

# SPring-8蓄積リングにおける入射時 蓄積ビーム水平振動の抑制

## -Suppression of Stored Beam Oscillation at Injection in the SPring-8 Storage Ring-

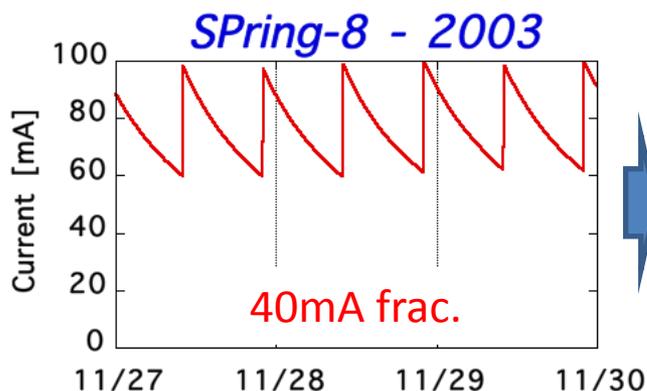
満田史織, 小林和生, 早乙女光一, 中西辰郎,  
深見健司, 正木満博, 大熊春夫, 佐々木茂樹

JASRI/SPring-8, (公財)高輝度光科学研究センター

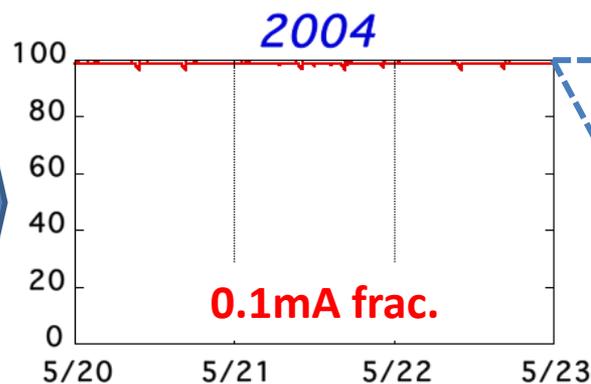
# Motivation

- 高輝度放射光を目指すためには、ビームエミッタンスの低減及びバンチ電流の増強が必要
  - ビームエミッタンスの低減: タウショック効果によるビーム寿命が短くなる
  - 大電流バンチ蓄積: 電流依存のビーム不安定性誘起
- ビーム寿命向上のためには入射頻度を向上させたTop-Up運転が必要 しかしながら入射時水平振動があると
  - 定期入射運転に比べ蓄積ビーム振動の顕在化
  - 蓄積大電流シングルバンチのビーム不安定性誘起
- 入射時蓄積ビーム水平振動の抑制が必要

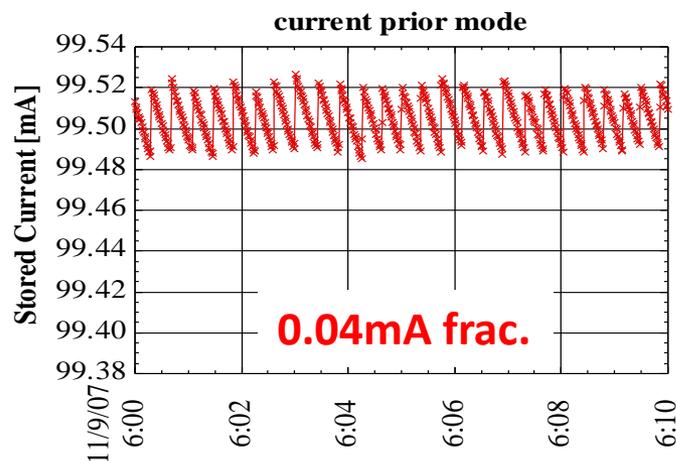
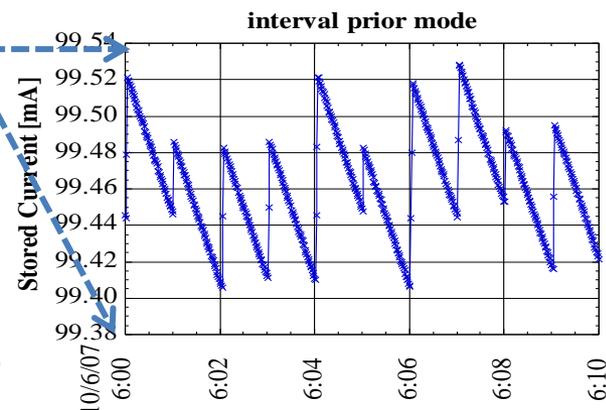
# Top-Up operation in SPring-8



Before Top-up operation: ~10hr



After Top-up operation: "Interval priority" 1min~5min

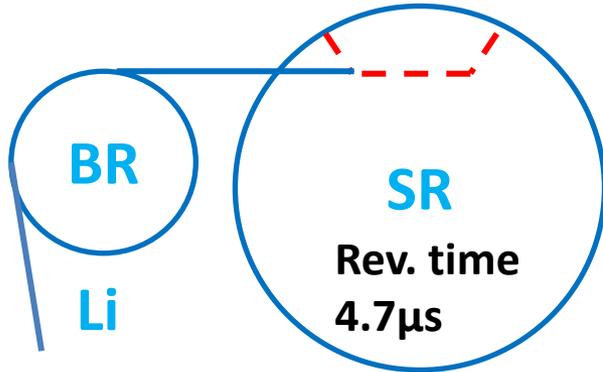


2007~ : "Current priority" 20s~1min

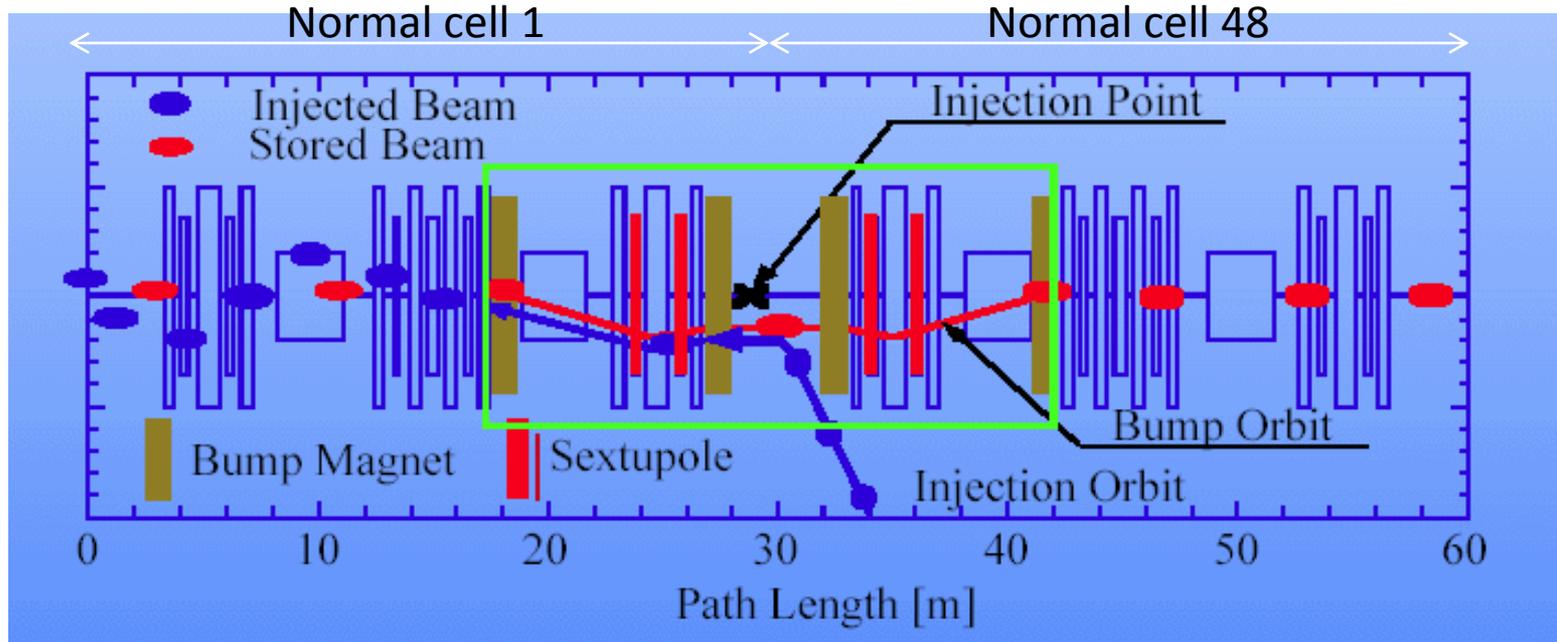
- ユーザー実験は入射及び電流値変化による中断を受けない
- 電流値依存のないビーム診断が可能
- ビーム電流値安定化により周辺機器のヒートロードの静的化とX線ビーム光学系の温度平衡状態が生まれ、放射光のより安定化が生まれる

