

# MTCA.4規格低電力高周波システムの SPring-8蓄積リングへの導入

#大島 隆, 細田 直康, 大橋 裕二, 佐々木 茂樹, 安積 隆夫, 福井 達, 前坂 比呂和, 稲垣 隆宏  
(高輝度光科学研究センター),  
(理研)

- はじめに
- LLRFシステムの構成
- LLRFシステムでできたこと
- まとめ



# はじめに

- SPring-8：大型放射光施設
  - 8GeV電子リング+入射器
  - 1997年 高輝度X線をユーザーに供給開始  
(建設から20年以上経過)
- LLRFシステムの高度化
  - upgrade計画 SPring-8II に先行してLLRF更新
  - 期待されること
    - 保守品の入手性悪化の解消
    - 高速通信：異常発生時の波形を保存
    - 高度制御：コヒーレントなシンクロトロン振動の抑制機能追加
- 4つのRFステーションの1つ A-stのLLRFを更新した
- 本発表ではシステムの構成、達成できたこと、課題について報告



# LLRFシステム

- LLRFシステムの役割
  - 加速電圧・位相を一定に保つ
  - 加速空洞の共振を保持する
- 従来のLLRFシステム
  - NIM規格の単機能RFモジュール+VME規格制御モジュール
    - NIM:多品種少量のモジュール類、煩雑なケーブル接続
    - VME:BUSに制限された通信帯域、CPUカード入手性悪化



