
cERLの現時点での達成性能の概要

第10回ERL計画推進委員

2017年7月7日 13時30分～15時30分

KEKつくばキャンパス 3号館1階会議室

高エネルギー加速器研究機構

加速器研究施設

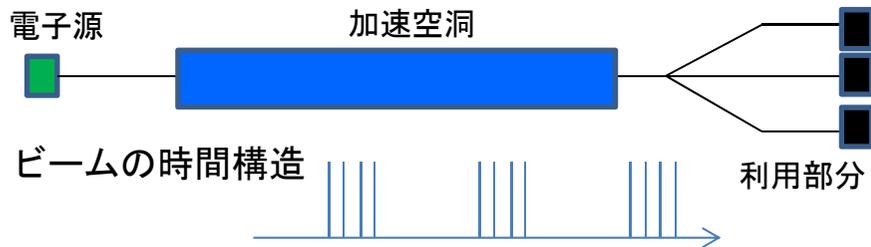
宮島 司

目次

- cERLで検証すべき課題
- 鍵となる要素の性能
- 加速器としての総合性能
- まとめ

ERL加速器の特徴

- 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

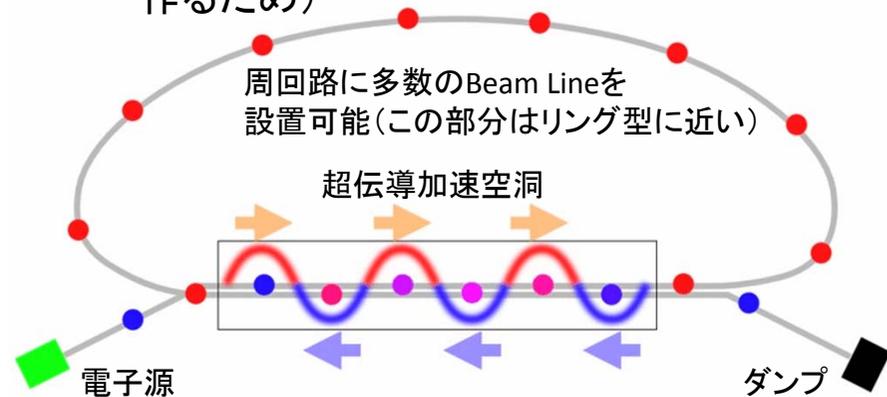
- Energy Recovery Linac (ERL、エネルギー回収型線形加速器)：加速した電子ビームをもう一度加速空洞に通して減速。そのエネルギーを次のビームに与える。

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**
- 放射光源利用の場合、**平均輝度の上昇、多数のビームラインを設置可能**(周回路を作るため)



- ERLを利用した光源の目指すところ

- **先端性**(高輝度、高繰り返し、短パルス長、小さいエネルギー拡がり)と**汎用性**(同時利用)の**両立**

高輝度・大電流ビームの生成・加速が鍵

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)



