

# J-PARCリニアックの 縦方向ビーム分布測定とその課題

2021年12月1日

日本原子力研究開発機構

J-PARCセンター

守屋克洋

# 報告内容

- 大強度陽子加速器とその利用
- J-PARC加速器
- リニアックビームモニタ
- 縦方向分布測定
  - 測定原理
  - J-PARCリニアックの現状と課題
  - 他施設の状況
  - J-PARCの取り組み
- まとめ

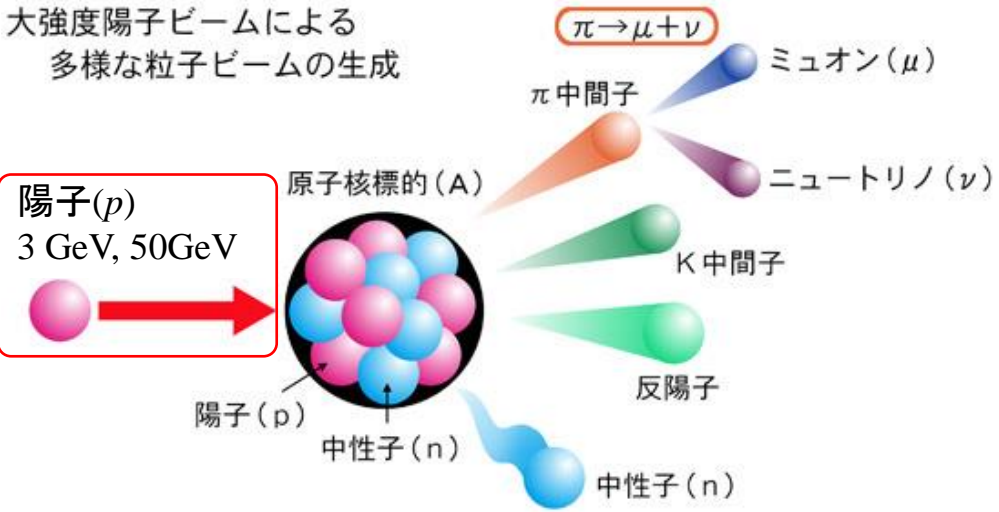
# 報告内容

- 大強度陽子加速器とその利用
- J-PARC加速器
- リニアックビームモニタ
- 縦方向分布測定
  - 測定原理
  - J-PARCリニアックの現状と課題
  - 他施設の状況
  - J-PARCの取り組み
- まとめ

# 大強度陽子加速器とその利用

大強度陽子ビームによる  
多様な粒子ビームの生成

陽子(p)  
3 GeV, 50GeV



J-PARCで生成される2次粒子

【素粒子・原子核実験】

ニュートリノ、K中間子

【物質・生命科学実験】

中性子、ミュー粒子

$$\text{ビーム強度[W]} = \text{平均ビーム電流[A]} \times \text{ビームエネルギー[eV]}$$

## ビームの更なる大強度化

→ 2次粒子生成量の増加

→ 稀な事象の発見・実験の効率化

# Japan Proton Accelerator Research Complex



今回はリニアックのビームモニタについて

# ちなみに...

12月1日の発表者のうち、3人がJ-PARリニアック関係者

時刻		発表者
9:30 – 9:50	接続試験	
9:50 – 10:00	オープニング	栗木 雅夫
10:00 – 11:00	招待講演	田島 俊樹
11:00 – 11:20	休憩	
11:20 – 12:10	Session 1.1	大谷 将士
12:10 – 13:10	お昼休み	
13:10 – 14:00	Section 1.2	守屋 克洋
14:00 – 14:50	Session 1.3	柴田 崇統
14:50 – 15:10	休憩	
15:10 – 16:00	Session 1.4	紀井 俊輝
16:00 – 16:50	Session 1.5	檜垣 浩之

Muon加速器、ビーム調整

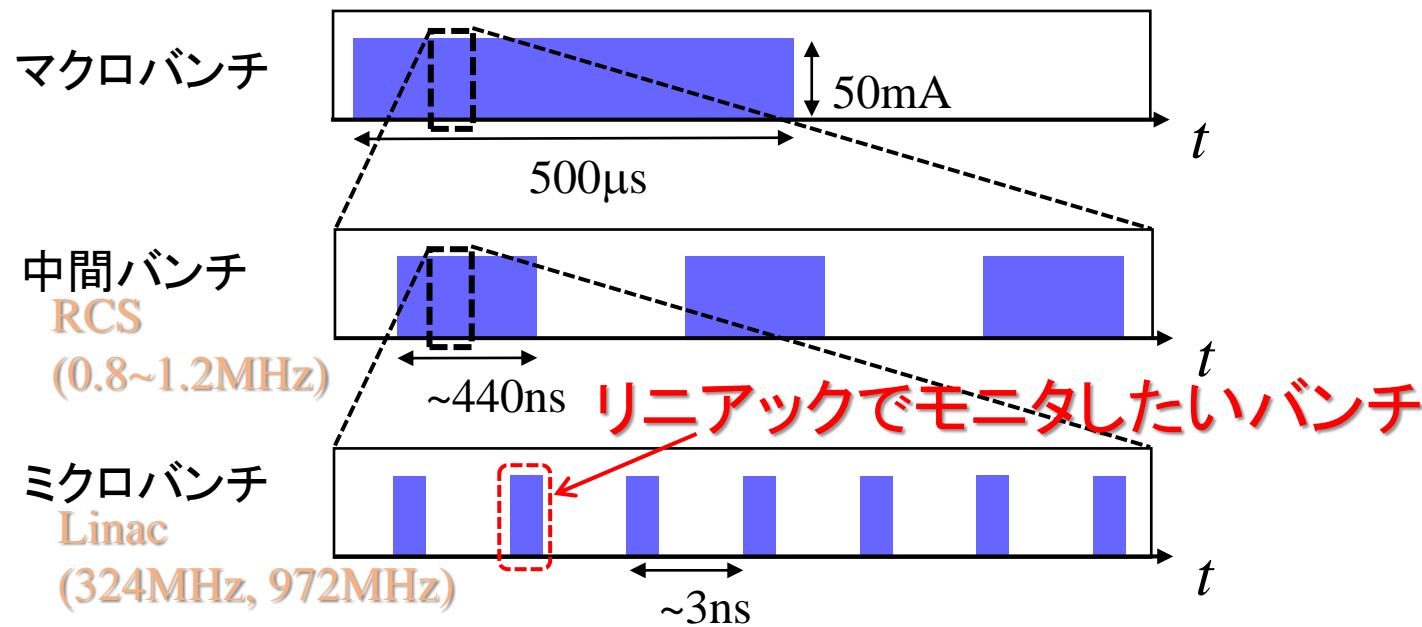
ビームモニタ、ビーム調整  
イオン源

# 報告内容

- 大強度陽子加速器とその利用
- J-PARC加速器
- リニアックビームモニタ
- 縦方向分布測定
  - 測定原理
  - J-PARCリニアックの現状と課題
  - 他施設の状況
  - J-PARCの取り組み
- まとめ

# モニタしたいビームパラメータ

ビームロスを減らすために、  
ビームパラメータを基にして最適な輸送条件(マッチング条件)を求める必要がある。



## ビームパラメータ

	横方向	縦方向
電流値	$I$	
重心	$x, x', y, y'$	$t(\phi), E$
分布	$\alpha_x, \beta_x, \varepsilon_x, \alpha_y, \beta_y, \varepsilon_y$	$\alpha_z, \beta_z, \varepsilon_z$

## リニアックビームモニタ

	横方向	縦方向
電流値	SCT	
重心	BPM	FCT, BPM
分布	WSM, GSM	BSM



# 横方向ビームモニタ

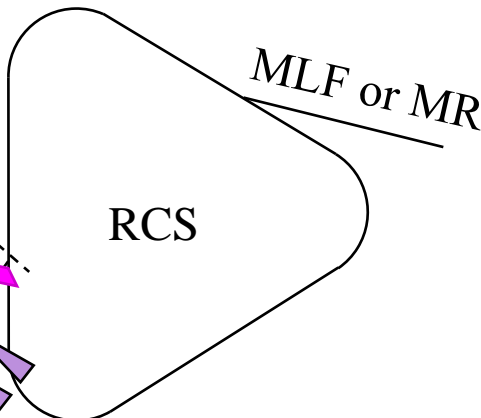
## 横方向モニタ

重心位置	BPM:ビーム位置モニタ	◆
横方向分布	WSM:ワイヤスキャナモニタ	▲

## 縦方向モニタ

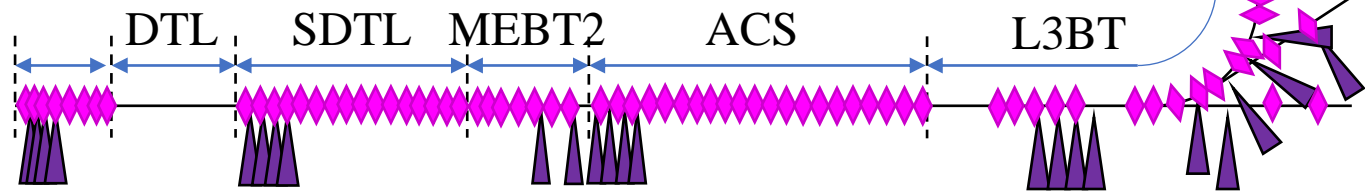
重心エネルギー	FCT:ビーム到達時間モニタ	◇
縦方向分布	BSM:バンチシェイプモニタ	▲

OK!  
OK!



### リニアック

Front-end (=IS+LEBT+RFQ+MEBT1)



