



# ナノテラス蓄積リング用ビーム位置 モニタシステムの構築と立ち上げ

前坂 比呂和<sup>1,2</sup>, 上島 考太<sup>3</sup>, 小原 脩平<sup>3</sup>, 土山 翼<sup>3,4</sup>, 及川 治彦<sup>3,4</sup>, 伊原 彰<sup>3,4</sup>, 齋田 涼太<sup>3,4</sup>,  
西森 信行<sup>3</sup>, 福井 達<sup>1</sup>, 正木 満博<sup>2,3</sup>, 藤田 貴弘<sup>2,3</sup>, 出羽 英紀<sup>2,3</sup>, 細田 直康<sup>2,3,1</sup>, 高野 史郎<sup>2,3,1</sup>

1: 理研 放射光科学研究センター

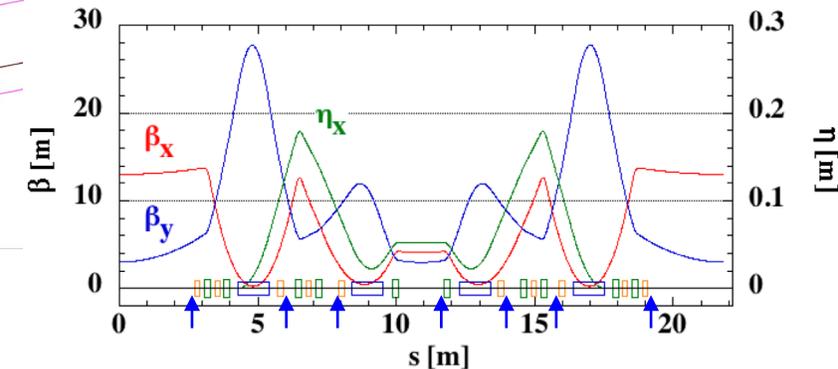
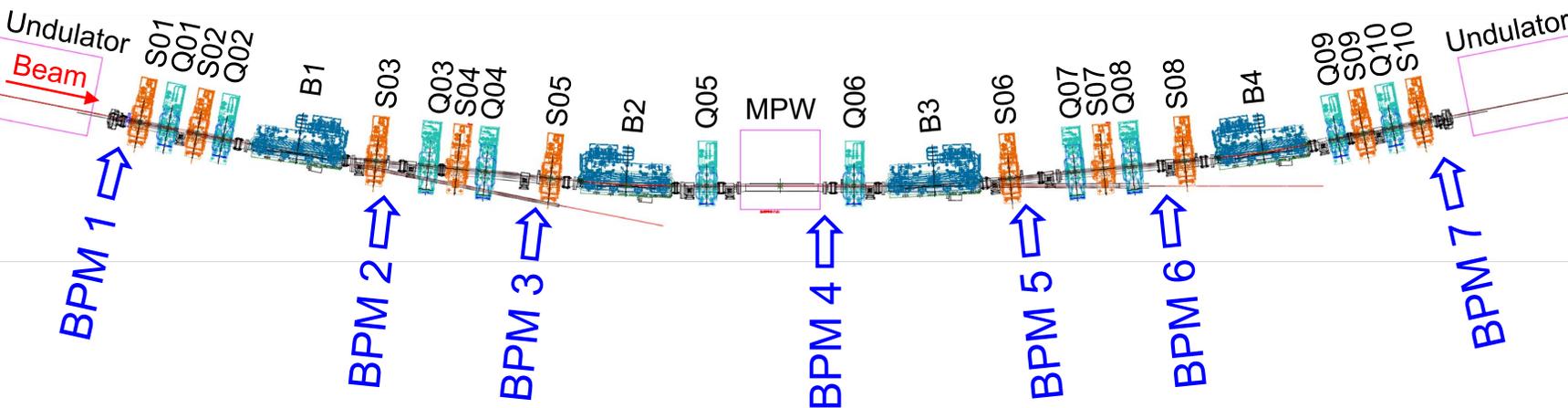
2: 高輝度光科学研究センター (JASRI)

3: 量子科学技術研究開発機構 (QST)

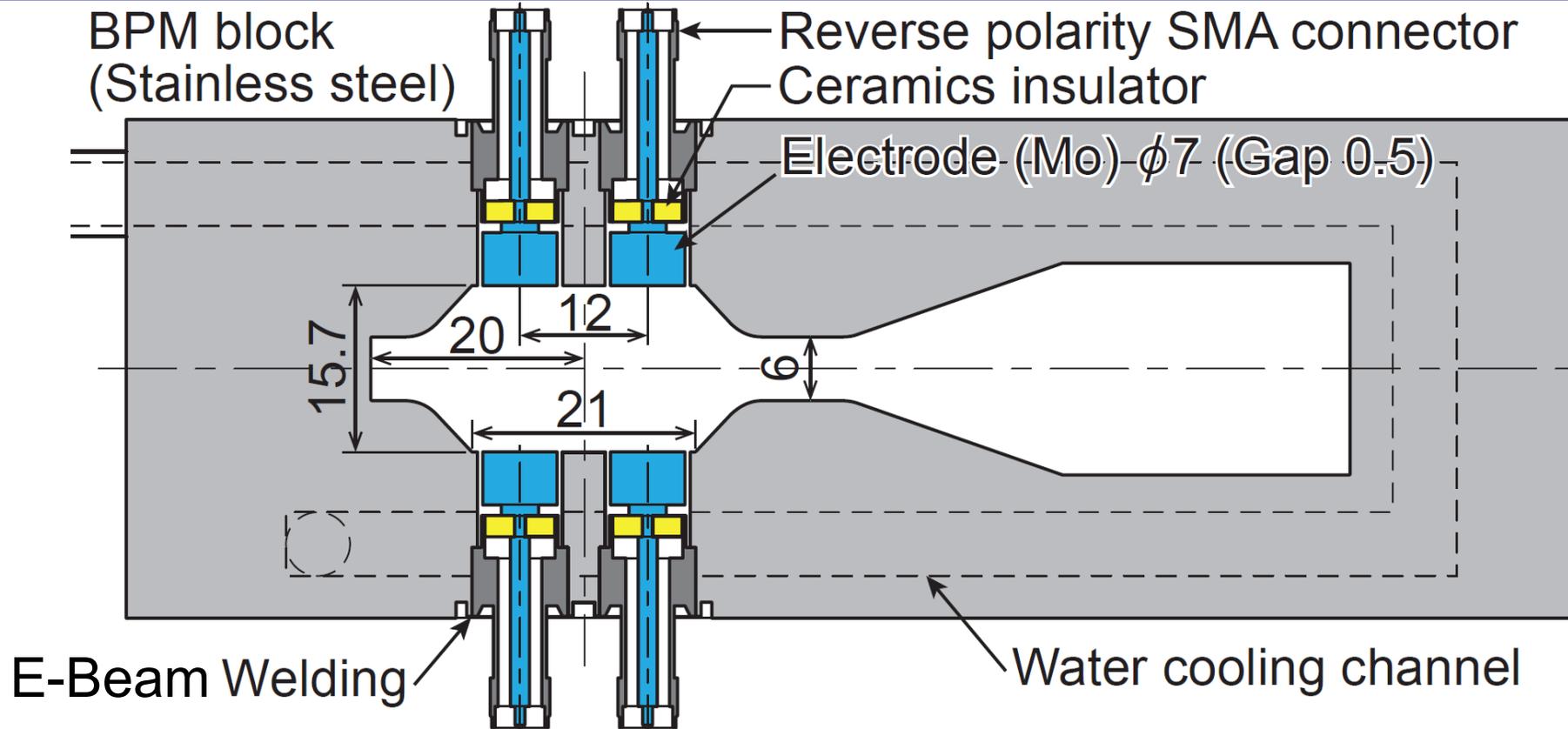
4: 株式会社 NAT

# はじめに

- ナノテラス蓄積リングのビーム位置モニタ (BPM) システムを構築した。
- 全112台 (7台/セル × 16セル)
- 要求性能
  - シングルパス分解能: 100 $\mu$ m std. (100 pC)
  - 絶対位置精度:  $\pm 100\mu$ m (without beam-based calibration)
  - 長期安定度: 5 $\mu$ m peak-to-peak for 1 month
- ダイナミックレンジ: 72dB以上
  - 蓄積電流: 0.1mA ~ 400 mA
- SPring-8-II 向けに開発済みの機器をベースに設計・製作した。
  - ボタン電極型 BPM ヘッド、耐放射線高周波信号ケーブル、MicroTCA.4ベースの読み出し回路。



