

SPring-8アップグレードに向けた ビーム位置モニタの開発

前坂比呂和、出羽英紀、藤田貴弘、正木満博、高野史郎

理研 放射光科学研究センター

高輝度光科学研究センター

2018.8.8.

第15回 日本加速器学会 年会

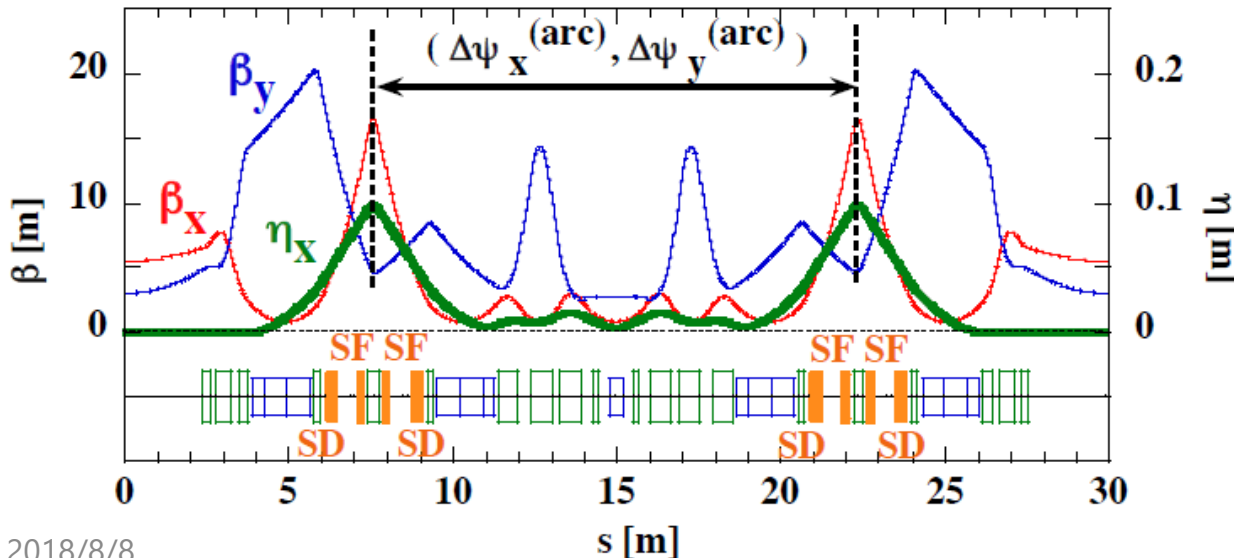
内容

- イントロダクション
 - SPring-8 アップグレード
 - BPM システムの概要
- BPM の設計
 - BPM 電極・ブロック・ケーブル・回路
- ビーム試験
 - 信号強度・波形・位置分解能・電気中心精度・長期安定性・温度上昇
 - 信号ケーブルの耐放射線性の評価
- 試験用ハーフセル
 - 物理的干渉・アライメント精度・振動等の評価
- まとめ

SPring-8 アップグレードと BPM

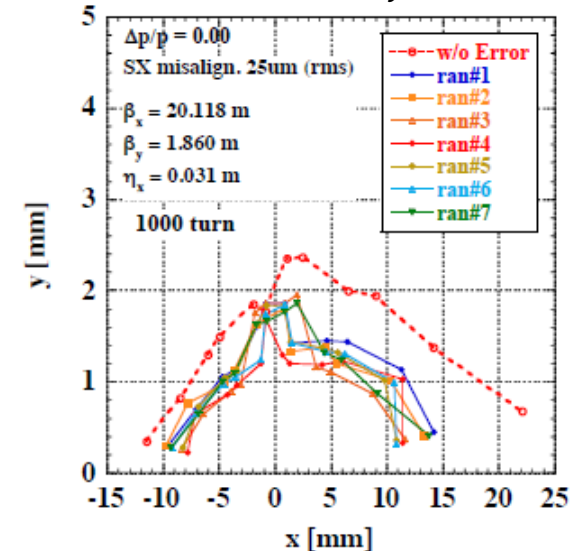
- SPring-8 アップグレード計画
 - ビームエネルギー: 6 GeV
 - ラティス: 5-bend achromat (5BA)
 - エミッタンス: ~ 140 pm rad
- 放射光軸の安定性とコミッショニング時の軌道補正を BPM で担保する
- 光軸の安定性は高輝度 X 線を有効利用するために極めて重要
 - 光源サイズ $\sim 28 \times 6 \mu\text{m}^2$ rms, 光の拡がり角 $\sim 5 \times 17 \mu\text{rad}$ rms @ 10 keV
 - ビーム軌道の安定性: $\sim 1 \mu\text{m}$, $\sim 1 \mu\text{rad}$ (COD mode)
- コミッショニング時の First-turn steering にて、狭いダイナミックアパーチャにビーム軌道を適切に導く必要あり (Single-pass (SP) mode)

Linear Optics



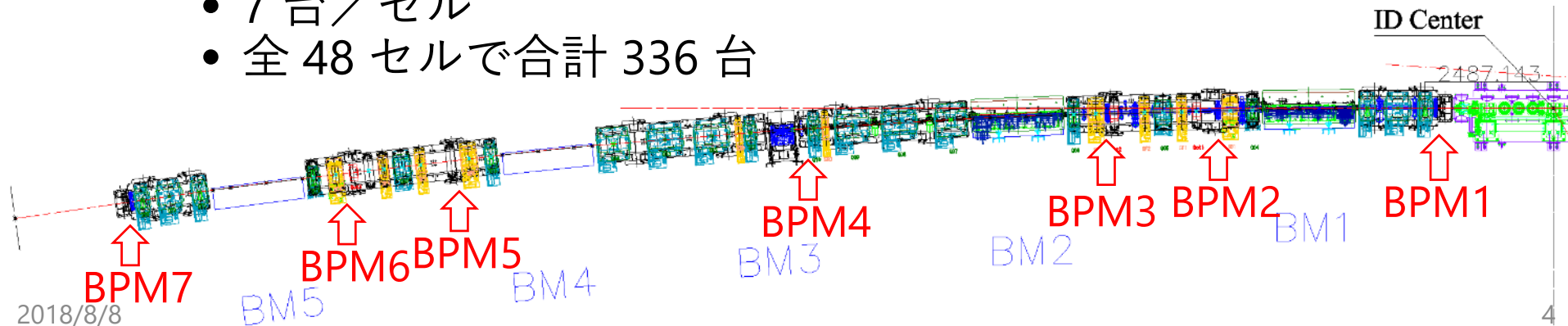
Dynamic Aperture

$$\beta_x = 20.1 \text{ m}, \quad \beta_y = 1.86 \text{ m}$$



BPMシステムの概要

- **BPM** システムに対する要求性能
 - 位置分解能
 - COD mode: **0.1 $\mu\text{m rms}$** (100 mA, 1 kHz bandwidth)
 - SP mode: **100 $\mu\text{m rms}$** (100 pC single-bunch)
 - 長期安定性
 - COD mode: **5 $\mu\text{m peak-to-peak}$ for 1 month**
 - 絶対精度
 - COD mode: **10 $\mu\text{m std.}$** after beam-based alignment
 - SP mode: **100 $\mu\text{m std.}$** (2σ max.)
- **BPM** の形式: ボタン電極型
- **BPM** 配置
 - 7 台/セル
 - 全 48 セルで合計 336 台



