

J-PARC MRの遅い取り出しの これまでと今後の展望

素核研 ハドロンビームラインG

J-PARC MR 遅い取り出しG

武藤 亮太郎

自己紹介

- KEK-PSの実験でD論取得
- 2007年より素核研 ハドロンビームライニンググループに所属しつつ、J-PARC MR 遅い取り出しグループの一員となり、遅い取り出しの仕事をはじめ。
- 現在：MR遅い取り出し / ハドロンホールにて新ビームライン(高運動量ビームライン)の建設

内容

- J-PARC MRにおける遅い取り出しの概要
- これまでの取り組み
 - ビームパワー増強
 - 高い取り出し効率(99.5%)の実現
 - パワー増強にともなう困難と、対策
 - 放射化・被ばくの抑制
 - スピル構造の改善
- 今後の展望

J-PARC

Japan Proton Accelerator Research Complex

400MeV
LINAC

3GeV
RCS

ν to
SK

MLF

Slow Extraction

30 GeV
Main Ring

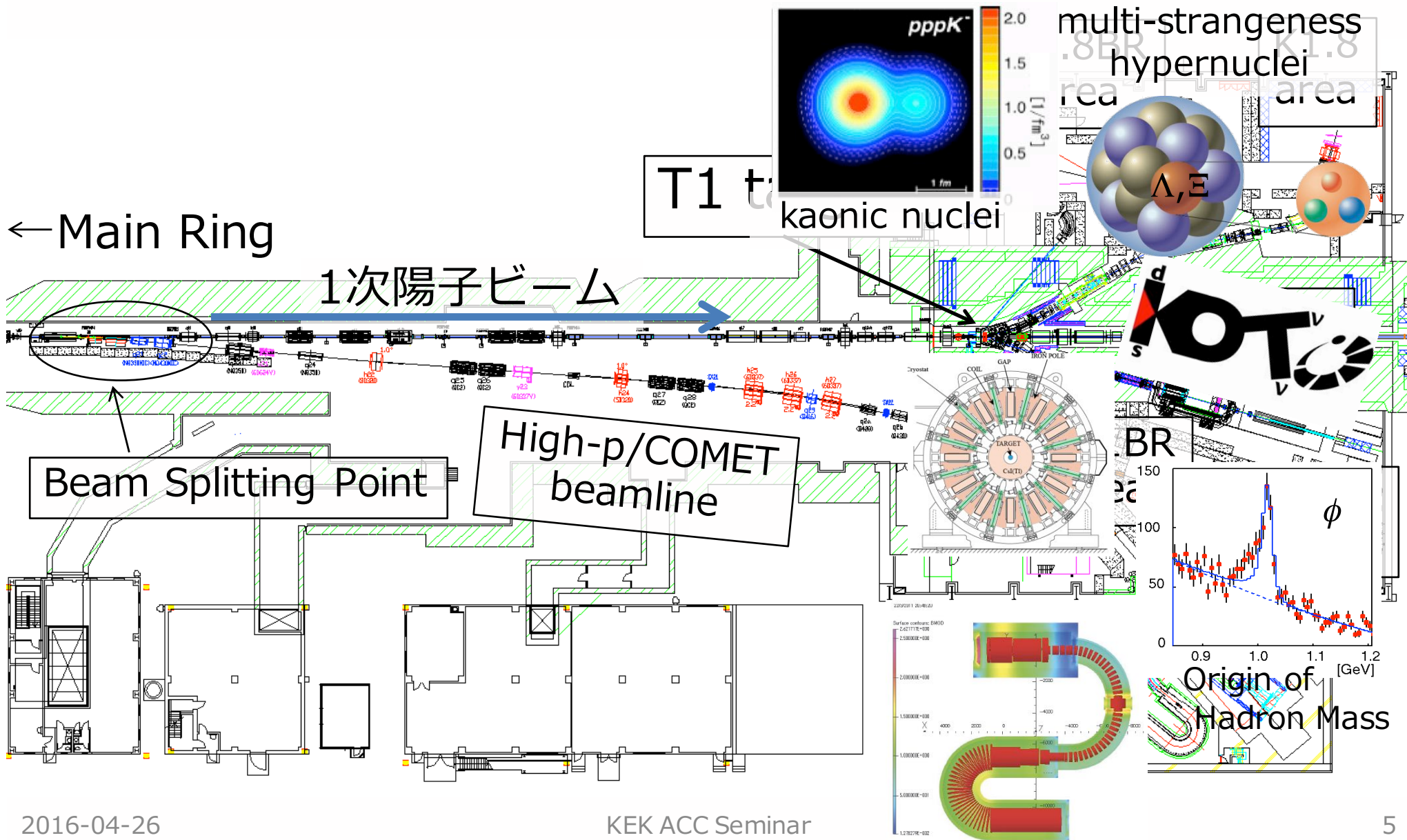
ハドロンホール

Bird's eye photo
in January 2016

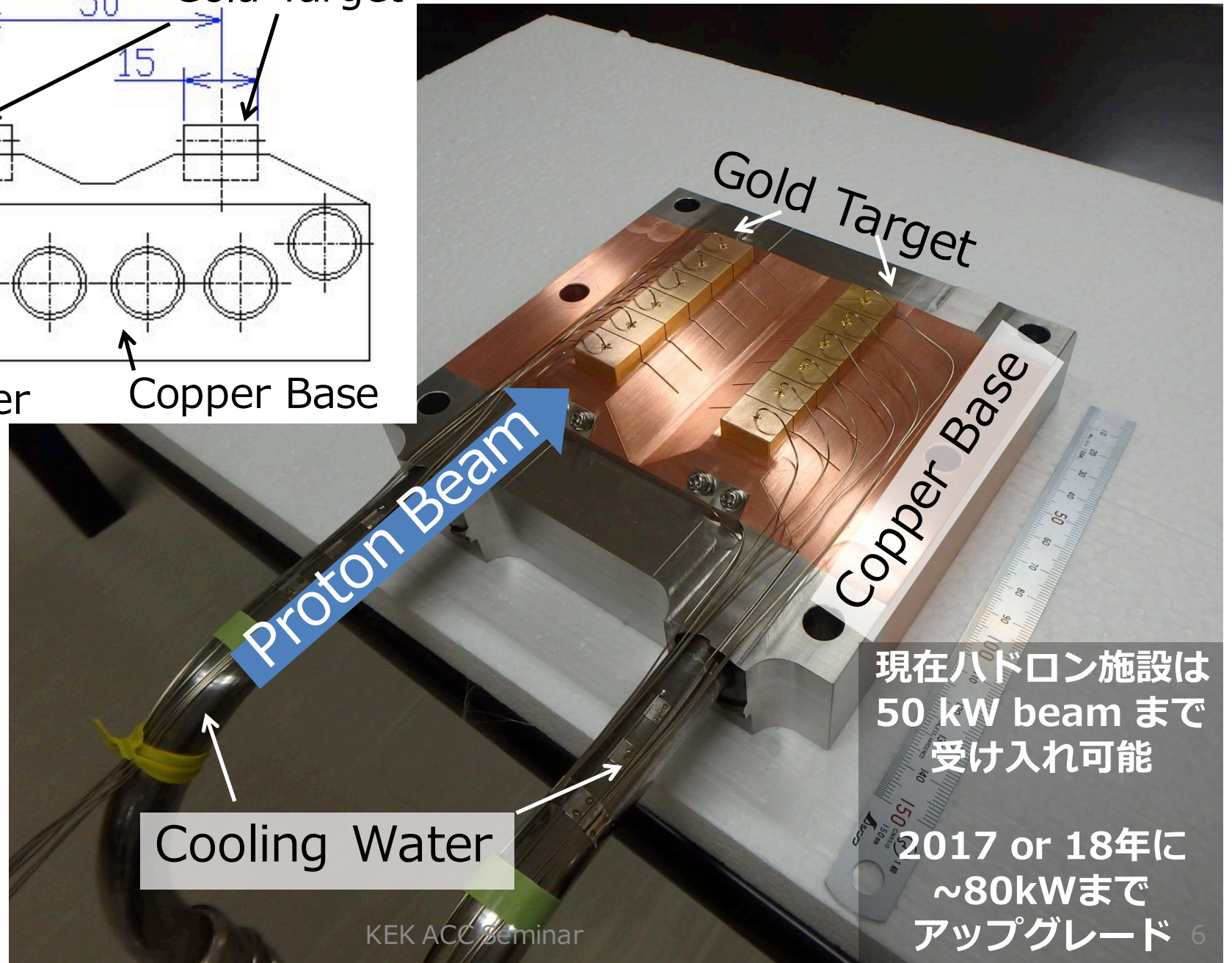
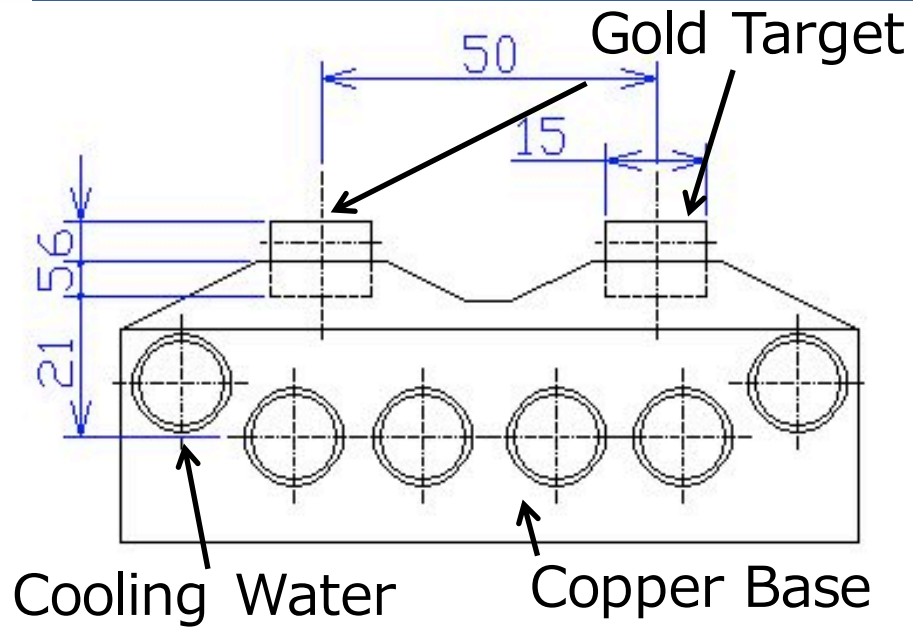
ハドロン実験施設

スイッチヤードトンネル

ハドロンホール



現在の T1 target



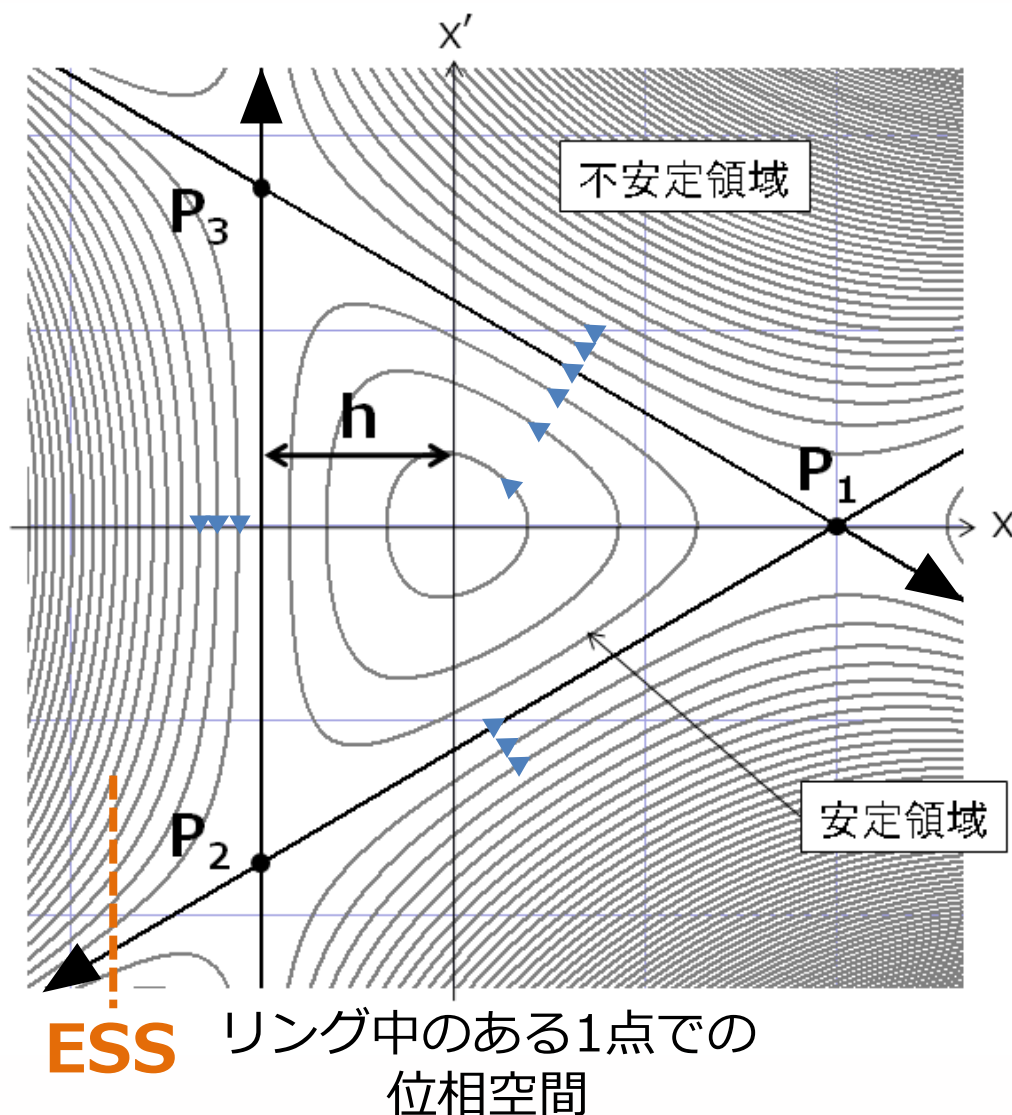
現在ハドロン施設は
50 kW beam まで
受け入れ可能

2017 or 18年に
~80kWまで
アップグレード

どんなビームが必要か

- 大強度の陽子ビーム
 - 大量のK中間子(sクォークを含む)ビームを用いて高統計データを取りたい
- “遅い取り出し”
 - 発生した中間子1個1個について、粒子の識別(PID)・運動量の測定(磁石の前後での位置を検出)を行いたい
 - 10MHzあたりが限界
 - Kが 10^7 個輸送されてくるとすると、2秒間にわたってフラットにビームを取り出せば、レートは5MHzになり大強度Kビームを最大限に利用した実験ができる。
- デバンチドビーム
 - 加速後にRFをオフしてデバンチさせる

3次共鳴を用いた遅い取り出し



6極磁石を用いて
3次共鳴を励起
→位相空間が
安定領域と
不安定領域に分かれる

安定領域のサイズ

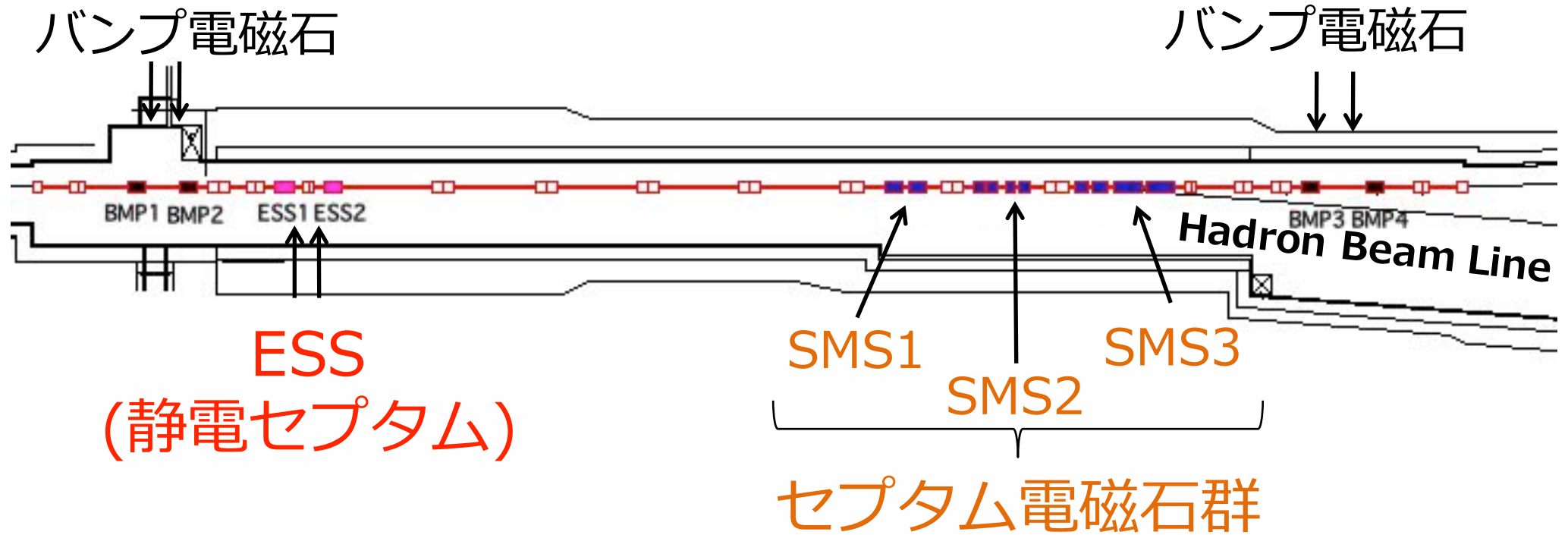
$$h = 4\pi \frac{\delta\nu}{S}$$

$$\delta\nu = \nu - (m \pm 1/3)$$

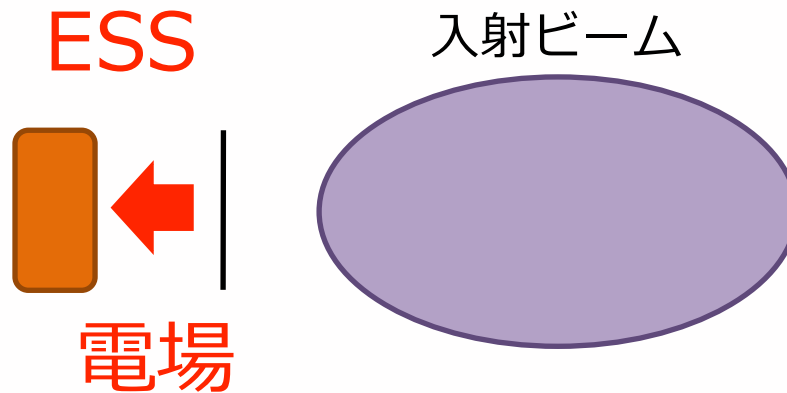
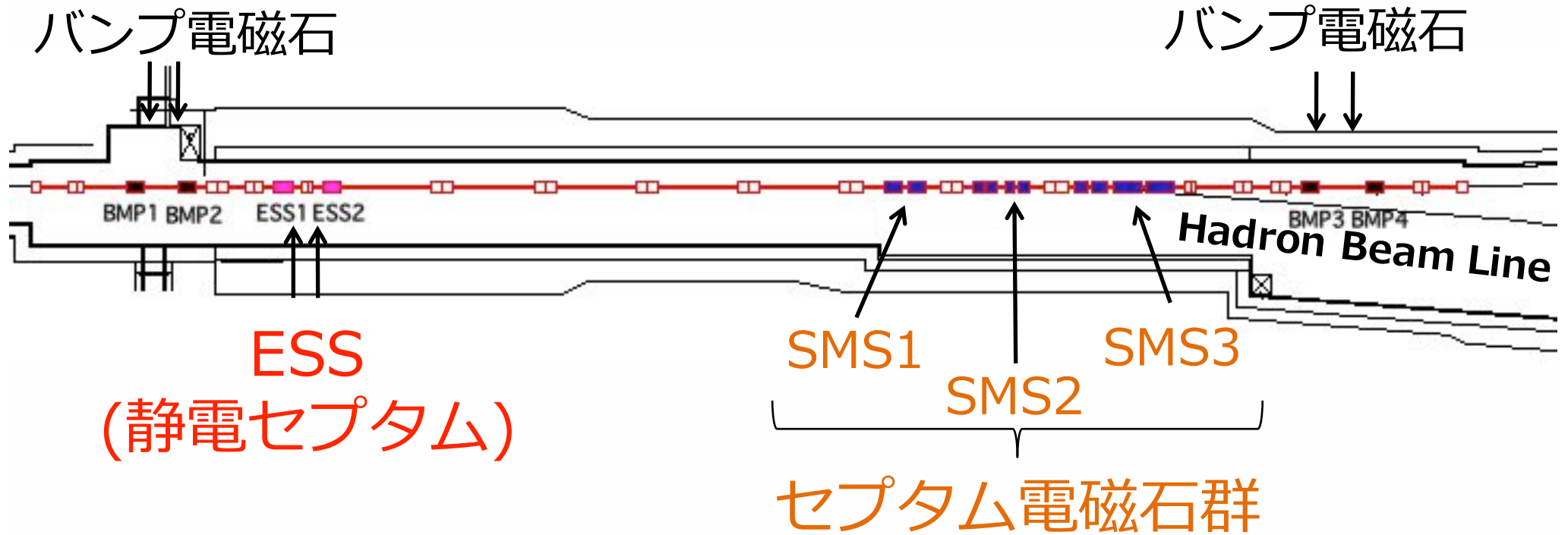
S : 共鳴6極の強さ

1. $\delta\nu$ を徐々に0に近づける
2. 外側の粒子から順に
振幅を増大させていく
3. ESSのリボンを越えて
取り出される

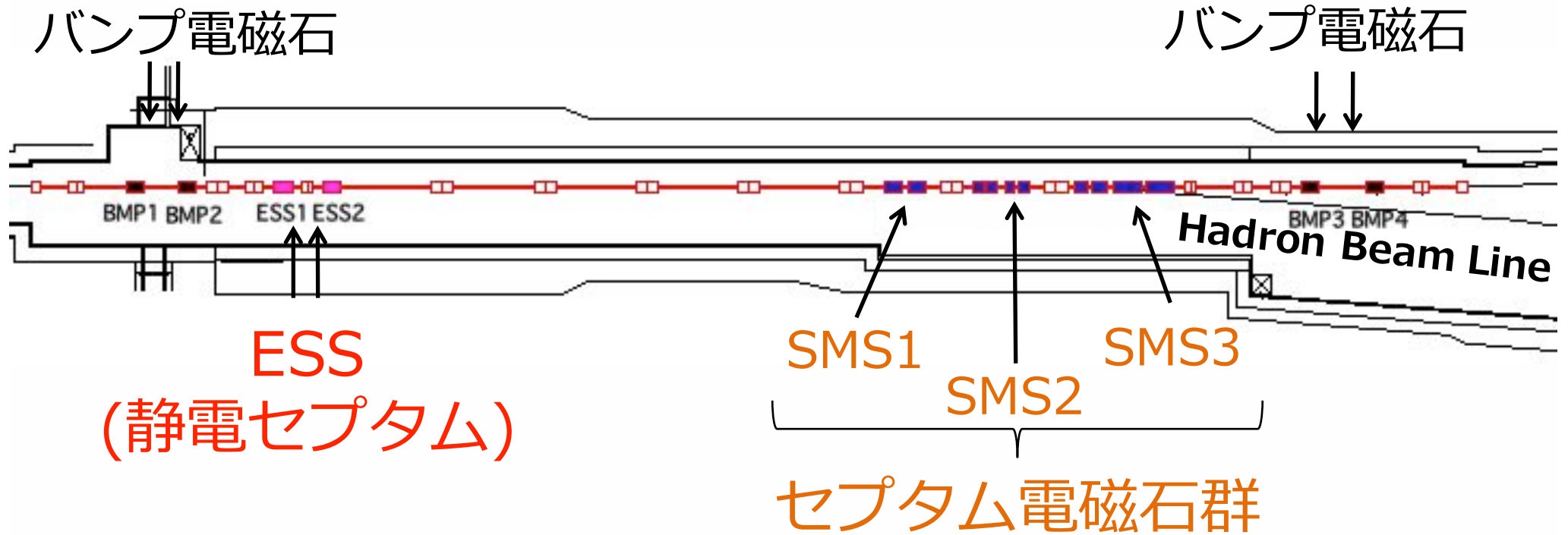
遅い取り出し直線部でのビームの動き



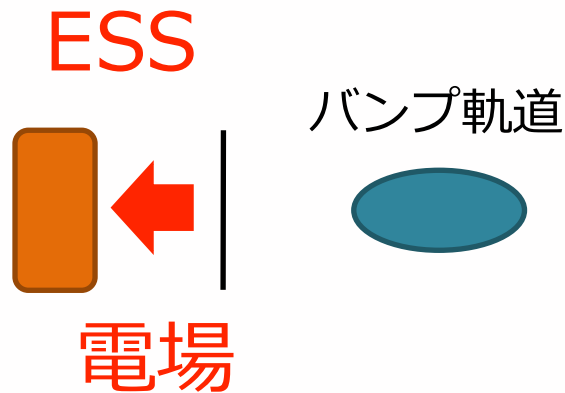
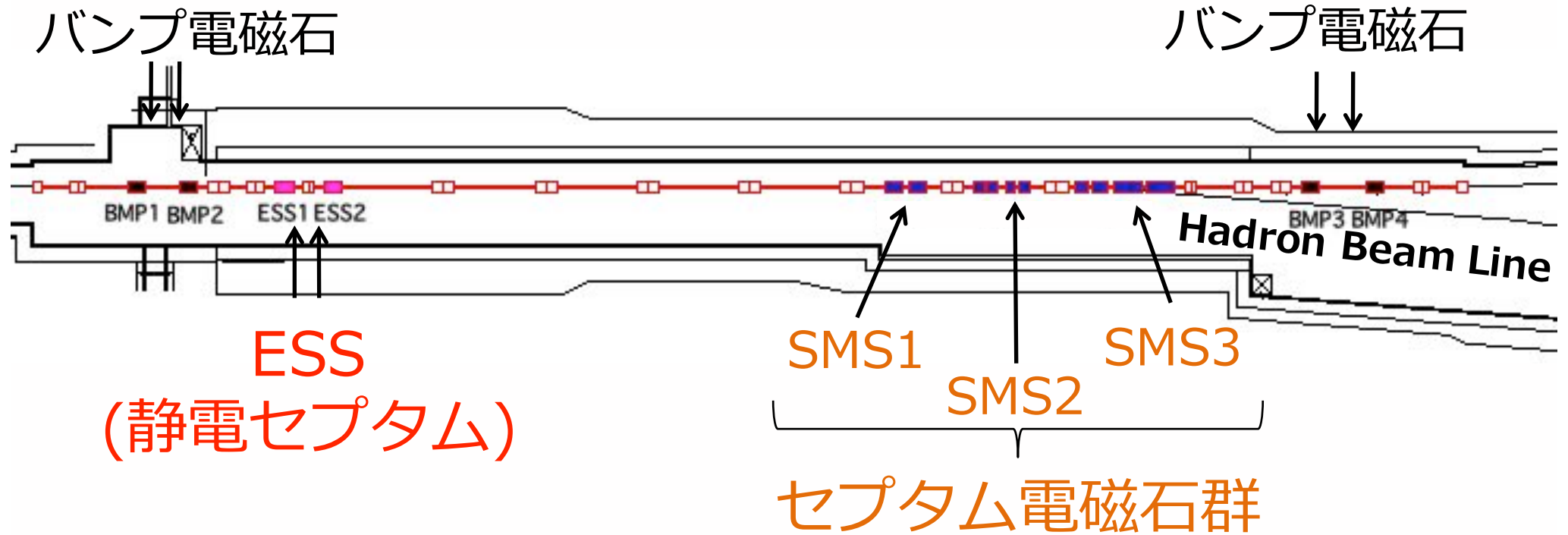
遅い取り出し直線部でのビームの動き



