

# cERLビームモニターの現状と今後の課題

KEK加速器研究施設

高井, 帯名, 下ヶ橋, 多田野, 本田(洋), 飛山  
谷本, 本田(融), 野上, 内山

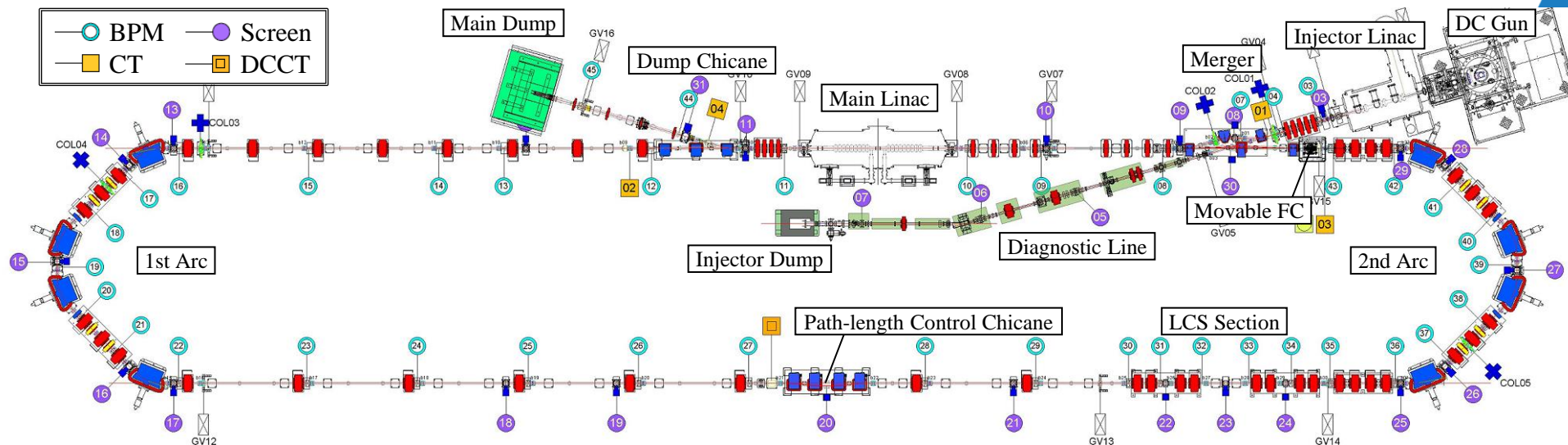
# Outline

- モニターの種類と配置, 今期からの変更点
- 主なモニターの詳細と今後の予定
  - スクリーンモニター (SCM)
  - ビーム位置モニター (BPM)
  - ビームロスモニター (BLM)
  - その他のモニターと関連機器
- 来年度の課題 : 周回部でのバンチ長計測

# Beam Monitors for the cERL

Monitor Type	Objective	#
BPM (Stripline/Button)	Position, Charge	43
SCM (Ce:YAG/OTR)	Position, Profile	30
BLM (Fiber&PMT)	Loss	4
CT	Charge	4
DCCT	Current	1
Movable FC	Charge	3

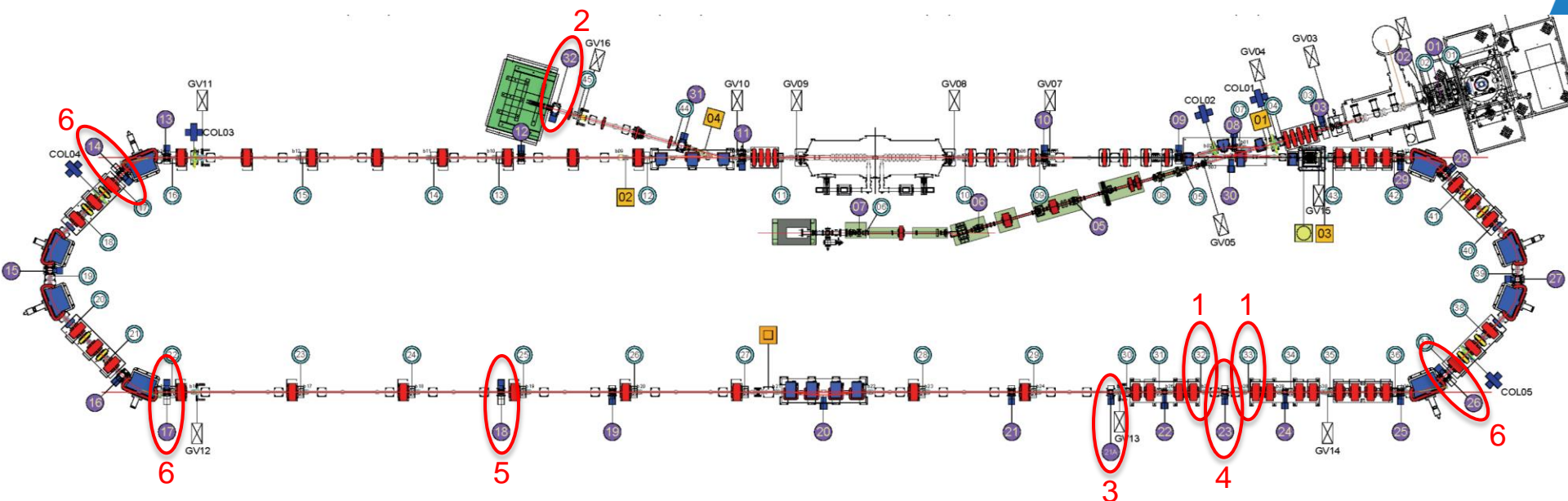
- ✓ Csl-scintillator-based BLMs, described later, are not listed here.
- ✓ A slit scanner and a deflecting cavity are installed along the diagnostic line.



# 今期からの変更点

BPM +2台, SCM +2台

1. これまで番号は割り振っていたが実体なかったBPM32, 33を設置  
(LCS衝突点前後のボタン電極型BPM)
2. メインダンプの直前にSCMを追加(MS32)
3. これまで“MS23”として使ってきたSCMを“MS21A”として4連QM上流に移設
4. アルミナ蛍光板を使用したSCMを新しいMS23としてLCS衝突点に設置
5. MS18のスクリーンホルダを改造してCTRを用いたバンチ長計測と両立化
6. 各BMチェンバーの光ポートを活かすためMS14, 17, 26のカメラ位置を反転

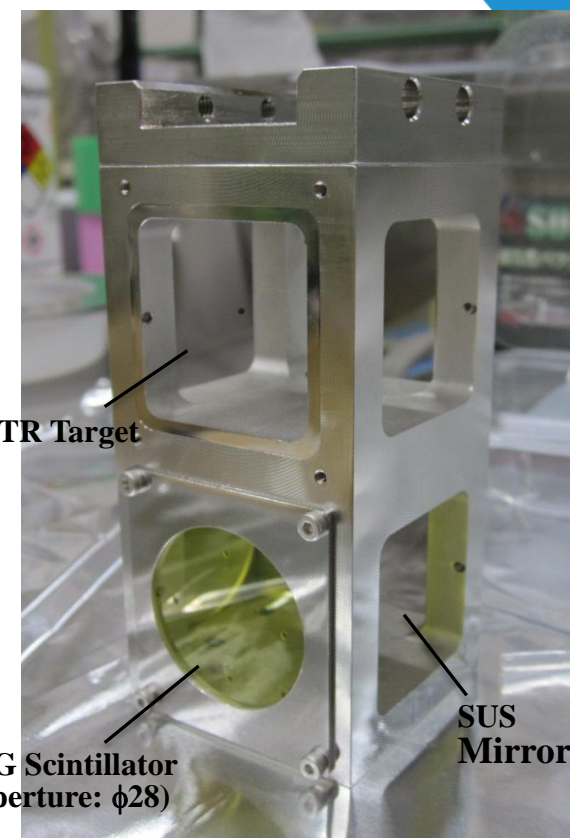
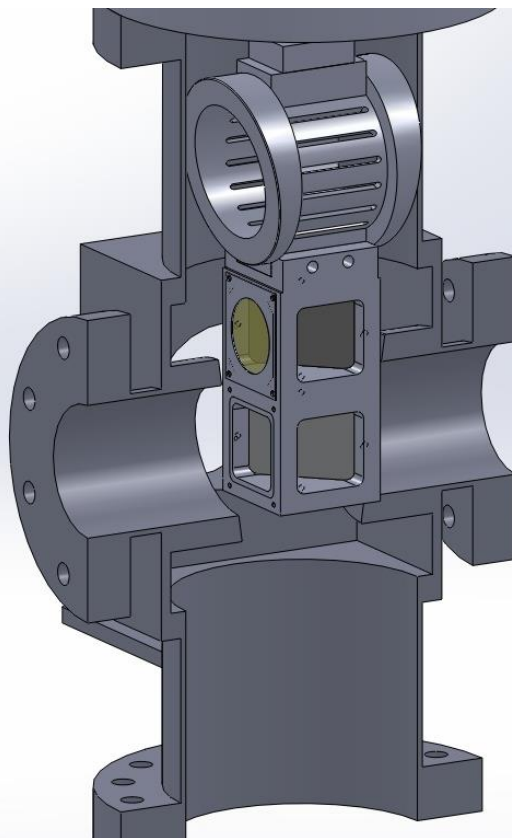
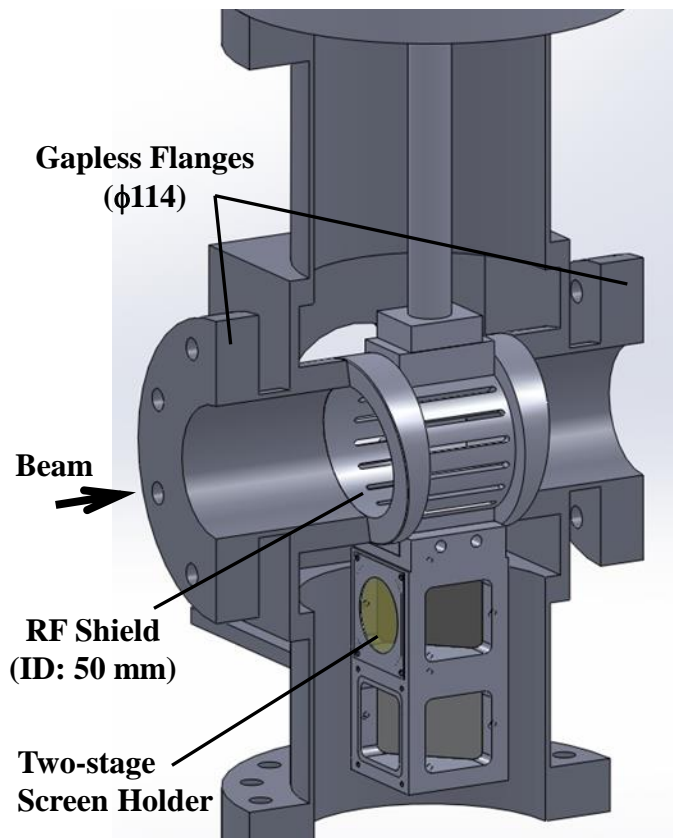


# スクリーンモニター(SCM)

- ビームの位置とプロファイルを同時に測定できる
- 上流の電磁石や偏向空洞と組み合わせることで様々な応用が可能
- 広いダイナミックレンジと高速応答, 低インピーダンスが必要  
⇒ Ce:YAGシンチレータとOTR標的を備えたRFシールド付SCM
- 内部構造や駆動方式により下記の6つに大別される

設置場所	ダクト	駆動方式	スクリーン	サイズ	台数
合流部・直線部	Φ50	Pneumatic	YAG & OTR	Φ28	16
入射部・診断部	Φ63	Pneumatic	YAG	Φ26	5
ダンプライン	Φ100	Pneumatic	YAG & OTR	Φ50	1
アーク部	8角形	Pneumatic	YAG & OTR	20 x 40	6
入射シケイン	扁平	Pneumatic	YAG / OTR	26 x 76	1
周長補正シケイン	扁平	Stepping motor	YAG / OTR	26 x 66	1

