

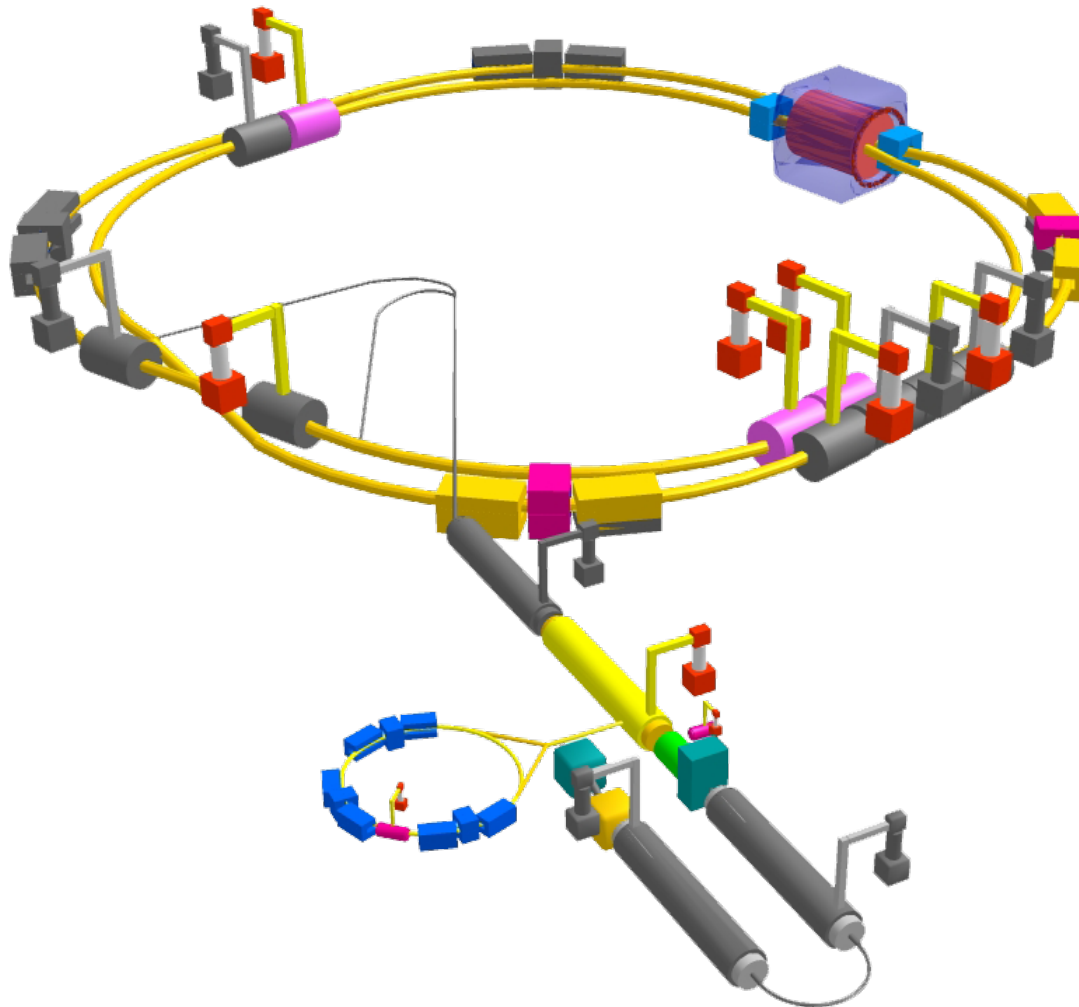


# SuperKEKBリング用 個別バンチフィードバックシステム

Makoto Tobiyama, John W. Flanagan(KEK)

Alessandro Drago(INFN-LNF)

# SuperKEKB accelerators



- Circumference 3km
- LER:  $e^+$  4GeV 3.6A
- HER:  $e^-$  7GeV 2.6A
- $f_{RF}=508.886\text{MHz}$
- $h=5120$
- Low emittance  
3.2/4.6nm with  
 $\sim 0.28\%$  xy-coupling
- Bunch length 6/5  
mm @1mA/bunch
- $\beta^*$  at IP H/V  
32/0.27mm  
25/0.3mm
- Luminosity  $80 \times 10^{35}$   
- x40 of KEKB

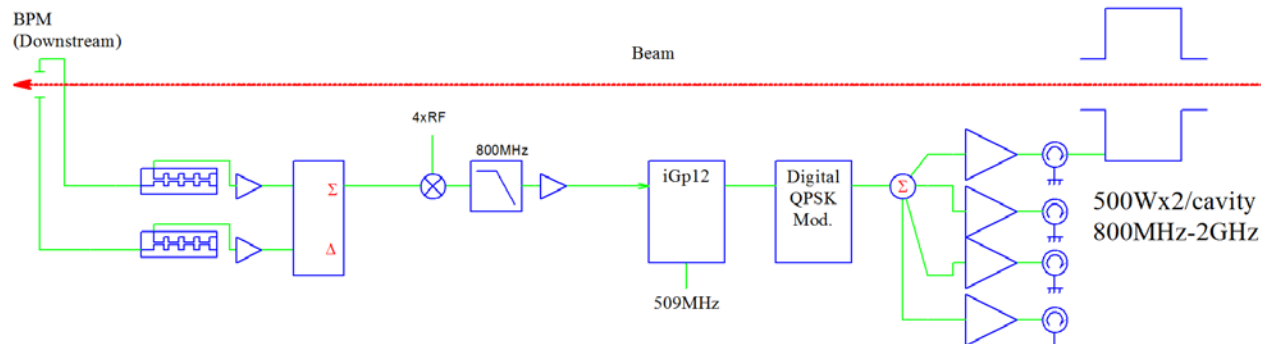
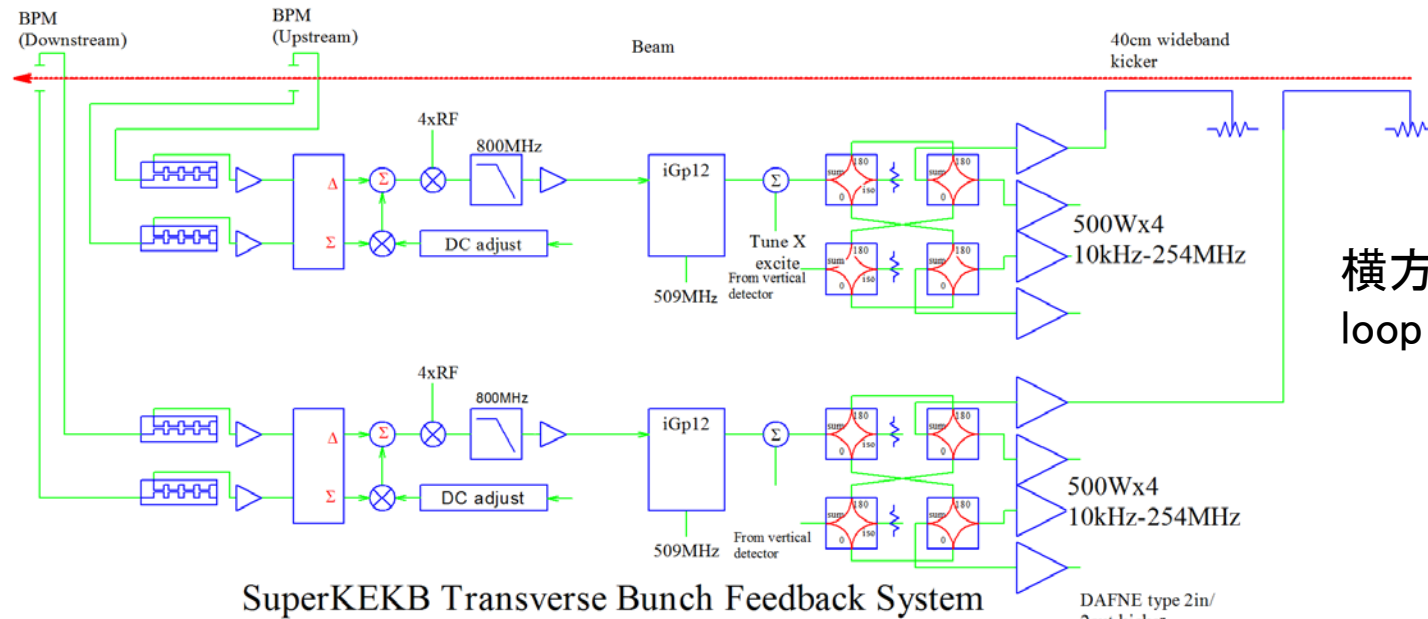
# SuperKEKB Phase 1 運転

