



# LバンドRFデフレクタによる SACLA入射部での電子ビーム時間構造測定

## Temporal Structure Measurement of an Electron Beam at the SACLA Injector Using an L-band Deflector

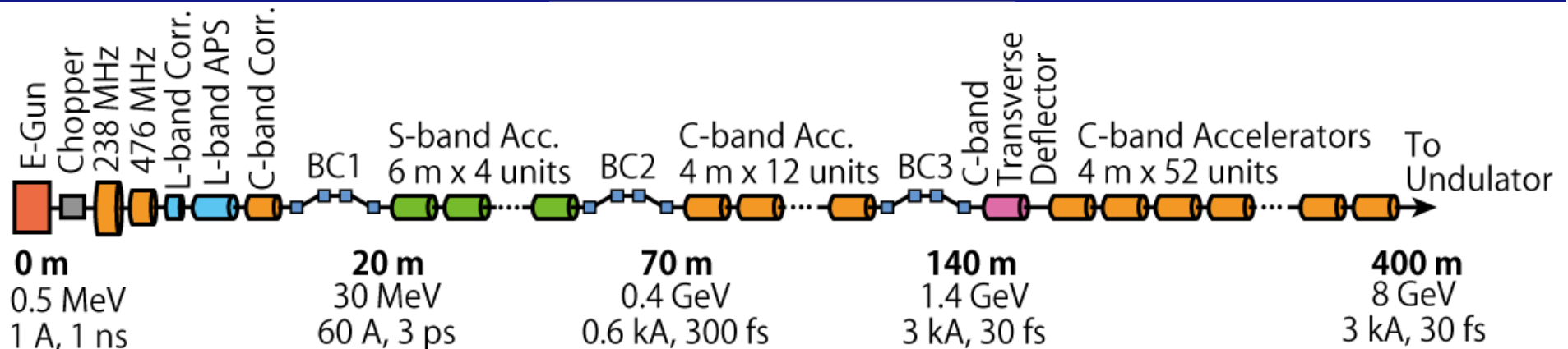
前坂 比呂和<sup>1</sup>、大島 隆<sup>1,2</sup>、松原 伸一<sup>2</sup>、  
原 徹<sup>1</sup>、田中 均<sup>1</sup>、大竹 雄次<sup>1</sup>

1: 理研 放射光科学総合研究センター

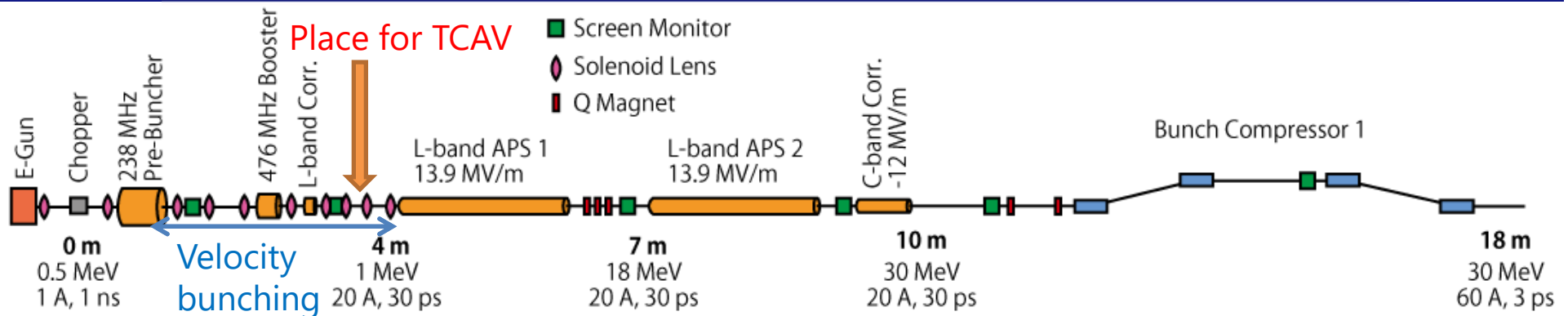
2: 高輝度光科学研究センター

2017年8月3日

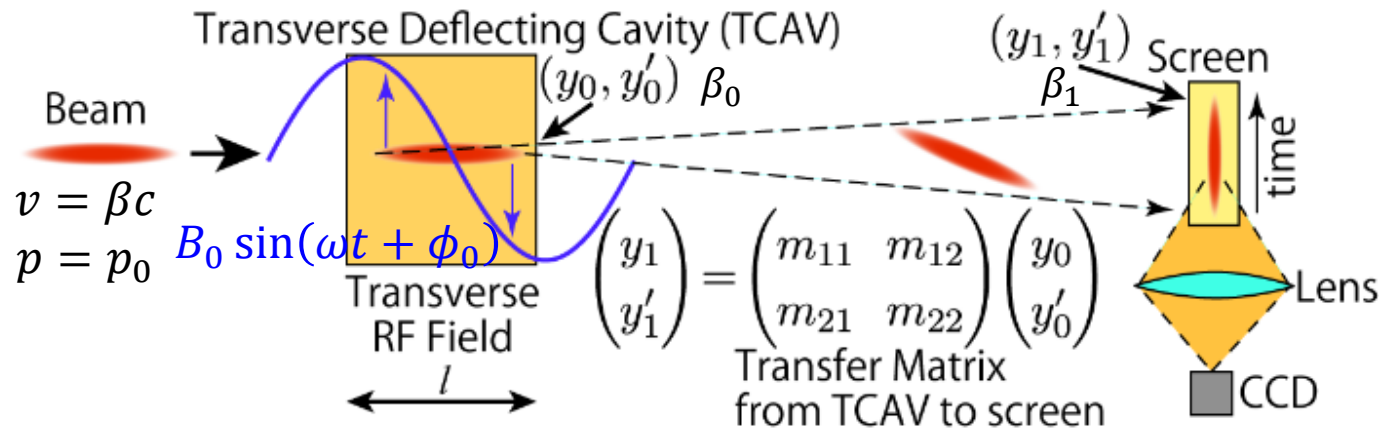
- はじめに
  - X線自由電子レーザー SACLA
  - 入射部での時間構造測定の必要性
- RFデフレクタシステムの概要
  - ビームパラメータと要求性能
- RFデフレクタの偏波制御
  - 直線偏波・円偏波 と 時間分解能・測定レンジ
- レバンドRFデフレクタ空洞の設計・製作
  - 電磁界シミュレーション
  - 低電力RF測定
- 電子ビームの時間構造測定
  - 通常的时间構造測定
  - エネルギー対時間 位相空間分布
- まとめ



- XFEL を安定に生成するには、極短バンチを安定に作る必要がある
  - 入射部での速度変調バンチング
  - 3台のバンチ圧縮器での、行路長のエネルギー依存性を利用したバンチ圧縮
- バンチ圧縮の調整には、時間構造測定システムが不可欠
  - BC3の下流にCバンドデフレクタ (C-TDS) を設置
  - C-TDS は BC2, BC3 の調整に有効
- 入射部の時間構造は、すべての初期条件を決めるため、かなり重要
  - BC1上流に5種類の加速ユニットが存在するため、調整が複雑
- 入射部での時間構造測定をするのが近道



