

# cERLコミッショニング(入射器)

2015年1月19日(月)13時30分～14時00分  
KEKつくばキャンパス 4号館2階輪講室1,2

宮島 司

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

加速器研究施設

## Outline

1. ERL加速器と入射器の役割
2. 入射器の概要と目標設定
3. コミッショニングの経過・現状の到達点
4. 性能向上に向けた対策
5. まとめ

# ERL Development Team in Japan



## High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

S. Adachi, M. Adachi, M. Akemoto, D. Arakawa, S. Asaoka, K. Enami, K. Endo, S. Fukuda, T. Furuya, K. Haga, K. Hara, K. Harada, T. Honda, Y. Honda, H. Honma, T. Honma, K. Hosoyama, K. Hozumi, A. Ishii, E. Kako, Y. Kamiya, H. Katagiri, H. Kawata, Y. Kobayashi, Y. Kojima, Y. Kondou, O. Konstantinova, T. Kume, T. Matsumoto, H. Matsumura, H. Matsushita, S. Michizono, T. Miura, T. Miyajima, H. Miyauchi, S. Nagahashi, H. Nakai, H. Nakajima, N. Nakamura, K. Nakanishi, K. Nakao, K. Nigorikawa, T. Nogami, S. Noguchi, S. Nozawa, T. Obina, T. Ozaki, F. Qiu, H. Sakai, S. Sakanaka, S. Sasaki, H. Sagehashi, K. Satoh, M. Satoh, T. Shidara, M. Shimada, K. Shinoe, T. Shioya, T. Shishido, M. Tadano, T. Takahashi, R. Takai, T. Takenaka, Y. Tanimoto, M. Tobiyama, K. Tsuchiya, T. Uchiyama, A. Ueda, K. Umemori, K. Watanabe, M. Yamamoto, Y. Yamamoto, Y. Yano, M. Yoshida



## Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

R. Hajima, S. Matsuba, R. Nagai, N. Nishimori, M. Sawamura, T. Shizuma



## The Graduate University of Advanced Studies (Sokendai)

E. Cenni



## Institute for Solid State Physics (ISSP), University of Tokyo

H. Takaki



## UVSOR, Institute for Molecular Science

M. Katoh



## Hiroshima University

M. Kuriki, Y. Seimiya



## Nagoya University

Y. Takeda, Xiuguang Jin, M. Kuwahara, T. Ujihara, M. Okumi



## National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

D. Yoshitomi, K. Torizuka



## JASRI/SPRING-8

H. Hanaki



## Yamaguchi University

H. Kurisu

# ERL加速器と入射器の役割

## □ERL (Energy Recovery Linac) 加速器

- 線形加速器の特徴を有する
- 「先端性と汎用性」の両立の可能性
- 高輝度・大電流ビームの生成・加速が鍵

## □入射器の役割

- 高輝度・大電流ビームの生成

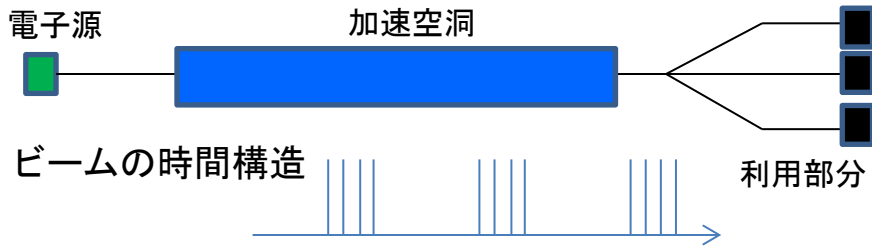
## □入射器の開発課題

- 要素技術開発：電子銃と超伝導加速空洞
- ビーム品質を保持した加速・輸送

# 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)

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_n}{\gamma\beta} \quad \Rightarrow \quad \text{加速すればするほど幾何学エミッタンスは減少}$$

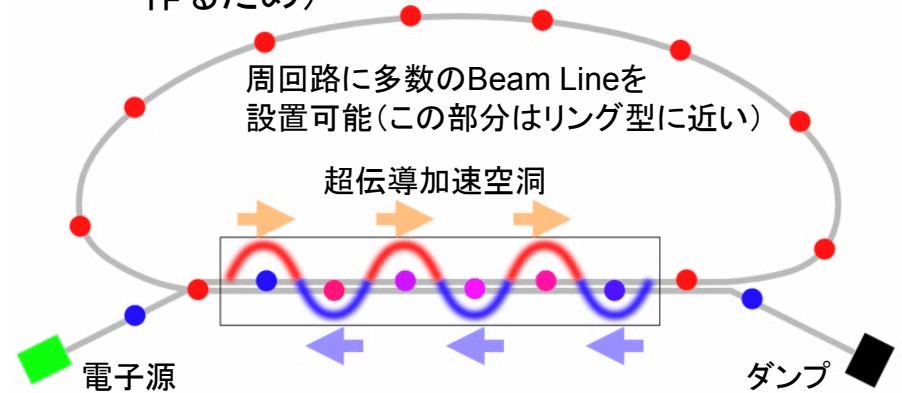
- でも、出力は「**電流 × 加速エネルギー**」なので、大電流化するとどんどん必要な電力が増加(ついでに捨てる時の放射線も増大)

⇒ 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。



- 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	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$
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

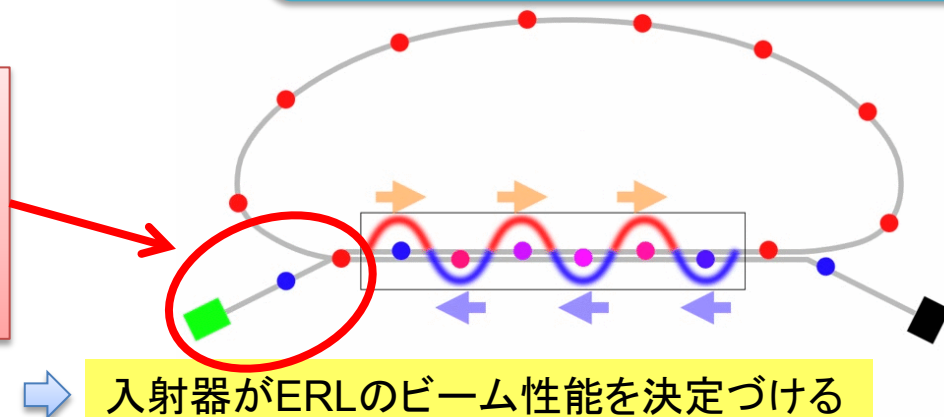
## 0.1 mm mradのエミッタンス

- 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)

- ERL加速器の入射器の役割

### 高輝度・大電流ビームの生成 超伝導空洞での中間段階への加速

- 線形加速器なので入射器のビーム品質 ⇒ 加速器全体のビーム品質
- エネルギーが低いので空間電荷効果の補償が鍵



# 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。



入射器で  
実証すべきこと



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

# 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

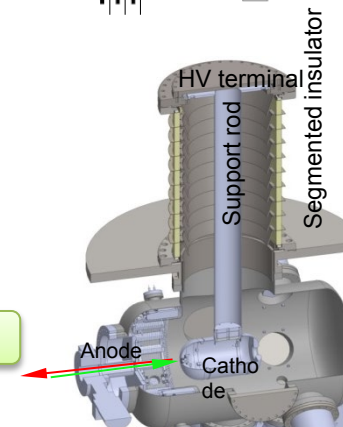
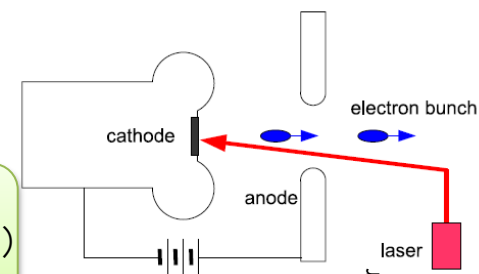
⇒ 「光陰極を用いたDC電子銃」を選択

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



## 入射器超伝導加速空洞

- 大電流を高い加速勾配でCW運転で加速することが必須

⇒ 主空洞とは異なり、「電流×エネルギー」の出力を供給し続ける必要がある

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）

- 目標設定：15 MV/m で100 mAを加速



これら二つの主要機器を通して、  
高品質を保持してビームを輸送可能なことを実証する  
必要がある



compact ERL (cERL)入射器コミッショニングの目的

# 入射器の概要と目標設定

## □cERL入射器を構成する機器

- 電子銃、バンチャー空洞、入射器空洞、合流部

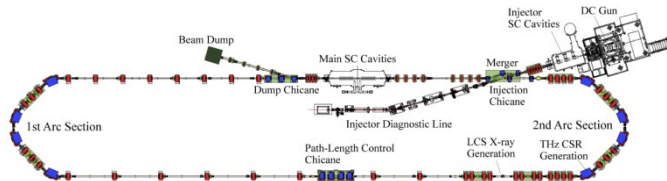
## □入射器コミッショニングの目標設定

- 放射線施設検査の期限内の合格
- 電子ビームの生成・加速
- 空間電荷効果の補償

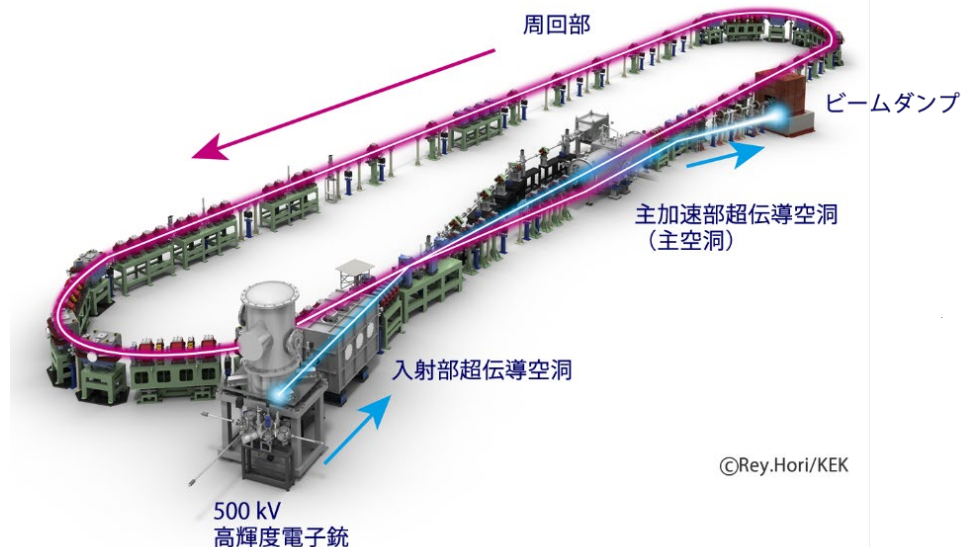
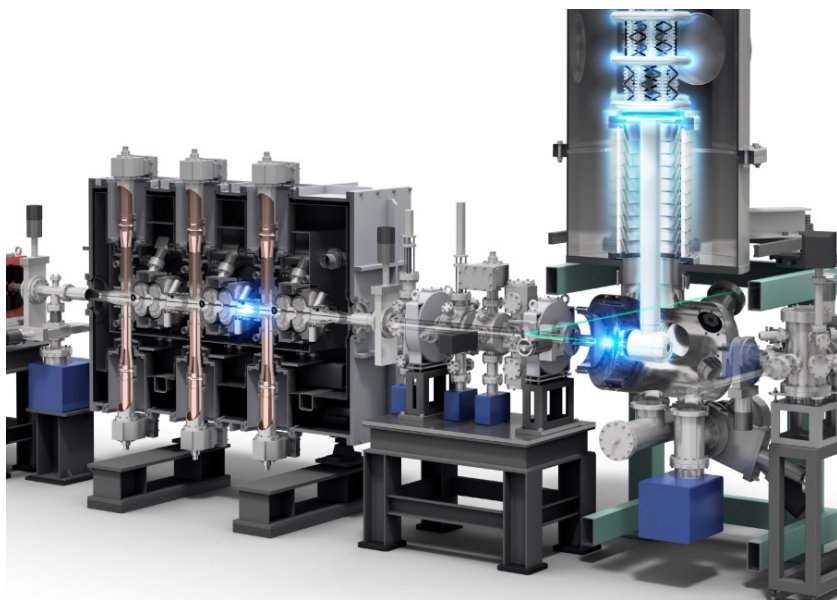


# cERLを構成する装置(電子銃・入射器)

- 光陰極DC電子銃 (JAEAで開発): 500 kV, 10 mA
  - 高電圧印加試験を経て、**390 kVで運転**
- 入射器超伝導空洞
  - 2-cell 空洞3台
  - 大電力試験を経て、**最大 7 MV/m で運転**
- 入射器診断ライン
  - 入射器で生成されたビームの品質(エミッタンス、バンチ長等)を診断



# cERLコミッショニングでの目標設定(初期段階)



©Rey.Hori/KEK

## cERL入射器の最終目標

Gun voltage	500 kV
Beam energy	5 – 10 MeV
Beam current	10 – 100 mA
Normalized rms emittance	1 mm·mrad (77 pC/bunch) 0.1 mm·mrad (7.7 pC/bunch)
Bunch length (rms)	1 – 3 ps (0.3 – 0.9 mm)

これらの性能を実現するには、  
500 kV, 15 MV/mの加速電圧・勾配が必要

- 加速電圧は低めで運転
  - 施設検査までの時間が限られている
- ⇒ より現実的な目標を設定する

## コミッショニングの目標(初期段階)

- 電子銃からの電子ビーム生成
- 超伝導空洞での安定な加速
- 品質を保持したビーム輸送 (7.7 pC/bunch) ( $\epsilon_n < 1 \text{ mm mrad}$  のエミッタンス)
- 周回部輸送
- エネルギー回収
- ビーム電流増強 (最大1 $\mu\text{A}$  ⇒ 10  $\mu\text{A}$ )

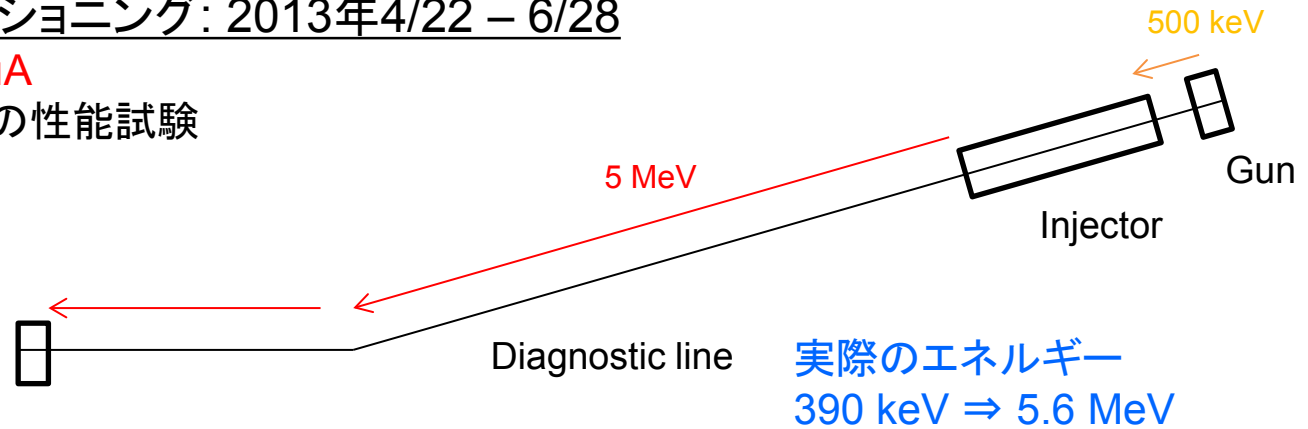
# cERL コミッショニング計画

- cERL入射器での単体試験の期間と、cERL全体での試験期間の2つに分ける

cERL入射器コミッショニング: 2013年4/22 – 6/28

平均ビーム電流: 1  $\mu\text{A}$

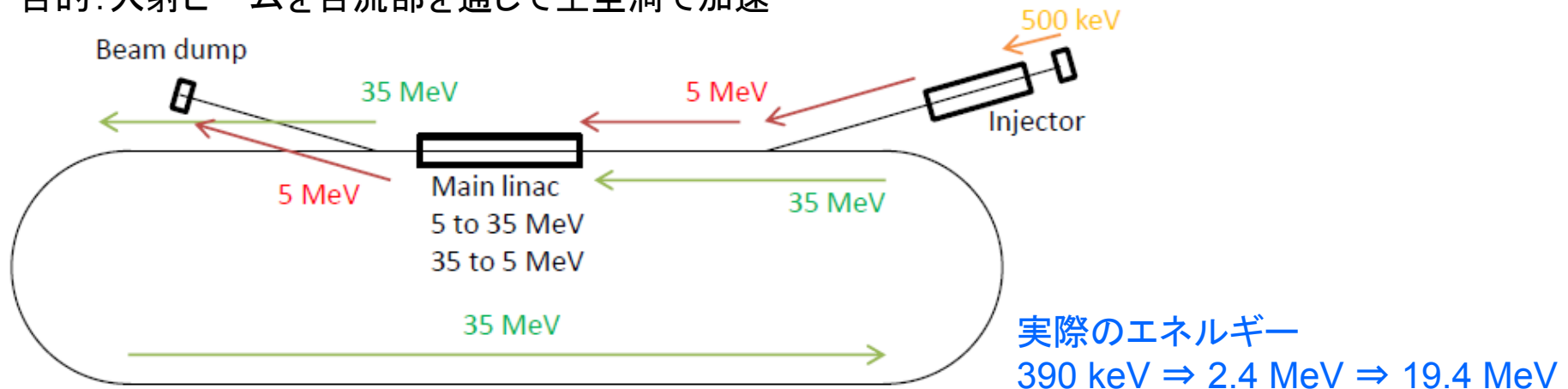
目的: 入射器単体での性能試験



cERL全体でのコミッショニング: 2013年冬から開始

平均ビーム電流: 10  $\mu\text{A}$   $\Rightarrow$  2015年1月から 100  $\mu\text{A}$

目的: 入射ビームを合流部を通して主空洞で加速



## コミッショニングの経過・現状の到達点

### □入射器単体試験

- 最低限の目標はクリア、調整はまだ不十分

### □周回部への輸送試験

- 入射エネルギー低下 ⇒ 空間電荷効果が厳しくなる・・・
- 低バンチ電荷(空間電荷効果なし)では高品質を保持
- 大バンチ電荷では調整が不十分



# cERLのビーム運転の経過

各機器の性能試験結果を元に目標を定めた

- 加速電圧は低めで運転
  - 施設検査までの時間が限られている
- ⇒ 段階的に試験を実施  
現実的な目標を設定した

## コミッショニングの目標(初期段階)

- 電子銃からの電子ビーム生成
- 超伝導空洞での安定な加速
- 品質を保持したビーム輸送 (7.7 pC/bunch)  
( $\epsilon_n < 1 \text{ mm mrad}$  のエミッタンス)
- 周回部輸送
- エネルギー回収
- ビーム電流増強 (最大1 $\mu\text{A}$  ⇒ 10  $\mu\text{A}$ )

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 $\mu\text{A}$ 電子生成・加速(5.6 MeV)に成功 7.7 pC(平均電流10 mA相当)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 $\mu\text{A}$ 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 $\mu\text{A}$ ビーム光学の基本情報の取得 7.7 pCで5.8 mm mrad(周回部)				

## ここで紹介する項目

- 入射器コミッショニングの経過
- ビーム性能: 電流、ビーム品質、安定性はどうか?
- cERLの運転を通してどのようなことがわかってきたか?

# 入射器コミッショニングの結果（施設検査）

- Step 1: Gunから入射器入口までの区間
- Step 2: 390 keVビームのダンプまでの輸送
- Step 3: RF空洞の位相調整
- Step 4: 電流の増強 (300 nA)

## Step 1

目的: 入射器空洞前の軌道を調整  
390 keVビーム

4/22(月)完了

## Step 2

目的: 390 keVビームの輸送  
390 keVビーム

4/23(火)輸送途中でビームが発散  
⇒低エネルギーでの輸送は難しい

## Step 4

目的: 電流の増強 (施設検査のため)  
5 MeVビーム、300 nA

4/26(金)電流増強 ⇒ 200 nA輸送  
5/23(木)施設検査 ⇒ 合格(5/27付)

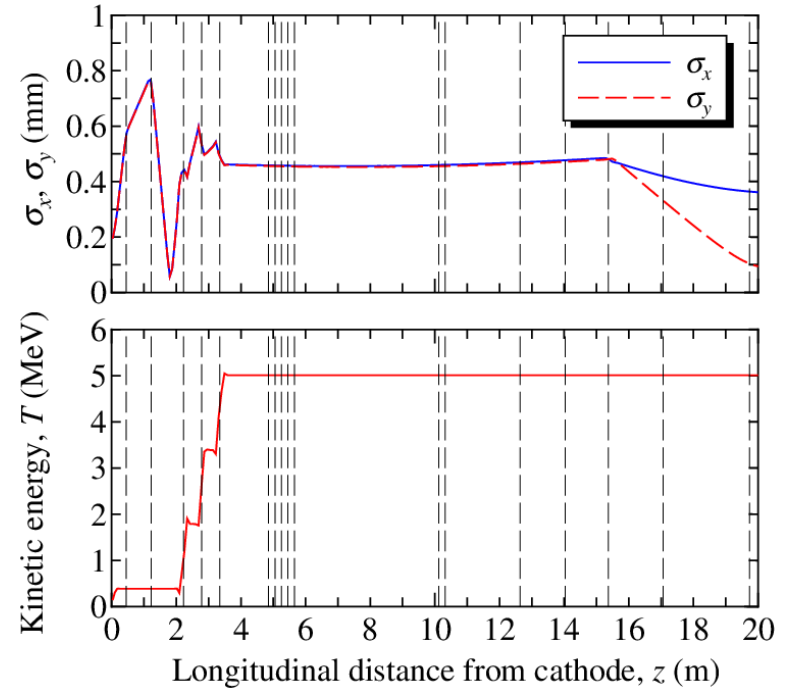
## Step 3

目的: RF空洞の位相調整  
エネルギー: 390 keV – 5 MeV  
入射器空洞1: 1.8 MeV  
入射器空洞2-3: 5.0 MeV  
Eacc = 7 MV/m

4/24(水)600 keV程度まで加速成功  
4/25(木)5 MeVに到達  
4/26(金)5 MeVオプティクス調整

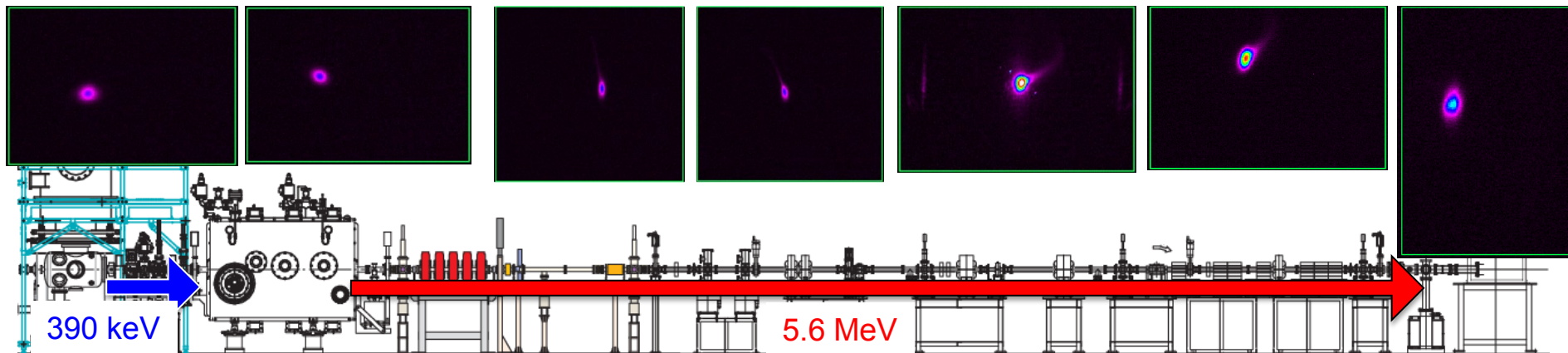
# 施設検査までのビーム調整結果

- 5日間で 5.6 MeV の加速に成功し、ビーム損失なくビームダンプまでの輸送に成功
- 5/23に施設検査を受け、5/27付で合格
- 電子銃電圧: 390 kV
- 入射器空洞加速勾配: 7 MV/m
- 平均ビーム電流; 200 nA (20 fC/bunch)
- 施設検査の後: 機器の性能試験、ビーム品質測定、調整法の確立に進んだ



## 電子銃からダンプまでのビームプロフィール

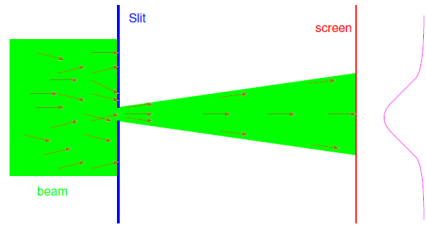
MS1	MS2	MS3	MS4	MS5 (Faraday cup)	MS6	MS7
電子銃直後	空洞前	空洞後	診断部入口	診断部中央	診断部出口	ダンプ前



