

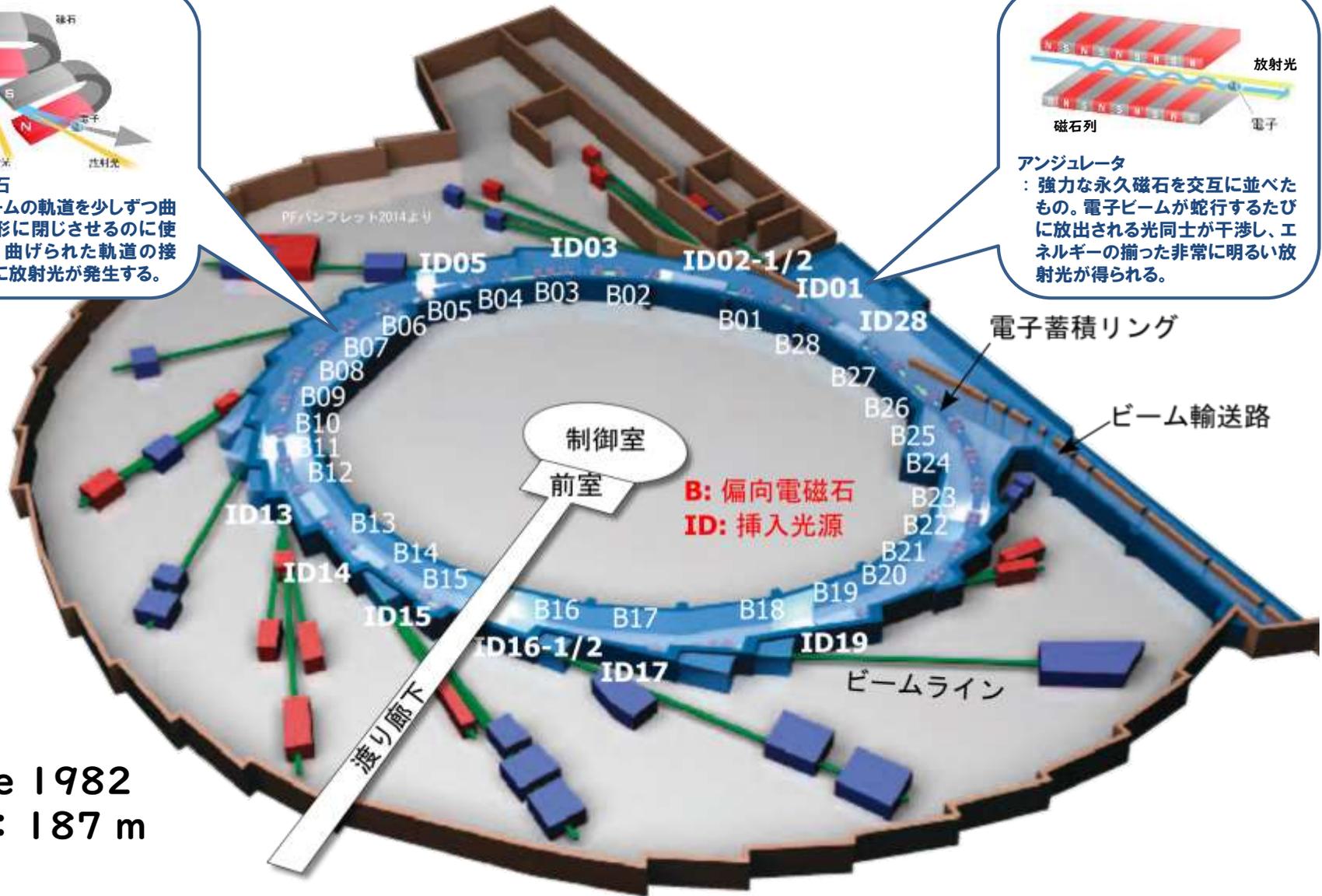
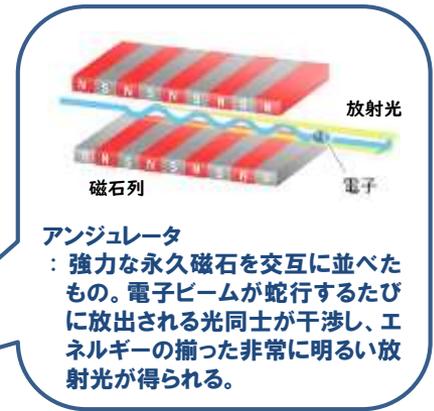
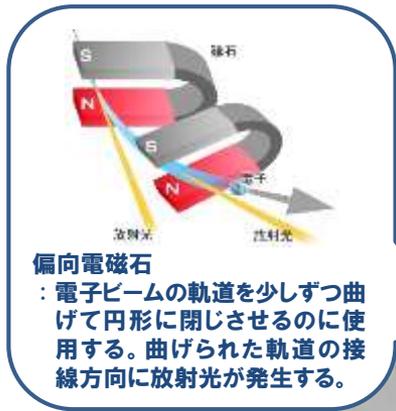
KEK PFリングにおけるMicroTCAを用いた ビーム軌道安定化システムの開発

2023/11/21

KEK加速器第6研究系

高井 良太

Photon Factory Storage Ring (PF-ring)



since 1982
周長: 187 m

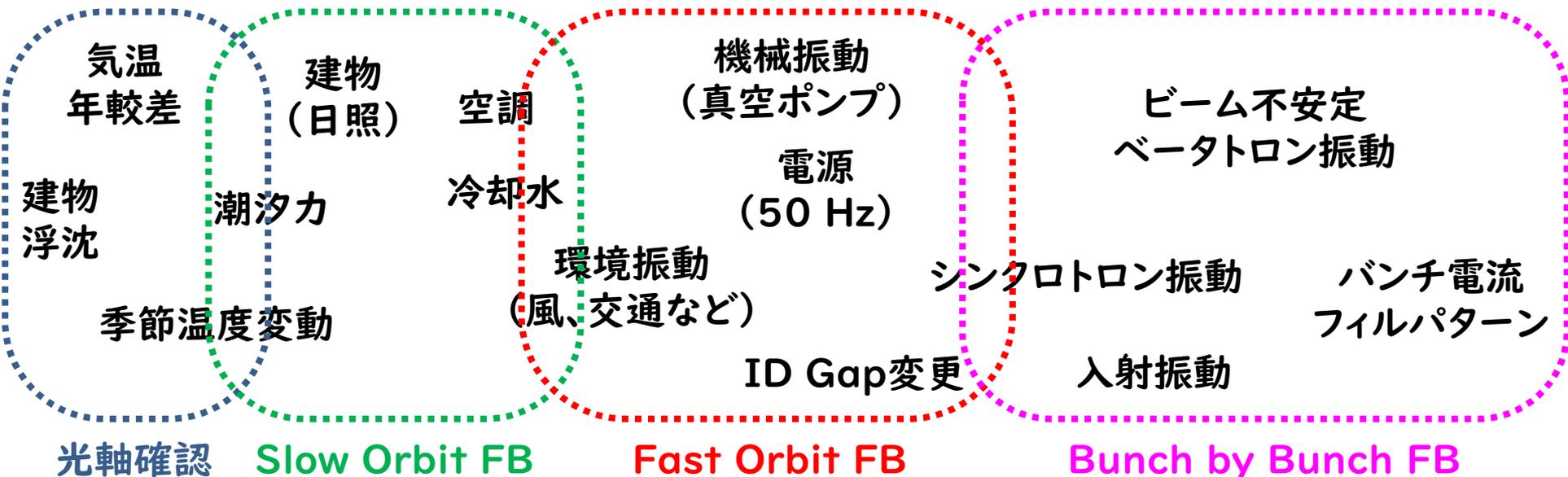
軌道安定化の必要性

➤ 蓄積ビームの軌道変動とその対策

Slow

Fast

年 月 日 時 分 秒 ms μ s ns



“Global Orbit Feedback”

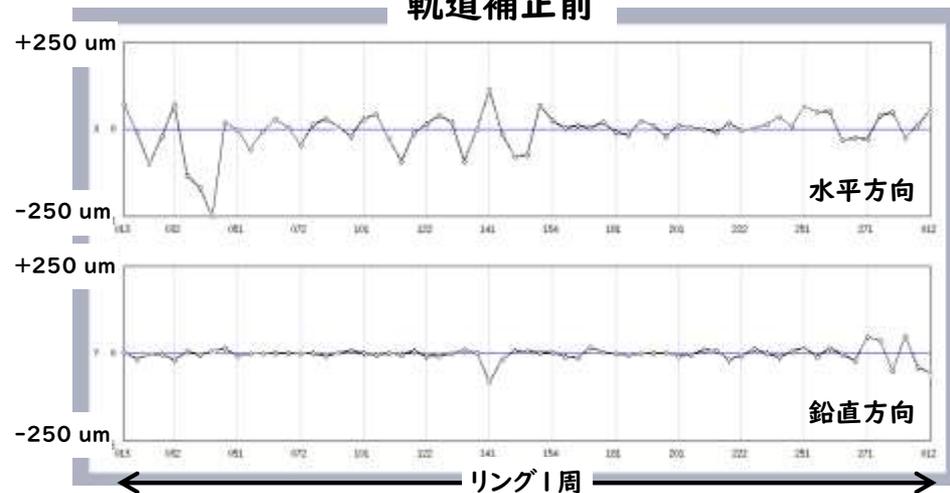
各ビームラインにおける光軸を一定に保つためには、
“ビーム軌道フィードバック”による軌道安定化が不可欠!