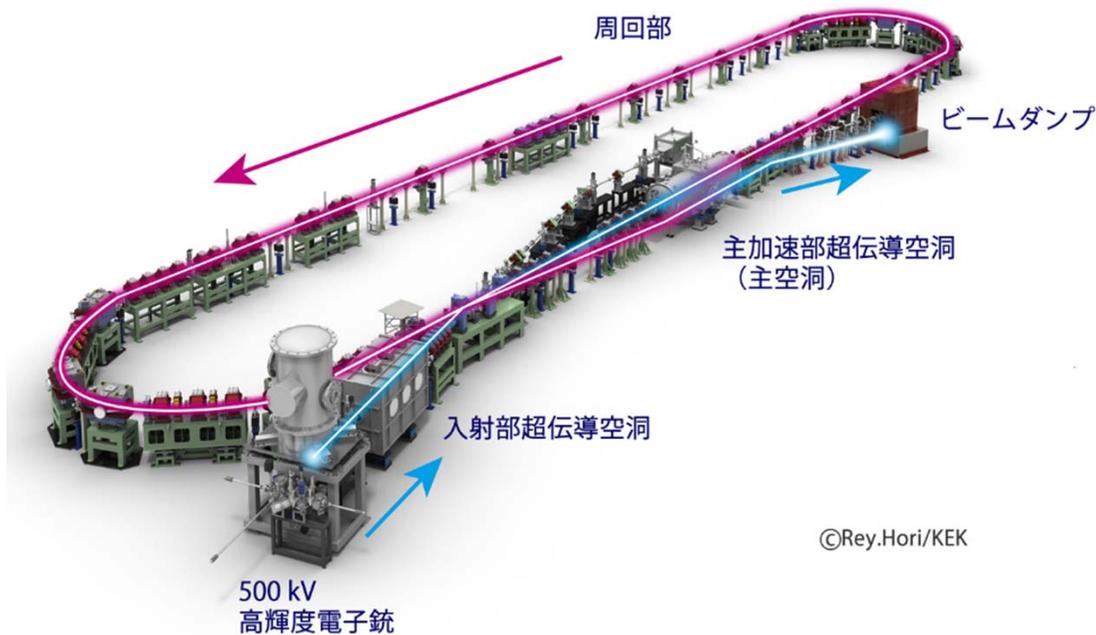
compact ERLの目的

- 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

目次

- cERLで検証すべき課題
- 鍵となる要素の性能
- 加速器としての総合性能
- まとめ

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

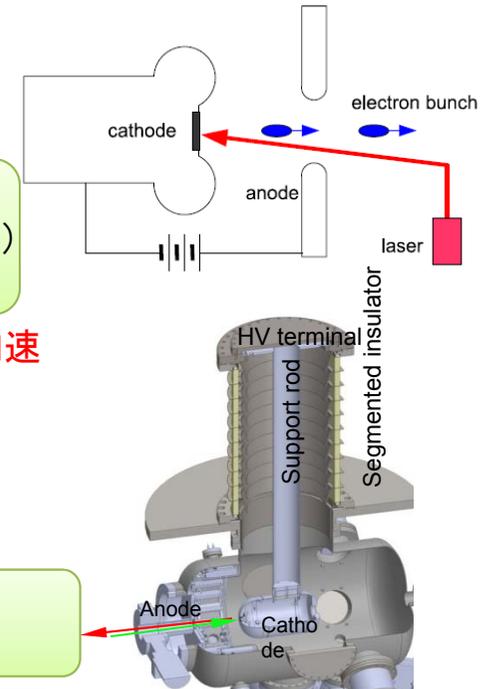
- 大電流を高い加速勾配でCW運転で加速することが必須

⇒ 「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

電子銃の現状

- **高品質**: 低電流で達成 (0.07 mm·mrad @10fC, 390 kV)
- **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