- BPM (非破壊測定)** : 多くのQM内に設置
- WSM (破壊測定)** : 各セクション毎に4台以上設置

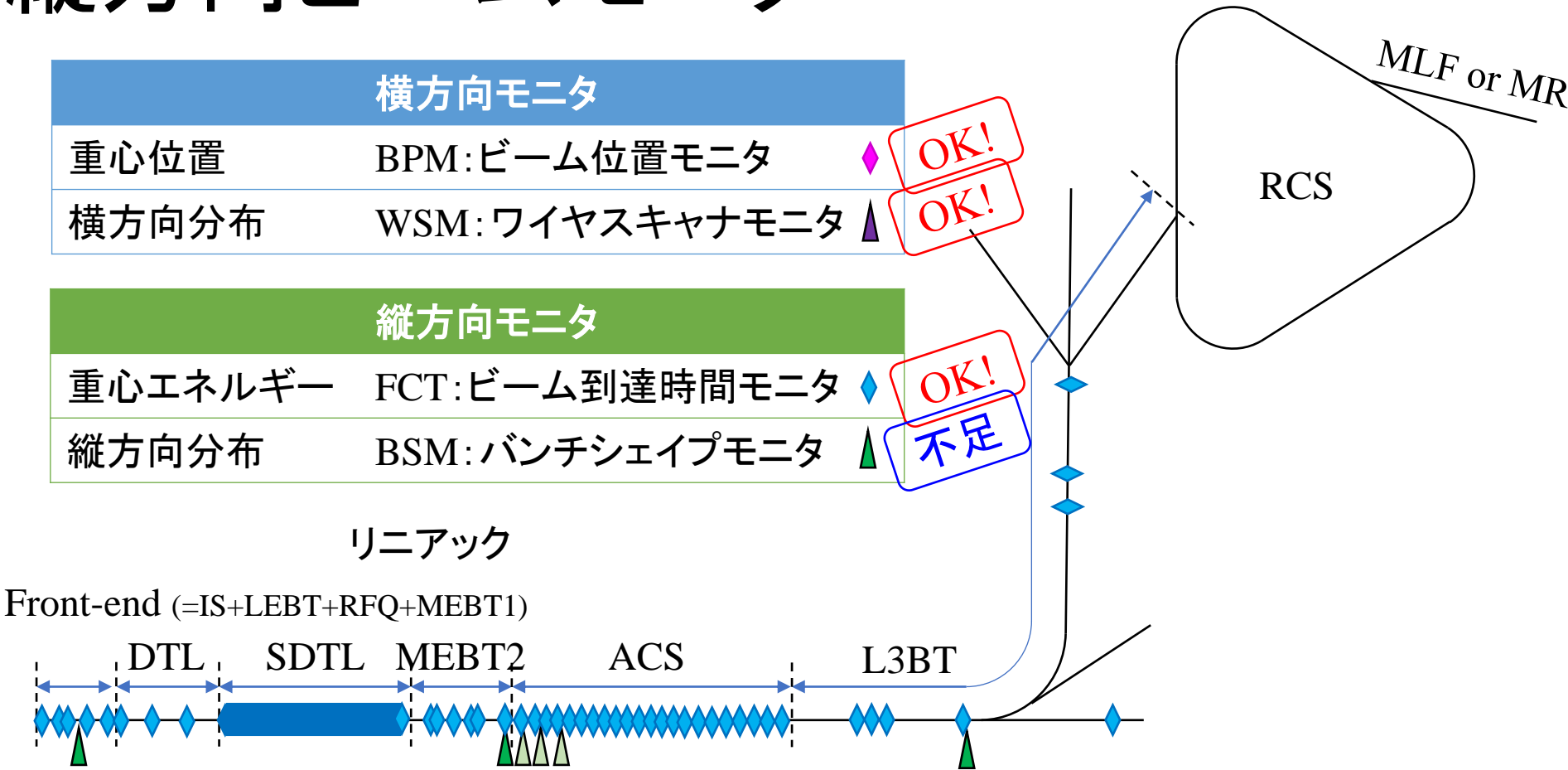
# 縦方向ビームモニタ

## 横方向モニタ

重心位置	BPM:ビーム位置モニタ	◆
横方向分布	WSM:ワイヤスキャナモニタ	▲

## 縦方向モニタ

重心エネルギー	FCT:ビーム到達時間モニタ	◆
縦方向分布	BSM:バンチシェイプモニタ	▲



**FCT** (非破壊測定) : ほぼ全ての加速空洞の上下流に設置  
**BSM** (破壊測定) : 一部セクションのみ

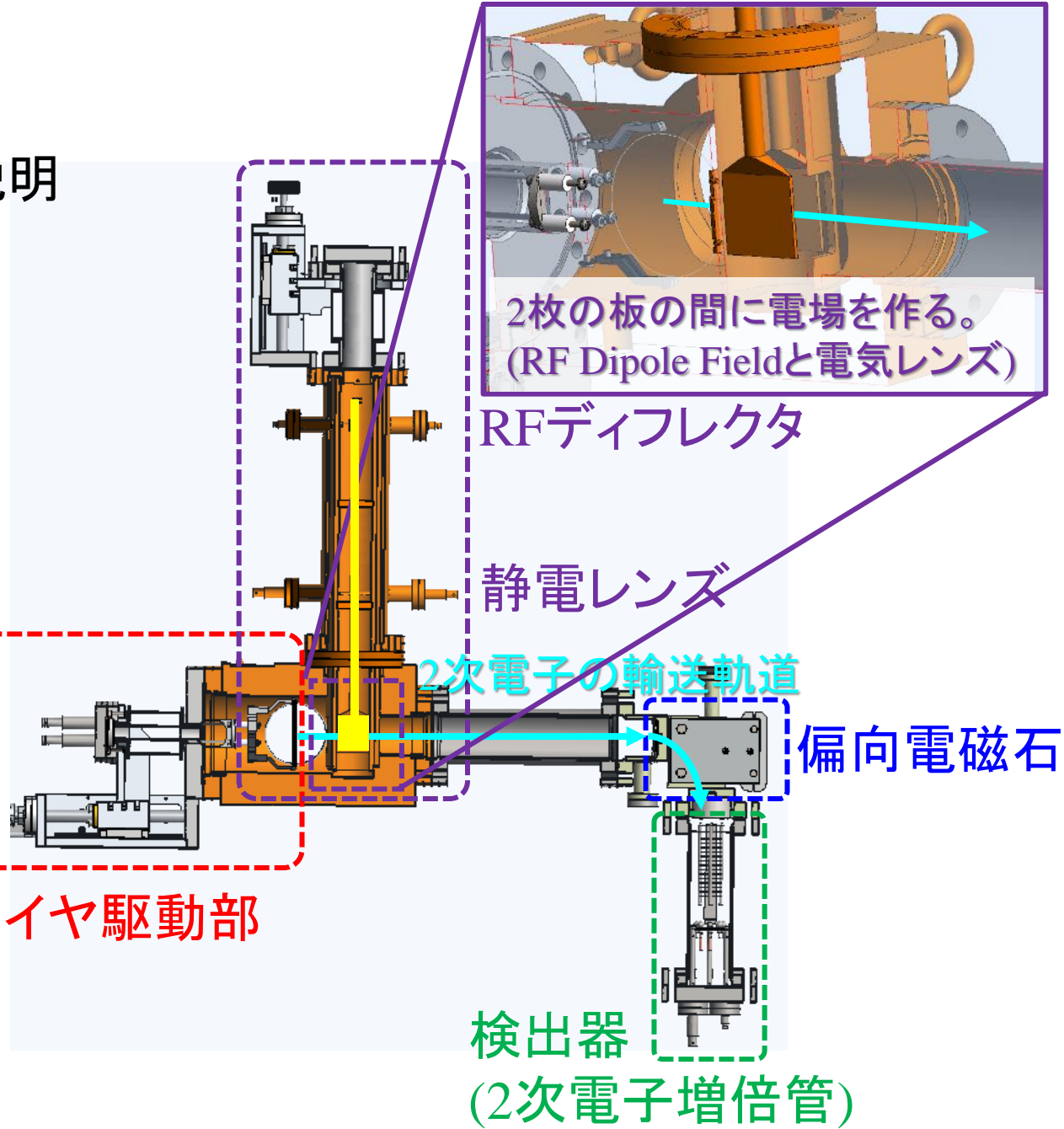
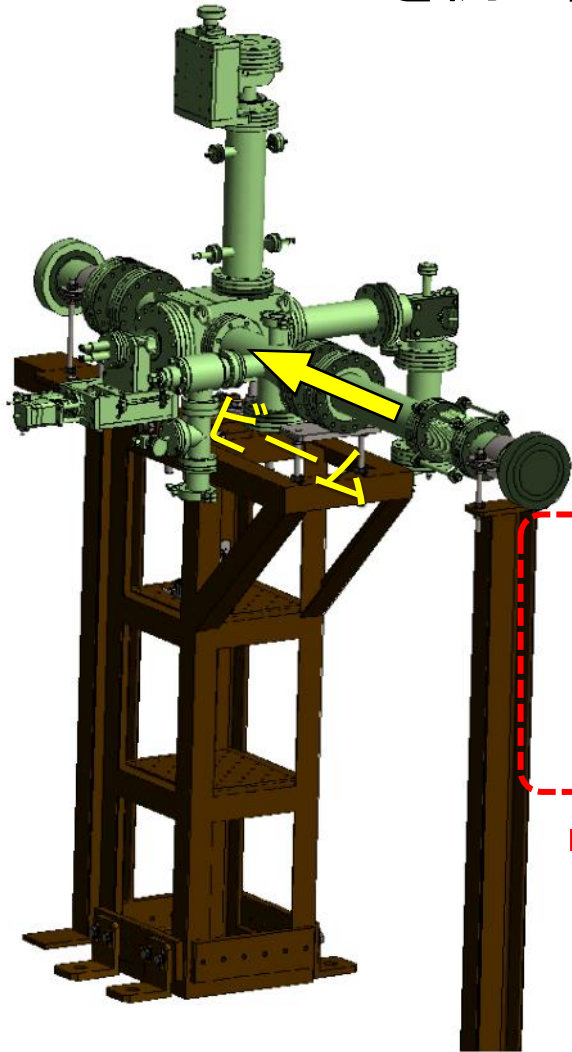
**横方向に比べて縦方向のビームプロファイルモニタが圧倒的に不足**

# 報告内容

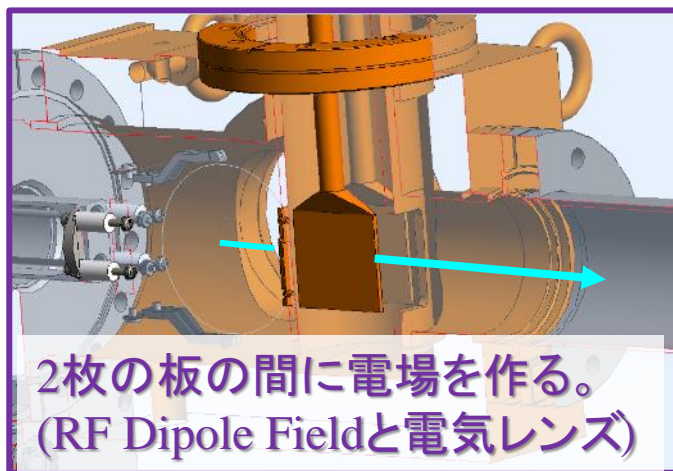
- 大強度陽子加速器とその利用
- J-PARC加速器
- リニアックビームモニタ
- 縦方向分布測定
  - 測定原理
  - J-PARCリニアックの現状と課題
  - 他施設の状況
  - J-PARCの取り組み
- まとめ

# BSMの構成

L3BT:BSM18を例に説明



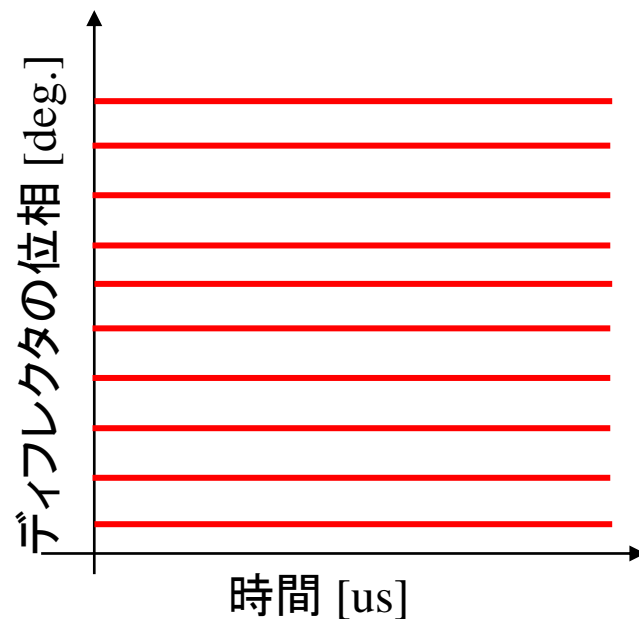
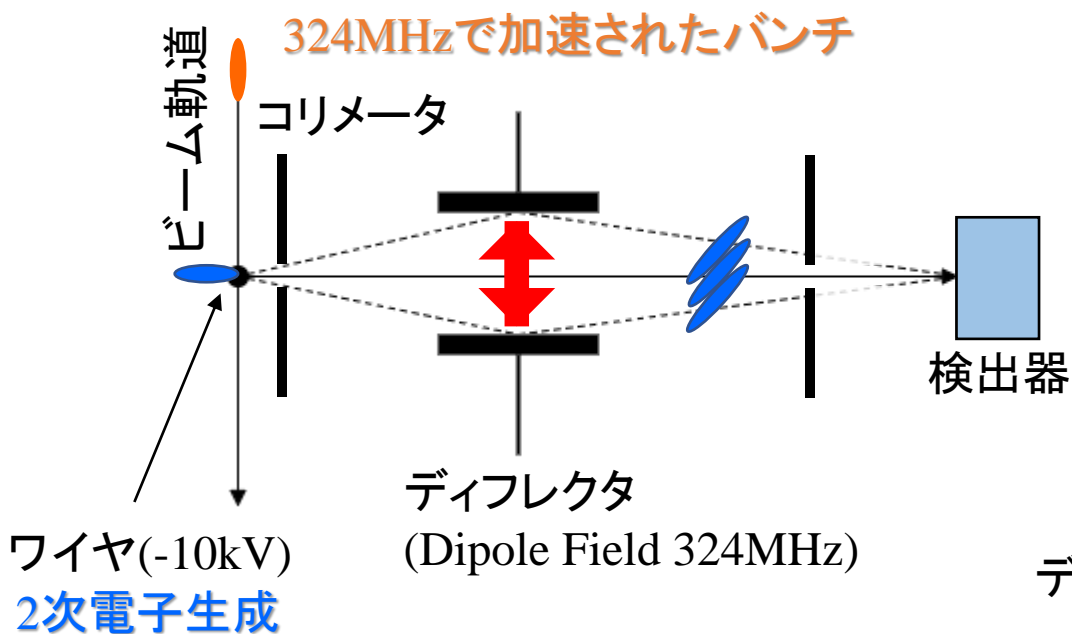
# BSMの測定原理 (概要)



