

J-PARC Main Ringの 遅い取り出しの 現状と課題

Ryotaro Muto
KEK/J-PARC Acc.

Outline

- 自己紹介
- 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

自己紹介

武藤 亮太郎

1975年06月生まれ (50歳)

KEK 加速器研究施設 / J-PARCセンター 加速器ディビジョン 所属

| | |
|-------|---|
| 1994年 | 京都大学理学部 入学 (P1) |
| 1998年 | 京都大学大学院 素粒子物性研究室 入学 (その後 素粒子物性は原子核とくっついて原子核・ハドロンに) |
| | KEK 12 GeV PS で E325実験に参加 |
| 2003年 | 理研 基礎特研 |
| 2006年 | 理研 協力研究員 |
| 2007年 | D論がようやく書けた |
| | J-PARC ハドロン実験施設(ビームライングループ)に助教として着任 |
| | MRからの遅い取り出し, High-p Beam Lineの建設, E16実験の準備 |
| 2017年 | 加速器に移り、現在に至る |

J-PARC Main Ringの遅い取り出し

J-PARC

Japan Proton Accelerator Research Complex

400MeV
LINAC

3 GeV
RCS

Neutrino
to SK

MLF

遅い取り出し

30 GeV
Main Ring

Hadron
Experimental
Facility

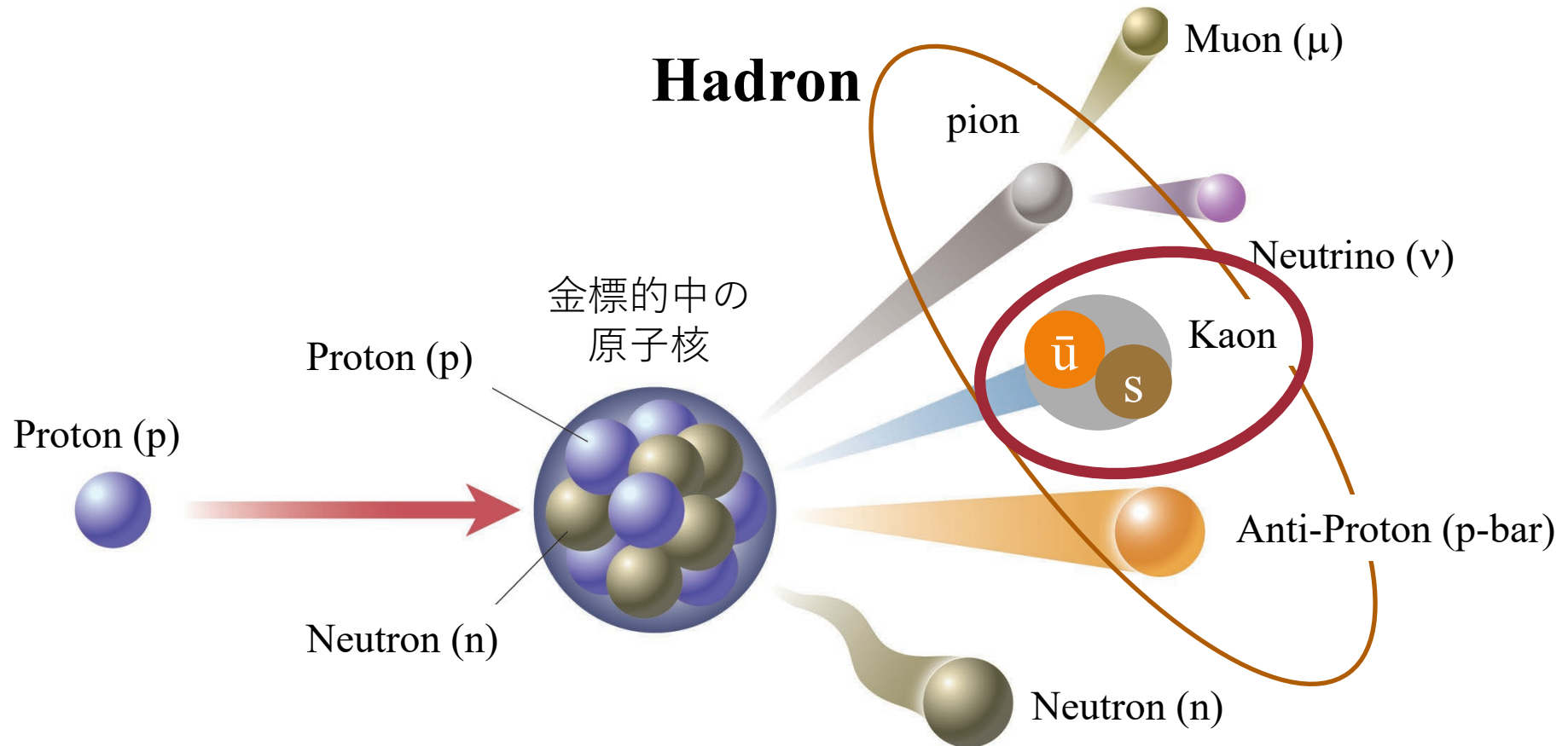
MR Params. in Slow Extraction

| | |
|----------------|-----------------------------|
| 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

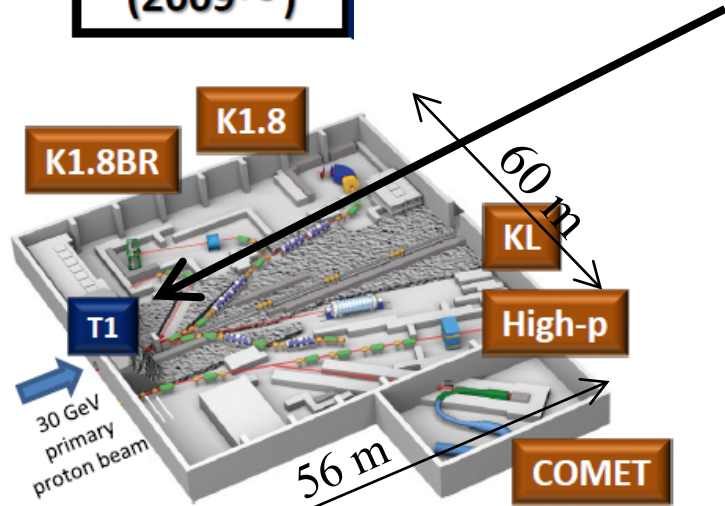
陽子ビームを金標的に照射し、生成される2次粒子(**K中間子** / **π 中間子**)
または**陽子そのもの**をつかって素粒子・原子核実験を行っている



Hadron Experimental Facility & Its Extension Plan

Acceptable
Beam Power:
115 kW

Present HEF
(2009~)



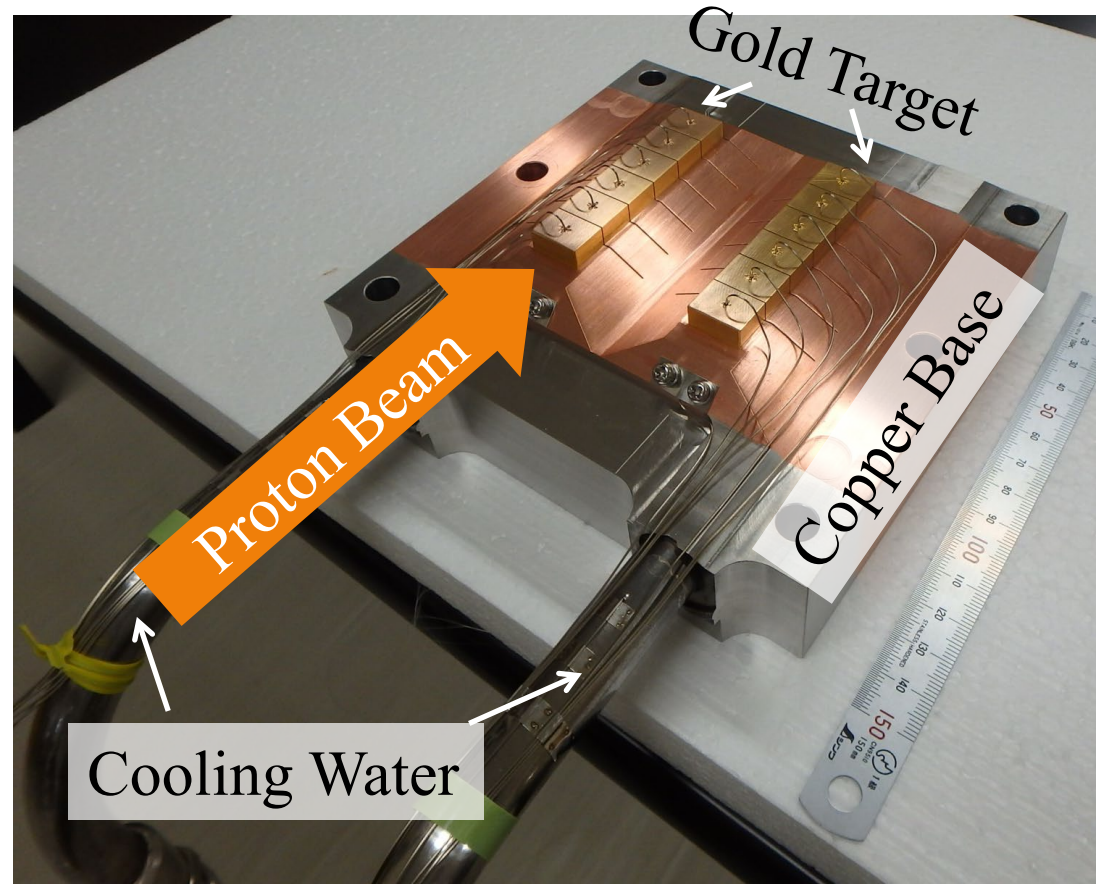
1 production target (T1)

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

1 neutral beamline (KL)

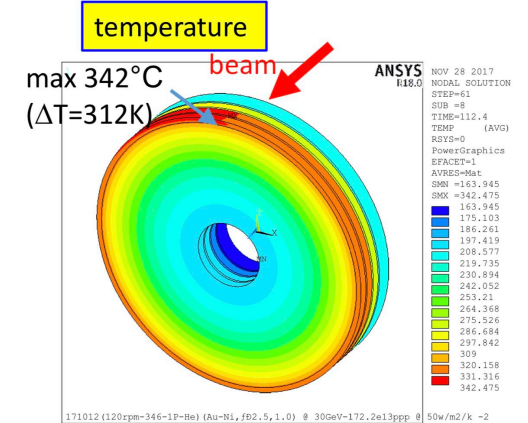
1 primary beamline (High-p)

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

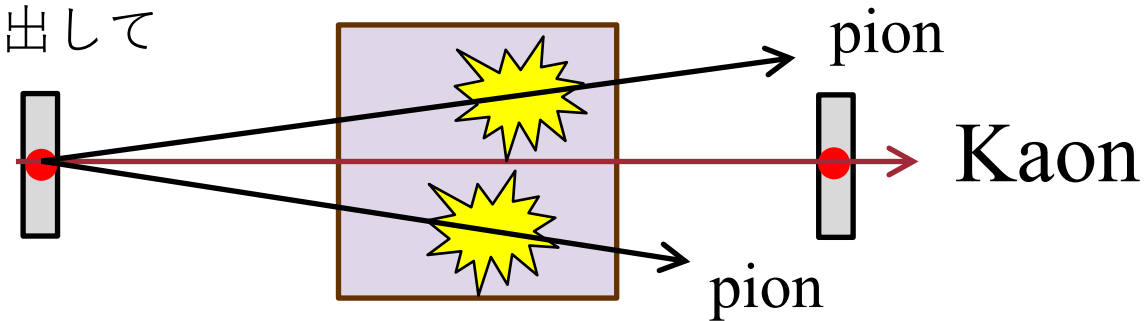
約2秒間にわたる“遅い取り出し”

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

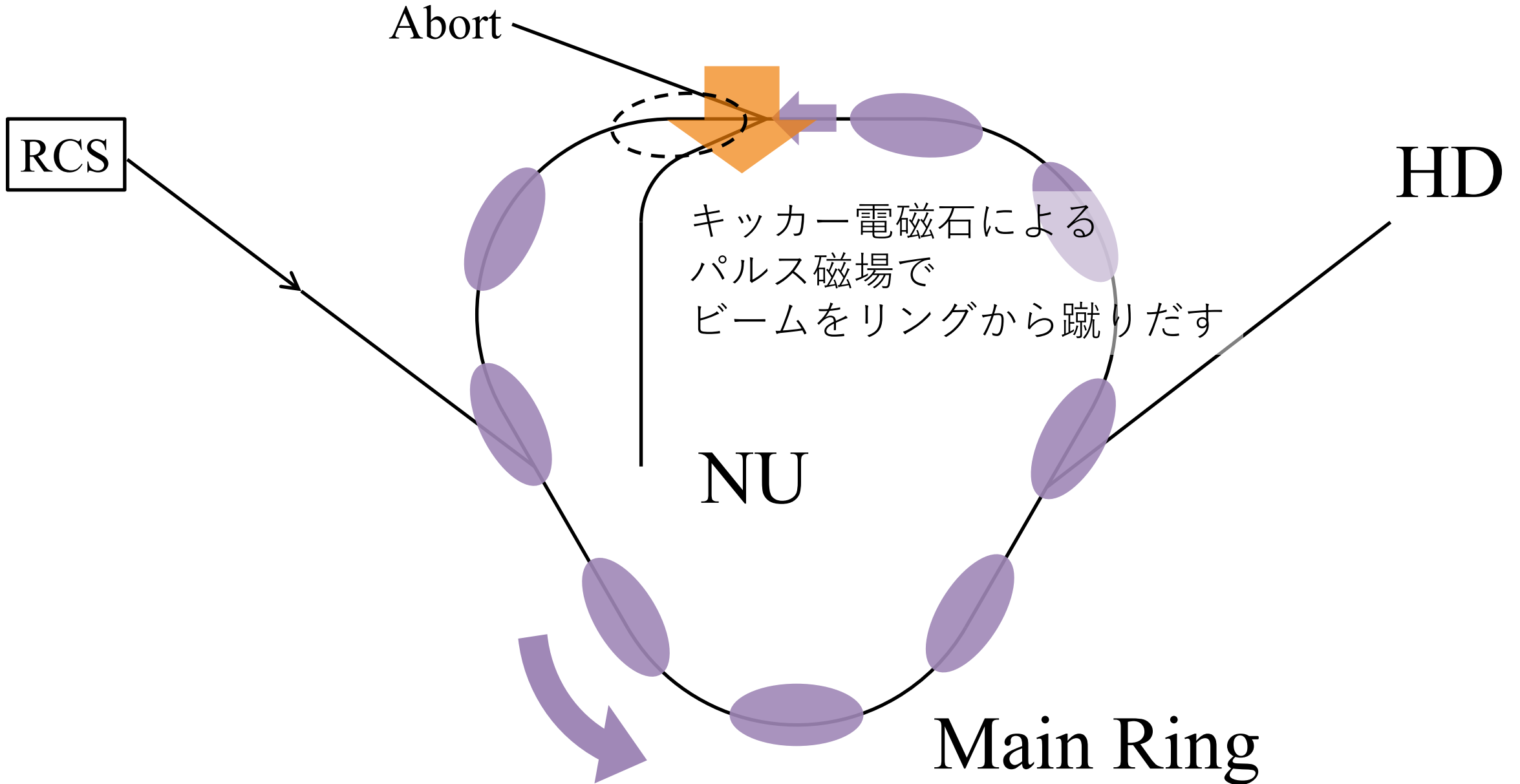
ビーム強度の時間変動の平坦化
(スパイル制御)



