

cERLのビーム調整 2016年2月～3月

第3回コンパクトERLミニワークショップ
2016年5月31日(火) 10:00 – 10:20
4号館2階輪講室1・2

cERL commissioning Team
報告: 宮島 司

Contents

- これまでのcERL運転状況
- 前回の運転の課題と、今期の改良箇所
- 今期の運転目標
- ビーム調整とその結果
- まとめ

これまでのcERL運転状況

2013年 1月～6月	7月～12月	2014年 1月～6月	7月～12月	2015年 1月～6月	7月～12月	2016年 1月～6月	7月～12月

入射器単体試験(4月～6月)、最大1 μ A
 電子生成・加速(5.6 MeV)に成功
 7.7 pCで0.8 mm mrad以下の規格化エミッタンス

cERL総合運転(12月～3月)、最大10 μ A
 主空洞での加速に成功(19.4 MeV)
 エネルギー回収に成功

cERL総合運転(5月～6月)、最大10 μ A
 ビーム光学の基本情報の取得
 7.7 pCで5.8 mm mrad(周回部)

LCS-X線生成試験(1月～3月)、最大100 μ A
 LCS用ビーム光学調整
 LCS-X線の観測

低エミッタンス調整(5月～6月)、最大100 μ A
 空間電荷補償のための基礎データを取得
 LCS-X線生成試験の続き

大電流試験(2月～3月)、最大1 mA
 1 mA 生成・加速試験
 バンチ長 100 fs 以下への圧縮、コヒーレントTHz光生成試験
 低エミッタンスビーム周回試験、電子銃電圧 390 kV \Rightarrow 450 kV

前回の運転の課題と、今期の改良箇所

前回の運転の課題

0.5 pC周回CW運転(2015年6月)

CW運転中の軌道変動: CW運転を開始すると徐々に軌道がずれ始めて、時間の経過とともに下流のビーム損失が大きくなる

電子銃から入射器空洞の間のプロフィールの非対称: 0.5 pCだとまだ良いがバンチ電荷を上げて7.7 pCにするとプロフィールの円筒対称性が大きく崩れる

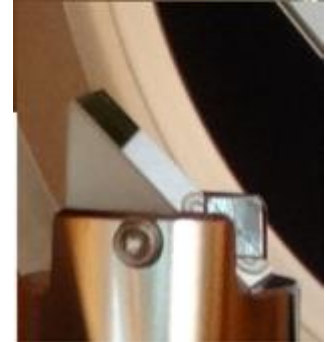
再現性が悪い: 何か電磁石を調整(軌道調整やQ-scan)を実施すると輸送条件が再現しない、またそれをリカバーするのに時間が掛かる

周回部のオプティクス: エネルギー回収に向かう第二アーク部でオプティクスが乱れる

今期の改良箇所

2016年2月～3月

→ レーザー導入ミラーをガラス製から金属製に交換
⇒ 帯電による影響を排除
⇒ CW運転が安定に



→ 新しい軌道補正法を導入
⇒ 低エネルギー領域のプロファイルが大きく改善

→ 電磁石の履歴管理(初期化)の徹底
BPMによる軌道補正の導入
⇒ 再現性が向上
⇒ 調整時間の短縮

→ 新しい分散関数補正法の導入
Skew四極電磁石の導入
⇒ アーク部のオプティクスを改善
⇒ ビーム損失の低減

今期の運転目標

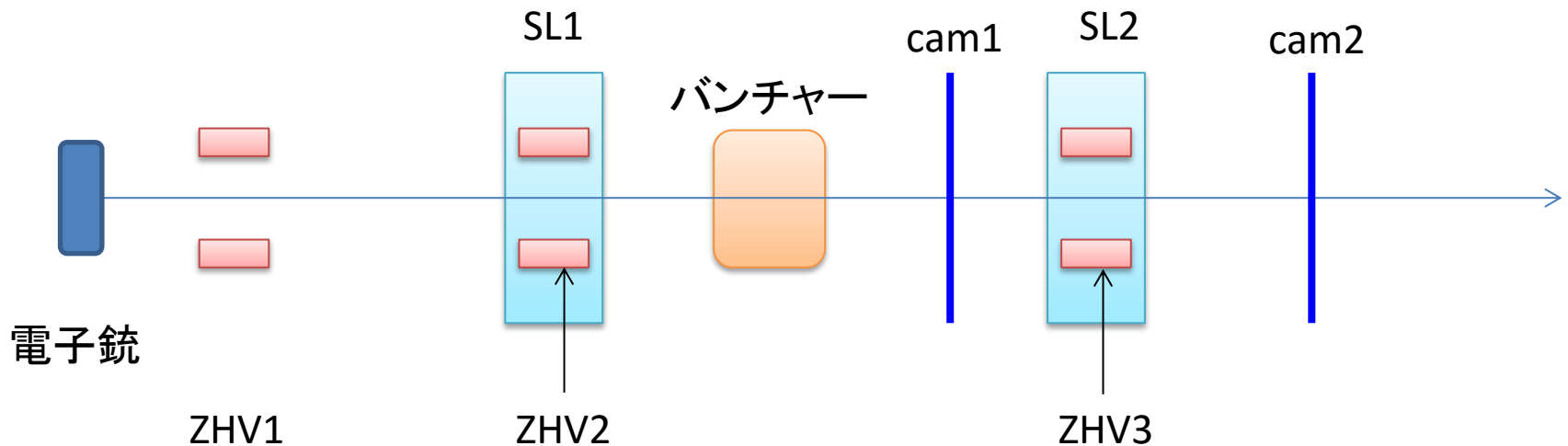
- ビーム調整における今期の目標
 - 放射線施設検査を通すこと(300 μ A CW運転)
 - 調整時間短縮のための方法の確立(限られた運転時間を最大限有効に使うため)
 - 平均ビーム電流を上げたとき(1 mA)のビーム損失の低減(平均10 mA CW運転の見通しを立てる)
 - バンチ電荷7.7 pC(10 mAピーク電流に相当)における損失のないビーム周回と、エミッタンス低減
 - 電子銃電圧を上げた運転 (390 kV \Rightarrow 450 kV)

