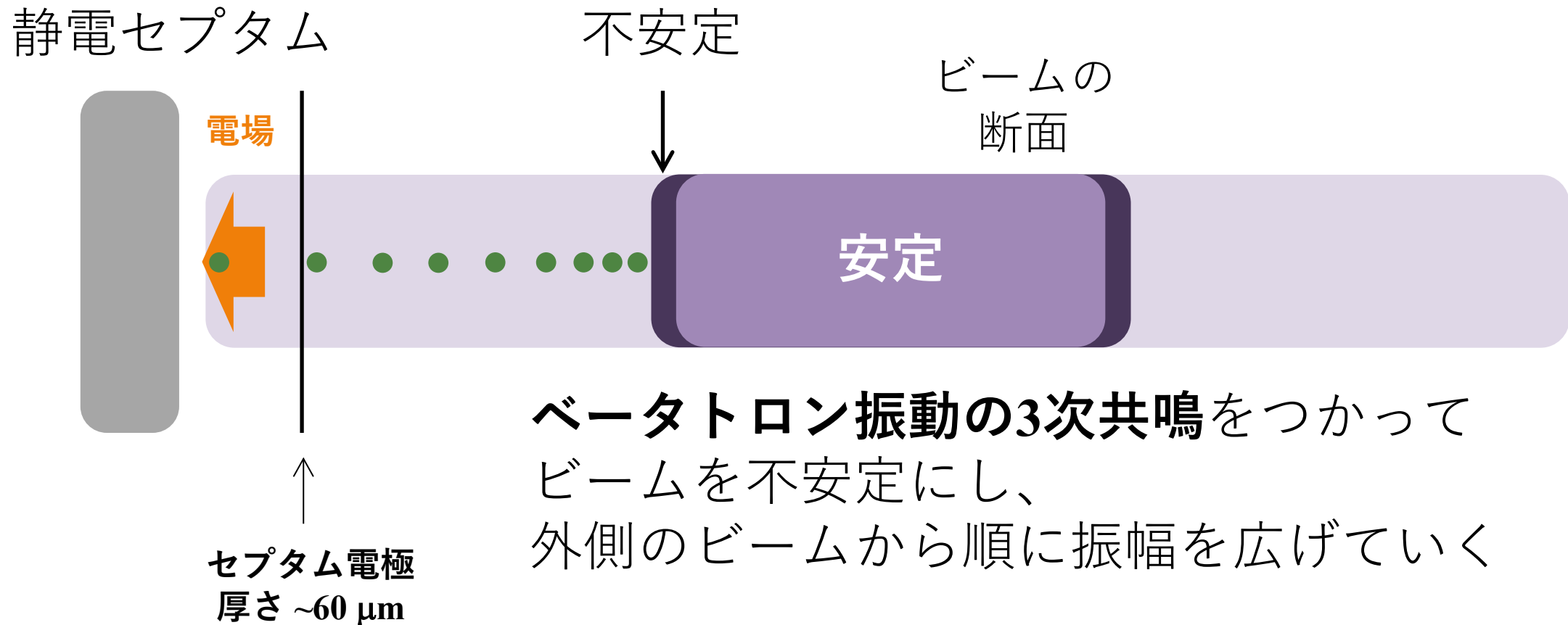
$$2 \text{ 秒間} = 400,000 \text{ 周}$$

$$\begin{aligned} 100 \text{ mm} / 400000 \text{ 周} \\ = 1/4000 \text{ mm} / \text{周} \\ = \mathbf{0.25 \mu m / 周} \end{aligned}$$

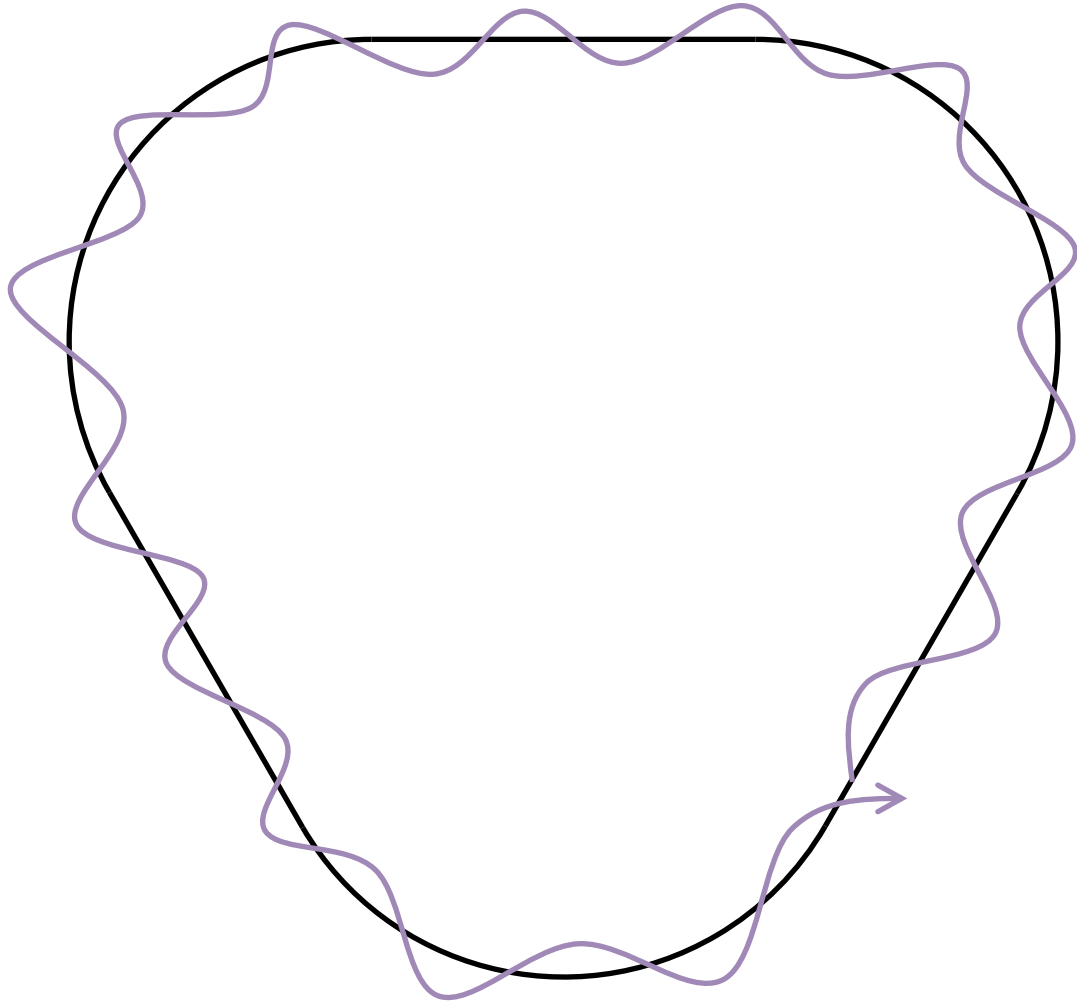
すべての粒子が失われる!

どのようにビームを電場領域に送り込むか

実際のやりかた



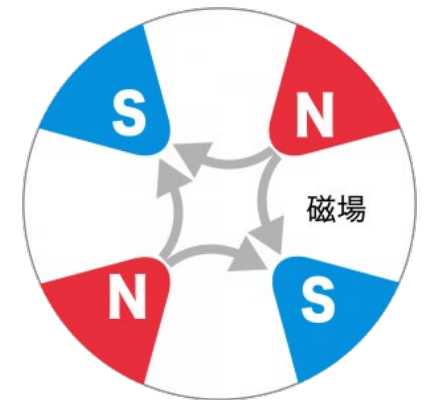
ベータトロン振動



メインリングのなかを、
陽子は理想軌道を中心として
水平&鉛直に振動しながら
周回している

→ ベータトロン振動

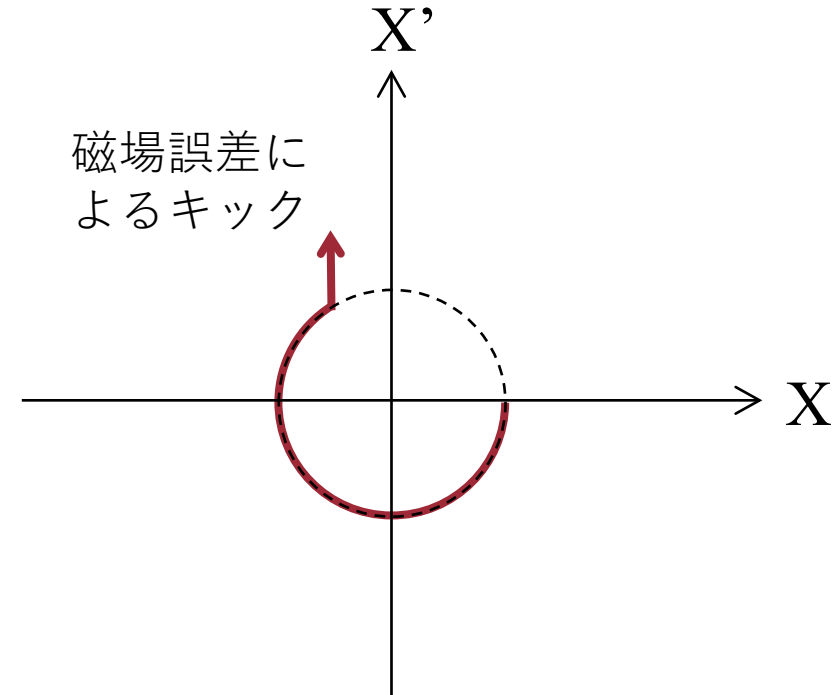
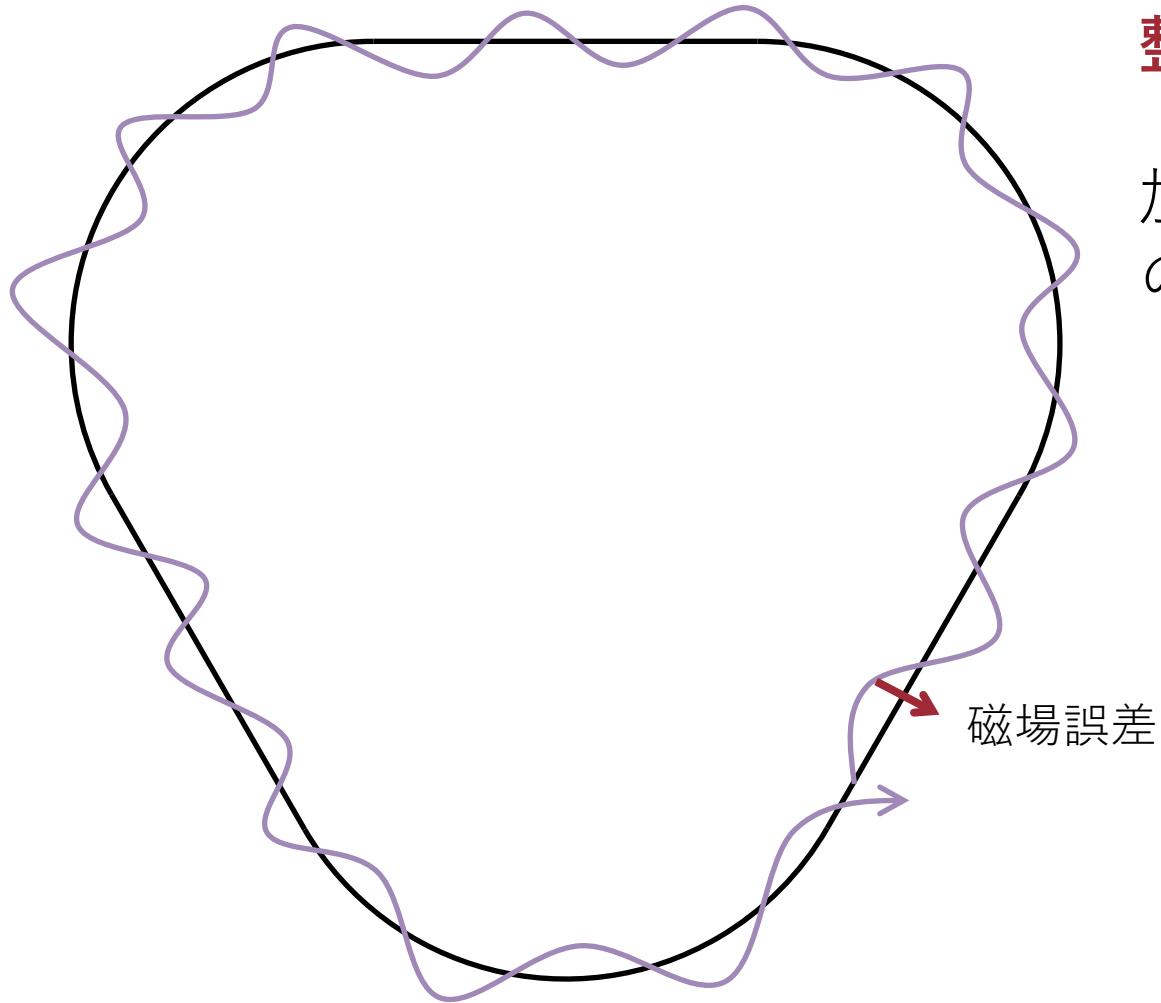
リング全周に配置された**四極電磁石**が発散
しようとする陽子を収束する働きを持つ
→ 振動の復元力として働く



ベータトロン振動の共鳴

1周する間の**ベータトロン振動数**が
整数だとどうなるか?