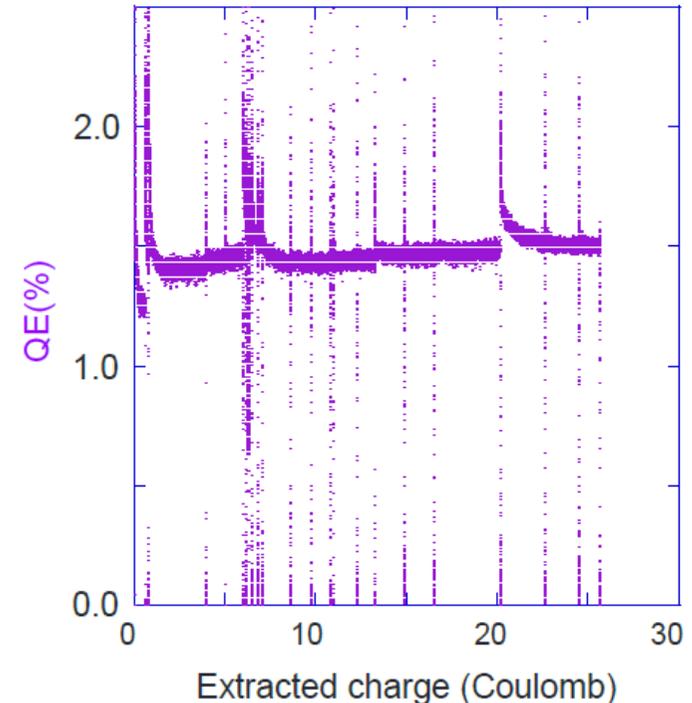
現状の性能から次の段階に向けて

- **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

N. Nishimori, ERL17 workshop

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

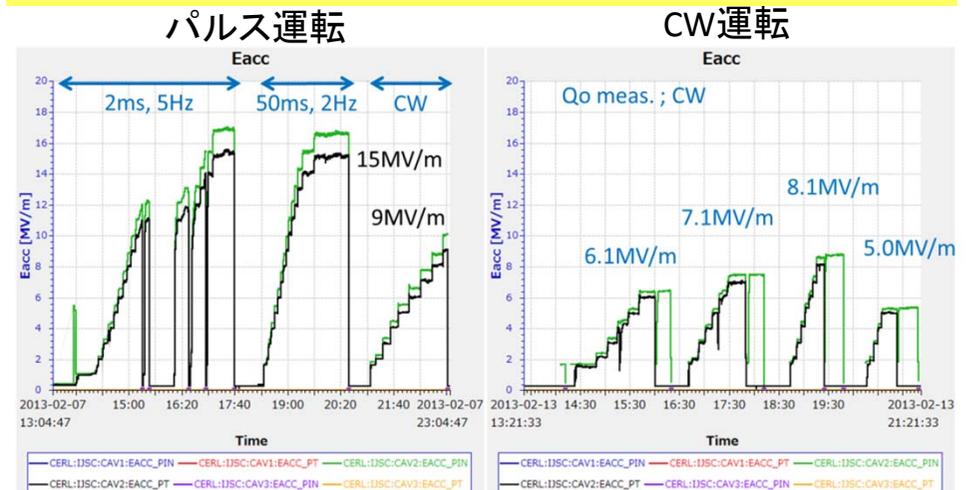
5 (10 *) MV

* 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

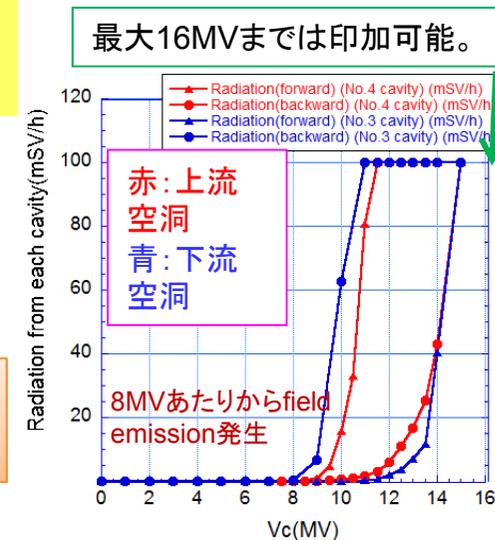
- 高い加速電圧: 8.57 MV/m を達成(2空洞同時)

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。

目次

- cERLで検証すべき課題
- 鍵となる要素の性能
- 加速器としての総合性能
- まとめ

cERL運転履歴

| 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 | 2017年 1月～6月 |
|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|
| | | | | | | | | |
| ↓ 1 μA | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| ↓ 10 μA | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| ↓ 100 μA | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| ↓ 1 mA | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

入射器単体試験 (4月～6月)、最大 1 μA
 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 μA
 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 μA
 ビーム光学の基本情報の取得
 7.7 pC で 5.8 mm mrad (周回部)

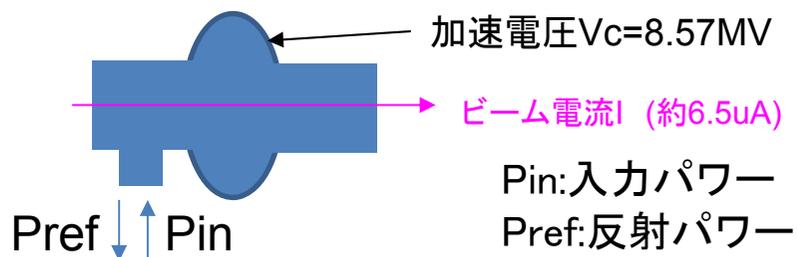
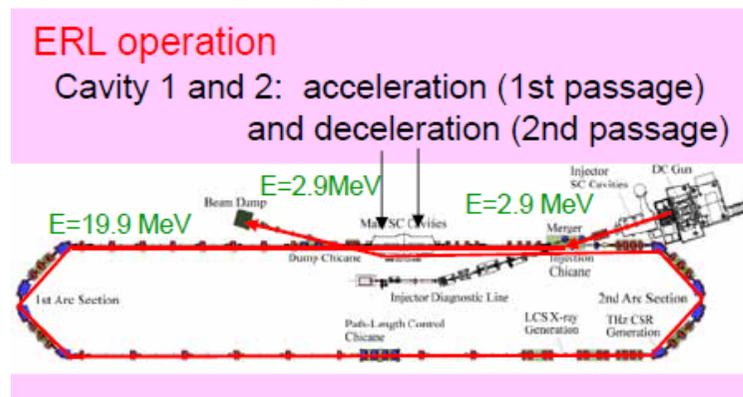
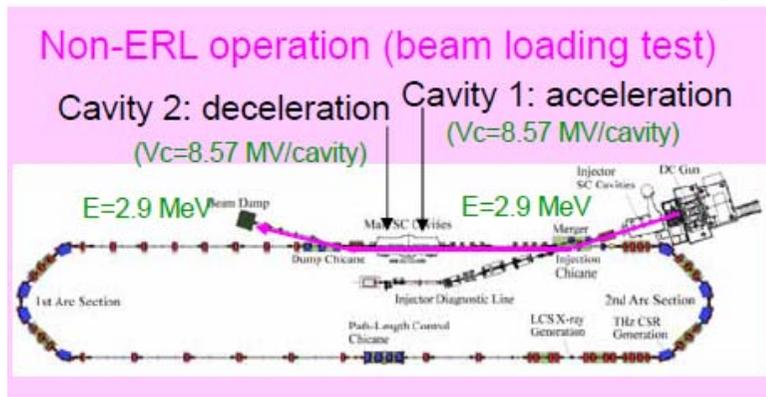
LCS-X線生成試験 (1月～3月)、最大 100 μA
 LCS用ビーム光学調整
 LCS-X線の観測

