

cERLの進捗状況

高エネルギー加速器研究機構(KEK)
加速器研究施設

中村 典雄

ERL共同開発チーム



High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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



Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

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



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

I. Ito, H. Kudoh, T. Shibuya, H. Takaki



UVSOR, Institute for Molecular Science

M. Katoh, M. Adachi



Hiroshima University

M. Kuriki, H. Iijima



Nagoya University

Y. Takeda, Xiuguang Jin, T. Nakanishi, 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

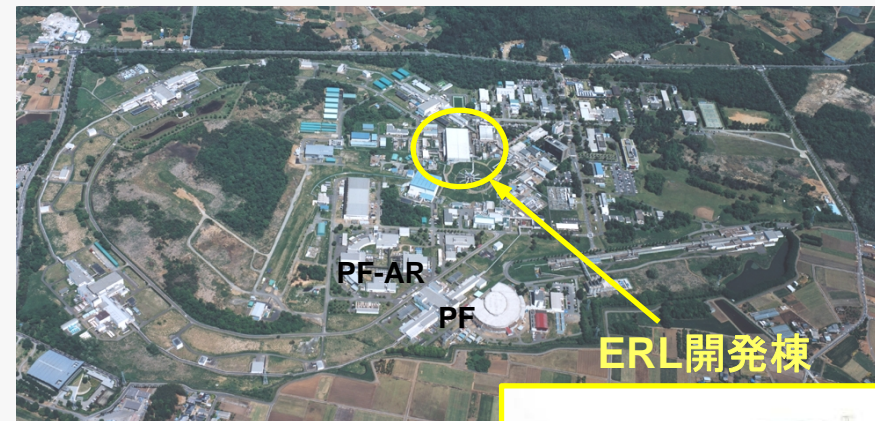
cERLについて

cERLの目的

- ERL光源実機に向けて、高輝度光発生に必要な低エミッタンスかつ大電流の電子ビームの生成、加速、周回の実証
- ERLコンポーネント(電子銃, 超伝導空洞, ...)の安定な運転の実現
- 第1目標: 規格化エミッタンス $1 \text{ mm}\cdot\text{mrad} @ 7.7 \text{ pC/bunch}$ (10mA), 35 MeV

cERLパラメータ

パラメータ	値
ビームエネルギー	35 MeV 125 MeV (空洞増強) 245 MeV (2ループ)
入射エネルギー	5 MeV (10 MeV)
平均電流	10 mA (100 mA)
規格化エミッタンス (バンチ電荷)	0.3 mm·mrad (7.7 pC) 1 mm·mrad (77 pC)
バンチ長(rms)	1 - 3 ps < 150 fs (バンチ圧縮)
加速勾配(主空洞)	15 MV/m
RF周波数	1.3 GHz

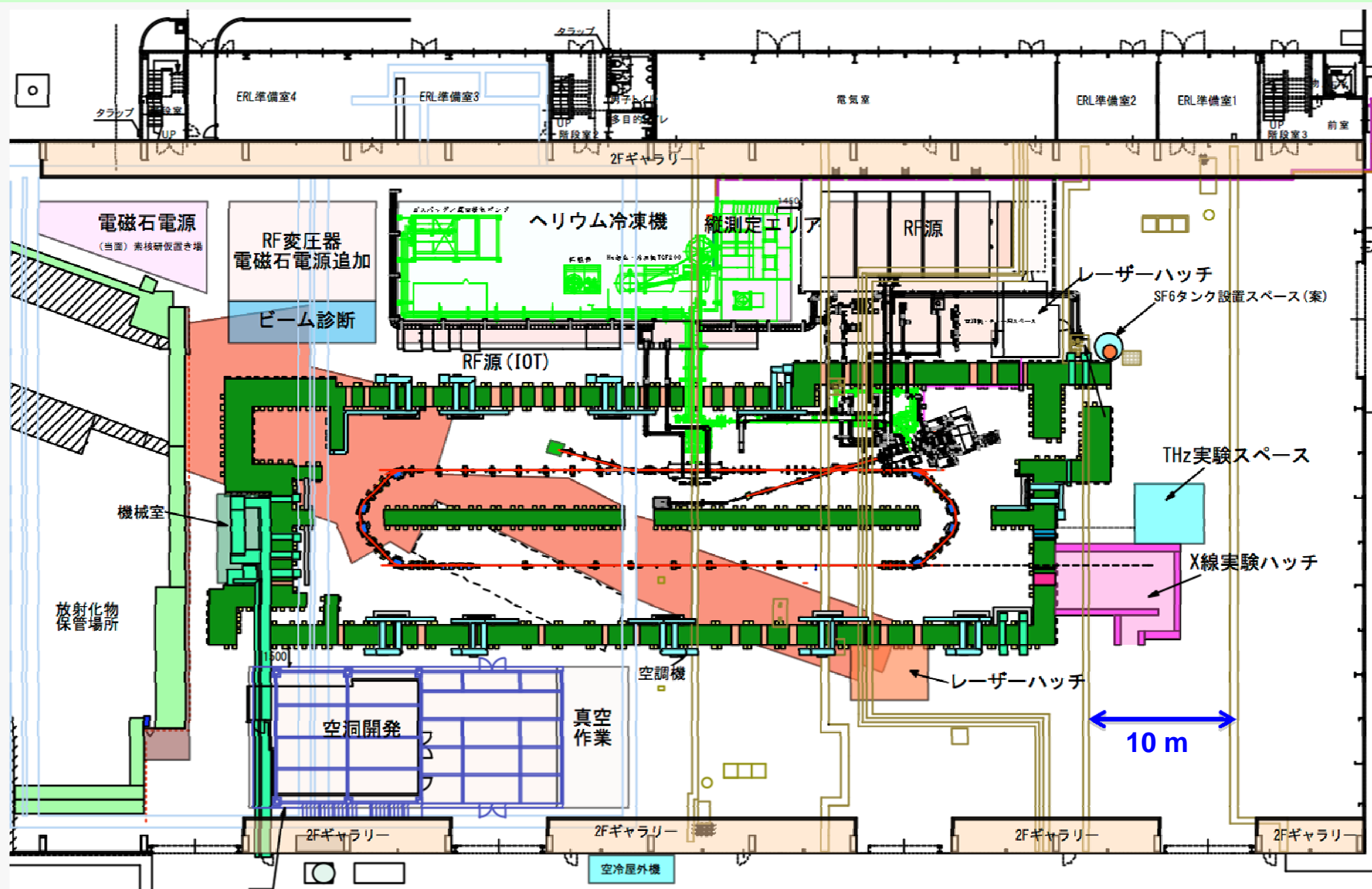


cERL建設場所@KEK

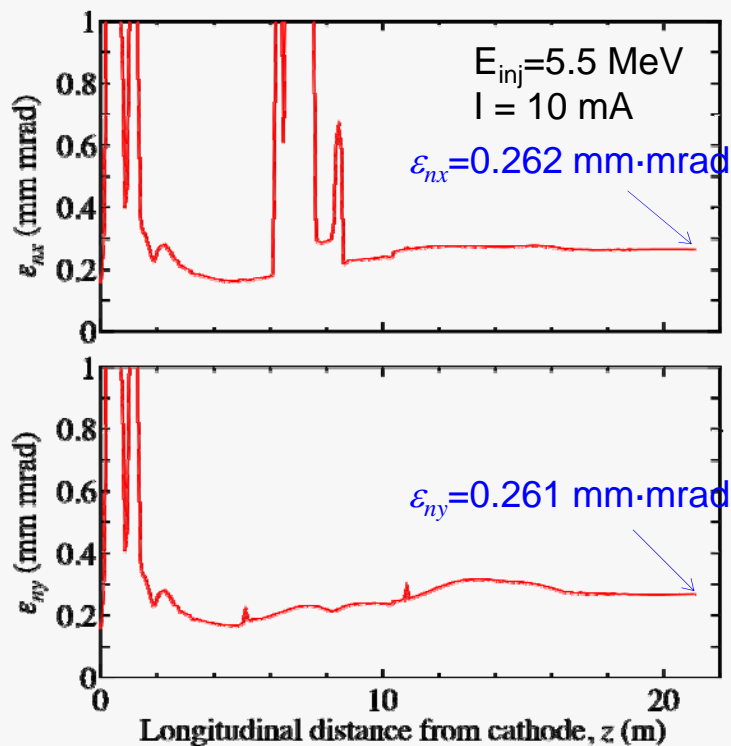


2013年春からコミッショニング開始予定。

ERL開発棟配置図



入射部の設計

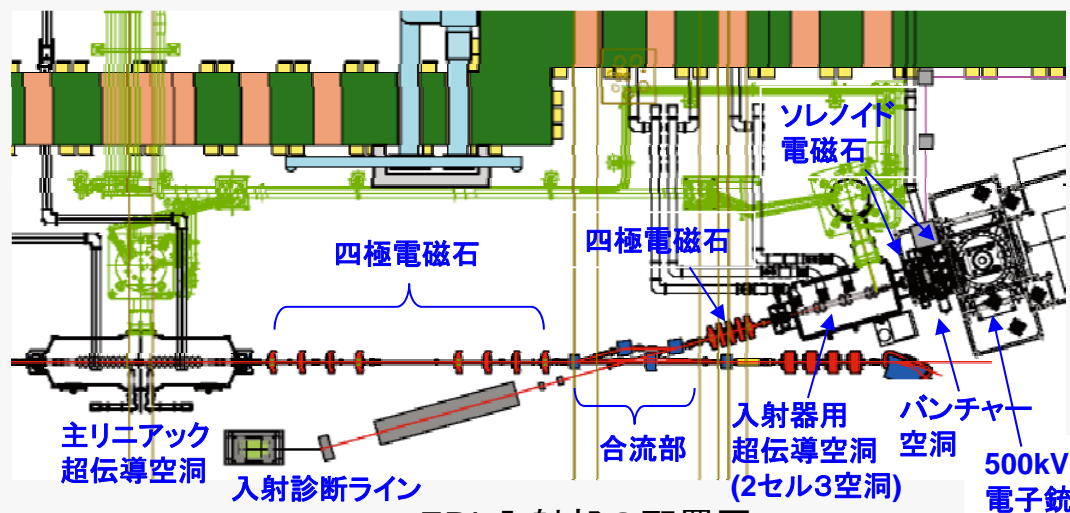


電子銃から主加速空洞出口までの規格化エミッタンスの変化(多変数最適化シミュレーション結果、トラッキング粒子数2k)

