

# コンパクトERLのコミッショニング Beam Commissioning of Compact ERL

第11回 日本加速器学会年会  
2014年8月9日(土)  
リンクステーションホール青森

高エネルギー加速器研究機構  
コンパクトERL建設・コミッショニングチーム  
島田 美帆(代表)

# コンパクトERL建設・コミッショニングチーム



## 高エネルギー加速器研究機構、KEK

足立 伸一, 阿達 正浩, 赤木 智哉, 明本 光生, 荒川 大, 浅岡 聖二, 江並 和宏, 遠藤 有聲, 福田 茂樹, 古屋 貴章, 芳賀 開一, 原 和文, 原田 健太郎, 本田 融, 本田 洋介, 本間 博幸, 本間 輝也, 細山 謙二, 穂積 憲一, 石井 篤, 金 秀光, 加古 永治, 神谷 幸秀, 片桐 広明, 河田 洋, 小林 幸則, 小島 裕二, 近藤 良也, Konstantinova Olga, 小菅 淳, 久米 達哉, 松本 利広, 松村 宏, 松下 英樹, 道園 真一郎, 三浦 孝子, 宮島 司, 宮内 洋司, 長橋 進也, 仲井 浩孝, 中島 啓光, 中村 典雄, 中西 功太, 中尾 克己, 濁川 和幸, 野上 隆史, 野口 修一, 野澤 俊介, 帯名 崇, 尾崎 俊幸, Qiu Feng, 下ヶ橋 秀典, 阪井 寛志, 坂中 章悟, 佐々木 慎一, 佐藤 康太郎, 佐藤 昌史, 設楽 哲夫, 篠江 憲治, 島田 美帆, 塩屋 達郎, 穴戸 寿郎, 多田野 幹人, 田原 俊央, 高橋 毅, 高井 良太, 高木 宏之, 竹中 たてる, 谷本 育律, 飛山 真理, 土屋 公央, 内山 隆司, 上田 明, 梅森 健成, 浦川 順治, 渡邊 謙, 山本 将博, 山本 康史, 矢野 喜治, 吉田 光宏



## 総合研究大学院大学

Enrico Cenni



## 日本原子力研究開発機構、JAEA

羽島 良一, 松葉 俊哉, 森 道昭, 永井 良治, 西森 信行, 沢村 勝, 静間 俊行



## 広島大学

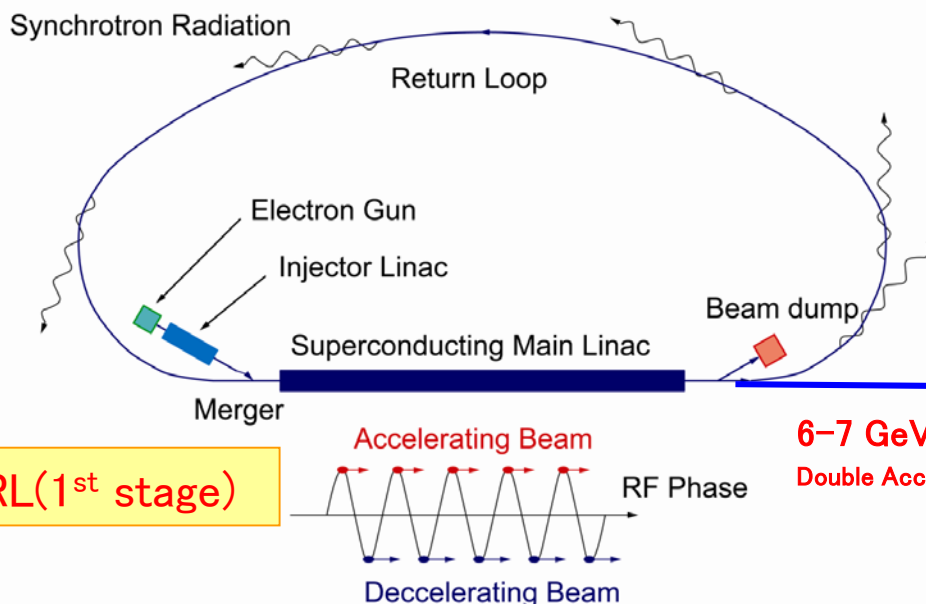
栗木 雅夫, 清宮 裕史



## Kyungpook National University

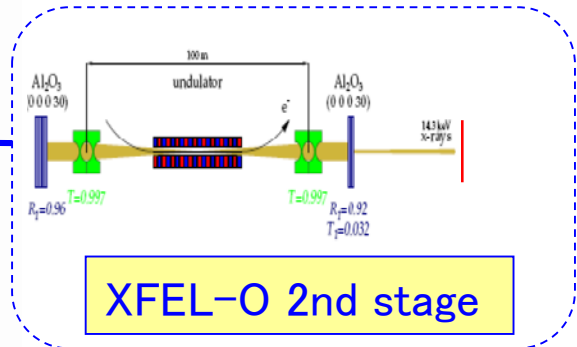
Ji-Gwang Hwang

# Energy Recovery Linac, ERL計画



3GeV ERL(1<sup>st</sup> stage)

6-7 GeV  
Double Acc.



XFEL-O 2nd stage

## ERL計画

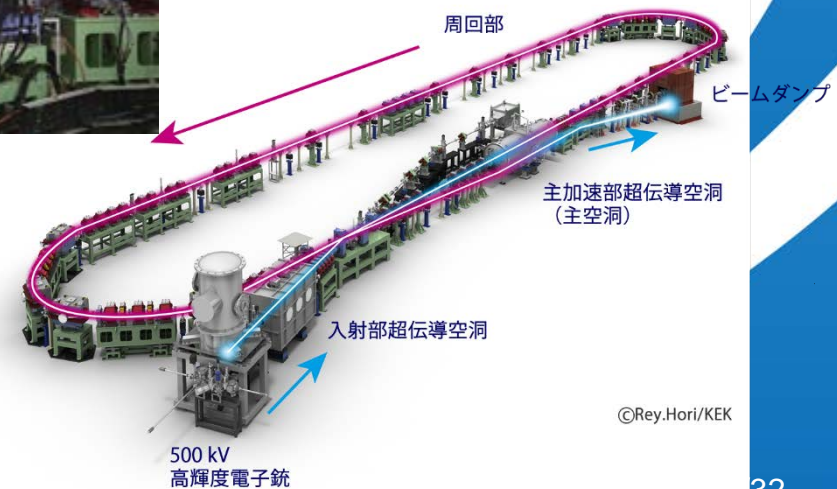
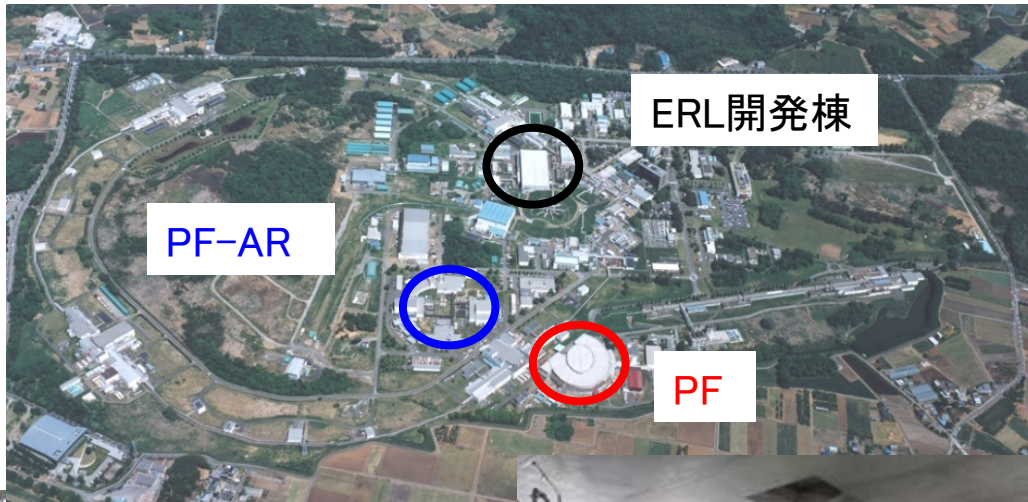
- ・回折限界X線光源
- ・極短パルスX線光源
- ・共振型X線自由電子レーザー(XFELO)
- ・Echo-enabled Harmonic Generation (EEHG)



## ERLの試験機としてのCompact ERL

- ・エネルギー回収の実証
- ・低エミッタンス化・短バンチに向けたビームダイナミクス
- ・CW超伝導加速空洞・高輝度DC電子銃の開発
- ・大電流とビームロス

# コンパクトERL



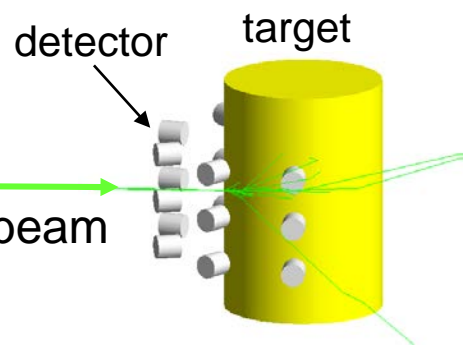
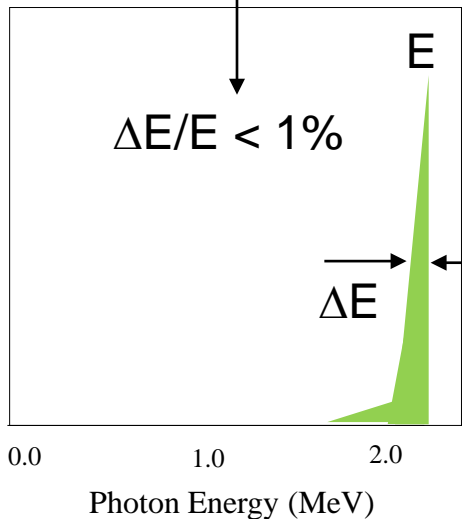
©Rey.Hori/KEK



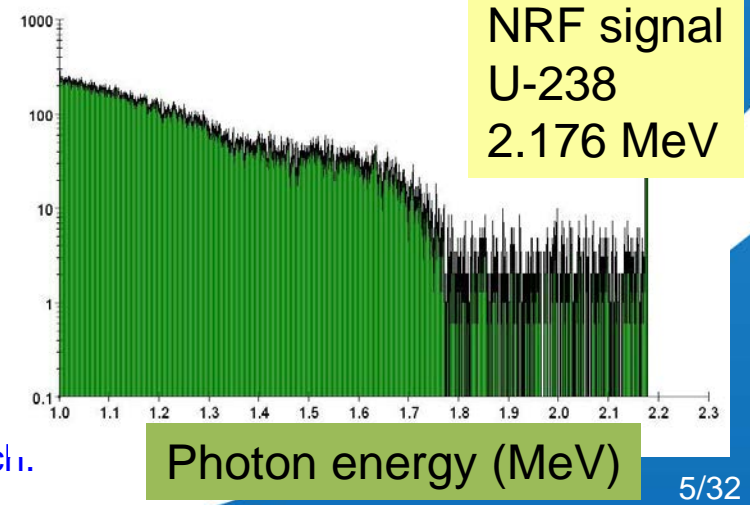
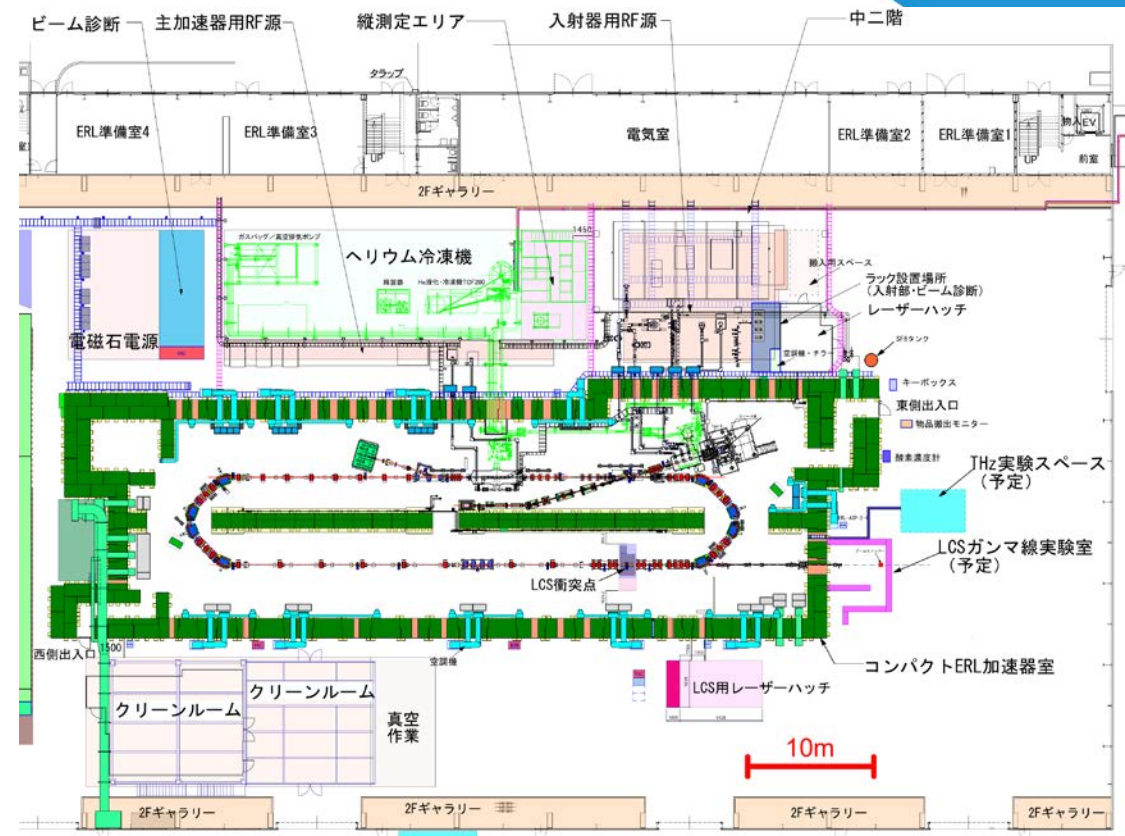
# コンパクトERLの利用案