時間構造を横方向分布に変換  
+従来の横方向分布の寄与を最小

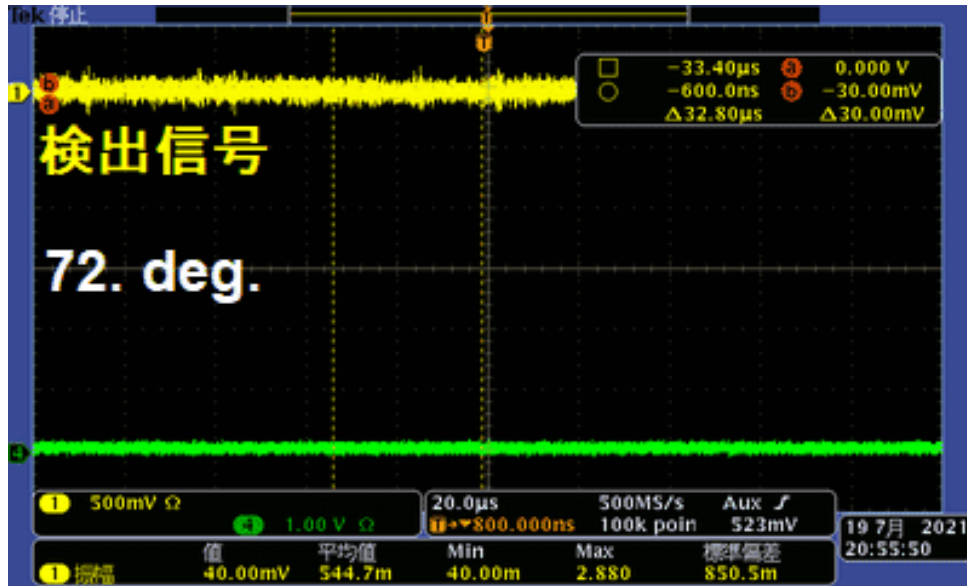
$$\sigma_{\text{measure}} = \sqrt{\sigma_{\text{Long.}}^2 + \sigma_{\text{Trans.}}^2}$$

$\sigma_{\text{Trans.}} \ll 1$ にできれば、 $\sigma_{\text{measure}} \approx \sigma_{\text{Long.}}$