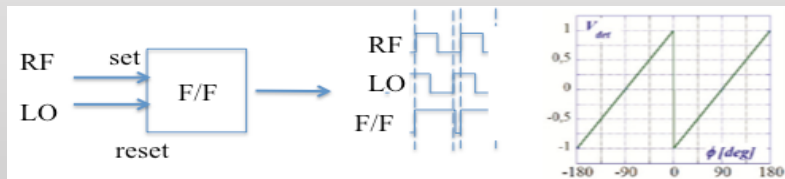
# 従来のLLRF

- 単機能NIMモジュールの組み合わせ
- 要 多数の配線 他種類のモジュールの管理

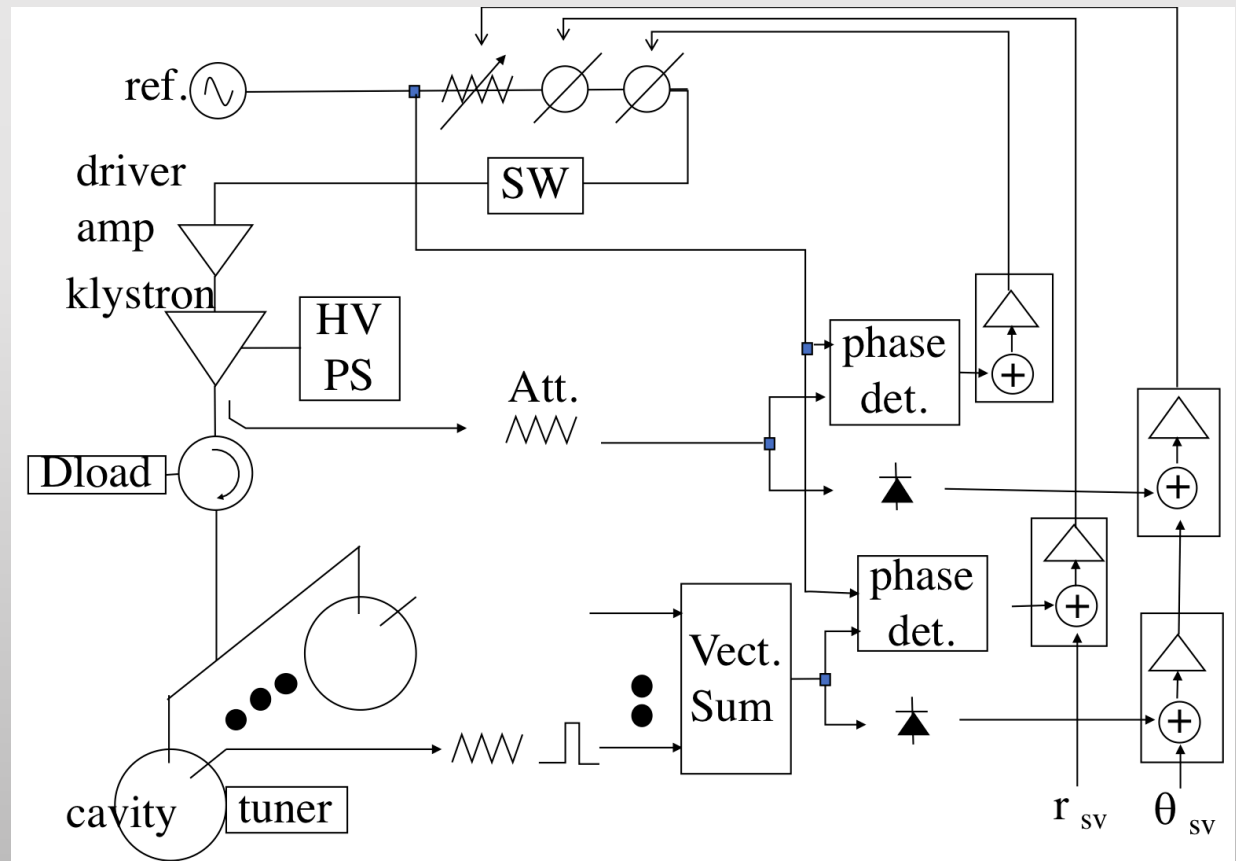
- アナログ検出：極座標で検出
- 振幅：ダイオード検波



- 位相：リミッタアンプ+F/F

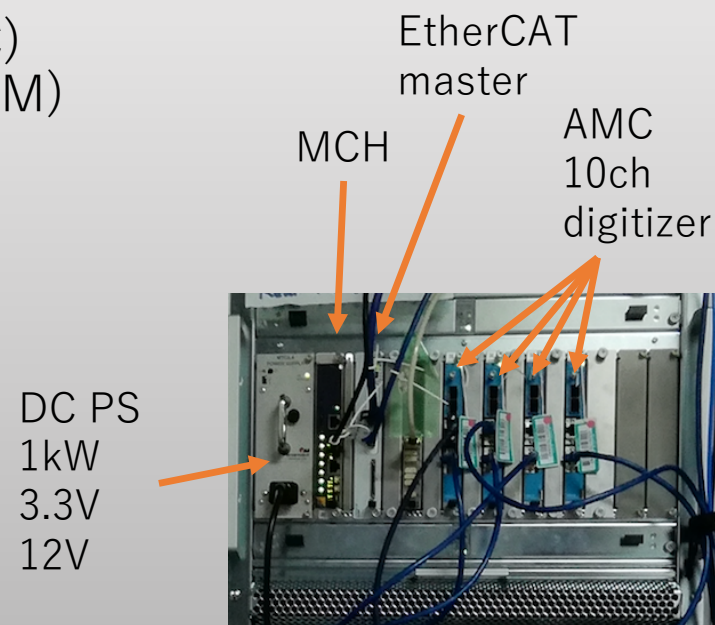


- 利点
  - 小さい遅延時間
- 欠点
  - 位相範囲に制限 ( $\pm 180$ 度  $\leftrightarrow \pm 10$ V)



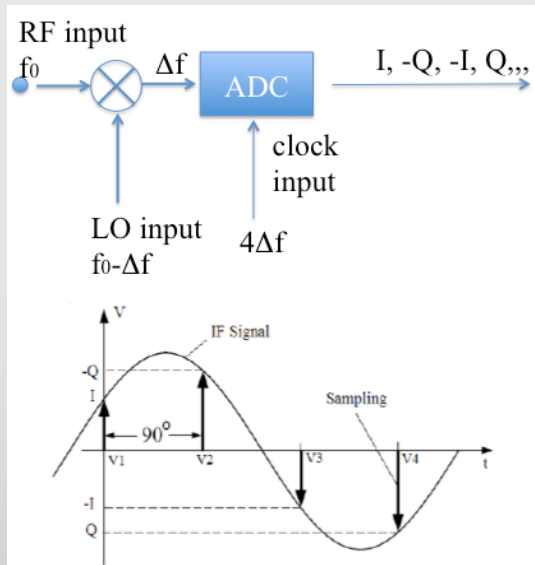
# 新システム

- 新しいLLRFシステムの目指すところ
  - コンパクト
  - 高速通信
  - 省配線:
  - 多くの機能をソフトウェアで実現→容易な機能追加、パラメータ変更
- MTCA.4を採用
  - **M**icro **T**elecommunication **C**omputing **A**rchitecture
  - 使用するモジュール： **A**dvanced **M**ezzanine **C**ard (AMC)
  - AMCに入力する信号の処理： **R**ear **T**ransition **M**odule (RTM)
  - hot swapが可能
  - **M**icroTCA **C**arrier **H**ubによるシステムの管理
  - DESY EuroXFELで運用実績有り
- Field BusとしてEtherCATを採用
  - EtherNETと互換性のある産業用フィールドバス
  - 2重化によって、障害時のシステムダウンを防止