低エミッタンス調整 (5月～6月)、最大 100 μA
 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
 低エミッタンスビーム周回試験、電子銃電圧 390 kV ⇒ 450 kV

大バンチ電荷試験 (2月～3月)、最大 60 pC
 電子銃でバンチ電荷 60 pC を生成
 バンチ電荷 40 pC 診断ライン試験、周回部途中まで輸送

エネルギー回収の実証



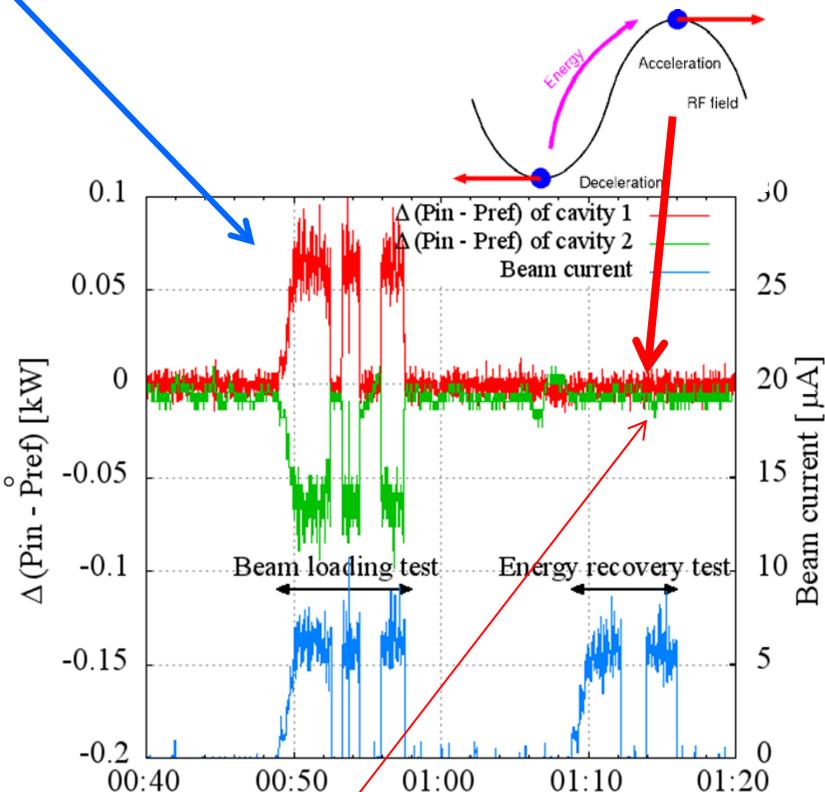
入力パワーと反射パワーの差 : $\text{Pin} - \text{Pref}$

・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、
 $\text{Pin} - \text{Pref}$ はビーム電流によらず一定。



ビームの有り無しで変動しない ⇒ エネルギー回収を確認

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

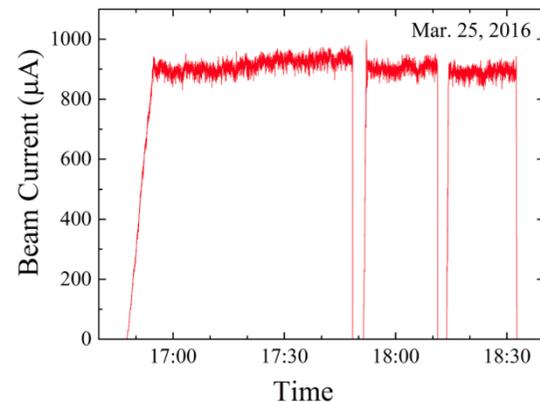
Average current: **0.9 mA** (charge: 5.5 pC)



