

# コンパクトERLのコミッショニング状況と ビーム利用に向けた取り組み

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設  
高井 良太

# コンパクトERL開発チーム



## 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

足立 伸一, 阿達 正浩, 赤木 智哉, 明本 光生, 荒川 大, 荒木 栄, 浅岡 聖二, 江並 和宏, 遠藤 有聲, 福田 茂樹, 古屋 貴章, 芳賀 開一, 原 和文, 原田 健太郎, 本田 融, 本田 洋介, 本間 博幸, 本間 輝也, 細山 謙二, 穂積 憲一, 石井 篤, 金 秀光, 加古 永治, 神谷 幸秀, 片桐 広明, 河田 洋, 小林 幸則, 小島 裕二, 近藤 良也, 小菅 淳, 久米 達哉, 松本 利広, 松村 宏, 松下 英樹, 道園 真一郎, 三浦 孝子, 宮島 司, 宮内 洋司, 長橋 進也, 仲井 浩孝, 中島 啓光, 中村 典雄, 中西 功太, 中尾 克己, 濁川 和幸, 野上 隆史, 野口 修一, 野澤 俊介, 帯名 崇, 尾崎 俊幸, Qiu Feng, 下ヶ橋 秀典, 阪井 寛志, 坂中 章悟, 佐々木 慎一, 佐藤 康太郎, 佐藤 昌史, 設楽 哲夫, 篠江 憲治, 島田 美帆, 塩屋 達郎, 宍戸 寿郎, 清宮 裕史, 高井 良太, 多田野 幹人, 田原 俊央, 高橋 毅, 高木 宏之, 田中 織雅, 竹中 たてる, 谷本 育律, 照沼 信浩, 飛山 真理, 土屋 公央, 内山 隆司, 上田 明, 梅森 健成, 浦川 順治, 渡邊 謙, 山本 将博, 山本 康史, 矢野 喜治, 吉田 光宏



## 日本原子力研究開発機構 (JAEA)

羽島 良一, 松葉 俊哉, 森 道昭, 永井 良治, 西森 信行, 沢村 勝, 静間 俊行



## 広島大学

栗木 雅夫



## 総合研究大学院大学

Cenni Enrico

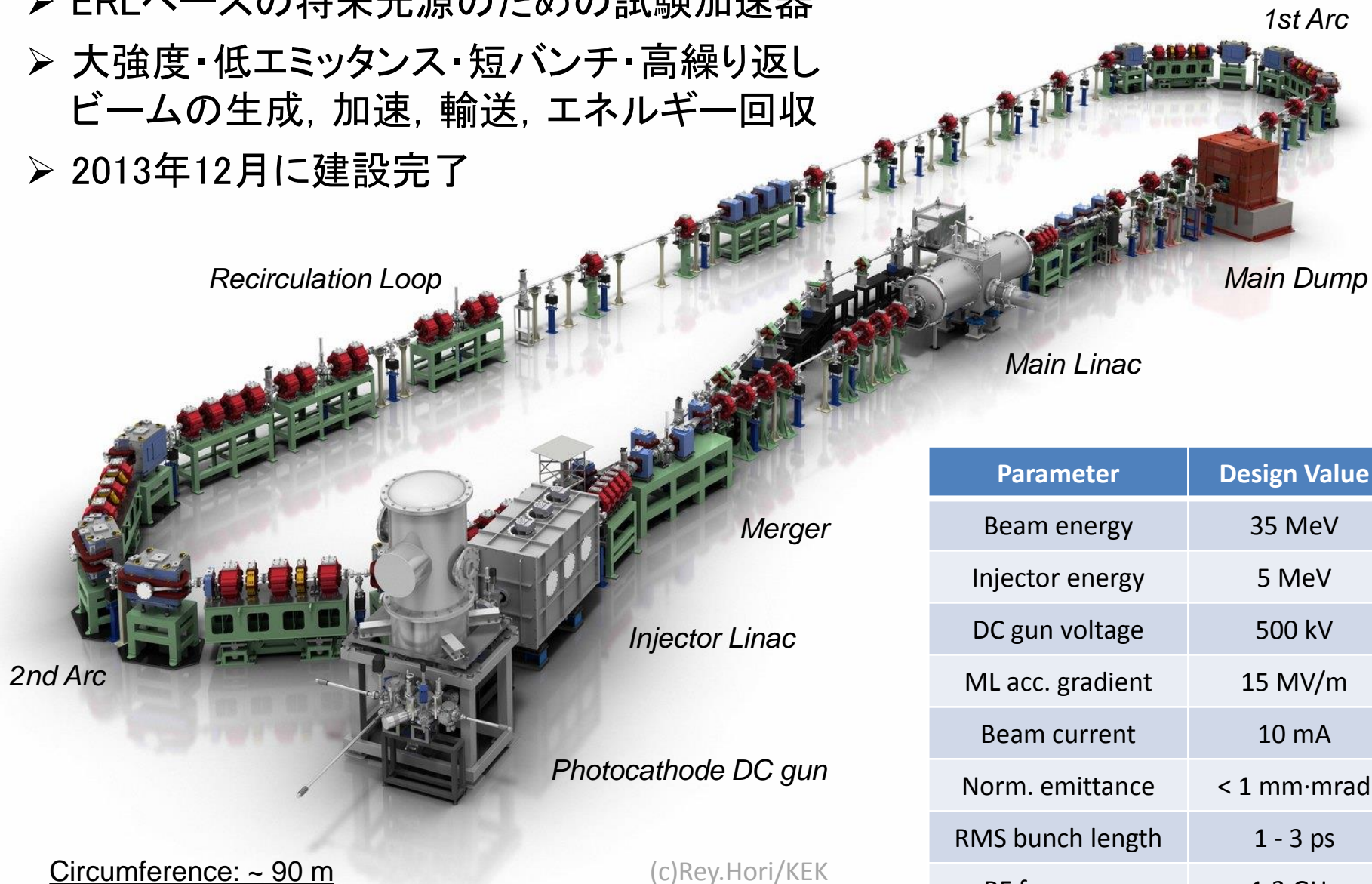


## Kyungpook National University (KNU)

Hwang Ji-Gwang

# コンパクトERL (cERL)とは？

- ERLベースの将来光源のための試験加速器
- 大強度・低エミッタンス・短バンチ・高繰り返しビームの生成, 加速, 輸送, エネルギー回収
- 2013年12月に建設完了