# 位相・振幅の検出

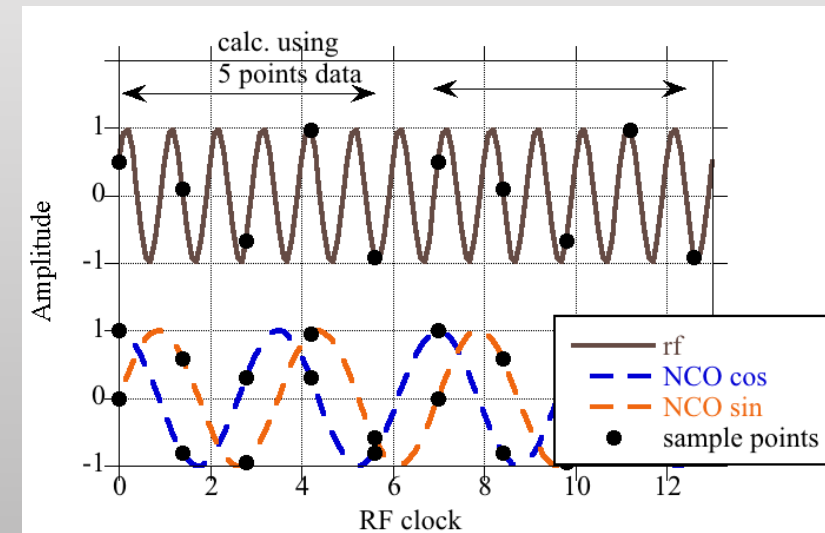
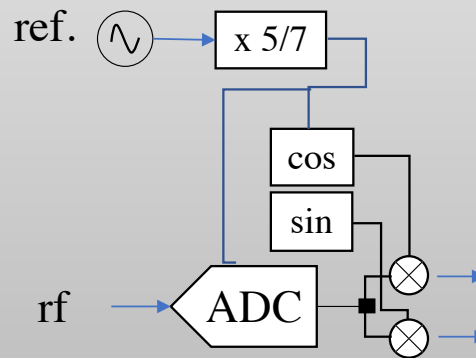
## • IQ検出：直交座標軸で検出



- 利点
  - 位相範囲は無制限
- 欠点
  - 遅延時間あり

## under sampling方式

- 通常のIQ検出 :  $f_{\text{clk}} \gg f_{\text{rf}}$
- under sampling方式 :  $f_{\text{clk}} < f_{\text{rf}}$ 
  - 回路構成が簡単
  - down convertor (非線形素子) を使わない → 環境変化に対して鈍感



# 新規MTCA.4規格ボードの開発

## • 高速デジタルAMC

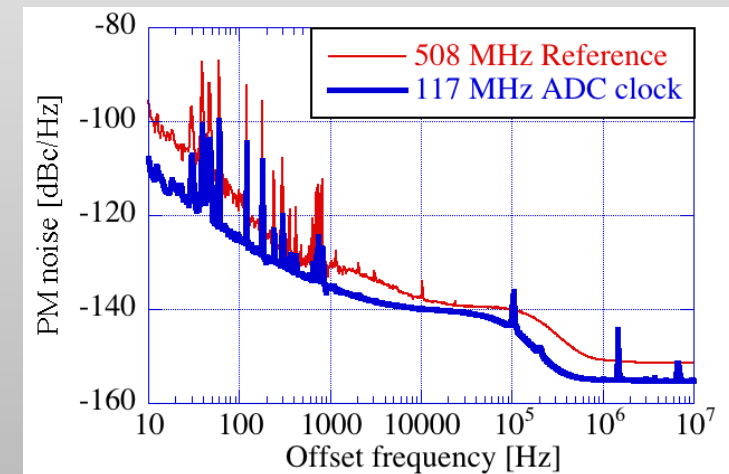
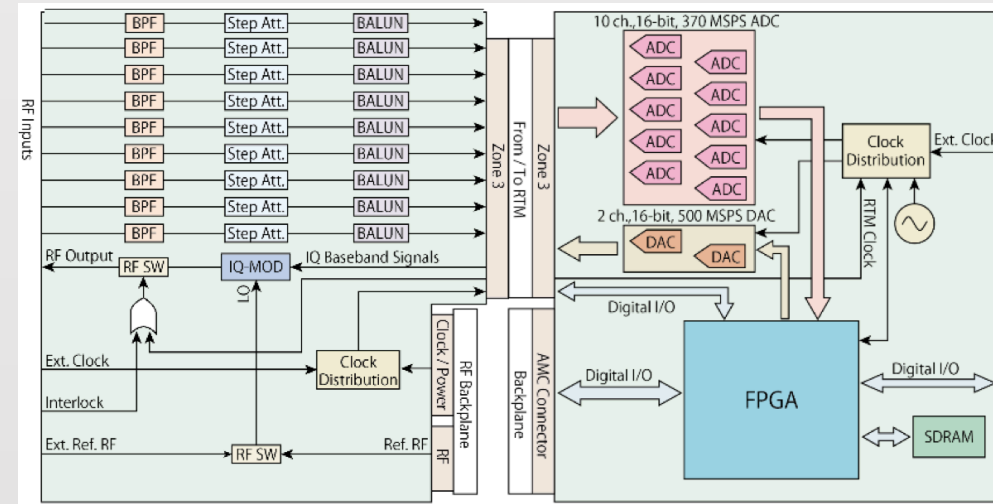
- ADC: 16bit 370Ms/s 10ch  
→ IQ under sampling
- DAC: 16bit 500Ms/s 2ch  
→ IQ Vector Modulation