BPM 電極・ブロック・ケーブル

• BPM 電極・ブロック

• 電極材質: モリブデン

- 非磁性
- 高い電気伝導率で発熱を低減
- 絶縁体セラミックと同等の線膨張率

• 電極サイズ: $\Phi 7 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$

• 電極穴径: 8 mm (gap 0.5 mm)

• 電極間隔: 12 mm (H) x 16 mm (V)

- 十分な信号強度が得られること
- Trapped mode の影響が小さいこと

• ブロック材質: SUS-316L

- モリブデンに比べて電気伝導率が低く、Trapped mode 等による発熱は主にブロック側で起こる

• 水冷式として温度を安定化

- 温度上昇による変形を抑制

• 試作結果

• 工作精度

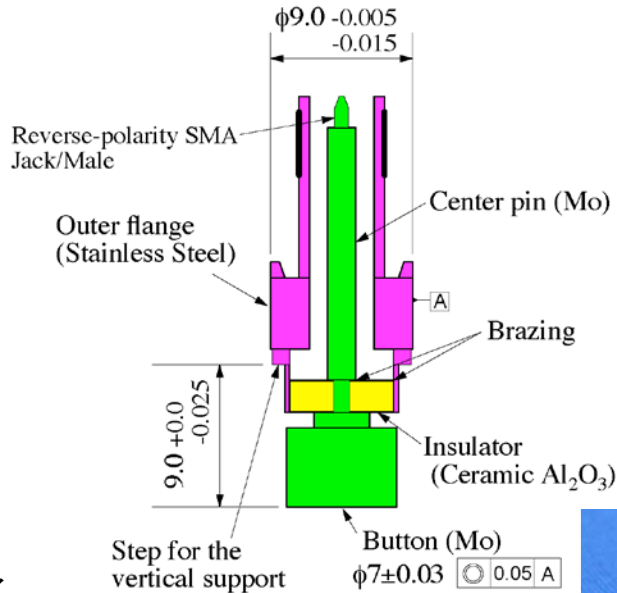
- 10 μm オーダの厳しい許容差をクリア

• 電子ビーム溶接による接合

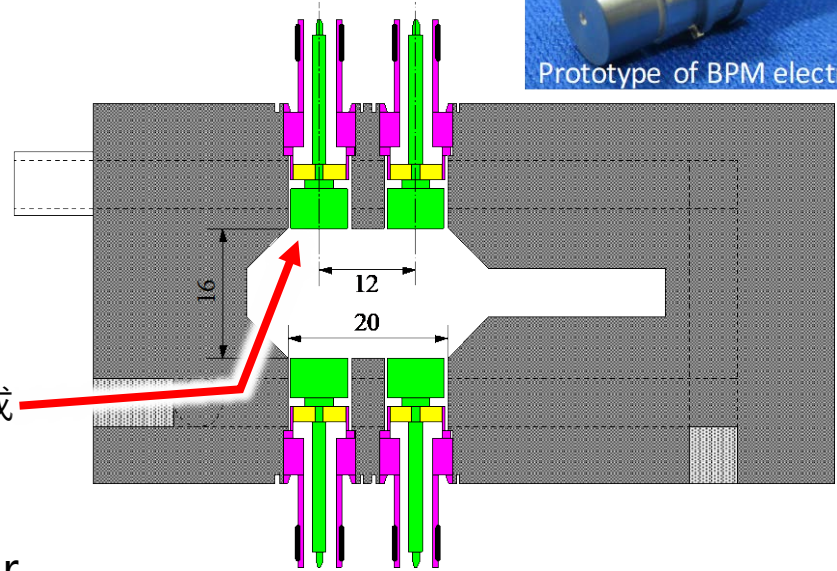
- ボタン面の引っ込み量 50 μm 以下を達成
- 電気中心のずれ < 80 μm (計算)

• 信号ケーブル

- 電極に接続するのは耐放射線の SiO_2 or PEEK セミリジッドケーブルとする



Prototype of BPM electrode

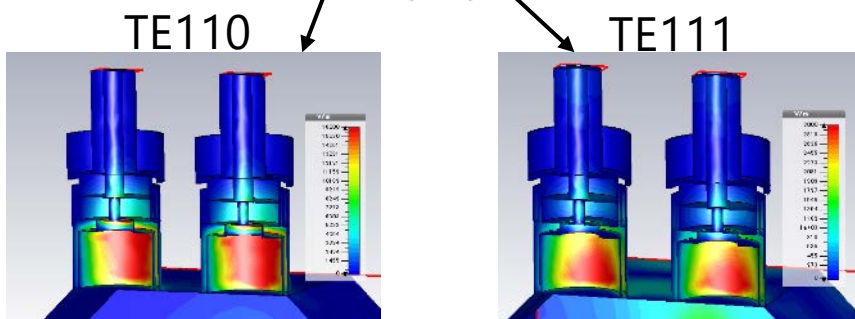
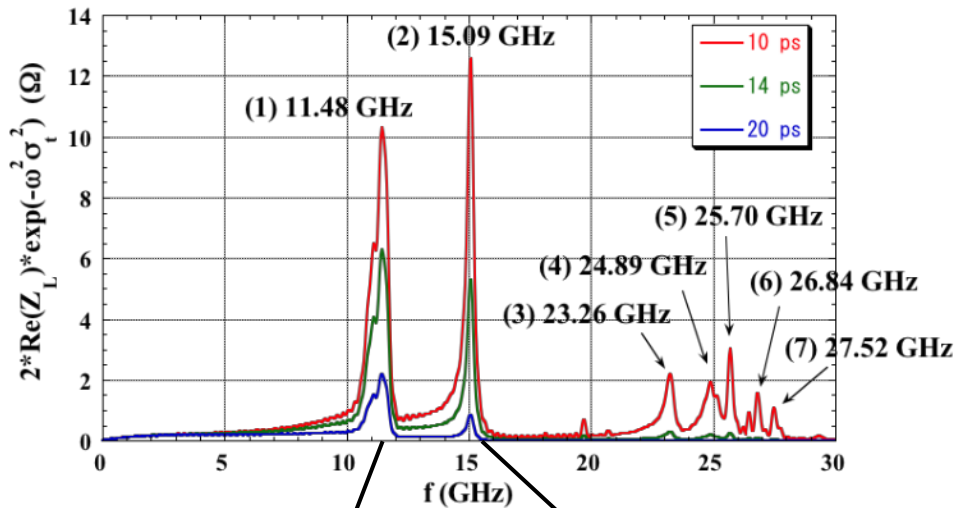