Global Orbit Feedback (GOFB)

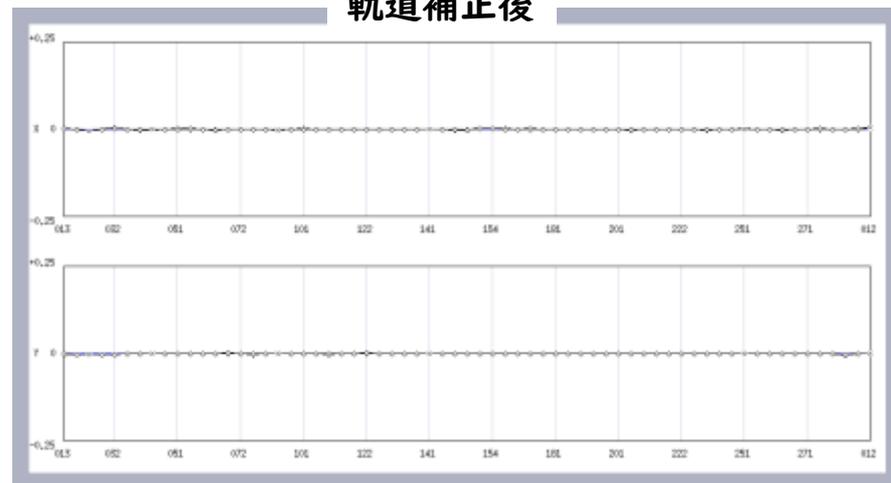
1. リング1周に渡る閉軌道をBPMで測定
2. 基準軌道との偏差を計算
3. 偏差を補正するためのキック量を計算
4. PI制御のための演算
5. 各補正電磁石の電流値を変更

フィードバック

軌道補正前



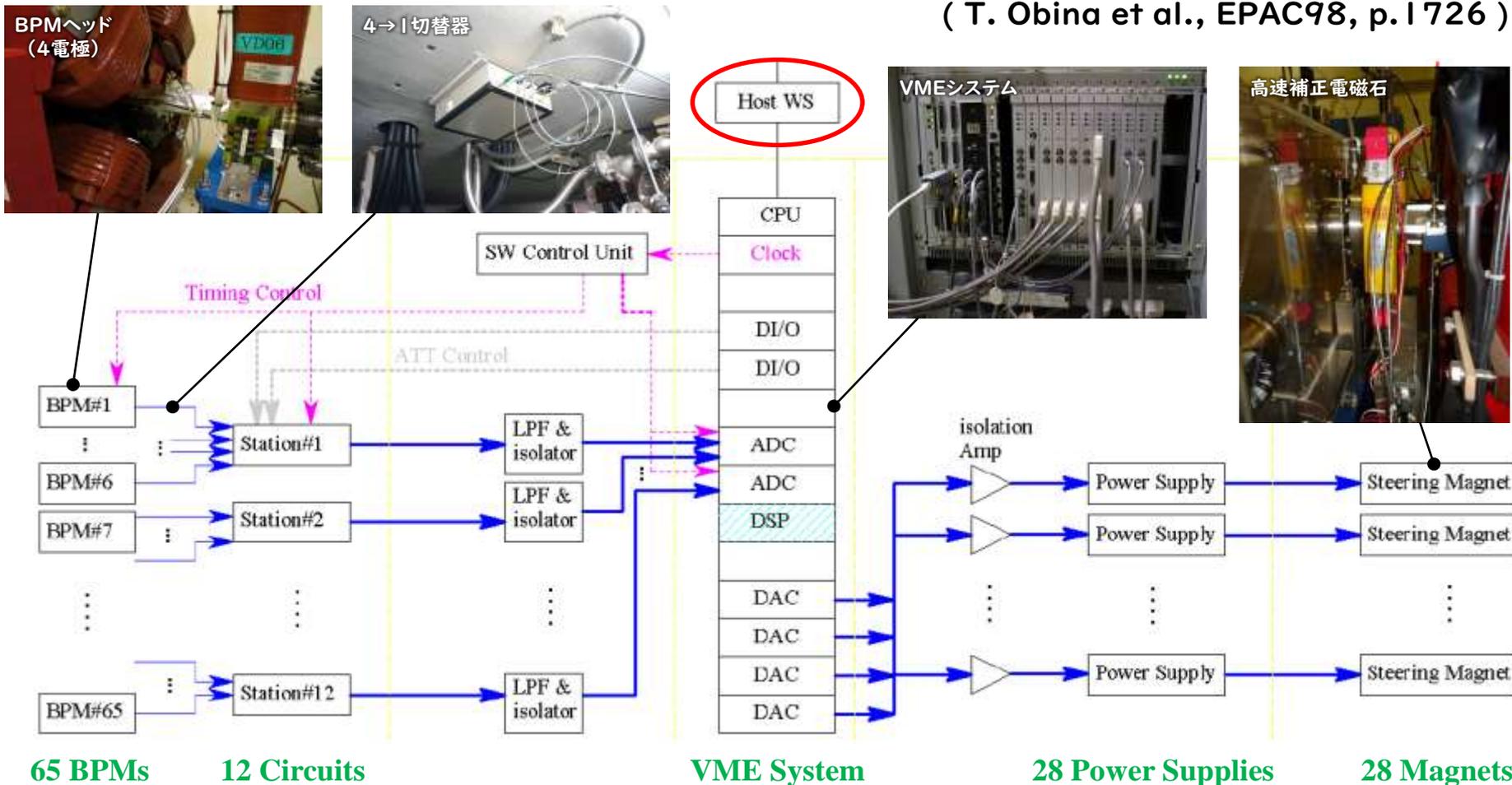
軌道補正後



- フィードバックの周期が速い程、速い軌道変動まで抑制できる
- GOFB = CPUベースのSOFB + DSP/FPGAベースのFOFB
- 「GOFBの高度化」 = 「FOFBの高速化・高精度化」

PFリングの現FOFBシステム

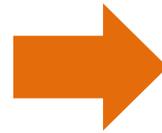
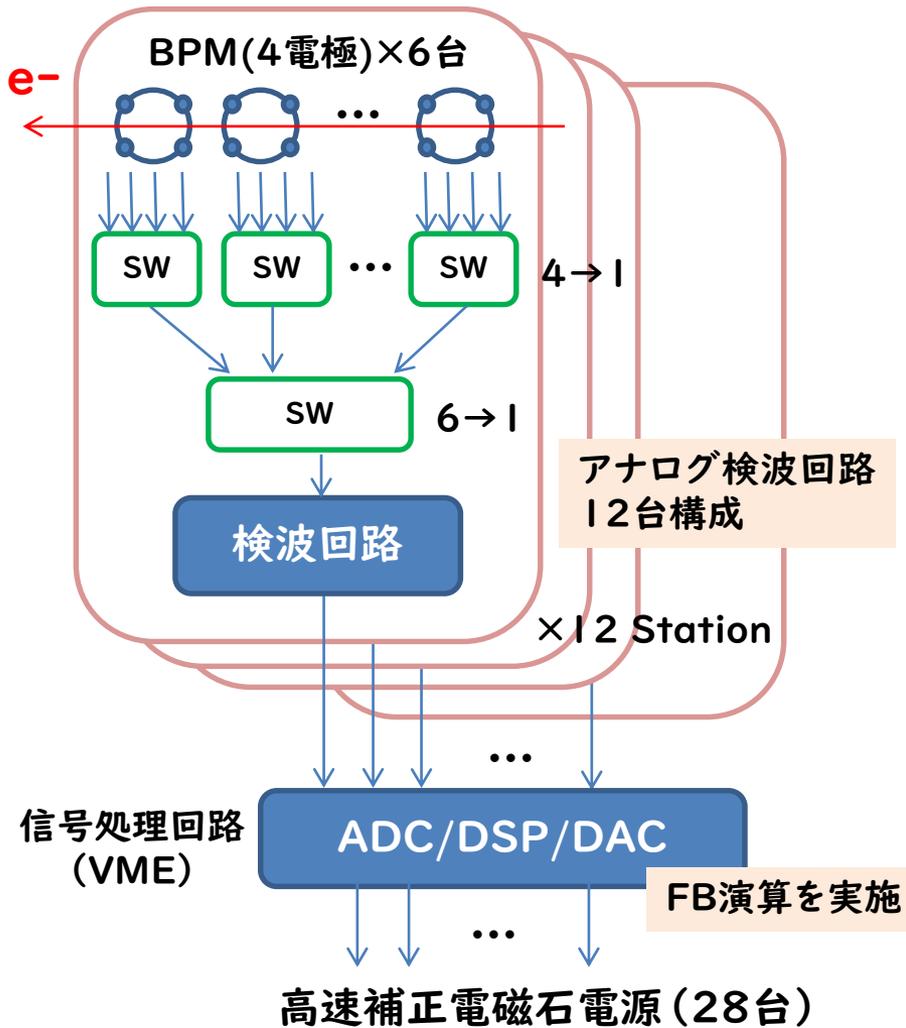
(T. Obina et al., EPAC98, p.1726)