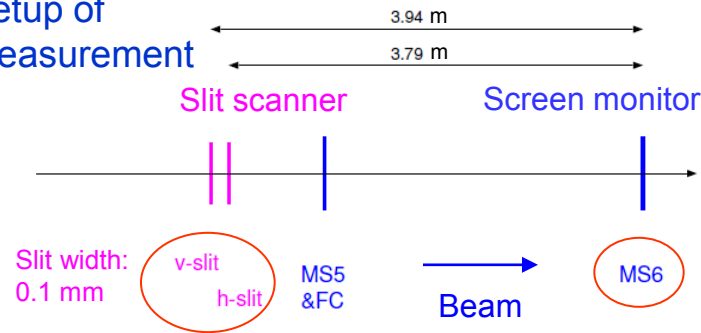
# 加速後(5.6 MeV)のエミッタンス測定(低バンチ電荷)

## 空間電荷効果が弱い電荷領域

### Slit-scan method



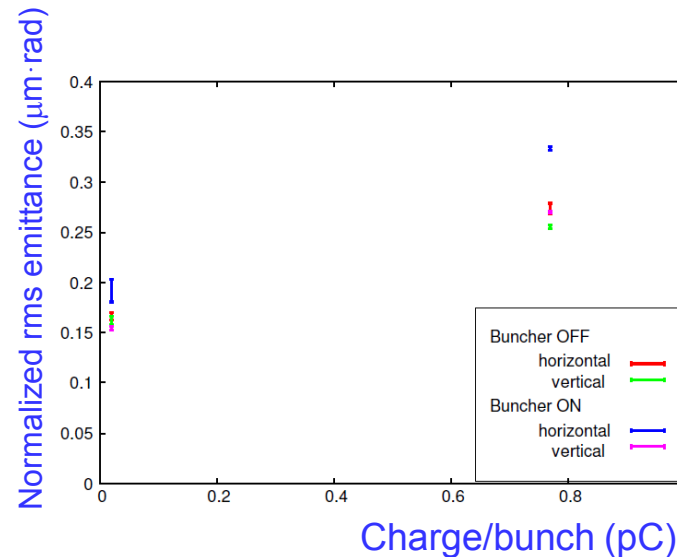
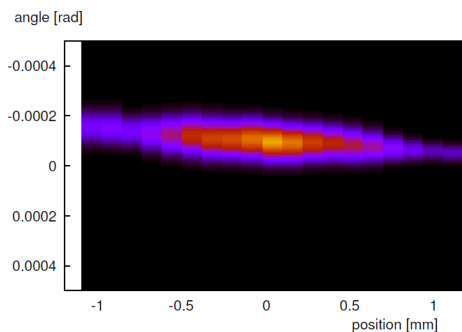
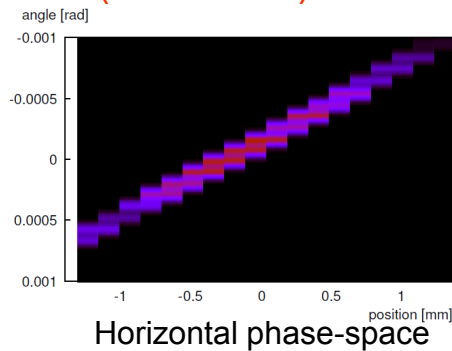
### Setup of measurement



### Measurement conditions:

Measured on 21-June-2013  
 After fine RF-phase tuning  
 Buncher: OFF or ON ( $V_c=40$  kV)  
 Laser: short-pulse ( $\sim 3$  ps rms)  
 Bunch charges: 0.02, 0.77 pC

Charge: 0.77 pC/bunch  
 (buncher off)



### Results:

$\epsilon_n \approx 0.17 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$  at 0.02 pC  
 $\epsilon_n \approx 0.3 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$  at 0.77 pC

低いエミッタンスで輸送できることが確認された。

ただし、数値計算ではこの電荷ではエミッタンス増加は十分小さく、0.1 mm mradが得られると予想される。

空洞に起因するエミッタンス増大(位相、位置のずれ、HOMカプラーによるキック等)がありそうなので、調査を進めている。

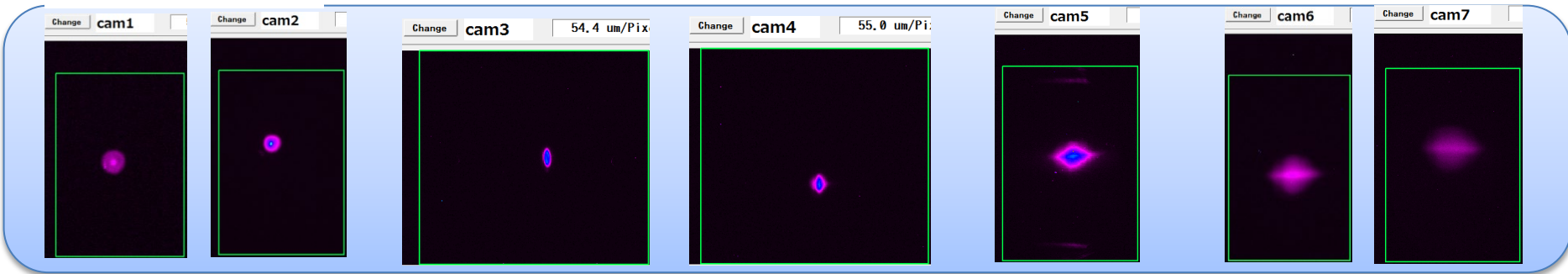
Y. Honda, ERL2013  
 S, Sakanaka, ERL2013 より



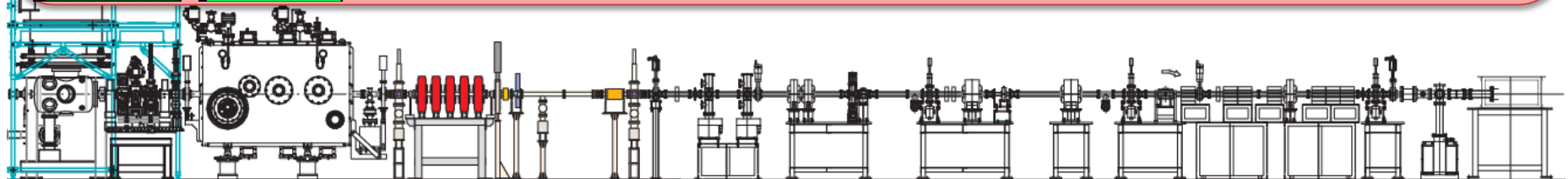
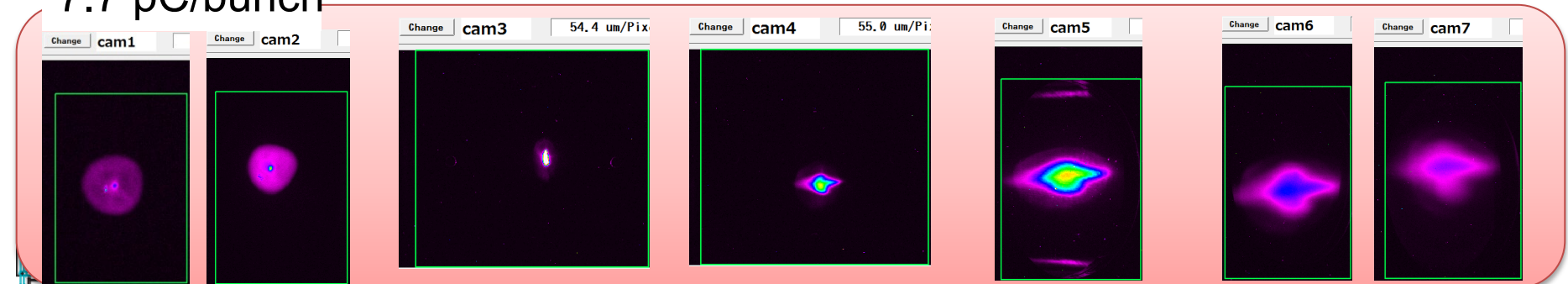
# 大電荷でのビーム試験

- 空間電荷効果の効かない微小電荷領域(10 – 20 fC/bunch)での調整法確立およびビーム品質の確認の後に、レーザーを増強して最大7.7 pC/bunchでの調整試験を開始した
- バンチ電荷を増やすと空間電荷効果による影響が見え始める

1.5 pC/bunch



7.7 pC/bunch



# 加速後(5.6MeV)のエミッタンス測定(高バンチ電荷)

空間電荷効果が顕著に現れる電荷領域

Y. Honda, ERL2013  
S, Sakanaka, ERL2013 より

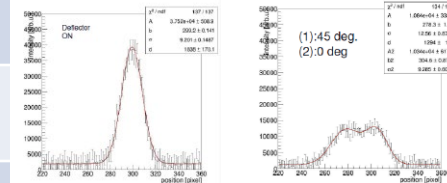
## Conditions of measurements

Meas. Date	Bunch charge (pC)	Width of laser pulse	Buncher Vc (kV)	Solenoids (SL1, SL2)
21-June-2013	0.02, 0.77	3 ps (rms, Gaussian)	40	7.8/8.7, 3.0
26-June-2013	3.1, 7.7	3 ps (rms, Gaussian)	50	8.3, 4.99
28-June-2013	1.5, 7.7	16 ps (FWHM, semi-flat)	50	8.3, 4.99

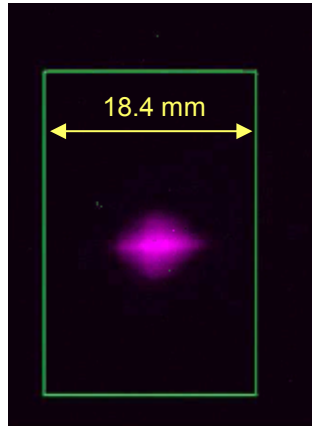
## Bunch lengths

3-ps laser

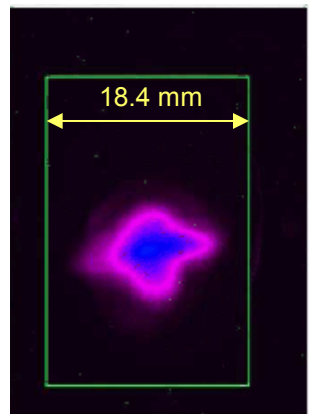
16 ps semi-flat



Beam profiles at screen monitor MS6

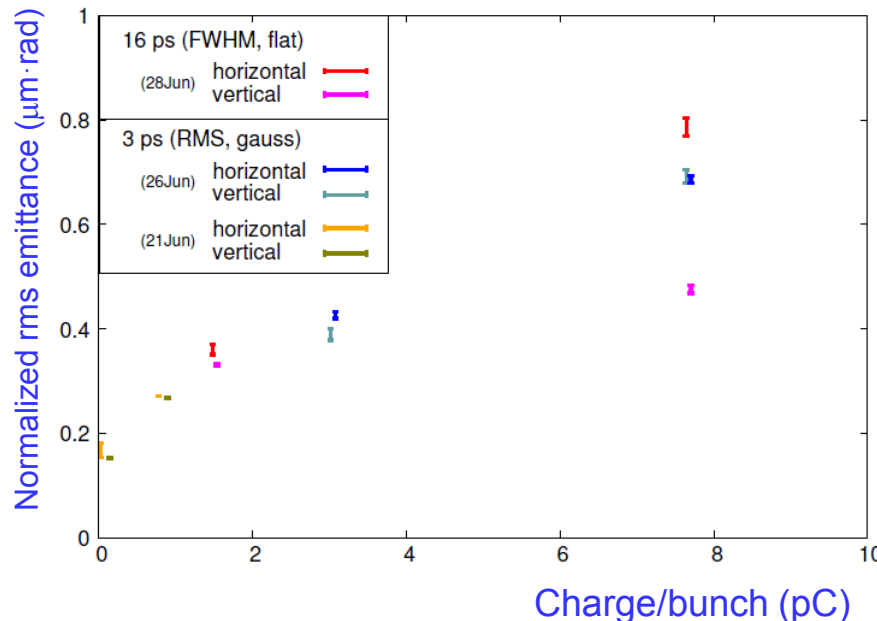


1.5 pC/bunch



7.7 pC/bunch

## Summary of measurements



Tentative result:

$$\varepsilon_n \approx 0.8 \mu\text{m}\cdot\text{rad at } 7.7 \text{ pC}$$

(not fully optimized yet)

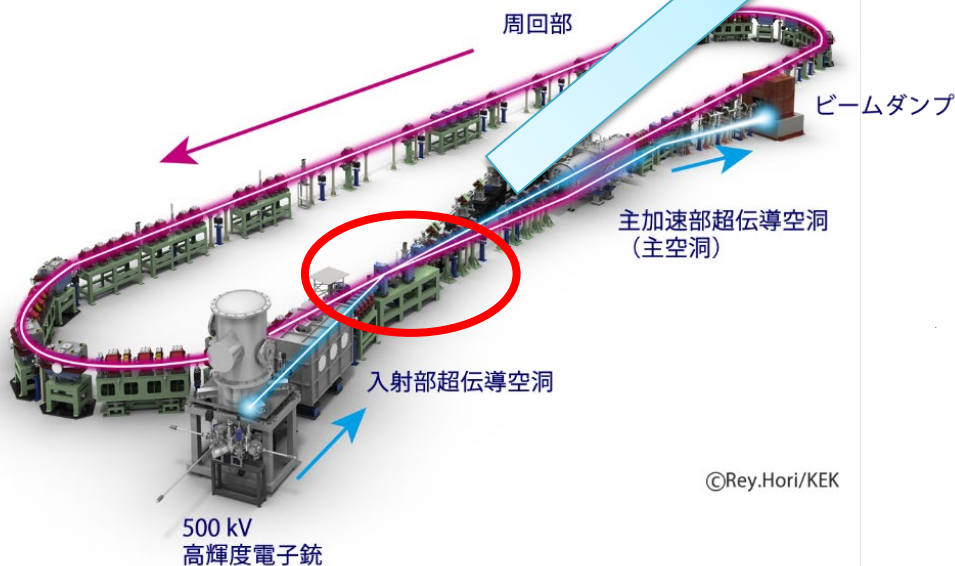
最低限の目標(< 1 mm mrad)は達成した。

しかし、数値計算ではコミッショニングの制約条件下でも、0.3 mm mradのエミッタンスが得られると予想されている。

位相調整、空洞内のビーム位置調整等が不十分であり、現在対策を検討している

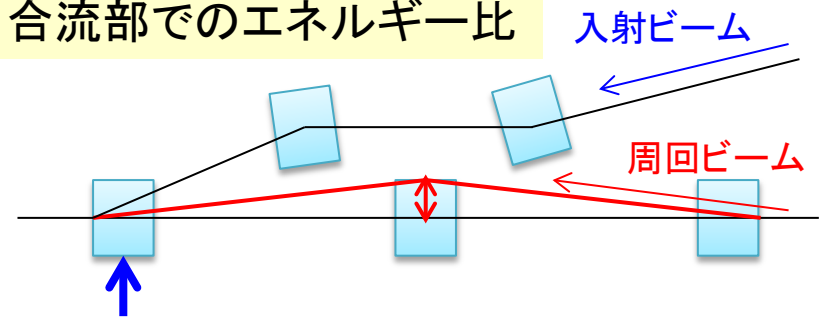
# 入射ビームの周回部への輸送

- 入射器単体試験では、入射器超伝導空洞の性能条件付近まで加速した (5.6 MeV)
- 周回部への輸送では、合流部を通して、主空洞までビームを輸送する必要がある



©Rey.Hori/KEK

## 合流部でのエネルギー比



この磁石を入射(エネルギー低)、周回(エネルギー高)の2つのビームが通過。  
 エネルギー比が近いと周回ビームのバンプがどんどん高くなり、チェンバー内壁に当たる。  
 主空洞が下がると、入射空洞も下げざるをえない。  
 現状は1:6が下限(これより大きくしたい)

## ○入射エネルギーの低減

### 主空洞

- 加速後のエネルギー: 35 MeV ⇒ 19.4 MeV

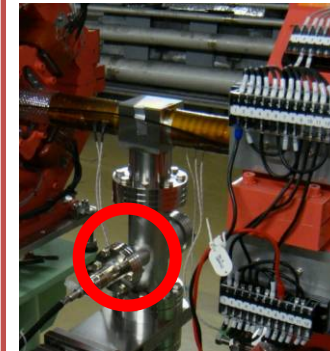
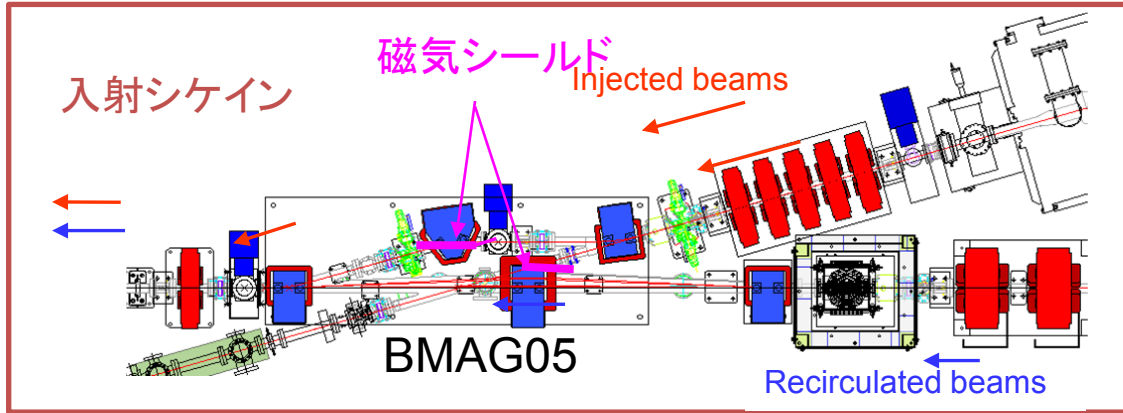
### 入射器超伝導空洞

- 入射エネルギーと周回エネルギーの比を1:7にするために、3.3 MV/m に下げて運転することに決定
- 加速後のエネルギー: 2.4 MeV
- 空間電荷効果はより厳しい方向へ...

# 入射器から主空洞までのビーム輸送

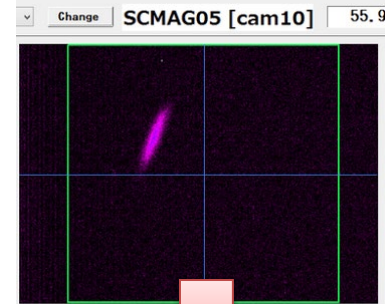
- 2013年12月の運転: 合流部電磁石の漏れ磁場により軌道のずれが見られた  
⇒ **磁気シールドを追加することにより対処**
- 合流部付近でステアリングの非線形な応答と、x-y結合が見られた ⇒ **真空圧カゲージ(CCG)の磁石がビーム軌道近くにあったので外すことで対処**

M. Shimada,  
ERL推進委員会資料  
(2014.03.20)より

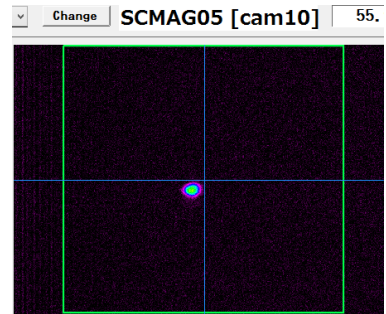


CCGの磁石

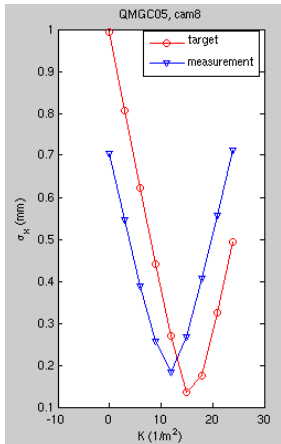
主空洞加速直前の  
xy カップリング



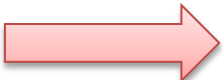
環境磁場対策とマッチング後



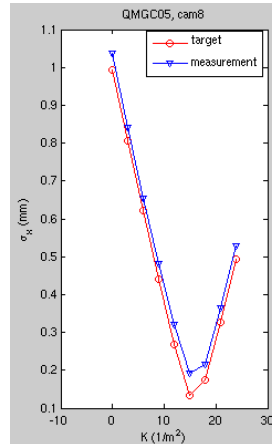
- 主空洞手前のビームプロファイルが設計からずれている ⇒ **合流部入口、主空洞入口でオプティクスマッチングを実施。ほぼ設計通りとなった。**



合流部入口  
直前の4極電  
磁石の応答



マッチングによ  
り測定値(青)  
は設計値(赤)  
にほぼ一致



低エネルギー領域特有の現象(環境磁場に弱い)があったが、一つ一つ対処することでほぼ設計通りのビーム輸送に成功

# ビーム性能開発の現状

空間電荷効果が支配的な高バンチ電荷(7.7 pC/bunch, 10 mAビーク)の輸送試験(これまで2回実施)

## (1) 入射器単体試験(2013年6月)

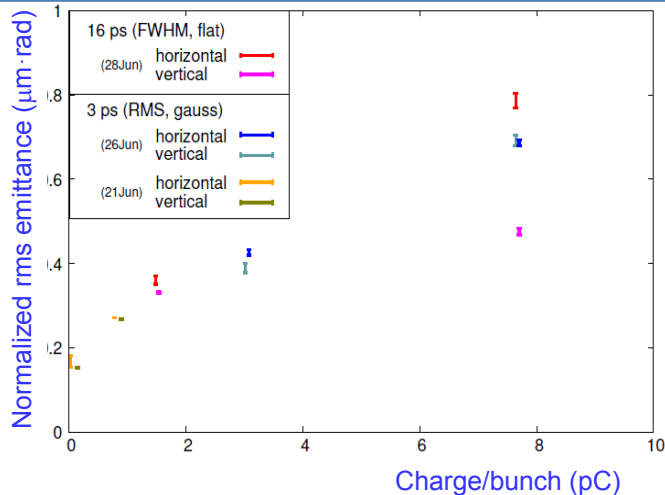
入射器エネルギー: 5.6 MeV

Y. Honda, ERL2013  
S. Sakanaka, ERL2013 より

周回エネルギー: 周回なし

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	(1)入射器 診断部
7.7 pC(短パルス)	0.8 / 0.5
7.7 pC(長パルス)	0.7 / 0.7



最低限の目標(< 1 mm mrad)は達成  
しかし、設計(0.3 mm mrad)にはまだ実証できず

エミッタンスが設計に到達していない原因: 入射器エネルギーの低下、軌道・位相の詳細調整がまだできていない

高バンチ電荷での基礎情報の測定・調整法の確立 ⇒ 2015年5月から開始予定

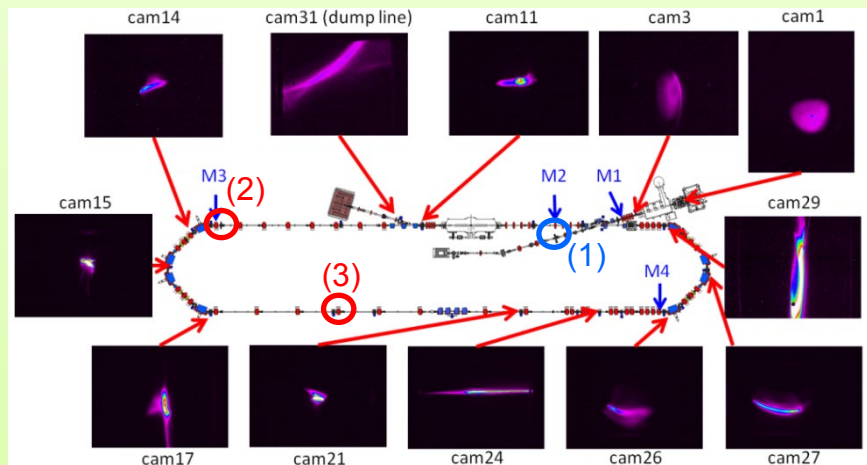
## (2) 周回部輸送試験(2014年6月)

入射器エネルギー: 2.4 MeV

周回エネルギー: 19.4 MeV

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	(1)入射器 診断部	(2)主空洞 出口	(3)第一 アーク後
20 fC	-	0.14 / 0.12	0.14 / 0.14
7.7 pC	2.5 / 2.9	2.9 / 2.4	5.8 / 4.6



低バンチ電荷: ほぼ初期エミッタンスを保持して輸送  
高バンチ電荷: 設計(0.6 mm mrad)よりかなり大きい

# 電子銃と入射器空洞の現状と今後の開発

## 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, 6.5  $\mu$ Aを達成
- **長時間**: 390 kV 低電流で達成(~ 260 hours)
  - 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)

- 高品質かつ大電流: **これから**
- 大電流かつ長時間: **これから**
- 高品質・大電流・長時間: **これから**

**ピーク性能だけではない真の性能へ**

## 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**: 6.5  $\mu$ A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: **これから**

E. Kako, et. al.,  
H. Sakai, et. al.

N. Nishimori,  
S. Sakanaka  
ERL2013発表資料より

## 現状の性能から次の段階に向けて

- **大品質化**: 390 kV  $\Rightarrow$  500 kV 印加へ(2015年夏に絶縁セラミックを改造予定)
- **大電流化**: 500 kV 10 mA試験の準備、100 mA用の電源の設計検討を進めている
- **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」
- **大電流生成**: KEK第二電子銃での500 kV 10 mA生成試験の準備を進めている
  - $\Rightarrow$  2015年2月から 100  $\mu$ A生成試験、2015年度中に10 mA試験を開始したい
- **マルチアルカリカソード開発**: JAEA, 広島大学を中心として、開発を進めている
  - $\Rightarrow$  現状でも電荷寿命で一桁以上改善できる見込み
  - 2015年にcERL、およびKEKで開発している第二電子銃に組み込んで検証を開始予定

