

# 電子加速器のビームモニター概要 (電氣的モニター)

Makoto Tobiyama

KEK Accelerator Laboratory

# ビームの何を測る？

## ■ ビーム強度

- バンチ内の粒子数(何個/bunch)、電荷(何C/bunch)、電流(A)など
- 平均電流(mA)、この増加率、減衰率(mA/s)
- ビーム寿命(分):電流が $1/e$ になる時間
  
- 例:
  - $-1\text{nC}$ の電荷をもつバンチ中には、 $6.2 \times 10^9$ 個の電子が入っている
  - $50\text{Hz}$ でこのバンチが通過するときの電流は、 $50\text{nC/s}=50\text{nA}$
  - 1バンチあたり $1\text{nC}$ 入った1個のバンチが、蓄積リングを $100\text{kHz}$ で周回すると、平均電流 $0.1\text{mA}$
  - $1\text{nC}$ の電荷を $50\text{Hz}$ で周回周期 $100\text{kHz}$ のリングに入射すると、入射効率 $100\%$ なら $5\text{mA/s}$ で電流増加するはず

# ビームの何を測る？

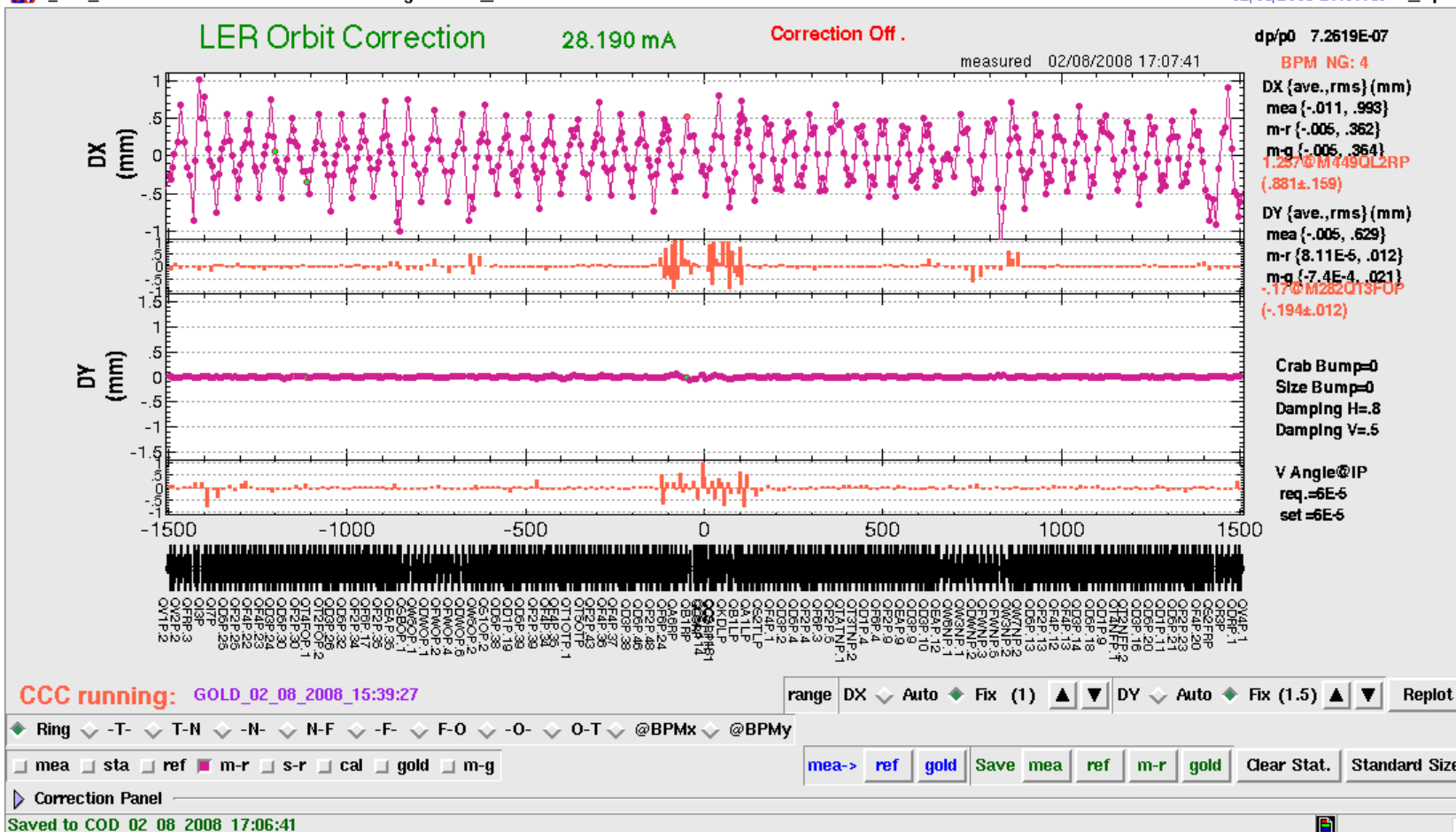
## ■ ビーム位置

- ビーム重心がどこにあるか
  - 横方向:水平、鉛直(四極電磁石磁場中心に対して、デザイン軌道に対して)
  - 進行方向:RFに対してどの位相にあるのか
- 平均位置なのか、瞬間位置なのか
  - 多くのバンチ、長時間に対する平均
  - あるバンチのある瞬間の位置

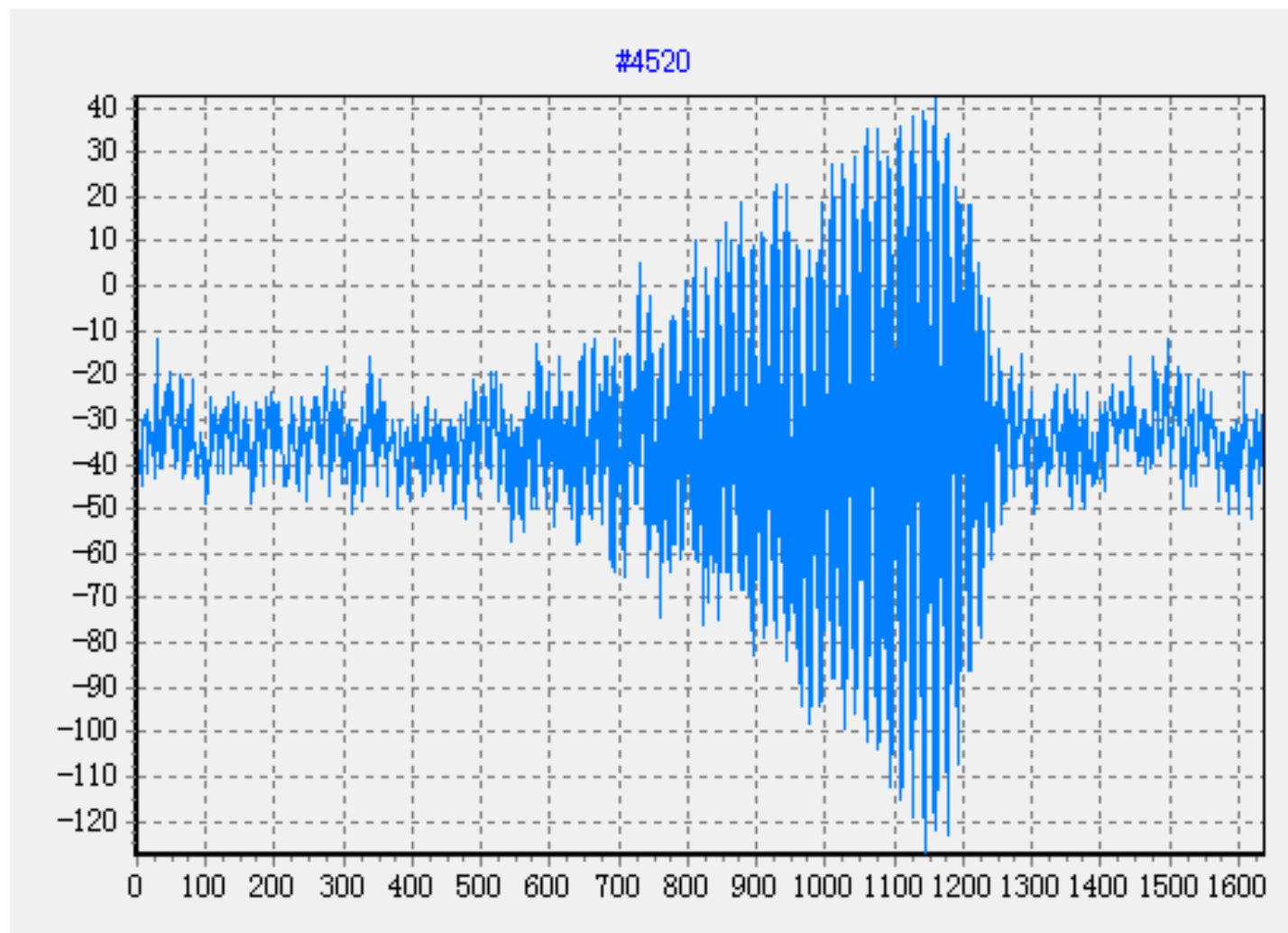
# 横方向平均位置の例

File Edit Measurement Correction Steering Orbit Window

02/08/2008 17:07:46 Help



# バンチの周回ごとの位置の例



# 他に測りたいもの

## ■ ビームエネルギー

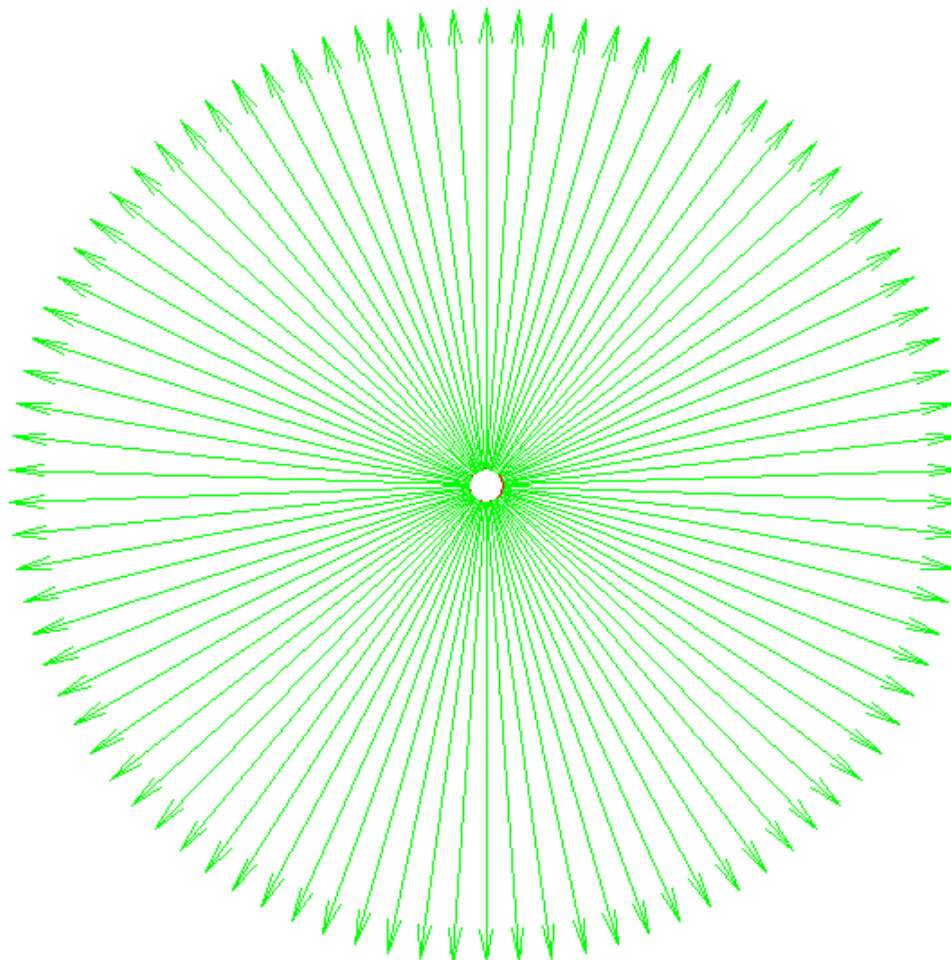
- eV単位(MeVとかGeV)
- 磁場がわかっている偏向電磁石でビームを曲げてみる
  - 閉軌道が出来ている場合(蓄積リングの場合)は直接測定は困難

## ■ ビームサイズ

- 横方向(水平、鉛直)、進行方向(バンチ長)
- 平衡状態に達していない場合は、どんな分布をしているか、というところから考える必要がある
- 軌道のパラメーターがわかっている場所でビームサイズを測ると、ビーム位相空間上の面積がわかる: エミッタンス
- 通常、電子リングでは電氣的モニターでのビームサイズ測定は(とっても小さいので)困難、ERL加速器のようにさらにビームサイズが小さいものは、ほぼ不可能に近い

# ビームが作り出す電磁場

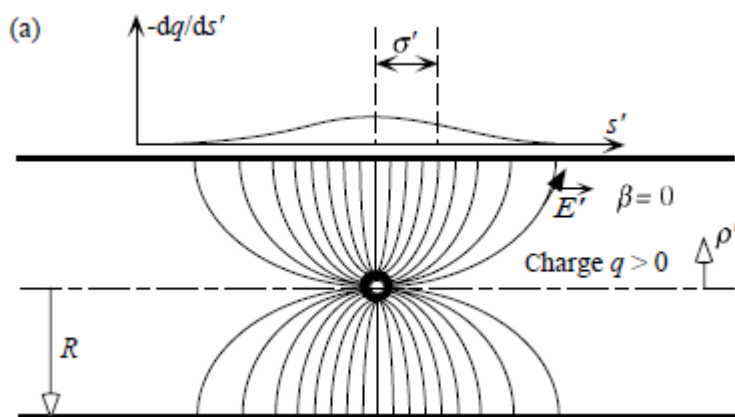
- 自由空間に静止している電荷が作る電場



電場は等方的に出ている

# 金属チェンバー中を走る電荷

- 超高真空中に保たれた真空チェンバー中を走る電荷
  - 金属の電気伝導度が十分大きいと、金属境界での境界条件を満たすため、電場は金属表面に対して垂直になるように変形する