- RFデフレクタ空洞 (TCAV) の設置場所
  - 速度変調バンチングの終端部のLバンドAPS空洞上流とする
  - エネルギーが 1 MeV 程度なので 数 10 kV 相当のキック力があればよい
- バンチ長の測定レンジ: 10 ps – 1 ns (通常 約 30 ps)
  - 10 ps 程度の短バンチに対しては、大きなキック力で分解能を稼ぐ必要あり
  - 100 ps 以上の長バンチを測定するには、低めの周波数のほうがよい  
→ Lバンド 1428 MHz とする
- ソレノイドレンズの進行方向磁場による、掃引した像の回転に配慮が必要
  - 時間軸をわかりやすくするには、偏波面の制御ができることが望ましい
- スクリーンモニタは LバンドAPS空洞の下流となる
  - 1 MeV の低エネルギービームは LバンドAPS空洞で加速しないとスクリーンまで到達しない
  - LバンドAPS空洞でのビームの振る舞いも考慮する必要がある



- RFデフレクタ空洞 (TCAV) による横方向キックにより、電子ビームを掃引し、そのビーム形状を取得する
  - RF位相はゼロクロスに合わせる

- TCAV の横方向キック力 (TM110 モード)

$$F_y = -e\beta c B_0 \sin(\omega t + \phi_0)$$

- TCAV が与える横方向運動量

$$p_y = \int_{-\frac{l}{2\beta c}}^{\frac{l}{2\beta c}} F_y dt = -eB_0 l T \sin \phi_0 \simeq -eB_0 l T \phi_0$$

$$T \equiv \sin \frac{\omega l}{2\beta c} / \frac{\omega l}{2\beta c} \quad (\text{transit time factor})$$

- キック角

$$y'_0 = \frac{p_y}{p_0} \simeq -\frac{eB_0 l T \phi_0}{p_0}$$

- 時間分解能

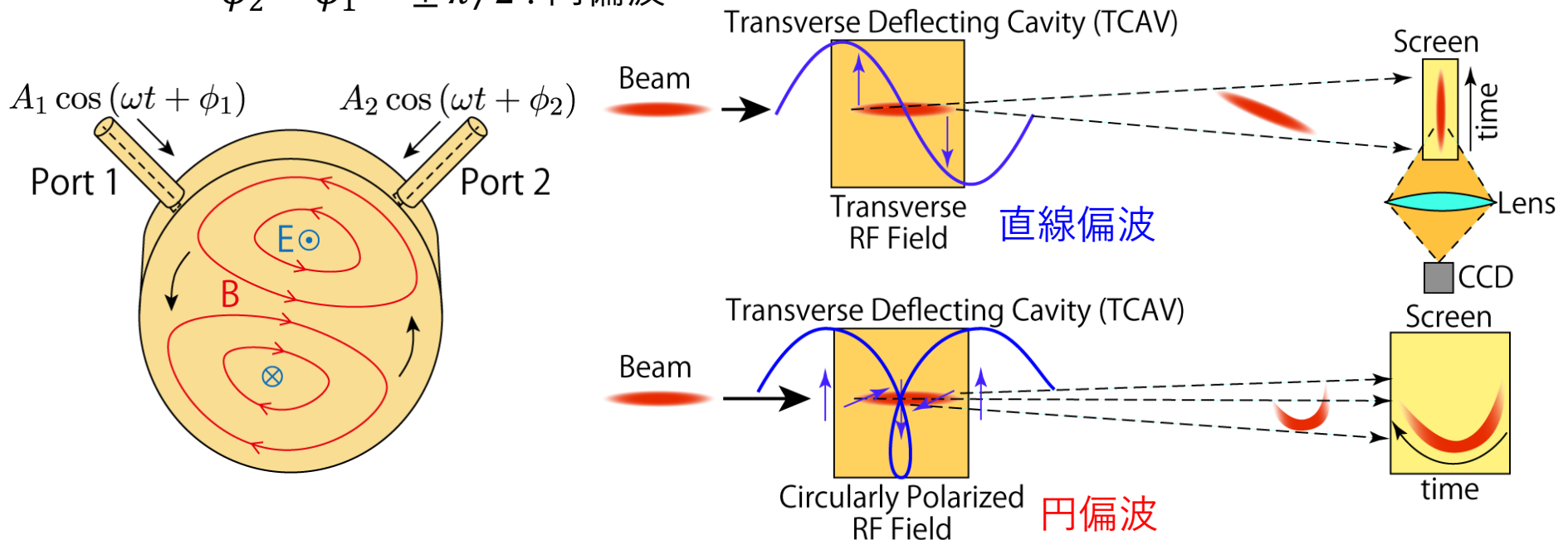
$$\sigma_t = \frac{p_0 \sigma_y}{|m_{12}| e B_0 l T \omega}$$