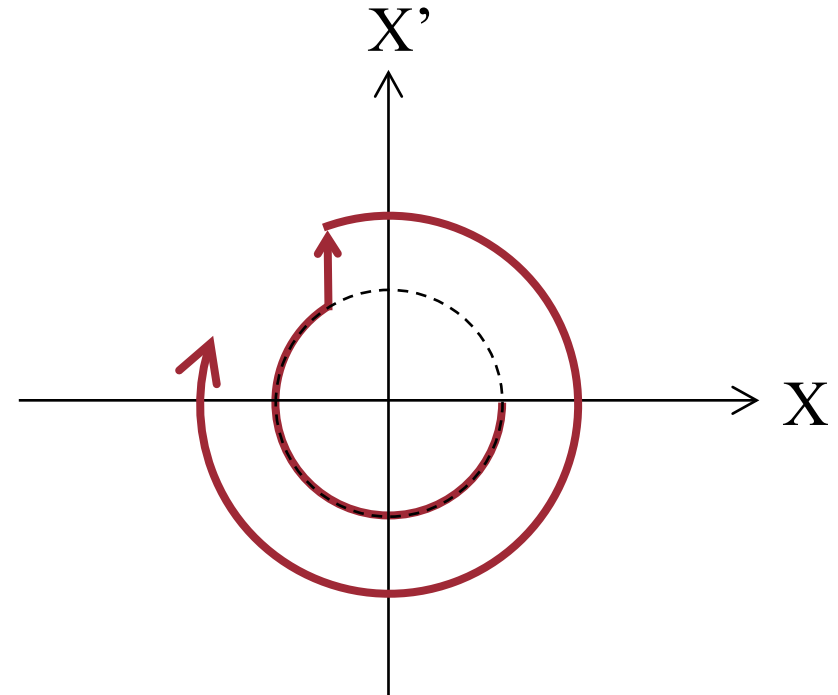
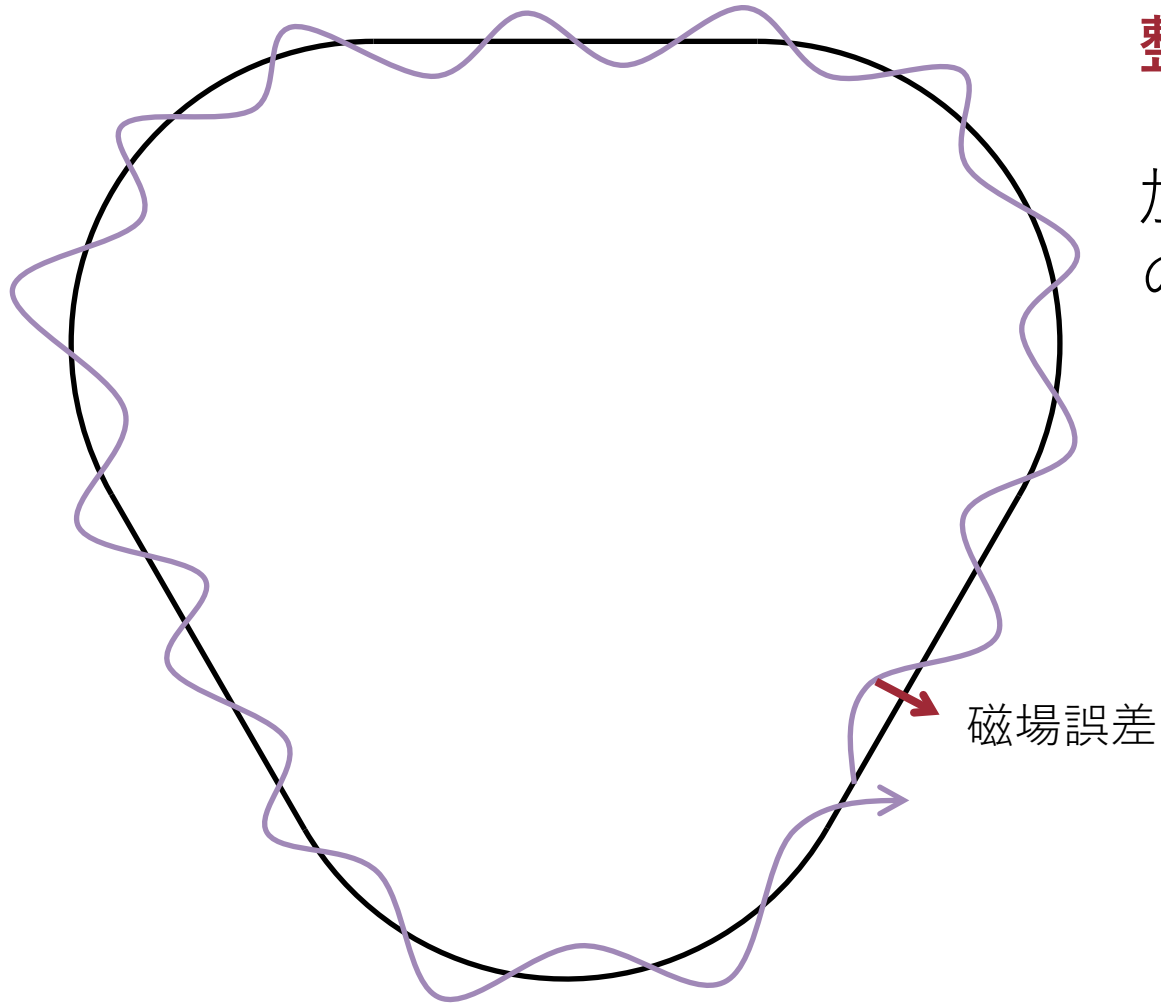
加速器にはつねに電磁石の磁場や設置位置
のずれがある



ベータトロン振動の共鳴

1周する間の**ベータトロン振動数**が
整数だとどうなるか？

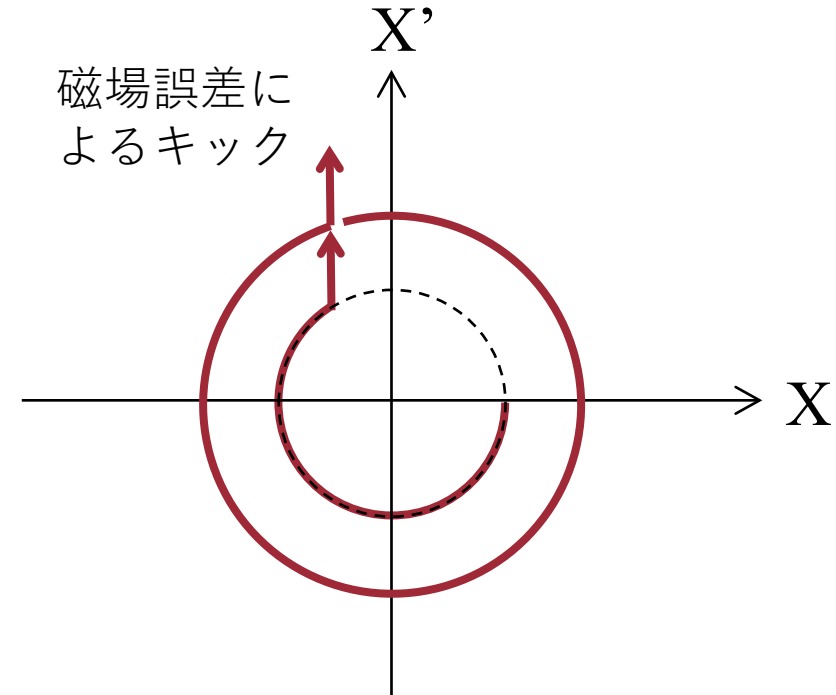
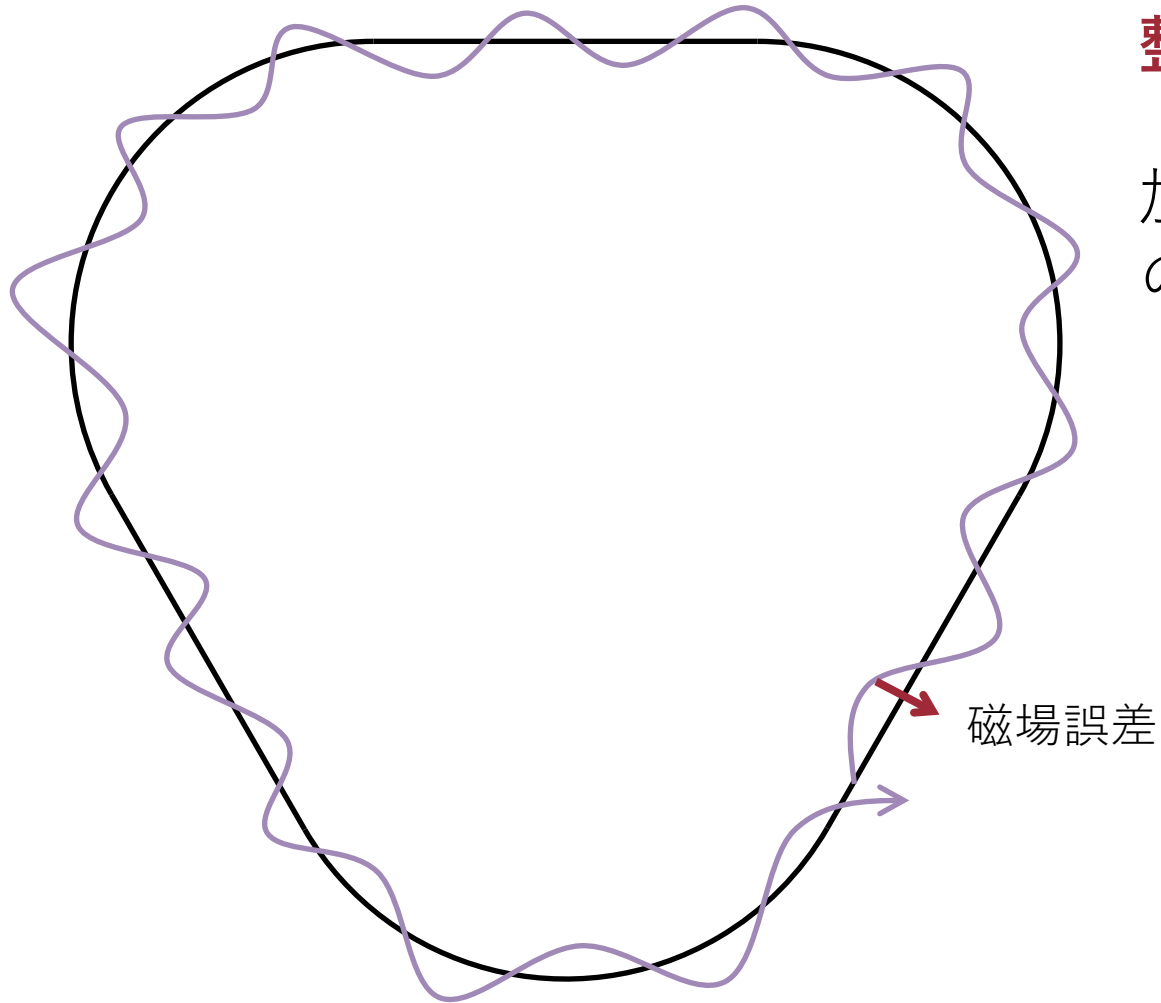
加速器にはつねに電磁石の磁場や設置位置
のずれがある



ベータトロン振動の共鳴

1周する間の**ベータトロン振動数**が
整数だとどうなるか?

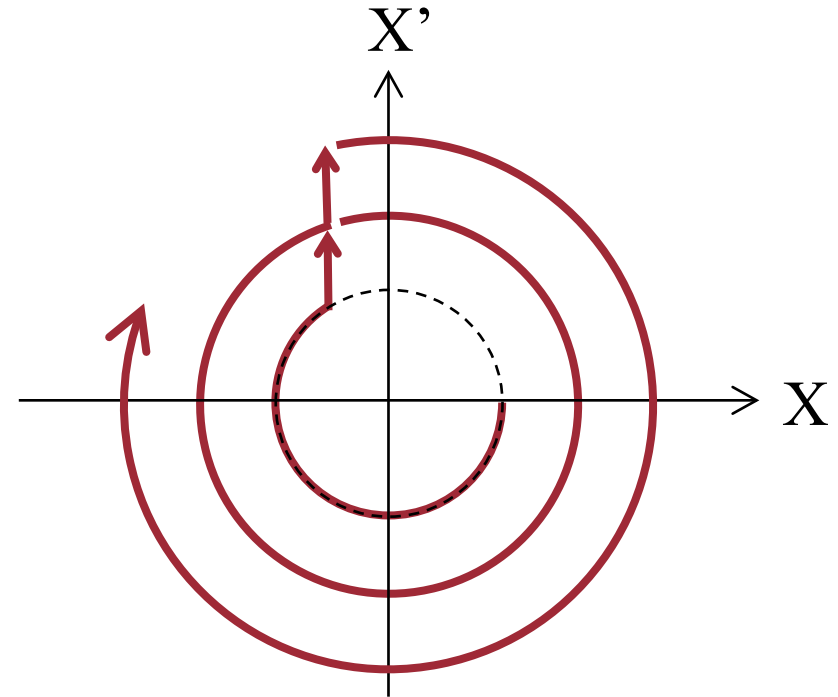
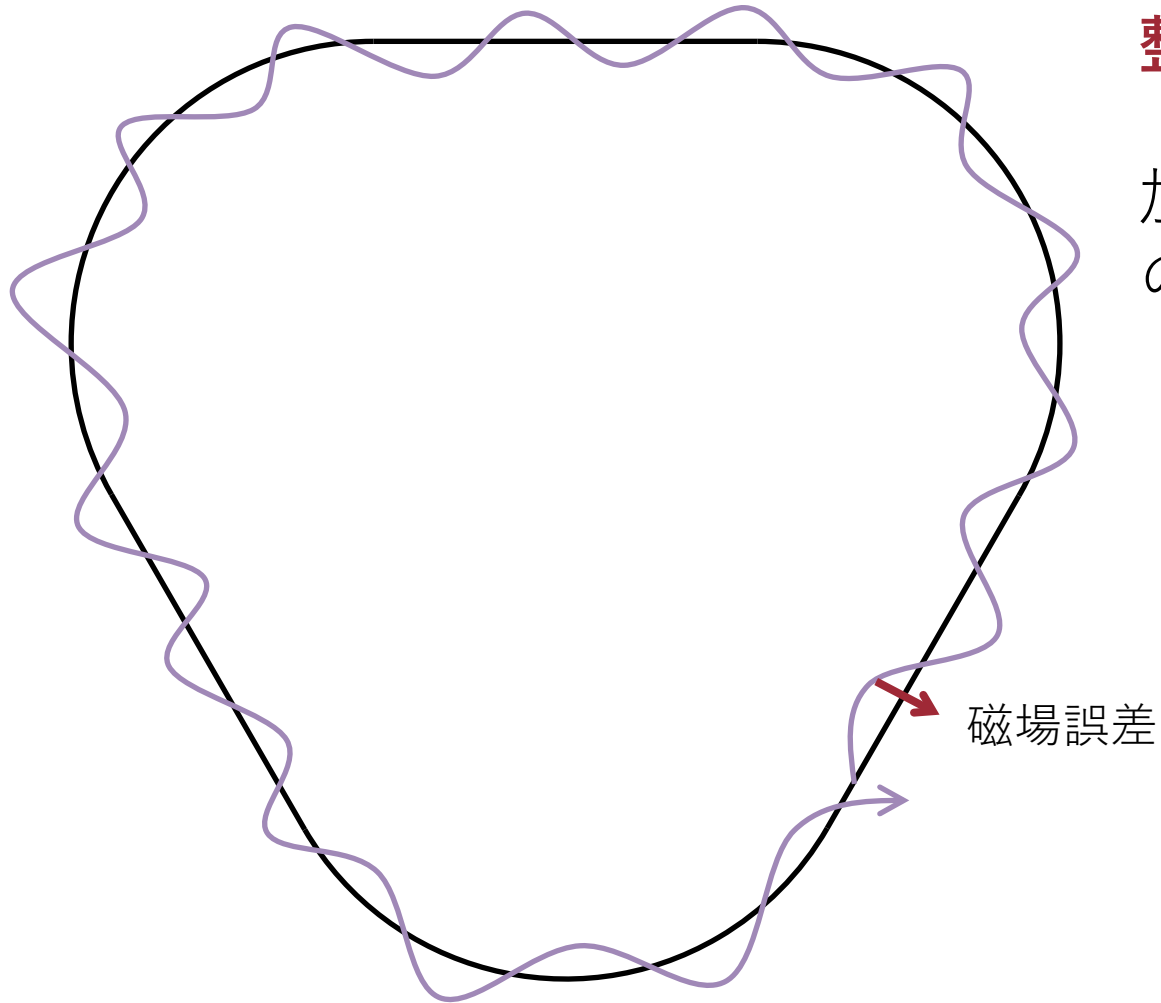
加速器にはつねに電磁石の磁場や設置位置
のずれがある



ベータトロン振動の共鳴

1周する間の**ベータトロン振動数**が
整数だとどうなるか?