# 例) 直線部用SCMダクト



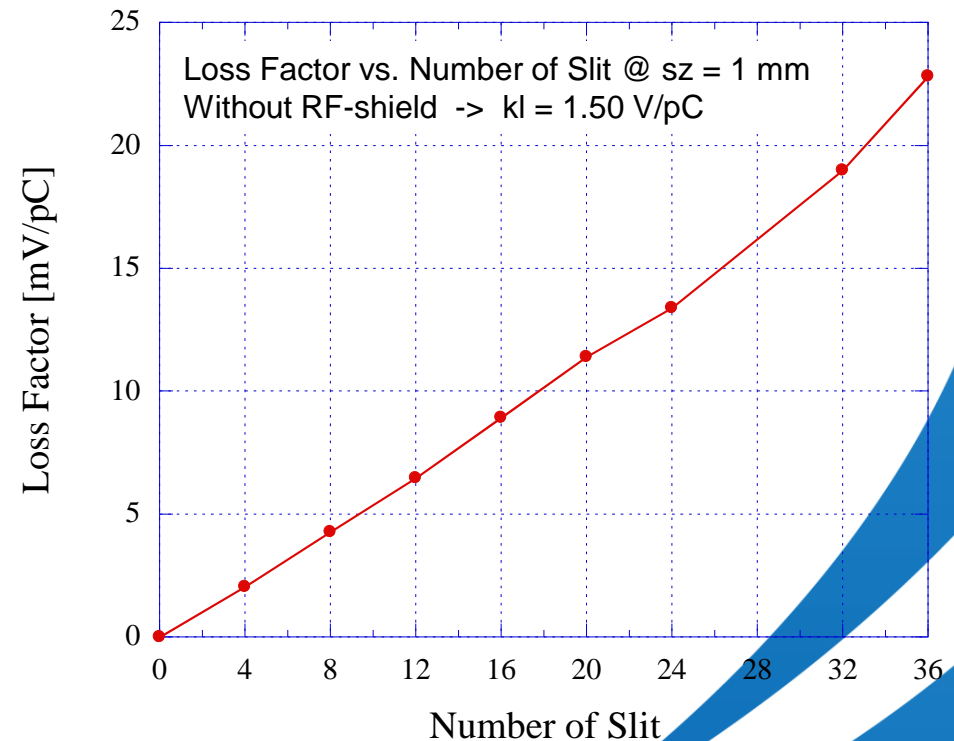
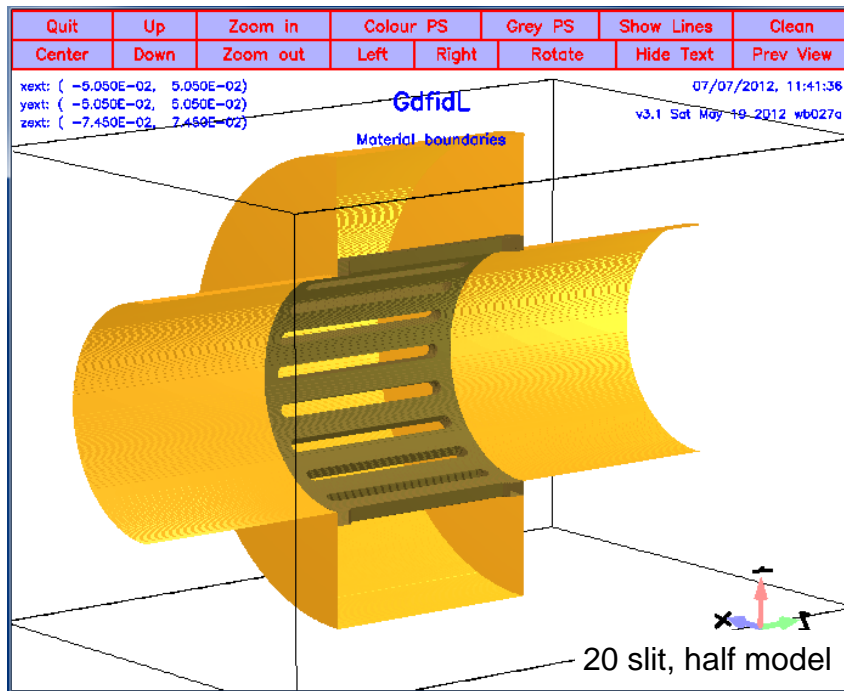
- ダクト内径: 50 mm, ダクト長: 180 mm
- スクリーン口径: 28 mm
- 2段式スクリーンホルダを採用 ⇒ ビームのエネルギーや強度によって2種類のスクリーンを使い分け
- Ce:YAGシンチレータ
  - 厚み: 100 μm
  - ビーム入射面には30 Åの導電性コート

- OTR標的: アルミコーティング付シリコンウェハー
  - 厚み(アルミ/ウェハー): 40 nm / 70 μm
- スクリーンを使用しないときは円筒型RFシールドが挿入される
- シールドとダクト間の接触は精密嵌合による物理的接触のみで実現



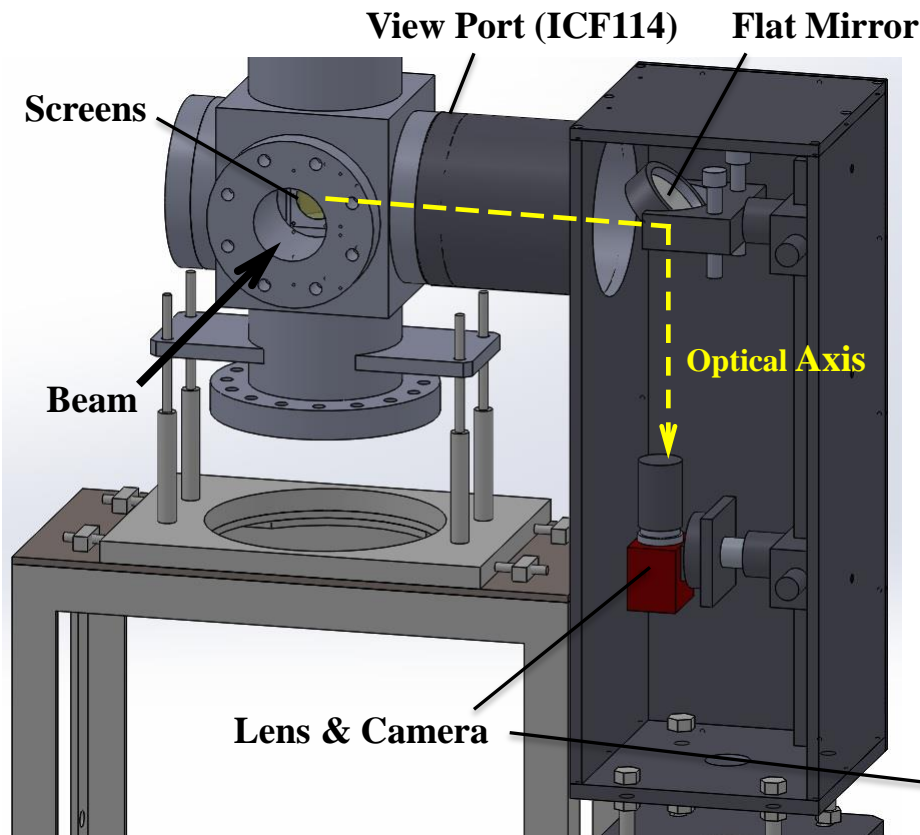
# RFシールドの効果

- GdfidLを利用
- バンチ長: 1 mm (3.3 ps), バンチ電荷: 1 pC を想定
- $\phi 50/100$  Cavity構造, スリット幅: 3 mm, 厚み: 3 mm, 長さ: 40 mm



- Loss factor @20 slits: 11.4 mV/pC
- シールド無しの場合の1/100以下

# 結像光学系 & CCDカメラ



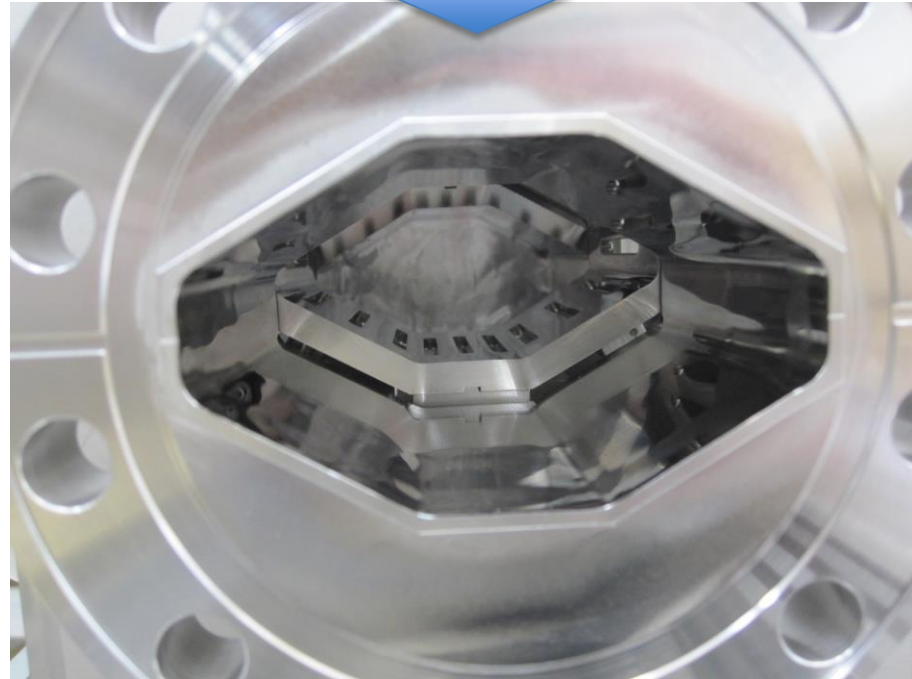
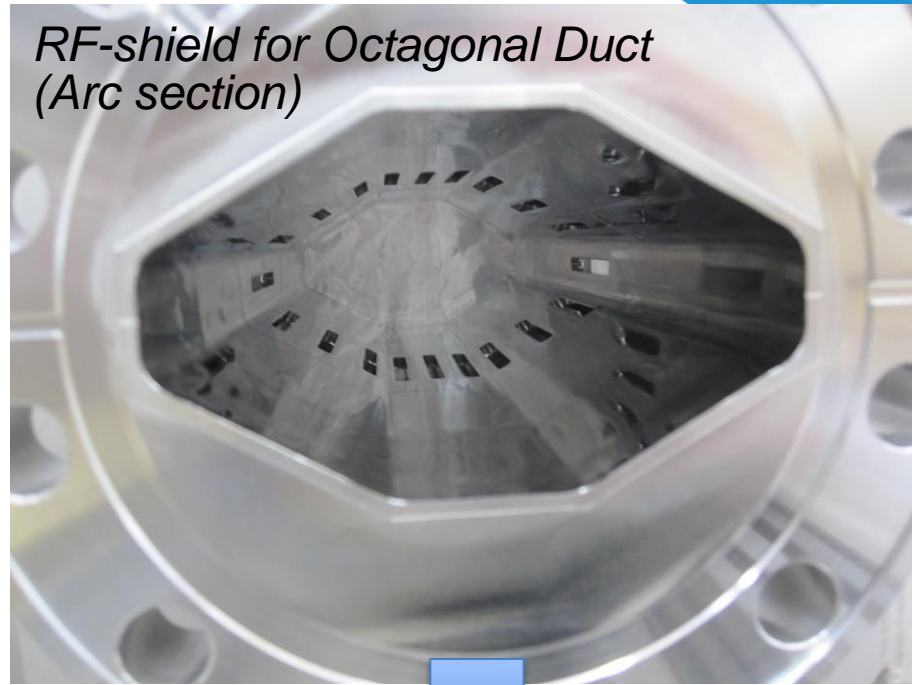
- ビーム軸に対して90° 方向から観測
- ミラーを介することで放射線によるダメージを軽減
- GigEカメラを採用 (Allied Vision Technologies, GC650)
  - 659 × 493 (VGA), □7.4 μm, 12 bit (4096階調)
- 低ディストーションCCTVレンズ (Myutron, HS5028J3)
- 吸収型NDフィルター (ND2, 4, 8, 20, 100, 1000)



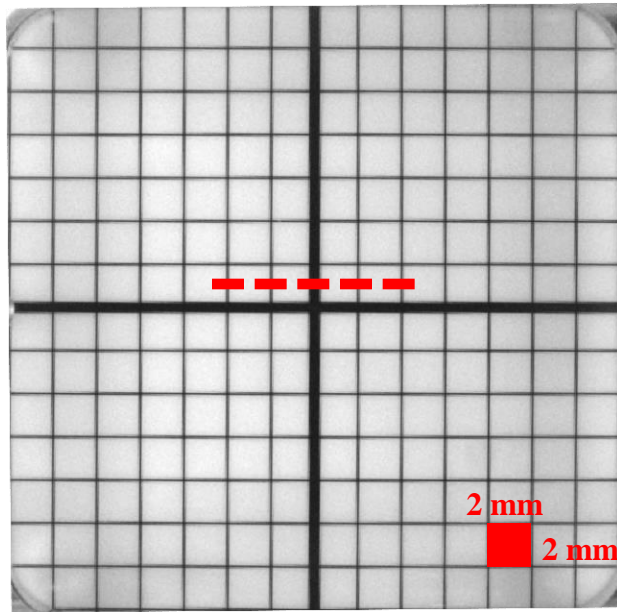
Setup



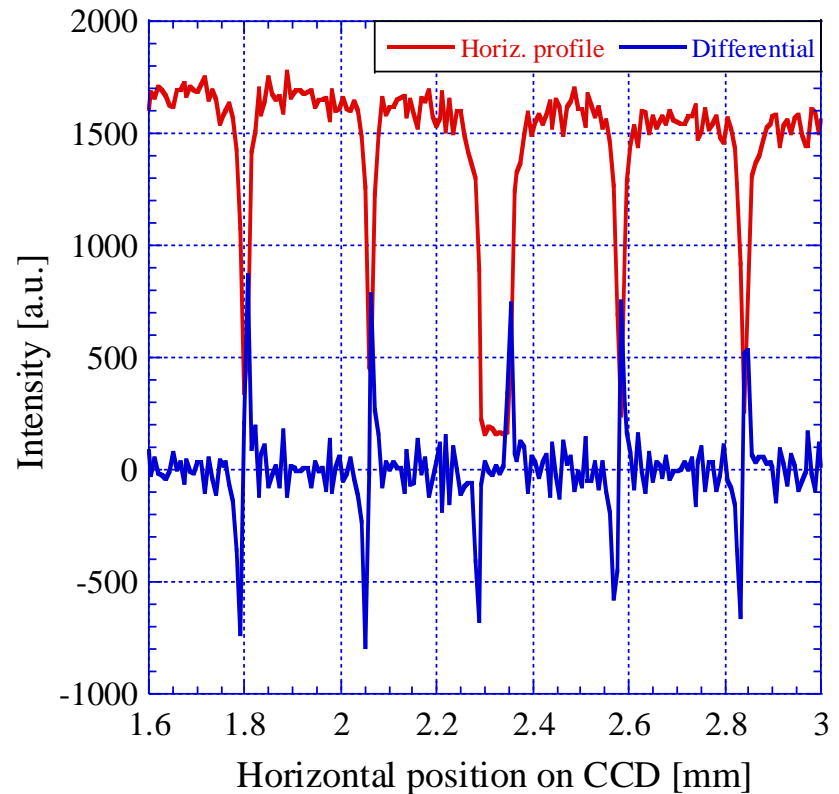
*RF-shield for Octagonal Duct  
(Arc section)*



# SCM Calibration



コミショニング時と同じ倍率で撮影された校正用方眼パターンの画像（線幅：0.5 / 0.1 mm）



点線上の水平方向プロファイルとその位置微分

- SCMの空間分解能：上記画像のエッジ幅（レンズの収差，絞りによる回折，CCD画素による量子化）に被写界深度の影響と結晶内での電子の多重散乱による効果（YAGスクリーンの場合）を加味して評価