# 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 6.5  $\mu$ A 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。
- 次の目標: 「高品質・大電流・長時間」の両立の実証、390 kV  $\Rightarrow$  500 kV 運転に向けた改造、10 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 6.5  $\mu$ A の CW 運転
- 次の目標: 大電流加速試験(電子源の増強に合わせて進める)。実用的な加速勾配に合わせて、3 GeV ERL光源設計の修正(加速勾配によって加速器の「長さ」が決まる)。

### – ビーム性能:

- 実証済み: 初期エミッタンスを保持して周回運転(低バンチ電荷、空間電荷効果なし)
- 次の目標: 高バンチ電荷での空間電荷効果補償法の確立  $\Rightarrow$  2015年5月に予定

### – 安定性(長時間・安定に、一様に):

- 実証済み: 低電流運転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
- 次の目標: 大電流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6.5  $\mu$ Aではまだ問題にはならない
- 次の目標: 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

2013年から運転を開始して、少しずつ回答を出しつつある  
この結果をERLの光源利用に今後反映していく

## 性能向上に向けた対策

### □低バンチ電荷輸送(空間電荷効果なし)

- 基本的に水平・垂直方向と時間方向は独立(2次元+1次元)
- 数値計算用モデルで実機を再現できつつある

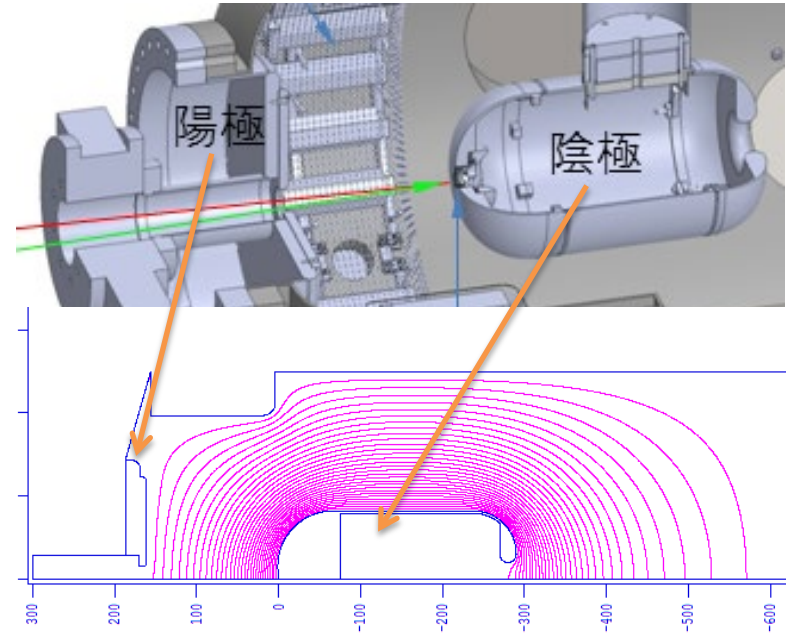
### □高バンチ電荷輸送

- 3次元ビーム制御が必須(水平・垂直+時間方向)
- 数値計算モデル補正用のデータを取る
- 加速過程の精密調整



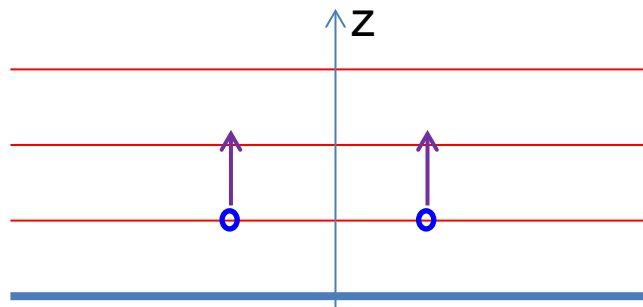
# 低バンチ電荷輸送 ～電子銃モデルの補正～

- 背景
  - DC電子銃の場合には、電極形状により電子ビームに収束あるいは発散力を与えることができる
  - ビームライン下流でのビーム性能を上げるには、上流側から正しくビームラインを理解できている必要がある
- 目的
  - 光陰極DC電子銃の実際の収束力を測定することによって、電子ビームにどのような収束・発散力が働いているかを実験的に調べる
- 電子銃での収束・発散力の起源
  - 電極形状に起因する静電場の分布



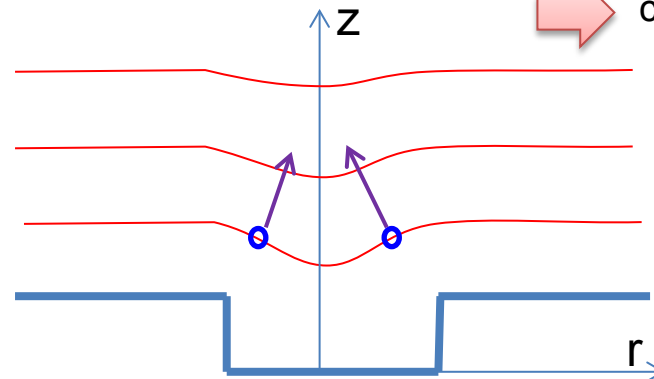
## (1) 完全に平板の場合

等電位面も陰極に対して平行でr方向の電場成分はなし(収束・発散力なし)



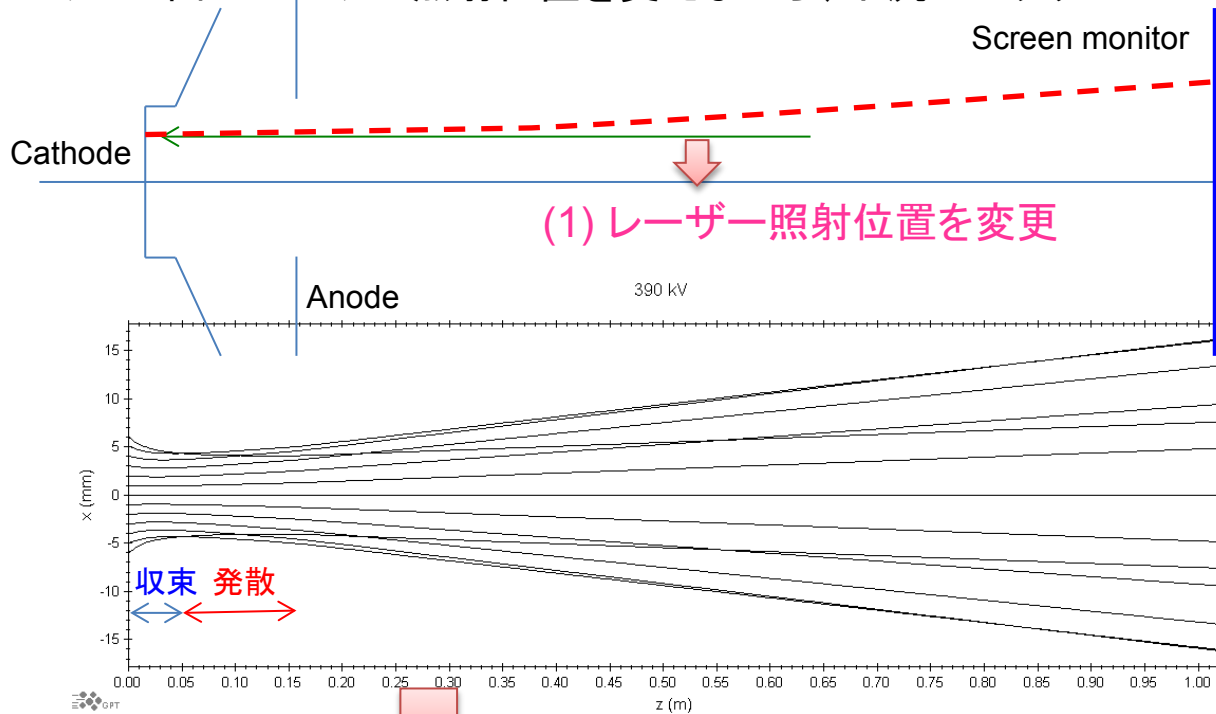
## (2) 陰極面に凹みがある場合

中心部分で電場が歪み、r方向の電場成分(収束力)が生じる



cERLの電子銃はこの形状

- カソード面のレーザー照射位置を変えながら、下流のスクリーン上でのビーム位置の変化を測定

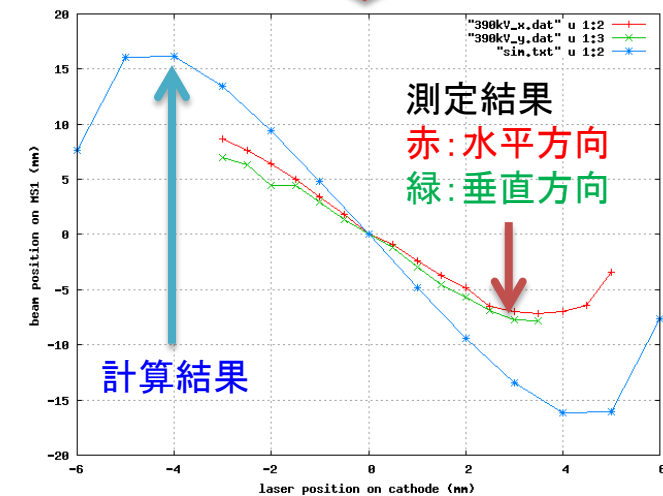


(2) スクリーン上での位置を測定

(1) レーザー照射位置を変更

ビームダイナミクス設計で用いた電場分布から計算した粒子軌道

- 電極近傍で収束
- 電子銃下流で発散
- 全体では発散

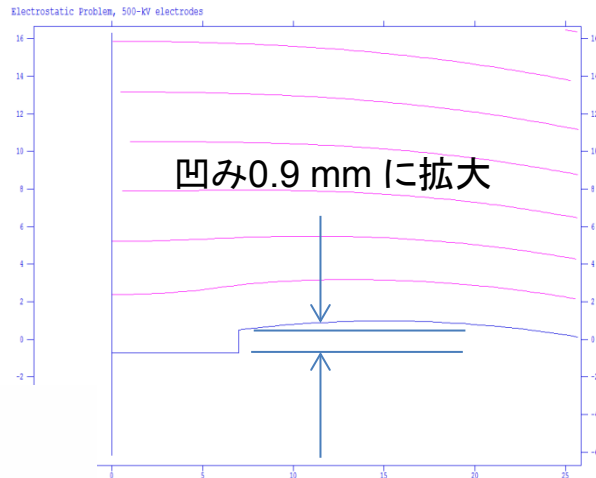
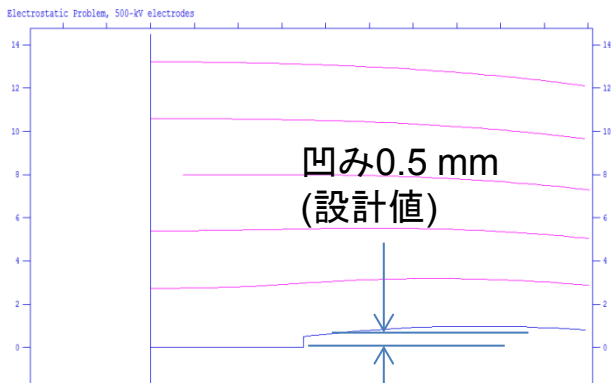


### 測定結果

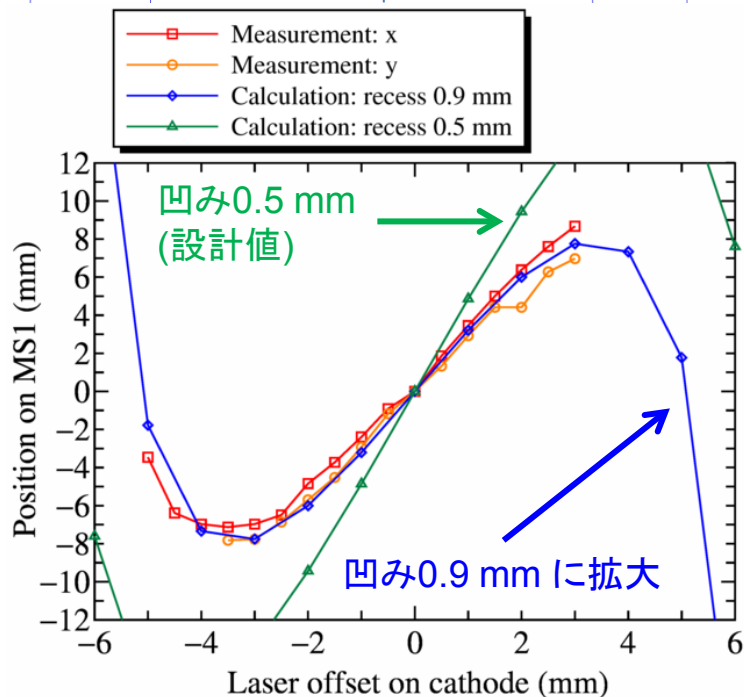
- 水平・垂直方向で大きな差はない  
⇒ 電場分布は軸対称にできている
- しかし、計算結果と合わない

電場分布が設計とは異なるのでは？  
カソード近傍での影響が大きいのでそこを調査

- カソード凹みの部分のわずかな違いが下流では大きく見える(エネルギーが低いため)
- 電極の構造: 電極と半導体のカソードキャップとの間に取り外しのための隙間がある
- いくつかの凹みを計算してみる(凹み = 0.5, 0.9, 1.0, 1.2 mm)



凹みを変えた時の電場分布 (カソード近傍) の計算結果



カソード凹み0.9 mmに拡大したときに実験結果をよく再現

電子銃の電場形状を実験的に決定できた

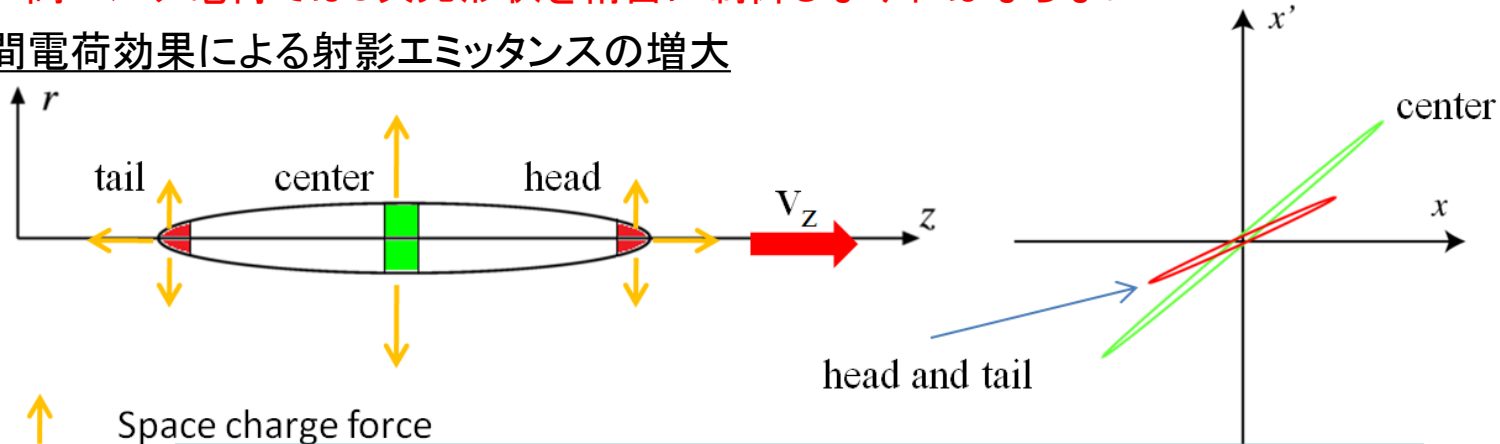
これ以降のビーム運転ではこの電場形状を用いて数値計算

このような補正を上流側から進めている

# 電子ビームの3次元形状

- 低バンチ電荷: 空間電荷効果がないので2次元面(水平、垂直方向)と時間方向は独立
- 高バンチ電荷: 空間電荷効果を通してお互いが独立ではなくなる  
⇒ **高バンチ電荷では3次元形状を精密に制御しなければならない**

## 空間電荷効果による射影エミッタンスの増大



**バンチ長が短い ⇒ 電荷密度上昇 ⇒ 空間電荷力による発散大**

## 制御可能なもの

(1) 初期電子バンチ条件 (励起レーザの条件)

Initial laser condition	Emitted electron beam
Laser spot size, $d$	Transverse beam size
Laser pulse width	Bunch length
Laser power	Bunch charge
Laser wave length	Initial emittance ( $k_B T$ )

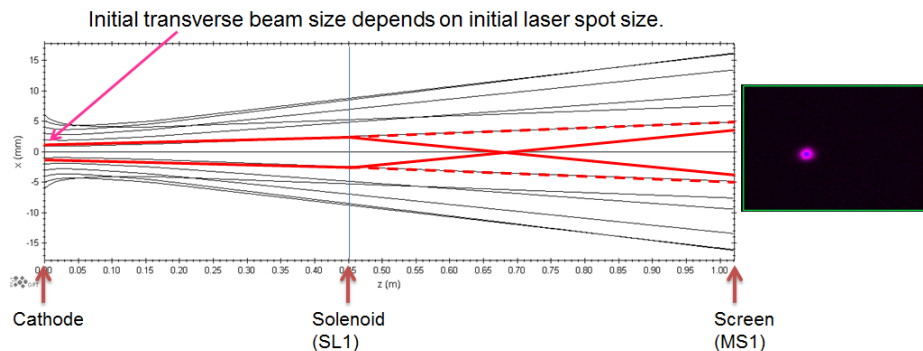
(2) 輸送路の条件

- 収束・発散力の制御(2次元形状)
  - バンチ圧縮の制御(バンチ長)
  - 加速の制御(エネルギー、バンチ長)
- これに加えて、条件を乱す外乱を排除していく必要がある  
⇒ **電子銃から入射器空洞までの総合調整が欠かせない**

# 高バンチ電荷ビームのモデル補正の現状

- 2次元(水平・垂直方向)のモデルの補正: 電子銃収束力測定からほぼできた
- 次は**時間方向の診断と補正**
- 10 mA(7.7 pC), 5 mA(3.85 pC), 1 mA (0.77 pC)のピーク電流の場合に、ソレノイドによるビームサイズ変化を測定
- 同じ初期バンチ長で電荷を増やすと、電荷密度が上昇し空間電荷力による発散力が増え、スクリーン上でのビームサイズが増加する
- このバンチ電荷に対するソレノイドスキャンの応答結果から、初期バンチ長を推定する

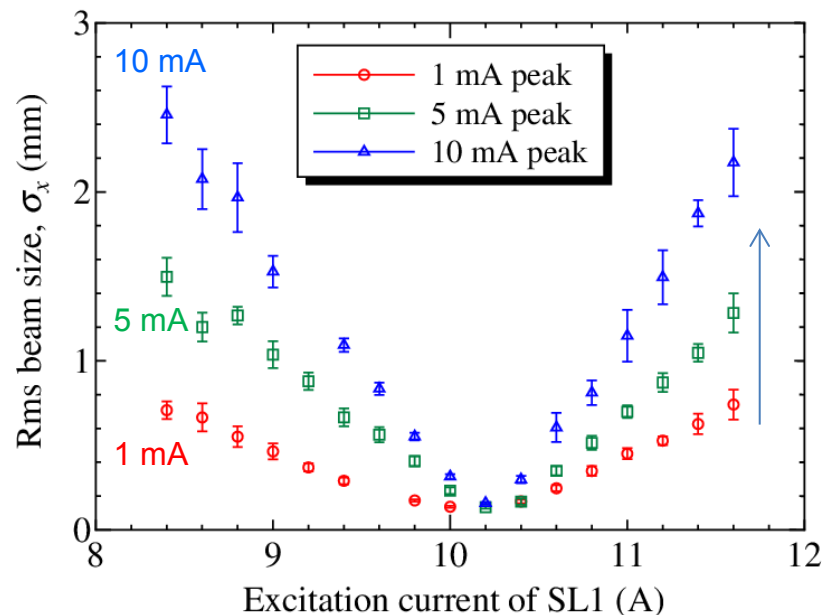
空間電荷効果の効かない場合のソレノイドによる収束



**測定条件**  
 2014年6月19日  
 電子銃電圧: 390 kV  
 初期レーザー直径: 1.1 mm  
 8個のガウシアンをスタック

測定結果

この測定結果から時間方向のモデルを修正する



# 初期バンチ長の推定と補正

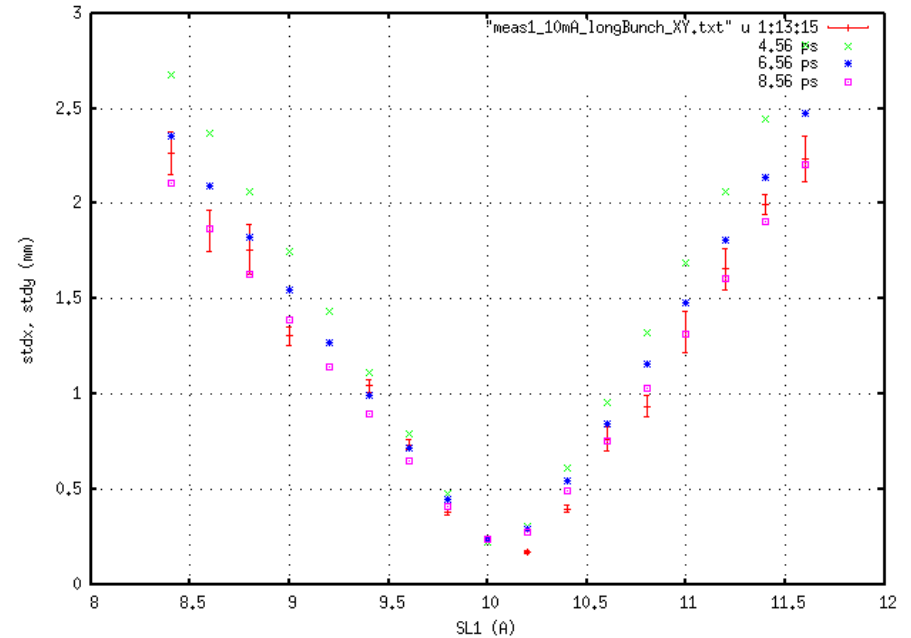
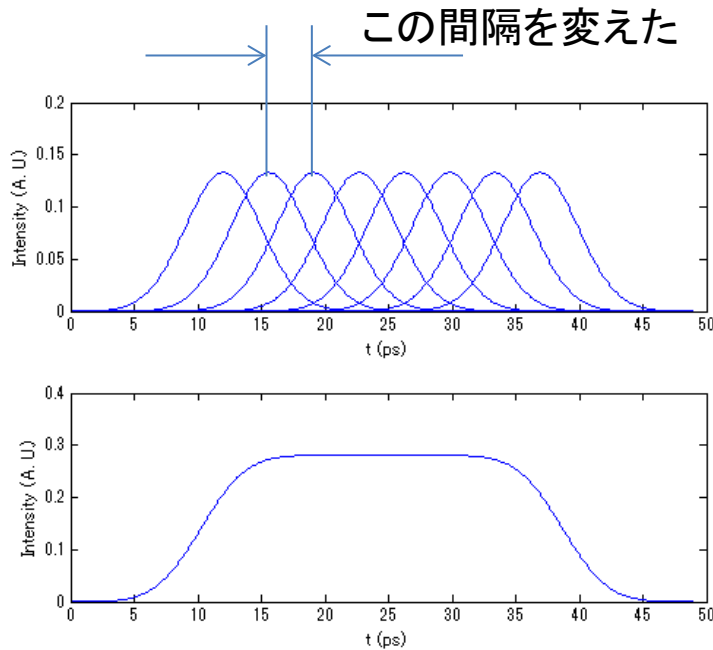
- ソレノイドスキャンに影響を与えるパラメタ

- 電子銃収束力
- ソレノイドによる収束力
- 初期レーザー直径
- 初期レーザーパルス長
- バンチ電荷



空間電荷効果の効かない条件で検証済  
固定パラメタとする

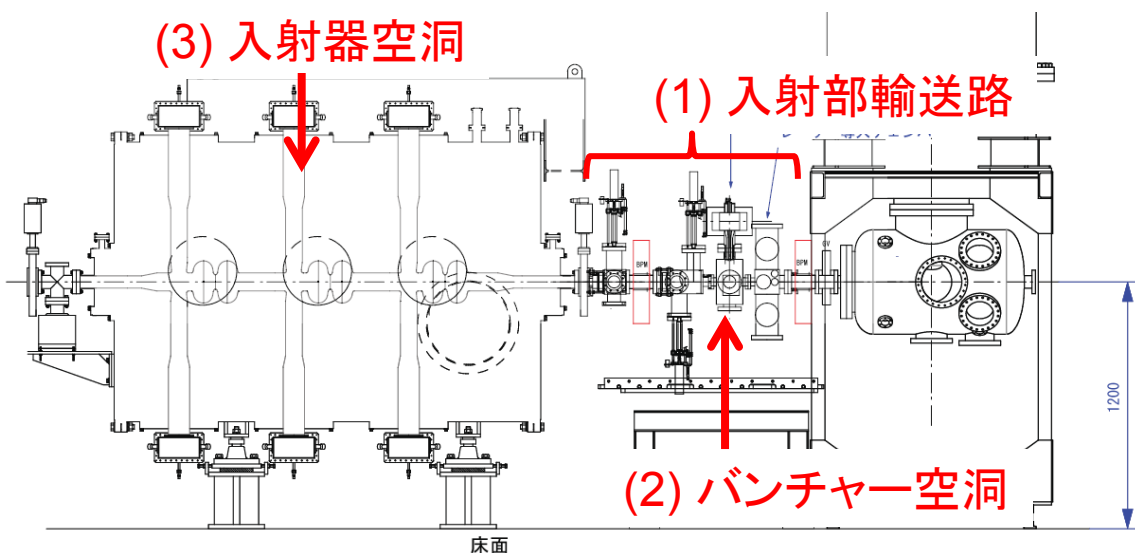
- 初期レーザーパルス長をフリーパラメタにして実験結果を再現するようなパルス長を決定した



- パルス間隔:8.56 psのときが、実験結果に近い応答
- 次の実験でこれを検証する

# 加速、バンチ圧縮過程のモデルの補正

- 電子銃近傍のモデル補正はある程度できてきた
- 次は、**加速、バンチ圧縮過程のモデル補正と3次元制御を実施する**

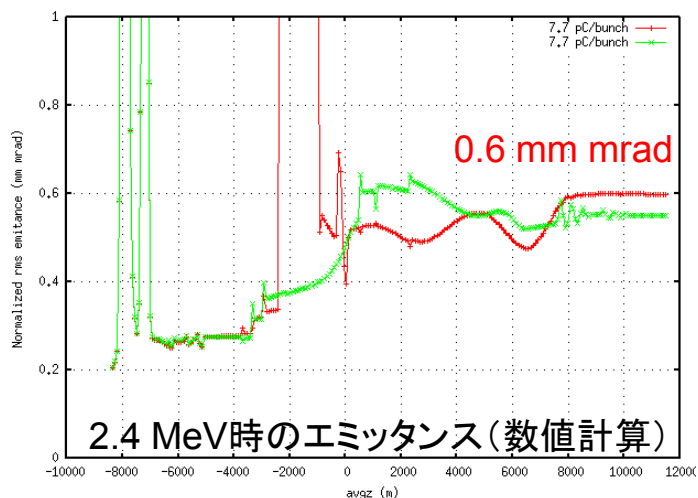


(1) 入射部輸送路  
 ・外乱の低減(軌道調整、補正コイルの磁場の影響調査)

(2) バンチャー空洞  
 ・軌道補正、加速位相・電圧制御

(3) 入射器空洞  
 ・軌道補正、加速位相・電圧制御

新しく開発したバンチ長測定法を用いながら、上流から調整を進める



次のターゲット ⇒ **2015年5月～6月に実施予定**

- ビーム応答測定(3次元)
- 入射器5.6 MeVにおける低エミッタンス化(0.3 mm mradが設計の最小値、ここに近づけてる調整を進める)
- 入射器2.4 MeVにおける低エミッタンス化と周回(0.6 mm mradに近づける)

# cERLのビーム運転の経過と展望

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
↓ 1 $\mu$ A							
↓ 1 mA							

**入射器単体試験(4月～6月)、最大1  $\mu$ 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

→ 試験済み

→ これからの予定

**cERL総合運転(12月～3月)、最大10  $\mu$ 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  $\mu$ 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  $\mu$ 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(案)(5月～6月)、最大100  $\mu$ A**  
入射器単体で0.3 mm mradを目標  
LCS-X線生成試験の続き

**バンチ圧縮試験(案)(11月～12月)、最大100  $\mu$ A**  
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  $\Rightarrow$  500 kV

**大電流試験(案)(2月～3月)、最大1 mA**  
1 mA 生成・加速試験

...