宮島氏計算



第1目標(1 mm·mrad@10 mA)の実現可能

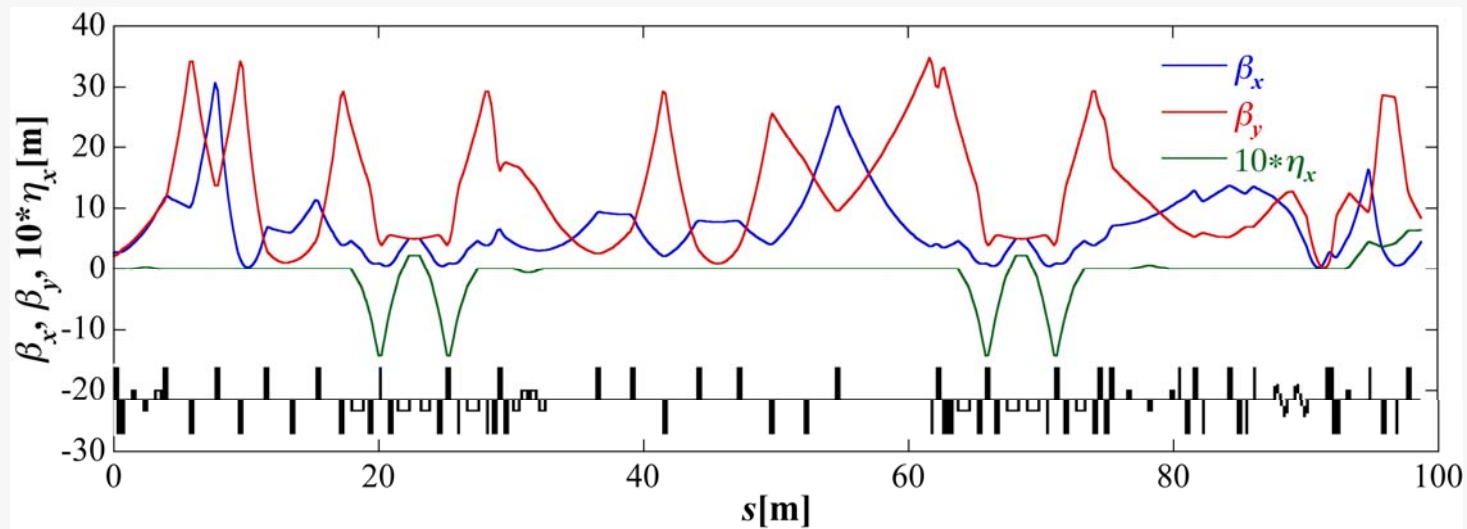
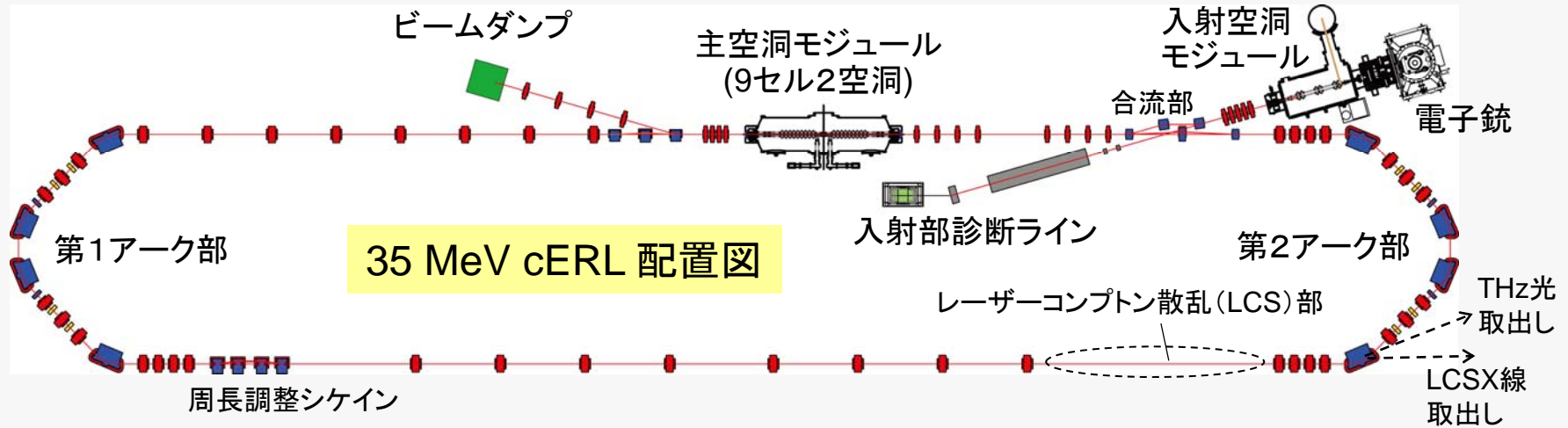


cERL入射部の配置図

入射部パラメータ表

パラメータ	値
DC電子銃加速電圧	500 kV
入射ビームエネルギー	~5 MeV
バンチャ電荷(電流)	7.7 pC/bunch (10mA)
レーザーパルス全幅	16 ps
レーザースポットサイズ	0.52 mm
ソレノイド磁場(1号、2号)	0.0364, 0.0146 T
バンチャー空洞電圧	105 kV
入射超伝導空洞の加速勾配	6.84, 7.53, 7.07 MV/m
RF加速周波数	1.3 GHz

周回部の設計(1)

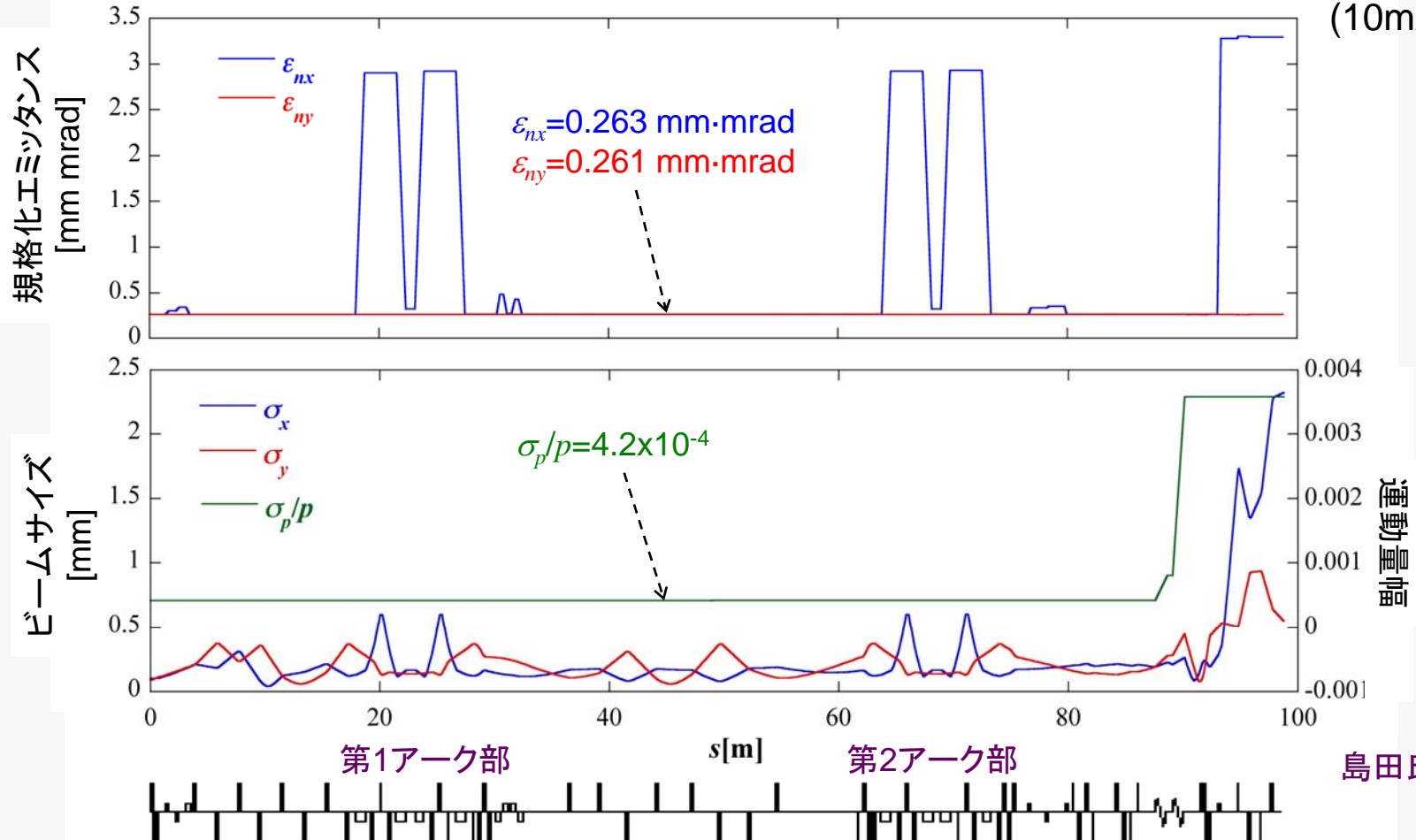


ベータトロン関数 $\beta_{x,y}$ 及び分散関数 η_x (主空洞出口からビームダンプまで)

周回部の設計(2)

ビームパラメータの変化(主空洞出口からビームダンプ)

7.7pC/bunch
(10mA)