ビーム調整とその結果

- 今期(2016年2月～3月)で一旦休止になりそうな見込みだったので、これまで以上に効率的にビーム調整をする方針とした
- 具体的には、
 - 調整時間を短縮するための新しい方法の導入
 - 運転モードの切替(バンチ電荷の変更、繰り返し周波数の変更)を極力少なくする(今回は、入射エネルギー:通常2.9 MeV, 高バンチ運転5.0 MeVに切り替えていたが、今回は全て2.9 MeVとする)
- また、
 - 1 mA CW 運転の実証
 - 10 mA CW 運転に向けたビーム損失の低減
 - バンチ電荷7.7 pCにおけるエミッタンス増大の低減に向けた輸送条件の精密調整を実施
- 今期の結果
 - 予定通り施設検査合格、その日のうちに、0.9 mA CW運転を実証
 - ビーム輸送条件の改善(ビーム損失、エミッタンスの低減)
 - Laser Compton Scattering 実験の実施を効率的に行うことができた

低エネルギー区間の新しい軌道調整法

- 低エネルギー区間の軌道調整の重要性
 - 空間電荷効果が支配的なため、この区間で設計条件に近づけることが重要
- 従来の調整法
 - SL1, SL2の中心を通すために、一つ上流のステアリング(ZT)を調整していた
 - 中心の確認法として、SLの磁場を変えても下流の軌道が変化しないようにしていた
 - メリット: SLの強さを変えても下流の軌道が影響を受けない
 - デメリット: 軌道調整用のステアリングの磁場がかなり大きくなる



ZHV2, ZHV3 はソレノイドの中に設置されており、磁場が大きくなるとプロファイルが歪むことがわかってきた(前回までの運転の課題)

低エネルギー区間の新しい軌道調整法

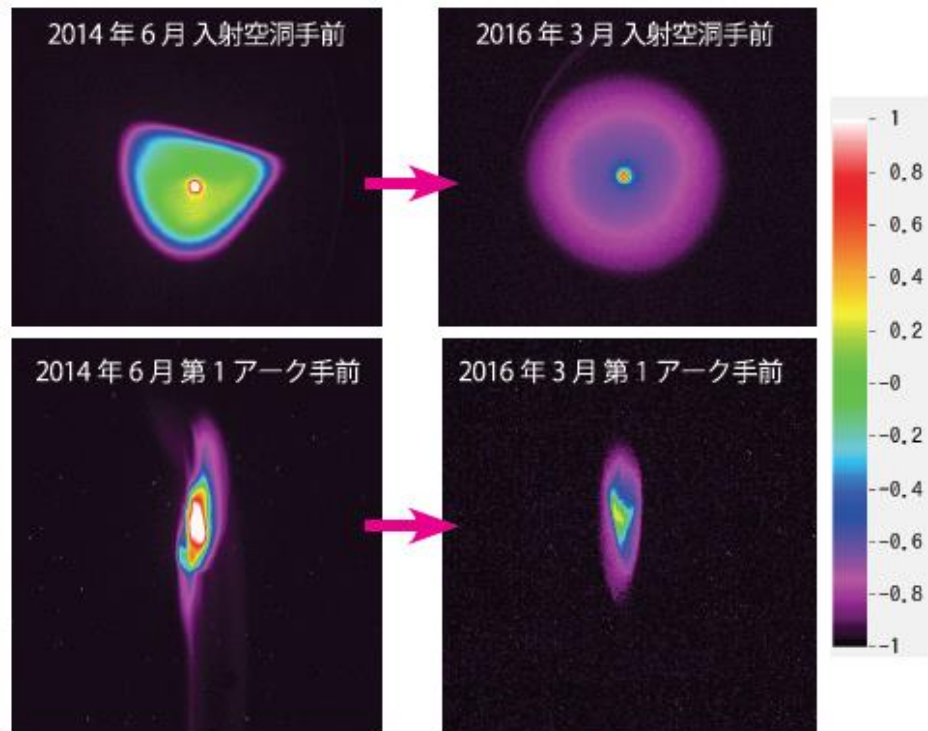
新しい補正方法： ソレノイド内の軌道差 (1 mm 程度) を許容して、ソレノイド内のステアリング磁場を弱める

バンチ電荷 7.7 pC 輸送時の比較
(空間電荷効果が強い場合)

一度対称性が崩れると、下流でその影響を補正することは難しい

2014年4月：
従来の軌道調整
プロフィールの歪みが大きい

2016年3月：
新しい軌道調整
ほぼ設計通りのプロフィール



• 新しい軌道調整法の結果

- 低エネルギー区間：プロフィールの円筒対称性を保持することができた
- 周回部：プロフィールの歪みが低減された
⇒ ビーム損失低減、エミッタンス低減に寄与

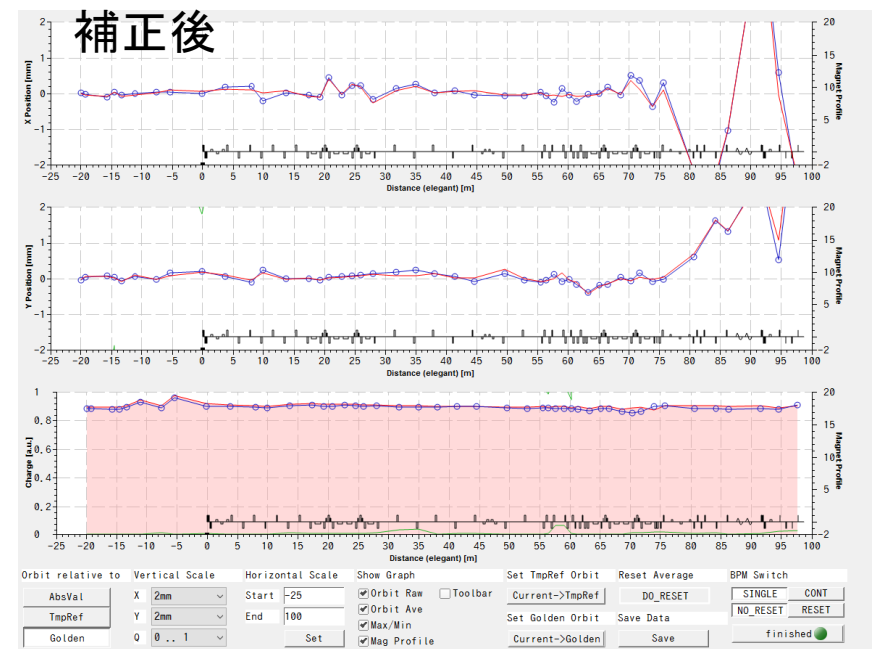
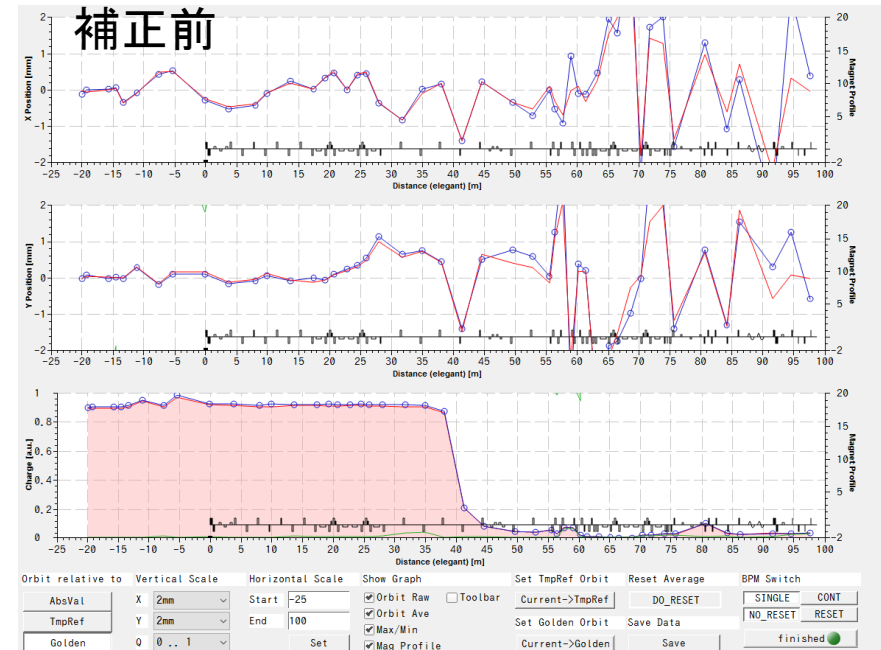
周回部の新しい軌道補正法の導入

