

ナノテラスにおける蓄積ビーム モニターシステムのコミッショニング

第21回日本加速器学会年会

2024年7月31日

上島考太^{A)}, 小原脩平^{A)}, 西森信行^{A)}, 安積隆夫^{A)}, 菅晃一^{A)}, 保坂勇志^{A)}, 青木駿堯^{B)},
芳賀浩一^{B)}, 伊原彰^{B)}, 伊藤優仁^{B)}, 岩下大器^{B)}, 門脇聖弥^{B)}, 小林創^{B)}, 及川治彦^{B)},
齋田涼太^{B)}, 櫻庭慶佑^{B)}, 高橋隼也^{B)}, 土山翼^{B)}, 井場祐人^{B)}, 金浜蓮人^{B)}, 高橋滉希^{B)},
田中達輝^{B)}, 西原秀雄^{B)}, 森谷佳津貴^{B)}, 吉岡里紗^{B)}, 高野史郎^{C),D)}, 正木満博^{C)},
藤田貴弘^{C)}, 出羽英紀^{C)}, 清道明男^{C)}, 阿部利徳^{C)}, 前坂比呂和^{D)}
^{A)}量研, ^{B)}量研/NAT, ^{C)}高輝度光科学研究センター, ^{D)}理研

内容

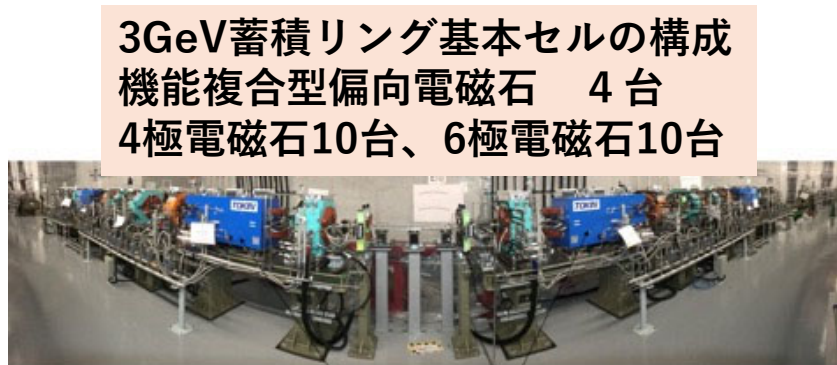
- ナノテラス加速器システム
- 蓄積ビームモニターシステムのコミッショニング
- ユーザー運転状況
- まとめ



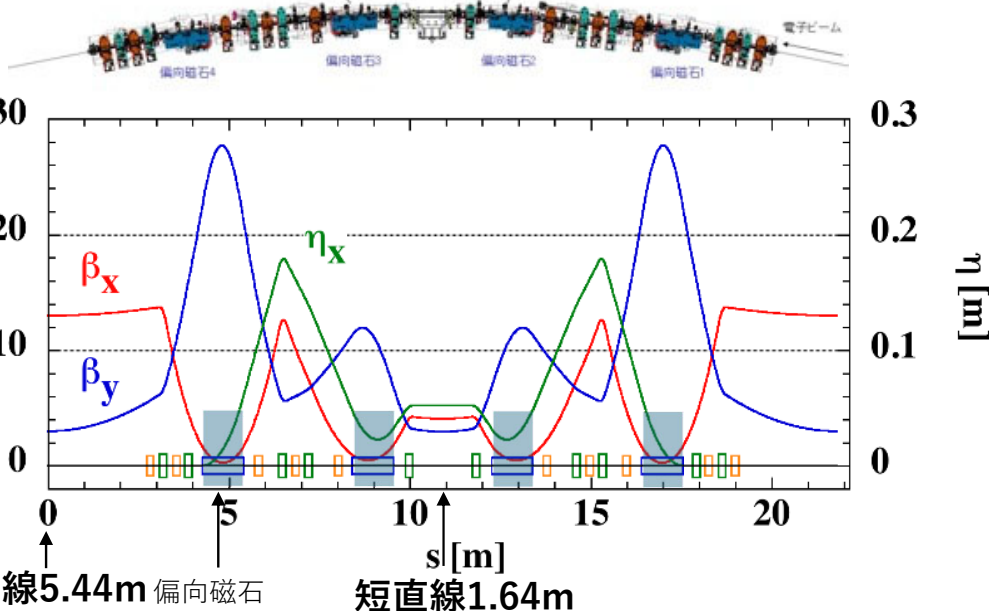
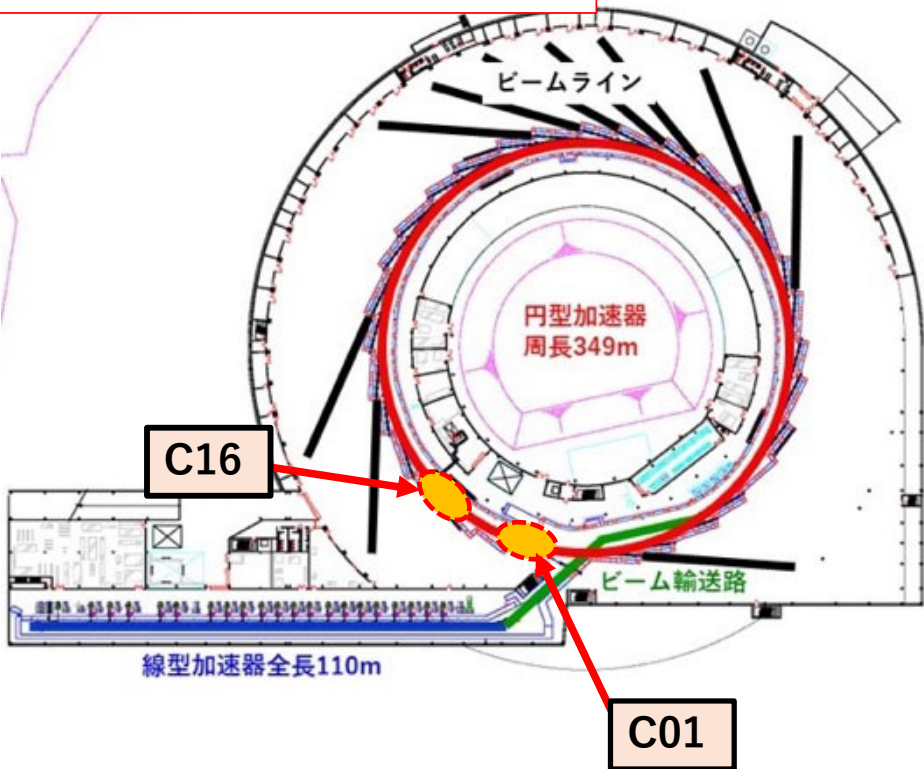
加速器構成

周長 349m
 16セル, ビームライン28本
 3GeV, 400mA, 1.14 nmrad

2024年4月時点
 ビームライン10本



3GeV蓄積リング基本セルの構成
 機能複合型偏向電磁石 4台
 4極電磁石10台、6極電磁石10台



蓄積電子ビームモニター用に2本の短直線部を使用
 C01短直線部:BBF関連機器、バンチ電流モニター用BPM
 C16短直線部:DCCT、3PW(電子ビーム撮像用の光源)

コミッショニング タイムライン

2023

- 4月17日 Linacコミッショニング開始、10日後エネルギー3GeV達成
- 6月8日 リングコミッショニング開始初日に電子ビーム周回確認(300ターン)
- 6月16日 電子ビーム蓄積成功、ファーストライト観測
- 7月 蓄積電子ビーム撮像成功 (XPC)
- 8月 24時間運転開始、蓄積電流100mA以上を達成 (設計エミッタンス)
- 9月 ID調整開始

● 12月 ファーストビーム

2024

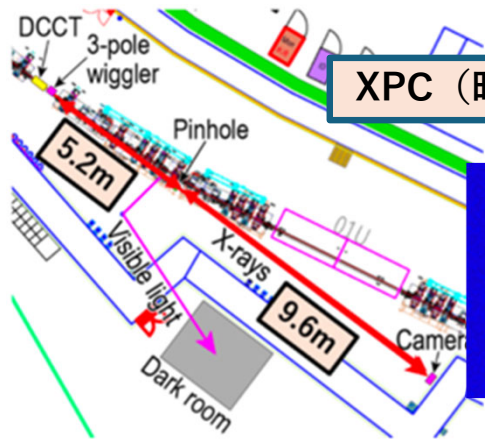
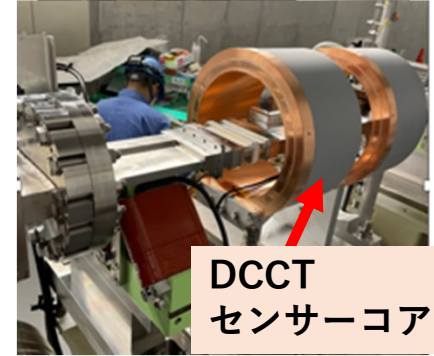
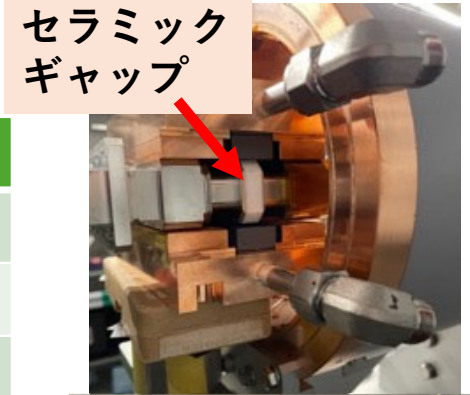
● 4月9日 ユーザー利用運転開始



https://nanoterasu.jp/users/operation_status/

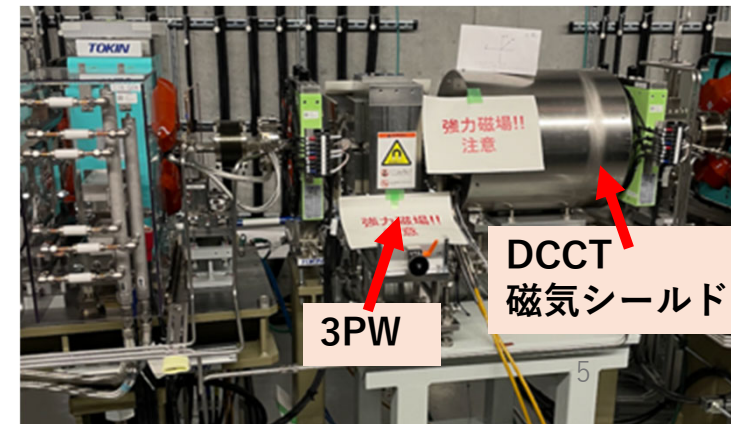
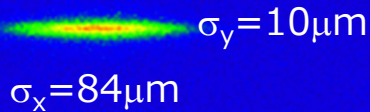
電子ビームモニターシステム

電子ビームモニター	
電子ビーム位置モニター (BPM)	112台 (7台/セル)
蓄積電流モニター(DCCT)	2台
ビームサイズモニター(XPC)	1台
横方向Bunch-by-Bunch Feedback(BBF) (チューンも測定)	1セット (キッカー1台、ピックアップ1台)
バンチ電流モニタ用BPM	1台
リング入射部BPM	3台
ビームロスモニター	32台 (2台/Cell)



XPC (昨年の学会で報告済み)

短直線電子ビームサイズ@160mA



モニターシステムコミッショニング 内容

- **BPM**

- ビーム位置データ収集
- Beam Based Alignment (BBA)