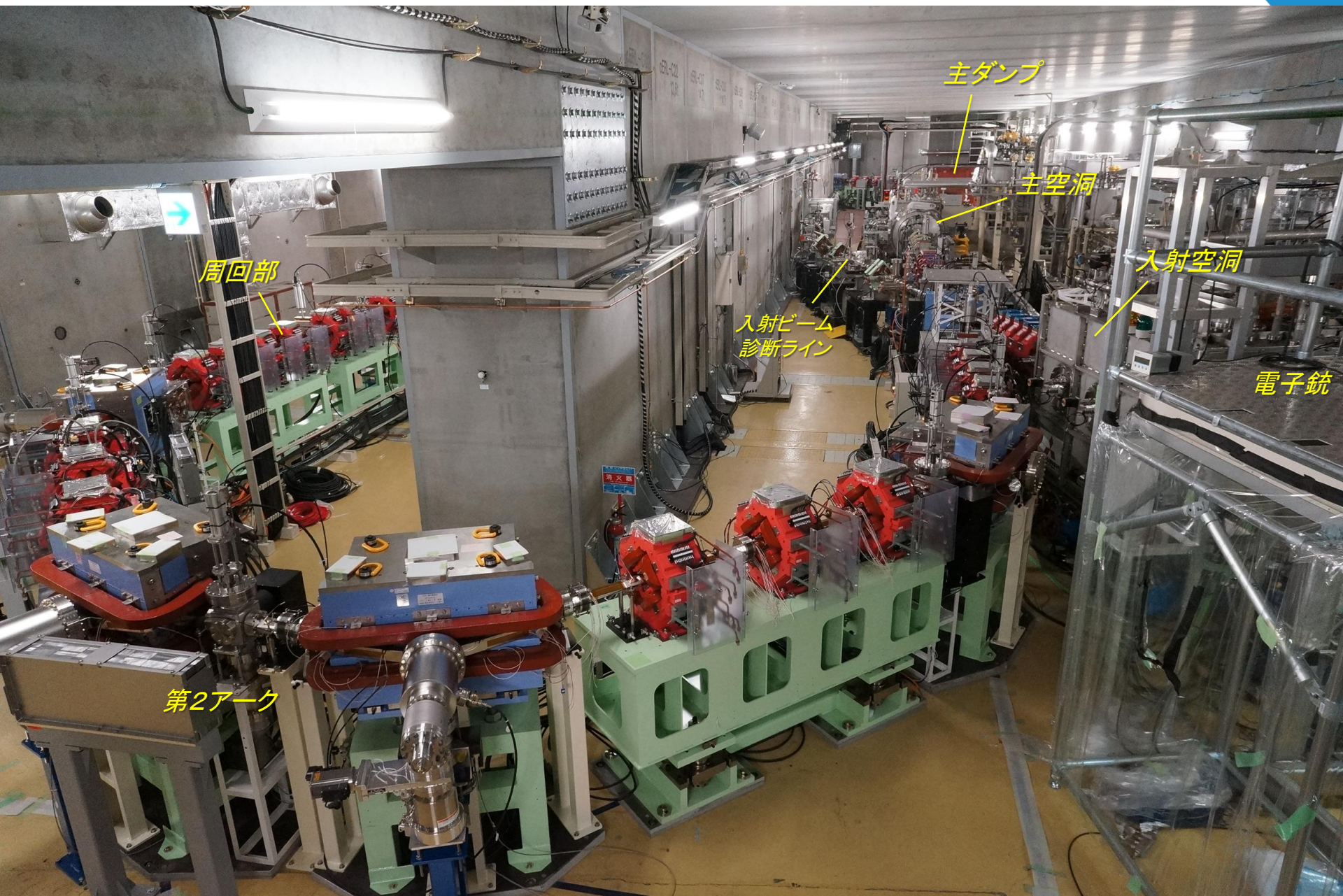


Circumference: ~ 90 m

(c)Rey.Hori/KEK

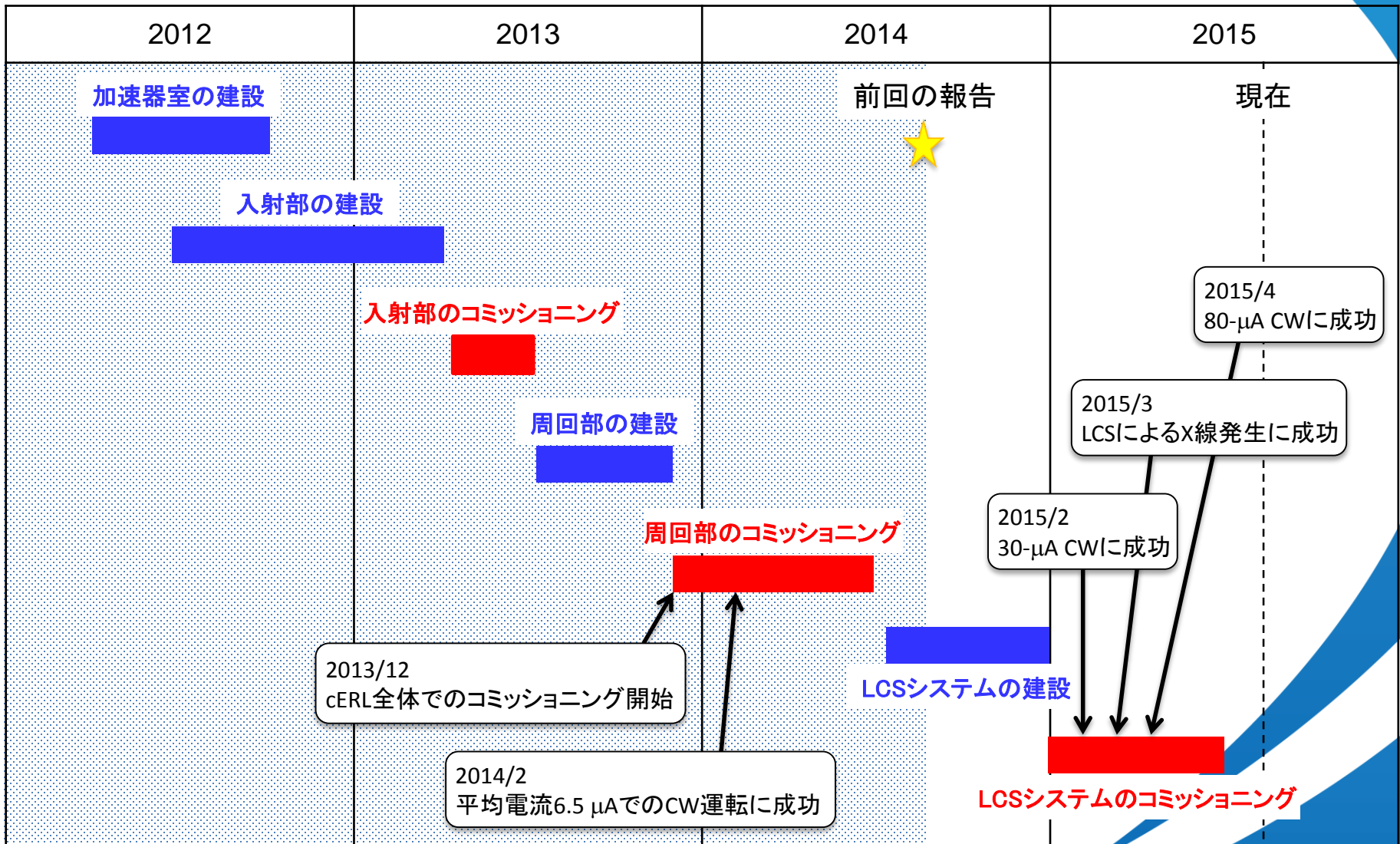
Parameter	Design Value
Beam energy	35 MeV
Injector energy	5 MeV
DC gun voltage	500 kV
ML acc. gradient	15 MV/m
Beam current	10 mA
Norm. emittance	< 1 mm·mrad
RMS bunch length	1 - 3 ps
RF frequency	1.3 GHz

# 完成したコンパクトERL



# これまでの歩み(2012年以降)

■ 建設期間  
■ コミッショニング期間



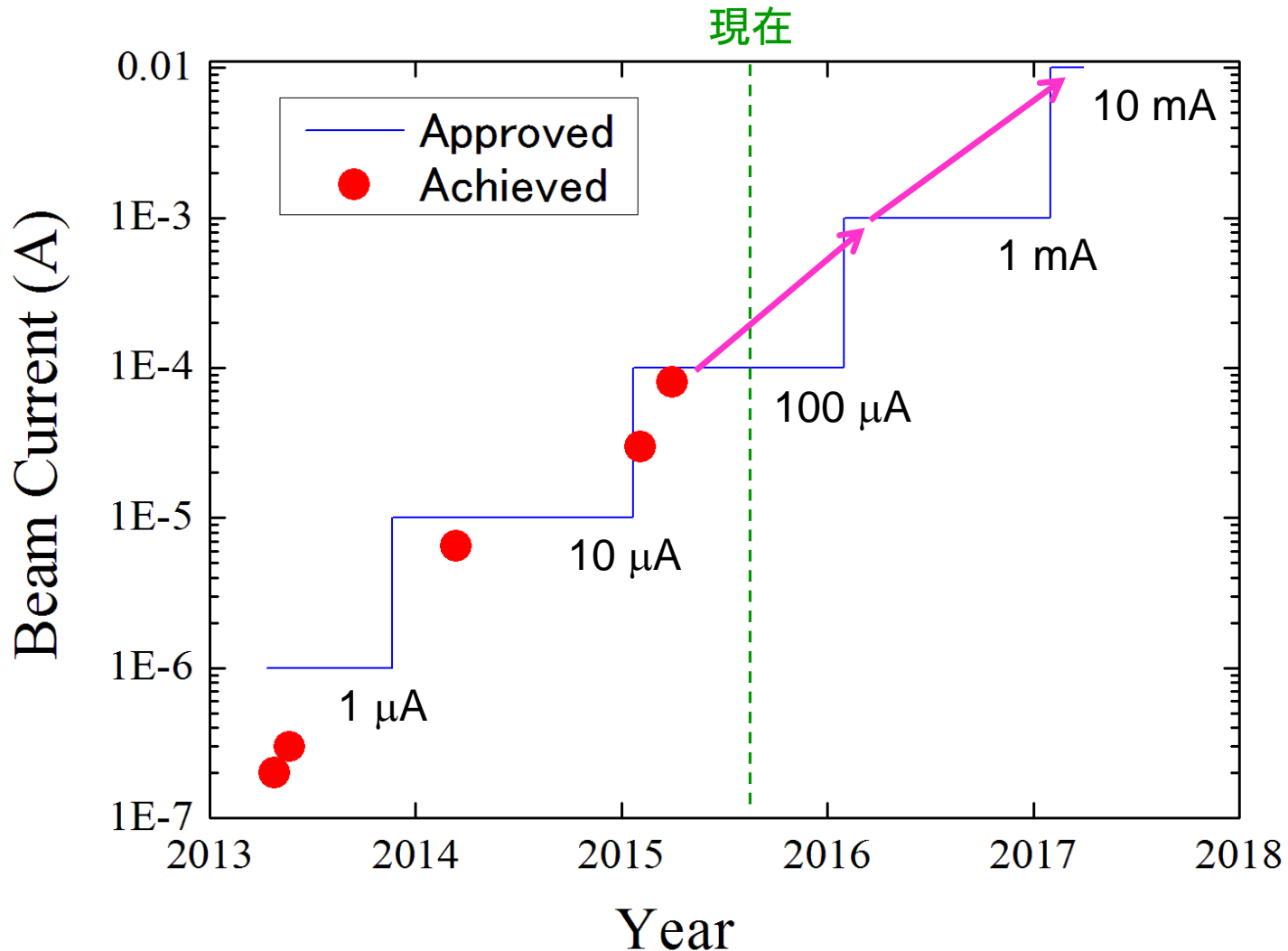
前回の報告以降の2大ミッション

- 10  $\mu$ A $\rightarrow$ 100  $\mu$ Aへの電流増強
- LCS実験用オプティクス確立

# 平均電流の増強

# 平均電流の申請値と達成値

- 施設で扱う最大ビーム電流の申請値を段階的に更新（当面の目標: 10 mA）
- 変更申請の承認には申請値の約3割にあたる出力で運転する必要あり

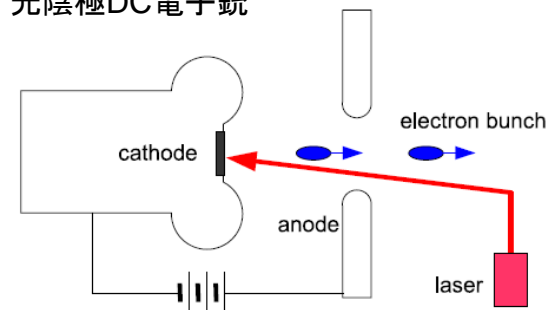


# 電子ビームの時間構造

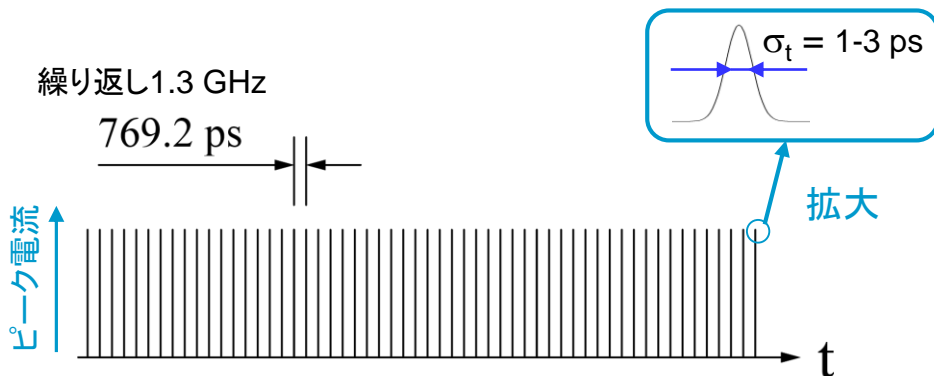
- 電子ビームの時間構造は電子銃の光陰極に照射するレーザー光の時間構造で決まる
- $\mu\text{A}$ オーダーの平均電流ではビーム調整の主役となるスクリーンモニターが使用できない

⇒ ビーム調整はマクロパルスビームを用いた“バーストモード”で行う

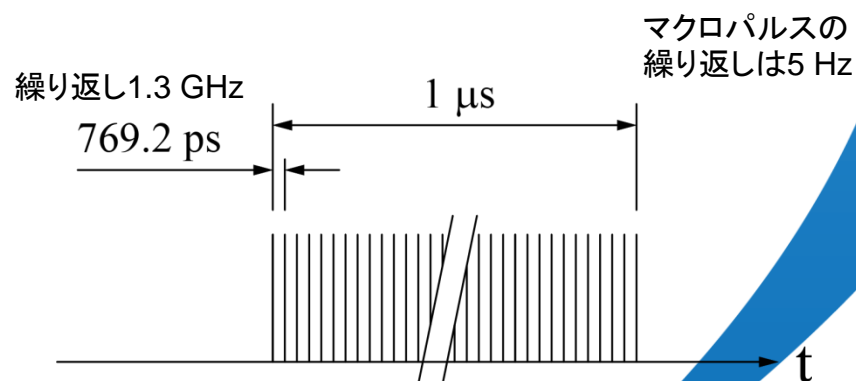
光陰極DC電子銃



## 連続(CW)モード



## バーストモード



平均電流:  $I_{\text{CW}} = q_b \cdot f_{\text{rep}}$

$I_{\text{burst}} = q_b \cdot f_{\text{rep}} \cdot T_p \cdot f_p$

( $q_b$ : バンチ電荷,  $f_{\text{rep}}$ : バンチ繰り返し,  $T_p$ : パルス幅,  $f_p$ : パルス繰り返し)

例)  $q_b = 7.7 \text{ pC}$ ,  $f_{\text{rep}} = 1.3 \text{ GHz} \Rightarrow I_{\text{CW}} = 10 \text{ mA}$ ,  $I_{\text{burst}} = 50 \text{ nA}$