- 従来の調整では、Qの中心を通すのに、Q-scanによる方法を用いていた（Qの中心を通ったときは下流の軌道が乱れないことを利用）
- これは、BBA(Beam Based Alignment)を毎回行っていることに対応
- しかし、デメリットとしては毎回Q-scanを行ってしまうため、Qの磁場の再現性を乱す原因にもなる
- 今回の方針
 - 立ち上げ最初にQ-scanによるBBAで基準軌道を確立したあとは、BPMを用いた軌道補正を行い、Q-scanは実施しない
 - メリット： Q-scanを行わないので磁場が乱れることを避けられる、軌道調整の時間短縮
 - デメリット： 最初に基準軌道を決める必要がある（Q-scanによるBBA）、補正には軌道の応答行列が必要
- 今回の実施項目
 - 入射器空洞出口から第二アーク出口まで新しい軌道補正を導入

軌道補正の結果

- 結果

- 大きいところで、0.5 mm 程度のずれが残るが、概ね 0.2 mm 程度の範囲内に収まった
- 補正時間: 1区間、1分程度 (全部で9区間)
- 施設検査前から実用化



- 軌道調整の精度、再現性が向上
- Q-scanによる軌道補正に比べて大幅に調整時間を短縮

1時間 ⇒ 10分程度

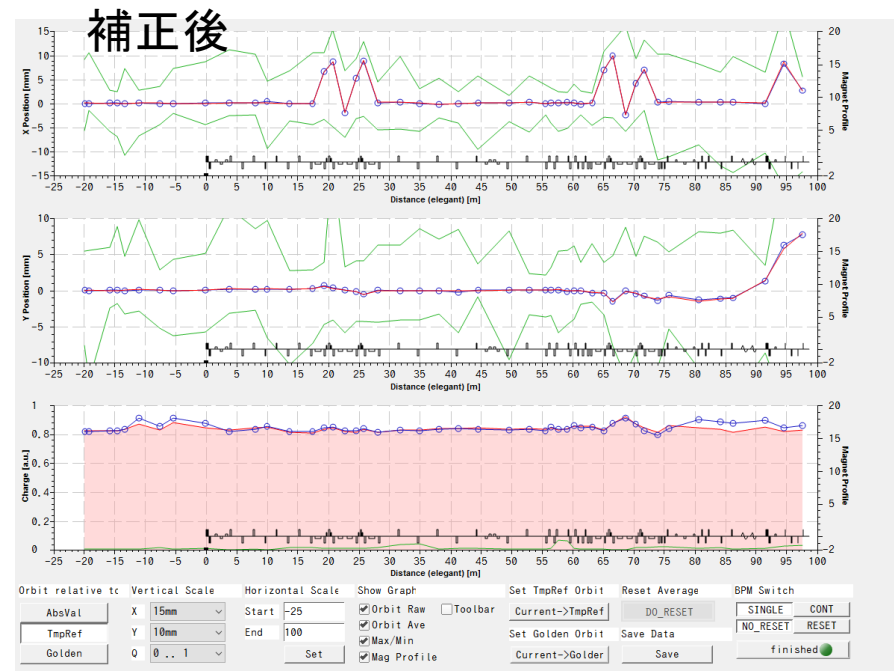
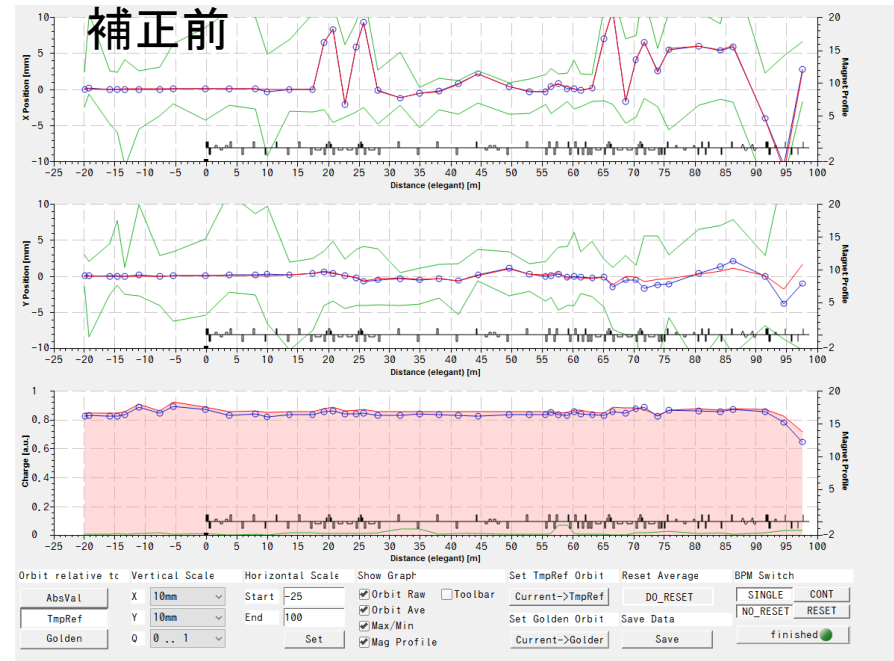
周回部のオプティクス補正