1. レーザー逆コンプトン散乱
2. CSRテラヘルツの利用

2.176 MeV for U-238



R. Hajima et al., J. Nucl. Sci. Technol. 45, 441-451 (2008)





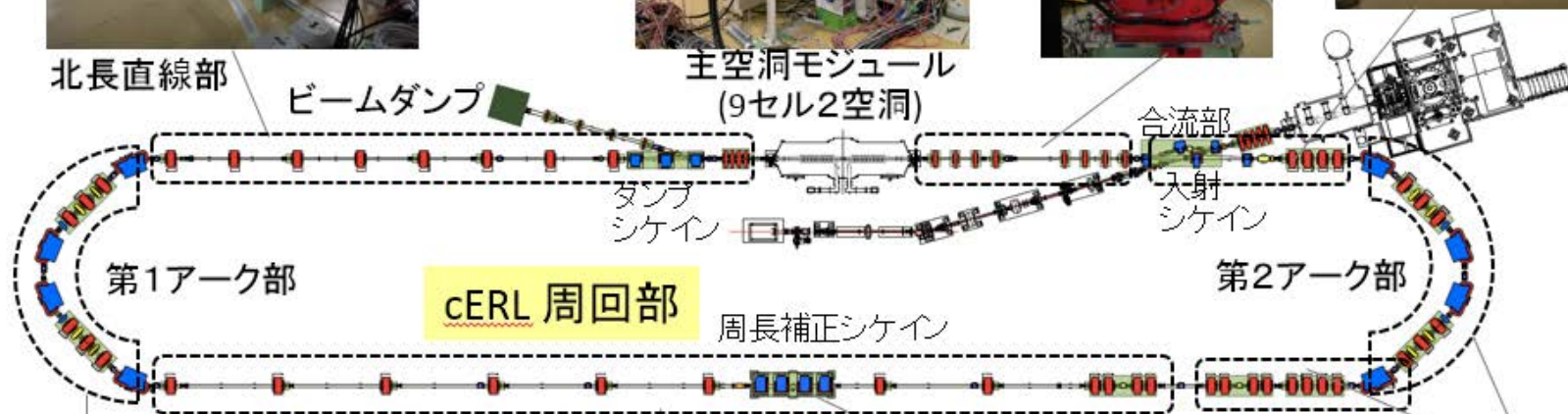
# 電磁石の設置



北長直線部



主空洞モジュール  
(9セル2空洞)



第1アーク部



南長直線部



周長補正シケイン



第2アーク部



# 周回部電磁石設置とアライメント

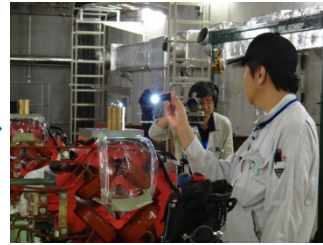
久米 達哉ら、SUP131  
“cERL周回部のアライメント”



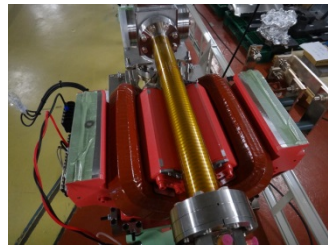
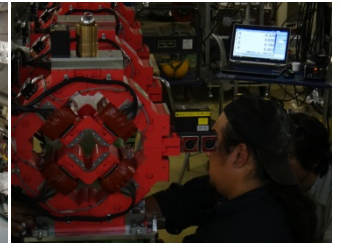
1. 壁面上基準点の精密測量



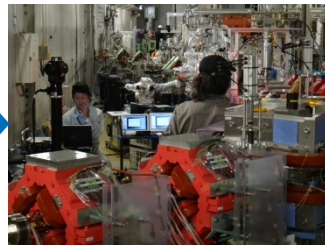
2. 床面上基準点と基準線の罫書き



3. ティルティングレベル(N3), トータルステーション(NET05X), レーザトラック(T3)を用いた電磁石精密設置



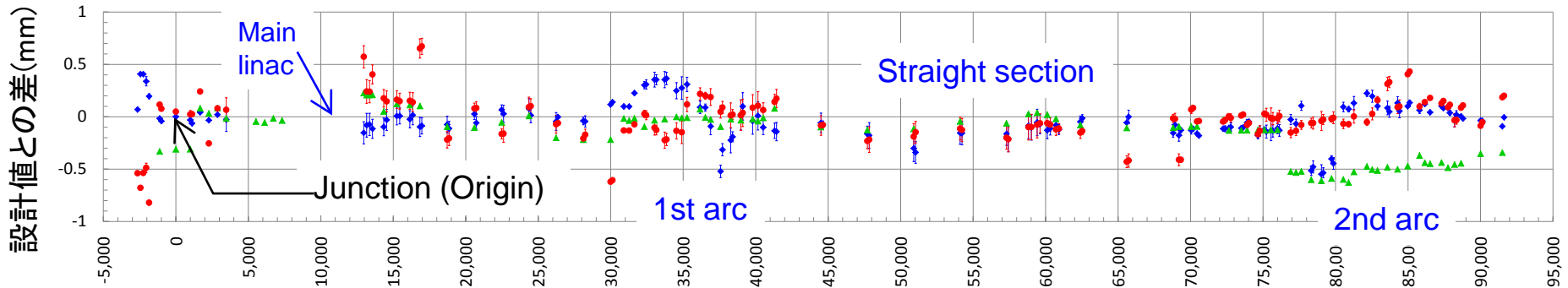
4. 電磁石半割後のビームパイプ設置



5. 最終測量

- 工期・工程の制約により、ビームパイプ設置前に電磁石を精密設置した
- $\pm 0.1$  mm程度に調整したずれ量が一部の範囲で、 $\pm 0.5$  mm程度となったが、性能上の問題は見られない

◆: dx(ビーム進行直交方向水平面内のずれ), ▲: dy(ビーム進行直交方向鉛直面内のずれ), ●: dz(ビーム進行方向ずれ)

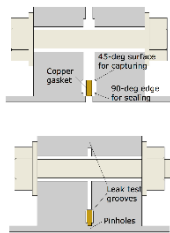
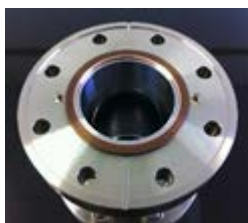
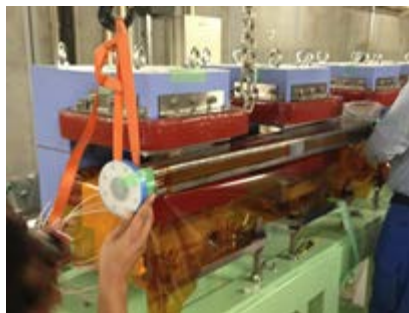


合流点を原点として反時計回りにとった周回ビームライン上位置(mm), マイナスは入射ビームライン上位置



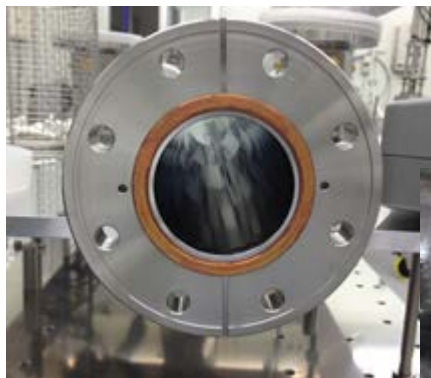
# 真空ダクト・Faraday Cup・ダンプの設置

## ダクトの設置



チャンバー間  
“ゼロギャップ”フランジ  
Impedanceを減らす。

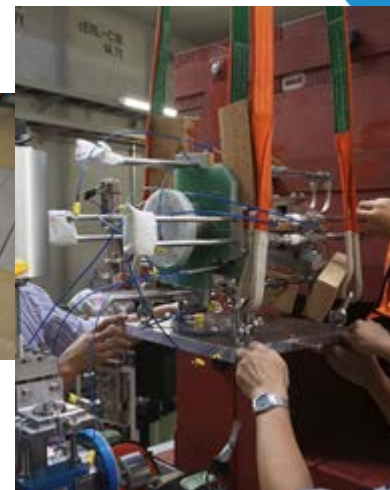
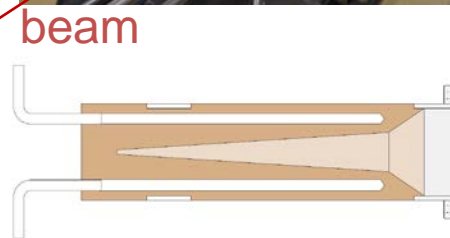
## 超電導加速空洞近くの真空作業



NEGコーティングの  
チャンバーを設置

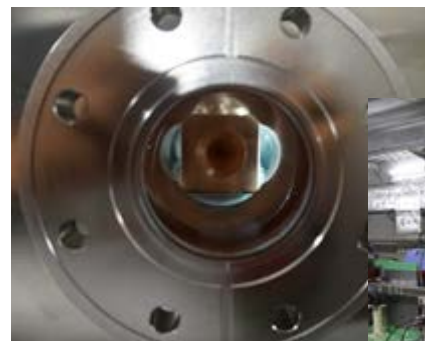


## 主ダンプ



40kW対応 (φ 40mmの電子ビームの場合)

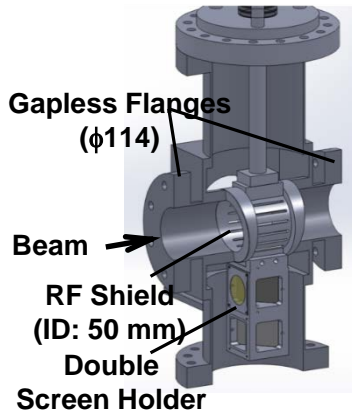
## 可動Faraday Cup



# 主なモニター

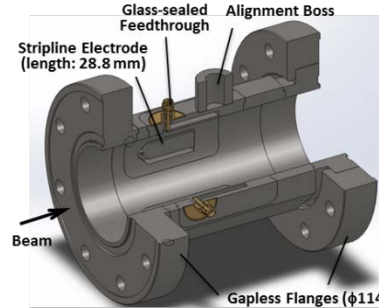
2013年12月-2014年6月のビームコミッショニングで主に使用したもの

## Screen Monitor

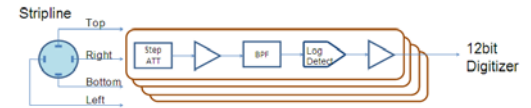


- 全体で30台設置
- 2種類のスクリーン  
Ce:Yag  
アルミ(OTR用)

## BPM

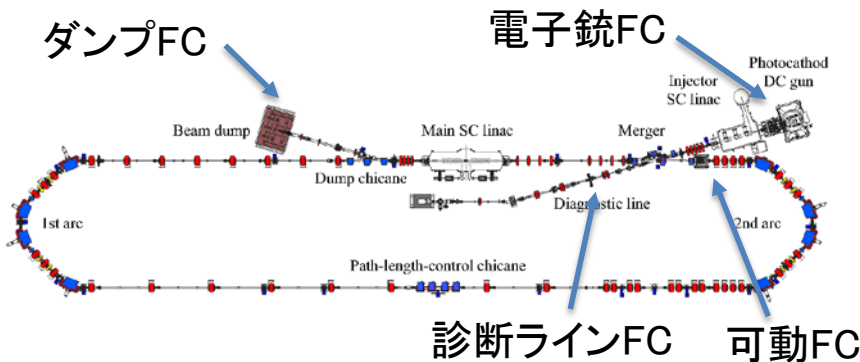


- 主にストリップライン型を採用
- 全体で45台設置  
(ボタン電極も含む)