$\sigma_y$ : スクリーン上のビーム半径

$$m_{12} = \sqrt{\beta_0 \beta_1} \sin \psi$$

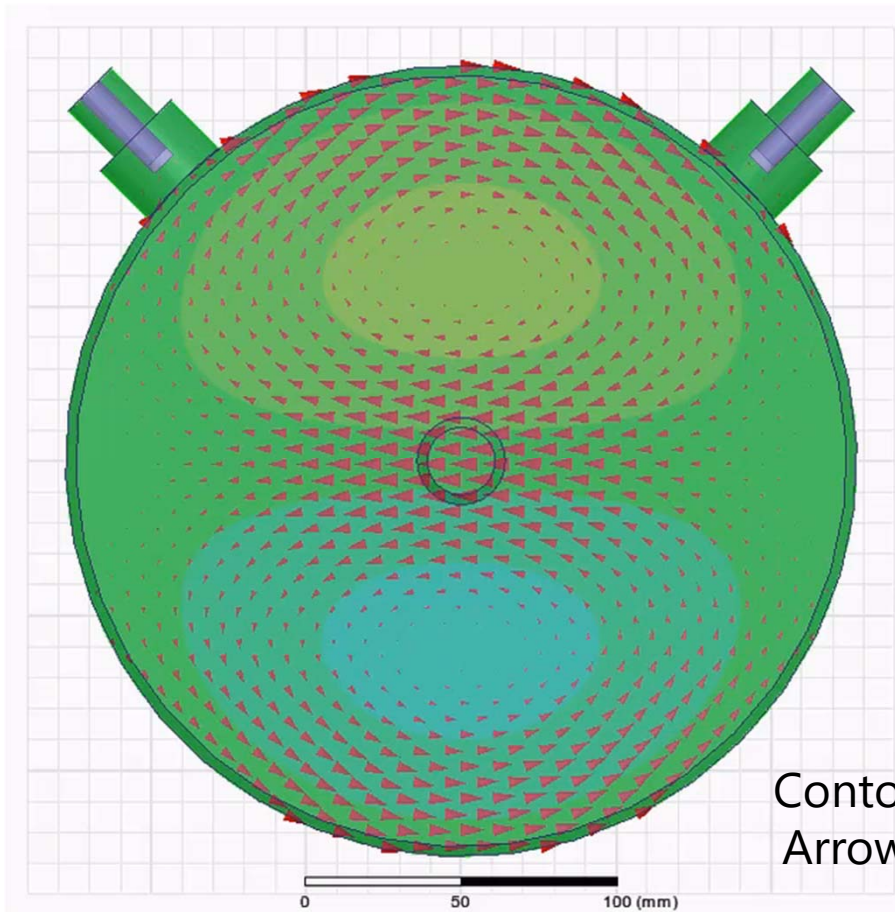
$\psi$ : TCAV, Screen 間のベータatron位相差

- 通常のRFデフレクタシステムでは、正弦波の線形部分しか使えない
  - キック方向も固定
- 円偏波を使うことで、RFの周期全体が使える
- 直交する2つのポートからRFを供給すれば偏波を制御可能
  - TM110モードは直交する2つのモードが縮退
  - それぞれのモードをそれぞれのポートから励振
- 偏波は各ポートの位相差で選択可能
  - $\phi_2 - \phi_1 = 0 \text{ or } \pi$ : 直線偏波 (直線偏波では各ポートの振幅で偏波方向を制御可能)
  - $\phi_2 - \phi_1 = \pm \pi/2$ : 円偏波