定期入射運転に比べ蓄積ビーム振動の顕在化

# Beam injection scheme



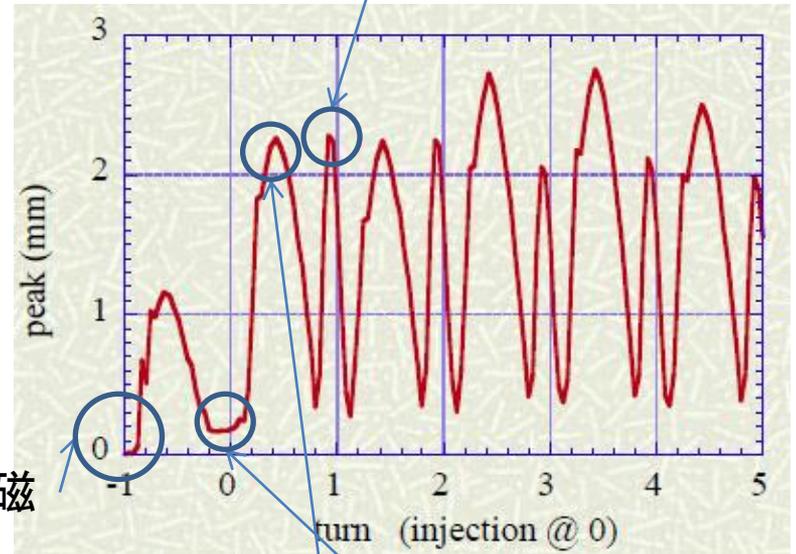
- 1GeV Li ~ BRからの8GeV電子ビーム入射
- バンプ4台を16.5m直線部に配置
- バンプ軌道14mmを生成
- ダイナミックアパーチャー10mm



# Problems up to 2004

Magnet	Kick angl. (mrad)	HV (kV)	Current (A)
BP1	-2.4	16.3	4316.2
BP2	-0.8	9.6	3999.3
BP3	-0.6	7.7	3300.2
BP4	-2.4	15.4	4267.3

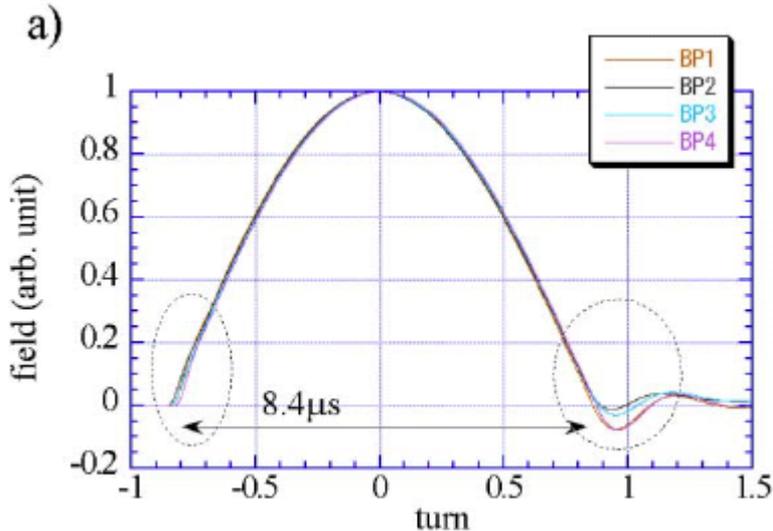
## 4台のバンプ磁場波形の非相似性



バンプ非励磁

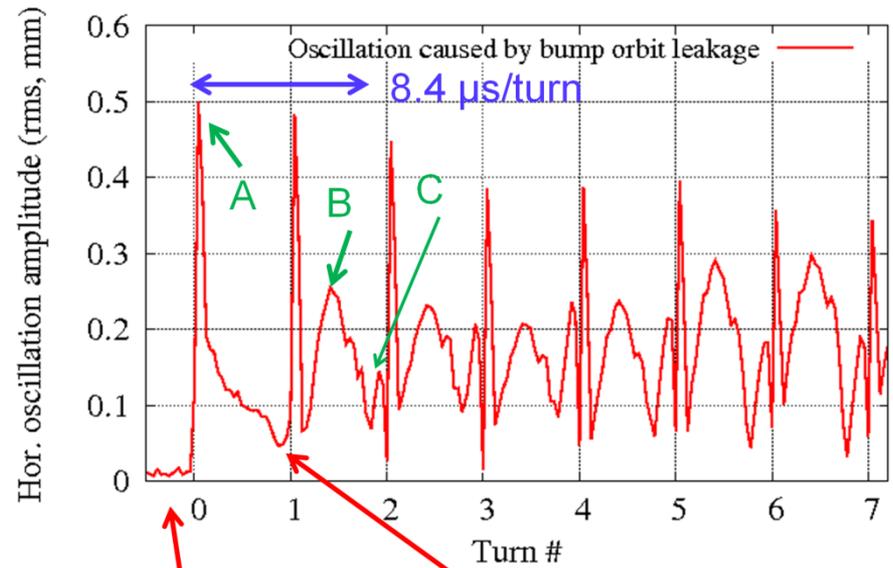
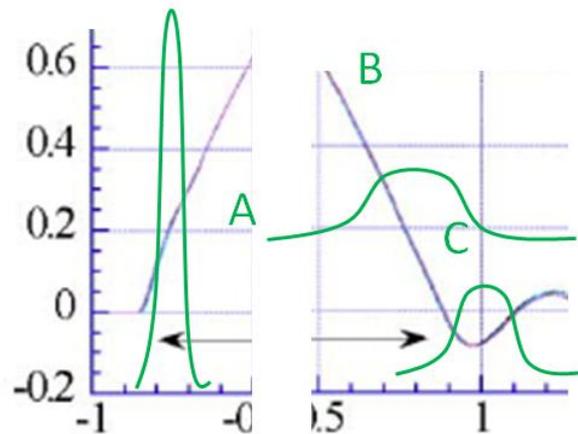
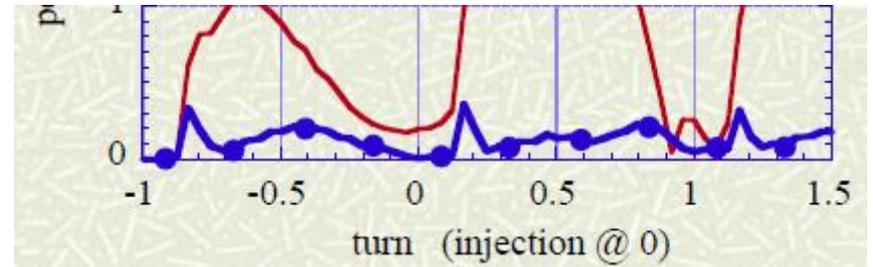
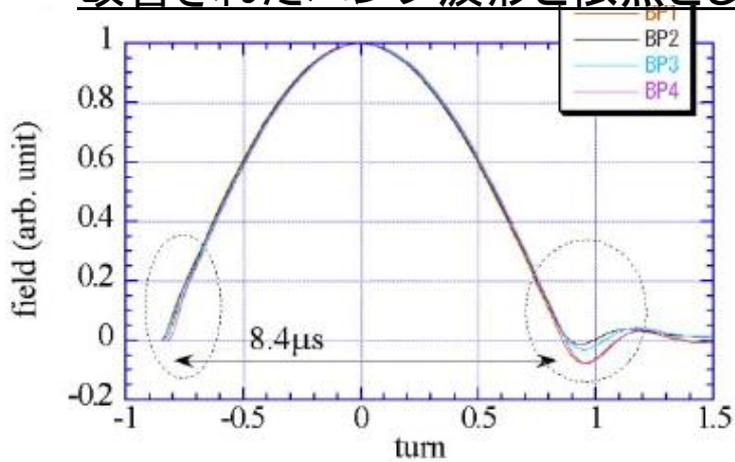
バンプピーク位置ではバンプ軌道が閉止