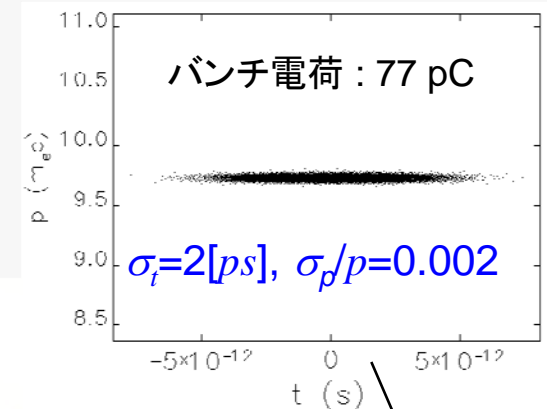
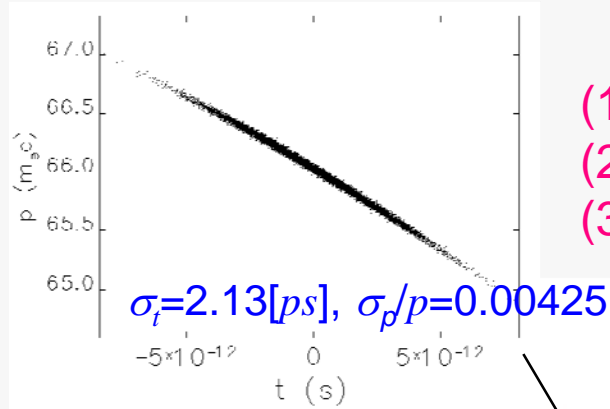
周回部でビーム品質(エミッタンス及び運動量幅)の劣化はほとんどない。

空間電荷効果を含むより精密なS2Eシミュレーションを現在進めているが、大きな変化はないだろう。

周回部の設計(3)

バンチ圧縮運転モード (超短バンチ生成)

- (1) アーク部オプティクスの変更
- (2) RF位相の変更(off-crest加速)
- (3) 六極電磁石の導入



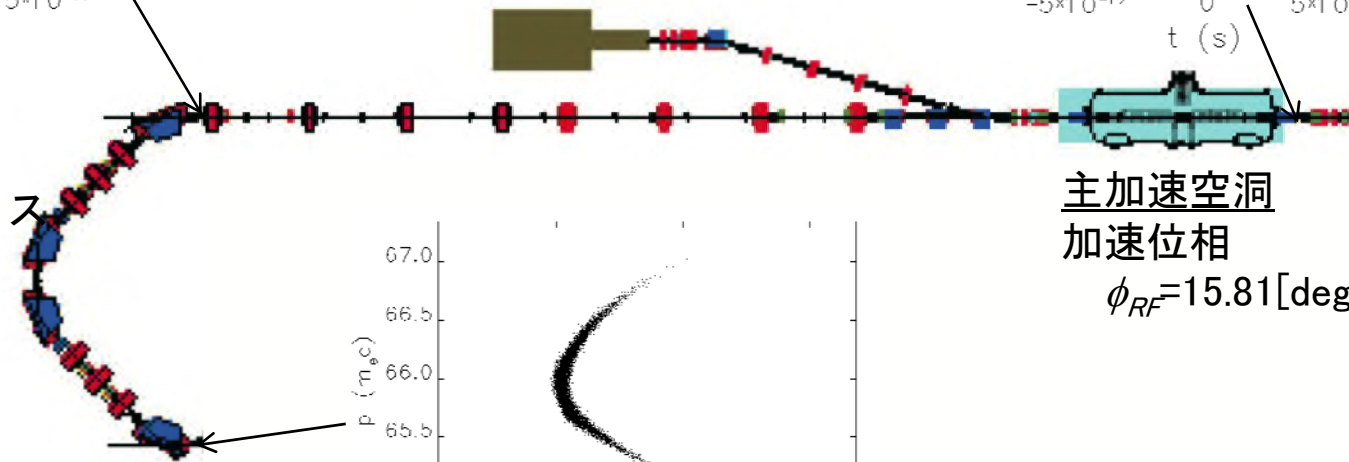
第1アーク部

四極電磁石

非等時性オプティクス

$$\alpha = (\Delta L/L) / (\Delta p/p) > 0$$

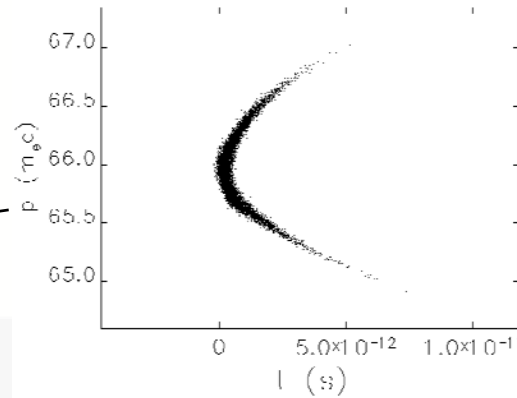
六極電磁石OFF



主加速空洞

加速位相

$$\phi_{RF} = 15.81 [deg]$$



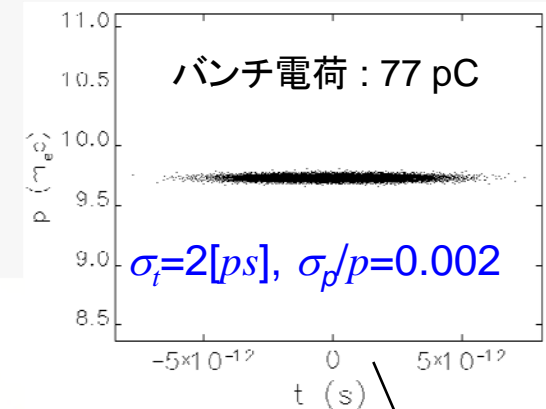
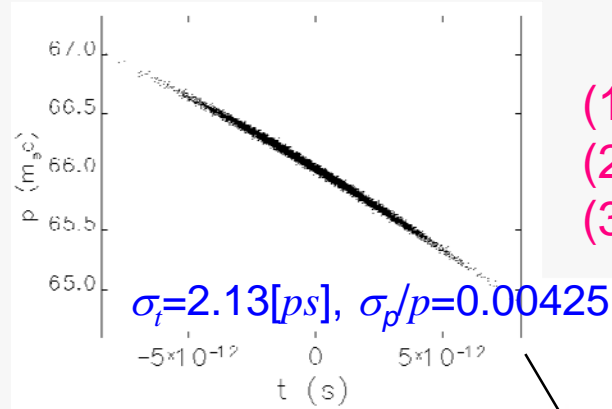
$$\sigma_t = 686 [fs]$$

$$\sigma_p/p = 0.00438$$

周回部の設計(3)

バンチ圧縮運転モード (超短バンチ生成)

- (1) アーク部オプティクスの変更
- (2) RF位相の変更(off-crest加速)
- (3) 六極電磁石の導入



第1アーク部

四極電磁石

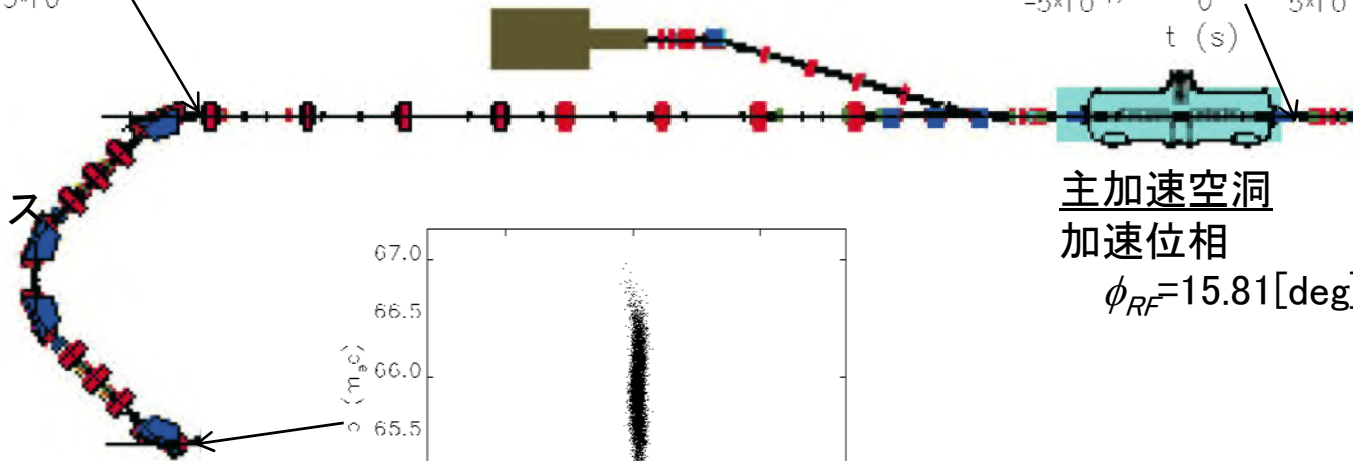
非等時性オプティクス

$$\alpha = (\Delta L/L) / (\Delta p/p) > 0$$

六極電磁石ON

$$K_2(\text{SX1}) = 46.5[\text{m}^{-3}]$$

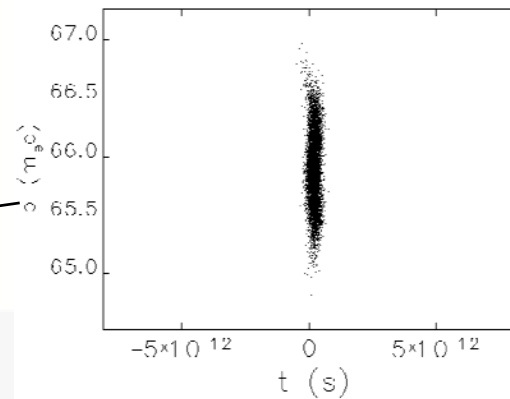
$$K_2(\text{SX2}) = 14.0[\text{m}^{-3}]$$