## • 信号処理RTM

- 9ch RF input with 0-31.5dB variable attenuator
- 1ch Vector Modulator output

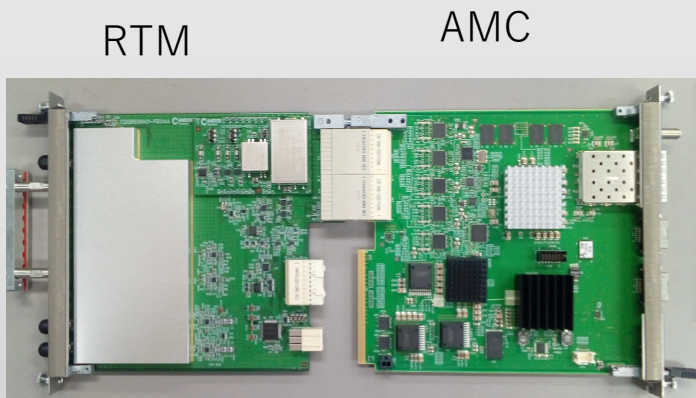
## • ADC用クロック発生eRTM

- 入力  $f_{RF}=508.58\text{MHz}$
- 出力  $f_{clk} = f_{RF} \times 5/7$
- 低位相雑音
- RF-back planeを使った信号供給

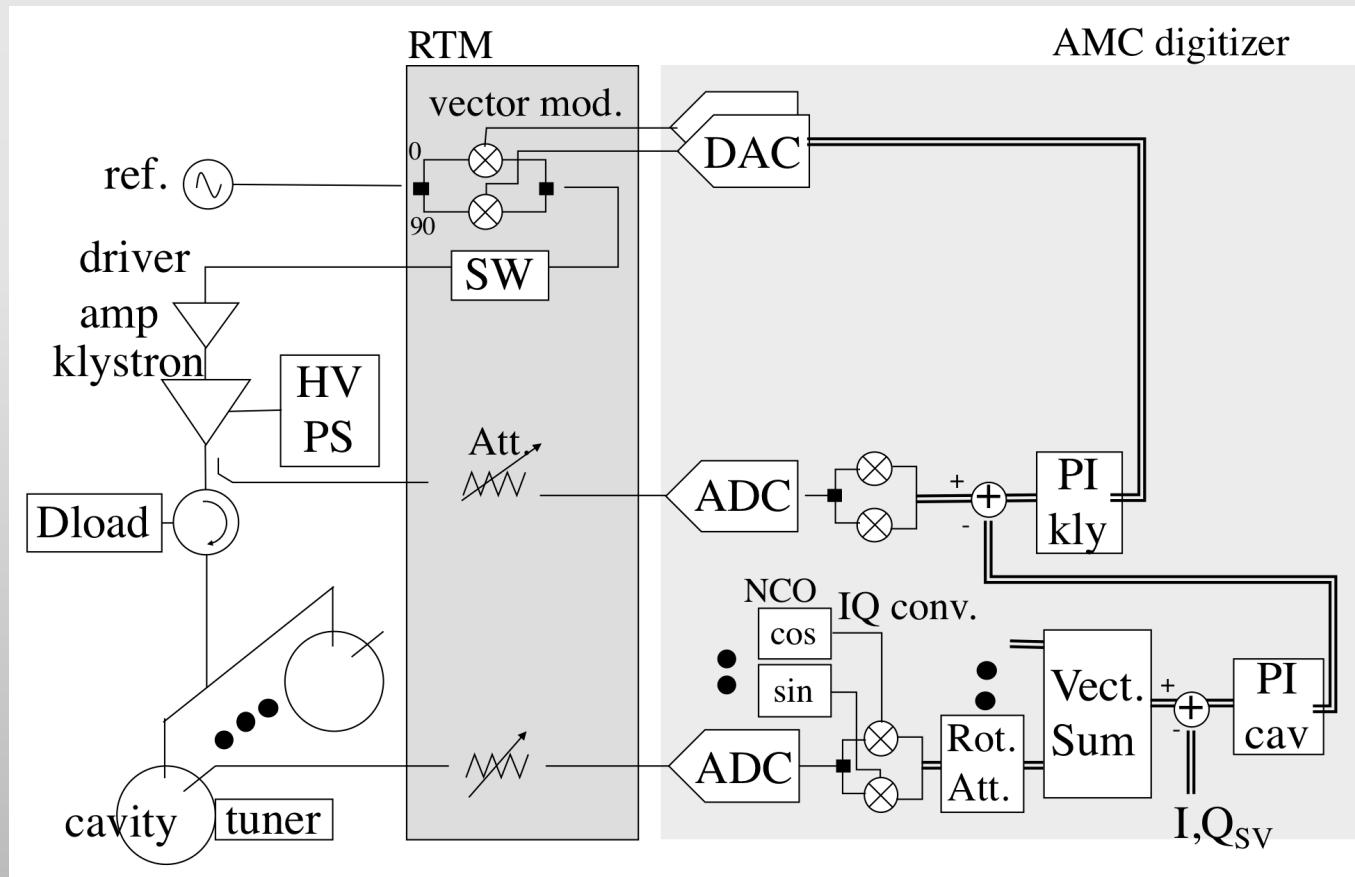
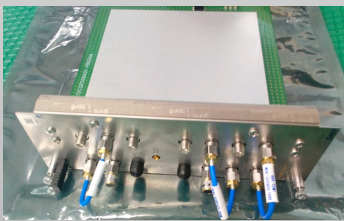


