

cERL成果報告

ビーム診断・制御まとめ

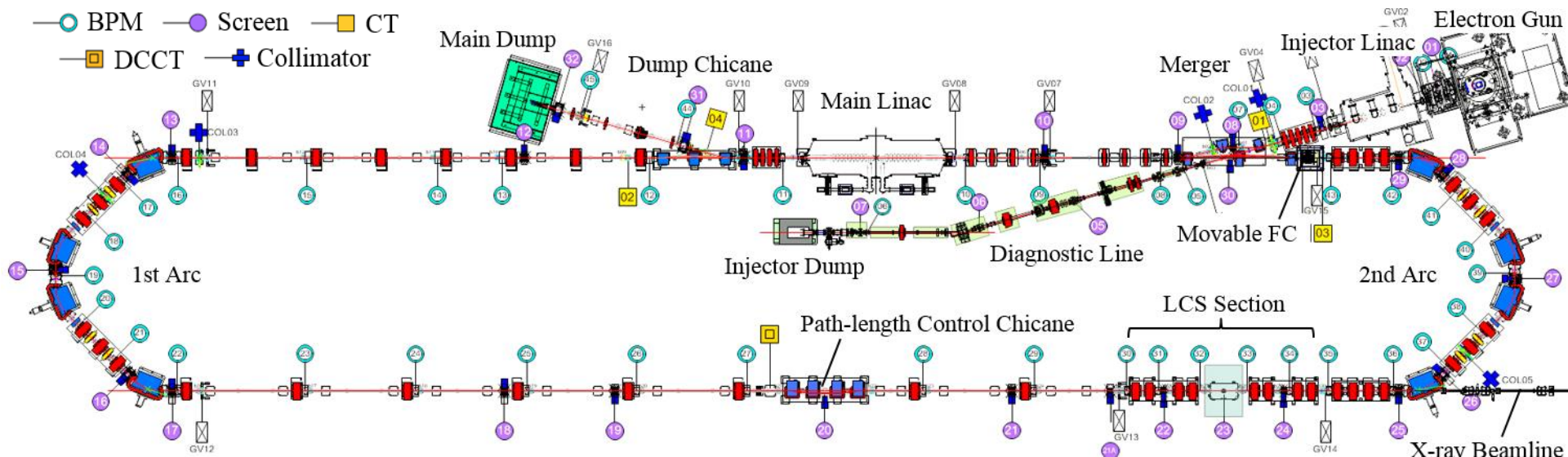
帯名 崇, 高井 良太, 多田野 幹人, 下ヶ橋 秀典, 本田 洋介,
飛山 真理, 谷本 育律, 本田 融, 野上 隆史, 内山 隆司, 芳賀 開一, 濁川 和幸, 長橋 進也,
路川 徹也*, 亀田 吉郎*

KEK 加速器第七系および第四系
*東日本技術研究所

2017/10/27 コンパクトERL評価専門委員会

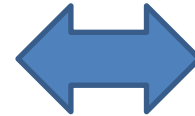
概要

- 取り扱う領域
 1. ビームモニター、診断
 2. インターロック（機器保護システム、MMS/MPS）
 3. 安全システム（PPS）
 4. 加速器制御 全般
- 評価項目
 - a. 実証すべき項目および開発研究が必要な項目
 - b. 建設および運用経験、マシンスタディを通して得られた達成度
 - c. 残された課題



1-a : ビーム診断での実証項目と R & D

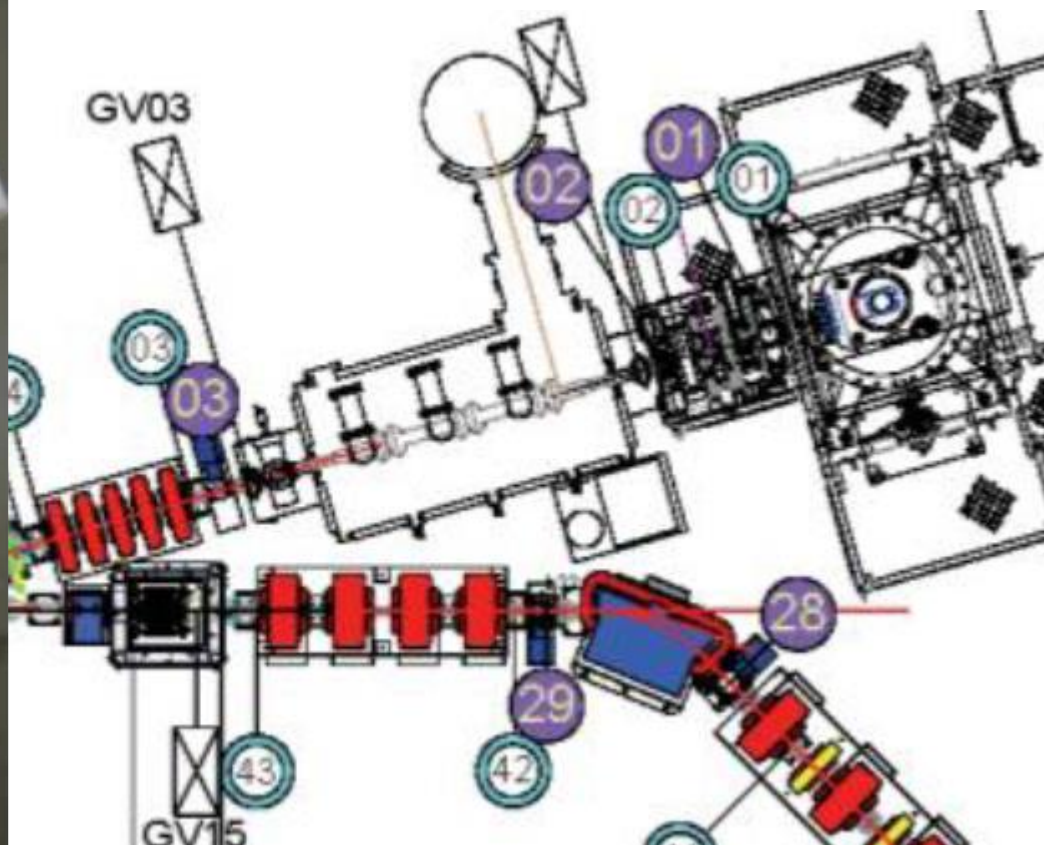
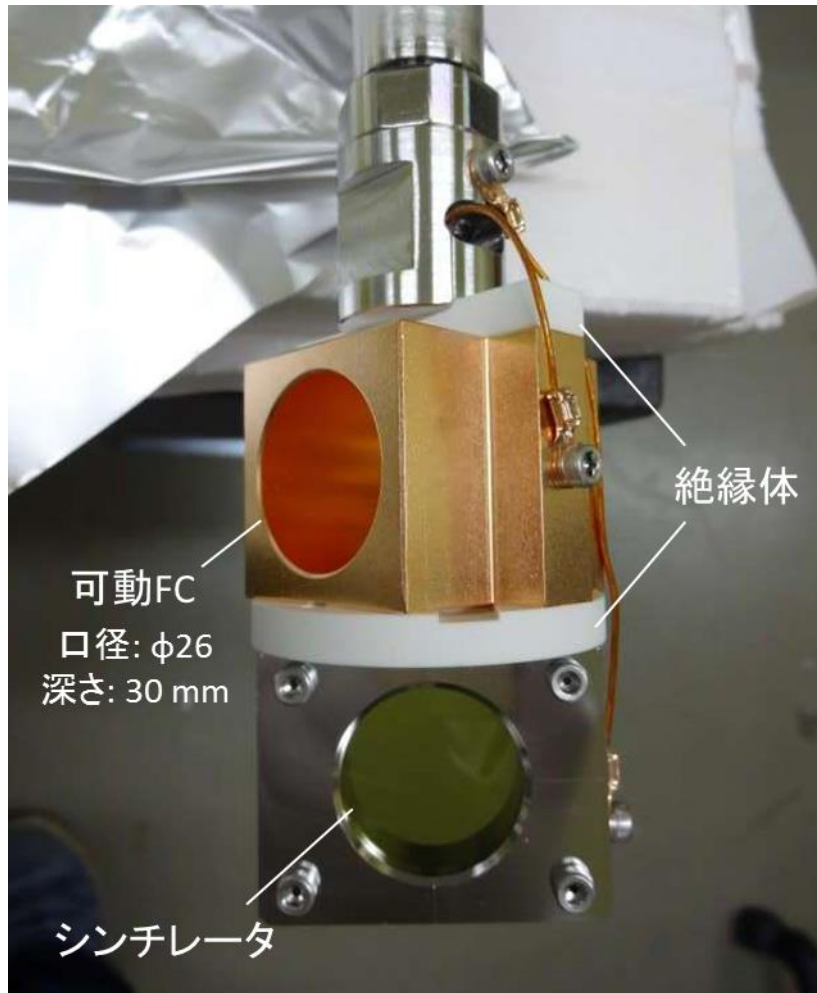
- コミッショニング時のビーム診断
 - 低電流・低電荷時のビーム診断
 - 必要な診断機器の設計・製作、設置、calibration等
 - コミッショニングでの使用
 - ERL特有
 - 非Gaussianビーム : **スクリーンモニター**がもっとも重要な診断装置
 - 2ビームが通過する場所での調整
 - その他 : 基本的な診断機器 (ビーム電流など) 、ソフトウェア等
- 初期コミッショニング後、ビーム品質向上のために必要なモニター類
 - エミッタンス測定
 - LCSでの衝突調整
 - その他
- 大電流、CW運転での調整
 - 非破壊で測定できる機器 : BPM等
 - ビームロスモニター及びスクレーパーによるロス低減調整
 - 大電流運転に耐える設計 (wakefield計算) を最初からする必要がある
 - ラスタリング調整
 - その他



限られた予算
設計・製作時間

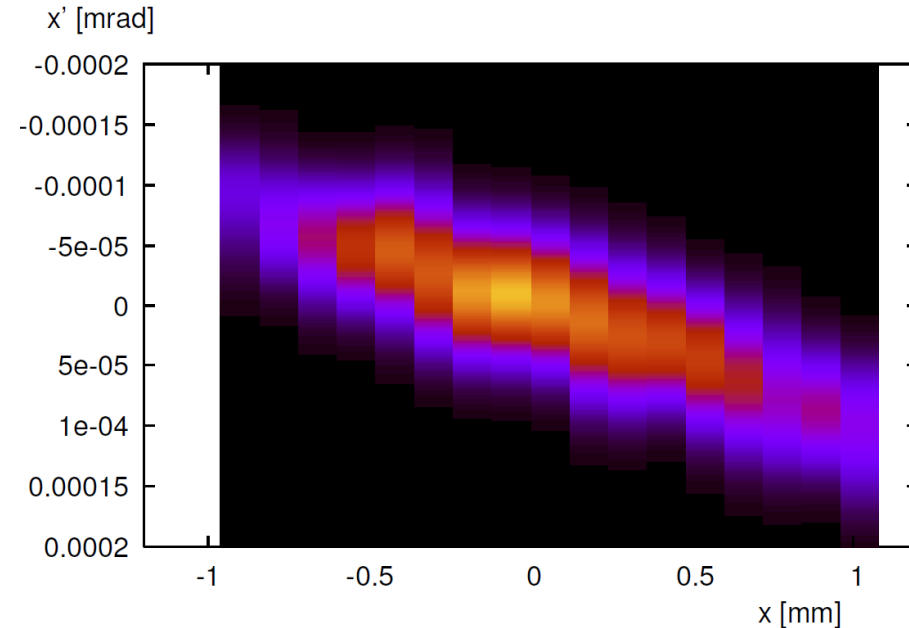
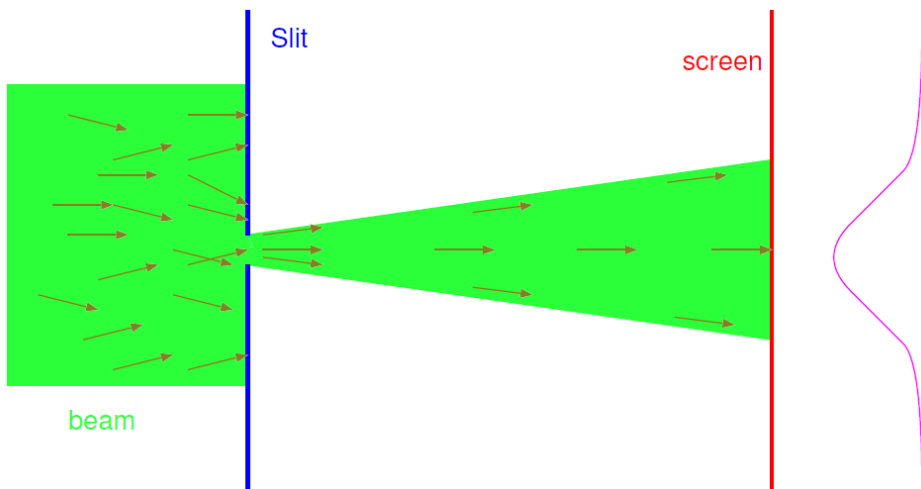
入射部、診断部での診断機器例