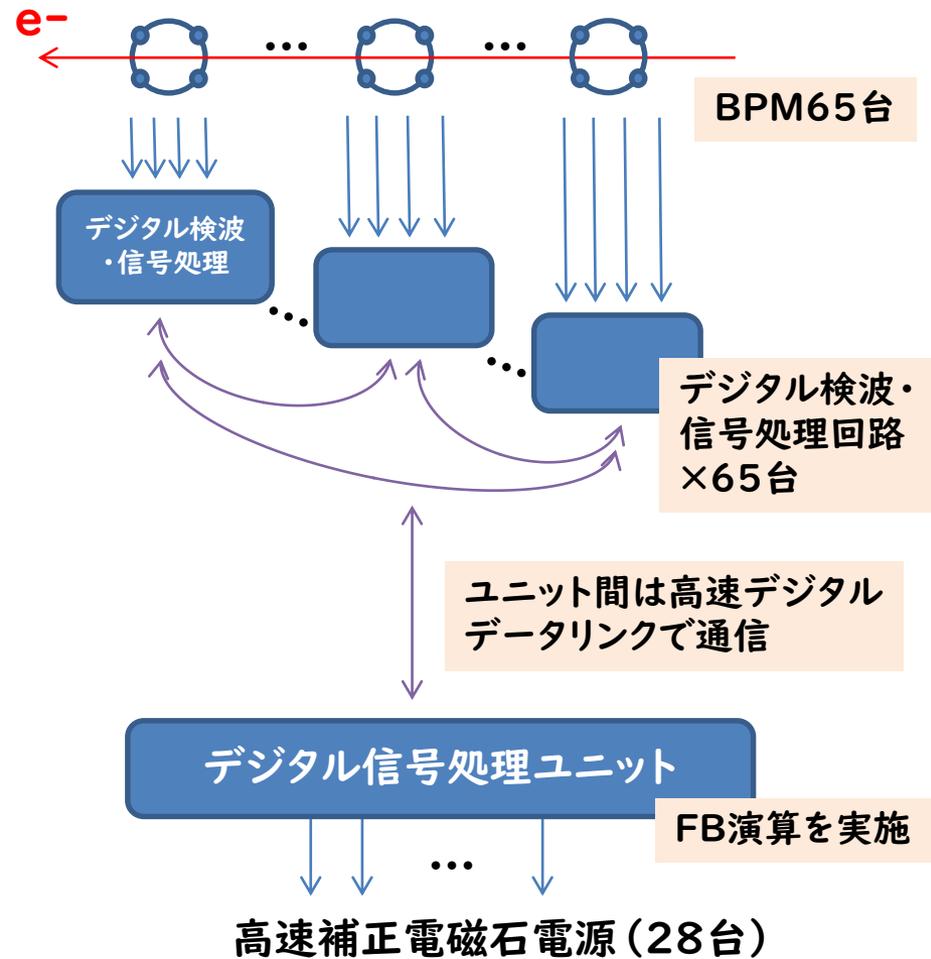
- 65台のBPMに対して12台のアナログ検波回路を用いた切り替え方式
- 測定精度: $2-3 \mu\text{m}@1 \text{ Hz}$, FB周期: 12 ms (80 Hz), FB帯域: $\sim 0.3 \text{ Hz}$
- 1997年に導入されたもので老朽化によるハードウェアトラブルが増加傾向

FOFBシステム高度化の方針

現状



高度化案



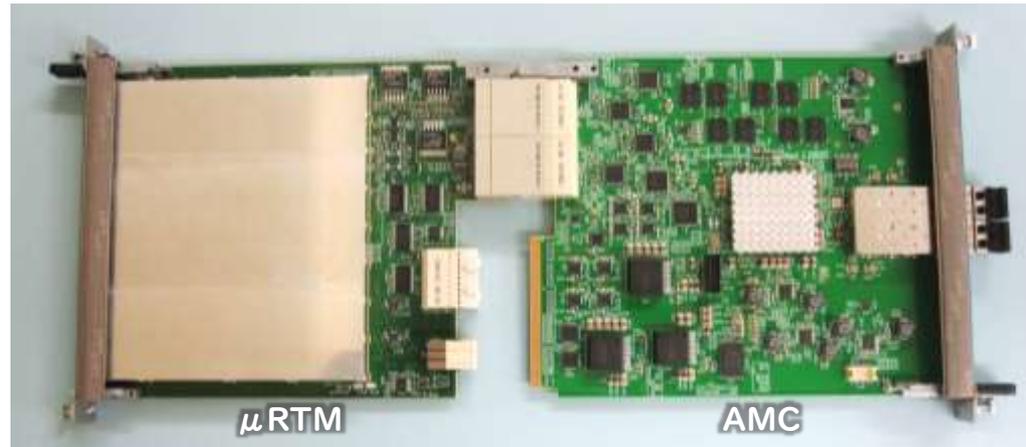
新デジタル信号処理回路

➤ MicroTCA.4規格のデジタル検波・信号処理回路

- Micro Telecommunications Computing Architecture + Scientific applications
- 高い可用性・冗長性, 高速データ通信, 高精度タイミング, リモート管理, 省スペース, 省配線
- 三菱電機ディフェンス&スペーステクノロジーズ(旧・三菱電機特機システム)製
- SPring-8の次期計画用に開発されたBPMモジュールをPFリング用にアレンジ

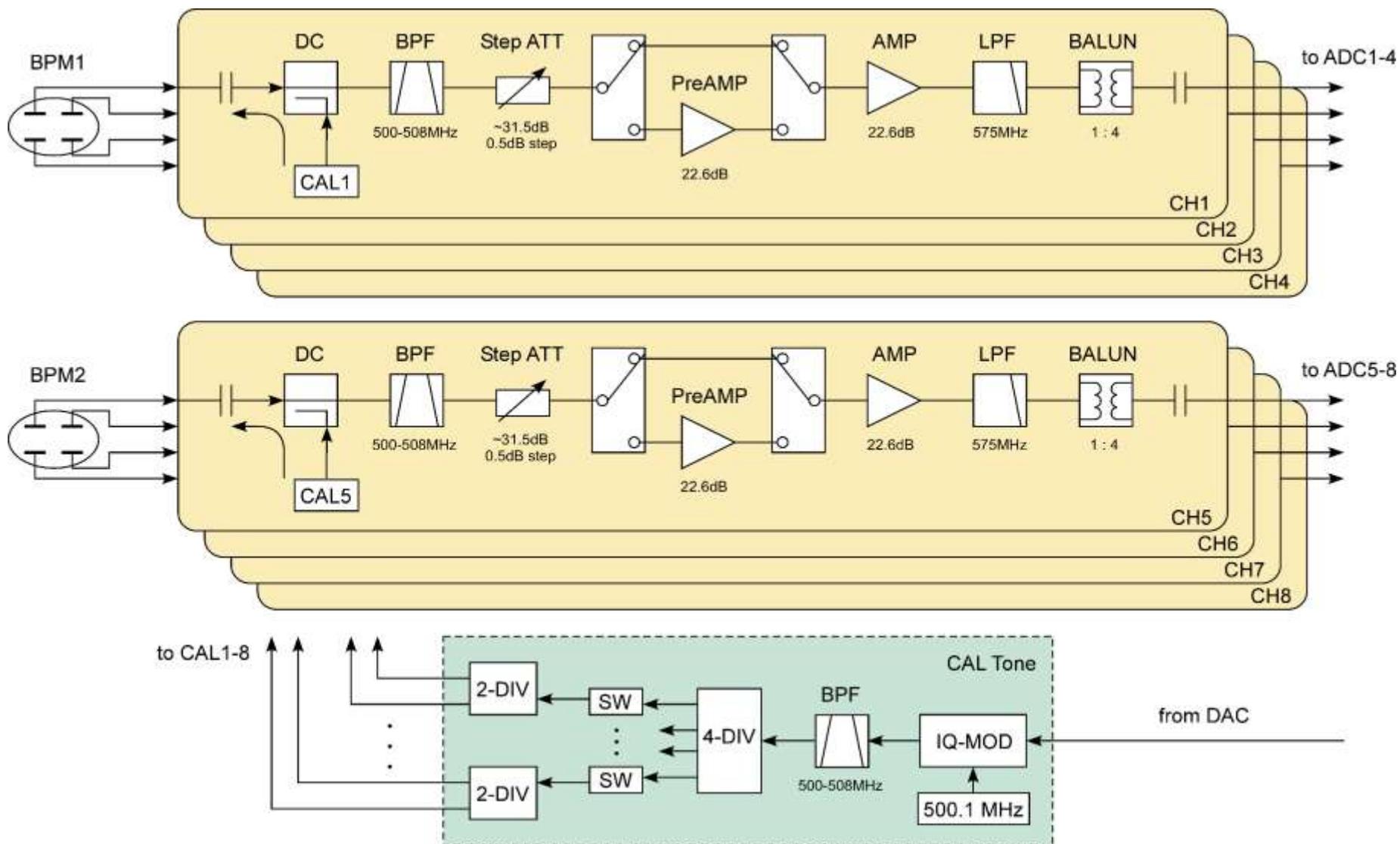


MicroTCA.4 shelf (front view)