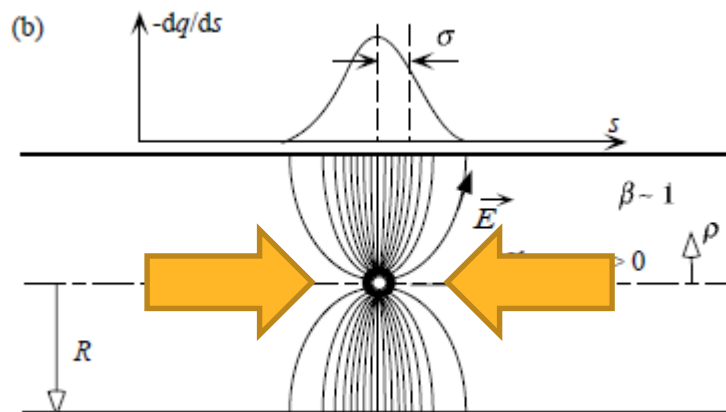
チェンバー内表面に、ビーム電場によって電荷と逆符号の電荷が誘起される: image charge (鏡像電荷)

電荷が走っていると、image chargeも一緒に走る: wall current (壁電流)



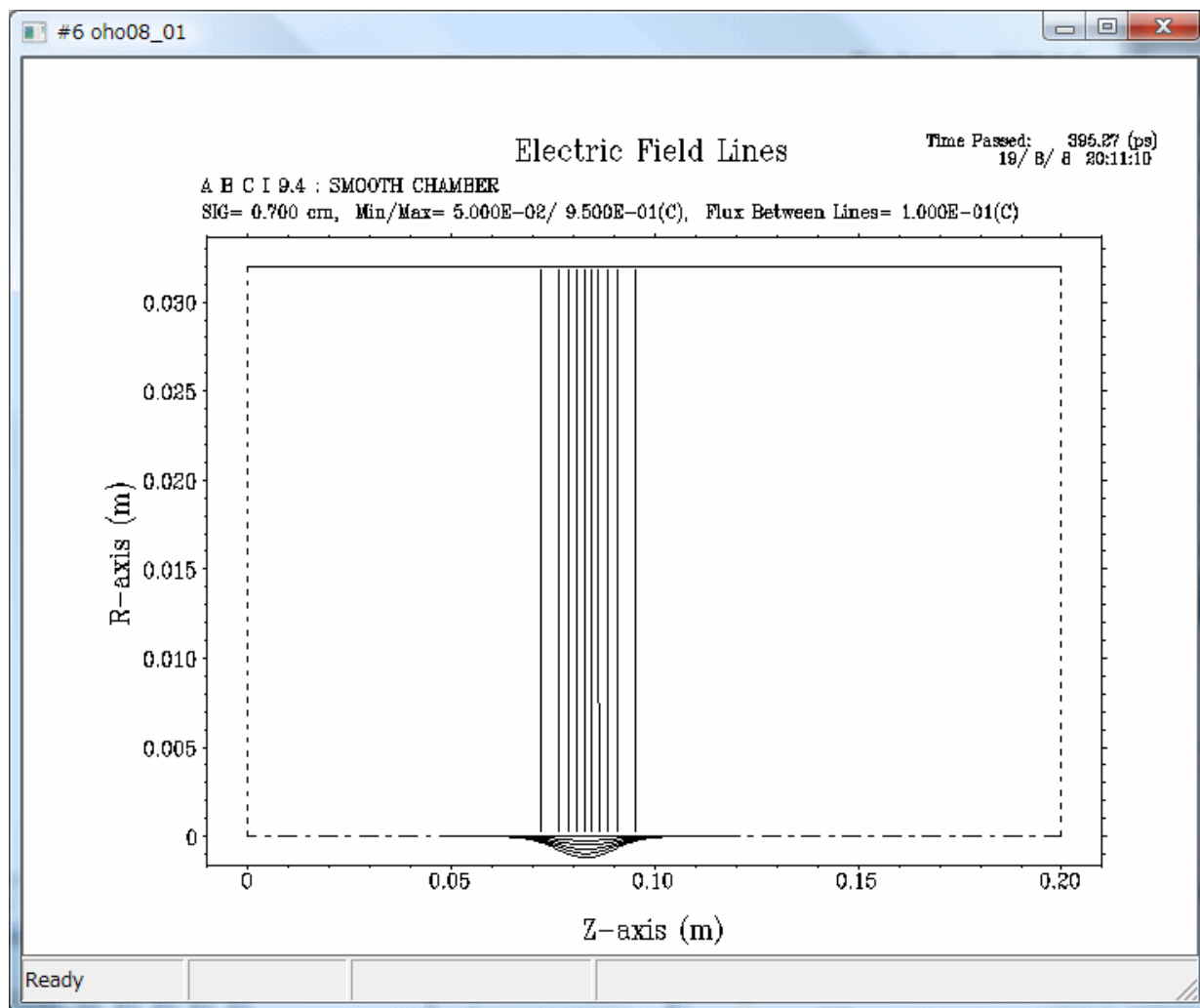
# 粒子が光速に近くなると

- この粒子を観測している実験室系では、ローレンツ収縮により、ビーム進行方向の電場成分が進行方向に対して垂直な方向(動径方向)に倒れ、光速と見なせる早さでは進行方向電場は無視できるほど小さくなる



壁電流も同じく進行方向に収縮し、光速では粒子長(バンチ長)と同じサイズになる

# 光速( $\beta = 1$ )では

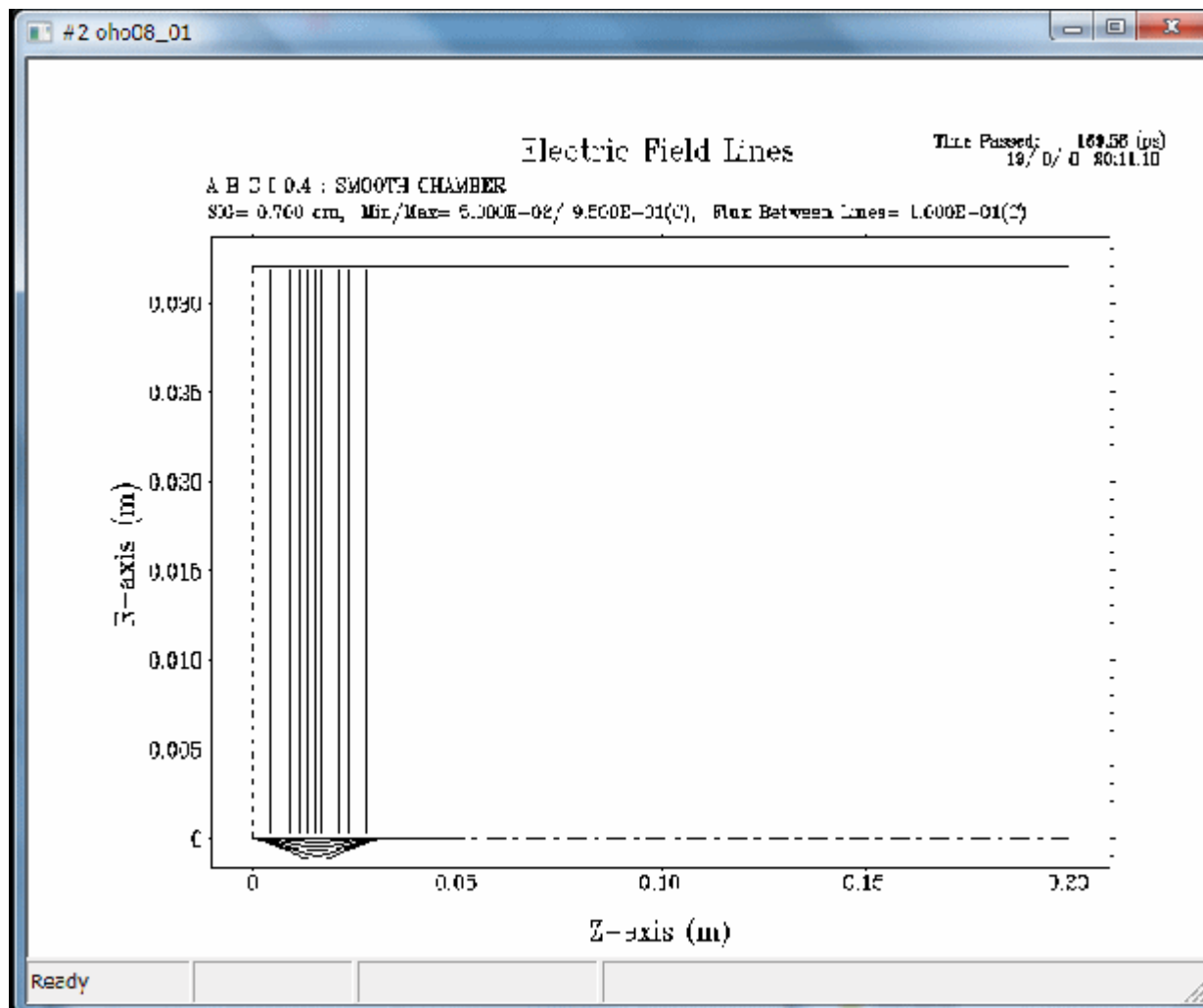


電場分布は、2次元の静電場問題となる



ビーム電場によって誘起される壁電流の分布も、2次元の静電場問題を解けばわかる

# 観測すると



# 壁電流は

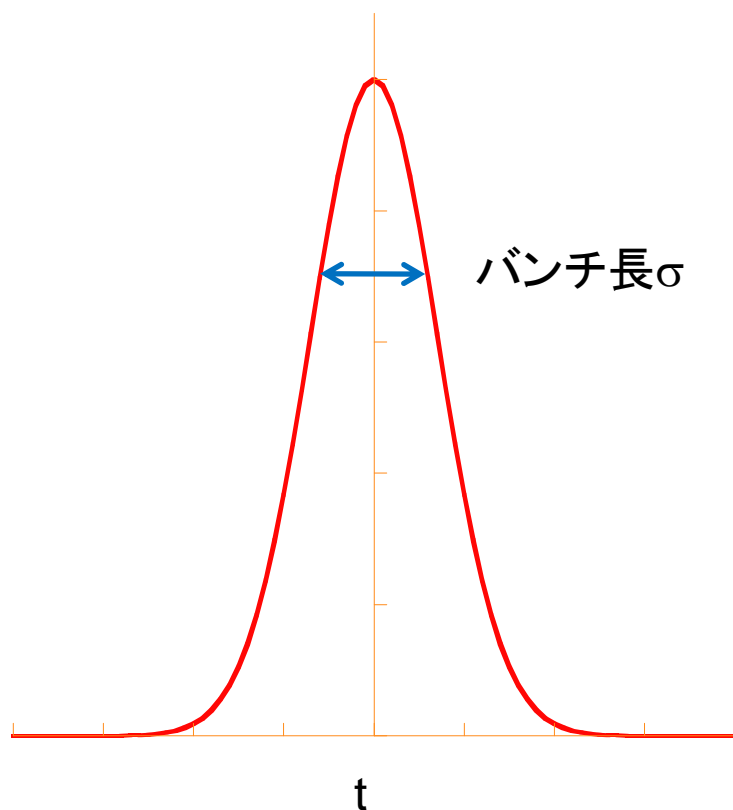
- **チェンバー内の電荷の位置を反映する**
  - 電荷がチェンバーの中心を通っていなければ、近い側の壁電流が増え、遠い側の壁電流が減る
  - 分布を「うまく」ピックアップすれば、ビームの横方向位置の情報が得られる(はず)
- **チェンバー内電荷に比例する**
  - 全体をうまくピックアップすれば、チェンバー内を走っている電荷の全電荷や進行方向時間構造を知ることができる(はず)



- **電氣的モニターは、壁電流をうまくピックアップして、電気信号として外部に取り出すもの**

# バンチ信号の時間分布と周波数分布

- ガウス分布のビーム



- ある時刻tにおけるビーム電流は時間領域で表すと

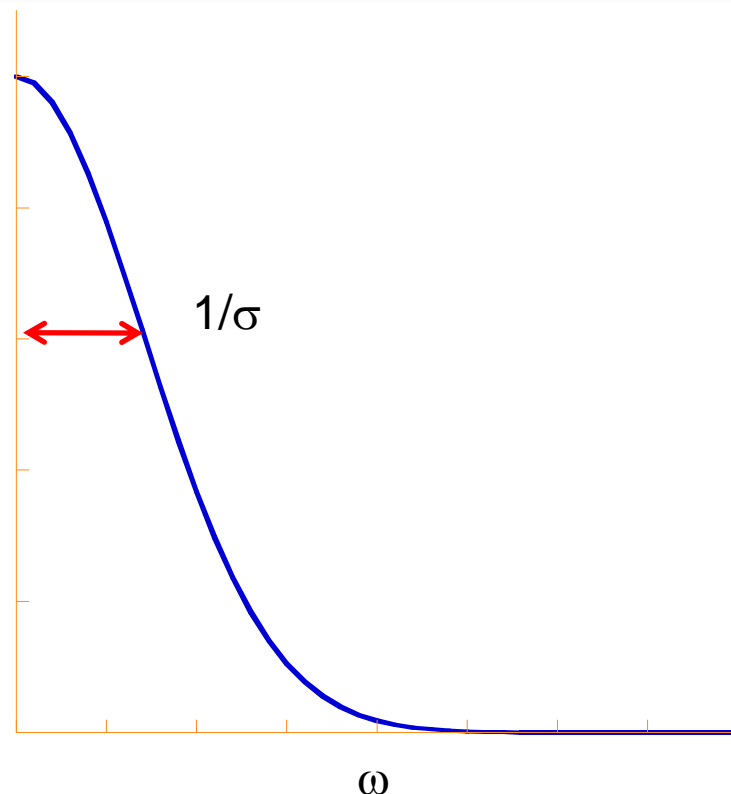
$$I_b(t) = A \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right)$$