- ファラデーカップとスクリーンモニター



スリットスキャナー

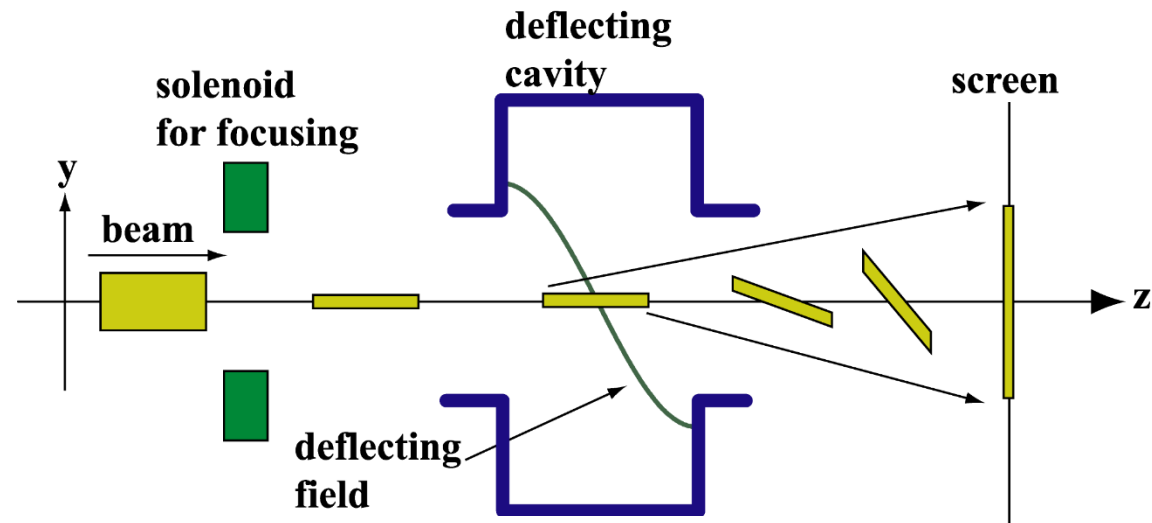
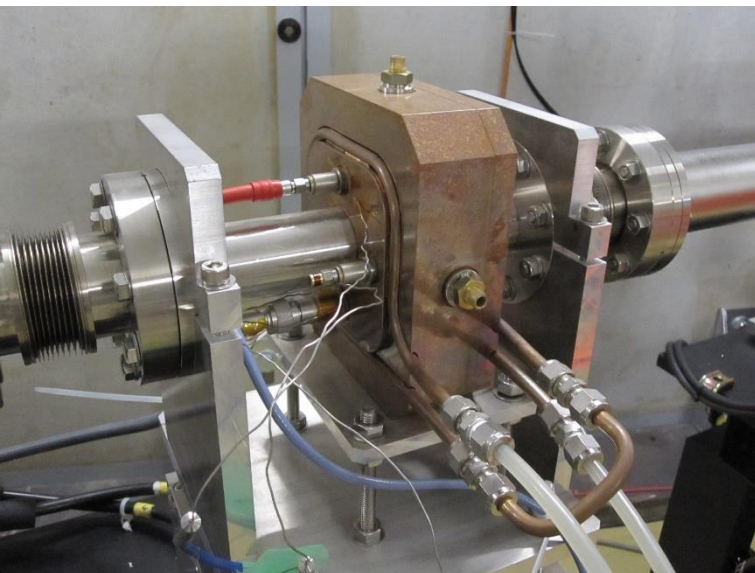
- 入射ビーム診断ラインに設置
- 下流のSCMと組み合わせてビームの**エミッタンス**（位相空間でビームが占める面積）を測定するための機器
- ビームの一部をスリットで切り取り、十分長い自由空間を伝搬させることでビームの角度拡がりを測定する
- スリットの位置をスキャンして位相空間での密度分布を再現



偏向空洞

松葉俊哉, 博士論文, 広島大学 (2012).
本田洋介 : cERLコミッショニングレ
ポート (2013).

- 入射ビーム診断ラインに設置
- 下流のSCMと組み合わせて**バンチ長**を測定するための機器
- 空洞内に生じるダイポール磁場を利用して通過タイミングに比例した強さの横方向キックを与え、ビームの時間構造を横方向のプロファイルに射影する

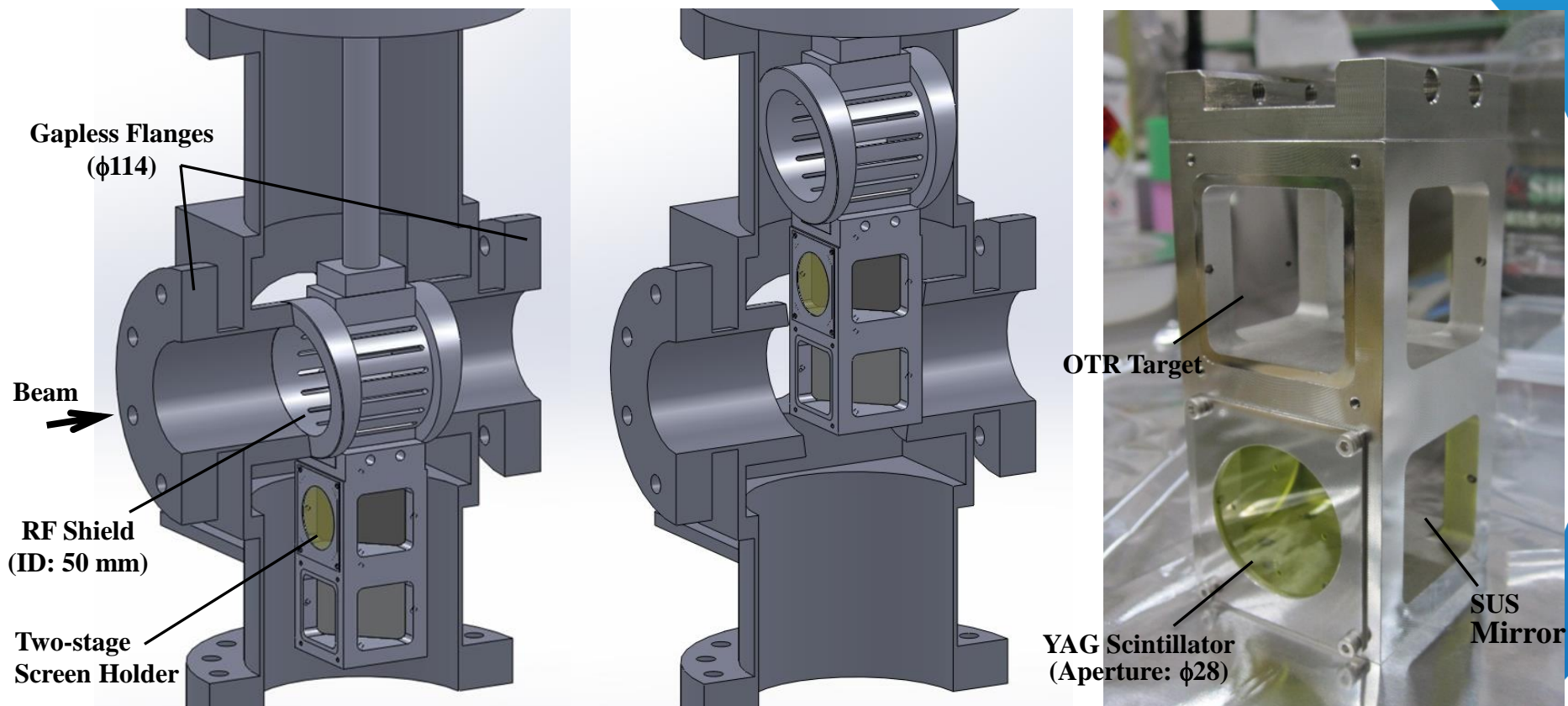


スクリーンモニター(SCM)

- ▶ 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
⇒ 2種類のスクリーンを備えたRFシールド付きSCM
- ▶ 内部構造や駆動方式により下記の7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 | 2 |
| 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 |
| LCS衝突点 | φ41.5 | Pneumatic | Desmarquest | 10 x 10 | 1 |