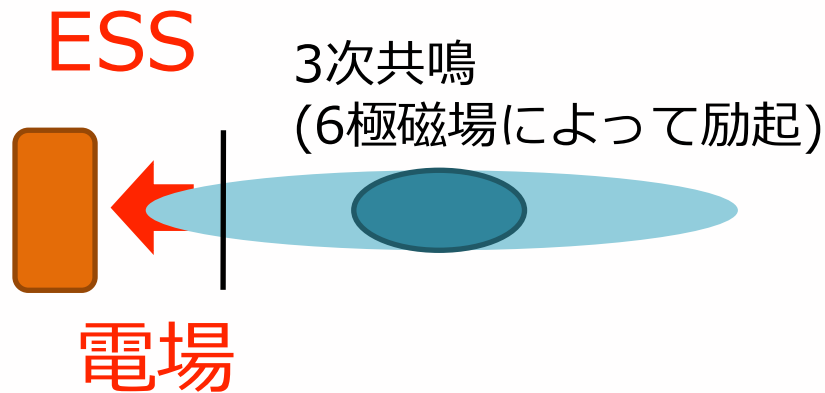
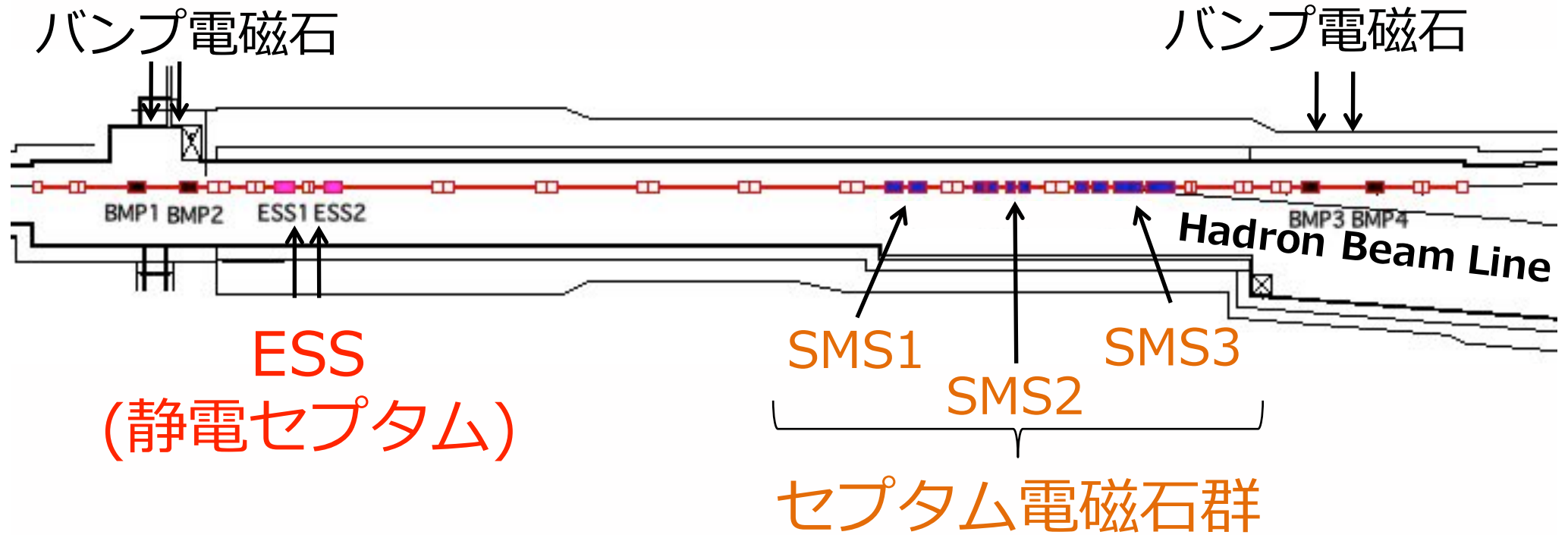
遅い取り出し直線部でのビームの動き



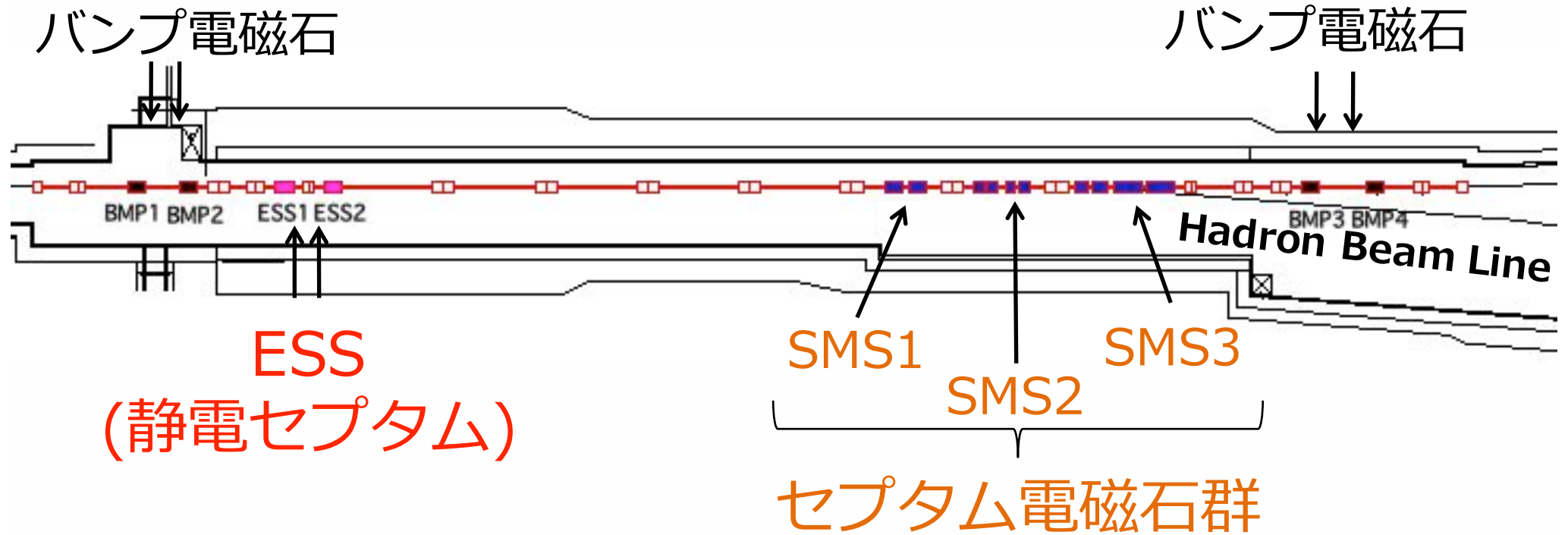
遅い取り出し直線部でのビームの動き



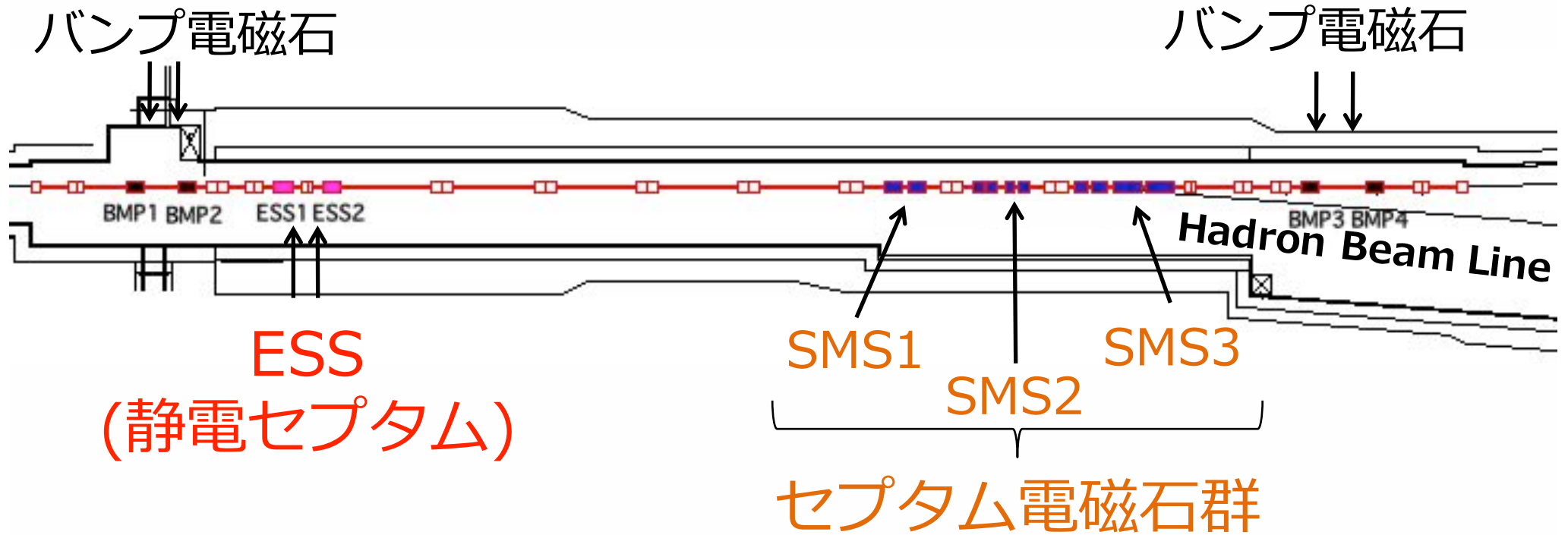
遅い取り出し直線部でのビームの動き



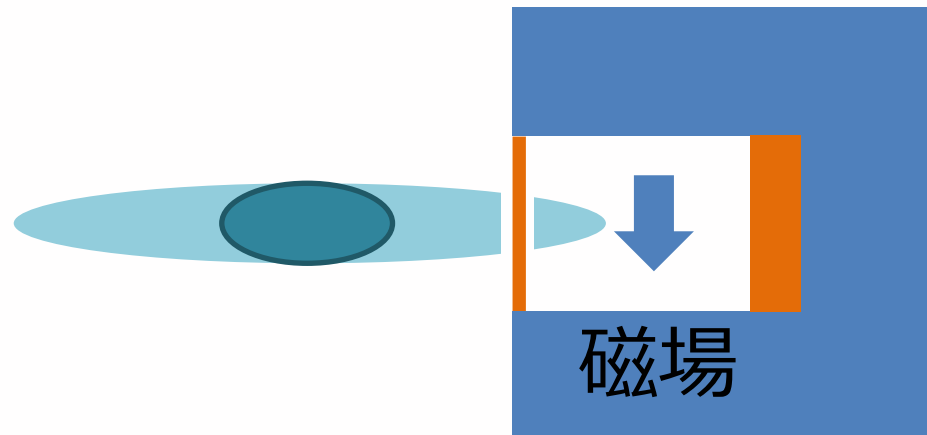
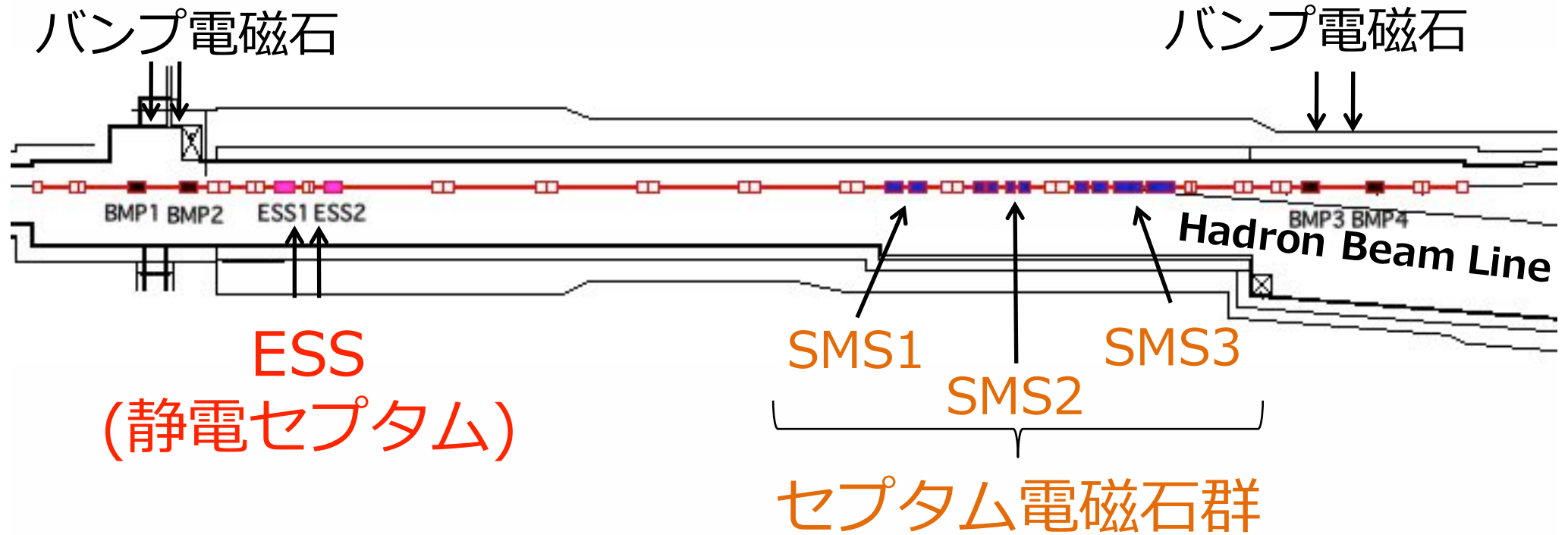
遅い取り出し直線部でのビームの動き



遅い取り出し直線部でのビームの動き

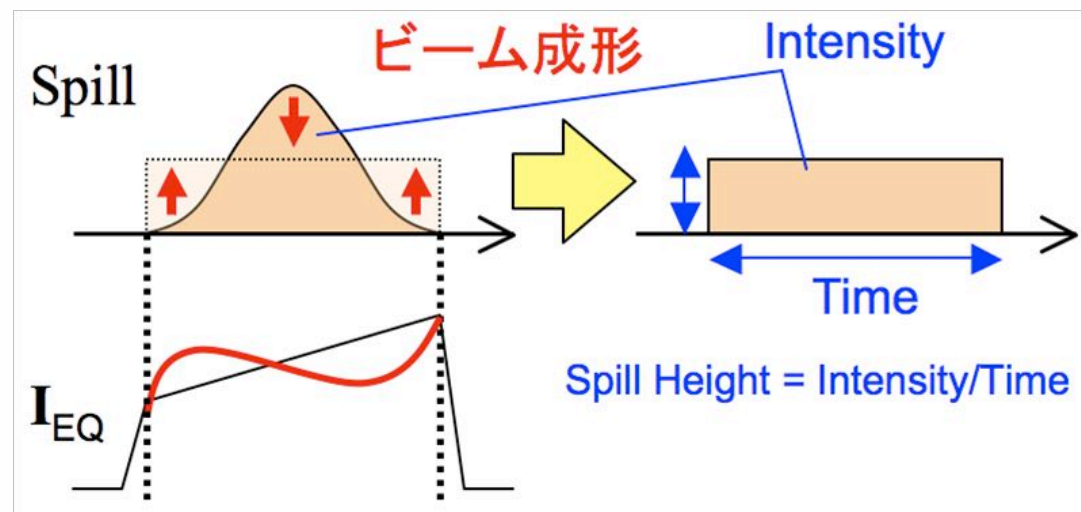


遅い取り出し直線部でのビームの動き



J-PARC MR 遅い取り出しの2大テーマ

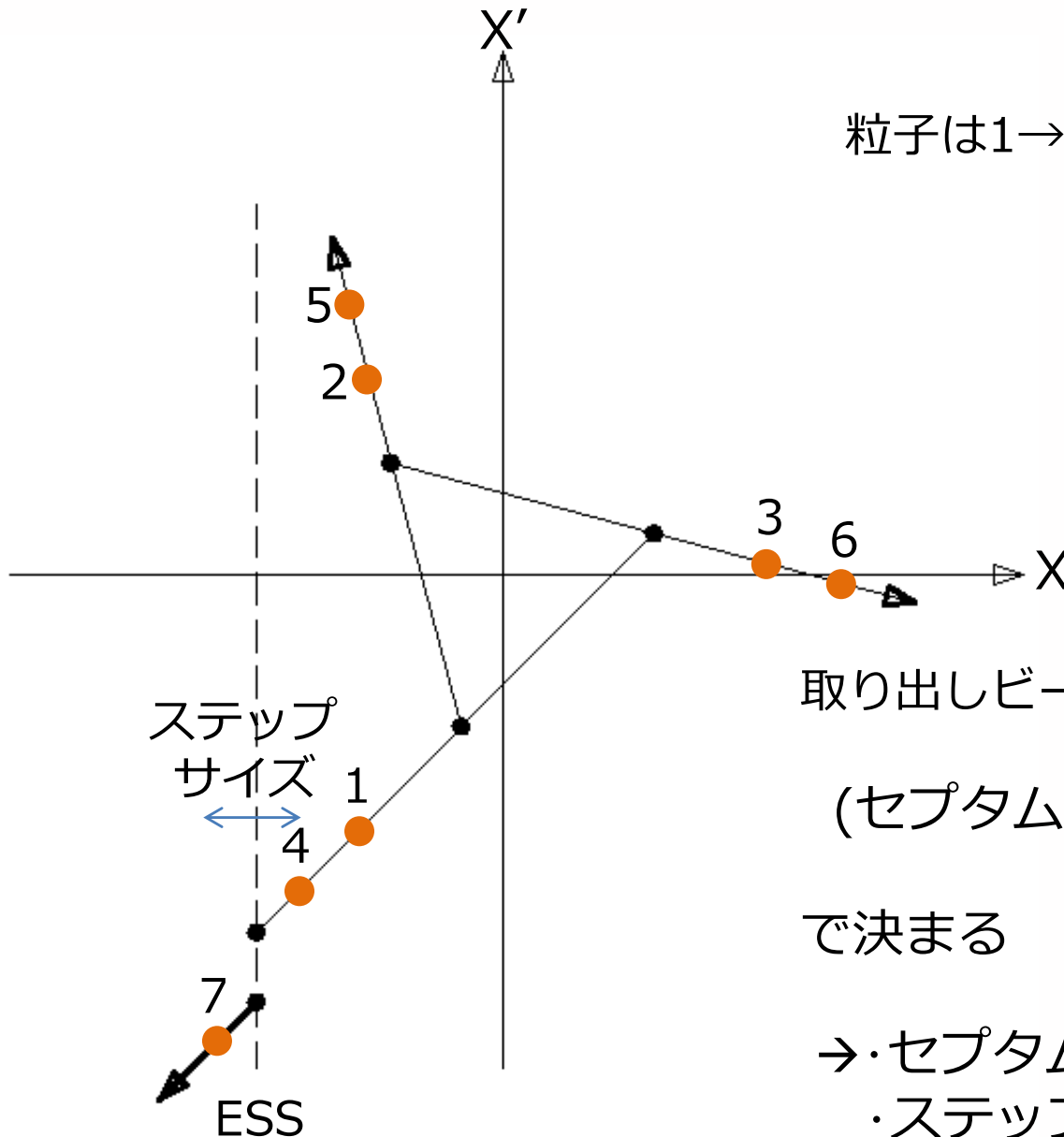
- ビームロスの低減
 - ESSのリボンにビームが当たることによって必ず起こるビームロスを減らし、高い取り出し効率を実現する
- スpill構造(ビーム強度の時間変化)の平坦化



高い取り出し効率の実現

ESSでのビームロスを減らすには

粒子は1→2→3…と移動して取り出される。



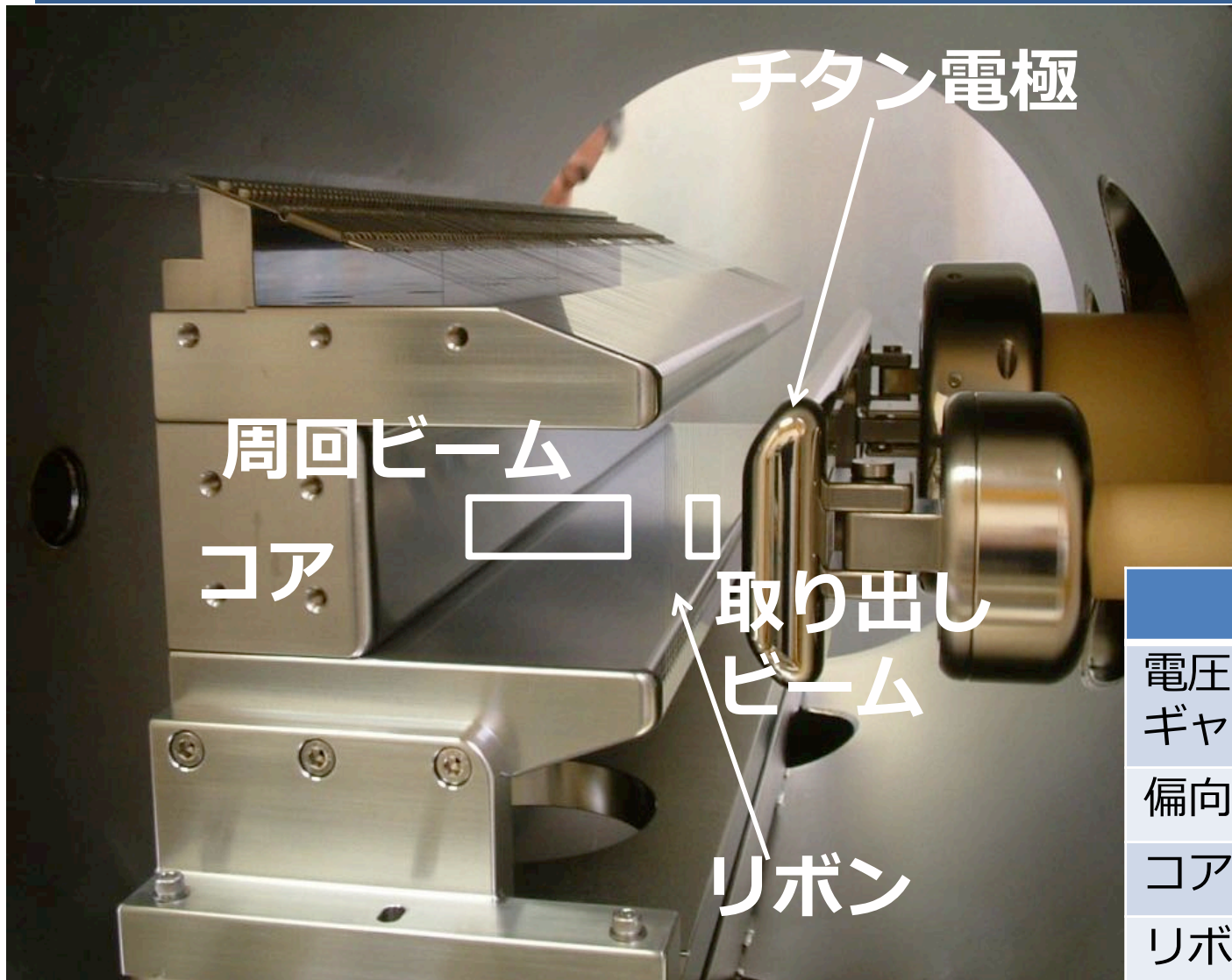
取り出しビームのESSセプタムへのヒット率は

(セプタムの厚さ)/(ステップサイズ)