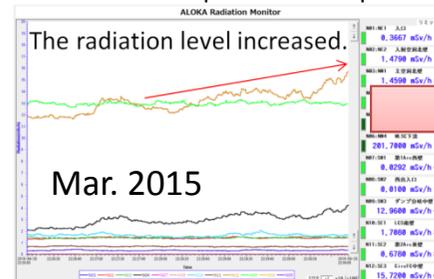
Al evaporated
Glass mirror



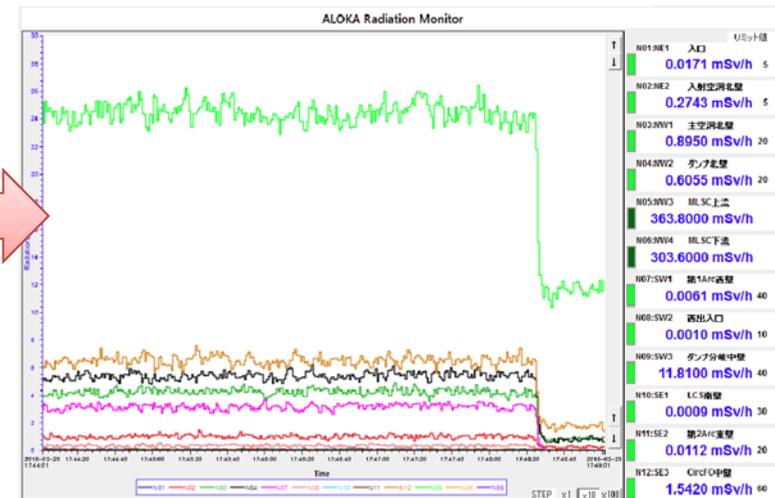
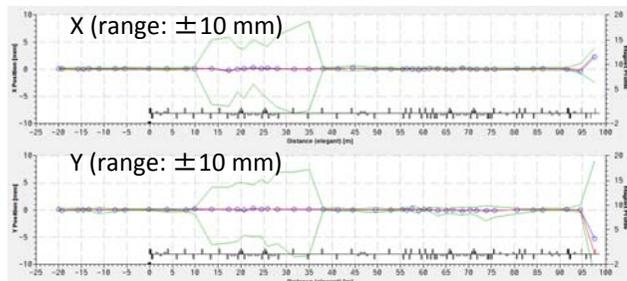
Metal Mirror



Radiation level in previous CW operation



Orbit fluctuation in CW operation (1 hour)



