

周回部コミッショニングと 今後の課題

cERLミニワークショップ 第2部

2015年1月19日（月）

4号館2階輪講室1,2

高エネルギー加速器研究機構

加速器研究施設 第7研究系

島田 美帆

周回部ビームダイナミクスの課題

ERLの光源利用

- 3 GeV ERL 放射光将来計画
- EUV-FEL（中村さん発表）
- cERLによるTHz光源やレーザー逆コンプトン散乱

ビームダイナミクスの課題

- 加速・減速2ビームオプティクス&ビーム調整
- 2 loopビームオプティクス&ビーム調整
- HOM-BBU（Chen Siさん発表）
- エミッタンス保存（空間電荷効果、CSR wake、放射励起）
- エネルギー回収と周長補正
- アイソクロナス・アクロマートのオプティクス
- バンチ圧縮（中村さん発表）
- ビームロス（織雅さん発表）
- ビーム安定性
- その他

KEKと世界のERL計画

世界のERL計画（一部）とその課題

Cornell ERL project

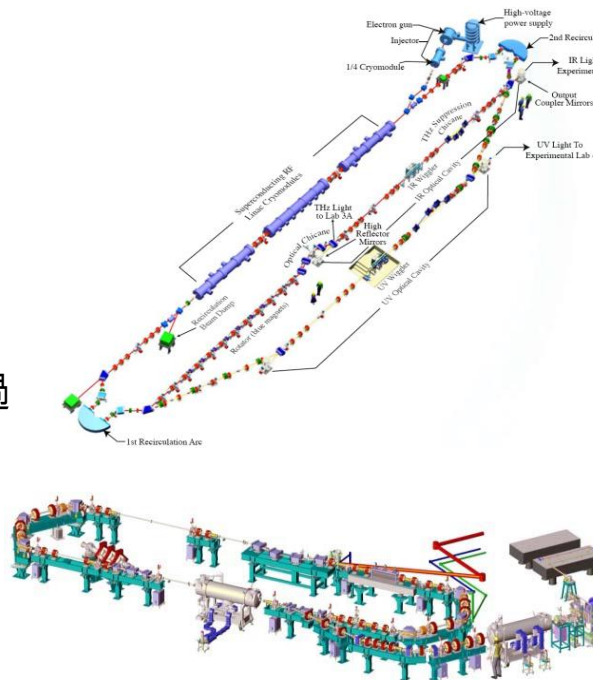
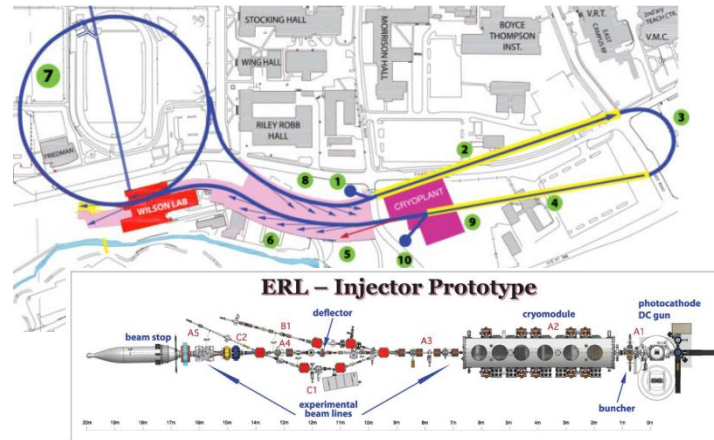
- 実機は5 GeV
- 入射部でビームクオリティが決まるという考え方のためか、周回部のテスト機はない。
- 将来計画はKEK-ERLに近い。

Jefferson Lab FEL

- エネルギー135 MeV
- HOM-BBUが問題になる。
- IR・VUV FELやTHz光源として稼働。

ALICE

- 4GLS ERL計画のテスト機だったが、現在IR-FEL、THz光源として活躍。過去にLCSを行ったこともある。
- 全周に渡って空間電荷効果などについて計算・実験が進められている。
- 空洞の数やビームエネルギーは今のCERLに近い。



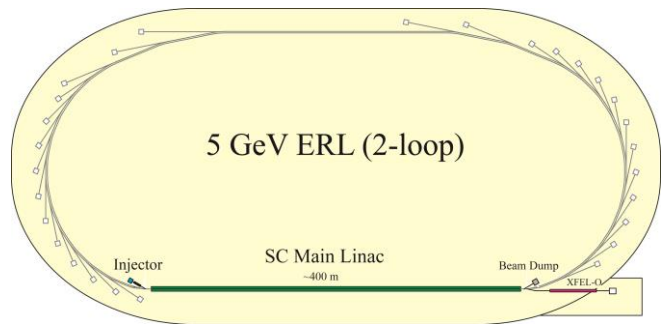
HOM-BBU
SRの放射励起

ビームダイナミクスの
課題が異なる。

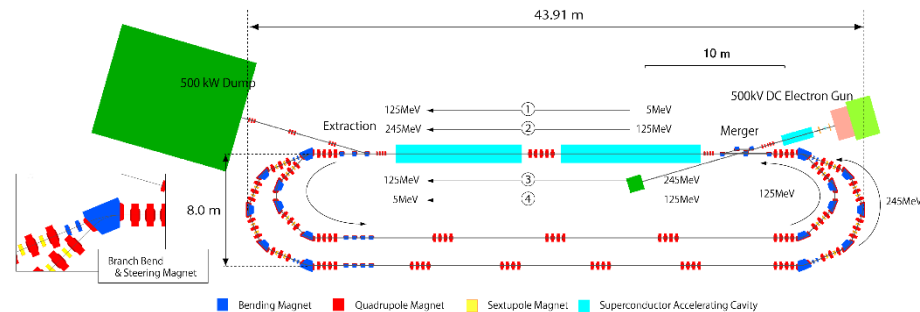
CSR wake
空間電荷効果

Multi loop ERL

2 loop ERLのビーム옵ティクス・ビーム調整が最もチャレンジングな開発項目（だった）。



試験機

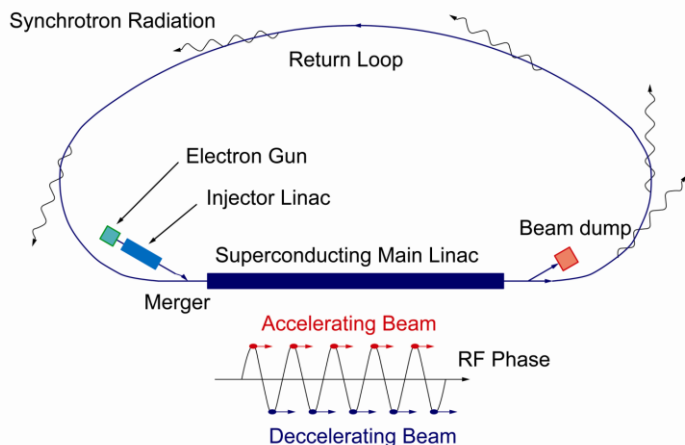


Undulatorがあるためloopを積み重ねるのが困難。

2010年の2 loop cERLのラティス
水平方向にloopが広がる



2011年に変更



3 GeV 1loop ERL

世界のmulti loop ERL (一部)

FSF LAYOUT

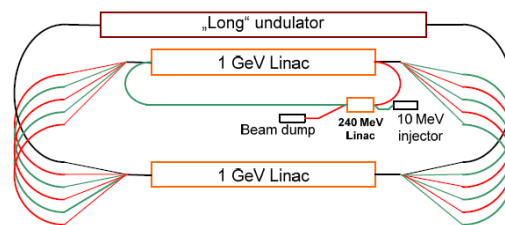
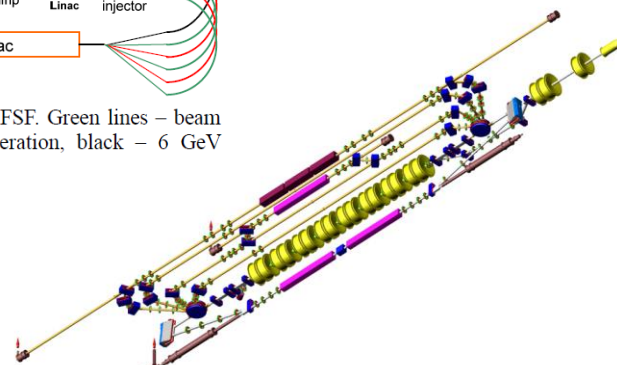


Figure 1: General layout of the FSF. Green lines – beam at acceleration, red – at deceleration, black – 6 GeV beam.

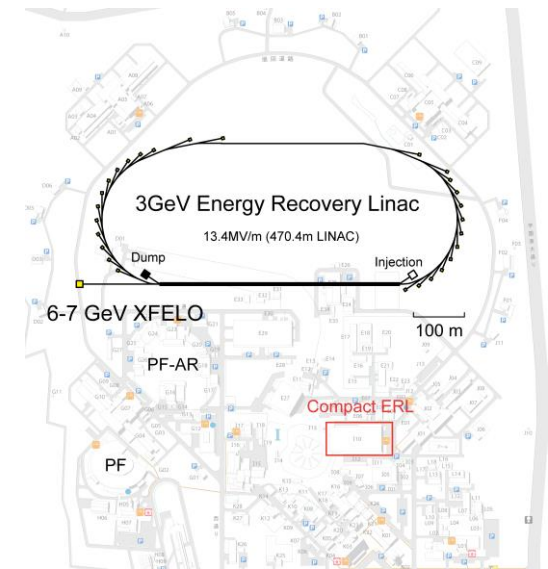
FSF@HZBなど
上に積み重ねるタイプ



BINP:横に広がるタイプ

3 GeV ERL 計画について

3 GeV ERL計画

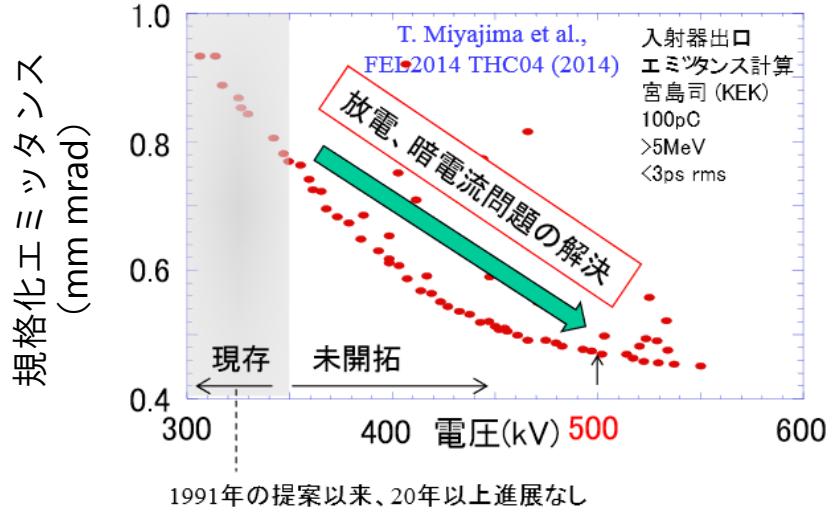


主要なビームパラメータ

Operation mode	High-Coherence	High-flux	Ultimate	Ultra short-pulse (Typical parameters)
平均電流	10 mA	100 mA	100 mA	77 uA
バンチ電荷量	7.7 pC	77 pC	77 pC	77 pC
バンチ繰り返し	1.3 GHz	1.3 GHz	1.3 GHz	1 MHz
規格化エミッタンス	0.1 mm · mrad	1 mm · mrad	0.1 mm · mrad	1-10 mm · mrad
自然エミッタンス	17 pm · rad	170 pm · rad	17 pm · rad	0.2-2 nm · rad
エネルギー広がり	2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}	To be investigated
rmsバンチ長	2 ps	2 ps	2 ps	100 fs

輝度の検討で参考にしたデータ

入射部ビームダイナミクス



達成可能か？

合流部出口

0.5 mm mrad@10 MeV, 77pC, 2ps

0.1 mm mrad@10 MeV, 20pC, 2ps

合流部後のvelocity bunching

Rmsバンチ長 2ps → 1ps

rmsバンチ長 エネルギー広がりを目安

1 ps

5e-5

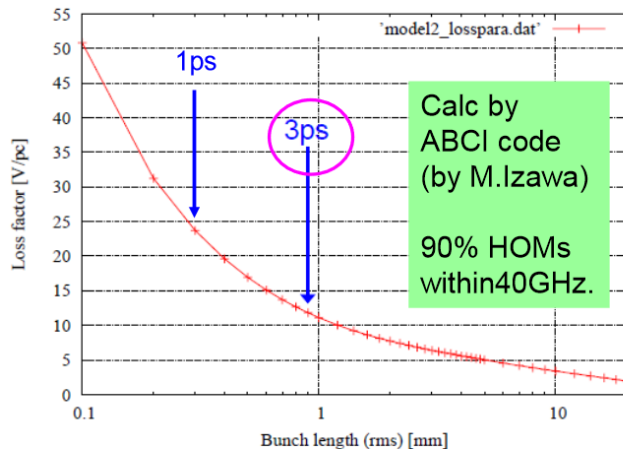
2 ps

2e-4

エネルギー広がりには主にRF curveで決まる。

主超伝導加速空洞のHOM heat loading

Loss factor



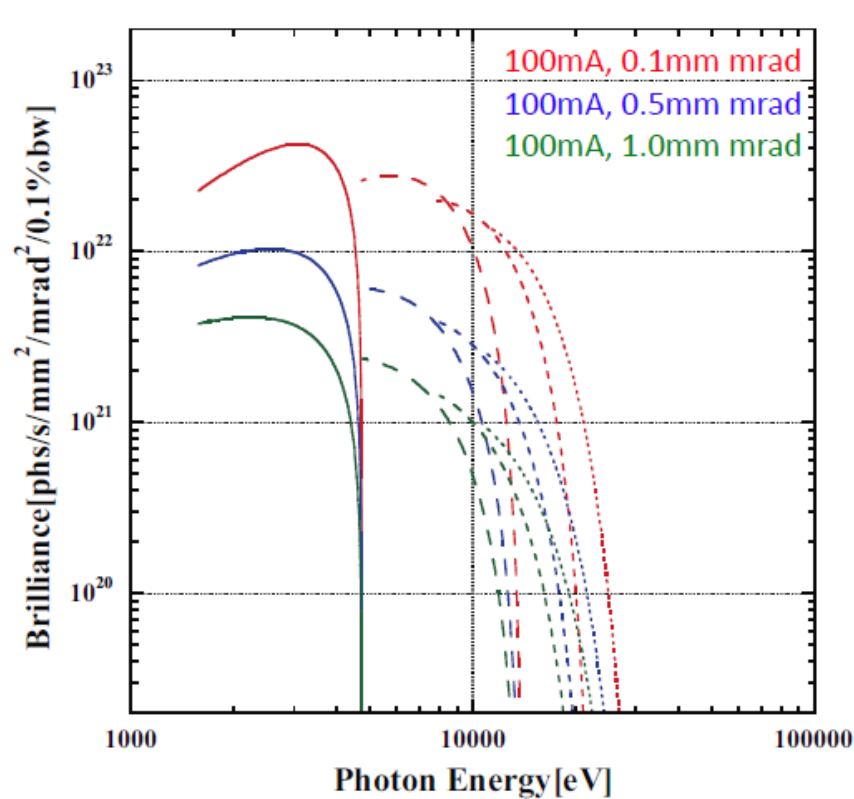
バンチ長 $\sigma_z=1ps$ のロスパラメータは
 $\sigma_z=3ps$ のおよそ2倍？