主加速空洞

加速位相

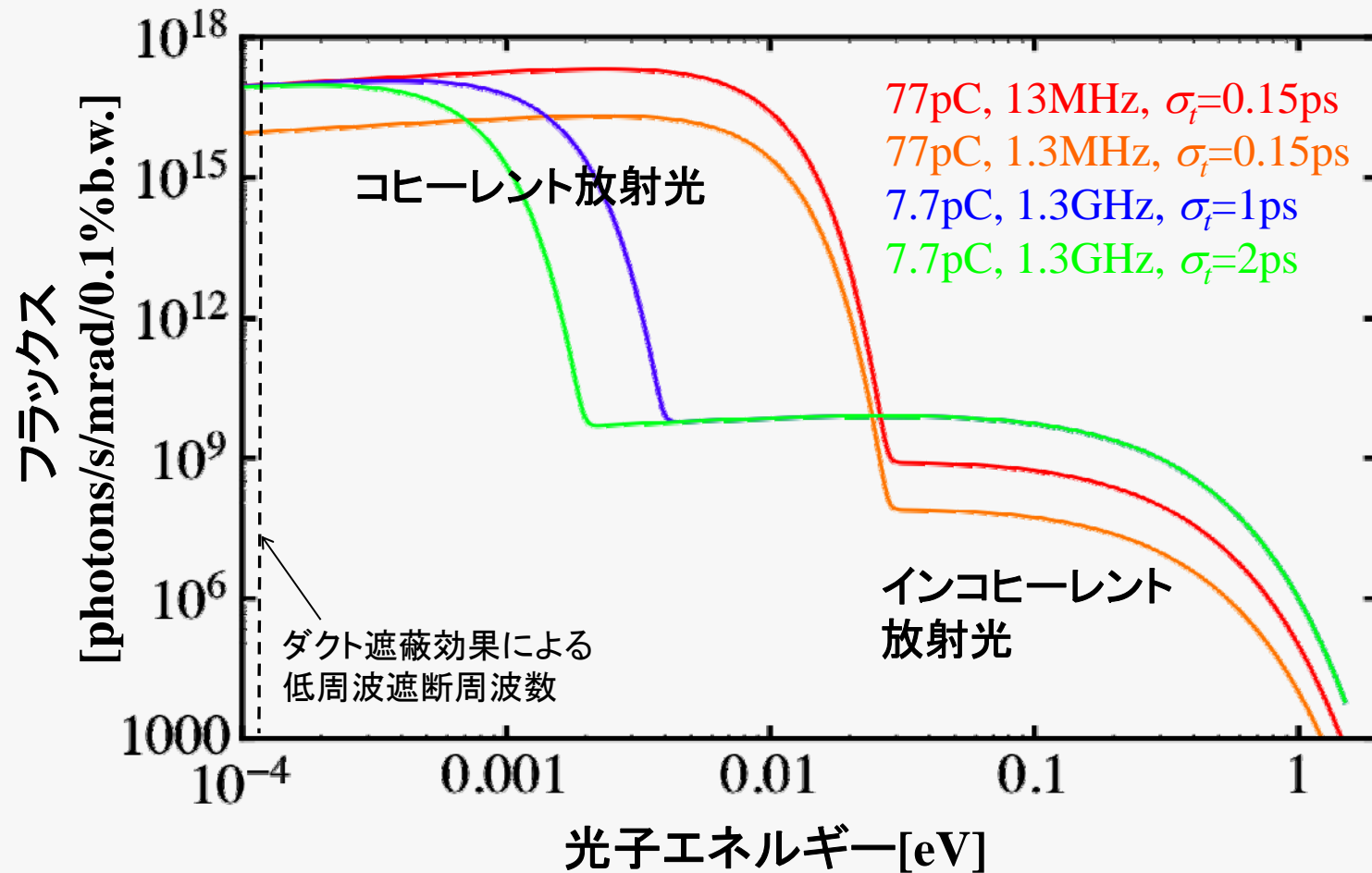
$$\phi_{RF} = 15.81[\text{deg}]$$



バンチ圧縮モードで第1アーク後に150fs以下のバンチ生成が可能である。

コヒーレント放射光 (THz領域)

アーク部偏向電磁石からの放射光スペクトルの例 (35MeV)

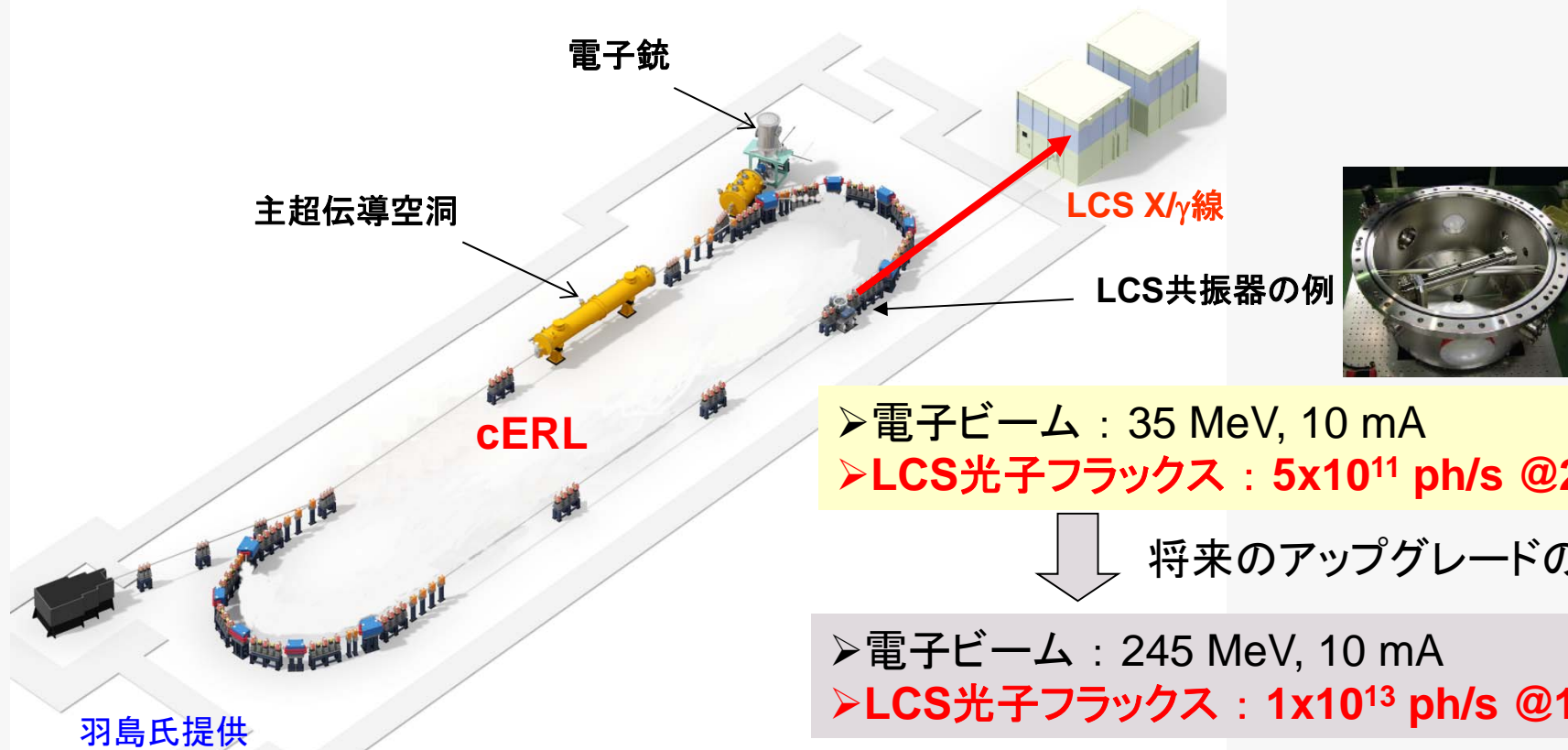


meV (THz) 領域でコヒーレント放射光が利用可能である。

レーザーコンプトン散乱(LCS)X線実験

cERLでのレーザーコンプトン散乱X/γ線による放射線同位元素の非破壊測定

JAEAによる3年間の文科省R&Dプログラム (FY2011-2013).



LCS衝突部のラティス設計及びレーザー・共振器設計が進行中である。
(KEK&JAEA)

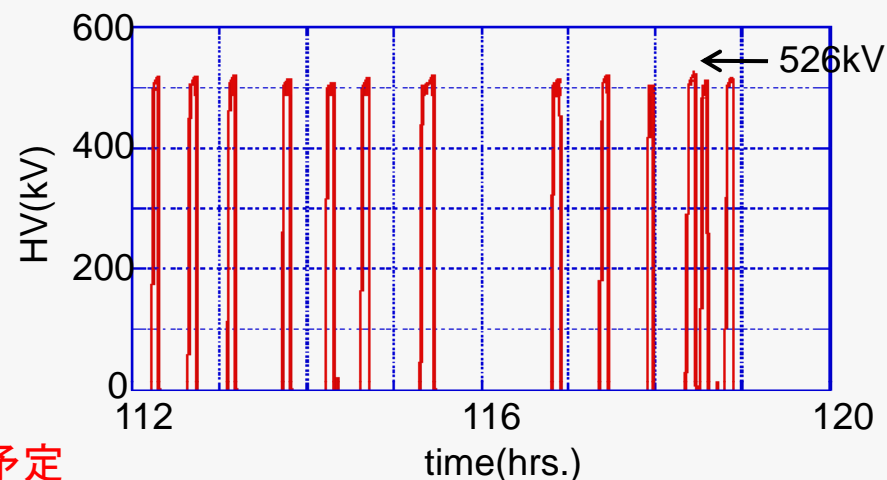
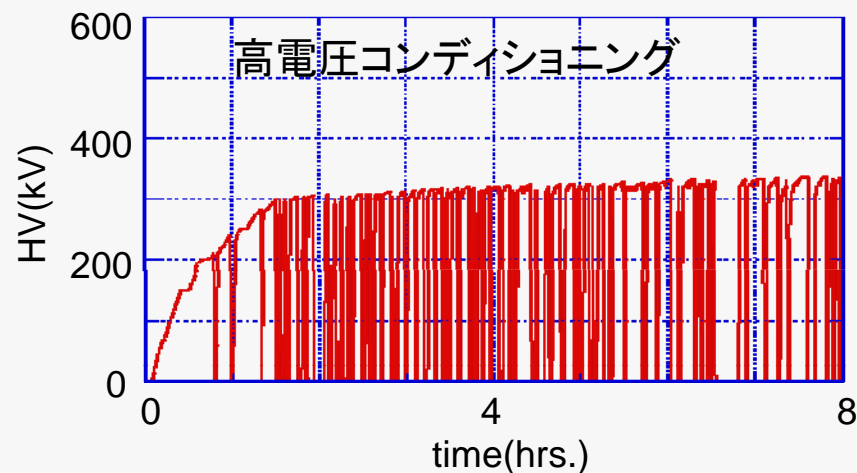
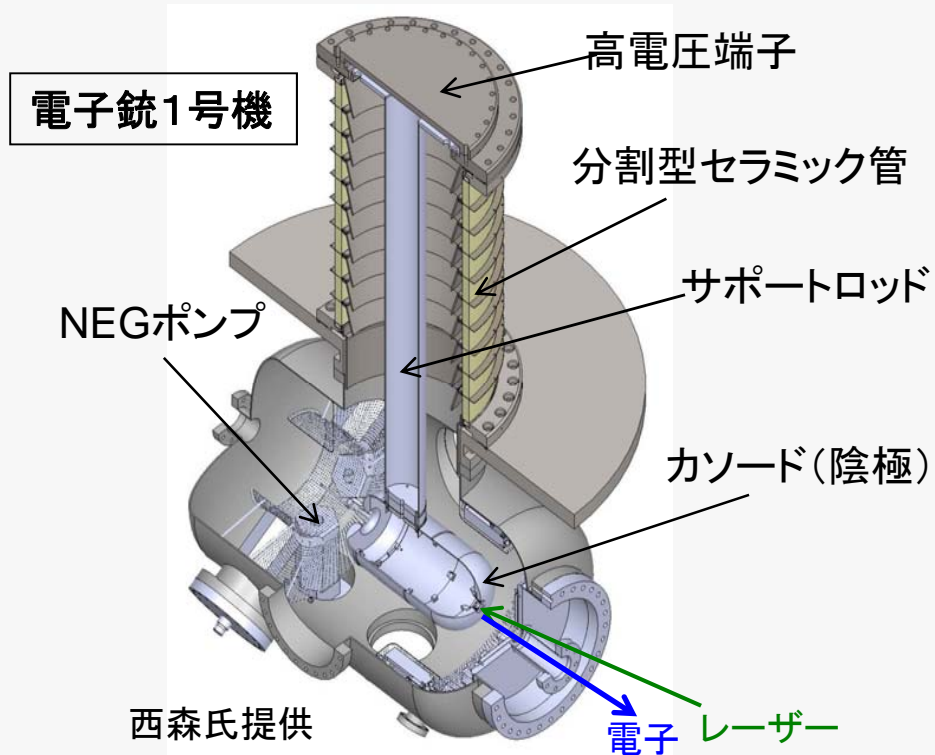
電子銃1号機の開発 (@JAEA)