# CW運転までの調整手順

## (3) 主空洞・北直線部

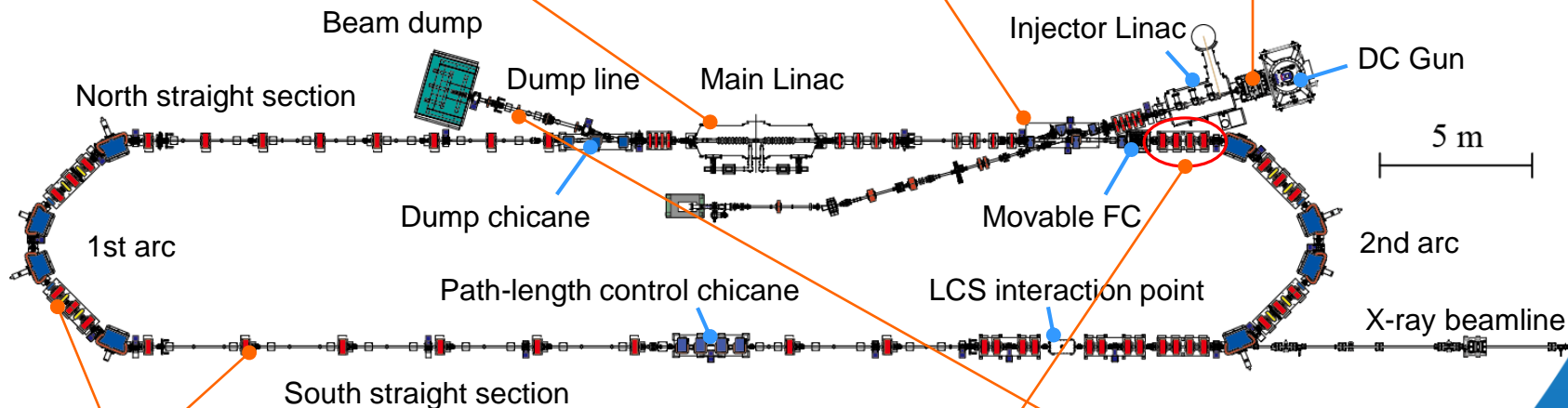
- 主空洞のRF位相調整
- 主空洞の中心通し
- 周回ビームのエネルギー調整
- オプティクスマッチング

## (2) 合流部・北直線部

- 4極電磁石の中心通し
- 入射ビームのエネルギー調整
- オプティクスマッチング

## (1) 入射部・入射空洞

- ソレノイドや4極電磁石の中心通し
- 可動FCによるビーム電流の確認
- 入射空洞のRF位相調整(オンクレスト)
- 入射空洞の中心通し
- オプティクスマッチング



## (4) アーク部・南直線部

- 4極電磁石の中心通し
- エネルギー分散の確認・調整
- オプティクスマッチング

## (5) 周回部最下流の調整セクション

- 可動FCによるビーム電流の確認
- 主空洞への再入射とダンプラインへの軌道調整

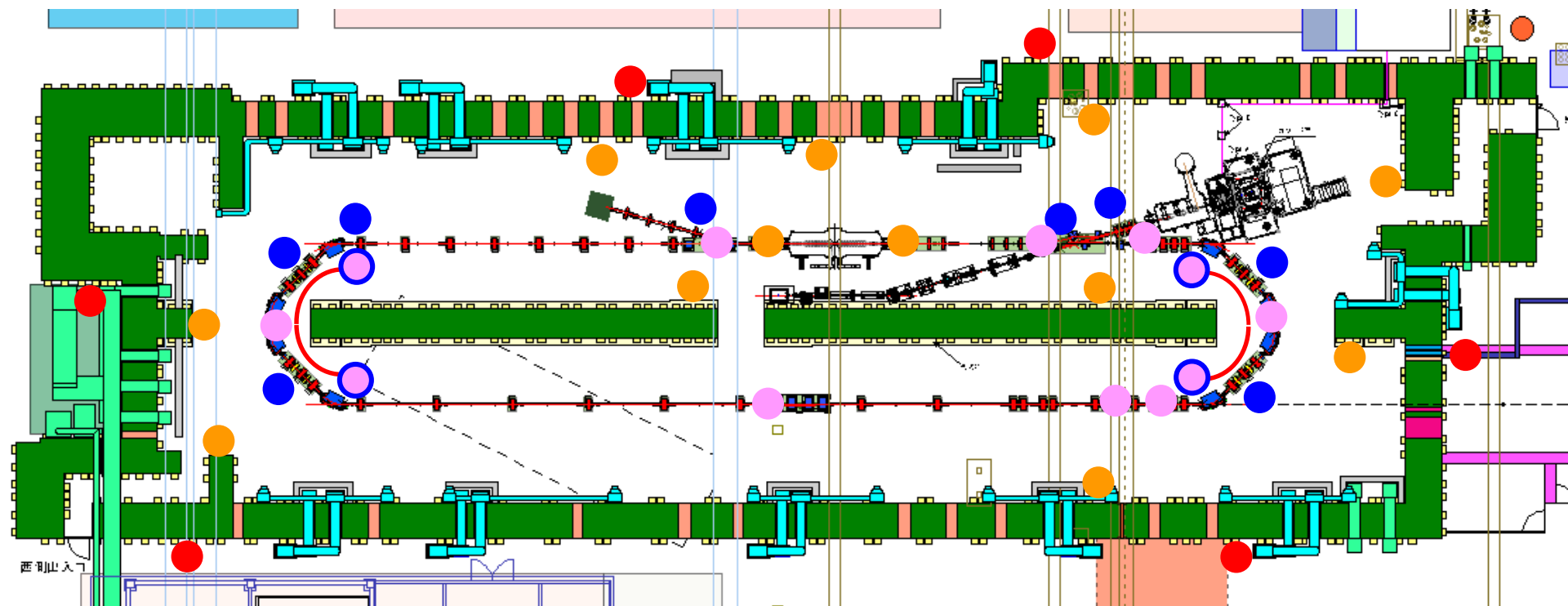
## (6) ダンプライン

- エネルギー回収の調整
- ダンプFCによるビーム電流の確認

⇒ このような手順でビームをほぼロスすることなく主ダンプまで導いたらバーストモードからCWモードへと移行する

# ビームロスモニター

- ビームロスによる放射線の発生をできるだけ小さく抑えることが重要
- 加速器周辺に設置されたロスモニターの出力を注視しながら徐々に大電流へ
- 平均電流の値は最上流の電子銃電源と最下流の主ダンプの2ヶ所で同時測定



● 放管設置モニター (Orange Monitor, 6台)

● 加速器室内エリアモニター (ALOKA, 10+2台)

● インターロック用ロスモニター (Pure CsI+PMT: 8台)

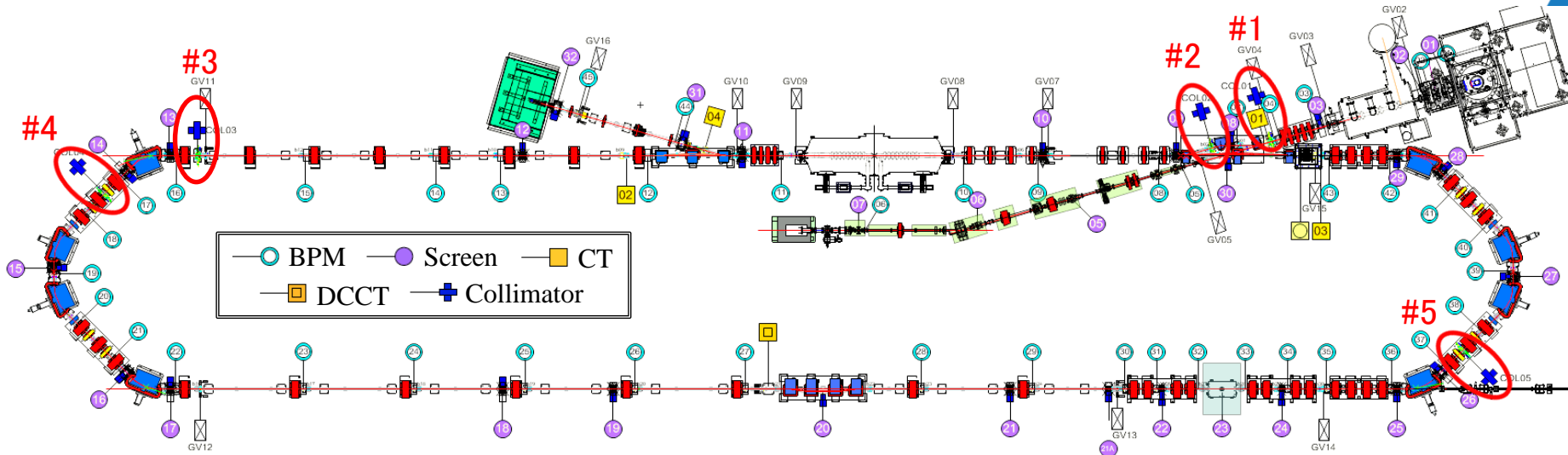
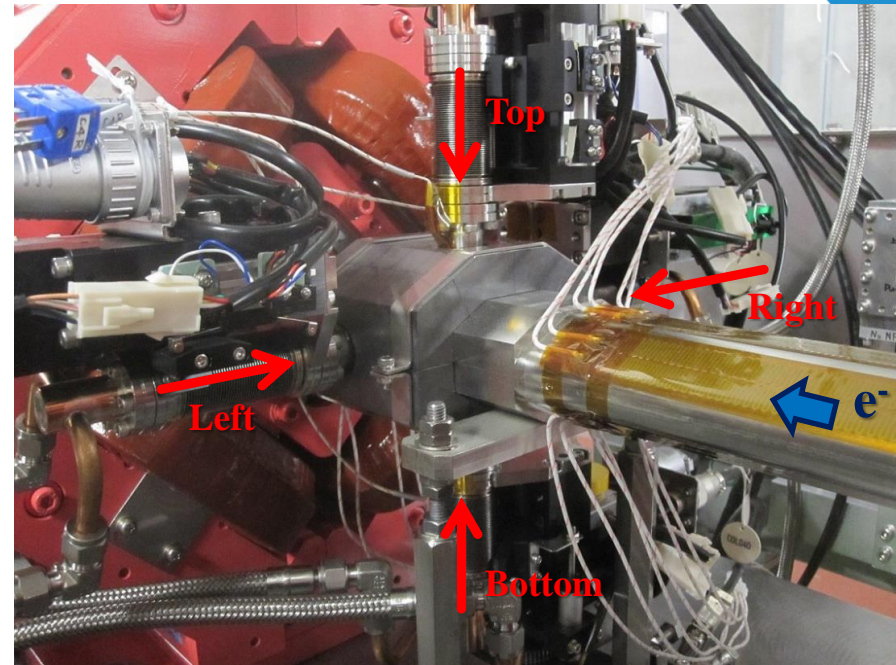
● 診断用ロスモニター (Fiber+PMT: 2セット)

● 診断用ロスモニター (TI-doped CsI+PMT: 8台)