左図：KEK-ERL model-2の空洞のロスパラメータの計算値
加速モードのロスパラメータも含まれている。

阪井、cERLミニワークショップ(2014.Dec)

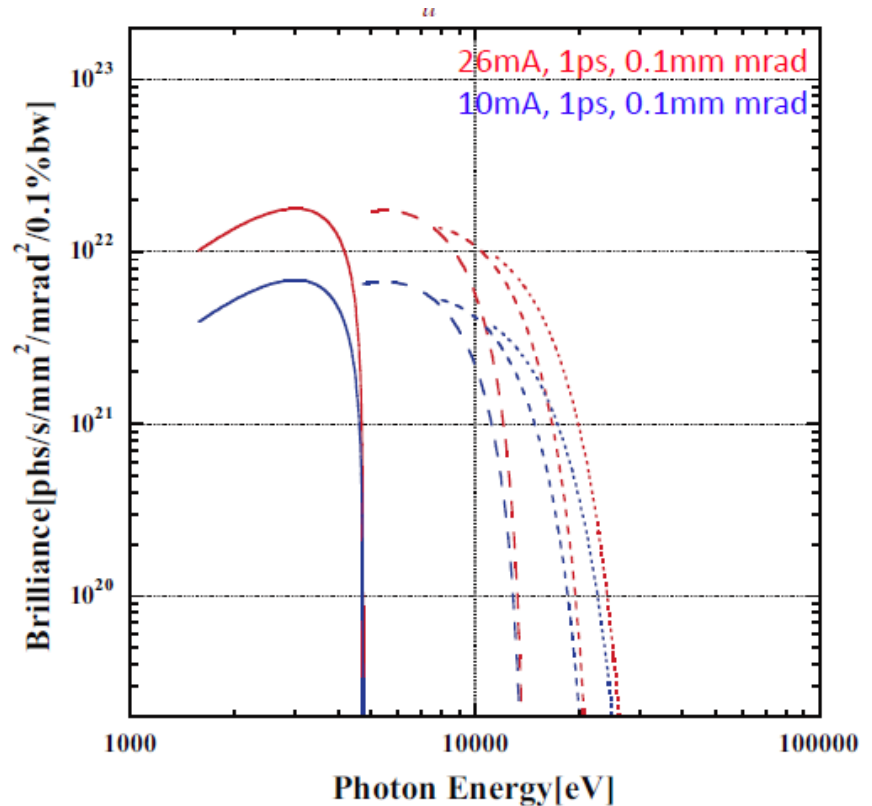
輝度の検討

Lu=30m, $\lambda_u=18\text{mm}$



輝度： $>10^{21}$ @8keVの3次光

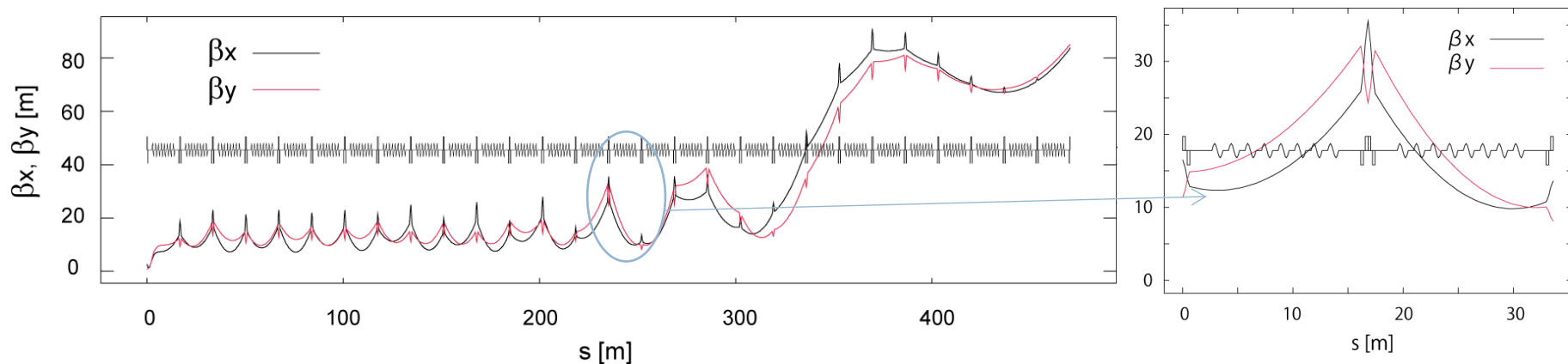
規格化エミッタンス 0.5 mm mrad
100mA, 77pC/bunch@1.3GHz
バンチ長 2 ps, エネルギー広がり $2E-4$



輝度： $>10^{22}$ @8keVの3次光

規格化エミッタンス 0.1 mm mrad
26mA, 20pC/bunch@1.3GHz
バンチ長 1 ps, エネルギー広がり $5E-5$

HOM-BBU対策



BBUに対する電流の閾値

R_{12} を小さく設計することが肝要

$$I_{\text{th}} = -\frac{1}{e} \frac{2\omega_\lambda}{(R/Q)_\lambda Q_\lambda k_\lambda^2 (R_{12}/p_i) \sin(\omega_\lambda t_r)}$$

$$R_{12}(i \rightarrow f) = \gamma_i \sqrt{\frac{\beta_i}{\gamma_i} \frac{\beta_f}{\gamma_f}} \sin \Delta \psi$$

- GeV class ERLのビームダイナミクスで最も懸念される問題
 - 全体的にベータ関数を小さくするため、variable KのTripletとする。
- 空洞のデザインに影響。加速勾配との折り合いが検討課題。
- 空洞の数が少ないcERLでは発生しない。
- シミュレーションの詳細な結果Chenさんが発表

3 GeV ERLの エミッタンス・エネルギー広がり増加

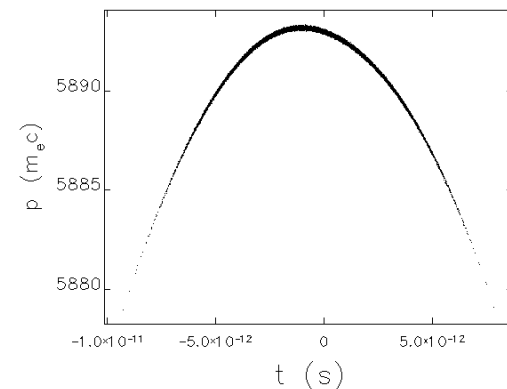
エミッタンス増加

- 放射励起とCSR wakeの影響をelegantでシミュレーション
- エミッタンス増加は10%以下。ほとんど放射励起によるものである。
- 計算の条件
 - $\text{Enx} = \text{eny} = 1\text{e-}7$ (規格化エミッタンス0.1mm-mrad)
 - $\text{Sigma}_{dp} = 2\text{e-}3$ (入射・ダンプエネルギー10MeVでのエネルギー広がり)
 - $\text{Sigma}_s = 600\text{e-}6$ (バンチ長2ps)
 - 粒子数: 30000個
 - 電荷量: 77pC

曲率半径	加速直後の ϵ_{nx}	周回直後の ϵ_{nx}
10 m	1.00e-007	1.07e-007
20 m	1.00e-007	1.02e-007

エネルギー広がり増加

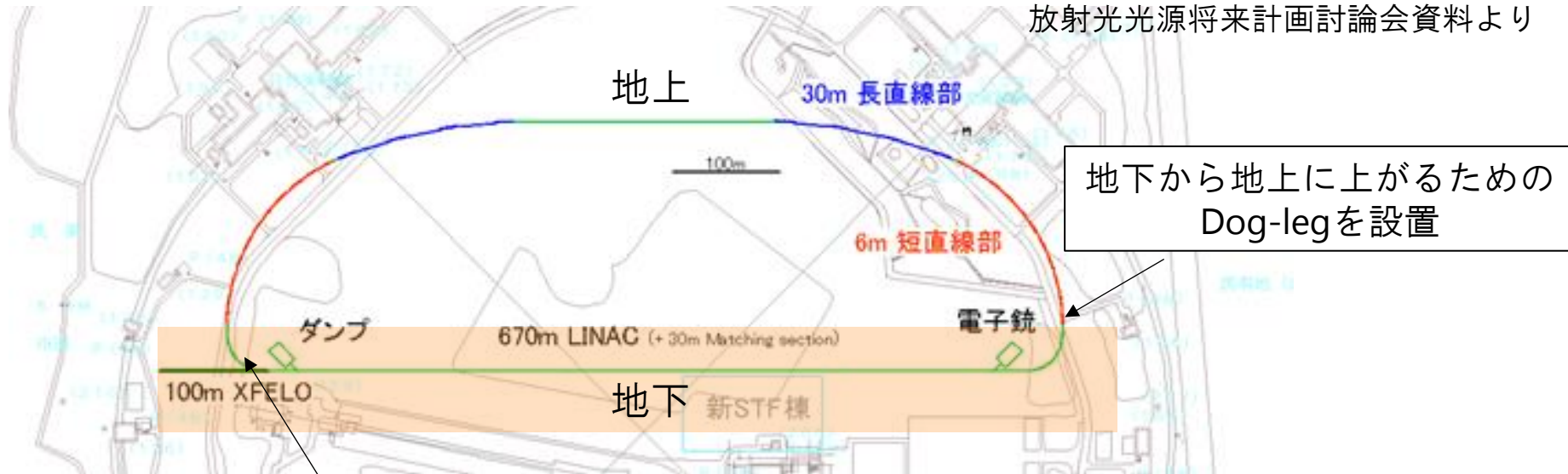
- 放射励起、CSR wake、TESLA空洞の縦方向のwakeの影響をelegantでシミュレーション
- 周回後のエネルギー広がり増加は $4\text{e-}5$ 程度@77pC, $\sigma_z=2\text{ps}$ である。RF curveによるものよりも小さい。



ビームロスと遮蔽について

2013.6.1

放射光光源将来計画討論会資料より

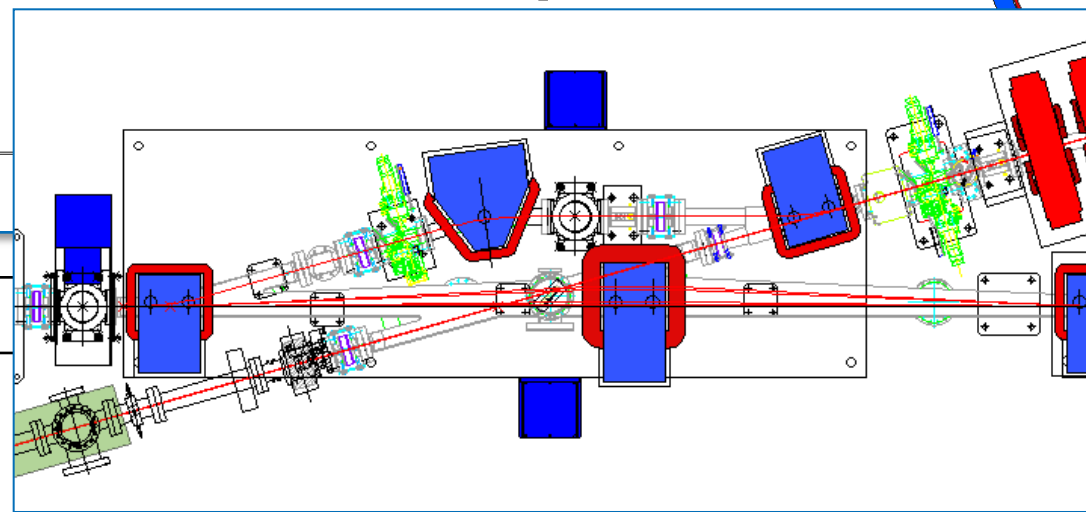
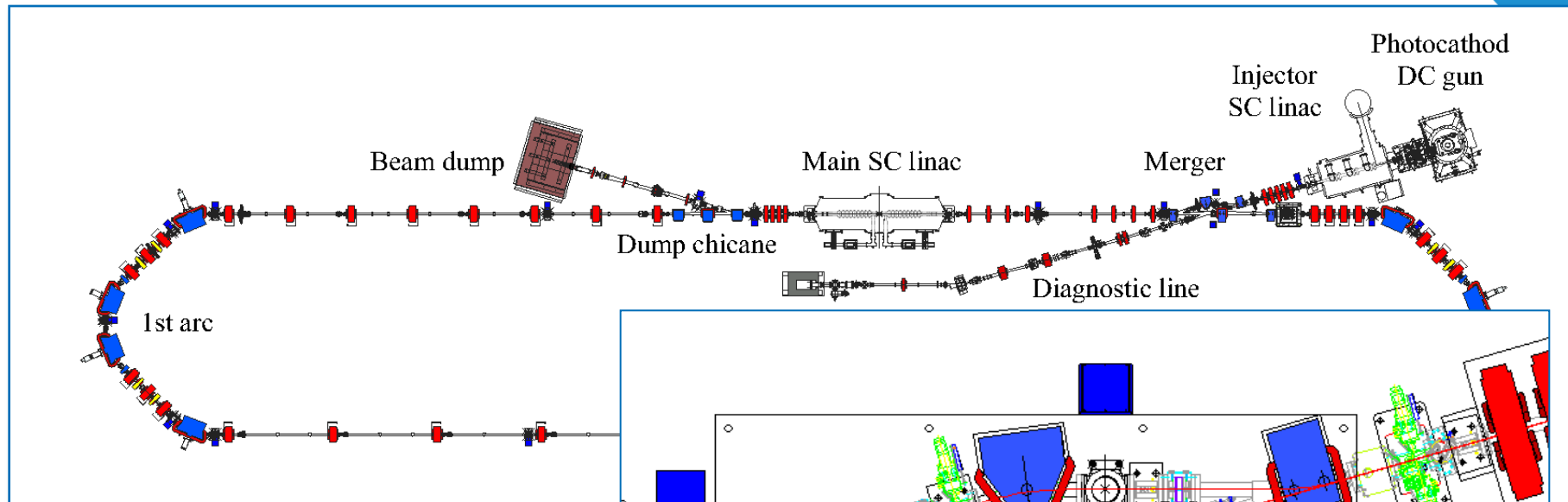