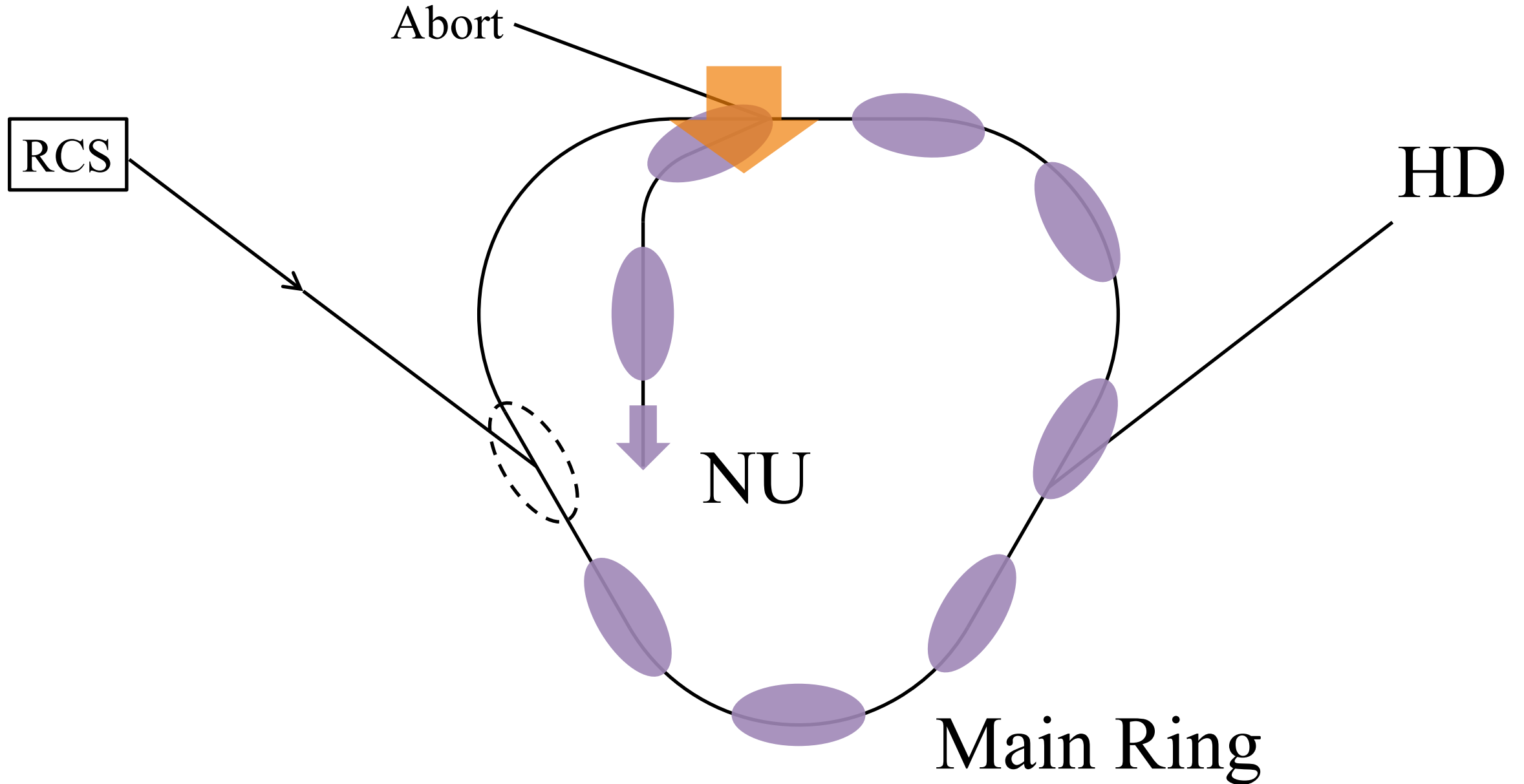
Aerogel Cherenkov Detector

遅い取り出しのやり方

速い取り出し

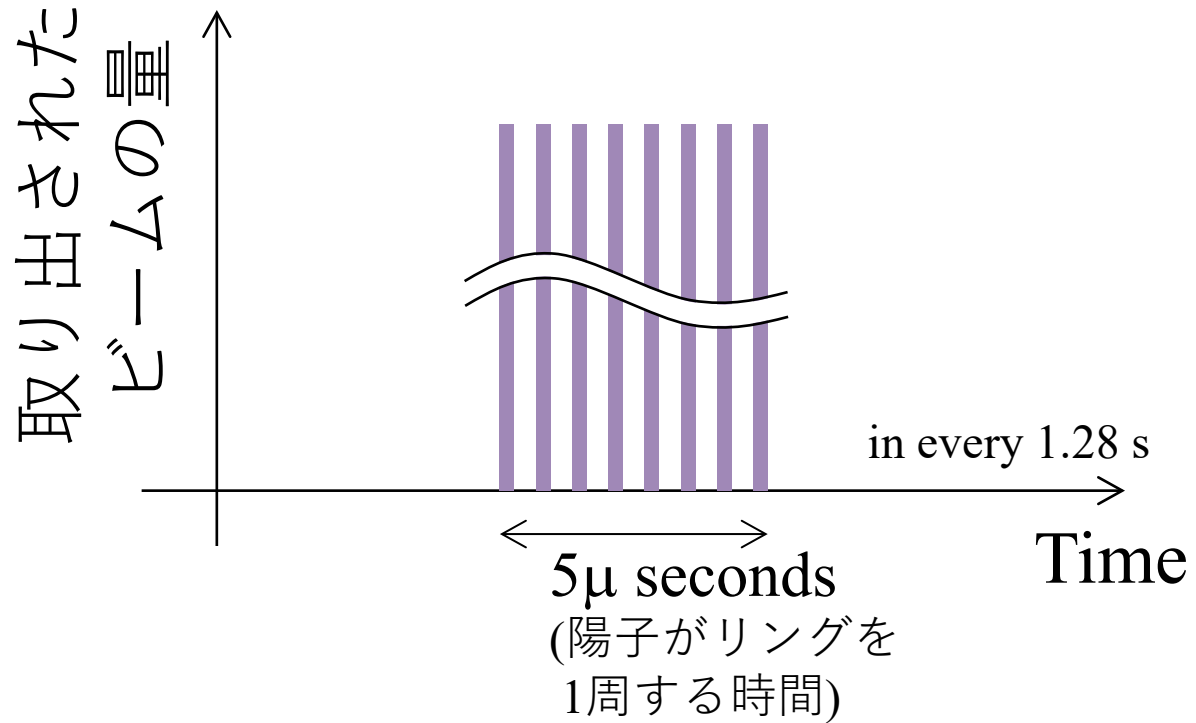


速い取り出し

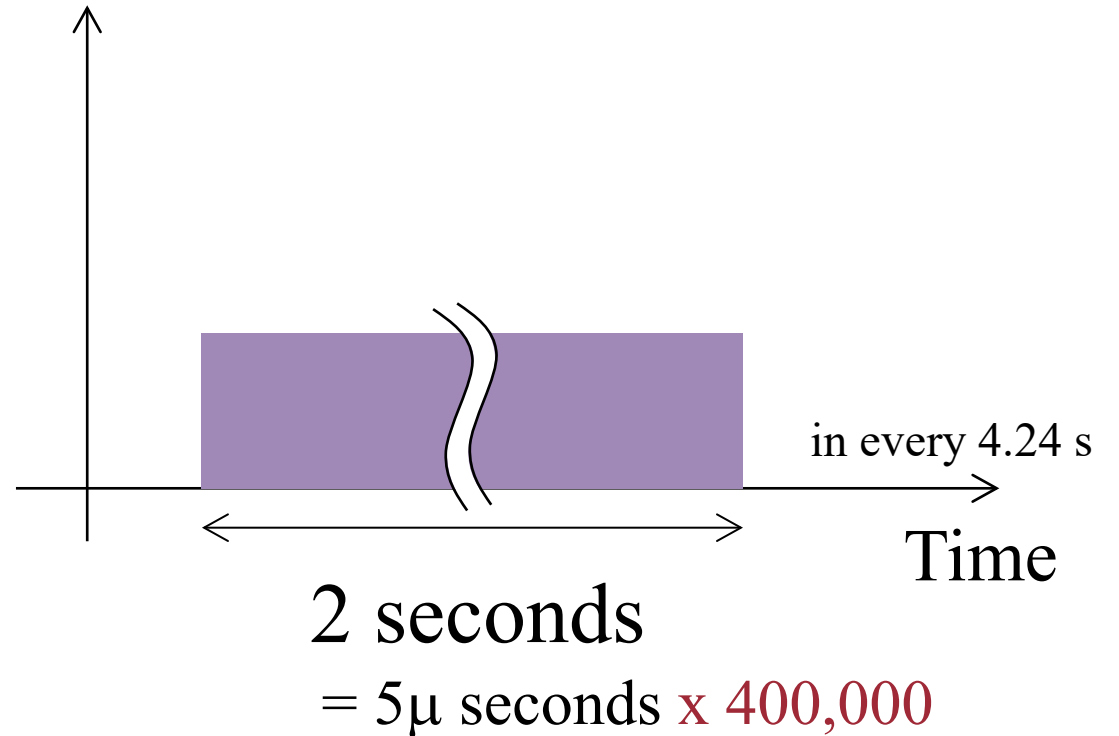


取り出しビームの時間構造

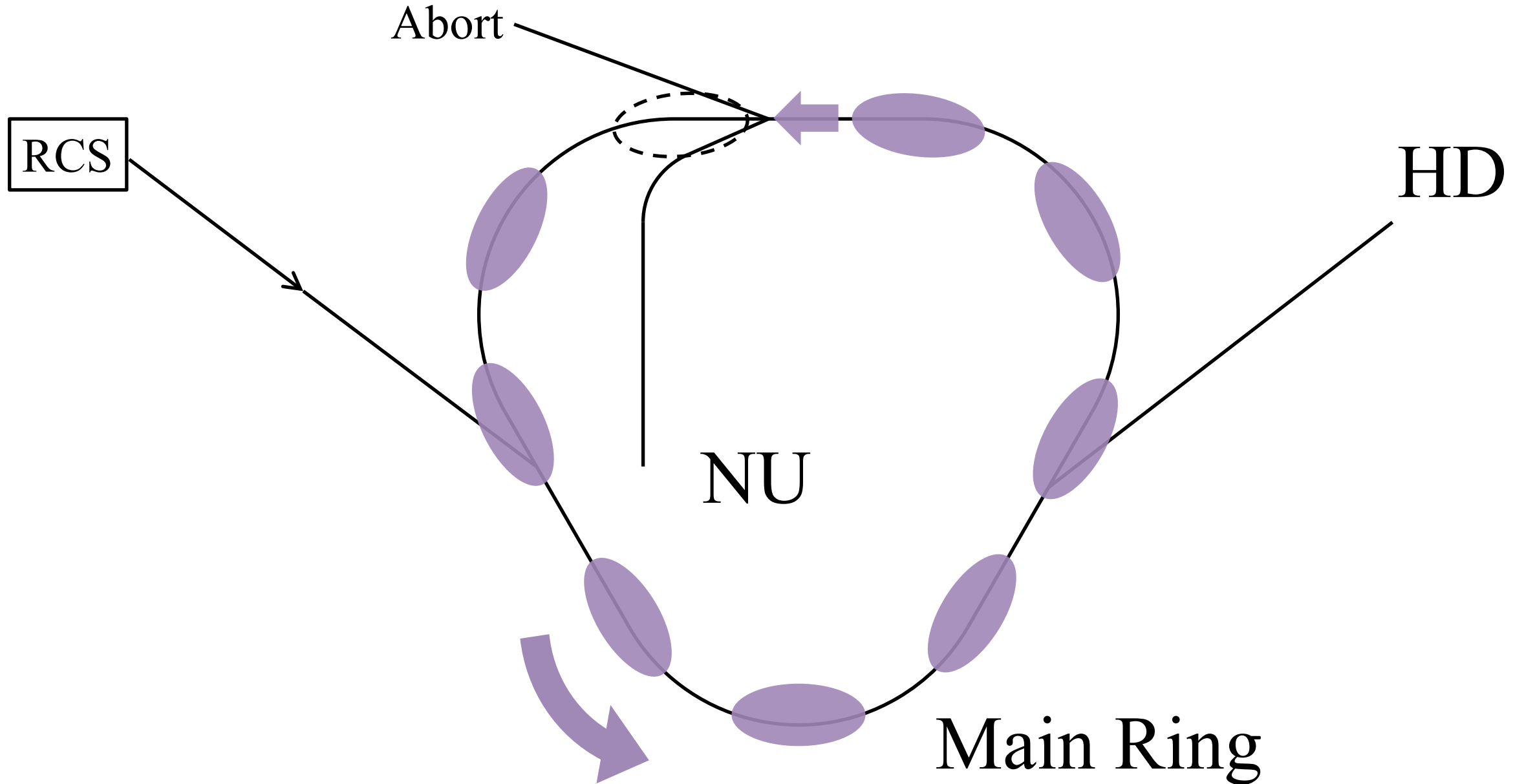
FX (Fast Extraction)



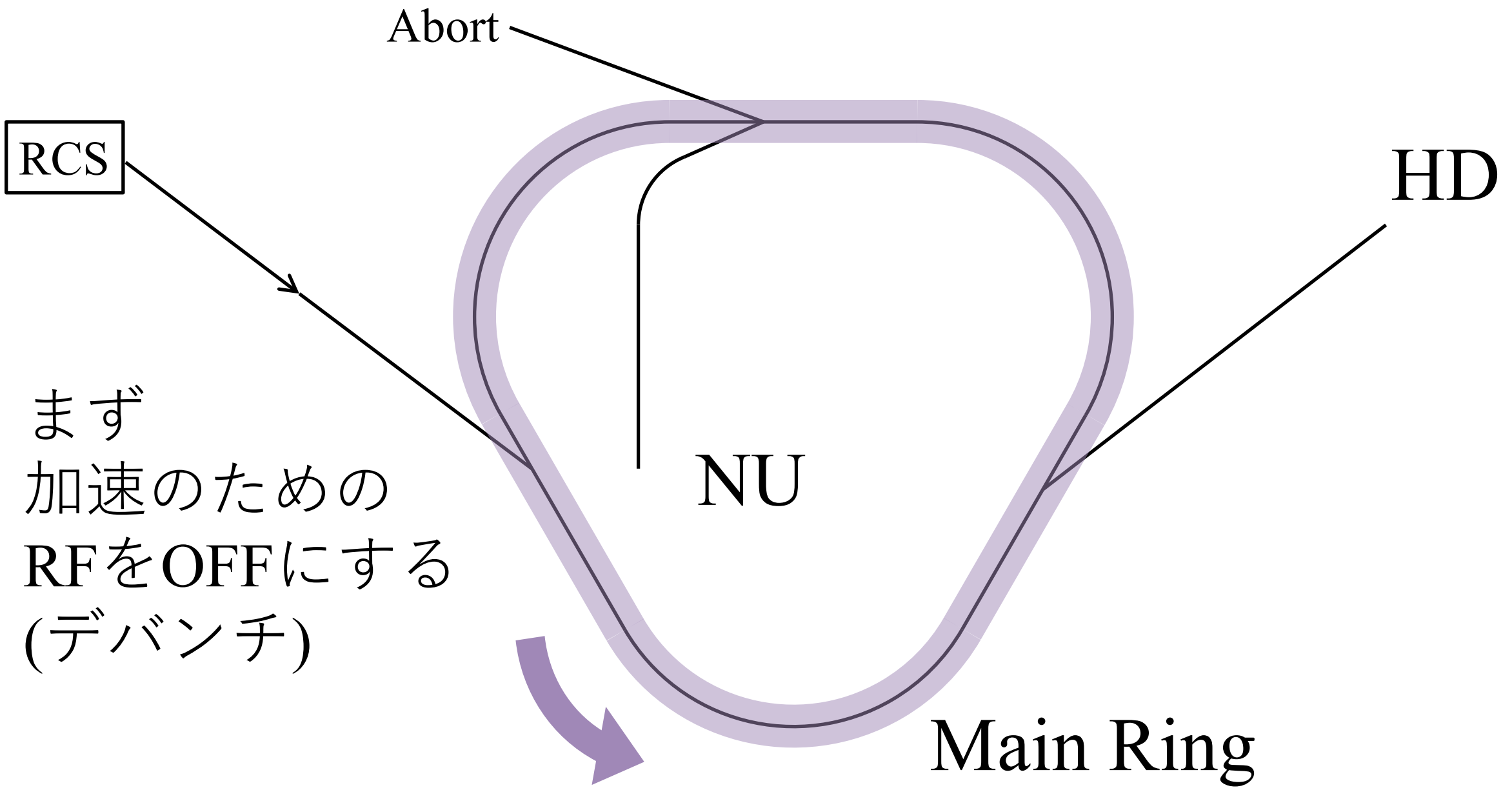
SX (Slow Extraction)