- 前回までの調整
 - 日々手動で調整していた
 - 再現性の確保が課題であった
- 今回の目的
 - 明確な手順(応答測定 ⇒ 疑似逆行列の計算 ⇒ 補正)でオプティクスを補正すること
 - 補正精度を向上させるとともに、調整時間を短縮すること
- 今回の実施項目
 - アーク部の転送行列(水平・垂直方向分散関数)の補正
- 補正方法
 - 水平方向:アーク部内の6台の四極電磁石を使用
 - 垂直方向:アーク部内の2台のskew四極電磁石を使用

分散補正の結果

- 第一アーケ、第二アーケともに水平・垂直分散関数を補正できた
- 補正時間は10分程度(応答測定、補正を含めて)

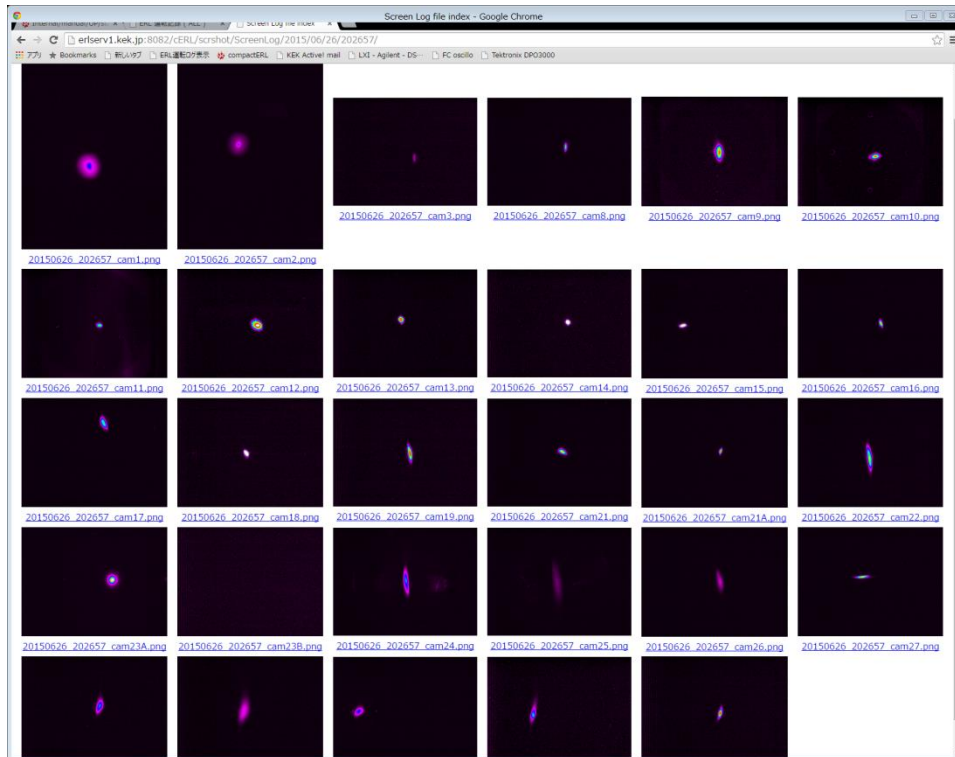
- アーク部の輸送条件をほぼ設計通りにできた
- 課題であった、第二アーケのプロファイルを改善
- 第二アーケのビーム損失低減にも寄与