で決まる

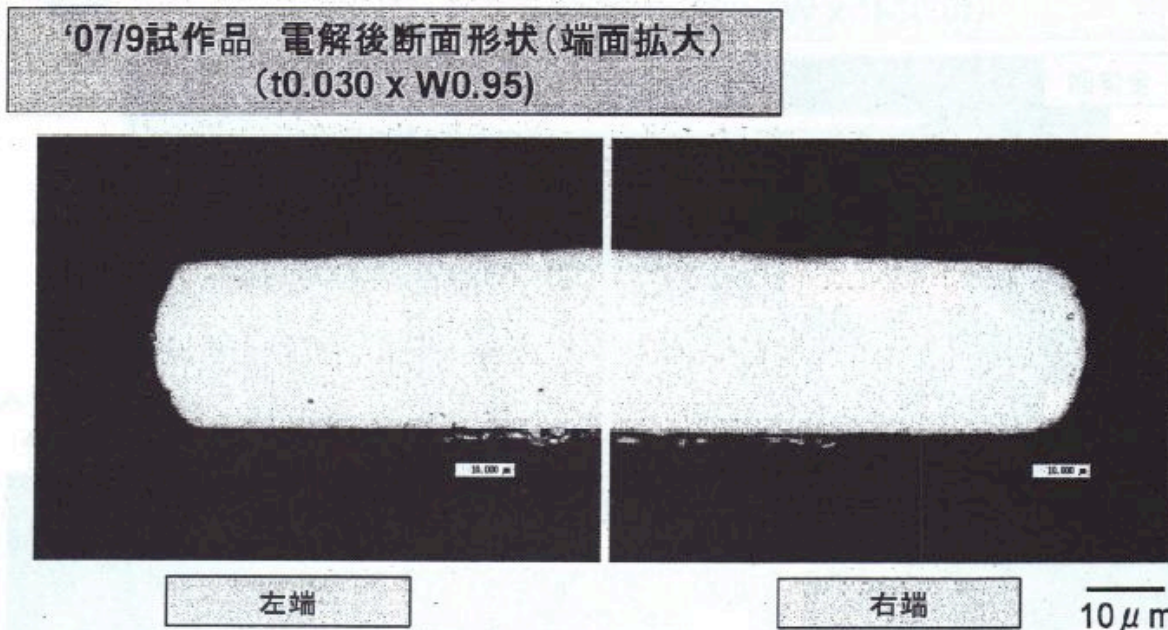
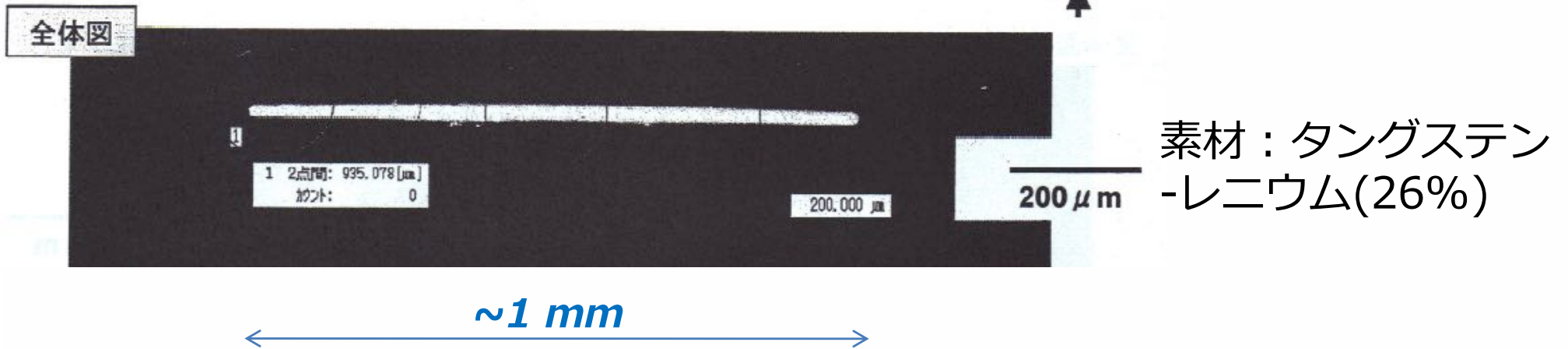
- セプタムを薄くする
- ・ ステップサイズを大きくする

静電セプトラム(ESS)



	ESS1,2
電圧 / ギャップ	104 (170) kV / 25 mm
偏向角	- 0.2 mrad
コア軸長	1.5 m
リボン厚さ	30 μ m
リボン幅	1 mm
リボン本数	495 本

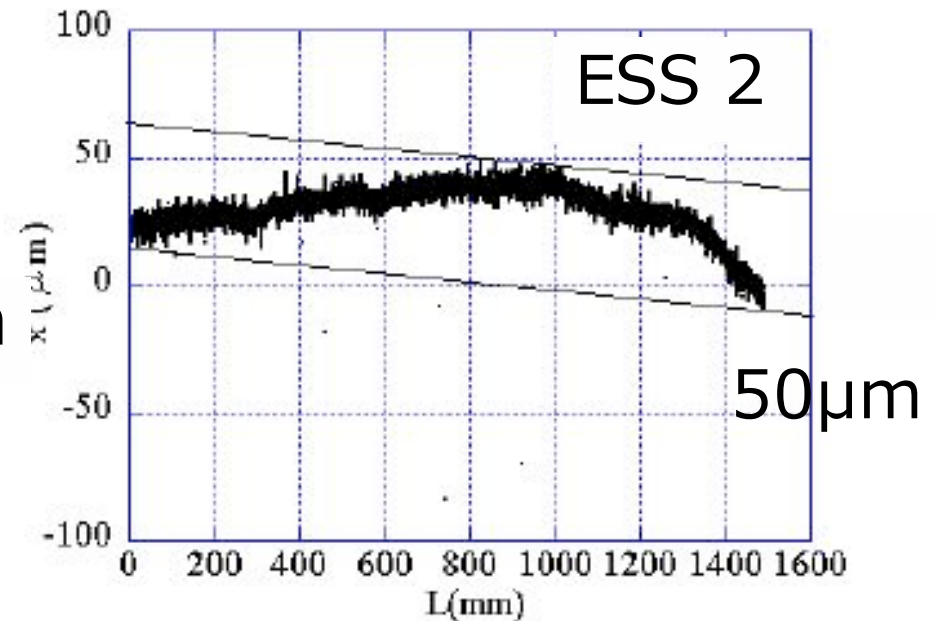
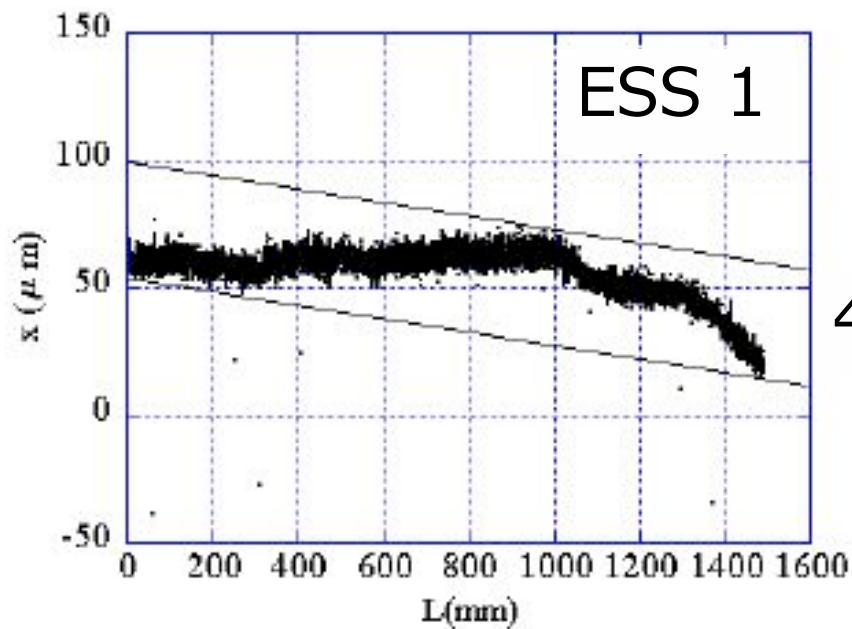
リボンの断面



“ばり”を取り除くため電解研磨する

リボンの位置の測定

リボン1本1本を薄くし、かつ
アラインをきちんとすることも同程度に重要



リボンの実効厚 = $30 + 50 \mu\text{m}$

ステップサイズは何で決まるか

取り出しビームのESSセプタムへのヒット率 =

~(セプタムの厚さ)/(ステップサイズ)

- ・セプタムを薄くする
- ・ステップサイズを大きくする

$$\text{ステップサイズ} = \sqrt{\beta_{ES}} \cdot \frac{3}{4} S \frac{1}{\cos \phi} X_{ES}^2$$

β_{ES} : ESSでの β

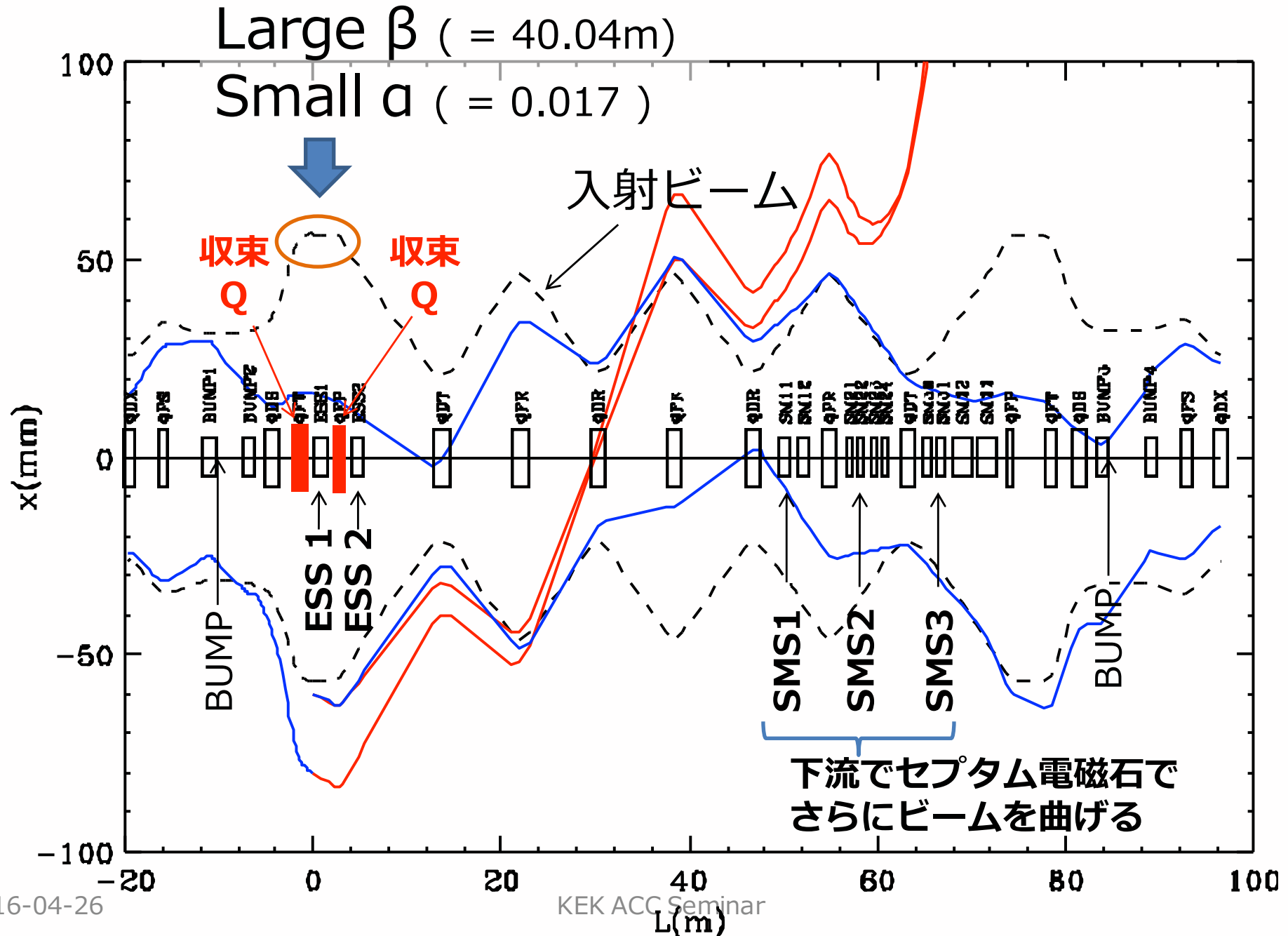
S : 共鳴6極の強さ

X_{ES} : ESSリボンの位置

ESSのところで β_{ES} を大きくしてやればよい

J-PARC MRでは、 Δx_{MAX} は 約20 mm
(ESSのリボンと電極間距離(25 mm)はそれより大きくとっておく)

SX直線部のビームエンベロープ



遅い取り出しセプタム電磁石の特徴

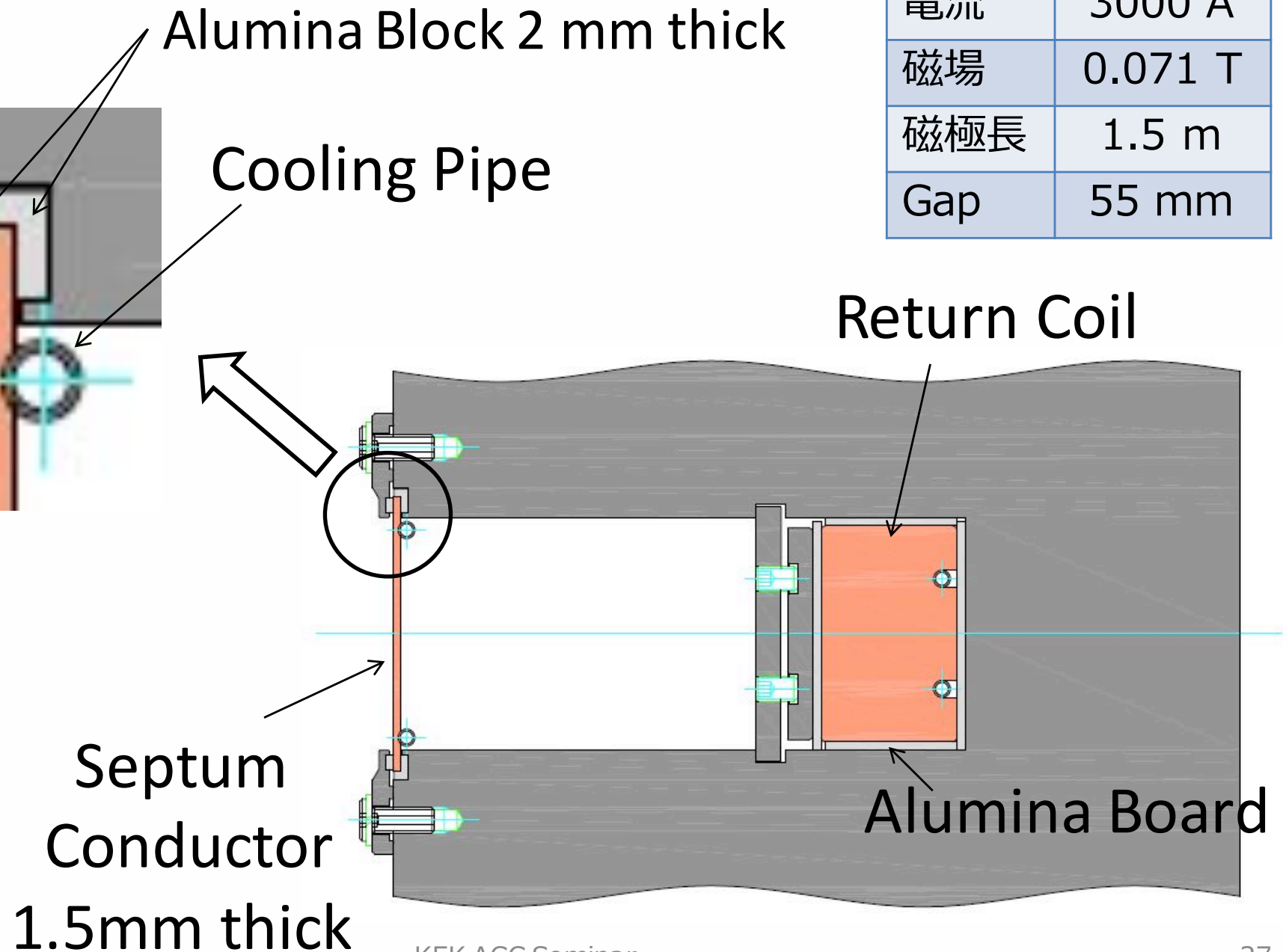
- 高い耐放射線性
 - SMS1とSMS2は無機物質のみで作られている
 - SMS3はポリイミド絶縁
- 遠隔位置調整システム(SMS1, SMS2)
 - ビーム軸と垂直に $\pm 5\text{mm}$ 、上下流独立に
- クイックアンインストール
 - LMガイド、クイック切り離し(冷却水、電気)
- DC運転 (3000 A)

低磁場セプトラム (SMS1)

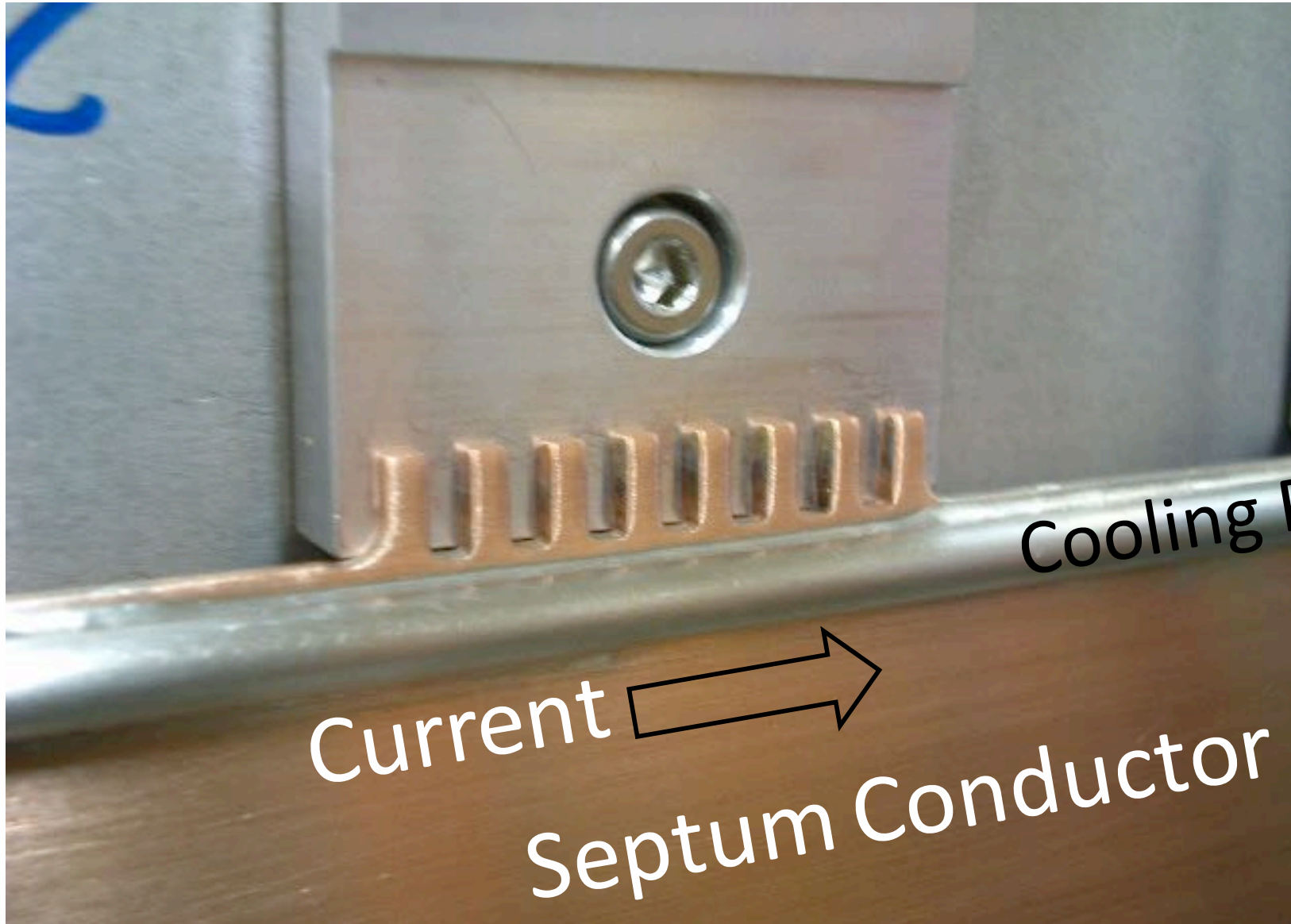


Cross Sections of SMS1_1

電流	3000 A
磁場	0.071 T
磁極長	1.5 m
Gap	55 mm



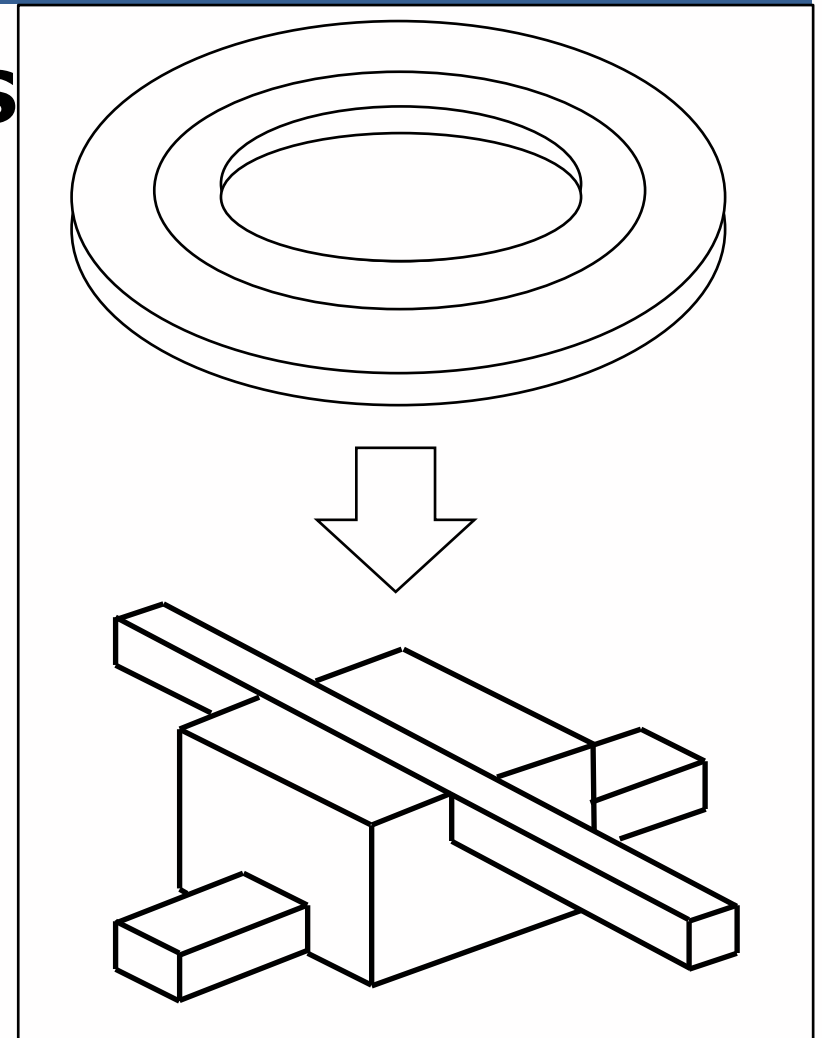
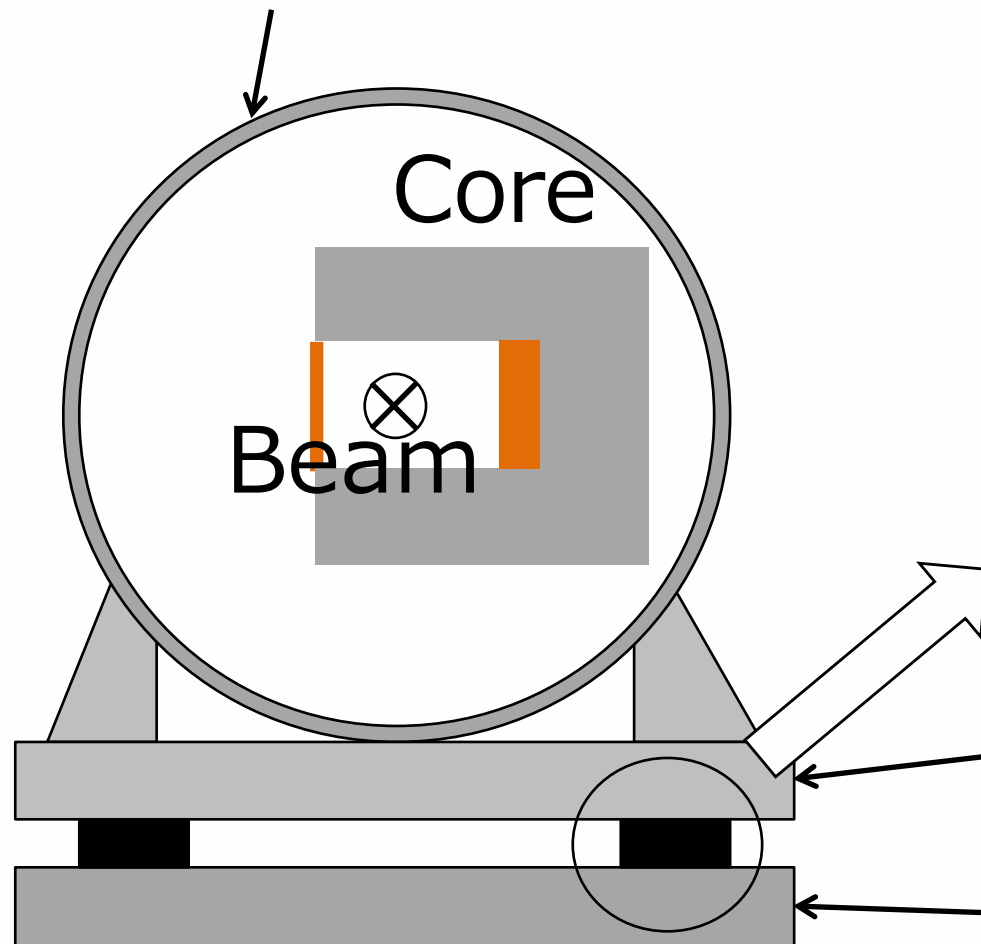
SMS1 Septum Conductor