- **Bunch by Bunch Feedback (BBF)**

- BBF調整(ピックアップ、キッカー、ゲイン・位相)
- ダイナミックレンジ、ビーム入射時の揺れ抑制
- チューン測定

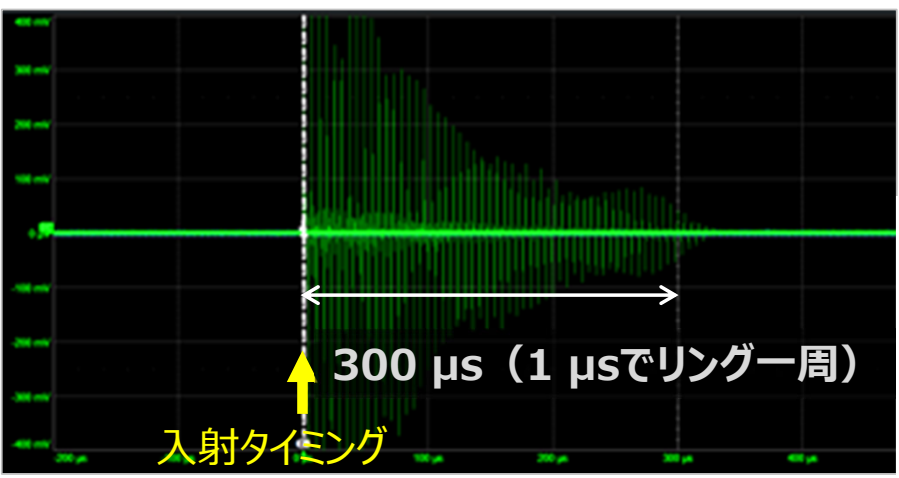
- **ビーム軌道監視、ビームアポート試験**

First Light 観測、電子ビーム蓄積

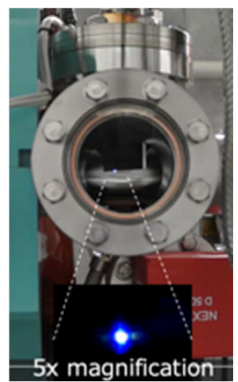
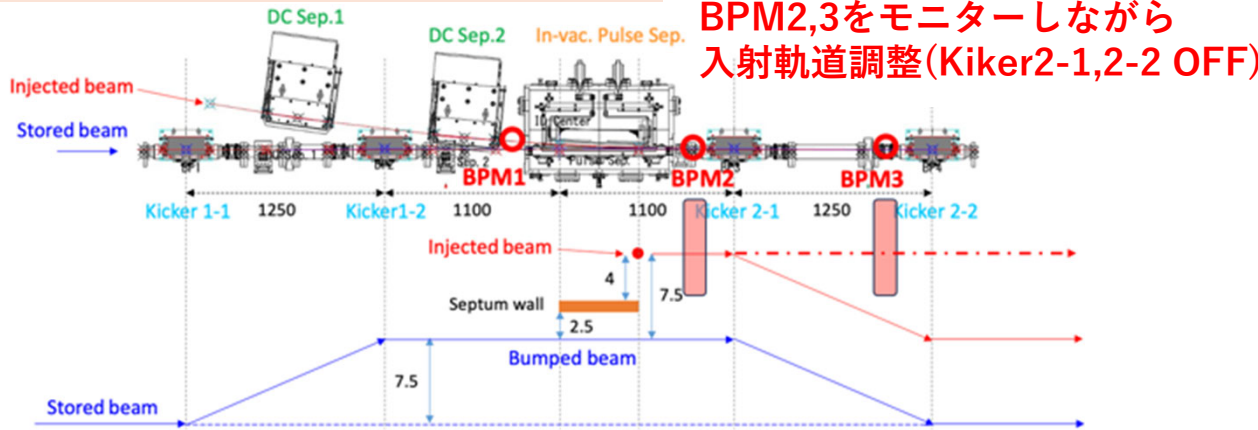
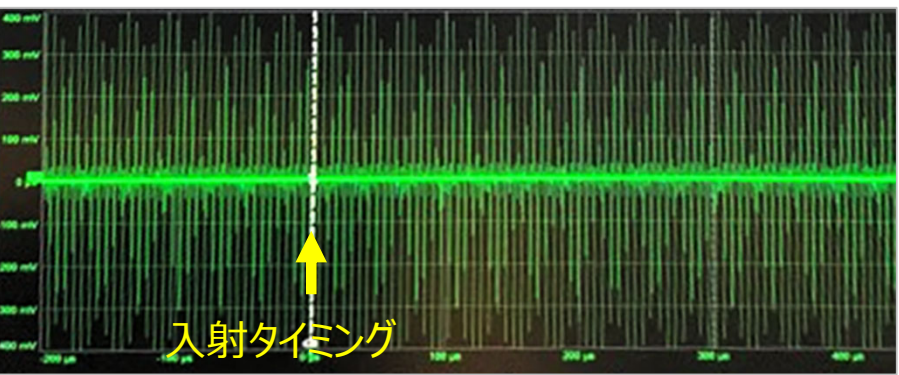
2023年6月
5月29日蓄積リング管理区域化

オフアクシス入射
First turn steeringなしでビーム周回確認

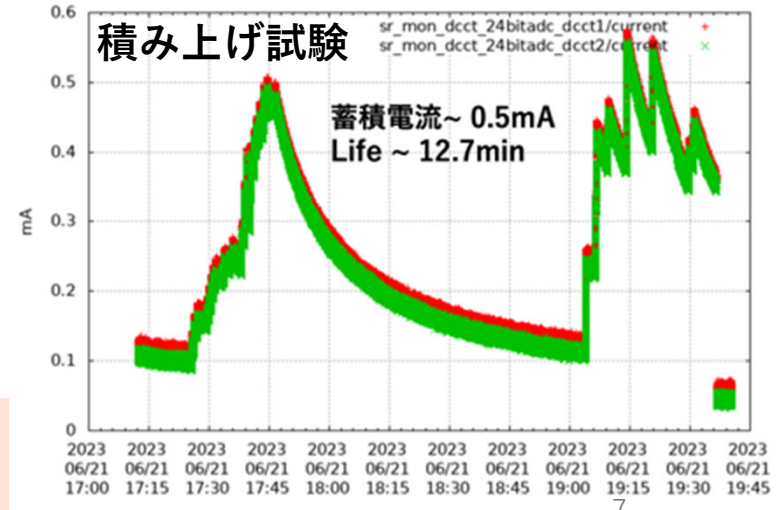
BPM信号 300周回 (空胴RF励振無)



BPM信号 蓄積確認 (空胴RF励振有)

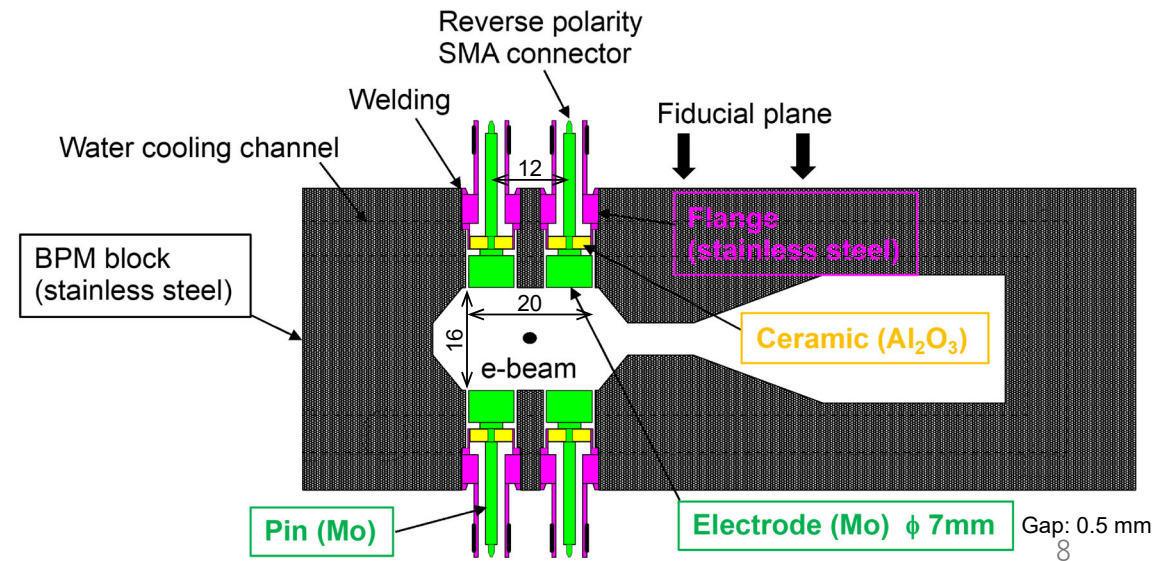
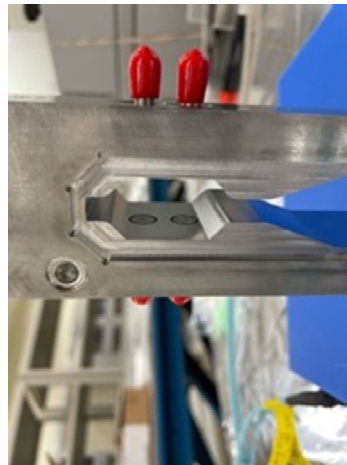
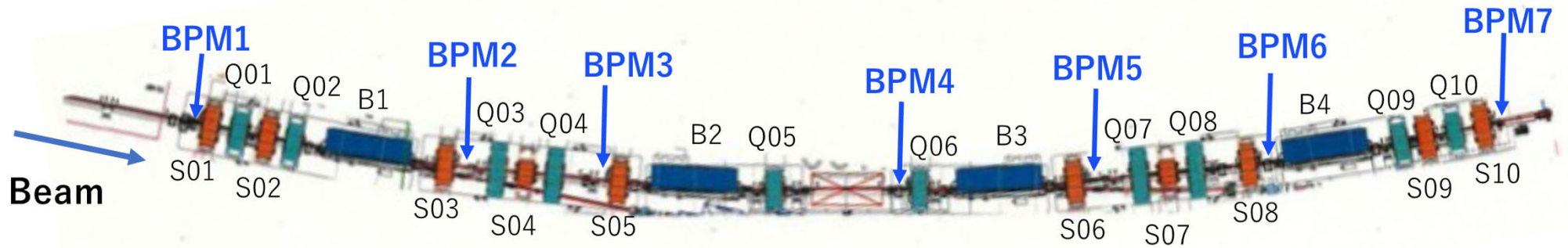


NanoTerasu
ファーストライト観測



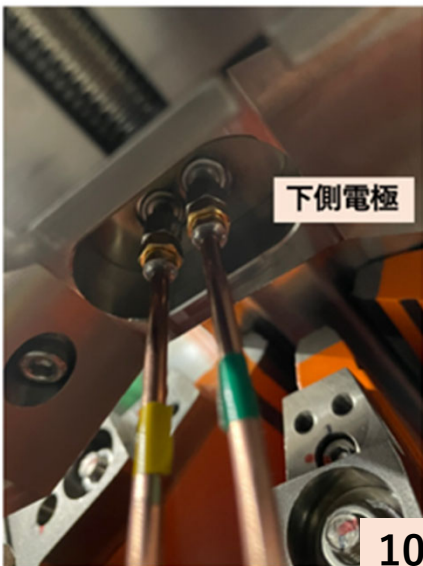
ビーム位置モニタ (BPM)

1セルあたり7台のBPM
合計112台

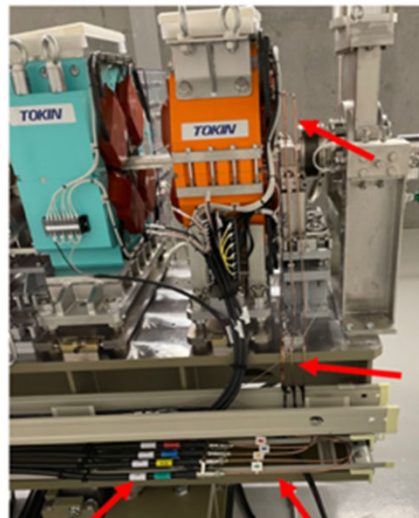


BPM データ収集

収集モード	モード	rate	主な用途
シングルパス	軌道測定		シンクロトロン振動測定、入射エネルギー・タイミング調整
Turn-by-Turn	COD	859kHz	入射の揺れ測定
Fast Acquisition	COD	10kHz	電子ビーム軌道監視、軌道インターロック、BBA
Slow Acquisition	COD	10Hz	COD補正、CODデータベース収集