分割型セラミック管で8時間の510kV運転を実現

R. Nagai et al., Rev. Sci. Instrum. **81** (2009) 033304

陰極・NEGポンプ取付後のコンディショニング

- 526 kVまでの高電圧コンディショニング
- 局所的な放射線レベルの上昇 → 調査 & 除去



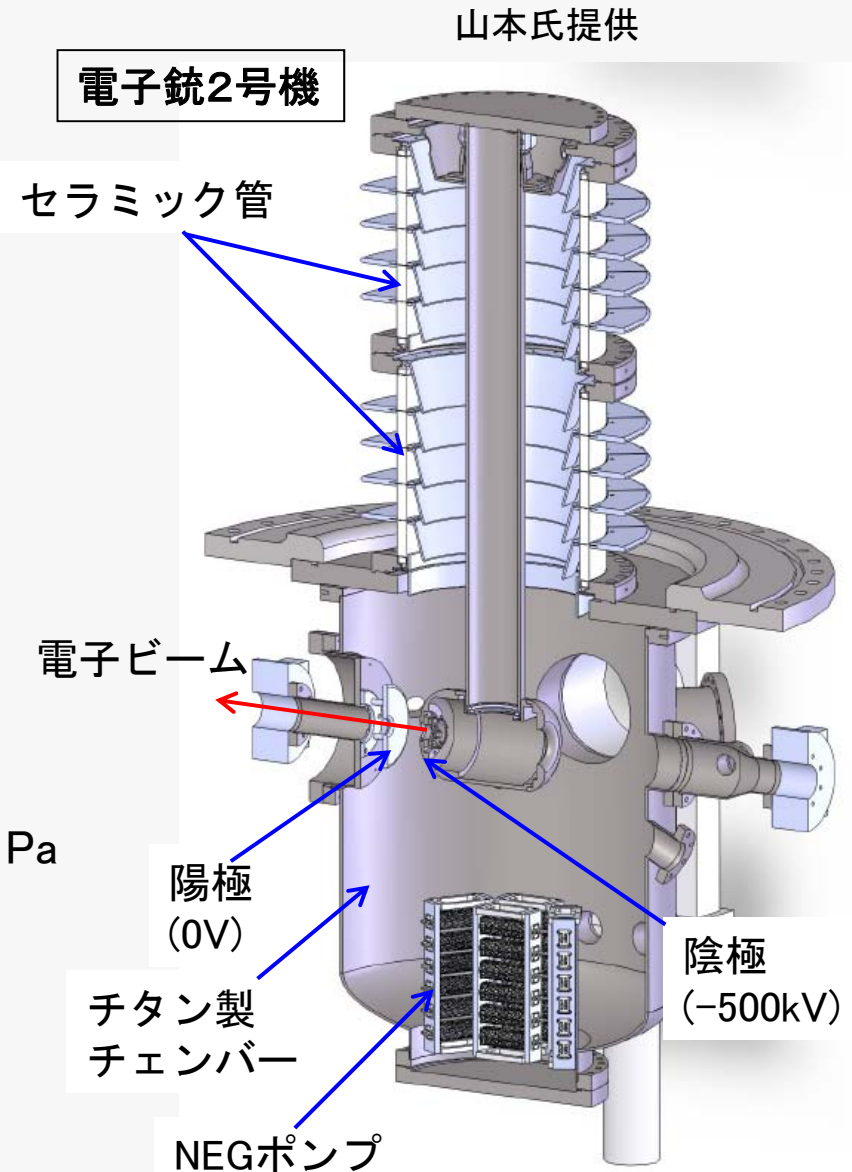
大電流試験を経て、今秋にcERLビームラインに設置予定

電子銃2号機の開発 (@KEK)

目標真空値: 1×10^{-10} Pa

(光陰極の負電子親和性保持)

- ・ 高電圧絶縁部
 - 分割型セラミック管(2段構造)
 - 高沿面耐電圧セラミック (TA010, 京セラ)
- ・ 低ガス放出材の使用
 - チタン製チェンバー, 電極, ガードリング
 - 全ガス放出係数 : $\text{約} 1 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (実測値)
- ・ 真空ポンプシステム
 - 4Kクライオポンプ(ベキーン可)
> 1000 L/s, for $\text{CH}_4, \text{N}_2, \text{CO}, \text{CO}_2$ @ 1×10^{-9} Pa (実測値)
 - NEGポンプ
> 10000 L/s, for H_2 (設計値)
- ・ 600kV高電圧電源システム



電子銃励起用レーザーシステムの開発

システム構成

- 1.3GHz Nd:YVO4 発振器
- Ybフォトリック結晶ファイバー増幅器
- 2倍高調波発生器
- パルス整形システム

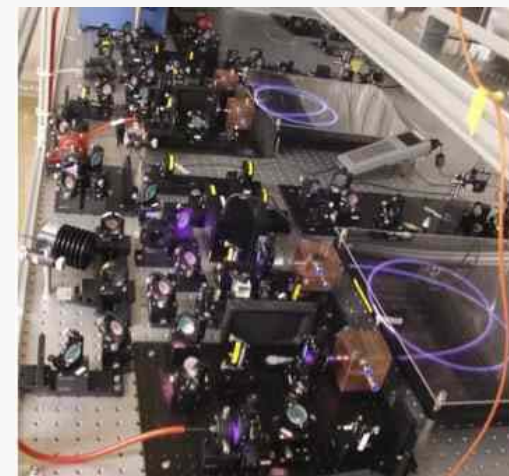
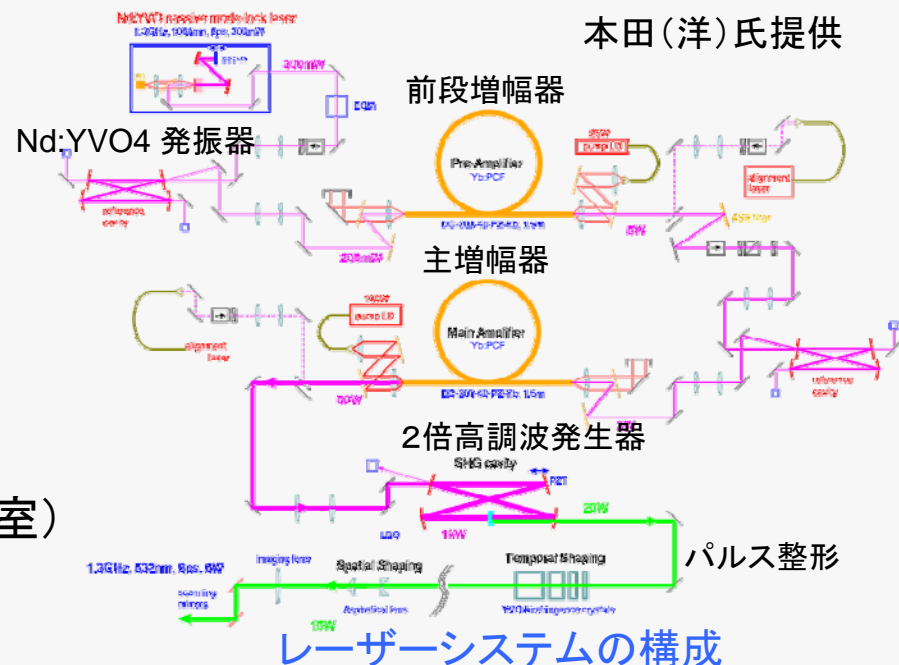
仕様 (10mA電子ビーム生成)

- パワー : 532 nm, 2.3 W (カソード)
→ 5W (532nm), 25W (1064nm) (レーザー室)
- パルス幅 : 32 ps
→ 8psパルス(×8)の重ね合わせ