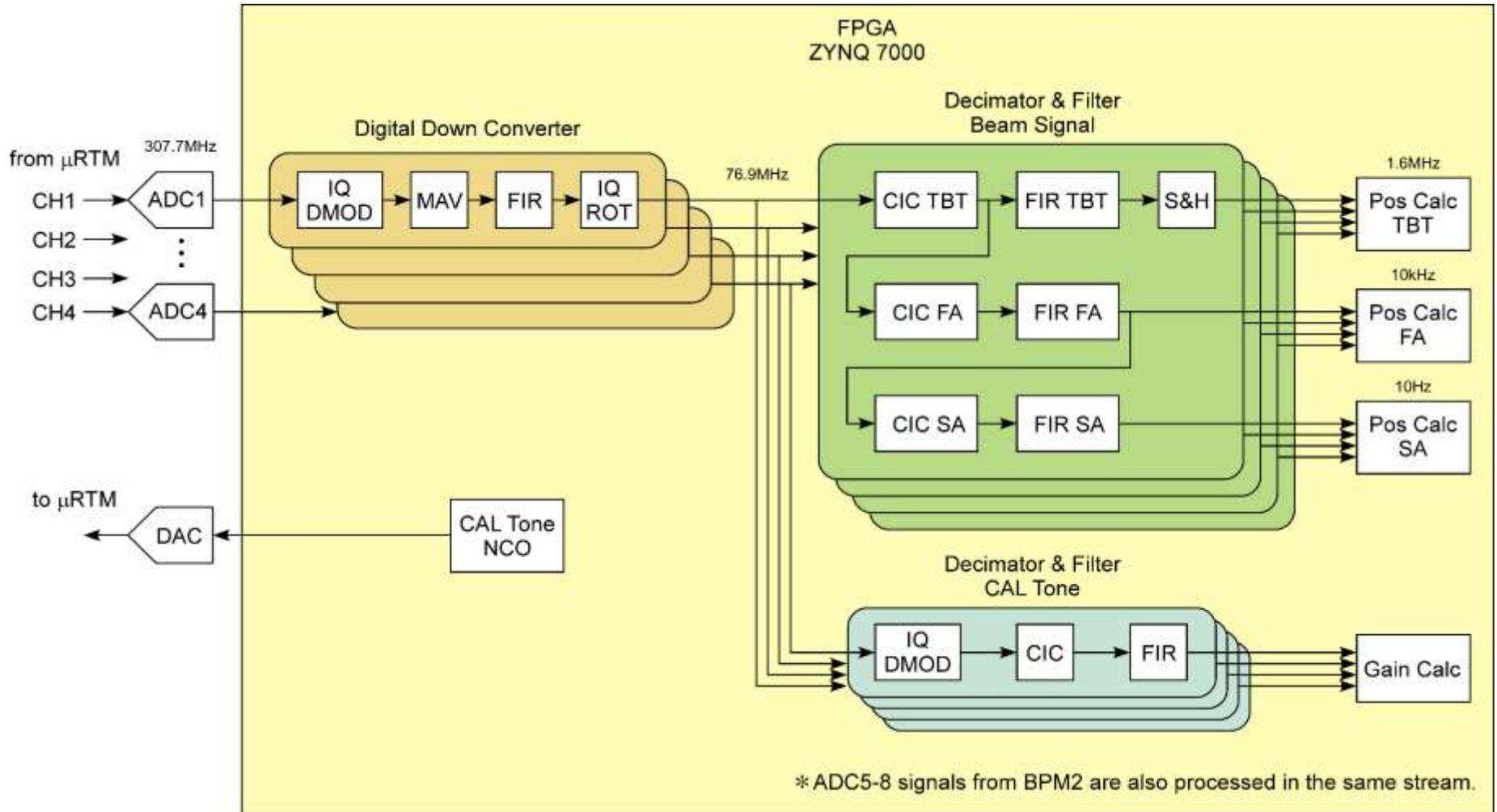


Rear Transition Module (RTM)
+
Advanced Mezzanine Card (AMC)

μRTM: アナログフロントエンド回路

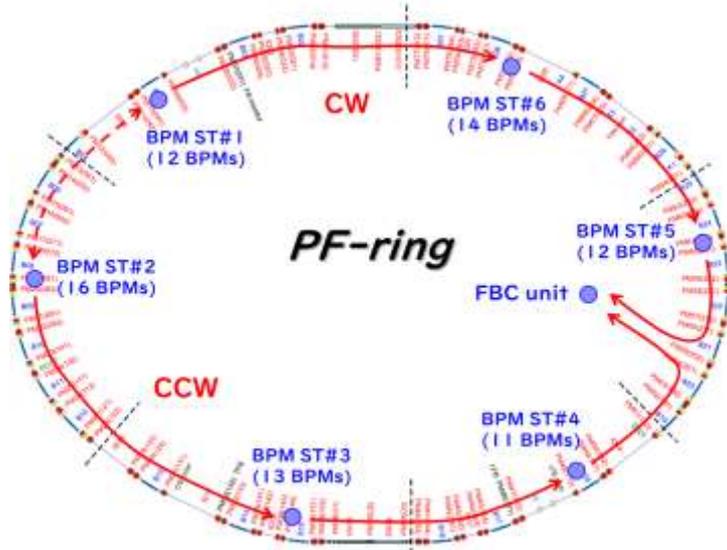


AMC: 高速デジタイザ&デジタル信号処理回路

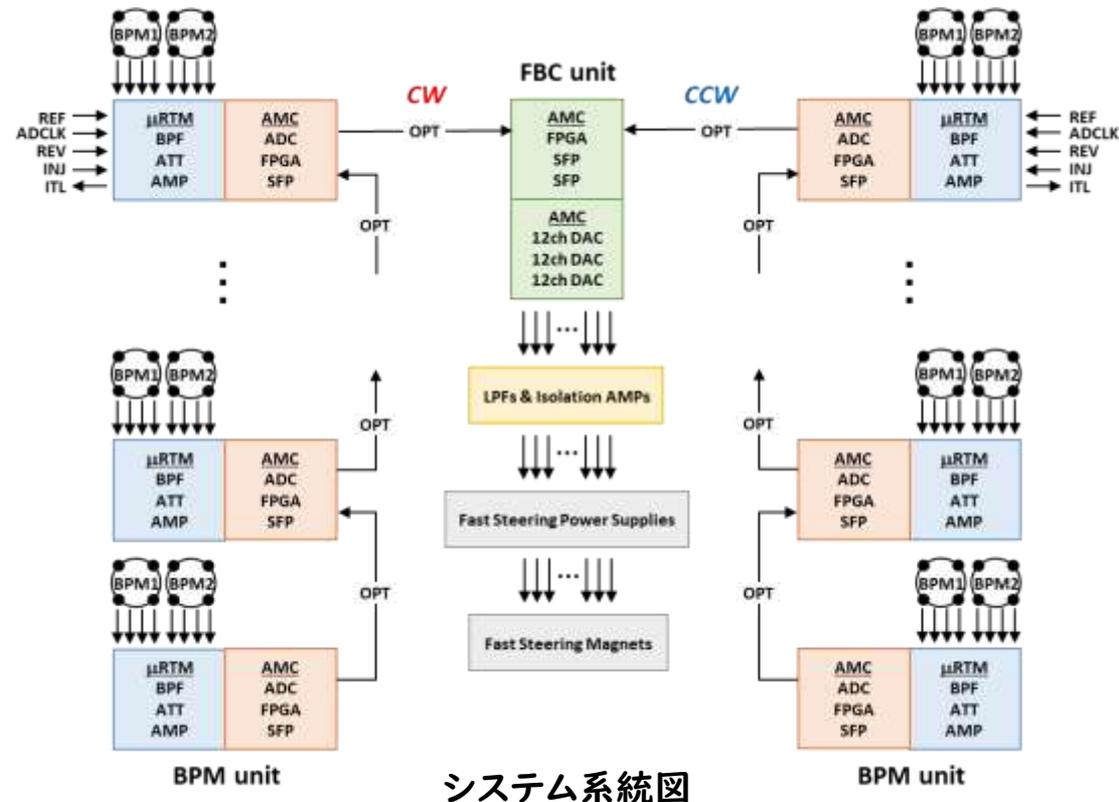


回路の分散配置と光接続

- BPM80台分の回路を6ヶ所のBPMステーションに分散配置
- 各回路・ステーション間を光ケーブルで接続し、10kHzレートのFAデータを中央のFeedback Controller (FBCユニット) に収集する
- $\{(\text{基準軌道データ}) - (\text{閉軌道データ})\} \times (\text{応答行列})^{-1} \Rightarrow (\text{補正電流値})$
- 高速のDAC (12chx3, 16bit, 500MSPS max) を経て電磁石電源へ