下側電極



BPM14台/1ラック



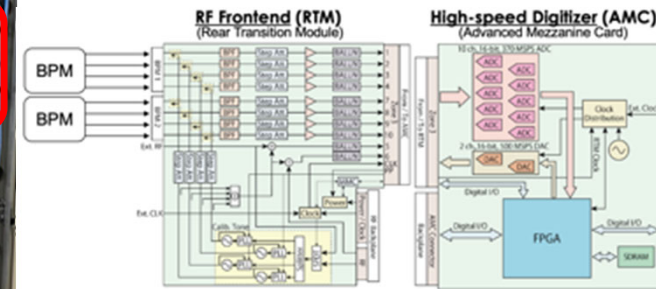
水冷ラック



読み出し回路

10Dコルゲートケーブル

PEEK
セミリジッド
ケーブル

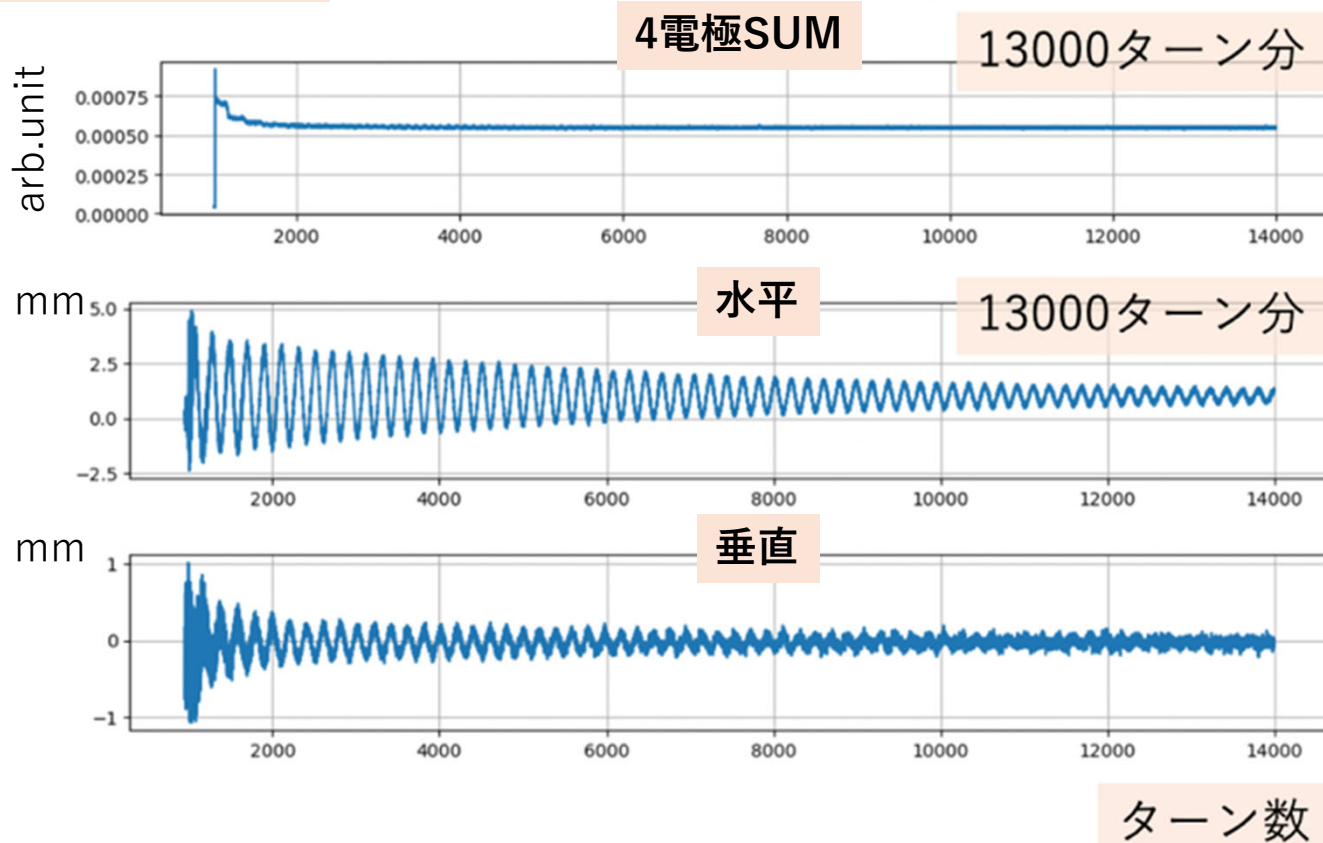


BPM収集データ

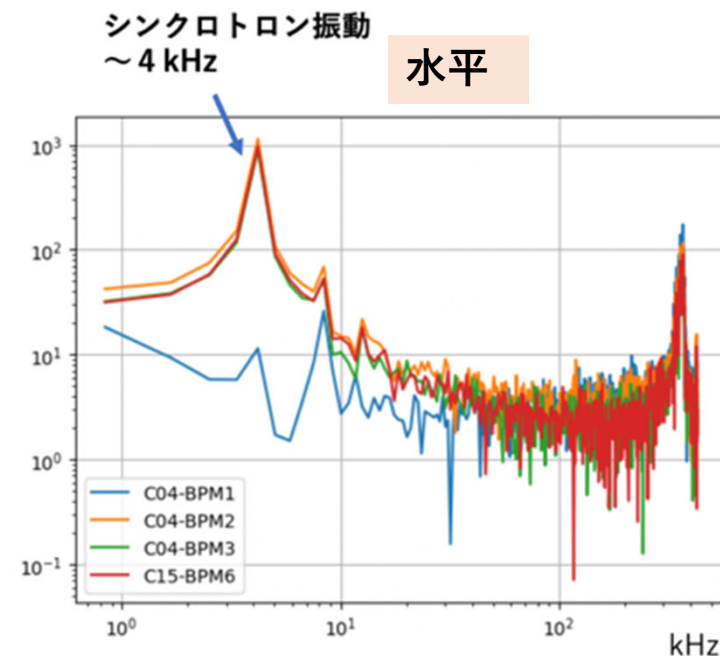
2023年6月 ビーム蓄積前にBPMタイミング調整完了

シングルパスデータ
蓄積電子ビーム

C04 BPM2 (分散部)



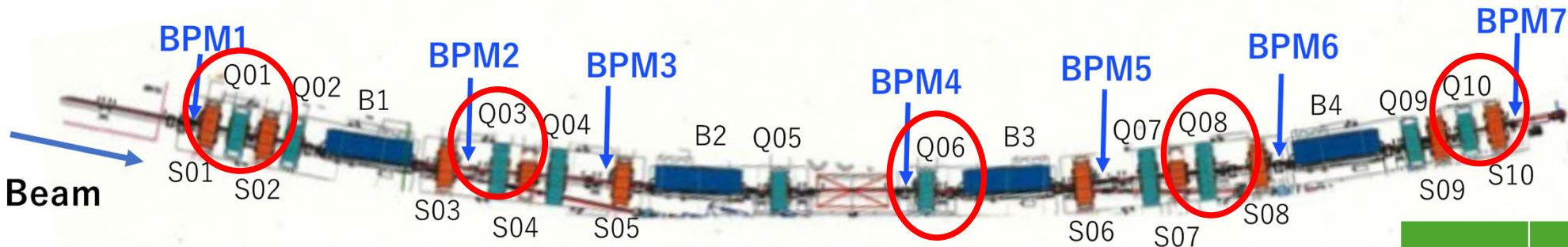
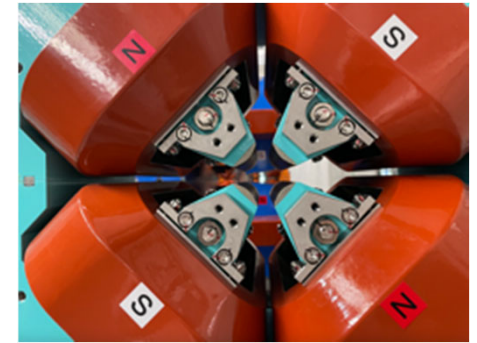
フーリエ変換データ



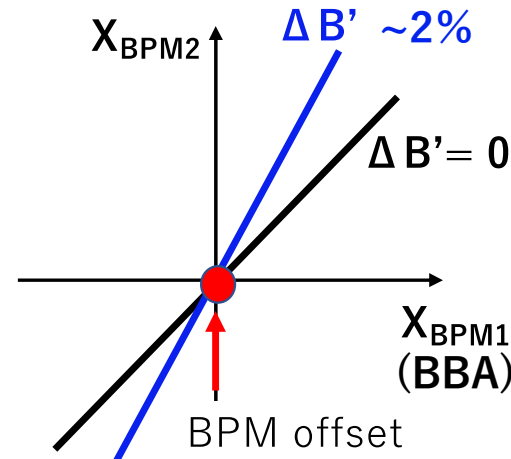
Beam Based Alignment (BBA)

2023年9月

BPMの読み値が近傍の磁石(4極)の磁場中心に一致するように、BPMオフセットを求める。



- ステアで軌道を振り、BBAを行うBPMと他のBPMの位置の相関を測定。4極励磁量を数%変化させ同様に相関を測定し、交点(励磁量が変化しても軌道が動かない位置)を求める。

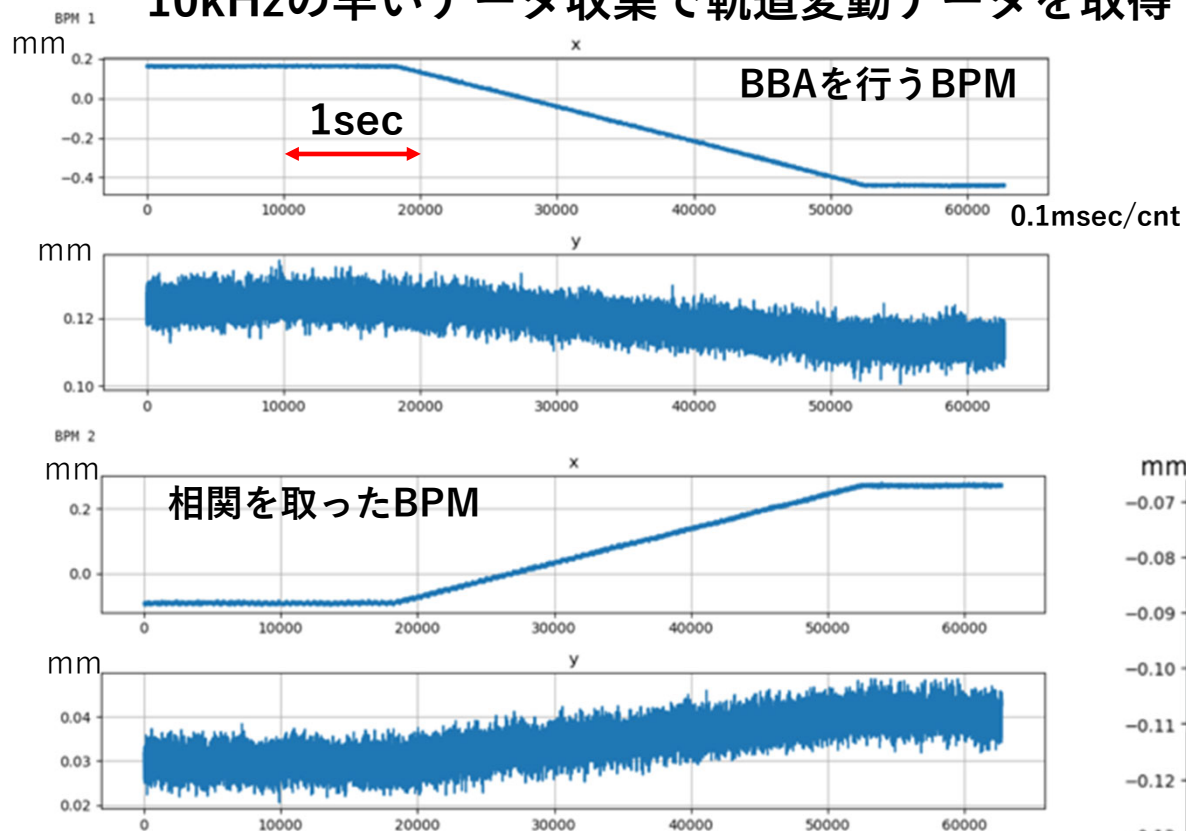


	QM
BPM1	Q01
BPM2	Q03
BPM3	Q03
BPM4	Q06
BPM5	Q08
BPM6	Q08
BPM7	Q10

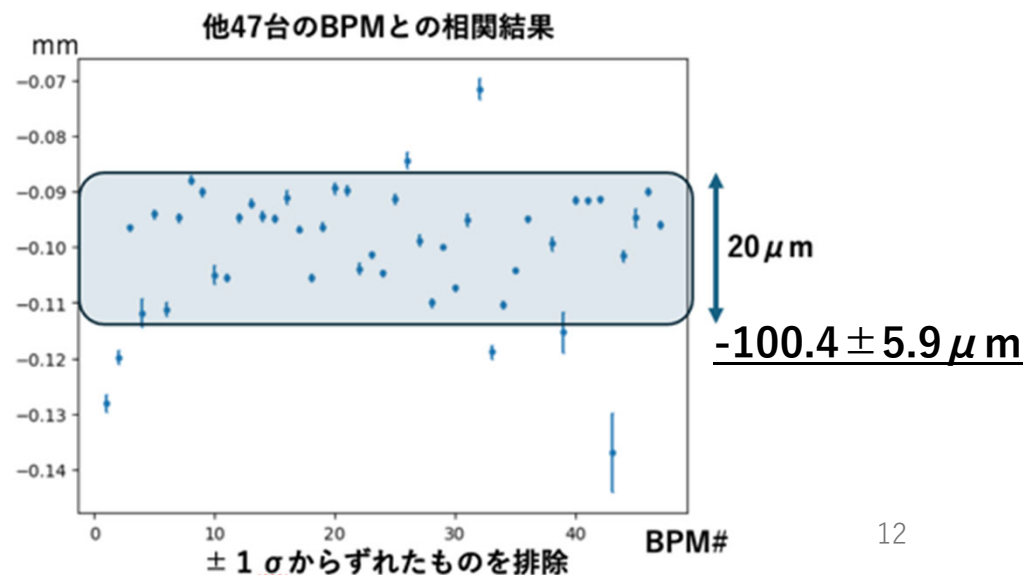
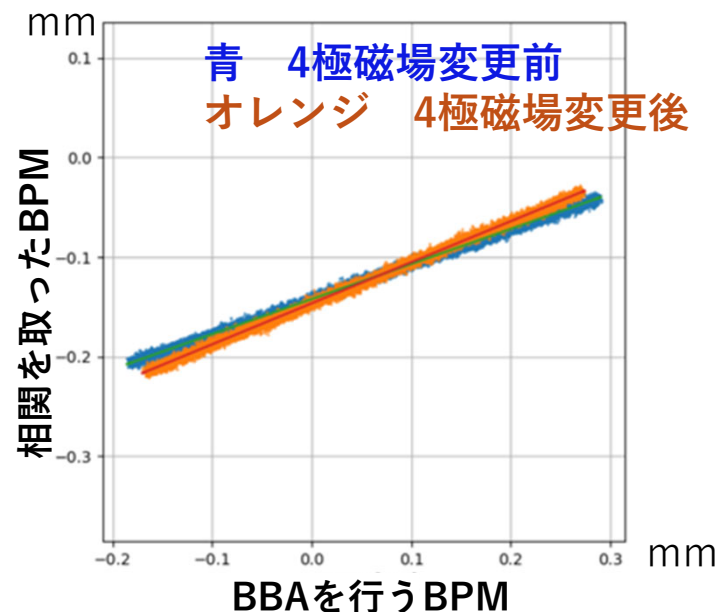
1セル5台の4極に補助電源を接続