遅い取り出し



遅い取り出し

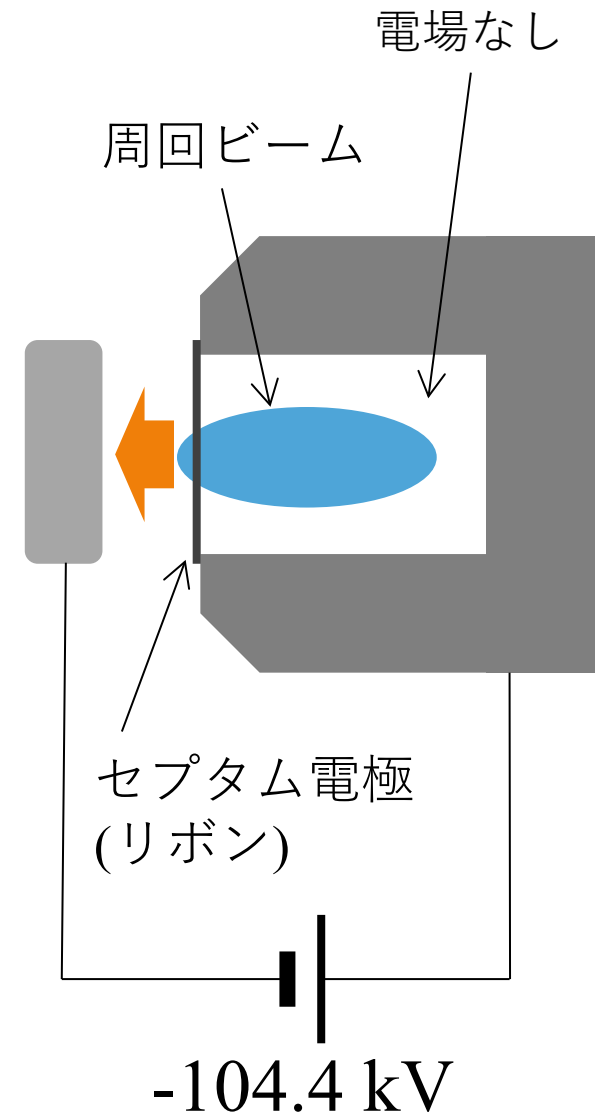
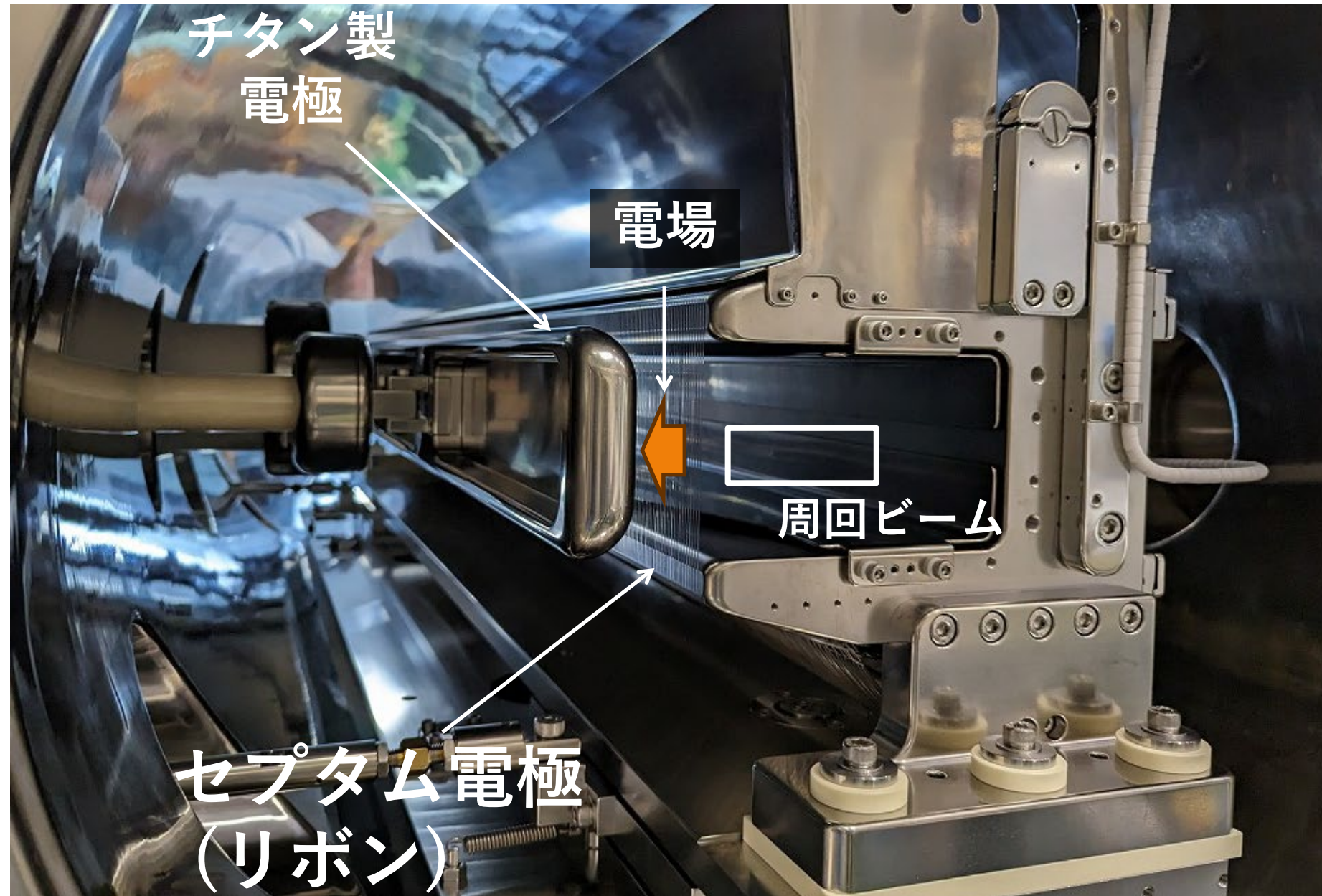


遅い取り出し — かつらむきのようにビームを削り出す

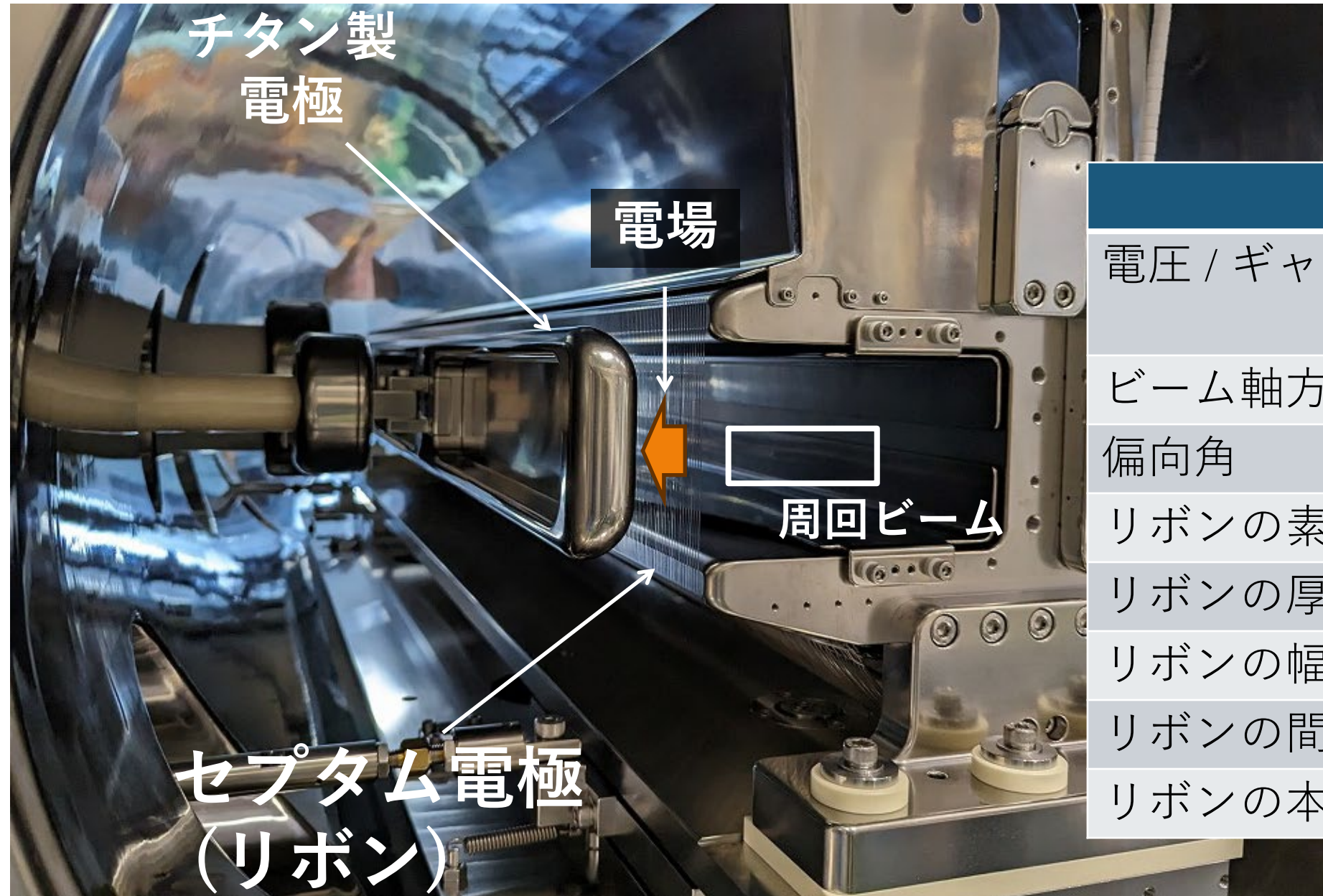


かつらむき

静電セプトムービームを削り出す包丁

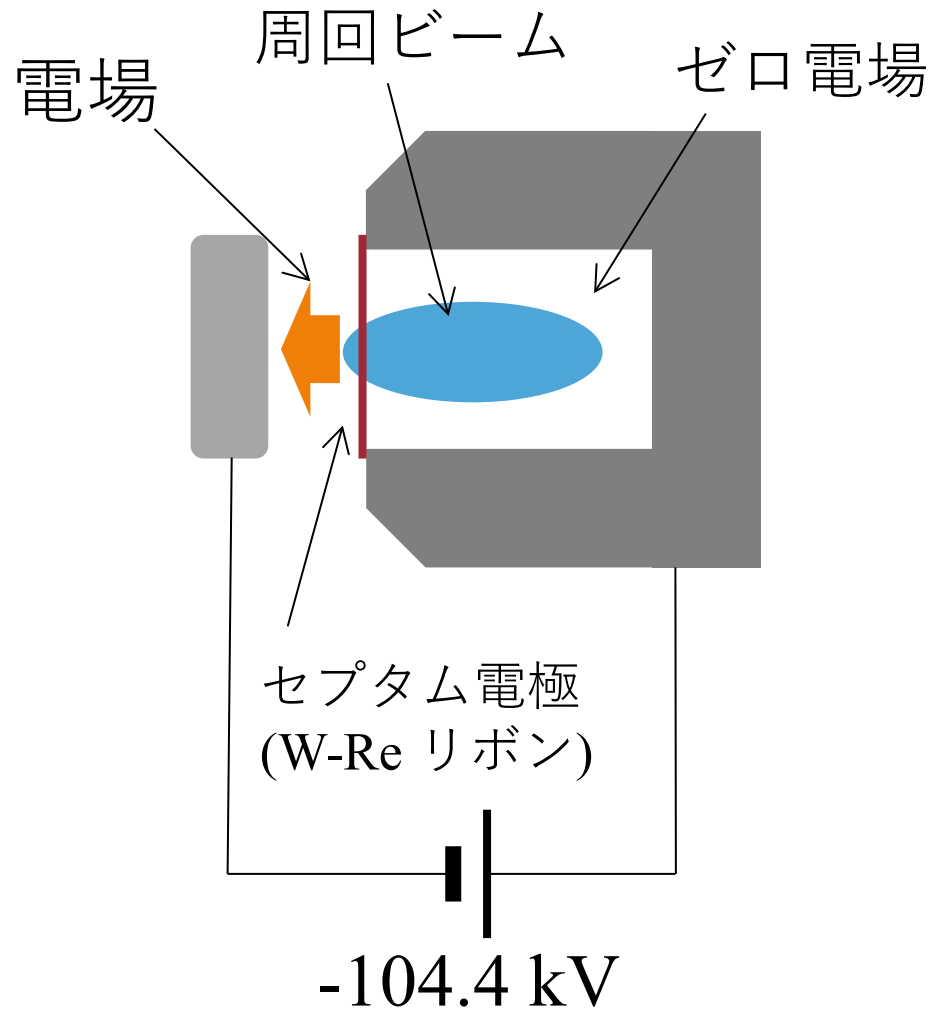


静電セプトラム - ビームを削り出す包丁

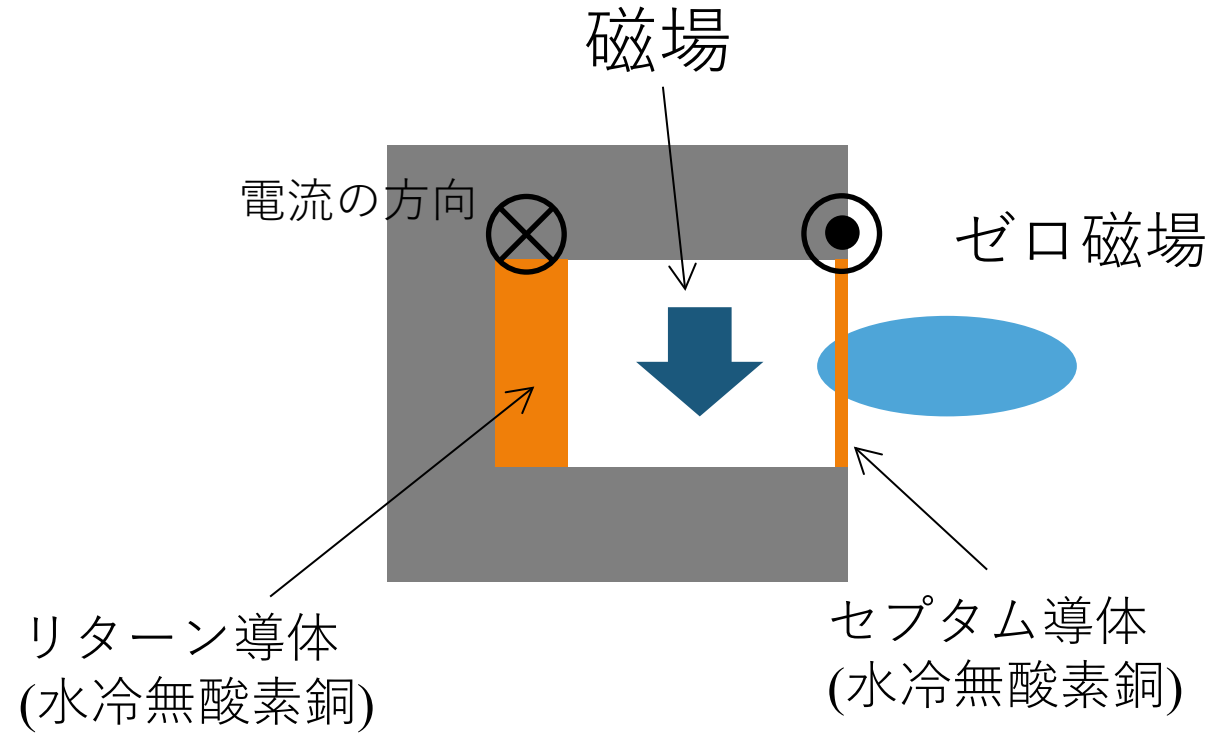


| | ESS1,2 |
|-----------|------------------------------|
| 電圧 / ギャップ | 104 kV / 25 mm = 4.2 MV/m |
| ビーム軸方向長さ | 1.5 m |
| 偏向角 | - 0.2 mrad |
| リボンの素材 | W-26 Re |
| リボンの厚さ | 30 μ m |
| リボンの幅 | 1 mm |
| リボンの間隔 | 3 mm |
| リボンの本数 | 495 |