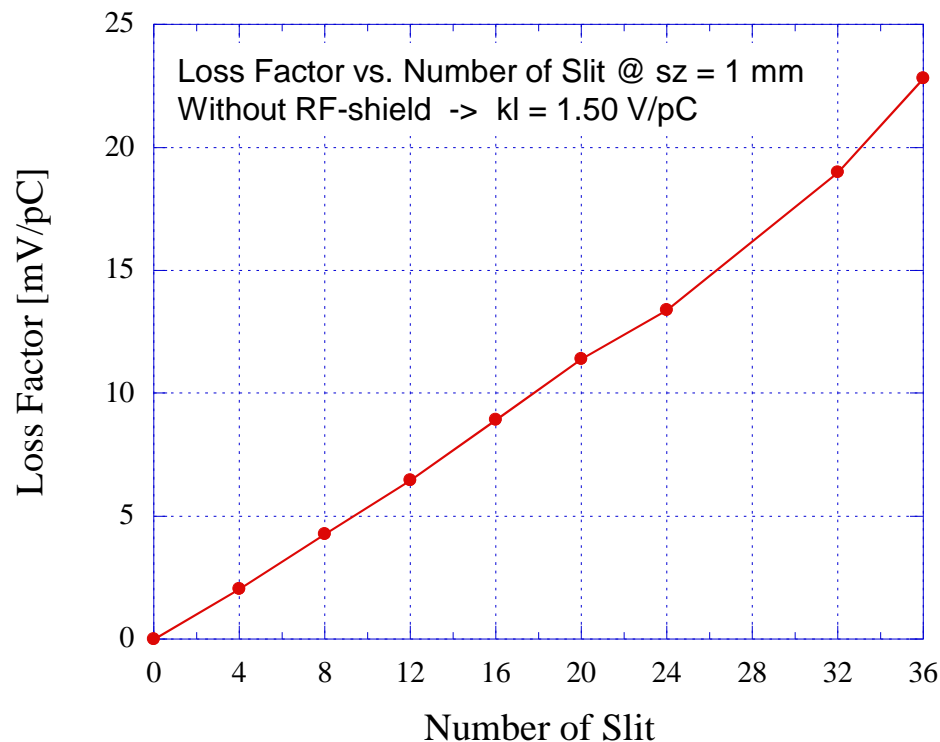
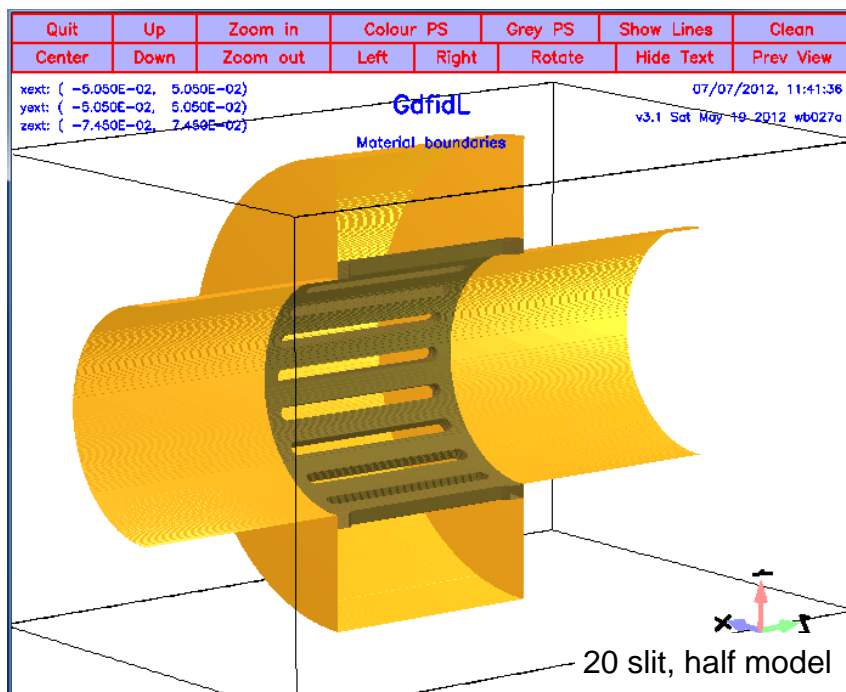
例) 直線部用SCMダクト



- 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 \AA 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
 - 厚み(アルミ/シリコン): 40 nm / 70 μm
 - 45° 入射時の後方OTRを利用
- 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

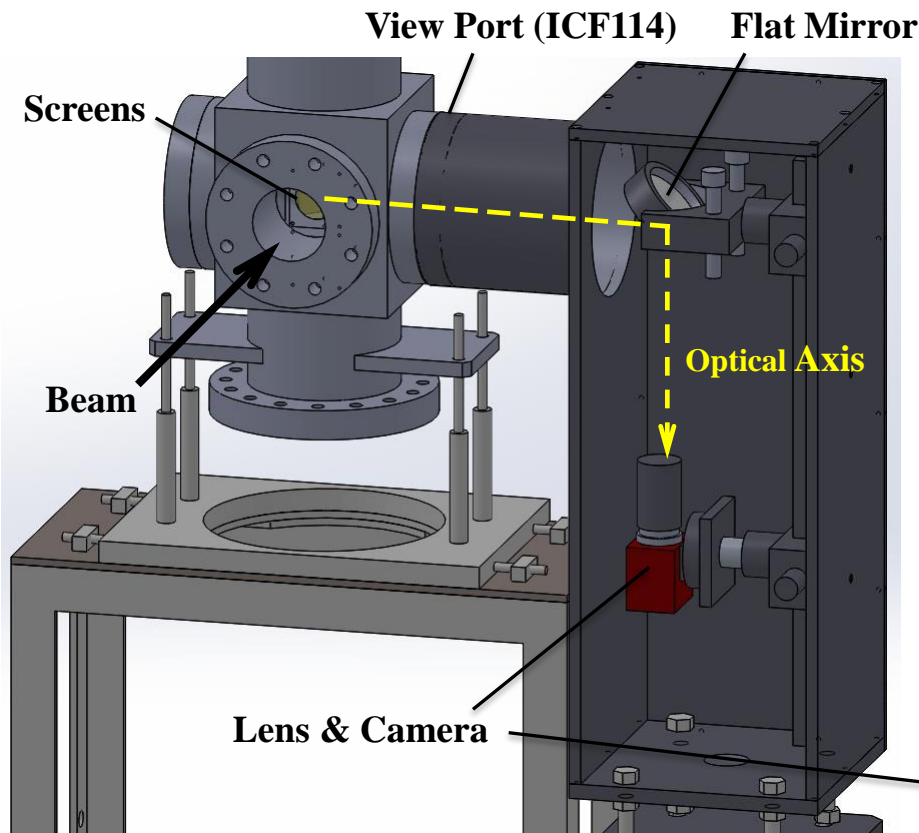
RFシールドの効果

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



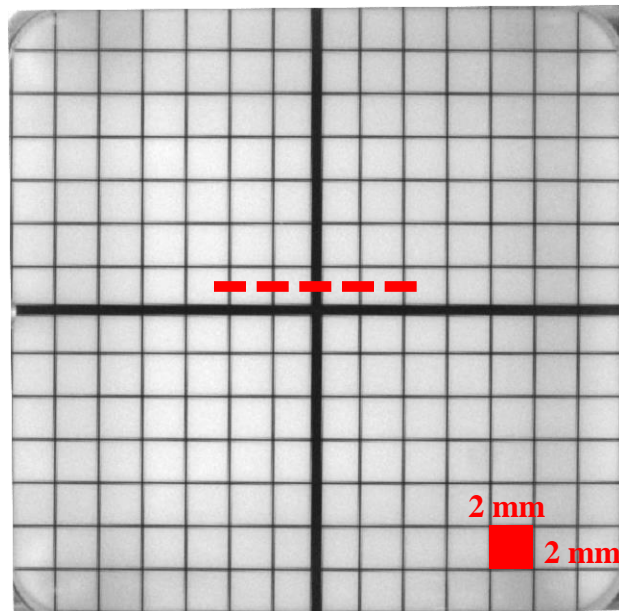
- Loss factor @20 slits: 11.4 mV/pC
- シールド無しの場合の1/100以下

スクリーン観測用光学系

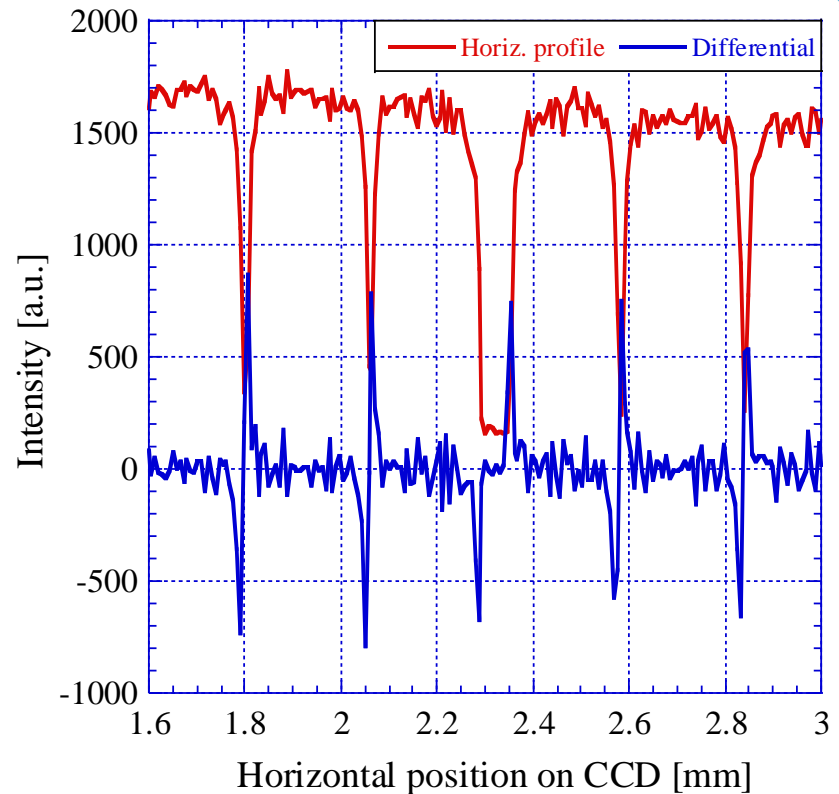


- ビーム軸に対して90° 方向から観測
- ミラーを介することで放射線によるダメージを軽減
- GigEカメラを採用 (Allied Vision Technologies, GC650)
: 659 × 493 (VGA), □7.4 μm, 12 bit (4096階調)
- 低ディストーションCCTVレンズ (Myutron, HS5028J3)
- 吸収型NDフィルター (ND2, 4, 8, 20, 100, 1000)

空間分解能の評価



コミッション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ィールとその位置微分

- 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 μ m, OTR: 37 μ 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

Change Camera ▼ Change **SCMIM04 [cam18]** **57.0 um/Pixel** CaptureON ●

| | Horizontal | Vertical |
|----------|------------|------------|
| Peak Pos | 378 | 234 |
| Peak Val | 120031 | 60661 |
| Mean Pos | 342 | 247 |
| Mean Val | 22,369 | 24,362 |
| Sigma | 136 | 135 |
| FWHM | 487 | 489 |
| Area | 11,016,918 | 11,016,918 |
| Min/Max | 0 | 4095 |

Horizontal Peak[ur]

Vertical Peak[ur]