- 2016年2月1日から6月28日まで
- 衝突点最終集束系、Belle2検出器ナシの運転
  - ディテクターテストのためBeast検出器
- 目標
  - ハードウェアの動作確認
  - 運転ソフトウェア、ツールなどの開発、確立
  - Belle2検出器インストールの準備
    - 真空焼きだし(~720Ah)
      - 特にLERはほとんどの真空チェンバーが新品
  - 大電流運転(1A目標)
  - 最終集束系および検出器ソレノイド磁場なしのOptics調整(低エミッタンス、低xy結合)

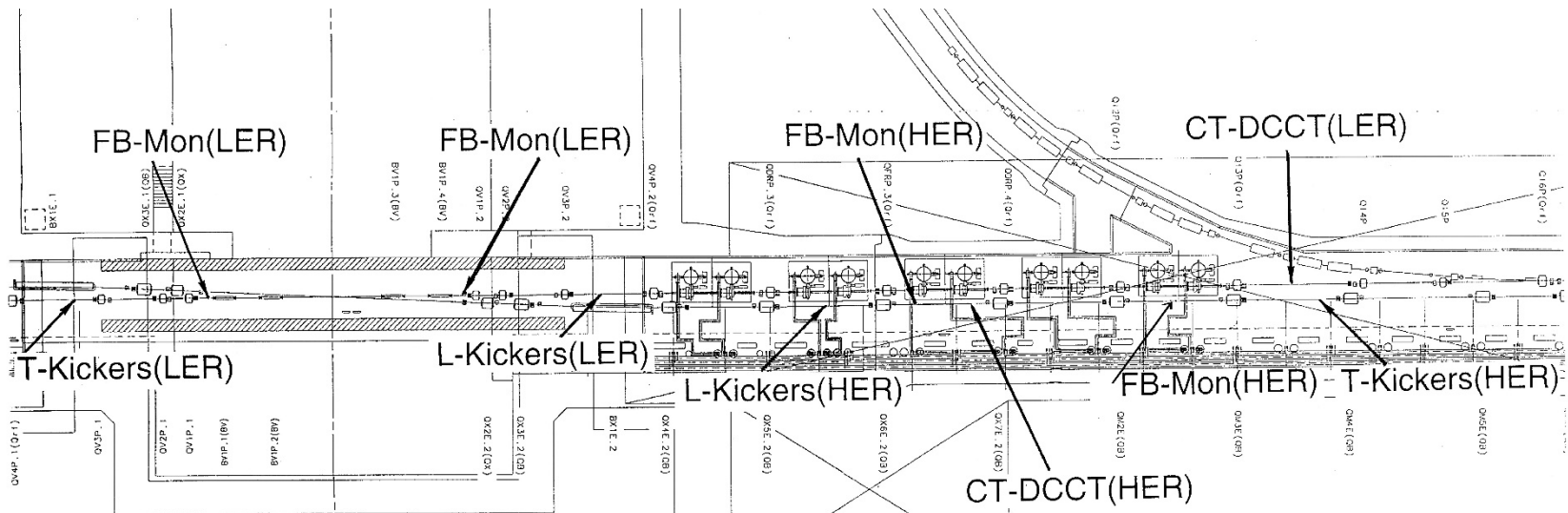
# 大電流・多バンチ蓄積リング

- **多くのモードからなる、非常に強いビーム不安定がおきやすい**
  - イオンラッピング、Fast Ion instability(HER)
  - 電子雲不安定(LER)
  - 真空コンポーネントのTrapped mode
  - 加速空洞のHOMの残り
- **個別バンチフィードバックシステムで不安定を抑制する**
  - 1つずつのバンチの振動を個別に検出し、それを抑制する個別のフィードバックキックをバンチに与える
  - 横方向(水平、鉛直)
  - 進行方向

