

# cERL入射部開発の現状

2011年2月23日  
高エネルギー加速器研究機構  
4号館1階セミナーホール

宮島 司  
高エネルギー加速器研究機構 (KEK)  
加速器研究施設 加速器第七研究系

## Contents

1. Outline of compact ERL injector
2. Photo cathode DC 500 kV gun system
3. Laser system
4. Gun test beamline
5. Development of photo cathode
6. Summary

# Teams for high brightness DC-gun development



Y. Honda, M. Yamamoto, T. Uchiyama, T. Miyajima,  
Y. Tanimoto, T. Honda, T. Nogami,  
T. Obina, M. Tobiyama, R. Takai, Y. Saito,  
M. Kobayashi, K. Sato, Y. Kobayashi, H. Kawata  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)



R. Hajima, N. Nishimori, R. Nagai  
Japan Atomic Energy Agency (JAEA)



M. Kuriki, H. Iijima, D. Kubo, S. Matsuba  
Hiroshima University



M. Kuwahara, S. Okumi, T. Nakanishi,  
X. Jin, T. Ujihara, Y. Takeda  
Nagoya University



H. Kurisu  
Yamaguchi University

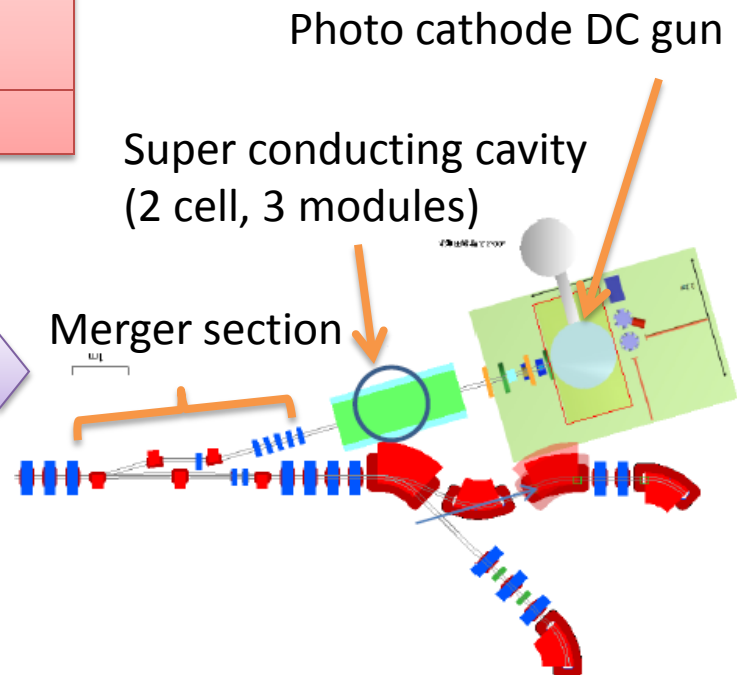
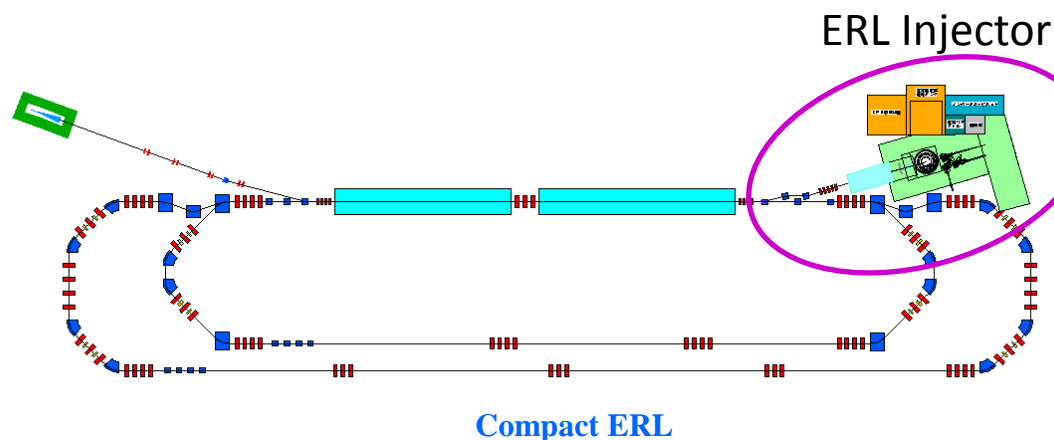


# cERL 入射部開発

- cERL入射器は、(1)フォトカソードDC電子銃、(2) 入射部ビームライン、(3)超伝導空洞、(4)合流部で構成される。
- ここでは、電子銃から超伝導空洞手前までの装置及びビームラインの開発状況について紹介する。

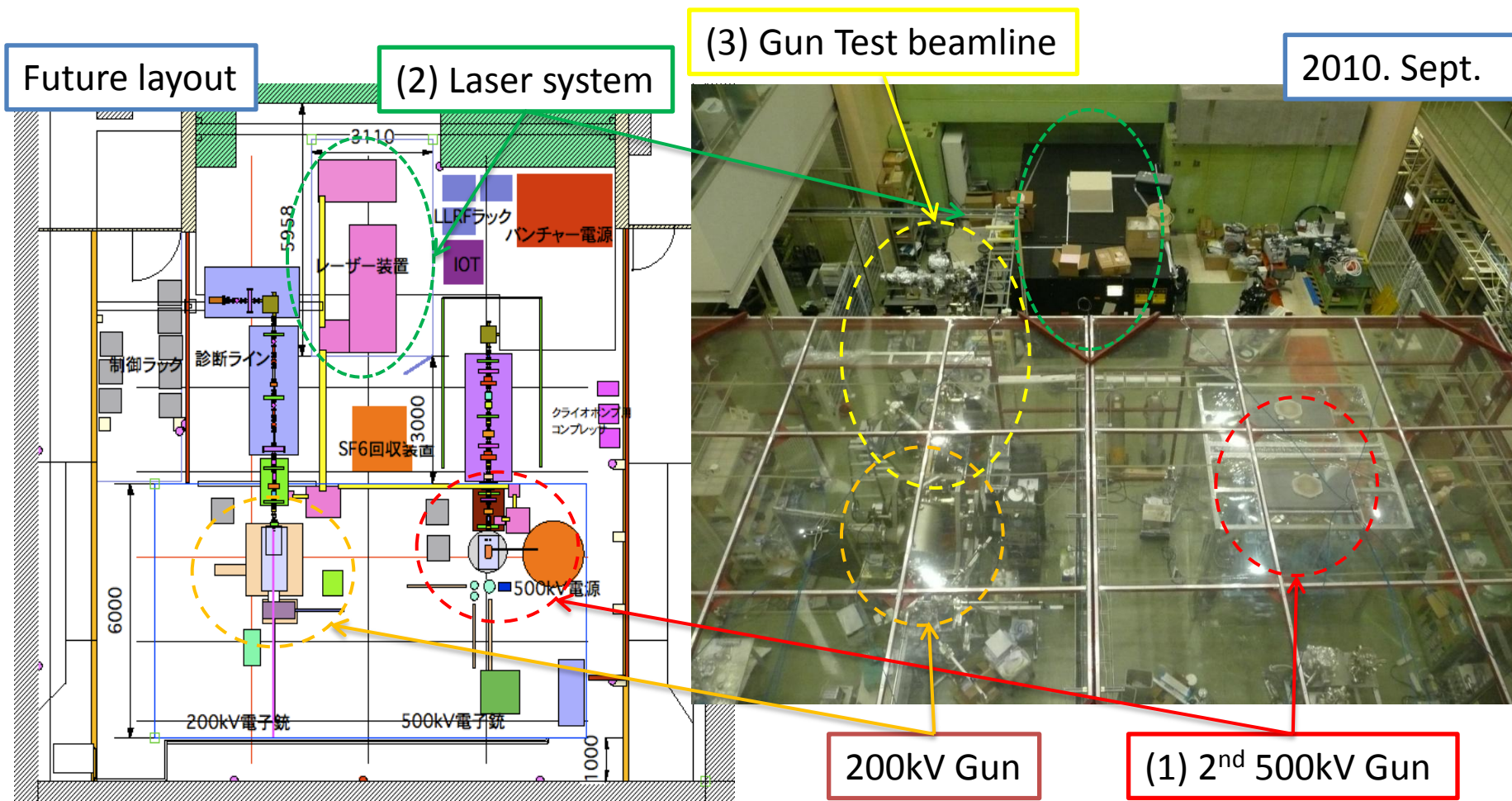
## Parameters of the Compact ERL Injector

Beam energy	5 – 10 MeV
Beam current	10 – 100 mA
Normalized rms emittance $\varepsilon_n = \varepsilon^*/(\gamma\beta)$	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)



# Photocathode DC Gun Test Facility at KEK

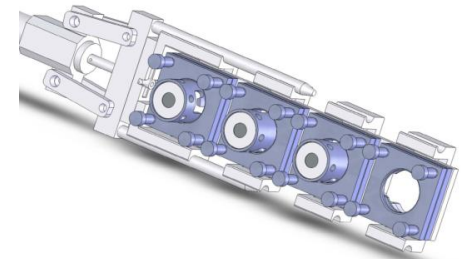
PF-AR 南棟において、500kV第二電子銃の開発、レーザーシステムの開発、電子銃テストビームラインの開発、フォトカソードの特性測定を進めている。