# ボタン電極型 BPM ヘッド



Kyocera



Hitachi Zosen

- 電極直径: 7 mm、電極穴径: 8 mm → ギャップ: 0.5 mm
- 電極間隔: 左右 12 mm、上下 15.7 mm
- 電極間の信号強度の  $\Delta/\Sigma$  に対するビーム位置への一次の換算係数: 水平: 7.7 mm、垂直: 6.6 mm
- 電極材質: モリブデン → 電気伝導率が高いため発熱が小さく、熱膨張率が絶縁用アルミナセラミックに近い。
- 電極は電子ビーム溶接で接合。
- コネクタ: 逆極性 SMA Jack → 熱サイクルによるバネ性低下の影響がない。

# 高周波信号ケーブル



- SPring-8 にて耐放射線性が検証されたものを選定した。
- 1.5 m 長の PEEK セミリジッドケーブル
  - BPM 電極に直接取り付けるケーブルなので特に放射線に強いものとした。
  - 挿入損失が大きいため線量が十分弱まる架台脇までとする。
  - 挿入損失: 0.57 dB/m at 509 MHz
- 10D コルゲート同軸ケーブル (ポリエチレン絶縁)
  - 線量がそれほど強くなければこのケーブルで問題ない。
  - 挿入損失: 0.054 dB/m at 509 MHz



Cadox Systems and COAX

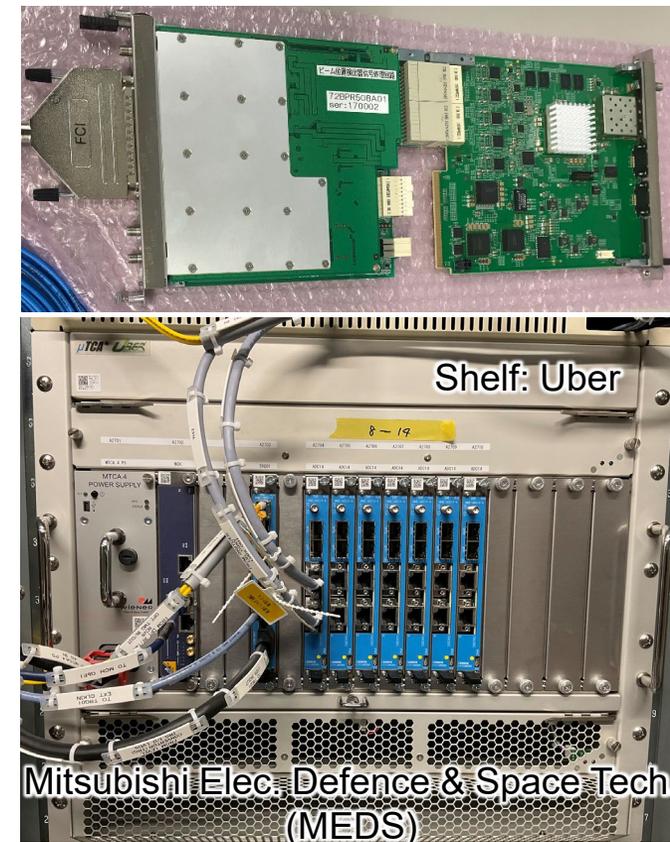
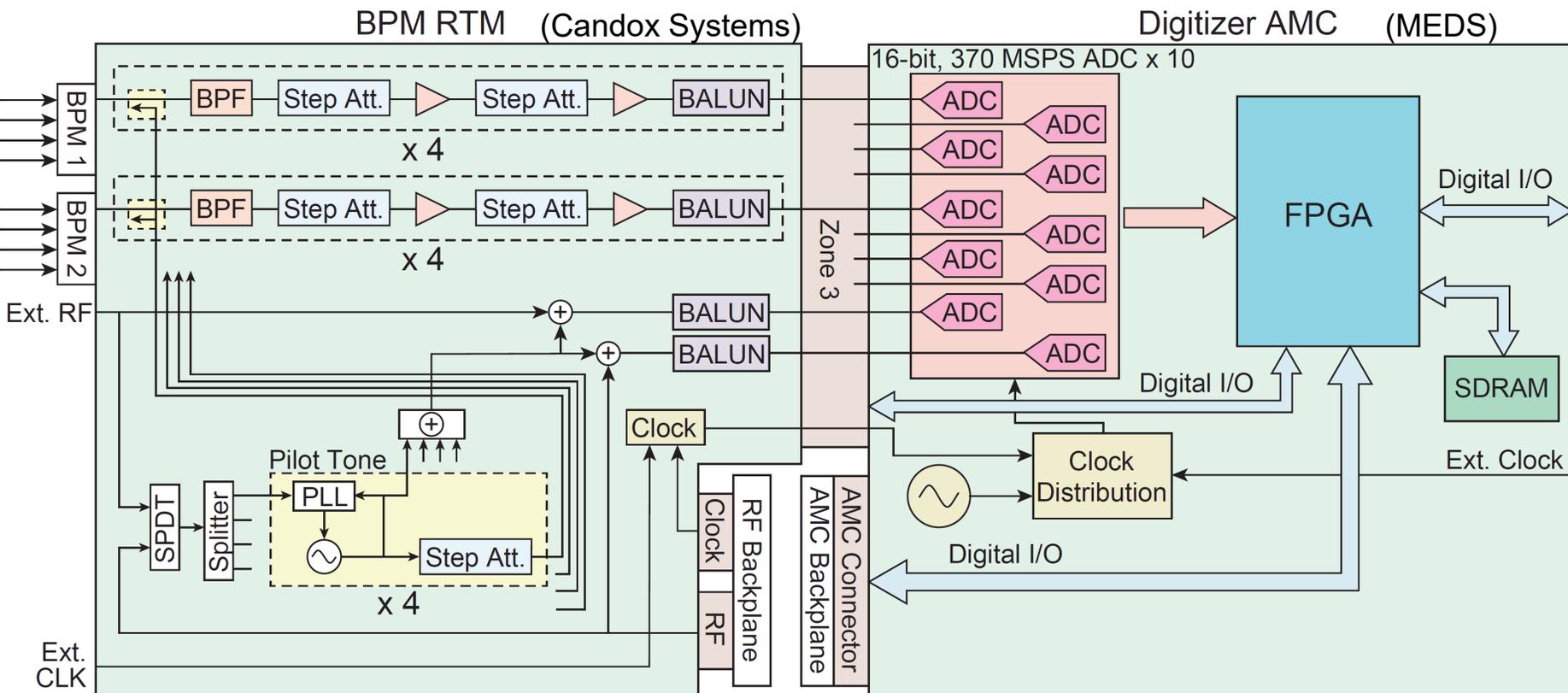


Mitsubishi Elec. Defence & Space Tech. (MEDS) and Oriental Microwave

# 読み出し回路 (μTCA.4)



- シングルパスデータ、及び、Turn-by-Turn (859 kHz), 10 kHz, 10 Hz の 3 種類のレートでデータを出力。



## • BPM フロントエンド RTM

- SAW BPF で 509 MHz を取り出す。
- ステップ減衰器・アンプでレベル調整 (0 ~ 63 dB)
- BALUN で差動に変換してデジタイザへ。
- 校正用のパイロットトーン発生器を内蔵。
- RF バックプレーン対応。