# MTCA.4ベースの新LLRF

- 10ch ADCのボードを4枚 (s6,s8,s10,s12) 使用
- s6のボード上のFPGAにfeedback機能を実装



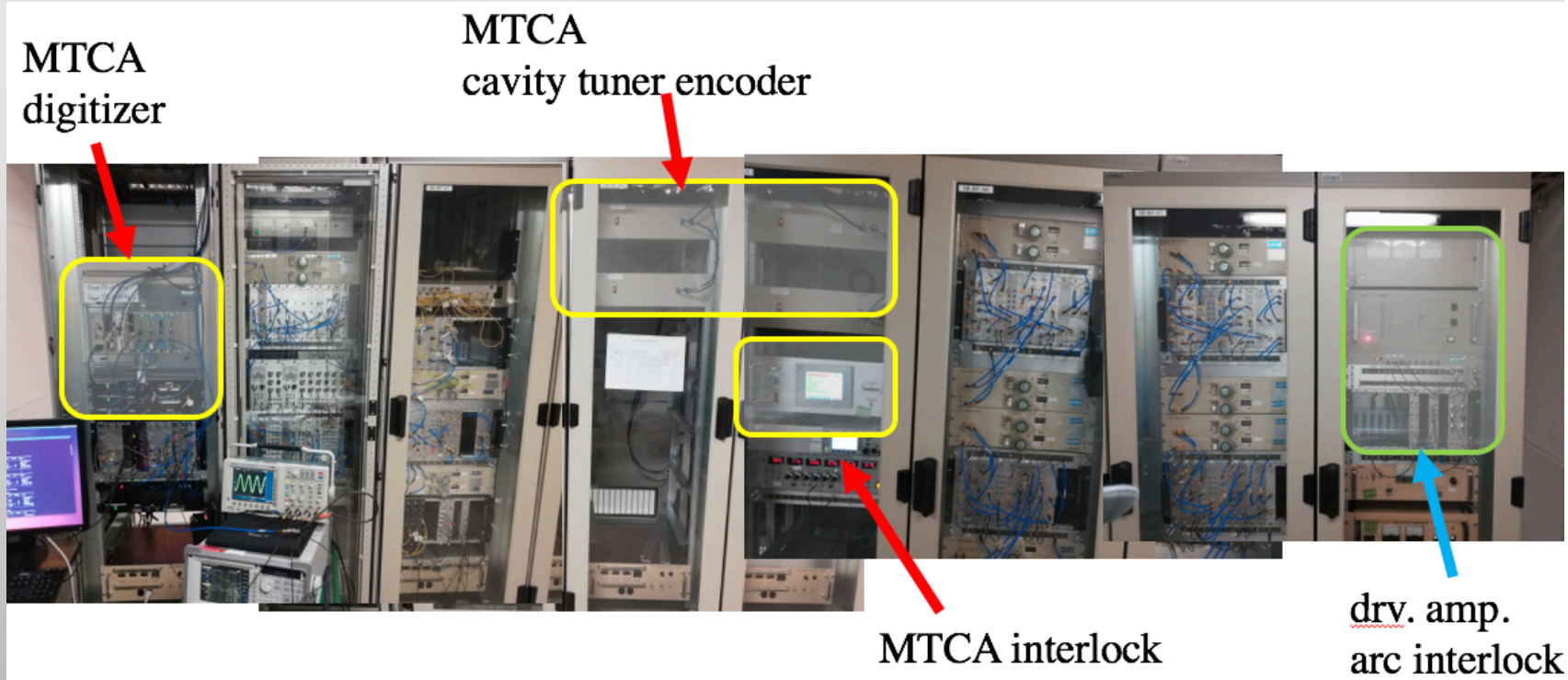
clock eRTM





# 新LLRFの実装

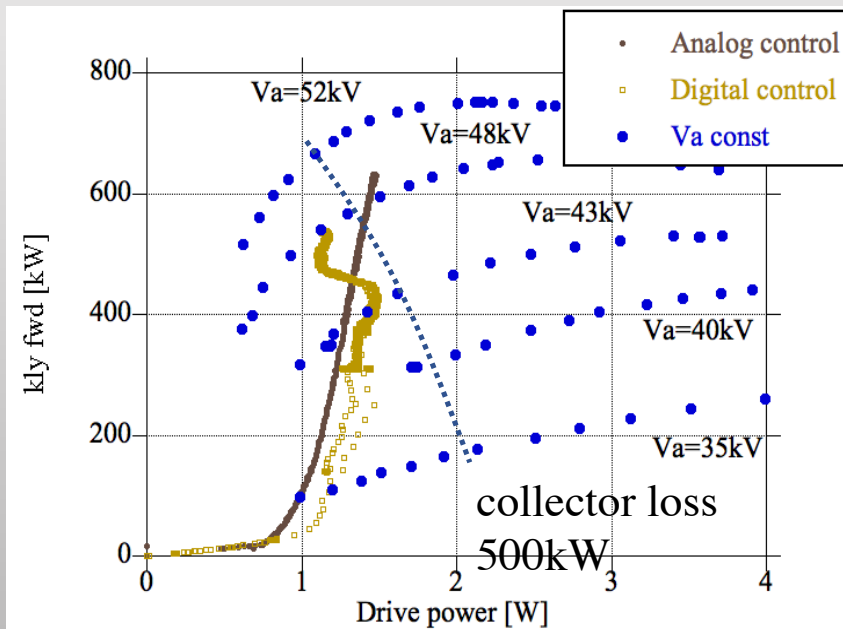
- 占有空間の削減・省配線
  - MTCA.4モジュールの高密度実装 (10ch/module)
  - RF backplaneを使ったクレート内配線
  - EtherCATフィールドバスを使った通信
  - 大幅に 占有空間を減らすことができた