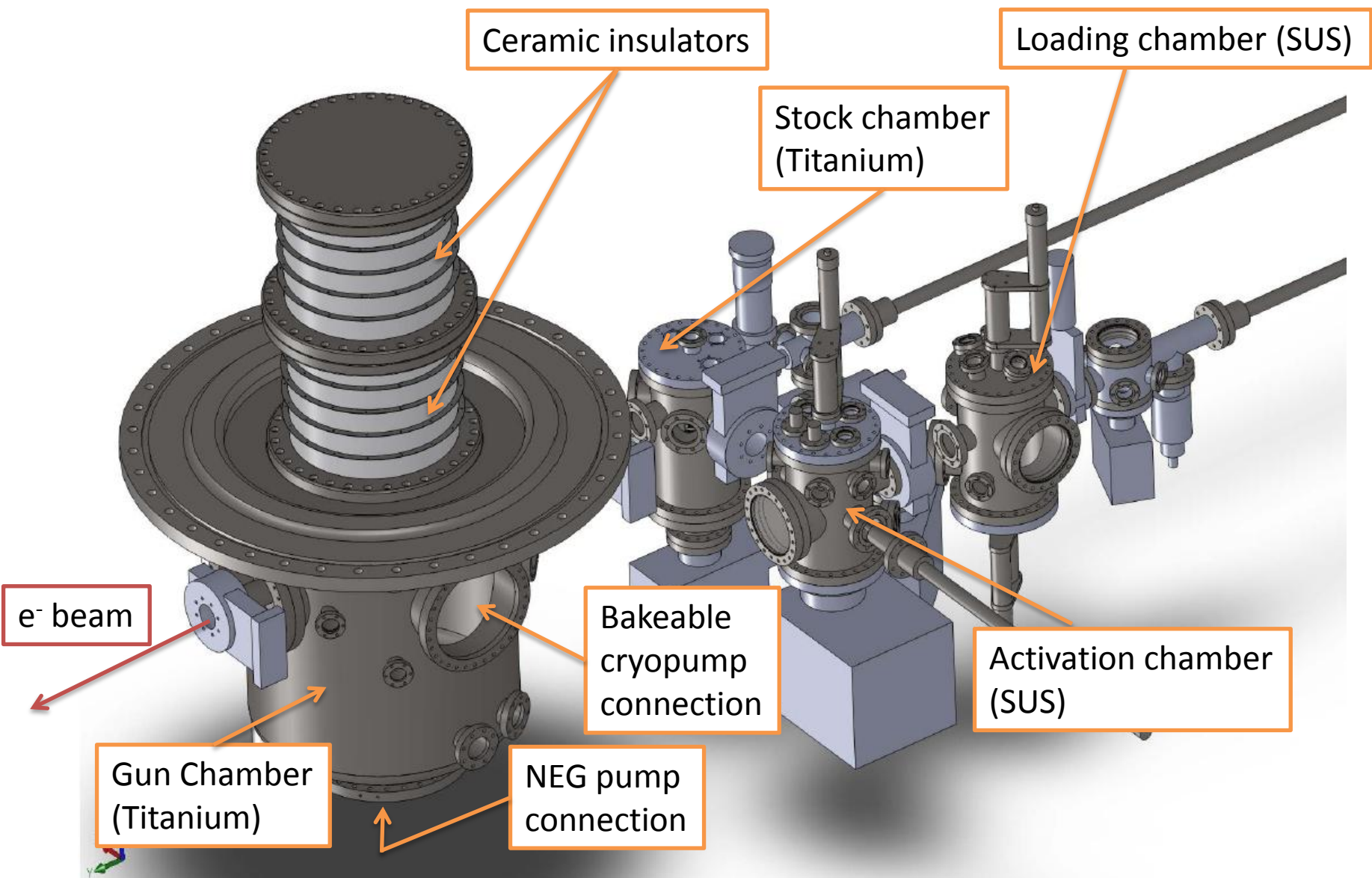
# 第二500kV電子銃の開発

JAEAを中心として500kV第一電子銃の開発が進んでおり世界最高電圧の500kVの印加に成功している。またKEKを中心として500kV第二電子銃の開発が進められている。

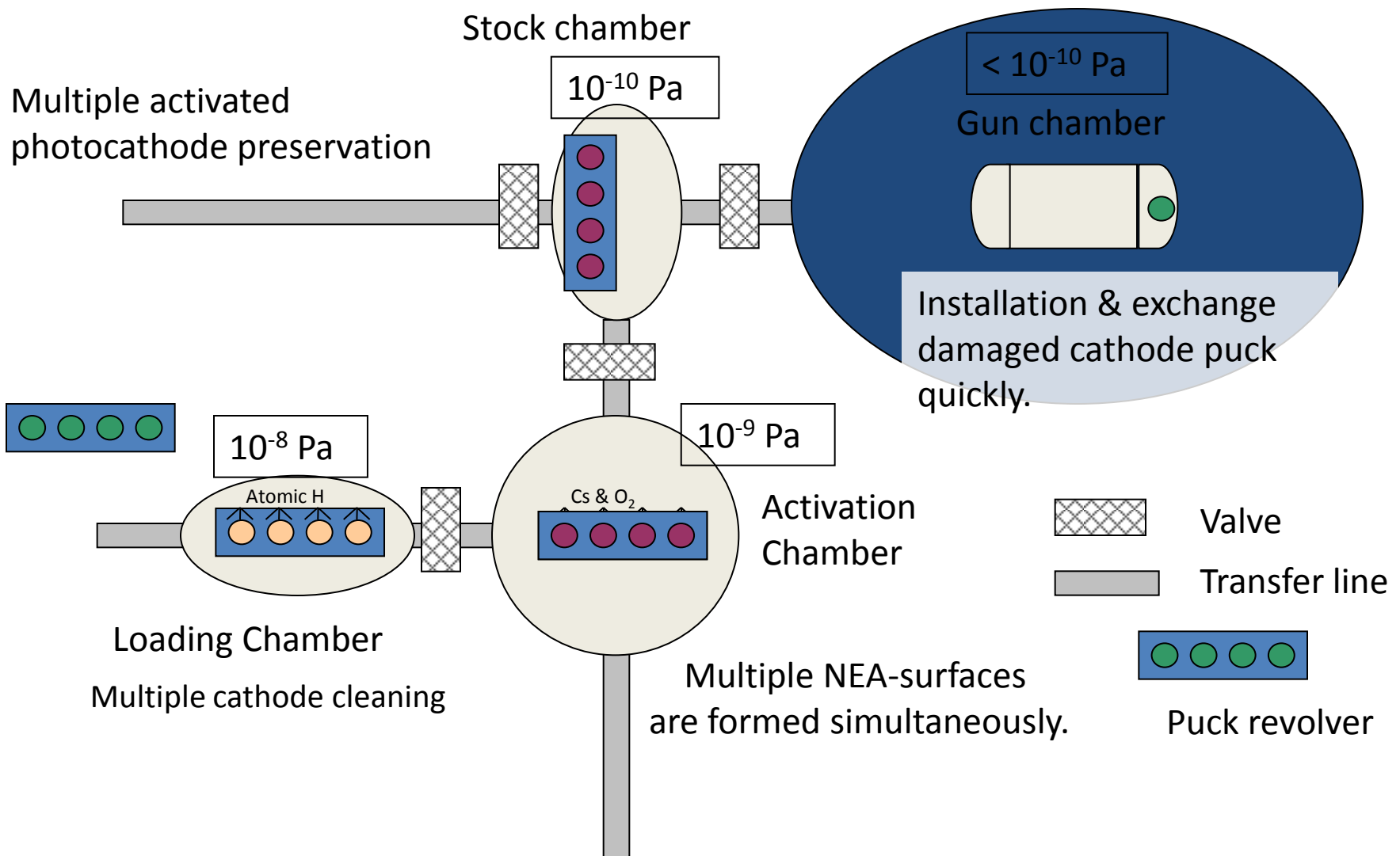
- Using **titanium** for the chamber and flanges to decrease outgassing rate.
  - H. Kurisu et al., "Titanium alloy material with very low outgassing", J. Vac. Sci. Technol. A21 (2003) L10
- Design that enables **easy maintenance**, considers **extendibility** and **compatibility with the 1<sup>st</sup> 500kV gun**.
  - Two ceramic tube structure, large maintenance port, compatible flange structure are employed.
  - A more large-scale ceramic tube can be connected by a part of remodeling.
- Using a specialized pumping system for extreme high vacuum.
  - Combination of NEG pumps and a **bakeable cryopump**.
  - H. Yamakawa, "Development and performance of bakeable cryopumps for extreme high vacuum", Vacuum 44 (1993) 675.
- Decreases cathode preparation duty.
  - Using a **multiple cathode preparation** system.
- Ti製真空チェンバー: 2010年4月より真空試験を開始している
- 絶縁セラミック: 単体でのガス放出速度の測定を実施
- 電子銃高圧電源: 現在製作中、2011年3月に納入予定