# Bunch feedback systems

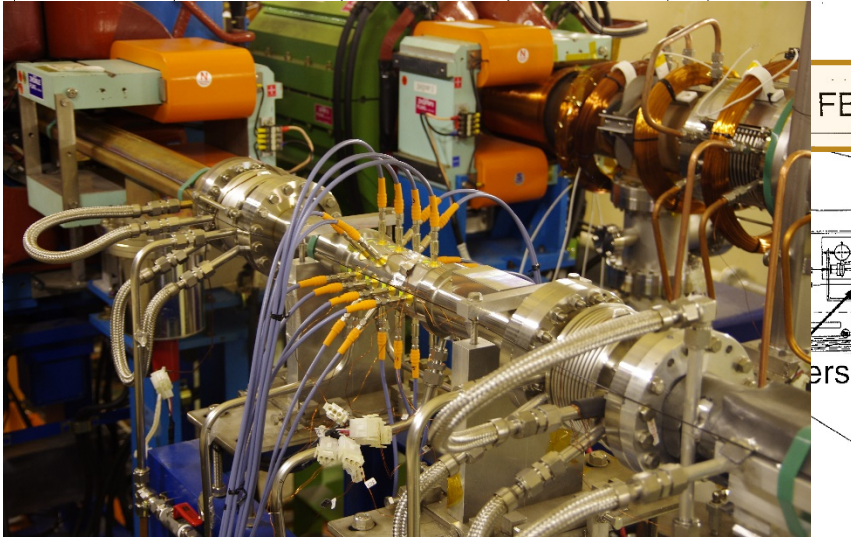


# SuperKEKB富士直線部





# SuperKEKB 富士直線部

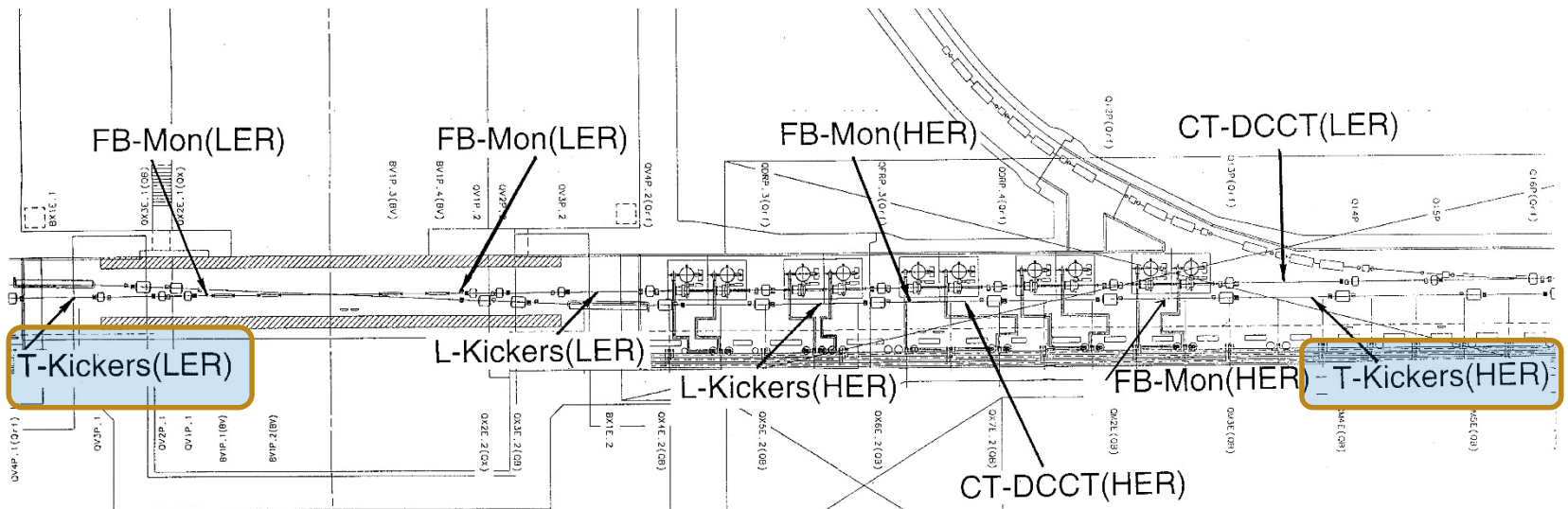


ガラスシール型  $\phi 6\text{mm}$  電極  
24個  $\times$  2 / Ring





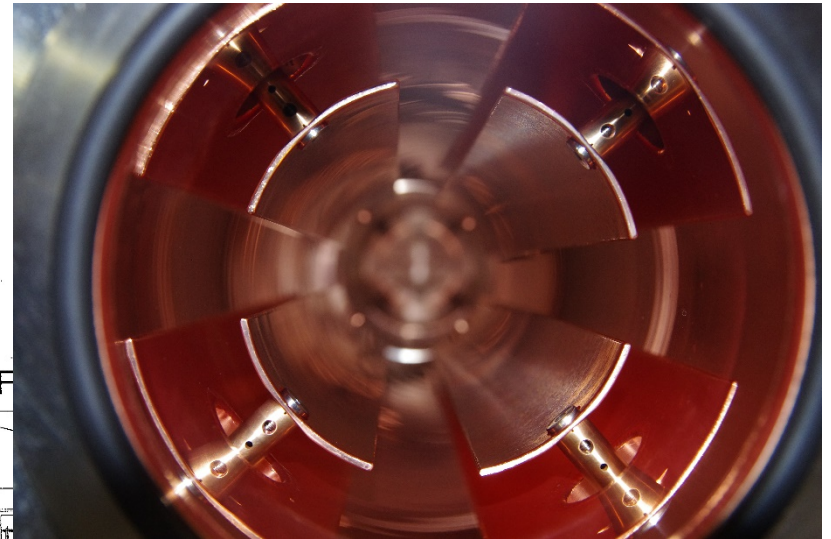
# SuperKEKB富士直線部



# SuperKEKB 富士直線部



横方向ストリップライン  
キッカー

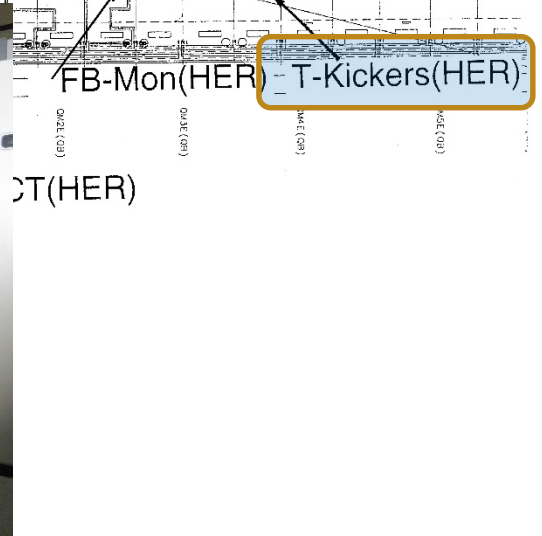


T-Kickers(HER)

横方向フィードバック用  
VHFアンプ(10k-254MHz  
500W)

