

総合運転(コミッショニング)

cERL評価専門委員会

2017年10月27日 14時15分～14時45分

KEKつくばキャンパス 4号館1階セミナーホール

高エネルギー加速器研究機構

加速器研究施設

宮島 司

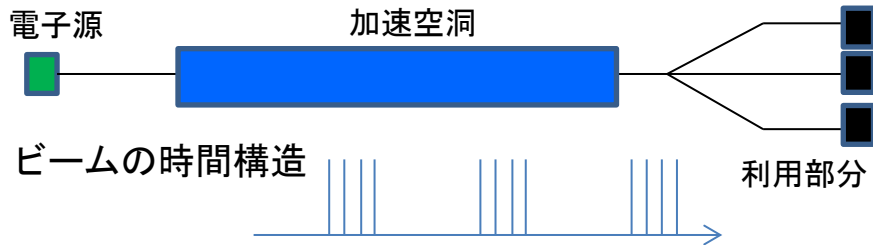
目次

- 開発・実証すべき項目
- cERL総合運転(コミッショニング)の概要
- 達成された成果
- 得られた知見と今後の展望
- まとめ

ERL加速器の特徴・何が難しいか？

- Energy Recovery Linac (ERL、エネルギー回収型線形加速器)の名の通り、**線形加速器**

- 線形加速器：電子源から電子を生成し加速、電子ビームを利用したのちに、ダンプに捨てる



- 線形加速器の特徴：
 - ビームは一度きりの使い捨て(ビーム品質は電子源によって決まる)

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_n}{\gamma\beta}$$



加速すればするほど幾何学エミッタンスは減少

- でも、出力は「**電流 × 加速エネルギー**」なので、大電流化するとどんどん必要な電力が増加(ついでに捨てる時の放射線も増大)



電流増強・加速すればするほど必要な電力も増える

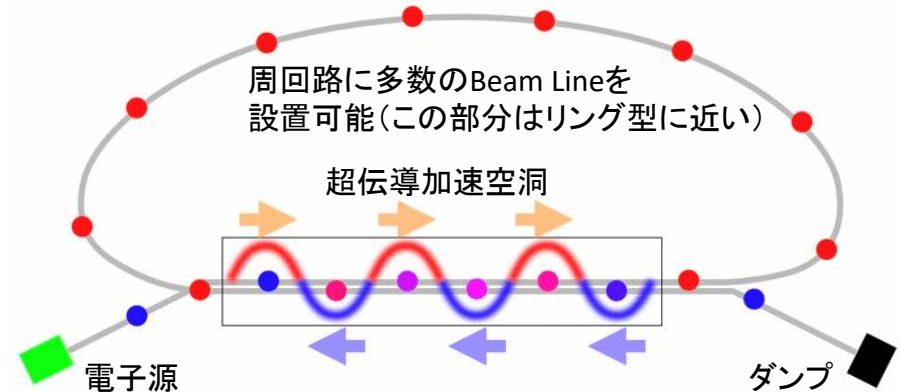
- Energy Recovery Linac (ERL、エネルギー回収型線形加速器)：加速した電子ビームをもう一度加速空洞に通して減速。そのエネルギーを次のビームに与える。

ビームの時間構造



- メリット

— **大電流ビームを扱うことが可能**



- 大電流ビームを扱う上で難しいこと

- 高輝度・大電流ビームの生成・加速
- さらに、損失なく安定に運転し続けることが重要 (平均電流が大きいので、ちょっと軌道が反れてビームが真空容器にあたると溶けたり、放射線が増加...)

開発・実証すべき項目

- cERLの総合運転では、開発した全機器の総合的な動作試験、ビーム運転環境下における性能実証、ビーム性能の実証とそれを実現するための調整方法を確立することが目標となる。
- 特にERLに特有の下記の項目の開発・実証が重要課題となる。
 1. エネルギー回収運転の実証
 2. 10 mA CWビームの生成・加速・輸送、制御する手法の開発
 3. ビームダイナミクスに関わる物理(空間電荷効果、CSR等)の理解と設計への応用
 4. 低エミッタンスかつ短バンチ長ビームを輸送する手法の開発(7.7 pCのバンチ電荷に対して、1 mm mrad以下のエミッタンスの実証。77 pCの高バンチ電荷(CW 100 mA相当)・低エミッタンスビームの生成・輸送)
 5. アーク部を利用した磁気的なバンチ圧縮技術による約100fsの極短バンチビームの生成と輸送

目次

- 開発・実証すべき項目
- cERL総合運転(コミッショニング)の概要
- 達成された成果
- 得られた知見と今後の展望
- まとめ

cERLの総合運転の概要

- 加速器の立ち上げに要する期間
 - 2週間程度：超伝導空洞の冷却・立ち上げ、電子銃のコンディショニング
- 運転期間中
 - 1週間のうち、月曜から金曜までの5日間を総合運転(ビーム運転)
- 運転期間中の1日
 - 朝：超伝導空洞冷却(2 Kまで)
 - 10時くらいから高周波空洞の立ち上げ
 - 13時くらいからビーム運転開始
 - 22時にビーム運転終了 (1日のビーム運転時間は9時間程度)
- 超伝導加速器は1度冷却して運転開始したら、運転し続けないと効率が悪い(が、総合運転中はビーム調整をぶっ続けで行うので人員の適正な配分は重要)

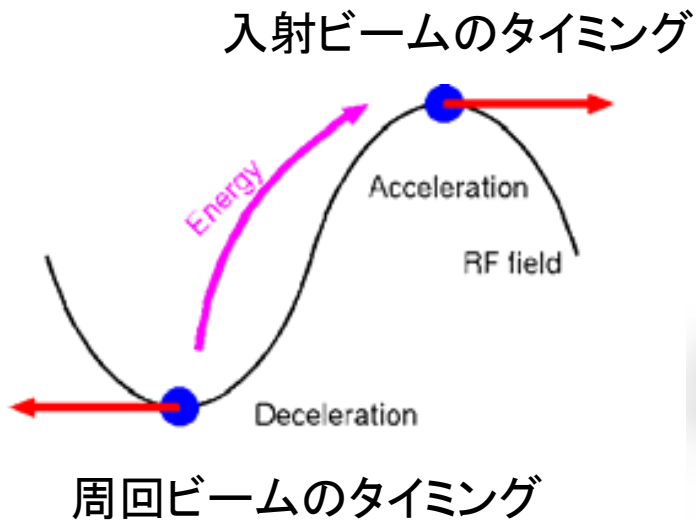
目次

- 開発・実証すべき項目
- cERL総合運転(コミッショニング)の概要
- 達成された成果
- 得られた知見と今後の展望
- まとめ

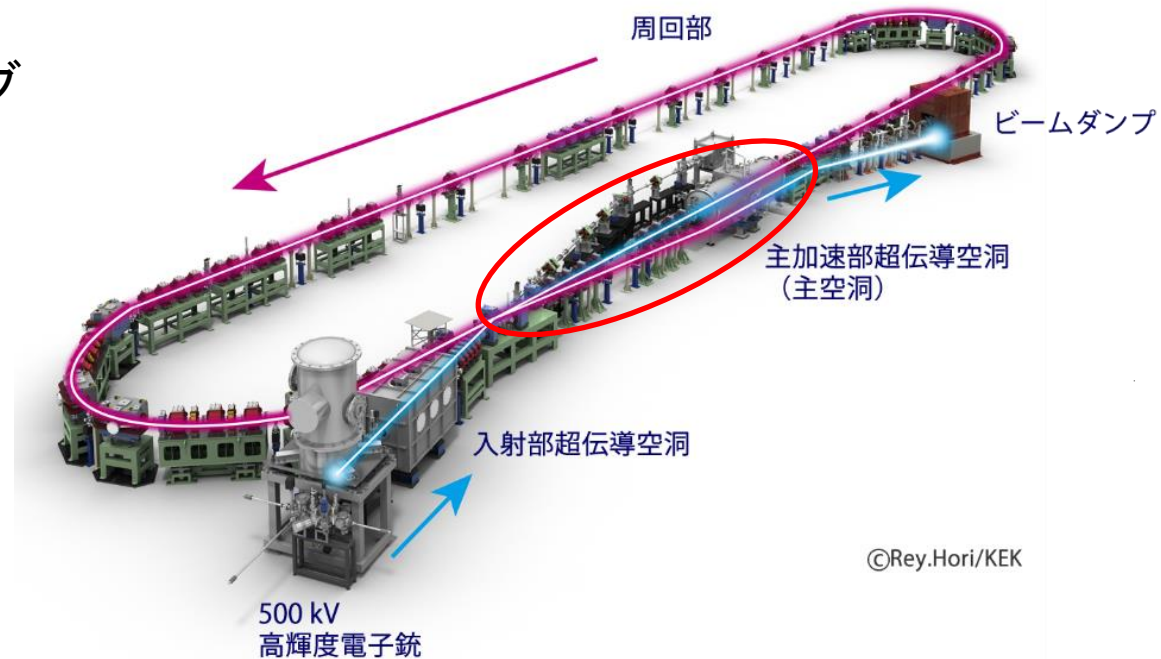
1. エネルギー回収の実証

- エネルギー回収運転をどのように実現するか？
- エネルギー回収を実現する上での課題
 - A) 周回ビームを減速タイミングに合わせること
 - B) 2つの異なるエネルギーのビームが同じ区間を通過

A) タイミング調整



B) 2つの異なるビームエネルギーが通過



Q. どうやってタイミングを合わせるか？

Q. 2つのエネルギーのビームをどうやって見分けて調整するか？

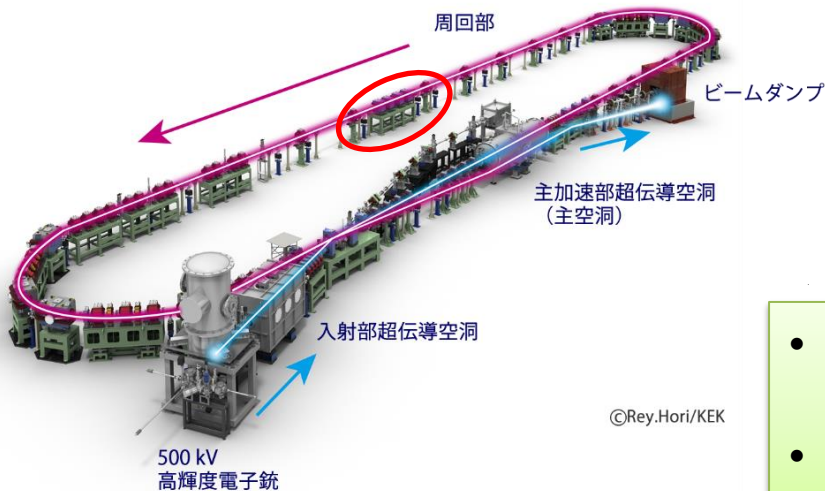
1. エネルギー回収の実証

A) タイミング調整

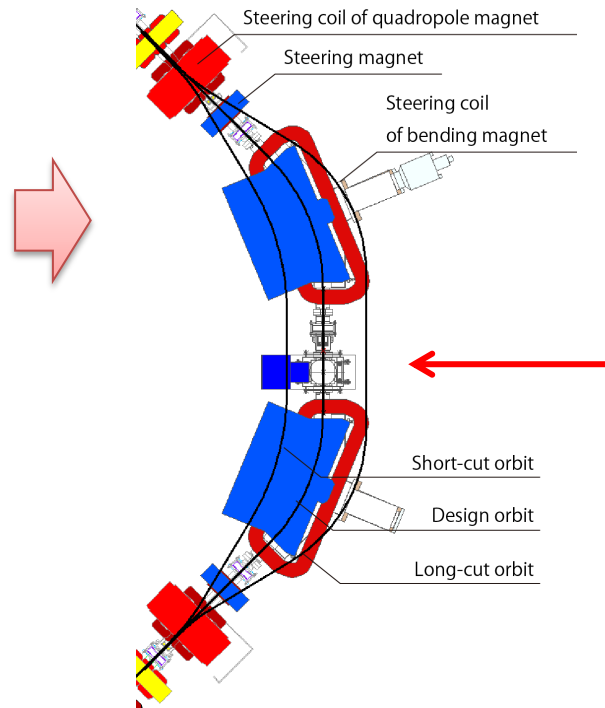
- 基本的に入射ビームは最大加速位相になるように調整する
- そのあとに、戻ってくるビームのタイミングを調整する必要がある

• 当初の目論見

- 4台の偏向電磁石で構成された周長補正シケインで、周長を調整してタイミングを合わせる
- ⇒ 周長補正量が十分ではなかった
- ⇒ また、20 MeV 程度のエネルギー領域だと、まだエネルギーによって戻るタイミングが変わる(ビームの速度が十分に光速に近づいていないため)



- それではどうやって調整するか？
- ⇒ アーク部内の軌道を変化させれば、周長をより多く変化させられる(調整範囲が広く、また測定・制御しやすい)



このスクリーンモニター上の水平位置で周長補正量が判断できる

- 十分な調整範囲をもった周長補正法(減速ビームのタイミング調整法)を確立できた
- エネルギーを変えても対応可能

1. エネルギー回収の実証

B) 2つの異なるエネルギーをもつビームの調整

- 同じ区間に、異なるエネルギーの2つのビームが走る区間がある
- どうやって見分けて、どうやって調整するか？

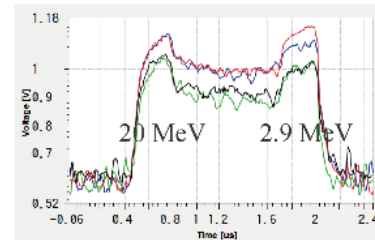
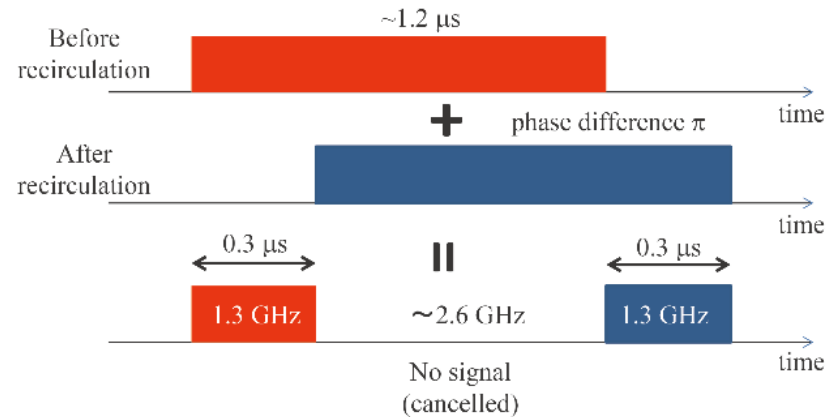


BPMを用いた測定方法の開発

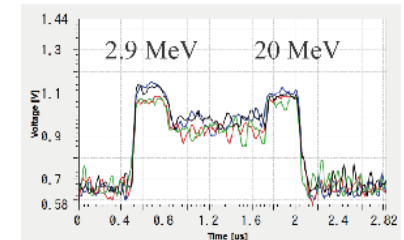
- 1.2 μs 幅のバーストモードで運転する
- 入射ビームに対して、周回ビームは周回部を走る分だけ遅れて到達する
- BPM信号が時間的に重なる部分と重ならない部分ができる

⇒ 重ならない部分が、それぞれ入射ビーム、周回ビームに対応する

⇒ この部分を切り出すことで、それぞれのビーム位置を測定することが可能となった



Downstream of main cavity



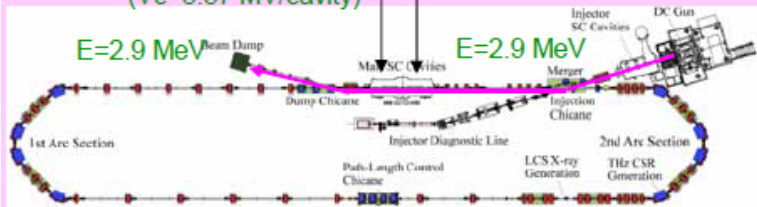
Upstream of main cavity

- ERL特有の、2つの異なるエネルギーを持つビームが通過する区間の診断・測定法を確立することができた
- (注: CW 運転すると全部重なるので、見えない...)
- エネルギー回収調整法を確立できた。

1. エネルギー回収の実証

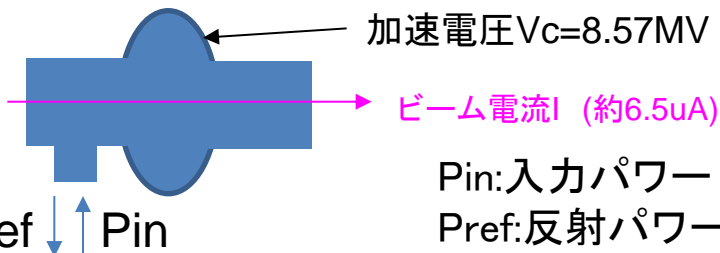
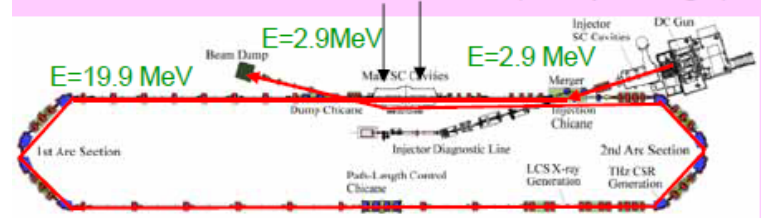
Non-ERL operation (beam loading test)

Cavity 2: deceleration ($V_c=8.57$ MV/cavity)
 Cavity 1: acceleration ($V_c=8.57$ MV/cavity)



ERL operation

Cavity 1 and 2: acceleration (1st passage)
 and deceleration (2nd passage)



Pin:入力パワー
 Pref:反射パワー

入力パワーと反射パワーの差 : $Pin - Pref$

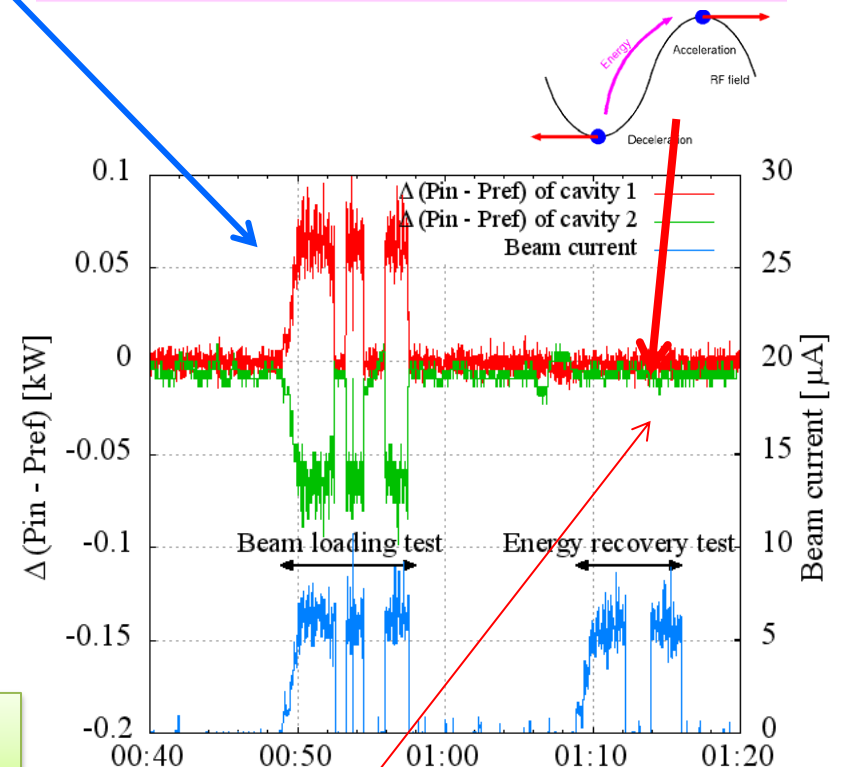
・ビームローディング試験

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。

・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、
 $Pin - Pref$ はビーム電流によらず一定。