BBA

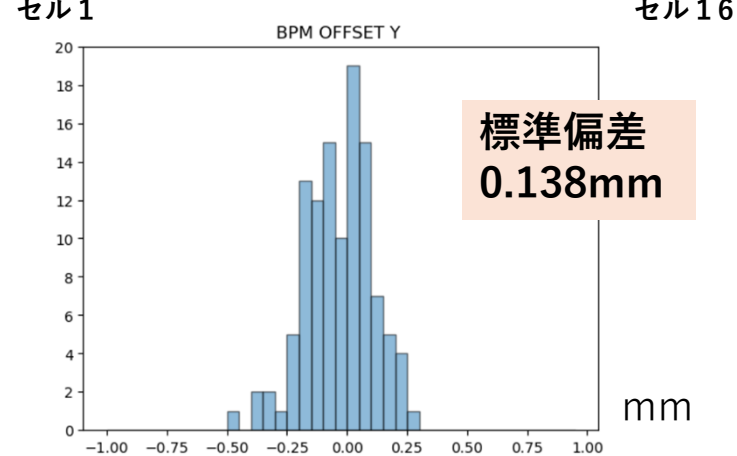
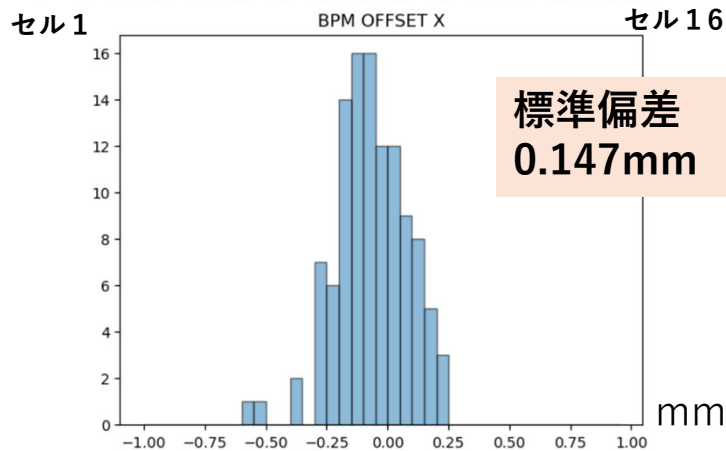
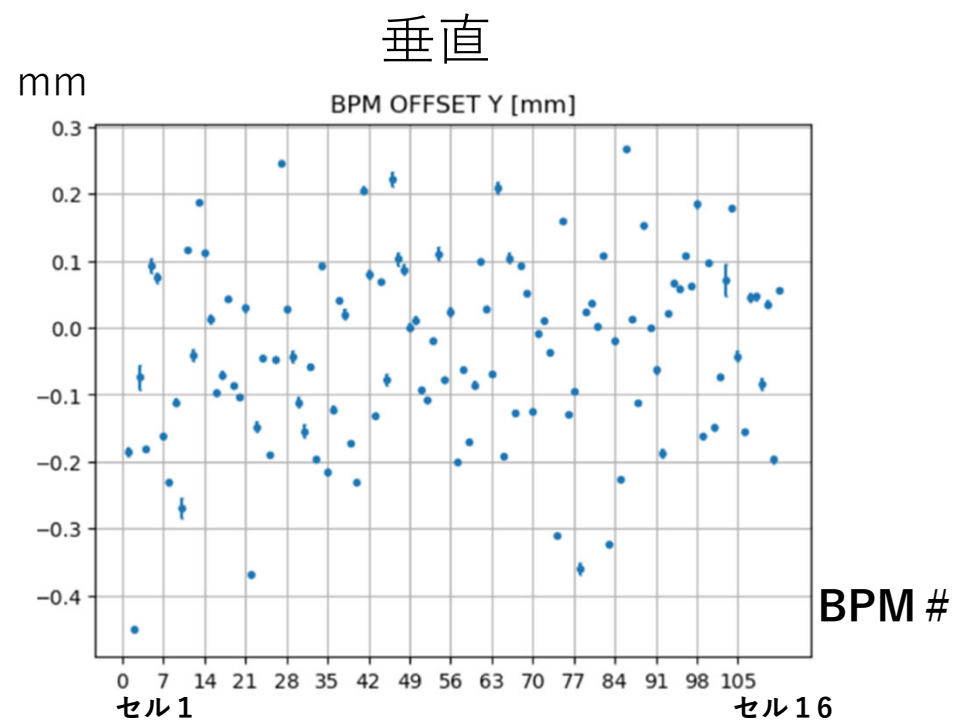
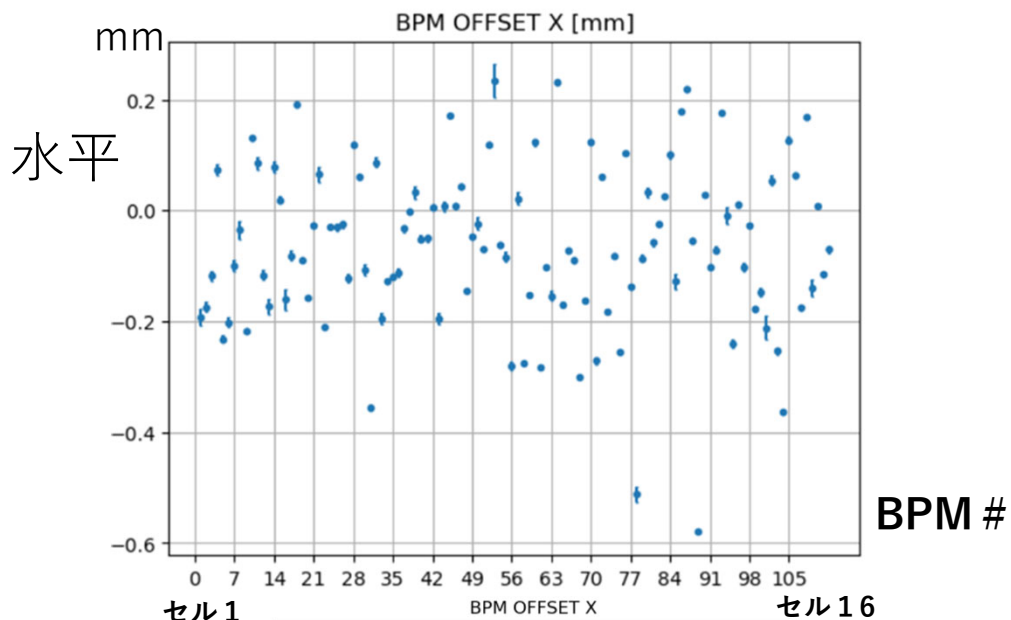
ステアリング電磁石で軌道を振る
10kHzの早いデータ収集で軌道変動データを取得



計48台のBPMデータを取得し、
ターゲットBPMと他の47BPMの相関をみる。
4極の励磁量を0.5%-3%変化させてQの中心を探す

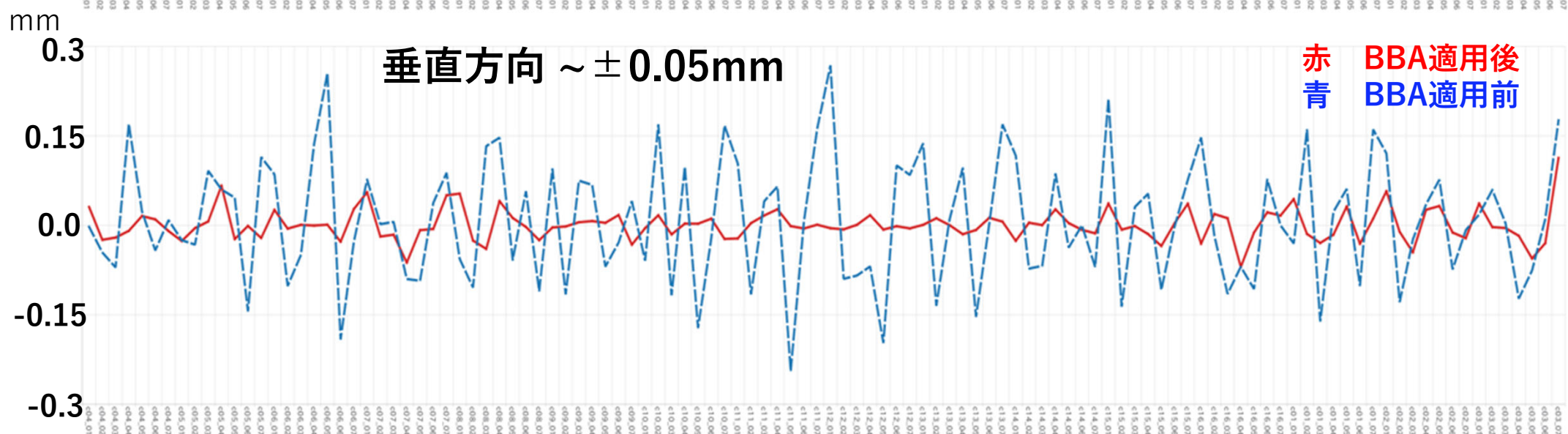
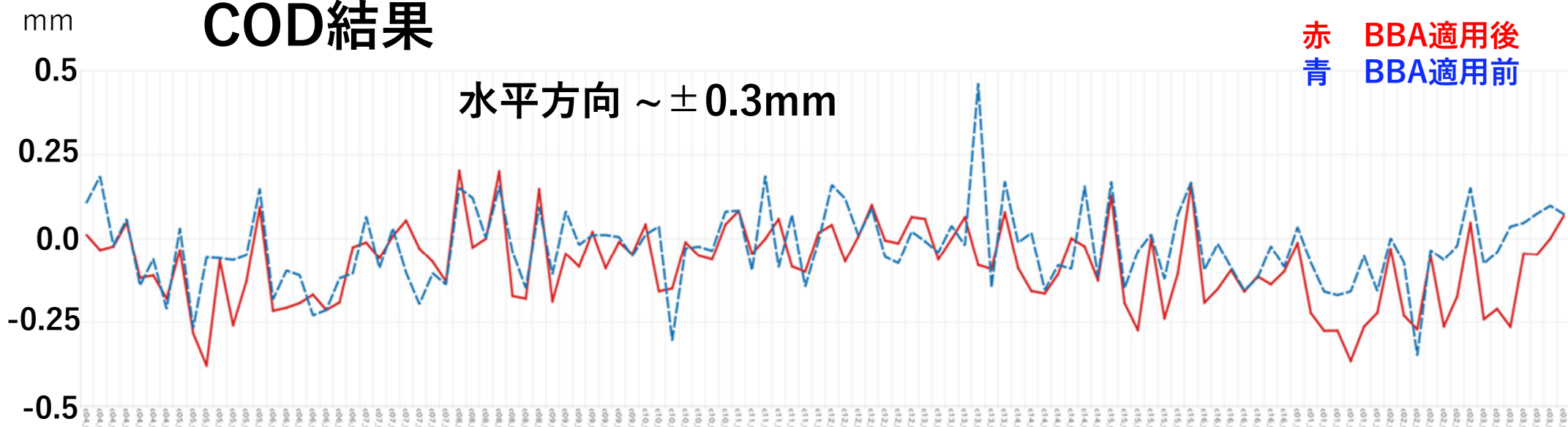