# 2<sup>nd</sup> 500kV gun system concept



# 500kV第二電子銃の構成



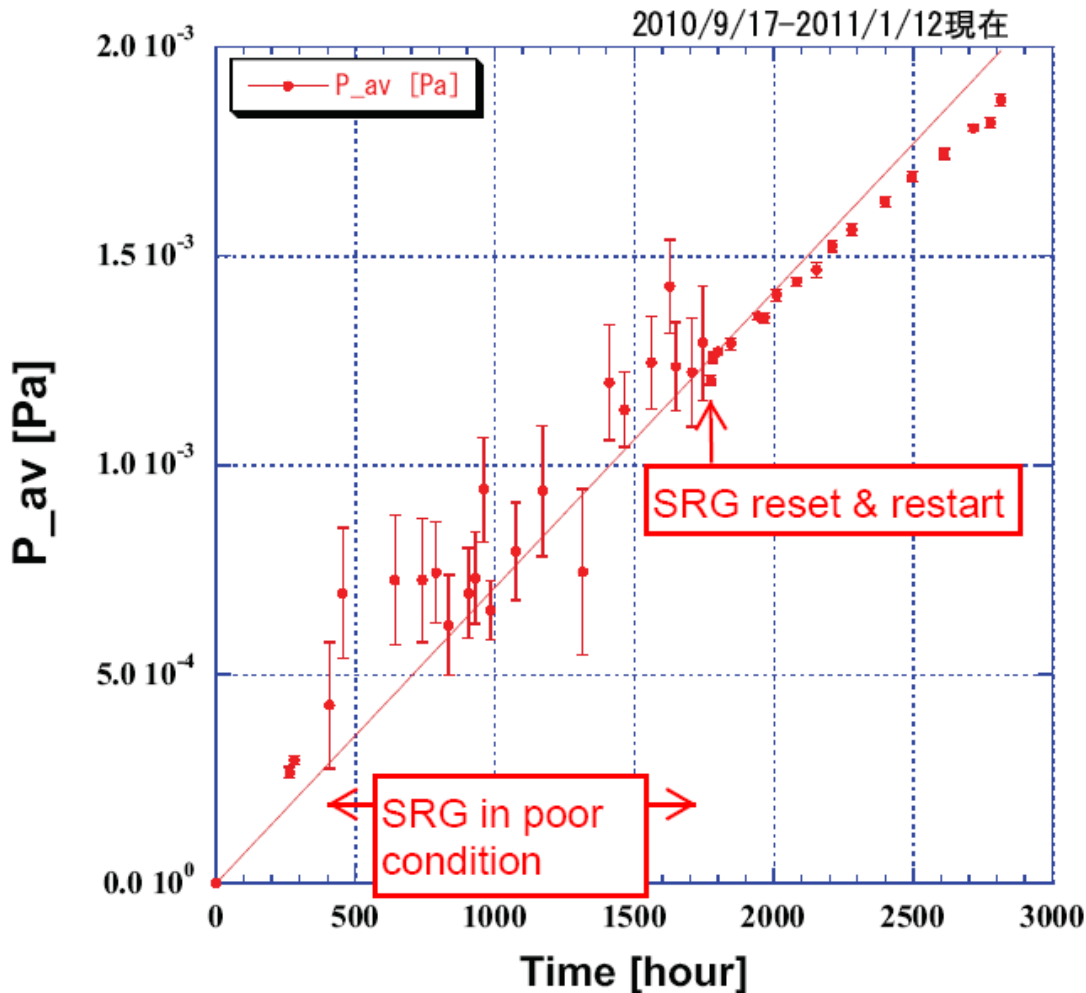
# 電子銃Tiチェンバーの組立





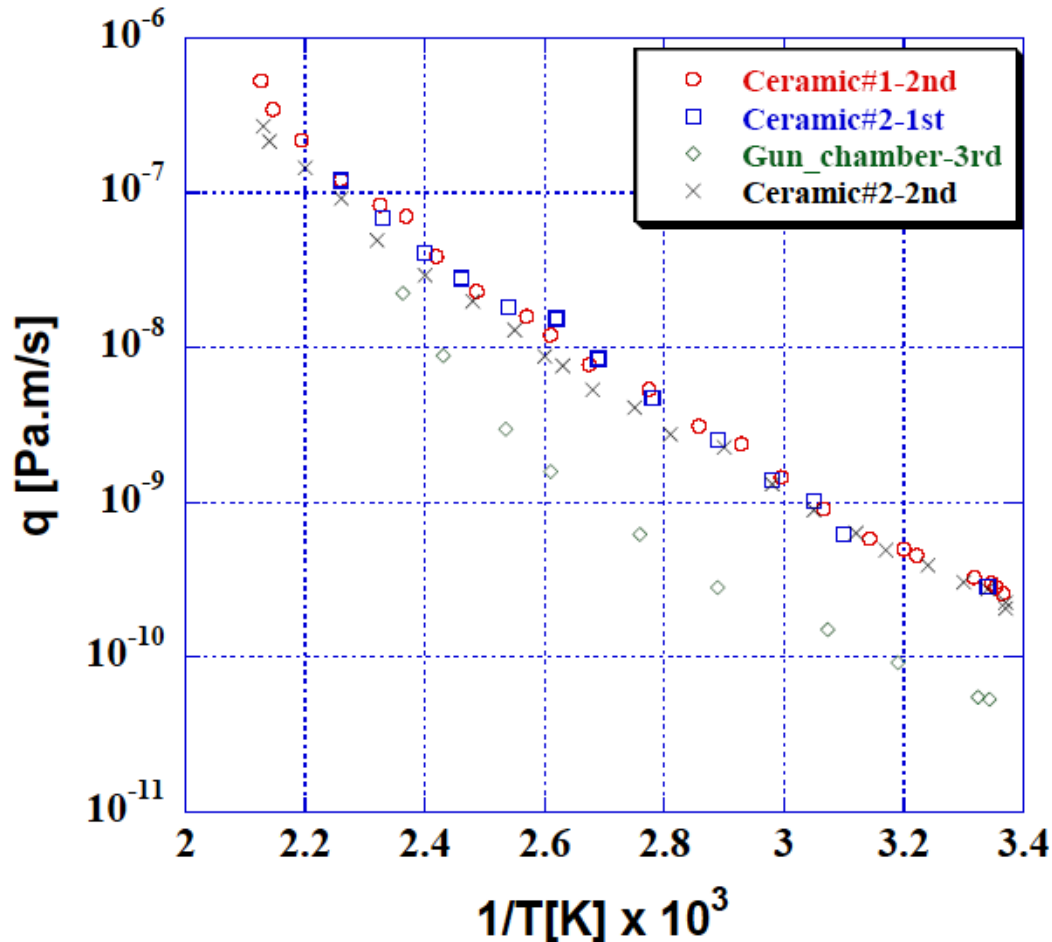
# Ti電子銃チャンバーの真空試験

SRGを使ったTiチャンバーの精密なガス放出速度測定の結果



# セラミックチェンバーの真空試験

## セラミック管のガス放出速度測定の結果



### Outgassing rate measurement

Method: accumulation method

Gauge: B-A gauge (yttrium oxide coated filament)

Duration: 30 ~ 300 sec.

Outgassing rate was improved about two order of magnitude after 190 °C , 100 hrs baking.

Outgassing rate @R.T.

~2.5E-10 Pa.m/s

(Included titanium flanges surface)

# 全ガス放出速度の見積り

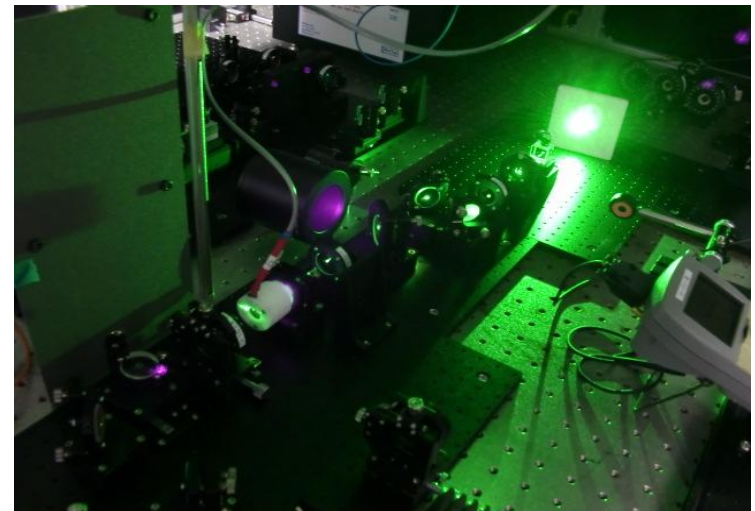
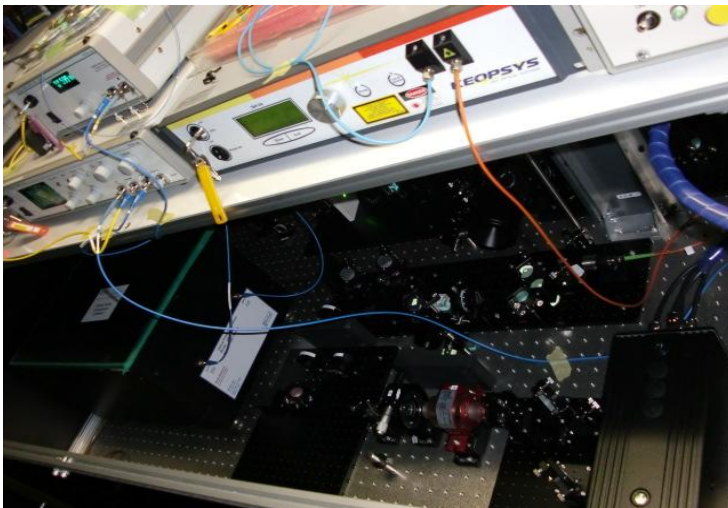
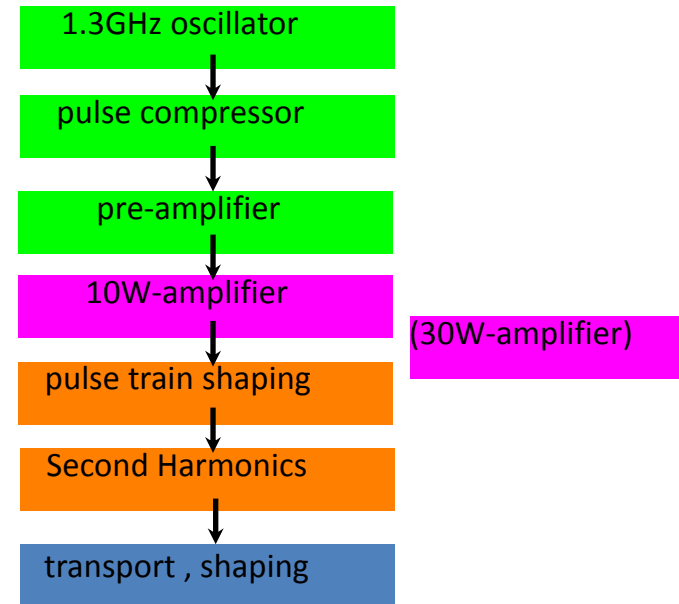
## 電子銃システム全体の全ガス放出速度見積り