なぜ電場をつかうのか



静電セプタム

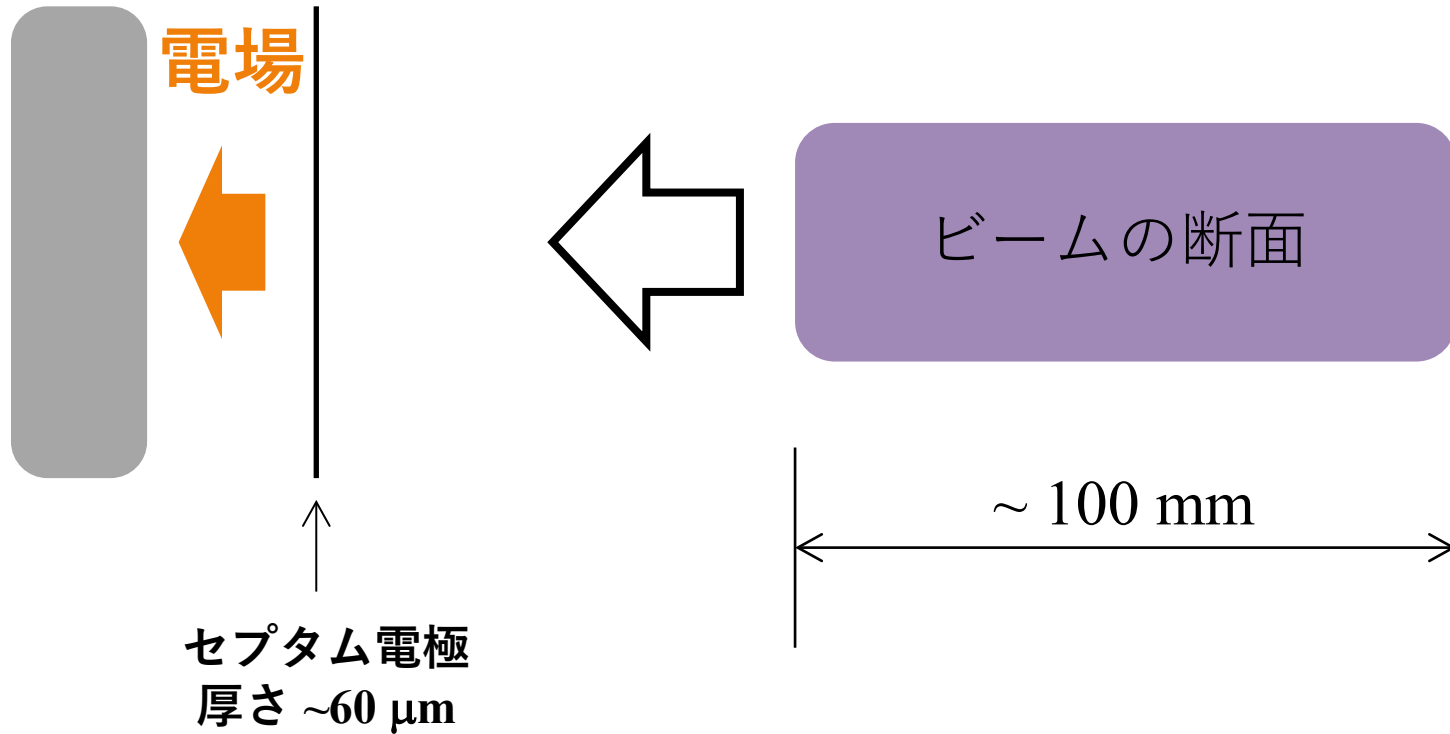


セプタム電磁石

- 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



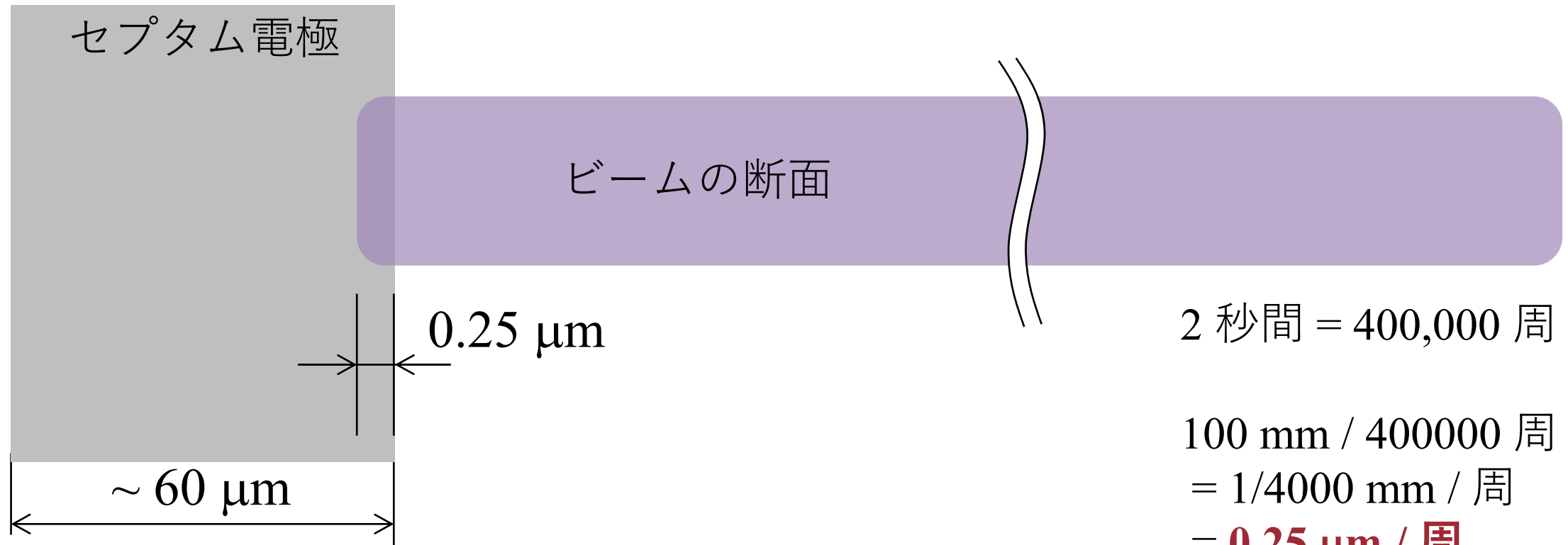
ビームをゆっくりと2秒間かけてセプタム電極のほうに動かしていくとどうなるか

$$2 \text{ 秒間} = 400,000 \text{ 周}$$

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

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



$$2 \text{ 秒間} = 400,000 \text{ 周}$$

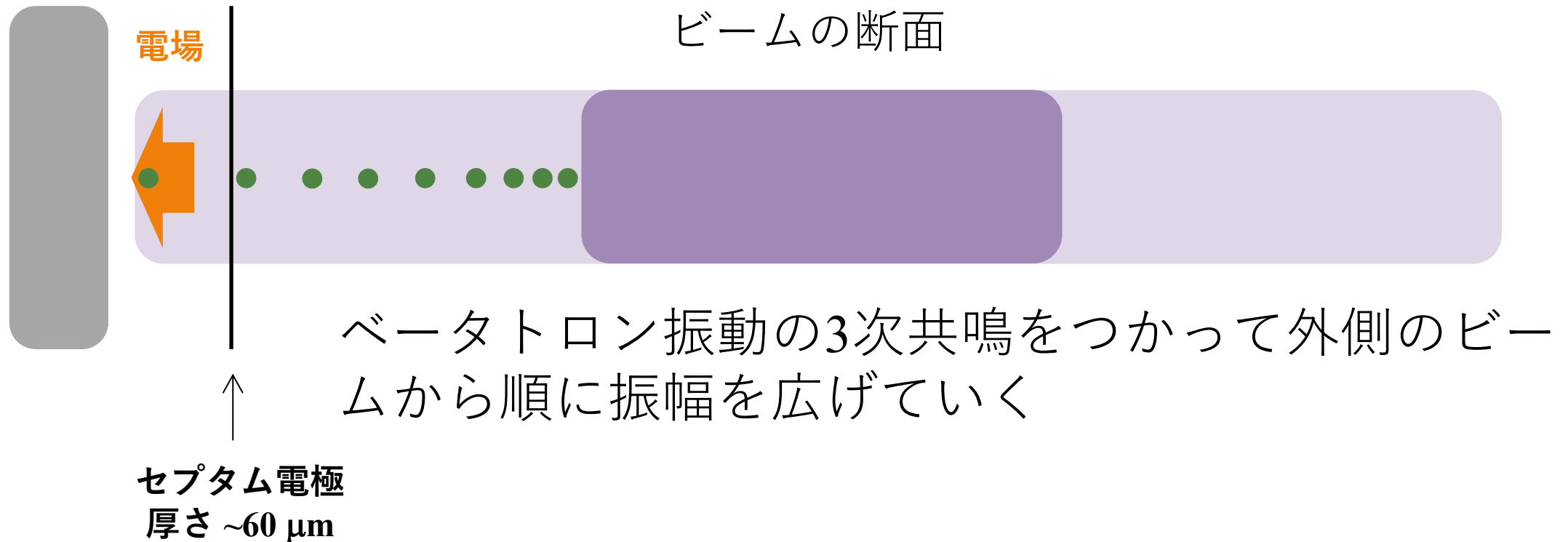
$$\begin{aligned} 100 \text{ mm} / 400000 \text{ 周} \\ = 1/4000 \text{ mm} / \text{周} \\ = \mathbf{0.25 \mu\text{m} / \text{周}} \end{aligned}$$

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

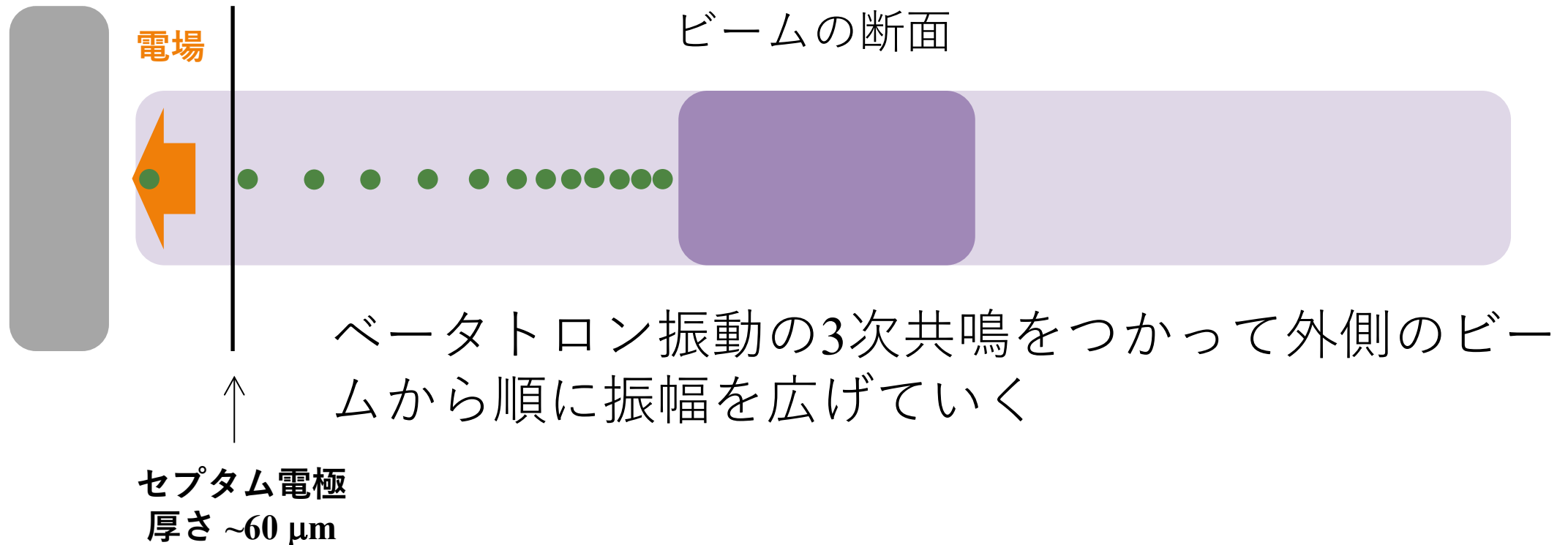
静電セプタム



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

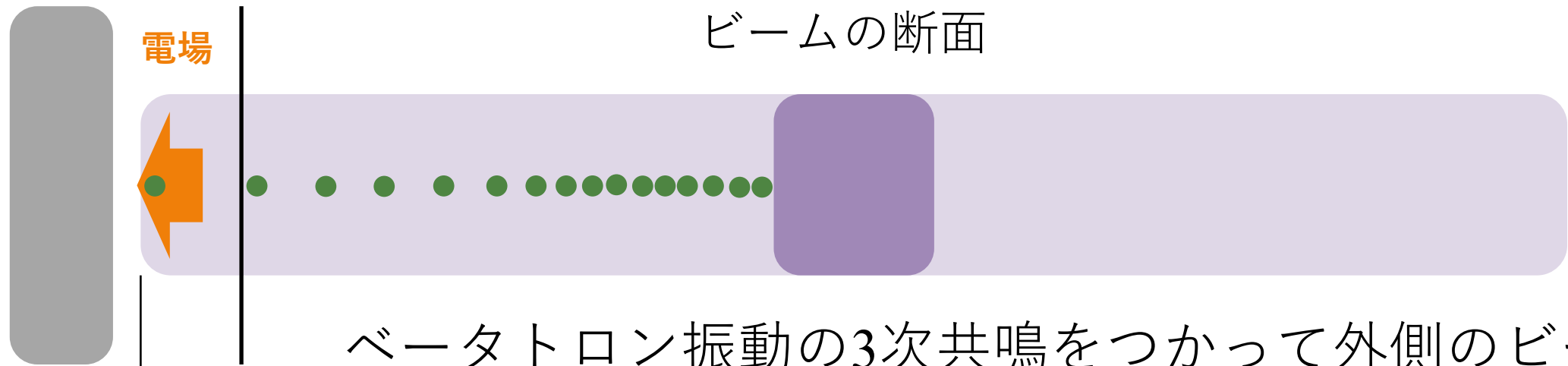
静電セプタム



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

静電セプタム



ベータトロン振動の3次共鳴をつかって外側のビームから順に振幅を広げていく

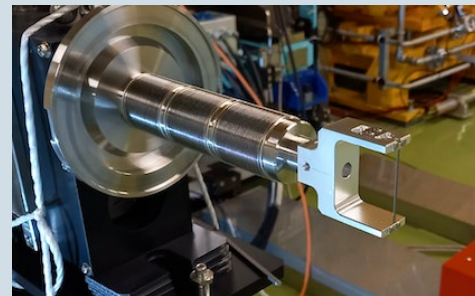
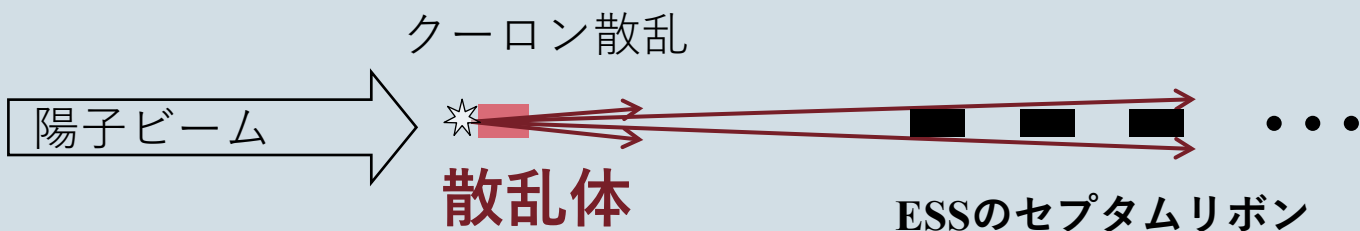
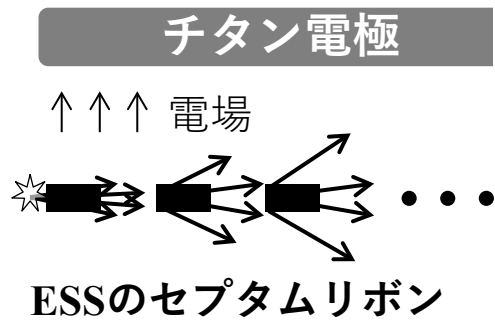
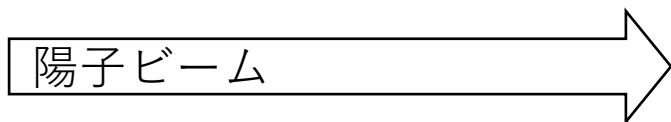
$20 \text{ mm} = 0.25 \mu\text{m} * 80,000 \rightarrow 99.5\%$ の取り出し効率を達成

ビームロスさらなる低減

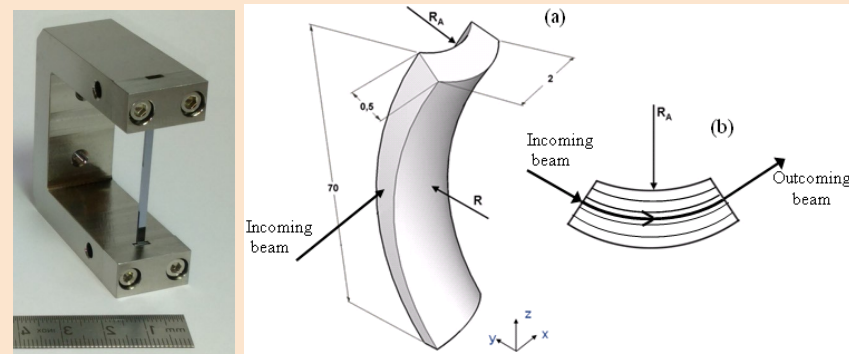
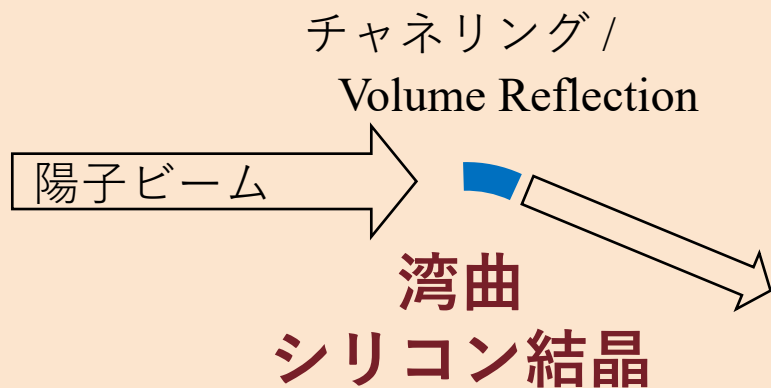
ビーム散乱体と湾曲シリコン結晶