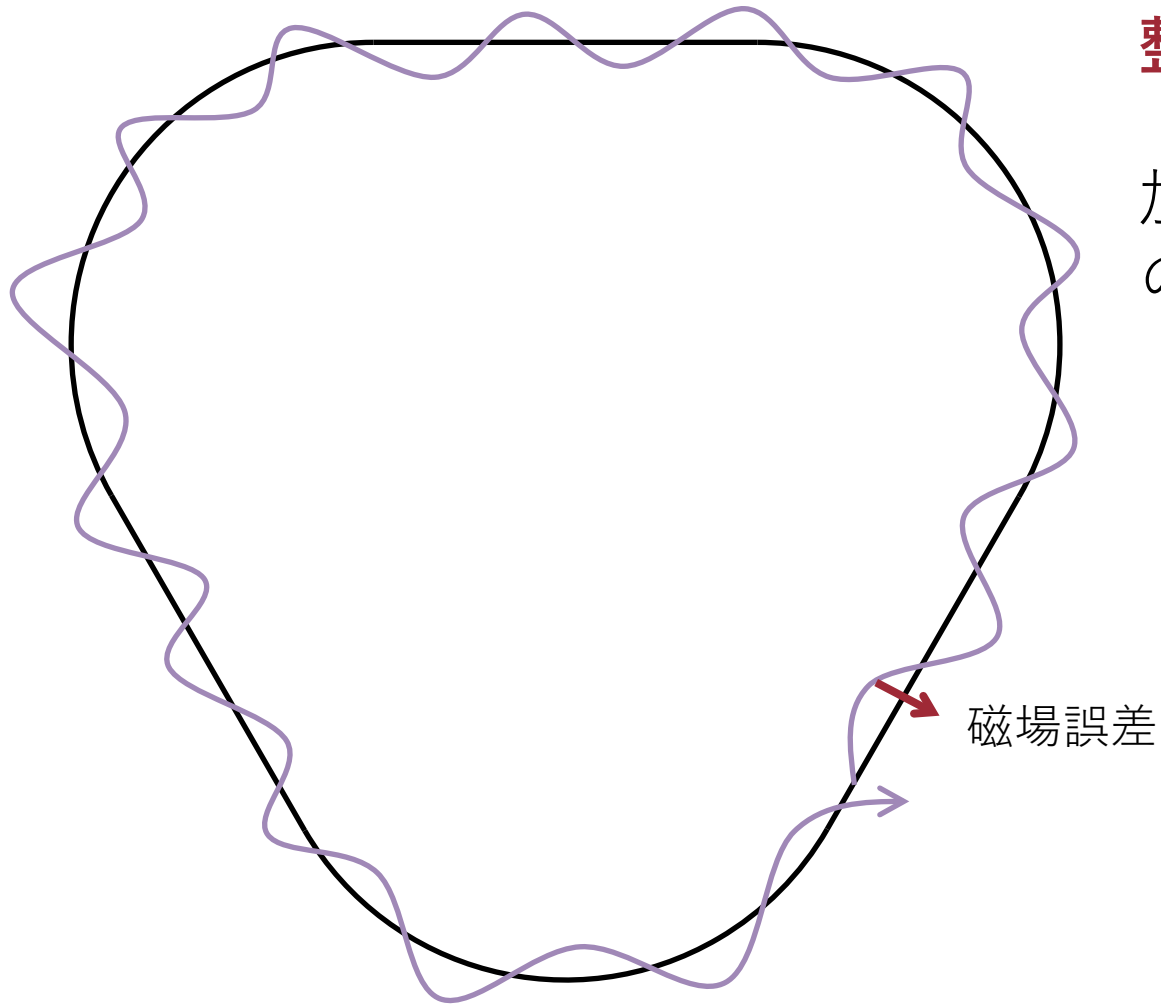
加速器にはつねに電磁石の磁場や設置位置
のずれがある



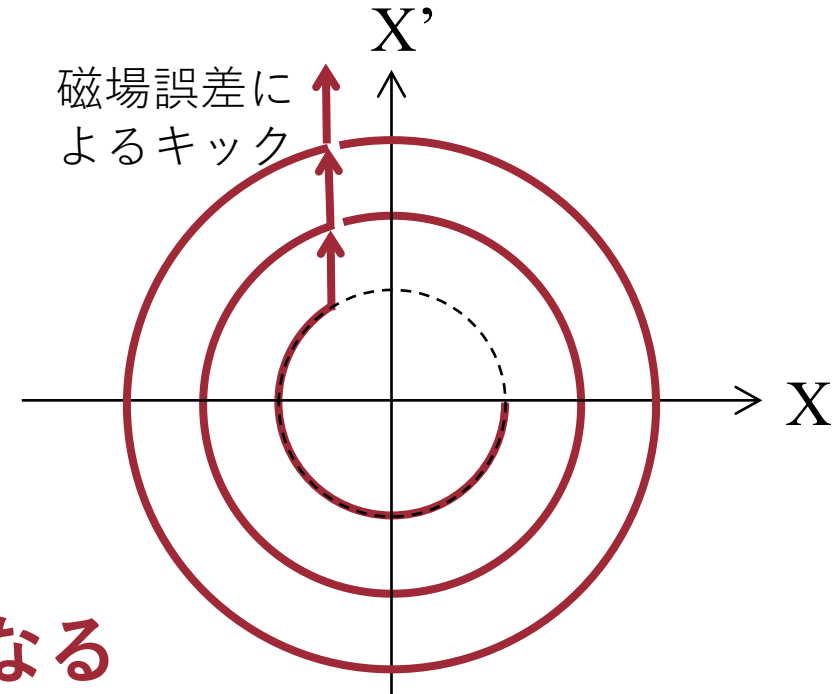
ベータトロン振動の共鳴

1周する間の**ベータトロン振動数**が
整数だとどうなるか？

加速器にはつねに電磁石の磁場や設置位置
のずれがある

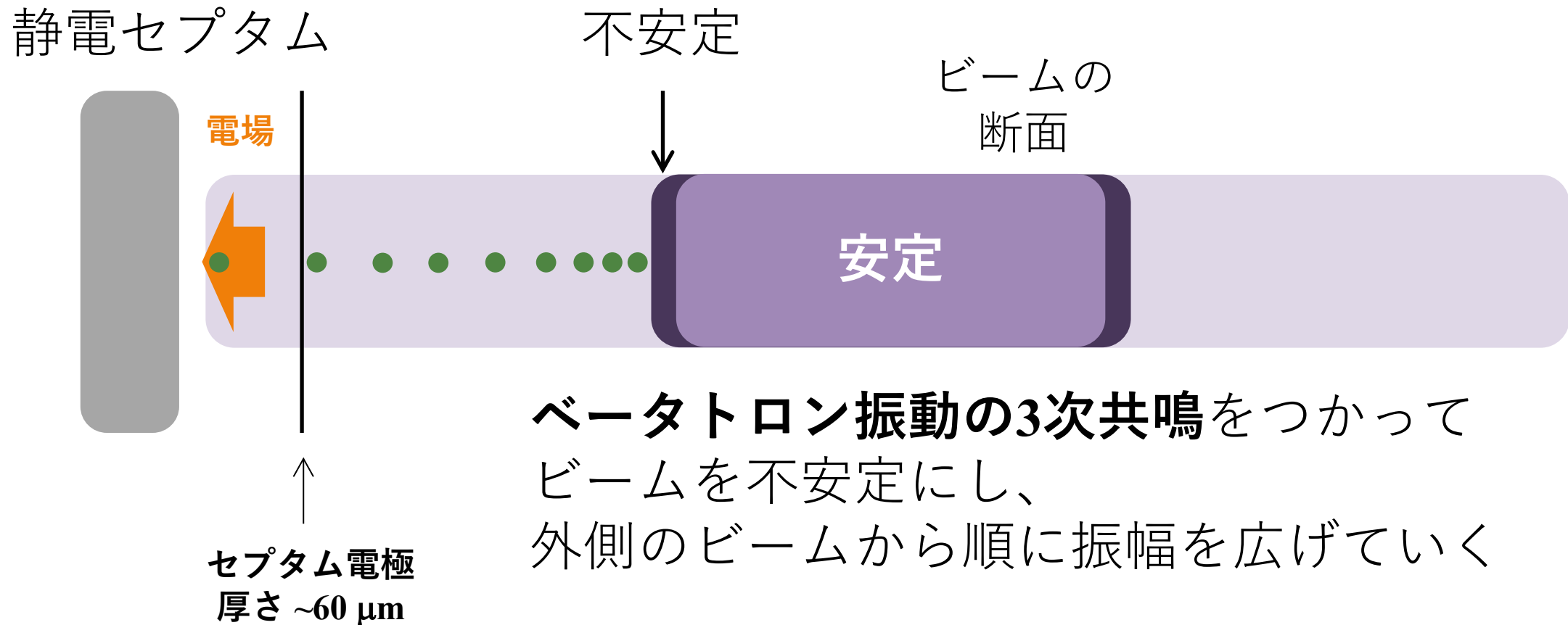


軌道が不安定になる



どのようにビームを電場領域に送り込むか

実際のやりかた



どのようにビームを電場領域に送り込むか

実際のやりかた

安定領域の大きさは
リングの四極電磁石の磁場の強さで
コントロールできる

静電セプタム

不安定

ビームの
断面

電場

安定

セプタム電極
厚さ $\sim 60 \mu\text{m}$

ベータatron振動の3次共鳴をつかって
ビームを不安定にし、
外側のビームから順に振幅を広げていく

どのようにビームを電場領域に送り込むか

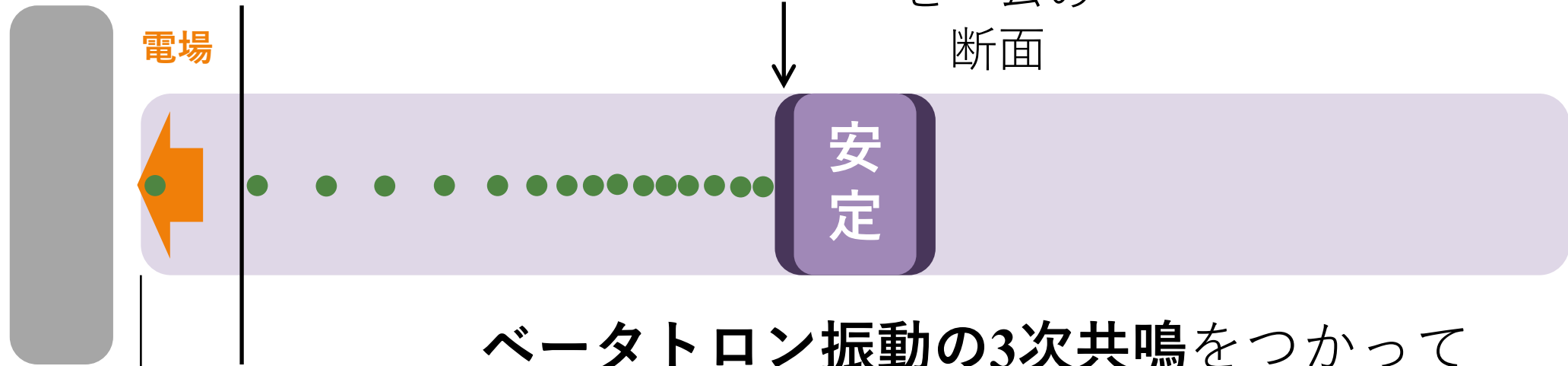
実際のやりかた

安定領域の大きさは
リングの四極電磁石の磁場の強さで
コントロールできる

静電セプタム

不安定

ビームの
断面



ベータatron振動の3次共鳴をつかって
ビームを不安定にし、
外側のビームから順に振幅を広げていく

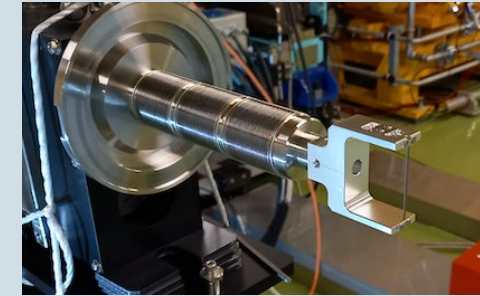
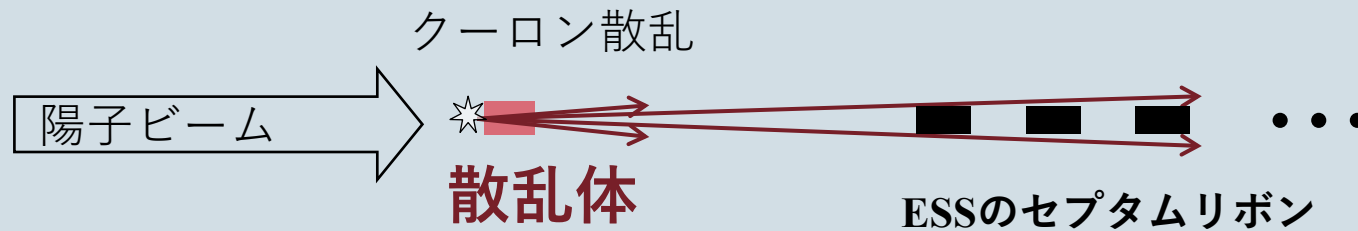
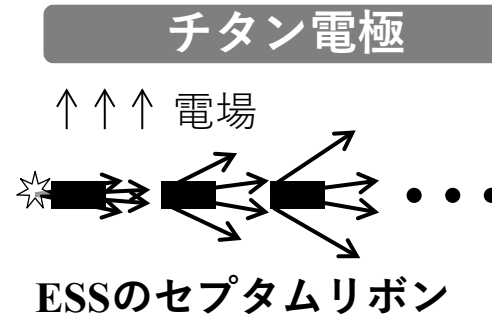
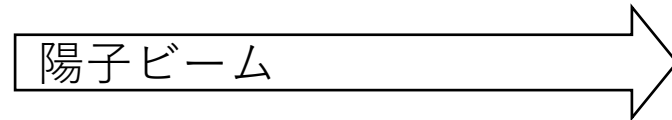
20 mm = $0.25 \mu\text{m} * 80,000$ → 99.5% の取り出し効率を達成