Remote Position Adjustment

To reduce the beam loss

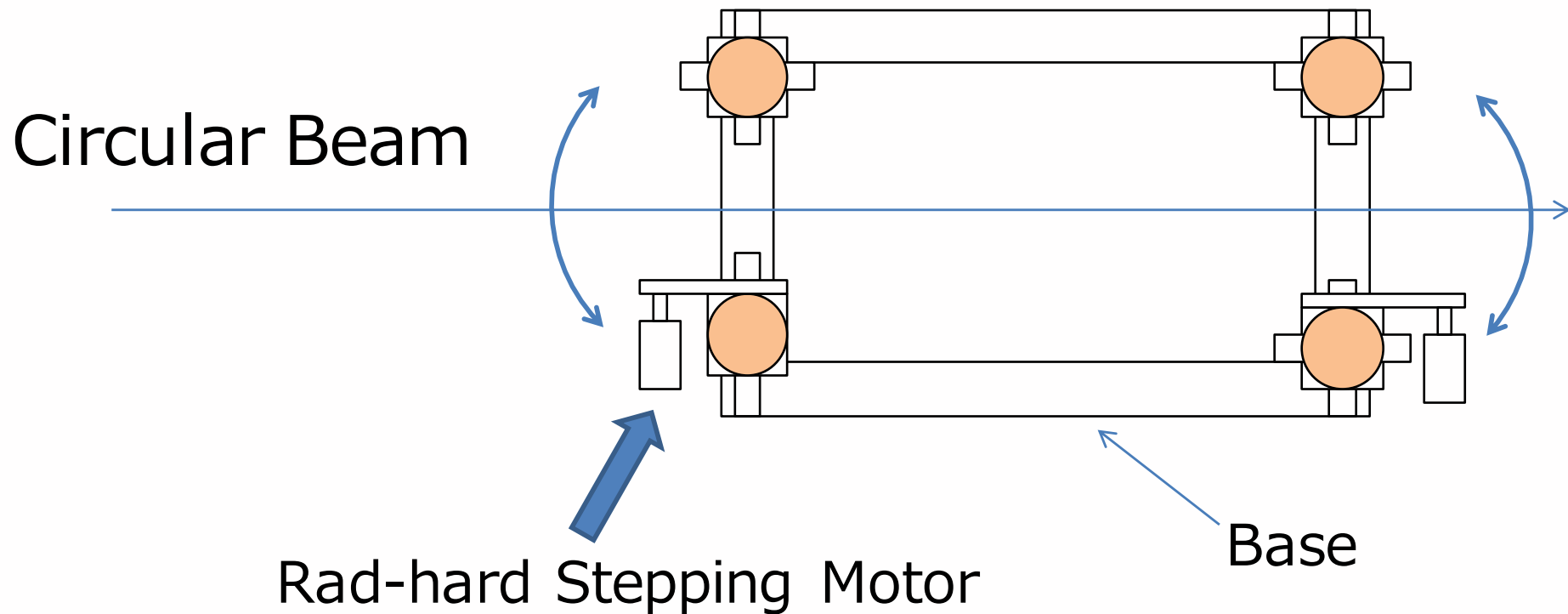
Vacuum Chamber



Upper Base

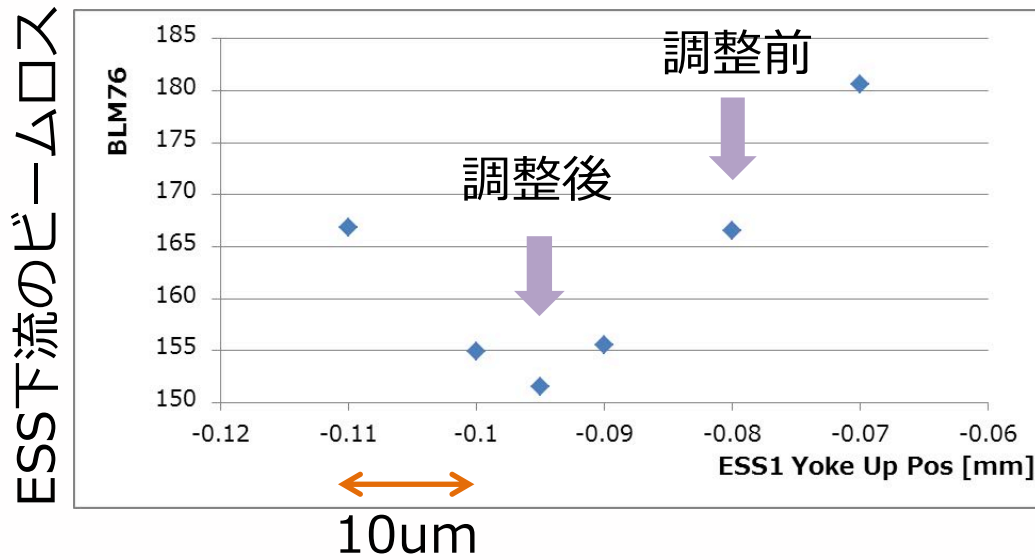
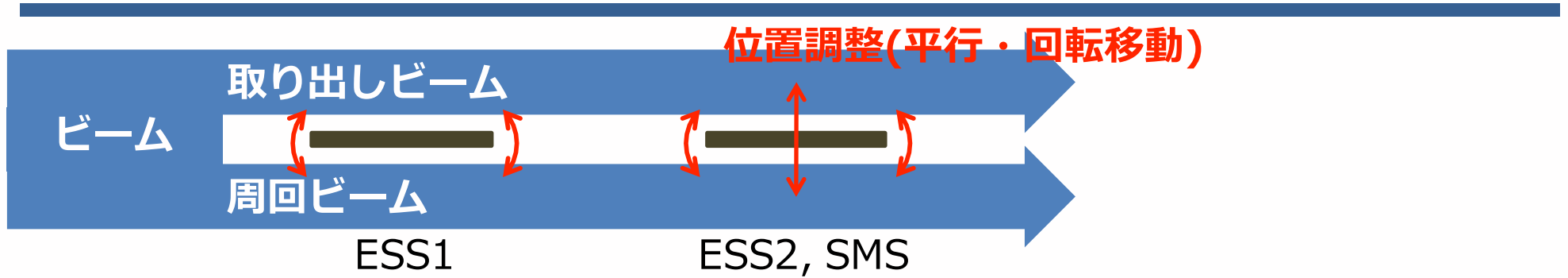
Lower Base

Remote Position Adjustment

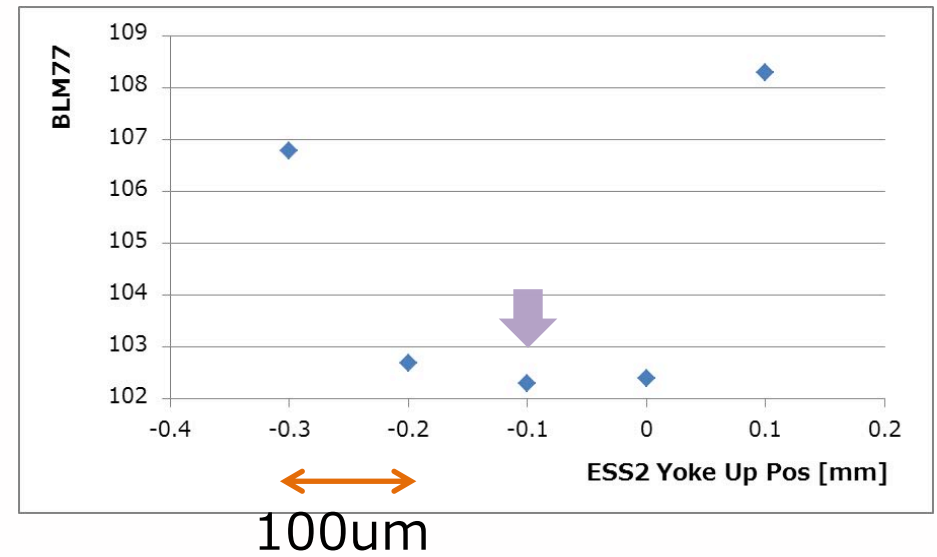


Adjustable Range : ± 5 mm

ESS, SMSの遠隔位置調整



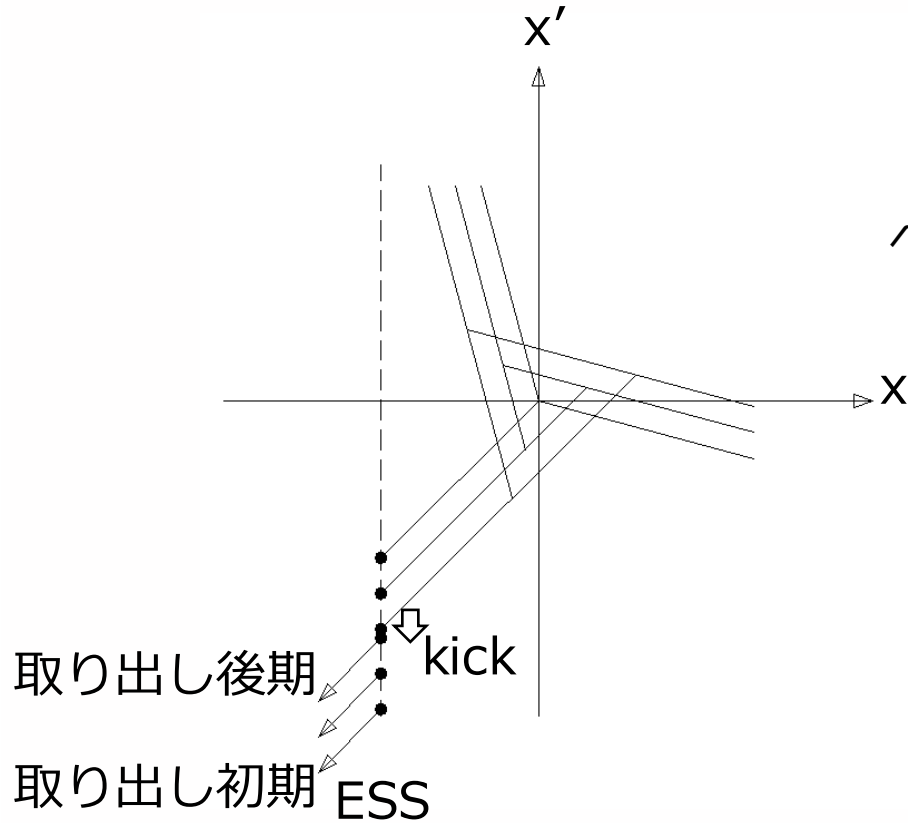
ESS1(上流)の回転調整



ESS2(下流)の平衡移動調整

取り出し中のセパラトリクスの変化

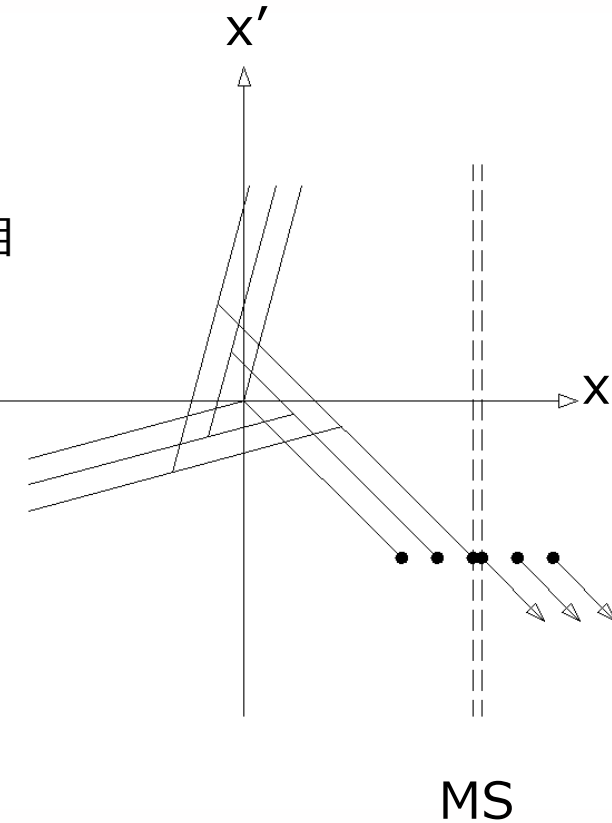
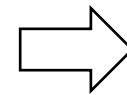
@ ESS



ESSでの角度の広がり
→ロス増加

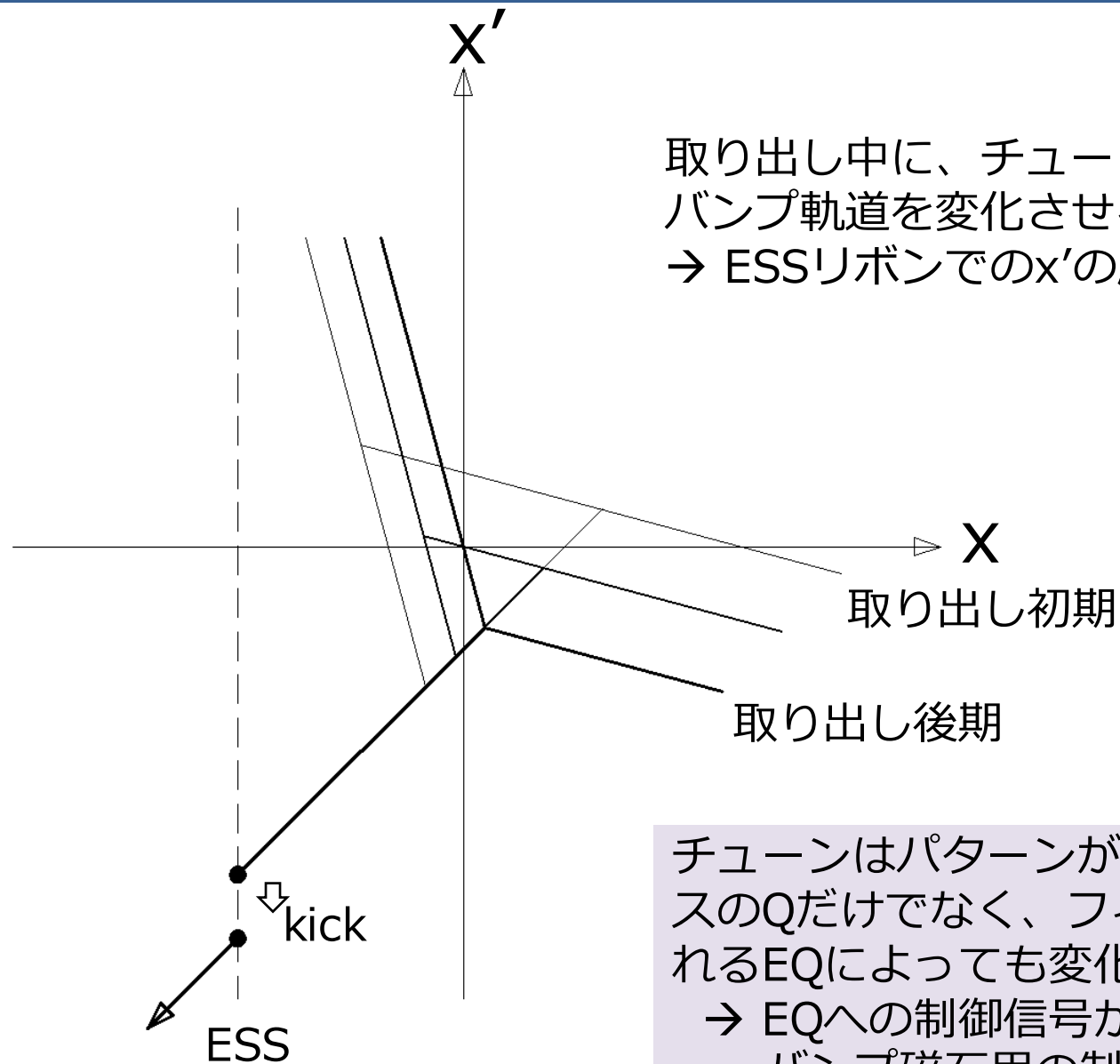
@ MS

ベータatron位相
+270°



MSの位置でのセパレーション縮小
→ロスの増加

ダイナミック バンプ



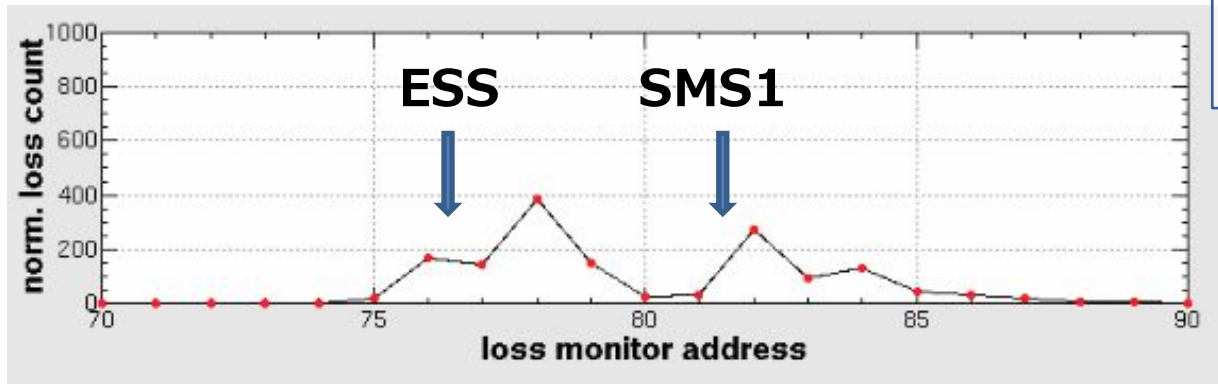
取り出し中に、チューンの変化に同期して
バンプ軌道を変化させる
→ ESSリボンでの x' の広がりを抑える

チューンはパターンが決まっているラティ
スのQだけでなく、フィードバック制御さ
れるEQによっても変化する
→ EQへの制御信号から、DSPをもちいて
バンプ磁石用の制御信号をつくる