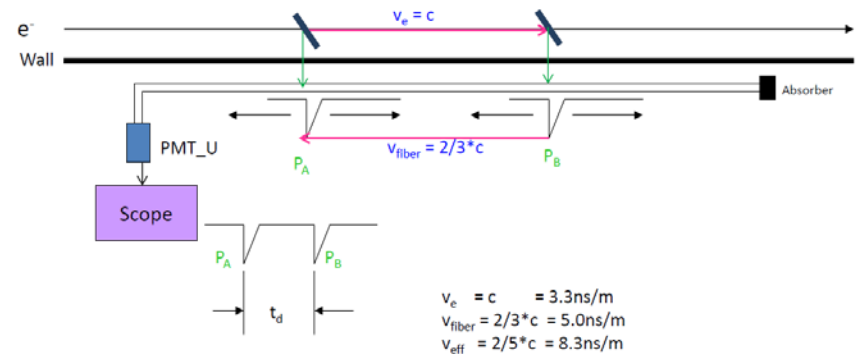
構成: 可変減衰器・1.3GHz BPF・ログ検波

## Faraday Cup



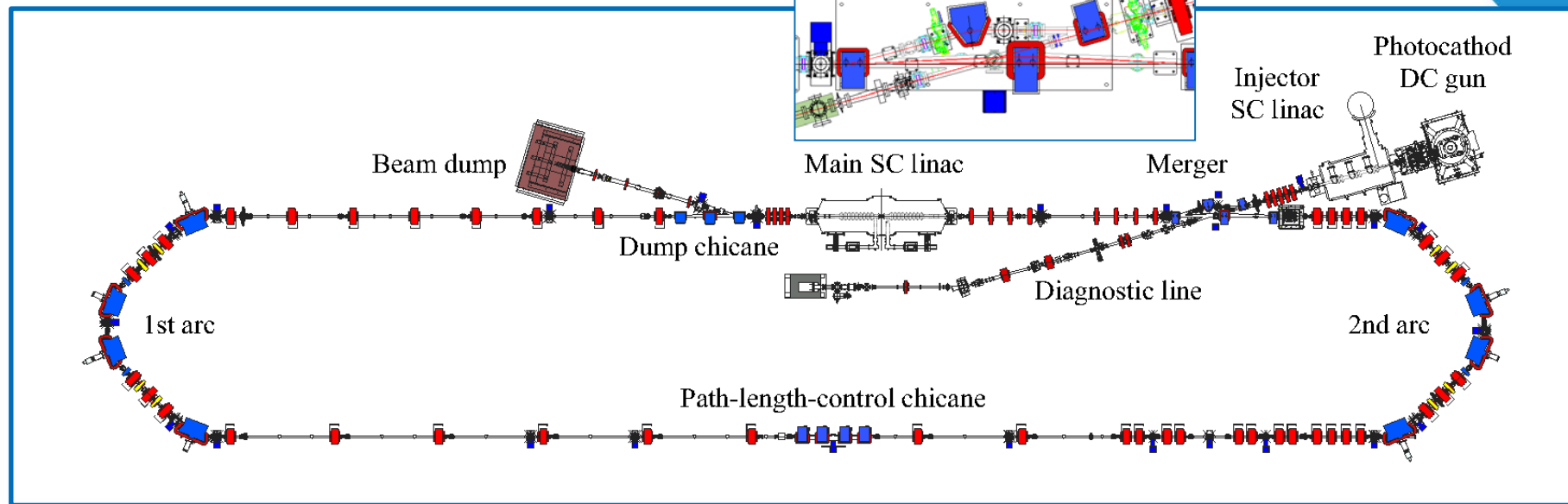
- 4台のFaraday cup
- 周回ビーム測定 of 可動FCは遮蔽強化

## Fiber Loss Monitor



信号の遅延時間から、発光点の位置を推定。

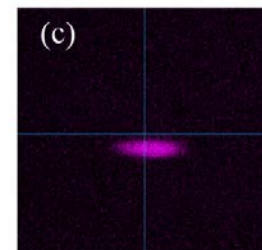
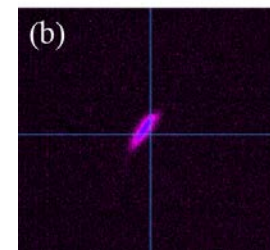
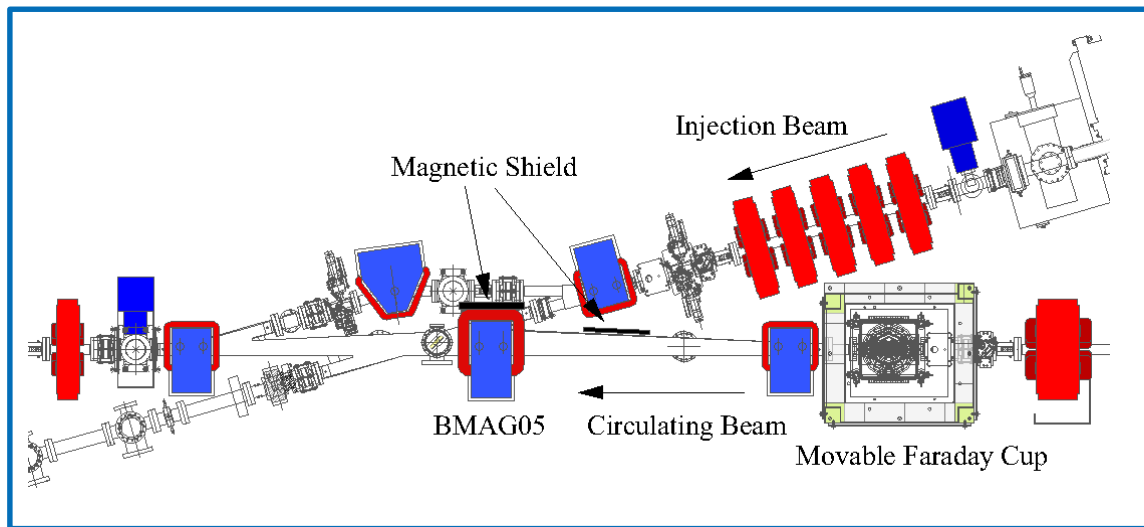
# コンパクトERLの主要パラメータ



	Nominal	Operation in Jan-Jun. 2014
周回エネルギー, $E_c$	35 MeV	20 MeV (主加速空洞のfield emissionの軽減のため)
入射エネルギー, $E_{in}$	5 MeV	2.9 MeV (周回ビームと入射ビームの運動量比で制限)
平均電流値(max)	10 mA	10 $\mu$ A (放射線申請の上限)
規格化エミッタンス	0.1 mm-mrad	0.3 mm-mrad (at a few 10 fC)
バンチ長	1-3 ps	1-3 ps



# 低エネルギービームに対する環境磁場の影響



チャンバーから20cmに設置しているCCG (a)  
CCG取り外し前(b)と後(c)のプロファイル

## ・偏向電磁石の漏れ磁場

周回部側シケインのBMAG05の調整中に入射ビームが蹴られ、軌道調整に影響。

1月のシャットダウン中に磁気シールドを設置。(入射・合流部、ダンプシケイン)

## ・CCGの磁石

ビームに非線形な効果と数10mradのキックを与えていることが判明。

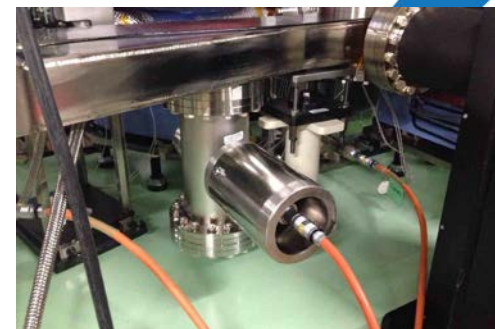
入射シケインから主空洞までの4つのCCGを取り除く。

さらに、入射合流部のopticsを調整。

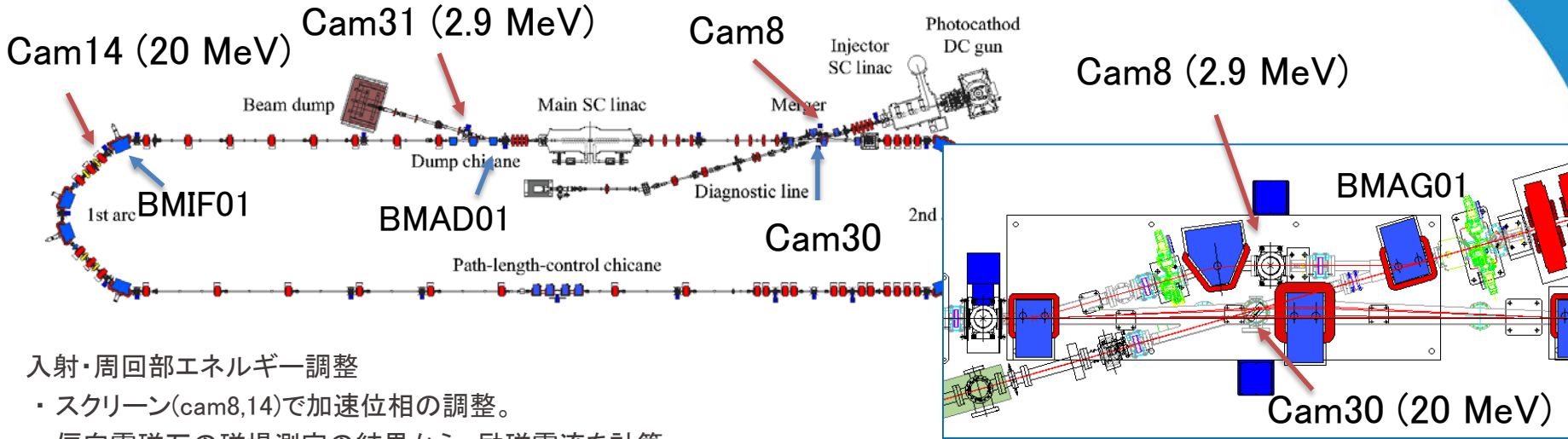
主空洞のCCGは遮蔽しているが、いまだに影響が残る。

CCGの遮蔽シールドを作製、効果があることを確認。

## 磁気シールド



# エネルギーおよびエネルギー広がり測定

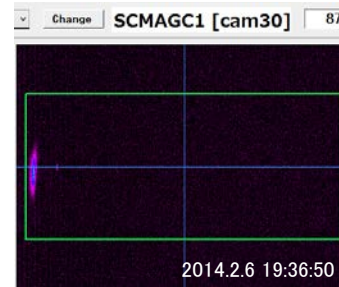


## 入射・周回部エネルギー調整

- ・ スクリーン(cam8,14)で加速位相の調整。
- ・ 偏向電磁石の磁場測定の結果から、励磁電流を計算
- ・ cam8,14の中心を通るように加速振幅調整

## エネルギーのクロスチェック

- ・ 入射部コミッションングの手法(ステアリング使用)とクロスチェック
- ・ cam30で周回ビームの位置確認
- ・ cam31で入射ビーム(主空洞デチューン状態)の位置確認

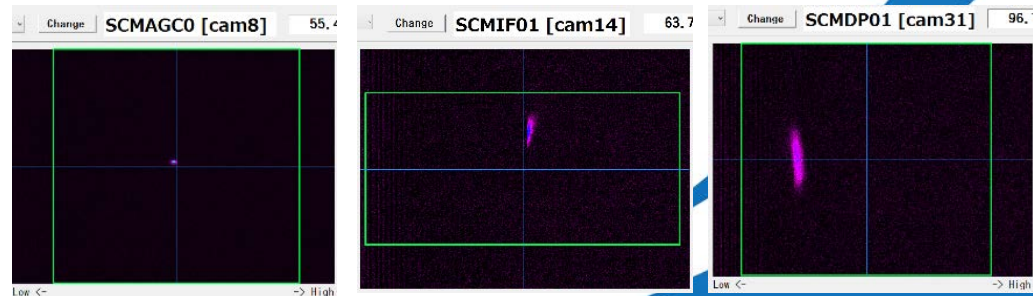


入射・周回ビーム運動量比  
ビーム位置 2:13、設計 1:7  
おおむね一致

## エネルギー広がり

入射ビーム(cam8)	< 7e-4
周回ビーム(cam14)	< 4e-4
ダンプビーム(cam31)	< 2e-3

スクリーン上で水平方向のビームサイズを最小化  
エネルギー広がり十分に小さいことを確認



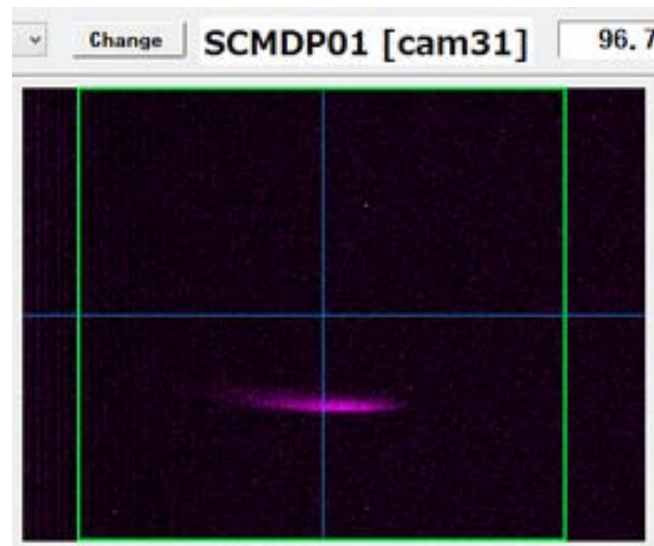
エネルギー広がり測定例

## ダンプラインと主ダンプの信号 (2014.2.6)

- ・主ダンプのFCでビームを観測
- ・電子銃直後のFCの応答と比較し、大きなビームロスなく輸送できたことを確認
- ・ダンプシケインの励磁電流から、ダンプエネルギーが入射エネルギーに近いことを確認。