# 周波数領域では

- フーリエ変換すると

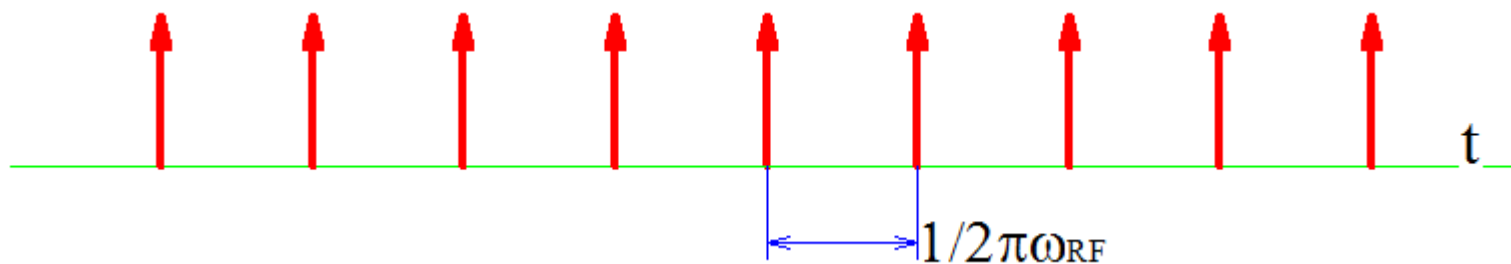
$$I(\omega) = A\sigma \exp\left(-\frac{\omega^2}{2\frac{1}{\sigma^2}}\right)$$

- ビームから出る信号の spectrum はバンチ長の逆数で  $1/e$  になるような、ガウス分布をしている

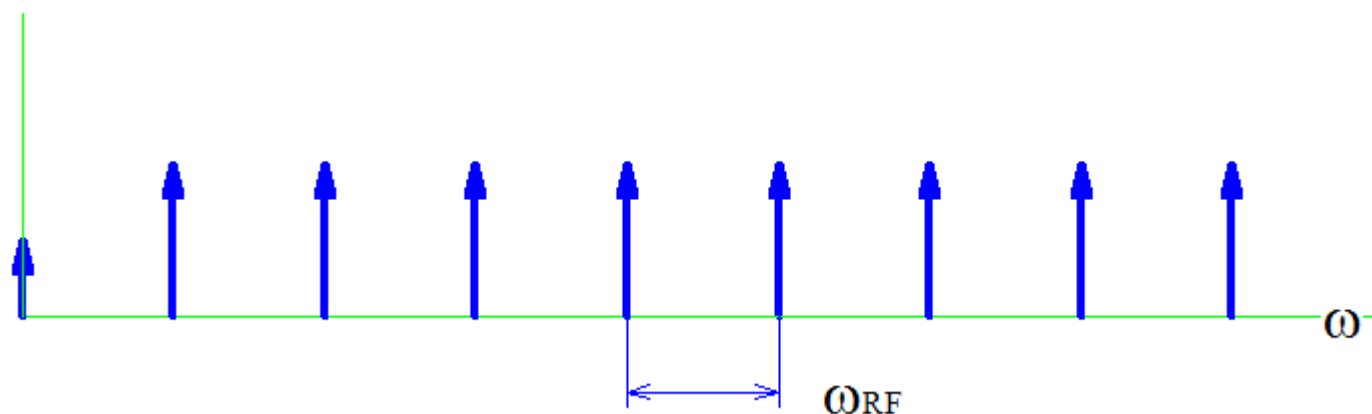


例: バンチ長7mm(23ps)では6.8GHz  
30μm(0.1ps)では1.6THz

# 一定時間間隔でやってくる信号

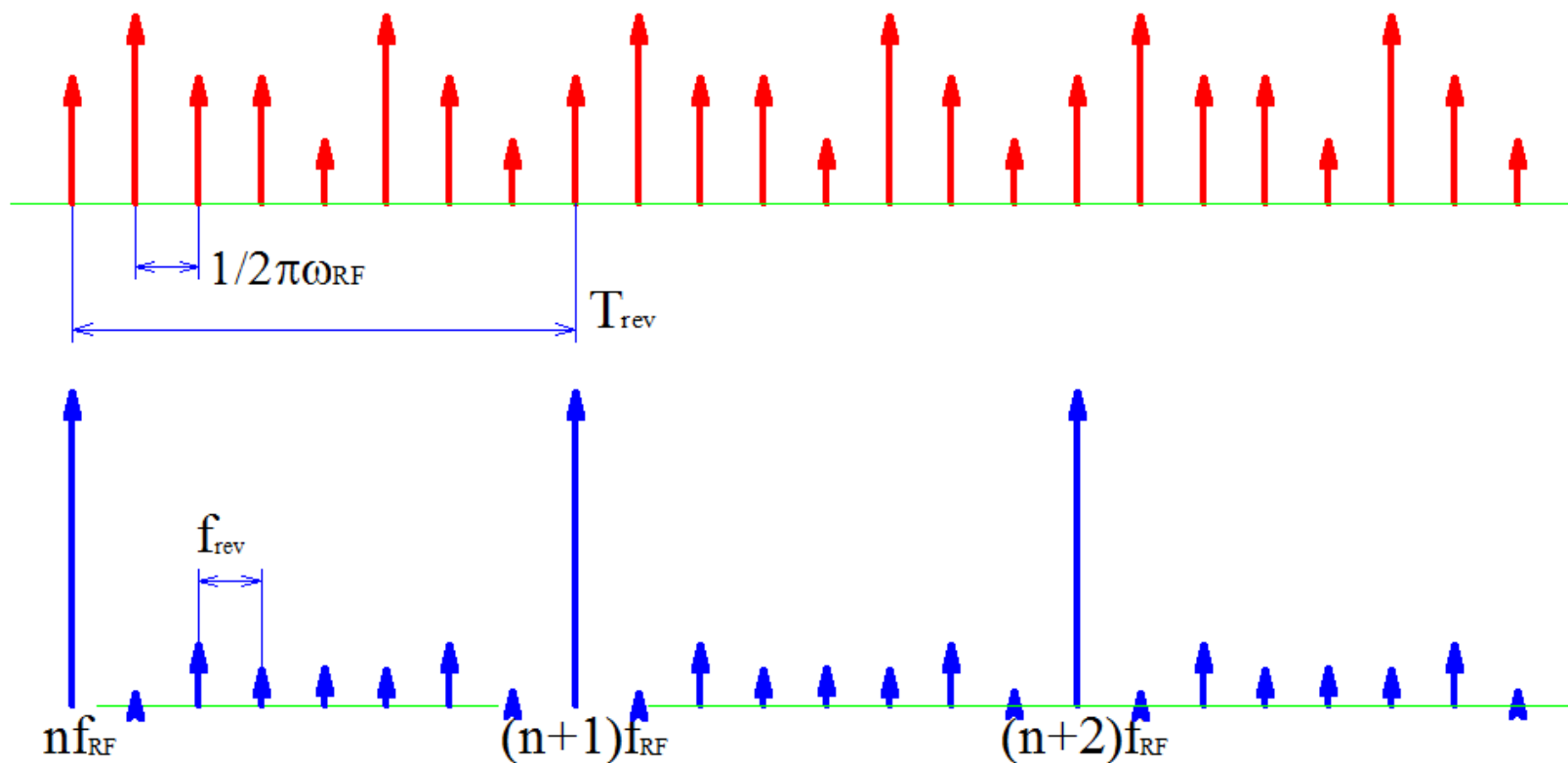


- $1/2\pi\omega_{RF}$ 毎に来るデルタ関数列を周波数領域で見ると



- $\omega_{RF}$ の $n$ 倍成分だけが残って見える


# バンチ強度のばらつきがあるとき



フィルパターンが一様でなく、例えばリング周回周期毎に繰り返す構造がある場合、周回周波数毎に対応するスペクトラムラインが現れる



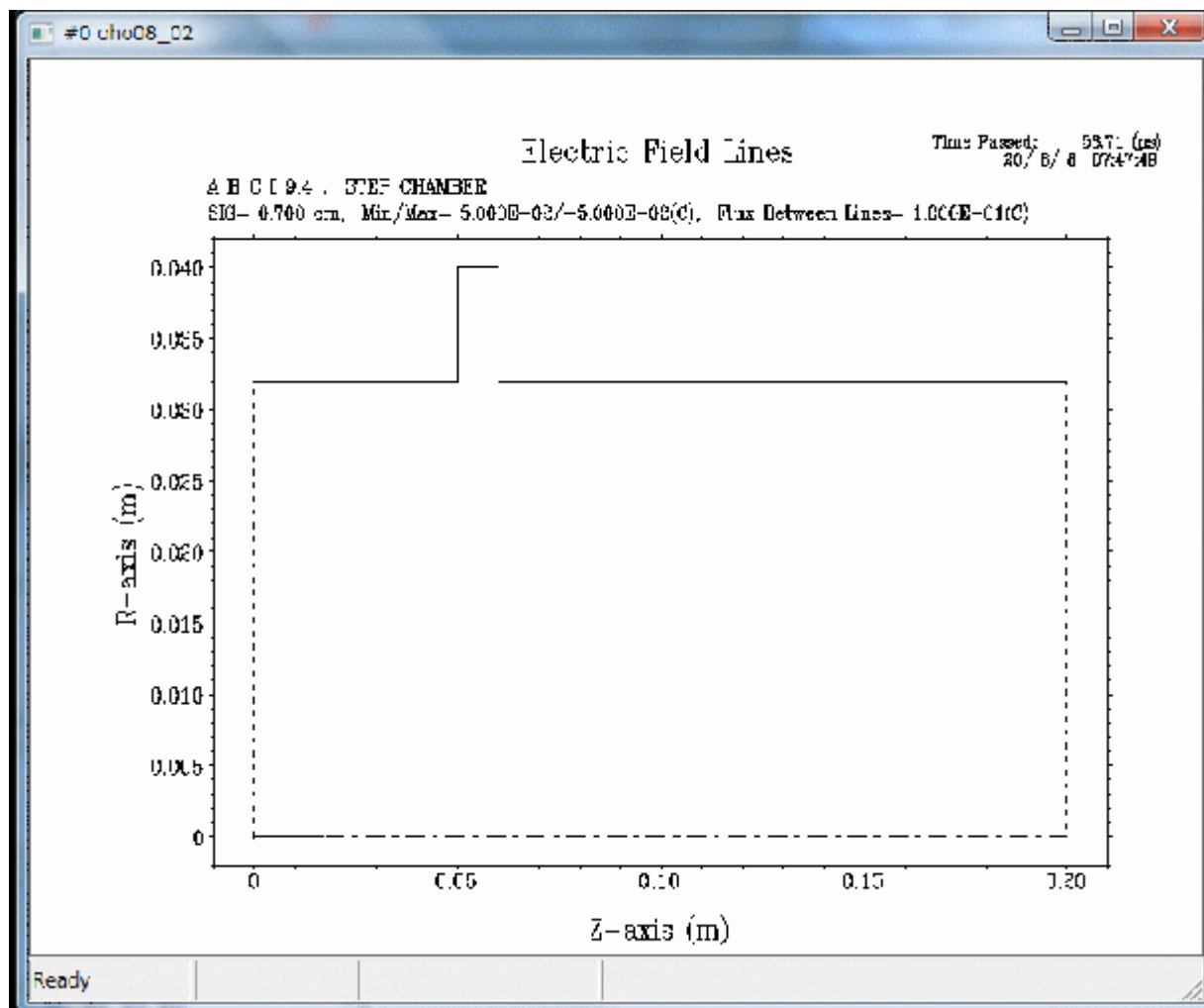
# 本物の真空チェンバーでは

- 普通の真空チェンバー: 完全導体でない(電気伝導度が有限)
  - ビームから見える構造がある(段差、でこぼこなど)
- 
- 構造により、ビームが作る電磁場が影響を受ける
  - 真空チェンバーとビームのとの間にエネルギーのやりとりが生じる
    - 電磁波としてチェンバー内に放出される
    - チェンバー表面や構造物で熱に変わる
    - チェンバー構造に捕獲されて、振動を続ける

## Wake field (航跡場)

モニターの立場からは、不要なノイズ

# でこぼこを見たビーム電場は



# 真空チェンバーのカットオフ周波数

- どこかで発生したwakeがモニターまで届くか
  - wakeの周波数が、チェンバーの導波管モードカットオフより上か下か
    - 導波管モードで伝わる電磁波のロスは非常に小さい: 遠くまで伝わる
  - wakeの発生点とモニターまでの距離