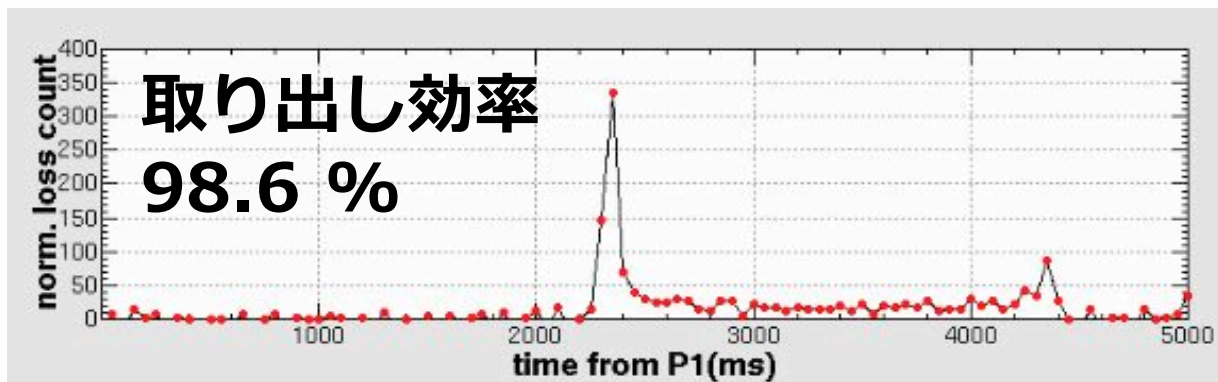
ダイナミックバンプの効果

Fixed Bump

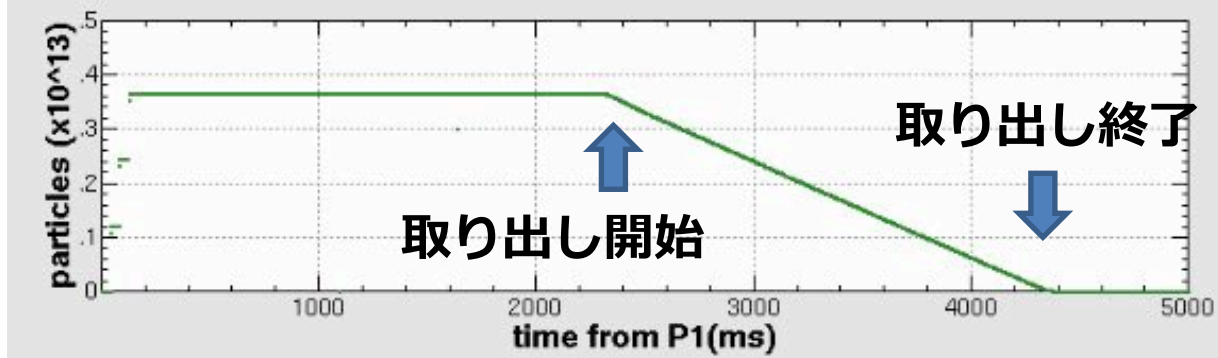
ビームロスの位置分布



ビームロスの時間変化



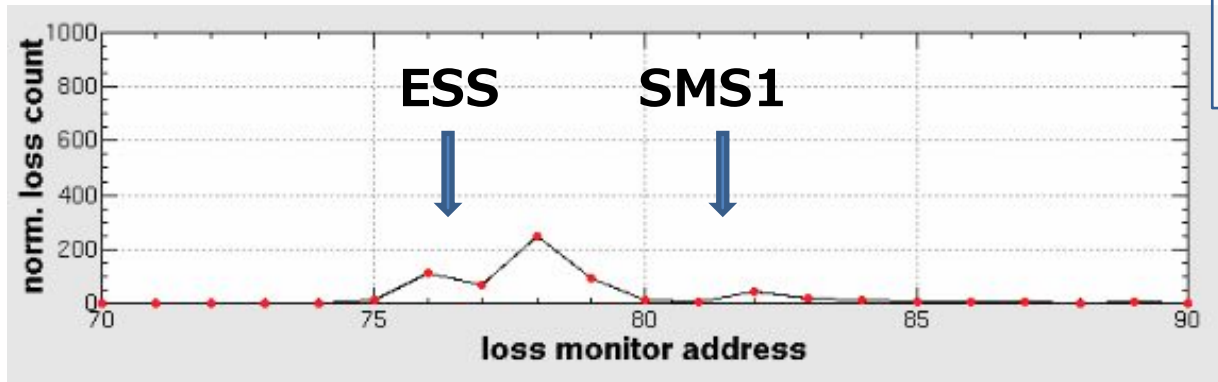
リング内ビーム量



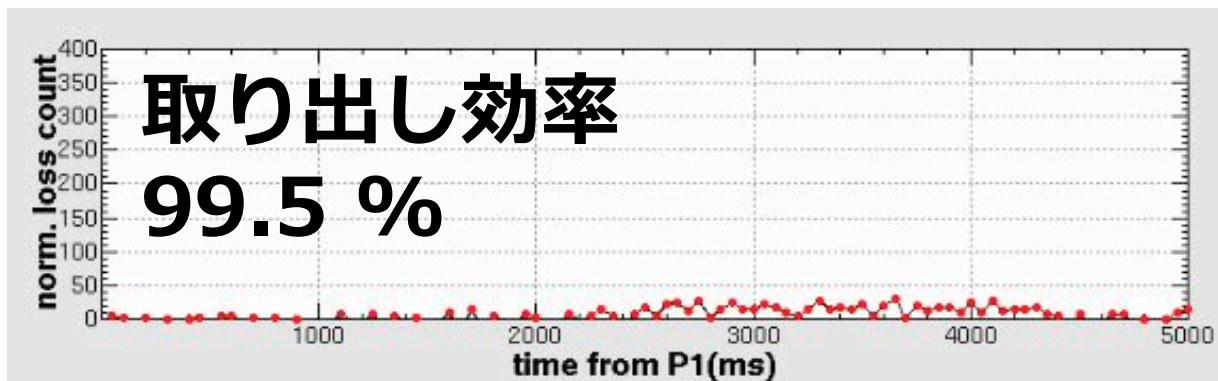
ダイナミックバンプの効果

Dynamic Bump

ビームロスの位置分布



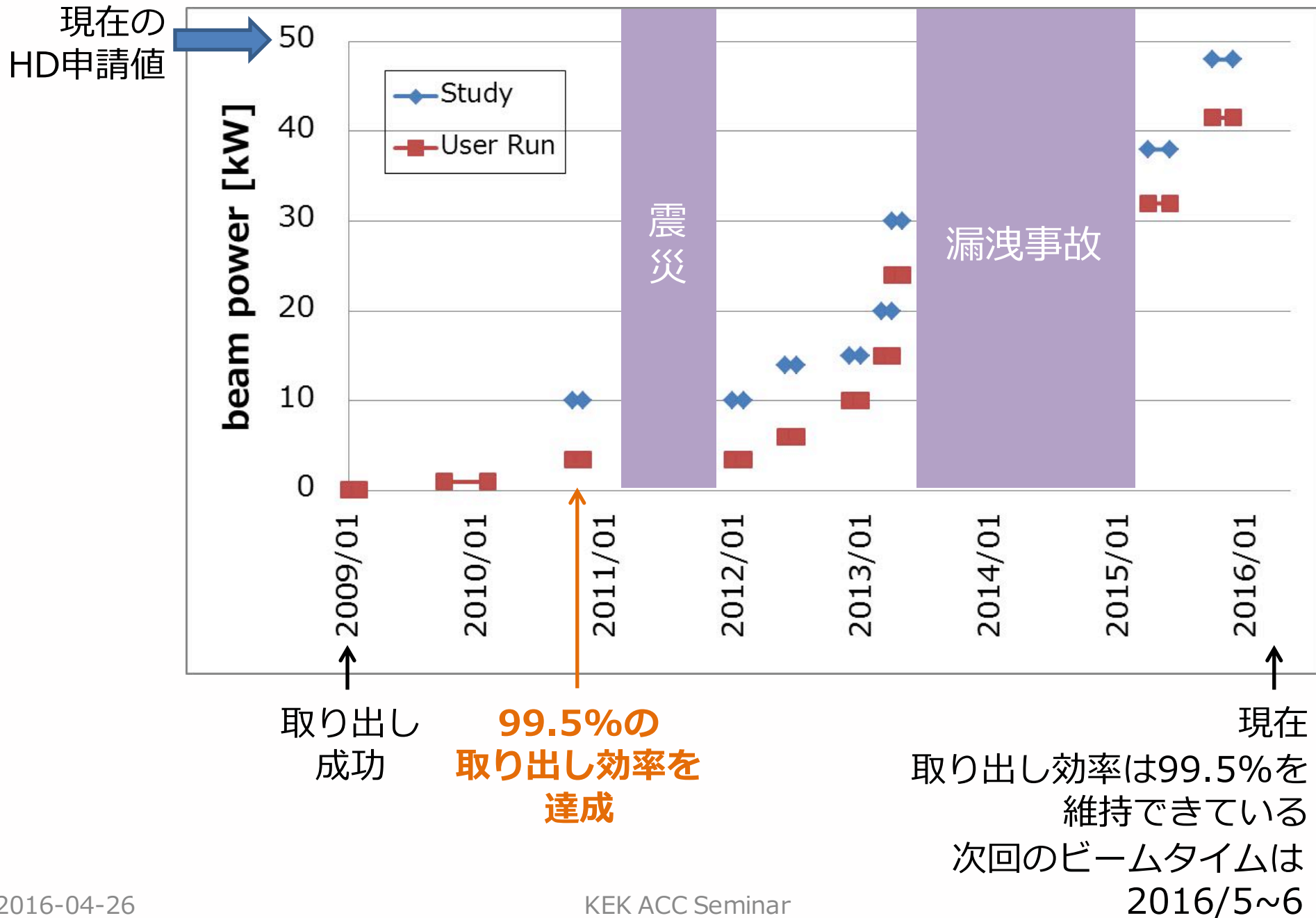
ビームロスの時間変化



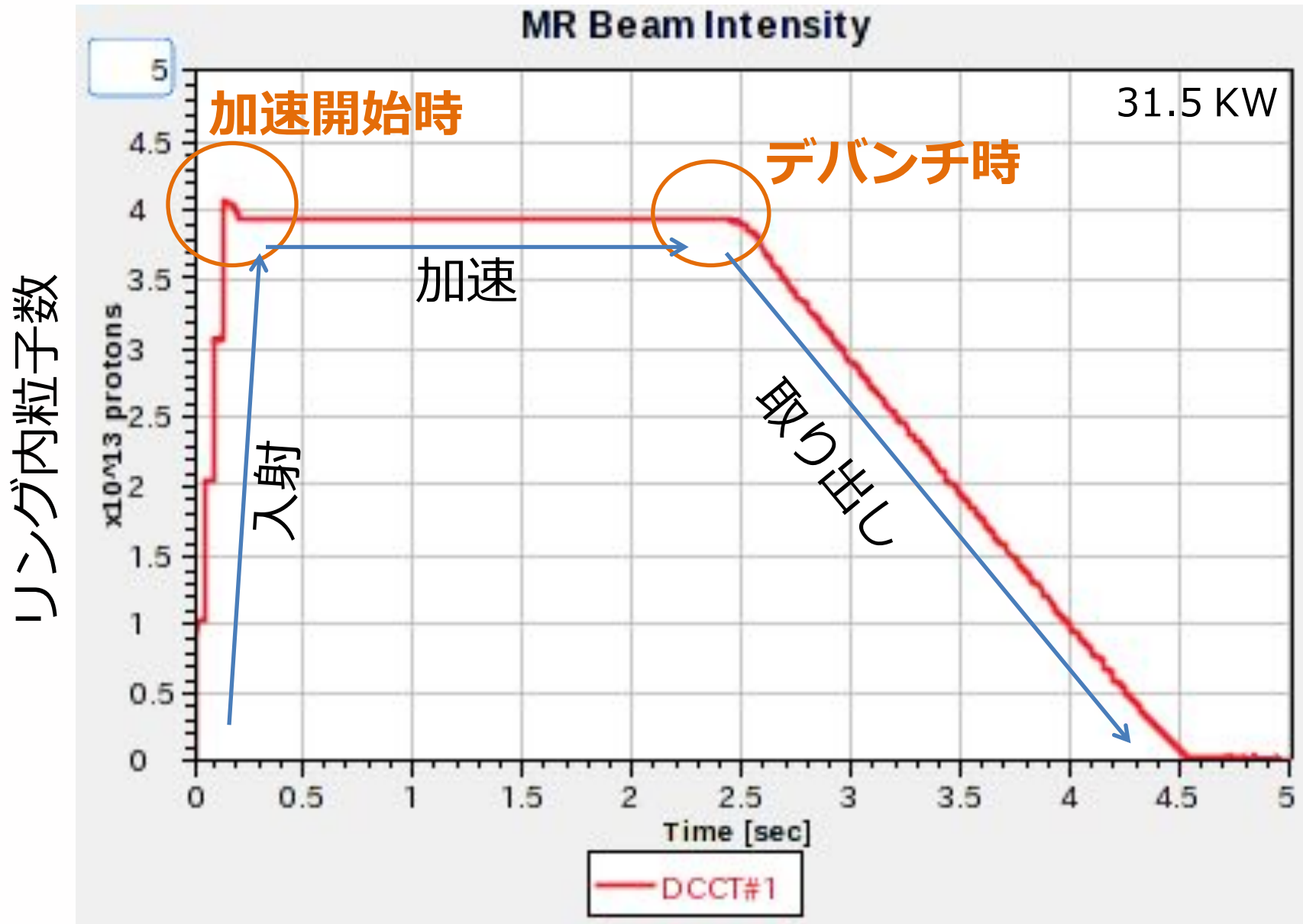
リング内ビーム量



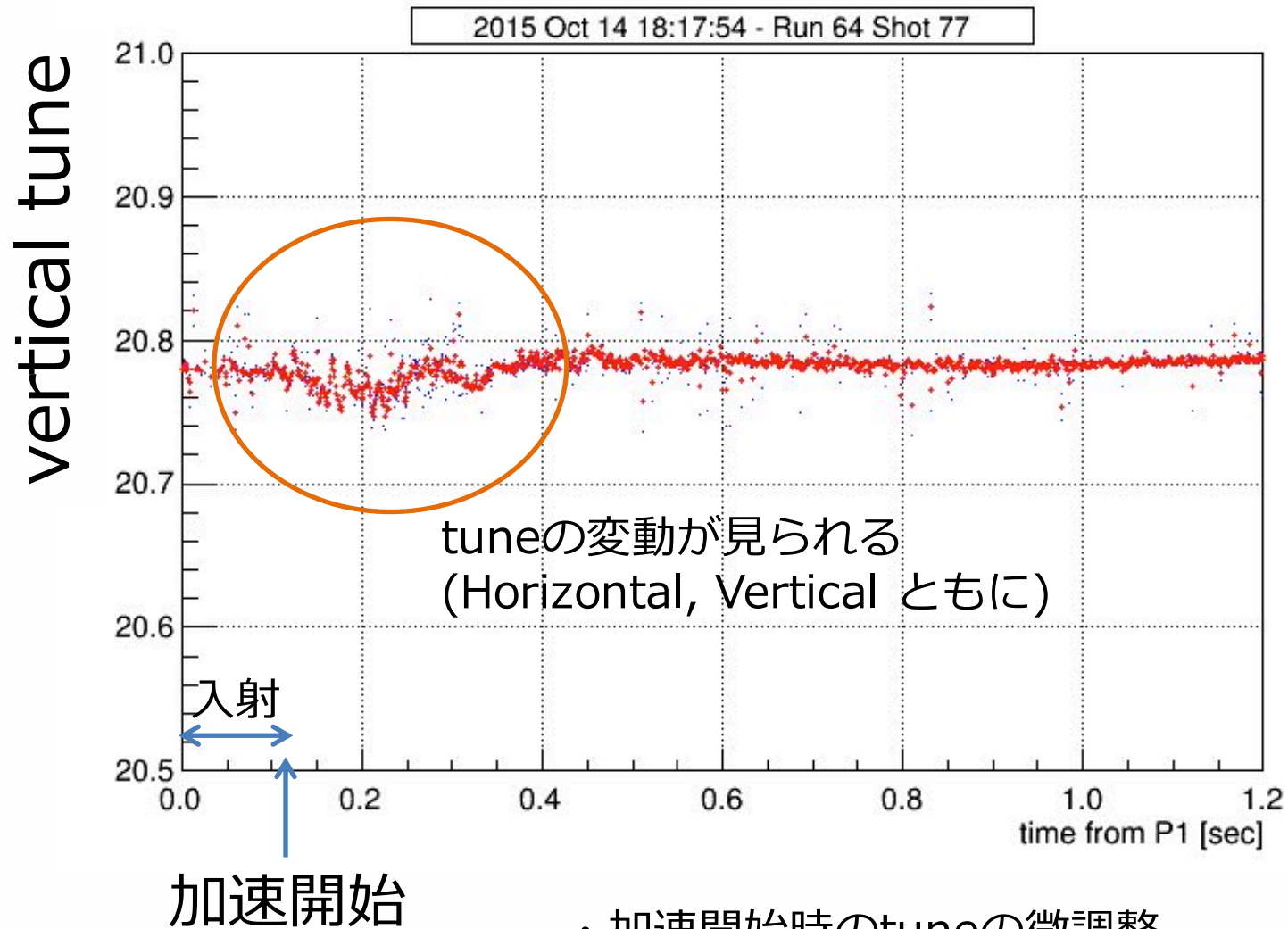
ビームパワーの歩み



ビーム強度増強にともなうビームロス



加速開始時のビームロス



- 加速開始時のtuneの微調整
- Trim 6極磁石, Trim Q磁石による共鳴の抑制により、ロスを低減することができる

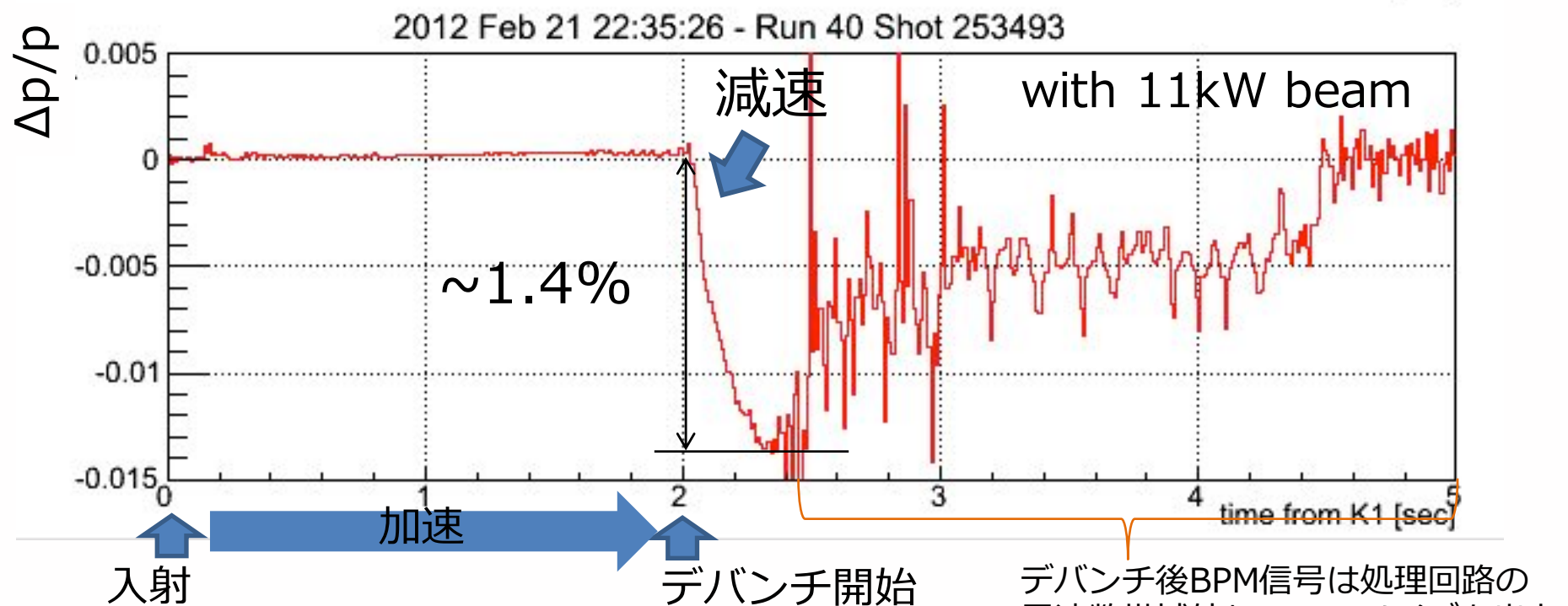
デバンチ時のビームロス

1) 減速によるもの

加速後、デバンチ開始から完了までの間(数100ms)に主にRF空洞のインピーダンスによってビームがエネルギーを失う
→tuneが広がりビームロスの原因となる

by F. Tamura

Beam Position Monitor (BPM) で見た $\Delta p/p$ の様子

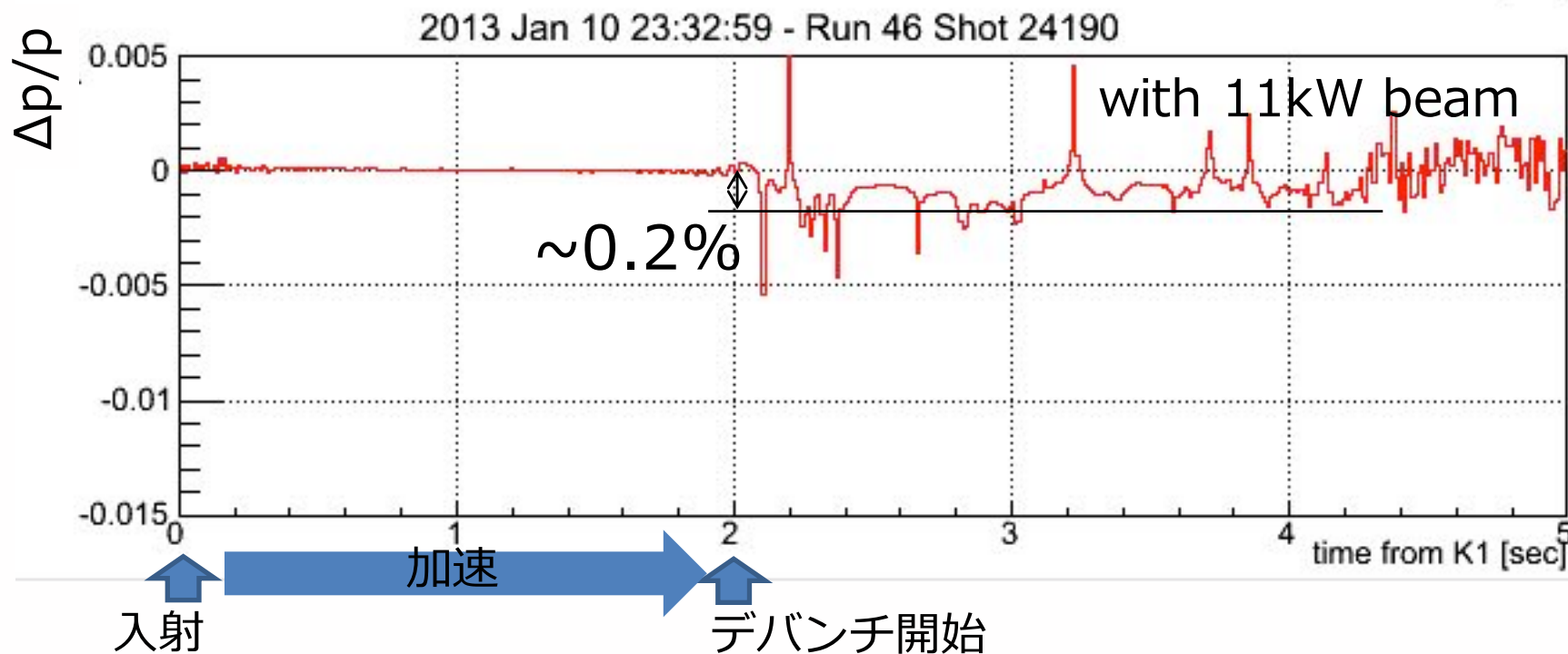


RF空洞による減速の抑制

RF空洞において、フィードフォワード法により
wake電圧を打ち消しRF空洞起源の減速を抑える
→これに起因するビームロスほぼ消えた
(ビームロス 4.1% → 0.44%)

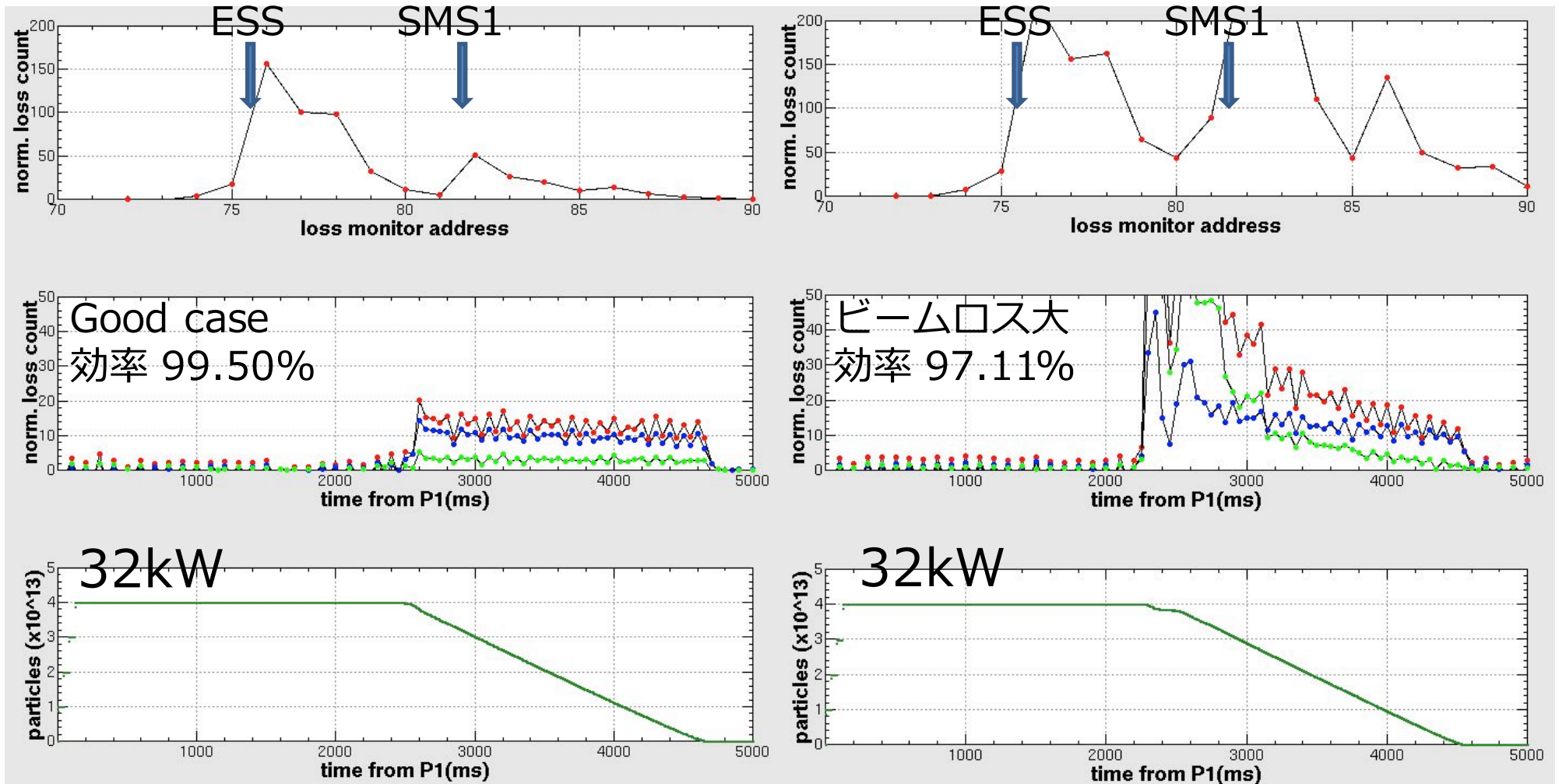
by F. Tamura

Beam Position Monitor (BPM) で見た $\Delta p/p$ の様子



デバンチ時のビームロス

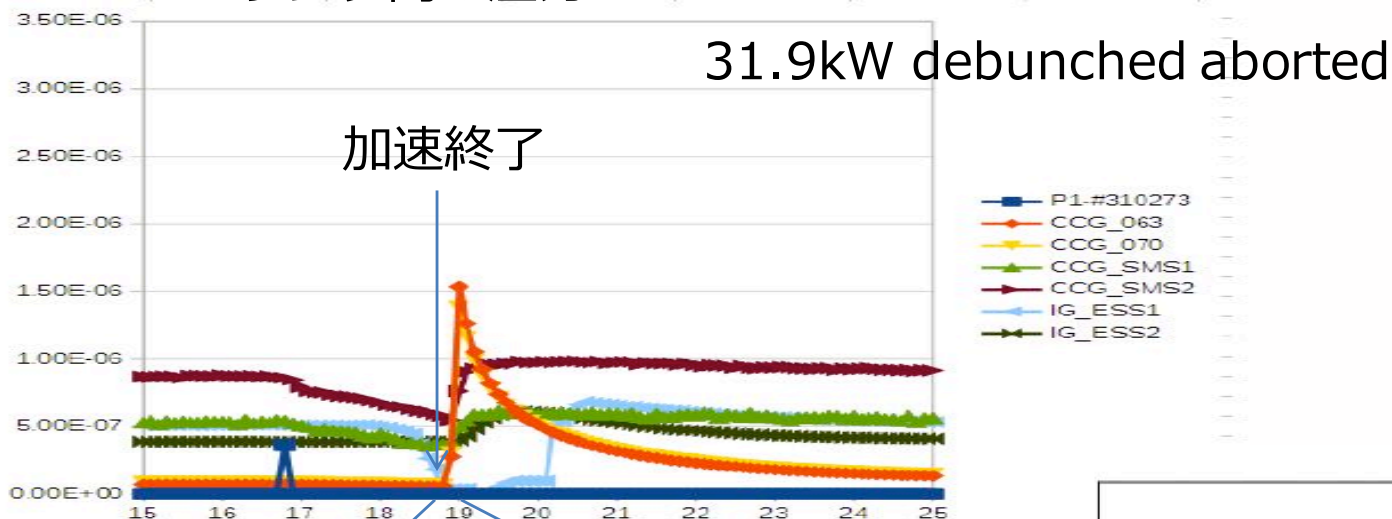
2) デバンチ時のinstability によるもの



デバンチが起こるタイミングのみクロマティシティの補正を弱くすることである程度抑制できる (その間チューンは共鳴から遠ざける)