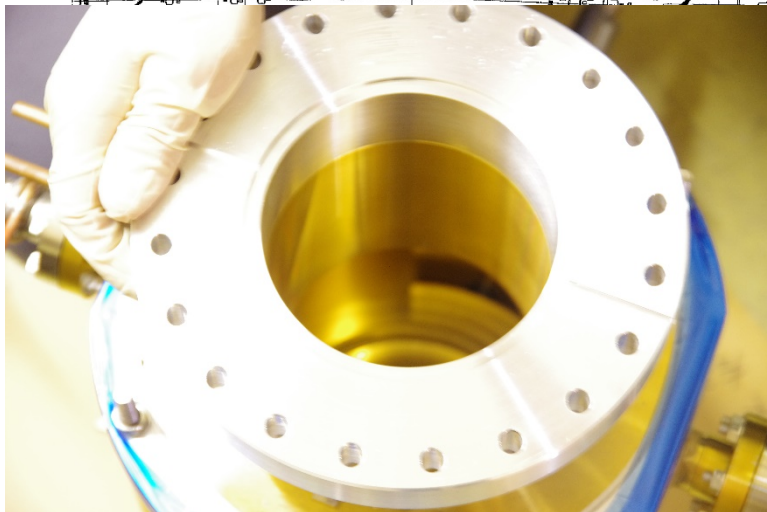
FB-Mon(HER) T-Kickers(HER)

DT(HER)

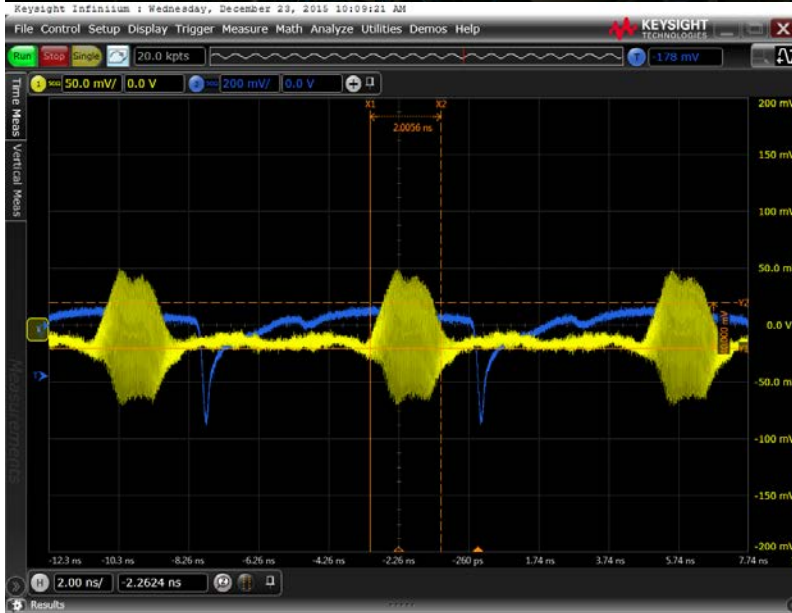
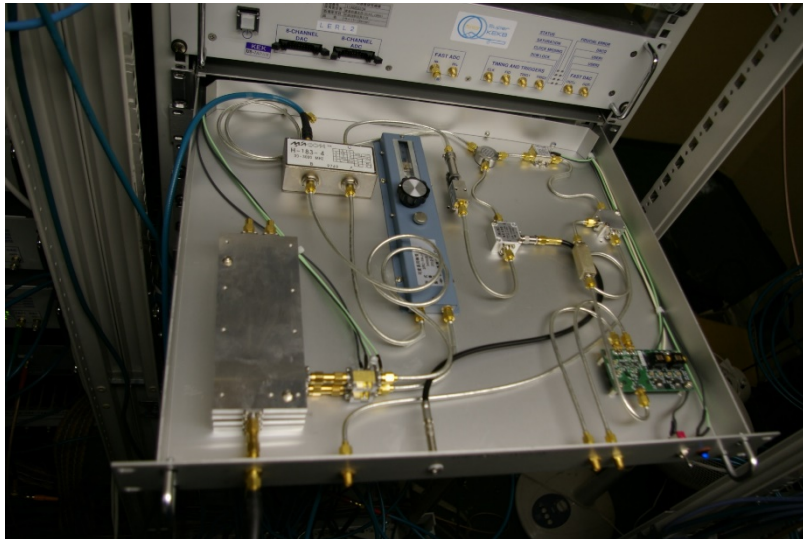




# SuperKEKB 富士直線部

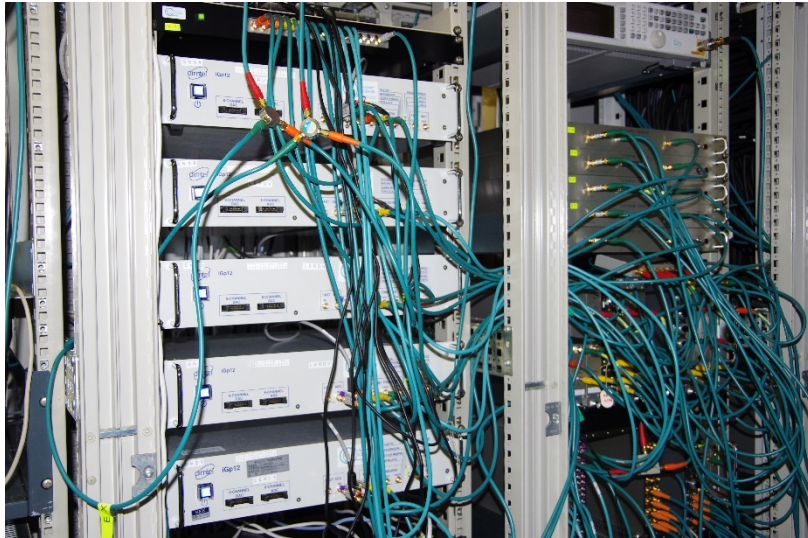


# フィードバック位置検出回路



- 2GHz(RF × 4)成分を3Tap combフィルターで抽出
- Tromboneディレイでタイミングを合わせ、180度ハイブリッドで引き算
- Sum信号を使い、バンチ電流によらないオフセットキャンセル回路
- 2GHzで検波、DCアンプで増幅
- 低ノイズに留意している