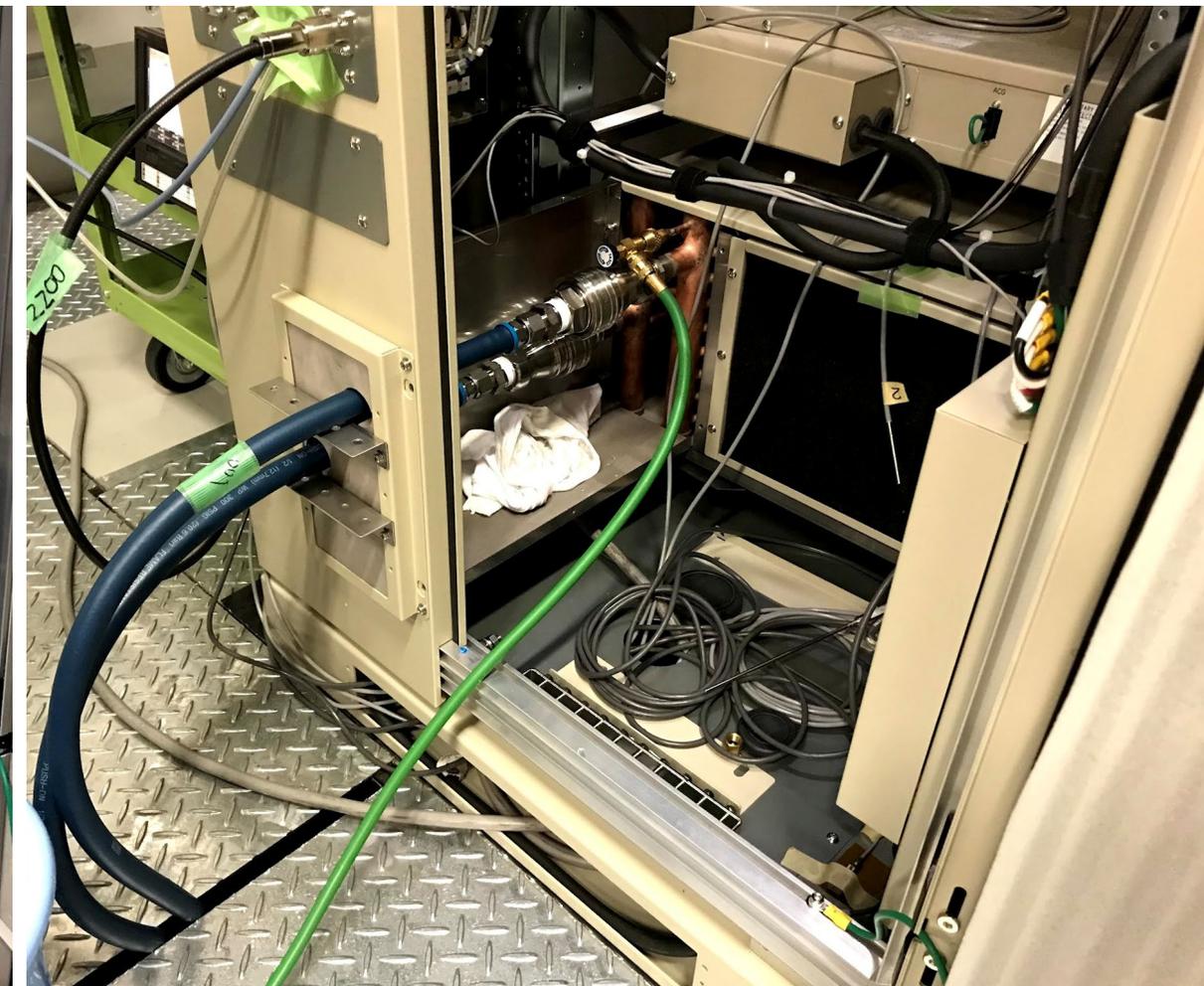
## • 高速デジタイザ AMC

- サンプリング周波数 318 MHz ( $f_{RF} \times 5 / 8$ )
- アンダーサンプリング法、中間周波数 127 MHz の波形データ。
- FPGA 内でデジタルダウンコンバートして IQ ベースバンドに変換し、振幅・位相を算出。
- $\Delta/\Sigma$  を計算してビーム位置データを得る。

# 水冷式恒温 19 インチラック

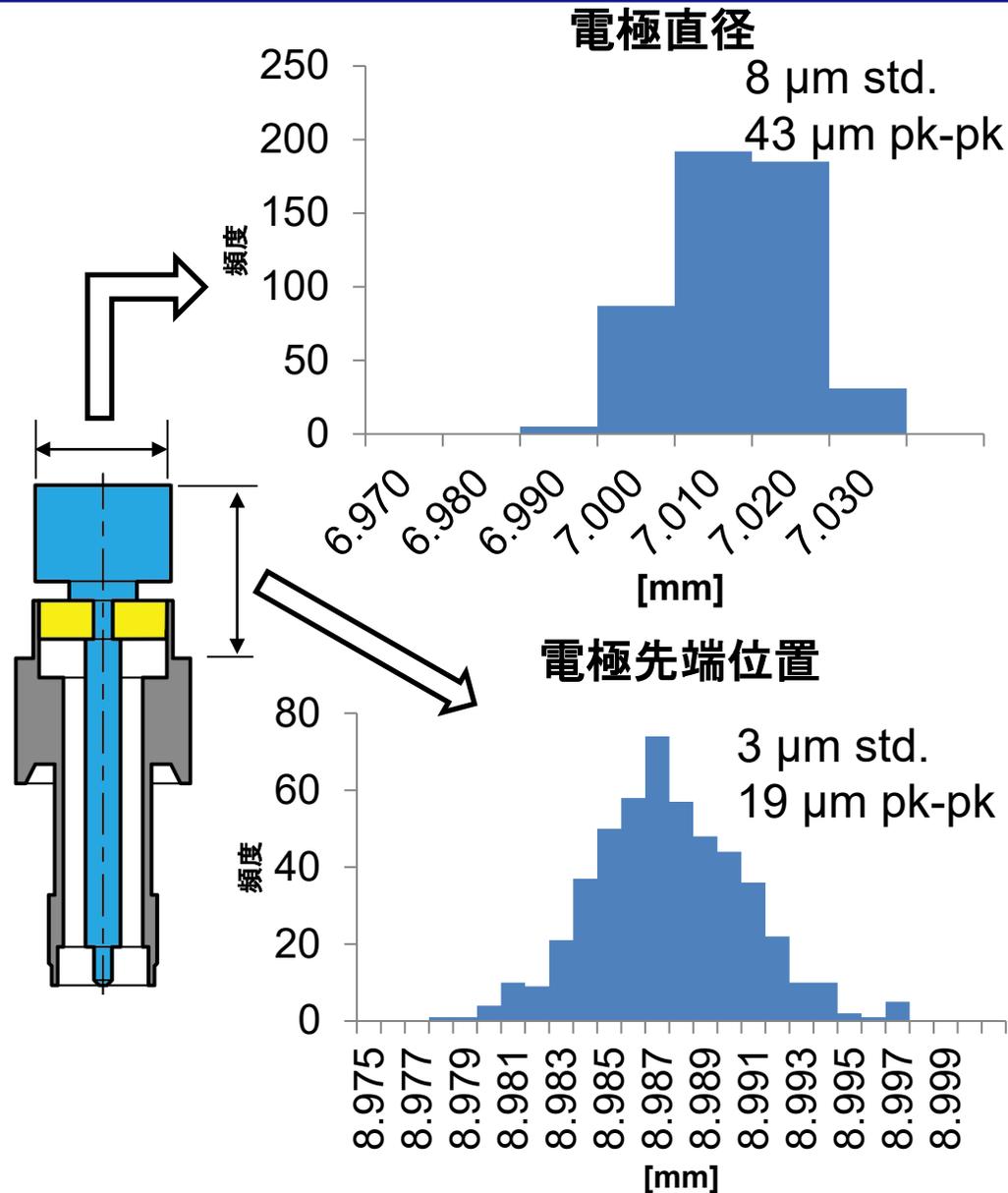


- 読み出し回路の温度安定化のため、19インチラックは断熱・密閉型とし、下部に水冷式熱交換器を設置。
  - 背面吸気、前面排気。
- 供給される冷却水は  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  程度の安定度 (実力値) を期待。(負荷ほぼ一定のとき)
  - 内部温度は a few  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  の安定度が見込まれる。



# BPM ヘッドの製作

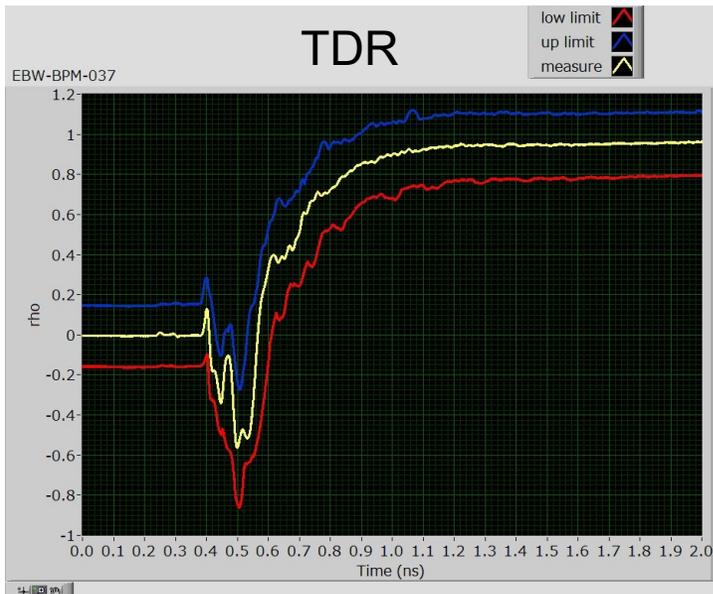
- BPM 電極、ブロックとも、10  $\mu\text{m}$  オーダの許容差を設けて高精度に製作。
- 寸法は電極単体、ブロックとも問題なし。
- 電極の電子ビーム溶接はダミー部品を用いて条件出し。
  - 電極先端位置の変化や溶け込み量を最適化。
  - 結果的に電極先端位置は全数 50  $\mu\text{m}$  pk-pk 以内に収まった。
- TDR 測定や S パラメータ測定で高周波特性を随時確認。
- 真空リーク試験、絶縁抵抗試験なども全数実施。
- 電極は一部抜き取りで熱サイクル試験、引張・ねじりの破壊試験も実施。
  - セラミック部やロウ付け部へのダメージは見られなかった。