主ダンプのFaraday cupの応答



ダンプシケイン直後の  
スクリーン画像



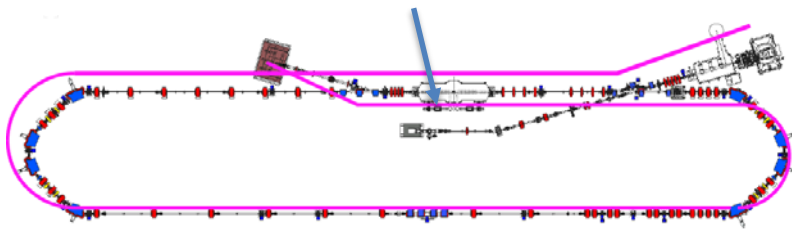


# 軌道調整

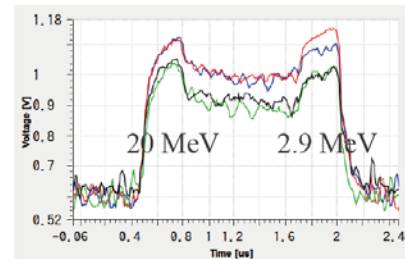
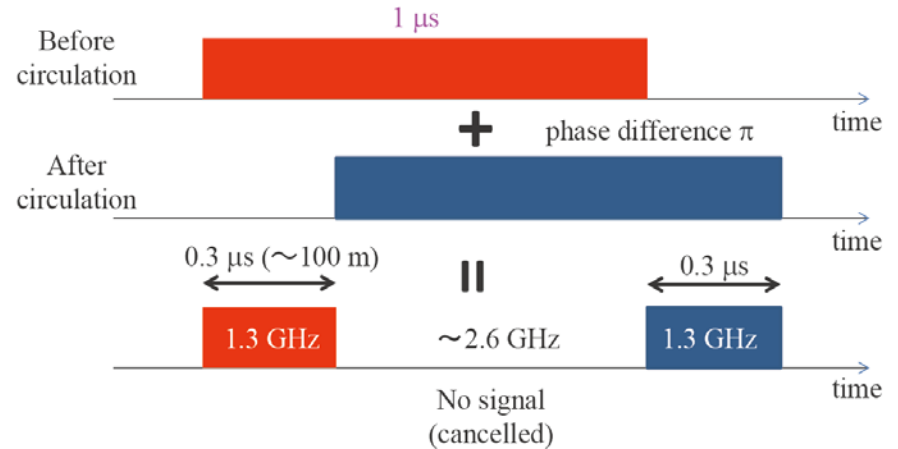
## 軌道調整時のビームパラメータ

バンチ電荷量	10 – 100 fC
マクロパルス長	1 $\mu$ s
運転周波数	1.3 GHz
マクロパルス繰り返し	~ 5 Hz
平均電流値	数100 pA

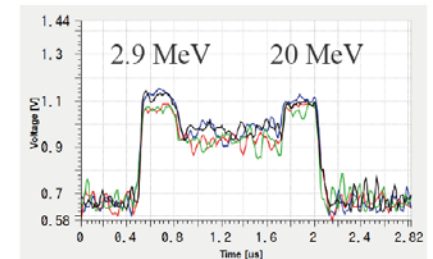
- 入射部～ダンプリン  
(減速ビームを除く)  
スクリーンのQ-scanによる軌道調整
- 減速ビーム  
BPMによる軌道調整(右図)



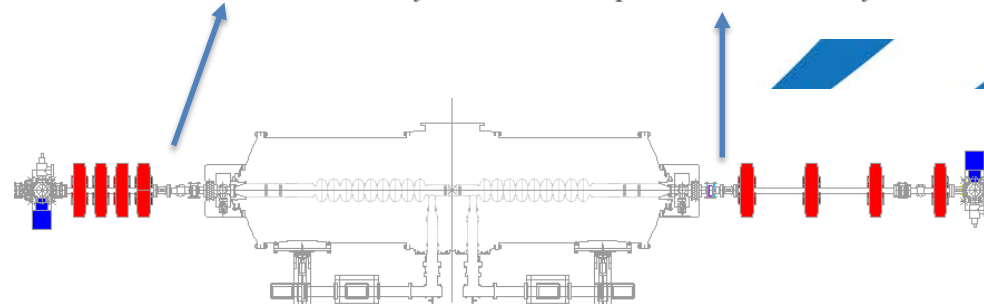
## BPMによる加速・減速2ビームの測定



Downstream of main cavity



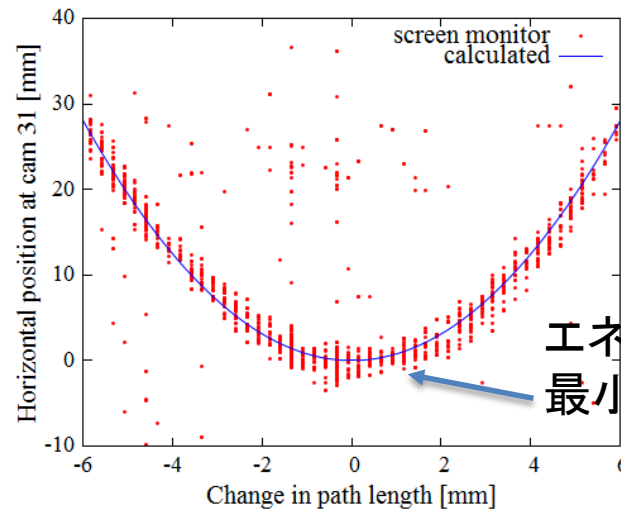
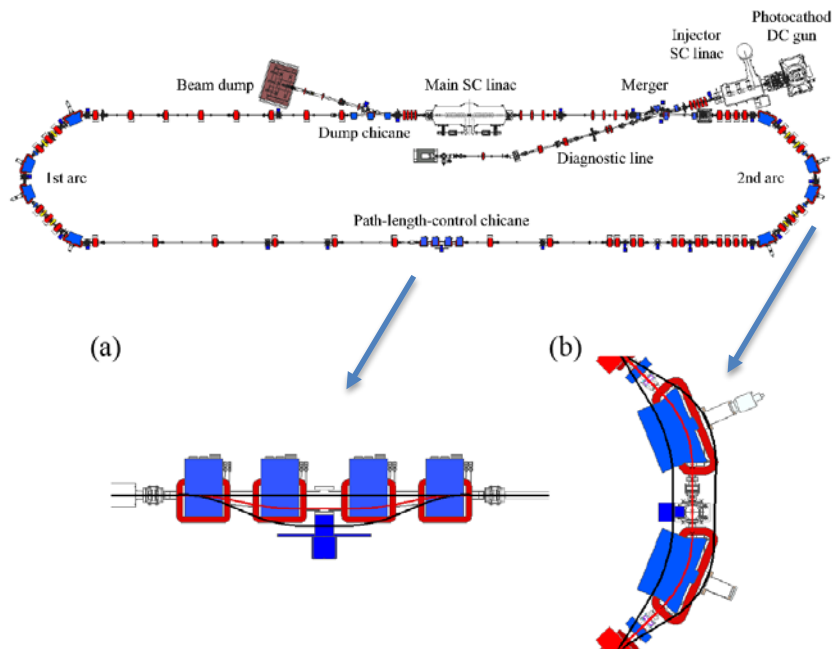
Upstream of main cavity



# 周長補正によるダンプエネルギーの調整

ダンプエネルギー・エネルギー広がりが最小となるように周長を調整

10uA以下の低い電流では空洞のビームローディングでの測定が困難。



エネルギーが最小となる軌道

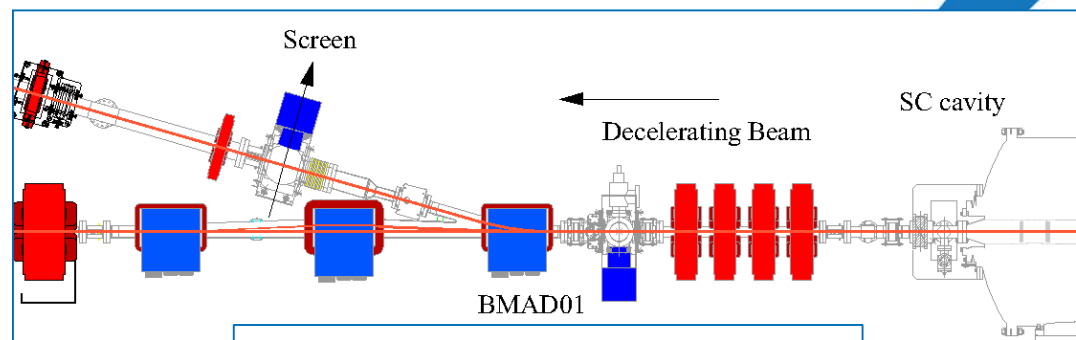
縦軸：cam31の水平方向のビーム位置

横軸：バンプの高さから推定される軌道長変化量  
(ステアリング励磁電流の推定値とほぼ一致。)

2つの周長補正方法・赤線は基準軌道

(a) 周長補正シケインによる補正  
南側直線部に配置、±5mm

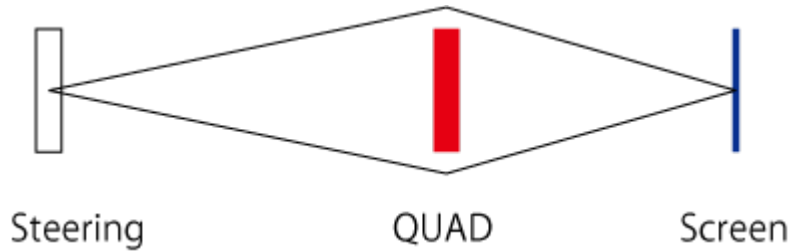
(b) アークの頂点による補正  
第2アークのみで±10mm程度



ダンプシケイン付近の配置図

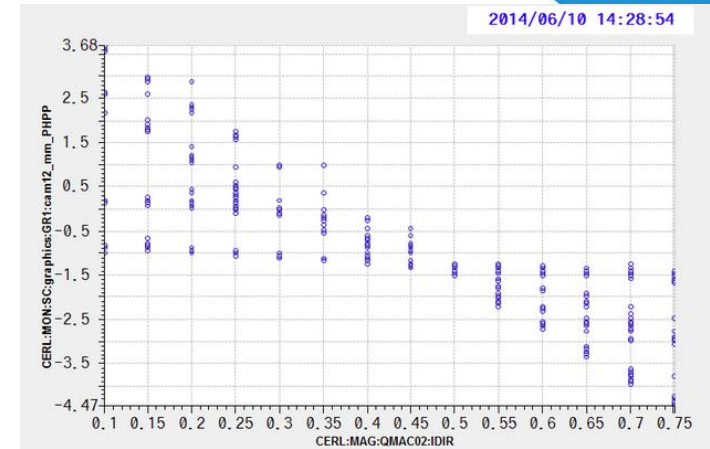


# 四極電磁石応答測定



四極電磁石の応答測定：  
ステアリングを振ってもスクリーンの位置が変わらないQDの強さを探す。

スクリーン上のビーム位置



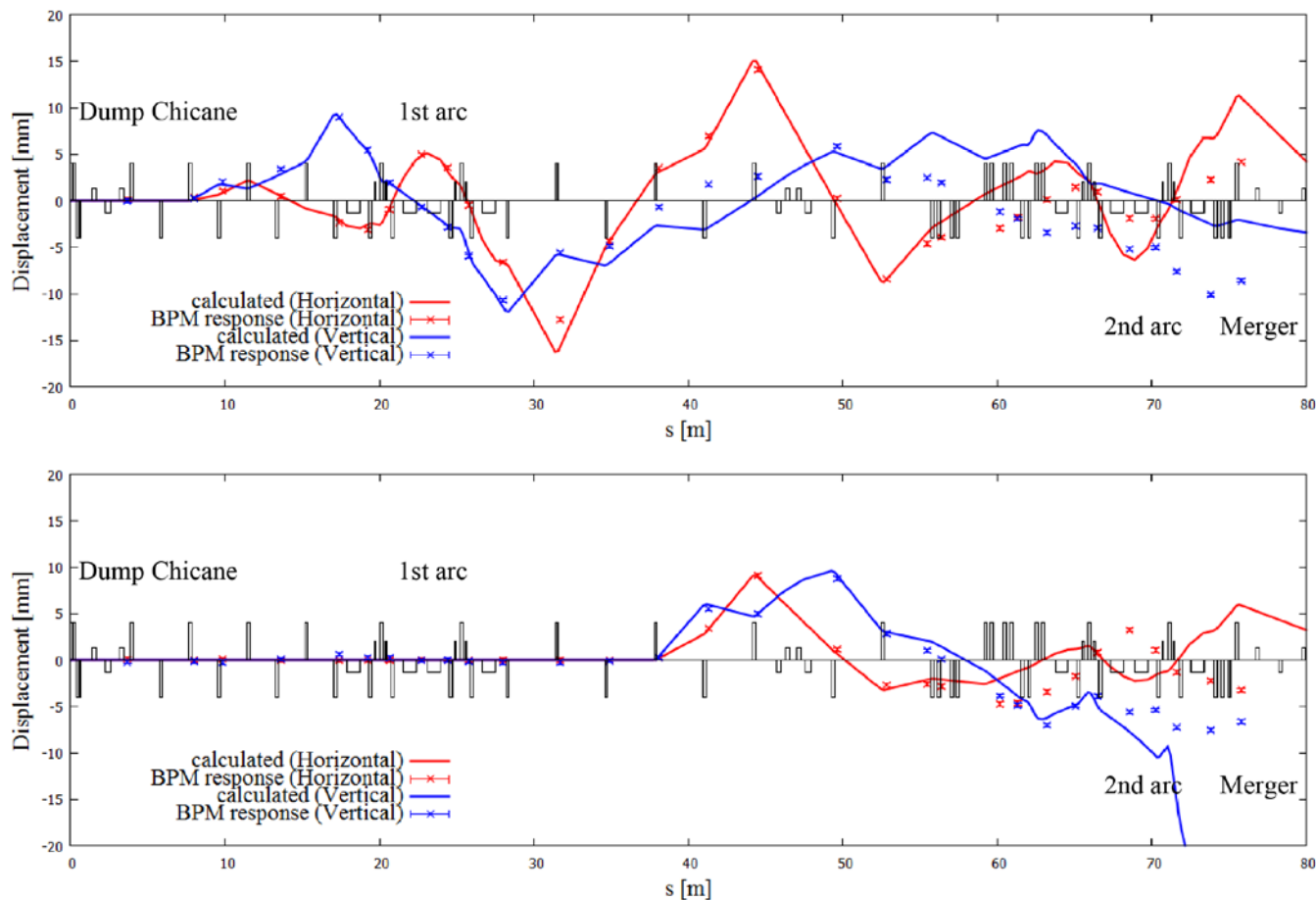
QDの励磁電流

測定回数	水平方向 [A]	垂直方向 [A]
磁場測定からの推定値	0.462	-0.462
1回目	0.5 ± 0.05 (+8%)	-0.48 ± 0.02 (+4%)
2回目 (逆順)	0.425 ± 0.05 (-8%)	-0.5 ± 0.02 (+8%)
3回目	0.48 ± 0.02 (+4%)	