## ■ 真空チェンバーのカットオフ周波数

- 例: 半径aの円形チェンバーでは、もっとも低次の導波管モードはTE<sub>11</sub>モードで、その周波数は

$$a \times \frac{\omega_c}{c} = 1.841$$

- 例:  $\phi$  64mmの円形チェンバーでは2.74GHz
- 一般的な形状のチェンバーでは、電磁界計算コードで2次元固有値問題を解いて求める

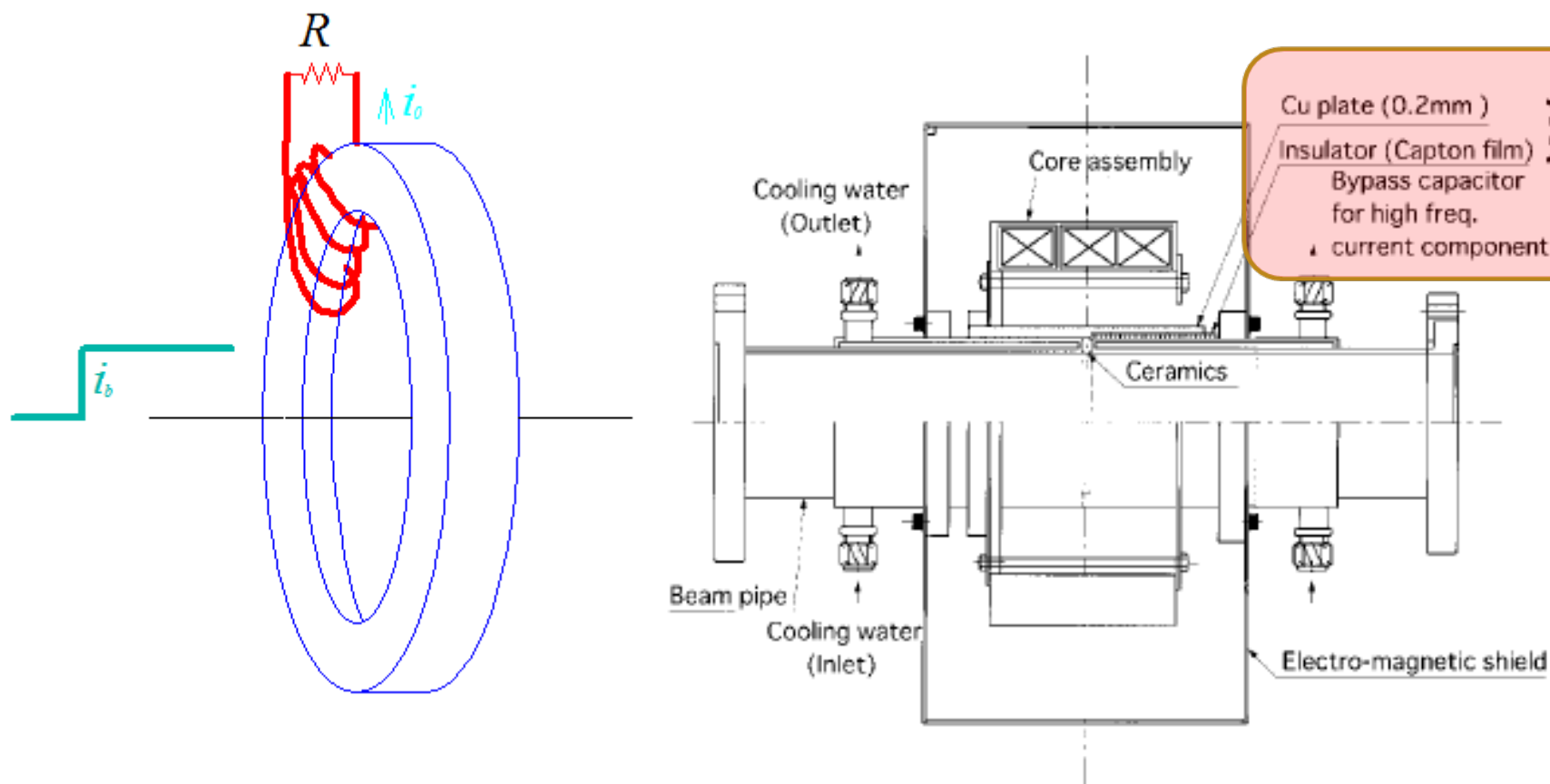
# 真空チェンバーのカットオフつづき

- **カットオフ周波数以上の周波数領域**
  - ノイズレベルが上昇、また、本来の信号レベルも大きく変動する
  - 精度が必要な信号観測には使えない
- **カットオフ周波数以下の周波数領域**
  - カットオフ周波数に近い信号は、発生源からある程度の長さは減衰しながら侵入する
  - 侵入長
$$\Delta z = \frac{\lambda_c}{2\pi\sqrt{1-(\lambda/\lambda_c)^2}}$$
    - 例:  $\phi$  64mmの円形チェンバーで2.5GHzのwake侵入長は42mm
    - 同じチェンバーで2.7GHzの侵入長は102mm
- **ビームの高周波成分を使いたいとき(=細かい時間構造を見たいとき)は、できるだけカットオフ周波数の高い(大きさが小さな)チェンバーにする必要がある**

# 真空チェンバーのskin depth

- 有限の電気伝導度＋有限の厚さなので、ビームが作り出すすべての電磁場をチェンバー内に閉じ込めることは出来ない
  - wall currentはビームのフィールドを完全には再現しない
- skin depth  $\delta = \sqrt{2 / \mu \sigma \omega}$ 
  - 室温の銅: 10GHzで $\delta=0.7\mu\text{m}$   
:10kHzで $\delta=0.7\text{mm}$
  - いずれにしても、DCに近い成分はチェンバー外に抜けてしまう

# ビーム強度を測るモニター: CT



# CTの応答

透磁率 $\mu$ 、有効断面積 $M$ 、磁路長 $\ell$ のコアにビームを通しコアに巻いた $n$ -turnの巻き線の出力を終端抵抗 $R$ で観測する:

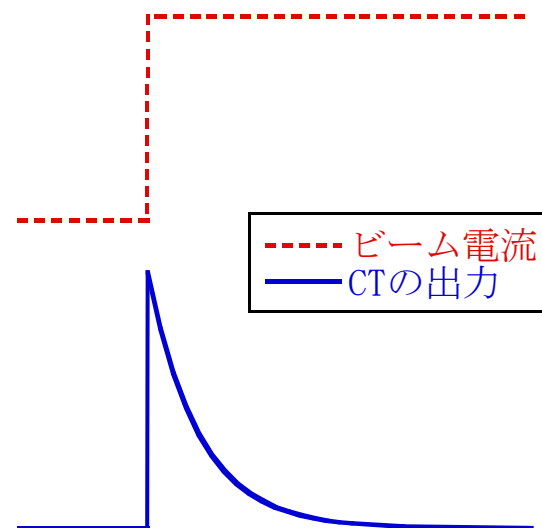
ステップ応答

$$\frac{d}{dt} \frac{n\mu M (i_b u(t) - i_o n)}{\ell} = i_o R$$

$$I_o = \frac{n\mu M i_b}{\ell R + n^2 \mu M s}$$

$$i_o = \frac{i_b}{n} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) u(t)$$

$$\tau = \frac{n^2 \mu M}{\ell R} = \frac{L}{R} \quad \text{ドゥループ時定数}$$



# CTの応答

## ■ 観測法

- このままオシロスコープなどで観測する
- ある程度の時間積分してAD変換する

## ■ 時定数を長くするためには

- Lを大きくする
- Rを小さくする



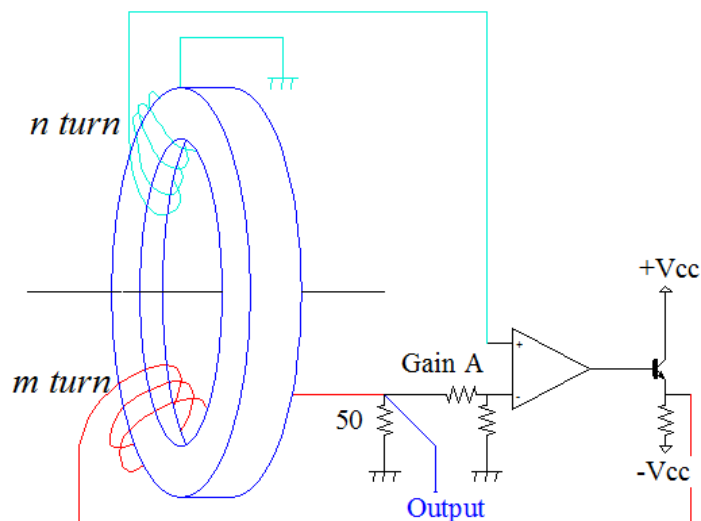
出力が小さくなる  
インピーダンス整合が悪化

## ■ 高周波特性

- 巻き線の線間容量、浮遊容量で決まり、あまり良くない



# フィードバックCT

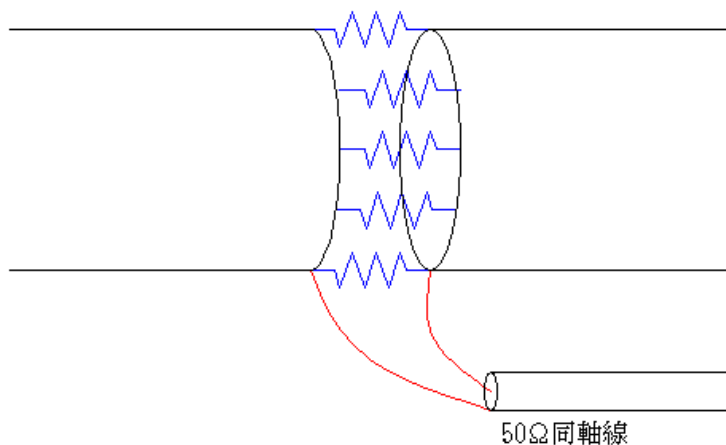


## ■ 時定数は

$$\tau = \frac{nm\mu MA}{lR}$$

- mA倍にのぼすことが出来る
- 出力も下がらない
- やたらに時定数を大きくすると発振する
- Activeなので、故障の心配がある

# Wall current monitor

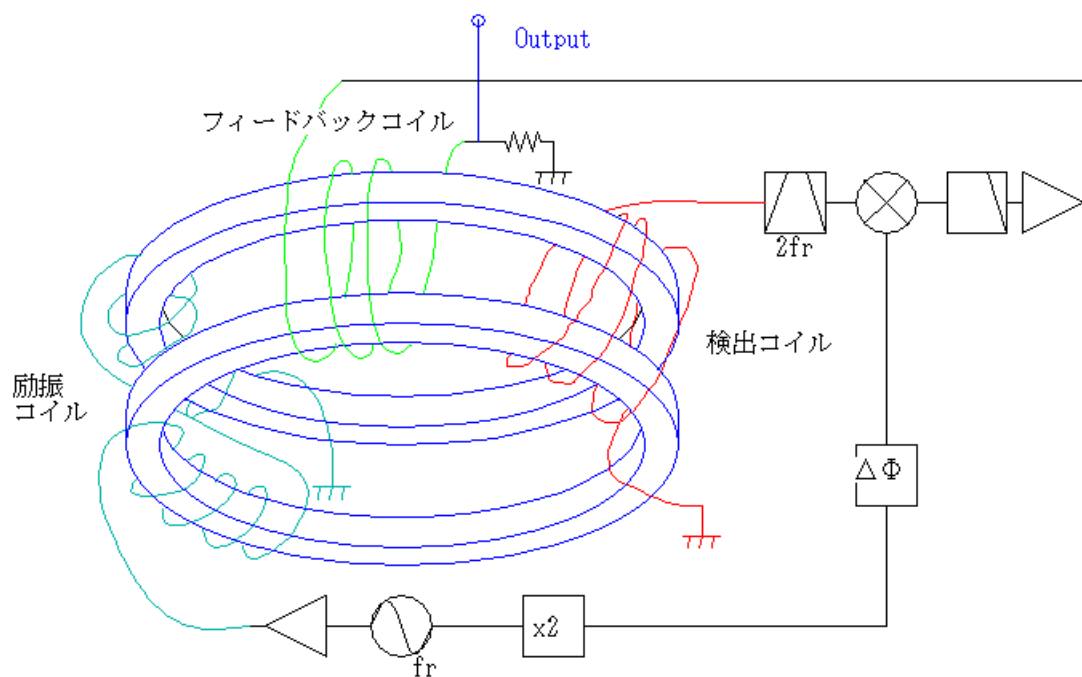


- 壁電流を切って、ビームバンチを観測
- 時間応答が結構いい
- 普通は外側をシールドケースで囲むため、インダクタンスが並列につき、ドゥループ時定数は $\tau=L/R$ となる
  - もっとのばしたいときは、フェライトなどを入れる

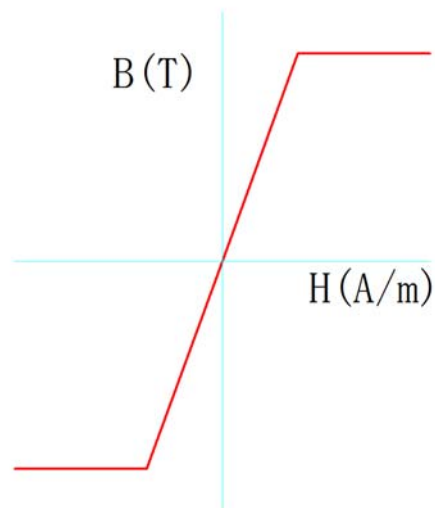
# DCCT

## ■ ビームのDC成分を検出

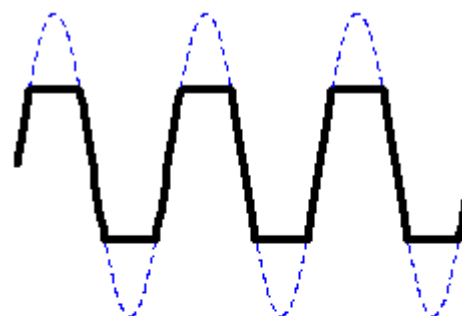
- ビームの磁場成分を検出する
- DC成分の(結構早い)時間変化も検出したい
- K.UnserによりParametric CTとして実用化、広く使われている



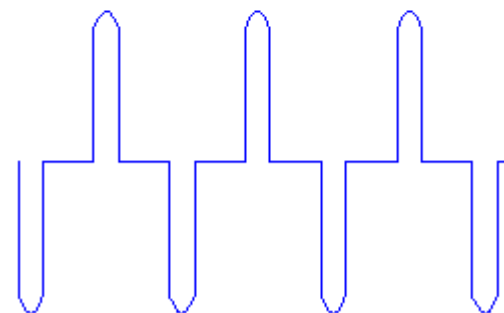
# コアを正弦波で励振すると



(a) コア内の磁束密度



(b) 検出コイルに誘起される電圧

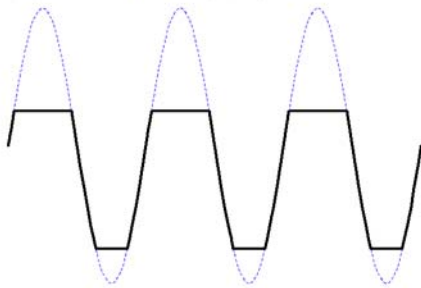


$$E_{emf} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \vec{\Phi}$$

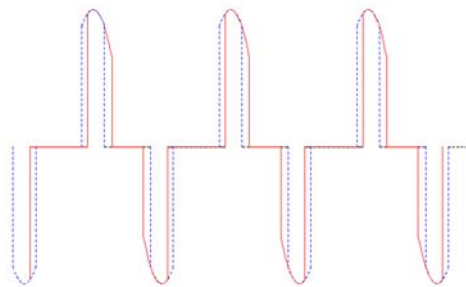
$$\Phi = \iint \vec{B} \cdot \vec{n} dS = \iint B_n dS$$

# コア内にDC電流が通っていると

(a) コア内の磁束密度



(b) 検出コイルに誘起される電圧



- DC電流分、コア内磁場がシフトする
- 磁束密度がシフトし、飽和していないところがずれるので、起電力パルスのタイミングは非対称にずれる

- コアを2個組み合わせ、励磁は互いに逆位相、検出コイルは同相にすると
  - 0電流ではお互いのコアで発生した起電力がキャンセルする
  - 電流があると、それぞれのコア起電力のシフト方向が逆方向になるので、検出コイルでの電圧はキャンセルしなくなり、励磁周波数の2倍の成分が強い信号が発生する