内面の断面形状は上下流の真空チェンバと同じ

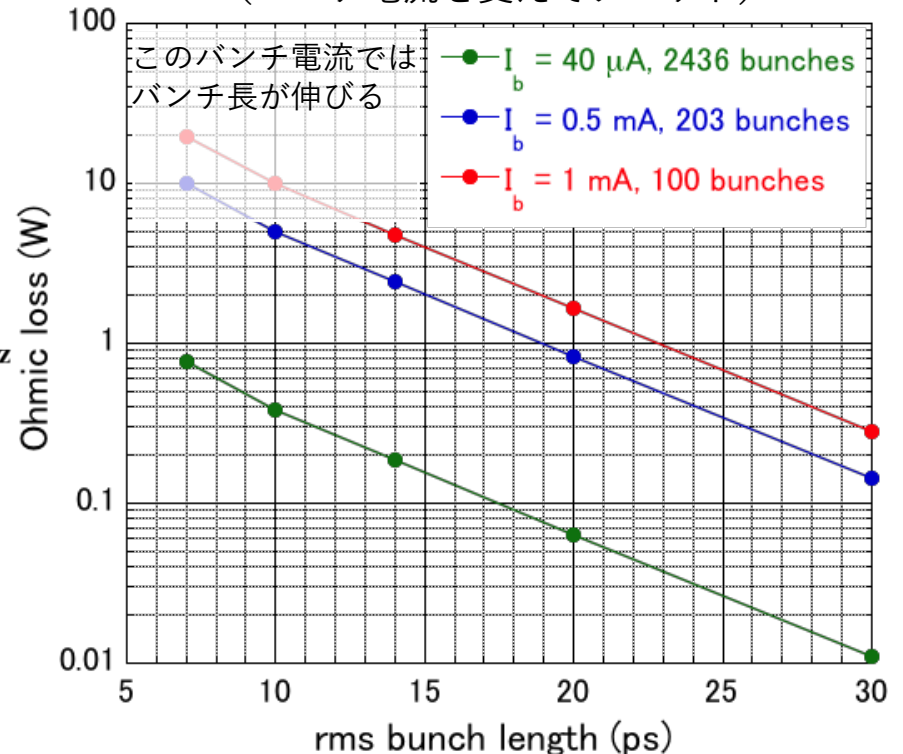
ビームによる発熱

- Trapped mode をシミュレーションで解析して発熱とその分布を求めた
- バンチ長はバンチ電流に依存
 - 0.5 mA/bunch では 10 ps 以上、1 mA/bunch では 14 ps 以上となる見込み
- BPM の発熱量は 5 W 以下 (100 mA total current)

Trapped mode の周波数分布
(バンチ長を変えてプロット)

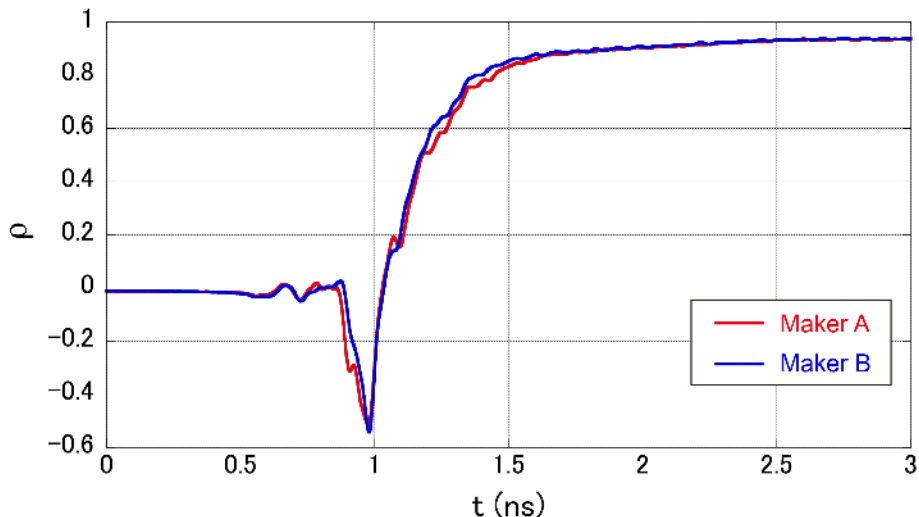


発熱量のバンチ長依存性
(バンチ電流を変えてプロット)

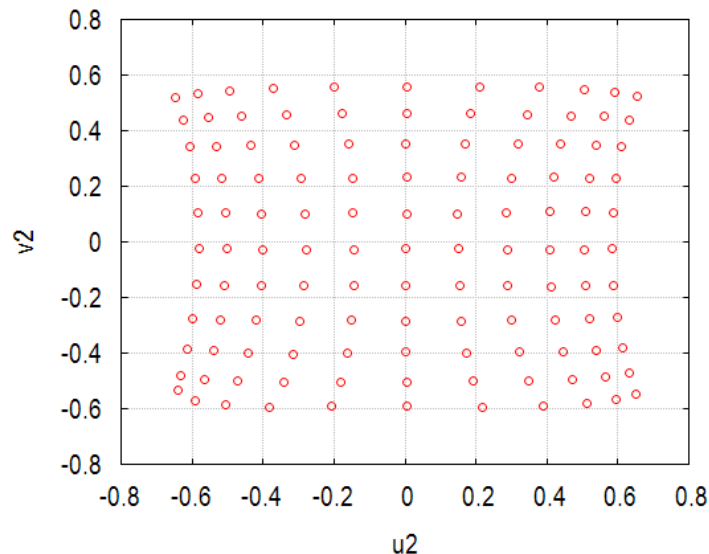


試作した BPM 電極・ブロックの評価

TDR 波形 (2社での試作品の比較)



BPM マップ測定



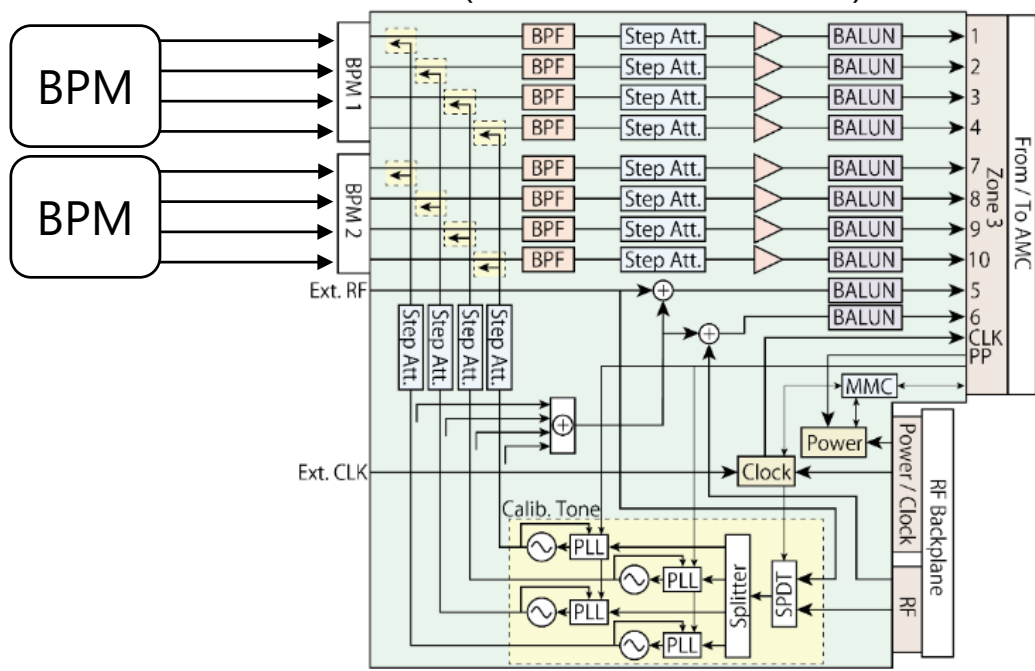
- Time-Domain Reflectometry (TDR) による電極の高周波特性評価
 - 2社で試作し、ほぼ同じ特性のものが得られた
 - 計算値とも矛盾しない
 - 両社とも十分な工作精度で製作できた
- BPM マップ測定
 - BPM にアンテナ挿入して RF 信号を印加し、アンテナ位置をスキャン
 - 計算どおりの位置感度係数が得られた

$$U_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2} + \frac{v_4 - v_3}{v_4 + v_3} \right),$$
$$V_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{v_1 - v_4}{v_1 + v_4} + \frac{v_2 - v_3}{v_2 + v_3} \right)$$