S parameters



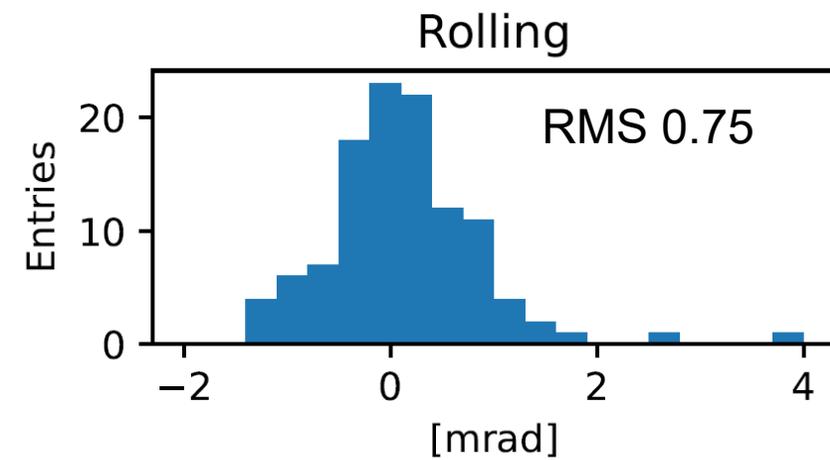
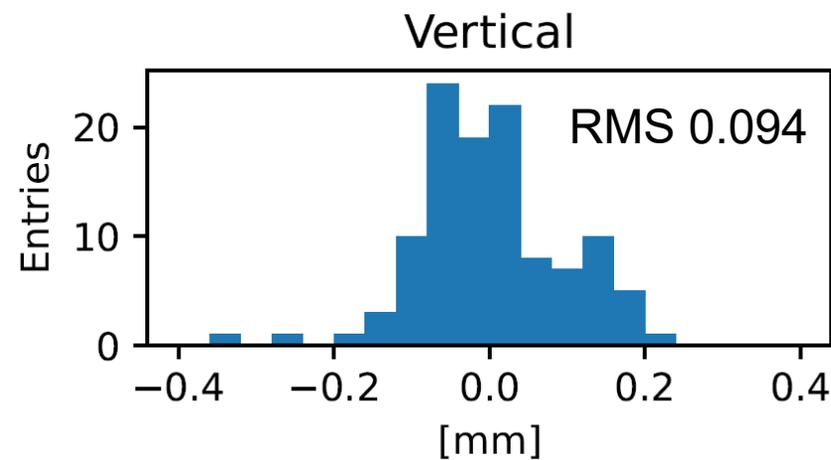
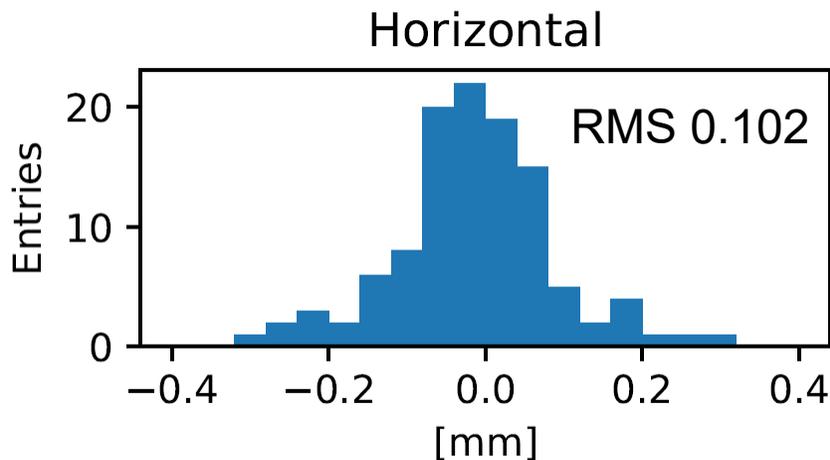
TDR



# BPM ヘッドの設置・アライメント



- BPM ヘッドは上下流の真空チェンバと溶接されて納品・据え付け。
- 熱膨張があっても BPM は固定点となるように架台を設計。
- 構造上 BPM を狙った位置にアライメントすることが困難なため、設置後の測量で位置のオフセットや傾き (rolling) を測定しておき、ビーム位置を補正する。
  - 設置位置精度は 0.1 mm RMS 程度
  - Rolling は 0.75 mrad RMS