# クライストロン アノード電圧の制御

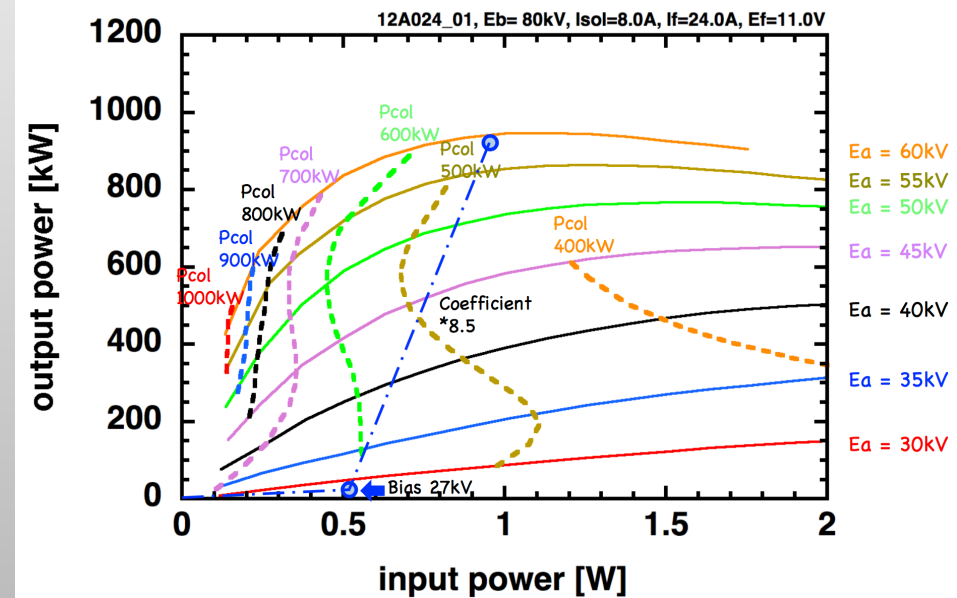
- コレクタ損失を減らす
- 従来：ドライブ電力を元に制御
- 新規：クライストロン出力を元に制御（調整途中）

A-stでの測定  $V_k=80kV$



参考

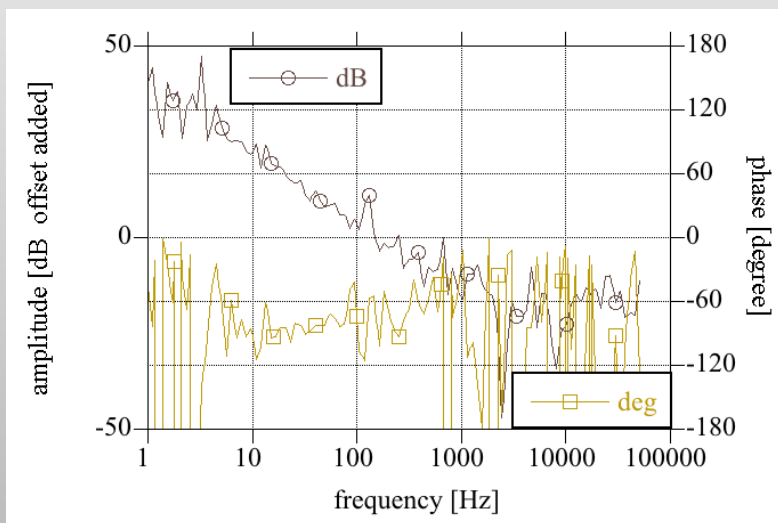
T-stで1MWダミーロードを使用しての測定



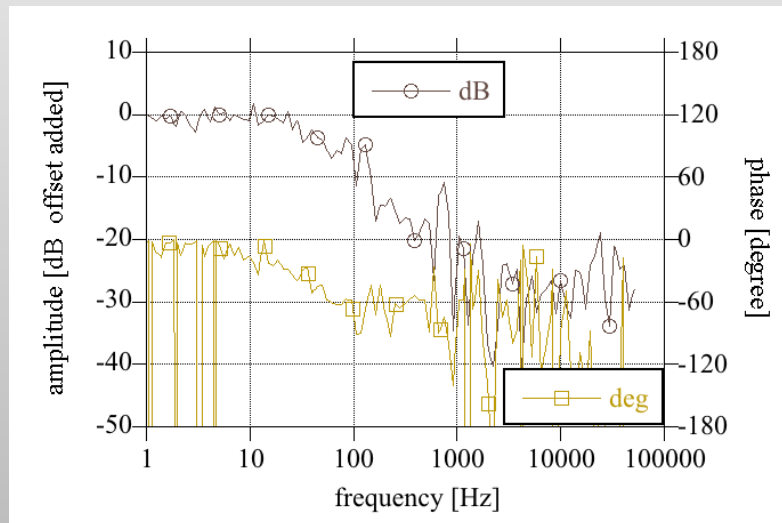
# フィードバック特性

- 空洞フィードバック
  - 温度変動、ビーム負荷など遅い外乱に対する補正
  - ~20Hzの帯域
- クライストロン フィードバック
  - 高電圧電源のリップルなどの外乱に対する補正
  - ~10kHzの帯域