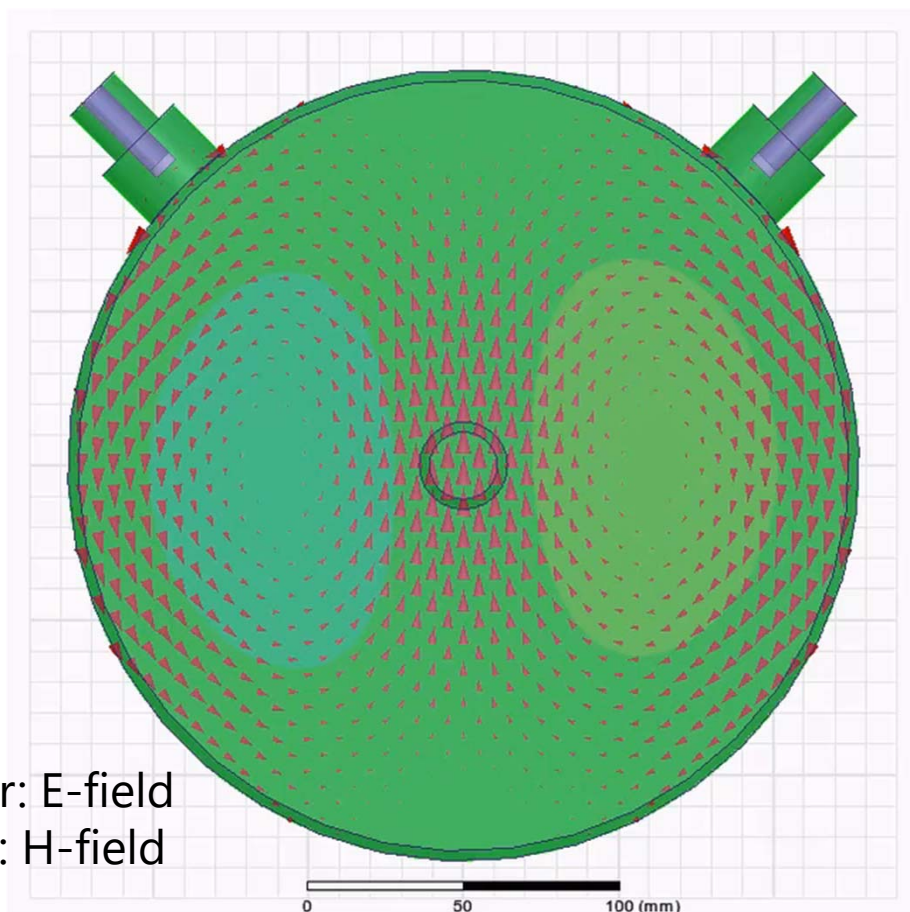
Vertical Deflection

$$\phi_2 - \phi_1 = 0$$



Horizontal Deflection

$$\phi_2 - \phi_1 = \pi$$



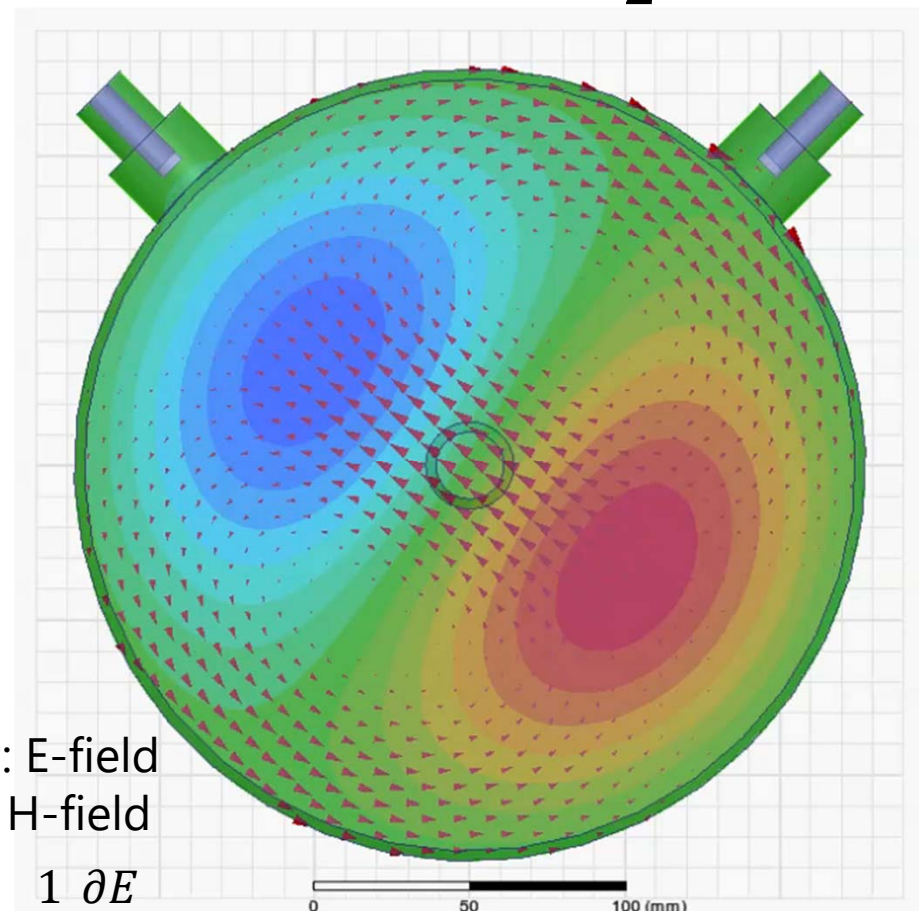
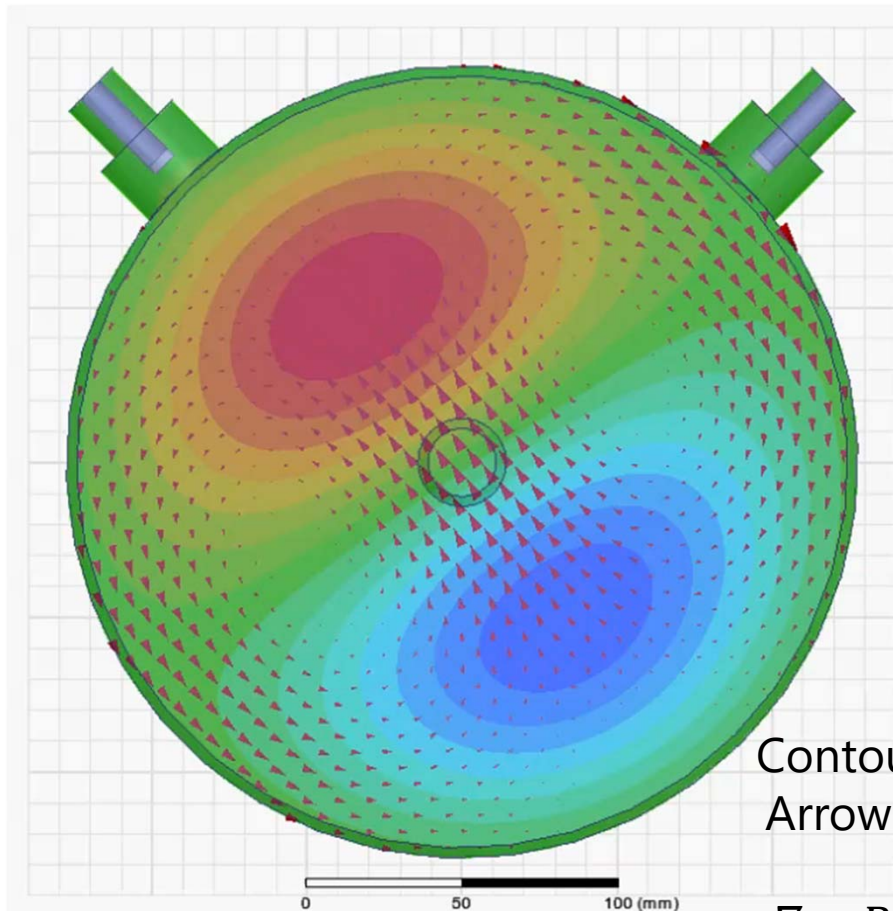
Contour: E-field  
Arrows: H-field

Clockwise Deflection

$$\phi_2 - \phi_1 = -\frac{\pi}{2}$$

Counter Clockwise Deflection

$$\phi_2 - \phi_1 = \frac{\pi}{2}$$



Contour: E-field  
Arrows: H-field

$$\nabla \times B = \frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t}$$



- RF周波数: **1428 MHz** (L-band).
  - RF period: **700 ps**
  - バンチ長のとらうる範囲 (10 ps – 1 ns) の大部分をカバー
- 時間分解能 **3 ps** を得るために必要なピークBL積

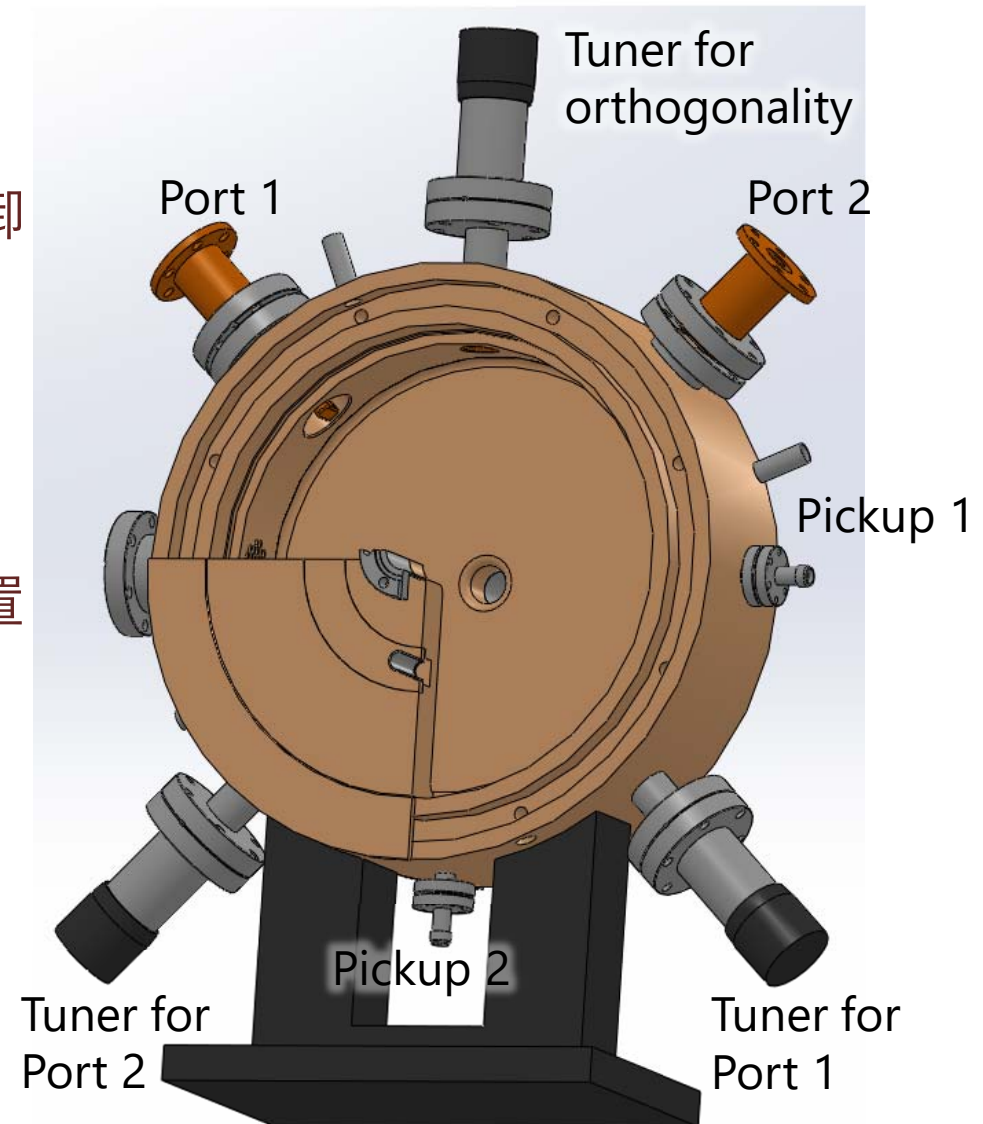
$$B_0 l T = \frac{p_0 \sigma_y}{|m_{12}| e \sigma_t \omega} \simeq \mathbf{2.8 \times 10^{-4} [Tm]}$$