GigE Config BG Ctrl

Save Profile Fitting Ctrl

2014/06/02 15:14:00

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

スクリーンモニターのまとめ

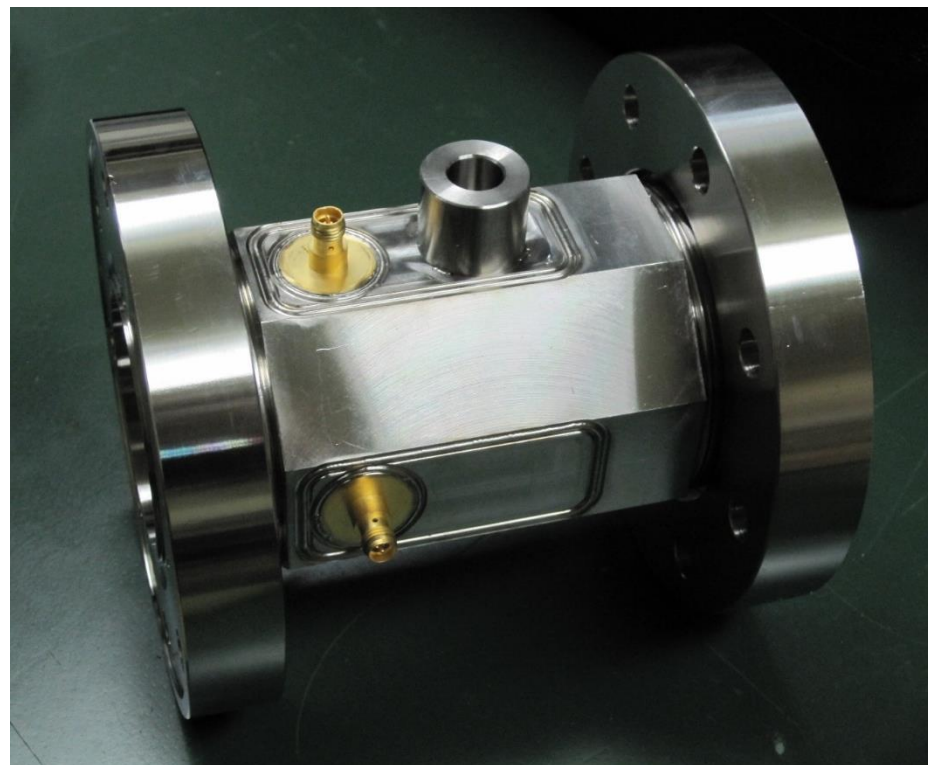
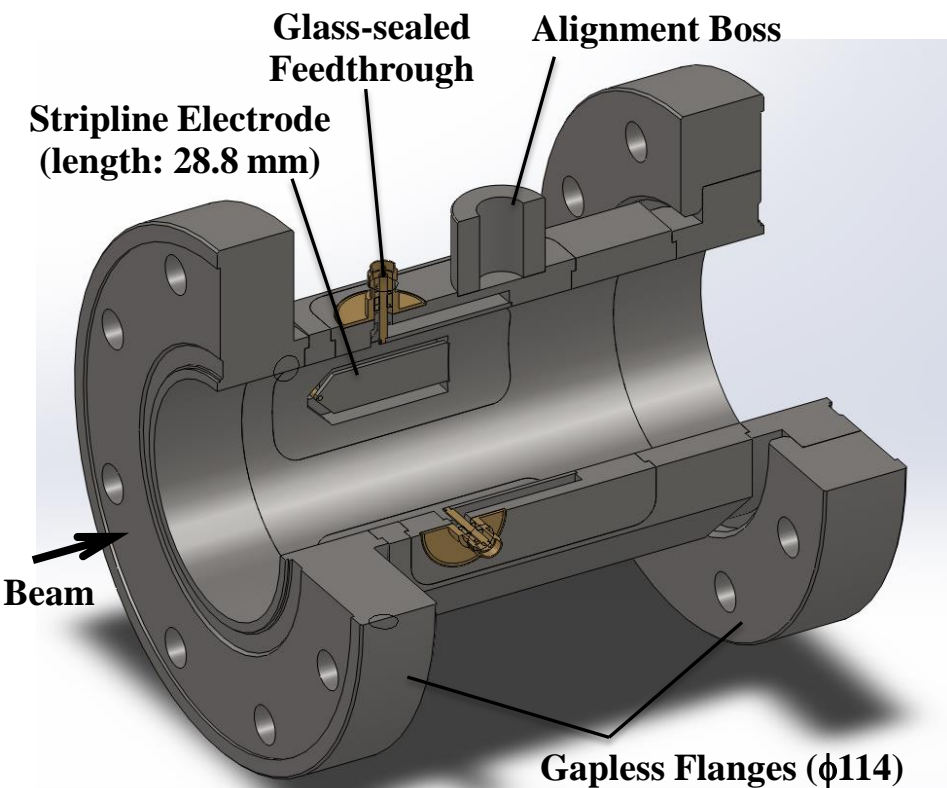
- 成果
 - エミッタンス測定やビーム調整に必要な十分な精度を持つスクリーンモニターを開発し、運用してきた
 - より精度が必要な部分については拡大光学系などを導入。
 - ソフトウェアによる画像解析や過去データとの比較、自動測定など、各種の制御ソフトウェアを作成して運用してきた
- 今後の課題
 - 小電荷の調整～大電荷での測定に対応するため、遠隔操作可能なNDフィルターや拡大光学系などの導入：予算と重要度を勘案しつつ導入
 - Coherent OTR 対策：空間 or 時間での分離 (XFELでは問題になり対策)
 - 放射線ダメージの影響はまだ見えていないが、今後も注意する

BPM

- 実証すべき項目と要求する精度について
 - 非破壊でのビーム位置測定（重心位置のみ）
 - 通常目的には、ビームサイズが比較的大きいので精度は追及しない
 - コミッショニングから大電荷運転まで、幅広いダイナミックレンジが必要
 - 2ビーム区間での位置測定実現

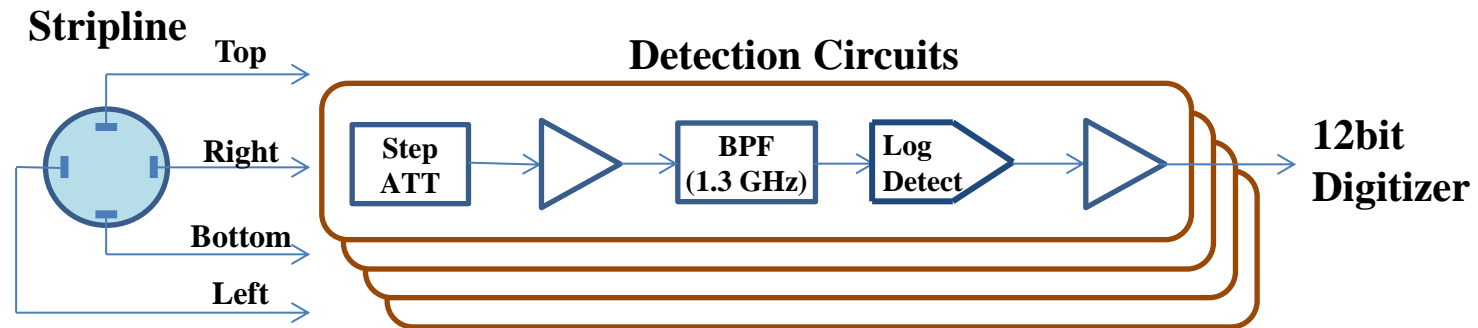
BPM設計指針

- ストリップライン長を1-Loopに最適化すると、2-Loop に拡張した際には inner-loopでの位置測定が不可能になってしまう
 - ストリップラインの周波数特性は長さに対して $\lambda/4$ 特性を持つため
 - 1-Loop でのゲインを多少犠牲にした設計を採用した
- ギャップレスフランジ（インピーダンス低減）
- 測量用のターゲット座を取り付け：マグネットとの相対位置を明確化

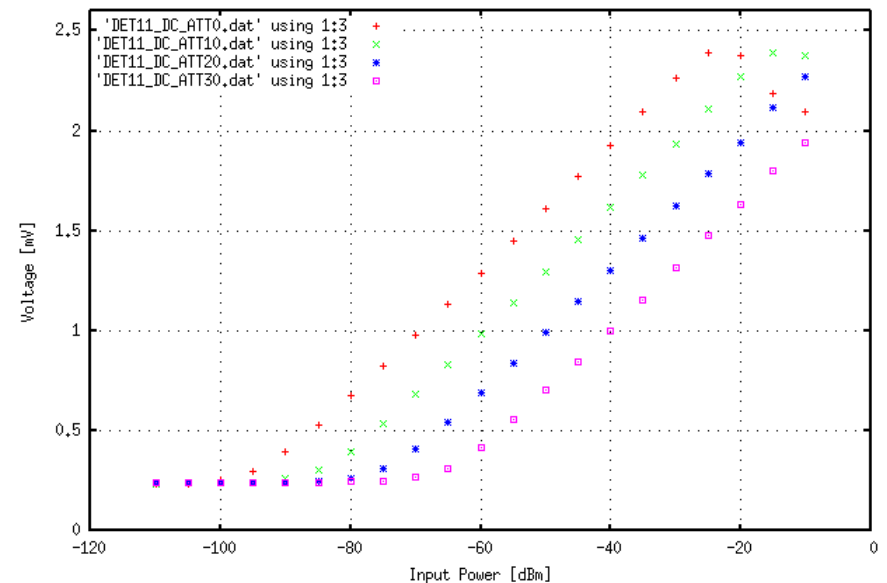


検波回路

- cERLでは位置・時間分解能よりもダイナミックレンジの広さを優先
- できるだけ低コスト ⇒ ログ検波回路



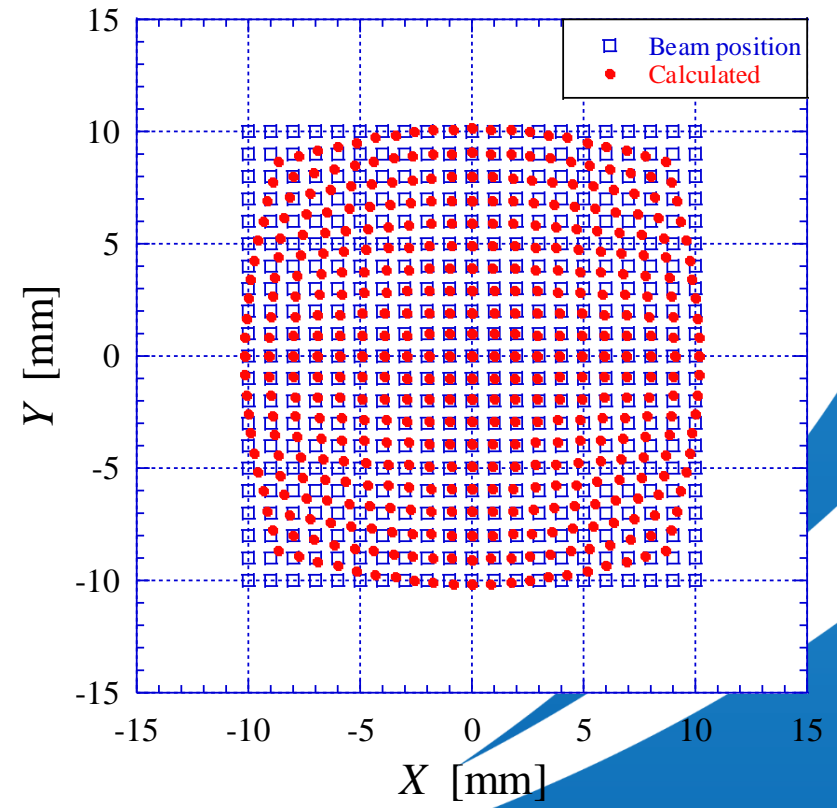
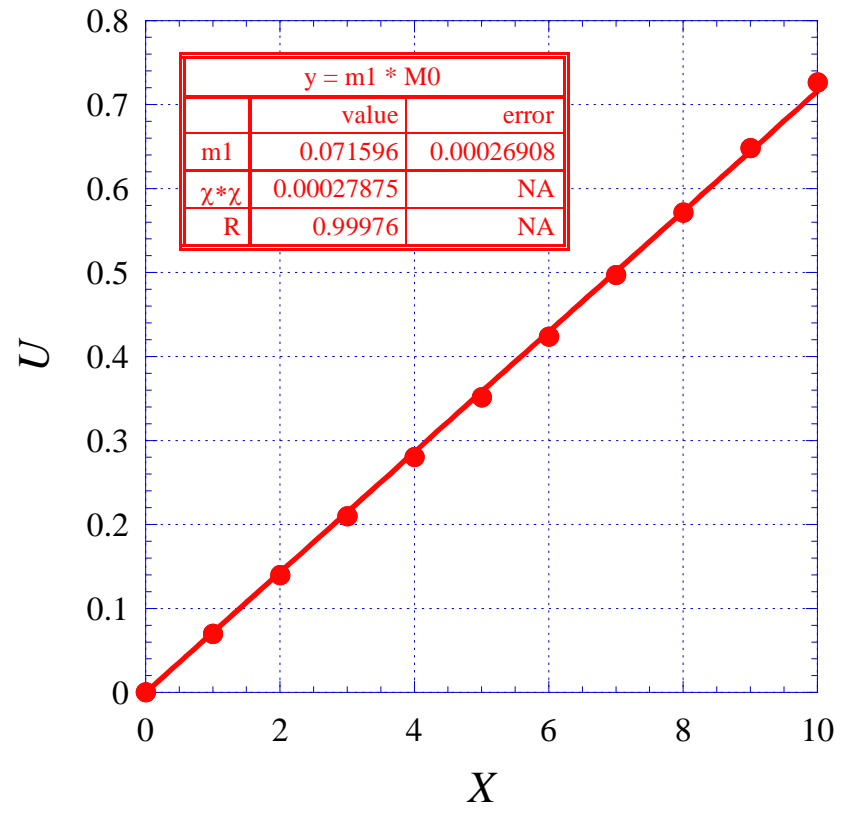
- 帯域幅: 10 MHz, 中心周波数: 1.3 GHz
- 入力段の可変アッテネータを0 dBに設定した場合、-90~-30 dBmの入力レベルに対してLog-Linearに応答
- デジタイザーには Yokogawa SL1000 を使用