	outgassing rate $q$ [Pa·m/s]	surface area $A$ [m <sup>2</sup> ]	total outgassing $Q$ [Pa·m <sup>3</sup> /s]
Gun chamber body	<b>5.0E-11</b>	2.4	<b>1.2E-10</b>
Ceramic chamber	<b>2.5E-10</b>	1.6	<b>4.0E-10</b>
Guard ring electrode	5.0E-11	~3	~1.5E-10
Cathode electrode & Support rod	1.0E-10	~1.5	~1.5E-10
Anode electrode	1.0E-10	~0.3	~3.0E-11
NEG cartridges support	5.0E-11	~0.5	~2.5E-11
Cryopump chamber	5.0E-11	~0.5	~2.5E-11
Gate valves & View ports	1.0E-09 (?)	~0.3	<b>&gt; 3.0E-10 (?)</b>

Total Q of the Gun	<b>&gt; 1.2E-09</b>
--------------------	---------------------

# レーザーシステム開発

- 2009年より、AR南棟においてカソード励起用のドライブレザーシステムの開発を行っている
- Requirement for 10mA operation of cERL:  
1.3GHz(repetition), 530nm(wavelength), 20ps(pulse duration), 1.5W(power)
- System has been built based on commercial units (1.3GHz oscillator, fiber amplifier, SHG, etc.)
- **100mW (2 $\omega$ ) output has been achieved. Enough for first commissioning of the injector upto 1mA.**  
Development of higher power amplifier is on going.



# 高調波発生試験

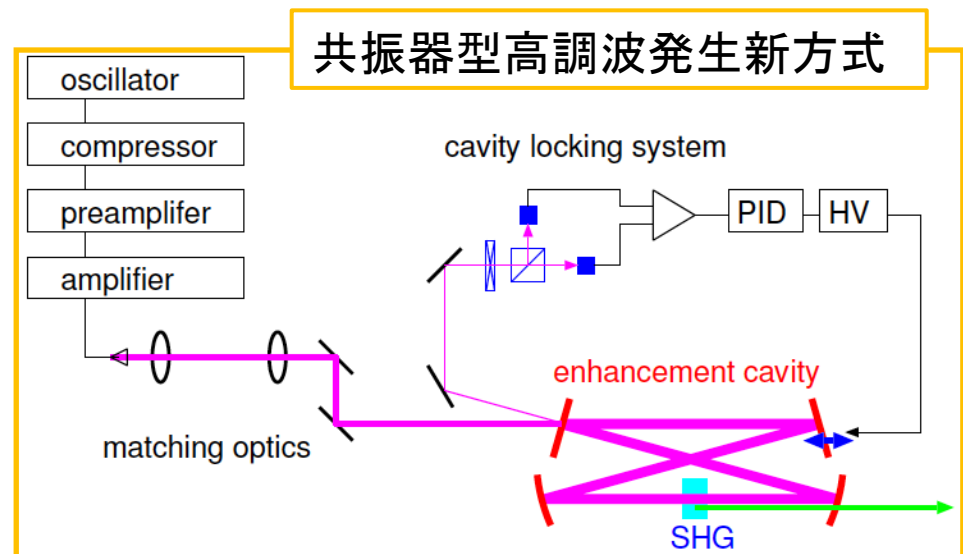
- 産総研における高効率高調波発生試験
  - 入力レーザーのパラメータ  $f=85\text{MHz}$ 、 $\lambda=1030\text{nm}$ 、 $P=10\text{W}$ 、パルス幅  $<2\text{ps}$
  - 入力レーザー出力  $150\text{nJ/pulse}$  (1.3GHz運転時では200W入力に相当)

変換効率48%を実証。(2010/4/27 ERL検討会伊藤氏報告)

Q.E.~1%では、77pC発生に18nJ/pulseあれば良く、十分な変換効率。

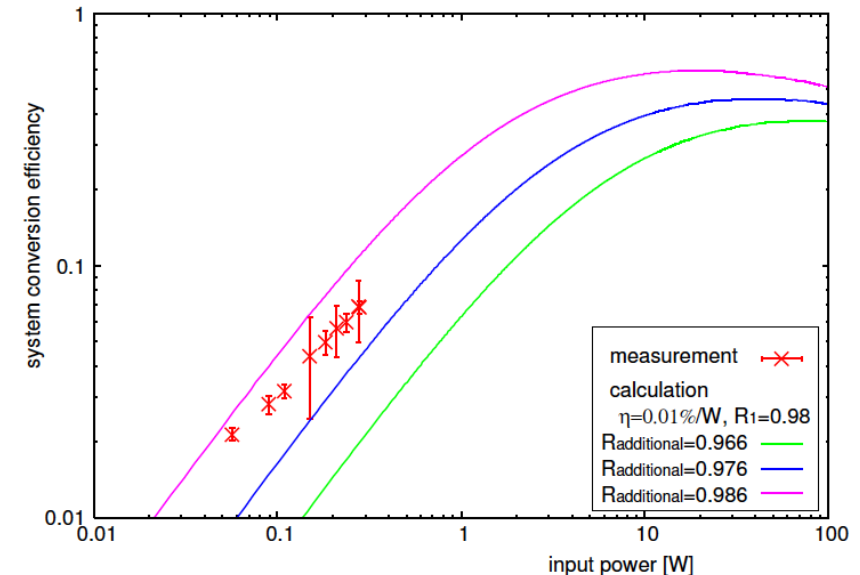
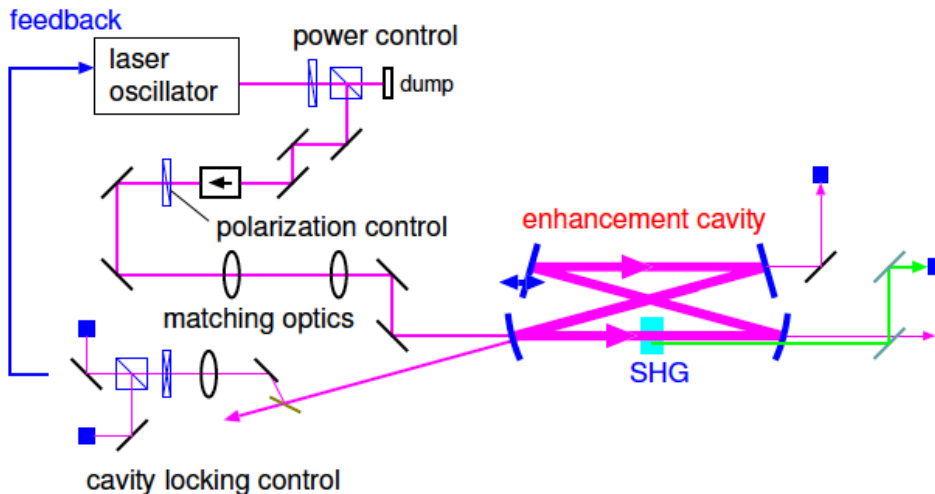
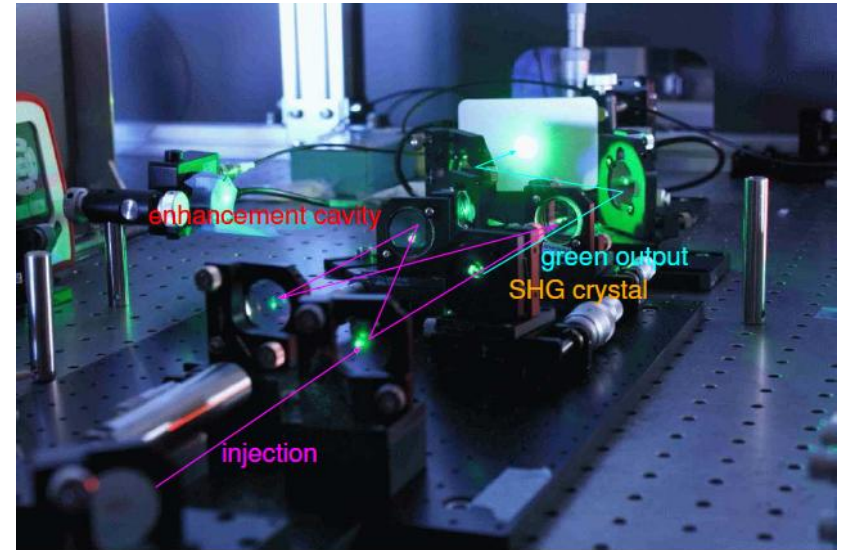
しかしながら、現在KEKにてcERL用ドライブレザーとして立上げを行っている1.3GHz発振のレーザーは、高調波発生前のレーザー出力が10W(~10nJ/pulse)程度であり、高調波発生は非線形効果であるため、変換効率は数%程度にしかならない問題がある。

- cERLドライブレザーの高調波発生方法として共振器を使う新方式を検討。
- 共振器型では、入力光を1度のパスで使い捨てずに、回収して再利用することで、実効的な波長変換効率をあげることができる。
- 簡単な試験を開始している。