# 実際には(1)

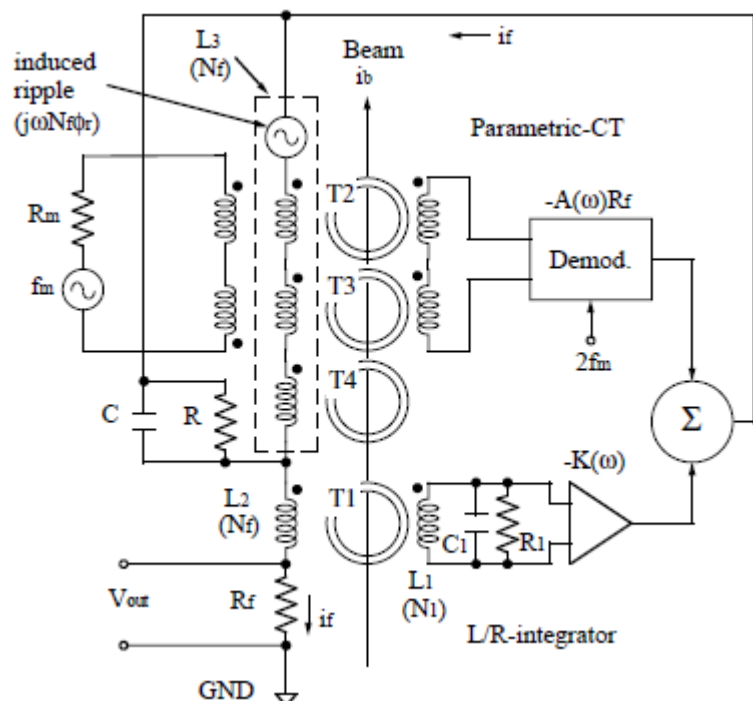
- B-Hカーブはそれなりに複雑で、(当然)ヒステリシスもある
- コアの飽和点付近では急激にコアのインダクタンスが変化するため、励磁電流はきれいなサイン波にはならない
  - 検出コイルに現れる起電力を直接測ったのでは、正しいDC電流にならない



- 検出コイルの出力を励振信号の2週倍信号で検波、DC分をフィードバックコイルを通してコアに戻し、DC電流分をキャンセルする(=DC電流が通っていない状態)
  - このフィードバック電流=コア内を通ったビームのDC成分

# 実際には(2)

- 励振周波数～1kHz程度がせいぜい
  - 2通倍信号検波後のLow pass filterの時定数で、DCCTの時間応答が決まる(～数Hz程度)
  - **おそすぎ**(ビームの入射、減少を観測する目的では)



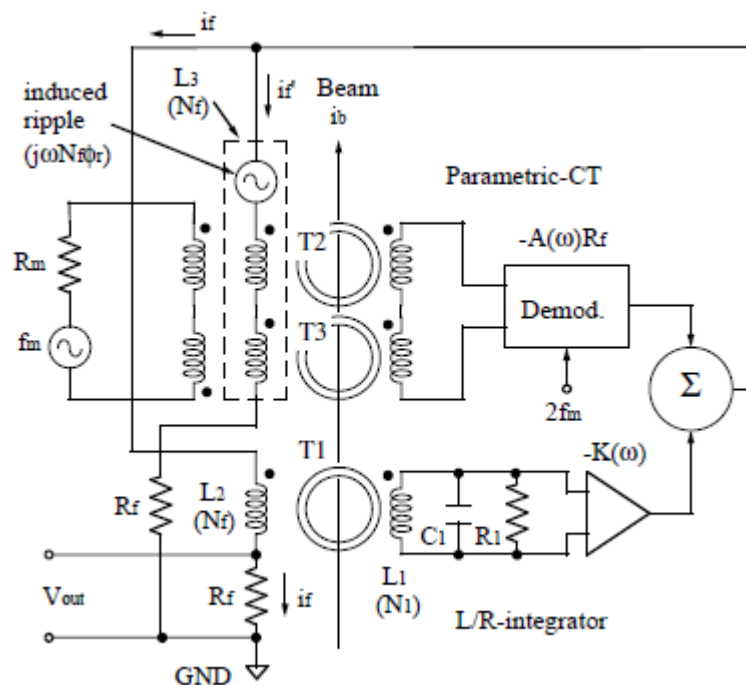
CERNのUnser先生が考えた  
parametric CT(=DCCT)

早い変動成分はフィードバックCTで  
測定する

売り物である(ほぼシェア100%)

# 実際には(3)

- 2つのコアの特性がぴったり合っていないと、0電流でもリップルがわんさか出て、後段回路を少々工夫しようが、どうにもならない
  - 大量にコアを製造して、特性のあったものを見つける
  - コアの特性が少々ずれていても大丈夫な回路に変更する




平松先生ご考案の並列フィードバック型DCCT

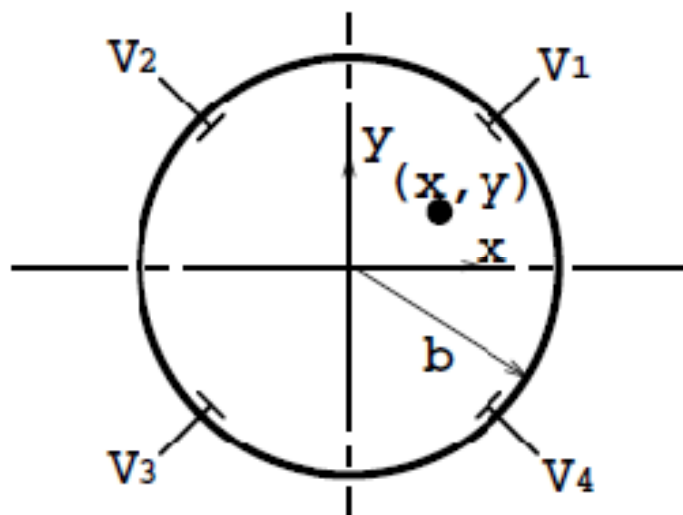
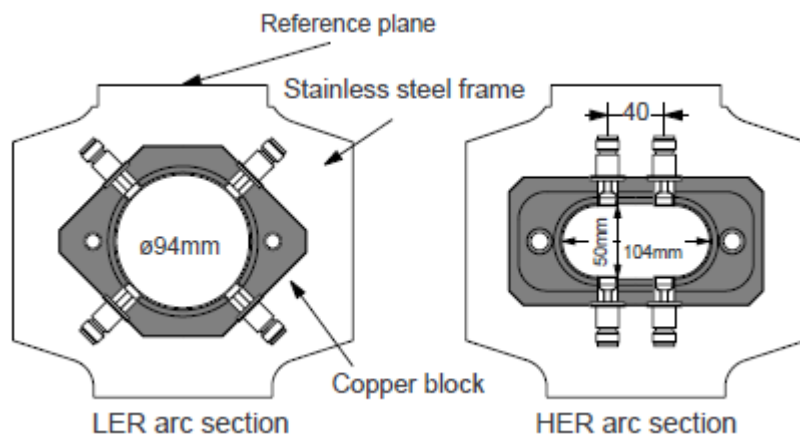
KEKB、J-PARC MRで使用  
高速レスポンスと高精度を両立



# DCCTは

- **外部磁場の影響を結構うける**
    - 外部磁場によりオフセットが変動する
    - 特に、「加速する」加速器ではこれを何とかしないと信用丸つぶれ
    - 出来るだけDCCTは電磁石の近くに設置しない
    - DCCTの周りに強力な磁気シールドを設置する
  - **セラミックスギャップ**
    - ビーム信号のDC分は必ずチェンバー外に出てくるが
      - 早い変化はeddy currentで止められてしまう
      - 真空チェンバーに乗っている各種の低周波電気ノイズが影響してしまう
- 
- ギャップで電氣的に切るが、やたらに高周波信号は出ないように容量でシールドする(DCCT回路が壊れないように)

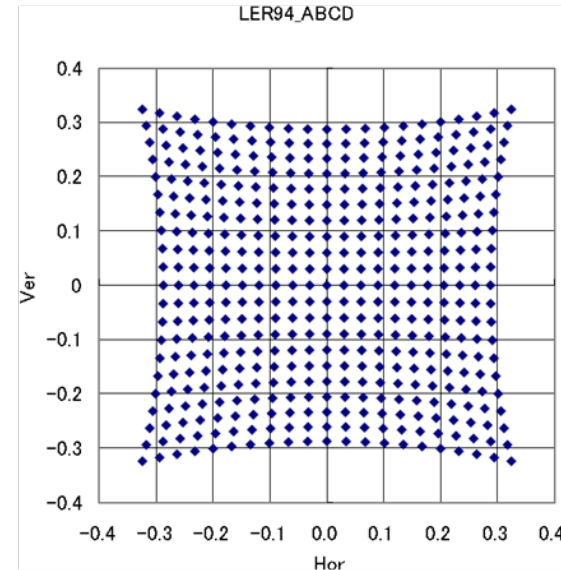
# ビーム位置を測るモニター



- 検出電極とビームとの距離が $r$ なら、電極に誘起される電荷は $1/r$ に比例する
  - 2つの電極をビームを挟んで対向させると2つの電極から出てくる電圧の差はビームのチェンバー中心からの変位に(おおまかには)比例する

# マッピング

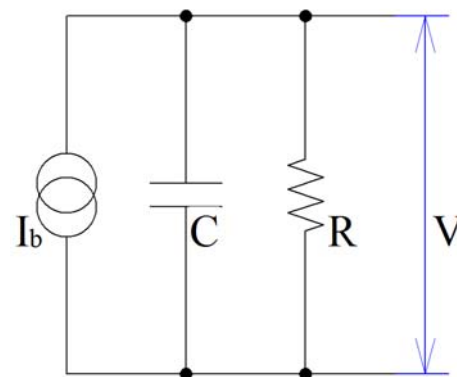
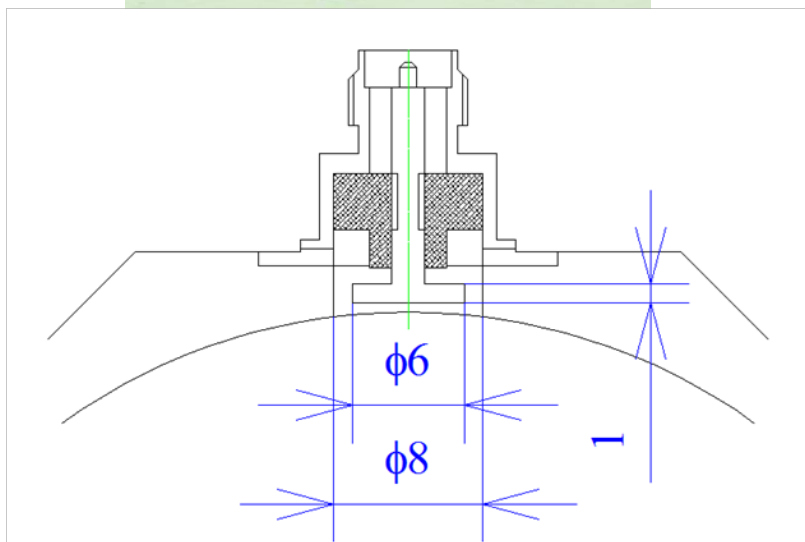
- 電極出力とビーム位置との関係
  - アンテナを入れ、電極に対して電場が垂直になる位置でアンテナを動かし、出力とアンテナ位置との関係を見る
  - 2次元境界要素法でビーム位置と電極に誘起する電圧との関係を見る



$$x = k_x \frac{V_1 + V_4 - (V_2 + V_3)}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}$$

$$y = k_y \frac{V_1 + V_2 - (V_3 + V_4)}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}$$

# ボタン型電極

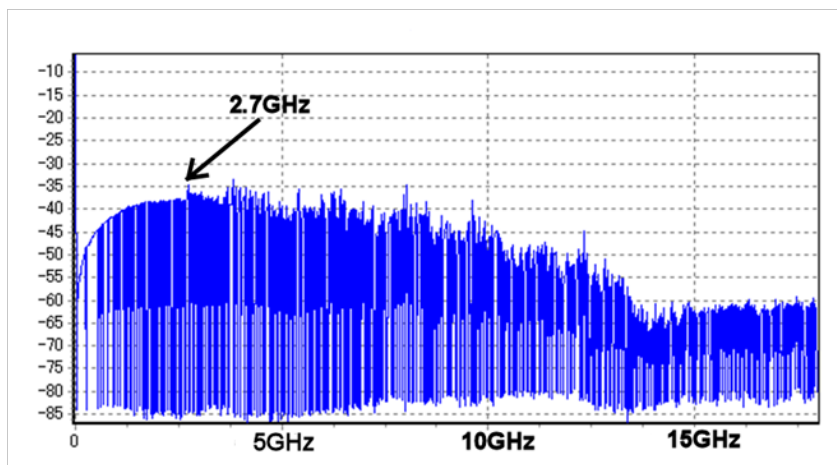
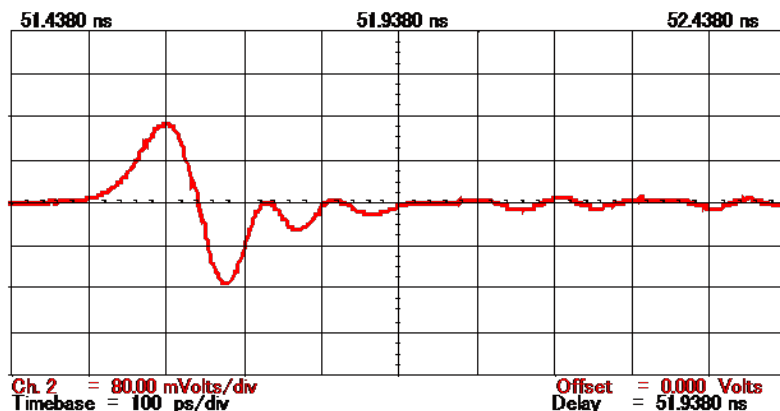


$$\frac{dq}{dt} = C \frac{dV}{dt} + \frac{V}{R}$$

$$V(s) = \frac{Q(s)}{C} \frac{s}{s + \frac{1}{CR}}$$

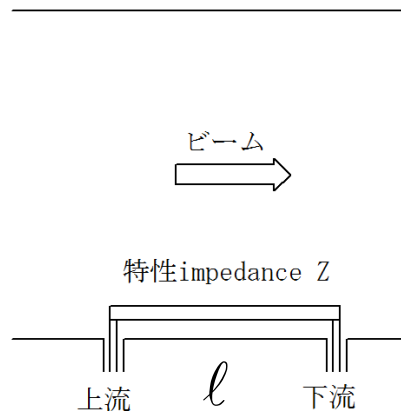
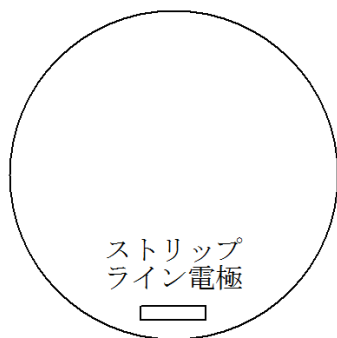
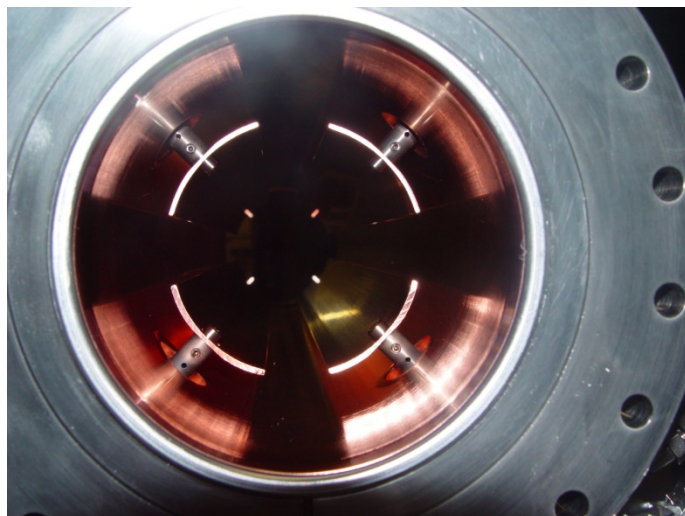
$$f_c = \frac{1}{2\pi CR}$$