# まとめ

# まとめ (cERLの運転)

- cERL試験加速器でERL実証試験を2013年4月から継続してきた
- ERLの鍵となる電子銃、超伝導空洞ともに非常に安定であった
- **6.5  $\mu$ A, CW運転でのエネルギー回収を実証** ⇒ **大きなmilestone**
- 加速後の規格化エミッタンス ⇒ 空間電荷効果を抑える調整はまだ不十分
  - 低バンチ電荷(空間電荷効果なし) ⇒ ほぼ入射器のエミッタンスを保持して周回できた
  - 高バンチ電荷(空間電荷効果あり) ⇒ 次の目標の0.3 mm mradに到達する調整が必要  
⇒ 2015年5月から開始予定
- 現状と今後の課題
- 現状 ⇒ **各機器のピーク性能を検証しつつある**
- 今後の開発 ⇒ **ピーク性能だけではなくて総合性能を発揮できるように**
  - 電子銃: **大電流と長寿命化の両立** ⇒ 大電流電源とマルチアルカリカソードの開発(2015年~)
  - 超伝導空洞: **電圧上昇と、大電流ビームの加速** ⇒ Field emissionを抑える組み立て、process法の開発等
  - ビーム制御: 低バンチ電荷(2次元)ではある程度制御できている。高バンチ電荷(3次元)の精密制御に向けた基礎データ測定、調整試験を2015年5月に実施する
- cERL試験加速器のユーザー利用に向けた準備
  - レーザーコンプトン散乱によるX線・ $\gamma$ 線の生成・利用(LCS光源利用) ⇒ 2015年1月から開始
  - コヒーレントTHz(CSR-THz)光の生成・利用 ⇒ 2015年度に試験開始予定

## • 謝辞 ～運転を支えて頂いた方へ～



コミッショニング運転では、建設・コミッショニングチームだけでなく、機器を安定に運転するために多くの方の協力がなければ進めることができませんでした。

大前提として、冷凍機の安定な運転が欠かせませんでした。冷凍機運転員の方に感謝します。  
また、コミッショニング運転では機器の迅速な立ち上げ・立ち下げ、そして運転に必要なソフトウェアの迅速なサポートが欠かせませんでした。

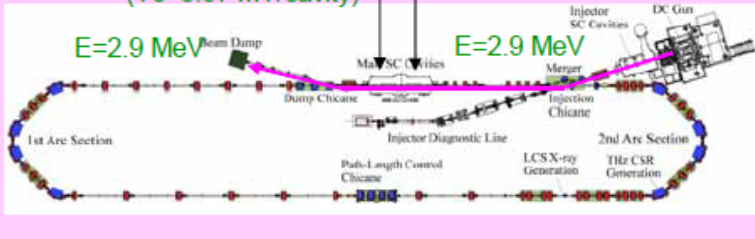
東日本技術研究所： 路川徹也さん、亀田吉郎さん、  
NAT： 山田浩気さん、沼田直人さん、浅川智幸さん  
に感謝します。

Buck up slides

# エネルギー回収の実証

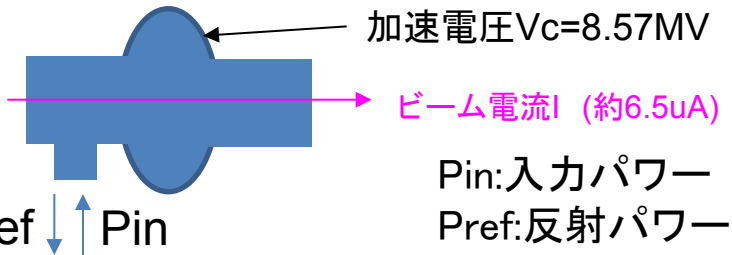
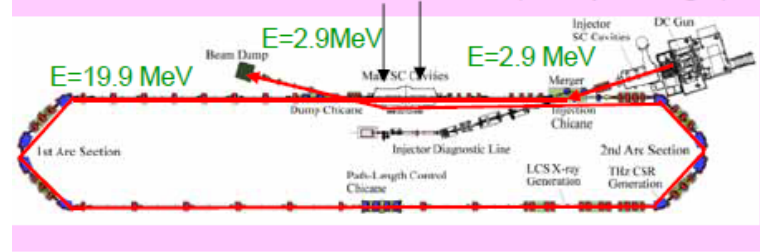
## Non-ERL operation (beam loading test)

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)



$P_{in}$ : 入力パワー  
 $P_{ref}$ : 反射パワー

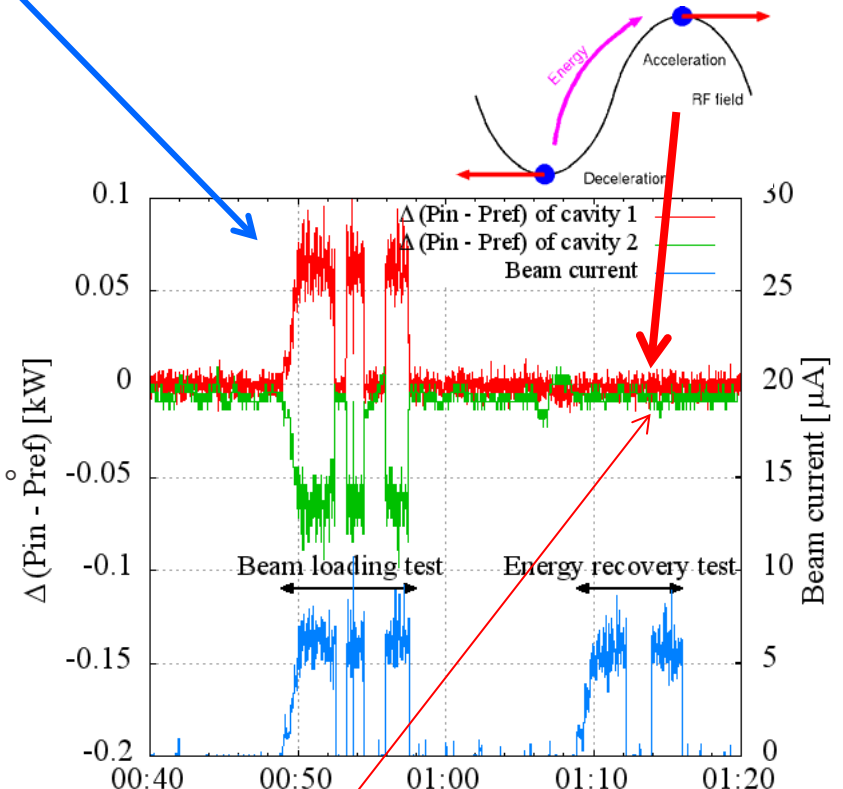
入力パワーと反射パワーの差:  $P_{in}-P_{ref}$

### ・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、  
 $P_{in}-P_{ref}$ はビーム電流によらず一定。



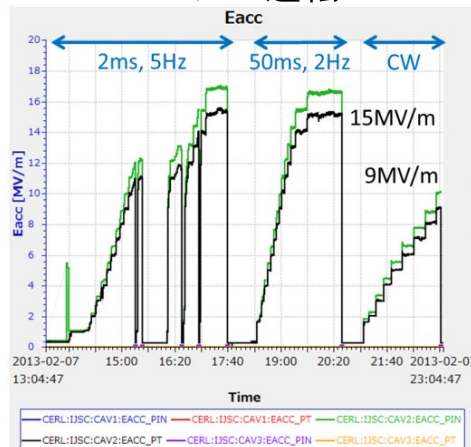
ビームの有り無しで変動しない ⇒ エネルギー回収を確認

# 超伝導空洞の現状と今後の課題

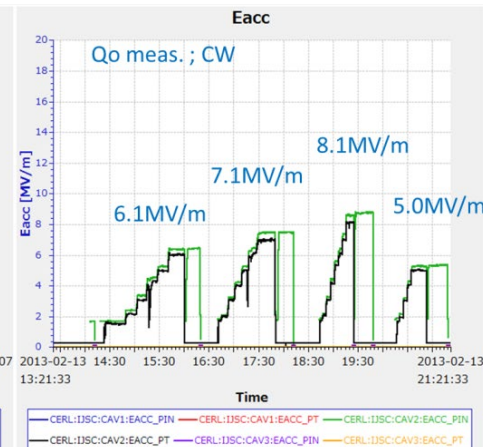
E. Kako, et. al.,  
H. Sakai, et. al.

## 入射器空洞単体での性能試験

### パルス運転



### CW運転



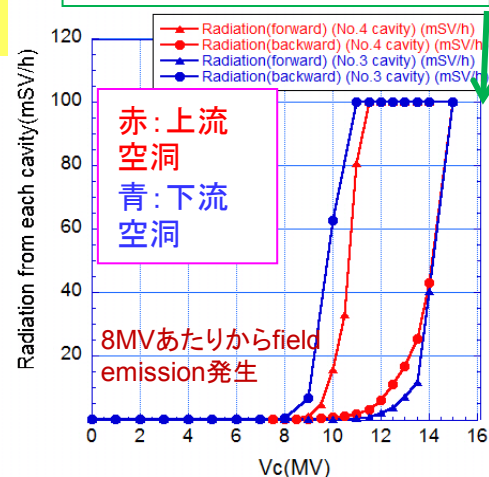
## 主空洞の現状

- 高い加速電圧: 8.57 MV/m を達成
- 大電流の加速: 6.5  $\mu$ A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)
- 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。
- 最終ターゲットの15 MV/mの安定運転はこれからの課題
- 高い加速電圧かつ大電流: **これから**

## 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

最大16MVまでは印加可能。

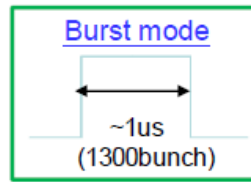


空洞の加速電圧は16MVまで到達するが、field emissionによるradiation増加がみられた。

# ビーム性能開発の現状と今後の課題(1)

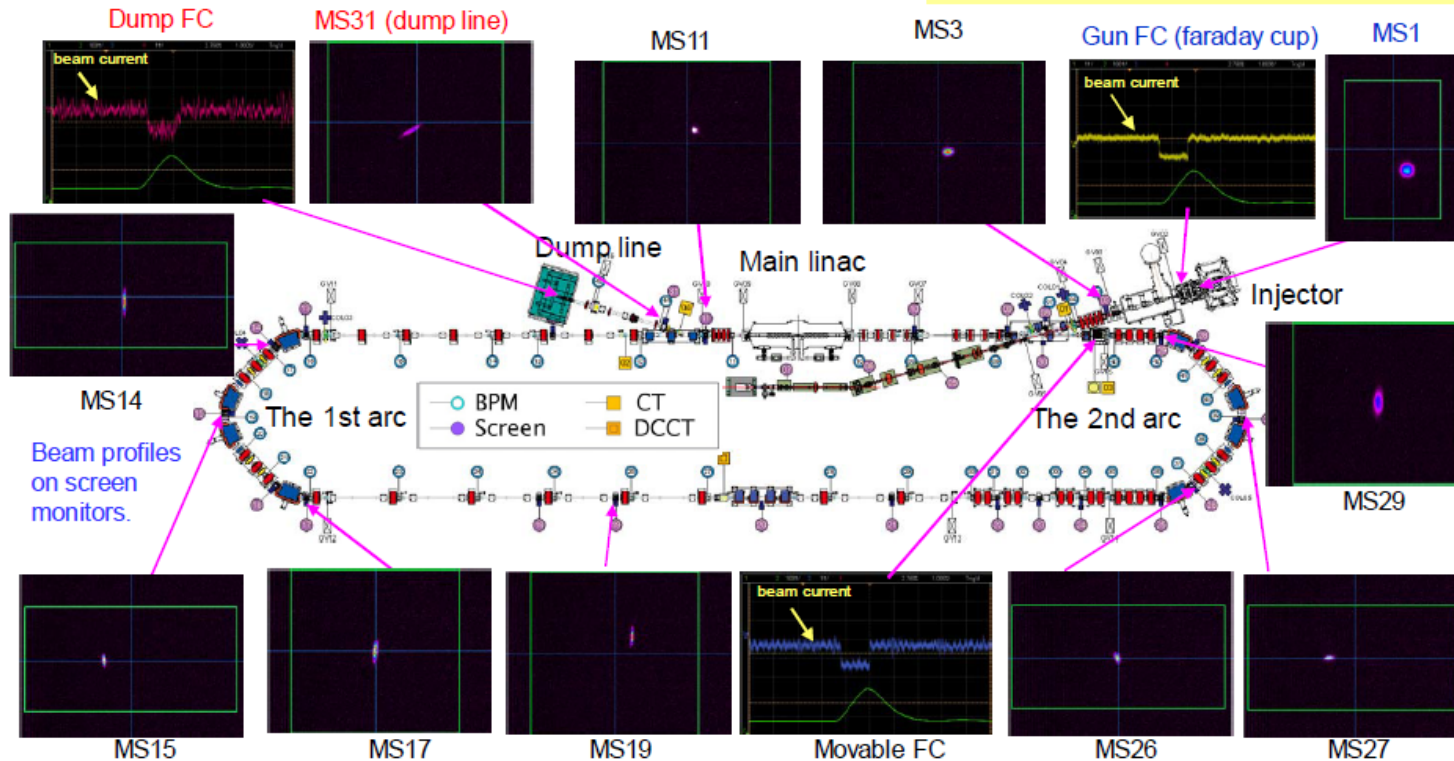
空間電荷効果の効かない低バンチ電荷の輸送試験(加速器の基本性能の評価)

## Tuning results with low-current beams



### Beam pulses (macropulse)

- peak current: ~20  $\mu\text{A}$  (~ 20fC)
- macropulse width: 1.2  $\mu\text{s}$
- repetition of bunches: 1.3 GHz
- repetition frequency: 5 Hz
- average beam current: ~ 120 pA



After several tuning:

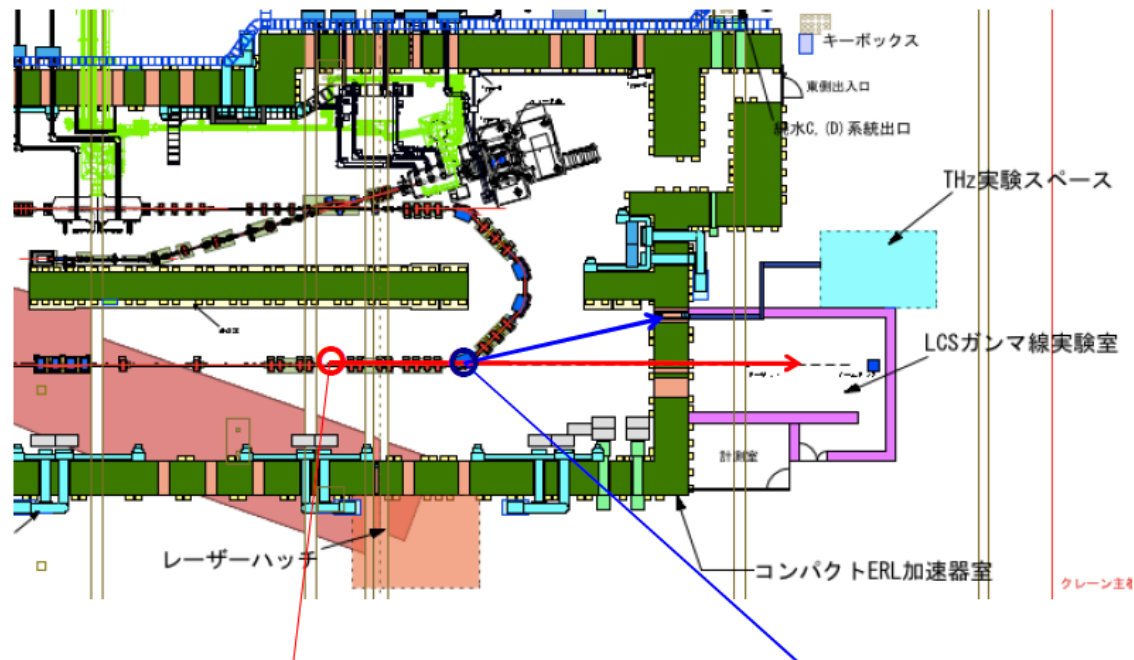
- smaller beam profiles
- ~100% beam transmission to the dump
- short bunches (~ 500 fs)

S. Sakanaka et al.,  
LINAC14

低バンチ電荷(空間電荷効果が効かない)では、ほぼ初期エミッタンスを保持して輸送

# cERLにおける実証試験の継続とユーザー利用

- 実証試験での次の項目
  - 空間電荷効果の支配的な高バンチ電荷でのビーム輸送法の確立
  - ビーム電流の段階的増強(放射線申請を着実にクリアする): 0.1 mA(2015年1月~)、1 mA(2015年度)、10 mA(2016年度?)、100 mA(電源増強が必要)
- ユーザー利用に向けた準備
  - レーザーコンプトン散乱によるX線・ $\gamma$ 線の生成・利用(LCS光源利用)
  - コヒーレントTHz(CSR-THz)光の生成・利用



## レーザーコンプトン散乱(LCS)X線/ $\gamma$ 線の発生

- 極小電子ビームの生成
- 電子ビームとレーザーとのコンプトン散乱X線
- 2014年度開始予定(2015年1月から)

## コヒーレント・テラヘルツ光(CSR-THz)の発生

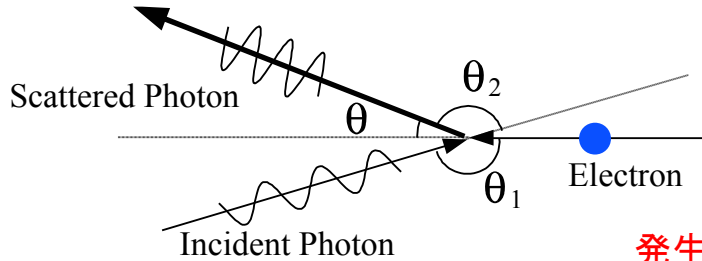
- 超短バンチ電子ビームの生成(<100fs)
- 第2アーク部偏向電磁石からのコヒーレント放射
- 2015年度開始予定



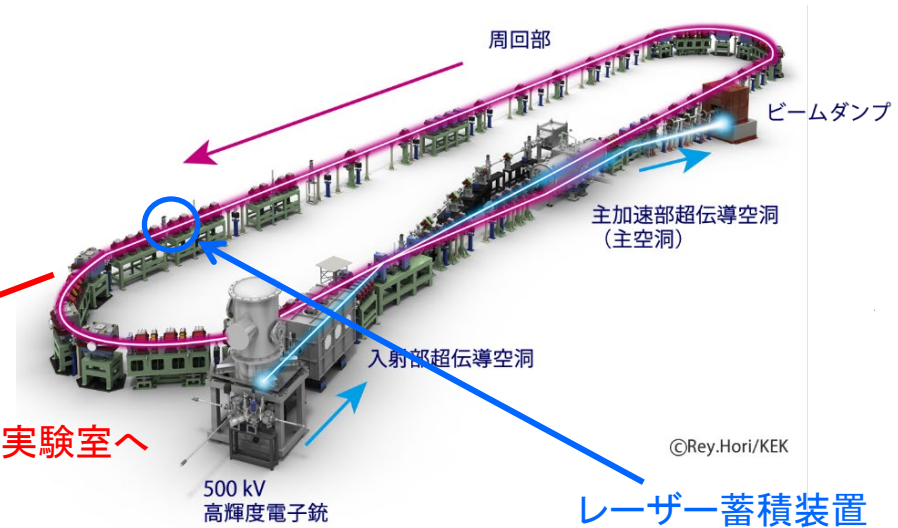
# レーザーコンプトン散乱光源

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



©Rey.Hori/KEK

レーザー蓄積装置

## 核セキュリティ補助金事業

目的:  
準単色・高輝度ガンマ線による非破壊核種分析システム

2014年7月-12月: LCS 関連設備の工事、レーザー移設と立ち上げ

2015年1月-3月: LCS 実験 (電子=25MeV の時、11 keV X線)

## ERL-LCS発生の実証

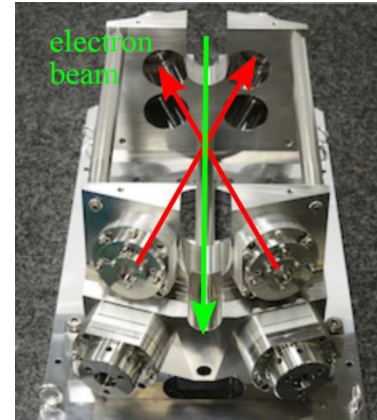
⇒ 今月から発生試験を開始予定

## 光・量子融合連携研究開発プログラム

2015年度-2018年度: イメージングを中心とした利用研究

## 微小光源X線の利用

KEK(代表:照沼)  
JAEA、広島大学、日本大学、早稲田大学、  
京都大学、産総研、東北大学、リガク



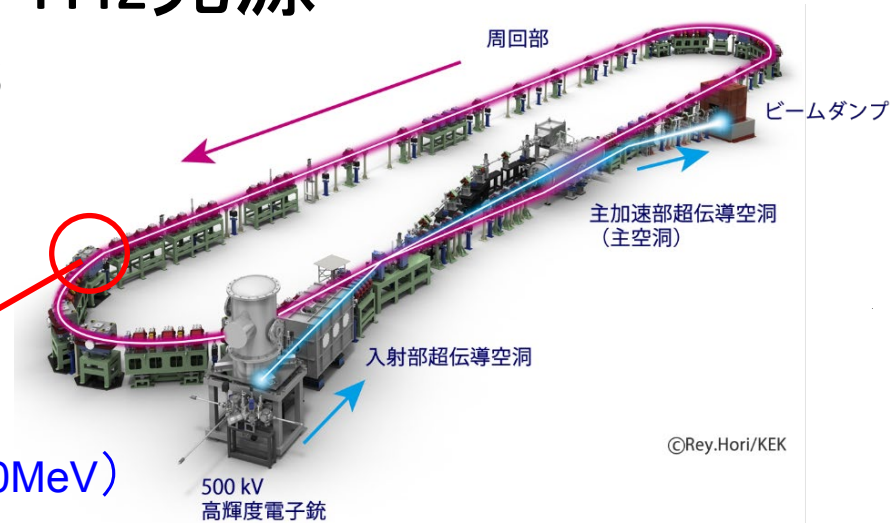
ERL計画推進委員会(2014年3月20日)「LCSビームラインの展望」羽島良一より