実績・成果

- 38 W (1064 nm) at 1.3 GHz (1段増幅器)
- 70 W (1064 nm) at 1.3 GHz (2段増幅器)
- 2倍高調波発生
- パルス整形

↓
10 mA以上のビーム発生が可能である。

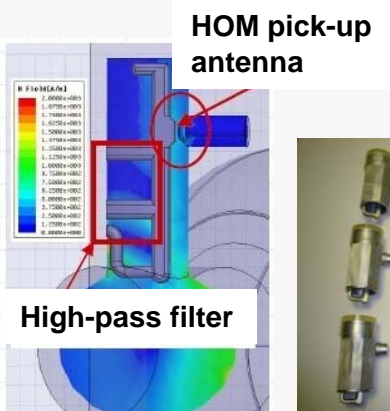
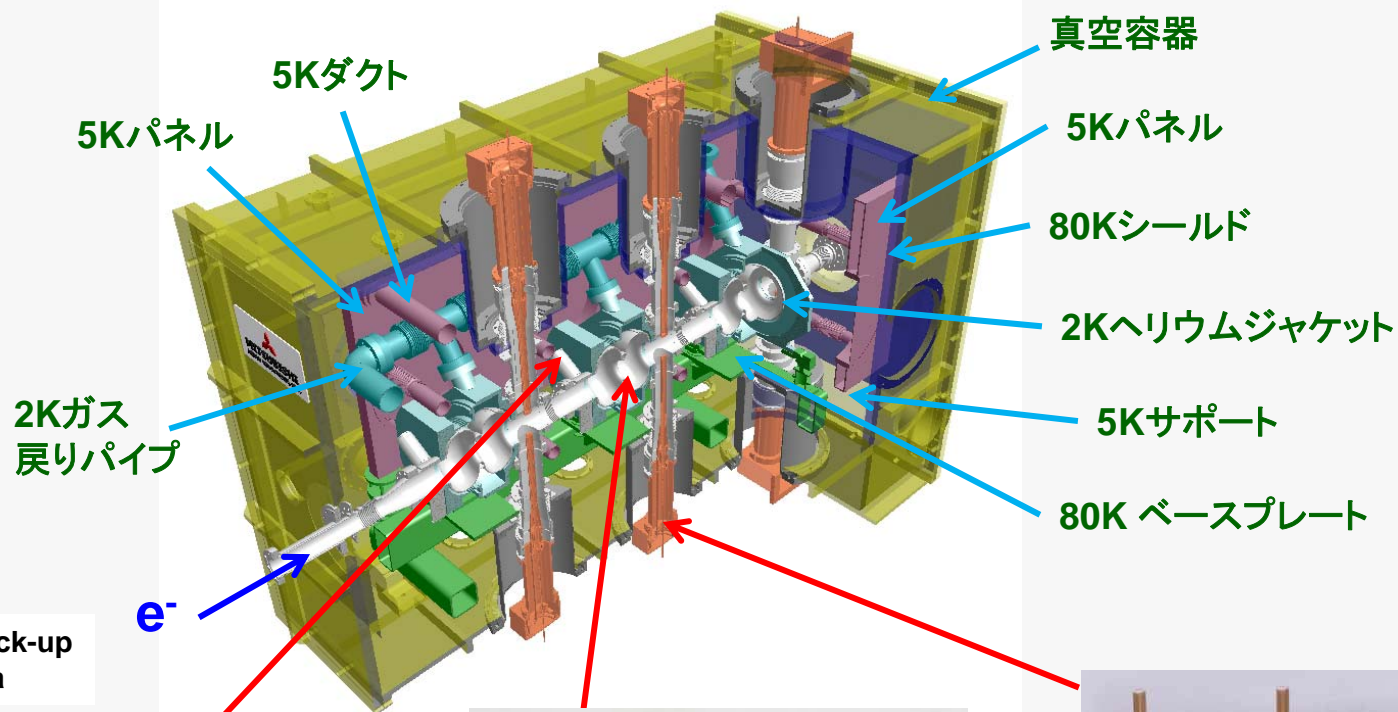


Ybファイバーレーザー増幅器@KEK

入射器用超伝導加速空洞の開発(1)

加古氏、渡邊氏提供

入射空洞クライオモジュールの構成



HOM(高次モード)カップラーとその構造



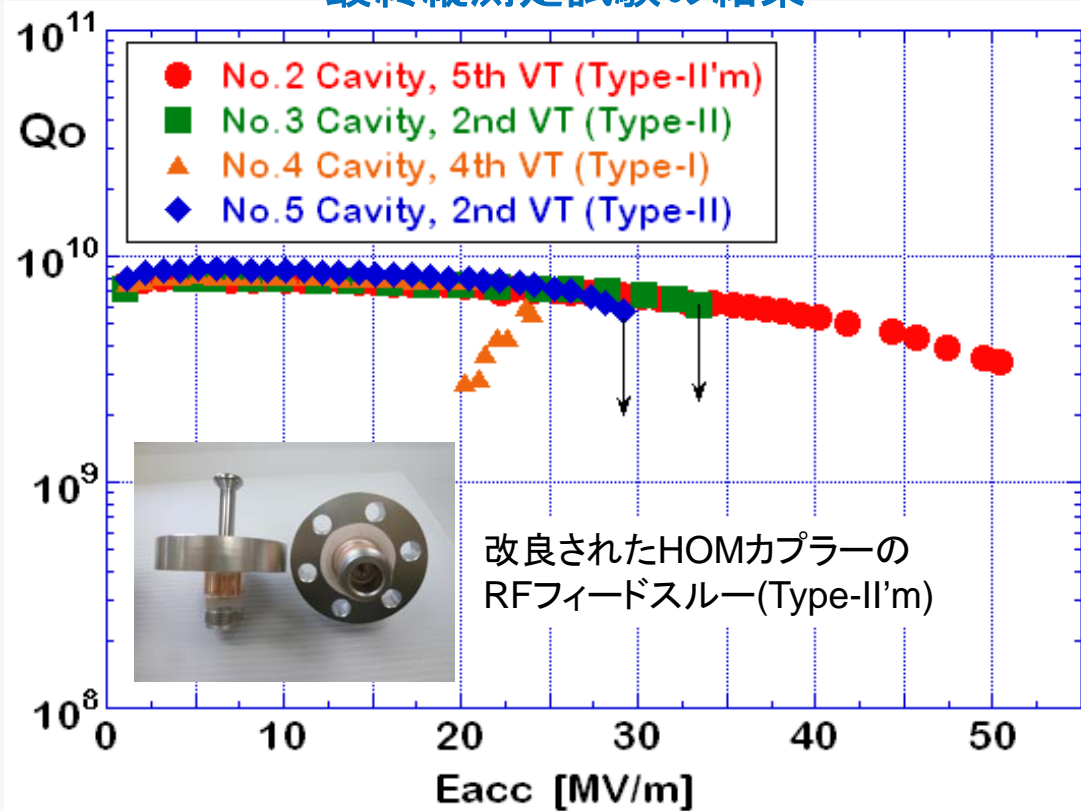
2セル超伝導空洞



入力カップラー

入射器用超伝導加速空洞の開発(2)

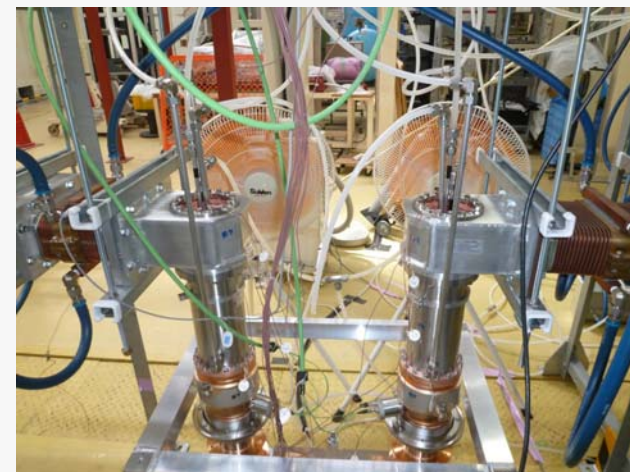
最終縦測定試験の結果



改良RFフィードスルーによる加速勾配の改善

cERL要求仕様 ($E_{acc} > 11$ MV/m) を満足する。

加古氏提供



入力カップラーの大電力試験



入射空洞クライオモジュールの組立

入射器用超伝導加速空洞の設置

cERL入射部ビームライン上に入射空洞(モジュール)が設置された。



入射空洞モジュール(側面)

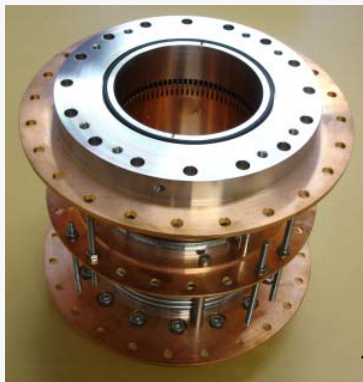


ヘリウムコールドボックス(左)と入射空洞モジュール(右)

8月の完成検査を経て、9月から各種試験・調整を行う予定である。

主リニアック用超伝導加速空洞の開発(1)