⇒ YAG: 62  $\mu\text{m}$ , OTR: 37  $\mu\text{m}$

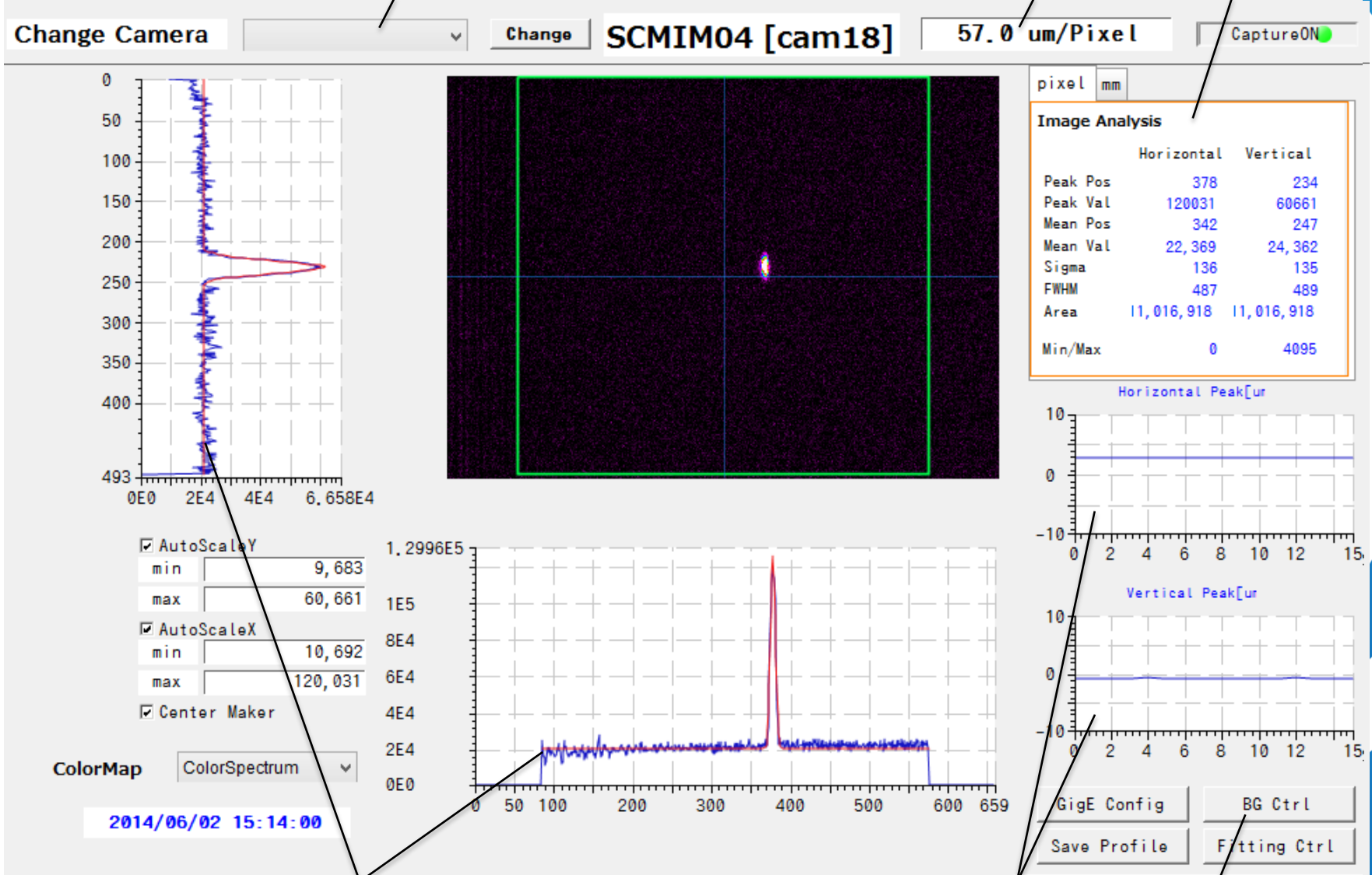
- 撮影倍率やCCDの画素数を増やせば分解能は上がる

# 制御パネル

カメラ選択メニュー

カメラ倍率

統計情報



射影プロファイル(青)  
リアルタイムフィッティング(赤)

ピーク位置のトレンドグラフ  
バックグラウンド補正機能

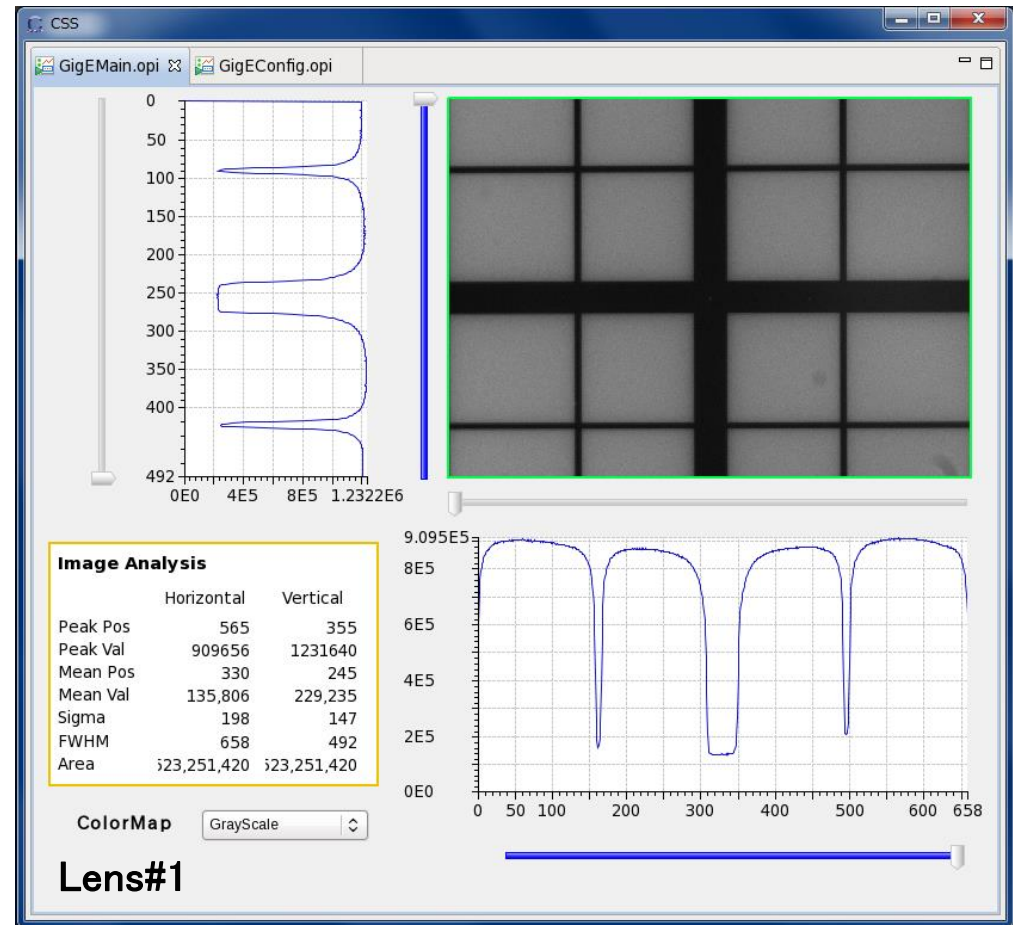
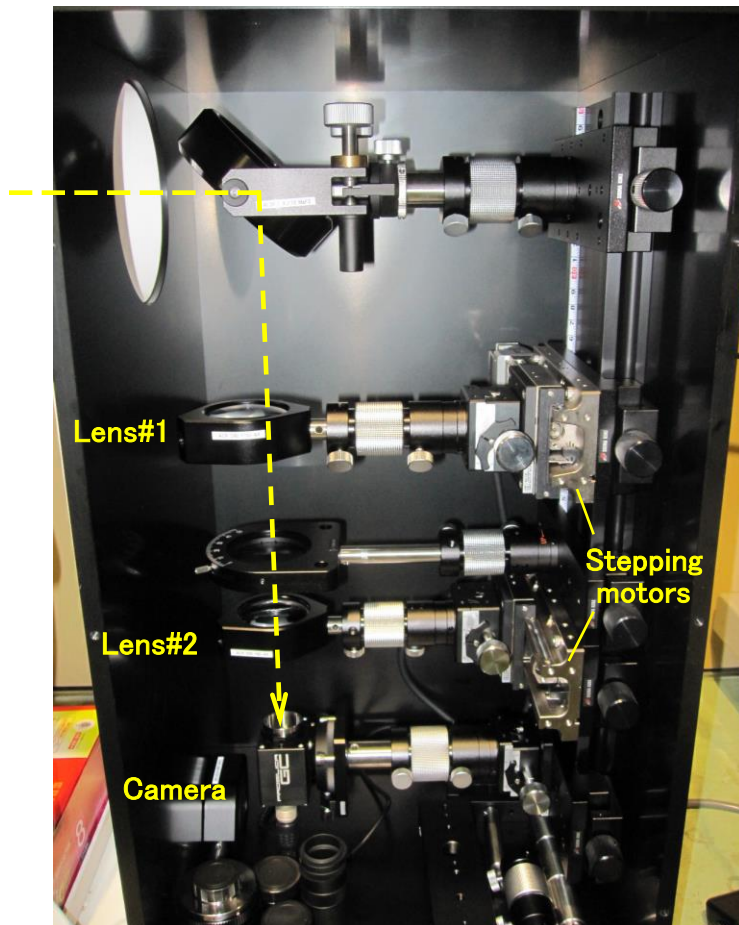


# 今後の予定

## ▶ 倍率可変光学系による一部のスクリーンの高分解能化

例) ・市販の電動ズームレンズを利用

- ・レンズとカメラの位置をそれぞれ前後に動かす
- ・カメラの位置は固定して焦点距離の異なるレンズを横から挿入する ⇒ テスト済み

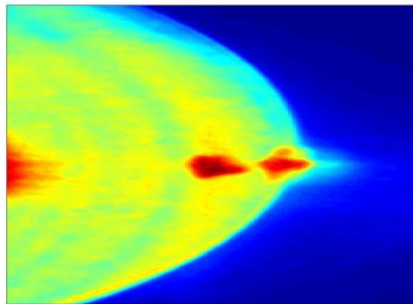


# 今後の予定

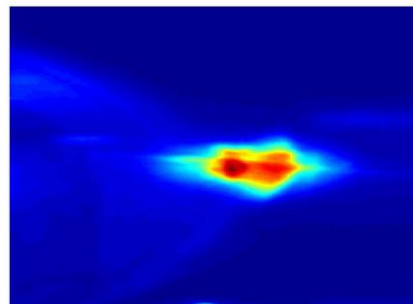
## ➤ Coherent OTR (COTR) 対策

- 例) ・ 高速ゲートカメラの低ジッターなトリガーディレイで時間的に分離する (a)
- ・ 穴開きミラーにより空間的に分離する (b) ⇒ 最も導入が容易で低コスト
  - ・ ターゲットとミラーの角度を調整して空間的に分離する (c)