# コヒーレントTHz光源

- 超短バンチ電子ビームの生成して、第2アーク部  
偏向電磁石からのコヒーレント放射

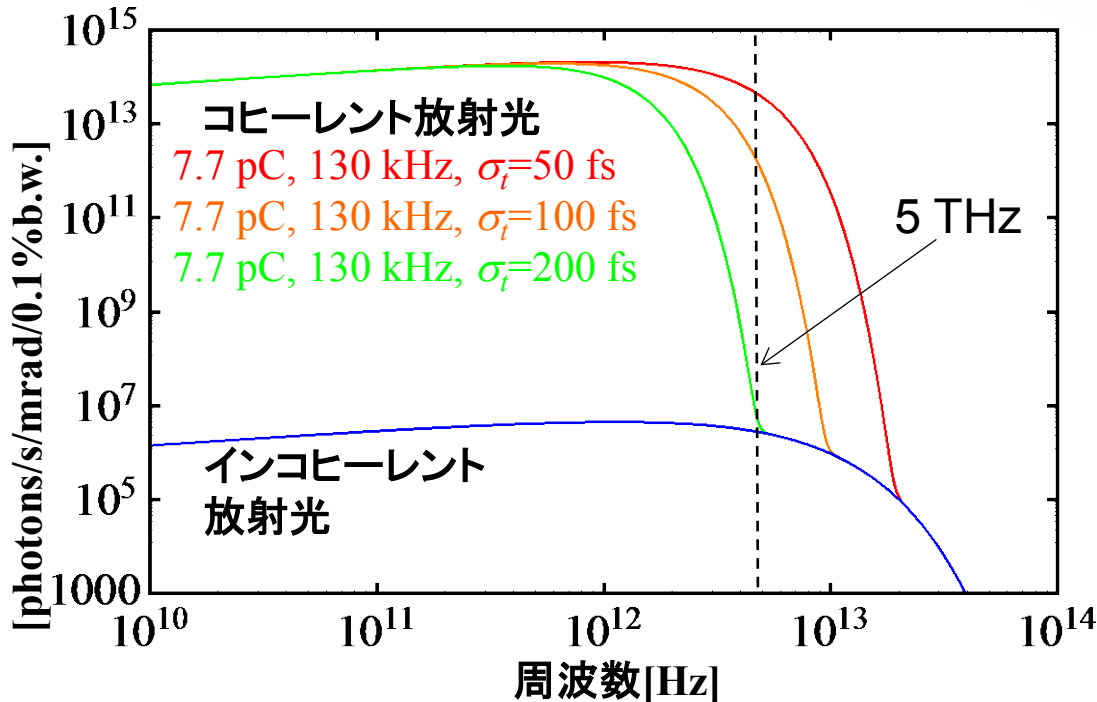


コヒーレント放射光



©Rey.Hori/KEK

アーク部偏向電磁石からの放射光スペクトルの例 (20MeV)



5THzまでのコヒーレント放射光発生には、100fs以下のバンチ長が要求される。

⇒ 数値計算では、45.2 fsまでバンチ圧縮が示されている

2015年から試験開始予定

- バンチ圧縮の実証
- コヒーレント放射の生成・観測

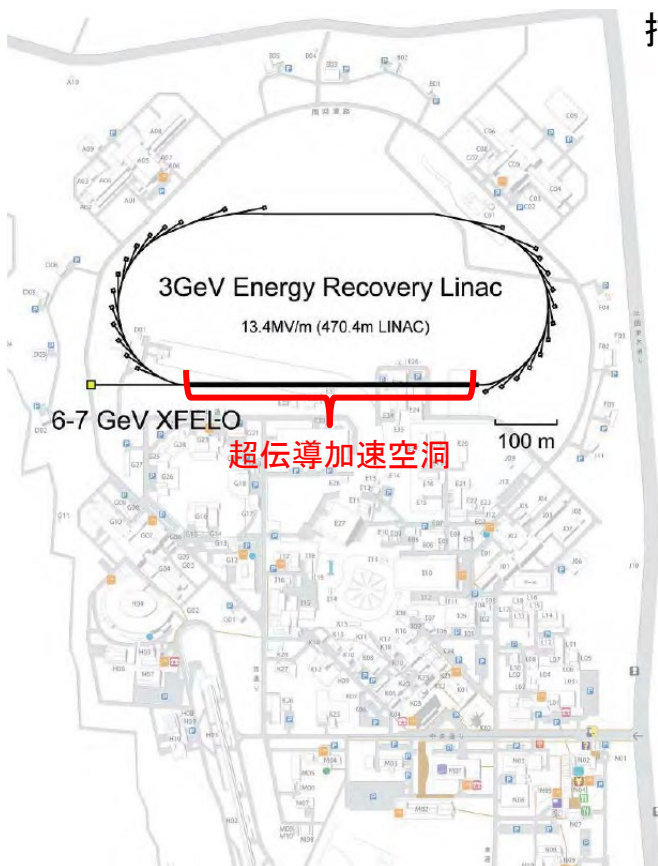
中村典雄「THz&LCS関係」資料より

# まとめ（光源加速器としてのERL）

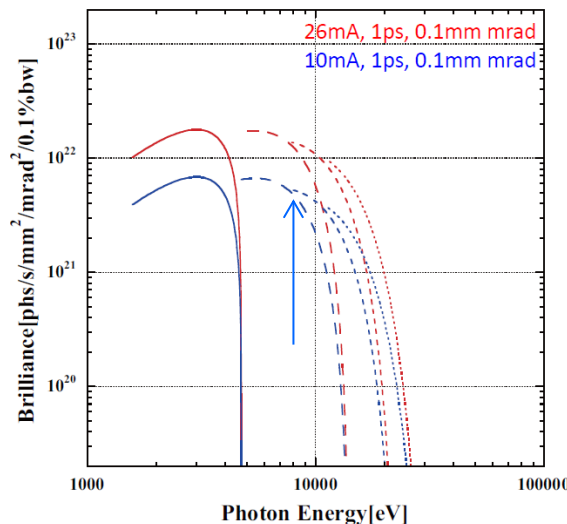
- ERL (Energy Recovery Linac) 加速器
  - 線形加速器の特徴を有する
  - 「先端性と汎用性」の両立の可能性
  - 高輝度・大電流ビームの生成・加速が鍵
- 光源加速器に必要な性能： 安定な光（変動しない、中断しない）
  - ⇒ 試験加速器 cERL において総合性能の検証と調整法を着実に開発する
- 試験加速器 cERL における結果のフィードバック
  - 大電流への道筋： 電子源は運転を続けながらも、別施設で開発継続が可能。段階的にアップグレードしていく方針を示す
  - 最終（限界）性能だけを示すのではなく、現実的な運転モードからのアップグレードの道筋を示す
- 「先端性と汎用性」の両立 ⇒ 「先端性」を利用した展開の可能性
  - 高繰り返しXFEL光源（LCLS-IIのような光源には、大電流電子銃と超伝導加速空洞が必要）
  - EUV-FEL光源（半導体リソグラフィ用）
  - XFEL-O

# 光源性能の目標 (3 GeV ERL光源を例として)

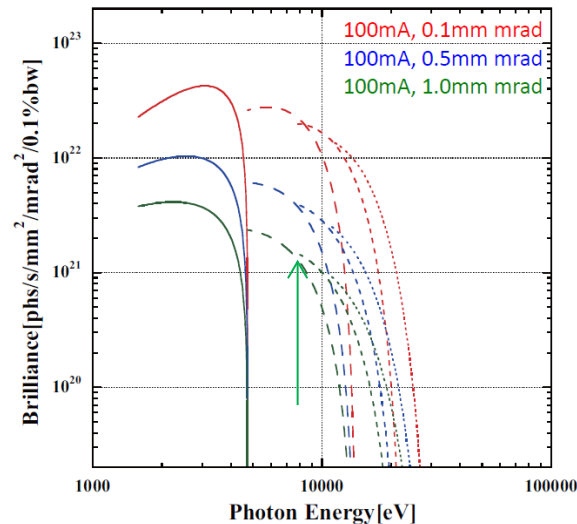
- ERL Conceptual Design Report (KEK Report 2012-4) より



挿入光源 ( $L_u=30$  m,  $\lambda_u = 18$  mm) からの光のスペクトル計算例 (中村典雄氏)



10 mA,  $\sigma E=5 \times 10^{-5}$  ( $\sigma z = 1$  ps)  
8 keVの3次光:  $10^{22}$ 弱



100 mA,  $\sigma E=2 \times 10^{-4}$  ( $\sigma z = 2$  ps)  
8 keVの3次光:  $10^{21} \sim 10^{22}$

## ERL光源性能(目標)

### 3 GeV ERL

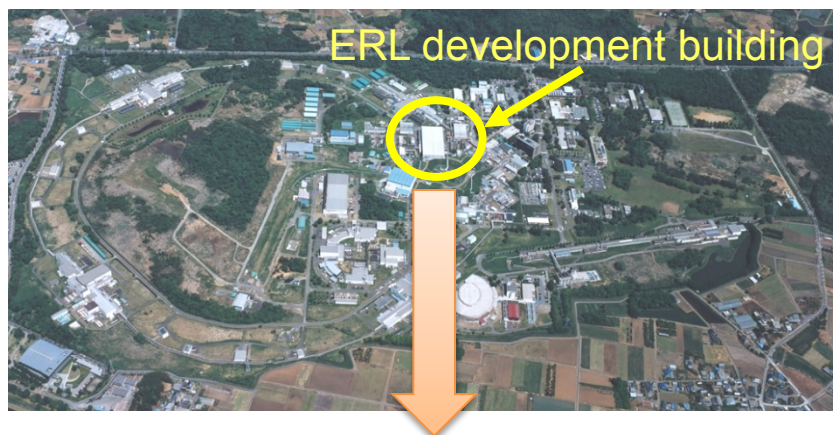
平均輝度	$10^{21} \sim 10^{23}$
設置可能BL数	~30本
空間干渉度	数10%
パルス幅	100 fs ~ 3 ps

KEKB加速器の内側にERL光源加速器を設置したときの配置案

⇒ 超伝導空洞の長さが加速器の大きさを決める

➡ これを実現する加速器の運転条件は？

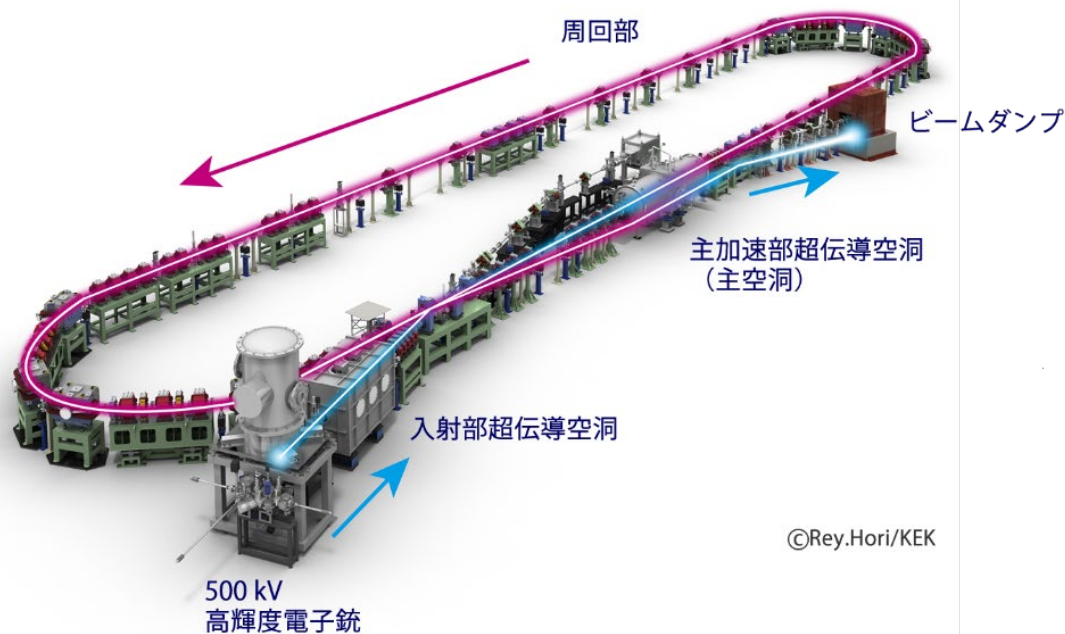
# 実証機としての compact ERL (cERL)



ERL development building

## 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



## 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

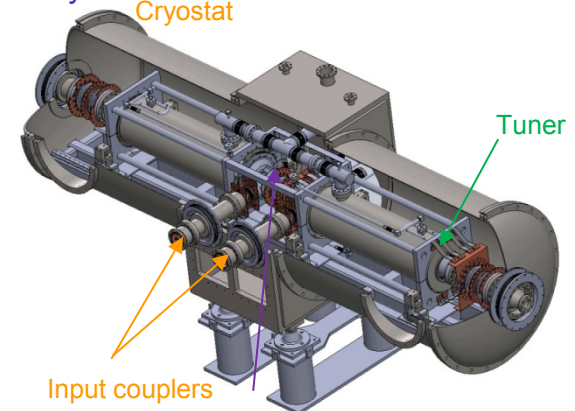
# cERLを構成する装置(主空洞、周回部)

## 主空洞(周回部超伝導空洞) エネルギー回収する部分

- 9-cell空洞2台(性能評価試験では、16 MVに到達)
- He lossの増大、およびfield emissionによる放射線増大を考慮し、**1台あたり8.57MVで運転**
- 加速後のエネルギー: **19.4 MeV**

## 主空洞

9-cell超伝導空洞  
Main-Linac Cryomodule  
Cryostat

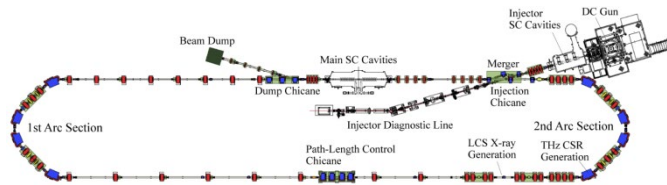


## 周回部

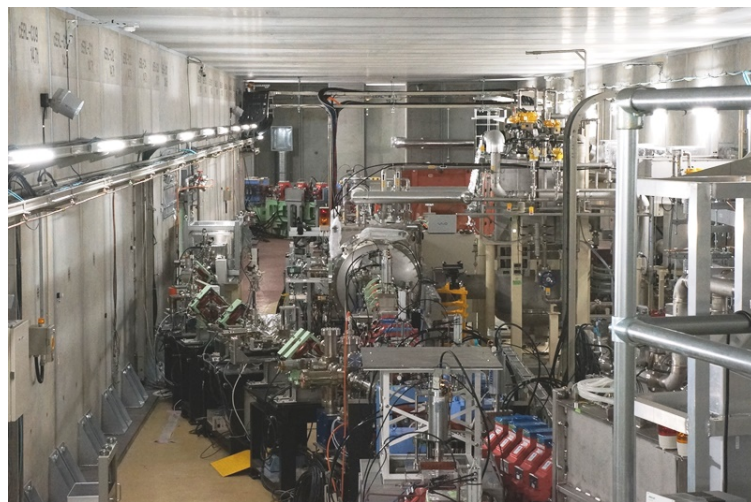
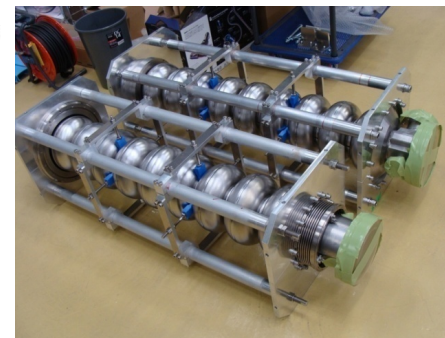
- 加速されたビームをもう一度主空洞まで輸送する
- LCS光源やTHz光源の発光点が配置される

## 主ダンプライン

- 減速ビームを捨てる



## 周回部



# 3GeV-ERL光源設計へのフィードバック

- 機器の現実的な性能のフィードバック
  - 超伝導加速空洞の現実的な加速勾配が見えてきた ⇒ 加速器の大きさに直結するので、全体デザインの修正が必要
  - カソード交換による中断時間の低減: ユーザー運転の中断時間を極力短くするための準備を進めている (複数のカソードを同時活性化しそれを保管 ⇒ 3つの同時活性化を実証)。交換時間は1回10分程度 (ただし、これに加速器の立ち下げ・立ち上げ時間が加わる)。
  - カソードの寿命: 大電流ビーム (最大10 mA) を使った寿命試験を2015年2月から開始予定。
- 運転モードの見直し
  - 3 GeV ERL光源の最終 (限界) 性能は示されてきたが、到達する道筋があまり見えていないのではないかな?
  - 段階的に性能向上を図れる道筋を示していきたい
  - 現状: **ビーム性能を制限するのは電子源**
  - 電子源の重要な点: 運転を続けながらも、別施設で開発継続が可能。段階的にアップグレードできる。
  - 例えば、10 mA で運転開始。100 mAの電子源が開発できたらそれにアップグレード。

	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	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$
Bunch length	2 ps	2 ps

## ○加速器性能の段階的なアップグレード案

Middle-coherence (cERLで1~2年後にテストできそう):

10 mA, 0.3~0.5 mm mrad



High-coherence:

10 mA, 0.1 mm mrad (エミッタンスはほぼ限界)



High-flux:

100 mA, 1 mm mrad (電子源開発が必要)

# 新たな展開の可能性

- ERL加速器開発での重要なこと：大電流を生成して加速すること
  - 大電流を生成可能な電子源の開発
  - 大電流を加速可能な超伝導空洞の開発
- これらの要素技術 ⇒ LCLS-IIのような高繰り返しX線FELの実現に必要な技術
- 一つの方向性として、ERLでの開発を基礎においた高繰り返し線形加速器型光源もありうるのではないか？
- 最終的には、XFEL-Oの加速器としての利用がゴールか
- ERL光源で目指してきたこと：「先端性」と「汎用性」の両立
  - 「先端性」を活かした方向性もありうるのではないか？
  - EUV光源として、ERL+FELが注目を集めつつある ⇒ 半導体のリソグラフィー用の光源
  - 平均電流 10 mA がターゲットになるので、設計条件がかなり緩和される
- 新たな展開の可能性の詳細については、[阪井さんの発表](#)を参照して下さい



# ERL開発の世界の動向

## □ERLの開発目的

- 放射光利用
- 素粒子原子核実験利用

## □世界のERL開発の現状

- 加速器の規模
- 運転状態(計画の進み具合)
- 到達している性能(ビーム電流・品質、エネルギー)



# 放射光利用を目的としたERL(2)

## 建設・計画中のERL試験機

- bERLinPro (HZB, ドイツ) : SRF光陰極電子銃、CW超伝導加速、50 MeV, max 100 mA,  $\epsilon_n < 1$  mm mrad, 77 pC
- IHEP ERL Test Facility (IHEP, 中国) : 500 kV-DC光陰極電子銃、CW超伝導加速、135 MeV, max 9 mA
- PKU-ERL (北京大学、中国) : DC-SRF injector、Pulse超伝導加速、30 MeV、 $\epsilon_n < 4$  mm mrad, 60 pC, 4 ps (FWHM)

## bERLinPro

M. Abo-Bakr, IPAC14より

2015年にGun-1.1からファーストビームの予定

2019年にERL試験開始予定

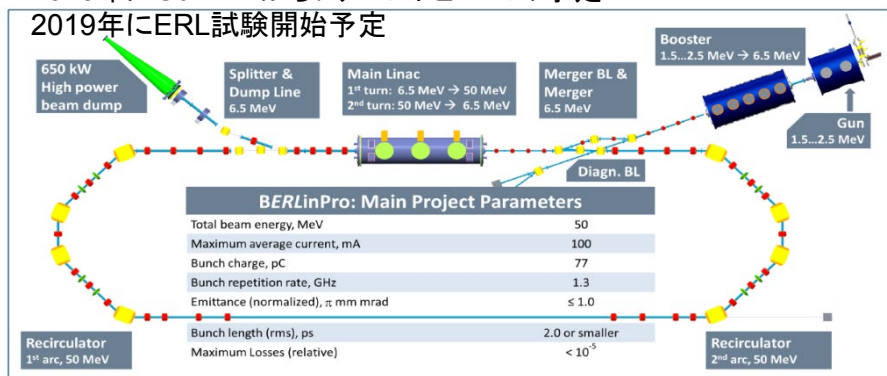
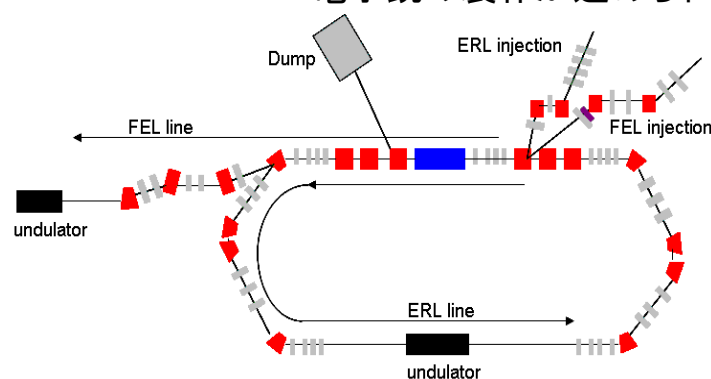


Figure 1: Draft of the major SRF and magnet components of bERLinPro with a summary of its main goal parameters.

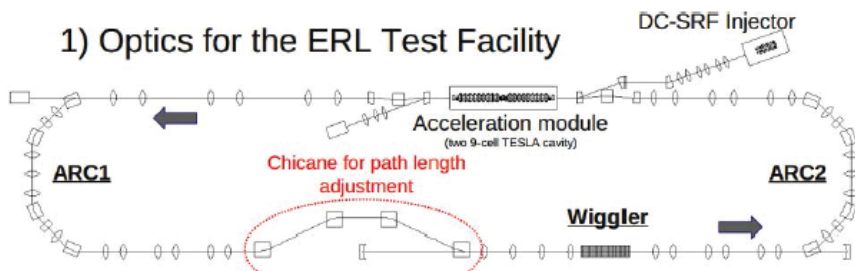
## IHEP ERL Test Facility

電子銃の製作が進められている



## PKU-ERL

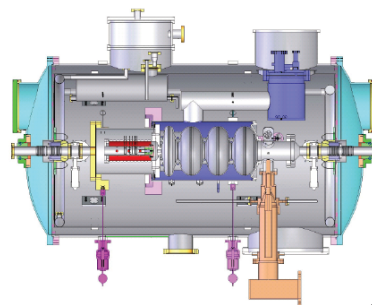
### 1) Optics for the ERL Test Facility



One of the lattice designs of PKU-ETF<sup>1</sup>

CHEN, Si, KEK加速器セミナー、2014/10/22

Energy	Bunch charge	Emittance	Bunch length
30MeV	60pC	4 $\mu$ m	4ps
Energy spread	rep. rate	pulse rep. rate	pulse length
0.32% (FWHM)	81.25/26MHz	10Hz	2ms



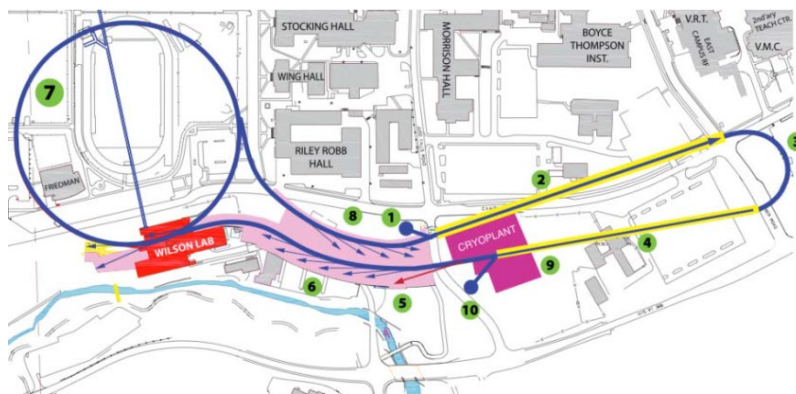
- ▶ Combination of a DC pierce gun and a 3.5-cell superconducting cavity.
- ▶ Two working modes
  - ▶ Marco pulse or continue wave mode for ERL.
  - ▶ Bunch compressor mode for coherent THz radiation.