- クレストでのキック角

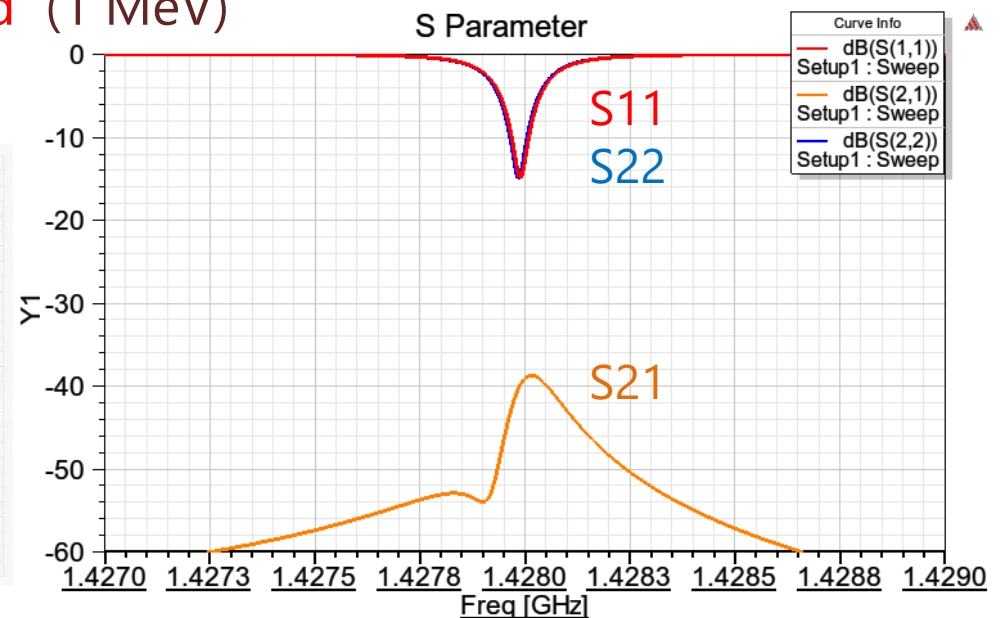
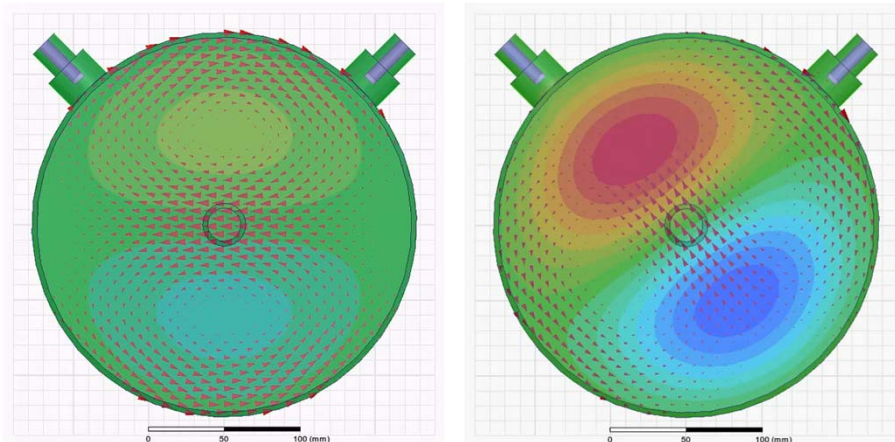
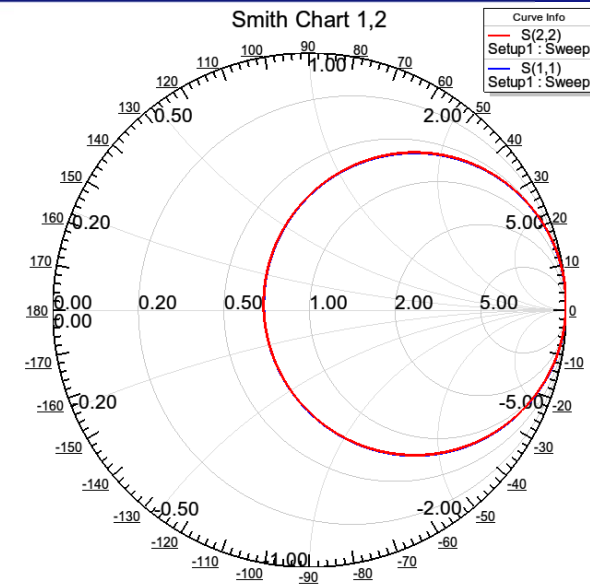
$$y'_{\max} = \frac{e B_0 l T}{p_0} = \frac{\sigma_y}{|m_{12}| \sigma_t \omega} \simeq \mathbf{60 [mrad]}$$