# iGp12フィードバックプロセッサ

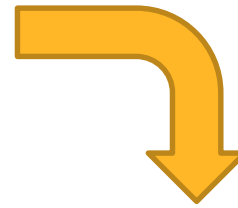
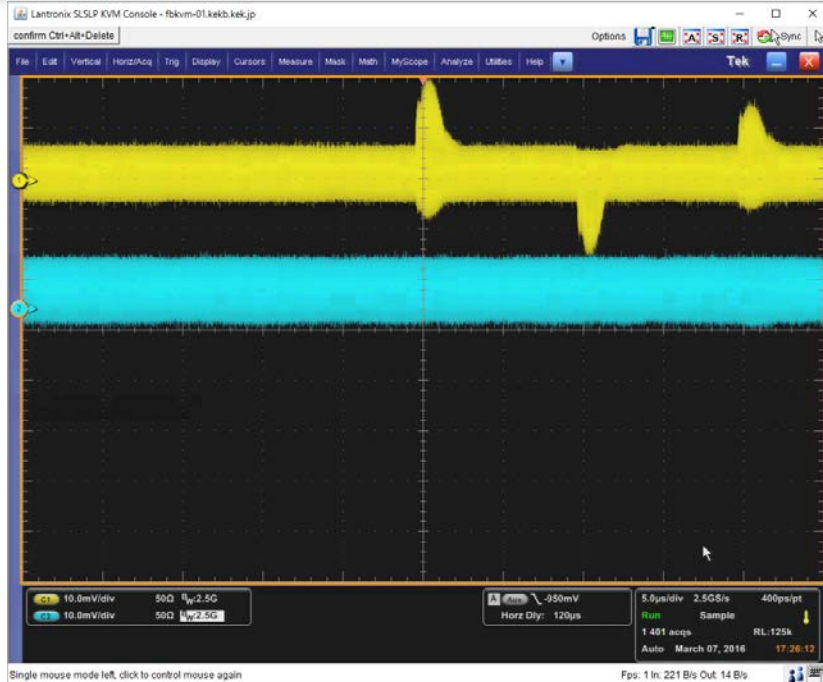


9台(LER 5台、HER 4台)のiGp12と1台のiGp8(HER)を使用した

検出系の感度:  
580 ADC count/mm/0.3mA

- 日米協力事業でSLACと開発したGproto/iGpを発展
- 12bit ADC/DAC
- Virtex5 FPGA
  - VXS95T or VSX50T
- 10-20 tap FIR(KEKB)
- 12MBメモリー(transient-domain analysis)
- Beam Transfer Function測定とPLLによるSingle bunch excitation

# FB関連モニター(1)検出器信号の直接利用

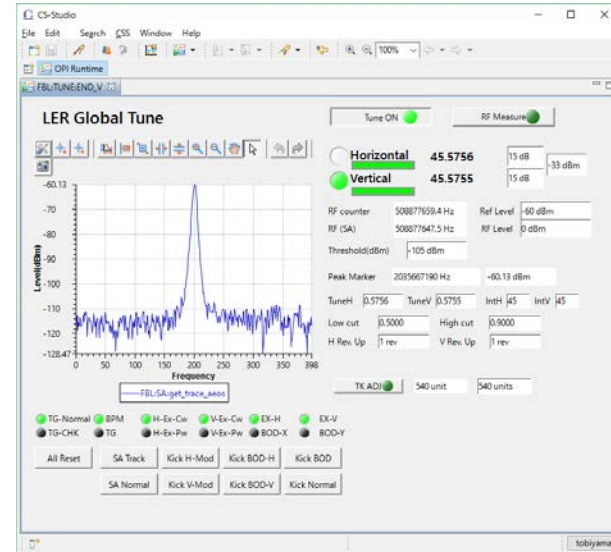
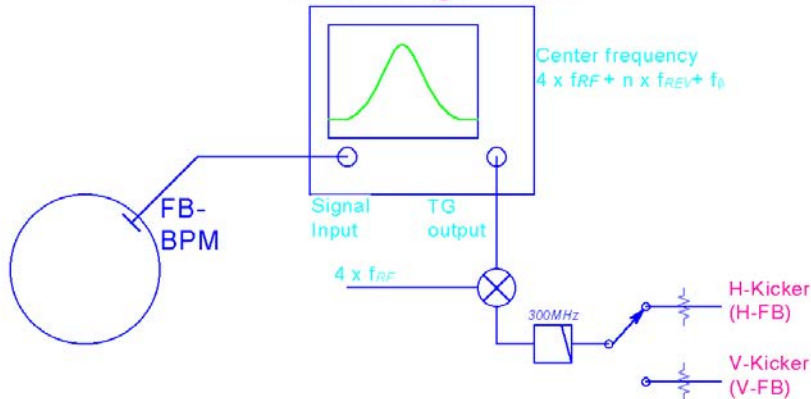