ビーム測定の誤差: 10%程度  
誤差の範囲内で一致している。

測定日: 2014.6.10、測定カ所: 北側直線部  
スクリーンcam12、四極電磁石QMAC02  
ステアリング、ZH(V)QMAC01

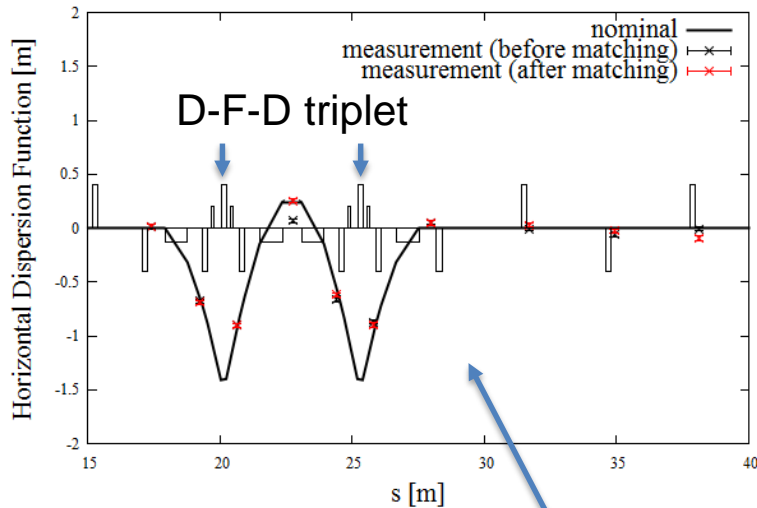
# Single Kickの応答測定



ステアリングキックによる応答の一例 (赤: 水平方向、青: 垂直方向)

- ・ ZH(V)QMAC03およびZH(V)QMIM04のキックによる応答
- ・ 測定値: BPMの応答、測定誤差 $\pm 0.2\text{mm}$
- ・ 実線: 磁場測定結果と励磁電流から推定されるビーム位置  
およそ20m先までは一致している。

# 分散関数のマッチング



## アークの条件

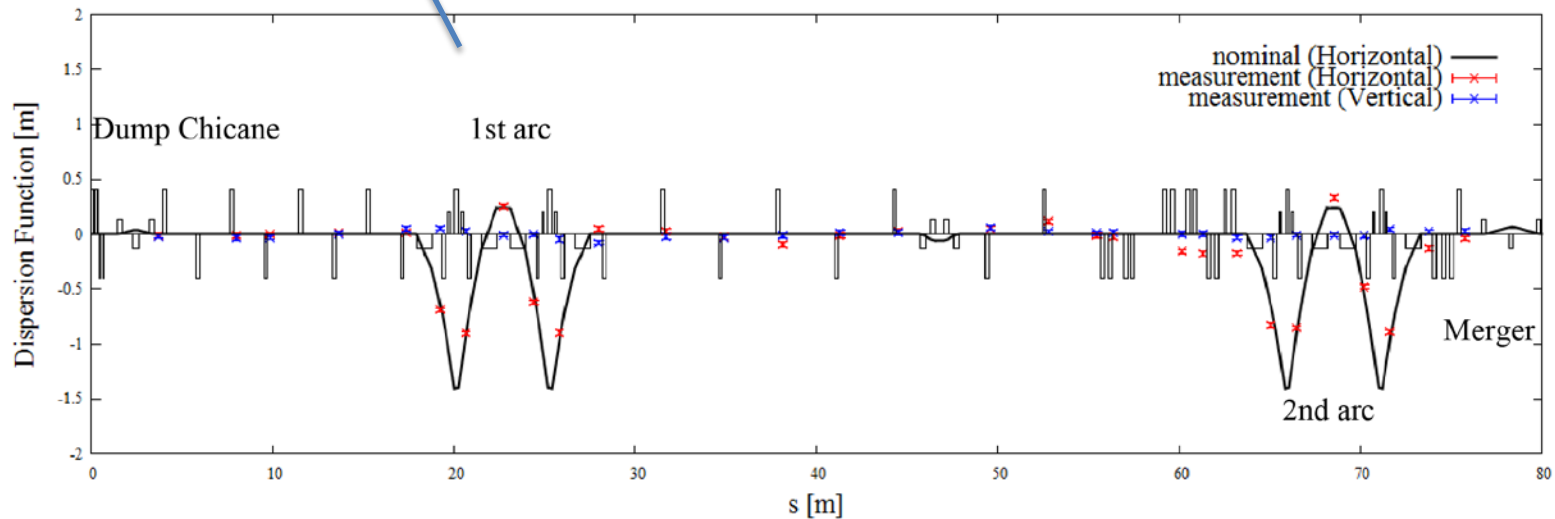
- ・ アクロマート: アークの出口で  $\eta_x = 0 \text{ m}$ ,  $\eta'_x = 0$
- ・ アイソクロナス: アークの中心で  $\eta_x = 0.24 \text{ m}$ ,  $\eta'_x = 0$

## マッチング

- ・ トリプレットを調整して、測定値をデザイン値に合わせる。

## 左図

- ・ 黒実線: デザイン値
- ・ 黒のクロス: BPMによる測定値
- ・ 赤のクロス: マッチング後の測定値



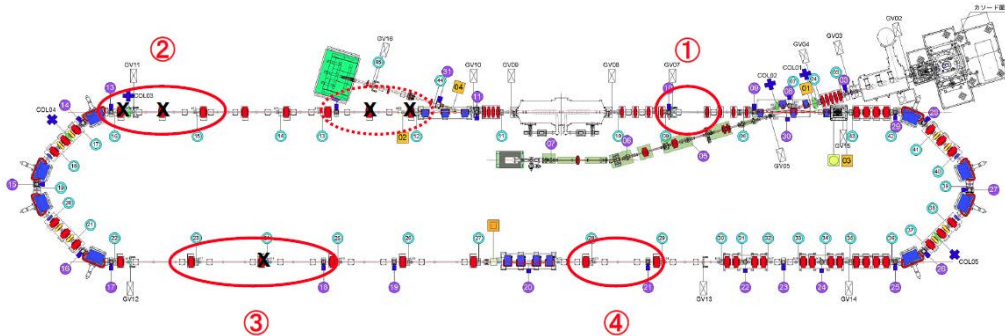
## 全体の分散関数

水平方向(赤): マッチング後の分散関数

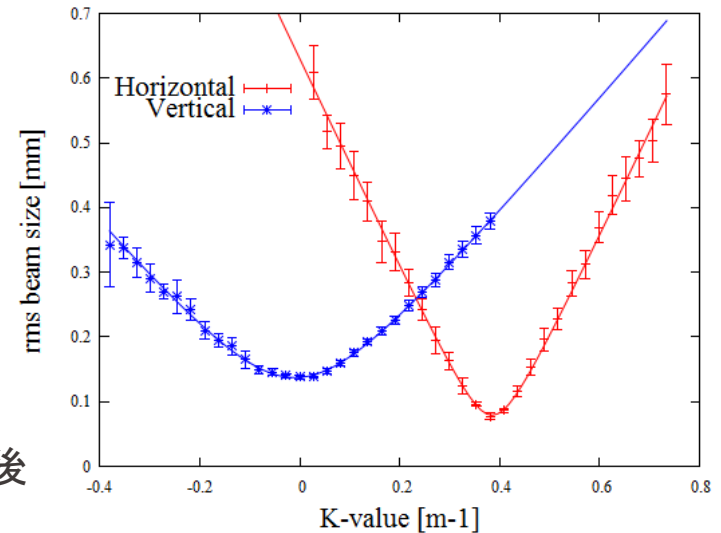
垂直方向(青): 分散関数がゼロの設計

南側直線部の最大値: 第2アークの前で0.17m

# Qスキャンによるエミッタンスの測定



- バンチ電荷: 数10 fC (軌道調整用運転)
- 測定箇所: 4か所  
主空洞前、主空洞後、第1アーク直後、周長補正シケイン後
- ウェストサイズがCCDカメラの分解能を下回らないようなQMとスクリーンの組み合わせを選ぶ。
- カメラが飽和しないようにゲイン・NDフィルタの調整、BGの差分。



Qスキャン測定例 (測定20回)

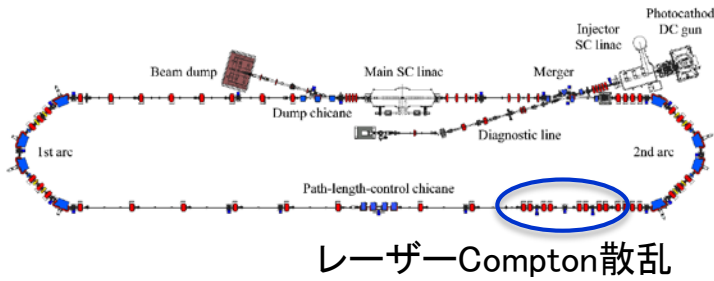
規格化エミッタンスの測定結果 ( $\epsilon_{nx} / \epsilon_{ny}$ ), 単位 mm mrad

測定日	主空洞前	主空洞後	第一アーク直後	周長補正シケイン後
3/11	-	0.56/0.36	0.52 / 0.45	-
3/14	-	0.28/0.41	-	0.23 / 0.26
6/13	0.15/0.14	0.14 / 0.12	0.14 / 0.14	0.13 / 0.15

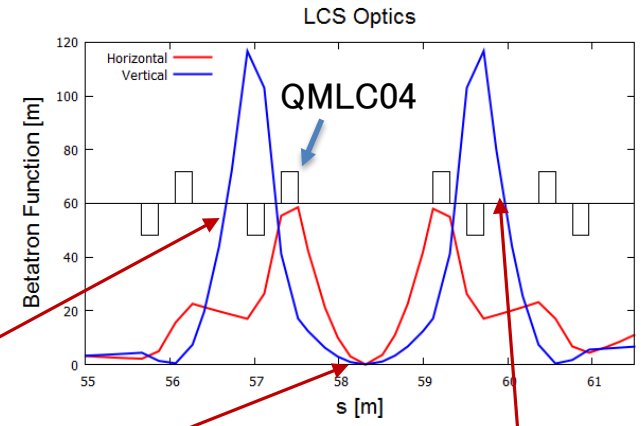
オプティクス調整が進むにつれ、結果が改善。  
規格化エミッタンス: およそ0.14 mm-mrad (数10 fC)



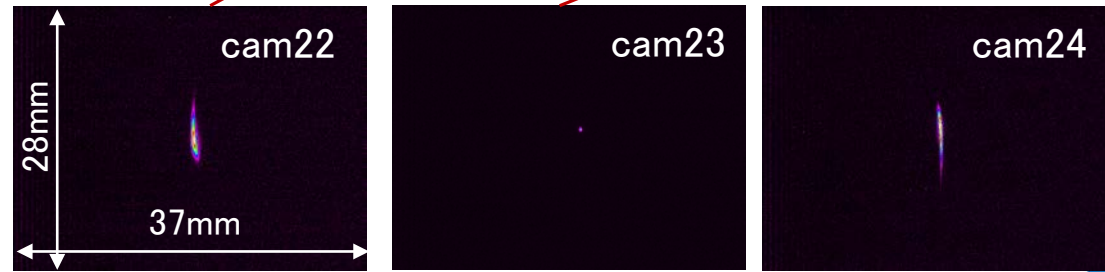
# レーザーCompton散乱のためのオプティクス調整



衝突点の $\beta$ 関数  
(デザイン値)  
0.01 m (H)  
0.038 m (V)



- QMLC04のQ-scanで衝突点でビームサイズが最小となるOpticsを探す。
- QMLC03と04でOptics調整
- cam23のビームサイズは分解能以下