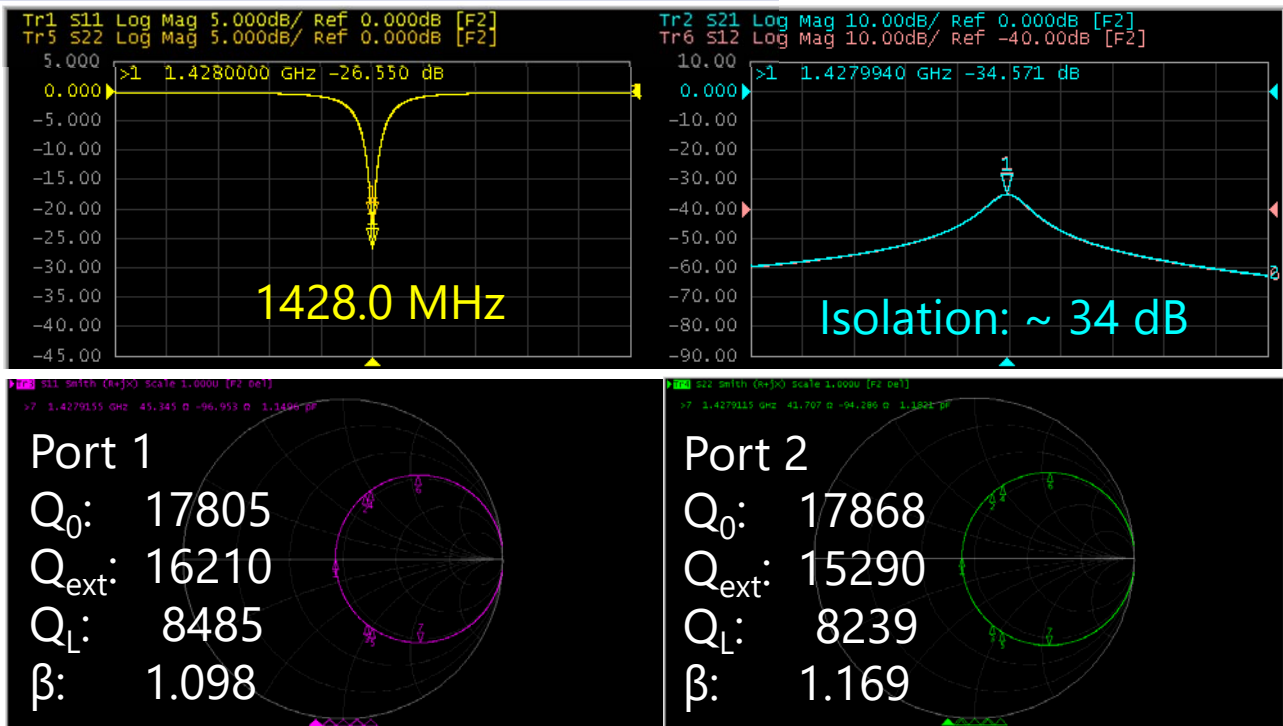
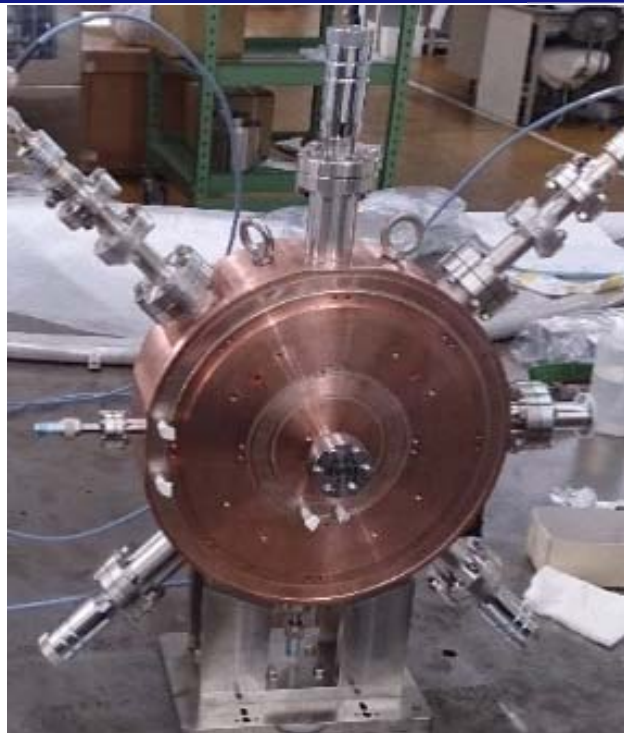
- スクリーン上でのビーム半径 ( $\sigma_y$ ): **0.5 mm rms**
- 転送行列の (1,2) 成分 ( $m_{12}$ ):  **$\sim -0.3$  m**
- 円偏波での時間分解能
  - キック力はスクリーンの大きさに制限される (直径 10 mm)
  - ビームの像の半径  $r_{\text{img}}$  を 3 mm とする
  - 時間分解能: **20 ps** ( $= 700 \text{ ps} \times \sigma_y / 2\pi r_{\text{img}}$ )

- 共振周波数: 1428 MHz
- 共振モード: TM<sub>110</sub>
- 直交する2つのポートで偏波制御
- チューナを3個設置
  - ポート1の周波数調整
  - ポート2の周波数調整
  - 直交性の調整
- ピックアップアンテナを2つ設置
  - 水平偏波・垂直偏波
- 進行方向長さ: 60 mm
- 内径: ~256 mm
- フランジ面間: 160 mm
- 入力RFパワー: 2.5 kW / port
  - 半導体増幅器を使用



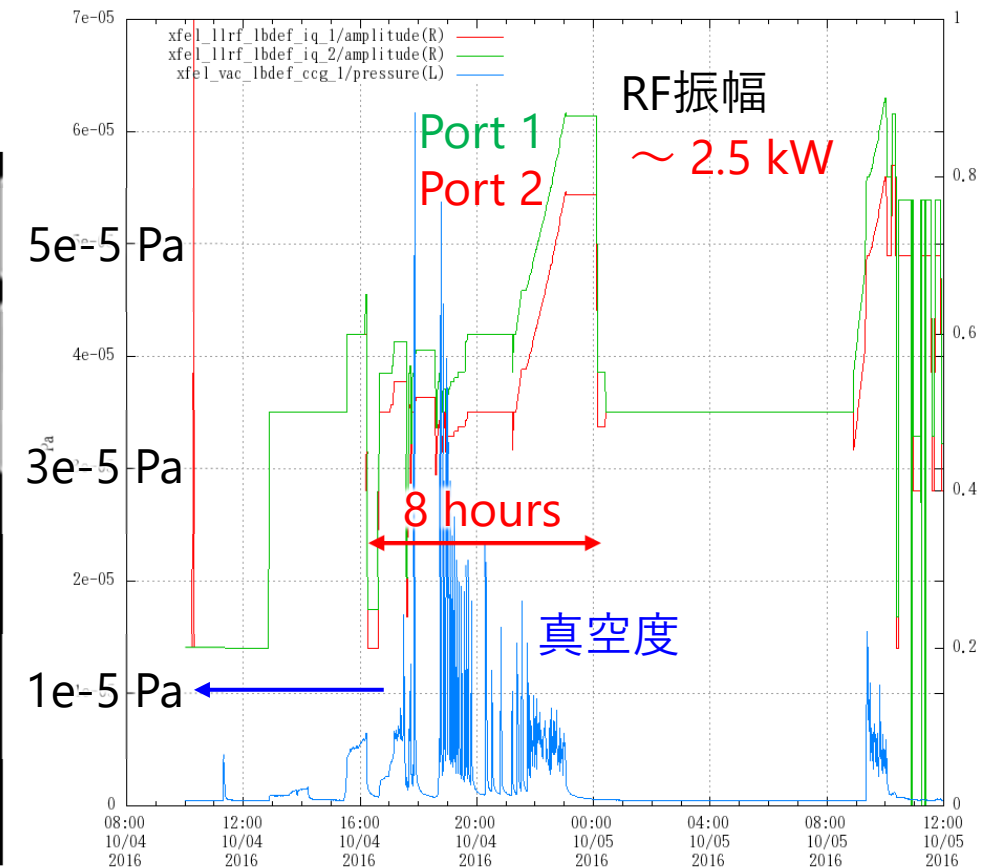
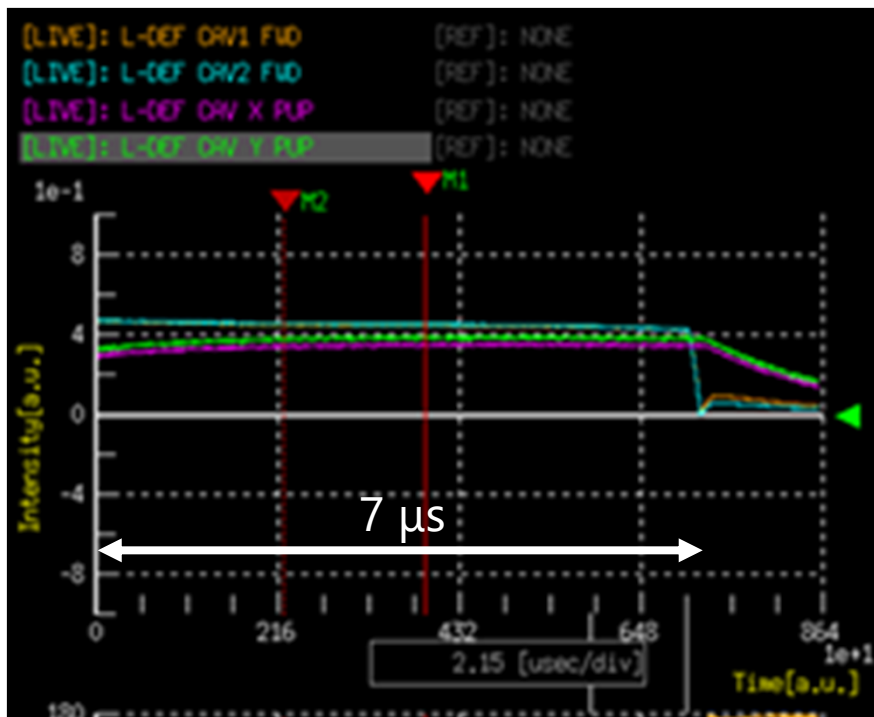
- 無負荷Q値  $Q_0$ :  $2.3 \times 10^4$
- 各ポートの外部Q値  $Q_{\text{ext}}$ :  $1.6 \times 10^4$
- 負荷Q値  $Q_L$ :  $9.5 \times 10^3$
- 各ポートの結合度  $\beta$ : 1.44
- 充填時間:  $6.6 \mu\text{s}$
- ポート間の結合度は十分小さい ( $-40 \text{ dB}$ )
- 横方向シャントインピーダンス:  $2.1 \text{ M}\Omega$
- クレストでのキック角:  $63 \text{ mrad}$  (1 MeV)
  - 合計 2.5 kW 入力にて