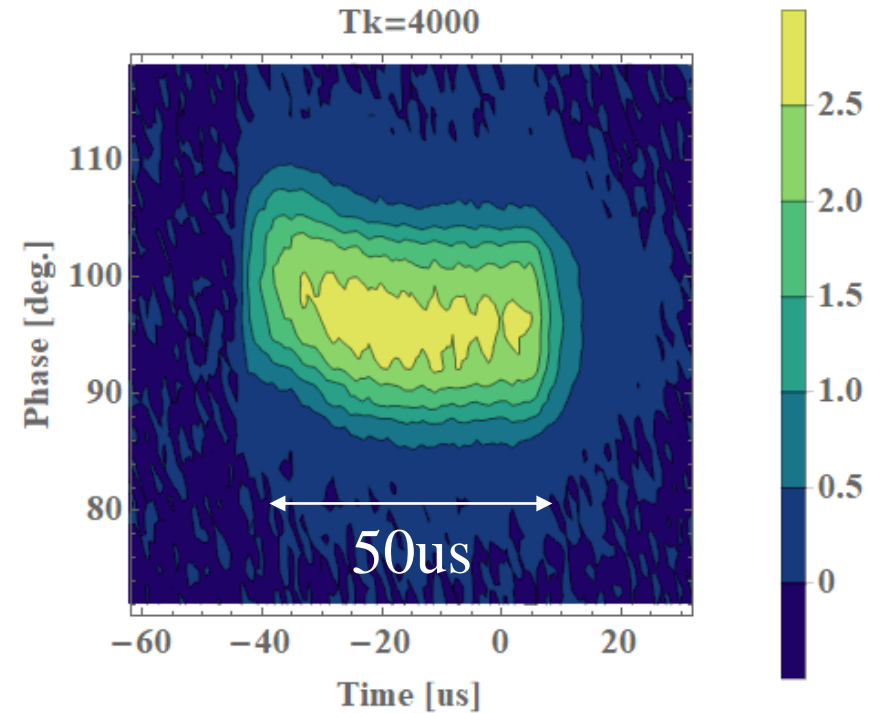


ディフレクタの位相を変えて電子を検出

# L3BT:BSMの測定結果

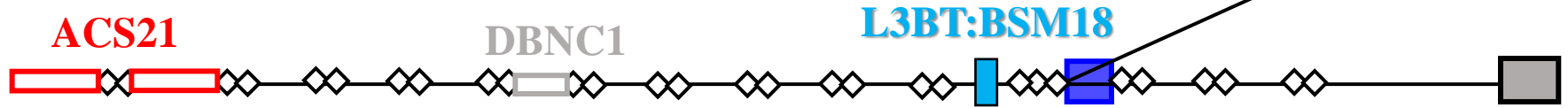


オシロスコープで取得した生波形

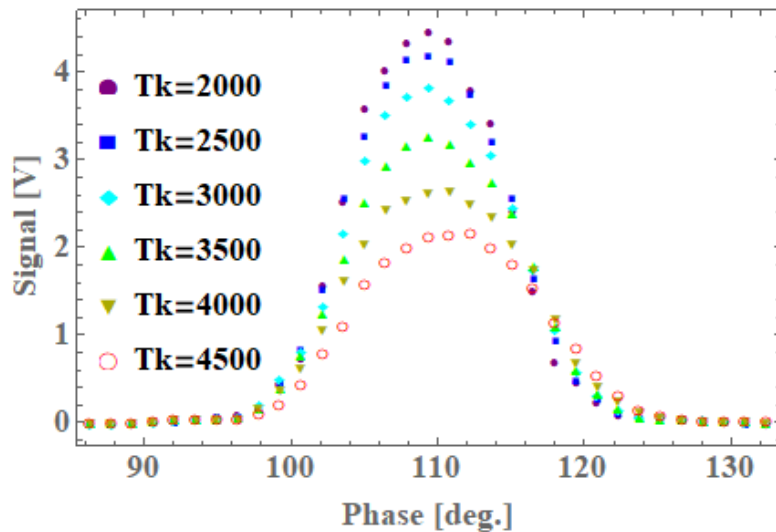


2次元画像化

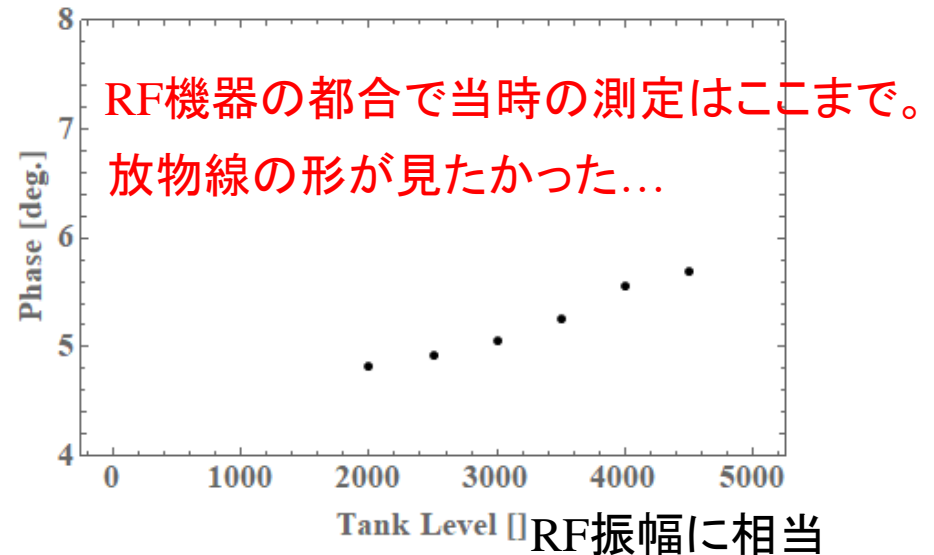
# RF振幅スキャン



RF振幅を変えて測定



縦方向分布



結果まとめ

2021年12月5日(日)にRF機器担当者と協力して再測定。

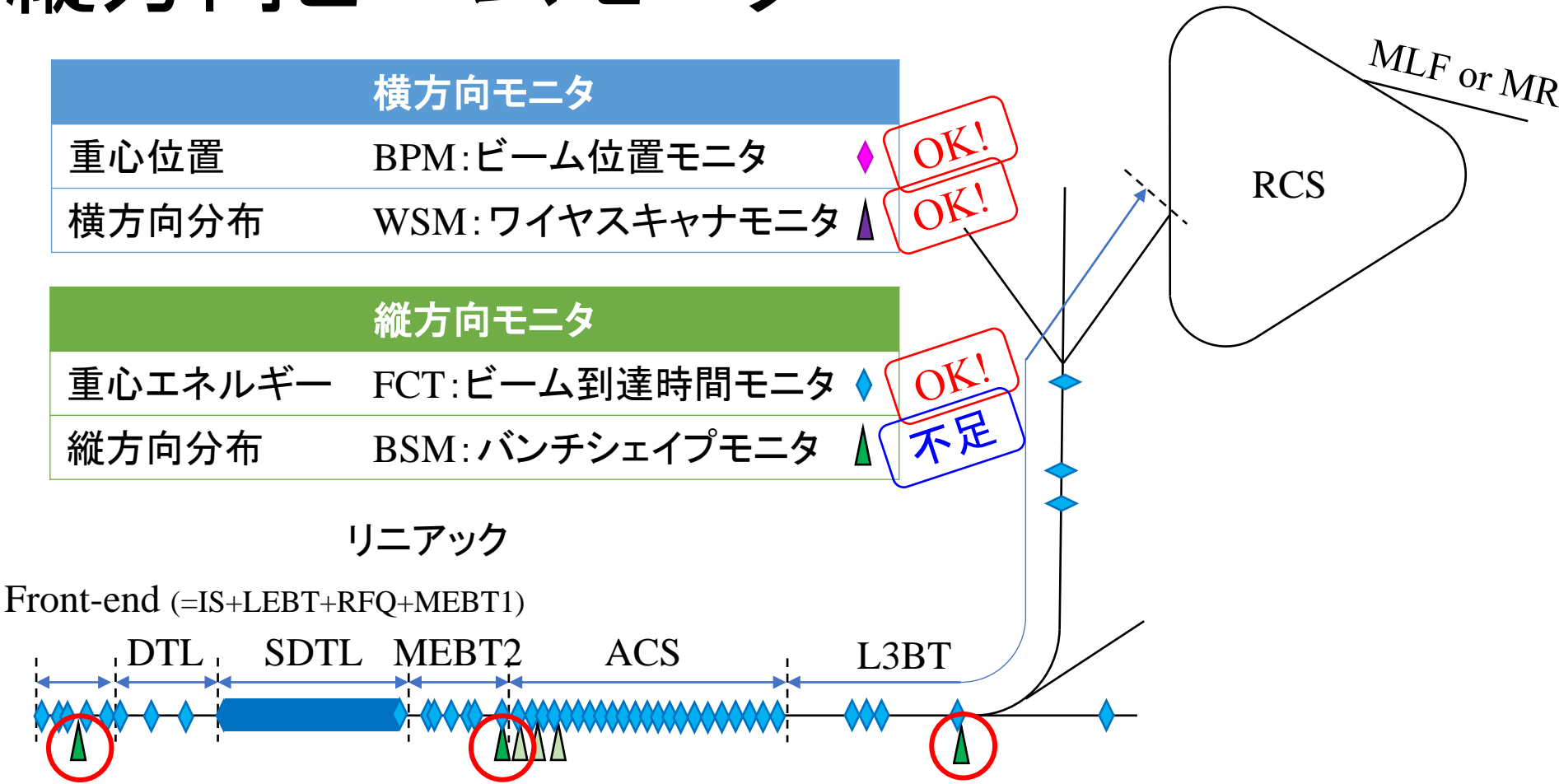
# 縦方向ビームモニタ

## 横方向モニタ

重心位置	BPM:ビーム位置モニタ	◆
横方向分布	WSM:ワイヤスキャナモニタ	▲

## 縦方向モニタ

重心エネルギー	FCT:ビーム到達時間モニタ	◆
縦方向分布	BSM:バンチシェイプモニタ	▲



**FCT** (非破壊測定) : ほぼ全ての加速空洞の上下流に設置  
**BSM** (破壊測定) : 一部セクションのみ

**ビーム測定可能なBSMの整備を進めていく。**



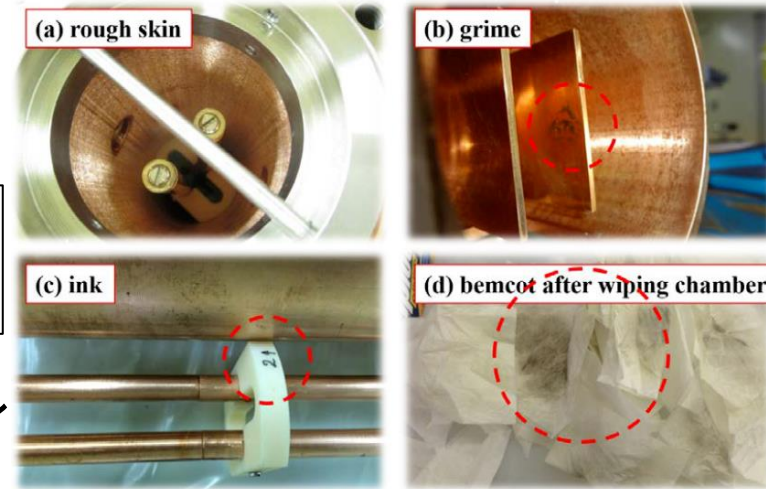
# J-PARC:BSMの課題

- 製作時期の違い (保守しづらい)
- ビームパラメータの算出
- 測定分解能の向上

# BSM設置の経緯

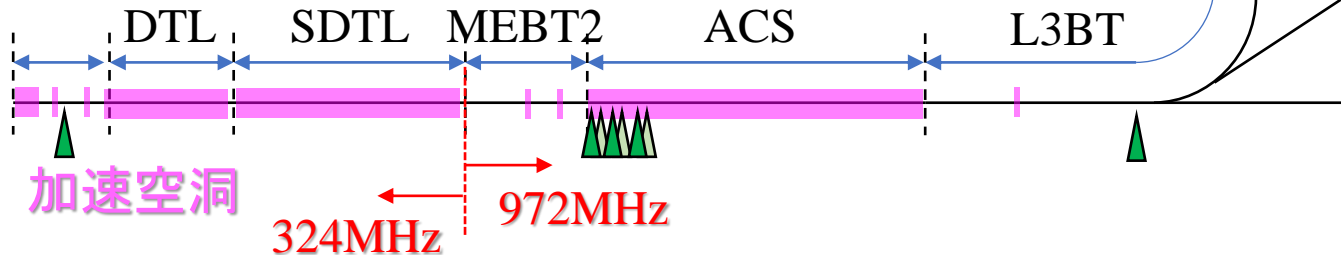
2013年夏にACSインストール  
⇒周波数が変わるため、縦方向測定が必要に。

- 1), BSMの開発者(Feschenko)をJ-PARCへ招待しJ-PARC用BSMを3台を製作。(2012年)
- 2), 超高真空用に加工していなかったため、空洞から離して1台だけ再設置。(2013年)
- 3), 超高真空用に製作したBSMを3台製作・設置(2015年)
- 4), 他の場所でもビーム縦方向を測定するために、DTL入射ビーム測定にMEBT1:BSMを設置(2016年)、ACS出射ビーム測定にL3BT:BSMを設置(2018年)



K. Futatsukawa et al., “Development of Bunch Shape Monitor at J-PARC Linac”, Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 5-7, 2015.

Front-end (=IS+LEBT+RFQ+MEBT1)



# 製作時期の違い

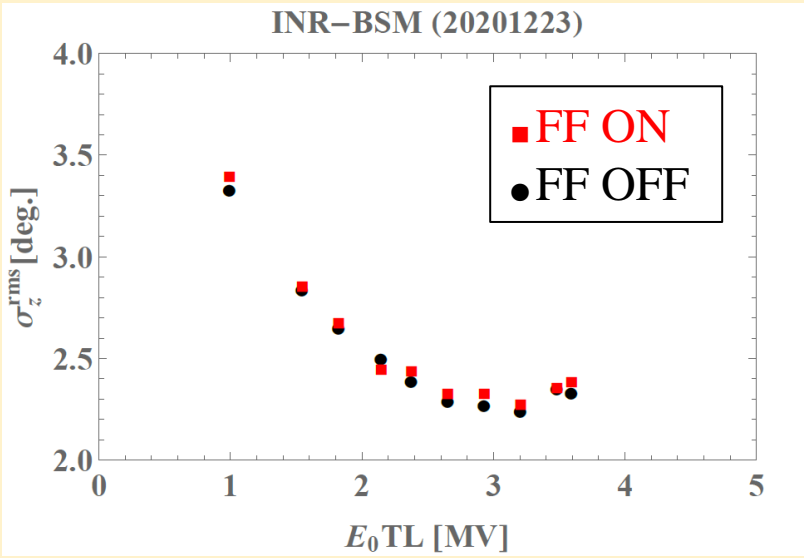
	2011	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
ACS	製作		設置	使用								
MEBT2:BSM ロシア製	製作	設置	使用	設置	使用							
ACS:BSM 日本製				製作	設置	調整						
MEBT1:BSM 日本製					製作	設置	調整		使用			
L3BT:BSM 日本製							製作	設置	調整		使用	

製作時期が違うため構成機器がバラバラ。保守しづらい。

※ビームライン上にワイヤを挿入するための駆動機構が異なる。  
(ステッピングモータの仕様変更)

# ビームパラメータ測定手法 (縦方向)

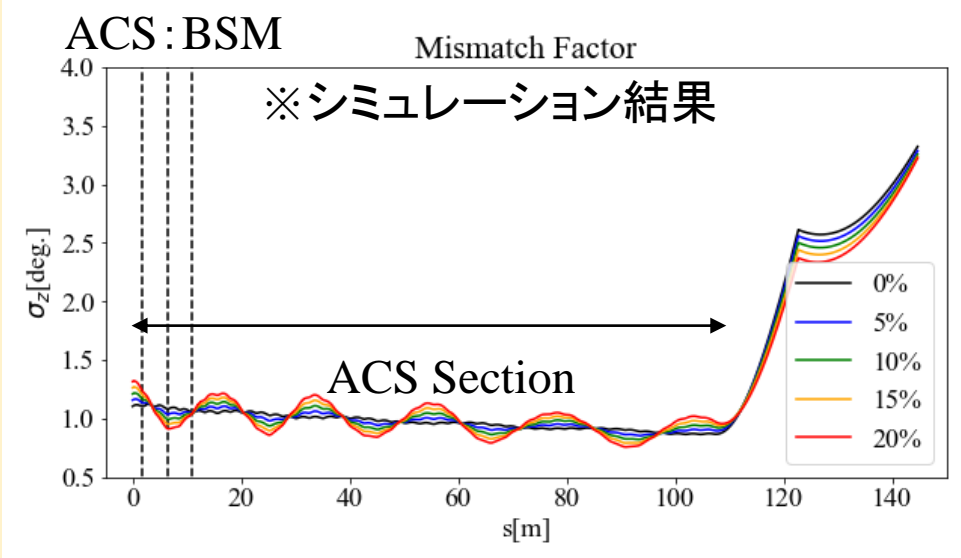
## 【モニタ1台+RF振幅スキャン】



例), MEBT2:BSM + MEBT2:B3  
(MEBT1やL3BTも同様)

測定はできた。  
ビームパラメータの算出はこれから。

## 【モニタ3台以上 + エンベロップ計算】

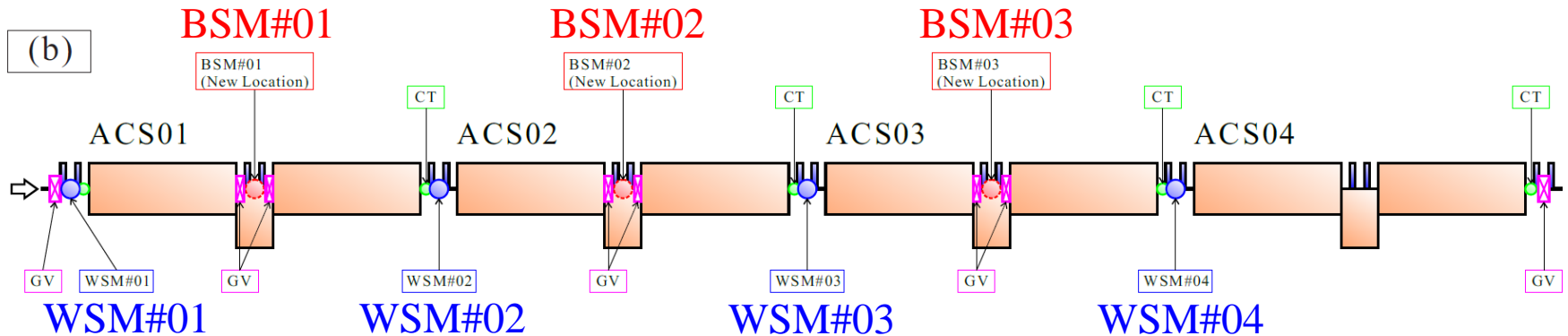


例), ACS:BSM

測定分解能は十分か?