(a) LCLS方式



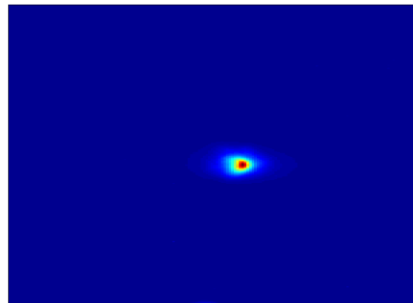
(a) OTR screen



(b) LuAG screen

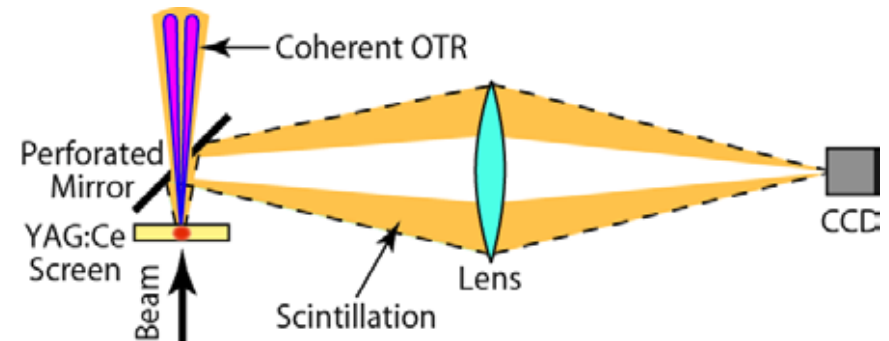


(c) OTR screen, +100ns delay

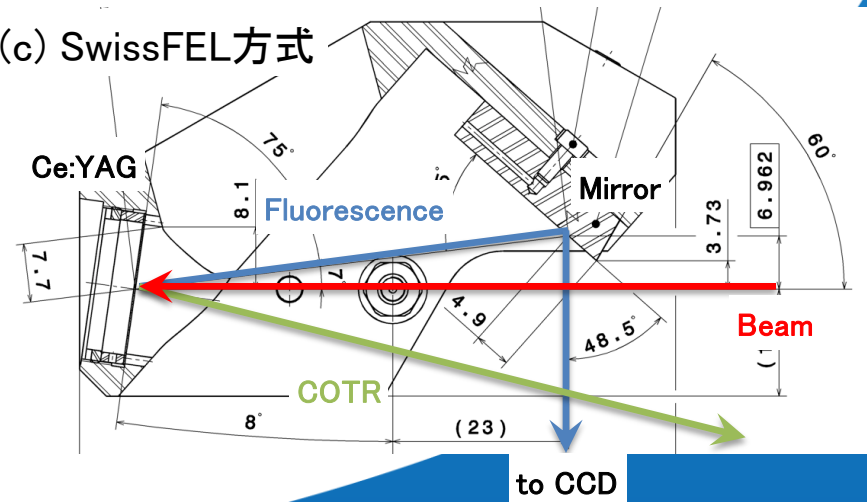


(d) LuAG screen, +100ns delay

(b) SACLA方式



(c) SwissFEL方式



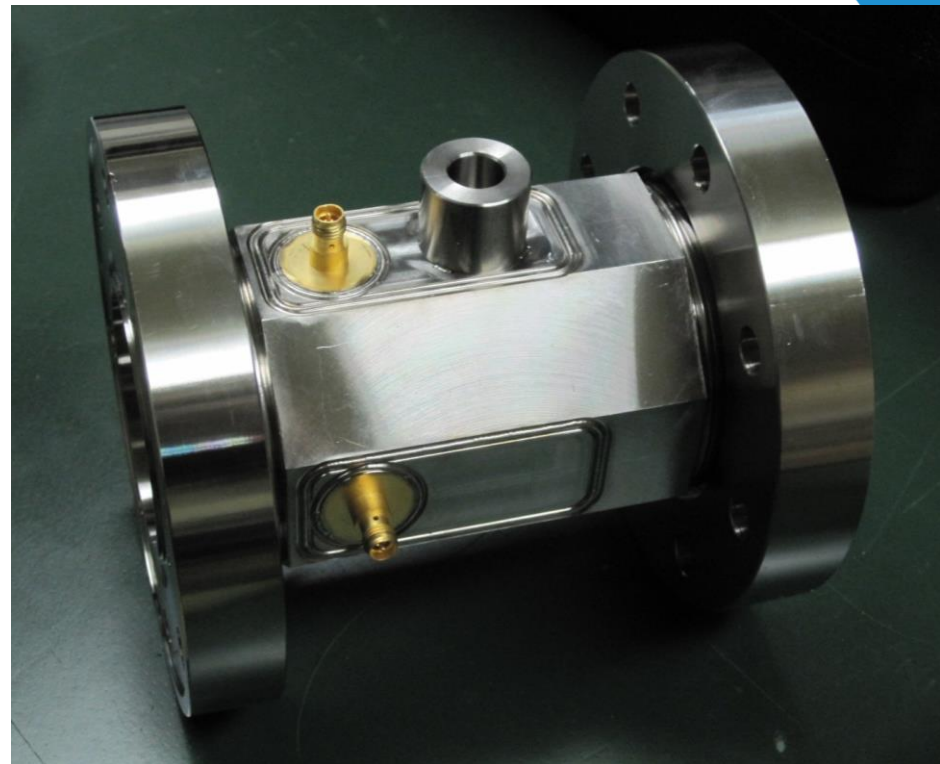
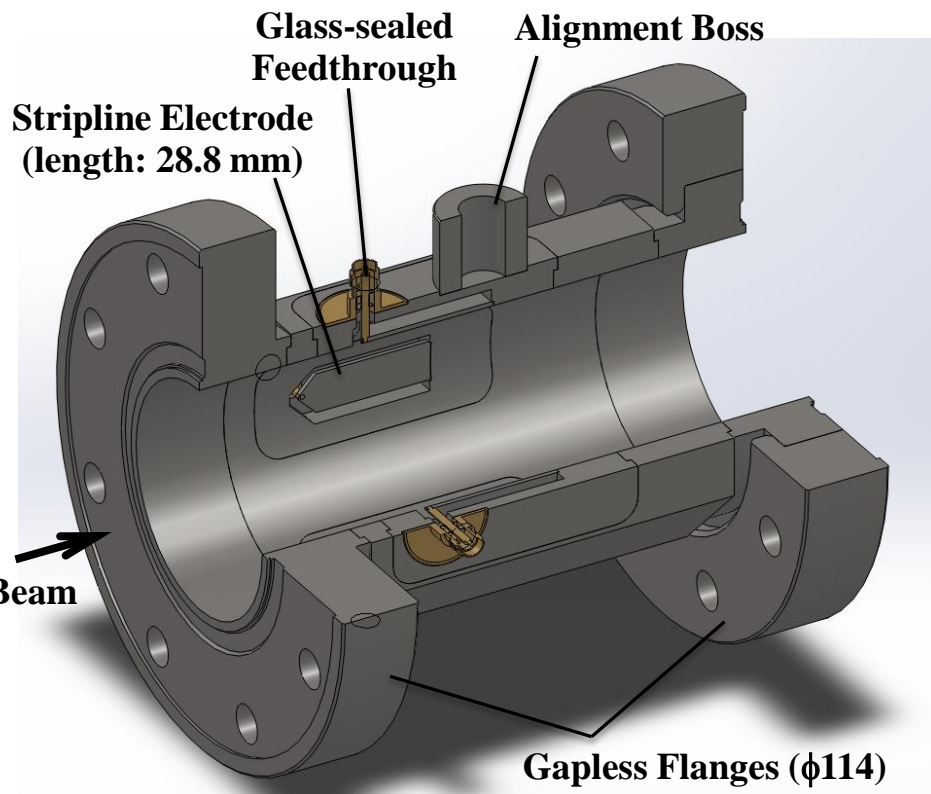


# ビーム位置モニター(BPM)

- ビームの重心位置を非破壊で計測できる
- 4電極の和信号によりビームロスポイントの推定も可能
- 微小電荷を検出できる感度と高速応答が必要
  - ⇒ ガラス封止フィードスルーを用いたストリップライン電極型BPM
- ダクトの内径や電極形状により下記の5つに大別される

設置場所	ダクト	電極	台数	出力 [mVpp]	ロスファクター [mV/pC]
合流部・直線部	Φ50	Stripline (Short)	27	103.5	59.1
入射部・診断部	Φ63	Stripline (Long)	4	88.6	48.3
ダンプライン	Φ85	Stripline (Long)	2	60.2	21.3
アーク部	8角形	Stripline (Short)	10	172.7	82.0
LCS衝突点	Φ50	Button	2	75.1	26.1

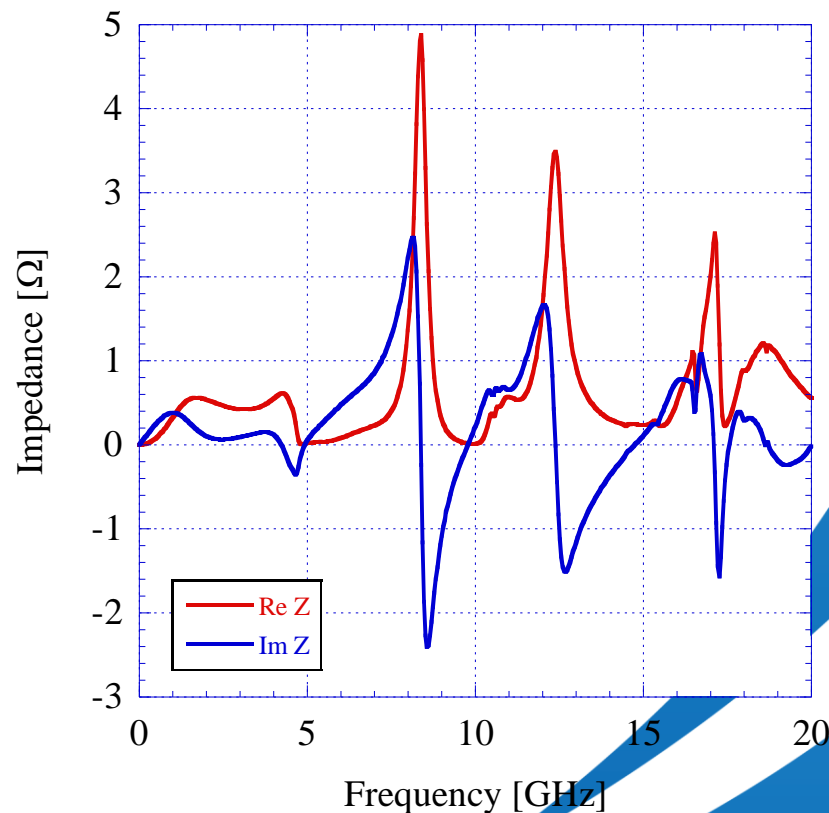
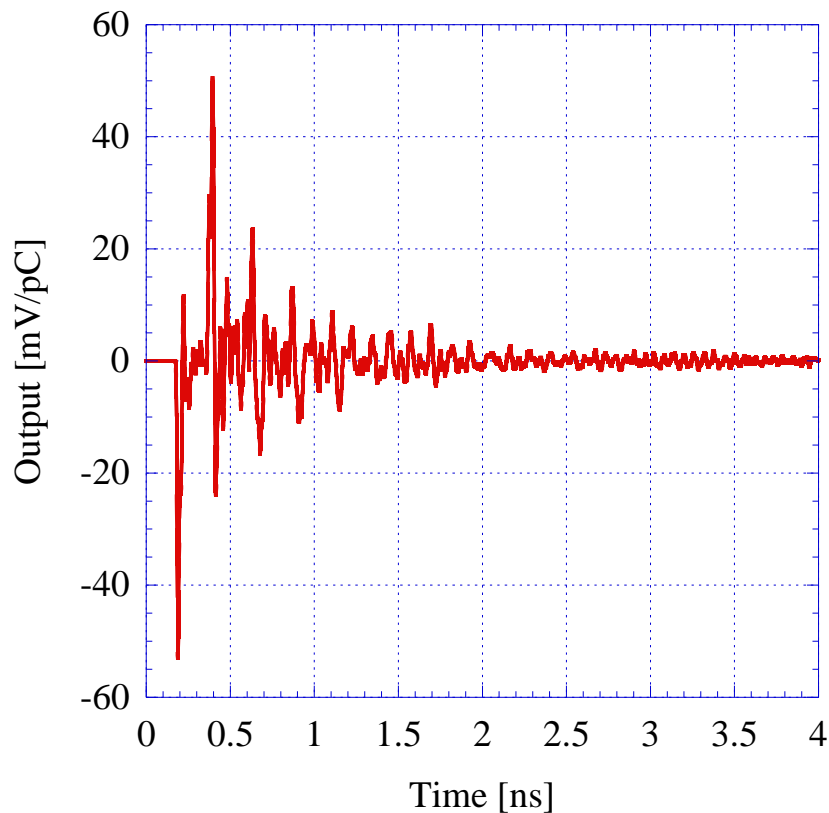
# 例) 直線部用BPMダクト



- ダクト内径: 50 mm, ダクト長: 125 mm
- 電極長: 28.8 mm (Short型) ⇒ 2.6 GHzで最大感度
- 電極幅: 8.8 mm (見込み角 20° )
- 特性インピーダンス: 50  $\Omega$  (TDRで検証済み)
- ギャップレスフランジを使用
- 精密アライメント用ターゲット座付き

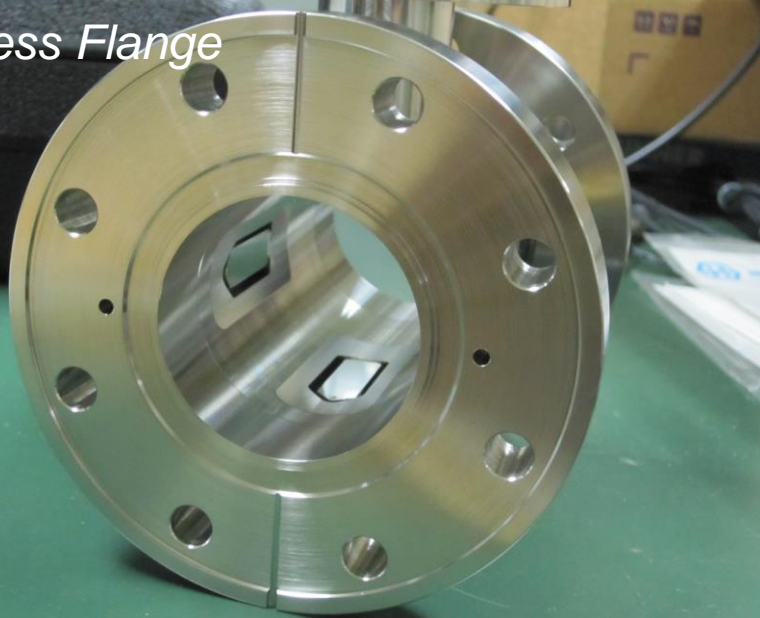
# 進行方向ロスファクターの計算

- GdfidLを利用
- バンチ長: 1 mm (3.3 ps), バンチ電荷: 1 pC を想定
- 直線部用BPMダクト (Short型) の場合



- Loss factor: 59.1 mV/pC
- Power loss: 4.6 mW @10 mA

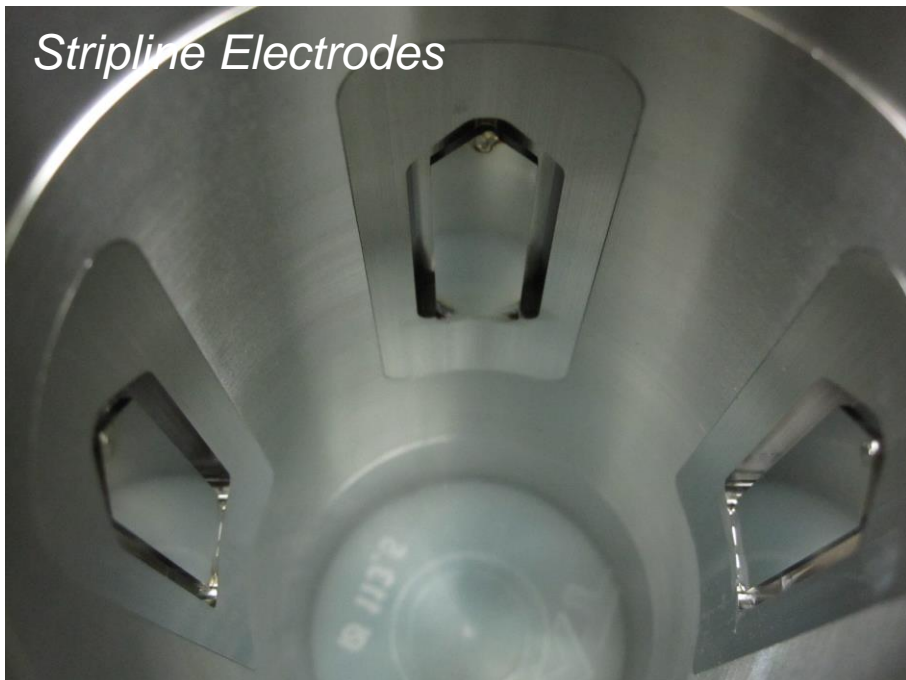
*Gapless Flange*



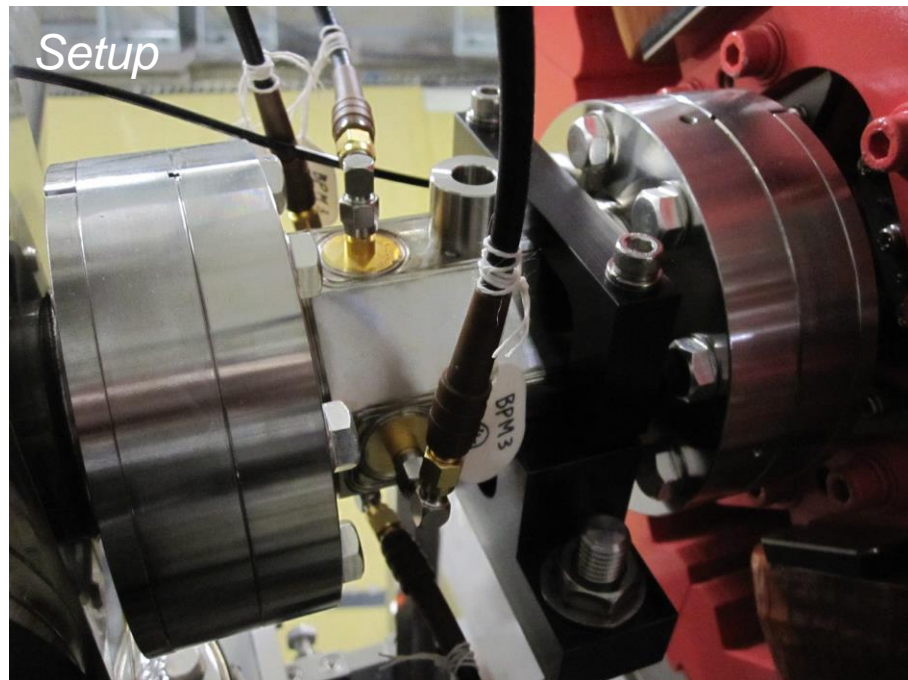
*Glass-sealed Feedthrough  
(Kyocera, BHA glass,  $\epsilon_r = 5.0$ )*



