

# KEK-PF 2.5GeVリング LLRF システム のコミットショニングと運用状況

第21回日本加速器学会年会

2024/8/2

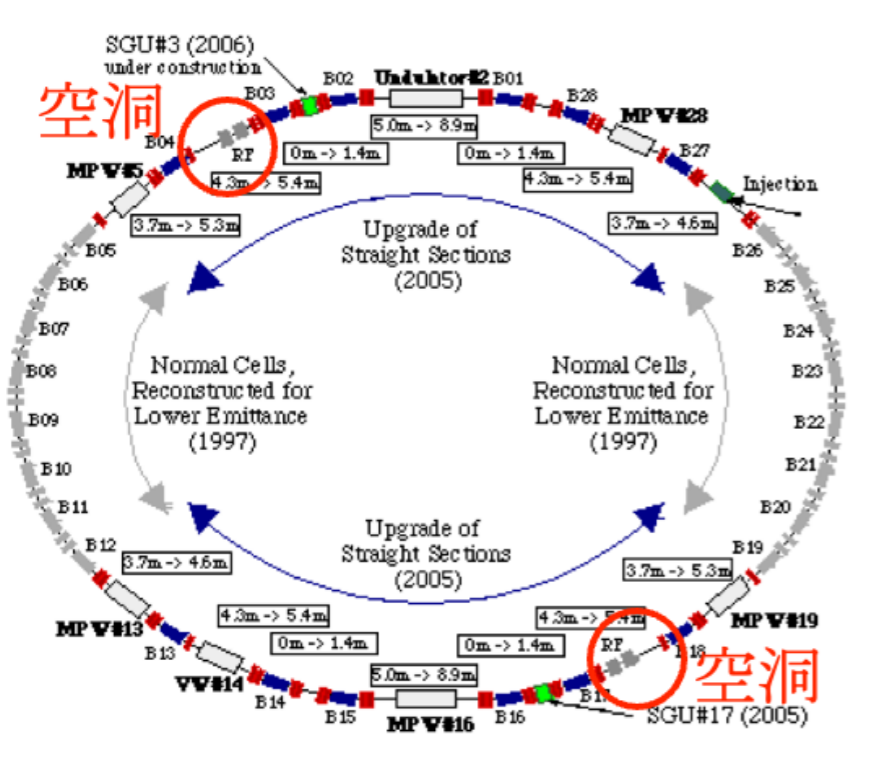
KEK PF RFグループ

内藤大地, 山本尚人, 高橋毅, 本村新, 坂中章悟

1. Photon Factoryの概要
2. 新規LLRFシステムの概要
3. LLRFシステムのビームコミッショニング
4. LLRFシステムの長期安定性
5. まとめ

# 1. Photon Factoryの概要

- PF : Photon Factoryの略。
- KEKつくばキャンパス内にあるリング型放射光施設。
- PFのRFシステム
  - ・リング内2ヶ所に2台ずつ、合計4台の空洞で電子を加速。
  - ・空洞1台につき1台のクライストロンを繋いで制御。
  - ・2023年8-10月にかけてアナログLLRFシステムをデジタルLLRFシステムに置き換えた。