90度のアークでハローや暗電流を取り除く

- ビーム安定機構がなく、常に電子銃からビームが供給されるため、ビームロスによる放射線対策が重要。
 - 織雅さんが、ロスシミュレーションを行う予定。
- 電子銃・超伝導加速空洞・ダンプは地下に敷設し、コリメータや遮蔽を強化
- 挿入光源は建設費節約のため地上に建設

cERLコミッショニングの成果とその課題
(加速器学会のスライドに補足コメント)

コンパクトERLの主要パラメータ



Nominal

周回エネルギー, E_c

35 MeV

入射エネルギー, E_{in}

5 MeV

平均電流値(max)

10 mA

10 μ 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)

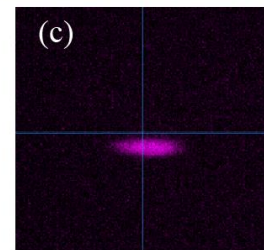
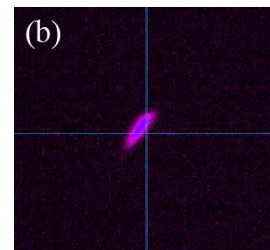
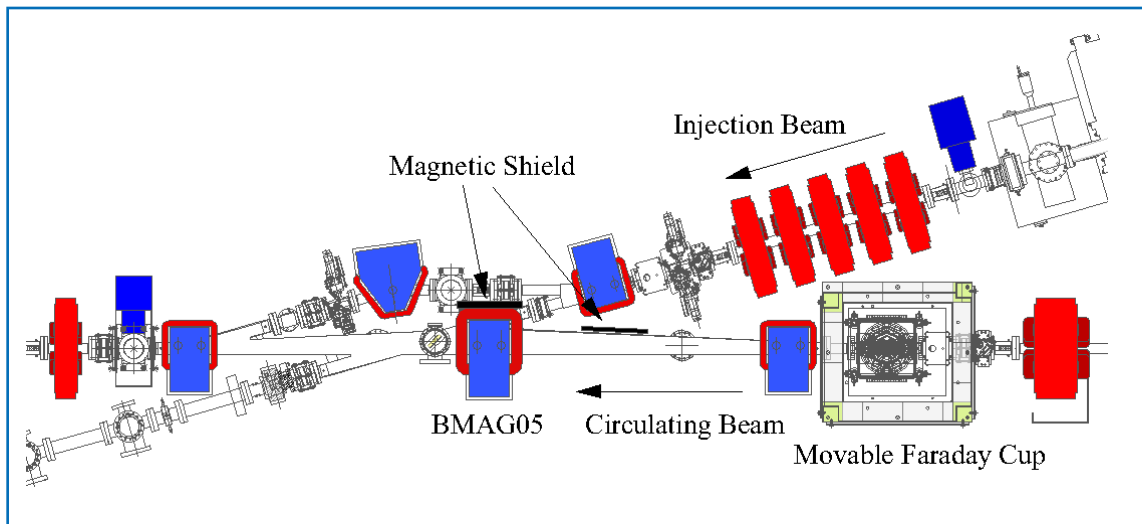
バンチ長

1-3 ps

1-3 ps

(周回ビームと入射ビームの運動量比で制限)

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 (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

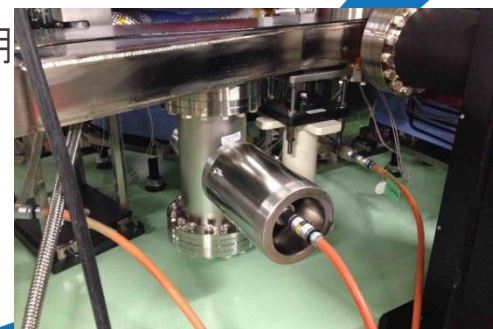
入射シケインから主空洞までの4つのCCGを取り除く。

さらに、入射合流部のopticsを調整。

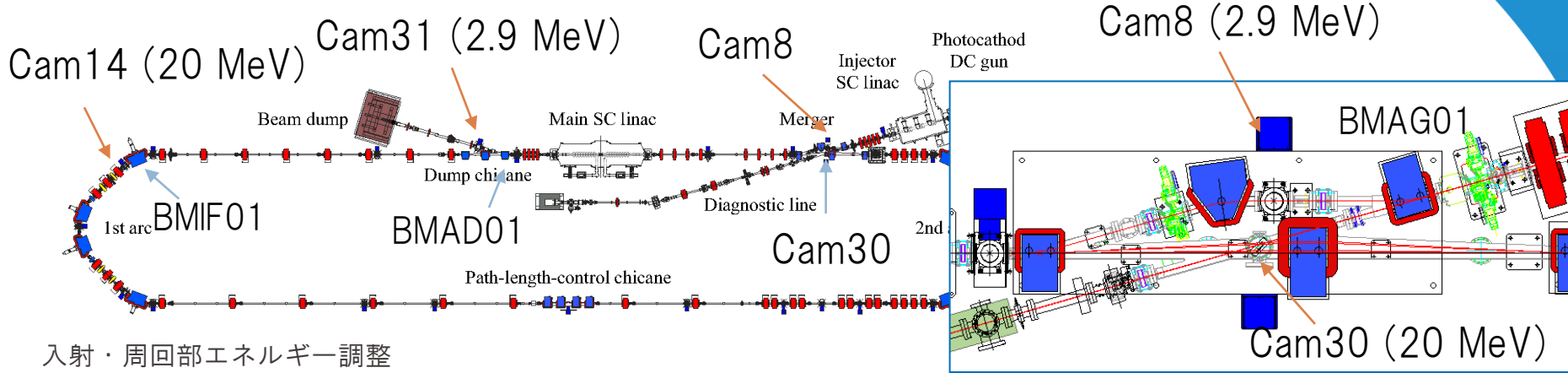
主空洞のCCGは遮蔽しているが、いまだに影響が残る。

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 の測定

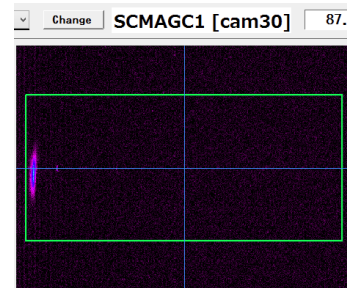


入射・周回部エネルギー調整

- ・ 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

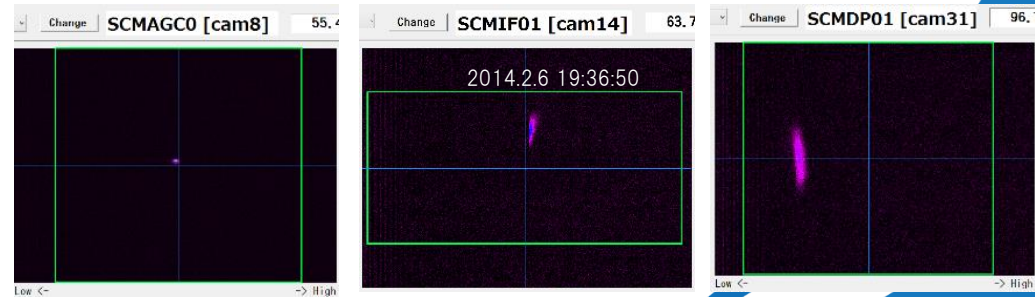
- ・ 入射部コミッションングの手法(ステアリング使用)とクロスチェック
- ・ cam30で周回ビームの位置確認
- ・ cam31で入射ビーム(主空洞デチューン状態)の位置確認



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

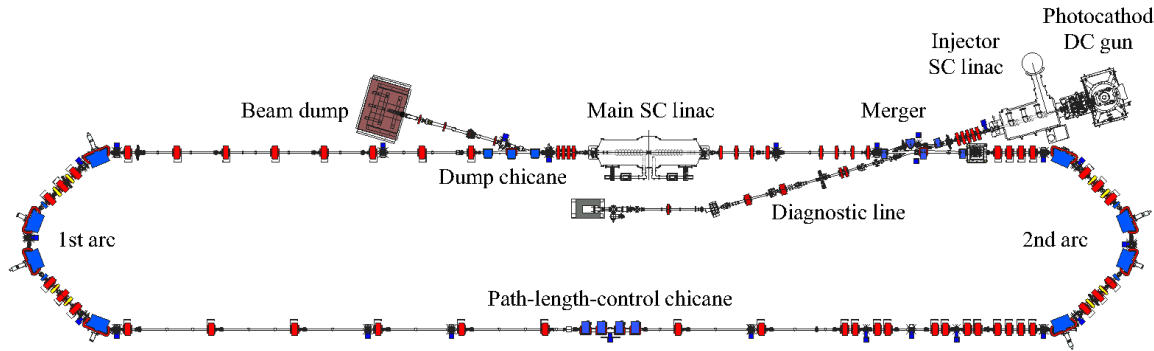
入射ビーム(cam8)	< 7e-4
周回ビーム(cam14)	< 4e-4
ダンプビーム(cam31)	< 2e-3



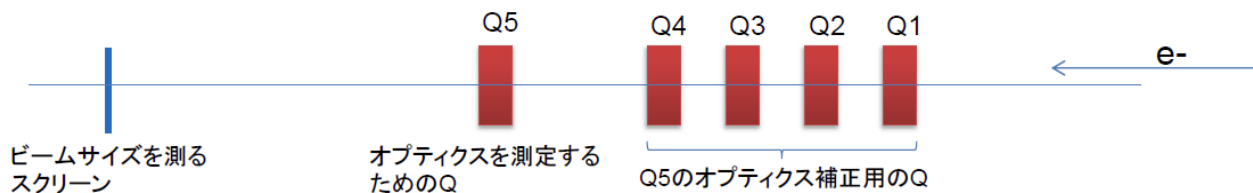
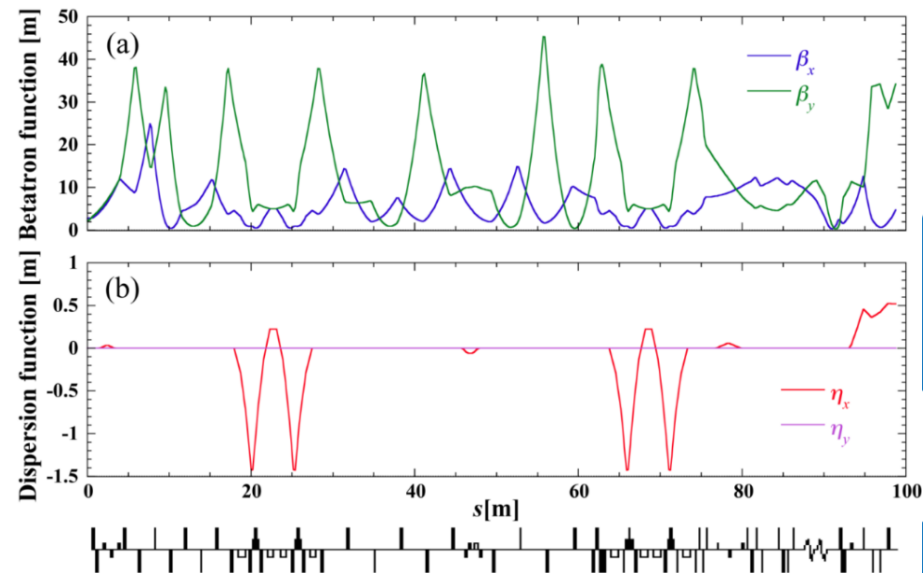
周回部のエネルギーに関係なくエネルギーアクセプタンスはダンプエネルギーの2割程度(ダンプラインを通過するかどうかで決まる。)

3 GeV ERLでダンプ10MeVの場合、およそ7e-4(ただし、バンチ圧縮しているときは別)

ビーム軌道調整・オプティクスマッチング

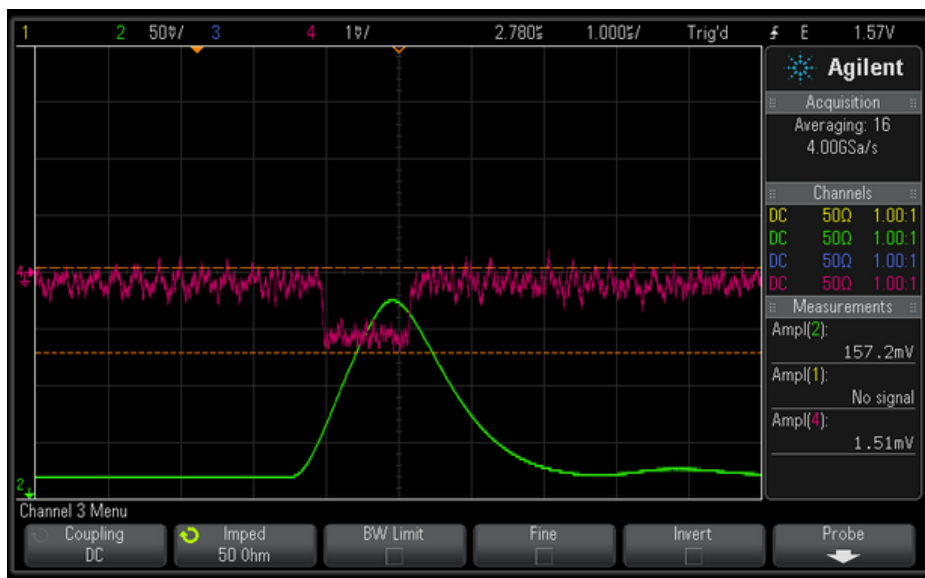


- 軌道調整はQ scanで行った。
 - 環境磁場により、まっすぐ通らない個所もあった。
- 第2アーク直後のQによる減速ビーム軌道・プロファイル調整。
- 行列演算によるオプティクスマッチングを行った。
 - ビームロスの減少

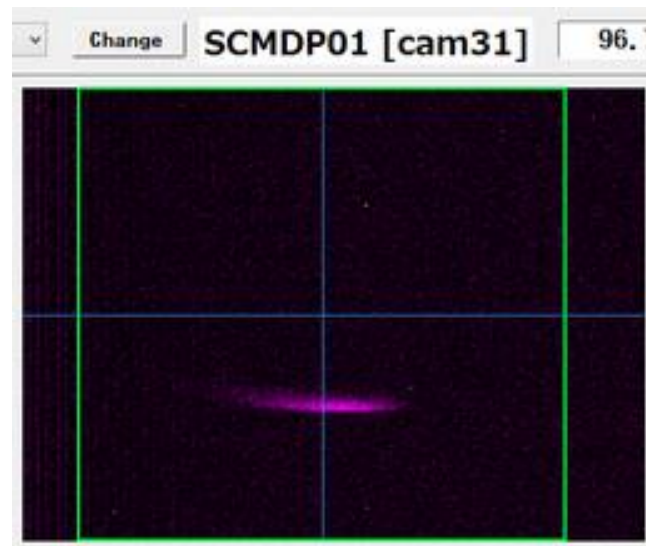


ダンプラインと主ダンプの信号 (2014.2.6)

- ・ 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

減速ビーム初観測 (2014.2.6)

Beam energy (E)

- Injector: 2.9 MeV
- Recirculating loop: 19.9 MeV

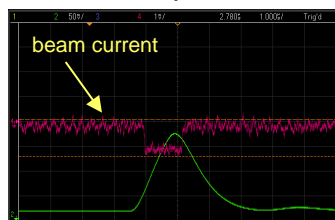
Parameters

- Gun voltage: 390 kV Buncher: OFF
- Injector cavities: $E_{acc} = (3.3, 3.3, 3.1)$ MV/m
- Main-Linac cavities: $V_c = (8.57, 8.57)$ MV

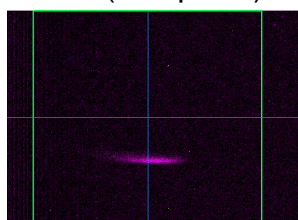
Beam pulses (macropulse)

- peak current: $\sim 24 \mu\text{A}$
- macropulse width: $1.2 \mu\text{s}$
- repetition of bunches: 1.3 GHz
- repetition frequency: 5 Hz
- average beam current: $\sim 140 \text{ pA}$

Dump FC

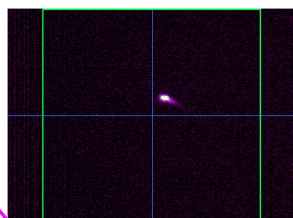


MS31 (dump line)

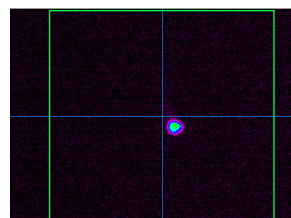


Beam profiles on screen monitors.