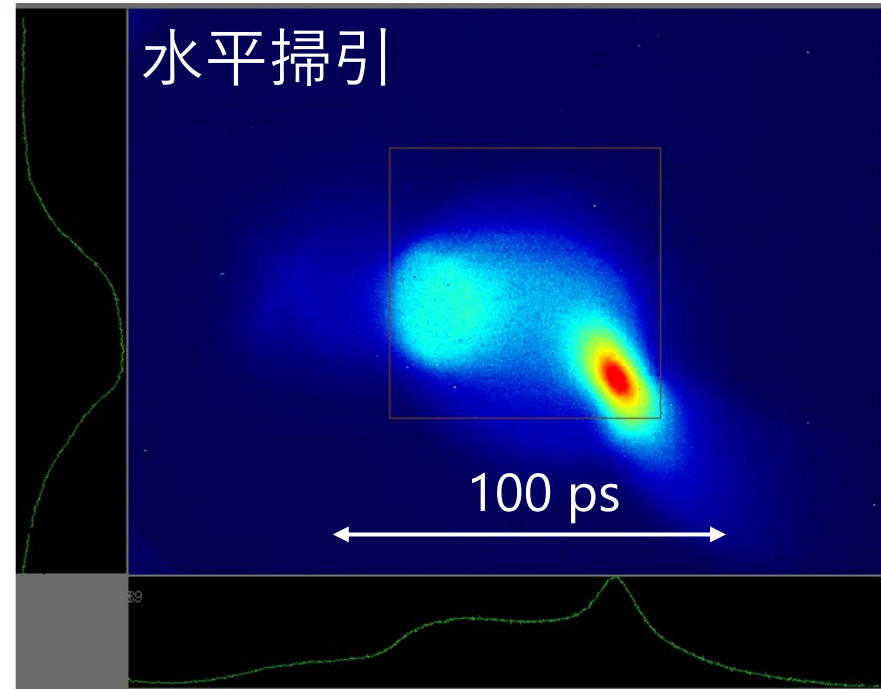
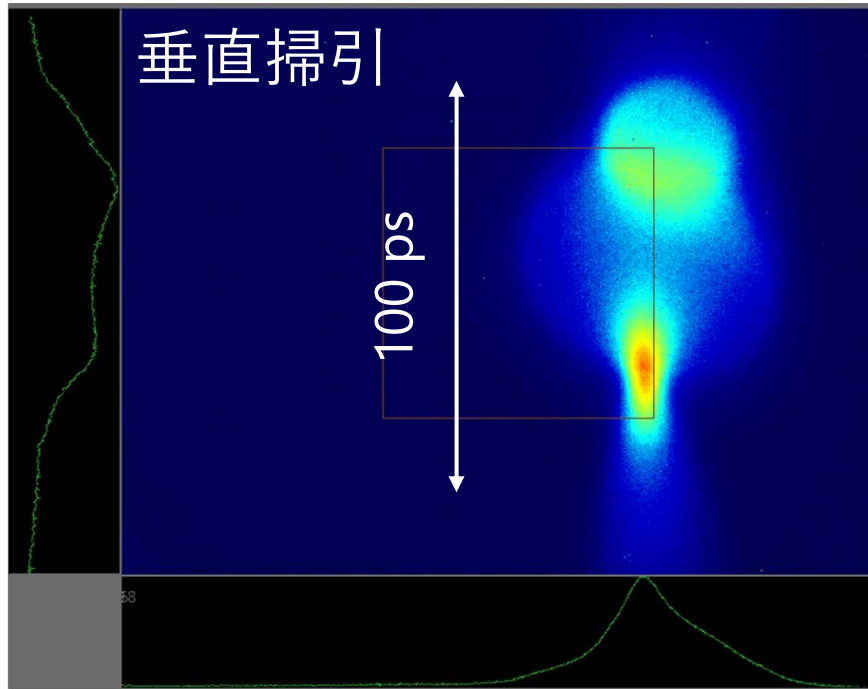




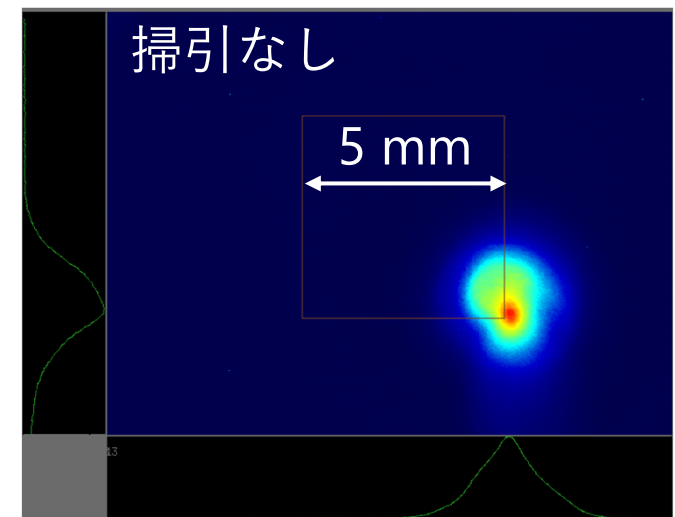
- 共振周波数はチューナで 1428 MHz に調整
- 無負荷 Q 値はシミュレーションの約8割
  - ショントインピーダンスが約2割減
  - キック力は約1割減
  - この程度の性能低下は問題ない
- アイソレーションはシミュレーション (40 dB) に近い 34 dB