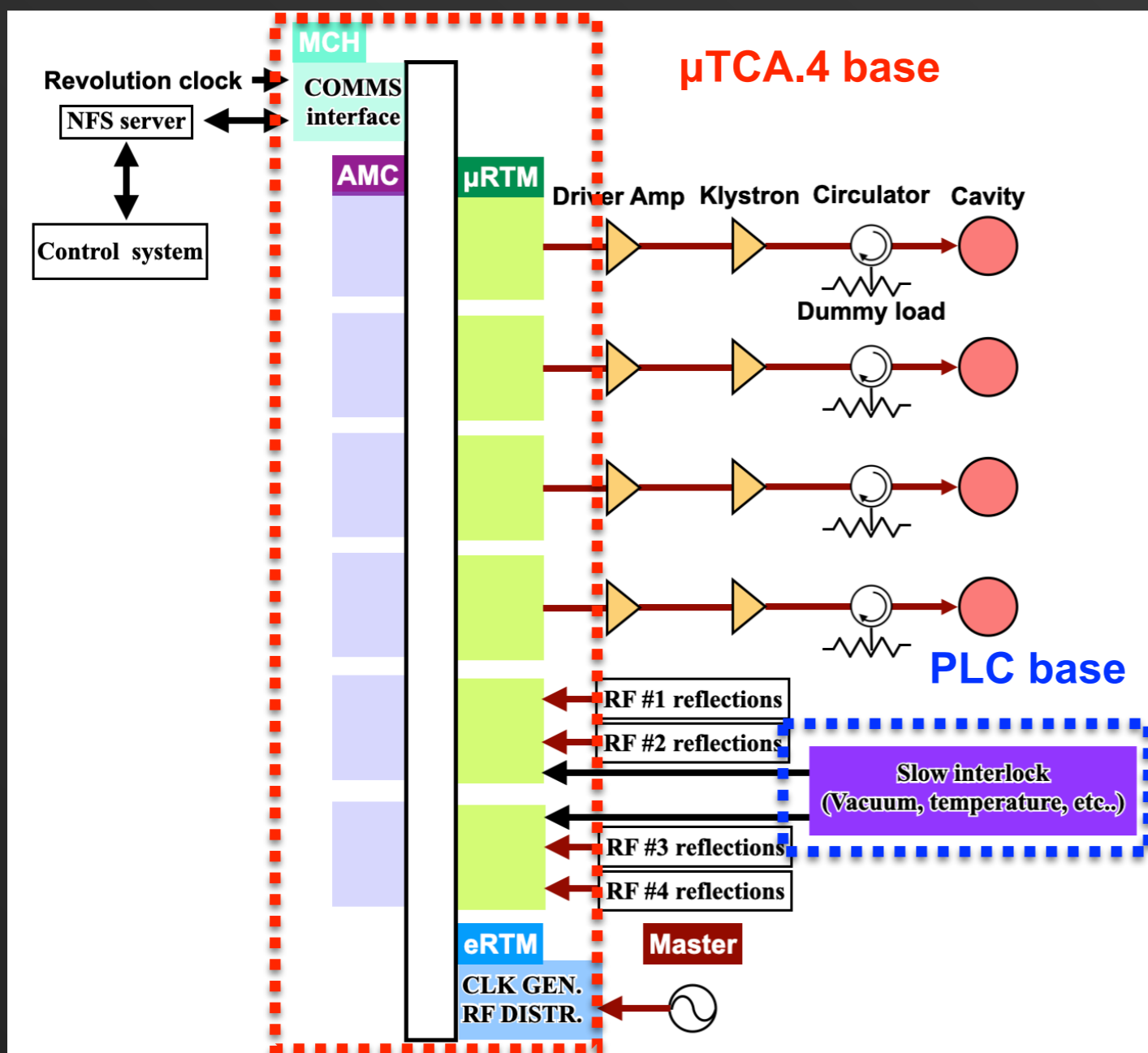


## <代表的なPFのパラメータ>

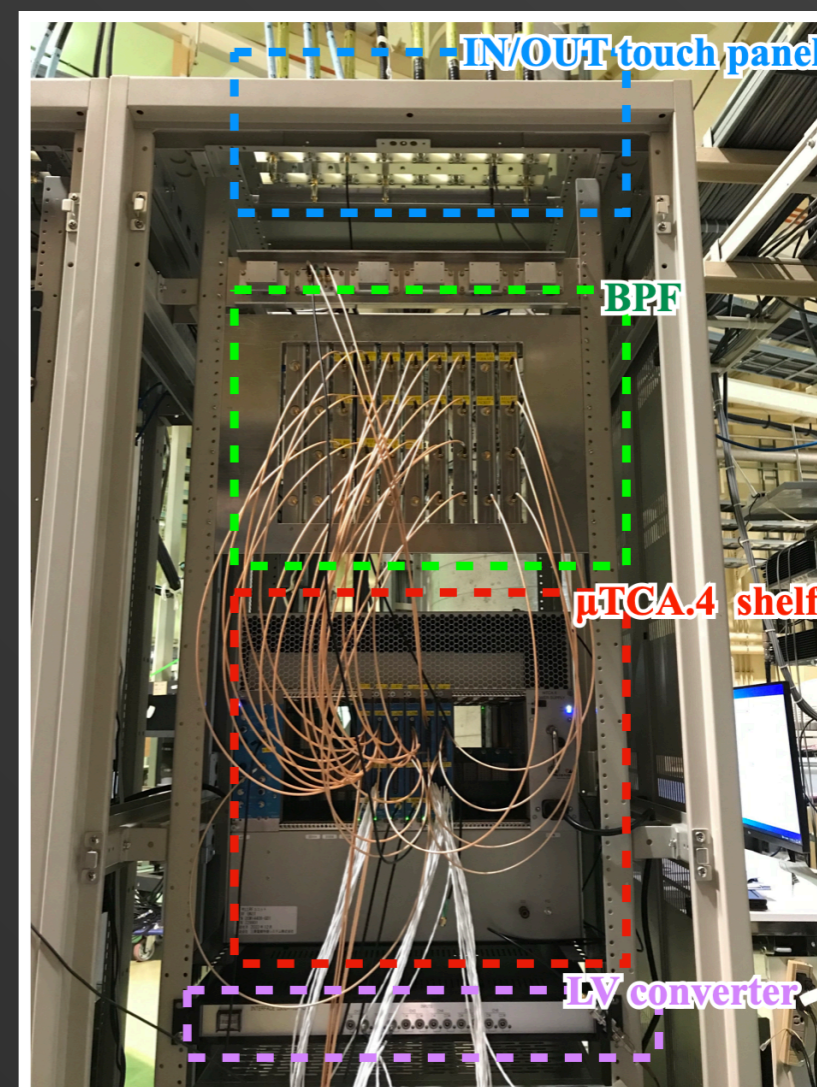
エネルギー	2.5 GeV
周長	187 m
ハーモニック数	312
ビーム電流	450 mA
ビームロス/turn	0.4 MeV
ビームライン数	38
自然エミッタンス	34.6 nm rad
RF 周波数	500.1 MHz
合計加速電圧	1.7 MV
合計クライストロン電力	287 kW



# 2-1. 新規LLRFシステムの概要

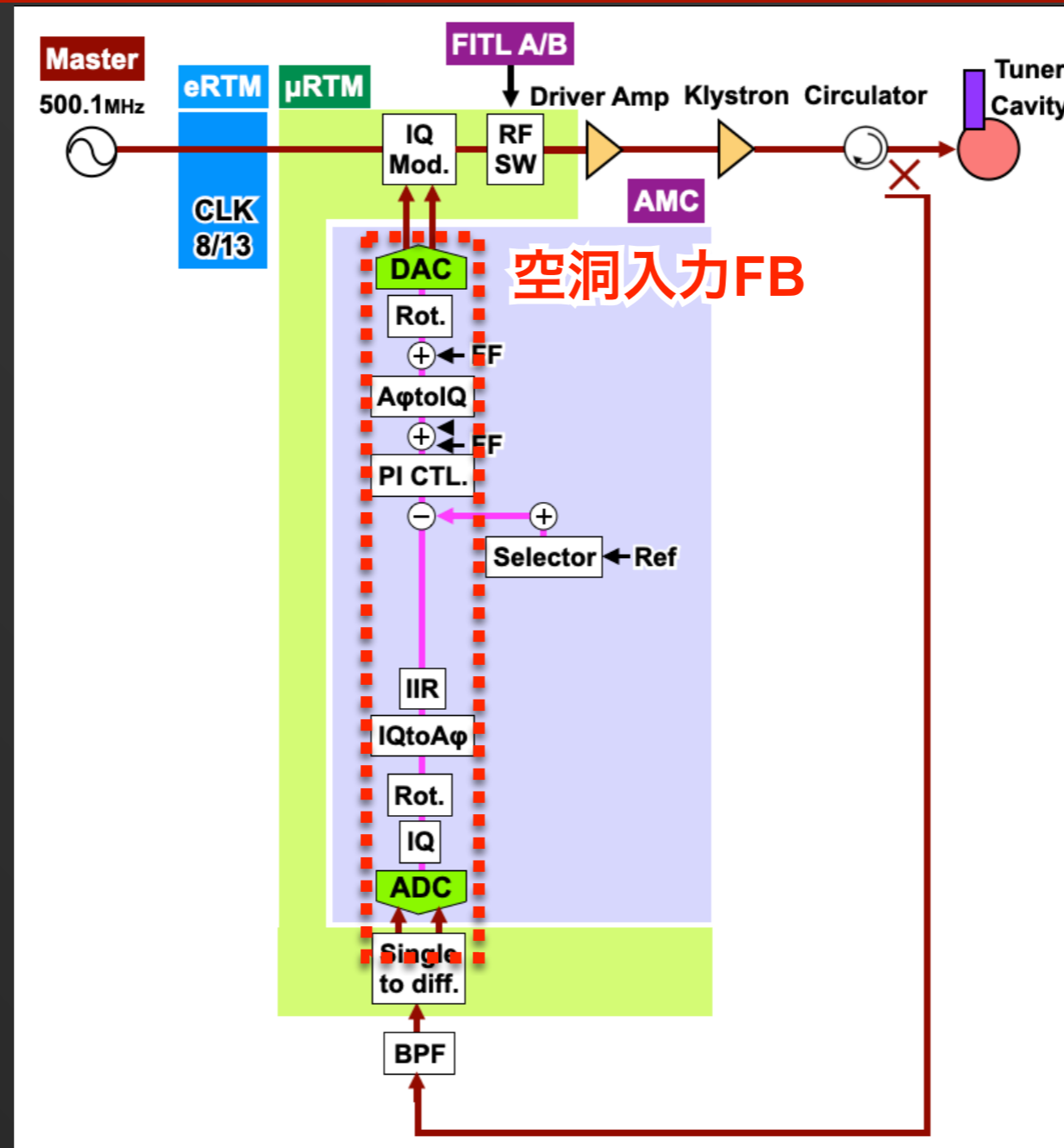


<新規LLRFシステムの写真>



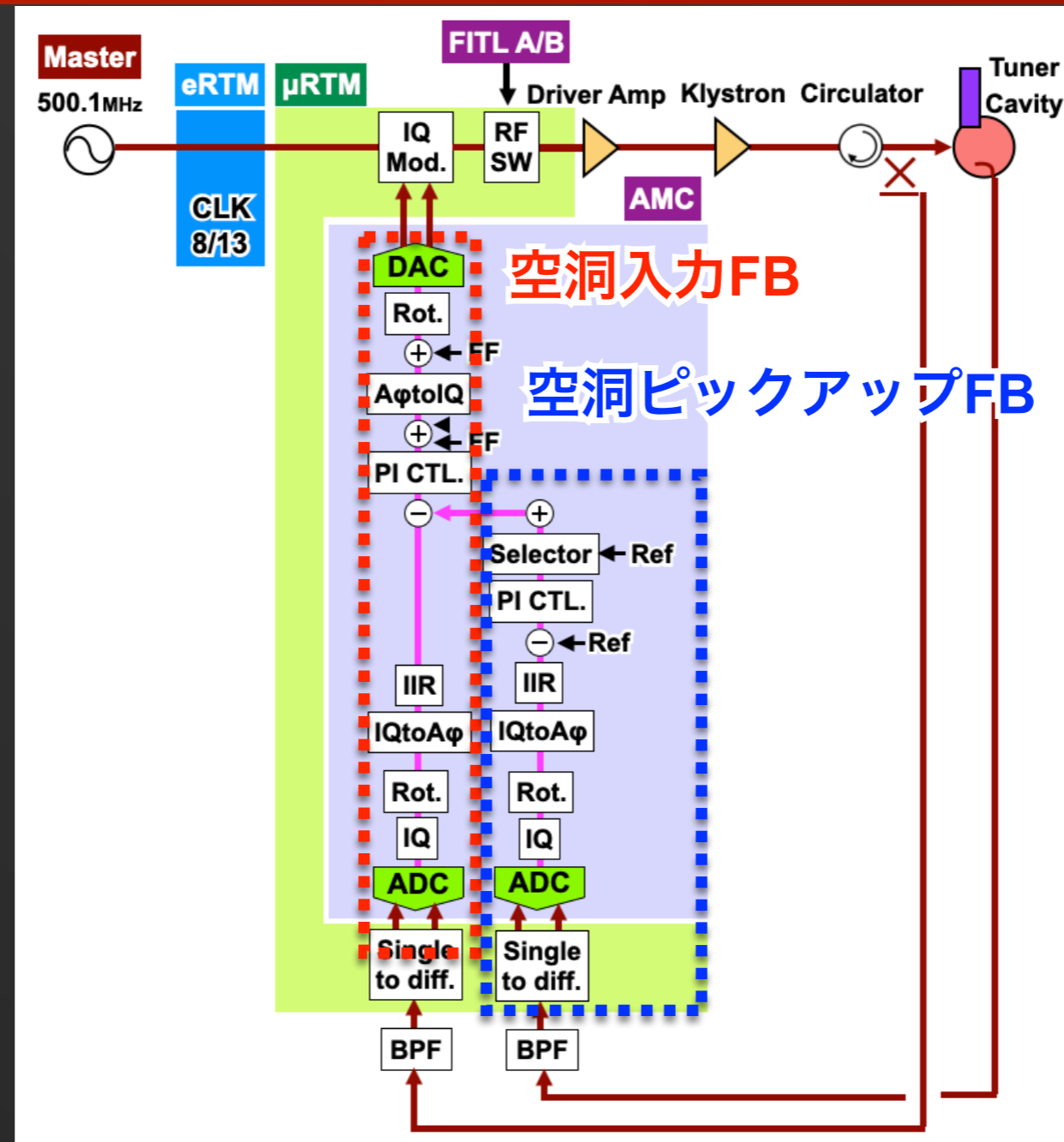
- MTCA.4 規格(RF制御, 高速インターロック監視) + PLC(低速インターロック監視)
- 1組の $\mu$ RTM(アナログインターフェース)とAMC(FPGAボード)で1台の空洞を制御(合計4組)。
- 1組の $\mu$ RTMとAMCで2系統の反射信号の監視を行なっている。