MS11



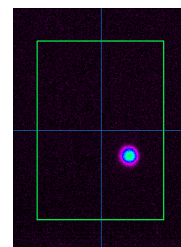
MS3



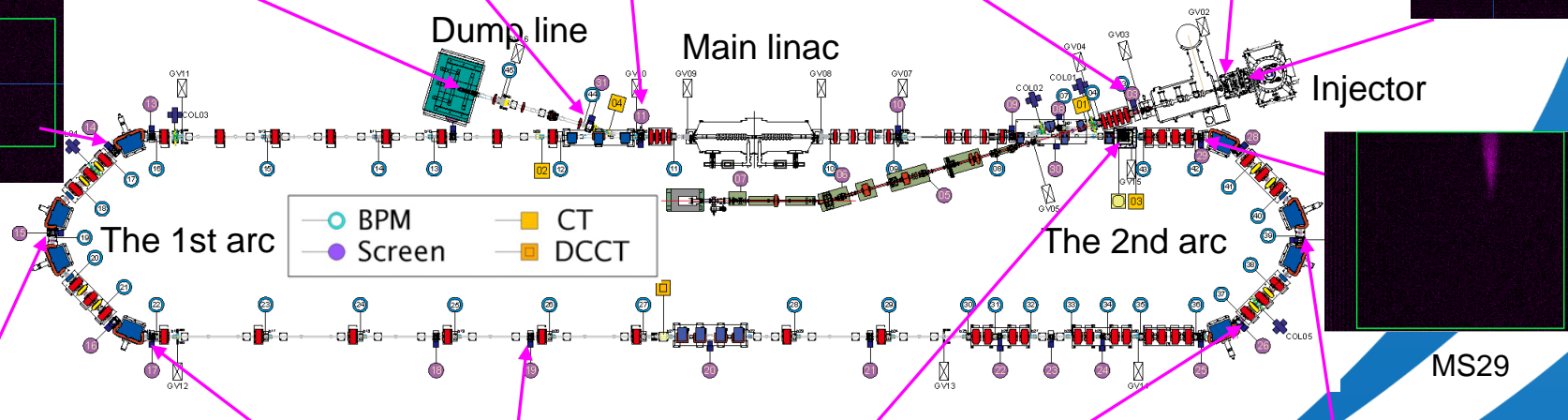
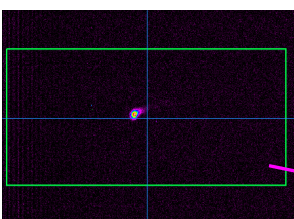
Gun FC (faraday cup)



MS1



MS14

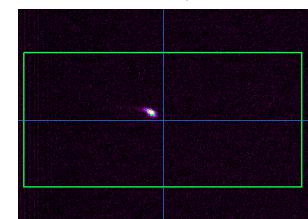


The 1st arc

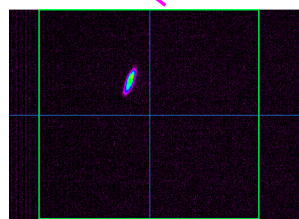
The 2nd arc

	BPM		CT
	Screen		DCCT

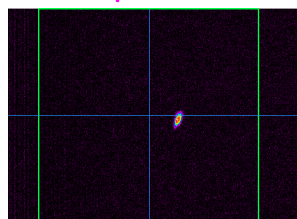
MS15



MS17

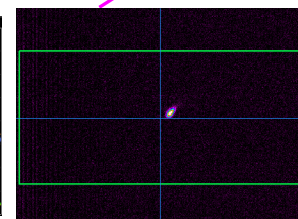


MS19

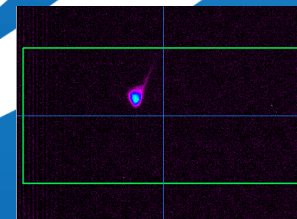


Movable FC

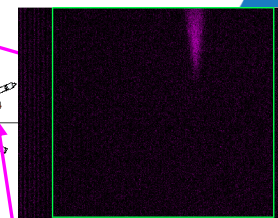
MS26



MS27



MS29

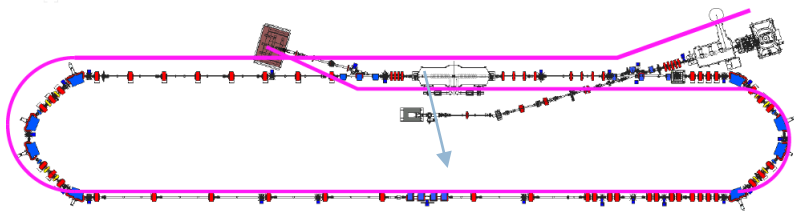


軌道調整

軌道調整時のビームパラメータ

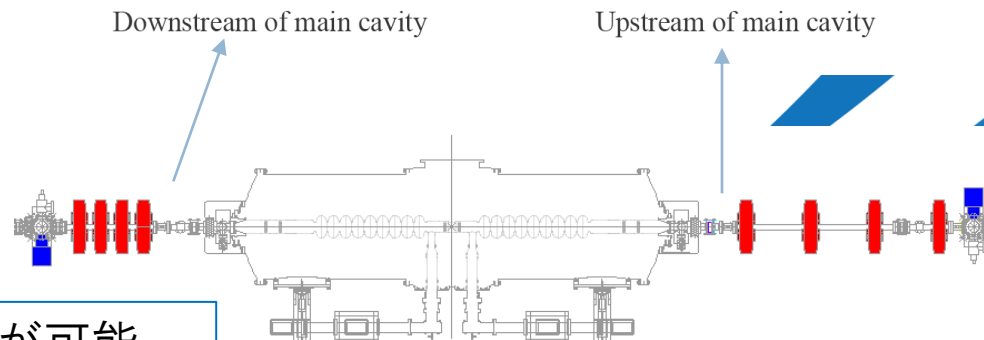
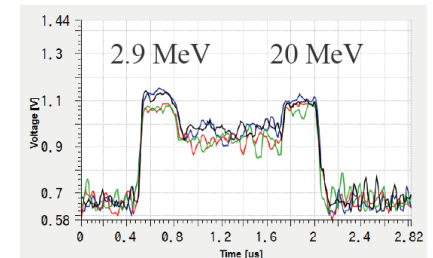
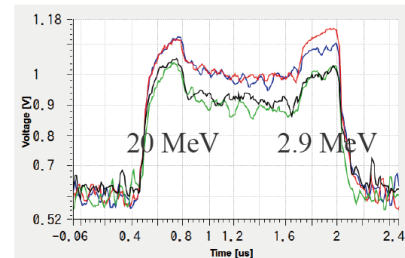
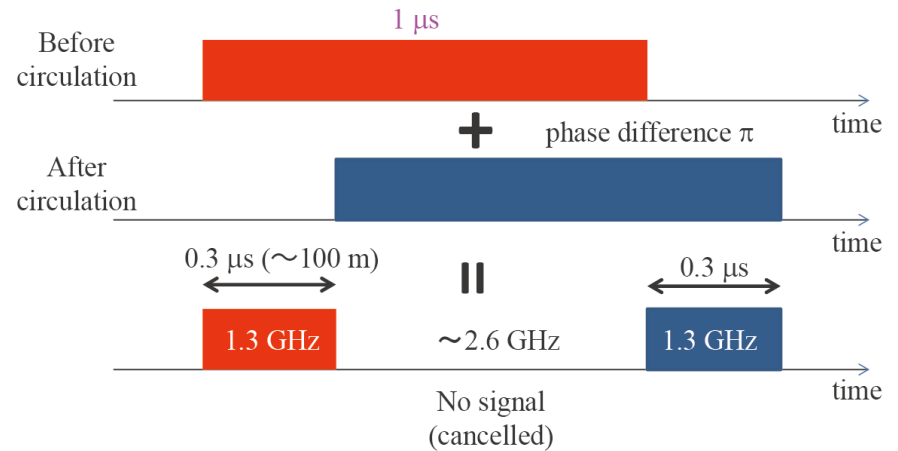
バンチ電荷量	10 – 100 fC
マクロパルス長	1 μ s
運転周波数	1.3 GHz
マクロパルス繰り返し	\sim 5 Hz
し	
平均電流値	数100 pA

- ・ 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)



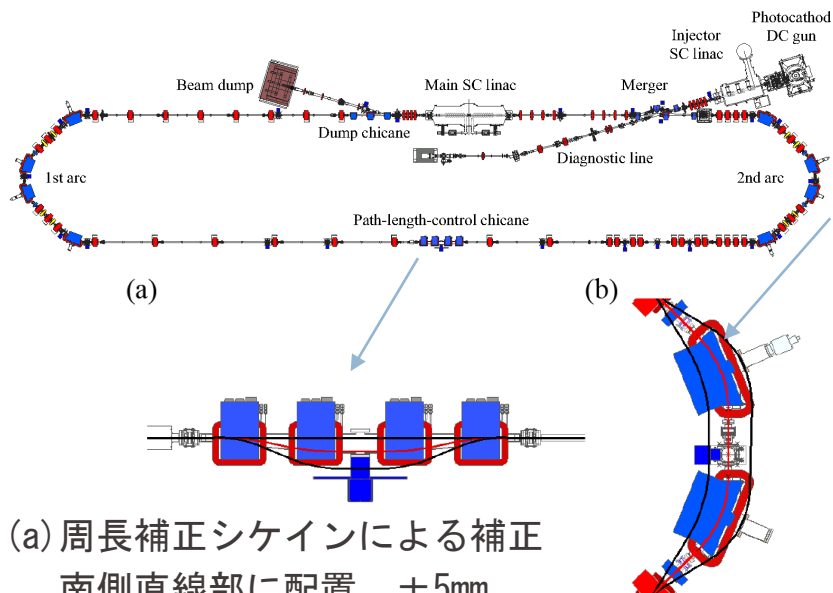
3 GeV ERLでも同じ手法でビーム調整が可能。

BPMによる加速・減速2ビームの測定



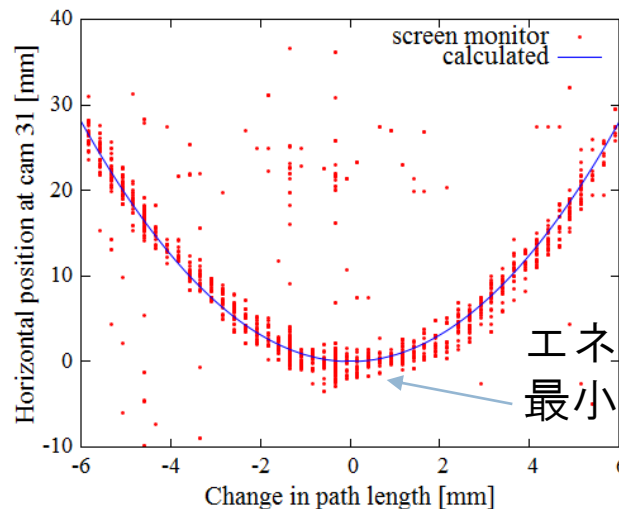
周長補正によるダンプエネルギーの調整

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。



(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



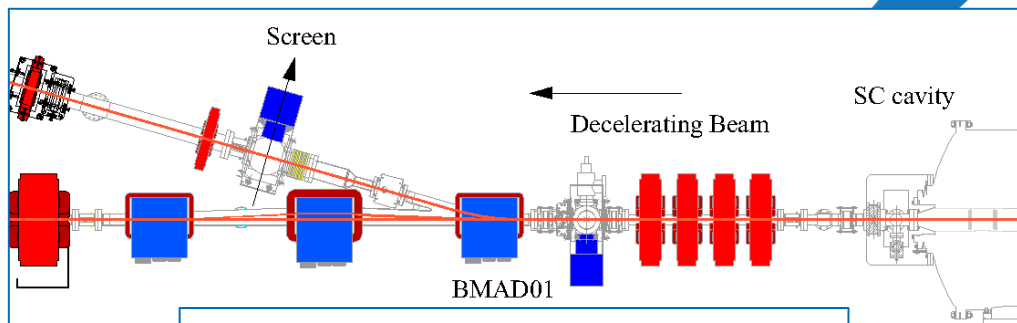
エネルギーが
 最小となる軌道

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。)