# ACS:BSMの設置位置

PASJ2015 ニツ川氏の資料より図を引用



## 【疑問】

BSMの配置が近すぎるのでは?

(何故近くに置いたのか?)

## 【予想】

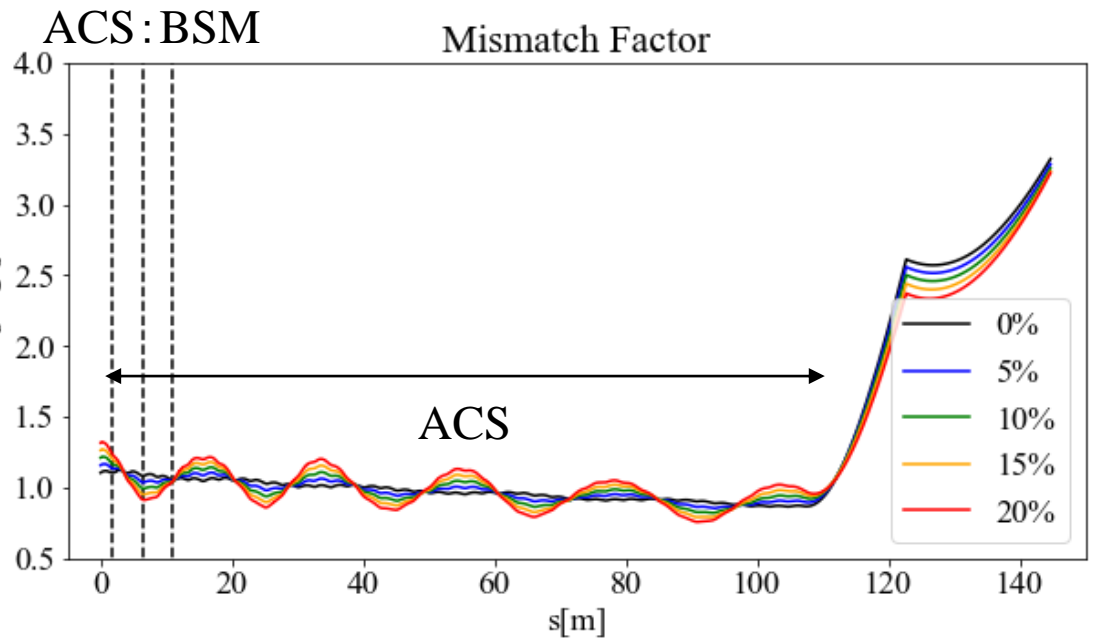
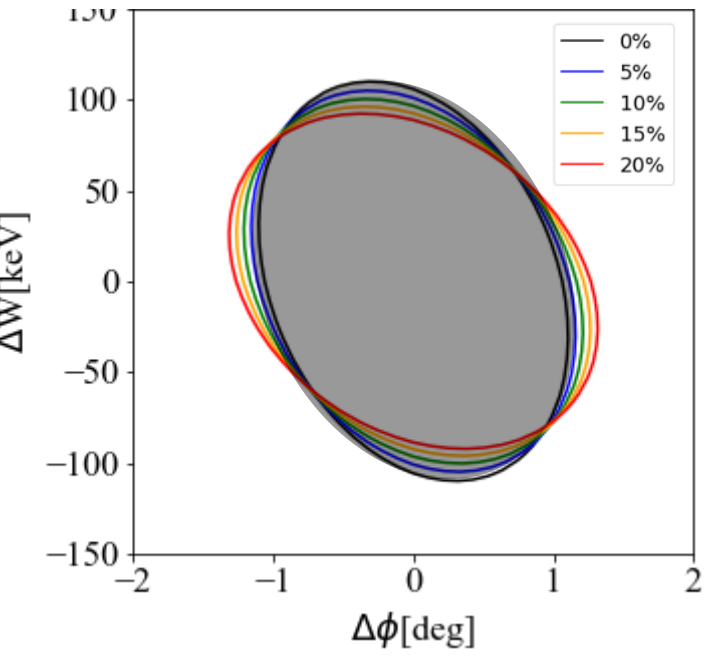
WSMと同様のマッチングツールを考えたため?

(RF振幅スキャンは行わない?)

現状のBSMの測定分解能でビームを測定できるか数値計算で検討

# ミスマッチファクタとビームサイズ変調

ACS入射時の縦方向初期条件

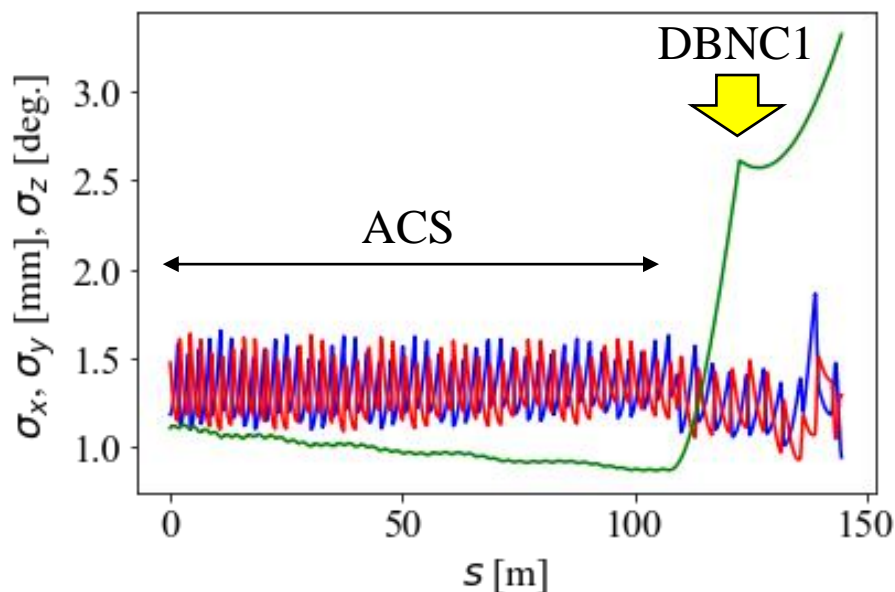


MF=20%の場合	
ACS:BSM1	1.2deg.
ACS:BSM2	0.9deg.
ACS:BSM3	1.1deg.

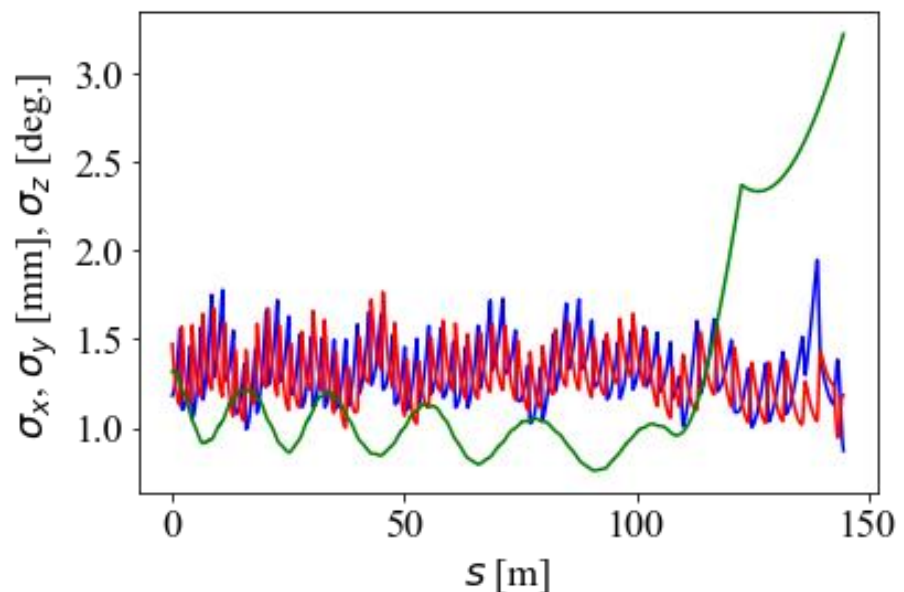
現状のBSMの分解能  
⇒ ±0.5deg.程度

WSMのようにエンベロップ計算からビームパラメータを求める方法では、縦方向のミスマッチに気付けない。

# ミスマッチ20%で何が起こるか



縦方向ミスマッチ 0%



縦方向ミスマッチ 20%

縦方向のミスマッチ(20%)により、横方向もミスマッチを起こす。

- ・縦方向 : BSMでミスマッチを検出不可
- ・横方向 : WSMでミスマッチを検出可

⇒ 本当は縦方向の問題にも関わらず、横方向の問題と勘違いしてしまう。

同様な問題は他の施設でも起きている。

# 報告内容

- 大強度陽子加速器とその利用
- J-PARC加速器
- リニアックビームモニタ
- 縦方向分布測定
  - 測定原理
  - J-PARCリニアックの現状と課題
  - 他施設の状況
  - J-PARCの取り組み
- まとめ

## SNSの報告

- 分解能の問題
- BSMの代替りとなる測定案
  - Laser
  - BPM ←こちらを紹介

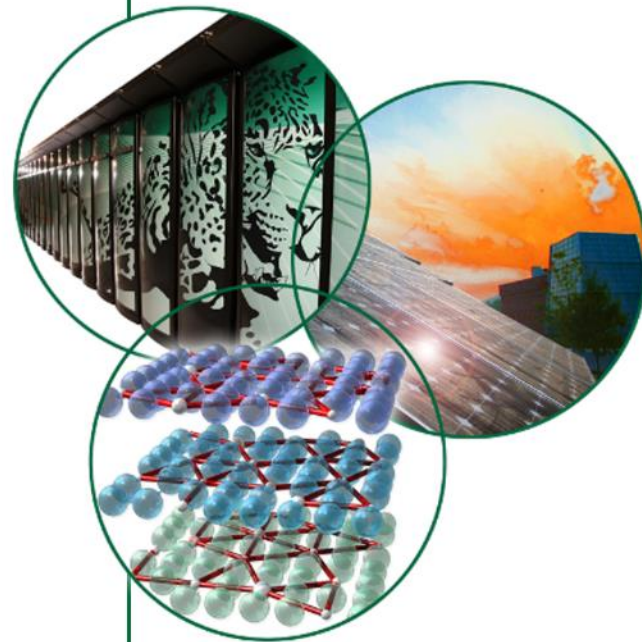


# SNSの報告 1 (BSM Workshop 2013)

## Experience with Bunch Shape Monitors at SNS

*A. Aleksandrov*

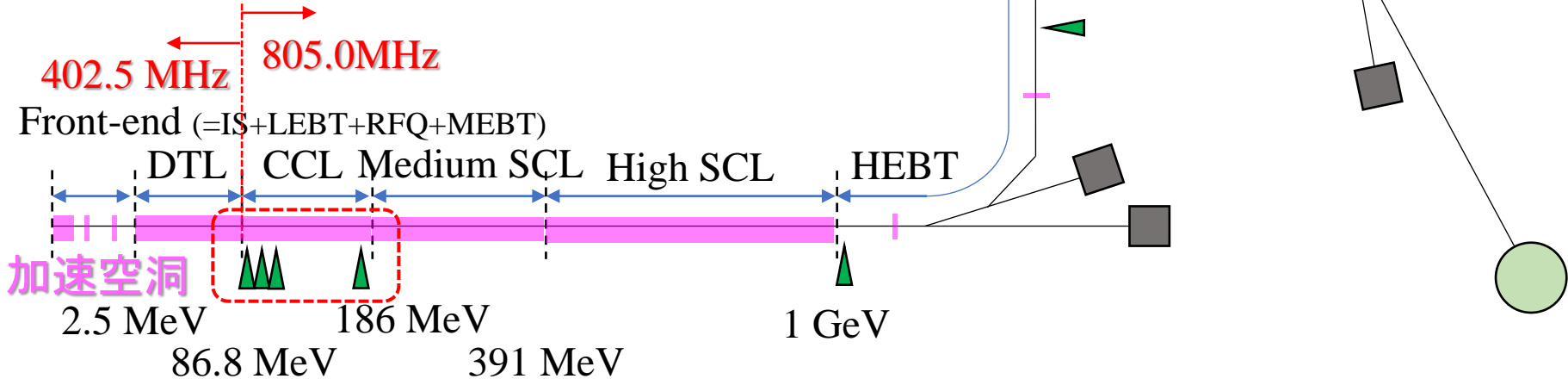
Spallation Neutron Source, Oak Ridge, USA