バンプ間にあるラティス6極の非線形性



# Residual oscillation and bump shape

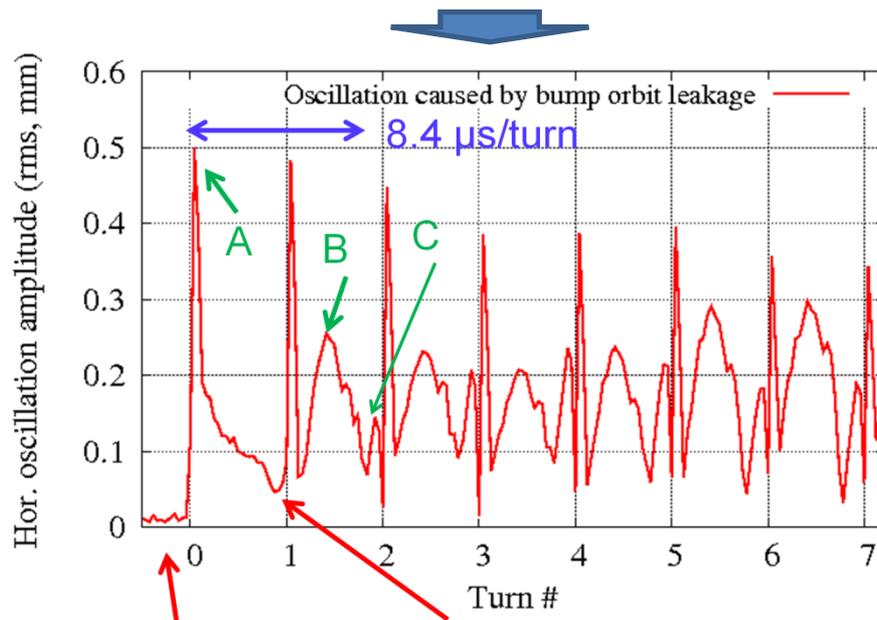
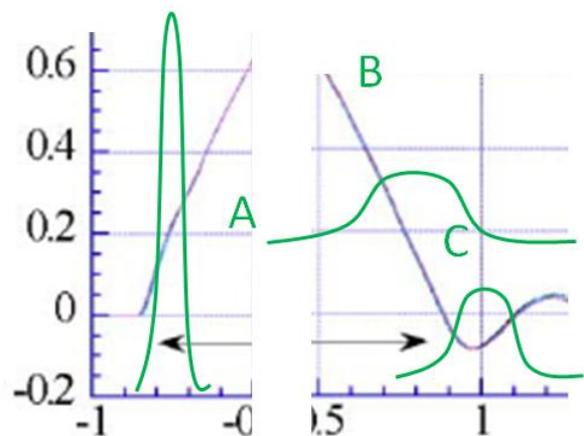
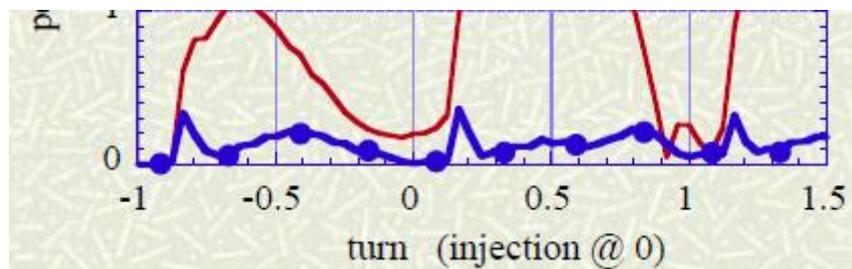
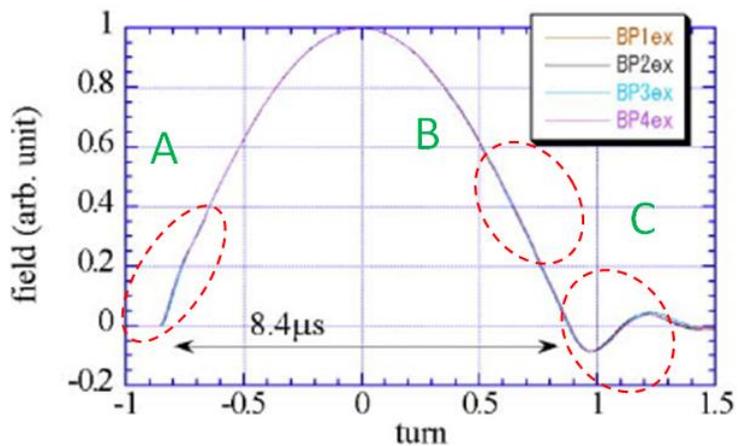
改善されたバンプ波形と依然として残る水平振動



相似性は確保されていると見えるが.....

# Residual oscillation and bump field shape

改善されたバンプ波形と依然として残る水平振動

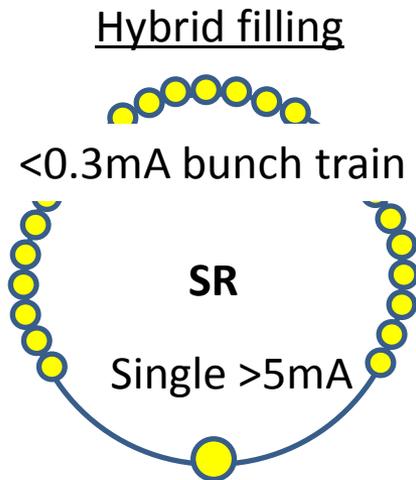


相似性は確保されていると見えるが.....

# Feed-forward scheme

## □依然として残る水平振動の抱える課題

- 放射光安定供給 積分型ユーザーのため**早い段階での振動の抑制**
- **大電流バンチシングル+バンチトレインの高度なハイブリッドフィリングでの安定したTop-Up運転の実現**



High current(ビーム不安定性大)

ビーム寿命の確保のため安定したTop-Up入射が必要

しかしながら、ここに大きな入射時振動振幅が存在すると

High+ Low current bunchの混在:ビーム不安定性の度合いの異なるものが混在

大振幅+大電流はBBF (Bunch-By-Bunch Feedback)でビーム不安定性の抑制が難しいフィリング

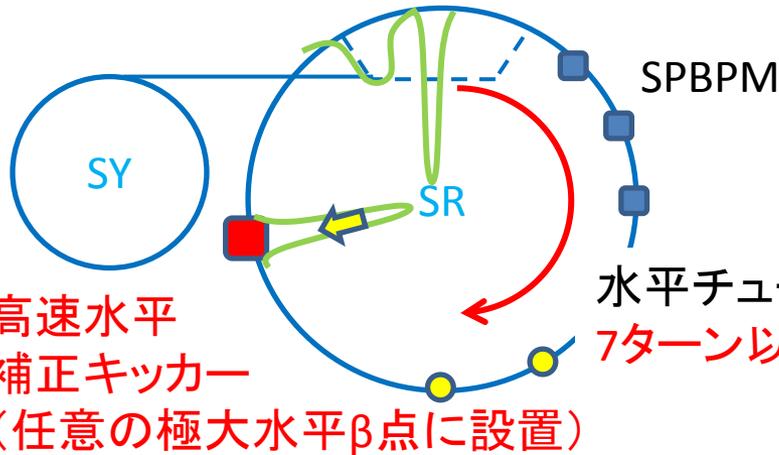
□**Feed-forward scheme**による**早い段階**での極めて低い振幅レベル(BBFで抑制が可能な)までの残留水平振動の抑制が必要である。

# Fast counter kick correction

□ バンプ電磁石磁場波形の相似性を高めるためには限界がある

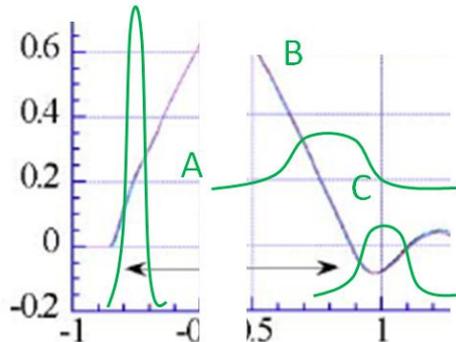
- バンプ波形は2ターン以内で閉じていること
- バンプ磁場出力波形の相似性を10ns以下の水準で揃えること

そこで.....



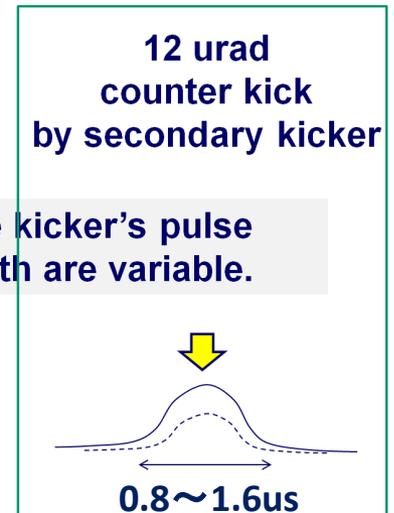
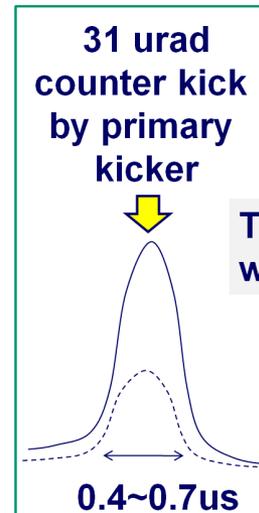
Single Beam Position Monitorで観測される振動形状に合わせてzero-cross位相にてカウンターキックを与え抑制する