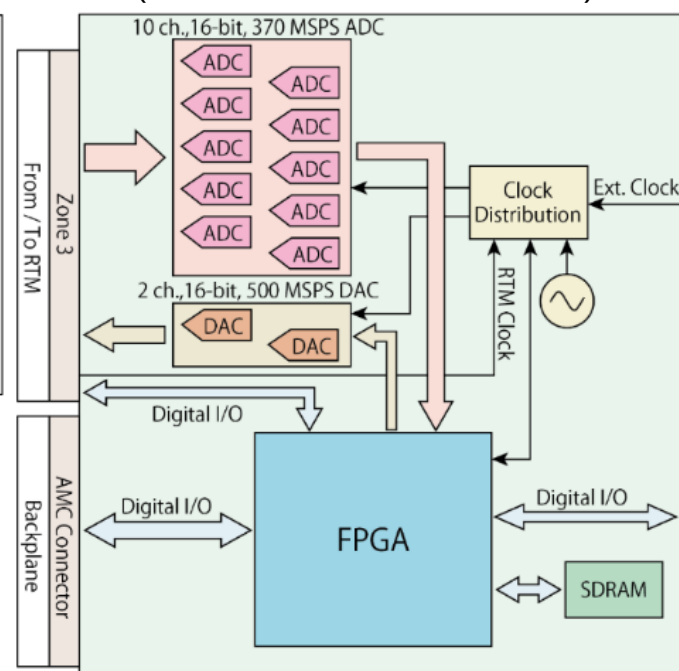
位置感度係数	計算	測定
水平方向 [mm]	6.8	6.7
垂直方向 [mm]	7.7	7.6

BPM 回路

RFフロントエンド (RTM) (Rear Transition Module)



高速デジタイザ (AMC) (Advanced Mezzanine Card)

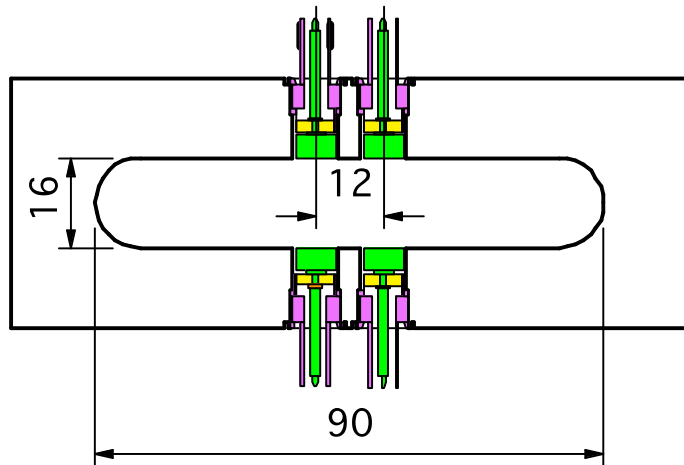


- MicroTCA.4 高速デジタイザを使用した回路を開発中
 - デジタイザは LLRF のものと同じ (10 ch., 370 MSPS, 16-bit ADC)
- 回路構成
 - Band-pass Filter で 508 MHz 成分を取り出す
 - Step Att., Amp. でレベル調整
 - アンダーサンプリング方式で検波
- バックアップとして Libera Brilliance+ を評価
 - 実験室、ビーム試験とも



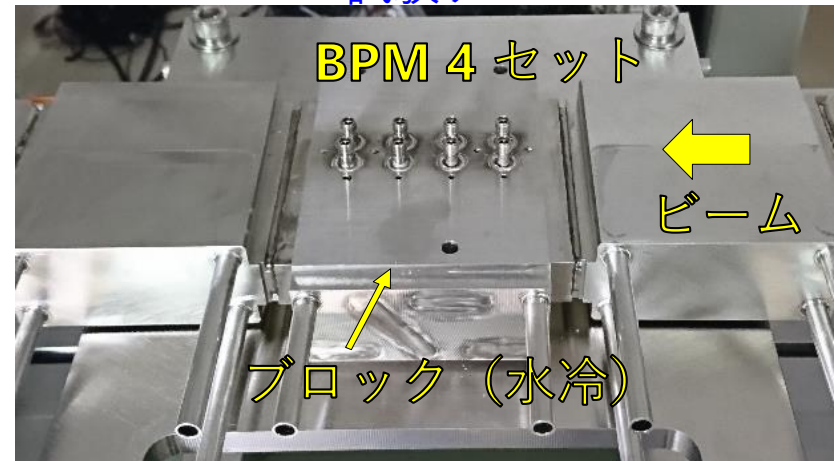
ビーム試験 (現 SPring-8 蓄積リングにて)

チェンバ断面



垂直開口、電極スパンはSPring-8-II に合わせた

ビーム試験チェンバ

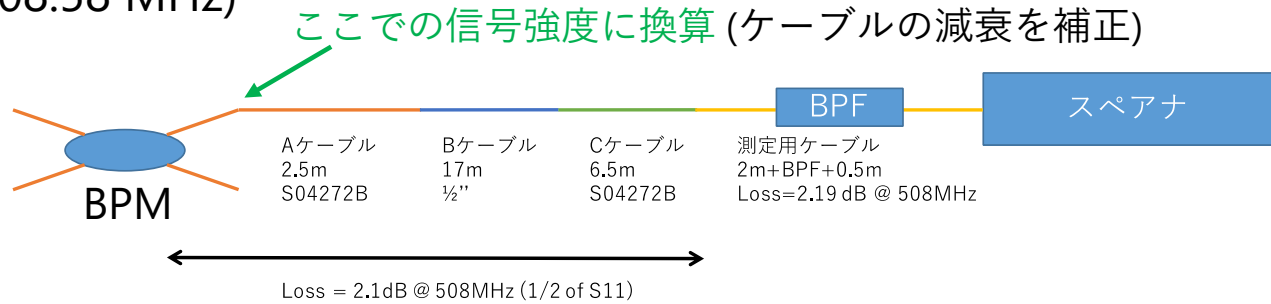


- 目的
 - 実際の電子ビームで BPM システム全体としての性能を実証するため
- 評価内容
 - BPM 電極・ブロック単体での 信号強度・波形・温度上昇
 - BPM システム全体としての 位置分解能・長期安定性・電気中心精度
- セットアップ
 - BPM 4 セット
 - 電極・電極間隔・垂直開口は実機と同じ
 - 耐放射線同軸ケーブル使用
 - 回路は Libera Brilliance+