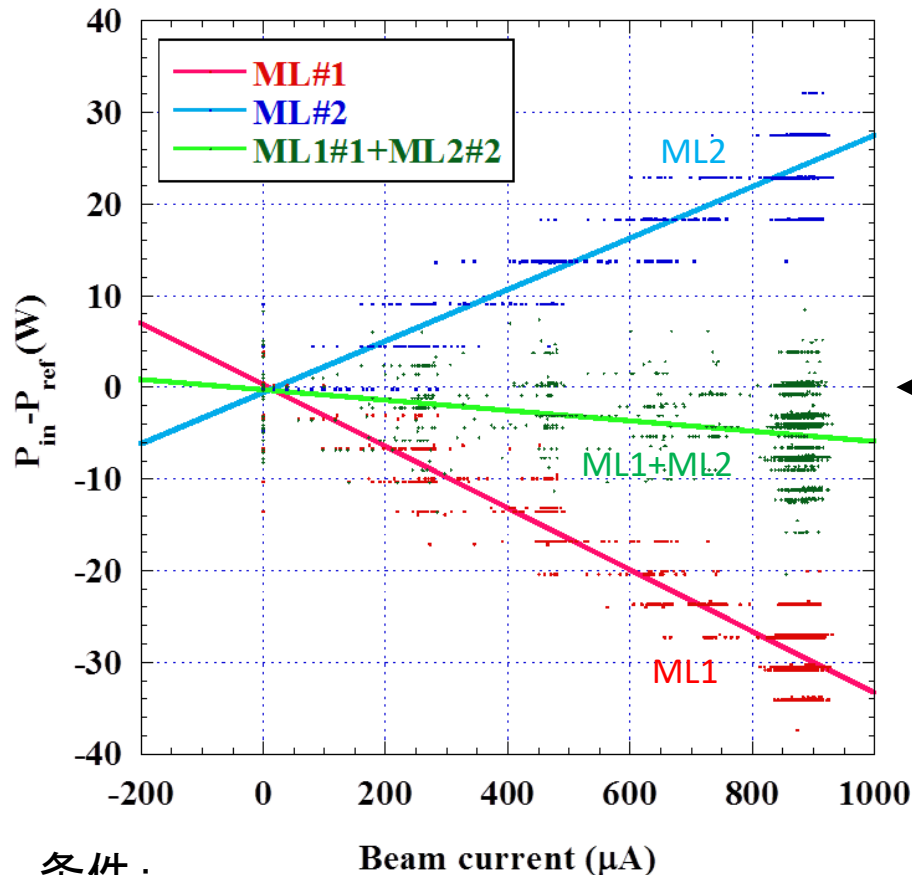
まずは、7 μ A CW運転でエネルギー回収を確認



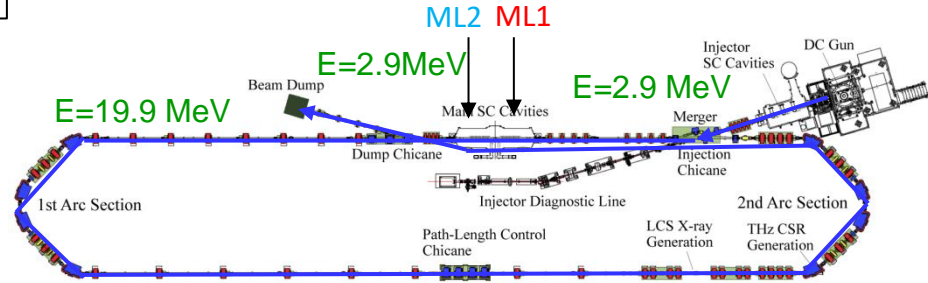
ビームの有り無しで変動しない ⇒ エネルギー回収を確認

1. エネルギー回収の実証

$$(空洞入力電力) - (空洞反射電力) = \\ (空洞内で消費される電力)$$



主空洞ML1, ML2では、加速(1回目通過)と減速(2回目通過)でエネルギーを回収(ER)



* 2台の9セル超伝導空洞を使用

ビーム電流なしの時、オフセットをゼロと定義した

- エネルギー回収なしで加速すると、空洞当たり約8.6 kWのビーム負荷があるはず (@1mA)
- エネルギー回収により、ビーム負荷は格段に小さい (~ 10 W)

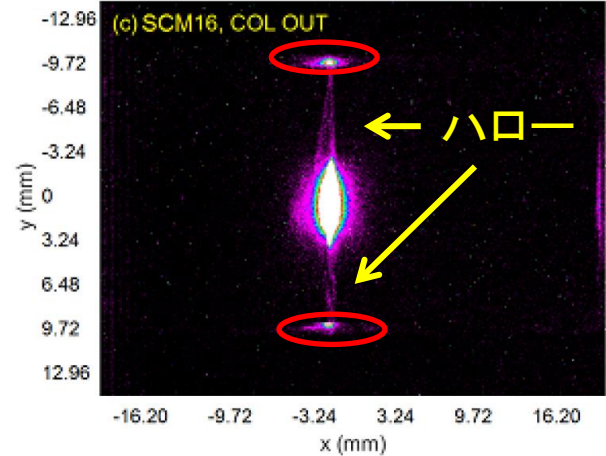
CW 0.9 mA 運転においても、ほぼ 100% のエネルギー回収効率を達成した。

2. CW 10 mA 運転

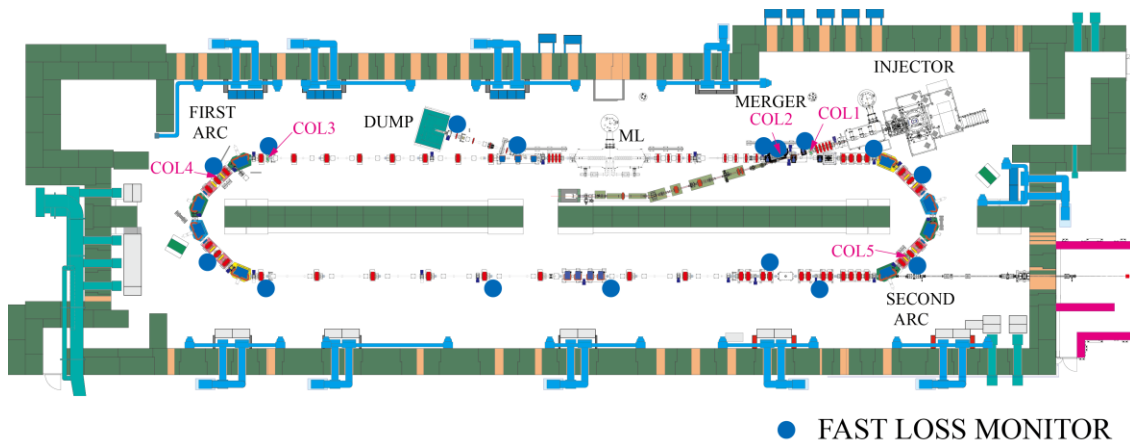
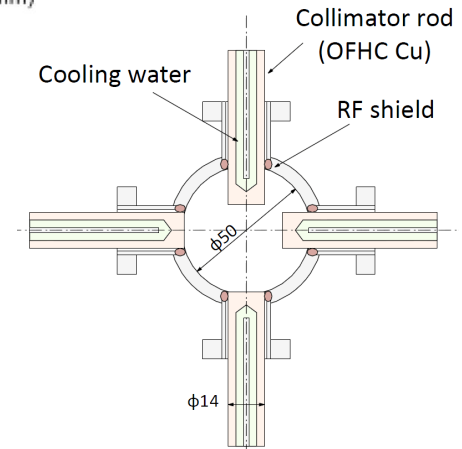
- CW運転実現に重要なこと
 - ビーム損失位置・ビーム損失量の制御
 - よくわかっていないビーム損失は、放射線量の増大を引き起こす
 - CW運転では、平均電流が大きいいためちょっとしたビーム損失でも見過ごせない
 - それでは、ビーム損失を設計段階から完全に把握できるか？
 - NO. 何らかの仮定が入り、それを実証する必要がある。
 - どうやって大電流 CW 運転を実証していくか？
 - 低いCW電流から開始して、ビーム損失に関わる諸現象を理解しながら進めることにした(放射線施設検査に着実に合格して先に進むために)
- ⇒ 最大ビーム電流 CW 1 μ Aから開始し、ビーム損失箇所・損失量の確認、放射線発生量を減少させる調整法を開発していくことにした。

2. CW 10 mA 運転 (ビーム損失の原因)

- ビームハローは、電子ビームの核となる部分の周囲に低密度で存在する電子集団であり、これが安定な輸送条件の外側に分布する場合にはビームが失われ、予期せぬ場所での放射線発生を引き起こすことになる
- ハローの原因 ⇒ 複数のメカニズムが絡んでいる
 - 空間電荷効果や磁場の非線形性などのビームダイナミクスに起因するもの、
 - 磁場誤差や電磁石・超伝導空洞のアライメント誤差、
 - 電子銃や光陰極 (有限な時間応答による時間方向テイルの形成や迷光による望まない電子の生成) による影響
 - 真空輸送路の内面形状等



注: 上下の赤丸内はビームではなく、スクリーンの端でビームによる発光が反射したものの

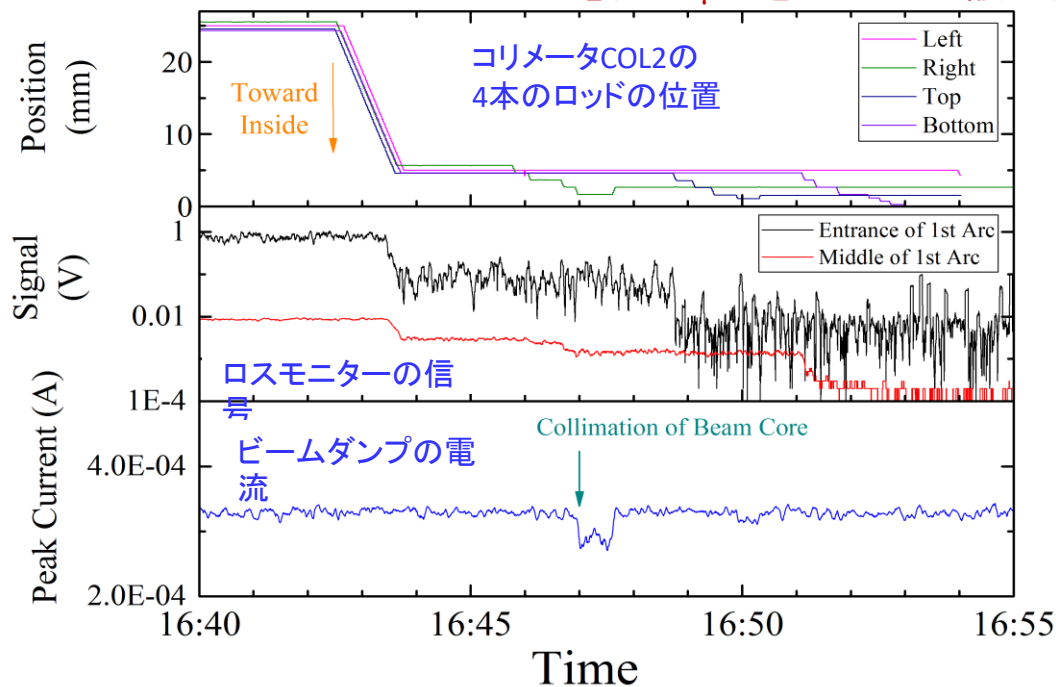


- これらを制御するにはどうするか?
 - 5か所に設置されたコリメタで、制御された位置でハローのみを削る

2. CW 10 mA運転(コリメータ調整)

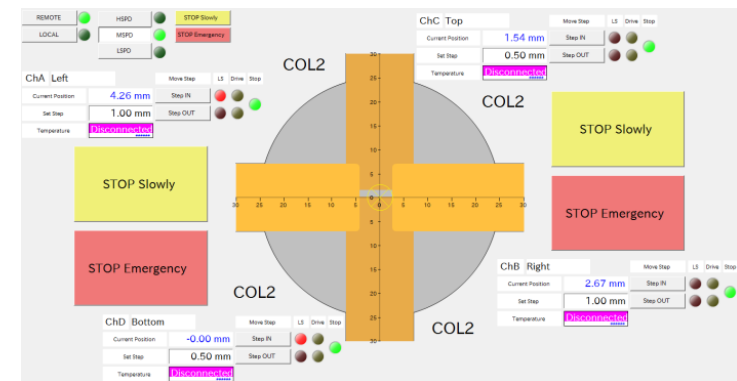
- 上流から(電子銃から下流に向けて)ビーム輸送路調整が完了したあとに、コリメータ調整を実施
- 加速器室内に設置されたロスモニターによる放射線発生量を見ながら、コリメータを調整
- 放射線発生量が少なく、かつビーム電流が減らない条件にする(当然ながら、コリメータを入れすぎるとダンプに到達するビーム電流が減少する)

バーストビーム(ピーク電流300 μ A)をダンプまで輸送中



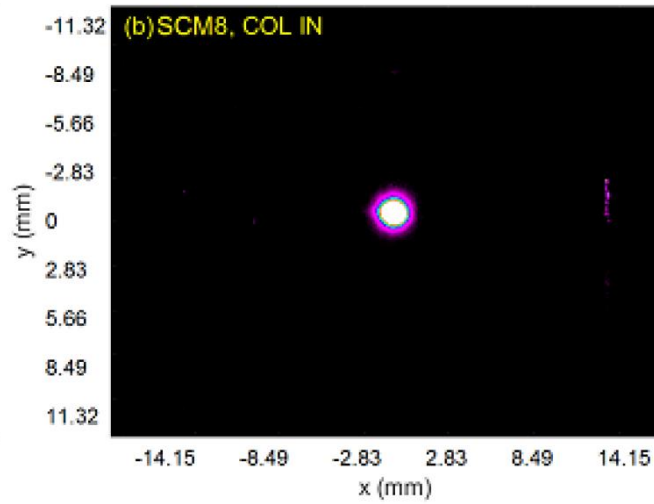
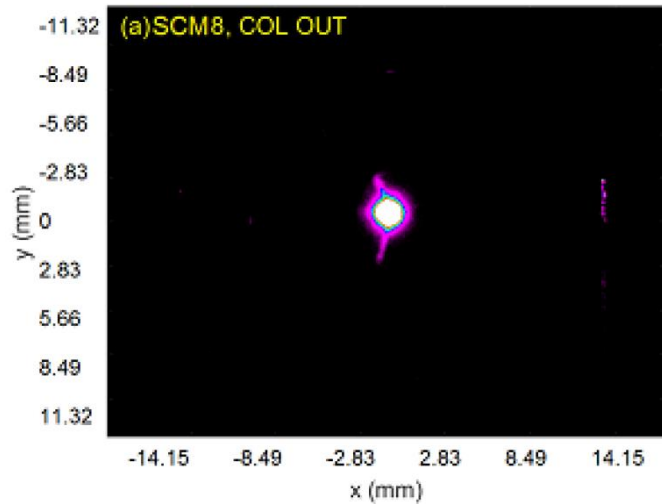
COL1, COL2, (COL4)を調整

典型的なコリメータ設定:
中心から先端まで2 ~ 4 mm

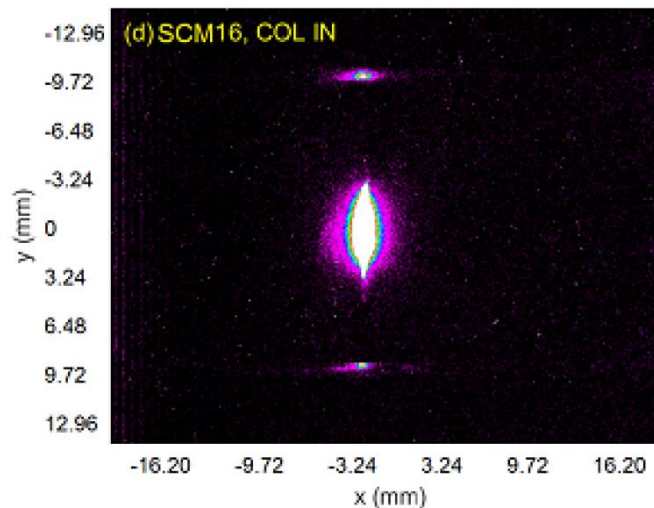
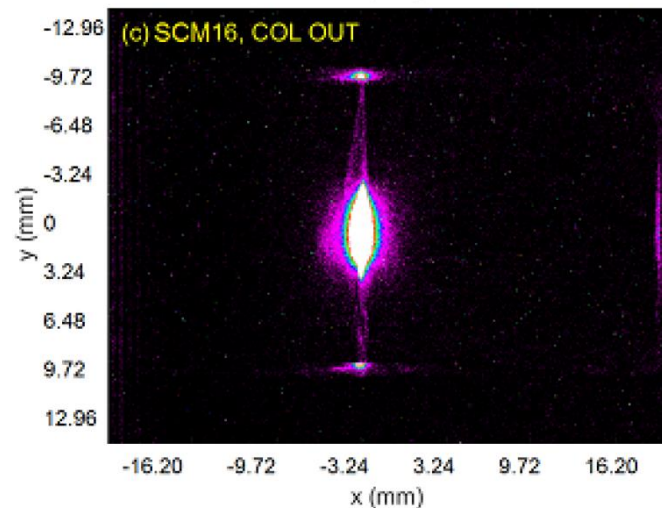