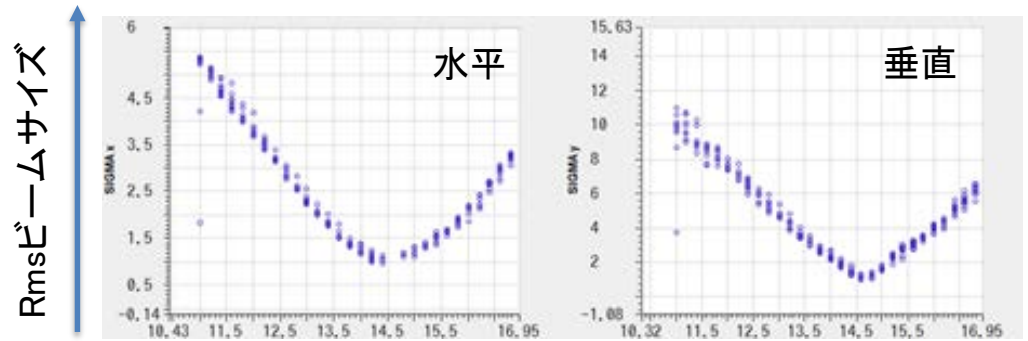


Q-scanの結果

ビームサイズ推定値

10.9  $\mu\text{m}$  (H)

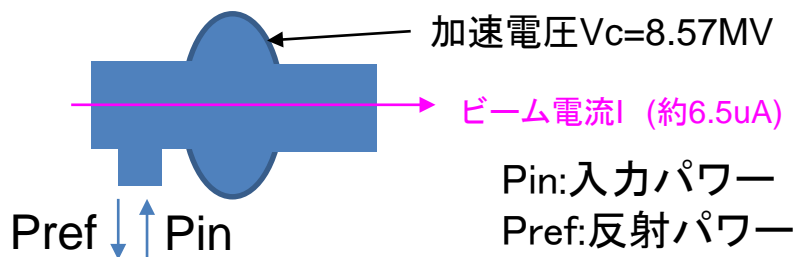
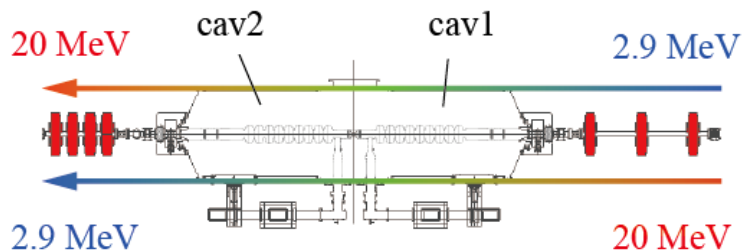
8.2  $\mu\text{m}$  (V)



実測値・QMLC04のK値

# エネルギー回収の確認

Energy recovery test



入力パワーと反射パワーの差 :  $\text{Pin}-\text{Pref}$

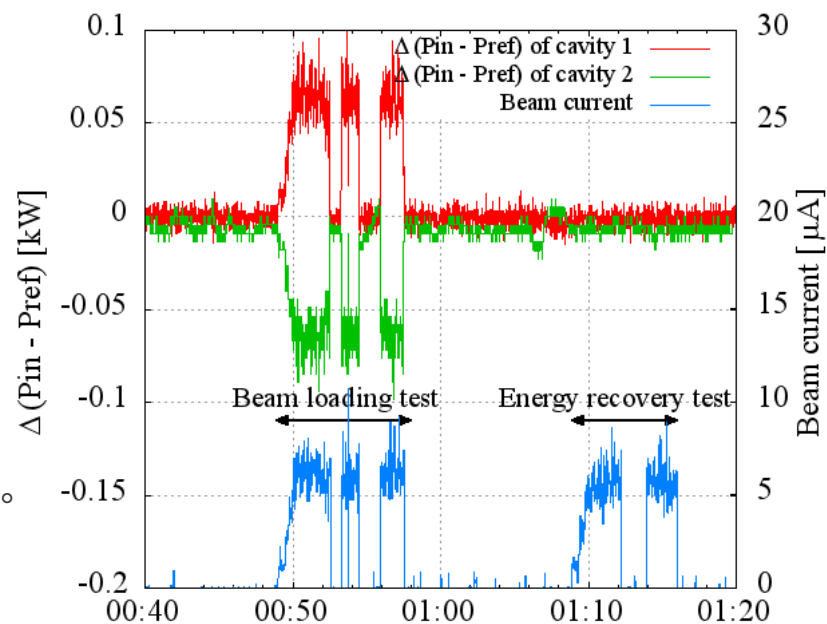
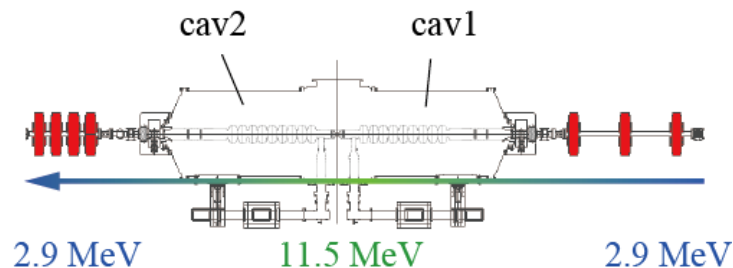
- ・ エネルギー回収試験

エネルギーのやりとりができていない場合、  
 $\text{Pin}-\text{Pref}$  はビーム電流によらず一定。

- ・ ビームローディング試験

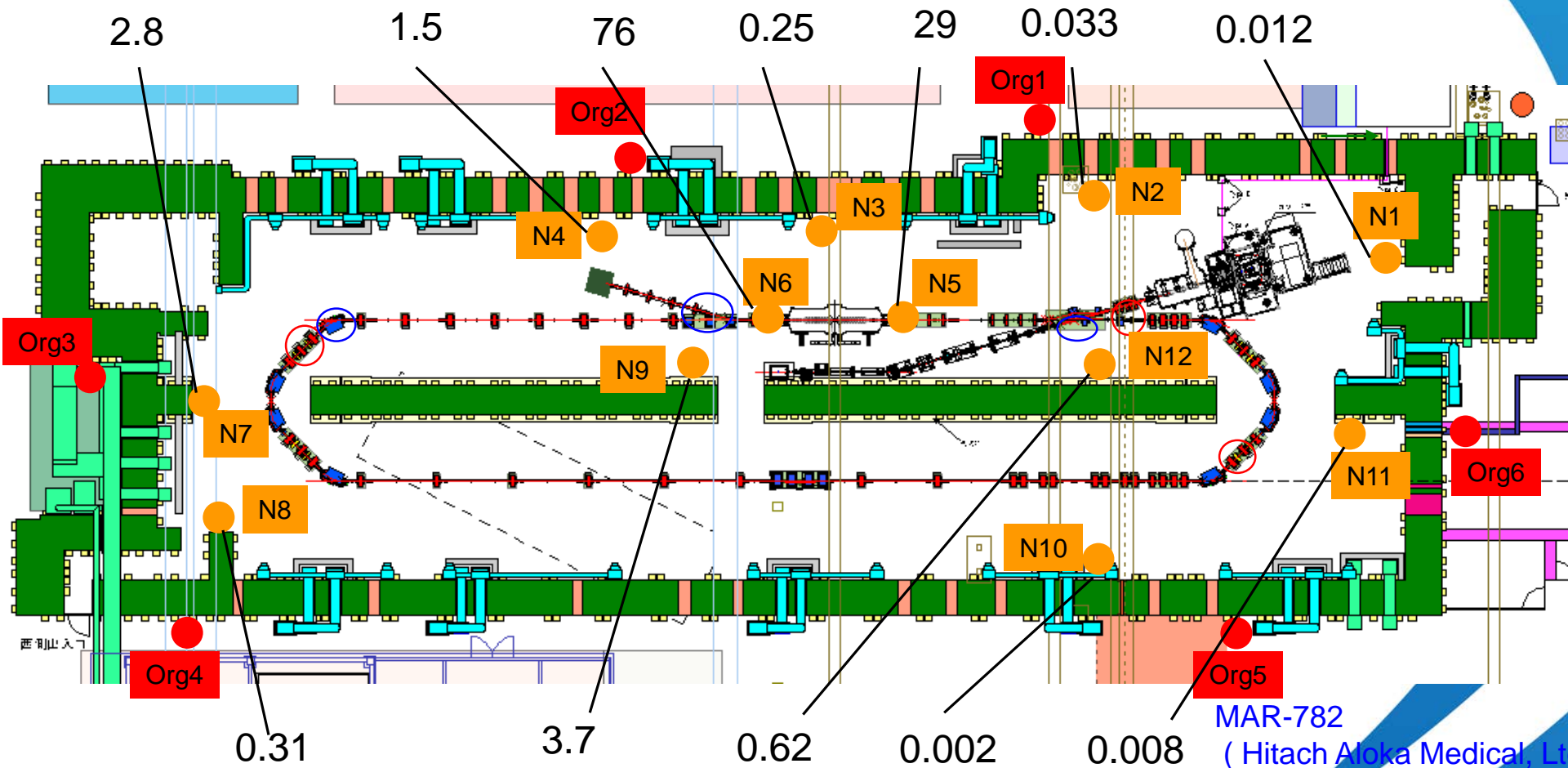
加速・減速のみの場合、エネルギー収支がゼロでない。  
 ビーム電流によって入力・反射パワーに変化がある。

Beam loading test



# 6 uA CW運転時の放射線量

単位: mSv/h



3/14測定時: 周回部T=19.4 MeV, 入射部T=2.4 MeV

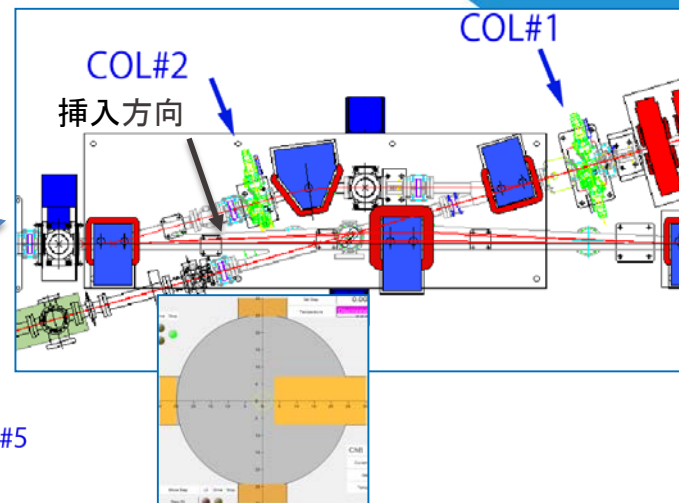
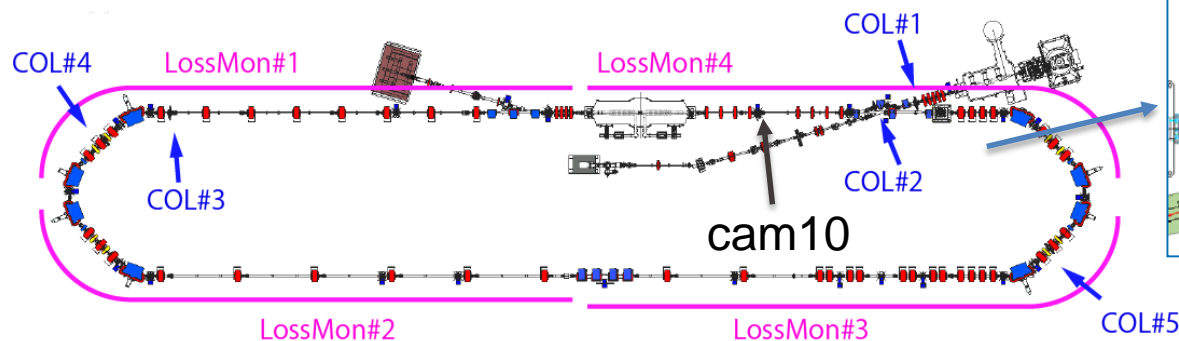
運動エネルギー:

入射器空洞:  $E_{acc}(Pt) = (3.24, 3.29, 3.12)$  MV/m 主空洞:  $V_c = (8.58, 8.59)$  MV

バンチャー:  $V_c = 30$  kV



# コリメータと光ファイバロスモニタ

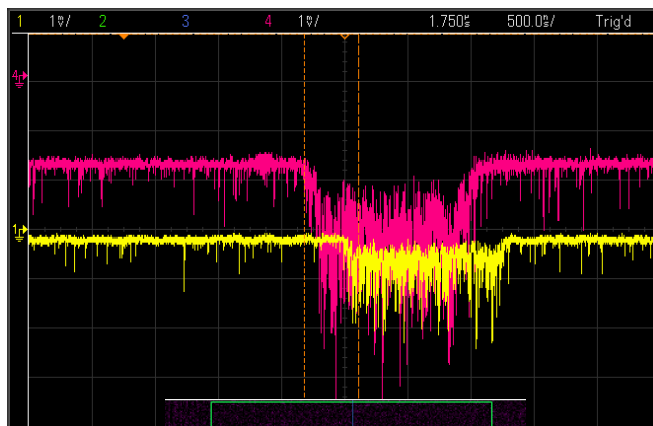


## ファイバロスモニタの信号

第1アーク  
LossMon#1&#2

第2アーク  
LossMon#3&#4

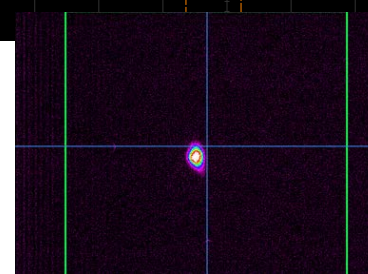
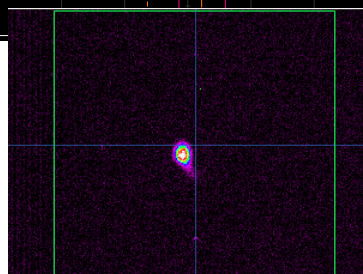
## コリメータCOL#1, #2挿入前