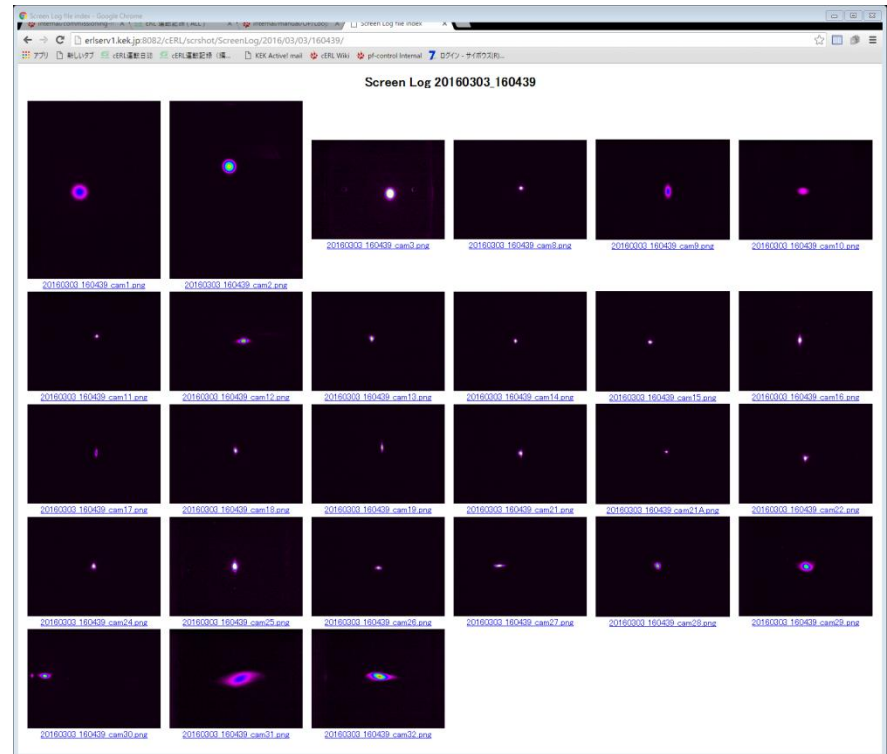
0.5 pC輸送時のプロファイル比較

- 2015年6月に比べてかなり設計に近づけることができ、ビームサイズを小さく輸送することができた

2015年6月26日



2016年3月3日

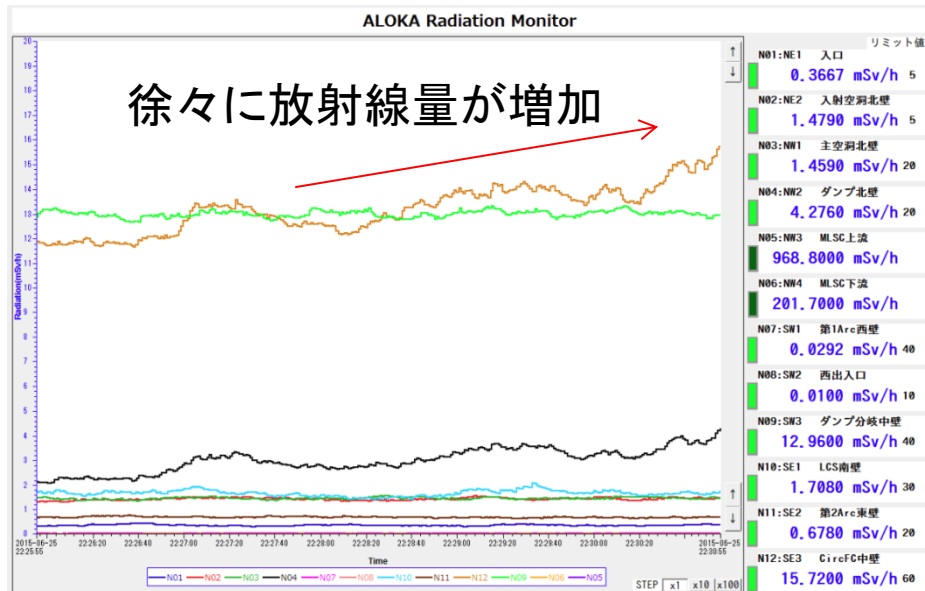


以上の軌道調整、オプティクス調整によって、かなり設計条件に近づけられた
この状態で、コリメタ調整を行い、十分小さなビーム損失を実現できた
⇒ 施設検査 (300 μ A, CW)のあと、0.9 mA CW運転を実証