2. CW 10 mA運転 (コリメタの効果)

- コリメタ挿入前後でビームハローがどのように変化するかを測定した



入射合流部

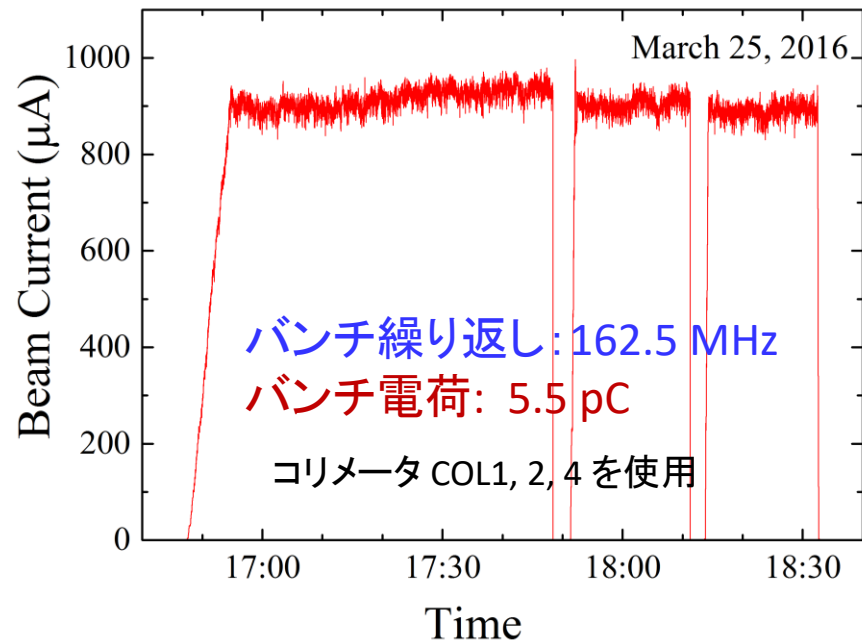
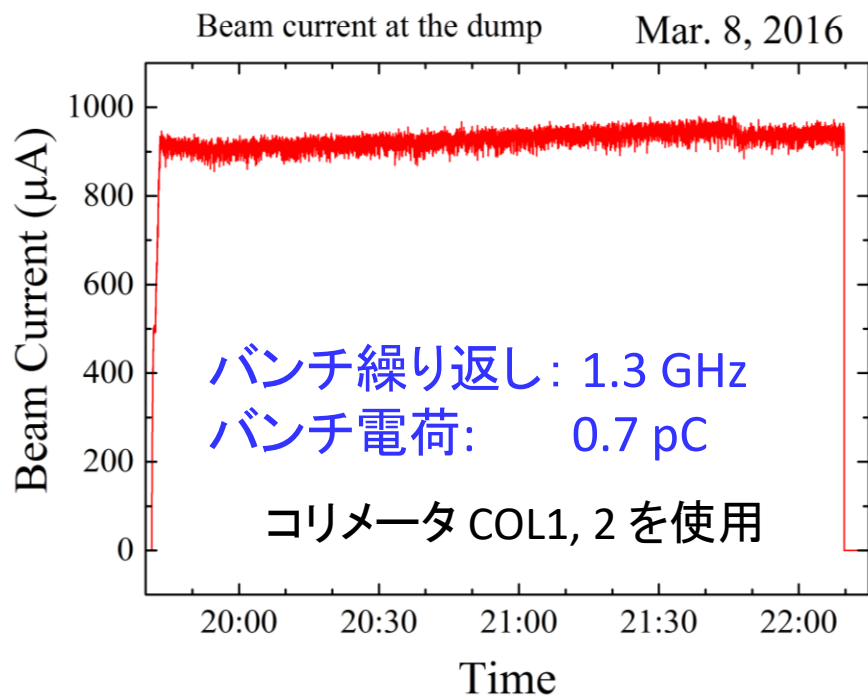


第一アーク部

コリメタによってビームハローのみが削り取られていることが確認できた

2. CW 10 mA (0.9 mA運転の達成)

- 2016年3月にCW 0.9 mA 運転を実証
- 0.9 mAではカソード寿命も問題ないことを確認



周回部でのビーム損失量の推定値

- コリメータ COL4 の場所で約 9×10^{-5}
- それ以外の場所で、1箇所あたり $\leq 2 \times 10^{-6}$
(天井で測定した線量率から推定)

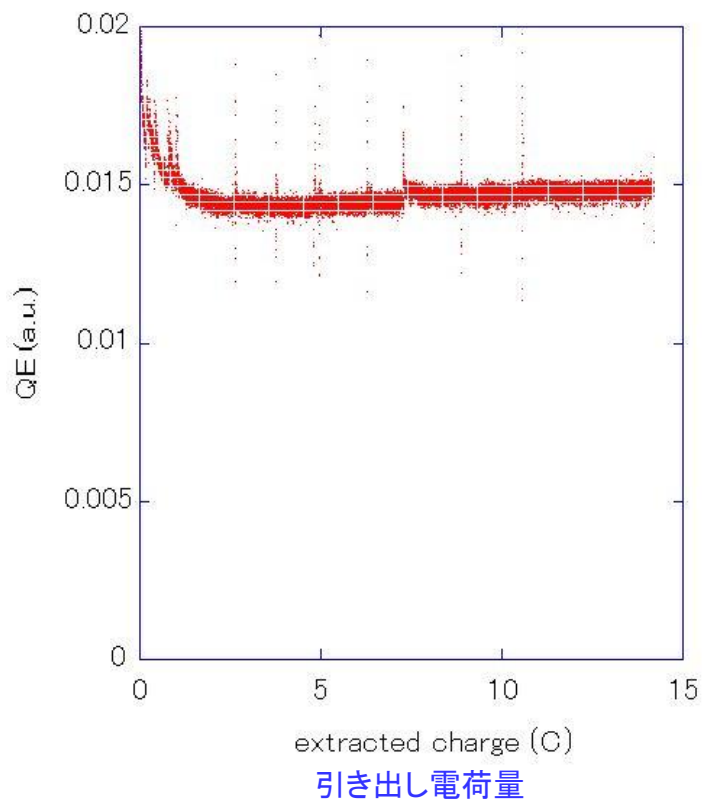
- CW 電流は 0.9 mA まで実証した。
- コリメータ以外の場所で、非常に低いビーム損失率 ($< 1 \times 10^{-5}$) を達成。
- ビーム損失制御法を確立できた。

CW運転中のカソード寿命

- CW 0.9 mAではフォトカソードの寿命は十分長いことを確認できた

NEA表面GaAsフォトカソードを使用

大電流運転中(2016/3/29)の
カソード量子効率(QE)の変化

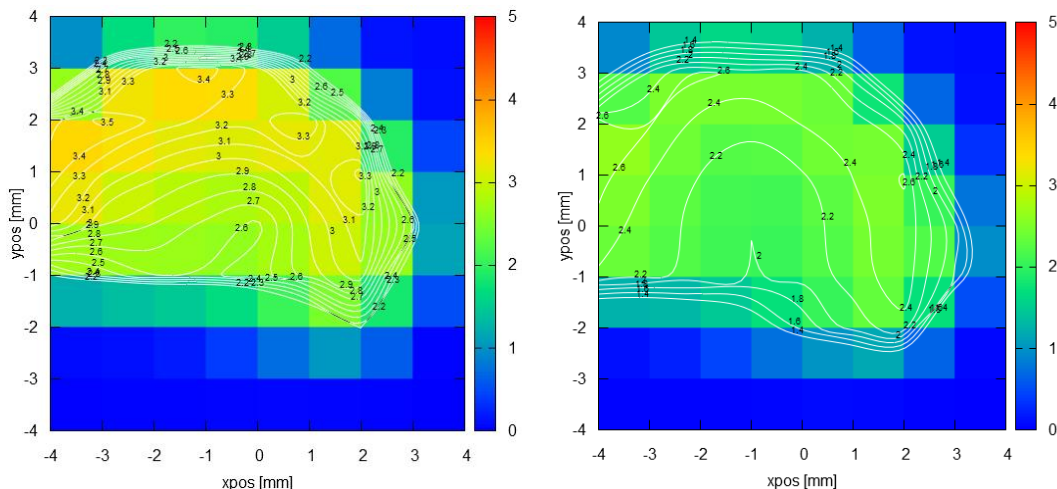


QEは運転開始直後に急速に下がるが、その後は上昇する傾向がある。

- 電子銃の到達圧力は約 1×10^{-9} Pa。
- 保管中のカソード寿命 (dark lifetime) は1000時間程度¹⁾
- 運転中の operational lifetime も十分長い。

1) 2015年には約6000時間

カソード使用前後のQEマップ (Quantum Efficiency)



カソード(2個目)設置
直後(2016/3/15)
QE ~ 2.6%



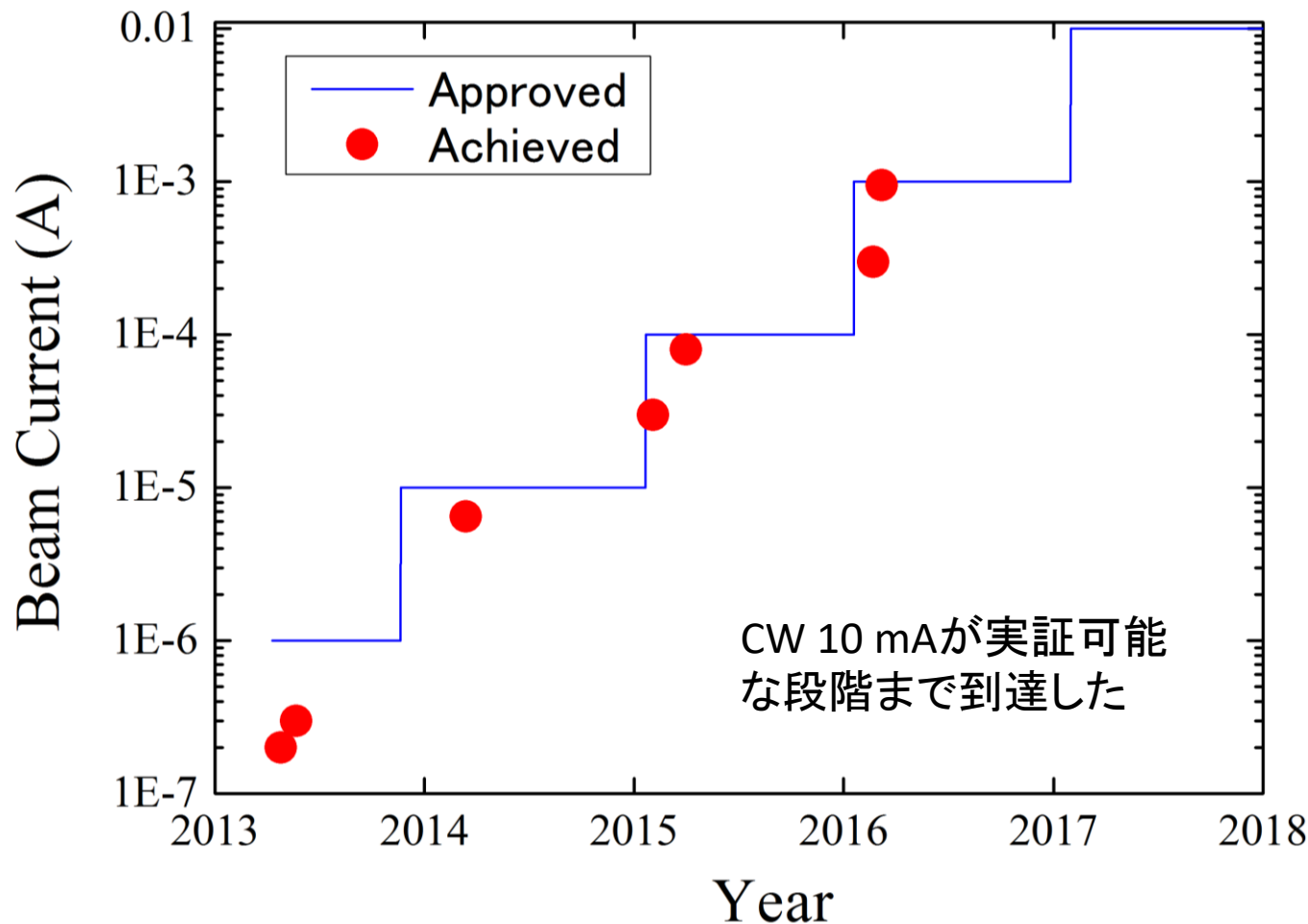
運転に使用後
(2016/3/31):
QE ~ 2.1%

約380時間経過
引き出し電荷量 25.6 C

坂中章悟、2016年日本加速器学会年会

山本将博他、ポスター発表 MOP043

2. CW 10 mA 運転(電流増強の履歴)



- 電流増強には、放射線申請に必要なビーム損失量の評価が必要
- 最初は仮定が多かったが、運転を重ねる毎にビーム損失現象の理解が進み、毎年CWビーム電流を10倍に増強することができた

3. ビームダイナミクスの理解

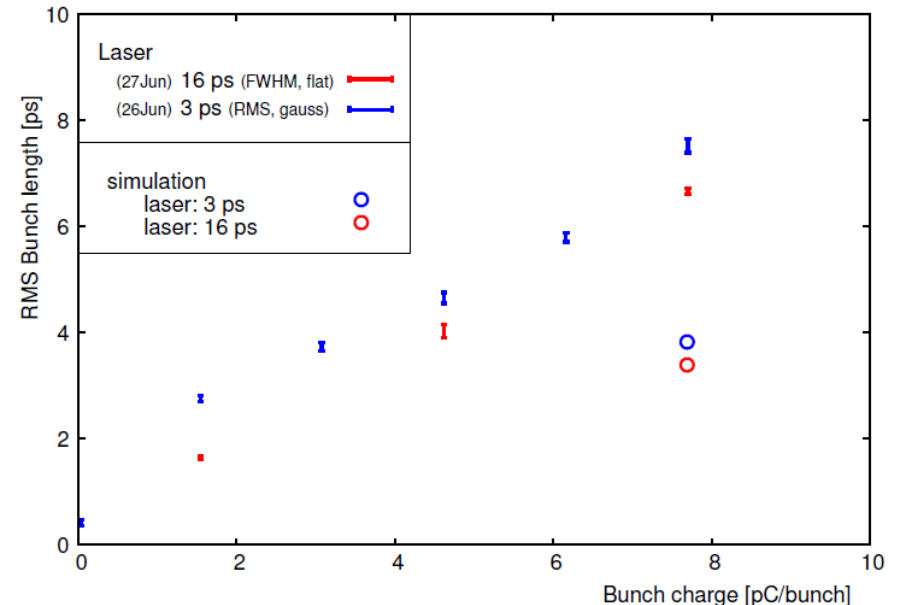
- ERLでは、電子銃で高輝度(低エミッタンス)ビームを生成し(規格化エミッタンス 0.1 mm mrad程度)、数 ps ~ 数 100 fsまでバンチ圧縮して電子ビームを利用することになる
- 高電荷密度であるため、空間電荷効果(入射部)、Coherent Synchrotron Radiation(CSR、周回部)がビームダイナミクスで重要となる
- これらの現象を理解し、モデルによる設計通りにビーム輸送すること(あるいはモデルを修正し、現実を再現できるようにすること)がcERL総合運転での重要な課題
- さらに、cERLでは周回部でもビームエネルギーが 20 MeVであるため、低エネルギー特有の現象の理解と対策が重要であった
 - 真空計(CCG)の磁石による漏れ磁場のビームへの影響 ⇒ 磁気シールドを追加することで対処
 - 電磁石のヒステリシスの管理 ⇒ 電磁石は最大 250 MeV程度のエネルギーを想定して設計していたが、cERLで現在使っているのはその1/10程度の磁場。磁場誤差の管理・補正法の確立が重要であった。

3. ビームダイナミクスの理解 (空間電荷効果)

- エネルギーの高い領域
 - 進行方向(時間方向)と横方向(水平・垂直方向)の運動は、基本的に独立となる
- cERLの場合(入射エネルギー 2.9 MeV, 周回エネルギー 20 MeV)
 - 空間電荷効果が支配的 ⇒ 進行方向と横方向の運動が強く結合。両方向のビームダイナミクスの理解・制御が重要

• 縦方向のダイナミクス(バンチ長、バンチ圧縮)

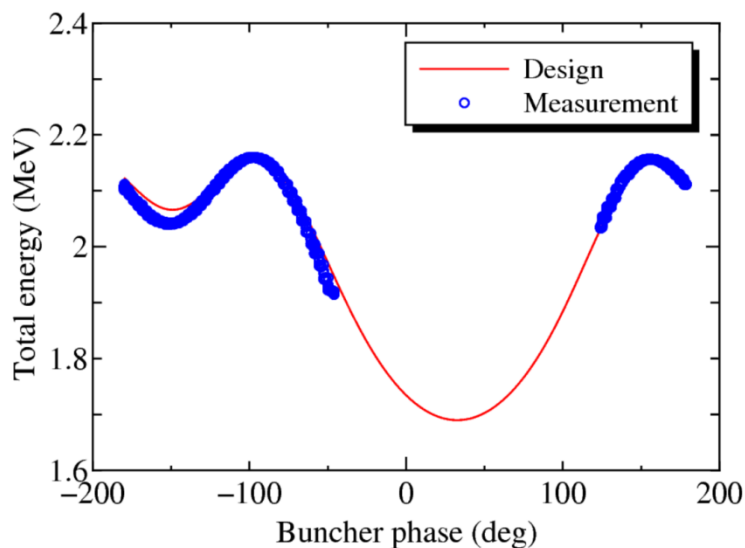
- 2013年に5 MeVビームに対して、電荷量 vs. バンチ長を測定
- モデル計算と測定されたバンチ長で大きなずれがあった
- 7.7 pCでは空間電荷効果が効く領域であり、バンチ圧縮のダイナミクス(加速空洞の位相調整)に加えて、空間電荷効果も理解できていないと精密な制御ができない



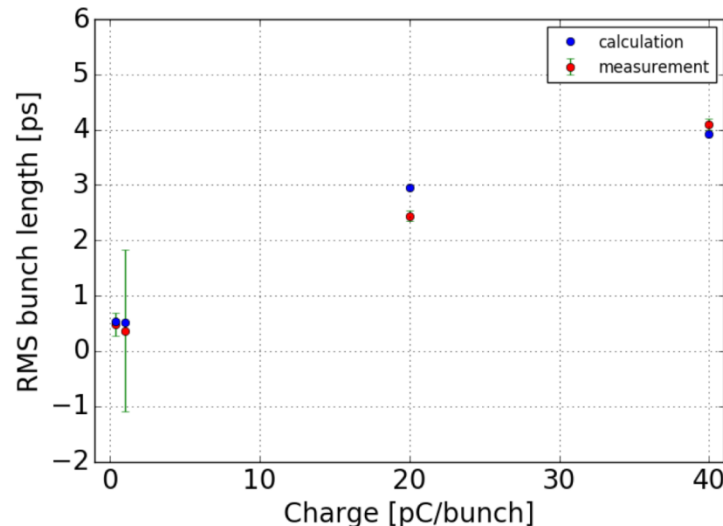
3. ビームダイナミクス(制御法の改善)

- 2017年3月の運転から新しい制御法を開発・導入
 - RF加速空洞の位相調整法を改善(モデル・シミュレーションと同じ調整法を実現できるようにした)

バンチャー位相とエネルギーの関係
(空間電荷効果なしの場合)



バンチ電荷 vs. バンチ長測定結果
(2017年3月)

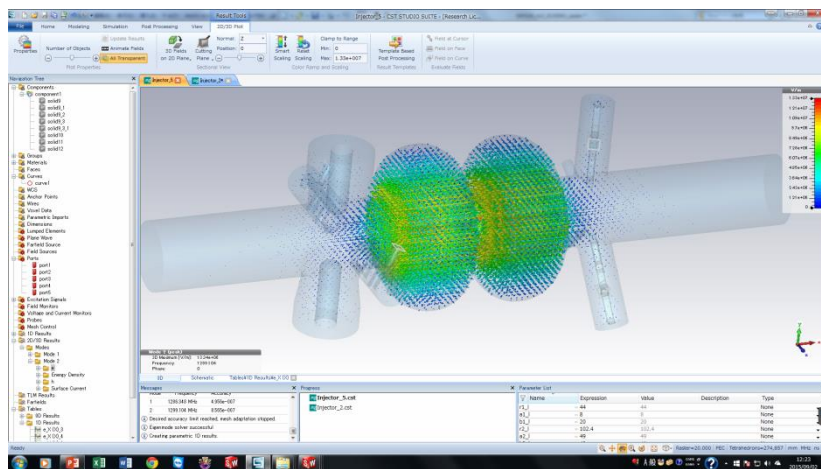
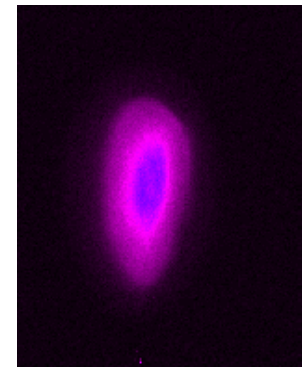
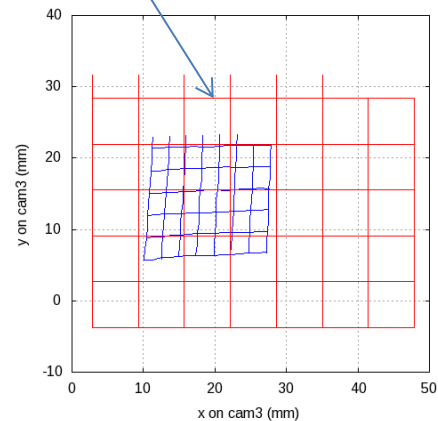
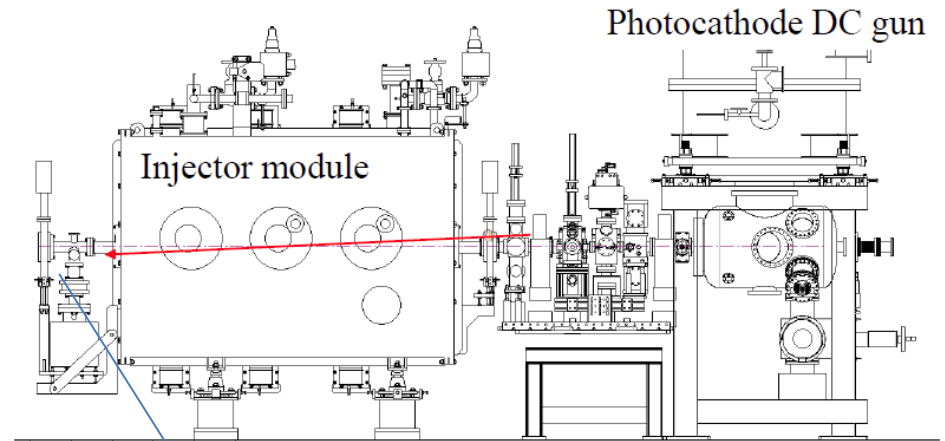