真空圧力と電子雲

MRリング内の圧力



デバンチのタイミングで圧力上昇

electron cloud monitor

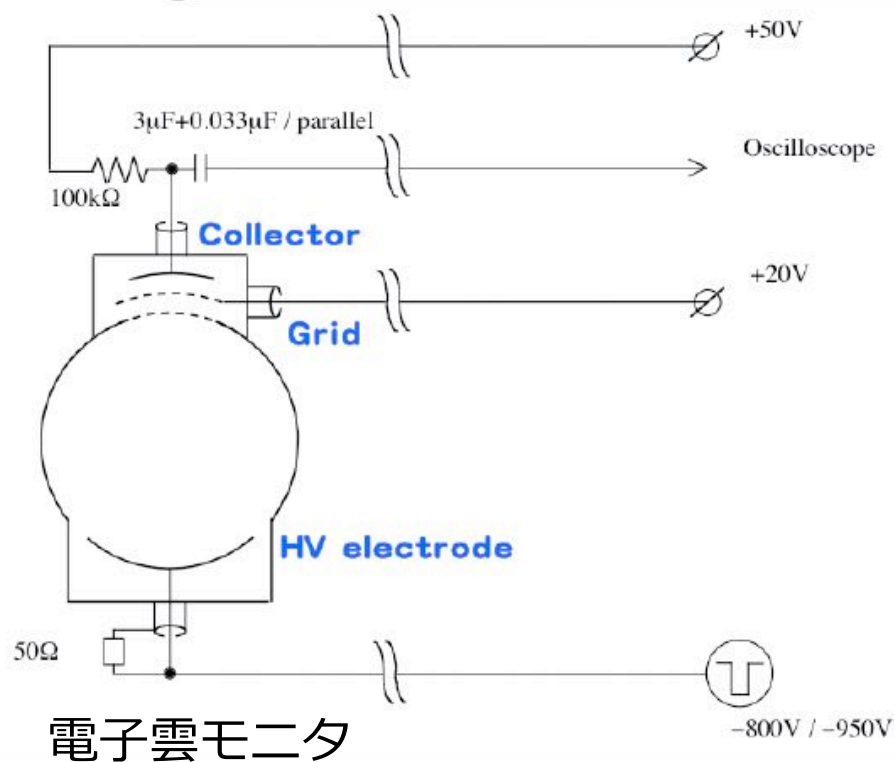


加速終了



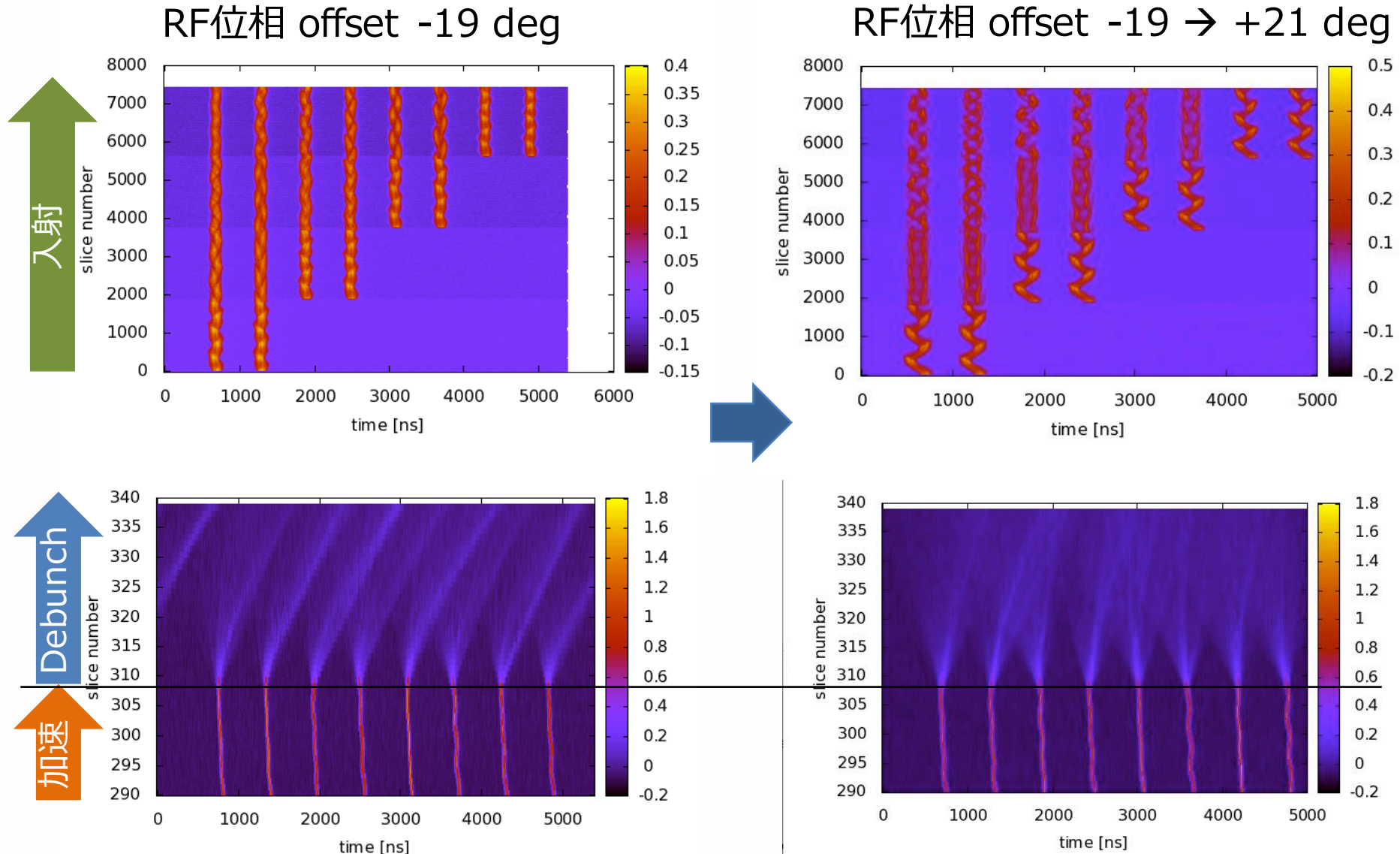
加速終了
+200ms

圧力上昇と同じタイミングで
電子の放出が観測されている



電子雲モニタ

Adjustment of RF phase at injection



入射時のRF位相をずらしてdipole振動を起こさせる
→ デバンチ時の不安定性を抑制でき, 41.5 kWでの利用運転を達成

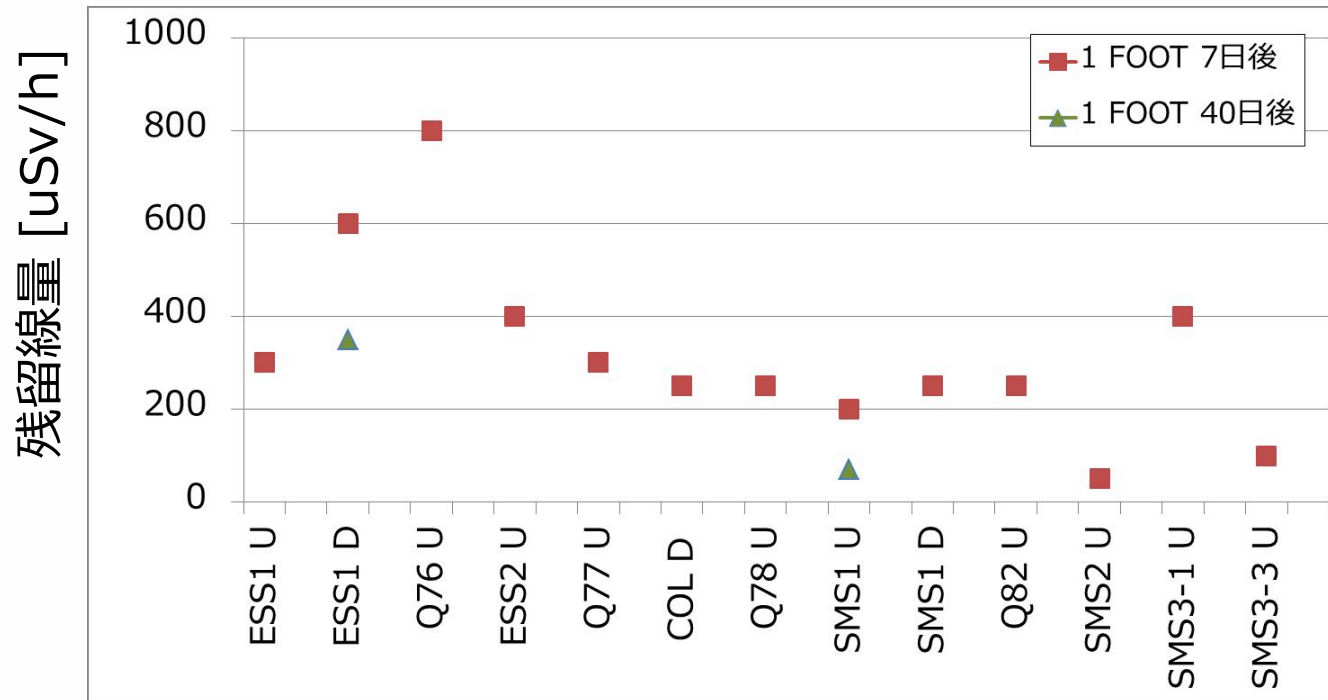
Higher beam power

- 48kWまでのビーム増強Studyを行った(2015-12)
取り出し効率 : 99.46% だが、デバンチ時のロスが見えてきている
- Longitudinalな構造がkeyであることがわかってきた
 - RF位相調整によるdipole振動の励起 ← 今回のstudy
 - 2nd harmonics RFの調整
 - RCSでのRF manipulation
 - 加速終了後にRFの位相をjumpさせて強制的にデバンチさせる
 - VHF cavityの導入(設計中)

さらなるビーム増強に向けて

SX運転後の残留放射線

RUN#65 (~2015/12, 41.5kW) 終了後の残留線量



作業可能性は 残留線量 × 作業時間で決まる

さらなるビームパワー増強のために
ビームロスの低減と、
放射化 / 被ばくの抑制を
すすめる

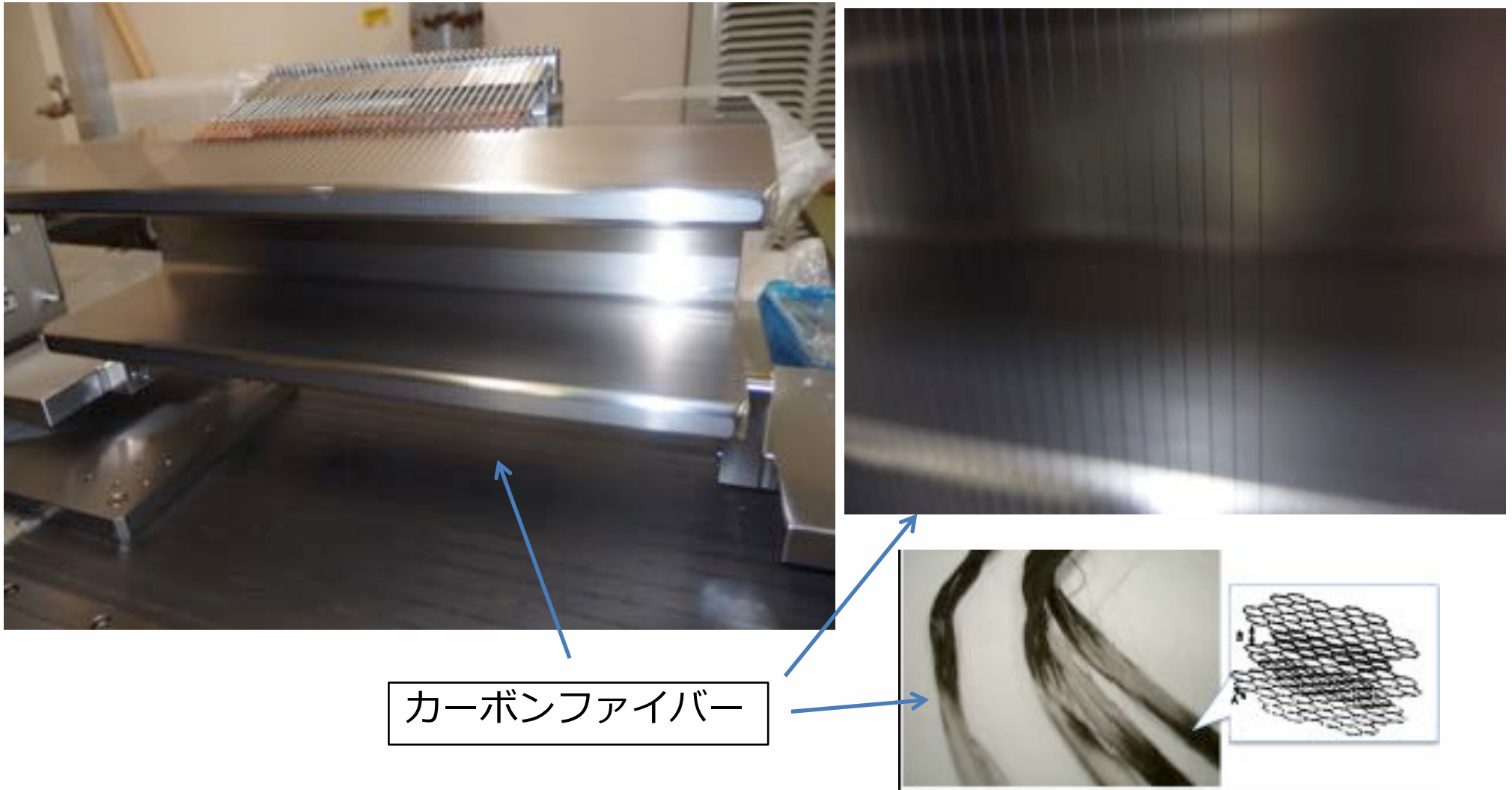
	KEK-PS	AGS	J-PARC (current)
Power [kW]	1.92	75	41.5
取り出し効率 [%]	80	97-98	99.5
Loss power [kW]	0.38	1.5-2.3	0.2

ビームロスと放射化/被ばく量の低減

- ビームロスを減らす
 - 新しいESSの開発
 - ESSの上流に散乱体を設置
 - リボンをカーボンファイバーで製作
 - ESSでの β をもっと大きくする光学の検討
- 機器の放射化を減らす
 - チタン製のESSを製作し、現在エーシング中
 - チタン製ダクト、真空チェンバーの導入
 - ローカルコリメータによる放射化の局所化
- 作業時の被曝量を減らす
 - クイックメンテナンスシステムの高精度化

新しいESSのR&D

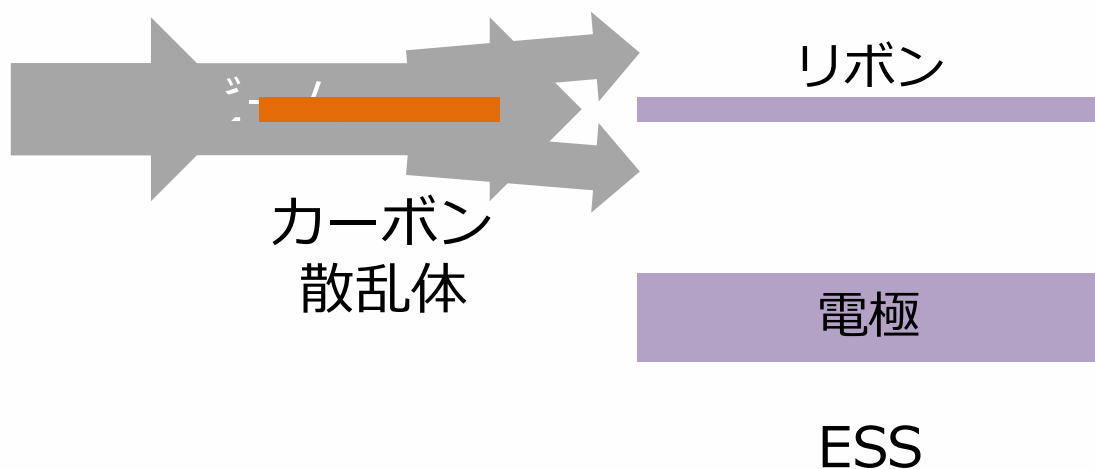
- ・リボンの材質をタングステンからカーボンへ
→スキッターリングによる角度広がりを低減



新しいESSのR&D

- リボンの材質をタングステンからカーボンへ
→スキャッタリングによる角度広がりを低減

- ESSの上流に散乱体を設置するアイデア



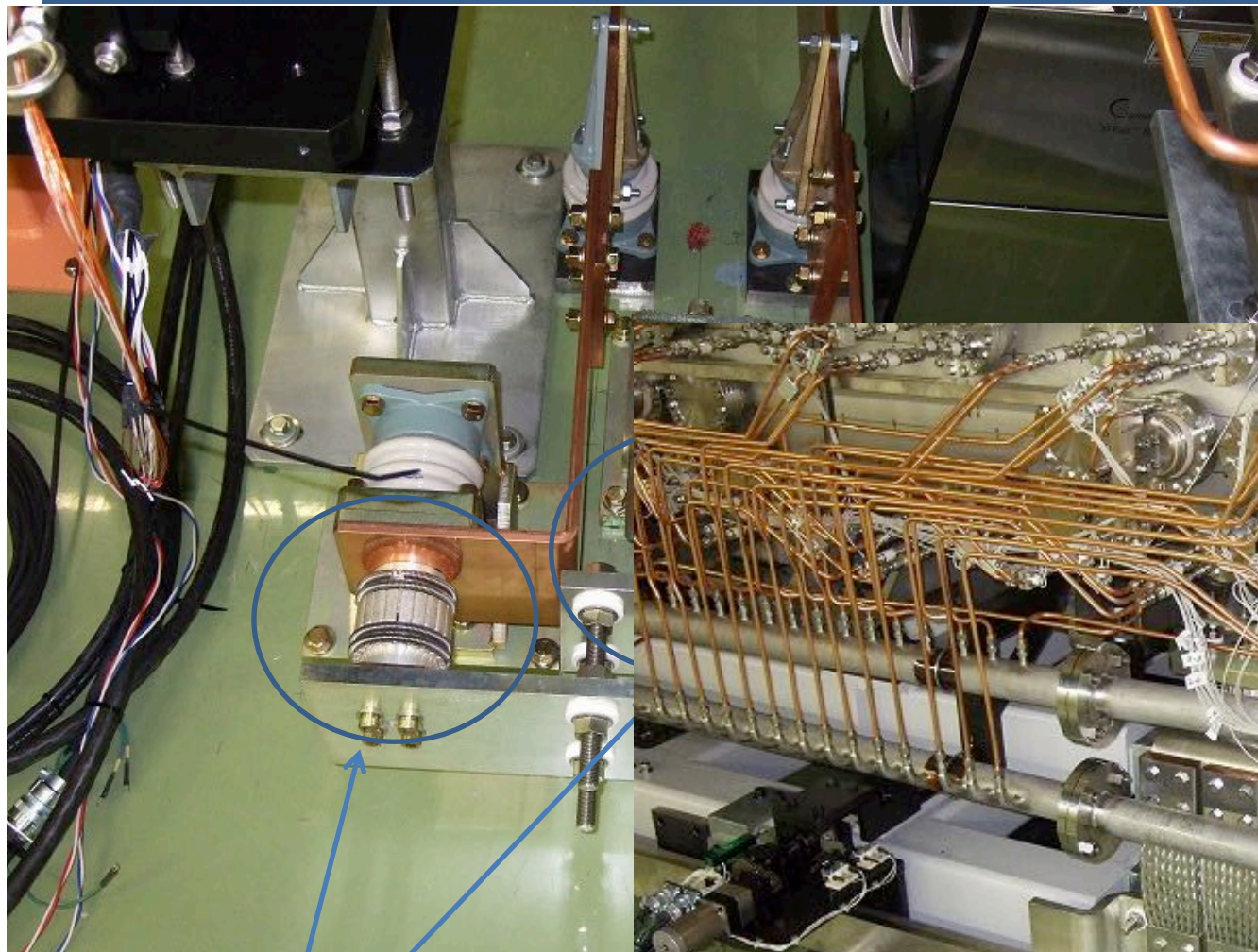
散乱体には電圧をかける必要がないので
メンテナンスが容易

作業時の被ばくを低減する

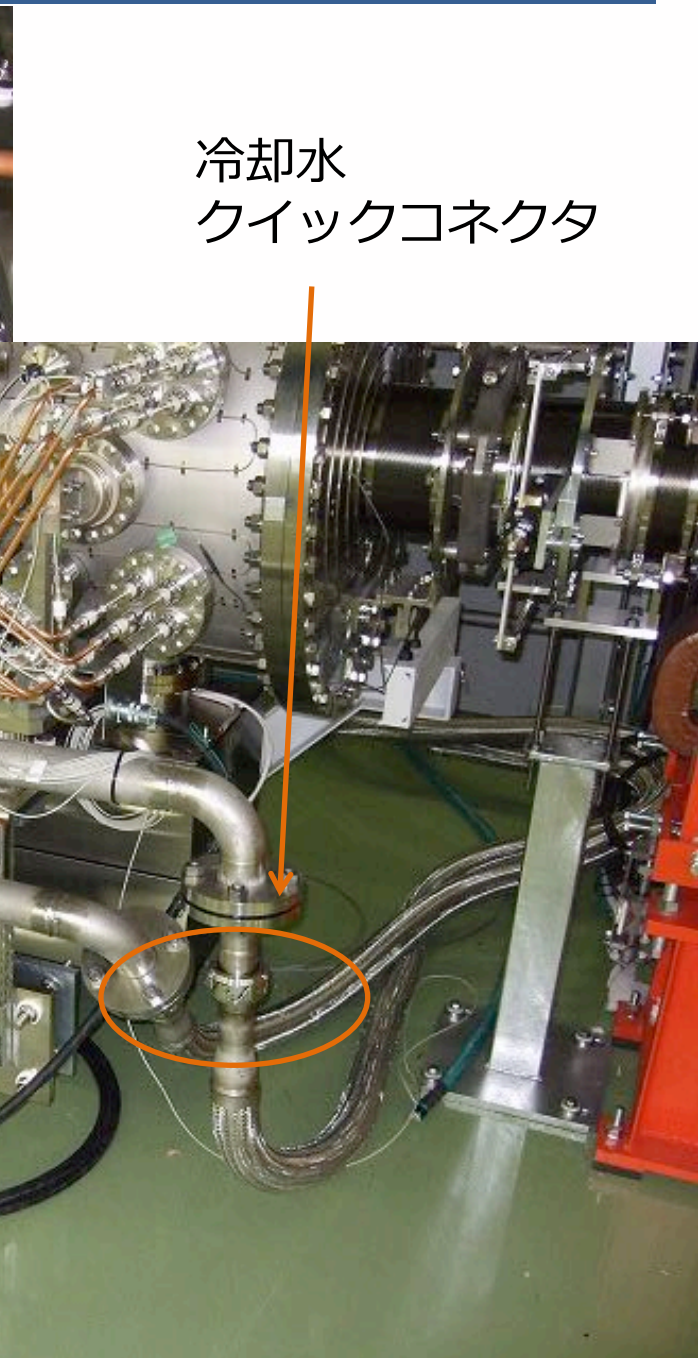


LMガイドによるクイック・ラインオフ

作業時の被ばくを低減する



電気
クイックコネクタ



冷却水
クイックコネクタ

ハドロン電磁石のメンテナンスシナリオ



- ・真空：ピローシール
- ・水：クイックカプラ
- ・電気：クイックコネクタ
- ・チムニー構造
- ・ツイストロック吊り具

速い脱着が可能な
クイックコネクタデバイス
(水・電気)

チムニー

ローカル遮蔽体

ツイストロック
吊り具

ピボット勘合
(再設置の際アライメント不要)

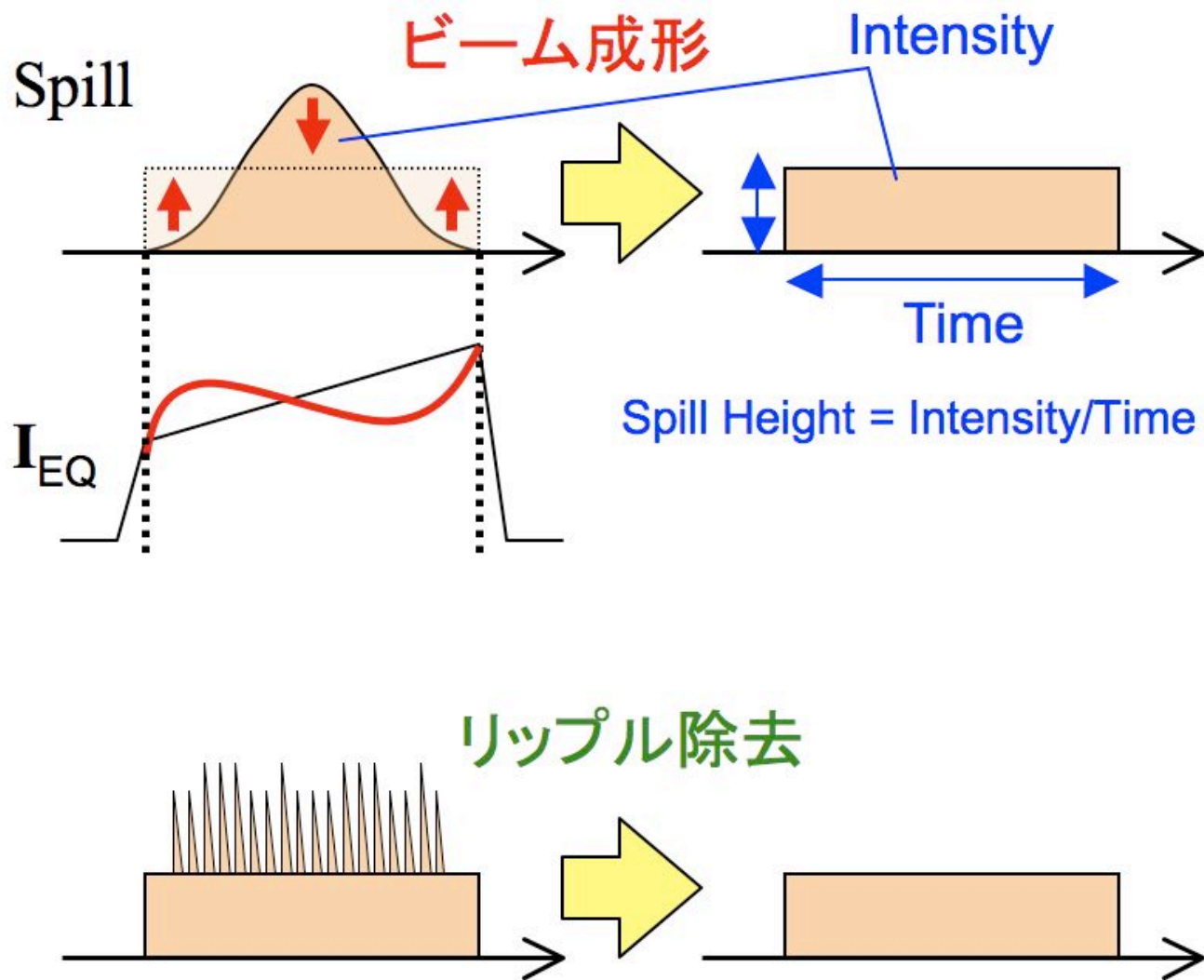


ビームパワー増強 まとめ

- 取り出し効率~99.5%を達成し、41.5kWまでのパワー増強に成功した
- さらなるビームパワー増強へ向けて
 - ビームのLongitudinalな分布を平坦化することによるデバンチ時の不安定性の抑制
 - ビームロスのさらなる低減 → 新ESSの開発, 新しい光学
 - 放射化の低減 → ESS, 真空チャンバー, ダクトのチタン化
 - 被ばく量の低減 → リモートメンテナンス手法の高精度化