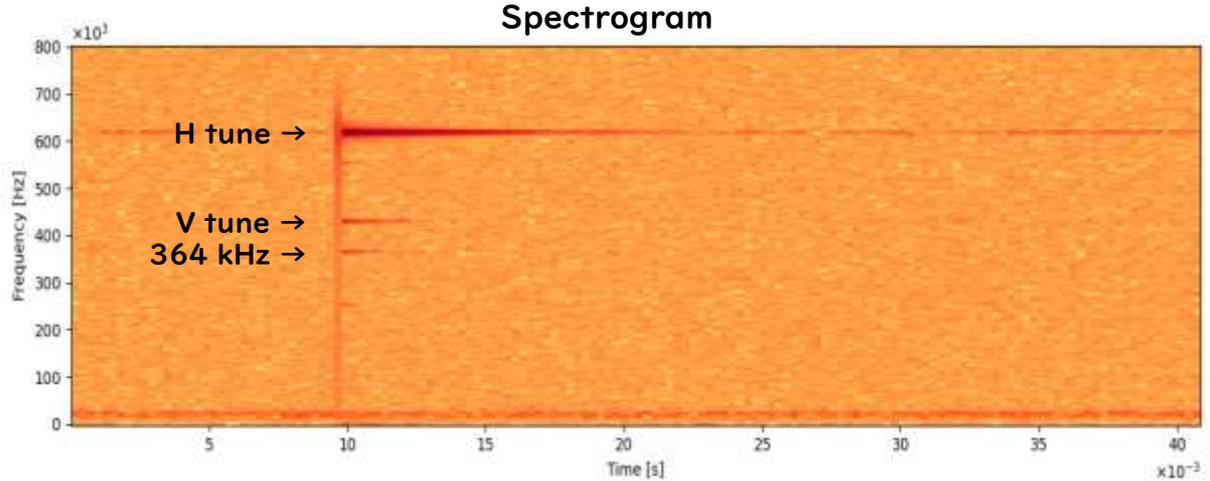
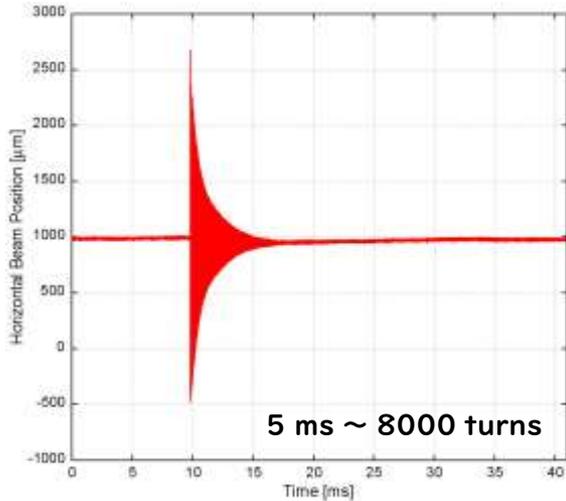
FBCユニット



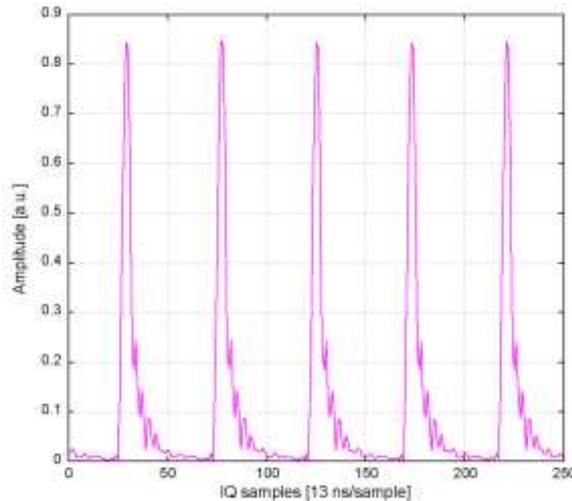
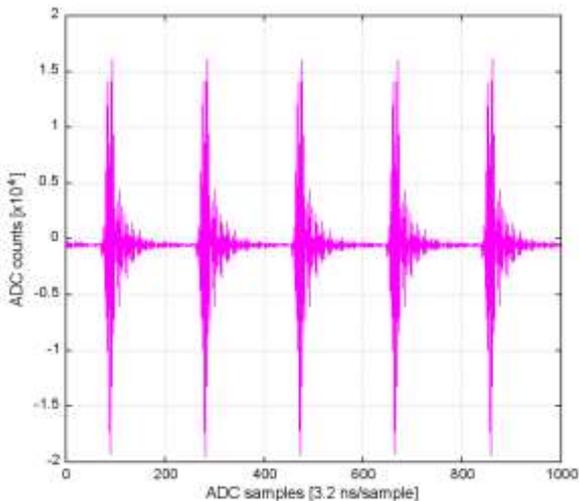
システム系統図

試験データ紹介

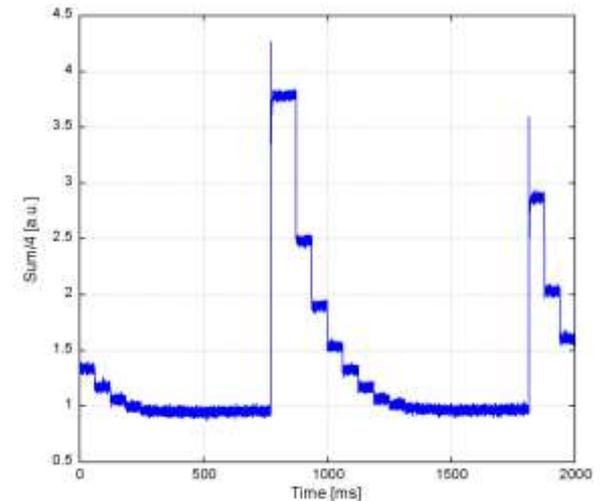
➤ TBTデータで捉えた水平方向入射振動 (MB 120 mA, ATT 18dB, with BxB FB)



➤ ADC生波形とIQ検波で得られた振幅波形 (SB 2 mA, ATT 0dB)

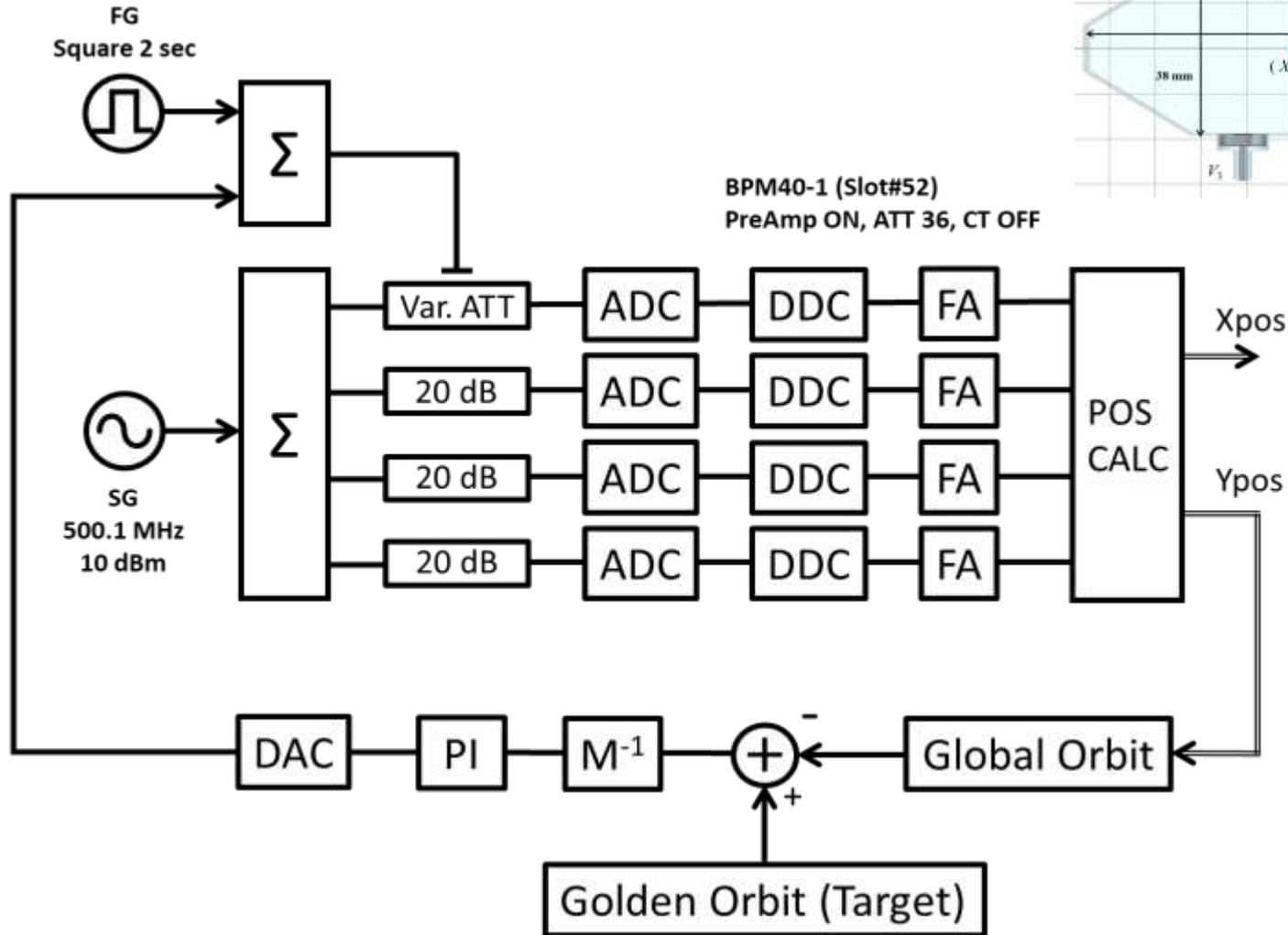


➤ FAデータで捉えた入射ビーム (SB 0.1 mA, ATT 0dB, with Gated RF-KO)