位相制御法の改善により、まずは空間電荷なしでモデルと実験がほぼ一致する状況まで制御できた

- 40 pCの高バンチ電荷でも、モデルと実験を一致させられる状態まで調整できるようになった
- 進行方向のダイナミクスはほぼ理解できた

3. ビームダイナミクス(横方向)

- 40 – 60 pCのバンチ電荷に対しては、まだ横方向のビームダイナミクスについて、モデルと現実の差を埋め切れていない
- ただし、差の原因はいくつかつかみつつある
 - 電子銃直後のレーザー導入ミラーによる空間電荷効果のひずみによる円筒対称性の破れ
 - 入射器空洞のHOMカプラに起因する、円筒対称性の破れ
- これらの効果は、空間電荷効果と合わさると下流で強い影響となって現れる(エミッタンスの増大)

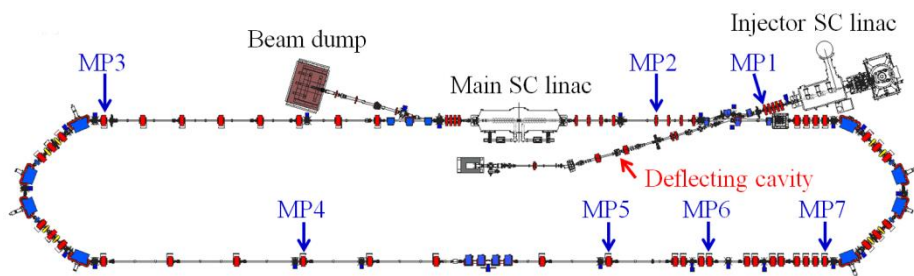


- 入射器空洞モデルの3次元化を行い、現象を理解しつつある。
- これらの新しいモデルを使って、輸送条件の再設計を行い、エミッタンスを下げるのが次の課題

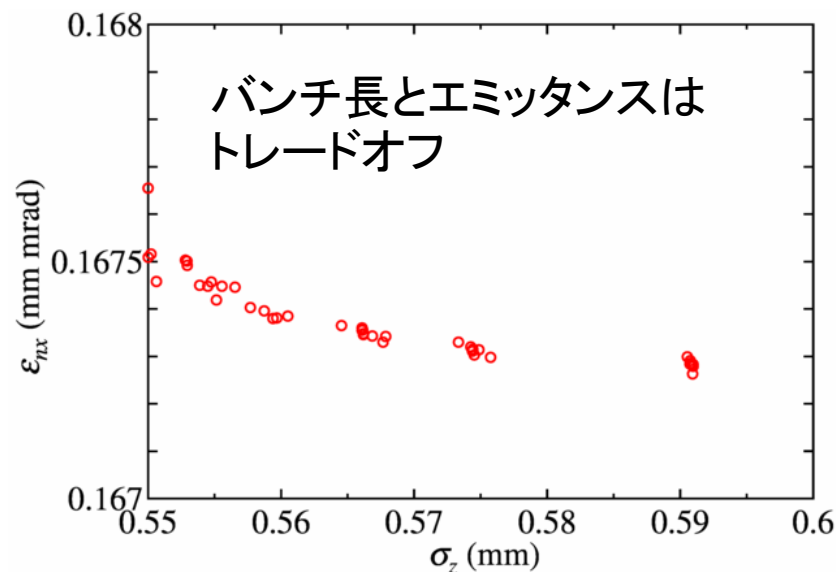
4. 高輝度ビーム輸送

- ERLで重要なこと

- **低エミッタンス・短バンチ長・大平均電流**を両立すること
- 空間電荷効果によって、低エミッタンスと短バンチ長が相反する関係になる
- ERLではエネルギー回収する(周回ビームが戻る)ため、多段バンチ圧縮が難しく、入射器で1~3 psまで最初から圧縮する必要がある ⇒ 低エネルギー領域での精密なビーム制御が要求される
- エミッタンスの評価: かならずバンチ長とセットで考える必要がある



エネルギー回収運転のためには、輸送条件のマッチングが必要となる。これらの条件の追加されるため、周回運転用のビーム性能は制限されてくる。



7.7 pC/bunch, 入射器直後の計算例

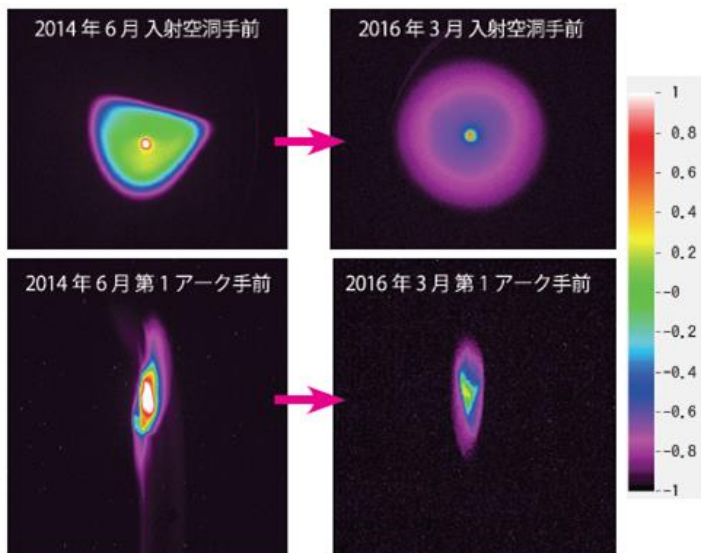
ビーム性能を達成するために、低バンチ電荷から段階的に、ビームダイナミクスの理解、補正・制御法の開発を着実に進めてきた。

4. 高輝度ビーム輸送（調整法の開発）

- 電子銃から高輝度電子ビームを生成しても、下流への輸送条件が設計からずれると、ビーム品質が悪化する
 - 特に、低エネルギー領域では、誤差磁場等の影響を受けやすいこと、空間電荷効果が支配的であることにより、わずかなずれでも下流で大きな品質悪化を引き起こす
- ⇒ 空間電荷効果を含めて輸送条件を調整する方法を確立する必要がある

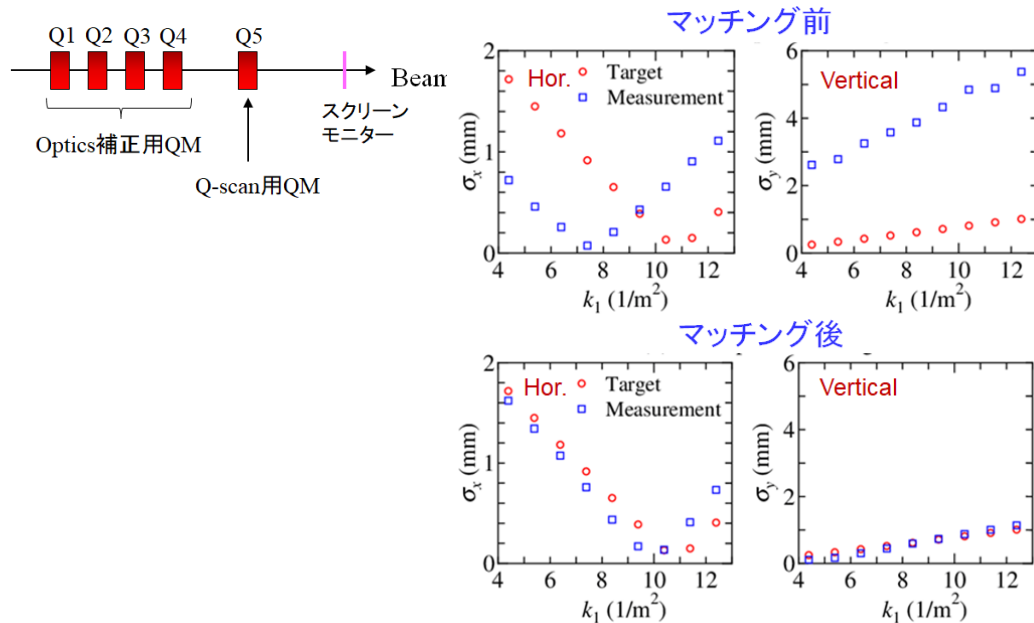
A) 電子銃直後の空間電荷効果の補正

- 電荷密度を下げることで、空間電荷効果を緩和、円筒対称性を回復させた




B) ビーム光学関数のマッチング

- 空間電荷込みでビームサイズの応答関数を合わせる手法を開発

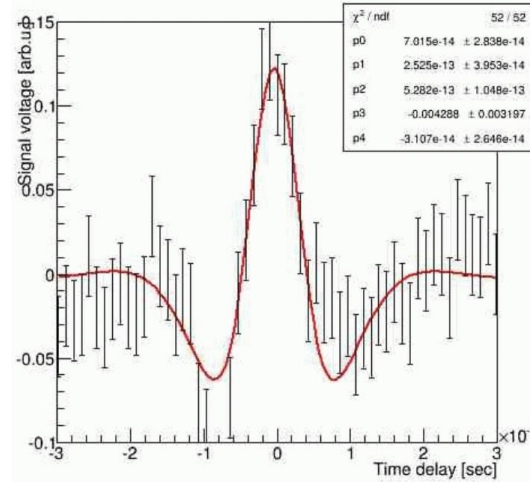
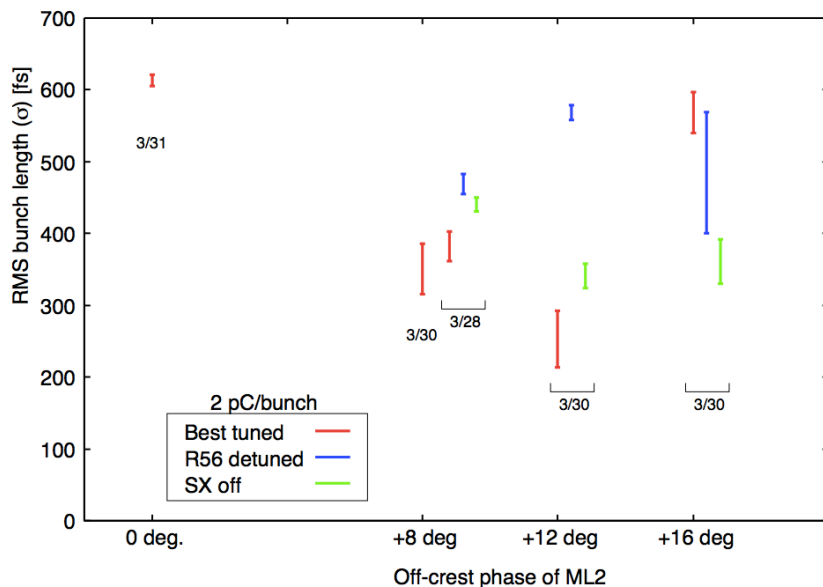
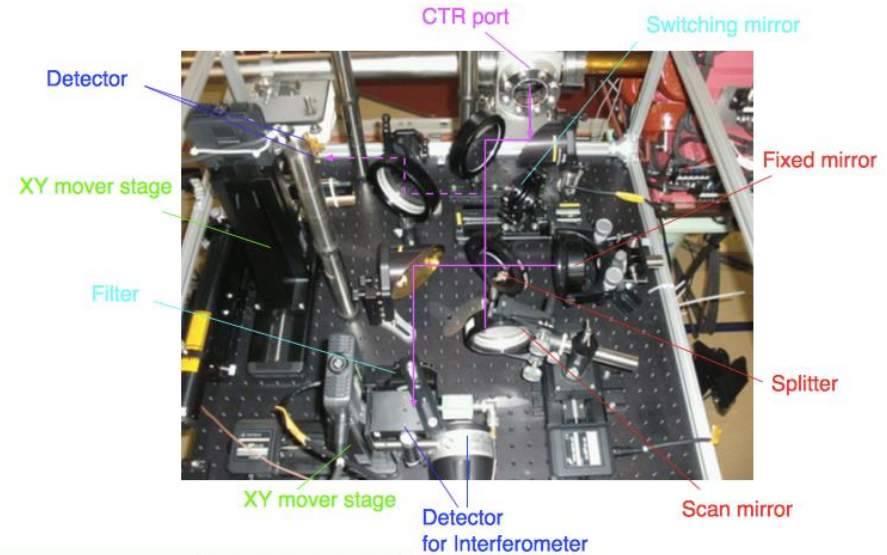


4. 高輝度ビーム輸送 (達成した規格化エミッタンス)

- 極低バンチ電荷 (< 50 fC/bunch)
 - ほぼカソードで生成されるエミッタンスを保持して周回を達成 (0.13 ~ 0.19 mm mrad)
 - ほぼ設計通り
 - 低バンチ電荷 (0.5 pC/bunch)
 - バンチ長: 3 ps
 - 0.3 ~ 0.41 mm mrad (周回部)
 - 設計から2倍弱
 - 中バンチ電荷 (7.7 pC/bunch)
 - バンチ長: 3 ps
 - 0.8 mm mrad (入射器)、1.0 ~ 1.6 mm mrad (周回部)
 - 設計から2~3倍
 - 高バンチ電荷 (40 pC/bunch)
 - バンチ長: 3-4 ps
 - 0.9 ~ 2.4 mm mrad (入射器)、2.0 ~ 10 mm mrad (周回部)
 - 最大設計の10倍程度
 - 低エミッタンス・短バンチ長・大バンチ電荷を実現する上で重要となること
 - 横方向、進行方向ビームダイナミクスを精密にモデルに合わせて制御する必要がある
 - モデル計算と実験結果を随時比較・検証し、改善策を提案・検証し、運転毎に設計に近づけつつある
- 
- 空間電荷効果の理解も進んできた
 - 合わせて、装置の改良・補正法の開発を進めてきた。
 - ただし、バンチ電荷を上げる毎に新たな課題が見えてくる
 - 現在は 60 pC の高バンチ電荷領域でのモデル修正と補正法の開発に取り組んでいる

4. 高輝度ビーム輸送(バンチ圧縮)

- 周回部では、バンチ圧縮後のバンチ長は数100 fsとかなり短くなる
- これを測定するモニターとして、ビーム輸送路上にSiターゲットを置いて、そこからのCTR(Coherent Transition Radiation)をMichelson干渉計で測定 (~THz)
- 測定されたスペクトラムから、バンチ長を推定



Courtesy of Y. Honda

- 周回部におけるバンチ長測定法を開発した。
- バンチ長 250fs (RMS) @2pC/bunch まで圧縮できていること実証。

cERL性能まとめ(入射器)

2017年3月までの運転で達成した性能

Parameter	Achieved performance	Target values	Remark
Beam energy T	5.6 MeV (typ.), 5.9 MeV (max.)	5 MeV (typical)	OK
DC voltage for DC gun V_{gun}	450 kV in operation (500kV achieved)	500 kV	OK
Acceleration Energy E_{acc}	7 MV/m (typ.)		OK
Normalized Emittance (Very low bunch charge)	$\approx 0.07 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (@~10 fC/bunch, T=390 keV)	0.1 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$	OK
Normalized Emittance (Low bunch charge)	$\approx 0.17 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (@0.02 pC/bunch, T=5.6 MeV)	0.1 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$	OK
Normalized Emittance (Medium bunch charge)	$\approx 0.8 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (@7.7 pC/bunch, T=5.6 MeV)	$\leq 1 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (at the beginning) 0.1 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (aggressive)	OK Still
Normalized Emittance (High bunch charge)	1.5~3 (@40 pC/bunch)	1 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$	still
Momentum spread $(\sigma_p/p)_{\text{rms}}$	$< 10^{-3}$ (< 1 pC/bunch) (1.5 - 2.5) $\times 10^{-3}$ (@7.7 pC/bunch)	$\leq 10^{-4}$ (3 GeV ERL)	Should be OK

H. Kawata, ERL17 workshop

cERL性能まとめ(周回部)

Parameter	Achieved performance	Target Value	Remark
Energy of the electron beam E	19.9 MeV	35 MeV	Still
Energy of Injector E_{inj}	2.9 MeV	5 MeV	Still
Average Current I_0	6.5 μ A (steady state)、 1mA (steady state)	10 μ A 10 mA	OK Should be OK
Field gradient of main linac E_{acc}	8.2 MV/m	15 MV/m	Still
Normalized Emittance at RL (Very low bunch charge)	$\approx 0.13 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (@ $\sim 0.05\text{pC}/\text{bunch}$)	0.1 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$	OK
Normalized Emittance at RL (Low bunch charge)	0.3 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (@0.5 pC/bunch)	0.1 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$	Not bad
Normalized Emittance at RL (Medium bunch charge)	$\sim 1.0\text{-}1.6\mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (@7.7 pC/bunch, E=19.9 MeV)	$\leq 1 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (Beginning) 0.1 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (aggressive)	Should be OK Still
Normalized Emittance at RL (High bunch charge)	2-10 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (preliminary) (@40 pC/bunch)	1 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (@77 pC/bunch)	Still we need an adjustment time
Momemtun Spread $(\sigma_p/p)_{rms}$	1.2×10^{-4}	$\leq 10^{-4}$ (3 GeV ERL)	OK
Jitter of Momentum $(\Delta p/p)_{rms}$	6×10^{-5}	$\leq 10^{-4}$ (3 GeV ERL)	OK
Bunch compression (σ_t)	0.25ps @ 2pC/bunch	0.1ps	Not bad

H. Kawata, ERL17 workshop

目次

- 開発・実証すべき項目
- cERL総合運転(コミッショニング)の概要
- 達成された成果
- 得られた知見と今後の展望
- まとめ

得られた知見と今後の展望

- cERLの総合運転を通して、課題としていることの他にも多くの知見を得ることができた
- 想定していた通りになったこともあるが、当初想定していなかったことの発見や失敗、それを克服するための方法の開発など、実際の加速器開発・運転を実施しなければ得られない多くの知見が得られた
- ここでは、そのうちのいくつかを紹介する
 - 低エネルギー領域における新たなバンチ長測定法の開発と実証
 - CW 運転中の軌道不安定とその改善
 - 超伝導空洞を運用する上での注意すべき点
 - 10 mA CW 運転へ向けての展望