バンプ軌道漏洩より想定される水平振動形状



For A part

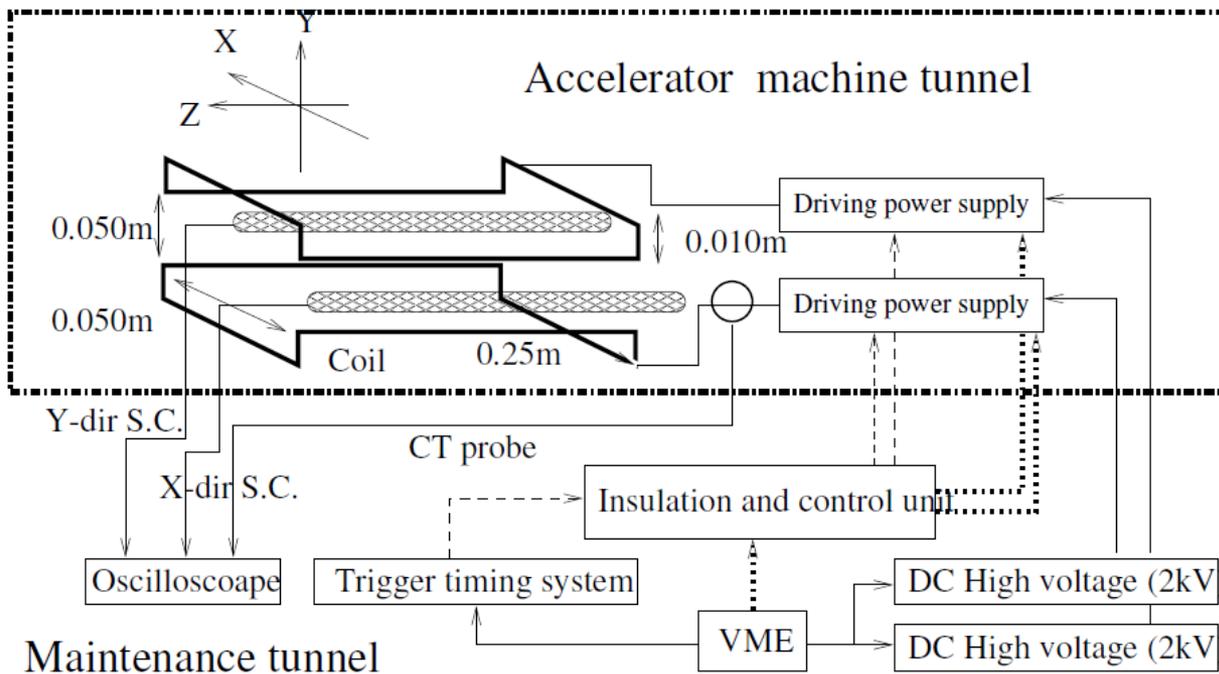
For B or C part



The kicker's pulse width are variable.

# Fast kicker system

□ SPring-8蓄積リングは90%以上の密度で装置群が配置されているためキッカーシステムを挿入に確保できる平均磁極長は0.3m以下である。



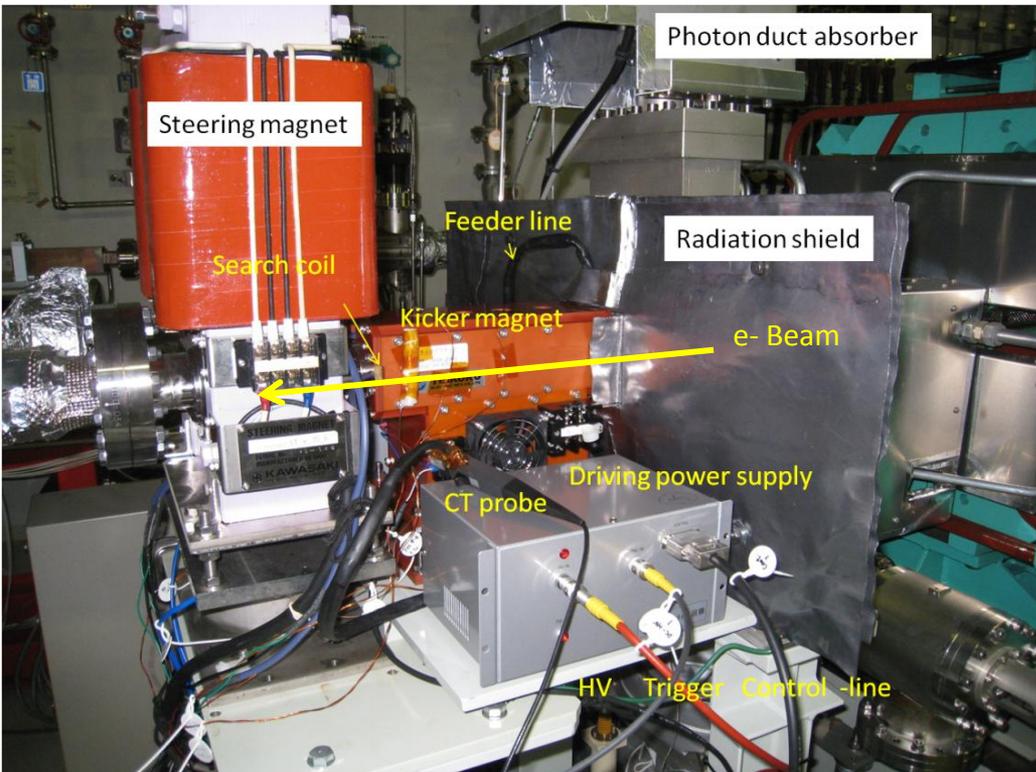
カウンターキッカーシステムに求められる三要件

1. 水平 $\beta$ 関数最大点での設置自由度を有すること
2. 設置自由度を高めるため電源の小型性能を高めること
3. 高速性能と短磁極長での高出力を実現すること

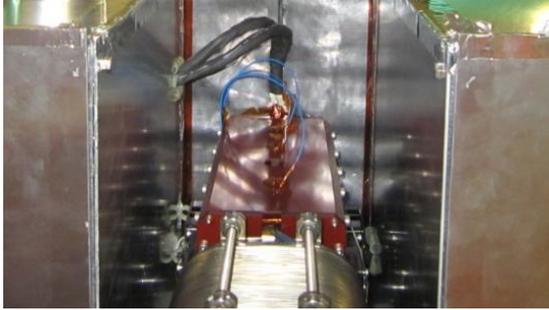
- 磁極長0.25m 上下空芯コイル1ターンをそれぞれのドライブ電源に接続
- 電源はドライブ回路・出力回路のみ収納部内キッカー近傍0.8mに設置し電源負荷 $<1.0\mu\text{H}$

# Test setup in 2010

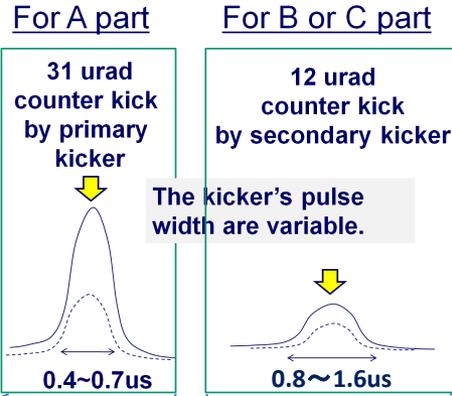
- ❑ 電源筐体寸法 200(L)x120(W)x150(H) <math><0.005\text{m}^3</math>
- ❑ 出力 800ns, 270A/coil (950V), 3.2mT, 33 $\mu$ rad@8GeV
- ❑ パルス幅可変、極性切り替え (振動幅及び位相)
- ❑ 蹴り角、出力可変、高圧印加による (振動振幅)
- ❑ 800ns振動幅の水平振動を振幅68%抑制



# Apply to user operation in 2012



第1高速補正キッカー  
L = 0.25m, @βx = 30m



- キッカー両翼に電源を格納するシールドボックスを設置
- ビームRFノイズシールド
- 放射線シールド(γ線)
- 予備電源も同時に格納

第2高速補正キッカー  
L = 0.22m, @βx = 32m



2014/8/11

400ns, 230A/coil  
700ns, 383A/coil  
(1.95kV applied)