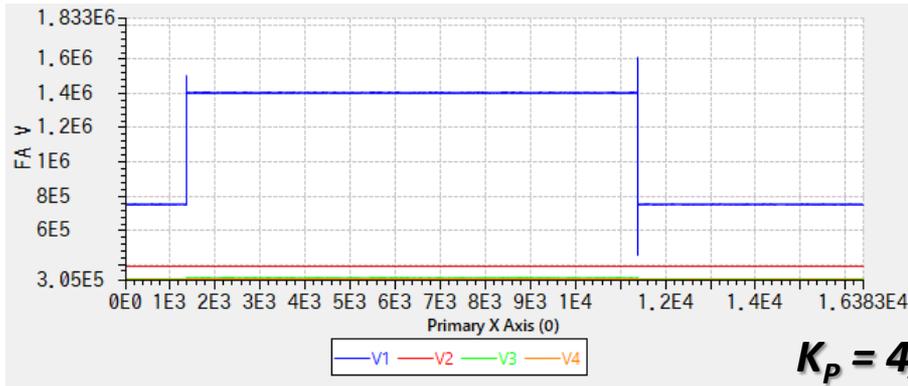


試験データ紹介

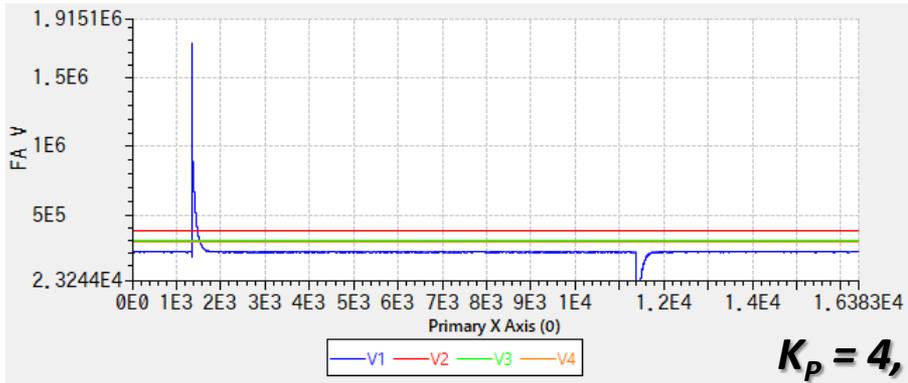
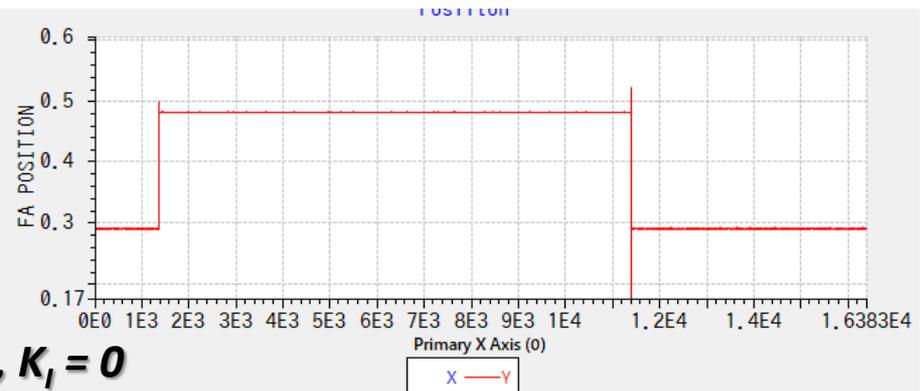
可変ATTを用いた入力出力での軌道フィードバック模擬試験



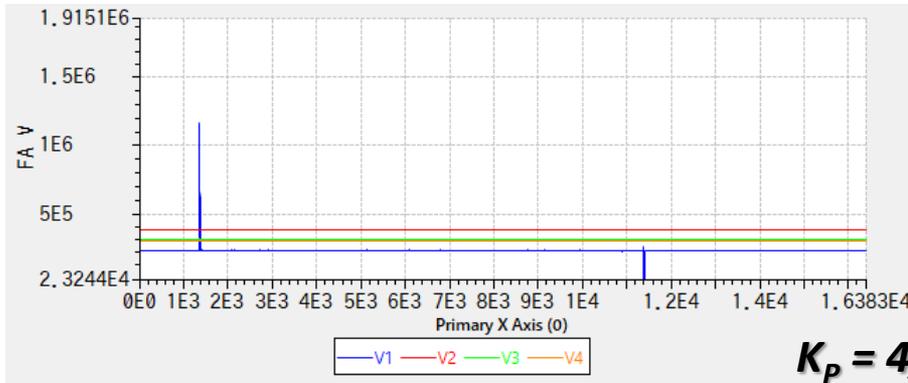
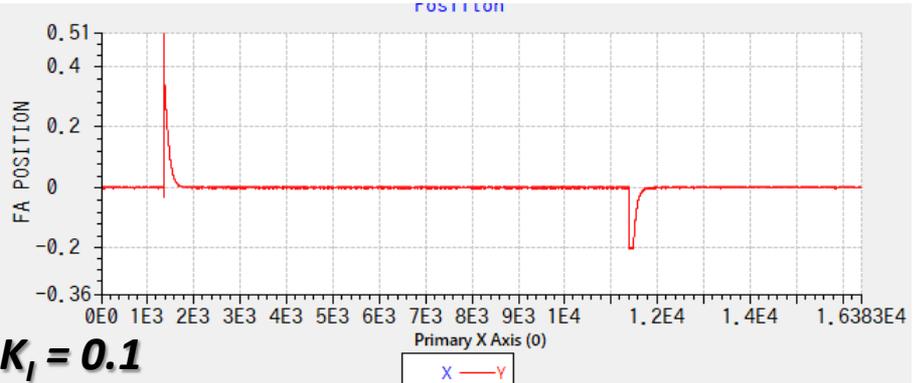
試験データ紹介



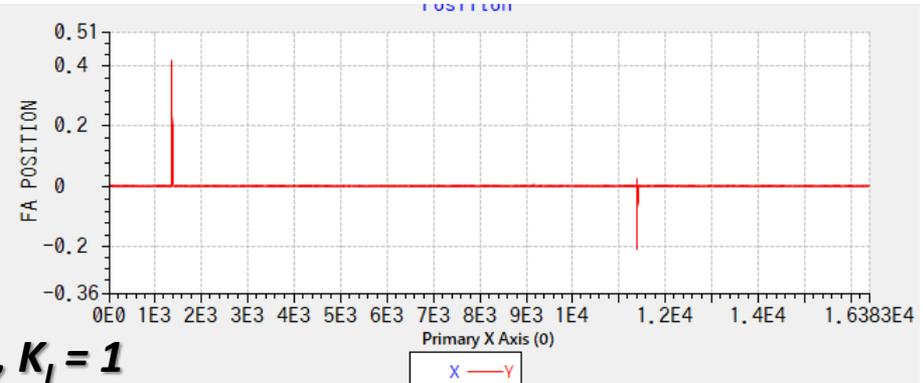
$$K_p = 4, K_i = 0$$



$$K_p = 4, K_i = 0.1$$

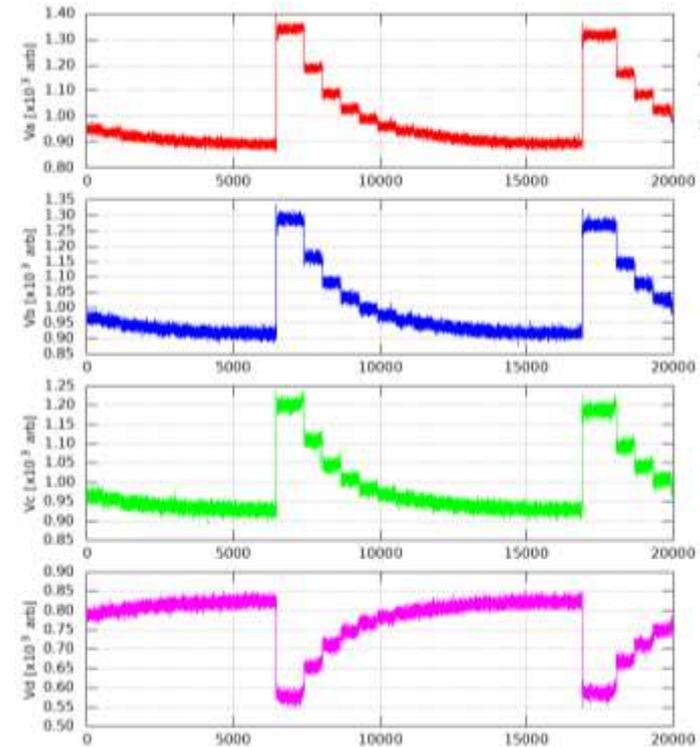


$$K_p = 4, K_i = 1$$



これまでの主な改修リスト

- DIOポートのI/L出力が発振する
⇒ 双方向IC後段の抵抗を予備バッファに切り替え
- 光リンクでFAデータを取得できない・同期できない
⇒ FPGAのロジックと起動スクリプトを修正
- ホットスワップレバーの接触不良
⇒ 全RTMに補助パーツを追加
- FBCのFPGAとDAC間の通信不良
⇒ FPGAの出力設定を見直し
- 入射トリガーのFA/SAデータへの漏れ込み
⇒ 光リンク関係の設定を修正
- 入力レベルが低い場合にFAデータの出力波形が反転する
⇒ DDC後の端数処理を切り捨てから四捨五入に変更することで丸め誤差によるオフセットが改善し、反転現象が軽減した、ダイナミックレンジが大幅に拡大
- 入力レベルが低い場合にTBTデータで入射振動が見えたり見えなかったりする
⇒ FIRフィルタが無効のままだった、デフォルトで有効化