スピル構造の改善

スピルフィードバック制御の概要



チューン ν が3次共鳴に近づくスピードをQ磁石を使って制御する

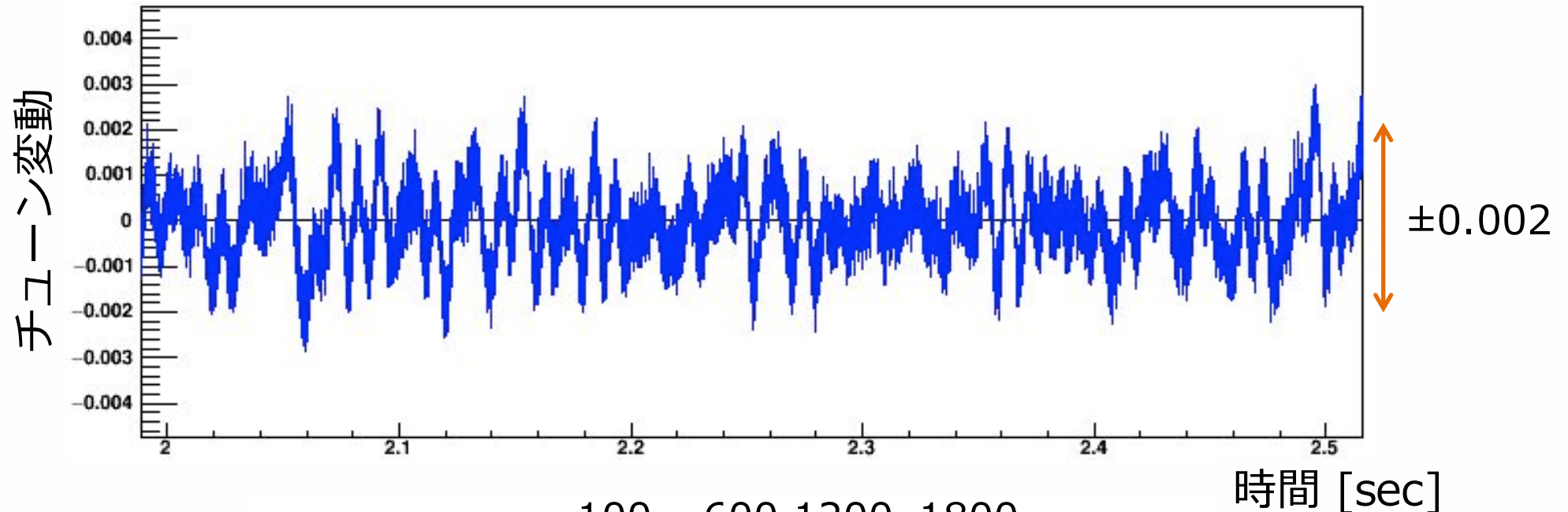
ラティスのQ
→linear ramp

EQ → ビーム成形

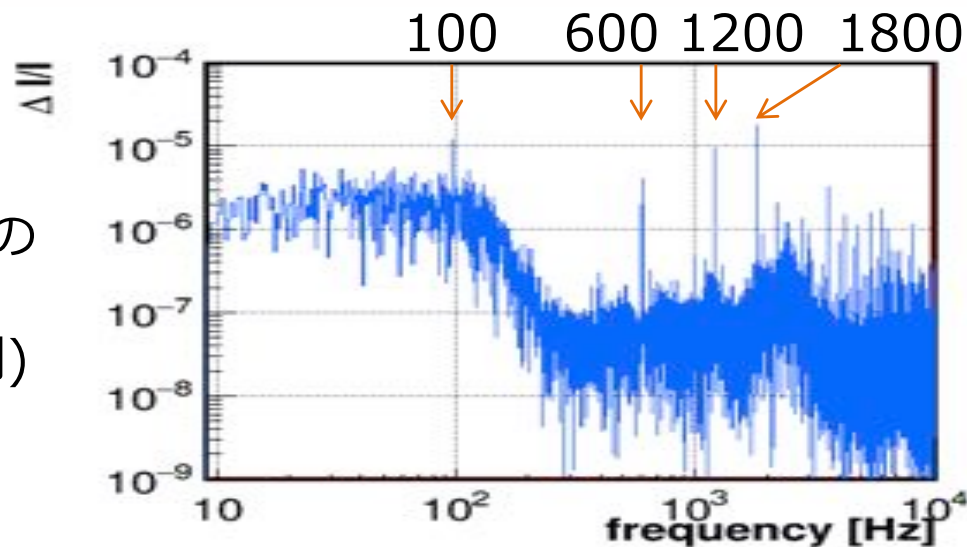
RQ → リップル除去

主電磁石電源のリップル

BおよびQ磁石電源の電流リップルによるチューン変動 (フラットトップ)

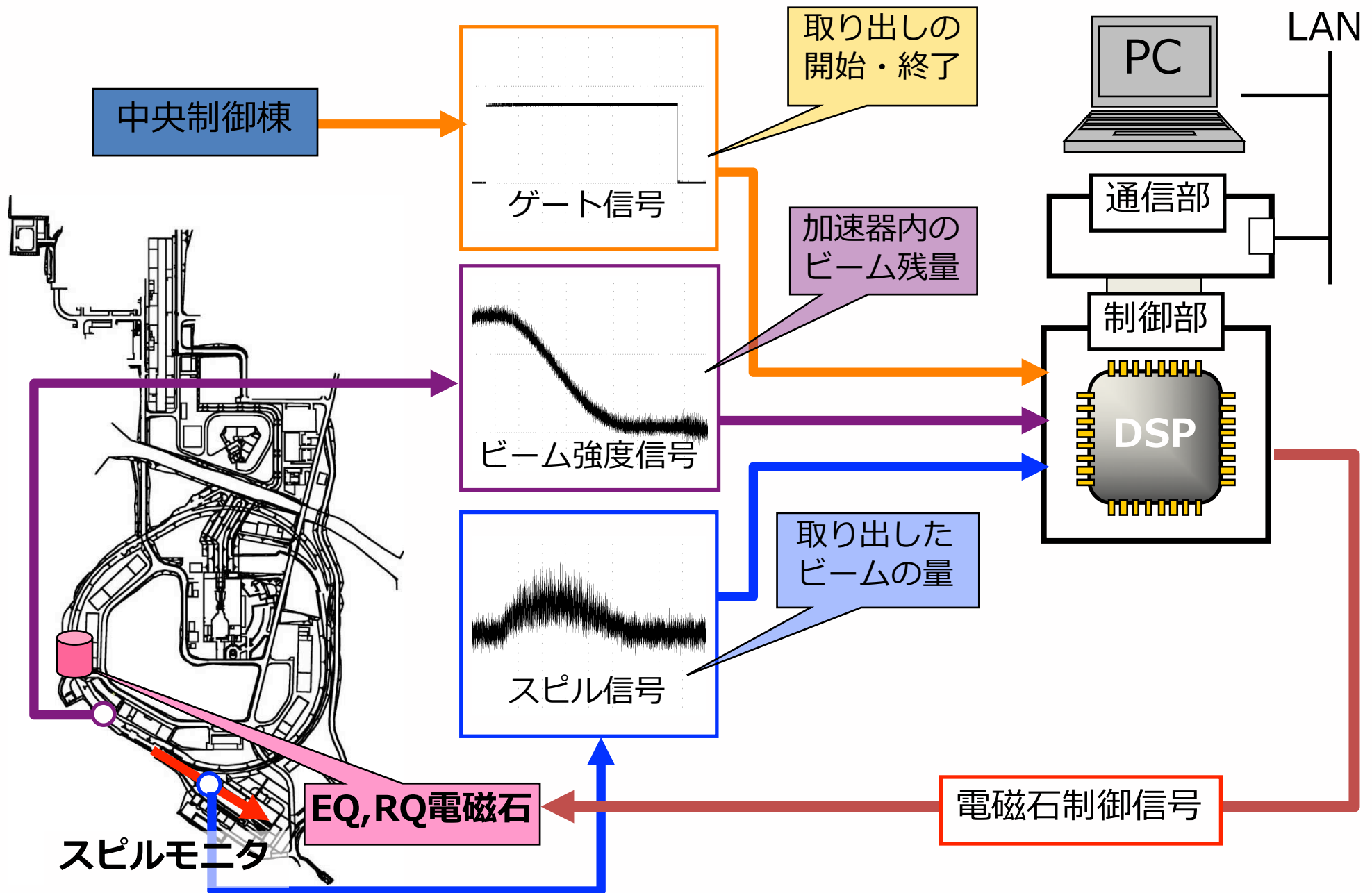


B電源
電流リップルの
FFT
(取り出し区間)

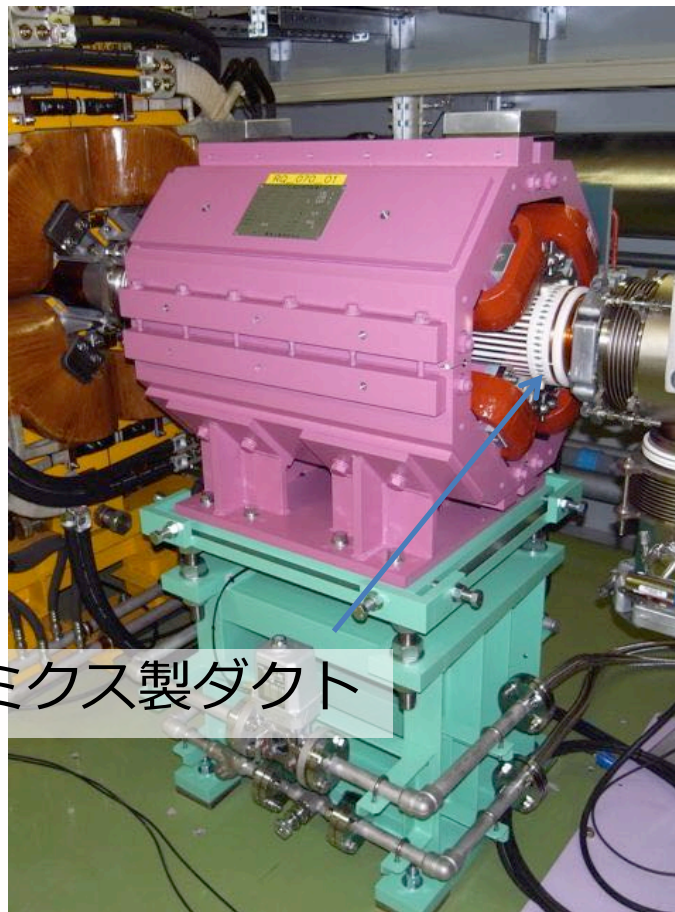


スピルフィードバックと
Transverse RFで
リップルに対処

スピルフィードバックシステムの構成



速い応答性を持つQ磁石(EQ,RQ)



セラミクス製ダクト

EQ
≲数百Hz

RQ
≲数千Hz

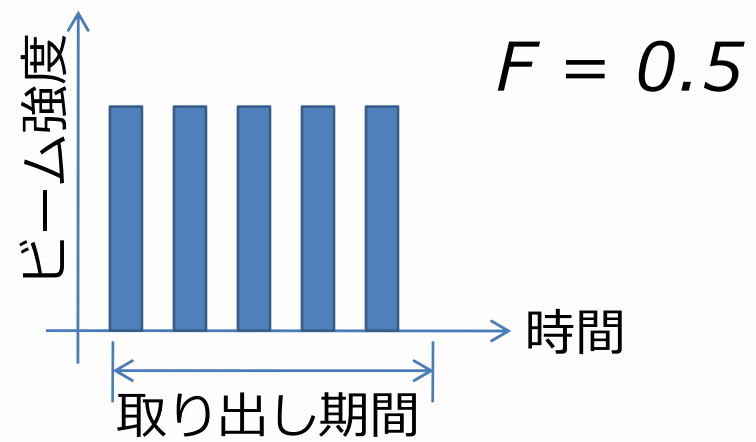
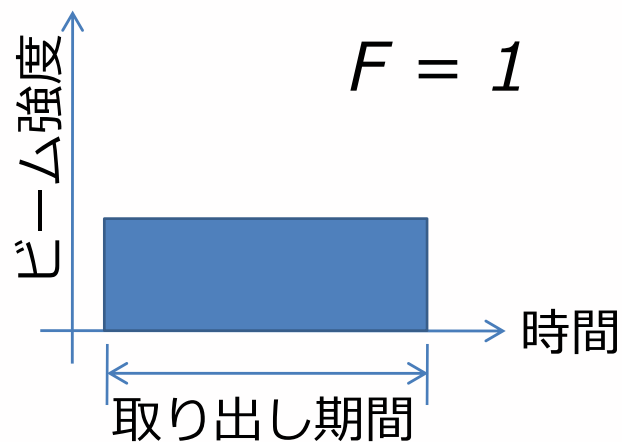


t 0.1mm 積層鋼板

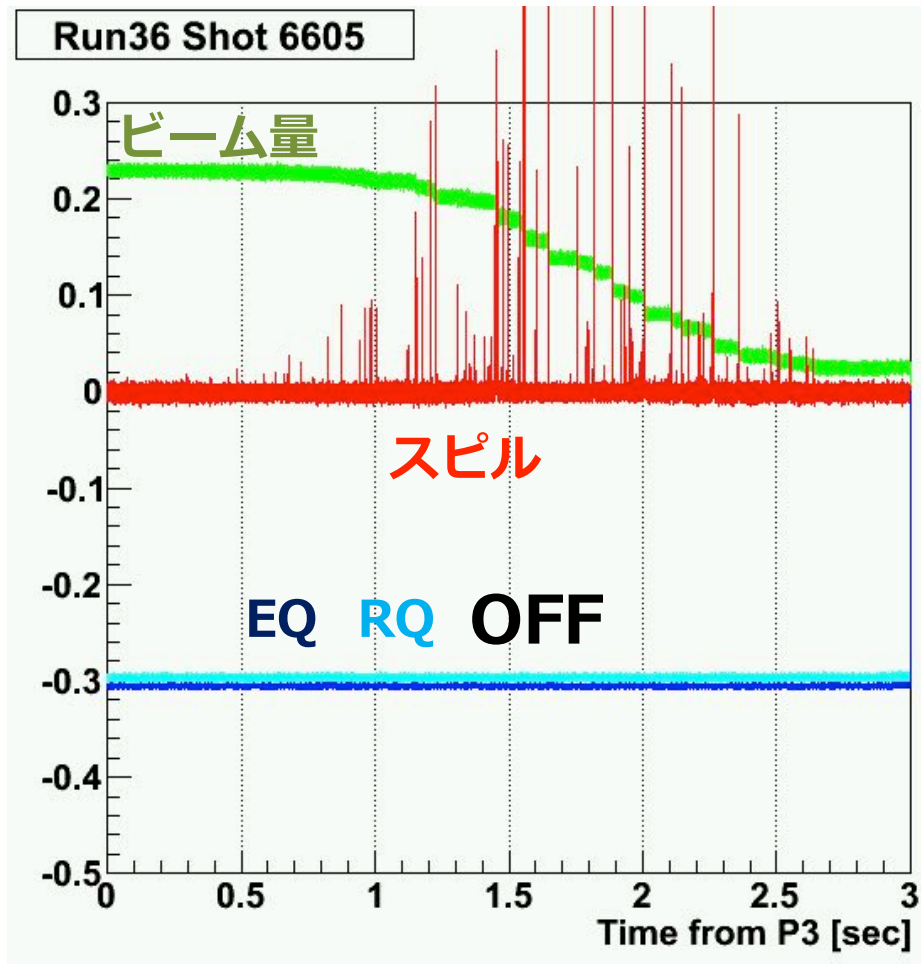
スピル構造の指標

Duty Factor F $F = \frac{\langle I \rangle^2}{\langle I^2 \rangle}$

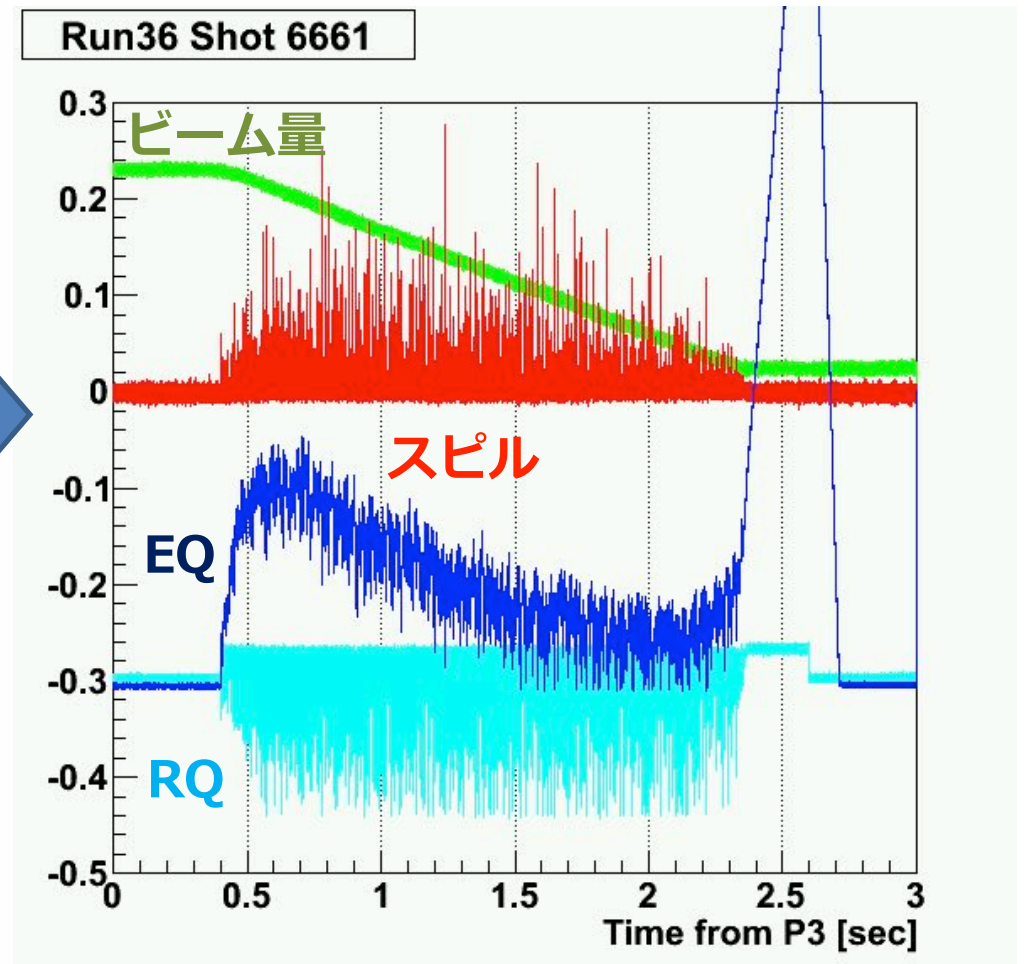
I : ビーム強度
 $\langle \rangle$: 取り出し時間中の平均



スピルfeedbackの効果



Duty Factor 3%

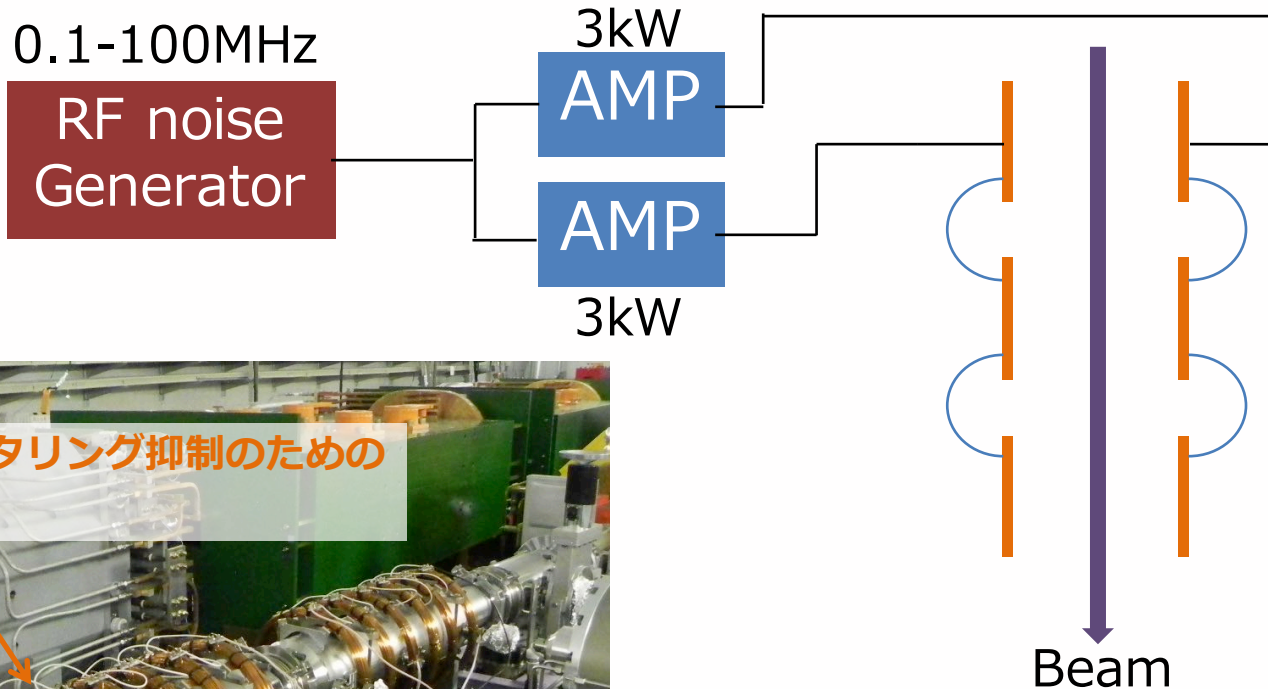


Duty Factor 18%

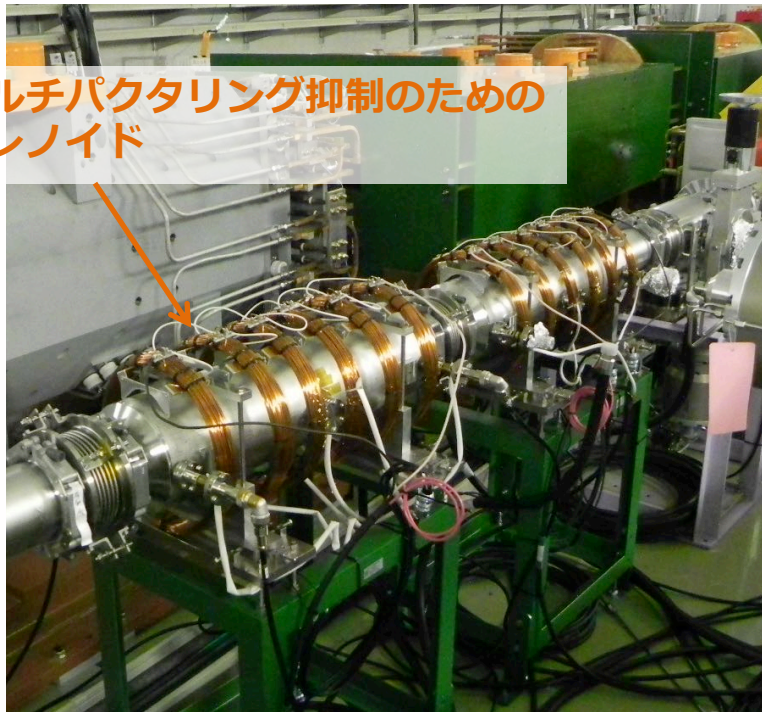
B,Q 磁石の補助コイルショートも
行っている

Transverse RF

Stripline Kickerを用いてBeamに横方向のRFをかけることにより
ベータatron振幅を増大させ、Beamを共鳴に近づける



マルチパクタリング抑制のための
ソレノイド

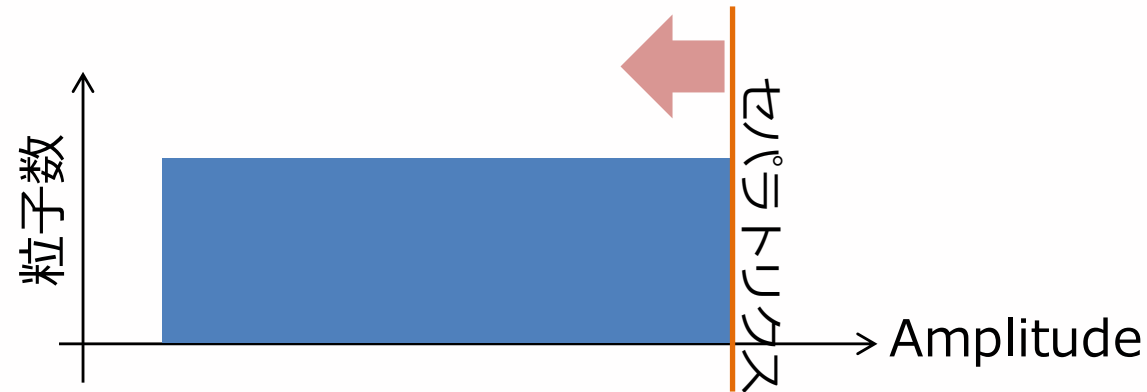


2015より
3台 (~47 MHz)+
1台 (~225 kHz)
に増強

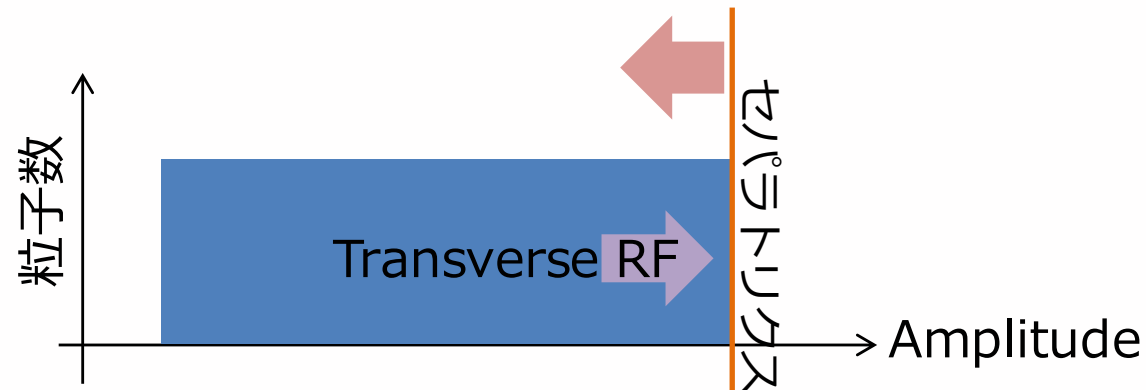
By A. Schnase, T. Toyama,
M. Okada & J-PARC RF group