信号強度・波形

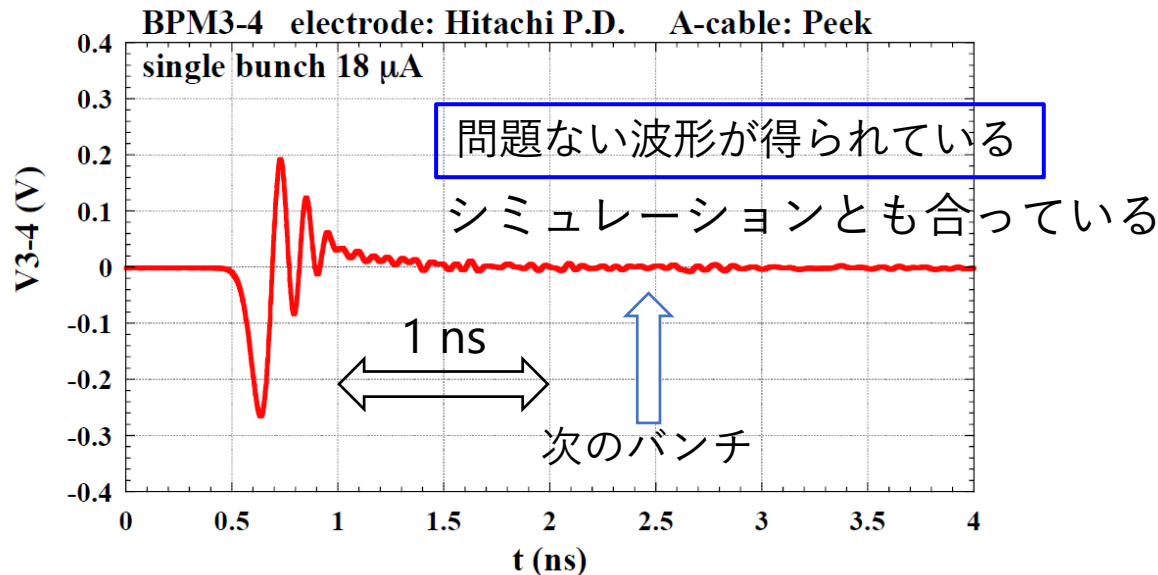
100 mA 蓄積時の信号強度 (508.58 MHz)

BPM	4 電極の平均パワー
BPM-1	-12.58 dBm
BPM-2	-12.66 dBm
BPM-3	-12.35 dBm
BPM-4	-13.31 dBm
計算値	-12.5 dBm



計算どおりの信号強度が得られている

信号波形 (Single-bunch)

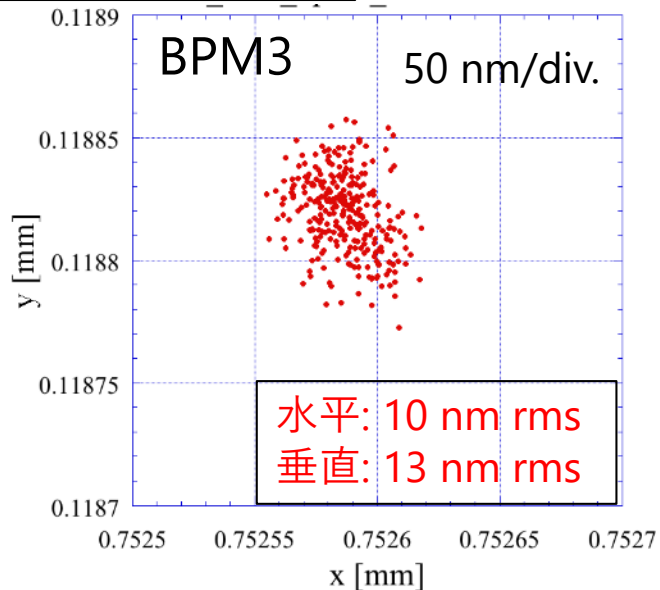
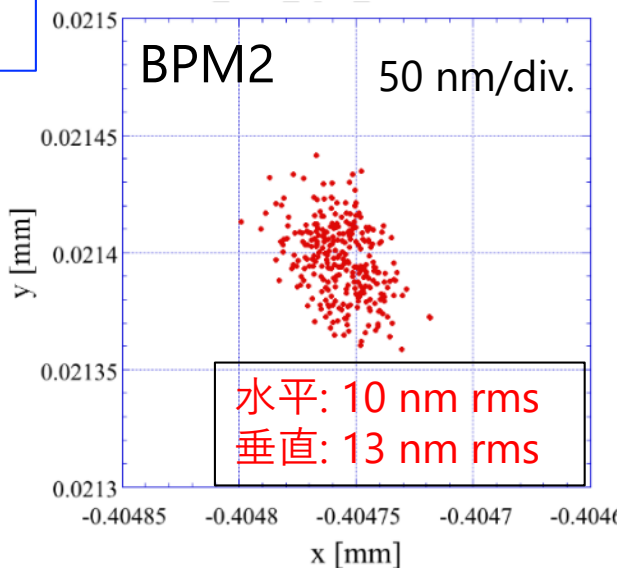
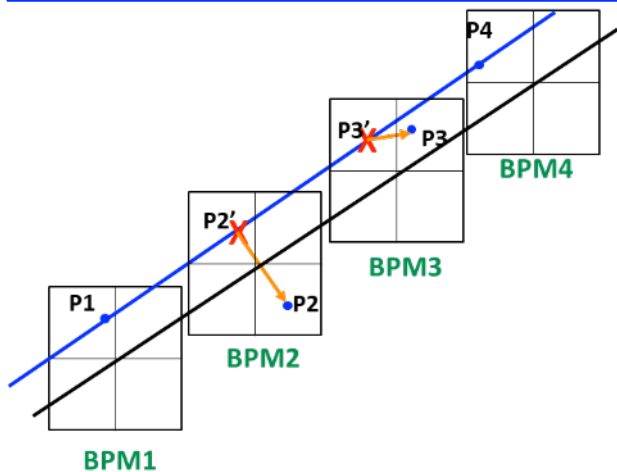


位置分解能 (Libera)

COD 位置分解能 (Slow Acquisition [SA] 10 Hz)

BPM2,3のBPM1,4との相対位置のばらつきから評価

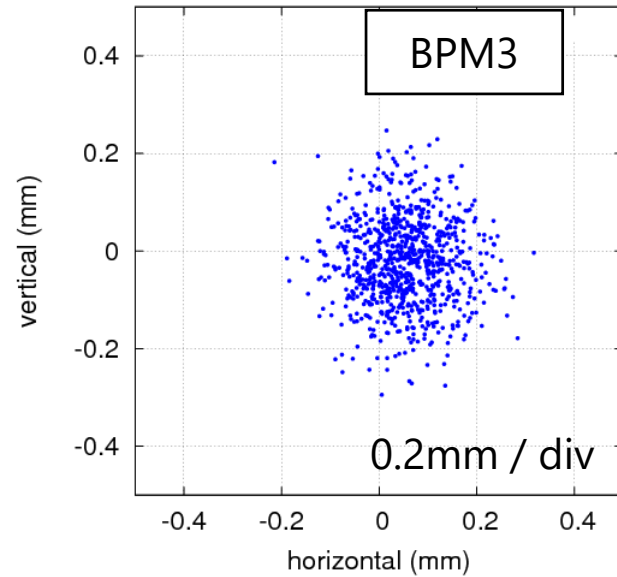
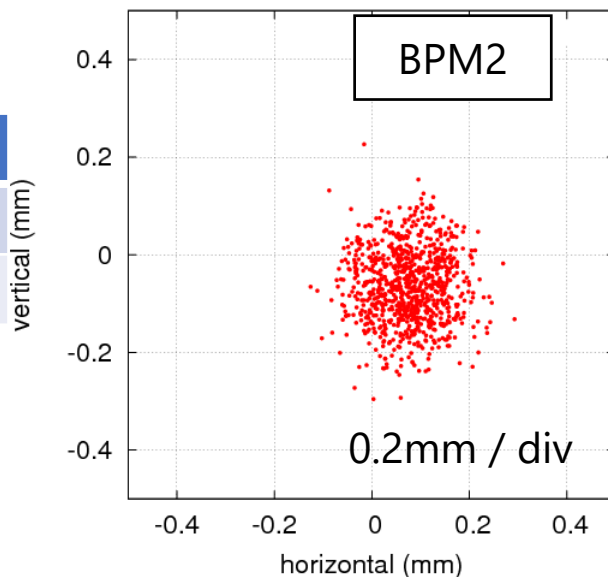
Aモード (203 bunches) 100 mA