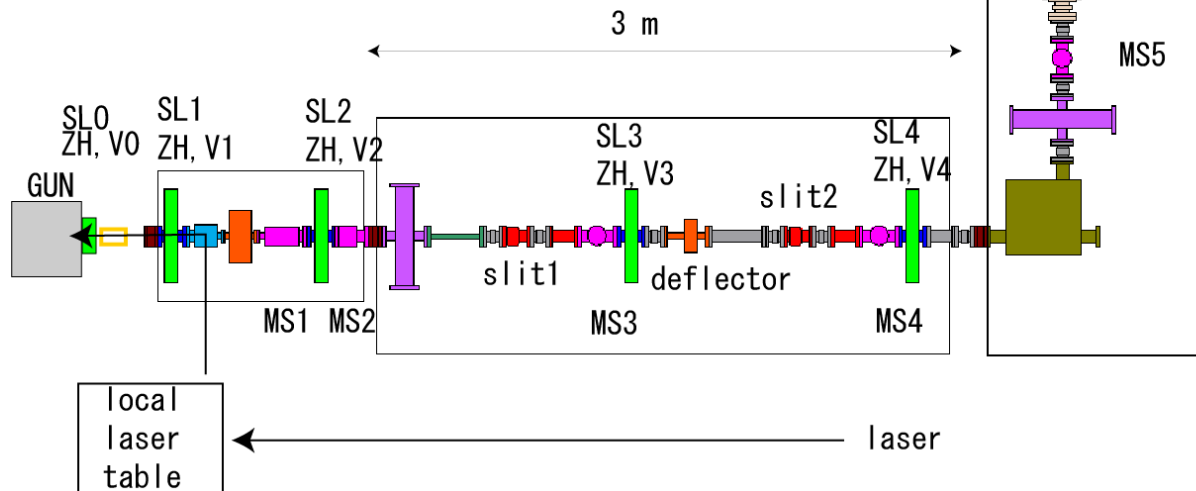
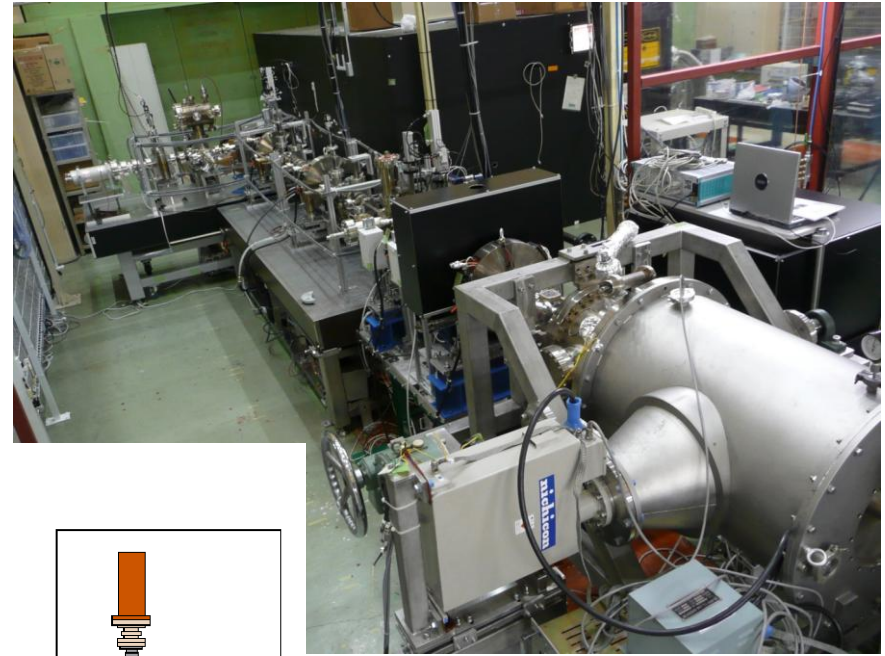
# 試験状況

- 低出力での簡易的な試験を一通り終えた。
- 出力300mWまでの低出力、レーザー発振器は本番用とは異なる。
- 共振器は完全に最適化されてはいない。
- 概ね計算どおりの変換効率が実証できた。このまま入力パワー10Wまで外挿すると、50%程度の変換効率が得られる見込みがある。
- 熱負荷等が問題にならない範囲で、効率良く、目標とするパワーが出せる可能性がある。



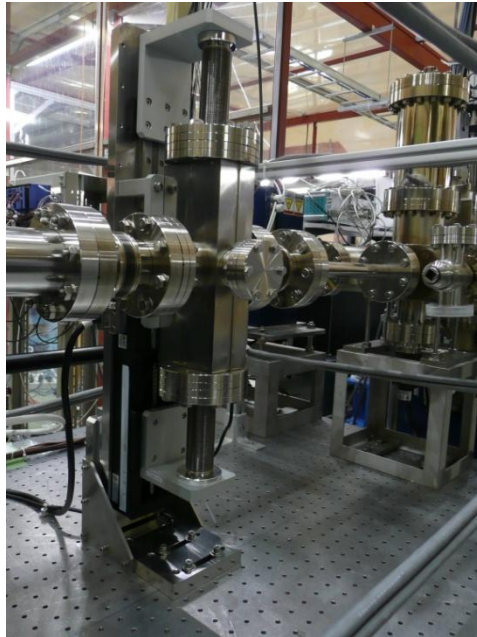
# 電子銃テストビームライン

- AR南棟にGun Test beamlineを建設し、ビーム試験を行っている。
- 目的
  - 入射部ビームラインの試験
  - 低エネルギービームの調整法の確立
  - カソード特性の評価(エミッタンス測定、応答時間測定)
  - 空間電荷効果の評価
- 2010年秋からカソード評価のための試験を開始している。
- これまでに、バルクのGaAs、厚みを変えたGaAs、超格子(GaAs, GaAsP)の幾つかの試料について測定を行った。



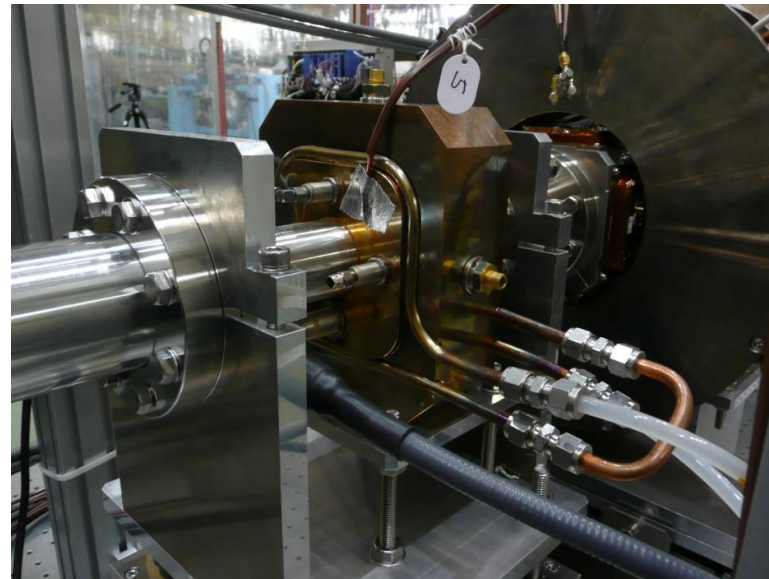
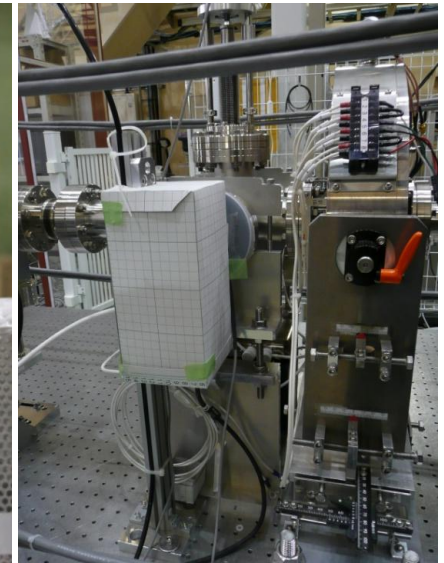
名古屋大学で開発されたNPES3, 200 kV電子銃を使用。ビームラインは、入射部(cERLと同じ構成)、診断部、ダンプ部から構成される。

# 電子銃テストビームラインでの診断装置



Slit scanner for emittance measurement

View screen

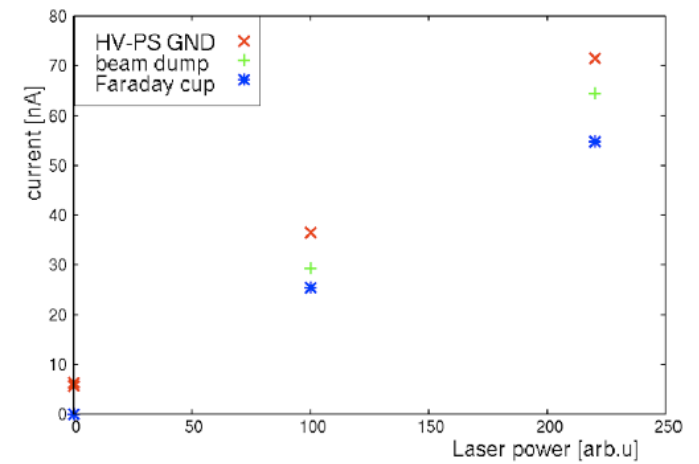


Deflecting cavity for measurement of cathode time response

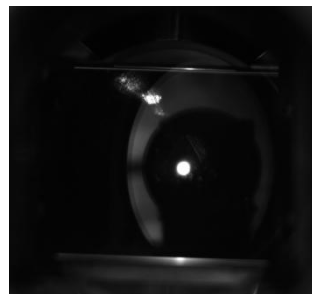


# ビームコミッショニング

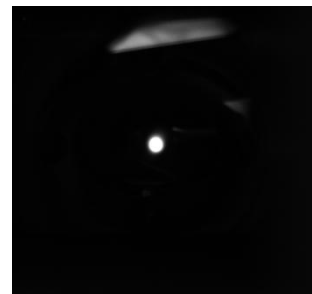
- 加速電圧100 kV ビーム電流 10nA程度  
励起レーザー He-Neレーザー CW 544nm
- QE 0.5% を維持しているカソードを使用。
- ソレノイドの電流を変化させてもビーム重心がぶれない位置に調整することでソレノイドの中心を通るビーム軌道を確立した。
- 95%以上の輸送効率が得られた。
- 画像は各スクリーンでのビームプロファイル。