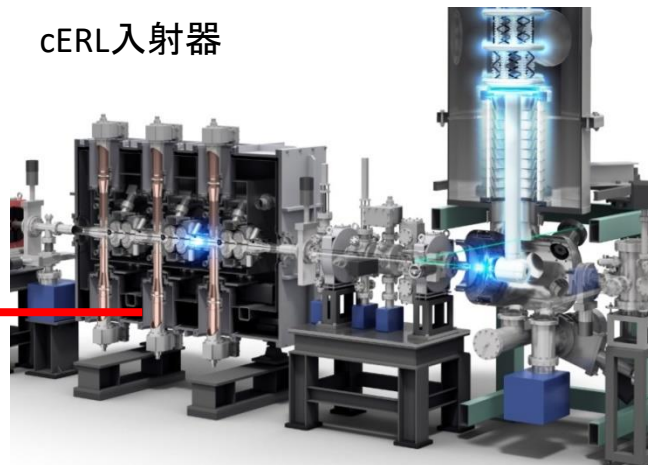
新しい手法の開発・バンチ長測定

- 発端：入射器空洞内の軌道調整を行う際に、位相を変えたときの空洞による収束力変化を利用していた
- ⇒ 空洞の中心をビームが通ると、加速位相を変えても空洞下流のビーム位置は変化しない

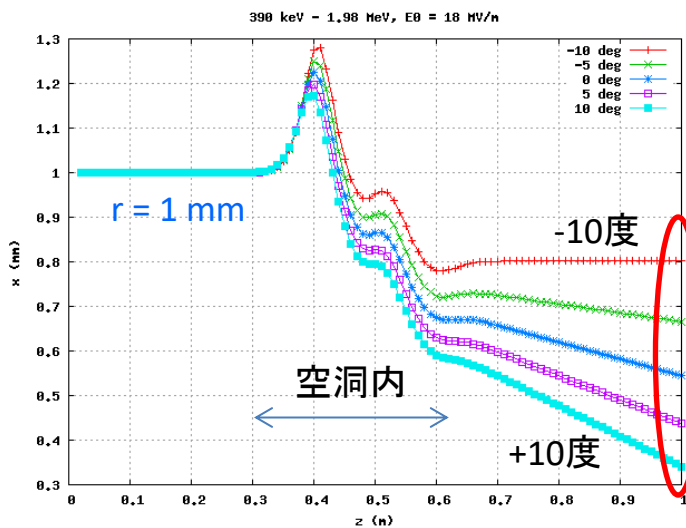
2-cell空洞3台で加速している 1.3 GHz



cERL入射器



空洞中心からのビーム位置 r (mm)

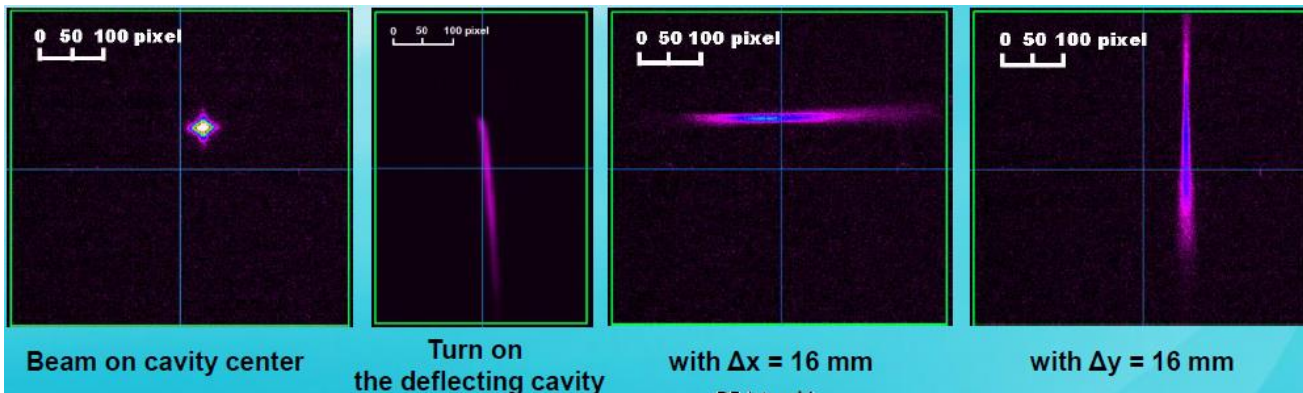
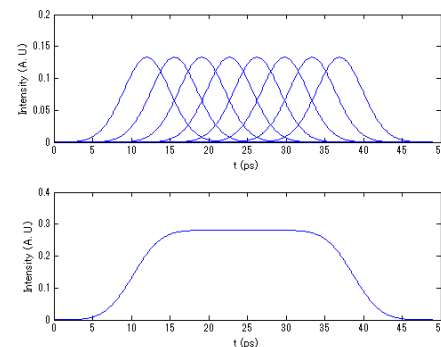
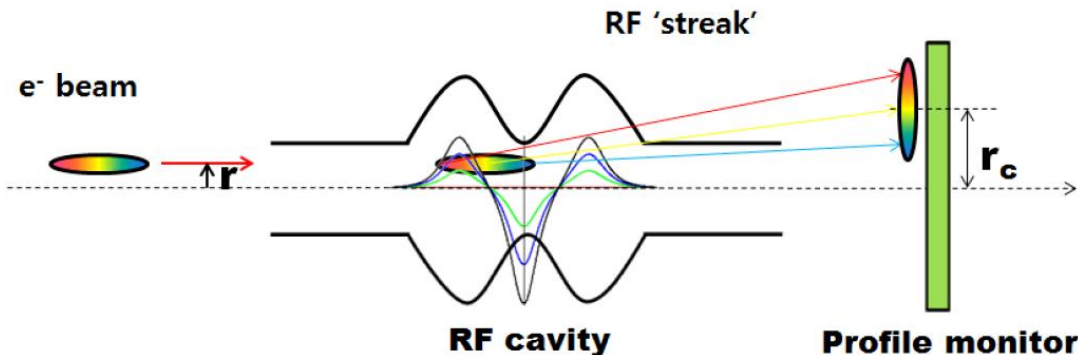


© Ray Hori/KEK

- 空洞の中心を通過していないとき、中心からの距離に比例した力が働き、軌道が変化する
- しかも、位相(空洞に入るタイミング)に依存
- あれ、これってバンチ長測定に使えないか？

新しい手法の開発・バンチ長測定

- 空洞内に有限のオフセットを持った軌道を通すとき、加速位相によって横方向に射影される位置が変化する
⇒ バンチ内の進行方向分布を横方向に射影することが可能



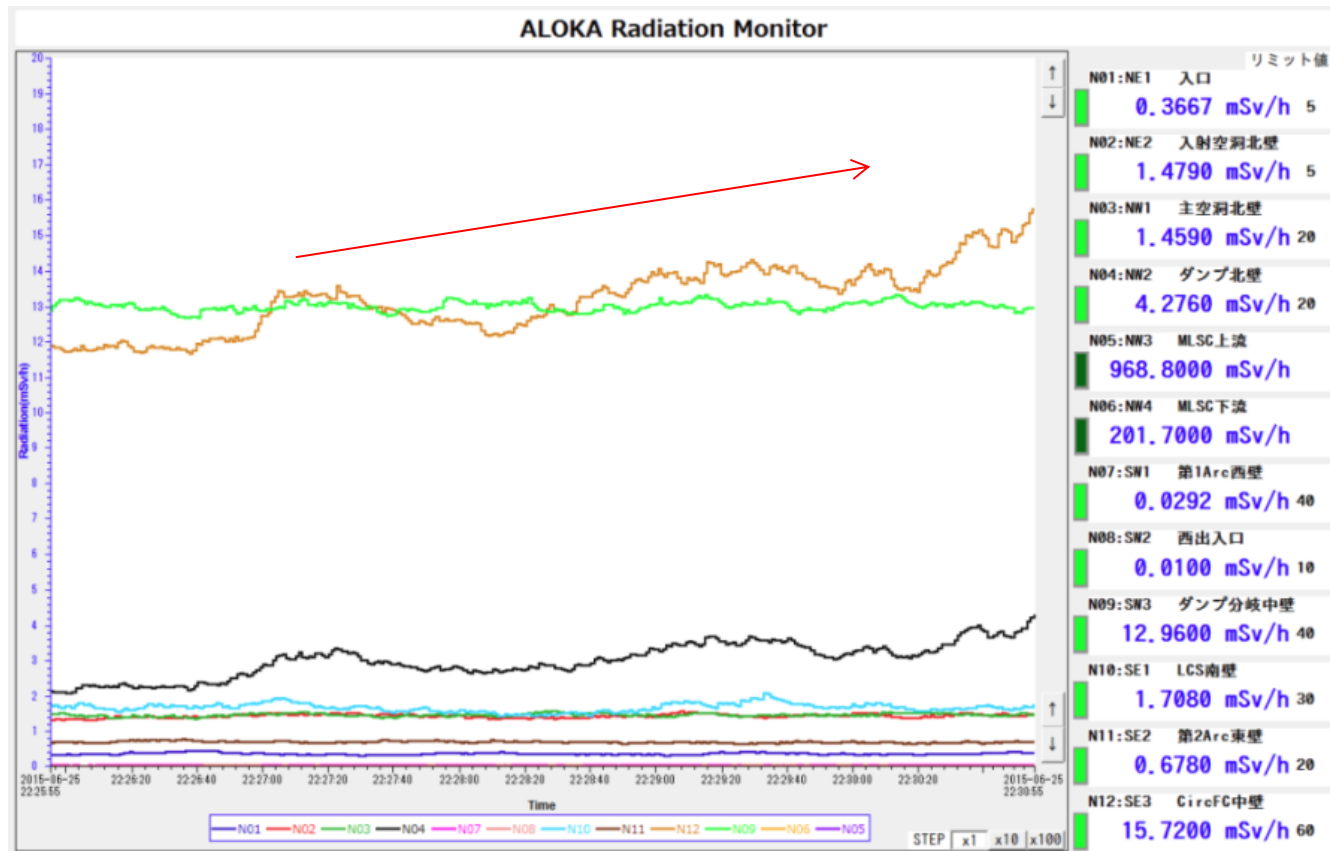
- cEERLで実証してみた結果
- 確かにバンチ長が測定できた
- しかも、追加の偏向空洞はいらない
- 原理は結構複雑・・・

- 後からわかったこと：本方法の有効な範囲は2 MeV程度まで
- それでも、電子銃直後のバンチ長を測定する上では本方法は有効なので、実用している(パルススタックの調整など)。

J. G. Hwang, et al.
submitted to PRAB.

克服したこと・CW運転の安定化

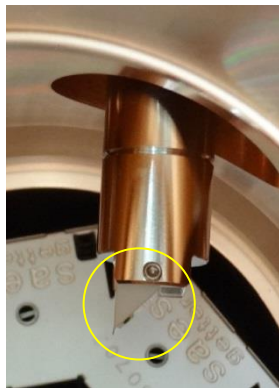
- 2015年のCW運転
 - CW 0.075 mA (バンチ電荷 0.46 pC)
 - 調整直後は良いが、徐々に軌道変動が生じた
 - それに合わせて、放射線発生量も増大、ついにはインターロックによってビーム停止 ⇒ CW運転を継続する時間が限られてしまう(困った・・・)



克服したこと・CW運転の安定化

- 気づいたこと
 - 時間の経過とともに、軌道変動が起きている ⇒ 何かチャージアップしていない？
 - そういえば、レーザー導入ミラーがガラス製(絶縁体)だったのでチャージアップするかも…

2015年夏の停止期間中にミラーを金属製に交換



アルミ蒸着ガラス鏡

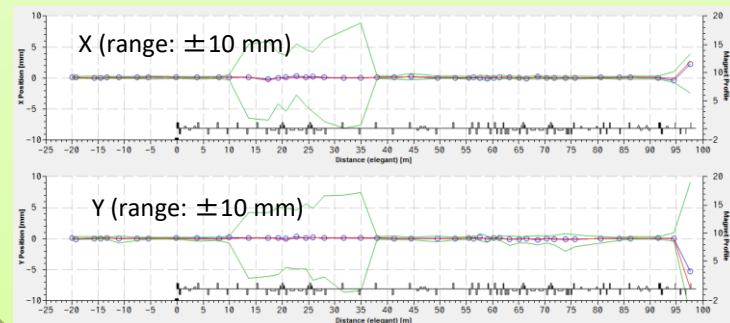


金属鏡

- CW運転はどうなったか？
 - CW 0.9 mA で試験
 - 軌道は極めて安定
 - 加速器室内の線量率も変化なし ⇒ CW運転の安定化が達成された



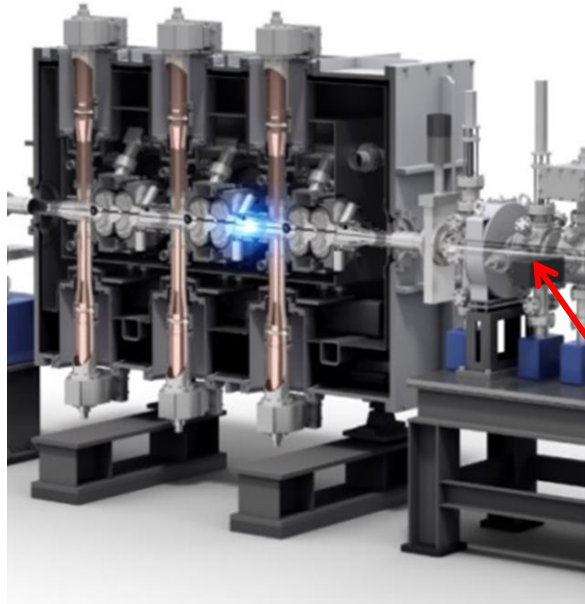
Radiation level (17:44-17:49)



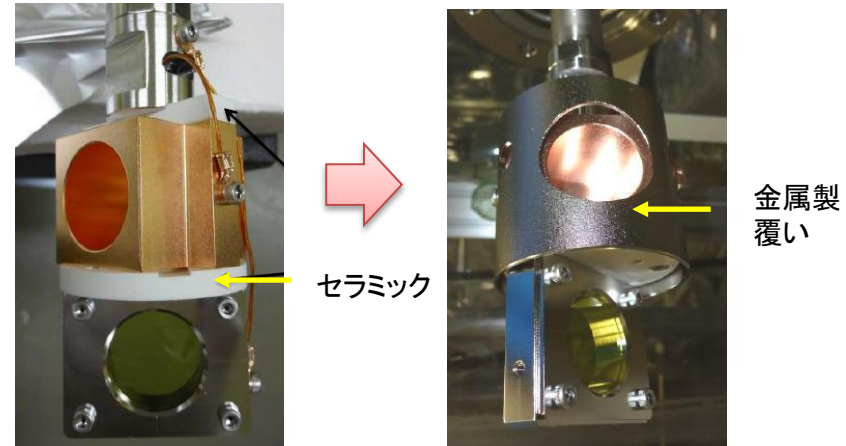
運転1時間の軌道の上書き ⇒ ほぼ変動なし

超伝導空洞を運用する上での注意すべき点

- 同様に絶縁体がチャージアップして、放電が起きるとい現象を観測した
- 入射器超伝導空洞からはわずかな暗電流が発生し、空洞上下流に輸送されている
- あるときに、空洞の加速勾配を高めて（暗電流も増加して）運転していた
- 上流に設置された、電荷量測定用のファラデーカップを挿入していたときに放電が発生し、入射器空洞の性能劣化が発生するという事象がおきた



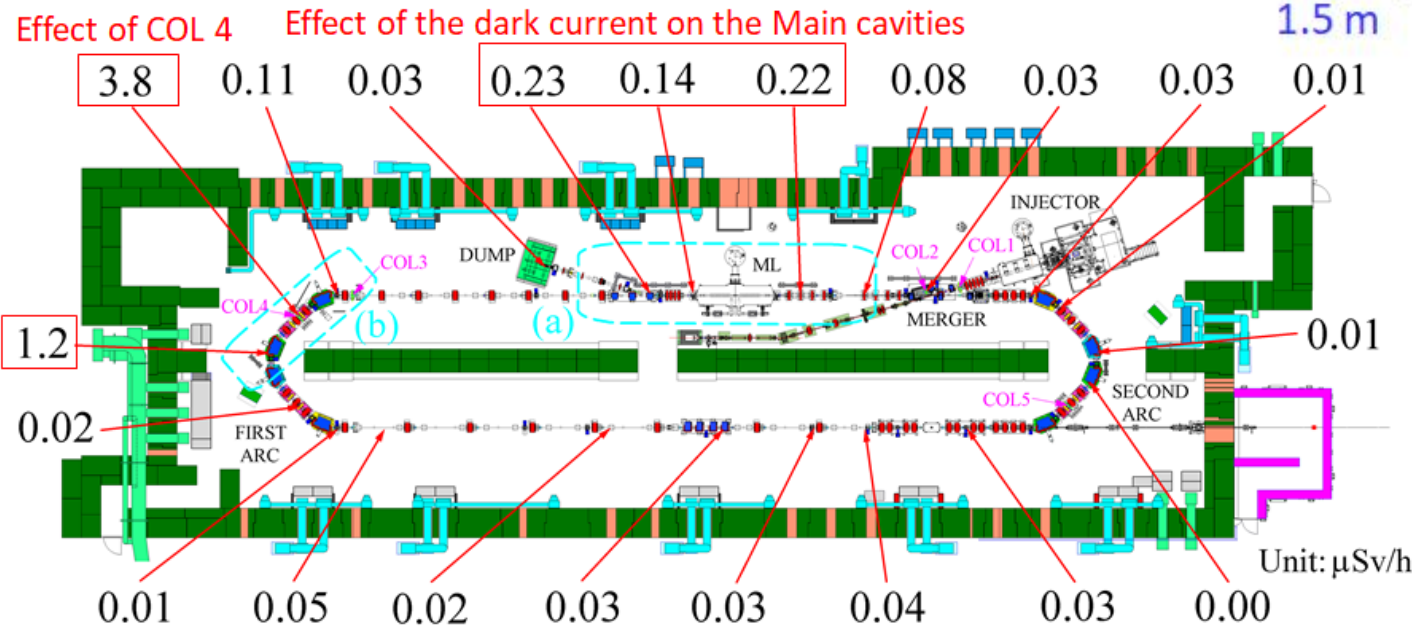
電荷量測定用のファラデーカップ



- 入射器空洞側からも絶縁用のセラミックが見通せる状態であった
- ここに空洞からの暗電流が当たり続け、チャージアップによる放電が発生したと推測
- 対策：絶縁体が見えないように金属製の覆いを追加
- 教訓：暗電流を発生させる超伝導空洞回りでの絶縁体の使用には十分気を付けること

CW 10 mAに向けての展望

加速器天井での線量率測定結果



S. Sakanaka et. al.;
IPAC'16 (TUPOW038)

H. Kawata, ERL17
workshop

- 2016年のCW運転: バンチ電荷 5.5 pC, ビーム繰り返し162.5 MHz
 - このバンチ電荷は、繰り返しを1.3 GHzにしたときの 7 mA に相当
- 一部遮蔽の増強は必要だが、この測定結果から外挿しても1.3 GHz, 10 mA (7.7 pC) を十分許容できるビームロス量に抑え込めることが実証できた