FB位置検出回路出力をオシロスコープで観測、CCRにネットワーク経由で転送

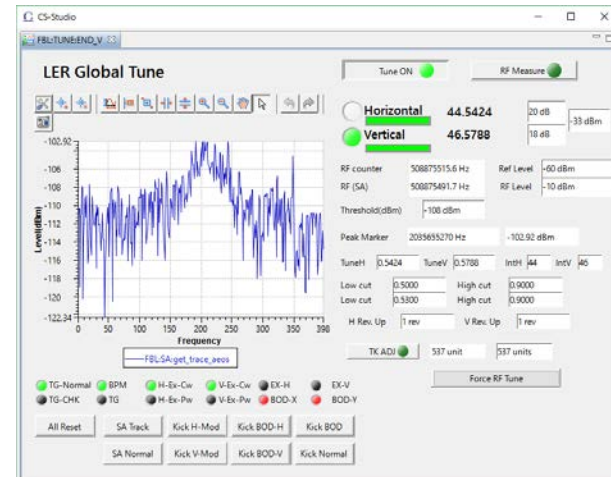
# FB関連モニタ(2)ベータトロンチューンモニタ



Spectrum Analyzer with Tracking Generator



## 大電流では測定困難





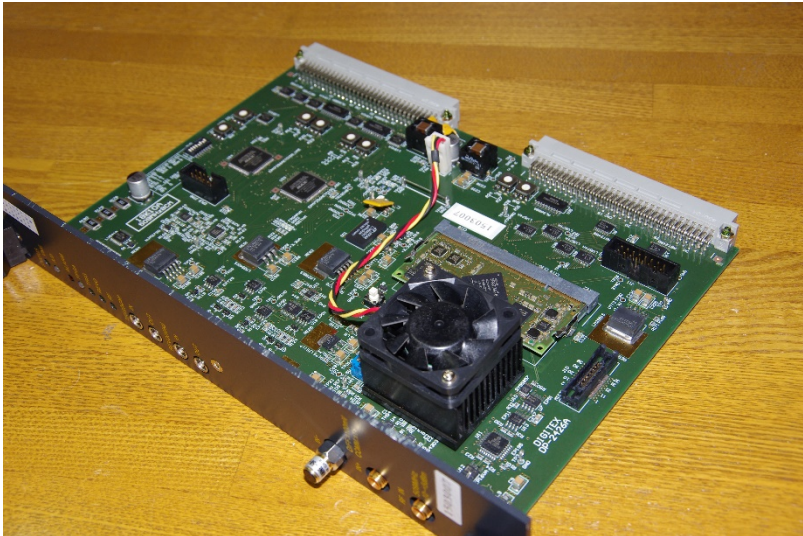
# FB関連モニタ(2) single bunch tune



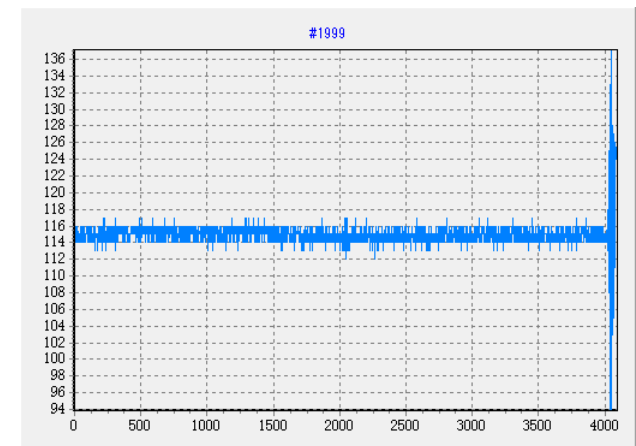
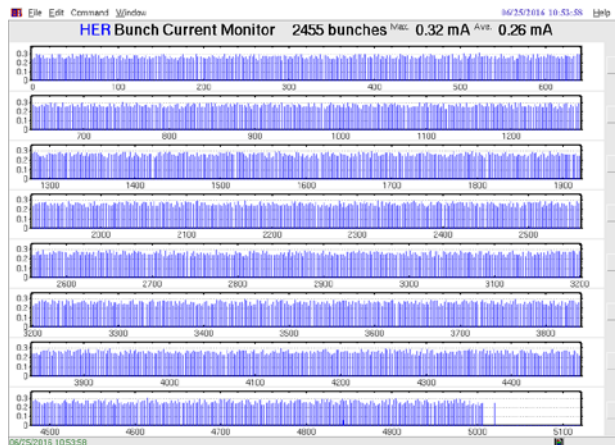
測定バンチ(フィードバックオブバンチ)のバンチ電流と、Single Bunch PLLで測定されたベータトロンチューン

- iGp12のBTF/SingleバンチPLL機能でFBオフのバンチをexcite
- バンチトレインに沿ったtuneの変化測定
- Gated Turn-by-turnモニターを使ったoptics測定

# FB関連モニタ(3)バンチ電流モニタ/BOR

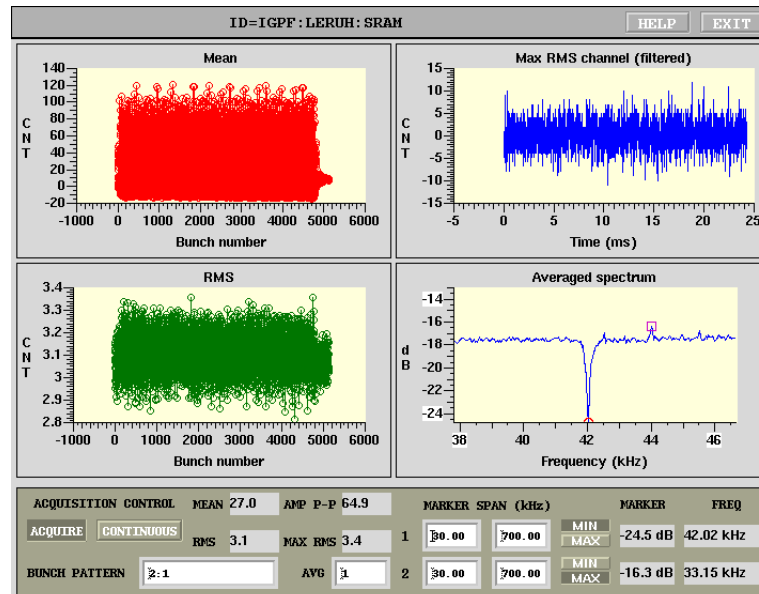


- FB検出回路出力を使用
- 8bit ADC 最大メモリ  
80MB(BOR)/5120(BCM)
- 入射トリガ(最大50Hz)あるいは  
1Hzでデータ取得、EPICSデー  
タにするとともに、入射バケット  
制御用IOCにReflective  
memoryでデータ転送(BCM)
- ビームアポート直前のデータ記  
録(BOR)



# 横方向FBシステムのコミッショニング

- HER/LERとも小電流、多バンチ状態で非常に強いビーム不安定が起き、ビーム蓄積が困難
- フィードバックシステムタイミング合わせ、フィードバック位相調整を行い、フィードバックを生かす
  - 不安定を抑制し、非常に順調なビーム蓄積、焼きだし
- フィードバックループ内spectrumを見て、位相を最適化する