全112台BBA 結果



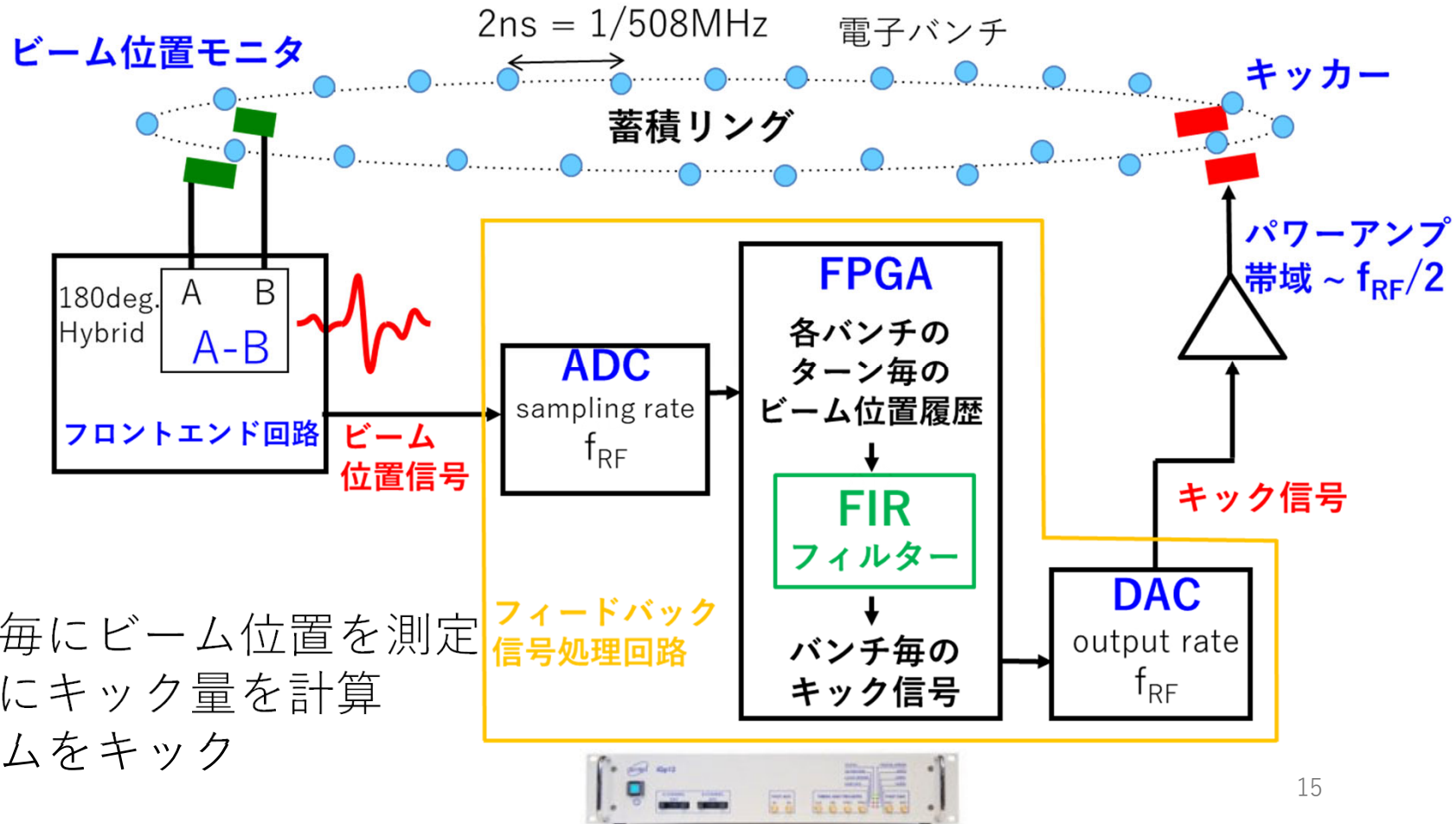
2023年9月時点では時間を要したが、現状100分でデータ収集完了

COD結果



Bunch-by-Bunch feedback system (BBF)

蓄積リングの横方向ビーム不安定性抑制システム

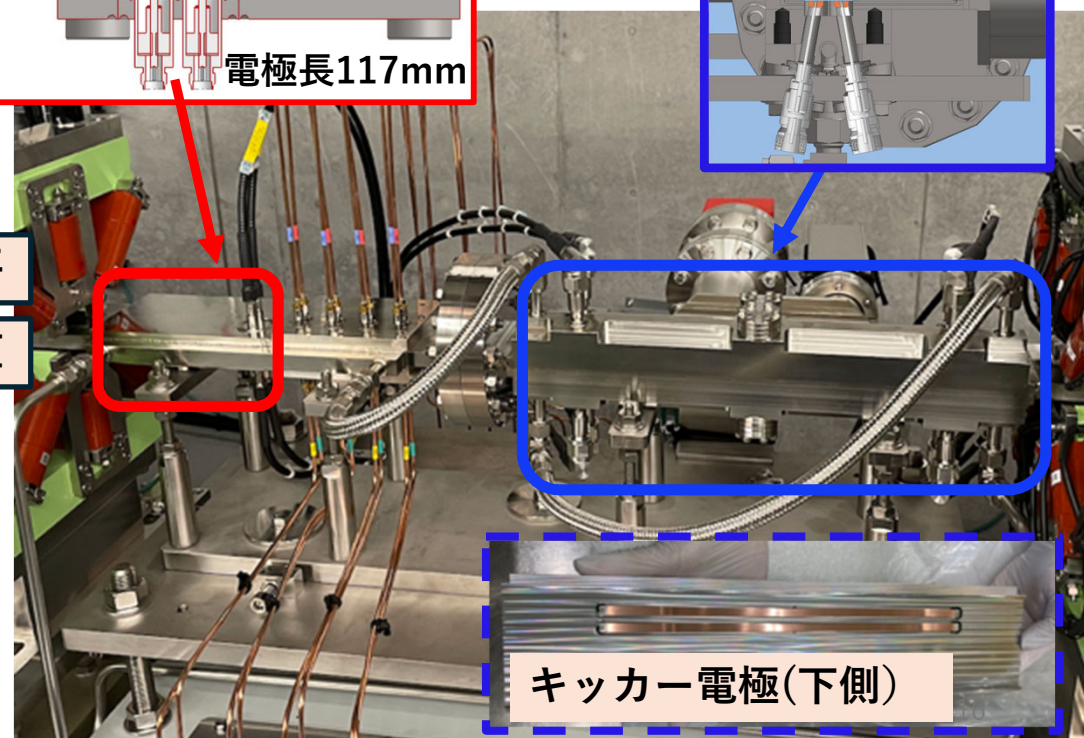
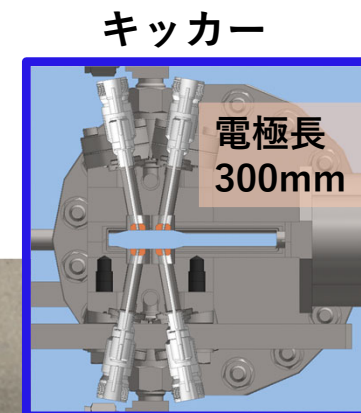
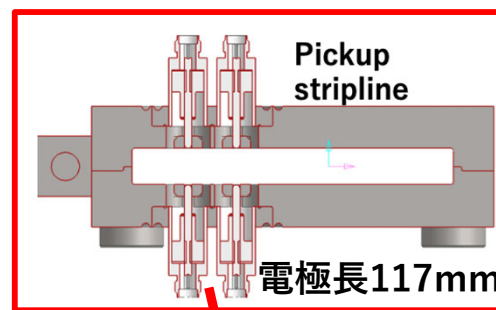
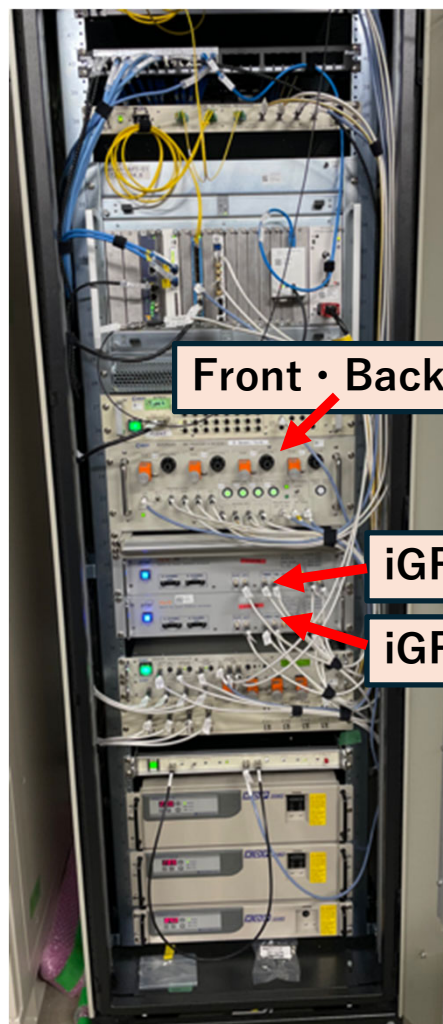
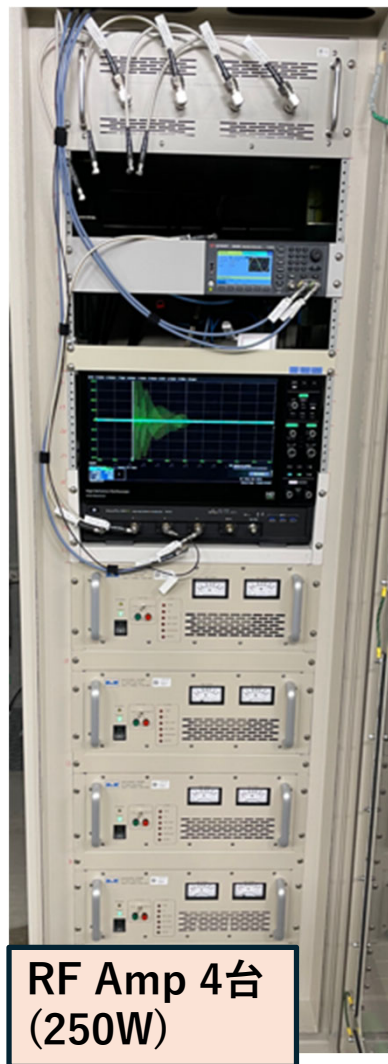


- 各バンチ、ターン毎にビーム位置を測定
- 1周以内 ($< 1\mu s$) にキック量を計算
- バンチごとにビームをキック

Bunch-by-Bunch feedback system (BBF)

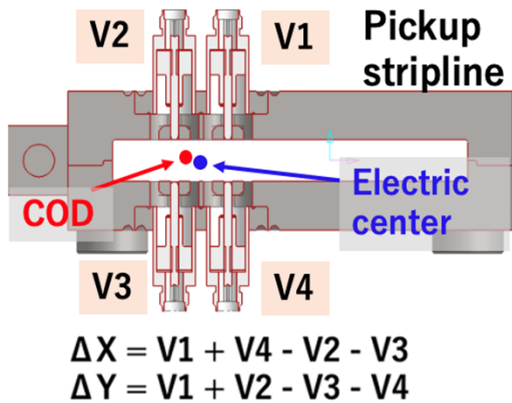
2023年8月

1台のキッカーで水平、垂直方向の不安定性を抑制

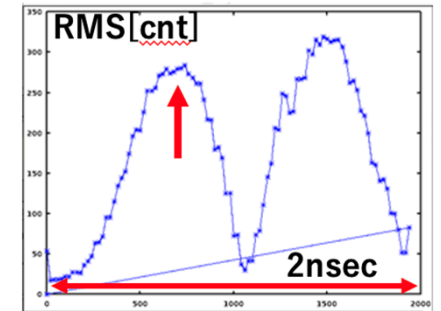
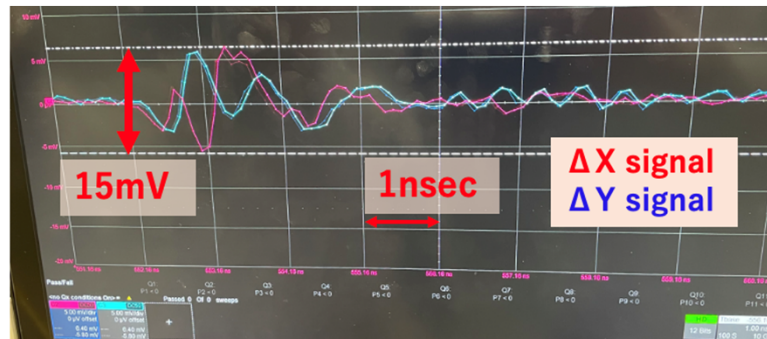


BBF調整

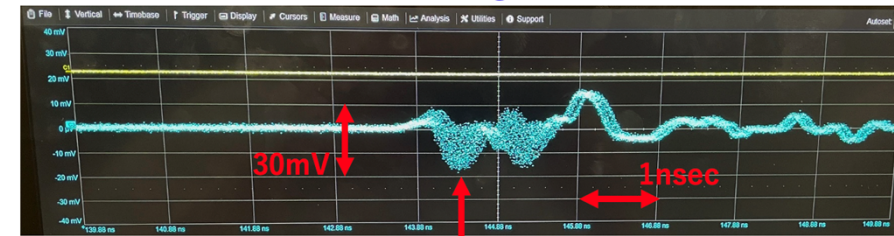
①ピックアップ信号の調整



各電極の減衰器/移相器を調整して4電極の差分信号 ($\Delta X, \Delta Y$)を ~ 0 にしてCODからのズレの振動(AC成分)を検知してフィードバックを与えて軌道を補正する。