First Turn Steering 用 Single Pass データ (turn-by-turn, 100 pC シングルバンチ)

	水平 (μm)	垂直 (μm)
BPM2	65.5	75.3
BPM3	78.8	87.8

< 100 μm rms

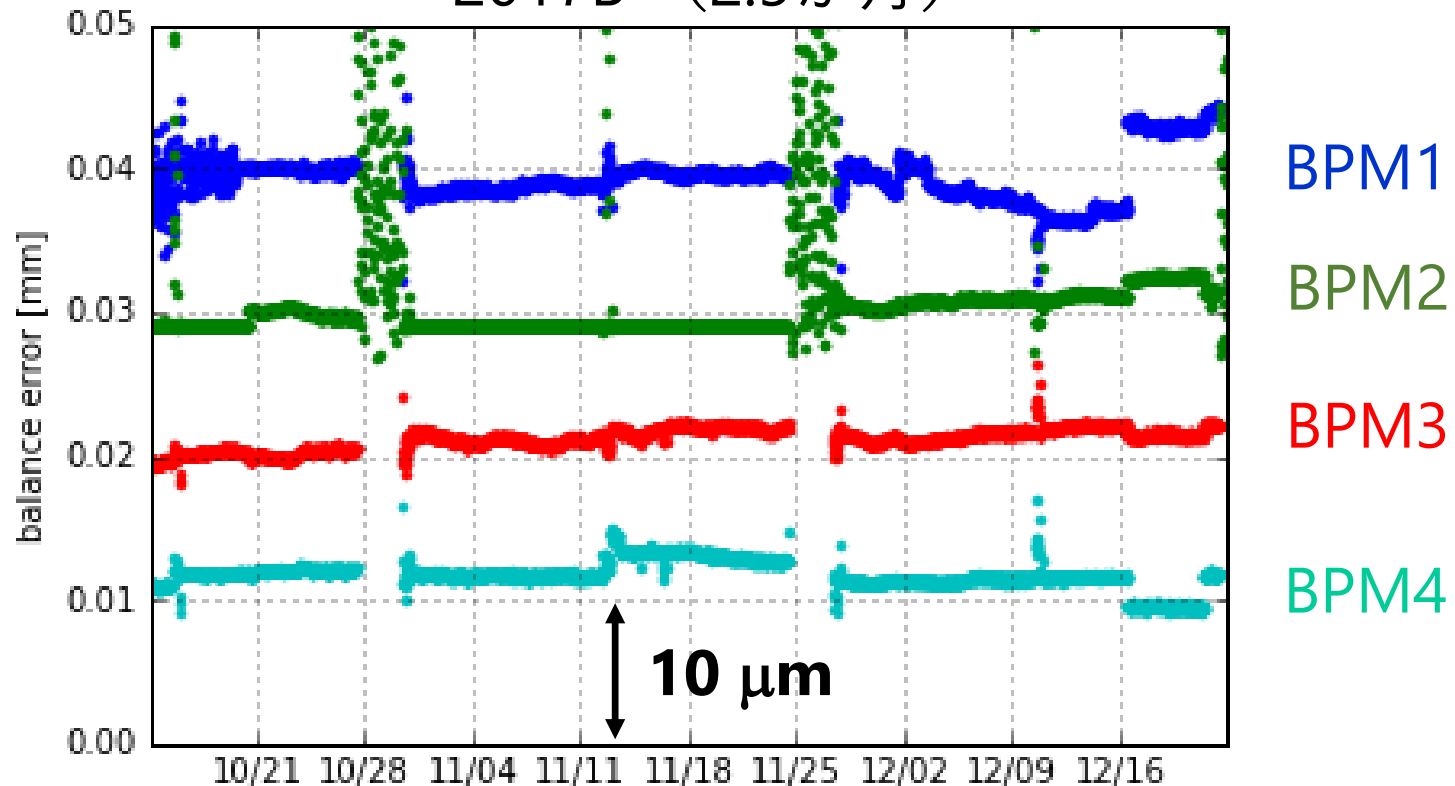


長期安定度 (Libera)

バランスエラーのドリフトで評価

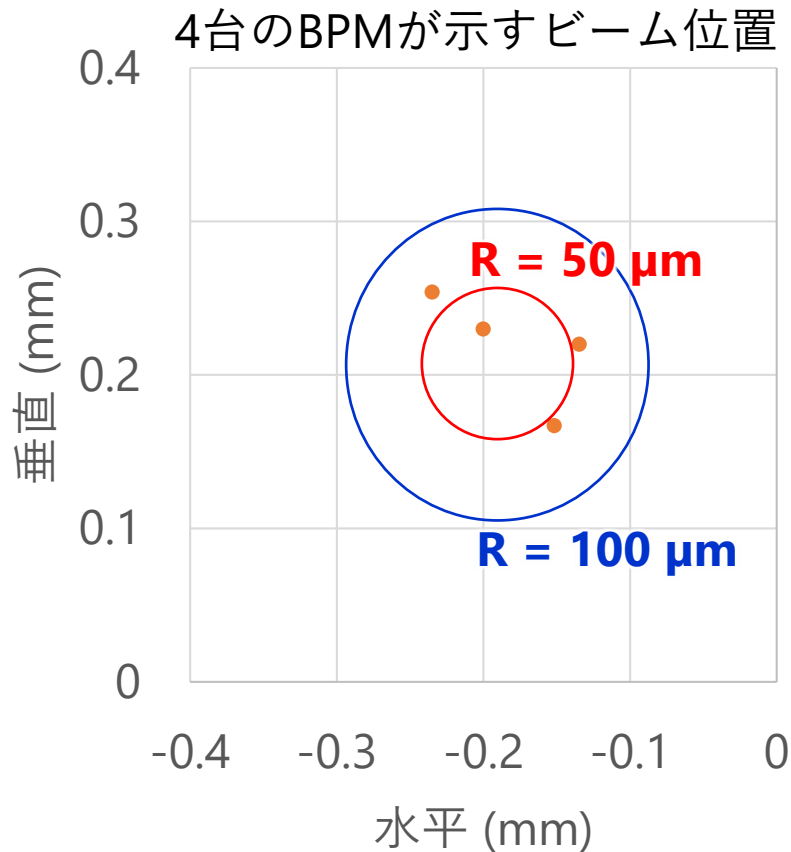
バランスエラー：4電極のうち3電極から求めたビーム位置（4つ）の最大偏差

2017B (2.5か月)



1 サイクル (~4 weeks) 中の変動： **5 μm** 以下

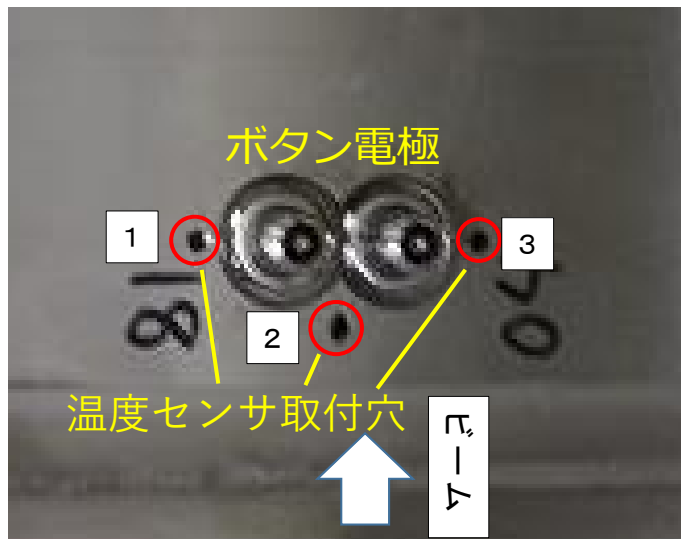
電気中心誤差の評価



- **4** つの **BPM** の値は **半径 $100 \mu\text{m}$ 以内** に入っている
- システム全体として電気中心誤差は **$100 \mu\text{m std. (}2\sigma \text{ cut)}$** を満たすことができそう