*Stripline Electrodes*



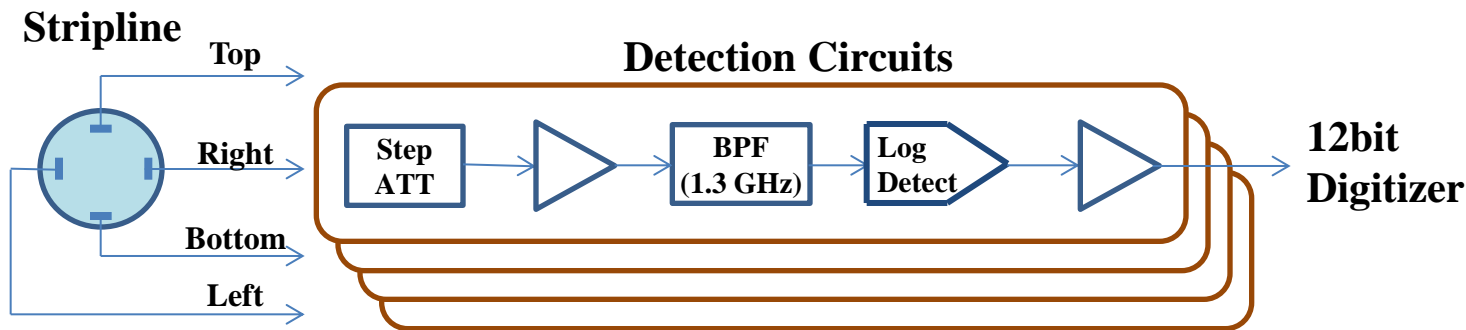
*Setup*



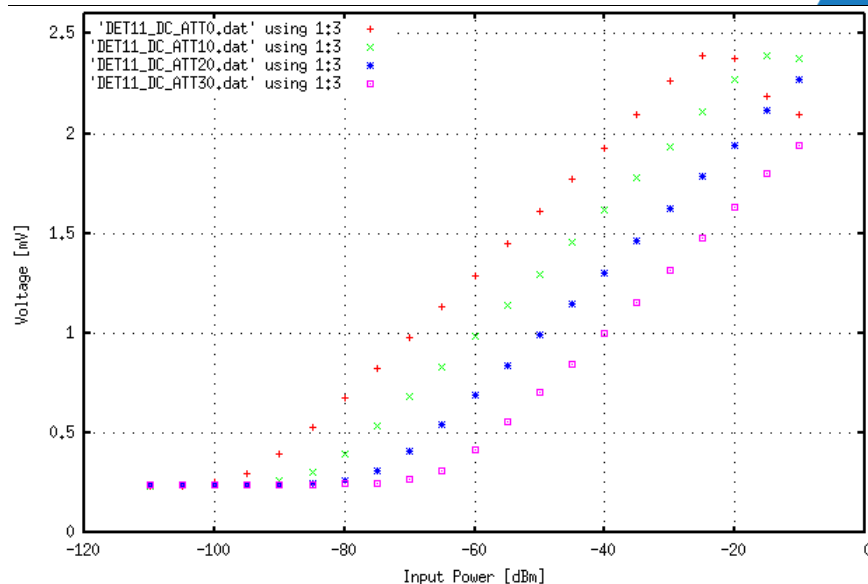


# 検波回路

- できるだけ広いダイナミックレンジ
- 個別のバンドごとに位置を測定する必要はない
- 測定精度よりもコミッショニング初期から使えることを優先
- できるだけ低コスト ⇒ ログ検波回路



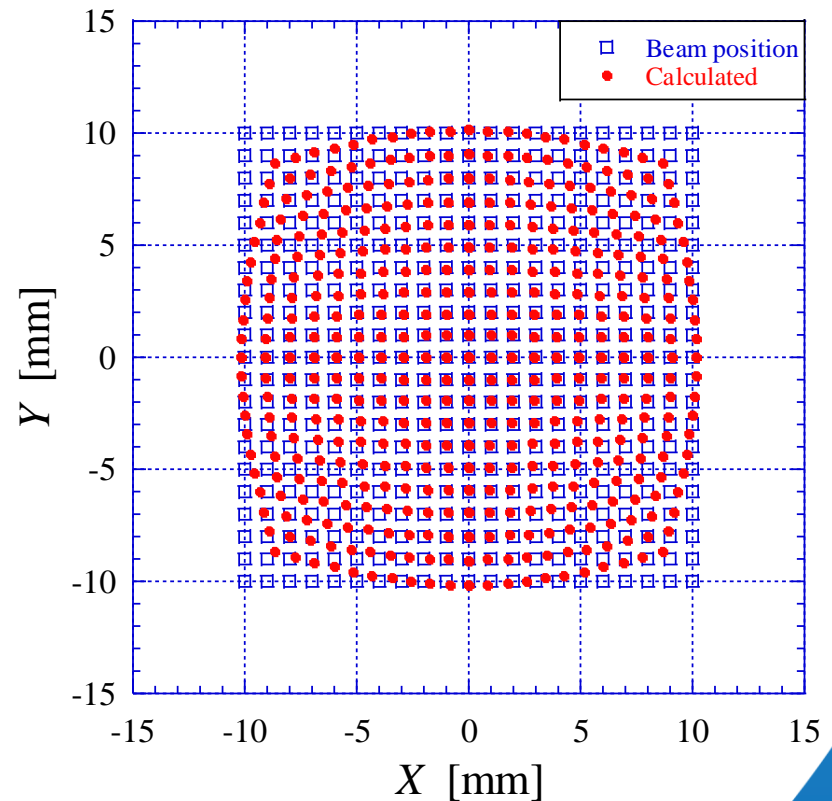
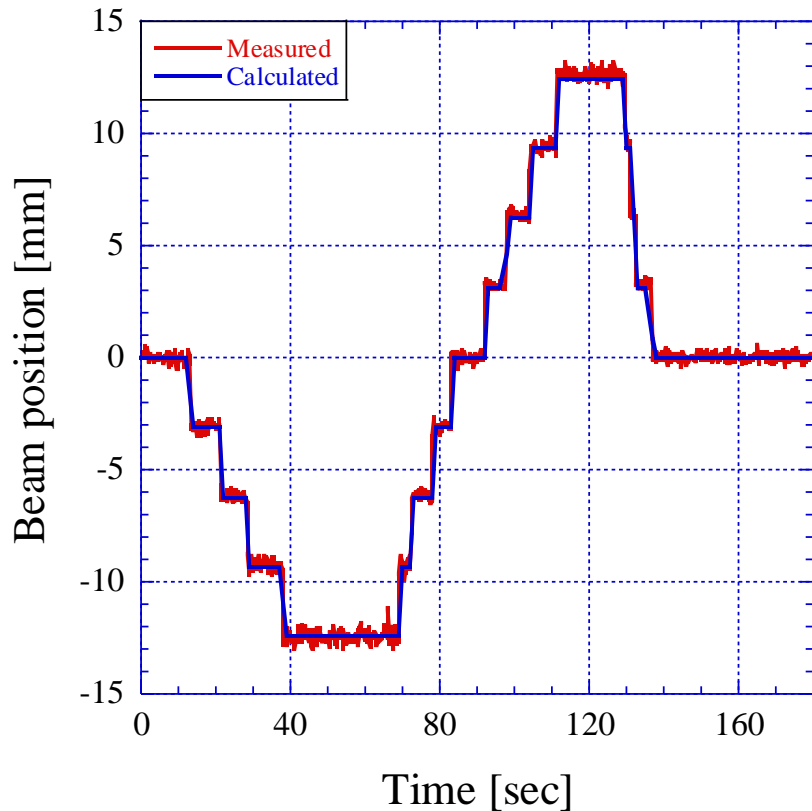
- 帯域幅: 10 MHz
- 中心周波数: 1.3 GHzで統一 (アーク部BPMダクトのカットオフ周波数:  $\sim 2.6$  GHz)
- 入力段の可変アッテネータを0 dBに設定した場合、 $-90 \sim -30$  dBmの入力レベルに対してLog-Linearに応答
- パルス入力に対する立ち上がり時間:  $\sim 200$  ns





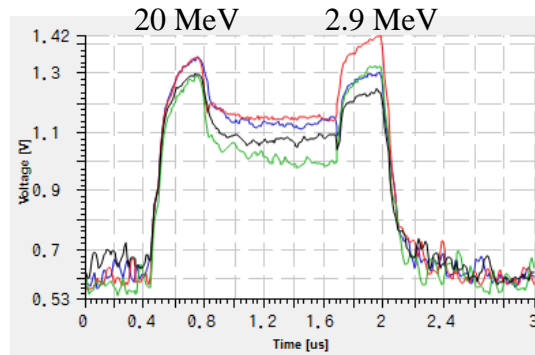
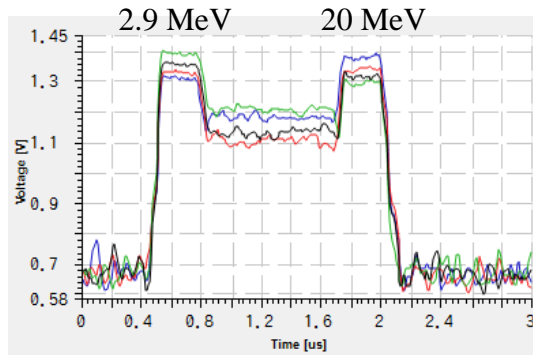
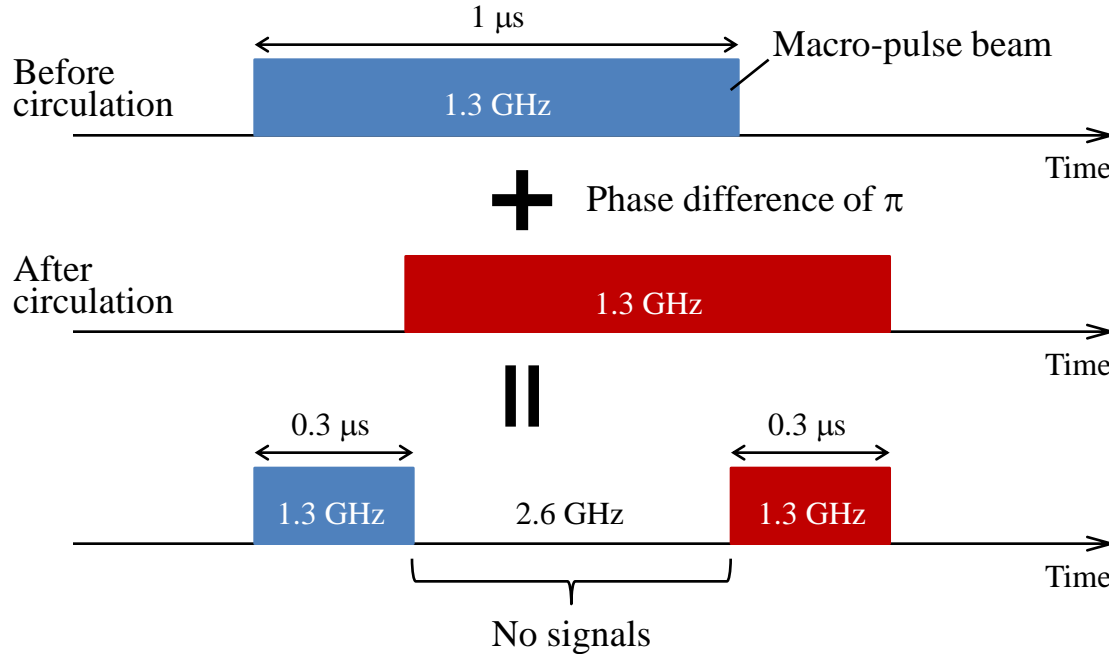


# BPM Calibration



- 上流のステアリング電磁石でビームの重心位置を階段状に変化させた
- 赤: BPMで測定したビーム位置  
青: SCMによる測定から得られたビーム位置
- 測定値のばらつきからBPMの分解能を評価  
⇒  $\sim 150 \mu\text{m}$  (ビーム軌道のジッターを含む)
- 検出信号を平均する時間幅を増やせば分解能は上がる
- 検出信号をビーム位置に変換する感度曲線の計算にはCST Particle Studioを利用
- 5次の多項式でフィッティング