ビームロスさらなる低減

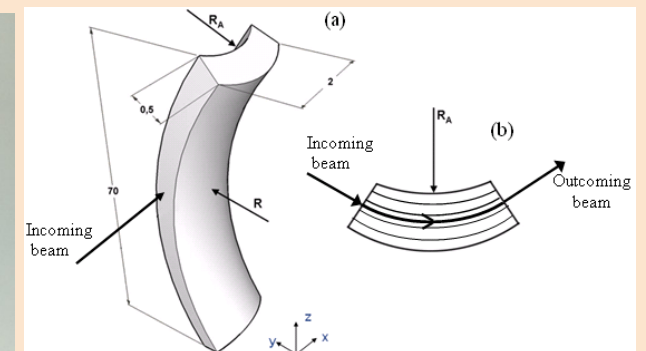
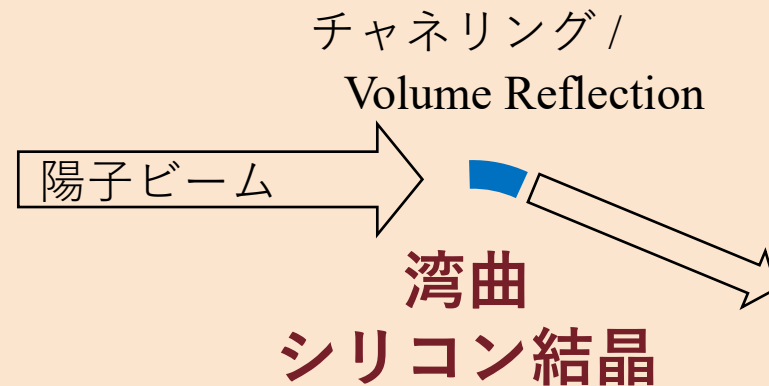
ビーム散乱体と湾曲シリコン結晶

ビーム散乱体と湾曲シリコン結晶

上から見た図

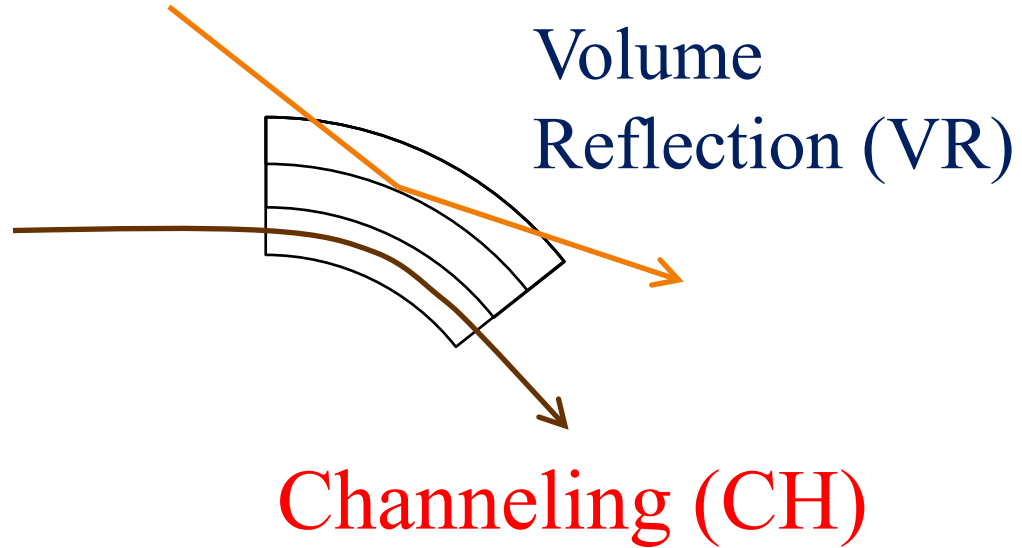


インストール前の
散乱体
タンタル製
幅 2 mm, 厚さ 0.1 mm



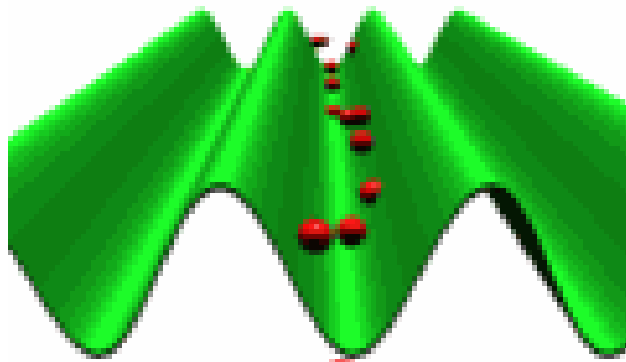
CERN LHC のビームコリメータ用の
湾曲シリコン結晶

湾曲シリコン結晶によるビームロス低減



Configuration	Beam Loss
No mitigation	1.00
Diff	0.58
CH	0.57
VR	0.54
CH + Diff	0.27
VR + Diff	0.26