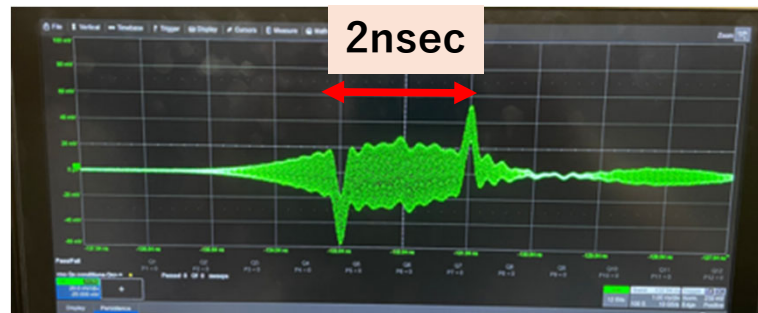


ΔY signal

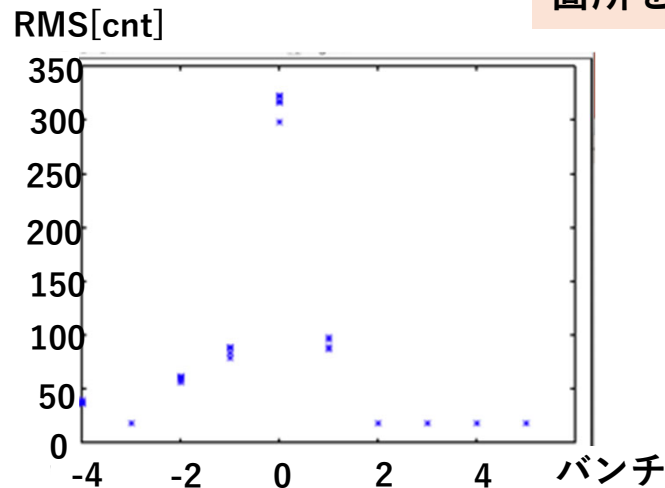


キッカーでビームを励振し、最も揺れの大きい箇所をピックアップ信号の検出時間に設定

②キッカーの調整



キッカーの戻り信号

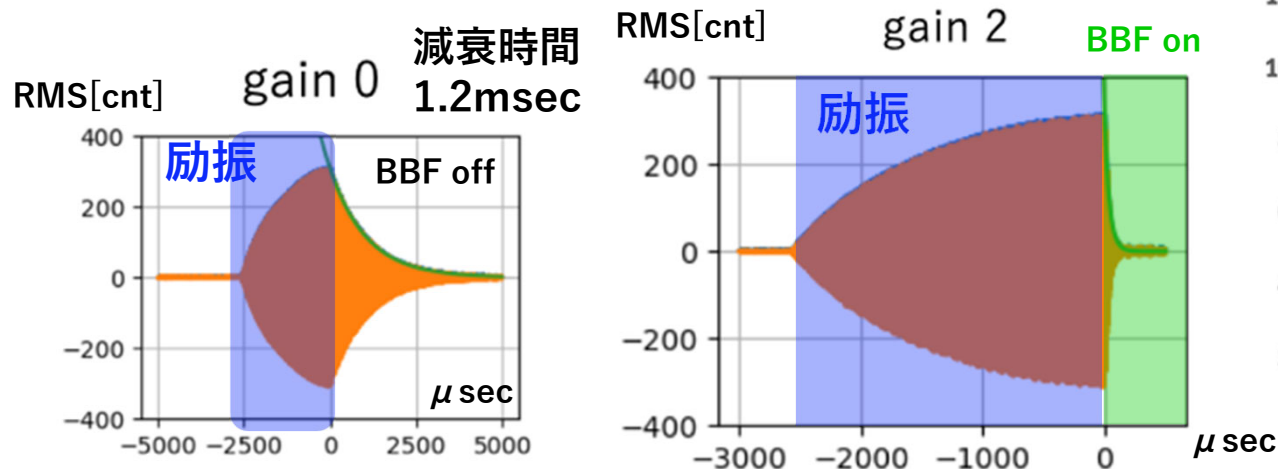


~ 20 psecの精度で決定

隣のバンチを蹴らないように DAC delayを調整(~ 50 psec)

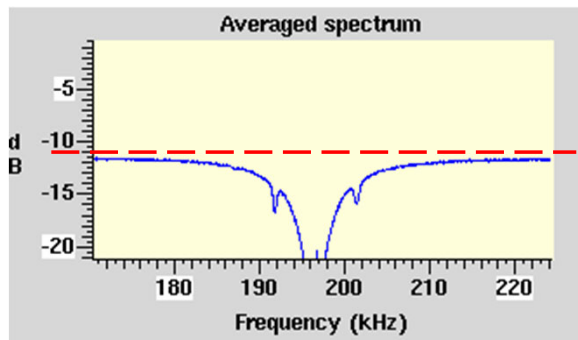
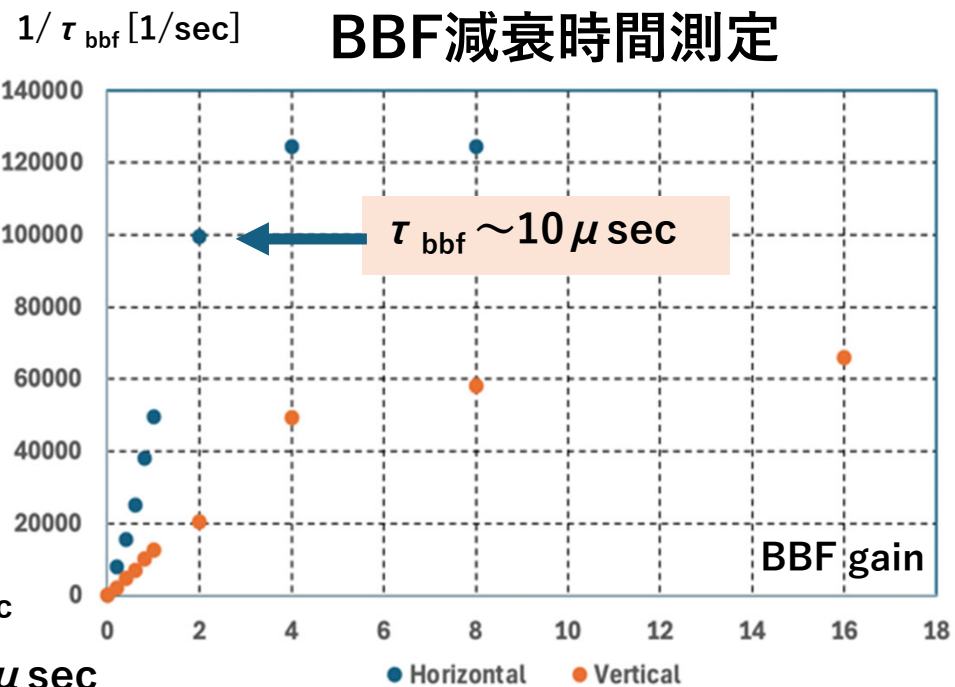
BBF調整

③ フィードバックゲイン、位相の調整



強制的にビーム振動を励振し、BBF onにし、BBFのgainとダンピング時間の関係を測定

減衰時間 $47 \mu\text{sec}$
~40ターンで減衰

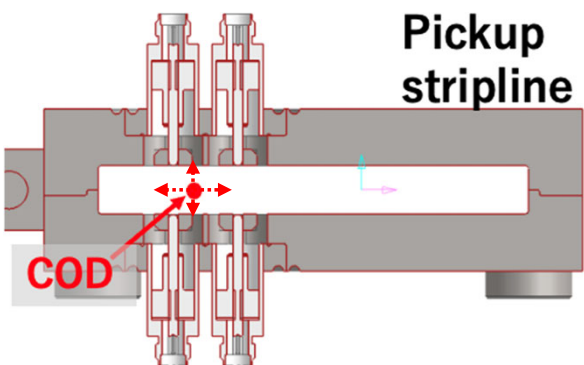


チューンのスペクトルノッチがフラットになる様にフィードバック位相を調整
~5°の精度

	チューン	tap数
水平	0.17	8
垂直	0.23	5

BBF調整

ローカルバンプを作って、位置分解能評価、ダイナミックレンジの評価



水平 **14cnt/mA/μm**

垂直 **12cnt/mA/μm**

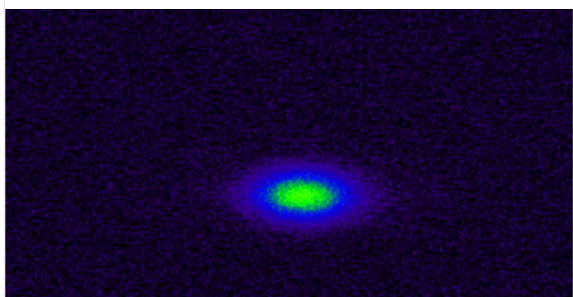
Bunch 電流	ADC (cnt)	Local bump	Bunch 電流	ADC (cnt)	Local bump
0.1mA	30cnt	0	0.1mA	0cnt	0
0.1mA	100cnt	+50 μm	0.1mA	60cnt	+50 μm
0.1mA	-40cnt	-50 μm	0.1mA	-55cnt	-50 μm

ダイナミックレンジは水平(±146 μm)、垂直(±170 μm) (1mA/bunchの場合)

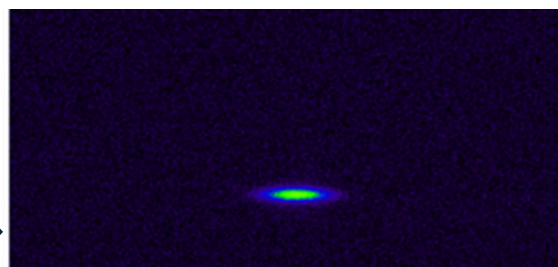
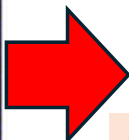
電子ビームサイズ

BBF OFF 蓄積電流33mA

BBF ON 蓄積電流137mA



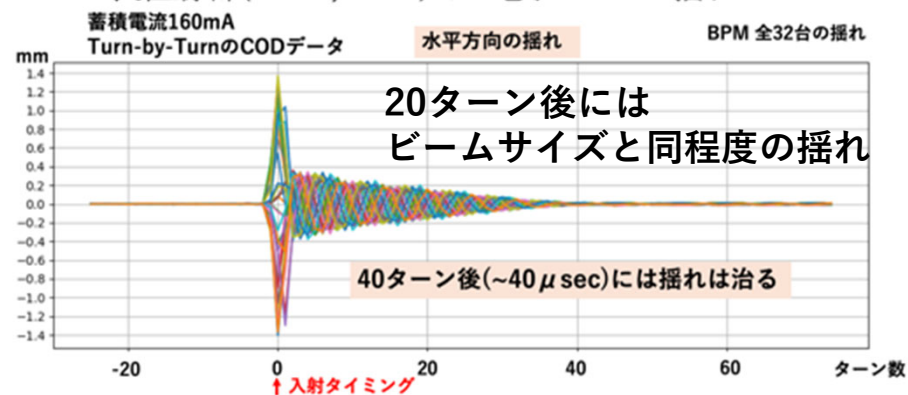
水平 121 μm (設計値 80 μm)
垂直 60 μm (設計値 6 μm)



水平 80 μm
垂直 16 μm
水平エミッタンス~1.1nm.rad

BBFで入射時の蓄積電子ビーム揺れも抑制

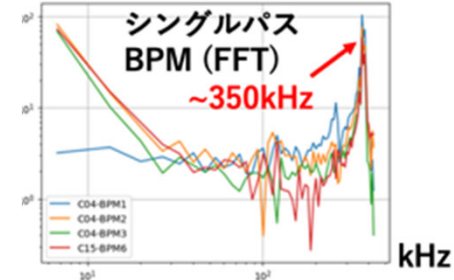
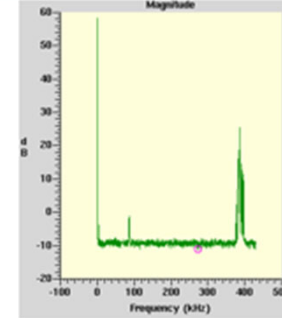
長直線部(BPM1,BPM7)での電子ビームの揺れ



チューン測定

2023年6月

数10kHz spanで
10~430kHzをスキャン

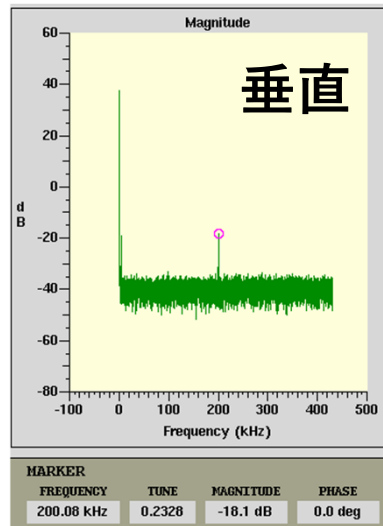
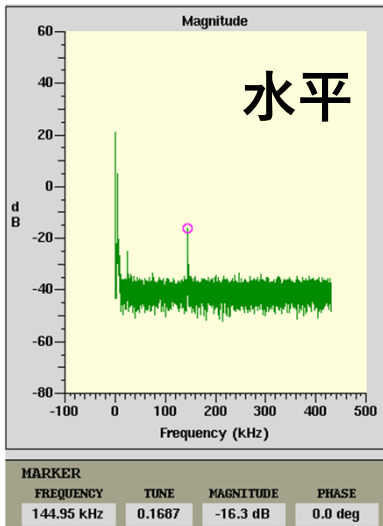