## 2-2. 新規LLRFシステムの概要 (RF電圧制御ロジック)



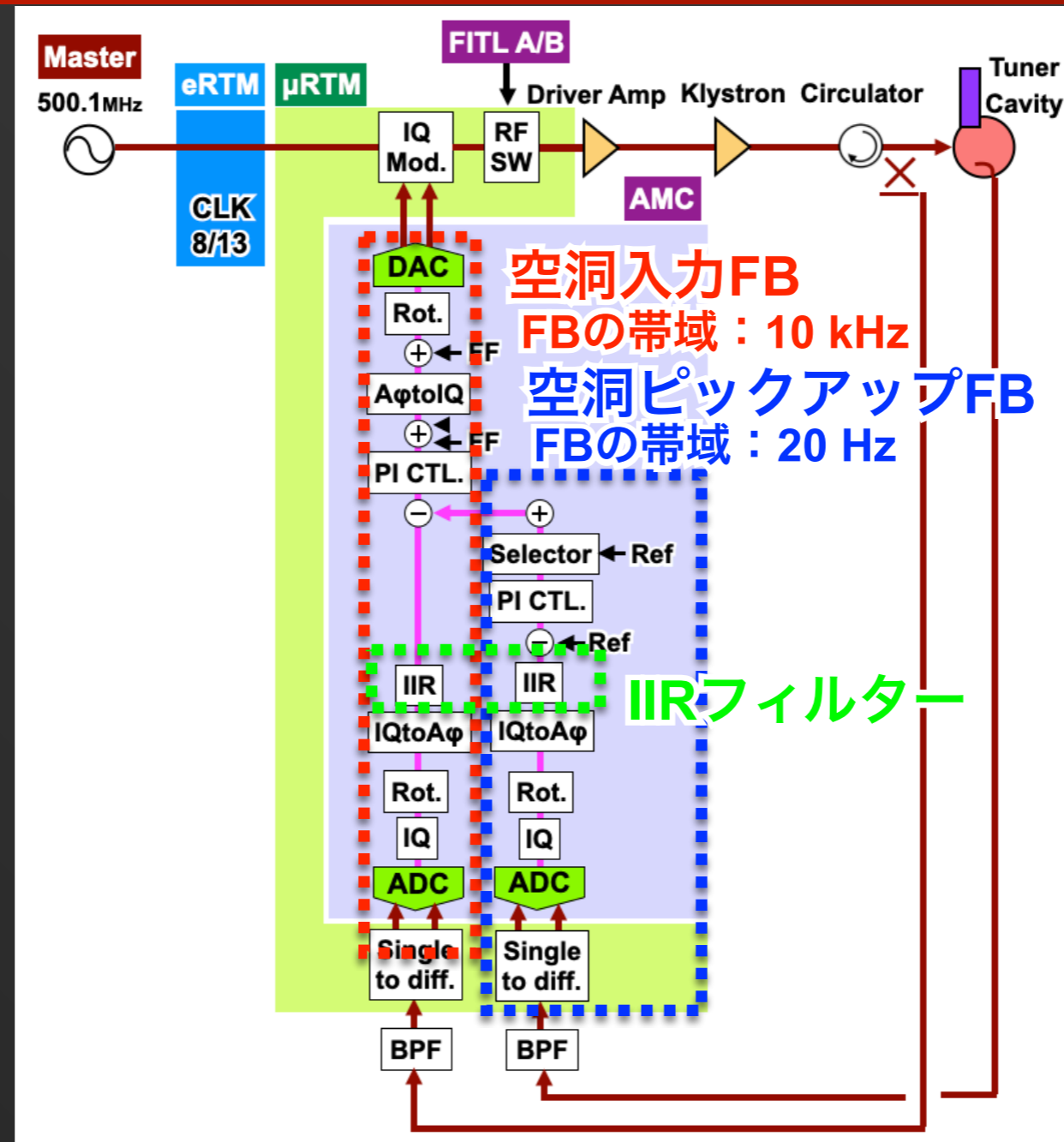
- 空洞入力信号をFBする事でクライストロン由来の電源リップルを抑制(< 10 kHz).

## 2-2. 新規LLRFシステムの概要 (RF電圧制御ロジック)



- 空洞入力信号をFBする事でクライストロン由来の電源リップルを抑制(< 10 kHz).
- 空洞ピックアップ信号をFBする事でビーム負荷由来の変動を抑制(~数 Hz).

## 2-2. 新規LLRFシステムの概要 (RF電圧制御ロジック)



- 空洞入力信号をFBする事でクライストロン由来の電源リップルを抑制(< 10 kHz).
- 空洞ピックアップ信号をFBする事でビーム負荷由来の変動を抑制(~数 Hz).
- 二つのFBを直列に繋いだ、ダブルループ構造。
- 空洞ピックアップFBが空洞入力FBから一定とみなせるようにIIRフィルターで帯域制限。
  - SPring-8で実用化、NanoTerasuでも導入。



## 2-3. 新規LLRFシステムの概要(運用状況)



- 2022年に製造。
- 2023年6-10月にかけて現場に設置。
  - ・新規LLRFの性能評価やFBパラメータ調整を行なった。
- 2023年11月から運用開始。
  - ・現在に至るまでトラブルもなく、非常に安定に動作。

今回はビーム立ち上げ試験、利用運転時の安定性を報告。



# 3-1. ビームコミッショニングの概要

- 2023/11/7 ビーム調整 (15 h)
  - ・ 電子バンチが感じる加速電圧が最大になるよう、空洞間の位相差を調整。
    - ・ 調整後にシンクロトロン振動数を測定した所、23.2 kHzだった。  
=>最大加速電圧(1.7 MV)から計算したシンクロトロン振動数 (23.5 kHz)と一致。
  - ・ 蓄積ビーム電流が100 mAを超えた所でRF電圧制御FBが発振した。
    - ・ FBの応答速度を段階的に変更。
    - ・ 無事450 mA(ユーザー運転条件)までビーム蓄積に成功。
- 2023/11/21 RF制御フィードバックパラメータ調整 (10 h)

# 3-1. ビームコミッショニングの概要

- 2023/11/7 ビーム調整 (15 h)