# SNSのBSM配置

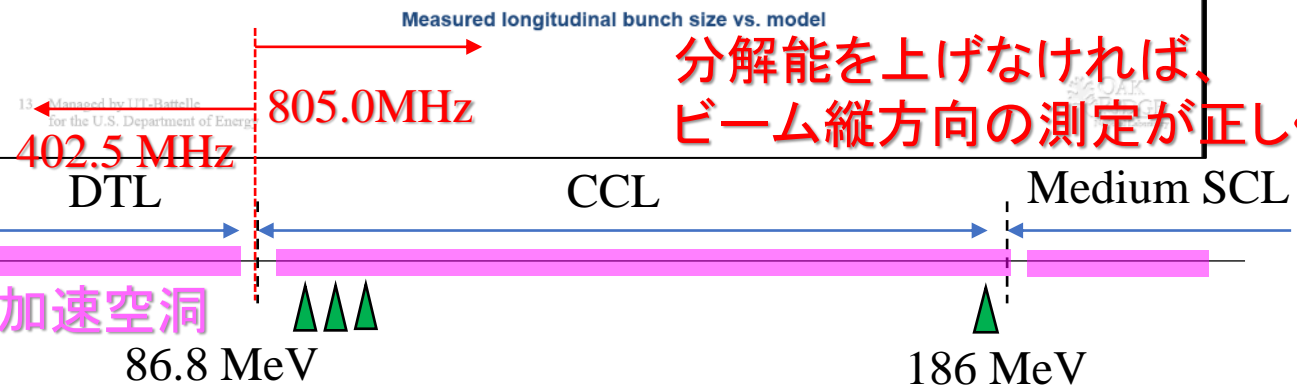
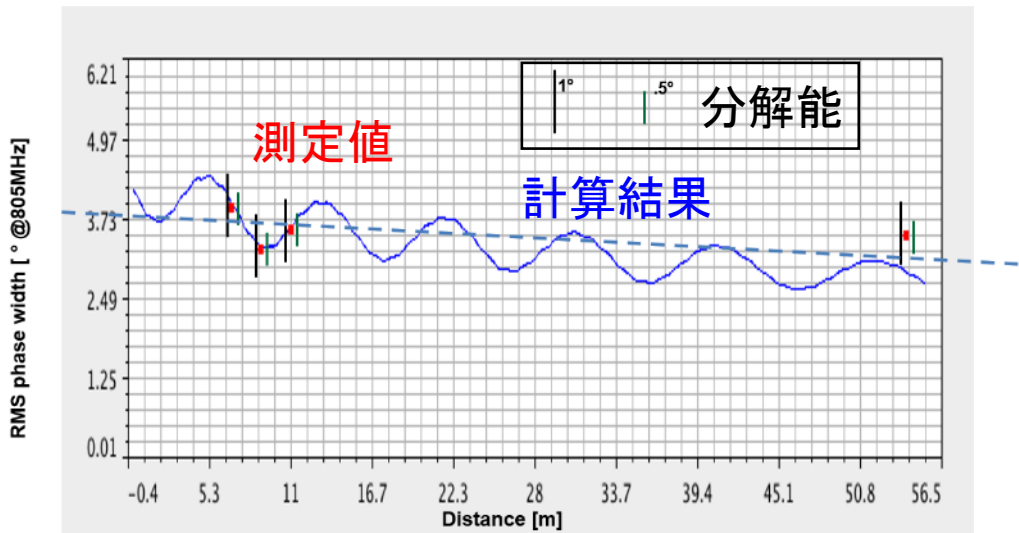
	SNS	J-PARC
Ion Species	H-	H-
Beam Current	38 mA	50 mA
Pulse Length	1000 us	500 us
Linac Ext. Energy	1000 MeV	400 MeV
Frequency	402.5, 805 MHz	324, 972 MHz
Repetition Rate	60 Hz	25 Hz
Downstream of Linac	Accumulator Ring	Rapid Cycling Synchrotron

物理量	縦方向モニタ
縦方向分布	BSM ▲



# エンベロープ計算結果と比較

High measurement resolution and accuracy is required to predict beam envelope



分解能を上げなければ、  
ビーム縦方向の測定が正しくできない。

# SNSの今後の方針

## Future Goals and Plans

- Experimental study of longitudinal emittance evolution in SNS linac
  - We trust longitudinal emittance measurements at CCL exit (BSM410)
  - Need to measure with confidence emittance at CCL entrance
    - Repair BSM107, modify BSMs 107,109
  - Measure longitudinal emittance in SNS MEBT
    - Laser based diagnostic, not BSM
- BSM development
  - Laser based BSM concept development (in collaboration with INR, A. Feschenko, Gavrilov)
    - Not high priority
  - Short pulse 266nm laser for off-line BSM testing
    - In progress
  - 2.5MeV Beam Test Stand Facility
    - In progress
  - New high-resolution BSM design
    - Interested, but do not have resources currently

21 Managed by UT-Battelle  
for the U.S. Department of Energy



BSMの精度向上よりもLaserを用いた計測を検討

# SNSの報告 2 (NA PAC 2013)

## Novel Methods for Experimental Characterization of 3D Superconducting Linac Beam Dynamics



*Andrei Shishlo,  
SNS, Accelerator Physics Group  
NA PAC 2013, Pasadena, CA*

*October 1, 2013*

Managed by UT-Battelle  
for the Department of Energy

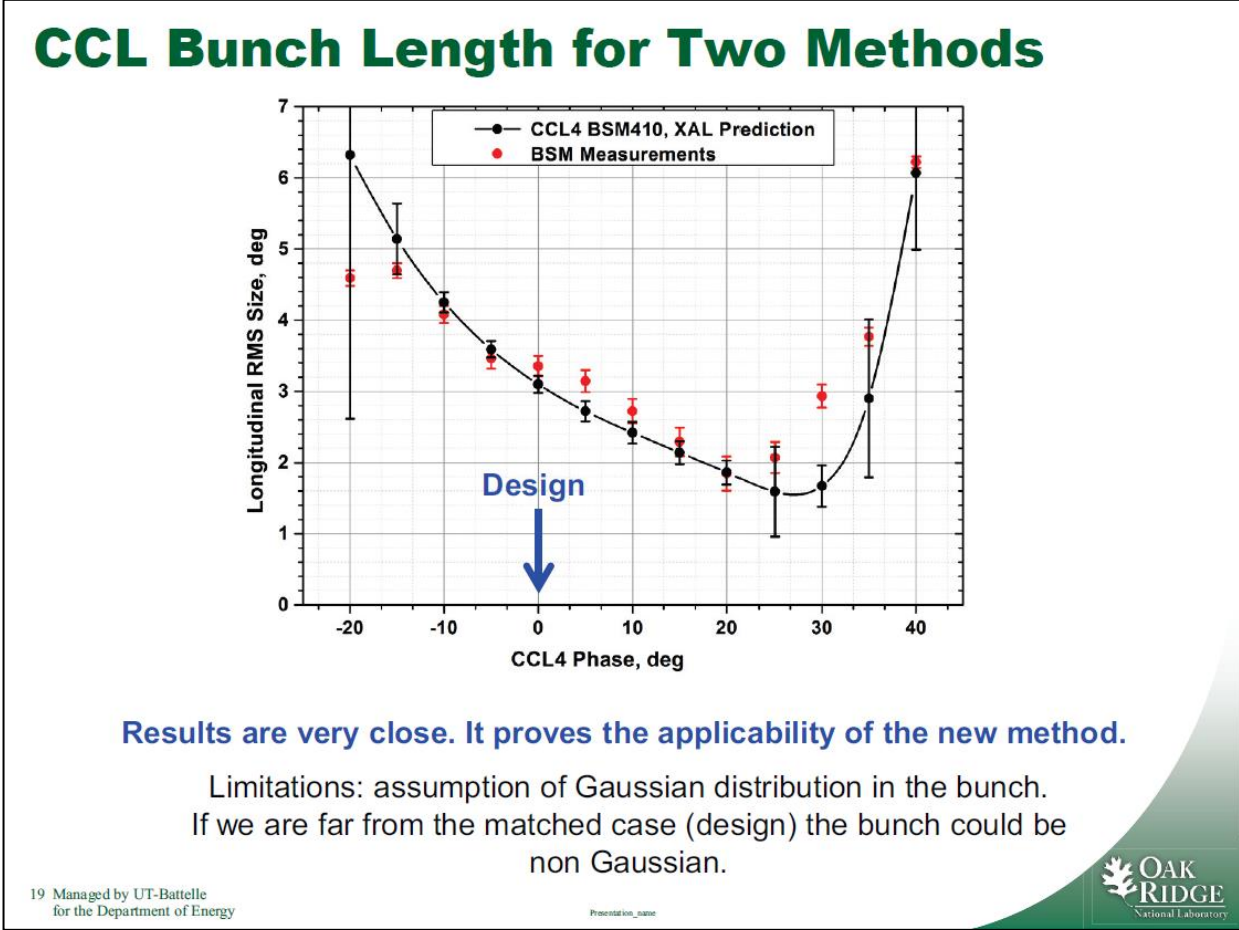


# BPMを用いた縦方向ビームサイズ測定

## How to Measure Longitudinal Twiss

- **We can use Bunch Shape Monitors**
  - For SNS they are in the CCL, which is a very long structure with many RF gaps. Data will be very sensitive to the model.
- **We can try to use Beam Position Monitors (BPM) as analogs of wire scanners to measure the longitudinal RMS size of the bunch**

# 測定結果の比較



A. Shishlo, A. Aleksandrov, Phys. ST Accel. and Beams 16, 062801 (2013).

J-PARCでも測定可能かShishloに聞いてみると、  
BPMの種類が違うためできないと思うとのこと。(詳細な検討はしていない。)

# 報告内容

- 大強度陽子加速器とその利用
- J-PARC加速器
- リニアックビームモニタ
- 縦方向分布測定
  - 測定原理
  - J-PARCリニアックの現状と課題
  - 他施設の状況
  - J-PARCの取り組み
- まとめ



# できることを少しずつ実施中

- 保守しやすい機器への入れ替え
- ACS:BSMの調整
- 測定精度の向上検討  
or 設置位置の再検討
- 測定精度の改善に向けた  
BSMの電子拳動シミュレーション
- 非破壊BSMの検討 (科研費)