梅森氏提供



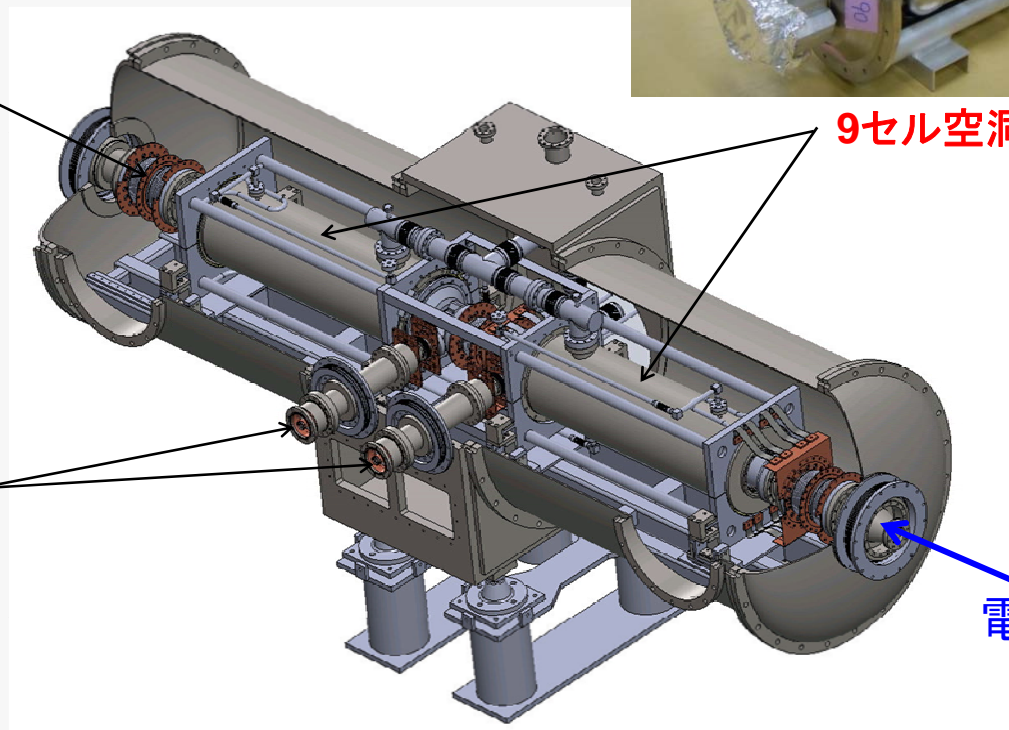
HOM 吸収体



9セル空洞



入力カップラー



電子ビーム

主空洞クライオモジュール

主リニアック用超伝導加速空洞の開発(2)

最終縦測定試験の結果

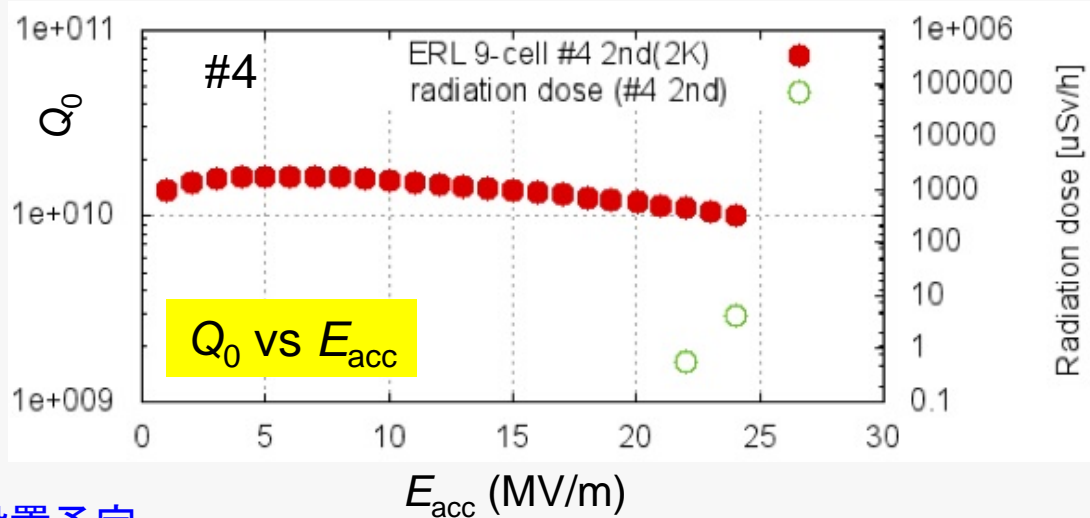
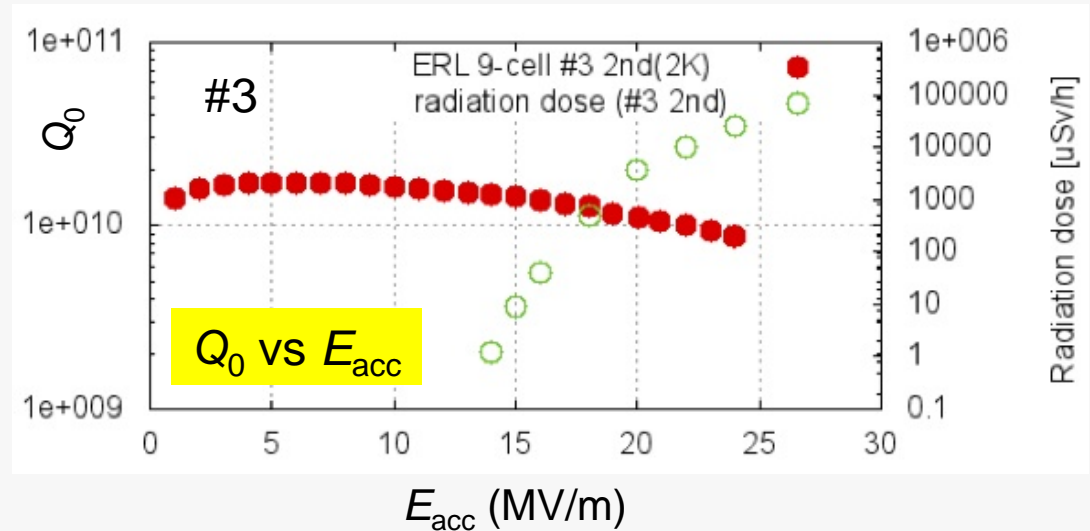
- 加速勾配 $E_{acc} > 25$ MV/m を達成
- cERL要求仕様を満足する。
($Q_0 > 10^{10}$ @ 15 MV/m)
- 空洞放射線の立ち上がり
14 MV/m (#3), 22 MV/m (#4)



ヘリウムジャケット付き主空洞

クライオモジュール組立を経て、今秋に設置予定

梅森氏提供



加速空洞用RF電源



入射空洞用30kWクライストロン



入射空洞用30kWクライストロン



主空洞用30kW IOT

ERL開発棟に設置完了

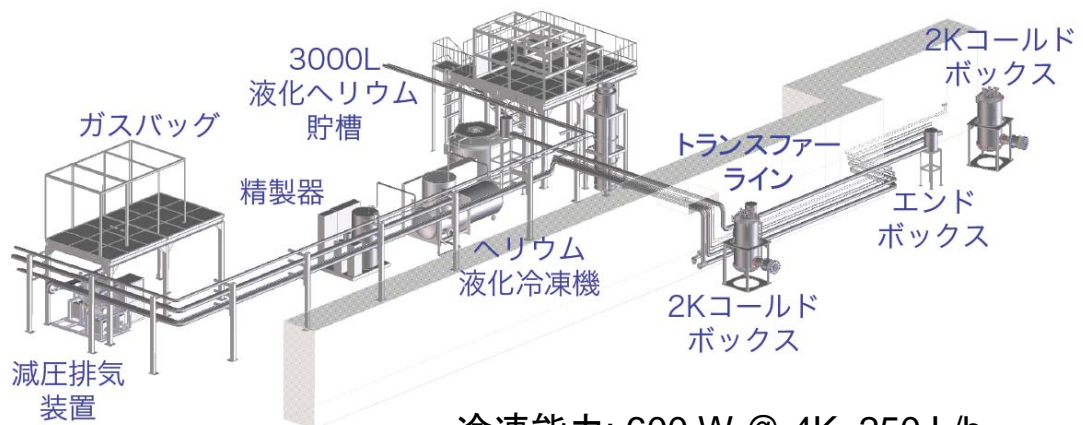
三浦氏提供



バンチャー空洞用20kW IOT

液体ヘリウム冷凍機システム

冷凍機システム全景



冷凍能力: 600 W @ 4K, 250 L/h

ERL開発棟に設置完了

仲井氏提供



3000L 液化ヘリウム貯槽



2Kコールドボックスとエンドボックス



TCF200 ヘリウム液化冷凍機

電磁石システム

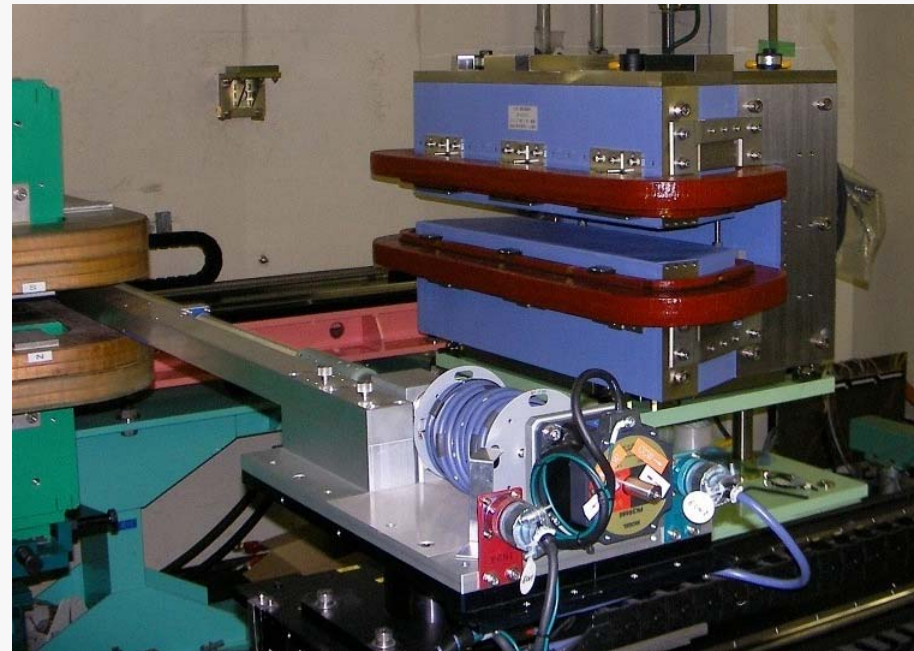
原田氏提供



四極電磁石(20cm)



四極電磁石(10cm)



磁場測定中のアーク部偏向電磁石

電磁石システムの現状

- アーク部偏向電磁石8台製作完了
- 四極電磁石(20cm)44台製作完了
- 四極電磁石(10cm)12台製作完了、残り今年度製作予定
- バンプ電磁石(入射、取出し、周長補正)は今年度製作予定
- 四極電磁石架台は来年度製作予定
- 偏向/四極電磁石(20cm,10cm)各1台の磁場測定試験