Estimation using FLUKA

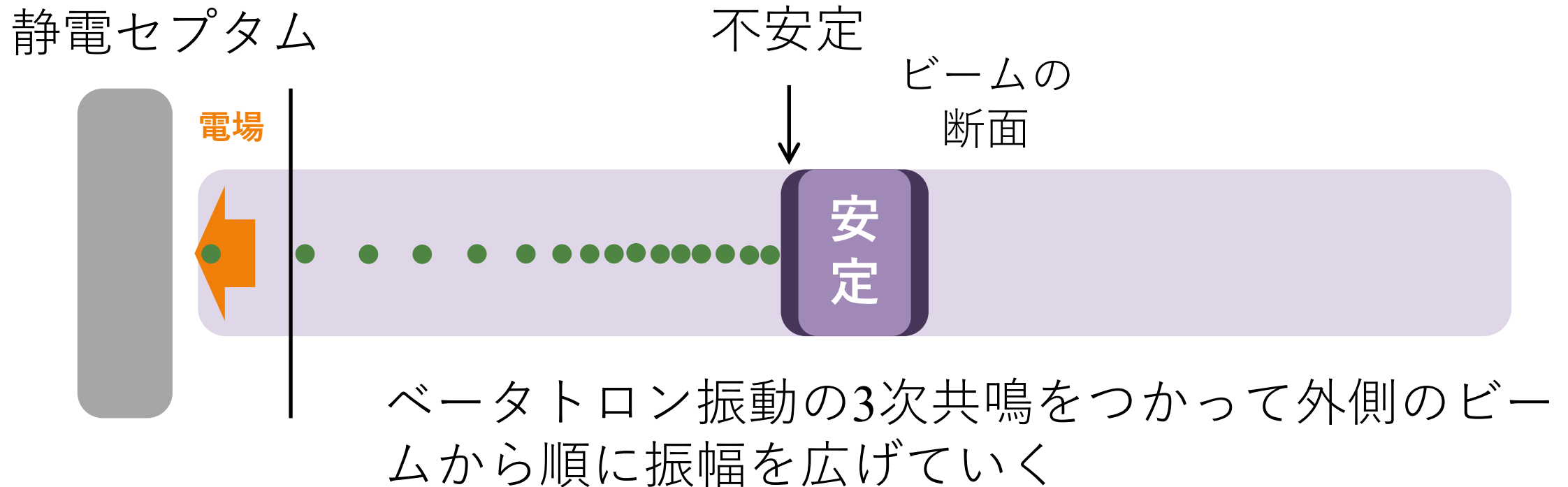


イタリアINFNと一緒に
J-PARC用の結晶を製作中

取り出しビームの時間構造の改善

取り出されるビーム量のコントロール

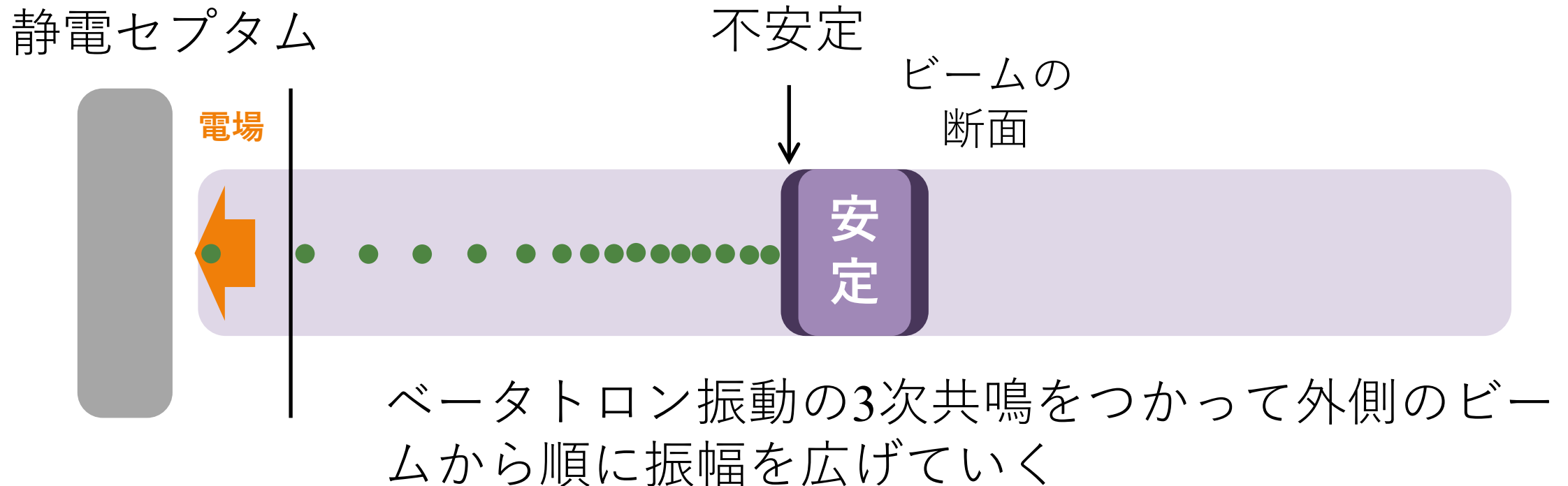
安定領域の大きさはリングの四極電磁石の磁場の強さでコントロールできる



取り出されるビーム量のコントロール

安定領域の大きさはリングの四極電磁石の磁場の強さでコントロールできる

→ 四極磁場の強さが揺れていると
ビームの取り出される量が変化してしまう



何も対策しないとどうなるか

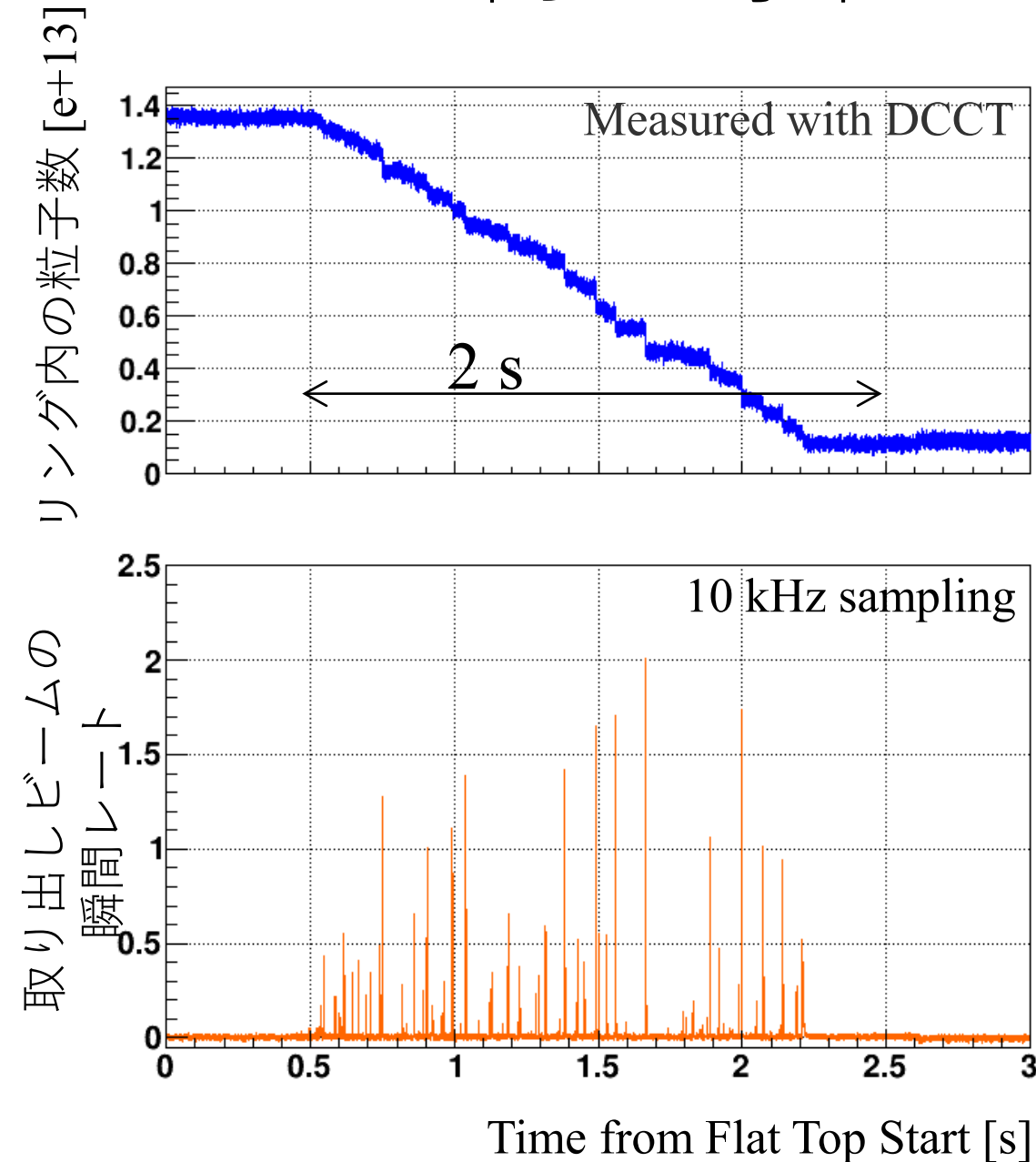
2020-June

大雑把な時間構造の制御のみ

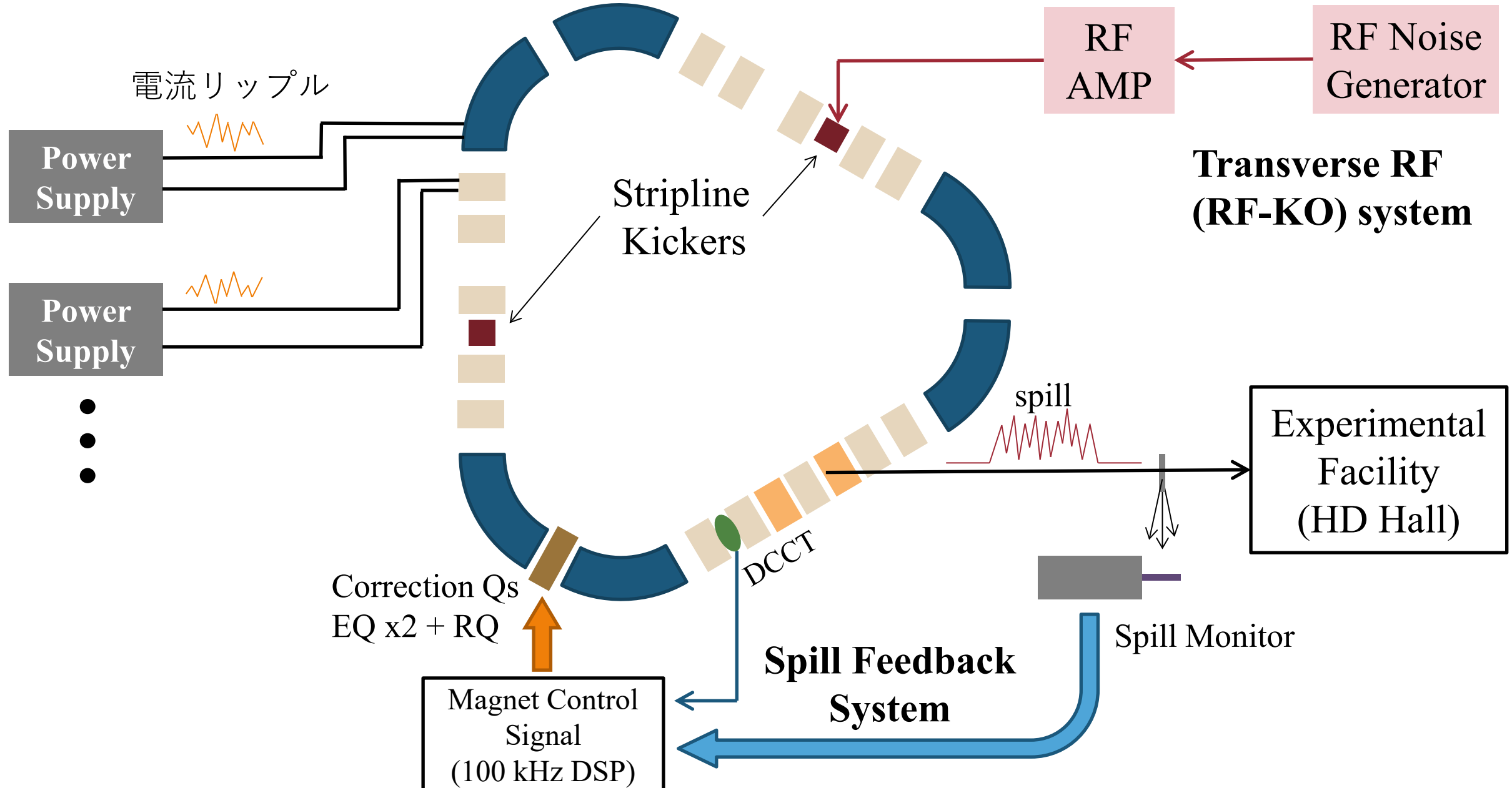
Spill Duty Factor : $\frac{\langle I \rangle^2}{\langle I^2 \rangle} \sim 4\%$
(10kHz Sampling)

I : 取り出しビームの瞬間レート
 $\langle \rangle$: 取り出し時間中の平均

四極電磁石および偏向電磁石の
電流の揺れが取り出しビームの
スパイク状の時間構造を作り出す



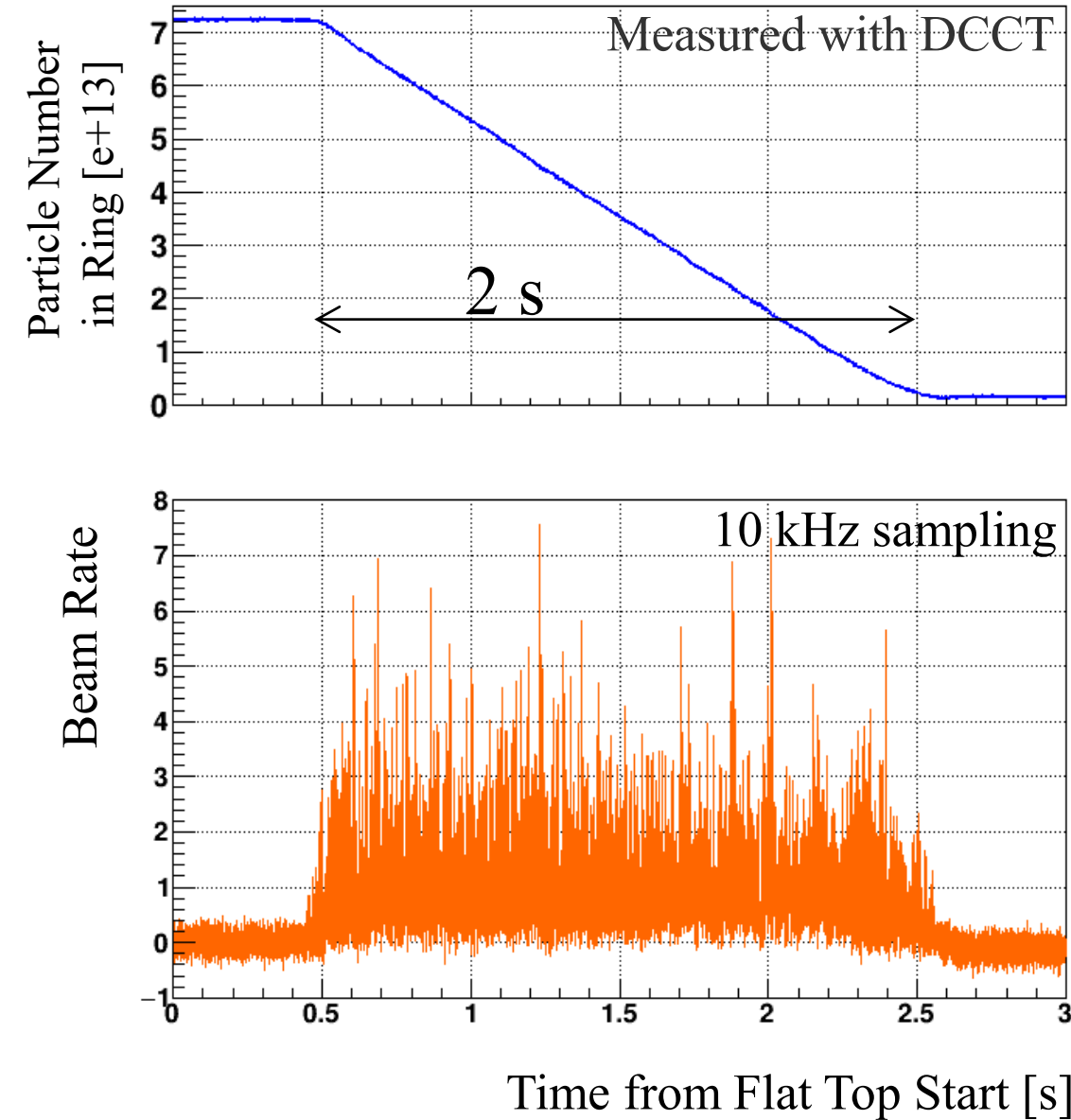
取り出しビーム量の制御



Spill structure after MR upgrade

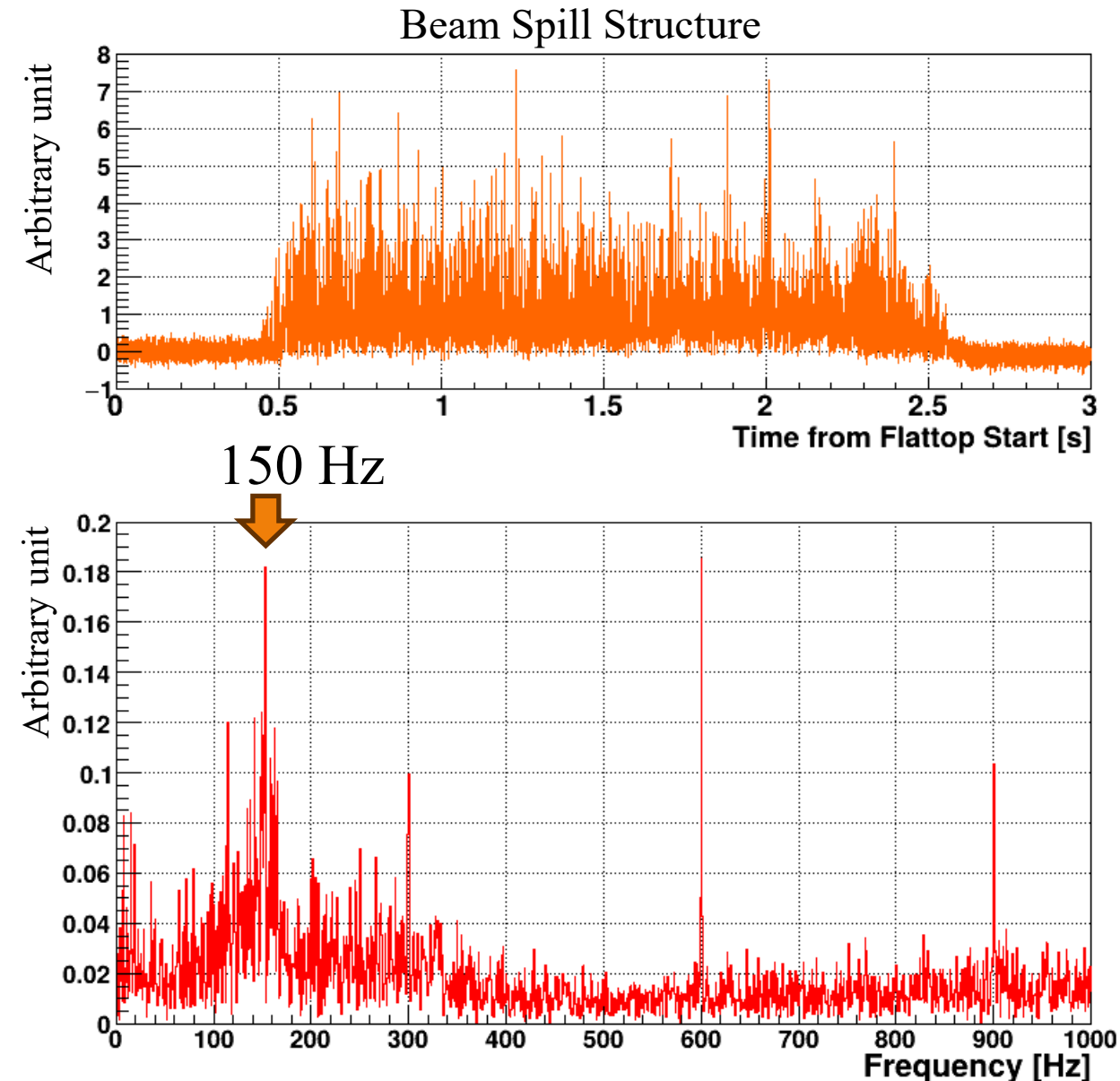
2024-Apr
After MR Upgrade

Beam power : 81 kW with 4.24 s repetition
(7.2×10^{13} particle/pulse)

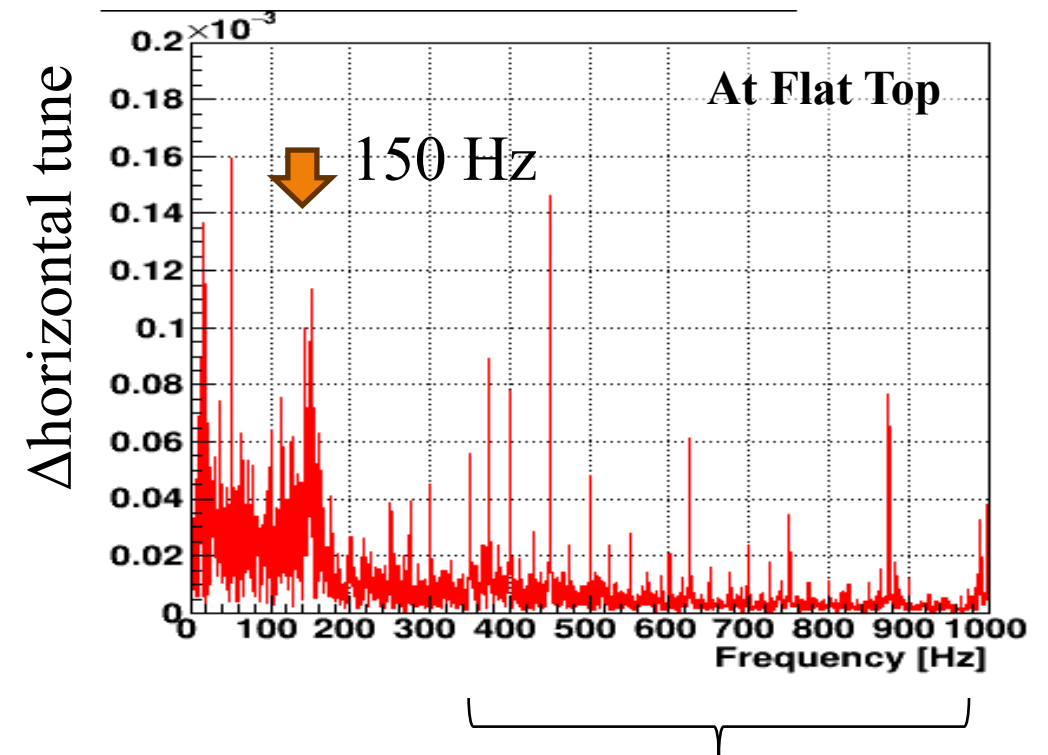


Spill Duty Factor : $\frac{\langle I \rangle^2}{\langle I^2 \rangle} \sim \mathbf{61\%}$
(10kHz Sampling)

Frequency Component of Beam Spill Structure



Main Mags' Current Ripple

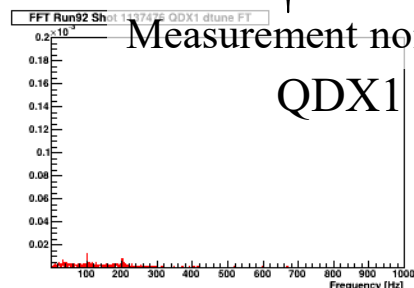
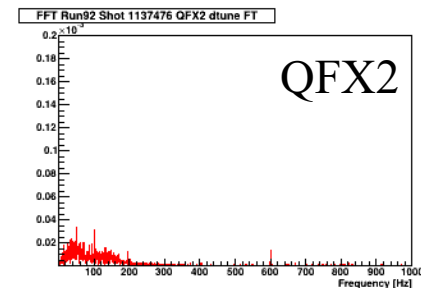
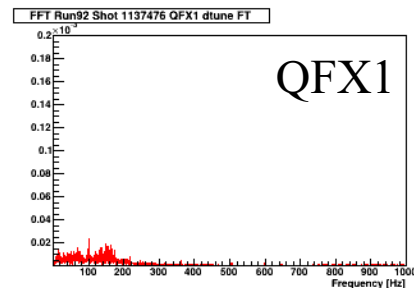
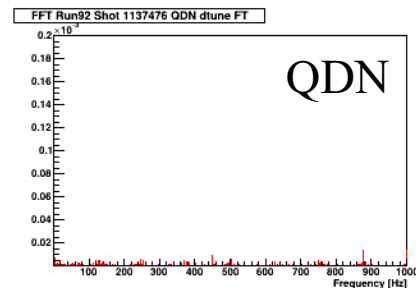
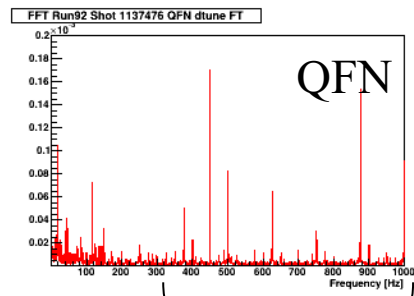