- BBFキッカーでビームを励振し、チューンを測定
- 1バンチのみBBFをOFFにして、水平、垂直方向にベータトロン振動数でビームを揺らしてチューンを測定
- 測定値を元に30秒おきにチューン補正を行なっている。

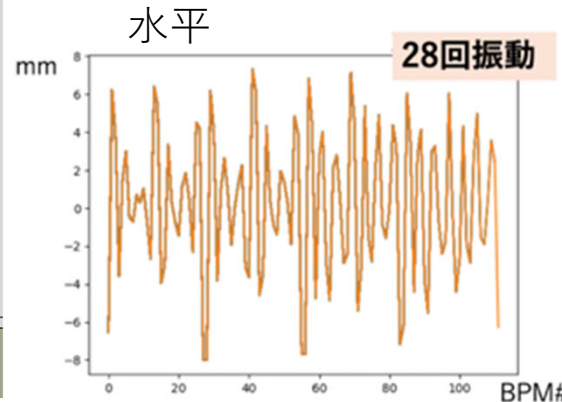
水平、垂直とも20kHz spanで
励振し、チューンを常時測定

設計値	チューン	振動数 kHz
水平	28.17	146.09
垂直	9.23	197.65

BBFではチューンの小数部のみ測定可能で、
0.5の折り返し対称のどちらか不明 (0.17 or 0.83)
→ 非分散部4極の励磁量を変更し、想定通りに
動くことを確認



整数部はBPMで測定



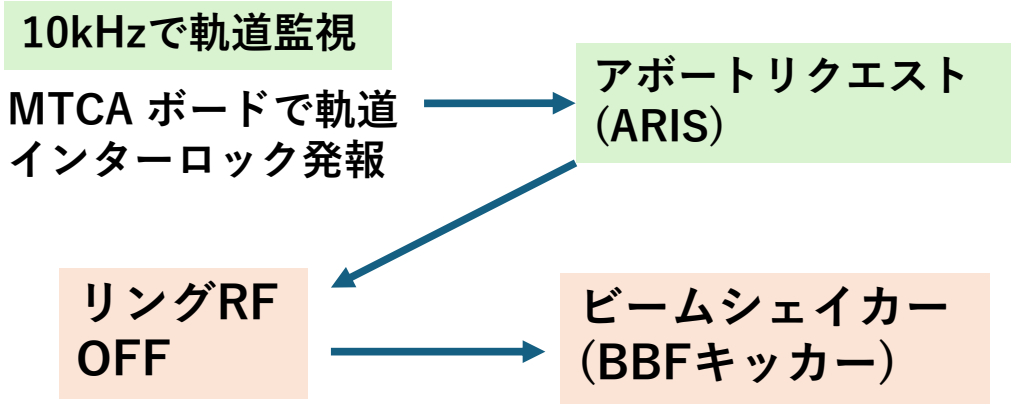
シングルパスBPMリング1周

$$\Delta v_x = \frac{+32}{4\pi} \{ \Delta K_1 \langle \beta_{x1} \rangle L_1 + \Delta K_2 \langle \beta_{x2} \rangle L_2 \}$$

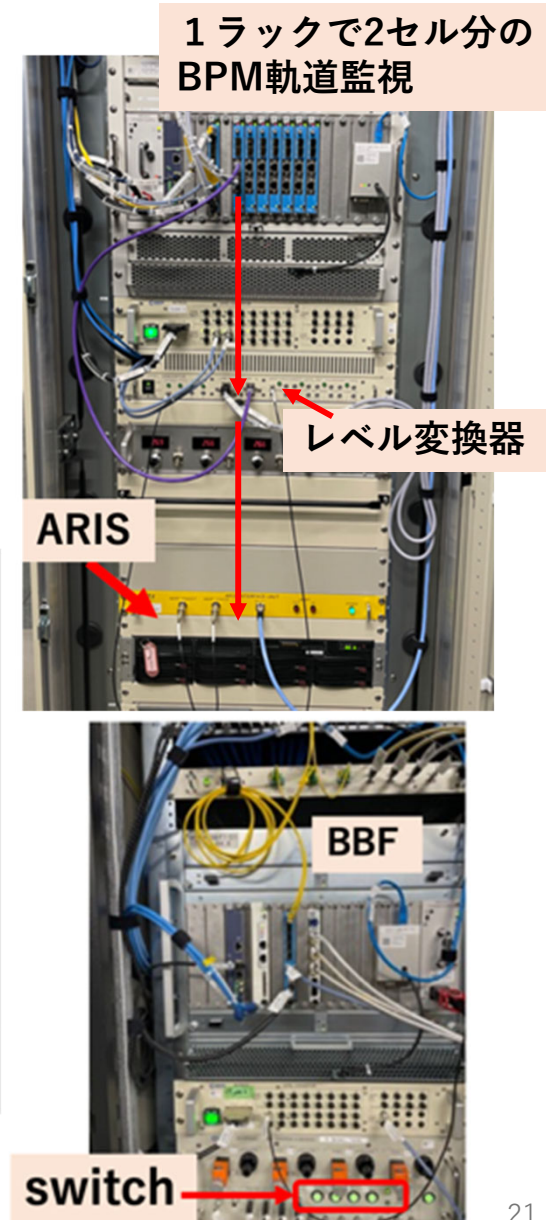
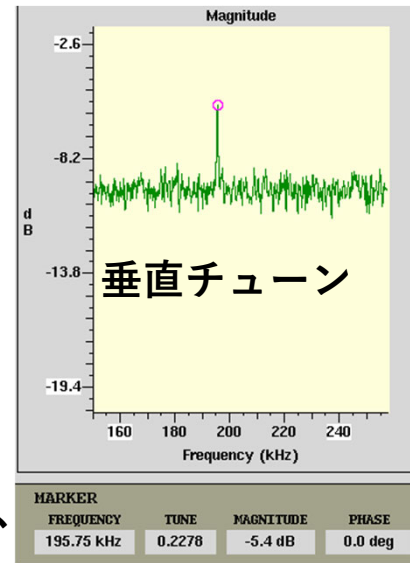
$$\Delta v_y = \frac{-32}{4\pi} \{ \Delta K_1 \langle \beta_{y1} \rangle L_1 + \Delta K_2 \langle \beta_{y2} \rangle L_2 \} \quad K_i \equiv \frac{B'_i}{[B\rho]}$$

ビーム軌道監視・アボート試験 2023年7月

- 低エミッタンスビームが1箇所であボートした場合、真空チャンバーにダメージを与える可能性が高い。
- ビーム廃棄の際は電子ビームを垂直方向に広げて廃棄する。
- ナノテラスでは蓄積電流3mA以上で、常に軌道インターロック閾値を設定して、軌道監視を行なっている。

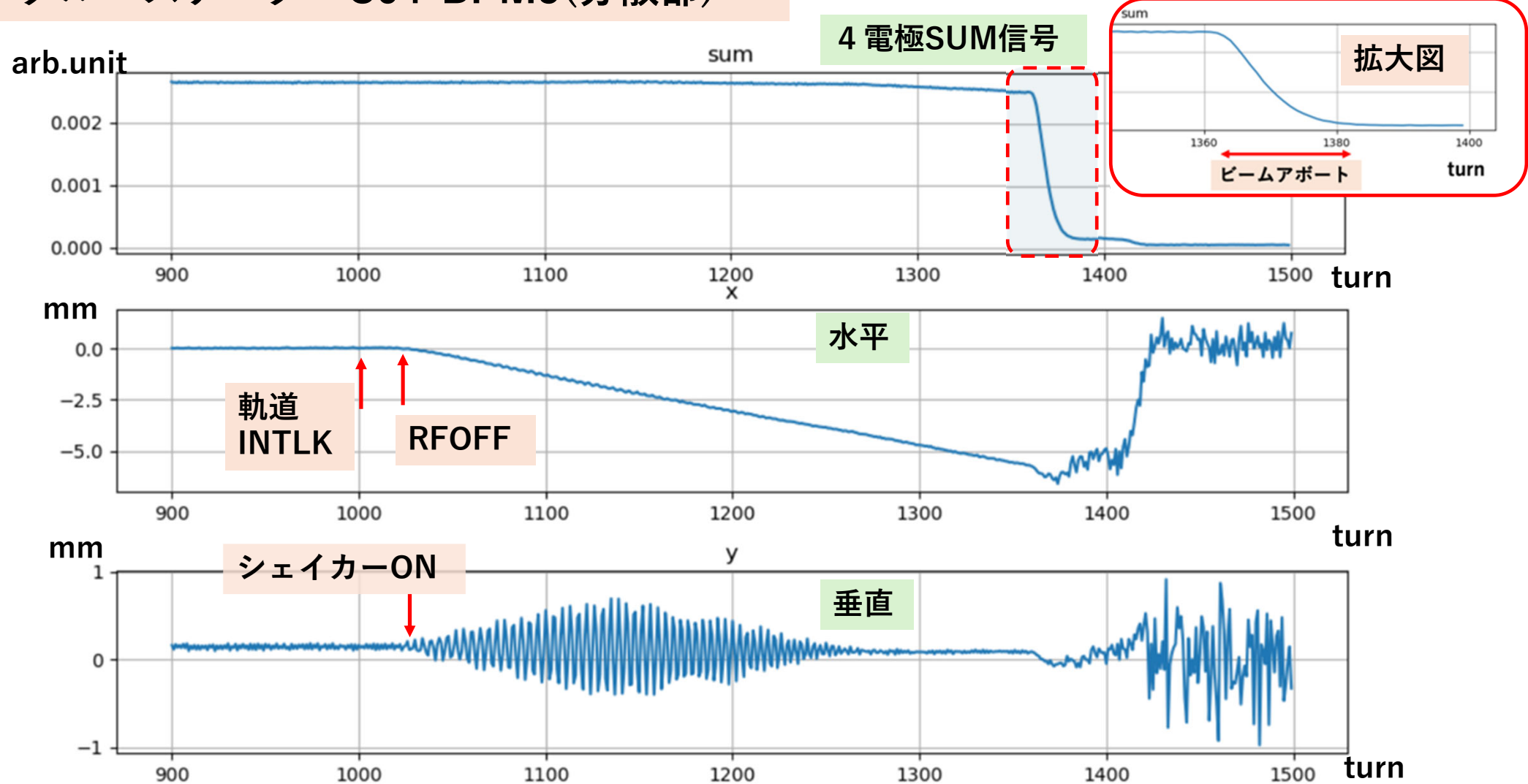


リングRF-OFF信号がBBFフロントエンド回路に伝達され、BBFからビームシェイカー機能にスイッチ切り替え、ビームを広げて廃棄



シングルパスデータ C04-BPM5(分散部)