## コリメータCOL#1, #2挿入後



## スクリーンモニタ Cam10の画像



コリメータ5カ所: ハロー調整用には入射部の2個が有効  
Fiber Loss Monitor は全周をカバー



# 高速ロスモニタ: Pure CsI シンチレータ

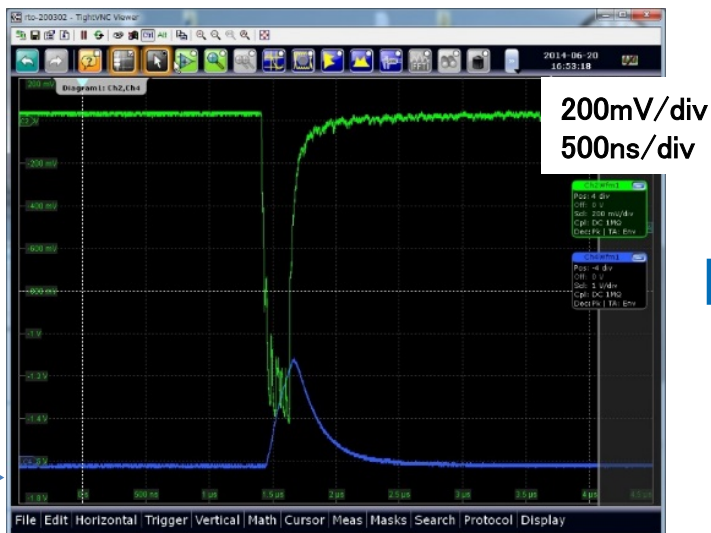
- ・PMT: 浜松ホトニクス社製、サイドオン型
- ・シンチレータ: Pure CsI (25x10x10 mm)

下ヶ橋ら、SUP083  
 “cERL高速ロスモニタ用検出系のテスト”



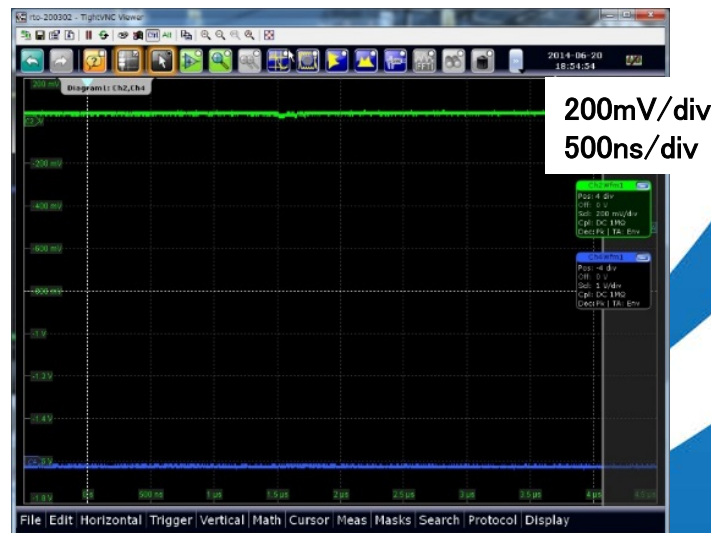
第1アーク中央  
 (cam15付近)

PMT信号



Interlock用  
 積分出力

オプティクスマッチング前: ビームロスあり  
 (コアは通過、スソを落としている状態)



オプティクスマッチング後: ビームロスなし

# 高バンチ電荷ビームの周回部輸送

宮島 司ら、SAP023  
 “7.7pC/bunch電子ビームのcompact ERL周回部輸送”

輸送試験: 入射部調整も含め、5日間

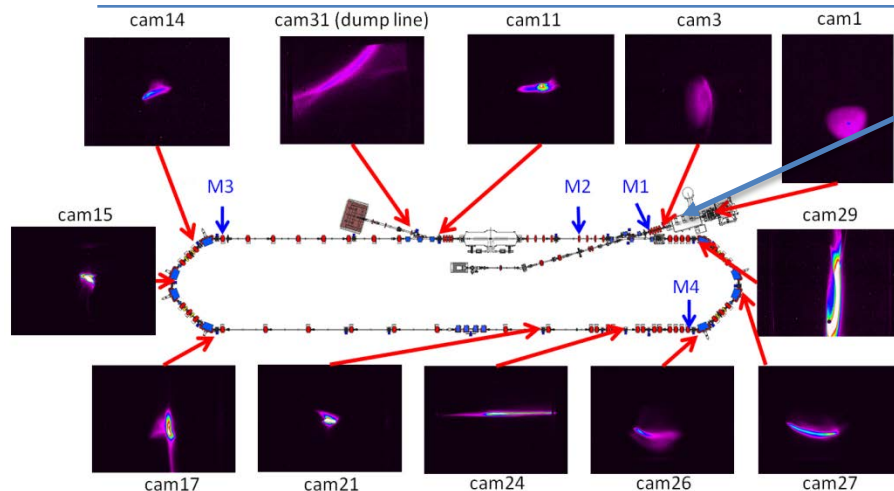
目的 : 空間電荷効果が支配的な高バンチ電荷(7.7 pC/bunch)の輸送試験

ゴール: 周回部でのビーム品質の確認、主ダンプまでのビーム輸送

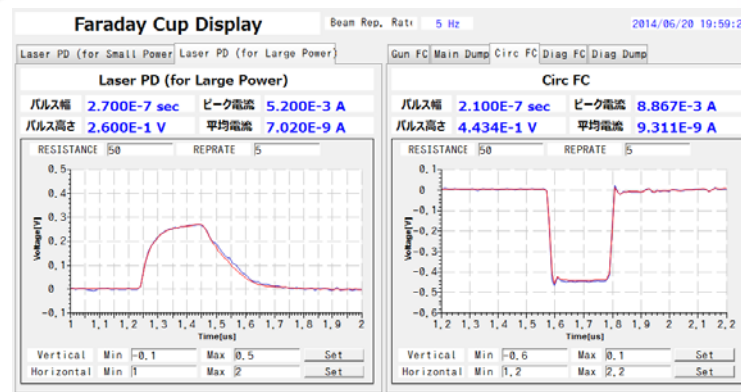
- ・ 周回部輸送調整: **9割が周回部FCに到達**。オプティクスマッチングが重要。
- ・ ビーム品質測定結果: 入射器 2.9 MeV, 周回部 19.9 MeV  
 規格化エミッタンス(設計 0.6 mm mrad): **2.9 mm mrad**(診断ライン)  
**2.9 mm mrad**(周回部第一アーク手前)、**5.8 mm mrad**(周回部南直線部)  
 バンチ長(設計 4 ps): **5.5 ps** (診断ライン)

規格化エミッタンスの測定結果 ( $\epsilon_{nx} / \epsilon_{ny}$ ), 単位 mm mrad

運転モード	入射器診断部	主空洞前	主空洞後	第一アーク後	第二アーク前
20 fC (6/13)	-	0.15 / 0.14	0.14 / 0.12	0.14 / 0.14	0.13 / 0.15
7.7 pC (6/19)	-	-	-	42 / 14.7	-
<b>7.7 pC (6/20)</b>	<b>2.5 / 2.9</b>	-	<b>2.9 / 2.4</b>	<b>5.8 / 4.6</b>	-



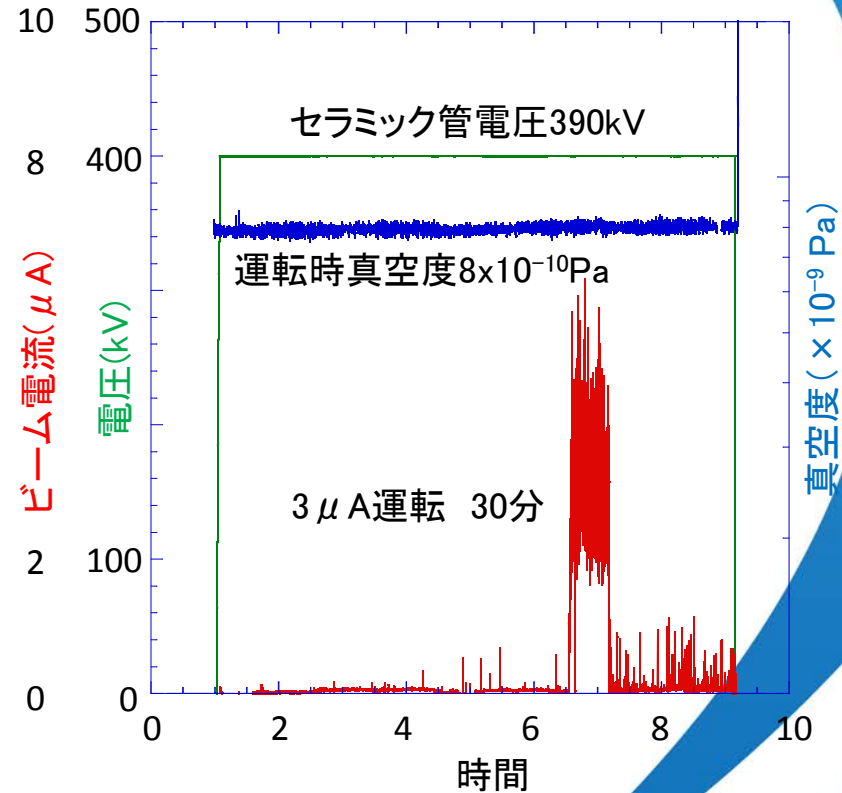
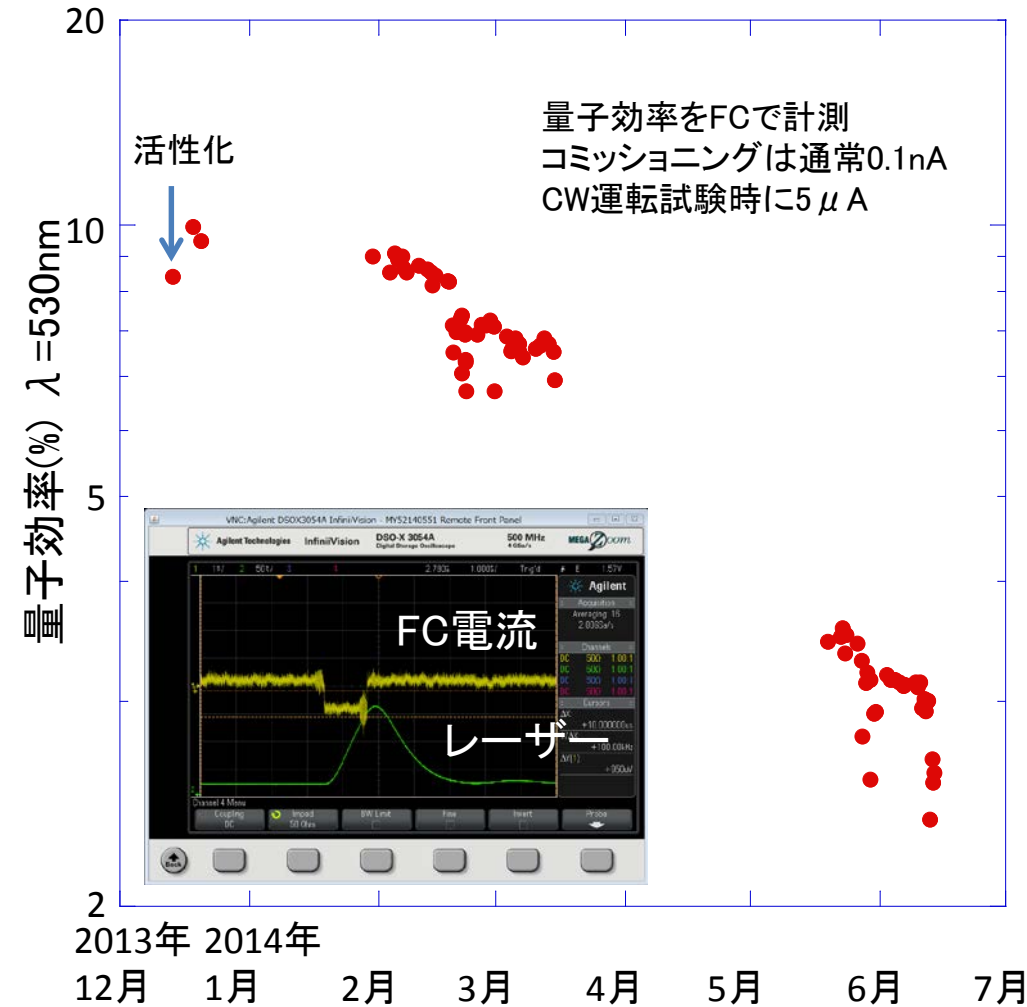
周回部Faraday cup に90%のビームが到達



# 電子銃運転状況

GaAs光陰極量子効率(周回部コミッシュヨニング時)