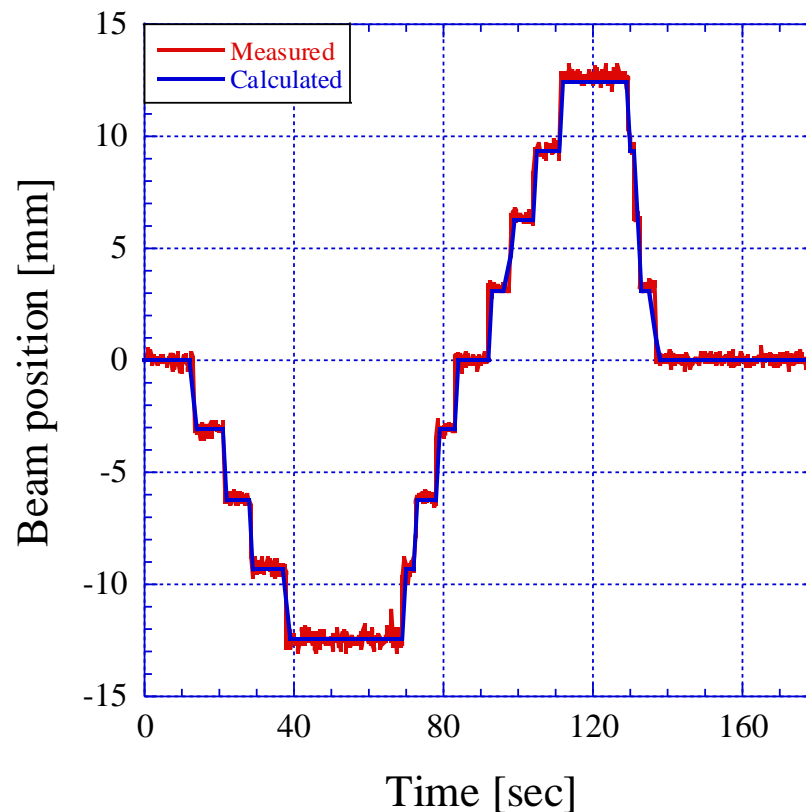
マッピングとビーム位置計算 その2

➤ 感度係数 k_x, k_y

$$\left. \begin{aligned} X &= k_x \cdot (\log_{10} V_r - \log_{10} V_l) \equiv k_x \cdot U \\ Y &= k_y \cdot (\log_{10} V_t - \log_{10} V_b) \equiv k_y \cdot V \end{aligned} \right\} \boxed{k_x = k_y = 14.0}$$

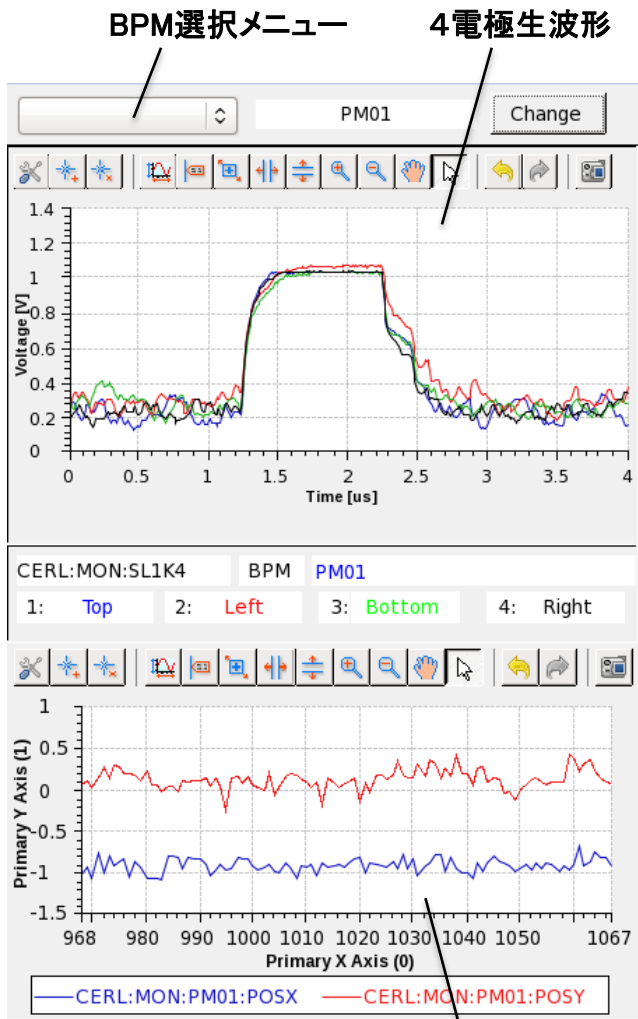


位置分解能の評価



- 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)
- ビームのバンチ電荷を上げる or 検出信号を平均する時間幅を増やすことで分解能は上げられる($\sim 10 \mu\text{m}$)

制御パネル例

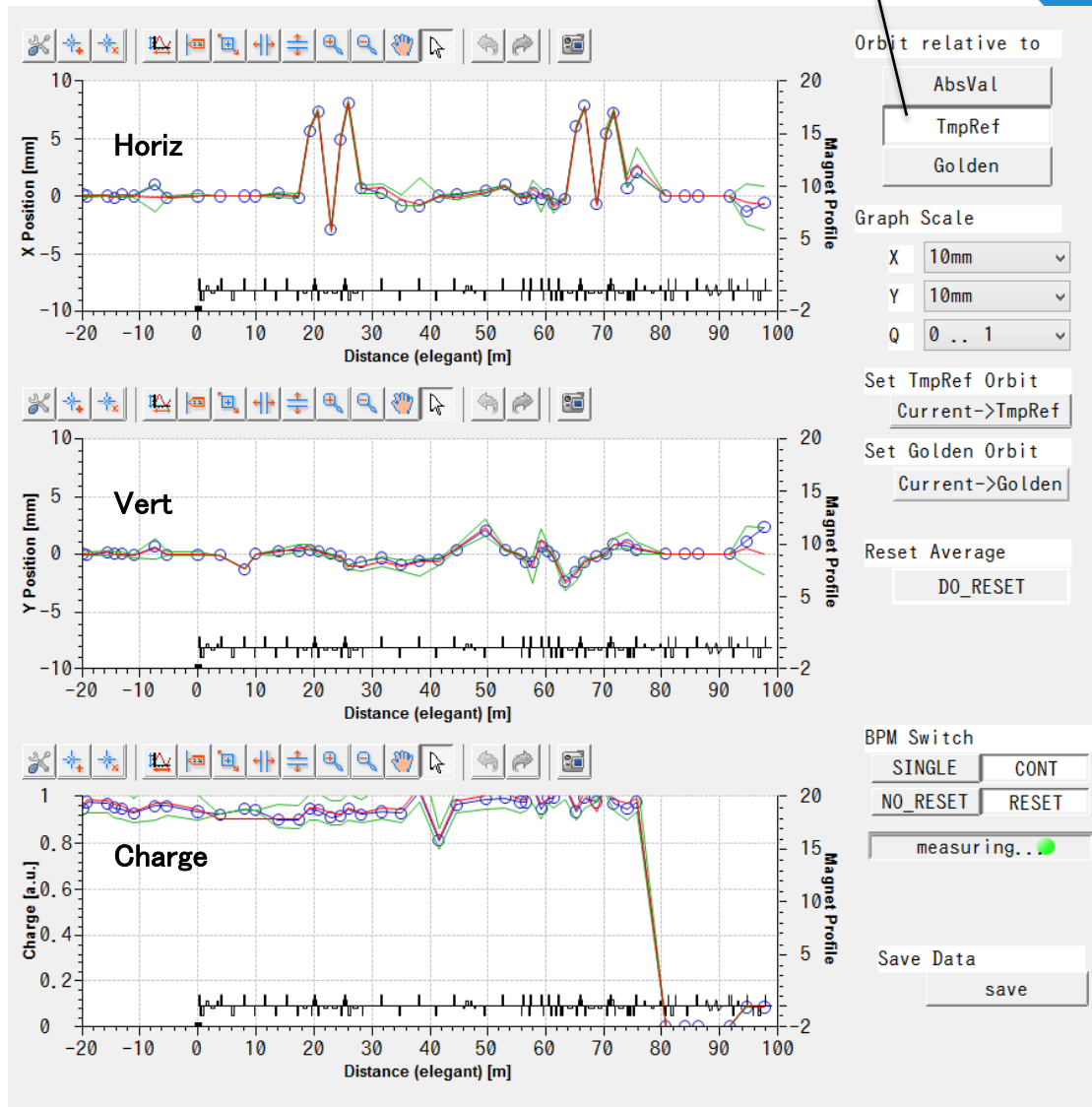


ビーム位置のトレンドグラフ

個別表示パネル
(バーストモード時)