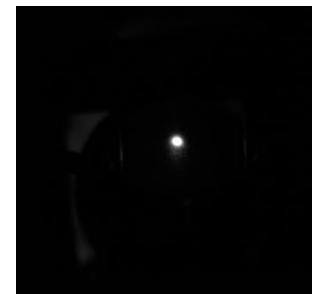
MS1



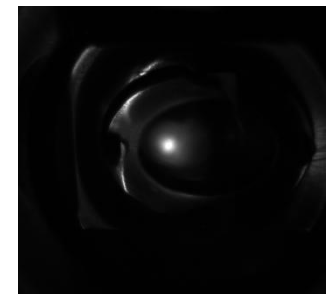
MS2



MS3



MS4

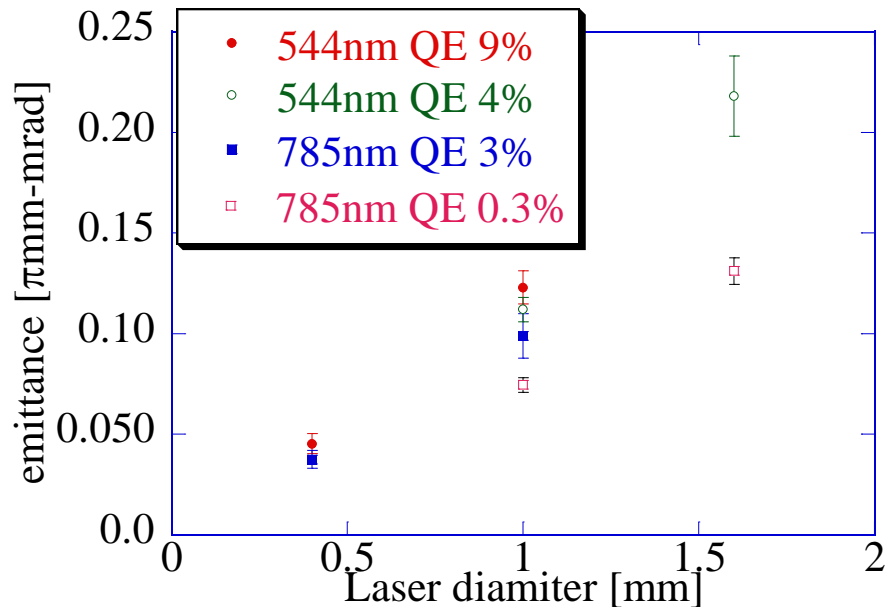


MS5

# ビーム品質の測定

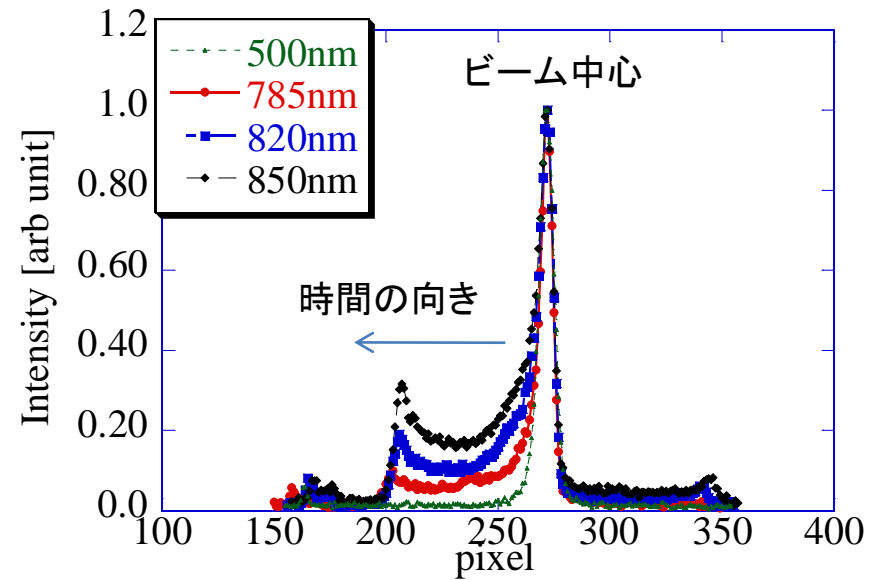
## バルクGaAsのエミッタンス測定結果

- ソレノイドスキャン法を用いてエミッタンスを測定(電子銃電圧100 kV)
- QE、レーザー波長、およびレーザー直径を変えて測定
- 診断システムの評価とエミッタンス解析手法の確立を行っている



## バルクGaAsの応答時間測定結果

- 偏向空洞とview screenを用いて、カソードの応答時間を測定
- レーザー波長を変えながら測定(波長が長い方が、レーザーが内部まで侵入し、応答時間が長くなる)
- 測定でもレーザー波長依存性が明らかに確認できた
- 時間応答データの解析手法を開発中

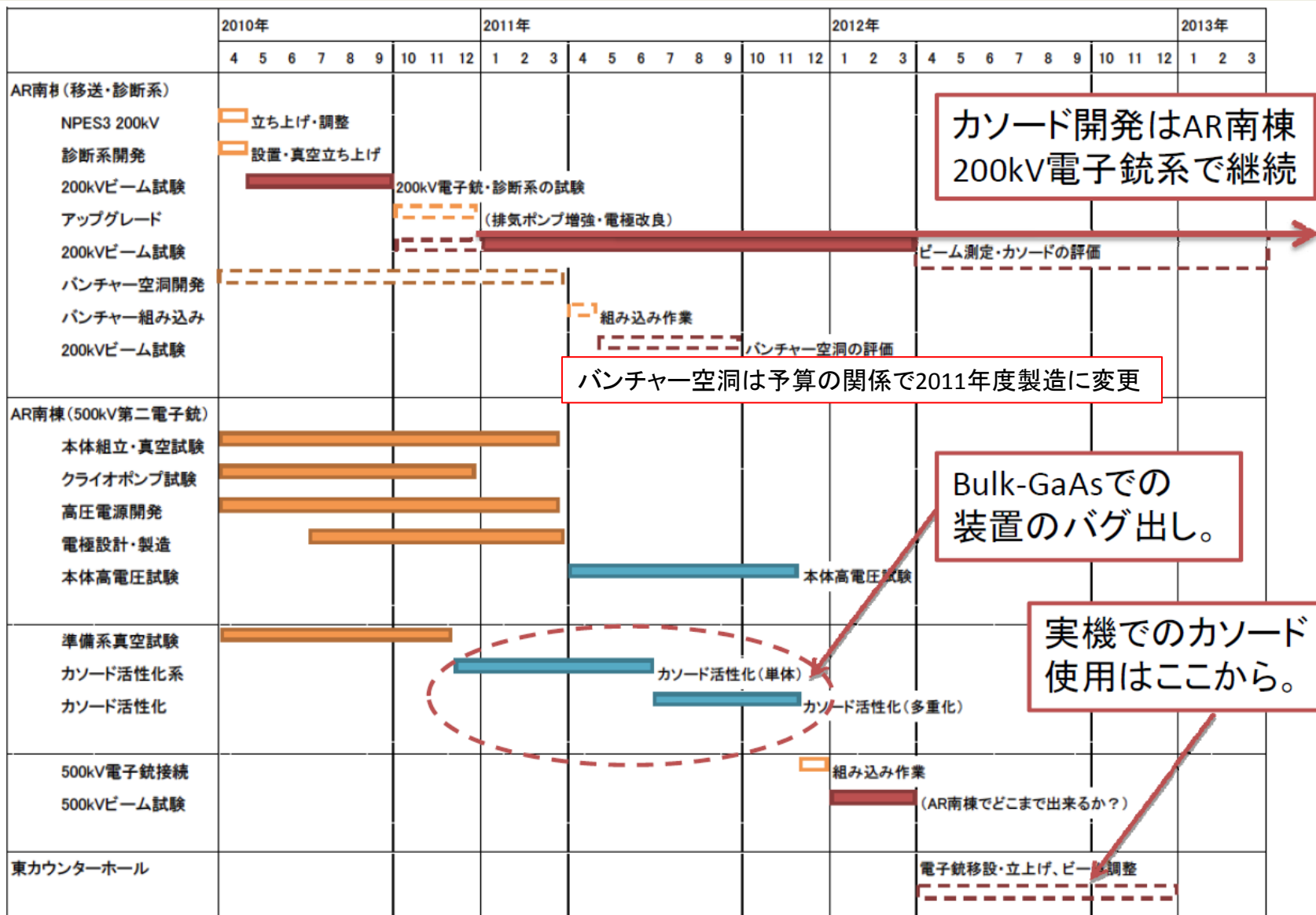


1pixelがおよそ1psecに対応

# カソード開発

- ERL電子銃に要求される性能
  - 規格化エミッタンス1 (0.1) mm.mrad 以下
  - バンチあたりの電荷量7.7 pC (77pC) 以上
  - 繰返し1.3GHz、平均電流10 mA以上
- カソードに要求される項目
  - 速い応答性(数ps以下の応答性)
  - 高い量子効率の実現(レーザーの負荷低減のために重要)
  - 低い熱(初期)エミッタンス
  - 熱対策(NEA表面の寿命を伸ばす上で重要)
- 名古屋大学の竹田研で作成されたカソードの特性評価を、AR南棟のGun Test beamlineを用いて行っている。
  - GaAsの厚さを変えたもの(応答時間を評価するため)
    - 100nm,300nm,**1000nm**,1500nm
  - GaAs/GaAsP超格子(超格子構造は本当に熱エミッタンスの低減化に効くのかの再検証のため)
    - GaAsP P組成:**0.325**, 超格子周期:**7.2nm**  
超格子ミニバンド幅:**47meV**, バンドギャップ:**784nm**
    - GaAsP P組成:**0.34**, 超格子周期:**13.2nm**  
超格子ミニバンド幅: **4meV**, バンドギャップ:**808nm**