世界の研究機関とのネットワーク構築

- 先行する研究機関からの協力
 - 米国Cornell大学、米国Jefferson Lab.、米国BNLから多くの経験に基づくアドバイスをいただき、それをcERLの設計、運転に反映させることができた
 - 電子銃開発においては、cERL用の電子銃構造が一つの標準となった(米国Cornell大学も採用)
- 総合運転時の研究者の受け入れ
 - 韓国Kyungpook 国立大学からの修士・博士課程学生の受け入れ・指導 (博士号を取得した学生: 現在はドイツHZBで活躍中)
 - CERN、中国応用物理学研究所(上海)、カナダTRIUMF等からの研究者のコミッションング参加
 - 民間企業からの受け入れ・指導(三菱重工、東芝、...)
 - 学術的なことに関して、オープンに情報交換・交流を行うことができた
- cERLで開発した事柄を活かしていくこと
 - 米国SLACとの協力(大電流ビーム生成に向けた超伝導電子銃開発)
 - ドイツHZBのERL開発への協力(2018年9月頃に予定されている総合運転への参加・協力を予定している)
 - 開発したCSRコードを Jefferson Lab. に提供し、共同研究を実施
 - iBNCTコミッションングへの協力(陽子加速器で大きく異なる加速器へもcERLで開発してきた項目・経験を活かした)

目次

- 開発・実証すべき項目
- cERL総合運転(コミッショニング)の概要
- 達成された成果
- 得られた知見と今後の展望
- **まとめ**

まとめ(達成状況)

- エネルギー回収運転の実証
⇒ ほぼ100%の回収効率を実証
- 10 mA CWビームの生成・加速・輸送、制御する手法の開発
⇒ CW 0.9 mA 運転を達成、CW 10 mA 運転への見通しも立った
- ビームダイナミクスに関わる物理(空間電荷効果、CSR 等)の理解と設計への応用
⇒ 空間電荷効果、CSRの理解が進んだ。補償法も段階的に開発。
- 低エミッタンスかつ短バンチ長ビームを輸送する手法の開発 (7.7 pC のバンチ電荷に対して、1 mm mrad 以下のエミッタンスの実証。77 pC の高バンチ電荷(CW 100 mA 相当)・低エミッタンスビームの生成・輸送)
⇒ 7.7 pC ではある程度エミッタンスを下げられた、高バンチ電荷(~60 pC)でのエミッタンスはまだ下げられていないが、低減するための対策を実施している
- アーク部を利用した磁気的なバンチ圧縮技術による約100fs の極短バンチビームの生成と輸送
⇒ バンチ長測定系を開発、250 fs までのバンチ圧縮を実証

まとめ(新たな知見と今後の展望)

- 新たな知見
 - 低エネルギー領域で有効な新たなバンチ長測定法を開発
 - 低エネルギービームに対する諸現象(誤差磁場、電磁石のヒ履歴効果、速度が光速に達していない影響等)
 - CW 運転の安定化を達成
 - 超伝導加速器を運転する上での重要な知見を得ることができた(絶縁体の使用には注意が必要)
- 今後の展望
 - CW 10 mA への見通しは立った(一部機器の増強と、電流増強の放射線申請が必要)
 - 電子銃単独運転ではあるが、高バンチ電荷(~ 60 pC)における空間電荷効果の理解と補償を目的としたビーム試験を続けている(可能であれば、超伝導空洞を込みで運転して低エミッタンス化試験を行っていきたい)
 - THz光生成などの試験
- 線形加速器の大電流CW化に重要な、CW運転における知見を多く得られている。これらは、自由電子レーザーや素粒子実験などでのCW線形加速器の開発で重要な知見となる。

Backup slides

ERL光源利用時に必要となる加速器性能

- 3 GeV ERL光源で想定される運転モード

	High-coherence mode	High-flux mode
Beam energy	3 GeV	
Average beam current	10 mA	100 mA
Bunch charge	7.7 pC	77 pC
Repetition rate of bunch	1.3 GHz	
Normalized emittance	0.1 mm mrad	1 mm mrad
Emittance at full beam energy	17 pm rad	170 pm rad
Energy spread	2×10^{-4}	2×10^{-4}
Bunch length	2 ps	2 ps

挑戦的な値はどれか？

- 平均ビーム電流 100 mA
- 規格化エミッタンス 0.1 mm mrad

- 平均ビーム電流 100 mA
 - これだけの電流を生成し続ける電子源開発が必要
 - さらにこれを加速し続ける加速空洞開発が必要

- 0.1 mm mradのエミッタンス
 - この小さい初期エミッタンスを実現するカソード材質
 - これを悪化させない輸送法(空間電荷効果:クーロン斥力の補償が鍵)

- 100 mAに必要な電力とビームを捨てる時の出力

エネルギー回収をしない場合

- 電力: GWクラス ($100 \text{ mA} \times 3 \text{ GeV} = 300 \text{ MW} + \text{空洞による損失等}$)
- 捨てる出力: 300 MW

エネルギー回収をする場合

- 電力: 数十MWクラス ($100 \text{ mA} \times 10 \text{ MeV} = 1 \text{ MW} + \text{冷凍機の運転等}$)
- 捨てる出力: 1 MW

線形加速器の大電流化に向けてはエネルギー回収が一つの解になる



それでは、他の加速器性能はどうか？

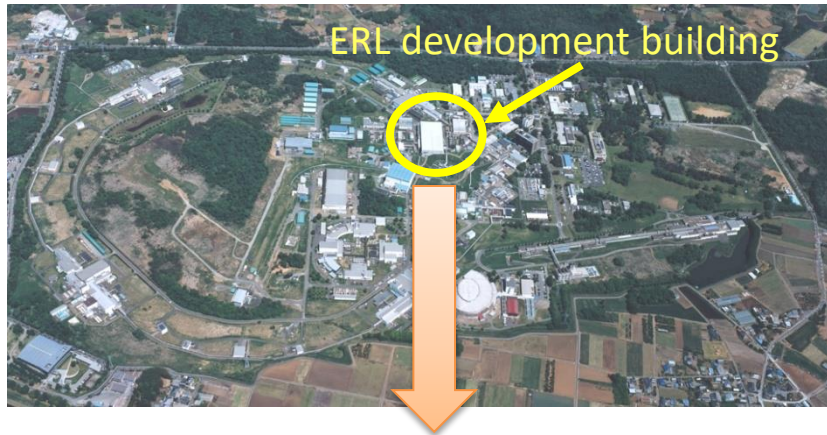
ERL光源実現に向けての課題

- 光源加速器に必要な性能: 安定な光(変動しない、中断しない)、低いコスト(建設・運転)
- 光源利用に向けたERL加速器実現の課題(未知数は何か?)
 - 高輝度・大電流電子ビームの生成:
 - 100 mAを供給し続ける電子源はこれまでにない
 - 大電流電子ビームの加速:
 - 100 mAを加速し続ける超伝導加速空洞はこれまでにない
 - ビーム性能:
 - 大電流・低エミッタンス・短バンチの両立を実証することが必要
 - 安定性(長時間・安定に、一様に):
 - 貯蔵リングのような安定化機構がないので、変動源を断つことが必要
 - ユーザー利用を中断する原因: カソード交換頻度(カソード寿命が重要)、超伝導空洞の停止頻度
 - 運転コスト:
 - エネルギー回収は一見エコっぽく見えるが、ビーム出力とは別に、超伝導空洞を2~4 Kに冷却するための冷凍機の運転にコストが掛かる。
 - 放射線遮蔽:
 - エネルギー回収によってダンプに捨てる出力はかなり下がる。が、輸送中にどこで、どれくらいビーム損失が起きるのかは、試験機で検証する必要がある。



要素技術開発とともに、光源加速器としての総合性能を検証する必要がある

実証機としての compact ERL (cERL)



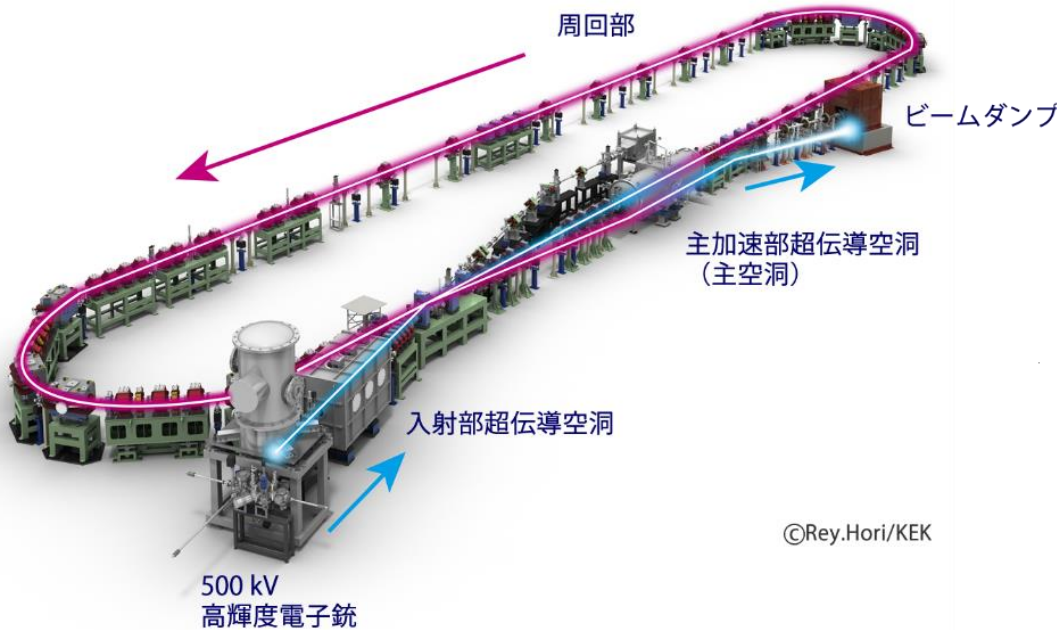
compact ERLの目的

- 鍵となる装置のR&Dと安定な運転の実証
- 超低エミッタンスビームの生成・加速
- エネルギー回収の実証
- 加速器総合性能の確認

設計段階のパラメタ
 (「コンパクトERLの設計研究」より)

Parameters of the Compact ERL

	Parameters
Beam energy (upgradability)	35 MeV 125 MeV (single loop) 245 MeV (double loops)
Injection energy	5 MeV
Average current	10 mA (100 mA in future)
Acc. gradient (main linac)	15 MV/m
Normalized emittance	0.1 mm·mrad (7.7 pC) 1 mm·mrad (77 pC)
Bunch length (rms)	1 - 3 ps (usual) ~ 100 fs (with B.C.)
RF frequency	1.3 GHz



ERLを構成する基本要素をすべて含む

鍵となる開発要素

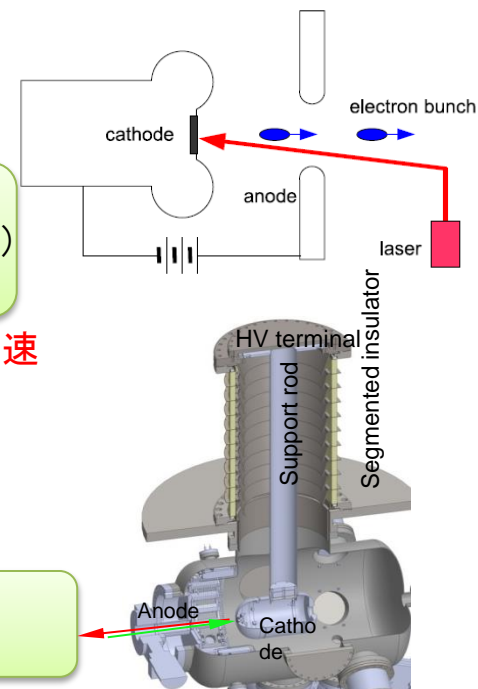
電子銃

- 高品質・大電流・長時間運転の3つを同時に満たすことが必須

⇒ 「光陰極を用いたDC電子銃」を選択

高品質のため：空間電荷効果を弱める⇒高い電圧が必要 ⇒ 500 kV
高品質+大電流のため：GaAsカソードの採用（NEA表面が長寿命化のカギ）
長寿命化するため：カソード周りの真空条件を良くする（極高真空開発）

- 目標設定：100 mA (77pC/bunch)で1 mm mradを切る電子ビームを、500 kVで加速



加速空洞

- 大電流を高い加速勾配でCW運転で加速することが必須

⇒ 「超伝導加速空洞」を選択

入射器超伝導空洞：2-cell 空洞（compact ERLでは3台、3 GeV光源では6台）

主加速超伝導空洞：9-cell空洞（compact ERLでは2台、3 GeV光源では224台）

- 目標設定：15 MV/m で100 mAを加速



課題を解決できるのか実証（段階的な開発を継続すること）が欠かせない



実証機として、compact ERL (cERL)を建設

電子銃の性能

N. Nishimori, ERL17 workshop

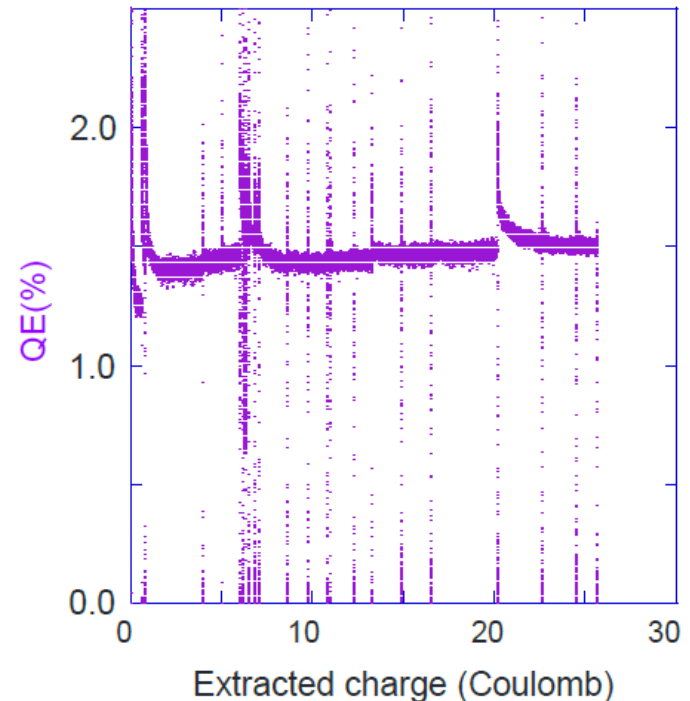
電子銃の現状

- **高品質:**
 - 低電流で達成 (0.07 mm·mrad @10fC, 390 kV)
 - 第二電子銃(KEK開発)でも短いギャップで500 kV印加達成
- **大電流:**
 - 500 kV で 1.8 mA、低電圧で10mAを達成(100 mAには新たな電源が必要)
 - cERL全体としては、390 kV, 0.9 mAを達成
 - 2017年6/29, cERLで500 kVビーム生成に成功
- **長時間:** 450 kV 低平均電流で達成(~17日間)
 - 高電圧に起因する停止はなし(下流の真空悪化による停止は1回あり)
 - 0.9 mA 運転では、GaAsで量子効率の顕著な劣化はなし

現状の性能から次の段階に向けて

- **大品質化:** 500 kV 印加達成で、目標性能に到達
- **大電流化:** 500 kV 10 mA試験の準備を進めている
- **長寿命化:** 「GaAs + 極高真空での性能検証」 + 「GaAsカソードに代わる材質の開発」
- **マルチアルカリカソード開発:** 広島大学、QST(旧JAEA)を中心として、開発を進めている
 - ⇒ 現状でも電荷寿命で一桁以上改善できる見込み
 - 2017年に広島からKEKまで輸送試験を実施したが、量子効率はゼロだったので、輸送システムのチェックを行っている

GaAs QE
derived from beam dump current and monitor laser power
for Mar. 24 to 30 operation in 2016



QE looks unchanged during 1mA operation

入射器超伝導空洞の性能

設計段階のパラメタ (「コンパクトERLの設計研究」より)

入射用超伝導加速器

セル数・空洞数	2セル・3空洞
加速勾配	7.4 (14.7 *) MV/m
加速電圧	5 (10 *) MV

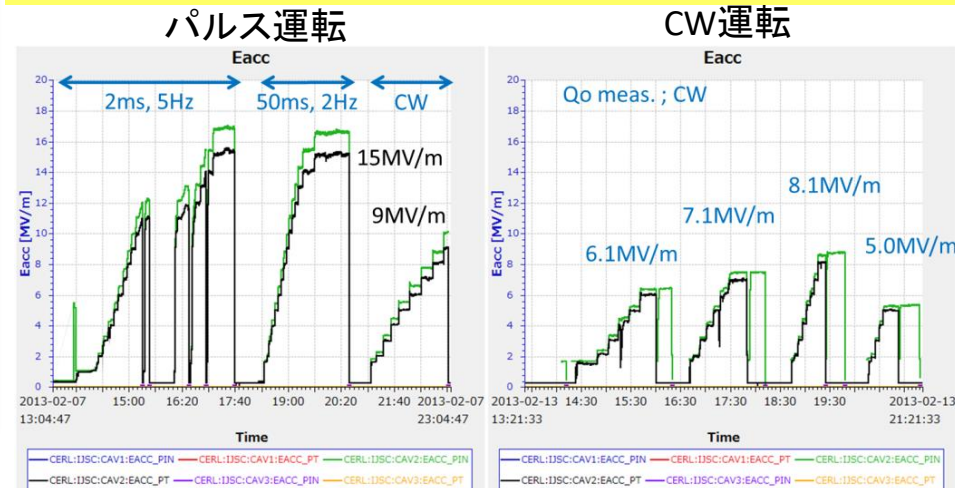
* 50 mA 以下の低電流の運転モード。



入射器超伝導空洞の現状

- 高い加速勾配: 7.1 MV/m を達成
- 大電流の加速: 0.9 mAの加速を達成 (3.3 MV/m)
- 長時間: 7.1 MV/m 運転 (5.6 MeVへ加速) では非常に安定 (~260 hours)
- cERL周回部運転: 3.3 MV/m 運転 (2.4 MeVへ加速) でも非常に安定
- 高い加速勾配かつ大電流: **次は10 mA**

入射器空洞単体での性能試験



主空洞の性能

設計段階のパラメタ (「コンパクトERLの設計研究」より)

主超伝導加速器

セル数・空洞数

9セル・4空洞

加速勾配

15-20 MV/m

加速電圧

55-80 MV



主空洞の現状

- 高い加速電圧: 8.57 MV/m を達成 (2空洞同時)

2015年5月～6月: 10 MV/m + 7 MV/m で運転

- 大電流の加速: 0.9 mA の加速を達成

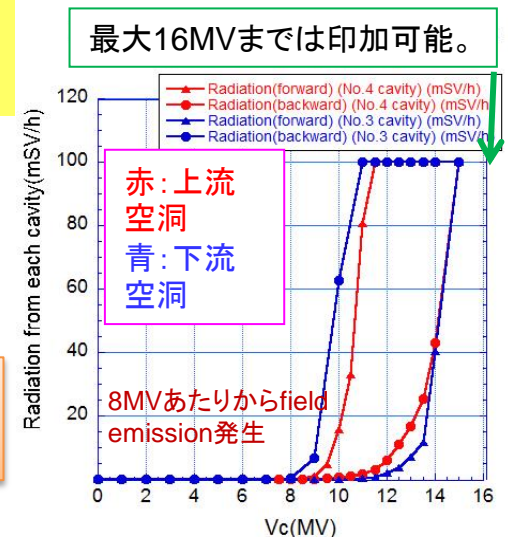
- 長時間: 8.57 MV/m 運転ではかなり安定 (2014年5/20～6/20の停止回数: 20回、全て対処可能なものである)

- 2014年6月～5月: 運転開始3週間後に、空洞の field emission の増大が見られたが、pulse aging によって回復できることがわかった。