# Transient-domain analysis

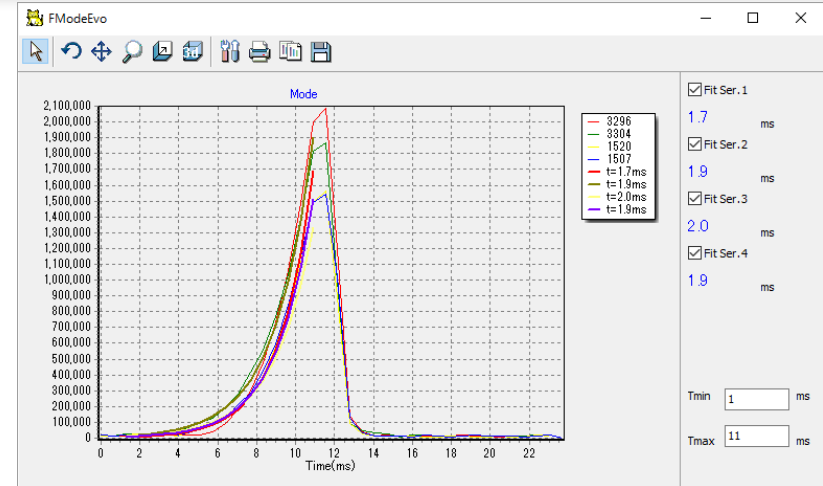
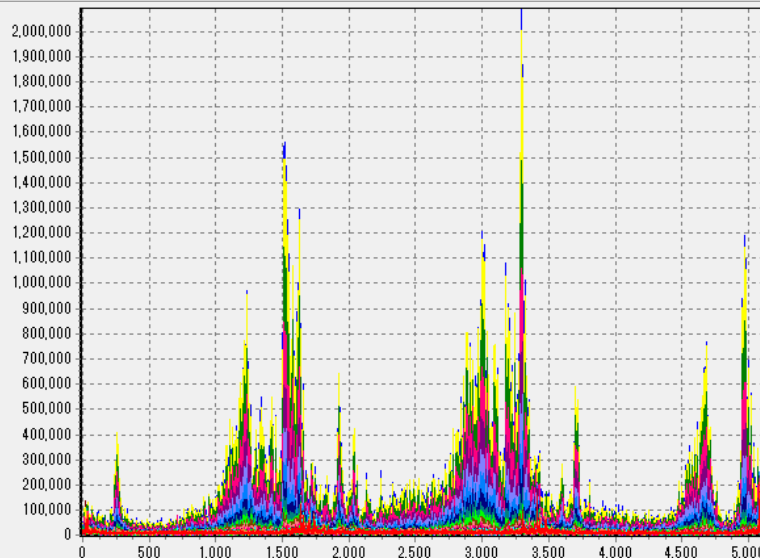
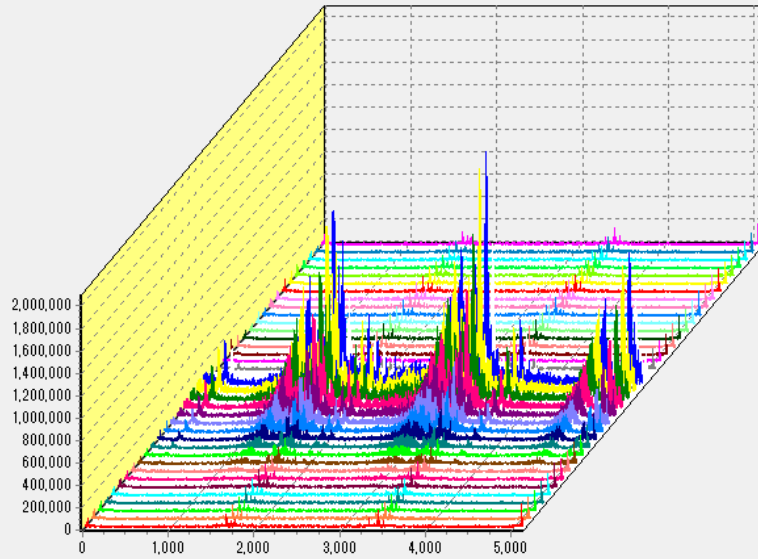
- バンチフィードバックシステムで不安定を抑制していたものを、ある時間だけFBをオフし、不安定の成長を観測する
  - 不安定モードの観測
    - 不安定のはじまりを観測でき、理論との比較がしやすい
    - モードの情報から、不安定の原因を探求しやすい
    - はじめに成長するモード、成長の様子などよりくわしい情報が得られる
  - フィードバックシステムの性能が分かる
    - 不安定の成長時間と、それを抑制するダンピングタイムにより正確なフィードバックダンピングタイム
    - 成長時のtuneとダンピング時のtuneからFBがresistiveかどうか分かる

# 実際には

- iGp12のGrow-damp機能を使う
- 2台のiGp12を同時にFB OFF、5ms～15ms後にFB ONしてその間のデータを取る
  - スタートして2ms後にFB OFF、その10ms後にONが標準パターン
- iGp12のデータ(約2400 turn)を
  - 5120x128周(可変)データを切りだし
  - Base 5のFFT
  - FFTの結果(amplitude)中の指定周波数のサイドバンドを全モードについて測定
  - これを64ステップ(64ごと重ね合わせ)で時間発展を表示する

# LER横方向フィードバックの例

C:\Users\tobiyama\Documents\Delphi\KEKB-iGp12\Win32\Debug\2016-05-26-14-28-43.dat Mode



8 Tap FIR filter

756mA, by 3 filling, 0.5mA/bunch

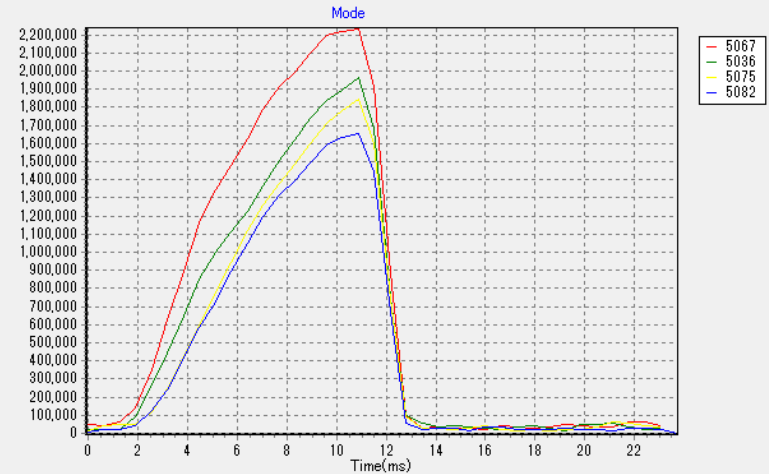
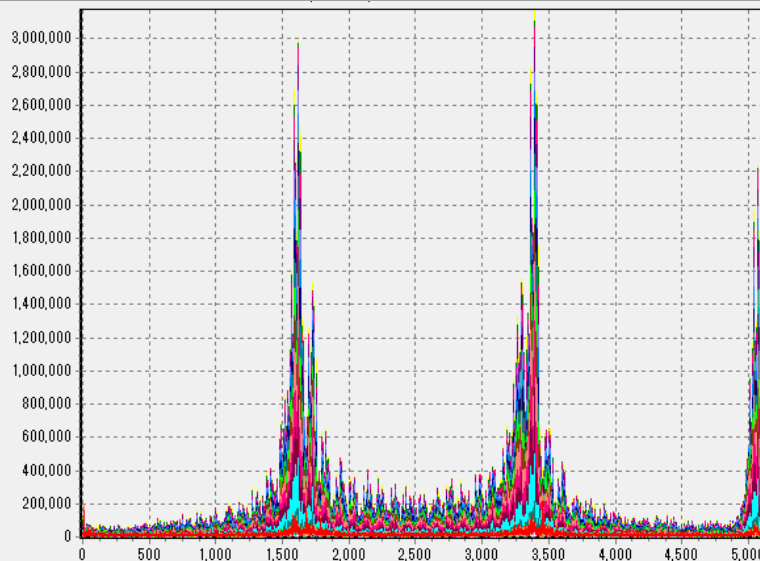
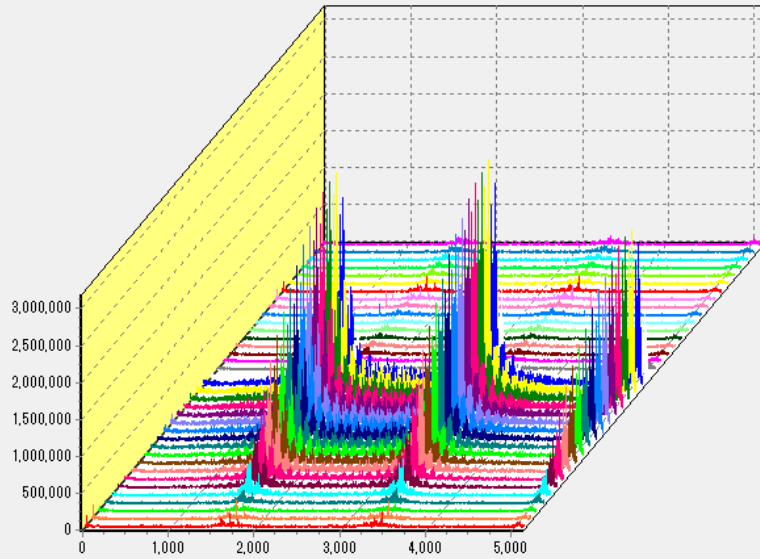
Vertical