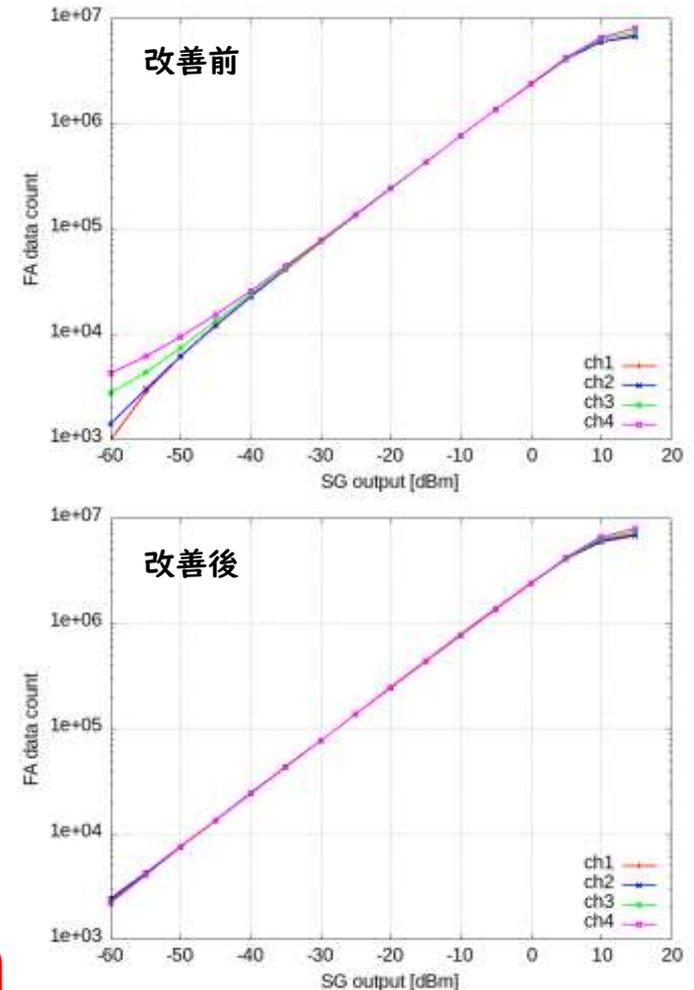
FA信号反転現象
(SB 0.1 mA, ATT 0dB, PreAmp OFF,
with Gated RF-KO)

これまでの主な改修リスト

- ADC Channel間で出力信号にタイミング差あり
⇒FPGAの同期設定を変更
- ADC Channel間で出力信号にレベル差あり
⇒500MHzに対してADC入力段でのインピーダンスマッチングが取れておらず反射・干渉が発生していた、全AMCの入力抵抗を付け替えることで軽減
- ADCの特定のChannel間でクロストークが大きい、方向性あり
- CAL Tone信号のビーム信号側への漏れ込み
- CAL Tone信号間にレベル差あり
- CAL Tone信号間の温度特性に差あり
- CAL Toneによる較正機能の実装
- ソフトウェア (EPICS) 関係の不具合は多数, その都度修正

海外の市販品ではなく国内メーカーで開発したことによるメリット

- ✓ 故障時や緊急時の対応の速さ (保守性の高さ)
- ✓ 回路の設計やデバッグ段階から関わることで得られる知識・経験



DDC丸め誤差改善前後での入出力特性 (SG出力, ATT 0dB, PreAmp OFF)

まとめと今後の予定

まとめ

- KEKのPFリングでは、2020年度よりビーム軌道安定化システムの更新が進められている
- 新システムでは現在のアナログ切り替え方式を脱却し、BPMと同数のデジタル検波・信号処理回路を導入することで大幅な高速化・高精度化が図られる
- 高い可用性と高速のデータベースを備えたMicroTCA.4規格の回路を採用
- BPM80台分の回路をリングに沿った6ヶ所に分散配置し、光リンクを通じて10kHzのレートで軌道データを収集, 基準軌道からのずれを検出してリングの補正電磁石にフィードバックする
- ビームサイズの1/10以下の軌道安定度、100-200 Hzのフィードバック有効帯域が目標

今後の予定

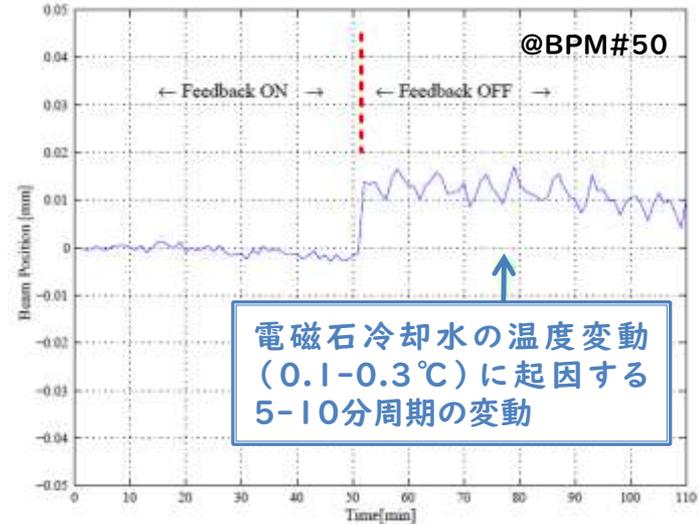
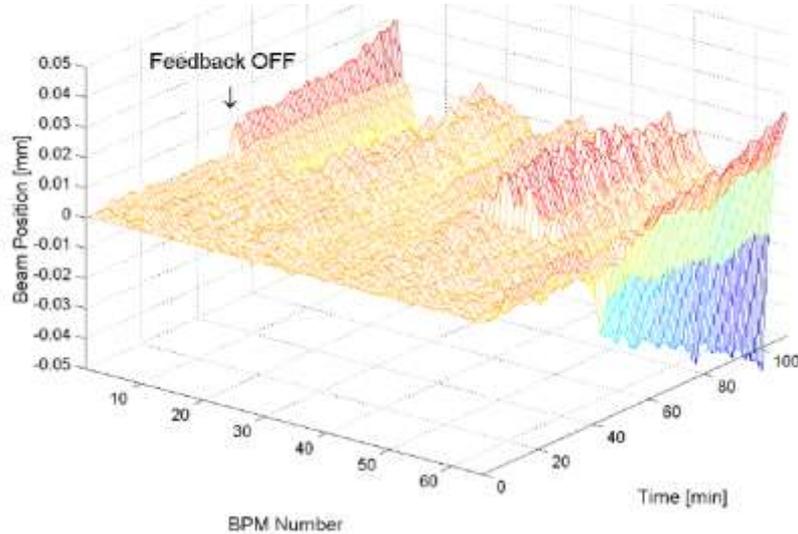
- ▷ テストベンチや実ビーム信号を用いた試験で問題点の洗い出しとその改修を進めてきた
- ▷ これまでに見つかった不具合やバグの多くは修正済み, 光リンクによるデータ収集も問題なし
- ▷ BPM1台、補正電磁石1台の構成で“実際の”軌道変動を抑制できることまで確認
- ▷ 今後はBPMと補正電磁石の数を段階的に増やしていき、現システムとの入れ替えを進める
- ▷ できるだけ早期に完全移行することを目指す(目標は2023年度内)