# 夏期休暇実習制度の紹介

JAEAでは学生インターン(夏期休暇実習)を実施しています。



目的: 学生に原子力について**広く学ぶ機会を提供し、**  
**原子力分野の人材育成に資するため。**

# 令和3年度の実施例

実習生3人 : D2(広大:小島さん)、M1、B4



## D2実習生の実習内容

- 1週目 ビームモニタの勉強、加速器見学
- 2週目 BSMオフライン試験、実習報告
- 3週目 BSM用数値計算コードの構築



RCS見学

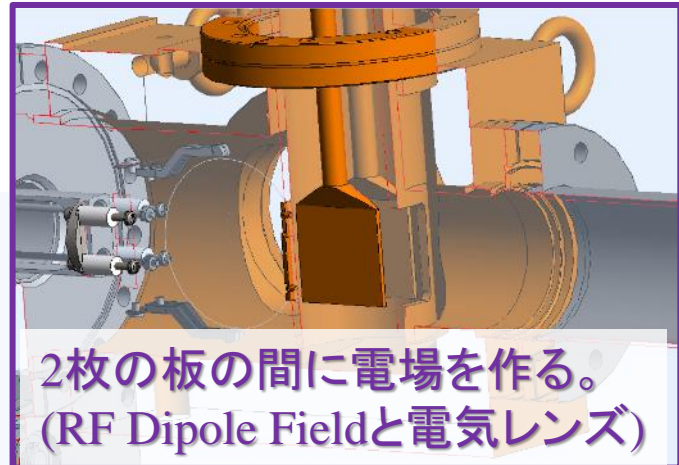


SDTL内部の見学

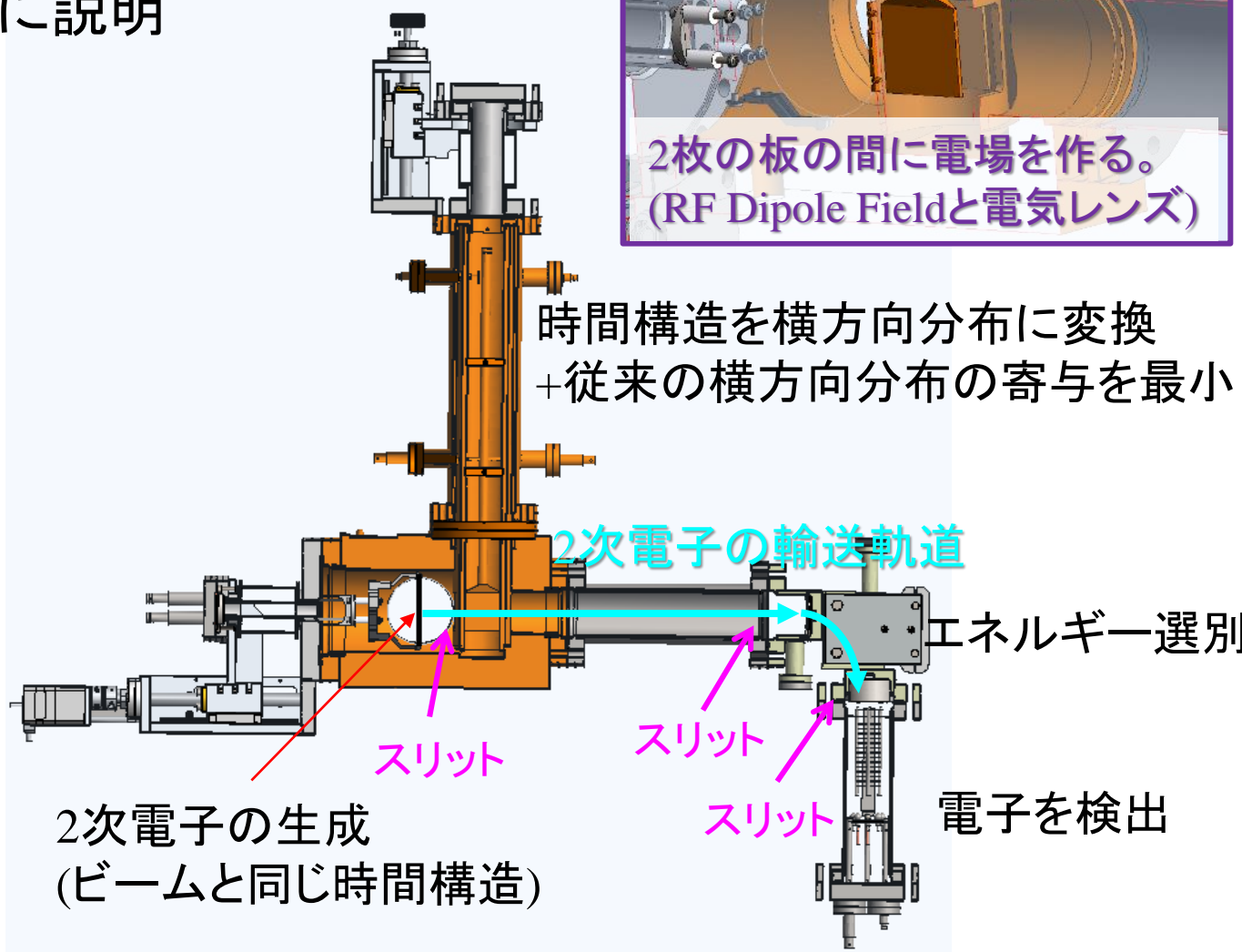
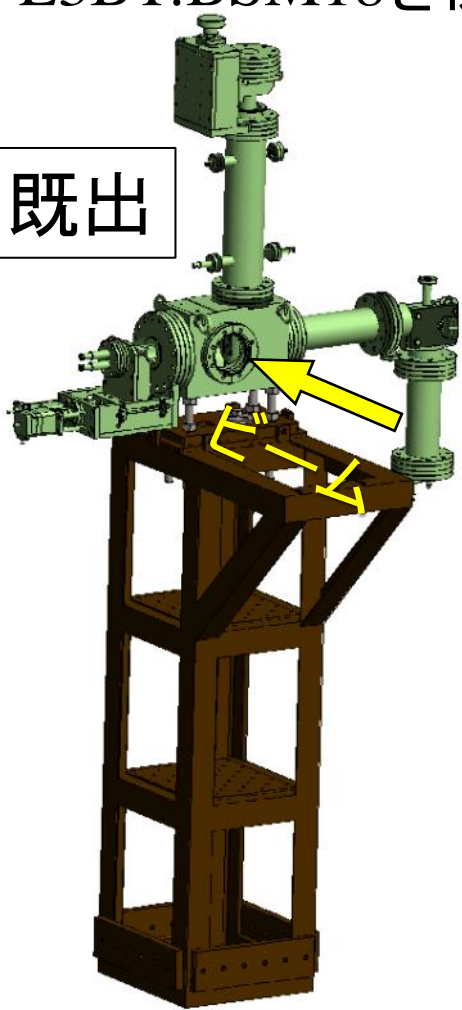
一般公開では見れない場所へ行けたり、  
普段見れない実験装置の見学が可能。

# BSMの構成機器の役割

L3BT:BSM18を例に説明



既出

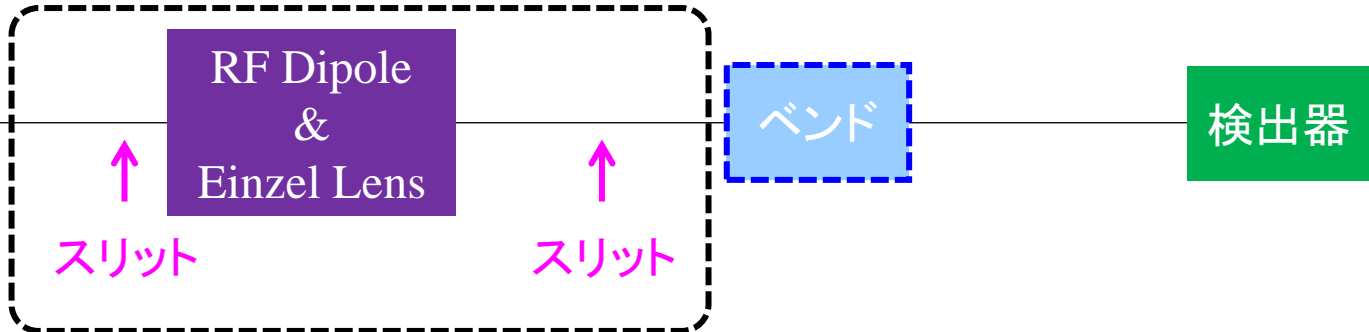


電子生成後の挙動をシミュレーション

# 各機器の役割 (概要図)

【水平方向】

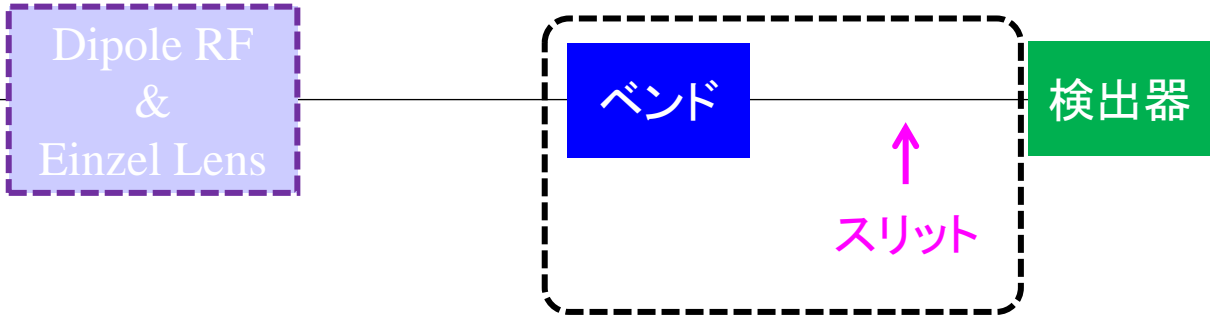
電子源  
-10keV



縦方向分布を横方向分布に変換

【垂直方向】

電子源  
-10keV



エネルギー選別

課題: 電子の輸送過程を数値計算で実現  
※ 広島大学の小島さん(D2)が1週間で対応



広島大学ビーム物理研究室では、PICコード”Warp”を用いて数値計算を実施中。

## Warp コード

大強度ビームのシミュレーションを念頭にローレンス・バークレイ国立研究所で開発された PIC コード。様々な機能を python インタープリタで簡単に呼び出せる。ソースコードの殆どが python で書かれており、再コンパイルなしで多様な問題に対応できる。