# 開発スケジュール



# まとめ

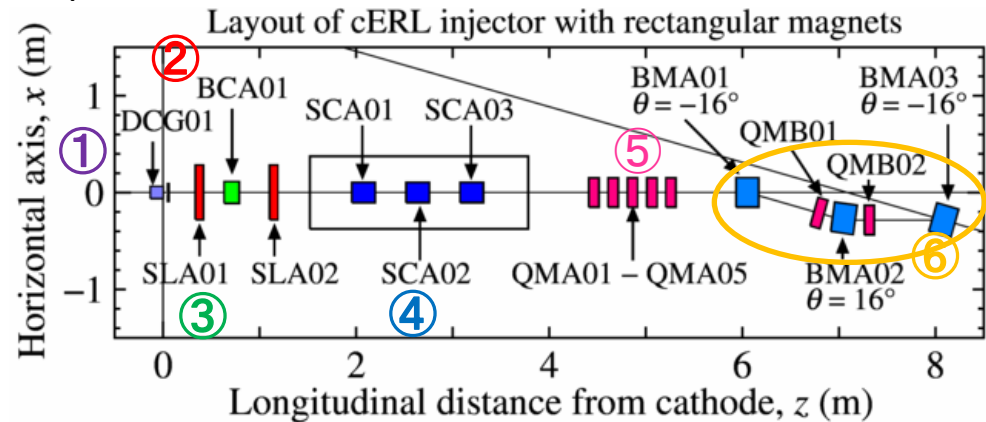
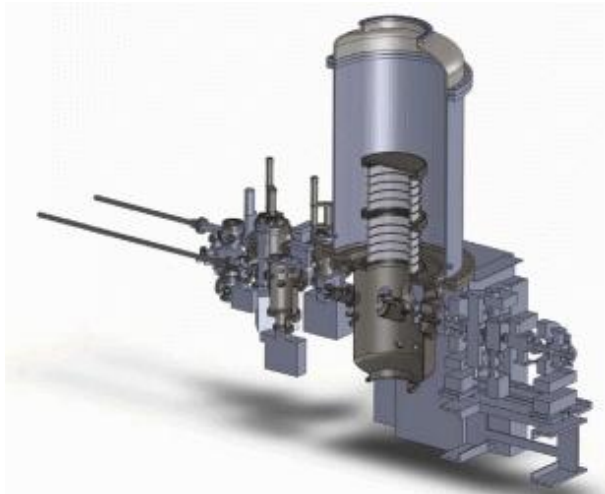
- 2012年度末の東カウンターホールでのcERLコミッショニング開始に向けて、AR南棟において500kV第二電子銃、レーザーシステム、電子銃テストビームラインの開発を進めている。
- 500kV第二電子銃開発は2009年より開始している。
  - 電子銃真空システムのテストが現在進められている。
  - Tiチェンバーと絶縁セラミックのガス放出速度が測定され、それぞれ $1.9E-11$  Pa.m/s,  $2.5E-10$  Pa.m/s と評価された。
  - 全体でのガス放出速度は $>1.2E-10$  Pa.m<sup>3</sup>/sと見積もられる。
  - 高電圧印加試験に向けて、電子銃高圧電源の製作を進めている。
- レーザーシステムの開発も2009年より開始している。
  - 1 mAビーム運転に向けた1.3GHzファイバーレーザーシステムは目標となる出力に到達している。
  - 波長変換効率を向上させるために、新たな方式として共振器型のテストを開始した。
- 2010年から200kV電子銃を用いて電子銃テストビームラインを用いたビーム試験を開始した。
  - 100kVの加速電圧でビーム試験を行い、カソード特性評価のためのエミッタンス測定、応答時間測定を行っている。
- 速い応答性、高い量子効率の実現、低い熱(初期)エミッタンスの実現に向けたカソード開発を開始している。
  - 厚みを変えたGaAsの他に、GaAs/GaAsP超格子カソードの性能評価を電子銃テストビームラインを用いて進めている。
- 2010年度に製作予定であったバンチャー空洞は、予算の関係で2011年度に製造することで準備を進めている。

# Backup slides



# Components in ERL injector

- ① **Photo cathode DC gun**
  - [Gun, HV power supply, driving laser system](#)
- ② **Solenoid magnet**
  - To compensate emittance
- ③ **Bunching cavity**
  - Normal conducting cavity for bunching
- ④ **SRF cavities**
  - 2-cell, 3 modules
- ⑤ **Quadrupole magnets**
  - To adjust CS parameters before merger section
- ⑥ **Merger section**
  - To merge injected beam into return loops




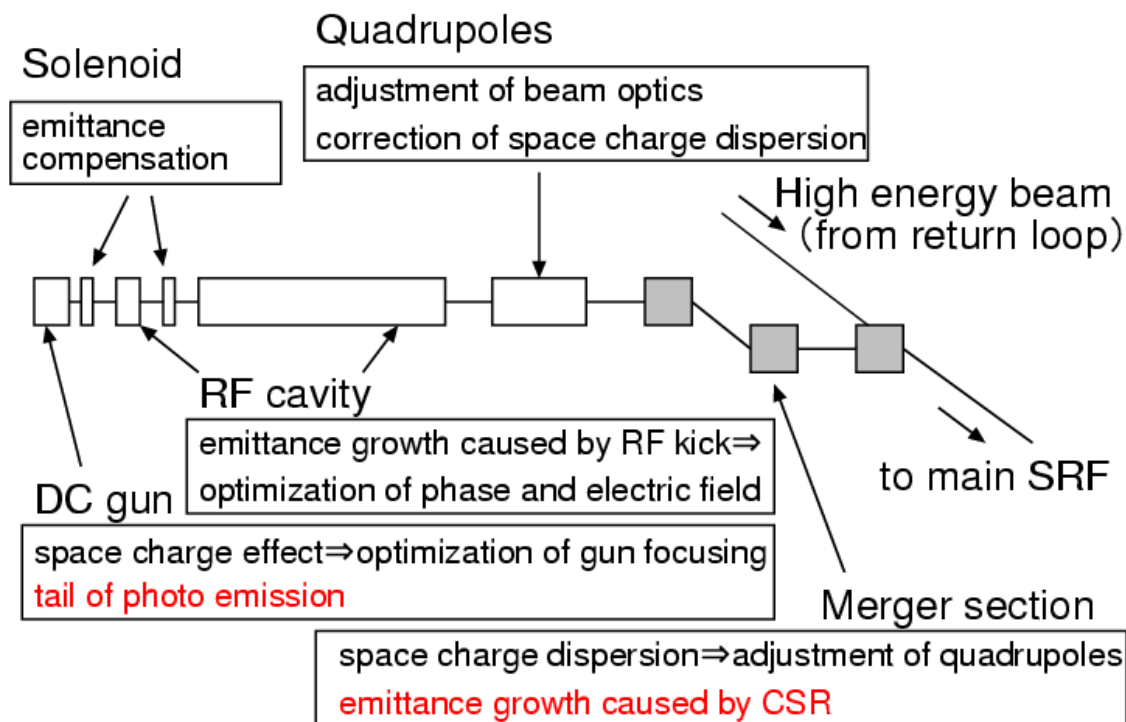
Beam energy: 500 keV → 5 – 10 MeV

*Space charge effect is dominant.*

# Physics in ERL injector

- (1) Space charge effect (Coulomb force between electrons)
- (2) Solenoid focusing (Emittance compensation)
- (3) RF kick in RF cavity
- (4) Higher order dispersion in merger section
- (5) Coherent Synchrotron Radiation (CSR) in merger section
- (6) Response time of photo cathode (It generates tail of emission.)

These effects combine in the ERL injector.

To obtain high quality beam at the exit of merger, optimization of beamline parameters is required.

Method to research the beam dynamics:

Macro particle tracking simulation with space charge effect is used.

The simulation code have to include

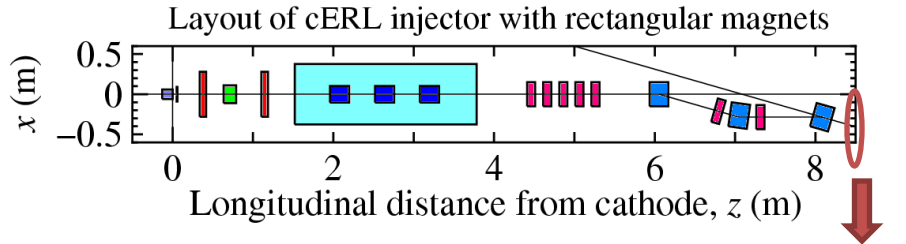
- (1) External electric and magnetic field,
- (2) Space charge effect (3D space charge).