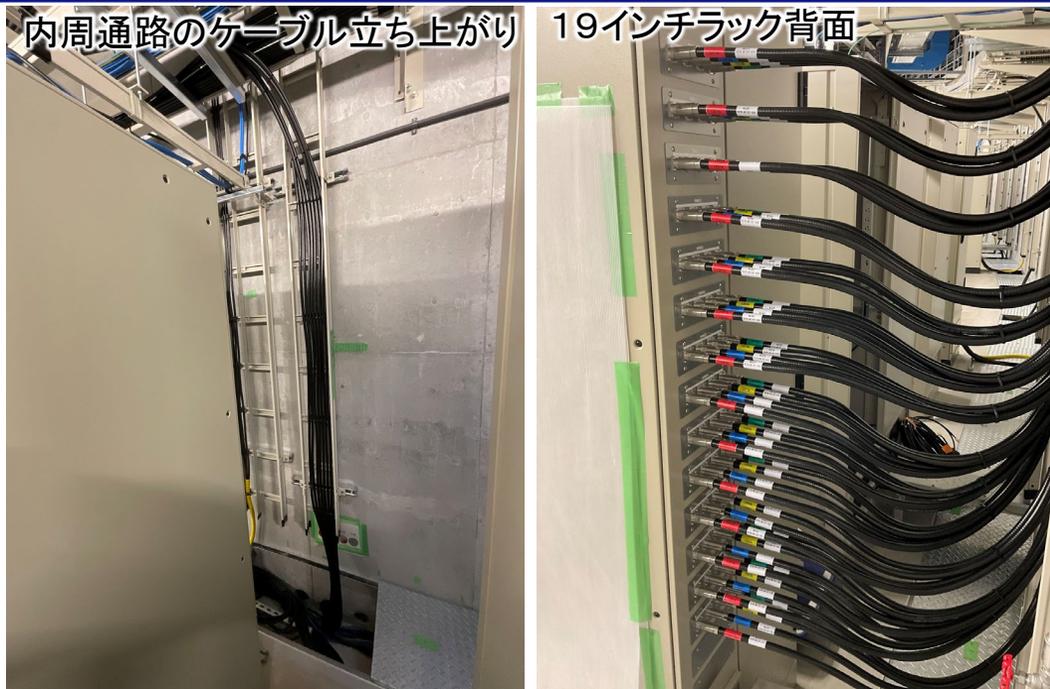
# 読み出し回路の設置・信号ケーブル敷設



19インチラック設置



BPM ヘッド付近の配線



内周通路のケーブル立ち上がり 19インチラック背面



トンネル内 架台脇の配線

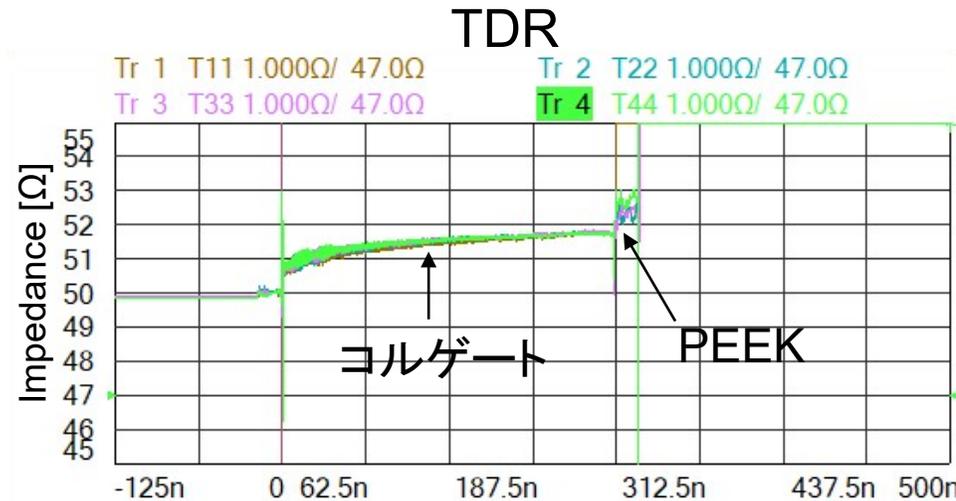


内周通路から床下ダクトにケーブル挿入

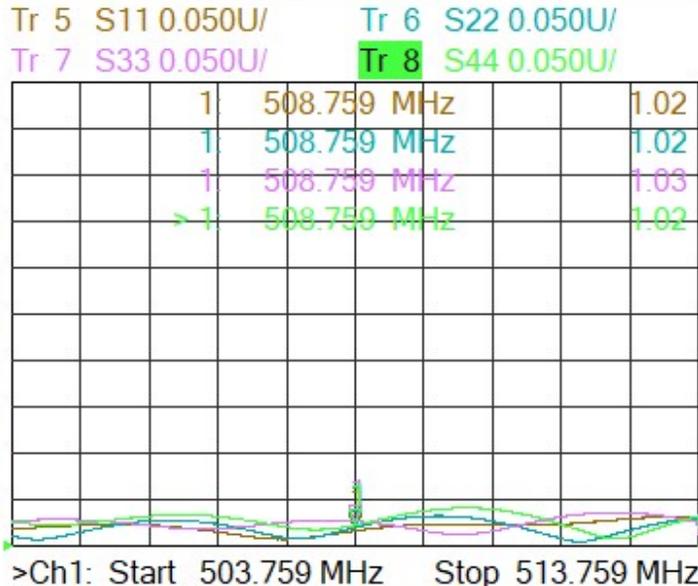
# 信号ケーブルの試験データ



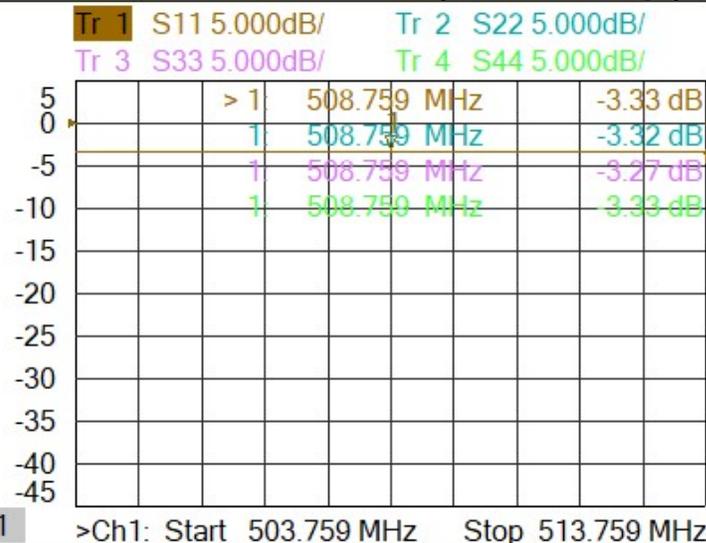
- ネットワークアナライザを用いて全数の高周波特性を確認。
- VSWR: 全数 1.05 以下 (509 MHz)
  - コルゲートケーブルのコネクタでの反射の影響で NG となるものが数本あったがコネクタを付け直して VSWR 1.05 以下にした。
- 挿入損失: 4本 1セット中の差は 0.1 dB 以内。
- その他のトラブル
  - 外皮の損傷が 1 本 (高周波的には問題なかったが新品と交換)
  - 電極のコネクタでの絶縁不良 (清掃すると直った)



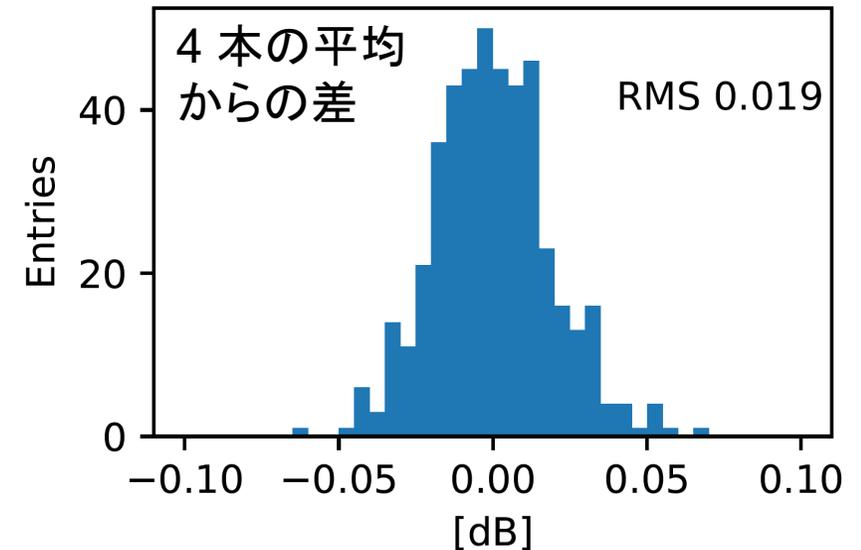
### VSWR



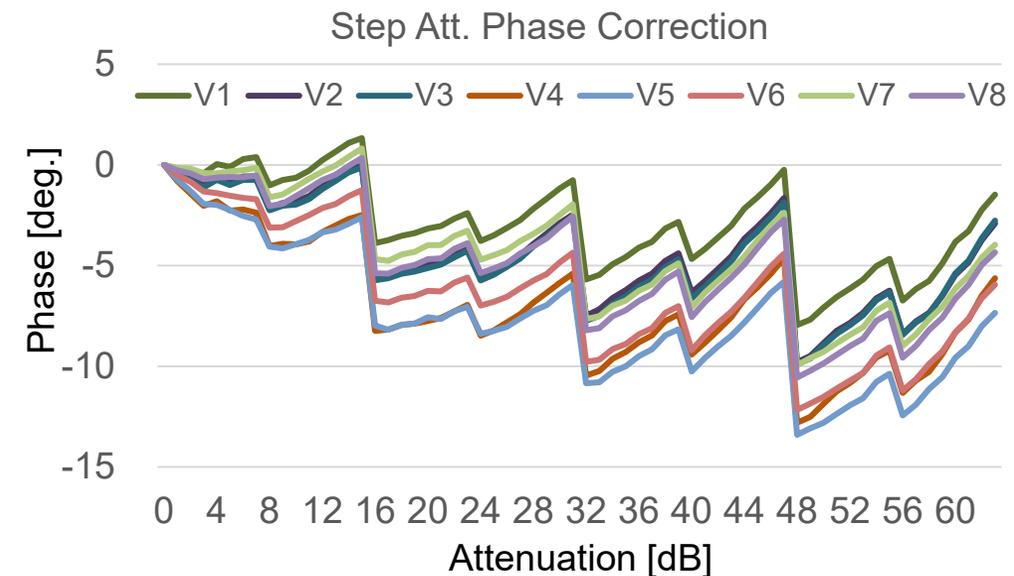
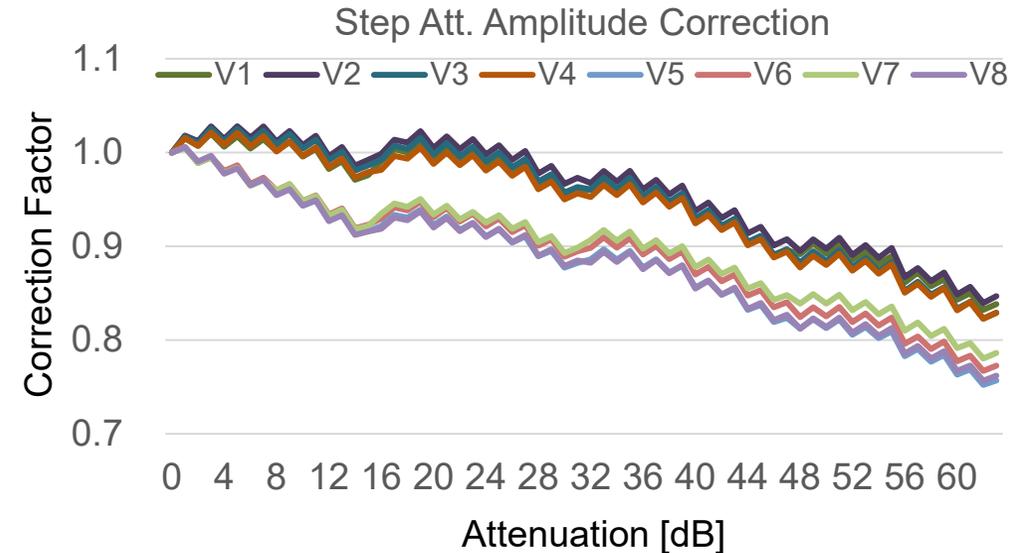
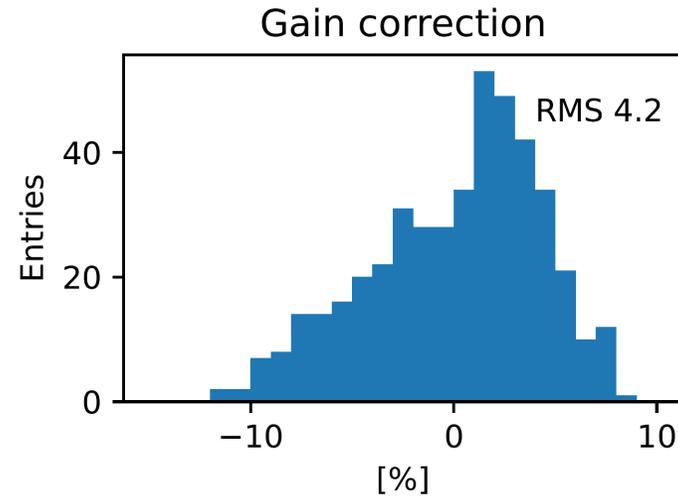
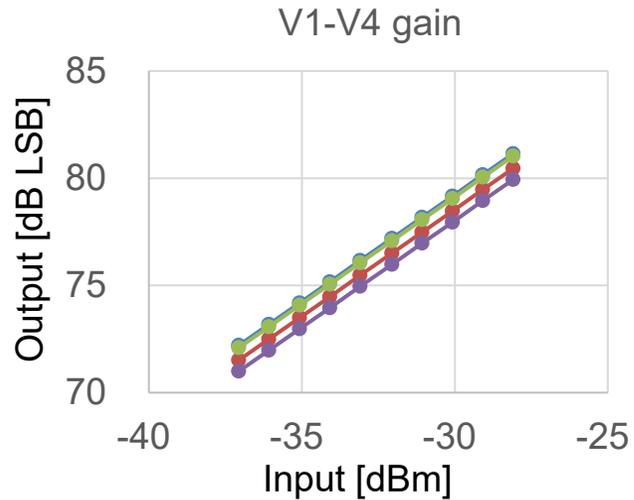
### Insertion Loss (round trip)