# KEKB-LERでの例



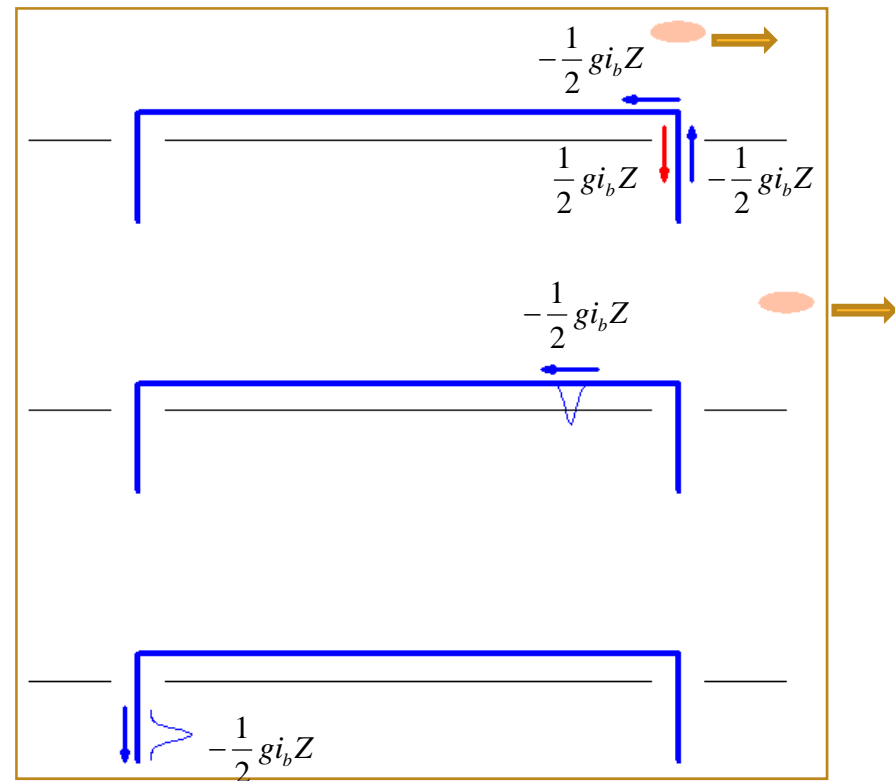
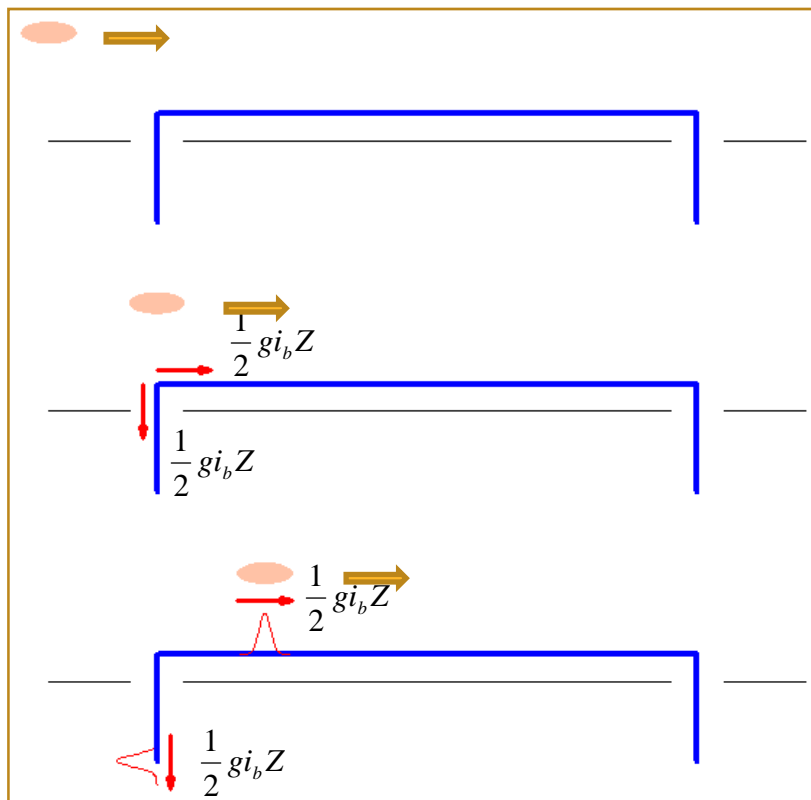
- 両極性のパルス
  - ガウス分布の微分型
- 2.7GHz付近からスペクトラムにでこぼこ
  - $\phi$  64mmチェンバーの同軸モードカットオフ
- ずっと高周波までスペクトラムがある
  - 良いことなのか、悪いことなのか

# ストリップライン電極



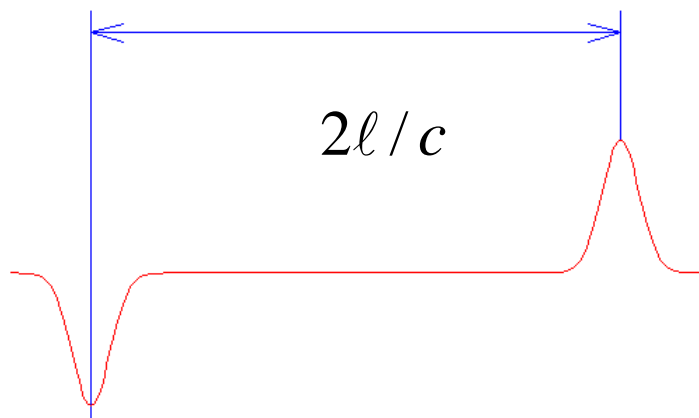
- 通常特性impedance  $50\ \Omega$  で設計する
  - ケーブル、フィードスルーが  $50\ \Omega$  だから
- $50\ \Omega$  は結構低インピーダンス
  - 突き出すとimpedanceは上がる
  - 板を狭くするとimpedanceは上がる
- モニター用には電極が真空チェンバー面位置になるように設計することが多い
  - 電極後ろ側チェンバーを引っ込ませる
  - 空洞構造になる

# ストリップライン電極の動作



# ストリップライン電極の出力

## ■ 上流側ポート

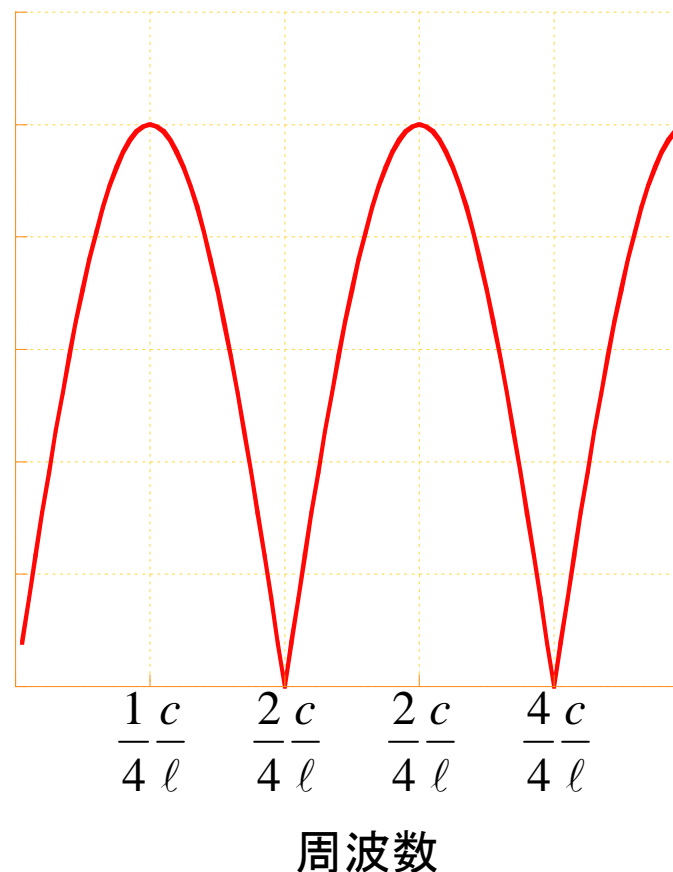


$$V_p = \frac{g}{2} Z (1 - e^{-j\omega l/c})$$

$$= gZ \exp(j(\pi/2 - k\ell)) \sin k\ell$$

## ■ 下流側ポートには出力なし

## ■ 周波数特性



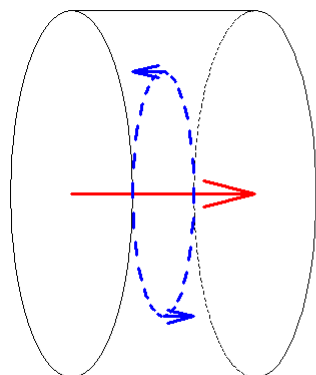


# ストリップラインおまけ

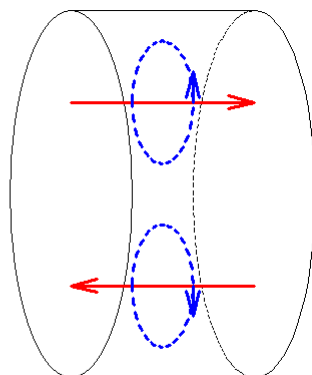
- 下流側ポートには出力は出ない
  - 下流側が短絡でも、上流側出力に違いはない(実際は違うが)
- 実際のストリップライン電極は、
  - インピーダンス不整合点からの反射
    - 上流、下流ともしっかりインピーダンス整合しないと
  - 構造的に複雑で精度が出しにくく、場所もおおく食う
  - ストリップライン幅からくる短パルス
  - 板が宙に浮いている(熱的に)ため、HOMなどがあると簡単にぶっ壊れる
    - 板が溶けたり、曲がったりする
  - ボタンに比べて大きな信号: 大電流マシンでは使えない

# 空洞型位置モニタ

- 非常に位置精度が要求される場所に
  - 超狭帯域(=高分解能)
  - 大きなゲイン
  - 機械的精度が良い



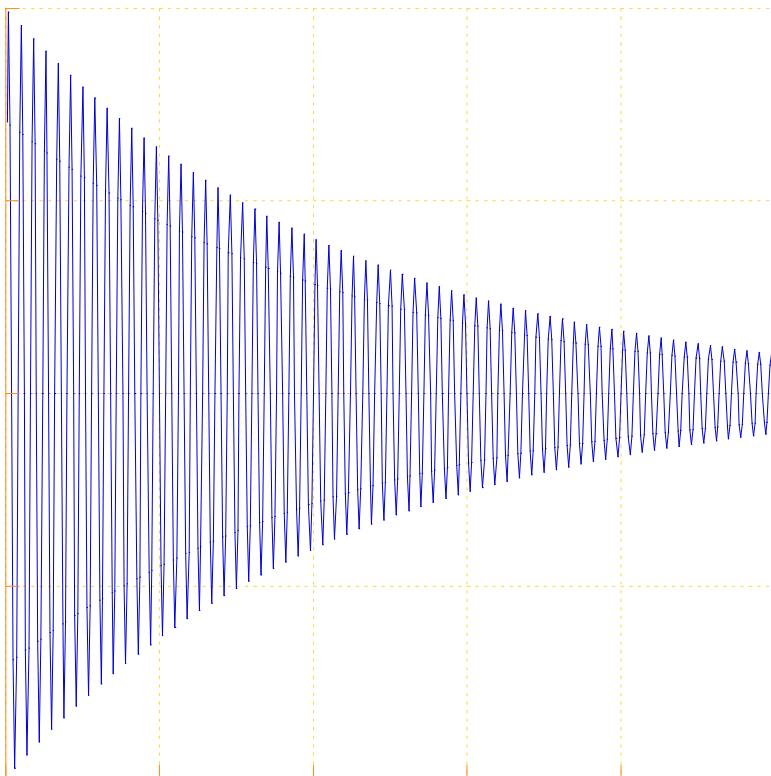
TM010モード



TM110モード(鉛直方向)

- TM110モードの大きさはビームの空洞からの横方向のずれに比例
- Qが大きいので
  - 信号の立ち上がりが遅い
  - 長い長いtailを引く
  - バンチ間隔が短い場合、前のバンチ信号との干渉がある

# Cavity BPMの出力



- 方向を判別するためには、位相を見る必要がある
- 振幅はバンチ電流に比例する
- TM010空洞と組み合わせて使うのが便利

# モニターの信号処理

- **時間分解能はどのくらい必要なのか**
  - バンチ毎の位置が必要なのか、ある程度なのか、あるいは非常に長い時定数で良いのか
- **精度、安定性はどのくらいが目標なのか**
  - 粗くて良いのか、超精密安定でないといけないのか

どんなヘッドを使うのか

- ボタン、ストリップライン、cavity BPM??