Red line contains peaks
from measurement noises

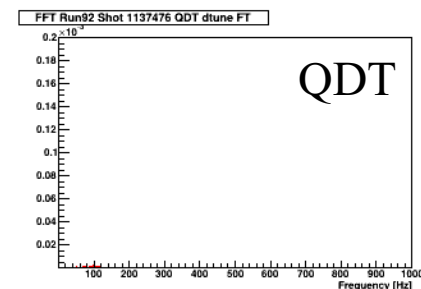
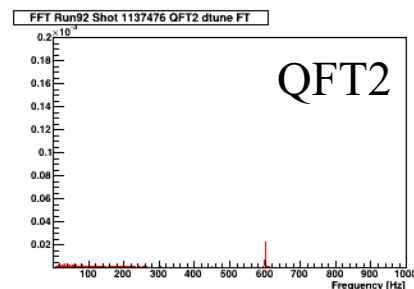
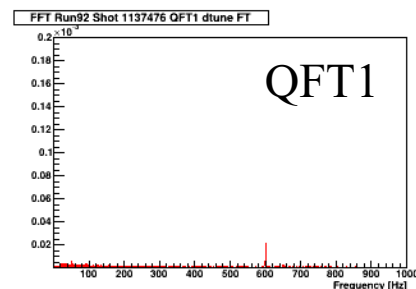
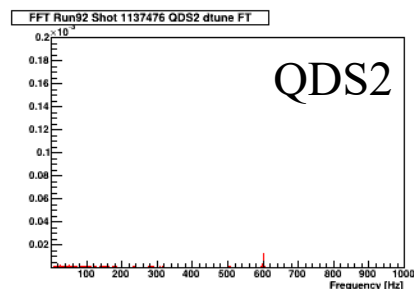
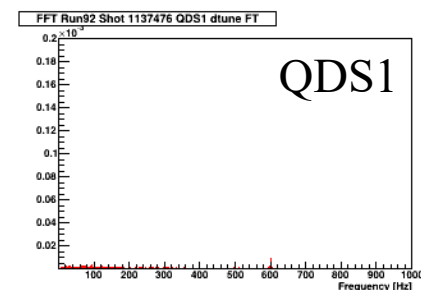
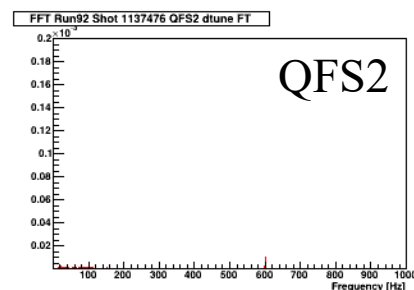
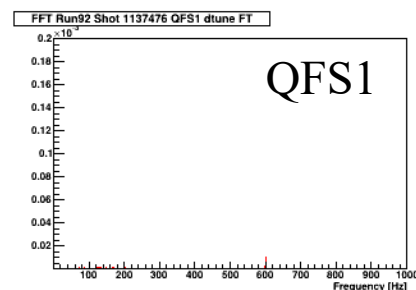
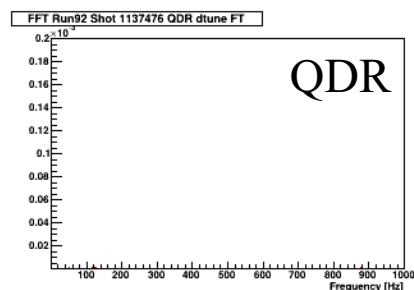
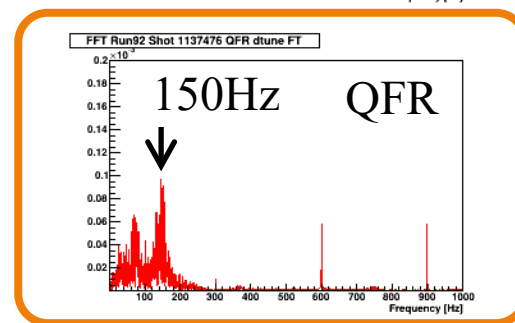
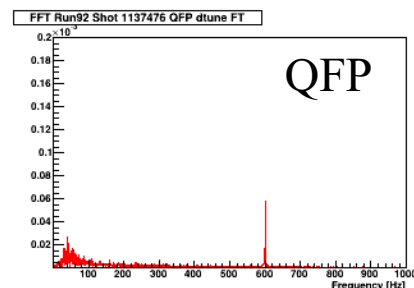
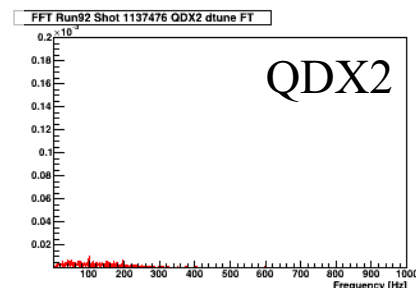
Source of 150 Hz Ripple

Horizontal Tune
Deviation

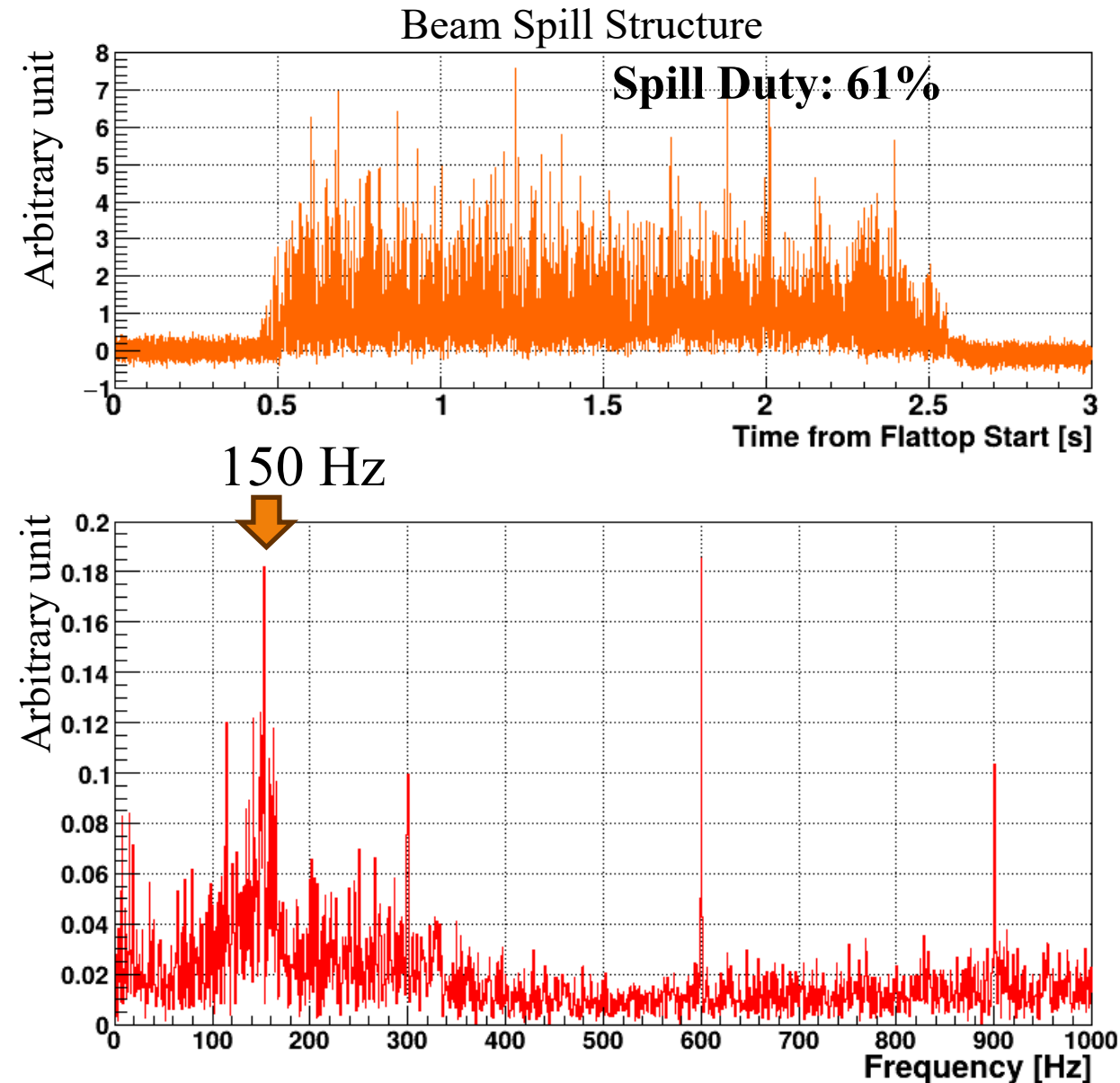
2×10^{-4}



Measurement noises



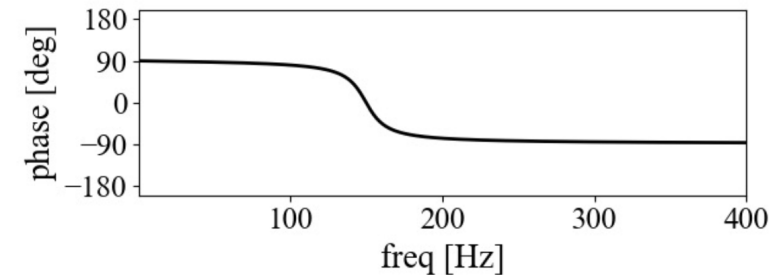
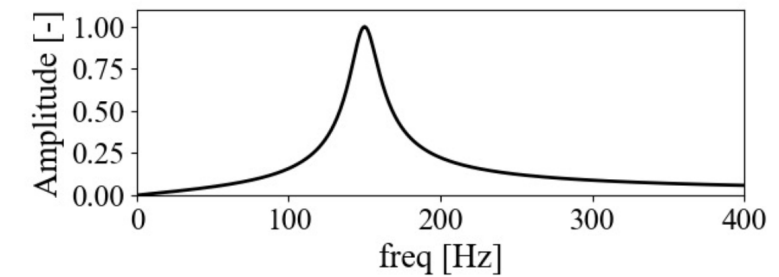
Improvement on spill regulations with new main PSs



RQ Gain Adjustment with bandpass filter

$$G(s) = \frac{\Delta\omega s}{s^2 + \Delta\omega s + \omega_0^2}$$

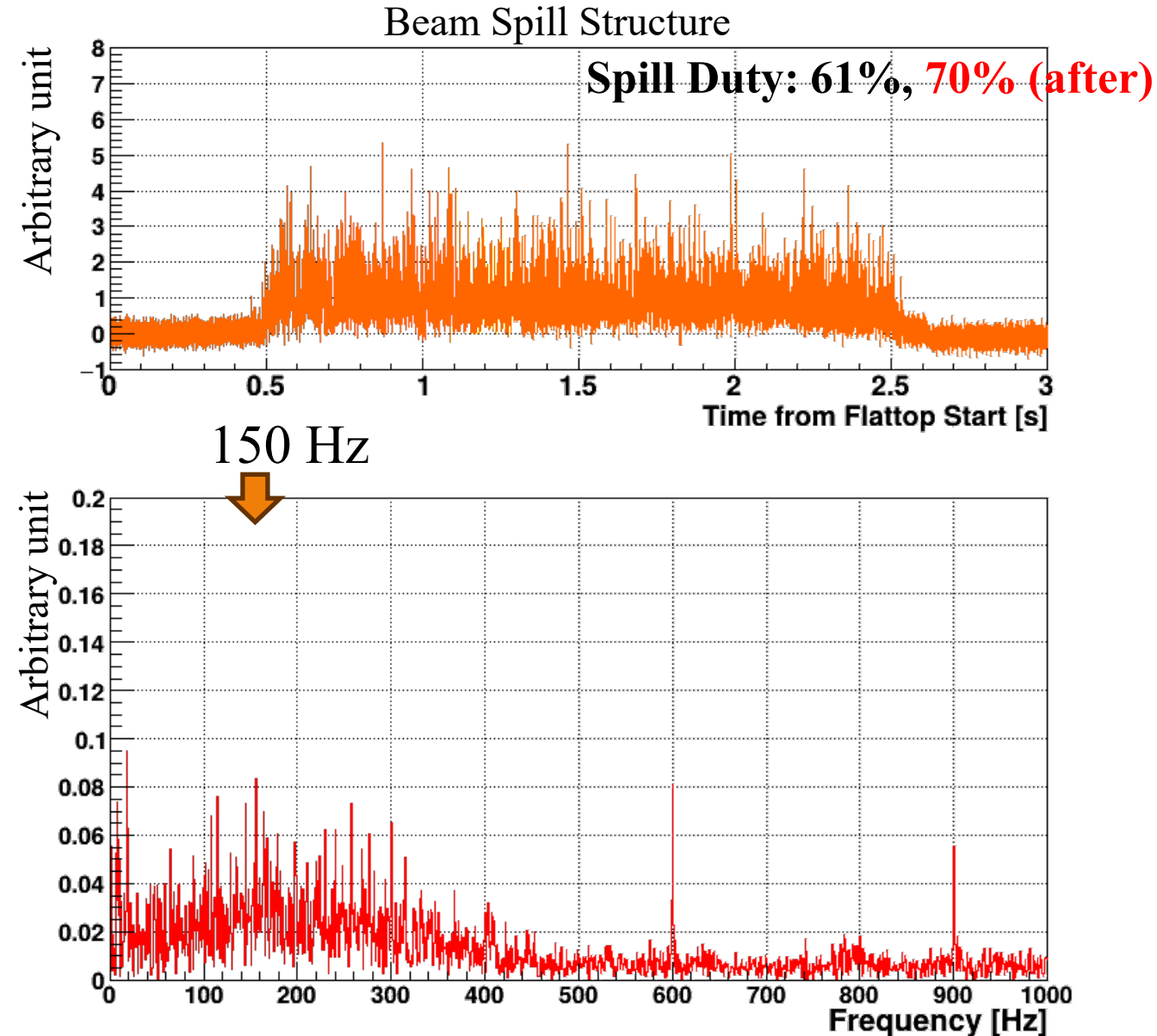
150 Hz



RQ Gain x 3 around 150 Hz

T. Asami

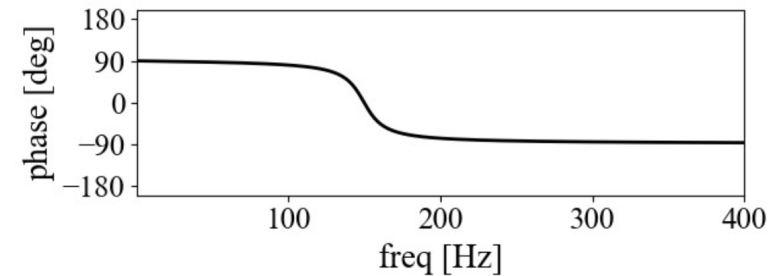
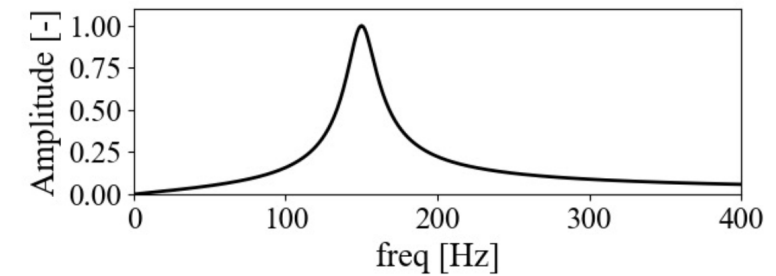
Improvement on spill regulations with new main PSs