### Cable loss deviation



# 読み出し回路の試験データ

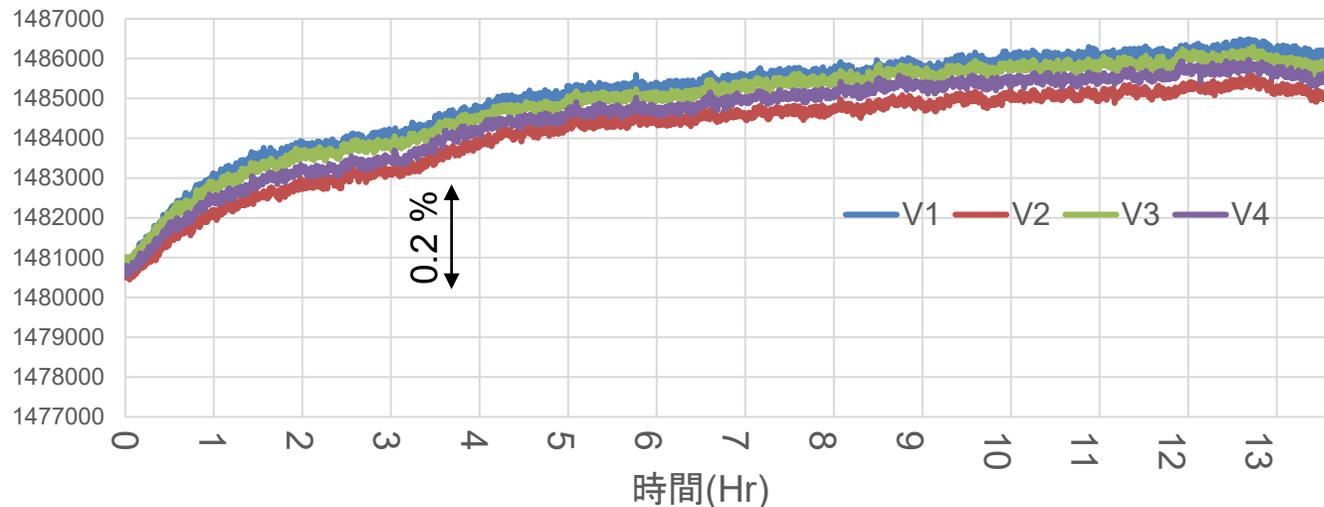


- チャンネルごとのゲインやステップアッテネータの減衰量・移相量を測定。
- このデータを使ってチャンネル間のゲインを補正する。
- MicroTCA.4 BPM 読み出し回路は高集積のため、部品間の特性のばらつき、インピーダンス整合、信号経路の違いなどにより  $\pm 10\%$  のゲインのばらつきが出る。
- 補正により誤差が  $1\%$  程度に抑えられれば電気中心精度  $100\ \mu\text{m}$  は達成可能。