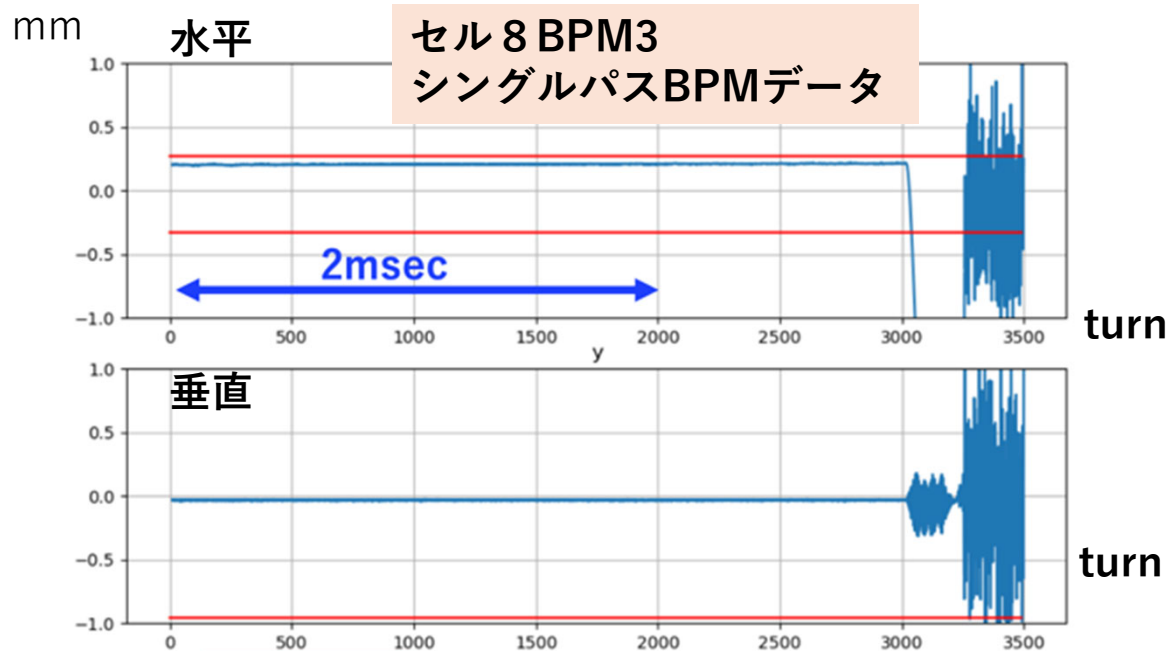
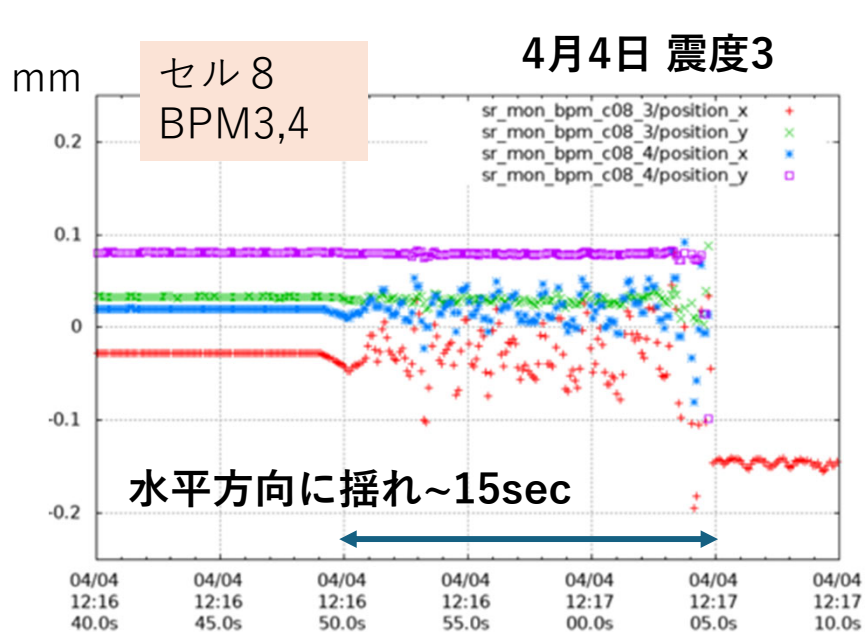
20ターン程度でビームアポート



軌道インターロック発報から400ターン程度でビームアポート($\sim 450 \mu\text{sec}$)²²

軌道インターロック

- FE機器、ビームライン機器を保護するため、常に電子ビーム軌道を閉鎖している。(10kHzで軌道監視)
- ID上下流のBPMで軌道を監視し、各IDで軌道インターロック閾値を決めて常時監視し、異常時は1msec以内に直ちにビーム廃棄する。最も厳しい設定値で $\pm 0.3\text{mm}$ (水平)、 $\pm 0.14\text{mm}$ (垂直) 地震発生時に何度かビームアボートした。



ユーザー利用運転状況

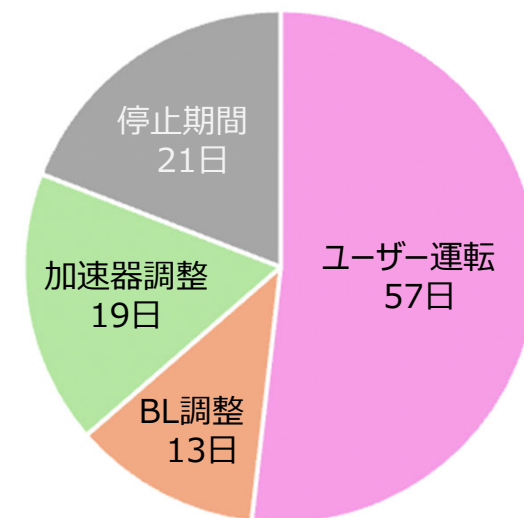
2024年4月9日 トップアップ運転でユーザー利用運転開始

	期間	蓄積電流	利用運転時間	ダウンタイム	Availability
第1サイクル	4/9-4/21	160mA	296時間	111分	99.38%
第2サイクル	5/19-5/31 (5/25除く)	160mA	272時間	218分	98.66%
第3サイクル	6/4-6/14	160mA	248時間	0	100%
第4サイクル	6/19-6/28	160mA	224時間	0	100%
第5サイクル	7/9-7/19	180mA	248時間	108分	99.27%
第6サイクル	7/26~8/6	200mA	272時間		

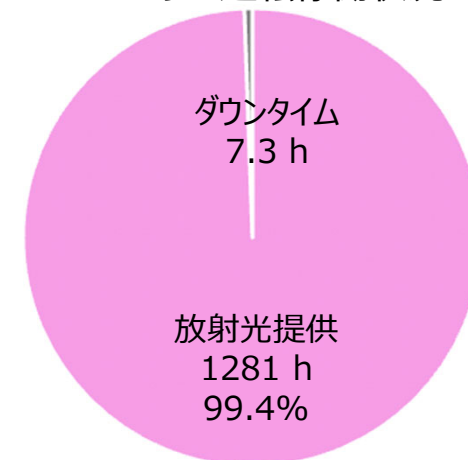
99%以上の高いAvailability を達成

加速器調整を進め、安定運転できることを確認しつつ、蓄積電流値を上げて、設計値400mAのフルスペックを目指す。

加速器運転状況
(2024.4.9 - 7.19)

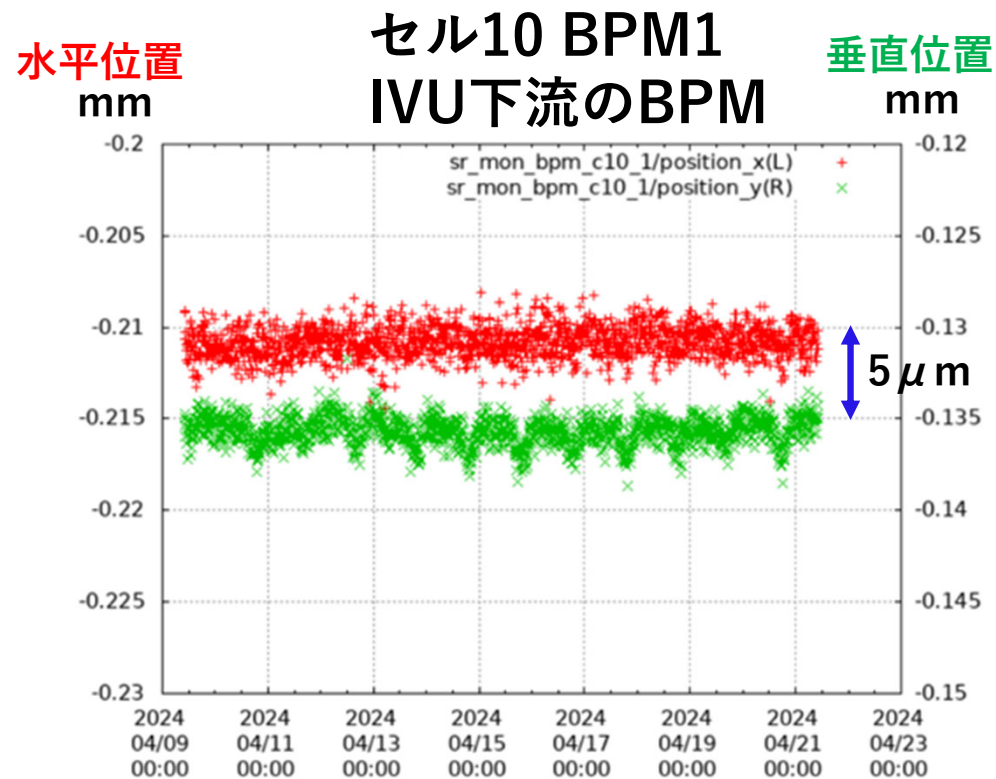
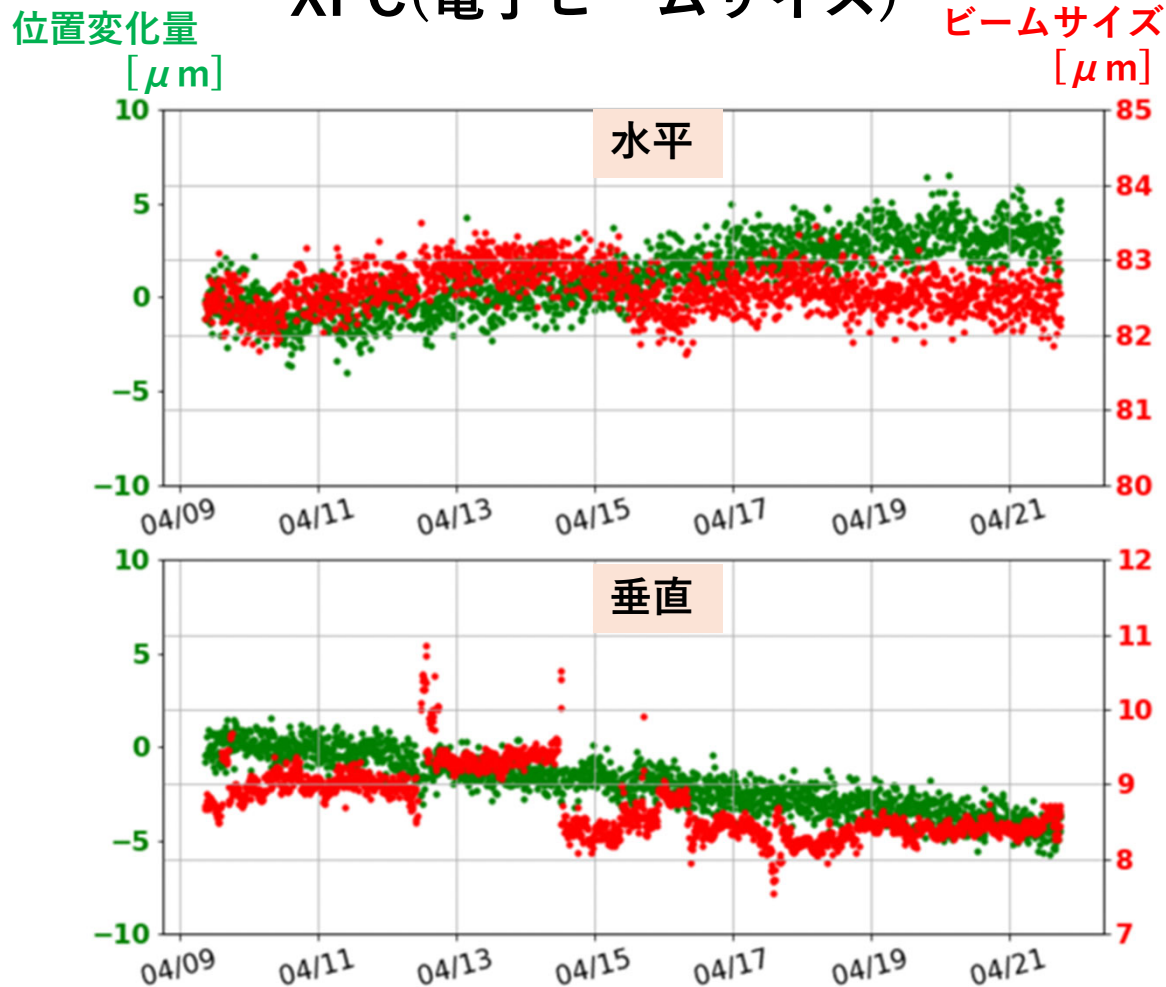


ユーザー運転稼働状況



蓄積電子ビーム安定性

XPC(電子ビームサイズ)



第1サイクル 4月9日～4月21日
159mA ~ 160mAでのトップアップ運転
リング空洞のRF反射で2回停止
電子ビーム位置、サイズも安定
高品質なX線ビームを安定にユーザーへ提供

まとめ

- BPM、BBF、ビーム軌道監視、ビームアポート試験等、予定より早いペースでナノテラス蓄積リングのコミッショニングを進めることができた。
- 4月より予定通り、ユーザー利用運転を開始し、設計エミッタンスで非常に安定にX線ビームを供給できている。99.43%のAvailability を達成。
- 現在は200mAまで蓄積電流を上げてユーザー利用運転を行なっている。
- 設計電流400mAフルスペックでのユーザー利用運転を目指し、加速器調整を引き続き続けていく。

日時	NanoTerasu関連の発表
7月31日17:20~ 口頭発表	菅 線型加速器のビーム安定性の評価
8月2日14:50~ 口頭発表	小原 蓄積リングビーム光学のコミッショニング
8月2日15:10~ 口頭発表	保坂 APPLE II型アンジュレータ多極磁場補正
8月1日、2日 ポスター発表	安積 NanoTerasu加速器の現状

謝辞

- SPring-8, SACLAの加速器関係者の方々には、加速器システム設計段階から多大なご協力を賜りました。
- NanoTerasu加速器の各コンポーネント、設計、製作、設置に関し、多くのメーカーの方々のご尽力を賜りました。
- 無事、高い安定度でユーザー利用運転を予定通り開始できました。深く感謝申し上げます。