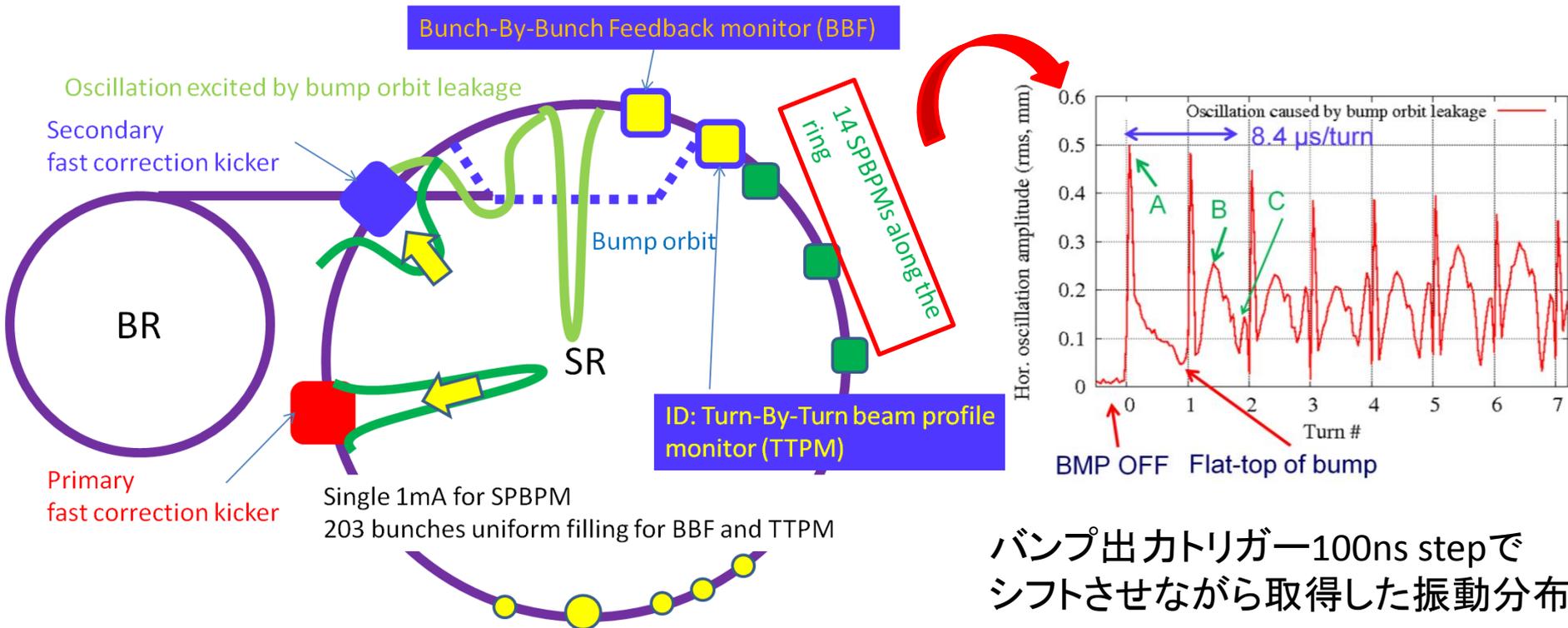


800ns, 270A/coil  
1600ns, 540A/coil  
(1kV applied)



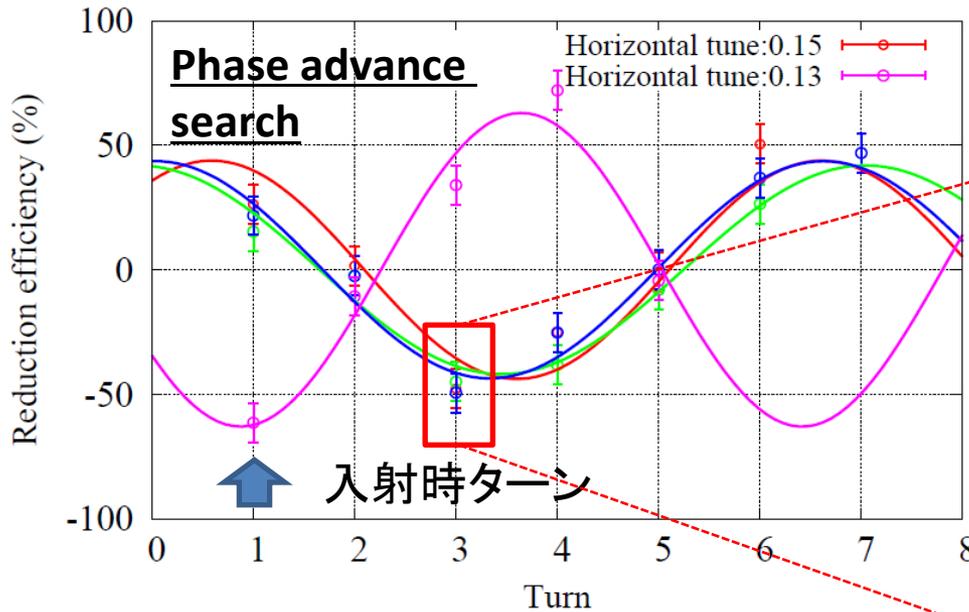
# Monitor systems and kickers

- 機器立ち上げ調整時: Single-Pass Beam Position Monitor 14台を使用 振動の抑制効果を100ns ステップにて観測が可能 (4096ターン分データ取得可)
- ユーザー運転時: BBF monitor、X線 TTPMなどを使用し、マルチフィリングでの振動の抑制効果をBunch-By-BunchまたはTurn-By-Turnにて観測が可能



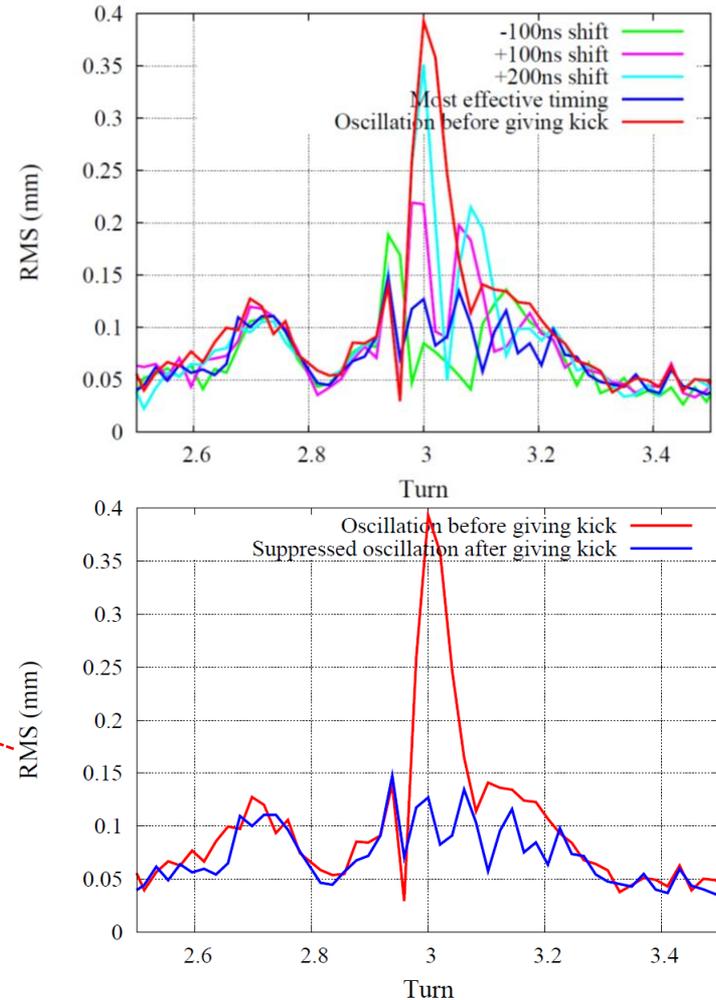
# Phase advance and timing tuning

- キッカー位置は動かすことが出来ないため Zero-Cross位相を周回数の整数倍にて探す

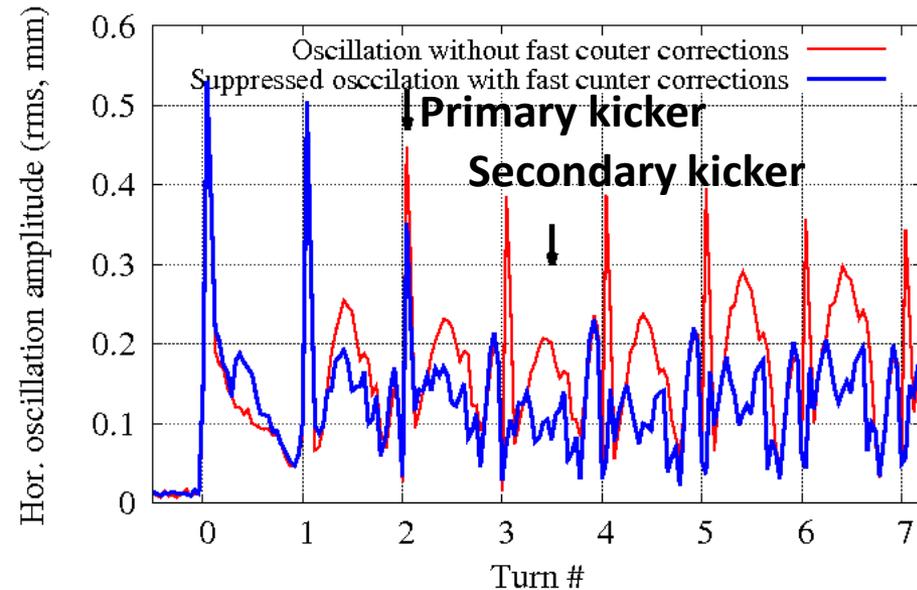


- 振動抑制効率最大点は水平チューン値から7ターン以内に存在する
- 抑制効率が最大点となるところで100ns stp.にて水平振動ピークとカウンターパルスピークを合わせこむ