- ・ 電子バンチが感じる加速電圧が最大になるよう、空洞間の位相差を調整。

- ・ 調整後にシンクロトロン振動数を測定した所、23.2 kHzだった。

=>最大加速電圧(1.7 MV)から計算したシンクロトロン振動数 (23.5 kHz)と一致。

- ・ 蓄積ビーム電流が100 mAを超えた所でRF電圧制御FBが発振した。

- ・ FBの応答速度を段階的に変更。

- ・ 無事450 mA(ユーザー運転条件)までビーム蓄積に成功。

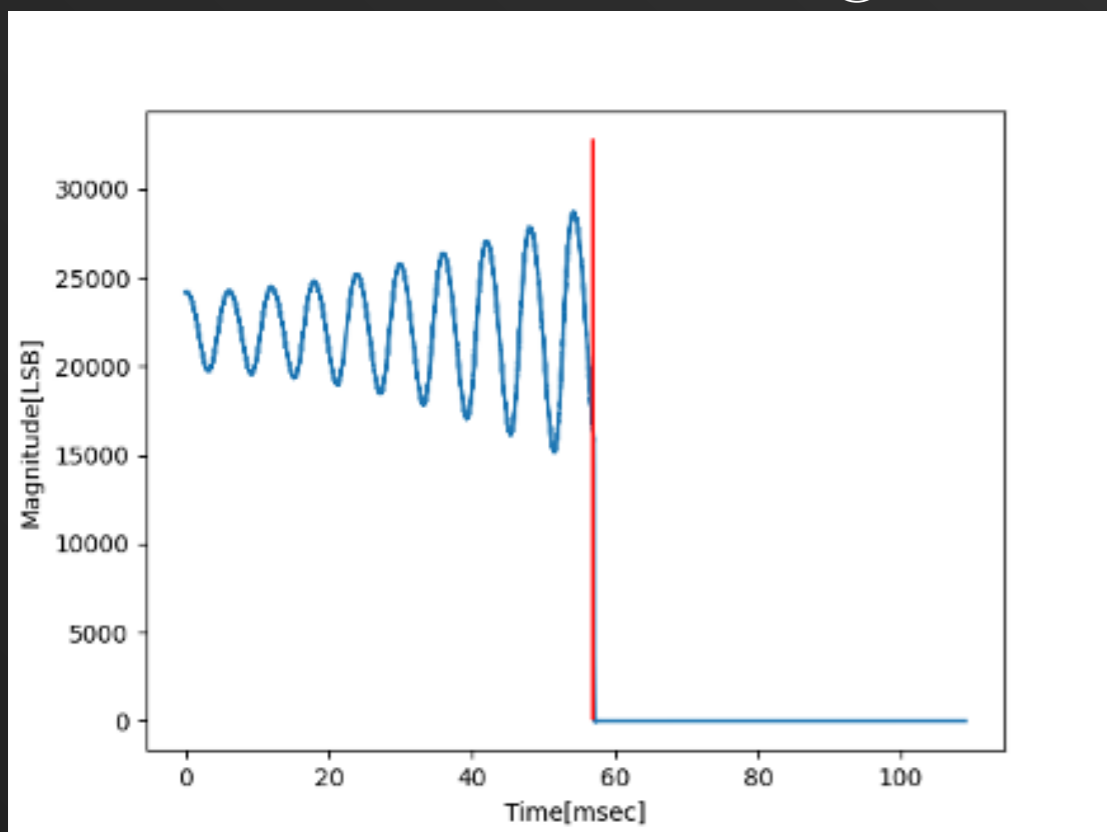
- 2023/11/21 RF制御フィードバックパラメータ調整 (10 h)

今回の発表項目

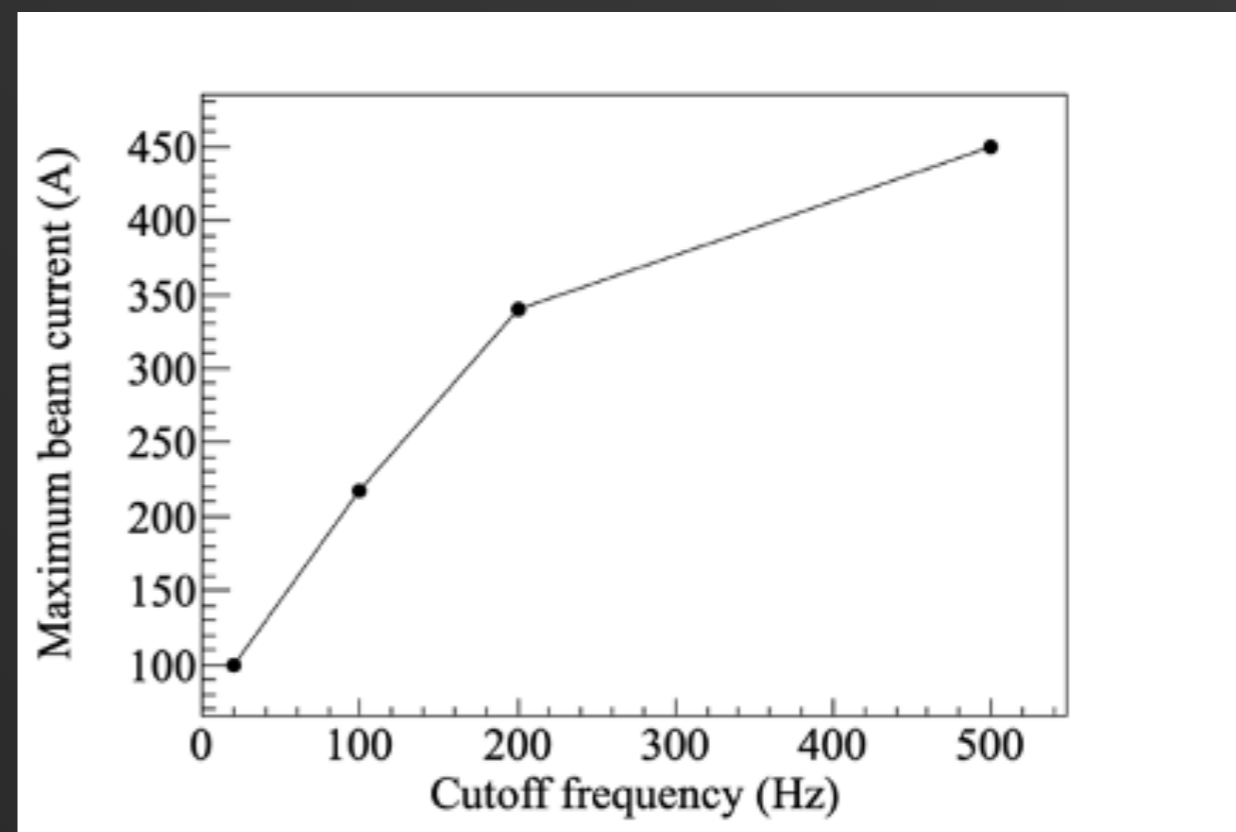
## 3-2. フィードバックの発振抑制

- 蓄積ビーム電流が100 mAを超えた所でRF電圧制御FBが発振。
  - ・ 空洞からの反射パワーのインターロックが働いてRF出力が遮断、蓄積ビーム全ロス。
  - ・ 再蓄積しても同じビーム電流でFB発振。
  - ・ IIRフィルターでFBの応答速度を20 Hzに制限していたが170 Hzの周波数で発振。
- IIRフィルターのカットオフ周波数を段階的に上昇。
  - ・ ビーム蓄積=>FB発振=>カットオフ周波数上昇のステップを繰り返した。
  - ・ カットオフ周波数を500 Hzにした所、ユーザー運転条件の450 mAまで蓄積成功。