RQ Gain Adjustment with bandpass filter

$$G(s) = \frac{\Delta\omega s}{s^2 + \Delta\omega s + \omega_0^2}$$

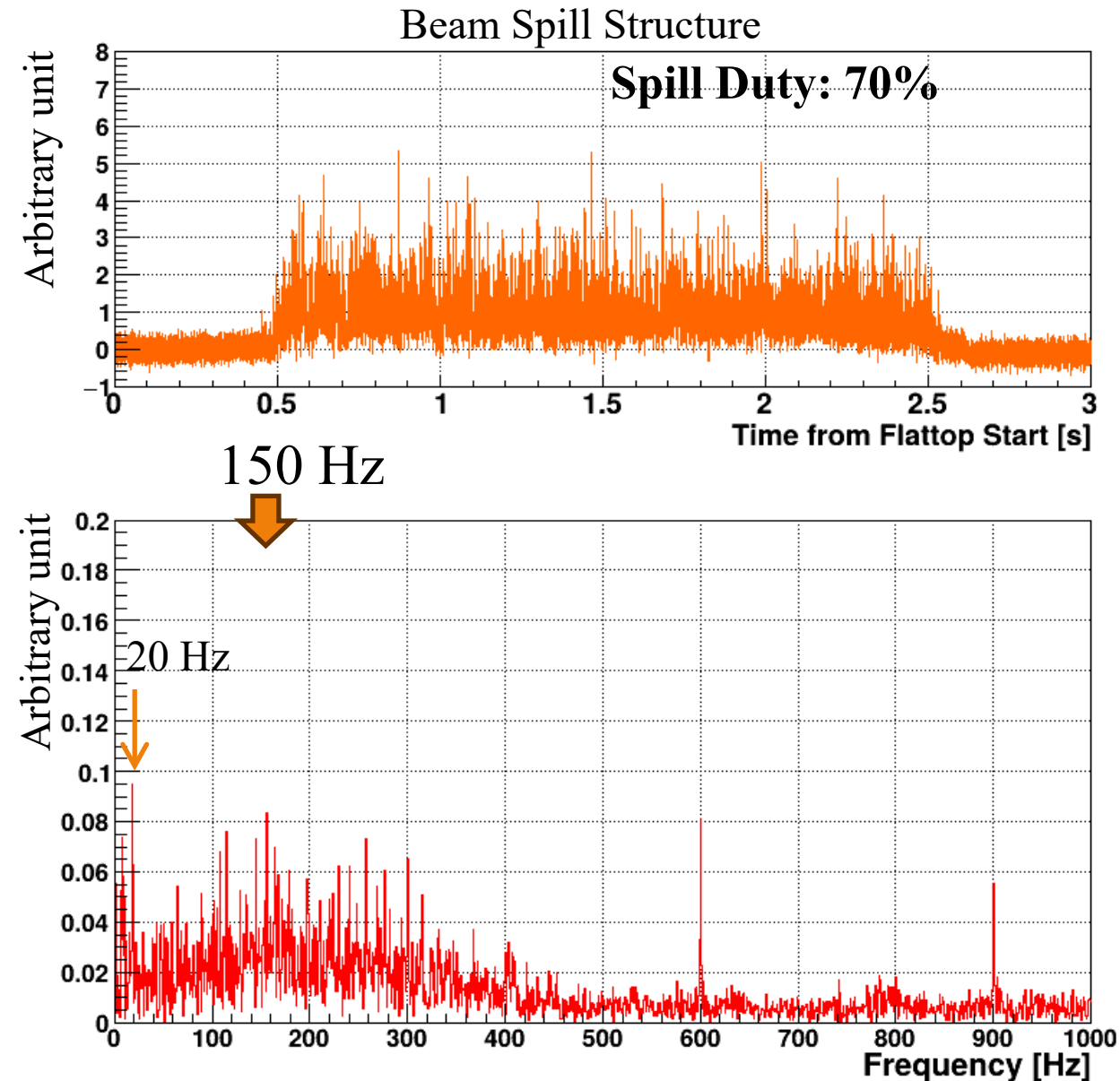
150 Hz



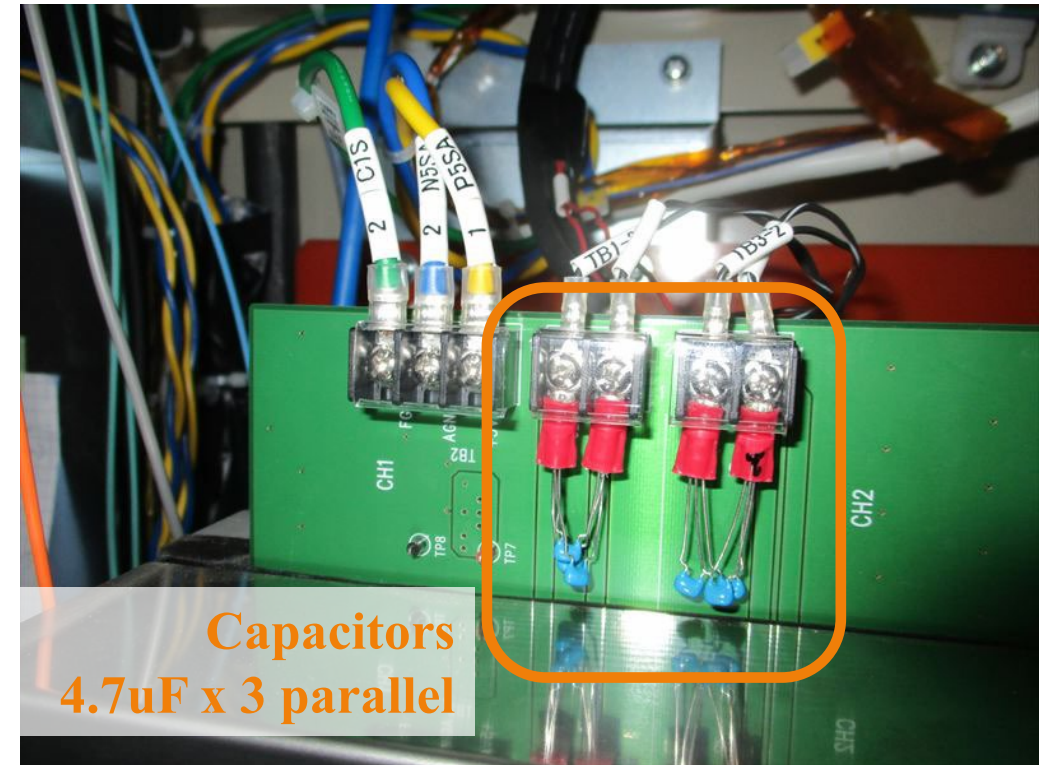
RQ Gain x 3 around 150 Hz

T. Asami

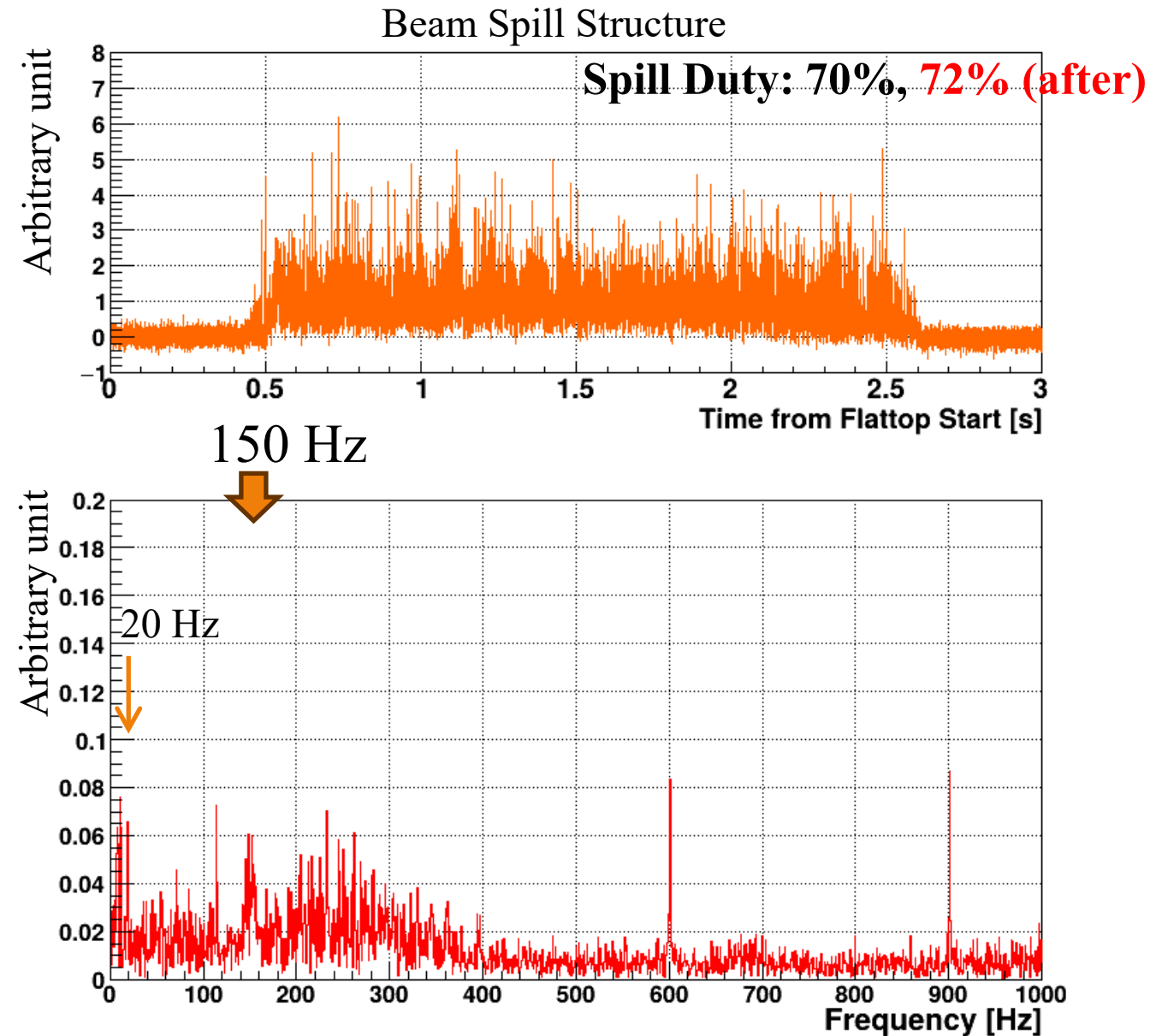
Improvement on spill regulations with new main PSs