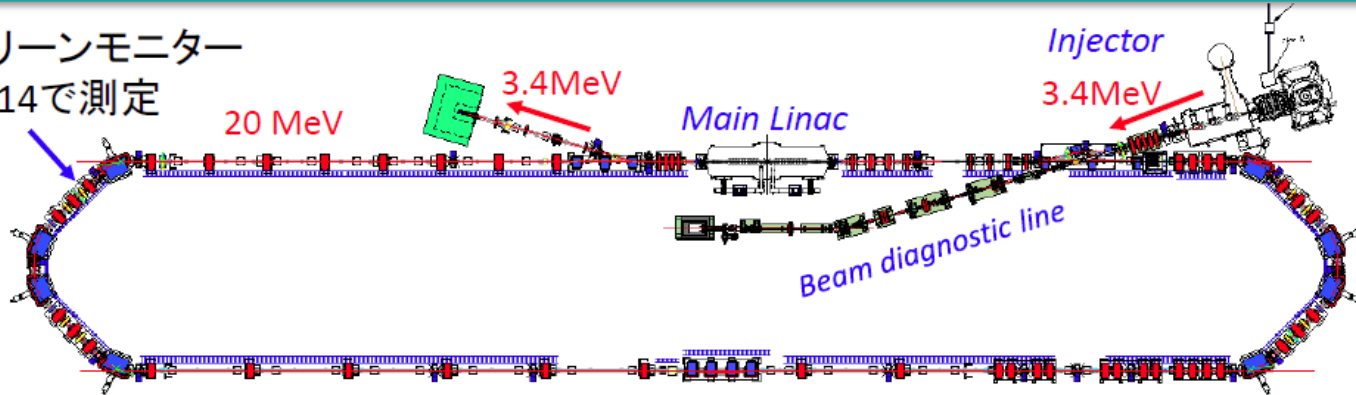
電子銃電圧、真空



- ・ 6か月交換なしで、2%以上の量子効率
- ・ 390 kV運転 (延べ500時間以上)
- ・ 運転時極高真空の達成

# Momentum Jitter for Total Energy

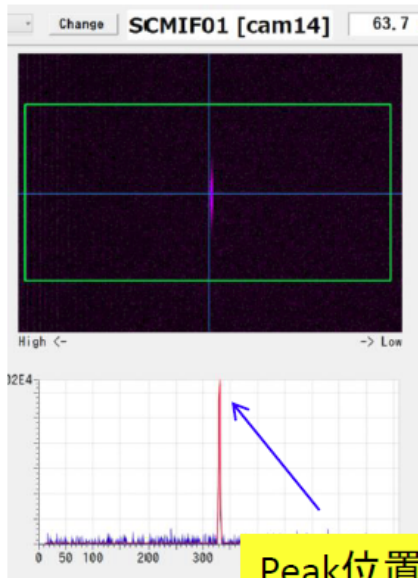
スクリーンモニター  
CAM14で測定



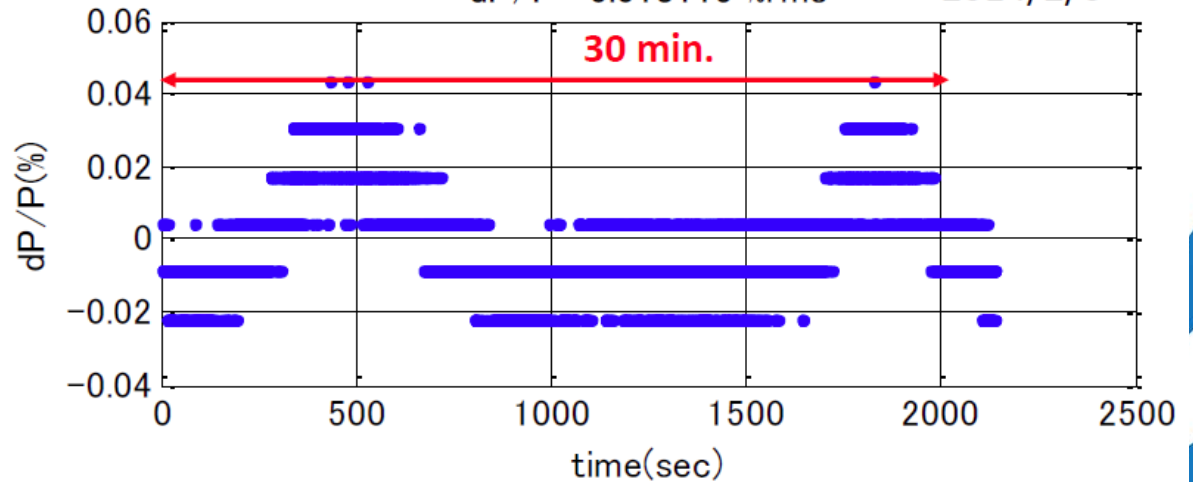
Dispersion :  $\eta_x = 0.487\text{m}$

Beam: 5Hz, 3ps rms, 23 fC, total Energy=20 MeV

63.7  $\mu\text{m}/\text{pixel}$



dP/P = 0.013115 %rms 2014/2/6



ゆっくりとしたエネルギーの変動が見られた。  
原因は、今後のStudyで調査したい

25 25

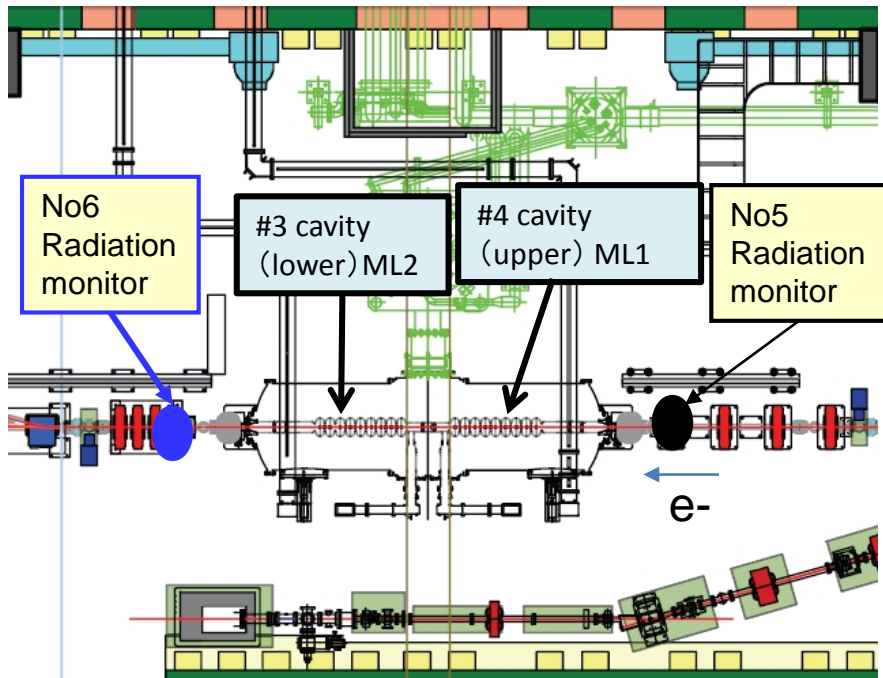


# 主超伝導加速空洞・長期運転

梅森 健成ら、SAP047

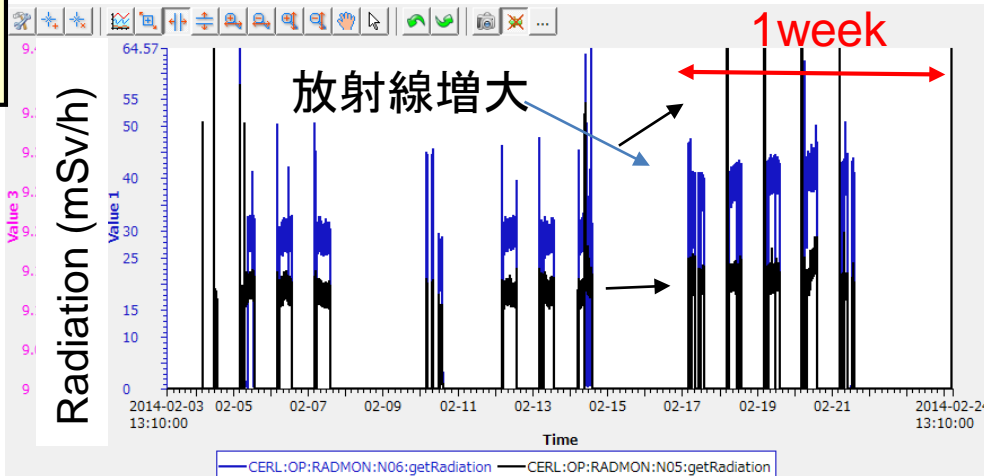
“Compact ERLにおける主加速部超伝導加速空洞の運転状況”

## 放射線量の増大



長期運転中のradaition増大による空洞劣化を見るため2つのモニター(radiation monitor (Si検出器、ALOKA))をradiationの出る空洞の軸方向に常時設置。

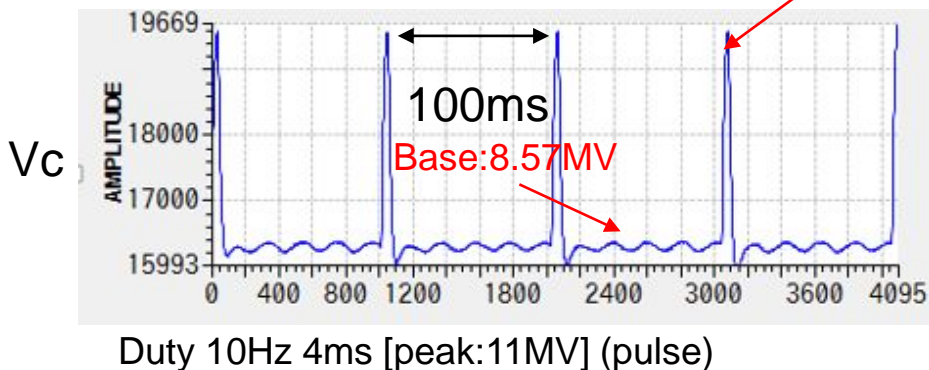
2月初めの20MeV運転を始めてから3週間のradiationの様子  
3週間後に突然下流にradaitionが増える現象が見られる。



## パルスエージング

空洞電圧測定波形(digital)(Vc)

一瞬空洞内に高いfieldができる



### ・パルスエージングの実施

8.5 MV + 2.5 MV (pulse), 10 Hz 4ms

### ・およそ1時間のエージング

### ・両方のcavityで効果あり

放射線量がおおよそ半分程度に減少

上流radiation(No.5) 38.7mSv/h (2/25 21:00)

→ 20.48mSv/h (2/26 21:47)

下流radaition(No.6) 133mSv/h (2/25 21:00)

→ 77.9mSv/h (2/26 21:47)

# まとめ

- コンパクトERLの建設
  - 5か月の短期間において、ダンプラインを含めた周回部の建設が完了
- 周回部ビーム調整
  - 低エネルギービームに対する環境磁場対策
  - BPMによる2ビームの測定が機能した。
  - ダンプエネルギーの最小化による周長補正
  - 電磁石の応答測定、Single Kickの測定、分散関数の調整
  - 主加速空洞のビームローディングによるエネルギー回収の確認
  - コリメータによるビームロスの軽減
  - 電子銃、超伝導加速空洞など、長期運転
- 今後の方針
  - 空間電荷効果の支配する電荷量におけるビーム調整
  - レーザー逆コンプトン散乱によるX線生成の実施
  - 100uA-1mAのCW運転の実現
  - テラヘルツビームラインの実現

# 加速器学会 発表 (一部)

- 中村 典雄ら “コンパクトERLの進捗状況” SUP014  
久米 達哉ら “cERL周回部電磁石のアライメント” SUP131  
田中 織雅ら “コンパクトERLにおけるビームロスの研究” SAP018  
中西 功太ら “EPICSを用いたヘリウム冷凍機システムの開発” SUP086  
山本 将博ら “500kV DC電子銃2号機の高電圧印加試験” SAP036  
永井 良治ら “コンパクトERLでのレーザーコンプトン散乱光源実証用装置の建設” SUP109  
永井 良治ら “レーザーコンプトン散乱光源用ビームラインモニタの開発” SAP113  
永井 良治ら “光陰極直流電子銃無塵化技術の開発” SUP027  
宮島 司ら “7.7pC/bunch電子ビームのcompact ERLの周回部輸送” SAP023  
濁川 和幸ら “cERLのpersonal protect system” SUP090  
下ヶ橋 秀典ら “cERL高速ロスモニタ用検出系のテスト” SUP083  
帯名 崇ら “EPICS内臓小型デバイスサーバの開発” MOOL08  
金 秀光ら “ERL電子銃のための光陰極準備系の開発” SAP032  
西森 信行ら “大電流電子源のための光陰極準備システムの開発” SUP031  
梅森 健成ら “Compact ERLにおける主加速部超伝導加速空洞の運転状況” SAP047  
芳賀 開一ら “cERL加速器室の設計と建設” SUP128  
芳賀 開一ら “cERLの放射線安全対策” SUP127  
原田 健太郎ら “cERL, DR用電磁石の磁場測定” SUP062  
原田 健太郎ら “cERLの電源システム” SUP066  
竹中 たてるら “CERLおよびSTFにおける導波管コンポーネントの諸特性” SAP057  
本田 洋介ら “ERL試験加速器における周回部バンチ長計測の検討状況” SAP089  
本田 洋介ら “収差保証を導入したレーザーコンプトン散乱用光学共振器の設計” SAP116  
花香 宣彦ら “cERLにおける大電力分配系の構築” SUP057  
赤城 智哉ら “cERLでのレーザーコンプトン散乱用光共振器の開発” SUP110  
宮島 司ら “荷電粒子ビームの静的な空間位相分布に対するマクロ粒子数の検討” SAP026