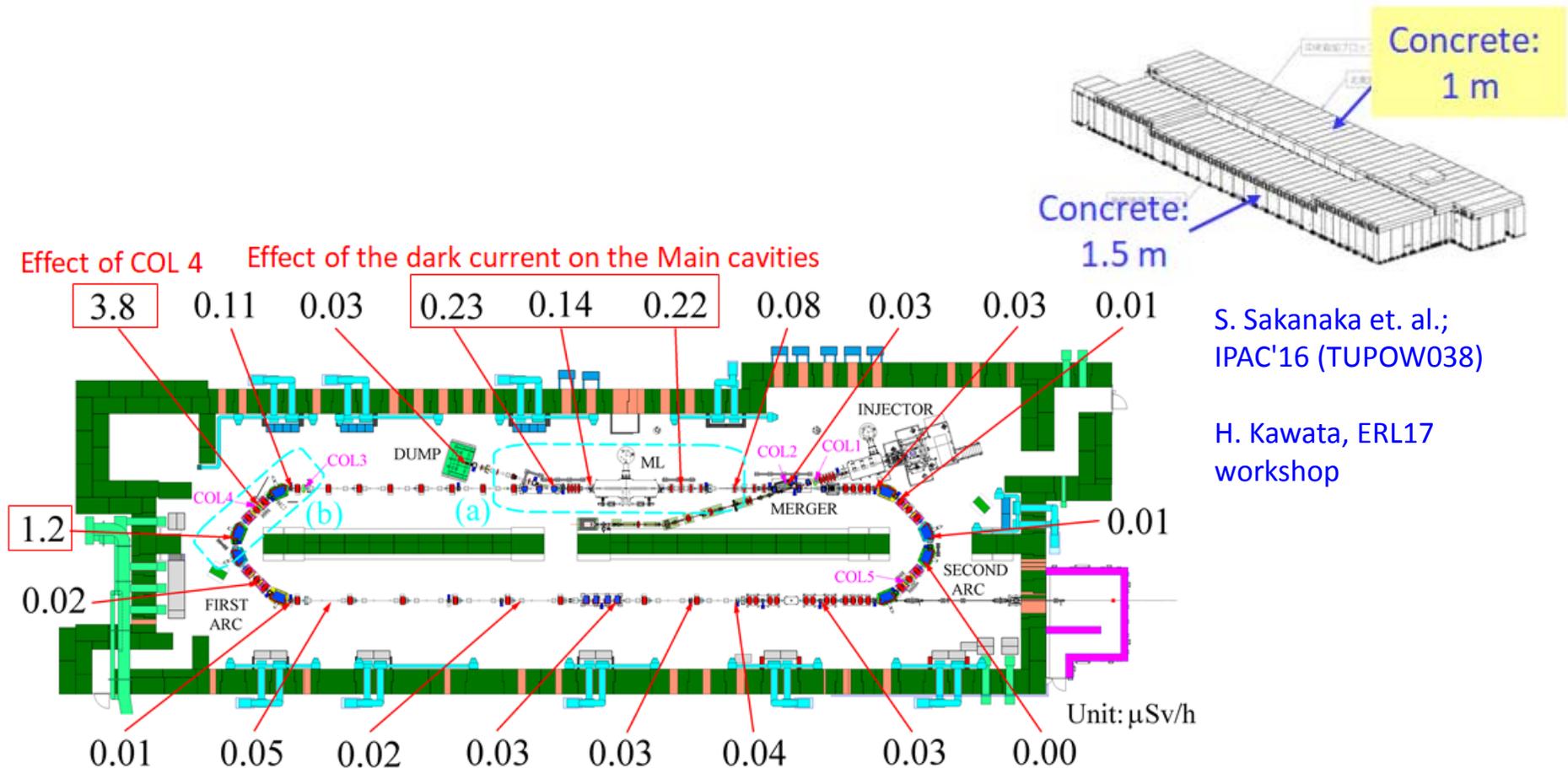
Radiation level (17:44-17:49), in Mar. 2016