3 GeV ERL, 外側ループはひとつの
 偏向電磁石の曲げ角が小さい。

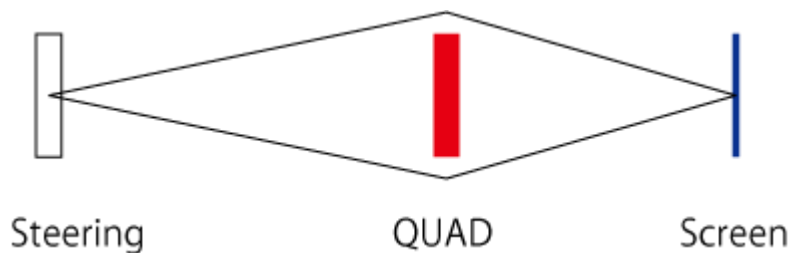
→(b)の方法が幾何学的に難しい

できれば、周長補正シケインで。

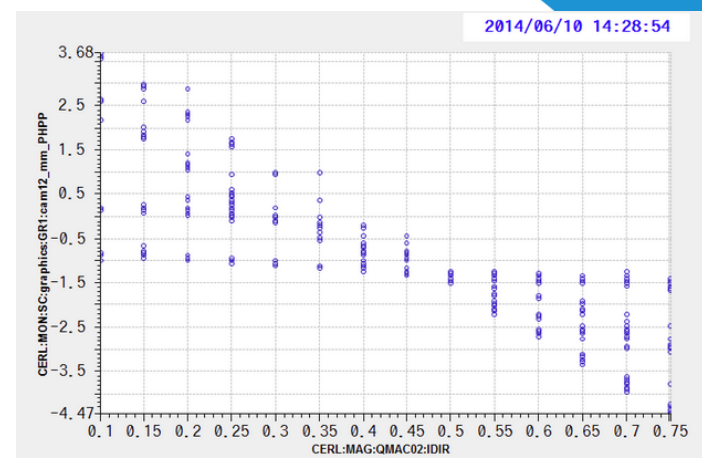


ダンプシケイン付近の配置図

四極電磁石応答測定



スクリーン上のビーム位置



QUADの励磁電流

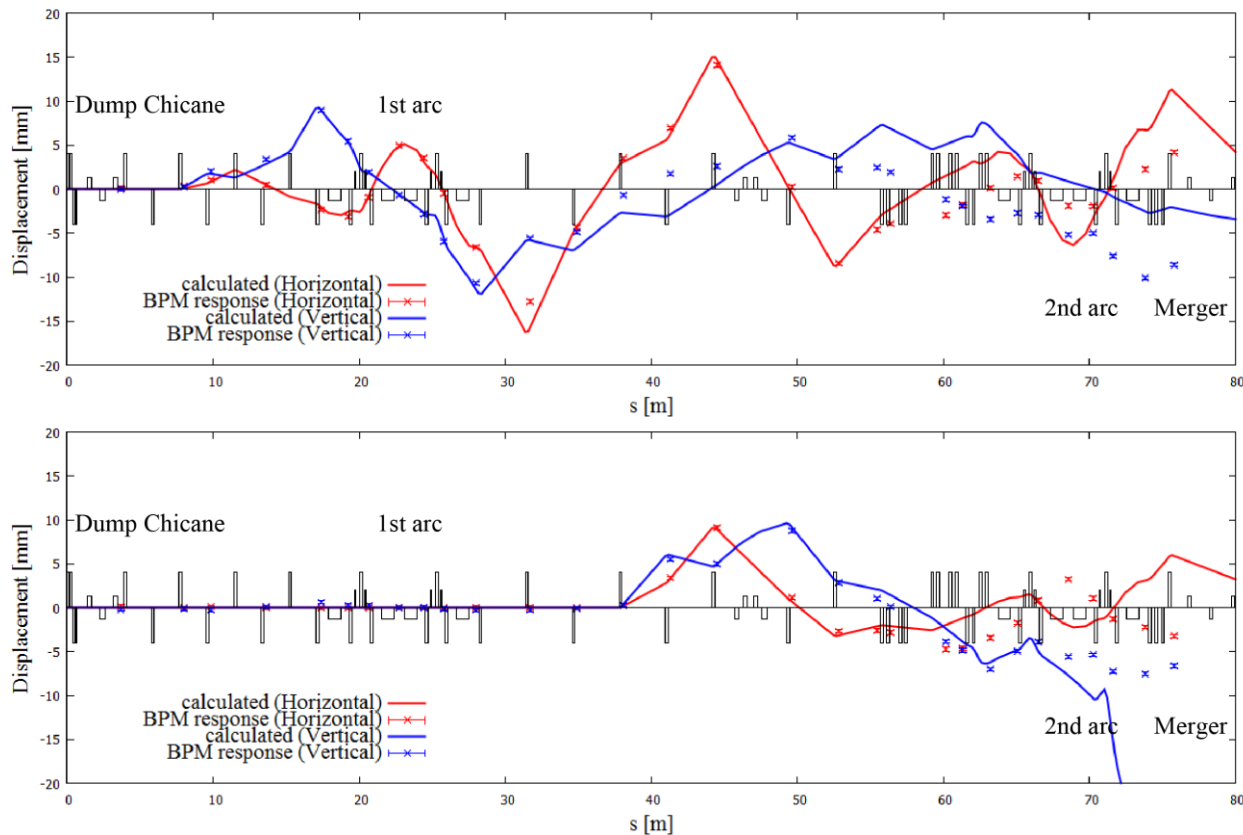
四極電磁石の応答測定：
ステアリングを振ってもスクリーンの位置が変わらないQUADの強さを探す。

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

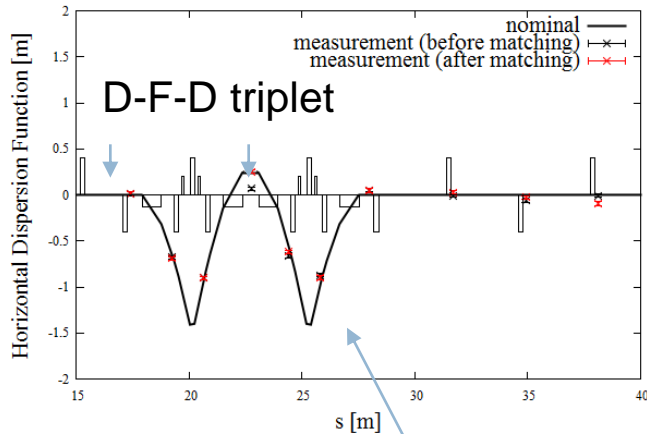


ステアリングキックによる応答の一例（赤：水平方向、青：垂直方向）

- ・ 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。

一致しない原因は残留磁場か？このほかに、xy couplingの問題が残る。

分散関数のマッチング



アークの条件

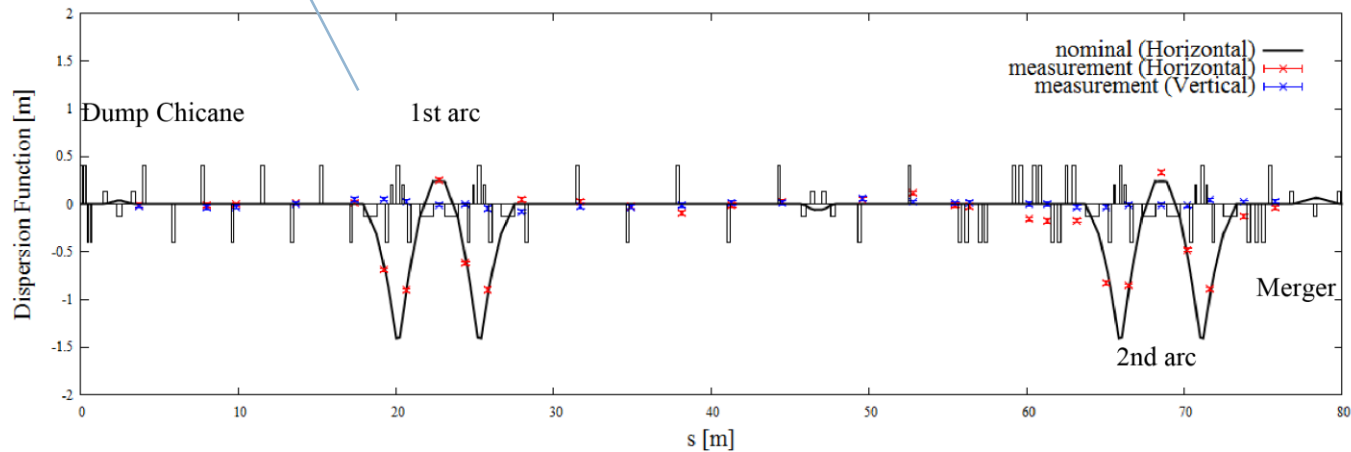
- ・ アクロマート: アークの出口で $\eta_x = 0 \text{ m}$, $\eta'_x = 0$
- ・ アイソクロナス: アークの中心で $\eta_x = 0.24 \text{ m}$, $\eta'_x = 0$

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

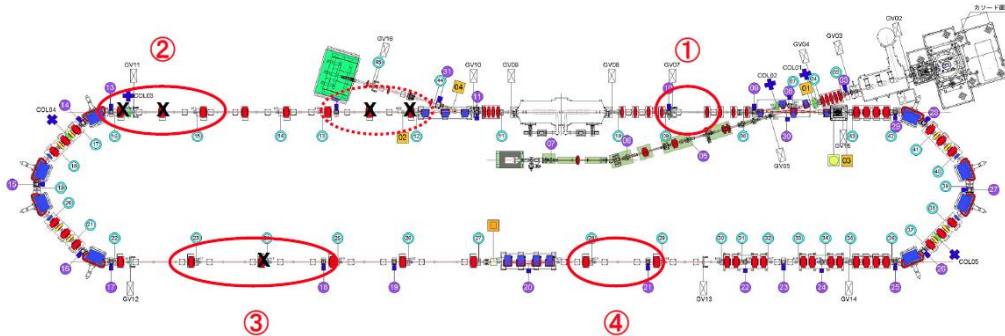
水平方向 (赤) : マッチング後の分散関数

垂直方向 (青) : 分散関数がゼロの設計

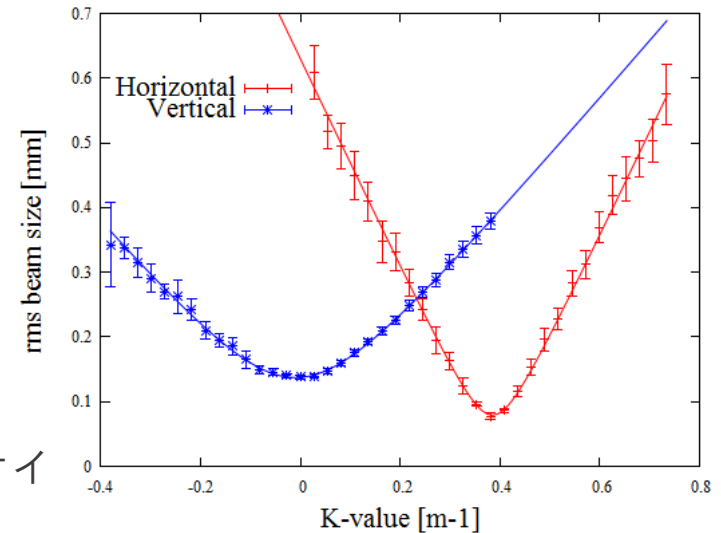
南側直線部の最大値: 第2アークの前で0.17m

3 GeV ERLもTBAで構成されるため、同じアプローチが可能。
残る課題: BPMによるR56の測定

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

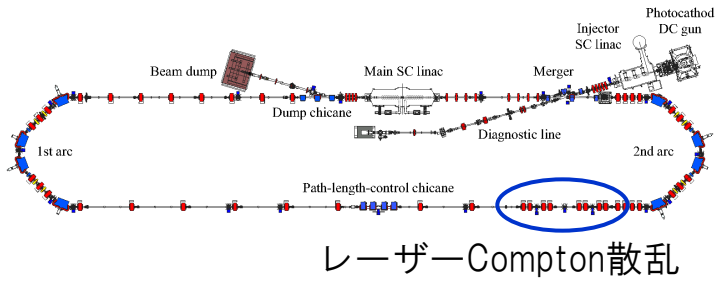


Qスキャン測定例（測定20回）

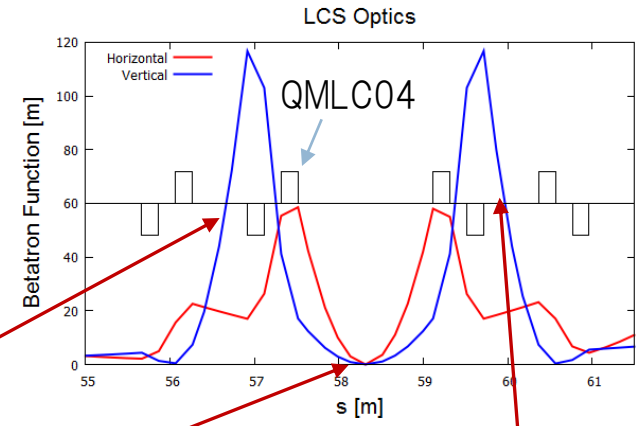
測定日	主空洞前	主空洞後	第一アーク直後	周長補正シケイン後
3/11	-	0.56/0.36	0.52 / 0.45	-
3/14	-	0.28/0.41	-	0.23 / 0.26
6/13	0.15/0.14	0.14 / 0.12	0.14 / 0.14	0.13 / 0.15

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）

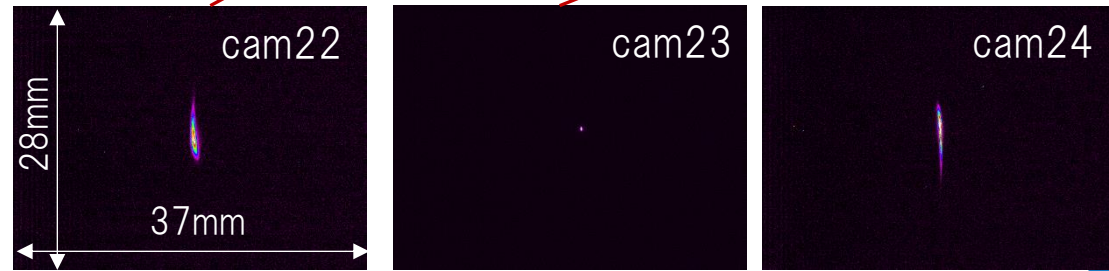
レーザーCompton散乱のためのオプティクス調整



衝突点の β 関数
(デザイン値)
0.01 m (H)
0.038 m (V)