開ループ特性



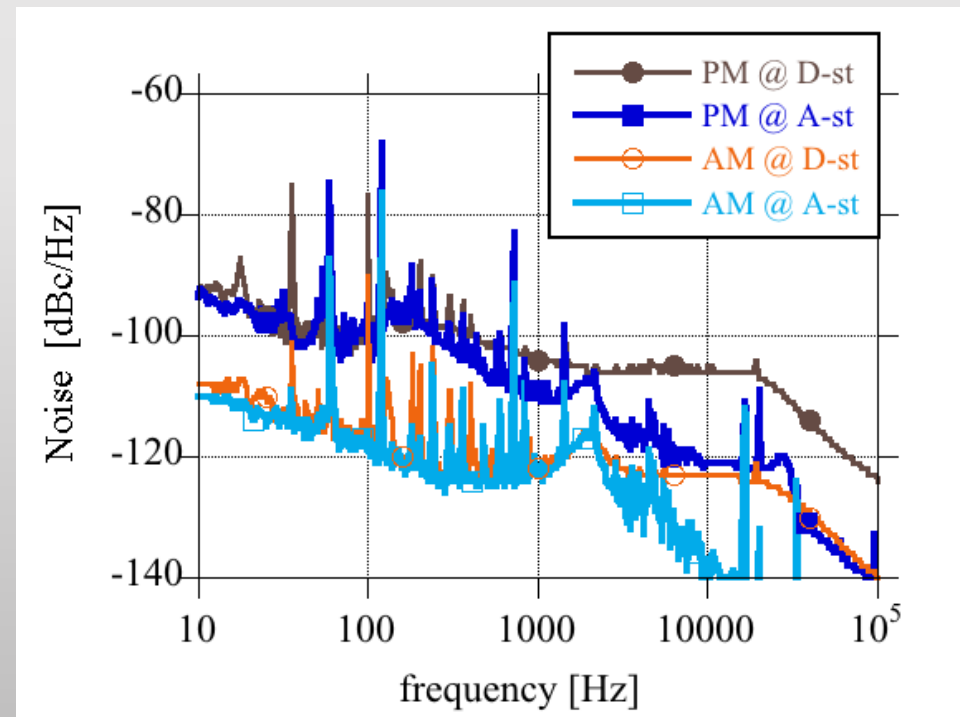
閉ループ特性



# 位相 振幅の短期変動

- 空洞ピックアップ信号のAMノイズ、PMノイズ
- 10Hz-100kHzの範囲で積分
- 要求 ( $<0.1\text{deg}$   $<0.1\%$ ) を満足

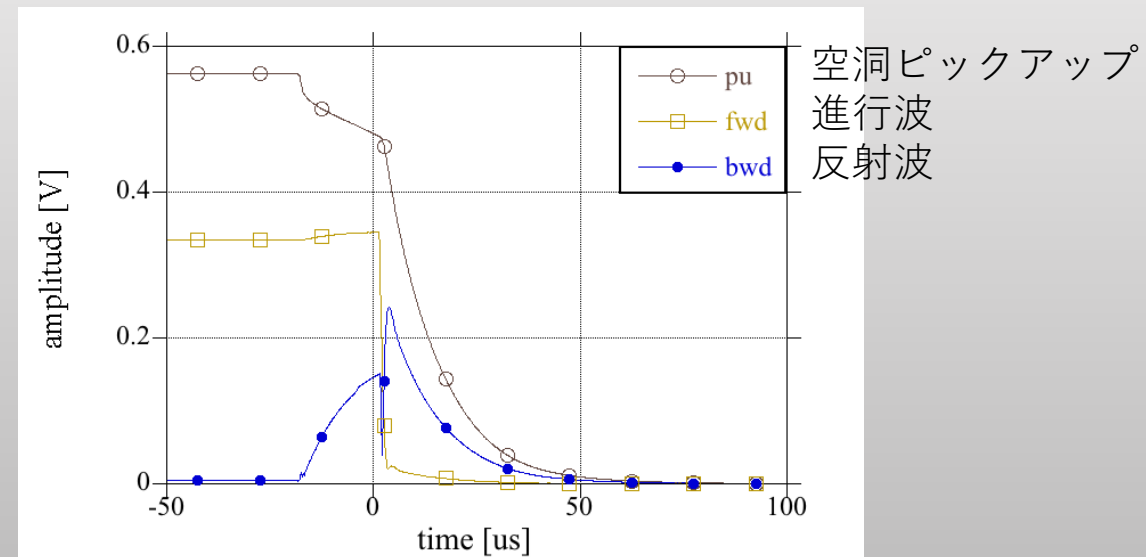
	位相雑音	振幅雑音
A-station	0.0591deg	.037%
D-station	0.0587deg	.024%