## Most effective timing search



# Oscillation suppression

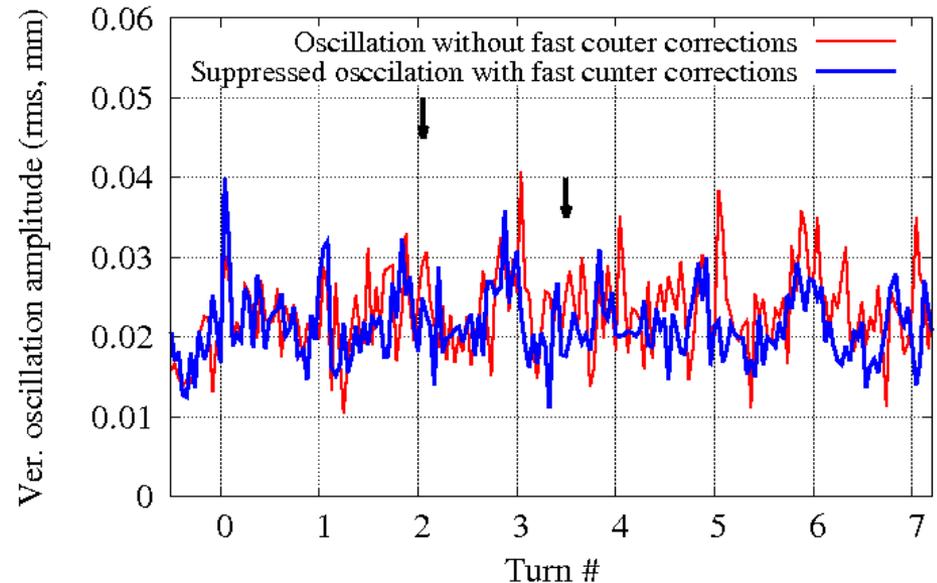


## □ 垂直方向振動抑制

蓄積リング全周に渡り電磁石磁場誤差としてのスキュー成分が存在する場合、垂直振動への回り込みが見られる。

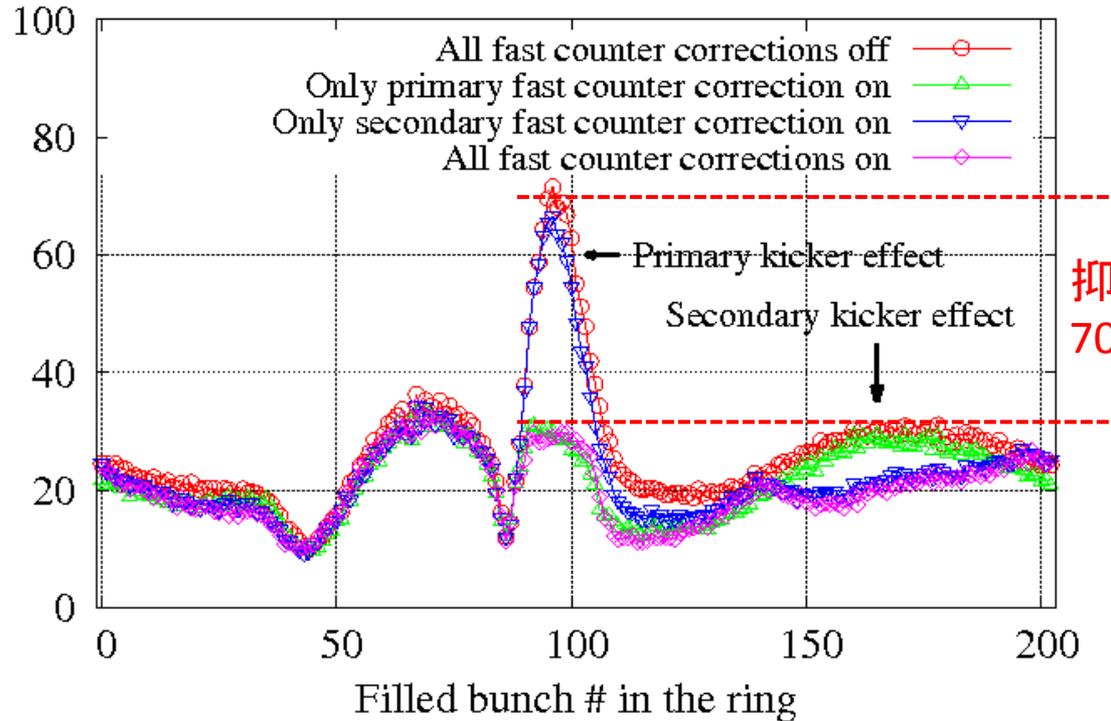
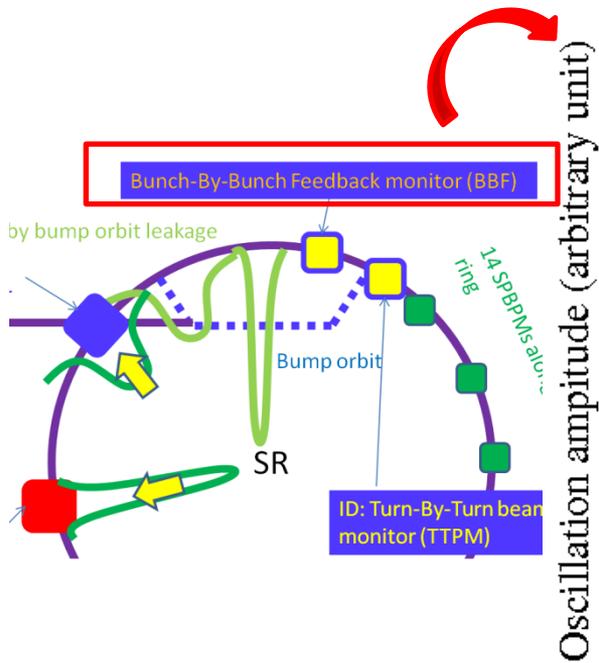
## □ 水平振動抑制と同タイミングにて垂直振動の抑制効果あり

- 水平方向振動抑制
  - 第1補正キッカー: 31 $\mu$ rad/500ns
  - 第2補正キッカー: 12 $\mu$ rad/1400ns
- 振動抑制率
  - 第1補正キッカー: 90%
  - 第2補正キッカー: 50%
  - 平均振動 <0.15mmまで抑制



# Bunch-By-Bunch, Turn-By-Turn convolution

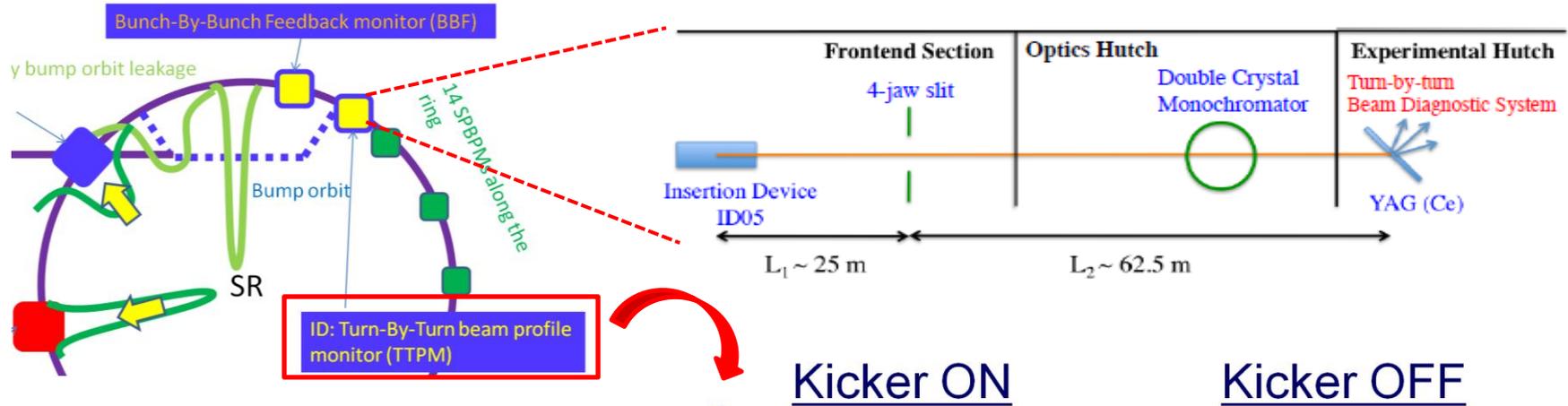
- BBFモニターでは、Bunch-By-Bunch, Turn-By-Turnにて2000ターン分の振動データを取得することが可能
- 203バンチファイリングにおけるバンチ毎の振動を128ターン分convoluteした結果