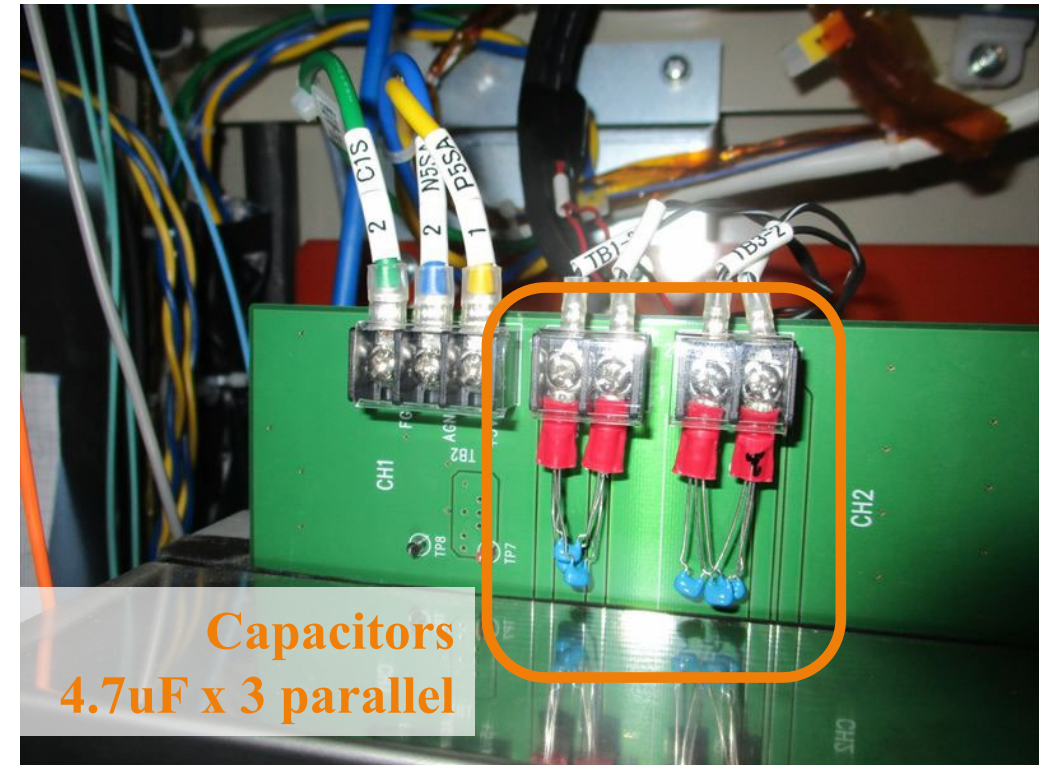
Input filter for A/D board was added



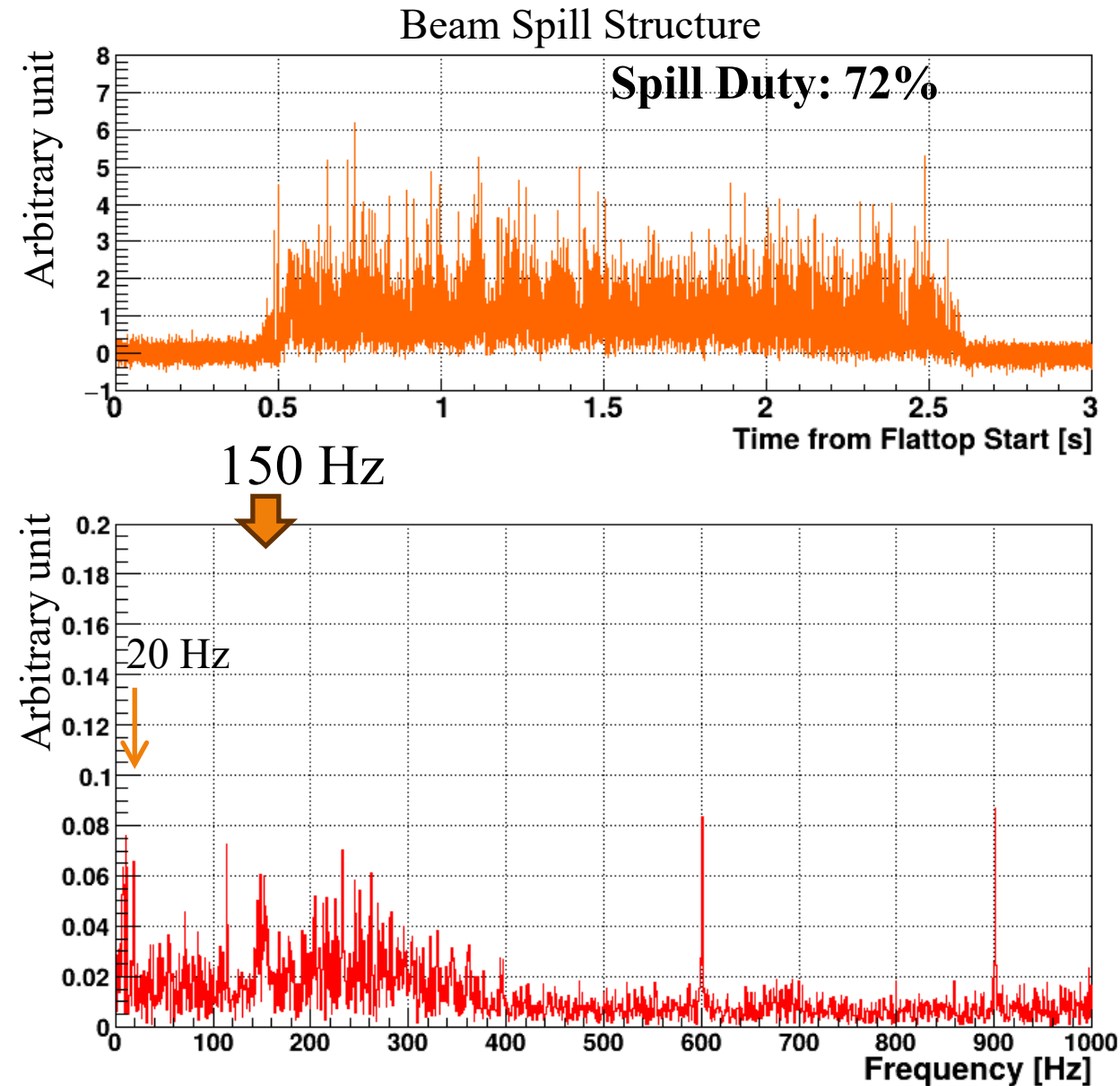
Improvement on spill regulations with new main PSs



Input filter for A/D board was added



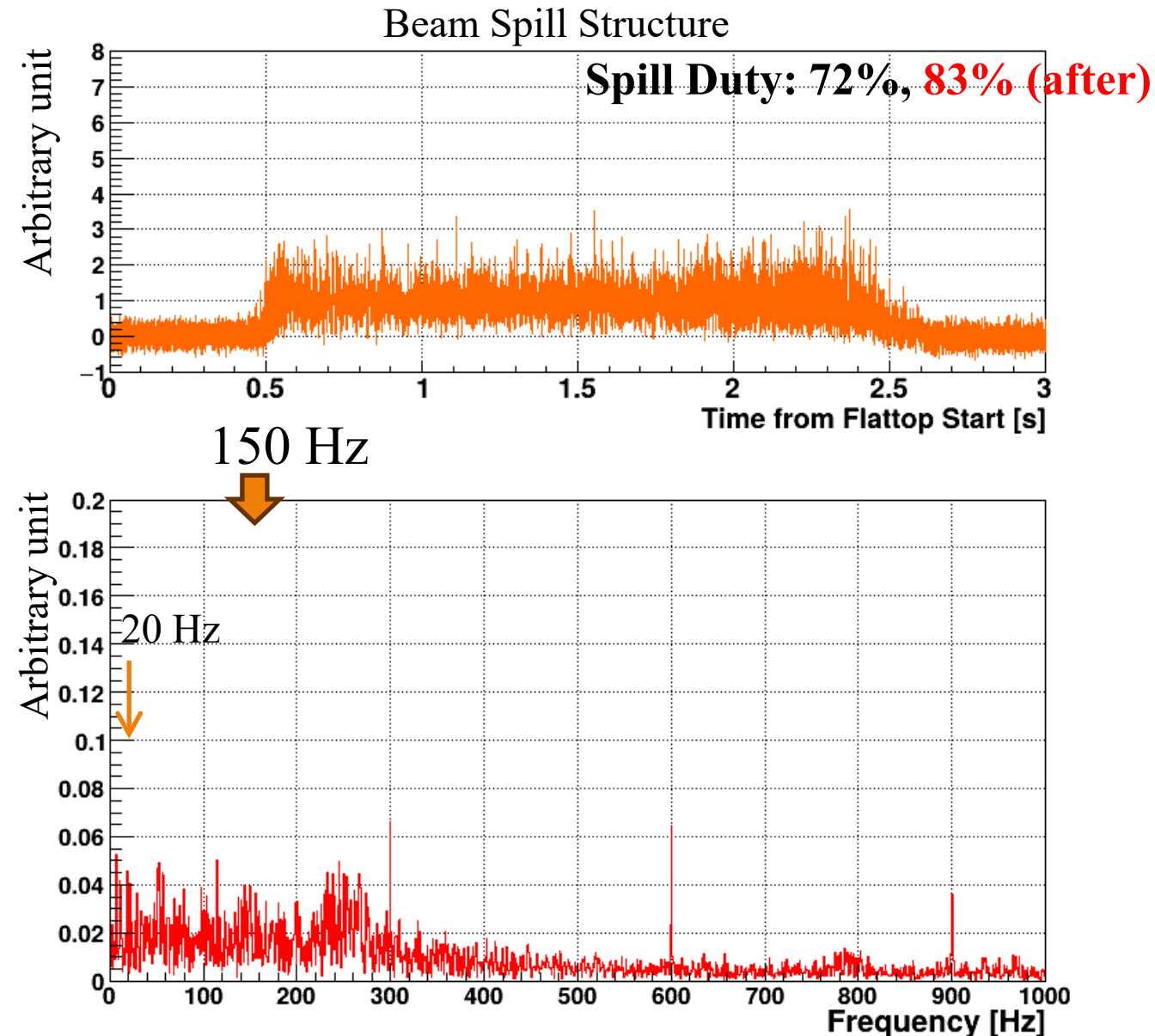
Improvement on spill regulations with new main PSs



Optimization of transverse RF

		Before	After
Exciter 1	Qex	0.2390	100.3236
	ΔQ_{ex}	0.0820	0
	Center Freq. [MHz]	0.255	19.2786
	Signal Strength	2 dBm	9 dBm
Exciter 2	Qex	248.3266	248.3274
	ΔQ_{ex}	0.0003	0
	Center Freq. [MHz]	47.4719	47.4721
	Signal Strength	0 dBm	3 dBm

Improvement on spill regulations with new main PSs

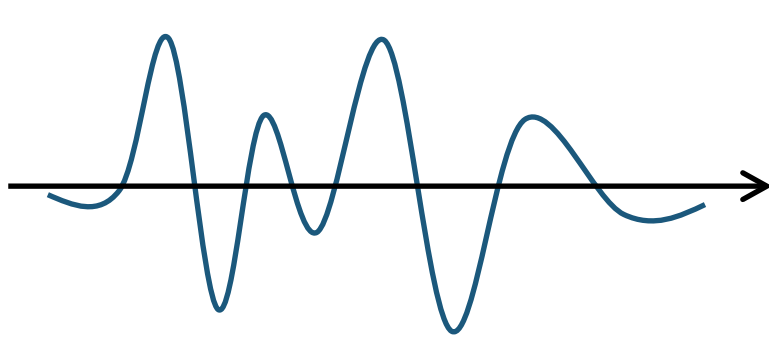


Optimization of transverse RF

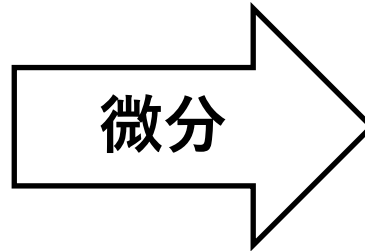
		Before	After
Exciter 1	Qex	0.2390	100.3236
	ΔQ_{ex}	0.0820	0
	Center Freq. [MHz]	0.255	19.2786
	Signal Strength	2 dBm	9 dBm
Exciter 2	Qex	248.3266	248.3274
	ΔQ_{ex}	0.0003	0
	Center Freq. [MHz]	47.4719	47.4721
	Signal Strength	0 dBm	3 dBm

We carried out user operations under this condition

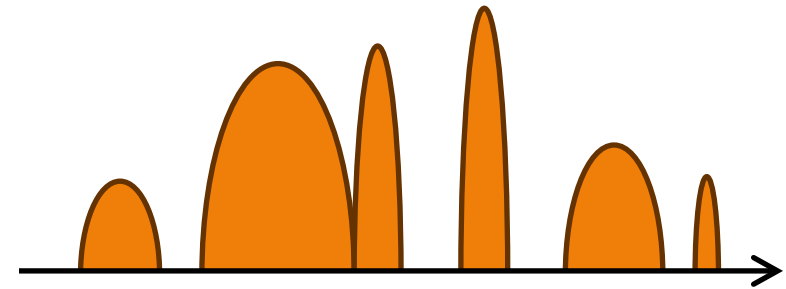
フィードバックシステムの改善案



電流リップル



~ 数100 usの遅延

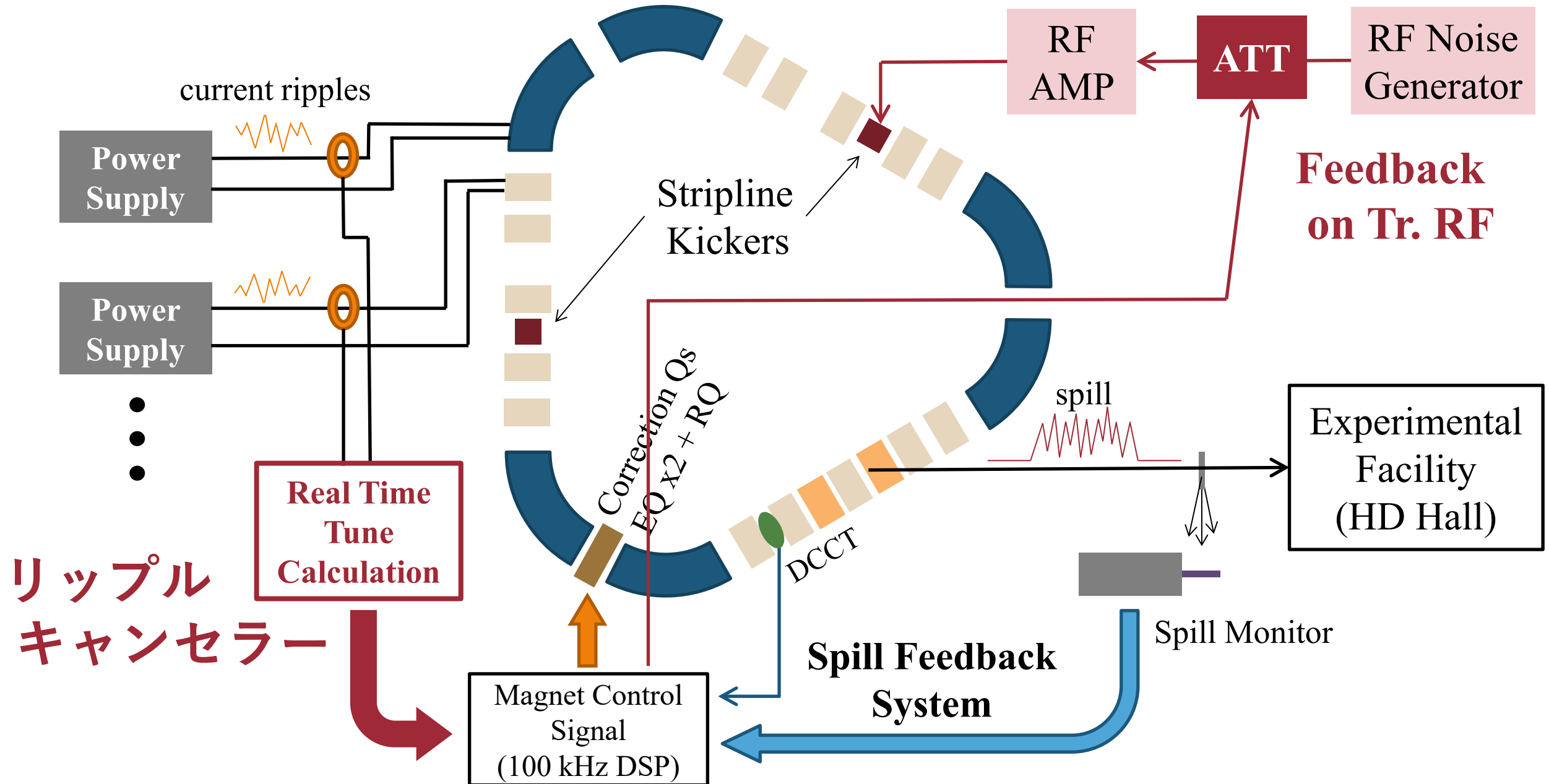


取り出しビーム

ビーム量は”負”になれない

- ・ 電流リップル情報を直接フィードバック装置に取り込む
(リップルキャンセラー)
- ・ AI/ML + FPGA を用いたフィードバック装置のアップグレード

フィードバックシステムの改善案



まとめ

J-PARC Main Ringの遅い取り出しには
今後のさらなるビーム品質向上
(ビームパワー増強, ビームの時間構造の平坦化) に向けて
多くの課題がある。

新しい手法をシミュレーションなどで検討

- 実機製作・インストール
- ビーム試験でのデータ収集・解析
- 手法の改善
- ...

を繰り返して加速器の性能改善に取り組んでいます。
興味がわいたらいつでも連絡ください!