### イオントラップ実験

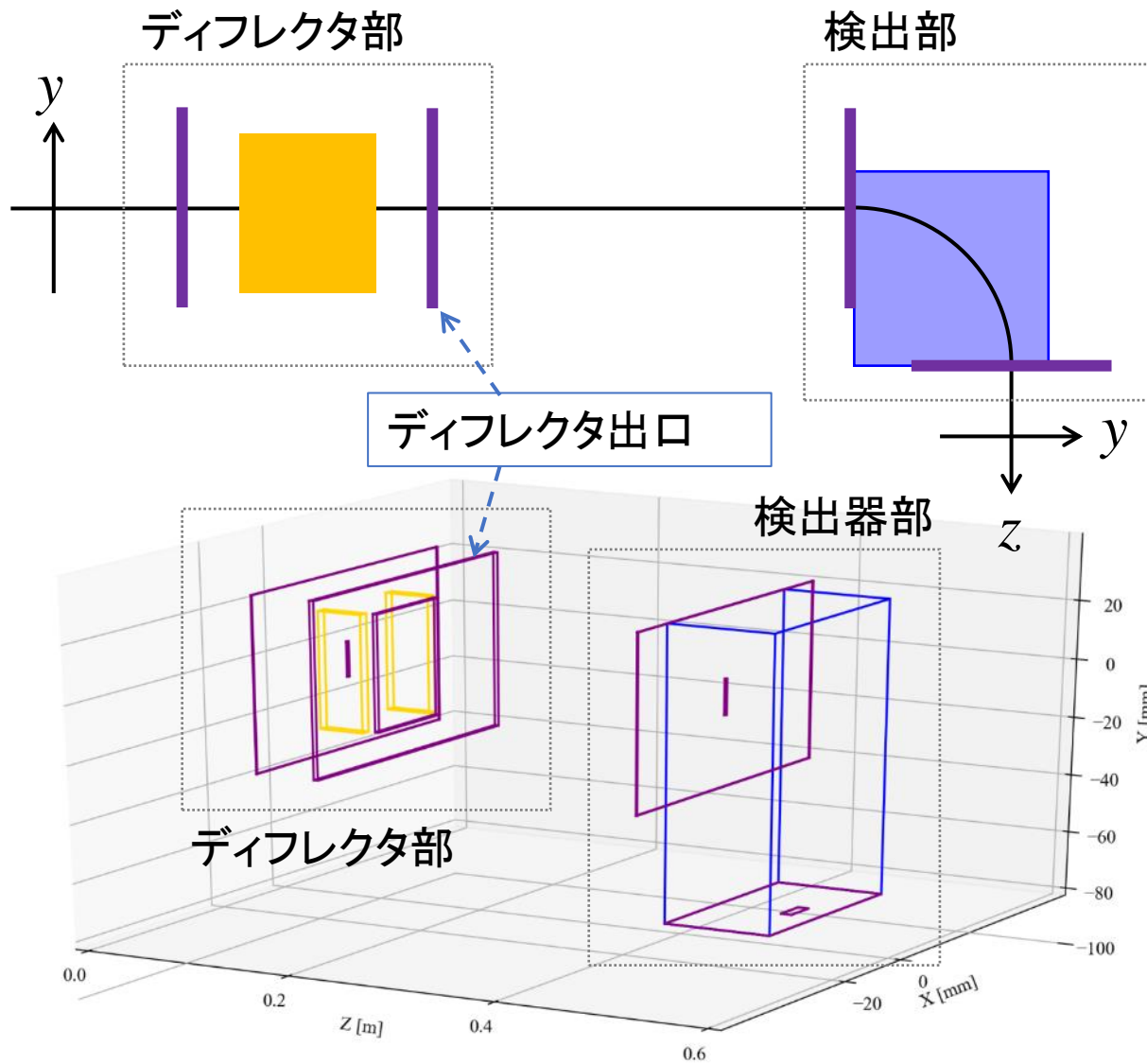
- ◆ 粒子種：アルゴン
- ◆ 外場：線形な電場
- ◆ 重心エネルギー：0



### BSM

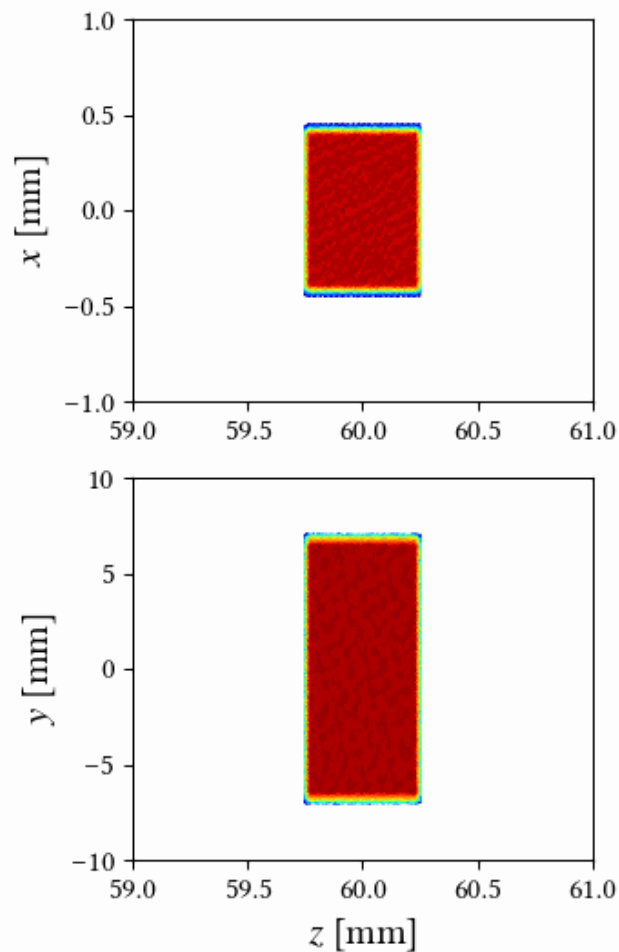
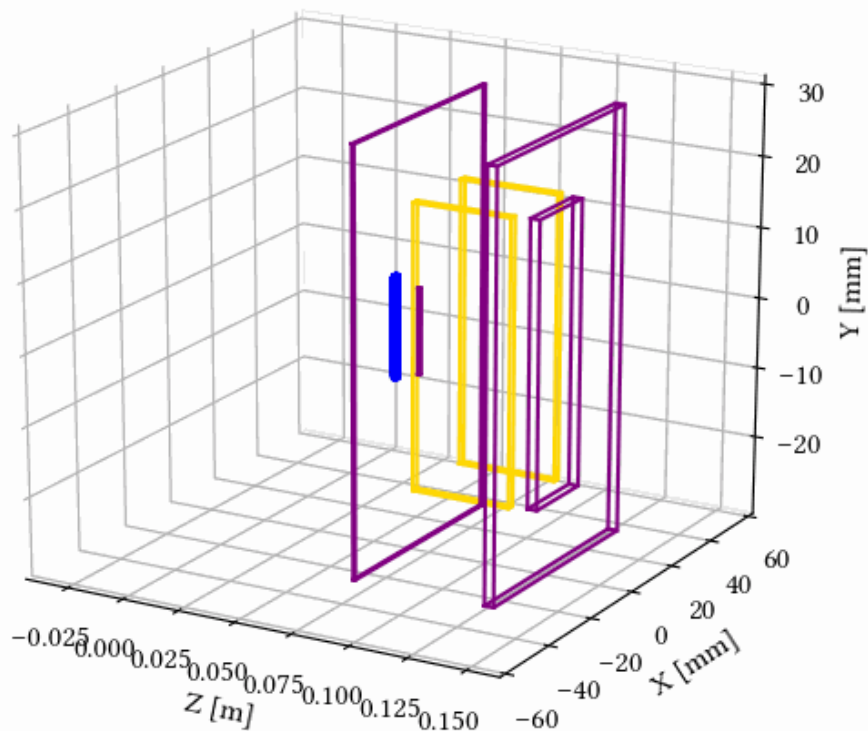
- ◆ 粒子種：電子
- ◆ 外場：電極が生む電場  
BM の磁場
- ◆ 重心エネルギー：10 keV  
(本来は重心位置に応じて動く  
計算領域を今回は固定)

# 計算条件(コンポーネント) 資料提供 小島さん(広大)



# シミュレーション結果

資料提供 小島さん(広大)



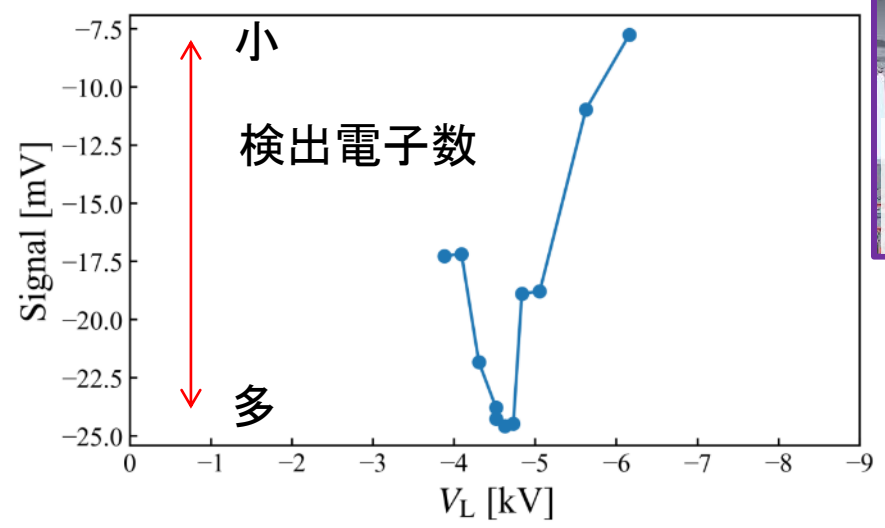
BSMの電子挙動シミュレーションコードが構築できた



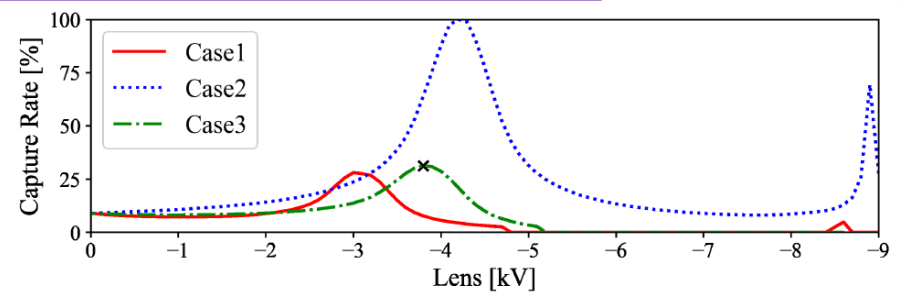
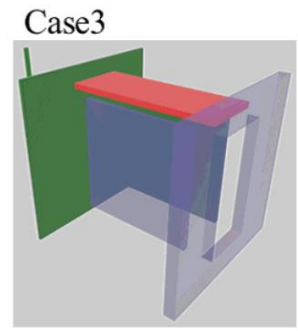
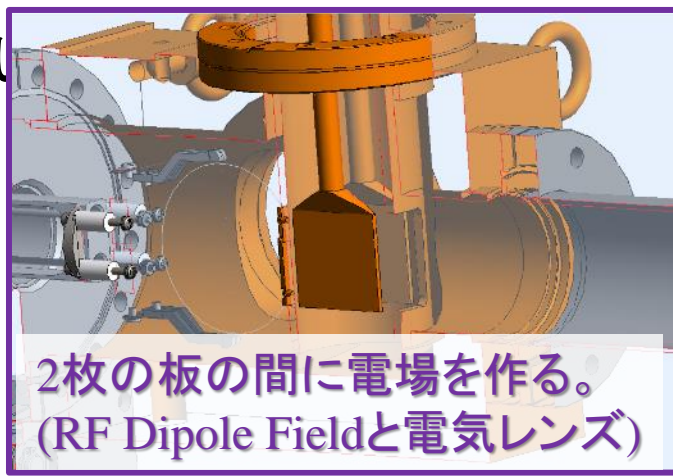
# 測定と計算結果の比較

資料提供 小島さん(広大)

電気レンズが作る収束力について



測定結果: -4.5V付近にピーク



計算結果: -4.0V付近にピーク

実際の電極構造等の再現が必要と判明。  
さらにシミュレーションを進めていく。

# まとめと今後

- ・J-PARCリニアックでは、バンチシェイプモニタ(BSM)を用いて縦方向ビーム分布を測定している。
- ・現在、稼働しているBSMはMEBT1/MEBT2/L3BTの3箇所さらにビーム測定可能なBSMの整備を進めていく。
- ・J-PARC:BSMの課題は以下の3つ
  - 構成機器が異なることによる保守性の悪さ
  - ビームパラメータの算出
  - 測定分解能の向上
- ・他施設(SNS/ORNL: 米国)でも測定分解能が問題に。
  - Laserを用いた新たな測定やBPMを用いた測定
- ・測定精度の改善に向けたBSMの数値計算を進めている。
  - ※小島邦洸さん(D2: 広島大学)の協力により実現