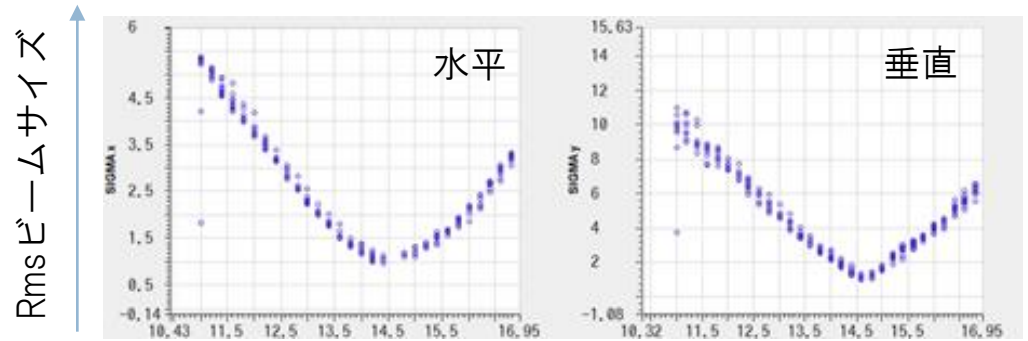


- QMLC04のQ-scanで衝突点でビームサイズが最小となるOpticsを探す。
- QMLC03と04でOptics調整
- cam23のビームサイズは分解能以下



Q-scanの結果

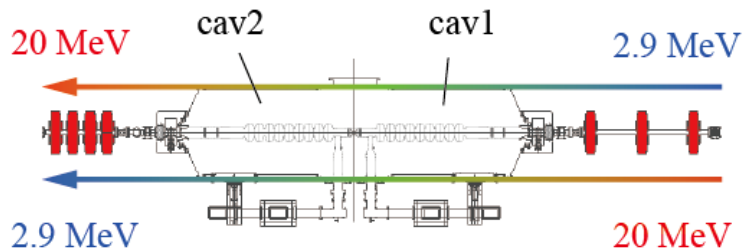
ビームサイズ推定値
10.9 μm (H)
8.2 μm (V)



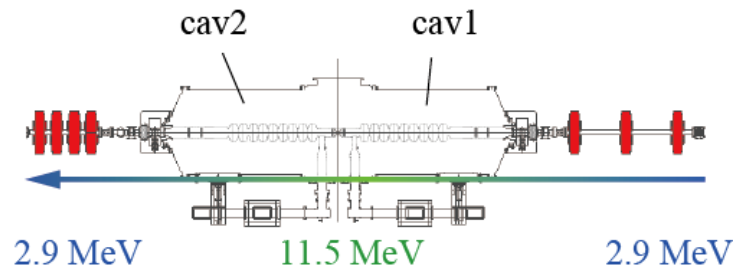
実測値・QMLC04のK値

エネルギー回収の確認

Energy recovery test



Beam loading test



入力パワーと反射パワーの差 : $P_{in} - P_{ref}$

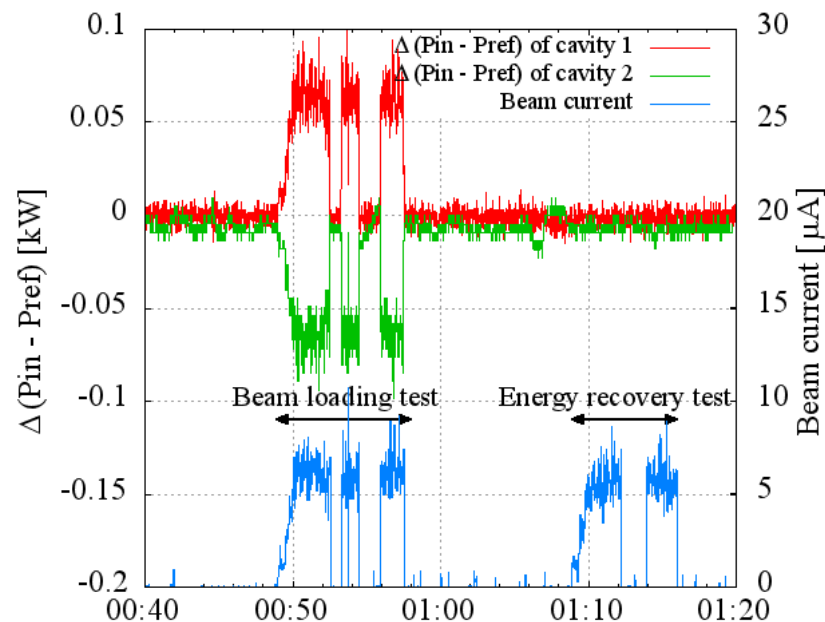
- ・ エネルギー回収試験

エネルギーのやりとりができていない場合、
 $P_{in} - P_{ref}$ 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。

P_{in} : 入力パワー
 P_{ref} : 反射パワー



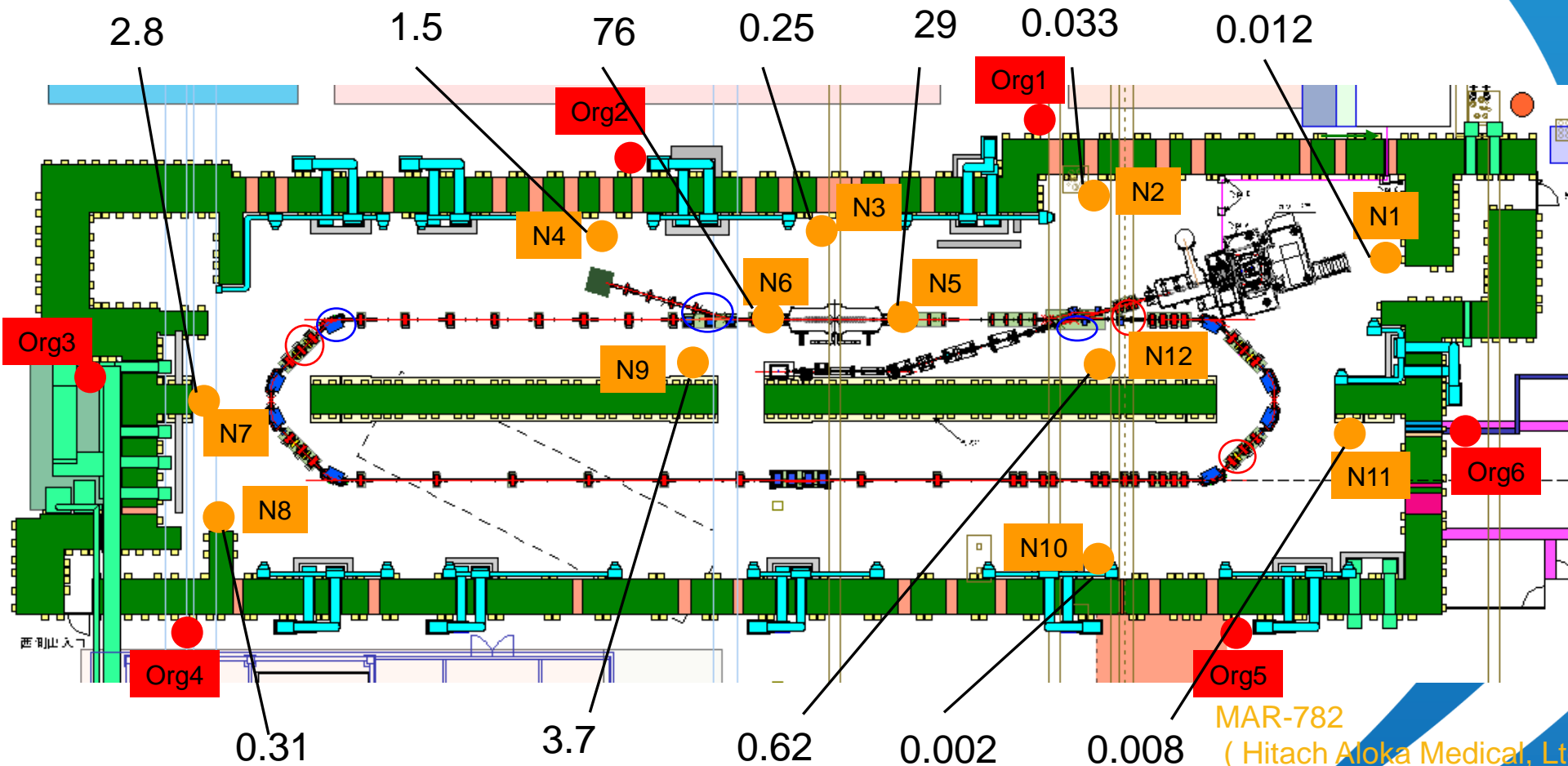
エネルギー回収効率の最終目標

→ 99%程度かそれ以上

3 GeV 100mAで1%のロスが消費電力3MWに相当 (遮蔽に問題がなかったとしても電力が問題に)

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

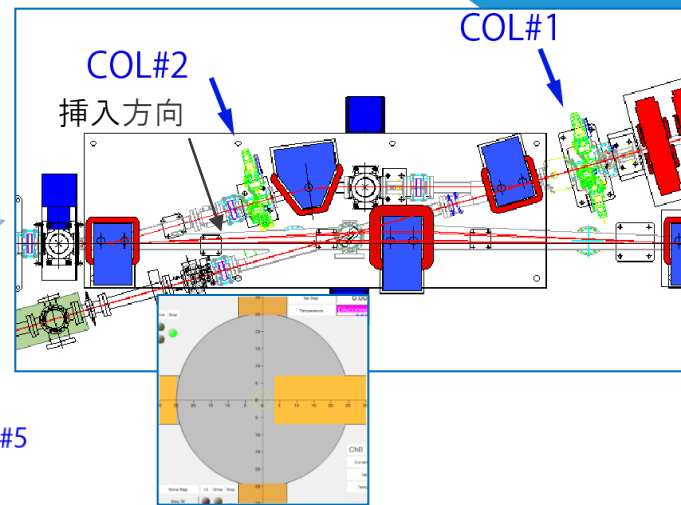
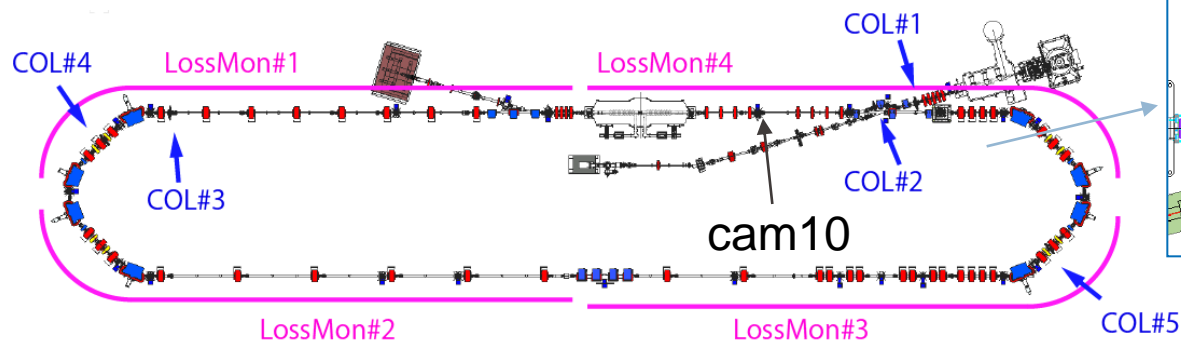
運動エネルギー:

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

バンチャー: $V_c = 30 \text{ kV}$



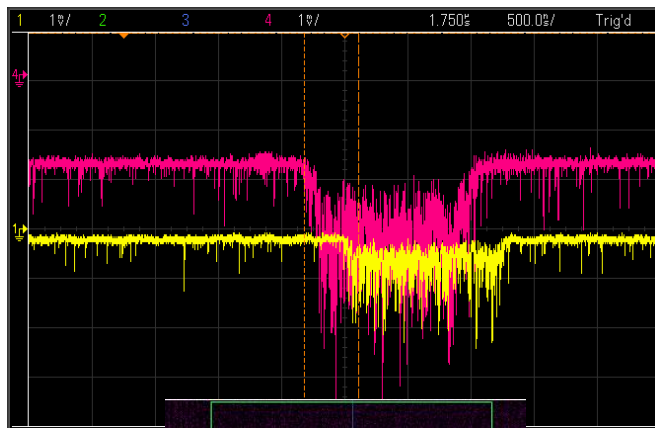
コリメータと光ファイバロスモニタ



ファイバロスモニタ
の信号

第1アーク
LossMon#1
第2アーク
LossMon#3

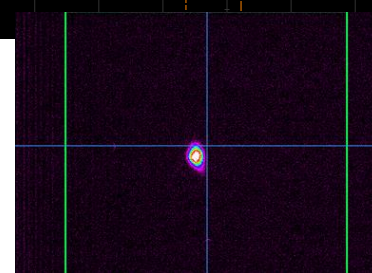
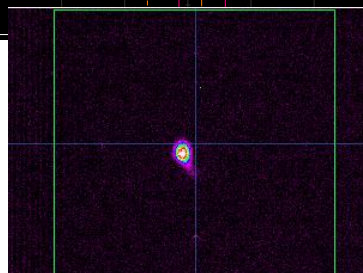
コリメータCOL#1, #2挿入前



コリメータCOL#1, #2挿入後



スクリーンモニタ
Cam10の画像



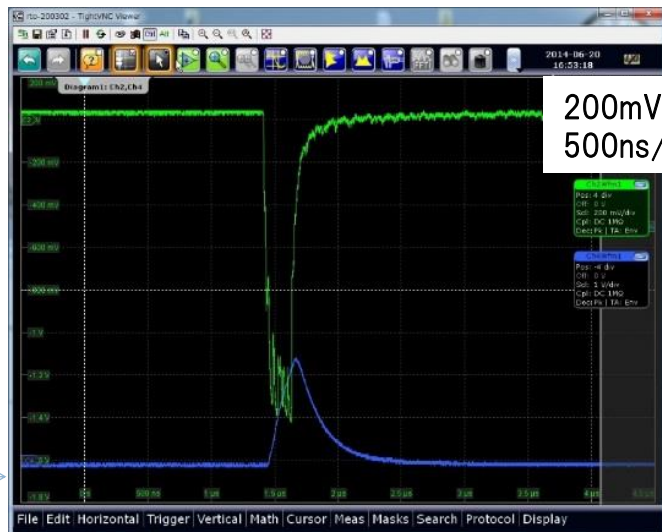
コリメータ5カ所：ハロー調整用には入射部の2個が有効
Fiber Loss Monitor は全周をカバー

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)