Transverse RF

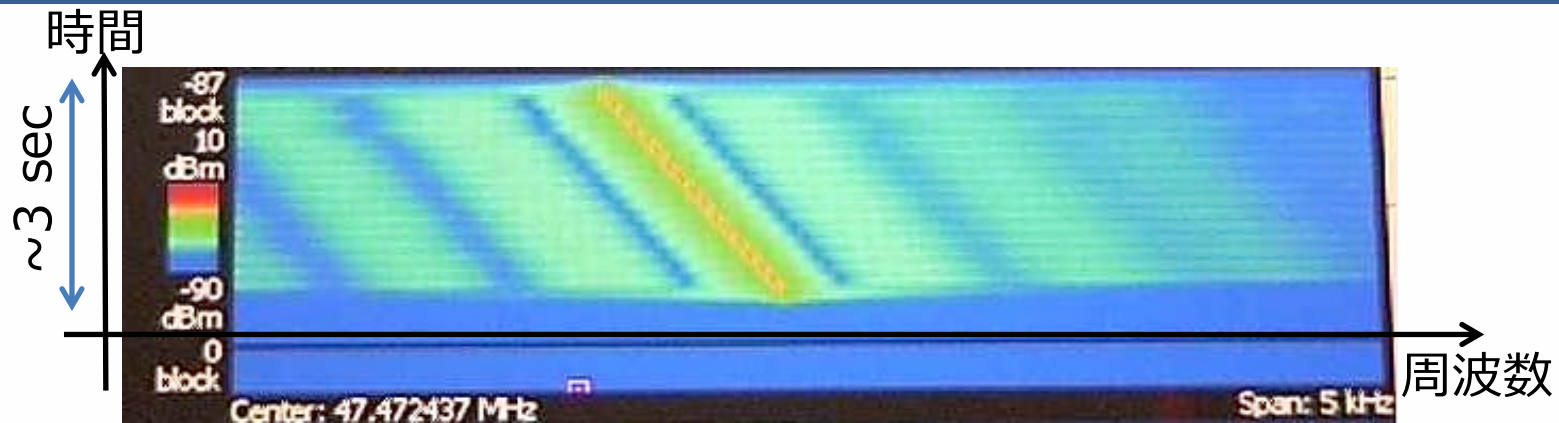
セパトリクスと粒子分布の相対速度 / チューンリップルの速度がリップルの影響の大きさを決める



Transverse RFによって粒子をセパトリクスの方へ押し
スピンにRFの構造がのるので周波数は高い方が望ましい
(現在は~47 MHz)



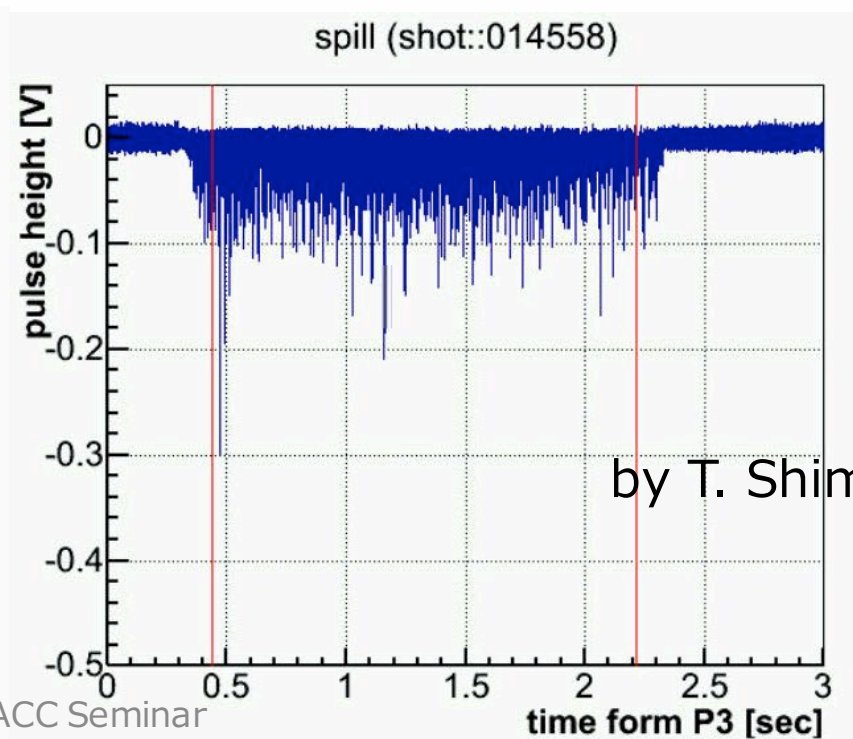
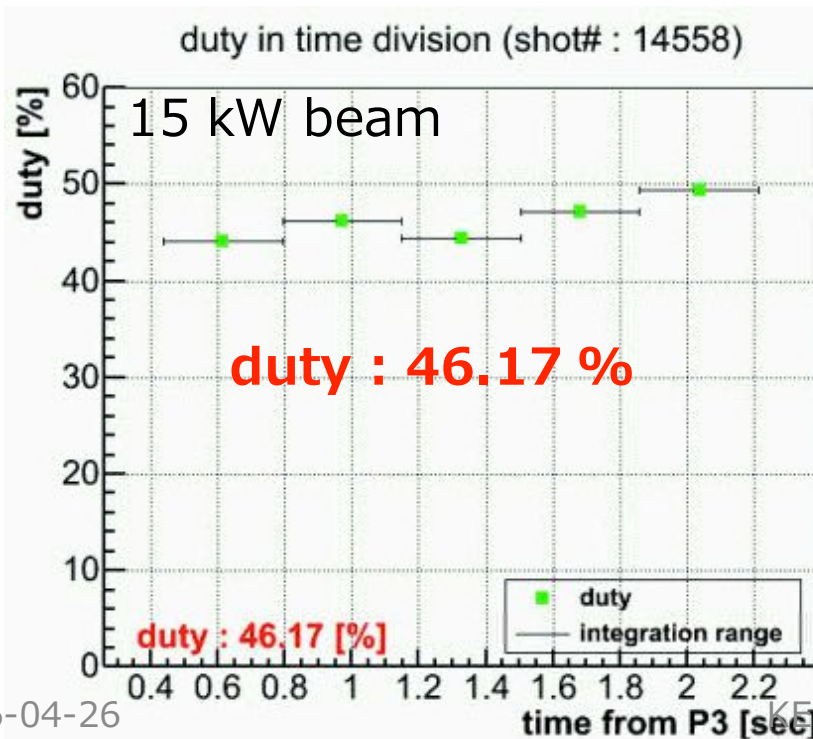
Transverse RF



$f \sim 47.47 \text{ MHz}$

チューン小数部を $\sim 1/3$ にし、

スピルdutyが最大になるように周波数をスキャン



by T. Shimogawa

スピル構造 現状のまとめと今後

スピルフィードバック、補助コイルのショート、Transverse RFをそれぞれ最適化することにより、スピルduty factor ~45%での運転を達成することが出来た。

さらなるスピル構造の改善のために

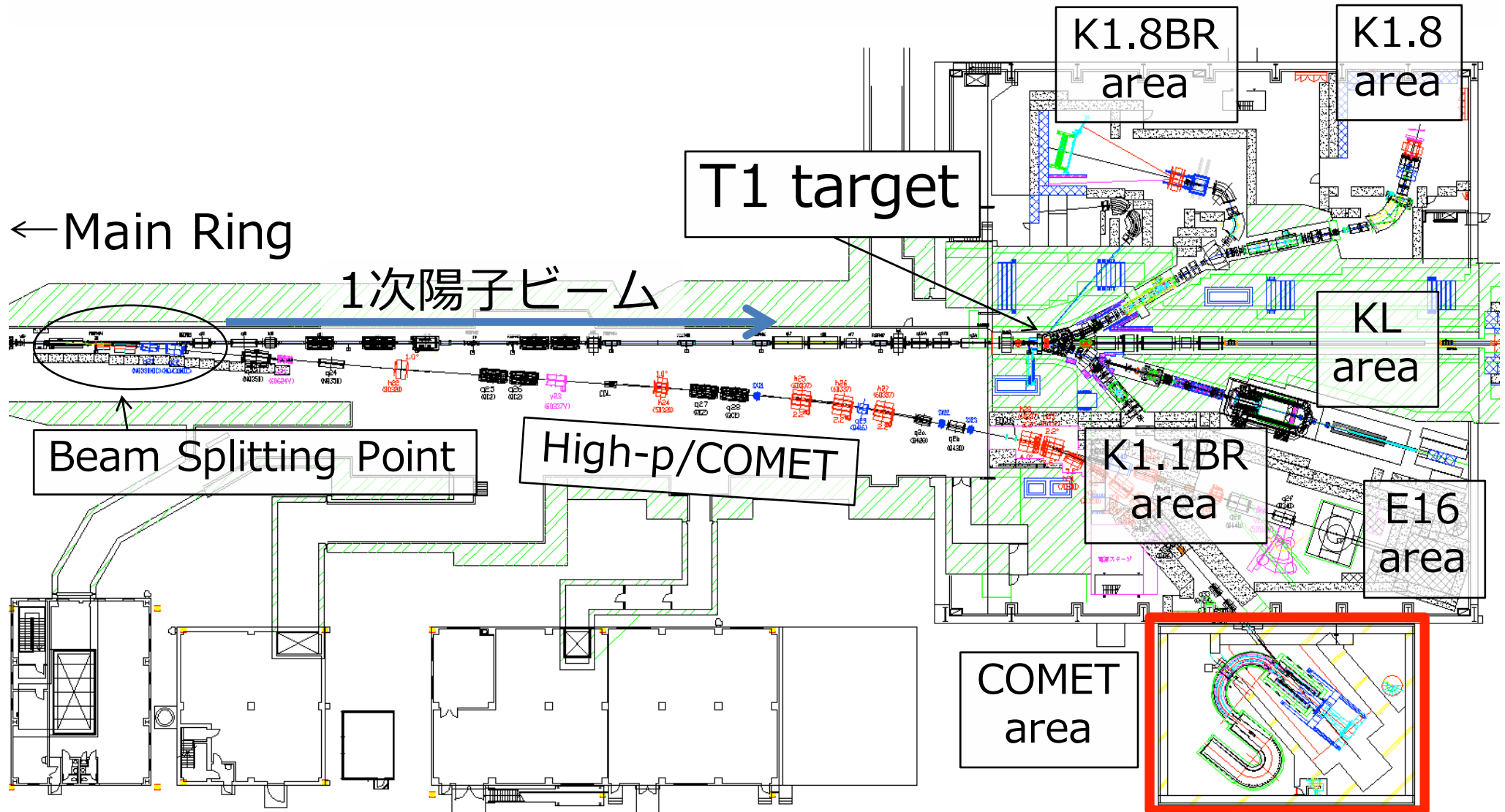
- Transverse RF : ケーブル長による位相の調整→次回Study
exciterの台数 / Amp のパワー増強の検討
- Transverse RFに対するFeed Backの可能性
- スピルでなく電源の電流リップルそのものでフィードバックをかける計画
- $d(\text{tune})/dt$ を大きくすることがSpill構造の改善に有効
→エミッタンスを大きくできるか?
- 主電磁石電源そのものの改善

将来計画

COMET

スイッチヤードトンネル

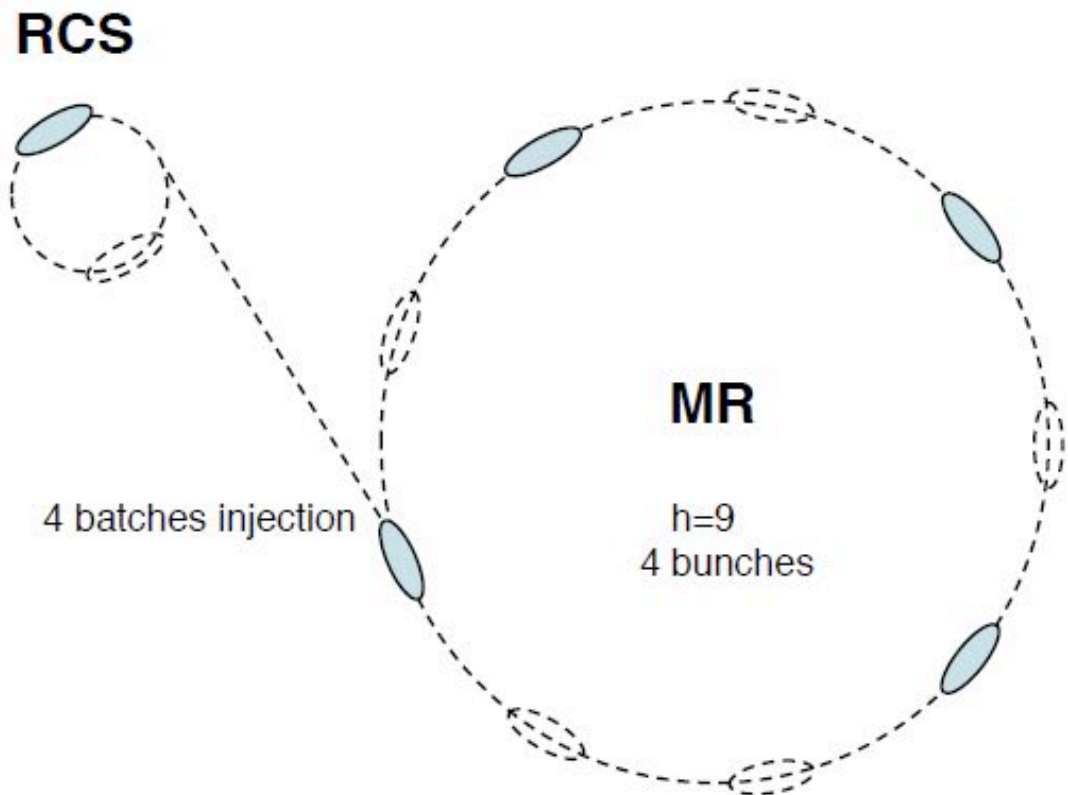
ハドロンホール



8 GeV での取り出し

取り出しビームへの要求

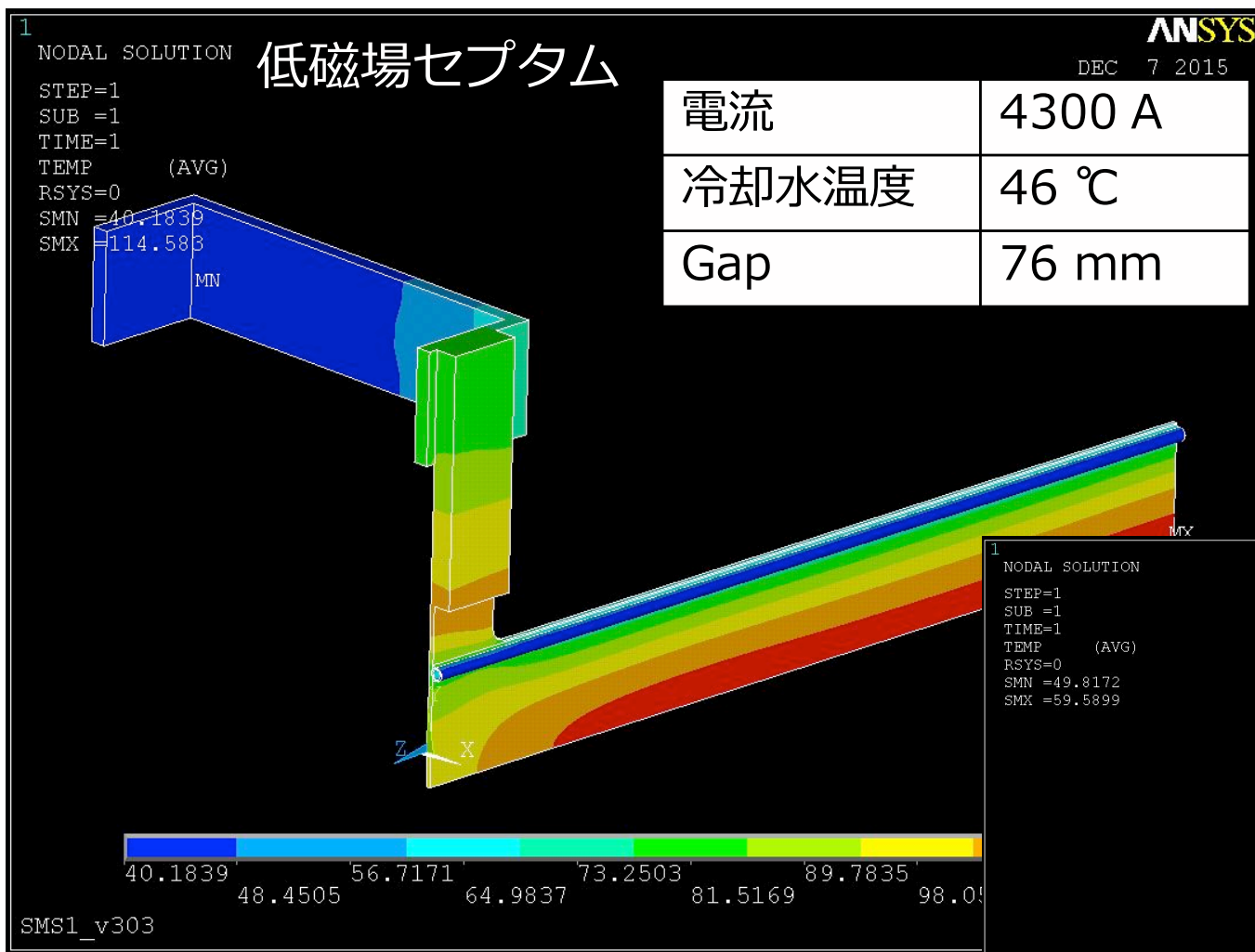
- 8GeV
- 3 or 4 bunch 運転
- Bunched Slow Extraction
- Phase 1 : ~ 3 kW
Phase 2 : ~60 kW



8 GeVのため、取り出し機器の apertureが問題になる

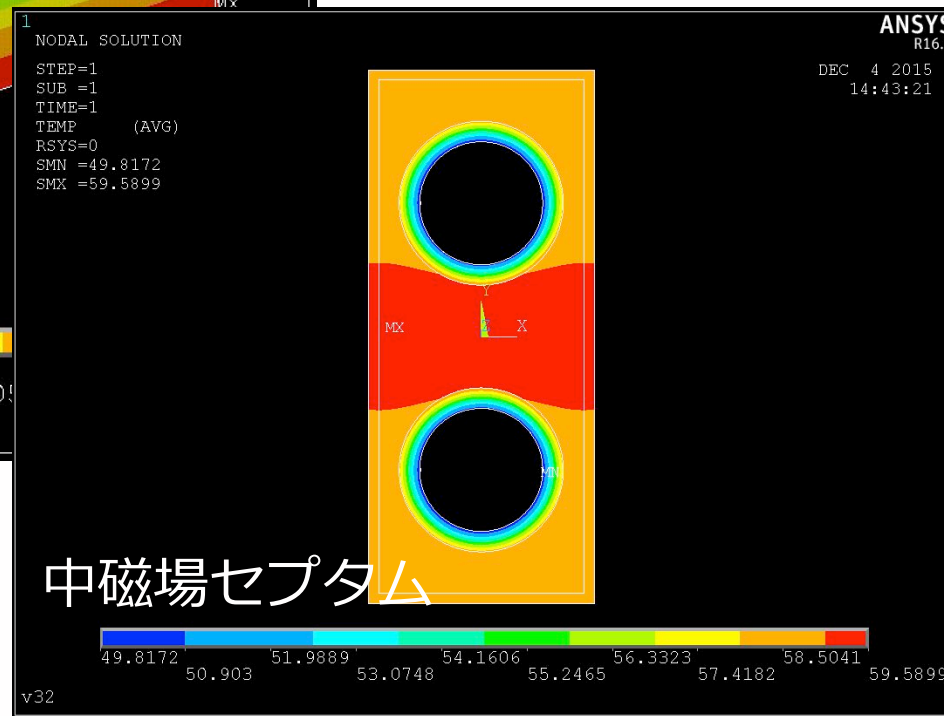
Phase 1 のビームパワーならRCSでのエミッタンスを小さくすることで取り出し可能にできる → 実証できた
Phase 2 までに大口径の取り出し機器を準備する

8 GeV 取り出し対応セプタム磁石



熱・応力計算など
設計を進めている

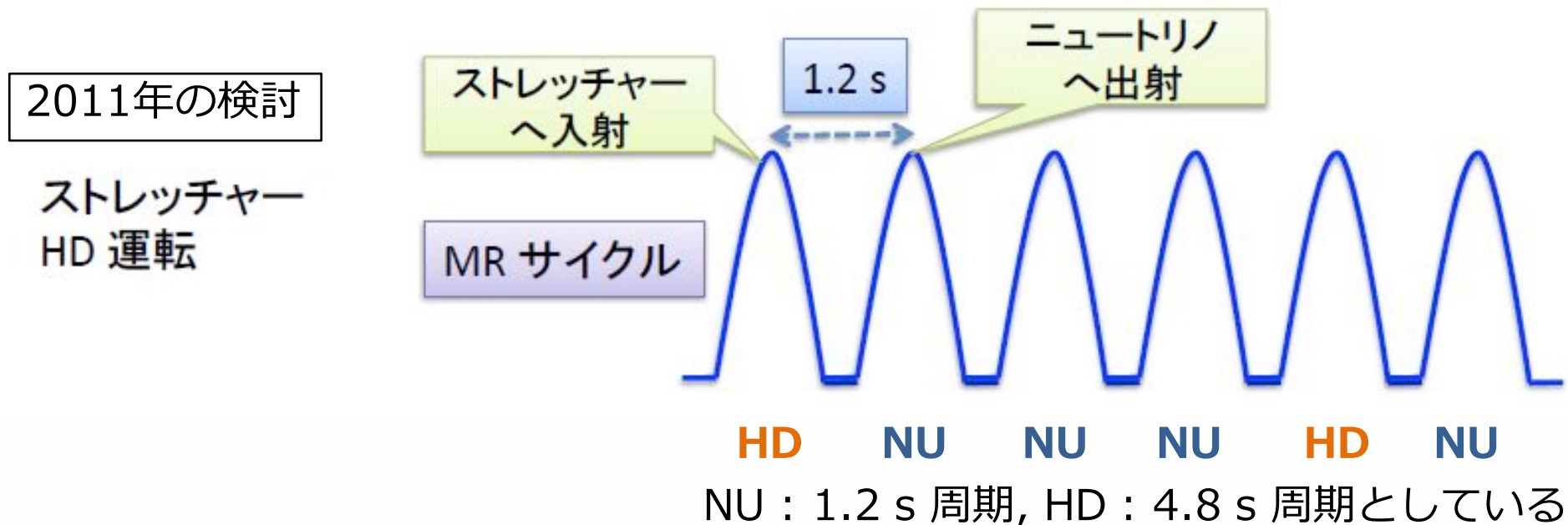
電流	3400 A
冷却水温度	46 °C
Gap	81 mm



新リング

NU / HD / COMET でMRの運転時間を分け合う必要がある

→ ストレッチャーリング?



ただ、COMETは周期が早いのであまり得にならない

→ 新シンクロトロン?

- リングをどこに置くのか
- 高放射化環境でのメンテナンス性の確保
- リングからリングへのビーム輸送(ストレッチャー)
→ 検討(問題点の洗い出し)を始めた

まとめ

J-PARC MRの遅い取り出し の2大課題

- ・ **ビーム強度の増強**
- ・ **スピル構造のフラット化**

ビーム強度

- ・ 取り出し効率~99.5%を保ったまま
41.5kWの連続運転に成功
- ・ 今後
 - ロスの低減 → 新ESSの開発, 新しい光学
 - 放射化の低減 → 機器のチタン化
 - 被ばく量の低減 → リモートメンテナンス手法の高精度化

スピル構造

- ・ EQ+RQのスピルフィードバック、補助コイルショートにくわえて
Transverse RFを用いることにより、~45%のDuty Factorを達成
- ・ 今後様々な手段を講じてDuty Factorの向上を目指す

将来計画

- ・ 物理の成果を最大化できるよう、新たなリングも含めて検討を進めたい