Growth  $\sim 1.7$ ms

FB damp  $\sim 0.5$  ms

# HER横方向フィードバックの例

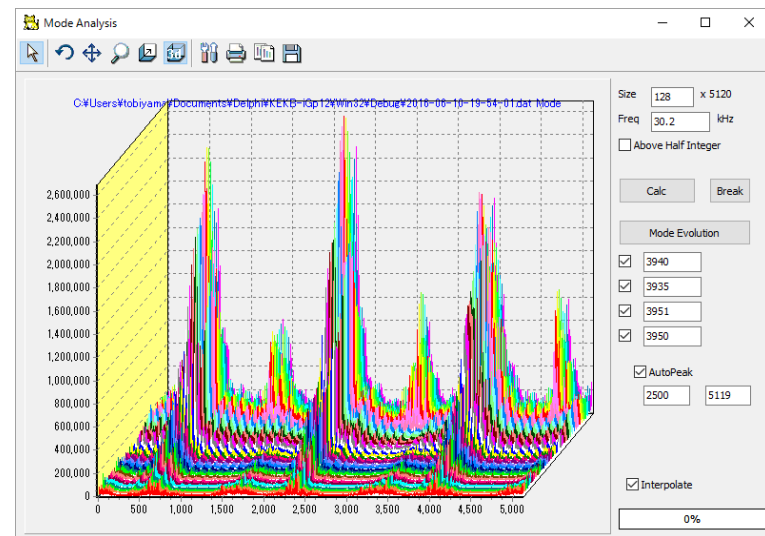
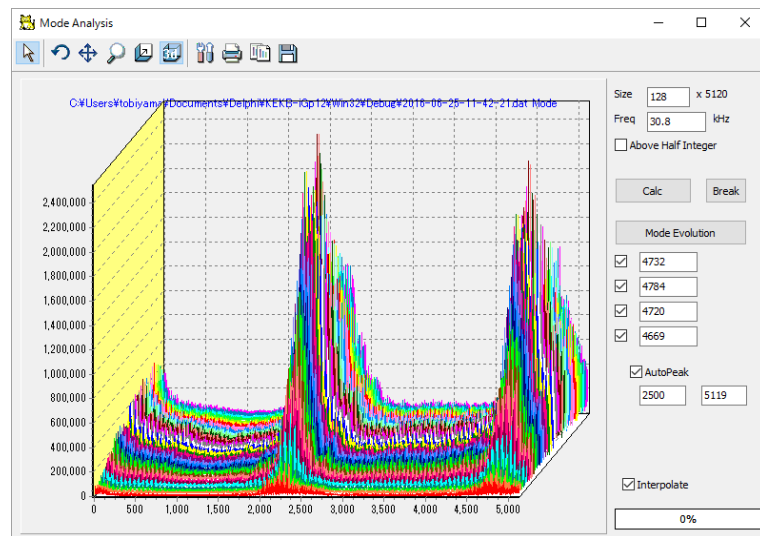
C:\Users\tobiyama\Documents\Delphi\KEKB-iGp12\Win32\Debug\2016-05-26-14-37-23.dat Mode



8 Tap FIR filter  
 732mA, by 3 filling, 0.5mA/bunch  
 Vertical  
 Growth $\sim$ 0.9ms  
 FB damping $\sim$ 0.5ms

# 進行方向不安定

- LER、By 3パターンで660mA以上で発生
  - KEKBでは最大電流2Aでも起きなかった
- モードは



- Growthは15ms程度、Dampは13ms程度
- 20Tap FIR/Down sample 3で、最大電流までは不安定抑制できた



# FB系のトラブル

## ■ フロントエンド検出回路の飽和

- LNAが飽和、結果としてバンチ電流リミッターが0.5mA以上で働かず、4.7mA/bunchの単バンチ蓄積を許してしまった
- ビームを使って飽和レベルを検証、回路を再配置し、飽和しないよう改造（全ゲインも上げた）

## ■ 進行方向フィードバック真空系用冷却水チラー停止

- 冷却水チラーが停止、チラー状態と温度はモニターしていたが、インターロックに入っていなかったため、6kW水冷ダミーロードが焼損
- チラーOFFと温度で自動的にビームアボートするようにした

## ■ 横方向キッカー故障疑い

- キッカーからの反射波が増大、インターロックでビームアボート
- キッカー故障の疑いがあるため、該当電極を運転から外した
- 運転終了後調査したところ、キッカー自体では無く高パワーAttenuatorの故障及びNコネクタ接触不良が原因と判明

# まとめ

- **SuperKEKB用個別バンチにフィードバックシステムを立ち上げ、運転に寄与した**
  - 横方向フィードバックシステムが迅速に立ち上がったため、ビーム蓄積が非常にスムーズにできた
  - 進行方向不安定も抑制出来た
  - フィードバック関連機器も順調に動作した
- **フィードバックシステムを用いて、不安定源に関する研究を行った**
  - LER: 電子雲不安定
  - HER: Fast Ion不安定
- **Phase 2運転に向けての作業中**
  - 故障疑い箇所および横方向キッカ一類点検
  - 検出系ノイズの低減