BPMブロックの温度上昇

電極付近の温度を測定



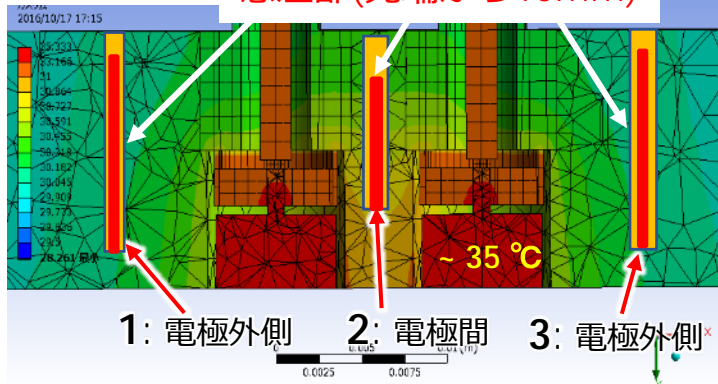
熱解析 計算条件

冷却水温 29.9°C

周囲気温 28.3°C

感温部(先端から10mm)

ANSYS R17.1



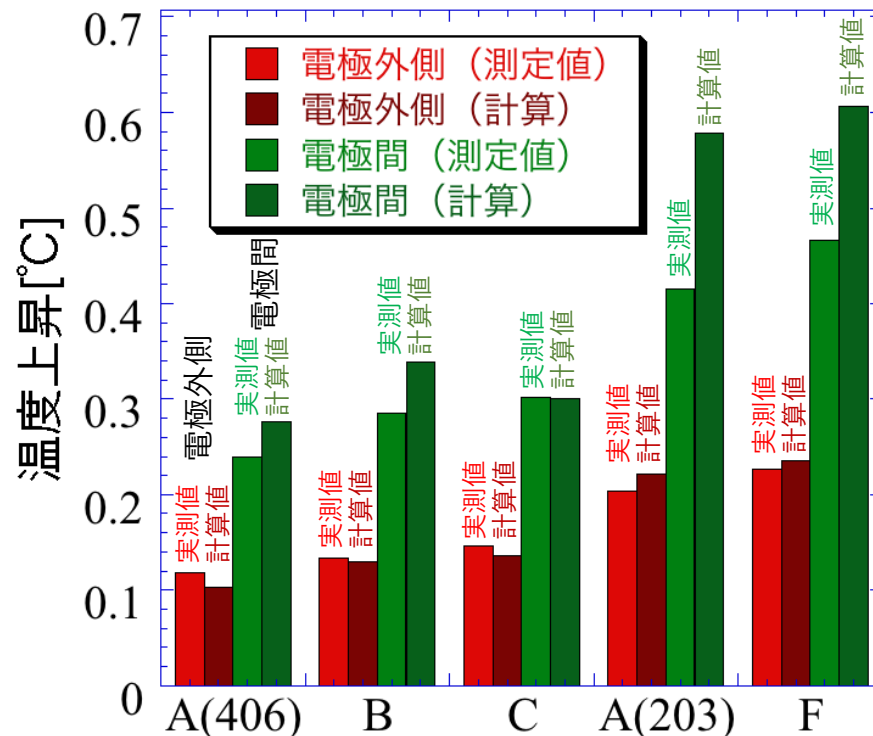
1: 電極外側

2: 電極間

3: 電極外側

1, 2, 3 : 白金測温抵抗体と感温部

ビームがないとき (29.9°C) からの温度上昇 ΔT (°C)



2016B 運転モード

A (406): 406 bunches

B: 4 bunch train x 84

F: 1/14 fill + 1.6 mA x 12

A (203): 203 bunches

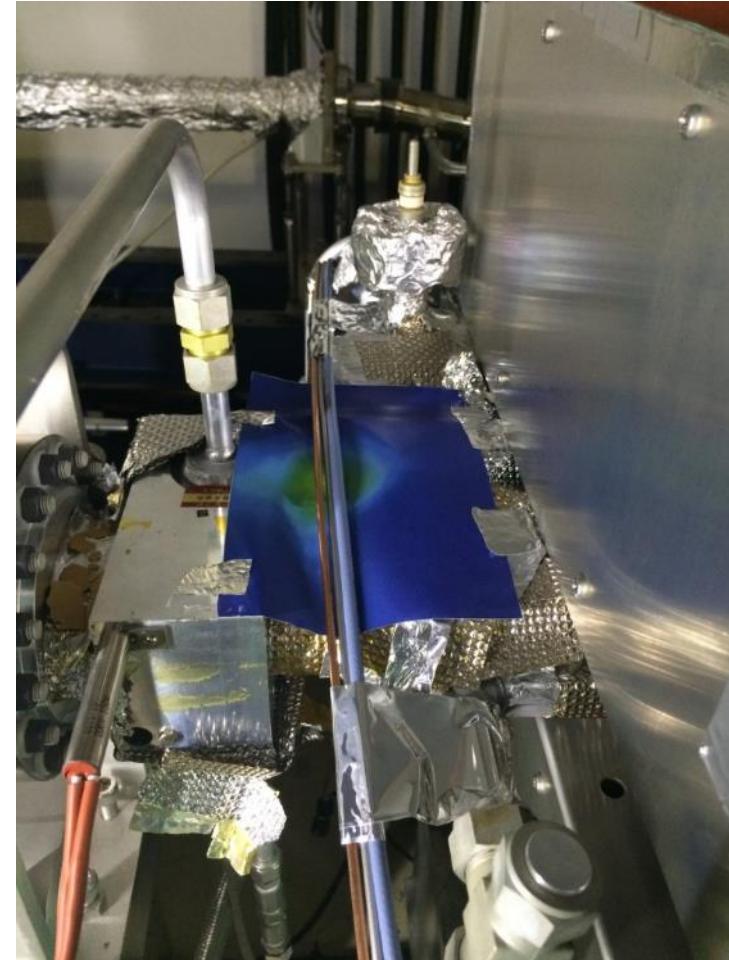
C: 11 bunch train x 29

冷却水温度上昇の測定から評価した発熱量も、RF シミュレーションとほぼ一致。

ANSYS でほぼ正確に温度計算ができた。

信号ケーブルの放射線照射試験

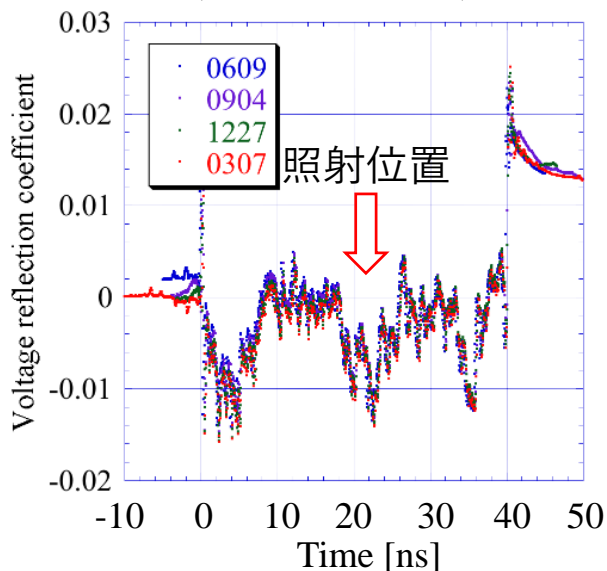
- 照射試験する信号ケーブル
 - SiO₂ セミリジッドケーブル
 - 耐放射線ケーブル
 - PEEK セミリジッドケーブル
 - 耐放射線ケーブル
 - S04272B ケーブル
 - SPring-8で現在使用中
- 試験場所：放射光アブソーバの直上
 - 散乱 X 線の線量が多い
 - 線量: 4.9 kGy/Ah
- BPM 位置での線量に換算して 10 年以上に相当する線量を照射
- 評価方法
 - Time-Domain Reflectometry (TDR) にて電圧反射率を測定して放射線劣化を調べる