Backup Slides

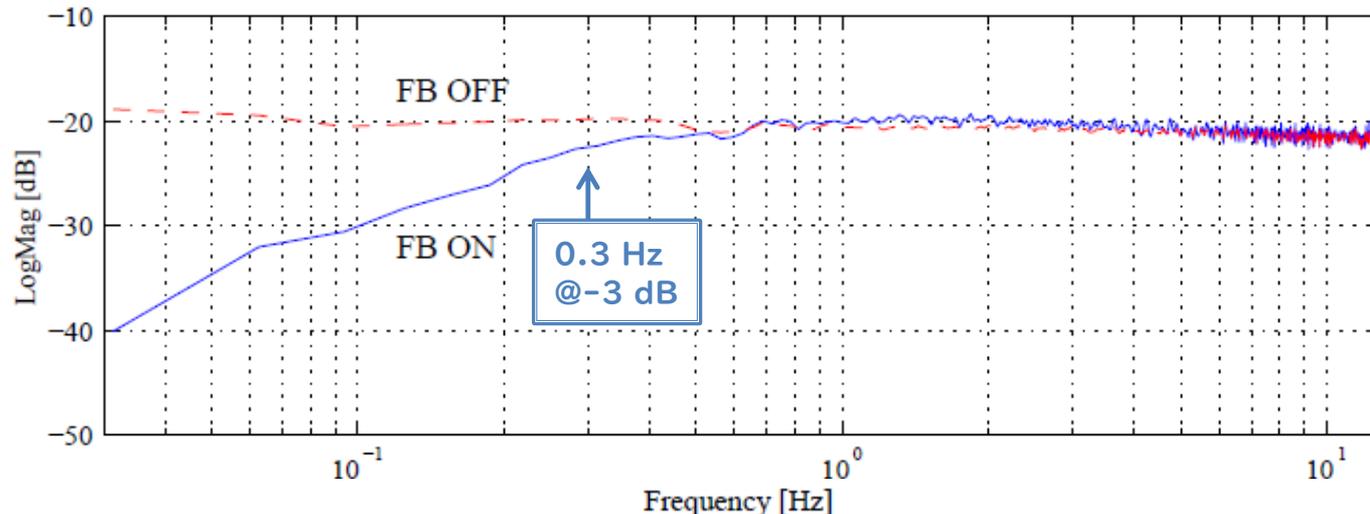
現FOFBシステムの性能

➤ FB ON→OFFで発生する鉛直方向の軌道変動

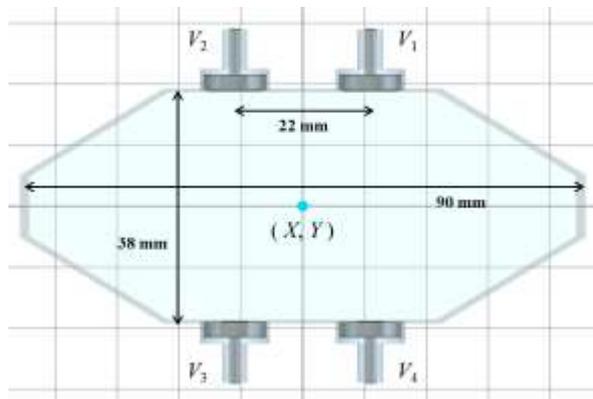
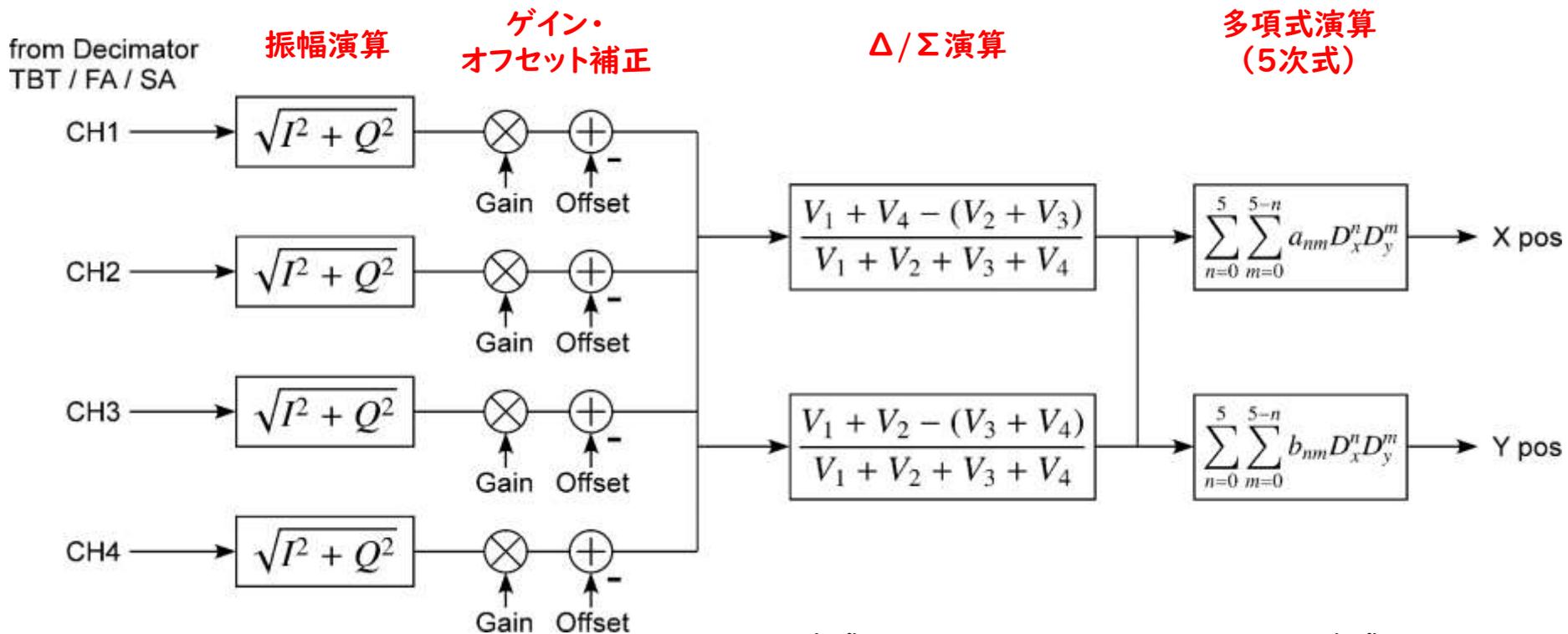
(T. Obina et al., EPAC98, p.1726)



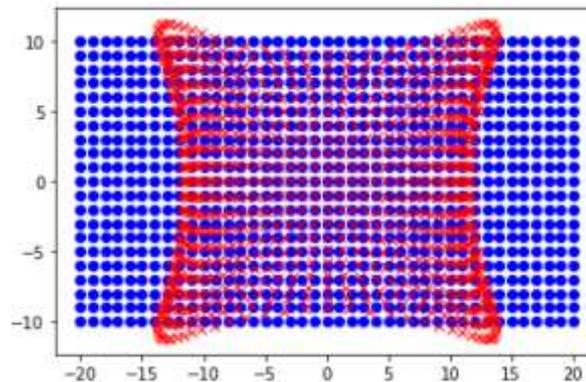
➤ フィードバックループの周波数応答



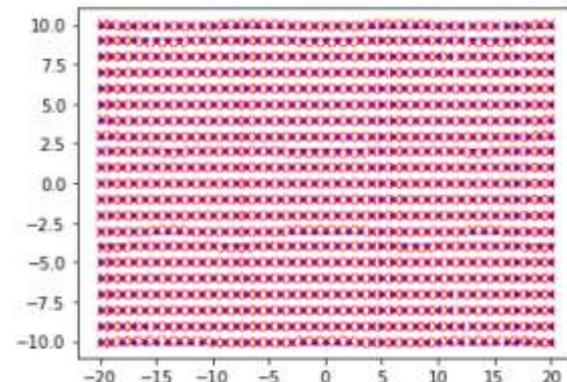
ビーム位置演算



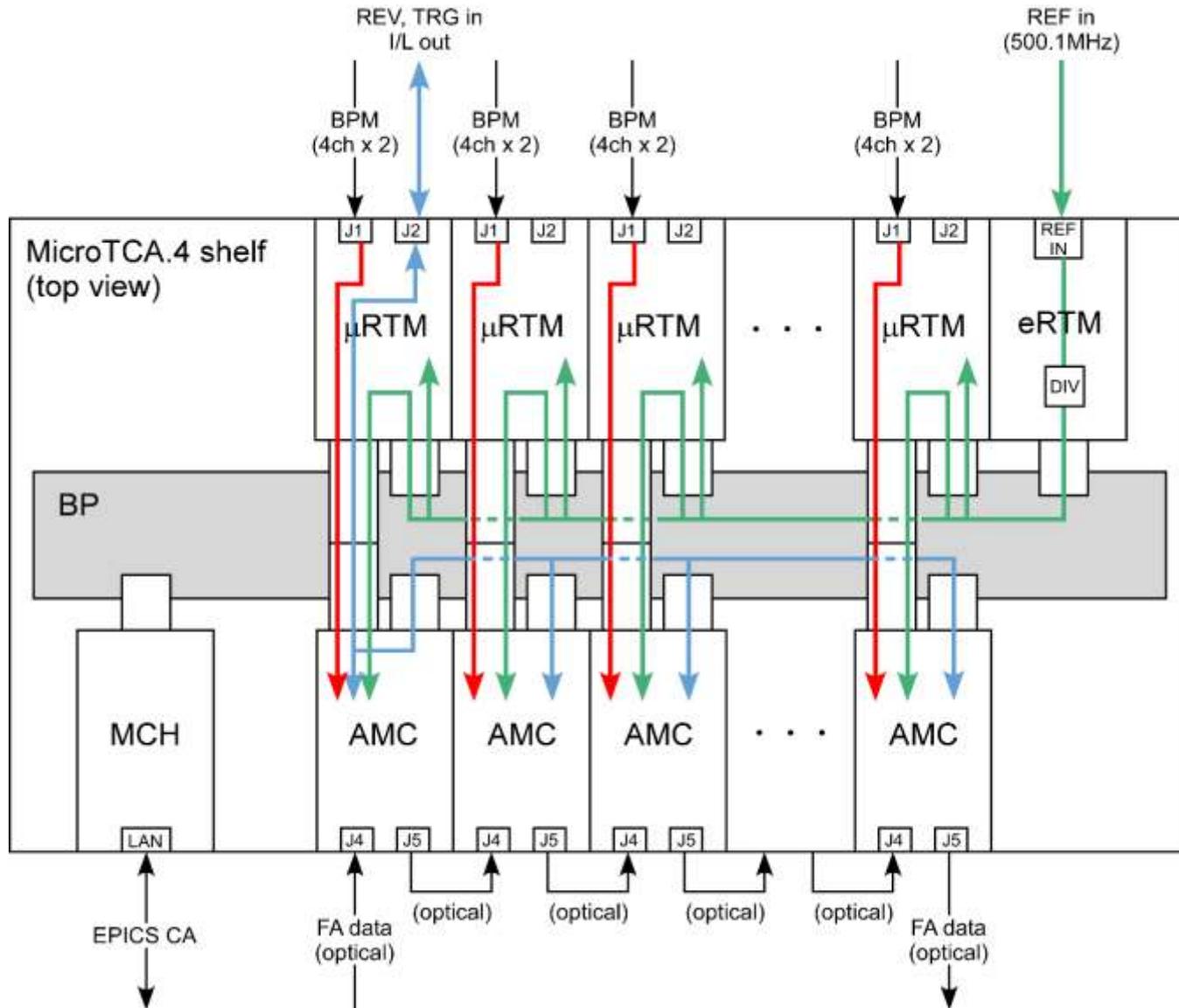
1次式



5次式



基準信号の分配



COD補正用GUI (作成中)