# Multi objective optimization

- To minimize both emittance and bunch length at 1 m from the exit of merger
- Multi objective method is used[2]

## Layout of beamline



## Free parameters in the optimization

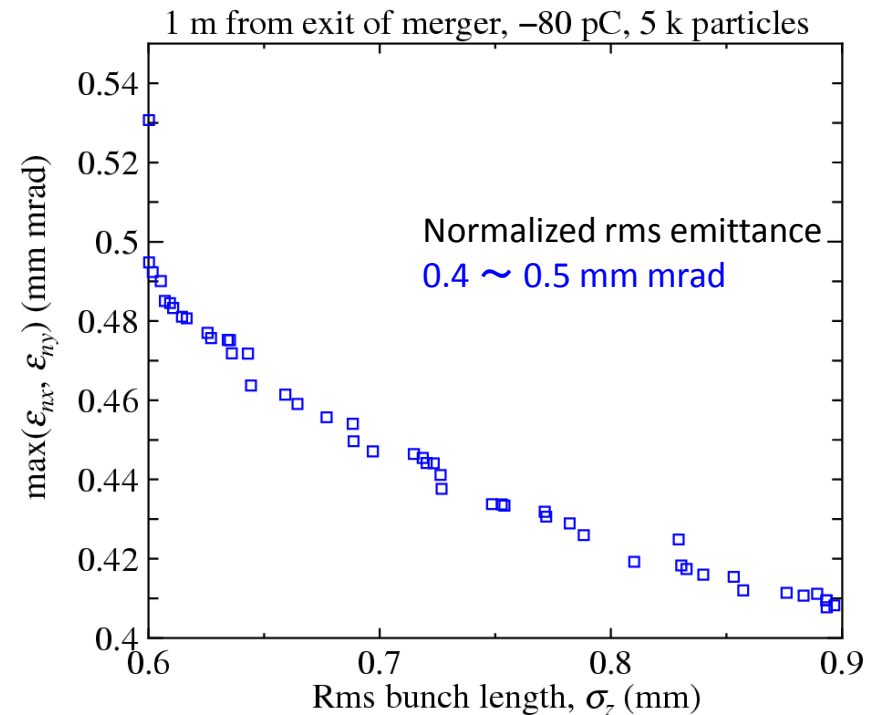
- ① Initial laser radius (mm)
- ② Initial laser pulse length (ps)
- ③ Magnetic field of 1<sup>st</sup> solenoid
- ④ Electric field of bunching cavity
- ⑤ Magnetic field of 2<sup>nd</sup> solenoid
- ⑥ Electric field and phase of SRF1
- ⑦ Electric field and phase of SRF2
- ⑧ Electric field and phase of SRF3
- ⑨ Magnetic fields of 5 quadrupoles

Number of free parameters: 16

Minimize both emittance and bunch length. (2 objects optimization)

## Results of optimization

Bunch length vs. normalized rms emittance  
For shorter bunch length, emittance is larger than the case of longer bunch length.



[2] Ivan V. Bazarov and Charles K. Sinclair ,  
Phys. Rev. ST Accel. Beams 8, 034202 (2005).

# Optimum beamline parameters

- Beam line parameters for high current mode with 80 pC/bunch, which give **bunch length of 0.63 mm** and **normalized rms emittance of 0.56 mm mrad**

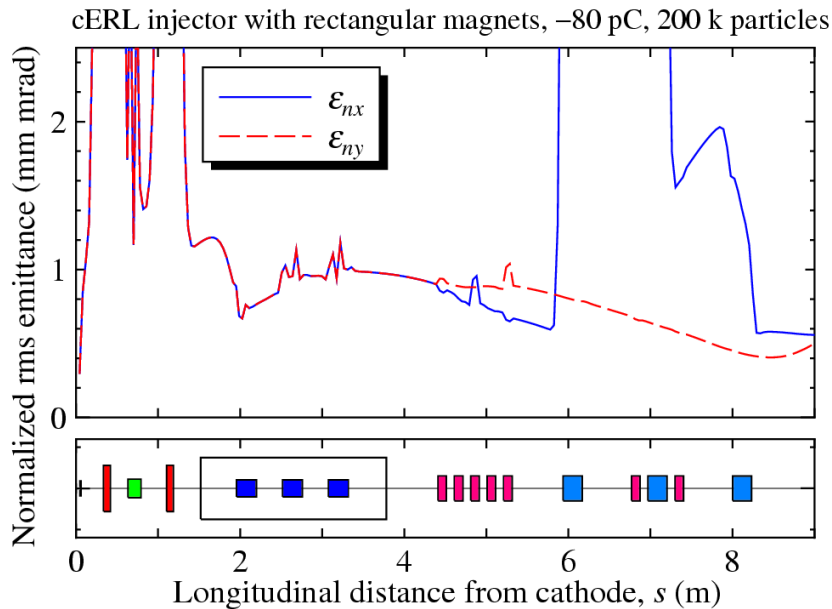


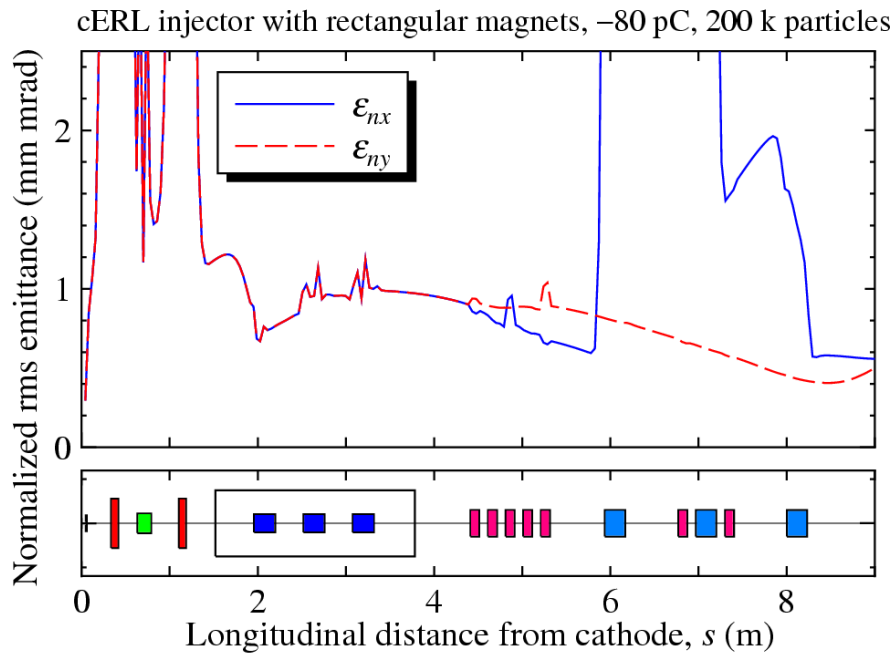
Table 1: Optimum beamline parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
$\sigma_{x0}$	0.34 (mm)	$\phi_{SCA03}$	10.0°
$\sigma_{t0}$	17.6 (ps)	$K_{1,QMA01}$	-27.4 (m <sup>-2</sup> )
$B_{SLA01}$	0.037 (T)	$K_{1,QMA02}$	-4.6 (m <sup>-2</sup> )
$B_{SLA02}$	0.024 (T)	$K_{1,QMA03}$	29.8 (m <sup>-2</sup> )
$V_{BCA01}$	96.0 (kV)	$K_{1,QMA04}$	-2.7 (m <sup>-2</sup> )
$E_{acc,SCA01}$	7.6 (MV/m)	$K_{1,QMA05}$	-24.3 (m <sup>-2</sup> )
$E_{acc,SCA02}$	13.1 (MV/m)	$z_{SLA01}$	0.38 (m)
$E_{acc,SCA03}$	15.0 (MV/m)	$z_{SLA02}$	0.71 (m)
$\phi_{SCA01}$	-20.9°	$z_{BCA01}$	1.14 (m)
$\phi_{SCA02}$	-20.8°		

\*:RF phase from maximum acceleration.

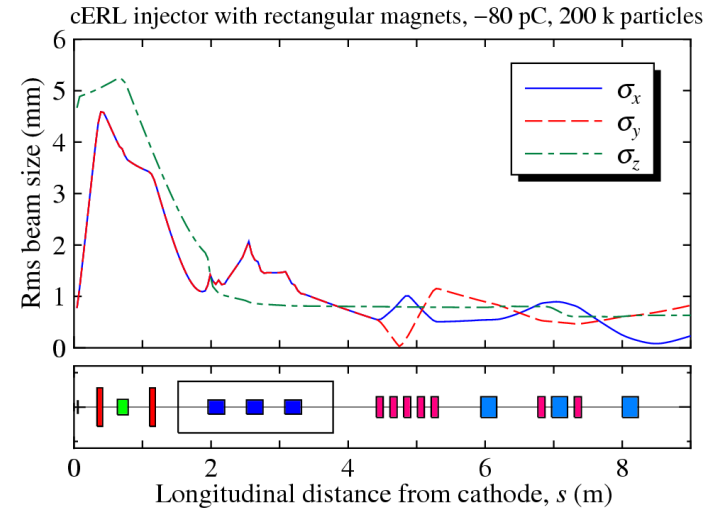
# Time evolution of beam parameters

## (1) Normalized rms emittance



Normalized rms emittance: 0.56 mm mrad  
 Bunch length: 0.63 mm  
 Kinetic energy: 8.2 MeV  
 Related rms energy spread: 0.23 %

## (2) Rms beam size and bunch length



## (3) Kinetic energy and energy spread