放射光アブソーバ直上に設置した
3種類の信号ケーブル
左から PEEK, SiO₂, S04272B

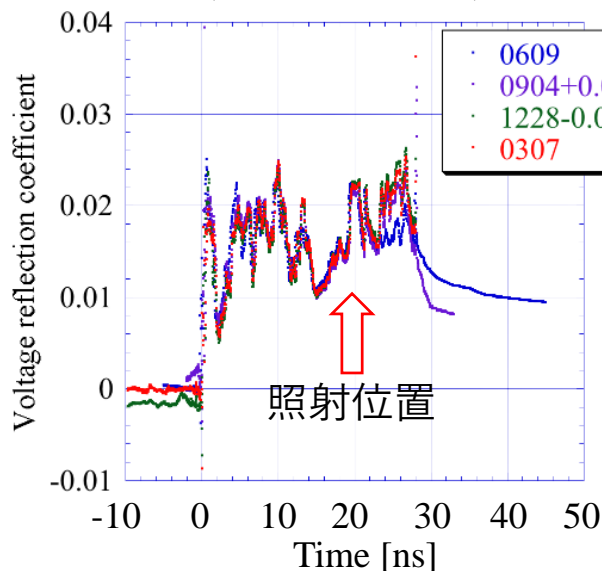
TDR 測定結果

SiO₂ セミリジッドケーブル
(耐放射線ケーブル)



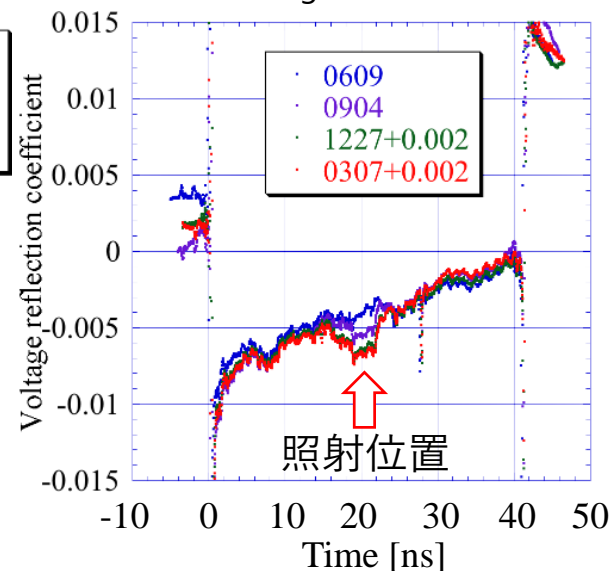
変化は見られない

PEEK セミリジッドケーブル
(耐放射線ケーブル)



変化は見られない

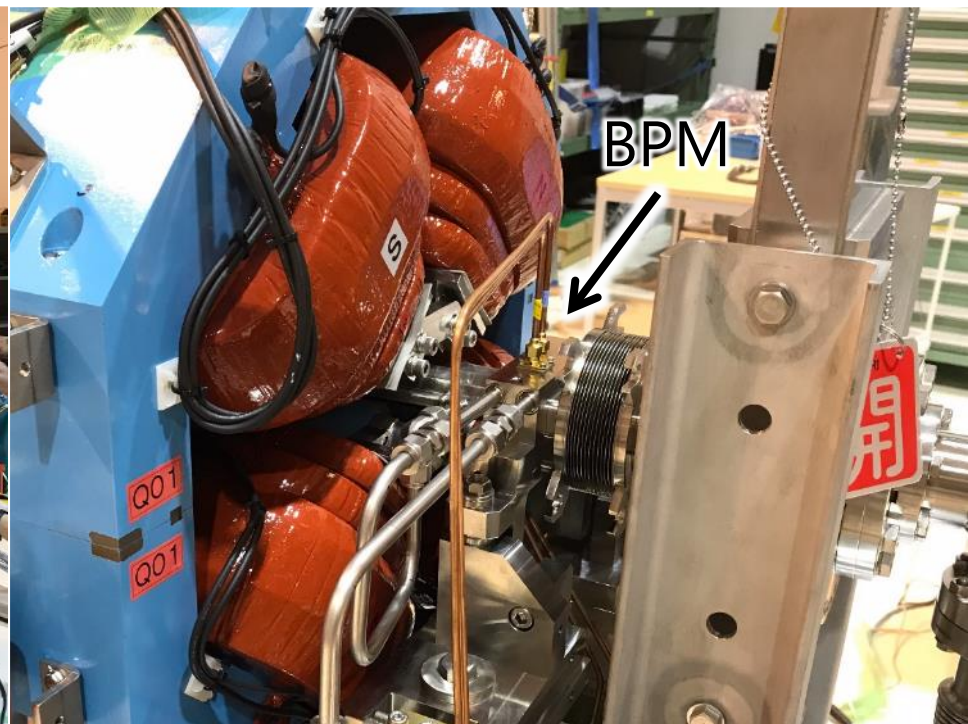
S04272ケーブル
(SPring-8で使用)



照射位置の反射率が変化

- 一定期間ごとに TDR 測定して重ね書き
- SiO₂, PEEK セミリジッドケーブルには有意な変化なし
- S04272 には放射線による劣化が見られる
- SiO₂, PEEK とも、10年以上の運転で劣化がないことが期待できる

試験ハーフセルでの評価



- 真空チェンバ (12 m 長) に ダミー BPM ブロックを装着
- どの BPM も 水平・垂直 0.1 mm、ローリング 1 mrad 程度でアライメントできたとのこと
 - 測量結果をもとに電気中心位置を補正する
 - 絶対位置精度 100 μm std (2 σ cut) を満たすうえで誤差要因が減らせそう
- 配線・配管等の干渉の確認、振動等の評価

まとめ

- SPring-8 アップグレードにおいて、BPM による高精度、かつ、高安定なビーム軌道測定が非常に重要である。
 - COD 位置安定度: 5 μm peak-to-peak for 1 month
 - 電気中心精度: 100 μm std. (2σ max.)
 - SP 位置分解能: 100 μm rms (100 pC)
- BPM の設計・試作
 - モリブデン製 BPM 電極 + SUS 製 BPM ブロック
 - 十分な工作精度で試作ができた
 - MicroTCA.4 の読み出し回路開発
 - バックアップとして Libera Brilliance+
- ビーム試験
 - 信号波形・強度・位置分解能・電気中心精度・長期安定性など、十分な結果が得られた
 - 耐放射線信号ケーブルの評価も良好
- 試験 HALF セルでも各種評価中
- SPring-8 アップグレードに十分な BPM システムが完成間近である