同じヘッドでも、処理方式によって大きく変わる

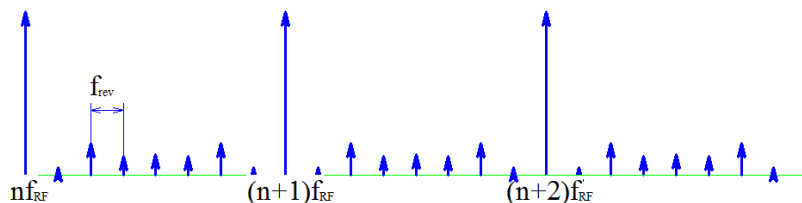
時間分解能が良い測定  
広帯域測定  
精度、安定性は???



高精度測定  
狭帯域測定  
時間分解能は??

# スーパーヘテロダイン方式

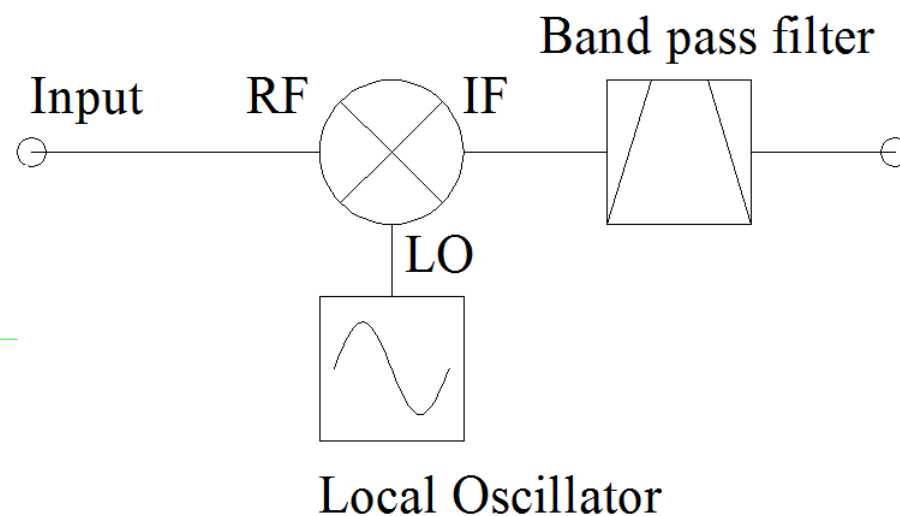
## ■ ビームのRF逓倍成分の強度を検出



- 高周波信号のままだと扱いにくいので、信号を低周波に変換、検波

$$A \sin(\omega_{RF} t) \times \cos(\omega_L t + \varphi)$$

$$= \frac{1}{2} A [\sin((\omega_{RF} + \omega_L) t + \varphi) + \sin((\omega_{RF} - \omega_L) t - \varphi)]$$



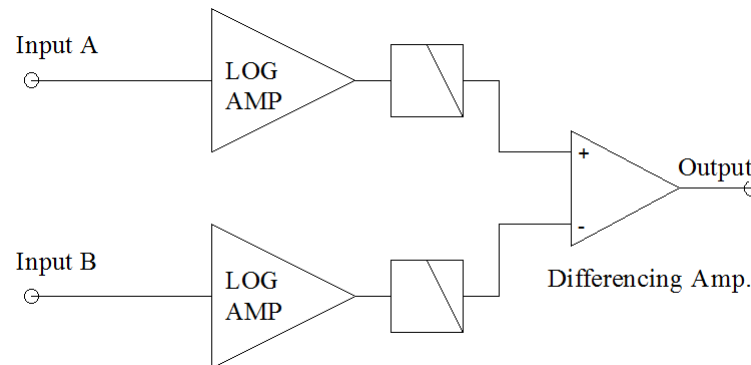
# スーパーヘテロダイン

- より狭帯域にするためには、中間周波数変換を2段(ダブルスーパー)、3段(トリプルスーパー)にする
  - いまでは(すくなくとも加速器分野では)使われない
  - 周波数変換は1段だけにして、比較的高い周波数のままAD変換して、DSPやFPGAを使って高速フーリエ変換をするのがトレンド
    - コスト、スピード、安定性いずれも優れている
- 4電極を測るのは
  - 4回路を使うと、回路毎のずれが心配:
    - 信号の方を切り替えるのが普通
    - 信号切り替え器の特性、クロストークに注意
- ビームの繰り返しが低い加速器、RFとちゃんと同期しているか怪しい加速器では使えない
  - ERLで使えるか結構微妙(無理に近い)

# Log-Ratio法

- 対向する2つの電極から出てくる信号から位置を出す近似式

$$x = \frac{K}{2} \log \frac{V_A}{V_B} = \frac{K}{2} (\log V_A - \log V_B)$$



- 非常に大きなダイナミックレンジ
- それなりに良い直線性
- 45度傾いていてもOK

$$x = K_x [\log(A/C) - \log(B/D)]$$

$$y = K_y [\log(A/C) + \log(B/D)]$$

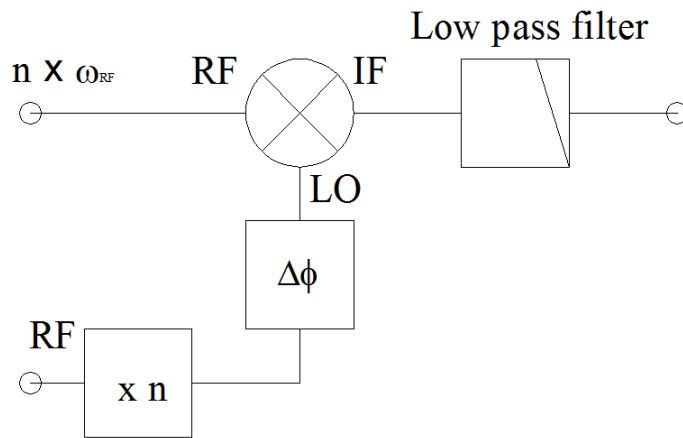
# Log-Ratio法の特徴

- Logアンプの特性により、ゲインリップルがある
  - ビーム位置の測定にうねりのような形で誤差が入る
- 入力レベルが低すぎると、出力が暴れる
- 検出周波数は高いが、応答はそれほど早くない
  - 狭いバンチ間隔でのバンチ位置の分離は無理、ある程度離れていけばOK。
- たまにしか来ないビームから、1.3GHz周期で来るビームまで同じ回路で測定出来る



# さらに広帯域な測定

## ■ バンチ毎の位置分離



電極の周波数特性が悪いとダメ  
 $n\omega_{RF}$ 成分を取り出すフィルターの特性(信号の切れ)も大事

LOとRFが同相

$$\begin{aligned}
 & I_b \cos(n\omega_{RF}t + \varphi(t)) \times \cos(n\omega_{RF}t) \\
 &= \frac{I_b}{2} [\cos(2n\omega_{RF}t + \varphi(t)) + \cos(\varphi(t))] \\
 &\rightarrow \frac{I_b}{2}
 \end{aligned}$$

LOとRFが90度

$$\begin{aligned}
 & I_b \sin(n\omega_{RF}t + \varphi(t)) \times \cos(n\omega_{RF}t) \\
 &= \frac{I_b}{2} [\sin(2n\omega_{RF}t + \varphi(t)) + \sin(\varphi(t))] \\
 &\rightarrow \frac{I_b}{2} \varphi(t)
 \end{aligned}$$

# 広帯域検出

- 位置検出したいとき
  - バンドパスフィルターを通した後、180度Hybridで信号の引き算をし、in-phase検出をする
- 進行方向位置検出したいとき
  - バンドパスフィルターを通した後、0度Hybridで信号の足し算をし、90度位相で検波する
- どっちにしても、出力はバンチ電流に比例する
- 独立に0度(I)、90度(Q)情報を観測して

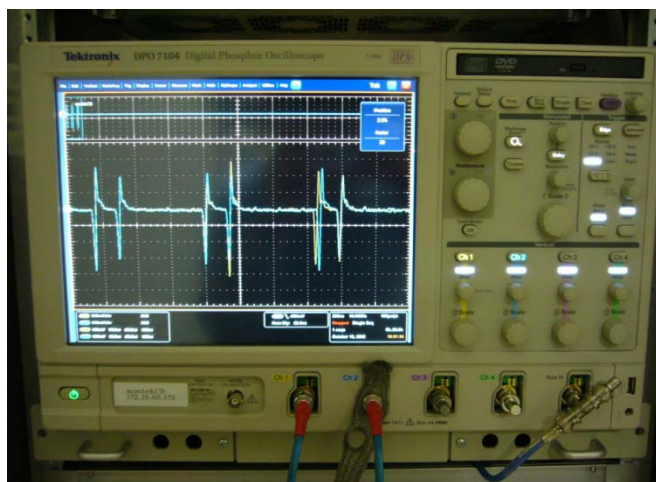
$$V = \sqrt{I^2 + Q^2}$$

$$P = \tan^{-1} \frac{I}{Q}$$

I/Q検波回路

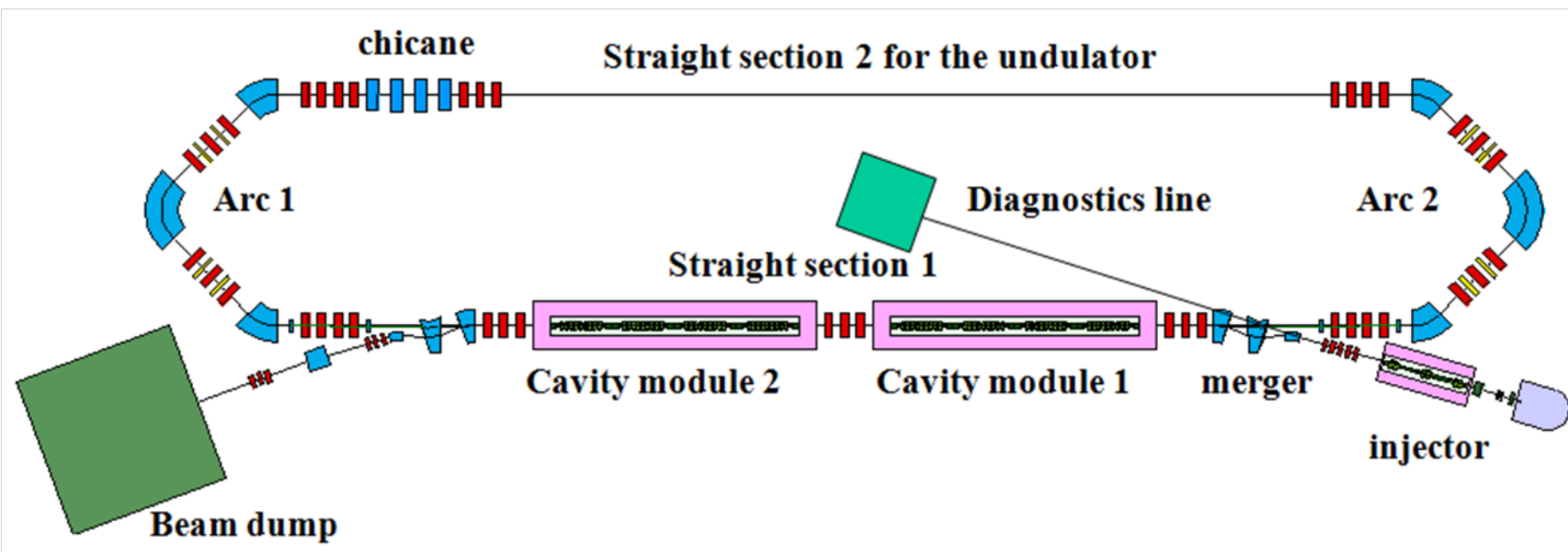
# オシロスコープを直接使う

- 最近のオシロスコープはほとんど計算機
  - オシロスコープで信号を検出、処理までやらせてしまう
  - 民生品なので安価、汎用性があり、しかも高機能



- 一般にオシロスコープのクロックは加速器の基準信号と全く非同期
  - やたらにメモリーが必要なことがある
- 必ずしも使いたい機能が使いやすいわけではない。思った通りに動かない、間抜けな動作をする可能性がある。

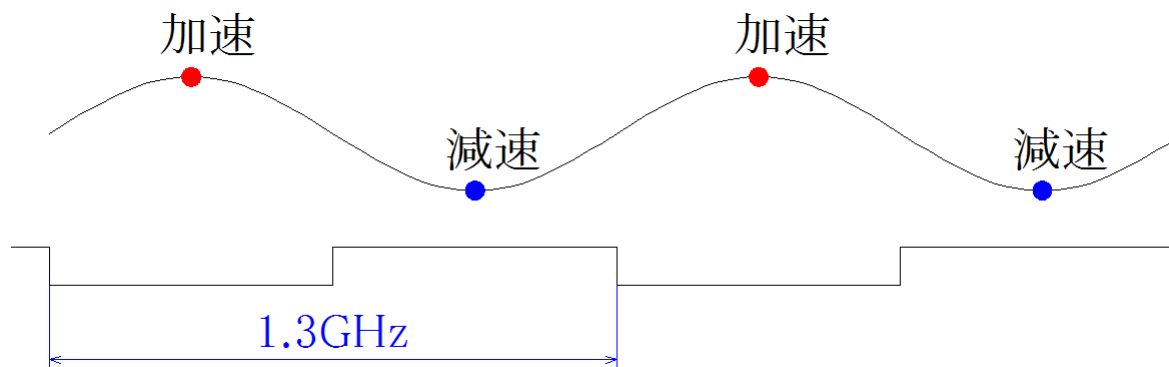
# ERL試験加速器のモニターに関連した話題



# Topics:超広帯域ボタン電極の開発

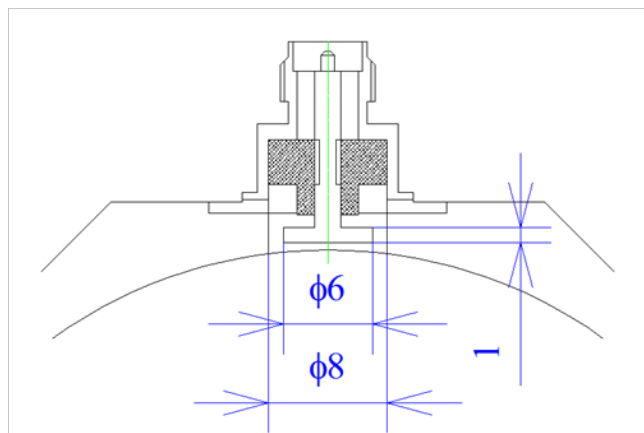
## ■ 主加速部

- 入射ビーム(加速)と周回ビーム(減速)が同居
- 基本的に2つの軌道は独立
- 高インピーダンス部なので、精密な軌道調整が必須



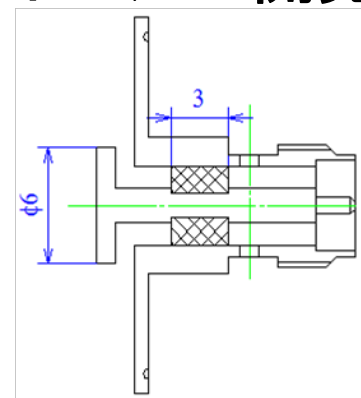
- 380ps以内の時間応答が必要:
  - 検出電極の時間応答
  - 高速スイッチ