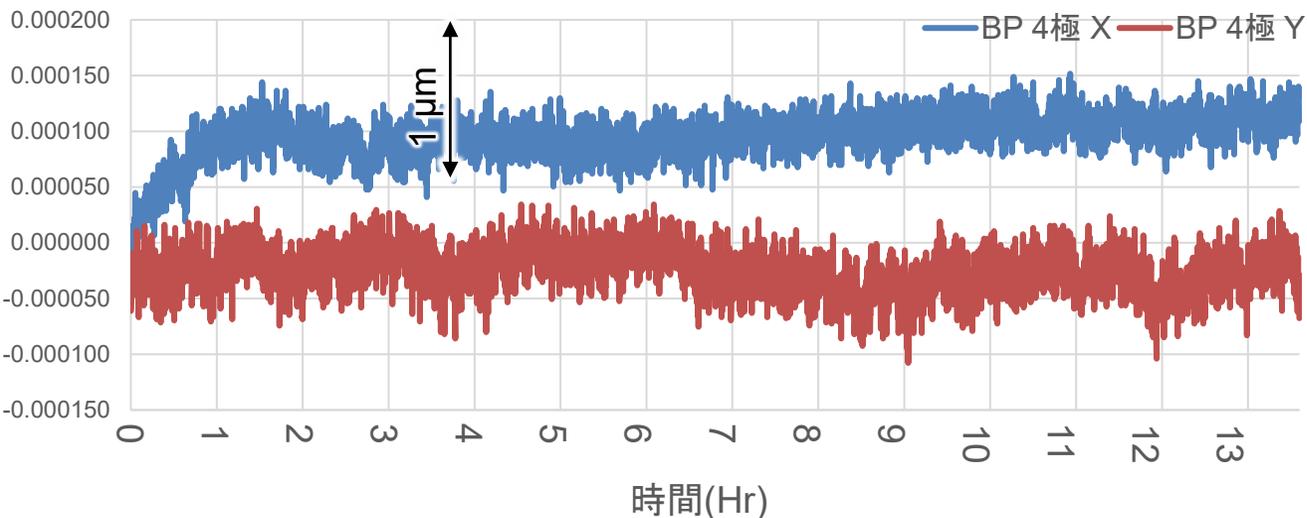
# 読み出し回路の安定性



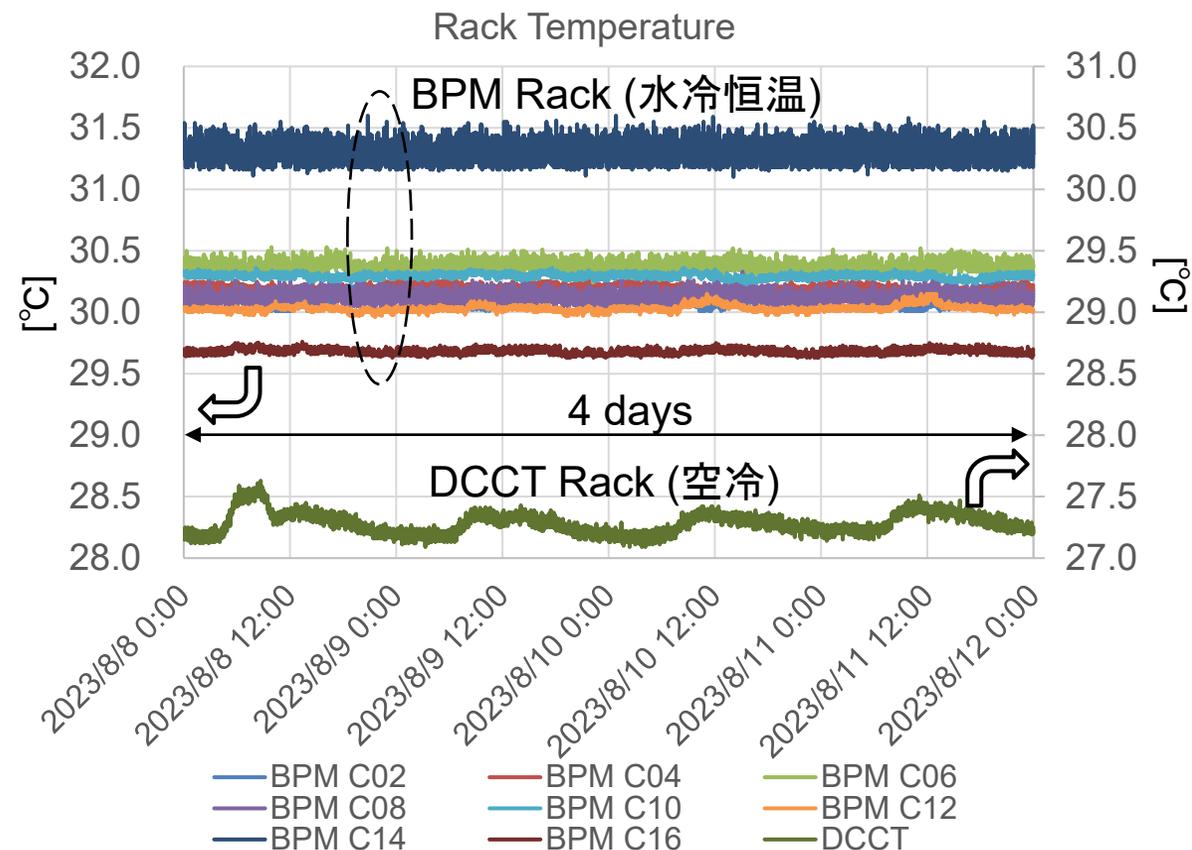
BPM振幅



位置演算結果



- BPM 回路
  - 一定の RF 信号を入れた場合、1  $\mu\text{m}$  相当のビーム位置安定度。
- 水冷ラック
  - 数日間にわたり 0.3  $^{\circ}\text{C}$  pk-pk ほど。





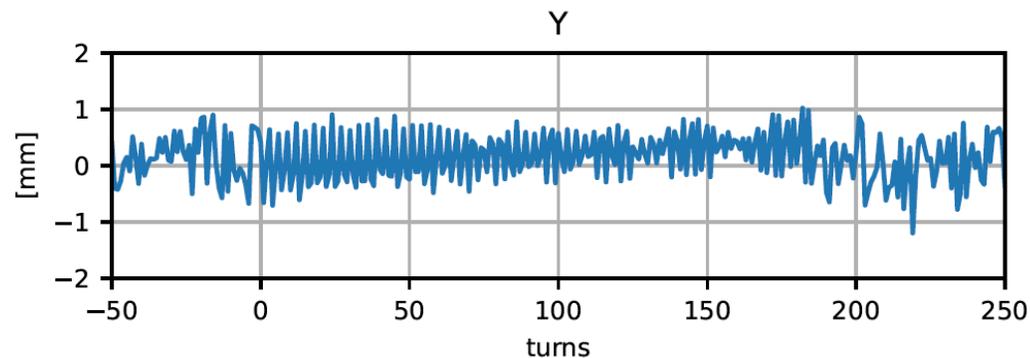
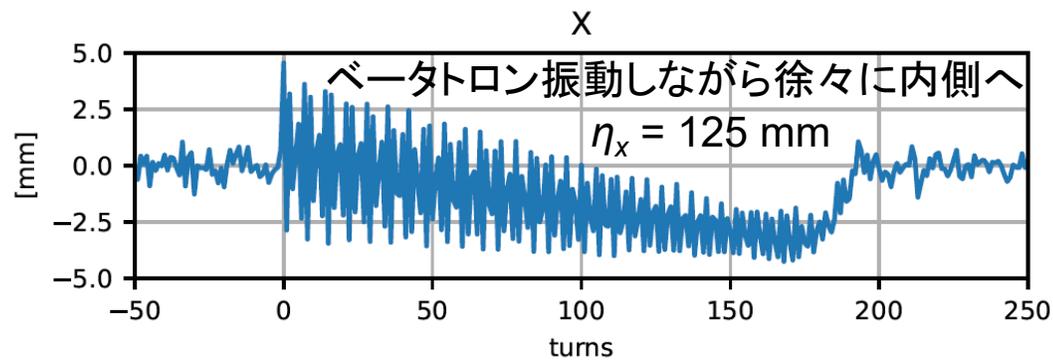
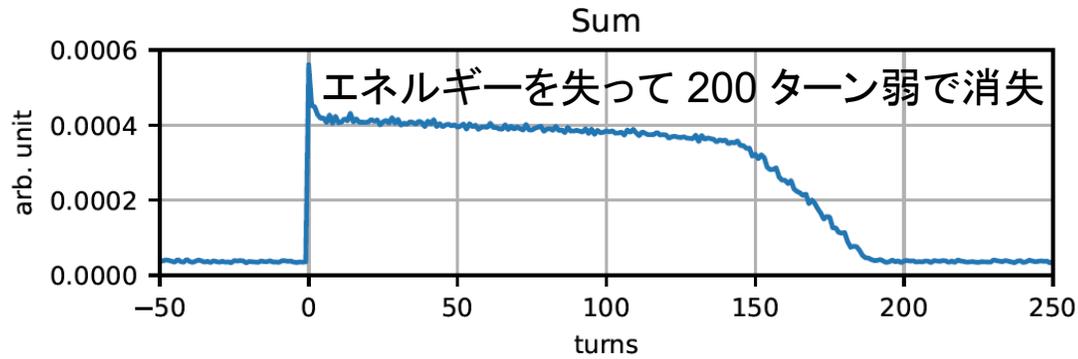
- BPM システムの準備が整うとともに、入射線型加速器や蓄積リングへのビーム輸送路の調整がひととおり進むと蓄積リングへのビーム入射を始めた。
- シングルパス BPM の調整
  - 入射トリガで BPM からの生信号波形を取得してタイミングを調整。
  - 周回信号とのタイミングも調整。
- リング入射部の調整 (RF OFF)
  - リング入射部の下流の BPM のシングルパスデータを見ながら調整。
  - ある程度調整が進むと一気に数 100 ターン周回するようになった。
- RF でビームがキャプチャできるようになると COD 測定も開始。

# シングルパスデータ

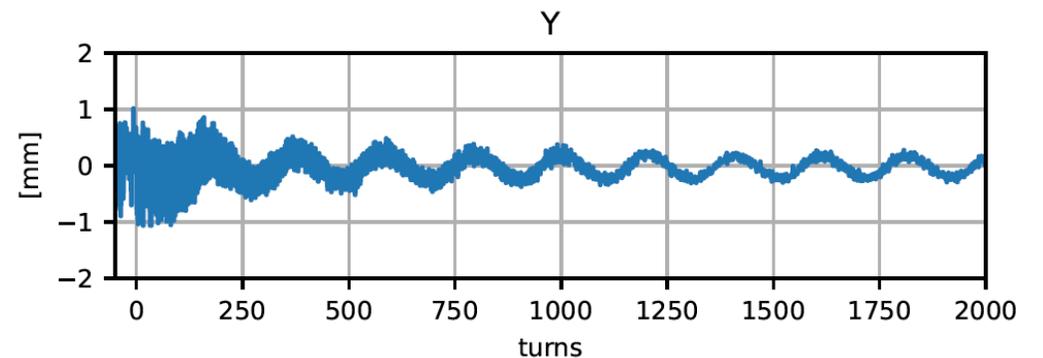
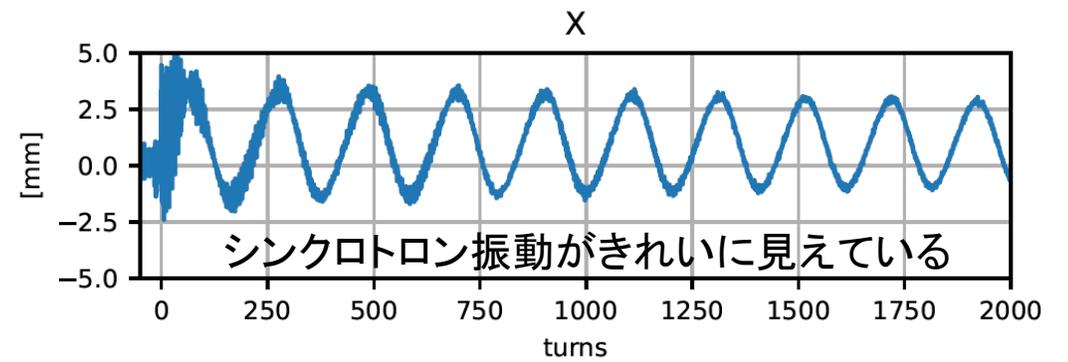
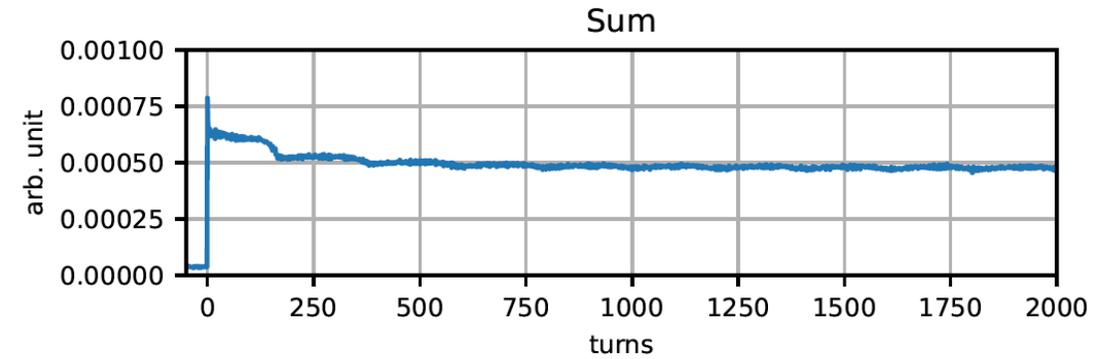
C04 BPM 2