真空システム

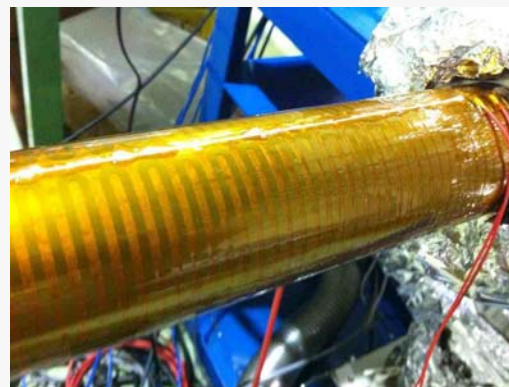


“ゼロギャップ”フランジの開発

- 銅ガスケットタイプ(左)
- U-tightsealタイプ(右)

真空試験結果

- リークなし
- ベーキング後TMPのみで
 2×10^{-8} [Pa]を達成



ベーキング用ヒータ試験

- 厚さ250umフィルムヒータ
- ジャケットヒータ
- 180°Cベーキング問題なし

谷本、本田(融)氏提供

主な真空ダクトは今年度末までに製作予定

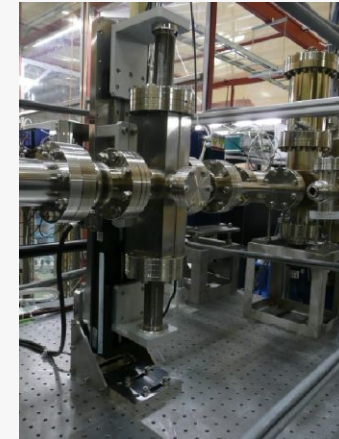
ビームモニタ



ストリップライン型ビーム位置モニタ



スクリーンモニタ

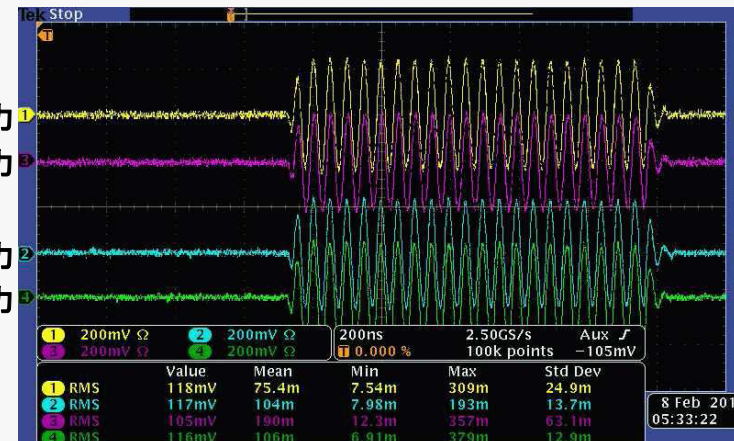


エミッタンス測定用スリット



#1出力
#3出力

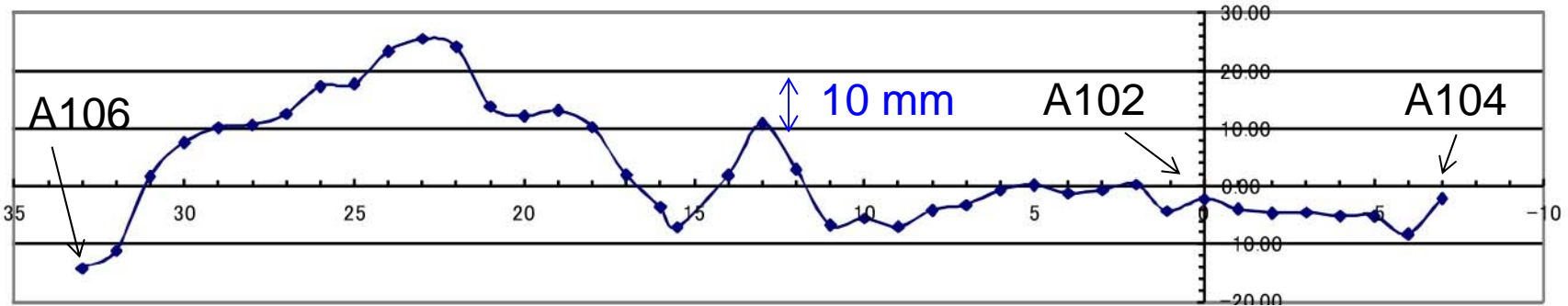
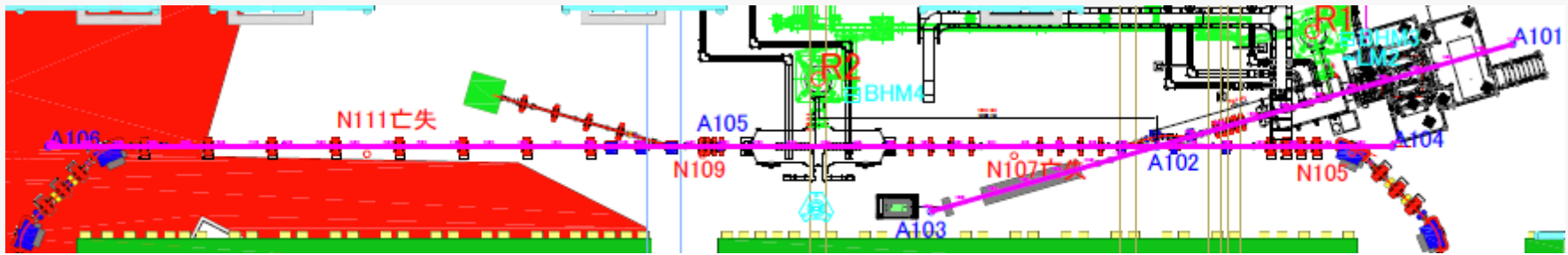
#2出力
#4出力



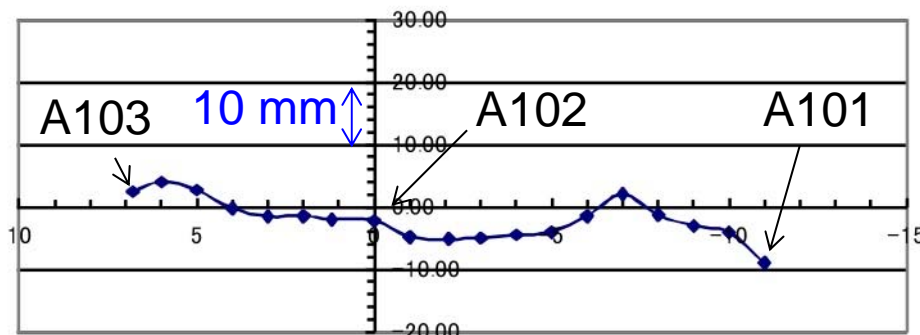
入射部用ビーム位置モニタ(左)と実ビーム試験での信号出力(右) @PF-AR南実験棟

高井、帯名、本田(洋)氏提供

測量作業



周回部ヶガキ線上床面高さ[mm]-交差点(A102)を位置原点として示す、横軸は[m]

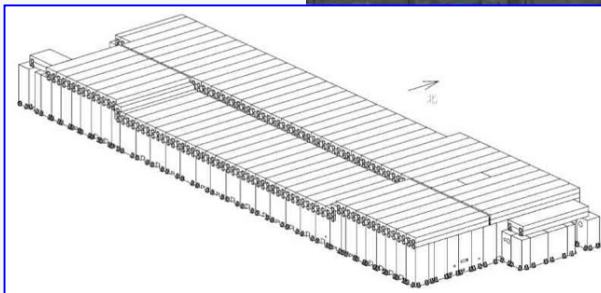
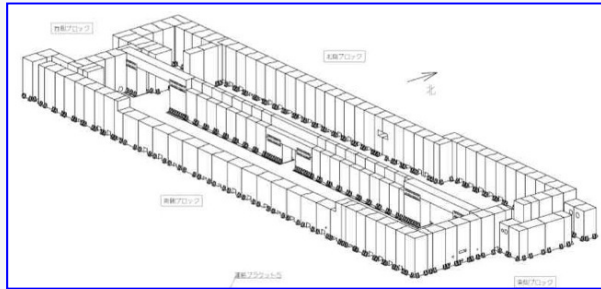


入射部ヶガキ線上床面高さ[mm]-交差点(A102)を位置原点として示す、横軸は[m]



久米氏提供

放射線シールド



芳賀氏提供

放射線シールドの建設が出入口等の一部を除いて終了。

スケジュール

年度	2012年度												2013年度											
月	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
電子銃 入射部	電子銃調整・試験						搬入・設置・調整						ビーム調整・運転					ビーム調整・運転						
	入射部製作・設置												ビーム調整・運転					ビーム調整・運転						
入射 空洞	製作		設置 完成検査		各種試験・調整								ビーム調整・運転					ビーム調整・運転						
	製作						設置・完成検査・各種試験・調整						ビーム調整・運転					ビーム調整・運転						
主空洞	製作						設置・完成検査・各種試験・調整						ビーム調整・運転					ビーム調整・運転						
周回部	設計・製作・試験												設置					ビーム調整・運転						
施設	放射線シールド建設						空調・電気・排水工事						施設検査					放射線申請手続き						
	遮蔽計算・申請準備						放射線申請手続き						施設検査					放射線申請手続き						

注)現状でのおよその予定。今後変更の可能性あり。

まとめ

- 高輝度光発生に必要な低エミッタンス・大電流電子ビームの生成・加速・周回を実証するためにcERLを建設している。
- 入射部及び周回部の設計及び最適化が行われ、レーザーコンプトン散乱X線やコヒーレントTHz放射光の利用も検討されている。
- 電子銃や超伝導空洞などのcERLコンポーネントの開発が進められていて、要求仕様を満足しつつある。
- cERL棟(ERL開発棟)にRF電源とヘリウム冷凍機システムが設置され、放射線シールドの建設が進行している。また、入射空洞が他のコンポーネントに先駆けてビームライン上に設置された。
- 2013年春からコミッショニングを開始する予定である。