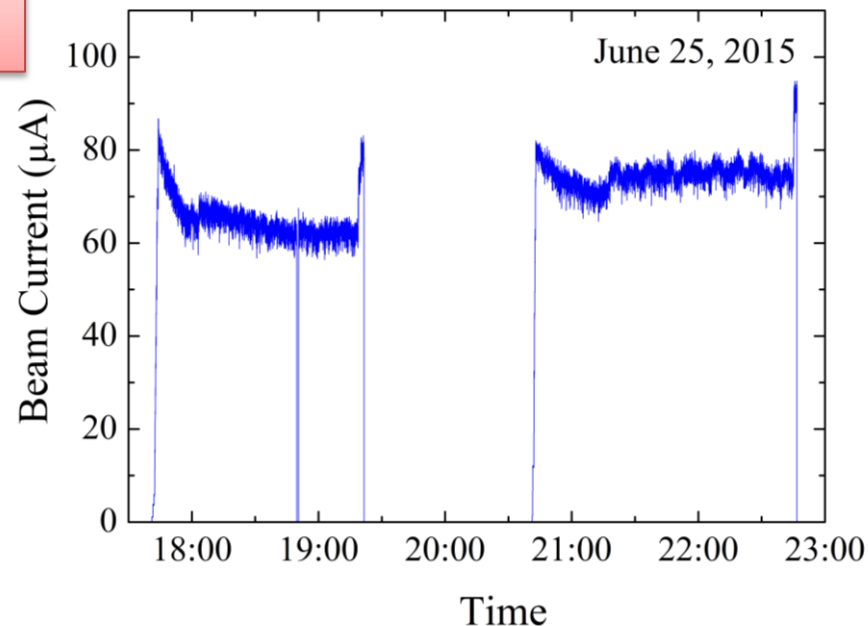
前回のCW運転の課題

- 平均電流 0.075 mA (バンチ電荷 0.46 pC)
- 課題: 徐々に放射線損失が増加していく

22:25-22:30の放射線モニタの変化

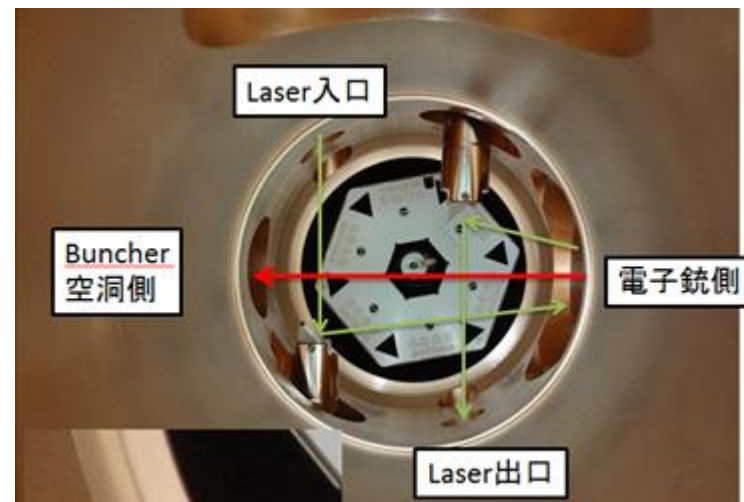


Measured at the beam dump



レーザー導入ミラーが徐々に帯電して、その電場が低エネルギービームの軌道を歪ませている

⇒ 2015年夏に、レーザー導入ミラーをガラス製から金属製に交換

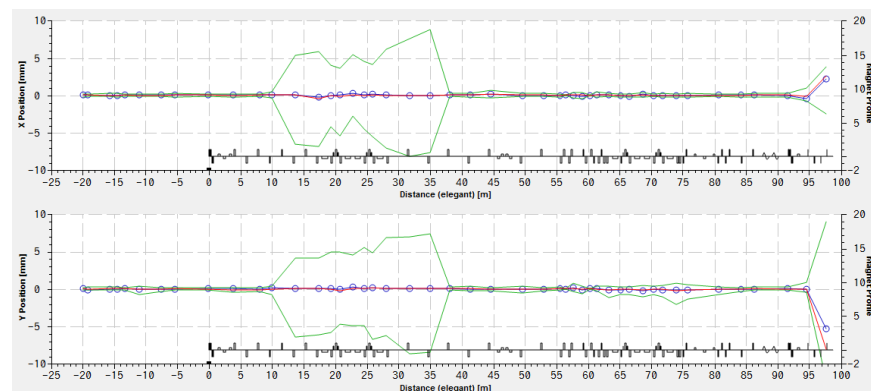
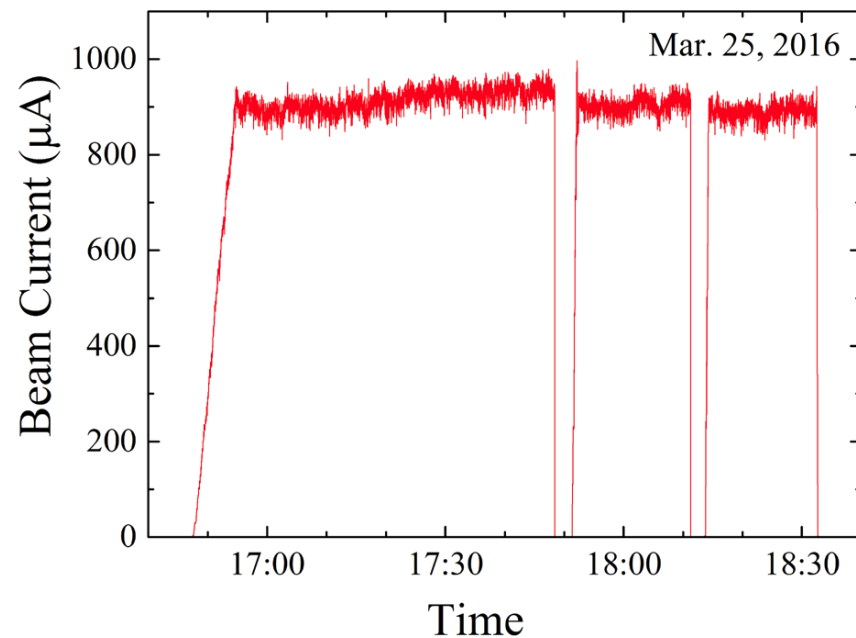


今回のCW運転

繰り返し: 162.5 MHz

平均電流: 0.9 mA (バンチ電荷: 5.5 pC)

17:44-17:49の放射線モニタの変化



課題であった安定性は？

⇒ 運転途中でビーム損失増大は全くなく、
極めて安定であった
ミラーの交換は非常に効果があった

CW開始後、約1時間での軌道変動
ほとんど変動無し。

高バンチ電荷でのエミッタンス低減

- 1.3 GHz で平均電流 10 mA では、バンチ電荷7.7 pCとなる
- 空間電荷効果が支配的
- 6次元位相空間で電子ビームを制御しなければならない

- これまで
 - 設計輸送条件を設定してビーム輸送
 - ⇒ あまりエミッタンスが良くない
 - 高バンチ電荷の物理を理解するために、横方向(x, y方向)と進行方向(z方向)を独立にビーム調整・測定を行い、モデルにフィードバックしてきた

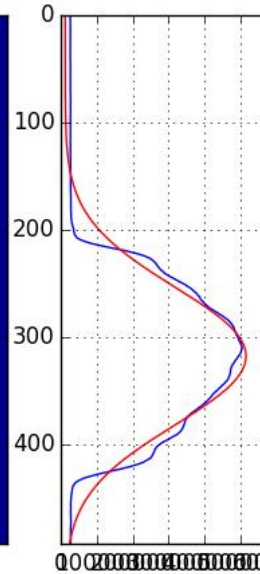
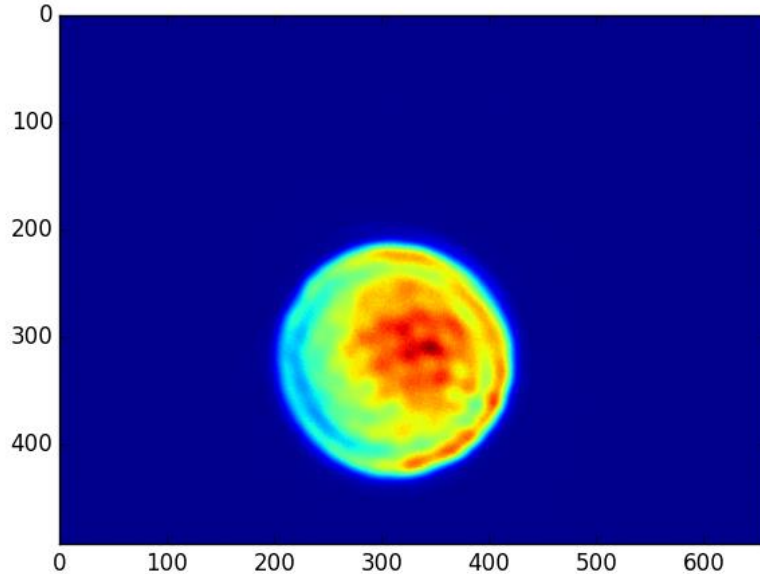
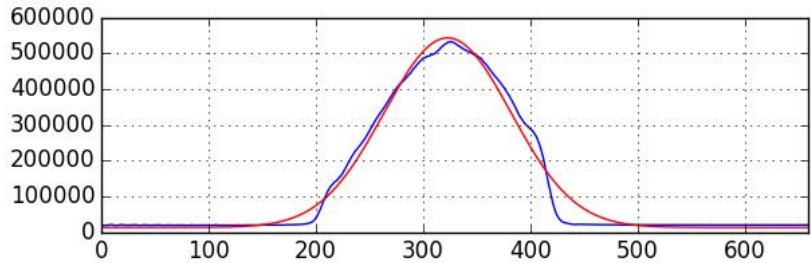
- 今回
 - 光陰極における初期電子分布モデルの精度向上
 - 設計輸送条件からのずれの補正(先に説明した方法を使用)
 - その上で、7.7 pCにバンチ電荷を上げて調整を実施

横方向の初期電子ビーム形状

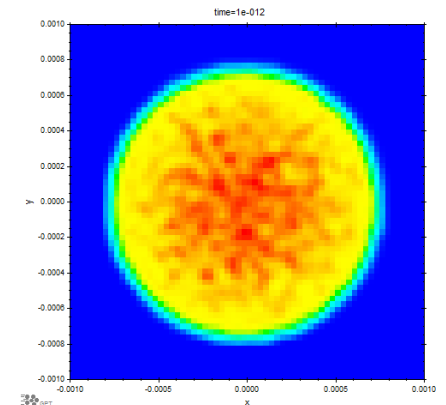
これまでの横方向分布： 一様分布を仮定

今回の分布： レーザープロファイルの測定結果からシミュレーション条件を作成

ピンホール直径 1.5 mm のプロファイル(測定結果)



シミュレーション(GPT)で
再現した初期分布
(中心付近はほぼ同じ
エッジ付近の干渉はなし)