# ビームコリメータ

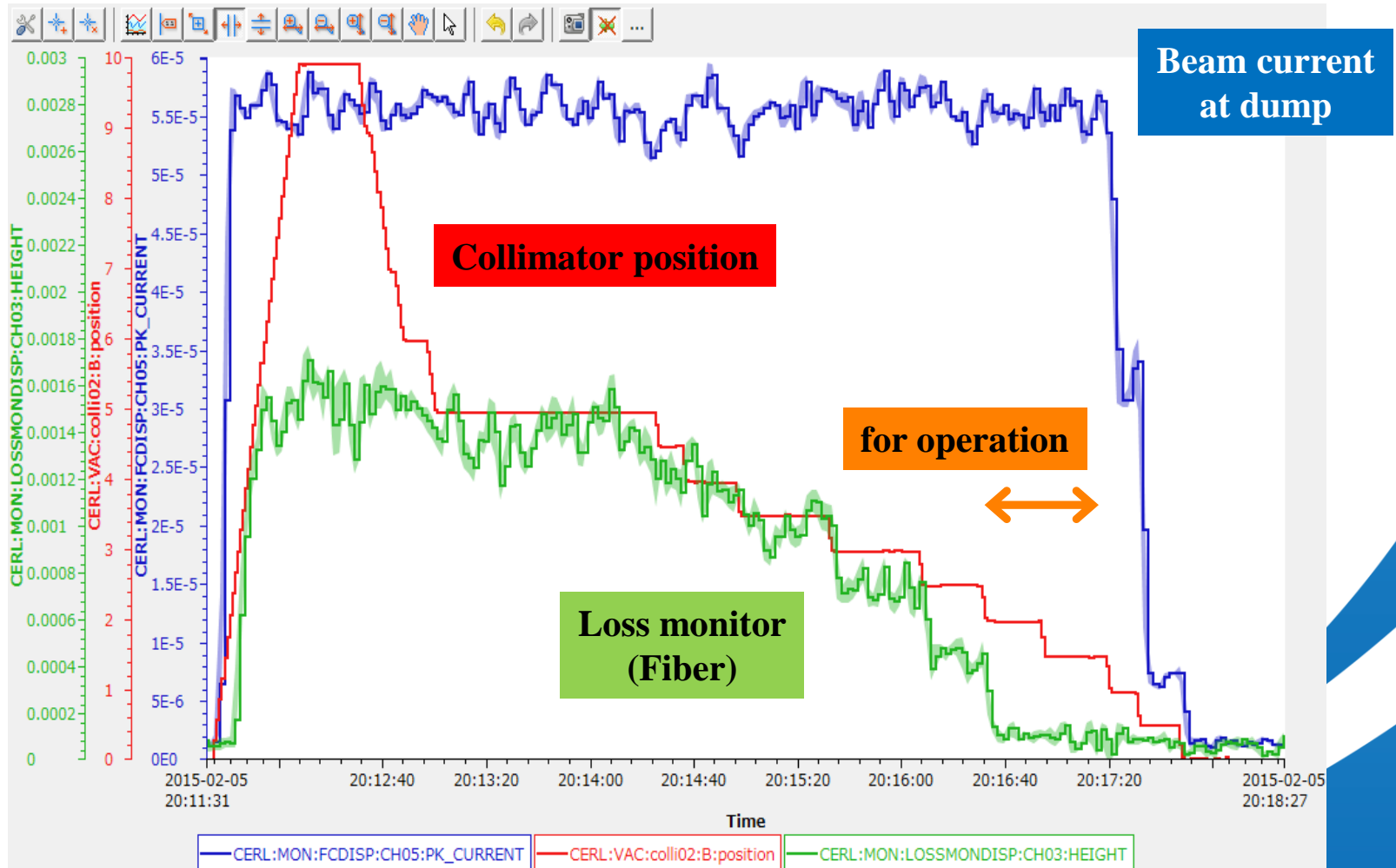
アーク部用コリメータ#4の外観

- 水冷した銅製のロッドを上下左右の4方向から独立に挿入可能
- ビームロスの原因となるビームハローやビームテイルの除去に利用
- 下図に示した5ヶ所に設置
- 特に低エネルギーセクションに設置した#1と#2が有効
- 近傍にはCsIシンチレータを用いた高速ロスモニターを設置



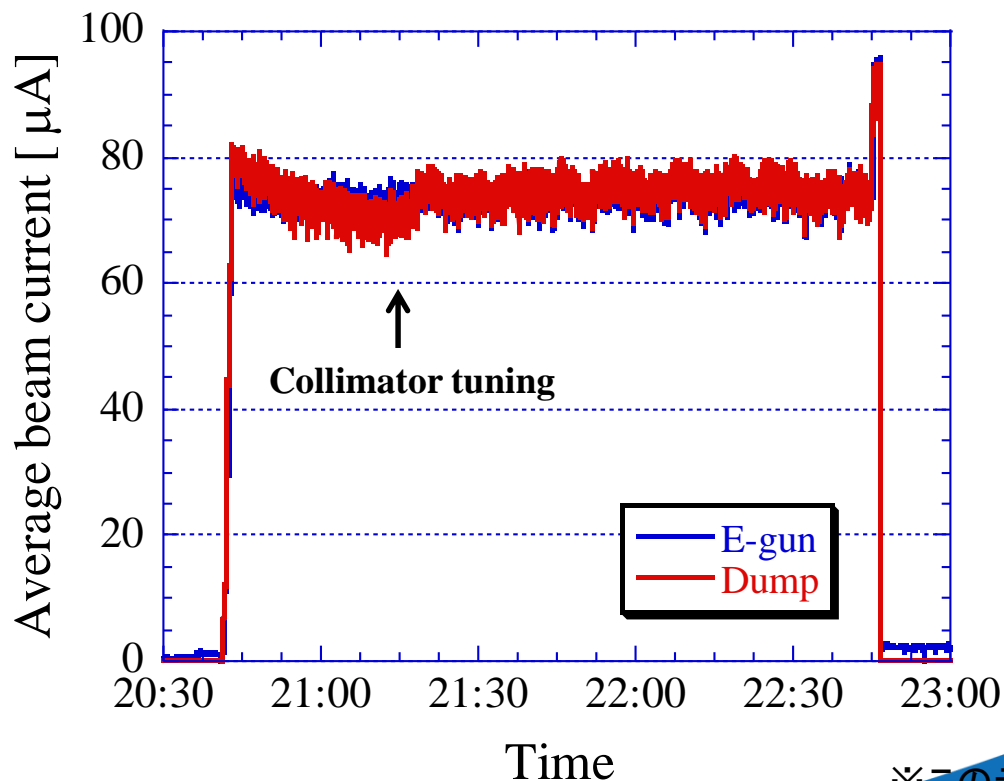
# ビームロス調整

- ▶ ビーム電流に影響を与えない(ビームコアを削らない)範囲でビームロスが最小となるよう各コリメータの挿入量を調整



# 平均電流 80 $\mu\text{A}$ を達成

- 2015年2月に 30  $\mu\text{A}$  を達成  $\Rightarrow$  最大100  $\mu\text{A}$ の施設検査に合格
- 2015年4月に 80  $\mu\text{A}$  を達成  
(LCSオプティクス, バンチ電荷: 0.5 pC, バンチ繰り返し: 162.5 MHz)
- 加速器室周辺で観測される放射線量も問題なし(最大0.6  $\mu\text{Sv/h}$ )  
 $\Rightarrow$  次回の1 mAへの電流増強に向けて明るい見通しが得られた
- ただし、CW運転中にゆっくりとしたビーム軌道のドリフトが発生