リング一周に渡り蓄積された203バンチ(バンチ時間間隔23ns)各バンチナンバー

# Turn-By-Turn Beam Profile Monitor

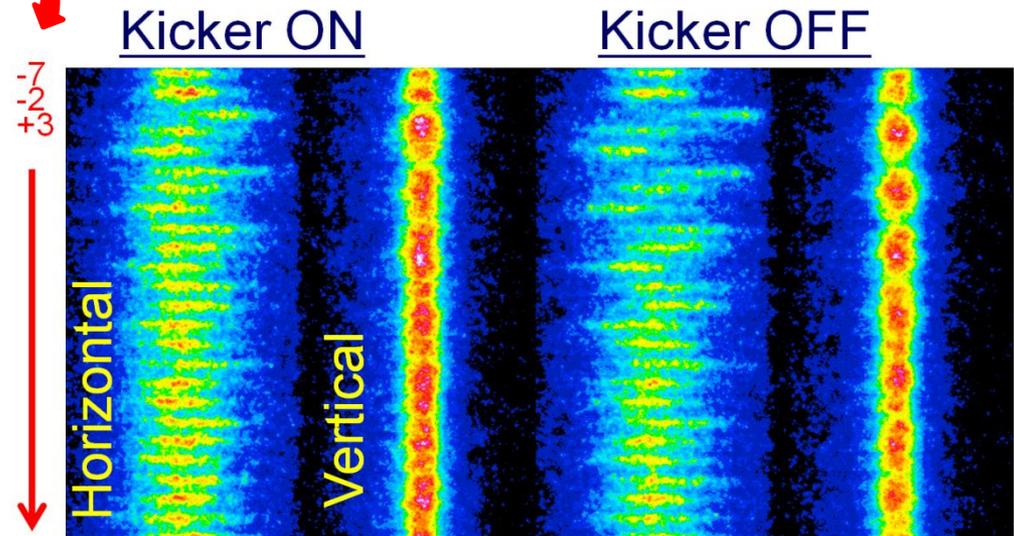
□ 電子ビームの水平振動の抑制が放射光軸振動の抑制効果として見れるかどうか



□ 2012年より整備されたTTPMはアンジュレーター光からの単色X線ビームプロファイルを観測することが可能

- 入射時ビーム振動
- ビーム不安定性によるエネルギー広がり+横方向広がり

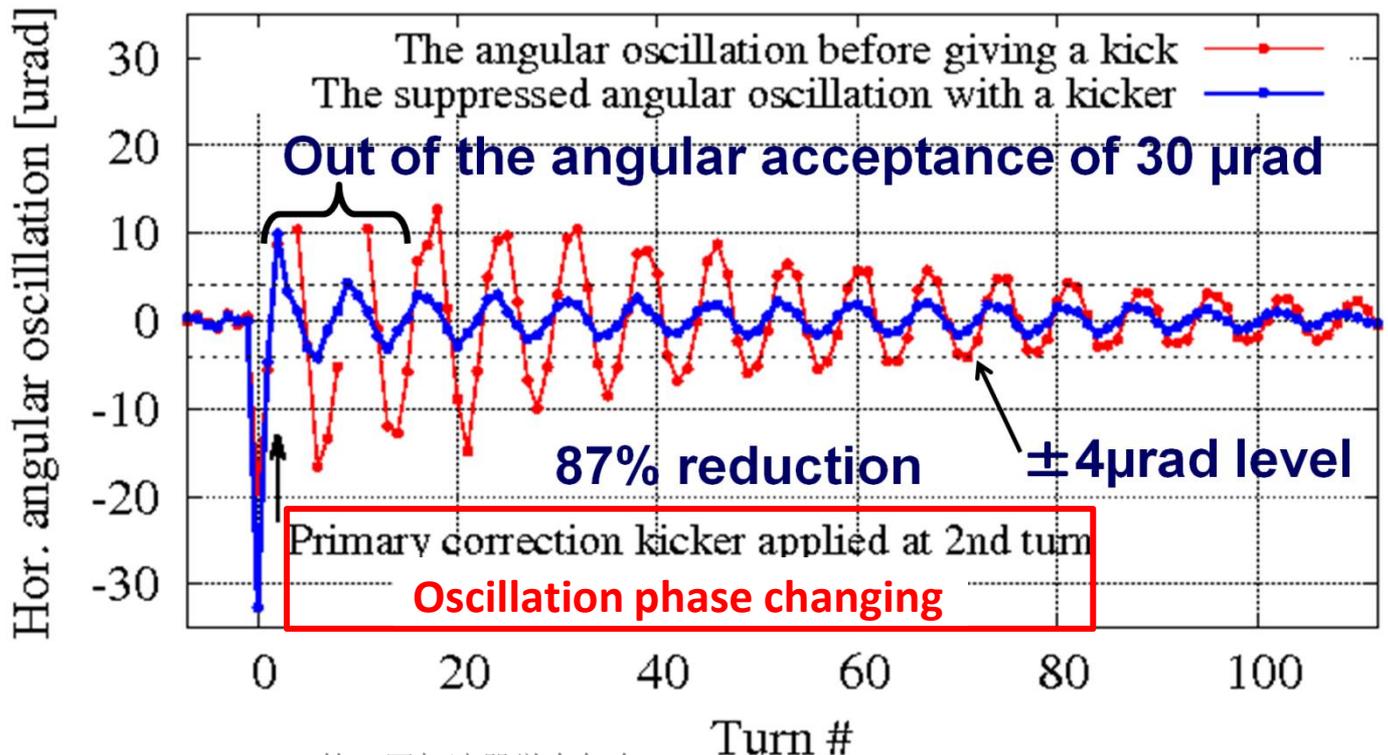
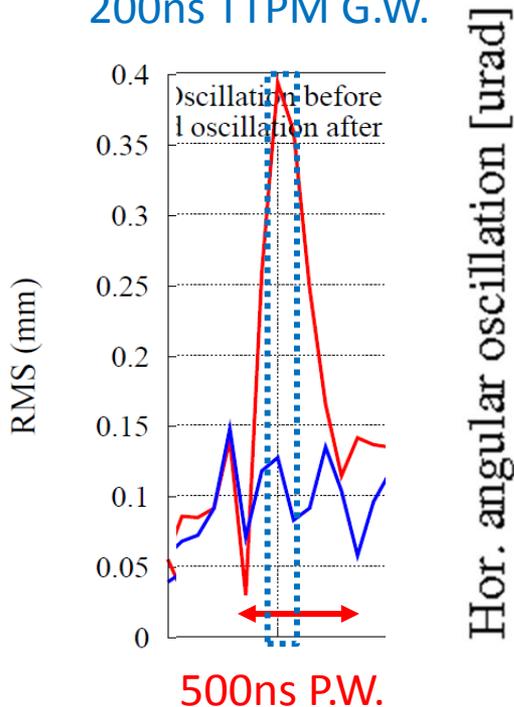
早い過渡現象を観測することが可能



# Horizontal light axis oscillation

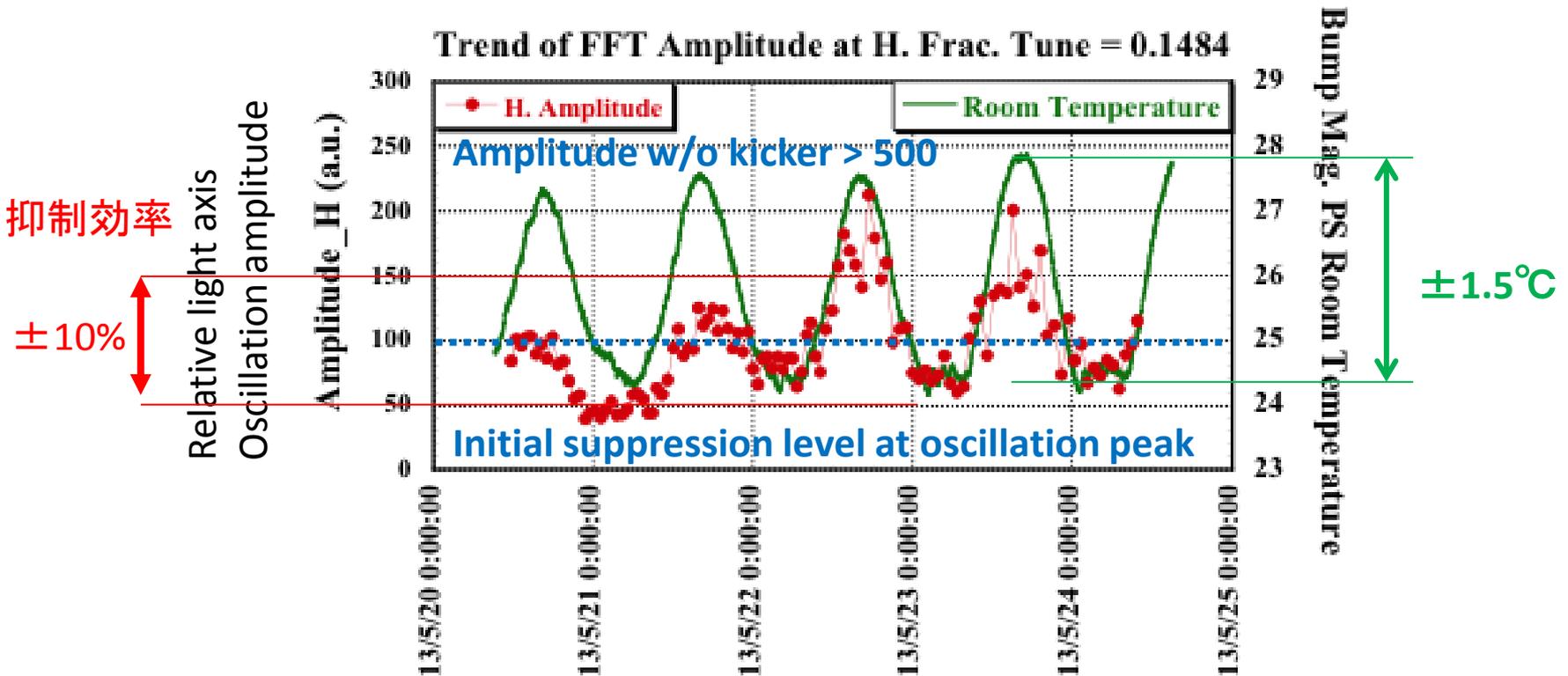
- TTPMのG.W.を入射時水平振動最大点に固定し、光軸振動のTurn-By-Turn解析
- 30 $\mu$ rad以上の振動角から4 $\mu$ rad以下まで減衰させるのにキッカーなしでは80ターンまでかかる**ところ3ターン目にて減衰。減衰率>87%を達成**
- ダンピングタイムがキッカーがある場合、ない場合に比べて**30%の改善** BBFを補完

200ns TTPM G.W.