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

入射部単独のビーム調整を優先すべき。

輸送試験：入射部調整も含め、5日間

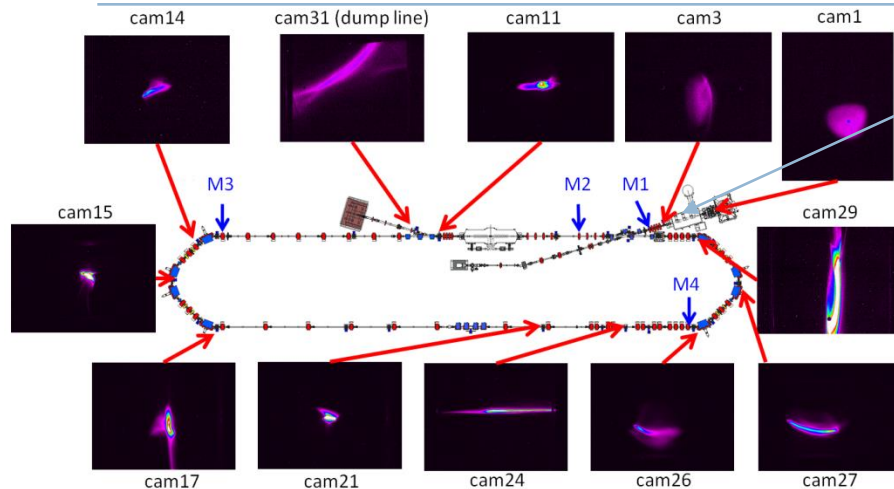
目的：空間電荷効果が支配的な高バンチ電荷(7.7 pC/bunch)の輸送試験

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

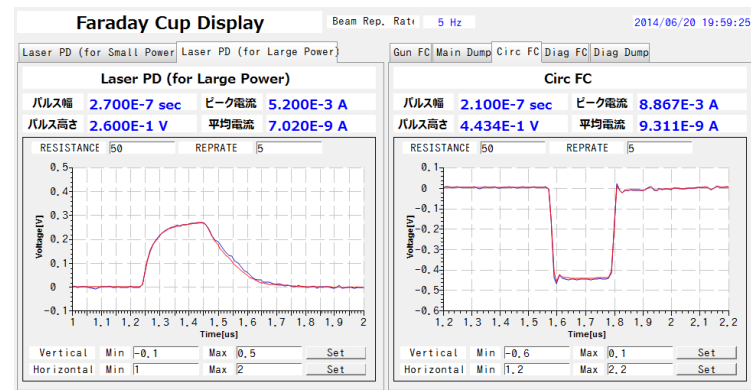
- ・周回部輸送調整： **9割が周回部FCに到達**。オプティクスマッチングが重要。
- ・ビーム品質測定結果： 入射器 2.9 MeV, 周回部 19.9 MeV
 規格化エミッタンス (設計 0.6 mm mrad) : **2.9 mm mrad** (診断ライン)
2.9 mm mrad (周回部第一アーク手前)、**5.8 mm mrad** (周回部南直線部)
 バンチ長 (設計 4 ps) : **5.5 ps** (診断ライン)

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

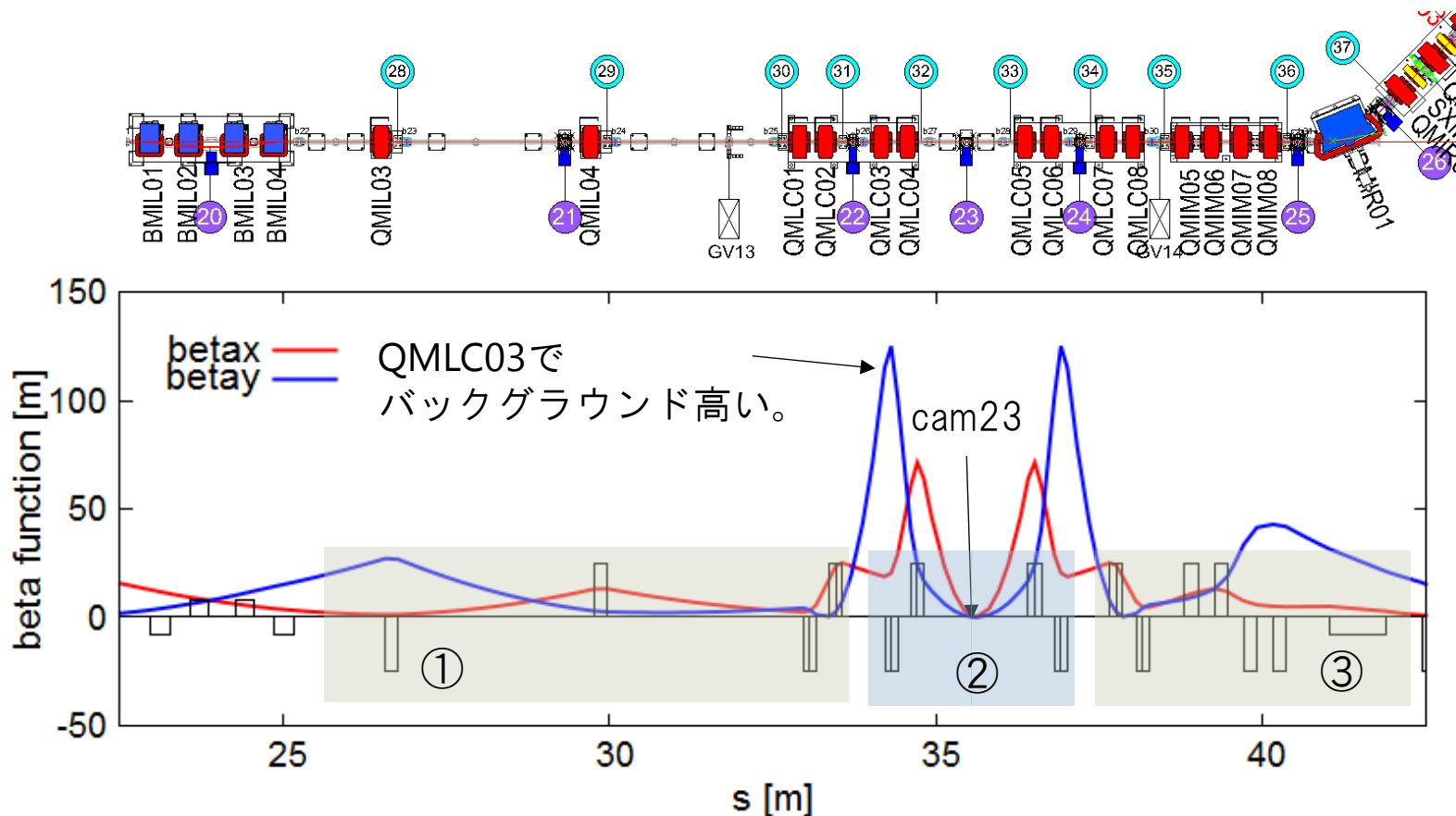
運転モード	入射器診断部	主空洞前	主空洞後	第一アーク後	第二アーク前
20 fC (6/13)	-	0.15 / 0.14	0.14 / 0.12	0.14 / 0.14	0.13 / 0.15
7.7 pC (6/19)	-	-	-	42 / 14.7	-
7.7 pC (6/20)	2.5 / 2.9	-	2.9 / 2.4	5.8 / 4.6	-



周回部Faraday cup に90%のビームが到達



LCSのmiddle opticsの調整方針

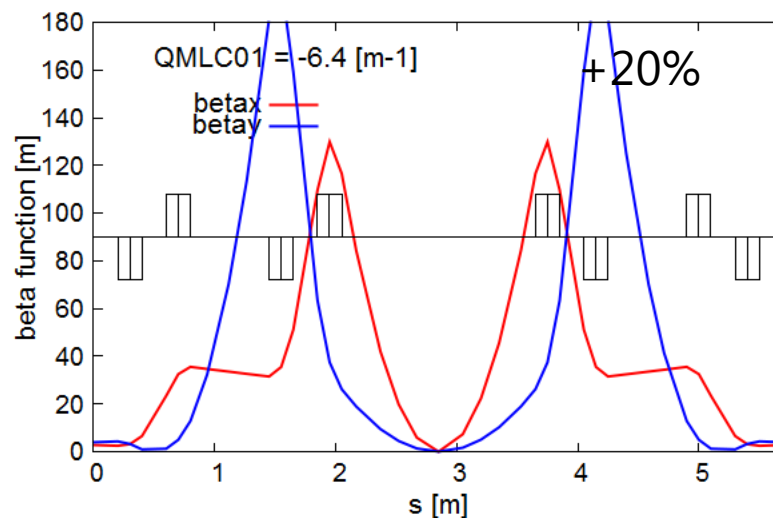
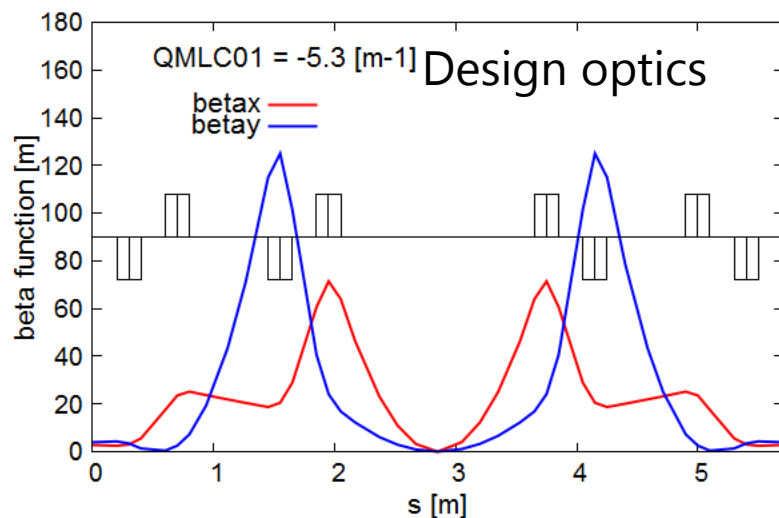
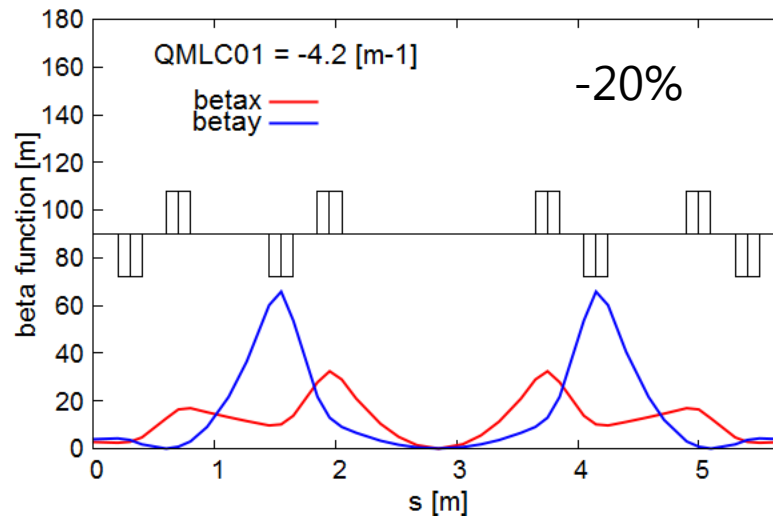
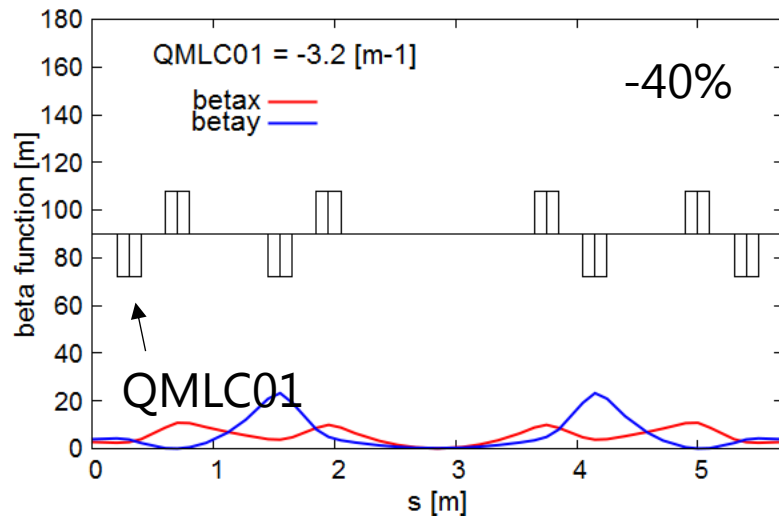


ミドルオプティクス：LCS信号がバックグラウンドに埋もれないように調整。

- ① QMLC03の β 関数を抑えてビームロスの低減する。
- ② cam23でビームが最小となるように調整 ($\alpha_x = \alpha_y = 0$)。
- ③ 第2アーケへのマッチング

QMLC01の場合

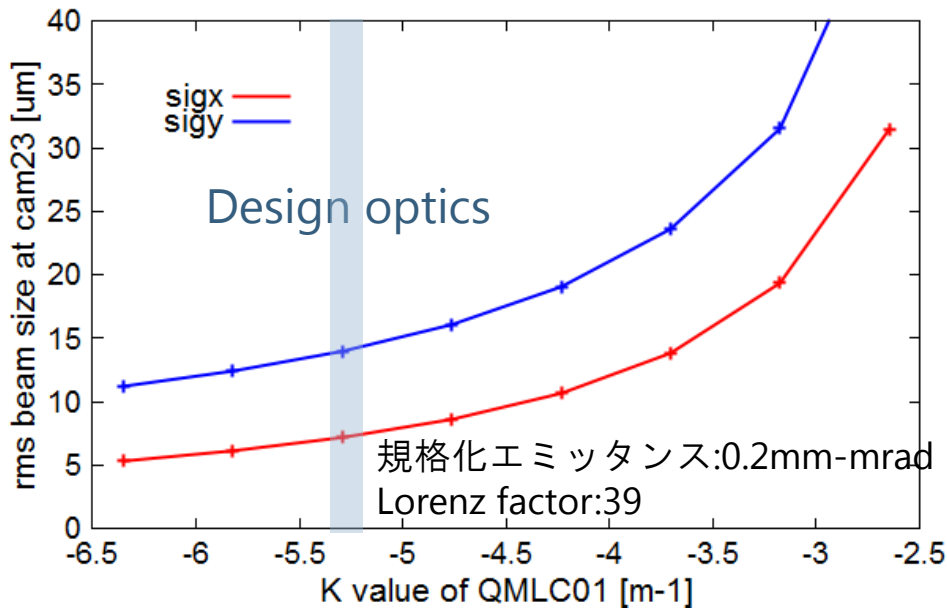
- QMLC01を弱めると、全体的に β_x と β_y の両方を小さくすることができる。