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。

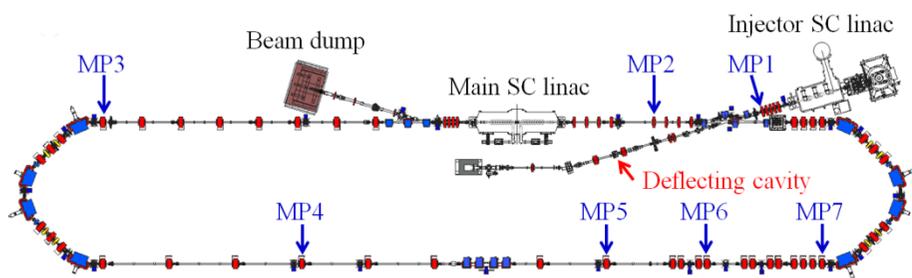
平均電流 10 mAに向けた見通し

- 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

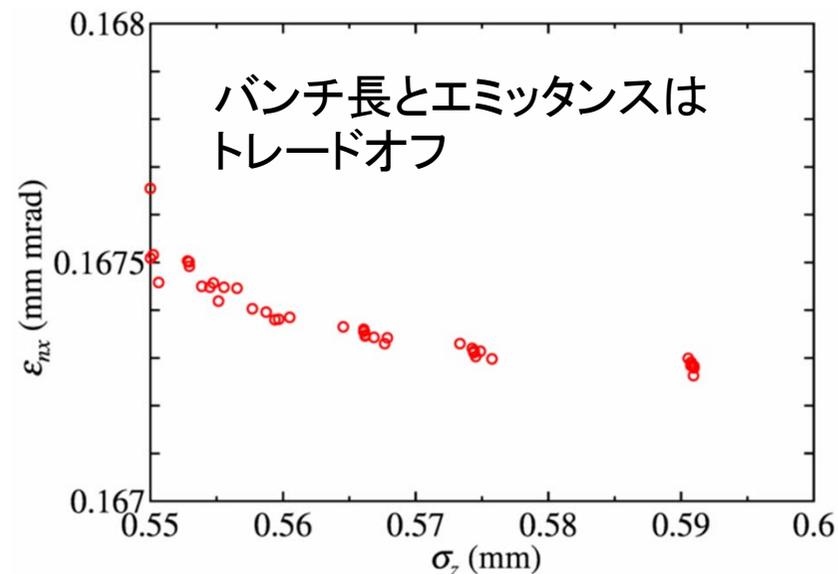


ビーム性能

- 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

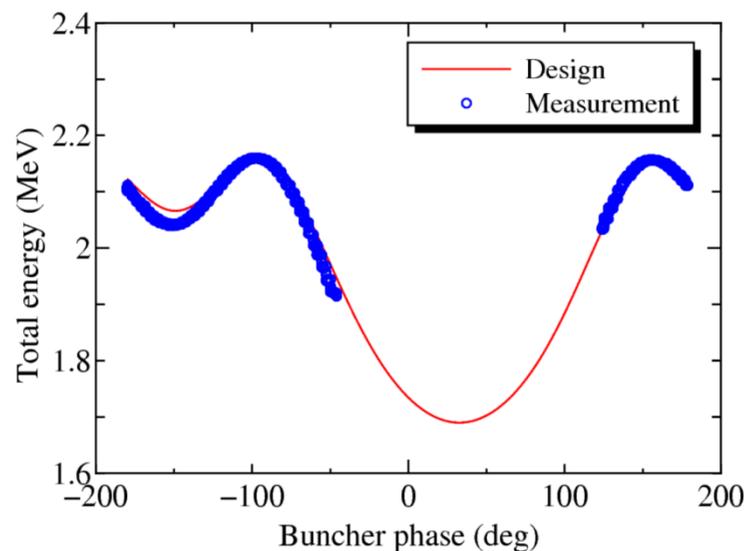
達成した規格化エミッタンス

- 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
 - 横方向、進行方向ビームダイナミクスを精密に制御する必要がある

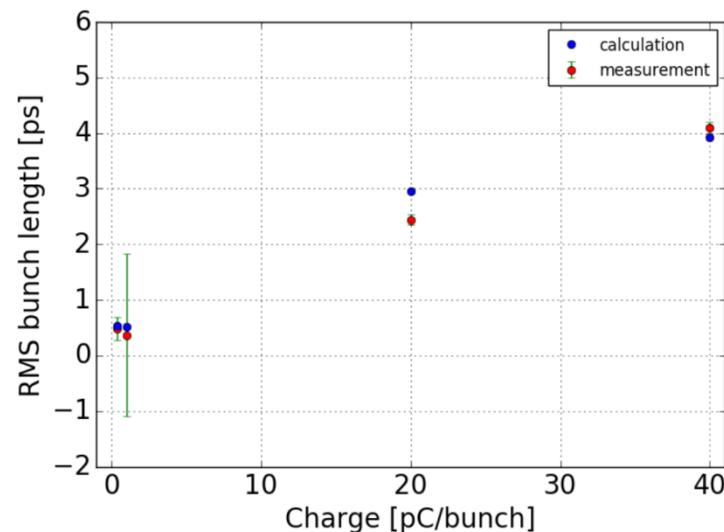
ビームダイナミクスの理解

- 進行方向のダイナミクス(短バンチ化)
 - 2017年3月から、ほぼ設計通りに制御できるようになってきた

バンチャー位相とエネルギーの関係



2017年3月に測定した、バンチ電荷とバンチ長の関係

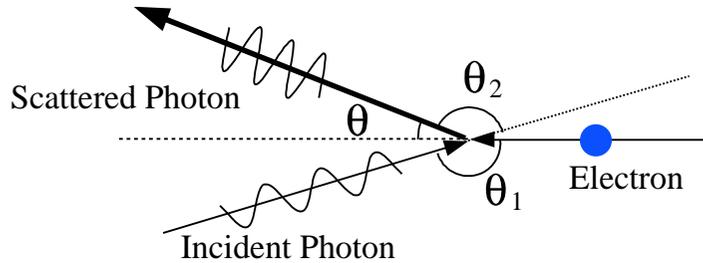


- 横方向のダイナミクス(低エミッタンス化)
 - 低エネルギー領域(500 keV)のビーム制御の精密化、入射器空洞の現実とモデルのずれの修正、励起レーザーのモデル修正が必要
 - ビーム制御法確立のための調整時間が必要(特に40 pC)
 - エネルギーを上げられれば空間電荷効果を弱められる