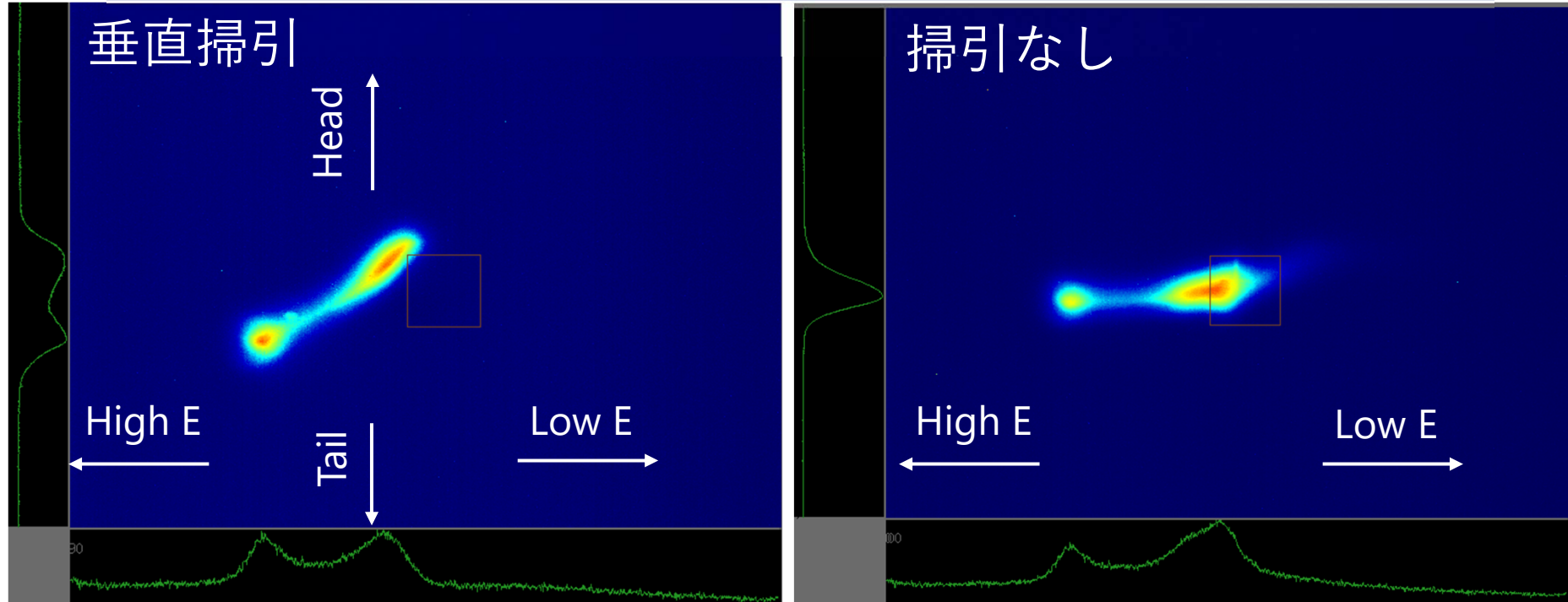
- 両ポートとも、約8時間で規定の 2.5 kW の RF 電力が入るようになった
- パルス幅: 10  $\mu\text{s}$
- 繰り返し: 10 Hz



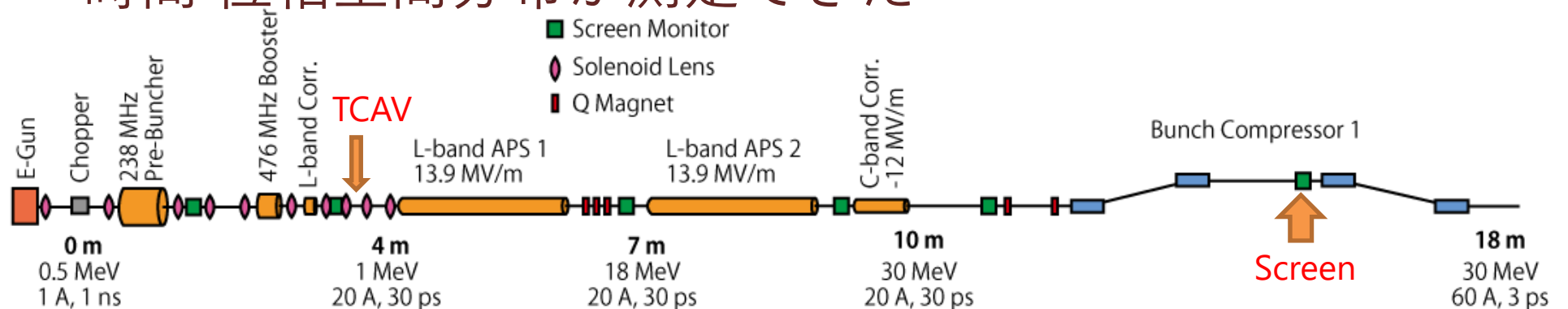


- 直線偏波による測定
  - スクリーン上で時間軸が垂直・水平になるように偏波方向を調整
- 垂直掃引・水平掃引とも適切に測定できた
- 位置・時間換算係数: 0.07 mm/ps
  - 合計約 1.1 kW 入力
- 約 10 ps の時間分解能





- バunch圧縮器のエネルギー分散部で、エネルギー対時間 位相空間分布が測定できた



- SACLA入射部において電子ビームの時間構造測定をしたい
  - 速度変調バンチングの様子を捉えることで、電子ビームの初期条件を決定する
- 速度変調バンチング部分のビームパラメータとRFデフレクタの要求性能
  - ビームエネルギー:  $\sim 1$  MeV
  - バンチ長: 10 ps – 1 ns
  - 時間分解能: 3 ps for 10 ps bunch
  - ソレノイドレンズの進行方向磁場による掃引方向の回転に対応すること
- LバンドRFデフレクタの設計・製作
  - RF周波数: 1428 MHz (L-band)
  - 偏波を自由に制御できること
    - 直線偏波とその方向、および、円偏波
    - 直線偏波は短バンチ向けで高時間分解能、円偏波は長バンチ向け
  - RFデフレクタ空洞 (TCAV)
    - 単セルピルボックス型 TM110 モード
    - 直交する2つのポートで偏波制御
    - RF源は2.5 kW 半導体増幅器 2台
- 電子ビームを適切に掃引し、時間構造を測定することができた
  - 直線偏波の方向を調整してスクリーン上の時間軸の方向を調整
  - BC1 エネルギー分散部にて エネルギー対時間 位相空間分布を測定
- 今後、円偏波などの測定もすすめ、入射部の理解をさらに深める