<RF遮断前後の空洞電圧振幅@100mA>

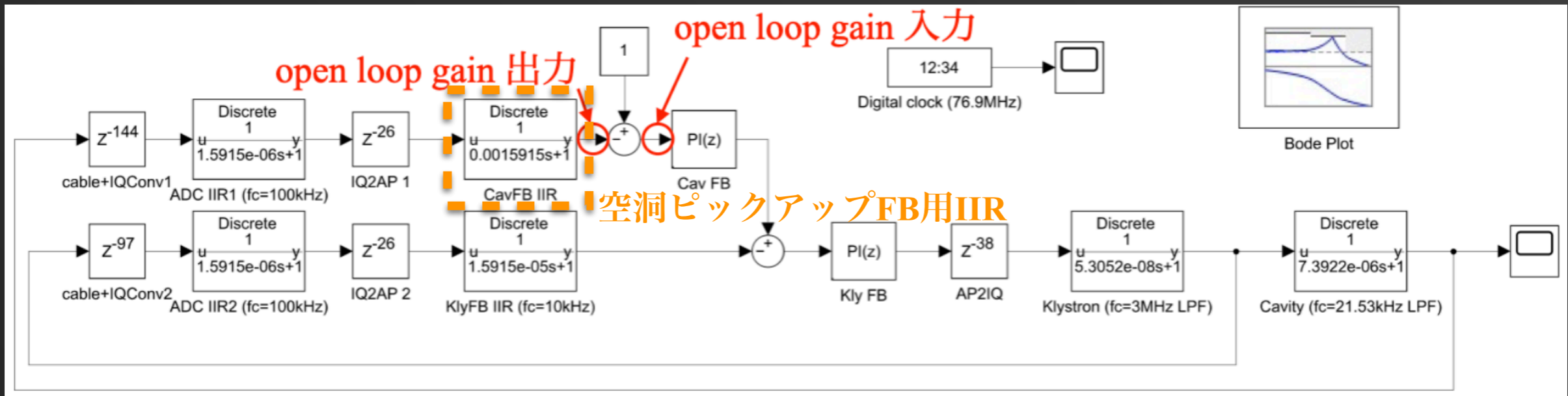


<蓄積可能最大電流とフィルターのカットオフ>



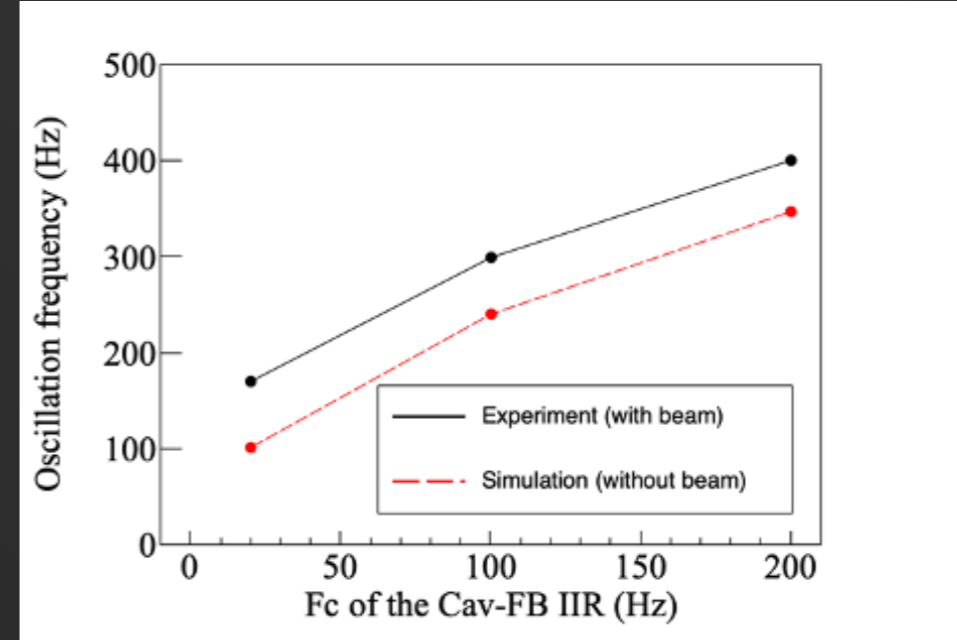
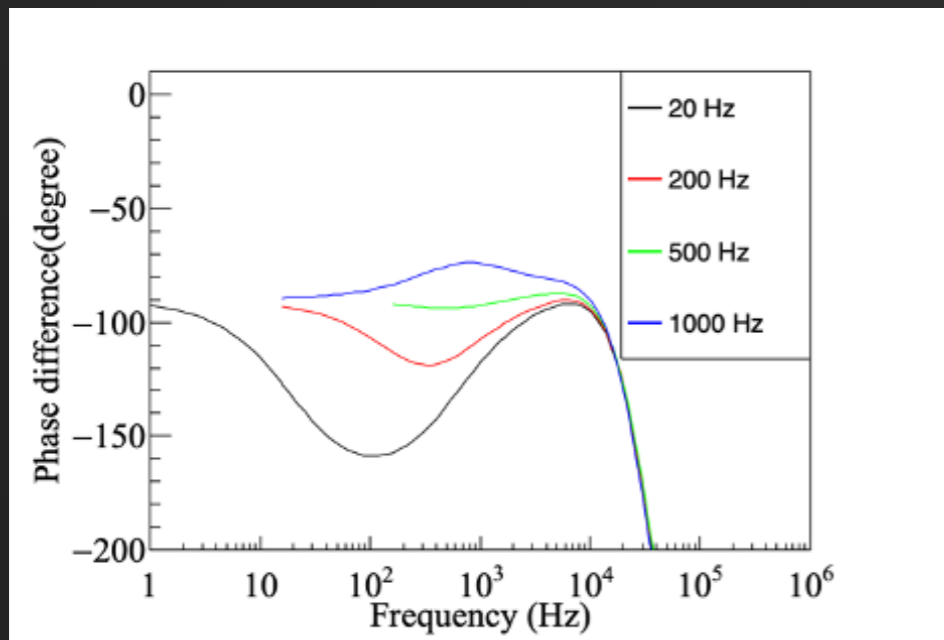
# 3-2. フィードバックの発振抑制 (定性的理解)

- 空洞とクライストロンを単純なLPFで近似して回路シミュレーション(ビーム負荷は未考慮)。
- オープンループゲイン(図の入力と出力の電圧比)と位相差からFBの安定性を評価。
  - ・ カットオフ周波数が低い時は位相進みに下向きのピークが存在。
- ビーム蓄積中にFBが発振した時の発振周波数(実測)と位相進みの下向きピーク(計算)を比較。
  - ・ カットオフ周波数を上げると位相進みが改善してFBが安定すると類推できる。