新しい軌道補正法と合わせて、低エネルギー領域の輸送条件を設計に近づけられた

電子銃450 kV + 7.7 pC輸送条件

- 計算条件

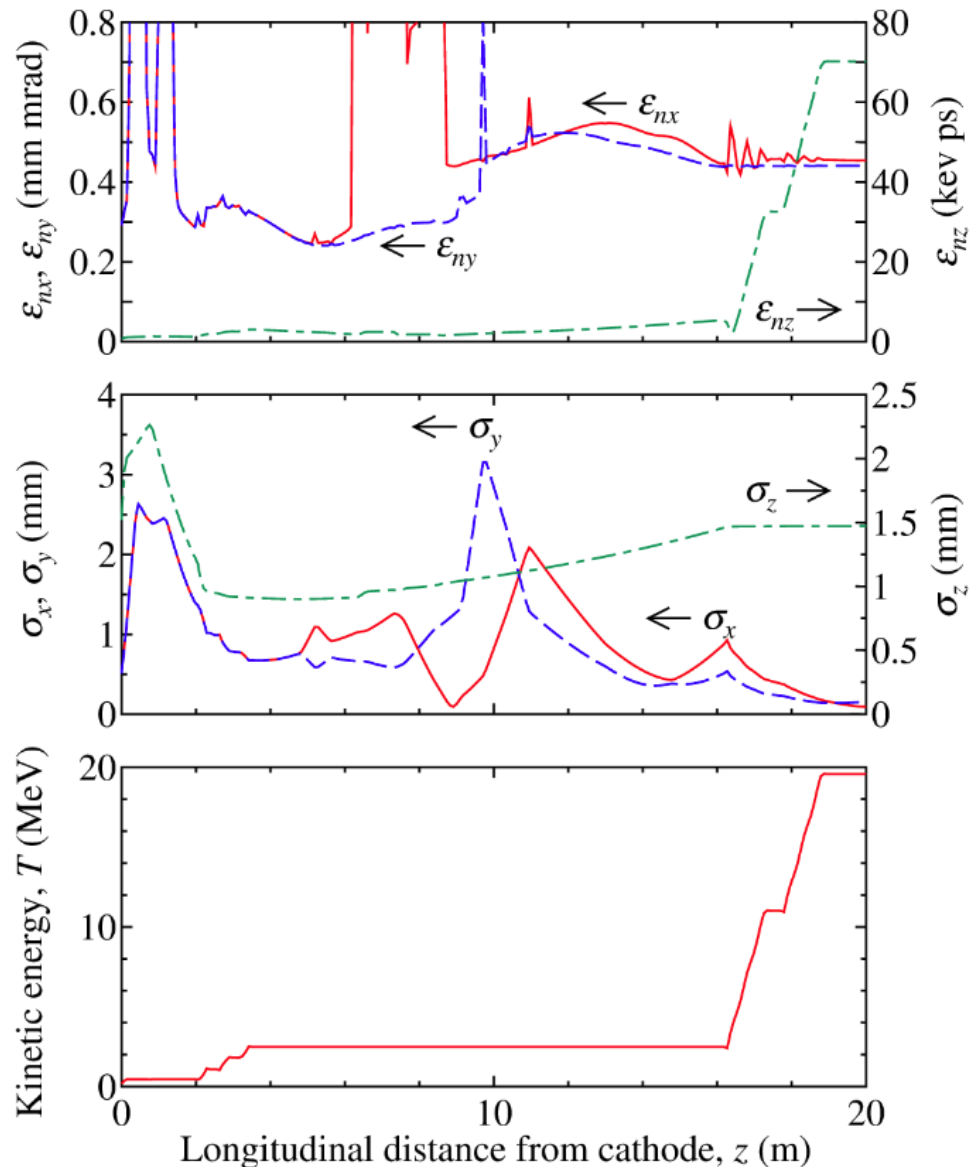
- 入力ファイル:
cerl_inj14_6_g2a.in
- nps = 20 k particles
- 初期サイズ: $d = 1.5$ mm
- 初期パルス: 3 ps
gaussian の8スタック

主空洞出口の値

$\epsilon_{nx} = 0.45$ mm mrad
 $\epsilon_{ny} = 0.44$ mm mrad
 $\text{stdz} = 1.47$ mm (4.9 ps)