# BPMを利用した2カラービームの同時測定



- 合流部からダンクシケインまでの区間では加速前のビームと加速後のビームが共存するため、加速後のビームを観測するのに破壊型のビームモニターは使用できない
- 工夫例) 穴開きスクリーン, 高速ゲートスイッチ等  
⇒ BPMを利用したシンプルで確実な方法を考案
- 加速後ビームの信号は加速前ビームの信号に周回時間分( $\sim 300$  ns)だけ遅延して重なる
- 先頭には加速前ビームからの信号、後尾には加速後ビームからの信号のみ現れる
- 両者の間の2.6GHz信号は検波回路内のBPFによって取り除かれる
- 実際には主加速空洞からの距離に比例してビームの位相差が $180^\circ$ からずれるため、有限の信号が観測される
- 逆に言えば、この区間の信号はビームの位相モニターとして利用できる

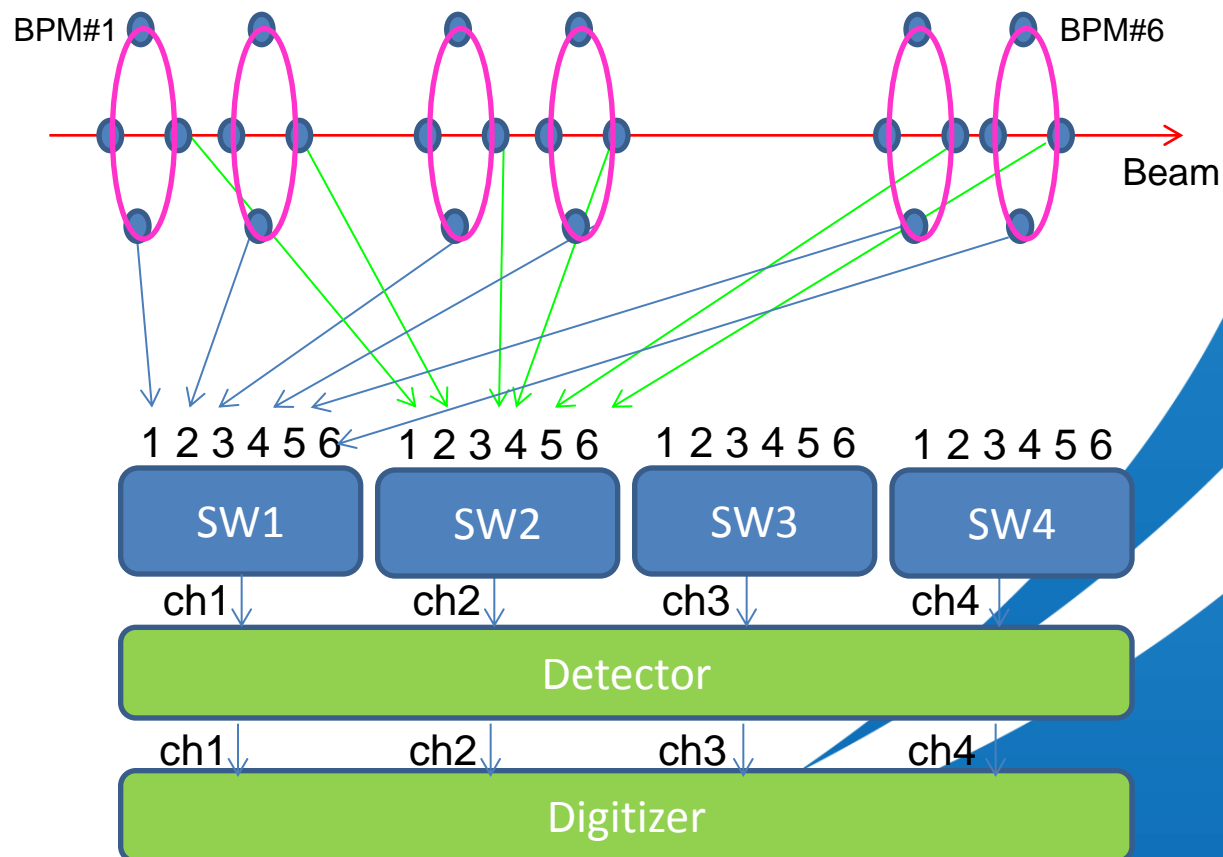
CWビームの場合でもビームのない区間を周期的に設ければこの方法を利用できる!

# 今後の予定

- 予算の都合上、ログ検波回路の数が不足している
- 現状: BPM 43台 ⇔ 回路 16台
- PF-ARで使用していた同軸スイッチによる切り替え方式を臨時採用
- 1台の回路で6台分のBPM信号を処理 ⇒ 全BPMの切替に約30秒



SP6T同軸スイッチ (Teledyne)



# 今後の予定

- 今期は検波回路を11台追加（計27台）
- さらに“周波数変換器（1.3 GHz ⇒ 508 MHz）+ Libera”を10台利用
- BPM 45台 ⇔ 回路 37台
  - ⇒ 測定時間が10秒程度に改善する見込み
- ネットワーク帯域の問題（対策は検討済み）
- アーク部の入口と出口にビーム位相モニターを設置（IQ検波 or 同期検波）
- 検波方式の変更による高精度化（Log検波 ⇒ 同期検波へ）

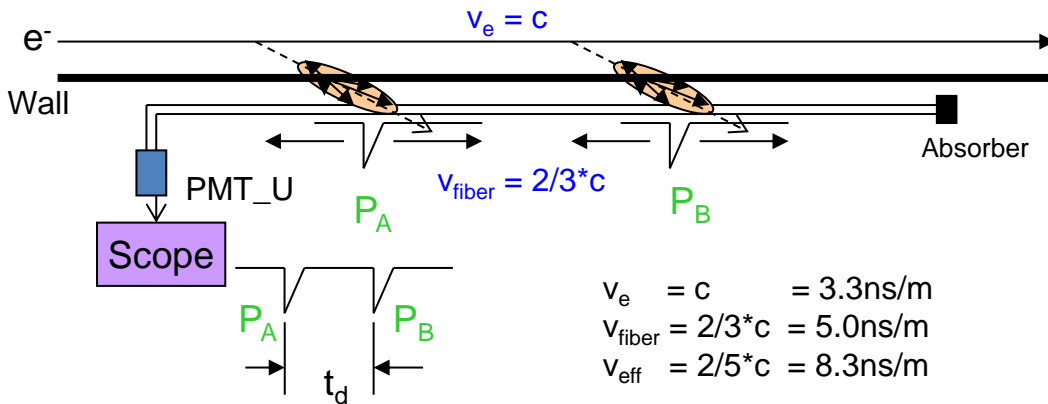


# ビームロスモニター (BLM)

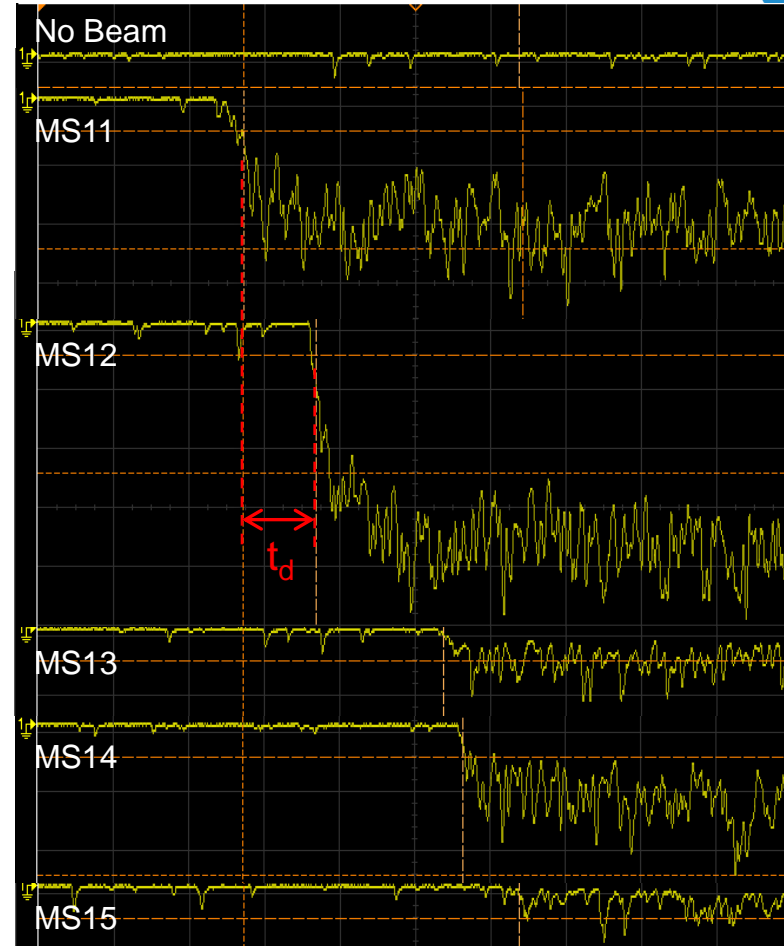
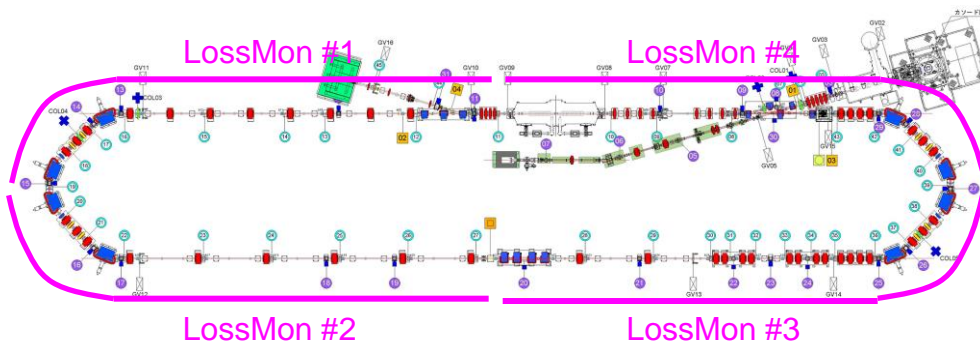
➤ 高速BLM #1 ⇒ 光ファイバー + フォトマル (PMT)

- 光ファイバー: Pure Silica (コア径: 600  $\mu\text{m}$ )
- PMT: Hamamatsu, H10721-110

➤ 原理



➤ 全周をカバーするように4セット設置

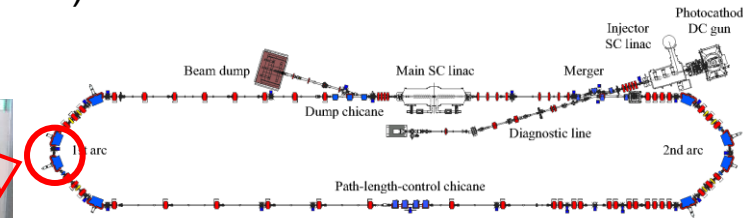
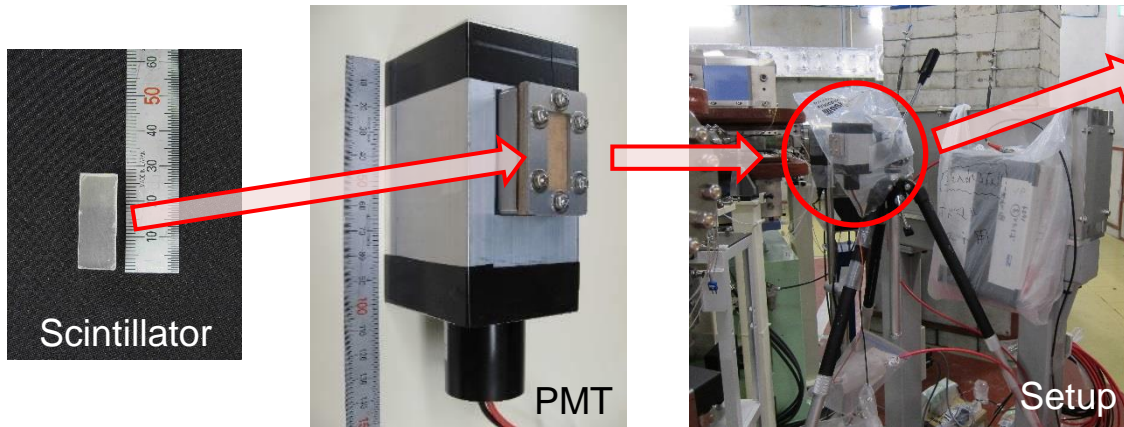


出力信号の時間構造を解析することにより、周方向に沿ったビームロスポイントの特定が可能

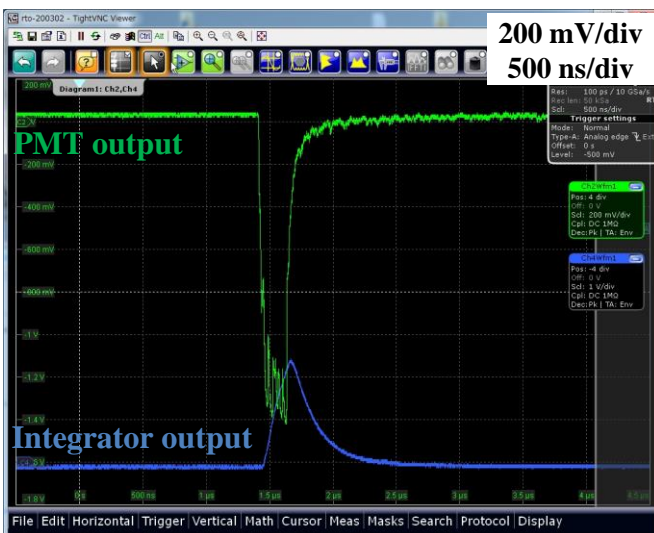
# ビームロスモニター (BLM)

➤ 高速BLM #2 ⇒ CsIシンチレータ + Large-cathode PMT (開発中)