- 高い加速電圧かつ大電流: 次は 10 mA

主空洞単体での性能試験

長期運転への一つのアプローチを確立



空洞の加速電圧は16MVまで到達するが、field emissionによるradiation増加がみられた。

cERLのCW大電流試験

- 大電流運転での重要な試験項目
 - 望まないビーム損失による放射線発生を如何に抑えるか？
 - 想定外のビーム損失は放射線増大、バックグラウンドノイズの増大を引き起こす
- 望まないビーム損失の発生原因
 - 望まない位置・時間からの電子生成 ⇒ 設計の収束条件から外れる(ビーム位置がずれる)、設計の加速条件からずれる(エネルギーがずれる)
 - 輸送中の外乱(望まない電磁場による影響) ⇒ 設計の収束条件から外れる
- 望まないビーム損失を抑える方法
 - 発生源の抑制 ⇒ 迷光の対策、カソードの時間応答の向上
 - 口径を制限した位置でビーム損失を落とす(下流に行かないようにする、エネルギーが低いうちに除去する) **ビーム損失の制御**



cERLでは低エネルギー部(入射器)に2か所、高エネルギー部(周回部)に3か所、横(X, Y)方向の口径を制限するためのコリメータが入っている

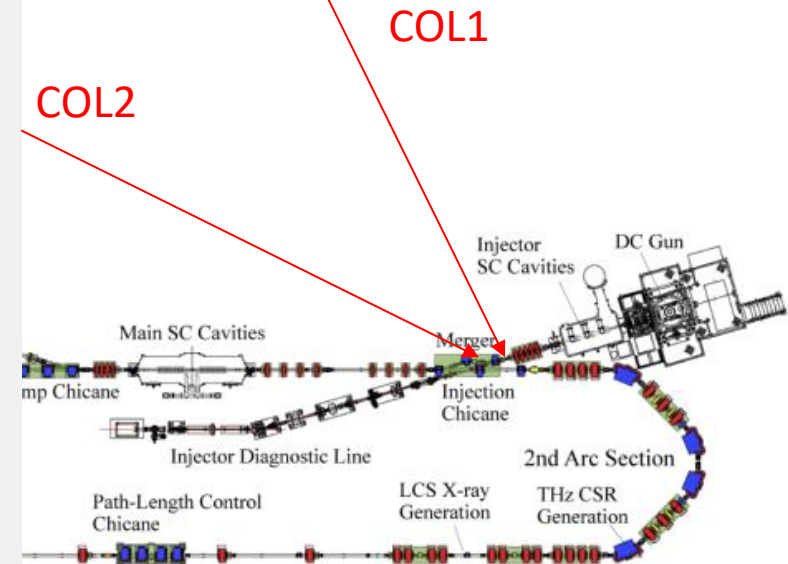
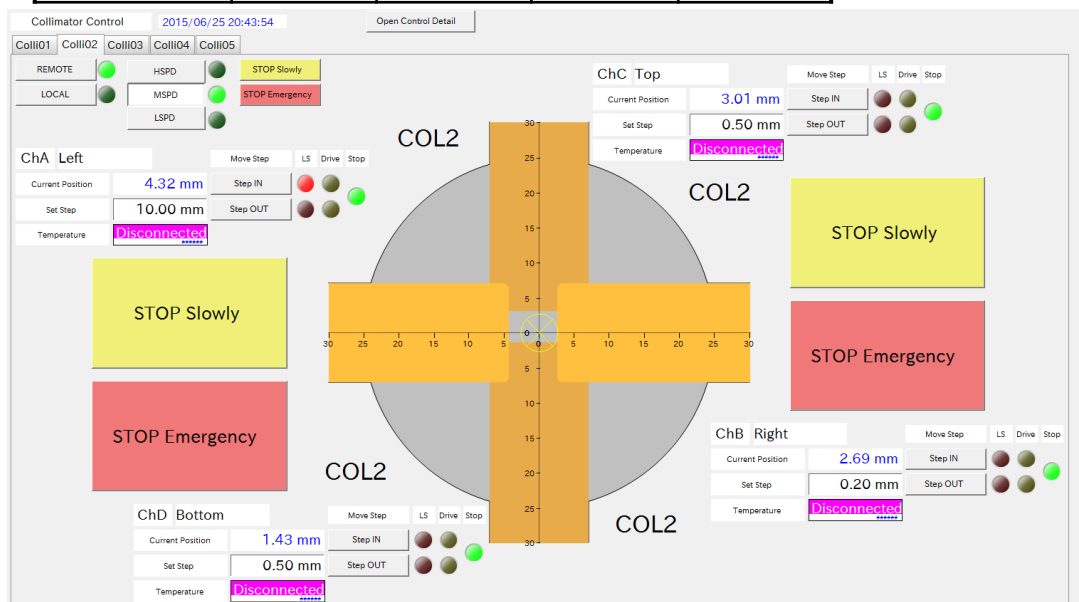
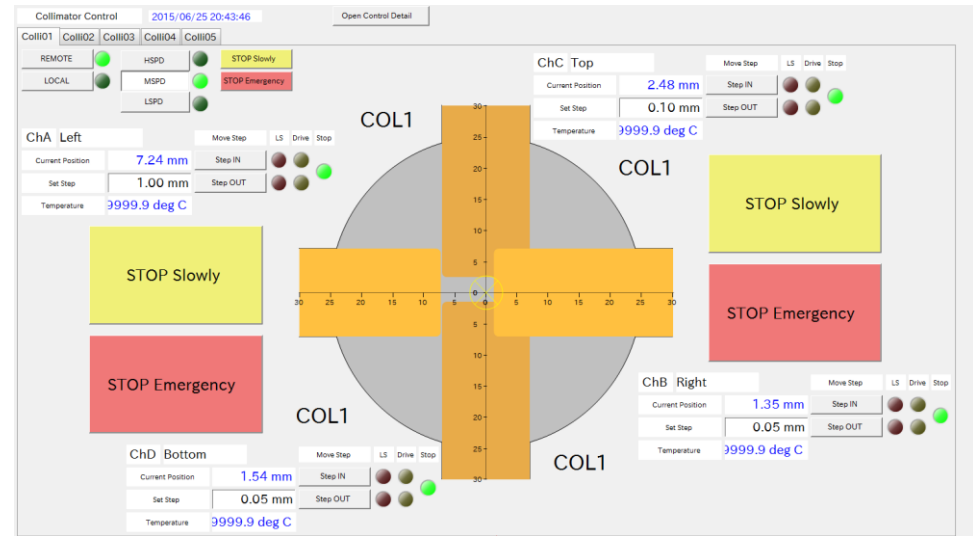
低エネルギー側の2か所を調整することで、80 μA でも望まないビーム損失を抑えられた

運転条件: 平均電流 80 μA , バンチ電荷 0.5 pC(空間電荷が効く領域),
163.5 MHz レーザー繰り返し

コリメータ調整 (6/25 20:44, 70 μ A)

- バースト運転(平均電流は微小)で各部に配置されたロスモニタを見ながら、コリメータ1, 2(COL1, 2)を徐々に挿入
- CW運転(大電流)に移行する

コリメータ	上	下	左	右
COL1	2.48	1.54	7.24	1.35
COL2	3.01	1.43	4.32	2.69
COL3	-	-	-	-
COL4	-	-	-	-
COL5	-	-	-	-



平均電流 0.9 mA CW運転の達成

- 2015年5月のCW運転では、徐々に軌道が変化し、放射線損失が増加する現象が見られた

⇒ レーザーミラーの帯電の可能性が高く、ガラス製から金属製ミラーに交換

2016年3月のCW運転

Beam repetition rate : 162.5 MHz

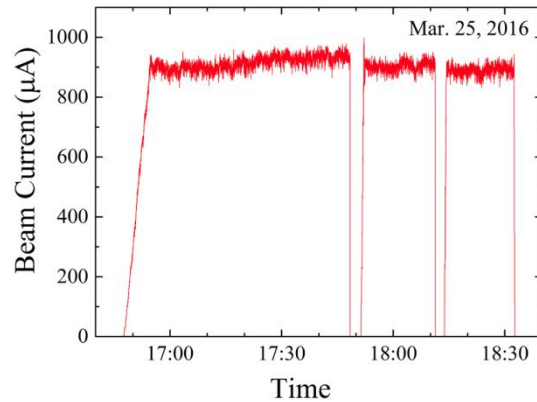
Average current: **0.9 mA** (charge: 5.5 pC)



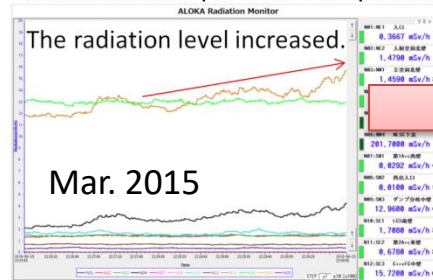
Al evaporated
Glass mirror



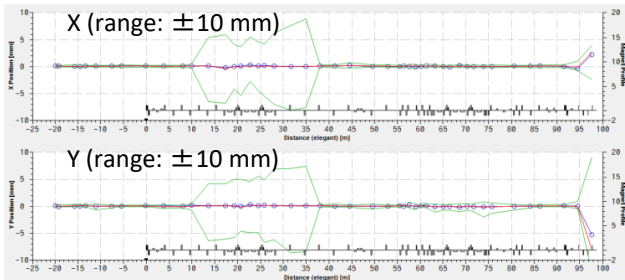
Metal Mirror



Radiation level in previous CW operation



Orbit fluctuation in CW operation (1 hour).



Radiation level (17:44-17:49), in Mar. 2016

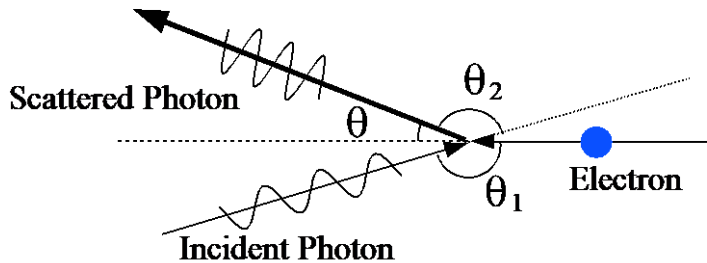
ミラー交換の結果

⇒ CW運転が極めて安定になった。軌道変動、放射線増加もみられなかった。

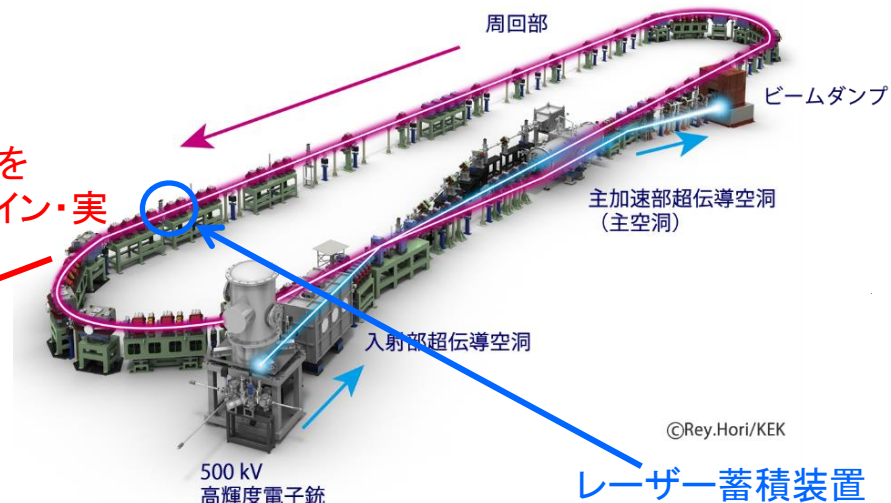
レーザーコンプトン散乱光源

単色性の良い高輝度・高強度ガンマ線を得るには
低エミッタンス・大電流電子ビームが必要

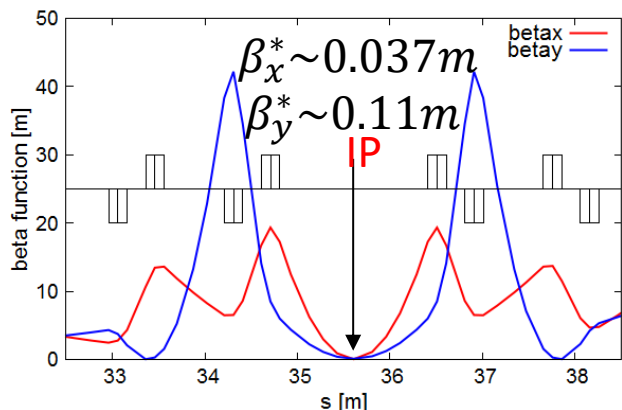
⇒ ERLの利用が適している



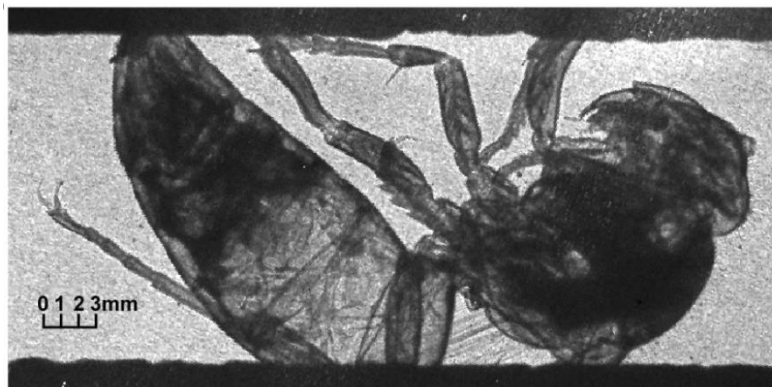
発生したX線を
LCSビームライン・実
験室へ



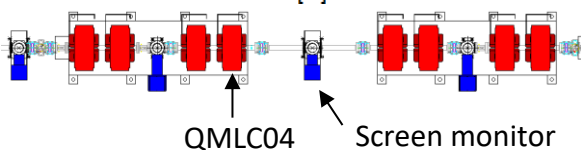
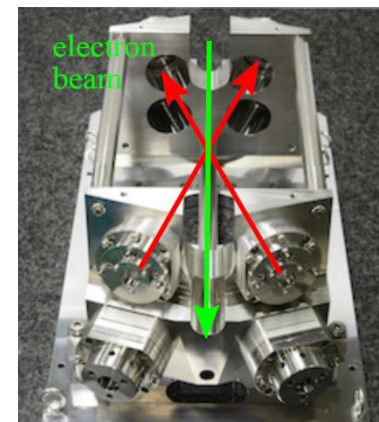
衝突点近傍の設計オプティクス



バンチ電荷: 0.5 pC, 162.5 MHz CW運転
平均ビーム電流: 80 μ A



A. Kosuge et al., Proc. IPAC-2015, TUPWA066



調整後のビームサイズ

$\sigma_x^* \sim 13 \mu m$, $\sigma_y^* \sim 25 \mu m$

調整技術を確立

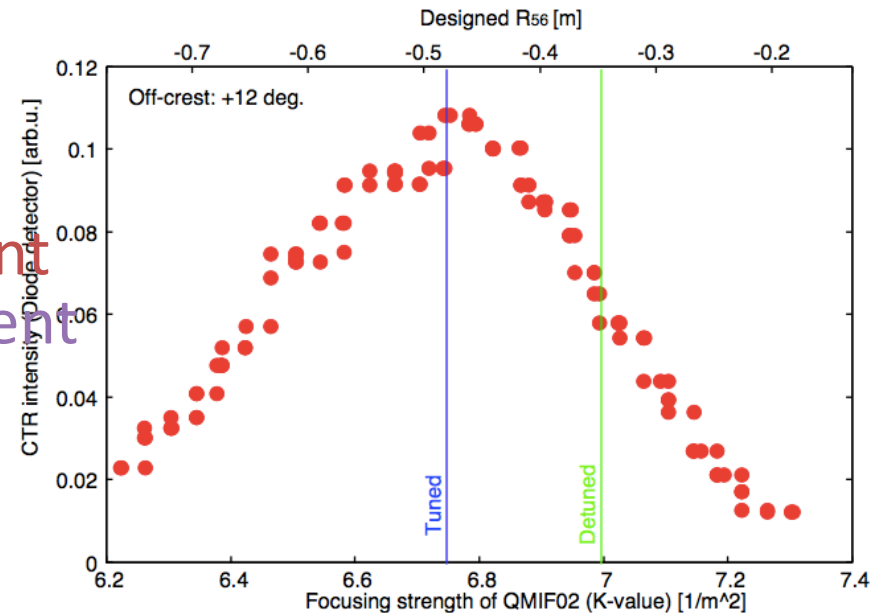
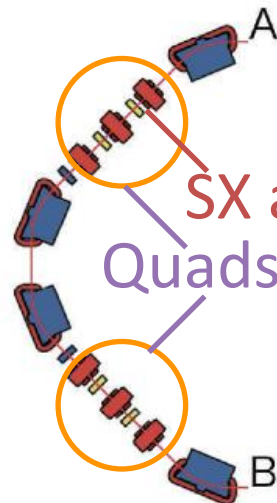
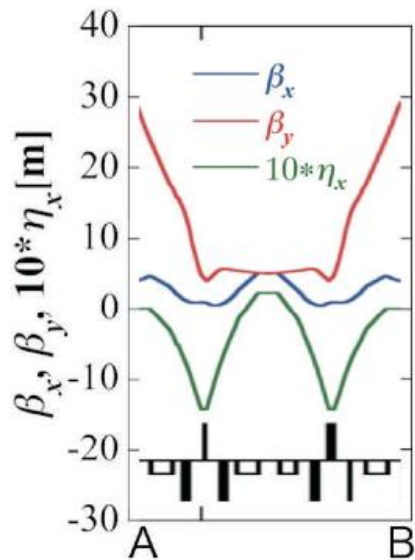
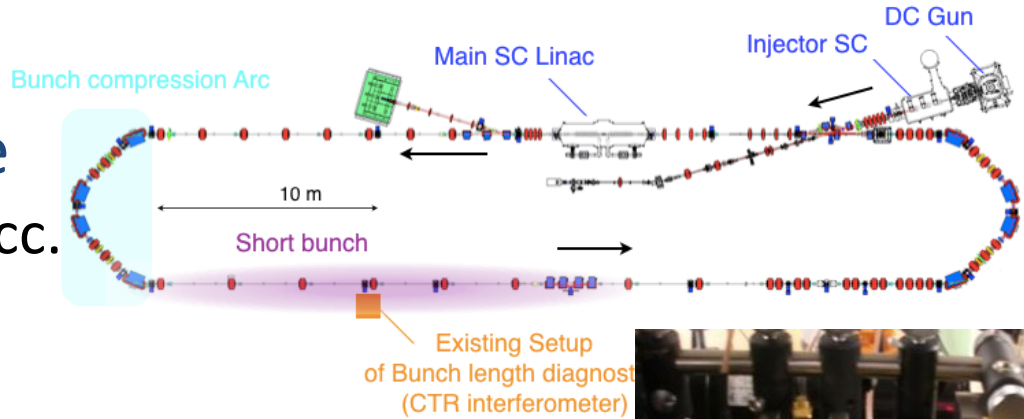
7 keV X線の生成に成功 (“ERL+レーザー蓄積”で世界初)
イメージングに成功

Bunch compression tuning

Courtesy of Y. Honda

H. Kawata, ERL17

- Beam tuning procedure
 - Set Main linac Off-crest acc.
 - Scan the arc optics
 - R56 by Q combination
 - SX
 - Referring CTR intensity

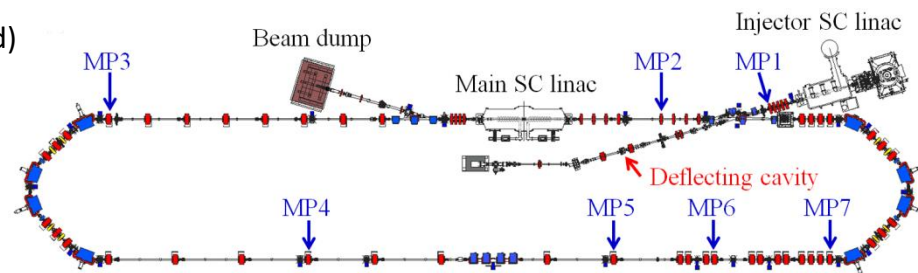


History of emittance measurement

Previous emittance measurement result (Q-scan method)

Very low charge (< 0.05 pC/bunch) enx / eny (mm mrad)

	Before main linac	After main linac	After 1 st arc	LCS
2014/6/13	0.15 / 0.14	0.14 / 0.12	0.14 / 0.14	0.13 / 0.15
2015/2/17	-/-	-/-	0.25 / 0.25	-/-
2015/2/19	-/-	-/-	-/-	0.17 / 0.19



Middle charge (0.5 pC/bunch)

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

High charge (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	-/-

➡ After the 1st arc section, emittance increased.