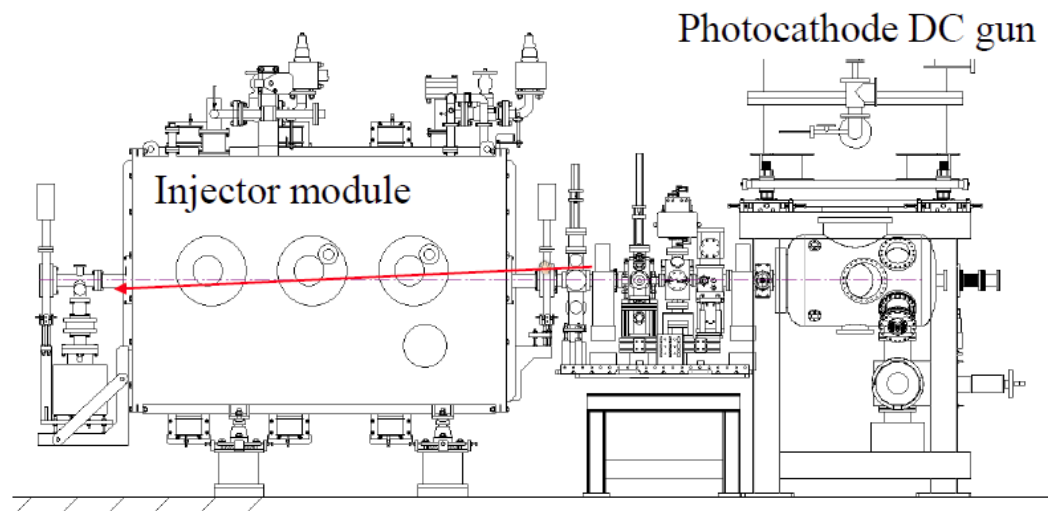
1.5 日間実施

とりあえず、損失なく周回できた

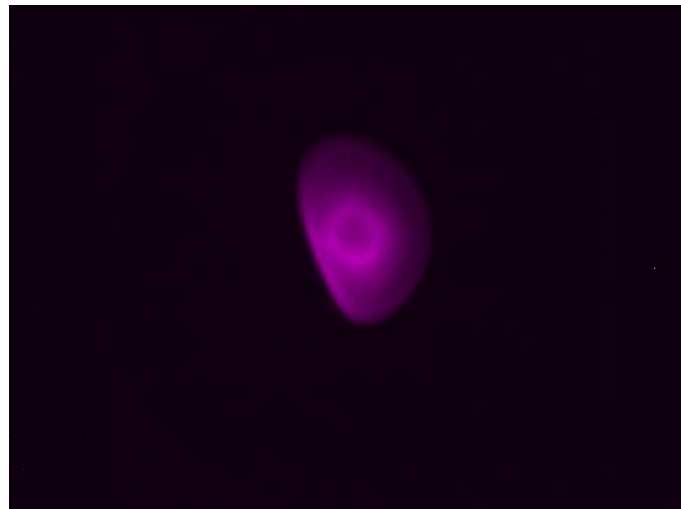


入射器空洞の精密な軌道補正

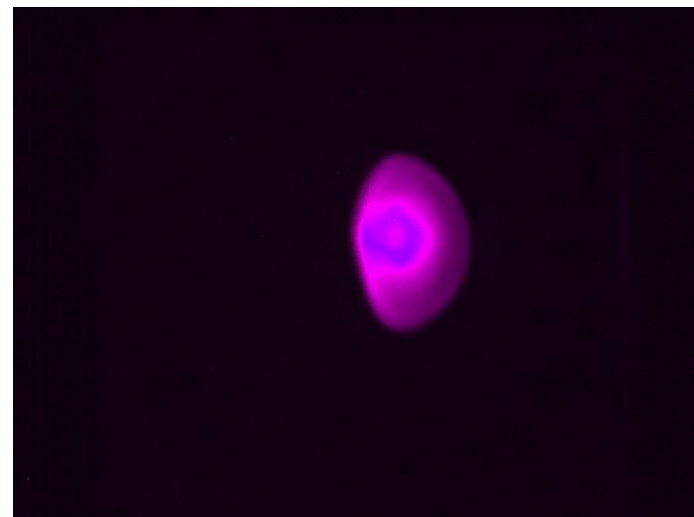
入射器空洞内の垂直方向の精密な軌道補正を実施



合流部のスクリーン(補正前)



合流部のスクリーン(道補正後)



- 空洞下流の垂直プロファイルを改善することができた(上下方向の対称性が回復)
- 下流の垂直プロファイルも改善
- 入射器空洞のより精密な軌道調整によって、エミッタンス低減に繋がることが確認できた
- ただし、水平方向は補正途中で終了

エミッタンス測定

2015年までのエミッタンス測定結果

2015年6月17日(水)高井さん資料より

四極電磁石を用いた
Waist-scan法で測定

➤ 微小電荷 (< 0.05 pC/bunch)

ϵ_x / ϵ_y [μm]

	主空洞前	主空洞後	第1アーク後	LCS前
2014/6/13	0.15/0.14	0.14/0.12	0.14/0.14	0.13/0.15
2015/2/17	---	---	0.24/0.25	---
2015/2/19	---	---	---	0.17/0.19

➤ 中電荷 (0.5 pC/bunch)

2015/3/25	---	---	0.32/0.28	0.41/0.30
-----------	-----	-----	-----------	-----------

➤ 高電荷 (7.7 pC/bunch)

2014/6/19	---	---	42/15	---
2014/6/20	---	2.9/2.4	5.8/4.6	---
2015/6/15	---	1.9/2.4	4.5/4.5	---

今期のエミッタンス測定結果
(詳細は島田さんの発表を参照)

	主空洞前	主空洞後	南直線部
5.3 pC	1.0 0.66	2.7 ± 0.21 1.0 ± 0.071	
7.7 pC	- 0.9	1.8 ± 0.40 1.02 ± 0.33	1.5 ± 0.082 1.1 ± 0.058

上段: ϵ_x (mm mrad)
下段: ϵ_y (mm mrad)

2015年の運転に比べてかなり低減したが、まだ設計値(0.45 mm mrad)よりは大きい

高バンチ電荷運転まとめ

- CW運転:
 - バンチ電荷5.5 pCで、CW運転(162.5 MHz)を実証
 - 十分損失が低いことを確認
 - コリメタの位置である程度ビームサイズを小さくすることが必要
- エミッタンス:
 - 設計値まで下げるには至らなかったが、2015年に比べてかなりエミッタンス増大は低減できた
- エミッタンス低減に効果のあった項目
 - 電子銃-入射器空洞間の軌道調整
 - 入射器空洞内の軌道調整(今回は垂直方向のみ精密調整)
 - マッチング点の追加
 - 周回部のオプティクス調整
- 課題
 - 超伝導空洞内の軌道の精密調整によるエミッタンス低減(設計値に向けて)
 - エミッタンス低減とコリメタ条件の最適化
 - 主空洞後にエミッタンスが増大しているので、合流部から主空洞に掛けての軌道調整
 - できれば、入射器のエネルギーを上げたい(空間電荷効果の低減)

まとめ

- 2016年2月～3月にかけて、最大平均ビーム電流 1 mA でcERLのビーム運転を実施
- 平均ビーム電流 0.3 mA の運転で、施設検査合格、その日のうちに 0.9 mA CW運転を実証
- 前回の運転の課題を解決するために、新しいビーム調整法を導入
 - 低エネルギー領域の軌道補正
 - 周回部の新しい軌道補正、オプティクス補正
- これらの導入により、調整精度が向上するとともに、調整時間を大幅に短縮できた
- これらの条件のもとで、高バンチ電荷運転(~ 7.7 pC)を実施
- バンチ電荷 5.5 pC の 0.9 mA CW運転(繰り返し162.5 MHz)を実証
- 平均ビーム電流を 10 mA に上げても放射線は問題ないところまで調整できた(10 mA 運転の見通しが立った)
- 高バンチ電荷運転のエミッタンスは、設計値まで下げるには至らなかったが、2015年に比べてかなりエミッタンス増大は低減された

cERL運転調整の現状と課題

- 現状

- 低バンチ電荷では、ほぼ調整手法は確立した
- 再現性も向上、調整時間も短縮

- 課題

- 高バンチ電荷におけるエミッタンス低減（設計値に向けて）
 - 対策1：超伝導空洞内の軌道の精密調整の継続
 - 対策2：診断ラインを用いたビームの6次元診断とモデル修正
 - 対策3：入射エネルギーの増強
- 高バンチ電荷におけるCW運転（ビーム損失）
 - 対策1：エミッタンス低減とコリメタ条件の最適化
 - 対策2：マルチアルカリカソード利用による時間方向テイルの低減
- 高バンチ電荷におけるCW運転（長時間運転）
 - 対策1：カソードオフセンター運転の最適化
 - 対策2：マルチアルカリカソードの利用と検証