RF OFF



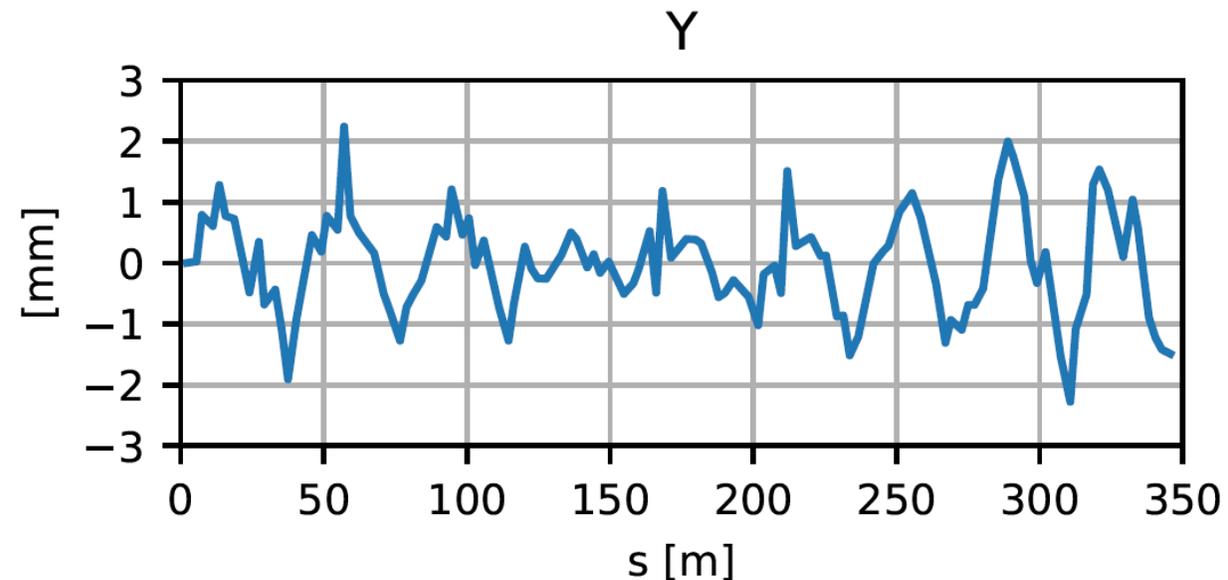
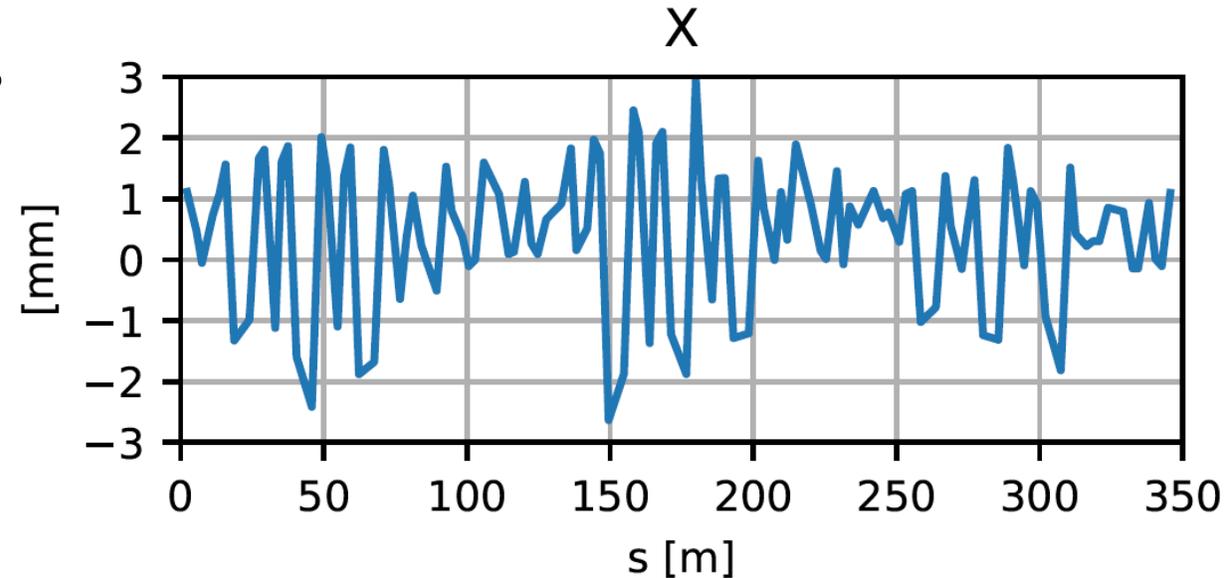
RF ON



# COD データ



- COD BPM は常時 10 Hz でデータ収集。
  - 必要に応じて Turn-by-Turn (859 kHz) や 10 kHz のデータも取得可能。
- 右図は軌道補正前の最初の COD データ (蓄積電流 約 0.1 mA)。
  - COD が水平方向  $\pm 3$  mm、垂直方向  $\pm 2$  mm 程度と非常に小さかった。
  - 水平・垂直ともチューンの整数部くらいの回数の振動が見えている。
  - チューン: 水平 28.17、垂直 9.23
- 電気中心誤差が大きすぎて調整に支障が出るような状況にはなっていない。
- まだ評価すべき項目が多くあるので順次進めていく予定。
  - 多極磁石の磁場中心からのズレ。
  - 位置分解能や長期安定性。



# まとめと今後



- 次世代放射光施設 NanoTerasu の蓄積リング用 BPM システムを構築した。
  - SPring-8-II 向けに開発したものをベースに設計。
  - 予定どおり製作、設置が完了。
- ボタン電極型 BPM ヘッド
  - モリブデン製のボタン電極をステンレス製のブロックに接合する形で設計・製作。
- 信号ケーブル
  - 耐放射線性を考慮したPEEK セミリジッドケーブルとコルゲート同軸ケーブルを選定、敷設。
- 読み出し回路
  - MicroTCA.4 をベースにした、シングルパス・COD の両方に対応したシステム。
- ビームコミッショニング
  - シングルパス BPM のタイミング調整などを行い、入射ビームの軌道を適切に取得できた。
  - RF キャプチャできるようになると COD 測定も開始。
  - 電気中心誤差が大きすぎて困るようなことにはなっていない。
- 今後の課題
  - ビームを使って多極磁石の磁場中心からの変位を測定し、BPM 電気中心の評価・調整を行う。
  - 位置分解能や長期安定度などの基本性能の評価。
  - 近い将来に建設予定の SPring-8-II の BPM システムへのフィードバック。

# 謝辞



- ご清聴ありがとうございました。
- 本BPMのヘッド部分を設計・製作・設置するにあたり JASRIの田村和宏氏、大石真也氏、小路正純氏、安積則義氏に多大なるご協力をいただきました。
- BPMヘッドの設置・アライメントの際には理研の平岩聡彦氏、スプリングエイトサービスの井上忍氏、住友博史氏、森谷佳津貴氏、横町和俊氏に大変お世話になりました。
- 本 BPM システムの構築には多くのメーカーの方々のご尽力を賜りました。
- この場を借りて感謝申し上げます。