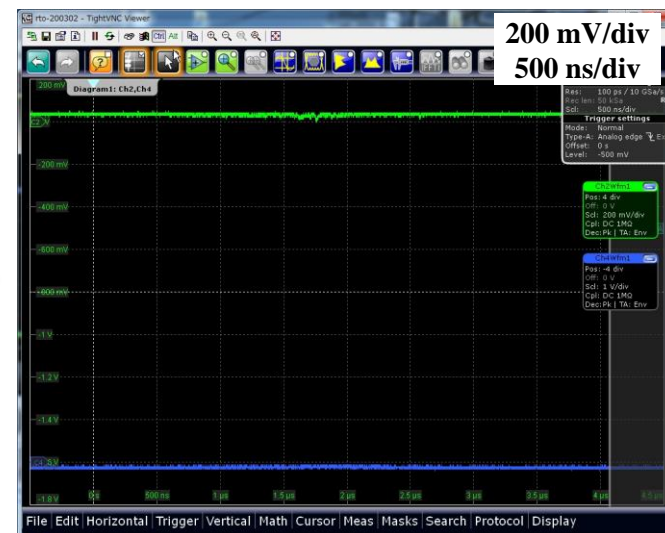
- シンチレータ: Pure CsI crystal (10 mm × 10 mm × 25 mm)
- PMT: Hamamatsu, R11558



@center of the 1st arc  
(around MS15)



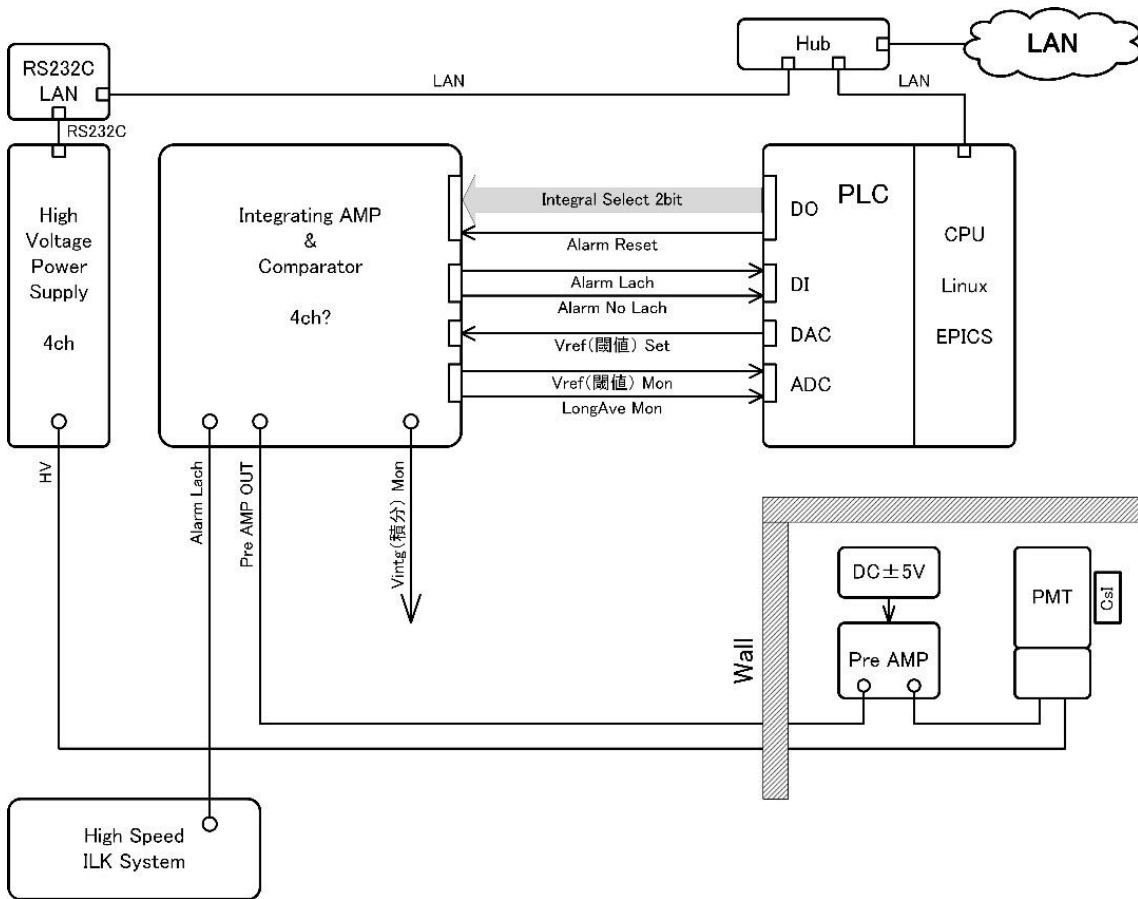
Before optics matching



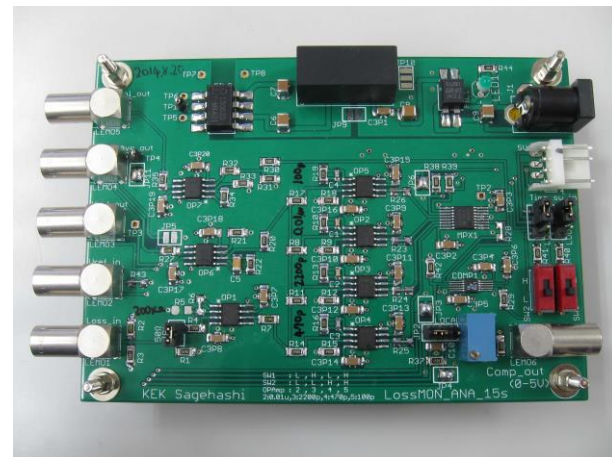
After optics matching

# ビームロスモニター (BLM)

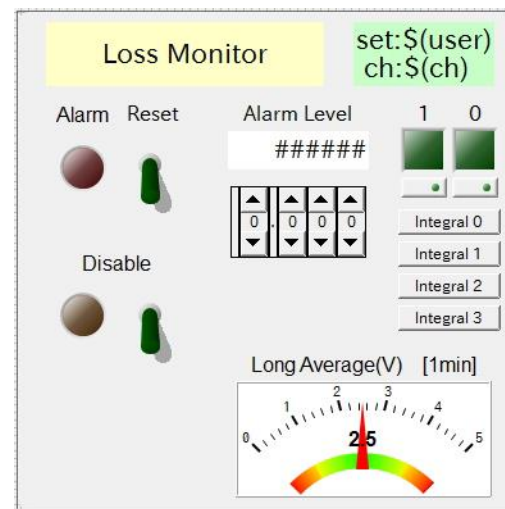
## ➤ 高速BLM #2 (CsIシンチレータ+PMT)の詳細



高速インターロックシステムのブロック図



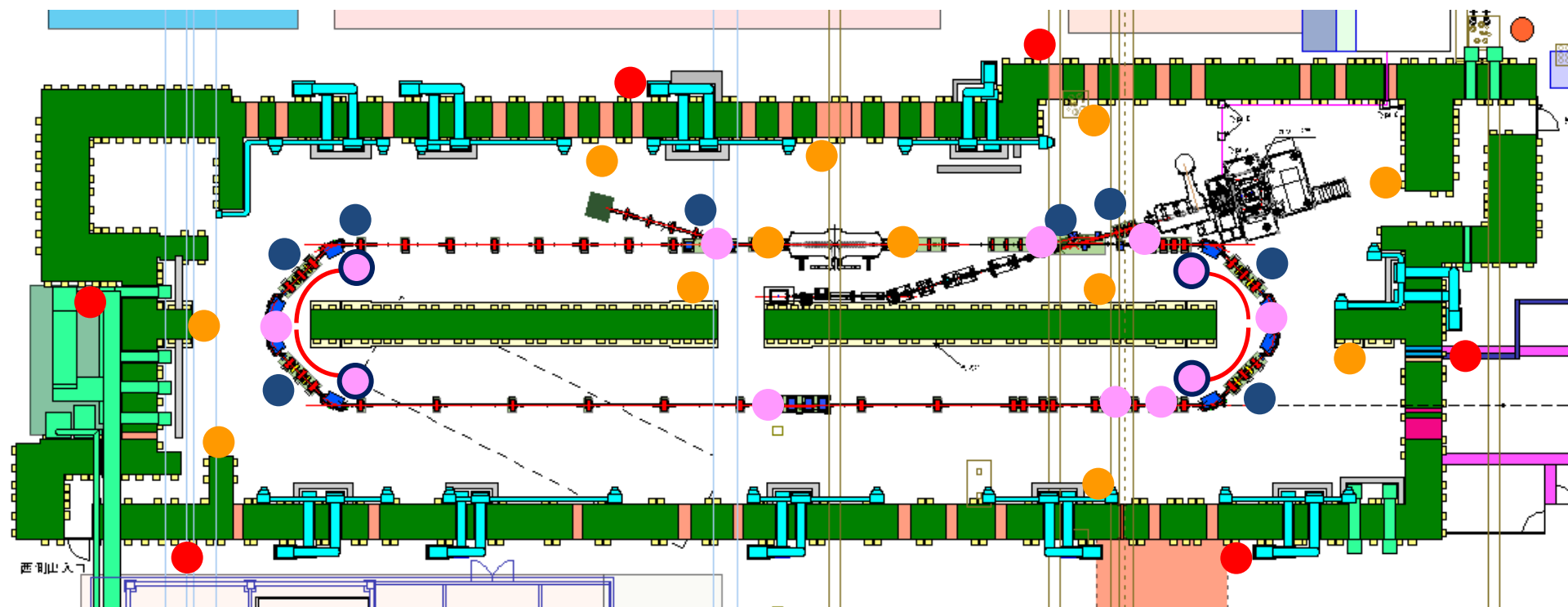
積分・比較回路基板



高速BLM#2 制御パネル

# 今後の予定

- ▶ 高速BLM#1 (Fiber+PMT)はアーク部の2セットのみに変更
- ▶ 高速BLM#2 (CsI+PMT) × 8台を主なロスポイントとコリメータ付近に設置
- ▶ 今期のビーム運転で調整後に実戦投入



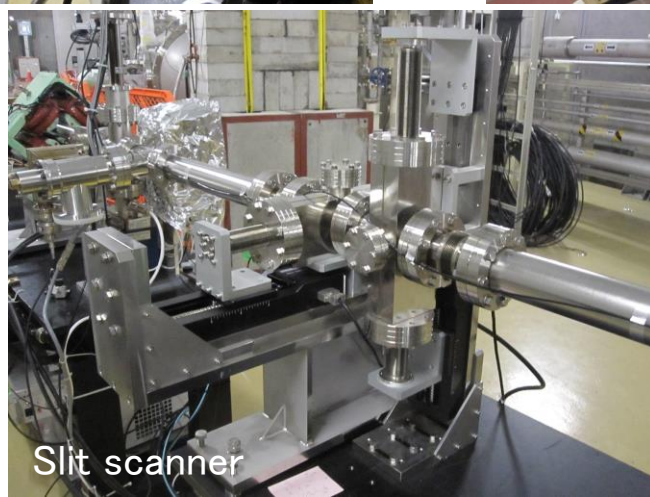
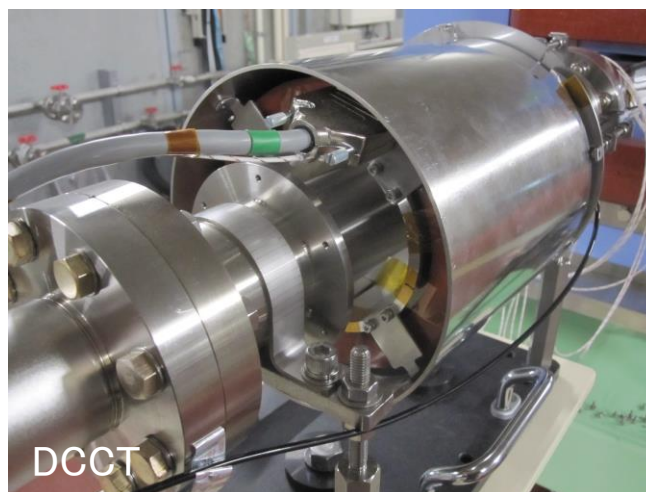
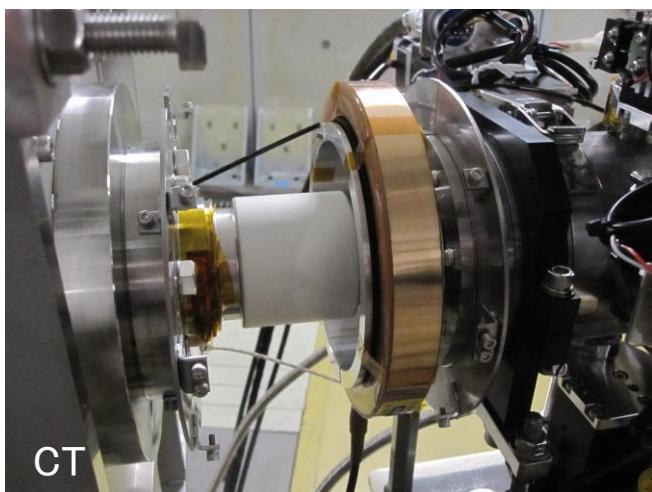
- 放管設置モニタ (Orange Monitor, 6台)
- 加速器室内エリアモニター (ALOKA, 10+2台)

- インターロック用ロスモニタ (Pure CsI+PMT: 8台)
- 診断用ロスモニタ (TI-doped CsI+PMT: 8台)
- 診断用ロスモニタ (Fiber+PMT: 2セット)



# その他のモニターと関連機器

- CTとDCCTはまだ平均ビームカレントが低いいため使用していない
- ビームカレントは3台の可動FCの他、2ヶ所のビームダンプでも計測
- 診断部にはエミッタンス測定用のスリットスキャナとバンチ長測定用の偏向空洞が設置されている