入射器のビーム試験が開始されている

# 放射光利用を目的としたERL(3)

- GeVクラス放射光源利用を目的としたERL計画
  - Cornell 5 GeV ERL(米国): 5 GeV ERL、シングルターン,既存のCESRリングを利用、ビームライン:14本
  - 3 GeV ERL(KEK, 日本): 1<sup>st</sup> stageで3 GeV ERL, 2<sup>nd</sup> stageでXFEL-O、ビームライン:~30本

## Cornell 5 GeV ERL Cornell ERL PDDRより

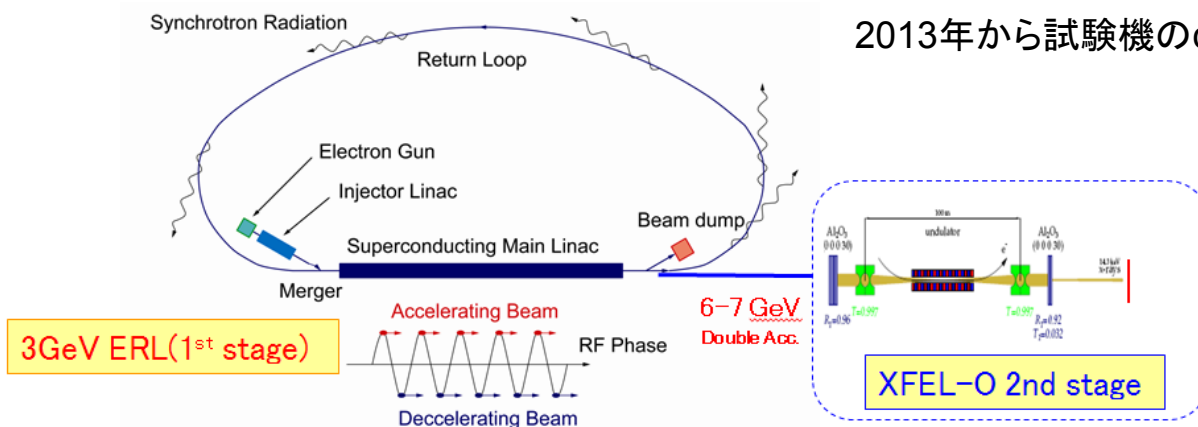


Parameter	ERL	Ring	Ring name
Horizontal emittance $\epsilon_x$	8 pm/30 pm	1 nm	PETRA-3
Vertical emittance $\epsilon_y$	8 pm/30 pm	1.2 pm	Australian LS
Bunch duration $\sigma_t$	2 ps	16 ps	ESRF
Energy spread $\sigma_\delta$	$2 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$	typical
Current $I$	25 mA/100 mA	500 mA	SPring-8

規格化エミッタンスに直すと、  
 8 pm rad  $\Rightarrow$  0.08 mm mrad  
 30 pm rad  $\Rightarrow$  0.3 mm mrad

2008年からCornell, ERL-Injector Prototypeを運転してきた  
 大電流・低エミッタンス生成をリードしてきた

## KEK 3 GeV ERL



2013年から試験機のcERL加速器のビーム運転を開始

# 放射光利用を目的としたERL(4)

- GeVクラス放射光源利用を目的としたERL計画
  - The Femto-Science-Factory (FSF) (ドイツ, HZB) : 6 GeV ERL、マルチターン, max 20 mA
  - IHEP 5 GeV ERL (中国) : phase 1で第三世代光源を建設、phase 2で5 GeV ERLを追加

## The Femto-Science-Factory (FSF)

FSF LAYOUT A.N. Matveenko, IPAC14より

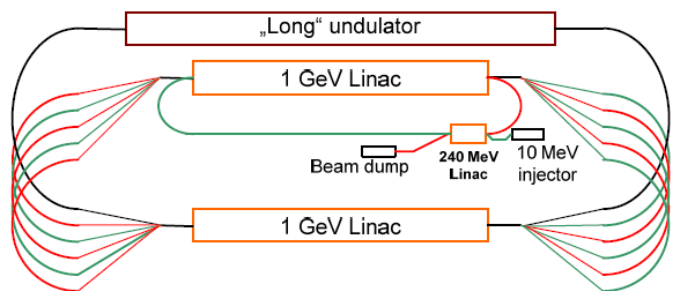


Table 1: Main Parameters of the Multi-turn ERL. Beam brilliance in 3000 period undulator in low emittance mode and 1000 period arc undulators for high brilliance and short pulse modes is given.

Accelerator/beam parameters	Low emittance mode	High brilliance mode	Short pulse mode
E, GeV	6	6	6
$\langle I \rangle$ , mA	20	6.5	1.3
Q, pC	15	5	1
$\epsilon_{in, x/y}$ mm	0.25/0.10	0.35/0.11	0.22/0.09
$\epsilon_i$ , keV·mm	320	21	7.8
$\tau$ , fs	1500	25	~10
$\langle B \rangle, \frac{Ph}{s \cdot mm^2 mrad^2 \cdot 0.1\%}$	$4.0 \cdot 10^{22}$	$2.6 \cdot 10^{21}$	$8 \cdot 10^{20}$
$B_{peak}, \frac{Ph}{s \cdot mm^2 mrad^2 \cdot 0.1\%}$	$5.4 \cdot 10^{24}$	$2.0 \cdot 10^{25}$	$\sim 1.5 \cdot 10^{25}$

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

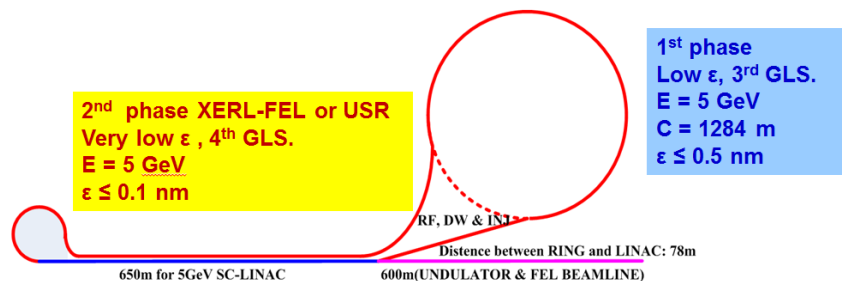
“Long” undulatorが特徴 (multi-user facilityとの記述もある)  
10 fs の短パルスを作るが特徴

## IHEP 5 GeV ERL

1<sup>st</sup> Phase : Low emittance 3<sup>rd</sup> light source ( BAPS, 5 GeV )

2<sup>nd</sup> Phase : XERL or USR ( 5 GeV )

Beijing Advanced Photon Source at IHEP  
(BAPS and Future Plan)



1<sup>st</sup> phase  
Low  $\epsilon$ , 3<sup>rd</sup> GLS.  
E = 5 GeV  
C = 1284 m  
 $\epsilon \leq 0.5$  nm

試験機に向けた電子銃開発を行っている

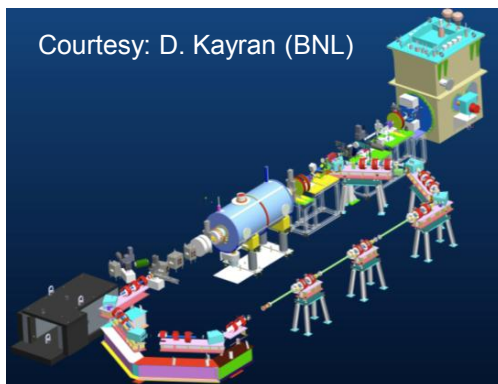
Courtesy: S. H. Wang, J. Q. Wang (IHEP)

# 素粒子原子核実験利用を目的としたERL(1)

- 建設・運転中のERL試験機(素粒子原子核利用)
  - The R&D Energy Recovery Linac at BNL(米国) : SRF光陰極電子銃、CW超伝導加速、20 MeV, max 350 mA
  - MESA(University of Mainz, ドイツ) : 原子核実験の電子散乱用、通常モード : 155 MeV at 150  $\mu$ A、ERLモード : 10 mA at 105 MeV

## BNL, ERL R&D

	High Current	High charge
Charge per bunch, nC	0.5	5
Average current, mA	350	50
R.m.s. Normalized emittances $\epsilon_x/\epsilon_y$ , mm*mrad	1.4/1.4	4.8/5.3
R.m.s. Bunch length, ps	18	31



R. Eichhorn, LINAC14より

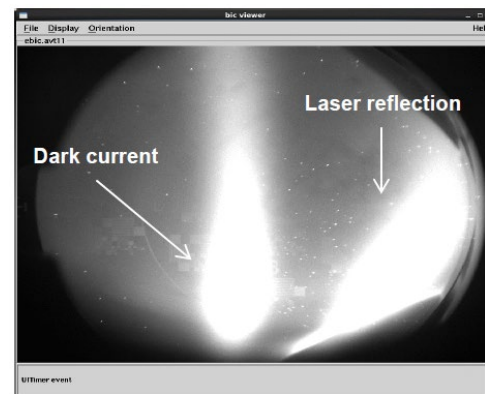
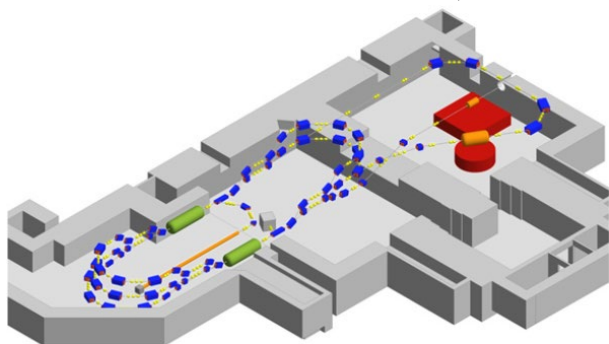


Figure 5: Dark current image taken at beam profile monitor during energy measurement at gun voltage setting of 1.2 MV, taken at the BNL SRF gun.

超伝導RF光陰極電子銃のビーム試験が開始されている  
2015年にエネルギー回収試験を予定

## MESA

R. Eichhorn, LINAC14より

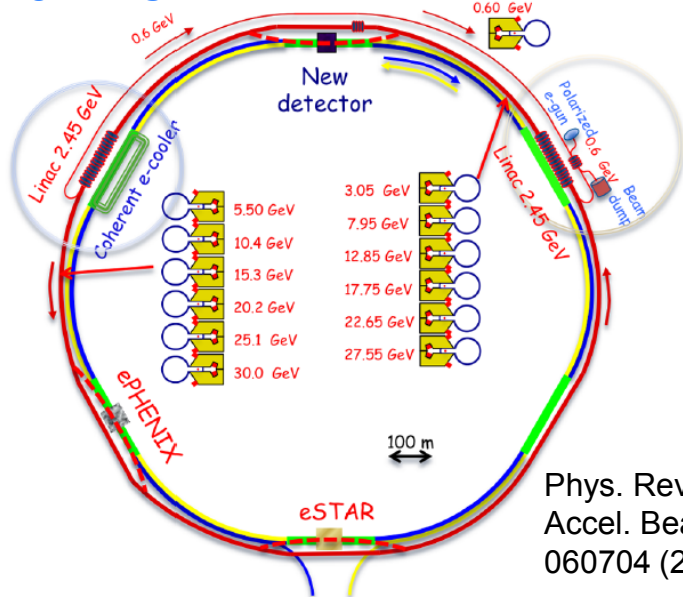


超伝導空洞のモジュールを発注している

# 素粒子原子核実験利用を目的としたERL(2)

- 素粒子原子核実験利用を目的としたERL計画(光源利用案もある)
  - eRHIC (future electronhadron collider at RHIC) (BNL, 米国): max 30 GeV ERL, FEL利用の場合: 1.8 GeV (Soft X-ray), 10 GeV (Hard X-ray)
  - Large Hadron electron Collider (LHeC)(CERN): 60 GeV ERL for e-p collisions

eRHIC

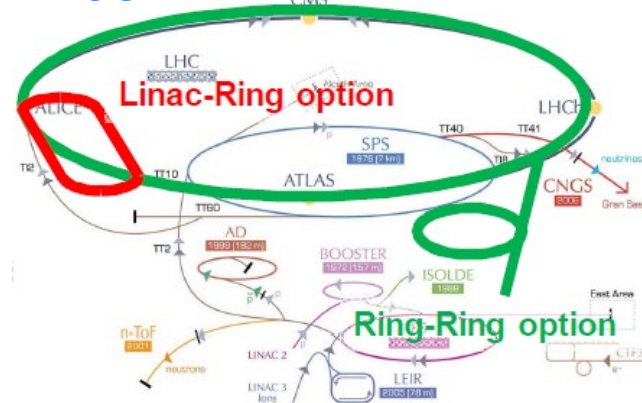


Phys. Rev. ST  
Accel. Beams 16,  
060704 (2013)

TABLE I. eRHIC beam parameters for FEL operation.

Name	Soft x ray	Hard x ray
Energy (GeV)	1.8	10
Bunch charge (nC)	0.2	0.2
Rms bunch length (ps)	1	1
Rms energy spread (keV)	50–200	500
Rms normalized emittance ( $\mu\text{m}$ )	0.6	0.2
Undulator period (cm)	1.85	3
Fundamental wavelength (nm)	1	0.1

LHeC ERL



Draft CDR completed 2011, TDR by  
2014, first beam by 2022

R. Eichhorn, LINAC14より

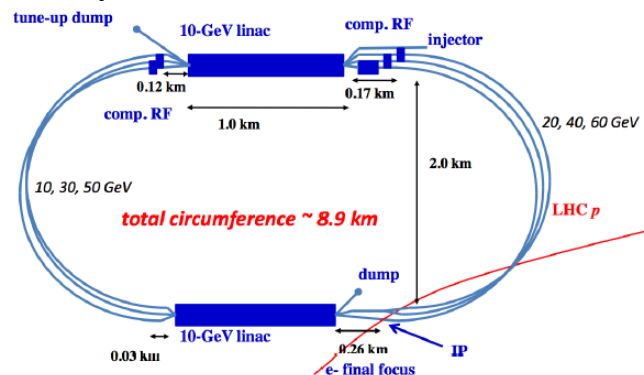
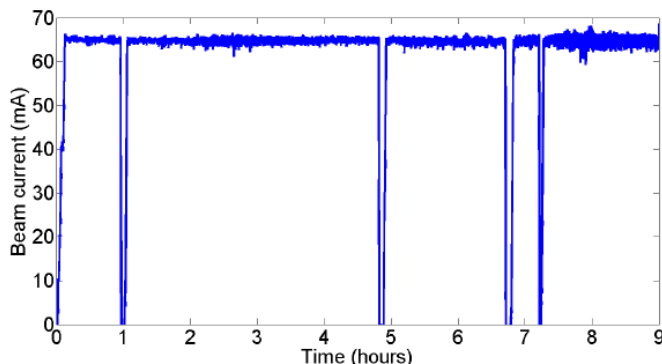


Figure 9: LHeC ERL under conceptual design at CERN.

# 世界のERLテスト機で実証できていること

- 大電流運転: Cornell ERL-Injector Prototype 65 mAの長時間運転(マルチアルカリカソード使用 ⇒ 寿命が長いカソード)



R. Eichhorn, LINAC14より

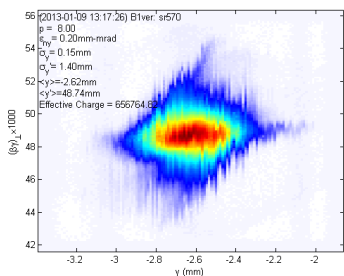
何回か中断しているが、65 mAを8時間キープしている短い時間だか 75 mA も出しているとのこと  
では、この時のエミッタンスは? ⇒ よくわからない

Figure 12: Electron beam current during an 8 hour run of the Cornell photo-injector.

- 高輝度電子ビーム: Cornell ERL-Injector Prototype 65 mAの長時間運転(GaAsカソード使用 ⇒ 低エミッタンスのカソード)

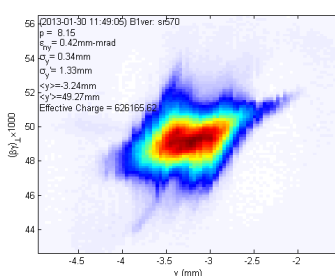
\*Phys. Rev. ST-AB 15 (2012) 050703

Courtesy: I. Bazarov (Cornell University)



20 pC/bunch

vertical phase space



80 pC/bunch

vertical phase space

Normalized rms emittance (horizontal/vertical) 90% beam,  $E \sim 8$  MeV, 2-3 ps rms  
0.22/0.15 mm-mrad

0.49/0.29 mm-mrad

Normalized rms core\* emittance (horizontal/vertical) @ core fraction (%)  
0.14/0.09 mm-mrad @ 68%

0.24/0.18 mm-mrad @ 61%

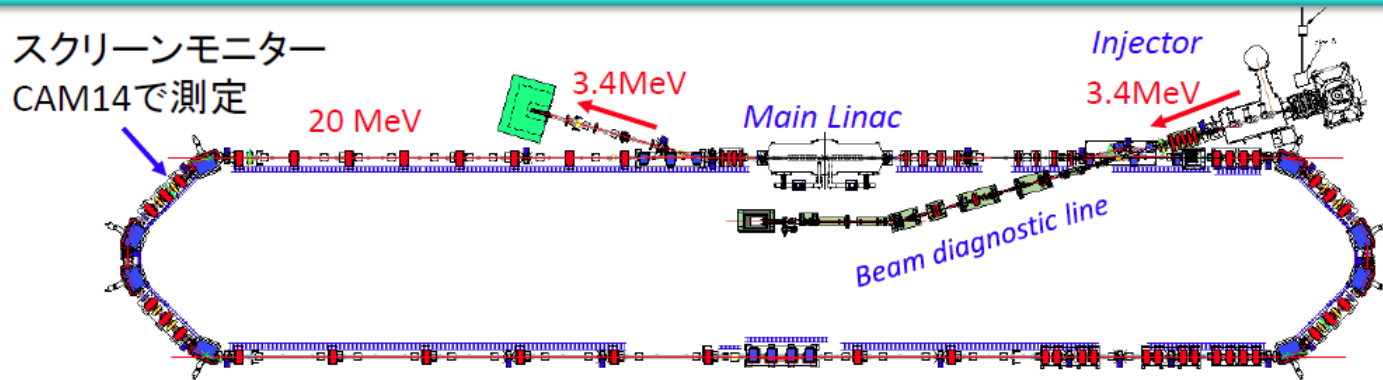
非常に低いエミッタンスを実現できている  
では、この時の平均電流とカソード寿命は?

低エミッタンス・大電流・長寿命の3つの両立がユーザー運転には必要



# ビーム性能開発の現状と今後の課題(3)

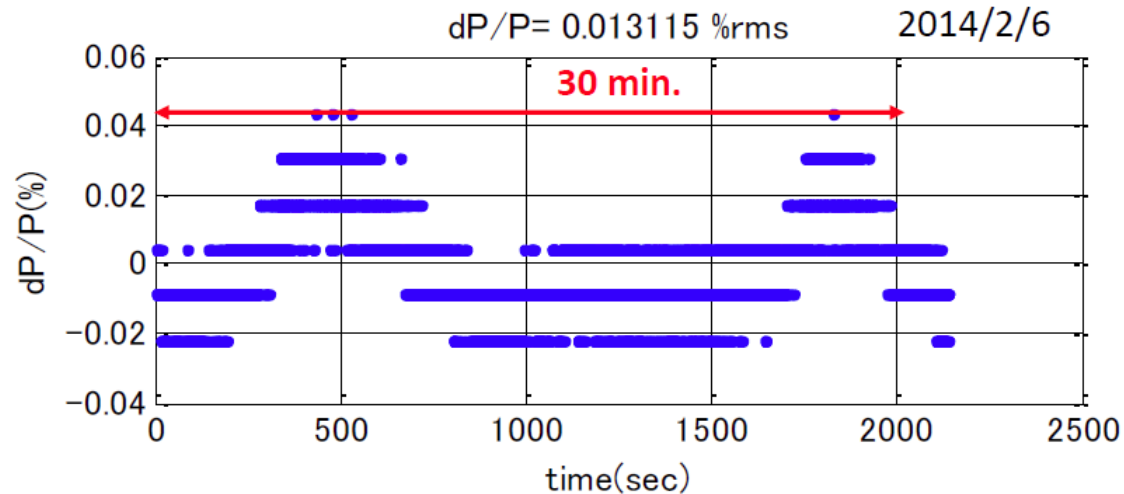
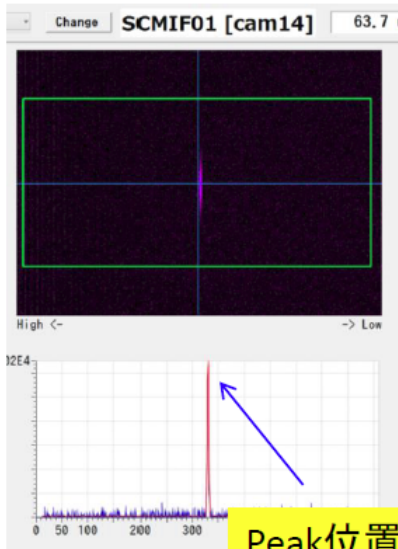
## Momentum Jitter for Total Energy



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

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

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



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

25 25

三浦孝子、2014年加速器研究施設交流会資料より

# ビーム性能開発の現状と今後の課題(4)

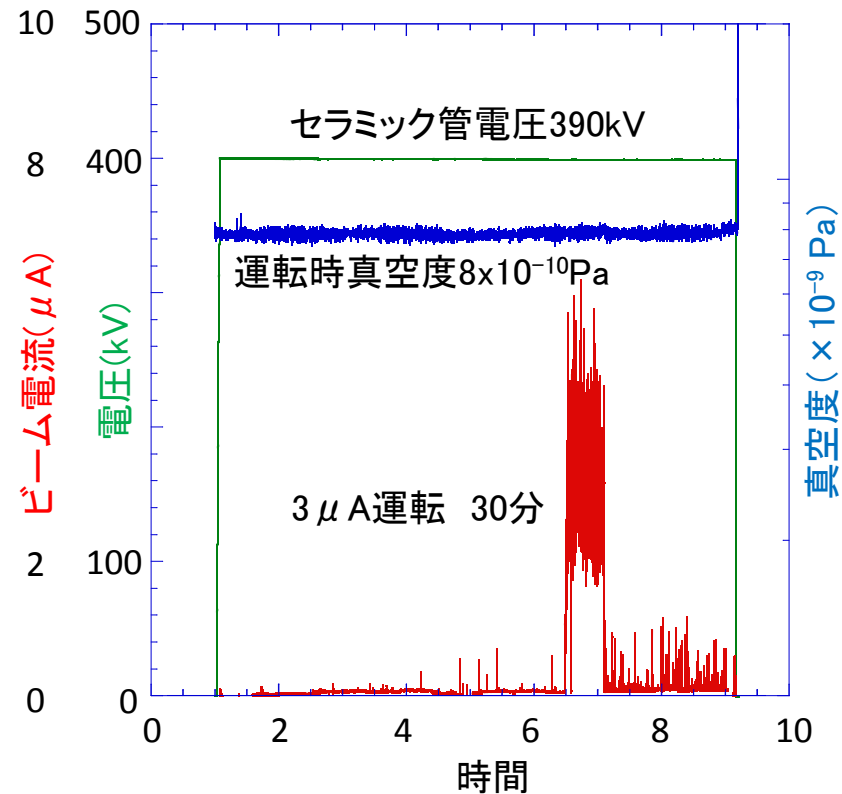
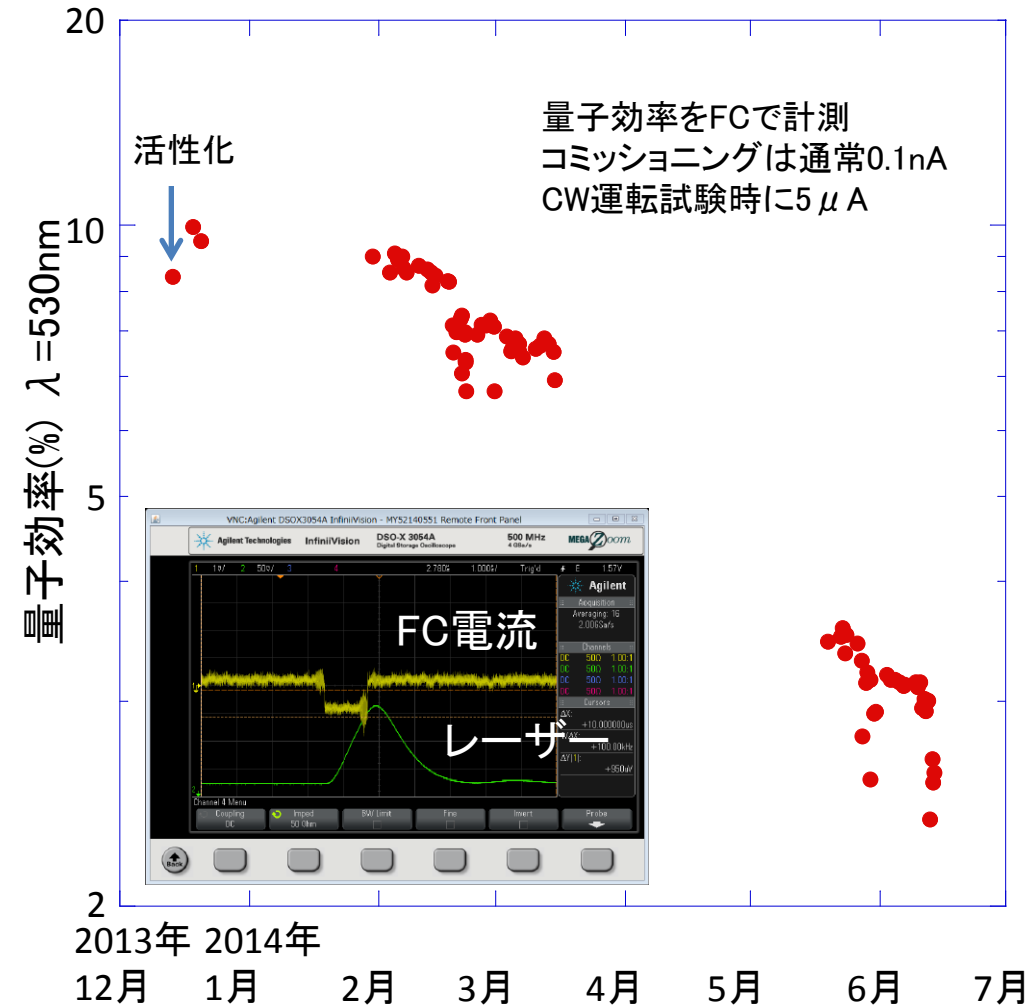
## ビーム性能向上に向けた今後の課題と対策