# ボタン電極



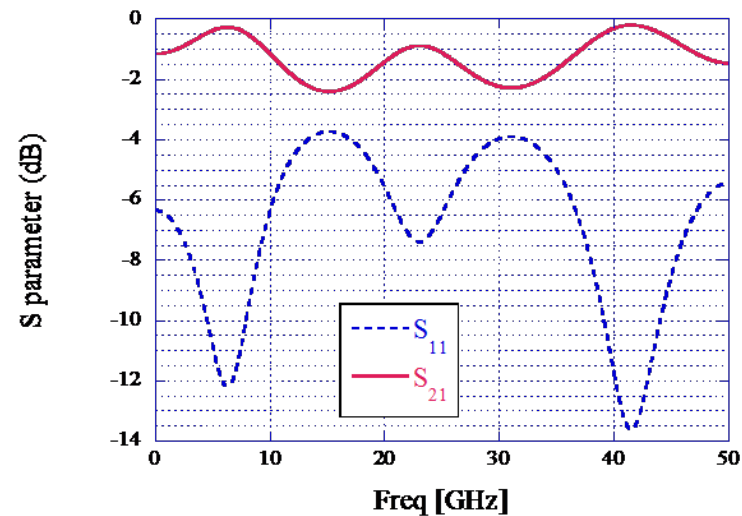
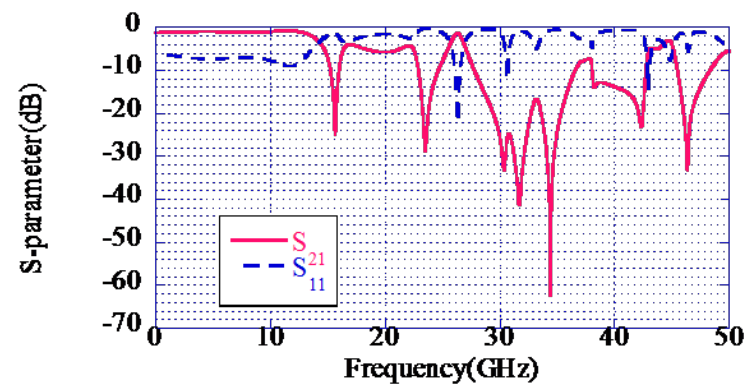
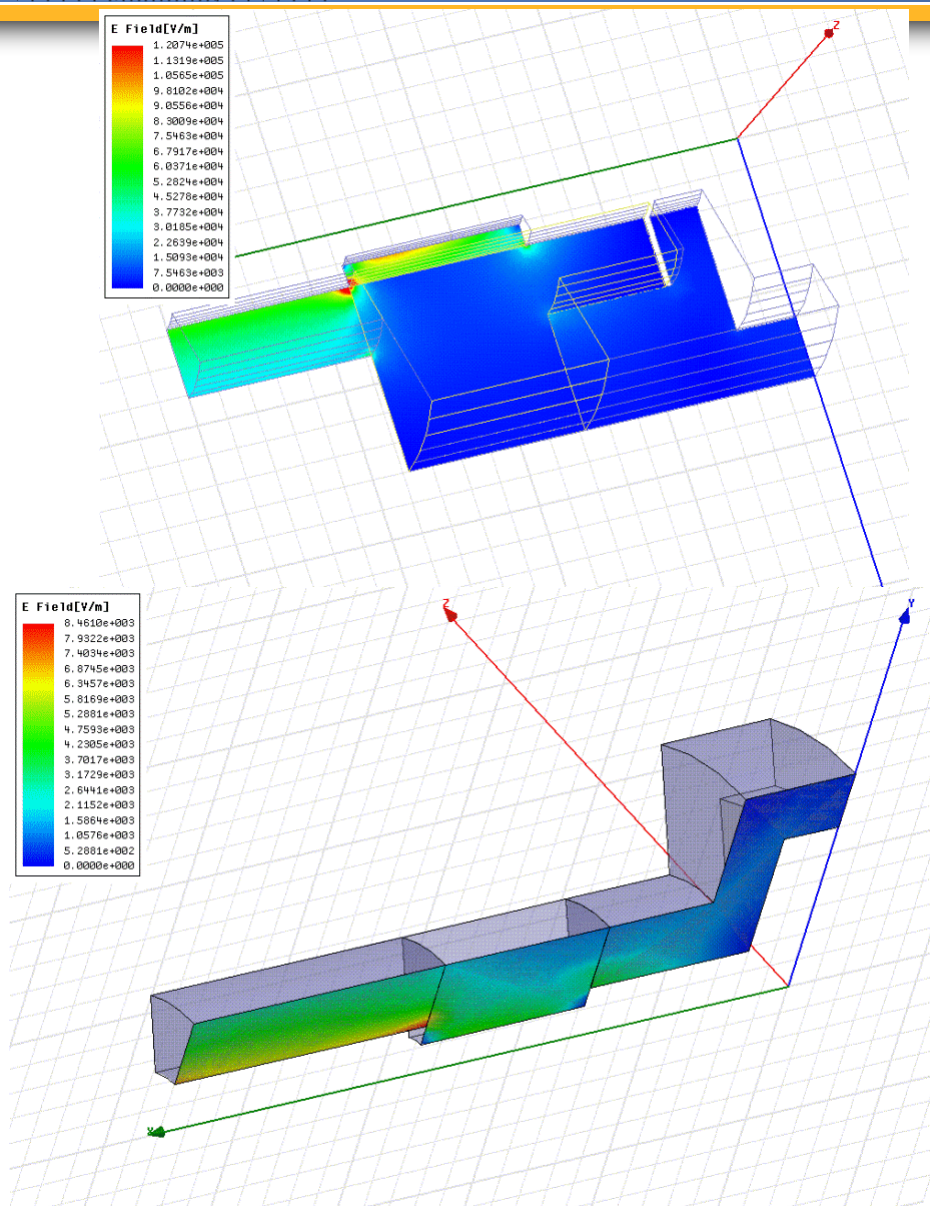
- セラミックスのところではインピーダンス整合困難(大きな $\epsilon_r \sim 10$ のため)
  - 低周波だけで整合させることは可能だが、その分高周波側が大きく乱れる
  - 大きな誘電率のままでは、あまり工夫の余地がない

- ガラスをシール材としたフイードスルー開発

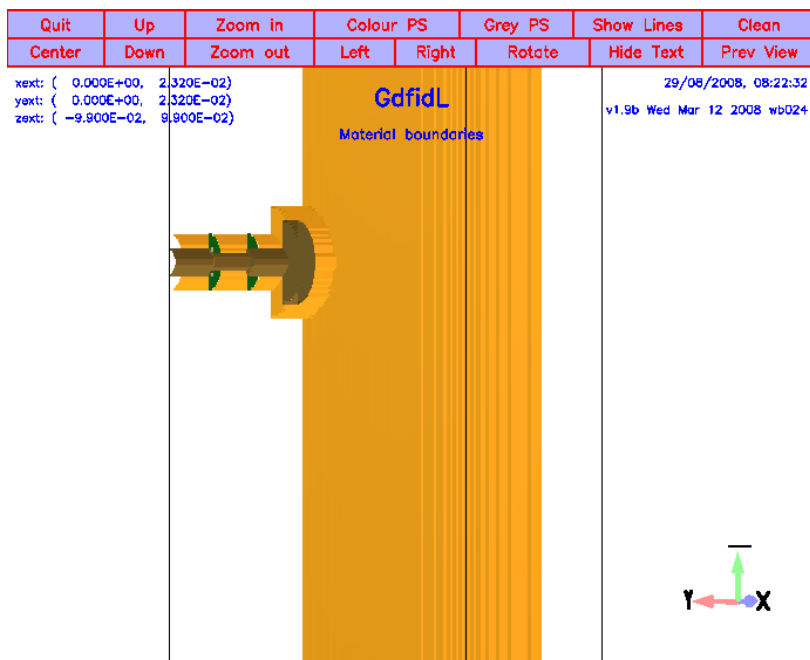


- 低 $\epsilon_r (\sim 4)$
- 複雑な形状は無理
- 融点はセラミックスに比べて低い
  - 耐衝撃性、対パワー不安

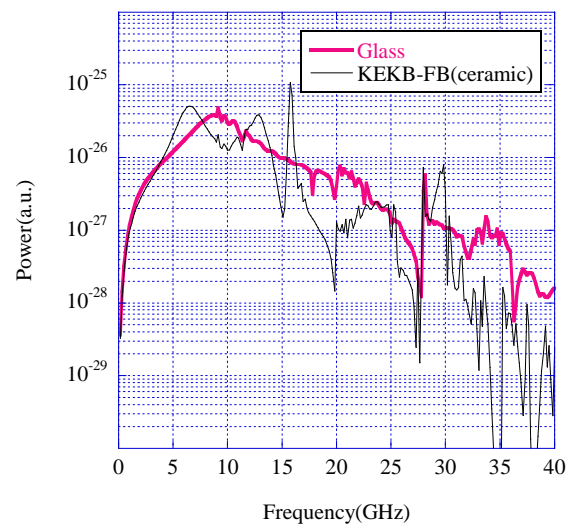
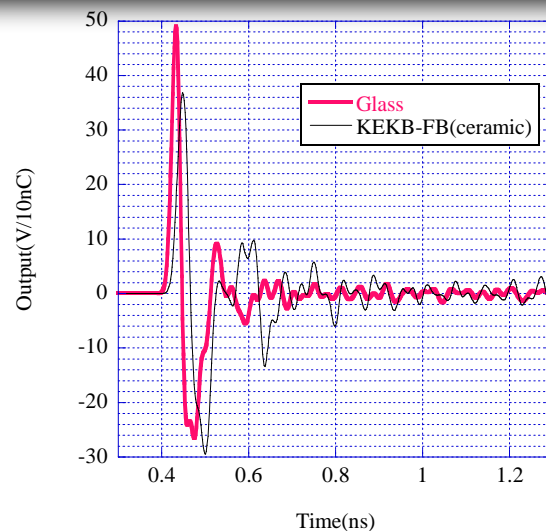
# 高周波シミュレーション(周波数領域)



# 高周波シミュレーション(時間領域)

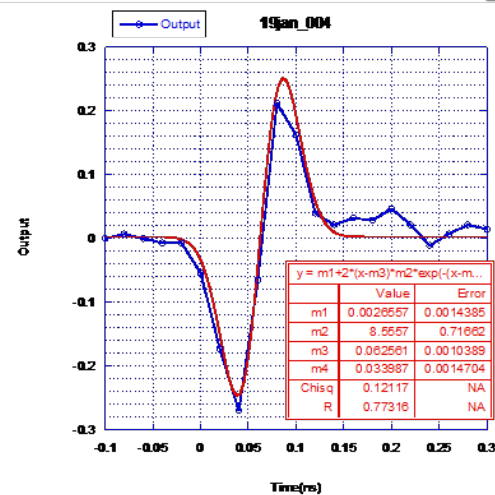
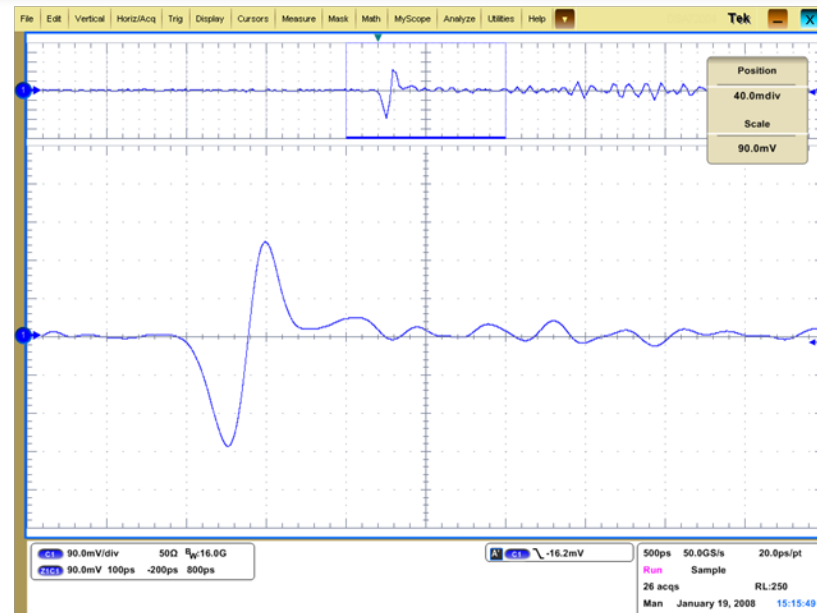


ビームを走らせ、電磁場を計算する  
 wake field、trapped mode、  
 デバイスの応答





# PF-BTでビームを通した実験



# まとめ

- 電氣的なビームモニターについて概略を紹介しました
  - ERLとはあまり関係ない話が多かったことをお詫びします
- 今後の大加速器
  - 非常に厳しい運転条件
    - 極小電流から大電流まで
    - 超低エミッタンス、短バンチ長
    - 不安定点に近い運転パラメータ
  - ビームモニターへの(非常に厳しい)要求、責任
    - 分解能、精度、時間応答