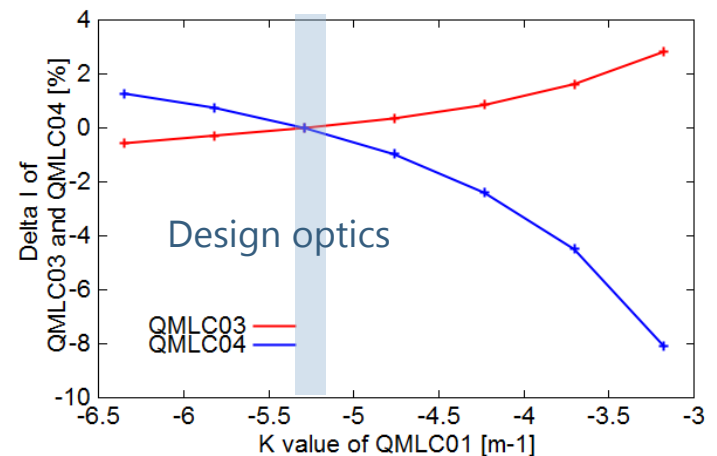
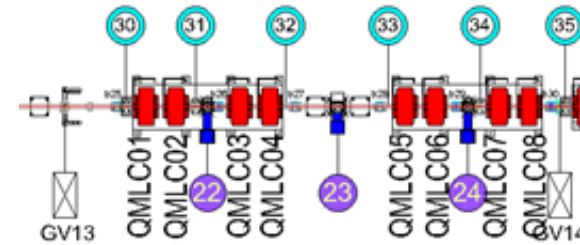
ビームサイズ@cam23

ミドルオプティクス調整手順 (案)

- バックグランドが少なくなるように、QMLC01で調整。
- その後、QMLC03と04で微調整 (手作業の予定)。
 - QMLC03は電流を上げて、QMLC04は下げる方向
- ビームサイズはQMLC03で半分にすると、QMLC03と04で調整後でも、cam23で2.5倍ほど大きくなってしまう。
- QMLC01がdesignの7割程度の電流値($K=-3.4 \text{ m}^{-1}$)でcam23のビームサイズが2倍になる。



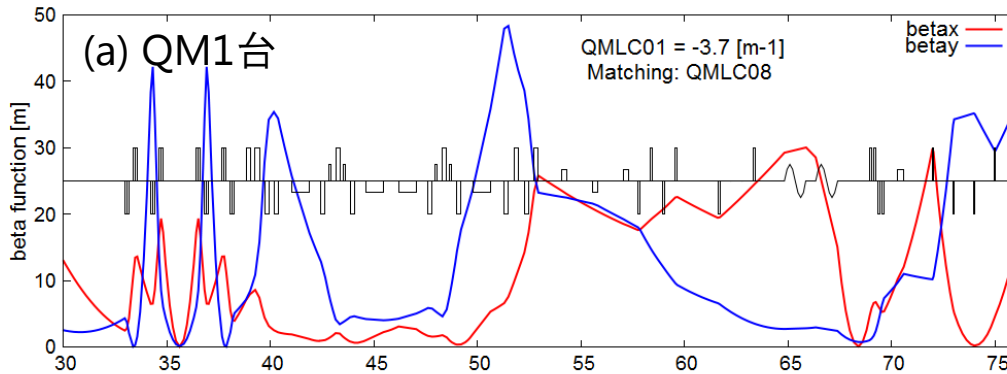
QMLC01のK値とcam23のビームサイズの関係



QMLC03と04の励磁電流調整量

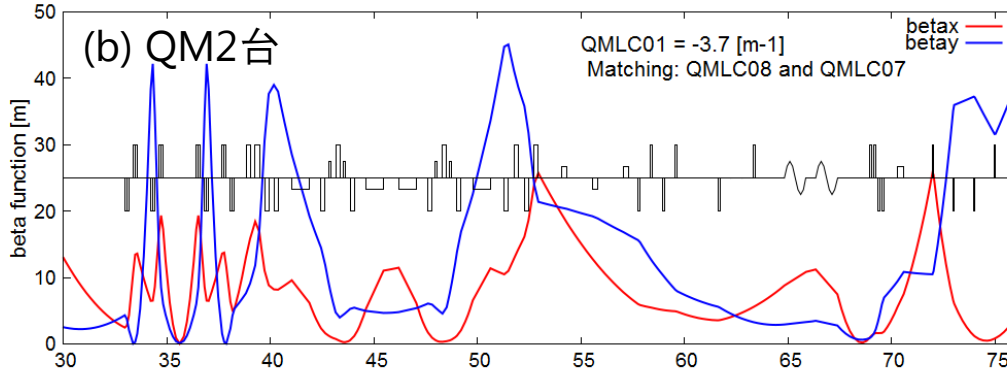
第2アークまでのマッチング（簡易）

- 第2アークの中心でdesign opticsに合わせなくてもいいという方針にする。



最適化の条件

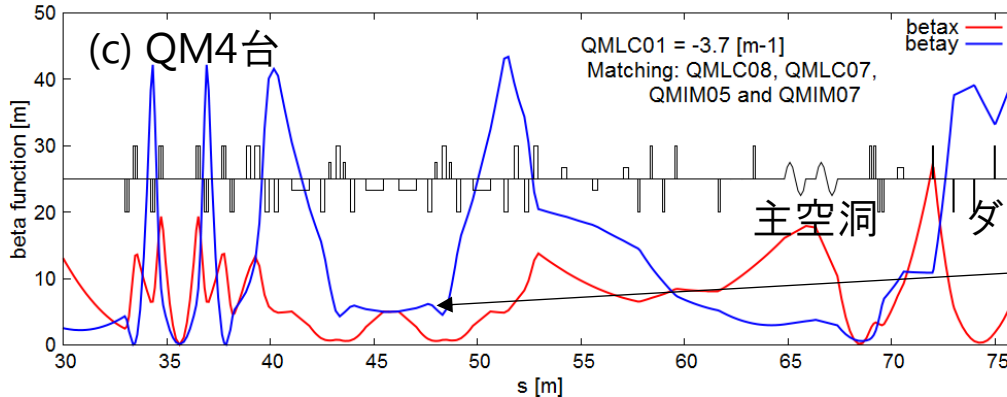
- (a)と(b) ダンプまでの範囲で、max.betaxとmax.betayを最小にする。



- (c) アーク中央でdesignに合わせる。

結論

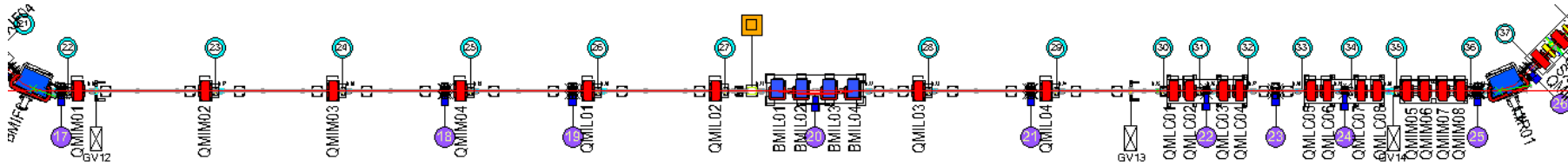
QMLC08の1台でダンプまでのopticsを調整することが可能。



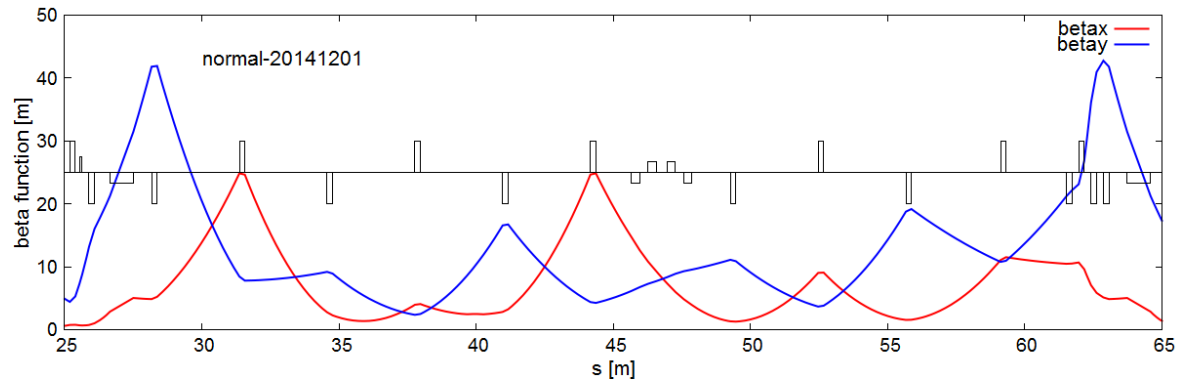
補足： β_y を第2アーク直前で小さくすると、出口で大きくなる。

Design optics@arc center
($\beta_x = \beta_y = 5\text{m}$, $\alpha_x = \alpha_y = 0$)

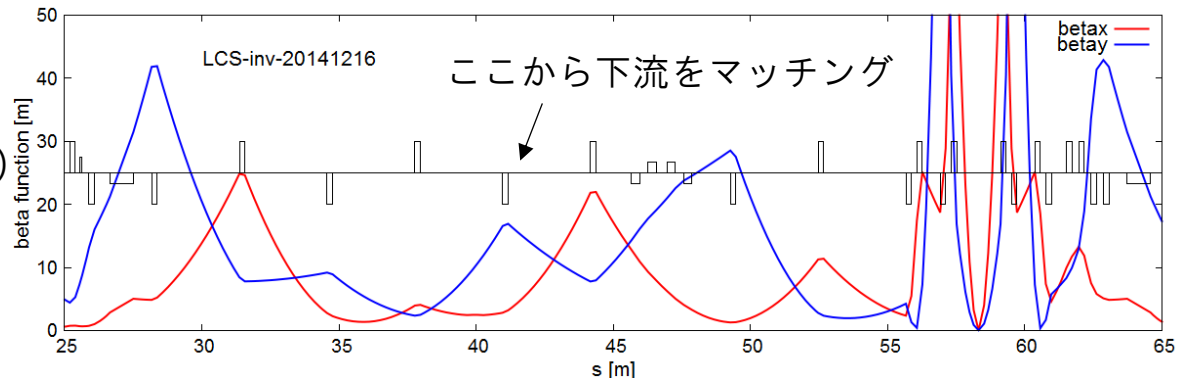
通常opticsとLCS optics



通常optics
(normal-20140520に近い)



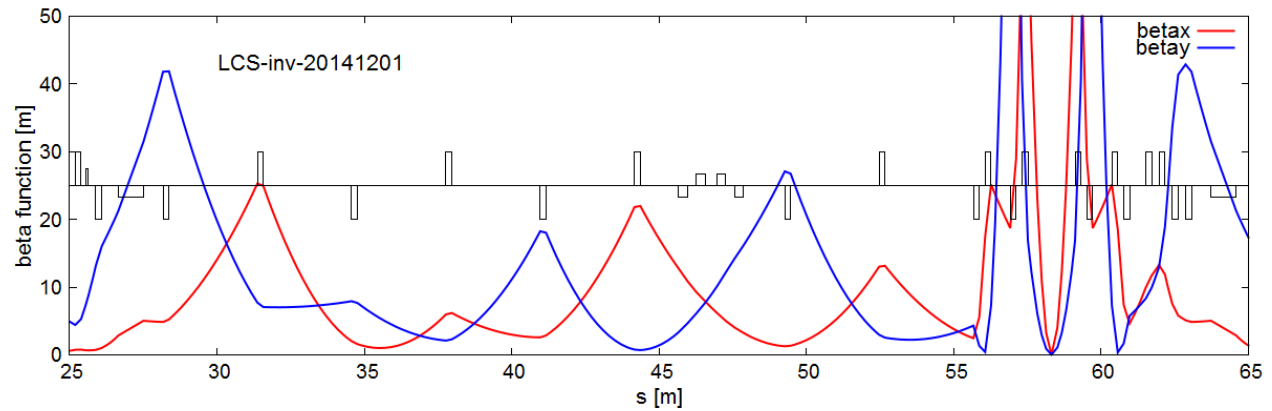
New LCS optics
(LCS-inv-20141224と同じ)



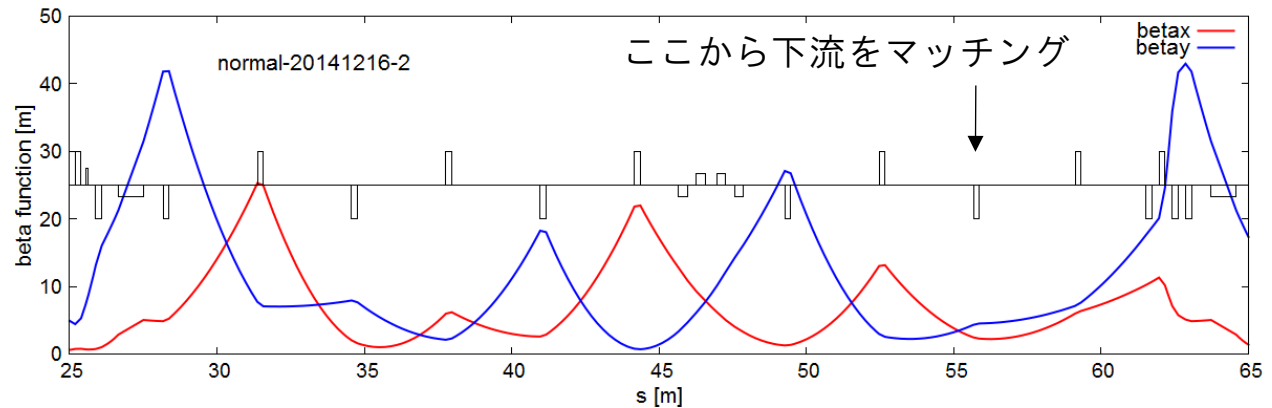
- 通常opticsをもとにLCSの設計を行った。
 - QMIL01-04, QMLC01,05, QMIM05-08の合計10か所のQをマッチングのために変更する必要あり。
 - 通常opticsではQMLC02-04と06-08はゼロに設定

LCS opticsをもとに通常opticsを設計

LCS optics
(LCS-inv-20140520に近い)



New 通常 optics
(normal-20141224と同じ)



- LCS opticsをもとに通常opticsを設計
 - マッチングにはQMLC01,05, QMIM05-08の合計6か所で済む。
 - 通常opticsではQMLC02-04と06-08はゼロに設定

まとめ

- 3 GeV ERLとcERLではビームダイナミクスの課題が異なる。
 - エネルギー回収などの基本的なことは実証済み。
 - HOM-BBUの現象などはcERLで観測が不可能。
 - cERL周回部のこれからの目標は、試験機としてではなく、THz光源やLCS利用となるか。
- cERLのコミッショニングでわかったこと
 - Collective force(空間電荷効果、CSR wakeなど) がなければ、エミッタンスが増加しないことを確認。
 - 加速・減速2ビームの位置測定がBPMで可能。
 - 低電流でビームローディングが見えない場合でも、周長補正をすることが可能。
 - 低エネルギービームに対する環境磁場対策。
- 今後の課題
 - HOM-BBU対策を含んだ3 GeV ERLのoptics・ラティス設計
 - cERLでは電荷量が多い場合のビーム調整を確立する必要がある。