- **低エネルギー領域のビームの取扱い**
  - 環境磁場(地磁気、予期せぬ磁場(CCGの磁石、クレーン、ビーム近傍の磁性体)、電磁石の残留磁場等)の制御
- **低電荷(空間電荷効果が効かない)ビームの輸送法の改善**
  - 入射器空洞を通過するとき、エミッタンスが悪化することがわかっている
  - 空洞内のビーム軌道、位相の調整がまだ不十分 ⇒ 2015年5月からの運転で対策していく
- **大電荷(空間電荷効果が支配的な)ビームの輸送**
  - モデルとのずれが大きい ⇒ 空間電荷効果を理解するためのビーム試験を続ける
  - 6次元位相空間の情報(ビームサイズ、バンチ長、エネルギー拡がり等)が必要になるので、まずは診断ラインを活用する
- **ビーム調整法の更なる精度向上**
  - シングルキック応答測定等の基礎的な測定を行っている
  - 異なるエネルギーのビームが通過する部分の軌道・オプティクス調整
  - 現状の転送行列を確認するとともに、オプティクスマッチングの精度を向上させる

# 電子銃の現状と今後の開発(1)

GaAs光陰極量子効率(周回部コミッショニング時)

電子銃電圧、真空



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

島田美帆、2014年加速器学会年会より

# LCSガンマ線とエミッタンス

- LCSガンマ線の輝度

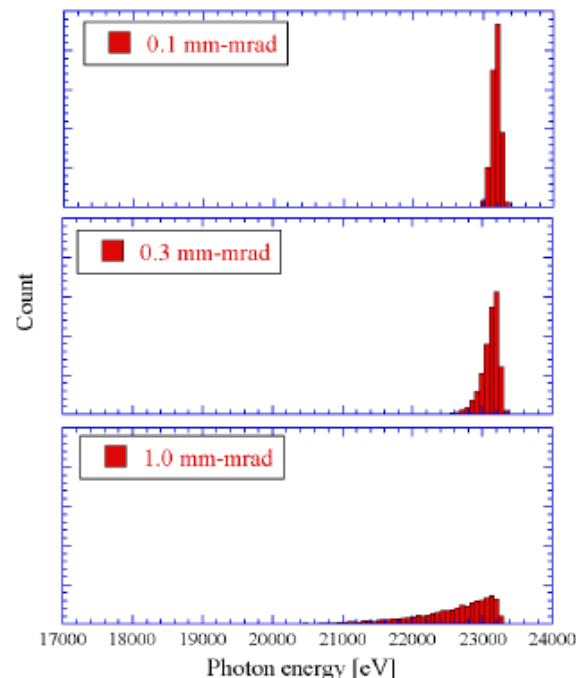
- エミッタンスの2乗に反比例  $B_\gamma \propto \frac{\gamma^2 N_e N_L}{\varepsilon_n^2 \Delta\tau}$

- LCSガンマ線の単色性

- 横方向の運動量の影響でにじむ

$$\left(\frac{\Delta\omega_s}{\omega_s}\right)_{rms} = \sqrt{\left[\frac{\varepsilon_{nx}^2}{\sigma_{ex}^2} + \frac{\varepsilon_{ny}^2}{\sigma_{ey}^2}\right]^2 + \left[\frac{2\sigma_\gamma}{\gamma}\right]^2 + \left[\left(\frac{\lambda_0}{4\pi w_0}\right)^2\right]^2 + \left[\frac{\sigma_\omega}{\omega_0}\right]^2}$$

Ref., W. J. Brown and F. V. Hartemann, Phys. Rev. STAB, 7, 060703 (2004)



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

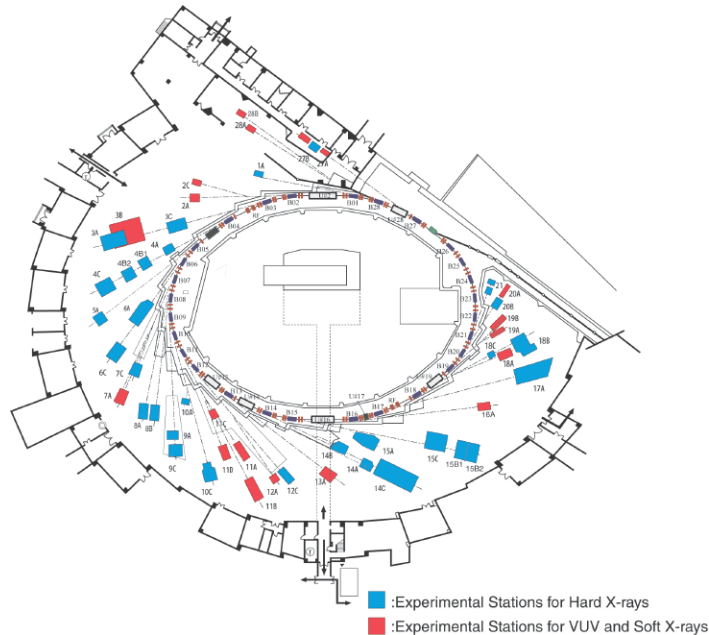


ERLが最適

「レーザーコンプトン散乱(LCS)ビームライン建設のスケジュール」永井良治  
2014年8月22日cERL建設打合せ資料

# 現在のKEK Photon Factory

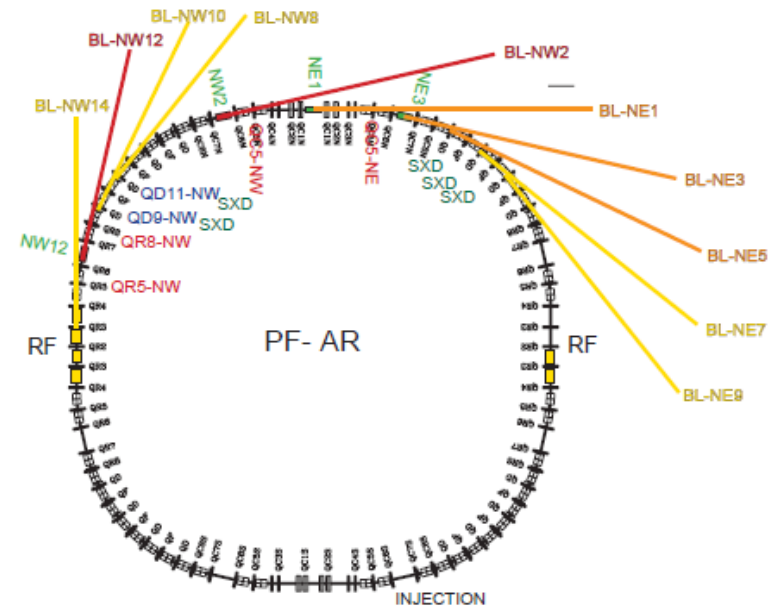
PF ring (2.5 GeV)



- E = 2.5 GeV, C = 187 m
- Beam emittance : 34.6 nm rad
- Top-up operation
- **11 insertion devices**
  - In-vacuum X-ray undulators: 4
  - VUV/SX undulators: 7
- 22 beamlines, 60 experimental stations
- Since 1982

資料作成: 島田美帆

PF-AR (6.5 GeV)



- E = 6.5 GeV (injection: 3 GeV), C = 377 m
- Beam emittance: 293 nm·rad
- Single bunch operation (full time)
- 8 beamlines, 10 experimental stations
  - In-vacuum X-ray undulators: 5
  - Multi-pole wiggler : 1
- Since 1987

# cERL使用電力(概算)

装置	使用電力 (kW)	一日当たり 運転時間 (h)	一日当たり 使用電力量 (kWh)
ヘリウム冷凍機システム			
ヘリウム液化・冷凍機	500	24	12,000
減圧ポンプ(空洞2K冷却時)	150	14	2,100
高周波源			
入射器用	310	14	4,340
主空洞用	24	14	336
冷却水系(2系統)	90	24	2,160
電磁石電源、空調、その他	100 以下	24	2,400以下
合計 (実績値)	1,174		23,336 18,000~19,500

(注)一日の運転を14時間(9時~23時)と仮定。

夜間の10時間は、ヘリウム液化・冷凍機と冷却水系のみ運転。

# cERL運転統計(1): 2013年4月～6月 入射器コミッショニング

Month	Machine Operation Time <sup>1)</sup> (hours)	Beam ON Time <sup>2)</sup> (hours)	Operation Time of Helium Refrigerator (hours)
Injector commissioning (Apr. - June, 2013)			
Apr. 2013	92	24	185
May 2013	111	70	291
June 2013	157	106	315
Subtotal	360	200	791

1) (LIMIT状態)または(KEEPOUT状態)の合計時間。運転準備・エイジングを含む運転時間

2) (KEEPOUT状態)かつ(電子銃HV ON)かつ(電子銃レーザーON)の時間

# cERL運転統計(2) : 2013年11月～2014年6月 周回部コミッショニング

Month	Machine Operation Time <sup>1)</sup> (hours)	Beam ON Time <sup>2)</sup> (hours)	Operation Time of Helium Refrigerator (hours)
cERL commissioning (Dec. 2013 - , June. 2014) * In Nov. 2013, conditioning of cavities was conducted			
Nov. 2013	59	0	489
Dec. 2013	113	36	480
Jan. 2014	49	11	418
Feb. 2014	211	121	672
Mar. 2014	113	71	345
May 2014	120	52	590
Jun. 2014	190	115	480
<b>Subtotal</b>	<b>855</b>	<b>406</b>	<b>3474</b>

- 1) (LIMIT状態)または(KEEPOUT状態)の合計時間。運転準備・エイジングを含む運転時間  
 2) (KEEPOUT状態)かつ(電子銃HV ON)かつ(電子銃レーザーON)の時間



# cERL運転中の超伝導空洞停止の統計

- 2014年5月20日～6月20日までの1か月間(空洞運転時間:10時～22時)
  - 入射器空洞の停止回数: 0回
  - 主超伝導空洞の停止回数: 20回
  - 全ての停止はほぼ対策可能

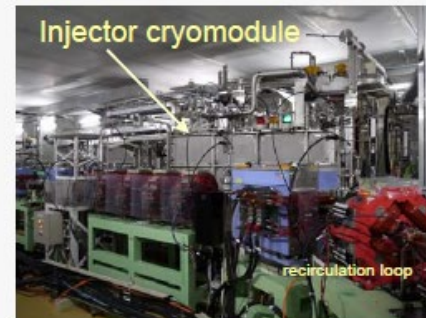
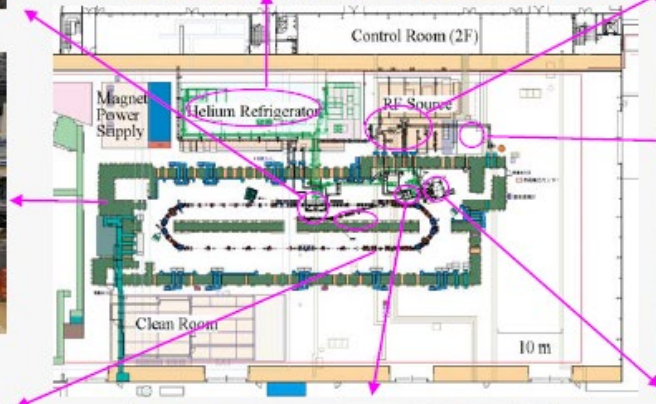
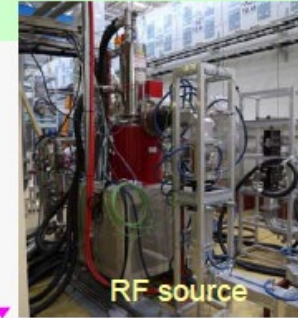
原因	回数	
チューナ	1回	
RF FB制御(High gain 運転)	3回	Middle gain で運転することで対処可能
アークセンサに太陽光入射	3回	対策済み
位相の設定ミス	1回	
ビーム調整中のカップラー・空洞の放電	4回	ビーム調整法の修正で対応
空洞下流の真空圧力上昇	4回	ビームダンプからの圧力上昇
ビーム負荷	3回	RF FBのゲインを変えて対処
冷凍機のオーバーロード	1回	対策済み

# cERL試験加速器の現状性能と課題への対策

- 平均電流: 6.5  $\mu\text{A}$ を実証。なぜ10 mAに到達していない？
  - 放射線申請を着実に通すため、段階的に上げている。申請最大電流: 1  $\mu\text{A}$   $\Rightarrow$  10  $\mu\text{A}$   $\Rightarrow$  100  $\mu\text{A}$  (2015年1月～)
- 加速勾配: 8.57 MV(主空洞)を実証。なぜ 15 MV/m に到達していない？
  - field emissionが制限。空洞の組み立て時の粒子混入に対する管理が重要。
- ビーム性能: 10 mAピーク相当で2.9 mm mradのエミッタンス(周回部)。なぜ0.3 mm mradに到達していない？
  - 調整時間不足(5日間で実施)、調整手法の未確立、と入射エネルギーの低下(入射器単体では5.6 MeV  $\Rightarrow$  周回運転で 2.4 MeVに下げた。空間電荷が厳しくなる方向)のためまだ到達できていない。調整手順を準備中(2015年5月～6月の運転で試験予定)。

# cERL建設完了後

The cERL was completed (Dec. 2013)



S. Sakanaka, TTC Meeting, 24-27 March, 2014

# cERL入射器コミッショニングでのビーム性能

## Result from the Injector Commissioning (Apr. - June, 2013)

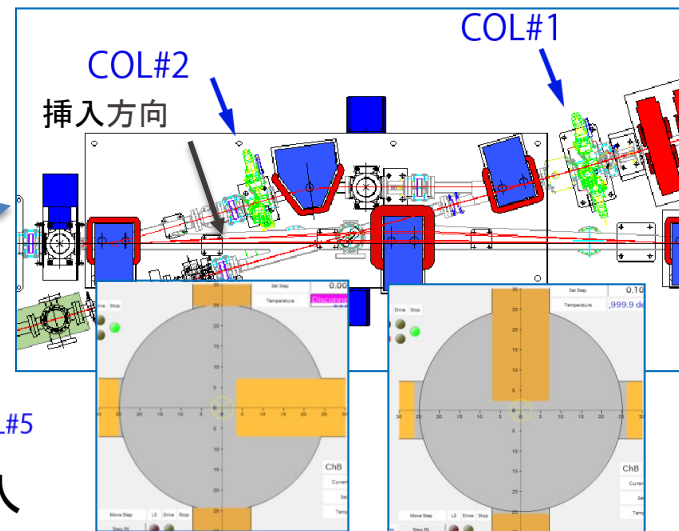
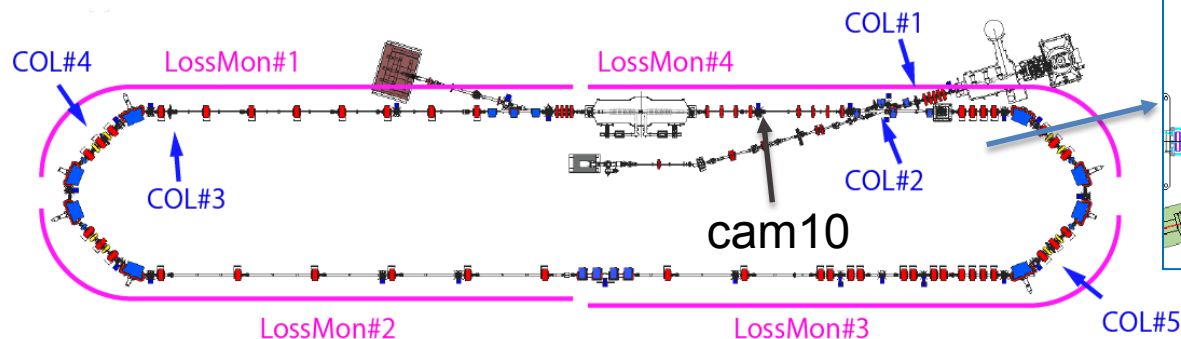
Reported in ERL13 workshop

Parameter	Achieved	Comment and Outlook
Kinetic beam energy $T$	5.6 MeV (typ.), 5.9 MeV (max.)	$T \approx 6$ MeV is allowed at present.
Average Beam current $I_0$	300 nA (max.)	$I_0 \approx 1$ mA is allowed at present. Beam current will be increased step by step.
Gun High Voltage $V_{\text{gun}}$	390 kV (typ.)	Very stable for more than 200 hours. Higher voltage is expected by polishing insulating ceramics.
Accelerating gradient of injector cavities $E_{\text{acc}}$	7 MV/m (typ.)	CW operation. Very stable for more than 200 hours.
Normalized beam emittance (T=390 keV, low charge)	$\approx 0.07 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (@~10 fC/bunch)	
Normalized beam emittance (T $\approx$ 5.6 MeV, low charge)	$\approx 0.17 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (@0.02 pC/bunch)	Close to the limitation of present instrumentation. Emittance might be smaller.
Normalized beam emittance (T $\approx$ 5.6 MeV, high charge)	$\approx 0.8 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (@7.7 pC/bunch)	Further improvement is expected by optimizing machine parameters and by higher gun voltage.
Momentum jitter $(\Delta p/p)_{\text{rms}}$	$6 \times 10^{-5}$	On-crest acceleration. With high rf-feedback gain.
Bunch length and energy spread	See graphs in these slides. (depend on bunch charges)	Parameters have not been optimized yet under space-charge effect.

S. Sakanaka, TTC Meeting, 24-27 March, 2014

# ビーム損失の評価と対策

## コリメータと光ファイバロスモニタ

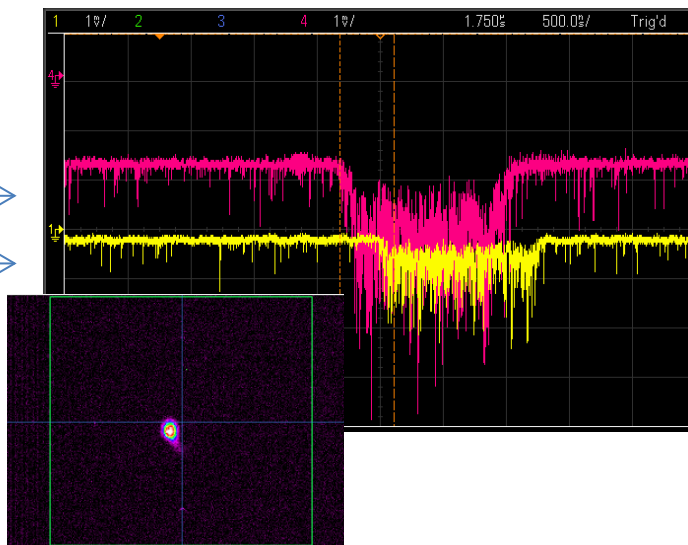


コリメータをダクト中央から2~4mmの位置まで挿入

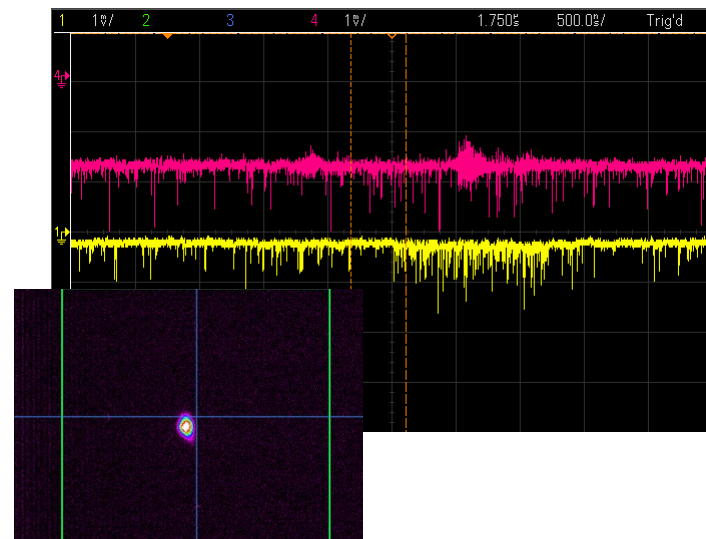
## ファイバロスモニタの信号

- 第1アーケ LossMon#1&#2 →
- 第2アーケ LossMon#3&#4 →

コリメータCOL#1, #2挿入前



コリメータCOL#1, #2挿入後

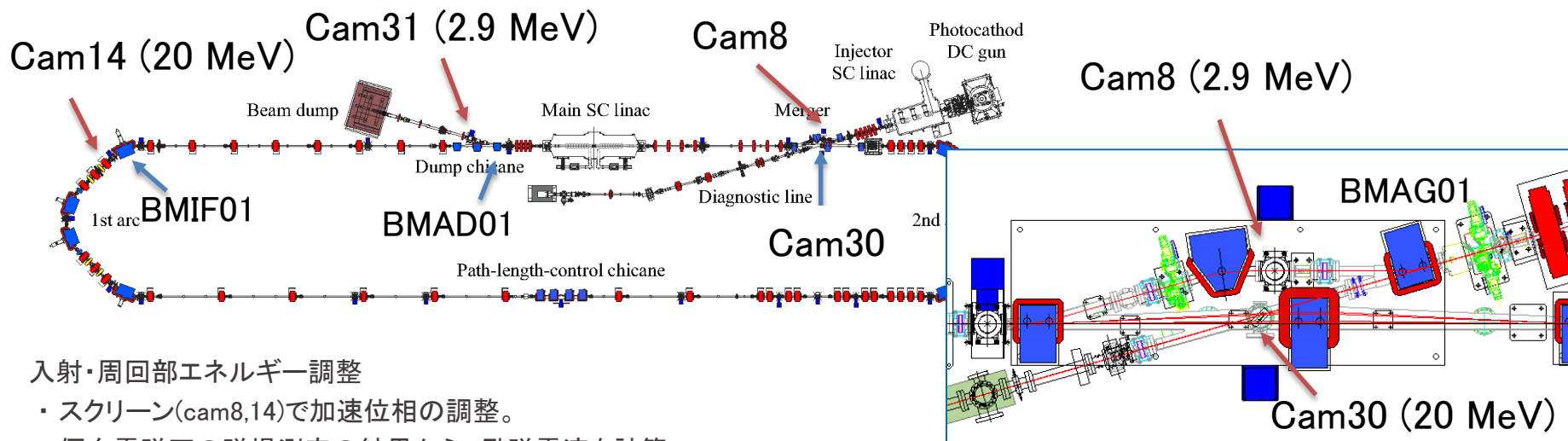


## スクリーンモニタ Cam10の画像

資料作成: 島田美帆

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

# エネルギー広がり測定結果

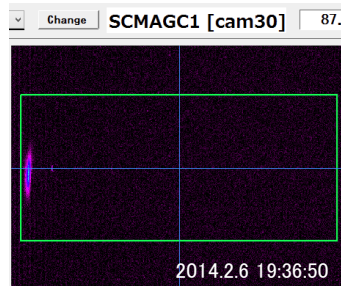


## 入射・周回部エネルギー調整

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

## エネルギーのクロスチェック

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

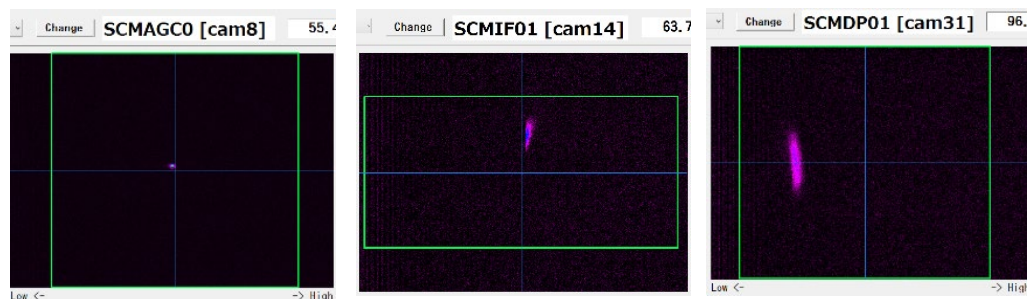


入射・周回ビーム運動量比  
ビーム位置 2:13、設計 1:7  
おおむね一致

## エネルギー広がり

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

スクリーン上で水平方向のビームサイズを最小化  
エネルギー広がりには十分に小さいことを確認



エネルギー広がり測定例

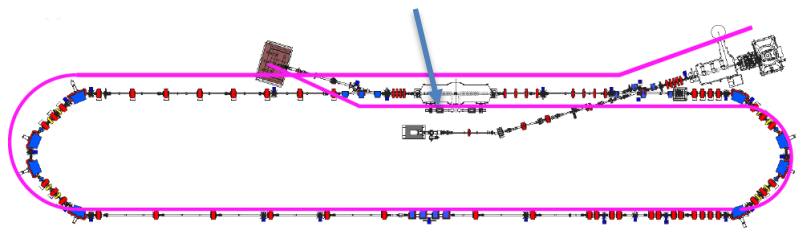
# 加速・減速ビームの軌道調整法の確立

## 軌道調整時のビームパラメータ

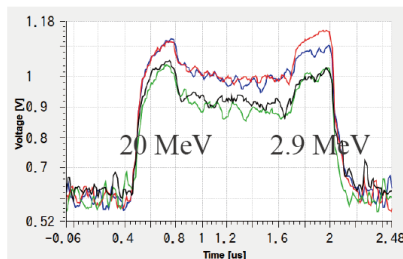
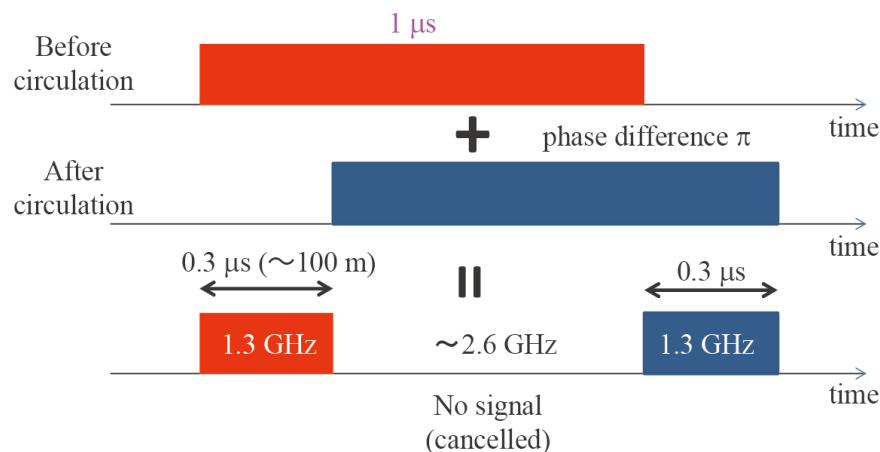
バンチ電荷量	10 – 100 fC
マクロパルス長	1 $\mu$ s
運転周波数	1.3 GHz
マクロパルス繰り返し	$\sim$ 5 Hz
平均電流値	数100 pA