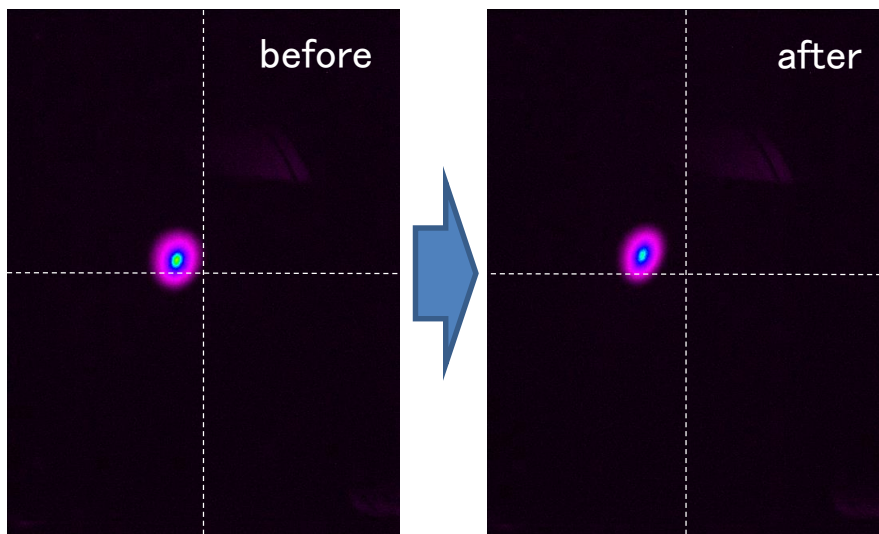


※このデータは2015/6に取得したもの

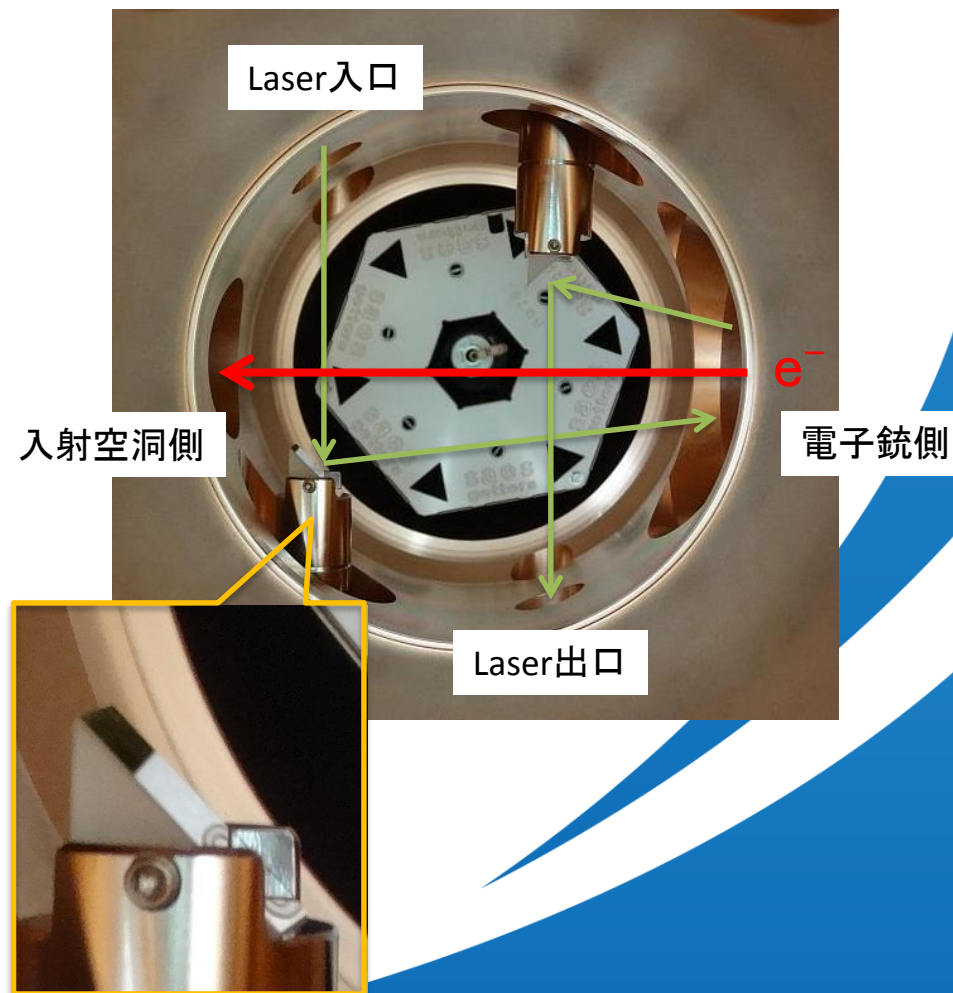
# 軌道ドリフトの原因

- 電子銃のレーザー導入に使用しているミラーのチャージアップと推定
- 次回のコミッショニングまでに金属ミラーに交換予定

CW運転前後におけるビーム位置の変化



レーザー導入チェンバー内部

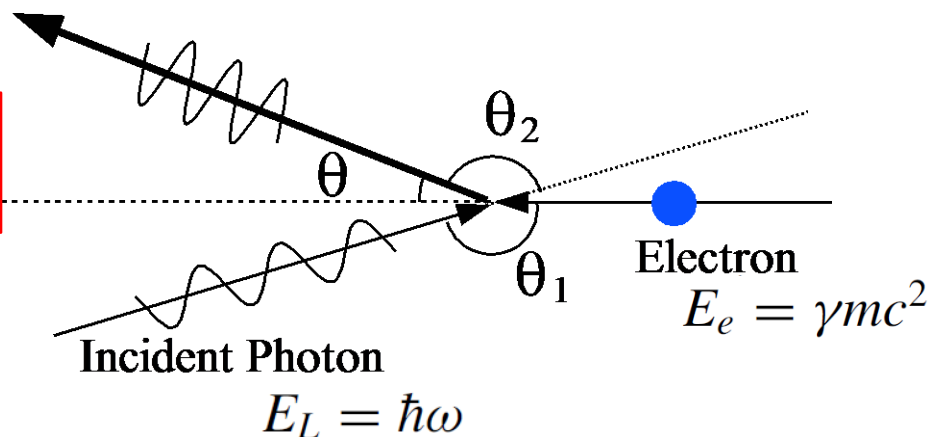


# LCSによるX線発生実験

# レーザーコンプトン散乱 (LCS)

$$E_X \simeq \frac{4\gamma^2 E_L}{1 + (\gamma\theta)^2 + 4\gamma E_L / (mc^2)}$$

(for head-on collision)



- 準単色かつエネルギー可変のX線/γ線が得られる
- 高い指向性を持つ
- 偏光状態も制御可能(直線・円)

➤ フラックス [photons/s]:

$$F_{\text{total}} = \frac{16}{3} N_e N_L f \frac{r_0^2}{w_0^2}$$

➤ 輝度 [photons/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW]:

$$B \approx F_{\text{total}} \frac{\gamma^2}{\epsilon_n^2} \times 0.1\%$$

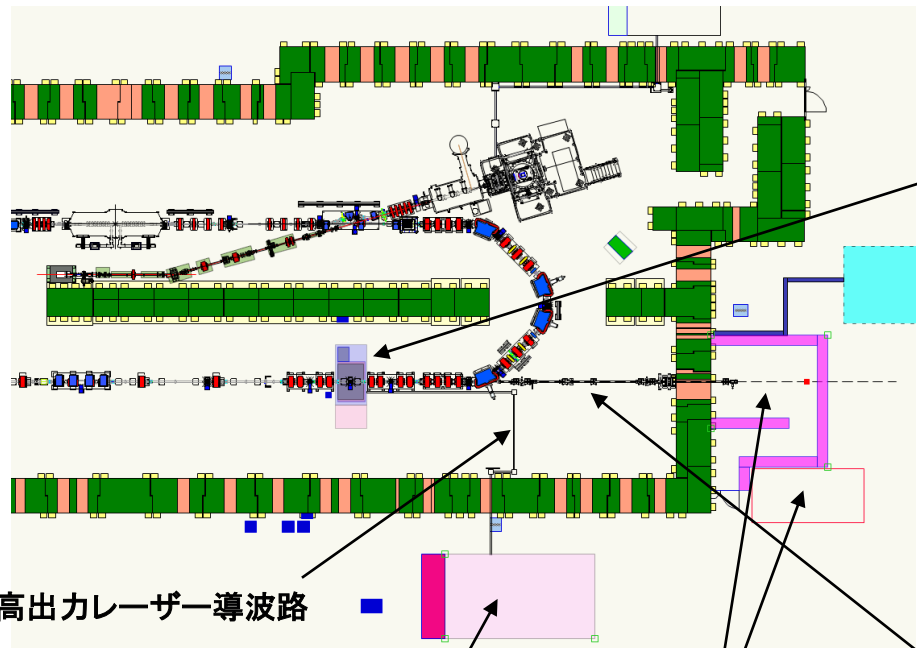
大電流かつ低エミッタンスのビームを備えるERLはLCS光源として最適

X線イメージングや核種の非破壊測定等への利用が検討されている



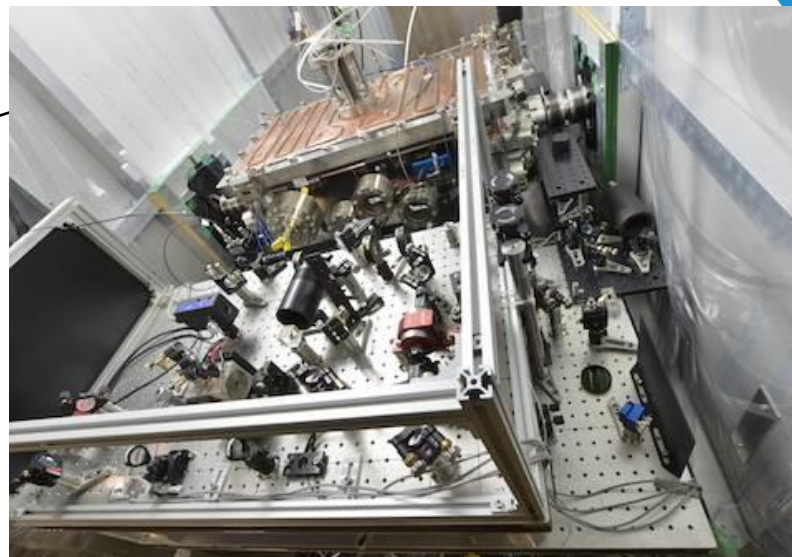
# LCSシステムの整備(2014/9~12)

LCS衝突点 (レーザー蓄積装置, 45Wレーザー, クリーンハッチ)



高出力レーザー導波路

高出力レーザー (100W, JAEA関西研より移設)



X線ビームライン



計測キャビン, フォトン実験室



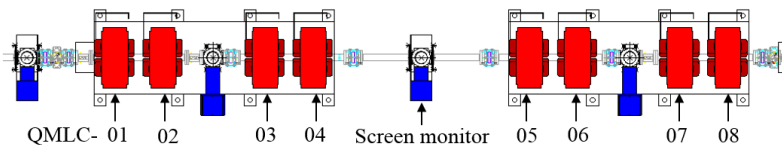
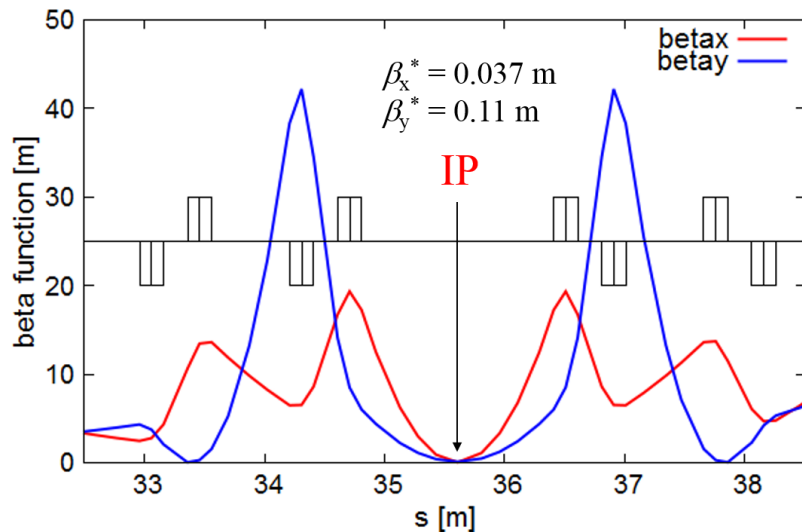
# LCS実験のためのビーム調整

- レーザーとの衝突点 (IP) でビームサイズを10 μmオーダーまで絞る
- ビームロス小さく抑えたまま輸送, エネルギー回収

調整技術を確立

衝突点でのビームサイズ(計算値)

$$\sigma_x^* = 21 \mu\text{m}, \sigma_y^* = 33 \mu\text{m}$$

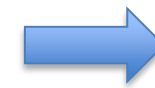


計算条件

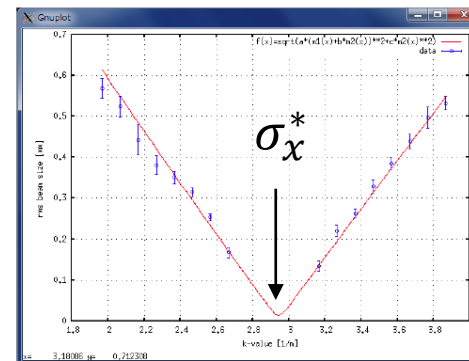
- バンチ電荷: 0.5 pC
- 規格化エミッタンス:  $(\varepsilon_{nx}, \varepsilon_{ny}) = (0.47, 0.39) \text{ mm}\cdot\text{mrad}$

衝突点でのビームサイズ(測定値)

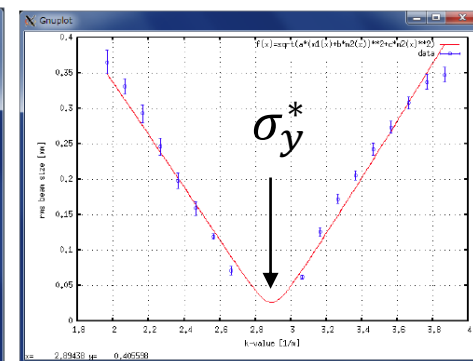
$$\sigma_x^* \sim 13 \mu\text{m}, \sigma_y^* \sim 25 \mu\text{m}$$



Beam size at the screen monitor ↑



K-value of QMLC04



K-value of QMLC04

※ IPでのビームサイズはスクリーンの分解能以下であるため、別途測定した規格化エミッタンスを拘束条件にし、フリーパラメータとしてオフセット項を加えた応答関数を測定データにフィットすることで推定した

$$\begin{aligned} \sigma_m &= \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_d^2} \\ &= \sqrt{A[m_{11}(k) + Bm_{12}(k)]^2 + Cm_{12}^2(k) + D} \end{aligned}$$

# LCSによる準単色X線の発生に成功

## ➤ 電子ビームパラメータ

Energy [MeV]	20
Bunch charge [pC]	0.36
Bunch length [ps, rms]	2
Spot size [ $\mu\text{m}$ , rms]	30
Emittance [mm mrad, rms]	0.4
Repetition Rate [MHz]	162.5
<hr/>	
Beam current [ $\mu\text{A}$ ]	58