<IIRカットオフ周波数ごとの位相差>

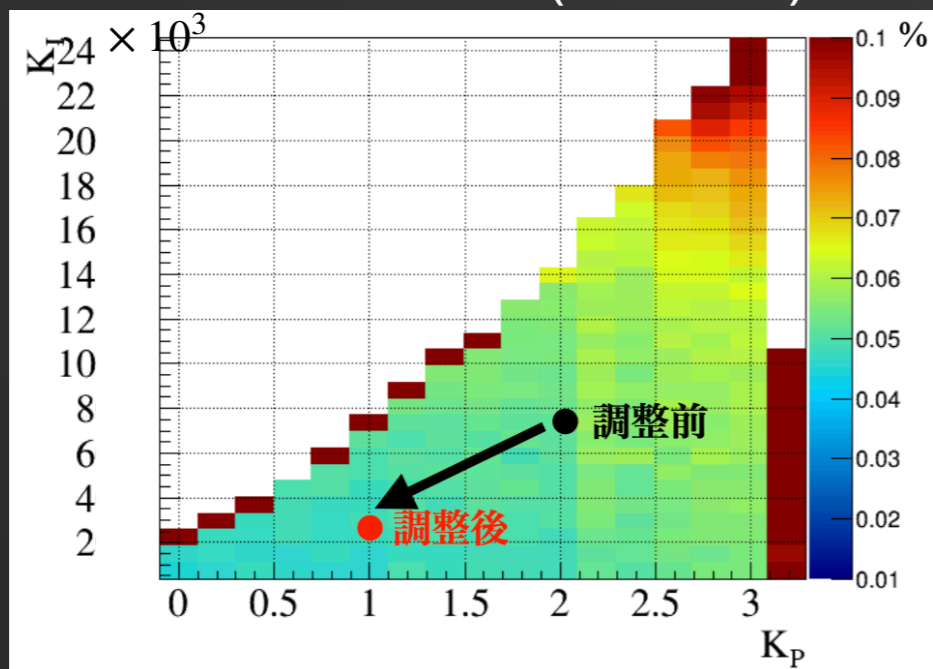
<FBの発振周波数(実測)と谷間の周波数(計算)の比較>



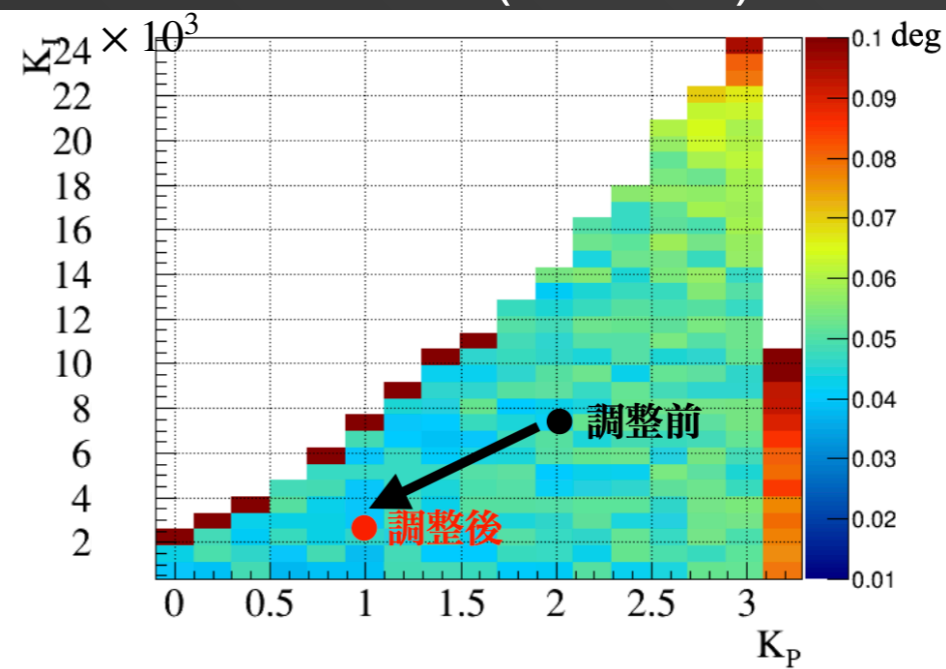


# 3-3. フィードバックパラメータの最適化

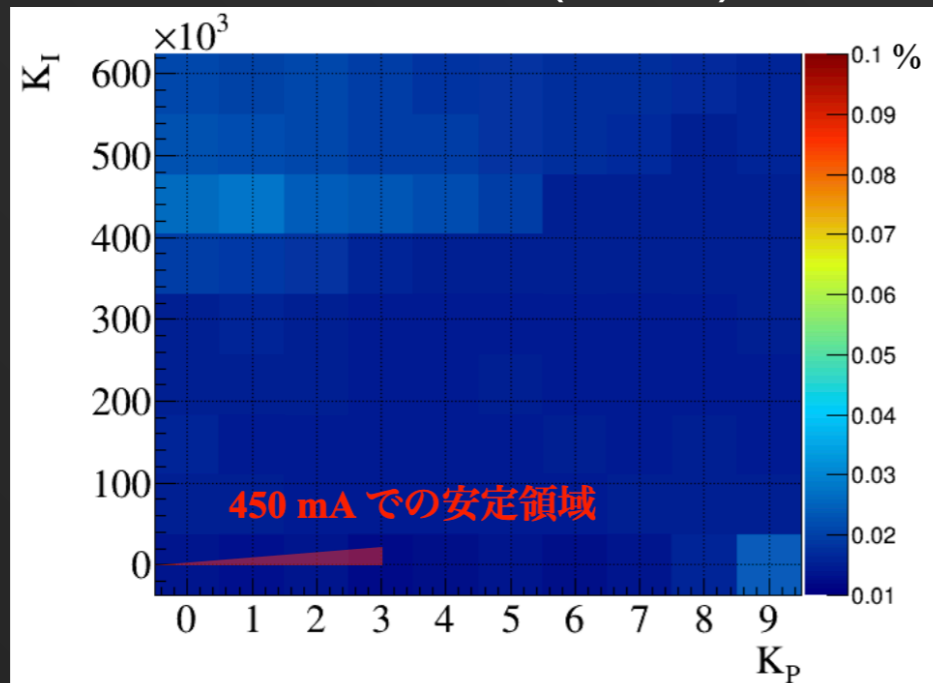
<振幅変動(450 mA)>



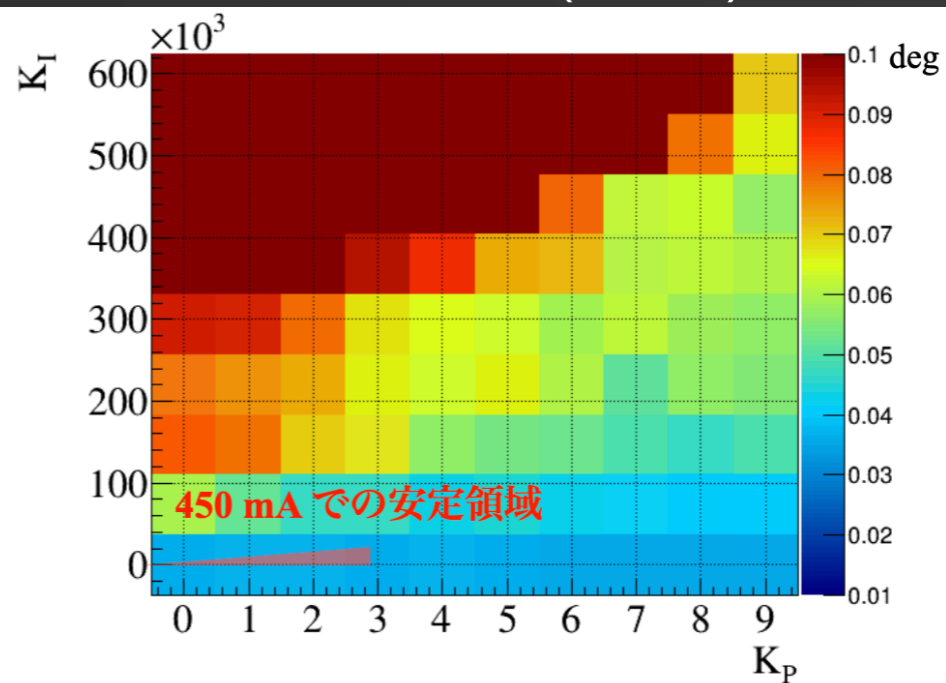
<位相変動(450 mA)>



<振幅変動(0 mA)>



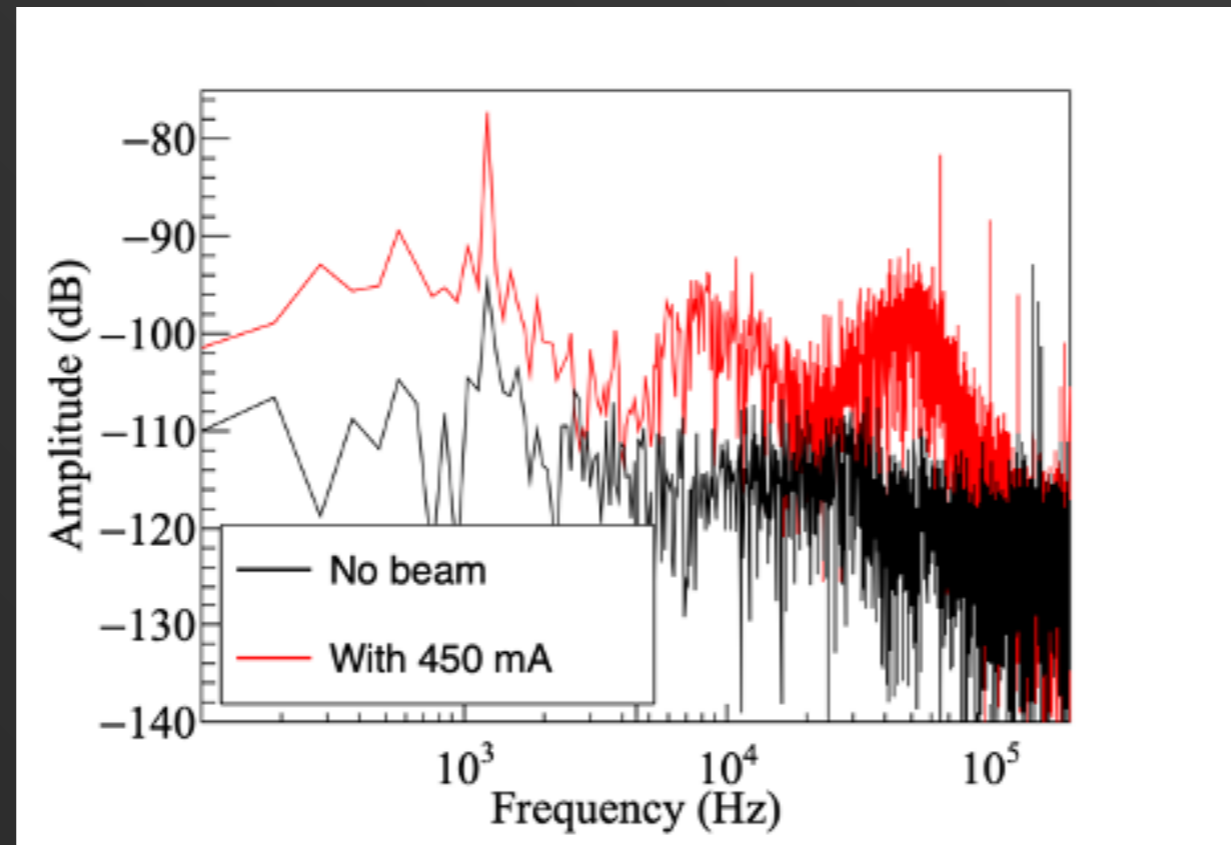
<位相変動(0 mA)>



- ビーム蓄積中にFBパラメータを変えていき、LLRFが発振してビームが落ちたら再蓄積。
  - ・ **FBパラメータを調整して振幅変動 $\pm 0.056\%$ 以下、位相変動 $\pm 0.053$ 度を達成。**
  - ・ ビーム負荷により安定領域が非常に狭くなる事が分かった。

## 3-4. 各ビーム電流でのスペクトラム比較

<空洞ピックアップ信号のFFT>