2017/10/27

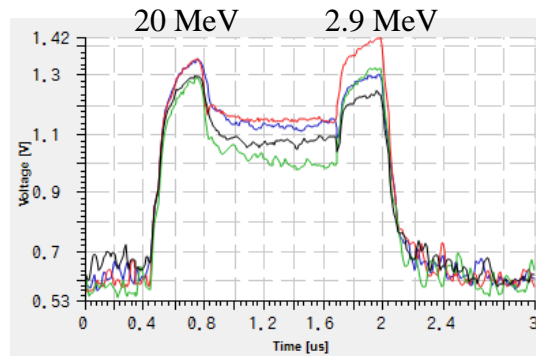
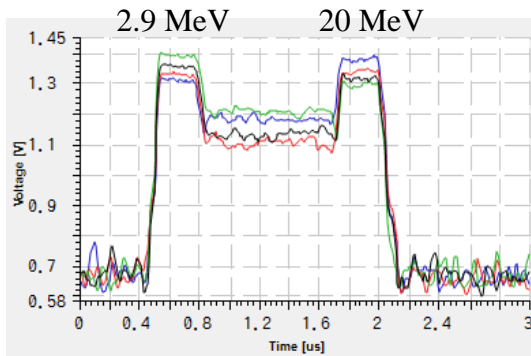
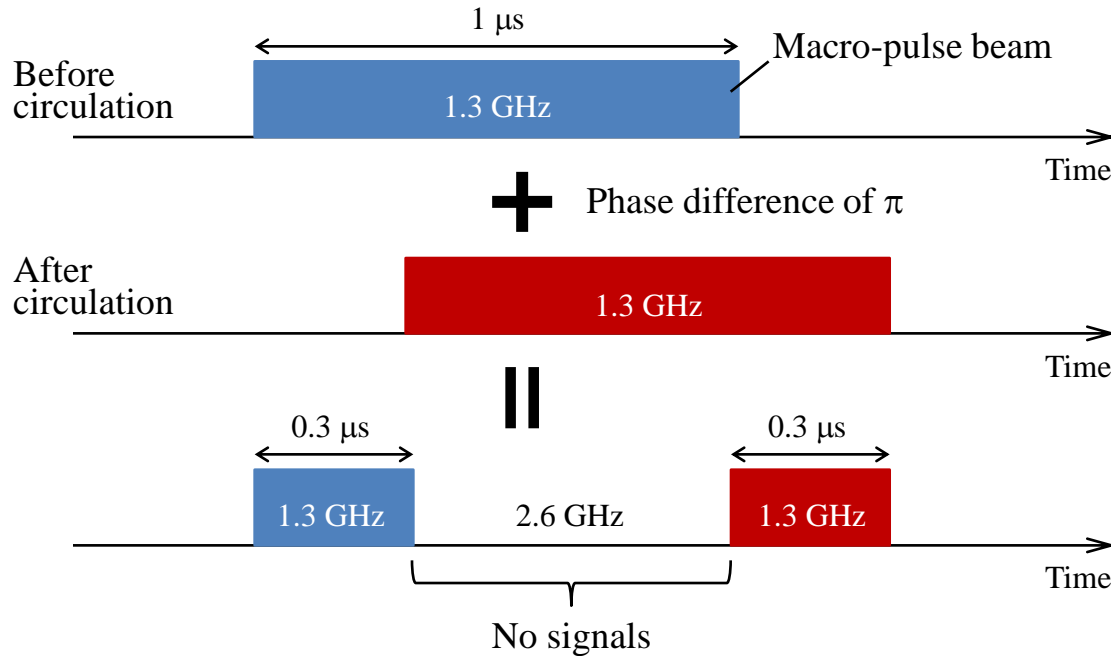
基準軌道からの差分表示



周回軌道表示パネル
(分散測定時, 主空洞: -0.2 MV)

コンパクトERL評価専門委員会

2カラービームの同時測定



- 合流部からダンプ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 (~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° 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!

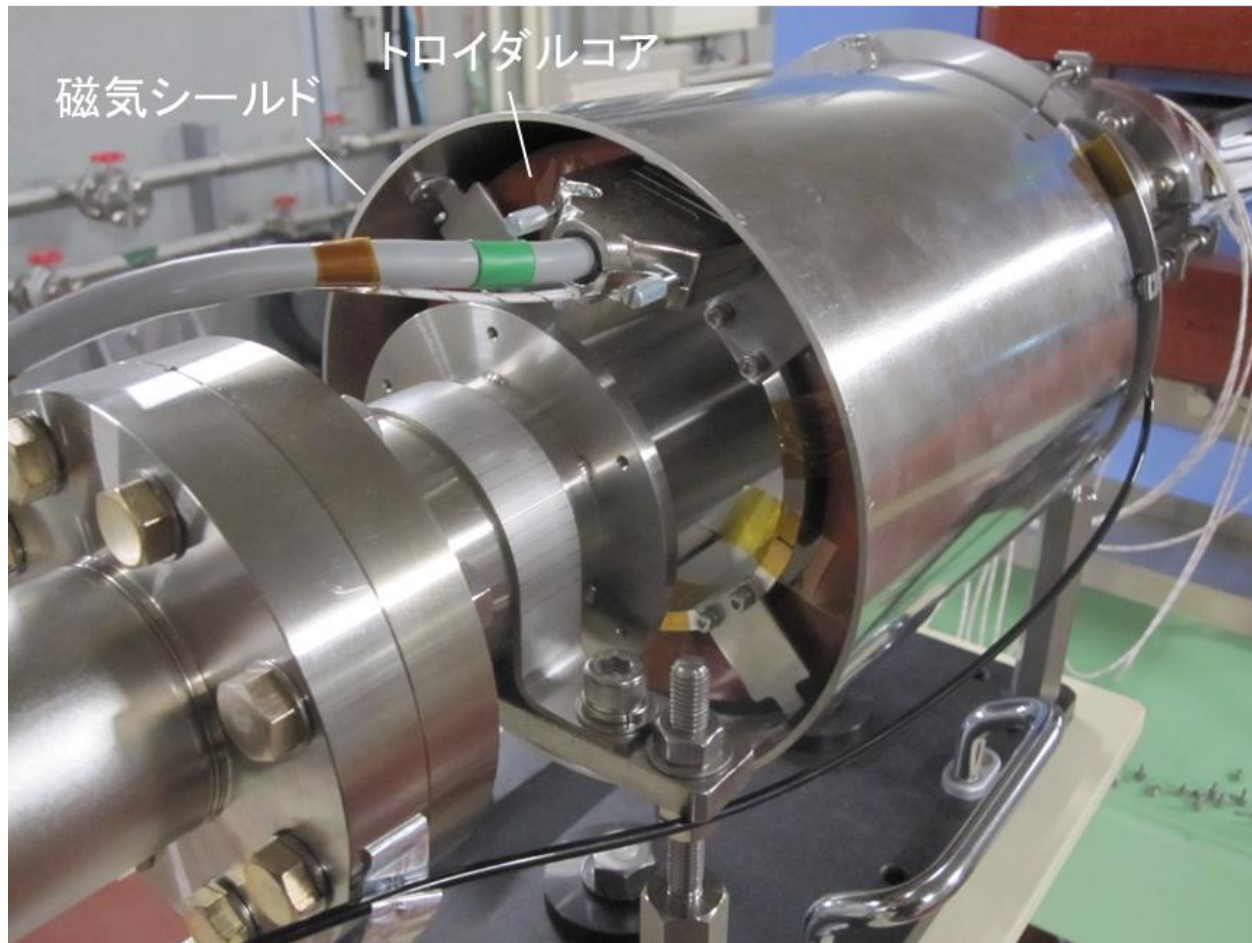
BPMのまとめ

- 今後
 - 高精度化（検波回路、ADCの見直し）
 - 測定器の入っているラックが温度調整されていない → 温調ラック導入
 - Beam Based Calibration をすすめる



その他の診断機器

- CT, DCCT, 主ダンプ電流モニター(Faraday Cup)など
 - DCCTはもともと 100 mA がターゲットであったため、1 mA 以下の電流ではあまり活躍していない。電流モニターは主として主ダンプの電流をみている。
- THzモニターは本田洋介氏の発表を参照



1-c : 診断関連の今後

- 今後の課題（スクリーンモニター、BPM以外の項目）
 - 周回部のビーム診断：特にバンチ長圧縮時のモニター
 - より小さなビームサイズ：Wire Scanner
 - 周回部でのDeflecting Cavity：エネルギーが問題
 - バンチ長測定：THz, ストリークカメラ(SR or OTR), EO Sampling 等
 - 高精度タイミング測定
 - ビームハロー測定
 - ダンプでの電流測定を高精度化（現在はノイズが問題）

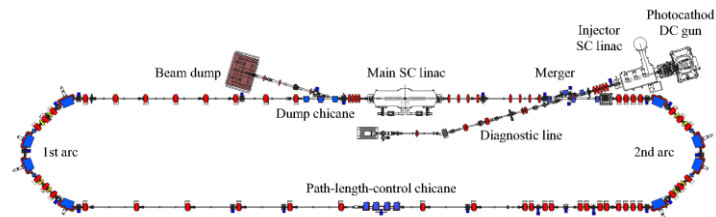
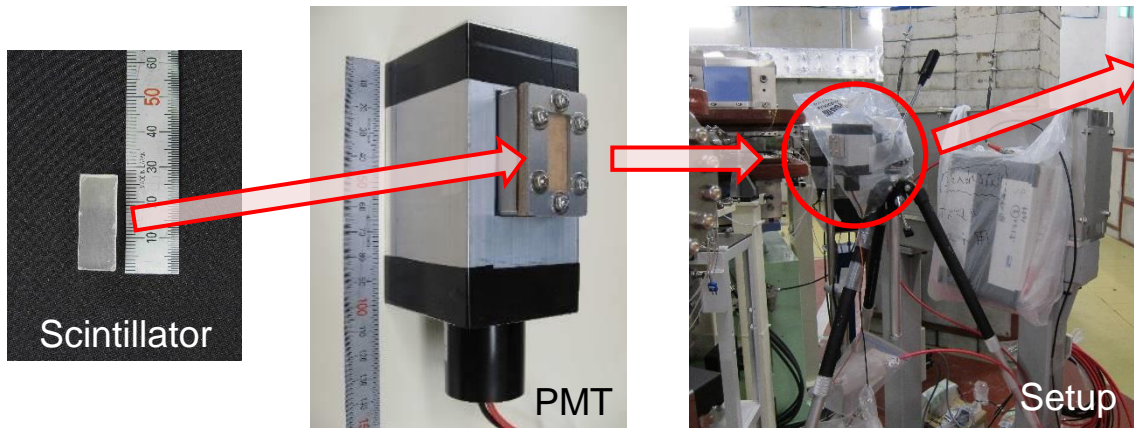
 - その他、必要に応じて診断機器の研究開発を行う

2-a : 高速インターロック

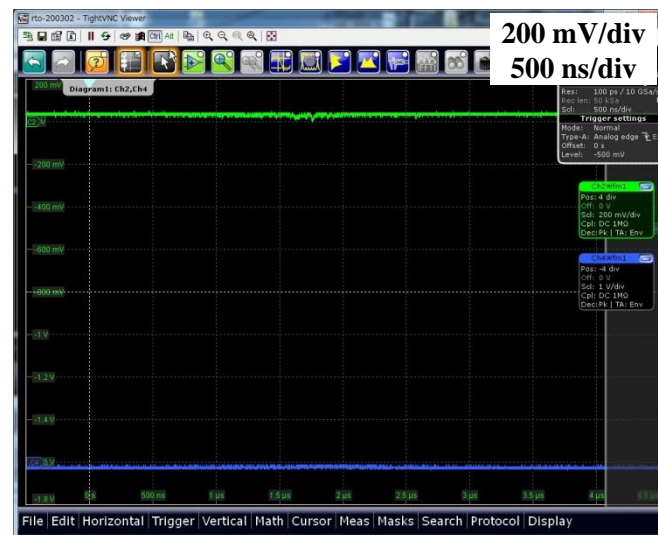
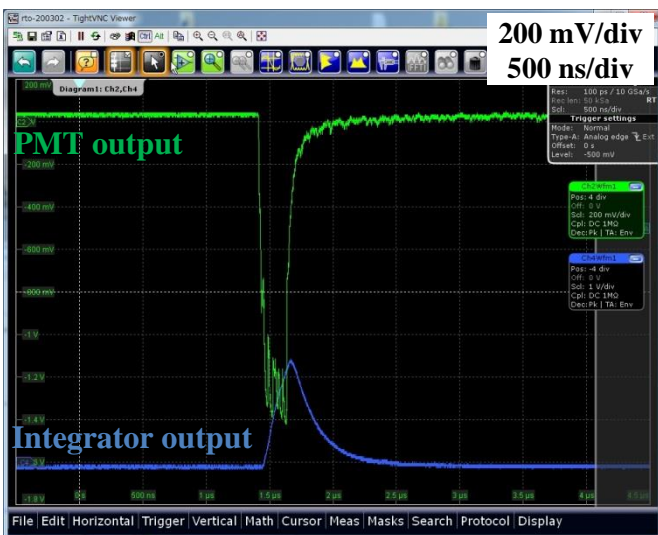
- 高速インターロックの目標
 - cERLはCW型線形加速器であるため、蓄積リングと異なって単にRFを落とすだけでは不十分。ビームが出続けてしまうトラブルが最も恐ろしい。
 - ビーム繰り返しも高速(1.3 GHz)であるため、できる限り速くビームを止める必要がある。想定するエラーとしては例えば
 - 調整用のパルス運転($\sim 1\mu\text{s}$ 程度) のつもりだったがパルスが意図せず長く出続ける
 - 意図せず大電荷のパルスが出てしまう
 - 放電やその他のトラブルなど、レーザーとは無関係にビームが出てしまう
 - これらの状態が発生したときにレーザーを停止するシステムを構築する
 - それでも不具合が収まらない場合にはLLRF停止、RF高圧停止などの対処を行う
 - 典型的かつ現実的な目標として、高速ロスモニターによるロス検出に数 μs 、ビーム停止まで 10 ~ 100 μs 程度で応答するシステムを目指して開発した
- 補足：低速の放射線モニターとインターロックについて
 - 低速（高精度）のインターロックとしてはシールド壁内側に放射線モニター（ALOKA社製）を1 2台設置して常時監視している。
 - シールド壁外には放射線科学センター管理のモニター（Yellow Monitor）