# 来年度の課題

## ➤ 周回部でのバンチ長計測

- バンチ圧縮の調整・実証に不可欠
- 設置場所：南直線部の第1アーク出口～周長補正シケイン間

## 【現案】CTR/CDRとマイケルソン干渉計を用いたバンチ長モニター

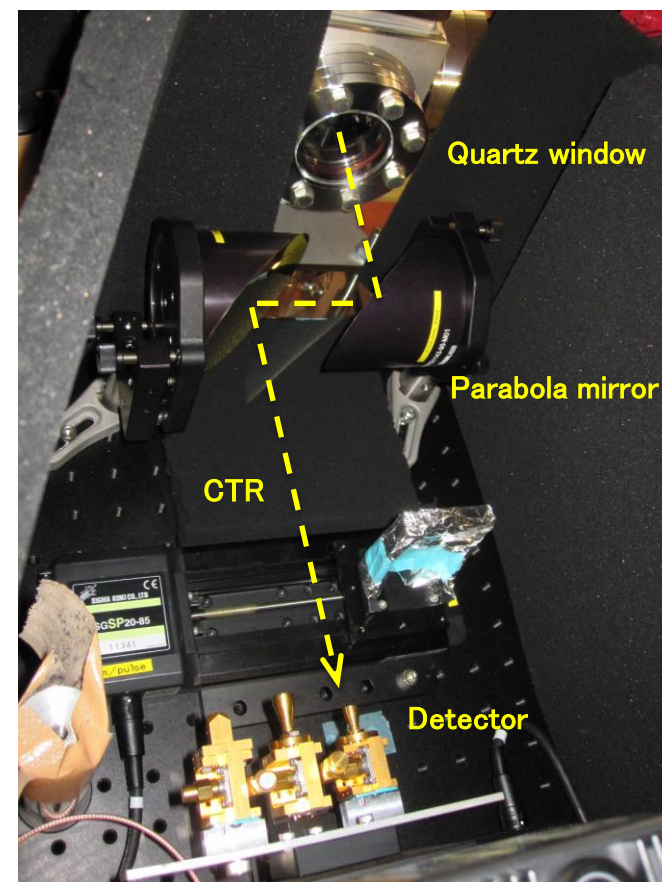
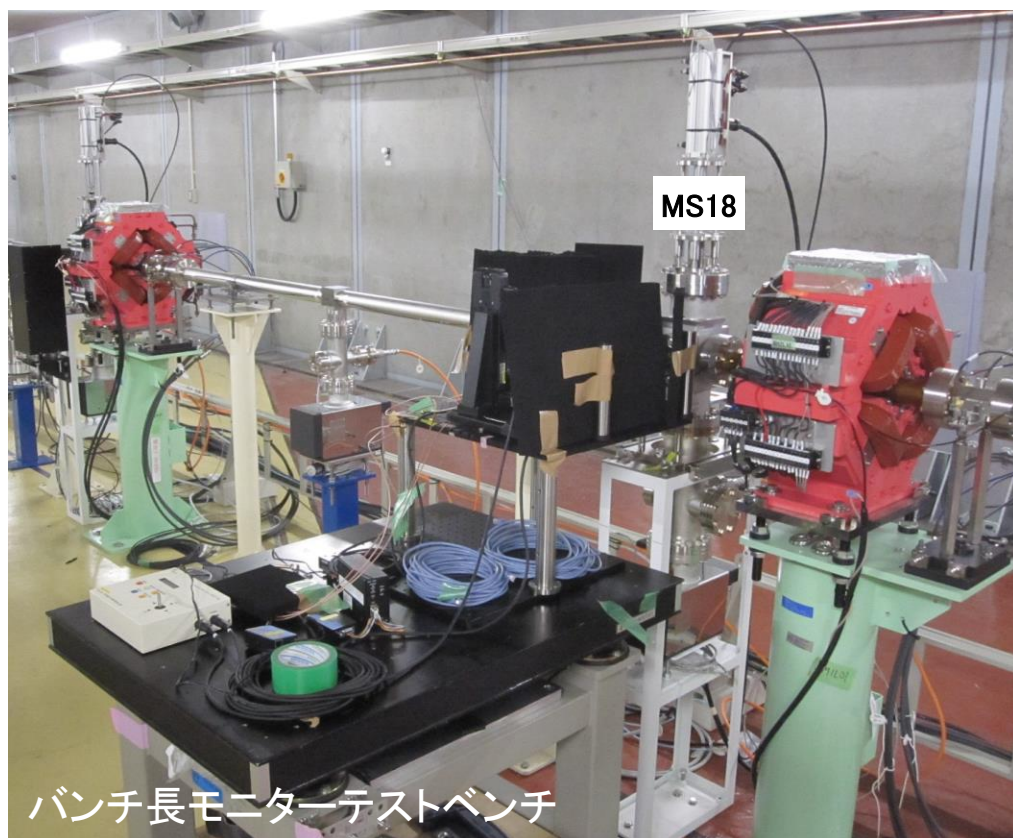
- MS18のOTR標的でテスト
  - ⇒ CTR光の強度分布がバンチ長に依存することを確認
- 「THz-CSR発生実験」(足立(伸), 野澤)に相乗り？
- 当初案：第2アーク第1BMを発生源とし、下流に実験ハッチを建設
  - ⇒ 南直線部に専用の標的挿入チェンバーを設置し、モニター兼利用ステーションとして使用する
- 予算要求：専用標的チェンバー, THz検出器(ボロメータ他), 干渉計用光学部品, etc.

## 【その他の案】

- OTR+フェムト秒ストリークカメラ (分解能はサブピコ秒)
- 偏向空洞+SCM (高インピーダンス)
- EOサンプリング

# バンチ長モニターの開発

- CTRとマイケルソン干渉計を用いたバンチ長モニター
  - 南直線部にあるMS18のOTR標的を用いて準備試験(2014/6/10, 11)
  - 狭帯域のTHz検出器でCTRによる信号を観測し、その強度がバンチ長に依存して変化することを確認

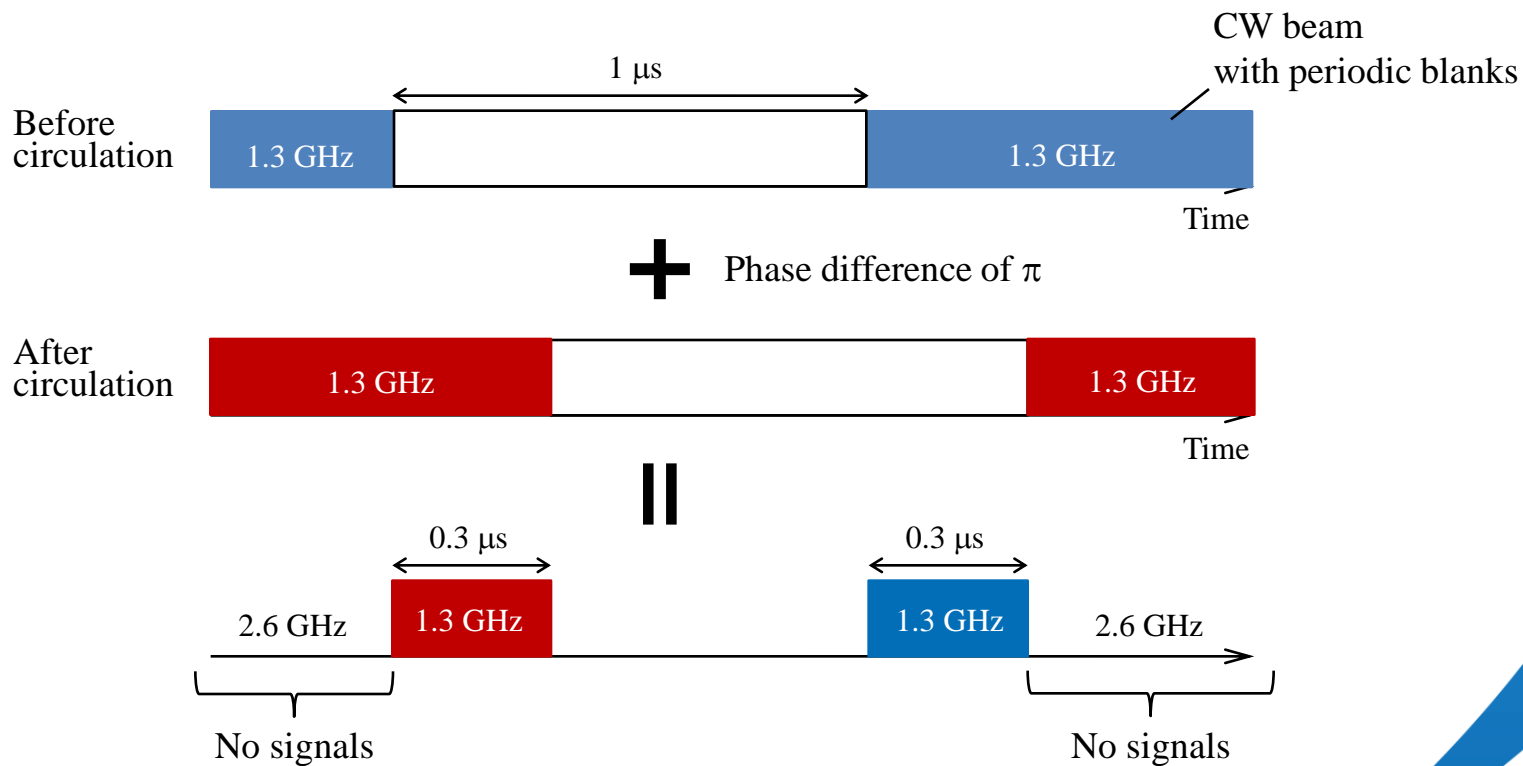


Y. Honda et al., "Development of Bunch Length Monitor System at the Return Loop of KEK ERL Test Accelerator," the 11th Annual Meeting of PASJ, Aomori, SAP089 (2014) [in Japanese].

# Backup Slides

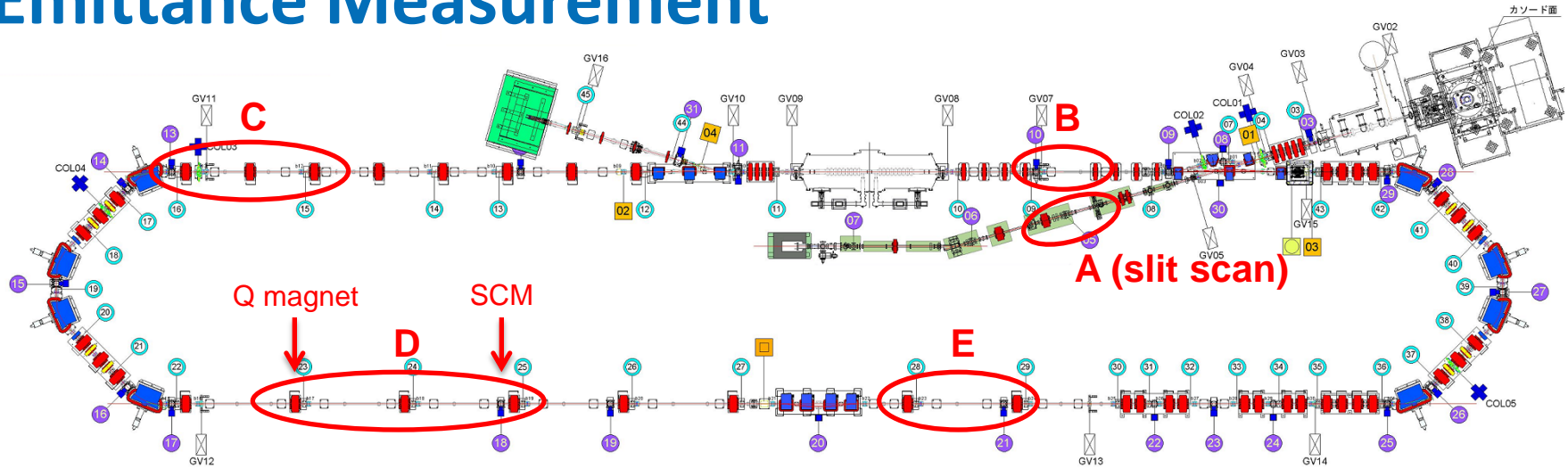
# BPMを利用した2カラービームの同時測定

- CWビームの場合 ⇒ 途中にビームのない区間を周期的に設ける

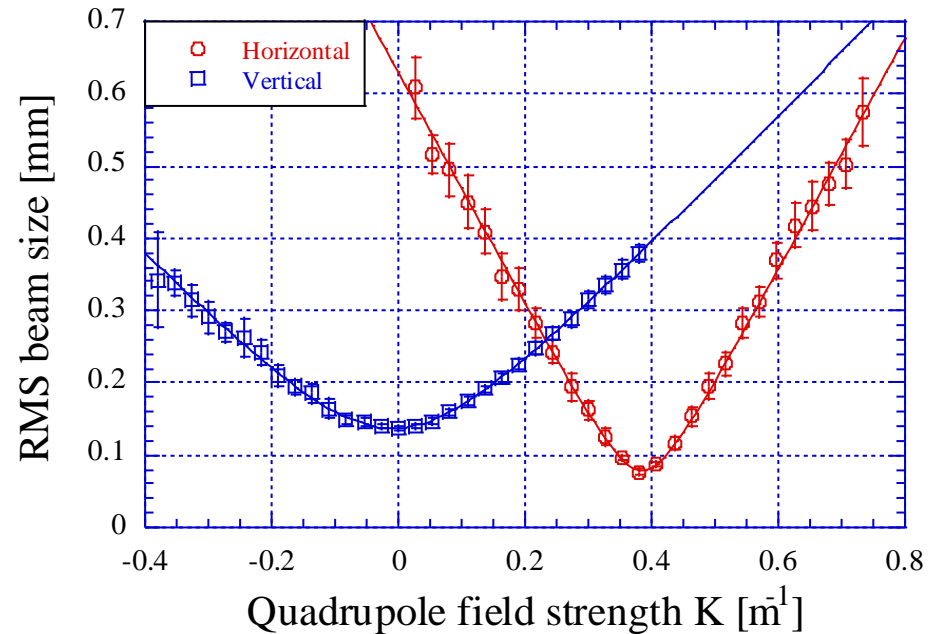


注) マクロパルスビームの場合と比較すると、得られるビーム信号の順番が逆になる (先頭: 加速後ビーム, 後尾: 加速前ビーム)

# Emittance Measurement



- Normalized emittance was measured by employing the Q-scan method at four sections (B, C, D, E).
- Result for low bunch charge: 0.14 mm·mrad
- This is almost the same as the design value.
- Emittances measured at five sections were consistent with each other.
- For high bunch charge (7.7 pC/bunch), emittance is still larger than the target value, but it is decreasing steadily because of elaborate optics matching using SCMs.



Example of the Q-scan result acquired at section D (for a low bunch charge of ~20 fC/bunch)