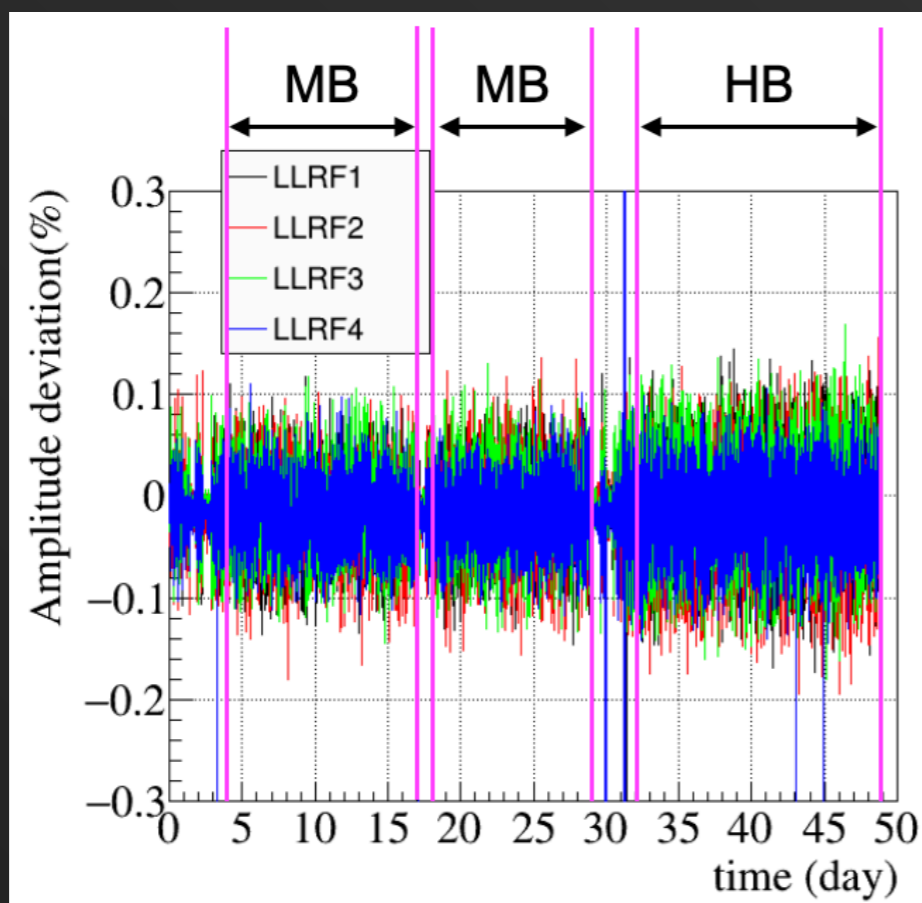


- ビームを蓄積している時としていない時の、空洞ピックアップ信号を比較。
  - ・ ビーム不安定性起因と思われる4kHz以上の成分が増加。
  - ・ 1 kHz付近のピークやその周辺でも信号強度が増加。
- 今後
  - ・ フィードバックパラメータの更なる最適化。
  - ・ ダブルフィードバックのオープンループゲインを測定してシミュレーションと比較。

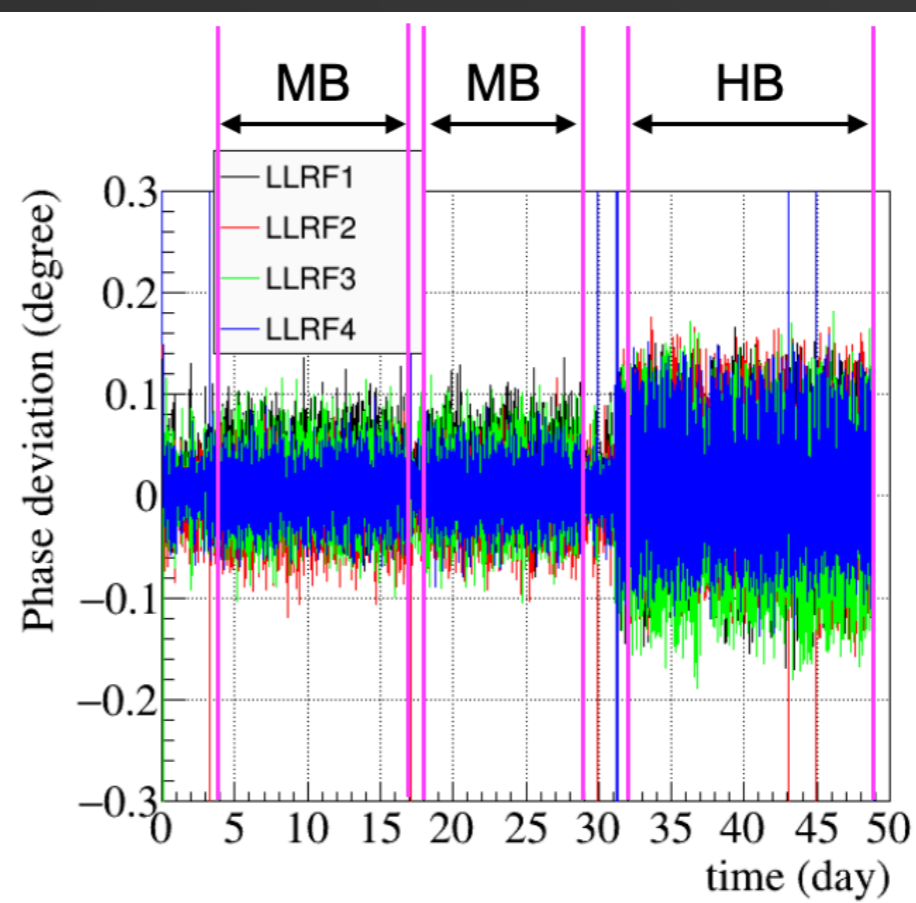
# 4-1. フィードバックの安定性

- 2023年2-3月期の空洞ピックアップ信号のFPGA内でのモニター値(1秒ごとに記録)を評価。
- マルチバンチ運転(450 mA)とハイブリッド運転(マルチ420 mA + シングル30 mA)で評価。
- 時々入射キッカーが蓄積ビームを蹴って変動が大きくなっている。
- ハイブリッド運転の方がマルチバンチ運転より変動が大きい。
  - ・ ハイブリッド運転では過渡的ビーム負荷によりバンチトレイン中で振幅/位相が変動。
- 全期間を通してFBが発振したり性能が悪化することもなく、安定的に動作。