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

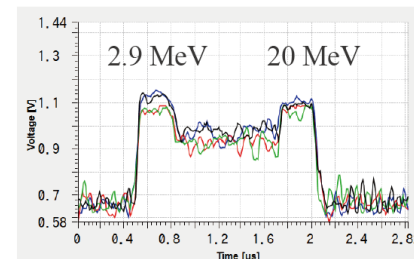
- 減速ビーム  
BPMによる軌道調整(右図)



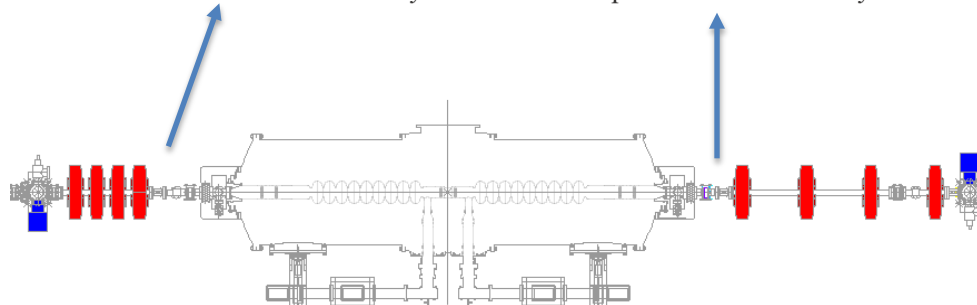
## BPMによる加速・減速2ビームの測定



Downstream of main cavity

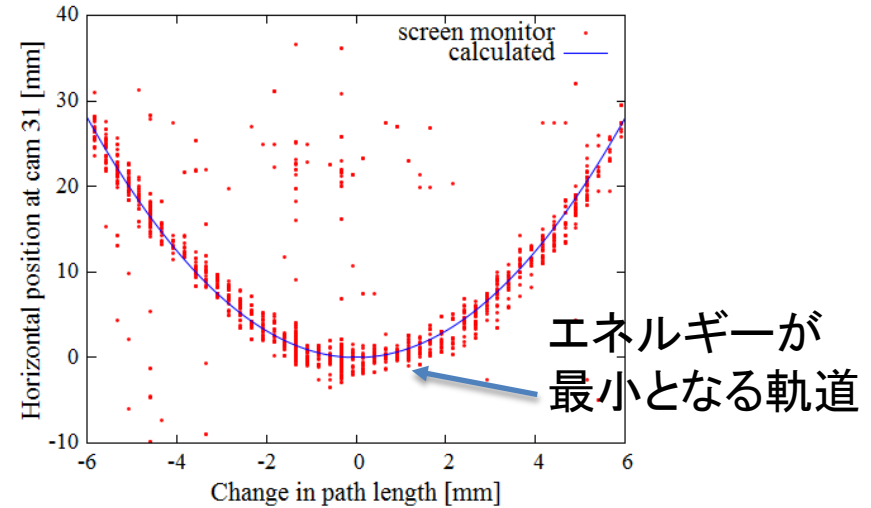
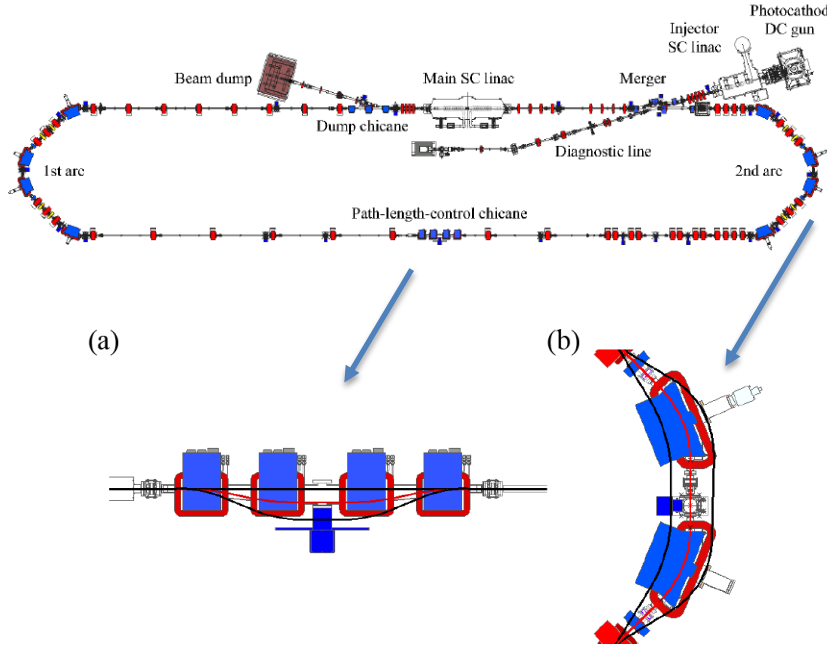


Upstream of main cavity



# 周長補正による減速エネルギーの調整

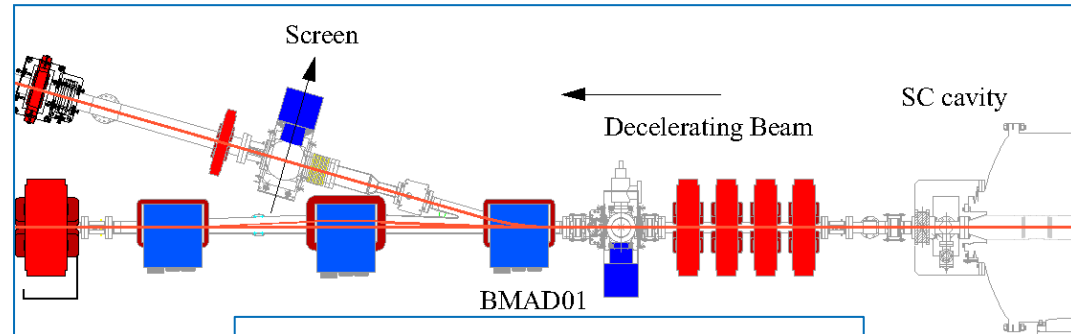
ダンプエネルギー・エネルギー広がりが最小となるように周長を調整  
 10uA以下の低い電流では空洞のビームローディングでの測定が困難。



縦軸：cam31の水平方向のビーム位置  
 横軸：バンプの高さから推定される軌道長変化量  
 (ステアリング励磁電流の推定値とほぼ一致。)

2つの周長補正方法・赤線は基準軌道

- (a) 周長補正シケインによる補正  
南側直線部に配置、±5mm
- (b) アークの頂点による補正  
第2アークのみで±10mm程度



ダンプシケイン付近の配置図

資料作成：島田美帆

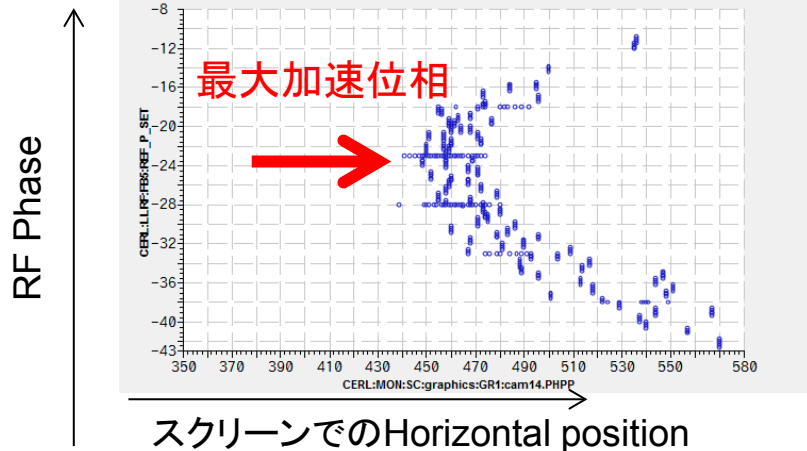
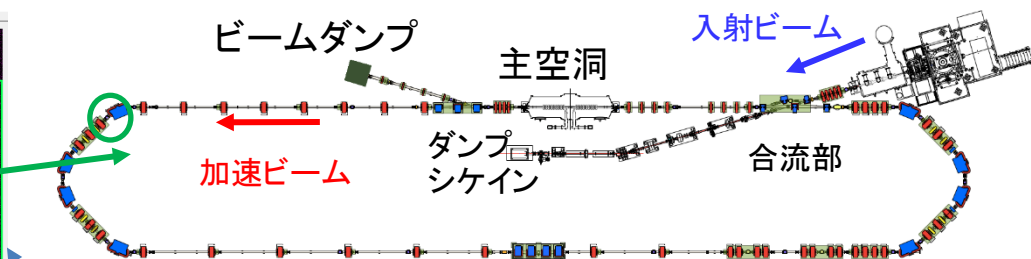
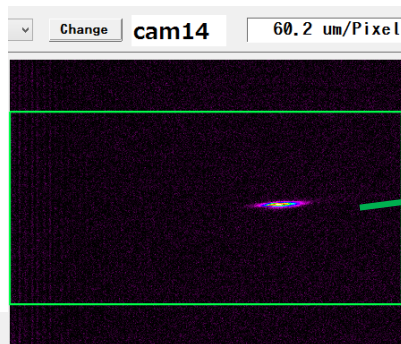


# 主空洞での加速

- 第一アーク偏向電磁石下流で位相調整とエネルギー測定

H. Sakai, et. al.,  
PFシンポジウム2014  
資料(2014.03.19)より

偏向電磁石下流のスクリーンでのプロフィール



ビームの位置(分散のある場所なのでエネルギー)はdriftなく安定であった

偏向電磁石(53A)による測定: +16.6MeV  
主空洞による測定: +16.7MeV

ほぼ一致  
設定通りに加速されている

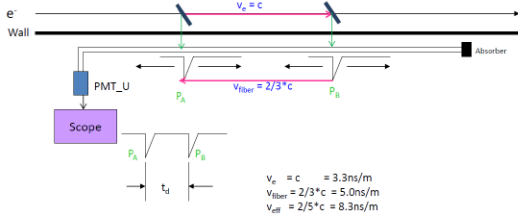
設定通りの電圧で加速されていることを確認。  
加速空洞によるオプティクスの大きな乱れは  
見えていない。  
加速後のエネルギーは安定であった。

# 損失を抑えた周回部ビーム輸送

M. Shimada,  
ERL推進委員会資料  
(2014.03.20)より

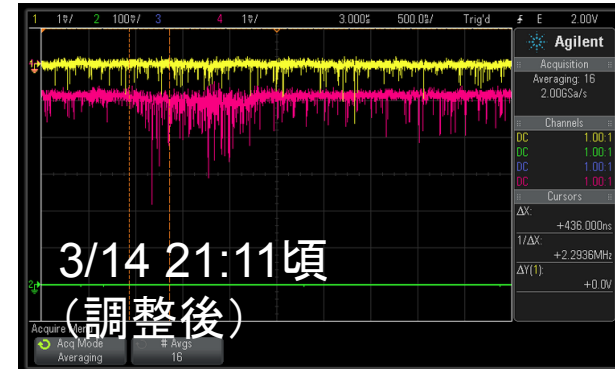
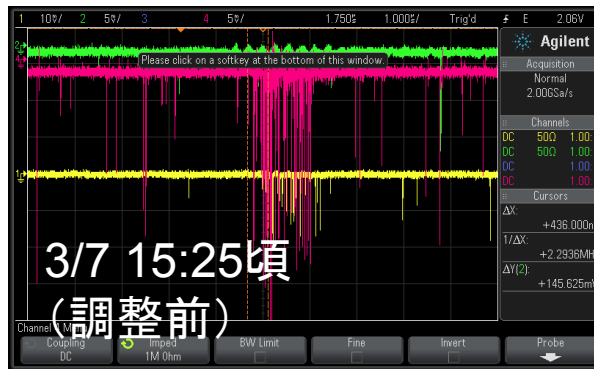
- 放射線施設検査は合格したが、次の電流増強にはまだアーク部での損失が大きい
- 調整項目
  - 第一アーク入口でのオプティクスマッチング
  - バンチャー空洞の使用(時間方向のアクセプタンスの拡大)

## ファイバロスモニタによる ビーム損失測定結果



ピンク: 第1アーク

黄色: 第2アーク



放射線レベル測定箇所	調整前 (mSV/h)	調整後 (mSV/h)
第一アーク中央 (N7)	9.6	2.8
第二アーク中央 (N11)	0.008	0.008
主ダンプ (N4)	7.5	1.5

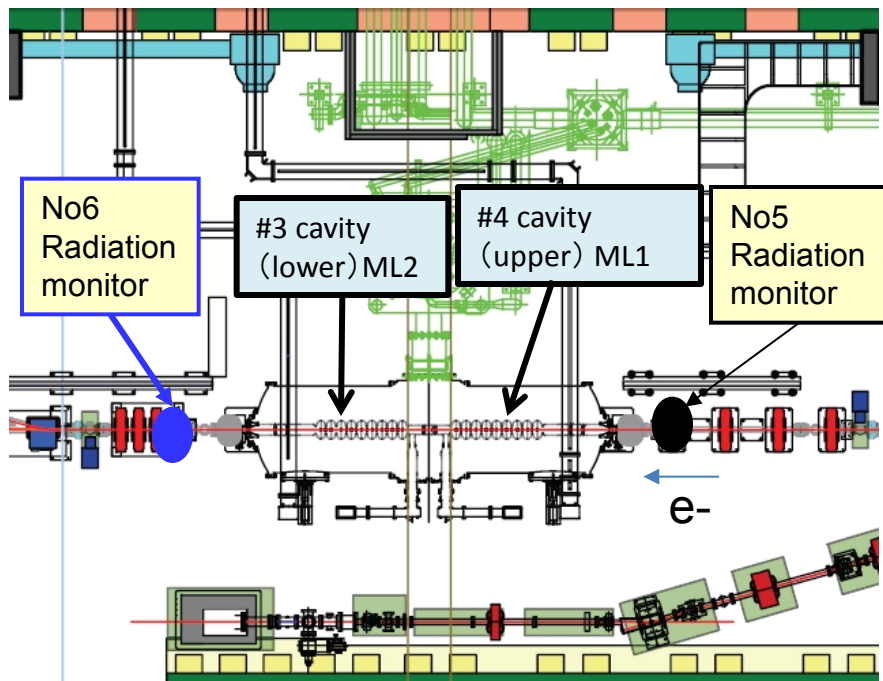
調整後に、第一アークでの放射線損失が大幅に減少。  
これで、次の電流増強(今のところ 100  $\mu$ Aがターゲット)に向けて、目途が立った

# 超伝導空洞の現状と今後の課題(1)

## 放射線量の増大

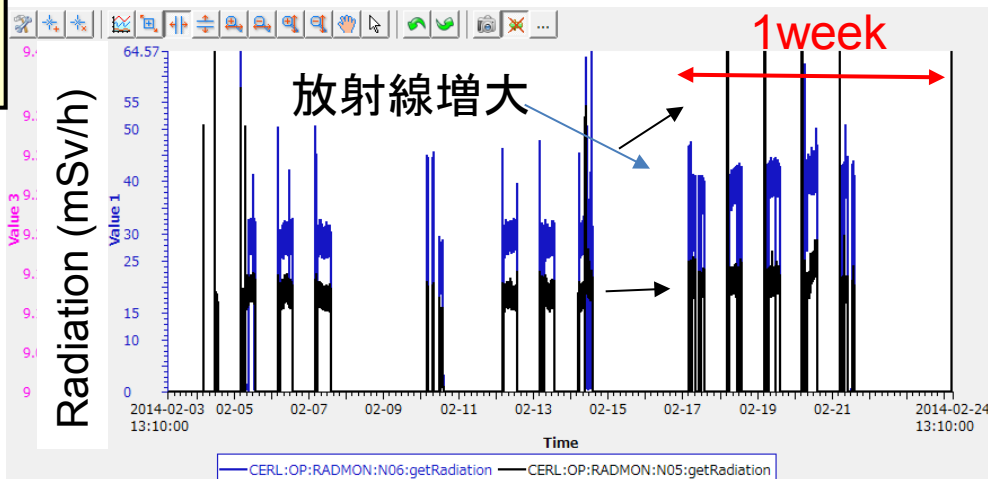
梅森 健成ら、SAP047

“Compact ERLにおける主加速部超伝導加速空洞の運転状況”



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

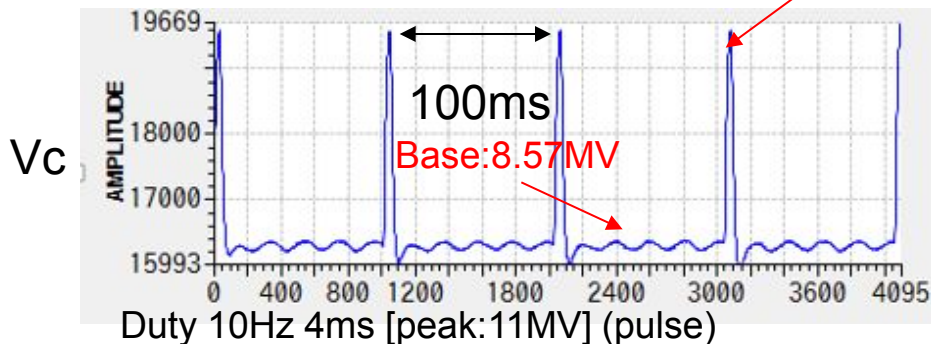
2月初めの20MeV運転を始めてから3週間のradiationの様子  
3週間後に突然下流にradiationが増える現象が見られる。



## パルスエージング

空洞電圧測定波形(digital)(Vc)

一瞬空洞内に高いfieldができる



・パルスエージングの実施

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

・およそ1時間のエージング

・両方のcavityで効果あり

放射線量がおおよそ半分程度に減少

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

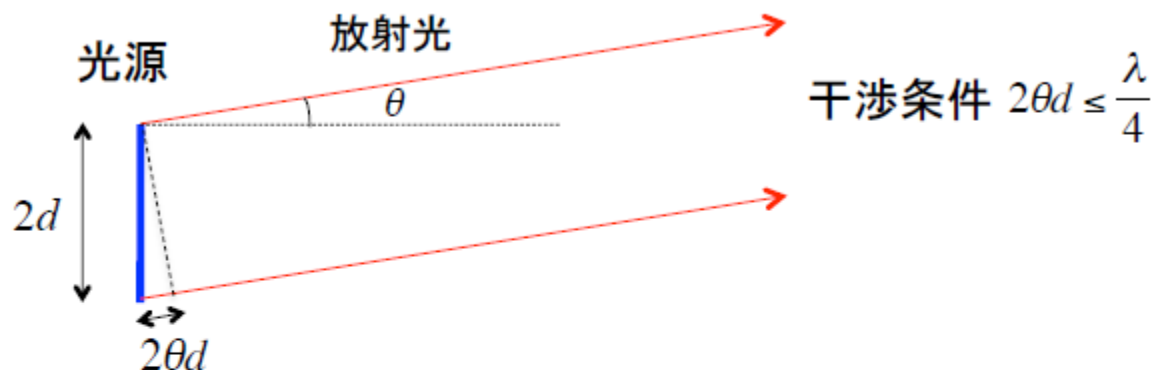
→ 20.48mSv/h (2/26 21:47)

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

→ 77.9mSv/h (2/26 21:47)

# 空間コヒーレンス

## 空間コヒーレンス (spatial coherence)



## アンジュレータ光のコヒーレント成分

$$F_c = \left( \frac{d^2 N}{dt(d\varepsilon/\varepsilon)} \right)_{\text{coherent}} \approx (2\theta_x)(2d_x)(2\theta_y)(2d_y)B_r = \left( \frac{\lambda}{2} \right)^2 B_r \quad \rightarrow \text{輝度に比例}$$

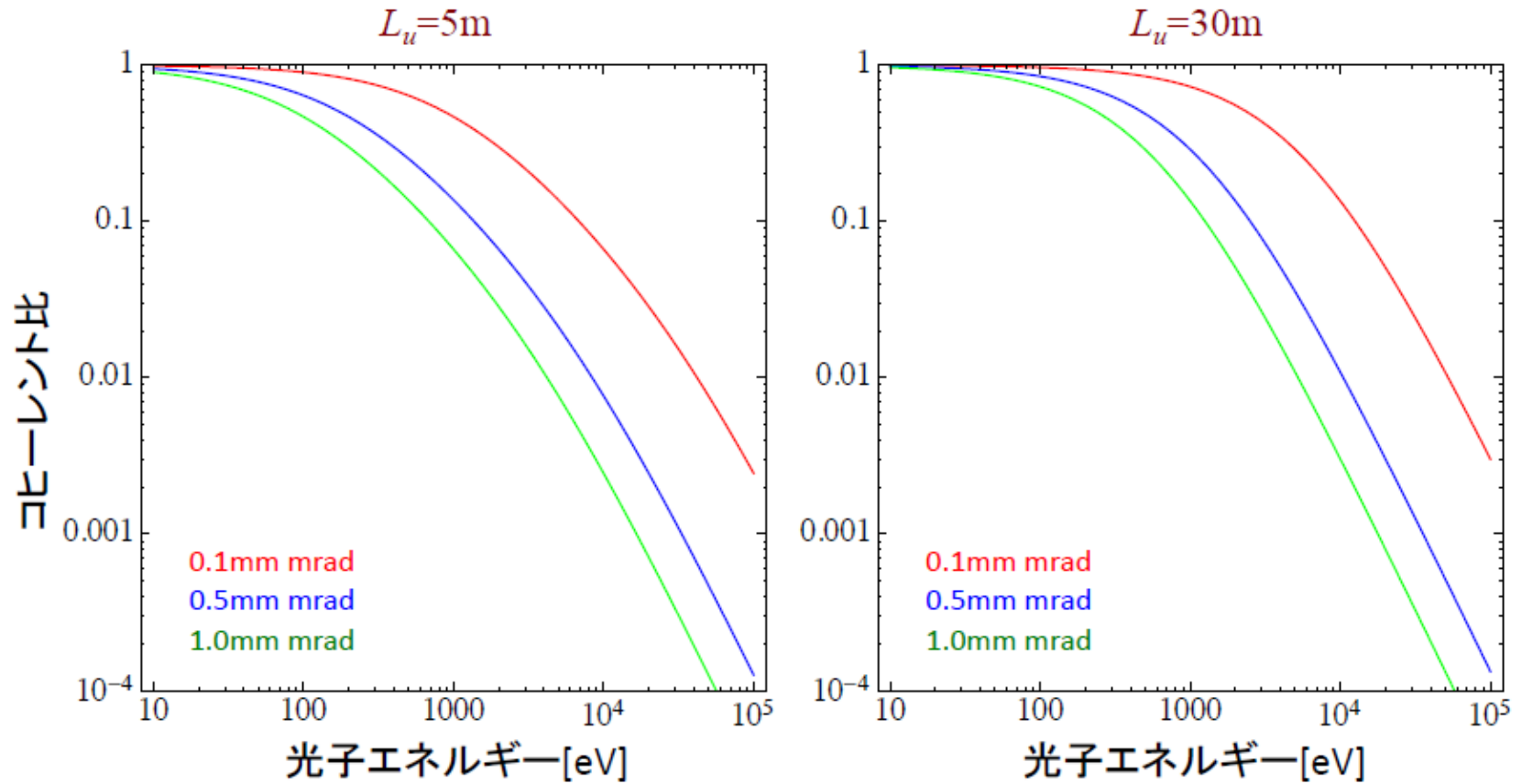
## コヒーレント比 (coherent fraction)

$$P_c = \frac{\left( \frac{d^2 N}{dt(d\varepsilon/\varepsilon)} \right)_{\text{coherent}}}{\left( \frac{d^2 N}{dt(d\varepsilon/\varepsilon)} \right)_{\text{total}}} \approx \frac{\left( \frac{\lambda}{2} \right)^2 B_r}{4\pi^2 \Sigma'_x \Sigma'_y \Sigma_x \Sigma_y B_r} = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 \Sigma'_x \Sigma'_y \Sigma_x \Sigma_y}$$

$\rightarrow$  エミッタンスが小さいと1に近づく。

資料: 中村典雄氏

# コヒーレント比 コヒーレント比



計算: 中村典雄氏