ビーム散乱体と湾曲シリコン結晶

上から見た図



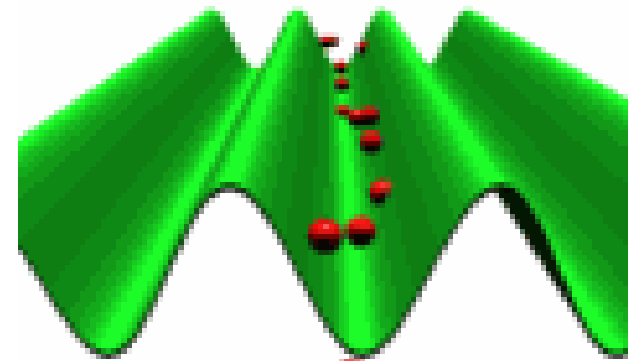
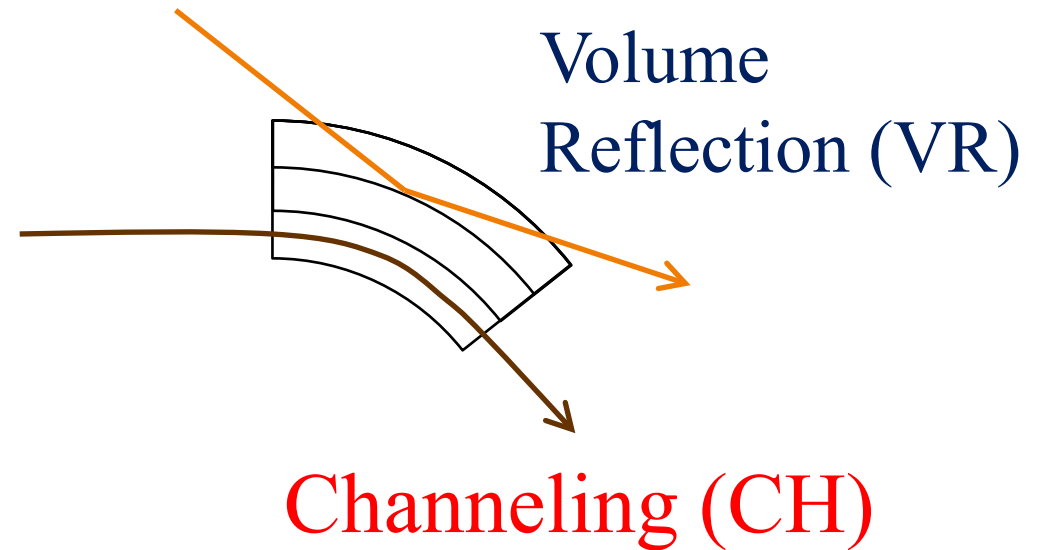
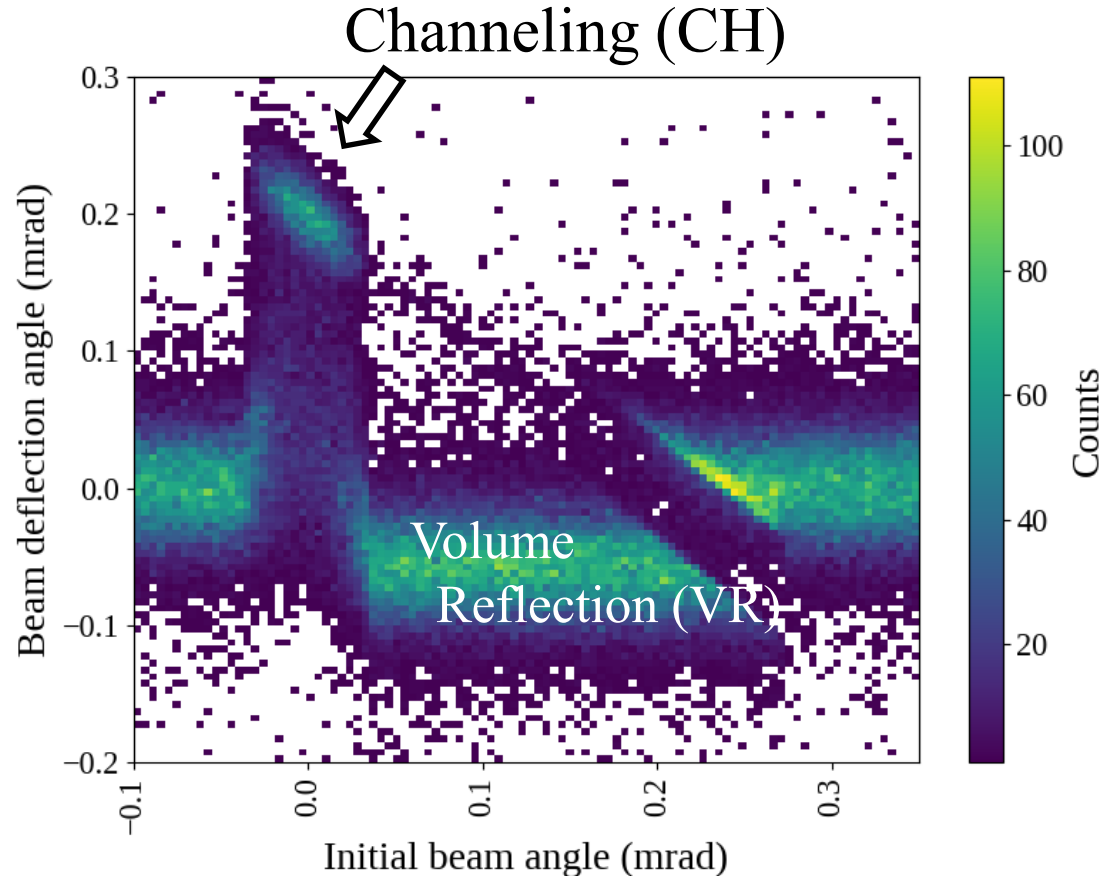
インストール前の
散乱体
タンタル製
幅 2 mm, 厚さ 0.1 mm



CERN LHC のビームコリメータ用の
湾曲シリコン結晶

湾曲シリコン結晶のビーム偏向効果

FLUKA simulation for 30 GeV proton deflection by bent silicon crystal



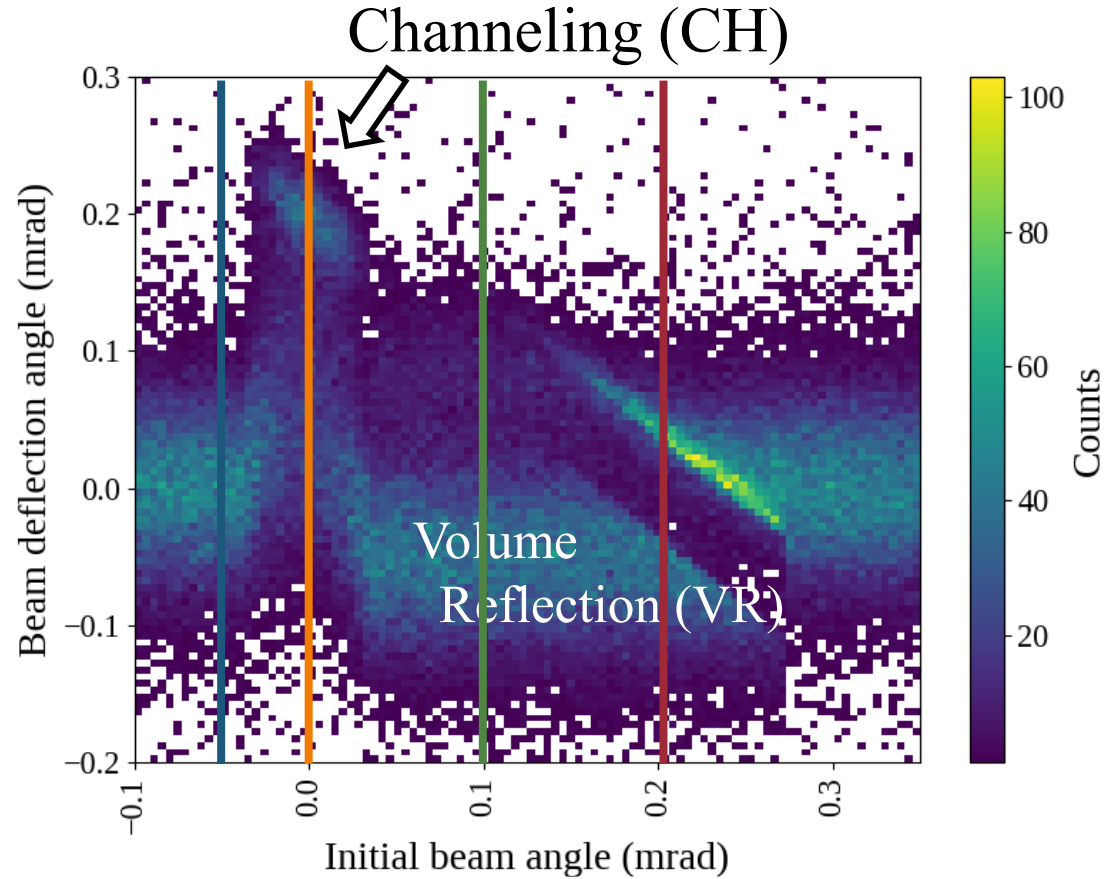
Bent Silicon Crystal Dimensions

Longitudinal Length 0.5 mm

Bending Angle 0.2 mrad

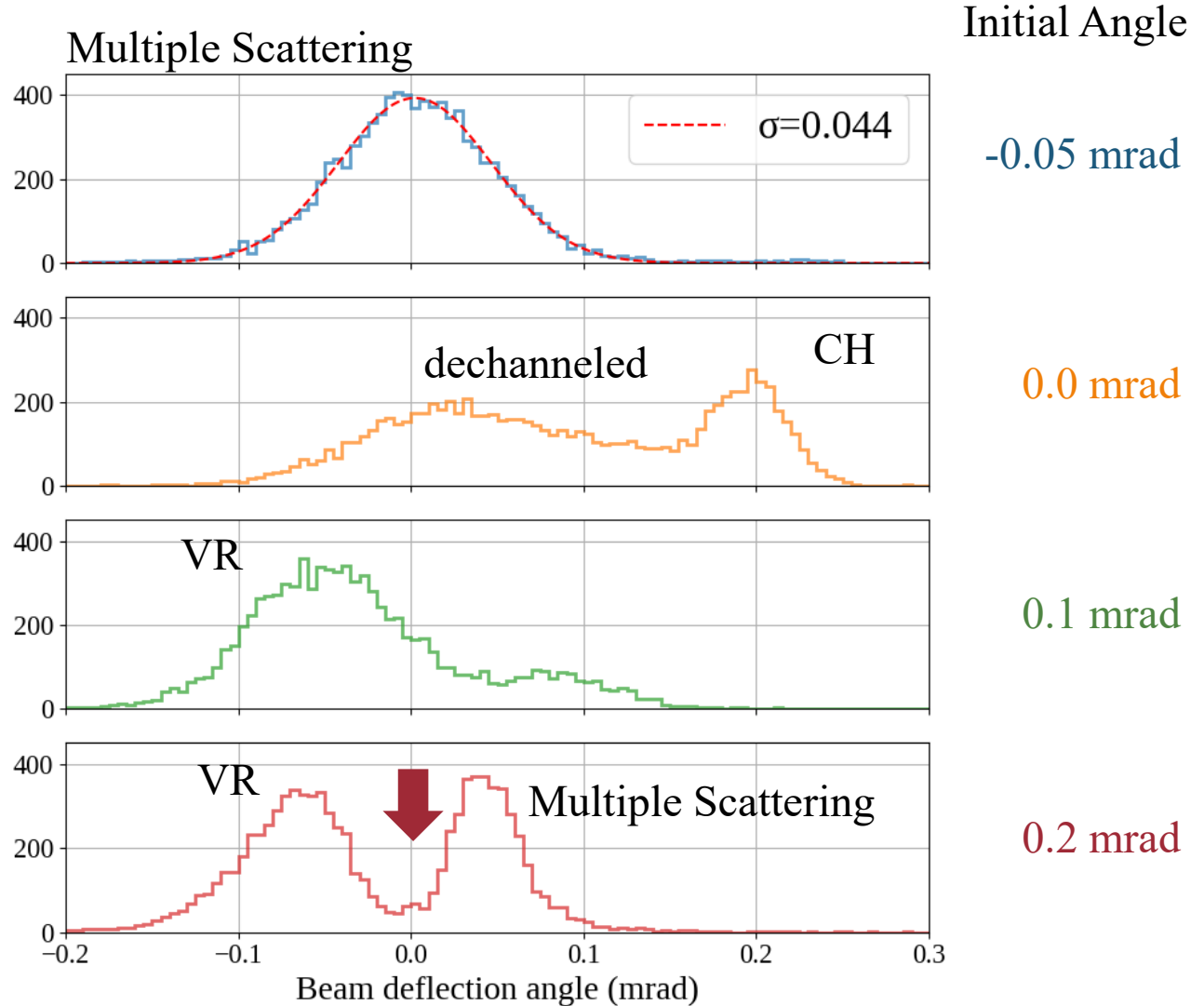
湾曲シリコン結晶のビーム偏向効果

FLUKA simulation for 30 GeV proton deflection by bent silicon crystal

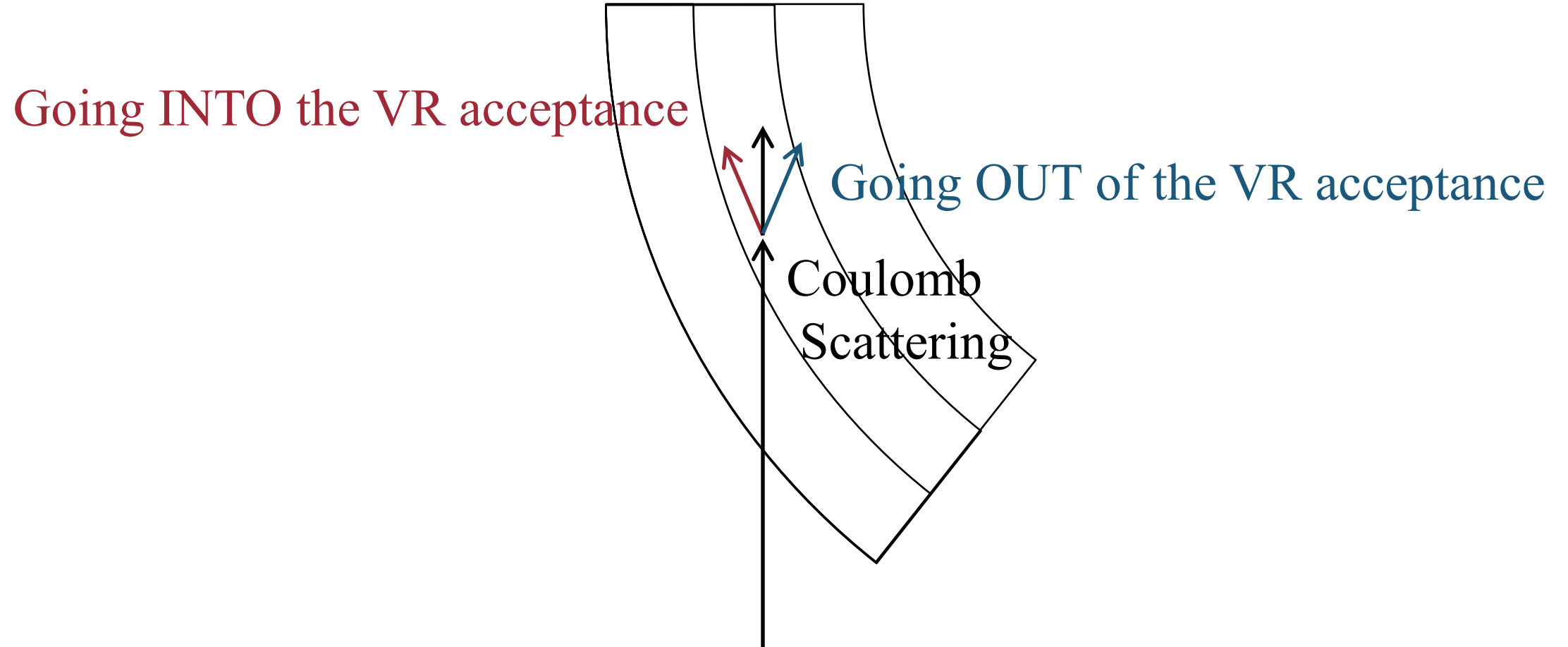


Bent Silicon Crystal Dimensions

| | |
|---------------------|----------|
| Longitudinal Length | 1.0 mm |
| Bending Angle | 0.2 mrad |



VR Acceptance の端で起こっていること



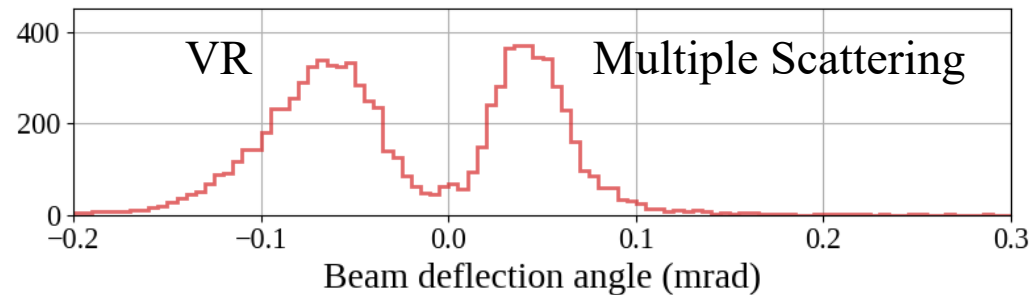
VR Acceptance の端で起こっていること

Going INTO the VR acceptance

Reflected by VR

Going OUT of the VR acceptance

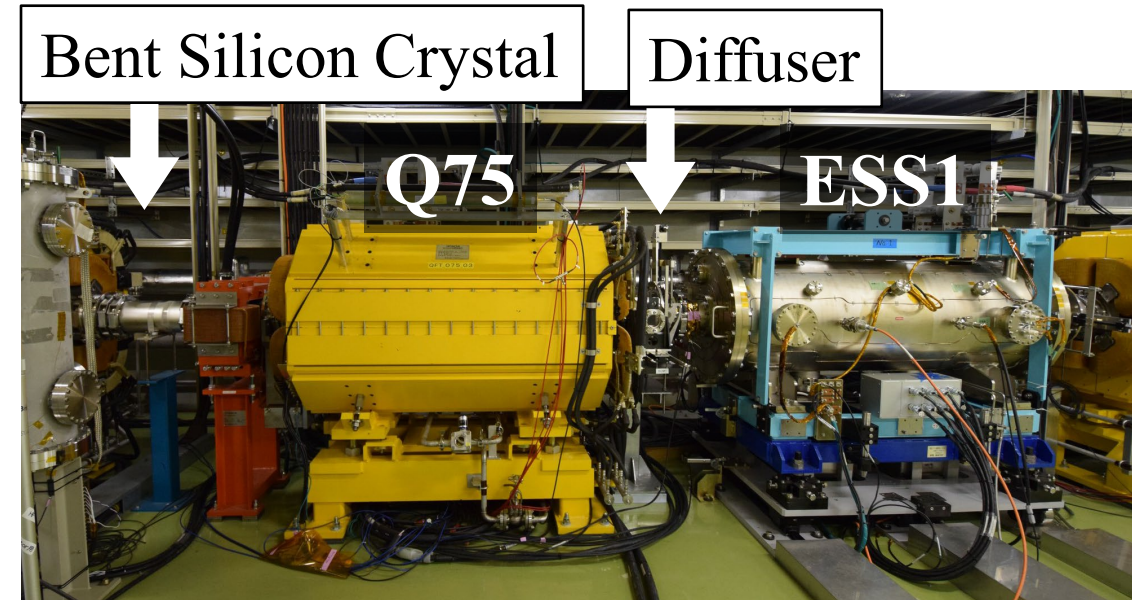
Coulomb Scattering



“Half-VR”

ビームロス低減効果の見積もり

| Configuration | Bending Angle | Beam Loss |
|-----------------------|---------------|-------------|
| No mitigation | - | 1.00 |
| Diff | - | 0.58 |
| CH | 200 μ rad | 0.57 |
| VR | 100 μ rad | 0.54 |
| Half-VR | 100 μ rad | 0.31 |
| CH + Diff | 200 μ rad | 0.27 |
| VR + Diff | 100 μ rad | 0.26 |
| Half-VR + Diff | 100 μ rad | 0.20 |



Estimation using FLUKA

イタリアINFNと一緒にJ-PARC用の結晶をこれから作ろうとしているところ

その他の課題

- **ビームパワー増強のためのデバンチ時のビーム不安定化の抑制**
 - RF Voltage の操作による縦方向分布のコントロール
 - スリッページというパラメータを大きくしたビーム光学の導入
 - 縦方向エミッタンスを大きくするためのVHF Cavityの導入
- **取り出しビームの時間構造の平坦化 (スピル制御)**
 - 電磁石電源の電流リップルを補正するリップルキャンセラー
 - 応答の速いQ磁石を用いたスピルフィードバック制御の高度化 (AI/ML)
 - ビームを横方向にキックして分布をなだらかにする
Transverse RF のフィードバック制御の導入

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 → ...