## ➤ レーザー蓄積装置パラメータ

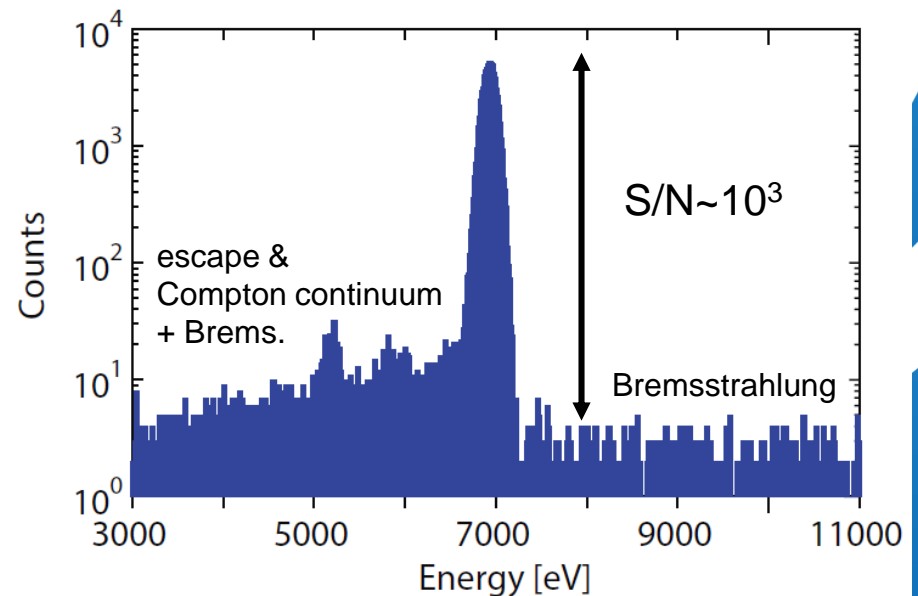
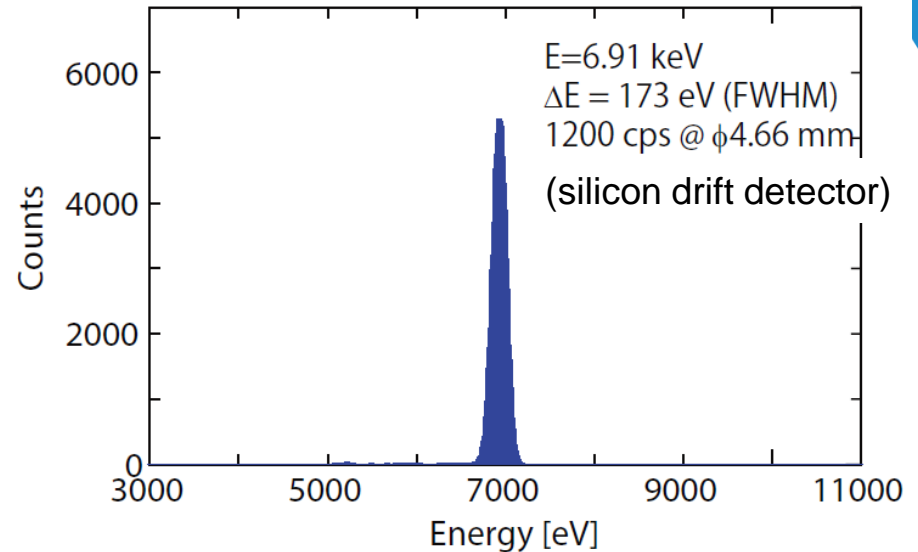
Center wavelength [nm]	1064
Pulse energy [ $\mu\text{J}$ ]	64
Pulse length [ps, rms]	5.65
Spot size [ $\mu\text{m}$ , rms]	30
Collision angle [deg]	18
Repetition rate [MHz]	162.5
<hr/>	
Intracavity power [kW]	10

## ➤ 実験結果(2015年3-4月のマシンタイム)

光子エネルギー = 6.9 keV  
計数率 = 1200 cps @  $\phi$ 4.66 mm (\*)  
発生点フラックス =  $4.3 \times 10^7$  ph/s (\*\*)

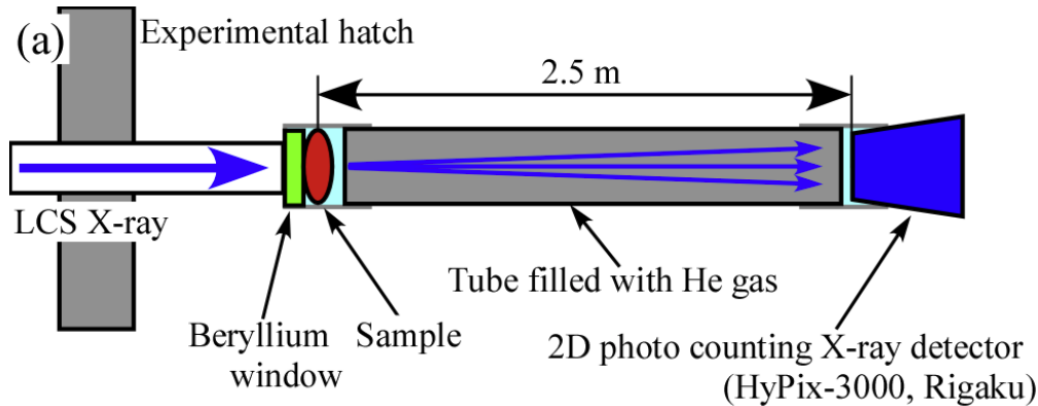
(\*) Detector collecting angle is  $4.66\text{mm}/16.6\text{m} = 0.281$  mrad.

(\*\*) CAIN/EGS simulations with the detector count rate.

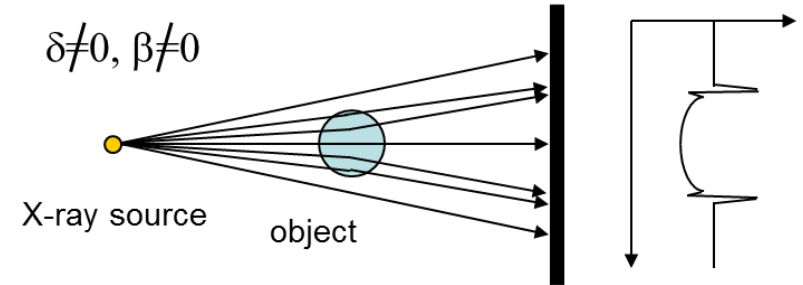


# LCS X線を利用したイメージング実験

## ➤ 実験セットアップ

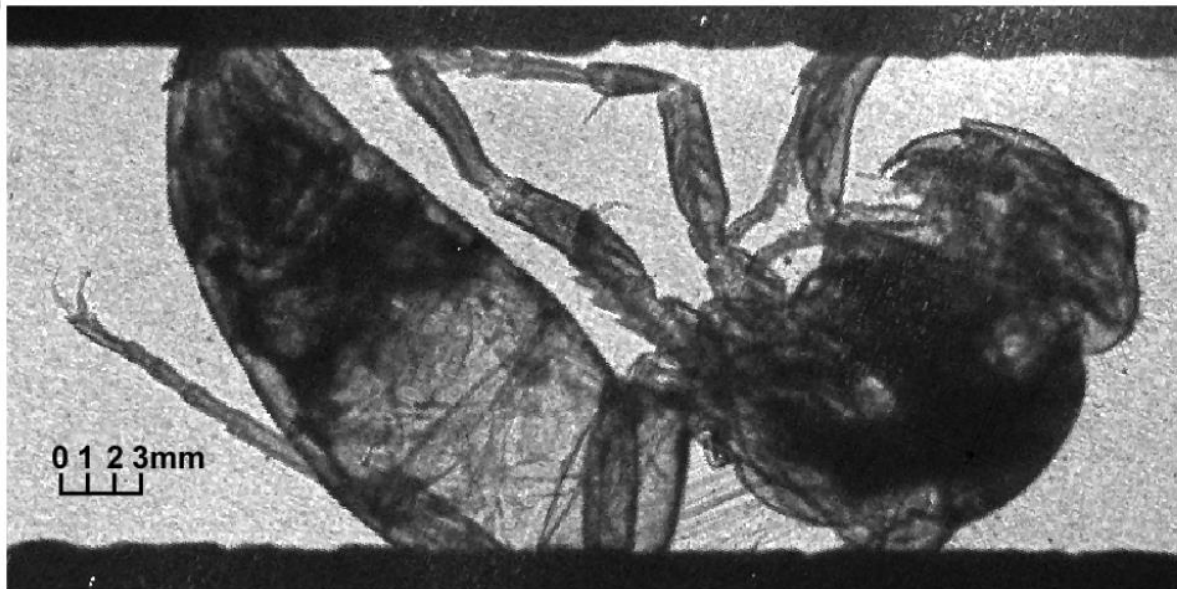


## ➤ 屈折イメージングの特徴



⇒ 吸収と屈折の複合効果でエッジが強調された画像

## ➤ 実験結果 (露光時間: 10分)



LCSによるX線を使って取得されたスズメバチのイメージング画像

A. Kosuge et al., Proc. IPAC'15, TUPWA066.

## その後も

- ・ イメージング視野の拡大
- ・ 空間分解能の評価
- ・ X線エネルギーの可変性チェック

等々、LCS光源としての性能向上に向けた努力が続けられている

# まとめと今後

- 現在までに最大80  $\mu\text{A}$ でのCW運転に成功  
今後も当面の目標である10 mAを目指して段階的に増強される
- LCSによる準単色X線の発生に成功  
イメージングの予備実験も行い、高精細のX線画像を取得  
電子ビームと蓄積レーザー双方からX線強度の増強に努める
- 高バンチ電荷のビームを低エミッタンスのまま輸送するための  
マシンスタディも進行中
- 大強度テラヘルツ光源に向けた準備も着々と進んでいる

平均電流の増強

LCS実験

低エミッタンス輸送

バンチ圧縮



ご清聴ありがとうございました

# Backup Slides

# cERL関連の発表リスト(一部)

## ビーム調整・マシンスタディ:

- 宮島司他, “電子線形加速器における低エミッタンスビーム輸送路光学系の最適化試験”, THP017
- 中村典雄他, “コンパクトERLにおけるコヒーレントテラヘルツ放射発生のためのバンチ圧縮・復元の研究”, THP018
- 島田美帆他, “cERL周回部のオプティクス測定”, THP019
- 田中オリガ他, “ビームロス研究のためのKEKコンパクトERLにおけるビームハロー伝播と緩和”, THP020

## 電子銃

- 西森信行他, “コンパクトERL電子銃の現状とアップグレード計画”, WEP037

## RF源・超伝導加速空洞

- 三浦孝子他, “cERLのRF安定度”, THP110
- 山田浩気他, “cERL入射器クライオモジュールのビーム運転状況”, WEP051
- 沼田直人他, “cERL主加速器クライオモジュール運転の現状”, WEP050
- 篠江憲治他, “ヘリウムプロセスを用いたERL主加速超伝導空洞の性能回復試験”, WEP046
- 江木昌史他, “cERL主空洞の振動モード測定”, THP055

## ビームモニター・電磁石・インターロックシステム

- 下ヶ橋秀典他, “cERLにおけるインターロック用高速ロスモニタシステムの開発”, THP083
- 本田洋介他, “cERLビーム運転時の放射線分布の簡易測定”, THP087
- 本田洋介他, “cERL周回部におけるバンチ長の測定”, THP088
- 本田洋介他, “cERL入射器超伝導空洞の高次モードによるビーム位置測定”, THP089
- 上田明他, “cERLシケイン用偏向電磁石の設計と製作”, WEP075
- 濁川和幸他, “cERLでのLCS実験用ビームラインのインターロックシステム”, THP103