# Changing reduction efficiency

- Feed-forwardスキームでは、振動抑制ターゲットが定常的であることが前提。それにより抑制効果が持続していることが重要。
- 振動抑制効果が、恒常的であるかどうか、ユーザー運転中での観測が可能なTTPMを使い光軸振動の抑制効果として評価



電源室室温の昼夜変動と連動し振動抑制効果の変動、振幅幅も増加している

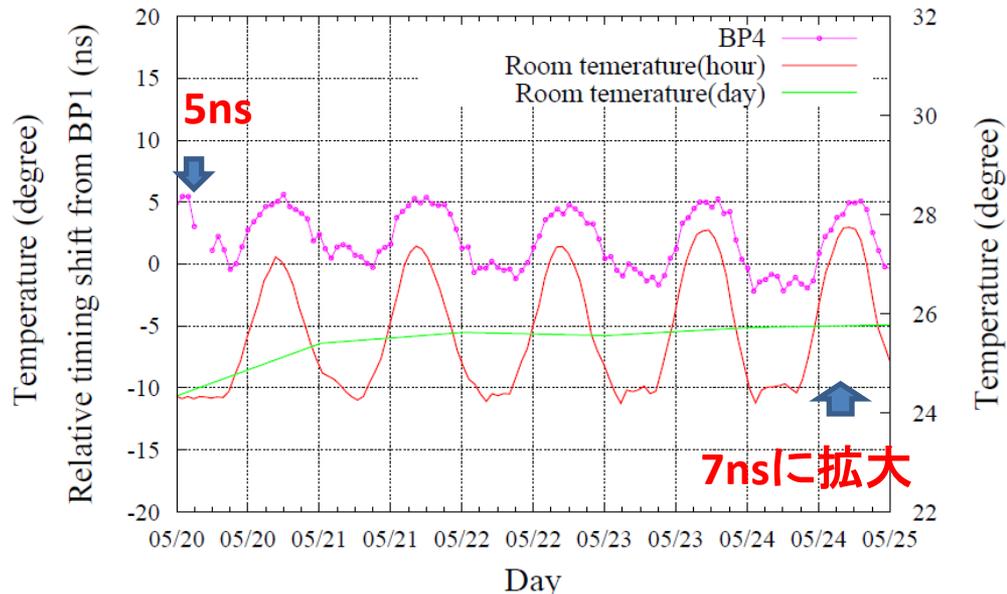
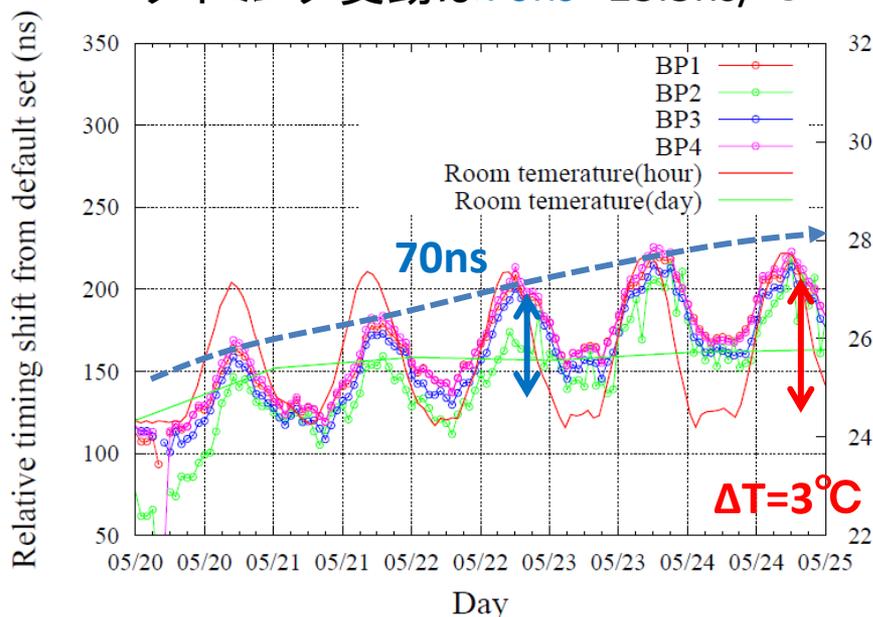
# D/N drift of bump output timing

- バンプ電流出力タイミングがサイラトロンに起因するShot-by-Shotのjitter 5nsよりも大きい70nsの昼夜変動があり
- この変動時にバンプ同志の相対的なタイミングが変化し、水平振動形状を変化

室温昼夜変動 $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$ に対して  
タイミング変動は70ns 23.3ns/ $^{\circ}\text{C}$



BP1~BP4間のタイミング変動としては  
5ns $\rightarrow$ 7ns



同時に平均室温の変化による季節変動(径日変化)による変動も見える

# To keep reduction efficiency

- 室温の昼夜変動に起因する出力タイミングの変動 23ns/°C
- 出力タイミングの昼夜変動に起因するバンプ間相対的なタイミングが変動 相対的な変動が径日変化し徐々に広がる方向

1台のバンプ励磁タイミングをずらし、実際に振動抑制対象である光軸振動形状(分布)が変化するか定量的に評価

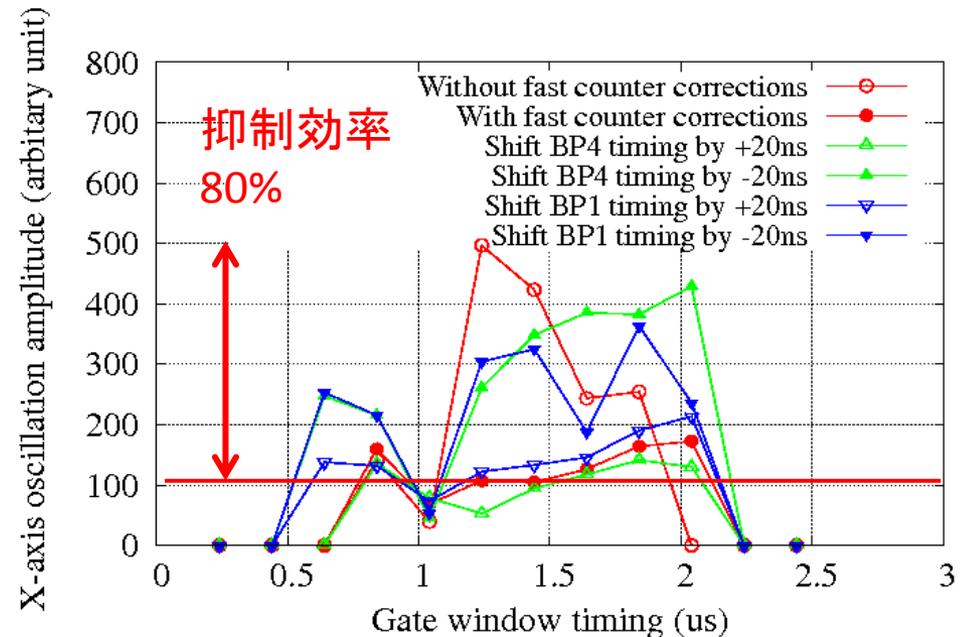


TTPMではG.W.を200nsステップにて入射時振動点前後をシフトさせ光軸振動形状(分布)を調べることが可能

- バンプ1台の<10nsのタイミングシフト  
→10%以内の振動抑制率の変動
- バンプ1台の>10nsのタイミングシフト  
→振動抑制率が80%以上失われる

ジッター(5ns)及び $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$ の昼夜変動による出力タイミング変動(5ns)では抑制効率を10%変動で維持

季節変動を考慮したドリフトでは、より大きなシフトが生じ、抑制率が徐々に失われる



# Summary

- 高速補正キッカーシステムの役割
    - 光軸が安定した放射光の供給
    - 大電流バンチフィリングにおけるビーム不安定性の抑制
  - Feed-forward schemeによる高速補正
    - 早い段階での振動の抑制を可能
    - BBFでは難しい大振動のダンピングタイムの改善
  - 将来
    - 光積分型ユーザーにとってメリット
    - 低エミッタンスでの光軸振動の顕在化時に重要
- 
- 振動の抑制率は~90%。振動抑制効果は10%以内の抑制幅で維持が可能。
  - ただし、Feed-forward schemeによる課題として、電源室の室温変動に連動しターゲットとなる振動の変動が起きている。これはバンパ電流出力タイミングのドリフトがバンパ軌道の閉止具合の変化へと結びつき生じている。
  - 現在、抑制効率を維持するため電源室室温の $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内での安定化を進めている。