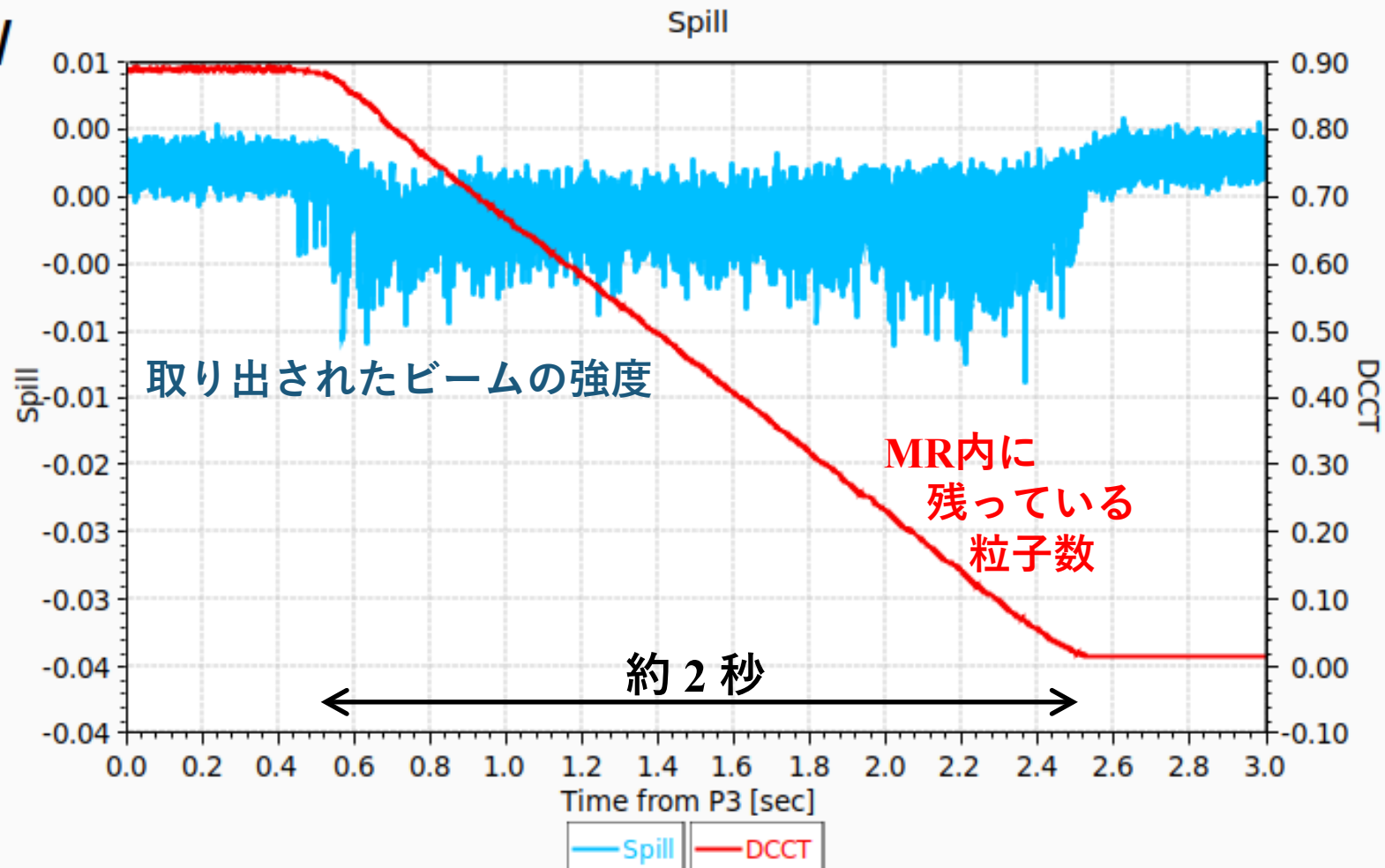
というループを回して加速器の性能を上げていく楽しさがあります。
興味がわいたらいつでも連絡ください!

J-PARC MRからHDへのビーム取り出し **101 kW** 達成

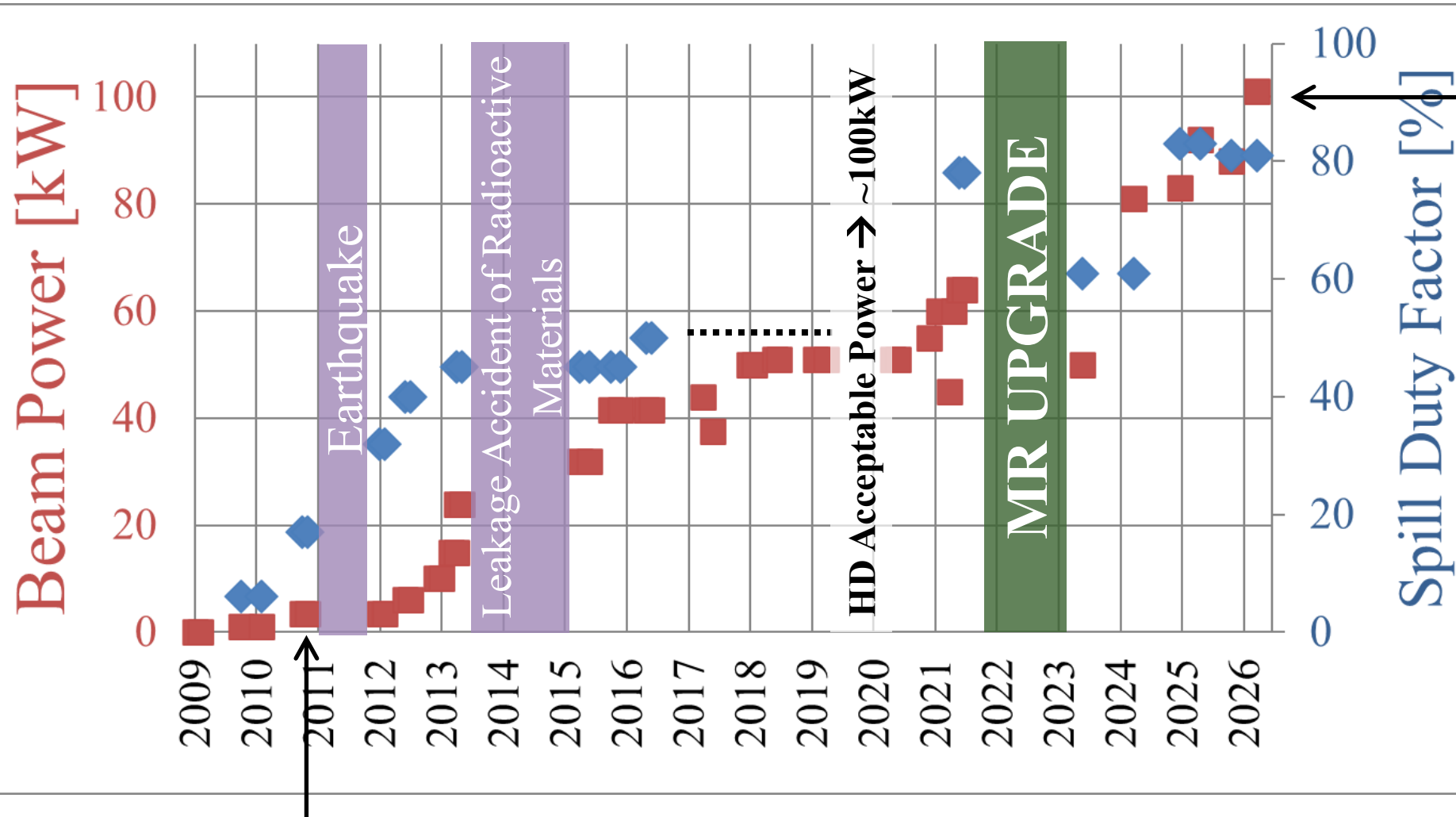
26/04/04 22:55:04 Run **93** Shot **4788666** at **26/04/04 22:55:01**
MR Power **101.00 kW** Spill

2026年4月4日、J-PARCメインリング (MR) からハドロン実験施設への陽子ビームの「遅い取り出し」において、J-PARC建設当初からの目標であった100 kWの大台を超える、101 kWでの安定した利用運転を達成しました (同日22:17~23:20)。

2026年4月1日からはじまったビーム調整で、ビーム不安定性を効果的に抑え込む加速空洞の条件を発見できたことが、101 kW達成の大きな原動力となりました。



Beam Power Trend of J-PARC Slow Extraction



Achieve 99.5% Extraction Efficiency
with Dynamic Bump

2026-Apr

Beam power: **101 kW**

Repetition: 4.24 s

Particle Number:

8.9 e+13 protons/pulse
(world record)

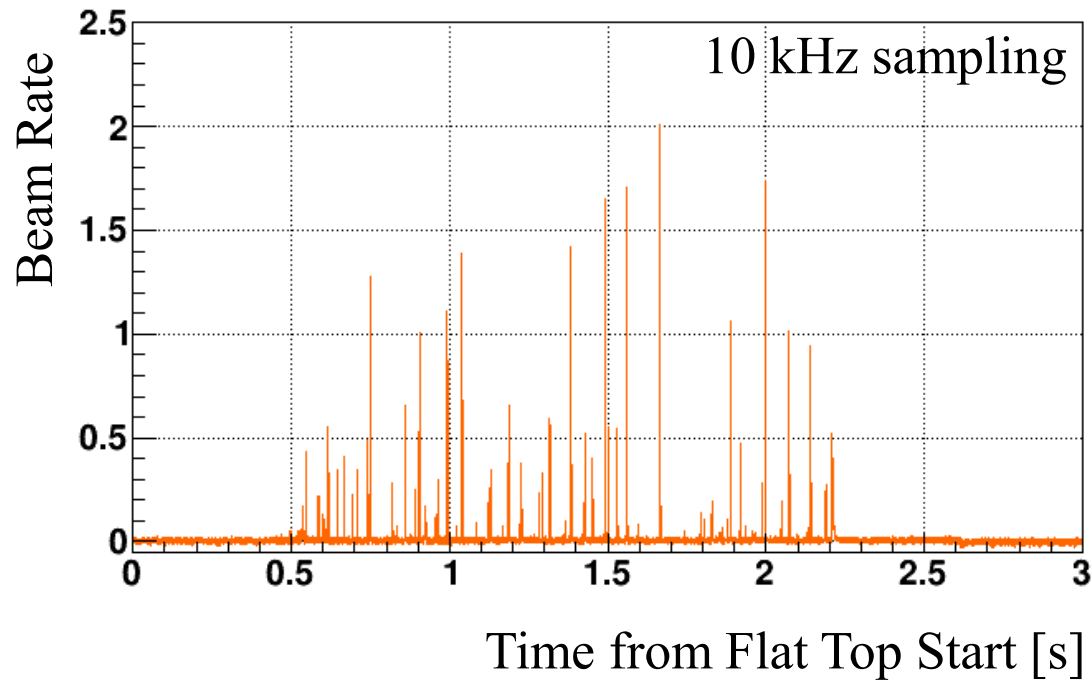
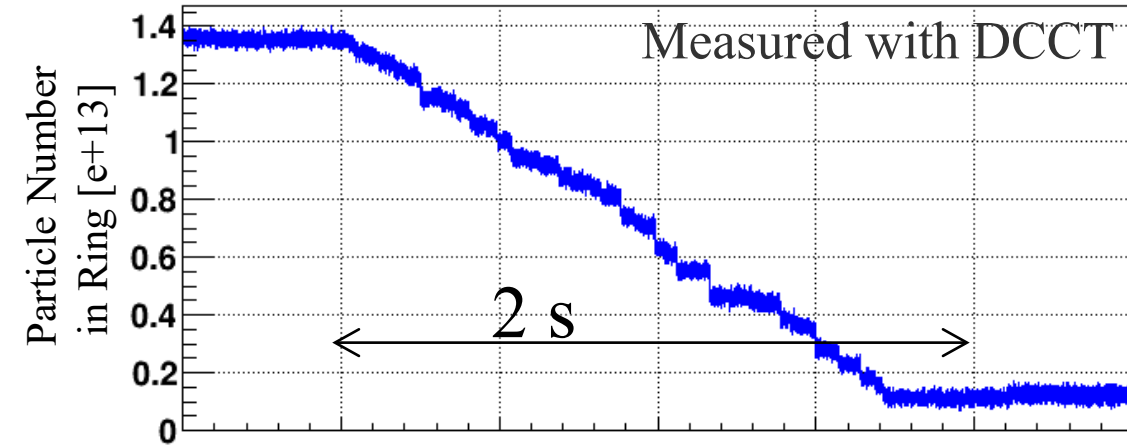
Ext. efficiency: ~**99.6%**

Spill duty: ~**83%**

Spill structure without tune ripple mitigation

2020-June

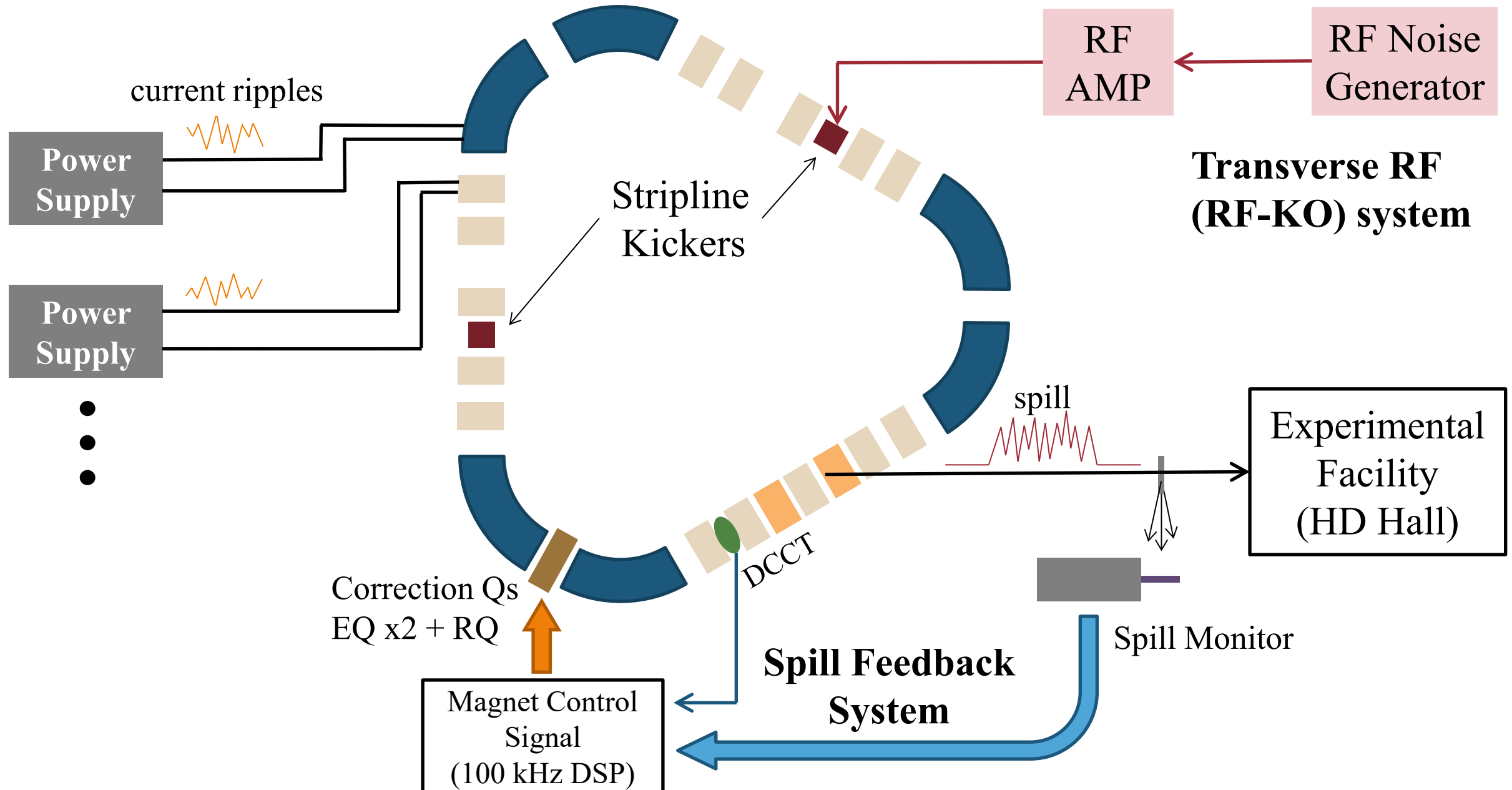
With macro structure regulation only



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

Large spikes in beam spill
come from current ripples
in main magnet power supplies