## LCS・ビーム利用

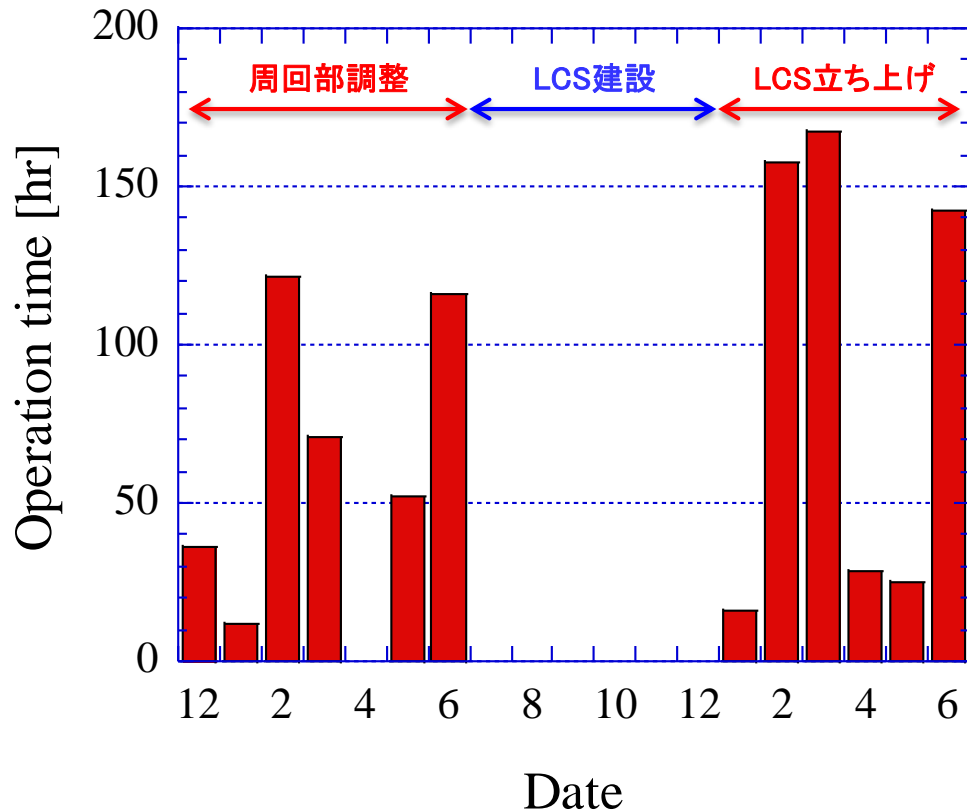
- 羽島良一他, “レーザー・コンプトン散乱による高輝度ガンマ線の実現とその利用”, WEOM07
- 永井良治他, “コンパクトERLでのレーザーコンプトン散乱光源実証実験”, THP113
- 赤木智哉他, “レーザーコンプトン散乱による小型高輝度X線源開発”, THP114
- 本田洋介他, “cERLにおける共振器型CDRによるTHz光源の検討”, WEP022

## 将来計画

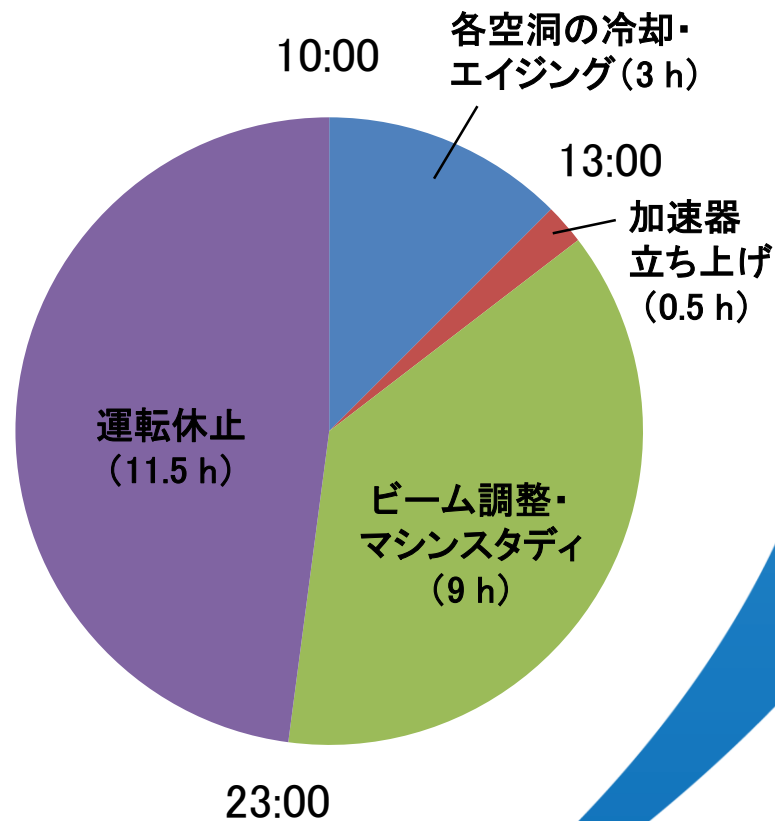
- 宮島司, “ERLを利用した EUV-FEL 光源の設計”, FROM10

# コンパクトERLの運転状況

総運転時間: 945時間



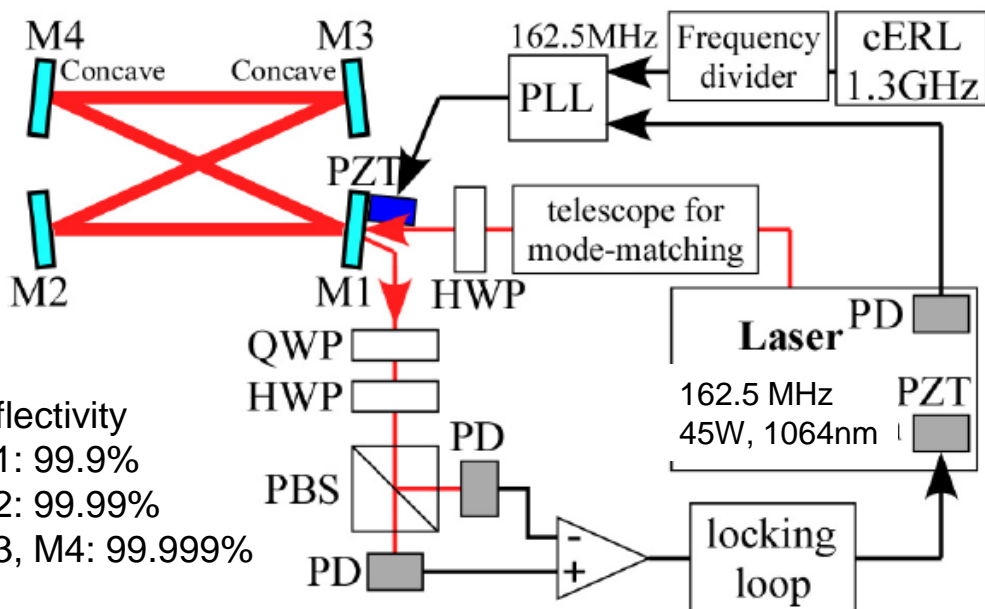
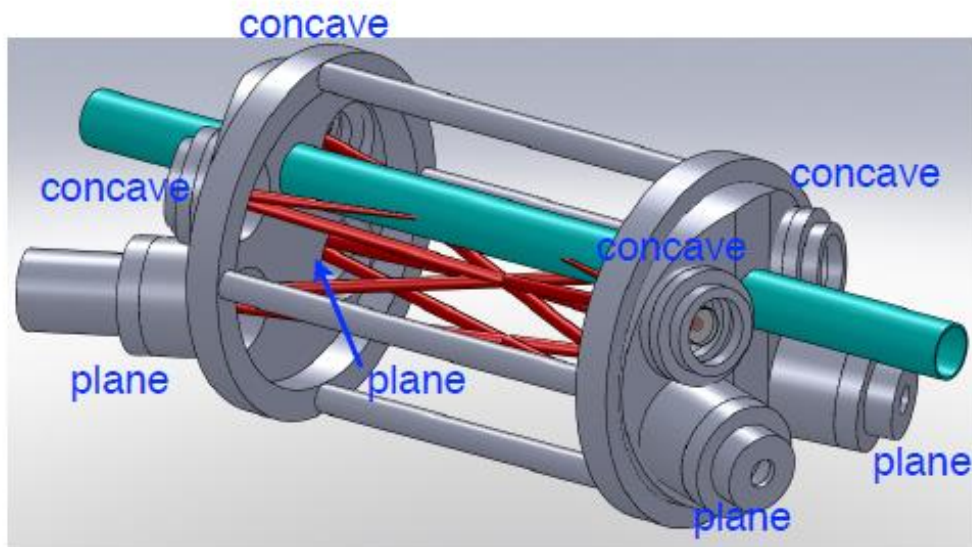
月別運転時間の推移(2013/12~)



典型的な1日の運転スケジュール



# レーザー蓄積装置

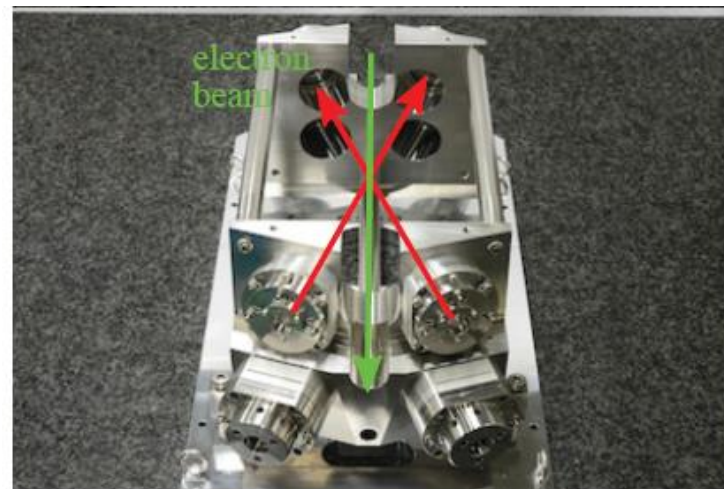


reflectivity  
 M1: 99.9%  
 M2: 99.99%  
 M3, M4: 99.999%

waist size:  $\sigma=30\mu\text{m}$

KEKにて開発(赤木 智哉)