<振幅変動>



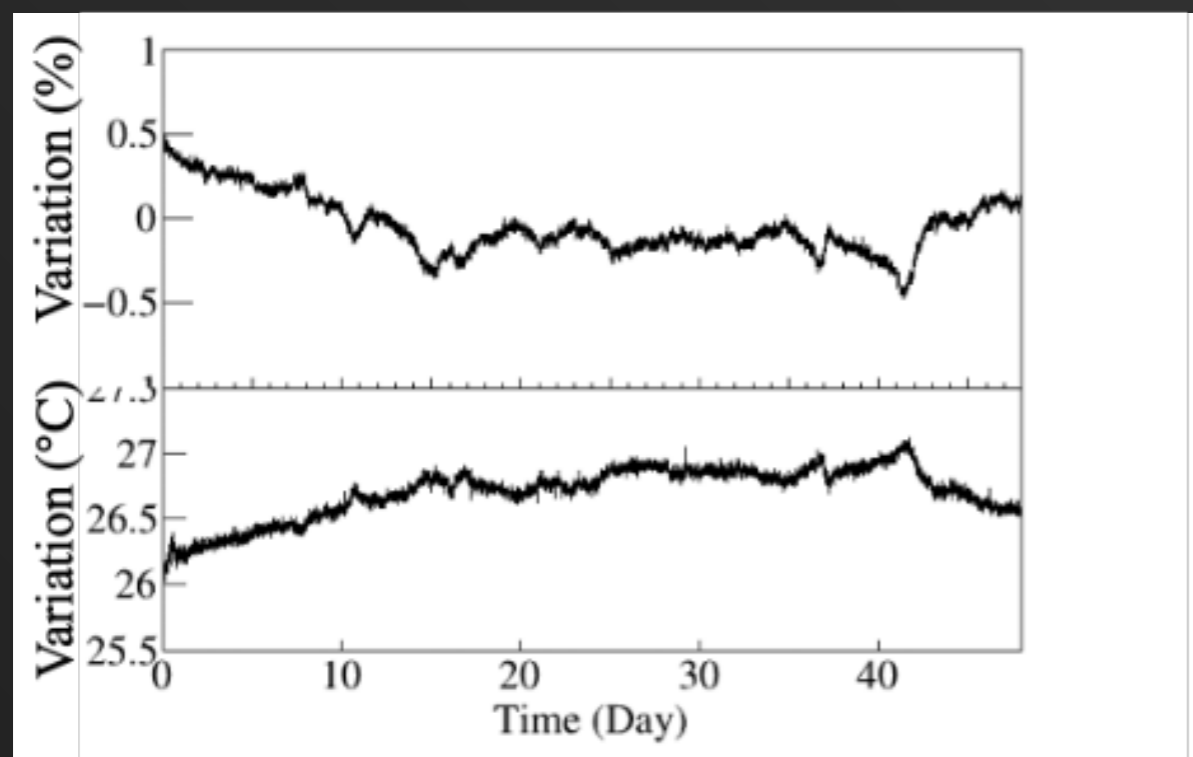
<位相変動>



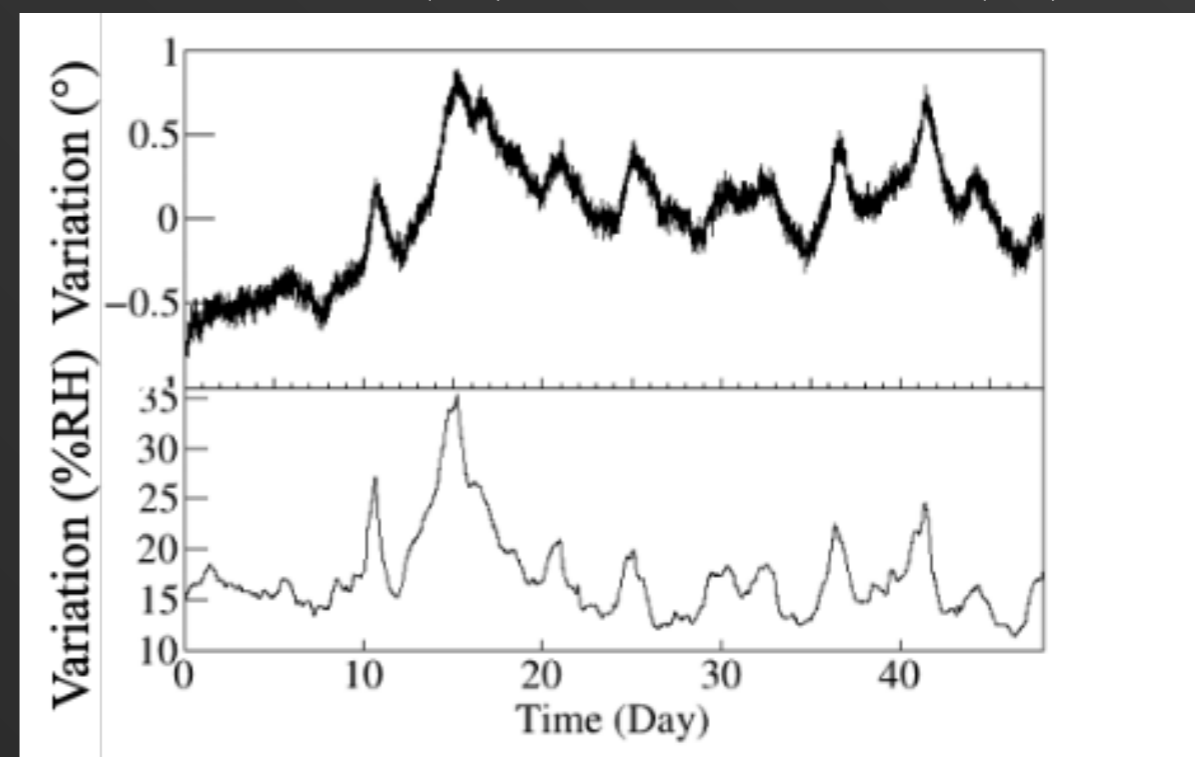
## 4-2. LLRFシステムの安定性

- RF基準信号の振幅と位相をRF制御用ボードのADCでモニターした値から評価。
  - ・ 観測した基準信号の時間変動は全てLLRFシステムでの信号検出が変動していると仮定。
- 振幅変動は室内温度変化と強く相関。
- 位相変動は室内湿度と強く相関。
- 振幅も位相も変化量は大きいは変化速度は非常に遅い。
  - ・ PFでのユーザー実験には問題なし。
  - ・ 比較的容易に補正も可能だと思われる。

<振幅変動(上)と室内温度変化(下)>



<位相変動(上)と室内湿度変化(下)>





# 5. まとめ

- PF 2.5 GeV ringのLLRF
  - ・ 2023年度にアナログからデジタルに置き換え。
    - ・ MTCA.4 規格(RF制御高速, インターロック) + PLC(低速インターロック)
- デジタルLLRFのコミッショニング
  - ・ ビーム蓄積中にLLRFが発振したが、FB手前のLPFを調整して問題解決。
  - ・ ビーム蓄積するとFBの安定領域が非常に狭くなるのを確認。
  - ・ 振幅変動 $\pm 0.056\%$ 以下, 位相変動 $\pm 0.053^\circ$ 以下を達成。
- デジタルLLRFの長期安定性
  - ・ 6ヶ月間何のトラブルもなく、順調に稼働。
  - ・ 振幅/位相の変動が観測されたが、とても遅い変化なので問題なし。