Spill regulation systems at J-PARC MR

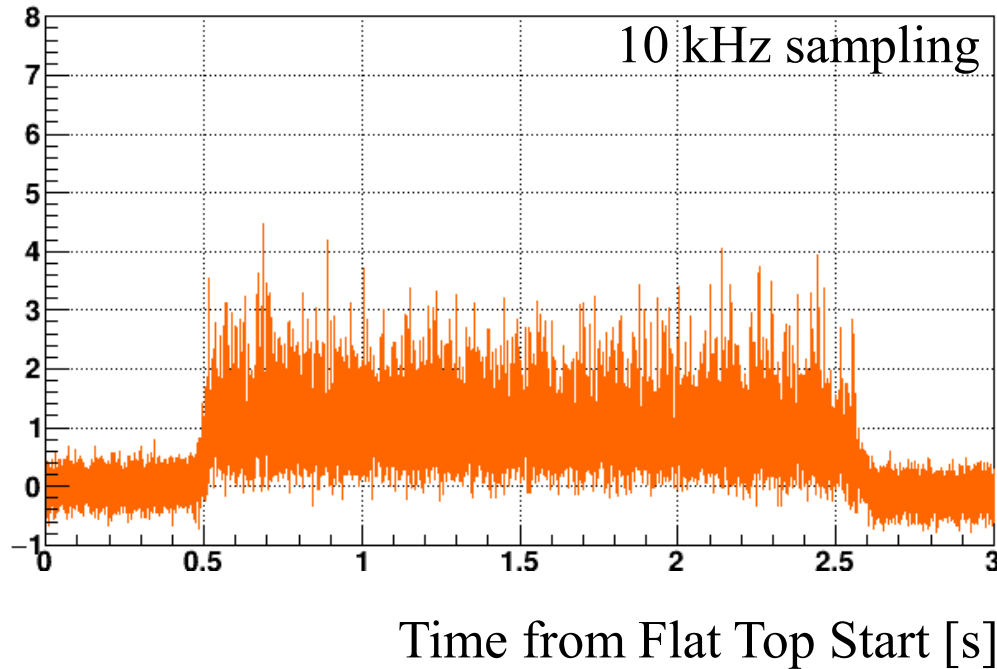
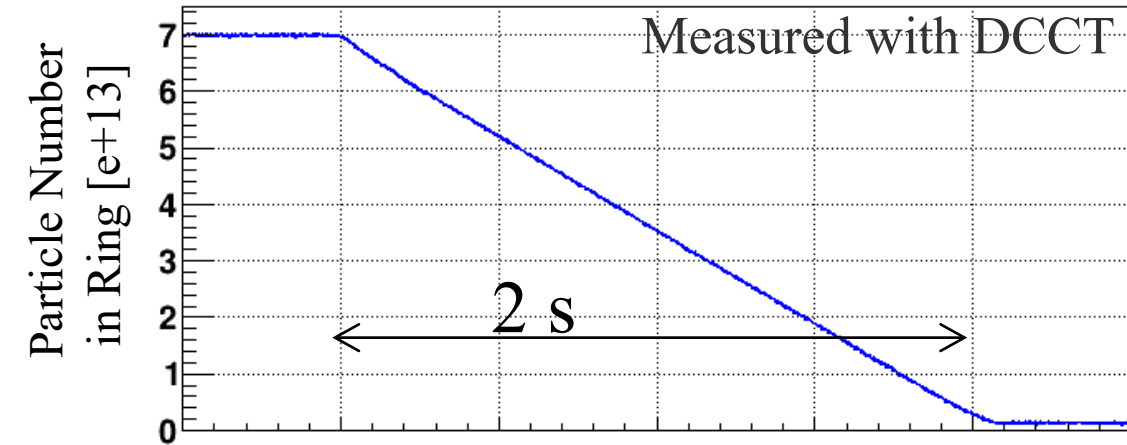


Spill structure with spill regulation systems

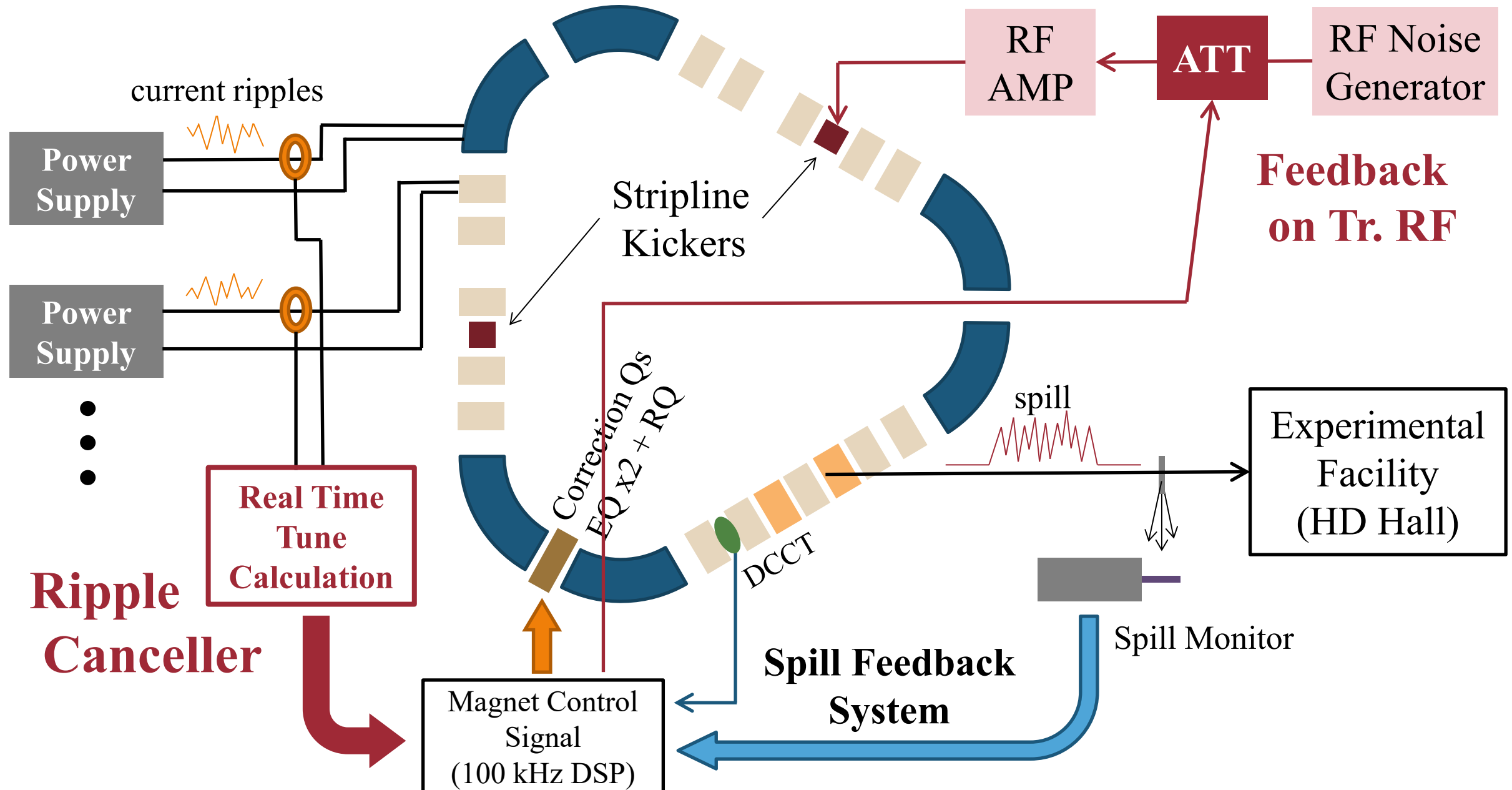
2021-June
Before MR Upgrade

Beam power : 64 kW with 5.2 s repetition
(7.0×10^{13} particle/pulse)

Spill Duty Factor : $\frac{\langle I \rangle^2}{\langle I^2 \rangle} \sim 78\%$
(10kHz Sampling)



Improvement Plans for Spill Regulation System



Beam Instability at Debunch Timing

RUN78 (Feb-2018) 63 kW

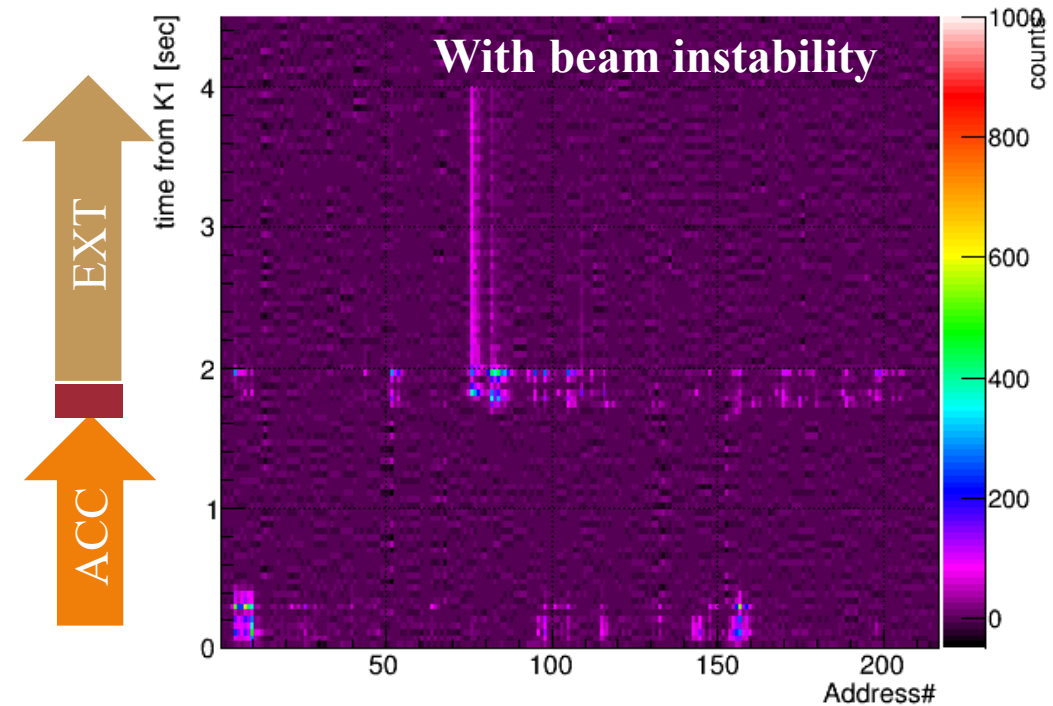
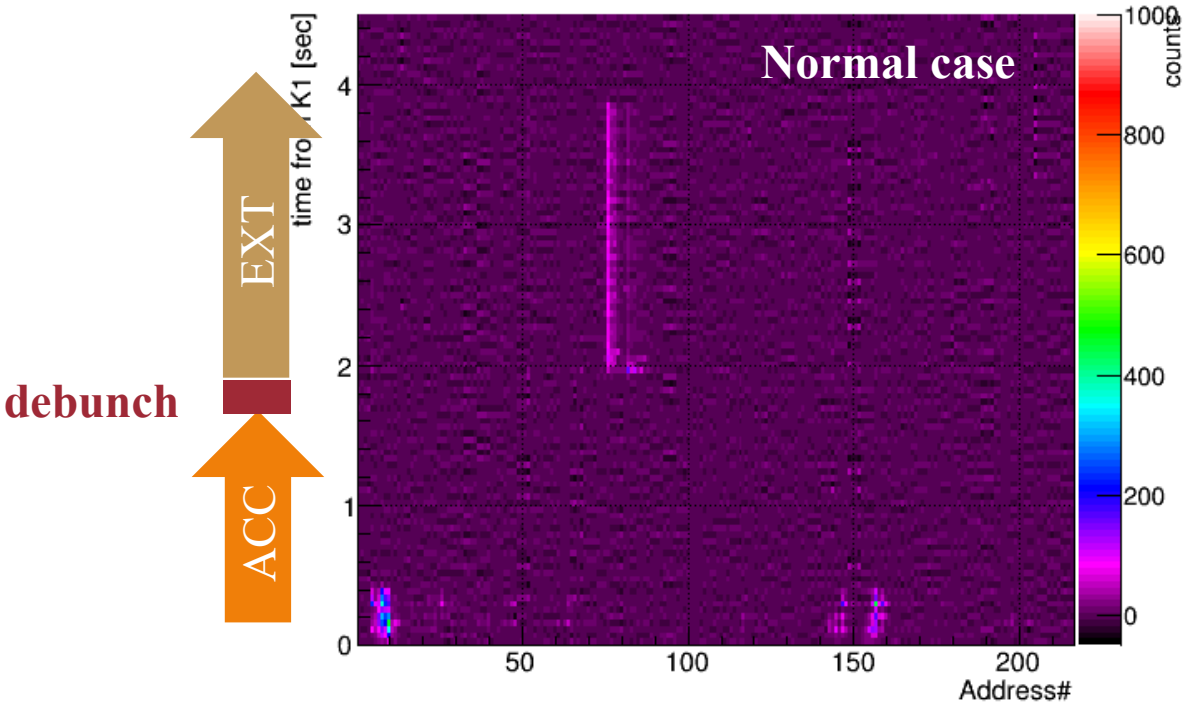
Ext. Efficiency 99.472% with phase offset of 50°

RUN79 (Jun-2018) 63 kW

Ext. Efficiency 98.666% with phase offset of 60°

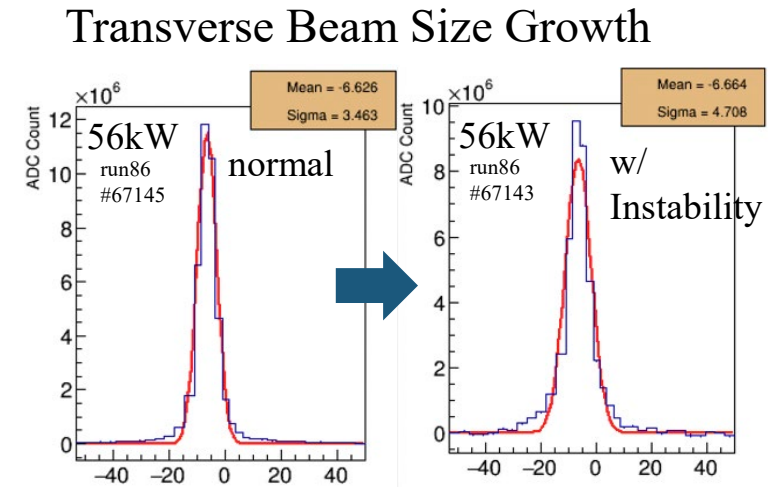
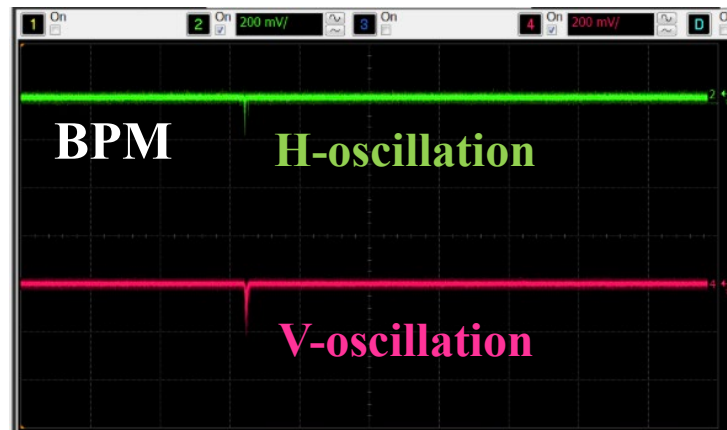
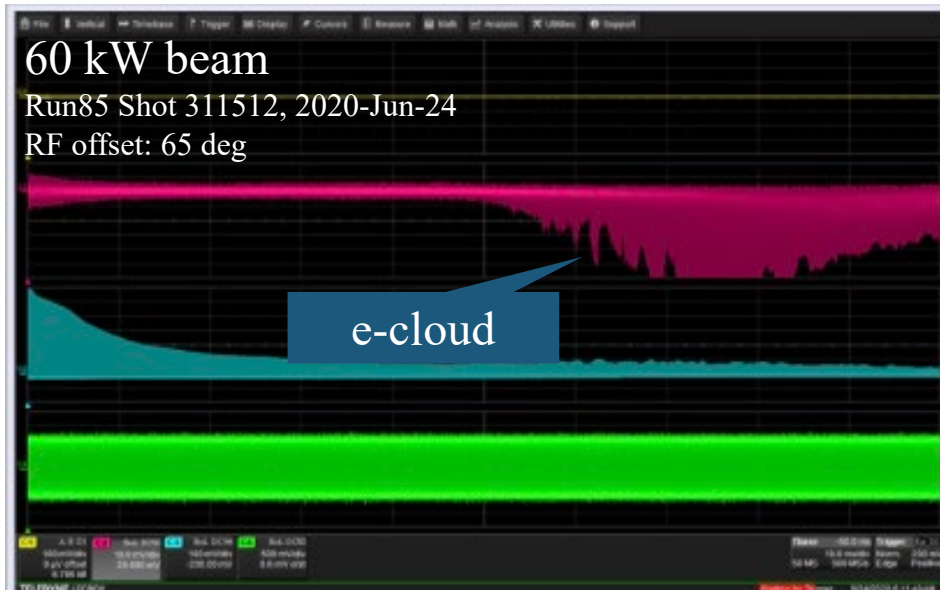
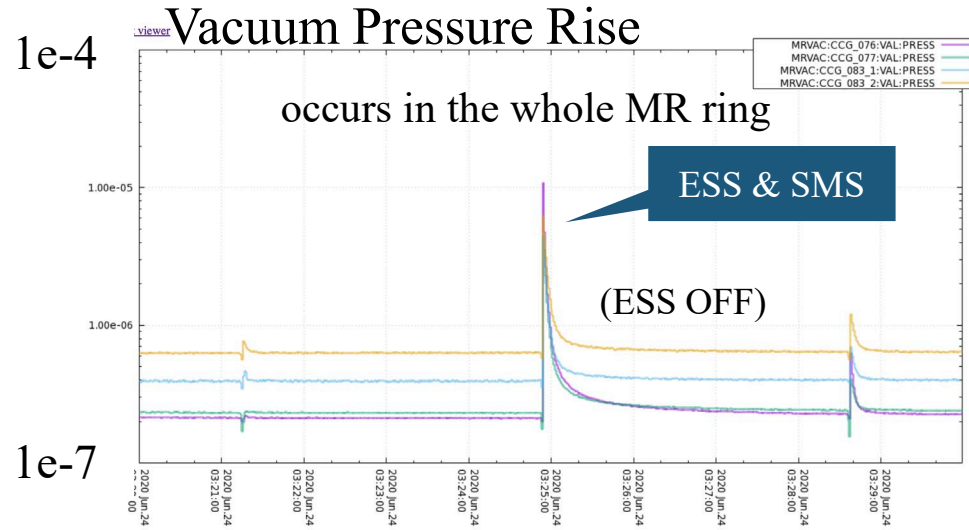
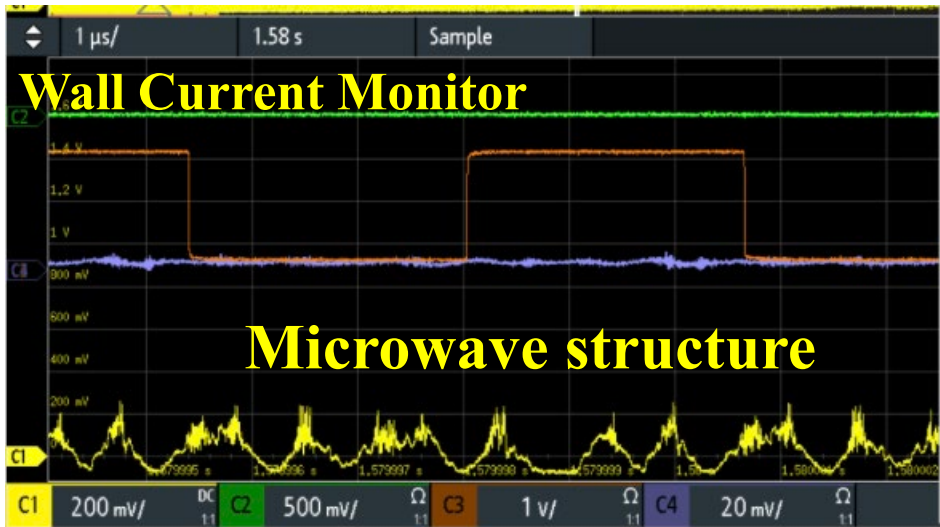
2018 Feb 26 08:39:29 - Run 78 Shot 397105