Upper column: enx (mm mrad)

Lower column: eny (mm mrad)

Emittance measurement in 2016 (Q-scan method)

Charge	Before main linac	After main linac	South straight
5.3 pC	1.0	2.7 ± 0.21	
	0.66	1.0 ± 0.071	
7.7 pC	-	1.8 ± 0.40	1.5 ± 0.082
	0.9	1.02 ± 0.33	1.1 ± 0.058

We reduced the emittance growth for 7.7 pC operation. However, to achieve design emittance (0.45 mm mrad), we required more operation time.

Generation of Higher Bunch Charge

We measured the generated bunch charge from a GaAs photocathode by a Faraday cup, which located at 1 m from the cathode.

- Quantum efficiency (QE): 3 %

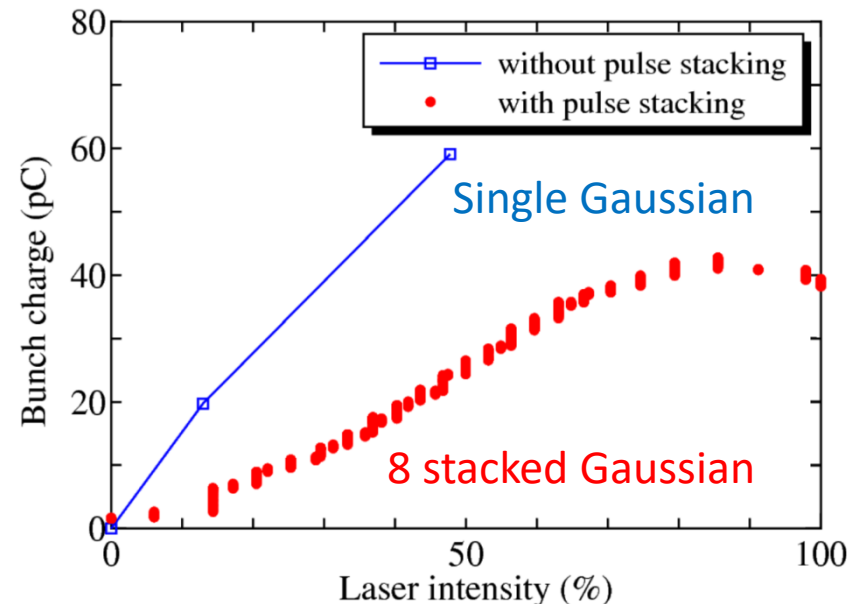
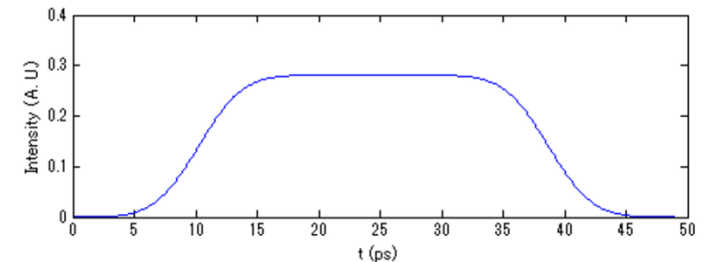
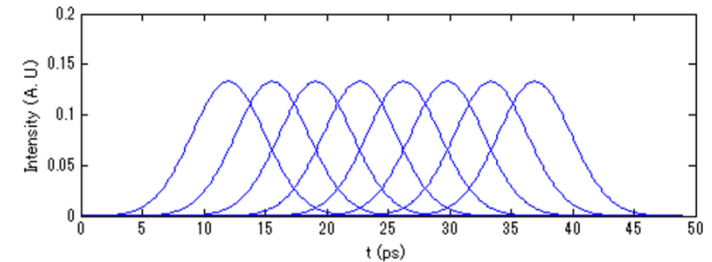
Laser pulse: single Gaussian 3 ps RMS

- We achieved the generation of 60 pC bunch charge.

For emittance compensation, we extend the pulse length of the excitation laser.

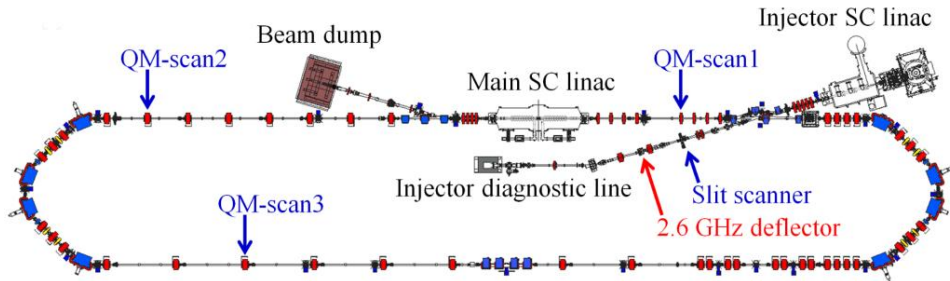
Laser pulse: 8 stacked Gaussian 31 ps FWHM

- The maximum bunch charge was limited to 40 pC.
 - The crystals to stack the laser pulse decrease the irradiated laser power on the cathode.
 - The stacked laser power is about 1/3 of the original power.
- ⇒ We did the beam operation with 40 pC bunch charge.



Emittance measurements in diagnostic line

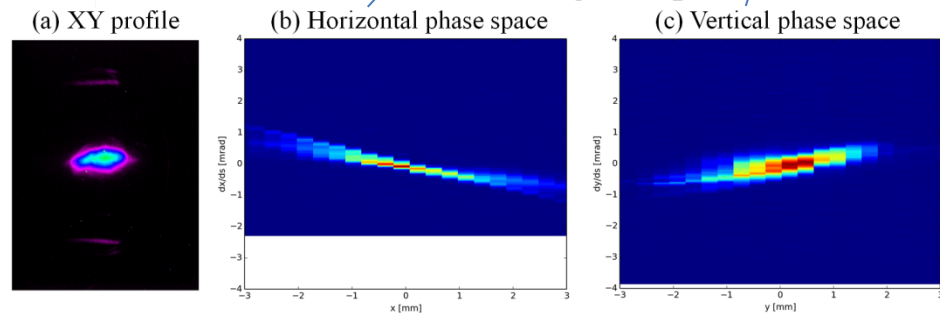
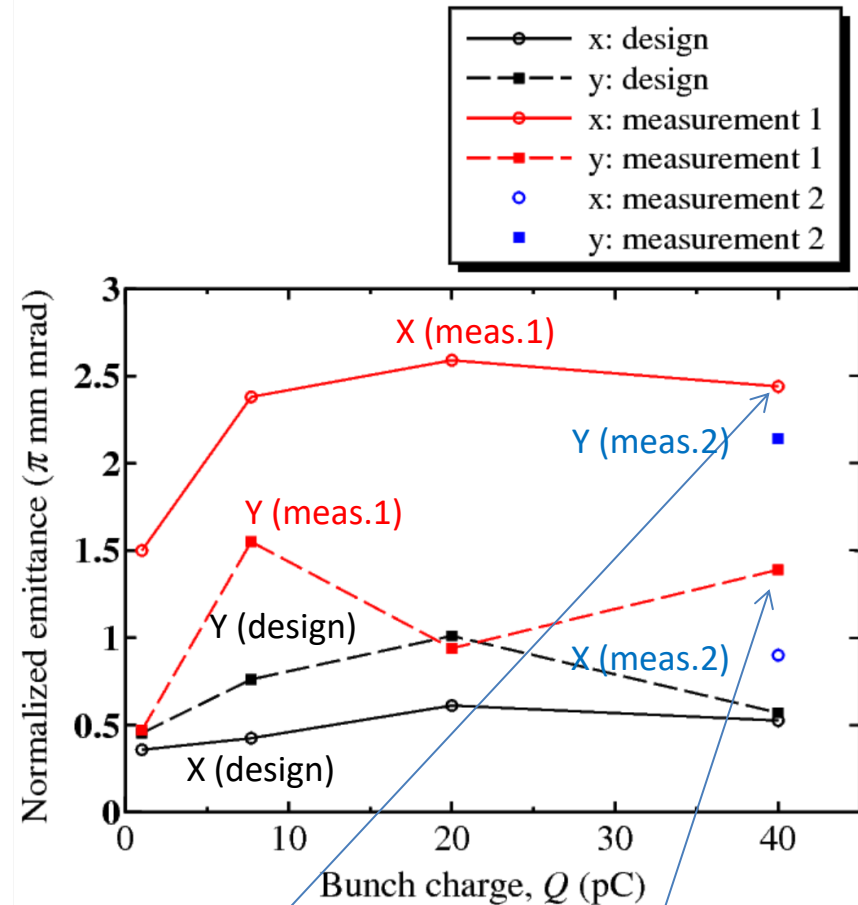
After optics tuning for the bunch charge of 40 pC, we measured normalized rms emittance by slit-scanner in the injector diagnostic line and Quadrupole scan method.



Results by slit-scanner in the injector diagnostic line (Preliminary)

Beam total energy: 5.1 MeV

- We measured emittances in two different transport conditions.
 - In measurement 1, the vertical beam size was focused at the slit scanners.
 - In measurement 2, the horizontal beam size was focused at the slit scanners.
- ⇒ So far, we did not achieve the design emittance.



Emittance measurements in recirculation loop

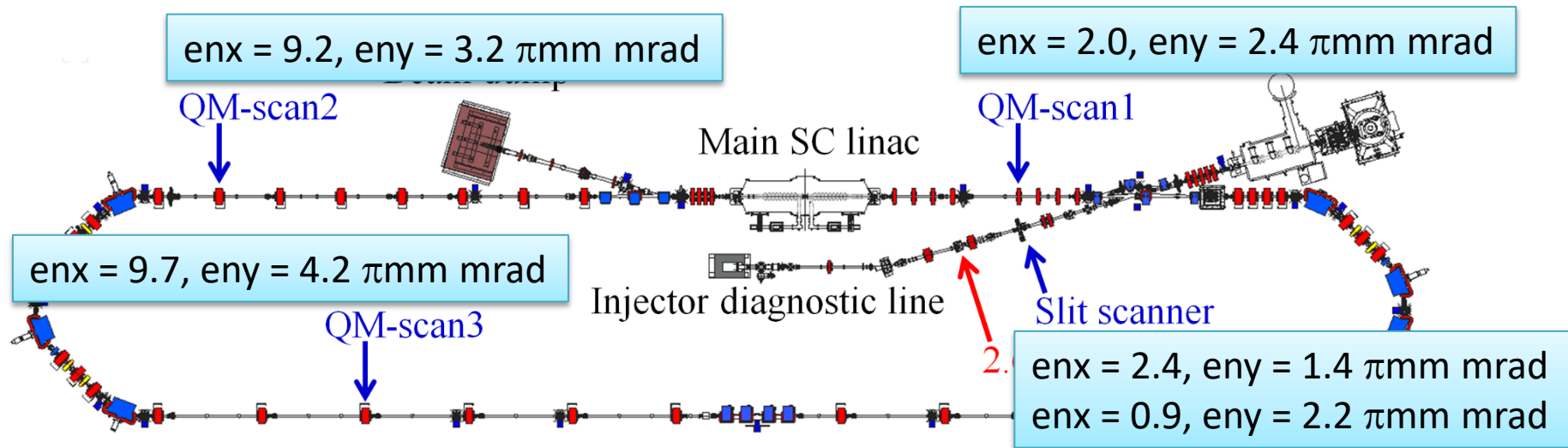
Results by waist-scan method in the recirculation loop (Preliminary)

Beam total energy: 17.1 MeV

For 40 pC bunch charge

- QM-scan1: $en_x = 2.0$, $en_y = 2.4 \pi\text{mm mrad}$
- QM-scan2: $en_x = 9.2$, $en_y = 3.2 \pi\text{mm mrad}$
- QM-scan3: $en_x = 9.7$, $en_y = 4.2 \pi\text{mm mrad}$

⇒ The emittance increases after the merger and the main linac.



In the recirculation loop, we observed large emittance growth, because the optics in the recirculation loop was not well matched.

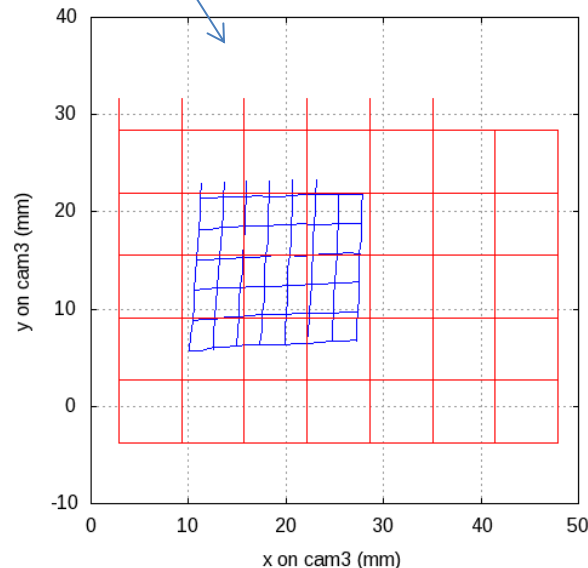
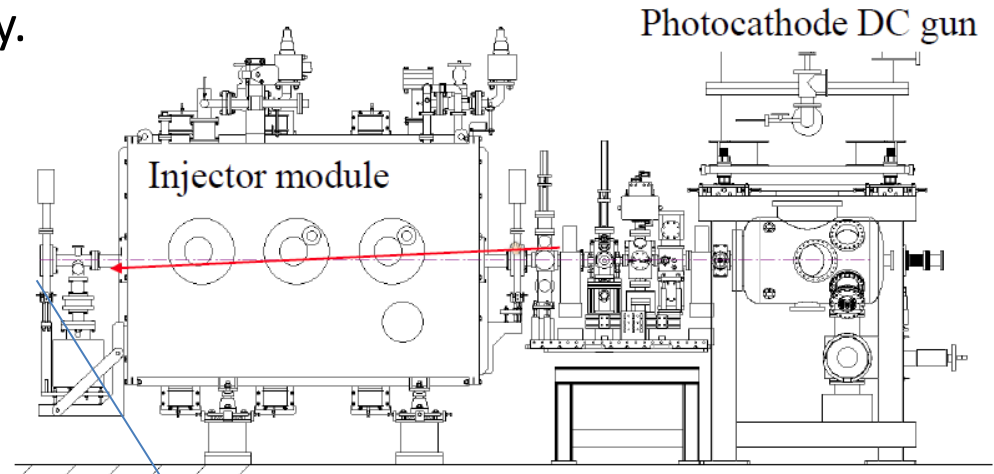
Single kick response for injector 1st 2-cell cavity

- In order to find the source of the asymmetry profile, we measure the single kick response for injector 1st 2-cell cavity.

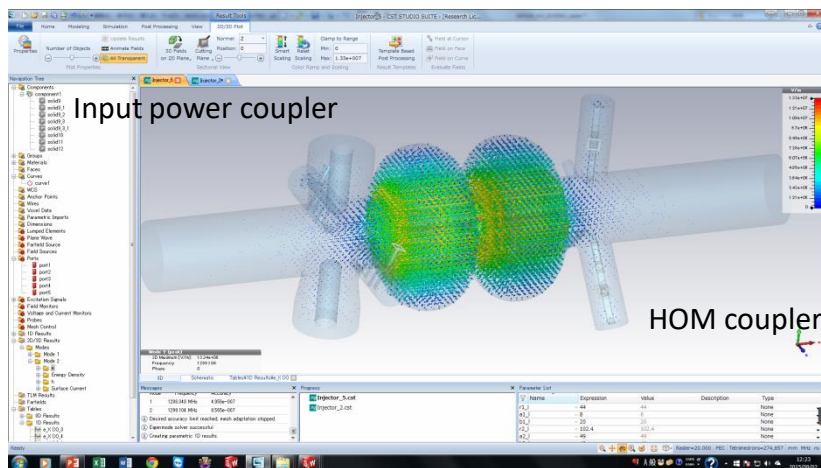
The beam is kicked by horizontal and vertical steering magnets, which are located at the entrance of injector SC linac.

⇒ From the single kick response, we obtained the asymmetric focusing force caused by the injector cavity. The input and HOM coupler may cause the effect.

⇒ Based on the measurement results, we are correcting the model of the injector cavity.



- All the injector cavities are turned off.
- The first injector cavity is turned on, and it is affected by the focusing force caused by the first cavity.



Courtesy of T. Konomi

cERL総合運転のまとめ

- 高輝度・大電流に向けたERL加速器実現の課題(未知数は何か?)
 - － 高輝度・大電流電子ビームの生成:
 - 実証済み: 500 kV で 1.8 mA生成(電子銃単体)、390 kV で 0.9 mA生成(cERL周回運転)。カソード単体でのエミッタンスは0.07 mm·mrad @10fC, 390 kV、実用環境下での500 kV ビーム生成を達成。
 - 残りの課題: 10 mA(100 mA)生成試験
 - － 大電流電子ビームの加速:
 - 実証済み: 8.5 MV/m で 0.9 mA のCW運転。実用環境下での性能回復法の確立。
 - 残りの課題: 大電流加速試験(10 mA, 100 mA)。加速勾配を上げること。
 - － ビーム性能:
 - 実証済み: 40 pC/bunchまでの性能検証を実施。進行方向ダイナミクスの制御はほぼ確立。バンチ圧縮の実証。
 - 残りの課題: 大バンチ電荷(> 40 pC)でのエミッタンス補償法の確立。
 - － 安定性(長時間・安定に、一様に):
 - 実証済み: CW 0.9 mA での長いカソード寿命、電子銃・超伝導空洞(ただし、空洞台数はまだ少ない)の高い安定性
 - 残りの課題: > 10 mA でのカソード寿命試験(寿命はどれくらい? ビーム品質の劣化は?)
 - － 運転コスト:
 - 超伝導空洞は一度冷やしたらずっと運転し続けないと効率が悪い。cERL運転の電力は1.1 MW(このうち、およそ半分が冷凍機の電力)。注: 3 GeV ERLでは冷凍機の構成が異なるので、これの外挿とはならない。
 - － 放射線遮蔽:
 - 実証済み: 平均電流0.9 mAでの低損失を実証。CW 10 mA運転の目途も立った
 - 残りの課題: CW 10 mA運転の実証、ビームダンプ以外でのビーム損失箇所・量の評価を進めること
- 総合運転を通して得られた知見
 - － CW大電流によって引き起こされる諸現象の理解と対策を着実に進められた