T. Akagi et al., Proc. IPAC'14, p.2072.  
 A. Kosuge et al., Proc. IPAC'15, TUPWA66.



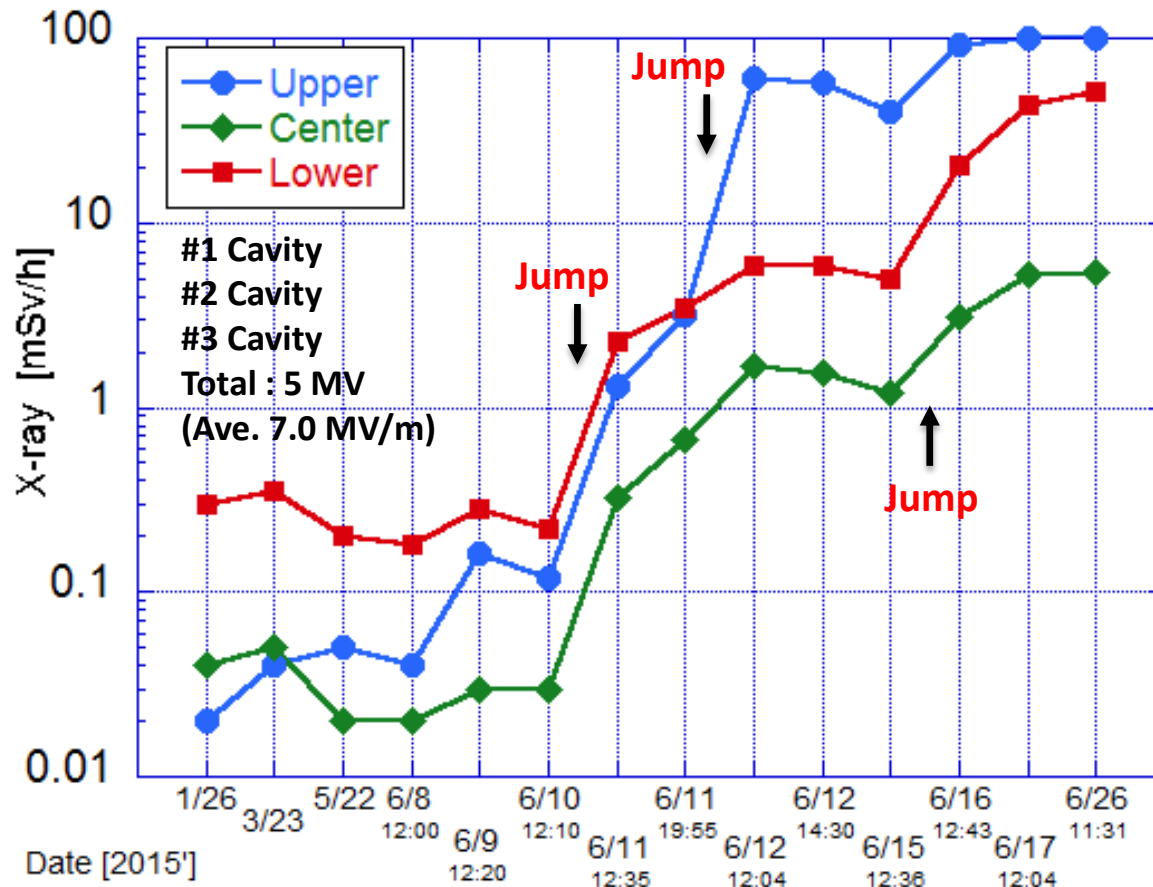
二本のレーザーを同時に蓄積



二種の偏光X線/ガンマ線を同時に  
 (またはパルスごとに)発生可能!

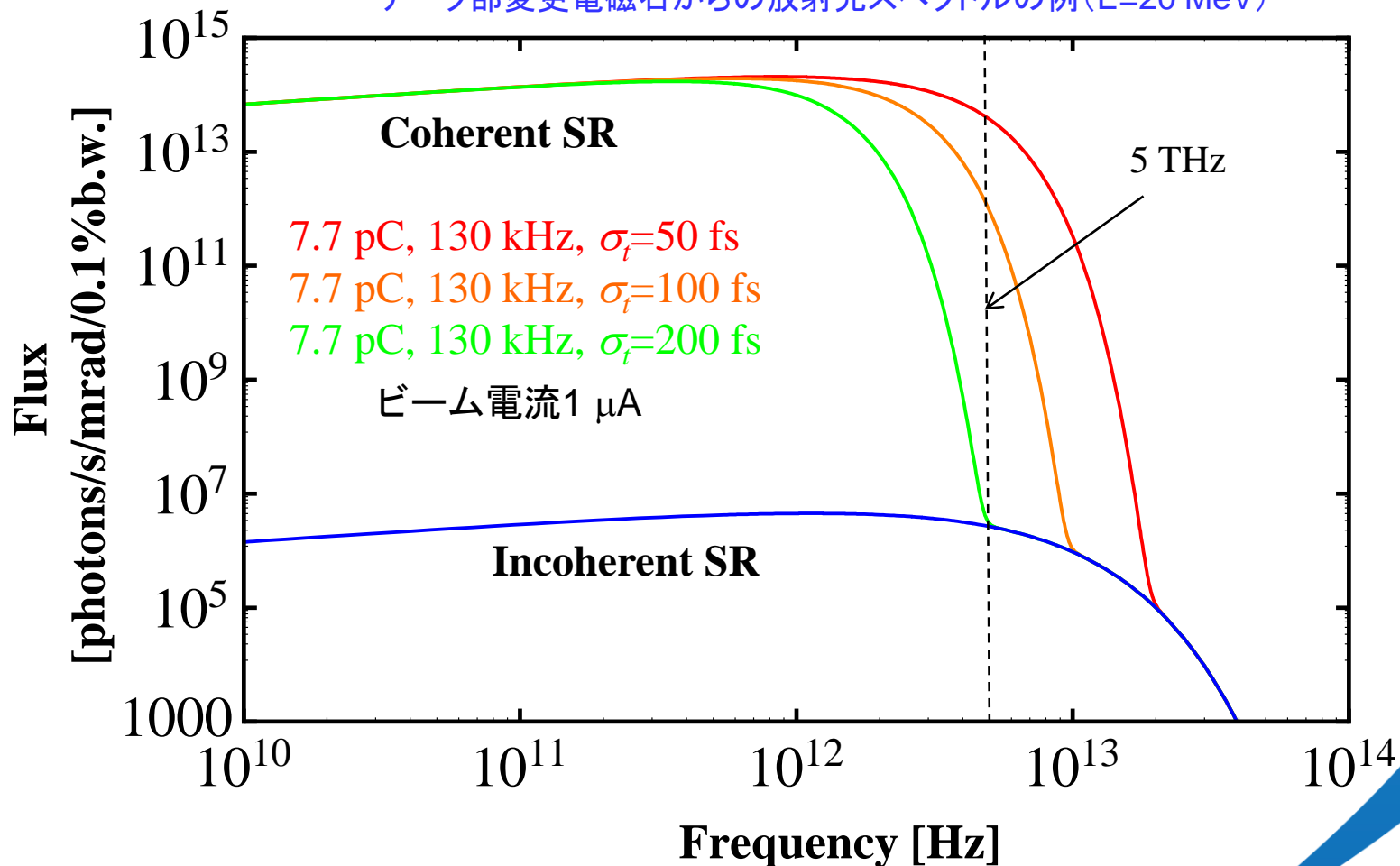
# 入射空洞のフィールドエミッション増加

- 2015年6月に行った5 MeV入射のスタディ中に入射空洞のフィールドエミッションが急増し、最終的には周辺で観測されるX線のレベルが2~3桁上昇した
- 空洞性能の悪化は最下流の空洞#3から始まり、徐々に上流側へ移った傾向あり
- X線が出始める加速勾配は5 MV/m程度
- 原因の究明と再発防止策、フィールドエミッションの抑制対策を進める



# 大強度テラヘルツ光源

アーク部変更電磁石からの放射光スペクトルの例 (E=20 MeV)

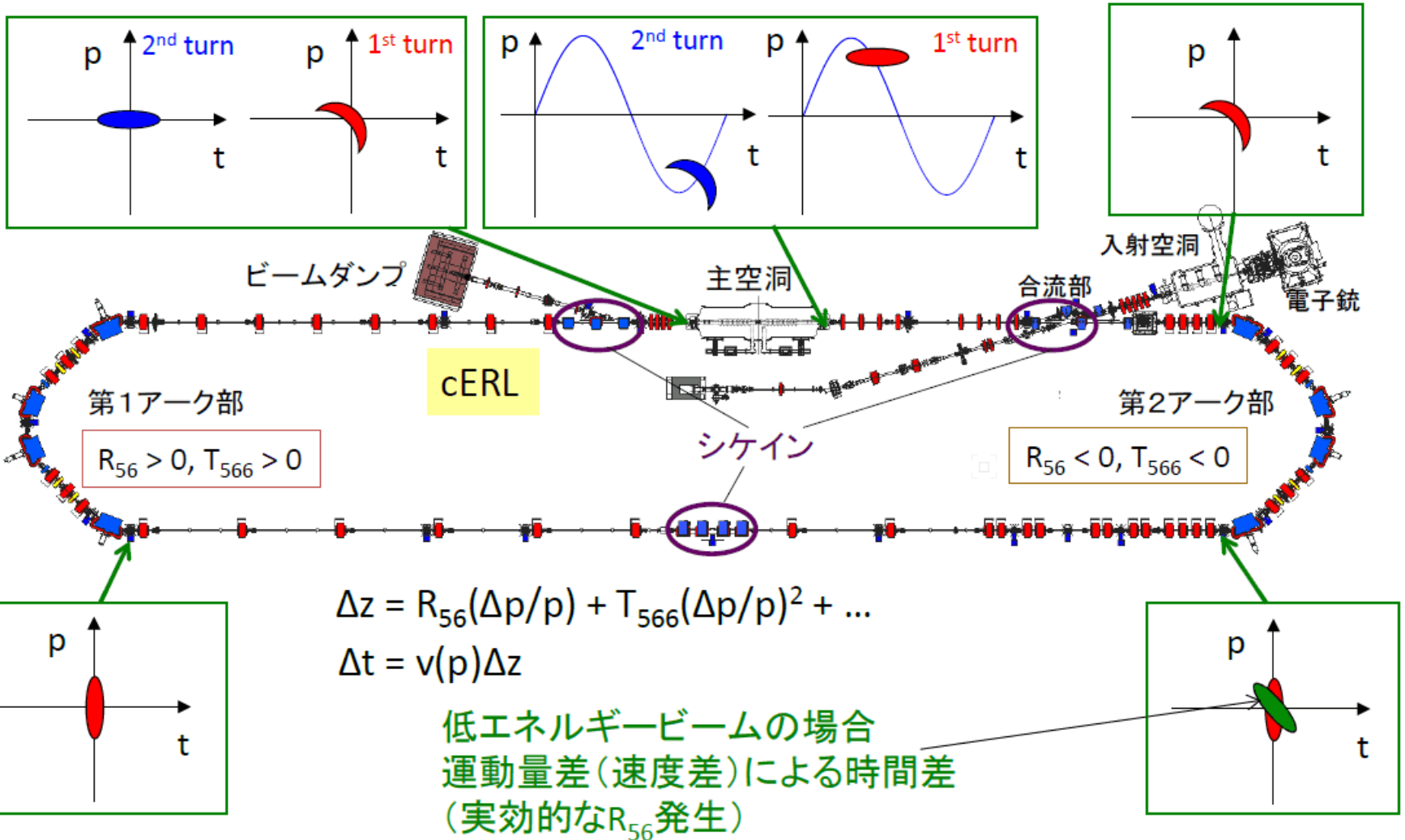


バンチ長を100 fs以下に圧縮すれば、5 THzまでのコヒーレント放射光が発生可能  
連続(CW)で平均強度の高いテラヘルツ光が利用できる ↔ FELとは相補的

# 大強度テラヘルツ光源に向けたスタディ

## ➤ cERLにおけるバンチ圧縮・復元方式

主空洞のoff-crest加速・減速＋アーク部での磁氣的圧縮・復元



# これまでに達成した性能

青色：達成  
赤色：未達成

パラメータ	目標値	これまでに達成した値
ビームエネルギー(周回部) (入射部)	35 MeV 5 MeV	20 MeV 5.5 MeV
平均ビーム電流	10 mA	80 $\mu$ A
規格化エミッタンス(入射部) [mm·mrad]	0.1 (7.7 pC) 1 (77 pC)	0.5 - 0.8 (7.7 pC) 未試験
規格化エミッタンス(周回部) [mm·mrad]	0.1 (7.7 pC) 1 (77 pC)	1.9 - 4.5 (7.7 pC) 未試験
主加速空洞での加速勾配	15 MV/m	8.2 MV/m (実用値)
rms バンチ長	1-3 ps (通常) ~ 100 fs (圧縮時)	1-3 ps 未試験
バンチ繰り返し周波数	1.3 GHz	1.3 GHz

- 今後も目標性能達成に向けて着実なコミッショニングを継続
- レーザーコンプトン散乱(LCS)によるX線発生実験も順調に進んでいる
- バンチ圧縮によるTHz-CSR発生実験の準備も進行中