ビームロスモニター

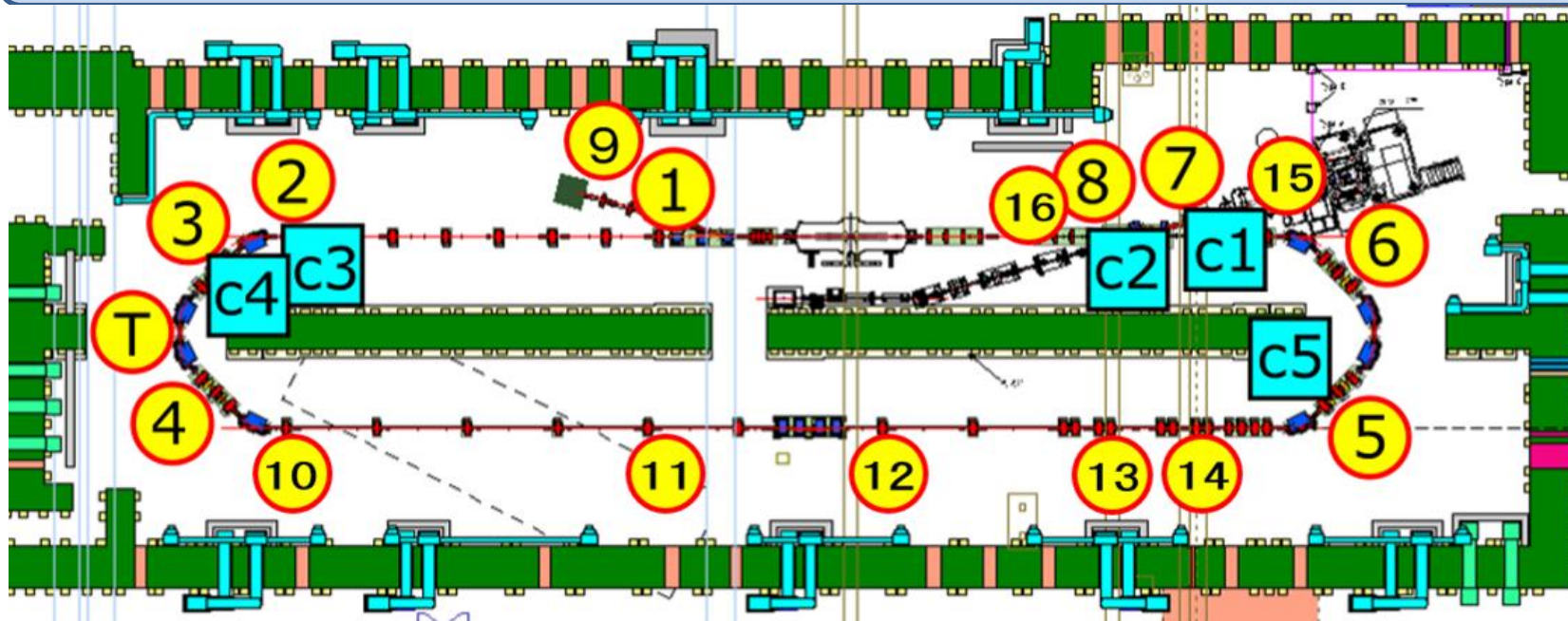
- シンチレータ : Pure CsI crystal (10 mm×10 mm×25 mm)
- PMT : Hamamatsu, R11558



@center of the 1st arc
(around MS15)



cERL ロスモニター及びインターロックシステム



- 高速インターロックシステムを構築
 - 複数のインターロック信号を統合する部分は、KEKBで開発されたシステムを利用
 - アナログのフロントエンド回路、ラッチ回路など、回路設計から基盤設計とWeb発注から部品実装まで、独自に開発した。



cERLの運転パターンに応じて動作モードや閾値設定変更できる高機能なインターロックシステムを構築できた。
基盤製作のノウハウも蓄積出来た。



2-b,c : 高速インターロックまとめ

- 実績（前ページ記載の項目以外）
 - ビームロス低減調整にも使用している。（診断用のロスモニターと併用）
- 今後
 - センサー部分は経年変化する可能性がある。運転前には再calibrationやチェックソース等による動作検証を実施する
 - CW 10 mA 運転にも対応できるだけの数のロスモニターは設置できており、特に数を増やすことは考えていない。
 - 複数回路の出力を統合する回路（OR回路）として、もともとKEKBで開発し、J-Parcでも採用されているシステムを使用しているが、ボード部品調達など今後の保守については少し不透明な部分がある。もっと単純なインターロック回路を開発中。これはcERLだけではなく他の加速器でも使用可能な汎用品として設計している。

3-a : 安全 (PPS)

- 言うまでもないが、Personnel Interlock System (PPS) は全てに優先する
- 堅牢で信頼性のあるシステムの設計と実装が必須
- 一方で、入退域状況などを遠隔からもモニターできる利便性が望ましい



←パーソナルキーシステムの写真
ラック背面にPLCを搭載しており、単独動作する。

上段ディスプレイはあくまでも利便性のため
の別システムであり、入退域の状況のほか、
各種インターロック状態や、酸欠警告などの
情報を表示している。

その他 PPS 関連機器

退避確認及び非常停止ボタン



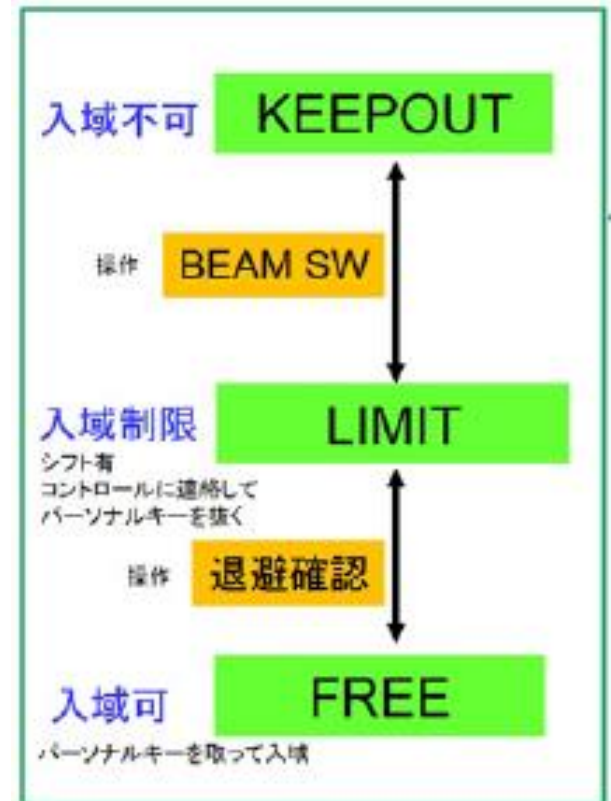
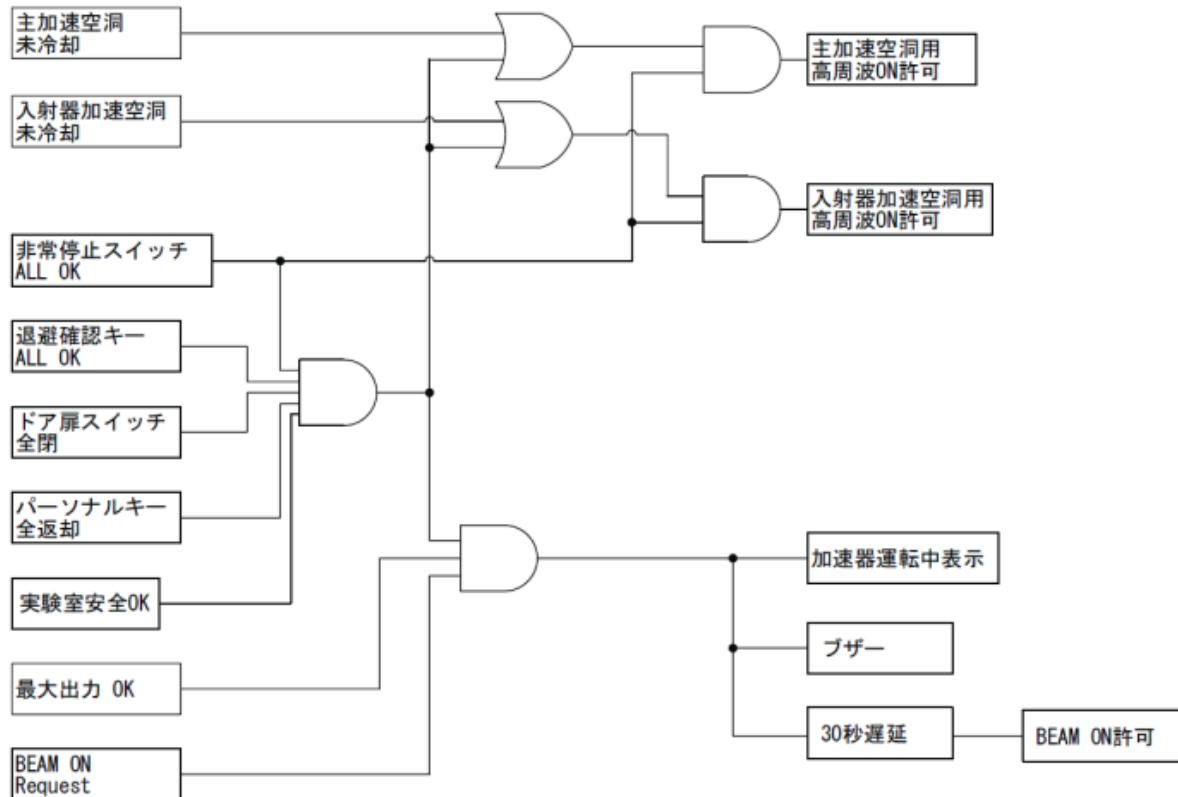
PPS状態表示パネル及びパトライト