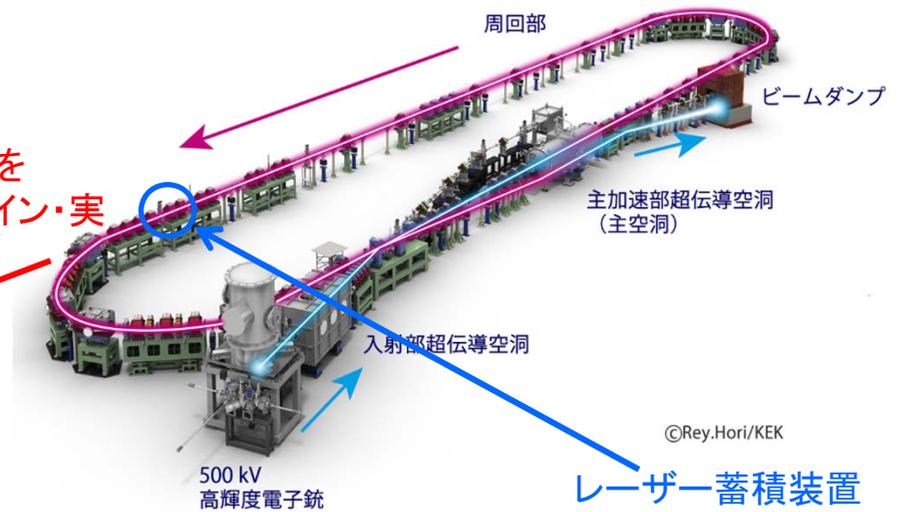
レーザーコンプトン散乱光源

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

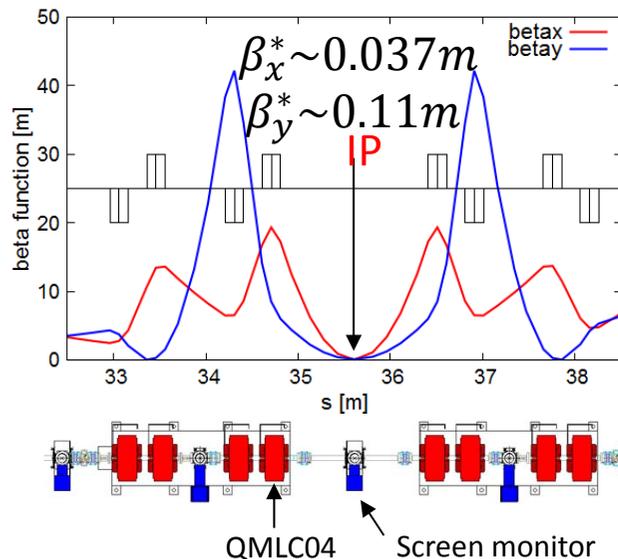
⇒ ERLの利用が適している



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

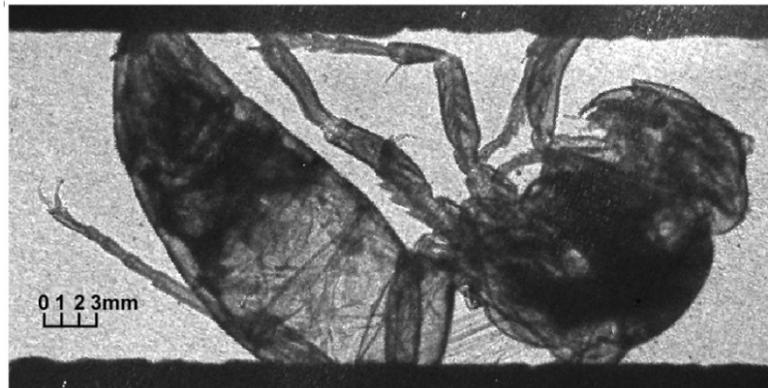


調整後のビームサイズ

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

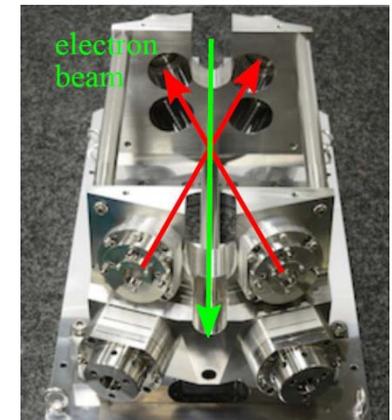
調整技術を確立

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



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

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



目次

- cERLで検証すべき課題
- 鍵となる要素の性能
- 加速器としての総合性能
- まとめ

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 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 μA (steady state)、 1mA (steady state) | 10 μA 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 bud |
| 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 Momemtum $(\Delta p/p)_{rms}$ | 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

ERL光源の課題に対するcERLの検証経過

- 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:
 - 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
 - cERLの利用に向けた試験
 - レーザーコンプトン散乱によるX線発生試験、THz光生成試験