2018 Jun 30 03:57:30 - Run 79 Shot 1852705



Beam losses were observed in the whole ring at debunch timing

Beam Instability at Debunch Timing



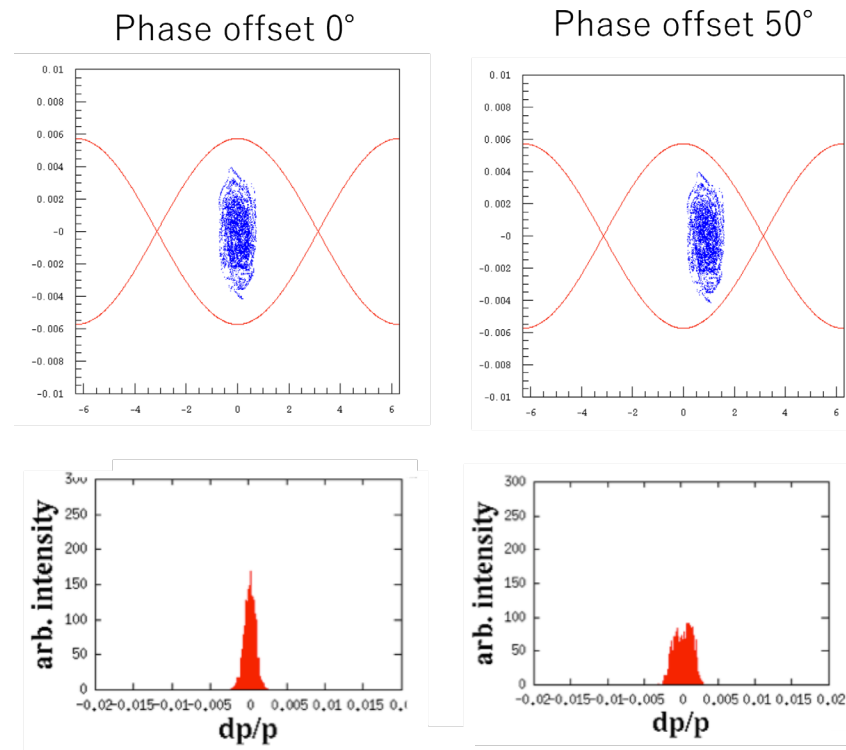
Beam instability occurs ~ 60 ms after RF OFF

Suppression of beam instability during debunching

Keil-Schnell criterion

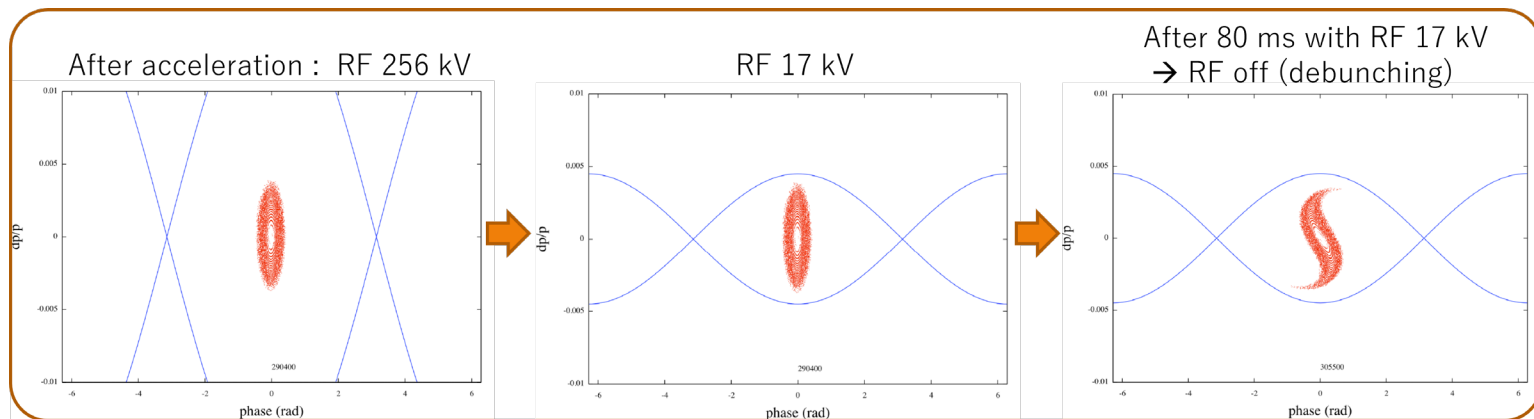
$$\left| \frac{Z_L(n\omega_0)}{n} \right| < F \cdot \frac{\text{Slippage} \cdot |\eta| \beta^2 E_0 / e}{I_p} \left(\frac{\Delta p}{p} \right)_{FWHM}^2$$

Impedance
Longitudinal Emittance



In the beam test after MR upgrade, we were able to suppress the instability up to 70.8 kW (7.6 e+13 protons/pulse with 5.2 s repetition).

We will further optimize RF manipulation based on simulation and beam study.



Large Slippage Optics

Keil-Schnell criterion

$$\left| \frac{Z_L(n\omega_0)}{n} \right| < F \cdot \frac{|\eta| \beta^2 E_0 / e}{I_p} \left(\frac{\Delta p}{p} \right)_{FWHM}^2$$

Impedance
Slippage
Longitudinal Emittance

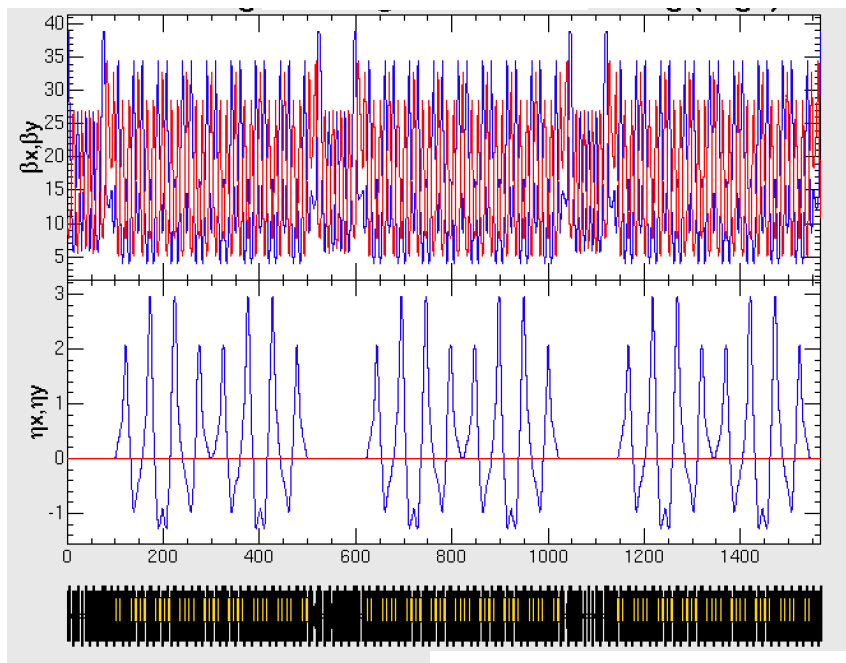
MR Lattice: imaginary $\gamma_t \rightarrow$ flexible momentum compaction

Optics with a larger slippage $|\eta|$ is a promising candidate for suppressing the instability at a higher beam power

$\eta = -.001920$ (current optics)

Tune (22.286, 20.788)

mrsx_021_009

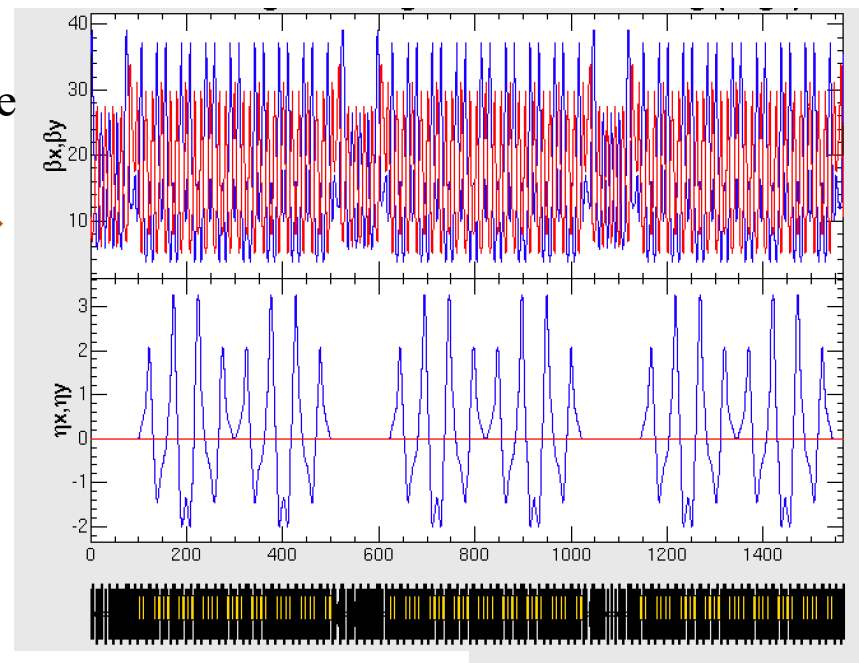


Slippage
x 1.5
➔

$\eta = -.00291$

Tune (22.286, 20.788)

mrsx_021_011_1



Reported in
ATAC2021

The slippage is changed during acceleration

VHF Cavity for Longitudinal Emittance Growth

Keil-Schnell criterion

Slippage

$$\left| \frac{Z_L(n\omega_0)}{n} \right| < F \cdot \frac{|\eta| \beta^2 E_0 / e}{I_p} \left(\frac{\Delta p}{p} \right)_{FWHM}^2$$

Impedance

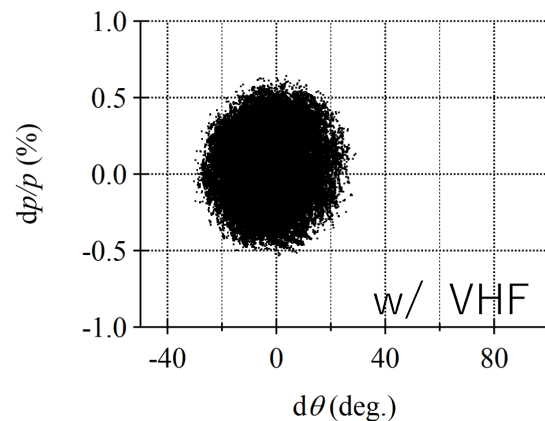
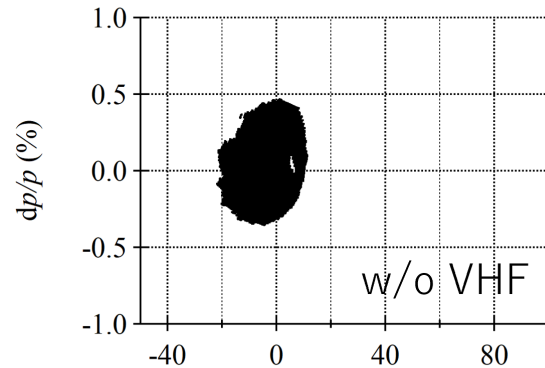
Longitudinal Emittance

Longitudinal emittance growth by VHF cavity phase modulation

$$V_{total}(t) = V_0 \sin 2\pi f_0 t + V_b \sin(2\pi f_b t + \psi(t)),$$

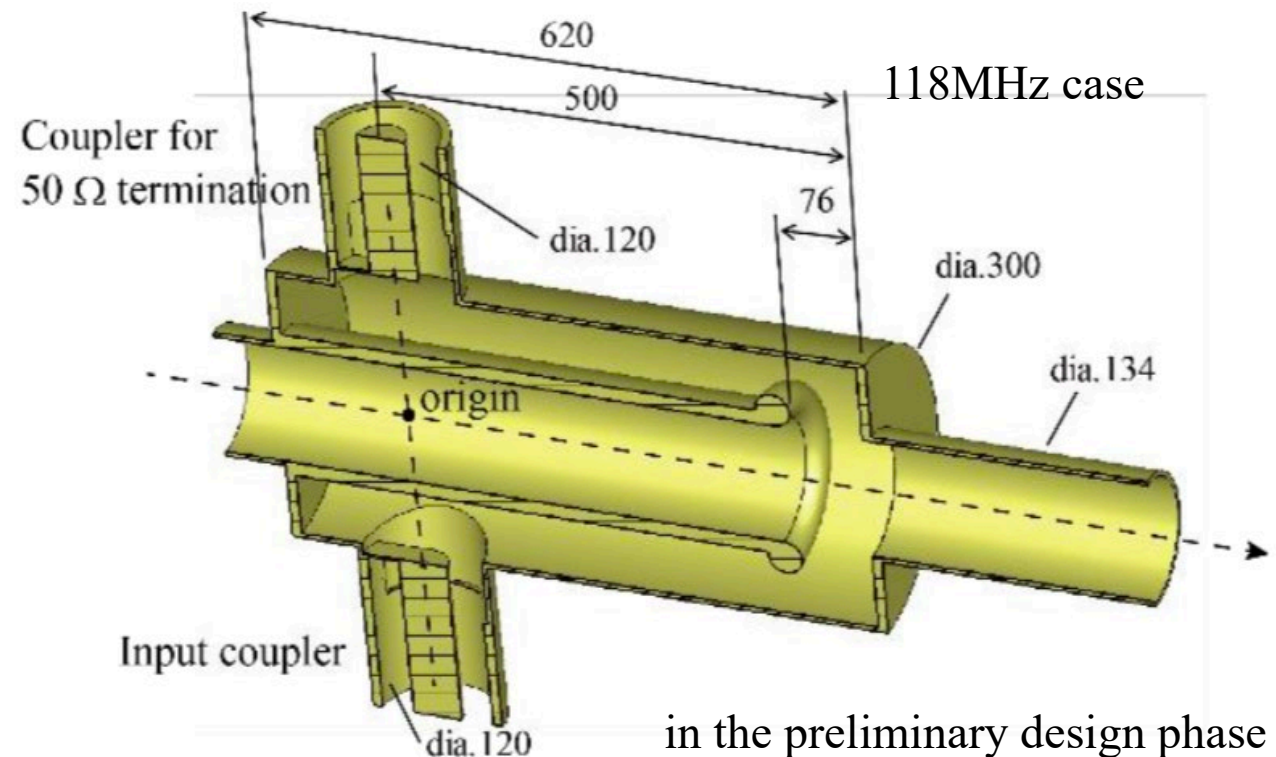
$$\psi(t) = \Delta\phi_m \sin 2\pi f_m t$$

Simulation example



by Y. Morita

$\lambda/4$ -coaxial cavity



in the preliminary design phase