# 異常発生時の波形収集

- 高い通信速度を生かした波形転送
- インターロック発生前後の進行波、反射波、ピックアップ波形を自動的に保存
- 異常発生の原因調査に役立つ

異常発生時の例



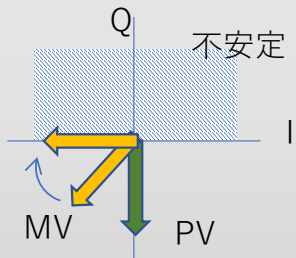
# 調整時に発生した事象

- チューナーが常に動作
  - 電子ビームのフィリングが不均等な場合、ローディングによって位相変動発生。→デジタルフィルタを設置
- MTCAクレータ電源の切入後に位相が元に戻らない
  - IQ復調で使用するNCOのタイミングが不定 → 外部トリガでリセット
- クライストロン進行波電力過大のインターロック1
  - AMCモジュールの温度上昇 → 発熱対策モジュールとの交換
- クライストロン進行波電力過大のインターロック2
  - フィードバックの安定領域からずれて発振

# LLRF feedback system 周波数応答

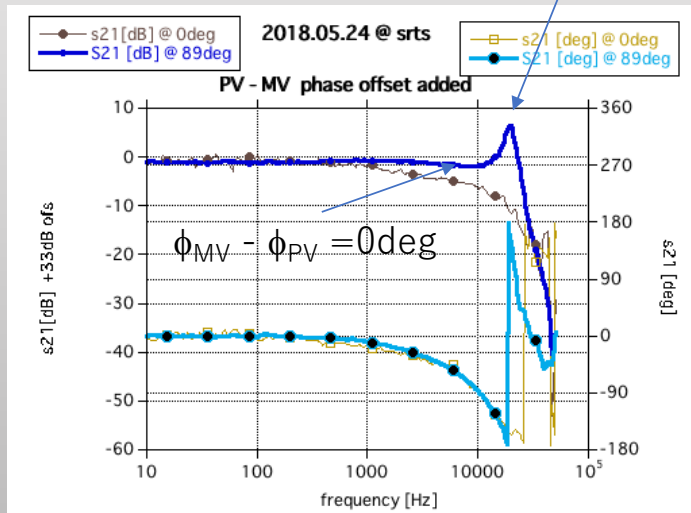
- IQ座標でのfeedback

- 動作が安定であるためには、PV,SV,MV の差が小さい必要あり
- その条件を維持するように補正を行う必要がある



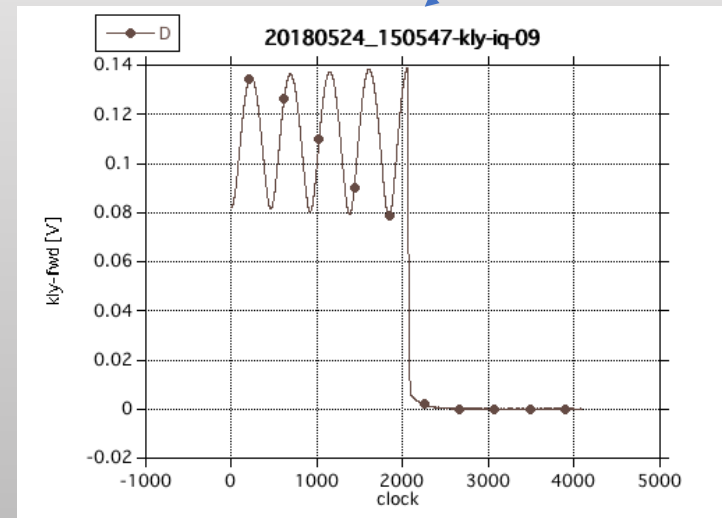
位相余裕の異なる条件での系の応答

$$\phi_{MV} - \phi_{PV} = 89\text{deg}$$



発振状態の例

クライストロン振幅過大でインターロック動作



# まとめ

- 8GeV電子蓄積リングSPring-8の4つのRFステーションのうちの1つ AステーションのLLRFシステムを更新した
- MTCA.4規格のモジュールで構成したシステム
  - コンパクト・省配線
  - 高速通信が可能 → 異常発生時の波形データの確認
  - 保守モジュール種類の削減
- 従来どおり 100mAのトップアップ運転を継続中



# 今後

- 問題点の改善
  - IQ座標での制御から極座標制御に移行
  - 暫定措置箇所を更新
- Dステーションの更新：2019年3月
- B,Cステーションの更新：2019年8月
- 高度化
  - コヒーレントなシンクロトロン振動の抑制の適用
    - 現在はマスターオシレータにFM変調 → BPM位置測定に影響
    - BPMからの位相信号を高速シリアル通信で伝送
    - 1ステーションのみの位相変調で抑制