←制御室でのPPS表示と監視カメラ表示

PPSロジックと運転モード

- 左図がPPSロジック、右図がこのロジックを実現するために実装した状態遷移図と、移行条件の概略を示している。



施設検査に合格。

運転開始前には自主検査を行って正常かどうかの確認を実施している。

3-b,c : PPSまとめ

- 実現できたこと
 - 加速器が診断部のみの状態から、周回部建設、LCS実験室増設など、段階を追って全体の構成は複雑になっている。
 - これら機器構成の変更に順次対応するとともに、安全で確実な加速器運転を実現できた。これまでに安全にかかわるようなトラブルは起きていない
- 今後
 - カードリーダーの読み取り不良など、いくつかの機器故障はあるほか、シリンダー錠など定期的に交換が必要な部品もあるので維持管理を行う。
 - 今後も安全最優先で維持管理を行い、変更申請の際には対応する

4-a,b: 加速器制御

- 実証すべき項目
 - 各種機器を遠隔制御可能に
 - データ保存・取り出しを簡便に実現
 - ビーム調整や各種スタディを円滑に実行できる土台をつくる
 - タイミング信号の生成と分配、安定化
- 達成した項目（一部）
 - EPICSによる制御系を構築した
 - ハードウェア：入出力コントローラー(IOC)としてYokogawa製のPLCを活用
 - データ保存・取り出し（次頁）
 - CSSによる GUI 作成：KEKでの本格導入としては最初の例（次々頁）
 - EPICS Collaboration

データ保存・取り出し

- CSS Archiver を使用
 - データベース（PostgreSQL）を使用したアーカイブ方式
 - バックアップとしてファイル保存方式の Channel Archiver も併用している
- 総データ量
 - それなりに多いが、取り扱い可能な量

| 年度 | データ量 |
|------|--------|
| 2012 | 1.7 TB |
| 2013 | 3.5 TB |
| 2014 | 4.5 TB |
| 2015 | 6.1 TB |
| 2016 | 3.0 TB |

GUI例

Magnet制御

| | Q | | | H | | |
|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| | K set | I set | I mon | K set | I set | I mon |
| QMAG01 | 0.050 | 0.050 | -0.000 | 0.050 | 0.050 | -0.000 |
| QMAG02 | 0.050 | 0.050 | 0.000 | 0.050 | 0.050 | 0.000 |
| QMAG03 | 0.050 | 0.050 | 0.001 | 0.050 | 0.050 | 0.001 |
| QMAG04 | 0.050 | 0.050 | -0.009 | 0.050 | 0.050 | -0.009 |
| QMAG05 | 0.050 | 0.050 | -0.002 | 0.050 | 0.050 | -0.002 |
| QMAG06 | 0.050 | 0.050 | 0.013 | 0.050 | 0.050 | 0.013 |
| QMAG07 | 0.050 | 0.050 | 0.003 | 0.050 | 0.050 | 0.003 |

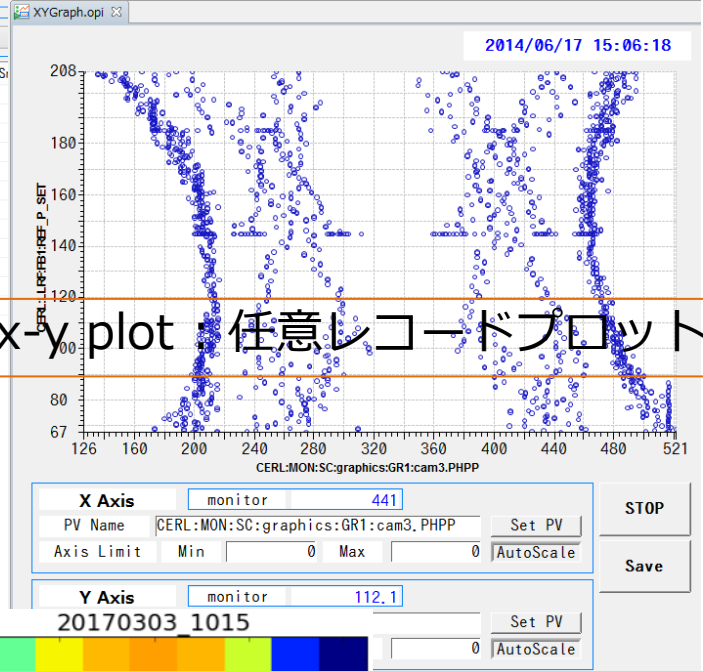
Save/Restore

SaveRestoreMain.opi

Y:\data\SaveRestore\magnet\2014\20140620_232028.log

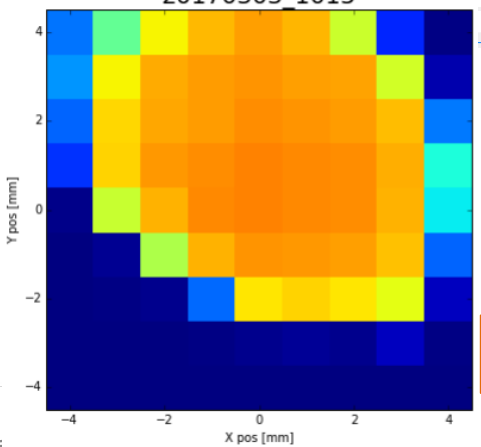
Comment: new optics for 7.7 pC, final
 Author: Miyajima and Honda
 Date: 2014/06/20 23:20:28

| Record | Snap Val | Current | Current-S |
|----------------------|--------------|---------|-----------|
| CERL:MAG:ZH04:IDIR | -0.037 | 0.0 | 0.03700 |
| CERL:MAG:ZV04:IDIR | -4.07 | 0.0 | 4.07000 |
| CERL:MAG:ZH05:IDIR | 0.18 | 0.0 | -0.18000 |
| CERL:MAG:ZV05:IDIR | 0.485 | 0.0 | -0.48500 |
| CERL:MAG:QMGC01:IDIR | 0.1052991... | 0.0 | -0.10530 |
| CERL:MAG:ZH06:IDIR | -2.65 | 0.0 | 2.65000 |
| CERL:MAG:ZV06:IDIR | 2.05 | 0.0 | -2.05000 |
| CERL:MAG:QMGC03:IDIR | -0.234244... | 0.0 | 0.23424 |
| CERL:MAG:ZH07:IDIR | 0.24 | 0.0 | -0.24000 |
| CERL:MAG:ZV07:IDIR | -0.06 | 0.0 | 0.06000 |
| CERL:MAG:QMGC05:IDIR | 0.0549 | 0.0 | -0.05490 |
| CERL:MAG:ZH08:IDIR | 0.9 | 0.0 | -0.90000 |
| CERL:MAG:ZV08:IDIR | 1.47 | 0.0 | -1.47000 |
| CERL:MAG:QMGC02:IDIR | 0.1099317... | 0.0 | -0.10993 |



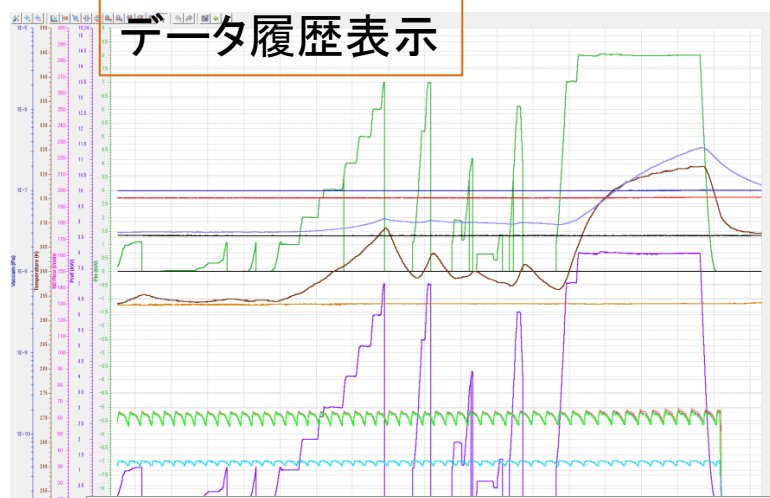
Screen Monitor (auto)

Screen Log: 20140620.161904



QEマッピング

その他 制御関連



スクリーンキャプチャー一覧

Zlog 用画像ファイル一覧 x
erlserv1.kek.jp

2017年 2月

| | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|
| 日 | 月 | 火 | 水 | 木 | 金 | 土 |
| | | | | 1 | 2 | 3 |
| 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | |

Multiple screenshots of monitoring dashboards and data tables are displayed, showing various graphs and numerical values.

ERL 運転日誌
acc-log.kek.jp/ERL/View/index_html

ERL運転日誌Zlog Viewer

ERL Log表示
2016/03/08 09:00 Tuesday

| 時間 | 運転 |
|----------|--|
| 09:09:54 | Buncher空洞エージングStatus_Pf=4kW_Pt=137.676kV_Pin=146.172kV |
| 09:19:08 | MLSC_Aging Status MLSC PINdiode Profile |

8時間 | 画像表示 | 更新時間 | 2016年 | 3月 | 8日 | 09:00~17

電子ログ

16 compact ERL (Public) X
wiki
pfconrg07.kek.jp

compact ERL Developer Home

このサイトはcERL関係者向けページです (KEK内部からのみアクセス可能)。外部サイトは⇒[ERL計画推進室](#)を参照してください。

お知らせ

- ChannelArchiverのデータを参照しブラウザ上でプロットするページを作成しました。(2017/08/22)
- CS5関連のページを更新してインストール～設定方法を記載しました。最新のデータブラウザ設定も参照してください。(2015/9/7)
- ミーティングスケジュールをこのページ下方に移動しました。
- 見学など、運転カレンダーに未記入の予定については [スケジュールのページ](#) に書いてください。

スケジュール・運転状況

- [スケジュールのページ](#) 建設・運転予定 カレンダー、運転当番など

4-b,c : 加速器制御まとめ

- 達成した項目
 - EPICSシステム構築
 - データ保存、取り出しシステム
 - CSS Archiver, Channel Archiver によるデータ保存
 - CSSによる制御GUI構築
 - バックアップ環境の構築
 - その他、多くのソフトウェアや環境を構築した
 - ネットワーク・Firewall構築、CATV-like動画表示, wiki, 共有フォルダ(NAS), 電子ログ、スクリーンモニターの自動制御、キャプチャ画像の比較、定期バックアップ環境、アラーム表示、音声+パトライトアラーム、履歴管理、電子メールによる異常通知システム、所内ネットワークへ向けたEPICS Gatewayシステム、その他
- 今後
 - 保存データは増える一方
 - 過去データが容易に検索できるように維持する
 - 取り出し速度の高速化
 - CSS Archiver の最大の欠点。他施設で実績のある Archiver Appliance 検討中
 - これまで開発したソフトウェアを他の加速器で有効活用
 - 人材育成

最後に

- ビーム診断・制御・安全に関して（残念ながら）**単体で**「これが世界最高性能」などという項目は無い
- cERL加速器のコミッショニングから性能向上に至るまで、最新の技術を導入しつつ利便性の高いビーム制御を実現し、成果達成に貢献した。
- 今後も加速器の運転目的に応じて適切な診断機器の導入と研究開発を進めていく。

- これまでに研究開発してきた多くの知見、技術、ソフトウェア、ノウハウ、人的資源は既に他の加速器でも活用している。今後もこれら資産を有効活用することを進めていきたい。